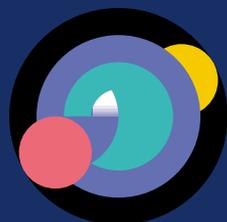
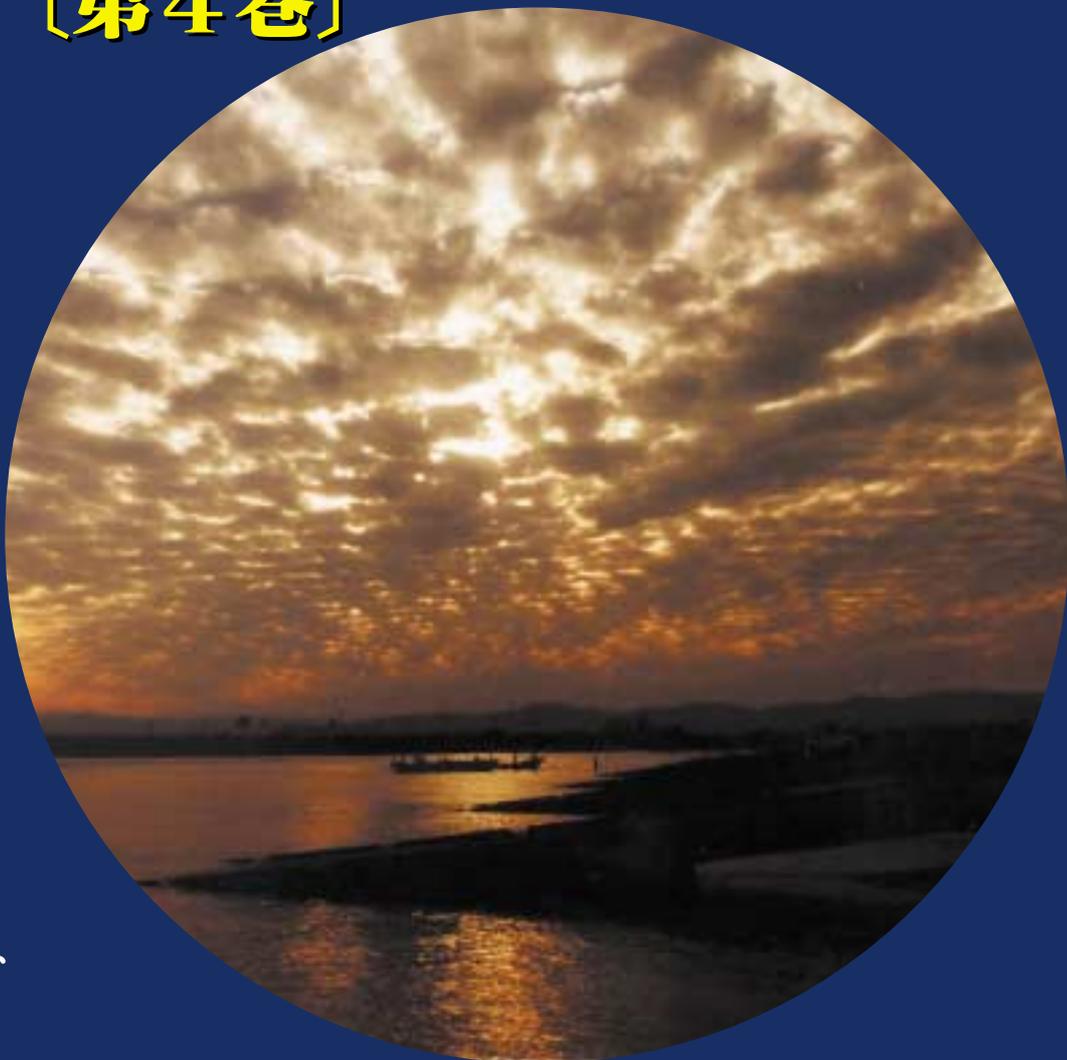




Saga University



# 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト 成果報告集〔第4巻〕



佐賀大学  
有明海  
総合研究  
プロジェクト

2008(平成20)年5月

## ごあいさつ

有明海総合研究プロジェクト長  
荒牧 軍治

有明海が社会問題となる引き金となった海苔養殖は、海苔漁家の皆さんと水産振興センターの技術者、指導者の地道な努力と、奇跡的とも言える天候、海象に恵まれてここ数年豊作が続いています。また、豊作時に起こる価格低下も、中国からの海苔が大量に出回ることによる売り上げ減少も起こっておらず、ここ数年は安定した状態が続いています。しかし、2006年には有明海湾奥部および諫早湾で大規模な貧酸素水塊が発生しましたし、2007年にはシャトネラ赤潮が広い海域で発生してアサリやサルボウ貝の養殖に大きな打撃を与えました。生物に大きな打撃を与える貧酸素水塊やシャトネラ赤潮がどのようなメカニズムで発生するのか、その発生を止められないまでも被害を軽減する対策はないのか、今も尚、社会がその原因解明と対策提言を待ち望んでいる状況に変わりはありません。

佐賀大学有明海総合研究プロジェクトは3年目を経過し、成果を纏める段階に入ってきました。有明海の海象、底質に関する調査研究は着実に進み、当初想定した以上の成果が挙がっていますし、それらの成果を取り込んだ有明海海象・生態モデルの構築も一定の見通しが立ちつつあります。これまでは個別の研究成果を発表してきましたが、現在は個別研究成果を統合化した佐賀大学独自の有明海モデルとそれを用いた再生策の提言が求められている段階であると認識しています。佐賀大学独自の有明海モデルが適切に構築されつつあるか、そのモデルは妥当なものであるか、御叱正、ご意見を戴ければ幸いです。

また、佐賀大学有明海総合研究プロジェクトのもう一つの研究目標である「有明海をフィールドとする研究」(コア2, コア3)も研究成果を取りまとめる時期にきています。これまでの調査研究から何が分かり、何が解決したのか、何を後世に伝えたいのか明確に示す必要があります。

環境省は、有明海・八代海総合調査評価委員会の最終報告で提案された「有明海調査研究のマスタープランの策定」の原案作成を行う機関を公募しました。(独)水産総合センター西海区水産研究所、特定非営利活動法人有明海再生機構、いであ株式会社の3者で受注し、膨大な作業を行いました。佐賀大学有明海総合研究プロジェクトの数名の教員がその中心的な役割を果たしました。3月末に提出した成果物の中には、有明海異変の解明と再生策の提案にはどのような調査研究をどのような時期に行う必要があるかを示した「有明海調査研究ロードマップ」の原案が提案されています。その中では、調査研究の必要性が非常に大きいにもかかわらず、誰も着手していない、あるいは着手の予定すらない項目が数多くあることが明らかになっています。有明海に関する調査研究は長期間着実に実施する必要があります。有明海総合研究プロジェクトが終了する2年後以降、佐賀大学における有明海研究をどのような組織でどのような資金を用いて継続するかを検討し、結論を出す時期にきているようです。



# 目 次

## ■ ごあいさつ

## ■ 環境物質動態研究部門

- 有明海湾奥部の底質に関する研究－細粒化の解明とモデル化にむけて－ ..... 1-8  
山本浩一・吉野健児・速水祐一・笠置尚史・原田浩幸  
濱田孝治・大串浩一郎・山田文彦・山口創一・横山勝英
- 有明海底質の細胞外ポリマーの性状と底質の安定化への効果 ..... 9-14  
原田浩幸・山本浩一・速水祐一
- 有明海湾奥部における貧酸素水塊がベントス群集に与える影響 ..... 15-22  
吉野健児・山本浩一・濱田孝治・速水祐一
- 有明海湾奥部における底泥の物性の変動特性に関する研究 ..... 23-28  
笠置尚史・古賀勝喜・山本浩一・吉野健児・速水祐一・濱田孝治・大串浩一郎
- 筑後川水系におけるSS流出の分布特性と長期傾向 ..... 29-34  
横山勝英・山本浩一

## ■ 干潟底質環境研究部門

- 2層ボックスモデルによる有明海奥部西岸域の貧酸素水塊発生機構の解析 ..... 35-42  
瀬口昌洋・郡山益実・石谷哲寛・加藤 治・原口智和
- 有明海奥部干潟域における窒素循環に関する研究－脱窒菌群の生息分布と脱窒活性－ ..... 43-48  
郡山益実・瀬口昌洋・古賀あかね・木本浩二・萬代敏夫
- 佐賀県沿岸域における覆砂の効果とその持続性 ..... 49-52  
原口智和・加藤 治・瀬口昌洋・郡山益実
- 有明海沿岸の海水中の鉄濃度変化と環境変化 ..... 53-58  
田端正明・Abudul Ghaffar・保見真悟・速水祐一・濱田孝治・山本浩一・郡山益実

## ■ 環境モデル研究部門

- 有明海奥部における物質輸送と低次生態系の動態について  
－プロジェクト 5 年間の中間報告－ ..... 59-68  
速水祐一・山口創一・真鍋智昭・山本浩一・濱田孝治・槻木(加)玲美・吉野健児・  
大串浩一郎・平川隆一・万田敦昌・経教雄策

数値シミュレーションによる有明海異変の原因解明に向けて .....	69-74
濱田孝治・三浦孝之・山本浩一・速水祐一・山口創一・経塚雄策	
GISを用いた筑後川・菊池川・白川・緑川における流出・負荷モデルの構築と 佐賀東部クリーク地帯における流出負荷量の算定 .....	75-84
大串浩一郎・鶴田芳昭・山本浩一・濱田孝治	
感潮域河口の流動と土砂動態に関する現地観測 .....	85-88
平川隆一・速水祐一・山本浩一・横山勝英・大串浩一郎・濱田孝治・大本照憲	
有明海奥部における流れとその経年変化 .....	89-94
山口創一・濱田孝治・速水祐一・瀬口昌洋・大串浩一郎	
複数地球観測衛星データによる赤潮分布モニタリング方法 .....	95-98
新井康平	

## ■ 微生物相研究部門

有明海に生息する乳酸菌の生産するII型制限酵素 .....	99-104
加藤富民雄・中川良美・小林元太・田代幸寛・神田康三	
有明海と伊勢湾・三河湾における細菌相の比較 .....	105-112
小林元太・田代幸寛・光武奈緒子・加藤富民雄・神田康三	
有明海における細菌相解析 .....	113-120
田代幸寛・光武奈緒子・小林元太・加藤富民雄・神田康三	
海苔スミノリ症病原細菌に感染するバクテリオファージ .....	121-124
神田康三・三根崇幸	
海洋資源摂取が生活習慣病発症に及ぼす影響 .....	125-126
柳田晃良・古屋健太・城内文吾・永尾晃治	
ヒト好中球の高度活性化に対するGPCR型受容体膜貫通ペプチドの配列依存性 .....	127-130
杉山大輔・林 良・長田聰史・藤田一郎・浜崎雄平・兒玉浩明	

## ■ 食水系感染症研究部門

ビブリオ・バルニフィカス感染症対策－臨床医学的アプローチ（第三報）－ .....	131-136
中島幹夫・大石浩隆・富田由紀子・松本浩一・前田祥範・三溝慎次・荒木和邦	
ビブリオ・バルニフィカス感染症対策－基礎医学的アプローチ（第三報）－ .....	137-142
大石浩隆・中島幹夫・田代幸寛・小林元太・富田由紀子・松本浩一・大重賢治	
救命しえたA群β溶血性連鎖球菌毒素性ショック症候群の1症例 .....	143-146
三溝慎次・山田友子・松本浩一・荒木和邦・大石浩隆・中島幹夫	

Loop-mediated Isothermal Amplification (LAMP) 法を利用した 起炎菌迅速診断法の検討 .....	147-150
草場耕二・中島由佳理・於保恵・坂口美和・永沢善三・大石浩隆・中島幹夫	

## ■ 地域文化・経済研究部門

有明海・諫早湾に関する総合的データベースの構築と新しい社会的決定システムに 関する研究(3) .....	151-154
榎澤秀木	
日韓両国の干潟生態系における食用水族資源の再生産力と捕獲量等に関する経時的・ 計量的比較研究4：佐賀県大浦浜におけるカキ採捕活動に関する再考 .....	155-164
武田 淳・李 應喆	
有明海・八代海沿岸域エコトーンにおける文化的景観の保全(3) ー調整池の機能と変容, 及びその保全をめぐるー .....	165-170
五十嵐 勉	
病気からみた有明海沿岸地域の特徴 ー佐賀県における病気の地理的分布からー .....	171-176
藤永 豪	

# CONTENTS

## ■ Preface

## ■ Research Division of SEDIMENT and MATERIAL TRANSPORT

- STUDY OF BOTTOM SEDIMENT IN THE INNER PART OF THE ARIAKE SEA  
– FOR THE MODELLING OF SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT AND  
EXPLANATION OF THE ACCUMULATION OF FINE PARTICLES – ..... 1-8  
Koichi YAMAMOTO, Kenji YOSHINO, Yuichi HAYAMI, Takashi KASAGI, Hiroyuki HARADA  
Takaharu HAMADA, Koichi OHGUSHI, Fumihiko YAMADA, Soichi YAMAGUCHI and  
Katsuhide YOKOYAMA
- THE CHARACTERIZATION OF EXTRACELLULAR POLYMERIC SUBSTANCES  
IN ARIAKE SEDIMENT AND ITS EFFECTS OF STABILIZATION OF SEDIMENT ..... 9-14  
Hiroyuki HARADA, Kouichi YAMAMOTO and Yuichi HAYAMI
- EFFECTS OF HYPOXIA ON MACROFAUNA  
IN THE INNER PART OF ARIAKE BAY ..... 15-22  
Kenji YOSHINO, Kouichi YAMAMOTO, Kouji HAMADA and Yuichi HAYAMI
- CHANGES OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF THE COHESIVE SEDIMENT  
IN THE INNER PART OF THE ARIAKE SEA ..... 23-28  
Takashi KASAGI, Katsuki KOGA, Koichi YAMAMOTO, Kenji YOSHINO, Yuichi  
HAYAMI, Takaharu HAMADA and Koichiro OHGUSHI
- SPATIAL AND TEMPORAL VARIATION IN SUSPENDED SEDIMENT YIELD  
IN THE CHIKUGOGAWA RIVER BASIN ..... 29-34  
Katsuhide YOKOYAMA and Kouichi YAMAMOTO

## ■ Research Division of ENVIRONMENTAL SCIENCE and TECHNOLOGY of TIDAL FLAT and SEDIMENT

- ANALYSIS OF THE OCCURRENCE MECHANISM OF HYPOXIC WATER IN  
THE INTERIOR PARTS OF THE ARIAKE SEA USING A TWO-LAYER BOX MODEL ..... 35-42  
Masahiro Seguchi, Masumi KORIYAMA, Tetuhiro ISHITANI, Osamu KATO and Tomokazu HARAGUCHI
- STUDY OF NITROGEN CYCLING IN THE TIDAL FLAT OF INTERIOR PARTS OF THE ARIAKE SEA  
– HABITAT DISTRIBUTION OF DENITRIFIERS AND DENITRIFICATION ACTIVITY – ..... 43-48  
Masumi KORIYAMA, Masahiro SEGUCHI, Akane KOGA, Koji KIMOTO and Toshio BANDAI
- DURABILITY OF SAND CAPPING EFFECT IN THE INNER AREA OF  
THE ARIAKE SEA ..... 49-52  
Tomokazu HARAGUCHI, Osamu KATO, Masahiro SEGUCHI and Masumi KORIYAMA

CHANGE IN TOTAL IRON CONCENTRATION AND ENVIRONMENT AT COASTAL AREA OF THE ARIAKE SEA .....	53-58
Masaaki TABATA, Abdul GHAFAR, Shingo HOMI, Yuichi HAYAMI, Takaharu HAMADA, Koichi YAMAMOTO and Masumi KOORIYAMA	

## ■ Research Division of ENVIRONMENTAL MODELING

MASS TRANSPORT AND ECOSYSTEM DYNAMICS IN THE INNER AREA OF THE ARIAKE SEA —INTERIM REPORT OF THE 5 YEARS— .....	59-68
Yuichi HAYAMI, Soichi YAMAGUCHI, Tomoaki MANABE, Koichi YAMAMOTO, Takaharu HAMADA, Narumi TSUGEKI KUWAE, Kenji YOSHINO, Koichiro OHGUSHI, Ryuichi HIRAKAWA, Atsuyoshi MANDA and Yusaku KYOZUKA	
TOWARD THE SOLUTION OF ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ARIAKE SEA WITH NUMERICAL MODEL .....	69-74
Takaharu HAMADA, Takayuki MIURA, Koichi YAMAMOTO, Yuichi HAYAMI, Soichi YAMAGUCHI, and Yusaku KyoZuka	
RUNOFF AND POLLUTANT LOAD MODELS IN THE RIVER BASINS OF CHIKUGO, KIKUCHI, SHIRA AND MIDORI AND ESTIMATION OF POLLUTANT LOAD FROM EASTERN SAGA CREEK AREA BY USING GIS .....	75-84
Koichiro OHGUSHI, Yoshiaki TSURUTA, Koichi YAMAMOTO and Takaharu HAMADA	
ON CURRENT AND SEDIMENT TRANSPORT IN THE ESTUARY .....	85-88
Ryuichi HIRAKAWA, Yuichi HAYAMI, Koichi YAMAMOTO, Katsuhide YOKOYAMA, Koichiro OHGUSHI, Takaharu HAMADA and Terunori OHMOTO	
FLOW AND ITS TEMPORAL CHANGE IN THE INNER AREA OF THE ARIAKE SEA .....	89-94
Soichi YAMAGUCHI, Takaharu HAMADA, Yuichi HAYAMI, Masahiro SEGUCHI and Koichiro OHGUSHI	
METHOD FOR DETECTING AND MONITORING OF RED TIDE BY MEANS OF MULTIPLE EARTH OBSERVATION SATELLITE DATA .....	95-98
Kohei ARAI	

## ■ Research Division of MICROBIAL TECHNOLOGY

STUDY ON TYPE II RESTRICTION ENDONUCLEASE OF LACTIC ACID BACTERIA ISOLATED FROM THE ARIAKE SEA .....	99-104
Fumio KATO, Yoshimi NAKAGAWA, Genta KOBAYASHI, Yukihiro TASHIRO and Kohzo KANDA	
ANALYSIS OF BACTERIAL COMMUNITY IN ARIAKE SEA .....	105-112
Yukihiro TASHIRO, Naoko MITSUTAKE, Genta KOBAYASHI, Fumio KATO and Kouzo KANDA	
ANALYSIS OF BACTERIAL COMMUNITY IN ARIAKE SEA .....	113-120
Yukihiro TASHIRO, Naoko MITSUTAKE, Genta KOBAYASHI, Fumio KATO and Kouzo KANDA	

STUDIES ON BACTERIOPHAGES INFECTIOUS TO PATHOGENIC BACTERIUM OF NORI SUMINORI DISEASE ATTEMPT FOR APPLICATION OF BACTERIOPHAGES AS THE MICROBIOLOGICAL CONTROL AGENT AGAINST <i>SUMINORI</i> DISEASE IN NORI CULTIVATION .....	121-124
Kozo KANDA and Takayuki MITUNE	
EFFECT OF MARINE RESOURCEON LIFE-STYLE RELATED DISEASES .....	125-126
Teruyoshi YANAGITA, Kenta FURUYA, Bungo SHIROUCHI and Koji NAGAO	
SEQUENCE DEPENDENCE OF GPCR PRIMING FOR HUMAN NEUTROPHILS .....	127-130
Daisuke SUGIYAMA, Ryo HAYASHI, Satoshi OSADA, Ichiro FUJITA, Yuhei HAMASAKI and Hiroaki KODAMA	

## ■ Research Division of MARINE & FOOD –BORNE INFECTION

A <i>VIBRIO VULNIFICUS</i> MEASURES APPROACH OF CLINICAL MEDICINE — THE THIRD REPORT — .....	131-136
Mikio NAKASHIMA, Hiroataka OISHI, Yukiko TOMITA, Kouichi MATUMOTO, Yoshinori, MAEDA, Shinji MITUMIZO and Kazukuni ARAKI	
A <i>VIBRIO VULNIFICUS</i> MEASURES APPROACH OF BASIC MEDICINE — THE THIRD REPORT — .....	137-142
Hiroataka OISHI, Mikio NAKASHIMA, Yukihiro TASHIRO, Genta KOBAYASHI, Yukiko TOMITA, Kouichi MATSUMOTO and Kenji OHSHIGE	
CURED CASES WITH STREPTOCOCCAL TOXIC SYNDROME (STSS) IN SAGA MEDICAL SCHOOL HOSPITAL .....	143-146
Shinji MITSUMIZO, Tomoko YAMADA, Kouichi MATSUMOTO, Kazukuni ARAKI, Hiroataka OISHI and Mikio NAKASHIMA	
STUDIES OF EARLY DIAGNOSIS METHOD FOR CAUSATIVE ORGANISM USING LOOP-MEDIATED ISOTHERMAL AMPLIFICATION (LAMP) .....	147-150
Kouji KUSABA, Yukari NAKASHIMA, Megumi OHO, Miwa SAKAGUCHI, ZENZO NAGASAWA, Hiroataka OISHI and Mikio NAKASHIMA	

## ■ Research Division of REGIONAL CULTURE and ECONOMY

CONSTRUCTION OF DATA-BASE FOR ARIAKE SEA AND ISAHAYA BAY, AND RESEARCH ON NEW SOCIAL DECISION-MAKING SYSTEM (3) .....	151-154
Hideki KASHIZAWA	
A COMPARATIVE STUDY ON EDIBLE MARINE RESOURCES IN TIDAL FLATS BETWEEN JAPAN AND KOREA 4: REEXAMINATION ON OYSTER-GATHERING ACTIVITIES AT OOURAHAMA, SAGA PREFECTURE .....	155-164
Jun TAKEDA and Eung-Cheol LEE	

CONSERVATION OF MULTIPLE CULTURAL -LANDSCAPE IN THE INSHORE ECOTONE, ARIAKE AND YATSUSHIRO SEA(3):THE ROLE , TRANSFORMATION, AND PRESERVATION OF THE DETENTION PONDS IN RECLAIMED LAND .....	165-170
Tsutomu IGARASHI	
REGIONAL CHARACTERISTICS OF DISEASE ON ARIAKE SEASHORE, DISTRIBUTION OF DISEASE IN SAGA PREFECTURE .....	171-176
Go FUJINAGA	



# 環境物質動態研究部門

Research Division of SEDIMENT and MATERIAL TRANSPORT



# 有明海湾奥部の底質に関する研究 — 細粒化の解明とモデル化にむけて —

STUDY OF BOTTOM SEDIMENT IN THE INNER PART OF THE ARIAKE SEA  
- FOR THE MODELLING OF SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT AND  
EXPLANATION OF THE ACCUMULATION OF FINE PARTICLES-

山本浩一<sup>1</sup>・吉野健児<sup>2</sup>・速水祐一<sup>3</sup>・笠置尚史<sup>4</sup>・原田浩幸<sup>5</sup>  
濱田孝治<sup>1</sup>・大串浩一郎<sup>6</sup>・山田文彦<sup>7</sup>・山口創一<sup>8</sup>・横山勝英<sup>9</sup>

Koichi YAMAMOTO, Kenji YOSHINO, Yuichi HAYAMI, Takashi KASAGI, Hiroyuki HARADA  
Takaharu HAMADA, Koichi OHGUSHI, Fumihiko YAMADA, Soichi YAMAGUCHI and Katsuhide  
YOKOYAMA

- <sup>1</sup>博 (工) 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト(〒840-8502 佐賀市本庄町1)  
<sup>2</sup>博 (水) 佐賀大学研究機関研究員 有明海総合研究プロジェクト(同上)  
<sup>3</sup>博 (農) 佐賀大学准教授 有明海総合研究プロジェクト(同上)  
<sup>4</sup>工修 佐賀大学大学院工学系研究科 都市工学専攻 (同上)  
<sup>5</sup>工博 佐賀大学准教授 理工学部機能物質工学科(同上)  
<sup>6</sup>工博 佐賀大学准教授 理工学部都市工学科(同上)  
<sup>7</sup>博 (工) 熊本大学教授 大学院自然科学研究科(〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39番1号)  
<sup>8</sup>博 (理) 佐賀大学研究機関研究員 有明海総合研究プロジェクト(〒840-8502 佐賀市本庄町1)  
<sup>9</sup>博 (工) 首都大学東京准教授 都市基盤環境コース(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

By reviewing previous researches and our own research on the bottom sediment distribution in the inner part of the Ariake Sea, it was clarified that the accumulation of the fine grained sediment occurs in almost all areas. As for the eastern part of the Ariake Sea, riverine fine sediment caused mud content rising for bottom sand-mud mixture. On the other hand, clay with marine organic matter accumulates in western inner part of the Ariake Sea. From the acoustic survey result, the accumulated clay on the bottom of the Isahaya Bay mouth gradually filled the submarine valley around the Takesaki Island. For the modeling of the suspended sediment transport, mapping of the resuspension limits and measuring of the settling velocity of the suspended sediment were performed. The resuspension limits in the Ariake Sea could be estimated by the clay content and vane shear strength of the bottom sediment. Settling velocity of suspended sediment in the Ariake Sea and Chikugo River Estuary were proportional to the square root of the concentration of suspended sediment.

**Key Words :** *Fine sediment, Isahaya Bay, Sonar, critical shear stress and settling velocity*

## 1. はじめに

有明海異変に関する問題のうち、底質の細粒化は懸濁物質の動態と密接に関連している。この原因を解明するためには、懸濁物質輸送モデルを用いて懸濁物質の輸送を再現する必要がある。そのためには底質の動態を明らかにすると共に、モデルパラメータの取得が必須となる。

本報告では、底質細粒化について過去の文献のレビューに新たに調査した知見を加えてその実態を明らかにし、後半では底質細粒化の解明のためのモデルのパラ

メータとして重要な底質の再懸濁条件・沈降速度についての研究を報告するものである。

## 2. 有明海における底質の分布と底質の細粒化

有明海においては表-1に示す底質分布に関する調査が行われており、1956年から現在に至るまで各機関による調査が行われている。これまでの研究において重要な指摘は3つあり、1) 1989年から2001年にかけての細粒底質の領域の拡大、2) 諫早湾締め切りに伴う粗粒砂から細

表-1 有明海底質の調査に関する既往の文献

調査年	対象海域	採取深	測定内容	文献
1956-57	有明海全域		Md φ など	1)
1975-76	有明海湾奥部		Md φ など	2)
1979	有明海・橘湾全域		含泥率, C, N, 炭酸カルシウム含有率	3)
1989. 8-9	有明海湾奥部80点	0-5cm	Md φ, 含泥率, 酸揮発性硫化物, IL	4)
1997. 6-2002. 6	有明海全域, 最大91点	0-12 cm	Md φ, C, N, 炭酸カルシウム含有率	5) 6)
2000. 9	有明海湾奥部55点	0-5cm	Md φ, 含泥率, 酸揮発性硫化物, IL	7)
2002. 7, 2003. 6	有明海湾奥部~諫早湾56点	0-1cm	含泥率 (< 64 μm), C, N, 色素成分, C/N比, δ <sup>13</sup> C, CDB-P	8) 9)
2004. 7	有明海湾奥19点		Md φ, IL, 色素成分, AVS, 底泥間隙中の各態窒素・リン成分	10)
2003, 2004. 5-6	有明海全域		表層堆積物の写真, 含泥率, 酸揮発性硫化物	11) 12)
2003. 5, 8	筑後川感潮河道: 45点 有明海湾奥東部135点	0-10cm	含泥率, 粒子密度, 含水比, 強熱減量, 有機炭素, 窒素, 各態リン	13) 14)
2005. 8	有明海湾奥98点	0-1cm 1-5cm	Md φ, シルト含有率, 粘土含有率, δ <sup>13</sup> C, 粘度, C, N	15) 16)

粒砂への底質変化<sup>17)</sup>, 3) 感潮河道からの出水時におけるシルト・粘土の流出に伴う河口域の底質変化<sup>13)</sup>である。このうち1)に関連して近年の細粒化について説明する。

### (1) 泥分含有率が増大した領域の拡大

1975年から2005年までの30年間に有明海湾奥における泥分(粒径0.0625mm以下)が増大した領域を考察する。砂とシルトの境界が0.063 mmであることから、この境界線は砂分とシルト・粘土が丁度同量含まれる底質であることを示している。また、泥分含有率増大領域においては砂に混入している泥分が増大していることを意味する。

図-1に中央粒径が0.0625mm以下の領域を1975年<sup>2)</sup>と2005年<sup>15)</sup>について示し、更に2005年における表層泥(0-1cm)中の有機物の起源についてコンターを示した<sup>15)</sup>。2005年の底質は4.252~0.075mmまではフルイで分析(それ以下はレーザー粒度分析)しており<sup>15)</sup>、1975年の分析結果<sup>2)</sup>と比較可能である。有明海湾奥部の広範な領域で泥分含有率の増加がみられる。泥分の由来については、陸域由来有機物の割合  $f$  の分布<sup>15)</sup>を基準にすると、湾奥東側の泥分含有率増加領域では陸域起源有機物の割合がおおむね0.4より大きい。すなわち湾奥部東側の泥分の起源は陸域から流入した有機物を含む泥分であり、従来の砂質に陸域由来の泥分を含むようになったか、陸域由来の泥質で置き換わったことになる。最近、出水時に感

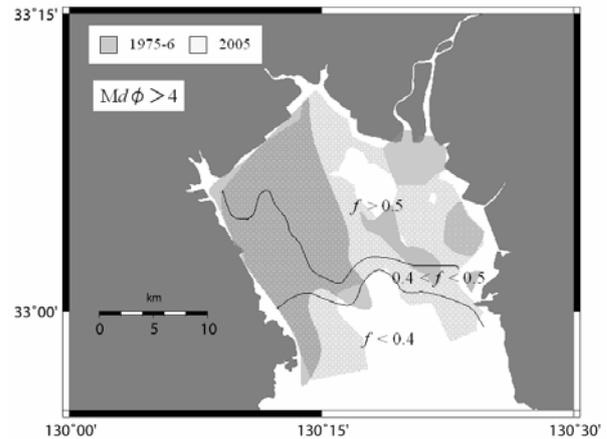


図-1 泥分含有率50%以上の領域(Md φ >4)の1975年<sup>2)</sup>と2005年<sup>15)</sup>の比較, 実線は陸域起源有機物含有量  $f$ <sup>15)</sup>

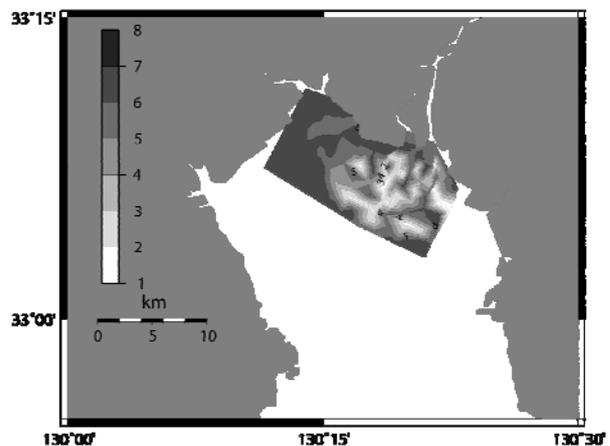


図-2 有明海東部における出水期前のMd φの分布(2003年5月)

潮域から掃流されて流出する多量のシルト・粘土が存在することが明らかになっており<sup>18)</sup>、2005年の調査<sup>15)</sup>は出水の影響が大きい8月に行われていることから一時的な泥質含有率の増大を含んでいると疑われる。しかしながら、出水の影響の小さい2003年5月に行われた筑後川河川事務所調査結果からMd φの分布を求めたところ(図-2)、筑後川東部~六角川沖にかけてもMd φが4以下となる領域は川副沖の干潟の部分に限られており、有明海東部海域においても長期的な含泥率の上昇があることを裏付けている。

一方、湾奥西側の、特に竹崎島の東(北緯32度58分, 東経130度16分を中心とする海域)の泥分含有率が拡大した海域においては陸域起源有機物割合  $f$  が0.4以下で植物プランクトンおよびそのデトリタスなど、海域起源の有機物含有率が高い。これは泥分含有率の増大について陸域の寄与が小さい海域であることを示している。この領域は海域自身の問題で泥分の割合が増大している。これは、この海域での粘土粒子の沈降フラックスが再懸濁フラックスを上回っていることを示している。原因の一

つに他の海域からの懸濁物質負荷量が増大した可能性があるが、岡村らは諫早湾を中心とした有明海湾奥部の詳細な調査を行い<sup>8)</sup>、諫早湾奥から竹崎島の東～太良町沖合にかけて炭素安定同位体比が低く、色素成分の濃度が高い底質が分布していることを示している。従って、化学分析の結果からも太良沖の底質の細粒化は植物プランクトンに密接に関係していて、諫早湾の底質との共通性は高く、諫早湾と同様の組成の粘土が堆積しているか、諫早湾の堆積物が当該海域に再移動していると考えられる。

### 3. 太良町沖合における底質の粘土含有率の増加

#### (1) 粘土含有率が高い海域の拡大

次に底質の粘土含有率が高い領域が拡大した海域に焦点を当てる。大隈らは1989年から2000年にかけて有明海湾奥部の中央部より西側でMdφが7を超える領域（粘土質の領域）が拡大したと指摘している<sup>7)</sup>。有明海湾奥部の底質ではMdφ=7は粘土含有率が36%程度となり（図-3）、砂含有率が0%（図-4）になる。すなわち、有明海でMdφが7以上になるということは「砂が全く含まれず、粘土含有率が36%程度以上の底質になる」こととほぼ同義である。

図-5に1975年<sup>2)</sup>、1989年<sup>4)</sup>、2000年<sup>7)</sup>、2005年<sup>16)</sup>までの、Mdφ=7のコンターの推移を示す。有明海湾奥中央部（北緯33度4分、東経130度15分を中心とする海域）についてはMdφ>7の領域拡大に関する一定の傾向はみられない。山本らは、この海域における陸域由来の有機炭素が集積することを示しており<sup>15)</sup>、短期的に、出水等に由来する陸域由来の粘土によって海底の粒度組成が影響を受ける可能性が大きい。その一方で、太良町の沖合（北緯33度1分、東経130度13分を中心とする海域）において経年的にMdφ>7の領域が拡大（南東進）していることがわかる。1975年から2005年までの30年間に、徐々に有明海湾奥西部については粘土含有率が高まったことを示している。前項の議論と総合すると、有明海湾奥部において粘土含有率が長期的に高まったのは太良町沖合から竹崎島周辺部であり、諫早湾の底質と密接に関連しているということになる。

#### (2) 竹崎島沖合における諫早湾の粘土堆積領域の東進

前項での議論において底質の粘土含有率が高まった竹崎島沖合の海底地形は非常に複雑であり、底質の採取地点の細かな違いが底質分布の結果に大きな影響をもたらす。そこで2008年3月24日に図-6に示す測線で38kHz/200kHz 2周波音響測深装置（Kongsberg Simrad社 EA400SP）による音響測深を行った。図-7に38kHzの測深結果を示す。

38kHzの音波は砂泥表面では反射するが、粘土質の場合は底質の内部まで音波が浸透して内部で密度の異なる層からの反射が捉えられるため縞状になる。すなわち、縞状の構造が認められる地点は粘土が厚く堆積している地点である。断面A-A'をみると、D点よりも西側（諫早湾側）で縞状の構造が見えている。堆積構造から判断す

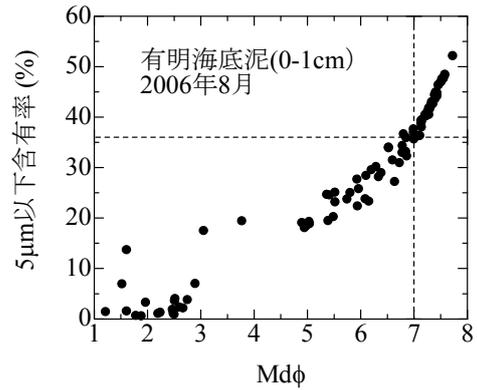


図-3 有明海湾奥部表層底質のMdφと5μm以下（粘土）含有率（2006年8月）

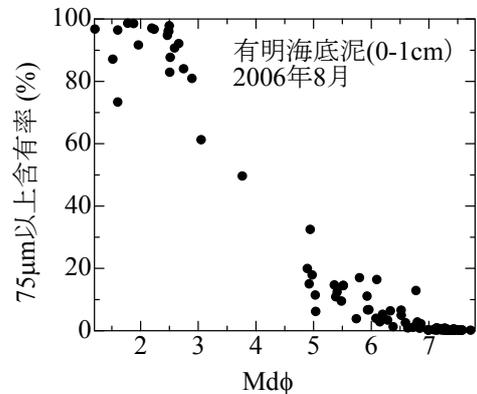


図-4 有明海湾奥部表層底質のMdφと75μm以上割合（砂）含有率（2006年8月）

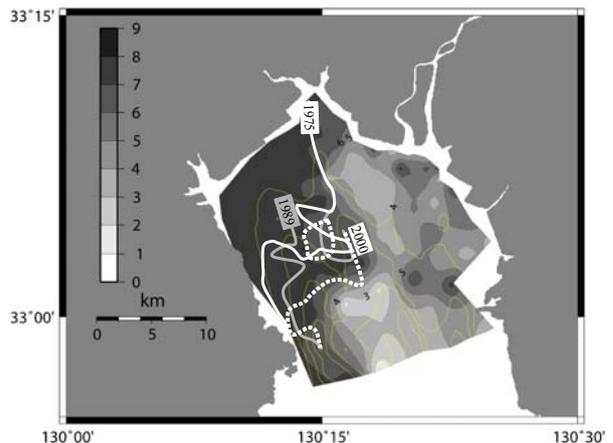


図-5 佐賀県海域におけるMdφ=7の境界線の経年変化  
2)7)背景は2005年8月時の底質のMdφ<sup>16)</sup>

ると、諫早湾の斜面に徐々に粘土が堆積して東に張り出し、竹崎島東側の海底谷を埋めていると推定される。海底谷は埋没しつつあるようであり、海底谷には粘土からなる水平面ができています。今後、さらに粘土の堆積がすすむと堆積領域が更に水平的に拡大することになる。

B-B' 断面やC-C' 断面をみると、B-X間あるいはC-D'間に存在する尾根により粘土堆積領域の東進が妨げられている。なお、表層底泥の採取結果と、底質探査結果は対応しており、縞状の構造が見える地点では厚く堆積した粘土が確認されている。

諫早湾から懸濁物質が竹崎島沖合の海底に輸送される機構は研究途上であるが、実際に懸濁物質が有明海湾奥へ輸送される現象が観測されている<sup>19)</sup>ことから、竹崎島沖合は諫早湾から流出した懸濁物質が堆積しやすい領域であるといえる。

#### 4. 有明海湾奥における底質の再懸濁条件のマッピング

懸濁物質の動態で重要な底泥の再懸濁には、底面直上の流体の運動と底質の種類によって異なる再懸濁速度が影響していることが予想される。そこで、有明海湾奥部において特性の異なる底質を対象に、再懸濁特性の違いを明らかにし、さらに底質の再懸濁条件（限界せん断応力）のマッピングを行なった。

##### (1) 底質調査方法

有明海湾奥部の表層底質の分布を把握するために、2006年8月9日～15日（大潮～中潮）において採泥を行った。図-8に調査地点を示す。また、底質特性の季節変動を把握するためにSx1とS3を通るラインで2006年7月～2007年7月の間、大潮の日に定線採泥調査を行った。

底泥採取にはエクマンバージ採泥器を用い、採取後直ちに表層1cmの泥のせん断強度を、回転粘度計（東機産業TVC-5、ロータNo.5）を用いて測定した。また、表層1cmの底泥については実験室に持ち帰り湿潤密度・含水比・強熱減量・粒度分布を測定した。乾燥密度は計算により算出した。別途、ベーンせん断強度と粘度の関係をj得ることにより、粘度をベーンせん断強度に変換した。図-9に底質のMdφの分布（2005年8月）とともに係留観測地点を示す。

##### (2) 係留観測方法

SS濃度と濁度の関係を得るためにKx1, Kx2にて底面直上20cm水と表層水を10サンプル採水し濁度とSS濃度を測定した。Sx1, S3についても別日程で採水し、SS濃度と濁度の関係を得た。図-9の4点においてADV

(Nortek Vector) と濁度計 (ATU5-8M) を設置して計測を行った。表-2にADVの計測緒元を示す。ADVによって得られたデータを用いて底面せん断応力 $\tau_b$  (Pa)を求め、ソナー方程式によって音響強度EL (dB)をSS濃度C (g m<sup>-3</sup>)に換算し、渦相関法を用いて鉛直SSフラックス $J_z$  (g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)を算出した。底質の再懸濁の限界せん断応力 $\tau_c$ には $J_z$

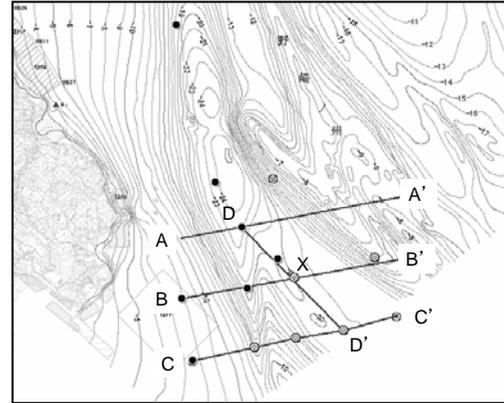


図-6 太良町沖合における底質の調査測線  
○: 砂泥底, ●: 泥底

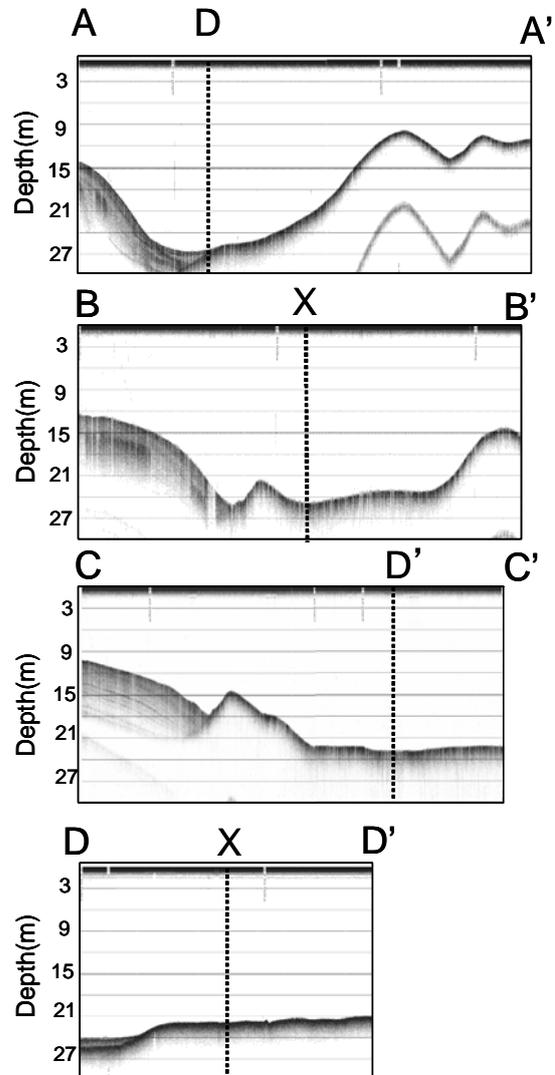


図-7 太良町沖合における底質の断面図  
(38kHz, 2008. 3. 24)

が顕著に増加を始めるときの $\tau_b$ を採用した。

表-2 ADVの計測諸元

地点	期間	f (Hz)	n	T (min)	計測高 (cm)
Sx1	06.10.14 ~06.11.14 06.12.14 ~07.1.14	16	160	10	25
S3	07.1.14 ~07.3.16	16	200	10	25
Kx1	07.11.8 ~07.11.9	16	480	1	25
Kx2	07.11.9 ~07.11.12	16	480	1	25

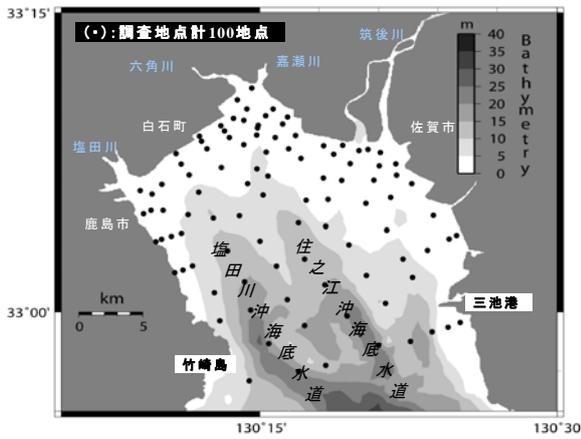


図-8 底質調査地点(2006年8月)

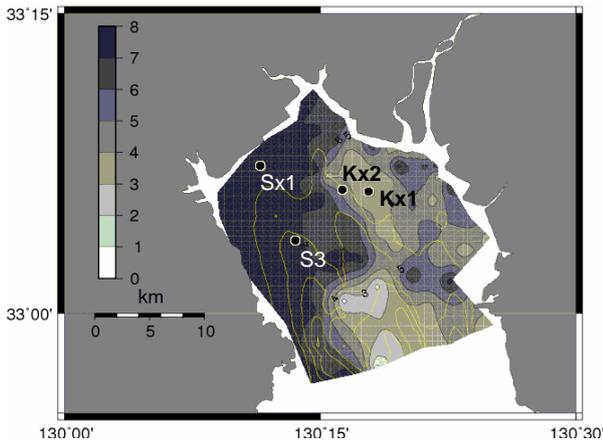


図-9 係留調査地点(2006年~2007年)

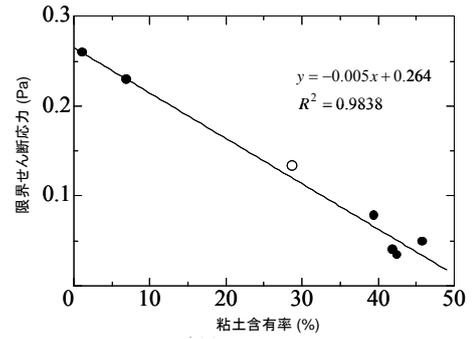


図-10 限界せん断応力と粘土含有率の関係(●:ADV, ○:山本らの旧東与賀町沖での結果<sup>20)</sup>)

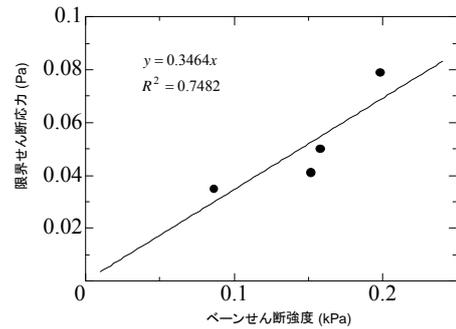


図-11 限界せん断応力とファンせん断強度の関係

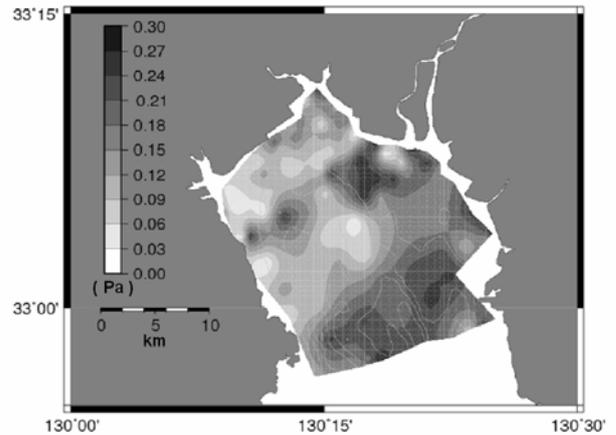


図-12 推定された限界せん断応力の平面分布

### (3) 底質の特性と再懸濁条件

係留観測で得られた定線底質調査日付近の限界せん断応力 $\tau_c$ と、底質の特性値を表-3に示す。調査日の $\tau_c$ を目的変数、底質の特性値(7項目)を説明変数として変数減少法にて重回帰分析を行ったところ、粘土含有率 $\alpha_c$ (%)が選択され、下記の回帰式が得られた(図-10)。

$$\tau_c = -0.005\alpha_c + 0.2648 \quad (1)$$

なお(1)式については、山本らが旧東与賀町沖で測定した限界せん断応力と比較的良好一致した。(1)式の切片である0.2648 Paは岩垣公式<sup>21)</sup>における平均粒径0.4 mmのときの限界掃流力とほぼ等しくなった。これは、砂泥に含まれる粘土粒子の飛び出しは砂の掃流条件に左右されることを示していると解釈される。

含泥率が99%に近いSx1およびS3では $\alpha_c$ がほとんど変わらないが、ベーンせん断強度 $S_v$  (kPa)との相関が高く、(2)式が得られた(図-11)。既往の研究<sup>22)</sup>でもベーンせん断強度と限界せん断応力の比較を行ったものがある。

$$\tau_c = 0.346S_v \quad (2)$$

以上より、90%粒径が0.075 mm以下を泥質域として、ベーン剪断強度分布が得られている(2)式を用い、それ以外を(1)式で $\tau_c$ を推定した。

表-3 定線底質調査日付近の限界せん断応力と底質の特性値

地点	Kx1	Kx2	Sx1 06/10/25	Sx1 06/12/22	S3 07/1/28	S3 07/2/21
Md $\phi$	2.47	1.39	7.30	7.44	7.08	7.22
含粘土率 $\alpha_c$ (%)	6.91	1.07	42.41	45.77	39.39	41.85
含泥率 (%)	14.80	4.00	99.93	99.96	99.57	99.91
含水比 (%)	49.21	41.39	357.00	307.95	278.70	263.53
強熱減量 (%)	1.43	1.05	10.06	11.86	11.03	11.49
湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.69	1.77	1.16	1.23	1.20	1.20
乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.13	1.25	0.25	0.30	0.32	0.33
ベーンせん断強度 $S_v$ (kPa)	0.06	0.65	0.09	0.16	0.20	0.15
調査日の限界せん断応力 $\tau_c$ (Pa)	0.23	0.26	0.04	0.05	0.08	0.04

#### (4) 底質の特性の分布と再懸濁に関する限界せん断応力のマッピング

前項で検討した方法と底質調査の結果から、再懸濁に関する限界せん断応力の分布を得た(図-12)。推定された限界せん断応力は0.022 (Pa)~0.263 (Pa)の範囲にあり、筑後川河口部の砂質干潟では限界せん断応力が高く、白石町~鹿島市沿岸の泥質干潟域ではが再懸濁しやすい底質であると推定された。このように有明海における再懸濁条件は底質の多様さに由来して多様であり、モデルに反映されることが期待される。

### 5. 有明海・感潮河道におけるSSの沈降速度

水域の懸濁物質(SS)の動態を数値モデルで再現しようとする場合、その沈降速度は重要なパラメータである。にもかかわらず、沈降速度あるいは沈降フラックスの実測例は国内においては非常に少ない。ここでは新しく開発した沈降速度の測定方法を用いて有明海北部海域・河川感潮域でのSSの沈降速度を実測し、現地のSSの沈降速度の濃度依存性について報告するものである。

#### (1) 沈降速度観測方法

観測は2007年8月31日に筑後川感潮域(14km地点、図

-13)において干潮~干潮の12時間観測を行った。沈降速度は沈降筒(後述)を用い、約30分間隔で計測した。また、2006年9月5日には浜川タワーにおいてアクリル角筒内を沈降させたブロックをビデオカメラで撮影する方法でブロックの沈降速度を測定し、同時にブロックの粒径分布をSequoia Scientific 社LISST-100で測定し、重量平均沈降速度を得た。

筑後川感潮域における高濃度のSSの沈降速度を算出するため、新開発の沈降筒法によって沈降速度を測定した。現地水中に、鉛直方向に3つのバルブが付属したアクリル円筒(内径50 mm, 全長392 mm)を水中に下ろし、ペリポンプでアクリル円筒内に現地水を下端バルブから導入後ポンプを停止し水上に引き上げ、ただちにバルブを全閉した。採水層の水温に設定した断熱容器に入れて沈降管を垂直に保ったままSSを沈降させた。一定時間(60~600秒間)沈降させたのち、中段の採水口から沈降管の上半分(上部カラム)の懸濁水を採水した。その後下半分(下部カラム)の懸濁水を採水した。これらの試料についてはそれぞれSS濃度、粒径分布を測定した。次に沈降速度の計算方法を示す。沈降管内については静穏なためSSの乱流拡散が無視できるから、カラム上端を原点とし、 $z$ を鉛直下向きにとって、ポンプ停止時刻を $t=0$ として

$$\frac{\partial C(z,t)}{\partial t} = w_s \frac{\partial C(z,t)}{\partial z} \quad (3)$$

によってカラム内の鉛直SS濃度分布を計算した。ここで $C$ :カラムのSS濃度、 $w_s$ :沈降速度である。下部カラムのSS濃度は、カラム下端を $z_2$ として、(3)の両辺を $z_1$ から $z_2$ まで積分して得られる。沈降管内の初期のSS濃度を初期条件として与え、式(1)を数値解析によって解くことで $w_s$ を得た。なお、本計測における $z_1=186$  mm,  $z_2=392$  mmである。

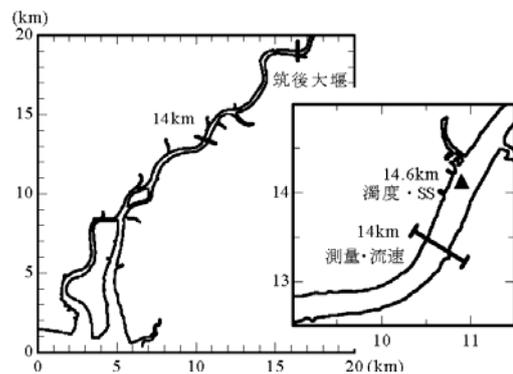


図-13 筑後川における沈降速度測定地点

#### (2) 沈降速度観測結果

SS濃度と沈降速度の関係を図-14に示した。SS濃度が約10000 g/m<sup>3</sup>以下において、

$$w_s = 7.6 \times 10^{-6} C^{0.5058} \quad (4)$$

が得られた。ただし $w_s$ :沈降速度(m/s),  $C$ :SS濃度(g/m<sup>3</sup>)である。(2)式は沈降速度がSS濃度に応じて増加することを示

している。Thornが行ったSevern Estuaryの底泥を用いた実験結果<sup>22)</sup>を同時に示しているが、筑後川感潮域の懸濁物質のThornの式に良く整合するものの、有明海の懸濁物質はThornの式で予想されるよりも沈降速度が1オーダー高い。これは低濃度でも懸濁物質が凝集しているためである。

### (3) 沈降速度に関する考察

ブロックの粒径を  $D_f$ 、一次粒子の粒径を  $D_p$ 、ブロックの密度を  $\rho_f$ 、水の密度を  $\rho_w$ 、一次粒子密度を  $\rho_s$ 、フラクタル次元を  $n_f$  とすると、ブロックの有効密度  $\Delta\rho_f$  は、

$$\Delta\rho_f = \rho_f - \rho_w = (\rho_s - \rho_w) \left( D_p / D_f \right)^{3-n_f} \quad (5)$$

で表される<sup>23)</sup>。ストークス則の沈降速度を適用した場合、

$$w_s = (1/18)\Delta\rho_f g D_f^2 = (1/18)(\rho_s - \rho_w)\mu^{-1} g D_p^{3-n_f} D_f^{n_f-1} \quad (6)$$

となる。ブロックカメラによる解析によると  $n_f$  については1.5~1.8であったから、 $w_s \approx D_f^{0.5-0.8}$  となる。粒径の大きなブロックほど沈降速度が速いことを示す。有明海・筑後川感潮域のブロックについてはSS濃度が高くなるにつれてその粒径が大きくなるといえる。なお、SSの一次粒子の中央粒径は5-15  $\mu\text{m}$ であったが、LISST-100によって観測された水中のブロックの中央粒径は50-250  $\mu\text{m}$ であり、確かに凝集していた。10000  $\text{g}/\text{m}^3$ 以上では干渉沈降が起こり、SSの沈降速度は減少した。

懸濁物質輸送のモデルパラメータ取得を目的として有明海湾奥部での懸濁物質の実用的な沈降速度について現地調査し、沈降速度がSS濃度の約0.5乗に比例することを示した。

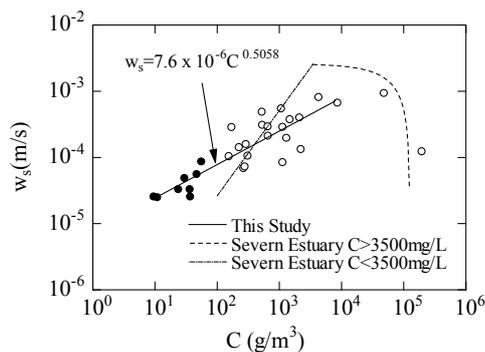


図-14 有明海・筑後川における沈降速度とSS濃度

## 6. まとめ

既往の文献情報および新たな調査から、有明海における底質細粒化の領域について知見を得た。有明海の底質の細粒化は東部海域で起こっている砂質底泥への陸域由来のシルト・粘土の混入と西部海域での海域由来の有機物を多量に含んだ粘土含有率の経年的増大が明らかになった。特に西部海域での底質断面の調査から、諫早湾

口に堆積する粘土質の底泥が徐々に竹崎沖の海底谷を埋め、東進していると推定された。

有明海において有明海総合研究プロジェクトが開発中の懸濁物質輸送モデルのパラメータとして、底質の再懸濁条件のマッピングと現地での懸濁物質の沈降速度の取得を行った。再懸濁条件としての限界せん断応力は粘土含有率とベーン剪断強度を用いることで推定でき、沈降速度は濃度の0.5乗に比例して沈降速度が速くなることが確認された。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、佐賀県有明海水産振興センター、国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所には底質データの提供を、佐賀県水産課、佐賀県有明海漁業共同組合、福岡県有明海漁業協同組合連合会には底質調査の協力を得ました。ここに記して感謝いたします。

## 参考文献

- 鎌田泰彦：有明海の海底堆積物，長崎大学教育学部自然科学研究報告，No.18，pp.71-82，1967.
- 鎌田泰彦：有明海の沿岸底質・海底地形と底質，月刊海洋科学，Vol.12，No.2，pp.88-96，1980.
- 木下泰正，62-2有明海および周辺海域の堆積物，公害特別研究報告書，工業技術院，1980.
- 古賀秀昭：有明海湾奥部の底質及び底生生物，佐賀県有明水産振興センター研究報告，13号，pp.57-79，1991.
- 近藤寛，東幹夫，西ノ首英之，有明海における海底堆積物の粒度分布とCN組成，長崎大学教育学部紀要－自然科学－，68，1-14，2003.
- 金澤拓，佐藤慎一，東幹夫，近藤寛，西ノ首英之，松尾匡敏，諫早湾潮止め後の有明海における二枚貝群集の変化，日本ベントス学会誌，60,30-42,2005.
- 大隈斉，江口泰蔵，川原逸朗，伊藤史郎：有明海湾奥部の底質及びマクロベントス，佐賀県有明水産振興センター研究報告，20号，pp.55-62，2001.
- 岡村和磨，田中勝久，木元克則，清本容子：有明海奥部と諫早湾における表層堆積物中の有機物の分布と有機炭素安定同位体比，海の研究，15(2)，pp.191-20，2005.
- Tanaka, K., Okamura, K., Kimoto, K., Yagi, H., Kodama, M(2007), Ctrate Dithionate-Bicarbonate Extractable Phosphorous (CDB-P) Pool in the Suspended and Surface Sediments of the Tidal Flat Area in Inner Ariake Bay, Japan, Journal of Oceanography, Vol. 63, pp.143-148.
- 徳永貴久，宗孝士，松永信博，児玉真史：有明海北部海域の底泥環境調査，水工学論文集，49巻，pp.1363-1368，2005.
- 秋元和實，滝川清，島崎英行，平城兼寿，田中正和，西村啓介，長谷義隆，松田博貴，小松俊文：「がらかぶ」が観た有明海の風景－環境変化をとらえるための表層堆積物（底質）データベース，NPO法人みらい有明・不知火，熊本大学沿岸域環境科学教育研究センター，2004.
- 秋元和實，滝川清，島崎英行，平城兼寿，田中正和，西村

- 啓介, 長谷義隆, 松田博貴, 小松俊文: 「がらかぶ」が観た有明海の風景2ー環境変化をとらえるための表層堆積物(底質)データベース, NPO法人みらい有明・不知火, 熊本大学沿岸域環境科学教育研究センター, 2006.
- 13) 横山勝英, 河野史郎, 山本浩一: 有明海湾奥部の地形・底質分布に関する現地調査, 海岸工学論文集, 52巻, pp.936-940, 2005.
- 14) 山本浩一, 末次忠司: 筑後川河口域における底質中の形態別栄養塩の分布特性に関する研究, 水工学論文集, 49巻, pp.1417-1422, 2005.
- 15) 山本浩一, 速水祐一, 笠置尚史, 宮坂仁, 大串浩一郎, 吉野健児, 平川隆一: 有明海湾奥部における表層底質の分布特性と底質環境の形成要因, 海岸工学論文集, 53巻, pp.961-965, 2006.
- 16) 笠置尚史, 山本浩一, 吉野健児, 速水祐一, 濱田孝治, 大串浩一郎: 有明海湾奥部における底泥の物性の変動特性に関する研究, 海洋開発論文集, 32 巻, 531-536, 2007.
- 17) 東 幹夫, 5. 底質の変化, 有明海の生態系再生を目指して, 恒星社厚生閣, pp.94-104, 2005.
- 18) 横山勝英, 有明海への土砂流入と底質環境, 海洋と生物173号, 2007d, 2007.
- 19) 速水祐一・濱田孝治・山本浩一・吉野健児, 諫早湾から有明海湾奥部への懸濁物質輸送, 2007年日本海洋学会秋季大会講演要旨集, pp.106, 2007.
- 20) 山本浩一, 加玲美, 速水祐一, 濱田孝治, 山田文彦, 有明海大授揚干潟における底泥の再懸濁および沈降に関する現地観測, 海洋開発論文集, 23, 1159-1164, 2007.
- 21) 土木学会編 水理公式集(平成11年度版), p158, 1999. Kamphuis, J. W. and K.R. Hall (1983): Cohesive material erosion by unidirectional current, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 109, No.1, January, 49-61.
- 22) Thom, M. F. C., Physical Processes of Siltation in Tidal Channels, Proceedings Hydraulic Modelling Applied to Maritime Engineering Problems, ICE, London, 1981, 47-55.
- 23) Kranenburg, C., 1994, On the fractal structure of cohesive sediment aggregates, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 39, 451-460. (2008. 3. 31受付)

# 有明海底質の細胞外ポリマーの性状と 底質の安定化への効果

The Characterization of Extracellular Polymeric Substances  
in Ariake Sediment and Its effects of Stabilization of Sediment

原田浩幸<sup>1</sup>・山本浩一<sup>2</sup>・速水祐一<sup>3</sup>

Hiroyuki HARADA, Kouichi YAMAMOTO, Yuichi HAYAMI

<sup>1</sup> 学術博士 佐賀大学准教授 理工学部機能物質化学科 (840-8502 佐賀市本庄町1番地)  
<sup>2</sup> 工学博士 佐賀大学有明海研究プロジェクト 講師 (840-8502 佐賀市本庄町1番地)  
<sup>3</sup> 農学博士 佐賀大学有明海研究プロジェクト 准教授 (840-8502 佐賀市本庄町1番地)

The extracellular polymeric substances(EPS) of Ariake Sea sediment were isolated from Ariake Sea sediment. Distribution of mono-carbohydrate and uronic acid determined. The soluble EPS fraction showed distribution of monosaccharides with Galactose, Glucose, xylose, rhamnose, fucose, and size distribution showed polymer of around  $10^3$ - $10^7$ , and monomer of  $10^2$  Da. The relationship water content, the ratio of chlorophyll-a/feo pigment and carbohydrate were maintained in summer to winter. Result of rheological experiment that EPS slurry with EPS and sediment behave as viscose, non-Newtonian fluids. Flow curve for the slurry were unidentical and effects of the addition of EPS in the presence or absence of  $Ca^{2+}$

**KEY Words** Extracellular Polymeric Substances, Ariake Sea Sediment, Rheology, Stabilization

## 1. 研究の目的

有明海では透明度と海水中のCODが長期的に上昇している。前者は赤潮の発生を助長するために問題になっている<sup>1)2)</sup>。我々は有明海の透明度上昇およびCOD増加の要因のひとつとして、付着生物や人的生産（養殖海苔）などが生産する細胞外ポリマー(EPS)が底質に影響して底質の再懸濁を抑制したり、溶出してCODを上昇させているのではないかと考え、その化学的評価と底質の凝集・安定化に及ぼす効果を明らかにすることを目的とした。

## 2. 研究内容

### (1) 底質のEPSの抽出方法検討

干潟の安定化に関して付着系藻類が分泌する細胞外ポリマーEPS (Extracellular Polymeric Substances) が関係しているとの報告がある。有明海の透明度増加の原因としていろいろな要因が考えられ、そのうちのひとつとしてEPSを確認しておくことは、底質中の有機物としての評価しかなされていない状況から重要である。

EPSの抽出方法には次のような方法が提案されている。

- ① 凍結乾燥した底泥を30℃で1時間蒸留水と接触して、その後3500 g, 15分間の遠心分離で回収する方法<sup>3)</sup>
- ② 底質500mgに対して蒸留水1cm<sup>3</sup>を加えて30℃で1時間溶出させて、2800 g, 10分間の遠心分離で回収する方法<sup>4)</sup>
- ③ 底質500mgに対して蒸留水1cm<sup>3</sup>を加えて30℃、1時間溶出させて、2800 g, 10分間の遠心分離で回収する方法④凍結乾燥底質5~55mgに蒸留水400 μlを加えて30℃で1時間溶出させて、6000 g, 5分間の遠心分離で回収する方法<sup>5)</sup>

同じである部分は30℃で1時間溶出と蒸留水を用いることの2点であり、底質に対する蒸留水の固液比、遠心分離の速度、時間とも異なっている。本研究では参考文献<sup>5)</sup>に基づき、凍結乾燥汚泥0.1mgを蒸留水0.8cm<sup>3</sup>に懸濁させて回転型攪拌器を用いて30℃で1時間攪拌した。その後6000 g, 5分間の遠心分離で回収した。抽出したEPSには構成が不明なポリマー状の炭水化物が含まれている。評価には分解して単糖、シアル酸、ウロン酸および、分子量分布の分析が行われる<sup>6)</sup>。本研究ではポリマーを構成する単糖とウロン酸の分析をおこなった。炭水化物としての総合的な評価には、全糖、およびウロン酸<sup>7)</sup>の分析をおこなった。更に高濃度のEPSを得るためにろ過後のEPSを遠心濃縮機を用いて濃縮した。また濃縮操作とは別に2000MWの限外ろ過を行い、文献ではエタノールで置換していき沈殿させる方法<sup>3)</sup>が報告されているが、本研究ではEPS溶液に対して4倍量の特級アセトンを加えて沈殿を得、5分間、4000rpmで遠心分離することで回収して冷風乾燥させた。この試料1.24mgに2mol/Lのトリフルオロ酢酸200 μLを添加し、100℃で6時間加水分解し減圧乾固した。得た残渣200 μLを添加し、溶解させ0.22 μmのフィルターでろ過後、希釈して50 μLをポストカラムHPLCシステムで検出した。カラム温度は70℃で、移動相は0.5mol/Lホウ酸カリウム緩衝液であり、中性糖の検出波長はEx. 320, Em430nmで、ウロン酸のそれは Ex360nm, Em430nmとした。また、HPLCを用いてGPC分析を行い、分子

量を推定した。

なお供試底質は2007年12月5日における干出時のSTA (図-1) からコアで採取し表層0.5cmをカットし、凍結乾燥したものである。

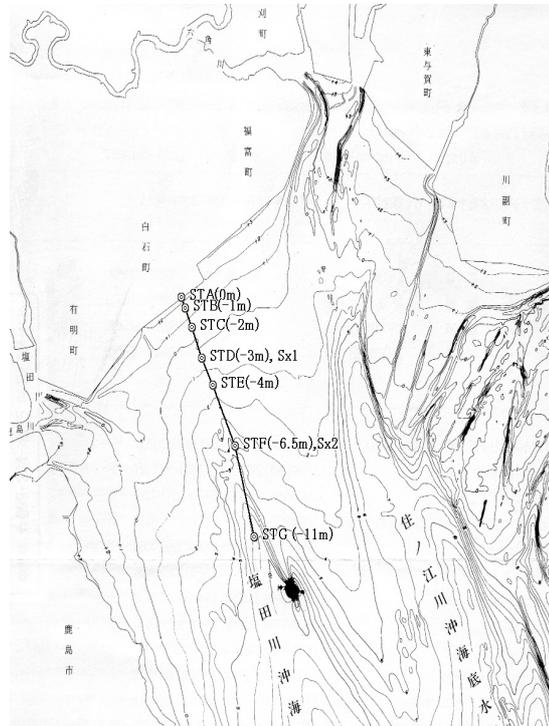


図-1 現地でのEPS (全糖評価) 測定するための測線

## (2) 現地底質中のEPS含有量

図-2に示す有明海の調査測線で2007年6月~12月にかけて表層1cmの底質を採取し、EPSとクロロフィルaは凍結した底質を、含水率はコア採取底質を対象に測定した。EPSは全糖量<sup>7)</sup>として、クロロフィル-aは90%アセトンで抽出して測定した<sup>3)8)</sup>。含水率は土質物性測定法<sup>9)</sup>に従った。

## (3) EPSの粘性変化

水抽出したEPS溶液を遠心濃縮機で濃縮し、粘度計で30℃におけるずり速度とずり応力の関係を調べた。測定には株式会社BROOKFIELD社製、回転粘度計DV=II+Proと共軸二重円筒を用いて30℃の条件で測定した。また、同時に調整したEPS溶液3本を4℃で保存し、それぞれ5, 7, 10日後に測定した。

#### (4)EPS添加による底質の粘度への影響

凍結乾燥した底質に蒸留水を加えて底質試料とし、これに粉末EPSの添加/無添加、CaCl<sub>2</sub>の添加/無添加の組み合わせにより、ずり速度とずり応力の関係を(株)BROOKFIELD社製、回転粘度計DV=II+Proと共軸二重円筒を用いて30℃の条件で測定した。EPSの添加は10mlの溶液に4mg、カルシウムは底質1gに対して300μgになるように添加し、それぞれの対象系とblankも考慮した。カルシウムの添加は2価金属の影響<sup>10)</sup>を見るためにおこなう。

### 3. 主要な結論

#### (1) EPSの回収

回転攪拌時間に対する溶出濃度の変化を図-1に示す。全糖は速やかに溶出して1時間で最大濃度に達した後濃度が減少する。これは底泥間隙水中に含まれていたEPSが懸濁物質に再吸着したことを示している。既往の研究では時間変化に対する報告は見られず、1時間での溶出で回収している<sup>3)</sup>。おそらく、長く溶出すると同じような傾向があつて濃度が低下するためと思われる。

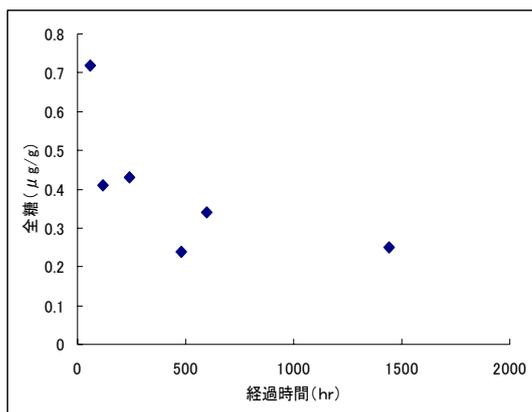


図-2 底質からのEPS溶出と再吸着

表層0.5cmの底質から抽出した粉末EPSの全糖、ウロン酸、たんぱく質の含有量はそれぞれ5.9%、1.2%、1.9%であった。有明海底質中の有機物含有量に関して、糖はタンパク質に比べて少ない<sup>11)</sup>が、今回の回収物中の糖の割合はその約3

倍であった。糖の構成について蛍光検出器付きHPLCで決定したところ、表-1に示すように7種類の中性糖と2種類のウロン酸からなることがわかった。

糖の構成糖の種類は干潟域での既往の報告<sup>10)</sup>とほぼ同じであった。しかしながらその多くが表層1mm以内の干潟の生物マット内での反応をとらえるために値が2から3桁程度高く<sup>4)5)</sup>、底質としての評価となっていない。これらのことから生物マットと同様の種類の構成糖が濃度が低いながら有明海底質に検出されることがわかった。またウロン酸は糖鎖のマトリックスを構成する<sup>12)</sup>。これについても濃度が低いながら存在することは、構成糖がマトリックスをつくって底質を安定化させる可能性があることを示している。図-2は分子量分布を示している。ポリマーとしては10<sup>3</sup>-10<sup>7</sup>Daまでシャープでない分布を示しているが、その多くが10<sup>3</sup>-10<sup>4</sup>の範囲にある。また、10<sup>2</sup>Daのモノマーの検出も見られる。先に述べたように既往の研究では生物マットを対象にしているので分子量分布もかなり異なる<sup>10)</sup>。

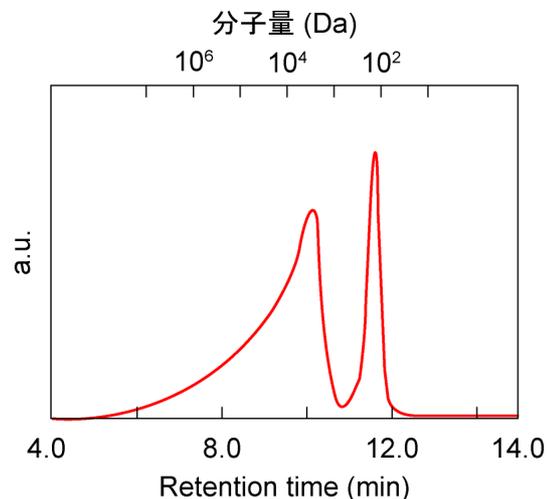


図-3 EPSの分子量分布

#### (2) 現地側線におけるEPSと含水比、クロフィラ/フコ色素との関係

全糖と含水率の関係を図-4に示した。沖合の

STGでは含水比と全糖濃度の相関が極めて高い( $r^2=0.84$ )が、岸のSTAでは外れ値が存在するこれは干出・水没に伴い鉛直移動する付着藻類の状況にも影響されるためと考えている。なお9月の全糖の値はSTAで $2.7 \mu\text{g/g}$ 、10月のSTGは $1.0 \mu\text{g/g}$ と傾向を異にするためデータからはずした。この意味については次に考察する。なお、11月の糖のデータは欠損である。

表-1 EPSを構成する中性糖とウロン酸

中性糖含量		ウロン酸含量	
試料中濃度 ( $\mu\text{g/mg}$ )		試料中濃度 ( $\mu\text{g/mg}$ )	
Rha	3.11	GalA	0.36
Rib	0.38	GlcA	0.32
Man	3.09		
Fuc	4.03		
Gal	4.19		
Xyl	3.06		
Glc	3.57		
total	21.44	total	0.68

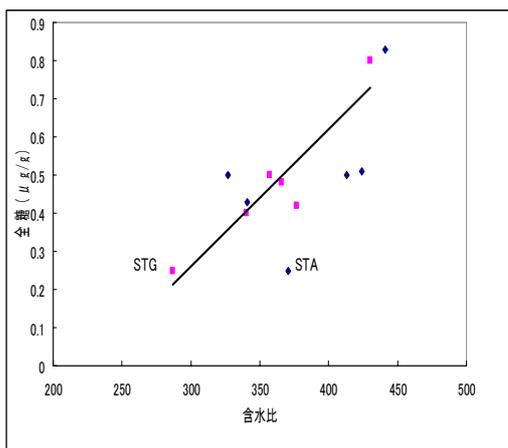


図-4 現地でのEPS (全糖評価) と含水比の関係

図-5は8月9月10月12月のクロロフル-a/フェオ色素と全糖の関係を示す。

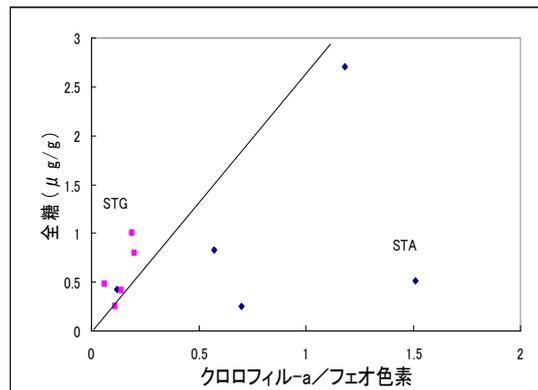


図-5 8月9月10月12月のクロロフル-a/フェオ色素と全糖の関係

図-5ではSTA9月の2.7のデータと10月のSTGの1.0のデータを入れてある。

クロロフィルaとフェオ色素の比は分解したクロロフィルaに対する分解していないクロロフィルaの値を示している。比が1.0をこすものについては、光合成により全糖量が増加するものと思われたが、比が0.25以下の場合とほぼ同じ範囲にあった。一方で比が0.5までは値が増加するにつれて増加した。また、この範囲で全糖が高いところは、フェオ色素濃度も高い。このことは現存量が多くてクロロフィルaの分解がある程度あるときに糖量が増加すると考えられる。また、図より分解したものは水分がおおいほど溶出することがわかる。糖濃度が高いHirstらは<sup>13)</sup>間隙水の平方根とEPSとの関係をとって相関があるとしている。海底底質においても同様に水分に溶出するものと考えられる。また、クロロフィルaの増加により糖が増加する報告があるが<sup>6)</sup>、フェオ色素との比の相関についての記述は見られない。

### (3) EPSのレオロジーと底質への安定化への影響

ずり速度とずり応力の測定において成り立

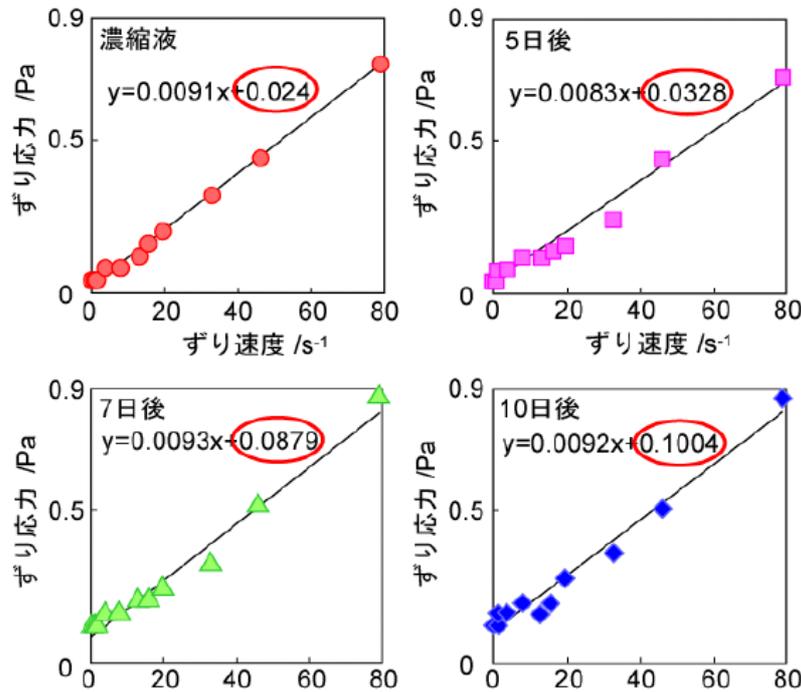


図-6 EPS 溶液のレオロジーと時間による降伏応力の変化

つ指数法則でEPSの溶液と底質・EPS懸濁液の場合にはべき乗の指数は1.0とならず非ニュートン流体の挙動を示した<sup>14)</sup>EPS溶液の測定結果は切片を有する直線関係となった(図-6)。切片は降伏応力と定義され、降伏応力までは流動せず、応力以上では応力と降伏応力の差とずり速度が比例する。それはEPS溶液の静置時間とともに増加して1週間では約4倍の値になった。このことはEPSの構造が水分子によって水和された結果、安定化したものと考えている<sup>15)</sup>。

底質懸濁液の場合はEPS単独の場合と異なり直線ではなく曲線となって非ビンガム流体挙動を示した(図-7)。底質のみの場合はずり速度によるずり応力の変化は小さく、ほぼ直線的にわずかに増加した。これに対してEPS添加系およびEPS・Ca添加系の場合はずり速度20s<sup>-1</sup>まで、速度の増加によって著しく応力が増加し、その後、増加の割合はやや減少して、直線的な比例関係になった。EPSは単独では効果を発現しないカルシウムによって底質の粘度が増加した。

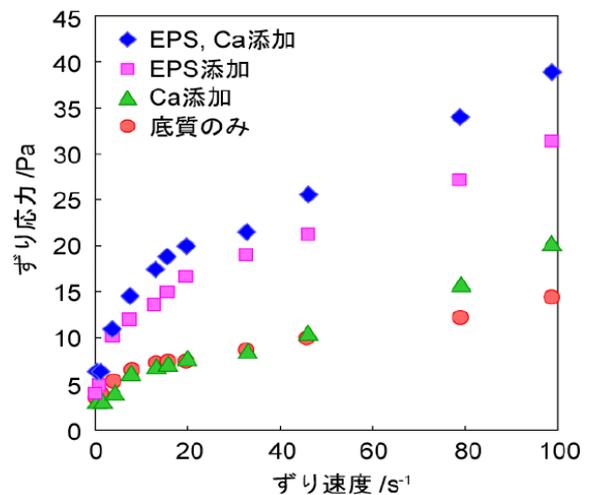


図-7 底質懸濁液におけるEPSとCaレオロジーに対する影響

これはカルシウムによってEPSが架橋されて粘性を発現するためと考えられた<sup>10)</sup>。溶液中の回収した粉末のEPS中には透析膜を通したにもかかわらず、マグネシウムとカルシウムが残存していた。これはEPSと結合したため透析膜を通過しなかったためで、このこともカルシ

ウムとの架橋が形成される裏づけになる。

### まとめ

- (1) 有明海底質の EPS の性状を検討し、水に溶出しやすく懸濁物質に吸着され易いことを明らかにした。
- (2) 現地の底泥において、EPS の全糖濃度はほぼ含水比に比例し、季節や場所によって濃度が変化することを確認した。
- (3) EPS がビンガム挙動を示し、降伏値が時間とともに変化することを明らかにした。
- (4) EPS を添加した底質懸濁液は非ビンガム流体挙動を示し、Ca の共存系において著しく底質の粘度を上昇させることがわかった。

### 参考文献

- 1) 後藤健介、後藤恵之輔：有明海異変を衛星データで読む、土木学会誌、Vol.86, No.8 pp.89-92 (2001)
- 2) 有明海・八代海総合調査評価委員会報告書 p13、2006
- 3) Brouwer J.F.C.de, K.Wolfstein, G.K.Ruddy,T.E.R. Jones, and L.J.Stal: Biogenic Stabilization of Intertidal Sediments, *Microbial Ecology*,p501-512,2005
- 4) Winder B.de ,N.Staales, L.J.Stal, D.M.Paterson :Carbohydrate secretion by phototrophic communities in tidal sediment,*Journal of sea research*, p131-146,1999
- 5) Brouwer J.F.C.de,L.J.Stal: Short-term dynamics in microphytobenthos distribution and associates in surface sediments of intertidal mudflats,*MARINE ECOLOGY PROGRESS* ,Vol.218,p33-44,2001
- 6) Brouwer J.F.C.de,T.R.Neu and L.J.Stal:On the function of secretion of extracellular polymeric substances by bentic diatoms and their role in intertidal mudflats,*Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*,p45-60,2006
- 7) 松田 和雄 (編著) 生物化学実験法 20 多糖の分離・精製法学会出版センター、p 49-52、1989
- 8) 中島重旗・加納正道・小島義博・金子好雄：水環境工学の基礎、p 180-181,1994
- 9) 農林水産技術会議事務局監修；土壌物性測定法、p 47-49、養賢堂出版、1982
- 10) Brouwer J.F.C.de, G.K.Ruddy, T.E.R.Jones, and L.J.Stal : Sorption of EPS to sediment and the effect on rheology of sediment slurries, *Biogeochemistry*, 61,p57-71,2002
- 11) Kristina Mojica, Danielle Elsey, Michael J. Cooney:Quantitative analysis of biofilm EPS uronic acid content,*Journal of Microbiological Methods*,71,p61-65,2007
- 12) 松原英隆, 木村健, 浦野紘平：有明海と博多湾の干潟底質中の有機物に関する研究, 水環境学会誌, Vol.27,No.5,p337-342,2004
- 13) Hirtz C.N., H.Cyr, L.A.Jordan: Distribution of Expolymeric Substances in the Littoral sediments of an Oligotrophic Lake,*MICROBIAL ECOLOGY*,46,22-32,2003
- 14) Wloka M. ,H.Rehage,H.-C. Flemming:Rheological Properties of Viscoelastic Biofilm Extracellular Polymeric Substances and comparison to the Behavior of Calcium Alginate Gels,*Colloidal Polymer Sci*,282,p1067-1076,2004
- 15) Dade W.B. , N.B.Pellerin, A.Moffet, P.A.Jumars and A.R.M.Nowell:The Effects of Bacteria on the Flow Behavior of Clay-seawater Suspension,*Journal of Sediment Research*, Vol.66, No.1,p39-42,1996

# 有明海湾奥部における貧酸素水塊がベントス 群集に与える影響

Effects of hypoxia on macrofauna in the inner part of Ariake Bay

吉野健児<sup>1</sup>・山本浩一<sup>2</sup>・濱田孝治<sup>2</sup>・速水祐一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>水博 研究機関研究員 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>2</sup>工博 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>3</sup>工博 佐賀大学准教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

We investigated the combined effect of salinity and hypoxic stresses on macrofauna in Ariake Bay. Grab samplings were conducted before- and after-hypoxia at 10 stations in two areas with different regime of salinity fluctuation but not differed in severity of hypoxia. Species richness, abundance, and biomass significantly decreased after the stresses even if sediment condition was taken into account. Multivariate analyses showed that the community structure significantly changed after hypoxia, and variation in the community structure among stations was also increased. However, the degree of those changes did not differ depending on the presence of salinity stress. The dominant species survived during the stress period was opportunistic species such as *Theora fragilis*, Capitellidae spp. and *Paraprinospio cordifolia*, which is typical of hypoxia-stressed area. These results suggest salinity stress is, if any, subsidiary compared with the hypoxic stress in the macrofauna in Ariake Bay.

**Key Words :** Hypoxia, Inner part of Ariake Bay, Macrofauna, salinity fluctuation

## 1. はじめに

有明海湾奥部では夏季に貧酸素水塊がここ数年頻繁に観測されており、底生生態系への影響が懸念されている。しかしながら湾奥部では底生生物に関する知見そのものが少なく、その現状すら明らかではなかった。このような現状に鑑み、Yoshino et al.<sup>1)</sup>では数少ない過去の湾奥部における1989年当時のデータと2006年のデータの比較を行い、塩田川海底水道周辺の湾奥部西側海域でマクロベントスの個体数、バイオマスともに減少傾向にあり、かつて広域に高密度で生息していた優占種はその分布域、密度ともに大きく減少させていたことを明らかにした。このようなベントス群集の荒廃がみられた西側海域は厳しい貧酸素にさらされる海域とも一致しており、湾奥部ベントス相の荒廃に対して貧酸素水塊が少なからず影響を与えていることを疑わせる結果となった。

そこで本研究では貧酸素水塊が湾奥部のベントス群集に与える影響を評価するため、貧酸素発生前後でのベントス群集の変化を調査した。

## 2. 方法

### (1) 調査地と採集方法

調査は2006年に行われ、西側泥質域に20地点を設定し、貧酸素が発生する前の5月と発生後の8月に同じ地点でベントスの採集を行った(図1)。この地点は濱田ら<sup>2)</sup>によって貧酸素水塊の動態が詳細に検討されたエリアに含まれている。濱田ら<sup>2)</sup>は2006年の6月末から8月末にかけて通算で9回の観測を行い、湾奥部広域での底層の溶存酸素の動態を調べている。本研究ではこのデータを線形補間し本調査地点における期間中の貧酸素の状況を推定した。

ベントスの採集はスミスマッキンタイヤ型採泥器(採集面積22.5×22.5cm)を用いて行い、各地点1回の採集を行った。採集した泥は1mm目合いのメッシュでふるい、残渣をローズベンガルを加えて着色した10%ホルマリンで固定し実験室に持ち帰った。サンプルからベントスを拾い出し、できる限り種まで同定した。種毎に個体数、バイオマスの計測も行い、各種の個体数からは底を2とするShannon-Wiener多様度指数を算出した。ただし軟体類のバイオマスは殻付きで測定している。

調査期間中の底質の変化についても調べるため、ベントス採集と同一地点でエクマンバージ採泥器(採集面積

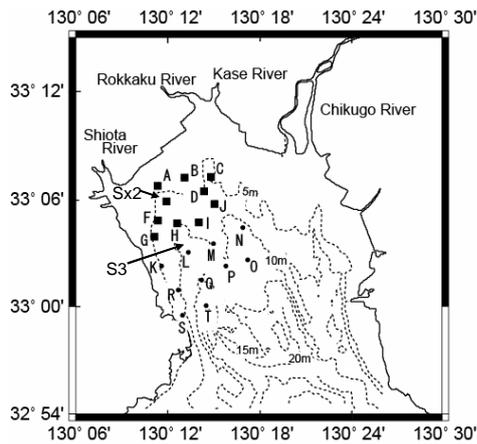


図1. 調査地点 (■: 北エリア; ●: 南エリア). 矢印は係留計のある地点を示す. エリアの詳細は本文参照.

22.5×22.5cm) による採泥も行った。泥はコア採取を行い、その表層1cmを分析に供した。全有機炭素量(TOC)、窒素量(TN)はCHNコーダ (JM-10, J-Science LAB) で測定し、中央粒径 (Mdφ) はレーザー粒度分析計 (SALD 3000, Shimadzu Co Ltd.) により測定した。

### (2) 予想される結果とデータ解析

有明海では貧酸素は梅雨明けに河川からの大量出水で生じる塩分成層が引き金になっているため<sup>2, 3)</sup>、干潟域に近い水深の浅いエリアでは底層でも潮汐の影響で貧酸素に加えて表層の低塩分水にもさらされる (図2)。塩分変動の影響にさらされやすい地点とそうでない地点をそれぞれ便宜的に北エリア (10地点) と南エリア (10地点) の2つに分け、塩分ストレスの影響も考慮に入れて解析を行った。また調査期間中に有意な変化がみられた底質項目は共変量として以下の解析に取り入れた。

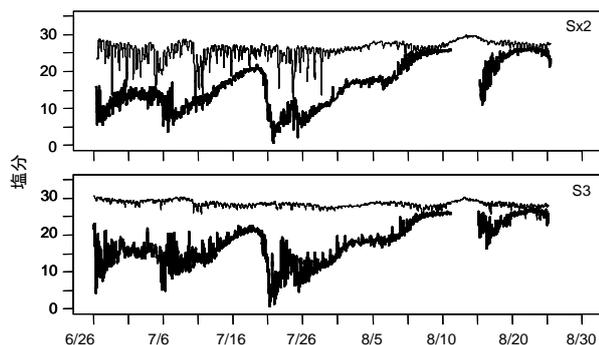


図2 地点Sx2とS3の係留計の表層 (下ライン) と底層 (上ライン) の塩分変動. Sx2では底層でも塩分が不安定なのに対し、沖合のS3では表層は不安定でも底層では安定している。

貧酸素の影響があるならば貧酸素の経験前と後でベントス全体の個体数、バイオマス、種数、多様度は減少すると予想される。この解析には多様性指数以外はlog変換した後split-plot ANOVAを用いた。また、ベントス群

集構造も貧酸素前後で変化すると予想される。群集構造変化の視覚化についてはCAP<sup>4, 5)</sup>とMDS解析によって行った。またその変化の有意性についてはノンパラメトリックMANOVA<sup>6, 7)</sup>で解析した。群集構造を表現するための指数としてJaccard distanceとModified Gower's distanceの2つの場合で評価した。前者は群集構造における種構成の変化を重視するのに対し、後者は出現種の個体数の相対変化を重視する<sup>8)</sup>。また、貧酸素経験前後の群集構造の地点間でのばらつき具合についてもPERMDISP解析<sup>8)</sup>で評価した。

塩分ストレスは貧酸素と同時期に生じるため、塩分ストレスの影響評価は貧酸素のみを経験する南エリアと塩分・貧酸素両方のストレスを経験する北エリアの群集パラメータの変化の度合いの違い (つまりエリアと季節の交互作用) として上述の解析方法で評価した。もし塩分ストレスの影響があるなら南エリアよりも北エリアで変動の程度は大きくなるはずである。

## 3. 結果

### (1) 物理環境

本調査期間内で各地点が経験した貧酸素 (溶存酸素2mg/L以下の状態) の状況が表1に線形補間されたデータとして示されている。塩分の影響にさらされやすいエリアとそうでないエリアが経験する貧酸素の程度は有意な違いがなかった (ANOVA, P>0.05)。

表1. 2006年の各地点の貧酸素状況

地点	溶存酸素 (mg/L)									推定累積日数
	6月		7月			8月				
	27	3	13	20	23	26	30	8	25	
<b>北エリア</b>										
A	5.5	5.5	2.5	2.5	1.5	1.5	1.5	0.5	4.5	24
B	4.5	7.5	2.5	3.5	4.5	1.5	1.5	0.5	4.5	20
C	4.5	6.5	2.5	1.5	2.5	1.5	1.5	0.5	3.5	28
D	4.5	6.5	2.5	2.5	1.5	1.5	1.5	0.5	3.5	26
E	4.5	4.5	1.5	1.5	2.5	1.5	0.5	0.5	3.5	33
F	3.5	5.5	1.5	2.5	2.5	2.5	1.5	0.5	4.5	22
G	3.5	5.5	1.5	2.5	4.5	1.5	0.5	0.5	3.5	27
H	3.5	4.5	1.5	0.5	1.5	1.5	0.5	0.5	2.5	40
I	3.5	5.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	0.5	2.5	40
J	5.5	6.5	2.5	2.5	1.5	1.5	1.5	0.5	3.5	26
<b>南エリア</b>										
K	4.5	5.5	0.5	1.5	2.5	1.5	0.5	0.5	2.5	38
L	4.5	4.5	1.5	1.5	1.5	1.5	0.5	0.5	2.5	40
M	4.5	5.5	1.5	2.5	1.5	1.5	1.5	0.5	2.5	31
N	5.5	5.5	2.5	2.5	2.5	1.5	1.5	0.5	3.5	23
O	4.5	3.5	2.5	-	1.5	-	2.5	1.5	-	14
P	4.5	3.5	2.5	-	1.5	-	2.5	0.5	-	20
Q	4.5	3.5	2.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	3.5	27
R	3.5	2.5	1.5	1.5	2.5	1.5	0.5	0.5	2.5	40
S	3.5	2.5	2.5	2.5	1.5	1.5	1.5	1.5	3.5	22
T	4.5	3.5	2.5	2.5	1.5	1.5	1.5	1.5	3.5	22

表2に5月と8月における底質環境を示した。中央粒径 Mdpは5月と8月で両エリアともに有意な違いはなかったが、全有機炭素と窒素量は8月の時点で有意に増加していた (split-plot ANOVA,  $P < 0.001$ )。

表2. エリア毎の底質の季節変動

	炭素 (mg/g)	窒素 (mg/g)	炭素/窒素比	Md φ
<b>北エリア</b>				
5月	22.9 ± 0.9	2.1 ± 0.1	12.85 ± 0.75	7.26 ± 0.12
8月	25.8 ± 0.7	2.6 ± 0.1	11.59 ± 0.37	7.31 ± 0.06
<b>南エリア</b>				
5月	20.7 ± 1.5	2.0 ± 0.1	11.92 ± 0.56	7.00 ± 0.20
8月	23.2 ± 1.7	2.3 ± 0.2	11.92 ± 0.46	7.11 ± 0.16

### (2) ベントス

底質のうち、有機炭素量と窒素量が有意に増加したため、これらを共変量として解析に取り入れた。しかし炭素量と窒素量には強い相関があったため (相関係数=0.8)、窒素量のみを統計モデルに含めた。表3にANOVAの結果が示してある。バイオマスについては共変量と有意な関係が得られなかったため誤差項にプールしている。種数、個体数は共変量で調整した場合でも季節に有意な変化があり、バイオマスも含め貧酸素経験後の8月に低下した (図3)。多様度は共変量と有意な相関があったものの貧酸素前後で有意な変化は認められなかった。また、エリアと季節の交互作用がみられなかったため、塩分ストレスによる有意な影響は認められない。

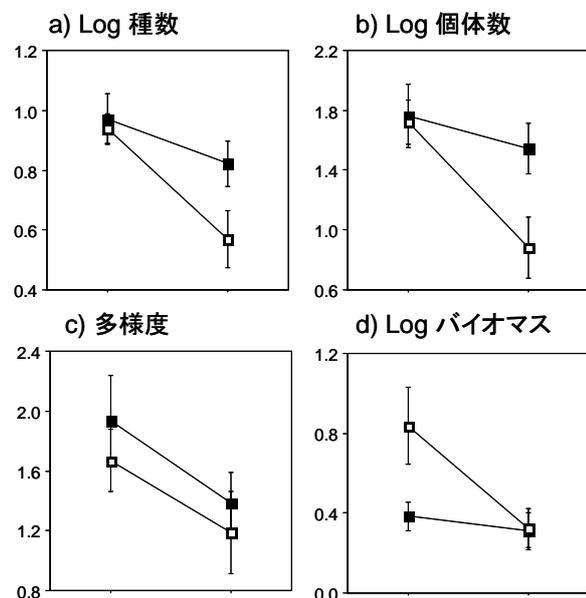


図3. 各群集パラメータのエリア毎の季節変化 (■南エリア ; □北エリア)

群集構造については有機物量で調整しても種構成、相対量の変化の両方の点で貧酸素後に有意な変化が認められた (MANOVA,  $P < 0.001$ , 図3左)。MDSプロット

(図4右) からわかるように5月と8月では8月の方がプロットの散らばり具合が大きく、貧酸素経験後に有意に地点間で群集構造のばらつきが増加した (PERMDSIP,  $P < 0.001$ , 図5)。しかしながらグループ間での群集構造の変化の程度は北エリアと南エリアでほとんど違いがなく、群集構造でも有意な塩分ストレスの影響はみられなかった (MANOVA, 季節 × エリア:  $P > 0.1$ , 図4左)。

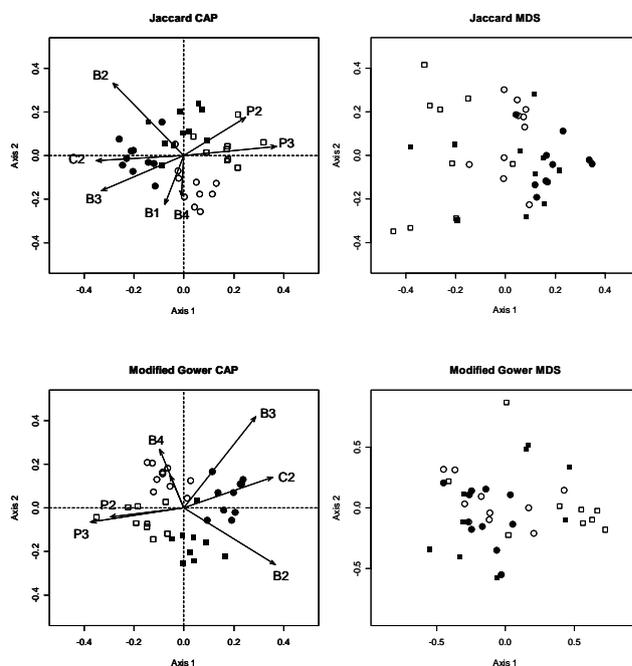


図4. 5月 (●南エリア ; ○北エリア) から8月 (■南エリア ; □北エリア) にかけての群集構造の変化. ベクトルの記号は表4の種と対応.

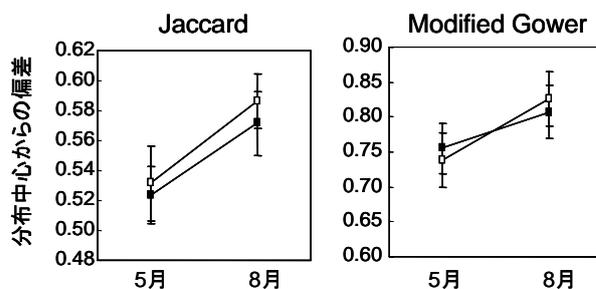


図5. 群集構造の地点間変異の季節変化 (■南エリア ; □北エリア)

図4左のプロットの分離の仕方からCAP軸1は主としてエリア間での群集構造の変異を表し、CAP軸2は季節による変異を表現していることが読み取れる。このような群集構造の変異に寄与していた種をみるため、CAP軸1と2に対して個体数・出現地点が多かった主要な種との相関をとったのが表4である。その相関係数が図4左にベクトルダイアグラムとしてプロットされている。それぞれの種のベクトルはその指し示す方向に出現 (Jaccard) ・個体数 (Modified Gower) が相対的に多いことを示す。例えばマルスダレガイ科のヒメカノコアサ

表3. 各群集パラメータにおけるsplit-plot ANCOVA表

	df	Log 種数			Log 個体数			多様度			log バイオマス		
		MS	F	P	MS	F	P	MS	F	P	MS	F	P
水準間変動													
Log(窒素)	1	3.746	14.135	0.002	9.176	6.085	0.025	4.226	4.684	0.045			
エリア	1	0.157	0.594	0.452	2.587	1.716	0.208	0.001	0.001	0.977	2.796	4.351	0.052
誤差	17	0.265			1.508			0.902			0.643		
水準内変動													
Log(窒素)	1	2.003	8.051	0.011	3.703	1.948	0.181	2.443	12.695	0.002			
季節	1	1.568	6.302	0.022	12.026	6.326	0.022	0.572	2.971	0.103	4.517	4.678	0.044
季節 x エリア	1	0.607	2.439	0.137	6.048	3.181	0.092	0.043	0.223	0.643	2.616	2.709	0.117
誤差	17	0.249			1.901			0.192			0.965		

リ *Veremolpa micra* では Jaccard 距離の場合と Modified Gower 距離ともに5月のプロット (○と●) の方向にベクトルが向いており、エリアの違いに関係なく8月よりも5月に本海域における出現率が高く、また個体数も多いことを示す。ベクトルの方向が似ているホソツツムシなどのヨコエビ類も同様の傾向を示しているが南エリアでより多いことがわかる。一方、これらとは反対の方向にあるスピオ科多毛類 *Paraprinospio cordifolia* やイトゴカイ類 *Capitellidae* spp. は5月よりも貧酸素を経験する8月に北エリアで出現が多く、個体数も多いことを示している。アサジガイ科のシズクガイ *Theora fragilis* は5月に出現率・個体数ともに多いが、Modified Gower 距離のケースではベクトルは短く、ヒメカノコアサリなどと比べて顕著に5月に個体数が多いというわけではない。またバカガイ科のチヨノハナガイ *Raeta pulchelus* では季節に関係なく南エリアに多く出現していることを示している。

表4. CAP軸と主要種の相関係数

種名	Jaccard		Modified Gower	
	Axis 1	Axis 2	Axis 1	Axis 2
P1 ダルマゴカイ	-0.184	-0.039	0.225	0.099
P2 イトゴカイ科 spp	0.247	0.174	-0.296	-0.041
P3 <i>Paraprinospio cordifolia</i>	0.370	0.042	-0.375	-0.064
C1 <i>Corophium</i> sp.	-0.237	-0.097	0.261	0.137
C2 ホソツツムシ	-0.353	-0.024	0.356	0.141
C3 <i>Photis</i> sp.	-0.245	-0.082	0.265	0.122
B1 シズクガイ	-0.077	-0.224	-0.056	0.148
B2 チヨノハナガイ	-0.285	0.332	0.367	-0.261
B3 ヒメカノコアサリ	-0.331	-0.162	0.288	0.418
B4 サルボウ	-0.011	-0.184	-0.097	0.267

これらのパターンは5月と8月における各エリアでの種毎の変化でもみてとれる (図6)。その統計解析結果を表5にまとめた。ただしベクトルの方向が似ている種に

ついてはいくつかプールしたものもある。ヒメカノコアサリとヨコエビ類は底質の影響を調整しても貧酸素経験後に有意に減少した。その他の種ではチヨノハナガイが有意に南エリアに多いことと、シズクガイにおいてエリアと季節の交互作用が認められた。 *Paraprinospio cordifolia* とイトゴカイ科多毛類をプールした多毛類1では統計上は有意ではないが、8月に個体数が増加傾向なのがみてとれ、図4の結果とも一致する。最後に5月と8月における各エリアでの優占種について表6にまとめて示した。

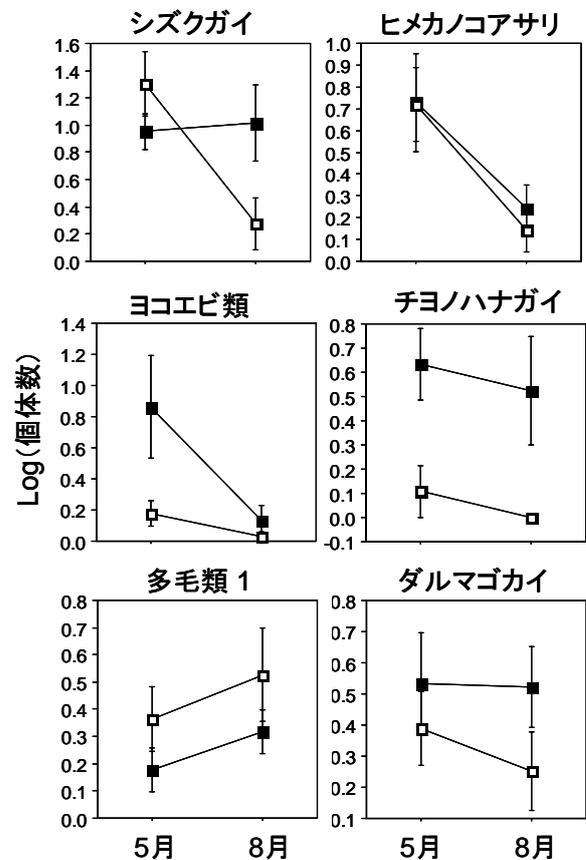


図6. 主要種、分類群における個体数の季節変化 (■南エリア; □北エリア)

表5. 主要種のsplit-plot ANCOVA表

	df	ヒメカノコアサリ			ヨコエビ類			チヨノハナガイ		
		MS	F	P	MS	F	P	MS	F	P
<b>水準間変異</b>										
Log(窒素)	1	0.772	0.346	0.564	3.858	2.332	0.145	1.194	1.632	0.219
エリア	1	0.055	0.025	0.877	6.842	4.136	0.058	13.554	18.527	0.000
誤差	17	2.232			1.654			0.732		
<b>水準内変異</b>										
Log(窒素)	1	16.345	51.688	0.000	0.009	0.006	0.939	6.192	5.400	0.033
季節	1	2.171	6.866	0.018	14.291	9.063	0.008	1.645	1.435	0.248
季節×エリア	1	0.011	0.034	0.855	2.855	1.811	0.196	0.418	0.365	0.554
誤差	17	0.316			1.577			1.147		
<b>シズクガイ</b>										
<b>水準間変異</b>										
Log(窒素)	1	0.141	0.088	0.771	1.243	1.448	0.245	0.058	0.038	0.848
エリア	1	1.854	1.154	0.298	2.867	3.338	0.085	1.547	1.007	0.329
誤差	17	1.606			0.859			1.536		
<b>多毛類1</b>										
<b>水準内変異</b>										
Log(窒素)	1	4.797	1.335	0.264	0.331	0.568	0.461	0.000	0.000	0.994
季節	1	7.622	2.121	0.163	0.954	1.636	0.218	0.884	1.518	0.235
季節×エリア	1	17.347	4.827	0.042	0.020	0.035	0.855	0.046	0.078	0.783
誤差	17	3.594			0.583			0.583		
<b>ダルマガカイ</b>										

#### 4. 考察

##### (1) ストレスの影響評価

ベントスの出現状況や個体数は貧酸素のようなストレスがない自然な状況下でも変動するものである。今回の研究のようにストレス前後の群集構造の変化からストレスの影響評価を行う場合は対照区と比較して有意に変化が大きいかを検討する必要がある（例えばBACIデザインとその発展型<sup>9)</sup>）。しかし野外では適切な対照区を取ることが難しいことも多い。対照区の探索自体に膨大なエネルギーとコストが必要ならば、貧酸素水塊のように広域にその影響が及ぶ場合、対照区になりうる海域では貧酸素以外の水深や底質条件も大きく隔たってしまう、適切な対照区として機能しなくなる可能性もある。

本研究ではコントロールとの差による影響評価ではなく、ストレスに対する群集の応答の指標となる項目と、代表的な種の生態学的情報を考慮することで貧酸素の影響を定性的に評価した。ストレスに対する応答を示す根拠として、攪乱によるストレスが群集構造の地点間でのばらつきに反映される研究例がいくつか示されている<sup>10, 11)</sup>ので、これを指標として利用した。また、優占種のいくつかについては生活史特性などの生態学的情報が利用可能である。

##### (2) 群集レベルでの応答

本研究では群集構造における地点間のばらつきはPERMDISPによる解析から5月と比較して8月に有意にば

らつきが増大した。このことは調査期間中に生じたストレスの影響があったことを示唆している。この期間中に生じた物理的ストレスには貧酸素水塊と底質の有機物量の増加があげられる。貧酸素のストレスのあるところでは地点間の群集構造のばらつきが増大する例は統計的な解析は行なわれていないもののMontagna et al.<sup>12)</sup>などのMDSプロットにもみられている。

しかしながら個体数をはじめバイオマスや種数、群集構造の変化においては北エリアと南エリアで違いがみられず、塩分ストレスはほとんど影響がないと考えざるを得ない。共変量として解析した底質の有機物含有量とベントスの応答との関連はある場合とない場合があり、その影響が調整された単変量、多変量両方の分散分析において個体数や種数の低下に有意な影響が検出された。バイオマスも有機物量と有意な関連はなかったが、やはり8月に有意に低下していた。しかしながらエリアと季節の交互作用は認められなかった。したがって塩分ストレスの影響はあるとしても小さく、貧酸素によるストレスのほうがベントス群集に大きく影響しているのが妥当である。

##### (3) 種レベルでの応答

主要な種の応答においても塩分ストレスの影響は小さく、貧酸素のストレスが大きいと考えられる。これは8月のベントス群集において貧酸素に敏感なヨコエビ類が消失し、シズクガイやイトゴカイ類、*Paraprinospio*

表6 各エリア・季節における優占種

種	5月		種	8月	
	個体数	頻度(%)		個体数	頻度(%)
<b>北エリア</b>					
シズクガイ	514	64.8	シズクガイ	63	35.8
ヒメカノコアサリ	103	13.0	<i>Paraprinospio cordifolia</i>	31	17.6
サルボウ	48	6.1	Capitellidae spp.	23	13.1
ダルマゴカイ	22	2.8	ダルマゴカイ	18	10.2
Capitellidae spp.	15	1.9	ヒメカノコアサリ	10	5.7
チヨノハナガイ	11	1.4	ヒメムツアシガニ	6	3.4
<i>Paraprinospio cordifolia</i>	8	1.0	トゲイカリナマコ	6	3.4
その他	72	9.1	その他	19	10.8
合計	793		合計	176	
<b>南エリア</b>					
<i>Corophium</i> sp.	1999	76.5	シズクガイ	405	62.2
ヒメカノコアサリ	144	5.5	チヨノハナガイ	122	18.7
シズクガイ	120	4.6	ダルマゴカイ	34	5.2
ホソツツムシ	106	4.1	イヨスダレ	14	2.2
チヨノハナガイ	60	2.3	ヒメカノコアサリ	13	2.0
<i>Photis</i> sp.	57	2.2	<i>Paraprinospio cordifolia</i>	8	1.2
ダルマゴカイ	46	1.8	Capitellidae spp.	6	0.9
その他	81	3.1	その他	49	7.5
合計	2613		合計	651	

*cordifolia*といった比較的貧酸素耐性がある生物を中心として形成されていたことからみてとれる。

甲殻類は一般に貧酸素に敏感であり<sup>13)</sup>、本研究でもヨコエビ類は8月に個体数を大きく減少させた。本研究のヨコエビ類は主に*Corophium* sp.であるが、5月の時点で塩分変動のない南エリアに多く出現していたので、8月における消失は貧酸素または有機物量の増加が考えられる。しかし有機物は彼らの餌資源であり、貧酸素の影響と考えるのが合理的である。事実ヨコエビ類の個体数は有機物量と有意な関連を持っていなかった。しかしながら8月の消失が貧酸素による大量死によるものかどうかはやや疑問が残る。同じドロクダムシ科に属する*Corophium voltator*では餌やテリトリーをめぐる種内競争が激しく<sup>14)</sup>、これを避けるため、しばしば移動を行うことが知られている<sup>15)</sup>。*Corophium* sp.の場合、8月には干潟域でも全く出現がみられなくなることから(吉野未発表データ)、貧酸素水塊を避けるためにより沖合に移動した可能性が高い。

ヒメカノコアサリはヨコエビ類と同様に8月に出現率・個体数ともに大きく減少させた。彼らの生態に関する基礎情報は少ないが、香港での研究によれば彼ら是有機物負荷に敏感に反応すると考えられており<sup>16)</sup>、事実本研究でも有機物量と有意な関係が認められた。そのような有機物量との関連が調整されてなお貧酸素の影響もみられている。ヒメカノコアサリは8月から9月でもかつて

は湾奥部の広域に優占して分布していた種であり<sup>1)</sup>、分散分析においてエリアと季節の交互作用は有意ではなかったため塩分ストレスの影響も考えられない。したがって8月に個体数を減少させたのは彼らの生活史特性によるものではなく、有機物負荷と貧酸素の両方のストレスで大量死したためであると考えられる。

対照的にイトゴカイ類や*P. cordifolia*は統計上有意ではないものの8月に増加傾向がみられた。*P. cordifolia*はヨツバナスピオのタイプBと呼ばれていたものが近年新たに記載された種であり<sup>17)</sup>、ヨツバナスピオは海外の研究でも貧酸素のストレスがある海域にしばしば優占して出現する代表的な種のひとつである<sup>18, 19)</sup>。Tamai<sup>20)</sup>によれば*P. cordifolia*は内湾でも奥部に多く分布する。加入時期も地域的な変動は小さく8月であることがわかっており、この点も本研究の結果と符号する。イトゴカイ類も属によって貧酸素に対する応答は異なるものの貧酸素のストレスがある海域によく出現する<sup>13)</sup>。以上のような特徴はCAPプロット上でのベクトルの方向がヒメカノコアサリやヨコエビ類とはほぼ正反対であることにも反映されている。

シズクガイは他の種と異なり興味深い応答を示しており、唯一、有意なエリアと季節の交互作用がみられた。個体数のグラフから南エリアでは個体数は大きく変化していないが、北エリアでは顕著な減少がみられたことが原因であるが、その機構は複雑であった。各エリアでの

シズクガイの全個体数と全バイオマスの5月から8月にかけての変化をみると、南エリアには大量の加入があったが、北エリアでは小型から大型個体まで大量に個体数が減少したことに加えて加入が少なかったことがみてとれる(図7)。シズクガイは実験環境下では貧酸素に対してかなり高い耐性を示すが<sup>21)</sup>、野外では溶存酸素と個体数は正の相関を示し、貧酸素による大量死が観測されている<sup>22)</sup>。本研究においても貧酸素は本種の動態に多大なストレスを与えており、さらに北エリアでは塩分と貧酸素の両方のストレスがあることで大量死に加えて浮遊幼生の加入が制限されるか、着底しても生き残れないことで8月に個体数を大きく減少させたのかもしれない。

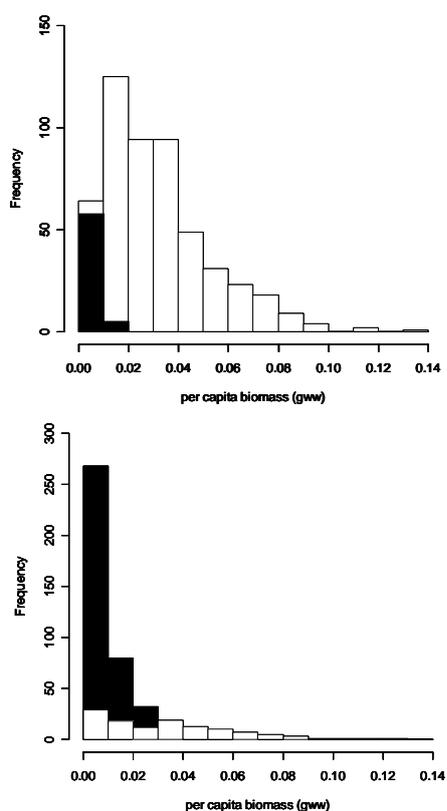


図7. シズクガイの1個体あたりの北エリア(上)と南エリア(下)でのバイオマス組成の違い。白いバーは5月、黒いバーは8月を示す。各地点の情報はエリア毎にプールされている。

## 5. まとめ

これまでのことを総合すると、攪乱ストレスの指標となる群集構造の地点間でのばらつきが8月に増大しベントス群集内の種数や個体数も底質特性の変化の影響を考慮してなお有意に低下し、群集構造も変化した。しかしほとんどのケースで塩分ストレスの影響は検出されず、その影響はほとんど無視できると考えられる。群集内の構成種は5月から8月にかけて優占種の中からヨコエビ類やヒメカノコアサリなどの貧酸素やその原因となる底質の有機汚染に敏感とされる生物が消失し、シズクガイ、

*Paraprinospio cordifolia*、イトゴカイ科多毛類などの比較的貧酸素耐性のある生物で占められるようになった。チヨノハナガイについては生態的情報が少ないので詳細な考察はできなかったが、北森<sup>23)</sup>によれば貧酸素を生じやすい有機汚染域にも出現し、ヨツバネスピオと似たパターンを示すとあり、チヨノハナガイも相応の貧酸素耐性は持っているものと思われる。以上のような群集構造の変動パターンは貧酸素水塊にさらされる海域の世界的な特徴である<sup>13)</sup>。

有明海湾奥部の底生生態系は近年大きく荒廃している<sup>1)</sup>。本研究の結果はその原因として夏季の貧酸素水塊が少なからず影響を与えていることを示している。ベントスの減少はそれを餌とする高次生物の生産性にも影響を与える。北アメリカのNeus川河口域では貧酸素水塊によるベントスの減少が底生魚類の生産性に影響を与えることを示唆する報告例がある<sup>24, 25)</sup>。有明海においても貧酸素問題の解決が湾奥部の底生生態系の再生に重要であるのは疑いない事実であるが、より高次の栄養段階にいる生物も含めた生態系全体の再生にも重要な鍵を握っているのではないだろうか。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、佐賀大学理工学部の笠置尚史氏には現場調査においてご協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) Yoshino, K., Yamamoto, K., Hayami, Y., Hamada, T., Kasagi, T., Ueno, D., Ohgushi, K.: Benthic fauna of the inner part of Ariake Bay: long-term changes in several ecological parameters, *Plankton Benthos Res*, Vol 2, pp.198-212, 2007.
- 2) 濱田孝治, 速水祐一, 山本浩一, 吉野健児, 大串浩一郎, 平川隆一, 山田裕樹: 有明海奥部における貧酸素水塊の形成・解消過程の観測, 海岸工学論文集, No. 54, pp. 1121-1125, 2007.
- 3) Tsutsumi, H.: Critical events in the Ariake Bay ecosystem: Clam population collapse, red tides, and hypoxic bottom water, *Plankton Benthos Res*, Vol 1, pp. 3-25, 2006.
- 4) Anderson, M. J. and Robinson, J.: Generalized discriminant analysis based on distances, *Aust NZ J Stat*, Vol 45, pp. 301-308, 2003.
- 5) Anderson, M. J. and Willis, T. J.: Canonical analysis of principal coordinates: a useful method of constrained ordination for ecology, *Ecology*, 84, pp. 511-525, 2003.
- 6) Anderson M. J.: A new method for non-parametric multivariate analysis of variance, *Aust Ecol*, Vol 26, pp. 32-46, 2001.
- 7) McArdle, B.H. and Anderson, M. J.: Fitting multivariate models to community data: a comment on distance-based redundancy analysis, *Ecology*, Vol 82, pp. 290-297, 2001.
- 8) Anderson, M. J., Ellingsen, K. E., McArdle, B.H.: Multivariate dispersion as a measure of beta diversity, *Ecol Lett*, Vol 9, 683-693,

- 2006.
- 9) Underwood, A. J.: Beyond BACI: experimental designs for detecting human environmental impacts on temporal variations in natural populations, *Aust J Mar Freshwater Res*, Vol 42, pp.569-587, 1991.
  - 10) Warwick, R. M. and Clarke, K. R.: Increased variability as a symptom of stress in marine communities, *J Exp Mar Biol Ecol*, Vol 172, pp. 215-226, 1993.
  - 11) Chapman, M. G., Underwood, A. J. and Skilleter, G. A.: Variability at different spatial scales between a subtidal assemblage exposed to the discharge of swage at two control locations, *J Exp Mar Biol Ecol*, Vol 189, pp. 103-122, 1995.
  - 12) Montagna, P. A. and Ritter, C.: Direct and indirect effects of hypoxia on benthos in Corpus Christi Bay, Texas, U.S.A, *J Exp Mar Biol Ecol*, Vol 330, pp. 119-131, 2006.
  - 13) Diaz, R. J. and Rosenberg, R.: Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna, *Oceanogr Mar Biol Ann Rev*, Vol 33, pp. 245-303, 1995.
  - 14) Wilson Jr, W. H.: Predation and the mediation of intraspecific competition in an infaunal community in the Bay of Fundy, *J Exp Mar Biol Ecol*, Vol 132, pp. 221-245, 1989.
  - 15) Hughes, R. N.: Dispersal by benthic invertebrates: the in situ swimming behaviour of the amphipod *Corophium voltator*, *J Mar Biol Ass UK*, Vol 68, pp. 565-579, 1988.
  - 16) Shin, P. K. S.: A trawl survey of the subtidal Mollusca of Tolo Harbour and Mirs Bay, Hong Kong., *The Malacofauna of Hong Kong and Southern China II*, Morton, B. and Dudgeon, D. eds., Hong Kong University Press, pp. 439-447, 1985.
  - 17) Yokoyama, H.: A revision of the genus *Paraprinospio* Caullery (Polychaeta: Spionidae), *Zool J Linn Soc*, Vol 151, pp. 253-284, 2007.
  - 18) Harper, D. E. Jr, McKinney, L. D., Salzer, R. R. and Case, R. J.: The occurrence of hypoxic bottom water off the upper Texas coast and its effects on the benthic biota, *Contr Mar Sci*, Vol 24, pp. 53-79, 1981.
  - 19) Gaston, G. R.: Effects of hypoxia on macrobenthos of the Inner Shelf off Cameron, Louisiana, *Estuar Coast Shelf Sci*, Vol 20, pp. 603-613, 1985.
  - 20) Tamai, K.: Some morphological aspects and distributions of four types of *Paraprinospio* (Polychaeta: Spionidae) found from adjacent waters to western part of Japan, *Bull Nansei Reg Fish Res Lab*, Vol 13, pp. 41-58, 1981.
  - 21) 玉井恭一, シズクガイの貧酸素耐性, *Nippon Suisan Gakkaishi*, Vol 59, pp. 615-620, 1993.
  - 22) Imabayashi, H.: Effect of oxygen-deficient water on the settled abundance and size composition of the bivalve *Thoera lubrica*, *Bull Japan Soc Sci Fish*, Vol 5, pp. 391-397, 1986.
  - 23) 北森良之介, 環境指標としての底生動物(2) —指標生物を中心に—, 日本生態学会環境問題専門委員会(編), 環境と生物指標2(水界編), 共立出版, 1975.
  - 24) Powers, S. P., Peterson, C. H., Christian, R. R., Sullivan, E., Powers, M. J., Bishop, M. J., Buzzelli, C. P.: Effects of eutrophication on bottom habitat and prey resources of demersal fishes. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol 302, pp. 233-243, 2005.
  - 25) Eby, L. A., Crowder, L. B., McClellan, C. M., Peterson, C. H., Powers, M. J.: Habitat degradation from intermittent hypoxia: impacts on demersal fishes. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol 291, pp. 249-261, 2005.

(2008. 3. 31受付)

# 有明海湾奥部における 底泥の物性の変動特性に関する研究

## CHANGES OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF THE COHESIVE SEDIMENT IN THE INNER PART OF THE ARIAKE SEA

笠置 尚史<sup>1</sup>・古賀 勝喜<sup>2</sup>・山本 浩一<sup>3</sup>・吉野 健児<sup>4</sup>  
速水 祐一<sup>5</sup>・濱田 孝治<sup>6</sup>・大串浩一郎<sup>7</sup>

Takashi KASAGI, Katsuki KOGA, Koichi YAMAMOTO, Kenji YOSHINO, Yuichi  
HAYAMI, Takaharu HAMADA and Koichiro OHGUSHI

<sup>1</sup>佐賀大学工学系研究科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地) <sup>7</sup>

<sup>2</sup>工博 佐賀大学講師 理工学部都市工学科 (同上)

<sup>3</sup>博 (工) 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト (同上)

<sup>4</sup>博 (水) 佐賀大学研究機関研究員 有明海総合研究プロジェクト (同上)

<sup>5</sup>博 (農) 佐賀大学准教授 有明海総合研究プロジェクト (同上)

<sup>6</sup>博 (理) 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト (同上)

<sup>7</sup>工博 佐賀大学准教授 理工学部都市工学科 (同上)

Vertical shear strength distributions of the surface cohesive sediments were measured to clarify the sediment transportation in the north Ariake Sea. The extreme wave by the typhoon 200613 re-suspended the sediment of the north Ariake Sea, Japan. After the extreme wave by the typhoon, surface soft cohesive sediment on the mudflat was obviously eroded and showed low Eh. In contrast, soft cohesive sediment was accumulated over 10 cm on the surface of the offshore sediment and it showed high Eh. Simultaneously, large amount of suspended sediment transportation toward offshore was observed by ADCPs when the typhoon hit the north Ariake Sea. These facts show that a sudden great amount of the sediment (5-15 tons/m) was suspended from the mudflat surface by the typhoon hitting, transported toward offshore, and accumulated on the offshore sea bed. The possibility of these sudden accumulation of the sediment may influence the habitat of bivalves.

**Key Words :** Ariake Sea, sediment, typhoon, viscosity, bottom mud

### 1. はじめに

有明海は我が国の湾海の中で最大の潮位差があり、大潮時の湾奥で 5m を越える。また、干潮時には広大な干潟が出現する。その面積は 270km<sup>2</sup> であり、国内の干潟の 4 割を占める。その干潟では従来からアサリ、サルボウ、タイラギを対象とした採貝や海苔養殖が行われているが、近年、底質が細粒化した海域でタイラギが激減したとの報告がされている<sup>1)</sup>。底質の細粒化の本質は表層への細粒懸濁粒子の堆積であると考えられ、湾奥西部では底泥中の 16 μm 以下の粒子の含有率が 9 割を超える<sup>2)</sup>。よって懸濁物質の動態の把握が有明海の細粒な底質の動態解明にとって重要であり、その第一歩として底質の再懸濁環境を把握することは重要である。

粘着性底質の再懸濁に関わる限界剪断応力が底質の剪断強度に等しいことは知られており<sup>3)</sup>、剪断強

度を把握することが再懸濁のしやすさにとって重要となる。ベーン剪断試験が可能な程度に固い底泥であれば剪断強度の測定が容易であるが、有明海の底泥表面は圧密した固い(剪断強度の高い)底質のごく表層に、再懸濁に寄与する可能性がある数 cm の高含水率・低比重の軟泥が存在することが多く、このような薄い底泥の剪断強度はベーン剪断では測定が困難である。一方で高い含水率を持つ霞ヶ浦の底泥の測定結果から、低ずり速度領域での粘度は底泥限界掃流力に対応するとされている<sup>4)</sup>。そこで本研究では底泥の粘度の詳細な鉛直分布を測定し、その広域分布や季節変動を明らかにし、かつ懸濁物質の流動と関連づけて底質の物性の変動特性を明らかにすることを目的とした。

## 2. 研究方法

### (1) 粘度計測方法

底質の粘度は船上で回転粘度計（東機産業，TVC-5，定格20rpm）を用いて測定を行った。試験的に有明海底泥の粘度を測定したところ，計測初期に粘度が高く，計測を継続すると粘度が減少する傾向にあった。これは底泥が粘度計のスピンドルの摩擦で降伏したことによるとみられた。スピンドル回転開始時は，スピンドルに付着した底質を剪断して回転開始することから最大の剪断応力がかかり，粘度計の表示としても最大値を示す。この応力はスピンドルのずり速度がまだ低いときに計測されていることから，底質の剪断強度あるいは大坪の「低ずり速度領域の粘度」<sup>4)</sup>に対応すると考えられたので，粘度の初期最大値を記録して，データとした。以降この方法で測定された粘度を通常の方法で測定された粘度と区別するため，「初期粘度」として表示することにす。厳密には初期粘度とペーン剪断強度の比較をする必要があるものの，初期粘度が高い底泥（100Pa・s以上）ではかなり締め固まっており，初期粘度の低い底泥（10Pa・s以下）は流動性を帯びているので，みかけの底質の剪断強度にほぼ対応していると考えられた。

実際の採泥・初期粘度計測についてはエクマンバージ採泥器によって採泥された底泥にシャッターを付けた方形のステンレス角形容器を埋め込み，底泥表面と角形容器上面が同じ高さになるまで底泥に埋め込んだところで角形容器のシャッターを開き，非擾乱状態で方形のステンレス製小型バットに採取した。これを90°転倒して最も細い2mm太さのスピンドルを用いてもとの底泥において3層から5層の初期粘度を測定して鉛直分布を求めた（図-1）。なお，通常粘度測定のためには円筒内でスピンドルを回転させる必要があるが，初期粘度計測方法においては高粘度の物体の剪断強度の測定に相当し，かつ壁面の影響は無視できることを確認している。

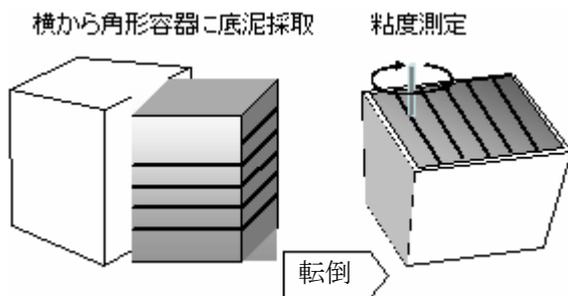


図-1 底泥の初期粘度の鉛直分布計測方法

### (2) 調査方法

#### a) 調査対象水域

調査対象の有明海は佐賀県，福岡県，長崎県，熊本県の4県に囲まれた長さ90km，幅20km，平均水深18m，面積1700km<sup>2</sup>の閉鎖性水域である。本研究では竹崎島と熊本県の三池港を結ぶ線より北側の有明海湾奥部を対象とした（図-2）。また，干潟から沖合にかけての底泥の物性の季節変動を調べるため10点の採泥ポイントからなる測線（塩田川沖測線）を設定した（図-3）。

#### b) 広域調査

有明海湾奥部の底質の広域分布特性を調べるため，2005年8月18日～23日と2006年8月9日～15日に調査を行った。底泥の採取にはエクマンバージ採泥器を用い，採取した泥のうち表層1cm，2～5cmを直径5cmのアクリルパイプを用いて分取した。現地では表層から5cmまでの泥温，酸化還元電位（ORP），初期粘度を測定した。

なお，使用したORP計の比較電極は3.33mol/L KCl-Ag/AgClを使用しており，一般には基準電極として標準水素電極が用いられることが多く今回使用した比較電極との関係は下記のようなものである。

$$E_h = E + 206 - 0.7(t - 25) \quad (t = 0 \sim 60^\circ\text{C}) \quad (1)$$

$E_h$ ：標準比較電極を比較電極としたORP測定値(mV)， $E$ ：3.33 mol/L KCl-Ag/AgClを比較電極としたORP測定値(mV)， $t$ ：泥温(°C)

#### c) 塩田川沖定線底泥調査

干潟から沖合にかけての底泥の季節変動を調べるため図-3の測点において2006年7/29，9/23，10/25，11/26，12/22，2007年1/28に採泥調査を行った。底泥の採取には広域採泥調査と同様にエクマンバージ採泥器を用い，採取した泥のうち表層1cmをアク

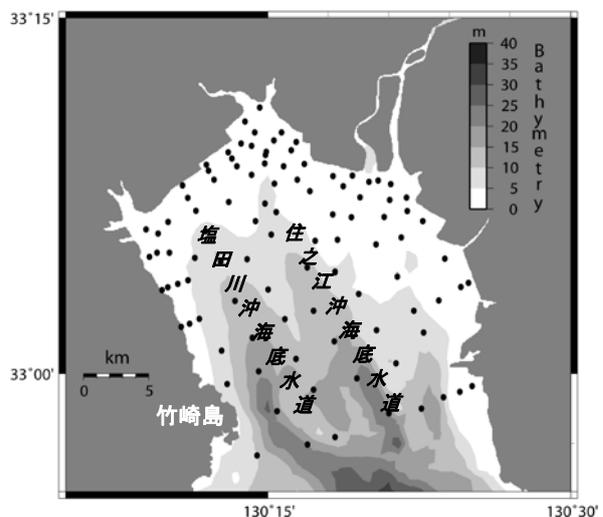


図-2 調査対象地域（●：底質調査地点）

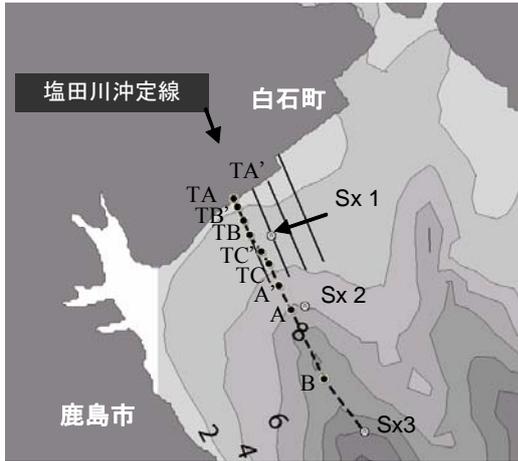


図-3 調査対象地域(●: 底質調査地点, ○: 係留点)

リルパイプ(径 5cm)を用いて分取した。現地では泥温、酸化還元電位(ORP)の 1cm 毎の鉛直分布、図-1 に示す方法によって表面下 1cm から 2cm 毎の初期粘度の鉛直分布を測定した。

#### d) 係留観測

懸濁物質の動態を調べるために塩田川沖定線に沿って Sx1 と Sx2 に ADCP (Nortek Aquadopp) ・濁度計を設置した。データは 2006 年 6 月 26 日～2006 年 11 月 14 日までのデータを用いた。計測間隔は 10 分である。

超音波流速計は底面から 25cm にセンサーを設置し、センサーから 65cm を第 1 層の中心とした。また、層厚は 50cm とした。なお、底面上 0cm～40cm は不感距離であり測定が不能である。濁度計は底面上 25cm に設置した。

超音波流速計 (Nortek Aquadopp) の反射音響強度の鉛直分布を用いて懸濁物質強度の鉛直分布を(2)式により推定することができる<sup>5)</sup>。

$$EL = -20 \log r - 2\alpha + 10k \log C + 10 \log(\psi v T / 2) + A \quad (2)$$

ここで、 $EL$  : 反射音響強度(dB),  $r$  : ADCP から測定層中心までの距離(m),  $C$  : 懸濁物質濃度( $g/m^3$ ),  $\alpha$  : 減衰係数(dB/m),  $\psi$  : 音波のビーム幅(sr),  $v$  : 音速(m/s),  $T$  : パルス長(s),  $k$ ,  $A$  は定数である。

SS フラックスの算出は Sx1, Sx2 に設置した濁度計データ, 超音波流速計の反射音響強度データから、以下のように求めた。

$$SSF_N = 0.65 \cdot SS_0 \cdot v_{N,0} + 0.5 \cdot \sum_{k=1}^n SS_k \cdot v_{N,k} \quad (3)$$

$$SSF_E = 0.65 \cdot SS_0 \cdot v_{E,0} + 0.5 \cdot \sum_{k=1}^n SS_k \cdot v_{E,k} \quad (4)$$

ここで、 $SSF_N$  : 北方成分 SS フラックス( $gm^{-1}s^{-1}$ ),

$SSF_E$  : 東方成分 SS フラックス,  $v_{N,0}$  : 底面上 25cm における北方流速,  $v_{E,0}$  : 底面上 25cm における東方流速,  $SS_k$  : ADCP の第  $k$  層における SS 濃度,  $v_{N,k}$  : ADCP の第  $k$  層における北方流速,  $v_{E,k}$  : ADCP の第  $k$  層における東方流速 である。

さらに、測線方向、測線直交方向の SS フラックスを式(5), (6)を用いて算出した。

$$SSF_{lon} = SSF_N \cos \theta + SSF_E \sin \theta \quad (5)$$

$$SSF_{orth} = -SSF_N \sin \theta + SSF_E \cos \theta \quad (6)$$

ここで、 $SSF_{lon}$  : 測線北方方向の SS フラックス,  $SSF_{orth}$  : 測線直交方向の SS フラックス,  $\theta$  : 測線方位角である。

### (3) 分析方法

#### a) 湿潤密度

試料を一定体積のビンに入れその重量を測定し、湿潤密度を算出した。

#### b) 粒度分布

砂泥質の試料については 75 $\mu m$  ふるいを通過する細粒分と、残留する粗粒分に分け、粗粒分は重量を測定後、JIS A 1204 に規定された試験用網ふるい群を用いてふるい分けした。鉱物質のみの粒度分布を得るために貝殻 ( $CaCO_3$ ) を 1N HCl で除去して重量を測定した。細粒分は蒸留水を加えメスシリンダーで 1L の懸濁水にし、その濃度を測定後少量の懸濁水を用いてレーザ回折式粒度分布測定装置 (島津 SALD-3100) によって粒度分布を求めた。懸濁水の SS 濃度を測定して、ふるい分析によって得た粗粒分の粒度分布と合成した。さらに土粒子の密度が 2.65 で一定であると仮定して質量に体積百分率を掛け合わせ、各粒径に対する通過質量百分率を求め粒径加積曲線を描いた。最大粒径 100 $\mu m$  以下の泥分より構成される試料はレーザ回折式粒度分布測定装置のみで粒径加積曲線を求めた。

## 3. 研究結果

### (1) 底質の広域分布特性

#### a) 粒度分布

図-4 に中央粒径値  $M_d\phi$  の平面分布を示す。  $M_d\phi$  は 1.02～7.87 の範囲にあった。図-4 において、有明海湾奥部の南側と筑後川河口に比較的粒径の大きな粒子が分布している。住之江川沖海底水道ではコンターが密になり、砂泥質と泥質の分布の境界になっている。  $M_d\phi$  が 7 以上である海域は白石町沖合のデルタ地形の西側であり、湾奥西部の底質は細粒分で占められていることが分かる。

b) 初期粘度広域分布

図-5に2006年8月の有明海湾奥部底泥1cm～2.25cmの初期粘度の広域分布図、図-6に有明海湾奥部底泥6.75cm～9cmの初期粘度の広域分布図を示す。大抵の地点は深いほど初期粘度が上昇する傾向が見られた。しかし、白石町沿岸から鹿島市沿岸の干潟部に初期粘度の低い地点が存在した。

c) 湿潤密度

図-7に2006年8月の有明海湾奥部底泥表層1cmの湿潤密度の広域分布図を示す。砂泥および粗粒シルトの場所では湿潤密度は高く、粘土が分布している西側では1300kg/m<sup>3</sup>以下の湿潤密度を示した。特に白石町沿岸に湿潤密度の低い地点が存在した。これは潮汐や波浪により底泥の表層が懸濁・堆積を頻繁に繰り返すことで底泥が締め固まらず他の地点よりも間隙が大きい可能性を示唆している。

(2) 懸濁物質の動態

Sx1 地点および Sx2 地点での SS フラックスの沿岸方向・岸沖方向の季節変化を図-8 に示す。8 月中旬までは明瞭ではないが、8 月下旬以降 Sx2 地点は岸沖方向の懸濁物質輸送が沿岸方向の懸濁物質輸送よりも卓越する。Sx1 地点は懸濁物質の輸送がほとんどない8月頭から9月半ば以外は塩田川沖定線に直交して東に輸送されている。また、岸沖方向にはコンスタントに岸方向に輸送が行われていることが分かった。

佐賀県に台風が通過した9月17・18日にSx1地点では西向きに、Sx2地点では沖向きに一気に大量の懸濁物質が輸送されている。これは台風により底泥が激しく巻き上げられたことが原因と思われる。

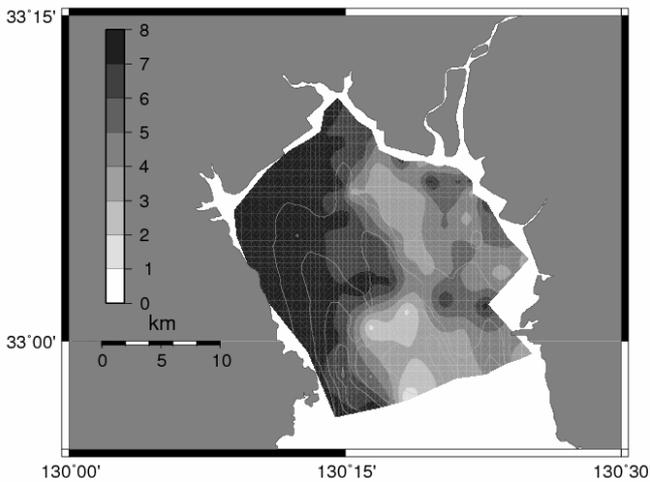


図-4 底質の  $Md\phi$  (2005/08, 3cm～5cm)

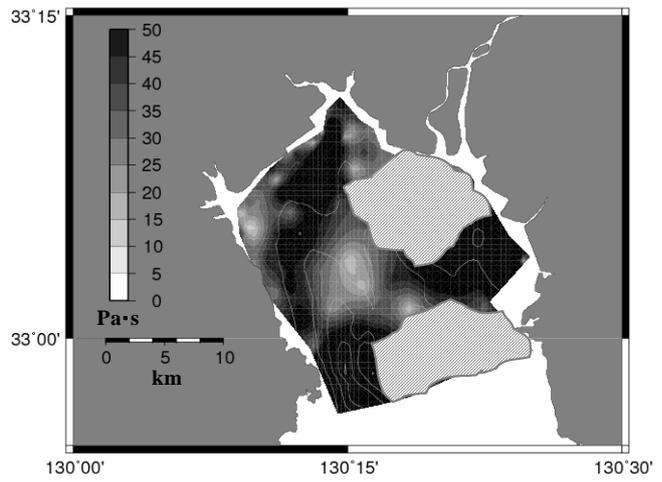


図-6 底質下層の初期粘度  
(2006/08, 深さ6.75cm～9cm □: 欠測)

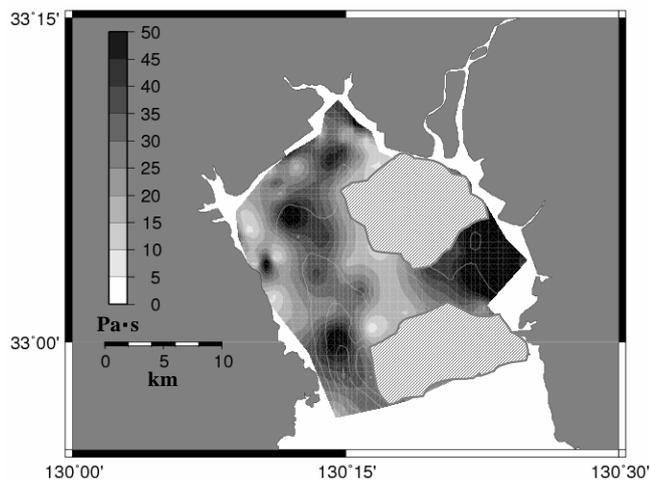


図-5 底質表層の初期粘度  
(2006/08, 深さ1cm～2.25cm □: 欠測)

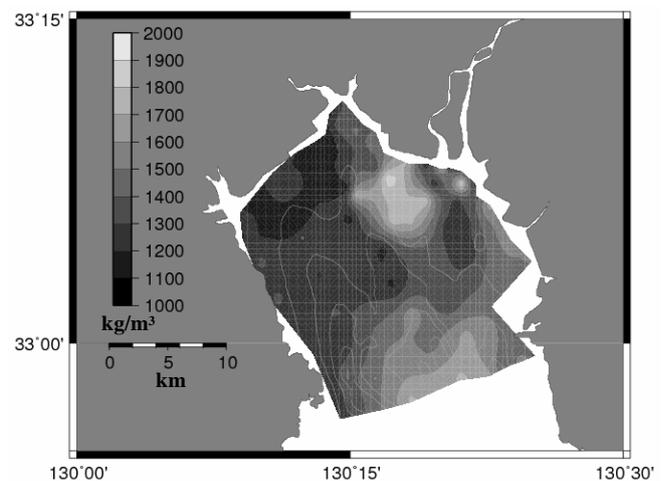
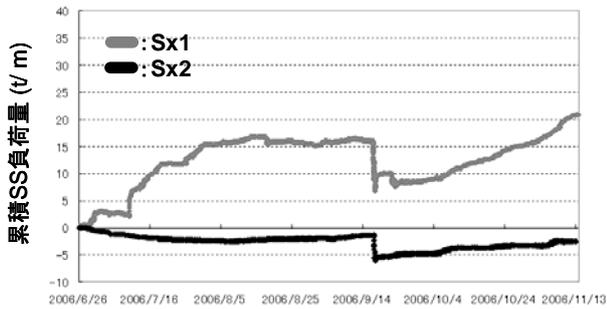
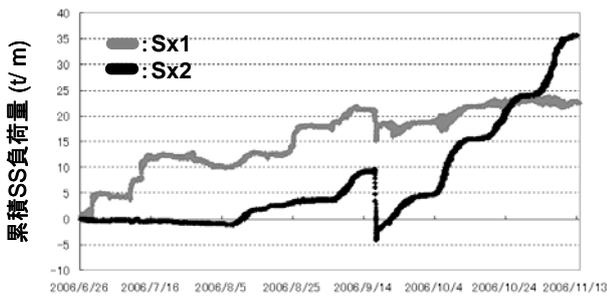


図-7 底質表層の湿潤密度 (2006/08, 表層1cm)



(a) 沿岸方向の累積SS負荷量(正が北東方向)



(b) 岸沖方向の累積SS負荷量(正が岸方向)

図-8 沿岸方向と岸沖方向の累積SS負荷量

るものか今の時点では不明である。また、干潟域の地点TA, TBで11月以降の粘度の変化があまりみられないのは波浪の影響と係留計観測より9月の台風以降、沖から物質の輸送が行われているからであると考えられる。以上より2006年8月～9月の台風をきっかけに大量の底泥が干潟域から懸濁し輸送され沖合に堆積したが、潮汐の作用により徐々に干潟に底泥が輸送されていると考えられる。

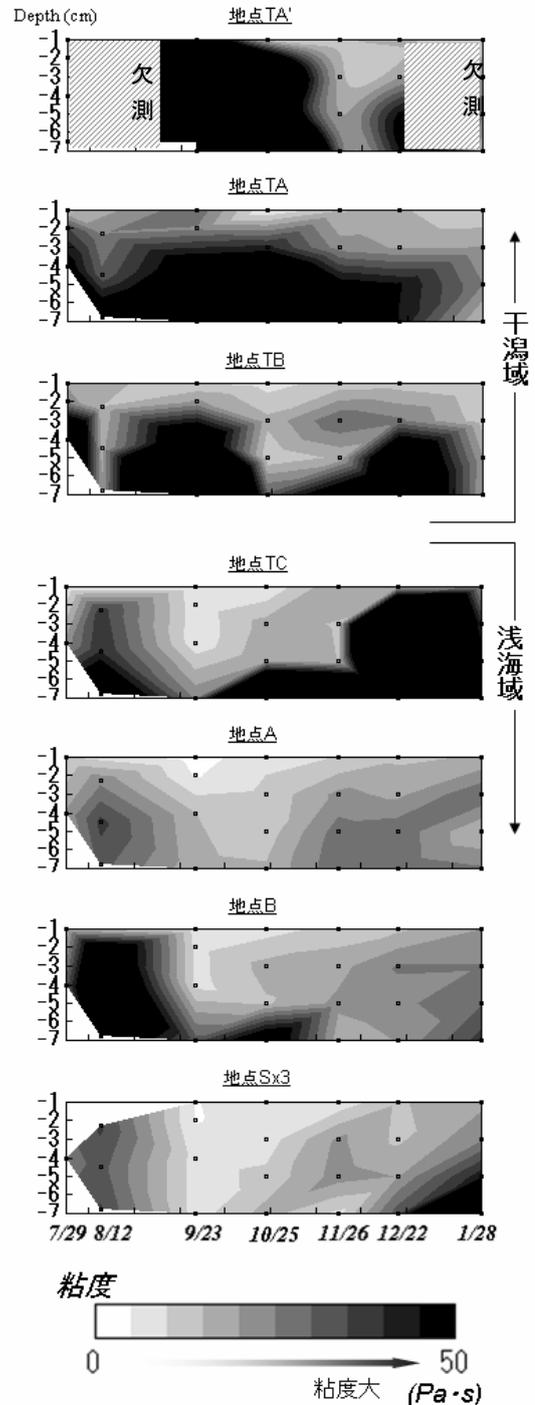


図-9 塩田川沖定線での初期粘度(Pa·s)の時間変化

岸から沖方向へTA' (標高-0.5m),  
TA (標高-1m), TB (標高-2.8m),  
A (標高-6.5m), B (標高-10.5m), Sx3 (標高-13m)

### (3) 塩田川沖定線観測

#### a) 初期粘度の鉛直分布の時間変化

図-9に塩田川沖定線での初期粘度(Pa·s)の鉛直分布の時間変化の図を示す。地点TA', TA, TBは干潟域であり、地点TC, A, B, S3は浅海域である。また最も岸よりの地点TA'では7月, 8月および2007年1月に調査中に潮が引いてしまい採泥することができなかつたために欠測となっている。初期粘度が高く、コンターの間隔がほぼ一定の部分で短期的に安定な圧密泥とするとその上に堆積している泥の初期粘度は約15 Pa·s以下であり、本研究ではそれを軟泥と定義した。図-9をみると9月に突然浅海域の4地点で圧密泥上に堆積している軟泥の厚さが増加しており、干潟域の地点TA, TBでは逆に減少している。調査期間中佐賀県には台風200610号(8/17～8/19)と台風200613号(9/17～9/18)が通過した。その影響により干潟域の地点TA, TBでは底泥が侵食され、浅海域の地点では干潟域から削られ輸送された底泥が堆積したと考えられる。9月23日の地点TCにおいて採泥を行うと、サルボウ貝の死骸の上に泥が約8cm堆積していたのが確認できた。なお地点TCは7月30日時点で154固体/m<sup>2</sup>のサルボウ貝の生息が確認されていた。10月になると地点TBでは軟泥厚が増加した。係留観測でも9月の台風移行は岸方向の輸送が見られたため、それにより軟泥厚が増加したものと思われる。浅海域の地点では10月以降の粘度の緩やかな上昇がみられたが、これが岸方向に表層泥が輸送されたからなのか、圧密によ

b) Ehの鉛直分布の時間変化

図-10に塩田川沖定線でのEhの鉛直分布の時間変化の図を示す。7月から9月になると干潟のEhの値が-20(mV)以上の底泥の厚さが減少しているのに対し、浅海域の地点では増加している。10月になると干潟域の地点ではEhの値が高くなり、浅海域では

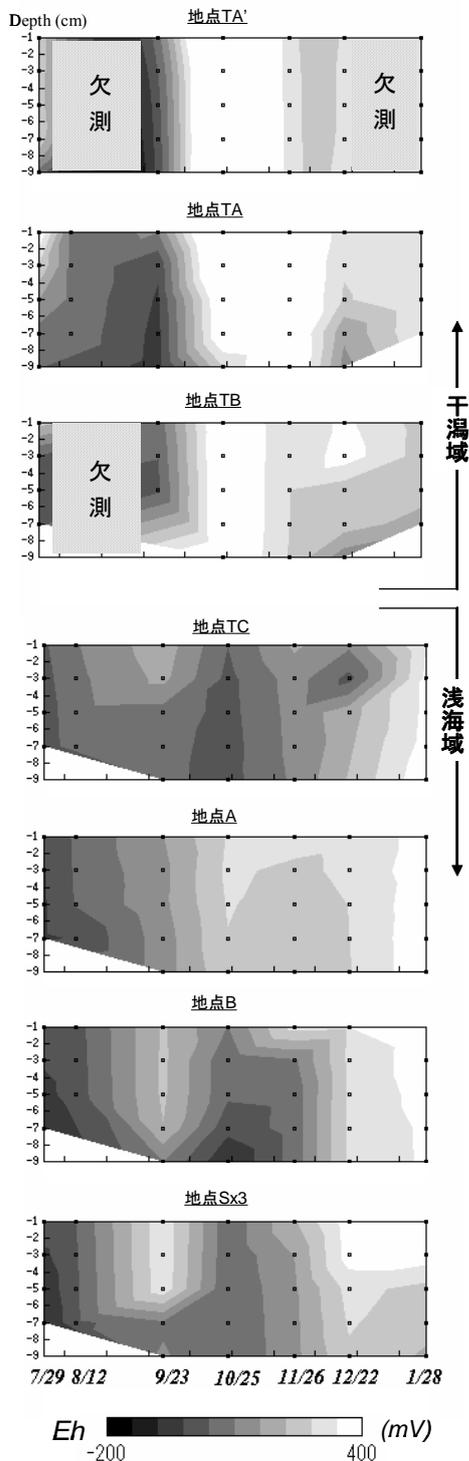


図-10 塩田川沖定線でのEh(mV)の時間変化

岸から沖方向へTA' (標高-0.5m),  
 TA (標高-1m), TB (標高-2.8m),  
 A (標高-6.5m), B (標高-10.5m), Sx3 (標高-13m)

低くなっている。9月にこのようなEhの変化を示したのは同時期の初期粘度の変化と同じように2006年8月～9月の台風によって干潟域では表層泥が削られ下層のEh値の低い層が現れ、浅海域では干潟域で削られた泥が再堆積する間に好氣的となりEh値が上昇したと考えられる。

4. まとめ

有明海湾奥部では西側に粘土が分布しており、砂泥および粗粒シルトは東側を主として住之江海底水道と塩田川沖海底水道に挟まれた標高の高い地帯を避けるように分布していた。

底泥の初期粘度の広域分布から同じような粒度であっても初期粘度は異なる地点が多く存在した。また、西岸沖に1地点2005年、2006年ともに周辺地点より初期粘度の高い地点が存在した。

塩田川沖定線付近での係留観測では懸濁物質の輸送はSx2地点で沿岸方向より岸沖方向の方が頻繁であり、6月後半から11月半ばまでは岸方向に輸送が行われることが分かった。また、台風により干潟域から底泥が巻き上げられ大量に沖合に輸送されたことも確認できた。それにより塩田川沖定線では干潟域の地点TA, TBでは軟泥厚が減少し、逆に浅海域の地点では増加したと思われる。

広域的・季節的に初期粘度およびORPを測定し、係留観測を行った結果、台風により干潟域から大量の底泥が懸濁し沖合に堆積したことが分かった。

参考文献

- 1) 大隈斉, 江口泰蔵, 川原逸朗, 伊藤史郎: 有明海湾奥部の底質及びマクロベントス, 佐賀県有明水産振興センター研究報告, 20号, pp.55-62, 2001
- 2) 山本浩一・速水祐一・笠置尚史・宮坂仁・大串浩一郎・吉野健児・平川隆一: 有明海奥部における表層底質の分布特性と底質環境の形成要因, 海岸工学論文集, Vol.53, pp.961-965, 2006
- 3) Trimbak M. Parchure and Ashish J. Mehta: Erosion of Soft Cohesive Sediment Deposits, *Journal of Hydraulic Engineering*, VOL.111, No.7-12, pp.1308-1326
- 4) 大坪国順: 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究. 国立環境研究所報告, 42号, p133, 1983.
- 5) 末次忠司, 日下部隆昭, 横山勝英, 山本浩一: 陸域・河口域における土砂・栄養塩動態に関する研究, 国総研資料第236号, 2005

(2008. 3. 31受付)

# 筑後川水系におけるSS流出の 分布特性と長期傾向

## SPATIAL AND TEMPORAL VARIATION IN SUSPENDED SEDIMENT YIELD IN THE CHIKUGOGAWA RIVER BASIN

横山勝英<sup>1</sup>・山本浩一<sup>2</sup>

Katsuhide YOKOYAMA and Koichi YAMAMOTO

<sup>1</sup>博(工) 首都大学東京准教授 都市基盤環境コース(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

<sup>2</sup>博(工) 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト(〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1)

Turbidity was measured continuously and suspended sediment samples were collected at the 17 gage stations in the Chikugogawa River basin, the suspended sediment budget and the characteristics of sediment rating curve were studied. The suspended sediment load was integrated for flood period of 2006, the sediment budget in the whole basin, the reservoir sedimentation by fine solids and the additional sediment supply to the flood water by river bed erosion in the estuarine channel were explained. The sediment rating curve for each stream were developed, it is shown that the coefficients of power function were affected by the watershed conditions such as topography, land use and rainfall. The annual sediment yield estimated from sediment rating curve after 1970 was  $265 \times 10^6$  kg, the deposited fine sediment on the estuarine channel bed is 4 times as large as the annual sediment yield.

**Key Words:** turbidity, SS, sediment budget, sediment rating curve, sediment process in estuary

### 1. はじめに

有明海や東京湾などは半閉鎖性の湾であり、湾奥には干潟が、陸地には広大な平野が広がっている。このような地形は河川が輸送する土砂の堆積作用によって形成される。土砂は粒径によって挙動が異なり、砂以上の粒径は主に掃流砂・浮遊砂として河床近傍を移動しながら河口や干潟域で堆積して地形を形成する。

一方、シルト・粘土はウォッシュロード・浮遊砂として懸濁しながら河川中を移動し、河口から沿岸までの広い領域に拡散して、沈降・再懸濁を繰り返しながら停滞性の強い領域に集積してゆくと考えられる。また、シルト・粘土成分は沈降しにくいために海域の透明度に影響を及ぼし、表面に多量の栄養塩を吸着させているためにプランクトンや底生生物にとって重要な物質である。

したがって、有明海の環境管理を考える上では、沿岸—河口干潟—感潮河道—河川—流域といった広域流域圏を対象にして土砂動態の空間分布、時間変化を粒径別に解明する必要がある。しかしながら、土砂のうちでもウォッシュロードとして輸送されるシルト・粘土は生産源や生産過程が明確ではなく、力学的な発生予測モデルが確立されていない。

また、有明海に流入する河川の土砂輸送特性に関する研究事例も多くはない。昭和28年水害に関する記録・研究としては、白川の崩壊地調査<sup>1)</sup>や熊本市内の泥土堆積調査<sup>2)</sup>などが行われた。また、ダム堆砂量に基づく土砂生産状況に関する研究は、嘉瀬川<sup>3)</sup>や筑後川<sup>4)</sup>で行われている。洪水時のウォッシュロード観測は、建設省・国土交通省によって白川<sup>5),6)</sup>と筑後川<sup>7)</sup>で行われており、山本・横山<sup>8)</sup>はこのデータを用いて白川のウォッシュロード輸送特性を整理している。田中ら<sup>9)</sup>は筑後川の下流流量基準点で1年間の濁度観測を行い、有明海へのウォッシュロード輸送量を推定している。

このように、白川では研究が6例、筑後川では3例、嘉瀬川では1例であり、有明海への研究資源の集中から見ると、流域の土砂に関する研究はかなり手薄である。

そこで本研究では、有明海に流入する最大の河川である筑後川を対象として、流域全体をカバーするように多点濁度モニタリングを実施し、流域における細粒土砂の生産状況、ダム群における捕捉状況、河道での輸送状況、感潮河道における内部生産状況について検討した。

なお本論文では用語の統一を図り、粒径が概ね0.1 mm以下の懸濁土砂をSS (Suspended Sediment) と称する。

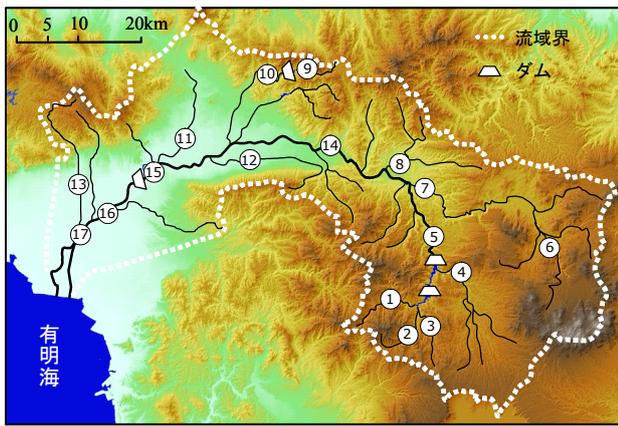


図-1 筑後川流域図

表-1 観測地点の名称と土地利用情報

番号	河川名	地点名	面積 (km <sup>2</sup> )	主な土地利用の面積率(%)				
				森林	草地	田畑	市街地	崩壊地
1	津江川	栃野	61.5	88.8	8.1	1.5	0.0	0.3
2	川原川	川原	38.0	91.4	5.0	1.2	0.0	0.8
3	川原川	上野田	36.5	90.7	4.0	2.6	0.0	0.2
4	筑後川	杖立	281.0	66.4	21.2	8.7	0.3	0.1
5	筑後川	松原ダム下流	524.2					
6	玖珠川	引治	120.2	55.9	29.9	10.1	0.0	0.5
7	玖珠川	小ヶ瀬	540.5					
8	花月川	花月	126.9	74.4	9.2	11.5	1.4	0.2
9	小石原川	江川ダム上流	18.8	86.3	3.6	7.0	0.0	0.0
10	小石原川	江川ダム下流	18.8					
11	宝満川	端間	167.0	43.7	5.0	30.0	9.4	0.0
12	巨瀬川	中央橋	50.0	53.8	2.4	32.3	3.9	0.2
13	城原川	日出来橋	50.8	76.9	2.8	15.3	1.4	0.0
14	筑後川	荒瀬	1443.0					
15	筑後川	瀬ノ下	2295.0					
16	筑後川	感潮河道14km						
17	筑後川	感潮河道10km						

注1) 森林は針葉樹林、広葉樹林の合計

注2) 草地は草地、伐採地の合計

注3) 田畑は水田、果樹園等の合計

注4) 崩壊地は露岩、崩壊地の合計

## 2. 研究方法

### (1) 研究対象地の概要

図-1 に筑後川の流域図を、表-1 に観測地点の名称や流域面積、土地利用の一覧を示す。筑後川は流域面積が2,860 km<sup>2</sup>であり、このうち阿蘇外輪山を源流とする本川上流域が580 km<sup>2</sup>、久住連山(火山)を源流とする玖珠川流域が540 km<sup>2</sup>、その他の低山地流域が940 km<sup>2</sup>である。流域に設置されたダムは11基あるが、このうち土砂動態に影響を及ぼすダムは本川上流の治水用ダムが2基、北部の低山地流域の利水・治水ダムが2基である。

また、河口から23 kmの区間が感潮域であり、広い範囲で河床材料がシルト・粘土となっている。感潮河道では洪水時に河床底泥が浸食されることが報告されているため<sup>10)</sup>、筑後川の土砂輸送が有明海に及ぼす影響を考える上では河川上流域だけではなく河口域での細粒土砂の動態にも着目する必要がある。

### (2) 現地観測の方法

現地観測の内容はSS流出の連続データを得るための濁度モニタリング、濁度をSSに換算するための採水分析、流量観測所がない地点での水文計測である。

濁度計はアレック電子製Compact-CLWを使用し、10分間隔でモニタリングした。設置地点は図-1及び表-1に示す17箇所であり、国土交通省が管理する河川量水標(H鋼)に測器を取り付けた。このうち、玖珠川上流には流量観測所が無いが、玖珠川流域は活火山地帯で、かつ牧草地が多いため、土砂生産を知ることが重要と考えて濁度観測を実施した。濁度計のメーカー検定はカオリン粘土により5,000 ppmレンジで行われている。

洪水時には濁水を自動採水器(ISCO-6712)もしくはバケツ採水により取得した。一般に、自動採水機の採水口(ストレーナー)は河岸に固定されるが、ストレーナー自身がゴミや土砂をトラップして異常に濃い濁水を吸入したり、逆に河岸境界層付近の低濃度水を吸入するといった問題がある。そこで、採水チューブの先端50 cmを針

金で補強して流心に突き出すように設置し、先端が振動して代表性の高い濁水を取得できるように工夫した。設置地点は本川上流の栃野と玖珠川上流の引治である。

バケツ採水では観測所近傍の橋梁から流心部の表面水を採取した。濁度データを補正することが目的なので、時間間隔や地点間の同時性にはこだわらず、1グループが数箇所の観測所を巡回しながら濁水を採取した。

得られた濁水は実験室に持ち帰り、SSと粒度分布の分析を行った。粒度分布はレーザー回折式粒度分析装置(島津製作所SALD-3100)により計測した。

玖珠川上流には測水所が存在しないので、流量を算出するために横断測量と水位計測、浮子観測を実施した。河道地形はRTK-GPS(TOPCON, GP1000)を用いて50 m離れた2断面を測量した。観測地点は河床が100~300 mごとに階段状になっており、平水時は水面勾配が1/167であるのに対して、洪水時は最大で1/60になっていたため、水面勾配は水位の関数とした。水位モニタリングは自動採水機に付属している水位計により行った。浮子観測は洪水時に1回実施した。以上のデータを用いてマニング式から流量を推定した。得られた流量と流域雨量から洪水流出率を計算し、下流観測所(7番、小ヶ瀬)の洪水流出率と同程度になることを確認した。

観測期間は2002年から2006年までの5年間であるが、全期間で観測を行ったのは4地点、残りの地点は1~3年である。さらに国土交通省が流域内で自動観測している雨量、流量データを提供していただいた。

## 3. 観測結果

### (1) 降雨分布の特徴

SSは降雨時に発生するため、基本情報として流域全体の降雨分布状況を図-2に示す。流域に44箇所、流域境界近傍に3箇所設置された雨量観測所の5年平均値(1995年

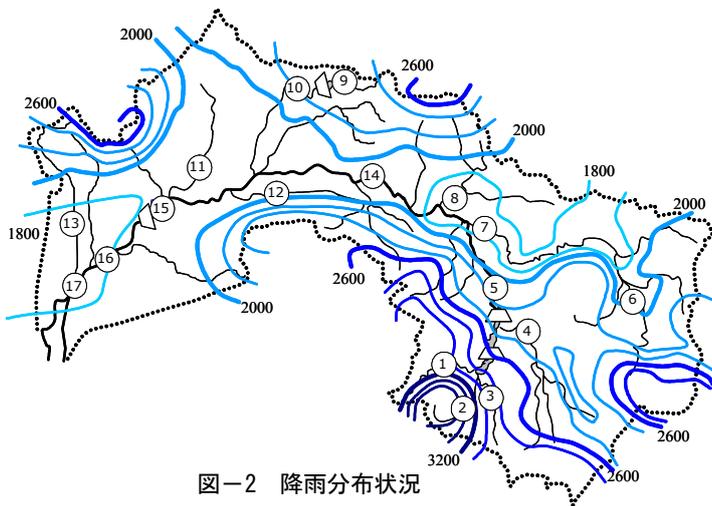


図-2 降雨分布状況

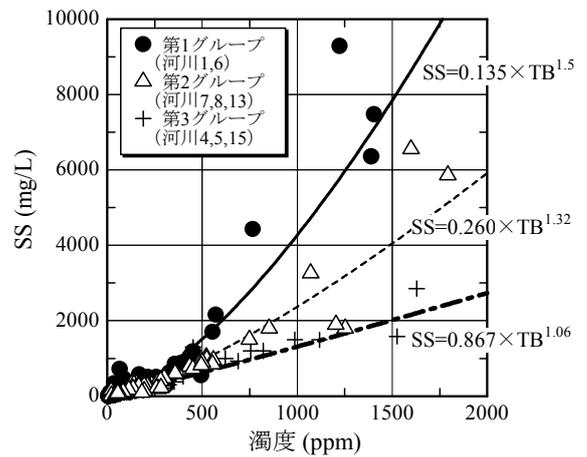


図-3 濁度とSSの相関図

～1999年)を等値線表示している。流域によって降雨の多寡があり、例えば河川1～3は年平均雨量が3,600 mmを超える多雨地帯であり、河川6は源流標高が筑後川で最も高いが雨量は河川1～3よりも少ない。河川8や11は雨量が1,800～2,000 mmの土地が支配的であり、流域1～3の半分程度となっている。5年間の内訳としては、梅雨期が約40%、台風期が約25%、それ以外が約35%であり、梅雨期に降雨が集中するのが特徴である。

## (2) 濁度とSSの相関

採水分析から得られたSSと濁度の関係を全てプロットすると図-3のようになった。両者の関係はかなりばらついており、例えば濁度が1,400～1,500 ppmでのSS濃度は最大で7,800 mg/l、最小で1,800 mg/lと4倍以上の開きがある。これは山地源流と100 km以上離れた河口付近ではSS粒子の性質が異なることを示している。

そこで、濁度-SSの関係性が類似している地点をグループ化し、図-3に示す相関式を作成した。第一グループは主に久住・阿蘇外輪山を源流とする急峻流域、第二グループはその他の低山地流域や大きな支流域の出口部、第三グループはダム放流水や本川下流部であり、概ね地形的な特徴に応じてべき乗指数が整理された。

指数の違いはSS粒子に対する光学的な反応性の違いを表していると考えられる。横山<sup>1)</sup>は濁度計の特性として、単位水量中の土粒子質量が等しくても粒子が細かいサンプルほど光の散乱強度(濁度)が高くなることを示している。すなわち、急峻流域のSSは粒径が大きく、ダム放流水や下流域では粒子が小さいと推測される。この点について粒度分布データを整理したが、SS濃度が同程度の粒度分布データは数が少なく有意な差が認められなかった。そのため、今後はさらなるデータの蓄積を進めて粒径以外の要因も含めて検討することが必要である。

## (3) SS動態マップ

図-3の相関式を用いて各地点の濁度データをSS濃度時系列に換算し、流量と掛け合わせてSS輸送量を計算し

た。図-4にデータが最も揃っている期間のSS動態マップを示す。表示期間は2006年6月20日～7月10日である。この間、洪水は3回発生しており、下流基準点におけるピーク流量は1,784 m<sup>3</sup>/s、2,026 m<sup>3</sup>/s、3,310 m<sup>3</sup>/sである。筑後川の平均年最大流量は約2,700 m<sup>3</sup>/sであり、梅雨期に断続的に洪水が発生することが多いため、図-4は平均的なSS流出状況を示していると考えられる。なお、2006年は7月20日に3,353 m<sup>3</sup>/sの洪水が発生しているが、多くの地点で濁度計を撤去していたため検討から除外した。

源流域から下流に向かって徐々にSS量が増えており、河川5、7、8の合計は合流後の14よりも11.6%過小、河川10、11、12、14の合計は合流後の15よりも3.8%過小となっており、計測していない支川があることを考慮するとSS収支はほぼ整合している。

最上流域に着目すると、河川1のSS量は河川4に対して80%であるが流域面積は22%であり、また河川6に対してはSS量が88%、流域面積が51%である。その他の河川と比較しても河川1は単位面積あたりのSS生産量が最も多い場所であることが分かった。

急峻流域である河川1、2、3、4におけるSS量の合計は98 × 10<sup>6</sup> kgであり、下流基準点の15番では156 × 10<sup>6</sup> kgである。急峻流域の面積は下流基準点の23%に相当するが、ここで63%のSSが生産されている。

上流2基のダムには河川1、2、3、4から71 × 10<sup>6</sup> kgのSSが流入するが放流量は39 × 10<sup>6</sup> kgであり、SS放流率は55%であった。これらのダムは梅雨期の洪水調節容量が有効貯水容量の98%と大きく(ほぼ空になっている)、また洪水調節開始流量に達するまでは流入=放流の運用をしているため、洪水時の短期回転率が高い。そのためSS放流率も比較的高くなっていると推測される。

急峻流域で生産されるSSのうち、河川1、2、3、4のSSはダムで45%が貯留されることから、筑後川下流へのSS供給源としては久住連山を源とする河川6および計測していない隣接河川が重要であると言える。

有明海への土砂供給という観点で着目すべきは河口域である。下流基準点(15)でのSS量は156 × 10<sup>6</sup> kgである

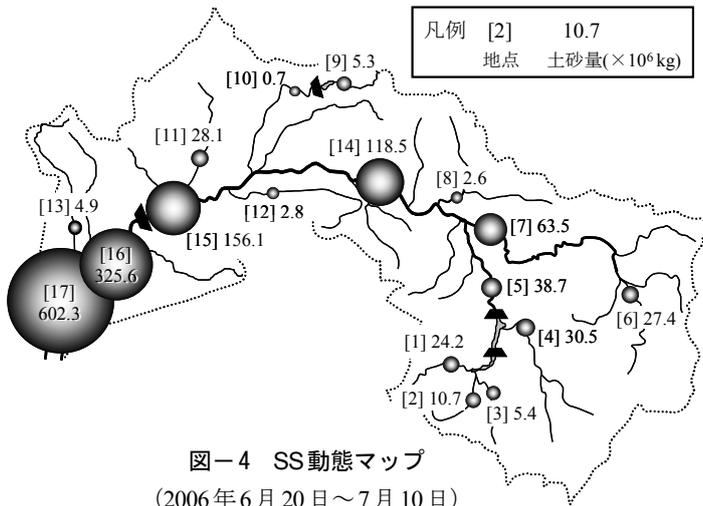


図-4 SS動態マップ  
(2006年6月20日～7月10日)

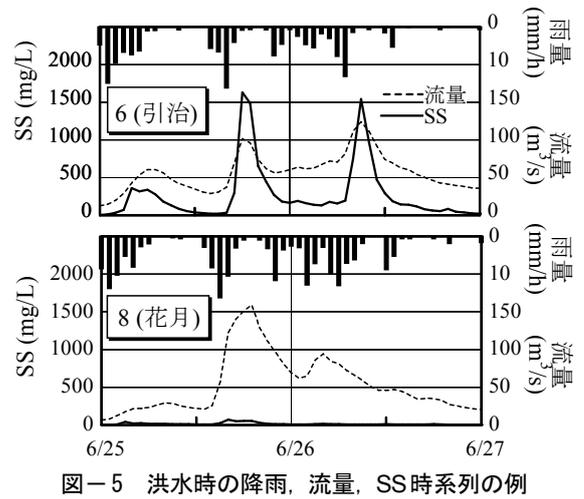


図-5 洪水時の降雨, 流量, SS時系列の例

が、感潮河道の10 km地点の通過量は  $602 \times 10^6 \text{ kg}$  と4倍に増えている。筑後川の感潮河道では河床底泥が洪水によって1～1.5 m浸食され、その後、数ヶ月のうちに高濁度水塊によりSSが逆流輸送されて、底泥堆積層が復元することが示されている<sup>10)</sup>。そこで、平均浸食深を1 m、浸食幅を150 m、浸食区間を河口堰までの13 km、含水比を200%と単純に仮定すると、浸食底泥は  $820 \times 10^6 \text{ kg}$  となり、濁度モニタリングから求まるSS増加量 ( $446 \times 10^6 \text{ kg}$ ) とオーダー的に一致する。

そのため、筑後川の感潮河道では洪水時に河床の底泥が浸食されることで、河川水中にSSが供給されることが分かった。計測していない10 kmよりも下流での浸食も考慮すると、有明海へのSS流出量はさらに増大する可能性があり、筑後川が有明海に及ぼす短期的影響としては流域のSS生産だけではなく、感潮河道における底泥の浸食も重要な現象であることが明らかになった。

#### 4. 上流域のSS流出特性

##### (1) SS流出状況の地点差

SS流出データの一例として、流域面積がほぼ等しい河川6と8を図-5に示す。降雨の強度や継続時間は同程度であり、河川8に対して河川6の流量は0.5～1.5倍となっている。しかし、SS濃度は10～30倍となっており、明らかに河川6の方がSSの生産・流出が著しいことが分かる。この原因を流量とSS輸送量の関係から考察する。

##### (2) 流量とSS輸送量の相関

一般にウォッシュロードの流出式(Q-Qs式)は流量の2～3乗で表されるが、大河川と小河川を比較したときにSS輸送量の大小が流量(流域面積)に依存しているのか斜断面浸食特性に依存しているのか判別できない。そこで、単位面積あたりの流量・SS輸送量に変換する。

$$Q_s = \alpha Q^\beta \quad (1)$$

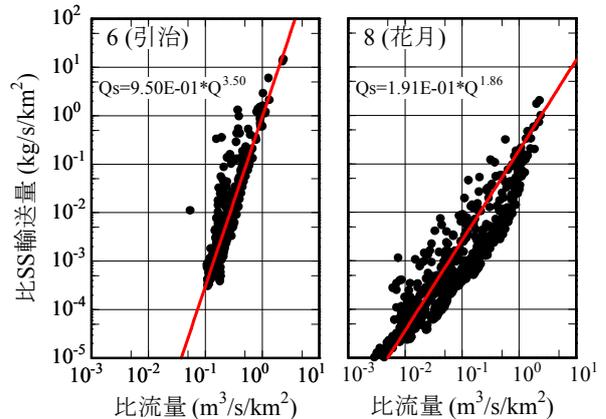


図-6 Q-Qs図(左:河川6, 右:河川8)

表-2 全地点のQ-Qs相関式

番号	河川名	地点名	Q-Qs式
1	津江川	柵野	$Q_s = 1.00E-01 \times Q^{2.86}$
2	川原川	川原	$Q_s = 1.00E-02 \times Q^{3.20}$
3	川原川	上野田	$Q_s = 6.00E-02 \times Q^{2.80}$
4	筑後川	杖立	$Q_s = 5.00E-01 \times Q^{2.40}$
5	筑後川	松原ダム下流	
6	玖珠川	引治	$Q_s = 9.50E-01 \times Q^{3.50}$
7	玖珠川	小ヶ瀬	$Q_s = 4.00E-01 \times Q^{2.50}$
8	花月川	花月	$Q_s = 1.91E-01 \times Q^{1.86}$
9	小石原川	江川ダム上流	$Q_s = 1.15E-01 \times Q^{2.67}$
10	小石原川	江川ダム下流	
11	宝満川	端間	$Q_s = 3.99E-01 \times Q^{2.30}$
12	巨瀬川	中央橋	$Q_s = 1.57E-01 \times Q^{1.95}$
13	城原川	日出来橋	$Q_s = 4.42E-01 \times Q^{2.27}$
14	筑後川	荒瀬	$Q_s = 3.00E-01 \times Q^{2.45}$
15	筑後川	瀬ノ下	$Q_s = 3.50E-01 \times Q^{2.20}$
16	筑後川	感潮河道14km	
17	筑後川	感潮河道10km	

ここで、 $Q_s$ は比SS輸送量 ( $\text{kg/s/km}^2$ )、 $Q$ は比流量 ( $\text{m}^3/\text{s/km}^2$ )、 $\alpha$ 、 $\beta$ は係数である。 $\alpha$ は比流量が  $1.0 (\text{m}^3/\text{s/km}^2)$  のときの比SS輸送量であり、単位流量に対する基本的なSS発生量を表す。 $\beta$ は対数グラフ上での傾きを表すが、比流量は単位換算すれば降雨強度 ( $\text{mm/h}$ )に相当し、比SS輸送量は浸食速度 ( $\text{mm/s}$ )に相当するので、指数 $\beta$ は降雨時の浸食の進みややすさを表す。

図-6に河川6と8のQ-Qs相関を、表-2に全地点の相関式を示す。SS流出にはループ特性があるが、ここで

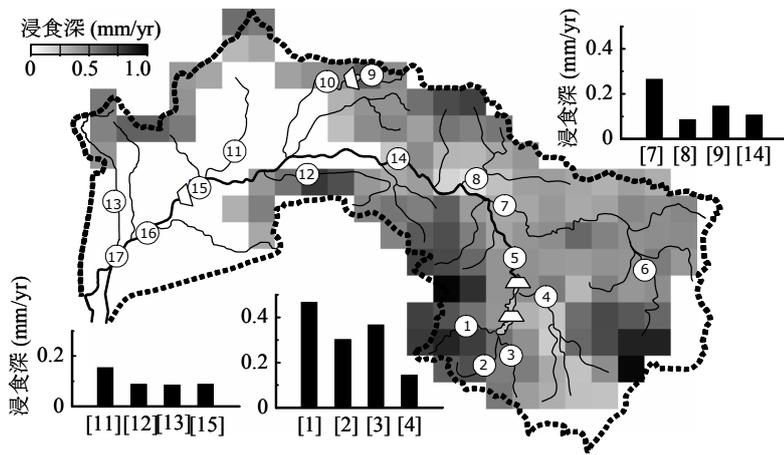


図-7 浸食深の分布図

(棒グラフはQ-Qs式から、分布図は降雨・起伏量モデル<sup>13)</sup>から、番号は観測地点)

は言及せずに大局的な違いを考える。河川6の指数 $\beta$ は3.5と最も大きく、河川8は1.86であり最も小さい。残りの河川はこの間に収まっている。したがって、河川6は筑後川流域の中で洪水時に最も地表浸食が進む場所であり、河川8は浸食が進みにくい場所と言える。一方で低水時の比SS輸送量を見ると、例えば比流量が $0.05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ のとき、河川6の比SS輸送量 ( $\text{kg}/\text{s}/\text{km}^2$ ) は $2.7 \times 10^5$ であるのに対して河川8では $7.2 \times 10^4$ と27倍大きく、平常時には河川8の方が濁っている。

河川6は急峻な山岳地帯を源とする溪流であることから、普段は清浄であるものの洪水時に地表面浸食が進みやすく、河川8は観測点付近が密集市街地であるために日常的に濁っているが、表面浸食は山岳地帯ほどには進まないと推測される。河川1, 2, 3, 6, 9の相関式は山地流域の特徴を有し、河川8, 10, 11, 12は低平地流域の特徴を有し、河川4は中間的な性質であった。

また、Q-Qs式の傾き $\beta$ が等しくても $\alpha$ の効果により比SS輸送量は10～1000倍異なる。これは単位流量のときの基本SS発生量が異なることを表しているが、 $\alpha$ の値自体に流出過程から見た意味はない。傾きと任意の一点を決めればQ-Qs式は表せるので、例えば低水時の比流量に対する定常的なSS輸送量の発生要因を解析すれば、Q-Qs式をモデル化できると考えられる。

### (3) SS発生要因の検討

洪水時のSS発生要因を調べるため、濁度モニタリングから得られる流域浸食深と既往の研究で示されている降雨・起伏量モデルによる浸食深を比較する。

前者については、2002年から2006年の濁度観測データもしくは表-2のQ-Qs式を用いて、各年・各地点の単位面積あたりSS輸送量 ( $\text{kg}/\text{km}^2$ ) を求め、土粒子密度と土壌空隙率を用いて地表浸食深に換算した。森林表層土壌の空隙率は $0.54^{12)}$ ～ $0.63^{13)}$ であるため、本研究では代表値として0.6を採用した。計算の結果、年平均浸食深(SS成分のみ)は $0.084 \sim 0.466 \text{ mm}$ となった。

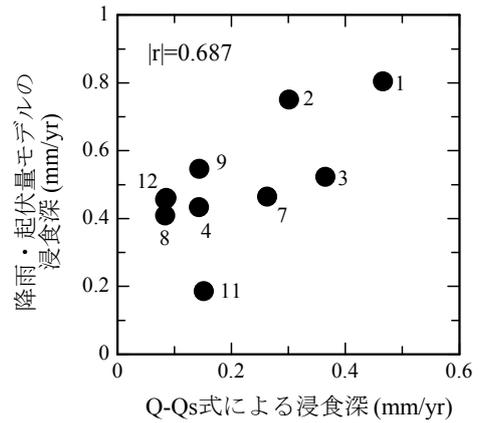


図-8 Q-Qs式による浸食深と降雨・起伏量モデルによる浸食深の比較

横山ら<sup>4)</sup>は筑後川流域の6つのダムにおける堆砂データを用いて、流域の土砂生産量分布 $Q_s'$ を起伏量 $H$ と日雨量 $r$ から予測している(降雨・起伏量モデルと呼ぶ)。

$$Q_s' = \sum_{i=1}^n cH^j r^k \quad (2)$$

ここで、 $c \cdot j \cdot k$ は係数であり、 $n$ は30年間の日数である。(2)式から求まる年平均土砂生産量を平均浸食深(mm)に換算し、前述の浸食深と比較すると、分布図(図-7)と地点別の相関図(図-8)が得られた。土壌によって空隙率が異なること、降雨・起伏量モデルではシルト・粘土と砂礫の合計量を求めており、平均期間も異なるため厳密には同じ比較にならないものの、いずれの浸食深も河川1, 2, 3において大きく、河川8, 12では小さいなど傾向が概ね整合している。

降雨・起伏量モデルは限られた地点のデータを全域に拡張しているが、それが実測値に近いQ-Qs式と整合しているため、流域のSS生産には降雨と起伏量(勾配)が大きく寄与していると考えられる。ただし、河川11は降雨・起伏量モデルによる全粒径の予測値がQ-Qs式と同程度であり、浸食深の予測が過小である。河川11は低平地だが、土砂生産の活発な田畑・市街地が多いために降雨・起伏量だけではうまく予測できないことを示しており、土地利用なども考慮する必要があると言える。

## 5. 1950年以降のSS輸送量

表-2で示したQ-Qs式を用いて、筑後川の流量基準点(17番、瀬ノ下)における長期間のSS輸送量を計算する。流量基準点では明治時代から水位・流量観測が実施されてきたが、通年の時間流量データが存在するのは1965年以降である。1950年から1964年の間、1982年から1986年の間は時間水位と日流量しか無いため、H-Q曲線を仮定して時間流量を計算し、それが日流量と整合するように調節した。

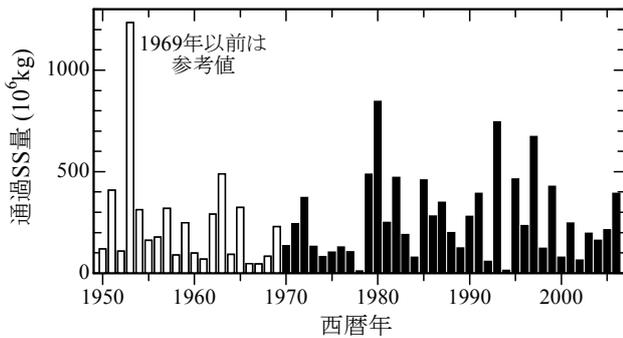


図-9 流量基準点(瀬ノ下)における年通過SS量

図-9に年別のSS通過量を示す。1969年以前は大規模なダムが存在せず、流域が現在よりも荒廃していたため、現在のQ-Qs式から計算されるSS輸送量は過小と考えられる。1970年以降についてみると、最大値は1980年の $847 \times 10^6 \text{ kg}$ 、最小値は1978年の $11 \times 10^6 \text{ kg}$ であり、約80倍の差がある。37年間の平均値は $265 \times 10^6 \text{ kg}$ であった。田中ら<sup>9)</sup>は日流量を用いてQ-Qs式からSS輸送量を計算し、最大値を $551 \times 10^6 \text{ kg}$ 、平均値を $182 \times 10^6 \text{ kg}$ と推定したが、本研究のSS輸送量の方が約1.5倍大きかった。SS輸送量は流量のべき乗で表されるため、日流量を用いた場合は洪水ピーク時の輸送量を過小評価してしまうことが原因と考えられる。

上流ダム群の堆砂量は1970年から1999年までの30年間で $7.94 \times 10^6 \text{ m}^3$ であり、松原・下笠ダムの堆砂ボーリング資料を参考に粒径別に積算すると、0.1mm以下の細粒成分は $5.29 \times 10^6 \text{ m}^3$ と推定される。空隙率は約75%なので年平均の細粒成分堆積量は $117 \times 10^6 \text{ kg}$ となる。そのため、もしダムが無かった場合、あるいは完全に土砂を排出した場合は、下流流量基準点の年平均通過SS量は $382 \times 10^6 \text{ kg}$ になり、ダムによって平均的に約30%のシルト・粘土が堰き止められていると言える。

横山<sup>14)</sup>は筑後川の感潮河道が1970年代の後半から泥質化していることを示しており、シルト・粘土の堆積量は3章で述べたように $1,000 \times 10^6 \text{ kg}$ のオーダーになると推定される。また洪水期にはそれらが浸食されて干潟・沿岸域へと移動してゆく。この底泥移動量は1953年を除いたいずれの年のSS通過量よりも多く、感潮河道における毎年の底泥浸食・堆積量は流域の約4年分のSS生産量に相当する。

## 6. まとめ

本研究では筑後川水系の17地点で濁度モニタリングとSS分析を実施し、ウォッシュロードの生産・輸送の特徴について検討した結果、以下の結論を得た。

- (1)濁度とSSの相関を調べたところ、源流に近いほど同じSS濃度に対して濁度の反応が低く、粒径が光学特性に影響していると推測された。
- (2)2006年の洪水期間について各地点のSS輸送量を実測

データから計算し、急峻かつ降雨量の多い最上流部でSS生産量が卓越していること、また治水ダムに流入したSSの55%が放流されること、感潮河道では底泥が浸食されることで多量のSSが水中に回帰し、上流生産量の約4倍のSSが移動していることを明らかにした。

- (3)比流量Qと比SS輸送量 $Q_s$ との関係式を地点別に整理し、式の係数が流域の土地利用や起伏、降雨などと関係している可能性を示した。
- (4)下流流量基準点における57年間のSS通過量をQ-Qs式から計算した。流域状況が現在と同様の1970年以降についてみると、年平均SS通過量は $265 \times 10^6 \text{ kg}$ となった。

**謝辞:** 本研究の実施にあたり、筑後川河川事務所から水文データを提供して頂いた。また、いであ(株)高島創太郎氏および水域(株)上田浩二氏には濁度観測・洪水時SS採水に際して多大なご助力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 熊本工事事務所: 阿蘇地域崩壊土砂量調査報告書, 1976.
- 2) 藤芳義男: 白川調査書(第一編, 白川洪水の解析, 昭和28年6月出水), 1956.
- 3) 橋本晴行, 渡辺勝利, 全炳徳, 上野賢仁, 山中稔, 笠井美青, 野上昭治, 緒方勤: リモートセンシングを用いた嘉瀬川ダム流域の被覆状況調査と流出土砂量の推定, 水工学論文集, 第45巻, pp.805-810, 2001.
- 4) 横山勝英, 中村岳由, 五十嵐麻美: 堆積学的手法による筑後川の土砂供給能に関する長期変遷解析, 水工学論文集, 第50巻, pp.1039-1044, 2006.
- 5) 建設省河川局: 河川砂防技術基準(案)調査編, 山海堂, 1976.
- 6) 熊本工事事務所: 平成11年度白川浮遊土砂調査業務報告書, 2000.
- 7) 末次忠司, 藤田光一, 諏訪義雄, 横山勝英: 沖積河川の河口域における土砂動態と地形・底質変化に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料32, 2002.
- 8) 山本浩一, 横山勝英: 懸濁物質負荷の確率流出特性に関する研究, 河川技術論文集, 第13巻, pp.29-34, 2007.
- 9) 田中勝久, 清本容子, 岡村和麿, 児玉真史: 筑後川懸濁物質負荷の実態と有明海北部海域環境への影響, 海と空, 82巻, 3~4号合併号, pp.81-86, 2007.
- 10) 横山勝英, 山本浩一, 一寸木朋也, 金子祐: 筑後川感潮河道における底泥の堆積過程に関する調査, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.451-455, 2007.
- 11) 横山勝英: 濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察, 土木学会論文集, No.698/II-58, pp.93-98, 2002.
- 12) 竹下敬司: 山の森と土と水, 福岡県水源の森基金, pp.43-55, 2001.
- 13) 有光一登, 牧勉: 森林土壌の保水のしくみ, 創分, pp.120-149, 1997.
- 14) 横山勝英: 筑後川感潮河道における1950年代以降の底質変化と河床変動の関係, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.586-590, 2006.

(2008. 3. 31受付)

# 干瀉底質環境研究部門

---

Research Division of ENVIRONMENTAL SCIENCE and  
TECHNOLOGY of TIDAL FLAT and SEDIMENT



## 2 層ボックスモデルによる有明海奥部西岸域の 貧酸素水塊発生機構の解析

ANALYSIS OF THE OCCURRENCE MECHANISM OF HYPOXIC WATER IN THE INTERIOR  
PARTS OF THE ARIAKE SEA USING A TWO-LAYER BOX MODEL

瀬口昌洋<sup>1</sup>・郡山益実<sup>2</sup>・石谷哲寛<sup>3</sup>・加藤 治<sup>4</sup>・原口智和<sup>2</sup>

Masahiro SEGUCHI, Masumi KORiyAMA, Tetuhiro ISHITANI

Osamu KATO and Tomokazu HARAGUCHI

<sup>1</sup>農博 佐賀大学教授 農学部生物環境科学科 (〒840 - 8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>2</sup>農博 佐賀大学助教 農学部生物環境科学科 (〒840 - 8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>3</sup>農修 鹿児島大学大学院 連合農学研究科 (〒890 - 0065 鹿児島市郡元1-21-24)

<sup>4</sup>農博 佐賀大学名誉教授 農学部生物環境科学科 (〒840 - 8502 佐賀市本庄町1番地)

In the present study, the occurrence mechanism of hypoxic water in the interior western parts of the Ariake Sea was investigated by the two-layer box model on the base of field observation data and Saga Prefecture research data in 1972-2000. Seasonal variations of flow structure, vertical diffusion coefficient and biochemical oxygen-consumption rate in the study area were clarified. The physical and biochemical oxygen-consumption processes, which related to the temporal variation of dissolved oxygen (DO) concentration in lower layer box, were evaluated. The analytical results showed that vertical diffusion and biochemical oxygen-consumption contribute greatly to DO concentration in lower layer box during summer season, and 83% of DO was supplied to lower layer box by vertical diffusion.

**Key words** : Ariake Sea, DO, Hypoxic water, Box model, Advection, Vertical diffusion coefficient  
Biochemical oxygen-consumption rate

### 1. まえがき

近年、底質の泥化が拡大している有明海奥部西岸域を中心に、夏季の底層DO濃度が数mg/L以下となる貧酸素水塊が広域に頻発し<sup>1)</sup>、二枚貝類を中心とする魚介類の斃死などの深刻な被害をもたらしている。

このような状況の中で、有明海における貧酸素水塊に関する調査研究は数多く行われ、その実態や発生メカニズムも次第に明らかになりつつある。例えば、梶原ら<sup>2)</sup>は、2002年夏季の現地観測により、長崎県諫早湾から佐賀県太良、鹿島沖にかけての有明海奥西部海域における貧酸素水塊の動態を明らかにした。また、中山ら<sup>3)</sup>は、諫早湾口周辺の流動、水質等の現地観測を行い、貧酸素水塊の発生・発達過程には、水温成層が関与し、貧酸素水塊の解消は風速に依存することを示

唆した。さらに、徳永ら<sup>4)</sup>は、室内実験により有明海西部海域で懸濁物質(SS)による酸素消費速度が底泥表面からのその約7倍に達し、SSが貧酸素水塊の形成に重大な影響を及ぼすことを報告している。

これらの研究は、有明海における貧酸素水塊の挙動や形成・発達要因を明らかにした重要な研究である。しかしながら、近年、貧酸素水塊が頻発し、有明海の主な発生域の1つと考えられる奥部西岸域<sup>1),5)</sup>での貧酸素水塊の発生機構の究明を目指した研究例は少なく、現在のところ同海域における貧酸素水塊発生機構は、まだ十分に解明されていない。

本研究は、既存のデータから2層ボックスモデルにより奥部西岸域の貧酸素水塊発生に関わる物理量を定量化し、その発生機構を究明することを目的とする。ここでは、まず2007年の夏季に行った現地観測や同年の

西海区水産研究所の観測データを基に、奥部西岸域における貧酸素水塊の発生状況及び貧酸素水塊発生時の海況について検討した。次いで、1972～2000年の浅海定線調査データを用いて、2層ボックスモデルより対象海域の貧酸素水塊発生に關与する物理的及び生化学的過程に關わるパラメータである移流速度、鉛直拡散係数及び生化学的酸素消費速度の季節変化の平年値を明らかにした。さらに、下層ボックスの溶存酸素(DO)濃度の時間変動に及ぼす物理・生化学的過程の寄与分を定量化し、貧酸素水塊の発生機構について考察した。

## 2. 現地観測及び実験の概要

まず、有明海奥部西岸域における海底付近の流況及び水質の時間変化を明らかにするために、観測地点 St.1,2 (Fig. 1) において、2007年7月中旬～9月中旬の約2ヶ月間にわたり現地観測を行った。これらの観測では DOPA システムを付帯した多項目計測装置(特注品、アレック電子)とメモリー型波高計(AWH-HR, アレック電子)及びメモリー型濁度計(ALCW-CMP, アレック電子)を海底上約20cmに設置し、流向、流速、海水温( $T$ )、塩分( $S$ )、DO濃度、濁度及び水位の連続測定を行った。

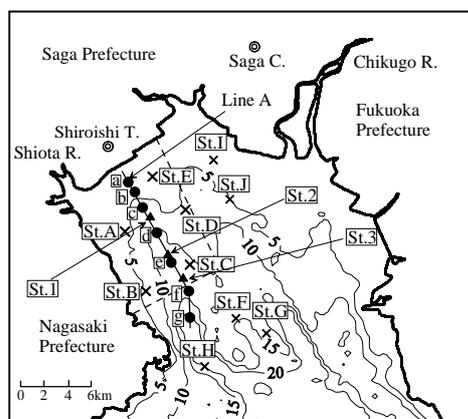


Fig. 1 有明海奥部における観測地点(×:浅海定線調査地点, ●:Line Aに沿った調査地点, ▲:多項目計測装置による観測地点), 解析対象海域(破線で囲まれた海域)及び水深(単位:m)

また、貧酸素水塊発生時の密度分布や密度躍層下の底層水及び底泥の酸素消費速度を明らかにするために、両地点で2007年8月23日に多項目水質計(AAQ1183, アレック電子)を用いてDO濃度、 $T$ 及び $S$ の鉛直分布を測定すると共に、北原式採水器(C号、離合社)による海面下0.5mから海底上0.5mまでの採水(St.1:1m毎, St.2:2m毎)と柱状採泥器(離合社)による層厚約80mmの未攪乱コアの採泥を行った。そして、こ

れらの採取試料を、その日のうちに実験室に持ち帰り、速やかに底層水及び底泥の酸素消費実験に供した。なお、底層水及び底泥の酸素消費実験は、それぞれ沿岸調査マニュアルⅡ<sup>6)</sup>の方法と環境庁調査方法<sup>7)</sup>に準拠した。一方、貧酸素水塊の発生時における海洋構造を把握するために、Line A (Fig. 1)に沿ったa～g点で、2007年9月3,4日に多項目水質計(AAQ1183, アレック電子)を用いてDO濃度、 $T$ 及び $S$ の鉛直分布を測定した。

## 3. 貧酸素水塊の発生状況

Fig. 2は、2007年7月23日～9月17日におけるSt.1,2での定点連続観測より得られた水位、底層(海底上20cm)のDO濃度、現場表底密度差( $\sigma_{Tb} - \sigma_{Ts}$ )、流速の経時変化を示したものである。なお、この図には、西海区水産研究所が実施している沖神瀬観測点(St.3)での底層(海底上50cm)のDO濃度の経時変化も併示されている。

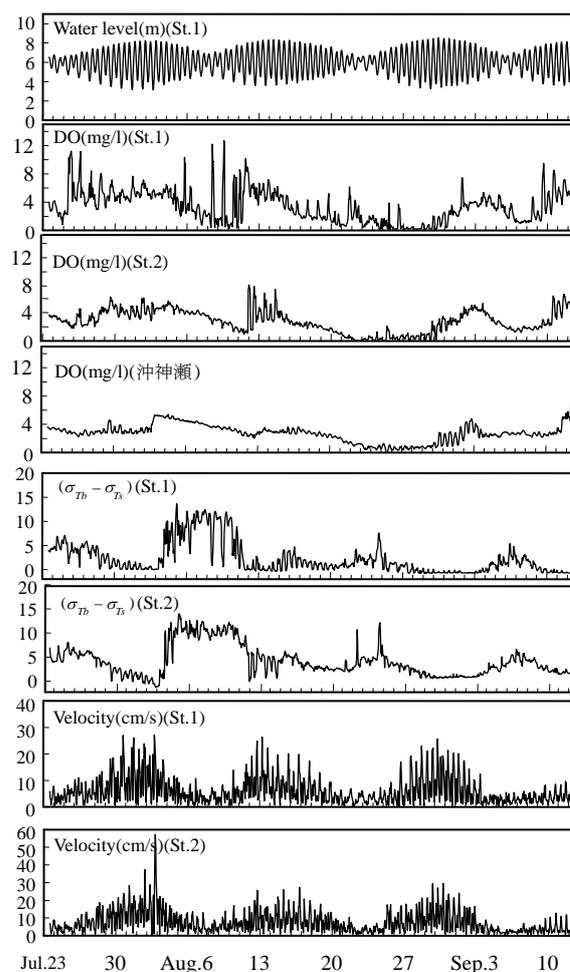


Fig. 2 St.1及びSt.2の潮位、DO、( $\sigma_{Tb} - \sigma_{Ts}$ )及び流速と沖神瀬におけるDOの経時変化(2007年7月23日～9月12日)

図示されるように、3地点のDO濃度の経時変化の一般的な傾向は類似している。すなわち、DO濃度は、流速の低下する小潮時に向かって減少し、逆に流速の増大する大潮時に向かって増加する傾向を示す。したが

って、この海域における貧酸素水塊の経時変化は、大きな潮汐の干満に伴う潮流の盛衰に強く支配されていることが伺われる。また、St.1からSt.2さらにはSt.3へと沖合に進むにつれて、DO濃度の短周期変動が小さく

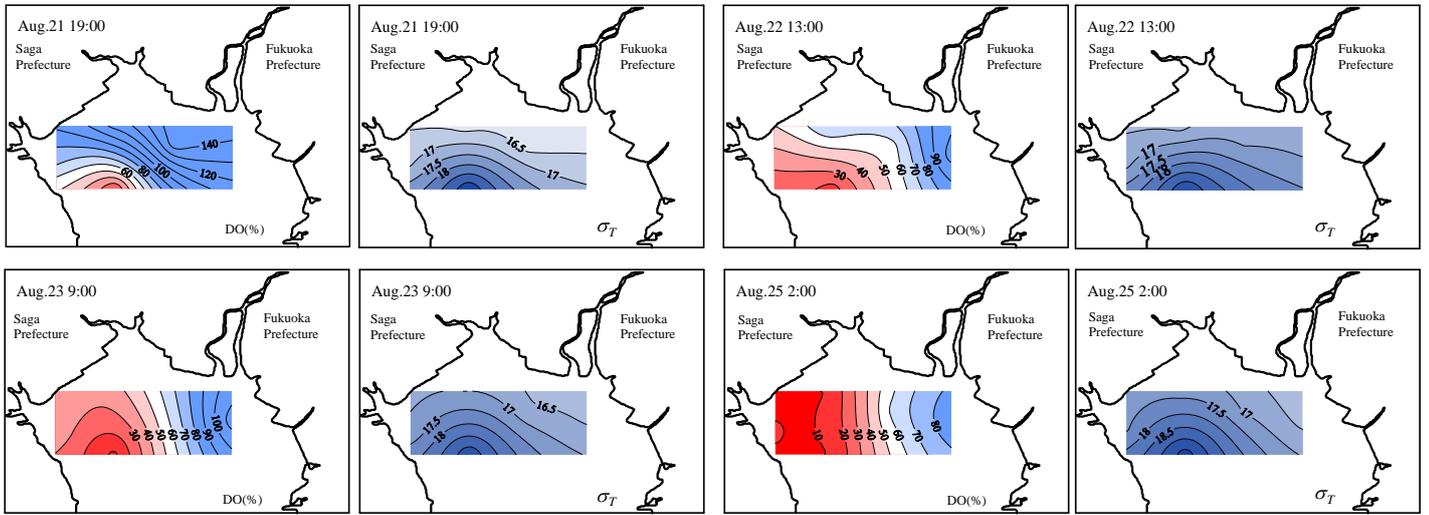


Fig. 3 有明海奥部におけるDOと $\sigma_T$ の水平分布の経時変化

なっている。これは、水深の浅い沿岸域ほど底層DO濃度が日潮不等や波浪などによる擾乱の影響を強く受けるためと推察される。さらに、St.1, St.2, St.3へと沖合に進むにつれて貧酸素水塊の発生日時に若干の遅れが見られる。このことは、今回の観測期間中の貧酸素水塊が沿岸域から沖合に向かって拡大したことを示していると考えられる。

Fig. 3は、今夏、最も大規模な貧酸素水塊が見られた8月21日～25日における海底付近の $\sigma_T$ とDO濃度の水平分布を経時的に追跡したものである。なお、この分布は、現地観測と西海区水産研究所の広域連続観測地点でのデータ<sup>8)</sup>に基づき作成された。図示されるように、小潮時のため、 $\sigma_T$ 分布には大きな変化は見られない。しかし、 $\sigma_T$ 分布の変化とは裏腹に、DO濃度<30%の海域は、日時の経過に伴い、水深10m以深の沖神瀬付近から奥部沿岸域さらには東岸域に拡大している。この原因の1つとして、8月20日から24日にかけて奥部西岸域から湾中央域の広範囲に発生したシャトネラ赤潮<sup>9)</sup>の死骸による底層での好氣的分解に伴うDO消費量の増加が推察される。

Fig. 4は、8月23日におけるSt.1及び2における現場密度 $\sigma_T$ とDO濃度の鉛直分布を経時的に表したものである。図示されるように、水深の浅い両地点においても海面下1～1.5m付近に密度躍層が形成されている。また、両地点のDO濃度<30%の層は、密度躍層下で海底に伏するように形成され、潮位の上昇に伴い増減

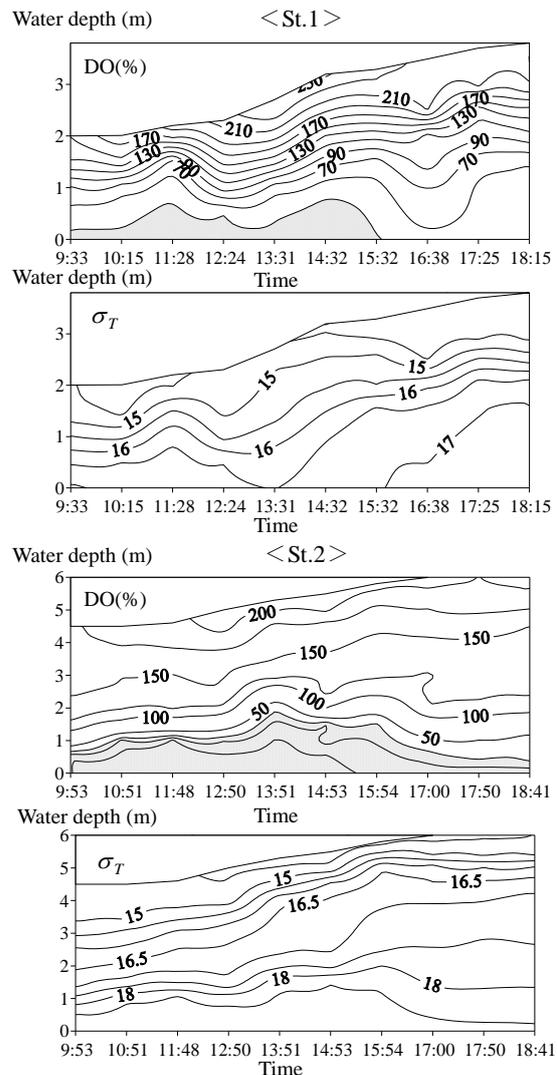


Fig. 4 St.1及びSt.2における $\sigma_T$ とDO濃度の鉛直分布を経時変化(■:DO<30%, 2007年8月23日)

している。特に流速が最大となる平均潮位付近で、この層厚は最大となっている。このことより、8月23日の両地点における貧酸素水塊の発生には、海底から潮流により巻き上げられた赤潮の死骸などの好氣的分解に伴うDO消費量の増大が大きく影響していると推察される。

#### 4. ボックスモデルによる貧酸素水塊の解析

##### (1) 使用データ

解析に用いた  $T$ ,  $S$  及び DO 濃度のデータは、Fig. 1 に示される St.A~J の佐賀県浅海定線調査データである。各測点の  $T$ ,  $S$  及び DO 濃度のデータは、海面下 0m, 5m, 10m, 20m, 30m, 40m で得られており、本研究ではこれらのデータを水深 1m 間隔に線形補間して用いた。また、海水密度( $\rho$ )は  $T$  及び  $S$  のデータより算出した<sup>1)</sup>。さらに、流量データの存在しない解析対象海域に流入する塩田川の河川流量は、その集水面積と佐賀県白石町の月降水量から推定した。

##### (2) ボックスモデル

海水中の DO 濃度は、移流・拡散過程や生化学的過程に伴う酸素の供給と消費のバランスにより決定されると考えられる。そのため、貧酸素水塊の形成機構を明らかにするには、物理(移流・拡散)過程及び生化学的過程の DO 濃度変化への寄与分を定量化する必要がある。そこで、ここでは、まず、既存の現地観測データを用いてボックスモデルより対象海域における移流速度、鉛直拡散係数及び底層の生化学的酸素消費速度の季節変化の平年値を明らかにする。次いで、底層の DO 濃度の時間変化に及ぼす個々の物理・生化学的過程を定量化することにより、貧酸素水塊の発生機構を究明する。

現地観測より、夏季の貧酸素水塊発生時には密度躍層が発達し、密度の鉛直分布が顕著な二層構造を示すことから、有明海奥部西岸域の Fig. 1 の破線で囲まれた海域(平均水深 9m)を Fig. 5 に示されるような 2 層のボックスモデルで近似した。ここで、上、下層ボックスの境界深さ( $H_1$ )は、11年間(1990~2000年)の夏季における有明海奥部の平均的な密度の鉛直分布<sup>10)</sup>や上述した Line A(Fig. 1)に沿った過去 4 年間の現地観測結果より、密度躍層の水深 4m とした。上、下層ボックス内の塩分( $s_1, s_2$ )及び DO 濃度( $C_1, C_2$ )は、各ボックス層内に含まれる St.A~E(Fig. 1)の  $S$  と DO 濃度の値を平均して求めた。また、南北方向のボックス外の塩分( $s_3, s_4$ )及び DO 濃度( $C_3, C_4$ )と東西方向のボックス外の塩分( $s_5, s_6$ )及び DO 濃度( $C_5, C_6$ )は、それぞれ

St.F~H(Fig. 1)及び St.I~J(Fig. 1)の  $S$  と DO 濃度の値を海面~ $H_1$ と  $H_1$  以深で平均して求めた。

さらに、本解析では、 $s_1$ ~ $s_6$  及び  $C_1$ ~ $C_6$  をそれぞれ 3ヶ月移動平均したデータを用いた。なお、各ボックスの諸元は、Table-1 に一覧される。

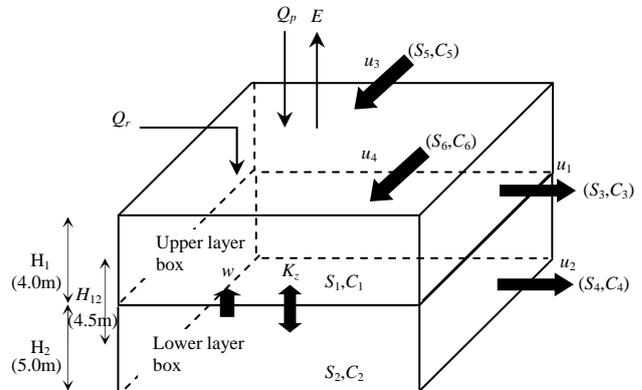


Fig. 5 2層ボックスモデルの概要

Table-1 各ボックスの諸元

Volume (km <sup>3</sup> )	$V_1$	0.426
	$V_2$	0.533
Interface Area (km <sup>2</sup> )	$A_{12}$	106.56
Cross Section Area (km <sup>2</sup> ) (North-South)	$A_1$	0.029
	$A_2$	0.037
Cross Section Area (km <sup>2</sup> ) (East-West)	$B_1$	0.058
	$B_2$	0.072

ここで、各ボックスにおける塩分収支及び水収支は、それぞれ次式で表される。

<上層ボックス>

$$V_1 \frac{dS_1}{dt} = -u_1 A_1 S_{13} + w A_{12} S_{12} + u_3 B_1 S_{15} + \frac{K_z (S_2 - S_1) A_{12}}{H_{12}} \quad (1)$$

$$u_1 A_1 = Q + w A_{12} + u_3 B_1 \quad (2)$$

$$Q = Q_r + Q_p - E \quad (3)$$

<下層ボックス>

$$V_2 \frac{dS_2}{dt} = -u_2 A_2 S_{24} - w A_{12} S_{12} + u_4 B_2 S_{26} + \frac{K_z (S_1 - S_2) A_{12}}{H_{12}} \quad (4)$$

$$u_2 A_2 = -w A_{12} + u_4 B_2 \quad (5)$$

ここに、 $V_1, V_2$  はそれぞれ上層及び下層ボックスの体積、 $A_{12}$  は上下層ボックス間の水平断面積、 $A_1, A_2$  はそれぞれ上層及び下層ボックスの南北方向の鉛直断面積、 $B_1, B_2$  はそれぞれ上層及び下層ボックスの東西方向の鉛直断面積、 $u_1, u_2$  はそれぞれ南北方向の上層及び下

層ボックスの水平移流速度,  $u_3, u_4$  はそれぞれ東西方向の上層及び下層ボックスの水平移流速度,  $w$  は上下層ボックス間の鉛直移流速度,  $K_z$  は鉛直拡散係数,  $S_{ij} = (S_i + S_j)/2$ ,  $H_{12}$  は上下層ボックスの中央点間距離,  $H_2$  は下層ボックスの層厚,  $Q$  は上層ボックスへの淡水流入量で, 河川からの流入量 ( $Q_r$ ) と降雨量 ( $Q_p$ ) 及び蒸発量 ( $E$ ) を考慮した正味の値であり,  $E$  は次式により推定された<sup>11)</sup>.

$$E = k(E_s - E_a)W \quad (6)$$

ここに,  $k$  は蒸発係数 ( $=0.17\text{mm d}^{-1}\text{hPa}^{-1}\text{sm}^{-1}$ )<sup>12)</sup>,  $E_s$  は観測された海面水温から計算した飽和蒸気圧,  $E_a$  は佐賀気象台で観測された月平均大気蒸気圧,  $W$  は佐賀気象台で観測された月平均風速である.

一方, 貧酸素水塊の発生する下層ボックスにおける DO 収支は, 次式で表される.

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} = -u_2 A_2 C_{24} - w A_{12} C_{12} + u_4 B_2 C_{26} + \frac{K_z (C_1 - C_2) A_{12}}{H_{12}} - V_2 R \quad (7)$$

ここに,  $C_{ij} = (C_i + C_j)/2$ ,  $R$  は生化学的酸素消費速度である.

### (3) 解析方法

上述したように本解析は, 既存の佐賀県浅海定線観測データより, 対象海域における移流速度, 鉛直拡散係数及び底層での生化学的酸素消費速度の季節変化の平年値を推算することを目的とする. したがって, (1), (2), (4), (5)式において算定しなければならない物理量 (未知数) は  $u_1 \sim u_4, w, K_z$  の 6 個である. そのため, これらの 4 式から 6 個の未知数を解析的に求めることは出来ない. そこで, ここでは 1972~2000 年の各月 29 個のデータ ( $S_1, S_2, S_{13}, S_{15}, S_{24}, S_{26}, Q$ ) について, 最小二乗法を適用し, 以下のように各月の未知数を決定した<sup>13)</sup>.

まず, (2), (5)式を(1), (4)式に代入し整理すると, (8)式が得られる.

$$m_t = u_2 a_t + u_3 b_t + u_4 c_t \quad (8)$$

ここに,  $m_t = V_1 \frac{dS_1}{dt} + V_2 \frac{dS_2}{dt} + QS_{13}$ ,  $a_t = A_2(S_{13} - S_{24})$ ,  $b_t = B_1(S_{15} - S_{13})$ ,  $c_t = B_2(S_{26} - S_{13})$  であり, 1972~2000 年の 29 年分の各月における(8)式 ( $t=1 \sim 29$ ) が得られ, これを行列に表すと次式となる.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{29} & b_{29} & c_{29} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{pmatrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{L} = \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \cdot \\ m_{29} \end{pmatrix} \quad (9)$$

この時, (8)式における右辺と左辺の誤差方程式は,

$$\mathbf{V} = \mathbf{L} - \mathbf{AX}, \quad \mathbf{V} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdot \\ \varepsilon_{29} \end{pmatrix} \quad (10)$$

となり, 誤差 ( $\varepsilon_t$ ) の二乗和  $S$  は, 次式で表される.

$$\mathbf{S} = \mathbf{V}^t \mathbf{V} = (\mathbf{L} - \mathbf{AX})^t (\mathbf{L} - \mathbf{AX}) = \mathbf{L}^t \mathbf{L} - 2\mathbf{X}^t \mathbf{A}^t \mathbf{L} + \mathbf{X}^t \mathbf{A}^t \mathbf{AX} \quad (11)$$

ここで,  $S$  が最小となる条件は(12)式で表されるため, 対象海域の塩分及び水収支を最も良く再現する  $u_2, u_3, u_4$  は, (13)式により得られる.

$$\frac{\partial \mathbf{V}^t \mathbf{V}}{\partial \mathbf{X}} = -2\mathbf{A}^t \mathbf{L} + 2\mathbf{A}^t \mathbf{AX} = 0 \quad (12)$$

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^t \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^t \mathbf{L} \quad (13)$$

このように求めた  $u_2, u_3, u_4$  を(1), (2), (4)式に代入し, 残りの未知数  $u_1, w, K_z$  を算出した. さらに, 得られた  $u_2, u_4, w$  及び  $K_z$  と 1972~2000 年における各月の DO 濃度の平均値を(7)式に代入することにより  $R$  を算出した.

### (4) 解析結果及び考察

Fig. 6 は, ボックスモデル解析により得られた  $u_1 \sim u_4$  の月変動を表したものである. なお, ここで  $u_1$  と  $u_2$  の正及び負の値は, それぞれ対象海域から湾中央部への流出及び流入を示し, また,  $u_3$  と  $u_4$  の正及び負の値は, それぞれ奥部東岸域から対象海域への流入及び流出を示している.

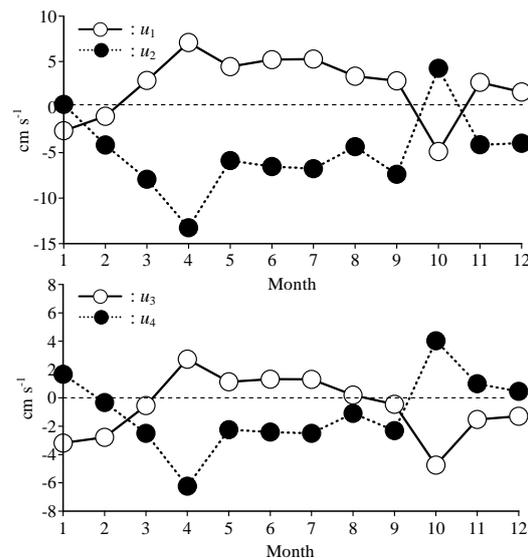


Fig. 6  $u_1, u_2, u_3$  及び  $u_4$  の月変動

図示されるように,  $u_1$  及び  $u_3$  と  $u_2$  及び  $u_4$  は, それぞれ同様の季節変化が見られる. すなわち,  $u_1$  及び  $u_3$  は,

冬季(12-2月)では、それぞれ平均 $-0.65\text{cm s}^{-1}$ 、 $-2.42\text{cm s}^{-1}$ と負の値であるのに対して、夏季(6-8月)では、それぞれ平均 $4.63\text{cm s}^{-1}$ 、 $0.94\text{cm s}^{-1}$ と正の値を示す。一方、 $u_2$ 及び $u_4$ は、冬季(12-2月)において、それぞれ平均 $-2.60\text{cm s}^{-1}$ 、 $0.60\text{cm s}^{-1}$ と負及び正の値であるが、夏季(6-8月)ではそれぞれ平均 $-5.89\text{cm s}^{-1}$ 、 $-2.01\text{cm s}^{-1}$ と負の値となる。特に夏季の上層及び下層ボックスの境界面における移流速度の分布を模式的に図示すると、Fig. 7となる。

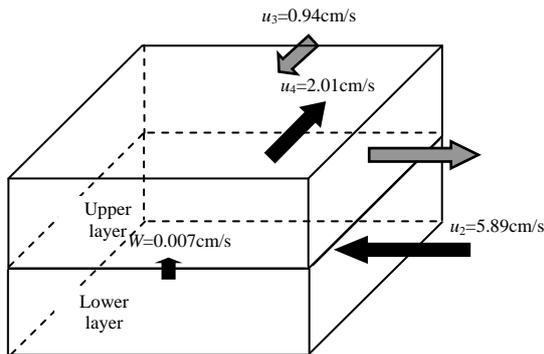


Fig. 7 夏季における上・下層ボックス境界面の移流速度

これらの結果より、貧酸素水塊が発生する夏季の対象海域においては、南北方向で表層流出、下層流入、東西方向で表層流入、下層流出の流動構造が卓越するものと考えられる。一般に、河川水が流入する内湾においてはエスチャリー循環流が発達する<sup>14)</sup>。有明海においても大きな河川が流入するために、基本的には河口循環流に伴う鉛直循環流が湾全体で卓越すると報告されている<sup>15)</sup>。本解析で得られた夏季の対象海域における流動構造は、このような有明海の鉛直循環流の特性を反映したものと考えられる。

Fig. 8 は、 $w$ 、 $K_z$  及び密度成層度( $P$ )の月変動を表したものである。なお、 $P$ は次式により定義される<sup>16)</sup>。ここで、 $P$ は成層した水柱のポテンシャルエネルギーとその水柱が鉛直混合した時のポテンシャルエネルギーの差を表している<sup>17)</sup>。したがって、 $P$ が増加するほど密度成層は発達し、安定した密度成層が長期間存在する。しかし、 $P$ が低下するほど海水は鉛直混合し、密度成層は減衰・消滅する。

$$P = \int_0^H |\rho(z) - \bar{\rho}| g dz \quad (14)$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{H} \int_0^H \rho(z) dz \quad (15)$$

ここに、 $H$ は水深、 $z$ は海底からの高さ、 $g$ は重力加速度である。

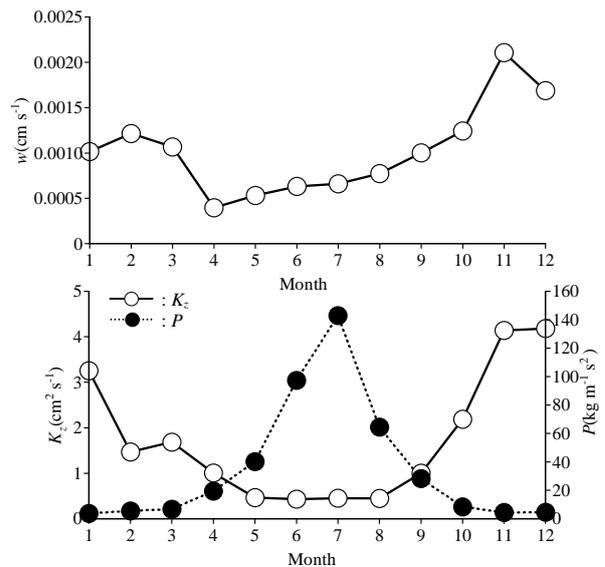


Fig. 8  $w$ 、 $K_z$  及び  $P$  の月変動

図示されるように、 $w$  及び  $K_z$  の季節変化は、 $P$  のそれと逆の季節変化を呈している。すなわち、 $P$  の増加に伴い  $w$  及び  $K_z$  は減少し、逆に  $P$  の減少に伴い  $w$  及び  $K_z$  は増加する。このことから、夏季～秋季においては、淡水流入量の増加や海面加熱などによる密度成層の発達( $P$  の増加)に伴い鉛直混合や移流が阻害されるために、 $w$  及び  $K_z$  は減少する。しかし、冬季～春季にかけては、淡水流入量の減少や海面冷却などによる密度成層の衰退( $P$  の減少)に伴い、海水の鉛直混合や移流が促進されるために、 $w$  及び  $K_z$  は増加すると推察される。

Fig. 9 は、 $R$  の月変動を表したものである。図示されるように、 $R$  は春季～夏季に正(消費)となり、秋季～冬季に負(生産)となる傾向を示す。 $R$  のこのような変化は、下層ボックスでの生化学的な DO 消費と生産の季節変動を示している。すなわち、春季～夏季における DO 消費には、海水温の上昇や海水中の有機物量の増加に伴うバクテリアの好氣的分解の増進が、また、秋季～冬季における DO 生産には、透明度の上昇による植物プランクトンの光合成の活性化が大きく関与しているものと考えられる。

Table-2 は、2006年8月24日と9月2日に St.1、St.2 (Fig. 1) で採取した底層水と底泥についての酸素消費実験の結果を一覧したものである<sup>18)</sup>。また、表中には両地点における底泥の酸素消費速度( $R_s$ )と密度躍層下の底層水の酸素消費速度( $R_w$ )より得られた密度躍層下の底泥と底層水による層内の酸素消費速度( $R_{sw}$ )が示されている。表に示されるように、St.1 及び St.2 における  $R_{sw}$  は、それぞれ  $0.62 \sim 2.36\text{mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$ 、 $0.16 \sim$

2.32mgL<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>であった。本解析で得られた夏季における  $R$  の解析値は 0.40~0.77mgL<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup> であり、これらの実験値の範囲内にある。

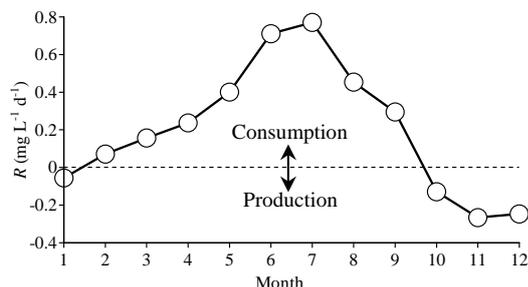


Fig. 9  $R$  の月変動

Table-2 St.1 及び St.2 における  $R_s, R_w$  及び  $R_{sw}$

Date	Observation point	$R_s$ (gm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	$R_w$ (mgL <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	$R_{sw}$ (mgL <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )
24 August 2006	St.1	1.25	0.78-1.67 (1.08)	1.41-2.30 (1.70)
	St.2	1.49	0.56-1.68 (1.08)	0.91-1.89 (1.29)
2 September 2006	St.1	1.25	0.00-1.73 (0.95)	0.62-2.36 (1.58)
	St.2	1.09	0.00-2.16 (1.21)	0.16-2.32 (1.37)

Numbers in brackets indicate the averaged value.

Fig. 10 は、下層ボックスの DO 濃度の時間変動に関与する移流項、鉛直拡散項及び生化学的酸素消費項の月変動を表したものである。なお、ここで、移流項は(7)式の右辺第1項~第3項の総和を、また鉛直拡散項は第4項を、さらに生化学的酸素消費項は第5項をそれぞれ  $V_2$  で除して求めた。図示されるように、移流項は年間を通して小さな値で推移している。また、鉛直拡散項は春季や冬季では小さな値であるが、7月をピークに夏季に大きな正の値となっている。一方、生化学的酸素消費項は、鉛直拡散項とは正反対の季節変化を呈し、夏季には大きな負の値となっている。このような夏季の鉛直拡散項と生化学的酸素消費項の増大には、前述したように夏季における密度躍層を挟んだ上下層ボックス間の DO 濃度差及び下層ボックスでの生化学的酸素消費量の増加が大きく寄与しているものと考えられる。

そこで、さらに下層ボックスの DO 濃度の時間変動に関わる各項の寄与分の季節的推移について見ると、冬季(12-2月)では平均して移流項  $-0.03\text{mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$ 、鉛直拡散項  $-0.03\text{mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$ 、生化学的酸素消費項  $0.08\text{mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$  となり、生化学的酸素消費項による DO 供給の寄与が高く、移流項及び鉛直拡散項による下層ボックス外への DO 輸送の寄与は同程度である。しかし、夏季(6-8月)においては、平均して移流項

$0.10\text{mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$ 、鉛直拡散項  $0.51\text{mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$ 、生化学的酸素消費項  $-0.64\text{mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$  となり、鉛直拡散項による下層ボックスへの DO 供給と生化学的酸素消費項による DO 消費の下層ボックスにおける DO 濃度の時間変動に及ぼす寄与は増大する。一般に、成層期の底層において、鉛直方向の DO 輸送は最も重要であり<sup>19)</sup>、水平方向の非一様性が顕著な夏季の瀬戸内海、周防灘においても底層への DO 輸送は、80%が鉛直拡散によるものと報告されている<sup>20)</sup>。本解析においても、夏季の対象海域における下層ボックスへの DO 供給は、約 83%が鉛直拡散項によるものである。

したがって、このことから対象海域における貧酸素水塊の発生は、基本的には底層での生化学的酸素消費量が鉛直拡散による表層から底層への DO 供給量より多いことに起因するものと推察される。

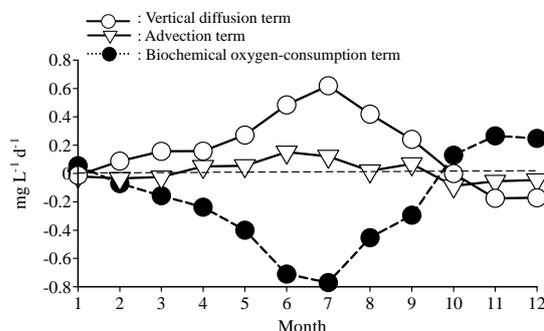


Fig. 10 (7)式の生化学的酸素消費項、移流項及び鉛直拡散項の月変動

## 5. まとめ

本研究では、2007年の現地観測データや1972~2000年の浅海定線調査データを基に、有明海奥部西岸域における貧酸素水塊の発生機構を検討、考察した。ここで、得られた主な知見は、以下のように要約される。

- (1) 奥部西岸域における貧酸素水塊の時空間的な動態が把握された。また、この動態から、貧酸素水塊の発生には、表層から底層への DO 補給量を大きく制御する密度躍層の形成と共に、赤潮の死骸などの有機懸濁物の好氣的分解に伴う海底付近の DO 消費量が大きく影響していると推察された。
- (2) 1972~2000年の浅海定線調査データを用いて、2層ボックスモデルにより対象海域の貧酸素水塊発生に関する物理量を解析した結果、この海域における流動構造や  $K_z$  及び  $R$  の季節変化の平年値が明らかにされた。また、 $P$  と  $w$  及び  $K_z$  との間には密接な関連性が見られた。すなわち、夏季に密度成層の発達に伴う  $P$  の増加により  $w$  及び  $K_z$  は減少す

るが、冬季の密度成層の減衰・消滅に伴う  $P$  の減少により  $w$  及び  $K_z$  は増加するものと考えられた。

- (3) 下層ボックスの DO 濃度の時間変動に関わる物理過程(移流, 鉛直拡散)と生化学的過程を定量的に評価した結果, 夏季の対象海域における下層ボックスの DO 濃度の時間変動には, 鉛直拡散項と生化学的酸素消費項の寄与が大きく, 下層ボックスへの DO 供給の約 83% が鉛直拡散項によるものと推定された。このことから, 夏季の対象海域における貧酸素水塊の発生は, 主に底層での生化学的酸素消費量が鉛直拡散項による表層から底層への DO 供給量より多いことに起因するものと考えられた。

**謝辞** : 本研究を実施するに際し, 平成 19 年度科学研究費補助金(基盤研究(B), 代表: 瀬口昌洋)及び佐賀大学有明海総合研究プロジェクトより, 多大なる支援を受けた。このことを, ここに付記し, 深謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 石谷哲寛, 瀬口昌洋, 郡山益実, 加藤治: 有明海奥部西岸域における貧酸素水塊の発生と密度躍層, 農業土木学会論文集, **247**, pp.65-72, 2007.
- 2) 梶原義範, 富田友幸, 中野拓治, 磯辺雅彦: 有明海湾奥部海域における 2002 年夏季の貧酸素水塊の発生状況について, 土木学会論文集, **747/II-65**, pp.187-196, 2003.
- 3) 中山哲巖, 佐伯信哉, 時吉学, 木元克則: 有明海北西部で発生する貧酸素水塊に着目した現地調査, 海岸工学論文集, **50**, pp.976-980, 2003.
- 4) 徳永貴久, 松永信博, 阿部淳, 児玉真史, 安田秀一: 有明海西部海域における高濁度層の観測と懸濁物質による酸素消費の実験, 土木学会論文集, **782/II-70**, pp.117-129, 2005.
- 5) 木元克則, 田中勝久, 中山哲巖, 奥石裕一, 渡辺康憲, 西内耕, 藤井明彦, 山本憲一連続広域観測で捉えた有明海の貧酸素水塊の動態, 2004 年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, pp.191, 2004.
- 6) 日本海洋学会編: 沿岸環境調査マニュアル II, 恒星社厚生閣, 東京, p.296, 1990.
- 7) 環境庁: 瀬戸内海の干潟, 浅海域の浄化機能, 平成 11 年度環境庁委託業務報告書, pp.134, 2000.
- 8) 西海区水産研究所(参照 2008.5.31): 有明海貧酸素水塊広域連続観測, (オンライン), 入手先<<http://www.ariake-do.jp/ariake/top.html>>, 2007.
- 9) 佐賀県: シャトネラ赤潮発生状況(別添資料), 平成 19 年 9 月 6 日 PRESS RELEASE, 2007
- 10) 柳哲雄, 下村真由美: 有明海における成層度の経年変動海の研究, **13**, pp.575-581, 2004.
- 11) 柳哲雄, 安部良平: 有明海奥部における塩分と DIP・DIN 収支の経年変動, 海の研究, **14(1)**, pp.21-33, 2005.
- 12) 石崎廣, 斉藤実: 瀬戸内海の蒸発散量, 沿岸海洋研究ノート, **16**, pp.11-20, 1978.
- 13) 柳哲雄, 下村真由美: 有明海における鉛直循環流の経年変動, 九州大学大学院総合理工学報告, **27(4)**, pp.367-371, 2006.
- 14) 藤原建紀, 福井真吾, 杉山陽一: 伊勢湾の成層とエスチュアリー循環の季節変動, 海の研究, **5(4)**, pp.235-244, 1996.
- 15) Yanagi, T. and R. Abe: Increase of water exchange due to decrease of tidal amplitude in Ariake Bay, Japan., *Continental Shelf Research*, **25**, pp.2174-2181, 2005.
- 16) 柳哲雄, 下村真由美: 有明海における成層度の経年変動, 海の研究, **13**, pp.575-581, 2004.
- 17) 二村彰, 武岡英隆, 郭新宇: 燧灘成層域における流動・海水交換と熱収支, 海の研究, **14(3)**, pp.429-440, 2005.
- 18) 郡山益実, 瀬口昌洋, 石谷哲寛, 加藤治: 有明海奥部西岸域における貧酸素水塊発生時の鉛直拡散係数及び酸素消費速度について, 水工学論文集, **51**, pp.1463-1468, 2007.
- 19) 柳哲雄: 貧酸素水塊の生成・維持・変動・消滅機構と化学・生物的影響, 海の研究, **13(5)**, pp.451-460, 2004
- 20) 磯辺篤彦, 神菌真人, 俵悟: 周防灘西部における貧酸素水塊, 沿岸海洋研究ノート, **31**, pp.109-119, 1993.

(2008. 3. 31 受付)

# 有明海奥部干潟域における窒素循環に関する 研究—脱窒菌群の生息分布と脱窒活性—

STUDY OF NITROGEN CYCLING IN THE TIDAL FLAT OF INTERIOR PARTS  
OF THE ARIAKE SEA— HABITAT DISTRIBUTION OF DENITRIFIERS AND  
DENITRIFICATION ACTIVITY —

郡山益実<sup>1</sup>・瀬口昌洋<sup>2</sup>・古賀あかね<sup>3</sup>・木本浩二<sup>4</sup>・萬代敏夫<sup>4</sup>

Masumi KORIYAMA, Masahiro SEGUCHI Akane KOGA, Koji KIMOTO and Toshio BANDAI

<sup>1</sup>農博 佐賀大学助教 農学部生物環境科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>2</sup>農博 佐賀大学教授 農学部生物環境科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>3</sup>農修 鹿児島大学大学院 連合農学研究科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>4</sup>佐賀大学 大学院農学研究科 修士課程 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

The spatial distributions of denitrifier numbers in a tidal sediment in the interior parts of the Ariake Sea changed largely with the properties of tidal flat and seasons. The denitrifier numbers in summer were many in the muddy tidal flat in the interior parts of this bay and about 18,000MPN/g-dry on the average. But, its numbers were few in the sandy and mud-sandy tidal flats in the east and west coast areas and about 1,700MPN/g-dry on the average. The vertical distribution of denitrifier numbers in the muddy tidal flat was high near the surface layer where Eh was almost zero in summer, but its distribution decreased in winter under the aerobic condition and spring under the anaerobic one of the bottom sediment. The denitrification rate in the muddy tidal flat changed largely with time ( $0.35-13.86\text{mg-N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ). The denitrification activity in the muddy tidal flat was assumed to be affected by the environmental factors and substrate concentration other than the denitrifier numbers.

**Key words :** *Ariake Sea, Tidal flat, Denitrifier, Denitrification rate, MPN method, Acetylene inhibition methods*

## 1. まえがき

近年, 干潟の有する生物生産, 生物育成, 環境浄化, 親水等の様々な機能が注目され, これまで埋め立て等により失われる一方であった干潟を保全・再生する試みが行われるようになった。

干潟生態系の維持・修復は, 河口・沿岸域の環境保全及び再生を考える上で必要不可欠な課題である。その中でも, 干潟における物質循環や海域からの物質の取り出しとも密接な関係にある脱窒を中心にした浄化作用の定量的評価は重要視され, これまでに様々な調査研究が行われてきた<sup>1), 2)</sup>。しかし, 有明海奥部に形成された広大な泥質干潟域を対象とした水質浄化能力の調査・研究は少なく, また, 水質浄化機能における干潟域底泥の窒素循環に関与する脱窒

菌の生息環境や分布性は十分明らかにされていない。

本研究は, 有明海の環境浄化機能を大きく支えている脱窒作用に注目し, 奥部干潟域の脱窒特性を明らかにすることを目的とする。ここでは, 特に脱窒菌群の生息分布及び脱窒速度の季節推移やそれらと底質環境との関係などについて, 調査及び実験データを基に検討, 考察した。

## 2. 現地調査及び実験の概要

今回の実験において設定した有明海奥部干潟域の調査及び底質の採取地点①～⑭を図-1に示した。これらの14地点は, 泥質, 砂泥質及び砂質の干潟に点在する。また, ①～⑭地点の所在地及び含泥(粘土+シルト)率を表-1に示した。

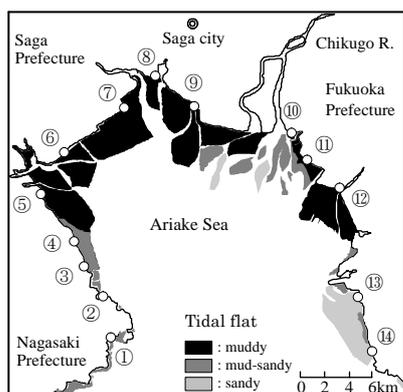


図-1 有明海奥部の干潟分布と調査及び底質採取地点(①～⑭)の位置

表-1 底質の採取地点(①～⑭)の所在地及び含泥率

地点	所在地	含泥率(%)*
①	長崎県諫早市井崎海岸	27.5
②	佐賀県太良町大浦海岸	47.3
③	佐賀県太良町太良海岸	22.0
④	佐賀県鹿島市飯田海岸	45.9
⑤	佐賀県鹿島市七浦干拓	98.5
⑥	佐賀県白石町有明干拓	97.2
⑦	佐賀県白石町福富海岸	99.2
⑧	佐賀県佐賀市江戸干拓	98.9
⑨	佐賀県佐賀市東与賀海岸	99.1
⑩	福岡県柳川市昭南干拓	92.9
⑪	福岡県柳川市橋本干拓	71.8
⑫	福岡県柳川市大和干拓	93.3
⑬	熊本県荒尾市荒尾海岸	6.7
⑭	熊本県長洲町長洲海岸	11.4

\*2006年6, 8, 11, 12月の含泥率の平均値

まず、奥部干潟域における脱窒菌数の広域的な分布性と底質との関連性を検討するために、14地点において2006年6, 8, 11, 12月及び2007年5月に現地測定と底質の採取をした。採取試料については、実験室で脱窒菌数の計測と化学分析を行った。なお、底質の採取に際しては、一般に脱窒菌数が多く、脱窒活性の高い表面から深さ4cmまでの底質を採取した。

次に、奥部に広く分布する最も典型的な干潟である泥質干潟における脱窒菌数の鉛直分布の季節推移と底質環境要因との関連性を検討するために、泥質干潟に位置する⑨地点で、2006年1月～2007年8月にわたり、各月2回の現地測定と表面から深さ10cmまでの底質をコアサンプラー(直径83mm, 長さ210mm)で採取した。採取試料については実験室で厚さ2cmにスライスカットした後、2cm毎の底質中における脱窒菌数の計測及び表面から深さ10cmまでの底質の脱窒速度の測定、底質及びその間隙水の化学分析を行った。現地では、温度とORPメーターによる酸化還元電位(Eh)を測定した。

なお、脱窒菌数はGiltay培地を用いて30℃で1週間培養した後、MPN法<sup>3)</sup>に基づき算出した。また、脱窒速度は、アセチレン阻害法<sup>4)</sup>で測定した。すなわち、採取した未攪乱のコア試料にアセチレンを飽和させたら過

海水100mLをコア試料内部及び直上に注入し、現地温度に設定したインキュベータで24時間培養した後、コア試料上のヘッドスペース中の気体を採取してガスクロマトグラフィー(G3810, Yanako)でN<sub>2</sub>O濃度を測定した。そして、N<sub>2</sub>O濃度の測定値(μL/L)から、(1)式により単位面積当たりの脱窒速度R<sub>d</sub>(mg・N・m<sup>-2</sup>・day<sup>-1</sup>)を求めた。

$$R_d = \frac{1.25C(V_g + \beta V_l)}{AT} \quad (1)$$

ここで、Cはヘッドスペース中のN<sub>2</sub>O濃度、V<sub>g</sub>、V<sub>l</sub>は、それぞれヘッドスペース(気相)及びろ過海水(液相)の容積、Aはコア試料の断面積、Tは培養時間、βはオストワルド溶解度係数(例えば30℃のとき、β=0.530mL/mL)である<sup>5)</sup>。一方、底質については、有機態炭素(Org.-C)、有機態窒素(Org.-N)を、また底質間隙水については、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Nを定量分析した。なお、Org.-C、Org.-N及びNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Nの定量分析には、それぞれCHNコーダー(JM-10, J-Science LAB)及びオートアナライザー(SWATT, BLTEC)を用いた。

### 3. 結果及び考察

#### (1) 奥部干潟域における脱窒菌数の広域的分布

図-2に、有明海奥部干潟域の14地点における2006年8月及び12月の底質表層(0～4cm)の脱窒菌数の分布を示した。底質表層の脱窒菌数の季節的推移は、各地点によって大きく異なった。しかし、全般的には、冬季に比べ夏季において底質表層の脱窒菌数は非常に多かった。また、年間を通して見た場合、最奥部の含泥率の高い底質表層において脱窒菌数は多く分布する傾向が見られた。特に、夏季における最奥部の泥質干潟(⑤～⑫地点)の脱窒菌数は多く、平均約18,000MPN/g-dryであった。しかし、東岸域や西岸域の砂質及び砂泥質干潟(①～④, ⑬, ⑭地点)の脱窒菌数は平均約1,700MPN/g-dryと少なかった。

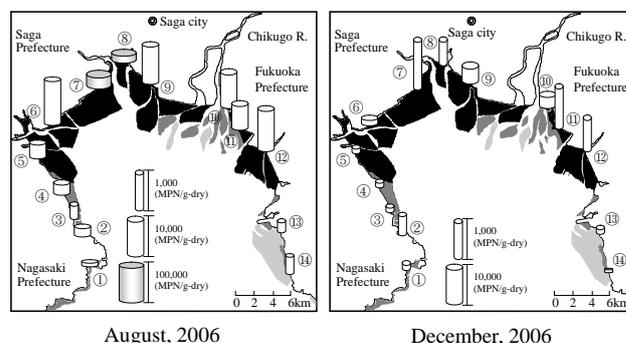


図-2 ①～⑭地点における底質表層の脱窒菌数の分布の季節的推移

図-3に、脱窒菌の生息環境要素として重要な各地点の底質表層の試料採取時における温度と Eh の季節変化を示した。測定時間が異なるため厳密に比較することはできないが、一般的に夏季に底質表層の温度が最も高く、逆に冬季に低かった。また、Eh の季節変化は各地点で大きく異なったが、温度の高い夏季に低く、逆に温度の低い冬季に高くなる傾向を示した。これは、温度の高い夏季においてバクテリアによる底質表層中の有機物の分解が促進され、酸素消費量が増大したこと、一方、温度の低い冬季においては、バクテリアによる底質表層中の有機物の分解が抑制され、酸素消費量が大きく減少したことによると推察される。しかし、⑬、⑭地点の Eh の分布は、夏季に高く冬季に低かった。これは、両地点の底質が有機物量の少ない砂質であるため、夏季では有機物の分解に伴う酸素消費量が少なく、また、マクロベントスによるバイオターベーションの増進により、底質中への酸素補給量が増加したこと、一方、冬季ではバイオターベーションの衰退により、酸素補給が減少したことを反映したと推察される。したがって、このような各季節における脱窒菌の生息環境要素の差異が、上述した各季節間の脱窒菌数の大きな違いや地点間の分布性に強く影響したと考えられる。

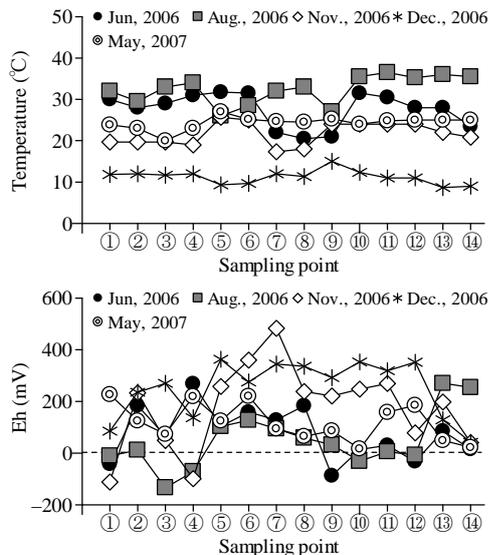


図-3 ①～⑭地点における底質表層の温度及び Eh の季節変化

図-4及び図-5に、それぞれ各季節での底質表層の含泥率と脱窒菌数及び含泥率と有機物量(Org.-N, Org.-C)の関係を示した。いずれの季節においても、脱窒菌数と含泥率との間には高い正の相関性が見られたが、夏季の回帰直線の勾配が最も大きく、冬季のそれが最も小さかった。すなわち、含泥率は、特に夏季において脱窒菌数を大きく左右すると考えられる。一方、Org.-N及びOrg.-Cは、一般的には含泥率の増加に伴って増大する傾向が見られた。これは、粘土分を多く含む、含泥率の高い地点ほど潮流や波によって巻き上げ

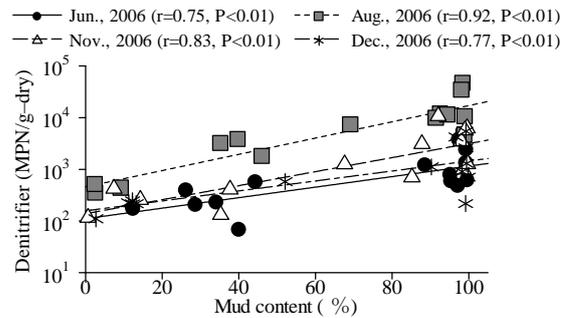


図-4 各季節の底質表層の含泥率と脱窒菌数の関係

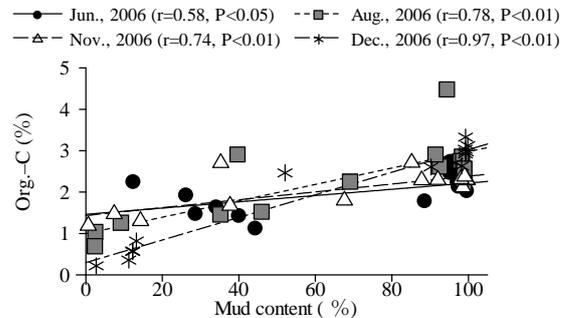
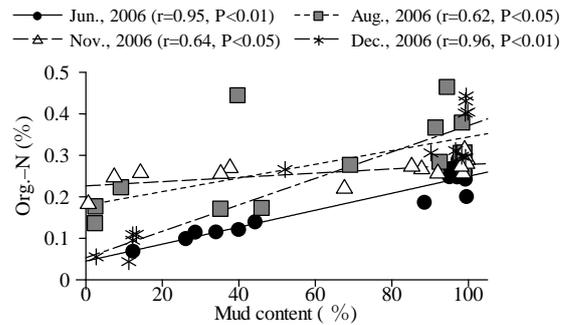


図-5 各季節の底質表層の含泥率と有機物量の関係

られた浮泥による有機懸濁物の吸着・沈降量が多いこと<sup>6)</sup>や比重の小さな、軽い有機物残渣が堆積し易いことなどを反映したと考えられる。しかし、各季節によって、両者の間の相関性や回帰直線の勾配に差異が見られた。すなわち、含泥率と Org.-N の相関性は、6月、12月に高く、逆に8月、11月に低かった。また、回帰直線の勾配は、相関性の高い6月、12月に大きく、逆に相関性の低い8月、11月に小さかった。さらに、含泥率と Org.-C の相関性は、12月に高く、逆に6月に低かった。また、回帰直線の勾配は、相関性の高い12月に大きく、逆に相関性の低い6月に小さかった。12月に含泥率と Org.-N 及び Org.-C の相関性が高く、勾配が大きくなったのは、巻き上げられた浮泥による有機懸濁物の吸着・沈降量や有機物残渣の堆積量が含泥率の高い地点ほど増加すること、さらに、冬季では、これらの有機物が分解されずに底質中に蓄積されることによると考えられる。また、8月、11月において、含泥率と Org.-N 及び Org.-C の相関性が低下し、回帰直線の勾配が小さくなったのは、各地点で底質中のバクテリアによる有機物の分解活性に大小の差異が生じ、底質中の有機物量にばらつきが生じたためと推察される。さらに、6月におい

ては、含泥率と Org.-N の相関性が高く、勾配が大きかったが、含泥率と Org.-C の相関性は低く、勾配も小さかった。このような相反する傾向が見られたのは、6月が前年の12月から8月、11月への移行期のため、両期間の中間的性状が両者の関係に反映したと考えられる。

## (2) 泥質干潟における脱窒菌数の鉛直分布

図-6及び図-7に、⑨地点における底質中の平均脱窒菌数、Eh及び泥温の平均値の経時変化を示した。なお、平均脱窒菌数は、干潟表面から深さ10cmまで2cm毎の各層における脱窒菌数の平均値である。平均脱窒菌数は、かなり大きな経時変動を呈したが、全般的には夏季に大きく増加した。この要因として、泥温の上昇とともに梅雨期や台風時の出水による底質中の有機物量の増加が考えられる。一方、Ehと泥温は、互いにほぼ相反する経時変化を示した。すなわち、Ehは、泥温の高くなる夏季に減少し、負の値となり、また、泥温の低下する冬季に上昇し、正の値となった。これは、泥温の上昇する夏季に、底質中の有機物の好氣的分解が進行し、底質中が嫌氣的状態となったこと、逆に泥温の低下する冬季には、底質中の有機物の好氣的分解が低下し、底質中が好氣的状態になったことによると推察される。そこで、さらに⑨地点における底質中の脱窒菌数とEhの鉛直分布及びそれらの季節的推移をより詳細に検討するために、脱窒菌数とEhを厚さ2cm毎に深さ10cmまで測定し、図-8にそれらの鉛直分布の経時変化を示した。なお、4月～9月までの干潟表面のEhは欠測のため、表示されていない。Ehの鉛直分布は特徴的な季節

変化を示した。すなわち、Ehは4月、5月において深さ2cm～10cmまでの層で負の値に、そして、7月、9月においては深さ2cmの層で0の値、その他の層で負の値となった。また、Ehは10月において8cmの層を境に正から負の値に変化した後、11月、12月においては干潟表面から深さ10cmの層まで正の値となった。さらに、Ehは、3月には干潟表面から深さ2cmの層までは正の値、それ以深の層では再び負の値に変化した。すなわち、干潟表面から深さ10cmまでの底質は、2006年4月～9月、2007年3月ではほぼ嫌氣的状態にあり、また、2006年10月～12月ではほぼ好氣的状態にあったと考えられる。このようなEhの鉛直分布の経時変化は、底質中の有機物の分解による酸素の消費や泥温変化に伴うバイオターベーションの盛衰が深く関与したと考えられる<sup>7)</sup>。

一方、干潟表面から深さ10cmまでの底質中の脱窒菌数の鉛直分布は、2006年4月、5月では平均約1,300MPN/g-dryと少なかったが、7月、9月に平均約12,400MPN/g-dryに急増した後、10月～12月、2007年3月には、再び平均約1,800MPN/g-dryに減少した。特に7月、9月では、深さ2cmの層に約31,000MPN/g-dryと非常に多くの脱窒菌が分布した。このような脱窒菌数の鉛直分布の経時変化は、底質中の生息環境要素であるEh、泥温、また代謝の際の電子供与体となる有機物量、さらには電子供与体となる海水や間隙水中の $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -Nの濃度分布が総合的に影響したと推察される。

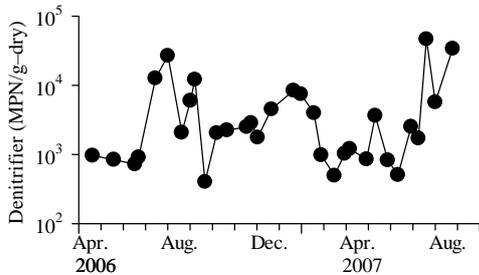


図-6 泥質干潟(⑨地点)の表面から深さ10cmまでの底質中における平均脱窒菌数の経時変化

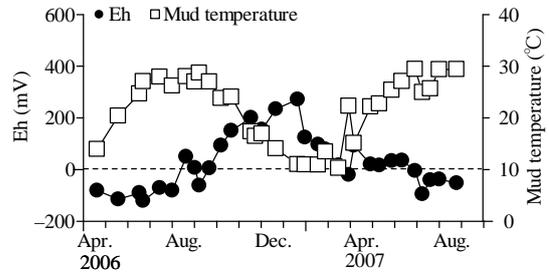


図-7 泥質干潟(⑨地点)の表面から深さ10cmまでの底質中におけるEhと泥温の平均値の経時変化

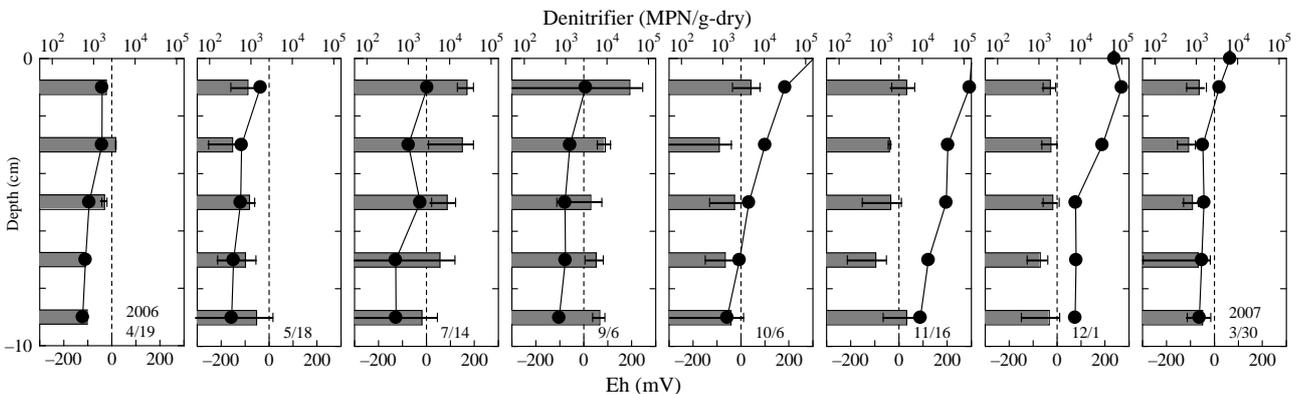


図-8 泥質干潟(⑨地点)における表面から深さ10cmまでの脱窒菌数(平均値と標準偏差)とEhの鉛直分布の経時変化 (■:脱窒菌数, ●:Eh)

### (3) 泥質干潟における底泥間隙水の無機態窒素濃度

図-9 に、⑨地点における干潟表面から深さ 10cm までの底泥間隙水中の無機態窒素濃度 ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ) の経時変化を示した。各無機態窒素濃度は特徴的な季節変化を呈した。すなわち、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  は春季から夏季にかけて 7mg/L 前後まで増加した後、冬季には 0.2mg/L 前後まで大きく減少した。一方、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  は、2006 年 5 月、2007 年 1 月に一時的に増加したが、年間を通して全般的に低く、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  のような明確な季節変化を示さなかった。また、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$  は、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  の場合とほぼ同時期に一時的に増加したが、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  とは異なり 2007 年 3 月頃より、変動を伴いながら長期間にわたって増加し、8 月には約 0.07mg/L に達した。このような  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  及び  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  の季節変化は、底質中の有機物の分解作用や硝化及び脱窒作用が深く関与したためと推察される。すなわち、春季から夏季にかけての  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  の増加及び冬季における  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  の減少は、図-7 に示された泥温の季節変化との対比より、それぞれ泥温の上昇に伴う有機物の分解作用の活性化及び泥温の低下に伴う分解作用の不活性化を反映したと考えられる。一方、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  の一時的な増加を除いて、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  が年間を通じ全般的に低い値を示したのは、底質中での硝化作用による  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  から  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  の生成量や海水中から底質への  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  の取込量に比べて、脱窒作用による  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  の還元量が比較的多かったためと推察される。

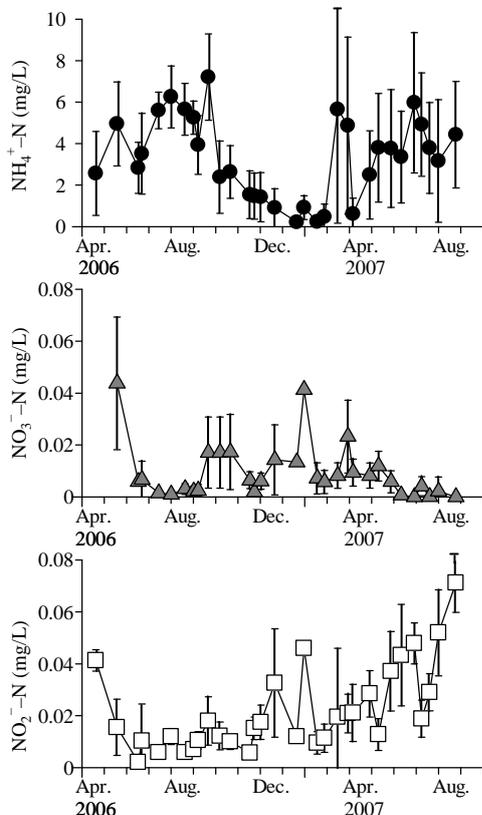


図-9 泥質干潟(⑨地点)における底泥間隙水中の無機態窒素濃度(平均値と標準偏差)の経時変化

また、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$  の 2007 年 3 月～8 月の長期的な増加は、図-7 に示されるように、同期間の Eh が前年 4 月～8 月のそれに比べて、全般的に高い値になり、前年 4 月～8 月の底質よりも 2007 年 3 月～8 月の底質の嫌気化が進んでいなかったために、硝化作用により  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  から  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  が生成、蓄積されたためと考えられる。なお、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  及び  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  の一時的な増加の原因は、底質中に局所的に存在した好氣的部位から  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  及び  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  の高い底泥間隙水が採取されたためによると推測される。

図-10 に、干潟表面から深さ 10cm までの底質中の C/N 比と筑後川流量(観測点:筑後川大堰直下)の経時変化を示した。C/N 比は 2006 年 6 月、7 月及び 2007 年 7 月にそれぞれ 9 及び 11 前後に増加し、その後、2006 年 9 月及び 2007 年 8 月に 7 前後まで急減した。一般に、C/N 比は有機物の分解の度合いにより変化するが、分解が進むと 6 程度に減少する<sup>8)</sup>。したがって、筑後川流量と C/N 比との対比より、2006 年 6 月、7 月及び 2007 年 7 月の C/N 比の増加には、河川によって搬入された有機物の増加が影響していると考えられる。また、C/N 比が 8、9 月頃に急減したのは、泥温の上昇に伴って底質中の有機物の分解、無機化が促進されたためと推察される。

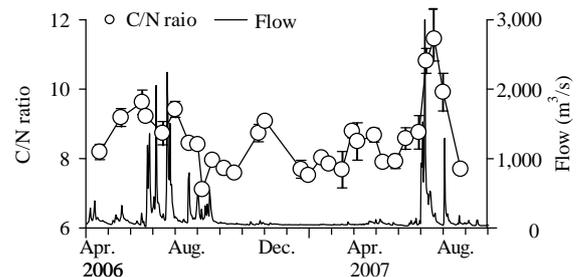


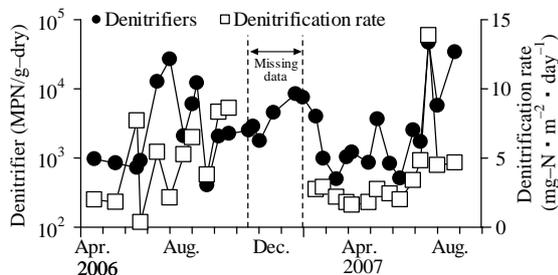
図-10 泥質干潟(⑨地点)における底質の C/N 比(平均値と標準偏差)と筑後川流量の経時変化

### (4) 泥質干潟における脱窒菌数と脱窒速度

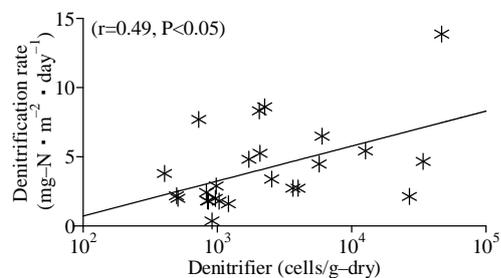
図-11 及び図-12 に、それぞれ泥質干潟に位置する⑨地点における干潟表面から深さ 10cm までの底質の平均脱窒菌数と脱窒速度の経時変化及び平均脱窒菌数と脱窒速度の関係を示した。脱窒速度の経時変化は大きく ( $0.35 \sim 13.86 \text{mg-N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ )、必ずしも、明確な季節的変動傾向は見られなかった。さらに、平均脱窒菌数と脱窒速度の間の相関性も低かった。脱窒過程を担う脱窒菌の活性は、一般に温度、Eh などの生息環境要素や代謝の際の電子供与体である有機物の量及び電子受容体である  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  の濃度によって複合的に左右されたため、⑨地点の底質の脱窒速度と平均脱窒菌数の間に相関性の高い一義的關係が見られなかったと推察される。

図-13 に、脱窒速度の測定の際に用いたろ過海水中の無機態窒素濃度の経時変化を示した。ろ過海水中の

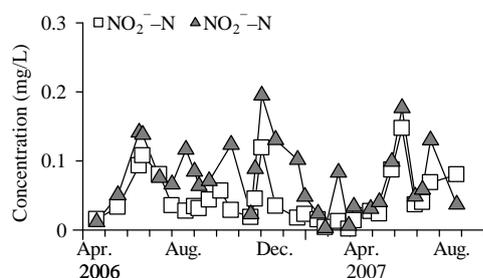
NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 及び NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N の濃度は、6 月及び 11 月頃に増加する傾向が見られた。この傾向は、沖合（浅海域）海水の NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 及び NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N の変動傾向とほぼ対応するものであったが、**図-9** に示された底質間隙水中の NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 及び NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N の変動傾向とは異なった。両者の変動傾向の差異は、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 及び NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N の生成場及び生成過程の違いを反映したと推察される。



**図-11** 泥質干潟(⑨地点)における平均脱窒菌数と脱窒速度の経時変化



**図-12** 泥質干潟(⑨地点)における平均脱窒菌数と脱窒速度の関係



**図-13** 脱窒実験に用いたる過海水中の NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 及び NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 濃度の経時変化

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見は、次のように要約される。

- (1) 奥部干潟域における底質表層(干潟表面から深さ 4cm)の脱窒菌数は、干潟の特性や季節により大きく異なった。また、底質中の脱窒菌数と含泥率との間には、高い正の相関性が見られた。特に夏季においては、含泥率は脱窒菌数を左右する重要な要素であると考えられた。
- (2) 奥部の最も典型的な干潟である泥質干潟(⑨地点)の底質(干潟表面から深さ 10cm)中において、2006 年春季では、底質は全層でほぼ嫌気の状態となり、脱窒菌数は平均約 1,300MPN/g-dry と少な

かった。しかし、夏季では、Eh=0mV となる表層付近を中心に、脱窒菌数は平均約 12,400MPN/g-dry と非常に多かった。さらに、秋季から冬季では、底質は全層でほぼ好気の状態となり、脱窒菌数は平均約 1,800MPN/g-dry と少なかった。

- (3) 泥質干潟(⑨地点)において、干潟表面から深さ 10cm までの底質間隙水中の無機態窒素濃度の季節変化が把握された。それらの季節変化は、それぞれ底質中の有機物の分解、無機化及び脱窒作用の季節に伴う増減が大きく影響していると推察された。
- (4) 泥質干潟(⑨地点)において、底質の脱窒速度は経時的に大きく変化した(0.35~13.86mg-N · m<sup>-2</sup> · day<sup>-1</sup>)。また、底質の脱窒活性は、平均脱窒菌数の他に生息環境要素や基質濃度などによって複合的に左右されると推察された。

#### 参考文献

- 1) 佐々木克之, 程木義邦, 村上哲生: 諫早湾調整池からの COD・全窒素・全リンの排出量および失われた浄化量の推定, 海の研究, 12(6), pp.573-591, 2003.
- 2) 柳哲雄, 阿部良平: 有明海奥部における塩分と DIP・DIN 収支の経年変化, 海の研究, 14(1), pp.21-33, 2005.
- 3) 土壤微生物研究会: 土壤微生物実験法実験法, p.216-221, 養賢堂, 1997.
- 4) Sorensen, J: Denitrification rates in a marine sediment as measured by the acetylene inhibition technique, *Appl. Environ. Microbiol.*, 36, pp.139-143, 1978.
- 5) 駒田充生, 竹内誠: 土壌を含む気液平衡系における亜酸化窒素溶解度, 日本土壤肥科学会誌, 70(6), pp.804-807, 1999.
- 6) 代田昭彦: 有明海の栄養塩類とニゴリ特性, 海洋科学, 12(2), pp.133, 1980.
- 7) 瀬口昌洋, 郡山益実, 加藤治: 泥質干潟におけるマクロベントスの巣穴形成とその硝化・脱窒過程への影響, 水工学論文集, 46, pp.1169-1174, 2002.
- 8) 久馬一剛: 最新土壌学, p46, 朝倉書店, 2001.

(2008. 3. 31 受付)

# 佐賀県沿岸域における覆砂の効果とその持続性

## DURABILITY OF SAND CAPPING EFFECT IN THE INNER AREA OF THE ARIAKE SEA

原口智和<sup>1</sup>・加藤 治<sup>2</sup>・瀬口昌洋<sup>3</sup>・郡山益実<sup>1</sup>

Tomokazu HARAGUCHI, Osamu KATO, Masahiro SEGUCHI, Masumi KOORIYAMA

<sup>1</sup>農博 佐賀大学助手 農学部生物生産学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地)

<sup>2</sup>農博 佐賀大学名誉教授 農学部生物生産学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地)

<sup>3</sup>農博 佐賀大学教授 農学部生物生産学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地)

The sand capping method appears to be useful for improving the environment of bottom sediment in the inner area of the Ariake Sea. It is usually thought that its effect becomes dull in only a few years. The present study investigates the secular change of the bottom sediment environment in sand capped sections, which were constructed by Saga Prefecture from 2001 to 2003. The relation between the habitation of benthos and the grain size distribution was investigated. Species, population and weight of benthos at sand capped point were obviously larger than non-capped point in northeastern spots of the inner area.

**Key Words :** Sand capping method, bottom sediment, benthos, grain size distribution

### 1. はじめに

有明海は、近年さまざまな環境問題が深刻化しており、2枚貝類の漁獲高は減少し続いている。この原因として、(1)湾奥部を中心とした底質の泥化（底質環境の変化）が進行していること、(2)稚貝の着底域が限られ、浮遊幼生の移動・集積に関与する流況が変化していること、(3)貧酸素により環境がストレスを受けていること、(4)ナルトビエイによる食害を受けていること、などが考えられる。このため、有明海沿岸域では、底質環境の改善や貝類漁場の整備を目的として、覆砂、耕耘、作濬、堆積物除去等が施工されてきた。しかし、こうした改善策の効果については十分な追跡調査がなされていない。

覆砂については、(1)底泥から栄養塩などの溶出を抑える、(2)汚染底質の巻き上げを防ぐ、(3)溶存酸素消費量を削減する、(4)生物相を回復する、などの効果が見込まれているが、それらの効果をいかに長く維持させるかが大きな課題である。覆砂効果の持続年数は場所によって異なり、浮泥や堆積泥の輸送を左右する潮流の影響を受けるものと思われる。本研究では、佐賀県が平成13年から平成15年にアサリの養殖場の改良を目的として実施した覆砂地点において、粒径分布がどのように変化しているかを実測調査で明らかにしてきた（加藤ら、

2006, 2007）。本年度は、覆砂施工区においてベントス調査を行い、その生息状況と粒径分布から覆砂の効果を検証した。

### 2. 実験方法

平成13年から15年までに行われた佐賀県沖の覆砂施工区9カ所（図1参照）において調査を行った。この図において、地点名に付けているH〇〇は施工年度を表す。地点①, ②, ③は住之江港沖・六角川濬筋沿い、地点④, ⑤, ⑥, ⑨は筑後川濬筋沿い、地点⑦は肥前七浦沖、地点⑧は太良町沖である。一区画の規模は、100m×400m（40,000m<sup>2</sup>）で、覆砂厚はおおよそ0.3mである。

平成17年および18年に、各施工区において、覆砂地点（以下、覆砂区と呼ぶ）から2本、その近傍の覆砂がなされていない地点（以下、対照区と呼ぶ）から1本の柱状採土を行い、この試料を5cmごとにスライスし、含水比および粒度分析を行った（結果の詳細については、加藤ら、2007を参照されたい）。平成19年に、地点①（H14東北工区）、②（H15東北工区）、および⑤（H14東南工区）において、ベントス調査を行った。エクマンバージ型採泥器を用いてベントスを採集し、ホルマリン固定の後、種毎の個体数、質量、大きさを計測した。

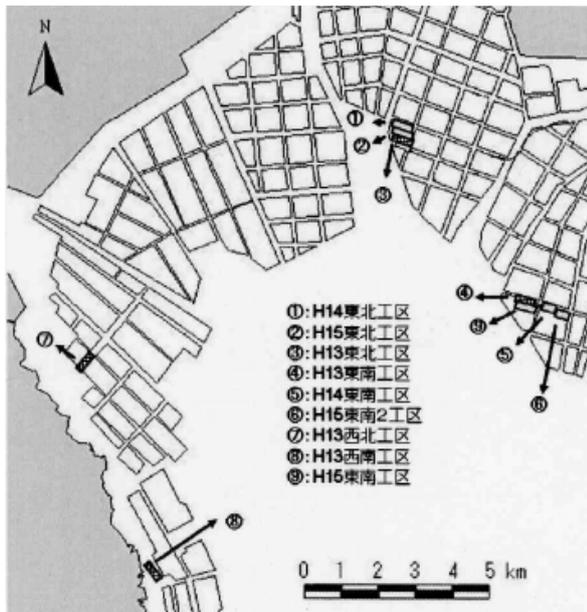


図-1 平成13年から平成15年に施工された覆砂地点（有明水産振興センターの図より作成）。

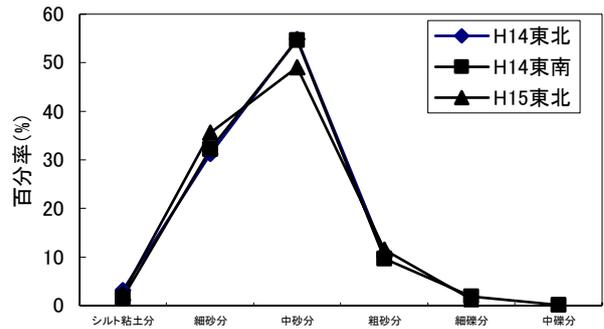


図-2 覆砂材の粒径分布。

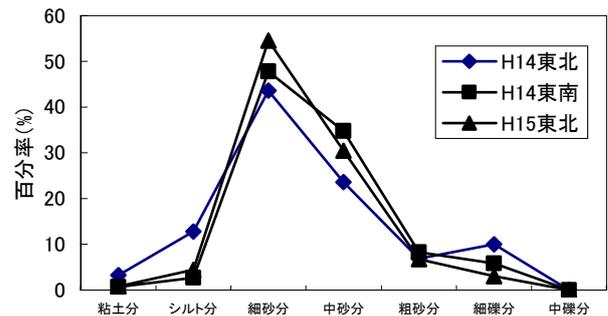


図-3 覆砂区の粒径分布（0-0.05m）。

### 3. 結果および考察

#### (1) 粒径分布

覆砂材は全て熊本県天草沖から運ばれたもので、各地点での粒度分布は図-2に示すとおりである。いずれの地点においても中砂（粒径0.25～0.85mm）の割合が48～55%と大きくなっている。

図-3, -4, -5はそれぞれ、各工区の覆砂区における表面から0-0.05m, 0.05-0.10mおよび0.10-0.15mの層の粒径分布を示したものである（覆砂区の2点平均値、平成18年調査）。0-0.05m層についてはいずれの工区においても中砂分より細砂分が多くなっている。0.05-0.10m層および0.10-0.15m層については、H14東北工区とH14東南工区では依然として中砂の割合が高いが、H15東北工区では細砂の割合が高い。

このことから、いずれの工区においても、細砂・シルト分の堆積が進行し、とくにH15東北工区ではそのスピードが早いと推測される。

#### (2) ベントスの生息状況

図-6に各工区におけるベントスの門別種数を示す。H14東北工区（地点①）においては、覆砂区と対照区で軟体動物門および節足動物門の種類数にほとんど差はないが、環形動物門については対照区ではゼロに対し覆砂区では6種類と明らかな差が見られた。なお、軟体動物門については巻貝類の1種を除いた5種（二枚貝類3種、巻貝類2種）は、覆砂区と対照区で同じであった。H15東北工区（地点②）においては、軟体動物門では覆砂区が

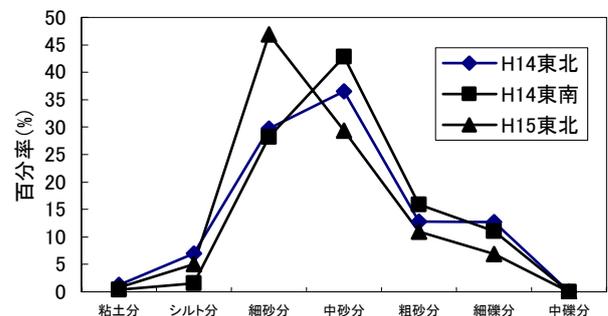


図-4 覆砂区の粒径分布（0.05-0.10m）。

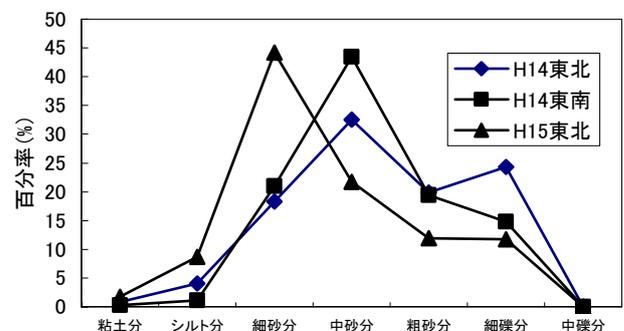


図-5 覆砂区の粒径分布（0.10-0.15m）。

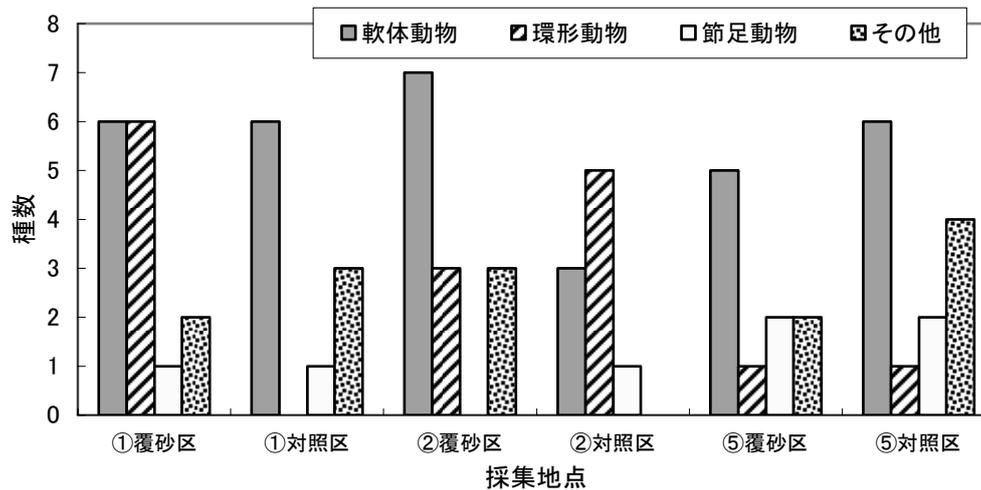


図-6 各工区におけるベントスの種数.

表-1 二枚貝類の大きさ (殻長) 別の個体数

地点		サルボウ					コケガラスガイ			
		- 0.020m	0.020- 0.025m	0.025- 0.030m	0.030- 0.035m	0.035m-	- 0.020m	0.020- 0.030m	0.030- 0.040m	0.040m-
①	覆砂区	1	6	13	27	6	53	0	3	4
	対照区	1	2	2	0	0	25	1	0	2
②	覆砂区	1	10	21	11	1	83	4	6	2
	対照区	0	0	0	0	0	0	0	0	0
⑤	覆砂区	0	0	4	2	0	4	0	0	0
	対照区	5	0	0	1	4	24	1	3	1

対照区より4種多かったが、環形動物門と節足動物門では対照区のほうが多かった。H14東南工区（地点⑤）においては、覆砂区と対照区とでは種数に顕著な差は見られなかった。

表-1に各工区におけるサルボウおよびコケガラスガイの大きさ（殻長）別の個体数を示す。H14東北工区（地点①）において、殻長0.03m以上のサルボウは対照区では確認されなかったが、覆砂区では全個体数の6割を超えた。また、コケガラスガイも対照区より覆砂区のほうが全個体数、および大きい（0.03m以上）の個体数が多かった。H15東北工区（地点②）においては、対照区ではサルボウ、コケガラスガイともに確認できなかったが、覆砂区では広い範囲の殻長の個体が生息していた。H14東南工区（地点⑤）においては、覆砂区、対照区ともに他の2地点に比べ個体数が小さく、コケガラスについては、覆砂区よりも対照区のほうが個体数は大きかった。

図-7に各工区におけるベントスの門別湿重量（単位面積当たり）を示す。全湿重量はH14東北工区の覆砂区が19,380g/m<sup>2</sup>で最大、次いでH15東北工区の覆砂区で12,680g/m<sup>2</sup>であった。

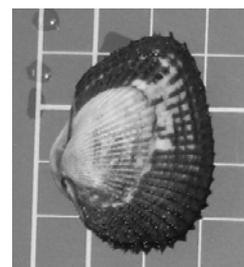


図-7 採集されたサルボウ（上段）とコケガラスガイ（下段）。

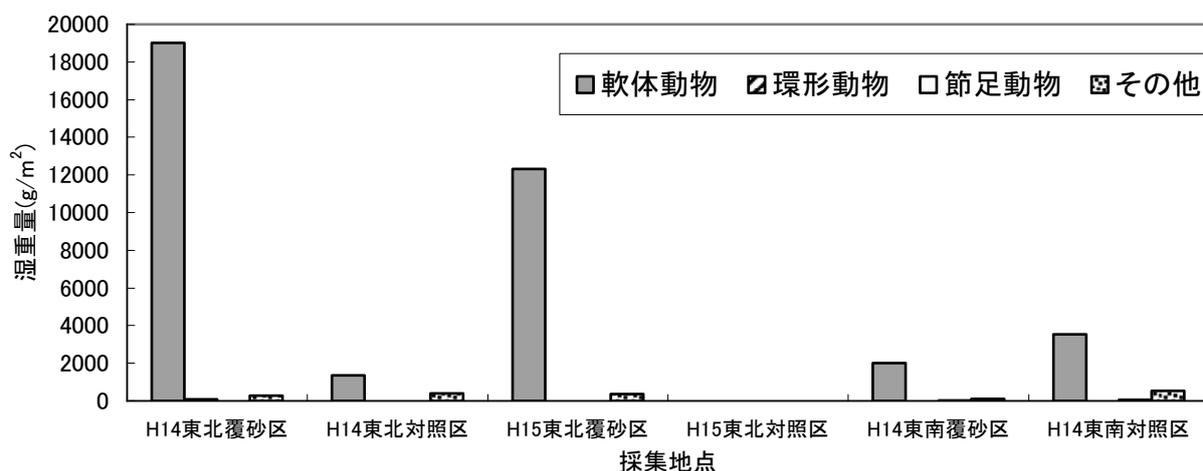


図-7 各工区におけるベントスの湿重量。

H14東北工区（地点①）において、軟体動物門が全体の98%を占め、その99%が二枚貝類であった。また、軟体動物門については覆砂区が対照区の14倍、全湿重量は覆砂区が対照区の11倍であった。

H15東北工区（地点②）においては、軟体動物門が全体の97%を占め、その99%が二枚貝類であった。また、軟体動物門については覆砂区が対照区の1700倍、全湿重量は覆砂区が対照区の800倍であった。

H14東南工区（地点⑤）においては、種数と同様、覆砂区と対照区で顕著な差はなかった。また、全湿重量は、他の2地点に比べ覆砂区は小さく、対照区は大きかった。

このように、二枚貝類（サルボウ、コケガラスガイ）の個体数ならびに湿重量に関しては、工区間あるいは覆砂区と対照区で顕著な差が見られたが、図-3に示すとおり、それらの生息していた底泥表層の物理的環境（粒径分布）にはほとんど違いがなかったことから、これらの生息状況の差は、より下層における覆砂の影響の違いによるものと考えられる。

#### 4. おわりに

平成14年度、15年度に施された佐賀県沿岸域の3ヶ所の覆砂工区におけるベントス生息状況調査より、以下のことが示された。

1. 覆砂によるベントスの種数への影響は小さい。
2. H15東北工区においては、覆砂上に数10cmの底泥の堆積があり、物理的環境（粒径分布）は覆砂区と対照区でほとんど差がないと思われるが、ベントスの生息状況からみると、明らかに覆砂区のほうが対照区よりも生息に適した底質環境にあると推察された。
3. サルボウおよびコケガラスガイの二枚貝類については、H14東北工区とH15東北工区では覆砂により、これらの生息に適した底質環境に改善され、H14東南工区では覆砂の効果がみられなかった。
4. 東北工区（住之江港沖・六角川濬筋沿い）においては覆砂による底質改良の効果が4、5年持続している。

#### 参考文献

- 1) 加藤 治, 原口智和, 瀬口昌洋, 郡山益実: 佐賀県沖有明海の覆砂による底質の経時変化について, 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集, 第2巻, pp.79-84, 2006.
- 2) 加藤 治, 原口智和, 瀬口昌洋, 郡山益実: 佐賀県沿岸域における覆砂効果について, 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集, 第3巻, pp.39-46, 2007.

(2008. 3. 31受付)

# 有明海沿岸の海水中の鉄濃度変化と環境変化

## CHANGE IN TOTAL IRON CONCENTRATION AND ENVIRONMENT AT COASTAL AREA OF THE ARIAKE SEA

田端正明<sup>1</sup>・Abdul Ghaffar<sup>2</sup>・保見真悟<sup>3</sup>・速水祐一<sup>4</sup>・

濱田孝治<sup>5</sup>・山本浩一<sup>5</sup>・郡山益実<sup>6</sup>

Masaaki TABATA, Abdul GHAFAR, Shingo HOMI, Yuichi HAYAMI,

Takaharu HAMADA, Koichi YAMAMOTO, Masumi KOORIYAMA

<sup>1</sup>理博 佐賀大学教授 理工学部機能物質化学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>2</sup>理修 佐賀大学大学院工学系研究科エネルギー物質科学専攻 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>3</sup>佐賀大学理工学部機能物質化学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>4</sup>農博 佐賀大学准教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>5</sup>博(工) 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>6</sup>博(農) 佐賀大学助教 農学部生物環境学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

Total iron concentration in the Ariake sea was determined for the samples collected at different depths of 1, 5(4), 10, and 15 m and of 1m from the bottom and on 7 different points from June 30 to August 25, 2006. All samples were acidified by addition of ultra-pure hydrochloric acid (1 mol dm<sup>-3</sup>). The concentration of iron was determined by a graphite furnace method using a Hitachi Zeeman Polarized Atomic Absorption Spectrophotometer. High concentration of sodium chloride interfered the determination of iron at ppb level. The interference was removed by addition of ultra-pure nitric acid to the samples before determination, because NaCl easily vaporizes as HCl from acidic solution at a preheating process (750 °C). Iron involved in the unfiltered sea water was a range of 700 to 30 ppb and the concentration depended on weather, the distance from the coast and sea depth. High iron concentrations were observed on the sky days after big rainy days. The dissolved oxygen (DO) and plankton (*Skeletonema costatum*) showed high concentrations after the rainy days. As the serious hypoxia occurred in the summer, 2006, the change in total iron concentration is discussed from the points of view of DO and plankton.

**Key Words :** Iron concentration, hypoxia, DO

### 1. はじめに

有明海は九州西部の佐賀、長崎、福岡、熊本の四県に囲まれた南北96キロメートル、幅は平均18キロメートルの北から南に向かって大きく入り込んだ内湾である。その総面積は約1700km<sup>2</sup>である。この有明海には約1万年の間に、阿蘇・久住山系からの火山灰質の土砂や、背振・天山山系の花崗岩質砕せつ物が筑後川、本明川、六角川、嘉瀬川、矢部川、菊池川、白川、緑川の河川により有明海へ運ばれてきた懸濁粒子が堆積して、干潮時には国内の総干潟面積の約42%にあたる263km<sup>2</sup>もの広大な干潟(海岸線から最大6km)が出現する。このため有明海の平均水深は約20mと非常に浅く、それに加えて、干満の差が最大で6mと非常に大きいので、底泥の巻き上げにより海水は濁っている。海水中の浮泥は河

川から流入する窒素やリンを吸着するので有明海は他の海に比べて、富栄養化が起こりにくいと言われて<sup>1)</sup>。海水のニゴリによる光の透過率の減少と浮泥の作用による富栄養化の抑制は有明海における赤潮発生の頻度が少ない要因である。しかし、近年有明海において貧酸素水塊が形成されている<sup>2,3,4,5)</sup>。貧酸素水塊はタイラギの瀕死など貝類漁獲量の減少および赤潮発生の要因の一つとして考えられる。

赤潮は、一般に富栄養化した沿岸水域において発生し、著しく高い密度まで増殖した結果生じる海の着色現象である。その発生機構の一つとして、河川からの流入や、雨水、堆積物の溶解などによって一時的な鉄の大量供給が起こり、赤潮藻類の大量発生に影響及ぼす可能性がある<sup>6,7)</sup>。有明海では1989年以降、夏季に有害プランクトンであるシャトネラの赤潮が発生し、魚介類の斃死など、漁業に大きな被害を与えている。有

明海の貧酸素水塊は、湾西部の沿岸干潟域に発生する<sup>2,5)</sup>。速水は有明海西部の塩田川沖水道上のラインで貧酸素水塊が発生することを示している<sup>8)</sup>。このような貧酸素水塊の形成によって、底泥から鉄が溶出し、特に底層では高濃度になり、それがシャネトラ増殖を促進している可能性がある、というものである<sup>2)</sup>。昨年度、濾過した(0.45 μmメンブレンフィルター)試料中の鉄濃度分布は主に雨による出水によることが明らかになった。しかし、溶存酸素濃度は雨の後表面で高い値を示し、海底では貧酸素塊が発生していることが明らかになった<sup>9)</sup>。

本研究では、夏季の有明海湾奥部における全鉄の分布の変動と有明海の環境変化、特に溶存酸素酸素とプランクトンの発生と関係について検討した。更に、2007年毎月採取した湾奥部の海水についても同様の検討を行った。

## 2. 実験

### (1) 試料および採取地点

本研究では貧酸素水域の発生が見られた有明海の塩田川沖水道に沿った7地点(A01~B4)で、船上から表層から1m, 5m, 10m, 15m, 底層から1mと深度を変えてサンプリングを行った(図1)。具体的な採水地点と深度は以下の通りである。A01, 表層から1m, 底層から1m; A03, 表層から1m, 4m底層から1m; A10, 表層から1m, 5m, 底層から1m; A13, 表層から1m, 5m, 10m, 底層から1m; B02, 表層から1m, 5m, 10m, 底層から1m; B12, 表層から1m, 5m, 10m, 15m, 底層から1m; B14, 表層から1m, 5m, 10m, 15m, 底層から1m。

採水は6月27日, 7月3日, 7月13日, 7月20日, 7月23日, 7月26日, 7月30日, 8月5日, 8月8日, 8月25日の計10日間行い、満潮を挟んで3時間以内に完了するようにした。更に、2007年の8月から毎月大潮の満潮時に海岸近くの採水地点A01-A03で採水し、全鉄及びイオン性鉄の分析を行った。

### (2) 実験操作

採水した試料の一部は現場で0.45 μmメンブレンフィルターでろ過した。もう一つはろ過しない試料とした。いずれも、直ちに実験室で3mol/dm<sup>3</sup>塩酸1mlを添加した。その各々のサンプルを偏光ゼーマン原子吸光度計Hitachi High-Technologies社 Z-2000を用いてグラファイトファーネス法で測定を行った。測定容器は、鉄の混入を防ぐためにフッ素容器を用いた。採水試料容器は1昼夜1 mol/dm<sup>3</sup>の硝酸容器浸した。蒸留水は精密再蒸留水を用いた。海水の塩化物はグラファイトファイトファーネス法で超微量の鉄(ppbレベル)の定量に妨害をもたらしたので、次のようにして

その妨害を除いた。試料に超精密濃硝酸溶液を加え海水中の塩化物イオンをHClとして余熱過程(700℃)で揮発させた。更に全試料について硝酸銀滴定により試料中の塩化物イオンの濃度を定量し、塩化物イオン濃度ごとに検量線を作成し、試料中の鉄の濃度を求めた。用いた試薬は、有害金属分析用塩酸(和光純薬工業製)と超微量分析用硝酸(和光純薬工業製)である。

## 3. 結果と考察

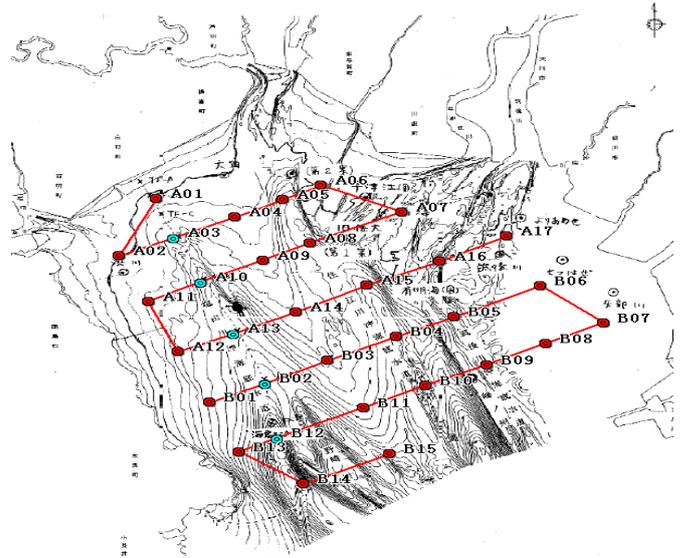


図1. 採水地点

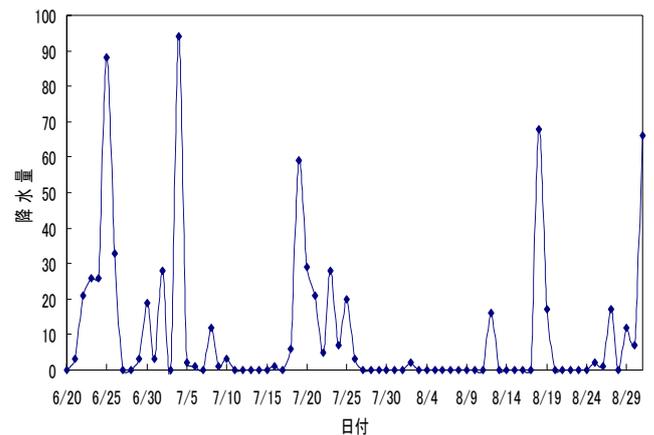


図2. 調査期間中の降雨量

### (1) 降水量と鉄の濃度

海水中の鉄の濃度は河川からの流入、特に雨による影響が大きいため、調査期間中の測定地域(白石)の降水量を図2に示す。2006年6月末から7月初めにかけて

まとまった降水量があり、また、7月半ば過ぎにもまとまった雨となった。梅雨明けが7月末で例年に比べて遅かった。

8月18日には降雨量は少ないが台風10号が通過している。

全鉄の濃度を深度別にまとめたものを表1、2に示す。全鉄濃度は700 ppbから30pbの範囲で変化した。表層1mの全鉄の濃度は6月27日と7月13日、7月20日及び7月30以降に高い値を示した。底層から1mでは6月27日、7月13日、7月20日、7月30日に高い値を示した。海水中の鉄の濃度は降雨による河川からと底泥か

らの巻き上げに依存する。表層の鉄の濃度が降雨日以外の晴天時に（7月13、30日）全鉄の濃度が高いのは興味深い。底層では底泥の攪乱が起こるので一般に高い値を示している。しかし、底層でも晴天の7月30日に全鉄濃度が高かった。全鉄濃度は深度によってそれほど大きく変化しないが、底泥との攪乱が少ないと思われる降雨後晴天が続いた8月初のデータを図5に示す。表面と底層は高く、中央で低くなった。しかし、海岸から遠い地点（B14、20km）では、表層から底層にかけて鉄の濃度は増大した（図3、4）。図3、4から次のような二つの興味ある結果が得られた。

表1. 表層1mにおける溶存態鉄の濃度(PPb)

	A01	A03	A10	A13	B02	B12	B14
2006.06.27	354	800	448	329	204	150	179
2006.07.03	275	240	212	280	143	152	144
2006.07.13	727	312	81	120	76	333	372
2006.07.20	638	372	561	147	402	466	319
2006.07.23	222	221	152	325	1716	170	166
2006.07.26	135	473	419	371	434	342	321
2006.07.30	658	470	452	476	188	365	349
2006.08.05	365	203	192	236	50	33	27
2006.08.08	363	258	169	58	76	35	63
2006.08.25	303	247	174	113	75	296	316

表2. 底層から1mにおける全鉄の濃度(PPb)

	A01	A03	A10	A13	B02	B12	B14
2006.06.27	380	725	460	842	837	848	
2006.07.03	286	786	835	398	837	705	365
2006.07.13	73	665	653	782	748	454	424
2006.07.20	434	241	307	550	579	240	328
2006.07.23	376	217	214	374	338	429	221
2006.07.26	70	452	496	509	695	781	845
2006.07.30	646	650	464	782	815	870	300
2006.08.05	278	249	235	234	245	201	302
2006.08.08	322	231	122	221	170	316	277
2006.08.25	308	243	279	374	292	323	319

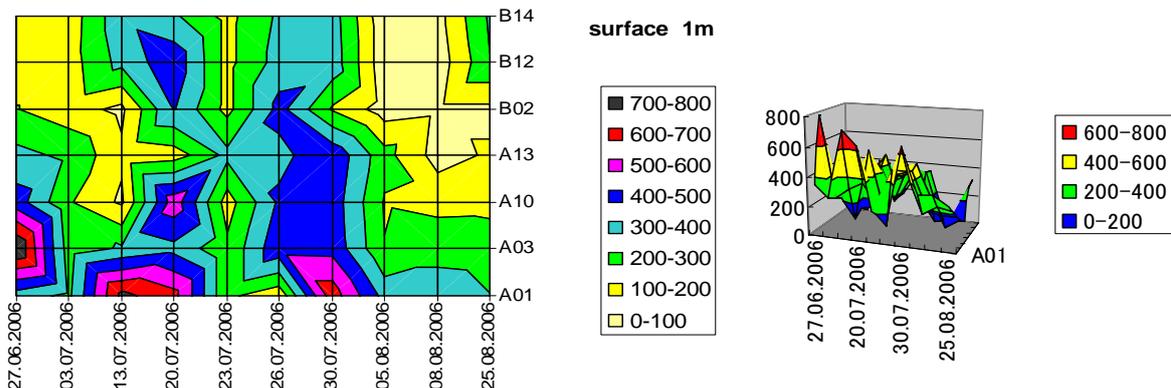


図3. 表層1mにおける全鉄濃度分布

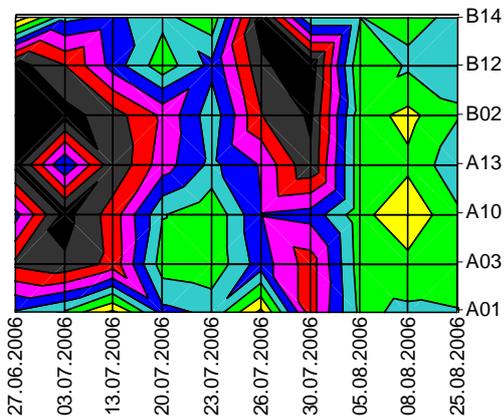


図3. 底層1 mにおける全鉄の濃度(PPb)

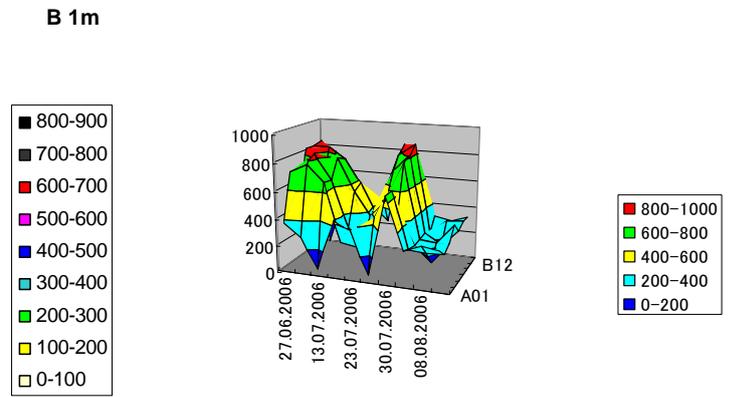


図4. 底層から1 mにおける全鉄濃度分布

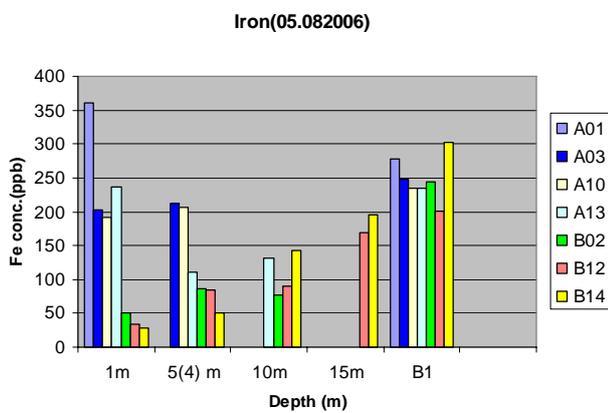


図5. 深さごとの全鉄の濃度変化

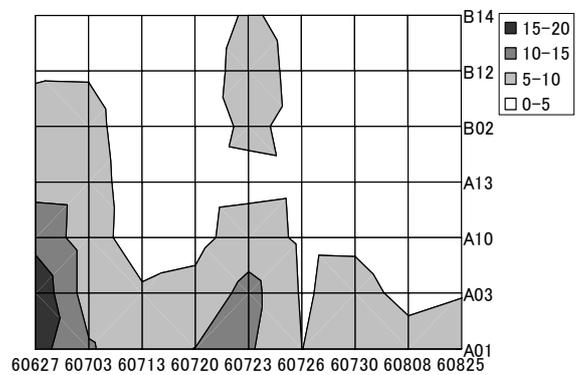


図6. 濁度の分布

①6月27日と7月20日の雨の日の直後では、沿岸近くの浅いところと沖合いの深いところに高濃度の全鉄が観測された。これは、雨により河川から供給された鉄が沿岸から沖合いに向けて、表層から徐々に鉄が沈降していくことを示唆している。②一方、降雨後7月25日から8月10日までの2週間の間の晴天で高温の時、特に7月30日ごろには沿岸の浅いところと、沖合いの深いところで高い鉄の濃度が観測された。このよう現象はイオン性鉄には観測されなかった。<sup>9</sup> 別の要因を考えなければならない。

### (2) 濁度と鉄の濃度

有明海の主要な鉄の供給源は河川からの流入であると考えられる。図6には有明海の測定期間中の濁度を示す。図3を図2および6と比較すると、7月30日以外はその類似性が明確である。これらの図の比較より、有明海の鉄の濃度は河川から降雨による流入量に強く依存しているが、7月30日は濁度も少ない。

### (3) 溶存酸素と鉄の濃度

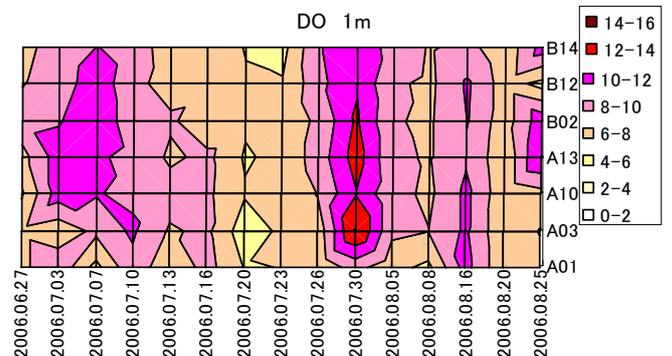


図7(a). 表層1 mにおける溶存酸素濃

### (3) 溶存酸素と鉄の濃度

図7には降雨による溶存酸素濃度分布を示す。6月27日と7月20日の雨に河川からの酸素供給よりも、晴天時期の7月30日に表層では沿岸地域を初めとして沖合いに向かって酸素濃度が高くなっている。一方底層(図7b)では7月30日以降は広い範囲で貧酸素が起きている。

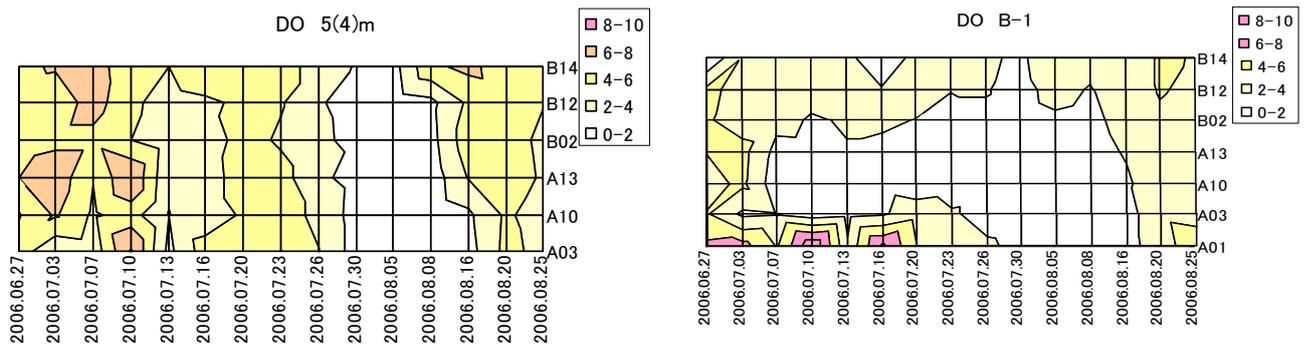


図7 (b) 表層から5(4)および底層から1mの地点における溶存酸素分布

図3に示すように、7月30日近くの沿岸部の表層における鉄の高い濃度は酸素濃度と関係つけられる(図7a)。夏の雨の後晴天が続くと、赤潮が発生しやすいといわれている。しかし、この時期には赤潮の発生は見られなかった。高酸素濃度の発生は植物プランクトンの発生による光合成が考えられる。従って、2006年の夏における植物プランクトンの発生量から考察した。図8には植物プランクトン *Skeketonema costatum* の発生量を示す。7月30日から8月5日にかけて、沿岸部の表層と底層部にプランクの発生が観測された。夏の降雨後の晴天時における高い溶存酸素濃度は、プランクトンによる光合成の結果であると考えた。従って、この時期の高い鉄はプランクトンに結合した、あるいは摂取されたものと考えられる。鉄はプランクトンの発生を促進するといわれているが、今回はじめて、晴天時に表層における高い鉄濃度をプランクトンの発生量と酸素濃

度と関係付けることができた。一方底層でもプランク

トンの発生が見られた。底層では酸素濃度が低いので、表層で発生したプランクトンが死亡し沈降浮遊しているものと考えた。しかし、鉄の濃度の濃度は沖合いの底層でも高い値を示しているの、これは次に述べる貧酸素水塊と関係が深い。

#### (4) 貧酸素水塊と鉄の濃度

測定期間中には大規模な貧酸素水塊が発生した<sup>10)</sup>。降雨量が多いと表層と底層において密度差により海水において躍層が生じ、底層の酸素濃度が低くなる。更には、小潮時においても沖合いからの高塩分水の流入は底層の酸素濃度を減少させる<sup>8)</sup>。溶存酸素濃度が減少すると還元状態になり、鉄が底泥より溶出すると考え

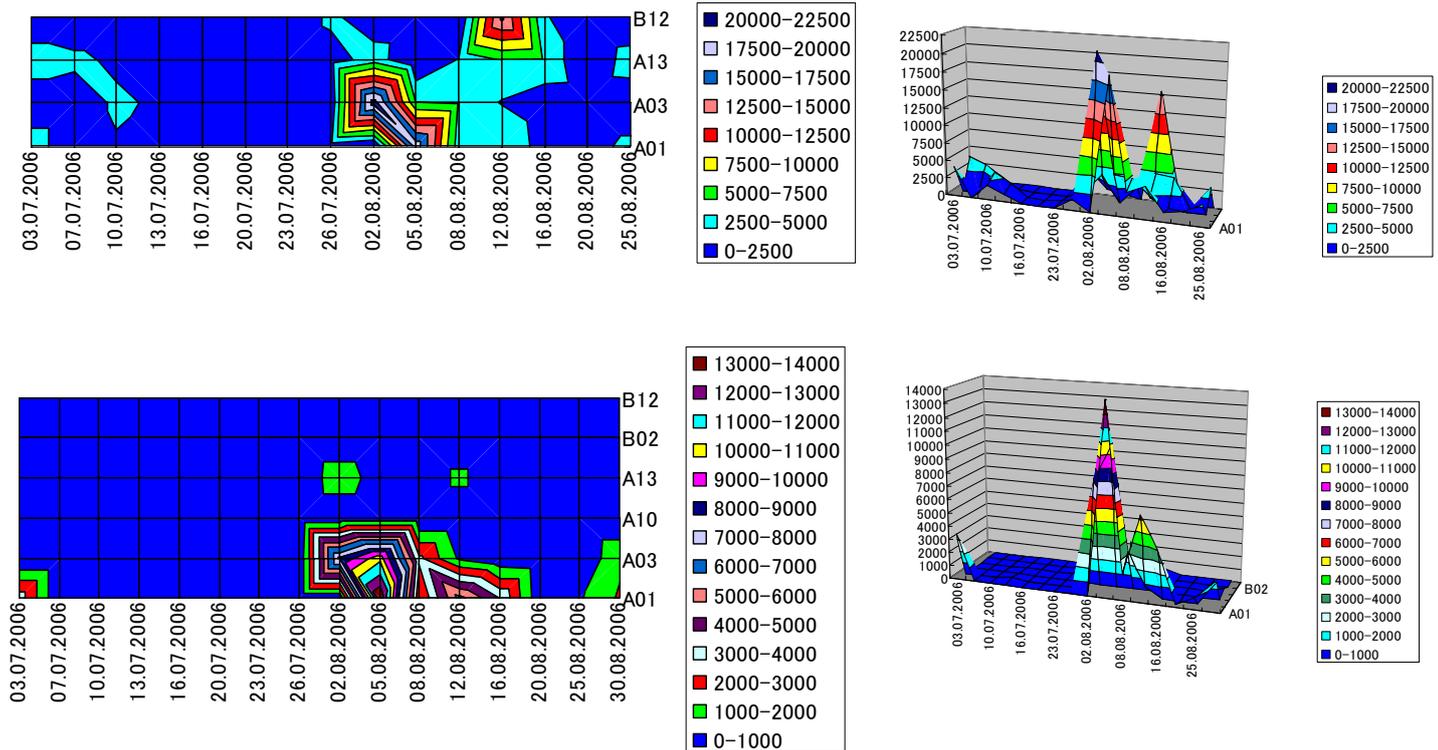


図8. 表層および底層におけるプランクトン (*Skeketonema costatum*)

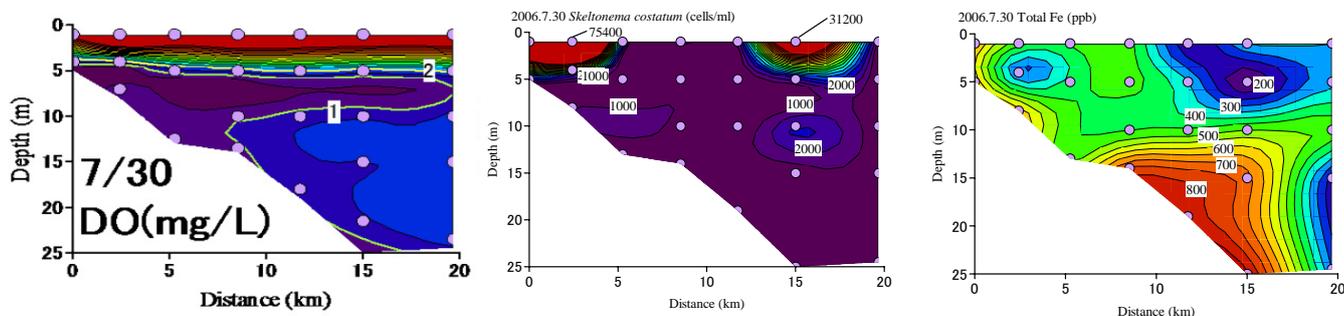


図9. 7月30日溶存酸素（左）、プランクトン（中央）、鉄（右）の空間分布

られる。溶存酸素濃度の低下による貧酸素水塊と溶存鉄濃度の分布を比較するために貧酸素状態がもっとも深刻化した7月30日のデータの空間分布を図9に示す。先に述べたように、降水後海水表面の酸素濃度は増大する。夏季の大量の降雨は海水の階層化をもたらし、底層への酸素供給が減少している。酸素濃度の減少は、海底の還元状態を一層進める。その結果、還元環境では底泥からの鉄の溶出が促進される。全鉄の濃度は、7月30日に沖合い20 km、深度20mまで高い濃度を示すようになった(図4)。

#### 4. まとめ

本研究において、鉄濃度は700ppb～30ppbの範囲で存在した。降雨による出水で河川から海水へ鉄が供給される。表層では沿岸部で高い濃度を示した。深いところでは、沖合いまで高い濃度が見られた。出水により供給された鉄は、表層では沿岸部で高くなり、次第に沈降して沖合い深いところでまで高い濃度を示した。一方、出水によらない降雨後の夏の晴天時に、沿岸部の表層と、底泥1 mでは沖合いまで高い鉄の濃度が観測された。この時期には沿岸部の表層部で、酸素濃度とプランクトンの量が多く、プランクトン発生による溶存酸素と増大とプランクトンに摂取された鉄が増大した。また、沖合いの底では貧酸素水塊が発生し、鉄の溶出が起こったと考えられる。しかし、沖合いの底には死亡したプランクトンはそれほど多く観測されなかった。

以上の結果から、今回初めて、降雨後の晴天時に、沿岸近くで、高濃度の鉄とプランクトンの発生と、溶存酸素の増大を観測した。また、沖合いの深いところで起こる貧酸素水塊で底泥からの鉄の溶出を確認することができた。昨年度の可溶性鉄の測定ではこのような明確な結果を得ることができなかった。海水中の鉄は、高分子やプランクトン、及び底泥成分(珪酸塩)と結合している。2006年夏季については、シャトネラの発生は観測されなかったが、スケトネマの発生を鉄が促進していることが明らかになった。また、沖合いの深いところの貧酸素水塊の形成は鉄の溶出を促進することを支持するデータを得ることができた。

謝辞：本研究は有明海総合研究プロジェクトからの研

究費で実施された。厚くお礼申し上げます。更に、共著者としてあげた以外の有明海総合研究プロジェクトの教員に多大な協力を頂いた。また研究室の学生諸君に試料の処理に協力してもらった。感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 佐々木克之：水底質変化—ノリ漁場栄養塩・調整池水質と諫早湾水質・有明海奥部貧酸素—。「有明海の生態系再生をめざして」, 日本海洋学会編, 恒星社厚生閣, 69-94, 2006.
- 2) 環境省：有明海・八代海総合調査評価中間取りまとめ, <http://www.env.go.jp/info/iken/h180328a/index.html>, 環境省, pp. 139, 2006.
- 3) 瀬口昌洋・郡山益美・石垣哲寛・加藤治：有明海湾奥部西岸域における貧酸素水塊の発生機構の解明とその防止法に関する研究, 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集, Vol. 1, pp. 7-14, 2005.
- 4) 瀬口昌洋・郡山益美・石垣哲寛・古賀あかね：有明海湾奥部における干潟域の脱窒と西岸域の貧酸素水塊の発生について, 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集, Vol. 2, pp. 47-54, 2006.
- 5) 木元克則・田中勝久・中山哲巖・興石祐一・渡辺康憲・西村耕・藤井明彦・山本憲一：連続広域観測で捉えた有明海の貧酸素水塊の動態, 2004年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, pp. 191, 2004.
- 6) 内藤佳奈子・藻類, Vol. 54, 177-180 (2006).
- 7) Knako Naito, Ichiro Imai and Hiroyuki Nakahara: Complexation of Iron by microbial siderophores and effects on the growth of marine microalgae causing red tides, *Phycological Research*, Vol.56, pp. 58-87 (2008).
- 8) 速水祐一・有明海奥部の貧酸素水塊—形成機構と長期変動—, 海洋, Vol. 39, pp.22-28, 2006.
- 9) 田端正明・大久保壮志・速水祐一・濱田孝治：2006年度夏季における有明海湾奥部海水中的の貧酸素水塊と鉄の濃度変化, 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集, Vol. 3, pp. 55-60 (2007).
- 10) 濱田孝治・速水祐一・山本浩一・吉野健児・大串浩一郎・平川隆一・山田裕樹：有明海奥部における貧酸素水塊の形成・解消過程の観測, 海岸工学論文集, 54 pp. 1121-1125, 2007.

# 環境モデル研究部門

Research Division of ENVIRONMENTAL MODELING



# 有明海奥部における物質輸送と 低次生態系の動態について —プロジェクト5年間の中間報告—

MASS TRANSPORT AND ECOSYSTEM DYNAMICS IN THE INNER AREA OF  
THE ARIAKE SEA –INTERIM REPORT OF THE 5 YEARS–

速水祐一<sup>1</sup>・山口創一<sup>2</sup>・真鍋智昭<sup>3</sup>・山本浩一<sup>4</sup>・濱田孝治<sup>4</sup>・槻木(加)玲美<sup>5\*</sup>・吉野健児<sup>6</sup>・大串浩一郎<sup>7</sup>・平川隆一<sup>8</sup>・万田敦昌<sup>9</sup>・経塚雄策<sup>10</sup>  
Yuichi HAYAMI, Soichi YAMAGUCHI, Tomoaki MANABE, Koichi YAMAMOTO, Takaharu HAMADA,  
Narumi TSUGEKI KUWAE, Kenji YOSHINO, Koichiro OHGUSHI, Ryuichi HIRAKAWA,  
Atsuyoshi MANDA and Yusaku KYOZUKA

<sup>1</sup>農博 佐賀大学准教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>2</sup>理博 佐賀大学研究機関研究員 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>3</sup>九州大学 大学院総合理工学府 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1)

<sup>4</sup>工博 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>5</sup>理博 佐賀大学研究機関研究員 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

\*現在 東北大学博士研究員 大学院生命科学研究所 (〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉)

<sup>6</sup>水博 佐賀大学研究機関研究員 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>7</sup>工博 佐賀大学准教授 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>8</sup>工博 佐賀大学助教 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>9</sup>理博 長崎大学准教授 大学院生産科学研究科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

<sup>10</sup>工博 九州大学教授 総合理工学研究院 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1)

As an interim report of the 5 years project study, recent works are organized and a hypothesis about the generation mechanism of the environmental crisis in the inner area of the Ariake Sea (increase of red tide, increase of transparency, sediment property change, decrease of bivalve catch, hypoxic formation of hypoxic water mass, instability of laver culture and decrease of fish catch) was constructed. Based on the hypothesis, the themes of the future studies with numerical simulation models are shown. The hypoxia in the inner area of the Ariake Sea is specially focused on in this report. There are 2 types of hypoxia occurs in this area: 1) freshet type and 2) bottom intrusion type. Only the freshet type hypoxia was observed by the Fisheries Monitoring Program (Senkai-teisen). According to this data set, there is no sign that the hypoxia increased inter-annually in 1990s. The bottom intrusion type hypoxia is generated by the intrusion of cold saline water from offshore. The origin of the intruded water is the cold dome formed over the bottom off Shimabara City to Takesaki. The bottom front formed between the cold dome and the inner Ariake Sea bottom water intrudes toward the bay head between spring and neap tide to strengthen the stratification. It stimulates the formation of the bottom intrusion type hypoxia. Therefore the DO of the cold dome would affect the hypoxia level in the inner area of the Ariake Sea. The sediment transport from the Isahaya Bay to the inner area of the Ariake Sea is also documented. It is possible that the red tide increased in the Isahaya Bay after the construction of the dike induced the increase of organic matter transport to the inner area of the Ariake Sea.

**Key Words :** inner area of the Ariake Sea, environmental crisis, hypoxia, freshet, bottom intrusion cold dome, sediment transport, Isahaya Bay

## 1. はじめに

本プロジェクトは、5年の期間の間に有明海異変の原因を解明し、対策を立案することを目的としている。ただし、我々の研究グループでは、限られた人員、時間で研究を進めるため、対象を有明海奥部における環境問題に絞って研究を進めてきた。さらに、効率よく研究を進めるため、まずデータ解析と実験にもとづいて環境問題が生じた機構について仮説を構築し、数値モデルによってその仮説を検証するという研究戦略を採用している<sup>1)</sup>。本稿では、5年間のプロジェクト研究の中間報告として、これまでの研究成果を整理し、有明海奥部において環境異変が生じた機構に関する仮説を示し、今後の数値モデル研究につなげたい。

## 2. 有明海異変の各問題について

有明海奥部における環境異変に含まれる問題を表-1に示す。昨年度報告書<sup>1)</sup>ではCOD上昇を問題の1つに取り上げたが、これは環境省報告書<sup>2)</sup>で主要な問題として取り上げられないなど、重要性が低いと思われたために省いた。また、アゲマキについては環境要因以外に病気の影響が疑われているため、本稿では解析の対象外とする。以下では、表に挙げた7つの問題について、これまでの研究を元にその原因について整理する。

表-1 有明海奥部における環境異変に含まれる問題

- 1) 赤潮の増加
- 2) 透明度上昇
- 3) 底質の細粒化
- 4) 貝類（サルボウ・タイラギ・アゲマキ）漁獲量の減少
- 5) 貧酸素水塊の発生
- 6) ノリの生産不安定
- 7) 底魚を中心にした魚類漁獲量減少

### (1) ノリの生産不安定

酸処理導入以前までは、有明海におけるノリ養殖はミニノリ病、アカグサレ病、壺状菌病などに影響され、しばしば栄養塩レベルが高くても生産枚数は低く押さえられた。現在では酸処理によってこれらの病害はほぼ克服され、ノリの生産枚数は栄養塩レベルを制限する植物プランクトンの発生時期に左右されている<sup>3)</sup>。したがって、ノリ生産が不安定化する要因は、秋・冬季の植物プランクトン、特に浮遊珪藻のブルーミングにある。

### (2) 赤潮の増加

有明海佐賀県海域では、1990年代から2000年代にかけて年間赤潮発生日数が増加した。それは主に秋・冬季の珪藻赤潮の増加に起因する。プランクトン沈殿量の経年

変動について重回帰分析をおこなった結果から、秋冬季の赤潮増加に対して最も影響が大きいのは二枚貝減少による捕食量減少であり、その次に透明度上昇による光環境の改善であると考えられた<sup>1)</sup>。二枚貝の影響については、漁獲データを用いて検討しており、その大半がサルボウである。透明度上昇が赤潮増加の原因である可能性については、清本ら<sup>4)</sup>によっても指摘されている。一方、堤ら<sup>5)</sup>は、諫早湾塩受け堤防締めきりによって潮流が減少し、成層が形成されやすくなったことが赤潮増加の原因であるとしている。ただし、有明海奥部において経年的に成層が強まったという事実はこれまで確認されていない。

### (3) 透明度上昇

有明海奥部における透明度は1970年代から90年代後半にかけて上昇し、その後はやや低下した。特に1990年代に透明度が高い時期が続いたことが特徴である<sup>1)</sup>。透明度上昇の原因としては、表層への懸濁物供給量の減少と、透明度が高い外海水との海水交換上昇という2つの原因が考えられる。さらに前者（懸濁物供給量の減少）の要因としては、潮流および潮間帯面積減少による再懸濁低下、風波による再懸濁低下、河川からの供給減少の3つが考えられる。このうち、河川からの供給については、大堰直下における筑後川からの懸濁物質の負荷量変動と筑後川河口域の大潮期の透明度変動には明瞭な関係がないことが示されている<sup>6)</sup>。一方で、感潮河道での土砂動態と関係している可能性が指摘されている<sup>7)</sup>。これまでデータ解析による検討では、1990年代に透明度が高くなった要因について解明することはできなかった。最大の要因は、潮流の変化を評価できていないためである。そこで、現在構築中の懸濁物輸送モデルを用い、流動場の変化も考慮に入れ、上記4つのうち何が主要な原因であったのか、研究を進めたいと考えている。

### (4) 貝類漁獲量の減少

#### 【サルボウ】

有明海佐賀県海域におけるサルボウの漁獲量は1990年代後半に急激に減少し、最盛期の1/3以下の状況が続いている。このような減少の要因として、環境省委員会はシャットネラ赤潮、貧酸素化、ナルトビエイの食害を挙げている<sup>2)</sup>。ただし、シャットネラ赤潮がサルボウの斃死を引き起こしたことはこれまで確認されていない。一方で、貧酸素化にともなってサルボウの大量斃死が生じていたことは、我々の調査でも確認している。Yoshino et al<sup>8)</sup>は、1989年と2006年の調査の結果から、有明海奥部におけるベントスの減少については、貧酸素化と底質の細粒化のどちらかあるいは両方が要因になっていると考えられ、優占種に大きな変化がないのに対して個体数が大きく減少したことから、貧酸素の影響の方が大きい可能性があることを示した。特にサルボウについては、

元々から海底が泥質の海域に生息していることから、貧酸素が主な減少要因と考えられる。

### 【タイラギ】

有明海佐賀県海域におけるタイラギの漁場は1990年代半ばまでは東部海域だけではなく、湾奥西部海域にも広がっていた。しかし、1990年代後半以降、湾奥西部海域の漁場は壊滅し、現在に至るも回復していない<sup>9)</sup>。この海域では同時期に底質の細粒化が生じており、その結果、着底直後の稚貝が生残できなくなり、漁場消失の要因になったものと考えられている<sup>9)</sup>。また、漁場改善による資源回復に対しては、ナルトビエイによる食害が障害となっている<sup>10)</sup>。

### (5) 貧酸素水塊

有明海奥部では、現在毎年のように夏季になると貧酸素水塊が形成されている。環境省報告書<sup>2)</sup>では、1972年から2002年の期間、有明海佐賀県海域西部奥部では底層DOが低下傾向にあることが示されている。速水<sup>11)</sup>は、年々の出水による影響を考慮した解析にもとづいて、有明海湾奥の底層DOは1970年代から80年代にかけて貧酸素化し易くなり、その後1990年代後半にかけては横ばいしないしやや改善となっていたという結果を示した。しかし、1990年代後半以降については、貧酸素化が進んだか否かまだ明確に示されていない。

経年的な貧酸素化の進行には3つの要因が考えられる。1) 底層への酸素供給量減少、2) 酸素消費速度増加、3) 初期DO濃度の減少である。底層への酸素供給量減少については、水平的な酸素輸送もあるが、成層強化による鉛直輸送量の減少が主要な問題である。1990年から2000年までの浅海定線調査データの解析からは、夏季の有明海奥部では成層強度はむしろ弱まっており、それは河川流量の減少と風の強まりによることが報告されている<sup>12)</sup>。したがって、少なくとも大潮期については、鉛直的な酸素輸送が近年減少傾向にある可能性は低い。酸素消費速度については、貧酸素水塊の発生時には、しばしば表層で赤潮が発生しており、大量発生した植物プランクトン起源の有機物が底層に輸送・分解されることが貧酸素水塊形成の原因の1つになっていると推察されている<sup>13)</sup>。しかし、有明海奥部では夏季の赤潮発生日数に明確な増加はみられない。一方、湾奥海域の外から供給される有機物については、近年増加した可能性がある。

諫早湾から有明海奥部にかけての懸濁物輸送について調査するため、2006年8月2日に図-1に示した海域で1潮汐(13時間)の間、繰り返し往復観測をおこなった<sup>14)</sup>。観測には2隻の船を用い、測点A-F、測点G-Lの2測線に分けて観測した。各測点では、多項目水質計のキャスト、ADCPによる1分間の流速測定をおこなった。

測点G-Jの断面における濁度分布(図-2右)を見ると、下げ潮時に諫早湾底層で濁度が上昇していることが分かる。塩田川沖海底谷に沿った測点A-Lの断面における濁

度分布(図-2左)を見ると、下げ潮～干潮時にJ, Kの中層に高濁度水が見られる(白矢印)。これは、下げ潮時に諫早湾底層で懸濁物が巻き上げられ、諫早湾外に流出したものである。諫早湾内は水深10m以下で、湾口で急に深くなっているため、海底谷内ではこのように中層の高濁度水塊となる。A-Lの濁度断面からは、続く上げ潮で、中層高濁度水が海底谷に沿って有明海湾奥へと輸送され、満潮の憩流時になると海底付近まで沈降することが分かる。海底谷内では、エスチャリー循環による湾奥向きの残差流が存在する。そのため、海底谷内では底質は潮汐周期で巻き上げられながら、平均的には湾奥向きに輸送される<sup>15)</sup>。

諫早湾では、1997年以前は年間赤潮日数は多い年でも20日程度であったが、1998年以降は60日を下回る年はない。これは、締切後に湾内で植物プランクトン生産量が激増したことを示す。しかも、有明海奥部と異なり、諫早湾の赤潮増加は夏季を中心に起きている。岡村ら<sup>16)</sup>は、諫早湾海底には大量の植物プランクトン由来の懸濁物が堆積していることを示している。今回の観測結果は、こうした懸濁物が巻き上げられ、湾外に流出すると、潮流、エスチャリー循環、粒子の沈降の相互作用によって、海底谷に沿って有明海湾奥部へと輸送されることを示す。このような輸送過程は過去から存在していたと思われるが、締切にともなって諫早湾の植物プランクトン生産量が激増した結果、湾奥への有機懸濁物輸送量も急に増加したと考えられる。こうしたプロセスは、諫早湾外の潮流変化を考えなくても、有明海湾奥部における底層や表層底泥中の有機物量増加、さらには底層での酸素消費速度増大を説明し得る。

貧酸素の問題については次章でさらに詳しく考察する。

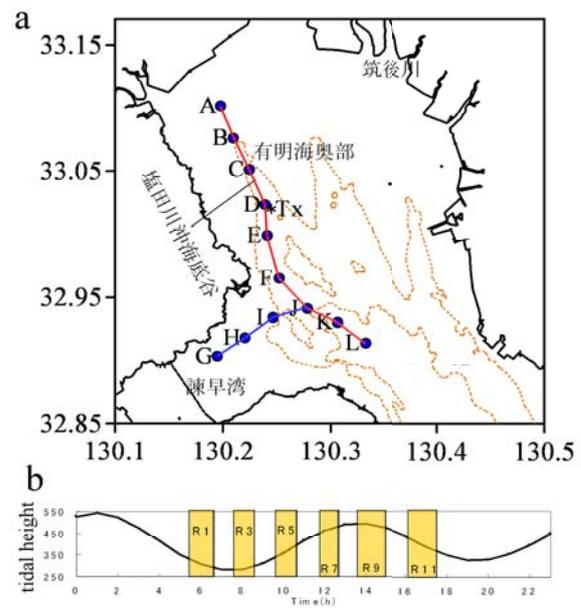


図-1 懸濁物輸送調査の観測点配置および観測時間。

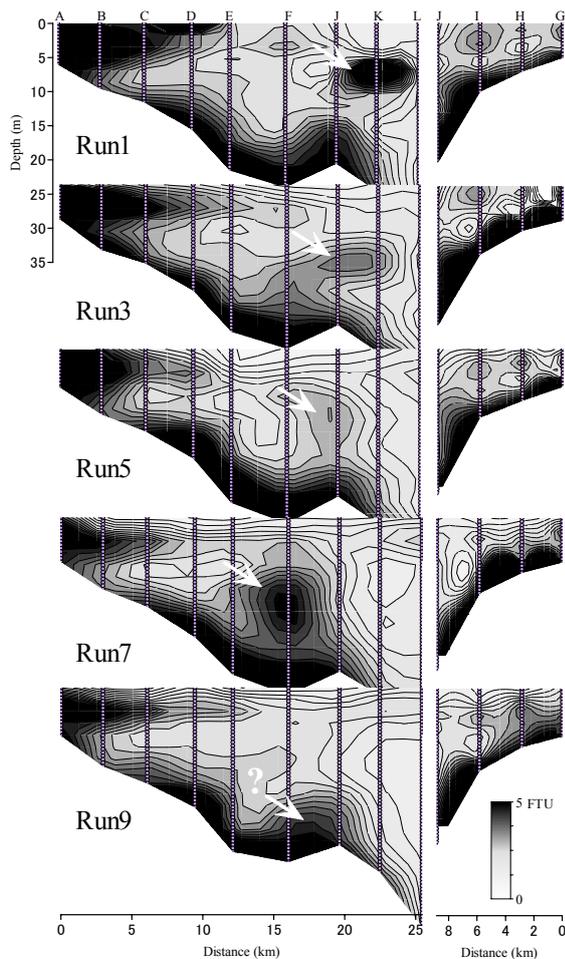


図-2 測線G-J (右), 測点A-L (左) に沿った濁度分布の変化. 矢印は諫早湾起源とみられる高濁度水塊.

### (6) 底質の細粒化

有明海奥部では、1989年から現在までの間に湾奥南西部から塩田川海底水道で海底が粘土質の領域が拡大したことがわかっている<sup>9,17)</sup>。こうした底質分布の変化は懸濁物の堆積フラックスの変化、すなわち堆積フラックスに占める細粒懸濁物の割合の増加を反映していると考えられる。1985年以降、筑後川ではダム建設などはおこなわれていないので、粗粒懸濁物のフラックスに大きな変化はないと考えられる。その場合、懸濁物堆積フラックス変化の原因は、a) 再懸濁によって移出する細粒懸濁物の減少、b) 細粒懸濁物の供給増加、の2つの要因が考えられる。前者については、その機構として潮流の減少による再懸濁量減少が考えられる。ただし、細粒化が進行した湾奥南西部太良沖では、諫早湾潮受け堤建設にともなった潮流流速変化の予測<sup>18,19)</sup>では、ほとんど流速変化がないか、あるいは増加となっており、潮受け堤建設による潮流減少では説明しにくい。したがって、影響があったとすると外海潮汐の変化が主であると考えられる。後者については、筑後川から供給される細粒懸濁

物が近年増加したという報告はこれまでにない。田中ら<sup>12)</sup>、筑後大堰における懸濁物負荷量の経年変動に一定の増減傾向は見られないことを報告している。これは濁度計による観測結果にもとづいたものなので、細粒懸濁物に関する結果である。また、横山<sup>17)</sup>は、筑後川感潮河道の底質の大きな変化は1985年以前に生じ、1983年以降、河床変動はほとんど起きていないと述べている。一方、沖合海域からの細粒懸濁物供給量は増加した可能性がある。前節で述べたように、諫早湾内で巻き上げられ、湾外に流出した懸濁物は、底質細粒化が進んだ湾奥西部の塩田川海底水道に輸送される。潮受け堤の完成以降、諫早湾内における植物プランクトン量の増加にともなって、有明海奥部に輸送される有機懸濁物は増加したと考えられるが、植物プランクトンは水中に浮遊する粘土粒子と共沈するため<sup>20)</sup>、同時に湾奥に輸送される粘土粒子の量も増加したと考えられるのである。海底調査の結果からは、諫早湾から塩田川海底水道南部にかけて粘土層が広がっている様子が捉えられている<sup>17)</sup>。

底質細粒化の機構については、最終的には透明度上昇の問題と同様に懸濁物輸送モデルによって検討したいと考えている。ただし、それまでに粘土鉱物輸送に対する植物プランクトンの影響の定量的評価をする必要がある。

### (7) 底魚を中心にした魚類漁獲量減少

環境省報告書<sup>2)</sup>では、魚類資源減少に関与する原因は生息場（特に仔稚魚の生育場）の消失・縮小、生息環境（特に底層環境や仔稚魚の輸送経路）の悪化に分けられている。前者としては、仔稚魚の生育場である干潟・藻場や感潮域の消滅・減少が、後者については貧酸素水塊の発生とベントス減少（餌料環境）が挙げられている。魚類漁獲量の減少については、魚類研究者がいなかったため、残念ながら本プロジェクトでは研究テーマとして取り上げられていない。今後、他の研究機関によって解明が進むことを期待する。

## 3. 貧酸素化に関する考察

貧酸素水塊形成の問題については前章の(5)で触れたが、本章ではさらに詳しくその特徴について分析する。

### (1) 2つの貧酸素水塊形成機構

有明海奥部における貧酸素水塊の形成機構には、次の2つのタイプがある<sup>10)</sup>：a) 出水型、b) 底層貫入型。前者は、出水にともなって河川プルームが長期にわたって発達し、その結果、鉛直的な酸素輸送が制限されることによって生じる。後者は、小潮時に沖合から高塩分水が底層に密度流として貫入して成層を強化し、水塊の進入が止まると速やかに貧酸素化する。これら2つのタイプの貧酸素水塊は形成の機構が異なるため、経年変化につ

いて検討する場合でも分けて考えるべきである。

## (2) 浅海定線調査データの解析からわかること

山口・速水<sup>21)</sup>は、夏季(6~9月)の佐賀・福岡両県の浅海定線調査データについて、観測前の河川流量変動にもとづいてパターン分けして解析し、出水に対する有明海奥部の海洋構造、水質分布の変化を明らかにした。ここでは、各観測日の前9日間で3日ずつ3期間に区切り、各期間の筑後川の平均河川流量が $200\text{m}^3\text{sec}^{-1}$ 以上である場合を出水(H)、それ未満である場合を平水(L)とし、観測前9日間の河川流量変動が出水がずっと続いた場合(HHH)から、約1週間前に出水がありその後は平水が続いた場合(HLL)、ずっと平水が続いた場合(LL)などのように6パターンに分類した。パターン毎に平均した成層強度の分布を図-3に示す。成層強度は表層と底層の密度差を水深差で割った値で表した。LLLでは成層は弱い、LLHになると筑後川河口域と湾奥で成層が強まり、LHLでは筑後川河口域と湾奥西部の2カ所に成層強度の極大域ができる。HLLでは西部の成層強度極大域は見られなくなり、LLLと同様の分布となる。これは、出水が3日以内に収まると、表層の低塩分水塊が地球自転の影響を受けて岸に沿って反時計回りに移動し、1週間以内に湾奥部の外に抜けることを示す。一方、LHH、HHHの場合には、湾奥域全体に強成層域が広がっている。この結果は、夏季の有明海奥部では出水の影響を受けて、数日から1週間程度の時間スケールで大きな成層強度の変動が起きることを示している。

次に、成層強度と底層D0の関係について河川流量変動パターン別に検討した。対象とした測点は、貧酸素水塊が形成されることが多い湾奥西部の測点1、2および10である。図-4に6月および7月に得られたこれら3測点における底上1mのD0と成層強度の関係を示した。貧酸素水塊の指標を $\text{DO}=3.0\text{mg/L}$ <sup>22)</sup>とすると、この図から貧酸素化のほとんどが連続した出水時に観測されていることが分かる。これは、浅海定線調査によって捉えられる貧酸素水塊が出水型に限られることを示している。

前記の結果からは、夏季の有明海奥部の海洋環境は短期的な河川流量変動の影響を強く受けて変動していることがわかる。一方、浅海定線調査は毎月1回の観測しかおこなわれていないため、そのままでは調査月の代表値として使うことには問題があると考えられた。そこで、6つの河川流量変動パターンのうち、平均的な成層強度分布について違いがほとんどなく、観測された回数が比較的多かったLLLとHLLのパターンだけを取り上げ、成層強度と底上1mにおけるD0の経年変動を調べた。データ数が多かった8月と9月についてみると、底層D0は1970年代から80年代半ばまでは年々の変動が大きく、はっきりしたトレンドは認められなかった(図-5a)。1980年代以降は年々の変動は小さくなり、1990年代終わりにかけて上昇、その後は低下に転じた。こうした経年変化は8月

と9月のデータで共通していることから、短期的な河川流量変動ではなく、もっと長期的な環境変化によって生じたものと考えられる。成層強度については、8月、9月ともに明確なトレンドは認められなかった(図-5b)。これは、出水の影響を除いても、近年有明海奥部で成層が強まっているという傾向は認められないことを示す。8月の成層強度と底層D0の関係を調べると、1990年までは強い負の相関があり、平水時であっても成層が強いほど底層D0が低くなっていた(図-5c)。それに対し、1991年以降は負の相関は全く見られなくなった(図-5e)。8月に比べると相関が弱いものの、9月についても、1990年以前は負の相関が強かったが、1991年以降はほとんど相関がなくなった(図-5df)。図-5gに1972年から2004年まで、連続する9年間について、成層強度と底層D0の相関係数を求め、時系列図で示した。ただし、9年間にデータが4個以上ある場合のみを示した。8月については、1990年までは良い負の相関があったが、1991年以降、負の相関は見られなくなった。9月についても1980年代後半を境にそれまで続いていた比較的良好な負の相関がみられなくなった。この結果は、1980年代終わり頃までは、平水時であっても主に成層強度の変化がもたらす酸素鉛直輸送の変動が底層D0変動の主要因であったこと、それが1990年頃を境に成層強度以外の要因が底層D0の変動に対して強く働くようになった可能性が高いことを示している。こうした変化は1990年代に底層D0が高い年が続いたことと関係があると思われるが、これまでのところまだ原因は不明である。

平水時の大潮ではあるが、1990年代にはそれ以前に比べて底層D0が高い時期が続き、しかもその間特に成層が弱かったという事実は認められないため、酸素消費速度の増加や初期酸素濃度の低下などはこの時期には起きなかった可能性が高い。また、出水時を除いても、成層強度の経年変動に一定のトレンドが見られなかった。こうしたことから、少なくとも大潮時の出水型貧酸素については1990年代に悪化したことはないと考えられる。データが少ないものの、2000年以降については、平水時の底層D0が成層強度に関係なく低下する傾向が見られたことから、酸素消費速度の増加あるいは初期酸素濃度の低下による貧酸素化の進行が起きた可能性が否定できない。

## (3) 底層貫入の発生機構

前節で示したように、浅海定線調査データによって捉えられるのは出水型の貧酸素だけである。底層貫入型貧酸素については、2000年以前の小潮時のデータが無いため、長期にわたって過去に遡って経年変化を調べることはできない。大潮時の観測結果の経年変動パターンが、濃度の違いだけで小潮時と同じであれば問題はないが、それはこれまで確認されていない。そこで、底層貫入型貧酸素水塊の形成機構について明らかにすることで、経年的な変化を生じさせる原因について考察する。

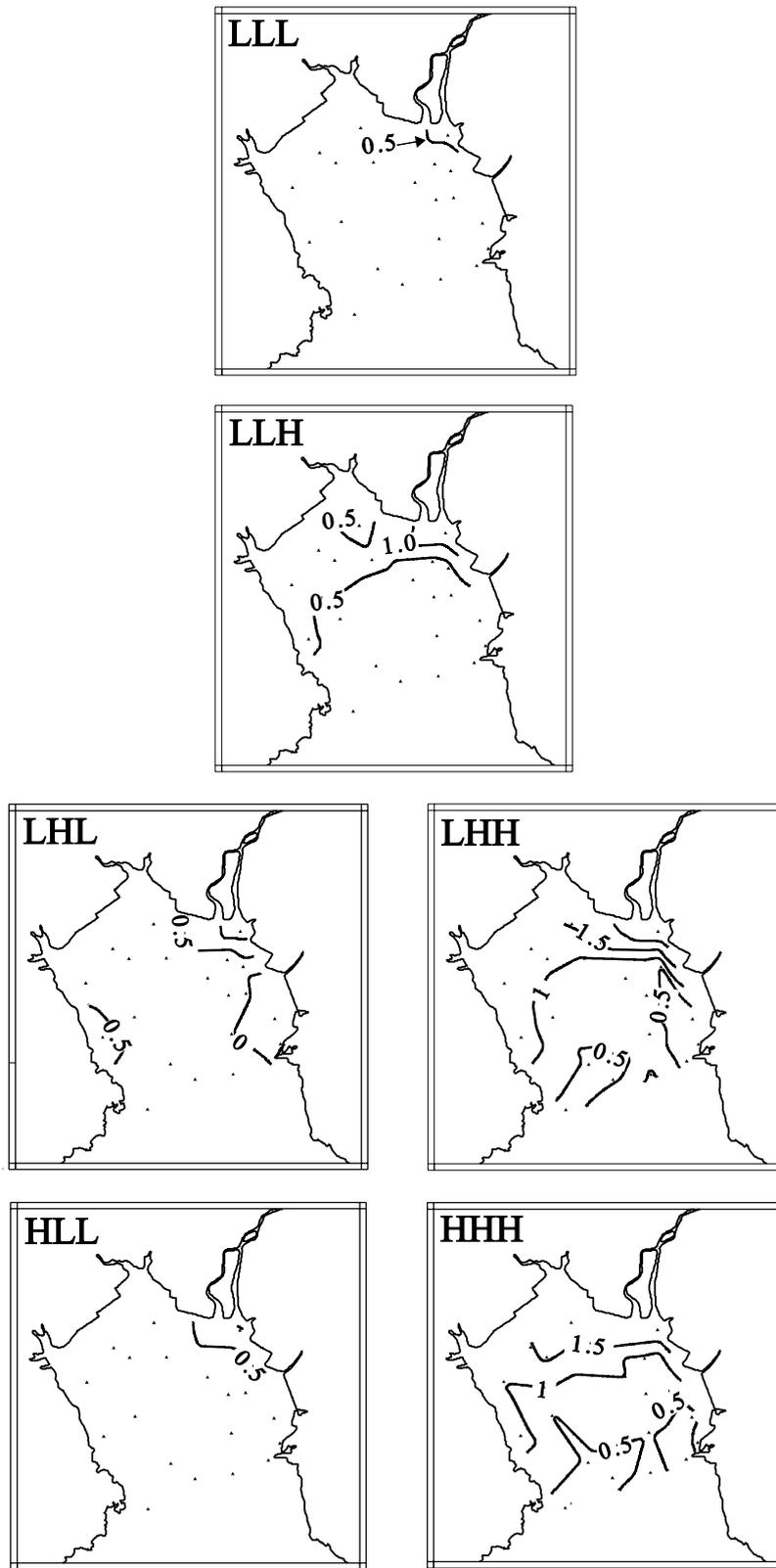


図-3 河川流量変動パターン毎に平均した有明海湾奥の成層強度分布.

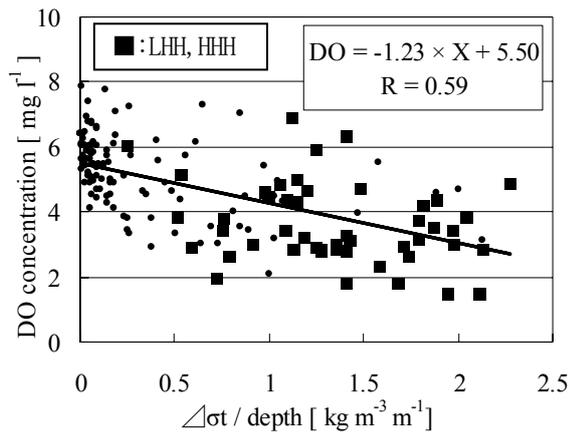


図4 河川流量変動パターン別を示した成層強度と底層DOの関係 (佐賀県浅海定線測点1, 2, 10) .

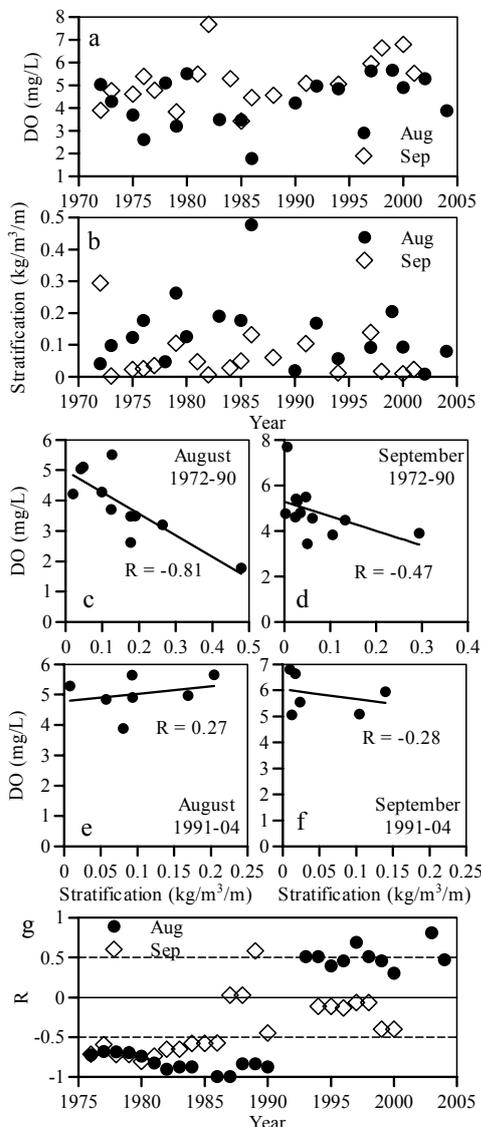


図5 河川流量変動パターンLLL・HLLの場合の底層DO(a), 成層強度(b), 成層強度と底層DOの関係(c~f),

連続した9年ずつの両者の相関係数の変化(g) (佐賀県浅海定線測点1, 2, 5, 10平均) .

有明海奥部の貧酸素水塊について、小潮時に発達、大潮時に回復という周期的変化があることは、木元ら<sup>23)</sup>によって報告されている。速水<sup>10)</sup>は、小潮時の貧酸素水塊発達が湾奥底層に沖合から高塩分水塊が貫入することによって引き起こされることを示した。しかし、これまでの調査研究は湾奥部に限られていたため、こうした底層貫入のメカニズムや貫入水の起源は不明であった。そこで、2007年夏季に、有明海湾口近くから湾奥白石沖にかけての測線に沿って1大潮小潮周期の間に繰り返し断面観測することによって、底層貫入のメカニズムおよび貫入水の起源を明らかにすることを試みた<sup>24)</sup>。

本研究では有明海全域を観測対象水域とし、図-6に示すように海底の谷筋に沿ってA~0の測点を設けた。この15点において、2007年8月16日から31日までの期間、大潮・中潮・小潮時に満潮時を挟むように合計5回のCTD観測を行った。また測点Tでは、流速および底層水温・塩分の係留観測を行った。

図-7に係留観測から得られた2007年7月から8月の測点Tにおける底層塩分変動を示す。図中の縦線はCTD観測を行った日時である。この図から、7月下旬以降、くりかえし小潮時に塩分上層、大潮時に塩分低下が生じていたことがわかる。図-8は8月下旬の1大潮小潮周期における測点A-0に沿った鉛直断面における密度分布である。

図-9には、5回の断面観測から得られた同じ測線上の底上1mにおける密度分布の時系列図を示す。図-8aから、8月16日の表層では、測点M付近で密度の水平勾配が大きく、フロントが形成されていたことがわかる。これは、湯島瀬戸から早崎瀬戸にかけての強混合域と湾奥の成層域の間に形成された潮汐フロントである。一方、底層では測点G付近で密度の水平勾配が極大となっており、底層フロントが形成されていた。湾奥ではさらに密度水平勾配が大きくなっているが、これは河川プリュームによるものと考えられる。また、島原市沖から竹崎沖の底層には冷水ドームが形成されていた。表層の潮汐フロントの位置は、大潮から小潮にかけて沖側へ移動し、次の大潮では再び湾奥側に移動した。底層では、大潮から小潮に向かう途中の8月20日には、底層フロントが湾奥に移動することによって、冷水ドームを形成していた低温・高塩分水が湾奥まで進入した。その結果、小潮時には湾のほぼ全域が強く成層した。次の大潮にかけて鉛直混合が進み、8/31には底層では高密度水が縮退すると共に測点I付近で再び密度勾配の極大が認められるようになり、湾全体の成層も弱まった。なお、8/16~31の期間中、強風は吹かず、降水量も最大で10mm/day程度であり、気象変動の影響は小さかった。

以上の結果から、有明海の特徴として、1) 表層フロントは湾口の混合域と成層域の境界に形成されるのに対し

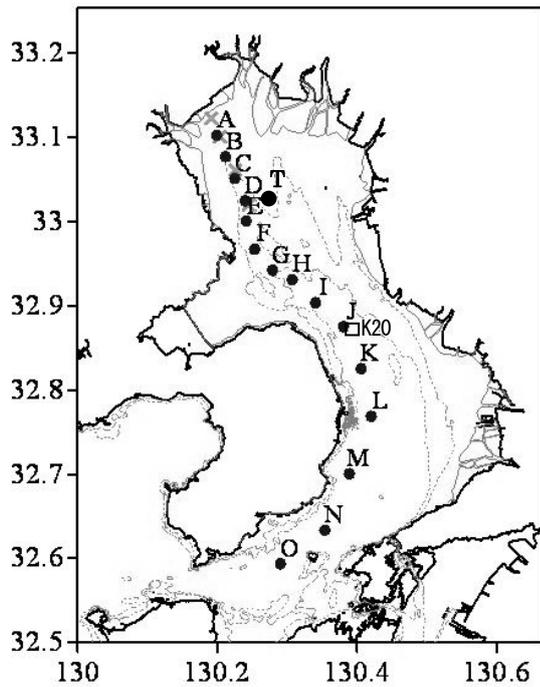


図-6 2007年夏季の有明海縦断観測の測点.

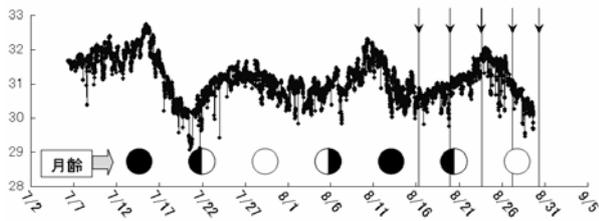


図-7 測点Tにおける底層塩分変動.

て底層フロントが湾奥部（諫早湾沖以北）に形成される、2)底層フロントは小潮になると、より湾奥部、測点A付近まで進入する、ことがわかった。こうしたフロント位置の変化は湾全体の成層強度変動と共に起きている。大潮小潮周期の貧酸素水塊の変動は伊勢湾などでも観測されている。伊勢湾の場合、それは湾口の混合域から湾内に貫入する水塊の貫入深度の変化によって引き起こされている<sup>25)</sup>。一方、本研究の結果は、有明海奥部の場合、大潮・小潮周期変動は混合水の貫入深度の変化ではなく、底層フロントの進入とそれともなった成層強化、その後の鉛直混合というプロセスによって生じていることを示している。

底層フロントが進入すると、湾奥海域の成層は突然強化される。その結果、底層への酸素供給が減少し、貧酸素水塊の形成が始まる。Linden and Simpson<sup>26)</sup>は、このような底層フロントの進入が潮汐混合によってコントロールされており、混合が弱まると前面にフロントを持った密度流の進入が不連続的に生じることを示している。したがって、有明海奥部において、経年的に潮流が

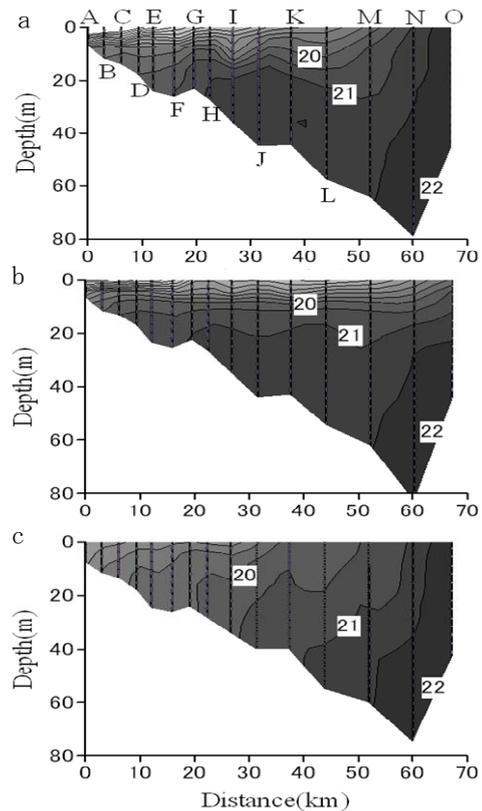


図-8 2007年8月16日から31日にかけての有明海縦断線に沿った密度 ( $\sigma_t$ ) 分布の変化.

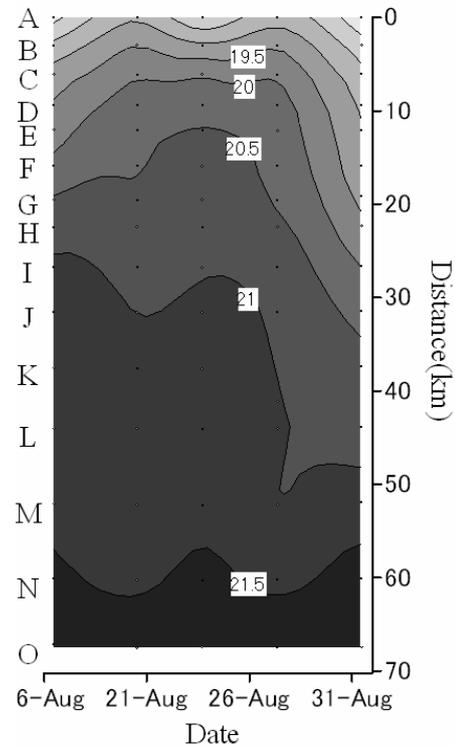


図-9 2007年8月16~31日における有明海縦断線に沿った底層密度 ( $\sigma_t$ ) 分布の変動.

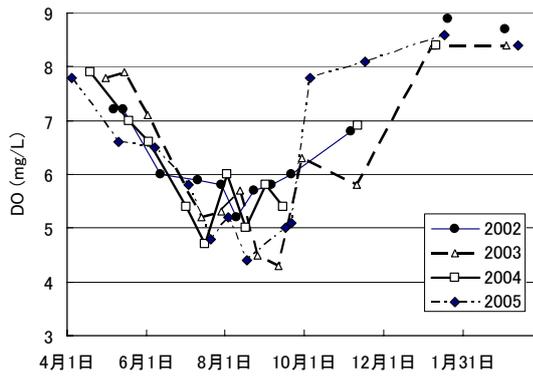


図-10 熊本県測点K-20における底層DOの変動。

弱まったとすると、大潮後に底層貫入が発生する時期が早まり、小潮を中心にした強い成層が続く期間が長くなった可能性がある。その場合、湾奥全体ではなく、竹崎沖付近における潮流の変化が特に重要である。このようなメカニズムを考えると、大潮時の成層強度には大きな変化がなくとも、小潮を中心とした時期に限って経年的な成層強度の変化が生じ、その結果貧酸素水塊の形成期間や酸素レベルが変化し得る可能性があると考えられる。この問題については、今後数値シミュレーションによって検討する必要がある。

底層貫入型貧酸素の経年変動については、もう1つ、これまでに挙げていない変動要因として、初期値の問題が挙げられる。先に述べたように、夏季の有明海では、島原市沖から竹崎沖にかけての底層に冷水ドームが形成され、その海水が小潮前に湾奥底層に貫入する。したがって、冷水ドームを形成する海水のDOが、湾奥底層で貧酸素化する海水の初期値として、大きな影響を与えると考えられる。図-10は環境省・熊本県による公共用水域水質調査の測点K20における2002年から2005年までの底層DO観測結果である。図-6に測点位置を示したが、この測点の底層における測定結果は冷水ドームを代表した値となっていると考えられる。この図から、夏季の測点K-20の底層DOは、4.3~6.0mg/Lと経年的にかなりの変動があることがわかる。こうした沖合底層水のDOの変動は底層貫入発生後の湾奥底層における貧酸素化のし易さに大きく影響すると考えられる。

#### 4. 結論

以上のことから、近年の有明海奥部における環境異変の発生機構について図-11のような模式図を描くことができる。我々が構築した有明海湾奥西部における環境異変発生機構に関する仮説の概要は以下の通りである。貧酸素化がサルボウに代表される二枚貝の減少を引き起こし、二枚貝の減少と透明度上昇が赤潮の増加をもたらす

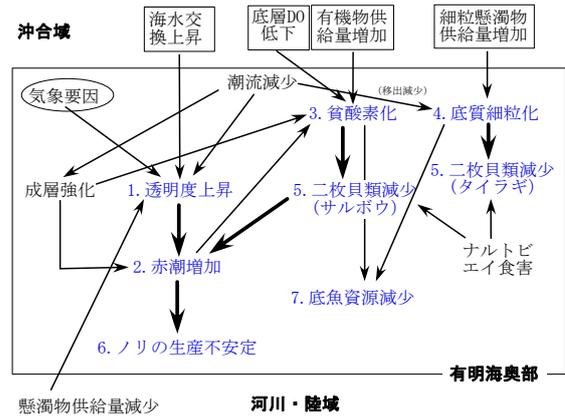


図-11 有明海奥部における近年の環境異変発生機構に関する模式図。太矢印は主要因と考えているもの。細矢印は、要因として挙げられているものの、重要性の評価ができていないもの。

た。そして、赤潮の増加がノリの生産不安定の原因となっている。また、同時期に底質の細粒化が生じ、それがタイラギの減少を引き起こした。重要なのは、貧酸素化の進行、および透明度上昇、底質細粒化の機構である。貧酸素化については出水型と底層貫入型に分けて考える。出水型に関しては、1990年代には貧酸素化が進んだ様子は確認できないが、2000年以降には酸素消費速度の増大あるいは初期値の低下に起因する貧酸素化の進行が生じた可能性がある。酸素消費速度に大きく関係する有機物供給量については、諫早湾における潮受け堤建設によって増加した可能性がある。底層貫入型については、2000年以前の小潮時のデータが無いため、経年変化は不明である。ただ、酸素消費速度増大は出水型と共通して影響するため、もし酸素消費速度が2000年以降に増大したのであれば、出水型と同様に貧酸素化が進行した可能性がある。さらに、底層貫入のメカニズムを考えると、潮流が経年的に弱まった場合、大潮時の成層強度に経年変動が認められなくても、小潮を中心にした成層が強い期間が長くなり、貧酸素化が進行することがあり得ると考えられる。また、底層貫入水の源である沖合水の底層DOの経年変化も底層貫入型貧酸素の経年変化に大きな影響を与えると考えられる。貧酸素化によって二枚貝類が減少することは、海域の植物プランクトン量を増加させ、海域内部からの有機物供給量を増加させる正のフィードバック効果をもつ。底質細粒化については、潮流の減少による移出量減少と、諫早湾を含めた沖合からの懸濁物供給量増加という2つの要因が考えられる。どちらが主要因であるかはこれから懸濁物輸送モデルによって検討したいと考えているが、これまでの潮流シミュレーションの結果<sup>18,19)</sup>に基づくと、諫早湾潮受け堤建設による潮流減少では説明しにくい。1990年代の透明度上昇についてはまだ何が主要因であるのか判断するに至っていないが、

2008年度中には懸濁物輸送モデルによって解明したいと考えている。

**謝辞：**これまでの研究をおこなうにあたって、貴重なデータを提供いただいた佐賀県有明水産振興センター、福岡県海洋科学技術センター有明海研究所、農林水産省農村振興局の各位に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 速水祐一 他：有明海奥部における物質輸送と低次生態系の動態について-2年目の成果-, 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集, 3, pp.71-80, 2007.
- 2) 環境省：有明海・八代海総合調査評価委員会報告書, 2006.
- 3) 川村嘉応：有明海奥部のノリ養殖, 海洋と生物, 28, pp.603-610, 2006.
- 4) 清本容子・田中勝久・山田一來・中田英昭：水産試験研究機関によるモニタリング-有明海における浅海定線調査-. 沿岸環境関連学会連絡協議会第15回ジョイントシンポジウム要旨集, pp.5-8, 2006.
- 5) 堤裕昭 他：陸域からの栄養塩負荷量の増加に起因しない有明海奥部における大規模赤潮の発生メカニズム, 海の研究, 15, pp.165-190, 2006.
- 6) 田中勝久 他：筑後川懸濁物質負荷の実態と有明海北部海域環境への影響, 海と空, 82, pp.81-86, 2007.
- 7) 横山勝英：有明海への土砂流入と底質環境, 海洋と生物, 173, pp.571-576, 2007.
- 8) Yoshino, K, et al: Benthic fauna of the inner part of Ariake Bay: long-term changes in several ecological parameters, *Plankton Benthos Res.*, 2, pp.198-212, 2007.
- 9) 伊藤史郎：「有明海異変」, 特にタイラギ資源の減少と今後, 海洋と生物, 28, pp.625-635, 2006.
- 10) 河原逸朗・伊藤史郎・山口敦子：有明海のタイラギ資源に及ぼすナルトビエイの影響, 佐賀有明水産振興センター研報, 23, pp.29-33, 2004.
- 11) 速水祐一：有明海奥部の貧酸素水塊-形成機構と長期変動-, 月刊海洋, 39, pp.22-28, 2007.
- 12) 柳哲雄・下村真由美：有明海における成層度の経年変動, 海の研究, 13, pp. 575-582, 2004
- 13) 田中勝久 他：有明海湾奥西部域における貧酸素水塊と底質環境の変動過程, 2005年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, pp.197, 2005.
- 14) 速水祐一・濱田孝治・山本浩一・吉野健児：諫早湾から有

明海奥部への懸濁物輸送, 2007年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, pp.106, 2007.

- 15) 速水祐一 他：夏季の有明海における懸濁物輸送とその水質への影響, 海岸工学論文集, 53, pp.956-960, 2006.
- 16) 岡村和磨・田中勝久・木元克則・清本容子：有明海奥部と諫早湾における表層堆積物中の有機物の分布と有機炭素安定同位対比, 海の研究, 15, pp/191-200, 2005.
- 17) 山本浩一 他：有明海奥部の底質に関する研究-細粒化の解明とモデル化にむけて-, 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集, 4, 2008.
- 18) 灘岡和夫・花田岳：有明海における潮汐振幅減少要因の解明と諫早堤防閉め切りの影響, 海岸工学論文集, 49, pp. 401-405, 2002.
- 19) 藤原考道・経塚雄策・濱田孝治：有明海における潮汐・潮流減少の原因について, 海の研究, 13, pp. 403-411, 2004.
- 20) Hamm, C. E.: Interactive aggregation and sedimentation of diatom and clay-sized lithogenic material, *Limnol. Oceanogr.*, 47, pp.1790-1795, 2002.
- 21) 山口創一・速水祐一：有明海湾奥における出水後の低塩分水塊の挙動およびその水質への影響, 沿岸海洋研究, 投稿中.
- 22) Diaz, R. J. and R. Rosenberg: Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioral responses of benthic macrofauna, *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 33, pp.245-303, 1995.
- 23) 木元克則 他：連続広域観測で捉えた有明海の貧酸素水塊の動態, 2004年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, pp.191, 2004..
- 24) 真鍋智明・速水祐一・山口創一・万田敦昌・経塚雄策：夏季の有明海における大潮小潮周期の底層貫入現象に関する研究, 2008年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, pp.100, 2008.
- 25) Kasai, A., Fujiwara, T. Kimura, T and Yamada, H.: Fortnightly shifts of intrusion depth of oceanic water into Ise Bay, *Journal of Oceanography*, pp.60, 817-824.
- 26) Linden, P. F. and J. E. Simpson: Gravity-driven flows in a turbulent fluid, *J. Fluid Mech.*, 172, pp.481-497, 1986.

(2008. 3. 31 受付)

# 数値シミュレーションによる 有明海異変の原因解明に向けて

Toward the Solution of Environmental Problems in Ariake Sea with Numerical Model

濱田孝治<sup>1</sup>・三浦孝之<sup>2</sup>・山本浩一<sup>3</sup>・速水祐一<sup>4</sup>・山口創一<sup>5</sup>・経塚雄策<sup>6</sup>  
Takaharu HAMADA, Takayuki MIURA, Koichi YAMAMOTO, Yuichi HAYAMI, Soichi  
YAMAGUCHI, and Yusaku Kyojuka

<sup>1</sup>博(工) 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>2</sup>工修 九州大学 大学院総合理工学府(〒816-8580 春日市春日公園6丁目1番地)

<sup>3</sup>博(工) 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>4</sup>博(農) 佐賀大学準教授 有明海総合研究プロジェクト(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>5</sup>博(理) 佐賀大学研究機関研究員 有明海総合研究プロジェクト(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>2</sup>工博 九州大学教授 大学院総合理工学府(〒816-8580 春日市春日公園6丁目1番地)

We have developed Ariake Sea numerical model based on FVCOM. The current model reproduces well the development process of the river plume over the head of Ariake Sea after flood. In addition, influences of spring-neap tidal phase, flood-ebb tidal phase and wind direction on the time scale of the stratification in Isahaya Bay are examined by the current model. The sediment module has been modified to treat cohesiveness. At present, the model and the calculation condition for sediment transport is too simple, however, the area of erosion and deposition obtained by the model corresponds to the distribution of critical erosion stress obtained by a field survey. For further improvement of our study, the model should be developed and modified to fill conservation lows because it enables us to the quantitative study.

**Key Words :** Numerical modeling, FVCOM, river plume, hypoxia, sediment transport

## 1. はじめに

有明海総合研究プロジェクトでは、有明海異変と呼ばれる現象を分類してそれぞれについて仮説を立て、検証のための調査・研究を進めている<sup>1)</sup>。その際、すべてを調査によって明らかにすることは様々な制約から不可能であるため、数値モデルを使用することになる。

数値モデルの特徴は、系を単純化し、すべてを量として取り扱うところにある。これは利点であると同時に欠点でもある。記憶領域や計算時間の制限から、変数の数は制限を受けるし、現象によっては支配方程式や境界条件を定めること自体が困難であるため、あえて単純化、あるいは省略される場合もある。つまり、数値モデルの内部で表現される現象は決して実際の現象そのものではない。しかし一方で、すべてを量としてとらえることから、適切に単純化された現象を数値モデルで取り扱う場

合には、定量的な評価が可能であるという大きな利点が生ずる(もちろん、適切でない問題、適切でない定式化の場合には単に値が出てくるにすぎない点には常に注意する必要がある)。

本プロジェクトでは現在、流動モデル、懸濁物輸送モデル、生態系モデルからなる総合的なモデルの構築を試みている。基本になるのは、物質の移流・拡散を支配する流動モデルであり、懸濁物輸送モデルや生態系モデルは、流動モデルで計算された流れ場をもとに計算が進められる。個々のモデルについて正確さが求められることはもちろんであるが、流動モデルの誤差は他のモデルへと伝播するので、流動モデルについては特に高い精度が要求される。

以上を踏まえ本プロジェクトでは、沿岸での流動の表現に有利であると考えられる有限堆積法数値モデル FVCOM<sup>2)</sup>をベースとした有明海モデルを構築してきた。本項では、流動モデルの成果として有明海奥部河川群から

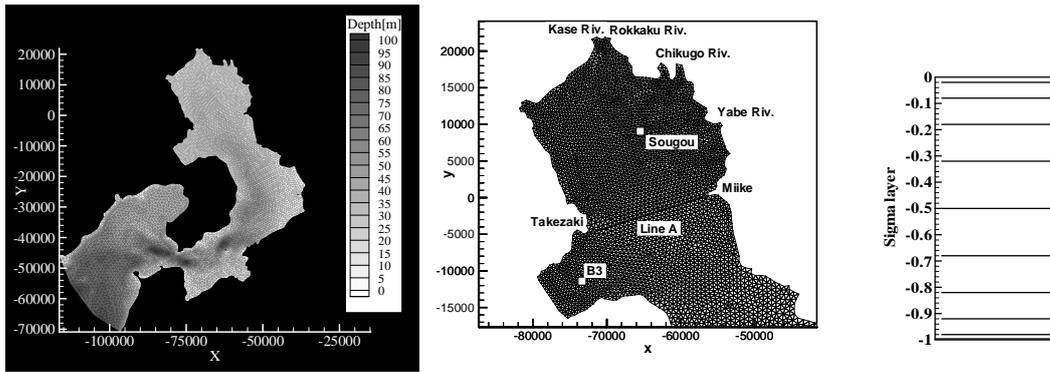


図-1 計算領域地形、湾奥・諫早湾の格子、および鉛直格子分割．图中Sougouは国土交通省観測塔(タワー総合), B3は九州農政局観測塔(B3)を表す．

の出水による河川プリュームの挙動に関する研究成果を紹介する．また、改良された懸濁物輸送モデルの結果を紹介し、今後のモデルの構築にあたっての課題について言及する．

## 2. 有明海奥部河川群の出水に伴う諫早湾の成層

### 強化の数値シミュレーション

#### (1) 背景と目的

近年諫早湾では貧酸素水海が多発し、大きな問題となっている．山口<sup>3)</sup>は諫早湾の貧酸素水塊形成には小潮期の底層貫入、あるいは湾外からの淡水供給がトリガーとなる二つのパターンがあることを明らかにした．前者は大潮・小潮サイクルで常に生じており、生成・消失の予測は比較的容易であると考えられる．一方後者は、筑後川をはじめとする有明海奥部河川群からの出水によるイベント的なものであり予測は難しい．そこで本研究では後者に注目し、有明海奥部河川群の出水によって形成される河川プリュームの諫早湾への到達についてのシミュレーションを行った．

#### (2) モデルとデータ、計算条件

本プロジェクトでは、FVCOM Ver. 2.6を用いて有明海モデルの構築を行っている．FVCOMは水平方向に三角形の非構造格子、鉛直方向に座礁を適用した有限体積法海洋モデルである．

計算領域および有明海奥部・諫早湾付近の水平格子、および鉛直格子を図-1に示す．地形は、JBIRD及びJODC500mメッシュを合成したものを使用した．開境界は橋湾・天草灘のみとし、八代海との接続は考慮していない．計算格子間隔は湾奥で500m、開境界付近で1200mとなるようにした．層の数は10である．

予備計算(後述)の初期値および水温・塩分の開境界条

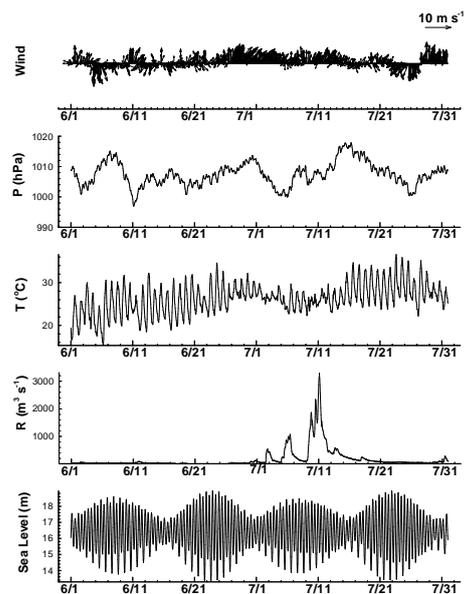


図-2 2005年6-7月の風向・風速、気圧、気温、筑後川流量、潮位．風向・風速、気圧、気温は佐賀の地上気象観測値．筑後川流量は筑後川河川事務所による瀬の下の値．潮位は6分潮による再現値．

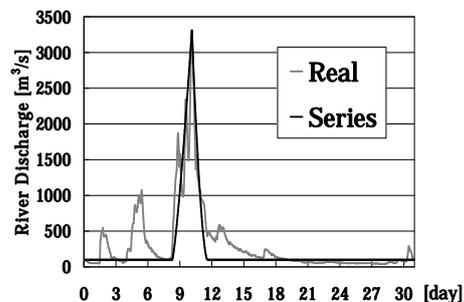


図-3 シリーズ計算の際に使用した流量時系列．Realは筑後川瀬の下の流量実測値，Seriesはそれをもとに作成された流量時系列．

件には有明4県の浅海定線調査データおよび長崎県沿岸定線調査の6月、7月平均値を使用した．開境界では6分

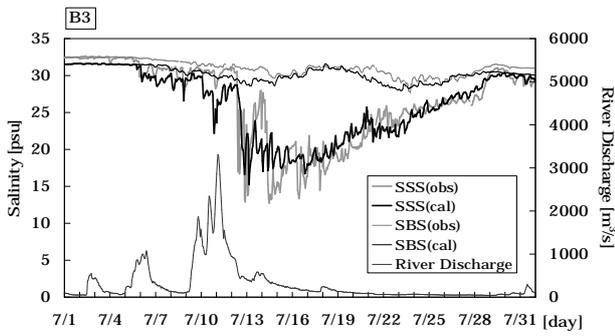


図-4 諫早湾観測塔(B3)における表層・底層塩分時系列

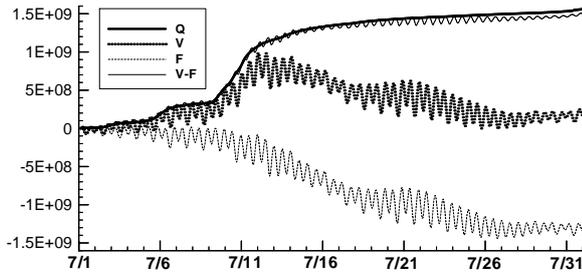


図-5 再現計算時のLine A(図-1)以北の淡水収支。Qは河川からの流入量, Vは淡水量(ただし7/1の淡水量を0としている), FはLine A上の累積淡水フラックス(湾奥への流入を正とする)。

潮( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$ )を与えることとし、有明海奥部の係留観測点Tx<sup>4</sup>)で2006年夏に得られた調和定数が再現されるよう調節した値を使用した。

淡水フラックスについては、一級・二級河川及び諫早湾干拓潮受け堤防からの流入を考慮した。一級河川については武雄・筑後川・菊池川河川事務所および熊本河川国道事務所による時別値、潮受け堤防からの排水は九州農政局による排水データを使用し、二級河川については最寄りの一級河川のデータに流域面積比を掛けたものを使用した。海面からの淡水フラックスは考慮しなかった。

海面熱フラックスは計算領域内で一様とし、佐賀の地上気象観測データ及び九州農政局諫早湾観測塔B3における海面下0.5m水温を使用してCOARE 3.0aアルゴリズム<sup>5</sup>)によって求めた。

風は計算領域内で一様とし、国土交通省観測塔(タワー総合)における観測値を使用した。

対象期間は2005年7月とした。図2に2005年6,7月の気象条件等を示す。計算は初期条件を求めるための予備計算、有明海奥部河川群プリュームの実際の挙動を再現する再現計算、プリュームの諫早湾への到達時間を支配する要因について考察するためのシリーズ計算を行った。

予備計算では6月の水温・塩分平均値を初期条件に用いて1ヶ月間計算を行い、計算終了時に得られた水位、

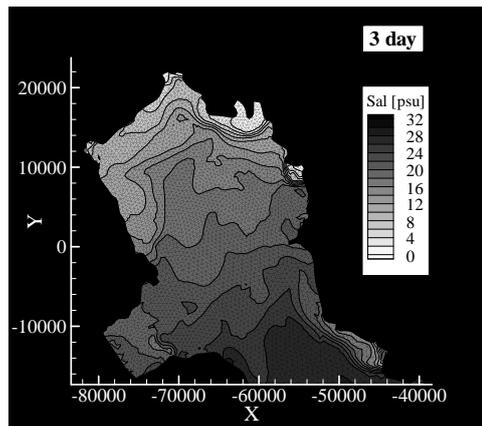
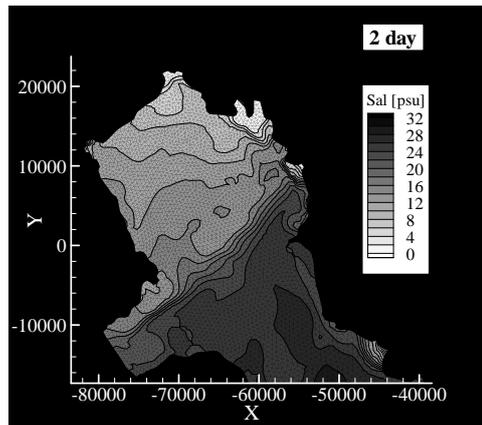
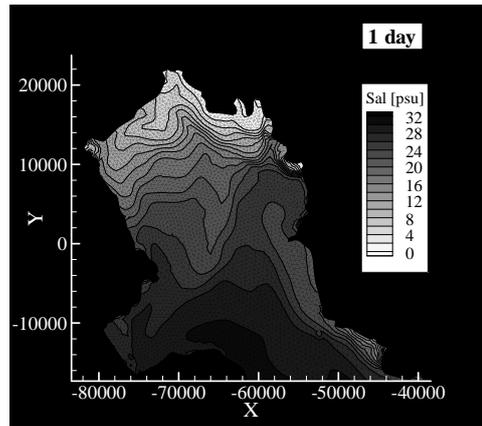
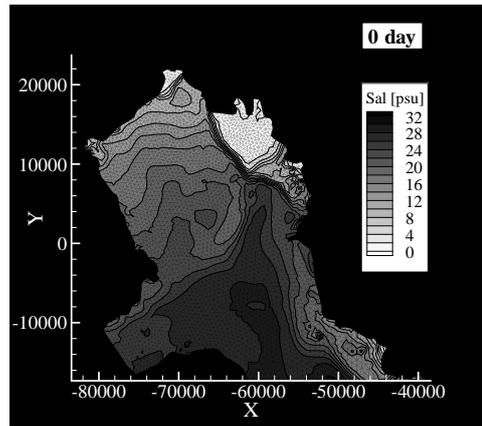


図-6 筑後川流量最大から3日後までの表層塩分分布。

流速，水温，塩分は再現計算およびシリーズ計算の初期値とした．再現計算では観測に基づく時系列を計算条件に用いて7月の計算を行った．シリーズ計算では，単純化された流量時系列(図-3)と7月の平均風速を用い，(A)流量最大時を大潮満潮時・小潮満潮時にあわせた場合の比較(B1)流量最大時を大潮満潮・大潮干潮にあわせた場合の比較(B2)流量最大時を小潮満潮時・小潮干潮時にあわせた場合の比較を行い，また，(C1)流量最大時を大潮満潮時にあわせ，北から反時計回りに30度の方向を湾軸方向としたときの0,90,180,270度の方向(便宜上NW, SW, SE, NWと呼ぶ)の風(風速 $5\text{m s}^{-1}$ )を与えた場合の比較，(C2)流量最大時を小潮満潮時に合わせ，NW, SW, SE, NWの風を与えた場合の比較を行った．

### (3)結果と考察

まず，再現計算の結果について示す．

図-4は，諫早湾観測塔B3における表層(海面下0.5m)・底層(海底上0.5m)の塩分の時系列である．計算値と観測値はよく一致しており，出水に伴って表層塩分が大きく低下するタイミング(7/12 8:00頃)や，その後塩分が30(psu)程度まで回復するまでのタイムスケールもよく再現されている．なお，その他の諫早湾観測塔についても比較したが，観測と計算はよく一致していた(図は略)．

図-5は，図-1のLine A以北の淡水収支の時系列である．V(淡水量)と，Q-F(河川の累積流量とLine A上の淡水累積フラックスの差)はよく一致しており，河川水についての保存則が十分な精度で満たされていることがわかる．

図-6は，流量最大以降の1日ごとの満潮時の表層塩分分布の変遷である．山口<sup>3)</sup>や濱田ら<sup>4)</sup>が示唆したように，筑後川河口付近に集中していた低塩分水塊が岸を右に見る方向に発達し，諫早湾に到達していることがわかる．

次に，シリーズ計算の結果を示す．諫早湾における表層塩分低下開始時刻は，出水と大潮・小潮の関係に影響され(図-7)，それ以外の要因には影響されなかった．最大流量が大潮満潮時に当たっているときのほうが表層塩分低下開始の時刻が早くなっていた．表層塩分開始時刻が大潮時に早くなった理由は，潮汐による流程が大潮時に大きいためであると考えられる．

表層塩分が最低となる時刻は，風の影響を最も強く受けた．最大出水時を大潮満潮時に合わせた場合は風向による違いはほとんどなかったが，小潮満潮時に合わせた場合には表層塩分が最低となる時刻はNW NE SE SWの順に早く，最大約1日の違いが見られ，表層塩分の最低値も同じ順で高かった(図-8)．計算条件は若干異なるが，濱田・経塚<sup>5)</sup>はNW方向風，SW方向風によって，有明海奥部西岸表層で湾口側，湾奥側に向かう残差流が強化されることを示しており，この結果はそれと一致する．大潮時に違いが表れなかった理由は，鉛直混合が盛んになった

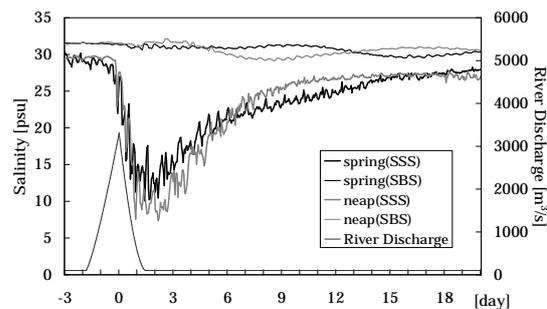


図-7 シリーズ(A)のB3における表層・底層塩分時系列の比較．Springは出水のピークが大潮満潮時，neapは小潮満潮時であることを示す．SSSは表層塩分，SBSは底層塩分を示す．横軸は最大出水を基準とした経過日数．

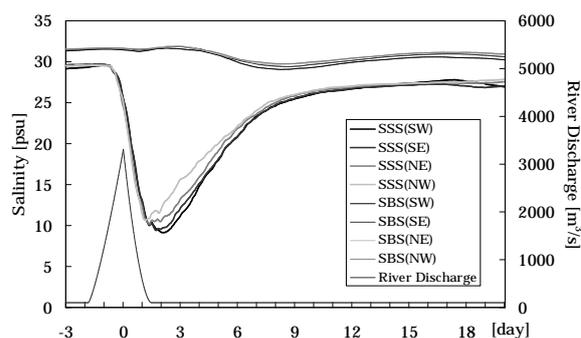


図-8 シリーズ(C2)のB3における表層・底層塩分時系列(25時間移動平均)の比較．

ことにより流れの鉛直構造が発達しにくくなったためと考えられる．また，シリーズ(A)でも若干の違いがみられたが，大きなものではなかった．ただしこのとき，表層塩分の最低値は大潮のほうが高かった．

なお，シリーズ(B1)(B2)では塩分の時系列の1潮汐あたりの変動が逆位相となったのみで，表層塩分低下開始時刻，表層塩分が最低となる時刻，表層塩分の最低値のいずれにも明確な違いは見られなかった．

## 3．有明海奥部の懸濁物輸送シミュレーション

### (1) 懸濁物モデルについて

速水ら<sup>1)</sup>に示されているように，低質の細粒化，透明度上昇，貝類漁獲量の減少，貧酸素水塊の深刻化など，有明海異変の多くに懸濁物の挙動が関係しており，これらを解決するために信頼できる懸濁物輸送モデルが必要である．

FVCOMの懸濁物輸送モデルはUSGSのSharwood, Butman, Signell, Warnerらを中心とするグループによりROMS上で開発されたモデル<sup>7)</sup>を移植したもので，複数の種類の

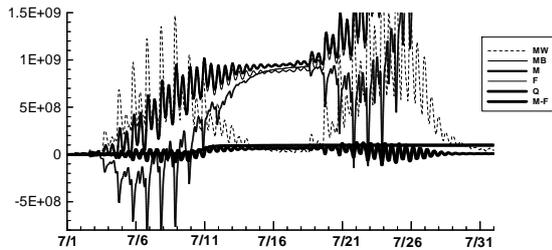


図-9 Line A以北の懸濁物収支．MWは水中の懸濁物量，MBは底質中の懸濁物量，Mは懸濁物総量(MW+MB)，FはLine A断面上の累積懸濁物フラックス(湾奥への流入を正とする)，Qは河川からの累積フラックス．

懸濁物を同時に扱え、底泥を多層とすることができるなど、優れた特長をもっているが、もともとnon-cohesive sedimentが卓越する海域を対象として開発されたモデルであるため、FVCOM開発者(Prof. Chen及びProf. Cowles, UMASSD)の協力を得てCohesive sedimentを取り扱えるよう改良を行った．Cohesive sedimentの特色は沈降速度 $w_s$ が濃度 $C$ の関数となることである．本モデルではcohesive sedimentについてはMetha<sup>8)</sup>に従い以下の式を用いた．

$$w_s = \min(k_1 C^n, w_{s0}(1 - k_2 C)^\beta) \quad (1)$$

低濃度側の特性を表わす定数 $k_1, n$ には山本らの実測値<sup>9)</sup>を用い、Hindered settlingを表わす定数 $w_{s0}, k_2, \beta$ にはMetha<sup>8)</sup>の値をそのまま用いた．堆積については、海底に達した懸濁物はすべて堆積するものとした．再懸濁については、USGSのモデルではActive Layerの仮定が取り入れられているが、本モデルではcohesive sedimentに対してどのように定義すべきか不明であったため適用せず、単純に以下の式で粒子 $i$ の再懸濁量 $E_i$ を評価した．

$$E_i = F_i M \left( \frac{\tau_b - \tau_{ce}}{\tau_{ce}} \right) \quad (2)$$

$F_i$ は堆積物中の粒子 $i$ の含有率， $M$ は浸食速度計数， $\tau_b$ はせん断応力， $\tau_{ce}$ は限界せん断応力である．

## (2) 計算

計算対象期間は2005年7月とした．懸濁物の種類は1種類とし、一次粒子の密度は $1300(\text{kg m}^{-3})$ ，堆積時の空隙率は0.828， $\tau_{ce}$ は $0.133(\text{Pa})$ ， $M$ は $2.85 \times 10^{-4}(\text{kg m}^{-2})$

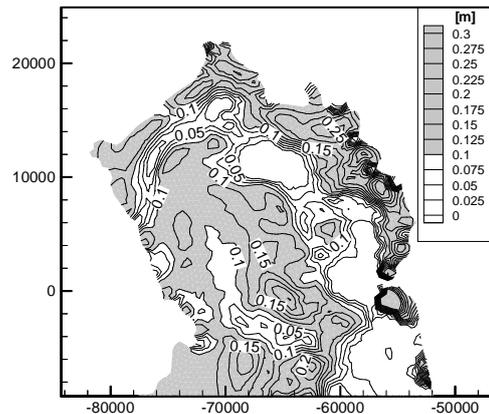


図-10 計算開始2週間後の底層懸濁物の分布．灰色は初期状態より厚く堆積していることを示す．

sec)とした．計算開始時に全領域一様に10cmの厚さで懸濁物が堆積しているものとし、7/1から1か月間、前章の再現計算と同じ条件で計算を行った．河川水中の懸濁物濃度は流量 $Q$ に比例するものとし、筑後川の場合は以下の式で決定した．

$$C = 7.29 \times 10^{-5} Q + 4.127 \times 10^{-3} \quad (\text{g L}^{-1}) \quad (3)$$

## (3) 結果と考察

図-9にA断面以北の懸濁物収支の時系列を示す．計算期間中2回の大潮があり、水中の懸濁物量が上昇している．また、同時に沖側から大量の懸濁物が流入していることが分かる．総懸濁物量 $M$ と、河川からの累積フラックス $Q$ と断面A上累積フラックスの差を比較すると、一回目の大潮では両者の値は近く、懸濁物の保存則は比較的満たされているように見えるが、2回目の大潮では崩れてしまっている．これは、懸濁物量はTracer Control Element(三角形格子の頂点を中心にもつ不規則な形状の多角形)に対して保存則を満たすよう離散化されており、断面A上でのフラックス計算の誤差を0にできないうえ、初期状態で全領域均一に懸濁物を分布させたことによって断面Aを大量の懸濁物が通過したためと考えられる．

2回目の大潮以降は保存則が破れており信頼できないと考えられるので、ここでは計算開始後2週間(7/15 0:00)の海底の懸濁物分布(図-10)に注目する．最奥部に、海岸線に並行に浸食された部分が帯状に広がっている．また、筑後川河口沖、三池港沖にも、広く浸食された部分がある．湾奥中央部および諫早湾口付近には堆積傾向の場所があり、その間は浸食されている．笠置<sup>10)</sup>は、広域底泥調査結果をもとに有明海奥部の限界せん断応力分布を推定したが、限界せん断応力の高い領域と本計算で

浸食傾向にあった領域との間には対応関係がみられた。限界せん断応力が大きいということは、巻き上がりやすい細かい懸濁物が堆積していないことを表わしていると考えられる。本計算では種類の懸濁物しか考慮しておらず、 $\tau_{ce}$  や  $M$  を全領域で一様に与えるなど極度に単純化された条件で計算を行っているが、有明海奥部の堆積・侵食傾向を定性的に表現できていると考えられる。

#### 4. おわりに

本プロジェクトの流動モデルは夏期の大出水に伴う諫早湾の成層強度の変化をよく再現しており、懸濁物輸送モデル、生態系モデルと組み合わせて使用するのに十分な精度を有していると期待できる。ただし、潮汐を再現するためには境界条件をチューニングする必要があることから、諫早湾干拓事業による潮位・潮流の変化を評価するといった用途にはまだ使えない。ただしこの問題は、高精度の地形を使用することでかなり改善されることが考えられている。懸濁物輸送モデルについては、限界せん断応力を空間分布で与える(あるいは底質の関数とする)といった、物性をより实际的に表現する改良が必要であることはもちろんだが、定量的な議論を可能にするため、計算に伴う誤差が発生しにくく、保存則が高い精度で成り立つようにプログラムや計算条件を改良していかなければならない。

#### 参考文献

- 1) 速水祐一, 山口創一, 真鍋智昭, 山本浩一, 濱田孝治, 榎木(加) 玲美, 吉野健児, 大串浩一郎, 平川隆一, 万田敦昌,

経塚雄策: 有明海奥部における物質輸送と低次生態系の動態について - プロジェクト5年間の中間報告 -, 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集(第4巻), 2008.

- 2) Chen, C., R.C. Beardsley and G. Cowles : An Unstructured Grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model FVCOM User Manual, 315 pages, 2006.
- 3) 山口創一: 諫早湾における貧酸素水塊形成機構に関する研究, 九州大学学位論文, 73 pages, 2007
- 4) 濱田孝治, 速水祐一, 山本浩一, 吉野健児, 大串浩一郎, 平川隆一, 山田裕樹: 有明海奥部における貧酸素水塊の形成・消滅過程の観測. 海岸工学論文集, 54, 1121-1125
- 5) Fairall, C.W., E.F. Bradley, J.E. Hare, A.A. Grachev, and J.B. Edson: Bulkparameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm. J. Climate 16, 571-591, 2003
- 6) 濱田孝治, 経塚雄策: 有明海湾奥における循環流とその変動について, 海の研究, 16(3), 203-221, 2007
- 7) Sherwood, C., B. Butman, R. Signell and J. Warner: Community Model for Coastal Sediment Transport, <http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/sediment-transport/>
- 8) Metha, A.J.: Characterization of Cohesive Sediment Properties and Transport Processes in Estuaries, Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, 14, 290-325, 1986
- 9) 山本浩一, 横山勝英, 山田文彦, 安江洋介, 速水祐一: 有明海・筑後川感潮域での懸濁物質の沈降特性, 2008年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 101, 2008
- 10) 笠置尚史: 有明海湾奥部における低質の再懸濁特性に関する研究, 佐賀大学大学院工学系研究科修士論文, 54 pages.

(2008.3.31受付)

# GISを用いた筑後川・菊池川・白川・緑川 における流出・負荷モデルの構築と佐賀東部 クリーク地帯における流出負荷量の算定

RUNOFF AND POLLUTANT LOAD MODELS IN THE RIVER BASINS OF  
CHIKUGO, KIKUCHI, SHIRA AND MIDORI AND ESTIMATION OF  
POLLUTANT LOAD FROM EASTERN SAGA CREEK AREA BY USING GIS

大串浩一郎<sup>1</sup>・鶴田芳昭<sup>2</sup>・山本浩一<sup>3</sup>・濱田孝治<sup>3</sup>

Koichiro OHGUSHI, Yoshiaki TSURUTA, Koichi YAMAMOTO and Takaharu HAMADA

<sup>1</sup>博士 (工学) 佐賀大学准教授 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>2</sup>工修 株式会社東京建設コンサルタント九州支店部長代理 建設環境部  
(〒810-0801 福岡市博多区中洲5-6-20)

<sup>3</sup>博士 (工学), 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

In this study, runoff and pollutant load models, such as chemical oxygen demand, nutrient etc., are constructed for the Chikugo River, Kikuchi River, Shira River and Midori River basins by using GIS. The models can reproduce the observed runoff and pollutant load efflux successfully. In the calculation of pollutant load, relations between day-averaged water discharges with day-averaged pollutant load concentrations are obtained. Furthermore, pollutant loads and water volume drained from creek area in the eastern Saga Plain are estimated by using GIS and pollutant load factors. The calculated pollutant load concentrations drained from the creek agree the observed ones in the irrigation period only. As the concentrations in the non-irrigation period differ from the observed ones, a utilization of the creek must be investigated in detail including double-cropping.

**Key Words:** runoff, pollutant load, GIS, river basin, creek, pollutant load factor, irrigation period

## 1. はじめに

有明海は、水域面積約1,700km<sup>2</sup>の閉鎖性内湾で、それを取り囲む陸域の流域面積は約8,455km<sup>2</sup>と水域の約5倍の規模となっている。直接有明海に面しているのは佐賀県、福岡県、熊本県、長崎県の4県であるが、流域まで含めると大分県も入り、有明海に流入する主要河川としては、国直轄の8つの一級河川である筑後川、矢部川、菊池川、白川、緑川、嘉瀬川、六角川、本明川や佐賀県管理の塩田川などが挙げられる。この8つの一級河川の流域面積の合計は約6,852km<sup>2</sup>と全流域面積の約81%を占め、中でも筑後川は流域面積2,860km<sup>2</sup>と全流域面積の約33.8%となっている。また、我が国最大の干満差を有する有明海には約19,162haの干潟が存在し、全国の干潟面積の約40%がこの有明海に集中している。そして、流域内には約337万人が生活を営んでいる (2001年度現在)。

このように、閉鎖性内湾である有明海で水域の約5倍の面積を占める陸域からの流入水の量と質の影響は無視できず、有明海の環境を議論する上での大きなファクターの一つである。

一方、2006年12月に環境省有明海・八代海総合調査評価委員会から提出された報告書<sup>1)</sup>によれば、有明海への汚濁負荷 (化学的酸素要求量 (COD), 全窒素 (TN), 全リン (TP)) は1975年位をピークに減少してきているとの報告がある。さらに、2005年3月に報告された「有明海水域に係る下水道整備総合計画に関する基本方針策定調査報告書」 (有明流総)<sup>2)</sup>では、CODに関わる基本方針の見直しと新たにTN, TPの基本方針の策定のため、有明海と筑後川の汚濁解析と将来の水質予測が詳細になされ、有明海流入河川流域を河川毎、県毎に順流域、感潮域、直接流入域に区分し、それらの汚濁解析を行っている。有明海への陸域の影響を正確に評価し、有明海モデルに組み込んでいくためには、以上の2つの報告書を議

論のスタートとして参考にしつつ、問題点を抽出して改善していく必要がある。

本研究では、以上のような背景の下、地理情報システム (GIS) を用いて、有明海に流入する主要8河川のうちの4河川である筑後川、菊池川、白川、緑川の流出モデルならびに汚濁負荷モデルを構築し、さらに、平野部のクリークからの負荷量に関する検討を行うため、佐賀平野東部クリーク地帯を研究フィールドに選び調査を行った。

## 2. 主要4河川の流出モデルの構築

表-1は有明海に流入する主要8河川の概略である。また、図-1に今回対象とした4河川の流域図を示す。4河川の中で、緑川、白川、菊池川については、流域面積、流路延長などから河道の考慮は行わず、単一のモデルとした。一方、筑後川については、後述のように、河道による遅延効果を考慮し、上流から複数のサブ流域に分割し、河道の効果を考慮した。流出解析の手法としては、低水時から高水時までの流量を解析することに主眼をおいた解析モデルを作成するため、タンクモデル法<sup>3)</sup>を用いた。蒸発散については、ソーンズウェイト法<sup>4)</sup>を採用した。

### (1) 緑川・白川・菊池川の流出解析

流域の特定にはESRI社のArcGISを用い、緑川・白川・菊池川それぞれの順流末端地点より上流を対象流域とした。解析対象年は平成15年とした。雨量については国土交通省河川局水文水質データベース<sup>5)</sup>と気象庁のアメダスデータ<sup>6)</sup>より平成15年の日雨量を用い、実測流量については日本河川協会の雨量・流量年表データベース<sup>7)</sup>の日流量を用いた。蒸発散量はタンクの貯留高より差し引き直列4段のタンクモデルを作成した。

流域の特定方法として、ArcGIS Spatial Analystツールを用い、国土地理院の数値地図50mメッシュ(標高)データより標高グリッドを作成した。それをもとにSpatial Analystに付属しているサンプル・エクステンションのHydrology Modelingを利用した。これは、指定した任意の1点を辿る流路や指定した点より上流の流域界を求めるツールである。このようにして緑川、白川、菊池川の順流域を特定した。順流末端地点の水位流量観測所は、それぞれ城南観測所、代継橋観測所、分田観測所である。また、緑川の緑川ダム、菊池川の竜門ダムの集水域についても同様にダム諸量観測所地点より上流域を集水域とみなして求めた。

流域平均雨量についてはティーセン法を用いて算出した。流域内及び流域近傍の雨量観測点として、緑川水系では、金内、島木、豊野、尾野尻、緑川ダム、高森を、白川水系では、熊本、西原、阿蘇乙姫、高森を、菊池川

表-1 有明海の注ぐ主要8河川の概要

河川名	流域面積(km <sup>2</sup> )	順流域面積(km <sup>2</sup> )	幹川流路延長(km)
筑後川	2,860	2,295	143
緑川	1,100	681	76
菊池川	996	898	71
矢部川	620	451	61
白川	480	477	74
嘉瀬川	368	276	57
六角川	341	32	47
本明川	87	38	21
その他	1,603	102	-
合計	8,455	5,253	-

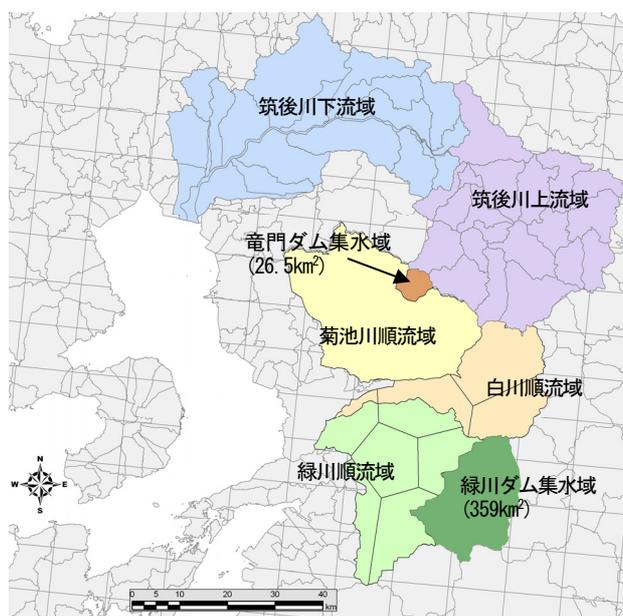


図-1 筑後川・菊池川・白川・緑川の流域図  
(筑後川以外は順流域とダム集水域を示している)

水系では、緑、岳間、平真城、田原、山鹿、赤星、合志、穴川の各雨量観測所のデータを用いた。

蒸発散量の算定に用いたソーンズウェイト法では、1月から12月までの各月の月平均気温をもとに月別の可能蒸発散量 $E_t$  (cm/month) を求めるようになっている。緑川、白川、菊池川の気温のデータとしては、甲佐、阿蘇乙姫、菊池における気象庁のアメダスデータを利用し、これを使って月別可能蒸発散量を求め、日数で除したものを日蒸発散としてタンクモデルに組み込んだ。

流出解析を行う際に緑川上流の緑川ダム、菊池川上流の竜門ダムの可動状況を考慮する必要がある。緑川ダムは、洪水調節・灌漑用水の補給・発電を目的とする多目的ダムである。洪水調節についてはダム地点における計画高水流量 2,800 m<sup>3</sup>/sであり、洪水調節流量800 m<sup>3</sup>/sである。緑川ダムにおいては、ダム集水域の日雨量をダムへの流入量とし、洪水調節方式よりダムの放流量を求めた。そこで得られた放流量を、ダム集水域を除く対象流域へ

の入力データとして雨量に加え、ダム集水域を除く流域のタンクモデルを作成した。

次に竜門ダムであるが、このダムは、洪水調節・灌漑用水、工業用水の補給を目的としている。その集水面積は26.5 km<sup>2</sup>と狭く、迫間川の水だけでは貯まりにくく、菊池川本川及び大分県の下笠ダム上流から導水路トンネルにより水を確保する計画としている。このような県境を越えた広域的な導水は全国的に見ても珍しい。操作要綱では流入量が540m<sup>3</sup>/sを超えると100 m<sup>3</sup>/s放流するとされている。これを元に、緑川ダムと同様に竜門ダムの放流量を推定した。

## (2) 筑後川の流出解析

流出解析の対象流域は、筑後川瀬ノ下(久留米市)より上流域とした。その流域面積は2,295.0km<sup>2</sup>である。筑後川瀬ノ下上流域を主要な流量把握地点で勘案すると7流域に分割できる。しかし、筑後川の河川水は発電や農業用水等に利用するため水収支が複雑となっている。特に小淵、片ノ瀬の2地点はその影響を大きく受けている。したがってタンクモデルの設定流域としては、C・E流域、F・G流域を統合した5流域とした(表-2, 図-2)。また、各流量把握地点内の河道を表-3のように4区分に分割した。

表-2 筑後川の流域分割

No.	流域名	面積(km <sup>2</sup> )	流量把握地点(地点名, 面積(km <sup>2</sup> ))	
A	下笠ダム流域	185.0	下笠ダム	185.0
B	松原ダム等残流域	306.0	松原ダム	491.0
D	玖珠川流域	530.5	小ヶ瀬	530.5
C・E	大山・荒瀬等残流域	421.5	荒瀬	1443.0
F・G	片ノ瀬・瀬ノ下等残流域	852.0	瀬ノ下	2295.0

表-3 筑後川の河道区分

No.	区 間	区間延長(km)	備 考
I	77/2~93/6	16.4	松原ダム~小淵(玖珠川合流点)
II	62/2~77/2	15.0	小淵(玖珠川合流点)~荒瀬
III	40/8~62/2	21.4	荒瀬~片ノ瀬
IV	25/6~40/8	15.2	片ノ瀬~瀬ノ下



図-2 筑後川(瀬ノ下上流)流域・河道分割図

図-3に示すように、流域の流出量はタンクモデルで解析し、河道流下量はManningの式を用いる事で、流域から河道を一体として追跡できるモデル構成とした。

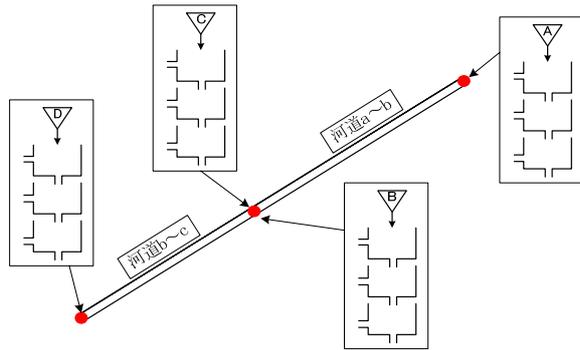


図-3 筑後川流出解析モデル構成図(模式図)

次に河道流下時間を考慮するために、以下のように考えることとした。すなわち、タンクモデルでは河道流下量の追跡精度はあまり期待できないが、河道での貯留効果はわずかであり、解析の目的(有明海への流出モデル構築)からすれば河道流下の遅れ時間を表現できれば十分である。したがって、Manningの式を用いて、流速・流下時間を算定し、タンクモデルで算定した流域流出量を遅れ時間を考慮して合成させ、下流地点の流量ハイドログラフを作成した。図-4にそのハイドログラフ算定流れ図を示す。

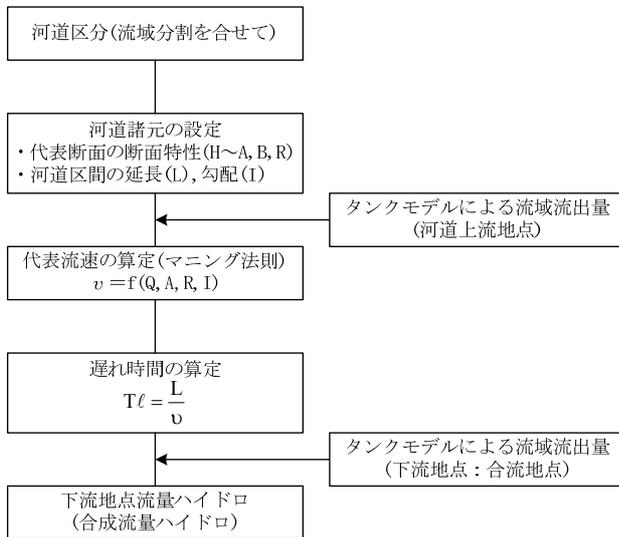


図-4 河道流下時間を考慮したハイドログラフ算定

タンクモデルは、通年で洪水時及び平水時の流出解析を行う必要があることから、緑川、白川、菊池川と同様、直列4段のタンクを設定した。具体の流出孔の高さ、流出係数及び浸透孔の係数などのモデル定数は、検証計算を通して同定した。各流域(タンク)と河道(遅れのみ)は図-5のとおり連結させた。

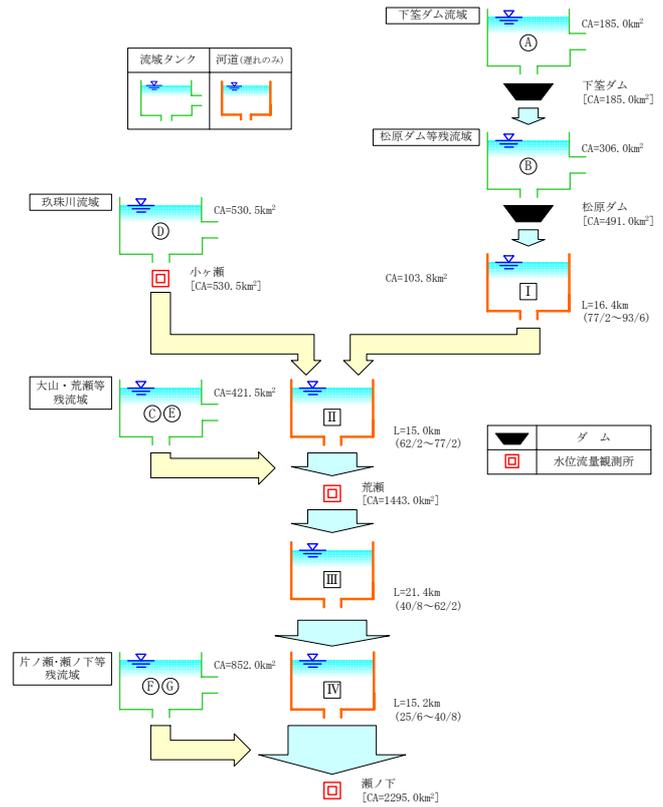


図-5 筑後川流域・河道タンク連結モデル図

河道遅れ時間の設定方法は以下のように行った。すなわち、河道区分・区間の現況河道横断面図を用いて、流量規模毎(1, 2, 5, 10, 20, 30, 50, 80, 100, 200, 300, 500, 1,000, 2,000, 3,000m³/sの15ケース)にManningの式により断面ごとの流速 $v$ を求めるとともに、河道区間距離 $L$ を流速 $v$ で除して、到達時間 $T_l = \sum L/v$ を設定した。河道A(77.2~93.6km)、河道B(62.2~77.2km)、河道C(40.8~62.2km)、河道D(25.6~40.8km)毎に流量規模別の到達時間を示したのが図-6~9である。また、遅れ時間を考慮した流量ハイドログラフの合成は、タンクモデルによる流出量及び実績流量が日単位で得られることから、その間の内挿精度を高めるため、6-pointスキーム<sup>8)</sup>を用いた補間多項式により内挿し合成した。

入力データならびに検証データとしては2003年1月1日~12月31日の1年間の日雨量ならびに日平均流量(m³/s)データを用いた。日雨量は、原田、横畑、野上、寺床、鯛生、黒川、黄川、杖立の計8箇所の国土交通省所管雨量観測所ならびに九千部山、久留米、耳納山、日田、朝倉、玖珠の計6箇所の気象庁所管雨量観測所のデータを用い、ティーセン分割により各サブ流域の流域平均雨量を求めた。日平均流量については、下笠ダム、松原ダムの流入量・放流量ならびに小ヶ瀬、荒瀬、瀬ノ下の流量観測所流量を用いた。

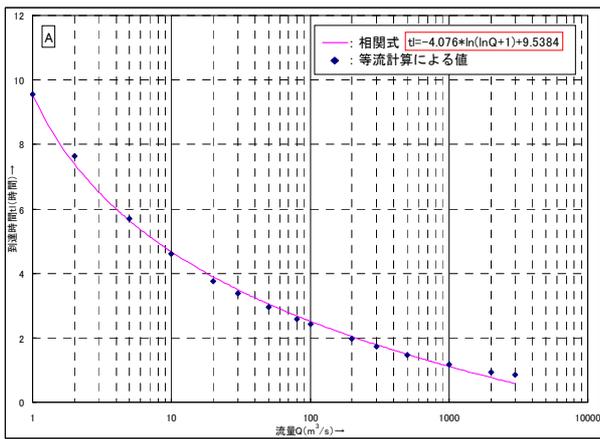


図-6 流量-到達時間の関係(A河道:77.2~93.6km区間)

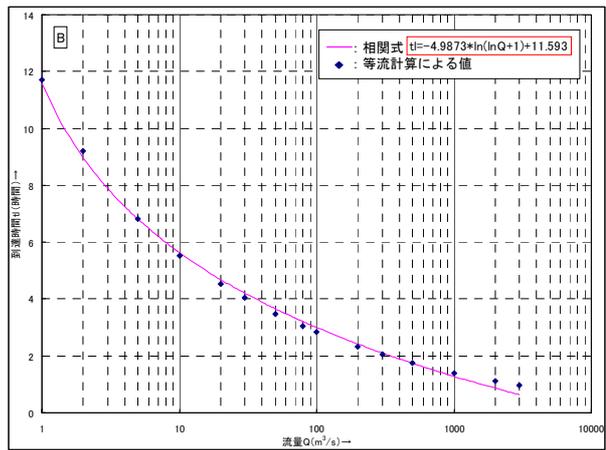


図-7 流量-到達時間の関係(B河道:62.2~77.2km区間)

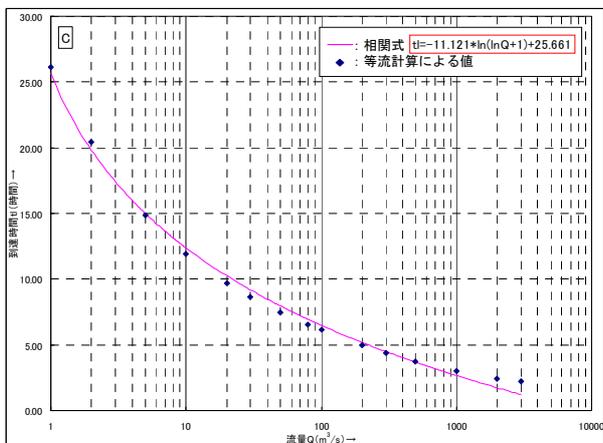


図-8 流量-到達時間の関係(C河道:40.8~62.2km区間)

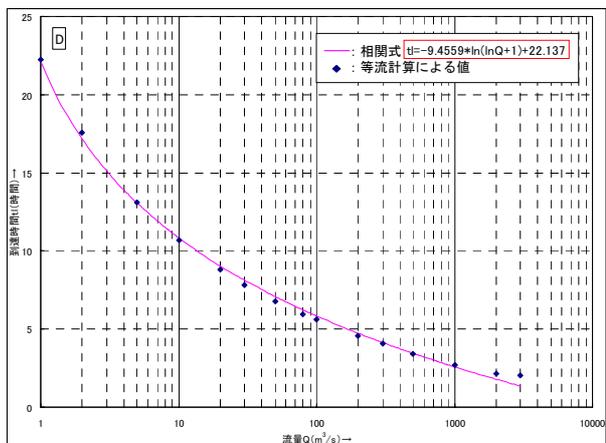


図-9 流量-到達時間の関係(D河道:25.6~40.8km区間)

### (3) 4つの河川流域の流出解析結果

緑川, 白川, 菊池川の流出解析によって得られたタンクモデルの流出孔の高さ, 乗数, 浸透孔の乗数, および初期貯留残高を表-4に示す. また, 同様にして筑後川の流出解析によって得られたモデル定数を表-5に示す.

図-10は, 緑川流域における2003年の流出解析結果である. 同様に, 図-11は, 筑後川サブ流域の1つである瀬ノ下(片ノ瀬・瀬ノ下等残流域)における同様の解析結果を示している(他の流域については紙面の関係で割愛する). これらの解析結果から, 本モデルは, 良好に流出を再現していることが分かる.

表-4 緑川・白川・菊池川のタンクモデル定数

		緑川		白川		菊池川	
		孔の高さ	乗数	孔の高さ	乗数	孔の高さ	乗数
第1段	流出孔(上)	40	0.2	50	0.2	60	0.2
	流出孔(下)	25	0.1	25	0.1	40	0.1
	浸透孔	-	0.35	-	0.35	-	0.15
	初期貯留残高	0		0		0	
第2段	流出孔	15	0.05	20	0.05	35	0.05
	浸透孔	-	0.12	-	0.16	-	0.12
	初期貯留残高	0		0		0	
第3段	流出孔	10	0.04	5	0.012	10	0.025
	浸透孔	-	0.03	-	0.03	-	0.05
	初期貯留残高	40		100		50	
第4段	流出孔	0	0.001	0	0.0025	0	0.001
	初期貯留残高	600		800		200	

表-5 筑後川各サブ流域のタンクモデル定数

流域NO.	流域名	タンクNO.	上孔or下孔	流出乗数	孔の高さ H (mm)	浸透係数	初期貯留残高 (mm)
A	下釜ダム流域	4	上孔	0.500	50	0.4000	0
			下孔	0.300	20		
		3	上孔	0.000	0	0.3000	0
			下孔	0.100	10		
		2	上孔	0.000	0	0.0500	10
下孔	0.030		0				
1	上孔	0.000	0	0.0000	100		
	下孔	0.010	0				
B	松原ダム流域	4	上孔	0.500	50	0.4000	0
			下孔	0.300	20		
		3	上孔	0.000	0	0.3000	0
			下孔	0.030	10		
		2	上孔	0.000	0	0.0500	20
下孔	0.010		0				
1	上孔	0.000	0	0.0000	200		
	下孔	0.010	0				
D	小ヶ瀬流域	4	上孔	0.500	30	0.4000	0
			下孔	0.200	10		
		3	上孔	0.000	0	0.3000	0
			下孔	0.100	10		
		2	上孔	0.000	0	0.0500	20
下孔	0.030		0				
1	上孔	0.000	0	0.0010	100		
	下孔	0.005	0				
CE	大山・丸瀬等	4	上孔	0.400	40	0.5000	0
			下孔	0.200	20		
		3	上孔	0.000	0	0.2000	0
			下孔	0.100	10		
		2	上孔	0.000	0	0.0500	10
下孔	0.050		0				
FG	片ノ瀬・瀬ノ下等	1	上孔	0.000	0	0.0000	50
			下孔	0.050	0		
		4	上孔	0.500	50	0.5000	0
			下孔	0.300	30		
		3	上孔	0.000	0	0.4000	0
下孔	0.300		5				
2	上孔	0.000	0	0.0500	10		
	下孔	0.010	0				
1	上孔	0.000	0	0.0100	100		
	下孔	0.010	0				

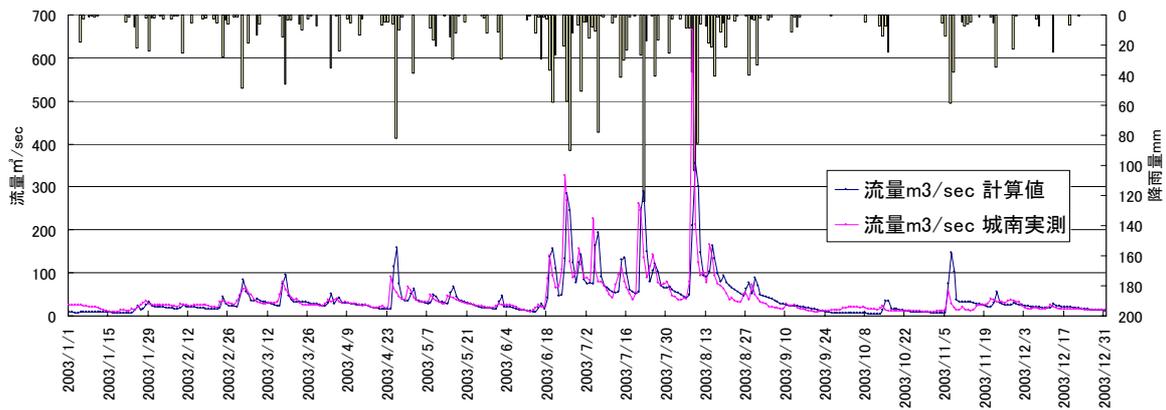


図-10 タンクモデルによる緑川流域の流出解析結果(2003年)

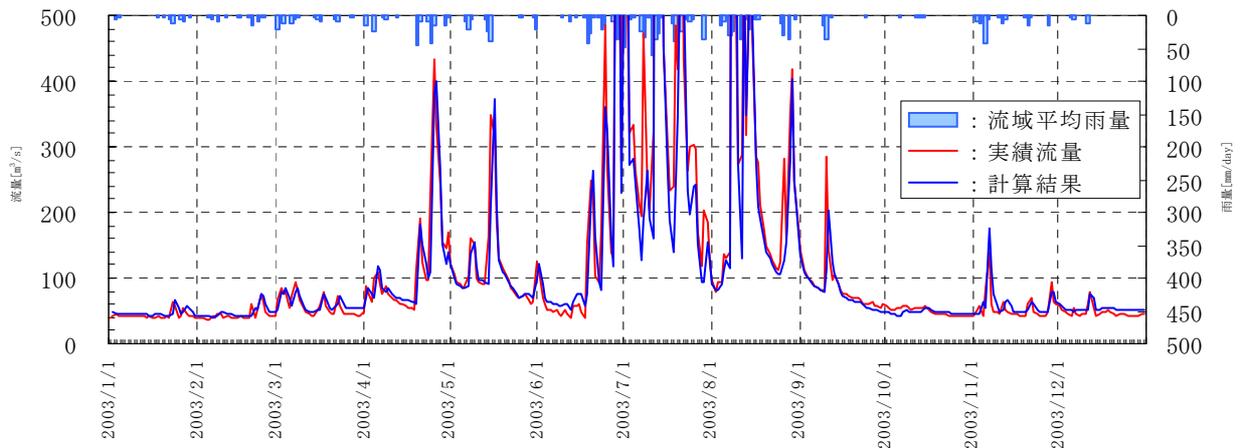


図-11 タンクモデルによる瀬ノ下より上流域の流出解析結果(2003年)

### 3. 主要4河川の負荷流出モデルの構築

河川流域から流出する負荷量は、降雨や融雪などによる流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ の変化によって大きく変動する。すなわち、負荷量 $L(\text{g}/\text{s})$ の発生や流出は低水時と高水時では大きく異なる。そのため、総負荷量を推定するためには、低水時と高水時を区別し、合わせた量を総負荷量とする方法が有効である。本研究では有明流総で策定された $LQ$ 式の係数を用いて、流出解析の結果得られた日平均流量 $\bar{Q}$ から負荷量を算出した。しかし、流総での $LQ$ 式は水質観測時の流量と水質濃度をもとに作成されている。そのため、新たに日平均流量に対して負荷量の日平均値との関係式を求めることとした。

日平均流量・負荷量関係式( $\bar{L}\bar{Q}$ 式)の作成には、2003年の城南(緑川)、代継橋(白川)、山鹿(菊池川)、瀬ノ下(筑後川)の実測の毎時刻流量に対し、流総の $LQ$ 式を用いて算出した負荷量の日平均値 $\bar{L}$ を求め、日平均流量 $\bar{Q}$ との関係式を得た。なお、流量・負荷量共

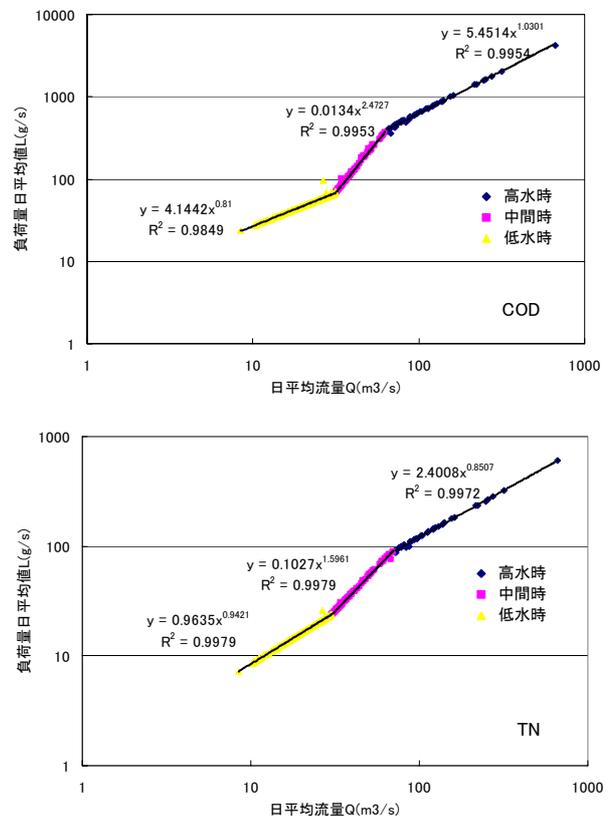


図-12 日平均流量と負荷量の関係(緑川)

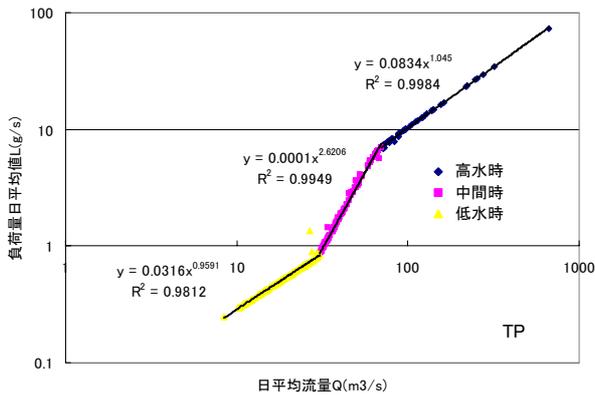


図-12(続き)日平均流量と負荷量の関係(緑川)

に、0時～翌0時までを1日とし、サンプル数は2003年1月1日0時から12月31日24時までの365個とした。流出負荷量の算定に当たって、求めた $\overline{LQ}$ 関係図のうち緑川・城南地点のCOD, TN, TPの関係を図-12に示す。それぞれの図中では、ある流量を境に回帰直線の傾きが変わっている。これは、その流域特有の負荷流出特性であると考えられる。その時の流量を閾値として低水・高水あるいはその中間と分け、近似曲線を2つ、または3つ求めて図中に示している。緑川、白川、菊池川の $\overline{LQ}$ 式の定数をCOD, TN, TPについてまとめたのが表-6である。同様にして筑後川の瀬ノ下地点においても2003年のデータに基づいて日平均流量と負荷量の間関係を求め、4河川の汚濁負荷モデルを構築することができた。

表-6 日平均LQ式の定数(緑川・白川・菊池川)

		L = a Q <sup>b</sup>			流量		
		低水時	中間時	高水時	低水時 上限値	高水時 下限値	
緑川	COD	a	4.1442	0.0134	5.4514	31.4	64.1
		b	0.81	2.4727	1.0301		
	T-N	a	0.9635	0.1027	2.4008	30.3	71
		b	0.9421	1.5961	0.8507		
	T-P	a	0.0316	1.00E-04	0.0834	30.4	68.5
		b	0.9591	2.6206	1.045		
白川	COD	a	8.3501	3.92E-02	0.3883	17.6	61
		b	0.5838	2.4205	1.7964		
	T-N	a	1.3799	-	0.9217	30.4	
		b	1.0976	-	1.1706		
	T-P	a	0.1738	6.71E-02	0.0108	21.6	66
		b	0.9192	1.2413	1.7025		
菊池川	COD	a	3.5348	-	0.0128	70.5	
		b	0.9125	-	2.1868		
	T-N	a	2.0801	-	0.3338	134	
		b	0.9632	-	1.3133		
	T-P	a	0.0432	-	0.0013	124.2	
		b	1.2481	-	1.982		

#### 4. 佐賀東部クリーク地帯の流出負荷解析

有明海に流入する汚濁負荷のうち、河川順流域以外に感潮区間あるいは直接流入域からの流入負荷を推定することが求められている。そこで、本研究では佐賀平野東部クリーク地帯を研究フィールドに選定し、排出される各項目の汚濁負荷量および排水量を既存の原

単位法により求め、その問題点の抽出を行うことを目的として研究を行った。

原単位法は簡便な方法で対象地から発生する汚濁負荷量を算定することができるが、時間や季節的变化などに対応しないと言われている。原単位法の季節的变化への適応を検討するため、期間を灌漑期、非灌漑期に分け比較した。なお、今回は汚濁負荷濃度算出するため、点源に関しては流出量を、面源に対しては降雨流出率を与え降雨流出量まで算定した。対象地は小領域として‘千代田線分水界’、大領域として‘佐賀平野東部クリーク地帯’を考えた。これらの地域は、有明流総では、筑後川右岸感潮域に含まれ、流総では既存の原単位を用いて汚濁排出量の推定が行われているが、実測値に基づいたものではないことに注意が必要である。研究対象地の概要を以下に示す。

#### (1) 千代田線分水界

小領域の対象地は、九州農政局から提供された佐賀平野東部流域分割図中の千代田線分水界とした。この地域の人口は19,353人である(2005年現在)。千代田線分水界は、城原川、田手川、筑後川に囲まれる面積2514.3haの低平水田地帯である。この地域の灌漑水は佐賀東部導水路から導水され、国営千代田線を通して千代田排水樋門から筑後川へと排出される。図-13に千代田線分水界概略図を示す。

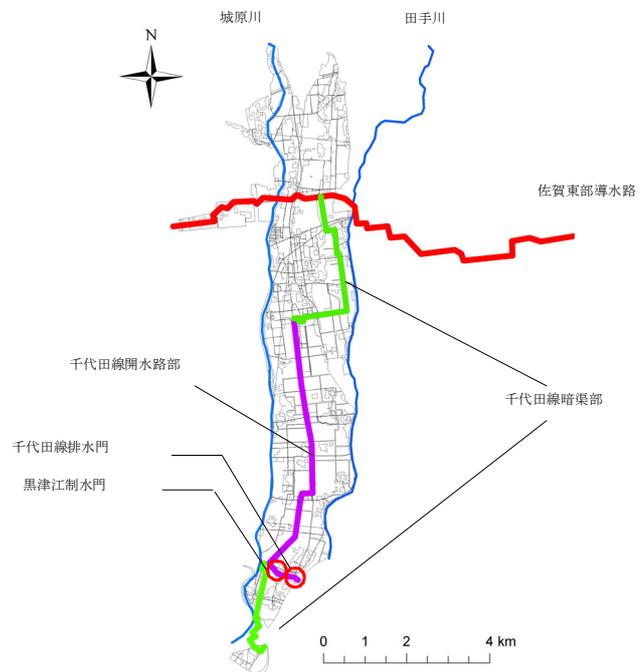


図-13 佐賀平野東部千代田線分水界概略図

この分水界の水収支ならびに物質収支を定量的に把握するために、本研究ではESRI社のArcGISを導入することとした。地図データとしては、国土地理院発行の数値地図(数値地図25000行政界・海岸線, 数値地図

2500空間データ基盤)，ゼンリン電子地図帳Ver. 10，九州農政局提供の佐賀東部流域図などを用いた。また，土地利用データについては，国土地理院流域自然環境調査作業（筑後川下流地区）のGISデータを利用した。国土地理院のGISデータを元に分類した当該地区の土地利用分布図を図-14に示す。

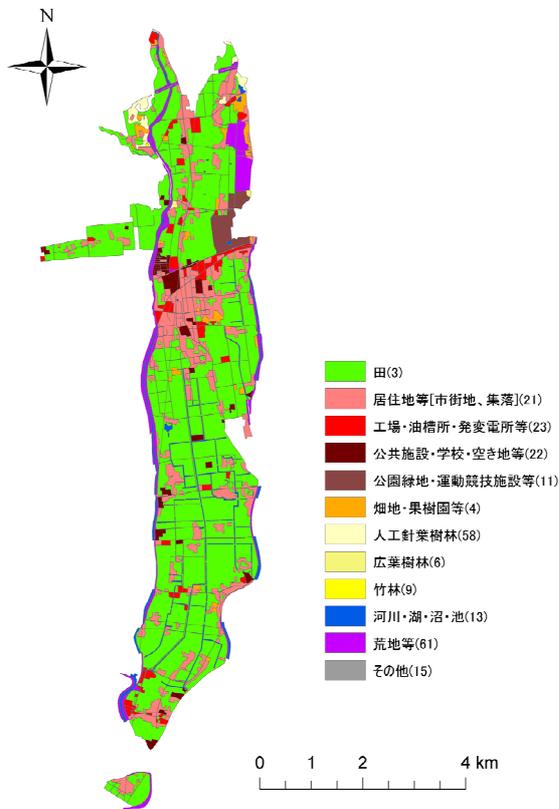


図-14 千代田線分水界土地利用分類図(2005)

本研究の後の汚濁負荷解析に利用するため，国土地理院の土地利用分類項目を表-7のように簡略化させた。その結果，千代田線分水界の土地利用割合が表-8のように得られた。

表-7 国土地理院と本研究での分類項目対応表

国土地理院分類項目	本研究での分類項目
田	田
居住地等	市街地
道路・鉄道等	
工場・油槽所・発電所等	
公共施設・学校・空き地等	
公園緑地。運動競技施設等	
畑地・果樹園等	畑
人工針葉樹林	森林
広葉樹林	
竹林	
河川・湖沼・沼・池	水面
荒地等	なし

表-8 千代田線分水界の土地利用割合

田	市街地	荒地	水面	畑	山林	その他
1591.1ha	616.8ha	144.6ha	92.4ha	41.9ha	27.2ha	0.3ha
63.28%	24.53%	5.75%	3.67%	1.67%	1.08%	0.01%

## (2) 佐賀平野東部クレーク地帯

本研究で研究対象とした大領域は，九州農政局から提供された，導水線ごとに分割された，城原金立線地区，諸富線地区，大詫間線地区，千代田線地区，三田川線地区，東脊振線地区，津崎三根線地区，上峰線地区，西島下田芦線地区，中原東部線地区，大島線地区の計11地区である。面積は約16,000haである（図-15参照）。

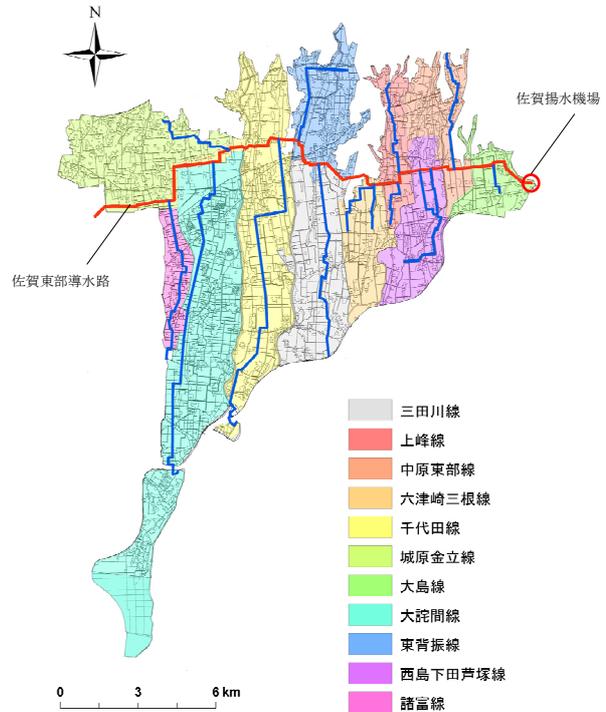


図-15 佐賀平野東部クレーク地帯の概略

千代田線分水界の時と同じように土地利用分類図を作成し，土地利用割合を求めると表-9のようになる。

表-9 佐賀平野東部クレーク地帯の土地利用割合

川	畑	田	市街地	山林	荒地等	その他
477.51	305.78	8828.51	5057.98	1088.28	331.55	78.26
2.95%	1.89%	54.61%	31.28%	6.73%	2.05%	0.48%

佐賀平野東部クレーク地帯は，約半分が水田，3割が市街地となっているが，千代田線分水界はそれより水田の割合がやや多い地域となっている。

## (3) 点源汚濁負荷の算出

### a) 生活系汚濁負荷

生活系汚濁負荷では，生活排水およびし尿について原単位を与えた。人口については平成17年佐賀県統計年鑑，福岡県統計年鑑から市町村ごとに求めた。千代田線分水界については生活排水およびし尿処理の割合は千代田町のものを与え，佐賀平野東部クレーク地帯については生活排水およびし尿の処理方式は下水道統

計年鑑<sup>9)</sup>、福岡県統計年鑑<sup>10)</sup>から市町村ごとに求めた。千代田線分水界については生活排水およびし尿処理の割合は千代田町のものを与え、佐賀平野東部クリーク地帯については生活排水およびし尿の処理方式は下水道統計行政編(2006)<sup>11)</sup>を参考にした。

#### b) 畜産系汚濁負荷

家畜の頭数は生活系汚濁負荷同様、平成17年佐賀県統計年鑑、福岡県統計年鑑から市町村ごとに求めた。その結果、千代田線分水界では、牛が481頭、豚・鶏は見られなかった。同様に佐賀平野東部クリーク地帯では、牛1922頭に対し、豚・鶏は見られなかった。原単位は、対象地域が近いということから「筑後川クリーク地帯の水質診断」(農業土木学会誌)<sup>12)</sup>より引用した。

#### c) 工業系汚濁負荷

冬季(11月中旬～3月)には、海苔工場からの排水も加わる。その水質調査は調査回数も少なく、ばらつきも多いがその濃度はCOD約50mg/l, T-N約5～20 mg/l, T-P約2 mg/l といわれている。排水量は269m<sup>3</sup>/日、発生負荷量はCOD14kg/日, T-N3.7kg/日, T-P0.96kg/日と推定されている。これを元に工業系汚濁負荷の原単位を与えた。なお、佐賀平野東部クリーク地帯には海苔工場は2件、千代田線分水界には海苔工場はなかった。

### (4) 面源汚濁負荷

#### a) 田の汚濁負荷

田の汚濁負荷については、灌漑期122日間(6月1日～9月30日)を水稻作付け期間として算出し、非灌漑期243日間のうち裏作である麦作の作付け期間を120日間として汚濁負荷を算出した。原単位は、「筑後川下流域クリーク地帯の水質診断」<sup>12)</sup>の値を用いた。千代田線分水界の水田面積は1591.1ha, クリーク地帯の水田面積は8828.51haである。なお、降雨量は灌漑期648.5mm, 非灌漑期637.5mmであった。

水田用水総量を正確に把握することは難しいため、水田からの蒸発散と浸透量に関する減水深からおおよその用水量が把握されている。水田用水総量は次式のように日減水深に基づいて推算される<sup>13)</sup>。

$$W = \frac{AhT - R}{1 - \ell} \quad (1)$$

ここに、 $W$ :水田用水総量,  $A$ :水田面積,  $h$ :日減水深,  $T$ :取水日数,  $R$ :稲作期間中の水田への降水量,  $\ell$ :損失率である。

ここで、 $w$ :水田日用水総量,  $r$ :日降水量,  $i$ :日灌漑量,  $k$ :日還元量とおくと、水田の降雨流失率は40%であるので、日降雨流出= $0.4r$ となり、 $0.4r$ が $w$ に関与しないと仮定すると、

- (i)  $w < 0.6r$  のとき、  $k = 0.6r - w$
- (ii)  $w > 0.6r$  のとき、  $i = w - 0.6r$

とおける(図-16参照)。

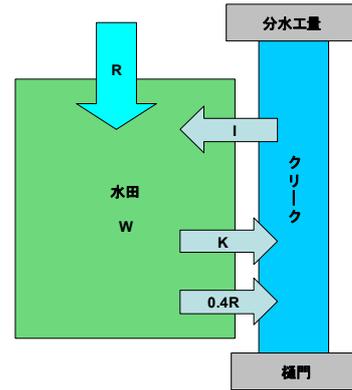


図-16 クリークと水田の水の動き

よって、水田から排出される水量=降雨流出量+還元量であるから、

$$\text{水田排水量} = \sum (0.4r + k) \quad (2)$$

となる。なお、計算には全国平均の日減水深15mm/日を与えた。

#### b) 畑の汚濁負荷

畑の作付け期間は灌漑期120日間、非灌漑期120日間とした。千代田線分水界の面積は41.9ha, 佐賀平野東部クリーク地帯の面積は305.78haである。原単位は、「筑後川下流域クリーク地帯の水質診断」<sup>12)</sup>の値を用いた。

#### c) 山林の汚濁負荷

山林の千代田線分水界の面積は27.2ha, 佐賀平野東部クリーク地帯のそれは1088.28haである。山林の面積には、ArcGISで土地利用分類された人工針葉樹林、広葉樹林、竹林の地目のものを用いた。原単位は、参考文献12のものを用いた。

#### d) 市街地の汚濁負荷

市街地の面積は、千代田線分水界616.8ha, 佐賀平野東部クリーク地帯5057.98haである。市街地の面積には、ArcGISで土地利用分類された居住地等、工場・油槽所・発電所等、公共施設・学校・空き地等、公園緑地・運動競技施設等、道路・鉄道等の地目のものを用いた。市街地には様々な汚濁負荷源となるものが混在している状態であり、原単位を与えられている市街地は少なく、全国でも市街地の汚濁負荷原単位を推定した箇所は17ヶ所と少ない。本研究では対象地もほぼ一致することから「有明海水域に係る下水道整備総合計画に関する基本方針策定調査」<sup>2)</sup>の原単位を用いた。

#### e) 水面の汚濁負荷

水面を、河川、クリーク、沼、池など地表面に水面が露出しているものと定義し、そこには降雨が直接降るため原単位には降雨の負荷濃度を用いた。

#### f) 分水の汚濁負荷

佐賀平野東部クリーク地帯では、筑後川の水を佐賀揚水機場から揚水し、佐賀東部導水路を経て田畑の灌漑用水に利用している。各分水界の分水工まではほぼ暗渠であるので、平成17年九州農政局が実際に測定した佐賀揚水機場の測定データを原単位として用いた。

### (5) 佐賀東部クリーク地帯の汚濁負荷解析の結果と考察

紙面の関係で、千代田線分水界のもののみを示す。灌漑期と非灌漑期に分け、それらの期間の負荷排出量、排水量を推計した結果を表-10に示す。

表-10 汚濁負荷量の推計結果(灌漑期(上)と非灌漑期(下))

項目	COD(kg)	T-N(kg)	T-P(kg)	排水量(m <sup>3</sup> )
分水工量	7,159.34	616.73	192.61	5,068,190
生活系	49,815.27	33,100.98	2,505.44	663,460
畜産系	1,088.55	1,191.24	205.39	5,281
降雨	376.07	179.86	3.27	327,017
市街地	22,063.18	3,341.08	391.30	2,799,964
水田	9,785.48	5,158.65	345.68	6,201,237
畑	56.02	322.11	3.50	81,516
山林	330.84	40.15	2.99	35,278
合計	90,674.76	43,950.82	3,650.17	15,181,944

項目	COD(kg)	T-N(kg)	T-P(kg)	排水量(m <sup>3</sup> )
分水工量	0.00	0.00	0.00	0.00
生活系	99,222.21	65,930.64	4,990.34	1,321,481
畜産系	2,168.18	2,372.72	409.09	10,519
降雨	369.69	176.81	3.21	321,470
市街地	43,945.52	6,654.78	779.39	2,752,470
水田	2,092.41	12,554.43	544.03	3,042,979
畑	55.10	316.83	3.44	80,134
山林	658.98	79.98	5.95	34,680
合計	148,512.09	88,086.19	6,735.45	7,563,733

原単位とフレーム値、排水量から求めた負荷濃度の推計値は、実測値(1993年に対象地に近い筑後川左岸域で観測されたもの)<sup>12)</sup>と比較すると、灌漑期についてはほぼ同様な値を得ることができた。しかし、非灌漑期では今回の推計結果の方が4倍程度大きくなってしまった。以上のことより、今回用いた原単位法および排水の流出は灌漑期にはおおむね適用できるが非灌漑期には適用できないことが分かった。

## 5. 結論

本研究では、GISを用いて筑後川、菊池川、白川、緑川の流出モデル・汚濁負荷モデルを構築し、良好な再現結果が得られた。有明海海域モデルへの境界条件としての役割が担えるようさらにモデルを改善していく予定である。また、筑後川右岸感潮域に存在するクリーク地帯からの汚濁負荷量の算出を行い、灌漑期で良好な推定が行えることを確認した。しかしながら、非灌漑期における原単位の適用に問題があることが分

かったため、今後、現地調査などを通じて適切なパラメータを求めていく必要があると思われる。

**謝辞:** 本研究で用いた雨量データの一部・流量データ・河道の断面データと計算諸元データは、国土交通省筑後川河川事務所より、ダム流入・放流量データは筑後川ダム統合管理事務所より、さらに雨量データの一部を気象庁・気象台より提供いただいた。また、佐賀平野東部クリークの諸元および佐賀東部流域図については九州農政局筑後川下流農業水利事務所より、クリークの水質データについては九州農政局北部九州土地改良調査管理事務所より、分水工取水量データについては独立行政法人水資源機構より提供いただいた。さらに有明流総分割図については、国土交通省九州地方整備局企画部企画課地方計画係より提供いただいた。そして、本研究の遂行を当時学部4年生だった本谷麻衣子さん、茶屋道祐輔君に中心的にサポートしていただいた。関係各位に深甚なる謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 環境省有明海・八代海総合調査評価委員会：有明海・八代海総合調査評価委員会報告, 2006.12.
- 2) 有明海水域に係る下水道整備総合計画に関する基本方針策定調査委員会：有明海水域に係る下水道整備総合計画に関する基本方針策定調査報告書, 2005.3.
- 3) 菅原正巳：流出解析法, 共立出版株式会社, 1973.
- 4) 榎根勇：水文学, 大明堂, 1992.
- 5) 国土交通省河川局：国土交通省河川局水文水質データベース (<http://www.mlit.go.jp/river/>)
- 6) 気象庁：気象庁アメダスデータ (<http://www.jma.go.jp/jma/>)
- 7) 日本河川協会：雨量・流量年表データベース (DVD-R), 2007.3.
- 8) Komatsu, T., K. Ohgushi, K. Asai and F.M. Holly Jr.: Accurate numerical simulation of scalar advective transport, J. of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol. 7, No. 1, 63-73, 1989.
- 9) 佐賀県：平成17年度佐賀県統計年鑑, 2005.
- 10) 福岡県：平成17年度福岡県統計年鑑, 2005.
- 11) 社団法人日本下水道協会：下水道統計行政編, 2006.
- 12) 柚山義人・木下陽児郎・中村精文：筑後川クリーク地帯の水質診断、農業土木学会誌, 1994.
- 13) 高橋裕：河川工学, 東京大学出版会, 1990.

(2008.3.31受付)

# 感潮域河口の流動と土砂動態に関する現地観測

## ON CURRENT AND SEDIMENT TRANSPORT IN THE ESTUARY

平川隆一<sup>1</sup>・速水祐一<sup>2</sup>・山本浩一<sup>3</sup>・横山勝英<sup>4</sup>  
大串浩一郎<sup>5</sup>・濱田孝治<sup>3</sup>・大本照憲<sup>6</sup>

Ryuichi HIRAKAWA, Yuichi HAYAMI, Koichi YAMAMOTO, Katsuhide YOKOYAMA,  
Koichiro OHGUSHI, Takaharu HAMADA and Terunori OHMOTO

<sup>1</sup>博(工) 佐賀大学助教 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>2</sup>博(農) 佐賀大学准教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>3</sup>博(工) 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>4</sup>博(工) 首都大学東京准教授 都市環境学部都市環境学科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

<sup>5</sup>博(工) 佐賀大学准教授 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>6</sup>博(工) 熊本大学大学院教授 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39番1号)

The loading measure of the material that flows into the sea from the river requests from the flow rate and the material density measured from the estuarine basin in the upstream or is often estimated by the basic unit law. However, there are possibilities that the outflow is greatly different in the estuarine basin upper pole of kidney and the mouth of a river if the chemistry and the living thing change are received in the tide river channel. The effect of the filtration of seawater in the tide river channel in Chikugo River was attempted in 18 fiscal year and the recognition was attempted quantitatively by the site investigation and the data analysis.

This time, the examination was done to Midori River and Kikuchi River which were other class A rivers at the spring tide.

*Key Words : Ariake Sea, Estuary, Suspended Sediment, Tidal Flow*

## 1. はじめに

有明海に流入する河川感潮域を対象にし、河川から海に流入する物質フラックスの調査を進めている。前報では筑後川を対象とした<sup>1)</sup>が、本稿では他の一級河川である緑川と菊池川について調査を行ったので報告する。

## 2. 調査概要

緑川の対象地水深(T.P.)と側線を図-1に示す。左岸には干潟が形成されている。

対象地は河口から0km~1kmの区間であり、その1km区間を200mの等間隔で河口から0, 200, 400, 600, 800m, 1km地点の6計測線に加え700mの1計測線の計7計測線を設定した。この計測線は0m地点をL1とし、上流方向に順にL2~L7とする。

菊池川の調査対象地は河口から2.4km付近の水制がある左岸に設定した。調査対象地を図-2の赤枠で示す。観測では比較的水深の浅い水際部を調査対象としたため、流速測定にはStreamProADCPを用いた。そのため、計測域は左岸から約30mの範囲であり、河口全域の横断観測は行っていない。

計測線は水制から下流へL1~L7までの10m間隔、横断方向には水際から河道中央に向けて約25m設けた。また、木杭水制の影響を調べるため、上流側木杭水制設置箇所側に側線を1点設けL8とし、計8測線設定した。

## 3. 観測結果および考察

### (1) 緑川河口域

ADCPによる横断面流況の計測結果をもとに上げ潮時と下げ潮時の水深平均化した流速ベクトルを図-3および4

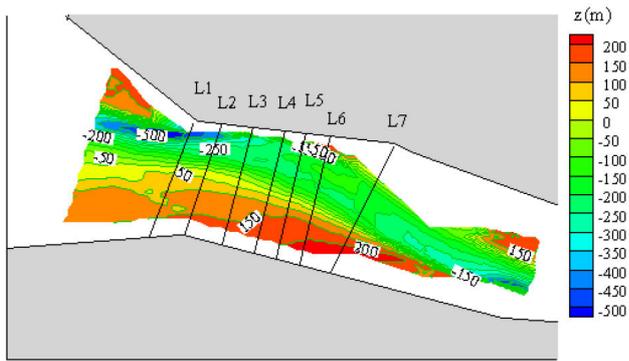


図-1 緑川の水深分布と計測線



図-2 菊池川の調査対象地

に示す。上げ潮、下げ潮共に左岸側は流速が小さくなっているがこれは左岸側にある干潟の影響だと考えられる。下げ潮時においては滞筋の影響を強く受けL1, L2は右岸に近づくに従って流速が増加し, L3~L7では中央付近で流速が大きくなっている。一方上げ潮時においては、水深平均流速が下げ潮時に比べて辛零筋の蛇行の影響を強く受けておらず相対的に横断方向に様な状態に近い。下げ潮に比べて、上げ潮時のほうで水深平均流速が横断方向に様化したのは、上げ潮時の方が河床形状の影響を受け難いためである。理由としては、塩水および土砂の濃度は、上げ潮時で大きく、両者は河床地形の影響を強く受け、辛零筋部に沿って遡上する。このため、上げ潮時においては、河床地形の流れへの影響は下層の高濁度水塊および塩水によって緩和されたと考えられる。

大潮時の上げ潮時下げ潮時の土砂輸送量の等値線を図-5および6に示す。図中左側が左岸、右側が右岸となっており上流向きを正とした。

この土砂輸送量はADCPで得た反射強度と多項目水質計で得た濁度とが高い相関を示したので、最小自乗法を用いて反射強度と濁度の実測値から土砂濃度を推定し、その推定値から土砂輸送量を求めた。

上げ潮では全体的な傾向としてはL1から上流に遡るにつれて土砂輸送量は増加傾向にあり下げ潮に比べL1, L7の輸送量の差が大きくなった。また上げ潮は各横断面内

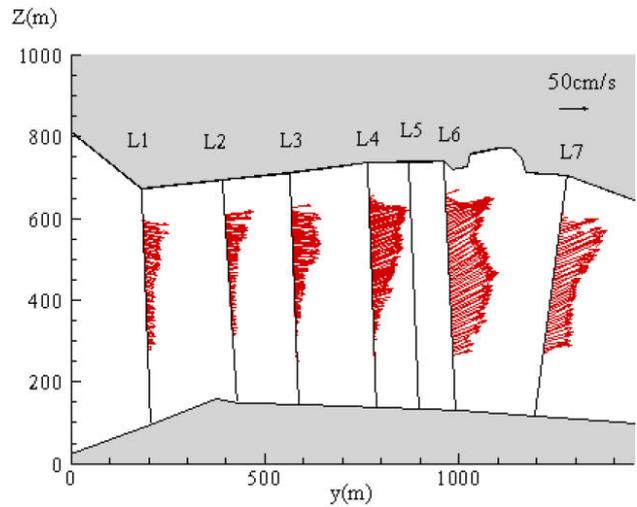


図-3 下げ潮時の平面流速ベクトル

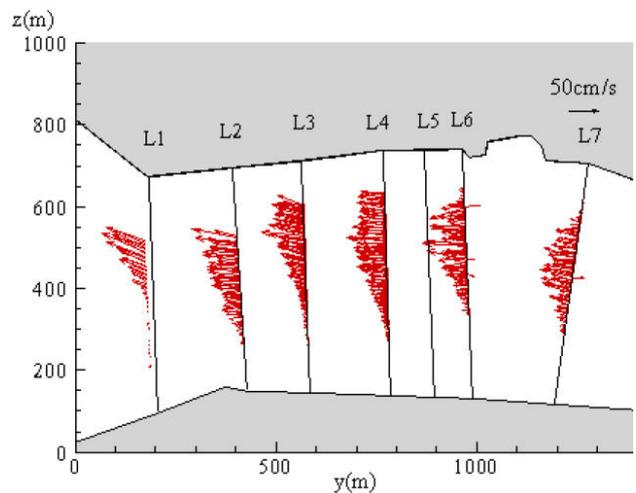


図-4 上げ潮時の平面流速ベクトル

において下げ潮に比べ比較的一様な値をとっている。

上げ潮において計測線L6では河道中央部上層で輸送量が高いさらに右岸側では下層においても輸送量は大きいため河床堆積物が再懸濁されていると考えられる。また干潟が存在するL4左岸では輸送量は小さい。

下げ潮時においては上げ潮時と比較すると各横断面内において上層での土砂輸送量に比べて下層での輸送量が非常に小さいことから、土砂はほとんど堆積することなく上層を通過して輸送されていると考えられる。またL2, L4の左岸側で土砂輸送量は小さい。これ干潟の存在が影響していると考えられる。L6ではその下流の計測線に比べ下層での輸送量は流化方向に大きくなっている。これは大潮時のL4左岸側では主流速は小さいが左岸側で生じている上昇流および下降流が影響していると考えられる。

上げ潮時においては上流方向に向かって土砂輸送量が増加することおよび横断面上層で輸送量が大きくなっていることから再懸濁が生じ上流方向へと輸送されたと考えられる。

## (2) 菊池川河口域

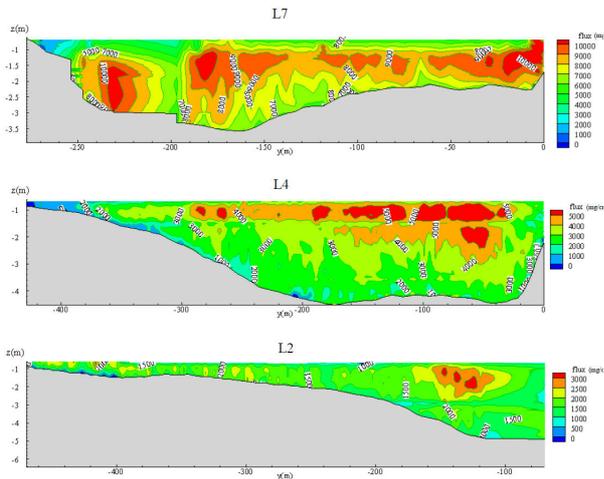


図-5 上げ潮時の土砂輸送量

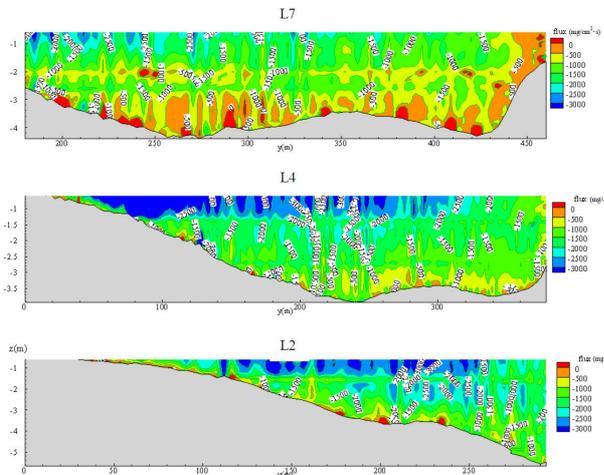


図-6 下げ潮時の土砂輸送量

ADCPによる横断面流況の計測結果をもとに大潮の上げ潮時と下げ潮時の水深で平均化した流速ベクトルを図-7および8に示す。下げ潮は、上げ潮より水深平均流速が遅かったため傾向が分かりやすいようにげベクトルの大きさを2倍にしている。また、赤枠で示しているのが捨石破壊部である。

図-7より上げ潮最大流速は、L1~L7で約35 (cm/s) 前後となっており、L8 (上流側木杭水制) では、26.6 (cm/s) となっている。このことから木杭水制によって流速が低減されていることが分かる。L1では、出水により、捨石の一部が破壊され、破壊された部分にベクトル向かっている。また、上げ潮は、中潮、大潮ともに、全ての計測線において水際部で流速が遅く、流心部に近づくにつれ流速が速くなり、上流方向へ安定した流れになっている。

図-8より下げ潮の大潮では、y軸70m付近で、L1は34.8 (cm/s) , L2は20 (cm/s) , L8は17.5 (cm/s) と下流方向を向くベクトルが最大流速をとっている。L3~L7では、約17 (cm/s) 前後で上流方向に最大流速をとっている。また、全体的に上流方向に逆流が生じている。

下げ潮で上流方向に逆流が生じているのは、藩政時代

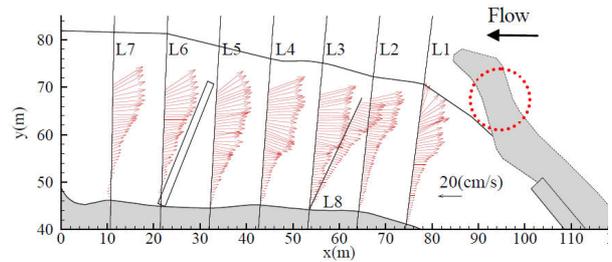


図-7 上げ潮時の平面流速ベクトル

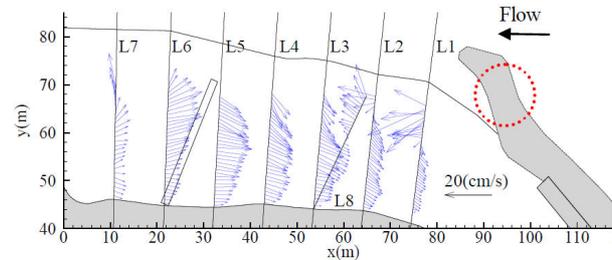


図-8 下げ潮時の平面流速ベクトル

の下向き水制と捨石の影響を受け、これにより、逆流が起きる循環流が形成されたと考えられる。また、上げ潮より下げ潮の流速が遅いのも、この下向き水制の影響を強く受け、流速が低減されていると考えられる。

大潮の下げ潮では全体的に逆流が生じているが、L1, L2, L8で流速が大きく、y軸60m~70mでベクトルが下流方向を示しているのは、破壊された部分から水が流入することによるものだと考えられる。

下げ潮の大潮で逆流している部分の流速は、側線中央部 (y軸55m付近) で速くなっており、左岸方向へベクトルも集まるような傾向にある。

各計測線において、ADCPで得られた反射強度のデータから求めたSS濃度と主流速uからSS-flux (g/m<sup>2</sup>/s) を求め、横断面での等値線を図-9に示す。また、低層の白い部分は欠損部である。

上げ潮において、各計測線での傾向は酷似しており、表層でフラックスが大きく、中層、底層に行くに従い、土砂輸送量は小さくなっている。L8の木杭水制が設置されている場所では、L8とL4を比較すると、L8でフラックスが小さくなっている。また、L8とL1を比較するとL1でフラックスは大きくなっている。このことから、木杭水制によってフラックスが低減され、木杭水制付近に懸濁物質が堆積していることが考えられる。

下げ潮では全ての計測線において、表層でフラックスの値が高く、表層で多くの土砂輸送がされており、底層に行くに従い、フラックスの値は小さくなっている。逆流が起こっている水際付近では、L4, L8, L1に行くに従い、フラックスの量が減少していることから、下向き水制に近づくにつれ、徐々に懸濁物質が沈降していき、堆積していることが考えられる。

以上のことから、上げ潮で懸濁物質が堆積し、下げ潮でも下向き水制の影響による逆流によって水際部に懸濁

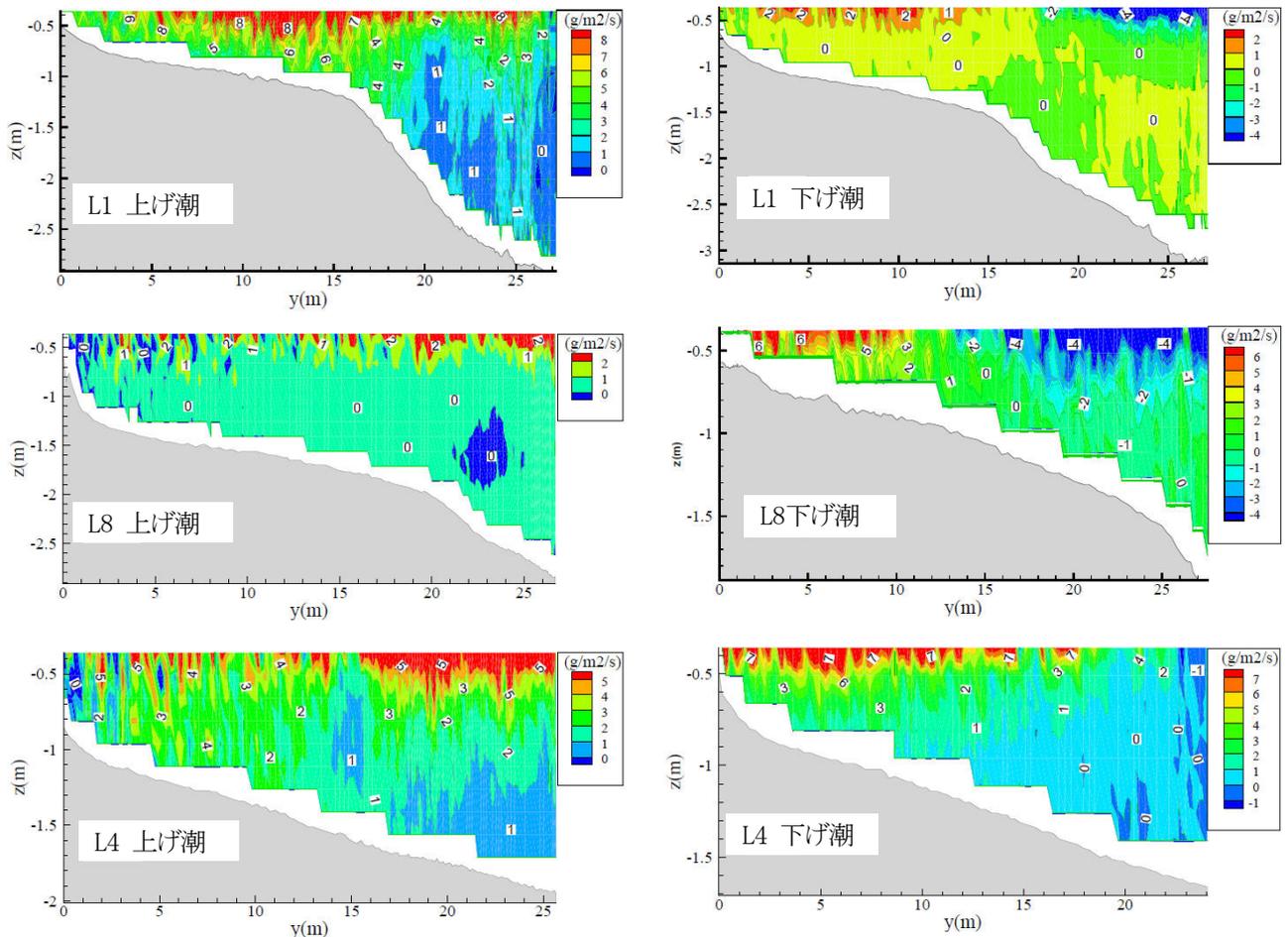


図-9 各測線における上げ潮時と下げ潮時のSS

物質が堆積する傾向があることがいえる。

また、木杭水制によって、流速と共に土砂輸送も低減され、木杭水制付近では、多くの懸濁物質が堆積することがいえる。

#### 4. 結論

本調査では、有明海に流入する一級河川の内、緑川と菊池川の河口域を対象とし、平水時における上げ潮および下げ潮時における流れ場の計測を行った。その結果以下のような知見が得られた。

1. 緑川河口域の水深平均流速は、下げ潮時には滞筋部の影響を受け、極大水深が生じているところで速くなっているが、上げ潮時には辛零筋部の影響は強く受けておらず相対的に横断方向に一様化する。
2. 緑川河口域の土砂輸送量は上げ潮では下げ潮に比べかなり大きいことが確認された。また上げ潮時には再懸濁を起こしていることが考えられる。
3. 菊池川左岸近傍の平均水深流速は、上げ潮の水際部で流速が遅く、流心部に近づくにつれ流速が速くなり、上流方向へ安定した流れになっている。下げ

潮は、藩政時代の下向き石積み水制の影響を受け、上流方向への逆流が見られる安定した水平循環流が形成され、潟土堆積を促進する機能を有することが明らかにされた。

4. 菊池川の潟土を含む懸濁物質の輸送は、上げ潮で上流方向に懸濁物質の輸送が行われ、徐々に堆積していた。下げ潮でも下向き水制の影響によって逆流が起こり、水際部に懸濁物質が堆積する傾向があった。

今後は、両感潮河口における一潮汐間の物質収支を求め海水の濾過効果を評価すると共に、他の一級河川においても調査および検討を加える予定である。

#### 参考文献

- 1) 平川隆一, 速水祐一, 山本浩一, 横山勝英, 大串浩一郎, 濱田孝治: 筑後川感潮域における水理特性と物質輸送, 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集, 第3巻, pp.111-114, 2007.

(2008. 3. 31受付)

# 有明海奥部における流れとその経年変化

## FLOW AND ITS TEMPORAL CHANGE IN THE INNER AREA OF THE ARIAKE SEA

山口創一<sup>1</sup>・濱田孝治<sup>2</sup>・速水祐一<sup>3</sup>・瀬口昌洋<sup>4</sup>・大串浩一郎<sup>5</sup>  
 Soichi YAMAGUCHI, Takaharu HAMADA, Yuichi HAYAMI, Masahiro SEGUCHI, Koichiro OHGUSHI

<sup>1</sup>博士(理) 佐賀大学研究機関研究員 有明海総合研究プロジェクト(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>2</sup>工博 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>3</sup>農博 佐賀大学准教授 有明海総合研究プロジェクト(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>4</sup>農博 佐賀大学教授 農学部生物環境科学科(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>5</sup>工博 佐賀大学准教授 理工学部都市工学科(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

There are many environmental problems in the inner part of the Ariake Sea such as increase of red tide, formation of hypoxia, decrease of particle size of the bottom sediments and etc. Although these phenomena are closely related to the temporal changes of flow and wave field, these changes have not been made clear based on field measurements. This study provides the characteristics and temporal changes of flow and wave based on field measurements that has been conducted from 1975 to 1998 in the inner area of Ariake Sea. The current decreases by 23 % due to the nori aquaculture conducted during autumn and winter season. The current speed at the flood tide temporally decreased from 1985 to 1997. Significant wave height (SWH) is highest in summer and closely related to southerly wind speed. SWH temporally increased due to the strengthening of southerly wind from the latter half of 1980's.

**Key Words :** *current, significant wave height, temporal change*

### 1. はじめに

近年有明海湾奥において特に秋冬季の赤潮の増加<sup>1)</sup>、底質の細粒化が指摘されている<sup>2)</sup>。速水ら(2007)<sup>1)</sup>は秋冬季のプランクトン沈殿量を最もよく説明する変数として、貝類漁獲量、透明度、DINをあげており、近年特に透明度が高いほどプランクトン沈殿量が多いという関係が強まってきていると報告している。田中ら(2004)<sup>3)</sup>は有明海奥部において小潮時の透明度の上昇にともなって珪藻赤潮が発生したことを示し、経年的な植物プランクトン量の増加が透明度の上昇によると述べている。つまり透明度は湾奥の植物プランクトン動態を左右する重要な環境因子であり、その上昇が赤潮の増加を引き起こしていることが分かる。

湾奥の透明度は何によってきめられているのであろうか。環境省の有明海海域環境調査<sup>4)</sup>によると、懸濁物質(SS)と透明度の間には正の相関があることが分かっており、透明度は懸濁物質の多寡に支配されている。中川ら

(2002)<sup>5)</sup>、八木ら(2006)<sup>6)</sup>は湾奥における懸濁物質の動態に関して観測を行い、基本的には潮流の強弱により支配されており、浮遊するSSは堆積した底泥の再懸濁物質であることを明らかにした。筑後川河口沖ではこれに加えて河口からの移流による高濁度水塊の影響を強く受けていると報告した。また、波浪の影響も無視できず、高波浪による再懸濁と風の吹き去る方向へのSSフラックスは大潮時とオーダーがほぼ同じという結果を得ている。一般に高波浪時には静穏時に比べて海底からSSが大量に巻き上げられることが知られており<sup>7),8)</sup>、特に干潟付近の浅海域ではSSの輸送に重要な働きを持っているという報告がある<sup>9)</sup>。瀬口ら(1992)<sup>10)</sup>は有明海奥部において観測を行い、波浪に起因する乱れが底泥の巻き上げに大きく影響していると述べている。

速水ら(2007)<sup>1)</sup>は透明度の上昇原因として、簡単な式(定常線形・水平拡散とネットの沈降フラックスを考慮)から、筑後川河口とその沖に位置する地点の濁度比の低下が透明度の上昇と強く関係し、その濁度比の低下の原因としてSSが河口域に沈降しやすくなったこと(つまり

再懸濁フラックスの減少もしくは沈降フラックスの増加)、水平拡散の低下が考えられると述べている。再懸濁フラックスの減少もしくは沈降フラックスの増加そして水平拡散の低下には流速の変化が大きな影響を持つが、現在までにその経年変化を実測値に基づいて評価した研究はない。また、上述したように風に伴う波浪による再懸濁効果も無視できず、その波浪を起こす風(北風)が1980年後半から経年的に減少しているという報告<sup>11)</sup>もあるが、使用している風データは陸域で計測されたものを使用しており、また波浪の経年変化は現在までに明らかとなっていない。

佐賀大学では、1974年に図1に示す筑後川河口沖5km地点に観測塔を建設し、長期にわたり気象海象観測を行ってきた。この佐賀大学海象観測塔の立つ地点は湾奥において透明度の上昇が最も顕著に見られた場所の一つである<sup>1)</sup>。本研究では、観測塔で長年にわたり計測されたデータを用いて透明度の上昇に強く関連している流れそして波浪の経年的な変化を明らかとする。

## 2. 観測方法

佐賀大学農学部浅海干潟総合実験施設では有明海湾奥部の潮流の変動特性を明らかにするための基礎的研究として1974年に佐賀大学有明海海象観測塔(以後観測塔とする)を佐賀県川副町国造干拓地先5kmの海苔漁場先端部(平均水深約6m)の浅海域(図1の●)に建設し、1975年5月から1998年3月まで風向・風速、雨量、気温、波浪、潮位、海面下1mにおける流向・流速、溶存酸素、電気伝導度、水温、水素イオンの計測を行ってきた。本研究では流向流速と風向風速および波浪のデータを解析に用いてその特徴と経年変動を評価した。以下に各計測方法について詳述する。

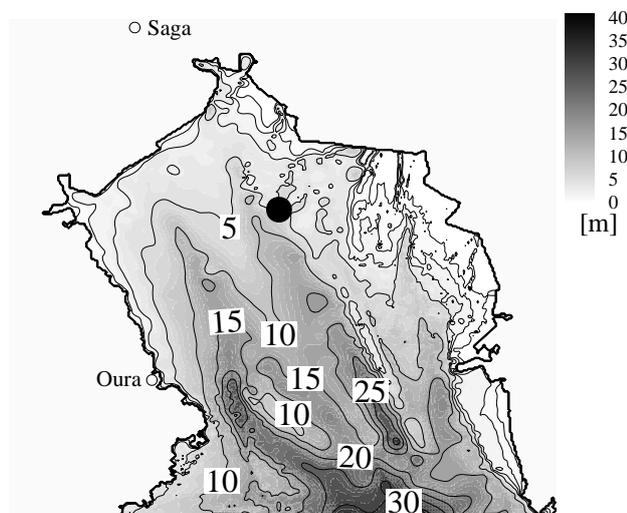


図1 観測塔位置と海底地形

流向流速は1975年から1984年までペーン型、サーボニアスロータ型の流速計(新日本気象海洋株式会社製)で計測され、それ以降は水平2軸電磁流速計(UECM-1000, ユニオンエンジニアリング)が用いられた。両流速計共にフロートを使用して常時海面下1m、観測塔の南西に設置された。前者による流速は10分間積算されたロータの回転数から求められ、流向は毎正時の瞬時値として出力される。後者は10分間のベクトル平均値として計測されている。波浪は観測塔の側面に鉛直に張られた約10mの抵抗線形の波浪検出器によって計測された。測定時ごとに波浪計から0.44秒間隔で約18分間読み取った一連の表面波形のデータから、ゼロアップクロス法によって順次波高と周期を計算し、最初から255波を対象として代表波高(有義波高など)を求めた。計測値はテレメータによって佐賀大学へと伝送されるが、1984年までは2進数8ビット構成、それ以後は12ビットであったため、分解能はそれぞれ3.92cm、0.24cmである。風向風速は平均海面下約12mで計測された10分間の平均値である。

## 3. 観測結果

### (1) 湾奥の流れと経年変化

まず湾奥の流れの特徴およびその経年変化について述べる。1976年度および1986年度冬季(12月から2月)に得られた流速のスカッタープロットを図2に示す。両年共に上げ潮時は北北西、下げ潮時は南西から南南西へ流れており、流れは上げ潮と下げ潮で対象ではない。図3に同じ期間の大浦の潮位、風速、有義波高と流速の観測例を示した。両年ともに風の強化に伴って有義波高が大きくなっていることが分かる。この有義波高と流速の対応関係を見ると、1976年において有義波高が高い場合、これに対応した流速の増大が見られる。一方で1986年には同様の対応関係は見られない。ロータ型の流速計により得られた流速は高波浪時には過大に評価されるということが報告されている<sup>12)</sup>。さらに1985年までの流向は瞬時値として出力されているため、波浪による往復流の影響を強く受けると考えられる。測器の違いや測定方法の違いなどに起因したこのような誤差の評価は非常に難しいため、後に示すノリ養殖の流速への影響や流速の経年変化の評価には1985年以降のみのデータを用いる。

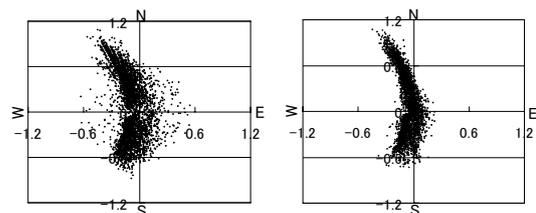


図2 冬季(12月から2月)の流速のスカッタープロット(1976年(左)および1986年(右))

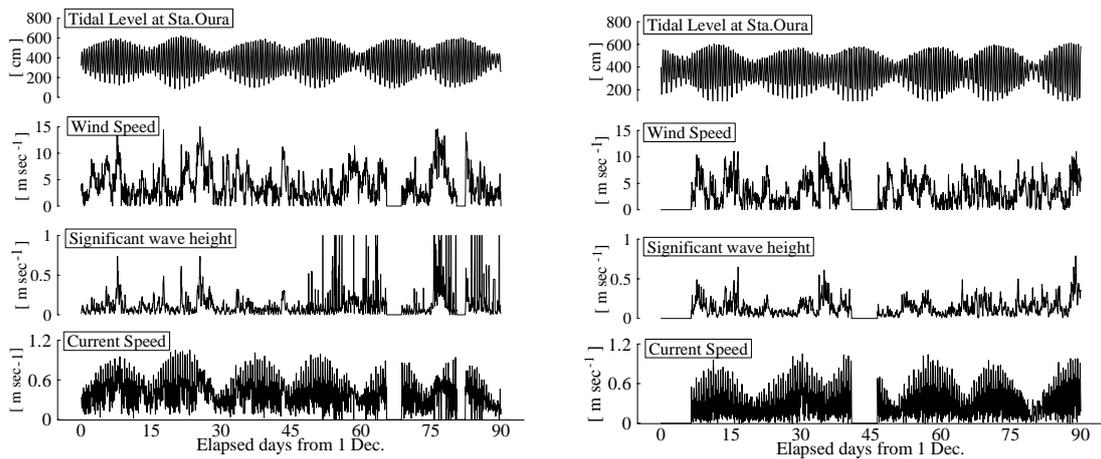


図3 冬季(12月から2月)の大浦潮位、風速、有義波高と流速の計測結果  
(1976年(左) および1986年(右))

次にノリ養殖が流れに与える影響について見ていく。観測塔がノリ養殖の先端部に位置し、また上げ潮および下げ潮で流向が大きく変わることから、以下のような方法で評価した。図4にノリ養殖期にあたる1986年2月と養殖の行なわれていない同年5月の一カ月間における大浦の満潮・干潮の潮位差とその間に計測された上げ潮もしくは下げ潮最強流速の関係を示した。ここで言う上げ潮および下げ潮とは南北成分が正(北向き)の場合を上げ潮、負(南向き)の場合を下げ潮とした。図4より上げ潮および下げ潮共に潮位差と良い相関関係があることが分かる。またノリ養殖期(2月)は非養殖期(5月)に比べて同じ潮位差であっても流速が小さい傾向にあることが分かる。そこでこのようにして得られた潮位差と最大流速の直線の傾きを1985年から1989年の毎月のデータについて求めたものが図5である。この期間中のノリ養殖が行われた時期にはハッチをつけ、潮位差と最大流速との間の相関係数(R)も示した。季節を問わず潮位差と最大流速は高い相関関係にあり、ノリ養殖期は非養殖期に比べて傾きが下がっていることが分かる。つまり同じ潮位差であってもノリ養殖期は非ノリ養殖期に比べて流速が弱まっていることを示している。ノリ養殖期と非ノリ養殖期の傾きの平均をとったものを図6に示す。同じ潮位差に対して、ノリ養殖期は非ノリ養殖期に比べて約23%最大流速が小さくなることを示しており、有明海湾奥の流れを考える時にはノリ養殖の影響は十分に評価する必要があることが分かる。

次に経年変動を評価する。流速について毎年の4月、5月の大潮(月齢が29から2と14から17)のみのデータを取り出し、上げ潮および下げ潮の流速平均値を計算した結果を図7に示した。同図には大浦における主要4分潮の振幅を足した値(大潮時の平均潮位差に相当する)の経年的な変動も示した。経年的に流速の低下が起っており、それが潮位差の減少と付随している様子が分かる。平均の上げ潮流速で約0.15m sec<sup>-1</sup>、下げ潮流速で約0.10m sec<sup>-1</sup>の減少となった。

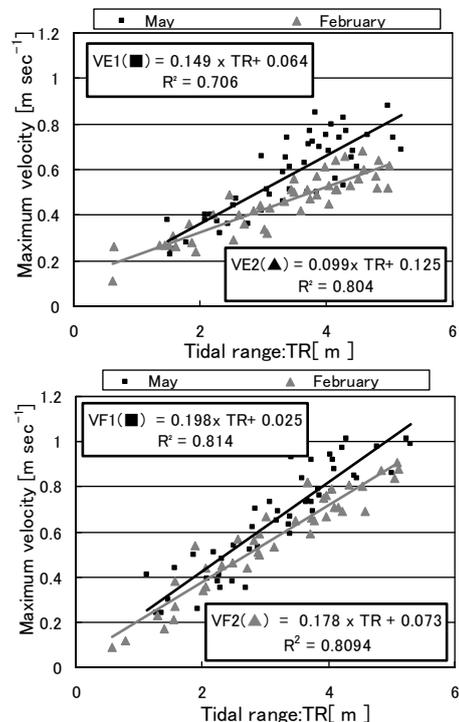


図4 ノリ漁期(1986年2月: ■)と非ノリ養殖期(1986年5月: ▲)の潮位差と最大流速の関係(上図が下げ潮、下図が上げ潮)。

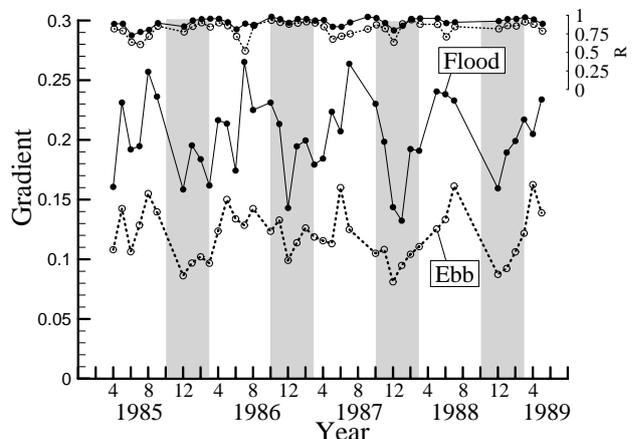


図5 潮位差と上げ潮(Flood)および下げ潮(Ebb)最大流速の関係式の傾きと相関係数(R)の季節変化。ハッチはノリ養殖期。

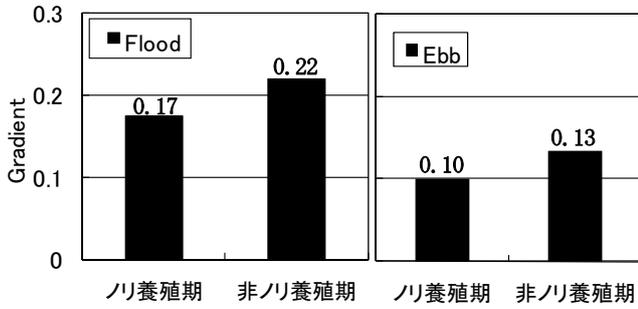


図6 潮位差と最大流速の関係式の傾きの有り養殖期(1, 2, 12月)と有り養殖期(4月から8月)の平均値。

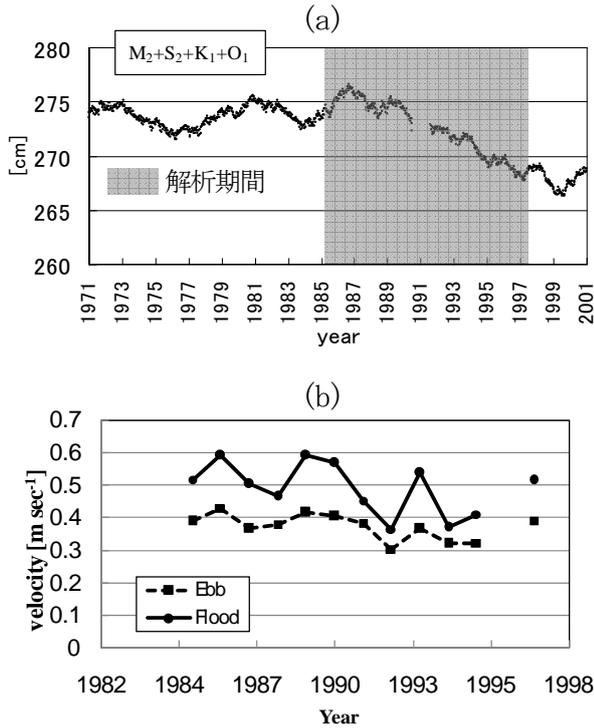


図7 大浦における主要4分潮(M2, S2, K1, O1)の振幅の積算値(a)および大潮時の平均上げ潮および下げ潮流速の経年変化

次に流向の変化に注目する。図8には毎年の4月、5月に計測された流速のスカッタープロットを1985年から1997年まで隔年(欠測の場合はその翌年を使用)で示す。1995年から1996年を境として上げ潮が真北へ、下げ潮がより西向きへと変化している様子が分かる。同図には海底設置型ADCP(Nortek's Aquadopp)により2007年に同じ海域で計測された海面下1.5mにおける流速のスカッタープロットも示した。その分布は1996年以後のものと同じである。よって1996年に流向の大きな変化があったことが検出された。

## (2) 波浪と風の経年変化

ここでは波浪(有義波高)と風の特徴および経年変化について検討する。図9に有義波高の各月平均値を示す。有義波高は夏季に高いことが分かる。図10には各季節(2, 4, 7, 10月)の風向頻度分布を示す。波高の高かった夏季は南風が卓越する。波浪は風の吹送距離が長いと発達しやすいため、南北に長い有明海では南風の卓越する夏季に高くなる。そこで以下では夏季(6月から8月)に注目して解析を進める。

浅い海域の波は海底摩擦や砕波のために外洋におけるように大きな波には発達せず、その波浪は水深に対応してある一定限度以上にはならないことが知られている<sup>13)</sup>。そこでBretshneider(1952)<sup>14)</sup>は、有義波高(SWH)、水深h、風速W、および吹送距離Fの関係をSMB法と言われる波浪推算法で求めた。Bretshneider(1952)<sup>14)</sup>にならい、南北風速と有義波高との関係をSMB法によって求めた。この時、吹送距離Fは一定とした。その結果を図11に示す。ここでは有義波高が1.0m以上の高波浪時のデータのみを使用した。その結果以下の式が得られた。

$$\frac{g \cdot SWH}{W^2} = 0.174 \times \left( \frac{g \cdot h}{W^2} \right)^{0.975} \quad (1)$$

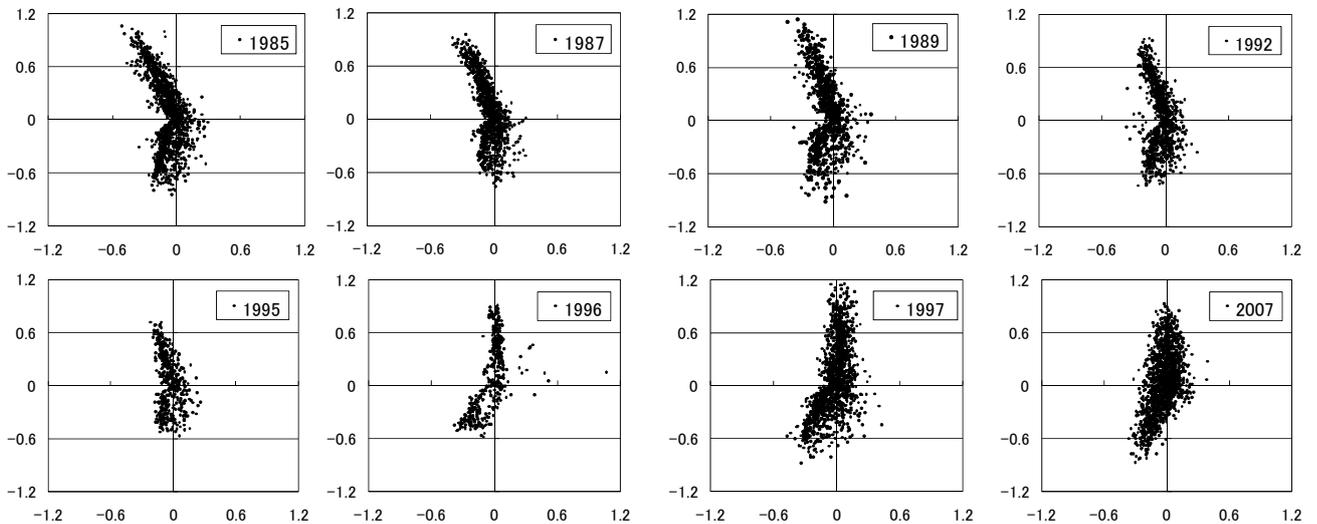


図8 流速のスカッタープロットの経年変化。

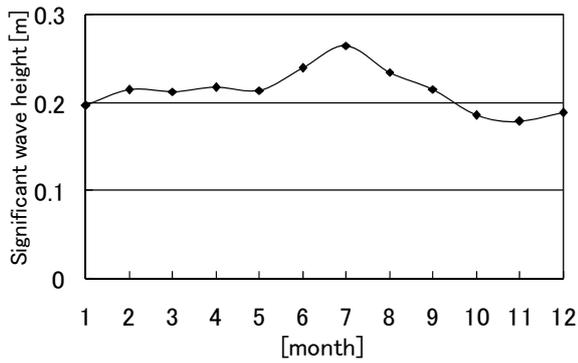


図9 有義波高の月平均値

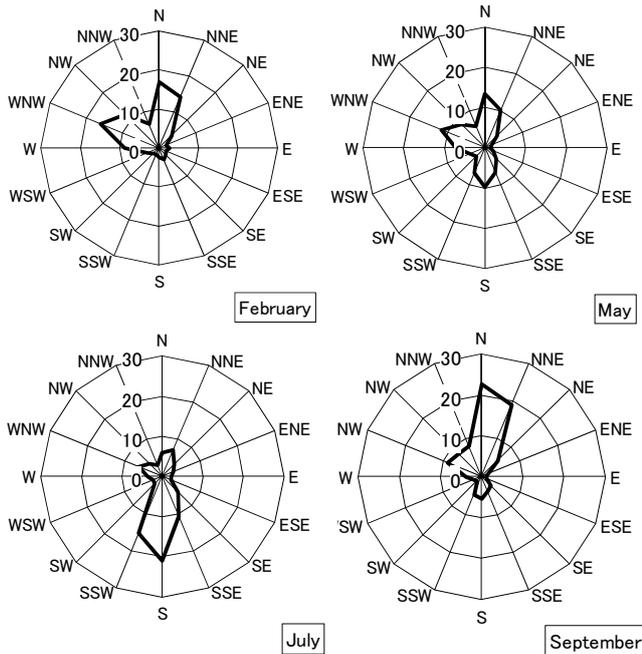


図10 各季節(冬:2月, 春:5月, 夏:7月, 秋:9月)風向頻度分布

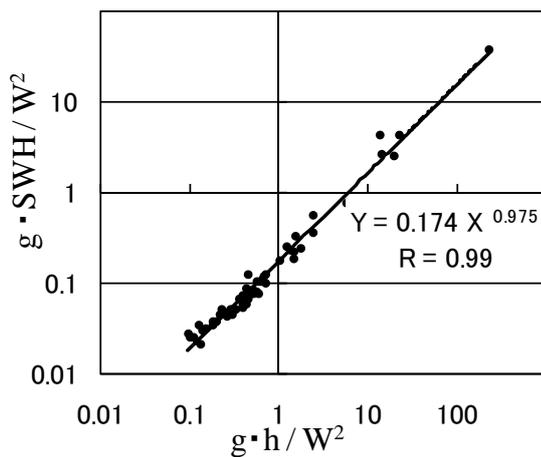


図11 有義波高(>1.0m)と南北風速との関係

ここで $g$ は重力加速度である。有明海における波浪(有義波高)は南北風速の二乗と良い相関があり、相関係数は0.99となった。よって夏季の波高は南方の風の強さに支配されていることが分かる。

次に有義波高の経年変化を評価していくが、第2章で

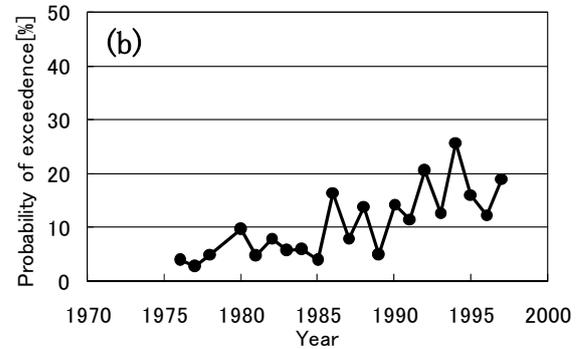
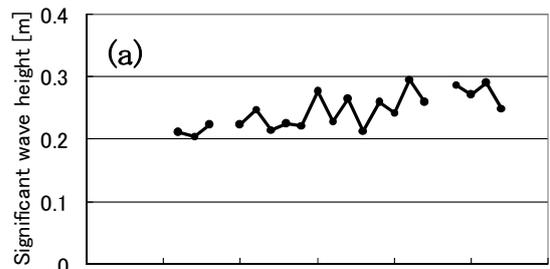


図12 有義波高(a)と0.4m以上の超過出現率(b)の経年変化

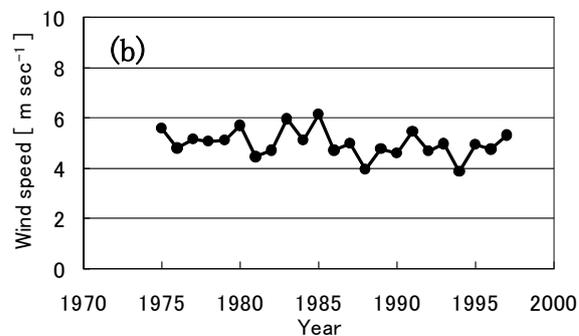
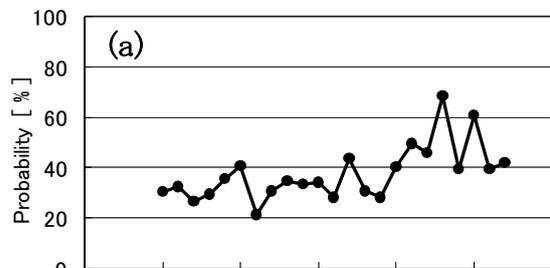


図13 南方風(南南西, 南, 南南東)の卓越頻度(a)および平均風速(b)の経年変化

述べたデータの分解能の影響を考慮し、0.1m以下の有義波高については扱わないこととした。毎年の夏季における有義波高の平均値の経年変化を図12(a)に、0.4m以上の有義波高の超過出現率の経年変化を図12(b)に示す。図12(a)より1980年代後半から有義波高の増加が見られ、超過出現率も上昇していることが分かる。このことは平均的な波高が高まったこと、より高い波浪が発達したことを示している。図11で示したように波高と南北風速との間には強い相関関係にある。そこで図13には毎年夏季(6月から8月)における南方(南南西, 南, 南南東)の風の平均風速および頻度の時系列を示す。経年的に平均風速

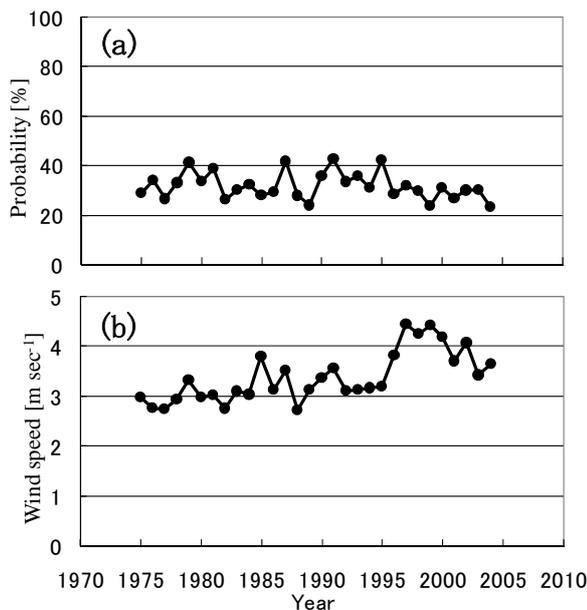


図14 佐賀地上観測所における南方風(南南西, 南, 南南東)の卓越頻度(a)および平均風速(b)の経年変化

は変わっていないが、南方の風の卓越する頻度が増加していることが分かる。この頻度の増加の影響を受け、波高が経年的に増加したということが分かる。

1997年以降の波浪の状況を推測するために、佐賀地上気象観測所で得られた2005年までの図13と同様の図をそれぞれ図14(a)と(b)に示した(タワーで得られた南方の風と佐賀地上気象観測所の風は良い相関関係にあることを確認している)。観測塔で検出されたほど明瞭ではないが、佐賀地上気象観測所においても1980年代後半に頻度が増加しており、同時期の南方風速の変化は小さいことが分かる。その後、頻度が徐々に下がり始め、風速も大きな変動はないが、1996年頃から風速が急激に上昇しており、この時期にも波高の上昇があったと考えられる。

#### 4. 結論

佐賀大学海象観測塔において経年的に観測された流れおよび波浪の資料を解析した結果、大潮時の流れは弱まり、また、南方の風の頻度が1980年代後半に高まった結果、波高が高くなったことが明らかとなった。こうした風系の変化時期は北太平洋スケールで検出された気候の変化(レジームシフト)<sup>16)</sup>の時期と一致する。有明海のような浅海域では砕波に伴う乱れは底質の浮遊拡散、海浜流の形成などに重要であり、検出された夏季の波高の増大の影響評価が重要である。また、夏季において湾奥の残差流は風の影響を強く受けるため(濱田・経塚, 2007)<sup>15)</sup>、風系の変化は残差流の変化を引き起こしていると考えられる。今後、数値計算等を駆使して、本研究で明らかとなった変化が有明海の環境に与えた影響を評価することが必要である。

#### 参考文献

- 1) 速水祐一, 槻木(加)玲美, 濱田孝治, 山本浩一, 吉野健児, 大串浩一郎, 平川隆一, 宮坂仁, 大森浩二(2007): 有明海奥部における物質輸送と低次生態系の動態について — 2年目の成果一, 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集第3巻, 71-80
- 2) 有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会(2002): 有明海の現状について—13年度調査と過去の資料の解析を踏まえて, 農林水産省, 200 pp.
- 3) 田中勝久, 児玉真史, 熊谷香, 藤本尚伸(2004): 有明海筑後川河口域における冬季のクロロフィル蛍光と濁度変動, 海の研究, 13, pp. 163-172
- 4) 環境省(2001): 有明海海域環境調査報告書
- 5) 中川康之, 今林章二, 末次広児(2002): 有明海の底泥輸送現象に関する現地データの解析, 海岸工学論文集, 49, 566-570
- 6) 八木宏, 井瀬肇, 松村航裕, 木元克則(2006): 有明海湾奥部干潟前縁域の流動構造と懸濁態物質輸送特性に関する現地観測, 水工学論文集, 50, 1465-1470
- 7) Anderson, F.E. (1972): Resuspension of estuarine sediments by small amplitude waves, J. sediment petrol., 42(3), 602-607
- 8) Ward L.G., Kemp W.M., Boynton W. R. (1984): The influence of waves and seagrass communities on suspended particulates in an estuarine embayment. Marine Geology, 59, 85-103.
- 9) Malcolm O.G., Kerry P. B., Carl L. A. (1997): Control of estuarine sediment dynamics by interactions between currents and waves at several scales, Marine Geology, 144, 97-116
- 10) 瀬口昌洋, 渡辺潔, 加藤治, 朴鐘和(1992): 有明海奥部海域における底泥の巻上げ, 農業土木学会論文集, 157, 65-74
- 11) 木谷浩三(2005): 有明海における北方成分風の変動について, 海と空, 80(4), 175-183
- 12) P. M. Saunders(1976): Near-surface current measurements, Deep-Sea Research, 23, 249-257
- 13) Munk W. H. (1949): Ocean Surface Waves, Annals of New York Academy of Science, 51, 376-424
- 14) Bretschneider, C.L. (1952) Revised wave forecasting relationships. Proc., Second Conf. on Coastal Engin., Council on Wave Research. 1952
- 15) 濱田孝治, 経塚雄策(2007): 有明海湾奥における循環流とその変動について, 海の研究, 16(3), pp. 203-221
- 16) S. YASUNAKA, K. HANAWA(2002): Regime Shifts Found in the Northern Hemisphere SST Field, J. Met. Soc. Japan, 80(1), 119-135

(2008. 3. 31受付)

# 複数地球観測衛星データによる赤潮分布 モニタリング方法

METHOD FOR DETECTING AND MONITORING OF RED TIDE  
BY MEANS OF MULTIPLE EARTH OBSERVATION SATELLITE DATA

新井康平<sup>1</sup>  
Kohei ARAI

<sup>1</sup>工博 佐賀大学教授 理工学部知能情報システム学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)  
Ph.D., Professor, Department of Information Science, Science and Engineering Faculty,  
SAGA University, Saga 840-8502, Japan

Method for detecting and monitoring red tide with multiple Earth observation satellite data is proposed. Relatively low resolution of Earth observation satellite data such as Advanced Very High Resolution Radiometer: AVHRR as well as Moderate resolution of Imaging Spectrometer: MODIS can be acquired a couple of passes a day while high spatial resolution of Earth observation satellite data such as Thematic Mapper: TM and Enhanced TM on Landsat satellite as well as Advanced Spaceborne spectrometer for Thermal emission and Reflection: ASTER on Terra satellite and High Resolution Visible: HRV on SPOT satellite are not so frequently acquired. Although it is not so easy to detect red tide with the low resolution of satellite data in detail, once some evidence of red tide is roughly found then it is confirmed with high resolution of satellite data of which is occasionally acquired coincidentally. Through the experiments during five year monitoring with Terra and Aqua/MODIS together with SPOT/HRV, Terra/ASTER and Landsat/TM and ETM, it is found that the proposed method does work to detect and monitor red tide, in particular, *Chattonella supp* which occurred in Ariake sea area in August 2007.

**Key Words** : *chattonella supp*, *Red tide*, *Terra/MODIS*, *Aqua/MODIS*, *SPOT/HRV*, *Landsat/TM,ETM*

## 1. まえがき

赤潮原因種には数多くの植物プランクトンがあり、種により発生時期や発生機構が異なるだけでなく、実際に被害を引き起こす頻度、すなわち、有害性が大きく異なる。そのため、モニタリングにおいては危険な赤潮を無害な赤潮の時点から早期に検出することが重要である。この早期検出を目的とした地球観測衛星による赤潮モニタリング方法が提案されている<sup>(1)-(6)</sup>。高空間分解能センサは観測頻度が低いために日々赤潮の変化に対応できないとの理由から、MODISやNOAA/AVHRRのように低空間分解能ではあるが毎日モニタリングできる衛星データを用いる方法が殆どである。しかし、前述の通り、早期に検出する必要があるため、高空間分解能センサデータを併用することが望ましいと考える。

2007年8月上旬から中旬にかけて有明海はほぼ全沿岸海域に大量のシャトネラが発生し、魚介類等に甚大な影響を与えた。8月23日頃からは魚の死骸が海面に浮くようになり、被害の甚大なことを見せ付けた。梅雨明け後は

珪藻類の赤潮が発生し、栄養塩を消費し尽くすが、今年は梅雨明け後の台風や大雨で栄養塩が8月まで残り、8月に入ってから海面温度が平年よりも2度程度高くなり、高水温に適応したシャトネラが増殖したものと見られる。また、海の上層と下層の塩分濃度が異なることで、海水が混合しにくくなる「成層化」も拡大の要因と考えられている。シャトネラはラフィド藻の一種で湾内ではしばしば有害赤潮の原因種となっている。本種の適水温は23~26°Cで、29~31の塩分を好む。そのため、2007年の夏はこれらの条件が満たされ、シャトネラが大量発生したものと考えられる。2000年以降の赤潮を衛星データに基づき観測を続けてきたが、2000年、2002年、そして2007年の赤潮は顕著である。栄養塩は勿論のこと、衛星から推定可能なクロロフィルa、海流、水温、日射、塩分濃度(降雨から推測)からも赤潮の予察が可能になりつつある。場所、規模を予測することは困難であるが、警報を提示することは可能と考えられる。また、ビブリオ・バルニフィカス菌の繁殖にも比較的高い水温、低塩分の海

域を特定することにより、警戒を呼びかけることが可能になると考える。

本小文は2007年8月に大量に発生したシャトネラ分布およびその大量発生の要因のひとつである海面温度の推移を衛星画像によって解析することを試みたものである。また、これまでの地球観測衛星データを用いた赤潮分布検出およびその追跡事例の蓄積から、複数衛星による赤潮モニタリング方法を提案するものである。

## 2. 有明海における2007年夏期のシャトネラ大量発生事例

### 2.1 衛星画像データとシャトネラ細胞数分布情報との一致

図1に8月11日における有明海の高空間分解能センサSPOT/HRV画像(10m空間分解能)を示す。有明海湾奥部から多良沿岸海域にかけて白濁した部分は河川水の有明海への流入である。その先に棚引いて白濁した部分は低層の薄い雲である。

これらに交じり合いながらシャトネラの分布している部分が散見される。この日に佐賀県有明水産振興センターの実測したシャトネラ個体数を図2に示す。

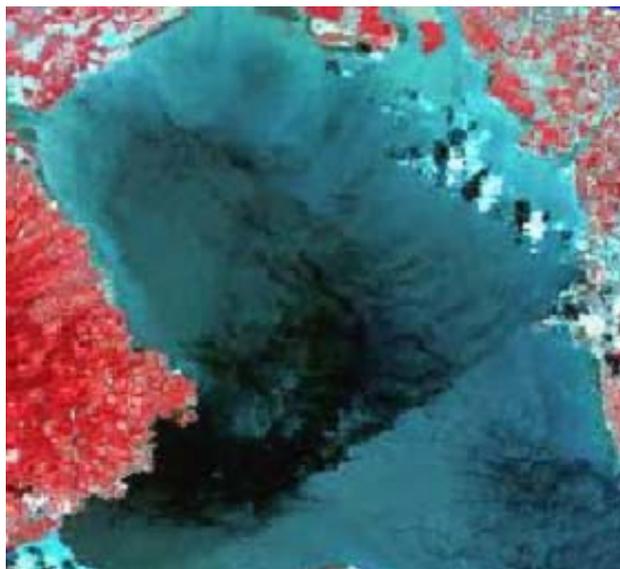


図1 平成19年8月11日11時にSPOT衛星搭載HRVセンサにより取得した可視近赤外画像©SPOT IMAGE

両者を比較するとシャトネラ発生場所が極めてよく一致していることが分かる。実測個体数調査は当該地点における点のデータであるが、衛星の示すシャトネラ分布は面的データである。したがって、両者を併用することによりシャトネラの定量的水平分布が把握可能になる。この分布の時系列解析および衛星から推定可能なクロロフィルa、海流、水温、日射、塩分濃度(降雨から推測)により、警報を提示することが可能になると考える。

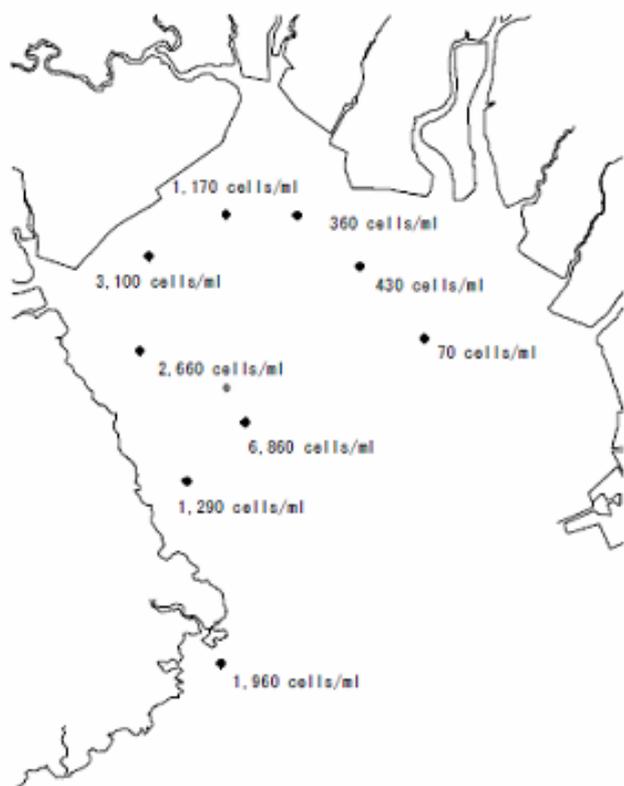


図2 佐賀県有明水産振興センターが8月10日に観測したシャトネラ細胞数分布(佐賀県有明水産振興センター)

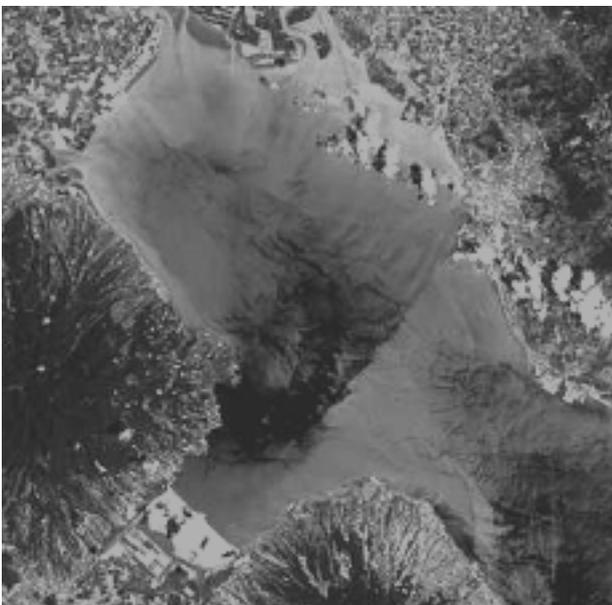
8月10および11日に取得したMODIS250m画像データ(図3(a)および同図(b))からもシャトネラ分布を確認した。これら図(a)および(b)を比較すると10日から11日にかけてシャトネラ分布がより鮮明に、また、広範囲に広がってしまった様子が分かる。そのため、この観測日周辺における高空間分解能の衛星画像を検索したところ、SPOT/HRVが最も近い観測日(8月11日)に観測していることを確認し、当該データを用いてより詳細なシャトネラ分布を確認し、佐賀県有明水産振興センターの提供しているシャトネラ細胞数分布と比較し、よく一致することが判明した。

### 2.2 状況情報

佐賀地方気象台からの観測日原簿から、平成19年8月上旬の気温は平年よりも2度高く、有明海における表皮水温も平年よりも2度程度高いことが確認できた。この表皮水温は衛星Terra, Aqua搭載のMODISセンサから確認している。また、7月下旬から8月上旬にかけて台風の影響もあり、降雨量が多かったが8月2日の台風通過後には好天が続いたことも確認している。さらに、日射量についても同様に8月上旬は平年よりも多くなっている。海面温度の年変化トレンドから2007年7月下旬から8月の間の海面温度は例年よりも高く推移していることを確認した。すなわち、有明海はこの時期、赤潮発生条件を備えていたことになる。



(a) 8月10日



(b) 8月11日

図3 8月10および11日に佐賀大学において受信処理したMODIS(250m)センサ画像(強調処理後)によるシャトネラ分布

佐賀県有明水産振興センター殿から提供を受けた水温、比重、DINおよびプランクトン沈殿量を調べてみると表1に示すように8月6日におけるそれらの値は平年を上回っていることが分かる。これらの観測点は図4に示すとおりであり、有明海主要河川河口付近に設置されている。また、熊本県水産研究センター殿の提供しているシャトネラ情報によれば、8月6日にすでに4660細胞/mlものシャトネラを捉えている。

このようにしてシャトネラの細胞数が増大し、その分布が広がり、8月11日にピークに達したことが窺われる。また、8月14日に取得したTerra/ASTER/VNIRのデータ(図6)を見るとシャトネラ発生は収束したことが窺われ、8月17日における佐賀県有明水産振興センターの細胞数情

報(図7)によれば、最大でも96細胞/mlと8月11日以降、大幅に減少したことが分かる。

表1 水温、比重、栄養塩、プランクトン沈殿量(佐賀県有明海漁協指導課)

◎ 水温と比重 (風間満潮時値)

	水温(°C)				比重			
	7月12日	7月23日	7月31日	8月6日	7月12日	7月23日	7月31日	8月6日
644号観測管	24.9	28.4	26.9	30.9	7.3	16.8	20.3	11.8
早津江川観測塔	24.8	29.4	27.0	29.2	5.6	12.7	20.2	13.1
220号観測管	24.6	29.2	26.4	30.1	6.1	13.6	20.9	11.1
六角川観測塔	24.5	28.1	28.7	31.2	4.8	16.3	20.2	10.6
355号観測管	25.1	28.3	28.7	31.7	4.1	17.3	20.1	10.9
428号観測管	24.7	28.9	28.4	29.9	7.4	16.9	20.1	10.2
503号観測管	24.6	27.4	28.4	30.1	11.1	18.1	19.9	9.8
沖神瀬	24.8	28.4	28.4	31.3	7.4	17.2	19.7	9.8
平均値	24.8	28.5	27.9	30.6	6.7	16.1	20.2	10.9
平年値*	26.7	27.7	27.7	29.0	15.0	16.5	16.5	19.5

◎ 栄養塩(DIN)とプランクトン沈殿量 (風間満潮時値)

	DIN(μg-at/L)				プランクトン沈殿量(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )			
	7月12日	7月23日	7月31日	8月6日	7月12日	7月23日	7月31日	8月6日
644号観測管	66.1	13.4	3.1	34.8	5	168	30	46
早津江川観測塔	71.4	27.4	11.3	16.7	6	83	11	34
220号観測管	69.8	26.9	8.4	15.5	3	286	13	27
六角川観測塔	69.7	13.0	3.7	6.1	2	115	32	16
355号観測管	77.4	1.7	0.7	1.8	6	125	44	14
428号観測管	68.5	1.2	0.8	6.9	5	118	27	13
503号観測管	46.8	3.1	0.7	5.4	4	464	48	17
沖神瀬	57.6	7.7	0.7	0.7	4	288	75	80
平均値	65.9	11.8	3.7	11.0	4	206	35	31
平年値*	21.1	10.2	10.2	7.8	22	19	19	36

\* 平年値は平成元年度から平成18年度までの18年間の平均値です。



図4 水温、比重、栄養塩、プランクトン沈殿量観測地点(佐賀県有明海漁協指導課)

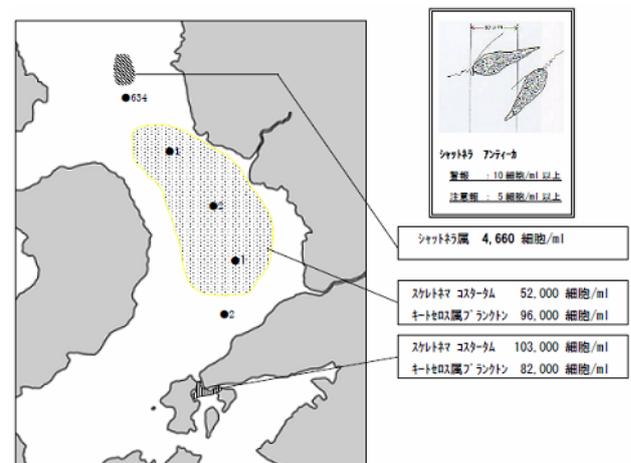


図5 8月6日におけるシャトネラ分布(熊本県水産研究センター殿Webサイト)

さらに、これ以降のMODISデータによるモニタ結果からシャトネラは8月20日頃に再発生し、24日頃まで分布は拡大を続け、27日頃に終息したことを確認している。

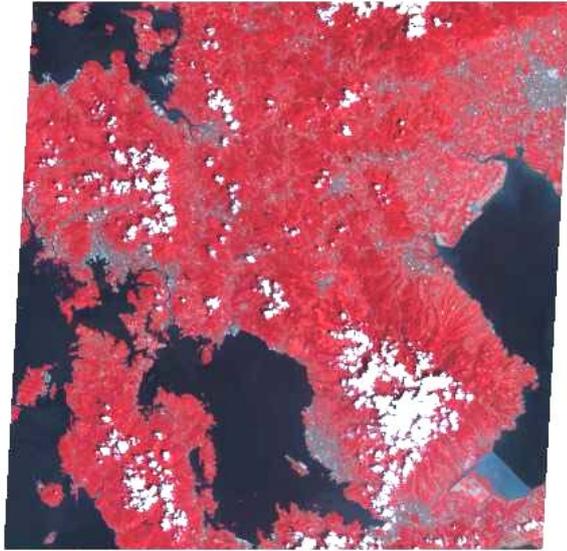


図6 8月14日に取得したTerra/ASTER/VNIR(Visible to Near Infrared Radiometer)データ((財)資源・環境観測解析センター)



図7 8月17日におけるシャトネラ細胞数分布(佐賀県有明水産振興センター殿WEBサイト)

### 3. 赤潮モニタリング方法

佐賀大学はTerra, Aqua衛星データの受信処理施設を運用しており、MODISデータを常時モニタし、異変があれば高空間分解能センサデータを入手して解析することにより、有害赤潮発生等を警報することが可能になると考えている。すなわち、赤潮予察の方法として、

- (1) 佐賀大学工学部7号館の屋上にある地球観測衛星受信処理施設にて受信できる衛星センサのMODISは1kmの空間分解能ながら毎日有明海を観測できる。このデータから毎日の変化のトレンドをモニタし、赤潮の予兆を調べる。
- (2) 一度その兆候が現れたなら、空間分解能の高いALOS/AVNIR2、Terra/ASTER/VNIR、SPOT/HRV、LANDSAT/ETM+等のセンサデータによって詳細を確認する。
- (3) 確認海域に出向き、目視、採水後細胞数検査を行う。を提案する。

### 4. あとがき

8月10, 17日におけるChattonella sppの佐賀県有明水産振興センターの調査分布と8月11, 18日に取得した衛星データ(SPOT/HRV, Terra/ASTER/VNIR)から推定した分布は極めてよい一致を見ている。また、その後の経過についてもMODISデータから推定した分布は佐賀県有明水産振興センターの調査分布とよく一致しており、提案する有害赤潮の早期検出モニタリング法が有効であることが分かった。

**謝辞：** 水温、比重、栄養塩、プランクトン沈殿量データをご提供戴いた佐賀県有明海漁協指導課江頭様に深謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) TAN C N, 石坂丞二: GIS と海色衛星の赤潮モニタリングへの応用、月刊海洋 36、5、376-379, 2004.
- 2) 川口修, 山本民次, 松田治, 橋本俊、水質の長期変動に基づく有明海におけるノリおよび珪藻プランクトンの増殖制限元素の解明、海の研究、13、2、173-183, 2004.
- 3) 堤裕昭, 岡村絵美子, 小川満代, 高橋徹, 山口一岩, 門谷茂, 小橋乃子, 安達貴浩, 小松利、有明海奥部海域における近年の貧酸素水塊および赤潮発生と海洋構造の関係、海の研究、12、3、291-305, 2004.
- 4) 鯉淵幸生, 磯部雅彦, 佐々木淳, 有田正光、有明海における水質変動の支配要因、海岸工学論文集、50、2、971-975, 2003.
- 5) 新井康平、地球環境研究会活動経過報告-2007年夏期におけるシャトネラ分布把握-、日本リモートセンシング学会誌、27、5、496-497, 2007.

(2008. 3. 31受付)

# 微生物相研究部門

Research Division of MICROBIAL TECHNOLOGY



# 有明海に生息する乳酸菌の生産する II型制限酵素

## STUDY ON TYPE II RESTRICTION ENDONUCLEASE OF LACTIC ACID BACTERIA ISOLATED FROM THE ARIAKE SEA

加藤富民雄<sup>1</sup>・中川良美<sup>2</sup>・小林元太<sup>3</sup>・田代幸寛<sup>4</sup>・神田康三<sup>1</sup>

Fumio KATO, Yoshimi NAKAGAWA, Genta KOBAYASHI, Yukihiro TASHIRO, Kohzo KANDA

<sup>1</sup>農博 佐賀大学教授 農学部応用生物科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>2</sup>農学部応用生物科学科4年 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>3</sup>農博 佐賀大学准教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>4</sup>農博 佐賀大学講師(研究機関研究員) 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

Type II restriction endonuclease activity in over 200 strains of lactic acid bacteria isolated from the Ariake sea at 30°C was investigated. The endonuclease activity was found out 17 strains among tested strains. *Leuconostoc mesenteroides* isolated from Ariake sea produced a novel type II restriction endonuclease designated as *LmsRI*. This enzyme could cleave several DNAs but had no cleavage site for  $\phi$ X174 DNA. This study is the first report on the production of type II restriction endonuclease by *Leuconostoc* in the world.

**Key Words :** Ariake sea, Lactic acid bacteria, Type II restriction endonuclease

### 1. はじめに

II型制限酵素はDNA塩基配列中のパリンδροーム構造を認識して切断する酵素<sup>1)</sup>で、遺伝子工学における重要な試薬として数多く市販され、利用されている。この酵素は細胞に外来のDNA (例えばバクテリオファージ) が侵入するのを防ぐためのシステムであり<sup>2)</sup>、細胞自身のDNAは対応するメチラーゼでメチル化することで切断されるのを防御しており、これらは細菌の制限・修飾系と呼ばれている<sup>3), 4), 5)</sup>。

有明海は半閉鎖系の内海で、独特の生物が生息していることや干満の差が大きいことなどの特徴を有している。この有明海から分離した細菌の生産するII型制限酵素を検索し、それらの特徴を明らかにすることで、有明海に生息する細菌相の変動がバクテリオファージの影響を受ける場合、細菌相の変動に制限酵素生産菌の存在がどのように関わっているかを解明できるのではないかと考えた。

有明海泥土から分離した細菌には様々な機能を持つものがあると考えられるが<sup>6)</sup>、我々はこれまでにその一種の細菌に*BamH I*と同じII型制限酵素活性があることを明

らかにし<sup>7)</sup>、細菌を分離する温度を20°C、37°C及び55°C<sup>8)</sup>と変え、それぞれの温度で生育可能な細菌のII型制限酵素活性の検索を行ってきた。

今回は乳酸菌の生産するII型制限酵素活性の探索を行うことを目的とし、有明海干潟泥から200株以上の乳酸菌を分離して、これまでに報告事例がない*Leuconostoc*属細菌について、その制限酵素の性状や認識塩基配列の検討を行った結果を報告する。

### 2. 材料と方法

#### (1) 乳酸菌の分離

##### (a) 分離用サンプル

有明海の4地点の干潟 (芦刈干潟、早津江川自動観測塔、428鋼管、六角川自動観測塔) にて採取された干潟泥を分離源として用いた。

##### (b) 分離培地

分離培地は表2-1に示すMRS培地を用い、平板培地には寒天1.5%を加えた。

表2-1 MRS培地

Peptone	10 g/L
Meat extract	8 g/L
Yeast extract	4 g/L
Tween 80	1 mL/L
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	2 g/L
CH <sub>3</sub> COONa · 3H <sub>2</sub> O	5 g/L
Tri-ammonium citrate	2 g/L
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	0.2 g/L
MnSO <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O	0.05 g/L
Glucose or Xylose	20 g/L

## (c) 分離方法

- ① MRS 培地に分離源を少量入れ、30°Cで集積培養を行った。
- ② 上記の培養液を CaCO<sub>3</sub> 含有 MRS 平板培地に画線し、30°Cで数日間、酸素吸収剤であるアネロパックケンキ（三菱ガス化学）を用いた嫌気条件下で培養を行った。
- ③ コロニーの周りにクリアゾーンを形成した菌株を釣菌し、MRS 培地で静置培養した。
- ④ 培養液を遠心分離操作（10,000 rpm、10 min）を行い、得られた菌体ペレットに 3%過酸化水素水溶液を 1 mL 加え、カタラーゼ試験を行った。発泡が見られなかったカタラーゼ陰性菌の培養液上清を HPLC にて分析し、対糖収率 50%以上のものを乳酸菌と見なして分離した。

## (2) 制限酵素活性のスクリーニング

## (a) 使用菌株

上記で分離された 225 株を制限酵素活性のスクリーニングに用いた。

## (b) 制限酵素活性スクリーニング法

分離培地と同様に MRS 培地に接種し、一晚培養後集菌、超音波により菌体を破碎し、抽出液を得た。抽出液 5 μl、0.2 μg λ DNA 1 μl、2 × 666buffer (6mMTris-HCl、6mMMgCl<sub>2</sub>、6mM2-mercaptoethanol) 10 μl、H<sub>2</sub>O 5 μl からなる反応混合液をそれぞれの株の適温で 30min 反応させ、アガロースゲル電気泳動により活性を確認した。

## (3) 菌の同定

ゲノムDNAを抽出するために平板培地上のコロニーもしくは液体培養液を遠心分離操作により菌体を回収した。さらにゲノム抽出キットである QIAmp DNA Mini Kit (QIAGEN, USA) によりゲノムDNAを抽出し、そのDNAを鋳型として、表2-2に示す全細菌ユニバーサルプライマーを用いてPCR反応を行い、完全16S rDNA (約1.5 kb)を増幅した。

表2-2 プライマー配列

8-519S	5' - AGA GTT TGA TCC TGG CTC AG- 3'
1510r-feace	5' - GTG AAG CTT ACG GYT ACC TTG TTA CGA CTT- 3'

反応液組成を表2-3に示す。

表2-3 PCR反応液組成

Reagent	Volume (μL)
Premix Ex Taq (タカラバイオ、日本)	25.0
Primer Forward (8-519S)	4.0
Primer Reverse (1510r-feace)	4.0
Template DNA	0.5- 2.0
H <sub>2</sub> O	15- 16.5
Total	50.0

PCR反応は以下の条件（変性95°C 30 sec、アニーリング55°C 30 sec、伸長72°C 1 min; 30 cycles）でTグラジェントサーモサイクラー96（バイオメトラ、ドイツ）を用いて行った。

## 反応条件

95°C	5 min	} 30 cycles
95°C	30 sec	
55°C	30 sec	
72°C	1 min	
72°C	5 min	

反応終了後に反応液を1.2%アガロースゲル電気泳動に供して目的とするバンドを確認後、PCR精製キット、QIAquick PCR Purification Kit (QIAGEN, USA) を用いてPCR産物を精製した。

得られたPCR産物をライゲーションキットTA-Blunt Ligation Kit (ニッポンジーン、日本) を用いてpGEM-T Easy Vector (Promega, USA) にTAクローニングを行い、16°Cで1晩反応させた。反応液組成を表2-4に示す。

表2-4 ライゲーション反応液組成

Reagent	Volume (μL)
pGEM-T Easy Vector (Promega)	1.0
10×Enhancer Solution	1.0
5×Ligation Mix	2.0
Purified PCR product	3.0
H <sub>2</sub> O	3.0
Total	10.0

ライゲーション反応液2 μLをコンピテントセル *Escherichia coli* JM109 (TOYOBO, 日本) 25 μLに加えて、42°Cで47 secヒートショックを行い、*E. coli* JM109を形質転換した。形質転換後、表2-5の組成のLBプレートに塗布して37°Cで1晩培養した。形成したコ

ロニーの色（白/青）を観察し、白コロニーを選抜した。

表2-5 LBプレート組成

Reagent	
Tryptone	10 g
Yeast extract	5 g
NaCl	5 g
アンピシリンナトリウム	100 mg
IPTG	100 $\mu$ mol
X-Gal	10 mg
寒天末	15 g

得られた白コロニーを直接鋳型として、表2-6に示すM13プライマーを用いたコロニーPCRにより、16S rDNA断片（1.5kbp）インサートの有無を確認した。

表2-6 M13プライマー配列

M13F	5' - CGC CAG GGT TTT CCC AGT CAC GAC- 3'
M13R	5' - TCA CAC AGG AAA CAG CTA TGA C- 3'

反応液組成を表2-7に示す。

表2-7 コロニーPCR反応液組成

Reagent	Volume ( $\mu$ L)
KOD Dash (TOYOBO, 日本)	0.1
Buffer	1.0
dNTPs	1.0
Primer Forward (M13F)	0.1
Primer Reverse (M13R)	0.1
H <sub>2</sub> O	7.7
Total	10.0

PCRは以下の反応条件（変性94°C 30 sec、アニーリング52°C 30 sec、伸長74°C 70 sec; 30 cycles）でTグラジエントサーモサイクラー-96を用いて行った。

反応条件

94°C	5 min	} 30 cycles
94°C	30 sec	
52°C	30 sec	
74°C	70 sec	
74°C	7 min	

反応終了後に反応液を0.8%アガロースゲル電気泳動に供して目的とするバンドを検出したコロニーをクローンとした。

得られたクローンを100 mg/Lアンピシリン含有LB培地に植菌して温度37°C、振とう速度200 rpmで16時間培養した。遠心分離操作（13,000×g, 5 min）により培養液3 mLから回収した菌体をHigh Pure Plasmid Isolation Kit（ロシュ、スイス）を用いてプラスミドを抽出した。

得られた抽出溶液を1.0%アガロースゲル電気泳動に供してプラスミドを確認した。

プラスミドの塩基配列を決定するために、ジーンネット（株）（日本）にシーケンス解析を依頼した。得られた配列は、データベース（BLAST program of the National Center for Biotechnology Information, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/BLAST/>）で相同性検索を行った。

#### (4) 酵素の部分精製

- 制限酵素活性が顕著だった KNK1-2 株を 200ml の MRS 液体培地で一晩培養した。
- 菌体を遠心（1,500×g, 4°C, 15分）により集菌後、超音波により菌体破碎を行い、超遠心（70,000×g, 4°C, 60分）により上清を得た。
- 得られた抽出液をホスホセルロースカラムに供し、0.1M~1.0MNaCl リニアグラジエントにより溶出させた。フラクションは2.5ml ずつ、70画分回収した。活性画分はSephadex G-100カラムに供し、溶出した活性画分を粗酵素液とした。

#### (5) 制限酵素の認識配列決定

制限酵素活性の高い株についてホスホセルロースカラムで部分精製を行い、数種の基質 DNA（ $\lambda$ , CoIE1,  $\phi$ X174, pBR322, pUC18, pKF3）を用いて、それらの切断パターンから認識塩基配列の決定を試みた。

### 3. 結果

#### (1) 制限酵素活性のスクリーニング

分離した細菌の制限酵素活性を検討したところ分離した225株のうち17株にスクレアーゼ活性が見られた。

#### (2) 菌の同定

制限酵素活性を有した17株中11株について、16S rDNAの塩基配列を決定し、BLAST検索解析による同定を行った結果、すべて*Leuconostoc mesenteroides*と同定された。その中でも制限酵素活性が顕著であったKNK1-2株は、*Leuconostoc mesenteroides*と99.9%以上の相同性を示したため、本菌株を*Leuconostoc mesenteroides* KNK1-2と同定した。

#### (3) *LmsRI*の各種DNA切断パターン

*Leuconostoc mesenteroides* KNK1-2が生産する制限酵素を*LmsRI*と名付け、認識塩基配列の解明を行った。

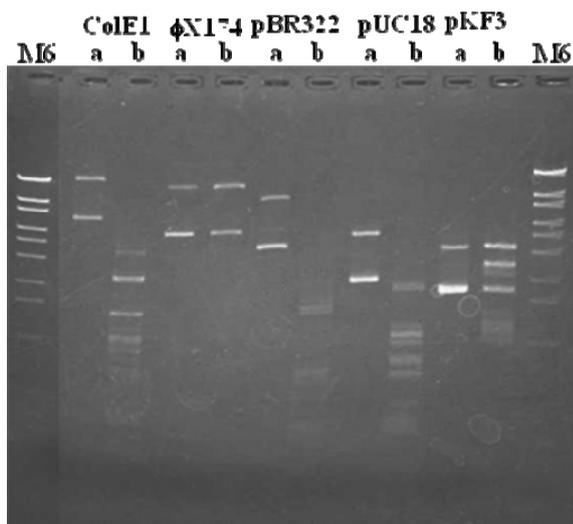


図3-1 *LmsRI*の各種DNA切断パターン

M6: Marker 6 (上から19.33, 7.74, 6.22, 4.26, 3.47, 2.69, 1.88, 1.49, 0.93 kbp),  
a: *LmsRI* 無し, b: *LmsRI* 有り

図3-1の結果から、*LmsRI*はφX174 DNAを切断せずに、CoIE1 DNAを4カ所以上、pBR322 DNAを2カ所以上、pUC18 DNAを5カ所以上、pKF3 DNAを2カ所以上で切断した。

#### (4) *LmsRI*のpKF3 DNA切断パターン

*LmsRI*によるpKF3 DNAの切断パターンを図3-2に示す。

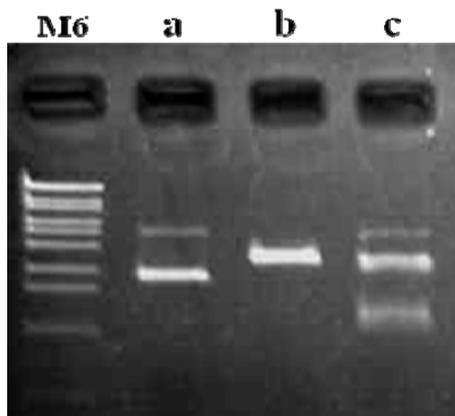


図3-2 *LmsRI*によるpKF3の切断パターン

M6: Marker 6, a: 制限酵素無し, b: *EcoRI*による切断, c: *LmsRI*による切断

*MfII*<sup>9)</sup>はpKF3 DNAを11bpと1112bpの2つのフラグメントに切断することが分かっており、また*BinI*<sup>10)</sup>はpKF3 DNAを4, 7, 61, 79, 1044, 1051bpのフラグメントに切断することが分かっている。

図3-2の結果より、*LmsRI*はpKF3 DNAを1000bp程度のフラグメントに切断しており、*MfII*や*BinI*の切断パター

ンと似ており、そのアイソシゾマーの可能性が示唆された。

#### (5) *LmsRI*のCoIE1 DNA切断パターン

次に、*MfI* Iおよび*Bin* IのCoIE1切断パターンが*LmsRI* Iの切断パターンと一致するか検討した。CoIE1を*MfI* Iで切断した場合は4箇所で切断され、11, 1184, 2216, 3235bpのフラグメントが生成されるが、この切断パターンは図3-3の結果と一致しない。一方で、*BinI*はCoIE1を11カ所で切断し、約1200, 1400, 2100kbpのフラグメントを生成し、この結果は*LmsRI* Iの切断パターンと一致する。*LmsRI*は*Bin* Iのアイソシゾマーであることが示唆された。

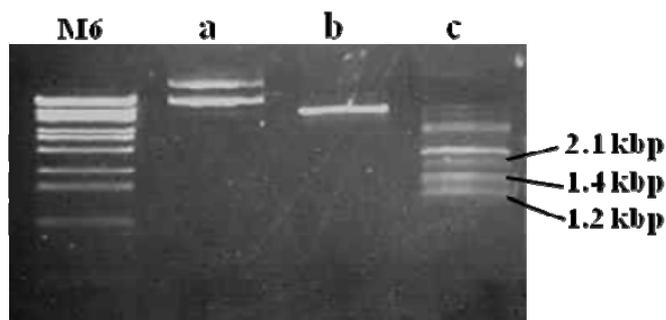


図3-3 *LmsRI*によるCoIE1の切断パターン

M6: Marker 6, a: 制限酵素無し, b: *EcoRI*による切断, c: *LmsRI*による切断

#### (6) *LmsRI*のλ DNA切断パターン

上記のように*LmsRI*の*Bin* Iアイソシゾマーとしての可能性が示唆されたため、その切断パターンについて検討した。*Bin* Iは*Bifidobacterium infantis* 659が生産する制限酵素であり、一般的に市販されていないためにダブルダイジェクションによるアイソシゾマーの確認はできない。また、*Bin* Iの切断認識部位が5'-GGATCNNNN-3'であることに基づくと、*Bin* Iによるλ DNAの理論的な切断パターンは、900bp以上のフラグメントについては、2944, 2899, 2855, 2485, 2320, 2225, 1724, 1570, 1487, 1464, 1366, 1352, 1351, 1322, 1176, 1172, 1158, 1095, 1094, 1057, 932, 912, 901 bpと多数のフラグメントが生成され、λ DNAを58カ所で切断することが推定される。

図3-4にλ DNAの切断パターンを示す。*LmsRI*によるλ DNA切断パターンでは、3000bpに満たない小さいフラグメントは確認できるが、上述のように*Bin* Iによる切断で生成されるほぼ3000bpのフラグメントが確認できないことより、*LmsRI*は*Bin* Iのアイソシゾマーではないことが明らかとなった。

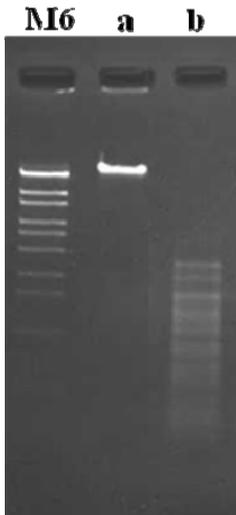


図3-4 *LmsRI*による  $\lambda$  DNAの切断パターン  
M6: Marker 6, a: *LmsRI*無し, b: *LmsRI*有り

(6) *LmsRI*の至適反応条件について  
*LmsRI*活性に及ぼす反応条件について検討を行った。

図3-5にpHの影響について示す。

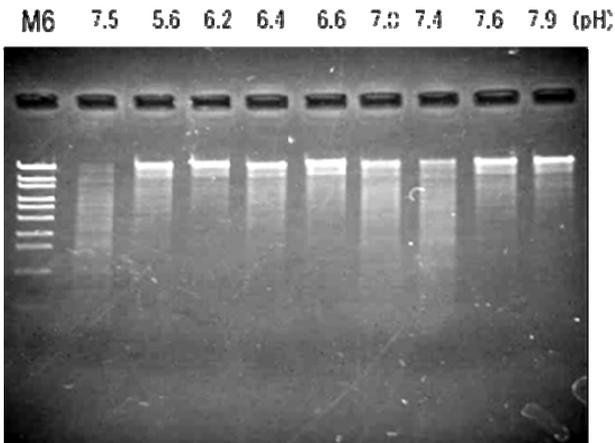


図3-5 *LmsRI*活性のpHによる影響

図3-6に反応温度の影響について示す。

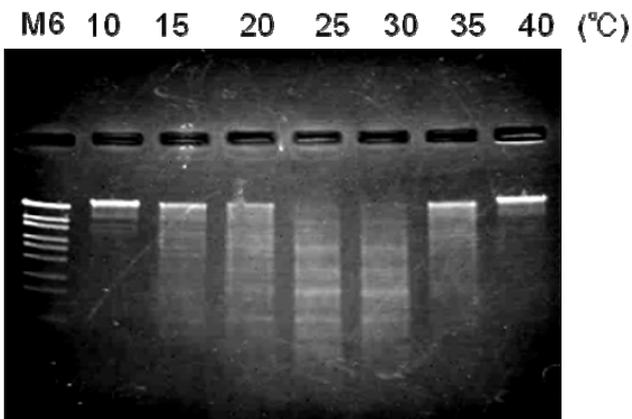


図3-6 *LmsRI*活性の温度による影響

図3-7にNaCl濃度の影響を示す。

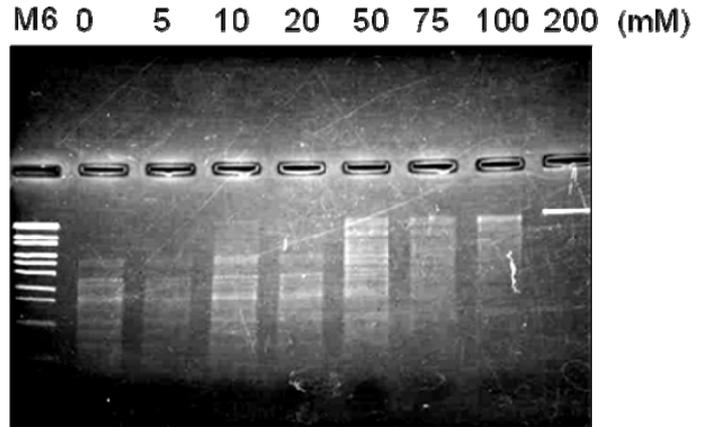


図3-7 *LmsRI*活性のNaClによる影響

図3-8にKCl濃度の影響を示す。

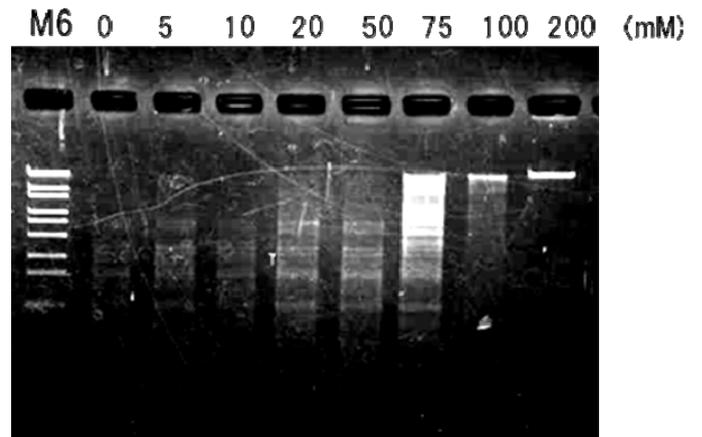


図3-8 *LmsRI*活性のKClによる影響

図3-9にMgCl<sub>2</sub>濃度の影響を示す。

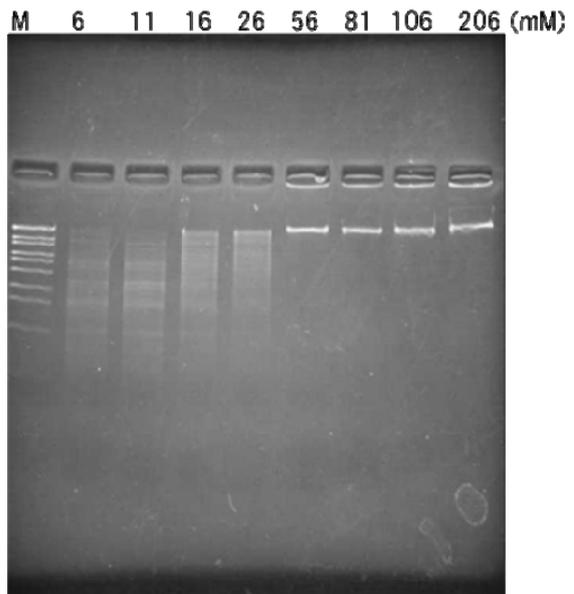


図3-9 *LmsRI*活性のMgCl<sub>2</sub>による影響

以上の結果から、反応温度は25~30°C、反応pHは7.5、

塩濃度に関して、NaCl濃度では0～5mM、KCl濃度では0～10mM、MgCl<sub>2</sub>濃度では6～11mMにおいて酵素活性がもっとも強くなることが明らかとなった。

### 3. まとめ・考察

有明海より分離した乳酸菌225株について制限酵素活性を検索した結果、17株が制限酵素活性を有していた。これらのλDNA切断パターンから制限酵素活性の高い11株について菌株の同定を行ったところ、いずれも*Leuconostoc mesenteroides*であった。これまでに乳酸菌が生産する制限酵素の報告事例は*Lactobacillus*属細菌や*Lactococcus*属細菌、*Bifidobacterium*属細菌などが主であり、*Leuconostoc*属細菌による報告事例は初めてである。部分精製を行った制限酵素による種々の基質DNAの切断パターンから、アイソシグマーの探索を行ったが、本酵素と同様の切断パターンを示す市販酵素はなく、新規のType II制限酵素である可能性が示唆された。

*Leuconostoc mesenteroides* KNK1-2が生産する本制限酵素を*LmsRI*と命名した。

**謝辞：** 土壌サンプルをご供与頂いた有明水産振興センター・三根崇幸氏に感謝します。

### 参考文献

- 1) Meselson, M., and R. Yuan, DNA Restriction enzyme from *Escherichia coli*, Nature (London), 217, 1110-1114, 1968.
- 2) Arber, W., DNA modification and restriction, Prog. Nucleic Acid Res. Mol. Biol. 14, 1-37, 1974.
- 3) Linn, S., J. A. Lautenberger, B. Eskin, and D. Lackey, Host-controlled restriction and modification enzymes of *E. coli* B, Fed. Proc., 33, 1128-1134, 1974.
- 4) Christoph Kessler, Peter S. Neumaier and Werner Wolf, Recognition sequences of restriction endonucleases and methylases — a review, Gene, 33, 1-102, 1985.
- 5) 安藤 忠彦, 柴田 武彦, 風見 潤, 制限酵素, 蛋白質・核酸・酵素, 30, 1429-1445, 1985.
- 6) H-R. Karimniaae-Hamidaani, K. Kanda, and F. Kato, Denitrification activity of the Bacterium *Pseudomonas* sp. AMS-2-3 isolated from the Ariake sea tideland, J. Biosci. Bioeng., 97, 39-44, 2004.
- 7) 加藤富民雄, 増子朝貞, 神田康三, 有明海干潟から分離した細菌のII型制限酵素に関する研究、佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集[第1巻], 93-96, 2005.
- 8) 加藤富民雄, 村田昌子, 神田康三, 小林元太, 有明海に生息する細菌の生産するII型制限酵素、佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集 [第2巻] 95 - 98, 2006.
- 9) Hiraoka, N., Kita, K., Nakajima, H., Obayashi, A., Purification and characterization of sequence-specific restriction endonuclease *MFI*, J. Ferment. Technol., 62, 583-588, 1984.
- 10) Khosaka, T., and Kiwaki, M., *BinI*: A new site-specific endonuclease from *Bifidobacterium infantis*, Gene, 31, 251-255, 1984.

(2008. 3. 31受付)

# 有明海と伊勢湾・三河湾における細菌相の比較

## ANALYSIS OF BACTERIAL COMMUNITY IN ARIAKE SEA

小林元太<sup>1</sup>・田代幸寛<sup>2</sup>・光武奈緒子<sup>3</sup>・加藤富民雄<sup>4</sup>・神田康三<sup>4</sup>

Yukihiro TASHIRO, Naoko MITSUTAKE, Genta KOBAYASHI, Fumio KATO and Kouzo KANDA

<sup>1</sup>農博 佐賀大学准教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>2</sup>農博 佐賀大学講師(研究機関研究員)有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>3</sup>農学部応用生物科学科4年 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>4</sup>農博 佐賀大学教授 農学部応用生物科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

To characterize a bacterial community in Ariake sea, we compared Ariake sea with Fujimae tideland, surrounded by Aichi Prefecture and Mie Prefecture, and Mikawa bay, located in south side of Aichi Prefecture. For an analysis of the bacterial communities, a 16S rRNA gene (rDNA) sequencing analysis and a double gradient-denaturing gradient gel electrophoresis (DG-DGGE) analysis were carried out. The 16S rDNA sequencing analysis indicated the existence of *Proteobacteria* in both Fujimae tideland and Mikawa bay. Sulfate-reducing relatives, sulfur-oxidizing relatives, or iron-reducing relatives were also detected in Fujimae tideland or Mikawa bay. DG-DGGE analysis exhibited the different profiles of Ariake sea from Fujimae tideland and Mikawa bay, which suggested the unique bacterial community of Ariake sea.

**Key Words :** Ariake sea, Fujimae tideland, Mikawa bay, bacterial community, 16S sequencing analysis, DGGE analysis

### 1. 序論

有明海は九州最大の内海であり、その干満の差は最大6 m以上にも達することが知られている<sup>1)</sup>。日本最大の広さの干潟を利用して古くから沿岸地域では漁業やノリ養殖業が発達している。しかし、1980年代以降には二枚貝類や底魚の急激な減少やスミノリ病をはじめとするノリの深刻な被害が報告され、いわゆる「有明海異変」がしばしば観察されている。これまでに、様々な分野からの有明海に関する研究が幅広く行われているが、有明海異変は複雑的かつ複合的プロセスにより生じることが容易に考えられるために、有明海異変の抜本的な原因は未だ解明されていないのが現状である。さらに、われわれが恩恵を受けていた頃すなわち有明海異変が報告される以前の有明海と現在の有明海を直接的に比較することが不可能となっていることも、原因解明への障害となっている。

有明海以外でも、日本各地には干潟が多在している。その中でも、われわれは愛知県南西部と三重県東部に囲まれる伊勢湾と愛知県南部に位置する三河湾に着目している。伊勢湾には323 haの藤前干潟が広がっており<sup>2)</sup>、

ラムサール条約で採択されたように、自然の干潟が現存している。藤前干潟には渡り鳥のほか、多数の底生生物や魚介類が生息しており、国際的に重要な湿地帯として登録されている。また、三河湾沿岸域は、有明海と同様に*Vibrio vulnificus* (ビブリオ・バルニフィカス) 感染症が報告されている地域であり<sup>3)</sup>、有明海との類似性が指摘されている。そこでわれわれは藤前干潟および三河湾との比較により、有明海の特徴をより詳細に解明できるのではないかと考えた。

細菌は様々な環境中に存在しており、硫酸化細菌<sup>4)</sup>やアンモニア酸化細菌<sup>5)</sup>などのように環境中における物質変換や物質循環に関わっていることが明らかとなっている。一方、細菌は食物連鎖の原点に位置することから、細菌より高等な生物の捕食対象つまり餌としての役割を担っていることが明らかとなっている<sup>6)</sup>。すなわち、あらゆる環境中の生態系にはそこに存在している細菌の寄与が大きいことが一般的に認められている。そこで本研究では、生態系におよぼす細菌の影響を調べるために、有明海と伊勢湾の藤前干潟および三河湾の細菌相解析を行い、各地域の比較を行った。

### 2. 実験方法

## 2-1 16S rDNAシーケンシング解析

本項では、抽出したDNAを直接鋳型としてPCR法により16S rDNAにおけるV1-V9領域 (約1.5 kb)を増幅して、クローニングを行い、クローンのシーケンシングにより細菌相の解析を行った。

### 2-1-1 有明海の底泥

有明海の4地点[芦刈 (以下アシカリ: 33°11.766'N, 130°12.494'E)、早津江川自動観測塔 (以下タカツ: 33°06.837'N, 130°17.421'E)、428 鋼管 (以下 428: 33°04.715'N, 130°10.885'E)、六角川自動観測塔 (以下ロッカク: 33°08.149'N, 130°13.303'E)] から平成18年8月に採取された底泥を試料として用いた。藤前干潟の3地点から平成19年8月、三河湾の2地点から平成19年8月に採取された底泥を試料として用いた。

### 2-1-2 底泥からのDNA抽出

底泥からのDNA抽出には土壌DNA抽出キットISOIL for Beads Beating (ニッポンジーン、日本) を用いた。底泥中の菌体破碎にはビーズ式細胞破碎装置MicroSmash MS-100R (トミー精工、日本) を用いた。破碎条件は4200 rpm、45 secとした。得られたDNAは微量分光光度計NanoDrop ND-100RP (NanoDrop Technologies、USA) にてDNA収量を測定した。

### 2-1-3 PCRによる完全16S rDNAの増幅

2-1-2で抽出したDNAを鋳型として、表2-1に示す全細菌ユニバーサルプライマー<sup>7)</sup>を用いて、PCRにより完全16S rDNA (約1.5 kb) を増幅した。

表2-1 プライマー配列

8f	5'-AGA GTT TGA TCC TGG CTC AG-3'
1510r	5' -GTG AAG CTT ACG GYT ACC TTG TTA CGA CTT-3'

反応液組成を表2-2に示す。

表2-2 PCR反応液組成

Reagent	Volume (μL)
Premix Ex Taq (タカラバイオ、日本)	25
Primer Forward (8f; 10 μM)	4.0
Primer Reverse (1510r; 10 μM)	4.0
Template DNA	0.5-2.0
H <sub>2</sub> O	15-16.5
Total	50.0

PCRは以下の反応条件 (変性95°C 30 sec、アニーリング55°C 30 sec、伸長72°C 1 min; 30 cycles) でTグラジエント

サーモサイクラー96 (バイオメトラ、ドイツ) を用いて行った。

### 反応条件

95°C	5 min	} 30 cycles
95°C	30 sec	
55°C	30 sec	
72°C	1 min	
72°C	5 min	

反応終了後に反応液を1.2%アガロースゲル電気泳動に供して目的とするバンドを確認後、PCR精製キットQIAquick PCR Purification Kit (QIAGEN、USA) を用いてPCR産物を精製した。

### 2-1-4 TAクローニングと大腸菌への形質転換

ライゲーションキットTA-Blunt Ligation Kit (ニッポンジーン、日本) を用いて 2-3で得られたPCR産物をpGEM-T Easy Vector (Promega、USA) にTAクローニングを行った。反応液組成を表2-3に示し、16°Cで1晩反応させた。

表2-3 ライゲーション反応液組成

Reagent	Volume (μL)
pGEM-T Easy Vector (Promega)	1.0
10×Enhancer Solution	1.0
5×Ligation Mix	2.0
Purified PCR product	3.0
H <sub>2</sub> O	3.0
Total	10.0

ライゲーション反応液2 μLをコンピテントセル*Escherichia coli* JM109 (東洋紡、日本) 25 μLに加えて、42°Cで47 secヒートショックを行い、*E. coli* JM109を形質転換した。形質転換後、表2-4の組成のLBプレートに塗布して37°Cで1晩培養した。形成したコロニーの色 (白/青) を観察し、白コロニーを選抜した。

表2-4 LBプレート組成

Reagent	
Tryptone	10 g
Yeast extract	5 g
NaCl	5 g
アンピシリンナトリウム	100 mg
イソプロピル-β-D-チオ ガラクトピラノシド	100 μmol
5-プロモ-4-クロロ-3-インドリル- β-D-ガラクトピラノシド	10 mg
寒天末	15 g
脱イオン水	1 L

### 2-1-5 コロニーPCR

2-1-4で得られた白コロニーを直接鋳型として、表2-5

に示すM13プライマーを用いて、コロニーPCRにより、16S rDNA 1.5 kb断片のインサートの有無を確認した。

表2-5 プライマー配列

M13F	5'-CGC CAG GGT TTT CCC AGT CAC GAC-3'
M13R	5'-TCA CAC AGG AAA CAG CTA TGA C-3'

反応液組成を表2-6に示す。

表2-6 コロニーPCR反応液組成

Reagent	Volume (μL)
KOD Dash (東洋紡、日本)	0.1
Buffer	1.0
dNTPs	1.0
Primer Forward (M13F; 10 μM)	0.1
Primer Reverse (M13R; 10 μM)	0.1
H <sub>2</sub> O	7.7
Total	10.0

PCRは以下の反応条件 (変性94°C 30 sec、アニーリング52°C 30 sec、伸長74°C 70 sec; 30 cycles) でTグラジエントサーモサイクラー96を用いて行った。

反応条件

94°C	5 min	} 30 cycles
94°C	30 sec	
52°C	30 sec	
74°C	70 sec	
74°C	7 min	

反応終了後に反応液を0.8%アガロースゲル電気泳動に供して目的とするバンドを検出したコロニーをクローンとした。

#### 2-1-6 プラスミド抽出

2-1-5で得られたクローンを100 mg/Lアンピシリンナトリウム含有LB培地に接種して温度37°C、振とう速度200 rpmで16時間培養した。培養液3 mLを遠心分離操作 (13,000×g, 5 min) により菌体を回収して、プラスミド抽出キットHigh Pure Plasmid Isolation Kit (ロシュ、スイス) を用いてプラスミドを抽出した。得られたプラスミドは微量分光光度計NanoDrop ND-100RPにてDNA収量を測定した。得られたプラスミドを1.0%アガロースゲル電気泳動に供してプラスミドを確認した。

#### 2-1-7 シーケンスおよび相同性探索

プラスミドの塩基配列を決定するために、ジーンネット (株) (日本) にシーケンス解析を依頼した。得られた配列は、アッセンブル解析ソフト (ATGC; Genetyx、日本) によりContig配列を得て、データベース (BLAST program of the National Center for Biotechnology Information,

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/BLAST/>) で相同性検索を行った。

#### 2-2 Double Gradient-Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (DG-DGGE) 解析

本項では、抽出したDNAを直接鋳型としてPCR法により16S rDNAにおけるV2-V3領域 (約0.2 kb)を増幅して、DGGEに供し、網羅的な細菌相の解析を行った。16S rDNAシーケンス解析と比較して、DGGE法ではクローンの選択のバイアスがないこと<sup>8)</sup>や環境中の細菌相の視覚的な比較が可能である<sup>9)</sup>ことが長所として認められている。

##### 2-2-1 有明海の底泥

2-1-1と同じ底泥を試料として用いた。

##### 2-2-2 底泥からのDNA抽出

2-1-2と同様に、底泥からのDNA抽出を行った。

##### 2-2-3 PCRによる部分16S rDNAの増幅

2-2-2で抽出したDNAを鋳型として、表2-7に示す全細菌ユニバーサルプライマー<sup>7)</sup>を用いて、PCRにより部分16S rDNA (約0.2 kb) を増幅した。

表2-7 プライマー配列

GC-	5'-CGCCCGGGGCGCGCCCCGGGCGGGG
HDA1	CGGGGGCACGGGGGGACTCCTACGG GAGGCAGCAGTAGAGTTTGATCCTGG CTCAG-3'
HDA2	5'-GTATTACCGCGGCTGCTGGCAC-3'

反応液組成を表2-8に示す。

表2-8 PCR反応液組成

Reagent	Volume (μL)
Premix Ex Taq Hot Start Version (タカラバイオ)	100
Primer Forward (GC-HDA1; 20 μM)	8.0
Primer Reverse (HDA2; 20 μM)	8.0
Template DNA	2.0-8.0
H <sub>2</sub> O	76-82
Total	200

非特異的な断片の増幅を防ぐために、Tグラジエントサーモサイクラー96 (バイオメトラ) を用いてHot start-touch down PCRを行った。

#### 反応条件

94°C	5 min	
65°C	1 min	
72°C	1 min	
94°C	1 min	} 20 cycles
64.5°C (“touch down” PCR, -0.5°C every new cycle)	1 min	
72°C	1 min	
94°C	1 min	
55°C	1 min	} 9 cycles
72°C	1 min	
72°C	5 min	

反応終了後に反応液を1.5%アガロースゲル電気泳動に供して目的とするバンドを確認後、PCR精製キット QIAquick PCR Purification Kit (QIAGEN) を用いてPCR産物を精製した。

#### 2-2-4 DGGE解析

40% (w/v) アクリルアミド/ビス混合液 [29:1 (ナカライテスク、日本)]、ホルムアミド (ナカライテスク)、尿素 (ナカライテスク) ペルオキソ二硫酸アンモニウム (ナカライテスク)、N,N,N'-テトラメチルエチレンジアミン (ナカライテスク) を用いて変性剤濃度勾配を30%~70%、ポリアクリルアミド濃度勾配を6~8%に調製した Double Gradient (DG)-DGGEゲル<sup>8)</sup>を作製した。なお、変性剤濃度100%は7 M尿素と40% (v/v) ホルムアミドに相当する。DGGEミニ電気泳動システム (NB-1490; 日本エイドー、日本) を用いて、2-2-3で得た精製PCR産物 (600 ng) およびDGGE Marker II (ニッポンジーン) を供した。まず50 Vで2時間電気泳動後、66 Vで3時間電気泳動を行った。電気泳動後にSYBR Gold (Molecular Probes、USA) に1時間染色し、紫外線により可視化した。フナゲルチップ (フナコシ、日本) により主要なDGGEバンドを得た。

#### 2-2-5 DGGEバンドのシーケンシング

2-2-4で得たDGGEバンドを滅菌した超純水で洗浄したのち、DNAを滅菌した超純水30 µLに4°Cで一晩溶出した。溶出したDNAを鋳型として、2-2-3と同様にHot start-touch down PCRにより、部分16S rDNA (約0.2 kb) を増幅した。

反応液組成を表2-9に示す。

表2-9 PCR反応液組成

Reagent	Volume (µL)
Premix Ex Taq Hot Start Version (タカラバイオ)	25
Primer Forward (GC-HDA1; 20 µM)	2.0
Primer Reverse (HDA2; 20 µM)	2.0
Template DNA	1.0
H <sub>2</sub> O	20
Total	50

2-1-4~2-1-7と同様に、TAクローニングおよび大腸菌への形質転換、コロニーPCR、プラスミド抽出、シーケンシング、相同性検索を行った。

### 3. 結果

#### 3-1 16S rDNAシーケンス解析

平成18年8月の有明海の4地点 (アシカリ、タカツ、428、ロッカク)、平成19年8月の藤前干潟3地点 (フジマエ①、フジマエ②、フジマエ③) および平成19年8月の三河湾2地点 (ミカワ①、ミカワ②) の底泥からDNA抽出、PCR、クローニング、プラスミド抽出を行い、完全16S rDNAのクローンをそれぞれ約20クローン得た。各底泥につき19~20クローンずつシーケンス解析を行い、アッセンブル解析を行い、得られたContig配列をBLASTによって相同性検索を行った。アッセンブル解析の結果、アシカリ、タカツ、428、ロッカクではそれぞれ3、4、3、4のContig配列を得た。一方、フジマエ①、フジマエ②、フジマエ③、ミカワ①、ミカワ②ではそれぞれ3、3、2、4、4のContig配列を得た。各地点の細菌相の結果をそれぞれ表3-1~表3-9に示す。

アシカリ、タカツからはUncultured *alpha proteobacterium*綱に属するContig配列が得られ、428からはUncultured *gamma proteobacterium*綱、Uncultured *Desulfobacterales*目、Uncultured *delta proteobacterium*綱に属するContig配列が得られ、ロッカクからは*Thalassiosira eccentrica chloroplast*、Uncultured *gamma proteobacterium*綱、Uncultured *alpha proteobacterium*綱に属するContig配列が得られた。一方、フジマエ①からはUncultured *Cyanobacteria*門、Uncultured *alpha proteobacterium*綱、Uncultured *Desulfuromonadaceae*目に属するContig配列が得られ、フジマエ②からはUncultured *Desulfosarcina*属に属するContig配列が得られ、フジマエ③からは門レベルに分類可能なContig配列は得られなかった。一方、ミカワ①からはUncultured *Actinobacteria*門、Uncultured *epsilon proteobacterium*綱、Uncultured *delta proteobacterium*綱に属する細菌が得られ、ミカワ②からは*Sulfur-oxidizing bacterium sp.株*、*Gamma proteobacterium*綱に属するContig配列が得られた。

一方、物質循環に関与する細菌では、タカツからは鉄還元細菌であるUncultured *Deferribacteres*門、硫酸還元細菌であるUncultured *Desulfobulbus*属およびUncultured *Desulfobacterales*目に属する細菌が得られた。428からは鉄還元細菌である2種類のUncultured *Deferribacteres*門、硫酸還元細菌である*Desulfobacterales*目、硫黄酸化細菌である*Thioclava*属に属する細菌が得られた。さらに、フジマエ①からは硫酸還元細菌である3種類の*Chloroflexi*門、硫酸還元細菌であるUncultured *Desulfuromonadaceae*科および*Desulfobulbaceae*科が得られた。フジマエ②からは硫

表3-1 アシカリにおける細菌相

Phylum	Closest phylotype/species (Accession No.)	Sim. (%)	No.
<i>Acidobacteria</i>	Uncultured <i>Acidobacteriales</i> bacterium clone Belgica2005/10-140-14 (DQ351783)	98	1
<i>Bacteroidetes</i>	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> bacterium clone AKYG1708 (AY921902)	96	1
<i>Proteobacteria</i>	Uncultured <i>alpha proteobacterium</i> clone ADK-BMe02-25 (EF520392)	98	3
	Uncultured <i>beta proteobacterium</i> clone: 233 (AB252904)	97	1
	Uncultured <i>delta proteobacterium</i> clone YS-UMF5_122 (DQ901618)	99	1
	Uncultured <i>delta proteobacterium</i> (AB238984)	93	1
<i>Verrucomicrobia</i>	Uncultured <i>Verrucomicrobiales</i> Sva0821 (AJ297461)	91	1
	Uncultured bacterium isolate JH10_C74 (AY568826)	99	6
-	Uncultured bacterium clone FFCH17716 (EU134153)	93	3
	Uncultured marine eubacterium HstpL71 (AF159643)	89	1
	Bacterium K2-15 (AY345434)	94	1

表3-2 タカツにおける細菌相

Phylum	Closest phylotype/species (Accession No.)	Sim. (%)	No.
<i>Deferribacteres</i>	Uncultured <i>Deferribacteres</i> bacterium clone MSB-4E9 (DQ811935)	98	1
<i>Proteobacteria</i>	Uncultured <i>alpha proteobacterium</i> clone MSB-3B6 (DQ811851)	96	3
	Uncultured <i>delta proteobacterium</i> clone Belgica2005/10-ZG-2 (DQ351798)	98	1
	Uncultured <i>Desulfobulbus</i> sp. clone VHS-B5-82 (DQ395035)	98	1
	<i>Myxobacterium</i> SMP-2 (AB016470)	91	1
	Uncultured <i>Desulfobacteriales</i> bacterium clone SIMO-1822 (AY711188)	91	1
	Uncultured <i>gamma proteobacterium</i> clone VHS-B5-70 (DQ395044)	93	1
	Uncultured <i>delta proteobacterium</i> clone UA32 (DQ269035)	90	1
	Uncultured bacterium clone MD2898-B16 (EU386058)	94	4
	Uncultured bacterium clone TfC20H61 (EU362217)	99	2
	Uncultured bacterium clone MSB-1B5 (EF125392)	99	2
Uncultured bacterium clone SIMO-1946 (AY711312)	94	1	
Uncultured bacterium clone 20BSU18 (AJ863190)	94	1	

表3-3 428における細菌相

Phylum	Closest phylotype/species (Accession No.)	Sim. (%)	No.
<i>Bacteroidetes</i>	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> bacterium clone CFB 1 (AY222319)	98	1
	<i>Cytophaga</i> sp. clone NB1-m (AB013834)	92	1
<i>Deferribacteres</i>	Uncultured <i>Deferribacteres</i> bacterium clone MSB-4A2 (DQ811933)	96	1
	Uncultured <i>Deferribacteres</i> bacterium clone MSB-4E9 (DQ811935)	90	1
<i>Fusobacteria</i>	<i>Propionigenium maris</i> strain ML-1 (Y16800)	99	1
<i>Proteobacteria</i>	Uncultured <i>gamma proteobacterium</i> clone VHS-B5-48 (DQ395021)	95	6
	Uncultured <i>Desulfobacteriales</i> bacterium clone SIMO-1719 (AY711085)	97	2
	Uncultured <i>delta proteobacterium</i> clone Belgica2005/10-140-18 (DQ351792)	88	2
	<i>Thioclava</i> sp. AMi4 (AB192382)	96	1
	Uncultured <i>Chromatiales</i> bacterium clone SIMO-2302 (AY711668)	96	1
	Uncultured <i>gamma proteobacterium</i> clone SIMO-1727 (AY711093)	96	1
	Uncultured <i>Bdellovibrio</i> sp. clone YE-3E (DQ659769)	87	1
	Uncultured bacterium clone CM20 (DQ832635)	96	1
	Unclassified bacterial species isolate koll11 (AJ224540)	90	1
	Uncultured bacterium clone SIMO-2169 (AY711535)	94	1

表3-4 ロッカクにおける細菌相

Phylum	Closest phylotype/species (Accession No.)	Sim. (%)	No.
<i>Bacillariophyta</i>	<i>Thalassiosira eccentrica</i> chloroplast strain P108 (AJ536458)	99	2
<i>Bacteroidetes</i>	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> bacterium clone SIMO-1976 (AY711342)	92	1
<i>Proteobacteria</i>	Uncultured <i>gamma proteobacterium</i> clone SS1_B_03_88 (EU050800)	95	4
	Uncultured <i>alpha proteobacterium</i> clone XME30 (EF061946)	99	3
	Uncultured <i>Oceanospirillales</i> bacterium clone SIMO-4207 (DQ421572)	95	1
	Uncultured <i>gamma proteobacterium</i> clone: IBC2-18 (AB175552)	89	1
	Uncultured <i>gamma proteobacterium</i> clone BS1-0-44 (AY254932)	98	1
	Uncultured <i>proteobacterium</i> clone Elev_16S_539 (EF019330)	86	1
	Uncultured bacterium isolate JH12_C30 (AY568871)	86	2
	Unidentified bacterium clone TK-NH7 (DQ463733)	90	1
	Uncultured bacterium isolate JH10_C68 (AY568820)	93	1

Uncultured bacterium clone HF10_A8_P1 (DQ300578)	94	1
Uncultured bacterium clone:BNT06-05 (AB240688)	89	1

表3-5 フジマエ①における細菌相

Phylum	Closest phylotype/species (Accession No.)	Sim. (%)	No.
<i>Bacteroidetes</i>	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> bacterium clone SIMO-1882 (AY711248)	98	1
<i>Chloroflexi</i>	Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium clone XME40 (EF061970)	99	1
	Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium clone XME3 (EF061967)	97	1
	Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium clone MSB-4F5 (DQ811873)	94	1
<i>Cyanobacteria</i>	Uncultured <i>Cyanobacterium</i> clone SIMO-2504 (AY711870)	97	3
<i>Proteobacteria</i>	Uncultured <i>alpha proteobacterium</i> clone Belgica2005/10-130-28 (DQ351770)	98	3
	Uncultured <i>Desulfuromonadaceae</i> bacterium clone 2B_269 (AM501802)	97	2
	Uncultured <i>gamma proteobacterium</i> clone: plfb-vmat-3 (AB294924)	94	1
	Uncultured <i>Desulfobulbaceae</i> bacterium clone: plfb-vmat-4 (AB294925)	90	1
	Uncultured <i>delta proteobacterium</i> clone SIMO-1730 (AY711096)	96	1
	Uncultured <i>delta proteobacterium</i> clone YS-UMF1_C154 (DQ901585)	99	1
	Uncultured <i>delta proteobacterium</i> clone SI28 (AY771951)	99	1
	Uncultured bacterium isolate JH10_C68 (AY568820)	99	1
	Uncultured bacterium clone AV9-26 (AM181821)	98	1
	-		

表3-6 フジマエ②における細菌相

Phylum	Closest phylotype/species (Accession No.)	Sim. (%)	No.
<i>Acidobacteria</i>	Uncultured <i>Acidobacteria</i> bacterium clone Cobs2TisA8 (EU246797)	93	1
<i>Chloroflexi</i>	Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium clone MSB-4D11 (DQ811875)	95	1
	Uncultured green sulfur bacterium clone K-249 (AJ428451)	99	1
<i>Proteobacteria</i>	Uncultured <i>Desulfosarcina</i> sp. clone SB4_53 (AY177791)	90	4
	Uncultured <i>Pseudomonas</i> sp. clone VHS-B4-54 (DQ395002)	98	1
	Uncultured <i>delta proteobacterium</i> clone YS-UMF1_C49 (DQ901568)	99	1
	Uncultured <i>delta proteobacterium</i> clone YS-UMF5_158 (DQ901623)	95	1
	<i>Desulforhopalus singaporensis</i> Spore T1 (AF118453)	97	1
-	Uncultured bacterium clone B01R013 (AY197384)	86	2

Uncultured bacterium clone Napoli-2B-55 (AY592677)	97	2
Uncultured bacterium clone KM02 (AY216445)	94	1
Uncultured bacterium clone IF-36-16 (DQ334660)	97	1
Uncultured bacterium clone KM87 (AY216458)	94	1
Uncultured bacterium clone Belgica2005/10-130-2 (DQ351752)	99	1
Uncultured bacterium clone 190b2 (EF459977)	88	1

表3-7 フジマエ③における細菌相

Phylum	Closest phylotype/species (Accession No.)	Sim. (%)	No.
<i>Actinobacteria</i>	Uncultured actinobacterium clone: Y193 (AB116478)	94	1
<i>Chloroflexi</i>	Uncultured green non-sulfur bacterium clone P. palm C 37 (AJ441227)	92	1
<i>Proteobacteria</i>	<i>Silicibacter pomeroyi</i> strain DSS-3 (AF098491)	99	1
	Uncultured <i>Comamonadaceae</i> bacterium clone DS171 (DQ234253)	92	1
	Sulfur-oxidizing bacterium ODIII6 (AF170422)	96	1
<i>Verrucomicrobia</i>	Uncultured <i>Desulfobacteraceae</i> bacterium (AB294926)	94	1
	Uncultured <i>Verrucomicrobia</i> bacterium clone GASP-MB3S1_H01 (EF665541)	91	1
-	Uncultured bacterium clone 282c2 (EF460022)	99	4
-	Uncultured bacterium clone: p763_b_4.09 (AB305485)	96	2
-	Uncultured bacterium clone Napoli-3B-43 (AY592715)	95	1
-	Uncultured bacterium clone SZB16 (AM176842)	99	1
-	Uncultured bacterium clone anNSH09 (EF034946)	99	1
-	Uncultured bacterium clone FCPP474 (EF516103)	92	1
-	Uncultured bacterium isolate JH12_C33 (AY568874)	94	1
-	Uncultured candidate division OP11 bacterium clone MSB-3A10 (DQ811940)	97	1
-	Uncultured bacterium clone anB09 (EF034514)	96	1

表3-8 ミカワ①における細菌相

Phylum	Closest phylotype/species (Accession No.)	Sim. (%)	No.
<i>Actinobacteria</i>	Uncultured actinobacterium clone PI_4c4d (AY580349)	97	2
<i>Bacteroidetes</i>	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> bacterium clone G3-39 (EU005301)	90	1

<i>Planctomycetes</i>	Uncultured planctomycete clone GL1-24 (EF215724)	98	1
<i>Proteobacteria</i>	Uncultured <i>epsilon</i> proteobacterium clone VHS-B1-48 (DQ394904)	99	2
	Uncultured <i>delta</i> proteobacterium clone Belgica2005/10-130-15 (DQ351760)	97	2
	Uncultured proteobacterium clone SIMO-1733 (AY711099)	97	1
	Marine bacterium BS110 (DQ659412)	97	1
	Uncultured <i>Geobacter</i> sp. clone VHS-B5-9 (DQ395028)	92	1
	Uncultured <i>gamma</i> proteobacterium clone Sylt 39 (AM040135)	99	1
	<i>Roseobacter</i> sp. GAI-109 (AF098494)	96	1
<i>Verrucomicrobia</i>	Uncultured <i>Verrucomicrobia</i> bacterium clone P. palm C 85 (AJ441222)	93	1
	Uncultured <i>Verrucomicrobia</i> bacterium clone PI_RT83 (AY580845)	93	1
-	Uncultured bacterium clone TFC20L15 (EU362287)	98	3
	Uncultured bacterium clone 282c2 (EF460022)	99	1
	Uncultured bacterium clone FE2MidBac29 (AY769008)	94	1

表3-8 ミカワ②における細菌相

Phylum	Closest phylotype/species (acc. No.)	Sim (%)	No.
<i>Bacillariophyta</i>	<i>Gyrosigma fasciola</i> (AF514847)	98	1
<i>Bacteroidetes</i>	Uncultured <i>Sphingobacteria</i> bacterium clone SIMO-2412 (AY711778)	98	1
	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> bacterium clone 2C5 (AY274840)	99	1
<i>Chloroflexi</i>	Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium clone 419 (EU097353)	93	1
<i>Proteobacteria</i>	Sulfur-oxidizing bacterium ODIII6 (AF170422)	93	3
	<i>Gamma</i> proteobacterium NEP68 (AB212806)	97	2
	<i>Andersenella baltica</i> BA141 <sup>T</sup> (AM712634)	98	1
	Uncultured <i>Thioalkalivibrio</i> sp. clone: JT58-36 (AB189351)	98	1
	Uncultured proteobacterium isolate C1_B021 (AF420364)	92	1
	Uncultured bacterium clone SIMO-2052 (AY711418)	96	2
	Uncultured bacterium clone TopBa5 (EF999344)	92	2
-	Uncultured marine bacterium clone PB1.14 (DQ071069)	96	1
	Uncultured bacterium clone 198b2 (EF459969)	91	1
	Bacterium DG981 (AY2580949)	93	1

酸還元細菌である*Chloroflexi*門、緑色非硫黄細菌および*Desulfosarcina*属、*Desulforhopalus singaporensis*種、さらに硫黄酸化細菌であるUncultured *Pseudomonas*属細菌が得られた。フジマエ③からは硫黄還元細菌である緑色非硫黄細菌、Uncultured *Desulfobacteraceae*科および硫黄酸化細菌であるSulfur-oxidizing bacterium ODIII6が得られた。ミカワ②からは硫酸還元細菌である*Chloroflexi*門、硫黄酸化細菌であるSulfur-oxidizing bacterium ODIII6およびUncultured *Thioalkalivibrio*属に属する細菌が得られた。

### 3-2 DG-DGGE解析

平成18年8月の有明海の4地点（アシカリ、タカツ、428、ロッカク）、平成19年8月の藤前干潟3地点（フジマエ①、フジマエ②、フジマエ③）および平成19年8月の三河湾2地点（ミカワ①、ミカワ②）の底泥からDNA抽出、PCRを行い、DG-DGGE解析に供した。DG-DGGE泳動図を図3-1に示す。

DG-DGGE解析を行った結果、それぞれのサンプルから多数のバンドが検出された。また、No. 1-3のバンドは有明海4地点、藤前干潟3地点および三河湾2地点に共通して検出された。また、フジマエ①（レーン6）にのみNo.4-7のバンドが検出され、フジマエ②（レーン7）No. 8-9のバンドが検出され、フジマエ③（レーン8）のみNo. 10-11のバンドが検出された。さらに、ミカワ①（レーン9）のみNo. 12-13のバンドが検出され、ミカワ②のみNo. 14-15のバンドが検出された。よって、有明海4地点（本書、田代幸寛他「有明海の細菌相解析」参照）と同様に藤前干潟と三河湾でも地点による細菌相の多様性が明らかとなった。

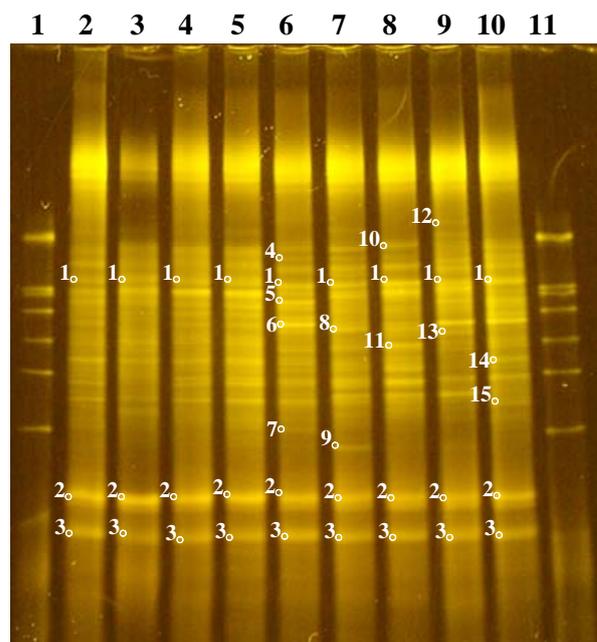


図3-1 DG-DGGE解析

1レーン; マーカー, 2レーン アシカリ(平成18年8月), 3レーン;

タカツ(平成18年8月), 4レーン; 428(平成18年8月), 5レーン; ロック(平成18年8月), 6レーン; フジマエ①(平成19年8月), 7レーン; フジマエ②(平成19年8月), 8レーン; フジマエ③(平成19年8月), 9レーン; ミカワ①(平成19年8月), 10レーン; ミカワ②(平成19年8月), 11レーン; マーカー  
写真の同じ数字のバンドは等しい移動度を示す。

#### 4. 結論

16S rDNAシークエンシング解析およびDG-DGGE解析により有明海の4地点と藤前干潟の3地点および三河湾の2地点の底泥の細菌相解析を行った。16S rDNAシークエンシング解析では、有明海のタカツと428と同様にフジマエ①、②、③とミカワ②から*Proteobacteria*門に属する硫酸還元細菌と硫酸化細菌および*Chloroflexi*門に属する硫酸還元細菌が得られた。よって、有明海と同様に藤前干潟と三河湾でも硫黄循環に関与する細菌が生息することが示唆された。細菌の硫黄循環におよぼす影響を調べるために、今後は16S rDNA<sup>11)</sup>、Dissimilatory Sulfite Reductase (*dsrAB*)<sup>12)</sup>、adenosine-5-phosphosulfate [APS] reductase (*aprA*)<sup>13)</sup>等をターゲットとしたリアルタイムPCRによる定量的な解析が必要である。

DG-DGGE解析の結果、有明海と同様に藤前干潟と三河湾でも多数のバンドが検出されたことから、日本の干潟には多様な細菌が生息していることが示唆された。また、藤前干潟と三河湾でも有明海と同じ位置に3本のバンドが検出されたが、ほとんどが異なるバンドの位置であったことから、有明海の細菌相は他の干潟と異なることが示唆された。さらに、藤前干潟3地点と三河湾2地点の間でもサンプリング地点に特異的にクリアなバンドが検出されたことから、藤前干潟と三河湾の細菌相は地点に特異的であることが示唆された。現在、これらのバンドに由来する細菌の同定により定性的な細菌相解析が可能である。

謝辞：有明海底泥サンプルをご供与頂いた有明水産振興センター・三根崇幸氏に深謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 田代幸寛, 光武奈緒子, 小林元太, 加藤富民雄: 有明干潟泥中の細菌相解析とビブリオ・バルニフィカス感染性バクテリアオフページの分離, 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集, 第3巻, pp. 127-134, 2007.
- 2) <http://www.kankyo-net.city.nagoya.jp/fujimae/>
- 3) 中島幹夫, 大石浩隆: ビブリオ・バルニフィカス感染症対策—臨床医学的アプローチ (第一報) —, 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集, 第2巻, pp. 119-126, 2006.
- 4) Sorokin, D. Y., Foti, M., Pinkart, H. C., and Muyzer, G.: Sulfur-oxidizing bacteria in Soap Lake (Washington State), a meromictic, haloalkaline lake with an Unprecedented High Sulfide Content, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol 73, pp.451-455, 2007.
- 5) Urakawa, H., Maki, H., Kawabata, S., Fujiwara, T., Ando, H., Kawai, T., Hiwatari, T., Kohata, K., and Watanabe, M.: Abundance and Population Structure of Ammonia-Oxidizing Bacteria That Inhabit Canal Sediments Receiving Effluents from Municipal Wastewater Treatment Plants, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol 72, pp.6845-6850, 2006.
- 6) Hahn, M. W. and Höfle, M. G.: Grazing of protozoa and its effect on populations of aquatic bacteria, *FEMS Microbiol. Ecol.*, Vol.35, pp.113-121, 2001.
- 7) Nakayama, J., Hoshiko, H., Fukuda, M., Tanaka, H., Naoshige, S., Tanaka, S., Ohue, K., Sakai, K. and Sonomoto, K.: Molecular monitoring of bacterial community structure in long-aged nukadoko: pickling bed of fermented rice bran dominated by slow-growing lactobacilli, *J. Biosci. Bioeng.*, Vol.104, pp.481-489, 2007.
- 8) Muyzer, G., Waal, E. C. D. and Uitterlinden, A. G.: Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16S rRNA, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol.59, pp.695-700, 1993.
- 9) Muyzer, G.: DGGE/TGGE a method for identifying genes from natural ecosystems, *Curr. Opin. Microbiol.*, Vol.2, pp.317-322, 1999.

(2008. 3. 31受付)

# 有明海における細菌相解析

## ANALYSIS OF BACTERIAL COMMUNITY IN ARIAKE SEA

田代幸寛<sup>1</sup>・光武奈緒子<sup>2</sup>・小林元太<sup>3</sup>・加藤富民雄<sup>4</sup>・神田康三<sup>4</sup>

Yukihiro TASHIRO, Naoko MITSUTAKE, Genta KOBAYASHI, Fumio KATO and Kouzo KANDA

<sup>1</sup>農博 佐賀大学講師(研究機関研究員) 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>2</sup>農学部応用生物科学科4年 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>3</sup>農博 佐賀大学准教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>4</sup>農博 佐賀大学教授 農学部応用生物科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

The bacterial community is shown to contribute to the environmental ecology. The bacterial community in Ariake sea or its contribution to ecology is poorly understood. In this study, we aimed at analyzing the bacterial community at the four sampling points in Ariake sea. We carried out a 16S rRNA gene (rDNA) sequencing analysis and a double gradient-denaturing gradient gel electrophoresis (DG-DGGE) analysis. From 16S rDNA sequencing analysis, sulfate-reducing relatives or sulfur-oxidizing relatives were detected at the all sampling points. The results by DG-DGGE analysis exhibited that the existence of sulfate-reducing relatives in Ariake sea and the ubiquity of *Flavobacterium*-like bacteria in and around the area of Nori cultivation.

**Key Words** : Ariake sea, bacterial community, 16S sequencing analysis, DGGE analysis, *Flavobacterium*-like bacteria

### 1. 序論

有明海は九州最大の湾である。その干満の差は6 m以上にも達し、干潮時には日本最大の広さの干潟が出現することが知られている<sup>1)</sup>。干潟一帯ではクチゾコ、アサリ、サルボウ、タイラギ等の漁業やノリ養殖業などの産業が古くから行われ、有明海はまさに「宝の海」として我々は恩恵を受けている。ところが近年では、赤潮の発生などによる漁業量の減少<sup>2)</sup>や様々な病気によるノリ生産量の低下<sup>3)</sup>が確認されている。有明海における様々な因子(生物的、化学的、物理的)による生態系の変化が危惧されているが、詳細な因果関係は未だ解明されていない。

細菌相は生態系の変化を調べる上で重要な生物的因子の一つである<sup>4)</sup>。微生物学的な先の研究により、有明海干潟より培養法による新規な硝化細菌が分離され、有明海干潟の窒素循環に寄与することが明らかとなっている<sup>5)</sup>。近年では、16S rRNA遺伝子(16S rDNA)をターゲットとした非培養法による分子生物学的手法がある環境における細菌相解析に応用されている<sup>6)</sup>。培養法と比較して、分子生物学的手法ではこれまでに分離されてい

ない未培養の細菌さえも検出することができるために、より正確に微生物相を解析することが可能である<sup>7)</sup>。しかしながら、これまでに分子生物学的手法による有明海の細菌相解析は行われていない。そこで本研究では、有明海に存在する細菌を決定して有明海の生態系変化のメカニズムの解明を目的とし、分子生物学的手法による有明海の細菌相解析を行った。

### 2. 実験方法

#### 2-1 16S rDNAシーケンシング解析

本項では、抽出したDNAを直接鋳型としてPCR法により16S rDNAにおけるV1-V9領域(約1.5 kb)を増幅して、クローニングを行い、クローンのシーケンシングにより細菌相の解析を行った。

#### 2-1-1 有明海の底泥

有明海の4地点[芦刈(以下アシカリ: 33°11.766'N, 130°12.494'E)、早津江川自動観測塔(以下タカツ: 33°06.837'N, 130°17.421'E)、428鋼管(以下428:

33°04.715'N, 130°10.885'E)、六角川自動観測塔 (以下ロッカク: 33°08.149'N, 130°13.303'E) から平成18年4月～平成19年4月までに毎月採取された底泥を試料として用いた。アシカリでは、干潮時に干潟が出現し、満潮時には海水で覆われる動的变化がある。また、他の3地点 (タカツ、428、ロッカク) では、常時海水に覆われており、その地点の周辺地域では10月～3月までにノリ養殖が行われている。

### 2-1-2 底泥からのDNA抽出

底泥からのDNA抽出には土壌DNA抽出キットISOIL for Beads Beating (ニッポンジーン、日本) を用いた。底泥中の菌体破碎にはビーズ式細胞破碎装置MicroSmash MS-100R (トミー精工、日本) を用いた。破碎条件は4200 rpm、45 secとした。得られたDNAは微量分光光度計NanoDrop ND-100RP (NanoDrop Technologies、USA) にてDNA収量を測定した。

### 2-1-3 PCRによる完全16S rDNAの増幅

2-1-2で抽出したDNAを鋳型として、表2-1に示す全細菌ユニバーサルプライマー<sup>8)</sup>を用いて、PCRにより完全16S rDNA (約1.5 kb) を増幅した。

表2-1 プライマー配列

8f	5'-AGA GTT TGA TCC TGG CTC AG-3'
1510r	5'-GTG AAG CTT ACG GYT ACC TTG TTA CGA CTT-3'

反応液組成を表2-2に示す。

表2-2 PCR反応液組成

Reagent	Volume (μL)
Premix Ex Taq (タカラバイオ、日本)	25
Primer Forward (8f; 10 μM)	4.0
Primer Reverse (1510r; 10 μM)	4.0
Template DNA	0.5-2.0
H <sub>2</sub> O	15-16.5
Total	50.0

PCRは以下の反応条件 (変性95°C 30 sec、アニーリング55°C 30 sec、伸長72°C 1 min; 30 cycles) でTグラジエントサーモサイクラー96 (バイオメトラ、ドイツ) を用いて行った。

反応条件

95°C	5 min	} 30 cycles
95°C	30 sec	
55°C	30 sec	
72°C	1 min	
72°C	5 min	

反応終了後に反応液を1.2%アガロースゲル電気泳動に供して目的とするバンドを確認後、PCR精製キットQIAquick PCR Purification Kit (QIAGEN、USA) を用いてPCR産物を精製した。

### 2-1-4 TAクローニングと大腸菌への形質転換

ライゲーションキットTA-Blunt Ligation Kit (ニッポンジーン、日本) を用いて 2-3で得られたPCR産物をpGEM-T Easy Vector (Promega、USA) にTAクローニングを行った。反応液組成を表2-3に示し、16°Cで1晩反応させた。

表2-3 ライゲーション反応液組成

Reagent	Volume (μL)
pGEM-T Easy Vector (Promega)	1.0
10×Enhancer Solution	1.0
5×Ligation Mix	2.0
Purified PCR product	3.0
H <sub>2</sub> O	3.0
Total	10.0

ライゲーション反応液2 μLをコンピテントセル*Escherichia coli* JM109 (東洋紡、日本) 25 μLに加えて、42°Cで47 secヒートショックを行い、*E. coli* JM109を形質転換した。形質転換後、表2-4の組成のLBプレートに塗布して37°Cで1晩培養した。形成したコロニーの色 (白/青) を観察し、白コロニーを選抜した。

表2-4 LBプレート組成

Reagent	
Tryptone	10 g
Yeast extract	5 g
NaCl	5 g
アンピシリンナトリウム	100 mg
イソプロピル-β-D-チオ ガラクトピラノシド	100 μmol
5-プロモ-4-クロロ-3-インドリル- β-D-ガラクトピラノシド	10 mg
寒天末	15 g
脱イオン水	1 L

### 2-1-5 コロニーPCR

2-1-4で得られた白コロニーを直接鋳型として、表2-5に示すM13プライマーを用いて、コロニーPCRにより、16S rDNA 1.5 kb断片のインサートの有無を確認した。

表2-5 プライマー配列

M13F	5'-CGC CAG GGT TTT CCC AGT CAC GAC-3'
M13R	5'-TCA CAC AGG AAA CAG CTA TGA C-3'

反応液組成を表2-6に示す。

表2-6 コロニーPCR反応液組成

Reagent	Volume (μL)
KOD Dash (東洋紡、日本)	0.1
Buffer	1.0
dNTPs	1.0
Primer Forward (M13F; 10 μM)	0.1
Primer Reverse (M13R; 10 μM)	0.1
H <sub>2</sub> O	7.7
Total	10.0

PCRは以下の反応条件 (変性94°C 30 sec、アニーリング52°C 30 sec、伸長74°C 70 sec; 30 cycles) でTグラジエントサーモサイクラー96を用いて行った。

反応条件

94°C	5 min	} 30 cycles
94°C	30 sec	
52°C	30 sec	
74°C	70 sec	
74°C	7 min	

反応終了後に反応液を0.8%アガロースゲル電気泳動に供して目的とするバンドを検出したコロニーをクローンとした。

#### 2-1-6 プラスミド抽出

2-1-5で得られたクローンを100 mg/Lアンピシリンナトリウム含有LB培地に接種して温度37°C、振とう速度200 rpmで16時間培養した。培養液3 mLを遠心分離操作 (13,000×g, 5 min) により菌体を回収して、プラスミド抽出キットHigh Pure Plasmid Isolation Kit (ロシュ、スイス) を用いてプラスミドを抽出した。得られたプラスミドは微量分光光度計NanoDrop ND-100RPにてDNA収量を測定した。得られたプラスミドを1.0%アガロースゲル電気泳動に供してプラスミドを確認した。

#### 2-1-7 シーケンスおよび相同性探索

プラスミドの塩基配列を決定するために、ジーンネット(株) (日本) にシーケンス解析を依頼した。得られた配列は、アッセンブル解析ソフト (ATGC; Genetyx、日本) によりContig配列を得て、データベース (BLAST program of the National Center for Biotechnology Information, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/BLAST/>) で相同性検索を行った。

#### 2-2 Double Gradient-Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (DG-DGGE) 解析

本項では、抽出したDNAを直接鋳型としてPCR法により16S rDNAにおけるV2-V3領域 (約0.2 kb)を増幅して、DGGEに供し、網羅的な細菌相の解析を行った。16S rDNAシーケンス解析と比較して、DGGE法ではク

ローンの選択のバイアスがないこと<sup>9)</sup>や環境中の細菌相の視覚的な比較が可能である<sup>10)</sup>ことが長所として認められている。

#### 2-2-1 有明海の底泥

2-1-1と同様に、有明海の4地点 (アシカリ、タカツ、428、ロッカク)から平成18年4月 (春)、平成18年7月 (夏)、平成18年10月 (秋)、平成19年1月 (冬)に採取された底泥を試料として用いた。

#### 2-2-2 底泥からのDNA抽出

2-1-2と同様に、底泥からのDNA抽出を行った。

#### 2-2-3 PCRによる部分16S rDNAの増幅

2-2-2で抽出したDNAを鋳型として、表2-7に示す全細菌ユニバーサルプライマー<sup>8)</sup>を用いて、PCRにより部分16S rDNA (約0.2 kb)を増幅した。

表2-7 プライマー配列

GC-HDA1	5'-CGCCCGGGCGCGCCCGGGCGGGG CGGGGGCACGGGGGGACTCCTACGG GAGGCAGCAGTAGAGTTTGATCCTGG CTCAG-3'
HDA2	5'-GTATTACCGCGGCTGCTGGCAC-3'

反応液組成を表2-8に示す。

表2-8 PCR反応液組成

Reagent	Volume (μL)
Premix Ex Taq Hot Start Version (タカラバイオ)	100
Primer Forward (GC-HDA1; 20 μM)	8.0
Primer Reverse (HDA2; 20 μM)	8.0
Template DNA	2.0-8.0
H <sub>2</sub> O	76-82
Total	200

非特異的な断片の増幅を防ぐために、Tグラジエントサーモサイクラー96 (バイオメトラ) を用いてHot start-touch down PCRを行った。

反応条件

94°C	5 min	} 20 cycles
65°C	1 min	
72°C	1 min	
94°C	1 min	
64.5°C ("touch down" PCR, -0.5°C every new cycle)	1 min	
72°C	1 min	} 9 cycles
94°C	1 min	
55°C	1 min	
72°C	1 min	
72°C	5 min	

反応終了後に反応液を1.5%アガロースゲル電気泳動に供して目的とするバンドを確認後、PCR精製キット QIAquick PCR Purification Kit (QIAGEN) を用いてPCR産物を精製した。

#### 2-2-4 DGGE解析

40% (w/v) アクリルアミド/ビス混合液 [29:1 (ナカライテスク、日本)]、ホルムアミド (ナカライテスク)、尿素 (ナカライテスク) ペルオキシ二硫酸アンモニウム (ナカライテスク)、N,N,N'-テトラメチルエチレンジアミン (ナカライテスク) を用いて変性剤濃度勾配を30%~70%、ポリアクリルアミド濃度勾配を6~8%に調製した Double Gradient (DG)-DGGEゲルを作製した。なお、変性剤濃度100%は7 M尿素と40% (v/v) ホルムアミドに相当する。DGGEミニ電気泳動システム (NB-1490; 日本エイドー、日本) を用いて、2-2-3で得た精製PCR産物 (600 ng) およびDGGE Marker II (ニッポンジーン)を供した。まず50 Vで2時間電気泳動後、66 Vで3時間電気泳動を行った。電気泳動後にSYBR Gold (Molecular Probes、USA) に1時間染色し、紫外線により可視化した。フナゲルチップ (フナコシ、日本) により主要なDGGEバンドを得た。

#### 2-2-5 DGGEバンドのシーケンシング

2-2-4で得たDGGEバンドを滅菌した超純水で洗浄したのち、DNAを滅菌した超純水30 µLに4°Cで一晩溶出した。溶出したDNAを鋳型として、2-2-3と同様にHot start-touch down PCRにより、部分16S rDNA (約0.2 kb) を増幅した。

反応液組成を表2-9に示す。

表2-9 PCR反応液組成

Reagent	Volume (µL)
Premix Ex Taq Hot Start Version (タカラバイオ)	25
Primer Forward (GC-HDA1; 20 µM)	2.0
Primer Reverse (HDA2; 20 µM)	2.0
Template DNA	1.0
H <sub>2</sub> O	20
Total	50

2-1-4~2-1-7と同様に、TAクローニングおよび大腸菌への形質転換、コロニーPCR、プラスミド抽出、シーケンシング、相同性検索を行った。

### 3. 結果

#### 3-1 16S rDNAシーケンス解析

平成18年4月~平成19年4月までの有明海の4地点の底泥 (アシカリ、タカツ、428、ロッカク) からDNA抽出、PCR、クローニング、プラスミド抽出を行い、完全16S

rDNAのクローンをそれぞれ255クローン、260クローン、259クローン、259クローンを得た。各干潟泥につき16~20クローンずつシーケンス解析を行い、アセンブル解析を行い、得られたContig配列をBLASTによって相同性検索を行った。アセンブル解析の結果、アシカリ、タカツ、428、ロッカクではそれぞれ18、20、21、14のContig配列を得た。各地点の細菌相の結果をそれぞれ表3-1~表3-4に示す。

すべての4地点から、*Acidobacteria*門、*Actinobacteria*門、*Chloroflexi*門、*gamma proteobacterium*綱、*delta proteobacterium*綱に属する細菌と相同性を示すクローンが得られた。また、*Nitzschia frustulum*、*Thalassiosira eccentrica chloroplast*、*Sulfurimonas* sp.、*Gelidibacter* sp.はそれぞれ、アシカリ、タカツ、428、ロッカクのみから得られた。一方、アシカリから、硫酸還元細菌である*Chloroflexi*門、*Olavius algarvensis sulfate-reducing endosymbiont*、*Desulfobulbus* sp.および硫酸化細菌であるSulfur-oxidizing bacteriumが得られた。同様にタカツから、硫酸還元細菌である*Chloroflexi*門、*Olavius algarvensis sulfate-reducing endosymbiont*、*Desulfobulbus* sp.および硫酸化細菌であるSulfur-oxidizing bacteriumが得られた。また、428から、硫酸還元細菌である*Chloroflexi*門、*Olavius algarvensis sulfate-reducing endosymbiont*、*Desulfuromonas* sp.および硫酸化細菌であるSulfur-oxidizing bacterium、*Sulfurimonas* sp.が得られた。さらに、ロッカクから、硫酸還元細菌である*Chloroflexi*門、*Desulfobacteraceae* bacteriumが得られた。

#### 3-2 DG-DGGE解析

平成18年4月 (春)、平成18年7月 (夏)、平成18年10月 (秋)、平成19年1月 (冬)の有明海の4地点の底泥 (アシカリ、タカツ、428、ロッカク) からDNA抽出、PCRを行い、DG-DGGE解析に供した。得られたバンドからDNAを溶出し、PCR、クローニング、シーケンシングを行い、得られた配列をBLASTによって相同性検索を行った。各地点の各季節におけるDG-DGGE泳動図を図3-1と図3-2に示す。また、バンド計30本の塩基配列の相同性検索の結果を表3-5に示す。

DG-DGGE解析を行った結果、それぞれのサンプルから多数のバンドが検出された。特に、428とロッカクにおいてクリアなバンドが検出された。すべてのサンプルから*gamma proteobacterium* (No. 3, 11)、*delta proteobacterium* (No. 5, 20)、*Chloroflexi* (No. 19, 26)、*Chromatiales* (No. 27)、sulfate-reducing bacteria (No. 21)、unclassified bacterium (No. 7, 24)が検出された。一方、アシカリの冬 (図3-2; 7レーン)にのみ*Nitzschia frustulum* (No. 28)、*gamma proteobacterium* (No. 29)、*alpha proteobacterium* (No. 30)が特異的に検出された。さらに、すべてのサンプルから硫酸還元細菌である

表3-1 アシカリにおける細菌相

Phylum	Closest phylotype/species (Accession No.)	Sim. (%)	No.
<i>Acidobacteria</i>	Uncultured <i>Acidobacteriales</i> bacterium clone Belgica2005/10-140-14 (DQ351783)	96	4
	Uncultured <i>Acidobacteriales</i> bacterium clone GR24 (AY150892)	89	4
<i>Actinobacteria</i>	Uncultured actinobacterium clone 3G02-22 (DQ431887)	94	3
	Uncultured actinobacterium clone MSB-3D10 (DQ811922)	93	3
<i>Bacillariophyta</i>	<i>Nitzschia frustulum</i> SAG 1052-2 (AY221721)	97	10
<i>Bacteroidetes</i>	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> bacterium clone S2-19 (EF491338)	91	5
<i>Chloroflexi</i>	Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium clone VHS-B3-80 (DQ394964)	97	2
<i>Proteobacteria</i>	Uncultured <i>gamma proteobacterium</i> clone MSB-4F10 (DQ811844)	93	55
	Uncultured <i>alpha proteobacterium</i> clone crystalBog022B5 (AY792287)	92	8
	Uncultured <i>Aquabacterium</i> sp. clone GASP-WC1S2_G04 (EF074520)	89	5
	<i>Olavius algarvensis</i> sulfate-reducing endosymbiont (AF328857)	95	4
	Uncultured <i>Desulfobulbus</i> sp. clone VHS-B5-82 (DQ395035)	98	3
	Uncultured <i>gamma proteobacterium</i> clone SC3-2 (DQ289941)	94	3
	Uncultured <i>alpha proteobacterium</i> clone CD207C10 (DQ200591)	93	2
	Uncultured <i>gamma proteobacterium</i> clone VHS-B5-65 (DQ395062)	95	2
	Uncultured <i>delta proteobacterium</i> clone YS-UMF5_122 (DQ901618)	95	2
	Uncultured <i>gamma proteobacterium</i> clone Belgica2005/10-120-18 (DQ351749)	97	2
Sulfur-oxidizing bacterium ODIII6 (AF170422)	93	2	

表3-2 タカツにおける細菌相

Phylum	Closest phylotype/species (Accession No.)	Sim. (%)	No.
<i>Acidobacteria</i>	Uncultured <i>Acidobacteria</i> bacterium clone EP3-22 (EF491495)	98	3
<i>Actinobacteria</i>	Uncultured actinobacterium clone MSB-5D2 (DQ811925)	92	3
<i>Bacillariophyta</i>	<i>Thalassiosira eccentrica</i> chloroplast strain P108 (AJ536458)	97	4
<i>Bacteroidetes</i>	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> bacterium clone SIMO-1934 (AY711300)	98	3
	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> bacterium clone SIMO-2430 (AY711796)	96	2
<i>Chloroflexi</i>	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> bacterium clone SIMO-1724 (AY711090)	92	2
	Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium clone Belgica2005/10-130-20 (DQ351765)	95	3
<i>Proteobacteria</i>	Uncultured green non-sulfur bacterium clone P. palm C 37.(AJ441227)	88	2
	Uncultured <i>gamma proteobacterium</i> clone Belgica2005/10-130-24 (DQ351767)	94	52
	Uncultured bacterium clone MSB-2G1 (EF125455)	94	12
	Uncultured <i>Desulfobacteraceae</i> bacterium clone: pltb-vmat-76. (AB294969)	93	11
	Uncultured <i>gamma proteobacterium</i> clone VHS-B4-12 (DQ394977)	95	10
	Uncultured <i>delta proteobacterium</i> clone Belgica2005/10-ZG-2 (DQ351798)	97	10
	Uncultured <i>delta proteobacterium</i> clone 3G02-06 (DQ431903)	98	6
	Uncultured bacterium clone MSB-2G4 (EF125458)	95	4
	Uncultured <i>alpha proteobacterium</i> clone MSB-3B6 (DQ811851)	96	3
	<i>Rhodobacteraceae</i> bacterium GPM2511 clone GPM2511. (AJ871950)	93	2
<i>Alterococcus agarolyticus</i> ADT3; CCRC17102 (AF075271)	93	2	
Uncultured <i>delta proteobacterium</i> clone SC1-40 (DQ289922)	97	2	
Uncultured <i>gamma proteobacterium</i> clone: pltb-vmat-80. (AB294972)	94	2	

表3-3 428における細菌相

Phylum	Closest phylotype/species (Accession No.)	Sim. (%)	No.
<i>Acidobacteria</i>	Uncultured <i>Acidobacteria</i> bacterium clone G7-30 (EU005340)	96	6
	Uncultured <i>Acidobacteriales</i> bacterium clone Belgica2005/10-140-14 (DQ351783)	93	2
<i>Actinobacteria</i>	Uncultured actinobacterium clone MSB-3D10 (DQ811922)	94	3
<i>Chloroflexi</i>	Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium clone MSB-5H11 (DQ811887)	94	5
<i>Proteobacteria</i>	Uncultured <i>gamma</i> proteobacterium clone MSB-4F10 (DQ811844)	95	46
	Uncultured bacterium clone MSB-2G1 (EF125455)	96	15
	<i>Olavius algarvensis</i> sulfate-reducing endosymbiont (AF328857)	94	15
	Uncultured <i>gamma</i> proteobacterium clone VHS-B4-12 (DQ394977)	95	12
	Uncultured <i>gamma</i> proteobacterium clone Belgica2005/10-130-9 (DQ351756)	94	10
	Uncultured <i>delta</i> proteobacterium clone 3G02-06 (DQ431903)	99	5
	Uncultured <i>delta</i> proteobacterium clone Belgica2005/10-ZG-2 (DQ351798)	96	4
	Uncultured <i>gamma</i> proteobacterium clone Sylt 32. (AM040128)	97	4
	Uncultured <i>gamma</i> proteobacterium clone LC3-5 (DQ289914)	95	3
	Uncultured proteobacterium clone SIMO-1765 (AY711131)	89	3
	Uncultured bacterium clone: SRRT69 (AB240495)	91	2
	Uncultured <i>Chromatiales</i> bacterium clone SIMO-2302 (AY711668)	91	2
	Uncultured bacterium clone B78-35 (EU286999)	95	2
	Sulfur-oxidizing bacterium ODIII6 (AF170422)	93	2
	Uncultured <i>delta</i> proteobacterium clone YS-UMF5_166 (DQ901625)	96	2
	<i>Desulfuromonas</i> sp. SDB-1 (AF019933)	96	2
<i>Sulfurimonas</i> sp. 0H30-7C-S (AB304903)	98	2	

表3-4 ロッカクにおける細菌相

Phylum	Closest phylotype/species (Accession No.)	Sim. (%)	No.
<i>Acidobacteria</i>	Uncultured <i>Acidobacteriales</i> bacterium clone Belgica2005/10-140-14 (DQ351783)	97	2
<i>Actinobacteria</i>	Uncultured actinobacterium clone PI_4c4d (AY580349)	97	2
<i>Bacteroidetes</i>	Uncultured <i>Gelidibacter</i> sp. clone h13 (DQ167082)	98	3
	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> bacterium clone VHS-B4-72 (DQ395008)	97	2
<i>Chloroflexi</i>	Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium clone XME38 (EF061969)	100	7
	Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium clone MSB-3D4 (DQ811864)	96	3
<i>Proteobacteria</i>	Uncultured <i>gamma</i> proteobacterium clone 30ANG2 (AJ633957)	93	76
	Uncultured <i>Desulfobacteraceae</i> bacterium clone: pltb-vmat-76 (AB294969)	95	15
	Uncultured <i>delta</i> proteobacterium clone YS-UMF5_158 (DQ901623)	98	7
	Uncultured <i>delta</i> proteobacterium clone Belgica2005/10-130-15 (DQ351760)	97	6
	Uncultured <i>alpha</i> proteobacterium clone MSB-3B6 (DQ811851)	98	3
	Uncultured <i>delta</i> proteobacterium clone KorMud-V6C13 (DQ112394)	98	2
Uncultured proteobacterium clone SIMO-1733 (AY711099)	96	2	
Uncultured <i>Chromatiales</i> bacterium clone SIMO-2206 (AY711572)	97	2	

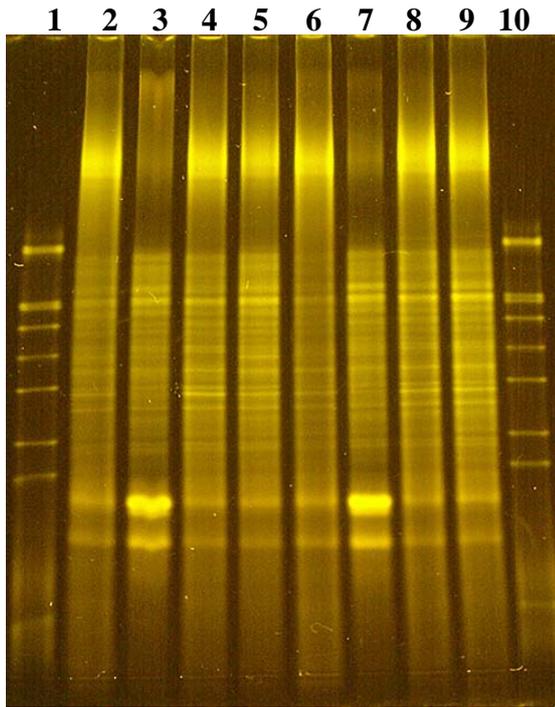


図-3-1 DG-DGGE解析 (平成18年4月、平成18年7月)  
 1レーン; マーカー, 2レーン アシカリ(平成18年4月), 3レーン;  
 タカツ(平成18年4月), 4レーン; 428(平成18年4月), 5レーン; ロッ  
 カク(平成18年4月), 6レーン; アシカリ(平成18年7月), 7レーン;  
 タカツ(平成18年7月), 8レーン; 428(平成18年7月), 9レーン; ロッ  
 カク(平成18年7月), 10レーン; マーカー

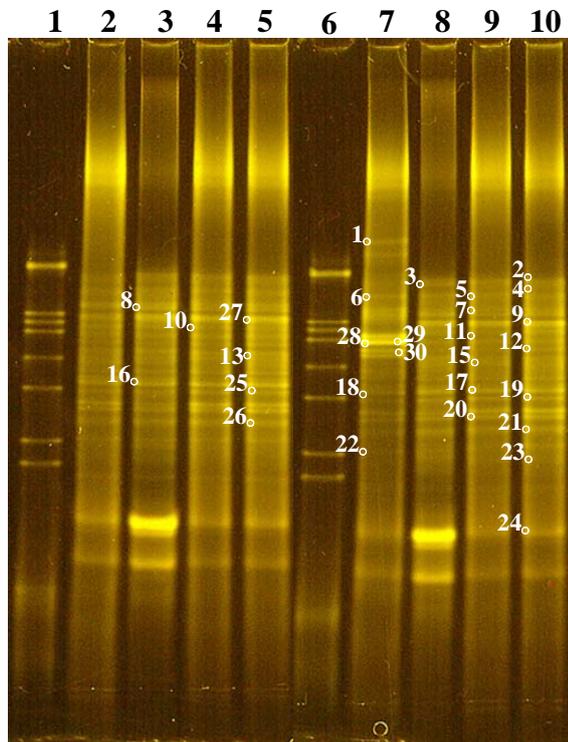


図-3-2 DG-DGGE解析 (平成18年10月、平成19年1月)  
 1レーン; マーカー, 2レーン アシカリ(平成18年10月), 3レーン;  
 タカツ(平成18年10月), 4レーン; 428(平成18年10月), 5レーン;  
 ロッカク(平成18年10月), 6レーン; マーカー, 7レーン; アシカ

リ(平成19年1月), 8レーン; タカツ(平成19年1月), 9レーン; 428  
 (平成19年1月), 10レーン; ロッカク(平成19年1月)  
 写真の数字はシークエンシングを行ったバンドNo.を示す。

表3-5 DG-DGGE解析におけるバンドの塩基配列の相同性検索

Band No.	Phylum	Closest phylotype/species (Accession No.)	Sim (%)
1	Proteobacteria	Uncultured <i>delta</i> proteobacterium clone SIMO-1753 (AY711119)	94
2	Proteobacteria	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i> (EU330417)	99
3	Proteobacteria	Uncultured <i>gamma</i> proteobacterium clone SIMO-1757 (AY711123)	100
4	Bacteroidetes	Uncultured <i>Flavobacteria</i> bacterium clone SIMO-2983 (DQ18995)	100
5	Proteobacteria	Uncultured <i>delta</i> proteobacterium clone BS1-0-104 (AY254955)	98
6	Proteobacteria	<i>Desulfobacterium catecholicum</i> Kette (EF442982)	98
7	-	Uncultured bacterium clone root_Ell_132 (EF029003)	94
8	-	Uncultured bacterium clone S26-19 (EU287319)	98
9	Cyanobacteria	Uncultured <i>cyanobacterium</i> clone DT_068 (DQ881210)	99
10	-	Uncultured bacterium clone C2 (EF590022)	91
11	Proteobacteria	Uncultured <i>gamma</i> proteobacterium clone Belgica2005/10-130-12 (DQ351758)	98
12	Bacteroidetes	<i>Flavobacteriaceae</i> bacterium YM6-073 (AB270585)	96
13	Verrucomicrobia	Uncultured <i>Verrucomicrobiae</i> bacterium clone HCM3MC91_11E_FF (EU373981)	93
14	-	Sponge bacterium Zo10 (AY948377)	95
15	Bacteroidetes	Uncultured <i>Flavobacteria</i> bacterium clone SIMO-1405 (AY710845)	98
16	Proteobacteria	Uncultured <i>delta</i> proteobacterium (AJ519664)	90
17	Bacteroidetes	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> bacterium clone MSB-3B10 (DQ811905)	100
18	Proteobacteria	Uncultured <i>delta</i> proteobacterium clone ADK-MOh02-61 (EF520538)	95
19	Chloroflexi	Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium clone XME38 (EF061969)	99
20	Proteobacteria	Uncultured <i>delta</i> proteobacterium clone SIMO-1739 (AY711105)	97
21	-	Uncultured sulfate-reducing bacterium clone BznS327 (EU047539)	96
22	-	Uncultured bacterium clone TIC20H44 (EU362204)	88
23	Chloroflexi	Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium clone XME3 (EF061967)	98
24	-	Uncultured bacterium clone TIC20H80 (AM040102)	95
25	-	Uncultured bacterium clone SII-1 (AJ853873)	100
26	Chloroflexi	Uncultured <i>Chloroflexi</i> bacterium clone VHS-B3-80 (DQ394964)	100
27	Proteobacteria	Uncultured <i>Chromatiales</i> bacterium clone SIMO-2416 (AY711782)	100
28	Bacillariophyta	<i>Nitzschia frustulum</i> SAG 1052-2 (AY221721)	99
29	Proteobacteria	Uncultured <i>gamma</i> proteobacterium clone XME27 (EF061959)	100
30	Proteobacteria	Uncultured <i>alpha</i> proteobacterium SLH20-Oil (AM282626)	100

*Desulfobacterium catecholicum* (No. 6)が検出された。また、ノリ養殖の行われているタカツ、428、ロッカクから *Flavobacteria*や*Flavobacteriaceae* (No. 4, 12, 15)が検出され、アシカリからは検出されなかった。

#### 4. 結論

16S rDNAシーケンシング解析およびDG-DGGE解析により有明海の4地点の底泥の細菌相解析を行った。両解析においても、すべての4地点より *delta proteobacterium* に属する硫酸還元細菌が検出されたことから、窒素循環に関与する脱窒細菌<sup>5)</sup>と同様に硫黄循環に関与する細菌の存在が示唆された。しかし、本研究で用いた解析手法では、定量性が得られず、詳細なメカニズムは不明である。そこで、有明海における硫黄循環の挙動を詳細に調べるために、今後は16S rDNA<sup>11)</sup>、Dissimilatory Sulfite Reductase (*dsrAB*)<sup>12)</sup>、adenosine-5-phosphosulfate [APS] reductase (*aprA*)<sup>13)</sup>等をターゲットとしたリアルタイムPCRによる定量的な解析が必要である。

本研究で行ったDG-DGGE解析により、ノリ養殖が行われているタカツ、428、ロッカクからスミノリ病原細菌である *Flavobacterium* sp.に類縁な3種の*Flavobacterium*様細菌が秋と冬だけでなく、春と夏にも常在することが明らかとなった。ところが、サンプリングを採取した平成18年4月～平成19年4月までにはスミノリ病によるノリ養殖の被害は報告されておらず、その発病メカニズムは不明である。しかしながら、広大な有明海でノリ養殖の行われている地点でのみ*Flavobacterium*様細菌が検出されたことにより、ノリと*Flavobacterium*様細菌の関連性が示唆され、スミノリ病のバイオマーカーとして*Flavobacterium*様細菌が有用であることが期待される。今後はスミノリ病と有明海に常在する*Flavobacterium*様細菌の関連性を明らかにするために、*Flavobacterium*様細菌をターゲットとしたリアルタイムPCRによる定量的な解析や培養法による*Flavobacterium*様細菌の性状解析を行う必要がある。

謝辞：有明海底泥サンプルをご供与頂いた有明水産振興センター・三根崇幸氏に深謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 堤裕昭, 岡村絵美子, 小川満代, 高橋徹, 山口一岩, 門谷茂, 小橋乃子, 安達貴浩, 小松利光: 有明海奥部海域における近年の貧酸素水塊および赤潮発生と海洋構造の関係, 海の研究, No.12, pp. 291-305, 2003.
- 2) 堤裕昭, 堤彩, 高松篤志, 木村千寿子, 永田紗矢香, 佃政則, 小森田智大, 高橋徹, 門谷茂: 有明海奥部における夏季の貧酸素水

発生域の拡大とそのメカニズム, 海の研究, No.16, pp. 183-202, 2007.

- 3) Kawamura, Y., Suzuki, S., Gasa, S. and Kusuda, R.: Partial purification of a pathogenic substance from *Flavobacterium* species which causes Suminori disease in nori *Porphyra* species, *Microbios*, Vol.92, pp.139-145, 1997.
- 4) Bothe, H., Jost, G., Schloter, M., Ward, B. B. and Witzel, K.-P.: Molecular analysis of ammonia oxidation and denitrification in natural environments, *FEMS Microbiol. Rev.*, Vol.24, pp.673-690, 2000.
- 5) Kariminiaae-Hamedani H.-R., Kanda, K. and Kato, F.: Denitrification activity of the bacterium *Pseudomonas* sp. ASM-2-3 isolated from the Ariake sea tideland, *J. Biosci. Bioeng.*, 97, pp.39-44, 2004.
- 6) Chandler, D. P., Brockman, F. J. and Fredrickson, J. K.: Use of 16S rDNA clone libraries to study changes in a microbial community resulting from ex situ perturbation of a subsurface sediment, *FEMS Microbiol. Rev.*, Vol.20, pp.217-230, 1997.
- 7) Ward, D. M., Weller, R. and Bateson, M. M.: 16S rRNA sequences reveal numerous uncultured microorganisms in a natural community. *Nature*, Vol.345, pp.63-65 (1990).
- 8) Nakayama, J., Hoshiko, H., Fukuda, M., Tanaka, H., Naoshige, S., Tanaka, S., Ohue, K., Sakai, K. and Sonomoto, K.: Molecular monitoring of bacterial community structure in long-aged nukadoko: pickling bed of fermented rice bran dominated by slow-growing lactobacilli, *J. Biosci. Bioeng.*, Vol.104, pp.481-489, 2007.
- 9) Muyzer, G., Waal, E. C. D. and Uitterlinden, A. G.: Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16S rRNA, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol.59, pp.695-700, 1993.
- 10) Muyzer, G.: DGGE/TGGE a method for identifying genes from natural ecosystems, *Curr. Opin. Microbiol.*, Vol.2, pp.317-322, 1999.
- 11) Stubner, S.: Quantification of Gram-negative sulphate-reducing bacteria in rice field soil by 16S rRNA gene-targeted real-time PCR, *J. Microbiol. Meth.*, Vol.57, pp.219-230, 2004.
- 12) Foti, M., Sorokin, D. Y., Lomans, B., Mussman, M., Zacharova, E. E., Pimenov, N. V., Kuenen, J. G., Muyzer, G.: Diversity, activity, and abundance of sulfate-reducing bacteria in saline and hypersaline Soda Lakes, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol.73, pp. 2093-2100, 2007.
- 13) Meyer, B. and Kuever, J.: Molecular analysis of the diversity of sulfate-Reducing and sulfur-oxidizing prokaryotes in the environment, using *aprA* as functional marker gene, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol.73, pp.7664-7679, 2007.

(2008. 3. 31受付)

# 海苔スミノリ症病原細菌に感染する バクテリオファージ

## STUDIES ON BACTERIOPHAGES INFECTIOUS TO PATHOGENIC BACTERIUM OF NORI SUMINORI DISEASE

### ATTEMPT FOR APPLICATION OF BACTERIOPHAGES AS THE MICROBIOLOGICAL CONTROL AGENT AGAINST *SUMINORI* DISEASE IN NORI CULTIVATION

神田康三

農博 佐賀大学教授 農学部応用生物科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

三根崇幸

農修 佐賀県有明水産振興センター (〒849-0313 小城市芦刈町永田2753-2)

*Suminori* disease caused by infection of pathogenic bacteria is listed as one of the most serious diseases of *nori* laver and it sometimes leads heavy damage on the *nori* cultivation carrying out around the coastal area of Ariake Sea. To prevent the occurrence of this disease, the acid treatment of *nori* cultivating nets has been done during the cultivation. Although the acid treatment is quite effective method for the disease control now, it might become the negative factor for the coastal environment. Thus, it is strongly required to develop a new other way of the disease control without any stress for the environment.

Bacteriophage which is bacterial virus is known to show the high host specificity during the infection and can amplify as the infectious unit vigorously, as long as host bacterium is existed. Thus it is strongly suggested to be an effective microbiological agent against bacterial disease, such as *Suminori* disease. In this study, the isolation of phages infectious to the *Suminori* pathogenic bacterium was carried out and the possibility of isolated phages as the microbiological control agents against *Suminori* disease was investigated.

**Key Words :** *suminori pathogenic bacterium* , *microbial control* , *bacteriophage*

#### 1. 序論

佐賀県の産業において非常に重要な位置を占める海苔養殖において、海苔幼体の細菌感染症であるスミノリ症の発生は海苔養殖業者にとって深刻な問題である。これまでにスミノリ症発生の防除法の開発と普及に多大の努力が払われてきた結果、現在では海苔養殖網の有機酸で処理することによりスミノリ症の発生を大幅に抑制する事に成功している。しかしながら、現在用いられているスミノリ症の防除法が有機酸を用いるいわゆる化学的防除法のみであることや、化学的防除法が環境に与える影響などを考慮すると、新たな防除法の開発が切望され

ているのも事実である。

ところで、自然界では細菌叢の変動に関する要因として、細菌が生育する物理化学的環境の変化とともに細菌感染性ウイルス（いわゆるバクテリオファージ）の存在が一般に指摘されている。このことは水圏に生息する細菌についても同様の事象が考えられたことから、1960年初頭から活発な研究がなされ始め、海洋において多種・多数のバクテリオファージの存在が知られるようになった<sup>1)</sup>。水圏におけるこれらのバクテリオファージの働きは、これまでの研究の結果から水圏環境の細菌叢に対して非常に重要な役割を担っていることが次々に明らかに

されている<sup>2)</sup>。特に注目すべきバクテリオファージの働きとしては、水圏における食物連鎖の出発点であるとの考えである<sup>3)</sup>。以上のことから、細菌の存在はすなわちバクテリオファージの存在を意味するものと考えてもおかしくはない。一方、バクテリオファージは感染・増殖において宿主細胞に強く依存するため宿主特異性が極めて高く、植物（海苔を含む）や動物（人畜等）には全く感染不可能であり、さらに感染単位としてのバクテリオファージが感染によりネズミ算式に増加してゆくことから抗生物質等の化学療法に変わる新たな細菌感染症の防除および治療法の因子として近年世界的規模で注目されるようになってきている。

そこで本研究では、海苔の細菌感染症であるスミノリ症のバクテリオファージによる微生物学的防除法の確立を目的として、これまでの研究によって確認・同定されたスミノリ症病原細菌を指示細菌として、それに感染するバクテリオファージの分離と性状の検討を行った。

## 2. 実験材料および方法

### スミノリ症細菌

スミノリ症細菌は佐賀県有明水産振興センターで感染・発症が確認された*Flavobacterium* sp. H14LY株を供試した。

### スミノリ症細菌の培養条件

培地はZoBell 2216E 培地（表1）を用いた。培養温度は20℃で、液体培養では振とう培養を行い、固体培養ではZoBell 2216E培地に終濃度が1.5%となるように寒天を加えた培地を使用した。

表1. Zobell 2216E 培地組成

Polypepton	0.5%
Yeast Extract	0.1%
海水(NaCl)	0.25%
pH 8.0	

### バクテリオファージの検索・分離

干潟泥土からのバクテリオファージの検索では、予め泥土を滅菌した海水に懸濁したのち、遠心してその上清を用いた。海水および泥土懸濁液の上清は孔径0.22μmのPVDFミリポアフィルターでろ過してバクテリオファージ検索の試料とした。バクテリオファージ検索試料液は、20℃で6時間振とう培養して対数増殖期初期に達したスミノリ症細菌 *Flavobacterium* sp. H14LY株を接種した0.5%寒天を含むZoBell2216E培地と混合し、直ちに混合液を固形ZoBell2216E培地上に注加した。バクテリオファージ検索試料液と*Flavobacterium* sp. H14LY株混合した試料は20℃で2日間培養し、溶菌斑

（プラーク）形成を観察することで、試料中のバクテリオファージの存在を検討した。

### バクテリオファージの一段増殖実験

分離したバクテリオファージを*Flavobacterium* sp. H14LY株にc.o.i: 0.5で感染させ、20℃で15分間吸着させた後、ファージ感染細菌を低速遠心して回収し、ZoBell 2216E 培地に再懸濁させた。ファージ感染細菌懸濁液を20℃で加温しながら経時的（15分毎）に一定量を採取し、除菌した試料中の放出ファージ数（PFU:プラーク形成数/1ml）を計測して感染中心の変移を求めた。

### バクテリオファージDNAの比較検討

バクテリオファージからDNAをフェノール抽出した後、制限酵素*Hind*IIIで消化し、アガロースゲル電気泳動することで各DNAの制限酵素消化パターンを比較した。

### バクテリオファージの温度安定性実験

バクテリオファージ懸濁液を37℃、20℃および4℃に放置後、プラーク形成能を経時的に計測することで各温度におけるバクテリオファージの不活化率の経時変化を求めることで各バクテリオファージの温度安定性を検討した。

### バクテリオファージによるスミノリ症病原細菌の感染阻止実験

*In vitro* 培養した海苔葉体にスミノリ症病原細菌 *Flavobacterium* sp. H14LY株を感染させた後、バクテリオファージを添加し、葉体の細菌感染による原形質流出率を計測することでバクテリオファージによる細菌感染阻止を検討した。

## 3. 実験結果および考察

### バクテリオファージの分離

今回、干潟泥土および海水からプラーク形態の異なる3種類（U1, U2およびU3）のバクテリオファージを分離することができた（図1）。

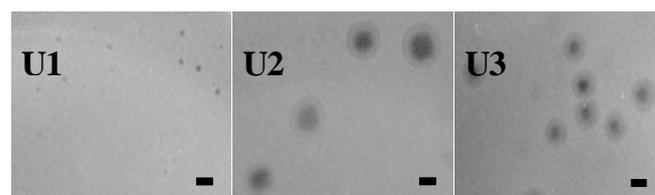


図1. バクテリオファージU1, U2 およびU3のプラーク形態

泥土から分離されたU1およびU2のうちU1はpin hole (針穴) 様であり、U2は周囲が濁った大型のプラークであった。一方、海水中から分離したU3のプラーク形態はU2に類似していたが、U2よりやや小型であった。これら3種類のバクテリオファージでは、形成するプラークの大きさからU2が最もスミノリ症病原細菌*Flavobacterium* sp. H14LY株に対する感染力が高いものと推察された。

### 分離バクテリオファージの一段増殖

分離した3種類のバクテリオファージの感染細菌当たりのバクテリオファージ放出量 (burst size) および感染からバクテリオファージ放出が開始されるまでの時間 (暗黒期) をそれぞれのバクテリオファージの一段増殖実験を行って検討した (図2)。

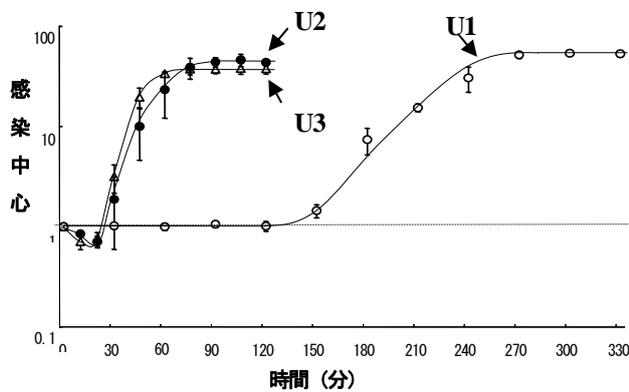


図2. 分離バクテリオファージの一段増殖

その結果、感染細菌当たりのファージ放出量 (burst size) は今回分離した3種類のバクテリオファージではほぼ同じで、感染中心数として40から60であった。しかしながら、バクテリオファージの感染から菌体内組み立てを経て菌体外に放出されるまでの期間である暗黒期の長さでは最も小型のプラークを形成するU1が150分を要し、大型のプラークを形成するU2およびU3では30分であった。

今回得られた一段増殖実験の結果から、感染力に関する限りスミノリ症細菌の微生物学的防除に適するバクテリオファージはU2およびU3であることが強く示唆された。

### 分離バクテリオファージの遺伝学的性状

分離した3種類のバクテリオファージの遺伝学的性状を検討するために、それぞれのバクテリオファージDNAの制限酵素消化パターンを比較検討した (図3)。その結果、U1では明らかに制限酵素消化DNAの泳動パターンが他の2種と異なるが、プラーク形態および一段増殖実験結果が類似したU2とU3では分離源が泥土と海水と異なるものの極めて似た消化パターンが認められた。

今回の結果から、U2とU3は遺伝学的に近縁関係にあることが強く示唆された。

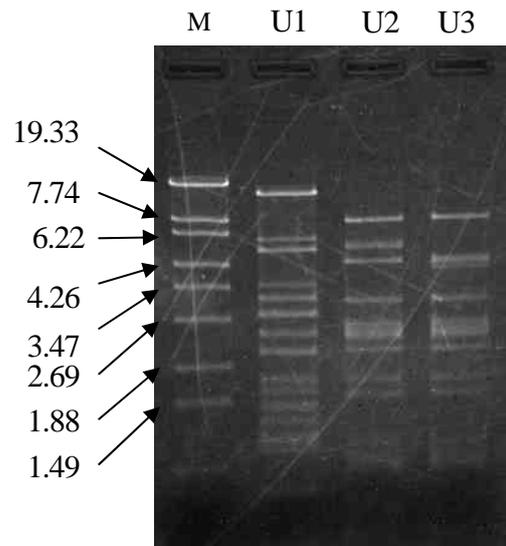


図3. U1、U2およびU3バクテリオファージDNAのHindIII消化パターン

### 分離バクテリオファージの温度安定性

分離したバクテリオファージをスミノリ症細菌の微生物学的防除に使用するためにはその温度安定性は感染力と共に重要な性状となる。そのため、今回は4℃、20℃および37℃の3種類の温度におけるバクテリオファージの不活化率を計測することで、分離したバクテリオファージの温度安定性を検討した (図4)。

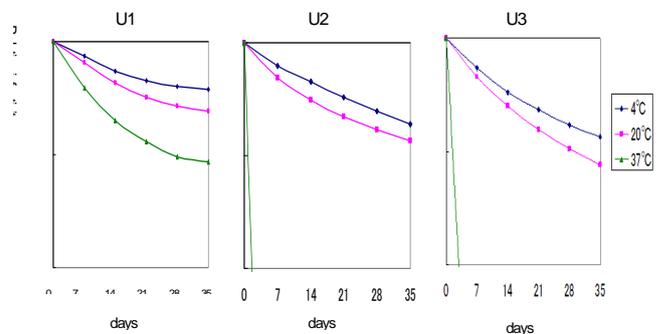


図4. 分離バクテリオファージの温度安定性

その結果、3種類のバクテリオファージのうちU1ではその活性は4℃および20℃で35日以上経過しても50%以上の活性を維持していた。一方、感染力において注目されたU2およびU3は4℃では35日経過しても30%の活性を維持していたが、20℃での安定性では35日間で約10%に低下した。また、37℃の高温下ではU1が10%の活性を維持していたにもかかわらず、U2およびU3はその活性は7日目には計測不能にまで低下した。これらの結果から、今回分離されたバクテリオファージは少なくとも4℃で保存する限り3週間は利用可能な感染性を維持することが判明した。

## バクテリオファージによるスミノリ症病原細菌の感染阻止実験

今回分離されたバクテリオファージの感染性や温度安定性などの性状解析の結果から、バクテリオファージによるスミノリ症発生防除の可能性が強く示唆されるようになった。そのため、実際に培養ノリ葉体を用いてバクテリオファージによるスミノリ症細菌の感染阻止実験を試みた。

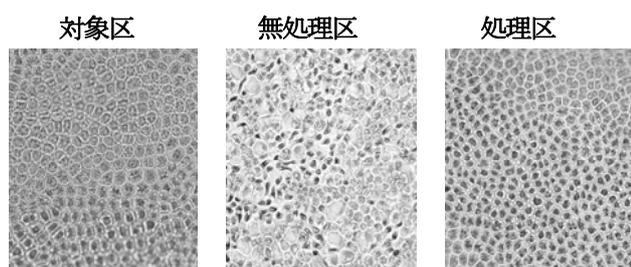


図5. スミノリ症細菌感染に対するバクテリオファージU2の影響

スミノリ症細菌に感染させた培養ノリ葉体に対し、10分後にバクテリオファージを添加した処理区と無処理区を設定し、3日後にスミノリ症の病徴である葉体細胞の原形質吐出を観察したところ、バクテリオファージ処理区ではスミノリ症の病徴は全く認められず、対象区と同様の組織形態を維持していた(図5)。

## 結論

さらに、スミノリ症病原細菌感染24時間後にバクテリオファージU2を添加した場合、明らかに感染被害を阻止する効果が認められた(表2)。

海苔スミノリ症病原細菌に感染して溶菌するバクテリオファージを3種類分離することができた。これらのバクテリオファージは感染成立後、感染細菌当たり40から60の感染単位としてのバクテリオファージの量に達することが出来ることが判明した。また、低温に保存することで、その感染性は30日は維持することが明らかとなった。

以上のことから、海苔スミノリ症発生に対するバクテリオファージによる微生物学的防除が可能であることが今回の研究で強く示唆された。

## 参考文献

- 1) Spencer, R.: Indigenous marine bacteriophages, *J. Bacteriol.*, Vol. 79, p. 614, 1960
- 2) Suttle, C.A., Chan, A.M. and Cottrell, M.: Infection of phytoplankton by viruses and reduction of primary productivity, *Nature*, Vol.347, pp.467-469, 1990
- 3) Fuhrman, J.A.: Marine viruses and their biogeochemical and ecological effects, *Nature*, Vol. 399, pp.541-548, 1999

(2008. 3. 31受付)

表2. スミノリ症病原細菌感染ノリ葉体に対するバクテリオファージU2の効果<sup>1)</sup>

	経過日数				
	1	2	3	4	5
対象区	0	0	0	0	0
無処理区	0	0	1	7	10
処理区 <sup>2)</sup>	0	0	1	2	3

1) 原形質の流出率(%)

2) スミノリ症病原細菌感染24時間後にバクテリオファージU2添加

# 海洋資源摂取が生活習慣病発症に及ぼす影響

## EFFECT OF MARINE RESOURCE ON LIFE-STYLE RELATED DISEASES

柳田晃良<sup>1</sup>、古屋健太<sup>2</sup>、城内文吾<sup>3</sup>、永尾晃治<sup>4</sup>

Teruyoshi YANAGITA, Kenta FURUYA, Bungo SHIROUCHI and Koji NAGAO

<sup>1</sup>農博 佐賀大学教授 農学部生命機能科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>2</sup>佐賀大学大学院農学研究科応用生物科学専攻修士1年 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>3</sup>農修 鹿児島大学大学院博士2年 連合農学研究科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>4</sup>農博 佐賀大学准教授 農学部生命機能科学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

### 1. 序論

近年、先進国では高脂血症、肥満、糖尿病および高血圧などの生活習慣病の罹患率増加に対して、食品の生体調節機能を利用したストレスが少ない予防法の確立が模索されている。本実験では、海洋資源の機能性食品としての利用の可能性を模索した。

### 2. 実験方法

海洋資源含有食を生活習慣病モデル動物に摂取させた。

### 3. 実験結果

詳細な結果に関しては、特許申請に関わるため非公開とさせていただきます。

(2008. 3. 31受付)



# ヒト好中球の高度活性化に対するGPCR型受容体膜貫通ペプチドの配列依存性

## SEQUENCE DEPENDENCE OF GPCR PRIMING FOR HUMAN NEUTROPHILS

杉山大輔<sup>1</sup>・林 良<sup>2</sup>・長田聰史<sup>3</sup>・藤田一郎<sup>4</sup>・浜崎雄平<sup>5</sup>・兒玉浩明<sup>6</sup>  
Daisuke SUGIYAMA, Ryo HAYASHI, Satoshi OSADA, Ichiro FUJITA, Yuhei HAMASAKI and Hiroaki KODAMA

<sup>1</sup>理修 佐賀大学大学院工学系研究科 エネルギー物質科学専攻 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>2</sup>理博 佐賀大学助教 理工学部機能物質化学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>3</sup>理博 Laboratory of Cell Biology, National Cancer Institute, National Institutes of Health (9000 Rockville Pike, Bethesda, MD 20859, U.S.A.)

<sup>4</sup>医博 佐賀大学准教授 医学部小児科学講座 (〒849-8501 佐賀市鍋島町)

<sup>5</sup>医博 佐賀大学教授 医学部小児科学講座 (〒849-8501 佐賀市鍋島町)

<sup>6</sup>理博 佐賀大学准教授 理工学部機能物質化学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

Neutrophils act as the first line of defense against the invasion of microorganisms in the body. Bacterial metabolites such as N-formylmethionyl peptides are chemoattractants for neutrophils and bind to specific surface receptors, formyl peptide receptor belong to GPCRs. Previously, we reported that syntheses, and biological activities of transmembrane peptides derived from human formyl peptide receptor. As a result, we found that human neutrophils pretreated with the fourth transmembrane peptide are enhanced the release of superoxide anion by neutrophils when stimulated with agonist. However, it is not clear yet that these activities are dependent on sequence or extremely high hydrophobicity. In the present study, the fourth transmembrane peptides of various GPCRs were synthesized to evaluate the effect of sequence and the biological activities for human neutrophils. We found that the priming effects for human neutrophils were dependent on the sequences of transmembrane peptides.

**Key Words :** GPCR, human neutrophil, transmembrane peptide, peptide synthesis, priming, superoxide production

### 1. 前置

GTP Binding Protein-Coupled Receptor (GPCR) をはじめとする膜タンパク質は、主に細胞外領域と細胞内領域が他の薬物やタンパク質と相互作用することで機能する。しかし最近、膜タンパク質の多量化が、タンパク質機能の制御に深く関与することが示唆され、これを制御する膜貫通ドメイン (Transmembrane, TM) の機能が注目されている。例えばGPCRは、細胞膜上で2つの異なるタンパク質受容体が、膜貫通ドメインを互いに絡み合わせるような複合体を構成することで、1つの受容体複合体に2つのリガンド結合部位をふくむことになる。一般に薬物受容体には相同性の高い異なるタンパク質が数種類存在し、これらがヘテロに複合体を形成することで効率的

に受容体の多様性を確保することができる。TMドメインはそれぞれが特異的に相互作用することで、複合体形成を制御することが考えられている。

昨年、高度活性化状態を保持した好中球調製を目的として、好中球活性化ペプチド受容体 (Formyl Peptide Receptor, FPR) の膜貫通領域配列を持つペプチド7種を化学合成し、それらのヒト好中球への機能について報告した。その結果、合成した7種のペプチド中、4、5、6番目の膜貫通ドメイン由来ペプチドが、ヒト好中球プライミングし、高度に活性化した状態を取ることを報告した。特にFPRの4番目の膜貫通ドメインFPRTM4は、 $10^{-6}$  Mの前投与により、fMLPによる好中球の活性酸素産生能を約2倍に上昇させた。この膜貫通ドメインは一般に疎水性アミノ酸で構成されており、また、一般に螺旋構造をとる傾向にあるアミノ酸が配置されている。しかしな

表-1 各膜貫通ペプチドの配列

Sequences	Peptides
Ac-SLAKKVIIGPVMALLLTLPVIIRSKSKSK-NH <sub>2</sub>	hFPRTM4
Ac-SLAMKVIVGPWILALVLTLPVFLFSKSKSK-NH <sub>2</sub>	hFPRL1TM4
SKSKSKRFVIGFSLPMSIVAI <u>S</u> YGLIAAKW-NH <sub>2</sub>	hFPRL1TM5
Ac-LYATVGLLVGMDVLTALAIWQIVDSKSKSK-NH <sub>2</sub>	hGABR1TM4

がら、この膜貫通ドメインの高度活性化が相当する受容体タンパク質FPRとの相互作用によるものかは明らかでない。そこで今回、膜貫通ドメイン高度活性化の配列依存性を検討する目的で、FPRに高い相同性を持つ受容体タンパク質Formyl Peptide Receptor Like 1 (FPRL1)及び、FPRと相同性を持たないGPCRの配列としてγ-アミノ酪酸受容体配列のそれぞれの第4膜貫通ドメイン配列をもとに新規なTMペプチドを調製し、好中球の活性酸素放出に対する機能を検討した。

## 2. 実験

### (1) ペプチドのデザイン

アミノ酸配列の検索はswissplotでおこなった。ホルミルペプチド受容体には相同性の高い3つのホモログの存在が知られている。そのうちヒト好中球では、主要受容体FPRとFPRL1が存在する。これらの第4膜貫通ドメインの相同性は約70%で、膜貫通部22残基中7残基のみが異なる。構造の異なるアミノ酸は、Phe、Ile、Leu、Valであり、化学的性質はほぼ同等と考えられる。一方、アミノ酸配列の全く異なる例として、抑制性の神経伝達物質であるγ-アミノ酪酸受容体の第4膜貫通領域由来配列を用いた(表-1)。相同性は20%で、膜貫通領域に特徴的なアミノ酸で構成されているものの、化学的類似性は見られない。膜貫通ペプチドのデザインは以前の報告をもとに行った<sup>1),2),3)</sup>。細胞膜の外側に位置すると考えられた部位には親水性配列SKSKSKを付加し、細胞膜の疎水場に埋もれないようにした<sup>2)</sup>。細胞膜の内側に位置すると考えられた部位には細胞膜に入り、ヘリックスをとりやすくするためにアセチル化を行った。

### (2) ペプチド合成

GPCR膜貫通ドメインは脂質二重膜を貫通するため、高い疎水性を有する約30個のアミノ酸から構成され、ペプチドとしては疎水性が高く、比較的長鎖である。そこで今回、ペプチド合成は迅速で簡便なFmoc固相合成法により行った。GPCR膜貫通ドメインは高い疎水性のため高次構造をとる事が考えられたため、固相担体には脱樹脂後C末端がアミド体で得られ、リンカー同士の距離が長

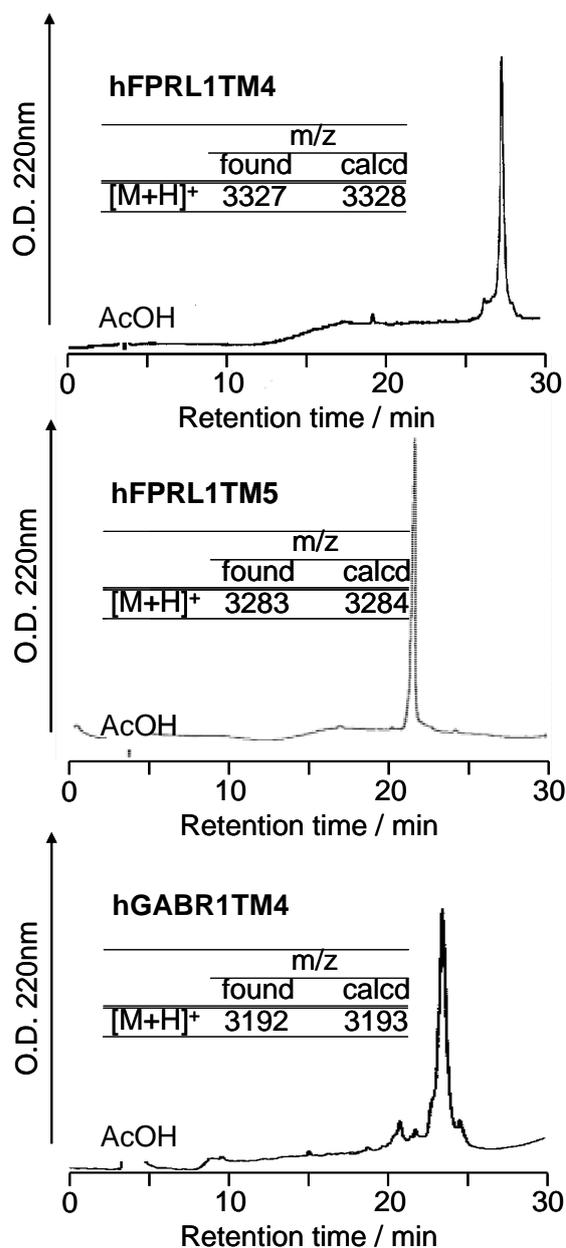


図-1 精製後の膜貫通ペプチド HPLC及MALDI-TOF MS分析

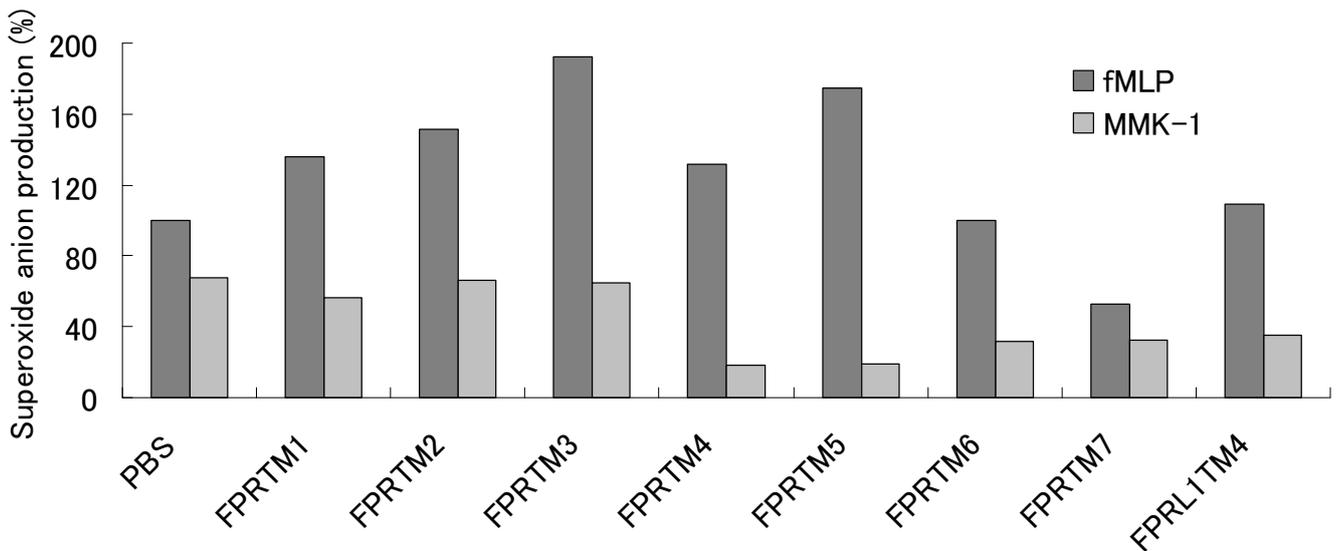


図-3 各膜貫通ペプチドのプライミング作用  
PBSで前処理した後のfMLPによる好中球の活性酸素放出量を100%とした時の比活性で示した

い、低置換の樹脂 (Tenta Gel S RAM resin; Peptide International) を用いた。N-[(1H-benzotriazol-1-yl)(dimethylamino)methylene]-N-methylmethanaminium hexa fluorophosphates N-oxide (HBTU) と N-hydroxybenzotriazole (HOBt) で行った。固相合成では目的の配列を伸長後、樹脂から切り出すため、液相合成のように順次精製を行う事ができない。そのため固相合成では、各ステップ高収率で得る事が必須である。そこで、10倍量のアミノ酸を各反応に用いた。Fmoc基の脱保護はピペリジンで行った。膜貫通性を高めるために膜貫通ペプチドのN端をアセチル化し電価をなくした。アセチル化はNMMと無水酢酸で行った。脱樹脂は室温で、TFA/水/フェノール/チオアニソール/エタンジチオール / トリイソプロピルシラン (82.5:5.0:5.0:5.0:2.5:1.0, v/v) で三時間反応させた。得られた粗ペプチドは逆相HPLCにより精製を行った。溶離液には水/アセトニトリル/TFA (95:5:0.05, v/v; solution A) と水/アセトニトリル/TFA (5:95:0.04, v/v; solution B) を用いた<sup>4),5)</sup>。試料を分取するカラムにはWakosil5C4-200 (10.0x 250 mm i. d.) を用い、ペプチド精製後の純度の確認はWakosil5C4-200 (4.0x 150 mm i. d.) により行った。構造の確認はMALDI-TOF MSにより行った。MALDI-TOF MSのマトリックスには  $\alpha$ -cyano-4-hydroxycinnamic acidを用いた。

#### (2) ヒト好中球の単離

血液の凝固を防ぐため、あらかじめヘパリンで処理した注射筒と注射針を用い、ヒト静脈採血より採血を行った。デキストラン T500により赤血球を沈

降分離し、上澄みを除去した。残った赤血球は低張溶解させ、Ficoll-Paque法で密度勾配遠心分離により好中球を単離した。単離した好中球は血球算定板を用いて白血球の数を計測後、以下の実験に用いた。

#### (3) 活性酸素放出評価

活性酸素の放出はferricytochrom cの還元量を540nm-550nmの吸光度差を測定する事により評価した<sup>6)</sup>。測定用のセル内には細胞懸濁液 ( $1 \times 10^6$  cells/ml)、1mM CaCl<sub>2</sub>、5mM d-glucose、20mM ferricytochrom cを用いた。測定

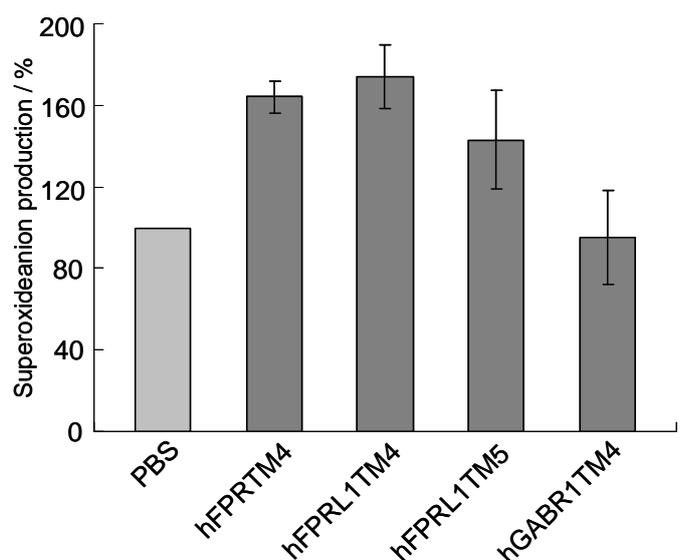


図-4 各膜貫通ペプチドの比活性  
PBSで前処理した後のfMLPによる好中球の活性酸素放出量を100%とした時の値

を行った、二波長分光光度計にはShimadzu UV-3000を用いた。膜貫通ペプチドを $10^{-6}$ Mもしくはリン酸緩衝液を添加し20分間インキュベート、その後formyl-Met-Leu-Phe-OH (fMLP)  $10^{-7}$ Mにより刺激し、その際の1分間の活性酸素放出量最大値について検討した。

### 3. 結果と考察

一般に膜貫通ペプチドの合成は、それらの高い疎水性と強い二次構造形成傾向のため容易ではない。我々はその数年このように合成の困難な膜貫通ペプチドの合成に取り組んでおり、ペプチドの固相合成法を基にした迅速合成を確立してきた。膜貫通ペプチドの合成は、官能基置換率の低い樹脂を用い、反応速度の速いHBTU-HOBt法によりアミノ酸の縮合をおこなった。目的のペプチド鎖までアミノ酸を伸長した後、ペプチドの脱保護と樹脂からの脱保護をTFA処理によりおこなったその後、不要な有機物を除去する目的で残渣をエーテルで処理した。得られた白色結晶を乾燥させた後、50%酢酸に溶解させた。HPLCにより分析したところ、複数の副生成物が観測された。逆相HPLCで主生成物を分取し、MALDI-TOF MSにより測定したところ、目的物の分子量が観測された。調製用HPLCで分取し、いずれのペプチドとも高い純度で調製された(図-1)。得られたペプチドの構造は、MALDI-TOF MSとアミノ酸分析で確認した。

膜貫通ペプチドの生物活性の評価はヒト好中球の活性酸素放出量により行った。膜貫通ペプチドは高い疎水性を有しているために、高次構造を形成する。それらは会合体を形成し、非特異的吸着を引き起こす。これを防ぐため、膜貫通ペプチド溶液の調製には表面をシリコナイズ処理した器具を用いた。

好中球に投与した結果、いずれの膜貫通ペプチドとも、ペプチドの単独投与だけではヒト好中球の活性酸素放出を引き起こさなかった。しかしながら、FPRL1TM4やFPRL1TM5膜貫通ペプチドを投与し、 $37^{\circ}\text{C}$ で20分間インキュベートした後、好中球の活性酸素放出に対するアゴニストであるfMLPで刺激すると、リン酸緩衝液を前投与した場合と比較して、高い活性酸素放出が観測された。またその活性は、FPR受容体由来膜貫通ペプチドにより引き起こされるプライミング能と比較して、ほぼ同等のものであった。ヒト好中球上に存在する受容体サブタイプのポピュレーションは、FPRが高く、FPRL1は約10%程度と予想されている。これらのことから、FPRL1由来膜貫通ペプチドは、FPRL1受容体だけでなく、FPR受容体にも関与していることが示唆された。また、配列の全く異なるGABA受容体由来膜貫通ペプチドはリン酸緩衝液を添加した場合と比較してほとんど活性の増強を示さなかった。このことから、全く異なる受容体の膜貫通配列、すなわち、単なる疎水性ペプチドでは好中球のプライミン

グは起こさないことが示唆された。以前我々は、FPR由来配列のプライミング活性が、膜貫通ペプチドを短くすることで減少することを報告した。また、各膜貫通ペプチド作用後、FPRL1選択的リガンドMMK-1で好中球を刺激したところ、どの膜貫通ペプチドにおいてもリン酸緩衝液を前投与したコントロールと比較して、低い活性酸素の放出しか観測されなかった。この結果は、MMK-1の作用する受容体サブタイプのポピュレーションの低さと活性酸素放出能の感度によるものと考えている。

今回の結果から、FPR受容体の引き起こす好中球プライミング活性は、特定の配列に依存すること、そしてそれは受容体会合に関与する膜貫通ドメインの働きを示唆するものであると期待された。これらの知見から、高度活性化好中球を調製し、新たな生物活性を有する有用生体物質の探索に期待したい。

**謝辞:** 合成ペプチドの分子量測定にご協力いただきました九州大学大学院理学研究院の下東康幸教授、野瀬健助教授、産業総合技術研究所九州センターの大庭英樹博士に感謝いたします。細胞の分化実験にご協力いただきました佐賀大学小児科学講座の在津正文先生に感謝いたします

### 参考文献

- 1) Miettinen, H.M., Mills, J.S., Gripenrog, J.M., Dratz, E.A., Granger, B.L., and Jesaitis, A.J., *J. Immunol.*, **159**, 4045-4054 (1997)
- 2) Wimley, W.C. and White, S.H., *Biochemistry* **39**, 4432-4442 (2000)
- 3) Hayashi, R., Osada, S., Yoshiki, M., Sugiyama, D., Fujita, I., Hamasaki, Y. and Kodama, H. (2006) *J. Biochem.*, **139**, 981-988.
- 4) Bollhage, R., Schmiedberger, M., and Grell, E., *J. Chromatogr.*, **711**, 181-186 (1995)
- 5) Otaka, A., Ueda, S., Tomita, K., Yano, Y., Tamamura, H., Matsuzaki, K., and Fujii, N., *Chem. Commun.* **7**, 1722-1723. (2004)
- 6) Miyazaki, M., Kodama, H., Fujita, I., Hamasaki, Y., Miyazaki, S., and Kondo, M., *J. Biochem.* **117**, 489-494 (1995)

# 食水系感染症研究部門

---

Research Division of MARINE & FOOD-BORNE INFECTION



# ビブリオ・バルニフィカス感染症対策 — 臨床医学的アプローチ (第三報) —

## A *VIBRIO VULNIFICUS* MEASURES APPROACH OF CLINICAL MEDICINE -THE THIRD REPORT-

中島幹夫<sup>1</sup>・大石浩隆<sup>2</sup>・富田由紀子<sup>3</sup>・松本浩一<sup>4</sup>  
前田祥範<sup>5</sup>・三溝慎次<sup>6</sup>・荒木和邦<sup>7</sup>

Mikio NAKASHIMA, Hirotaka OISHI, Yukiko TOMITA, Kouichi MATSUMOTO  
Yoshinori MAEDA, Shinji MITSUMIZO and Kazukuni ARAKI

<sup>1</sup> 医博	佐賀大学教授	麻酔・蘇生学	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
<sup>2</sup> 医博	佐賀大学准教授	有明海総合研究プロジェクト	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
<sup>3</sup>	佐賀大学助教	麻酔・蘇生学	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
<sup>4</sup>	佐賀大学助教	麻酔・蘇生学	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
<sup>5</sup> 医博	佐賀大学助教	医学部付属病院麻酔科蘇生科	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
<sup>6</sup> 医博	佐賀大学講師	医学部付属病院集中治療部	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
<sup>7</sup> 医博	佐賀大学准教授	医学部付属病院手術部	(〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)

*Vibrio vulnificus* naturally found in all coastal waters of Ariake Sea can cause serious illness and death in persons with preexisting liver disease or compromised immune systems. *V. vulnificus* can cause disease in those who eat contaminated seafood or have an open wound that is exposed to seawater. Sporadic cases continue to occur all year, increasing in frequency during the warmer months. Of all food-borne infectious diseases, infection with *V. vulnificus* is one of the most severe; the case-fatality rate for *V. vulnificus* septicemia exceeds 60%.

Our main goals in Ariake Sea Research Project include its prevention, and decrease in mortality of this life-threatening illness, and intensive studies in both clinical and basic medicine have been carried out for three years. This review article is designed to provide an update to our guidelines for management of *Vibrio vulnificus* infection according to the “Surviving Sepsis Campaign” published in 2008. The discussion is focused on initial resuscitation within 6 hrs, diagnosis, antibiotic therapy, source control, fluid therapy and use of vasopressors, and corticosteroids.

**Key Words :** *Vibrio vulnificus*, Clinical Medicine, Surviving Sepsis Campaign

### 1. はじめに

*Vibrio vulnificus*感染症の発生は、きわめて気候的・地理的要因が強く、温暖な汽水域を有する世界のさまざまな沿岸地域で好発している。生鮮な海産物を介した経口感染の他にも、皮膚、粘膜の傷から菌が直接侵入し、宿主側の肝機能障害や免疫能低下が加われば、敗血症性ショックから急激な経過を辿り死に至る。しかし、有効な治療法が確立されていない現在、感染者の死亡率は7割前後と推定される。我々の最新の誌上調査によれば、わが国における症例報告の約半数は有明海沿岸地域で発生し、その6割以上が不幸な転帰を辿っている<sup>1)</sup>。

有明海総合研究プロジェクトにおける食水系感染症部門の目標はこの難治性感染症の撲滅にあり、過去3年間、予防・啓蒙活動や、病態の解明、救命率

向上につながる治療法の研究に取り組んできた(表1)。予防活動の中心は、有明海沿岸の地域基幹医療機関や行政組織との間に県境を越えた情報ネットワークであり、沿岸地域医師会への講演や佐賀県や市町村の保健師への情報提供を積極的に行ってきた。幸いなことに本プロジェクトがスタートして以降、現時点まで佐賀県下の医療機関からの患者発生を見ていない。

*V. vulnificus*感染症患者の死亡原因は敗血症性ショックに伴う多臓器不全である。これまで本プロジェクト食水系感染症部門で得られた3年間の臨床的研究成果をもとに、Surviving Sepsis Campaignが2008年に改訂した敗血症性ショックの治療ガイドライン<sup>2)</sup>に沿った佐賀大学医学部付属病院における本感染症に対する初期対応について概説する。

表1. Working Breakdown structure

No	活動名称	研究名称	Pro名	テーマ名称
I	発症予防	積極的疫学調査	A	患者通報ネットワークの構築 発生患者調査とサンプリング
			B	聞き取り調査 対象物調査
			C	検証(パルスフィールド電気泳動法)
		啓発活動	D	啓発用パンフレット作成 広報
		有明海海域環境把握	E	有明海からのビブリオ・バルニフィカス菌サンプリングと周囲環境解析
II	基礎科学 研究	菌挙動に関する研究	F	リモートセンシング(RS)技術を応用したビブリオ・バルニフィカス症予見に関する研究
			G	伊勢湾、三河湾における調査研究
		病原体特徴に関する研究	H	分類に関する研究
			I	WB解析
		ビブリオ・バルニフィカス毒 素の研究	J	動物を用いた感染実験
			K	動物を用いた病態生理実験
		菌迅速検出・同定法に 関する研究	L	新規培地開発に関する研究
			M	LAMP法を用いた菌迅速検出法の開発
		免疫に関する研究	N	患者血液分析 肝硬変患者血液分析 肝機能正常者血液分析
			O	新規予防法・治療法開発に 関する研究
III	患者実態 調査と治療	患者実態調査	P	佐賀県に関する実態調査 全国実態調査
			Q	治療に関する検討

## 2. Initial Resuscitation (Early goal-directed resuscitation)

来院時、38℃以上の熱発、低血圧があり、何らかの感染症を契機として敗血症あるいは敗血症性ショックと考えられる症例が来院した場合、6時間以内に全身状態の改善を図ることを目指す。低血圧に対しては、輸液負荷(晶質液1,000 mL、または膠質液300-500 mL)を30分程度で輸液負荷を行う。それでも低血圧が持続するか、乳酸値 $\geq 4$  mmol/Lであれば、2008年の新ガイドラインに基づき敗血症性ショック(組織レベルでの血液灌流低下)と考え、直ちに集中治療室に収容し、初期蘇生を行う。初期6時間以内の治療目標を、①中心静脈圧 8 mmHg(人工呼吸中であれば12mmHg)、②平均動脈圧(MAP)  $\geq 65$  mmHg、③尿量  $\geq 0.5$  ml  $\cdot$  kg<sup>-1</sup>  $\cdot$  hr<sup>-1</sup>、④中心静脈(上大静脈)血酸素飽和度(ScvO<sub>2</sub>)  $\geq 70\%$ または混合静脈血酸素飽和度(SvO<sub>2</sub>)  $\geq 65\%$ に設定し治療を開始する。

輸液負荷によってもScvO<sub>2</sub>またはSvO<sub>2</sub>の改善が認められなければ、ヘマトクリット値 $\geq 30\%$ を目標に濃厚赤血球輸血を行うか、ドブタミンの持続点滴(最大20 $\mu$ g  $\cdot$  kg<sup>-1</sup>  $\cdot$  min<sup>-1</sup>)を開始することで組織への酸素供給を増加させ、静脈血酸素飽和度の増加をはかる。

## 3. 診断

### 3-1 問診、臨床症状

数時間から1日の潜伏期間(平均16時間)の後、健康人では腹痛、下痢等の症状で軽快する機会が多いため、本症への罹患が見逃されていることも多いと考えられる。重篤な肝障害(肝硬変、原発性肝臓癌)や免疫能低下(抗癌剤治療中、あるいは長期ステロイド服用中)、あるいは貧血に対し鉄剤が投与されている患者では、悪寒、発熱、血圧低下などの敗血症または敗血症性ショックを来とし、同時に四肢の腫脹、疼痛、発赤、水疱形成(のちに血疱化)、蜂窩織炎、筋膜壊死などが急激に進行する。重度肝障害や免疫機能が低下していると考えられる患者に、上記症状があり、過去3日以内に生鮮海産物を摂取した既往があれば本症が強く疑われる。さらに、本疾患の発症の季節性(わが国では殆ど5月~12月の間に発症)も参考になる。また、この時期での海岸での切創等の有無も問診上重要である。

最終的には、細菌培養の結果によって確定診断がなされるが、多くの場合、培養結果を待つ間に病状が急激に悪化し死に至る事例が多く、死亡時に本症の確定診断がなされていない症例が数多く存在するものと考えられる。

しかし、有明海沿岸の基幹病院で、病歴や基礎疾患、臨床症状から、本症による敗血症性ショックが強く疑われた症例の半数以上が、他の細菌によるものであった。なかでも我々が経験した*Krebsiella oxytoca*による壊死性筋膜炎を伴う敗血症性ショック症例では、急性発症、急性増悪、死亡という*V. vulnificus*感染症に極めて類似した臨床像を示した<sup>3)</sup>。このため、本疾患における早期の確定診断は、早期治療による予後の改善のためにきわめて重要で、抗

表2. *V. Vulnificus*に対する抗菌剤の感受性試験結果

Antibiotic	MIC (µg/ml) determined by Vitek-II													No. (%) of susceptible isolates
	≤0.25	0.5	≤1	1	2	4	8	16	32	≥64	50%	90%		
Piperacillin-tazobactam	-	-	-	-	-	21	-	0	0	0	0	≤4	≤4	21 (100)
Ceftazidime	-	-	21	-	-	0	-	0	0	0	0	≤1	≤1	21 (100)
Cefoperazone	-	-	-	-	-	21	-	0	0	0	0	≤4	≤4	*
Ceftriaxone	-	-	21	-	-	0	-	0	0	0	0	≤1	≤1	*
Cefepime	-	-	21	-	-	0	-	0	0	0	0	≤1	≤1	21 (100)
Imipenem	-	-	21	-	-	0	-	0	0	-	-	≤1	≤1	21 (100)
Meropenem	21	0	-	0	-	0	-	0	0	-	-	≤0.25	≤0.25	21 (100)
Aztreonam	-	-	0	-	-	6	-	15	0	0	0	4	4	*
Amikacin	-	-	-	-	1	-	-	9	8	2	1	8	16	20 (95)
Gentamicin	-	-	12	-	-	7	-	2	0	0	-	1	2	21 (100)
Tobramycin	-	-	16	-	-	3	-	2	0	0	-	1	2	*
Ciprofloxacin	21	0	-	0	-	0	-	0	-	-	-	≤0.25	≤0.25	*
Levofloxacin	21	0	-	0	-	0	-	0	-	-	-	≤0.25	≤0.25	21 (100)

Antibiotic	MIC (µg/ml) determined by Phoenix													No (%) of susceptible isolates		
	≤0.25	0.5	≤1	1	2	≤4	4	≤8	8	16	>16	>32	>64		50%	90%
Ampicillin	-	-	-	-	-	21	-	-	0	0	0	-	-	≤4	≤4	21 (100)
Piperacillin	-	-	-	-	-	21	-	-	0	0	-	-	0	≤4	≤4	21 (100)
Cefazolin	-	-	-	-	-	6	-	-	14	0	0	-	-	8	8	20 (100)
Cefmetazole	-	-	-	-	-	-	-	21	-	0	-	0	-	≤8	≤8	*
Cefotaxim	-	-	1	-	2	-	16	-	2	0	0	-	-	4	4	*
Cefotaxime	-	-	-	-	-	21	-	-	0	0	-	0	-	≤4	≤4	21 (100)
Latanoxef	-	-	-	-	-	21	-	-	0	0	-	0	-	≤4	≤4	*
Cefaboren	21	0	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	≤0.25	≤0.25	*
Cefpodoxime	-	-	21	-	0	-	0	-	-	-	-	-	-	≤1	≤1	*
Minocycline	-	-	21	-	0	-	0	0	0	-	-	-	-	≤1	≤1	*
Gatifloxacin	-	-	21	-	0	0	0	-	-	-	-	-	-	≤1	≤1	*

MIC, minimum inhibitory concentration, not tested \*, no Clinical and Laboratory Standards Institute interpretive criteria available

菌剤の投与開始前にまず速やかに細菌培養検査を行い菌の同定と薬剤感受性試験を行う必要がある。

### 3-2 細菌培養

抗菌薬投与の前に必ず血液や創部滲出液、便、尿の採取、あるいは皮膚生検などを行い、複数の部位から培養検体を確保する。しかし、起炎菌が明らかになるには、培地での培養に約1日、VITEC-IIなどを用いた生化学的細菌同定に約1日、計2日を要する。しかし、*V. vulnificus*感染症はきわめて急激な経過をとり、培養結果の報告を待っていれば、外科的処置を行う時期を逸することになりかねない。このため、我々は、抗菌薬投与前に検体をグラム染色し、特徴的なグラム陰性短桿菌を認めれば*V. vulnificus*を強く疑い、積極的な治療を行ってきた。しかし、一般的には緊急時に限られた人員で、初期治療と並行してグラム染色を行うことには限界がある。そこで、細菌培養に栄研(株)と共同開発したCVA-1<sup>4)</sup>と血液寒天培地の2つを用い、従来の半分の時間で*V. vulnificus*感染が否かを判定できる簡易迅速診断法を開発した。この方法は大型細菌同定装置を必要としないため、孵卵器さへあれば医療機関でも利用でき、外科的処置を含めた早期治療が可能となる。一昨年

12月に筑後地区で発生した*V. vulnificus*感染症では、実際にこの検査法を用い、初めて来院後24時間以内に確定診断を得ることができた。しかし、本症例では、すでに原発性肝癌で余命3ヶ月の宣告を受け、家族も外科的治療を望まず、早期治療開始には至らなかったが、緩和的治療を含めた治療方針の決定に大きな役割を果たした。

### 3-3 画像検査

*V. vulnificus*感染症の救命のためには、一刻も早く敗血症のフォーカスとなった病巣への外科的処置を行う必要がある。しかし、壊死性筋膜炎は、表皮から皮下組織、筋膜、時には筋組織内に及び、体表から観察される皮膚所見は、いわば氷山の一角に過ぎない。MRI検査は解剖学的な深達度を正確に知る上で極めて有用であり、壊死組織の除去、切開排膿、あるいは患肢の切断など治療方針の決定に重要な情報となる。しかし、患者の全身状態が不安定な時期に、モニタリングや医療機器の使用が限定されるMRI検査室で数十分間検査を行うことは危険を伴うため、超音波エコー等で代用せざるをえないことも多い。

## 4. 抗菌剤

### 4-1 静脈内投与

抗菌剤の静脈内投与は初期蘇生と同様、救命のためには必須であり、重症敗血症性ショックでは抗菌剤投与の遅れが救命率を低下させる<sup>5)</sup>。Surviving Sepsis Campaignでは、敗血症あるいは敗血症性ショックであることを確認次第、1時間以内に抗菌剤の静脈内投与を開始するよう推奨している。重症例では、すでに複数の静脈路から全身状態改善のために昇圧薬など複数の薬剤が持続注入されており、抗菌剤投与には新たな静脈路を確保するなどして培養検体の採取後に直ちに開始する。原因菌が不明の中でempirical therapyとしての抗菌剤選択には、想定しうる起炎菌の全てに感受性があり、有効な濃度で病巣組織に達するものでなければならない。壊死性筋膜炎を惹起する病原菌は多様であるが、抗菌剤の選択の誤りは予後を左右するだけに、劇症型で死亡率の高い細菌感染を念頭に、各施設でこれまで経験した感受性試験を参考に、抗菌剤を組合せて使用する。

我々の施設で経験した*V. Vulnificus*に対する抗菌剤の感受性試験結果を表2に示す。基本的には、第3世代セフェム系、またはカルバペネム系に、ニューキノロン系、ミノサイクリン、またはテトラサイクリン系を組合せ投与する。ただし、本症の場合には基礎疾患として重篤な肝機能障害があり、来院時すでに腎機能が低下していることも考えられ、しかも初期の輸液負荷によって細胞外液量の増加や、腹水や胸水の出現など体液分布に異常をきたしていることも考えられる。したがって、可能であれば抗菌剤投与後早期に、薬剤の血中濃度を測定し、有効血中濃度と肝・腎毒性を考慮して投与量を調節する。Empirical therapyは3日以上続けず、起炎菌とその薬剤感受性が明らかになった時点で、すみやかに最適な抗菌剤へ変更する。

### 4-2 経口投与

*V. vulnificus*のほとんどは経口感染であり、腸管からbacterial translocationによって全身に播種される。我々が経験した*V. vulnificus*感染症5例の剖検所見では、回腸粘膜に菌塊を形成していた症例<sup>6)</sup>があったことや、来院時に下痢症状を認めた症例では有意に予後が良い<sup>1)</sup>ことを考慮すれば、早期に腸管内に存在する*V. vulnificus*に対し抗菌剤の経口投与を行うことは有効ではないかと考えられ、経口感染を疑った場合には、早期にポリミキシンBの経口投与を行っている。

## 5. 外科的処置

壊死性筋膜炎に伴う敗血症ないし敗血症性ショックが疑われる場合には、感染巣に対する外科的処置

を早急に（6時間以内）に行うことが推奨されている。*V. vulnificus*による壊死性筋膜炎では病巣が複数あることを念頭に、患者の全身状態や臨床所見、画像診断から病変の深達度などを総合的に評価し、外科的処置の範囲および内容置を検討する。とくに*V. vulnificus*感染症では、急激な病巣が拡大とともに敗血症性ショックも重篤化することから、早急に侵襲的処置を行わなければ救命の機会を逸することになる。この場合、切開排膿から壊死組織の除去・洗浄、患肢の切断までが考えられる。通常は全身状態に影響の少ない範囲内での処置が選択されるが、*V. Vulnificus*感染症の場合、壊死組織の除去等の侵襲度の低い処置を行っても、他の部位に新たに感染巣が出現することを我々は経験しており、*V. Vulnificus*感染が明らかであれば、早期に患部切断を含めた積極的な治療に踏み切るべきではないかと考えている。

## 6. 輸液、昇圧剤

*V. vulnificus*感染症に伴う低血圧に対する治療もSurviving Sepsis Campaignの治療方針に従い、一般的な敗血症性ショックの初期蘇生を行う。重症例では輸液負荷だけでは平均動脈圧を65 mmHg以上に保つことは困難であり、ノルエピネフリン、あるいはドパミンを中心静脈から持続点滴静注を行う。エピネフリン（頻脈や内臓血流低下への危惧）、フェニレフリン（一回心拍出量低下）やバソプレッシンは、初期の昇圧薬としては推奨されない。しかし、エピネフリンはさせ、ノルエピネフリンやドパミンの効果が弱い場合にはエピネフリンを使用する。細胞外液補充液、代用血漿製剤、アルブミン製剤等のうち、輸液製剤の選択が予後に影響するという報告はない。他の昇圧剤の効果が無い患者では、低容量のバソプレッシンが有効な場合があるが、*V. vulnificus*感染症に伴う低血圧での有効性は不明である。静脈圧の上昇にもかかわらず心拍出量が増加しない場合、あるいは心不全を伴う場合にはドブタミンの点滴静注を行う。

当施設においても外科的処置の後、エンドトキシン吸着療法、引き続き持続血液浄化を積極的に行っているが、その効果は今後の検証が必要である。

## 7. ステロイド

我々が経験した本症患者のうち、膠原病等により長期ステロイド投与による免疫能が低下した1症例で、ステロイド補充の目的で持続投与をおこなった<sup>7)</sup>が、一般的には敗血症性ショック患者に対するハイドロコルチゾンの静脈内投与は議論のあるところである。Surviving Sepsis Campaignでは、成人の敗血症性ショック患者で輸液負荷や昇圧剤投与に反応しないときにのみ使用すべきとし、投与量としてはハ

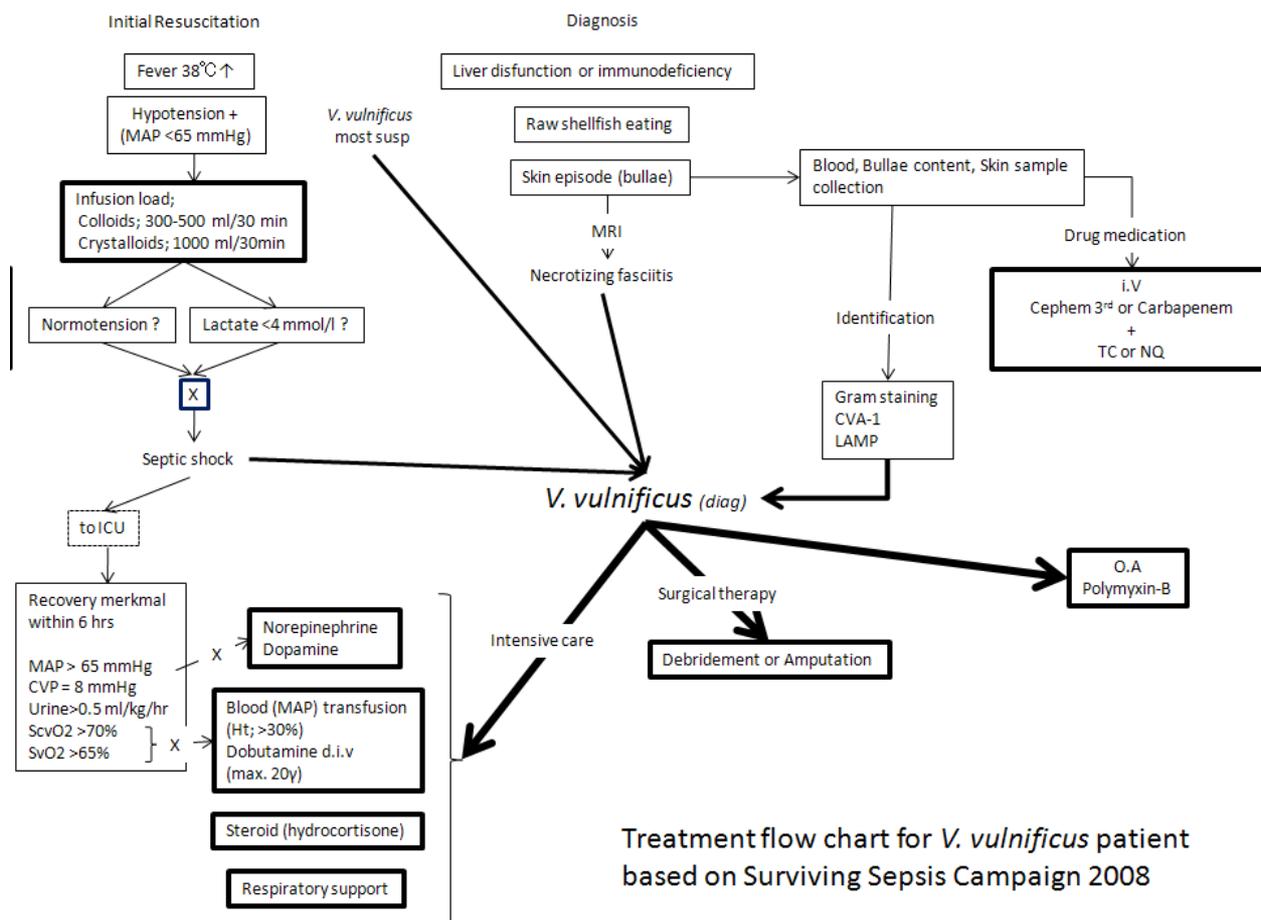


図. *V. vulnificus*患者治療フローチャート

イドロコルチゾン300mg以下が望ましく、大量に投与しても効果が無いばかりか有害であるとしている。いくつかの大規模なRCT研究によると、ハイドロコルチゾン投与でショックからの離脱が可能な場合も多いが、最終的な死亡率の改善にはつながっていない。一般的に、ステロイドを使用する場合には、デキサメサゾン、視床下部—下垂体—副腎系に対する抑制作用が強いため、ハイドロコルチゾンが第一選択薬として推奨されている。昇圧薬によって循環動態が改善できる状況になればステロイドを中止するが、リバウンドを避けるため徐々に減量していくのが望ましい。

*vulnificus*感染症に対する治療指針としても十分に活用できると思われる。また、早期診断と感染巣コントロールに関しては、指針よりもさらに積極的な関与が必要であると考えられる。とりわけ、外科的処置に関しては、救命のために早期に患肢の切断を余儀なくされる場合がある。*V. vulnificus*感染症は各地で散発的に発生するため、RCTによる大規模研究が行い難いが、情報ネットワークに参加する有明海沿岸の医療機関での治療の標準化を検討する必要がある。

## 8. 終りに

Evidenceに基づき新しく改定された Surviving Sepsis Campaignは、敗血症あるいは敗血症性ショックに対する一般的な治療方針について記されている。今後、この指針は世界的規模のデータを集積することにより、更なる改定が行われる予定であるが、*V.*

## 参考文献

- 1) 大石浩隆、浦由紀子、三溝慎次、中島幹夫：わが国における *Vibrio Vulnificus* 感染症患者誌上調査。感染症学雑誌 80(6): 680-689, 2006
- 2) Dellinger R.P., Levy M.M., Carlet J.M., et al.: Surviving sepsis campaign: International guidelines for management of severe sepsis and septic shock: 2008. Critical Care Medicine 36:296-327, 2008.
- 3) Oishi H., Kagawa Y, Mitsumizo S, et al.: A fatal case

of necrotizing fasciitis due to bacterial translocation of *Klebsiella oxytoca*. *Journal of Infection & Chemotherapy*. 14: 62 - 65., 2007

4) Nakashima Y., Oho M, Kusaba K. et al: A Chromogenic Substrate Culture Plate for Early Identification of *Vibrio vulnificus* and Isolation of Other Marine *Vibrios*. *Annals of Clinical & Laboratory Science*. 37(4);330-334, 2007

5) Kumar A., Roberts D., Wood K.E., et al: Duration of hypotension prior to initiation of effective antimicrobial therapy is the critical determinant of survival in human septic shock. *Critical Care Medicine*. 34: 1589-1596, 2006.

6) Chen Y, Satoh T, Tokunaga O. *Vibrio vulnificus* infection in patients with liver disease: report of five autopsy cases. *Virchows Arch*;441(1):88-92.. 2002

7) Amemori H., Hyakutake M., Maeda Y., et al.: A survived case of *Vibrio vulnificus* infection with multiple endocrine neoplasia type I. *Fukuoka Acta Medica*. 98(9): 346 - 352, 2007,

(2008. 3. 31受付)

# ビブリオ・バルニフィカス感染症対策 — 基礎医学的アプローチ (第三報) —

## A *VIBRIO VULNIFICUS* MEASURES APPROACH OF BASIC MEDICINE -THE THIRD REPORT-

大石浩隆<sup>1</sup>・中島幹夫<sup>2</sup>・田代幸寛<sup>3</sup>・小林元太<sup>4</sup>

富田由紀子<sup>5</sup>・松本浩一<sup>6</sup>・大重賢治<sup>7</sup>

Hiroataka OISHI, Mikio NAKASHIMA, Yukihiko TASHIRO, Genta KOBAYASHI  
Yukiko TOMITA, Kouichi MATSUMOTO and Kenji OHSHIGE

<sup>1</sup> 医博	佐賀大学准教授	有明海総合研究プロジェクト (〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
<sup>2</sup> 医博	佐賀大学教授	麻酔・蘇生学 (〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
<sup>3</sup> 農博	佐賀大学機関研究員	有明海総合研究プロジェクト (〒849-8502 佐賀市本庄1)
<sup>4</sup> 農博	佐賀大学准教授	有明海総合研究プロジェクト (〒849-8502 佐賀市本庄1)
<sup>5</sup>	佐賀大学助教	麻酔・蘇生学 (〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
<sup>6</sup>	佐賀大学助教	麻酔・蘇生学 (〒849-8501 佐賀市鍋島5-1-1)
<sup>7</sup> 医博	横浜市立大学准教授	予防医学講座 (〒236-0004 横浜市金沢区福浦3-9)

*Vibrio vulnificus* causes necrotizing fasciitis and sepsis mainly in patients with liver dysfunction through ingestion of raw fish or shellfish, which has high mortality and short latent period. We are carrying out the prevention promotion, basic and clinical studies as measures of this fatal disease. Promotion of basic medical studies may lead to more appropriate treatment, diagnosis and preventive measures.

Our results of this year are as follows,

- 1) *Vibrio vulnificus* was detected from July to September in Ariake Sea. Microbial detection was associated with sea water temperature.
- 2) Sixty-four percents of 16S rRNA gene pattern of *V. vulnificus* which were obtained from Mikawa and Ise Bay (Aichi prefecture) indicated type-B.
- 3) Serum indicators of liver function in *V. vulnificus* patients were not associated with prognosis. On the other hand, patients with diarrhea at onset tended to have a good outcome.
- 4) We experienced a fatal case of necrotizing fasciitis due to bacterial translocation of *Klebsiella oxytoca*.

**Key Words :** *Vibrio vulnificus*, Basic Medicine, 16S rRNA gene, *Klebsiella oxytoca*

### 1. はじめに

平成17年4月より、佐賀大学では有明海異変に取り組むために全学部横断的な有明海総合研究プロジェクトが組織され、食水系感染症研究部門では*Vibrio vulnificus* (ビブリオ・バルニフィカス) 症に関する対する臨床医学的、基礎医学的研究を継続中である。

本稿では昨年一年間の本疾患対策で、主に基礎医学的研究成果について報告する {中島ら; ビブリオ・バルニフィカス感染症対策—臨床医学的アプローチ (第三

報)・表1(Working Breakdown Structure)参照}。

### 2. 平成18年度の有明海における*V. vulnificus* 菌検出状況

- (1) 解析時期; 平成18年4月~平成19年2月までの各月一回、計11回
- (2) 海水採水ポイント; 図-1に示す7点(A~G点)
- (3) 菌分離培養同定方法



図1. 海水採水ポイント

採取した海水を3000回転で15分遠心し、沈渣をアルカリペプトン水中で振とう培養後、培養液をCVA1培地<sup>1)</sup>にて分離培養した。発育が認められた菌種に関してVITEK2<sup>®</sup>（日本ビオメリュー）及びLAMP法<sup>2,3)</sup>を使用し確定した。

(4) 結果等

昨年と同様、塩田川沖海底水道に沿った海洋上でのサンプリング調査を行った結果、本年度は6月から9月にかけて*V. vulnificus*が確認された。また海水温、塩分濃度、溶存酸素、クロロフィル及び濁度の変化（有明海総合研究プロジェクトコア研究第1部門速水、山本らのデータを使用）と菌検出状況について、各定点における表層0.5m下のイソプレットを図2に示す。

菌検出時の海域環境は、前回の報告と同じく高い海水温（28.1℃±1.8）と低い塩分濃度（26.4±3.9）の際に検出されていた。なお各海域環境データと菌検出の相関について解析を行ったが、海水温以外にははっきりとした相関は認められなかった。

3. 愛知県採取菌の16S rRNA gene分析について

Nilsson<sup>4)</sup>らは、*V. vulnificus*の16S rRNA gene解析により、本菌が大きく2タイプ（type-A；環境株33株中31株、type-B；患者株34株中26株）に分類できることを報告している。我々は、北部九州以外の地域では愛知県において*V. vulnificus*感染症が多く報告されていることを確認したが<sup>5)</sup>、今回愛知県より海水を採取し、16S rRNA gene解析を行った。

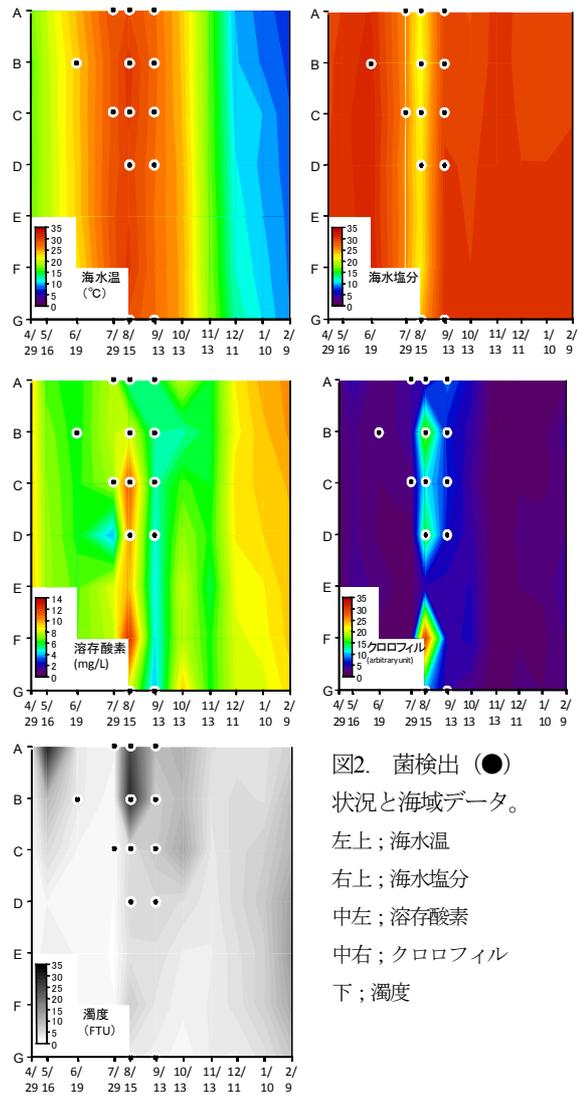


図2. 菌検出 (●) 状況と海域データ。  
 左上; 海水温  
 右上; 海水塩分  
 中左; 溶存酸素  
 中右; クロロフィル  
 下; 濁度



図3. 愛知県での*V. vulnificus*採取場所

表1. 16S rRNA gene用プライマー

8-519-S	5'-AGA GTT TGA TCC TGG CTC AG-3'
8-519-A	5'-ATT ACC GCS GCT GCT G-3'

表2. PCR反応溶液組成

	μL
Template DNA	2.0
Primer Forward (8-519-S)	2.5
Primer Reverse (8-519-A)	2.5
dNTPs	1.0
MgCl <sub>2</sub>	5.0
Buffer B	5.0
Taq Polymerase	0.5
H <sub>2</sub> O	31.5
Total	50.0

## (1) 愛知県採取菌の取得場所と時期

図3に示す愛知県湾岸部より海水サンプルを入手した。採水は8月7日～9日にかけて実施した。

## (2) 実験方法

各点における海水温及び海水塩分濃度は携帯型の計測器を用いた。海水サンプルからは、2-(3)と同様の方法にて*V. vulnificus*のみを純培養した。DNA抽出にはQuiagen DNA mini kit (QIAGEN, USA) を用いた。抽出したDNAを鋳型とし、表1に示すユニバーサルプライマーを用いてPCRにより部分16S rDNA(約0.5kb)を増幅した。反応液組成を表2に示す。PCRは、変性；94°C 30秒、アニーリング；53°C 30秒、伸長；72°C 1分、計30サイクルの反応条件でサーマルサイクラー (PC320, ASTEC) を用いて行った。反応終了後に反応液を1.5%アガロースゲル電気泳動に供し目的とするバンドを確認後、PCR精製キットQuiagen QIAquick PCR purification Kit (QIAGEN)を用いてPCR産物を精製した。次に、目的PCR産物の配列解析を行うために、(株) ジーンネットにシーケンス解析を依頼した。得られた配列はデータベース (BLAST program of the National Center for Biotechnology Information) で相同性検索を行った。

## (3) 結果

各採水点の環境データを表3に示す。*V. vulnificus*は全点から検出された。また、表4に16S rRNA gene typeを区分した結果を示す。小林らの報告<sup>3)</sup>では、有明海由来の*V. vulnificus*は、約9割程度がtype-Bに分類されていたが、愛知県から採取した*V. vulnificus*も高い割合でtype-Bに分類されるという結果となった。しかしながら現段階でも未だ、本識別(type-Aか-Bか)と毒素生産や発症メカニズム

表3.

サンプリング地点	藤前干潟			名古屋港		一色干潟	蒲郡	汐川干潟
	日光川沖	新川河口	庄内川河口	潮見橋付近	堀川河口			
海水温(°C)	31.5	29.1	30.1	29.6	30.3	29.9	31.6	33.9
塩分濃度(‰)	7	3.5	5	20	5	25	20	20
<i>V. vulnificus</i> 検出	+	+	+	+	+	+	+	+

表4. 16S rRNA gene type

	愛知株	佐賀大学患者株 (参考)
type A	4	2
type B	7	19
%B	63.6	90.5

との相関が明らかとされていないために、病原性の有無を論じるには注意が必要であると思われる。

4. *V. vulnificus*患者特性に関する研究

有明海周辺の医療機関にて入院加療された*V. vulnificus*患者について、カルテ記載(入院時の身体所見や血液生化学検査等)をもとに、本患者特性について考察した。

## (1) 対象患者

1984年～2006年までの、佐賀大学医学部付属病院、佐賀県立病院好生館及びビブリオ・バルニフィカスネットワーク病院において、*V. vulnificus*と確定診断されカルテが保存されていた35症例(男性33名、女性2名)。

## (2) 用いたデータ項目

入院時の年齢、性別、基礎疾患、入院時所見、治療方法等。

## (3) データ解析方法

軽快患者と死亡患者の患者特性の差については、 $\chi^2$  test あるいは Mann-Whitney U test. を用い解析を行った。また、予後に関する評価方法として、ロジスティック回帰分析を行った。肝機能の指標はChild-Pugh分類項目であるアルブミン、ビリルビン、プロトロンビン時間(%)の血液データを用いた(他項目である腹水及び昏睡に関する項目についてはカルテへの未記載が多く、除外した)。上記3項目については以下のようにスコア化しダミー変数とした。①アルブミン 1: >4 mg/dl; 2: 3.5-4.0 mg/dl; 3: 2.8-3.5 mg/dl; or 4: <2.8 mg/dl。②ビリルビン 1: <2 mg/dl; 2: 2-3 mg/dl; 3: 3-5 mg/dl; or 4: >5mg/dl。③プロトロンビン時間 (%) 1: >80%; 2: 60-80%; 3: 40-60%; or 4: <40%。①～③の合計点数をmodified Child-Pugh スコア (mCP スコア)とし投入した。その他の共変量として年齢、血小板数、患肢数、下痢を量的変数として用い、患肢数 (0: 所見なし又は一肢のみ、1: 二肢以上)及び下痢の有無 (0: 下痢なし、1: 下痢あり)はダミー変数とした。外科的手術(デブリードメント、患肢離断術)及び血液浄化療法は患者状態により選択されるため変量からは除外した。

表5. *V. vulnificus*患者35症例

Patient	Onset		Sex	Age (years)	Underlying liver disease	Other disease	Raw fish /shellfish diet	Period from ingestion to onset (days)	Diarrhea	Skin lesion on extremities	Surgery
	Year	Month									
1	1984	Aug	M	54	CH	GU	U		-	Lt. lower	d
2	1989	May	M	62	HB, LC, HCC	-	U		-	Bil. lower	d
3	1991	Jul	M	78	HC, LC	GU	Yes	1	-	Bil. lower	d
4	1991	Aug	M	59	LC, HCC	-	Yes	1	-	Bil. lower	-
5	1992	Sep	M	42	ALD	HT, DM	Yes	1	+	Bil. lower	d
6	1993	Jul	M	58	ALD, HC	-	Yes	3	+	Lt. upper	d
7	1995	Aug	M	58	HC, LC, HCC	Esophageal varices	U		-	Lumbar	-
8	1996	Aug	M	56	ALD	-	Yes	5	-	Bil. lower, Rt. upper	d
9	1996	Oct	M	58	ALD	-	U		-	Both upper and lower	d
10	1998	Jul	M	66	HC, LC	DM, Esophageal varices	Yes	1	-	Lt. lower	d
11	1999	Sep	M	60	ALD	Arteriosclerosis obliterans	Yes	2	-	Both upper and lower	a
12	1999	Sep	M	60	HC, LC	-	Yes	1	-	Bil. lower	d
13	1999	Jul	F	66	HC, LC	-	Yes	2	-	Bil. lower	d
14	1999	Jul	M	55	ALD	U	Yes	3	-	Bil. lower	d
15	2000	Jun	M	62	HC, LC, HCC	Esophageal varices	Yes	2	-	Bil. lower	d
16	2000	Jul	M	46	ALD	DM, Chronic pancreatitis	Yes	1	-	Bil. lower	d
17	2000	Aug	M	30	HB, HC, LC, HIV	Hemophilia	Yes	2	-	Bil. lower	-
18	2000	Jul	M	65	ALD	-	Yes	1	+	Rt. lower	d
19	2000	Sep	M	56	HB, LC	DM	Yes	1	-	Rt. lower	d
20	2001	Aug	M	94	HC, LC, HCC	-	Yes	1	-	Bil. lower	-
21	2001	Jun	M	75	Multiple Myeloma	Gastric cancer	Yes	7	-	Lt. upper	a
22	2001	Jul	M	46	ALD	-	Yes	5	+	Bil. lower, Lt. upper	d
23	2001	Aug	M	64	HC, LC, HCC	-	Yes	1	-	Both upper and lower	d
24	2001	Aug	M	46	HC, ALD	-	Yes	1	+	Bil. lower	d
25	2002	Oct	M	72	ALD	-	Yes	1	-	Bil. lower	d
26	2003	Sep	M	69	HB, HC, LC, HCC	-	Yes	7	+	Lt. lower	d
27	2003	Jul	M	50	HB, LC, HCC	DM, GU, Esophageal varices	Yes	1	-	-	-
28	2004	Jul	F	35	MEN type I	Malabsorption syndrome	U		+	Rt. lower	d
29	2004	Oct	M	68	U	GU	Yes	U	-	Lt. upper and lower	a
30	2004	Jul	M	72	-	DM	U		-	Rt. lower	a
31	2005	Jul	M	61	HB, LC	-	Yes	2	+	Bil. lower	-
32	2005	Sep	M	66	ALD	GU	Yes	1	+	Bil. lower	-
33	2006	Jul	M	54	HC, LC, HCC, ALD	-	Yes	1	-	Rt. lower	a
34	2006	Jul	M	52	HC, LC, ALD	-	Yes	2	+	Rt. lower	a
35	2006	Dec	M	73	LC, ALD	Esophageal cancer post-op	Yes	1	-	Bil. lower	-

M, male; F, female; CH, chronic hepatitis; HB, hepatitis B; HC, hepatitis C; LC, liver cirrhosis; HCC, hepatic cell carcinoma; ALD, alcoholic liver disease; HIV, human immunodeficiency virus; GU, gastric ulcer; HT, hypertension; DM, diabetes mellitus; PMX-DHP, polymyxin B immobilized fiber-direct hemoperfusion; CHDF, continuous hemodiafiltration; U, unknown; d, debridement; a, amputation; D, death; C, cure.

表6. 軽快及び死亡患者に関するデータ

	Outcome		P value
	Cured [n = 12]	Deceased [n = 23]	
Mean age [years]	54.6 (9.7)	62.3 (13)	0.034 <sup>b</sup>
Hemoglobin [g/dl]	12.1 (1.9)	12.2 (2.4)	0.862 <sup>b</sup>
Platelets [ $\times 10^4/\mu\text{l}$ ]	7.3 (4.3)	5.5 (3.5)	0.076 <sup>b</sup>
mCP score	8.1 (1.7)	9.0 (1.8)	0.126 <sup>b</sup>
Aspartate aminotransferase [IU/l]	156.3 (110.2)	200.3 (217.8)	0.876 <sup>b</sup>
Alanine aminotransferase [IU/l]	69.7 (30.2)	55.1 (26)	0.237 <sup>b</sup>
$\gamma$ GTP [IU/l]	295.0 (202.2)	290.5 (612.2)	0.068 <sup>b</sup>
C-reactive protein [mg/dl]	13.6 (10.6)	10.2 (7.9)	0.492 <sup>b</sup>
Creatine kinase [IU/l]	1463.3 (1911.9)	5459.7 (9932)	0.971 <sup>b</sup>
Fever [°C]	38.5 (1.1)	38.8 (1.3)	0.280 <sup>b</sup>
Extensive skin lesion [%]	33.3	78.3	0.024 <sup>a</sup>
Diarrhea [%]	50.0	17.4	0.059 <sup>a</sup>
Surgery [no. treated/no. group]	10/12	17/23	
PMX-DHP [no. treated/no. group]	1/12	13/23	
CHDF [no. treated/no. group]	5/12	15/23	

Values in parenthesis are standard deviations. mCP score, modified Child-Pugh score;  $\gamma$  GTP,  $\gamma$  glutamyl transpeptidase; PMX-DHP, polymyxin B immobilized-direct hemoperfusion; CHDF, continuous hemodiafiltration. <sup>a</sup> Fisher's exact test for  $\chi^2$ ; <sup>b</sup> Mann-Whitney U test

表7. *V. vulnificus*患者予後への影響因子

	Adjusted OR	95% CI	P value
Mean age	1.166	1.013 - 1.343	0.033
Platelets	0.775	0.541 - 1.109	0.163
mCP score	1.951	0.782 - 4.869	0.152
Extensive skin lesion	11.770	1.136 - 122.005	0.039
Diarrhea	0.059	0.004 - 0.996	0.050

mCP score, modified Child-Pugh score; OR, odds ratio; CI, confidence interval.

統計処理ソフトはDr. SPSS (SPSS Inc., Tokyo, Japan)を使用し、p値が0.05以下を統計学的有意とした。

(4) 結果と考察1 一患者像 (表5) 一

平均年齢は59.7歳であり、82.9%の患者が経口感染(潜伏期約2日)と考えられ、死亡率は65.7%であった。米国では原発性敗血症型患者(経口感染による)は約4割程度であるのに対し<sup>6)</sup>、今回の調査ではその8割以上が経口感染型であったことから、魚介類の生食を好む我国の食文化が影響していると考えられた。また、患者の80%は6月から9月に発生し、患者の90%以上が基礎疾患として何らかの肝疾患を持っていた。77%の患者が外科的手術を受け、57%の患者は血液浄化療法を受けていた。

(5) 結果と考察2 一予後関連因子等 (表6, 7) 一

軽快した群と死亡した群を比較したデータを表6に示す。死亡した群では軽快した群より患者年齢が高く(p=0.034)、来院時の患肢数が二肢以上の患者が多かった(p=0.024)。また、軽快した患者では約半数に入院時下痢症状が認められ、死亡群と比較し予後がよかった(P=0.050)。更に予後に関連する因子を解析したところ(表7)、mCPスコアと予後の間には関連は見られず、年齢と患肢数が予後に影響を与えていた。患者の9割以上は肝疾患が認められたが、血液生化学検査では、軽快した群と死亡した群には有意な差が認められないという

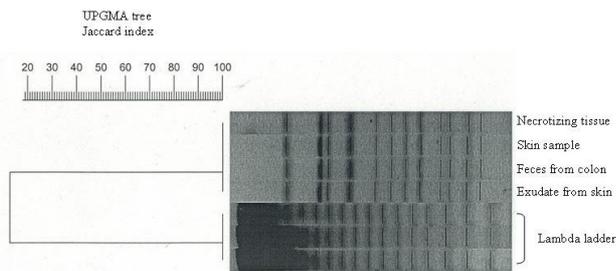


図4. PFGE法によるDNA切断パターン。

結果となった。また、軽快した群の約半数で下痢症状が来院時に認められていたが、これは生理的な防御機構と考えられ、これを基に本症の発生初期における腸管洗浄や経腸管抗生剤投下等の治療法の可能性が示唆された。

## 5. *V. vulnificus*症を疑った壊死性筋膜炎の症例

### (1)症例の要約

73歳の男性肝癌患者(ステージIV-A)が、下肢の発赤と激痛を主訴に当院を受診した。皮膚の症状は進行性であり、また、受診日以前に魚介類の喫食歴が認められたため、当初*V. vulnificus*感染症が疑われたが、水泡内容の培養結果より*Klebsiella oxytoca* (クレブシエラ・オキシトカ)が検出された。患者は3日目に永眠された。

### (2)基礎医学的考察

#### 1) 病理所見

下肢病変部位について病理解剖を行った。肉眼的に点状出血と組織の壊死が認められ、顕微鏡的所見でも皮下組織及び一部筋層に壊死が確認された。また微小血管のフィブリン血栓を伴う急性皮膚炎と皮下脂肪組織炎が観察され、血管周囲にリンパ球と好中球の浸潤が見られた。グラム染色で陰性桿菌を認め、腸管にはびらんと出血、粘膜下組織にリンパ球と好中球の浸潤を認めた。

#### 2) 細菌学的解析

クレブシエラ属は、同定の際にミスクラシフィケーションが起きる可能性がある<sup>7)</sup>。特に*K. oxytoca*と*Raoultella*においてその傾向があり<sup>8)</sup>、我々はサンプルを採取した各部位 ①下肢壊死部分、②皮膚、③腸内容物、④水泡内容について、確定診断のため16S rRNA gene及び*rpoB* 遺伝子解析を行い菌の同定を行った。ゲノムDNAはQIAamp DNA Mini kit (QIAGEN)で精製し、16S rDNAをPCRで増幅した。使用したプライマーは、8-519-S (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') 及び1510r (5'-GTGAAGCTTACGGYTACCTTGTTACGACTT-3')を用いた。また、*rpoB*についてはMolletら<sup>9)</sup>の記述に従い、CM81b and CM32bをプライマーに用いPCRを行った。その結果、16S rDNAと*rpoB*のシーケンスより、99.6%で*K. oxytoca*と確実に同定された。

更に、本菌の侵入門戸を検索するために、腸内容物か

ら検出された*K. oxytoca*と、それ以外の部位から取得した*K. oxytoca* (下肢壊死部分、皮膚、水泡内容)についてパルスフィールドゲル電気泳動法(PFGE)を用いて検索を行った。PFGEにはGenePath Group 6 Reagent Kit (Bio-Rad Laboratories, CA, USA)の試薬を用い、制限酵素には*Xba*I (Bio-Rad Laboratories)を用いた。泳動にはGenePath System (Bio-Rad Laboratories)を用い、1% agarose gel上で6.0 V/cm、19.7時間、パルスタイムレンジ5.3 ~ 49.9sで行った。その結果DNA切断パターンは、腸内容物とそれ以外で同一のパターンであった(図4)。

クレブシエラ属は敗血症、肺炎、尿路感染症そして軟部組織感染症(サイトトキシンによる)の起原菌となる<sup>10)</sup>。Linら<sup>11)</sup>は*K. oxytoca*による臨床所見として、肝胆道系感染(58%の患者)、菌血症(23%)、血管内デバイスに関連した感染症(7%)、尿路感染症(5%)、腹膜炎(2%)、そして皮膚軟部組織感染症(5%)と報告している。我々が検索した限りでは、*K. oxytoca*による蜂巣炎は2例のみであり、壊死性筋膜炎を呈した過去の症例報告は見当たらなかった。

今回我々は、腸内容物と皮膚等から取得された菌についての相同性をPFGE法を用いて確認した。その結果切断パターンが同一であったことから、バクテリアトランスロケーションにより腸管内の*K. oxytoca*が皮膚感染症を惹起したことが考えられた。Gilbertら<sup>12)</sup>は、腹膜炎により腸内細菌、特にグラム陰性菌が、局在しているリンパ節から侵入すると報告している。また門脈圧亢進や腹水が存在する場合は場合には腸粘膜の損傷が起り、バクテリアトランスロケーションが起りやすいとしている。今回の症例も、患者は肝癌による門脈圧亢進、腹水が認められていた。

## 6. まとめ

平成19年度の研究成果について報告した。次年度では、*V. vulnificus*の毒素に関する研究として、二次元電気泳動やアミノ酸解析を用いた研究と、感染モデルを用いた微生物学的防除法に集中的に取り組む予定としている。

謝辞：各研究の実施にあたり、佐賀大学医学部病理学講座青木先生、有働先生、同内科学講座江口先生、大座先生、宇宙航空研究開発機構東端晃先生、有明海総合研究プロジェクト・コア研究1速水先生、山本先生、佐賀大学医学部付属病院検査部に深謝申し上げる。

### 参考文献

- 1) Nakashima Y, Oho M, Kusaba K, Nagasawa Z, Komatsu O, Manome I, Araki K, Oishi H, Nakashima M: A

- Chromogenic Substrate Culture Plate for Early Identification of *Vibrio vulnificus* and Isolation of Other Marine *Vibrios*.** *Ann. Clin. Lab. Sci.* 2007, **37(4)**: 330-334.
- 2) Notomi T, Okayama H, Masubuchi H, Yonekawa T, Watanabe K, Amino N, et al. : **Loop-mediated isothermal amplification of DNA.** *Nucleic Acid Res* 2000, **28**: e63.
  - 3) Mori Y, Nagamine K, Tomita N, Notomi T: **Detection of loop-mediated isothermal amplification reaction by turbidity derived from magnesium pyrophosphate formation.** *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2001, **289**: 150-154.
  - 4) Nilsson WB, Paraniyep RN, DePaola A, Strom MS: **Sequence Polymorphism of the 16S rRNA Gene of *Vibrio vulnificus* Is a Possible Indicator of Strain Virulence.** *J. Clin. Microbiol.* 2003, **41**: 442-446.
  - 5) 小林元太、田代幸寛、加藤富民雄: **有明海由来の微生物に関する研究** 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集 第2巻, 2006: 99-106.
  - 6) Shapiro RL, Altekruze S, Hutwagner L, Bishop R, Hammond R, Wilson S, et al.: **The role of Gulf Coast oysters harvested in warmer months in *Vibrio vulnificus* infections in the United States, 1988-1996.** *Vibrio Working Group. J. Infect. Dis.* 1998, **178(3)**: 752-759
  - 7) Alves MS, Dias RC, de Castro AC, Riley LW, Moreira BM: **Identification of clinical isolates of indole-positive and indole-negative *Klebsiella* spp.** *J Clin Microbiol.* 2006, **44**: 3640-3646.
  - 8) Drancourt M, Bollet C, Carta A, Rousselier P: **Phylogenetic analyses of *Klebsiella* species delineate *Klebsiella* and *Raoultella* gen. nov., with description of *Raoultella ornithinolytica* comb. nov., *Raoultella terrigena* comb. nov. and *Raoultella planticola* comb. nov.** *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 2001, **51**: 925-932.
  - 9) Mollet C, Drancourt M, Raoult D: ***rpoB* sequence analysis as a novel basis for bacterial identification.** *Mol. Microbiol.* 1997, **26**: 1005-1011.
  - 10) Kim BN, Ryu J, Kim YS, Woo JH: **Retrospective analysis of clinical and microbiological aspects of *Klebsiella oxytoca* bacteremia over a 10-year period.** *Eur. J. Clin. Microbiol. Infect. Dis.* 2002, **21**: 419-426.
  - 11) Lin RD, Hsueh PR, Chang SC, Chen YC, Hsieh WC, Luh KT: **Bacteremia due to *Klebsiella oxytoca*: clinical features of patients and antimicrobial susceptibilities of the isolates.** *Clin. Infect. Dis.* 1997, **24**: 1217-1222.
  - 12) Gilbert JA, Kamath PS: **Spontaneous bacterial peritonitis: an update.** *Mayo Clin. Proc.* 1995, **70**: 365-370.

(2008. 3. 31受付)

# 救命しえた A 群 $\beta$ 溶血性連鎖球菌毒素性 ショック症候群の 1 症例

CURED CASES WITH STREPTOCOCCAL TOXIC SYNDROME (STSS)  
IN SAGA MEDICAL SCHOOL HOSPITAL

三溝慎次<sup>1</sup>・山田友子<sup>2</sup>・松本浩一<sup>3</sup>・荒木和邦<sup>4</sup>・大石浩隆<sup>5</sup>・中島幹夫<sup>6</sup>  
Shinji MITSUMIZO, Tomoko YAMADA, Kouichi MATSUMOTO,  
Kazukuni ARAKI, Hirotaka OISHI and Mikio NAKASHIMA

1	医博 佐賀大学講師	医学部附属病院集中治療部	(〒849-8501 佐賀市鍋島 5-1-1)
2	佐賀大学医員	医学部附属病院集中治療部	(〒849-8501 佐賀市鍋島 5-1-1)
3	佐賀大学助教	医学部附属病院麻酔科蘇生科	(〒849-8501 佐賀市鍋島 5-1-1)
4	医博 佐賀大学准教授	医学部附属病院手術部	(〒849-8501 佐賀市鍋島 5-1-1)
5	医博 佐賀大学准教授	有明海総合研究プロジェクト	(〒849-8501 佐賀市鍋島 5-1-1)
6	医博 佐賀大学教授	医学部麻酔・蘇生学	(〒849-8501 佐賀市鍋島 5-1-1)

We experienced cured case of Streptococcal toxic syndrome (STSS). A 46-year-old woman with Stevens-Johnson syndrome was admitted to our hospital due to lower leg pain and redness. Within several hours, the patient had consciousness level-down and sudden onset of septic shock. Magnetic resonance imaging of the patient's right lower leg showed a high signal on T2W1, and hypodermal edematous change was revealed. These observations were consistent with necrotizing fasciitis. *Streptococcus pyogenes* was isolated from cultures of the blood samples. In spite of the severity of the clinical pictures, this patient survived due to debridement and intensive care including Polymyxin-B immobilized fiber-direct hemoperfusion.

Because of the high morbidity and mortality associated with STSS, effective treatment including early diagnosis of the disease, aggressive antibiotic therapy, and supportive care are important.

**Key Words:** *Streptococcus pyogenes*, STSS, *Vibrio vulnificus*,  
*Polymyxin-B immobilized fiber-direct hemoperfusion (PMX-DHP)*

## 1. はじめに

化膿連鎖球菌 (*Streptococcus pyogenes*) は、連鎖球菌属に属する細菌の一種である。羊血液寒天培地で培養すると、増殖した連鎖球菌コロニーの周囲に溶血を起こし溶血環が観察され、完全な溶血を起こし透明な溶血環が観察されるものを  $\beta$  溶血性連鎖球菌と言う。また連鎖球菌の鑑別に用いられるランスフィールド抗原分類では、*S. pyogenes* は A 群に属し、この性質から A 群  $\beta$  溶血性連鎖球菌とも呼ばれる。本菌は咽頭炎や膿皮症などを引き起こすが、喉や皮膚にこの細菌を持っていても無症状の場合もある。しかし、本菌により壊死性筋膜炎や敗血症等を生じることがあり、劇症化すれば致死率も高く、しばしば、我々が調査・研究を行っている *Vibrio vulnificus* と鑑別しなければならないことがある。今回、我々は *S. pyogenes* により壊死性筋膜炎、

敗血症性ショックとなり、デブリードマンやポリミキシン吸着療法 (*Polymyxin-B immobilized fiber-direct hemoperfusion*; PMX-DHP;) などを含む全身管理により救命できた症例を経験したので報告する。

## 2. 症例

患者：46歳、女性

【主訴】

発熱、右拇趾中心の疼痛・熱感・腫脹・発赤

【現病歴】

2月初旬より下肢の疼痛・38度台の熱発を認め、歩行不能となったため当院を受診。蜂窩織炎、壊死性筋膜炎を疑われ、当院に緊急入院となった。魚介類の生食のエピソードはなかった。

【既往歴】



図 1. 入院時皮膚所見（右下肢）

24 歳 Stevens-Johnson 症候群（毎年霜焼けになっていた）。強皮症は指摘されたが抗核抗体は陰性で、確定診断には至っていなかった。糖尿病はなかった。

【家族歴】

特記事項なし。

【入院時現症】

体温：39.6℃，心拍数：90 回/分整，血圧：120/80mmHg，呼吸回数：14 回/分，意識清明  
皮膚（図 1.）：右下腿から足部に著明な浮腫・腫脹、右第 1 趾尖端熱感、右踵外側に潰瘍、左足第 5 趾尖端に潰瘍、口囲皮膚硬化、開口制限あり

【検査所見】

<血算>

白血球：13200/ $\mu$ l，赤血球：3.66 $\times$ 10<sup>6</sup> / $\mu$ l，ヘモグロビン：10.1g/dl、ヘマトクリット：30.5%，血小板：6.2 万/ $\mu$ l

<生化学>

BUN：42.3mg/dl，Cr：2.75mg/dl，AST：62IU/l，ALT：53IU/l，LDH：318IU/l，ALP：127IU/l，Na：128mEq/l，K：2.6mEq/l，Cl：95mEq/l、CRP：31.38mg/dl

<感染症>

RPR 定量：(-)，TPHA 定量：(-)，HBs-Ag：(-)，HCV-Ab：(-)

<ECG>

洞性頻脈

【画像所見】

<胸部 X-p>

入院時は肺野に明らかな異常なく心拡大もなし。

<下肢 MRI> (図 2)

右下腿～足部の皮下脂肪は腫脹しており、皮下脂肪織内～筋表面～筋間に T1 強調画像にて低信号、T2 強調画像にて高信号、造影後は増強効果がみられる領域あり、炎症性変化と思われた。筋肉や骨に明らかな異常信号はなかった。

<組織診>

壊死組織：表皮には変性とびらんが、また、真



図 2. 下肢 MRI 所見

皮を中心に壊死組織が認められ、内部にはグラム陰性桿菌が認められた。  
紅斑、紫斑：散在性に表皮内の水疱、液状変性がみられ、真皮上層の毛細血管は拡張し、炎症細胞の浸潤を認めた。また、一部肉芽腫の形成も認め、敗血症と考えられた。

【入院後経過】

入院後より徐々に意識レベル低下し、血圧も低下（80/50mmHg）、敗血症性ショックとなり、臨床所見、MRI、血液検査から壊死性筋膜炎が強く疑われたため、入院当日にデブリードマンを行った。抗生剤スルバクタム/アンピシリン

(SBT/ABPC)、クリンダマイシン (CLDM) を投与した。術後 ICU に入室し、人工呼吸管理、循環管理を含めた全身管理を行った。術後 1 日目) 全身状態改善せず、局所の熱感、腫脹、発赤も改善しなかったため、下腿、足部に追加のデブリードマンを行った。また敗血症性ショックが持続し、DIC を併発した。術後 2 日目) 敗血症性ショックに対して PMX-DHP を導入し、カテコラミンを減量した。術後 3 日目) 大腿部の熱感、腫脹が増悪したため、壊死性筋膜炎が拡大したと判断し、同日大腿部までの追加切開を行った。また、血液培養より *S. pyogenes* が検出され、侵襲性 A 群 β 溶血性連鎖球菌感染症と診断した。術後 4 日目) 敗血症性ショックが持続していたため、再び PMX-DHP を導入し、カテコラミンを減量した。術後 8 日目) 呼吸状態の改善を確認し抜管したが、開眼するものの従命に応じず、敗血症による意識レベルの低下と考えられた。術後 9 日目) ICU を退室。術後 17 日目) 創閉鎖のため、デブリードマンと分層植皮術を行った。また意識レベルは徐々に改善していった。術後 35 日目) 残存する潰瘍部に対し分層植皮術を行った。術後 61 日目) リハビリにより、歩行器による歩行が可能まで改善し、退院となった。

### 3. 考察

A 群 β 溶血性連鎖球菌が血液や筋肉に感染すると侵襲性 A 群 β 溶血性連鎖球菌感染症と呼ばれる。このうち、頻度は少ないが最も重症なのが、壊死性筋膜炎(Necrotizing fasciitis)と A 群 β 溶血性連鎖球菌毒素性ショック症候群(Streptococcal toxic shock syndrome : STSS)である。

本症例では壊死性筋膜炎を引き起こし、敗血症性ショックとなったが、この病態を引き起こす細菌感染症は *V. vulnificus*、肺炎球菌、黄色ブドウ球菌など数多くあり、初診時に肺炎球菌の尿中抗原の検査などを行ったものの病原菌の同定は困難であった。佐賀県を含む有明海沿岸地域で多い *V. vulnificus* 感染症では魚介類の生食が特徴的で、季節的に暖かい時期に多いと言われているが、摂取歴がはっきりしない症例の報告も多く、11 月に発生した症例もあり<sup>1)</sup>感染を否定はできなかった。敗血症性のショックを伴う壊死性筋膜炎の治療としては抗生剤の適切な投与と、原因がいずれの菌でもデブリードマン、呼吸・循環管理、蛋白分解酵素阻害薬の投与、

DIC の治療などの全身管理が重要で、我々も原因菌が不明のままデブリードマンを含めた全身管理治療を開始した。また、敗血症性ショックに対しては循環管理の 1 つとして血液浄化法が有効であった症例も報告されており、最近では PMX-DHP を使用した症例も報告されている。本症例ではデブリードマン後も敗血症性ショックが持続していたため、2 回の PMX-DHP を導入したが、PMX-DHP 導入後には血圧も上昇し、カテコラミンも減量でき全身状態は改善し有効であると考えられた。

侵襲性 A 群 β 溶血性連鎖球菌感染症では壊死性筋膜炎患者の約 20%と STSS 患者の半数以上が死亡する。STSS は、黄色ブドウ球菌によって起こされる毒素性ショック症候群(Toxic shock syndrome, TSS)によく似ており、Toxic shock like syndrome, TSLS と呼ばれ、本邦では 1999 年からの 5 年間で 302 例報告され、死亡が 114 例、うち 65 例 (60%) は 3 日以内にこの病態にて死亡していた。その発生には目立った季節性は認められず、また、患者の分布は岩手県以外の全国 46 都道府県にわたっており、特に地域差も認めず、患者は 60 代に多くみられ、男性に多い。我々が研究している *Vibrio vulnificus* では死亡率は約 7 割であり侵襲性 A 群 β 溶血性連鎖球菌感染症より予後が悪い。また、暖かい地方で発生しやすく気温の上昇している冬以外に発生が多く男性が多いことが特徴的である<sup>2)</sup>。

感染のリスクファクターとしては「家庭に 3 人以上で住んでいる」、「糖尿病」、「心臓病」及び「悪性腫瘍」について侵襲性 A 群 β 溶血性連鎖球菌感染症との関連が報告され<sup>3)</sup>、侵襲性 A 群 β 溶血性連鎖球菌感染症患者の 56%は、慢性疾患を持ち、皮膚あるいは軟部組織の感染が 48%で、病巣部が不明な菌血症が 14%で、肺炎が 11%でとの報告もある<sup>4)</sup>。本症例では糖尿病や心臓病、悪性腫瘍は合併しておらず、家庭 3 人以上で住んでいることだけがリスクファクターであった。しかし、確定診断には至っていないものの強皮症が疑われており、このことが関与した可能性もある。

### 4. 結語

我々は A 群 β 溶血性レンサ球菌により壊死性筋膜炎、敗血症性ショックとなった症例を経験し、デブリードマンや PMX-DHP などを含む全身管理により救命できた。今後は *Vibrio vulnificus* 感染症の死因のひとつの原因である敗血症性ショックに対する治療法の確立のためにも、他の感染症による敗血症性ショックの治療も併せ

て行いながら、その病態・治療法を研究していく予定である。

#### 参考文献

1)堀田吏乃, 橋本好司, 中田一徳, 菊間幹太, 佐川公矯: 冬季に検出し得た *Vibrio vulnificus* 感染症の 1 例 ; 日本臨床微生物学雑誌, 16 卷 1 号 2006. p1-7

2)大石浩隆, 浦由紀子, 三溝慎次, 中島幹夫: わが国における *Vibrio vulnificus* 感染症患者誌上調査 ; 感染症学雑誌, 80 卷 6 号 2006, p.680-689.

3)Stephanie H. Factor, Orin S. Levine, Benjamin Schwartz, et al. ; Invasive Group A Streptococcal Disease: Risk Factors for Adults ; Emerging Infectious Diseases , Vol.9, No.8, 2003. p.970-977.

4)H. Dele Davies, Alison McGeer, Benjamin Schwartz, et al. (The Ontario Group A Streptococcal Study Group) ; Invasive Group A Streptococcal Infections in Ontario, Canada. ; the New England Journal of Medicine. Vol.335, No.8, , 1996, p.547-554.

(2008.3.24 受付)

# Loop-mediated Isothermal Amplification (LAMP) 法を 利用した起炎菌迅速診断法の検討

STUDIES OF EARLY DIAGNOSIS METHOD FOR CAUSATIVE ORGANISM USING LOOP-MEDIATED ISOTHERMAL AMPLIFICATION (LAMP)

草場耕二<sup>1</sup>・中島由佳理<sup>2</sup>・於保恵<sup>3</sup>・坂口美和<sup>4</sup>  
永沢善三<sup>5</sup>・大石浩隆<sup>6</sup>・中島幹夫<sup>7</sup>

Kouji KUSABA, Yukari NAKASHIMA, Megumi Oho, Miwa SAKAGUCHI  
Zenzo NAGASAWA, Hiroataka OISHI, Mikio NAKASHIMA

- |                            |                                   |
|----------------------------|-----------------------------------|
| 1 佐賀大学医学部主任臨床検査技師          | 検査部微生物検査室 (〒849-8501 佐賀市鍋島 5-1-1) |
| 2 佐賀大学医学部臨床検査技師            | 検査部微生物検査室                         |
| 3 佐賀大学医学部臨床検査技師            | 検査部生化学検査室                         |
| 4 佐賀大学医学部臨床検査技師            | 検査部微生物検査室                         |
| 5 医博 佐賀大学医学部副臨床検査技師長       | 検査部微生物検査室                         |
| 6 医博 佐賀大学准教授 有明海総合研究プロジェクト | (〒849-8501 佐賀市鍋島 5-1-1)           |
| 7 医博 佐賀大学教授 麻酔蘇生学          | (〒849-8501 佐賀市鍋島 5-1-1)           |

Loop-mediated isothermal amplification (LAMP) attracts attention as novel polymerase chain reaction to detect a specific gene for rapidity and high sensitivity. We tested LAMP for *Bordetella pertussis* (*B. pertussis*) and *Clostridium difficile* (*C. difficile*) detection. In the study of *B. pertussis*, we compared two DNA extraction methods, boiling and commercial extraction kit, for LAMP sensitivity. Boiling extraction was simple and easy procedure, and to finish a short time. However, sensitivity of LAMP was higher in commercial extraction kit than in boiling method. In the study of *C. difficile*, which has difficulty with detection in culture, we compared the sensitivity of detection for toxins between LAMP and enzyme immunoassay. Our results indicated that it could be better to use LAMP and enzyme immunoassay together for valid detection of this toxin.

**Key Words:** Loop-Mediated Isothermal Amplification (LAMP), *Bordetella pertussis*, *Clostridium difficile*

## 1. はじめに

感染症の適切な治療を行うためには、その起炎菌となる病原微生物を分離し、同定・薬剤感受性検査に基づいて正しく診断・治療することが必要である。しかし、細菌の同定及び薬剤感受性検査の結果を得るためには時間を要するため、近年においては早期診断を目的とした種々の迅速診断が開発されてきている。特に、重篤となる敗血症、髄膜炎や *Vibrio vulnificus*、*Streptococcus pyogenes* などの細菌により起こる壊死性筋膜炎などは迅速に菌種を同定することが求められている。また、現在微生物検査室においては培養による細菌の検出が主流であるが、培養が困難あるいは不能な菌種においては検出不能となる場合が多い。これらを補う方法としては、検体中に存在する病原微生物に対する特定の抗原を免疫学的に検出する方法、あるいは患者血清中に存在する病原微生物に対する特異

的抗体を検出する方法などを利用した検査試薬が開発されてきている<sup>1)</sup>。近年、分子生物学的手法のなかでも Polymerase Chain Reaction (PCR)をはじめとした核酸増幅法を用いた診断法が特異度・感度ともに高く注目されている。そこで今回我々は、栄研化学株式会社が開発した一定温度下で核酸を増幅する方法の一つである Loop-Mediated Isothermal Amplification (LAMP)法<sup>2)</sup>を利用して、培養検査で検出が困難である *Bordetella pertussis* (*B. pertussis* 百日咳)と、偽膜性大腸炎の起炎菌であり院内感染菌としても重要である *Clostridium difficile* (*C. difficile*)に注目し、その同定方法を検討することとした。

*B. pertussis* が起こす呼吸器感染症は咳嗽が6～10週間続き、乳幼児では無呼吸発作、生後6ヶ月以内、特に早産児とワクチン未接種者では重症になることが多い。時に痙攣、脳症、肺炎などを起こし死亡する例も認める。この菌の検出

には一般に Bordett-Gengou 培地、Cyclodextrin Solid 培地など特殊な培地を用いるが、瘧咳期に入ると検出されにくくなるため、分離率は低く、特にワクチン接種歴がある場合、抗生剤投与開始後は通常培養陰性となる<sup>5)</sup>。また、抗体検査が臨床の間では多く用いられているが、感染初期では抗体の上昇が見られないので急性期と回復期のペア血清を用いて確定診断としては有用であるが迅速診断としては不向きである。本菌種では LAMP 法<sup>3)</sup>を利用し、核酸抽出法である煮沸法と和光純薬から発売されているセパジーンを用いて検出の比較検討を行った。

一方、*C. difficile* は抗菌薬が誘因となって引き起こされる下痢症/腸炎の主要な原因菌である。本菌は芽胞を有する菌であるため病院環境に長期にわたって存在し、院内伝播することが知られ、特に欧米では多くの院内集団発生が報告されている。また、*C. difficile* による腸炎の発症には toxinA と toxinB が関与している。従来毒素産生株は toxinA と toxinB の両毒素を産生し、毒素非産生株は両方とも産生しないとされてきたために、*C. difficile* 関連下痢症 (Clostridium difficile associated diarrhea : CDAD) の細菌学的検査には糞便中の toxinA あるいは toxinB のどちらかかの検出と *C. difficile* の分離培養が行われてきた。ところが近年 toxinB は産生するが toxinA は産生しない toxinA<sup>-</sup>B<sup>+</sup>-*C. difficile* 株がヒトの消化管に対して病原性があることが報告されはじめ注目されている<sup>6,7)</sup>。欧米では toxinA と toxinB が同時に検出できるキットが利用されており、日本でも 2007 年に同時に検出できるキットが発売された。しかし全国的に普及するには至っていないのが現状である。そこで、今回我々は当院で測定している酵素免疫法を用いた toxinA 検出キットと、toxinB 遺伝子の有無を確認するために LAMP 法<sup>4)</sup>、及び菌培養を用いて検出の違い等についての比較検討を行った。それぞれの検討結果について報告する。

## 2. 材料および方法

### 1) *B. pertussis*

2007 年 7 月~12 月までに百日咳感染症の疑われる患者の鼻分泌物 42 検体を対象とし、綿棒で採取された検体を 1ml の PBS で十分に洗浄後等分に分けたのち、一方を煮沸法、もう一方はセパジーンキットを用いた核酸抽出法で行った。

#### (1) 煮沸法

① 1.5ml マイクロチューブに検体 500 $\mu$ l 入れ、12000rpm, 5 分間遠心。

- ② 上清を取り除き、100 $\mu$ l の TE Buffer を加えてよく混和。  
 ③ ヒーティングブロックにて 100 $^{\circ}$ C, 10 分間加温。  
 ④ 水中で急冷し、12000rpm, 2 分間遠心。  
 ⑤ 上清を LAMP 用検体(Template)とした。

#### (2) セパジーン法 (和光純薬社製)

- ① 1.5ml マイクロチューブに検体 500 $\mu$ l 入れ、12000rpm, 5 分間遠心。  
 ② 上清を取り除き、セパジーン試薬 I を 100 $\mu$ l 加えピペットでよく混和し 10 分間室温放置。  
 ③ セパジーン試薬 II を 100 $\mu$ l 加えピペットでよく混和。  
 ④ セパジーン試薬 III を 700 $\mu$ l、セパジーン試薬 IV を 400 $\mu$ l 加え、蓋をして激しく数十秒間 Vortex 後 12000rpm, 10 分間遠心。  
 ⑤ 別の 1.5ml マイクロチューブにセパジーン試薬 V を 50 $\mu$ l 加え、④の上清 500 $\mu$ l を添加。  
 ⑥ イソプロパノールを 550 $\mu$ l 加え、蓋をしてゆっくり混和後、-80 $^{\circ}$ C で 5 分間放置。  
 ⑦ 12000rpm, 5 分間遠心後、デカンテーションで上清を除去。  
 ⑧ 70% エタノールを 1ml 加え軽く混和後、12000rpm, 2 分間遠心し、デカンテーションで上清を除去。  
 ⑨ 軽く乾燥させ、30 $\mu$ l TE Buffer を加え抽出した核酸を溶解し LAMP 用検体(Template)とした。

#### LAMP 用プライマー (*B. pertussis*)

Primer	Sequence (5'-3')
BP-FIP	TTGGATTGCAGTAGCGGGATGTGCATGCGTGCAGATTCGTC
BP-BIP	CGCAAAGTCGCGCGATGGTAACGGATCACACCATGGCA
BP-F3	CCGCATACGTGTTGGCA
BP-B3	TGCGTTTTGATGGTGCTT
BP-LF	ACGGAAGAATCGAGGGTTTTGTAC
BP-LB	GTCACCGTCCGGACCGTG

#### LAMP 反応溶液 (*B. pertussis*)

試薬	量 ( $\mu$ l)
2 x Reaction Mix(RM)	12.5
Bp-FIP(100pmol/ $\mu$ l)	0.4
Bp-BIP(100pmol/ $\mu$ l)	0.4
Bp-F3(100pmol/ $\mu$ l)	0.1
Bp-B3(100pmol/ $\mu$ l)	0.1
Bp-loopF(100pmol/ $\mu$ l)	0.2
Bp-loopB(100pmol/ $\mu$ l)	0.2
<i>Bst</i> DNA polymerase	1
Template	5
Distilled Water	5.1
Total	25

### LAMP 反応の時間と温度 (*B. pertussis*)

	温度 (°C)	時間 (分)
反応	63	90
反応停止	80	5

また、LAMP 試薬に検体(Template)4 $\mu$ l と陽性コントロール(*B. pertussis*)を 1 $\mu$ l 加えたものを内部コントロール (Internal control : IC) とした。

### 2) *C. difficile*

2007 年 9 月から 2007 年 10 月までに検査室へ提出された糞便 99 検体を対象とした。

#### (1) LAMP 法 (煮沸法による抽出)

提出された検体をクックトミート液状培地 (関東化学) に摂取して 37°C, 24 時間培養後、培養液 1ml を 1.5ml マイクロチューブに移し、12000rpm、2 分間遠心した。上清除去後、TES Buffer 500 $\mu$ l を加えよく混和し、95°C で 15 分間加熱後、氷中で急冷した。12000rpm、2 分間遠心し、上清を LAMP 用検体(Template)とした。

#### (2) 酵素免疫測定法

バイダスアッセイキット CDA2 (VIDAS *C. difficile* ToxinA II : 日本ビオメリュー) を用い、添付文書に従って測定した。

#### (3) 分離培養

糞便を CCFA-S 培地 (栄研化学) に塗布し、35°C 嫌気状態で 48 時間培養を行い、発育の有無を確認した。

### LAMP 用プライマー (*C. difficile*)

Primer	Sequence (5'-3')
HK101-FIP	CTGCACCTAAACTACACCATCTATCTTCCTA CATTATCTGAAGGATT
HK101-BIP	GAGCTAAGTGAAACGAGTGACCCGCTGTTG TTAAATTTACTGCC
HK101-F3	GTATCAACTGCATTAGATGAAAC
HK101-B3	CCAAAAGATGAAGTAATGATTGC
HK101-LF	AATAGTTGCAATTATAGG
HK101-LB	AGACAAGAAATAGAAGCTAAGATAGG

### LAMP 反応溶液 (*C. difficile*)

試薬	量 ( $\mu$ l)
2 x Reaction Mix(RM)	12.5
Distilled Water	8.1
CD-FIP(100pmol/ $\mu$ l)	0.4
CD-BIP(100pmol/ $\mu$ l)	0.4
CD-F3(100pmol/ $\mu$ l)	0.1
CD-B3(100pmol/ $\mu$ l)	0.1
CD-loop-F(100pmol/ $\mu$ l)	0.2

CD-loop-B(100pmol/ $\mu$ l)	0.2
<i>Bst</i> DNA polymerase	1
Template	2
Total	25

### LAMP 反応の時間と温度 (*C. difficile*)

	温度 (°C)	時間 (分)
反応	62	60
反応停止	80	2

## 3. 結果と考察

### 1) *B. pertussis*

今回実施した 42 検体中 5 件が、煮沸法による LAMP 反応の結果において IC が陰性となり判定不能となったため除外した。なお、セパジーン法では判定不能はみられなかった。煮沸法およびセパジーン法ともに LAMP 法の結果が一致したものは、両法とも陽性が 37 検体中 7 件 (18.9%)、両法とも陰性が 37 検体中 31 件 (78.4%) であり、全体の 97.3% が一致した。一方不一致は、煮沸法陽性でセパジーン法陰性はなかったが、煮沸法陰性かつセパジーン法陽性は 1 件 (2.7%) であった(表 1)。

以上より、今回比較した 2 法において、煮沸法は作業手順が簡便でありかつ短時間で核酸抽出できるが、セパジーン法での核酸抽出がより感度が高く、かつ IC が陰性になる検体もなかったため反応阻害物質の混入も防げることが判明した。従って、各核酸抽出法によって検査データが影響を受けることが示唆された。

### 2) *C. difficile*

今回、LAMP 法、酵素免疫測定法 (バイダスアッセイキット CDA2) 及び培養法での比較検討を実施した結果、3 法とも陽性になったものは、99 検体中 8 件、3 法共に陰性になったものは 69 件であり、3 法とも結果が一致したのは 77 件 (78%) であった。一方、不一致であったものとして、LAMP 法・CDA2 法が陽性で培養法陰性は 8 件、LAMP 法・培養法が陽性で CDA2 法陰性は 2 件であり、LAMP 法陰性で CDA2 法・培養法が陽性となったものはなかった。また、LAMP 法のみ陽性は 6 件、CDA2 のみ陽性、培養のみ陽性はそれぞれ 3 件であった (表 2)。

これらの結果より、3 法とも陽性になった 8 件と LAMP 法・CDA2 法が陽性で培養法陰性の 8 件は ToxinA 及び ToxinB 毒素産生株であること

表 1. *B. pertussis* におけるセパジーン核酸抽出法と煮沸法の LAMP 反応結果の比較

セパジーン 煮沸法	陽性	陰性	Total
陽性	7(18.9%)	0 (0%)	7
陰性	1 (2.7%)	29 (78.4%)	30
Total	8	29	37

表 2. *C. difficile* における、LAMP 法・CDA2 法・培養法の検出結果

		CDA2 法・ 培養法		CDA2 法陽性 培養法陰性	CDA2 法陰性 培養法陽性
		共に 陽性	共に 陰性		
LAMP 法	陽性	8	6	8	2
	陰性	0	69	3	3

が考えられた。また、LAMP 法・培養法が陽性で CDA2 法陰性の 2 件と、LAMP 法のみが陽性の 6 件は ToxinB 毒素産生/ToxinA 毒素非産生株であったことが考えられた。なお、LAMP 法・CDA2 法で陽性の結果となっても培養法で陰性となったものが 14 件あったことより、本菌は培養での検出が困難なものの一つであることを示唆した。更に培養法のみが陽性の 3 件は ToxinA 及び ToxinB 毒素非産生株と考えられる。

CDA2 法のみが陽性の 3 件は、*C. difficile* の LAMP 法及び培養法共に培地での菌の増殖操作が必要であり、この操作による増殖不良であった可能性が考えられる。これらの結果より 3 法全てを実施し比較することで、ToxinA、ToxinB 毒素産生の有無が推定されより、より精度高く判定できると考えられた。

#### 4. 結語

今後、敗血症、髄膜炎や壊死性筋膜炎の原因菌となる *Vibrio vulnificus*、*Streptococcus pyogenes* などの細菌の検出にも LAMP 法が応用可能と考えられるが、各実験段階及び判定において更なる改善が必要である。

#### 参考文献

- 1) 渡辺治雄. 1990. 病原因子と DNA 診断—総論—. 臨床と微生物. 17:5-8.
- 2) Tsugunori Notomi, Hiroto Okayama, Harumi Masubuchi, et al. 2000. Loop-mediated isothermal amplification of DNA. Nucleic Acid Research. 28: E63.
- 3) Kazunari Kamachi, Hiromi Toyoizumi-Ajisaka, Kohei Toda, et al. 2006. Development and Evaluation of a Loop-Mediated Isothermal Amplification Method for Rapid Diagnosis of *Bordetella pertussis* Infection. Journal of Clinical Microbiology. 44: 1899-1902.
- 4) Haru Kato, Toshiyuki Yokoyama, Hideaki Kato, et al. 2005. Rapid and Simple Method for Detecting the Toxin B Gene of *Clostridium difficile* in Stool Specimens by Loop-Mediated Isothermal Amplification. Journal of Clinical Microbiology. 43:6108-6112.
- 5) 天羽清子、塩見正司. 2006. 百日咳、マイコプラズマ感染症、A 群溶血レンサ球菌咽頭炎. 臨床と微生物. 33:719-721.
- 6) 加藤はる. 2006. *Clostridium difficile* の toxin B 検出法. 検査と技術. 34:862-964.
- 7) 佐藤洋子、加藤はる、小岩井健司ら. 2004. がんセンターにおける toxin A 陰性 toxin B 陽性 *Clostridium difficile* による下痢症の院内集団発生. 感染症学雑誌. 78:312-319.

(2008.3.24 受付)

# 地域文化・経済研究部門

Research Division of REGIONAL CULTURE and ECONOMY



# 有明海・諫早湾に関する総合的データベースの構築と 新しい社会的決定システムに関する研究 (3)

## CONSTRUCTION OF DATA-BASE FOR ARIAKE SEA AND ISAHAYA BAY, AND RESEARCH ON NEW SOCIAL DECISION-MAKING SYSTEM (3)

檜澤秀木

Hideki KASHIZAWA

法修 佐賀大学教授 経済学部法政策講座 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

I aim at constructing data-base for Ariake sea and Isahaya reclamation problem in this project. The data-base will contain the articles of local and national newspapers, official documents in the national and local governments, some writings in the trial and records of the Diet.

In 2007, I digitized the relevant 5300 articles from 1952 to 2005 in Saga Sinbun (Saga local newspaper) to PDF files. I researched the relevant articles of Asahi Shinbun (Japanese national newspaper), too.

Moreover, I drew up the chronological table for Ariake sea and Isahaya reclamation problem in this year.

**Key Words :** Ariake sea, Isahaya reclamation, Asahi Shinbun, quantity analysis, gaps of agenda setting

### 1. 今年度の作業

経済学部グループの今年度の作業は、以下の通りである。①1952年から2005年までの佐賀新聞の有明海・諫早湾関連記事をデジタル化し、PDFファイルにする作業を完成させた。②収集した朝日新聞の同記事を整理し、記事の内容を研究した。③西日本新聞記事の検索に着手した。④関連する文献を研究した。⑤国会議事録を研究した。

以上の作業について、若干敷衍して説明する。

まず、佐賀新聞の関連記事についてである。2005年度に同記事の検索を一応、終了していたが、まず、その点検を行った。その結果、1994年以降のウェブ上で検索した記事には、内容的に関係のない記事もヒットしていることがわかった。そのため、再度、佐賀大学図書館所蔵の実物の新聞を調査し、より正確さを期した。

次に、朝日新聞の同記事の収集であるが、これは、前年度に朝日新聞西部本社のご厚意により、関連記事の切り抜きをコピーさせてもらっていた。今年度は、まず、その見出しの書き出しを行った。これは、朝日新聞の記事自体をデータベース化し、ウェブ上で公開することについては朝日新聞社側の同意が得られなかったが、見出しだけであれば可能とのことであったので、その準備のために見出しを書き出したものである。また、いただ

た記事切り抜きの補遺作業は、現在、作業途中である。さらに、後に示すように、朝日新聞記事を基に詳細な年表を作成した。

西日本新聞については、1989年～2005年の記事をネット上で検索しただけである。

以上をもとに、現時点での暫定的な成果を以下に示す。

### 2. 記事の内容

朝日新聞の記事の内容について、印象の域を出ないが、若干述べておく。本研究は、1980年代後半から1990年代前半に大きな環境意識の変化が生じたのではないかと、という仮説を検証することを目的の一つに掲げているが、この時期は、ちょうど諫早湾干拓が最終的に確定する時期でもある。1989年の着工に最も近接しながら、対照的な内容を示している記事を以下に示す。

1985年8月8日 佐賀版 (見出し)

経済活況に期待

諫早湾防災干拓事業規模の収拾案  
漁民の失業や補償の不安も

政治決着の色濃く

投資効果を犠牲

防災機能ぎりぎり

これは、事業規模が最終的に3,550haとなった経緯を説明した記事であるが、この見出しにみられるように、自然環境への言及は全くなく、農水省・長崎県と福岡・佐賀・熊本県漁連との政治決着という内容しかない。しかも、三県漁連の反対理由について、「湾外三県漁連、とくに佐賀県有明海漁連は当初から『絶対反対』の態度だった。諫早湾の潟は藻場とほぼ同じ働きをしており、これがなくなると稚魚や稚貝がふ化し、育たなくなるとの理由からだ。防災重視の今の事業になってからも、潟を少しでも多く残したいとの希望が強く、58年8月、当時の金子農水大臣が『3,000ha』を請け合ったこともあって、3,000haにこだわり続けた。」と述べており、自然保護どころか、漁民を突き放した印象を受ける。

次に、上記記事にもっとも近接した対照的な記事を挙げる。

**1989年11月7日 西部本社版（見出し）**  
**「干潟の紅葉」消える運命**  
**諫早湾のハマツナ**

これは、諫早湾奥に群生し、秋に紅葉する塩生植物「ハマツナ」（これは、その後の記事を見ると、正しくは「シチメンソウ」であったようである）を惜しむコラム記事である。

この後、1989年11月に起工式が行われ、反対の市民運動が活発化してくる。そうすると、その運動を紹介する形で、徐々に自然保護の観点から批判的な記事が増えてくる。確認できるところでは、最初の批判的な記事は、天声人語である。

**1991年11月18日 天声人語**  
**諫早湾の干拓事業**

「…(略)… 一部市民や環境保護団体の反対運動は続いている。栄養に富んだ干潟が消えたら、ムツゴロウやワラスボなどの珍魚、よそでは減る一方の貝やカニ類はどうなるのか。120種もの渡り鳥たちはどこに行くのか。」

以上から、やはりまだ印象の域は出ないが、80年代後半から90年代にかけて大きな環境意識の変化が生じたように思われる。この点については、80年代後半から90年代初めにかけての他紙の記事も調査し、検証しなければならない。

**3. 年表の作成**

朝日新聞やその他の文献を基に年表を作成したので、暫定的なものであるが、それを以下に示す。なお、括弧内は新聞名と掲載日（西暦末尾2桁+月日）もしくは下記の参考文献・ウェブサイトと参照日（西暦末尾2桁+

月日）を示している。なお、この年表は現時点での暫定的なものであることを付言しておく。

事項
1952. 10. 30 頃 長崎県が諫早湾干拓構想を発表。北高小長井村から南高山田村に堤防を築造、水田2万町歩、2万農家入植、工費160億円。これで県内の食糧不足はすべて解消する見通し。（朝日:521030）
1952. 11. 25 頃 長崎県西岡知事が農林省と交渉。農林省は乗り気で、食糧増産5カ年計画に優先的に採用し、直ちに予備調査に着手。（朝日:521125）
1953 長崎干拓期生同盟会（推進）発足。（G71-1:200）
1957. 7 諫早大水害、死者539名。
1960 諫早湾内12漁協、長崎干拓期生同盟会を脱退。（G71-1:200）
1964 長崎干拓全体実施計画完成および認可（諫早湾口締切、締切面積10,000ha）。（G71-1:200）
1965. 6 有明海総合開発計画の骨格がまとまる。島原半島と三角半島間に堤防を築き、大規模干拓を行う計画。（朝日:650612）
1965. 2 諫早湾内12漁協「長崎干拓絶対反対実行委員会」結成。（G71-1:200）
1967. 9 有明海総合開発計画に否定的雰囲気。（朝日:670926）
1968. 6. 21 運輸相、埋め立て認可。（朝日:680622）
1968. 6. 22 建設相、埋め立て認可。（朝日:680623）
1969. 2 湾内漁民、強硬に反対。（朝日:690221）
1969 米の生産調整始まる。（G71-1:200）
1969. 3 有明海総合開発計画は、「総合調査報告書」をまとめ、中止。（G71-5:48）
1969. 9. 18 県が長崎干拓計画を手直し。米作りから多目的へ。（朝日:690919）
1970. 12. 1 水資源の確保等を目的とする長崎南部総合開発計画として再出発。（朝日:701202）
1973. 10 「諫早の自然を守る会」発足。（G71-3:218）（朝日:731015）
1973. 12. 13 漁業補償交渉行き詰まり「南総計画」休止。（朝日:731214）
1975. 1 「南総計画」再開。（G71-1:200）
1976. 9 湾内12漁協と長崎県が、補償問題で大筋合意し、仮調印。（G71-1:200）

1977.2 佐賀・熊本・福岡県漁連が「南総反対期生会」を結成。(G71-1:200)	1987.1.21 小長井漁協が漁業権放棄を否決。(朝日:870120)
1979.7 佐賀県が独自にアセスを実施。「湾外漁業への影響が大きい」との結論。(G71-4)	1987.1.31 小長井漁協が漁業権放棄を決議。(朝日:870201)
1980.3 長崎・佐賀・熊本・福岡県と九州農政局が5者委員会を設置。締め切り規模を検討。(G71-1:200)	1987.3.19 湾内12漁協が補償契約に調印。(朝日:870320)
1980.6 日本が、ラムサール条約に加盟。(G71-8:080330)	1987.7.20 湾外11漁協が補償契約に調印。(朝日:870721)
1981.12 5者委員会が規模縮小で合意。(G71-1:200)	1987.9.26 福岡・佐賀・熊本県漁連が、補償協定に調印。(朝日:870926)
1982.11 金子農水相が諫早湾外・県外関係者の同意が得られず、「南総開発」打ち切りを示唆。(G71-1:200)	1988.3 環境庁が、環境影響評価に干潟再生策などの意見書を提出。(朝日:970519)
1983.5.17 金子農水相が、参議院農林水産委員会で、防災が主で干拓は副産物と答弁。(G71-6:070421)	1988.3.9 建設・運輸省が、干拓を認可。(朝日:880310)
1983.5.30 農水省内に「諫早湾防災対策検討委員会」を設置。(G71-2:23, G71-5:50)	1989.11.8 工事着工。(朝日:891109)
1983.11 「諫早湾防災対策検討委員会」が中間報告書をまとめる。締め切り面積について3案を併記し、3,900ha案と3,300ha案では不十分とする。(G71-2:23)	1991.1 建設省の要求により北部排水門を追加。再度、アセスを再度実施へ。(朝日:910116)
1983.11 農水省は締め切り面積を3,900haと決定。(朝日:831120)	1993.1.21 小長井漁協青年部会がタイラギ不漁を理由に実力阻止行動。(朝日:930121)
1984.8.28 閣議アセス制定。(G71-8:060706)	1993 諫早湾内のタイラギ休漁。(G71-1:200)
1984.12.10 福岡・佐賀・熊本漁連が締め切りを3,000haとするよう要求。地元選出国議員に調停を依頼。(朝日:841210)	1996.7.16 干拓事業差し止めを求める「自然の権利訴訟」提訴。(朝日:960716)
1985.4 筑後大堰、運用開始。(G71-1:200)	1996.12 九州地方建設局が、調整池の水質対策を求める。(朝日:961206)
1985.8 締め切りを3,550haとする調停案がまとまる。(朝日:850807)	1996.12 森山町に出向中の農水省職員が、ニフティサーブ掲示板に地元民をかたり書き込み。(朝日:961215)
1985.8.31 諫早で高潮被害。(朝日:860214)	1997.4.14 潮受け堤防締め切り。(朝日:970414)
1985.10.3 佐賀・熊本・福岡県漁連が締め切り面積3,550haで合意・調印。(朝日:851004)	1997.4.16 「諫早干潟緊急救済本部」発足。(朝日:970416)
1986.9.5~10.2 環境影響評価書の縦覧。(朝日:860904)	1997.4.27 約200人のボランティアがムツゴロウ救出活動を行う。(朝日:970428)
1986.9.8 湾内12漁協が漁業補償協定に調印。(朝日:860908)	1997.7 集中豪雨により諫早湾岸の低平地湛水被害。
1986.10.7 野鳥の会県支部が意見書提出。アセス縦覧は計68名。(朝日:861008)	1997.11 「自然の権利訴訟」第6回公判で、田村亮干拓事務所長が、市街地への防災効果はないことを証言。(朝日:010902) (G71-7:82)
	1998.8 小長井沖で諫早湾内では初の赤潮発生。
	1999.7 集中豪雨により、床上浸水234棟、床下浸水427棟。
	1999.9 小長井漁民が、アサリの大量死に抗議行動。
	1999.11 事業計画変更(完成2006年に、総工事費2490億円に)。

2000. 3. 18 佐賀県大浦漁協漁民が実力闘争を開始。(G71-3:244)
2000. 12 有明海でノリの色落ちが始まり、空前の大凶作に。
2000. 1. 1, 13 有明海漁民が大規模抗議行動。
2001. 2. 26 ノリ第三者委員会設置。
2001. 3. 9 長崎県国弘参事監が県議会で、市街地への洪水防止効果がないことを認める。(G71-7:070301)
2001. 8. 19 「有明海・漁民市民ネットワーク」発足。
2001. 8. 24 事業再評価第三者委員会、「事業の環境に配慮した見直し」を答申。
2001. 10. 30 農水省、干拓面積を半減させた見直し案を発表。
2001. 12. 19 ノリ第三者委員会、短期・中期・長期の開門調査を提言。
2002. 3. 10 干拓事業の中止を求める大規模会場デモ。
2002. 3. 27 農水省、見直し案の費用対効果は0.83と発表。
2002. 4. 24～5. 20 短期開門調査実施。
2002. 7. 29～8. 12 漁民による工事阻止行動。
2002. 11. 22 有明海特措法、成立。
2002. 11. 26 「よみがえれ！有明海訴訟」佐賀地裁に提訴。
2003. 3. 27 ノリ第三者委員会、最終報告。
2003. 3. 28 農水省は中長期開門調査検討委員会を設置。(朝日:)委員はすべて官僚OB。(G71-6:(質問主意書平成15年第53号):080325)
2003. 4. 16 漁民側、公害等調整委員会に原因裁定を申請。
2003. 12. 25 中長期開門調査検討委員会、実施には否定的な報告書を提出。
2004. 3. 30 漁民有志と市民約500人が、東京で中長期開門調査の実施を求めて「人間の鎖」行動。
2004. 4. 30 中長期開門調査を求める海上デモ。
2004. 5. 11 農水相、中長期開門調査の見送りを表明。
2004. 5. 24 福岡・佐賀・熊本漁連が中長期開門調査実施を求める総決起集会を開催。
2004. 8. 26 佐賀地裁、工事中止を命じる仮処分決定。
2005. 3 「自然の権利訴訟」地裁で敗訴。

2005. 5. 16 福岡高裁、佐賀地裁仮処分を取り消し。
2005. 8. 30 公調委、専門委員会報告をくつがえし、因果関係を特定できない旨の裁定。
2005. 9. 30 最高裁、福岡高裁の決定を承認。

#### ■ 参考文献

有明海漁民・市民ネットワーク他編『市民による諫早干拓「時のアクセス」2006』2006年  
 山下弘文『日本の湿地保護運動の足跡』信山社 1994年  
 山下弘文『諫早に死す』南方新社 2001年  
 三輪節生『ムツゴロウの遺言』石風社 2001年  
 山下弘文『諫早湾 ムツゴロウ騒動記』南方新社 1998年

#### ■ 参考ウェブサイト

国会会議録検索システム <http://kokkai.ndl.go.jp/>  
 長崎県議会 <http://www.pref.nagasaki.jp/gikai/>  
 環境省 <http://www.env.go.jp>

## 4. まとめ

以上のデータおよび検討から、さしあたり以下のことが言える。

第一に、諫早湾干拓は、社会的に環境意識が高まる以前に「決定」され、それが高まりつつある時期に工事が「実施」され、それが大きく高まった時期に「完成」されたということである。計画「決定」時期に、漁民の補償問題は大きな問題となっていたが、環境保護の観点からの記事・論調は見受けられない。また、実際の市民感覚からも自然保護はほとんど考えられていなかったことが伺える。例えば、諫早湾干拓事業のアクセスは、もちろんアクセス法ではなく、閣議アクセスでもなく、長崎県のアクセス要綱に則って行われたが、その縦覧者も意見書提出もきわめて少数であった。ちなみに事業完成期の1997年は、環境アクセス法が成立した年であり、さらには、当時、大きな社会問題となっていた産業廃棄物問題に対応すべく、廃棄物処理法が大改正された年である。

第二に、朝日新聞の記事に関して言えば、環境保護の観点からの批判的な記事は、環境保護の社会運動を紹介する記事やコラム記事から始まり、その蓄積の上に、通常の事件記事に批判的な記載が目立つようになっている。このことは、社会意識の転換は、社会運動がきっかけとなっていることを示唆する。言い換えれば、意識構造の変化に伴って起こされた社会運動が、新聞の論調の変化を導くと考えられる。

(2008. 3. 31受付)

# 日韓両国の干潟生態系における食用水族資源の 再生産力と捕獲量等に関する経時的・ 計量的比較研究 4: 佐賀県大浦浜における カキ採捕活動に関する再考

A COMPARATIVE STUDY ON EDIBLE MARINE RESOURCES IN TIDAL FLATS  
BETWEEN JAPAN AND KOREA 4: REEXAMINATION ON OYSTER-GATHERING  
ACTIVITIES AT OOURAHAMA, SAGA PREFECTURE

武田 淳<sup>1</sup>・李 應喆<sup>2</sup>

Jun TAKEDA and Eung-Cheol LEE

<sup>1</sup>理博 佐賀大学教授 生物生産学科地域資源学研究室 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

<sup>2</sup>農博 ソウル長神大学講師 生態人類学研究室 (〒464-742 京機道廣州市京安洞219-1)

A good catch of various kinds of marine resources has endowed the people with the self-sufficiency of the life for the people living along and/or near tidal flats since ancient times. Such ecosystems with coral reef or tidal flats have also afforded women, children and even the aged chances to catch species diversity all year round, which has given them daily-basis self-sufficient livelihoods and affluent marine resources.

We studied the people engaged in the activity in winter from November to February living along the Bay of Imariwan at Ourahama, Saga Prefecture, in order to elucidate the ecological anthropological significance observed in oyster-gathering activities and the sustainable utilization and management of marine resources. We focused on the spatiotemporal structure of oyster-gathering activities of the people in tidal flat ecosystem. At the same time, we examined the relationship among age, sex, and career (years engaged in gathering), that between age and the time spent in gleaning activities, that between age and the gathered amount for 30 minutes in weight, the day or other nature-oriented backgrounds, and so on in order to analyze the interrelationship among gathering skills, technologies, aging, efficiencies found in oyster-gleaning activities.

This study reexamines and reconsiders data obtained through questionnaires and direct observation methods in 2001 and 2002 as viewed from ecological anthropology.

**Key Words :** *oyster-gathering, tidal flat ecosystem, ecological anthropology, subsistence activities, sustainable management of edible marine resources*

## 1. はじめに

佐賀県伊万里湾の肥前町大浦浜の前方には、まるで箱庭のようなおだやかな内海の美しい48の島々からなる「いろは島」が広がっている(図-1)。海拔50~200mの起伏のゆるやかな山地が、海に沈水してできたリアス式海岸の湾奥部にそびえるために、集落の後背地にある傾斜部は日本棚田百選にも選ばれたほどの見事な棚田が発達している。日本の干潟でカキを採捕するところは有明海も含めても数少ない。さらにリアス式海岸がおりなす

干潟生態系を巧みに利用して、カキの採捕活動が集中的にかつ集団的に展開しているところは希少である。

本稿では現地調査に基づいて、干潟生態系における食用水族資源の一つであるカキの採捕活動に焦点を当てて、時間・空間構造および性差・年齢差とその内容についてこれまで収集したデータを吟味・分析・考察し、今後の干潟資源の有用な持続的利用と維持管理の可能性と学術的意義を模索しながら、有明海を含む干潟研究のための基礎データを供したい。

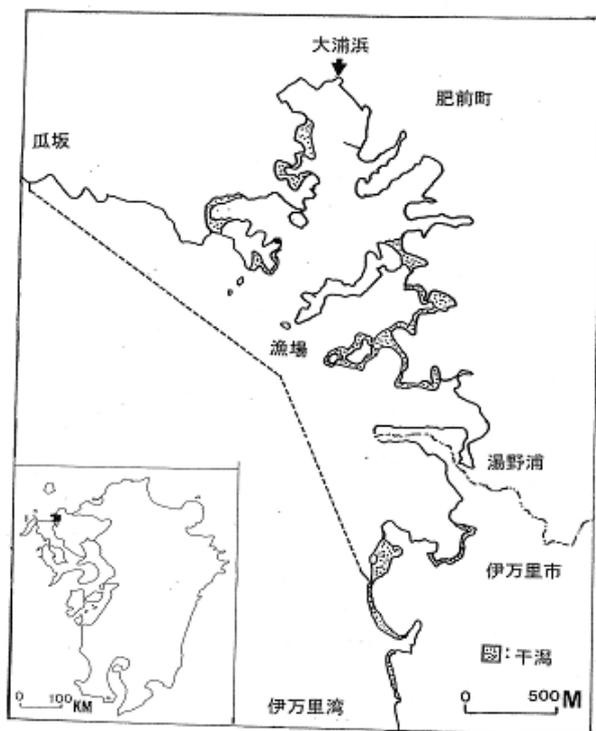


図1. 調査位置図

## 2. 調査地の背景と概要

「いろは島」の地名は、その昔、弘法大師がその眺めのあまりある素晴らしさに筆を投げて、しばし見とれたということに由来する。佐賀県東松浦郡肥前町は、波静かな箱庭のような内海と男性的な玄界灘の外海に臨むおだやかな丘陵地帯の半島に位置する。佐賀県の北西部、東松浦郡の南西端にあり、東は唐津市に、西は玄界灘（日比水道）を隔てて長崎県福島と対峙し、北は玄海町に、南は伊万里市に接している。東端は東経129度55分（切木の楠谷）、西端は東経129度46分（向島の牟田）、南端は北緯33度23分（湯の浦の角口）、西端は北緯33度29分（向島の北目）に位置し、西部海岸線は伊万里湾に、更に北上して玄界灘に伸び、また北東部は仮屋湾におよび、西部海岸にかけて半島を形成している。東南部の唐津・伊万里両市に接する一部の丘陵地域を除いては肥前町の周囲はほとんど海岸線で囲まれていて、住民の生活や産業に与える海況の影響は大きい。肥前町は棚田に代表されるように、大浦浜においても丘陵地の地形を生かした棚田が発達している。栽培面積が限られているため、棚田の米も野菜も、そのほとんどは自家消費用にあてられる。

肥前町は、昭和33年（1958年）1月1日、入野村と切木村の一部との合併により成立し、面積46.9km<sup>2</sup>の地に10,009人（平成7年）が住んでいる。その面積は佐賀県内の49市町村のなかでは第7位で広い方に属する。しかし全体のほぼ3分の1は山林であり、困難な地形にもかかわらず比較的畑地が多く、水田も開かれている。人

口の推移を見ると昭和33年の合併当時の総人口は15,292人であったが、昭和32年の大鶴鉱業所の閉鎖に伴い急激な人口減少がはじまり、高度経済成長期には雇用の場を求めた人びとや若年層の離町により、人口は減少し続け、昭和50年には11,093人となった。その後、世帯数には大きな変化は見られないが、わずかな減少傾向になっていて、核家族化が進行している。

調査地の佐賀県東松浦郡肥前町大浦浜は、1997年現在、人口302人で世帯数は61戸である。

玄界灘沿岸に接する肥前町の気温は、暖流の対馬海流の影響を受けて年間平均気温は15～16度、平均湿度は73～75%で、佐賀県内の他の地域に比べてやや温暖である。海流性気候のため年間最高温度は34度、最低温度も零下になることもなく、平均気温は15度である。また無霜期間と場所は他の地域より長く、かつ広いが、積雪は少ない。しかし年間降雨量は、佐賀県の他の地域と比べて、降雨回数、降雨量ともに特に少なく、年間1,647.5mmであり、7月、8月と10月は年間で一番降雨量が多いものの、それでも他地域と比較すると極端に少ない。1月、2月、11月と12月は特に少なく、8月と10月がこれに次ぎ、7月と8月に稲作の灌漑用水のもっとも必要な時に降水量が少ないために干害に遭遇することが多い。そのため最近、上場開発事業の一環として多くの大型貯水池が造成された。また玄界灘に面しているため、年間を通じて強い北西風が作物におよぼす被害も多く、畑と果樹園に小規模な防風林を設けて風害を防止している<sup>1)</sup>。

一方、海に面した入江の多くでは、新鮮な魚介類が豊富で古来、漁業をさかんにしてきた。カキの採捕のほかにはイワシ、エソ、ブリ、マダイ、エビ、イカ、ヒラメ、コチ、ウニ、ナマコなどを中心とした底引き網、巻き網漁やイカ漁などが展開されてきた。主な漁場は、いろは島周辺や玄界灘（向島や馬渡島周辺）である。また、多くの住民たちは自家消費を含み、なんらかの形でいろは島周辺および干潟における貝類や海藻など海産物の漁撈・採捕活動にかかわっている。

この集落では、漁業を主な生業として行うかたわら、季節に応じて農業も営む、いわば半農半漁に近い<sup>2)</sup>。

## 3. 調査方法および項目

大浦浜の干潟におけるカキの採捕活動（カキの採捕、カキ打ち、袋詰めと冷蔵倉庫への保管までのすべての過程を含む）は、家族単位で行われている。そのカキの採捕活動は採捕から商品化の段階、すなわち作業終了までには以下のように大きく4つの流れがある。

まず第1段階であるカキの採捕（以下「カキの採捕」）は、干潟でカキを殻ごと拾ったり、岩石に付着しているカキをはがしとる活動。

第2段階は、採捕したカキを集落前の漁港の海上に建て

られたカギ小屋（以下「小屋」）でカギ殻から身を剥ぐ作業で、カギ打ち（以下「カギ打ち」）と呼んでいる活動。

第3段階はカギ殻から剥いだカギの身を村の中心にあるカギの加工所でビニール袋に入れるまでの作業を袋詰め（以下「袋詰め」）と呼ぶ活動。

最後の第4段階は袋詰めしたカギを箱につめて冷蔵倉庫に保管する活動。

カギの採捕活動を行なっている調査対象者に、それぞれの活動において個人の時間・空間活動について、個人単位で直接観察法、聞き取りによる調査を行った。またカギの採捕量、調査対象者の年齢と経験年数、販売方法などについては被調査者から直接聞き取りも行った。

調査期間は2001年1月25日～2月6日まで予備調査、2月8～14日までカギの採捕活動の継続調査とさらに2月23～27日までに30分間あたりのカギ打ちに関する現地調査を行なった。調査期間中に被調査人数は、重複する者もいるが、カギの採捕が5日間で延べ88名、カギ打ちが3日間で延べ161名、袋詰めは3日間で延べ158名におよんだ。

また個人のカギ打ちの効率を検討するために、30分間あたりのカギ打ちの量と数について、5日間で延べ26名を対象に計量した。

なお統計処理については、平均値の比較には分散分析を用い、危険率5%を有意水準とした。これら一連の分析は、統計プログラムパッケージ StatView 4.0日本語版を用いて行なった。

#### 4. カギの採捕活動

大浦浜の干潟におけるカギの採捕活動は、農閑期ともいえる11月から始まり、翌年2月までに家族単位で行われている。そのカギの採捕活動は、干潟生態系に応じて主に夜間に行われることと、採捕の段階から商品化までを含む作業を行なうのが大きな特徴になる。

カギの採捕は潮がもっとも引く大潮の時に集中的に行われることが多く、漁業組合員であれば、何人でカギの採捕を行なってもかまわない。そのため家族が多い世帯では、月に15日～20日間に1か月分のカギを捕ったあと網袋などに入れて海中に生かしておき、後日に小屋でカギと袋詰めだけを行なう世帯もみられる。

この集落がカギを採捕したのは、30年～40年前からといわれている。昔は女性だけがカギの採捕活動を行っていた。主に自家消費のための採捕が多く、販売する場合は個人でカギ殻ごと売るかカギの身を剥いでビニール袋に入れたものを大浦浜周辺の高串で毎週日曜日に開かれる朝市や唐津の市場に行って販売したのが、はじめといわれる。

現在のように組合員が共同で「いろは島天然カギ」というブランド名で販売するようになったのは、平成元年

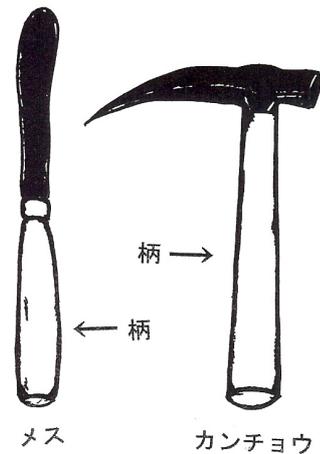


図2. 採捕道具

からで、冬期の収入源として重要な生業活動の一つになっている。

カギの採捕は、家族単位で行なうために若い夫婦や70歳代の老夫婦、父子、親子3人、親と息子夫婦4人などの組み合わせの他に、女性一人が単独で行なう場合もある。カギの採捕はカギの採捕場である潮が引いた干潟まで個人所有の小船で行って自分が漁況を心得た場所に小船を止めてから始まる。カギの採捕は闇夜に行なうため前頭部に懐中電灯をつけて移動しながらカギを捕る。普通一箇所にて世帯だけで採捕するが、親しい仲間とは一緒の場合もある。それぞれ毎年行く場所が同じ伊万里湾周辺であるのは、カギの生息地域、生息状況・環境と干潟生態系をよく認識し、認知しているためであると考えられる。

カギの採捕道具は、カギの採捕にカンチョウだけを使用するが、カギ打ちの場合にはカンチョウ（有明海周辺では「カギ打ち棒」、韓国・西海岸周辺で「チョセ」、韓国・南海岸周辺で「チョシ」と呼ばれる<sup>3)</sup>）とメス（カギの身を剥ぐ時に使用する小さい刃物）が使われる（図-2）。もっとも重要な小船をはじめ、懐中電灯、網かご、真珠の核ぬきかご、長靴、手袋などが加わる。さらにカギ打ちのさいには、ゴムバケツ、カギの鮮度を10℃に保つためと衛生管理上のための氷なども不可欠である。

他に袋詰めの際には組合で作った「いろは島天然カギ」と印刷されたビニール袋、賞味期限の日付のハンコ、カギの量を測るコップ、海水を入れるコップ、氷、発泡スチロール製の箱などがある。

カンチョウは岩に付着しているカギを叩いて捕るのに使用する。またカギ打ちのさいにカギ殻を開ける時にカンチョウを使って、身を剥ぐ時にメス状の刃を使用する。

捕ったカキは、集落前の港の海上に建てた小屋でカキ殻から身を剥く、いわゆるカキ打ち作業を行う。出荷する組合員はカキの新鮮さを保つためにカキ打ちは可能な限り正午までに終了するように心がける。袋詰めは、個人差はあるものの、なるべく16時までには袋詰め作業を終える。

カキ打ちは、干潟にカキの採捕に行った家族を除き、家に残った家族のメンバー（主に祖母であることが多い）が先に小屋に出て来て焚き火を起こしてからカキ打ちを始める世帯もある。カキの採捕に行った人々が自宅に戻り着替えてからカキ打ちに合流し、家族で焚き火を囲んでカキ打ちを行う。カキ打ちの途中に婦人たちは食事の支度やら家事のために一時カキ打ちを中断することもある。食事と交代で行く場合が多いが、一緒のところもあるし、カキの採捕を終えて一端、家に戻って着替えと食事などを済ましてからカキ打ちを始めるところもある。最も忙しい11月半ばから12月には食事する暇もないことも多々ある。

袋詰めは、集落の中央にあるカキの加工所で行われる。加工所は2箇所あってそれぞれ組合員は決められた場所で、身を剥いだカキを海水で洗ってから、漁業組合で作った「いろは島生カキ」という名前がはいったビニール袋にカキ80～90g（カキの身だけで約9～11個）と海水をまぜて約220～240gにする。

袋詰めにしたカキは、40個ずつ箱に入れて冷蔵倉庫に保管する。1日5箱（1箱カキの身だけで約3.2kg）ほどの袋詰めを行い、毎日午前10時前後に漁業組合からその日のカキ箱の数を通知される。およそ1日5箱を用意するため、毎日約16kgのカキが出荷されることになる。しかし、カキの旬（シュン）である11月と12月には1日10箱の場合や組合からの連絡次第で無制限までと箱の出荷が許される日も何日かある。ちなみに2001年11月カキの採捕活動を始めた頃には無制限に出荷してよい日が多く、平均1日10箱出荷していた。

カキの集荷は、組合と契約している魚市場が月曜日から金曜日までの毎日、そして日曜日の夕方に冷蔵倉庫に保管してあるカキを取りに来る。カキの価格は、1袋で約110～150円（消費者の手元では約200～300円）で、時期によって価格が異なるが、もっとも高い時期は12月で約150円、もっとも安い時期は2月で約110円になる。

## 5. 調査結果

### (1) 調査対象者の諸属性および年齢と経験年数

カキの採捕活動は、家族単位で行うが、カキの採捕から商品化までの作業の過程で採捕活動するメンバーが入れ替わることもあった。

カキの採捕に関しては延べ88名（男性48名：54.5%、女性40名：45.4%）、カキ打ちが延べ161名（男性81名：

表－1 調査対象者の諸属性

		カキの採捕 人数(%)	カキ打ち 人数(%)	袋詰め 人数(%)
性別	男性	48 (54.5)	81 (50.3)	78 (49.3)
	女性	40 (45.4)	80 (49.6)	80 (50.6)
年齢	30～40代	23 (26.1)	50 (31.0)	69 (43.6)
	50代	31 (35.2)	49 (30.4)	36 (22.7)
	60代以上	34 (38.6)	62 (38.5)	53 (33.5)
経験年数	1～15年	26 (29.5)	49 (30.4)	66 (41.8)
	16～24年	26 (29.5)	61 (37.9)	64 (40.5)
	25年以上	36 (40.9)	51 (31.7)	28 (17.7)
全体		88 (100.0)	161 (100.0)	158 (100.0)

50.3%、女性80名：49.6%）、袋詰めが延べ158名（男性78名：49.3%、女性80名：50.6%）が調査対象になった（表－1）。

いずれの作業においても性差（男女比）に大きな違いは見られなかった。家族単位で行なうカキの採捕活動は多くの世帯が夫婦で採捕活動を行なうためである。

被調査者を年代別に見ると、カキの採捕の平均年齢は53.7歳（男性：平均53.4歳、女性：平均54.1歳）であり、年代別では60歳代以上が34名（38.2%）でもっとも多く、次に50歳代が31名（35.2%）、それから30～40歳代が23名（26.1%）になった。

カキ打ちの平均年齢は53.6歳（男性：平均52.7歳、女性：平均54.5歳）で、年代別では60歳代以上が62名（38.5%）でもっとも多く、次に30～40歳代が50名（31.0%）で、それから50歳代が49名（30.4%）でもっとも少なかった。

袋詰め平均年齢は50.1歳（男性：平均49.0歳、女性：平均51.1歳）であった。年代別では30～40歳代が69名（43.6%）でもっとも多く、次いで60歳代が36名（22.7%）で、それから50歳代が36名（33.5%）でもっとも少なかった。カキの採捕段階から袋詰め行程に進むにつれ、平均年齢が若くなる傾向が見られた。

### (2) カキの採捕活動の空間的構造

カキの採捕場は伊万里湾周辺の沿岸海域に限られるが、カキの採捕活動の地理的空間は大きくカキの採捕場、カキ打ち場、カキの加工所、そしてカキを保管する冷蔵倉庫に分けられる。カキの採捕場、袋詰めをする場である加工所と冷蔵倉庫は組合員が共同管理を行うのに対して、カキ打ちは個人所有の海上の小屋で行なう。カキ打ちを行なう海上の小屋に関しては組合に使用料を払って各個人がいかだや小屋を建てることのできる。使用料は、いかだや小屋の面積に応じて異なるが、年間1～3万円になる。

カキの採捕場の空間的な配置は、図－1に示されるように「いろは島」周辺でそれほど広くはない。その沿岸海域を中心にした干潟において、組合であらかじめ決めた採捕期間内で潮が引いた干潮の時にあわせて採捕活動を行う。採捕場まで小船で行って潮が引いた干潟に小船をとめてからカキの採捕を始める。一般的に1日1カ所

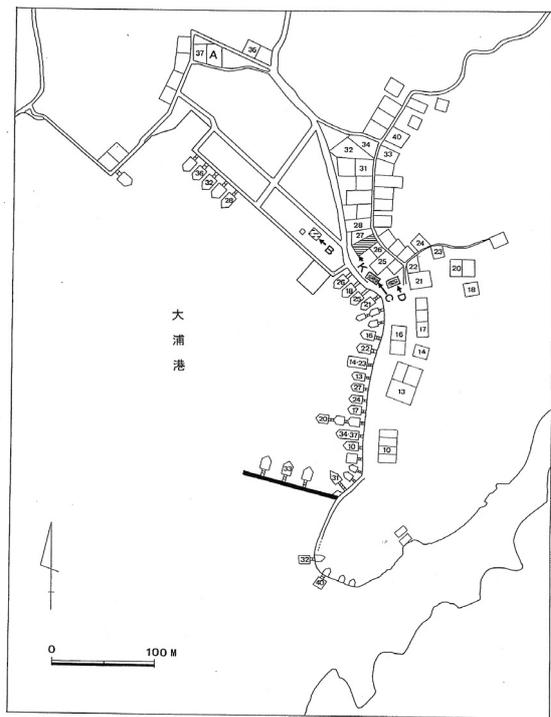


図3. カキの採捕活動の空間

A: 公民館、B: 冷蔵倉庫  
 CとD: カキの加工所、K: 漁業組合  
 □: 住宅、◇: 海上の小屋

で行なうことが多く、船の移動もそれほど行わない。小船で採捕場に出かける前に海上の自分の小屋で着替えたり、焚き火で身体を少し温めてから採捕場に行く人もいるし、自宅から小船に直行して灯りを灯しながら闇の海に船を出す人もいる。

採捕したカキは全部海上の小屋に持ちかえる場合もあるが、採捕に出かけた家族数も多くカキの量が多い時には、カキを網袋に入れたまま沿岸の干潟に生かしておくこともある。カキを入れた袋をおく場所も、各自好きな場所があり、小屋に近い所におく人もおれば、少し離れた場所におく人もいる。

カキ打ちはほとんどの世帯が村の前方の海上に建てられた小屋で行なうのが普通であるが、世帯番号14、17、23の3世帯だけは自宅の隣にある陸上の小屋で行った

(図-3)。23番は自宅から少し離れた14番の小屋と一緒にカキ打ちをした。また普通は1世帯ずつ自分の海上の小屋でカキ打ちを行なうが、時折カキの採捕場にも一緒に行くことが多かった34番と37番は1つの海上の小屋で一緒に行った。

カキの採捕活動のなかでカキの採捕とカキ打ちは世帯単位での行動が多かったのに対して、最後の袋詰めだけは組合員全員が図-3に示されるCとDのカキの加工所に集まって行った。

夜中のカキの採捕からカキ打ちまでの長い活動で疲れ果てた組合員の顔色は袋詰めの段階になって、一気に賑

やかで生彩にあふれる。その様子は漁村の採捕文化に共通するものである<sup>4)</sup>。またカキの加工所は隣家の人々とその日はじめて顔を合わせ、挨拶を交わす場にもなる。袋詰めに終えた袋は、図-3に示される組合の冷蔵倉庫(B)に保管される。そのさい当日納入する伝票紙に世帯の女性の名前を書くのは、カキの採捕を始めたのが村の婦人会であったことに由来するといわれる。もっともカキの加工所や冷蔵倉庫の当番などは世帯の男性の名前が書かれる。

### (3) カキの採捕活動の時間的構造

伊万里湾周辺の干満の差は約2.6~3.3mで有明海や韓国の西海岸と比較すると非常に小さい。カキの採捕活動は潮が引いた干潮時に行なうため、干潟に入る時間は主に潮汐によって決まる。もっとも潮汐は季節によっても異なり、北半球では一般的に旧暦の3月~9月は昼の潮が年間でもっとも引き、10月~2月には夜の潮がよく引く。

カキの採捕は、潮がもっとも引く時期である11月1日から翌年2月末にかけて、主に夜間にカキの採捕を行なう。大浦浜の潮汐は伊万里の波瀬港の潮汐表を利用してのが普通で、2001年2月11日の干潮時間と採捕時間の関係を見ると、波瀬港における干潮は05時38分で、満潮は昼の11時50分にあたる。この日カキの採捕のためにもっとも早く船着き場に見えたのは、02時01分に世帯番号36-AとBである。この世帯は小屋に到着して着替えてから、02時30分ごろに小船でカキの採捕場に向かって闇の海に出ていった。また05時54分に世帯番号31-Aがこの日もっとも遅く海上の小屋にやってきて、05時58分に出港した。そのために最初に港に見えた人と、最後に見えた人の間には3時間53分のひらきがあった。またカキの採捕を終えて海から最初に港に帰って来た人は世帯番号21-Aの夫婦で06時20分に、世帯番号17-Aの夫婦が08時43分に最後に戻って来た。カキの採捕に出かけるために海上の小屋に到着した平均時間は03時50分、海に出ていた平均時間は03時58分であった。海上の小屋に到着した多くの人々は、およそ2分から30分を要して着替えたり、カキの採捕に行っていない家族のメンバーのためにカキ打ちの準備をしてから海に出ていった。カキの採捕時間でもっとも短かったのが世帯番号17-Aの夫婦で1時間35分、もっとも長かったのは世帯番号18-Aの夫婦で4時間30分であった。カキの採捕にかかわり、海に滞留していた平均時間は3時間18分になる。

カキ打ちの時間(表-2)について見ると、2001年2月12日の場合は祝日であるため、カキの採捕を休む世帯が多く、普通であればカキの採捕に行く時間にカキ打ちを始めた。毎週土曜日は組合で決めたカキ打ちの休日になる10日と、11日はカキの採捕だけを行なっている。それは、カキの採捕に出かけなくても、ストック用に網袋に入れて生かしておいたカキだけで十分カキ打ちができる世帯が多いことを意味する。その影響で12日もっとも

表-2 カキ打ちの活動時間 (2001. 2. 12)

世帯番号 <sup>*1</sup>	年齢 (歳)	経験年数 (年)	到着時刻 <sup>*2</sup>	開始時刻 <sup>*3</sup>	終了時刻 <sup>*4</sup>	カキ打ち時間 <sup>*5</sup> (分)
10-a	64	30	5:18	5:20	13:32	492
13-a	72	20	3:37	3:41	7:44	243
13-B	52	20	3:31	3:41	7:44	243
13-b	48	20	3:35	3:41	7:44	243
14-A	52	17	7:28	7:40	11:57	257
14-a	48	17	5:00	5:05	11:57	412
16-B	48	20	4:50	5:00	9:10	250
16-b	41	20	4:50	5:00	9:10	250
17-A	65	32	8:00	8:05	11:40	215
17-a	60	32	8:00	8:05	12:16	251
18-A	67	10	2:44	2:55	10:32	457
18-a	60	10	5:12	5:17	10:32	351
21-A	64	25	7:05	6:30	9:40	190
21-a	59	25	7:05	6:30	9:40	190
21-b	35	10	6:20	6:30	9:35	185
22-a	78	13	4:22	5:10	9:11	241
22-B	40	13	2:10	5:10	9:11	241
22-b	38	13	6:02	6:05	9:11	186
23-B	41	16	7:55	8:00	9:35	95
23-b	34	10	5:35	5:42	9:35	233
24-a	56	3	7:20	7:26	11:11	225
24-b	34	3	8:00	8:05	11:11	186
25-A	56	20	7:15	7:20	11:17	237
25-a	55	20	7:15	7:20	11:17	237
25-B	36	10	7:15	7:40	11:17	217
26-A	58	4	9:33	9:40	11:40	120
26-a	50	20	6:38	6:50	9:10	140
26-B	30	4	9:33	9:40	11:40	120
27-A	64	30	6:58	7:08	10:07	179
27-a	58	30	7:10	7:15	10:07	172
27-B	36	17	8:30	8:33	10:07	94
28-A	70	10	4:15	4:18	11:30	432
28-a	65	10	4:30	4:34	11:30	416
31-A	61	33	5:15	5:17	11:32	375
31-a	58	33	6:10	6:13	11:32	379
32-A	69	33	4:07	4:14	8:00	226
32-a	68	30	4:07	4:14	8:10	236
32-B	49	20	6:14	6:16	7:42	86
32-b	49	20	6:14	6:16	7:42	86
33-A	57	20	5:14	5:19	9:15	236
33-a	58	20	5:14	5:19	9:15	236
34-a	68	20	5:00	5:07	9:58	291
34-B	52	20	8:39	8:42	9:58	76
34-b	53	20	8:39	8:42	9:58	76
36-A	67	23	2:25	2:30	11:35	545
36-B	40	16	4:33	4:35	11:35	420
37-A	67	25	6:50	6:55	10:28	213
37-a	62	25	6:50	6:55	10:28	213
40-A	60	20	3:22	5:00	9:30	270
40-a	58	20	6:32	6:35	9:30	175

\*1: AとBは男性で父子関係 (A: 父、B: 息子)、aとbは女性、Aとaは夫婦、Bとbは母子関係 (a: 母、B: 息子)、Bとbは夫婦、  
 \*2: 到着時刻はカキ打ちを行なうために小屋に着いた時間。  
 \*3: 開始時刻は小屋でカキ打ちを始めた時間。  
 \*4: 終了時刻は小屋でカキ打ちを終えた時間。  
 \*5: カキ打ち時間は到着時間から終了時間までの時間である。  
 なお、カキ打ち時間は16kgのカキの身をむく作業に投入した時間を意味する。

早く小屋に着いたのは世帯番号22-Aで02時10分であったが、05時10分に夫人と一緒にカキ打ちを始めた。カキ打ちがもっとも早かった人は世帯番号36-Aで02時間25分に小屋に着いて02時30分にはカキ打ちを始めた。カキ打ちをもっとも遅く始めたのは世帯番号26-AとBの2人で09時40分、そしてカキ打ちを終えた時間は11時40分であった。カキ打ちがもっとも遅かったのは世帯番号10-aで13時32分であった。10-aの世帯はカキの採捕とカキ打ちを1人で行なうためにいつも出足が遅いことが多い。またカキ打ちの場合はカキの採捕と異なって小屋に出て来る時間帯では、夫が先に出て来る世帯、夫人が先に出て来る世帯、祖母が先に出て来る世帯などばらつきはあるが、カキ打ち全体の平均時間は3時間42分であった。

袋詰めしたカキは冷蔵倉庫に保管する時間が組合で16時までと決まっている。袋詰めは、カキの採捕活動の最終段階で家族全員が出て行なう。また袋詰めは家族全員でカキ打ちを終えてから袋詰め加工所に行く世帯もいれ

ば、家族が多い世帯ではカキ打ちをしながら袋詰めも行なうところもある。12日の袋詰めでもっとも早かった世帯番号13は08時16分に始め、袋詰めを終了したのは09時15分でもっとも早かった。袋詰め作業開始がもっとも遅かったのは世帯番号10で13時14分、袋詰めが終了したのは14時10分であった。世帯番号10は、主にカキの採捕とカキ打ちは女性1人で行なうために他の世帯よりも、袋詰めを始めるのが遅いことが多く、袋詰め過程で息子が加わっている。袋詰め平均時間は54分であった。

カキの採捕、カキ打ち、袋詰めまで行なった世帯が一日16kgのカキの商品化までに要した時間を見てみると、もっとも少ないケースは世帯番号23の夫婦の12時間34分で、もっとも長いのは世帯番号36番の父子で26時間32分であった。世帯ごとの時間の幅が非常に大きく、時間が長い世帯はカキの採捕よりもカキ打ちに投入する時間が長かったことに起因するものと考えられる。また家族数が多い世帯ほどカキ打ちに余裕をもって行なえるのに対して、1人で行なう世帯やカキ打ちが苦手な世帯の場合はカキ打ちを集中的に行なって他の組合員と同じ時間の袋詰めには歩調を合わせるようとする傾向が見られた。世帯ごとの人数は21, 31, 34番で3人で、26番で4人、他のほとんどの世帯で2人であった。ただし世帯番号10の場合、10-Bは袋詰めだけに参加している。

#### (4) 性別とカキの採捕活動時間

性別によるカキの採捕時間を見ると、男性の平均時間は3時間18分、女性の平均時間である3時間20分と差がほとんどなかった。

調査初日の2月8日は0時47分にもっとも早く海に到着し、0時50分にもっとも早く海に出たのは世帯番号28-Aとaの夫婦である。05時54分にもっとも遅く小屋に着いた男性(世帯番号31-A)は、05時58分に出港し、この日は1人でカキの採捕を行なった。また世帯番号28-Aとaの夫婦は、カキの採捕時間をもっとも長く4時間34分を投入している。男性においてカキの採捕時間をもっとも短かったのは世帯番号40-Aの1時間25分で、カキの採捕も1人で行なっている。世帯番号23-aの女性の場合、1時間35分でもっとも早くカキの採捕を行った。このように採捕に投入する時間は、もっとも短い1時間25分から、もっとも長い4時間34分で幅が非常に大きい。

カキ打ちの場合は、カキの採捕と異なって小屋に来る時間帯がかならずしも夫婦、すなわち男女一緒ではないことが多い。女性の場合は子供の世話や家事などのために男性より小屋に来るのは遅いのが普通である。しかし、家事などから開放されている年長者(祖母)たちは1人で小屋に早く出てカキ打ちを行なうことが多い。

カキ打ちの時間では、男性の平均時間は3時間37分に対して、女性の平均時間は3時間48分で、男性の方がやや短い。2月13日のカキ打ちの時間構造を見ると、男性でもっとも早く小屋に着いたのは、世帯番号36-Aで02

時10分であった。カキ打ちは02時15分から始めて12時0分に終了したので、9時間48分間行なっていたことになる。女性では世帯番号13-aの年長者で02時00分に小屋に着いた。カキ打ちは02時10分に始めて03時20分に終了したので、カキ打ちに1時間10分要している。もっとも遅く小屋に着いた世帯番号26-AとBの2の男性は09時33分に終了し、カキ打ちを09時40分に始めて11時40分に終了したので、ちょうど2時間行なっていることになる。世帯番号26-aの場合、06時38分に小屋に着いて、06時50分にカキ打ちを始めて夫婦一緒に終了した。女性でもっとも遅かった世帯番号34-bの場合、08時39分に小屋に着いて、08時42分から作業を始めて09時15分に終了し、カキ打ちに男性も同じく1時間16分投入した。05時00分に小屋に着いた世帯番号34-aは、05時07分から始めて、家族でもっとも遅く09時58分に終了し、カキ打ち時間ももっとも長い4時間51分であった。

カキ打ちの終了時間では、04時42分に小屋に着いて、04時46分から始めた世帯番号32-Aの男性が、06時20分でもっとも早く終了し、カキ打ちに夫人も一緒に1時間34分を要した。また女性では、02時に小屋に着いて02時05分からカキ打ちを始めた世帯番号13-aは03時20分にもっとも早く終了し、カキ打ちに1時間15分かかった。終了時間がもっとも遅かったのは男性の方が先に小屋に出ることが多い世帯番号18-Aで、02時30分にカキ打ちを始め、12時52分に終えていた。05時18分にカキ打ちを始めた世帯番号10-aの女性は13時32分に終了しているのもっとも遅かったことになる。

男性においてカキ打ちをもっとも長く行なったのは、02時30分から始めて12時52分に終了した世帯番号18-Aの10時間22分だった。女性では世帯番号28-aの場合、02時25分から始めて10時50分まで行い、8時間25分を要した。男性でもっとも短く行なったのは、世帯番号34-Aの1時間16分で、08時42分から始めて9時58分に終了した。女性では世帯番号40-bの1時間、08時28分から始めて09時28分に終了した。男女ともカキ打ちのために小屋にやって来る時間帯に多少のずれがあることと女性の方がカキ打ちに投入する時間がやや長い傾向はあるものの、性差による活動時間の違いは統計的に見られなかった。

男性も一緒に行なう袋詰めに関しては、女性よりも手つきが早い男性もいる。しかし、カキの採捕とカキ打ちと異なって共同作業場であるカキ加工所でカキを洗う細かい作業が多いために女性たちの役割が大きい。一方、男性は海水や袋詰めしたカキを入れる箱の運搬などで室内より戸外の作業が主になるために男女の役割分担（性的分業）は多少見られた。袋詰め時間では、男性の平均時間が53分であるのに対して、女性は56分であった。男性でもっとも短く袋詰めを行なったのは世帯番号16-Aの10分であった。女性では世帯番号23-aとbの2人で26分、世帯ごとで26分間を要して袋詰めの作業を終了した。もっとも長く袋詰めしたのは世帯番号18-Aとbの夫婦で、

1時間59分であった。袋詰めについては男女による役割分担が多少見られたことと、平均時間では女性の方がやや長いあいだ作業に従事したが、袋詰めの行程にみられる性差に統計学的な差はなかった。

#### (5) 年齢とカキの採捕活動時間

年齢によるカキの採捕時間は、60歳代（男性：13人、女性：10人）以上が3時間24分でもっとも長く、次ぎに30～40歳代（男性：17人、女性：14人）が3時間19分、そして50歳代（男性：18人、女性：16人）が3時間11分でもっとも短かった。カキ打ち時間では、30～40歳代が3時間15分、50歳代が3時間10分、60歳代以上が4時間30分で、カキ打ちもカキの採捕と同じく60歳代以上がもっとも長く、50歳代がもっとも短かった。カキの採捕時間の経験年数による差を検定したところ、30～40歳代と60歳代以上と50歳代と60歳代以上において統計学的な有意差（ $P < .001$ ）がみられた。

袋詰めの時間では、60歳代以上が1時間2分でもっとも長く、次ぎに50歳代が54分、そして30～40歳代が48分でもっとも短かった。30～40歳代の年齢層がもっとも短いのはカキの採捕やカキ打ちを行なっていない若い人々が袋詰め作業にだけ加わるために、他の年齢層より作業に力が入るからであると考えられる。また袋詰めのさいに年長者は、隣近所の女性たちと談笑しながら作業を行なうことが多いに対して、若い人々は他人とあまり談笑せず、早く袋詰めを終らせたいという意欲が作業を早めることに深く関わっていることになる。

#### (6) 経験年数とカキの採捕活動時間

経験年数によるカキの採捕時間では、1年～15年がもっとも長い3時間39分、次ぎに16～25年が3時間14分、25年以上が3時間3分であった。カキの採捕時間の経験年数による差を見たところ、経験年数が1年～15年と16年～25年では、 $P < .05$ の水準で、また経験年数1年～15年と25年以上では、 $P < .01$ の水準で有意差がみられた。これは、経験年数が短いほどカキの採捕時間が長くなることを意味し、16年～25年と25年以上では統計学的な有意差がみられなかった。

カキ打ち時間については、1年～15年がもっとも長い4時間11分、16年～25年が3時間27分、25年以上が3時間35分であった。経験年数1年～15年と16年～25年では $P < .05$ の水準で統計学的な有意差がみられた。

袋詰めに投入した時間では、経験年数1年～15年がもっとも長い60分、16年～25年が52分、そして25年以上が51分であった。1年～15年と16年～25年は、 $P < .01$ の水準で、また1年～15年と26年以上においても、 $P < .05$ の水準で統計学的な有意差がみられた。

#### (7) カキの採捕活動日と時間

カキの採捕日と時間を見たところ、カキの採捕時間が

もっとも長い2月10日の3時間29分を除いては、日によって採捕に投入する平均時間数が異なる。調査初日の2月8日は3時間28分、9日が3時間18分、11日が3時間16分、12日が2時間24分であった。2月10日と12日では、 $P < 0.001$ の水準で、11日と12日は、 $P < 0.01$ の水準で有意差がみられた。12日と8日は $P < 0.001$ の水準で、12日と9日は、 $P < 0.01$ 水準で有意差がみられた。採捕に投入する平均時間数が日によって違う理由としては、潮汐や天候条件などの海況が考えられる、伊万里湾の潮汐差（干満差）が小さいために潮汐差が大きい大潮の際に集中的に長い時間を投入して採捕を行なう傾向ははっきり見られた。2月14からは小潮になるが、大潮にあたる2月7日～8日からカキの採捕時間を増やしたと考えられるからである。カキ打ちが休みになる土曜日の10日は採捕時間が長いのも大潮に近い潮汐差があったためである。もっとも採捕時間が短い2月14日の場合、2月でカキの採捕活動が終了することと、既に2月分まで十分にカキを捕って生かしている人々も多く、カキの採捕に出かける人々が減ったことにも深くかかわっていると考えられる。

カキ打ち日と時間では、2月12日が4時間4分でもっとも長く、13日が3時間42分、14日が3時間24分であった。カキ打ちもカキの採捕と同様に日が経つにつれて作業時間が短くなるのは、カキの採捕に従事する時間が減ってカキの採捕量が減少するのに加え、カキ打ちに集中的に専念できることと、カキ打ちだけを行い、採捕に出かけない家族が増加したことにかかわっている。

袋詰め日と時間では、2月12日が54分、13日が53分、14日が58分でもっとも長かった。日によって袋詰め時間が違う傾向が見られたことについては、袋詰めするカキの数量にも深くかかわっていて、統計的に検定する意義があるかどうかは今後の課題としておく。

### (8) 単位時間とカキ打ち

干潟資源の生産性と効率をみるために30分間にカキ打ちした数と量について性差、経験年数差と年齢別に検討してみたのが表-3である。

カキ打ちの量と性別では、男女全体の平均量が1591gで、男性が1658g、女性は1525gで女性の方がやや少なかった。30分間でもっとも多かったのは男性で世帯番号22-B（カキの数：187個）と20-Bの2200g（カキの数：131個）で、女性でもっとも多かったのは世帯番号32の2000g（数：204個）であった。もっとも少なかったのは、女性で世帯番号22-b（数：190個）と17-aの1150g（数：206個）で、男性でもっとも少なかったのは世帯番号36-Aの1200g（数：187個）であった。

性別とカキ打ちの数では、男女全体の平均数は185個で、男性は177個、女性が193個で女性の方が多い。30分間でもっとも多かったのは女性で世帯番号10-aの243個（カキの量：1600g）、男性でもっとも多かったのは世帯番号23-Bの220個（量：1700g）であった。30分間で

表-3 30分間あたりにカキ打ちされた数と量

調査日時	採捕者の世帯番号*	年齢(歳)	経験年数(年)	むき身の数(個)	むき身の量(g)
2001年 2月23日 6名	14-a	47	17	189	1500
	23-B	41	16	220	1700
	23-b	34	10	193	1550
	34-a	68	20	182	1570
	37-A	67	25	156	1500
	37-a	62	25	205	1500
2月25日 6名	17-A	65	32	188	1250
	17-a	60	32	206	1150
	34-B	52	20	191	1700
	34-b	53	20	222	1750
	10-a	64	30	243	1600
	14-A	52	17	212	1400
2月26日 6名	32-B	49	20	179	1800
	32-b	49	20	204	2000
	18-A	67	10	156	1900
	18-a	60	10	193	1500
	28-A	70	10	140	1650
	28-a	65	10	140	1450
2月27日 8名	22-a	78	13	146	1300
	22-B	40	13	201	2200
	22-b	38	13	190	1150
	36-A	67	23	193	1400
	36-B	40	16	187	1200
	20-A	53	16	151	1650
	20-a	54	15	198	1800
	20-B	30	12	131	2200

\*1: AとBは男性で父子関係（A:父、B:息子）、aとbは女性、Aとaは夫婦、aとBは母子関係（a:母、B:息子）、Bとbは夫婦、

もっとも少なかったのは男性で世帯番号20-Bの131個（量：2200g）、女性でもっとも少なかったのは世帯番号28-aの140個（量：1450g）であった。

年齢とカキ打ちの量では、50歳代がもっとも多い1729g、次に30～40歳代が1643g、60歳代以上が1481gであった。

経験年数とカキ打ちの量では、1年～15年がもっとも多い1656g、16年～25年が1623g、そして25年以上が1400gであった。経験年数が長いほどカキ打ちの量が少なくなる傾向がある。一方、経験年数とカキ打ちの数では、25年以上がもっとも多い199個、次いで16年～25年で194個、そしてもっとも少ない1年～15年が165個であった。経験年数が長いほどカキの数が多くなる傾向が見られた。1年～15年と16年～25年と、16年～25年と25年以上のあいだで、 $P < 0.05$ の水準で統計学的な有意差がみられた。

## 6. 考察

### (1) 性別によるカキの採捕活動について

漁撈活動を行なう漁家においては男性が海上の作業、女性が陸上の作業を担うという性的分業が一般的にみられる<sup>5)</sup>。干潟における採捕活動においても有明海の鹿島周辺では、採捕場であるカキ床まで男性だけが出向くことが多く、女性は小屋でカキの身を剥ぐ作業を行なう。カキを殻ごと販売するところやカキ焼きを商売にするところは夫婦一緒にカキを捕りに干潟に行く場合もある。

しかし今回の調査においては、カキの採捕における性差や役割分担傾向が見られなかったのは、主に夫婦、夫

婦と息子、両親と息子夫婦、母親と息子夫婦、親子といった家族単位でカキの採捕を行なうためであると考えられる。その他の理由として、カキの採捕は夜間に小船で約10～20分かけて採捕場まで出かけ、1人での作業がきつく、共同で作業を行なわなくてはならないことと、大潮の時に可能な限りカキを多く捕っておくという備蓄ができるからであると考えられる。実際、ほとんどの世帯が家族で行なうのに対して世帯番号10のところでは単独でカキの採捕を行なうし、世帯番号31は時折2隻の小船で夫婦が別行動するケースも見られる。

カキ打ちのために小屋にやってくる時間帯が男女で多少違う世帯も見られるものの、女性の方がカキ打ちに投入する平均時間がやや長い。その理由は、女性の場合、カキ打ち以外に家事や子どもの世話などで小屋に男性より遅く来る場合があっても、カキ打ちを始めるとほとんど移動せずに作業に専念するためであると考えられる。これに対して、男性の場合は小屋には早く来ても、網袋に入れて生かしておいたカキをとりに行ったり、カキ打ちを始め段取りに時間を要することなどでカキ打ち時間が短くなったと考えられる。

袋詰めについては、男女の役割分担の傾向が多少見られたことと、平均時間では女性の方がやや長い間作業を行なう傾向が見られた。その理由として、カキ打ちが終了と直ぐに袋詰めを始めるばかりか、カキ加工所でカキを洗うなどの細かい作業が多く、女性たちが担う役割が多い。一方、男性は海水や袋詰めしたカキを入れる箱の運搬などの屋外作業が多く、男女の役割分担（性的分業）が多少見られた。

大浦浜において、干潟生態系に特異的なカキの採捕、カキ打ち、カキの袋詰めまでの一連の採捕活動を通して女性の方が採捕活動に投入する時間が男性よりやや長いことが明らかになった。

## (2) 年齢と採捕活動について

現在、共同でカキを集荷するようになったのは婦人会がおよそ14年前にカキの採捕活動を始めたことから始まった。50歳代のなかで16年～25年までの経験者が全体の38名いるなかで24名は50歳代に集中している。そのため、カキの採捕時間において、他の年齢層より50歳代がもっとも短かったのは、カキの採捕から販売まで各個人が行なっていた女性に比べ、男性の経験年数不足によるものであると考えられる。

カキ打ちに投入する時間は、年齢が若い人より年長者で長いことが明らかになった。また、カキ打ち時間がもっとも短い約1時間から10時間22分までと幅が大きいのは、家族人数が多い世帯の場合にはカキ打ちが早く終了する傾向があり、家族単位でカキ打ちを行なう人数の違いに左右されるものと考えられる。

特に袋詰め作業で全体的に平均年齢が若いのは、カキの採捕やカキ打ちの作業に参加しなかった若い嫁や息

子などの家族メンバーが加わったからであると考えられる。また袋詰めでは男性の平均年齢が若い理由は、男性は袋詰め作業そのものよりカキの袋詰めの際に使う氷や海水の運搬、そして袋詰めしたカキを組合の共同冷蔵倉庫に運搬し、保管する作業などの戸外の仕事に従事することが多いからであると考えられる。

## (3) 経験年数と採捕活動について

経験年数とカキの採捕時間では、経験年数が長いよりも短い人の方がカキの採捕時間が長いことが明らかになった。その理由は、この地域におけるカキの採捕場の地理的空間を把握することとカキの出来具合を見極めることは非常に重要であり、経験年数が長い人たちの組合員がその能力に長け、若い組合員よりも短時間に活動にとりかかれるからであると考えられる。経験年数が長い人たちより短い人たちが、カキ打ち時間が長いのは、1年～15年の経験年数層に若い年齢層が多いからであると考えられる。

経験年数1年～15年の49名の年齢層を見ると、30歳代～40歳代が27名、50歳代が4名、60歳代以上が18名で、30歳代～40歳代がもっとも多く50歳代は4名しかいなかったことも大きな原因であると考えられる。

袋詰め作業もカキ打ちと同じく経験年数が短い人たちが、袋詰め投入する時間が長いのは、1年～15年の経験年数層に若い年齢層が多く含まれるからであると考えられる。

## (4) 30分あたりのカキ打ちについて

性別によるカキ打ちの量と数を見ると、数では女性の方が多いが、量的には女性の方が少ない傾向が見られた。カキ打ちの際に男性はカキ殻が大きいカキを選ぶことが多いといわれる。それは、大きなカキ殻ほど殻をあける際に大きな力があるため、男性が大きなカキ殻を選択する傾向があるからである。実際、男女ともカキの量は多いが、数が少ない人はカキの身が小さいものを選別することが多い。

年齢別と時間では50歳代が、他の年齢層よりカキ打ちの量が多い傾向を指摘できる。このことは50歳代の年齢層が他の年齢層よりカキ打ちが早い、すなわちカキ打ちが上手である(skillful)と考えられる。年齢とカキ打ち数では、50歳代がもっとも多い193個、次ぎに30～40歳代が187個で、60歳代以上が179個と少なかった。

経験年数によるカキ打ちの量と数を見ると、経験年数が長いほどカキの数は多いが、カキの量は少なくなる傾向が見られた。その理由は、経験年数1年～15年が9名いるなかで男性が6人と多いからである。すなわち男性の場合、カキの数は少ないものの、量は多くなる傾向と関連がある。また経験年数が短いほどカキの量が多いのは、大きいカキ殻を選んで行なう傾向とも関連があると示唆できる。

## 7. 結論

性別によるカキの採捕活動時間について見たところ、家族単位で採捕活動を行なうにもかかわらず、カキの採捕、カキ打ち、袋詰めまでの行程に要する全体の平均時間は女性の方がやや長い傾向がみられた。

年齢と採捕活動時間の関係では、カキの採捕時間について有意の差がみられなかったが、カキ打ちの平均時間においては60歳代以上が4時間30分ともっとも長く従事し、平均時間は3時間42分であった。30～40歳代と60歳代以上では、 $P < 0.001$ の水準で有意差がみられ、年長者の方が若者よりカキ打ち時間は長いことが示唆された。袋詰めにおいても、60歳代以上が1時間2分ともっとも長く、カキ打ちと同じ傾向であった。

経験年数と採捕活動時間の関係では、カキの採捕と袋詰め時間においては、経験年数が短いほどそれぞれ活動時間が長い傾向がみられた。

30分あたりの性別によるカキの量と数を見ると、数では男性より女性の方が多いものの、量的には女性より男性の方が多く傾向がみられた。大きいカキほど、身を剥ぐのに大きな力を要するために女性の方が敬遠し男性に任せることに起因している。

年齢では、50歳代がカキの量について1729 gともっとも多く、カキの数も同様にもっとも多かった。これは、カキ打ちの全体の時間でも50歳代が他の年齢層よりカキ打ちの時間が短い傾向がみられ、50歳代が他の年齢層よりカキ打ちが早いことが示唆された。また経験年数では、経験年数が長いほどカキの数は多いが、カキの量は少なくなる傾向がみられた。

干潟が持つ生態的、文化的、経済的価値についての住民の高い認識が自然環境の保全や伝統的文化および干潟資源の持続的利用と維持管理に深く寄与しているといえる<sup>6,7,8,9,10</sup>。同時に干潟生態系に強く依存する人びとの現地調査をかさね、今後、比較検討するための基礎デー

タを蓄積していく必要がある。

最後に、こうした量的な検討に耐える集落や組合<sup>3)</sup>が有明海から消滅しつつあることは大きな課題であり、問題であると提起したい。

## 参考文献

- 1) 山崎猛夫：肥前町史上巻，肥前町，3-25，1989.
- 2) 小林恒夫：半農半漁の歴史的推移と現状－『海浜台地学』第Ⅱ編第1章第1節第1項：統計分析一，海と台地，12号，1-8，2000.
- 3) 李應喆・武田淳：干潟の水産資源（第3報）韓国・西海岸咸平湾における持続的資源利用と管理－カキの採捕活動を中心に－，佐賀大学農学部彙報，85号，45-62，2000.
- 4) 田村勇：海の漁撈，野本寛一・香月洋一郎編，日本の民俗学5生業の民俗，雄山閣出版社，153-173，1998.
- 5) INAOKA, T and SUZUKI, T: Oyster Shelling: Cooperation Between and and Division of Work by Sexes in Oyster Aquaculture, *Journal of Human Ergology*, 9, 147-158, 1980.
- 6) 武田淳・五十嵐勉・趙慶萬・李應喆：干潟の水産資源（第1報）有明海における伝統的採捕技術と多様性，佐賀大学農学部彙報，83号，80-83，1998.
- 7) 武田淳：サンゴ礁資源の利用について：採捕にかかわる伝統漁法の生態学的検討，モンゴロイド，14号，10-17，1992.
- 8) 武田淳：イノエの採捕経済：サンゴ礁海域における伝統漁法の多様性，九学会連合地域文化の均質化編集委員会編，地域文化の均質化，平凡社，51-68，1994.
- 9) Takeda, J: Plant phenology, animal behaviour and food-gathering by the coastal people of the Ryukyu Archipelago, *Humans and Nature*, 3, 117-137, 1994.
- 10) 李應喆・武田淳：干潟の水産資源（第2報）韓国・西海岸咸平湾における伝統的漁撈と採捕活動，佐賀大学農学部彙報，84号，11-27，1999.

(2008. 3. 31受付)

# 有明海・八代海沿岸域エコトーンにおける 文化的景観の保全(3) —調整池の機能と変容、及びその保全をめぐって—

CONSERVATION OF MULTIPLE CULTURAL -LANDSCAPE IN THE INSHORE ECOTONE,  
ARIAKE AND YATSUSHIRO SEA(3):THE ROLE , TRANSFORMATION, AND PRESERVATION OF  
THE DETENTION PONDS IN RECLAIMED LAND

五十嵐 勉

Tsutomu IGARASHI

文修 佐賀大学准教授 農学部生物環境科学科・地域資源学研究室(人文地理学)(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

It is important to consider the ecotone in seashore , especially in the argument of conservation of wetlands. The secondary ecotone as a transitional zone from reclaimed land to tidal flats is very important spaces. Because there is a bio-diversity and multiple subsistence by inhabitants. In addition , these sustainable production and life style formed multiple cultural landscapes.

A great deal of effort has been made on the reclamation or land improvement in tidal land. What seem to be lacking, however, is a consideration on sustainability of the reclaimed land and a sustainable subsistence system. This sustainability was made possible by the single-dike type reclamation before introduction of *inpoldering* ( the duplex-dyke type reclamation) in the after World War II. The main reason is that most settlers engaged not only farming in reclaimed land, but also fishery in tidal flat. This multiple subsistence offers the key to an understanding of the sustainable use of tidal land.

In this paper, so far , we have seen that the the role , transformation, and preservation of the detention ponds in reclaimed lands.

**Key Words:** *Seashore ecotone, Cultural landscapes, Subsistence structure, detention ponds*

## 1 はじめに

本稿は、複式干拓の社会構造的な問題、及び干拓地と浅海域における高投入型農漁業への特化、すなわち土地利用景観のモノカルチャー化について検討してきた一連の研究に引き続いて、干拓地と干潟・浅海域の漸移帯(エコトーン)の内陸水面・湿地・水辺としての調整池(広義の潮遊池・遊水池・溝渠を含む)に焦点を当て、それらの歴史的な形成過程を踏まえた機能と変容、及びそれらが急速に失われつつあるもつ現状を踏まえた保全と活用の意味について考察するものである。

なぜならば、この漸移帯における水辺は、ヨシを始めとする湿地植物、汽水域・淡水域に生息する多くの魚貝類、ガン・カモ等の野鳥(渡り鳥)の休息・餌場という生物多様性の場であり、そしてそれらを古くから利用してきた沿岸住民によってつくられてきた文化的

景観の重要な要素とみなされるからである。同時に、この空間は、上流からの汚染物質を一時的に貯留し(「悪水溜」)、ヨシや魚介類によって浄化され、有機質の泥土を揚げて農地に利用し、余水を海へ排水して反復的に(循環的に)利用する機能を有していたからである。干拓地と浅海域での大規模かつ高投入型の農漁業は、それぞれの生産の場を最大限に利用するために、平地林やヨシ原に代表される湿地は徹底的に除去されてきた歴史がある。特に海苔養殖が産業の基盤となっている有明海沿岸域では、ヨシの浅海への流入は、海苔養殖網に支障をきたすとして、ヨシの持つ陸域や漸移帯での水質浄化能力や生物多様性の側面は肯定的に評価されるものではなかった。

しかしながら、湿地の保全や人間の生業・生活と結びついた水辺の文化的景観の保全は、いまや社会的常識である。各地で調整池の人工的水辺・湿地のビオトープ整備が進められている。本研究では、残された伝

統的な潮遊池・遊水池を含む調整池の現状とその問題を、日本と韓国における事例を比較することで、有明海再生のための、オルタナティブ（もう一つの）選択について考察するものである。

## 2 干拓地における調整池・潮遊池・遊水池・溝渠の生成・機能・変容

### (1) 単式干拓地等における調整池・遊水池

稲を植える横で、ムツゴロウがびよんびよん跳んどった。私たちがこの地に入植した当時（1957年頃）はどこまでも続く広々としたヨシの山また山。それにちよっと低い所では底知れぬ潟土の状態であり、・・（中略）、しかしまた、潮遊池での魚とり、干潟での貝とり、それを肴にしての堤防での語らいと焼酎での一杯の味のよさなど楽しかったことも脳裏をよぎります。

諫早共栄干拓農業協同組合(1983)の回顧録による

広大な干潟の締め切りは世界の各方面で問題を提供しているのである。海や山から泥土が湾内に集まって、次第に水深が浅くなり、海底が肥沃になると、人はそれを耕地にしたいのである。これらの湾の自然の形としてはその入口で締め切ることが最も良い場合が多い。こうして締め切った水域の一部が、干拓するには深すぎるとか、海底が砂質であって肥沃でない場合には、この部分には手をつけずにそのまま残しておく干拓面積を制限するのが合理的である。良い条件の場合には残存する水面は淡水池にかえ、潟水時にはかんがい用貯水池とし、又豪雨の時には遊水池として利用するのである。

Pr. Jansen (1954) による

この干潟の開発と遊水池をめぐる二つの言説は、干潟・湿地のエコトーン(生態学的漸移帯)について考える場合に、極めて対照的である。前者は、戦後に実施された国営諫早干拓によって造成された長崎県守山町の共栄干拓地に入植した農民の回顧録であり、後者はこの国営干拓地が現在の締め切り方式による諫早湾干拓事業に継承される計画に大きな役割を演じたオランダのピーター・ヤンセンによるものである。奇しくも2007年11月20日に、国営諫早湾干拓事業が完工し、2008年4月には42経営体による環境保全型農業を標榜する干拓地営農が開始される。前者の回顧録の舞台となった入植地を含む諫早湾岸の干拓地農民こそが、この大規模複式干拓の完工を最も待ち望んだ人々である。

緩慢差が大きく泥質干潟が発達する有明海沿岸域では、干拓地での自然圧密による地盤沈下と堤外の干潟の成長による樋門の埋没によって、排水不良と塩害・湿地化が進行するため、絶えず周期的な干拓の前進と不要となった旧堤塘の除去が繰り返される(単式干拓

による干拓宿命論)。戦後に入植した干拓地農民にとっ

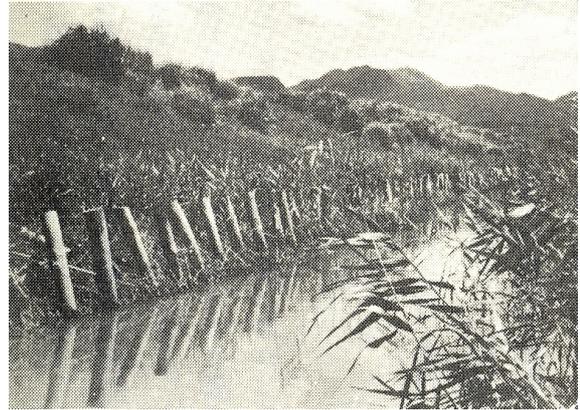


図1 長崎県森山町(諫早湾)旧十六開(干拓地)の汐土井堤防(「原」とイカイ(遊水池)、及び干拓地のヨシ原(昭和12年頃)

『森山町郷土誌(1985)』による

て、度重なる計画の変更に伴う大規模複式干拓計画の遅延は、この「伝統的」単式干拓による排水不良問題の解決が棚上げ状態にさらされることに等しいと考える所以である。

図1(写真)は、前述の森山町における伝統的な単式干拓地にみられた遊水池—この地域では「イカイ」と呼ぶ—と護岸の木杭、及びヨシ原の景観である。戦前の写真であるが、このような干拓地景観は「前近代的な景観として否定されてきた。しかし、「近年の多自然型、あるいは近自然型工法による水辺景観の整備後」となったら変わりのない景観である。このような干拓地

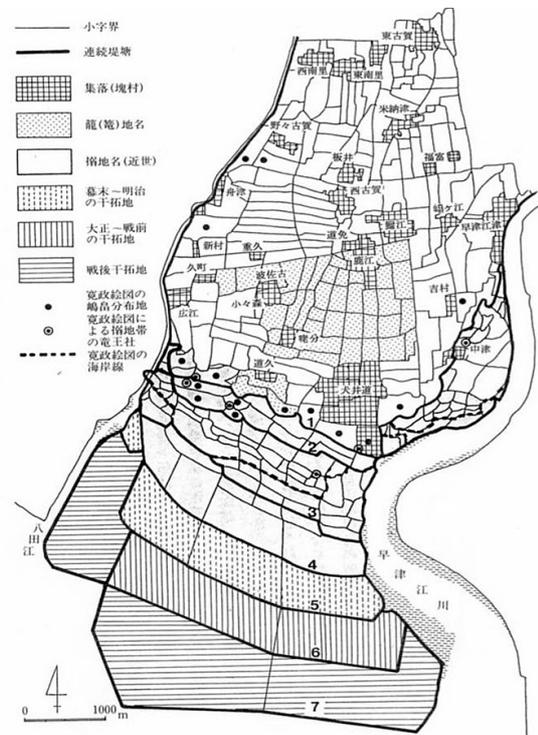


図2 佐賀県川副町における干拓地景観

五十嵐(1992)

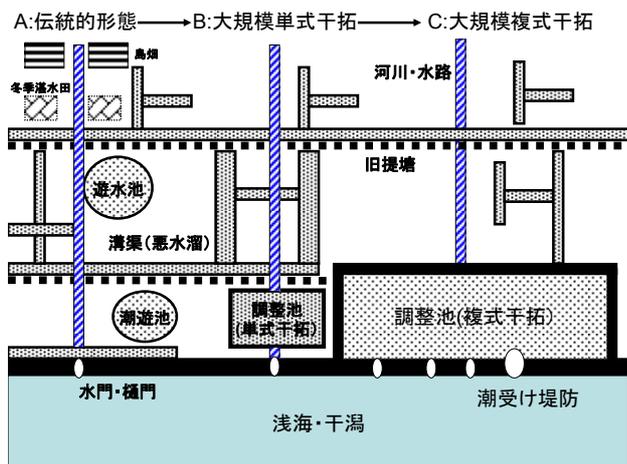


図3 干拓地における調整池・潮遊池・遊水池・溝渠の展開過程(模式図)

における悪水溜・遊水機能を有する景観は、湿田農耕に対応した島畑・うね畑の農耕景観、及び乾田化以前の冬季における湛水田(冬水田んぼ)からなる景観は、有明海沿岸におけるプロトタイプであった(図2)。

このような伝統的な干拓地景観は、戦後の大規模な干拓事業と土地改良事業によって、潮受け堤防最前線に灌漑と治水機能を併せ持つ調整池を設置し、その後の複式干拓では巨大な調整池が築造され、大きく変貌した。かかる干拓地における淡水・汽水域の歴史的な展開過程は図3に模式的に示される。図3中のAは、佐賀県の国営有明干拓地のように、深井戸灌漑に依存するような慢性的な水不足地地域において、灌漑用貯水池として重要な役割を有している。このタイプの調整池には、堤防に沿う規模の大きな細長い水路式のものも有明海東岸・八代海域に卓越する(図4)。



図4 大規模単式干拓地における調整池・遊水池  
A: 国営有明干拓地、B: 鹿島市七浦干拓地、  
C: 大牟田市昭と開干拓地 D: 熊本市沖新町

これらの調整池は灌漑用としての機能以外に、ヨシ等の湿地植物が繁茂し、比較的良好な水質環境にある

と同時に、淡水魚や野鳥(渡り鳥)の貴重な餌場・休憩場となっている。Aの有明調整池周辺は、転作としてのレンコン栽培が盛んで、レンコンの作付け期においては、カモ類の餌場・ねぐらともなっており、「冬水田んぼ」的な機能を持つが、同時に作物への鳥害問題を抱えている。Bの鹿島市七浦干拓地では、地元の土地改良区が調整池を管理し、ヨシの湿地はタナゴ・フナ・ウナギ等の貴重な生息場であると同時に、干潟と調整池を往復するカモ類の生息場であり、釣りを禁じる管理体制がとられている。これに対して、人間の生業や暮らしと密接に結びついた調整池・遊水池を、自然保護のみならず文化的景観の保全・活用の視点から、より積極的に水辺・湿地を保全する取り組みがみられる地域が存在する。

湖沼の環境保全に関する取り組み事例として参考となる琵琶湖では、環境基礎調査とそれに基づく組織的な環境教育の実践、合成洗剤排斥運動、外来魚駆除、及び滋賀県によるヨシ保全条例などの官民協働の様々な取り組みを行ってきたことで知られる。同時に、水環境と住民の生業・暮らしの文化も、陸域を含めて調査し、水環境を守る仕組みを解き明かしつつある。そのようなプロセスを経て、水郷景観で知られる近江八幡市は、内湖(ラグーン)一帯の湿地を文化的景観の保護制度を活用して、保全する取り組みを行っている。



図5 琵琶湖の西の湖(内湖)と重要文化的景観

図5は、琵琶湖の内湖(ラグーン)の一つである近江八幡市の西の湖とその周辺である。この内湖一帯は、改正文化財保護法に基づく重要文化的景観選定地区の第一号である。近江八幡の文化的景観は内湖の湿地環境を維持してきたヨシ利用のためのヨシ原焼の復活による保護に取り組み、在来種のフナ類の産卵場が保護される仕組みとなっている。

同様に環境・農林漁業、及び文化財保護を連携させて、野鳥の生息する湿地環境を保全する事例も増加している。「冬水田んぼ(冬季湛水田)」や有機農業の推

進による湿地環境の保全は、東日本やコウノトリの野生化プロジェクトの兵庫県豊岡市が知られている。八代海域では、出水平野（出水干拓地）のツル越冬地保護が特筆される（図6）。ここでは、日本最大のマナヅル・ナベヅルの飛来地保護のために、文化財保護法と環境行政の連携によって冬季のみ水辺となるエコトーンが形成されている（五十嵐、2006）。



図6 出水平野（出水干拓地）における冬季湛水田とツル保護区

また、調整池が内水面漁業、ないしは遊漁空間として生活に密接に結びついている事例として、八代市明和町の「昭和タブ」が特筆される（図7）。「昭和タブ」と称される潮遊池では、古くから地元の漁協がフナを放流して、ハレの食事用やオカズ採りの場として利用してきたが、秋から冬場には遊漁料を徴収して一般に開放されている。



図7 八代平野の「タブ（調整池・遊水池）」

有明海東部では、かつての炭鉱開発・操業に伴うボタ処理場が人工的な凹地となって、貴重な水辺空間を形成した事例も多い。大牟田市岬町の通称「ボタ池」は、1999年に閉山した三井三池鉱山のボタの埋め立て地にある遊水池である（図8）。閉山後の大型店舗の進出

計画にあわせて行った自然調査の結果、センベイアワモチ・タケノコカワニナ・アズキカワザンショウなどの有明海沿岸に特有の絶滅危惧貝類の生息が確認され、その保護のための湿地保全が緊急の課題となっている。



図8 大牟田市のボタ池

以上のような沿岸部の調整池や潮遊池・遊水池は、陸域と浅海干潟の中間域にあるエコトーンであって、上流からの水を一時的に貯留し、ヨシ原や微生物による浄化機能が高い水域と考えられる。同時に、人間の暮らしと密接に関わってきた空間であるため、住民を主体とする保全・管理意識が潜在的に高い。この点において、人間が近づけない、あるいは生物多様性が極度に少ない複式干拓による調整池には、単なる水質汚濁問題を越えた課題が多いといわざるを得ないのである。

## （2）複式干拓と調整池

大規模複式干拓の最大の特徴は、ヤンセンの言説に象徴される「残存する水面は淡水池にかえ、渇水時にはかんがい用貯水池とし、又豪雨の時には遊水池として利用する」調整池の存在である。灌漑と治水機能を併せ持つ調整池は、いわば「海の中のダム」である。この調整池の創出の前提としての締め切り堤防が、潮流の変化や葦原の広がる干潟の消失による浄化能力の低下や「有明海の子宮」・「生命のゆりかご」とされる泉水海環境変化に大きな影響を与えたとして、水門の撤去や開放を求める漁民・環境保護団体等による運動が続いている。複式干拓は、オランダのポルダーを嚆矢として、North Sea Fringe（北海縁辺）、ヨーロッパの植民地統治時代のアジア諸国へと伝播していった。日本の八郎潟干拓地・児島湾干拓地・諫早湾干拓地、そして世界最大級の複式干拓が進められている韓国の黄海沿岸（シファ干拓地、セマングン干拓地）では、過去において、そして現在においても、この調整池の水質悪化という、河口域の閉鎖系水域であるが故の宿

命的な課題を抱えてきたのである。

干拓地の調整池は、利水と治水というダム機能特性に類似するが、ダムの多くが河川の上流・中流域に建設されるため汚染物質の流入が少なく、需要期には絶えず放水されるという意味で、半開放系の内陸水面であるという決定的な相違がある。かかる水質の悪化が進行する海のダムの淡水を利用しながらの「環境保全型農業」、あるいはチッソ成分の流入量の増加が懸念される有機農業を推進する農業振興計画とは、どのように整合するのだろうか。



図9 国営諫早湾干拓地

この干拓地における環境保全型農業は、複式干拓の嚆矢となった八戸型干拓地において、すでに推進されている。八郎潟は、戦後のモデル農業・モデル農村の舞台となったところであるが、大潟村に入植後、米の生産調整が始まり、その後の激動の戦後農政の象徴的な場でもある。

八郎潟は、江戸期から小規模な干拓が行われてきたが、主な生業は汽水域の湖での多用な漁撈と肥料用の藻の採取という湿地利用が中心であった。戦後にヤンセンらのオランダ流干拓方式を取り入れた干拓は、戦後の食糧難解消、水田単作、モデル農業・農村（大規模経営・水田直播栽培・協業化）づくりを目的として、1957年に工事が着工し、1966年に入植が開始された（589名・1都1道36県）。しかしながら、1970年からの米の生産調整による畑作転換（田畑複合経営）が求められ、営農意欲の高い入植者は、減反遵守派と自作付派へと二極分化し、当初の協業化も個別経営体化し、離農や転出する農家や負債の増加に苦しむ状況を呈した。そのような状況下で、宅配便を利用した銘柄米の産直や環境保全型農業への模索が続けられている。承水路を含む調整池では伝統的な漁撈がほとんど消滅し、東北日本有数のブラックバスの釣り場として、ゲームフィッシングの場として利用されている。



図10 八郎潟干拓地



図11 締め切り後の児島湾干拓地

八郎潟干拓地に続いて実施された複式干拓は、岡山県の児島湾干拓地である。児島湾は、潟スキーの利用など有明海に類似する伝統的な干潟漁撈が持続的に行われてきた海域である。同時に、戦国期から継起的に単式干拓が進められてきたことでも有明海に類似する。17世紀に藩営干拓や町人請負干拓が進展し、明治期における藤田農場による大規模な干拓が進んだ結果、慢性的な水不足に悩まされた。戦後の食料増産体制下における複式干拓は、1959年に児島湾が締め切られ、児島湖の調整池が生まれた。しかしながら、米麦二毛作とイグサ栽培を主とする干拓地農業は、米の生産調整とイグサの産地間競争の激化（熊本の八代平野から、その後中国産のイグサ流入が進む）により衰退を余儀なくされた。さらには、経済の高度成長期における拠点開発（岡山県南新産業都市）と、それに伴う岡山・倉敷の急激な都市化により、旭川・笹瀬川・倉敷川からの汚染物質の児島湖への流入が進み、湖の水質が悪化した。これは、児島湾を含む瀬戸内海一帯に赤潮被害を拡大した現象として、知られている。瀬戸内海再生のための法的整備や環境保

全策によって瀬戸内海の再生が試みられてきたが、児島湖の水質改善は必ずしも十分ではない。干拓地での営農は、兼業化が進む中でトマトに代表される施設園芸農業に特化しつつあるが、これらの農業も高投入型の性格を有し、環境負荷の軽減上、大きな課題を有している。

八郎潟と児島湾における複式干拓は、その後の環境問題への関心の高まりや農業を取り巻く状況の変化により、戦後に企画された他の大規模複式干拓をめぐる論議に大きな影響を与えた。オランダのポルダーにおける水門開放による湿地の再生や直線河川の再蛇行化による自然再生事業、EUの共通農業政策を背景にした環境保全型農業への転換も、大規模干拓をめぐる逆風となり、中海干拓のように事業の中止に至った事例も見られた。しかしながら、諫早湾国営干拓と韓国の黄海における複式干拓が推進され、特に調整池の水質汚濁が深刻な環境問題としてクローズアップされている。

韓国においては、日本の植民地統治時代から「国内法」を適用させた干拓政策が推し進められてきたが、筆者はシファやセマングンに先行する小規模な複式干拓が多数、存在することを確認した。それらの小規模な複式干拓地は、開発公社（国営）によるものは少なく、郡や市レベル、もしくは地主階級によるものが多い。小規模な複式干拓について、予備的な調査を実施した江華島や珍島では、調整池や灌漑用溜池が、野鳥を含む自然保護地域として生態系の保全や環境教育のフィールドとして活用されたり、日本流の寒ブナ釣りやブラックバス・ライギョ・ソウギョなどのルアーによるゲームフィッシングやツーリズムの場として活用される事例が、近年、急速に増加傾向にある。すなわち、複式干拓が全否定されるわけではなく、環境負荷の少ない小規模な方式であれば、調整池の利用と管理・活用も、人間の手のうちにあるのである。自然の摂理や住民の管理から遠い干拓方式こそが問題なのではないか。

### 3 おわりに

内湾域の有明海と八代海では、半農半漁を基盤とする複合的な生業が一般的であった。そのような多様な生業を育んだ場としての水辺エコトーンは、複合的な文化的景観を生み出した。文化的景観とは、棚田や里山・里地・里海のような「地域における人々の生活又は生業及び当該地域の風土により形成された景観」とされ、文化財保護法の一部改正によって、このような文化的景観が新たな文化財として位置づけられ、地域の歴史や文化と密接に関わる固有の風土的特色を表す文化的資産であり、我が国の歴史、文化等の正しい理解のため欠くことのできないものとして保護すること

が定められた。これらの文化的景観の保存の動きは、ユネスコの世界文化遺産の指定制度やワイズ・ユースを前提とするラムサール条約登録地などでの、自然環境と人間の営為の密接な関係性の所産と見なす文化的景観に関する国際的な動向が背景にある。干拓地における大規模農業と浅海域での海苔養殖業の展開は、生業の単一化と景観のモノカルチャー化である。このような単一化は、生産至上主義を前提とするもので、ポスト生産主義を前提とする多様性の持続、なしは再生こそが、有明海再生のもう一つの選択であり、その意味において伝統的な遊水池や溝渠の再生、あるいは単式干拓によって生まれた調整池・遊水池・潮遊池の現代的な意味についてのデータの収集とその価値付けが重要となるであろう。これらについては、今後の継続調査によって解き明かされねばならないが、現実的な対応として、残された調整池・潮遊池・遊水池の保全策の構築と、沿岸域での遊休農地を活用した新たな水辺空間の創出が、陸域の視点から見た有明海再のためのもう一つの選択なのかもしれない。

### 参考文献

- 1) 有明干拓史編集委員会編：『有明干拓史』、九州農政局有明干拓事務所、1969
- 2) 五十嵐勉：「村受干拓新田—肥前国佐賀郡川副郷における籠と搦を事例に—」桑原公德編『歴史景観の復元—地籍図利用の歴史地理』、古今書院所収、184-199、1992
- 3) 五十嵐勉「海面干拓における単式干拓から複式干拓への展開過程と干潟の環境」、吉越昭久編、『人間活動と環境変化』、古今書院所収、83-104、2001
- 4) 五十嵐勉：「白石平野の開発過程と複合的生業—地先干拓の持続的性格—」、日下雅義編、『地形環境と歴史景観—自然と人間の地理学』、古今書院所収、180-191、2004、
- 5) 五十嵐勉：「海面干拓の展開過程と複合的生業の持続可能性」、佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集、1、169-172、2005
- 6) 五十嵐勉：「蕨野の集落と棚田・文化的景観の保存と活用」、文化庁委託事業『文化的景観「蕨野の棚田」保存活用事業報告書』、佐賀県唐津市所収、2005
- 7) 五十嵐勉：「有明海・八代海沿岸域エコトーンにおける複合的文化景観の保全（1）—出水平野のツル越冬地における冬季湛水田と湿地のワイズ・ユース—」、佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集、2、2006
- 8) 五十嵐勉：「有明海・八代海沿岸域エコトーンにおける複合的文化景観の保全（2）—有明海西北部における海苔養殖漁家の複合的生業—」、佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集、3、2007
- 9) 五十嵐勉：「有明海」、平岡昭利編『日本の地域変貌』、海青社所収、2008（印刷中）

（2008. 3. 31 受付）

# 病気からみた有明海沿岸地域の特徴 佐賀県における病気の地理的分布から

## REGIONAL CHARACTERISTICS OF DISEASE ON ARIAKE SEASHORE, DISTRIBUTION OF DISEASE IN SAGA PREFECTURE

藤永 豪  
Go FUJINAGA

博士(理学) 佐賀大学講師 文化教育学部 地域・生活文化講座(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

Cancer is the leading cause of death in Saga prefecture, and the mortality rate is increasing every year. This resulted from the change of the eating habit into western. And also the mortality rate of cardiac disease and cerebrovascular disorders are also high. These facts imply that the mortality rate of Saga prefecture is strongly influenced by the life-style related disease. The aim of this report is to overview the trend of some disease in Saga prefecture and to make some exploration about geographic distribution of the disease in Ariake coast area. We used the standardized mortality ratio between 1993 to 2003 about cancer, cardiac diseases (without hypertensive disease), cerebrovascular disorders, hypertensive disease, diabetics and hepatic disease.

*Key Words : Regional Characteristics of Disease, Standardized Mortality Ratio, Saga, Ariake Seashore*

### 1. はじめに

現在、コア研究3の地域文化・経済研究部門では、コア研究2の食水系感染症研究部門と共同で、有明海沿岸地域における食生活と健康に関する伝承について調査を進めている。これは、有明海沿岸地域を中心に、食中毒や感染症の防止など食と健康についての言い伝えや知恵を採集し、その分析・検証を通して、病気に関する有明海沿岸地域の特徴と住民生活との関連を明らかにしようとするものである。具体的には、食に関する禁忌や慣習、また、干潟地域独特の感染症や食中毒が、現地ではどのような形で認識され(症状や名称など)、どのような予防法を講じていたのか、発症した際はどのような処置を行っていたのか、といったことについて、聞き取り調査を行っている。すなわち、医科学的な側面からではなく、住民の生活レベルからみた、文化的な側面から有明海沿岸の病気についての地域的特徴を解明しようとするものである。

そこで、本報告では、前述の研究に先立ち、有明海沿岸地域における実際の病気の地理的分布について若干の考察を行うものである。

### 2. 佐賀県における主要死因

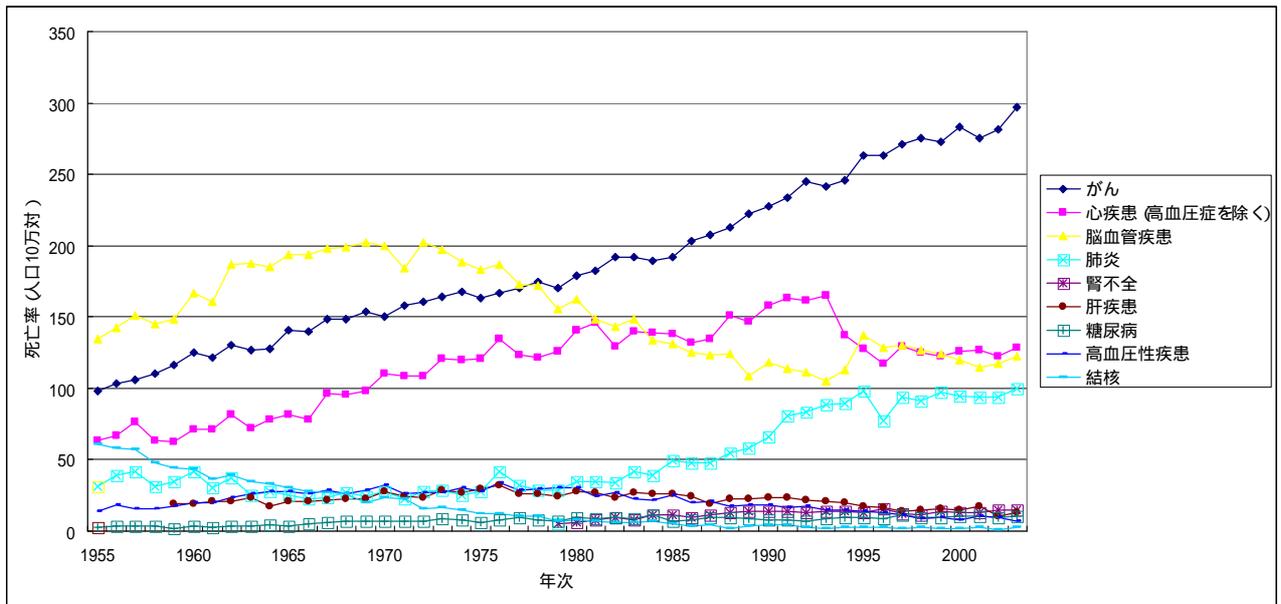
第1図に1995年から2003年までの佐賀県における主要死因の年次推移を示した。

これによると、1978年にがんが脳血管疾患を抜き、死因第1位となり、その死亡率は上昇し続けている。これは食の欧米化など、生活様式の変化と関連している。かわって、1970年代前半より脳血管疾患の死亡率が、1990年代前半より心疾患(高血圧症を除く)の死亡率が低下傾向にある。塩分摂取の抑制や栄養バランスのとれた食事の指導・推進など食生活の全体的な改善が進められた結果であろう。

しかしながら、これら佐賀県における死因の上位3つは、全国的にみても死亡率が高く、中でもがんは1978年以来、死亡原因全国1位となっている。2004年の厚生労働省人口動態によれば、全国では、全死者数のうち、31.1%ががんで亡くなっているのに対して、佐賀県では、32%ががんで亡くなっている。およそ3人に1人ががんで亡くなっている計算となる。がんの部位別死亡率では、胃、肺、肝臓、大腸、すい臓、子宮が全国平均を上回っている。

また、心疾患、脳血管疾患による死亡率の割合も、全国ではそれぞれ15.5%、12.6%であるのに対して、佐賀県はそれぞれ14.2%、12.1%と高い値を示している。

このように、佐賀県では、三大成人病や生活習慣病に起因する死亡割合がきわめて高い県といえる。

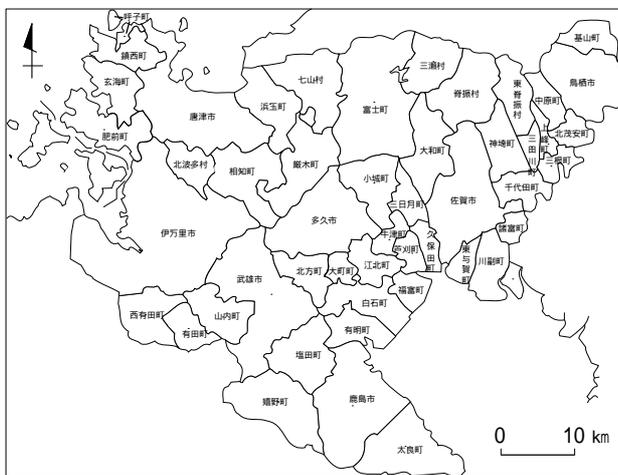


第1図 佐賀県における主要死因の年次推移（1955～2003年）

（佐賀県人口動態統計による）

### 3. 佐賀県における病気の地理的分布

では、こうした病気は、佐賀県内において、どのような広がりを持ち、どのような分布を示すのか。ここでは、いくつかの死亡原因となった疾患を取り上げ、その分布状況をみていく。本報告で取り扱う疾患は、主要死因や成人病、生活習慣病を考慮して、がん（各部位毎）、心疾患（高血圧症を除く）、脳血管疾患、高血圧性疾患、糖尿病、肝疾患とする。これらの疾患について、1993年から2003年までの死亡者数を基礎データとした標準化死亡率（standardized mortality ratio）（以下、SMR）を市町村単位で地図化した（第2図）。なお、データの稀釈を少しでも防ぐために、いわゆる平成の大合併以前の旧市町村を地域単位とした。そのため、本文中では特に「旧武雄市」等の名称は用いない。

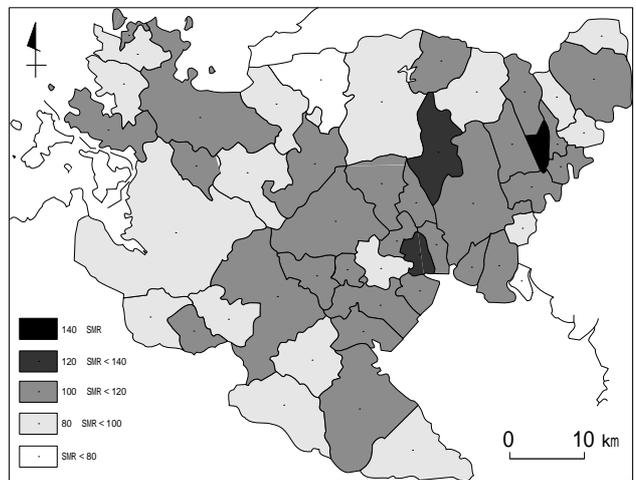


第2図 本報告で地域単位とした市町村

#### （1）がんの地理的分布

##### a. 全がん（第3図）

各市町村における全がんのSMRをみると、140以上の高い数値を示すのは三田川町（141.1）である。このほか、大和町（124.7）と芦刈町（122.4）が120を超え、平野部の市町村と唐津市およびその周辺町村でSMRが100以上を示す。



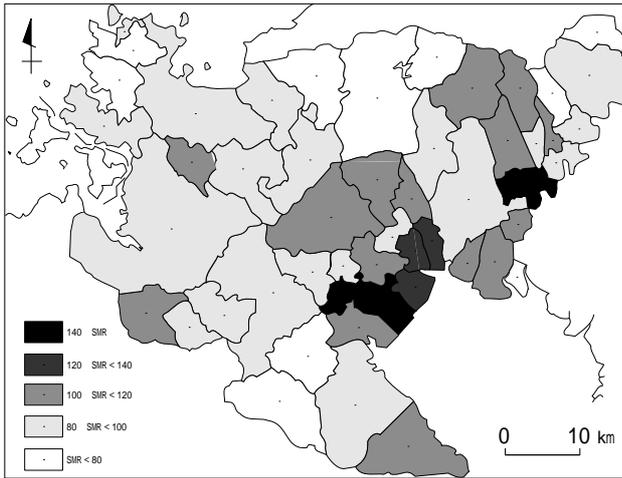
第3図 市町村別の全がんのSMR

（佐賀県人口動態統計による）

##### b. 胃（第4図）

千代田町が147.3と最も高い値を示す。続いて白石町（141.0）、芦刈町（130.1）、久保田町（128.8）、福富町（126.5）と、有明海沿岸中央部がSMRの高い地域となっている。また、東与賀町（109.9）、川副町（105.6）、諸富町（104.8）など有明海沿岸東部と筑後川下流地域においてSMRが100を超える。これに対して、北部の山間地域と西部の丘陵地域、玄界灘沿岸の地域の

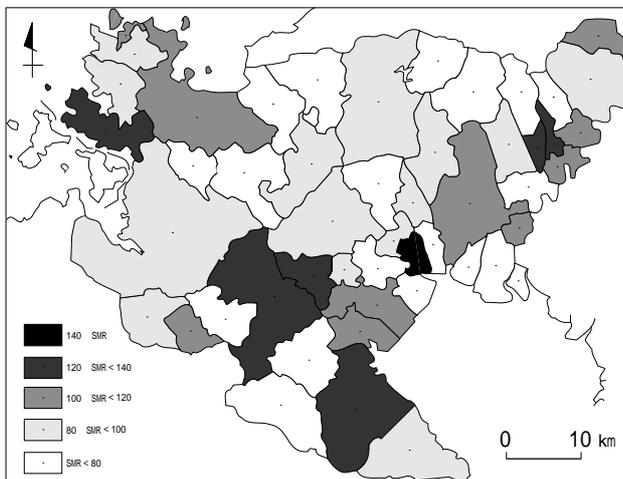
値は100以下の低い値を示している。



第4図 市町村別のがん（胃）のSMR  
（佐賀県人口動態統計による）

c. 直腸S状結腸移行部および直腸（第5図）

芦刈町（147.2）が最も高い値を示す。また、SMR120～140の市町村は東部の上峰町（139.8）、三田川町（126.0）、西部の北方町（138.2）、武雄市（132.2）、鹿島市（124.0）および北西部の肥前町（136.3）であり、死亡率の高い地域は分散している。一方、SMRの値が低い地域は、北部の山間部である。また、東与賀町（75.2）、久保田町（77.5）、福富町（77.8）、川副町（78.6）など有明海沿岸の一部でもSMRが80未満となっている。

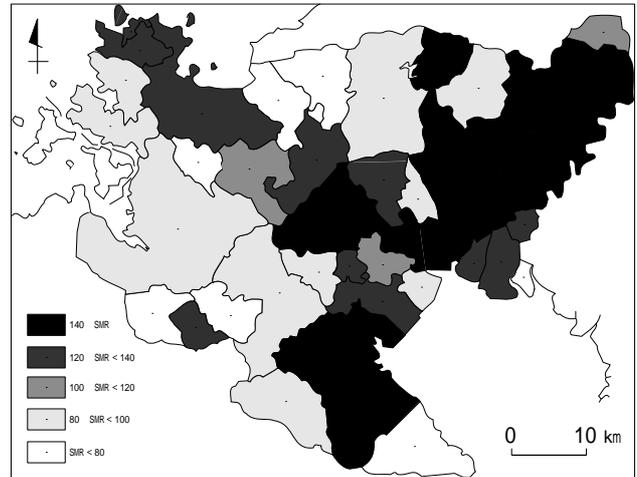


第5図 市町村別のがん  
（直腸S状結腸移行部および直腸）のSMR  
（佐賀県人口動態統計による）

d. 肝および肝内胆管（第6図）

SMRが140以上の高い市町村は、三田川町（352.8）をはじめ県西部に集中する。有明海沿岸地域でも、久保田町（201.5）、芦刈町（153.2）、有明町（164.1）、鹿島市（186.0）と140を超える市町が分布し、諸富町（124.4）、川副町（138.4）、東与賀町（127.2）、白

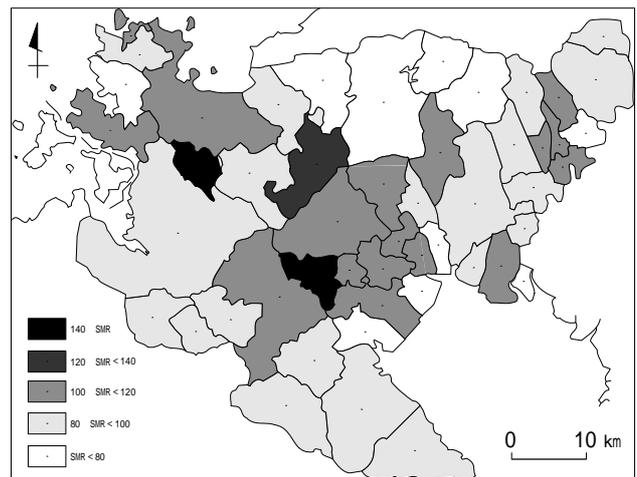
石町（133.0）もSMRが120以上を示す。また、多久市（151.6）、厳木町（125.0）、小城町（122.5）など県中央部の値も高い。さらに唐津市（127.9）や呼子町（122.8）、鎮西町（120.0）といった玄界灘沿岸地域でもSMRが120以上であり、肝臓に関わるがんの死亡率は佐賀県全体で高い傾向にある。



第6図 市町村別のがん（肝および肝内胆管）のSMR  
（佐賀県人口動態統計による）

e. 気管、気管支および肺（第7図）

最も高いSMRを示すのは北波多村（160.7）であり、周辺の唐津市（102.9）、呼子町（114.6）、肥前町（100.1）も県内において相対的に高い値を示す。また、北方町（147.8）や厳木町（121.1）も高く、近隣の多久市（105.9）や武雄市（104.4）などでもSMRは高くなっている。西部の上峰町（11.5）や三根町（105.7）、三田川町（101.7）、中原町（101.3）の値も相対的に高い傾向を示す。

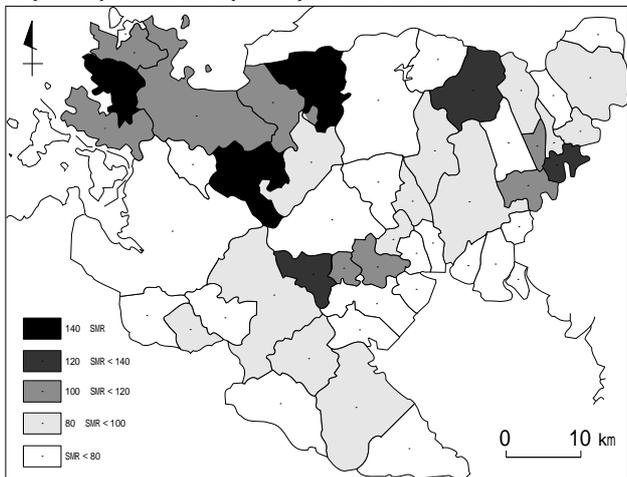


第7図 市町村別のがん  
（気管、気管支および肺）のSMR  
（佐賀県人口動態統計による）

(2) 糖尿病の地理的分布（第8図）

SMRが140を超える高死亡率の町村は、七山村

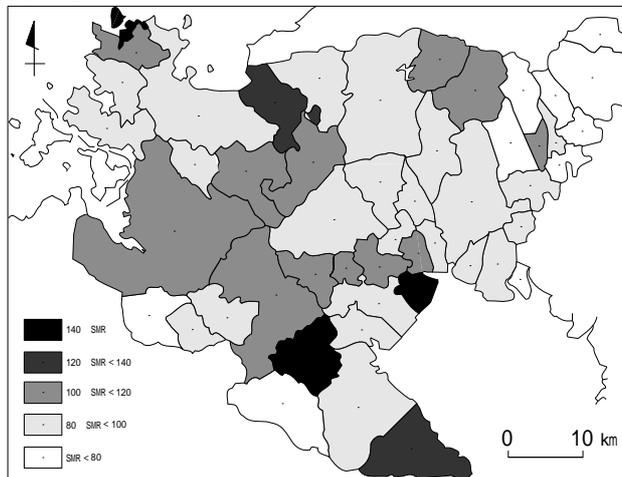
(165.0)、玄海町(155.6)、相知町(147.3)である。周辺の西町鎮(116.2)、肥前町(109.4)、唐津市(104.6)、浜玉町(101.7)の値も相対的に高い。このほか、北方町(133.7)、三根町(123.0)、脊振村(121.1)でSMRが120を超える。有明海沿岸地域では、鹿島(96.8)を除き、すべての町がSMR80以下の低い水準にある。また、西部の伊万里市(77.1)や西有田町(72.2)、山内町(64.0)でも低い値を示している。



第8図 市町村別の糖尿病のSMR  
(佐賀県人口動態統計による)

(4) 脳血管疾患の地理的分布(第10図)

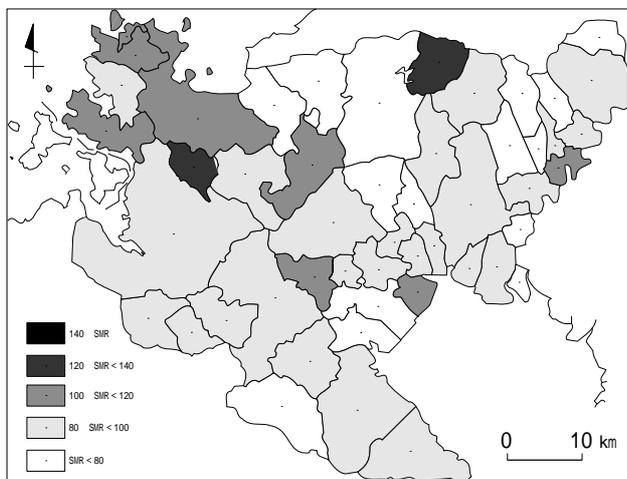
SMRが140以上の高水準にあるのは塩田町(194.9)、呼子町(145.9)、福富町(140.2)で、SMR120~140の町は浜玉町(135.8)と太良町(122.2)である。これら高い数値を示す町は分散して分布する。SMRが100を超える市町村は、西部に多くみられ、逆に80を下回る市町村は西部に集中している。有明海沿岸ではSMR80~100の町が多い。



第10図 市町村別の脳血管疾患のSMR  
(佐賀県人口動態統計による)

(3) 心疾患(高血圧症を除く)の地理的分布(第9図)

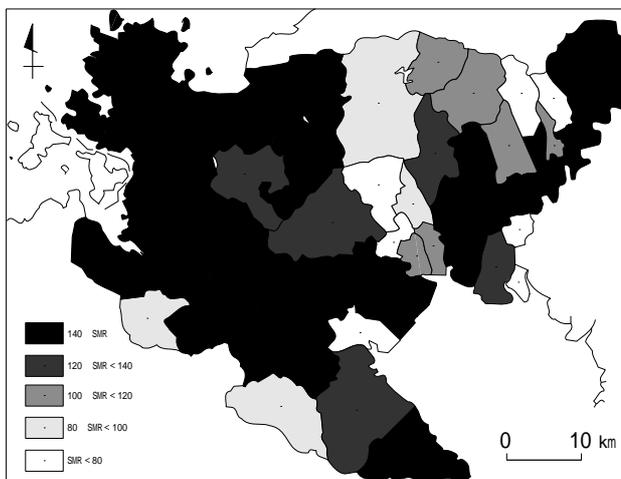
SMRが140を超える市町村は存在しない。三瀬村(135.8)と北波多村(123.5)が120以上の値を示す。北波多村周辺の呼子町(11.6)や鎮西町(107.2)、唐津市(104.4)、肥前町(104.2)といった玄界灘沿岸地域において100を超え、相対的に死亡率が高い地域となっている。県全体としてはSMRの値はそれほど高くなく、三瀬村を除けば、特に北部の山間部において低い値を示す。有明海沿岸地域のSMRは、福富町(101.9)がわずかに高いが、白石町(75.4)や有明町(69.0)は80未満であり、相対的に低いといえる。



第9図 市町村別の心疾患(高血圧症を除く)のSMR  
(佐賀県人口動態統計による)

(5) 高血圧性疾患の地理的分布(第11図)

高血圧性疾患のSMRは佐賀県全体で高く、本報告で地域単位とした49の市町村のうち、28が140を超える高い水準にある。これらの市町村は県の西部ほぼ全域と東部の一部に広く分布する。その中でも、SMRが200以上の非常に高い値を示すのは江北町(291.2)、浜玉町(291.0)、呼子町(290.6)、玄海町(287.7)、有田町(239.1)、武雄市(237.7)、肥前町(222.1)、千代田町(213.4)、鎮西町(206.8)の9市町である。これに対し、北部の山間地域では相対的に値が低い傾向にあるが、それでも多くの町村がSMR100以上を示している。



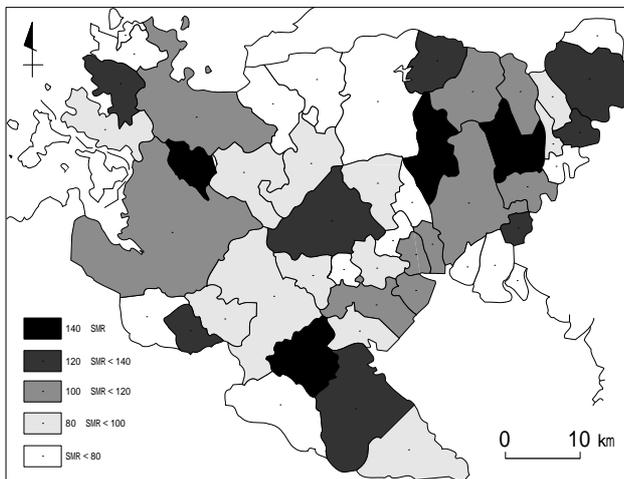
第11図 市町村別の高血圧性疾患のSMR  
(佐賀県人口動態統計による)

有明海沿岸でも、東与賀町（154.4）、福富町（151.6）、白石町（174.9）、太良町（159.4）がSMR140以上と死亡率が高い。その一方で、同じ有明海沿岸でも有明町のSMRは28.4と県内で最も低い値を示す。諸富町も78.2と低い。

#### （6）肝疾患の地理的分布（第12図）

肝疾患のSMRが140を超える市町村は三田川町（183.0）、北波多村（176.7）、神埼町（148.6）、大和町（146.5）、塩田町（140.7）の5つである。これらの周辺にSMR100以上の市町村が分布する傾向にある。これに対し、北部の七山村（19.6）、浜玉町（64.0）、富士町（77.2）を中心とする山間地域において値が低い。

有明海沿岸では、鹿島市（120）が最も高く、久保田町（112.0）、芦刈町（106.9）、福富町（106.8）、白石町（115.0）でも100を超える。諸富町も136.0を示す。しかしながら、川副町（69.1）と東与賀町（62.9）は低い値となっており、有明海沿岸でも地域差が見られる。



第12図 市町村別の肝疾患のSMR  
（佐賀県人口動態統計による）

#### 4．有明海沿岸地域における病気の地理的特性

ここまで、大まかに佐賀県における主要死因別の疾患の分布をみてきた。

がんの死亡率は、佐賀平野全体と唐津市周辺において

高い。さらに部位別の分布をみると、胃がんは有明海沿岸部において死亡率が高くなる傾向にある。特に白石町など有明海沿岸中央部においてSMRの値が高い。大腸に関するがんは、鹿島市などの有明海沿岸西部において高い値を示すのに対して、西部では低く、同じ有明海沿岸でも地域差がみられる。肝臓に関するがんの死亡率は、佐賀平野全体で高く有明海沿岸地域では鹿島市や太良町などの西部において特に高い傾向にある。呼吸器に関するがんの死亡率は、北部の山間地において低く、有明海沿岸地域も全体として高くはない。

また、糖尿病のSMRは、県北部の玄界灘沿岸地域で高いのに対して、有明海沿岸地域は低い値を示す傾向にある。高血圧症を除いた心疾患も同様の傾向にある。脳血管疾患の死亡率は県西部において死亡率が高い。有明海沿岸地域のSMRは全体として低いが、福富町や太良町などで局地的に高い値を示している。高血圧性疾患の死亡率は県全体で高い。しかしながら、有明海沿岸地域では高いSMRを示す市町がみられる一方で、有明町が県内で最も低い値を示すなど、地域差が大きい。最後に肝疾患の死亡率の分布をみると、有明海沿岸東部において高く、中央部から東部にかけて徐々に低くなる傾向にある。

#### 5．おわりに

以上、佐賀県における病気の地理的分布の傾向をもとに有明海沿岸における病気の地域的特徴についてみてきた。今後は、こうした実際の病気の地理的傾向を踏まえながら、有明海沿岸地域における食と健康に関する住民の生活実態と民間伝承について調査を進め、分析を行っていききたい。

#### 参考文献

- 青野壽郎・尾留川正平編（1976）：『日本地誌 第20巻 佐賀県・長崎県・熊本県』二宮書店。
- 加賀美雅弘（2004）：『病気の地域差を読む 地理学からのアプローチ』古今書院。
- 佐賀県：平成15年人口動態統計  
<http://www.pref.saga.lg.jp/web/jinkoudoutai15.html>（最終閲覧日2008年3月21日）



**【連絡先】**

佐賀大学有明海総合研究プロジェクト

Ariake Sea Research Project, Saga University

〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地

Phone/Fax : 0952-28-8846

URL : <http://www.ariake.civil.saga-u.ac.jp/index.html>





<http://www.ariake.civil.saga-u.ac.jp/index.html>

# 佐賀県有明海沿岸域におけるノリ養殖の協業化の 現状とその特質

SEAWEED COOPERATION SYSTEM IN THE ARIAKE SEA, SAGA JAPAN

山下宗利

Munetoshi YAMASHITA

理博 佐賀大学教授 佐賀大学文化教育学部地域・生活文化講座 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

This study focuses on the intensification of massive cooperation between seaweed growers in the Ariake Sea, Saga as that is in the most advanced area of seaweed production in Japan. Seaweed has been produced by family members at small home plants individually. Recent research, however, has recognized that cooperating between seaweed growers leads to better productivity as measures for meeting the needs of both the aging society and lack of their successors. within this paper, I intend to discuss the current status of the cooperative system of seaweed production in Kashima, Saga prefecture and explores the extent to which the productivity of seaweed in the neighborhood.

**Key Words:** *Ariake Sea, seaweed cooperation system, Kahima,*

## 1. はじめに

ここ数年来、佐賀県有明海におけるノリ養殖業には活況が続いている。2007年度の佐賀県有明海産ノリの共販実績は、枚数で2,145,060千枚（秋芽：693,143千枚、冷凍：1,451,917千枚）、金額で23,003,382千円（秋芽：8,766,319千円、冷凍：14,237,063千円）となり、5季連続で日本一であった。販売額は過去最高で、枚数も2005年度（2,156,887千枚）に次ぐ記録となった。また平均単価も10.72円（秋芽：12.65円、冷凍：9.81円）と、ここ5年間では2003年度の11.80円に次ぐ高値で取引された。佐賀県と佐賀県有明海漁業協同組合（2007年4月1日発足）の両者の新基準で厳選された「佐賀海苔 有明海一番」は2007年の第1回ノリ入札会では平均単価193.80円で落札され、佐賀県産海苔の新ブランドとして注目されている。

しかしながら当該地域におけるノリ養殖を取り巻く状況は必ずしも良好とはいえない。その一つはノリ養殖には海況に左右される不安定要素が多分に存在しているからである。2007年度の佐賀県有明海におけるノリ網の種付け作業は高海水温の継続で大幅に遅れ、平年よりも15日ほど遅く10月

25日ようやく始まり、ノリ養殖漁民の間で不安感が高まった。近年でも栄養塩類の不足にともなう色落ち発生による生育期間の短縮や赤潮・病害発生による不作といった海況に左右される点は克服されておらず、生産面での安定化が強く望まれている。また台風被害も無視できない。二つ目の不安要素として、ノリ養殖業は、このような自然を相手とした産業であるとともに、グローバル化の進展にともなう国際競争にも直面している点をあげることができる。海苔の輸入に際しては、2004年までは韓国産に限定されていたが、2005年度以降は輸入割当制度を適用し、中国産海苔の輸入に踏み切ることになった（2006年度の総輸入割当量は5.85億枚で、うち韓国：3.4億枚、中国：2.3億枚）。現時点では国産海苔と海外産海苔の間には品質面で大きな格差が存在し、著しい脅威には発展していない。しかし生産・漁場環境面での不安要素の存在、さらに商社が共販価格に大きな力を有している状況においては、今後のわが国のノリ養殖業への影響は逼迫しているといわざるを得ない（漁価安定基金 2006<sup>1)</sup>）。またノリ単価の下落による生産金額の低迷も見逃すことはできない。佐賀県においては、ノリ養殖業はきわめて重要な産業であり、ノリ養殖漁家の経営面での安定化が大きな課題となっている。第三にノリ養殖漁家の

労働力問題がある。高齢化の進行と後継者問題がその基底にあり、従来の比較的小規模な家族的経営をいかに発展させるか、といった課題が存在している。

佐賀県はノリ養殖業の重要性を認知し、上記の種々の課題に対して全国的にも早くから対策を講じてきた。その一つがノリ養殖協業化である。ノリ養殖漁家にとって協業化は、とりわけ女性労働時間の縮減や生産性の向上、後継者の確保などに効果が認められ（中村 1996<sup>2)</sup>；のり養殖協業化推進検討委員会・佐賀県有明海漁業協同組合連合会 2000<sup>3)</sup>；島 2001, 2002<sup>4)</sup>；片岡 2003<sup>5)</sup>；山下 2005<sup>6)</sup>；福富町漁業協同組合水産振興研究部 2005<sup>7)</sup>）、1995年以降、県内有明海沿岸域においてノリ養殖協業化施設の整備が推進されてきた。現在では漁業経営構造改善事業を中心に、生産効率の向上とコスト削減によるノリ養殖漁家の経営基盤の強化を図ることを目的に、ノリ養殖協業化施設整備が重点的に継続して行われている。

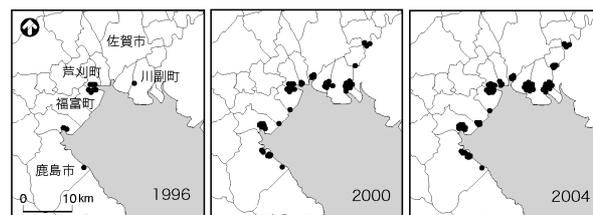
本研究は、佐賀県有明海沿岸域におけるノリ養殖協業化の進展の現況を踏まえた上で、地域差とともに協業化の背景を検討したい。なお、本研究では鹿島を事例地域として選定し、調査・分析を進めた。

## 2. ノリ養殖協業体

### (1) 3種類の協業体

ノリ養殖業における協業化のパターンは、全面協業タイプ、委託加工タイプ、そして加工場共同利用タイプの3種類に大区分できる（水産庁 2006<sup>8)</sup>）。協業化のタイプはノリ養殖漁家の特性と地域の社会的条件によって変化し、後述のように、佐賀県では全面協業タイプが主流であり、委託加工タイプもみられる。

全面協業タイプは、海上および陸上の施設と設備のすべてを協業により行うものであり、海上と陸上のいずれの作業も協業体漁家が分担する。したがって協業体の利益は各ノリ養殖漁家に配分され、設備などの減価償却費も分担される。これに対して委託加工タイプは、海上作業は各ノリ養殖漁家が従来どおりそれぞれ個別に行い、ノリの加工を施設所有者に委託する方式である。ノリ養殖漁家は海上作業のみを専ら行い、ノリ乾燥機などの施設は有しない。加工施設所有者は漁協の各支所であることが多い。ノリ養殖漁家は加工施設所有



第1図 ノリ養殖協業体の展開  
資料：佐賀県有明海漁業協同組合

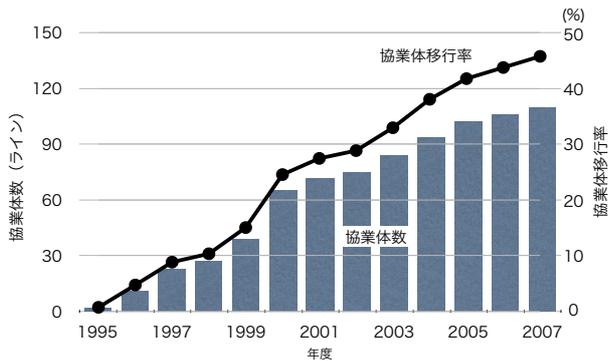
者に対して委託加工料（3.5円/枚）を支払い、製品化された板海苔を受け取る仕組みである。しかし共販価格によっては委託加工料を減免せざるを得ず、漁協支所の負担が大きくなるおそれがある。加工場共同利用タイプは、協業体の各ノリ養殖漁家が個別に海上作業と加工作業を行うが、加工施設は共同で利用する方式である。加工場共同利用タイプでは、加工作業の日程が重複し、時間的な制約が大きいためといわれる。佐賀県有明海沿岸域のノリ養殖協業体では前二者が採用されている。

### (2) 佐賀県におけるノリ養殖協業化の進展

第1図は佐賀県有明海沿岸域におけるノリ養殖協業体の拡大を地図化したものである。ノリ養殖協業体は1995年度に芦刈漁協と福富町漁協の中部地区で開始された。ともに県単独の協業化モデル経営体設置事業による補助を受けたものであった。前者では5つのノリ養殖漁家が、後者では4つのノリ養殖漁家が協業体を組織した。1996年にはノリ養殖協業体は広江支所や新有明支所、鹿島市（七浦）支所にひろがった。初期のノリ養殖協業体は佐賀県有明海沿岸域の中でも中西部地区に偏在していた。協業体数は計11、協業化したノリ養殖漁家数は計52であり、協業化への移行率は5%弱であった（第2図）。

ノリ養殖協業体は1999年に39、2000年には65に急激に増加した。それとともに協業体移行率も大きな伸びを示した。この間の増加は、南川副支所や佐賀市支所といった東部地区と中部地区において多くの協業体への移行が生じたためであった。とりわけ生産規模の大きな川副町において協業化が進展した。2001年以降は協業体移行率の伸びに陰りがみえ始め、2004年のノリ養殖協業体の分布は2000年当時のそれと大きな変化は認められない。しかし既存の協業体に隣接して新たな協業施設が配置され、集積の度合いが進行していることが看取できる。

第2図にみられるように、2007年には佐賀県有明海沿岸域全域におけるノリ養殖の協業体総数は



第2図 佐賀県におけるノリ養殖協業体の増加  
資料：佐賀県有明海漁業協同組合

110に達し、個人経営から協業体へと移行したノリ養殖漁家総数は498を数え、その協業体移行率は45.8%に達している。これら協業体には計10の委託加工タイプの協業体が含まれ、それらのラインの合計は23を数える。委託加工タイプの協業体は、諸富町（5ライン、以下同様）、広江（3）、東与賀町（6）、福富町（2）、白石町北明（2）、新有明（2）、たら（3）の各支所に立地している。

ところで協業体への移行には地域差が存在している。漁協の支所別にみると、最も移行が進展しているのは福富町の88.4%であり、43行使者のうち38漁家が協業体を組織している。白石町北明支所（84.4%）が次いで高く、佐賀市支所（75.0%）、たら支所（72.4%）と続く。協業化の進展している支所では、規模拡大を目指すノリ養殖漁家が存在する一方で、高齢化と後継者問題が深刻化し、さらには小規模なノリ養殖漁家の存在が少なからず要因となっている。これに対して、協業体移行率の最も低い支所は、大詫間支所の3.5%である。また鹿島市（浜町）支所（32.6%）、南川副支所（38.2%）も低く、これらの支所では大規模な個人経営が存続していることがその背景にある。

### 3. 鹿島におけるノリ養殖

#### (1) 鹿島ノリ養殖業の位置づけ

2003年漁業センサスによれば（第1表）、鹿島市における漁業経営体数は218であり、このうち58戸（26.6%）が専業である。浜町では専業経営体は37戸の56.1%を占め、鹿島市の中でも漁業に特化した地域となっている。また160の兼業経営体においても漁業が主の兼業経営体が111（全兼業経営体の69.4%）あり、浜町以外の漁家においても漁業経営に重きが置かれている。

第1表 鹿島における漁業経営体(2003年)

事業所	総数	経営体		漁業が主の兼業経営体 (戸)
		専業経営体	兼業経営体	
鹿島	26	10 (38.1%)	16 (61.5%)	15
鹿島町	44	0 (0%)	44 (100%)	40
浜町	66	37 (56.1%)	29 (43.9%)	12
七浦	82	11 (13.4%)	71 (86.6%)	44
計	218	58 (26.6%)	160 (73.4%)	111

資料：漁業センサス

鹿島市漁業協同組合（現佐賀県有明海漁業協同組合鹿島市支所）では、ノリ養殖の水揚金額は当該漁協全体の97.7%（2006年度）に達する。小型底曳き網のモガイ漁が次いで大きいですが、その比率はわずか0.8%に過ぎない。鹿島においてはノリ養殖業が基幹的漁業となり、ノリ養殖業に大きく依存している。

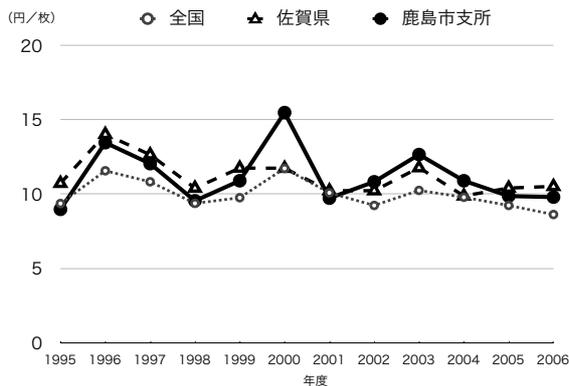
ここで鹿島におけるノリ養殖業の位置づけをしてみたい。2007年度における佐賀県有明海のノリ養殖業は前述のように豊漁であった。鹿島市支所全体のノリ共販枚数は214,729千枚であり、これは佐賀県産ノリ全体の10.0%を占め、また共販金額は2,346,768千円（同10.2%）であった。鹿島市支所は有明海湾奥の西部に位置しているため、栄養塩が豊富な筑後川河口に隣接している南川副や大詫間支所と比べると生産面で不利であり、柵当たりの生産量や生産額はそれら有明海東部地区には及ばない（山下 2005）。このような不利な状況にもかかわらず鹿島市支所のノリ養殖は、ほぼ大詫間支所に匹敵する生産規模を有していることに注目したい。また鹿島市支所の平均共販価格は10.93円/枚（2007年度）と、県平均の10.72円/枚を上回っている。したがって鹿島市支所のノリ養殖業は、地理的に不利な条件に置かれているにもかかわらず、比較的高品質のノリを大規模に生産している点に特徴がある。

第2表は鹿島市支所におけるノリ養殖業の現況を示したものである。2002年度以降、ノリ養殖経営体数は漸減傾向にあり、2007年度には169となっている。また施設数も減少もしくは横ばいの状況にある。県全体の傾向とは少し異なり、2007年度の鹿島市支所におけるノリ生産量と生産金額は、前年度に比べて6千万枚、3億3千万円の減少となっている。この一方で、ノリ養殖漁家の生産規模には拡大が認められ、1戸当たりの平均施設数（柵）は2007年度には252となり、また1施設数（柵）当たりの平均生産量や1戸当たりの平均生産額も2007年度を除けば近年は安定した豊作が続いている。とりわけ1戸当たりの平均施設数

第2表 鹿島市支所におけるノリ養殖の現況

	2002年度	2003年度	2004年度	2005年度	2006年度	2007年度
経営体数(戸)	194	192	187	184	170	169
施設数(柵)	45,210	45,050	44,560	44,300	42,590	42,650
生産量(千枚)	155,685	185,786	200,400	279,781	275,807	215,753
生産金額(千円)	1,690,226	2,357,147	2,188,867	2,767,073	2,709,768	2,382,652
1戸当たりの平均施設数(柵)	233	235	238	241	251	252
1施設当たりの平均生産量(枚)	3,444	4,124	4,497	6,316	6,476	5,059
1戸当たりの平均生産額(千円)	8,713	12,277	11,705	15,038	15,940	14,099
1枚当たりの平均単価(円)	10.85	12.68	10.92	9.89	9.82	11.04

資料:佐賀県有明海漁業協同組合鹿島市支所



第3図 佐賀県におけるノリ共販価格の動向

資料:佐賀県有明海漁業共同組合

(柵)に顕著な増加が生じている。高齢化や後継者難により廃業した漁家の柵は各事業所内で再配分されるため、意欲的なノリ養殖漁家が柵を引き継ぎ、経営規模の拡大を図っていることがこの背景にある。漁場行使の制約が残存している。

第3図は1995年度以降におけるノリ共販価格の動向を示したものである。有明海でノリの大不作が発生した2000年度および全国的に不作であった2003年度の両年では鹿島市支所のノリ共販価格は佐賀県平均価格よりも高値で落札され、鹿島では影響が小さかったことがわかる。このようなノリ価格の年変動とともに、全国的にノリ価格は漸減傾向にあり、佐賀県産ノリの高価格を維持することは年々困難になりつつある。第3図から佐賀県有明海産ノリ価格と鹿島市支所のノリ価格はほぼ全国価格を上回る水準で推移しているが、全国平均との格差は近年ほど縮小しつつあり、10円/枚に近づきつつある。これにはコンビニエンスストアで販売されるおにぎり用のノリの需要拡大、といったノリを取り巻く需要構造の変化が大きく作用している。ノリの販路の拡大や消費の拡大、ノリ価格の設定には海苔商社の力が大きく、生産者側では主導権を保有し難いシステムである。その

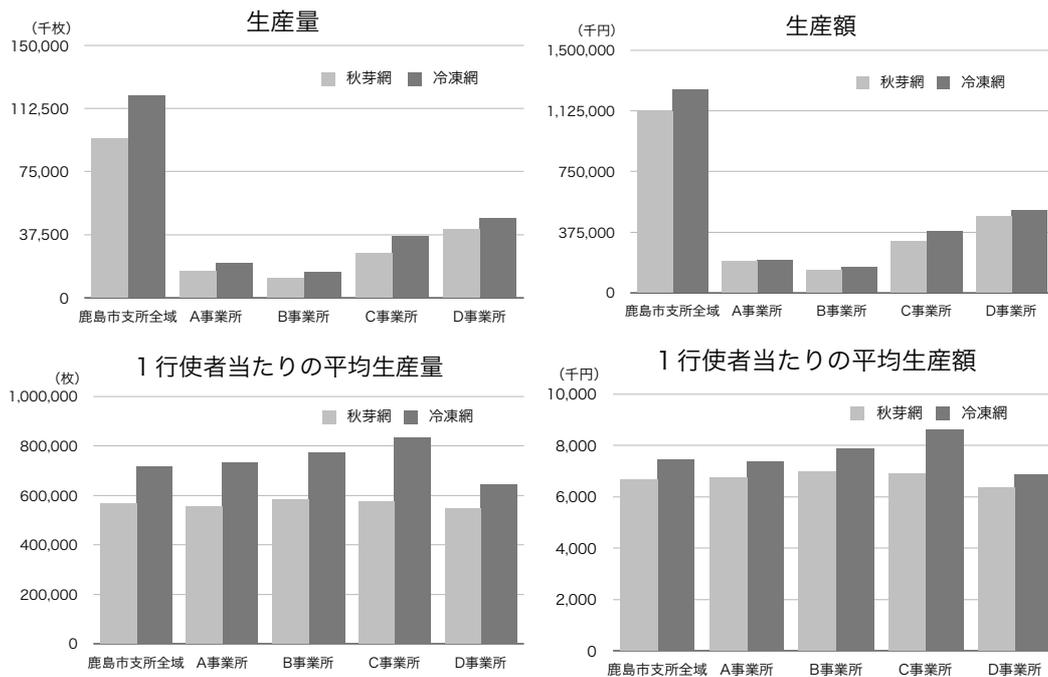
ため佐賀県有明海においてもノリ価格の低下を生産量の増大によって補填しようとする動きが生じており、これがノリ品質の低下をも招きつつあるといえよう。

## (2)鹿島ノリ養殖業の地域差

上述のように鹿島市におけるノリ養殖業は生産面での不利な条件を克服して大きな生産規模をあげている。以下では鹿島ノリ養殖業の特色を探ってみたい。

第4図は佐賀県有明海漁業協同組合鹿島市支所の4つの事業所別ノリ生産の現況を示したものである。生産量と生産額はともにD事業所が最も大きく、最も小さなB事業所との間には約3倍の開きがある。ノリ養殖経営体数や施設数(柵)もほぼ同様な開きがある。またノリ1枚当たりの平均単価は10.92~11.11円/枚(鹿島市支所の平均単価は11.04円/枚)、1柵当たりの平均生産量は4,934~5,186枚/柵(同柵当たり枚数は5,058枚/柵)であり、4つの事業所には地域差はほとんどみられない。すなわち生産量の地域差は経営体数や柵数の差が表れているものと考えられる。

1行使者当たりの平均生産量および1行使者当たりの平均生産額になると、事業所間の差異が表面化する。秋芽網では地域間で差がないものの、冷凍網ではC事業所の値が平均生産量と平均生産額の両者で大きくなり、D事業所を上回っている。1行使者当たりの値では、ノリ養殖に携わっている漁師間の労働力投下量の差異が浮かび上がるとされる。



第4図 鹿島市支所におけるノリ養殖の事業所別現況 (2007年度)

資料：佐賀県有明海漁業協同組合鹿島市支所

#### 4. おわりに —鹿島におけるノリ養殖協業化の完了—

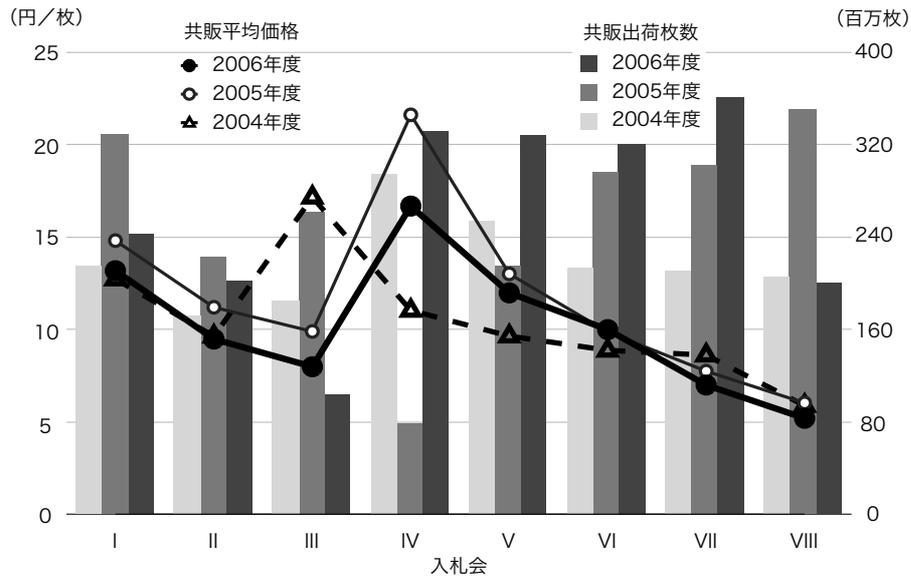
佐賀県有明海沿岸域におけるノリ養殖は熊本県などに比べて遅く始まり、昭和30年代に広まり、今日では全国有数のノリ養殖産地に成長した。鹿島では、とりわけ浜町では戦前から専業漁家が活躍し、遠く朝鮮半島にまで漁に出る漁村社会が形成されていた。そのためノリ養殖は農業の冬季副業としてではなく、多くは専業形態でなされるようになった。鹿島沖でのノリ養殖は、筑後川河口域に比べて早く色落ちするため、養殖期間が短く生産量や品質とも有明海湾奥の東部地区に比べて劣点が存在した。そのため佐賀県有明海では比較的早くから協業化が取り入れられ、生産効率の向上を目指した。協業体移行漁家とともに精力的な若手のノリ養殖漁家が鹿島市支所では存在し、現在では大詫間と肩を並べるまでにノリ養殖業が発展するに至っている。

鹿島での最初のノリ養殖協業化は七浦でモデル高度化事業の補助を受けて1996年に始まった。この協業体は4漁家から構成されていた。その後、1998年に1つ、2000年に7つ、2003年に1つ、2005年に2つの計12の協業体が現在稼働してい

る。浜町に3つ、七浦に9つあり、参加漁家数は前者が15、後者が42であり、協業体それぞれに4ないし6漁家から構成されている。この結果、協業体移行率は浜町事業所では32.6%、七浦事業所では56.8%となっている(2007年11月現在)。また施設数(柵)は大規模な協業体では1,450枚、小規模なものでは910枚で、平均値は1,213枚である。今後はさらなる経営の効率化を目指して、4漁家で1つの協業体を運営できるような体制づくりが求められている。なお、委託加工タイプの協業体は鹿島市支所では存在せず、専ら全面協業である。

12の協業体のうち2005年に2つが加わったが、鹿島市支所では協業体への移行はほぼ完了し、これ以上増えないだろうとされる。すなわち、将来の高齢化や後継者難によるノリ養殖漁家の廃業が生じた場合には、意欲的な漁家がそれらを引き継いでいくと予想されている。この背景には漁場利用の権利意識が強く根付いていることがあげられ、当該漁場の意欲的な後継者へノリ漁場の継続がなされている。

ノリ養殖協業化は、他地域と同様、鹿島においても生産コストの縮減や女性労働時間の短縮などの生産性の向上をもたらした。また同一の協業体で生産された同品質の等級の板海苔が同時に多量に出品されるため、価格の上昇とともに取り扱いの簡素化をもたらしたとされる。



第5図 佐賀ノリ入共販価格・枚数の推移

資料：全国海苔貝類漁業協同組合連合会  
 入札会の日時（2006年度）I：11月21日、II：12月7日、III：12月25日、IV：1月10日、  
 V：1月25日、VI：2月8日、VII：2月22日、VIII：3月8日

鹿島市支所においてもノリ価格の維持が今後の懸案事項となっている。ノリ価格の維持を図るため、品質の向上、販路の拡大、そして消費の増大が重要な要素であるが、後2者は生産者、すなわちノリ養殖漁家の力の及び難い領域である（漁価安定基金 2006）。第5図は佐賀県産乾ノリ入札会ごとのノリ共販価格・共販枚数の変動を示したものである。秋芽網ノリの第1回目において高価格が形成されている。しかし入札会の進行とともに秋芽ノリは価格、出荷枚数ともに低下がみられ、冷凍網から摘み取られたノリの最初の入札会（第4回入札会）において価格は上昇するが、その後は再び下降傾向をとるようになる。年度による違いがあるが、出荷枚数は3月まで高い状況が継続される。このようなノリの共販価格や共販枚数のリズムを適切に管理する仕組みづくりが必要と思われる。そのためにも協業化が一段落する近い将来に向けて、より一層効率的な生産・出荷管理体制の導入を図る必要がある。また、高齢化や後継者難の進行により、生産規模の拡大に取り組む意欲的な家族型ノリ養殖漁家の存在はきわめて重要であり、かれらの生産基盤の向上を図る必要がある。

参考文献

- 1) 漁価安定基金：ノリの生産・流通・消費の現状と今後の課題, 67p., 2006.
- 2) 中村周作：有明海漁村における浅海水域利用の変容—佐賀県川副町のノリ養殖業を事例として—, 低平地研究, 5, 75-87, 1996.
- 3) のり養殖協業化推進検討委員会・佐賀県有明海漁業協同組合連合会：ノリ養殖の協業化にむけて, 34p. 2000.
- 4) 島 秀典：海苔養殖産地の発展と協業化—佐賀県有明海の事例—, 東京水産振興会『漁業経営（組織・管理方式）のあり方—事例調査研究報告—』, 191-214, 2001.  
 島 秀典：有明海ノリ養殖業と協業化, 東京水産振興会『漁業経営（組織・管理方式）のあり方—最終報告—』, 59-75, 2002.
- 5) 片岡千賀之：ノリ養殖の協業化と漁協委託加工—佐賀有明海の事例—, 農業経済研究48-1, 59-75, 2003.
- 6) 山下宗利：有明海におけるのり養殖協業化の進展, 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集1, 41-48, 2005.
- 7) 福富町漁業協同組合水産振興研究部：未来のノリ養殖経営へ向けて—協業体の取り組みと成果、そして今後—, 漁村11, 36-44, 2005.
- 8) 水産庁：養殖, 23p., 2006.