

周防灘豊前海における潮流による再懸濁過程に関する観測

山口哲昭¹, 安田秀一^{2†}, 鬼塚 剛³, 伊沢瑞夫⁴, 高島創太郎⁵, 湯浅豊年⁶

Field experiments on resuspension due to tidal currents in the south-western sea of Suonada

Tetsuaki Yamaguchi¹, Hideichi Yasuda^{2†}, Goh Onitsuka³, Mizuo Izawa⁴, Sotarou Takashima⁵ and Toyotoshi Yuasa⁶

Abstract : In the south-western sea of Suonada, it has been reported that oxygen consumption in the sea water might be induced by the resuspension of the bottom mud. Therefore we tried elucidating the resuspension process of the bottom layer by the field-experiments using the mooring system at a fixed observation point over a fortnight of the late summer in 2005 and 2007. The analysis of the observational data has revealed that the non-periodic current was generated rather strongly at the neap tide although the induced current was periodic around the spring tide. Resuspension due to tidal currents was recognized well around the spring tide while it was never observed at the neap tide even if the current was large. Resuspension around the spring tide was caused quarter-diurnally in phase of the current speed in 2005. However, it was caused semi-diurnally in 2007, and it was observed only at the flood flow.

Key words : tidal current, turbidity, tidal resuspension, Suonada

ASFA : tidal current, turbidity, suspended particulate matter

はじめに

瀬戸内海西部に位置する周防灘 (Fig.1) は、山口県、福岡県、大分県に囲まれており、面積はおよそ3100km²、平均の深さが23.7mで、瀬戸内海の中で3番目に広い灘である。周防灘の東部は豊予海峡 (速吸瀬戸) を通じて太平洋に面し、西部は関門海峡を通じて日本海に接しているが半閉鎖的な環境になっている。また、福岡県側と山口県側では底質が大きく異なり、豊前海と呼ばれている福岡県側の海域では、係留系で使用した錆びた鉄のアンカーが、25

時間の観測後にその錆がほとんど無くなるほどの還元的な泥が堆積している¹⁾。そのため、豊前海では貧酸素水塊がたびたび出現し、養殖カキなどの魚介類の斃死被害が報告されている²⁾。

この周防灘豊前海での貧酸素水塊の形成に関わる溶存酸素 (Dissolved Oxygen : 以下DO) の変動要因に関しては、底泥の再懸濁による底層水のDO消費³⁾、河川水の栄養塩流入後のDO消費を伴うデトリタスの分解過程⁴⁾、水平的な移流の影響⁵⁾などが報告されている。Senjyu *et al.*³⁾ は大潮期の25時間に注目してDOに関わる潮流、濁

2009年6月30日受付. Received June 30, 2009.

- 1 水産大学校 水産学研究科生 (Graduate student, National Fisheries University)
現在 山口県漁業協同組合連合 (Yamaguchi Municipal Fisheries Corporation)
 - 2 水産大学校 水産学研究科 (Fisheries Science and Mechanical Engineering, National Fisheries University)
 - 3 水産大学校 海洋生産管理学科 資源環境計画学講座 (Fishery Science and Technology)
現在 (独) 水産総合研究センター中央水産研究所 (National Res. Inst. of Fisheries Sci., Fisheries Res. Agency)
 - 4 水産大学校 海洋機械工学科 海洋環境保全システム講座 (Ocean Mechanical Engineering)
 - 5 株式会社 いであ (IDEA Inc.)
 - 6 豊前海区海洋環境保全協議会 (Council for preservation of the marine environment of Buzen Sea)
- † 別刷り請求先 (corresponding author) : yasuda@fish-u.ac.jp

度, 水温, 塩分などを定点観測することにより, DOの変動には, 底層の再懸濁が重要な役割を果たすことを観測結果から示した。

これまで周防灘の観測においては, 25時間の連続観測³⁾や, 1週間毎などバースト的なその時々⁶⁻⁷⁾の観測は行われることはあったが, 大潮から小潮期を含むような連続的で長期間の観測はほとんど行われてこなかった。当該研究グループは周防灘豊前海において15日間以上の連続観測を計画し, 地元漁業者や海上保安庁の理解を得て, Fig. 1の中に示した観測点において2005年の8月後半にその観測を実施することができた⁵⁾。それに引き続いて2007年にも再び大潮小潮を含む長期間の連続観測を実施することができたことから, 両観測結果の比較を行いながら, DO変動に関わる物理的変動要因の1つである再懸濁のメカニズム解明を目的に, 潮流による底層の再懸濁過程の解析を行った。

観測概要と観測結果

2005年の夏季の16日間に亘る係留観測に引き続き, 2007年も同時期・同地点において同様の係留系観測機器を用いて観測を行った。観測内容の詳細は, 前報⁵⁾に紹介しているのでここでは省略する。同地点で同様の観測を実施した目的は, 潮汐に引き起こされる海洋現象の再現性の確認もあるが, 外的な気象要因の違いによる海洋環境の違いを把握することにもあった。これらの観測においては, 多種類の計測機器を設置して膨大なデータを得ているが⁵⁾, 本報では, 特にDO変動に関わるとされている底泥の再懸濁に着目して, シアー流速計で得られた, 流速, 流向, 濁度の連続データを中心に解析を行った。

観測データは, 5分毎のバーストモードで測定しているが, データ解析に際しては, 12個の中央値を基礎データとして1時間毎のデータを作成し作図などにも使用した。5

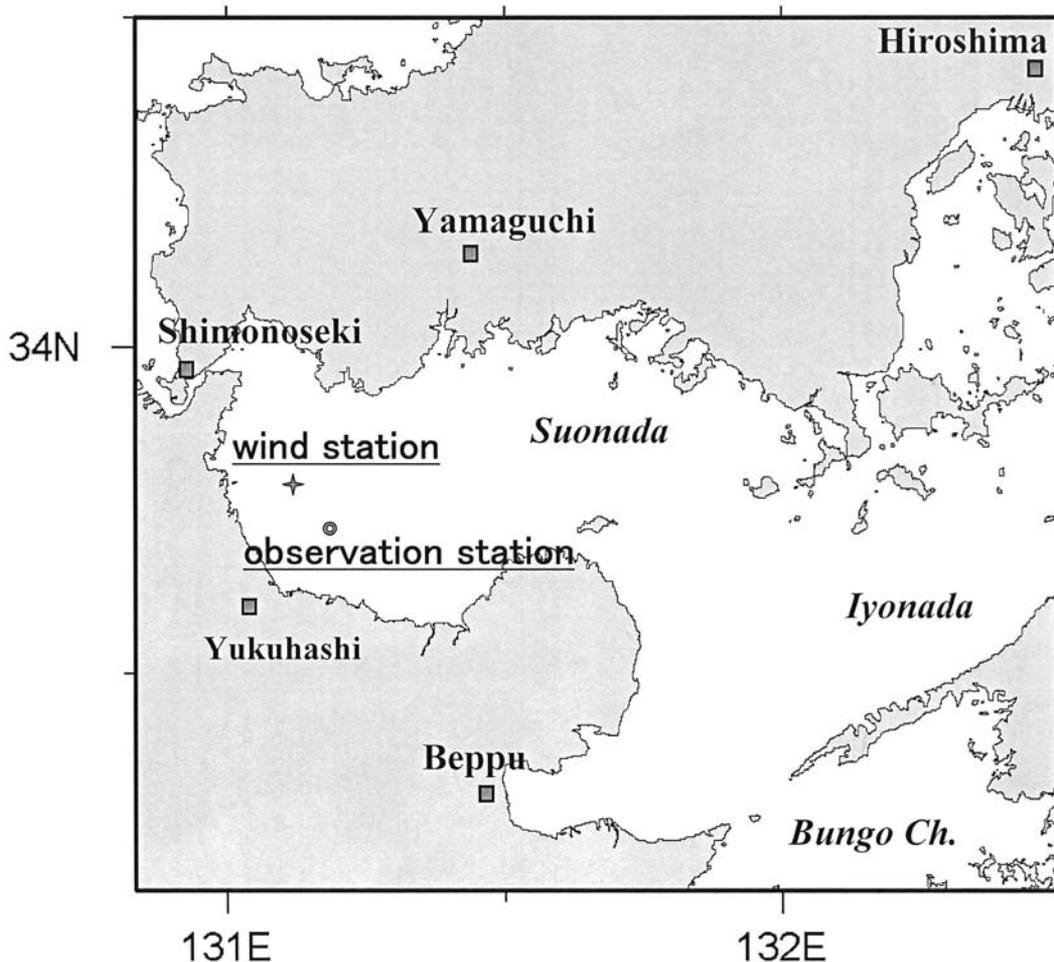


Fig. 1. Suonada sound and the location of the stationary observation station.

分毎の生データから1時間毎の基礎データを作るとき、通常1時間平均のデータを使用することが多いが、シアーク流速計の5分毎の生データには部分的に異常値が認められたことから、本研究では平均値の代わりに中央値を用いた。

観測期間中の様子を把握するために、2005年にシアーク流速計で得られた潮位、流速（絶対値）、濁度の時間変動、および、溶存酸素計から得られたDO濃度を、Fig.2とFig.3のそれぞれに前半と後半に分けて示す。観測前半は大潮期含む8月18日から8月26日まで、後半は小潮期含む8月26日から9月2日までで、流速値とDOは海底上1m、濁度は、海底上0.5mから2mまでの4層のデータから描いた鉛

直分布である。

前半の大潮期（8月21日～8月23日）においては、流速は潮位に対応して変動し、ピークで20cm/s以上を示していた。濁度のピークは徐々に高くなって22日前後で最大となり（22ppm～40ppm：濁度センサーは赤外後方散乱方式で値はカオリナイトに換算している）、それ以降は低下していた。また濁度が高くなっている時の鉛直分布を注目すると、海底付近で高く海底から離れるにつれて低くなっており、さらに、濁度の変動は潮流のピークと同様に1/4日周期で現れていることから、潮流による海底からの再懸濁と示唆される。

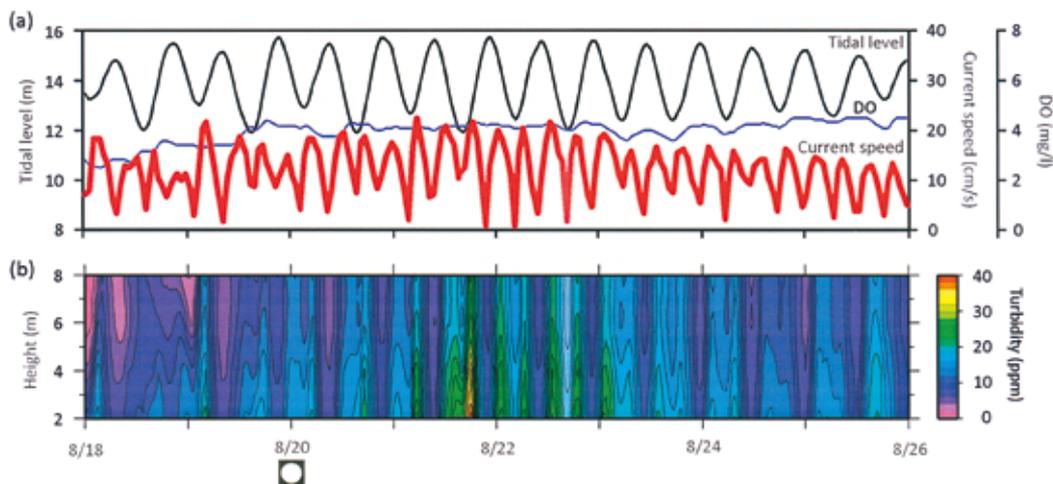


Fig. 2. Temporal variations of observed data at the observation station in the first half of the observation period in 2005. (a) Tidal level, current speed and DO at the level of one meter above the basin floor, and (b) the vertical profile of turbidity near the floor.

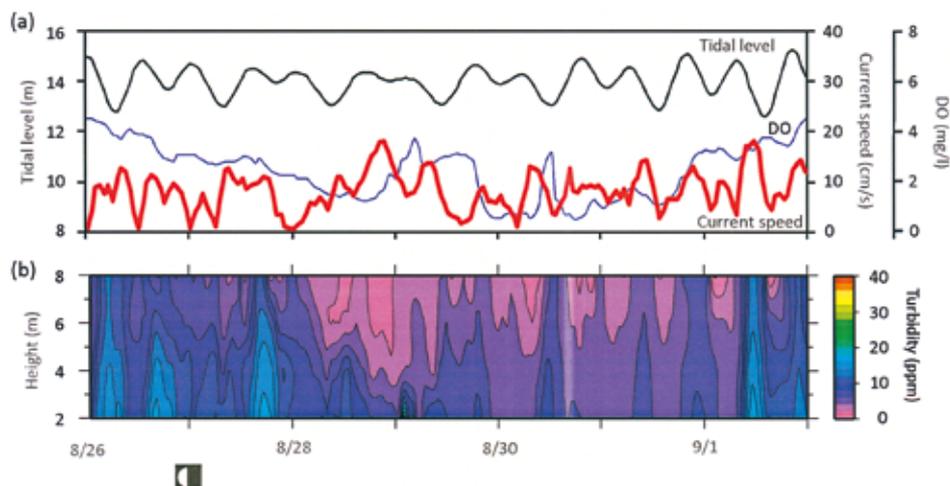


Fig. 3. Same variations as Fig. 2 in the latter half of the observation period in 2005.

小潮期では流速は大潮期と比べて小さいが、潮流とは異なる非周期的な流れが突発的に認められる。特に8月28日から29日には小潮期にも係わらず15cm/s以上の流れが観測されている。25日から26日頃は、潮流は弱いながらも周期的に増減しており、その場合は15cm/s以下でも再懸濁が認められるが、この小潮時の大きい流れの時には濁度の増加は見られなかった。つまり大潮期から中潮期にかけて前半においては、潮流の強さに対応して濁度が高くなる様子が認められるが、小潮期においては流れの強弱に対応する濁度の変動は明瞭には窺えない。

Fig. 4とFig. 5は、それぞれ、2007年の観測前半（小潮期含む8月18日～8月26日）と観測後半（大潮期を含む8

月26日～9月3日）における、Fig. 2およびFig. 3と同様の図である。2007年においても、小潮期の8月22日から23日にかけて非周期的な流れが観測されているが、2005年と同様に流速の強弱に対応する濁度の増加は観測されなかった。流速は27日から大きくなり始め、特に大潮期（8月30日～9月1日）で大きく、このときの流れは潮流が優勢と見なされる。Yasuda⁸⁾は、周防灘の観測データを用いた吹送流の解析において、吹送流は大潮期には見いだすことができず小潮期にのみEkman螺旋が形成されることを示し、強い流れがより優勢に現れると述べているが、周防灘豊前海においては、大潮期には潮流が卓越し、小潮期には潮汐起源以外の流れが現れやすいと考えられる。濁度は

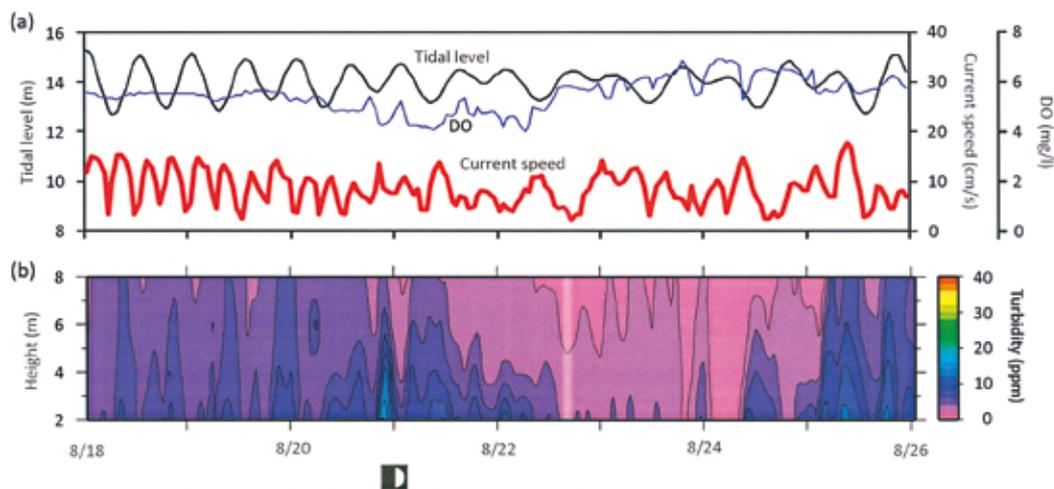


Fig. 4. Same variations as the above figure in the first half of the observation period in 2007.

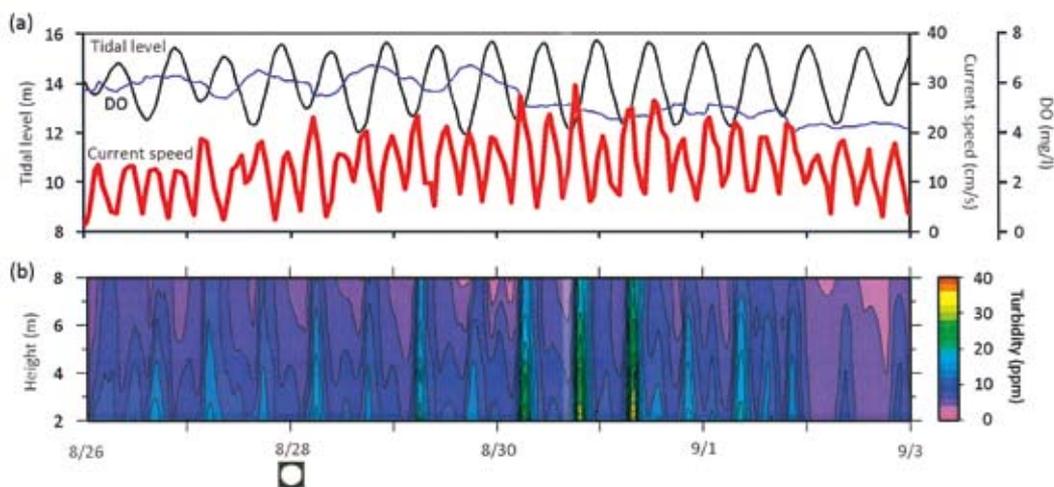


Fig. 5. Same variations as the above figure in the latter half of the observation period in 2007.

2005年と同様に大潮期で流速が大きい時に高くなっており、海底から離れるにつれて低くなっていった。濁度は30日と31日で特に高くなっているが(22~36ppm)、1/4日周期の変動が優勢であった2005年の場合と異なり、2007年は1/2日周期の変動が卓越しているといえる。

DOは、2005年には複雑に変動して1 mg/l程度の貧酸素も観測されたが⁵⁾、2007年においては、全体的に高くなっていた。

データ解析と考察

前節で示された潮流と濁度の関連性をより定量的に把握するため、統計的な解析を試みた。小潮期においては、濁度と潮流に関連性は認められなかったことから、ここでは大潮期に的を絞って濁度と潮流の関連を調べた。

濁度と潮流の変動の関係を把握するために、まず、2005年と2007年の大潮期を中心にした50時間(M2潮で4潮汐周期)の潮流の速さ(絶対値)と濁度の調和解析を行った。2005年はFig.2に示される8月21日0時からの50時間で、2007年はFig.5の8月30日0時からの50時間のデータを用いた。解析の対象期間を大潮期の短い期間に限定すると、Fig.2とFig.5の潮位変動からもわかるように、半日周期であるM2潮周期の変動が顕著に現れてくる。Senjyu *et al.*⁵⁾にも示されているように、潮流による再懸濁の検討のためには、濁度と潮流(大きさ)の1/4日周期に相当するM4潮周期成分の振舞いを調べる必要がある。2005年と2007年の両年の、底層4層における、流速のM4成分の振幅と位相遅れ、濁度のM4成分の振幅と位相遅れと濁度の平均値を、Fig.6とFig.7に順に示す。

濁度の平均値は両年もとも海底付近が高く、海底から離れ

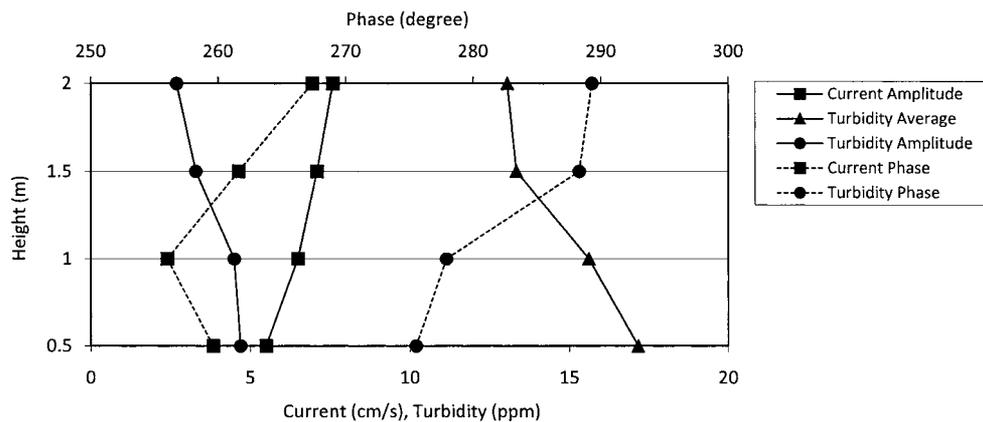


Fig. 6. Vertical variations near the basin floor of the amplitude and the phase lag of the M4-component of current speed and turbidity, and the averaged turbidity around the spring tide in 2005.

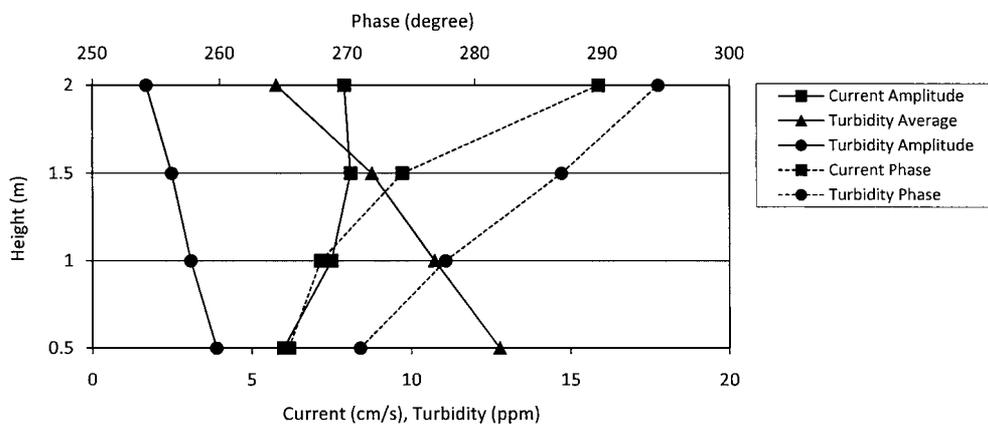


Fig. 7. Same variations as Fig. 6. in 2007.

るにしたがって低くなっている。濁度のM4潮成分の振幅も同様の傾向があり、さらに、濁度の位相は海底付近から離れるにしたがって遅れている。また、流速の位相と濁度の位相を比べると、濁度の位相は流速から2005年は 20° 前後、2007年は 10° 前後遅れている。ちなみにM4潮周期の 10° は実時間で約10分に相当する。これらの位相関係は潮流の変動が濁度の変動を引き起こしていることを示唆しており、大潮期の底層の濁度変動は潮流による再懸濁の影響が大きいと見なすことができる。

次に、流れの強さと濁度の関係を調べるために、流速と濁度の相関図を描いた。海底上0.5mから2.0mの4層の2005年と2007年の両年における、流れの強さとその時の濁度の相関図をFig.8とFig.9に示す。相関図に使用したデータは調和解析を行った期間のものである。相関係数は4層すべてにおいて正の相関が得られた。また、それぞれの層で1次近似式を求めると、海底に近いほど傾きが大きく、このことも潮流による海底からの再懸濁を裏付けている。また、両年を比較すると、2005年の方が傾きが大きく、2007年と比較して再懸濁がより生じやすい環境にあっ

たといえる。

2005年と2007年の大潮期の違いをさらに詳しく検討するため、Fig.2とFig.5で示した海底上1mの流速（絶対値）、潮位、海底上0.5mから2.0mまでの4層から得られた濁度の鉛直分布を拡大して、大潮期の2日間の時間変動をFig.10とFig.11に示す。これを見ると、2005年の流速と濁度のピークは1日に4回あり、潮流の強さと濁度の変動はよく対応しているが、2007年の流速のピークは1日に4回にも係わらず、濁度のピークは1日に2回となっており、上げ潮時にのみ濁度が高くなっていることがわかる。

このことから、2005年と2007年の大潮期における海底上0.5mから2.0mの4層の流速と濁度の相関図を、上げ潮時と下げ潮時に分けてFig.12からFig.15に順に示した。2005年の場合は、上げ潮時と下げ潮時とも正の相関が高く、海底から離れるに従って1次近似式の傾きが小さくなる傾向が見て取れる。一方、2007年の場合は、上げ潮時は2005年と同様な傾向を示しているが、下げ潮時には傾きがかなり小さくなっている。このことから改めて2005年の図をよく見ると、わずかではあるが、下げ潮時の方が全体的

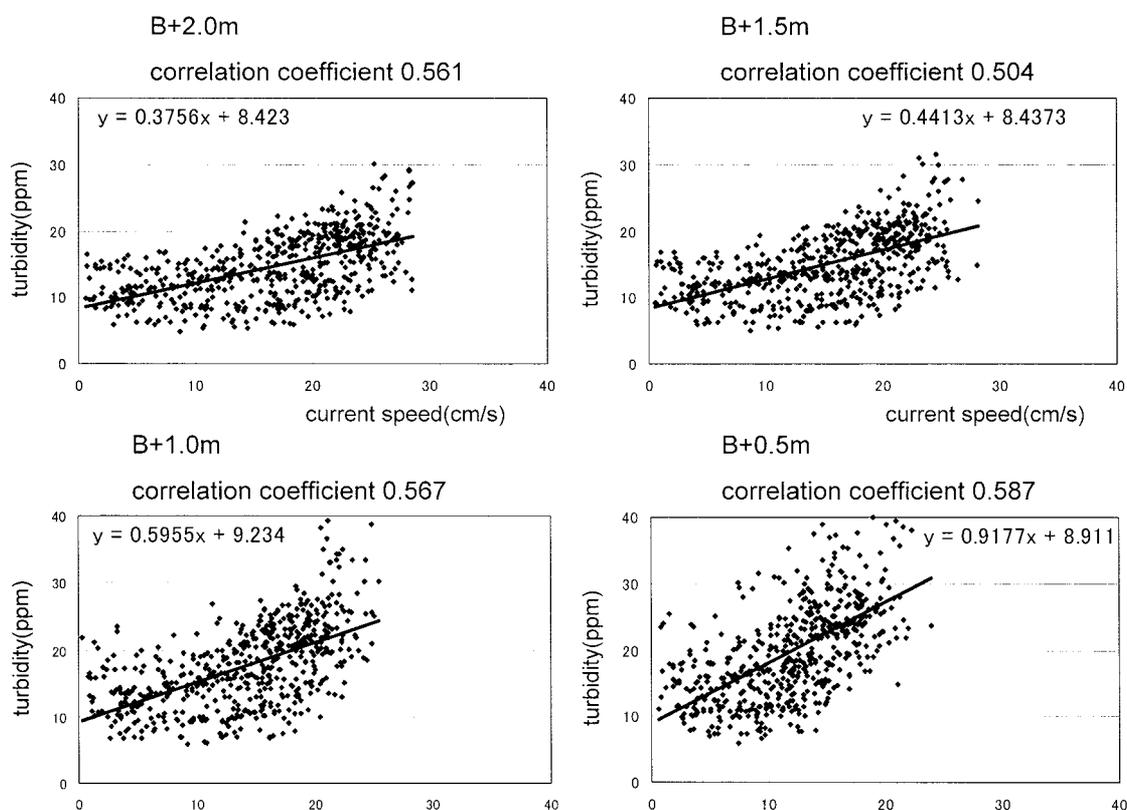


Fig. 8. Relationship between turbidity and current speed at four levels near the basin floor in 2005.

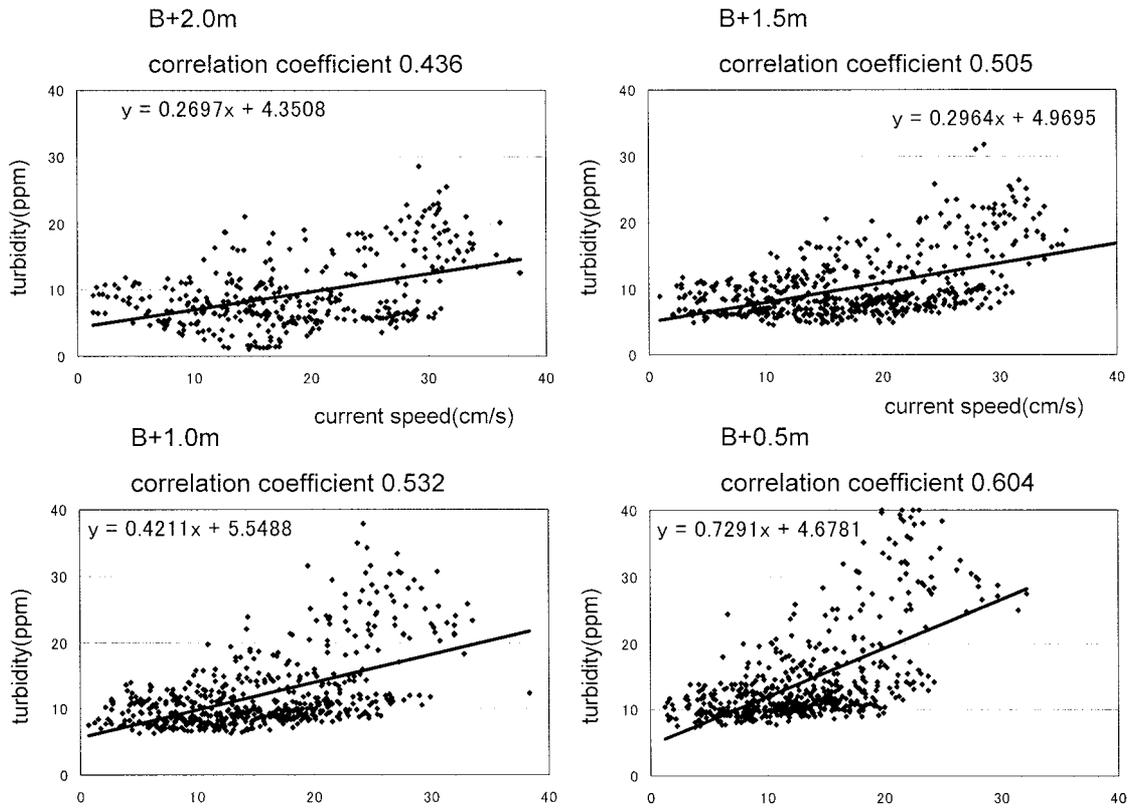


Fig. 9. Relationship between turbidity and current speed at four levels near the basin floor in 2007.

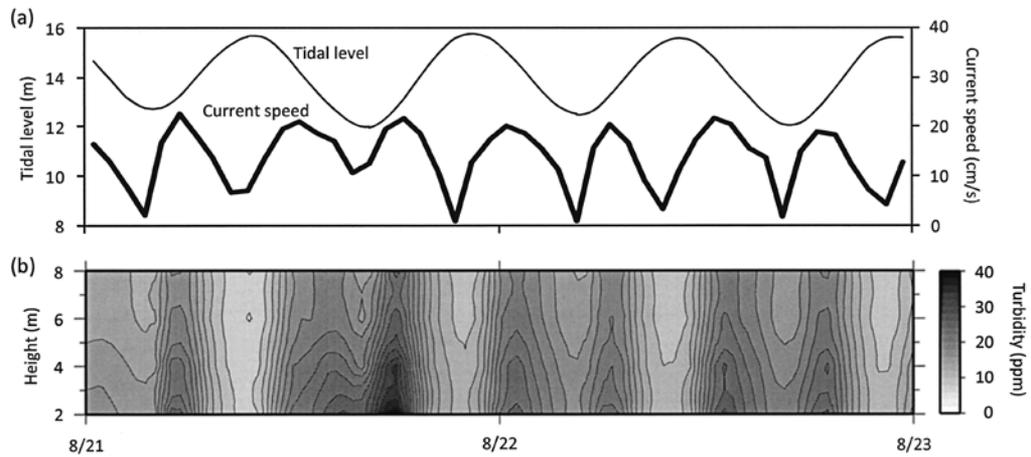


Fig. 10. Temporal variations of (a) tidal level and current speed at the level of one meter above the floor, and (b) vertical profile of turbidity near the floor around the spring tide (two days from 0 : 00 hours on the 21st of Aug. in 2005).

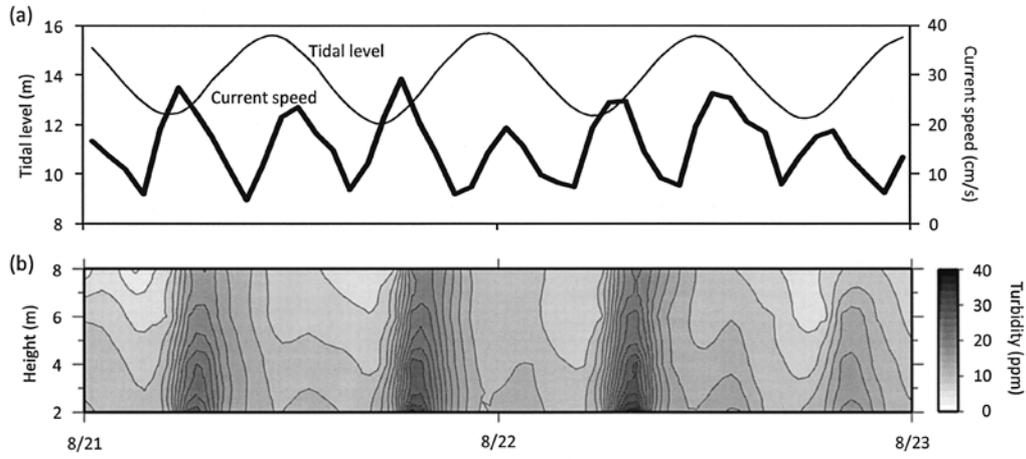


Fig. 11. Same variations as Fig. 10 (two days from 0:00 hours on the 28th of Aug. in 2007) .

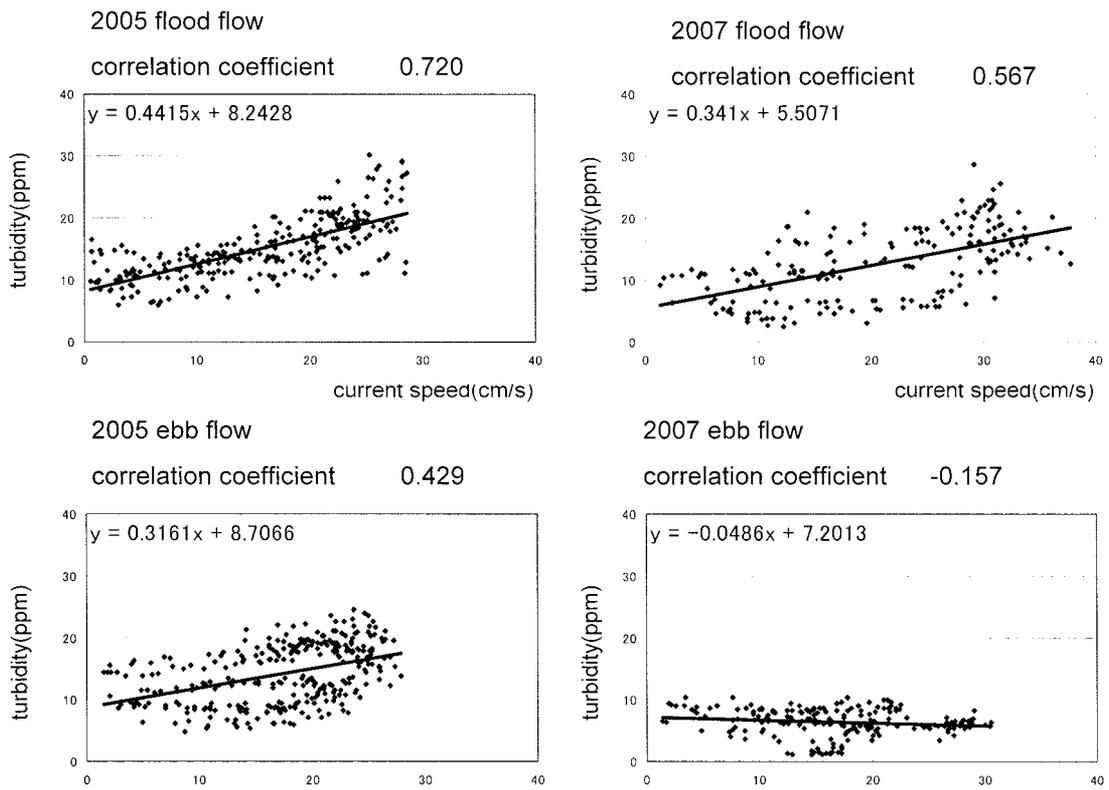


Fig. 12. Comparison between 2005 and 2007 of relationship at the flood and ebb tides between turbidity and current speed at the level of 0.5 m above the basin floor.

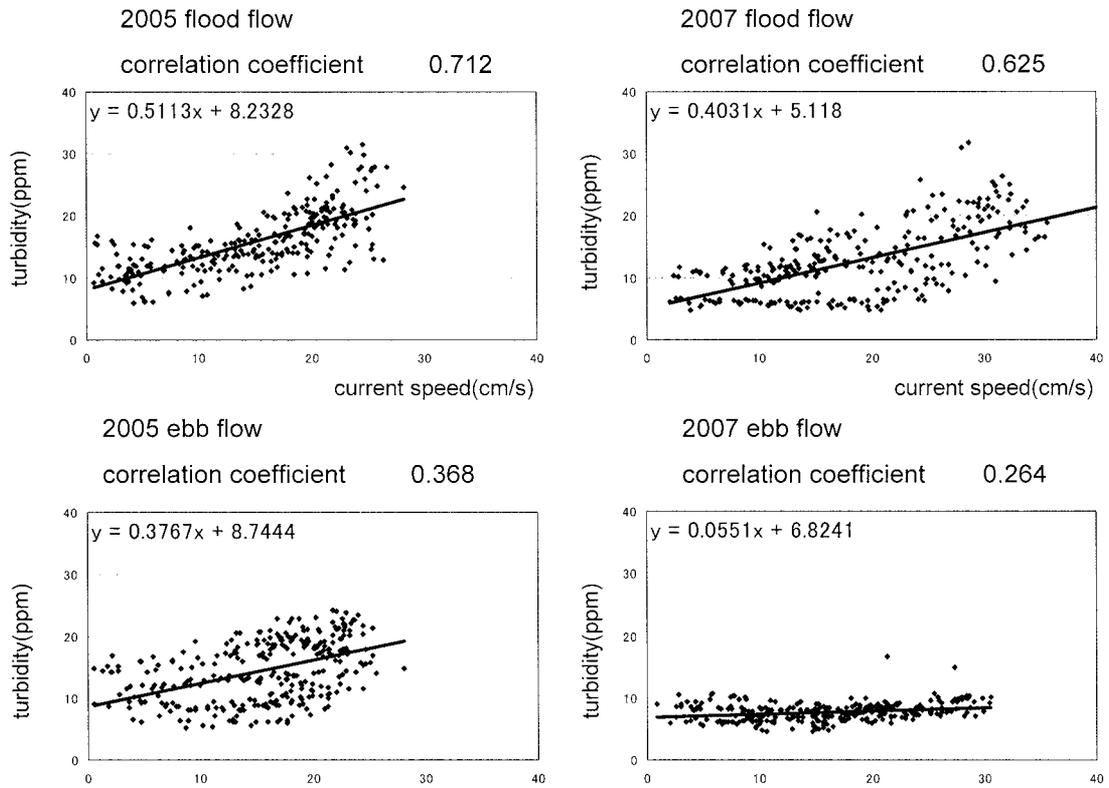


Fig. 13. Same comparison as Fig. 12 at the level of 1 m above the basin floor.

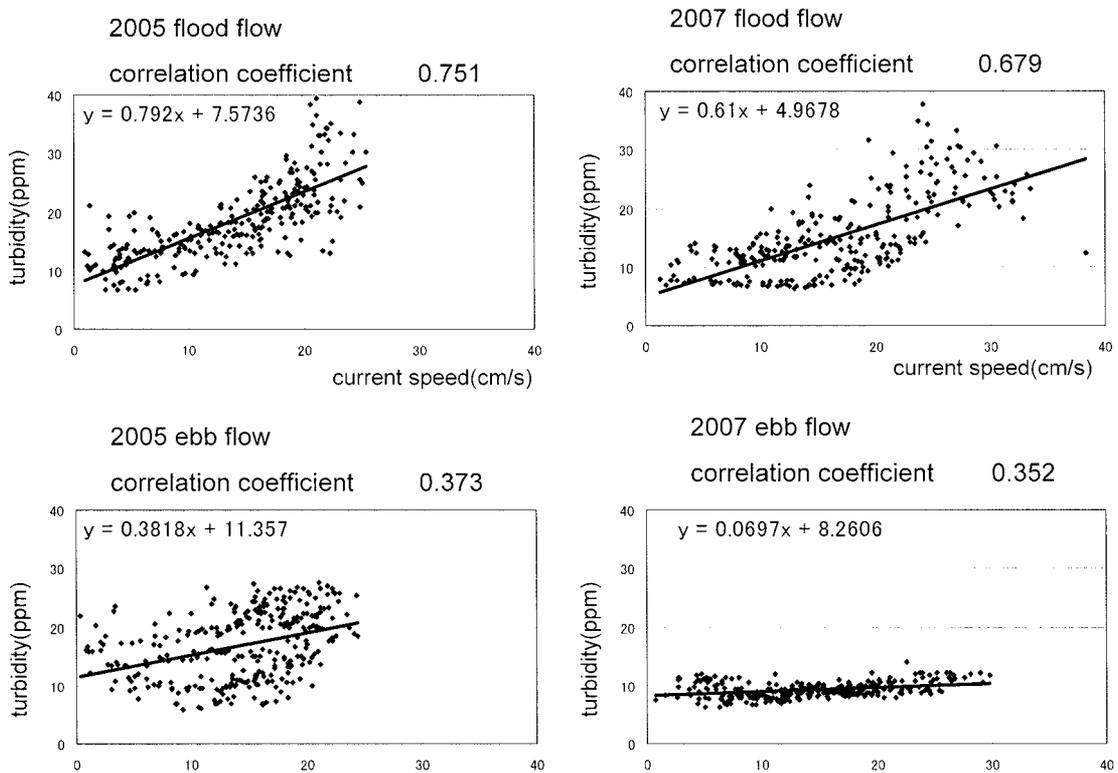


Fig. 14. Same comparison at the level of 1.5 m above the basin floor.

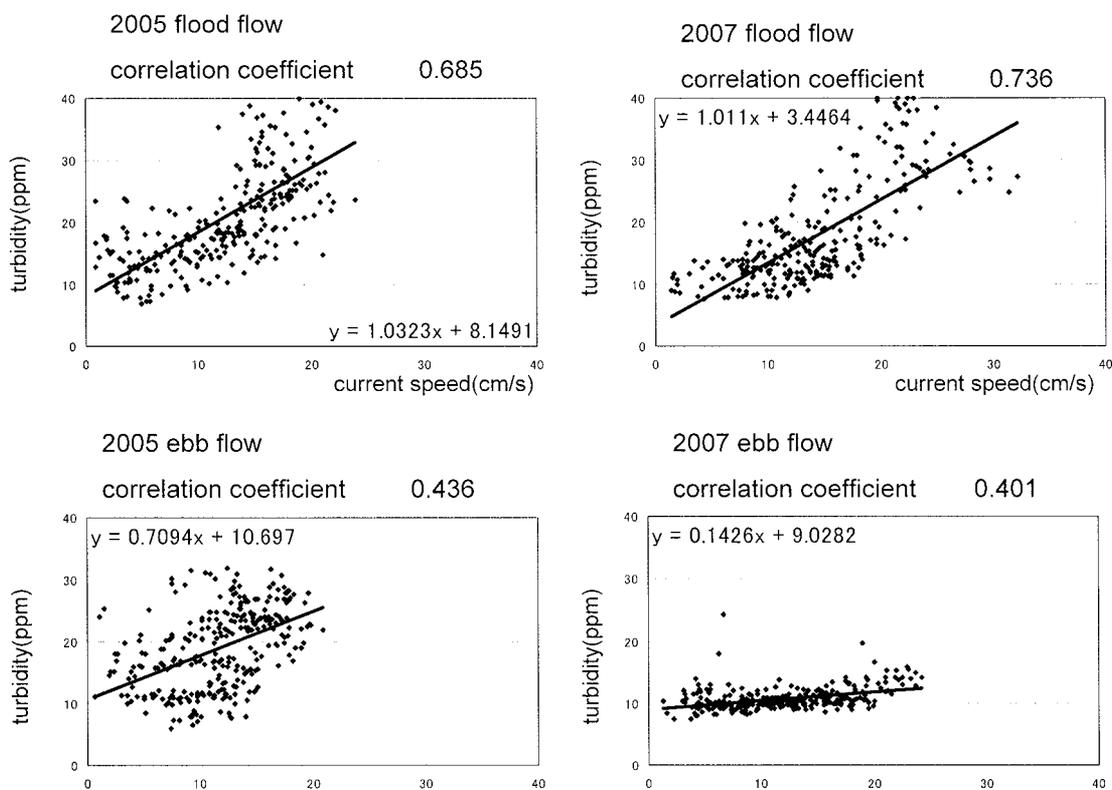


Fig. 15. Same comparison at the level of 2 m above the basin floor.

にやや傾きが小さい傾向が窺える。

これらのことをまとめると、潮流による底泥の再懸濁は両年とも引き起こされているが、再懸濁は下げ潮時よりも上げ潮時に効果的に現れ、濁度が全体的に低い2007年においては上げ潮時と下げ潮時の違いが明瞭に現れたのではないかと考えられる。

再懸濁のプロセスを詳しく把握するために、2008年の9月初旬の大潮期には25時間に集中した定点観測を行った。観測結果は現在解析を進めているところであるが、濁度の鉛直フラックスの計算結果からも、下げ潮時よりも上げ潮時にフラックス量は大きくなり2005年と2007年の観測結果と定性的に一致することが示されている⁹⁾。

以上の解析から、当海域では潮流による底泥の再懸濁が引き起こされていることがわかるが、2005年と2007年で再懸濁の様子に違いが現れた理由については、次のようなことが考えられる。Fig.2 からFig.5 の濁度変動の図やFig.6 とFig.7 の大潮時の調和解析結果からも、全体的に2005年の方が底層の濁度が高いといえる。また、底層のDOを比較

すると、Senjyu *et al.*の1998年³⁾よりも岸本らの2005年⁵⁾の方がDO濃度は高くなっており、2007年の観測においては、1998年と2005年に観られた貧酸素水塊（2 ppm以下の低酸素水）は確認できないほど、DO濃度はさらに高くなっていった。地元の漁業者の聞き取り調査でも、2006年までは貧酸素による養殖場の斃死被害があったが、2007年においては低酸素が原因と考えられる魚介類の被害はなかったとのことである。これらの事実は、豊前海の水質が徐々に改善されていることを示しているのではないかと考えられ、このことは底質の改善にも関連して再懸濁しやすい泥の減少にもなっているのではないかと考えている。

2005年の場合には、中潮期などで15cm/s以下であっても周期的に流れが変動しているときには再懸濁は確認されるが、小潮期においては突発的に15cm/s以上の流れが生じて再懸濁の様子は認められなかったことや、2007年の場合の上げ潮期にのみ顕著に現れる片潮的な再懸濁の振る舞いなど、再懸濁に関しては、底泥の状態など、さらに詳細な観測を積み上げていく必要があると考えている。

おわりに

2005年と2007年の夏季の海底近傍に注目した係留観測から、次のことが明らかになった。

- (1) 流れについては、大潮期には潮流が優勢であるが、小潮期には潮流以外の突発的な流れが観測された。
- (2) 大潮期から中潮期にかけては流れの強さに依存して濁度は高くなる傾向にあるが、小潮期の突発的な流れは、中潮期よりも強い場合でも濁度の上昇を引き起こすことはなかった。
- (3) 大潮期の濁度の周期的な上昇は、潮流による底泥の再懸濁によって生じていた。
- (4) 2005年の大潮期は、濁度は潮流の強さに対応して1/4日周期で変動するが、2007年の大潮期においては、下げ潮時に比べて、濁度は上げ潮時で高い値が観測された。特に2007年で顕著に現れた片潮的な再懸濁の原因については、上げ潮時と下げ潮時の底層からの乱流の違いにあると考えられ、詳細を明らかにするために、2008年9月初旬には乱流拡散プロセスに係わる詳細な観測を実施した⁹⁾。この観測結果については現在解析を進めつつあり、次の機会に報告したい。

引用文献

- 1) H. Yasuda, T. Senjyu and S. Sugihara : Hypoxia formation process in a tidal basin of the Seto Inland Sea. *Proc. of 3rd International Symposium on Environmental Hydraulics*, CD-ROM (2001)
- 2) 水産庁：周防灘小型機船底曳き網漁業対象種（カレイ類、ヒラメ、クルマエビ、シャコ、ガザミ）資源回復計画, (2004) <http://www.jfa.maff.go.jp/sign/syuboukosoko.htm>
- 3) T. Senjyu, H. Yasuda, S. Sugihara and M. Kamizono : Current and Turbidity Variations in the Western Part of Suo-Nada the Seto Inland Sea, Japan : A Hypothesis on the Oxygen-Deficient Water Mass Formation. *J. Oceanogr.* 57, 15-27 (2001)
- 4) 馬込伸哉, 磯辺篤彦, 神菌真人：周防灘における貧酸素水塊の流入河川水に対する応答 沿岸海洋研究. 40, 59-70 (2002)
- 5) 岸本充史, 安田秀一, 鬼塚 剛, 高島創太郎, 湯浅豊年：周防灘豊前海における溶存酸素変動と海洋構造について－2005年夏季の15日間定点係留観測から－ 水大校研報 第56巻 第1号 47-60 (2007)
- 6) 磯辺篤彦, 神菌真人, 俵 悟：周防灘南西部における貧酸素水塊 沿岸海洋研究ノート. 31, 109-119 (1993)
- 7) 神菌真人, 磯辺篤彦, 江藤拓也, 俵 悟, 小泉喜嗣：周防灘南西部における貧酸素水塊形成機構 沿岸海洋研究ノート. 32, 167-175 (1995)
- 8) H. Yasuda : Transient Wind Drift Currents in a Tidal Inlet : theoretical analysis of Ekman drift current and field experiments in Suonada, the Seto Inland Sea. *J. Oceanogr.* 65, 455-476 (2009)
- 9) 安田秀一, 山口哲昭, 高島創太郎, 河野史郎, 湯浅豊年, 鬼塚 剛, 伊澤瑞夫：周防灘豊前海の底層濁度変動と再懸濁過程解明に関する観測－乱流流速測定装置 VECTORによるMASS FLUXの解析と輸送メカニズム－ 2009年度日本海洋学会春季大会要旨集 (2009)