

# 諫早湾内における 低塩分水の挙動に関する現地観測

## FIELD OBSERVATION ON BEHAVIOR OF LOW SALINITY WATER IN ISAHAYA BAY

齋田倫範<sup>1</sup>・田井明<sup>2</sup>・橋本彰博<sup>1</sup>・大串浩一郎<sup>3</sup>・多田彰秀<sup>4</sup>・松永信博<sup>5</sup>・小松利光<sup>6</sup>  
Tomonori SAITA, Akira TAI, Akihiro HASHIMOTO, Koichiro OHGUSHI, Akihide TADA,  
Nobuhiro MATSUNAGA and Toshimitsu KOMATSU

<sup>1</sup>正会員 博(工) 九州大学大学院学術研究員 工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

<sup>2</sup>学生員 工修 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻・日本学術振興会特別研究員 (同上)

<sup>3</sup>正会員 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>4</sup>正会員 博(工) 長崎大学教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

<sup>5</sup>フェロー 工博 九州大学大学院教授 総合理工学研究院流体環境理工学部 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1)

<sup>6</sup>フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

In Ariake Bay, the large scale hypoxic water mass tends to increase. In addition, the occurrence of the blue tide in Isahaya Bay in 2008 was reported. Therefore, it is important to comprehend not only longer-term changes in the stratification in Ariake Bay but also short-term ones for about a tidal period. In this study, the field observation on behavior of low salinity water in Isahaya Bay was carried out under the stratified condition. As a result of this study, low salinity water in Isahaya Bay was drifted northeastward by a wind-driven current due to strong SSW wind. The magnitude of the wind-driven current was comparable with that of a tidal current. Consequently, the coastal upwelling of bottom water was observed in the area off the southern shore of Isahaya Bay. Therefore it can be concluded that a wind-driven current plays an important role for the seawater exchange in Isahaya Bay.

**Key Words:** *Isahaya Bay, low salinity water, wind-driven current, coastal upwelling*

### 1. はじめに

近年、有明海とその西岸に位置する諫早湾では、赤潮や貧酸素水塊の大規模化・長期化といった水環境問題が生じ、二枚貝をはじめとする水産資源への影響が深刻な問題となっている。このような水環境悪化の一因として、1997年4月に潮受け堤防の締め切りが行われた諫早湾干拓事業の影響が指摘されている。しかし、有明海における水環境の悪化と諫早湾干拓事業との因果関係については未だ明らかにされていない部分が多く残されている。また、水環境悪化の根本的な原因が解明されていないため、抜本的な対策も講じられていない。このような背景から、諫早湾干拓事業の影響を強く受けられていると考えられる諫早湾では、流動特性や水質動態を把握するために多くの観測が行われてきた。中村ら<sup>1, 2)</sup>は、湾口部の流動観測により島原半島沿いに大きな潮流流速が生じるこ

と、湾口南側で反時計回り、北側で時計回りの2つの残差環流が存在していることなどを示した。また、鯉淵ら<sup>3, 4)</sup>は、湾口北側で実施した連続観測結果から南風によって有明海中央部の貧酸素水塊が諫早湾に湧昇してくることや諫早湾の水塊構造には風と筑後川からの淡水流入が大きく影響することを示した。さらに、多田ら<sup>5, 6)</sup>は、DBF海洋レーダーによって湾口部の平面的な流速場を観測している。以上のように、これまでの多くの研究は諫早湾口部を中心に行われており、湾内を対象とした観測例は決して多くはない。数少ない例としては、多田ら<sup>7)</sup>による小潮時の諫早湾全域を対象とした観測がある。この観測データを用いて齋田ら<sup>8)</sup>は、諫早湾口での海水交換機構について検討を行っている。しかし、深山ら<sup>9)</sup>や多田ら<sup>6)</sup>が指摘しているように、諫早湾の流動特性や水質動態は風向・風速や成層構造に強く支配されるため、多田ら<sup>7)</sup>の観測結果だけからその全貌を明らかにすることは困難である。

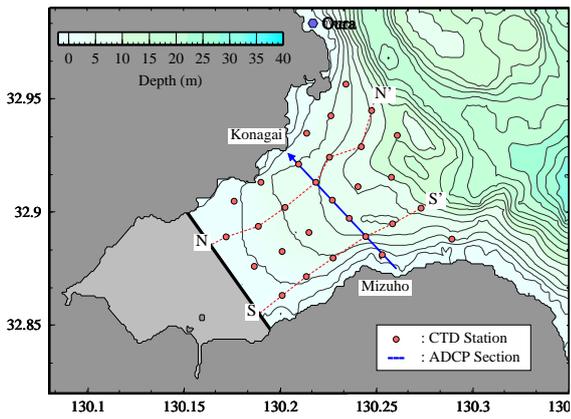


図-1 観測実施海域の概略図  
(矢印の向きはADCP曳航観測時の航行方向を示す。)

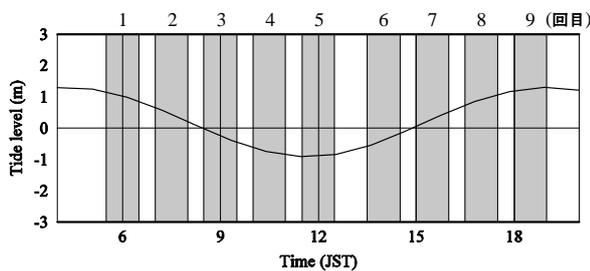


図-2 観測当日の天文潮位 (T.P.) と観測時間帯  
(図中のハッチは観測時間帯を示す。)

そこで本研究では、諫早湾内における低塩分水の挙動を把握することを目的として、諫早湾全体を対象として詳細な現地観測を行ったので報告する。

## 2. 観測概要

観測は夏季の諫早湾における成層状況を詳細に把握するために、潮差が比較的小さい2008年7月13日(長潮)に実施した。観測では諫早湾内全域(図-1)を観測対象とし、多項目水質計を用いた水質測定と超音波ドップラー流速計(ADCP)を用いた流速測定を実施した。観測実施日の大浦検潮所における潮汐と観測時間帯を図-2に示す。観測日の潮位は、満潮: 1.30m (4:18), 干潮: -0.91m (11:12), 満潮: 1.30m (18:06)であった。

### (1) 塩分・水温の測定

低塩分水の挙動を把握することを目的として、図-1に示す諫早湾内の29測点で多項目水質計による塩分・水温の測定を行った。5艘の観測船を用いて一潮汐間に計9回の測定を実施した。使用した多項目水質計は、JFEアレック社製クロロテックACL220, ACL1183, AAQ1183, Compact-CTD, ワイエスアイ・ナノテック社製YSI6600, YSI600QSである。水深方向の測定間隔は使用した機器によって異なるが、いずれの観測船においても測定間隔が0.1m以下になるように注意してデータを取得した。なお、観測終了後に観測海域周辺から採水した海水を用い

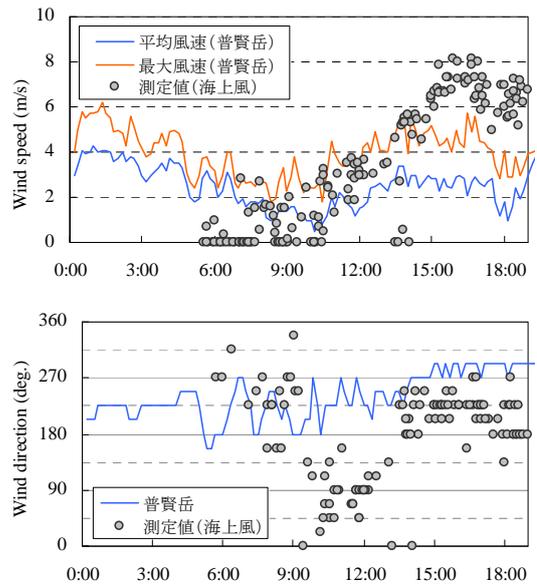


図-3 観測当日の風速と風向 (上図: 風速, 下図: 風向)

て器差の補正を行った。

### (2) 流動観測

諫早湾内の流況を把握することを目的として、ADCP曳航観測を実施した。観測では1艘の観測船を用いて、水質観測と平行して一潮汐間に9回の測定を実施した。観測断面は図-1に示す湾央の1断面である。観測に使用したADCPはRD-Instruments社製WorkhorseADCP1200kHzであり、サンプリング間隔3s, 表層のブランク1.25~1.35m, 層厚0.5mとした。

### (3) 観測実施時の気象および成層状況について

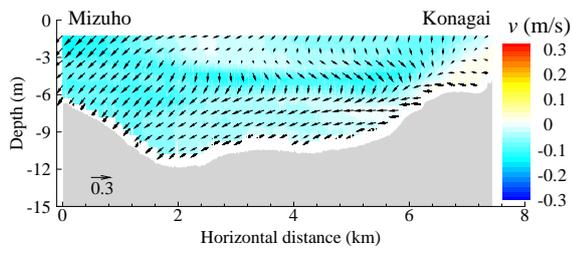
アメダス(普賢岳)によると、観測実施時(5:30~19:00)の気温は20~28°Cの範囲であった。風速・風向は図-3に示すように午前中は1~2m/sであり、観測後半は3m/s前後の西よりの風であった。また、観測実施日までの7日間(7月7日~13日)の諫早における積算降水量は0mmであった。なお、風速・風向については観測船上でも海上風の測定を実施した。図-3に示すように海上では午前中には風は0~4m/sの西寄りの風、観測後半には6~8m/sの南西の風が吹いていた。

有明海の成層構造に強い影響を与える筑後川の13日の日平均流量は78m<sup>3</sup>/sであった。また、観測実施時には諫早干拓調整池の南北排水門からの排水はなく、ポンプによる常時排水のみであった。成層状況は潮時や場所に依存するが、諫早湾のほぼ中央に位置するADCP測線付近での表層と底層の密度差は3kg/m<sup>3</sup>程度であった。

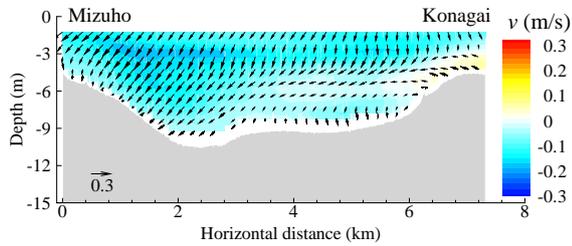
## 3. 観測結果と考察

### (1) 諫早湾央の流動構造

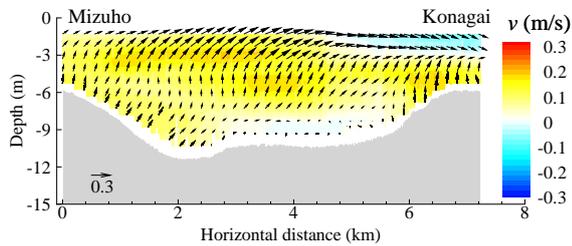
観測結果のうち1, 3, 7, 8, 9回目の測定によって得



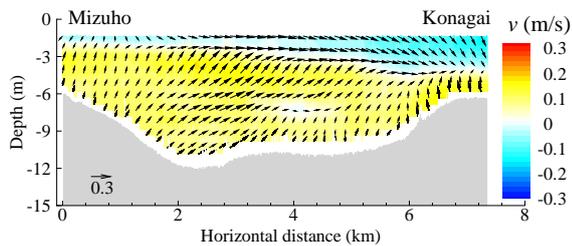
(a) 1回目



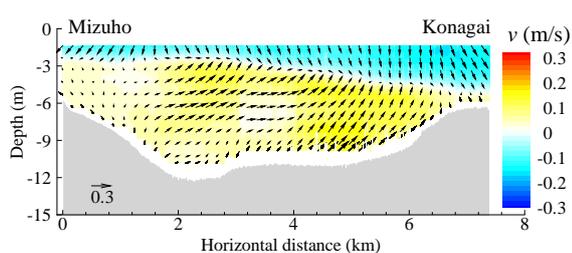
(b) 3回目 (下げ潮最強)



(c) 7回目 (上げ潮最強)

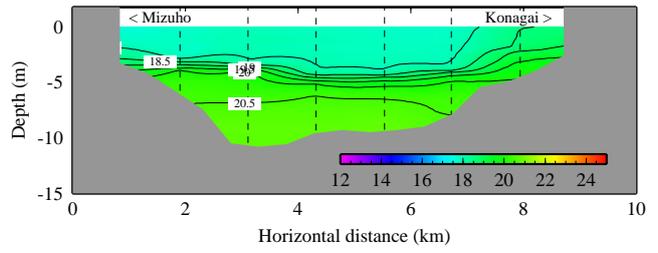


(d) 8回目

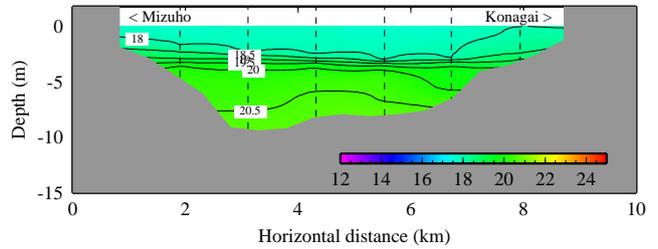


(e) 9回目

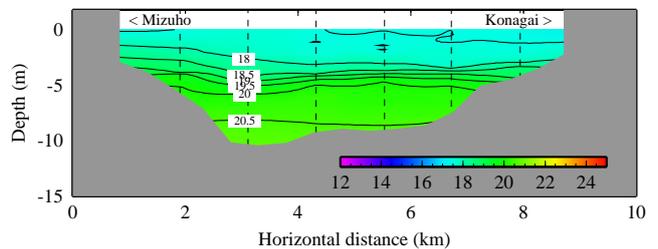
図-4 水平流速の断面直交成分の分布と流速ベクトル  
(暖色：諫早湾奥に流入，寒色：諫早湾奥から流出)



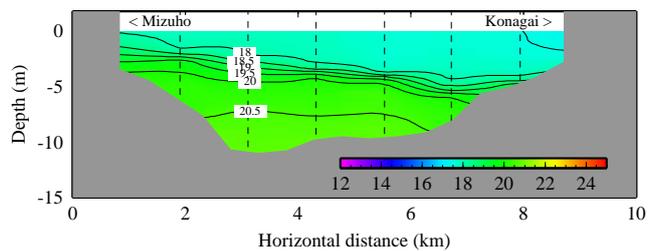
(a) 1回目



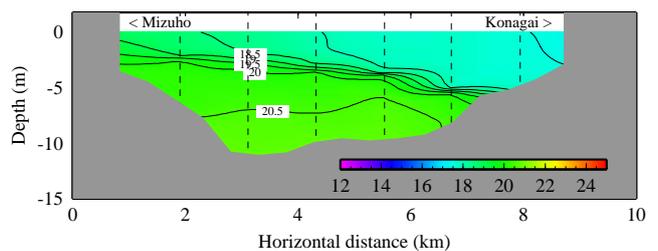
(b) 3回目



(c) 7回目



(d) 8回目

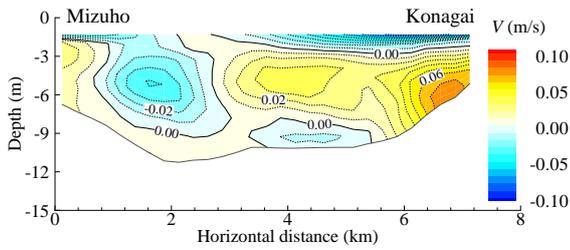


(e) 9回目

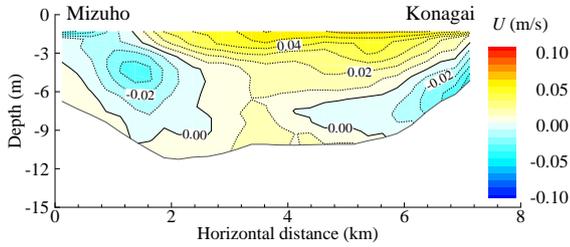
図-5 ADCP測定断面における $\sigma_t$ の分布

られたADCP測定断面における水平流速の断面直交成分のコンターと流速ベクトルを図-4，同断面における $\sigma_t$ の分布を図-5に示す。図-4中の上向きのベクトルは流入，下向きは流出を表す。なお，一回の曳航には1時間弱の航行時間を要しているが，特に時間補正は行っていない。これらの結果から，下げ潮時には断面南側（瑞穂側）と密度躍層付近から流出方向の流速が生じ始め，下げ潮最

強時には断面南側全層と北側の上層を中心として0.2m/s程度の流速が生じていた。一方，北側（小長井側）の底層では0.1m/s以下と弱いながらも流入方向の流速が満潮（1回目）から干潮（5回目）のすべてにおいて生じていた。同様の流れは多田ら<sup>7)</sup>による小潮期の観測結果においても確認されている。同断面における観測事例が少ないため，生成要因については不明であるが，いずれも潮



(a) 断面に直交する成分V (湾奥へ向かう方向が正)



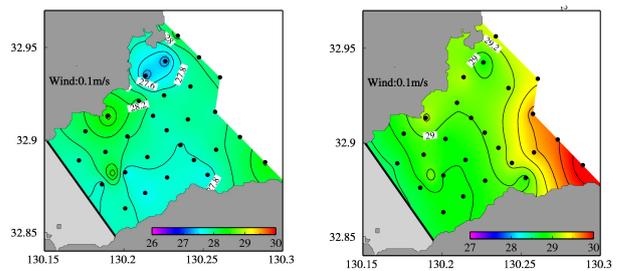
(b) 断面に平行な成分U (小長井に向かう方向が正)

図-6 一潮汐平均流速の断面分布

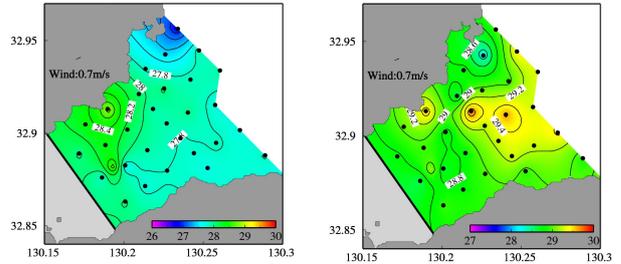
差の小さい条件下で観測されたという点が共通している。

上げ潮時には、南西の風が強くなった7回目の測定からADCP測定断面北側の表層で吹送流とみられる流出方向の流れが生じ始めた。8回目の測定時には吹送流がさらに発達し、表層水が湾口方向へ流出しながら北に向う流れが生じている。密度分布の結果から、この北向きの流速成分によって低密度水が諫早湾北部に吹き寄せられていることが確認できる。9回目には断面の南側で水深2m、北側で5mの深さまで流出方向の流速が生じていた。その流速はADCPの第一層(水深1.35m)で最大0.16m/sであり、潮流流速と同程度の値であった。海面近傍ではさらに大きな流速が生じていたと推察される。

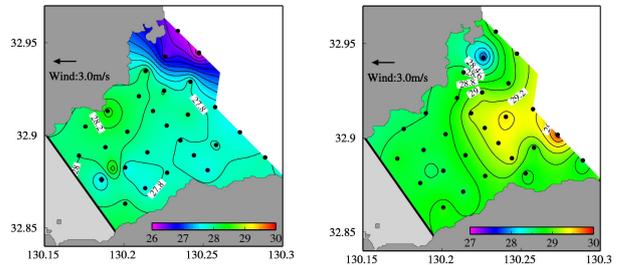
次に、ADCP測定断面における一潮汐平均流速の断面分布を図-6に示す。平均流速の算出は、ADCPデータを空間平均によって測線方向に等間隔(250m毎)のデータとし、水深方向のデータ取得領域(水面と海底近傍を除く領域)を10層に分割した後に、流速データを再配置して各層の平均流速を算出した。なお、5:00(潮位:1.29m)から同じ潮位に戻る18:40(潮位:1.29m)までを一潮汐として平均処理を行った。ADCP曳航観測による一潮汐間のデータから算定を行っているため、定量的な議論はできないが、観測当日の平均流の流出・流入の分布は概ね再現できていると考えられる。なお、断面に直交する流速成分をV(諫早湾奥に向かう方向を正)、断面に平行な流速成分をU(瑞穂から小長井に向かう方向を正)とする。これらより、ADCP測定断面北側の表層で流出方向の平均流が生じていることがわかる。これは、図-4(c)-(e)において見られた流出方向の流れに対応するものであり、風の影響と考えられる。断面に平行な成分Uに着目すると、Vと同様に測定断面北側の表層で風の影響によって小長井側に向かう平均流が生じている。全体的に見ると、本観測結果では諫早湾北側表層と南側



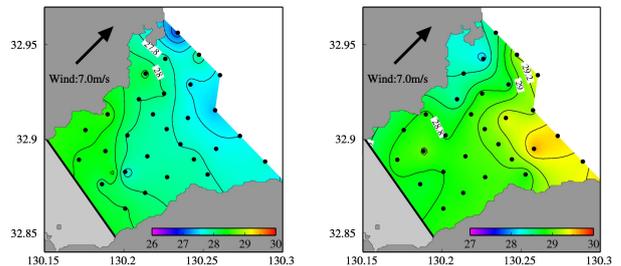
(a) 1回目 (満潮時)



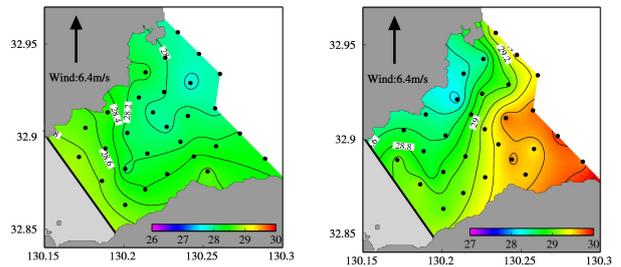
(b) 3回目



(c) 5回目 (干潮時)



(d) 7回目



(e) 9回目 (満潮時)

図-7 塩分の水平分布  
(左図: 表層塩分, 右図: 水深平均塩分)

中層で流出、中～底層で流入という平均流が生じており、上層流出・下層流入といったエスチャリー循環に対応するような平均流は明確には確認できなかった。これは、観測当日に密度成層が弱かったこと、風の影響が強かつ

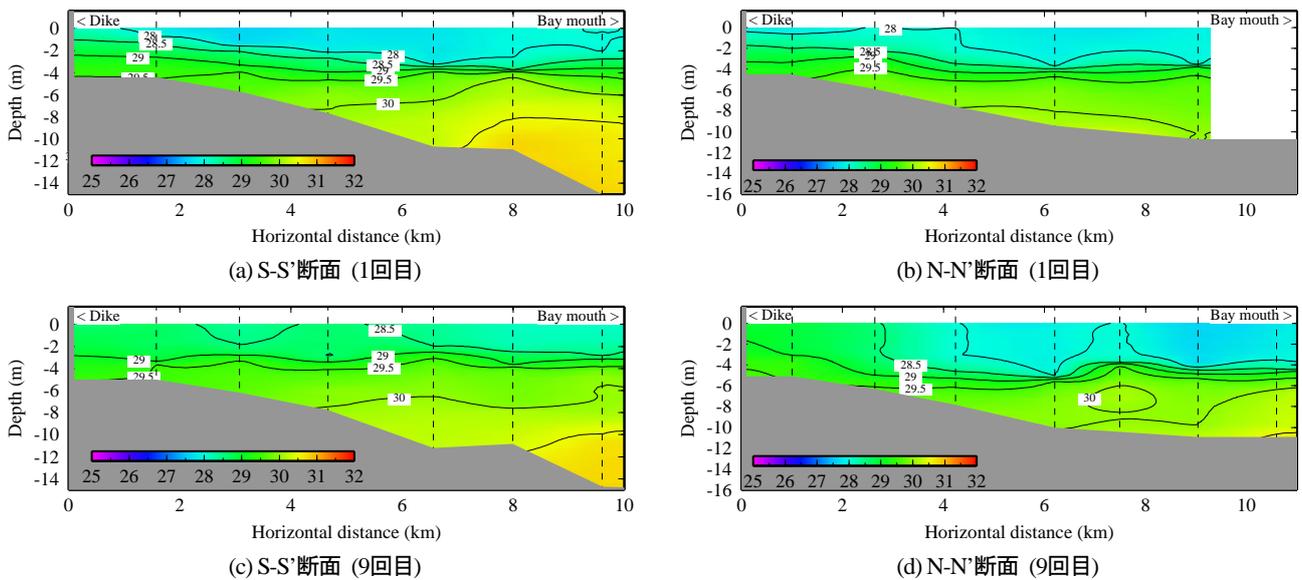


図-8 湾軸方向の鉛直断面における満潮時の塩分分布（上段：N-N'断面，下段：S-S'断面）

たこと、ならびに鯉淵ら<sup>4)</sup>が指摘しているように諫早湾奥に供給される淡水よりも有明海奥部から諫早湾に移流してくる淡水の影響が強いため、必ずしも諫早湾を一つのエスチャリーと位置づけられないことが要因として挙げられる。一方で、山口・経塚<sup>10)</sup>は風の影響の小さい小潮期に密度効果によって湾外の底層水が諫早湾内に流入することを指摘している。また、中村ら<sup>2)</sup>による長期連続観測によってもエスチャリー循環の存在が示されており、その流速は最大0.02m/s程度となっている。本研究で算定した一潮汐間の平均流速では数cm/sオーダーの密度流を評価することは困難であるが、少なくとも本研究で観測された吹送流の影響は中村らによって示された残差流速よりも1オーダー大きく、潮流流速と同程度であった。さらに、海陸風とみられる日周期の風速変動が諫早湾周辺に存在することを真木<sup>11)</sup>が報告していることから、吹送流によって生じる残差流シアも諫早湾の短期的な海水交換に対して重要な役割を担っていると推察される。

## (2) 諫早内の塩分分布とその挙動

観測結果のうち1, 3, 5, 7, 9回目の測定によって得られた表層塩分と水深平均塩分の水平分布を図-7に示す。1, 9回目は満潮時、5回目は干潮時の結果である。一回の測定には1時間を要しているが、時間補正は行っていない。なお、図中の矢印は観測船上で測定された海上風を表しており、風速の平均値と風向の最頻値を用いて作図した。1回目測定時には竹崎島沖の表層にパッチ状の低塩分水が存在している。これは、吹送流の発達が見られた時間帯と同程度（3～4m/s）の南南西の風が観測実施前の上げ潮時に普賢岳において観測されていたことや低塩分水の層厚が0.5m程度と比較的薄かったことから考えると、諫早湾内に流入する河川または諫早調整池から

のポンプ排水によって諫早湾奥に供給された低塩分水が移流してきた可能性が高い。さらに、図-7の(b), (c)において諫早湾口北側に低塩分水が見られることから、下げ潮時～干潮時にかけて比較的塩分の低い水が有明海奥部から南下してきていることが確認できる。干潮時には竹崎島から諫早湾口中央部にかけて広く低塩分水が分布している。しかし、南西の風によって生じた諫早湾の湾奥から湾口に向かう吹送流の影響を受け、干潮から上げ潮にかけてこの低塩分水が諫早湾内に取り込まれることはなかった。9回目の満潮時には諫早湾南部と潮受け堤防前面で表層の塩分が上昇している。これは、諫早湾の湾奥から湾口に向かう吹送流の補償流によって底層水の湧昇が生じたためである。これと同様の湧昇現象は李ら<sup>11)</sup>や多田ら<sup>12)</sup>によっても報告されている。水深平均塩分の分布からは、満潮時に諫早湾口南側から諫早湾奥北側に向かうように高塩分水が流入しているのが確認できる。9回目の満潮時には、1回目の満潮時よりも湾の奥まで高塩分水が侵入しているように見える。これは、図-5の密度分布からもわかるように、風による吹き寄せによって諫早湾北部で低塩分水の層厚が増大するとともに、南部で底層水の湧昇が発生していたためである。加えて、諫早湾口方向の吹送流の補償流による諫早湾内への高塩分水の流入も一因と考えられる。

次に、図-1に示す湾軸方向の鉛直断面S-S'、N-N'断面における満潮時（1, 9回目）の塩分分布を図-8に示す。南側のS-S'断面では9回目の測定時にはほぼ全域で塩分の上昇が生じている。これは、図-7からも確認できるように、諫早湾北部への表層水の吹き寄せに伴って発生した高塩分水の湧昇の影響、ならびに上げ潮時の諫早湾への高塩分水の流入が主に諫早湾口の南側で生じることによるものと考えられる。一方、北側のN-N'断面では、9回目の測定時に諫早湾奥の表層の塩分が上昇するとともに

に、潮受け堤防から3~4kmの付近でコンターラインが立っており、堤防前面でも高塩分水の湧昇が起きているのが確認できる。堤防前面と沖側底層の高塩分水とが連続していることから、吹送流の湾口方向の成分に対応する補償流によって沖側底層から比較的塩分の高い水が供給されたと考えられる。また、図-4、図-5から確認できるように、風の影響によって低塩分水が北岸側に吹き寄せられながら諫早湾北部海域を中心として諫早湾口方向に輸送されていることから、北側で流出、南側で流入といった水平方向の補償流に上げ潮流が加わった三次元的な流動構造によって高塩分水が堤防に沿って南側から移流してきた可能性もある。本研究では諫早湾奥部における流速測定を行っていないが、諫早湾奥部の流況は諫早湾調整池からの排水の挙動にも影響を与えるため、データの蓄積が必要であるといえる。

#### 4. まとめ

諫早湾内における低塩分水の短期的な挙動に関する現地観測を実施した。得られた主な結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 潮差の小さい条件で実施された本観測においても、多田ら<sup>7)</sup>によって報告されている諫早湾北岸で下げ潮時に諫早湾奥に流入する方向の潮流が生じていることが確認された。
- 2) 風速7m/s程度の南西の風が4時間程度連吹することによって小潮期の諫早湾における潮流流速と同程度の吹送流が生じ、諫早湾奥で底層水の湧昇が発生した。
- 3) 諫早湾の短期的な海水交換には吹送流が大きく寄与している可能性が示唆された。

以上のことから、海陸風等によって生じる吹送流も諫早湾の海水交換に対して重要な役割を果たしていると考えられる。諫早湾の環境を議論する上で海陸風の影響を考慮することが必要であることは坪野ら<sup>13)</sup>によっても示唆されており、さらに真木<sup>14)</sup>が指摘している諫早湾奥の陸地化による海陸風の変化や潮受け堤防建設による吹送距離の減少に伴う海象の変化、およびそれに伴う諫早湾の水質の動態の変化については今後検討が必要である。

**謝辞：**有明町漁業協同組合の松本秀光氏、松本透氏、松本光一氏、宮本和敏氏、松本清森氏、松本正明氏、橋本清和氏、篠塚光信氏には観測船の備船に多大なご協力を頂いた。また、観測には佐賀大学の野口剛志氏、ならびに九州大学の志岐慎介氏をはじめとする長崎大学、佐賀大学、九州大学の研究室に所属する多くの学生諸氏の協力を頂いた。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「沿岸海域環境再生に関する総合的研究」（研究代表者小松利光、課題番号20246083）の援助を受けた。ここに記し、深甚なる感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 中村武弘, 矢野真一郎, 多田彰秀, 野中寛之, 亀井雄一: 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, 2002.
- 2) 中村武弘, 多田彰秀, 矢野真一郎, 武田誠, 野中寛之: 諫早湾湾口部における夏季の流況観測, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.371-375, 2003.
- 3) 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.
- 4) 鯉淵幸生, 佐々木淳, 有田正光, 磯部雅彦: 有明海における水質変動の支配要因, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.971-975, 2003.
- 5) 多田彰秀, 竹之内健太, 坂井伸一, 染矢真作, 水沼道博, 中村武弘: DBF海洋レーダによる諫早湾湾口部の流況観測, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.356-360, 2006.
- 6) 多田彰秀, 竹之内健太, 染矢真作, 坂井伸一, 水沼道博, 中村武弘, 坪野考樹: DBF海洋レーダ観測に基づく諫早湾湾口部の表層流動特性, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.391-395, 2007.
- 7) 多田彰秀, 中村武弘, 矢野真一郎, 武田誠, 橋本彰博, 染矢真作, 齋田倫範: 諫早湾内における夏季の流況観測, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.351-355, 2005.
- 8) 齋田倫範, 矢野真一郎, 田井明, 小松利光: 夏季小潮期の現地観測による諫早湾の海水交換に関する検討, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.336-340, 2006.
- 9) 深山顕寛, 磯部雅彦, 鯉淵幸生: 有明海奥部における貧酸素水塊の動態に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.951-955, 2005.
- 10) 山口創一, 経塚雄策: 諫早湾における貧酸素水塊の形成機構, 海の研究, 第15巻, pp.37-51, 2006.
- 11) 李洪源, 樋口秀太郎, 松永信博: 南風により諫早湾南岸で発生した低酸素水塊の湧昇, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.406-410, 2009.
- 12) 多田彰秀, 阿部和也, 中村武弘, 竹之内健太: 2008年夏季に諫早湾で発生した赤潮および青潮と水質動態の関連について, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.961-965, 2009.
- 13) 坪野考樹, 吉井匠, 松山昌史, 坂井伸一, 多田彰秀: 海陸風と海洋レーダーで観測された諫早湾口周辺の表層の日周潮流速, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.401-405, 2009.
- 14) 真木太一: 諫早湾干拓地・潮受け堤防のメリットとデメリット, 風で読む地球環境, 古今書院, p.184, 2007.

(2009. 9. 30受付)