

有明海の竹崎－大牟田ラインにおける 成層構造と水質特性

DENSITY STRATIFICATION AND WATER QUALITY IN A VERTICAL SECTION ALONG TAKESAKI - OHMUTA LINE OF ARIAKE SEA

徳永貴久¹・鵜崎賢一²・松永信博³・小松利光⁴

Takahisa TOKUNAGA, Ken-ichi UZAKI, Nobuhiro MATSUNAGA, Toshimitsu KOMATSU

¹学生会員 修(工) 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)

²正会員 博(工) 日本学術振興会特別研究員 (〒816-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

³正会員 工博 九州大学大学院 総合理工学研究院教授 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1)

⁴正会員 工博 九州大学大学院 工学研究院教授 (〒816-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

Water quality in a vertical section along Takesaki - Ohmuta line of Ariake Sea was observed under diverse vertical density distributions in the summer season of 2003. A high turbidity layer is formed near the bottom during the ebb tide period. The density stratification suppresses the mixing between the upper layer and the lower one. Both the generation of the high turbidity layer and the density stratification induce the rapid consumption of dissolved oxygen over the whole of the lower layer. Fluxes of Chl.a and SS take large values in the western area of Ariake Sea even under non-stratification field. When the stratification due to the freshwater is formed, primary production in the west area of Ariake sea become larger than that in the east area, and the difference of the between the fluxes west and east areas may become more apparent.

Key Words : Ariake Sea, density stratification, water quality

1. はじめに

有明海では、その閉鎖性、大きな潮位差、多くの河川からの淡水流入、広大な干潟の存在、潮流による底泥の巻き上がりといった様々な力学機構と地形的特徴によって、多様で固有な生態系が構成されている。また、同時に高い生物生産性が維持されてきた。しかし近年、有明海奥部の水質は干潟の著しい消失や過剰な栄養塩の流入のため富栄養状態にある。富栄養化は赤潮を発生させ、海苔の不作を引き起こす。さらに、赤潮の発生は貧酸素化を引き起こし、魚介類の生息環境を悪化させる。事実、有明海特産であったアサリやタイラギなど二枚貝の漁獲高は激減している。また、2000年冬季に発生した海苔の色落ち問題は、諫早湾干拓事業と相まって全国的な関心を集めることとなった。このような社会的背景から、有明海における水質・底泥環境の保全に向けた取り組みが様々な研究機関で行われている（例えば、堤ら¹⁾、鯉淵ら²⁾、柳ら³⁾、滝川ら⁴⁾）。

小松⁵⁾は有明海の流況と水質を時空間的に調べるため

「有明プロジェクト」を組織し、2001年10月16日に有明海全域を対象に流速、流向、水質の一斉観測を行った。その膨大なデータは有明プロジェクト中間報告書（その1）にまとめられており、これまであまり知られていなかった潮流の時空間パターンと水質の空間分布に知見を与えている。しかし、この一斉観測は10月中旬に行われたため、密度成層の効果を明らかにすることはできなかった。そこで、小松は有明プロジェクトⅡを立ち上げ、2003年7月20日、貧酸素水塊の発生が期待される湾奥部、湾中部および諫早湾内を中心に流況および水質の一斉観測を行った。あいにく、この時も天気恵まれず、海域は成層状態になかった。有明プロジェクトⅡの広域に及ぶ同時観測データはまもなく報告される予定であるが、その後も著者らは有明プロジェクトⅡにおいて担当した竹崎－大牟田ラインでSTDによる水質観測を定期的に行ってきた。有明海を横断する竹崎－大牟田ラインは有明海の水質特性を理解する上で、極めて重要な測線の一つである。その理由は、竹崎－大牟田ラインは有明海の湾奥部と湾中部とを地理的に区分するラインであること、そのラインに沿った海底地形の変化が著しいこと、底質

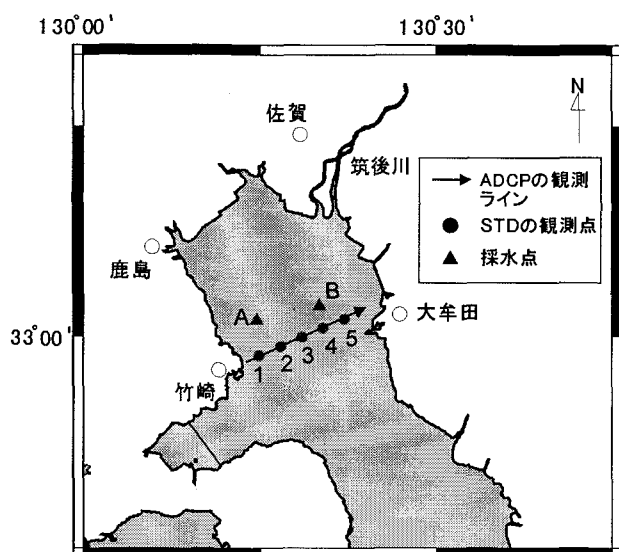


図-1 観測地点

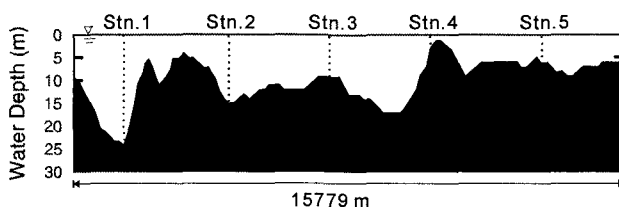


図-2 竹崎－大牟田ラインに沿った水深と海底地形

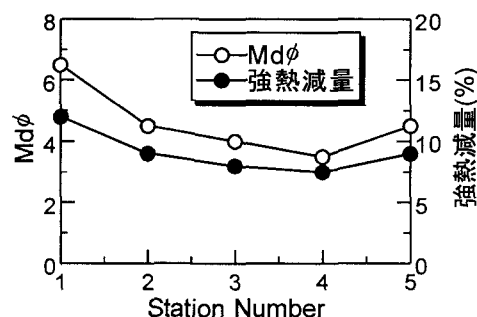


図-3 観測地点における中央粒径と強熱減量
(陶山ら⁶⁾を基に作成)

表-1 観測概要

Run	日時	潮名	観測日 の潮位差 (cm)	観測時の潮の位相	STD	ADCP	採水	成層パラメータ
1	7月2日	中潮	421	干潮	○	×	×	8.66×10^{-3}
2	7月20日	中潮	257	満潮	○	○	×	1.77×10^{-3}
3				下げ潮最強時	○	○	×	2.11×10^{-3}
4				干潮	○	○	×	2.55×10^{-3}
5	8月22日	長潮	105	満潮	○	×	○	9.41×10^{-3}
6	9月3日	小潮	308	上げ潮最強時	○	×	○	5.22×10^{-3}

が西部海域のシルト質から東部海域の砂質に変化すること(陶山ら⁶⁾)、最近貧酸素水塊の発生が竹崎沖でしばしば観測されていること(佐藤ら⁷⁾)などが挙げられる。

本論文では、2003年7月20日有明プロジェクトⅡで行った竹崎－大牟田ラインに沿った流況・水質観測の結果に加え、定期的に行ってきた水質観測結果をまとめ、密度成層構造の違いによる水質の変化について報告する。また、下げ潮最強時における竹崎－大牟田ラインからの物質流出フラックスを見積もり、空間分布特性について検討する。

2. 観測概要

観測は7月2日から9月3日まで6回行われた。水質観測は、図-1に示す様に竹崎沖から大牟田沖を直線上に結んだライン上に等間隔に設定された5地点において行われ

た。Stn.1からStn.5で多項目水質計(アレック電子製: ACL1182-PDK, 以下STD)を船上から釣り下げ、水質の鉛直分布を1m間隔で測定した。測定項目は水温、塩分、クロロフィルa(以下Chl.a)、濁度、DOである。観測時に採水を行い、ウィンクラー法によりDOのキャリブレーションを行った。また、Chl.aのキャリブレーションについてもDOと同様に観測時に採水することによって行われた。Chl.a濃度は、試料水約250mlをガラス繊維濾紙(Whatman, GF/C)で吸引濾過した後、濾紙を90%アセトン溶液中に入れてChl.aを抽出し、Lorenzen(1967)の方法に従って測定された。7月20日においては超音波流速計(RD-Instruments社製、以下ADCP)による流速観測も同時に行った。なお、ADCPのデータ取得は1m間隔で3秒毎に行われた。さらに8月22日においては、図-1に示す地点Aおよび地点Bにおいて表層、底層で採水し、栄養塩の分析を行った。ガラス繊維濾紙(Whatman, GF/C)で試料水を吸引濾過後、濾液中の栄養塩($\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$,

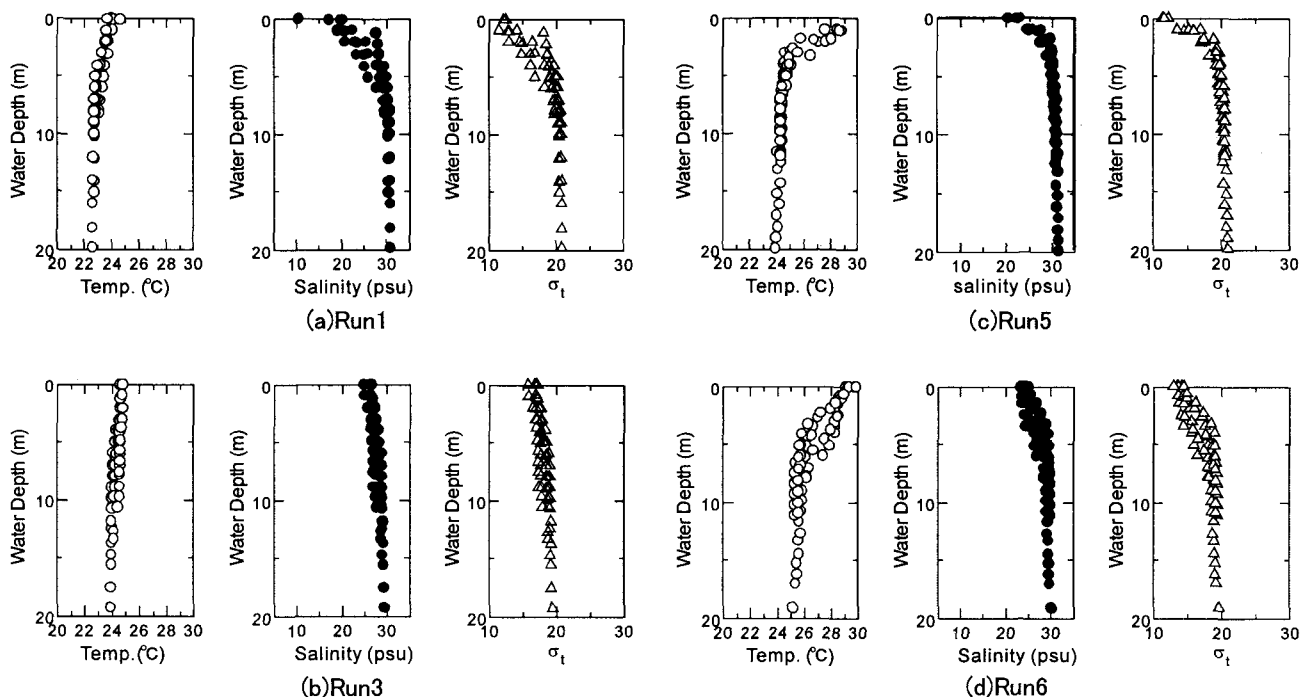


図-4 水温、塩分、密度の鉛直分布

PO₄-P) 濃度を水質分析装置 (セントラル科学, DR2010) を用いて測定した。図-2に竹崎-大牟田ラインにおける基本水準面下での海底地形を示す。この図より竹崎-大牟田ラインでの地形的特徴は以下の通りである。Stn.1付近で水深が最も深くなっており、Stn.1からStn.2までの間には水深5m程度の浅い地点が存在する。Stn.2からStn.3までは比較的平坦な地形となっている。Stn.3からStn.4の間に水深が15m程度の深い地点が存在する。またStn.4付近で水深は最も浅くなり、2m程度である。Stn.4より東側では比較的平坦な地形となっており、平均水深は6m程度である。

図-3に各観測地点における底泥の中央粒径および強熱減量を示す。陶山ら⁹⁾の論文からデータ値を直接読み取ったもので、読み取り精度に若干の問題がある。Stn.1では粒径が小さくシルト質となっており、強熱減量が大いことから有機物が底泥に堆積していることがわかる。Stn.1からStn.3にかけて粒径は大きくなり、有機物量は減少する傾向がある。最も粒径の大きいStn.4では底泥は砂質で構成されている。

表-1に各観測日の観測概要を示す。ここで、各観測日の成層構造を示すために、 $(\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$ で定義される成層パラメータを示した。ここで、 ρ_1 、 ρ_2 はそれぞれ表層の密度と底層の密度である。密度の値は、STD測定によって得られた水温と塩分の値を用いて算出された。

3. 観測結果および考察

(1) 成層構造

図-4に、Run1, 3, 5, 6のSTD観測で得られた水温、塩分および水温と塩分のデータから算出した密度 σ_t の鉛直分布を示す。図中には、Stn.1~5のデータがプロットされている。Run2と4のデータはRun3とは同じ観測日であり、これらの分布の違いはほとんど無かったためここでは記載していない。Run1では、水深5mの深さまで密度躍層が形成されている。この密度成層は、温度成層に依るというよりむしろ塩淡成層に依るものである。水表面における塩分の分布にはばらつきが見られる。これは、Stn.1~5における河川水の分布の違いによって引き起こされたもので、有明海に流れ込んだ河川水の流況に起因していると思われる。実際、強い密度成層はStn.4より西側の海域 (竹崎側) で観察されており、筑後川からの淡水が有明海西岸に沿って南下したものと考えられる。Run3では成層が最も弱く、鉛直方向の混合は活発であったと推測される。水温と塩分の分布にそれ程ばらつきが見られないことから、竹崎-大牟田ラインに沿って密度分布はほぼ一様であったことがわかる。Run5は、観測期間中最も成層が強く、およそ水深3mという薄い層内で密度成層が形成されている。密度成層は、温度成層と塩淡成層の両者に起因していることがわかる。また、分布においてもばらつきはほとんど見られず、竹崎-大牟田ラインに沿って成層構造が一様であったことがわかる。Run6では水温と塩分による比較的弱い成層が密度

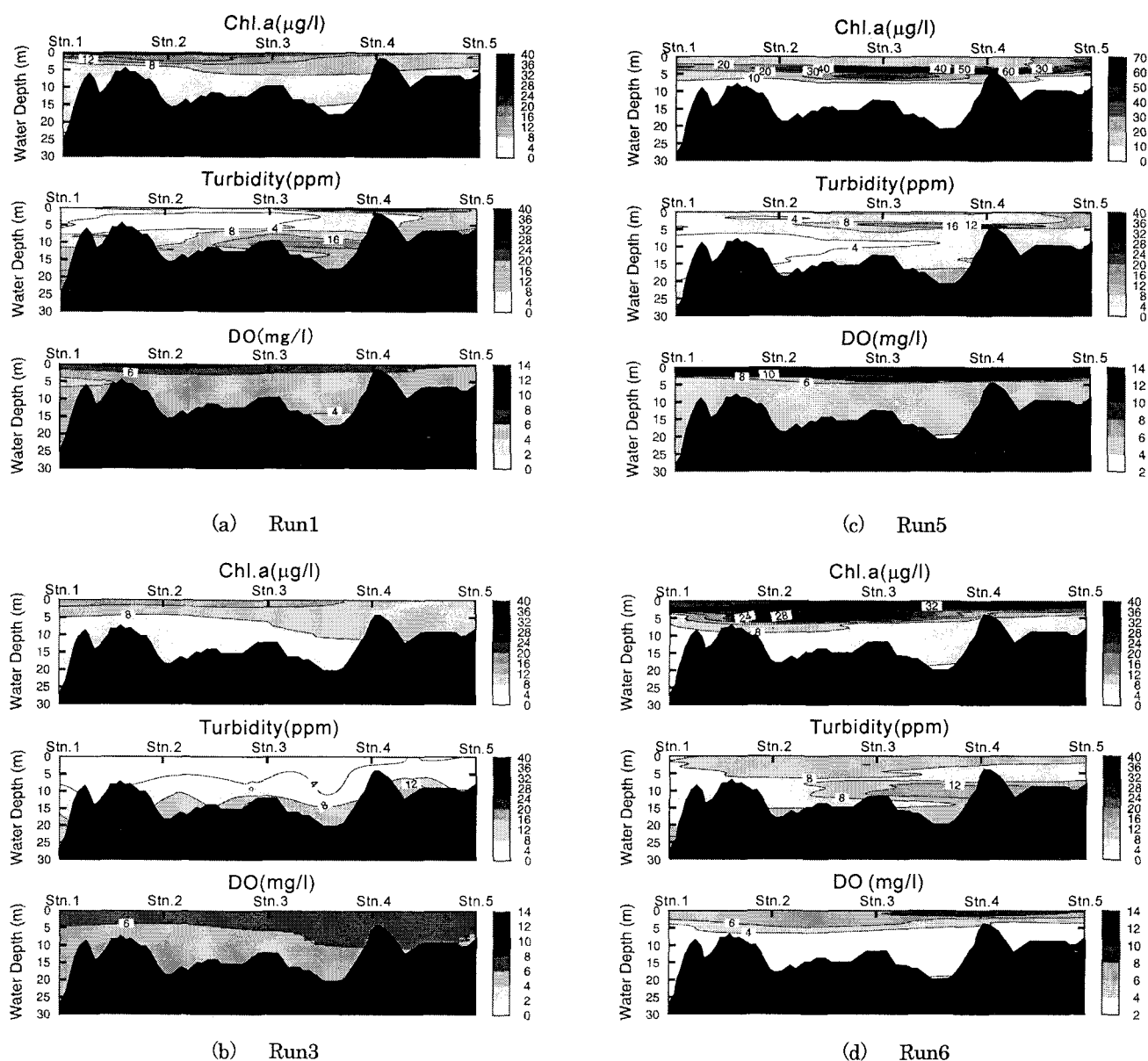


図-5 Chl. a 濃度、濁度、DO濃度の空間分布

成層を引き起こしている。躍層は約5mの厚さをもっているが、密度界面付近においてばらつきが見られる。これは、成層強度が弱くなり潮流による鉛直混合が進行し、竹崎-大牟田ラインに沿った成層構造が非一様化したと思われる。竹崎-大牟田ラインに沿った観測日における成層構造をまとめると以下の通りである。7月2日では河川水流出による塩淡水成層が形成されており、淡水分布の違いにより非一様な分布となっている。7月20日ではほぼ密度一様な場が鉛直方向に形成されている。8月22日では水温と塩分による強い成層が海域全体に渡って一様に形成されている。9月3日は温度成層と塩淡水成層ともに弱くなり始めている時期である。

(2) 水質の空間分布

図-5にRun1, 3, 5, 6において得られたChl.a濃度、濁度、DO濃度の空間分布を示す。空間分布として、

Stn.1からStn.5の範囲が描かれている。Run1では、Chl.a濃度が西側の表層に集中していることがわかる。これは、前述したように豊富な栄養塩を含んだ河川水が西側沿岸に沿って南下したため、西部海域で植物プランクトンが発生したことに起因する。一次生産の増加に伴い、表層内のDO濃度も高くなっていることがわかる。観測時は潮位差4.21mの干潮時に当っており、底泥の巻き上がりによる高濁度層が密度界面付近まで達していることがわかる。成層効果によって酸素が底層に供給されにくいことと高濁度層の拡散によって底層内の溶存酸素が消費されることが重なって、底層内のDO濃度は低くなっていることがわかる。

Run3では、強い密度成層が形成されていないため、Chl.a濃度、濁度、DO濃度の鉛直分布はかなり滑らかなものとなる。表層付近に存在する8~12 $\mu\text{g/l}$ のChl.a濃度は通常観測される植物プランクトン量に対応している。

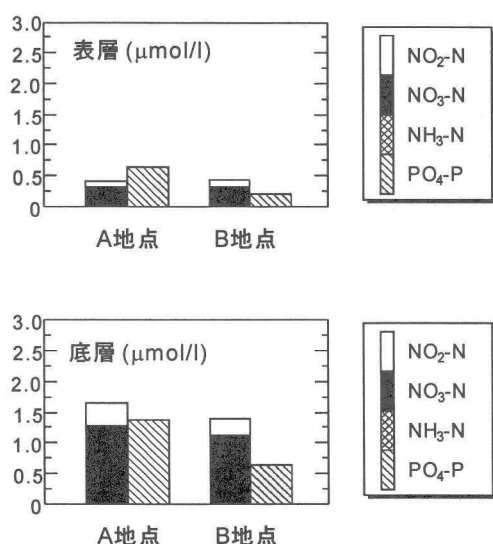


図-6 栄養塩の濃度

観測時は潮位差2.57mの下げ最強時であり、底面付近に高濁度の巻き上がりが形成されている。

Run5は、強い水温成層と塩淡水成層が形成されていた時期に対応しており、Chl.a濃度から表層全体に渡って赤潮が発生していることがわかる。これは、河川からの豊富な栄養塩の供給と十分な日射量とが一致したためであり、竹崎一大牟田ライン全域に渡って赤潮が広がっている。表層に存在する高濃度の植物プランクトンの存在によって、濁度は表層で高い値を取っている。観測時は潮位差1.05mの小潮の満潮時であり、底泥の巻き上がりはかなり小さい。DO濃度の分布も成層しており、表層で過飽和状態となっている。しかしながら、底層内のDO濃度は密度成層効果と底泥の巻き上がりによって低下していることがわかる。

Run6の観測は、Run5の観測と近い時期に行われたものであり、潮位差と潮汐の位相は異なっているものの、Chl.a、濁度、DO濃度の定性的なパターンはよく類似している。密度成層の弱まりと同時に赤潮も回復に向かっている。しかし、底層内のDO濃度は全域に渡って4mg/l以下の値を示しており、貧酸素に近い状態となっている。Run5の底層内のDO濃度と比較すると濃度が一様に低下していることがわかる。これは、8月22日から9月3日にかけて表層内の栄養塩は枯渇し、成層効果も弱まり、枯死した植物プランクトンが底層に沈降したため、表層からの有機物の供給によって底層内の酸素消費が加速したものと推測される。

8月22日A,B地点の表層および底層から採取した海水を分析し、得られた栄養塩の濃度を図-6に示す。表層においては無機態リンおよび無機態窒素いずれにおいても低い濃度を示している。これは、大量の植物プランクトンの発生によって吸収された結果である。一方、底層内の栄養塩濃度は表層よりも3から4倍高い値を取っている。図-5 (c) より表層を水面下5mまで、底層をそれ以下

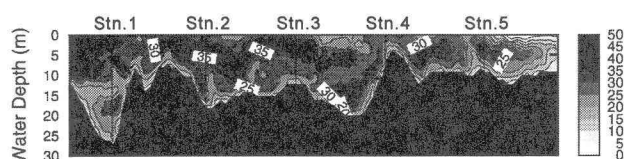
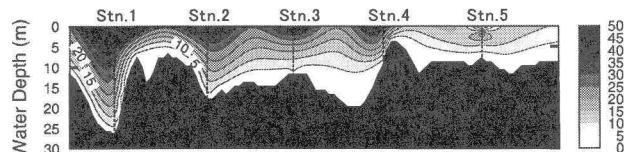
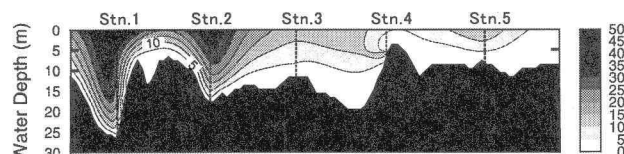


図-7 下げ潮最強時の流速 (Run3) の空間分布



(a) Chl. aフラックス



(b) SSフラックス

図-8 Chl. aとSSフラックスの積分値の空間分布

とし、底層の厚さが表層の厚さの3、4倍であることを考慮すると、底泥の巻き上がり機構を通しての有機物の分解は非常に活発であったことが示唆される。

(3) 物質フラックスの空間分布

7月20日の流速・水質同時観測から得られた流速データのうち、下げ潮最強時の流速 (Run3) の空間分布を図-7に示す。流速値はラインに直交する成分を示す。また、およそ2時間の観測所要時間に対する時間的補正は行われていない。全体的に底層では底面の影響を受け強いシアアの層が形成されていることがわかる。Stn.1からStn.3の表層付近に35cm/s以上の強い流れが形成されており、Stn.5付近の表層では30cm/s程度の流れがみられる。高速流の形成位置と海底地形とは密接な関係があるように思われる。

下げ潮最強時における竹崎一大牟田ラインを通過するChl.aと懸濁物質 (以下、SS) の流出フラックスを算出した。物質のフラックスの算出は、Stn.1からStn.5における竹崎一大牟田ラインに直交する流速とSTDで得られたChl.aとSSの濃度をかけることにより算出した。図-8は、得られたフラックスの値を鉛直方向にわたって積分し、海底面からある高さまでのフラックス量を等値線分布で示したものである。(a)にChl.aの流出フラックス、(b)にSSの流出フラックスを示す。いずれのフラックスもStn.3よりも西側、つまり西部海域で大きな値を取ることがわかる。底層付近のSSフラックスの等値線間隔は、東部海域よりも西部海域で密になっている。このことは、西部海域の海底付近でSSの巻き上がりが大きく、また輸送量も大きいことを示している。これらの結

果は、現在、赤潮や貧酸素水塊が西部海域で顕著に観察されることと矛盾しない。また、陶山ら⁶⁾によって示された竹崎一大牟田ラインに沿った底質粒径と強熱減量の分布とも矛盾しない。図-7, 8は7月20日の密度成層が顕著でない場合の結果であるが、Run1で観られたような河川水の流出に伴う塩淡水成層が発達している場合、西部海域と東部海域との間にはもっと大きなフラックス量の差が生じるものと思われる。

4. おわりに

有明海奥部における竹崎一大牟田ライン上で行った、水質・潮流観測に基づいて、密度成層に伴う水質変化と物質輸送量を検討した。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 下げ潮最強時に底層付近において顕著な高濁度層が形成される。
- 2) 成層構造と水質の空間分布の関係から、強い水温成層と塩淡水成層が形成されると、表層では赤潮が発生してDO濃度は過飽和状態となる。底層では密度成層効果と底泥の巻き上がりによって低下する傾向にある。非成層時においては、Chl.a、濁度およびDO濃度の鉛直分布はかなり滑らかな分布となる。
- 3) 河川、特に筑後川からの淡水流出は西部沿岸に沿って南下するため、塩淡水成層が形成された場合は、西部海域において植物プランクトンが増殖する傾向が見られ、東部海域との違いが顕著となる。
- 4) 非成層時においてもChl.aとSSのフラックスは西部海域において大きな値を示し、西部海域と東部海域における輸送量に違いが見られる。また、西部海域の底層付近においてSSフラックスの等値線が密になることから、この領域で底質の巻き上がりが大きく、輸送量も大きいことが明らかとなった。

以上の結果と、中央粒径と強熱減量が西部海域で大きいという陶山ら⁶⁾の結果から、有明海湾奥の西部海域で

は、底泥の巻き上げにより有機物の分解による酸素消費が活発に行われ、さらに密度成層が重なると赤潮の発生と底層におけるDO濃度の低下が顕著となることが示唆された。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費補助金（基盤研究(A) (1) 14205075, 研究代表者：小松利光）および（基盤研究(B) 15360268, 研究代表者：松永信博）の助成を受けて行われた。また、水産大学校安田秀一教授からはSTDを貸与していただいた。さらに、現地観測を行うにあたり、九州大学大学院総合理工学府環境流体科学研究室の学生の皆様に多大なる協力を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 堤裕昭ら：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)，pp. 291-305, 2003.
- 2) 鯉淵幸生，佐々木淳，磯部雅彦：2001年の有明海における水質の動態解明，海岸工学論文集，第49巻，pp. 1056-1060, 2002.
- 3) 柳哲雄，阿部良平：有明海の塩分と河川流量から見た海水交換の経年変動，海の研究，12 (3)，pp. 269-275, 2003.
- 4) 滝川清ら：有明海の中中部海域における環境変動の要因分析，海岸工学論文集，第49巻，pp. 1056-1060, 2002.
- 5) 小松利光（代表）：有明プロジェクト中間報告書(その1)，2002.
- 6) 陶山典子，奥石裕一，須田有輔，村井武四：底質から見た有明海北部の海域区分とマクロベントスの分布，水産大学校研究報告，第51巻，第4号，2003.
- 7) 佐藤ら：諫早湾・有明海で何が起きているのか？，科学7月号，岩波書店，pp. 882-894, 2001.

(2003. 9. 30受付)