

有明海における流れと物質輸送に関する現地観測

小松利光* ・安達貴浩** ・金納 聡***
矢野真一郎**** ・小橋乃子***** ・藤田和夫*****

2001 年 10 月 16 日に有明海全域において、ADCP 12 台と STD 8 台を用いた流動構造と成層の一斉観測が実施された。観測日として混合期の日潮不等の小さい大潮時が選ばれ、一潮汐間に渡って観測が行われた。得られた主要な結果は、(1) 島原半島に沿った狭い領域に強い表層流が存在し、塩淡水層が形成されており、この流れが物質輸送に大きな役割を果たしている、(2) 諫早湾湾口では両端部から流出し、中央部から流入する残差流パターンが形成される、(3) 有明町と長洲を結ぶ有明海の狭窄部を挟んで混合形態が変化しており、この断面の海水交換特性が有明海の水質構造を規定している、などである。

1. はじめに

2000 年冬の珪藻赤潮の大発生によるノリの色落ちに端を発した有明海問題は、1989 年着工、1997 年 4 月に潮受け堤防が完成した諫早湾干拓事業との関連が取り沙汰され、大きな社会問題へと発展した。事業を実施してきた農林水産省は、有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会、いわゆる第三者委員会を発足させ、干拓とノリ不作との因果関係についても議論してきたが、明確な結論は出ていない（農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会、2003）。2002 年末には、「有明海及び八代海再生特別措置法」が施行され、有明海における総合的な環境調査の重要性が一般にも認識されるようになった。

これまでに、国・地方自治体・大学・市民団体など多くの機関により有明海で現地調査が実施されてきたが、その多くは小規模な調査に留まっており、東京湾にも匹敵する広大な有明海における包括的かつ高い精度の調査はあまり行われていなかった。比較的規模が大きな調査として、水質や成層については（財）日本自然保護協会（2002）による貧酸素水塊調査や福岡・佐賀・熊本・長崎の周辺 4 県が継続的に実施してきた浅海定線調査などが、また流れも含んだものとしては海上保安庁水路部（1974）が第 3 水俣病の発生に伴い実施したものがある。これまで、流れに関する有明海全体の情報は、海上保安庁のものがほとんど唯一であったため数値シミュレーションなどの再現性の検証には、この結果が利用されてきた。しかしながら、この観測結果は有明海内の 6 地点で 15 日間連続設置と、13 地点で 1 日設置の電磁流速計のデータをもとにしたものであり、これから空間的な流

速分布を推定するのは容易ではない。また、鉛直方向の流速分布が得られていないため、3 次元的な流動構造の把握はできない。

そこで、有明海の水環境を調べる上で最も基本的な情報である流動構造を把握するために、超音波ドップラー流速計（以下 ADCP）を多数用いた有明海全体における流れの一斉観測が試みられた。また、同時に密度の鉛直・空間構造を把握するための STD 観測も実施された。観測は、冬季の珪藻赤潮がノリ色落ちの直接原因であったことや、観測体制の整備などの兼ね合いから混合期である 10 月に実施された。本論文では、この一斉観測により明らかとなった有明海全体の流動と物質輸送の構造について紹介する。

2. 現地観測の概要

（1）ADCP による流動観測について

2001 年 10 月 16 日に、ADCP 曳航観測を計 11 艘の観測船を用いて実施した。観測断面は有明海の湾口部である早崎瀬戸から奥へ向けて 5 横断面（うち 4 断面は 2 艘で分担）、諫早湾口 1 横断面、有明湾湾口に沿って 1 縦断面の計 7 断面 11 測線が設定された（図-1 参照）。観測に使用した ADCP は観測船の対地速度を計測して流速を補正できるボトムトラッキング機能の付いた RD-Instruments 社製 Work Horse ADCP 600 kHz が 4 台、1200 kHz が 3 台、BroadBand ADCP 300 kHz が 1 台、600 kHz が 2 台、1200 kHz が 1 台であり、各測線の水深分布に対応した機種をそれぞれ使用した。ADCP は、層厚：1 m、ブランク：2.56 m、サンプリング間隔：3 s に設定され、航行速度は 5~6 knot で、DGPS による測線の確認を行いつつ測定された。

また、観測当日の潮汐は比較の日潮不等の小さい大潮期であり、06:00 の上げ潮最強時から 18:00 の上げ潮最強時までの一潮汐間に渡り 1 時間半毎に計 9 回の走行を行い、潮流の断面流速分布を測定した。なお、当日の三池での予報潮位は、干潮：53 cm (02:33)、満潮：524 cm (08:39)、干潮：32 cm (14:51)、満潮：529 cm

* フェロー 工 博 九州大学教授大学院工学研究院環境都市部門

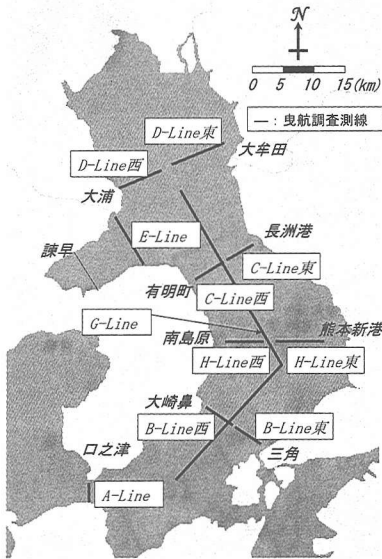
** 正 会 員 博(工) 九州大学助教授大学院工学研究院環境都市部門

*** 修(工) 国土交通省

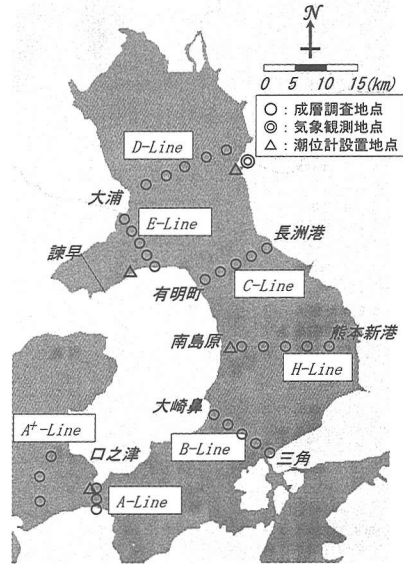
**** 正 会 員 博(工) 九州大学学術研究員大学院工学研究院環境都市部門

***** 正 会 員 博(工) Loughborough 大学 Academic Visitor

***** 正 会 員 九州大学校官大学院工学研究院環境都市部門



図一 流動観測の測線



図二 成層観測の測点

(21:00)であった。

(2) STD 観測について

ADCP 曳航観測と同時に、6 横断面上に各々 5 地点ずつ(早崎瀬戸の A ライン上のみ 3 地点)設定した測点と、有明海の外海である橋湾内に 3 地点の計 31 地点(図一2 参照)において多項目水質計による STD 観測と表層水の採水を 7 艘の観測船を用いて実施し、塩分と水温の鉛直分布と表層栄養塩($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, T-N, $\text{SiO}_2\text{-Si}$)を測定した。なお、栄養塩分布の観測結果については、有明プロジェクト研究チーム(2002)に詳述したので、本報告では取り扱わない。

測定は、ADCP 曳航観測と同じ潮汐間に測線の長さに応じて、A, E ライン上は 1 時間半毎に計 9 回、その他のライン上では 2 時間毎に計 6 回行われた。測点位置は、GPS による測位で確認された。今回使用した観測機器は、メーカーや機種が統一できなかったので、機器間でのデータ補正が重要となる。そこで、塩分については採水した表層水のサリノメータ測定値と観測値から一点補正し、水温に関しては基準温度計を用いた検定を後日実施し補正した。本報告では、補正後のデータのみを用いている。

(3) その他の観測と観測当日の状況について

ADCP 曳航観測と STD 観測の他に、潮位観測を三池港、瑞穂漁港、島原港、口之津の 4 か所で、気象観測を三池港で実施した。また、大浦沖で塩分・水温の連続観測(アレック電子社製 Compact-CT)と有明町沖で ADCP の海底設置による 1 ヶ月程度の連続観測も併せて実施した。

一斉観測日前後の気象条件は、前日の 10 月 15 日は晴天、16, 17 日は台風 21 号の接近により降雨があり、日射は少なかった。気温は、16 日はほぼ一定で観測中は 20~22°C 程度だった。風は、島原で 3 m/s 程度、その他は 2 m/s 程度の弱い南~南東風が吹いていた。

有明海の流況に強い影響を与える河川流量については、16 日の主要 8 河川(筑後川・菊池川・緑川・嘉瀬川・六角川・本明川・矢部川・白川)の平均総流量は約 150 m^3/s であった。うち、筑後川が半分、本明川が 2 % 程度の割合を占めていた。諫早干拓調整池の南北排水門からは、16 日の 15:00~18:00 の 3 時間に平均 170 m^3/s (総排水量: 184 万 m^3)が排出されていた。

3. 観測結果について

(1) 流動構造について

得られた多数の観測結果のうち代表的なものとして、下げ潮最強時(第 4 回目観測, 10:30~11:30)と上げ潮最強時(第 8 回目観測, 16:30~17:30)における水深平均流速の平面分布をそれぞれ図一3, 4 に示す(図中の右下に、観測の時間帯を潮汐と併せて示した)。なお、ADCP 曳航観測では測線の始点から終点まで行くのにおよそ 1 時間程度の航行時間が必要であり、同一の観測時間帯でも時間のズレが生じる。したがって、ある時刻の流況パターンを得るには、本来ならば時間的な補間を行い修正する必要があるが、ここではそのような時間補正は行っていない。

得られた結果より、以下のような特徴的な流動構造が見て取れた。

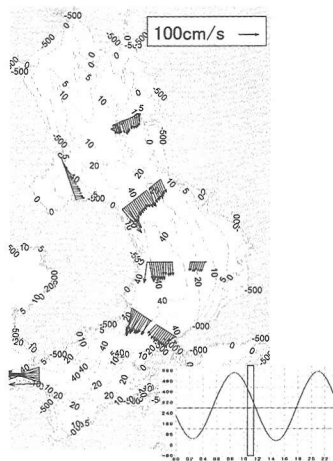


図-3 下げ潮最強時の水深平均流速分布図

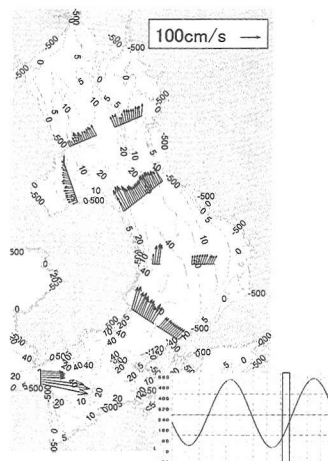


図-4 上げ潮最強時の水深平均流速分布図

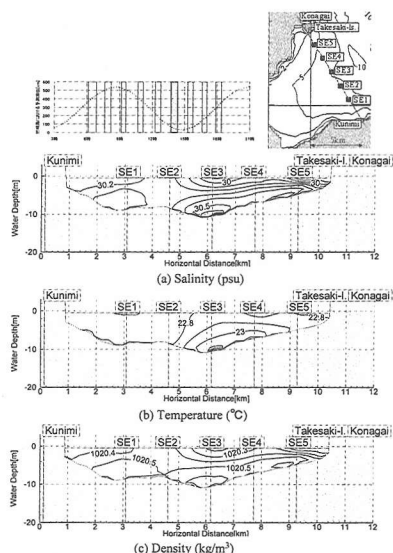


図-5 Eラインにおける干潮時の塩分・水温・密度分布

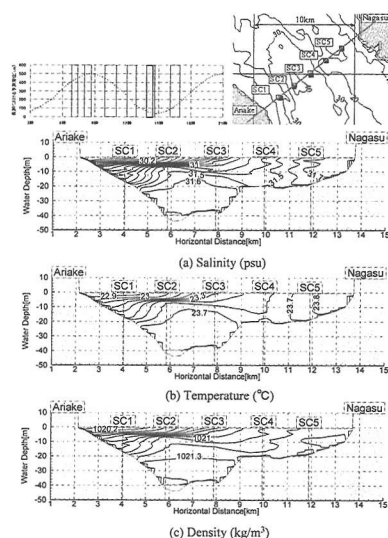
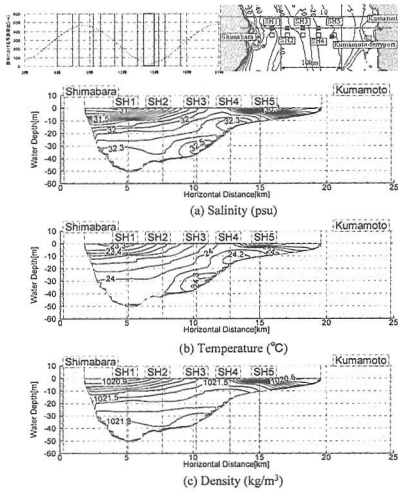


図-6 Cラインにおける干潮時の塩分・水温・密度分布

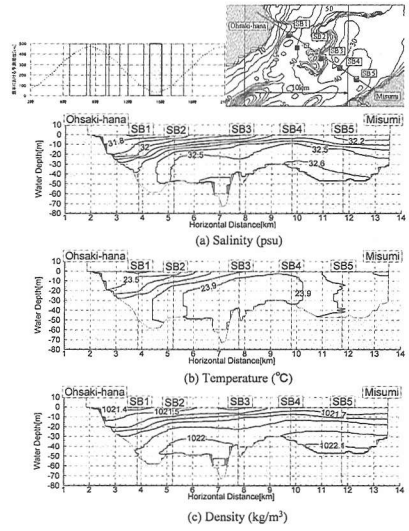
1) 諫早湾口(Eライン)において表層流速の振幅を調べると、STDの測点(図-5参照)であるSE1で60 cm/s, SE3で40 cm/s, SE5で20 cm/s程度となっており、諫早湾口の南岸側と北岸側とは潮流流速の絶対値に大きな違いが見られる。測線上で潮流の振幅が最大となる地点は諫早湾口の南岸から測線に沿って2~3 km離れた位置に出現する。また、SE1では潮流の主軸がほぼ東西方向であるのに対し、SE5では北西から南東に向かっており、流向にも違いが見られる。なお、諫早湾口に関しては、中村ら(2002)により詳細な検討が行われているので参照されたい。

2) 有明町と長洲を結ぶCラインの表層流速は、測線

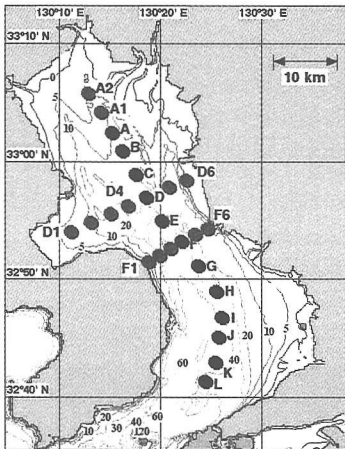
上の各点において潮流の主軸の向きは概ね一致しており、上げ潮最強時、下げ潮最強時のいずれにおいても、島原半島の沿岸において最大流速(150 cm/s程度)が出現している。これは、島原半島に沿った領域の表層において、そのすぐ北側に諫早湾が存在して比較的大きな入退潮が生じるなどの湾地形の影響により潮流の振幅そのものが大きいこと、ならびに振動流境界層の特性により島原半島に沿った区間では他の区間よりも最大流速の出現する時刻が早くなっていること、等が原因となっているものと考えられる。特に第4回目や第8回目の観測時には、西岸より4~6 km離れた海域に、比較的流速の遅い領域(100 cm/s以下)が存在するため、表面流速の空



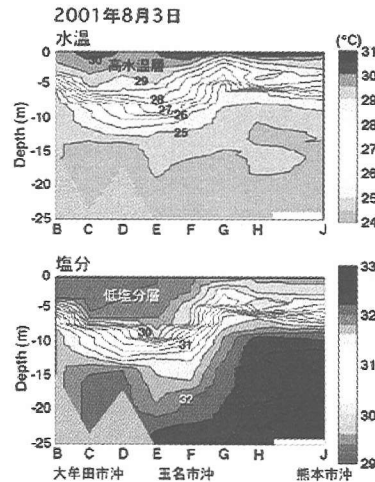
図一7 Hラインにおける干潮時の塩分・水温・密度分布



図一8 Bラインにおける干潮時の塩分・水温・密度分布



図一9 堤ら (2003) による成層調査測点配置



図一10 夏季の水温と塩分の縦断面分布 (堤ら, 2003)

間勾配が測線に沿って大きな値を示していた。なお、Cライン上では下げ潮時に表層において流速が最大になり、上げ潮時には表層よりも水深10m付近の流速が最大となるような鉛直分布が得られており、一潮汐平均的に見て鉛直方向のエクステンジ・フローの存在が示唆された。

3) 海底近傍では深い海底地形に沿った流速が見られるが、その影響は上層にまで伝わっており、上層と海底近傍の流れの方向とは概ね一致している。

4) 有明海湾奥部にある比較的水深の浅い峰の州を境にして、流れの特性が大きく異なっている。

(2) 諫早湾から島原半島沖にかけての淡水の挙動
次に、諫早湾周辺領域を対象に淡水の挙動について考察を行う。諫早湾口(Eライン)における塩分(図一5参照)と残差流の分布(結果省略)から、諫早湾内では、締切堤の南北排水門より排出された淡水が、南北両岸に沿った残差流(中村ら(2002)により、諫早湾口の両岸付近では流出方向、中央部では湾内に流入する方向の残差流が形成されている)によって湾口まで輸送されており、その結果、南北両岸では総じて塩分が比較的薄くなっていることが明らかとなった。

次に、C, H, Bラインにおける塩分の横断面分布(図一6, 7, 8参照)を調べると、これらの測線でも一潮汐間を

通じて東西両岸に沿って塩分が薄くなっていること、調整池からの排水が放出された干潮直後において、CラインやHラインの島原半島に沿った地点の上層水(水深10 m程度まで)だけが急激に希釈され、特に安定した成層が形成されていることが観測された。2002年4月より約1ヶ月間実施された締切堤排水門の短期開門調査において、島原半島沿いに安定した塩淡水成層が形成されていたという事実や本一斉観測において得られた流速分布から判断すると、諫早湾内に存在する低塩分水は島原半島に沿った狭い領域を通じて流出しているものと推定される。島原半島に沿った領域では比較的大きな流速が発生しているにもかかわらず、一潮汐間にわたって比較的安定した成層が形成されていたことから、諫早湾や湾奥に供給される淡水は、島原半島に沿って偏って分布し流出していることが示唆される。

最後に、今回の一斉観測とは別に堤ら(2003)により実施された成層調査の結果を示す。図-9に測点の配置を、図-10に2001年8月3日の水温と塩分の縦断面分布を示す。測点F~Gの間、すなわち有明町と長洲を結ぶ断面を挟んで成層構造が急激に変化していることが分かる。つまり、この断面より奥部では混合形態が弱混合から緩混合的であり、筑後川からの大量の淡水流入に起因する河口密度流を形成している。それに対し、南側では強混合型に近くなっている。狭隘部である有明-長洲の断面が境界となって湾奥部で淡水の滞留傾向が見られる。したがって、この断面を介した海水交換特性が有明海全体の水質構造を規定しているものと考えられる。

4. ま と め

有明海全域において2001年10月16日に実施されたADCPとSTDを用いた一斉観測より得られた結果をまとめると、以下ようになる。

- 1) STD観測の結果より、島原半島に沿ったBラインまでの沿岸域で干潮時に水面から約10 mまでの表層が希釈されていた。
- 2) 島原半島に沿った海域の表層10 m層では、表層流出の残差流パターンが確認されることから、湾奥や諫早湾で淡水により希釈された水が同領域に集中して流入しているものと考えられる。このため、河川からの直接的な淡水の供給がなく、潮流の強い有明海西側においても、成層が形成されやすくなっている。
- 3) 有明町と長洲町を結ぶ線(湾口以外では、有明海的最狭部)は地形上からも湾奥部と湾中央部を分離する境界となっている。この線上では、島原半島沿いの領域で潮流の水平流速のピーク値を持ち、この最強流速

が湾奥に供給される河川水を効率的に湾中央から湾口へ向けて輸送している。この水平流速分布の非一様性が移流分散効果により湾奥部の海水交換や物質輸送に大きな役割を果たしているものと考えられる。

- 4) 湾奥の流動構造については、峰の州を境にパターンが大幅に変化している。

今回の観測は、比較的混合している秋の大潮期に実施されたが、有明海全体の流動構造を把握するには夏季成層期の大規模な観測や、大潮期と小潮期の混合能力の違いに起因する成層構造がエスチャリー循環などの流動構造に与える影響に着目した観測なども行う必要がある。これらの観測が実施されることにより、有明海内部の物質輸送構造が明らかとなり、赤潮発生のメカニズム等が解明できることが期待される。

謝辞: 今回の有明海一斉調査は、「有明プロジェクト」と名付けられ、大学の研究者と学生、ならびに民間企業有志のボランティアで実施された。九州大学大学院総合理工学研究院・経塚雄策教授、松永信博教授、濱田孝治助手、熊本県立大学環境共生学部・堤裕昭教授、長崎大学水産学部・西ノ首英之教授、長崎大学環境科学部・中村武弘教授、長崎大学工学部・多田彰秀助教授、佐賀大学理工学部・大串浩一郎助教授、中部大学工学部・武田誠講師、東京大学大学院新領域創成科学研究科・磯部雅彦教授、大阪大学大学院工学研究科・西田修三助教授と各大学の学生諸君、株式会社東京久栄、五洋建設株式会社技術研究所、株式会社エス・イー・エーの下田力氏には一斉観測に参加を頂いた。また、早米ヶ浦漁協、三井鉱山株式会社には観測本部設営に、芦刈・荒尾市・川口・口之津・島原半島南部・島原・瑞穂の各漁協には観測船の備船に多大な協力を頂いた。ここに記し、深甚なる感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 有明プロジェクト研究チーム(2002): 有明プロジェクト中間報告書(その1), 161 p.
- 海上保安庁水路部(1974): 有明海・八代海海象調査報告書, 39 p.
- 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(2003): 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巻, 3号, pp. 291-305.
- 中村武弘・矢野真一郎・多田彰秀・野中寛之・丸井雄一(2002): 諫早湾湾口部における流況の現地観測, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 396-400.
- 日本自然保護協会(2002): ありあけ大調査, 日本自然保護協会HP, <http://www.nacsj.or.jp/>.
- 農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会(2003): 最終報告書-有明海の漁業と環境の再生を願って, <http://www.jfa.maff.go.jp/ariakenori/negai/index.html>.