

有明海北部海域の物理的環境特性

— 淡水流入に伴う潮流・濁度・溶存酸素の変動と有明海の副振動 — *1

安田秀一*², 松永信博*³, 徳永貴久*³, 阿部 淳*³, 高島創太郎*⁴
河野晋悟*⁵, 宇都帝信*⁵, 鬼塚 剛*², 伊沢瑞夫*², 河野史郎*⁴

Physical environment of the northern part in Ariake Sea — Variations of tidal currents, turbidity and dissolved oxygen caused by heavy rain and the secondary oscillation of the sea —

H. Yasuda, N. Matsunaga, T. Tokunaga, J. Abe, S. Takashima
S. Kohno, T. Uto, G. Onitsuka, M. Izawa and S. Kawano

Field experiments were carried out using a mooring system to elucidate the physical process concerning the environmental variation in the northern area of Ariake Sea. The duration of the experiment was about 19 days from the 12th to the 31st of July, 2003 when we had both spring and neap tides and heavy rain inducing severe flood in some cities around the sea. We have got the following data from this mooring system; vertical profiles of both of tidal currents and turbidity, dissolved oxygen at the level of two meters from the basin floor and tidal level at the station.

It has been revealed from this experiment that the residual current, playing an important role in matter distribution in tidal basins, was rather changeable with the behavior of fresh water discharge. The variation of the residual current has been recognized to be related to the concentration of dissolved oxygen in the lower layer. Harmonic analysis of tidal level, currents, dissolved oxygen and turbidity has suggested some interesting phenomena, especially the existence of a secondary oscillation in Ariake Sea. The result of harmonic analysis using Fourier expansion can show that the period of the secondary oscillation is about 8.37 hours. This oscillation period has a concern in the largest tidal difference of this sea in Japan.

1 はじめに

有明海は、冬季における季節はずれの赤潮発生やそれによる養殖ノリの色落ち、さらには諫早湾の潮受け堤防建設などで、社会的な関心も高まっているが、堤防の是非に関わる問題についても未だに研究者や行政、マスコミ等で活発な議論がなされている。それに伴って、赤潮発生の原因や潮受け堤防の影響を解明するために、現地観測やモデリングが試みられ、多くの研究報告もなされてきた^{1), 2), 3), 4)}。環境問題については、どのような場合でも早急な解決が望

まれるが、成果を急ぐあまりに理論や原理を寄せ集めて、風と桶屋の関係で話を収めてしまつては将来に禍根を残すことにもなりかねない。膨大な予算を使った後の尻ぬぐいのために、盲人が象に触れたときの感想のように、都合のよい実像を作り上げようとしている風潮も否めない。

近年の海洋観測装置の開発やその高精度化に伴って、沿岸海域のデータは非常に豊富になり、いろいろと明らかになってきたが、多くの要素を取り入れた複雑な研究報告を拝聴するたびに、その中で扱っている物理的な過程に限っていても、未だに解明されていない基本的な素過程が残さ

2004年9月6日受付. Received September 6, 2004.

*1 本論文の主な部分は2004年度日本海洋学会春季大会で口頭発表した。

データ解析の多くは2003年度の卒論研究の中で行った。

*2 水産情報経営学科 数理科学講座 (Laboratory of Scientific Methodology and Modeling, Department of Fisheries Information and Management)

*3 九州大学総合理工学研究院環境流体研究室 (Department of Earthsystem Science and Technology, Kyushu University)

*4 国土環境株式会社 (METOCEAN ENVIRONMENT INC.)

*5 水産情報経営学科 数理科学講座 2003年度卒論生

れているように見受けられる。環境問題は物理学、化学、生物学、さらには社会学的な要素も考慮に入れて学際的に取り組むことは極めて重要であるが、それぞれの分野で重要な要素が未解明のままに取り残されているのは、学際的な研究も功を奏すことにはならないのではないかとと思われる。環境悪化の原因や解決策が明瞭に示されたわけでもなく、最近の学会の講演においても有明海のテーマは一頃のような勢いはなくなったように思われるが、身近な環境問題が流行に左右されるのは研究者の体質にも問題があるのではなからうか。有明海の研究については、これまでに膨大な予算がつき込まれ、高度な数値モデルも構築されているが、本研究では、環境変動を支配しうる物理的素過程をもう一度丁寧に整理する必要があるのではないかとこの観点で、負酸素水塊の発生などに関わる物理的な環境変動要因を明らかにすることを目的として、時系列データの測定とその解析を行った。

諫早湾口から北に位置する有明海北部海域は、岸沿いに広大な干潟が発達し、その周辺ではノリ養殖が営まれているが、古くから宝の海とも言われるほど魚介類の豊富な海域として知られていた。しかしながら、1980年頃からは漁獲高も漸減し、タイラギ貝などの高級な二枚貝は、最近では、ほとんどとれなくなってしまった²⁾。このようなことから、本研究では有明海北部海域に注目し、2003年7月12日～31日の19日間、佐賀県太良町沖に、主に物理量を測定するための係留系を設置した。この観測の計画段階から、梅雨明け時の豪雨を期待していたが、予想に違わず、有明海周辺の異なる地域で期間内に2度の豪雨が観測された。2002年初秋の予備観測で、この海域の底泥が効果的に溶存酸素を消費しうることを明らかにしたこと²⁾から、この度の観測では、底泥の再懸濁過程にも着目し、係留地点は前年の測点のごく近傍に設置した。

2002年の観測は、大潮期の25時間に注目したものであったが、有明海のように潮汐の卓越した海域では、M2潮成分を根拠に12時間30分か25時間の中の変動を調べることが多い。日本の沿岸海域では、一般船舶の他に小型漁船や遊漁船、プレジャーボートなどの航行が頻繁で、係留系を設置しても監視の必要性からその程度の観測時間に抑えられることになるが、現象をより正しく認識するにはより長期間のデータは欠かせない。本研究の19日に及ぶ連続測定は、同海域に関わる漁業協同組合などの理解と協力があつてなされたもので、少ない予算にもかかわらず、計画していた観測がこれだけの長期間、事故や欠測もほとんどなく正常に測定できたことは幸運にも恵まれたことと思わざるを得

ない。実際、我々の観測地点の1 km弱離れたところで行われた他機関の係留系は、漁船とのトラブルのために、結果的に測定データは得られなかったとのことである。

この度の測定点は1定点のみであるが、流れの鉛直分布や溶存酸素、濁度などを時系列的に測定していることから、これまでに指摘されることのなかった沿岸海洋過程が見出され、物理的な現象（物理的過程）を推測することができた。室内の水理実験やコンピュータによる数値シミュレーションと違って、現場の観測実験においては、そのデータの中に多種多様なプロセスが入り交じり、個々の現象を正確に記述することは困難なことが多いが、本報告では、潮位差が大きく潮流の強い有明海でも淡水流入などの潮汐以外の要因によって流れなどがかなり変動しうることや、従来の25時間観測結果の問題点なども提示する。

2 観測内容とそのデータ

2.1 観測内容

筑後川の河川水は、河口沖合の地形などからバルジ（高気圧性渦）を形成することなく、西岸を南下することが塩分分布¹⁾や地元の漁業者などの話から知られている。このことから、係留系による測定定点はFig. 1に示すような位置（St.）に設定した。当地点の平均水深は16.4mで、係留測定に使った装置、測定項目、測定水深などは次のとおりである。

- (1) Aquadopp (ADP=音響ドップラー式流速分布測定装置で、アレック電子株式会社などによ

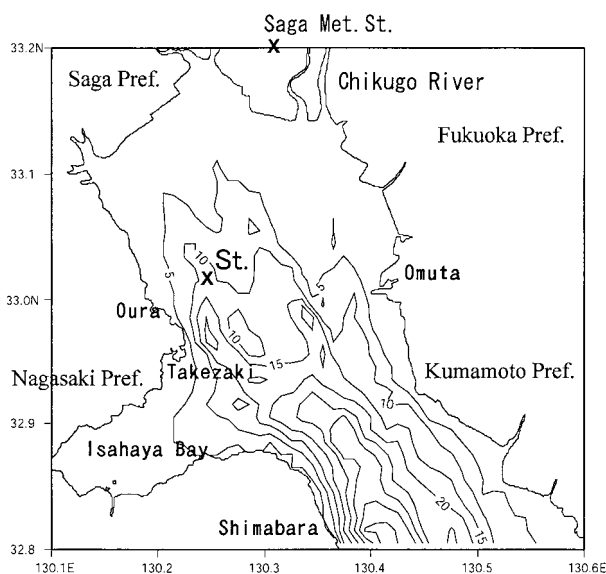


Fig. 1. Topography of Ariake Sound and positions of the mooring system and Saga weather station.

ってADCPを浅海用に改良したもの)

海底上0.4mから12mまで、0.4m毎30層の流れと濁度(音響散乱強度)⁶⁾および潮位(水圧)

(2) C/Tタワー(底層環境測定装置)⁷⁾

海底上0.5m, 1m, 1.5m, 2mの4層における流れと濁度および付属センサーによる海底上2.2mにおける水温・潮位(水圧)・塩分

(3) 電磁流速計(2台)

海面下2mと4mにおける流れと水温

(4) DO計

海底上2mの溶存酸素と水温

以上の装置の係留は、7月12日の10時からダイバーによって設置作業に入り、撤収作業は7月31日8時30分から行った。設置作業に伴う海水の擾乱などからデータの有効期間は12日14時から31日8時までであるが、途中21日の昼頃、各装置のセンサーの掃除などの保守のため、1時間の欠測がある。この欠測期間中の値は、欠測直前の値と再測定直後の値を線形補間した。各装置の測定は、バッテリーの容量とデータ集録メモリーの制限から、5分毎のバーストモードで行った。

またこの観測期間中の海洋構造の把握のために、装置設置直後と回収直前および中日の保守点検時において、

(5) CTDによる水温、塩分、濁度、クロロフィルの鉛直分布測定を行い、海洋現象に関わるその他のデータとして、

(6) 国土交通省管理の筑後川河口堰(大堰)の河川流量および、

(7) 佐賀地方気象台の気温・気圧、風向・風速、降水量、日照時間などを利用させていただいた。

2.2 観測データと観測時の物理的環境

観測期間中のこの海域の様子を示すために、Fig. 2に期間中の潮位[水深をmの単位で表示]、海底上2mにおける溶存酸素DO[%]、C/Tタワーによる海底上0.5mと2mの濁度[ppm]の時間変動を表した。なお、この濁度の値は、赤外後方散乱方式によって得られた散乱強度をカオリナイトの場合に置き換えた値を使っており、必ずしもこの海域の懸濁物質の濃度を表しているわけではないが、相対的な変動は本報の議論の範囲では有意なものとする。それぞれのデータは5分毎に測定しているが、濁度や溶存酸素は変動が大きいため、1時間で平均(12個で平均)したものを描いている。DOについては24時間で移動平均したグラフもその中に描いた。図中の◆印は、九州最大の筑後川の日平均流量[m³/s]で、この川の流域面積は有明海北部海域に流れ込む河川の7割以上にもなることが理科年表にも記されており、この海域に流入する河川水を代表していると考えられる。

この図を見ると、観測期間中は2度の大潮があり、その時には濁度は短周期の大きな変動を見せながらも高い値を示し、その値が海底近くで高いことから、ここに見られる濁度の変動は、海底からの底泥の再懸濁によるものと考えられることができる。2002年9月の観測結果は、この海域の底泥が効率的に酸素消費をする可能性があることを明らかにしたが²⁾、このことは再懸濁が貧酸素化に関わることを

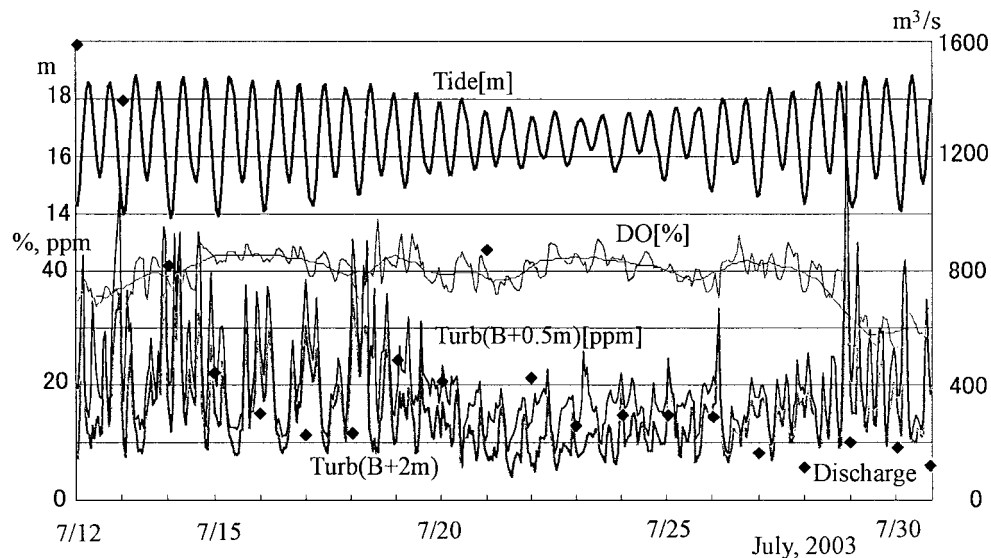


Fig. 2. Variations with time of tidal level [m], DO [%] (B + 2 m) and turbidity [ppm] (B + 0.5 m, B + 2 m) in the duration of this experiment. The mark ◆ indicates daily averaged discharge of Chikugo river [m³/s].

意味する。しかしながら、この図によると後半の大潮期にはDOが減少して貧酸素化の傾向が認められるものの、前半の大潮期にはDOはむしろ高くなる傾向にあった。DOの変動については、潮位の変動に追従するような短周期変動も見られる。このような変動は海底近傍のDOが潮流の主軸方向に分布をしていることを反映しているものと考えられることができる。

この時期の天候の様子ができるように、Fig. 3には、佐賀地方気象台における7月の日降水量 (mm/day) を描いた。比較のために筑後川の日平均流量 (m^3/s) も記入している。この図を見ると、11日から13日にかけては、大雨が降って河川流量が増加したという様子が認められるが、20日においては、降水量が多いにもかかわらず、河川流量はそれほど増加しない傾向にあり、その傾向は29日にはさらに顕著に認められる。このことは後で議論の対象となるが、この海域への淡水の流入は、筑後川から河川水として入る場合と、河川水よりも降雨による場合というような種分けができるのではないかと考えられる。有明海のように干潟の広い海域では、河川水ではなく、陸などから流れ込んだ淡水が干潟にたまることによって特異な流動現象を引き起こされることが予想される。

Fig. 4の中の上部は同気象台の風のベクトル変動図である。風のデータは1時間毎であったが、変動的に見にくいこともあって24時間の移動平均をとった。その下には風と

の比較のために各水深における潮流の潮汐成分を除いたベクトルの変動を描いたが、この潮汐フィルターについては後で述べる。

Fig. 5の (a), (b), (c) は、それぞれ、係留系の設置直後、中日の保守点検時、回収直前において、CTDによって測定した水温、塩分、濁度、クロロフィルの係留定点における鉛直分布である。(a)の7月12日においては、筑後川の洪水に伴う淡水流入を反映して、海面近くでは塩分は非常に低く、濁度も非常に高くなっている様子が見てとれる。海面のごく近くで低塩分と高濁度になっている様子は洪水時の河川水が盛んに流入してきていることを暗示している。(b)の7月22日の2日前は、筑後川の流量が12日より小さいものの、熊本県では記録的な豪雨があり、水俣市周辺では大きな水害が発生している。低塩分水が海面下1mくらいまでを一様に分布している様子は、低塩分水がこの厚さで海域内に広がっているものと推測される。(c)の2日前には降水量はかなり多かったが、筑後川の流量はそれほど多くはなかった時である (Fig. 3)。クロロフィルの鉛直分布を見ると、塩分と逆相関の傾向が見られるが、表層に淡水の流入が伺える (a) と (b) においては、塩分躍層のところにクロロフィルのピークが現れている。このことは有明海の植物プランクトンの振る舞いを暗示しているものと考えられるが、生物学的議論については他に譲る。

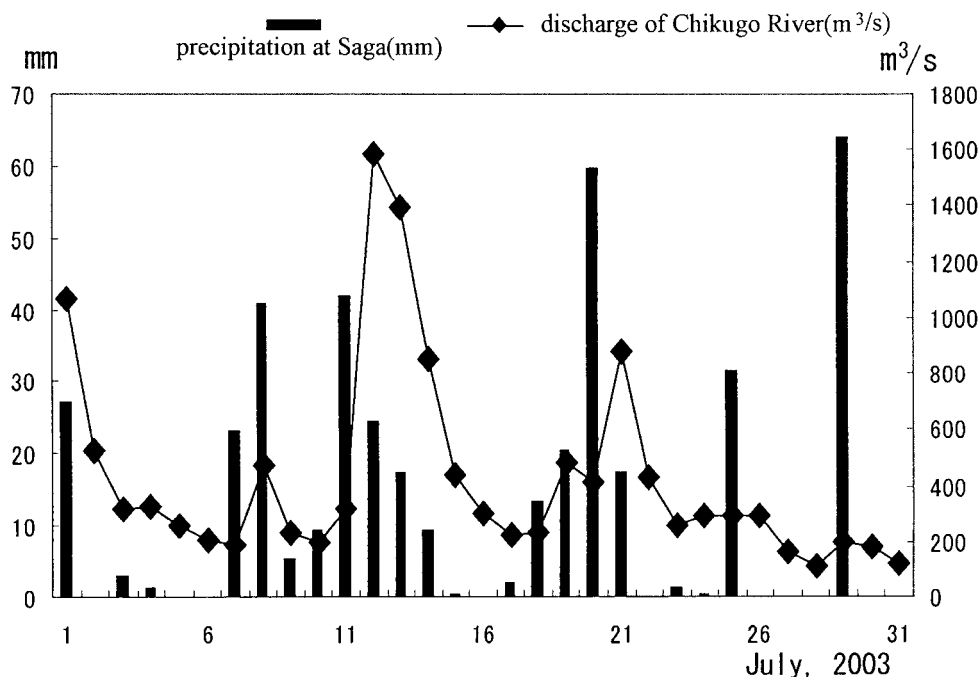


Fig. 3. Precipitation per each day [mm] at Saga weather station and discharge of Chikugo river [m^3/s] in July, 2003.

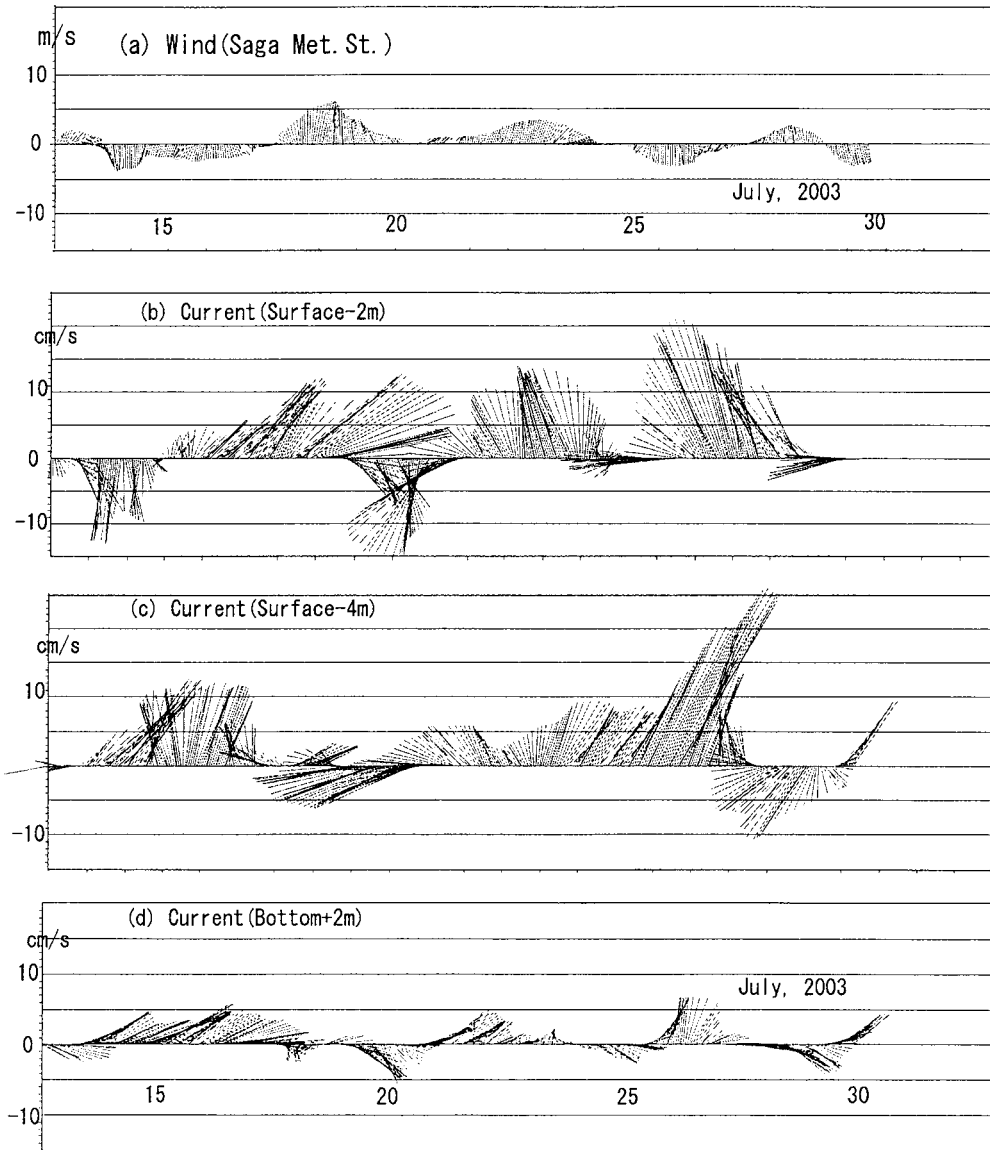


Fig. 4. Stick diagram of wind at Saga weather station and residual currents at the levels, S- 2 m, S- 4 m and B+ 2 m of the mooring station.

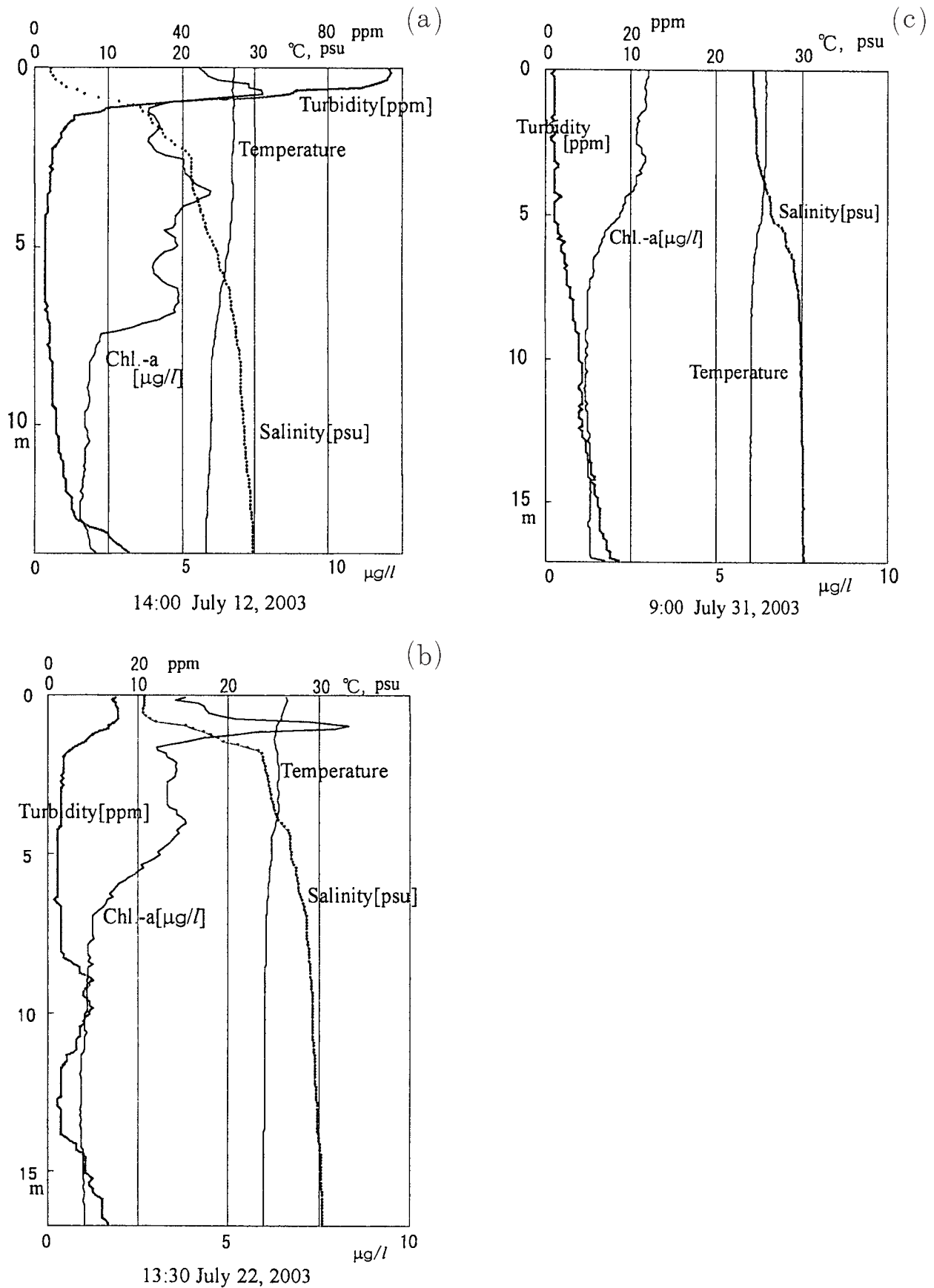


Fig. 5. Vertical profiles of water temperature, salinity, turbidity and chlorophyll-a at the mooring station. (a), (b) and (c) are those at 14 o'clock on July 12, 13:30 on July 22 and 9:00 on July 31, respectively.

3 データ解析

3.1 各時系列データの15日調和解析結果

有明海は、潮汐の干満差が国内で最も大きいことから、測定データから諸現象を考察する場合には、潮汐に伴う変動特性を把握してそれを考慮することは不可欠である。ここでは、上記の係留系で得られた時系列データはすべて15日間で調和解析をし、さらに24時間50分のブロック毎に調和解析を施した。それぞれの生データは5分毎に測定されたものであるが、15日間の解析においては、12個で平均した1時間毎のデータを用いた。本研究では、調和解析は1組のデータをフーリエ級数で展開することによって、それぞれの成分の係数を求めたが、このことによって、潮汐成分の周期の調和常数だけでなく、当初は想定していなかった周期のところにもピークが認められ、内湾の副振動に関する新たな考察もできた。

因みに、本報における各調和成分は、周期 T の潮汐成分について、 $A \cos(2\pi t/T + \delta)$ の形で、振幅 A と位相 δ を求めている。従って、 δ の値は位相の遅れを表して、15日間データの場合には、 $\delta=0$ は解析開始時の7月12日14時には変動が正のピークになっていることを示している。

Fig. 6は、潮位[m]と海底上2mのDO[%]およびC/Tタワーによる濁度[ppm]の、7月12日14時から15日間データの調和解析による各周期毎の振幅を表したものである。縦軸は、図中に収まりやすいように対数をとっている。そ

れぞれの平均値は、順に、16.62m, 40.41%, 16.63ppmであった。潮位については、M2成分が最も大きく、以下S2, O1, K1と主要4分潮が大きく現れているが、8.37時間(8時間22分)のところにも、小さいながらもピークが認められる。この周期は有明海の固有振動周期を表すものと考えられ、有明海の潮汐の増幅にも関わるものと推測される。

DOの調和解析結果でもM2潮成分が顕著に見られ、その位相も潮位に比較して約23 π の遅れで、潮位に近い位相をもったM2周期変動が優勢といえる。また、K1に相当する24時間周期の変動も顕著に認められるが、これは日変動する日射の強さに関わる植物プランクトンの生態サイクルを反映しているのではないかと考えられる。さらにM4潮周期のところにもピークが見られるが、これは潮流で最も優勢なM2潮成分の流れの強さ(方向に関係なく強さに関わるために、M2潮流のスピードはM4潮成分に現れる)に対応しているものと考えられ、流れが強くなると鉛直混合が盛んになって上層から酸素が供給されやすいという現象を示していると推測される。

濁度はM4潮周期の変動が最も大きく、K1やM2の変動周期も顕著であるが、潮位で見られた8.37時間周期の変動もこれらと同程度に現れている。M4潮周期成分が現れることについては、これまでも海底からの再懸濁を意味していることを述べてきたが^{7), 8)}、この有明海北部海域においても潮流による再懸濁が盛んに行われていることを暗に示している。

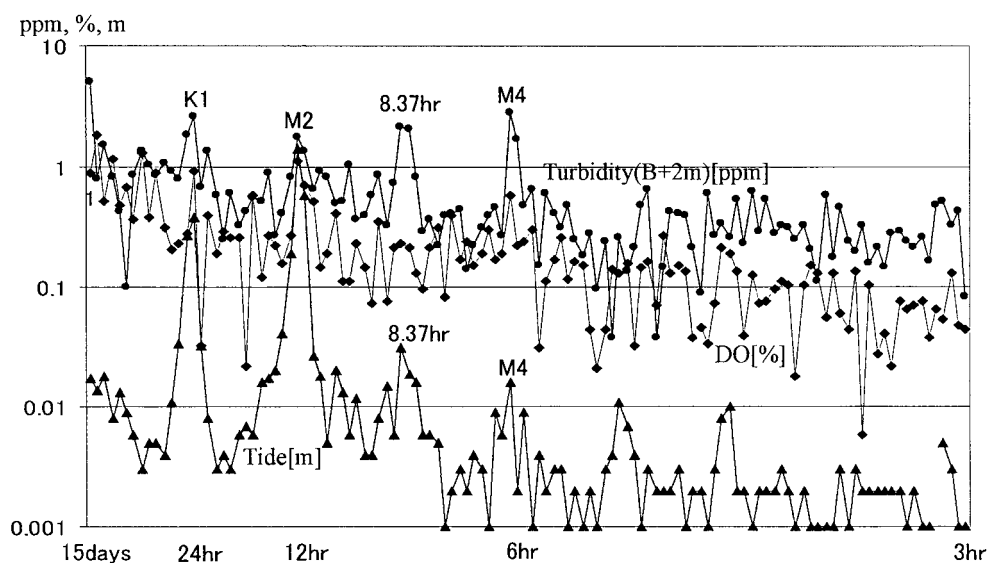


Fig. 6. Amplitudes at each frequency (period) of DO, turbidity at the bottom layer (B+2 m) and tide given by harmonic analysis

Table 1 は、7月12日14時から27日13時まで15日間の、電磁流速計による海面下2mと4mの流れ、C/Tタワーによる4層の流れ、および、Aquadoppによる代表的な4層の流れの調和解析結果である。解析に用いたデータが15日間であることから、その360時間を正の整数で割った時間を周期とした各成分のフーリエ係数が求められるが、この表には、この期間で求めることのできる代表的な潮汐成分に相当するものと、さらに上述の周期8.37時間のものも記した。観測期間が15日間であることから半日周潮成分のN2(周期12.66時間)を表すことができないが、K1, O1, M2, S2の主要4分潮は高い精度で得られていると考える。潮位などの解析で認められた副振動周期と思われる振動成分も、振幅などの値は比較的安定しており、有意な値で得られていると考えられる。

海中の超音波のドップラー効果を利用したAquadoppからは、流速値の測定と同時に各層における音響散乱強度が測定できる。ここでは、C/Tタワーによって得られた4層の濁度と音響散乱強度を対応させることから、海底から0.4m毎に高さ10mまでの濁度を次のような変換式で表すことができた⁶⁾。

$$\text{換算濁度} = B - I + k \cdot \log R + 2 \cdot \alpha \cdot R \quad (1)$$

ただし、 B は基準音圧、 k は拡散係数、 α は減衰係数で、ここでは順に、78, 35, 2.8の値を導入した。 R はAquadoppの設置点からの距離(海底からの高さ)、 I は得られた音響散乱強度[count]である。

再懸濁によって巻き上げられた懸濁物の質量を求めるために、精度の問題は多少残るが、濁度の鉛直方向の積分量を算出した。データからは高さ6m($R=6$)以上においては、海底からの再懸濁と思われるような換算濁度の変動は明瞭には見られなかったことから、ここでは0.4m毎の8mまでの濁度の積算値を懸濁態物質の単位面積当たりの重量[mg/cm^2]とした。この時間的な変動成分が海底からの再懸濁に関わるものとする。

Fig. 7は、Aquadoppから得られた海底上0.4m, 2m, 8mの換算濁度と、上述の8mまでの積算による重量、および、比較のための潮位の時間変動を描いたものである。これを見ると、海底に近いほど濁度は大潮の時に高いピークをもつことがよくわかる。海底上8mの濁度においては、多少のピークは見られるものの、ほとんど一定値を保っているように見受けられる。

このような変動の特徴を調べるためにそれぞれ15日間の調和解析を行い、Table 2には、潮位、各水深における換算濁度と前述の積算重量、C/Tタワーによる濁度、DOの各潮汐成分(周期)の振幅と位相遅れを表した。潮位はC/Tタワーによるもので、測定水深である海底上2.2mを考慮して、平均値にその数値を加えるとその地点の平均水深と言うことになる。Fig. 6によると、潮位の他にも副振動周期と思われるところにピークが見られたこともあって、この周期の振幅と位相も表の中に表した。下の4層の濁度はC/Tタワーによって得られたものである。最上段の調和成分の下に記した整数値は、15日(360時間)をその数値で割ることによってそれぞれの調和成分の周期に相当

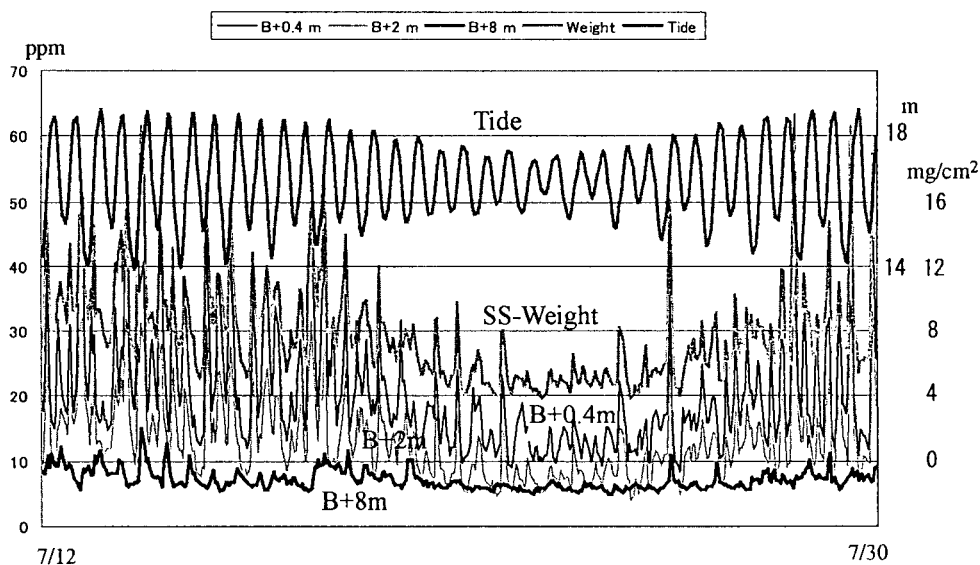


Fig. 7. Variations with time of turbidity at the levels, 0.4 m, 2 m and 8 m above the floor and the weight (mg/cm^2) of suspended particles, measured by Aquadopp.

Table 1. Harmonic analytical results of fortnight tidal currents at each level.

	Residue	MSF		O1		K1		M2		S2		8372 hr		M4		M6		M8		
		Major	Minor	Major	Minor	Major	Minor	Major	Minor	Major	Minor	Major	Minor	Major	Minor	Major	Minor	Major	Minor	
S-2m	Speed	12	5.5	0.9	2.9	0.4	1.6	0.5	4.34	8.1	14	0.1	2.8	0	2.9	1.1	1.1	0.2	0.7	
	Ori.	3.4	94.7	4.7	350.2	80.2	54.1	144.1	337.3	67.3	170.4	260.4	124.2	34.2	169.4	259.4	167.1	257	358.9	268.9
	Pha. Lag		127.1		22.1		76.7		108.3		7.8		97.9		34.2		9.3		25.4	
S-4m	Speed	5.9	7.5	0.2	3.1	0.1	5.6	2.9	32.6	1.7	12.5	0	1.6	1.2	1.8	0.5	0.7	0.3	0.5	
	Ori.	0.1	40.3	130.3	357.8	267.8	4.9	94.9	342.3	72.3	160.4	250.4	335.7	65.7	172.8	82.8	112.5	203	356.7	86.7
	Pha. Lag		6.2		97.5		147.7		108.8		20.7		30.9		24.5		152.1		80	
C/T tower B+2m	Speed	3.5	2.1	1.4	3.6	0.1	4.4	0.9	24.6	5.6	8.5	0.6	2	0.1	1.5	0.6	0.7	0.1	0.4	
	Ori.	60.8	46.8	136.8	356.5	266.5	345.7	75.7	349.1	259.1	329.8	59.8	214.9	304.9	336.4	246.4	328	58	299.8	29.8
	Pha. Lag		68.5		88.5		133.4		70.6		171.1		76.5		118.5		156.1		101.9	
C/T tower B+1.5m	Speed	4.1	1.8	0.8	3.4	0.3	4	1	23.6	5.3	8.1	0.9	1.9	0	1.5	0.3	0.4	0.1	0.3	
	Ori.	47.3	23.6	113.6	352.6	82.6	343.9	73.9	345.9	255.9	329.1	59.1	212.9	122.9	323	233	300.2	30.2	288.8	18.8
	Pha. Lag		52.1		83.8		131.5		67.3		168.8		72.4		117.9		140		88.1	
C/T tower B+1m	Speed	3.5	1.5	0.9	3	0.5	3.7	0.7	22	5.1	7.7	0.7	1.6	0.1	1.4	0.1	0.6	0.3	0.4	
	Ori.	47	44.8	134.8	348.8	78.8	341.7	71.7	343.1	253.1	329.3	59.3	214.2	124.2	316.3	226.3	280.8	10.8	291.7	21.7
	Pha. Lag		66.5		80.2		130.4		65.1		168.4		72.3		115.3		129		86.5	
C/T tower B+0.5m	Speed	3.5	1.2	0.7	2.6	0.6	3.1	0.6	18.4	4.1	6.6	0.6	1.4	0.1	1.2	0.1	0.5	0.4	0.3	
	Ori.	47.3	40.5	130.5	348.9	78.9	343.3	73.3	343.3	253.3	331.9	61.9	217.6	127.6	317.3	226.3	280.8	10.8	291.7	21.7
	Pha. Lag		63.6		81		129.1		63		165.9		72.8		116.9		88.3		73.5	
Aquadopp B+8m	Speed	9.6	3.5	1.1	4.3	0.2	6.2	0.1	26.7	0.9	11.9	1.3	1.2	0.7	2.5	0	1.5	0.6	0.6	
	Ori.	79.3	240	150	8.8	98.8	348.7	78.7	340.5	250.5	145	235	260.8	170.8	39.7	129.7	67.8	338	295.9	25.9
	Pha. Lag		114.1		107.4		146.9		93.1		13.7		37.6		123.4		150.7		2.3	
Aquadopp B+6m	Speed	5.1	2.3	0.7	4.8	0.1	6.2	0.2	27.8	2.5	11.4	1.7	1.8	0.1	3	0.3	1.3	0.4	0.4	
	Ori.	48.6	174.7	84.7	358.4	88.4	356.1	86.1	345.9	255.9	144.1	234.1	205	115	20.5	290.5	204.3	114	162.2	72.2
	Pha. Lag		114.3		110.2		152.6		85.2		8.1		78.1		115.6		5.8		87.9	
Aquadopp B+4m	Speed	3.8	1.8	0.6	4.7	0.3	5.3	0.5	26.1	4	10	0.9	1.9	0.1	2.7	0.6	0.9	0.2	0.3	
	Ori.	47	131	221	355	265	349	79	347.1	257.1	326.3	56.3	210.7	120.7	12.2	282.2	346.6	257	352.4	82.4
	Pha. Lag		121.8		99.3		159.5		78.2		178.8		93.1		99.2		170.5		14.5	
Aquadopp B+2m	Speed	4	1.6	0.7	3.2	0.1	4	0.9	22.2	4.9	7.7	0.7	1.7	0	1.4	0.5	0.8	0.2	0.3	
	Ori.	50.2	24	114	353.9	83.9	342.8	72.8	345.2	255.2	329.1	59.1	215.9	125.1	318.2	228.2	311.8	41.8	339.7	69.7
	Pha. Lag		48.2		82.6		133.9		68.2		170.1		78.9		118.1		142.6		15.3	

cm/s
degree
degree

Table 2. Harmonic analytical results of tidal level, turbidity at each level and the weight of suspended particles which are given by Aquadopp. Those of turbidity given by C/T lower and DO are added in the lower lines. The upper and lower numerals in each cell are the amplitude and phase lag, respectively.

	Residue	Msf	O1	K1	M2	S2	8.372 hr	M4	M6	M8	
Tide	1373.5	1	14	15	29	30	43	58	87	118	cm
		2.2	26.2	36.5	140.0	56.5	2.8	0.9	0.9	0.1	degree
		199.4	160.1	192.1	181.0	273.9	13.6	301.8	241.6	252.3	
B+8.0m	6.4	1.1	0.3	0.7	0.4	0.5	0.1	0.4	0.1	0.1	ppm
		86.3	65.5	134.1	117.4	214.3	302.1	305.8	39.6	138.0	
B+6.0m	6.0	1.7	0.2	0.6	1.0	0.9	0.1	0.3	0.1	0.0	
		80.0	48.9	129.4	120.8	191.9	213.8	281.1	3401	62.2	
B+4.0m	7.5	3.1	0.4	0.5	1.7	1.1	0.7	0.9	0.1	0.3	
		80.9	302.9	50.8	107.6	181.9	209.3	191.8	286.3	307.3	
B+2.0m	12.9	5.0	1.4	2.0	1.3	0.9	1.6	2.5	0.4	0.5	
		85.8	288.6	357.8	80.4	183.2	194.5	172.1	223.6	256.3	
B+1.6m	14.2	5.0	1.5	2.3	1.0	0.9	1.6	2.8	0.4	0.4	
		86.1	290.7	357.0	68.0	183.6	188.6	168.6	226.6	250.9	
B+1.2m	15.7	5.4	1.8	2.6	0.9	1.0	1.7	3.2	0.4	0.5	
		87.1	292.8	357.4	52.8	179.5	182.1	164.8	219.2	250.3	
B+0.8m	17.8	6.3	2.0	3.1	1.0	1.1	1.9	3.8	0.5	0.5	
		89.2	296.5	358.7	42.6	171.2	178.3	161.3	207.2	253.0	
B+0.4m	20.1	7.0	2.1	2.9	1.1	1.0	2.0	4.1	0.5	0.5	
		90.0	299.2	2.1	1.0	171.4	180.9	156.0	195.0	250.3	
SS	7.7	2.6	0.5	0.6	0.9	0.7	0.6	1.0	0.1	0.2	mg/cm ³
-weight		84.7	301.5	21.9	98.7	186.4	195.0	176.0	235.8	268.9	
B+2.0m	14.6	4.9	1.8	2.6	1.7	1.4	2.1	2.8	0.3	0.5	ppm
		82.4	285.4	17.8	52.6	170.1	188.8	169.0	220.5	260.8	
B+1.5m	15.2	4.7	1.8	2.8	1.7	1.4	2.0	2.9	0.4	0.4	
		82.6	284.4	16.1	35.7	165.8	184.0	161.5	229.6	238.0	
B+1.0m	18.0	5.1	2.0	3.3	1.9	1.5	2.1	3.2	0.3	0.4	
		82.3	289.1	16.0	19.4	163.0	180.7	154.6	223.1	227.2	
B+0.5m	20.5	5.3	2.1	3.7	1.9	1.6	2.3	3.5	0.3	0.4	
		83.4	295.1	19.4	10.2	159.1	174.3	147.1	166.2	232.2	
DO at	3.233	0.070	0.022	0.073	0.090	0.056	0.018	0.047	0.017	0.005	mg/l
B+2.0m		164.4	240.9	228.2	152.6	321.6	312.6	180.4	178.9	315.2	

するものが得られる。

この表によると、全水深に亘って約15日周期のMSf成分の振幅が最も大きくなっている。このことは濁度が大潮期で高くなって小潮期で小さくなるということを反映したもので、位相遅れが約90°(ピークが7月12日14時から4日弱遅れている)ということからもそのことが伺える。

海底近傍については、Fig. 6にも示されるように、M4潮成分、K1潮成分、周期8.37時間のところに有意な値が得られているが、それぞれ、海底からの再懸濁、生物活動を反映していると思われる日変動、有明海の副振動を表しているものと考ええる。

3.2 潮流の25時間調和解析結果

潮流の卓越する沿岸海域では、最大の潮汐成分であるM2潮に基づいて、その2周期分の25時間のデータ(M2潮周期の変動をより正確に見るために24時間50分のデータを用いる)に注目することが多く25時間観測がよく行われる^{2), 7), 8)}。有明海に限らず瀬戸内海、伊勢湾、東京湾では潮汐に伴う変動は大きく、大潮や小潮のことなどを考慮すると、15日間の観測をすることが望ましいが、先にも述べたように、このような海域では、係留系を設置して15日間も

測定し続けることは、安全性や費用などから困難な場合が多い。そのため、25時間の観測でM2潮周期などの振る舞いに着目することになるが、本報では25時間の調和解析結果の妥当性の検討も念頭に入れて、今回の観測期間19日間に亘る25時間解析結果の変動を調べた。今回の観測ではデータが5分毎に得られているため、24時間50分を1ブロックとしたが、データの先頭は便宜的にそれぞれの日の真夜中0時として翌日の0時50分までを1ブロックとした。例えば、7月17日の解析結果は、17日0時0分~18日0時45分までのデータを用いている。それぞれのデータは、7月13日から7月30日までの18ブロック分が25時間調和解析の対象となり、潮流については全装置から36層のデータが得られている。潮流の解析結果を見ると、大潮や小潮に伴う変動だけでなく、流入淡水の形態にも多に影響を受けていることが認められた。本報では特に潮流の調和解析結果について述べる。

18ブロックのうち、7月17日は、風が弱かったことに加えて降水量もなく筑後川河川水の流入も小さいときに当たり、このときの流れは基本的に潮汐起源のものと考えられる。Fig. 8は、その時の調和解析結果を鉛直分布として描いたものであるが、左図がAquadoppによる海底から0.4m

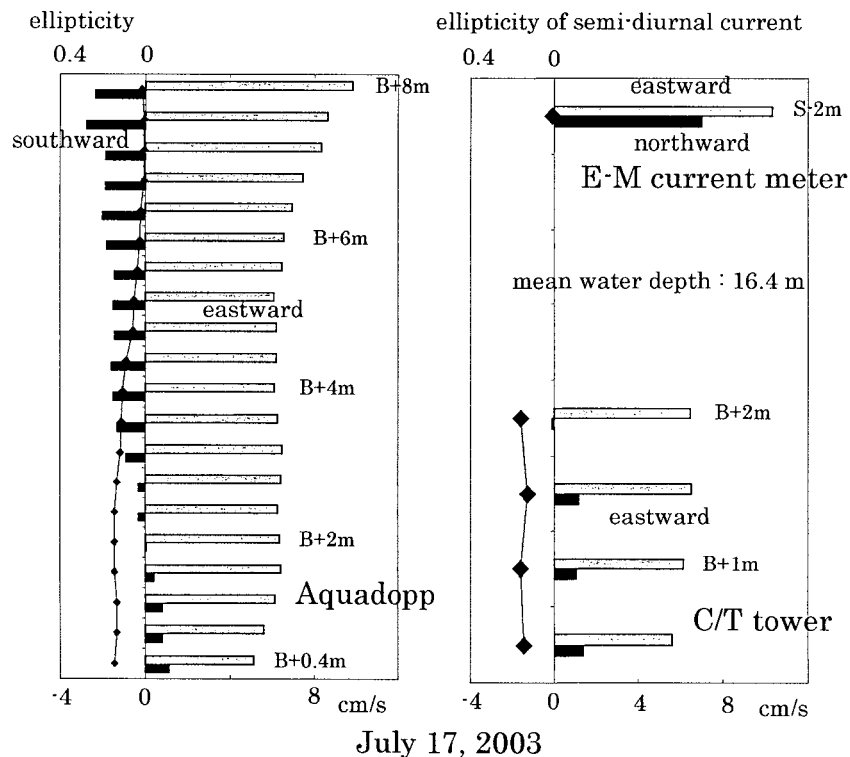


Fig. 8. Vertical profiles of the east-west (thin bar) and the north-south (thick bar) components of diurnal averaged residual currents on July 17. The marks \blacklozenge indicate the ellipticity (the ratio of the minor to the major components) of M2 constituent. The left shows those obtained from Aquadopp and the right those from an electro-magnetic current meter and C/T tower.

毎に8mまでのもので、右図が、C/Tタワーによる海底上0.5m, 1m, 1.5m, 2mのものと電磁流速計による海面下2mのものである。◆印はM2潮周期成分の潮流楕円の楕円率で、棒グラフは残差成分の東西方向成分(淡い色)と南北方向成分(濃い色)である。なお、この方向については、潮流(摩擦の影響が少ない海面下2mのもの)の15日間調和解析結果によるM2潮周期成分の主軸の方向が、有明海の縦軸の方向にほぼ一致して、約 -23° であったことから、実際の東西南北を -23° 回転させた方向に、それぞれの成分を投影している。従って、南流と北流は、それぞれ、この海域からの流出と流入を表すものと考えることができる。Aquadoppによる潮流データは、実際には海底から12mまで測定しているが、10mよりも高い水深のデータは、海面からの音波の反射によってノイズを含んで誤差もあるために、精度を考慮して海底上8mまで(全水深の半分程度)のデータを採用している。また、海面下4mにおいても電磁流速計を取り付けていたが、強い潮流によって流速計の傾きが大きかったようで、部分的に明らかな異常値が認められたためにここでは省いた。

音響ドップラー効果を利用した流速計はRDインストルメント社製のADCPがよく知られているが、通常の電磁流速計などによるデータと比較すると、必ずしも一致しているとは言い難い⁹⁾。2002年9月の観測²⁾でも電磁流速計

と共にADCPを使用した⁹⁾が、調和解析結果は多少異なっていた。この度の観測で使用したAquadoppのデータは、海底上2mまではC/Tタワーのものと比較することができるが、Fig. 8を見てもほとんど同じような値を示していると言える。

この地点における、潮汐の影響のみによると思われる流れの特徴は、残差流は全水深的に東向きに10cm/s以下の流れになっていると見てとれる。細かく見ると、海底近くでは徐々に北向きの流れが認められ、海底に向かって残差流が左方向に偏向している様子が伺える。M2潮周期成分については、潮流楕円の楕円率(離心率とは異なり、ここでは楕円の短軸と長軸の比とする。従って、0の時は直線で、1の時は円になる。)は全水深的に小さいもの(直線的に振動)、海底に向かって徐々に大きくなっている(潮流ベクトルのホドグラフが楕円を形成)ことがわかる。このような残差流は定常流の海底Ekman境界層の特性を再現するものであり、M2潮周期の潮流楕円の分布は、地球自転効果影響下のStokes境界層の性質を表している¹⁰⁾。

Fig. 9は、筑後川の日平均流量が7月で最大になった12日の翌日の13日におけるFig. 8と同様の図である。Fig. 4の(a)は12日の14時のものではあるが、低塩分水は表層1m程度のところにあり、海面下2mの残差流は南南西(-23° の補正を考慮するとほぼ南向き)に流れており、表層

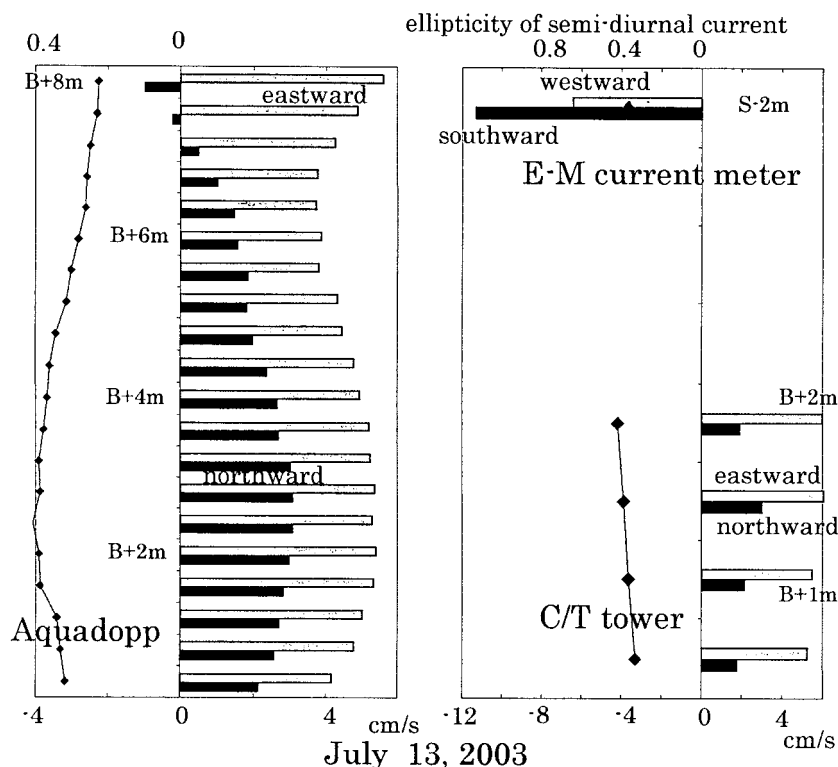


Fig. 9. Vertical profiles of current component on July 13.

の流入河川水に引きずられた流れであることが推測される。下層の方の残差流は北東から北北東に向かっており、このときには筑後川河川水の流入によってこの海域に鉛直循環流(エスチャリ循環)が形成されていると考えられる。

また、M2潮流の楕円率は全水深で大きくなって、潮流の向きが安定することなく揺らいでいる様子が推測される。

Fig. 5 (a)の係留系設置後の12日14時のCTD測定によると、表層の塩分は2 psuで、水深1mから1.5mのところに極め

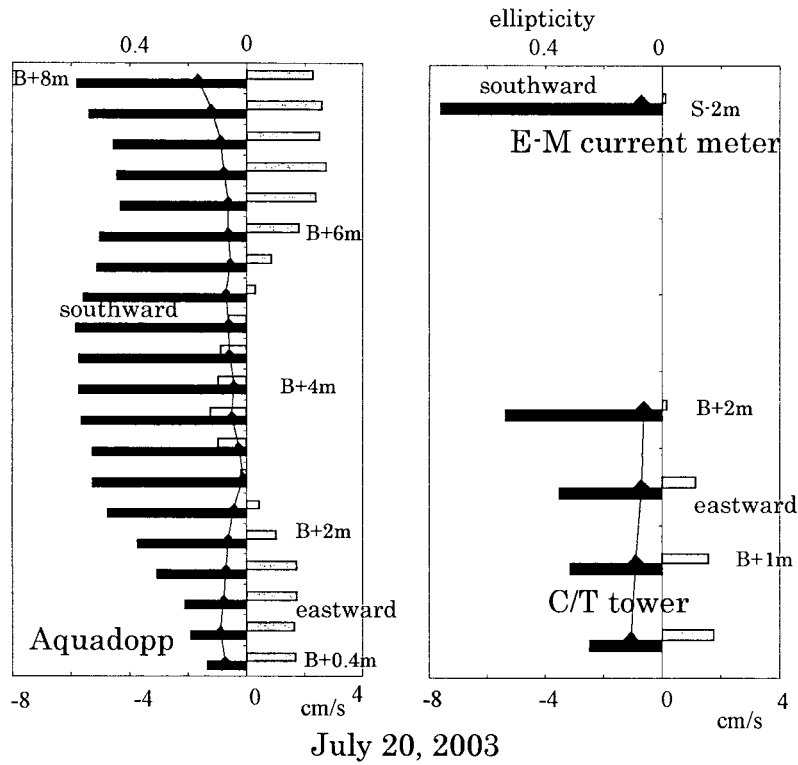


Fig. 10. Vertical profiles of current component on July 20.

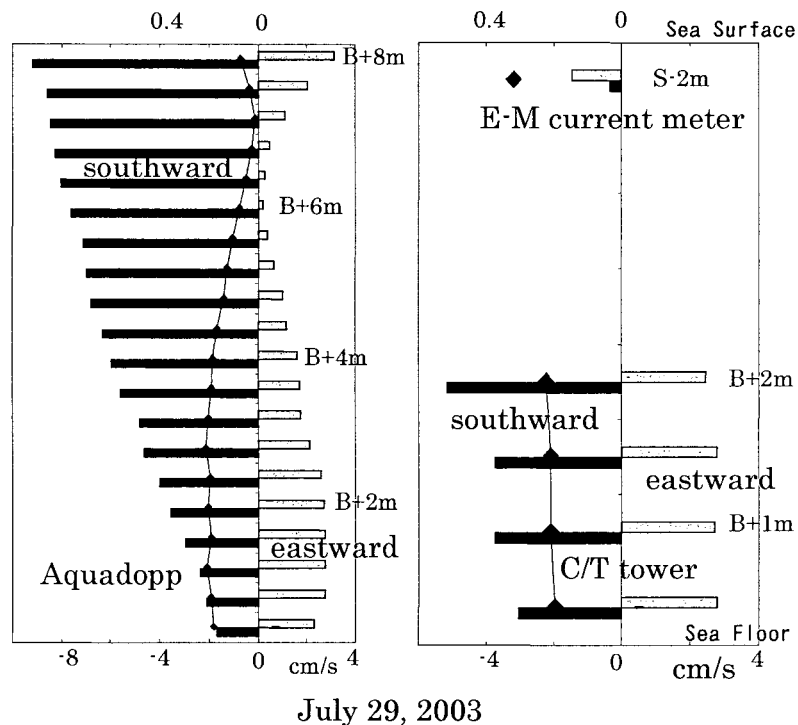


Fig. 11. Vertical profiles of current component on July 29.

で強い塩分躍層が形成され、海底近傍では29.6 psuであったことから弱混合タイプ（塩水楔タイプ）のエスチャリ循環の形成を裏付けていると言える。

Fig.10は、筑後川の流量はそれほど多くはないが降水量が多いときの7月20日における同様の図である。また、Fig.11は、筑後川の流量はさらに小さく降水量が多いときの29日の図である。これら両図は、淡水が干潟の上に供給されている場合と考えることができるが、このときの残差流は、鉛直循環流を形成することなく全水深で沖合に向かう傾向にある。このようなプロセスはこれまでに報告されたことはないが、干潟形成海域に見られる特徴的な現象ではないかと考えている。

4 考察とまとめ

4.1 副振動と有明海の潮汐について

潮位については、主要4分潮であるO1, K1, M2, S2が明瞭に現れているが、小さいながらも8時間22分(8.37時間)のところにもピークが認められた。この周期の変動は潮流にも認められるが、次のような理由から、これは有明海の固有振動周期で、副振動が誘発されたことによって現れたのではないかと考える。

一般に、地形が単調な内湾の平均水深を h 、湾長を l 、重力加速度を g とすると、第1モードの副振動周期 T は次のように与えられる。

$$T = \frac{4l}{\sqrt{gh}} \quad (1)$$

有明海を想定して、平均水深を15mとし有効長を90kmと仮定して、これらの値をこの式に代入すると、周期 T は8時間10分となる。振り子などの振動現象の解析からも推測されることではあるが、風の吹き寄せによって湾内に海水のセットアップが引き起こされたとき、その風が突然止むと、引き上げられた振り子の分銅を静かに手放したときのように、その湾の固有振動、つまり、副振動が発生することが考えられる。調和解析で得られた8時間22分のピークはこのような有明海の副振動であると推測される。しかしながら、このような振動の場合には、常に生じているわけではなく、さらに、生じる時期も規則的というわけにもいかないもので、位相が整って調和解析結果に常に現れると言うこともないのではないかとと思われる。前節でも紹介した24時間50分の調和解析結果においても、8時間22分の周期に近い8時間17分のピークを取り出すことができる

が、この周期にも常に明瞭なピークが見られており、このことから考えても、風などのような気象要因によって有明海の副振動が生成されているとは考えにくい。流体の振動現象において、運動方程式からも推測できるように、非線形効果は倍潮成分や複合潮成分を誘発する可能性がある。広い干潟が発達して遠浅の海岸を形成する有明海においては、非線形効果が発生しやすい環境にあり、その効果によって副振動が現れるのではないかと考えている。

内湾の潮汐の増幅率については、振動流が形成するストークス境界層の厚さよりも水深が大きい単調な地形の内湾においては、副振動周期がこの程度の場合には、M2潮周期の潮汐は湾奥で2倍程度に増幅することが解析的に示されている¹⁾。有明海の湾口部は太平洋岸などに比べてM2潮汐の振幅は大きく、このようなことから、8時間22分周期のピークは有明海の第1モードの副振動周期で、国内で最大と言われる有明海の潮差を生みだしているものと考えられる。副振動発生メカニズムや内湾の増幅率については、さらに詳細を調べるために、他の内湾も含めて解析を進めている。

4.2 残差流の鉛直分布について

25時間の調和解析によると、残差流はかなり変動的であることがわかる。残差流は海中の物質を一方方向に運ぶことから、その様子をそれぞれの海域において明らかにすることは非常に重要で、有明海の研究者もそれぞれの観測データに基づいて残差流のパターンを示しているが、Fig.8からFig.11の図を見ても残差流のパターンは変動的である。しばしば行われる25時間観測結果から、その海域に恒常的に生成される潮汐残差流として記述することは慎重な注意が必要であることを示している。

Fig.9の残差流は、大量の筑後川河川水の流入に伴う、鉛直循環を形成する場合である。一方、Fig.10とFig.11は河川流入水の量は少ないが、降雨によって干潟に淡水が供給されたような場合で、このときには鉛直循環流は形成されず全水深的に残差流が湾奥から流出するような傾向を示している。そのメカニズムは、現段階では次のようにものと推測している。

干潟に降った淡水は、水深が浅いことから、底面摩擦は相対的に大きくなって流速は小さく、位置エネルギーを伝達する $\frac{1}{2}\rho g h^2$ （記号は式(2)と同様）も非常に小さいために、干潟の上に留まりやすく、結果的に干潟から沖合に向かって海面傾斜が維持されるのではないかと、また、海底近傍で沖合に向かう残差成分はこのような海面傾斜によって

バロトロピックな現象として引き起こされるものではないかと考えられる。Fig. 4の海底上2mにおける主要4分潮を取り除いた残差流は、降水量が多かった時に南向き（流出方向）の流れを生成する傾向にあることをよく表している。この現象は、通常の密度分布に伴うバロクリニックな鉛直循環流と異なり、底層の残差流を干潟から押し出すように流れ、干潟を広げる効果を持つものとして遠浅の干潟を形成維持する上で重要な役割を果たすものと考えられる。現段階では仮説として推測の域を出ないが、このような現象はマングローブ周辺海域でも想定され、沿岸海洋過程の重要な物理現象の一つになるものと考えている。

4.3 DOの変動について

先にも記したように、底層のDOの変動はM2潮成分が顕著で、その位相は潮汐に近く、潮汐に連動して変動する成分が大きいと言える。このことは、底層のDOは潮流の主軸方向に分布していると推測されるが、Fig. 2に示す前半の大潮時のDOの上昇は、Fig. 9のような鉛直循環流に伴う底層の北上する残差流に引き起こされていると考えられる。一方、後半の大潮時にはDOが減少しているが、これはFig. 11のように降雨に伴う底層で流出する残差流に引き起こされているものと推測される。このような傾向は、Fig. 10の20日過ぎや25日過ぎにも、わずかではあるがDOの低下として認められる。観測期間の前になるが、7月7日、8日、11日も降水量が多くなっており、観測開始日の12日にDOが低下していたことは、このような残差流の存在を裏付けていると思われる。なお、底層のDOは、底泥の $Md\phi$ の複雑な分布や植物プランクトンなどとも関連しており¹⁴、その変動のプロセスは一側面からの説明では割り切れないが、上記の仮説として挙げた沿岸海洋過程はDOの変動も裏付けており、当海域のDO変動に関わる物理的な過程の一つと考える。

4.4 濁度の変動について

濁度の15日間調和解析結果を見ると、強いM2潮流の中にも関わらず、M2潮周期成分は全水深でそれほど大きくはなく、M4潮周期成分が海底に近いほど大きい傾向が認められる。さらに平均値も海底に近いほど大きいということから判断すると、先にも記したように、この海域では潮流による再懸濁が非常に盛んであると推測される。

K1潮周期（地球の自転周期に相当し23時間56分）成分も海底近傍でM4潮周期成分について大きいと言えるが、この周期はほとんど24時間で、位相をみると午後2時から

3時のところにピークが現れているといえる。これは潮汐のK1潮成分に伴う変動というよりも、海水温や日射に関わる変動と考えられ、それらに伴う生物活動などの日変動に引き起こされたものと考えられる。

M2潮周期成分については、かなりばらついているが、大まかに見ると位相は潮流のM2潮成分に近いと見こともできる。このことは、M4潮周期で変動する濁度が北流の時の方が大きくなっていることを暗示しているが、下げ潮よりも上げ潮の方で再懸濁が大きくなるという河口域の特徴¹⁵を再現していると見ることができる。このことは、海底近傍での流れのシアアが下げ潮時よりも上げ潮時に強くなることによるものであるが、これに関しては、さらに詳細にデータを解析し検討する必要がある。

海底近傍の濁度については副振動周期と思われる変動もかなり明瞭に認められる。潮汐や潮流では、副振動周期はM2潮成分などに比べてそれほど大きいとは言えないが、濁度については相対的に非常に大きい変動を見せている。これについては、現在他のデータとも比較するなど考察中である。

この度の観測では、わずか1測点ではあるが、大潮や小潮、さらには河川水や降雨などによる流入淡水量の変動など、外的要因に引き起こされる、潮流、残差流、溶存酸素、濁度などの変動に関わる事実がいくつか示された。本報告は、この観測から推測される新たな沿岸海洋過程の紹介にとどめたが、本文でも記したように、この報告に基づいて現在はそれぞれの現象について詳細な解析を進めている。今後さらに新たな観測も実施し、有明海の環境変動に関わる物理的なプロセスを順次整理していきたいと考えている。

最後に、本研究は文科省科研費補助金（基盤研究(B)（2）15360268、研究代表者：九州大学 松永信博）の助成を受けて行われたもので、関係各位に記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 小松利光ら：有明プロジェクト中間報告(その1)、有明プロジェクト研究チーム、161 pp. (2002)
- 2) 阿部 淳, 松永信博, 児玉真史, 徳永貴久, 安田秀一：海岸工学論文集, 50, 996-970 (2003)
- 3) 灘岡和夫, 花田 岳：海岸工学論文集, 49, 401-405

- (2002)
- 4) 田中昌宏, 稲垣 聡, 山木克則: 海岸工学論文集, 49, 406-410 (2002)
 - 5) 江刺洋司: 有明海はなぜ荒廃したのか, 269 pp. (2003)
 - 6) 横山勝英, 宇野誠高, 森下和志, 河野史郎: 海岸工学論文集, 49, 1486-1490 (2002)
 - 7) Yasuda H., Y. Takasugi and T. Higo: Journal of Coastal Research, special issue, 25, 31-40 (1997)
 - 8) Senjyu T., H. Yasuda, S. Sugihara and M. Kamizono: J. Oceanogr., 57, 15-27 (2001)
 - 9) 高杉由夫, 安田秀一, 肥後竹彦, 埜口英昭: 中国工業技術研究所報告, 47, 1-14 (1996)
 - 10) Yasuda H.: J. Oceanogr. Soc. Japan, 43-5, 309-318 (1988)
 - 11) Yasuda H.: J. Oceanogr. Soc. Japan, 35-6, 241-255 (1980)
 - 12) 陶山典子, 輿石裕一, 須田有輔, 村井武四: 水産大学校研究報告, 51(4), 105-114 (2003)
 - 13) 八木 宏, 大森義暢, 高橋亜依: 海岸工学論文集, 50, 461-465 (2003)