

大規模一斉観測データを用いた諫早湾口周辺の流動特性の検討

齋田倫範*・矢野真一郎**・橋本泰尚***・小松利光****

2001年10月16日(大潮)と2003年7月20日(中潮)に有明海で実施された, 2回の大規模同時観測結果を用いて諫早湾口の流動構造について検討を行った。得られた主要な結果は, (1) 潮汐条件によって流況が大きく変化している, (2) 湾口中央では流入, 南部と北部では流出する残差流が生じている, (3) 湾口中央部では, 概ね潮汐に対応した潮流の変化が見られるのに対して, 湾口南部では, 湾口中央部よりも早く流速が最大となっており, 湾口中央部と南部の潮流の間に明確な位相差がある, などである。

1. はじめに

有明海の水環境問題は, 諫早湾干拓事業が着工された1990年以降の赤潮の大規模化・多発化や二枚貝等の漁獲量減少に端を発し, 2000年冬期の大規模なノリの色落ちを契機に深刻な社会問題へと発展した。その環境異変の一因として, 1997年に潮受堤防の締切が行われた諫早湾干拓事業が指摘されている。事業主である農林水産省は, 2003年に短期開門調査を実施し, 事業が有明海全体の環境には大きな影響を与えていないと報告(九州農政局, 2003)したが, 2004年8月には, 諫早湾干拓工事の差し止め仮処分が佐賀地方裁判所により決定された。その後, 2005年5月に福岡高等裁判所により, 干拓事業と漁業被害の因果関係を認めた工事差し止め命令を取り消す決定がなされるなど, 事業の是非が議論されている。このような状況に至った背景として, 有明海の空間的なスケールが大きく全体像を把握できていないために, 事業前後の海象や環境の変化を正確に把握できないことが挙げられる。

有明海全体を対象にした潮流観測等に関する代表的なものとして, 1973年に実施された海上保安庁水路部(1974)の観測や2001年に実施された小田巻ら(2003)の観測, 1974~1977年の間に北部有明海で実施された井上ら(1979)の観測がある。しかしながら, いずれの観測も鉛直方向に十分な情報は得られておらず, 空間的な流動構造の把握は至っていない。そこで, 有明海の三次元的な流動構造を把握することを目的として, 2001年10月16日(大潮)に, 超音波ドップラー流速計(以下, ADCP) 11台を使用した大規模同時観測「有明プロジェクト」を, 2003年7月20日(中潮)には, ADCP 6台を使用した二回目の大規模同時観測「有明プロジェクトII」を実施した。これら2回の大規模同時観測によって

得られた広域的な流動構造については, 小松ら(2003, 2004)によって既に報告されている。本稿では, 貧酸素水塊や赤潮の発生が報告されている北部有明海に位置しており, 潮受堤防建設の影響を特に大きく受けていると考えられる諫早湾口周辺の流動特性を明らかにするために, 大規模同時観測で得られた結果を用いて, 詳細な検討を行ったので報告する。

2. 現地観測の概要

有明プロジェクト(以下, 観測I)は, 有明海全域(図-1参照)を観測対象とし, 冬季の珪藻赤潮がノリの

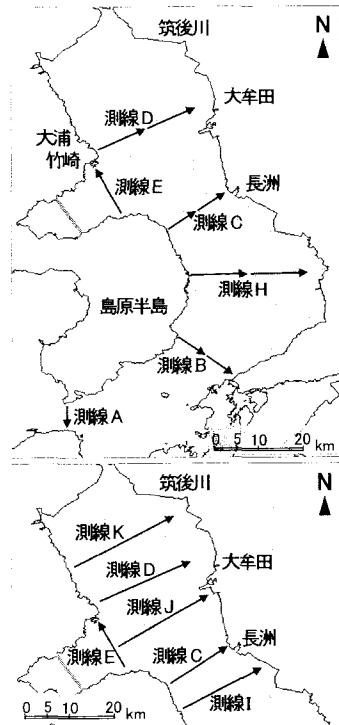


図-1 大規模同時観測実施海域の概略図
上段: 観測I, 下段: 観測II
(矢印の向きは曳航観測時の航行方向を示す。)

* 学 生 員 修(工) 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻
** 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
*** 学 生 員 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻
**** 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

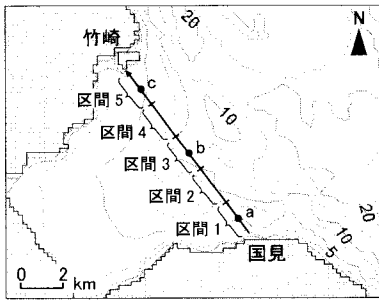


図-2 測線E周辺の概略図（海域に記した数字は水深（m）を表す。）

色落ちの直接原因であったことから混合期である2001年10月16日（大潮）に実施した。また、有明プロジェクトⅡ（以下、観測Ⅱ）は、近年、堤ら（2003）、梶原ら（2003）などによって貧酸素水塊や赤潮の発生、ならびにタイラギなどの不漁が報告されている北部有明海（図-1 参照）を対象とし、成層期である2003年7月20日（中潮）に実施した。観測内容は、両観測ともに ADCP を用いた流動観測と多項目水質計を用いた水質観測である。

（1）ADCP による流動観測について

観測Ⅰでは、ADCP 曳航観測を、11艘の観測船を用いて一潮汐間に渡り1時間半毎（計9回）に実施した。観測断面は、図-1に示す有明海全域の6測線である。測線B, H, C, Dは観測時間の都合上、東西の断面に二分した。使用した ADCP は、RD-Instruments 社製 Workhorse ADCP 1200 kHz が3台、600 kHz が4台、BroadBand ADCP 1200 kHz が1台、600 kHz が2台、300 kHz が1台である。

観測Ⅱでは、6艘の観測船を用いて一潮汐間に渡り3時間毎（計5回）に実施した。観測断面は、図-1に示す北部有明海の6測線である。なお、測線C, D, Eは観測Ⅰと共通である。使用した ADCP は、Workhorse ADCP 1200 kHz が3台、600 kHz が3台である。両観測ともに、ADCP は層厚：1 m、プランク：2.56 m、サンプリング間隔：3 s に設定した。本稿では、これらの測線のうち図-2に示す測線Eに着目して詳細な検討を行った。なお、各観測日の大浦検潮所における干潮位と満潮位を表-1に、潮位変動と観測時間帯を図-3に示す。

（2）観測当日の気象および成層状況について

観測Ⅰ実施時は、前線が九州上にあったために天気が崩れた。アメダスの気象データによると、10月15、16日の降水量は、島原でそれぞれ0 mm、36 mmであった。観測中の風速は島原で3 m/s 程度の南～南東風で、気温はほぼ一定で20～22℃程度であった。有明海の成層構

表-1 観測実施日の大浦における潮位

		時刻	実測潮位(m)
観測Ⅰ（大潮） 2001年10月16日	満潮	8:44	2.81
		21:03	2.89
	干潮	2:36	-1.87
		14:57	-2.09
観測Ⅱ（中潮） 2003年7月20日	満潮	0:58	1.9
		12:59	1.58
	干潮	7:06	-0.87
		19:00	-0.96

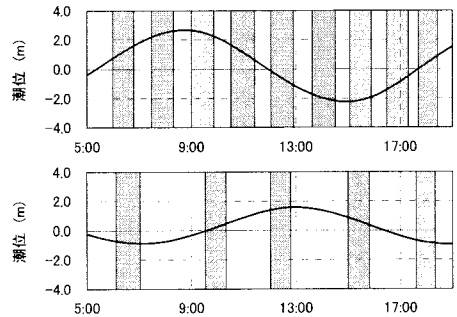


図-3 観測実施日の大浦における実測潮位（図中のハッチは観測時間帯を示す。）

造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 m³/s であり、筑後川は50%程度の割合を占めていた。また、諫早干拓調整池の南北排水門から15:00～18:00の3時間に平均170 m³/s（総排水量：184万 m³）が排水されていた。

観測Ⅱ実施時は、前日から当日にかけて梅雨前線が活発化したため、荒れた天候となった。7月19、20日の降水量は、島原でそれぞれ26 mm、140 mm であった。観測中の風速は島原で3 m/s 程度の南東風であり、気温はほぼ一定で23～25℃程度であった。20日の主要8河川の平均総流量は約1,220 m³/s であり、筑後川は30%程度の割合を占めていた。南北排水門からは、17:00～22:00の5時間に平均1,073 m³/s（総排水量：1.931万 m³）が排水されていた。

成層状況は、観測Ⅰ実施時には、上げ潮流によって高塩分水が底層に侵入してきたが、表層と底層の密度差は1 kg/m³程度であり、顕著な密度躍層は見られなかった。一方、観測Ⅱ実施時には、前日から当日にかけての降雨の影響により、表層と底層とで3～4 kg/m³程度の密度差が生じていた。特に、竹崎側においては、25 PSU 程度の低塩分水塊が偏在しており、顕著な密度躍層を形成していた。

3. 観測結果について

(1) 諫早湾口の流動構造

得られた観測結果のうち代表的なものとして上げ潮最強時（観測Ⅰの8回目16：29～17：19，観測Ⅱの2回目9：32～10：20）と下げ潮最強時（観測Ⅰの4回目10：31～11：25，観測Ⅱの4回目15：00～15：49）における水深平均流速ベクトル図を図-4に示す。ただし，一回の曳航には1時間弱の航行時間を要しているが，時間補正は行っていない。観測Ⅰでは諫早湾湾口全域にわたって上げ潮と下げ潮にあわせて水塊が流出入しているのに対して，観測Ⅱでは湾口北側で上げ潮時に流出，下げ潮時に流入しており，キャビティフロー的な流動構造が見られる。松野・中田（2004）は，諫早湾湾口の流況を，有明海奥部への入退潮が諫早湾口を通過する際に生じるキャビティフローと諫早湾へ出入りする潮流との重ね合わせによって説明している。この考えに基づくと，観測Ⅰは大潮で諫早湾への入退潮量が大きいいためキャビティフローが明瞭に表れず，観測Ⅱにおいては潮差の比較的小さい中潮であったために，キャビティフローの影響が相対的に顕著に表れたものと推測される。

次に，観測Ⅰにおける測線Eの残差流速の鉛直断面コンターを図-5に示す。なお，観測Ⅱについては，一潮汐間の観測回数が少なく残差流速の算定を行えなかった。残差流速の算出は，ADCPデータを平均処理によって測線方向に等間隔（250 m 毎）のデータとし，水深方向のデータ取得領域（水表面と海底近傍を除く領域）を10層に分割した後に，流速データを再配置して各層の残差流速を算出した。なお，一潮汐間の平均を行う際には，有明海において支配的である M_2 潮の周期（12.4時間）を基準とした。ADCPによって測定された一潮汐間のデータから算定を行っていることから長期的な残差流を表していないが，諫早湾口の残差流の特徴を概ね表現できていると考えられる。ここで，測線Eに直交する流速成分を V （諫早湾湾奥に向かう方向を正），測線Eに平行な流速成分を U （島原半島側から竹崎に向かう方向を正）とする。これらより，湾口南部では上層で南東，下層で南西方向の残差流が存在していることが確認できる。観測地点に僅かな違いはあるものの，この傾向は中村ら（2003）の連続観測の結果とよく対応している。また，湾口中央部では北西，北部では北東方向の残差流が存在していることが確認できる。湾口中央で流入，南部および北部で流出するという特徴は，田中ら（2002）や千葉ら（2003）の数値シミュレーション結果においても確認されている。

(2) 諫早湾口の海水交換特性

諫早湾口における空間的な流況が確認されたことから，

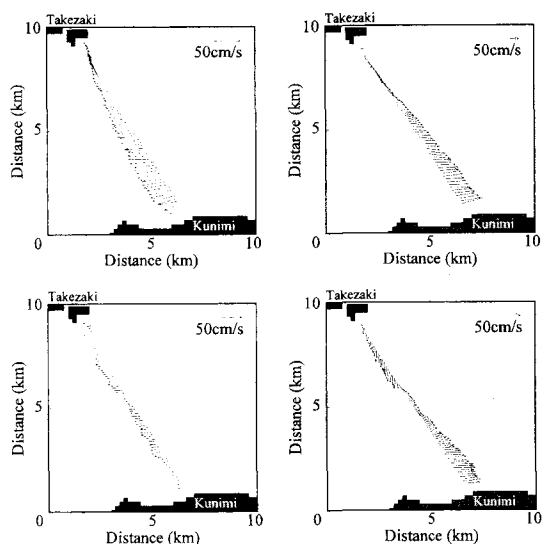


図-4 水深平均流速ベクトル図
上段：観測Ⅰ（大潮），下段：観測Ⅱ（中潮），
左図：上げ潮最強，右図：下げ潮最強

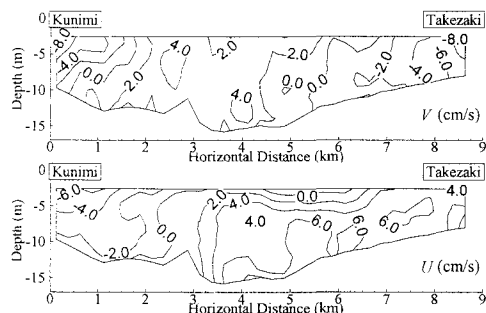


図-5 残差流速の鉛直断面コンター図
上段：断面に直交する成分（湾奥へ向かう方向が正），下段：断面に平行な成分（竹崎側に向かう方向が正）

測線E上の3点a, b, c（図-2参照）における流速の経時変化を図-6，図-7に示す。ここで， v, u の方向と符号は，平均流速の際の V, U の定義とそれぞれ対応している。各点における流速データは，a, b, c点からの距離が30 m 以内の領域に存在するデータを抽出し，それらを層毎に平均して鉛直分布を求めた。これらより，湾口中央部のb点では，概ね潮汐に対応した流速の変化が見られるが，a点では湾口中央部よりも早く流速が最大となっていることがわかる。a点における位相のズレは，流速が最大となるタイミングやその発生位置が，武岡・樋口（1982）の実験結果によって報告されている，地形性渦に起因する流れとよく対応している。このことから，得られた観測結果は諫早湾における地形性渦の存在を示唆するものであるが，a点における位相のズレの発生機

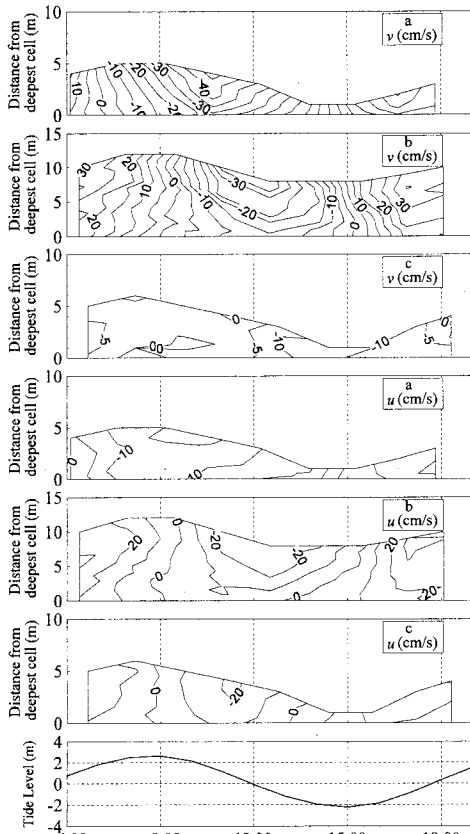


図-6 a, b, c点における流速 v と u の時間変化(観測Ⅰ)
上段から, a, b, c点の v , a, b, c点の u , 大浦の潮位

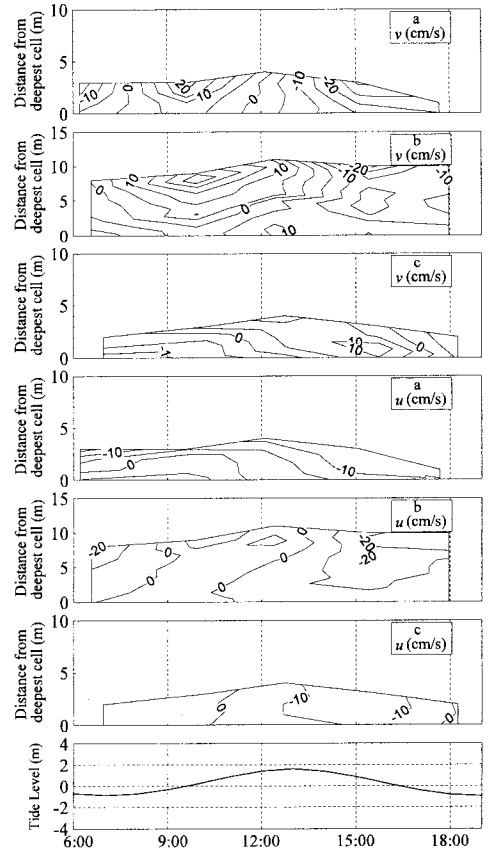


図-7 a, b, c点における流速 v と u の時間変化(観測Ⅱ)
上段から, a, b, c点の v , a, b, c点の u , 大浦の潮位

構や諫早湾における渦流の存在については、今後詳細な検証が必要である。また、c点における v の変動には、潮汐に対応した明瞭な周期性が表れておらず、測線Eに沿う方向の成分が卓越していることが分かる。このことから、上げ潮時には、北上してきた水塊が竹崎島付近にぶつかって諫早湾を出て有明海湾奥に進む流れと諫早湾奥に向かう流れの分岐点となり、下げ潮時には竹崎島周辺の複雑な地形の影響を受けるため、この海域で局所的に流況が複雑になっていると推測される。

次に、測線Eを5区間(図-2参照)に分割し、各区間を通過する流量の算定を行った。観測Ⅰにおける流量の経時変化を図-8に示す。観測Ⅱについては、一潮汐間の観測回数が少なく観測Ⅰと同様の評価を行えなかった。これより、湾口北部の区間4、5と比較して、南部～中央部の区間1、2、3の流量が大きく、下げ潮時の区間1、2、3からの流出量を算定したところ、3区間の合計が、下げ潮時の総流出量の85%を占めていた。このことから、諫早湾への海水の流入は、主として湾口南部から中央部で生じていることが分かる。また、各区

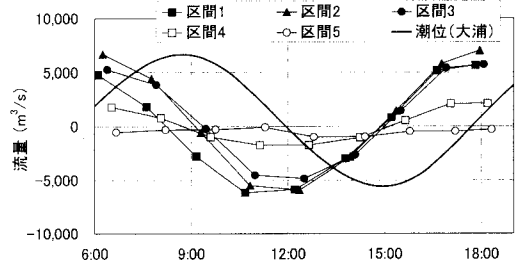


図-8 測線E上の各区間における流量の経時変化

間の満潮の転流時から満潮後の1/8周期までに、区間1、2、3からの流出量はそれぞれ、総流出量の6.9%、0.8%、0.3%、各区間の転流時から1/4周期後まででは、それぞれ19.9%、12.3%、9.0%であり、転流時から下げ潮の前半にかけて、湾口南部(区間1)から総流出量の20%程度の流出が生じていることが分かる。ここで、流出量の算定に用いた転流時刻は潮流流速が0となる時刻であり、各区間によって異なる。このことから、位相のズレを伴う湾口南部の潮流によって生じる諫早湾口南

部からの局所的な水塊の流出が、諫早湾内の水位変動に大きく寄与していると考えられる。更に、Fischer ら (1979) は、主流部 (有明海本体) と支流部 (諫早湾) との間の潮流の位相差は Tidal Trapping の機構によって物質の分散に大きく寄与するとしており、諫早湾の存在は有明海の物質輸送に大きな役割を果たしていると推測される。

4. ま と め

有明海における2回の大規模同時観測結果を用いて諫早湾口の流動構造について検討を行った。得られた主な結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 観測Ⅰでは諫早湾湾口全域にわたって上げ潮と下げ潮にあわせて水塊が流入しているのに対して、観測Ⅱでは湾口北側で上げ潮時に流出、下げ潮時に流入しており、潮汐条件によって大きく流況が変化している、
- 2) 観測Ⅰにおいて、諫早湾口中央で流入、南部と北部で流出する平均的な流れが生じていた、
- 3) 諫早湾口中央部では、概ね潮汐に対応した潮流流速の変化が見られるのに対して、諫早湾口南部では、湾口中央部よりも早く流速が最大となっており、湾口中央部と南部の潮流に明確な位相差がある、
- 4) 観測Ⅰにおいて、転流時から下げ潮時前半の諫早湾からの海水の流出は、主に湾口南部において生じていた。これらより、諫早湾口における、位相のズレを伴った潮流の分布は、Tidal Trapping によって物質輸送に大きく寄与していると推測される。

謝辞：本稿で使用した観測データは、大規模同時観測の一環として長崎大学環境科学部中村武弘教授の研究グループによって観測されたものである。なお、本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 A 「有明海の流れ構造の解明と蘇生・再生のための調査研究」 (研

究代表者小松利光、課題番号14205075) の援助を受けた。ここに記し、深甚なる感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 井上尚文・青山恒雄・宮地邦明 (1979) : 沿岸域の海況調査方法としての多数船同時観測の有明海における試行の意義, 月刊海洋科学, Vol.11, No.5, pp. 448-457.
- 小田卷実・大庭幸広・柴田宣昭 (2003) : 有明海の潮流新旧比較観測結果について, 海洋情報部研究報告, 第39号, pp. 33-61.
- 海上保安庁水路部 (1974) : 有明海・八代海海象調査報告書, 39p.
- 梶原義範・富田友幸・中野拓治・磯部雅彦 (2003) : 有明海湾奥西部海域における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, No.247, II-65, pp. 187-196.
- 九州農政局 (2003) : 諫早湾干拓事業開門総合調査報告書, 65p.
- 小松利光・安達貴浩・金納聡・矢野真一郎・小橋乃子・藤田和夫 (2003) : 有明海における流れと物質輸送に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 936-940.
- 小松利光・矢野真一郎・齋田倫範・松永信博・鶴崎賢一・徳永貴久・押川英夫・濱田孝治・橋本彰博・武田誠・朝位孝二・大串浩一郎・多田彰秀・西田修三・千葉賢・中村武弘・堤裕昭・西ノ首英之 (2004) : 北部有明海における流動・成層構造の大規模現地観測, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 341-345.
- 松野健・中田英昭 (2004) : 有明海の流れ場を支配する物理過程, 沿岸海洋研究, 第42巻, 第1号, pp. 11-17.
- 田中昌宏・稲垣聡・山本克則 (2002) : 有明海の潮汐及び三次元流動シミュレーション, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 406-410.
- 千葉賢・武本行正 (2003) : 諫早湾潮受け堤防設置に伴う有明海の流れ変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 376-380.
- 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, 第12巻, 3号, pp. 291-305.
- 中村武弘・多田彰秀・矢野真一郎・武田誠・野中寛之 (2003) : 諫早湾湾口部における夏季の流れ観測, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 371-375.
- 武岡英隆・樋口明生 (1982) : 地形性渦流による小港湾の海水交換, 沿岸研究ノート, 第19巻, 第2号, pp. 175-181.
- Fischer, B. H., E. J. List, R. C.Y., Koh, J., Imberger and N.H.Brooks (1979): Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, pp. 241-242.