

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

齋田倫範¹・矢野真一郎²・田井 明³・小松利光⁴

2004 年 8 月 8 日 (小潮) に, 諫早湾内において ADCP 曳航観測, および CTD 観測を実施した。観測結果を用いて, 諫早湾の海水交換機構に関する検討を行なった。得られた主要な結果は, (1) 諫早湾においては, 成層の効果が顕著であると考えられる夏季小潮期であっても, エスチャリー循環の効果が支配的とならない場合がある, (2) 諫早湾口南部の反時計回りの残差環流は, 諫早湾の海水交換に対して重要な役割を果たすものではない可能性がある, (3) 下げ潮時に北部有明海から南下していたと考えられる低塩分水塊の一部が湾口北部から諫早湾内に取り込まれるような流れが上げ潮時に生じている, などである。

1. はじめに

九州西岸に位置する有明海は, 古くから生物資源の宝庫として知られてきた。しかし, 諫早湾干拓事業が着工された 1990 年以降, アサリやタイラギをはじめとする魚貝類の急激な減少や赤潮の増加などが深刻な社会問題となっている。これらの原因究明のために潮流に関する現地観測が数多く行われている (小松ら, 2004, 徳永ら, 2004 など)。また, 矢野ら (2004) は, 現地観測により有明町と長洲町を結ぶ海域において観測される非一様な水平流速分布が, 北部有明海の海水交換に重要な役割を果たしている」と指摘している。

諫早湾干拓事業の影響を直接的に受けられていると考えられる諫早湾周辺の潮流を主に対象とした観測の代表的なものとして, 2001 年に実施された中村ら (2002) の観測や 2003 年に実施された多田ら (2004) の観測がある。しかしながら, いずれの観測も諫早湾口の情報が得られておらず, 諫早湾全域の流動構造の把握には至っていない。その一方で, 千葉・武本 (2003) は平面二次元数値シミュレーションにより, 有明海奥部に排出された物質の多くが, 諫早湾を経由した後に島原半島に沿って南下していくことを示している。また, 齋田ら (2005) は, 諫早湾によるタイダルトラッピングが北部有明海の海水交換を促進している可能性があることを報告している。これらのことから, 諫早湾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。

このように諫早湾は, 潮受堤防建設の影響を直接的に受けている海域であるにもかかわらず, その流動構造の現況すら明らかにされていない。そこで, 諫早湾内の流

動構造を把握するために 2004 年夏季に超音波ドップラ一流速計 (以下, ADCP) 曳航観測を実施した。観測の概要およびその結果については, 多田ら (2005) で既に報告されているが, 本稿では諫早湾の海水交換に着目してさらに詳細な検討を行ったので報告する。

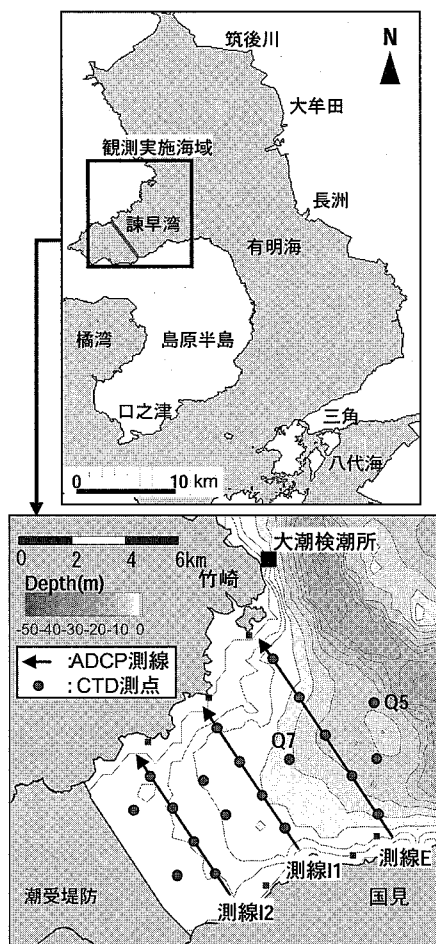


図-1 観測実施海域の概略図

1 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
2 正 会 員 博(工) 九州大学大学院助教授 工学研究院環境都市部門
3 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
4 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

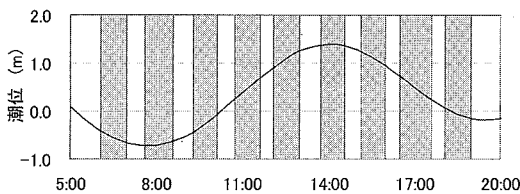


図-2 観測当日の潮汐（大浦）と観測時間帯
(図中のハッチは観測時間帯を示す.)

2. 観測概要

(1) ADCP による流動観測について

2004年8月8日(小潮)にADCP曳航観測を実施した。3艘の観測船を用いて一潮汐間に渡り約1時間半毎に計9回の観測を実施した。観測断面は、図-1に示す測線E, 測線I1, 測線I2の3断面である。観測に使用したADCPはRD-Instruments社製Workhorse ADCP600 kHz, 1200 kHzであり、サンプリング間隔2~3秒、表層のプランク1.0~2.5 m, 層厚0.25~1.0 mとした。潮汐と観測時間帯を図-2に示す。観測日の大浦検潮所における実測潮位(気象庁, 2006)は、満潮: 1.88 m (1:06), 1.40 m (14:05), 干潮: -0.74 m (7:41), -0.20 m (19:34)であった。

(2) 塩分・水温観測について

観測時の成層状況を把握することを目的として、図-1に示す測線E, I1, I2上の13測点を含む計20測点で多項目水質計による塩分・水温の測定(以下、CTD観測)を行なった。3艘の観測船を用い、ADCP曳航観測と平行して一潮汐間に計9回の測定を実施した。使用した多項目水質計は、アレック電子社製クロロテックACL220, ACL1183, およびワイエスアイ・ナノテック社製YSI6600である。なお、観測前日に観測海域周辺の二箇所から採水した水を用いて器差の補正を行なっている。

(3) 観測当日の気象および成層状況について

アメダス(島原)(気象庁, 2006)によると観測実施時(5~20時)は、気温が27.7~32.8℃の範囲にあり、風は0~3 m/sの東寄りの風が吹いていた。また、観測実施日7日前から当日にかけての積算降水量は8 mmであり、安定した気象・海象の下での観測であった。成層状況は、CTD観測の結果から σ_t を算出したところ、測線E, I1, I2の全断面において常に σ_t の値が南側に比べて北側の方が0.5~1.0程度、底層に比べて表層の方が1.0~2.0程度小さくなっており、密度成層が生じた状況下での観測であったといえる。低密度水塊が諫早湾の北側に偏って存在する傾向は、橋本ら(2005)によって報告されており、本観測でも同様の傾向が確認された。

3. 観測結果について

(1) 浮力フラックスの算定

主として淡水の交換特性を把握することを目的として、浮力フラックスを算定した。なお、本研究では室田・中辻(1984)の定義と同様に浮力 b を式(1)のように定めた。

$$b = \frac{\rho_m - \rho}{\rho_m} g \quad (1)$$

ここで、 b は浮力、 ρ_m は観測で得られた密度の最大値(=1020.5 kg/m³)、 ρ は測定された密度、 g は重力加速度である。

湾口断面(測線E)において断面に直交する流速成分を u とし、宇野木(1993)と同様の方法により、残差流と周期的な潮流に分解した。本研究の観測結果は時間解像度が低いため、乱れの効果は周期的な潮流に含まれると仮定した。浮力 b についても同様に分解した。次に、残差流と潮流をそれぞれ断面平均とそれからの偏差に分解した。浮力 b も同様とした。このとき、断面を通過する時間平均浮力輸送量 F は、断面積を A としたとき、

$$F/A = \bar{u}_A \bar{b}_A + (\bar{u} * \bar{b})_A + \bar{U}_A \bar{B}_A + (\bar{U} * \bar{B})_A \quad (2)$$

となる。ここで、 U は周期的な潮流成分、 B は b の一潮汐平均値からの偏差である。また、 $\bar{}$ は一潮汐間の時間平均、添え字 A は断面平均、 $*$ は断面平均値からの偏差を意味する。式(2)の右辺第一項は断面平均の残差流による移流項、第二項は残差流のシアによる交換項、第三項は断面平均潮流による交換項、第四項は潮流のシアによる交換項である。

諫早湾口における観測データを用いて、浮力フラックスに対する各項の寄与を算定した。まず始めに、潮流と浮力を潮汐変動成分と一潮汐平均成分に分離した。分離に際しては、当日の大浦の潮位変動から、潮位-0.15 cmである5:30から同じ潮位に戻る19:00までを便宜上一潮汐とした。なお、断面積の時間変化は考慮していない。観測データから一潮汐間の流速と浮力の平均値を算定し、一潮汐平均成分とした。また、流速と浮力の変動から一潮汐平均成分を差引いた値を潮汐変動成分とした。これらの各値を用いて諫早湾の海水交換について各交換項を算定した。なお、ADCPで計測を行なえない表層の流速については、ADCPの第一層の流速を表層まで一定として与えた。

(2) 諫早湾の海水交換機構

諫早湾口断面における一潮汐間の単位面積当たりの浮力輸送量を図-3に示す。ここで、正の値が諫早湾へ流入、負の値が流出を意味する。この結果より、諫早湾の海水交換において、諫早湾への浮力の流入には、断面平均潮流による交換と潮流のシアによる交換が寄与してい

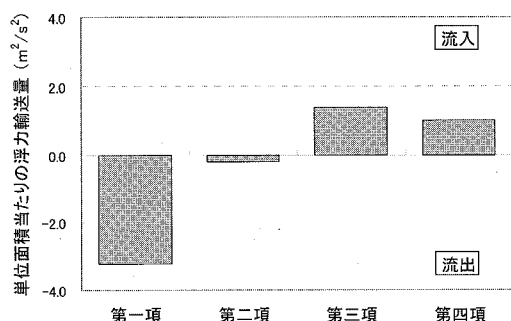


図-3 諫早湾口断面における一潮汐間の浮力輸送量（第一項：残差流による移流，第二項：残差流のシアによる交換，第三項：断面平均潮流による交換，第四項：潮流のシアによる交換）

るのに対して，流出には残差流による移流が寄与していることがわかる．残差流のシアによる交換の効果は，これらの効果と比較して小さかった．また，4つの項の合計値と成分分解を施さずに算定した場合の浮力の輸送量はともに $-1.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ であり，一致していた．

a) 断面平均残差流による移流

観測実施時の諫早湾内の平均塩分・水温の経時変化，ならびに大浦の潮位変動を図-4に示す．平均塩分と平均水温は，測線E以西に配置されたCTD測点における平均値である．この結果より，塩分がほぼ一定の値を保っているのに対して，水温は上昇していることが確認できる．観測時間帯の塩分と水温の変化量（1回目と9回目の差）は，それぞれ -0.1 と $+0.9^\circ\text{C}$ であった．これらの変化に伴う浮力の変化量は $0.0034 \text{ m}^2/\text{s}^2$ であり，観測時間帯に諫早湾内の浮力は上昇していた．さらに，塩分変化による浮力の増加量は $0.0007 \text{ m}^2/\text{s}^2$ であり，水温変化による浮力の増加量は $0.0027 \text{ m}^2/\text{s}^2$ であった．晴天の下での観測であったことから，本観測については海面からの浮力の供給（加熱）が湾内の浮力増加の主要因であったと考えられる．一方，断面平均残差流は一潮汐間の湾内への淡水供給量をAで割ったものに等しくなるため，断面平均残差流が流出方向に生じていたことは，湾内に淡水供給があったことを示している．

これらのことから，加熱によって上昇した断面平均浮力が，淡水供給によって生じる断面平均残差流によって流出したことが，断面平均残差流による移流の寄与を大きくしていると考えられる．夏季には海面の加熱や出水のように諫早湾内に浮力を供給する要因が多いことから，本観測結果と同様に断面平均残差流による浮力の輸送が諫早湾から浮力を流出させる方向に生じていると推察される．

b) 残差流のシアによる交換

残差流の断面平均からの偏差，浮力の断面平均からの

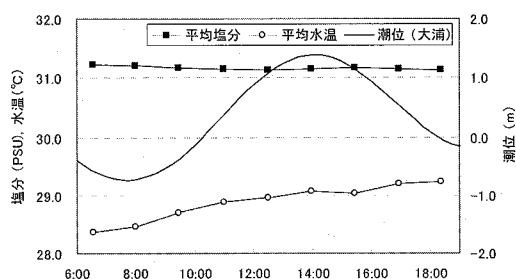


図-4 諫早湾内の平均塩分と平均水温の経時変化

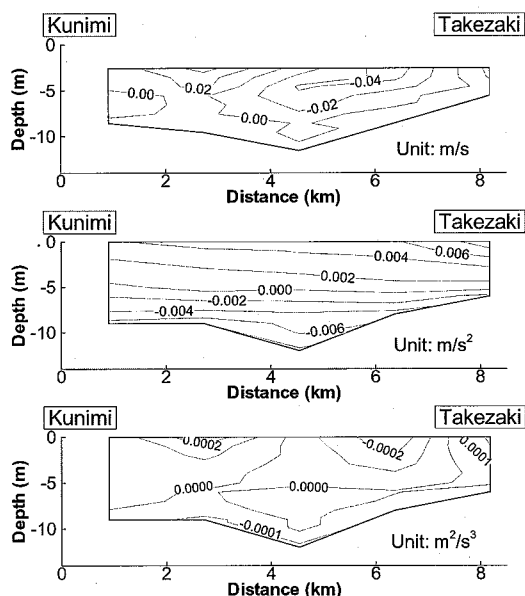


図-5 残差流速，浮力，残差流のシアによる浮力フラックスの断面分布（上段：残差流速，中段：浮力，下段：残差流のシアによる浮力フラックス）

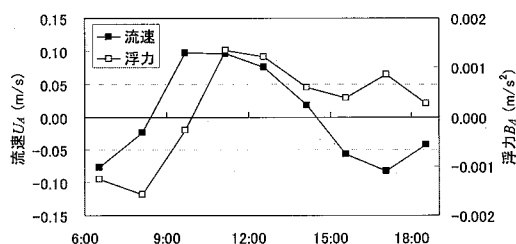


図-6 周期的な潮流流速の断面平均値と断面平均浮力の時系列

偏差，ならびに残差流のシアによる浮力フラックスの断面分布を図-5に示す．残差流のシアによる交換は，エスチャリー循環や水平残差環流による物質輸送を意味する．夏季小潮期の観測であり，浮力分布からも密度成層していたことが確認できるが，残差流速の断面分布に明瞭な鉛直循環（エスチャリー循環）は現れていなかった．

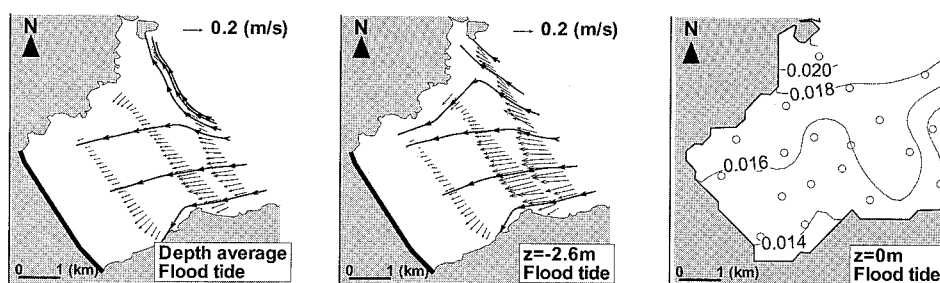


図-7 上げ潮最強時（4回目）の流速ベクトルと流線，および浮力の平面分布（左図：水深平均流速ベクトルと流線，中央図：2.6m層の水深平均流速ベクトルと流線，右図：浮力の平面分布）

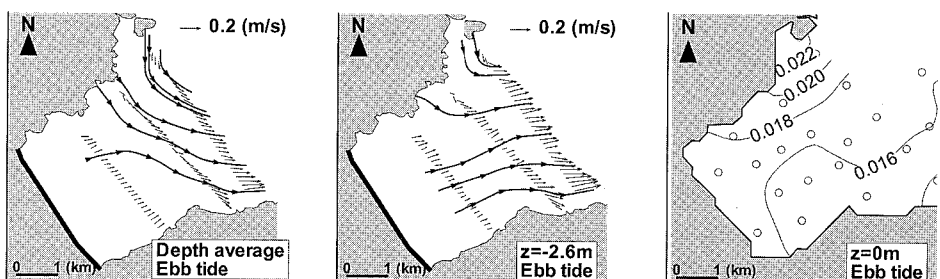


図-8 下げ潮最強時（8回目）の流速ベクトルと流線，および浮力の平面分布（左図：水深平均流速ベクトルと流線，中央図：2.6m層の水深平均流速ベクトルと流線，右図：浮力の平面分布）

このため，残差流のシアによる交換が他の効果と比較して小さくなっていたと考えられる。ただし，中村ら（2003）によって，諫早湾内にエスチャリー循環が生じていたことが報告されており，河川流量等の条件によってエスチャリー循環の影響が変化することも考えられる。

また，本観測結果には現れていないが，田中ら（2002）の数値シミュレーション結果には，諫早湾口南部の沖側で諫早湾に流入，陸岸側で流出という反時計回りの残差環流が見られる。これは，千葉・武本（2003）の平面2次元の数値シミュレーション結果にも現れており，主として地形の影響によるものと考えられるが，残差流のシアによる浮力の交換が他の機構と比較して小さいことは，この残差環流が小潮期の諫早湾の海水交換に対して重要な役割を果たすものではない可能性を示唆している。ただし，残差流による物質輸送は長期的な物質循環を考える際に重要となる場合があるため，今後長期的な連続観測による検証が必要である。

c) 断面平均潮流による交換

周期的な断面平均流速 U_A と断面平均浮力 B_A の経時変化を図-6に示す。午前中の干潮時に浮力が減少していること，午後に浮力の大きな状態が継続していることが確認できる。この一因として，図-4で示した海面の加熱による影響が考えられる。加熱の影響が比較的小さかったと考えられる午前中に着目すると，下げ潮時に浮力の小さな水塊が湾内から流出していること，干潮時に

減少していた浮力が上げ潮に転じた後に上昇していることが確認できる。これは，諫早湾外の浮力の大きな水塊が，上げ潮時に湾口断面を通過して諫早湾内に流入していること示唆している。その後，午後の下げ潮時に浮力が諫早湾から流出するが，一潮汐平均としては諫早湾内に浮力が流入する結果となった。上げ潮の前半に諫早湾外のCTD測点において表層塩分の低下が確認されたことから，流入した浮力の一部は有明海灣奥部から下げ潮時に移流してきた低塩分水塊によるものと推察される。このことは，諫早湾によるトラッピングの効果が北部有明海の物質の分散や輸送を促進することを示唆している。

d) 潮流シアによる交換

海水交換機構の発生要因を考察するために，諫早湾内の測線E，I1，I2における上げ潮最強時（4回目）と下げ潮最強時（8回目）の流速ベクトルと流線，ならびに表層における浮力の分布を図-7，図-8に示す。流線を描く際には，Inverse Distance Weighted法によって空間的な内挿処理を施したが，連続条件などを満足させる補正処理は行っていない。この結果より，上げ潮時の表層（ADCPデータの第一層である-2.6m層）においては，下げ潮時に北部有明海から南下して諫早湾口周辺海域に存在していたと推測される浮力の大きな水塊（ここでは淡水）の一部が湾口北部から諫早湾内に取り込まれるような流れと浮力分布が確認できる。この流況によって浮力の大きな水塊が上げ潮時に諫早湾口北部か

ら供給されること、ならびに諫早湾北部の潮流は南部と比較して小さいことが、諫早湾北部海域における低塩分水塊の偏在の一因となっていると推察される。

一方、下げ潮時には、北部有明海からの南下流が湾口北側で諫早湾内に流入し、流入区間のすぐ南側から諫早湾外に流出する流れとなっている。この流況は湾口断面において潮流のシアによる浮力の交換をもたらす一要因となる。しかしながら、この流況が生じていた領域（本研究では、ADCP 測線の北側 3/5 の区間）の一潮汐間における単位面積当たりの浮力輸送量を算定すると $0.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ であり、南側の 2/5 の区間における $2.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ と比較して小さかった。このことから、実際には諫早湾奥と有明海本体との海水交換に対する寄与は小さいと考えられる。

4. ま と め

2004 年 8 月 8 日（小潮）に、諫早湾内において ADCP 曳航観測、ならびに塩分・水温の観測を実施した。観測結果を用いて諫早湾の海水交換機構に関する検討を行なった。主な結果は以下のとおりである。

- (1) 諫早湾への浮力の流入には、断面平均潮流による交換と潮流のシアによる交換が、流出には残差流による移流が寄与していた。
- (2) 諫早湾においては、成層の効果が顕著であると考えられる夏季小潮期であっても、エスチャリー循環の効果が支配的とならない場合がある。
- (3) 諫早湾口南部の反時計回りの残差環流は、諫早湾の小潮期の海水交換に対して重要な役割を果たすものではない可能性がある。
- (4) 下げ潮時に北部有明海から南下していたと考えられる低塩分水塊の一部が湾口北部から諫早湾内に取り込まれるような流れが上げ潮時に生じている。

これらより、諫早湾の海水交換には、断面平均された残差流と潮流の効果が大きく寄与していることが確認された。また、断面平均潮流は、諫早湾の海水交換だけではなく、北部有明海の物質の分散や輸送に重要な役割を果たしていることが示唆された。

「重点研究課題（研究助成金）」（研究代表者：矢野真一郎）の援助を受けた。また、本稿で使用した観測データは、長崎大学工学部多田彰秀教授、長崎大学環境科学部中村武弘教授、中部大学武田誠助教授、ならびに東京電機大学理工学部橋本彰博助手（当時）と著者らの共同研究グループによって観測されたものである。ここに記して深甚なる謝意を表わします。

参 考 文 献

- 宇野木早苗(1993): 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, pp. 524-532.
- 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.
- 気象庁: 気象統計資料電子閲覧室 (オンライン), <http://www.data.kishou.go.jp/etn/index.html>, 参照 2006-05-17.
- 気象庁: 潮汐観測資料 (オンライン), <http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/tide/genbo/index.php>, 参照 2006-05-17.
- 齋田倫範・矢野真一郎・橋本泰尚・小松利光(2005): 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, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 346-350.
- 多田彰秀・中村武弘・矢野真一郎・武田誠・藤本大志(2004): 諫早湾湾口部における潮流流速と溶存酸素濃度の現地観測, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 901-905.
- 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況変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 376-380.
- 徳永貴久・鶴崎賢一・松永信博・小松利光(2004): 有明海の竹崎一大牟田ラインにおける成層構造と水質特性, 水工学論文集, 第 48 巻, pp. 1273-1278.
- 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況観測, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 371-375.
- 橋本彰博・関根章雄・有田正光(2005): 有明海北部海域の水質構造と赤潮発生に関する一考察, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 931-935.
- 室田明・中辻啓二(1984): 成層せん断流の乱流構造, 土木学会論文集, 第 351 号, II -2, pp. 107-116.
- 矢野真一郎・齋田倫範・橋本泰尚・神山泰・藤田和夫, 小松利光(2004): 有明海における潮汐条件に対する流動・成層構造の変化, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 331-335.

謝辞: 本研究に対して, (社) 土木学会の平成 16 年度