

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—

岸本充史¹, 安田秀一^{1†}, 鬼塚 剛¹, 高島創太郎², 湯浅豊年³

Variations of Dissolved Oxygen and Related Marine Phenomena in Buzen Sea, the Suonada Sound : analytical results of fortnight field experiments in the late summer, 2005

Atsushi Kishimoto¹, Hideichi Yasuda^{1†}, Goh Onitsuka¹,
Sotarou Takashima² and Toyotoshi Yuasa³

Field experiments were carried out in the southwest part of the Suonada sound in the late summer, 2005 to reveal the process and the mechanism of the dissolved oxygen (DO) variation in this sea. This study shows that DO near the basin floor was changed widely by the influence of the residual current, the atmospheric temperature, the thermocline and so on though many of researchers reported that DO variations resulted from resuspension of floor mud. In other words, DO variation is not concerned with the vertical phenomena but with the horizontal advection. It is suggested from the further analysis that the residual current given by elimination of the four main tidal components was varied by the wind during this experiment and the behavior of the thermocline was concerned with the wind and the atmospheric temperature.

Key word : DO variation, fortnight field experiment, drift current, coastal waters
ASFA : 02142, 02170, 01521, 2090

はじめに

近年、瀬戸内海西部に位置する周防灘豊前海では、養殖魚介類などに貧酸素水塊による斃死被害が頻発している¹⁾。この周防灘豊前海における貧酸素水塊の形成に関わる溶存酸素(DO)の変動要因として、底泥の再懸濁による底層水中の酸素消費²⁾や河川水の流入³⁾などの影響が報告されている。Senjyu et al.²⁾は大潮期の25時間に注目して溶存酸素に関わる潮流・濁度・水温・塩分などの環境要素の詳細な観測を実施し、DOの変動に関しては、潮流にともなう底層の再懸濁が重要な役割を果たしていることを示した。周防灘は福岡県側と山口県側では底質が大きく異なり、特に福岡県側の豊前海といわれる海域では、係留系で

使用した錆びに覆われた鉄のアンカーが、25時間観測の後にその錆がほとんどなくなるほどの還元的な泥が分布しており⁴⁾、このような底泥の再懸濁に関心が払われている。これまで周防灘豊前海では、25時間連続観測²⁾や1週間毎の観測^{5)・6)}は行われているが、潮流以外の環境要素にも注目した大潮・小潮を含む総合的な長期間の連続観測はほとんど行われていない。沿岸海域においては、大潮から小潮期にかけて潮流は大きく変動しており、大潮・小潮を含んだ15日間連続観測は、沿岸域のDO変動過程の解明や貧酸素水塊形成の予測をする上で意義があると考えられる。

周防灘は船舶の運航が頻繁で、多くの小型漁船やレジャーボートも航路以外の海面を昼夜を問わず縦横に往航している。そのため、この海域で係留系を設置して15日間

2007年4月16日受付, Received April 16, 2007.

- 1 水産大学校 水産情報経営学科 情報システム数理講座 (Department of Fisheries Information and Management, National Fisheries University)
 - 2 株式会社 いであ (IDEA Inc.)
 - 3 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

の観測を行うことは困難であったが、この度、周辺の漁業者や第七管区海上保安本部、国土交通省荇田港湾事務所などの理解と協力を得て、次節で示すような係留系設置による15日間連続観測を実施することができた。本報では、この観測データの解析によって新たに見出されたDO変動に関わる物理過程を中心とした海洋現象について報告する。

観測内容

15日間の係留定点観測は、Fig. 1に示す周防灘豊前海の

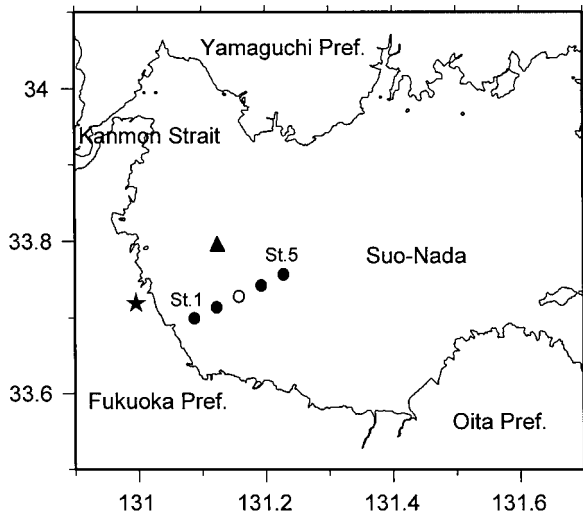


Fig. 1. Locations of experimental stations in the Suonada sound. A mark ○ indicates the stationary station for mooring system and CTD, and ● for CTD. Marks ▲ and ★ are wave observing station for wind and AMEDAS in Yukuhashi for atmospheric temperature.

福岡県行橋市沖定点（以下St. 3；図中の○印）において、2005年8月17日から9月2日の期間で行われた。また気象データはFig. 1に示す国交省荇田港湾事務所波浪観測塔（図中の▲印）で海面より平均10m上で観測された風向・風速、行橋気象観測所（アメダス；図中の★印）で観測された気温のデータを使用した。

今回使用した係留系の概要をFig. 2に示す。観測においては、シア流速計（アレック電子社製ACM16M-4CH, 以下C/Tタワー）をSt. 3（○の位置）に設置し、海底上0.5m, 1.0m, 1.5m, 2.0mの流向、流速、濁度、及び、海底上2.0mの水温、塩分、水圧（潮位）を5分毎に測定した。また同地点の海底上1.0mにサーミスター付きのDO計を設置した。さらに潮流の鉛直分布を測定するためAquadop（沿岸用ADCP）を海底に設置し、海底から0.4m毎に30層の潮流と濁度、潮位変動を観測した。電磁流速計（アレック電子社製, ACM 8 M）はSt. 3の海面下1.0m, 3.0mに係留し、5分毎の流向、流速および水温を測定した。それぞれの装置には水温センサーがついているが、さらに保留ロープに水温計をとりつけ海底上2.7m, 3.5m, 4.2mにおいても水温の測定をし、鉛直分布の時間変動がわかるようにした。

観測期間中の周辺の海洋構造を知るために、多項目水質計クロロテック（アレック電子社製, MODEL ACL1182-PDK）を用いて8月17日（設置日）、8月25日（保守点検日）、9月2日（回収日）の合計3回にわたって、St. 1からSt. 5（図中の○印および●印）の5測点において水温、塩分、溶存酸素、濁度などの横断面内の分布を測定した。

なお、濁度の値は赤外後方散乱方式でカオリンの値に換

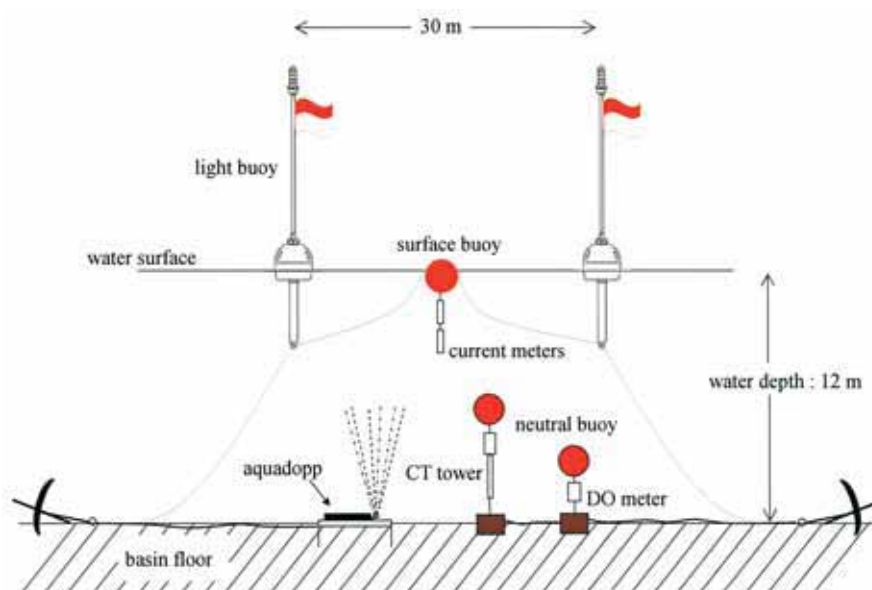


Fig. 2. Illustration of mooring system at the stationary station.

算したものであり、DOは測定前後に100%海水で検定はしているものの、ここでは絶対値を高精度に測定することよりも連続的に変動する様子をとらえることを目的としたもので、これらの個々の数値を他の観測データと定量的に比較するには無理があるかもしれない。

観測結果とそのデータ解析

データ解析に際しては、まず、観測で得られた5分毎のデータから1時間ごとのデータを作成した。このような処理においては、通常、5分毎のデータを1時間で平均して1時間毎のデータを作成することが多いが、その場合には、測定データに異常値が現れたときに影響をうけやすい

ことから、本研究では1時間毎の中央値を基礎データとして作図や解析に使用した。

Fig. 3にSt. 3における観測期間中の水温鉛直分布の時間変動を示す。図中の上部の波状の曲線は、潮位の時間変動を表している。観測期間の前半の(a)に示す大潮期(8月20日から8月22日)においては、表層では夏季の瀬戸内海でよく見られる28.5℃以上の高温水が見られる。一方、底層では23.0℃以下の低温となっており、海底に近いところでシャープな水温躍層が形成されそれが周期的に上下していることがわかる。8月24日以降は大潮期に比べ表層の水温が低下し、底層では水温が上昇して躍層が弱くなる傾向にある。小潮期(8月27日から8月29日)においては表層と底層で水温差が小さくなって成層が弱まり、大潮期に

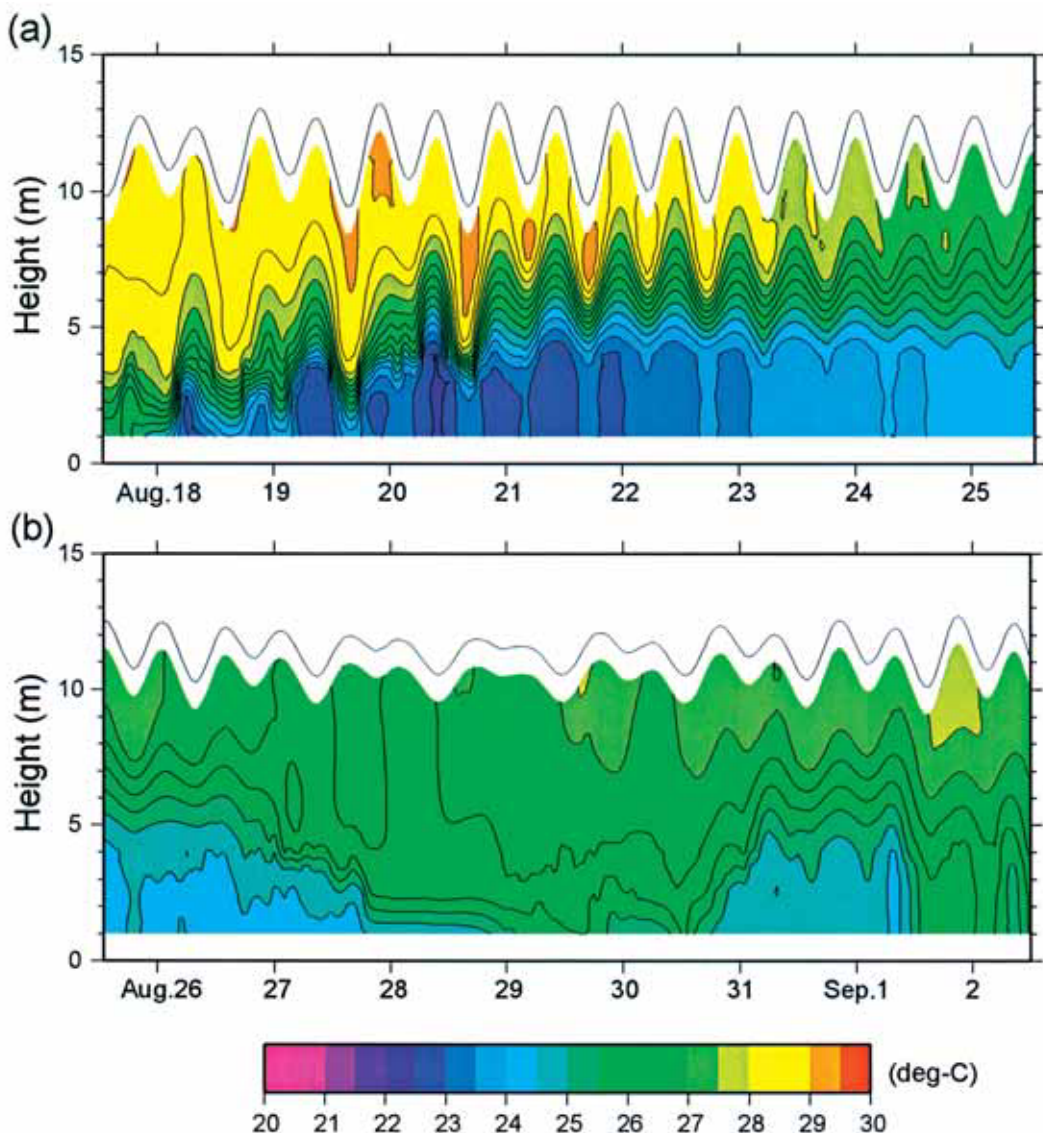


Fig. 3. Variation with time of vertical profile of water temperature at the stationary station. (a) the first half and (b) the latter half of this experiment.

比べて一見矛盾を示すような水温分布を形成している。

小潮期に成層が弱くなった原因を探るために、観測点に近いアメダス（行橋）の気温を調べた。Fig. 4に観測期間中の気温と水温（海面下1.0m）の変動を時系列で示す。観測期間の後半には、夜中から早朝にかけて気温が表層の水温よりもかなり低くなる時もあり、それに伴うように表層水温は徐々に低下しているように見える。この海域が浅くて広い海域であることから、気温の低下によって表層と底層の海水の密度差が小さくなり成層が弱まったと考えることができるが、これに関しては、今後沿岸海域の物理過程として定量的な検討をする必要があると考えている。ちなみに、8月の後半に周防灘の海岸周辺で20℃にまで低下することはまれで、地元の漁業者によると例年になく冷夏であるとのことであった。

次に8月17日、8月25日、9月2日のSt. 1からSt. 5における水温の鉛直断面図をFig. 5に示す。8月17日ではSt. 1とSt. 2で表層に29.0℃以上の海水が見られる。St. 4とSt. 5の底層では23.0℃以下の外洋水と見られる低温水が存在している。8月25日では全観測地点で成層が弱まり表層と底層で水温差が少なくなっている。9月2日ではSt. 1とSt. 2の表層で水温が8月25日に比べ上昇している。このように空間的にも短期間で大きく変動していることがわかった。

水温と同様にDOの鉛直断面図をFig. 6に示す。それぞれ8月17日、8月25日、9月2日のもので、8月17日は全体的に5.5mg/l以上あり貧酸素水塊は見られないが、St. 4とSt. 5の底層は4.0mg/l以下でほかの観測点と比べて低い。8月25日は表層では5.5mg/l以上あるものの底層で

は低い。特にSt. 1の底層では2.0mg/l以下の貧酸素水塊が存在している。9月2日はSt. 1で過飽和と思われる値が見られる。一方St. 5の底層では3.0mg/l以下の低酸素の水塊が認められる。

Senjyu et al.²⁾はDOの変動に関しては、潮流にとまなう底泥の再懸濁が重要な役割を果たしているとしており、ここでもDOと濁度の変動の関係を調べた。Fig. 7にSt. 3における海底上1.0mのDOと濁度の変動を時系列で示す。大潮期に濁度が大きく変動しているにも関わらず、DOは大きな変動もなく4.5mg/lから3.5mg/lの間で維持されている。この値は飽和濃度で50%程度よりも小さいといえる。一方、小潮期では濁度が低くなり、躍層が崩れたにも関わらずDOは4.5mg/lから1.5mg/l以下まで徐々に低下している。8月29日と8月30日には一時的にDOが上昇し、再び低下している。その後8月30日以降、DOは上昇を見せる。

沿岸海域の濁度は一般的に海底に近い程値が高くなる傾向にあるが、その変動についてSenjyu et al.²⁾は大潮期の25時間のデータに基づいて検討し、潮流の強さに依存していることを示した。潮流は大潮や小潮などで大きく変化していることから、本研究では大潮期から小潮期までを含む15日間以上の連続観測を行っている。Fig. 8の(a)と(b)のそれぞれに、この期間中の大潮期と小潮期における海底上1mの濁度および流速の時間変動を示す。Fig. 8(a)によると、大潮期の濁度の変動は流速の大きさに対応しているようにみえるが、Fig. 8(b)の小潮期では、大潮期のように濁度と流速が関連しているようには見えない。濁度と流速の関係を定量的に見るために、それぞれの期間において

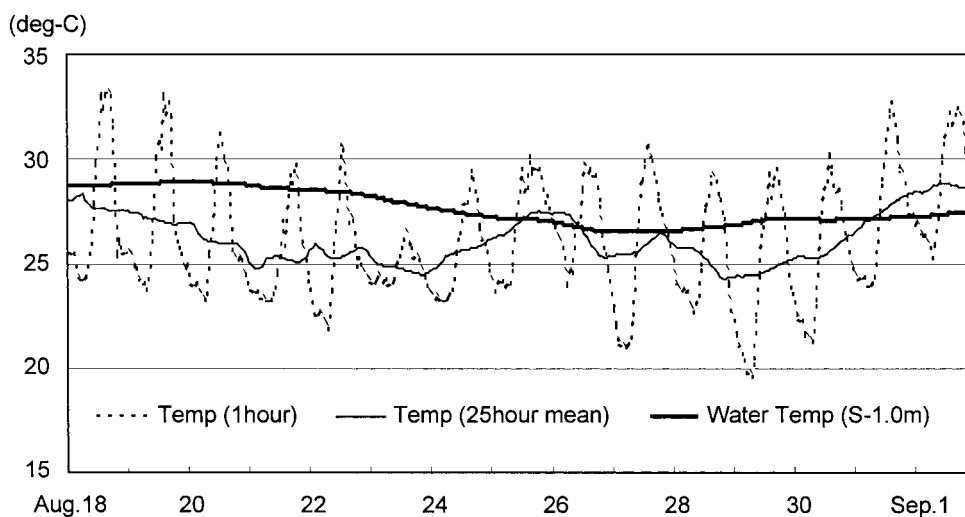


Fig. 4. Variations with time of temperature in the atmosphere and the sea water.

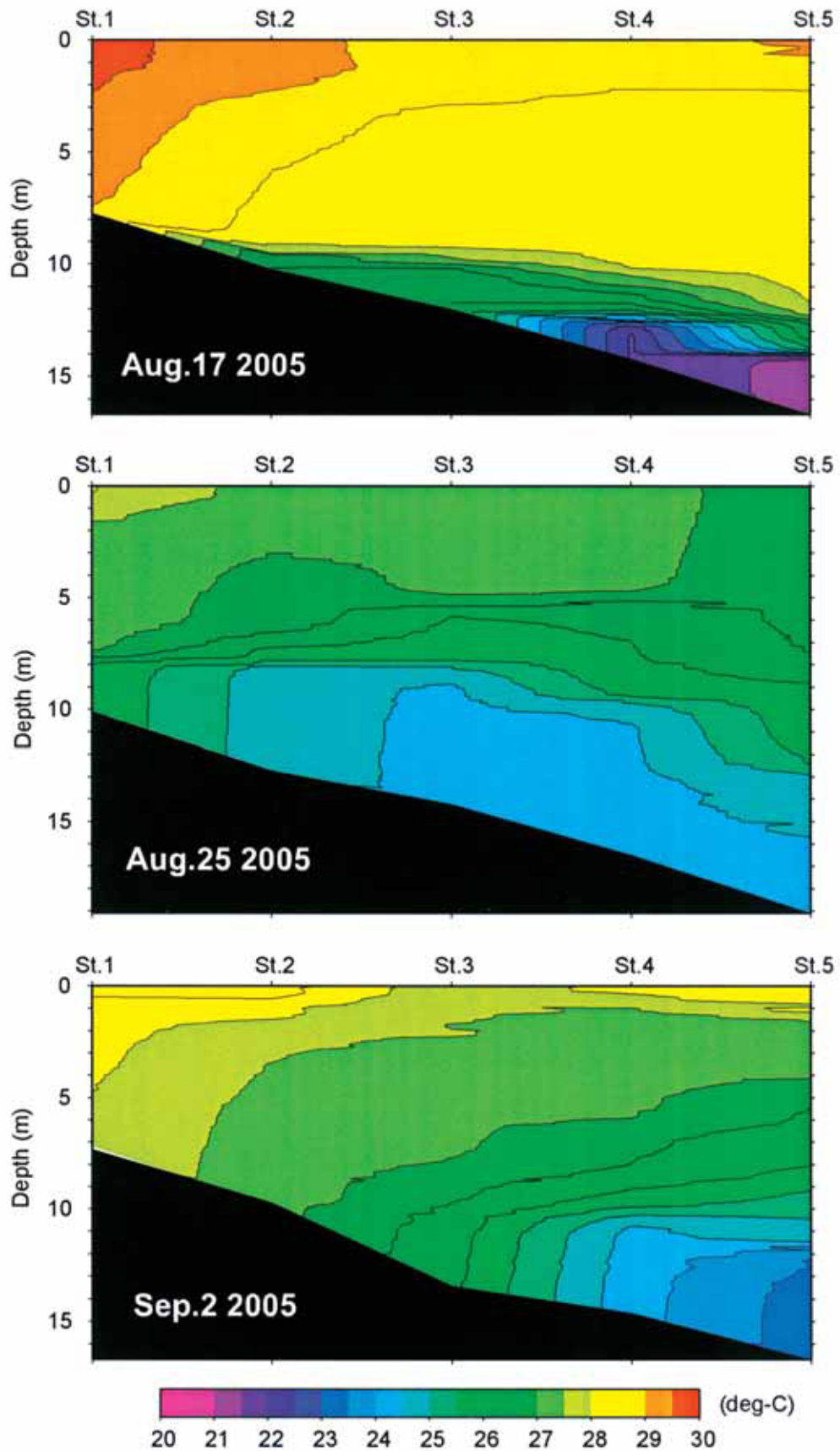


Fig. 5 . Lateral sections of water temperature from St. 1 to St. 5 .

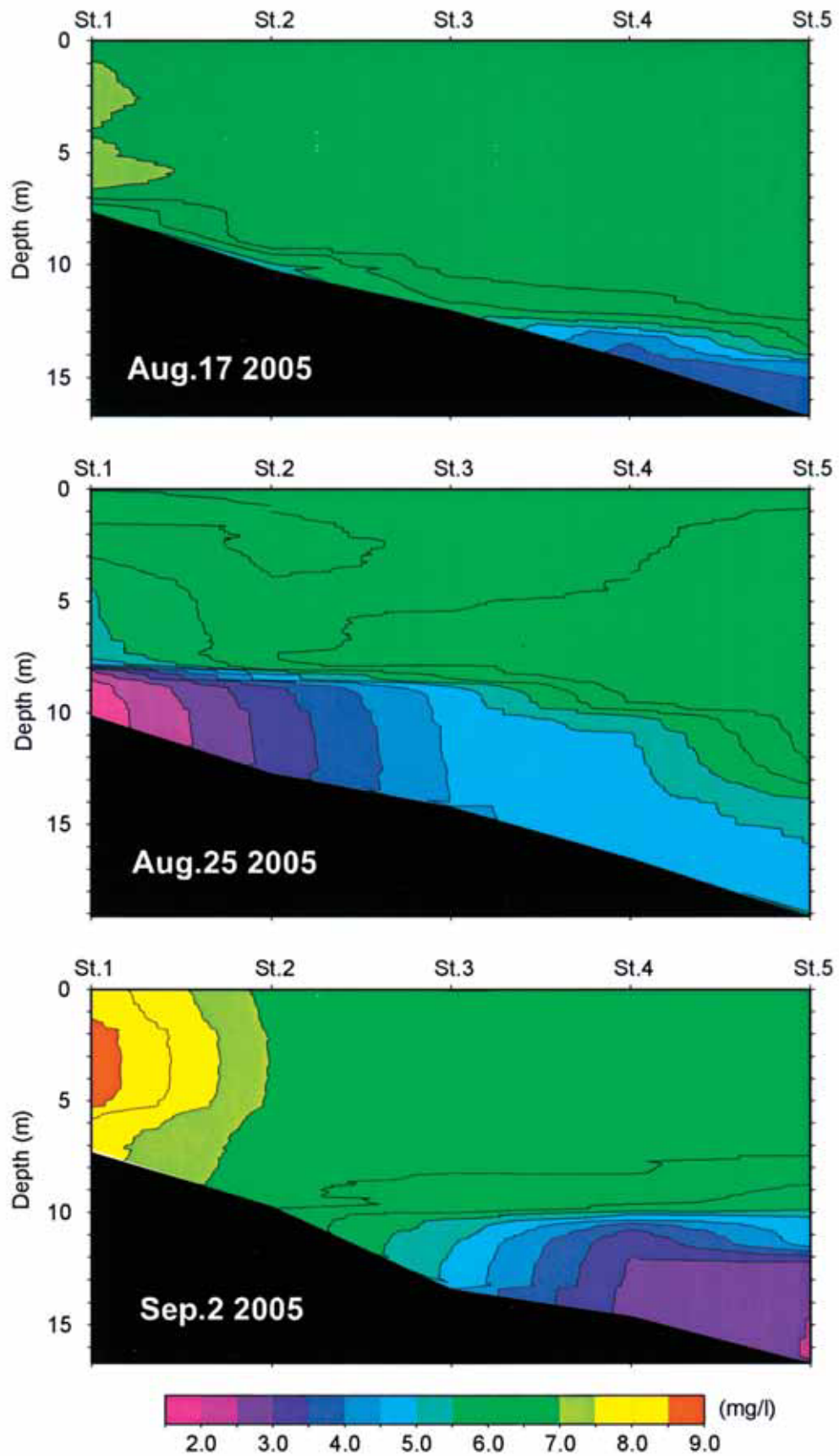


Fig. 6. Lateral sections of DO.

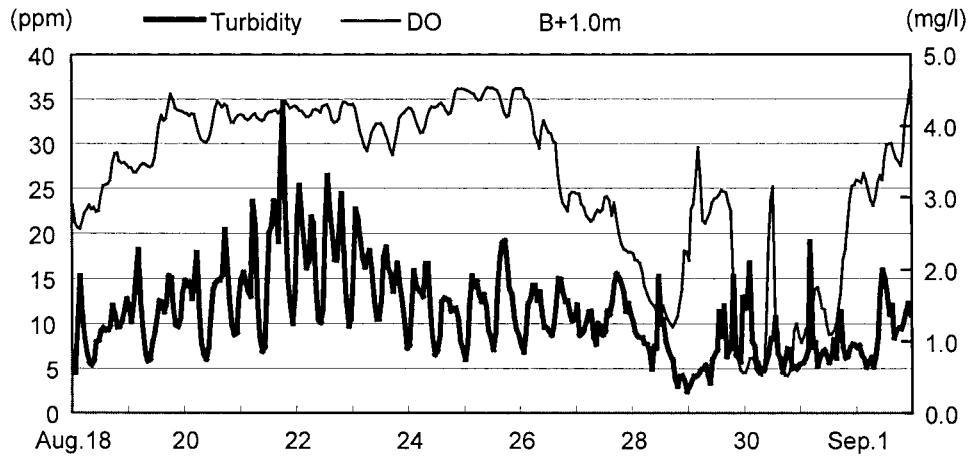


Fig. 7. Variations with time of turbidity and DO at the level of one meter from the basin floor.

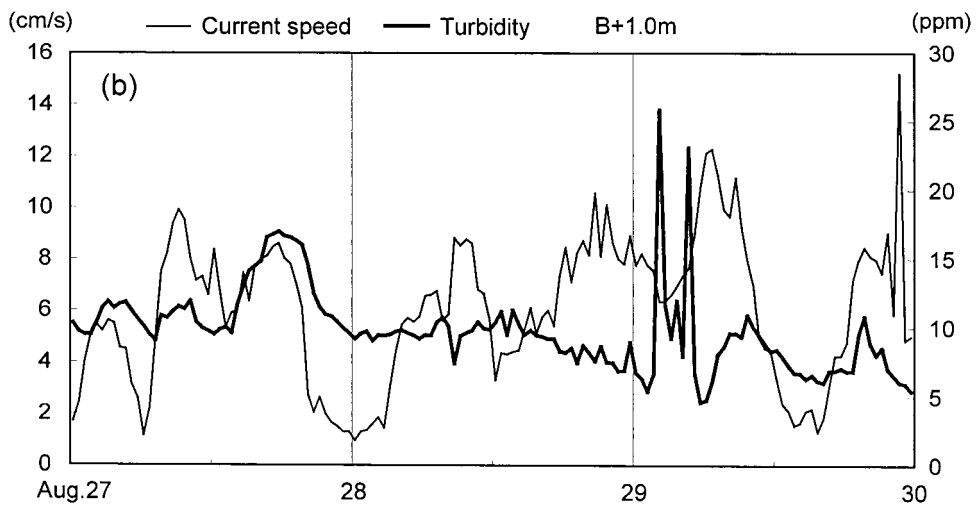
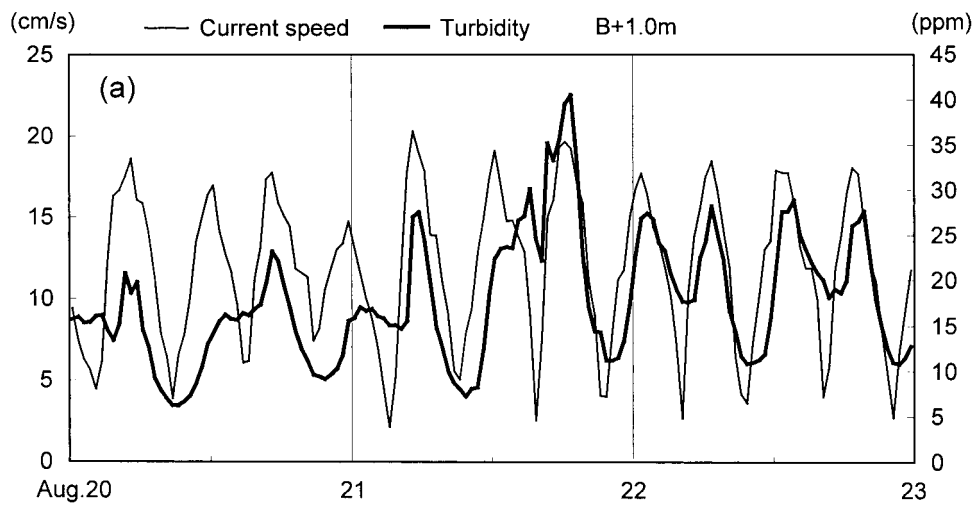


Fig. 8. Variations with time of current speed and turbidity near the floor. (a) spring tide and (b) neap tide.

濁度と流速値の調和解析を行った。その結果をTable 1とTable 2に示す。

Table 1は大潮期（8月20日0時から75時間）の場合の解析結果で、(a)には海底上1mの濁度と流速のM2周期成分とM4潮周期成分を示した。なお、ここで示すM2周期成分とM4周期成分は、振動周期をM2潮とM4潮にし

たもので、潮汐成分を表したものではない。さて、これを見ると、流速についてはM4潮周期の方が6倍近く大きくなって、潮流自身は半日周期が卓越していることを暗に示しているが、濁度はM2周期成分とM4周期成分が同程度に現れている。このことは、濁度が潮流による移流と底からの再懸濁の両方の影響で変動していると考えることがで

Table 1. Harmonic constants in the period of the spring tide of (a) current speed and turbidity at the level of one meter from the water floor and (b) turbidity at each level.

(a)

	M2 component		M4 component	
	amplitude	phase lag	amplitude	phase lag
Current	1.1 cm/s	20.8°	6.4 cm/s	299.9°
Turbidity	4.16 ppm	81.1°	4.28 ppm	320.0°

(b)

	Residue	M2 component		M4 component	
	amplitude	amplitude	phase lag	amplitude	phase lag
B+2 m	13.46 ppm	3.11 ppm	79.9°	3.59 ppm	332.4°
B+1.5 m	13.99	3.24	76.9	3.69	327.8
B+1 m	16.32	4.16	81.1	4.28	320.0
B+0.5 m	18.26	4.75	85.5	4.84	314.1

Table 2. Harmonic constants in the period of the neap tide of (a) current speed and turbidity at the level of one meter from the water floor and (b) turbidity at each level.

(a)

	M2 component		M4 component	
	amplitude	phase lag	amplitude	phase lag
Current	2.2 cm/s	205.8°	0.5 cm/s	251.6°
Turbidity	0.46 ppm	107.5°	0.26 ppm	329.4°

(b)

	Residue	M2 component		M4 component	
	amplitude	amplitude	phase lag	amplitude	phase lag
B+2 m	4.33 ppm	0.74 ppm	78.1°	0.41 ppm	62.0°
B+1.5 m	5.35	1.08	109.5	0.21	327.5
B+1 m	7.86	0.46	107.5	0.26	329.4
B+0.5 m	9.42	1.01	166.8	0.06	66.0

きる。M4周期成分に関しては、濁度の位相が流れの強さに遅れていることから潮流が強くなったときに再懸濁が生じることを暗に示している。また、(b)には、海底上4層における濁度の平均値と、M2周期とM4周期のそれぞれの振幅と位相遅れを示した。海底から高くなるに従って、平均値が小さくなっていることと、M4周期の振幅も小さくなり位相が遅れるという傾向は再懸濁の特徴を表しているが、M2周期に関しては位相が上の方で早いということは、潮流の速度分布を考慮すると、潮流の移流に影響を受けていると見なしてよいのではないかと考える。

一方、小潮期においては、濁度の平均的な鉛直分布は海底近くで高く、海底から離れるに従って減少しているが、潮汐周期の変動成分は非常に小さく、潮流とは別の要因で濁度分布が形成されていると考えられる。Fig. 8 (b)をみると濁度は時間的に変動はしているが、この原因については風などの外的要因も考えられるものの、ここでは言及することはできない。

底層の濁度に関わる海底近傍の潮流は、移流や再懸濁に関わって沿岸では非常に重要であるが、Senjyu et al.らも示したように、残差流に相当する長周期の流れもこの海域に影響を与えているようである。そこで、次に海底付近の長周期の流れについて調べた。ここでは、1時間毎の潮流データから、調和解析によってM2, S2, K1, O1の主要4分潮を求め、それを取り除いて残渣データを作り、潮汐成分以外のものについて検討した。Fig. 9は、各水深の残渣データに24時間の移動平均をかけてstick diagramにして表したものである。期間は8月18日深夜0時から9月2日深夜0時に対応している。除去した主要4分潮はTable 3に示す。表の中のSとBは海面と海底を表し、S-1mは海面下1m、B+1mは海底上1mを意味する。図中の上部には、後で検討するために波浪観測塔の風を24時間移動平均にして載せている。

Fig. 9をよく見ると、海面下1mと3mで水深が深くなるにつれて流れの強さが弱くなり、全体的には風の方向から時計回りに偏向する傾向にあり、上層の流れがEkman spiralを形成しているように見える。観測期間中は、上層の流れは風の影響を受けて南流が優勢であるといえる。一方、底層の流れは大潮期、南向きの流れが優勢で上層の流れと同方向であるが、小潮期は北向きの流れが優勢になって上層の流れと逆の向きを示している。これは小潮期に観測地点で上層から底層にかけて鉛直循環流が形成されているように見える。

瀬戸内海などの沿岸域では夏には海陸風が発達すること

が知られている。風と流れの関係をもう少し詳しく見るために、4時間の移動平均をとった場合の風と流れのstick diagramをFig. 10に描いた。風のデータは1時間毎のものが提供されているが、そのstick diagramでは変動が激しく図がわかりにくかったために、日周期程度の変動が見えやすいように4時間の移動平均をかけている。また、変動は東西方向に大きく、そのままでは変動の様子が見えにくかったことから、図中にも示すように南北方向のスケールを2倍にして描いている。海面下の流れを見ると、すでに主要4分潮が除去されているにもかかわらず、周期的な変動が明瞭に残されている。図によると、その変動周期は風の変動周期と似ており、流れが風に影響を受けているのではないかと推測される。

次に、流れと風の間関係を定量的にみるためにFig. 10で用いた風と海面下1.0mと3.0m流れのスペクトル解析を行った。その結果をFig. 11に示す。Fig. 11は上層の2層と風のスペクトル解析の結果である。Fig. 10より風の南北成分で1日周期付近にピークが見られる。東西成分では1日周期周辺にピークがみられない。流れの南北成分では2層とも1日周期付近にピークがみられない。東西成分では2層とも1日周期周辺にピークがみられないが約12.8時間周期にピークが見られる。これは、主要4分潮を取り除いたことによりN2成分が現れたためと考えられる。スペクトル解析の結果からははっきりとした風と流れの関係は見出せなかった。この原因として変動周期が一定していなかったことが考えられる。しかしながらFig. 11で示したように流れの変動に風が影響を与えている可能性は高いと考えられる。

考察とまとめ

Fig. 7によると、観測地点の海底上1mのところ測定したDOは観測期間内で大きく変動していることが示された。その値は飽和溶存酸素濃度に換算して約50%を上回ることがなかった。Senjyu et al.²⁾はこの時期の大潮期に観測をして、底層では2mg/l以下になることを報告しているが、この度の観測においては、大潮期の期間中、4.5mg/lから3.5mg/lの間で維持されていた。大潮期で再懸濁が盛んな時にもかかわらず、この度は比較的高い値が維持されていた理由は、底層の残差流(24時間移動平均流)にあると考える。つまり、この大潮の期間中は底層は南流が優勢になっており、関門海峡近くのDOが飽和状態の海水²⁾が流入して、還元性堆積物の再懸濁によるDO消費と釣り

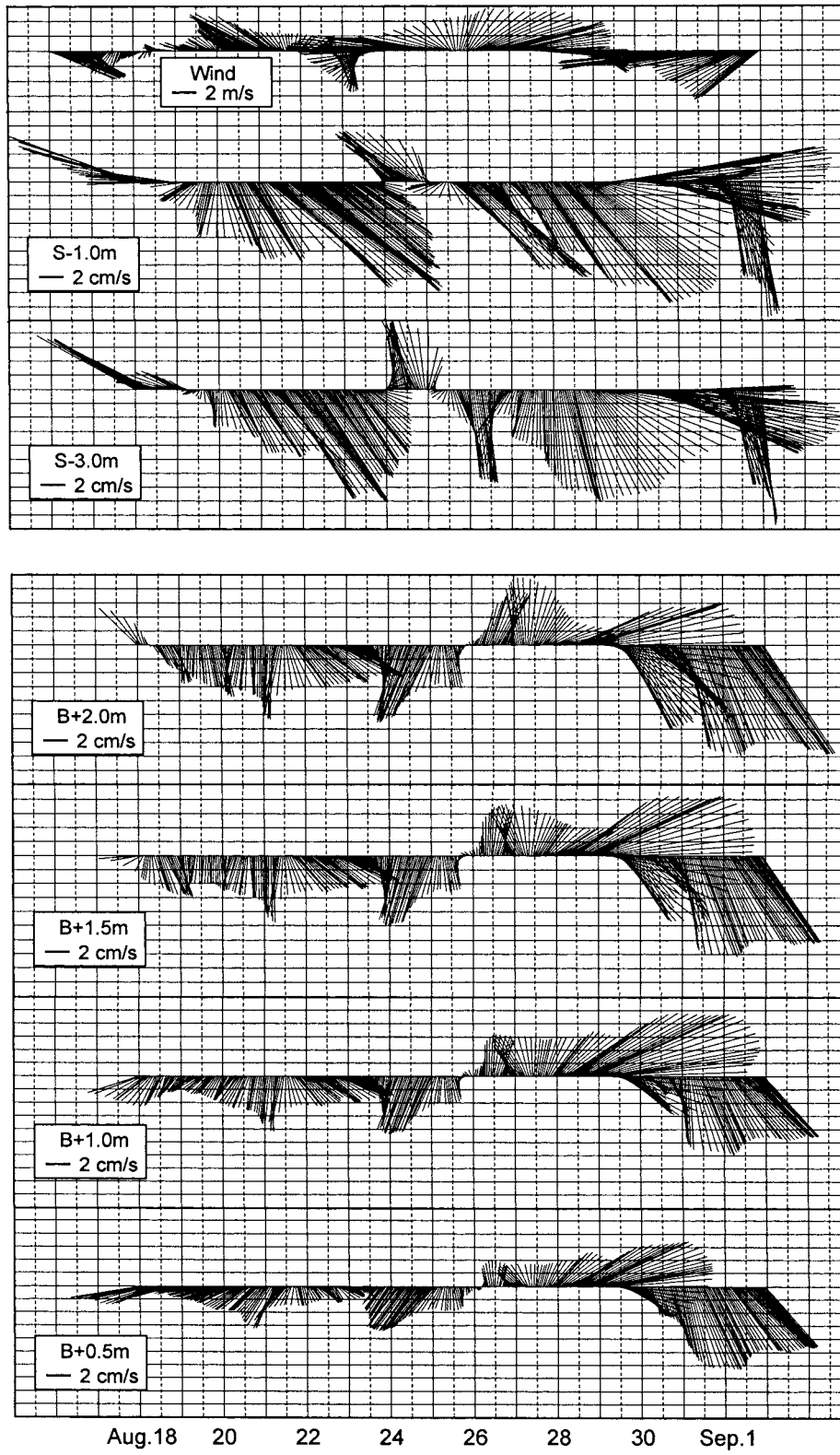


Fig. 9. Stick diagrams of running-averaged wind and currents at each level over 24 hours.

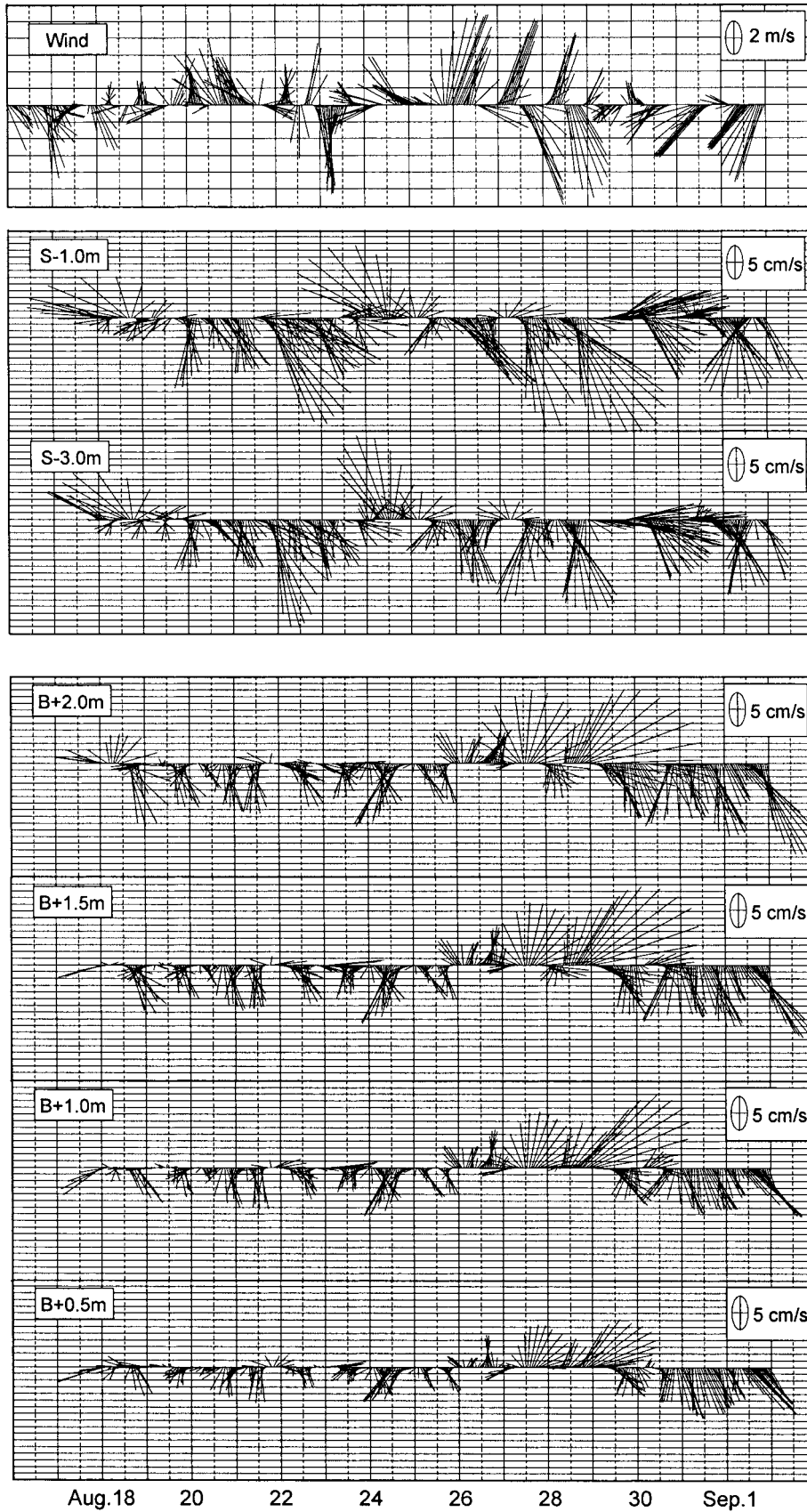


Fig.10. Stick diagrams of running-averaged wind and currents at each level over 4 hours

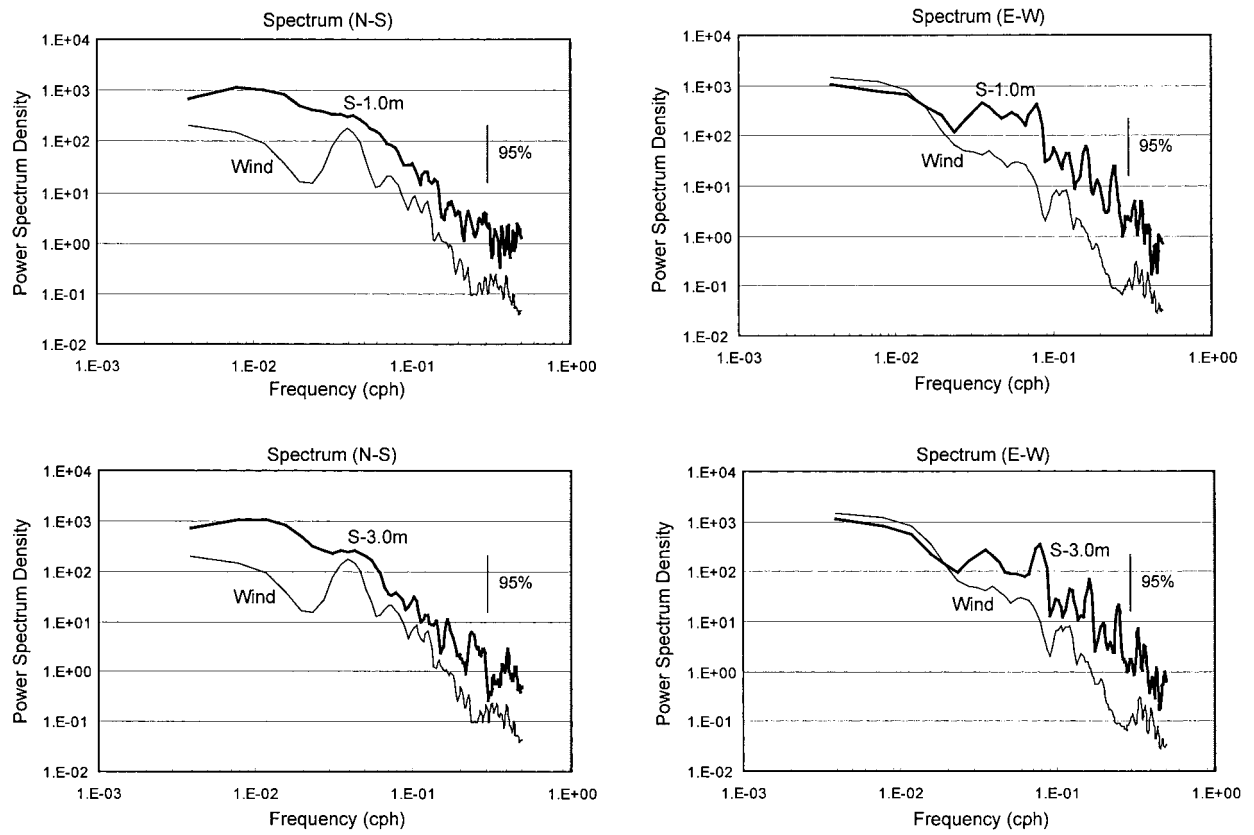


Fig.11. Comparison of spectra between wind and current. The upper diagrams show the N-S and E-W components at the level of one meter from the water surface and the lower diagrams show the components at the level of 3 meters from the water surface.

Table 3. Harmonic constants of main tidal components at each level.

[M2-comp]	Major axis(cm/s)	Minor axis(cm/s)	Orientation(°)	Phase lag(°)
S-1 m	16.90	2.70	260.1	146.4
S-3 m	16.94	2.66	274.2	152.1
B+2 m	13.98	0.97	288.6	122.5
B+1.5 m	13.05	1.38	287.1	119.4
B+1 m	11.96	1.81	287.2	115.0
B+0.5 m	10.10	1.86	287.1	112.2

[S2-comp]	Major axis(cm/s)	Minor axis(cm/s)	Orientation(°)	Phase lag(°)
S-1 m	9.27	1.39	84.7	58.2
S-3 m	9.64	1.44	87.4	66.2
B+2 m	8.32	0.50	113.7	35.6
B+1.5 m	7.60	0.96	110.6	31.1
B+1 m	6.71	1.09	108.0	30.1
B+0.5 m	5.58	1.05	105.6	29.7

[O1-comp]	Major axis(cm/s)	Minor axis(cm/s)	Orientation(°)	Phase lag(°)
S-1 m	3.31	1.43	273.5	131.2
S-3 m	3.24	1.14	293.4	137.7
B+2 m	2.53	0.09	282.5	150.9
B+1.5 m	2.00	0.28	267.5	150.6
B+1 m	1.76	0.42	248.3	156.0
B+0.5 m	1.60	0.39	232.9	165.0

[K1-comp]	Major axis(cm/s)	Minor axis(cm/s)	Orientation(°)	Phase lag(°)
S-1 m	5.09	2.03	279.5	91.2
S-3 m	4.25	1.53	296.6	104.6
B+2 m	2.29	0.76	239.1	188.7
B+1.5 m	2.07	0.59	220.2	195.4
B+1 m	1.82	0.46	217.0	188.1
B+0.5 m	1.62	0.04	219.2	175.1

[Residue]	Amplitude(cm/s)	Orientation(°)
S-1 m	3.83	138.2
S-3 m	3.36	145.6
B+2 m	2.54	148.0
B+1.5 m	2.13	148.1
B+1 m	1.45	148.4
B+0.5 m	1.23	177.4

合う形で、約50%のDOが維持されていたと推測される。小潮期にはDOは4.5mg/lから1.5mg/l以下まで徐々に低下しているが、この期間は再懸濁も弱く、さらに躍層が弱くなっており、このような場合にDOが低下するという現象は通常は想定することはできない。しかしながら、この期間は北流の残差流が優勢となり、Senjyu et al.²⁾の報告にあるように、このときも豊前海南部に低酸素領域が存在していたとすると、このDOの変動はこの移流によってうまく説明できる。これら大潮期と小潮期のDOの変動は、可能性の一つとして、水平的な移流に支配されていたと考える。

小潮期が終わり8月30日以降底層の残差流が南流傾向になり、関門海峡付近のDOの高い海水が流入したことによって再びDOは高くなっている。また、小潮期にDOが一時的に上昇しているが、Fig. 3と比較すると弱くなった水温躍層が内部波動的な運動で下降し、上層の高いDOをとらえたためと推測することができる。内部波動的な運動は、Senjyu et al.²⁾でも示されており、これも可能性の一つとして記した。

15日間を越える連続観測を行うことで、新たにわかった現象やDO変動に関わるプロセスが見出されたが、それでも夏季の一時期のみの現象であることは否めない。他の年における夏の様子や1年間を通じたそれぞれの環境要素の変動過程など、さらに解明すべき多くのことが残されている。今後さらに観測を行ってデータを蓄積し、数値モデルをうまく使いながら適切なモニタリングシステムを提案することによって沿岸海域の環境保全に貢献できるのではないかと考えている。

謝 辞

本研究の観測で使用したシアー流速計(C/Tタワー)とDO計およびクロロテックCTDは、学内の競争資金で購入

した貴重な観測機器である。予算獲得に労を執っていただいた関係各位に感謝します。解析に用いた風のデータは国土交通省荏田港湾事務所から提供いただいた。またこの卒業研究を進めるにあたり、水産情報経営学科情報システム数理講座講師伊澤瑞夫博士と生物生産学科資源環境学講座講師村瀬昇博士にはセミナー等で熱心に議論をしていただき貴重な意見をいただいた。この場を借りて各位に厚く御礼を申し上げます。

本論文は、2006年度の水産情報経営学科における卒業論文を元にしたもので、卒業生であった筆頭者が理解できなかったものは本文中には加えなかった。従って、一査読者(学内)の指摘にもあるように論文としての完成度の不十分さは否めないが、いくつかの新しい事実は提示できたと考えている。完成度を高めるための各素過程の解明は、現在、共著者らによって進められつつある。

参考文献

- 1) 水産庁：周防灘小型機船底びき網漁業対象種(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/sigen/syuboukosoko.htm.
- 2) T. Senjyu, H. Yasuda, S. Sugihara and M. Kamizono: J. Oceanogr. 57, 15-27 (2001)
- 3) 馬込 伸哉, 磯辺 篤彦, 神蘭 真人: 沿岸海洋研究. 40, 59-70 (2002)
- 4) H. Yasuda, T. Senjyu and S. Sugihara: Proc. of 3rd International Symposium on Environmental Hydraulics, CD-ROM (2001)
- 5) 磯辺 篤彦, 神蘭 真人, 俵 悟: 沿岸海洋研究ノート. 31, 109-119 (1993)
- 6) 神蘭 真人, 磯辺 篤彦, 江藤 拓也, 俵 悟, 小泉 喜嗣: 沿岸海洋研究ノート. 32, 167-175 (1995)