

有明海湾奥における近年の潮流の変化と残差流の変動特性

Change of Tidal Current in Recent Years and Variation Properties of Residual Current in the Head of Ariake Sea

田井 明¹・齋田倫範²・矢野真一郎³・川村嘉広⁴・野口敏春⁵・小松利光⁶

Akira TAI, Tomonori SAITA, Shinichiro YANO, Yoshio KAWAMURA
Toshiharu NOGUCHI and Toshimitsu KOMATSU

It has been suspected that the construction of the Isahaya sea-dike causes deterioration of aquatic environment in the Ariake Sea. Many studies on the aquatic environment have ever been conducted, but the causes have not been made clear yet. In this study, we examine the change of the tidal current due to the sea-dike by using the field observation data before and after constructing the sea-dike. As a result of the present study, it is clarified that the tidal current direction is changed and the M_2 tidal current is weakened in the head of the Ariake Sea by the sea-dike. In addition, it is concluded that properties of residual current might be affected by the sea-dike.

1. はじめに

有明海は九州西部に位置し、東シナ海および八代海とつながる閉鎖性内湾である。近年、湾奥部を中心に水環境の悪化が生じており、2000年度冬期のノリの色落ちやアサリやタイラギなどの二枚貝の漁獲量の減少が社会問題に発展している。このような水環境の悪化の一因として、1997年4月に行なわれた諫早湾潮受け堤防の締め切りの影響が考えられている。潮受け堤防締め切りによる水環境への影響はいくつか指摘されているが、そのなかでも潮汐・潮流の減少は密度成層の強化や河川水の輸送経路の変化、透明度の上昇などに関連していることから、多くの研究が行なわれてきた(宇野木・佐々木, 2007)。

有明海の潮汐の変化に関する研究は、主に1960年代から継続して存在している検潮データを用いて行なわれている。その結果、潮受け堤防締め切りにより M_2 分潮が減少したことが示された(宇野木, 2006)。この理由は、潮受け堤防の締め切りにより有明海の半日周潮に対する増幅効果が弱まったためと考えられている。さらに、田井・矢野(2008)は、潮受け堤防締め切りによる潮汐の変化が時空間的に変動していることを示すなど、潮汐の変化については明らかになりつつある。

多くの研究者が指摘するように、有明海の環境変化への影響は潮汐よりも潮流の変化のほうが重要であると考え

えられる(例えば、武岡, 2003)。諫早湾内およびその周辺に関しては、灘岡・花田(2002)が示したメカニズムにより潮受け堤防締め切り後に潮流は減少していると考えられる。しかし、諫早湾外における潮受け堤防締め切り前の潮流の現地観測データは非常に少なく、潮受け堤防締め切りと潮流の変化との関係やその影響範囲については未知の部分が多いのが現状である。

諫早湾外で締め切り前後の潮流の比較を行なった貴重な例として西ノ首ら(2004)による調査がある。西ノ首ら(2004)は図-1に示す地点P1, P2において締め切りによって潮流が減少していることを示し、その影響は島原半島側に集中して現れていると指摘した。しかし、近

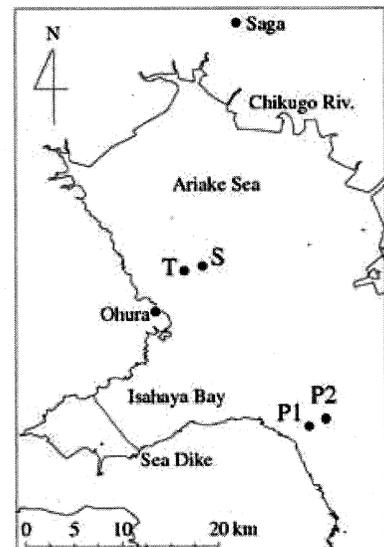


図-1 観測地点の位置

S: 本研究, T: 濱田・経塚(2007)
P1, P2: 西ノ首ら(2004)

- | | |
|--------------|-----------------------------------|
| 1 学生会員 修(工) | 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 |
| 2 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 |
| 3 正 会 員 博(工) | 九州大学大学院准教授 工学研究院環境都市部門 |
| 4 農 博 | 佐賀県 暮らし環境本部有明海再生・自然環境課 |
| 5 | 佐賀県有明水産振興センター |
| 6 工 博 | 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門 |

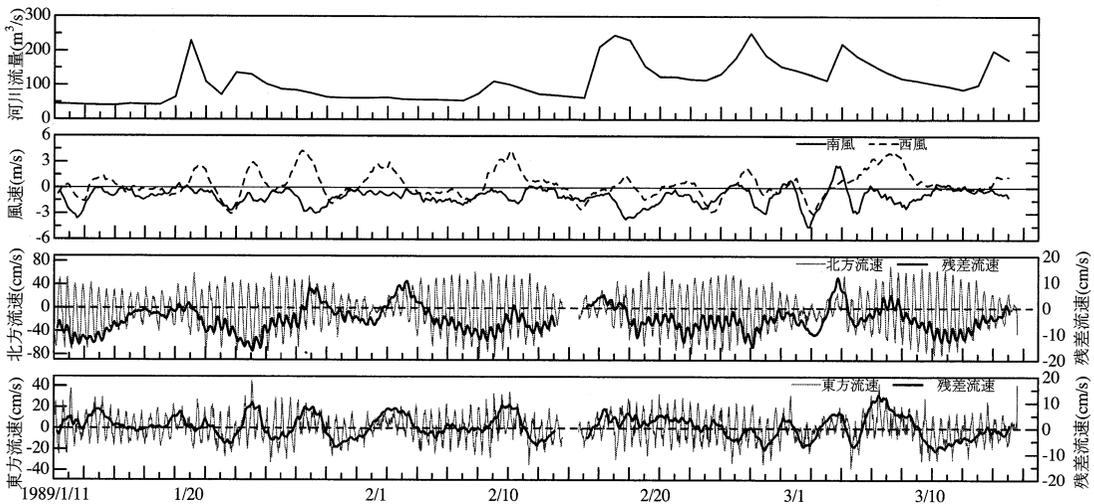


図-2 期間Iにおける河川流量(筑後川), 風速(佐賀), 北方潮流速, 東方潮流速および, 残差流速

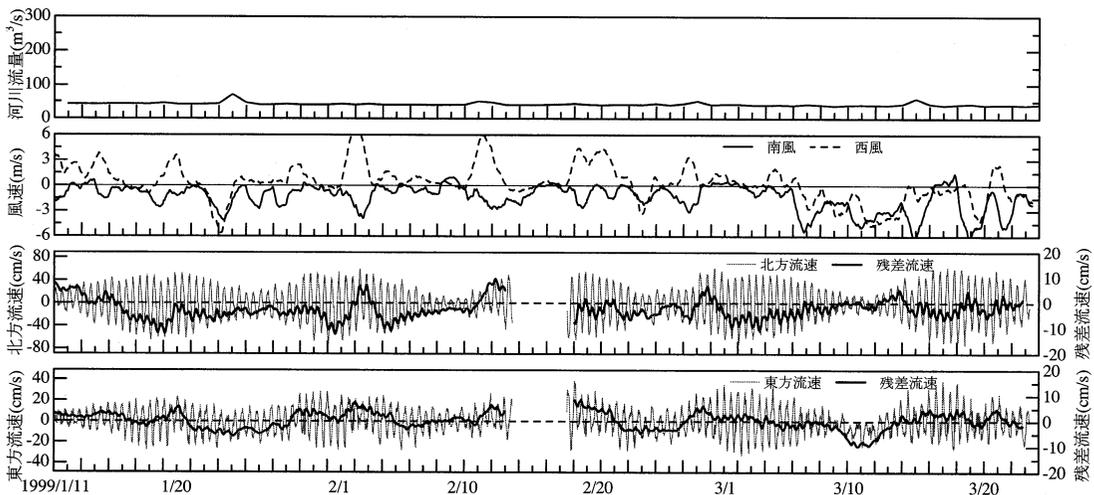


図-3 期間IIにおける河川流量(筑後川), 風速(佐賀), 北方潮流速, 東方潮流速, および残差流速

年水環境の悪化が深刻な大浦沖以北の湾奥部の潮流変化に関する研究結果は数値シミュレーションによる検討を除いて報告されていない。

そこで, 本研究では有明海湾奥部において潮受け堤防締め切り前後に取得されていた潮流観測データを新たに解析し, 潮受け堤防締め切りが潮流に与えた影響について検討を行なった。また, 有明海湾奥部の物質輸送に対する知見を得るために, 残差流の変動特性についても解析を行なったので併せて報告する。

2. 潮流観測の概要

使用したデータは佐賀県有明海水产振興センターが図-1に示す有明海大浦沖の地点S ($33^{\circ} 01' 07''$ N, 130°

$14' 53''$ E) に自記式電磁流速計(アレック電子社製, ACM-8M)を係留し, 海面下1.5mの表層流の流向・流速を30分間隔で測定したものである。係留は電磁流速計の下に付けたロープで魚礁にアンカーリングし, 上に付けたロープに浮標をつけて行なっている。

観測は, 1989年1月10日から同年3月15日(途中に26時間の中断を含む)までの期間(以下, 期間I), および1999年1月11日から同年3月24日(途中に96時間の中断を含む)までの期間(以下, 期間II)に実施された。期間Iは潮受け堤防締め切り前, 期間IIは締め切り後の観測であり, 両期間ともに冬期混合期の観測である。

観測結果を期間ごとに図-2, 3に示す。図中には筑後川の日平均河川流量(瀬ノ下)および佐賀における日平

表-1 潮汐・潮流の調和解析の結果

観測期間	M ₂	S ₂	N ₂	K ₂	K ₁	O ₁	
I	潮汐振幅 (cm)	147.6	71.0	27.8	26.0	33.6	26.2
	北方流速 (cm/s)	35.0	17.6	6.2	5.7	5.1	3.1
	東方流速 (cm/s)	11.9	4.6	1.8	1.2	0.3	0.3
	潮流楕円の長半径 (cm/s)	36.8	18.1	6.5	5.7	5.1	3.1
II	潮汐振幅 (cm)	154.2	73.1	23.3	18.8	25.4	19.1
	北方流速 (cm/s)	33.0	17.9	6.0	5.3	2.7	2.3
	東方流速 (cm/s)	13.7	6.3	2.0	2.8	0.7	1.0
	潮流楕円の長半径 (cm/s)	35.5	18.6	6.2	5.9	2.8	2.5

均風速（気象庁，2008）も示した。風速については図中において潮流の流速の方向と対応させるために，南風，西風をそれぞれ正としている。冬期の季節風により南風がほとんど生じず北風が卓越している。また，東西方向の風が南北方向の風より強い期間が多くあり，3m/s以上の西風と東風が断続的に生じていることが分かる。また，期間Iの筑後川の平均河川流量は109.7m³/s，期間IIは42.7m³/sであった。

3. 潮受け堤防締め切りの影響について

潮受け堤防締め切りの影響を解析するために潮流データの調和解析を行なった。解析には，各期間の初日から58日間のデータを用い，最小自乗法により主要10分潮（M₂，S₂，K₁，O₁，Q₁，P₁，N₂，K₂，M₄，MS₄）の調和定数を求めた（中野，1940）。主要な6分潮の流速振幅および潮流楕円の長半径を表-1に示す。また，図-4には得られた調和定数を用いて描いた主要4分潮の潮流楕円を示す。なお，期間I，IIともに途中に観測の中断があり，調和解析の精度への悪影響が考えられた。そこで，連続した29日間のデータに対しても調和解析を行ない，以下の考察に影響がないことを確認している。表-1には大浦の検潮データ（日本海洋データセンター，2008）を潮流と同様の方法で調和解析して求めた調和定数も併せて示している。月の引力により生じる分潮は月の昇交点運動により振幅が18.6年周期で変動する。期間Iと期間IIはこの18.6年周期の変動のそれぞれ極大と極小の時期であるため，表-1に示した分潮のうち太陽の引力のみに起因するS₂潮以外の分潮は期間Iと期間IIで潮汐振幅が大きく異なっている。

まず，最も支配的なM₂潮の変化について考察を行なう。潮汐振幅は期間Iに比べて期間IIが4.5%増加したのに対し，潮流楕円の長半径は3.5%減少していた。こ

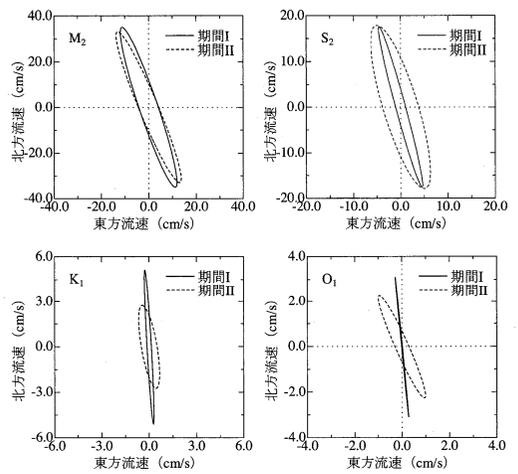


図-4 締め切り前後の主要4分潮の潮流楕円の比較

れは，潮受け堤防締め切りによりこの海域のM₂潮の流速が減少したことを示している。また，潮流楕円の長軸の向きは反時計回りに回転していることが分かる。西ノ首ら（2004）は，諫早湾の南東に位置する地点P₁，P₂（図-1）では潮受け堤防締め切り後にM₂潮の潮流楕円が時計回りに回転したことを示している。このことから，潮受け堤防締め切りにより潮流楕円は，諫早湾の北東部に位置する海域では諫早湾へ向かう流れの成分（上げ潮：北東，下げ潮：南西）が弱まり反時計回りに，一方，南東部に位置する海域では諫早湾へ向かう流れの成分（上げ潮：北西，下げ潮：南東）が弱まって時計回りに回転したと考えられる。

次にM₂潮以外の分潮について考察を行なう。表-1に示したK₂潮以外の分潮は期間IからIIへの潮汐振幅の増減に対応して長半径も増減しており潮受け堤防締め切

表-2 重回帰分析により得られた標準偏回帰係数と重相関係数 (*は有意水準 $P<0.05$ を表す)

期間		V_p	風速 (南風)	風速 (西風)	自由度調整済み 重相関係数
I	北方残差流	-0.60*	0.11	0.22*	0.38*
	東方残差流	-0.13	-0.19	0.56*	0.29*
II	北方残差流	-0.48*	-0.30*	0.31*	0.32*
	東方残差流	0.40*	-0.04	0.62*	0.57*

りの影響は確認出来なかった。また、 S_2 , K_1 , O_1 潮の潮流楕円はいずれも期間 I に比べて期間 II は反時計回りに回転していた。これは、前述の M_2 潮の場合と同様の理由が考えられる。さらに、潮流楕円の楕円率が期間 I に比べて期間 II の方が大きくなっていることも分かる。これらは、漁業者の「締め切り後に流れの方向が安定しなくなった」という証言(有明海再生機構, 2007)に対応していると考えられる。

以上のように、対象海域において潮受け堤防締め切りによる潮流の流速・流向への影響が確認された。しかし、この海域は既往の数値シミュレーション結果では潮受け堤防締め切り後に潮流が「変化無し～増加」となっている(塚本・柳, 2002; 灘岡・花田, 2002; 田井ら, 2006; Manda・Matsuoka, 2006)。そのため、潮受け堤防締め切りが湾奥部の潮流に与えた影響を明らかにするためには、数値シミュレーションの精度向上など今後更なる調査・研究が必要であると考えられる。

4. 残差流の変動について

筑後川から有明海へ流入した河川水は、風の影響が小さければコリオリ力の影響で湾奥を西方向へ輸送されることが漂流ブイを用いた現地観測によって示されている(齋田ら, 2008)。このことから、本研究で対象としている海域は、西側へ輸送された河川水の諫早湾および南方への主たる輸送経路となっていると考えられる。河川水は栄養塩の輸送や成層化などを促進する有明海湾奥の水環境に大きく影響するため、本海域の物質輸送を担う残差流の特性に関する知見は有明海湾奥の水環境を理解する上で非常に重要である。

研究対象海域の表層の残差流特性に関しては既に濱田・経塚(2007)や多田ら(2007)により報告されている。濱田・経塚(2007)は図-1の地点 T で実施した現地観測および数値シミュレーションから湾の長軸方向(ほぼ南北方向)の表層残差流には大潮・小潮周期変動があること、湾の短軸方向(ほぼ東西方向)の表層残差流は風の影響を強く受けていることを明らかにした。また、多

田ら(2007)は DBF 海洋レーダーによる表層流観測結果から、この海域の日平均流速が潮汐差、風速、筑後川の流量、潮受け堤防排水門からの淡水流入により影響を受けていることを示した。しかし、これらの解析は潮受け堤防締め切り後に行なわれたものであり、潮受け堤防締め切りが残差流に与えた影響については現地観測データに基づいた検討はできない。そこで、湾奥部の残差流特性、および潮受け堤防締め切りによる影響を評価することを目的として以下の検討を行なった。

本研究では潮流の25時間移動平均値を残差流と定義して解析を行なった。図-2, 3の流速の図中に太線で残差流の計算結果を示す。以下では、北方流速および東方流速の25時間移動平均値をそれぞれ北方残差流、東方残差流とする。

残差流の生成要因を定量的に調べるために重回帰分析を行なった。従属変数である残差流は、毎日0時から25時間間の流速の平均値とした。独立変数は、残差流の主な成分が潮汐残差流、吹送流、および密度流であることから以下の変数を用いた。吹送流の強さを表す変数として日平均風速を、潮汐残差流の強さを表す変数として毎日0時から25時間間の北方流速のピーク値の大きさの平均値 V_p を用いた。この V_p は大潮・小潮周期で変動する。これらの変数を標準化したデータを用いて線形重回帰分析を行なって標準偏回帰係数を求めた。この標準偏回帰係数を比較することにより各独立変数の残差流生成への寄与を調べた。結果を表-2に示す。表-2には得られた重回帰式の自由度調整済みの重相関係数も示している。なお、河川流量を独立変数に追加した場合の解析も行なったが、全てのケースで有意な偏回帰係数が得られなかったため、河川流量を除外して解析を行なった。これは、河川流量が両期間ともにあまり大きくなかったため、残差流の生成に対して密度流の影響がほとんどなかったことを示している。

結果より、北方残差流は両期間ともに V_p の標準偏回帰係数が最も大きく、その値は負であった。これは、潮北方残差流は大潮・小潮周期の変動特性を有しているこ

とから、流速が大きくなるほど南向きの残差流が生じることを示している。次に、東方残差流は両期間ともに西風の標準偏回帰係数が最も大きくその値は正であった。西風の北方残差流に対する標準偏回帰係数も有意な正の値となっており、西風が吹くと北東向きの残差流が生じやすいことが示された。以上の結果は、前述した濱田・経塚(2007)および多田ら(2007)の報告と定性的に一致しており、これらの既往の知見を支持していると考えられる。

また、東方残差流に関する V_p の標準偏回帰係数は期間Ⅰで-0.13であったのに対し、期間Ⅱでは西風の標準偏回帰係数(0.62)と同程度の大きさである0.40と大きく変化した。これは、期間Ⅰと期間Ⅱで残差流の特性が変化したことを示唆している。湾奥部では潮受け堤防締め切り前後の期間で河川水の輸送パターンが変化したことが示されている(日本海洋学会, 2005)。これらは湾奥部では近年、残差流および物質輸送機構が変化していることを示しており、この変化と潮受け堤防締め切りの関連については今後更なる検討を行なう必要がある。

5. おわりに

以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 潮受け堤防締め切り後に、 M_2 潮の潮汐振幅は4.5%増加していたが潮流流速は3.5%減少しており、湾奥部でも締め切りにより流速が減少したことが示された。
- (2) 潮受け堤防締め切り後に、主要4分潮の潮流楕円は反時計回りに回転しており、締め切りにより湾奥部でも流向が変化したことが示された。
- (3) 残差流の南北方向成分は潮流の大きさに依存して大潮・小潮周期で変動しており、潮流が大きいほど南向きの残差流が生じていた。
- (4) 東西方向の風は残差流の東西方向成分および、南北方向成分にも影響しており、西風により北東向きの残差流が生じることが分かった。
- (5) 潮受け堤防締め切り前後の期間に残差流の特性が変化した可能性が示唆された。

本研究により、これまで数値シミュレーションにより潮受け堤防締め切りによる潮流への影響が「変化無し～増加」とされていた湾奥部においても締め切りの影響があることが示された。

謝辞：本研究で用いた潮流データを取得された佐賀県有明海水産振興センターの皆様、観測方法に関する情報を

提供していただいた同センターの伊賀田氏、河川流量データを提供していただいた国土交通省筑後川河川事務所、データ解析に関して多くの有益な助言をいただいた佐賀大学有明海総合研究プロジェクトの濱田孝治先生に感謝の意を表します。また、結果の解釈に関して潮流解析勉強会(主催：NPO法人有明海再生機構)の場で大変有意義な議論をさせていただきました。参加された皆様に感謝の意を表します。最後に、本研究は有明海再生機構からの受託研究「有明海湾奥の潮流解析」の一環として行なわれたこと、および潮位データは日本海洋データセンターのものを頂いたことを付記します。

参考文献

- 有明海再生機構(2007)：平成18年度漁業者ヒアリング調査結果報告書、築地書館、84p.
- 宇野木早苗(2006)：有明海の自然と再生、築地書館、264p.
- 宇野木早苗・佐々木克之(2007)：有明海異変の発生システムについて、海の研究、第16巻、第4号、pp. 319-328.
- 気象庁：<http://www.jma.go.jp>、参照2008/2/1
- 齋田倫範・矢野真一郎・田井明・重田真一・小松利光(2008)：筑後川から有明海へ流入する河川水の挙動、水工学論文集、第52巻、pp. 1327-1332.
- 田井明・矢野真一郎(2008)：外海を基準とした有明海の M_2 潮増幅率の変動特性と諫早湾潮受け堤防建設による影響、海の研究、第17巻、第3号、pp.205-211.
- 田井明・Hatta,M.P.・矢野真一郎・齋田倫範・小松利光(2006)：諫早湾湾奥の締め切りが有明海の潮汐・潮流に与えた影響、海岸工学論文集、第53巻、pp.331-335.
- 武岡英隆(2003)：有明海における M_2 潮汐の変化に関する議論へのコメント、沿岸海洋研究、第41巻、pp. 61-64.
- 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・坪野孝樹(2007)：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について、海岸工学論文集、第54巻、pp. 391-395.
- 塚本秀史・柳哲雄(2002)：有明海の潮汐・潮流、空と海、第78巻、第1号、pp. 31-38.
- 中野猿人(1940)：潮汐学、古今書院、528 p.
- 灘岡和夫・花田岳(2002)：有明海における潮汐振幅減少要因の解明と諫早堤防締め切りの影響、海岸工学論文集、第49巻、pp.401-405.
- 西ノ首英之・小松利光・矢野真一郎・齋田倫範(2004)：諫早湾干拓事業が有明海の流動構造へ及ぼす影響の評価、海岸工学論文集、第51巻、pp. 336-340.
- 日本海洋学会編(2005)：有明海の生態系再生をめざして、恒星社厚生閣、211 p.
- 日本海洋データセンター：<http://www.jodc.go.jp>、2008/2/1
- 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、第16巻、第3号、pp. 203-221.
- Manda, A. and K. Matsuoka (2006)：Changes in Tidal Currents in the Ariake Sound Due to Reclamation, Estuaries and Coasts, 29(4), pp.645-652.