

有明海における潮汐条件に対する流動・成層構造の変化

矢野真一郎* ・ 齋田倫範** ・ 橋本泰尚***
神山 泰**** ・ 藤田和夫***** ・ 小松利光*****

2003 年 6 月 30 日 (大潮), 7 月 20 日 (中潮), 8 月 6 日 (小潮) に, 有明海の有明-長洲, 竹崎-大牟田を結ぶ断面について, ADCP 曳航観測および STD 観測を実施した。得られた主要な結果は, (1) 島原半島沿いに相対的に大きな流速帯が生じており, その傾向は大潮時に顕著であったこと, (2) 表層流出・中底層流入の典型的な鉛直循環がみられ, その傾向は小潮時に顕著であったこと, (3) 島原半島沿岸部では, 局所的に生じる大きな潮流によって成層が不安定になりやすい傾向があることなどである。

1. はじめに

諫早湾干拓事業が 1990 年に着工され, 1997 年には事業の一環として, 延長 7.05 km の潮受け堤防が建設されたことにより, 諫早湾奥部の約 3550 ha が締め切られた。事業が着工された 1990 年以降, タイラギやアサリの漁獲量の減少や赤潮の大規模化と多発化等が深刻化しており, 社会的な問題となっている。

有明海における水質問題の深刻化の要因については, 種々の分野において活発な研究が行われている。宇野木 (2003) や柳・塚本 (2004) によって, 潮汐の減少が報告されており, 潮受け堤防建設による海表面積の減少や平均水位の上昇, 外部潮汐の減少との関連が議論されている。潮汐・潮流の減少に伴う鉛直混合の減少や透明度の増加が, 水環境の変化の一因と考えられることから, 潮汐・潮流に関する研究がこれまでに行われてきた。しかしながら, 従来の研究の多くは流速が大きく, 変化の激しい大潮期を中心に観測を行っており, 小潮期の観測データについては, 中村ら (2003) の諫早湾湾口部の観測を除き, 十分に得られていないのが実状である。小潮期は, 潮流流速が小さく成層化しやすいことから, 貧酸素化や海水交換能の低下による赤潮発生等の水環境上の問題を考える上で非常に重要である。また, 密度勾配に起因して発達する鉛直循環 (エスチャリー循環) も, 湾内の海水交換や物質循環を考える上で重要な働きをしている。そこで, 本稿では, 大潮, 中潮, 小潮期における流動構造・成層構造の違いについての検討を行うために実施した, 超音波ドップラー流速計 (以下, ADCP) による曳航観測および多項目水質計による STD 観測の結果を紹介する。

2. 観測概要

(1) ADCP 観測について

2003 年 6 月 30 日 (大潮), 7 月 20 日 (中潮), 8 月 6 日 (小潮) に, ADCP 曳航観測を実施した。観測断面は, 水環境の悪化が著しい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有明町-長洲町を結ぶ断面 (以後, 測線 C) と, 筑後川などの河川から流入した淡水の輸送経路を考える上で重要となる竹崎町-大牟田市を結ぶ断面 (以後, 測線 D) の 2 断面 (図-1 参照) を設定した。ただし, 6 月 30 日については, 測線 C のみ

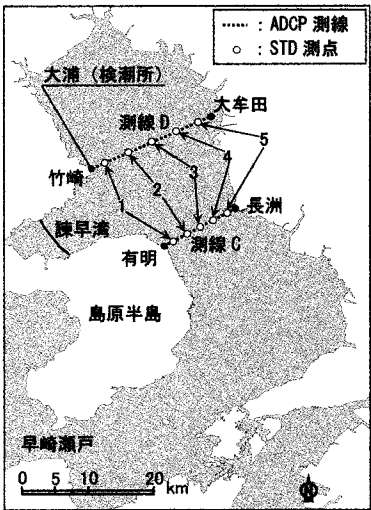


図-1 ADCP 測線と STD 測点の概略図

表-1 観測中の雨量, 気温, 風速

	6 月 30 日 (大潮)	7 月 20 日 (中潮)	8 月 6 日 (小潮)
雨量 (mm)	2	106	0
平均気温 (°C)	23.4	23.6	30.5
最高気温 (°C)	24.4	24.7	33.8
最低気温 (°C)	22.2	22.8	26.4
平均風速 (m/s)	2.1	2.6	2.7
最大風速 (m/s)	4	6	4

* 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
** 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
*** 学生会員 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻
**** 正 会 員 修(工) 国土交通省北陸地方整備局
***** 正 会 員 九州大学技官 大学院工学研究院環境都市部門
***** 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

観測を実施した。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 WorkhorseADCP 600 kHz, 1200 kHz の 2 台であった。ADCP は、測定層厚：1 m, プランク：0.5 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 により測線の確認を行いながら西から東へ向けて測定された。

(2) STD 観測について

ADCP 曳航観測と同時に、ADCP 測線上に等間隔で設定した 5 測点 (6 月 30 日は 3 測点のみ) (図-1 参照) において多項目水質計により、塩分と水温の鉛直分布を測定した。測定は、ADCP 曳航観測期間と同じ一潮汐間に、3 時間毎に計 5 回行われた。測点位置は、GPS による測位で確認された。本観測で使用した観測機器は、アレック電子社製 ACL 220, ACL 1183, およびワイエスアイ・ナノテック社製 YSI 6600 であった。機器間でのデータ補正は原則として行っていない。ただし、7 月 20 日のデータについては大規模一斉観測「有明プロジェクト II」の一環で行われたので、塩分に関しては採水した海水のサリノメータ測定値により補正し、水温に関しては基準温度計を用いた検定により補正している。

(3) 観測当日の状況について

観測実施海域における観測時間帯 (5:00~19:00) の気象条件として、アメガス (島原) における降水量、気温、風速を表-1 に示す。観測の 4 日前からの積算降水量については 6 月 26 日~6 月 30 日で 47 mm, 7 月 16 日~7 月 20 日で 170 mm, 8 月 2 日~8 月 6 日で 0 mm であった。また、6 月 30 日は平均風速 2.1 m/s の南東~南南東の風, 7 月 20 日は平均風速 2.6 m/s の南南東~南の風, 8 月 6 日は平均風速 2.7 m/s で、午前中は南南東~東

表-2 観測実施日の潮位 (大浦)

		実測	
		時刻	潮位 (cm)
6 月 30 日 (大潮)	満潮	9:02	582
		22:07	599
	干潮	3:17	274
		15:29	159
7 月 20 日 (中潮)	満潮	0:58	564
		12:59	532
	干潮	7:06	287
		19:00	278
8 月 6 日 (小潮)	満潮	2:07	556
		15:19	521
	干潮	8:46	262
		21:17	333

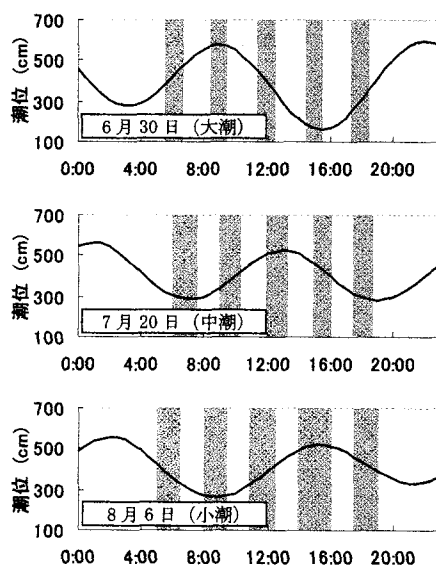


図-2 観測実施日の実測潮位 (大浦検潮所)
(図中のハッチは観測時間帯を示す。)

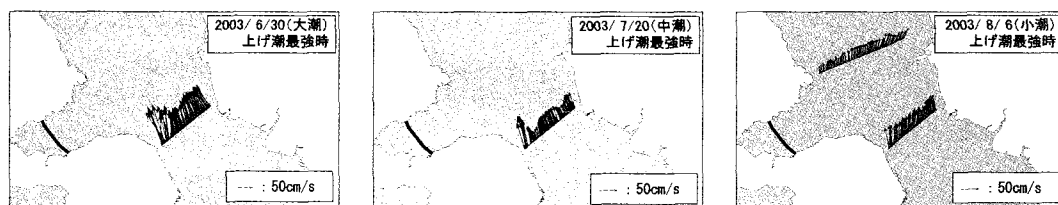


図-3 水深平均流速ベクトル図 (上げ潮最強時) (左: 6 月 30 日, 中央: 7 月 30 日, 右: 8 月 6 日)

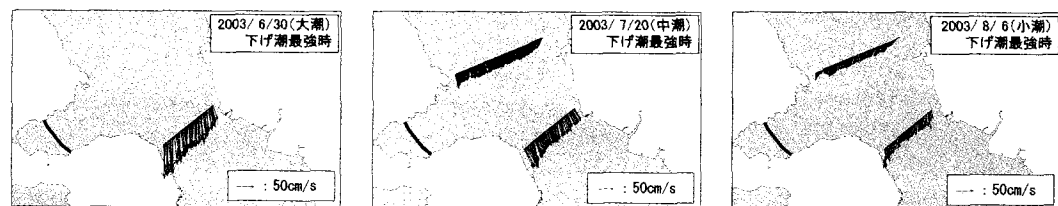


図-4 水深平均流速ベクトル図 (下げ潮最強時) (左: 6 月 30 日, 中央: 7 月 30 日, 右: 8 月 6 日)

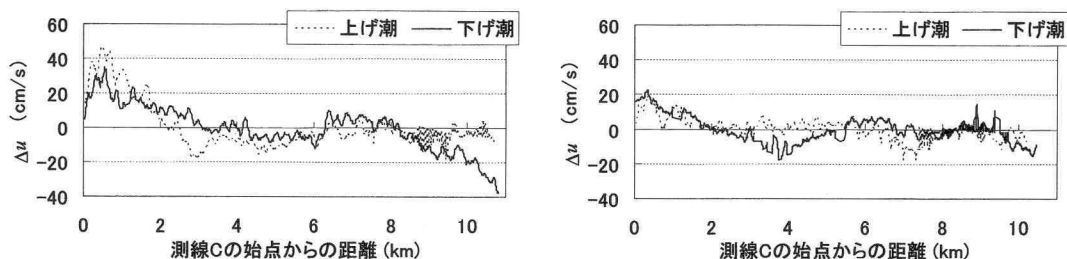


図-5 測線Cにおける水深平均流速の断面平均流速からの偏差
(左:6月30日(大潮),右:8月6日(小潮))

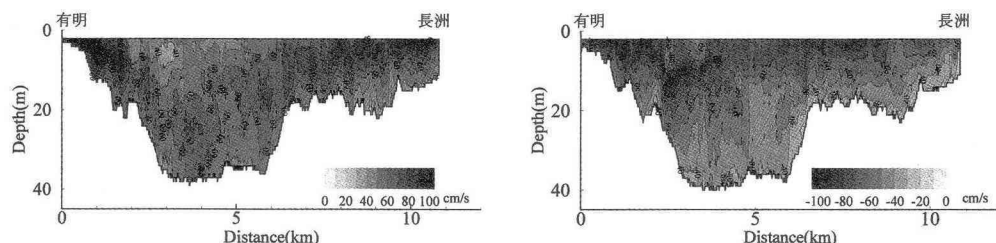


図-6 6月30日(大潮)断面直交流速のコンター図(左:上げ潮最強時,右:下げ潮最強時)

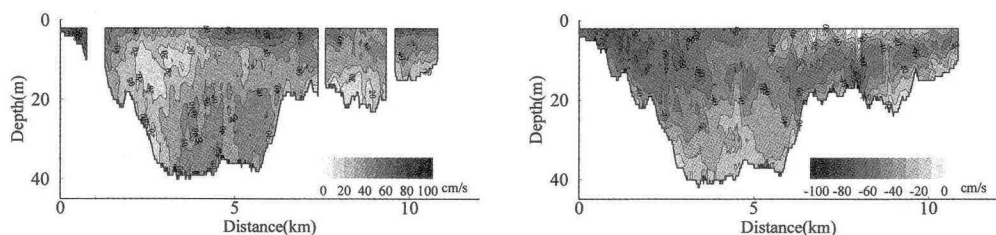


図-7 7月20日(中潮)断面直交流速のコンター図(左:上げ潮最強時,右:下げ潮最強時)

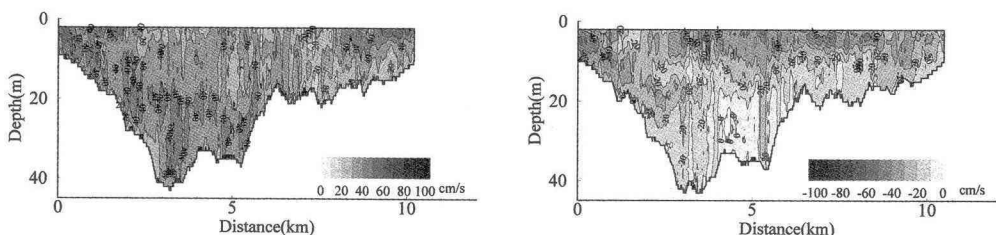


図-8 8月6日(小潮)断面直交流速のコンター図(左:上げ潮最強時,右:下げ潮最強時)

南東, 午後は北東～北北東の風が吹いていた。6月30日と8月6日は, 観測前から観測当日にかけての降雨量は少なく, 観測当日も安定した天候・海象条件の下で観測が行われた。その他, 観測時の気象条件として特徴的なことは, 7月20日は前日から当日にかけてまとまった降雨があったこと, 8月6日は日照時間が他の観測日と比較して長かったこと等が挙げられる。観測当日の気象庁大浦検潮所における干潮位と満潮位を表-2に, 実測潮位の時系列を図-2示す。

有明海の成層構造に強い影響を与える河川流量につい

ては, 主要河川である筑後川の日平均流量が, 6月30日が約 $280.1 \text{ m}^3/\text{s}$, 7月20日が約 $417.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 8月6日が約 $131.3 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。諫早干拓調整池からの排水量については, 6月30日と8月6日は $9.3 \text{ m}^3/\text{s}$, 7月20日は $4.6 \text{ m}^3/\text{s}$ のポンプ排水が終日行われていた。その他に, 6月30日は南排水門から 15:00～17:00 の2時間に平均 $158 \text{ m}^3/\text{s}$ (総排水量: 114 万 m^3), 7月20日は南北排水門から 17:00～22:00 の5時間に平均 $1073 \text{ m}^3/\text{s}$ (総排水量: 1931 万 m^3) が排水されていた。8月6日は南北排水門からの排水はなかった。

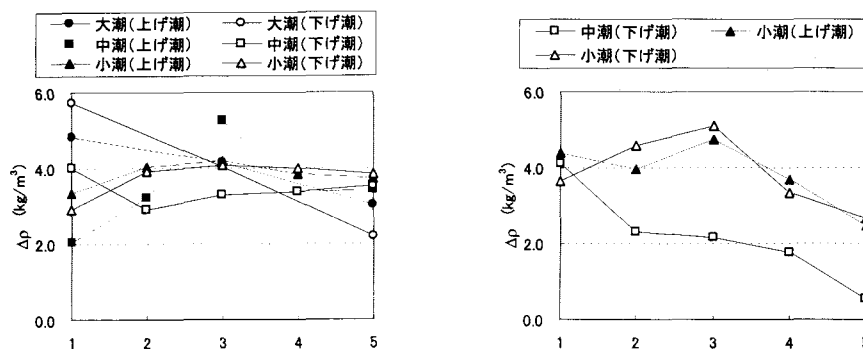
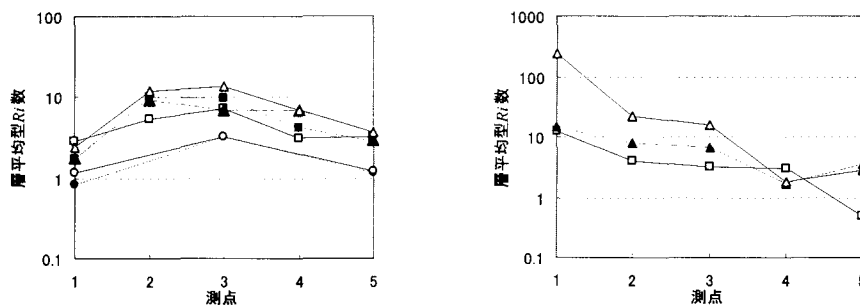
図-9 $\Delta\rho$ の分布 (左:測線C, 右:測線D)

図-10 層平均型リチャードソン数の分布 (左:測線C, 右:測線D)

3. 観測結果および考察

(1) 流動構造について

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 (6月30日17:23~18:25, 7月20日8:55~10:14, 8月6日10:53~12:27), 及び下げ潮最強時 (6月30日11:26~12:26, 7月20日14:55~16:05, 8月6日17:26~19:00)の測線Cと測線Dにおける水深平均された水平流速のベクトル図を図-3, 4に示す。ADCP 曳航観測では, 測線の始点から終点までに1時間半程度の航行時間が必要であり, 同一の観測であっても時間的なズレを含んでいる。そのため, 本来は時間的な内挿処理を行う必要があるが, ここではそのような処理は行っていない。ただし, データの処理過程において, エラーデータの除去, ならびにノイズの除去を目的とした移動平均処理を行っている。この結果より, 測線Cの島原半島沿いにおいて流速が大きくなっていることが分かる。この流速分布の空間的な特性を把握するために, 各点における水深平均流速の断面平均流速からの偏差 Δu の分布を図-5に示す。なお, 7月20日の観測結果については, 機器のトラブルにより島原半島沿いに欠測区間が生じたので, 検討は行っていない。大潮時と小潮時のいずれの場合も島原半島沿い (測線Cの島原側から0~3 kmの区間) に相対的に大きな流速が生じているこ

とが確認された。これは, 小松ら (2003) による2001年秋季の観測結果においても見られた特徴であった。この傾向は小潮時よりも大潮時に顕著であり, 流速の最大値は大潮の上げ潮と下げ潮時の平均で114.6 cm/s, 小潮の上げ潮と下げ潮時の平均で60.6 cm/s程度であった。これらの関係は, 観測当日の干満差の平均値である431.5 cmと223.5 cmの比とほぼ一致していることから, 順圧的な潮流成分であると考えられる。

次に, 測線Cにおける上げ潮最強時と下げ潮最強時の観測断面に直交する成分 (湾奥に流入する方向を正とする)の水平流速コンター図を図-6~8に示し, 流速の鉛直分布の比較を行った。この観測断面において海水の流出入の中心となっていると考えられる最深部付近において, 上げ潮時には表層と比較して中層~底層の流速が大きくなっているのに対して, 下げ潮時にはその逆で表層の方が中層~底層よりも流速が大きくなるという傾向 (エスチャリー循環)が見られた。そこで, 水深が30 m以上となっている区間を対象として, 上層と中底層の比較を行った。比較対象区間内を上層 (0~10 m)と中底層 (10 m~海底)に分け, 各領域内に含まれるデータから平均流速を求めた。6月30日 (大潮)の上げ潮時には, 上層が52.9 cm/s, 中底層が68.5 cm/s, 下げ潮時には, 上層が87.4 cm/s, 中底層が65.5 cm/s, 7月20日 (中潮)の上げ潮時には, 上層が37.8 cm/s, 中底層が39.8 cm/s, 下げ

潮時には、上層が 52.5 cm/s、中底層が 43.0 cm/s、8 月 6 日（小潮）の上げ潮時には、上層が 37.8 cm/s、中底層が 47.7 cm/s、下げ潮時には、上層が 45.1 cm/s、中底層が 27.1 cm/s であった。中底層の流速に対する上層の流速の割合で比較を行ったところ、6 月 30 日（大潮）の上げ潮時、下げ潮時では各々 0.8 倍、1.3 倍程度、7 月 20 日（中潮）の上げ潮時、下げ潮時には、各々 0.9 倍、1.2 倍程度、8 月 6 日（小潮）の上げ潮時、下げ潮時には各々 0.8 倍、1.7 倍程度の流速差が生じており、その傾向は小潮時に顕著であることが分かった。

（2）淡水の挙動について

測線 C と測線 D における STD 観測結果から算出した、上げ潮最強時と下げ潮最強時の表層と底層の密度差 $\Delta\rho$ を図-9 に、(1) 式で定義される層平均型 Ri 数の分布を図-10 に示す。

$$Ri = \frac{(\rho_b - \rho_s)gh}{\rho_b u^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ_b は海底における密度、 ρ_s は水面における密度、 g は重力加速度、 h は水深、 u は水深平均流速とした。6 月 30 日（大潮）には、測線 C の有明側（西側）で、7 月 20 日（中潮）には、測線 C の有明側と測線 D の竹崎側（西側）で $\Delta\rho$ が比較的大きくなっており、河川水等で希釈された水塊が有明海西側に偏在していたと考えられる。また、 Ri 数を指標に用いて成層の安定度を評価したところ、本海域では、概ね小潮、中潮、大潮の順で成層が安定している傾向があった。また、局所的な成層の安定度を比較すると、測線 D においては、竹崎側（西側）で成層が安定になっているのに対して、測線 C においては、有明側（西側）では成層が不安定になっていた。このことから、淡水で希釈された水塊が有明海西側に偏在していたことにより、表層と底層の密度差が大きくなっていたが、島原半島沿いに生じる大きな潮流による強い混合力により成層が不安定になりやすい傾向があることが示唆された。

4. ま と め

有明海の大潮、中潮、小潮期における流動構造や成層構造の違いについての検討を行うために現地観測を実施した。得られた結果をまとめると以下ようになる。

1) 大潮、中潮、小潮期のいずれの場合も、測線 C の島原半島沿いに相対的に大きな流速が生じており、その傾向は小潮期よりも大潮期に顕著であった。

2) 測線 C の最深部付近において、上げ潮時には上層と比較して中底層の流速が大きくなっているのに対し、下げ潮時には上層の方が大きくなっており、典型的なエ

スチャリー循環が見られた。また、その傾向は小潮期に顕著であった。

3) 層平均型 Ri 数によって成層の安定度を評価したところ、小潮、中潮、大潮の順で成層が安定している傾向があった。

4) 大潮、中潮の観測時に島原半島沿いで、表層と底層の $\Delta\rho$ が比較的大きくなっており、河川水等で希釈された水塊が輸送能力の大きい島原半島沿いに偏在していた。

5) 測線 C においては、有明側（西側）で比較的成層が不安定になっているのに対して、測線 D においては、大牟田側（東側）で成層が不安定になっていた。

6) 島原半島沿岸部では、大潮、中潮期の観測時に表層と底層の密度差が大きくなっていたにもかかわらず、 Ri 数が比較的小さいことから、島原半島沿いに生じる大きな潮流によって成層が不安定になりやすくなっているものと思われる。

本観測においては、気象条件や淡水流入に違いはあるものの、各潮汐条件での代表的な流動構造は得られていると考えられ、これまで不十分であった小潮期データを含む貴重な情報が得られた。この結果、島原半島沿いに生じる大きな流速を持つ流動構造が、鉛直混合能力と水平方向のシアーにより北部有明海の海水交換を支配していることが示唆された。また、大潮期には潮流流が卓越するが、小潮期には密度差に起因する流動（エスチャリー循環）が出現しやすいことなどがあらためて確認された。

謝辞：本研究の一部は、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。

また、本稿で使用した 7 月 20 日の観測データは、「有明プロジェクト II」の一環として、九州大学大学院総合理工学研究院松永信博教授、中部大学工学部武田誠講師の研究グループによって観測されたものである。ここに記し深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 宇野木早苗 (2003): 有明海の潮汐と潮流はなぜ減少したか、海の研究, 第 12 巻, 第 1 号, pp. 85-96.
- 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.
- 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.
- 柳 哲雄・塚本秀史 (2004): 有明海における潮汐振幅の経年変動, 海の研究, 第 13 巻, 第 3 号, pp. 295-300.