

# 南風により諫早湾南岸で発生した低酸素水塊の湧昇

## The Upwelling of Water Mass with Low Dissolved Oxygen Induced at the South Coast of Isahaya Bay by the South Wind

李 洪源<sup>1</sup>・樋口秀太郎<sup>2</sup>・松永信博<sup>3</sup>

Hongyuan LI, Shutaro HIGUCHI and Nobuhiro MATSUNAGA

In this study, the field observations were carried out along Konagai-Mizuho observation line at a spring tide in summer to investigate the characteristics of tidal flow and water quality in Isahaya Bay. A strong density-stratification and the anoxic water in the lower layer were observed and were not broken in one tidal period. The velocity profiles were appreciably different between the upper layer and the lower layer because of the stratification and the action of the south wind. The upwelling of water mass with low dissolved oxygen was observed at the south coast of Isahaya Bay during the ebb tide. It was caused by the superposition of the density stratification and the wind stress to transport the water mass of the lower layer toward the south coast on the unique tidal flow attributed to the geographical feature of Isahaya Bay.

### 1. はじめに

諫早湾干拓事業により潮受堤防が施工された後、諫早湾内の水質環境は悪化し、水産資源への影響が懸念されている。このような状況において、中村ら（2002）は、諫早湾湾口部において超音波流速計による潮流観測および多項目水質計による水質観測を行い、湾口部における潮流の現況を明らかにした。また、松野ら（2004）は、有明海の流れ場を支配する物理過程について調べ、諫早湾湾口における島原半島に沿って観られる強い潮汐残差流は、潮流によるポテンシャル流れと諫早湾内に流れ込むキャピティ流れの重ね合わせによって説明できることを示した。木谷（2003）は、冬季有明海における平均流に占める吹送流の寄与率を算定し、冬季の有明海では吹送流の効果は無視できないことを示した。多田ら（2005）は、夏季小潮時において諫早湾内の流況を観測し、上げ潮時には島原半島に沿った流れが卓越することを示した。齋田ら（2006）は、多田らと同様に夏季の諫早湾内における潮流観測および水質観測を実施し、下げ潮時に有明海から南下した水塊が、上げ潮時に諫早湾内に取り込まれるプロセスを見出した。Liら（2009）は、2008年の夏季において諫早湾底泥の生物化学的環境調査を行い、諫早湾南岸に沿って有機物が堆積し、底泥が嫌気状態に達していることを明らかにした。しかしながら、近

年このように多くの調査研究が行われているにもかかわらず、諫早湾干拓事業以前における有明海および諫早湾に関する詳細なデータが少ないため、潮受堤防の施工前後で有明海の流動・水質・底質がどの様に変化したかについて解明できないのが現状である。

著者らは諫早湾内の成層構造の動態を明らかにするため、夏季成層期の大潮時において諫早湾中央部の小長井（諫早湾北岸）から瑞穂（諫早湾南岸）のラインに沿って、1潮汐間にわたって多項目水質計（STD）による水質観測と超音波流速計（ADCP）による潮流観測を同時に行った。その結果、諫早湾南岸において下層の低酸素水塊が海表面まで湧昇する現象が見出された。この現象については、これまでほとんど知られておらず、諫早湾内の水質環境特性を理解する上で興味深い現象であると

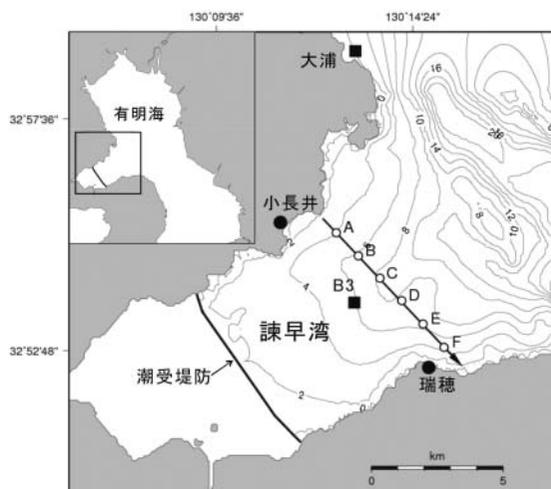


図-1 諫早湾における観測ライン

1 学生会員	工修	九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻
2 学生会員		九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻
3 フェロー	工博	九州大学教授大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

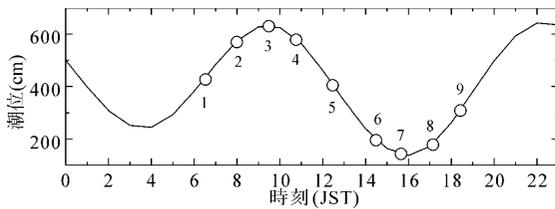


図-2 観測時間帯と潮位の関係

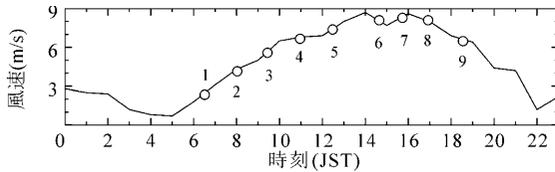


図-3 風速の時間変化

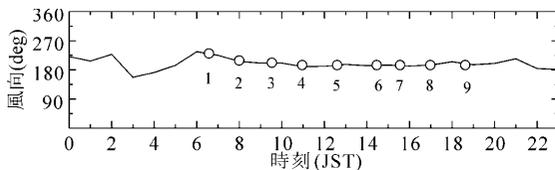


図-4 風向の時間変化

思われる。本研究では、この諫早湾南岸で発生した低酸素水塊の湧昇現象について報告するとともに、その発生機構について検討する。

## 2. 観測概要

2008年8月2日（大潮）に、図-1に示した観測ライン（小長井-瑞穂ライン）に沿って、観測船2隻を用いて多項目水質計（STD）による水質観測と超音波流速計（ADCP）による潮流観測を実施した。観測時間帯と潮位の関係を図-2に示す。潮位データは気象庁大浦潮位計（地点は図-1参照）のデータを使用した。観測は、午前6時30分開始の第1回観測から午後18時30分開始の第9回観測まで、1潮汐間にわたって約1.5時間間隔で行われた。水質観測は、地点A～Fの6地点において観測を行い、水温、塩分、pH、濁度、溶存酸素（DO）濃度、クロロフィルa濃度を、海底から鉛直方向に1m間隔で測定した。観測地点A～Fの経度と緯度を表-1に示す。観測に使用したSTDは、アレック電子株式会社製AAQ1183である。潮流観測は、観測船の舷側にADCPを取り付け、ほぼ一定速度で走行することにより、流速データを水面下1.76mから鉛直方向に1m間隔で約3秒ごとに取得した。観測に使用したADCPは、RD Instruments社製Workhorse ADCP1200Hzである。潮流計測ラインの始点と終点の経度と緯度は、表-1に示す。第5～8回の観測では、潮位低下により走行不可能と判断されたため、F地点以南での潮流観測は行わなかった。

観測当日における風向・風速のデータとして、九州農

表-1 STD 観測地点および潮流計測ラインの座標（世界測地系）

STD 観測地点	経度	緯度
A	130°12'34" E	32°55'16" N
B	130°13'06" E	32°54'47" N
C	130°13'37" E	32°54'19" N
D	130°14'08" E	32°53'50" N
E	130°14'39" E	32°53'21" N
F	130°15'10" E	32°52'52" N
潮流計測ライン	経度	緯度
始点	130°12'07" E	32°55'41" N
終点	130°15'36" E	32°52'30" N

政局がB3地点（図-1参照）で取得しているデータを使用した。図-3と4は、観測当日の風速と風向の経時変化を示したものである。風向は、北風の風向を0°として時計回りに取られている。観測時において南風が卓越しており、第4～9回の観測において風速は7m/s以上に達していた。観測日の天候は終日快晴であり、気象庁アメダス（諫早）の記録では7月29日14時から当日までの間、降雨は観測されていない。また、九州農政局のデータによると、潮受堤防に設置されている南北排水門からの淡水の排出は、7月24日から8月17日までの間行われなかった。ここで、第1～5回観測において、小長井沖からB地点にかけて赤潮が観測され、クロロフィルa濃度は最大で約40 $\mu$ g/lを計測したことを記しておく。

## 3. 観測結果

### (1) STDによる水質観測

図-5と6に、それぞれ第4回～9回の観測において得られた海水密度 $\sigma_t$ とDO濃度の等値線の空間分布を示す。海水密度 $\sigma_t$ は、測定された水温と塩分に基づいて算定した値である。各地点間における観測時間の遅れは、観測データを時間的に内挿することにより補正されている。図-5から、各観測において諫早湾は密度成層していたことがわかる。表層と底層の塩分差が約1～2PSUであったのに対し、表層と底層の水温差が約3～5度あったこと、7月下旬から当日までの間に南北排水門からの排水や降雨などの直接的な淡水の供給がなかったことから、この密度成層は温度による寄与が大きいと考えられる。また、諫早湾内の密度成層構造は大潮時にもかかわらず、1潮汐間では破壊されないことがわかる。

図-6から、各観測においてDO濃度が4mg/l以下の貧酸素水塊が底層で形成されていたことがわかる。観測期間における最小DO濃度は1.7mg/lで、観測当日における底層の水質環境は非常に悪かったといえる。この結果から、観測当日前後の諫早湾底層は深刻な貧酸素状態にあったことが予想される。図-5と6から、下げ潮である第5回～

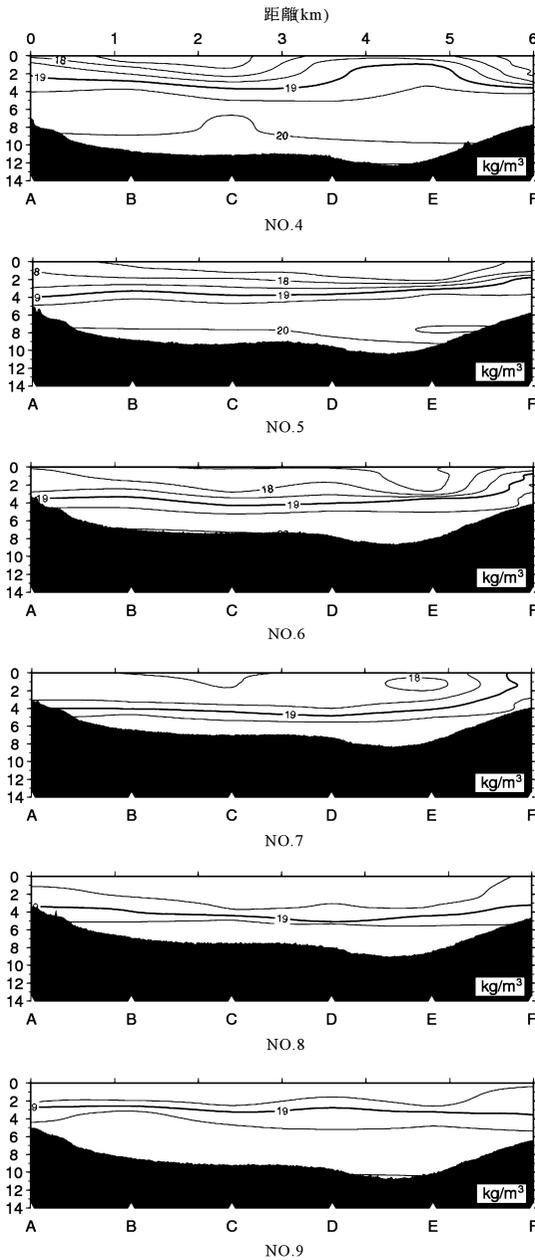


図-5  $\sigma_t$  の等値線分布図

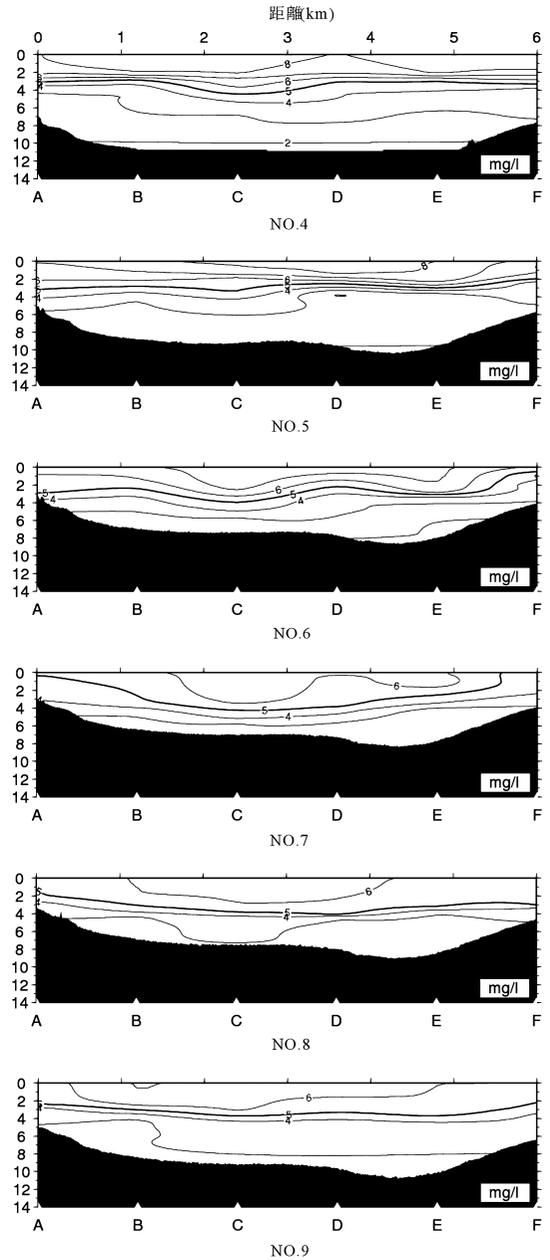


図-6 DO 濃度の等値線分布図

7回の観測において見られるように、 $\sigma_t = 19$ とDO濃度 = 5mg/lの等値線は諫早湾北岸から南岸に向かって上昇しており、特に、諫早湾南岸 (F地点) では、DO濃度 5mg/l以下の低酸素水塊が海表面付近まで湧昇していることがわかる。この湧昇現象に関しては、流速データに基づいて次節で言及することとする。

(2) ADCPによる潮流観測

図-7と8に、第5回観測 (下げ潮最強時) と第9回観測 (上げ潮最強時) における上層 (水深1.76m) と下層 (水

深4.76m) の流速ベクトルを示す。各観測回とも、上層と下層では流速分布の形状が異なっていることがわかる。特にその違いは、図-7に示されるように下げ潮時において顕著であり、下層の流向は、上層の流向よりも南方向に傾いていることがわかる。また、下層においては、北岸付近の流向は南岸付近の流向と比べ、著しく南方向に傾いている。同様に、図-8の上げ潮時において、下層の流向は上層の流向よりも南方向に傾いていることがわかる。また、上層においては、北部の流向は南部の流向

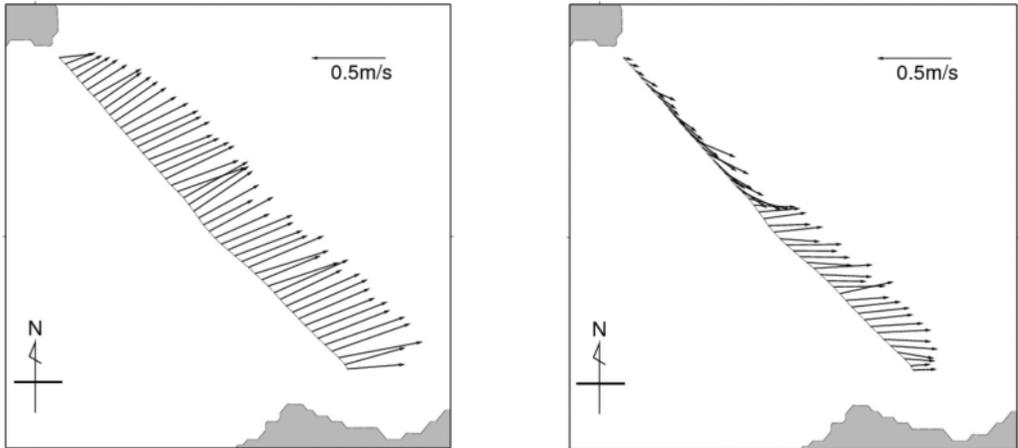


図-7 第5回観測（下げ潮最強）における流速ベクトル図  
左図：上層（水深1.76m）、右図：下層（水深4.76m）

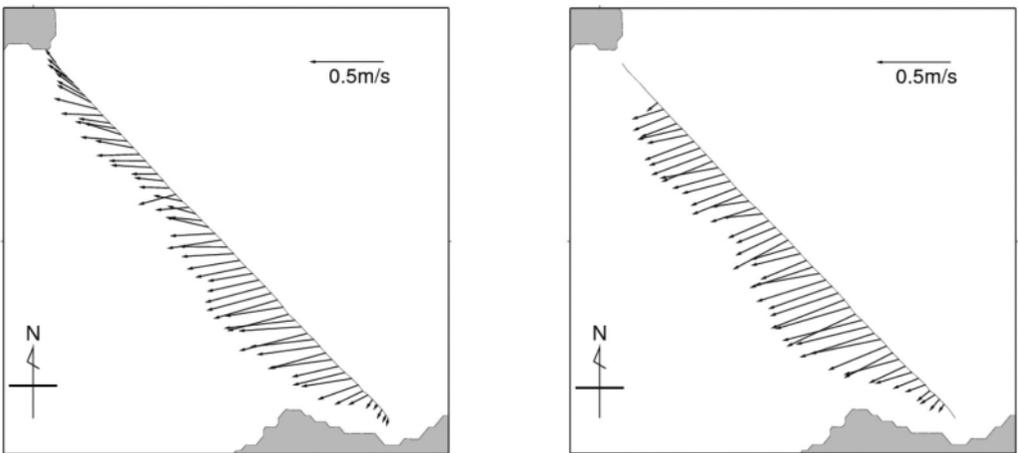


図-8 第9回観測（上げ潮最強）における流速ベクトル図  
左図：上層（水深1.76m）、右図：下層（水深4.76m）

と比べ、より北方向に傾いていることがわかる。これらの形成機構については、次節で考察することとする。

図-9は、ADCP観測から得られた流速から水深がほぼ一樣な区間B～Dのデータを抽出し、深さごとの平均流速を求め、その南北流速成分の鉛直分布をプロットしたものである。縦軸は平均水深 $h_0$ で規格化されている。第5, 6回の下げ潮時の観測結果と第8, 9回の上げ潮時の観測結果が示されている。諫早湾の地形上、湾央では上げ潮時の潮流は南方向成分をもち、下げ潮時は逆に北方向成分をもつことが知られている。これに、南風によるせん断応力が海表面に作用すると、上層流体は北向きの力を受け、下層流体は南向きの流れを受けることになる。従って、上げ潮時において下層では南向き流速成分が強まることになる。一方、下げ潮時においては、上層で北向きの流速成分が強まることになる。図-9で示される南北の流速成分の鉛直分布は、この特性を非常に良く表し

ており、諫早湾南岸における低酸素水塊の湧昇は、この南風の吹送効果に拠るものと思われる。

#### 4. 考察

ここで、今回瑞穂付近で観測された低酸素水塊の湧昇現象について考察する。松野ら（2004）が提唱した諫早湾湾口における流速ベクトルの模式図を図-10に示す。彼らは、諫早湾の地形効果と島原半島東岸の海底地形の影響から、湾口では下げ潮時において潮流は南方向成分をもち、その結果島原半島沿岸で流速が強まることを指摘した。また、上げ潮時には潮流は湾口を横切るラインに対して北方向成分をもつことを指摘した。このように、松野らは、島原半島に沿って形成される比較的強い潮汐残差流は、潮流によるポテンシャル流れと諫早湾内に流れ込むキャビティ流れの重ね合わせによって説明できることを示した。ここで、諫早湾内が密度成層し、かつ海

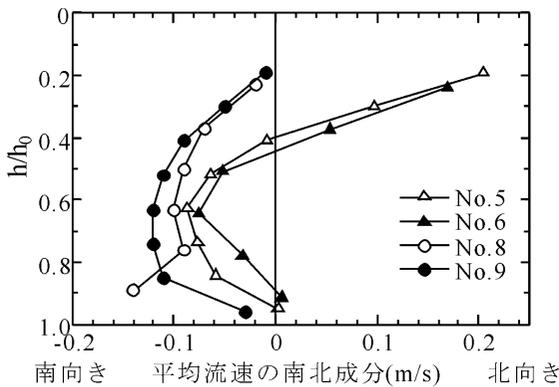


図-9 流速の南北成分の鉛直分布図

表面が南風によりせん断応力を受ける場合、諫早湾内の流況がどのように調整されるかについて考えてみよう。この場合、上層流体は北向きの力を受け、小長井方向へ輸送される。一方、下層流体はそれを補償する流れとなって島原半島沿岸に輸送される。従って、下げ潮時において、上層では北向き流速成分が強まり下層では南向き流速成分が強まることになる。上げ潮時においても同様に、上層で北向きの流速成分が強まり、下層では南向き流速成分が強まることになる。この流れを松野らのモデルに加えたものが、図-11である。図-11は図-7と8で示した上層および下層の流速ベクトルの特性を定性的に良く表しており、第3節で示した諫早湾南岸における低酸素水塊の湧昇現象は、この南風の吹送効果に拠るものと考えられる。

5. 結論

2008年8月2日に実施された諫早湾中央部における水質観測、および潮流観測により得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 諫早湾内では大潮時にも関わらず終日密度成層が形成され、上げ潮最強、下げ潮最強時にも密度成層は崩れなかった。また、全観測において、表層と底層の水温差が約3~5度あったことと、7月下旬から当日までの間に南北排水門からの排水や降雨などの直接的な淡水の供給がなかったことからこの密度成層は温度による寄与が大きいと考えられる。
- 2) 密度成層の効果により、1潮汐間にわたって低酸素水塊が形成され、諫早湾南岸では、DO濃度5mg/l以下の低酸素水が海表面付近まで湧昇する現象が観測された。
- 3) 密度成層時の諫早湾に、南風によるせん断応力が海表面に作用すると、上層の海水は北に輸送され、下層の海水は逆に南に輸送される。その影響を受け、下層の海水が諫早湾南岸において湧昇し、低酸素水塊が表層付近に現れる。

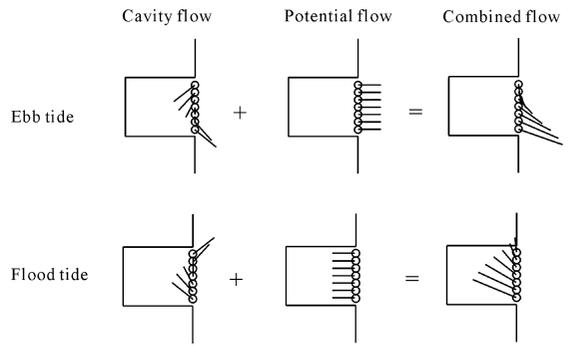


図-10 諫早湾口の流動構造概念図(松野ら, 2004)

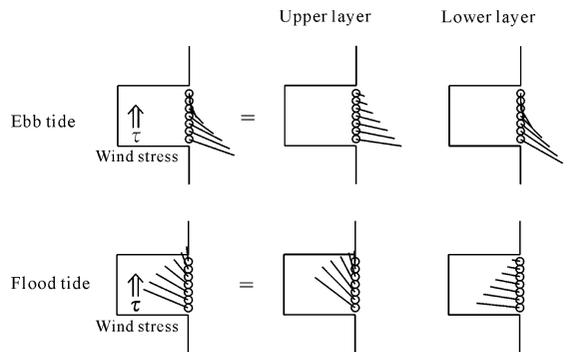


図-11 成層時に南風が作用した場合の諫早湾内の流動構造概念図

謝辞：本研究に対して、科学研究費（基盤A，研究代表者：小松利光）の援助を受けました。また、農林水産省九州農政局からは風向・風速データ、および調整池からの南北排水門の排水量データをご提供いただきました。さらに、ADCPデータの解析にあたっては、(株)エス・イー・エイの田中照喜氏に多大な協力を受けました。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

気象庁 (2008) : 気象統計情報 (オンライン), <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>, 参照2008-08-02  
 木谷浩三 (2003) : 有明海における冬期の平均流について, 海と空, 第78巻, pp.129-134.  
 齋田倫範・矢野真一郎・田井 明・小松利光 (2006) : 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.  
 多田彰秀・中村武弘・矢野真一郎・武田 誠・橋本彰博・染谷真作・齋田倫範 (2005) : 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.  
 中村武弘・矢野真一郎・多田彰秀・野中寛之・亀井雄一 (2002) : 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.  
 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.  
 Li H, N. Matsunaga and T.Takino (2009) : Investigation on biochemical environments of seabed in Isahaya Bay, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.53, pp.1501-1506.