

— 論文 —

## 周防灘における潮流による再懸濁過程と SS flux の解析\*

安田 秀一†1, 山口 哲昭†2, 河野 史郎†3, 高島 創太郎†3

### 要 旨

瀬戸内海周防灘において係留系による底層近傍の 15 日間の現地観測を実施し、潮流による再懸濁の振る舞いを調べた。それによると、中潮期から大潮期にかけて、流れは潮流が優勢となり、それに関連する濁度の上昇が観測された。一方、小潮期には、潮流以外の優勢な流れが突発的に生じることがあるが、その流れに伴う底層の濁度の上昇は認められなかった。調和解析によると、大潮期には M4 潮周期で濁度が上昇する傾向が認められるが、M2 潮周期の変動も大きく現れた。このことは、濁度が M2 潮流の移流によって運ばれるということの他に、濁度の上昇が下げ潮時よりも上げ潮時で大きいという片潮的な現象を示唆している。この関係をさらに詳しく調べるために、大潮期の 25 時間に注目して、音響を利用した高精度の精密流速計を用いて 16Hz で流れと音響散乱強度（濁度と高い相関）を測定した。解析に際しては SS の乱流拡散フラックスの考え方を整理し乱れの振る舞いを解析した上で、鉛直方向の乱流フラックスの潮時変動を調べた。それによると下げ潮時に比べて上げ潮時では流れのスペクトルのパワーも高い傾向にあり、乱流フラックスも大きく見積もられた。

キーワード：周防灘，再懸濁，パワースペクトル，SS 乱流フラックス

### 1. はじめに

沿岸域の浅い海域では、底泥の再懸濁は濁りとなって陸岸からも目にとまり、表面波に伴うものとしてそのメカニズムなども報告されている (Butman *et al.*, 1979; Sanford, 1993)。一方、沿岸海域でも沖合いの比較的深

いところでは直接目に触れることはないが、多くの観測から潮流による再懸濁が引き起こされることが報告されてきた。Kawana *et al.* (1984) は、瀬戸内海の海底に櫓を設置し、それに超音波流速計と濁度計を取り付けて、海底近傍の流速と濁度を同時に測定した。そのデータからは潮流によって濁度変動が見出され、底泥の再懸濁の可能性を示唆したが、櫓という海底上の構造物の影響も危惧されていた。Sanford *et al.* (1991) は、米国のチェサピーク湾において船上から潮流と濁度の鉛直分布を 1 潮汐周期測定し、その時間変動から tidal resuspension として再懸濁現象の存在を提示した。Yasuda *et al.* (1997) は、海底上に構造物を設置することなく海底近傍 4 層の濁度と流れを同時に連続的に測定できる装置 “C/T タワー” を導入し、瀬戸内海の燧

\* 2010 年 4 月 23 日受領；2010 年 8 月 24 日受理

著作権：日本海洋学会，2010

†1 独立行政法人 水産大学校水産学研究所

〒759-6595 下関市永田本町 2-7-1

e-mail address : yasuda@fish-u.ac.jp

†2 独立行政法人 水産大学校水産学研究所修士課程 (現在 山口県 漁業協同組合連合 電算課勤務)

†3 いであ株式会社九州支店

灘西部海域における流れと濁度の調和解析から、再懸濁のプロセスをさらに詳しく示した。また、Senjyu *et al.* (2001) は同装置を用いて、貧酸素水塊の出現が問題となっていた周防灘西部海域で再懸濁過程を把握し、底泥の再懸濁が酸素消費に大きく関わっていることを示した。最近では、中川ら (2007) が、港湾内や近傍の航路の埋没に再懸濁が係わっているとして、現地観測や数値モデルの構築によってそのメカニズムの解明を進めつつある。

沿岸海域の再懸濁に関する観測は、その他にもいろいろとなされてきたが、我々研究グループは、周防灘の福岡県側の豊前海における貧酸素水塊形成の物理的な要因を明らかにするために、係留系を設置して潮流や溶存酸素、濁度などの連続観測を行ってきた。これらの観測で測定された潮流や濁度の変動を解析することによって再懸濁に関わる新たな現象が見出された (岸本ら, 2007; 山口ら, 2009)。そこに報告された 2005 年と 2007 年の夏季の 15 日間以上の連続観測結果を整理し、それをもとに、2008 年夏季には大潮期に集中し乱流測定に関わる詳細な観測を実施した。本研究では、その観測データから SS フラックスの解析の内容を検討し、それに基づいて再懸濁の詳細な振る舞いとそのプロセスの解明を試みた。基礎となる乱流の解釈が十分とは言い難いが、これらの観測と解析によって新たに得られた知見をここに報告する。

## 2. 観測内容

貧酸素水塊の形成要因を明らかにすることを目的に、2005 年夏季に Fig. 1 の◎で示す位置 (北緯 33°43'36.0", 東経 131°09'18.0") において、8 月 17 日から 9 月 2 日まで係留系を設置して、流れや濁度、溶存酸素などのための定点連続観測を行った。周辺の海底地形は概して平坦で、この定点の平均水深は約 14.5 m である。観測機器の内容は、海面下 1 m と 3 m における流れと水温の測定のための 2 台の電磁流速計、底層 4 層 (海底上 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m) の流れと濁度および海底上 2.2 m における水圧や水温、塩分を測定する C/T タワー、海底上 1 m の溶存酸素を測定する溶存酸素計などで、詳細は、岸本ら (2007) に示している。経年的な変動を見るために、翌年の同時期にも観測を予定していたが、台風の襲



Fig. 1. Location of the observation station in Suonada sound.

来で 2006 年は中止したものの、2007 年には、再度 8 月 17 日から 9 月 3 日まで同地点で同じ観測機器を設置して連続観測を行った。これらの観測においては、係留系の全機器とも、バッテリーとデータメモリーの容量から、5 分毎のバーストモードで測定している。両観測の結果から、再懸濁は大潮期前後で引き起こされ、その強さは潮時によって変動することが示されたことから、2008 年には大潮期に的を絞って測定間隔を短くし連続モードの観測を行った。観測機器は、これまでのものに加えて、高精度に測定できる精密流速計 (Nortec 社製; 商品名 Nortec Vector Velocimeter, 以下, Vector 流速計) を 9 月 2 日から翌 3 日までの 25 時間設置した。Vector 流速計は、海底から 1 m の高さのデータがとれるように超音波の焦点を絞り、16Hz (1 秒間に 16 回の測定) で三次元流速成分と音響散乱強度 (濁度) の連続測定を行った。さらに、2008 年の観測においては、係留系の一測点でのデータの解釈を補う目的もあって、定点近傍で 1 時間毎の CTD (濁度センサーなどを内蔵する多要素タイプ) 観測を 25 時間行った。

### 3. 15 日間連続観測の結果

#### 3.1 観測結果の概要

この海域の物理的な背景を把握するために、Table 1 に、2007 年の 8 月 18 日 0 時（真夜中）から 9 月 1 日 24 時までの 360 時間（15 日間）の、海面下 1 m（S-1 m）と海底上 1 m（B+1 m）の潮流、および、水圧センサーから得られた潮位の調和解析結果を示す。表によると、この海域では M2 潮と S2 潮の半日周期成分が卓越しており、半日周潮成分の大潮と小潮が現れやすいことがわかる。また、振幅の大きさは、M2 潮の方が 2 倍近く大きく、部分的に見ると、見かけ上、半日潮周期は M2 潮周期で変動することになる。潮流の M2 潮と S2 潮の半日周期成分については、海面下 1 m の上層よりも、海底上 1 m の下層で位相が 20°から 30°程度速くなっており、海底の摩擦の影響を示しているが、O1 潮と K1 潮の日周期成分については、逆に底層の方で位相が遅れる傾向を示している。Yasuda (2009) によると、この海域は夏には 24 時間の周期をもつ海陸風による吹送流が生成されており、さらには、吹送流に伴う慣性流も生成

**Table 1.** Harmonic constants of tidal level and currents at the levels one meter below the sea surface and one meter above the floor. The durations of data are from 0 : 00 hours on the 18th of August to 0 : 00 hours on the 2nd of September, 2007.

	Current(S-1m) [cm/s]					
	Period[hr]	Major	Minor	Ellipticity	Orientation	Phase lag
Mean		1.851			142.7	
O1	25.714	3.559	1.989	0.559	295.4	98.462
K1	24	4.949	2.231	0.451	284.4	266.078
M2	12.414	15.104	0.933	0.062	84.67	120.564
S2	12	9.052	0.023	0.003	85.16	58.379

	Current(B+1m) [cm/s]					
	Period[hr]	Major	Minor	Ellipticity	Orientation	Phase lag
Mean		0.597			314.4	
O1	25.714	2.449	0.412	0.168	239.9	176.594
K1	24	2.314	0.378	0.163	227.1	355.057
M2	12.414	13.1	0.329	0.025	102.5	97.836
S2	12	7.355	0.528	0.072	102.8	33.515

	Tide [m]		
	Period[hr]	Amplitude	Phase lag
Mean		11.494	
O1	25.714	0.243	183.827
K1	24	0.268	351.7
M2	12.414	0.972	16.83
S2	12	0.574	316.381

されていることから、これらの変動成分が日周潮の O1 潮と K1 潮の中にも取り込まれて、単一の振動流とは異なる振る舞いを示したものと考えられる。2005 年の調和解析結果は、岸本ら (2007) に示しているが、各成分の振幅やお互いの位相差など、上記の傾向はほとんど同じで、両年とも、半日周期成分については潮汐と潮流の位相差は 90°に近く、潮汐波は定常波の様相を呈している。また、日周期成分に関しては潮流以外の流れもかなり含んでいるといえる。なお、調和解析はフーリエの方法によって 8 月 18 日 0 時から余弦展開で行った。

本報では、海底からの底泥の再懸濁に注目したことから、まず、海底近傍の流れや濁度を記録した C/T タワーのデータを示す。Fig. 2 は、2005 年と 2007 年の 8 月 18 日 0 時から 9 月 1 日 24 時までの、海底上 1 m の流れの大きさ（スカラー量）と濁度、および、C/T タワーの中の水圧センサーから得られた潮位（水圧センサーは海底上 2.5 m のところにあり、実際的水深はこの値を加える必要がある）の時間変動を描いたものである。作図においては 1 時間平均値を用いている。これらの図に描かれた流れの大きさを見ると、大潮期には流れは潮位変動に対応しているようで、流れは潮流が優勢と考えられるが、小潮期には突発的で非周期的な流れが目立ち、潮流以外の流れの方が優勢になっているように見える。この傾向は海面近くの上層においても認められている (Yasuda 2009)。このような非周期的な流れは、一般的に、吹送流や密度流が原因と考えられるが、水深 14 m にも及ぶ海底近傍においても、潮流成分と同程度に現れており、沿岸海洋研究を進める上で、無視できない流れであると考えられる。そのプロセスやメカニズムに関しては今後の課題としたい。

潮位変動から大潮と小潮の時期はよくわかるが、2005 年に関しては、大潮期前後においては、潮流が強いときに濁度が高くなる様子が認められ、潮流による再懸濁が引き起こされていると考えられる。図によると、潮時変動する中で、潮流のピークが 15 cm/s に達するような時には、再懸濁が認められるが、小潮期の突発的な流れにおいては、流れが 15 cm/s を超えても濁度が高くなることはないようである。一方、2007 年の場合には、大潮期前後においては、潮流の上げ潮時のピークには濁度は高くなるものの、下げ潮時にはそれほど濁度は高く

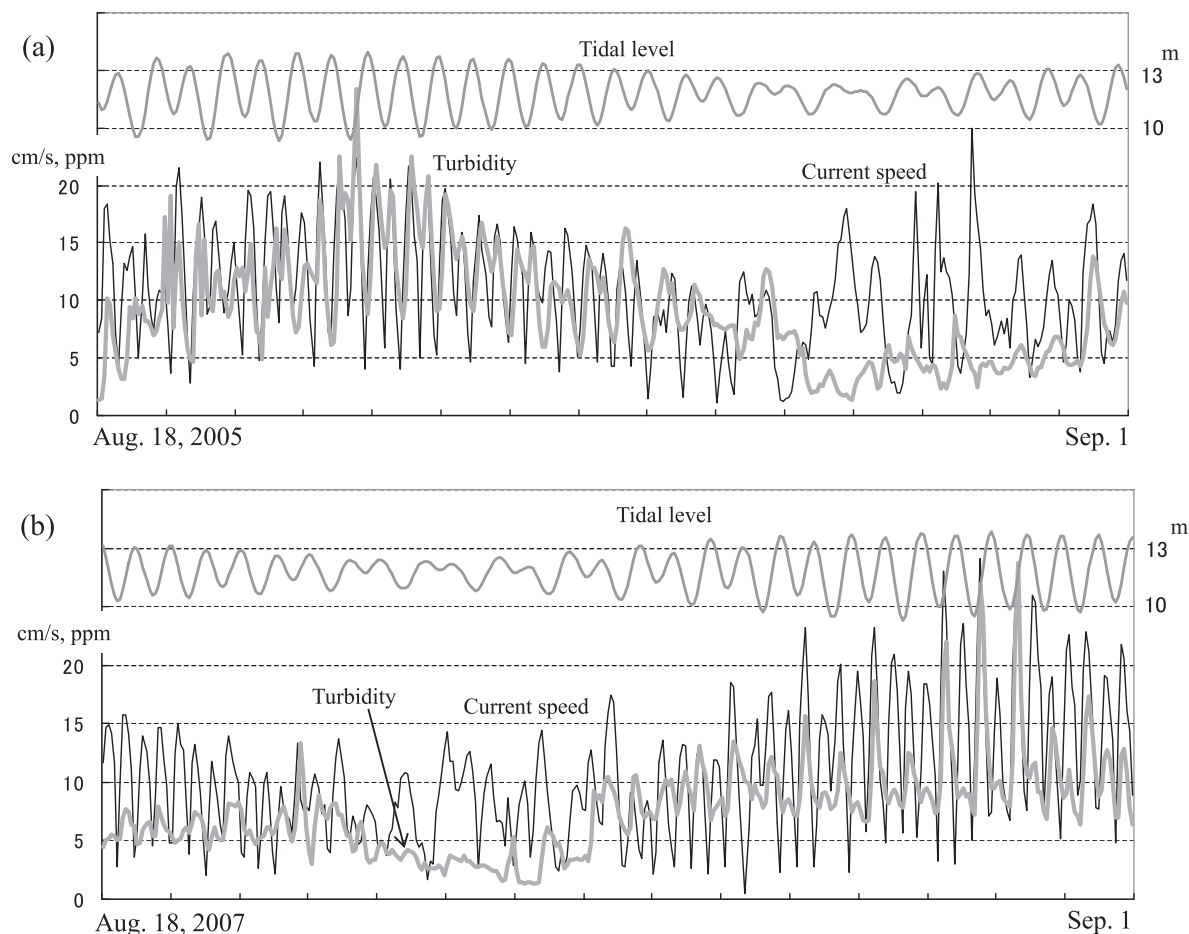


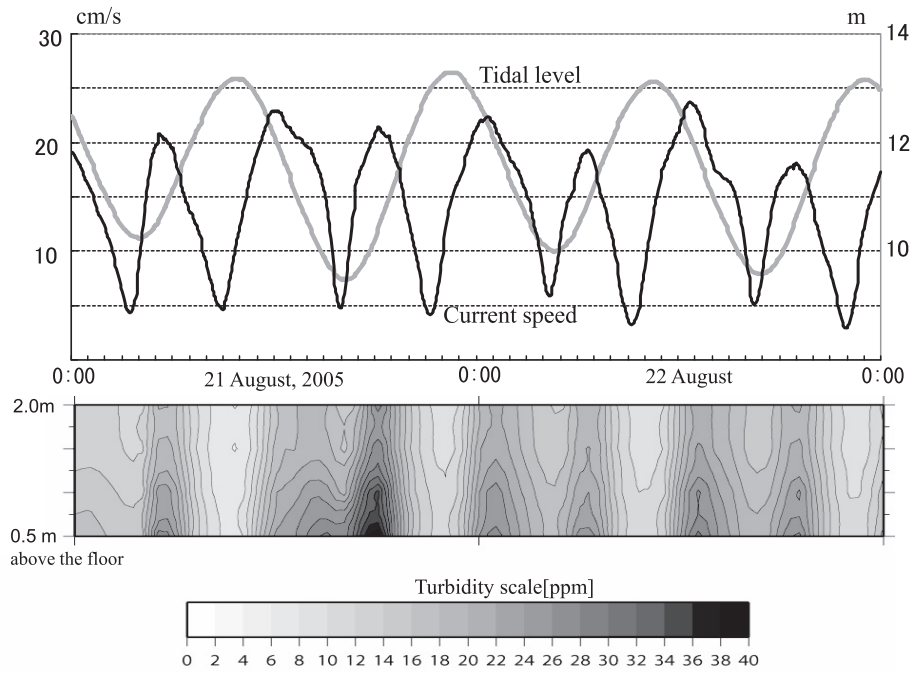
Fig. 2. Temporal variations of tidal level, current speed and turbidity at the level of one meter from the basin floor at the stationary station. The duration is from 0 : 00 hours on the 18th of August to 0 : 00 hours on the 2nd of September in 2005(a) and the same duration in 2007 (b).

ならず片潮的な傾向が窺える。また小潮期の突発的な流れは、2007年でも濁度を高くする効果は持たないようである。

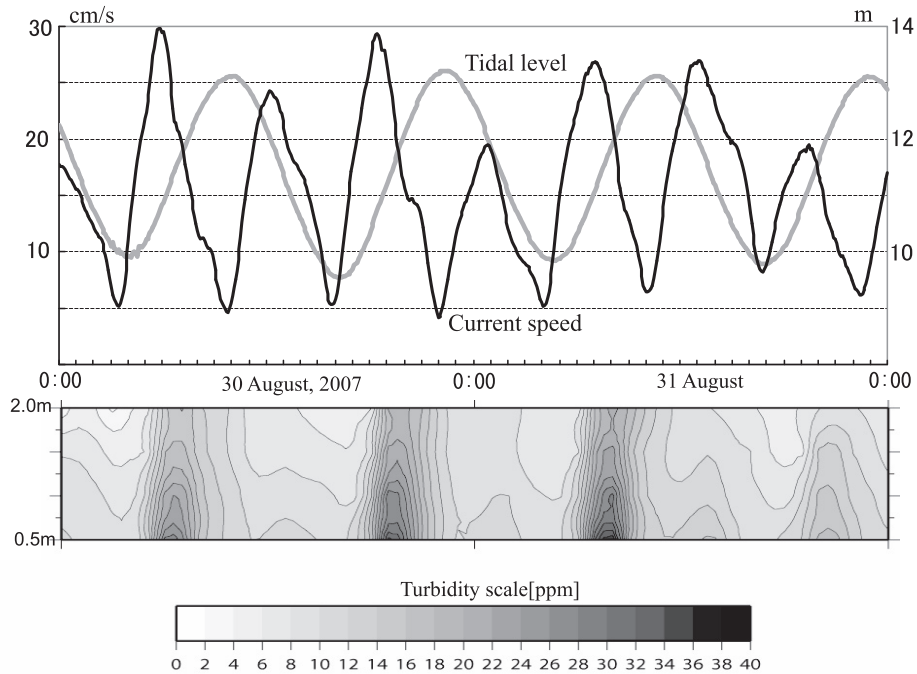
中潮から大潮の期間は、潮流によって再懸濁は周期的に起きているようであるが、これは、周期的な潮流が優勢なときは、憩流時においてもSS（懸濁態物質のことで、ここでは濁度に対応するものとする）は海底面にしっかりと沈殿することなく、流れが強くなるときには再び巻き上がりやすい状態にあると考える。しかし、小潮期になって流れの弱い期間がある程度持続すると、再懸濁のチャンスが少なくなりSSは海底面に沈殿して張り付いたように堆積した状態になり、突発的にある程度の流れが生じて再懸濁しにくい状態になっているのではな

いかと推測する。この点は、今後、再懸濁を微細な視点で観測する必要があると考えている。

大潮期前後の再懸濁の様子が2005年と2007年で異なっているが、それをより詳しく比較できるように、それぞれについて大潮期の48時間分に注目して、潮位と海底上1mの流れの強さ、及び、底層近傍の濁度分布の変動をFig. 3の(a)と(b)に描いた。濁度は、C/Tタワーの赤外後方散乱方式の光学センサーで測定されたもので、海底から0.5m毎に高さ2mまでの4層のデータを用いて鉛直分布にして表した。(a)の2005年の場合は、潮流の強さに対応して1/4日周期の再懸濁を明瞭に窺うことができるが、(b)の2007年の場合には、潮流は1/4日周期で強く現れるものの、再懸濁は半日周期で現れて



(a)



(b)

**Fig. 3.** Temporal variations of tidal level, vertical profile of turbidity near the basin floor and current speed at one meter above the floor during two days at the spring tide. (a) is from 0 : 00 hours on the 21st to 0 : 00 hours on the 23rd of August, 2005 and (b) is from 0 : 00 hours on the 30th of August to 0 : 00 hours on the first of September, 2007.



いるように見える。その現れ方も潮位変動と比べると、2007年は、下げ潮時よりも上げ潮時において流れが強いときもあるが、上げ潮時と下げ潮時で流れの強さが同じ場合でも、上げ潮時に再懸濁が強く現れているように見える。さらに細かく見ると、2005年においては、流れの極大値はいずれも20 cm/s前後で濁度のピークも概ねその時に対応しているが、2007年においては、極大値はそれぞれ異なって、2005年の場合に比べかなり大きく、30 cm/sに達するときもある。上げ潮時と下げ潮時の単純な比較は困難であるが、流れの極大値が両潮時で27 cm/s程度になるときと20 cm/s弱のときがあるが、同じ流れの強さでも、下げ潮時よりも上げ潮時で、再懸濁が著しく大きいことが窺える。

### 3.2 大潮期の流れと濁度の調和解析

流れと濁度の変動の関係をさらに詳しく見るために、周期的な変動が顕著になる大潮期において、各層の流れと濁度の調和解析を行った。Table 2.に、潮位と海面下1 m (S-1 m) と海底上1 m (B+1 m) の潮流ベクトルの解析結果を示す。2005年のデータ期間は8月21日0時から8月23日1時40分まで、また、2007年は8月30日0時から9月1日1時40分までで、どちらも大潮期間のM2潮周期で4周期分 (Fig. 3(a)と Fig. 3(b)を参照) に相当する。平均流成分に関しては、2005年は3倍前後大きく、流向もお互いに異なり、この期間の平均流は潮汐以外の要因で引き起こされていること、つまり、潮汐残差流以外の流れであることを暗に示している。

**Table 2.** Harmonic constants of tidal level and currents at the levels one meter below the sea surface and one meter above the floor at the spring period. The durations are from 0 : 00 hours on the 21st to 1 : 40 hours on the 23rd of August in 2005 and from 0 : 00 hours on the 30th of August to 1 : 40 hours on the 1st of September in 2007.

2005 Spring tide							2007 Spring tide						
Current(S-1m)							Current(S-1m)						
Period(hour)	Major	Minor	Ellip.	Orient1	Orient2	Phase lag	Period	Major	Minor	Ellip.	Orient1	Orient2	Phase lag
Mean	9.416			135.359			Mean	3.482			259.736		
49.667	1.181	0.112	0.095	-229.535	40.465	172.441	M0	3.205	0.404	0.126	23.173	-66.827	101.888
24.833	2.82	1.894	0.672	-28.779	61.221	115.714	M1	5.633	3.693	0.656	-175.419	-85.419	142.566
12.417	27.983	3.037	0.109	76.832	-193.168	35.951	M2	27.025	0.31	0.011	70.565	-199.435	33.958
8.278	0.861	0.202	0.235	34.466	-55.534	124.766	M3	0.947	0.283	0.298	-65.637	-155.637	22.21
6.208	2.65	0.433	0.163	81.596	-188.404	167.381	M4	2.725	0.047	0.017	84.062	-185.938	166.298
4.139	1.511	0.604	0.4	-87.51	-177.51	98.993	M6	1.658	0.294	0.178	-58.053	-148.053	100.105
3.104	0.883	0.208	0.235	-251.461	-161.461	59.635	M8	0.751	0.216	0.288	-55.699	-145.699	170.187
2.069	0.307	0.204	0.664	4.822	-85.178	101.486	M12	0.492	0.444	0.902	-73.453	-163.453	165.394
Current(B+1m)							Current(B+1m)						
Period	Major	Minor	Ellip.	Orient1	Orient2	Phase lag	Period	Major	Minor	Ellip.	Orient1	Orient2	Phase lag
Mean	2.538			153.862			Mean	0.571			39.251		
49.667	1.432	0.168	0.117	-121.187	-31.187	38.713	M0	4.951	1.27	0.257	-132.582	-42.582	113.455
24.833	1.734	0.386	0.222	-180.604	89.396	111.05	M1	2.943	0.904	0.307	-113.704	-23.704	29.259
12.417	20.793	1.874	0.09	-70.66	-160.66	178.168	M2	23.004	0.453	0.02	-253.982	-163.982	1.828
8.278	0.751	0.102	0.136	-113.902	-203.902	90.965	M3	0.816	0.328	0.401	-61.31	28.69	9.238
6.208	2.647	0.099	0.038	-260.485	9.515	153.026	M4	2.36	0.055	0.023	61.853	-208.147	164.95
4.139	2.135	0.441	0.207	-69.386	-159.386	65.444	M6	2.529	0.636	0.252	-82.177	-172.177	91.027
3.104	0.956	0.314	0.328	-69.401	20.599	169.82	M8	0.432	0.077	0.177	-30.34	59.66	102.958
2.069	0.723	0.283	0.391	-12.331	77.669	93.049	M12	0.544	0.251	0.461	-26.404	63.596	49.015
Tide			Tide										
Period	Amplitude	Phase lag	Period	Amplitude	Phase lag								
Mean	11.541		Mean	11.482									
49.667	0.059	21.91	M0	0.05	316.974								
24.833	0.313	41.321	M1	0.112	30.657								
12.417	1.647	288.547	M2	1.649	288.032								
8.278	0.043	88.589	M3	0.048	103.375								
6.208	0.074	93.785	M4	0.057	96.955								
4.139	0.029	159.865	M6	0.03	165.3								
3.104	0.009	95.567	M8	0.009	77.899								
2.069	0.009	63.542	M12	0.007	58.963								

潮位の変動に関して、まず M2 潮周期成分を見ると、振幅は両年でほとんど同じ値を示している。M1 潮周期成分については、2007 年の振幅は M2 潮周期の 1/16 程度と小さく、2005 年はやや大きくなっているものの 1/5 以下になっている。この期間は秋の大潮期に近いこともあって、日潮不等の傾向は比較的小さいといえる。倍潮周期成分は、両年とも M1 潮周期成分に比べるとさらに小さくなっている。Fig. 3 から推測できるように、潮位変動については M2 潮周期成分が支配的と見なすことができる。以下で述べる流れと濁度の議論において M2 潮周期成分が優勢であることがベースとなる。潮流の振動成分に関しては、潮位と比較して両年の違いは大きくなっているが、これは、夏季においては大潮期に侵入しやすい底層の重い海水（岸本ら、2007）によって海底上約 5 m のところにシャープな密度成層が形成され、そのため潮流が傾圧モードを伴い、その流れが両年で異なったことによるものではないかと推測する。ちなみに夏季の大潮期に海底上に重い海水が侵入してくる現象は 2007 年の 15 日間観測でも現れているが、この海域だけを注目すれば、小潮期に比べて大潮期で成層が強いという通常とは逆の傾向となっている。その原因は、豊後水道と伊予灘の間にある豊予海峡での海水の混合が大潮期に盛んになり、外洋系の海水が多量に取り込まれ塩水楔のように周防灘まで侵入してきたのではないかと考えている。このように侵入する外洋系の海水は、伊予灘などの漁業者らに“底入り潮”と呼ばれている。

なお、ここで用いた M2 潮周期成分とは、潮汐の M2 潮成分と同じ周期の半日周期成分を意味しており、長期間の潮位・潮流を調和解析したときの S2 潮成分や N2 潮成分などの半日周期成分とは分離された M2 潮成分（潮汐分潮の一つ）とは異なるものであることを念のために述べておく。従って、他の半日周期成分の分潮である S2 潮成分なども、その振幅の中に含まれることになる。特に、M2 潮成分と S2 潮成分がほとんど同位相の時は大潮となり、M2 潮成分の振幅のほうが S2 潮成分よりも大きいことから、振動周期は M2 潮が優勢に現れるために上記のような M2 潮周期を基準にした調和解析を行った。本報告に限り、M2 潮周期成分は、本来の分潮である M2 潮成分とは、“周期”というタームを入れることで区別した。つまり、M1 潮周期、M2 潮周期、

M4 潮周期などは、それぞれ、24.833 時間、12.417 時間、6.208 時間に相当する。

Table 3. の(a)と(b)は、それぞれ、2005 年と 2007 年の上記大潮期の C/T タワーによる底層 4 層の濁度の調和解析結果で、潮流の流速値（絶対値）の調和常数と対応できるように表にした。解析した大潮期のデータは 49 時間 40 分（M2 潮周期で 4 潮汐周期分）のものを用いた。Table 3 から示される濁度と流れの変動を、以下にわかりやすく箇条書きにする。

- (1) 濁度の平均値は、両年とも海底に近いほど大きい傾向にあり、その値は 2005 年の方が 1.5 倍前後大きい。
- (2) 濁度の振動成分の振幅に関しては、2005 年は M4 潮周期が最も大きく、次に大きいのが M2 潮周期であるが、2007 年においては、逆に、M4 潮周期よりも M2 潮周期成分の方が大きい。
- (3) 濁度の鉛直分布を見ると、両年における M2 潮周期と M4 潮周期の振幅は、海底に近いほど大きくなる傾向にあり、位相は、2005 年の M2 潮周期がほとんど同位相であることを除いて、海底から離れるほど少しずつ遅れている。また、2005 年の位相は潮位に比べて 150°近く（逆位相に近い）遅れているが、2007 年は、特に海底上 0.5 m において 90°近く進んでいる。
- (4) 流速の M4 潮周期成分は潮流ベクトルの M2 潮周期成分を反映するものであるが、それに関しては、振幅は海底に近いほど小さく、位相は海底から離れて高くなるほど遅れている。M2 潮周期成分は、濁度の場合に比べて振幅は著しく小さい。
- (5) 濁度と流速の位相の関係に関しては、両年とも M4 潮周期は濁度の方が 20°から 30°近く遅れる傾向にあるが、流速の M2 潮周期（M1 潮流）に関しては流れに依存する濁度の関連性が明瞭には認められない。

濁度の平均値や M4 潮周期成分の振幅の鉛直分布、さらに、濁度の M4 潮周期成分の位相が流れよりも遅れていることから、優勢な M2 潮流による tidal resuspension と呼ばれる底泥の再懸濁が引き起こされて

**Table 3.** Harmonic constants of turbidity at the four levels near the basin floor measured by C/T tower. (a) 2005 and (b) 2007. The durations are the same as Table 2.

Speed(cm/s)			Turbidity(ppm)		
2005			2005		
B+2 m			B+2 m		
Period	Amplitude	Phase lag	Period(hour)	Amplitude	Phase lag
Mean	16.767		Mean	14.647	
M1	0.669	222.639	24.833	1.934	260.14
M2	2.342	38.106	12.417	3.346	105.253
M4	8.544	352.108	6.208	4.247	23.629
M6	2.765	175.567	4.139	0.777	196.57
B+1.5 m			B+1.5 m		
Period	Amplitude	Phase lag	Period	Amplitude	Phase lag
Mean	15.555		Mean	15.22	
M1	0.766	219.209	24.833	2.001	254.222
M2	1.951	34.732	12.417	3.515	101.607
M4	7.806	347.776	6.208	4.658	18.208
M6	2.342	170.902	4.139	0.511	175.702
B+1 m			B+1 m		
Period	Amplitude	Phase lag	Period	Amplitude	Phase lag
Mean	14.31		Mean	17.667	
M1	0.824	210.781	24.833	2.702	257.568
M2	1.458	38.83	12.417	4.579	106.551
M4	7.122	346.768	6.208	5.321	11.438
M6	1.868	166.772	4.139	0.907	168.28
B+0.5 m			B+0.5 m		
Period	Amplitude	Phase lag	Period	Amplitude	Phase lag
Mean	12.073		Mean	19.933	
M1	0.802	199.705	24.833	3.425	250.464
M2	0.759	111.998	12.417	5.366	107.978
M4	6.069	346.733	6.208	6.206	3.416
M6	1.093	155.576	4.139	1.001	172.442

(a)

Speed(cm/s)			Turbidity(ppm)		
2007			2007		
B+2 m			B+2 m		
Period	Amplitude	Phase lag	Period(hour)	Amplitude	Phase lag
Mean	18.8		Mean	12.468	
M1	3.029	164.088	24.833	3.091	272.825
M2	1.978	67.892	12.417	5.408	227.517
M4	9.258	7.47	6.208	2.11	34.855
M6	2.241	188.788	4.139	1.261	243.8
B+1.5 m			B+1.5 m		
Period	Amplitude	Phase lag	Period	Amplitude	Phase lag
Mean	17.33		Mean	10.056	
M1	2.187	159.365	24.833	0.891	107.082
M2	1.388	142.6	12.417	4.099	211.983
M4	9.363	358.311	6.208	3.314	25.658
M6	1.366	173.272	4.139	1.218	199.923
B+1 m			B+1 m		
Period	Amplitude	Phase lag	Period	Amplitude	Phase lag
Mean	15.763		Mean	12.929	
M1	1.88	163.995	24.833	0.805	74.141
M2	0.896	137.21	12.417	5.509	192.163
M4	8.472	354.105	6.208	3.631	19.589
M6	0.948	177.141	4.139	1.14	207.645
B+0.5 m			B+0.5 m		
Period	Amplitude	Phase lag	Period	Amplitude	Phase lag
Mean	13.275		Mean	15.603	
M1	1.669	163.229	24.833	1.968	232.954
M2	1.114	156.54	12.417	7.423	181.218
M4	6.815	351.824	6.208	4.118	356.873
M6	0.595	168.999	4.139	0.696	228.813

(b)



いると考えることができる。濁度の M2 潮周期成分については、M4 潮周期成分のようなプロセスではなく、上記 (3) に記したように、2005 年の M2 潮周期の変動は、満潮時に低く干潮時に高くなって潮位と逆に近い位相を示している。解釈としては、下げ潮時に浅い方から濁度の高い海水が徐々に観測定点を覆い、上げ潮時には沖合の濁度の低い海水がやって来るということになる。満潮時と干潮時の濁度の違いは、Senjyu *et al.* (2001) にも記されているように、このような水平的な移流（潮流）によるものと考えられる。一方、2007 年の M2 潮周期の海底上 0.5 m (B+0.5 m) における 90°に近い位相の進みは、下げ潮時よりも上げ潮時に大きくなることを示しており、位相の鉛直分布からも上げ潮時の潮流による再懸濁ではないかと推測する。

2005 年と 2007 年における濁度の M2 潮周期変動の違いは、濁度の平均値が上記項目 (1) のように 2005 年の方が高いことから、2005 年が再懸濁を引き起こしやすい状態にあり、上げ潮時と下げ潮時で同程度に濁度が高くなったと推測される。2007 年は再懸濁による濁度の上昇が弱くなったために、上げ潮時と下げ潮時の再懸濁への効果の違いが明瞭になったのではないかと思われる。山口ら (2009) は、2005 年と 2007 年の両ケースにおいて、上げ潮時と下げ潮時それぞれで、流れの強さと濁度の散布図を作成し、流れと濁度の関連性を示したが、それによると、2007 年では下げ潮時には回帰直線の傾斜は小さく上げ潮時には傾斜も大きく高い相関性がみられ、2005 年においては、両潮時で相関性は高いものの、比較をすると、上げ潮時の方が相関性は高いという結果を得ている。

つまり、当海域の大潮期においては、濁度変動の M4 潮周期成分にみられるように、潮流による再懸濁は明瞭に認められるが、再懸濁の程度は、下げ潮時よりも上げ潮時の方が強いようであった。Fig. 3 をみると、2005 年の大潮期は、上げ潮時よりも下げ潮時の方で流れがやや強い傾向があるが、それにも拘わらず、濁度上昇は同程度か上げ潮時に、少しではあるが、大きいことが窺える。一方、2007 年においては、流れの強さは 2005 年よりも大きく、さらに、下げ潮時よりも上げ潮時に強い傾向にあったことから、2007 年の上げ潮時に再懸濁が強いという傾向は顕著になったといえる。Fig. 3 をよく見

ると、上げ潮時の濁度を両年で比較すると、あまり違いはないようであるが、下げ潮時の再懸濁の仕方が、2007 年で著しく弱かったと見ることもできる。それらの原因については、2006 年には観測を断念する程の 2 つの台風がこの時期に襲来したが、漁業者のコメントによると、台風が周防灘を浄化したのではないかとのことである。実際、2007 年の観測においては、海水の透明度は非常に高く、水深 14 m の海底で作業するダイバーの動きがわかる程で、漁業者によると、初めての経験とのことであった。このことから推測すると、2005 年は底泥も再懸濁しやすい状態にあったが、2007 年では再懸濁しやすい泥が少なくなって、下げ潮時の潮流では再懸濁が生じにくくなり、片潮的な現象が強調されたのではないかと推測している。ちなみに、2008 年は海底近くのダイバーの動きは確認できなかった。

上げ潮時と下げ潮時のこのような違いなど、濁度変動の要因をさらに詳しく検証するため、2008 年には、大潮期に的を絞って、25 時間のより詳細な観測を実施した。

#### 4. Vector 流速計による 25 時間観測

潮流が単調に正弦波的に往復する場合でも、1 潮汐周期の中で再懸濁が上げ潮時に強いなど、片潮的に引き起こされるときには、周期平均した SS の輸送量は一方向に向かう傾向があると考えられる。このことは内湾における底泥の輸送堆積にも係わる重要な物理的プロセスとなるのではないかと推測される。そこで、この違いなど再懸濁の詳細を明らかにすることを目的に、日潮不等の小さい 9 月初旬の大潮期に Vector 流速計を設置して 25 時間連続観測を行った。Vector 流速計は音波を利用したもので、室内の水理実験の乱流解析にも使用されており、原理的にも高い精度で流れが測定できると考えられる。単位時間あたりの物質の輸送量は、元来、分子運動による拡散フラックスと流れによる移流フラックスがあるが、現場海域では前者は無視され、後者が物質輸送の収支に支配的な役割を果たす。Vector 流速計は流れと同時に SS による音響散乱強度を同じ時間間隔で測定することができる。移流フラックスは流速と物質濃度の積で定義されるが (Fischer *et al.*, 1979 など)、音響散乱

強度は濁度に依存しており、両者の比較から換算式を作ることによって、計算上、流速と濁度の積によるSSのフラックスを導くことが出来る。この度の現地実験では装置を海底に固定し、海底上1mに焦点を絞って16Hzの連続モードで流れと音響散乱強度を測定した。前年(2007年)の15日間連続観測で用いた表層のための電磁流速計と底層のためのC/Tタワーも併用したが、これらは1秒毎の連続モードで測定した。機器の設置作業は朝から行ったが、その擾乱などが消えて測定データが乱れやフラックスの解析に使用できる有効期間は9月2日12時30分から9月3日13時30分の25時間であった。

#### 4.1 流れや濁度の変動と調和解析結果

状況を把握しやすいように、C/Tタワーで測定された海底上1mの潮流と濁度および潮位(水圧による)の、9月2日12時から9月3日14時までの時間変動をFig. 4に示した。潮位変動を見ると、日潮不等は非常に小さく、1日の間に2周期分の現象が引き起こされていると見なすことができるが、濁度変動を見ると、同じ現

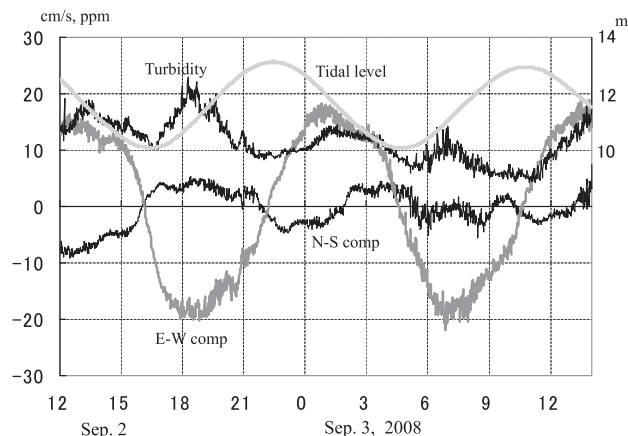


Fig. 4. Temporal variations of tidal level, current components and turbidity at one meter above the floor during 26 hours at the spring tide of September, 2008.

象が単調に2周期分引き起こされているとは言い難い。

Table 4は、9月2日12時30分から24時間50分後まで(M2潮周期の2倍)の潮位(水圧)と、海面下1mと海底上1mの流れの調和解析結果である。まず潮位を見ると、日周潮であるM1潮周期成分の振幅は、M2潮周期成分に比べて約1/30となっており、調和解

Table 4. Harmonic constants of tidal level and currents at the levels one meter below the sea surface and one meter above the floor. The duration is from 12:30 hours on the 2nd to 13:20 hours on the 3rd of September in 2008.

Period	Current S-1m(cm/s)				
	Major	Minor	Ellipticity	Orientation	Phase lag
Mean	8.949			156.747	
M1	4.424	0.741	0.167	315.222	25.745
M2	23.721	1.453	0.061	77.747	30.144
M4	1.692	0.706	0.417	94.239	87.147
M6	1.573	0.251	0.159	304.017	84.729
M8	1.133	0.76	0.671	320.524	158.433

Period	Current B+1m(cm/s)				
	Major	Minor	Ellipticity	Orientation	Phase lag
Mean	0.623			219.484	
M1	1.672	0.687	0.411	16.1	168.886
M2	17.854	0.843	0.047	97.519	10.731
M4	1.423	0.224	0.158	67.918	169.253
M6	2.01	0.285	0.142	269.28	78.264
M8	0.624	0.262	0.42	221.414	143.998

Period	Tide(m)	
	Amplitude	Phase lag
Mean	11.581	
M1	0.043	124.061
M2	1.463	288.892
M4	0.042	88.107
M6	0.019	160.739
M8	0.007	58.444

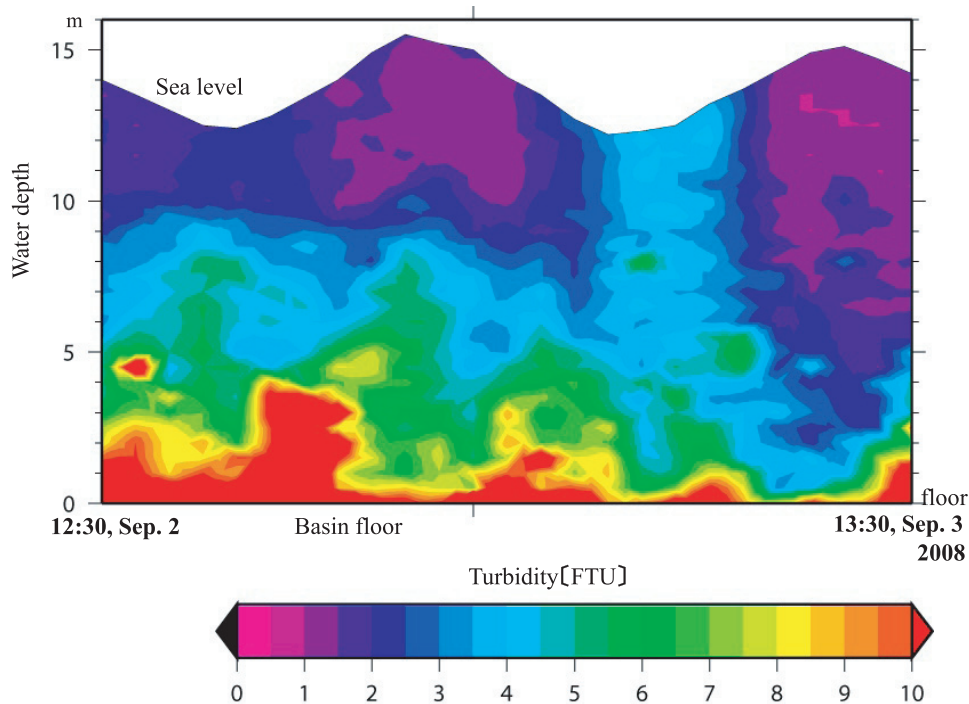


Fig. 5. Variation with time of the vertical profile of turbidity at the stationary station during 25 hours of September, 2008.

析結果からも、観測期間中において日潮不等は非常に小さく単一の M2 潮周期の潮汐が 2 周期分生じていると見なすことができる。従って、流れについても M2 潮周期の潮流（M2 潮流）が卓越しているといえる。潮流の M2 潮周期成分の振幅は海底から離れるほど大きく、さらに位相は遅れており、海底摩擦に伴う振動流の鉛直分布の特徴を定性的によく表している。潮位と流れの M2 潮成分の位相を比較すると、この期間においても、東流の鉛直平均的な最盛時は高潮時から 90 度程度遅れているようで、西側に関門海峡という出入り口はあるものの、15 日間観測結果と同様、この海域は東に開いた半閉鎖海域における定常波の振る舞いを呈していることになる。

この観測期間中、定点近くにおいて多要素 CTD による 1 時間毎の鉛直分布測定を行った。Fig. 5 は、CTD によって得られた濁度（センサーは赤外後方散乱方式）の鉛直分布の時間変動である。潮位変動は定常波に近いことから、流れの位相から判断すると、濁度は上げ潮とともに海底から高くなり満潮時には低下して SS は沈殿したように見える。下げ潮とともに再び濁度は上昇する

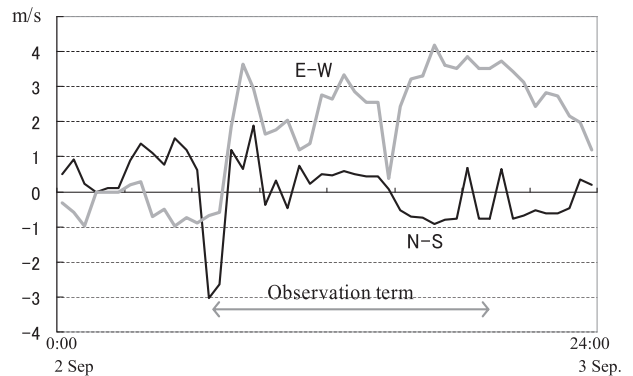


Fig. 6. Temporal variation of the wind at the AMeDAS in Kitakyushu airport.

が、その程度は上げ潮時よりも低くなっている。その後、上層の海面まで高い濁度が認められるが、9月2日の夕方からは北または西からの風が強く吹き、その影響が現れたのではないかと考えられる。次の満潮時には一気に濁度が下がっているが、これは沖合の濁度の低い水が進入してきたことによるのではないと思われる。Fig. 6 に北九州空港内の AMeDAS で得られた観測期間前後の

**Table 5.** Harmonic constants of current speed (a) and turbidity (b) of four levels near the floor for 12 hours 25 minutes from 12 : 30 hours on the 2nd of September, 2008.

12h-Harmonic 2008					
Speed(B+2m), cm/s			Speed(B+1m), cm/s		
Period(hour)	Amplitude	Phase lag	Period	Amplitude	Phase lag
Mean	14.339		Mean	12.558	
12.433	1.806	83.563	12.433	1.655	137.946
6.217	7.212	9.633	6.217	6.113	10.267
4.144	0.718	200.169	4.144	0.234	152.684
3.108	2.537	254.657	3.108	1.948	242.316

Speed(B+1.5m), cm/s			Speed(B+0.5m), cm/s		
Period	Amplitude	Phase lag	Period	Amplitude	Phase lag
Mean	13.562		Mean	10.665	
12.433	1.588	108.773	12.433	1.226	136.087
6.217	6.759	8.126	6.217	5.141	3.293
4.144	0.451	189.009	4.144	0.264	197.624
3.108	2.285	245.042	3.108	1.62	239.148

Tide [m]		
Period	Amplitude	Phase lag
Mean	11.622	
M2	1.503	289.772
M4	0.05	106.289
M6	0.021	164.815
M8	0.004	97.084

(a)

12h-Harmonic 2008					
Turb.(B+2m), ppm			Turb.(B+1m), ppm		
Period	Amplitude	Phase lag	Period	Amplitude	Phase lag
Mean	10.91		Mean	13.441	
M2	1.436	138.381	M2	2.626	123.974
M4	2.646	43.709	M4	3.138	29.682
M6	1.037	164.568	M6	1.344	148.056
M8	0.607	17.901	M8	0.534	6.864

Turb.(B+1.5m), ppm			Turb.(B+0.5m), ppm		
Period	Amplitude	Phase lag	Period	Amplitude	Phase lag
Mean	11.522		Mean	14.952	
M2	1.848	129.388	M2	3.369	120.592
M4	2.727	36.108	M4	3.428	23.357
M6	1.135	156.301	M6	1.446	138.389
M8	0.559	6.166	M8	0.515	19.628

(b)

風の様子を示す。Fig. 1 に示すようにその位置は観測定点とは 20km 近く離れて直接対応づけることはできないが、実際、定点に係留した観測船（19 トンの小型作業船）においても、日没後には観測の中止を迫られるほどの強い風と波を受けた。

Table 5. は、潮流による再懸濁の振る舞いを把握する

ために、風の影響が少ない前半に注目して、9月2日12時30分から9月3日1時前までの12時間25分間の、底層4層の流れのスピード（大きさ）と濁度を調和解析したものである。濁度の平均値やM4潮周期成分の振幅は海底に近いほど大きく、濁度の位相は流れよりも遅れ、海底から離れるほど遅れが大きくなっており、底泥が

M2 潮周期の潮流によって再懸濁している様子をよく示している。

#### 4.2 Vector 流速計のデータとパワースペクトル

25 時間連続観測では Vector 流速計を Fig. 1 の観測点の海底に固定し、海底上 1 m に焦点を絞って、16Hz の連続モードで流れの三次元の各方向成分と音響散乱強度を測定した。測定された生の流れの変動の様子を Fig. 7 に示す。表示期間は上げ潮最盛時の 18 時 30 分 00 秒からの 1 分間で、それぞれ潮流楕円の主軸方向に近い東西方向成分（東が正）と南北方向成分（北が正）、および鉛直方向成分（下向きが正）である。鉛直方向成分は平均流がほとんどないにも拘わらず細かい変動まで認められるが、その変動に比べて、東西方向成分には、より高周波の強い変動が見られる。この高周波の変動は、平均流（後で述べる乱流平均流）がある中で Euler 的に流れを測定したことによるものと考えられる。東西方向成分については、さらに 5 秒程度の周期的な変動も明瞭に確認できる。この 5 秒周期の変動は、水平的にはかなり優勢であるにも拘わらず、鉛直方向成分には明瞭に認められないことから、混合や輸送には関わらない波動現象と考えてもよいのではないかと考えている。

流れと同時に測定される音響散乱強度のカウント数は水中の濁度を反映していることから、C/T タワーによる濁度（海底上 1 m）の値との関係式を得るため、Fig. 8 に散布図を作成した。乱れによるばらつきを抑えるために、両データは 10 分間平均値としている。また、データは 9 月 2 日 12 時 30 分から 9 月 3 日 3 時 30 分までの 15 時間分を用い、後半の 9 月 3 日 3 時 30 分からのデータは、次の Fig. 9 で示す理由により相関も悪くなったため、この散布図からは削除した。C/T タワーによる濁度〔y〕と音響散乱強度のカウント数〔x〕の関係式を表す散布図の最適曲線は、 $40\log_{10} y = x - 72.43$ （つまり、 $y = 0.01546 \times 10^{0.025x}$ ）のように得ることができた\*。Fig. 9 には、C/T タワーによる濁度とその関係式によって得られた濁度を 10 分間の移動平均にして描いた。図中の後半のカウント数と濁度が隔たっている区間は、Fig. 5 のところでも記したが、風によって濁度が上層まで高くなっていた区間（9 月 3 日 6 時から 12 時

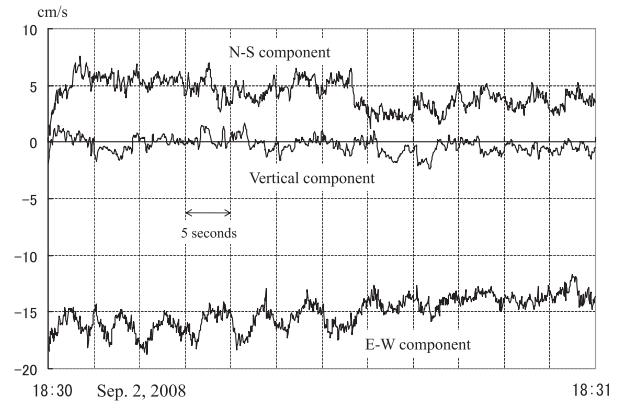


Fig. 7. Raw data of current components measured by Vector current meter during one minute at the flood period. The sampling interval is 16 Hz.

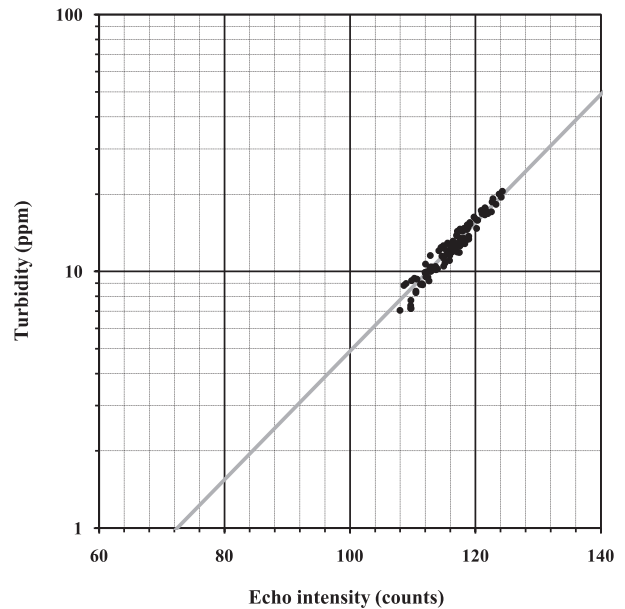


Fig. 8. Scatter diagram of the turbidity by the C/T tower and the echo intensity by Vector current meter.

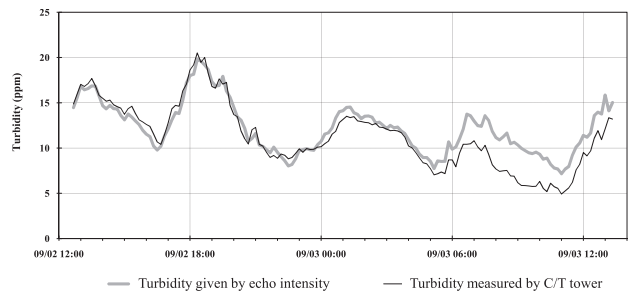


Fig. 9. Temporal variations of turbidity measured by C/T tower and calculated by the echo intensity.

\* 音響散乱強度と濁度との関係式を得るために、それぞれ、10 分間の平均値を用いて、Fig. 8 の相関係数  $R^2$  は 0.939 であった。20 秒平均値を用いると、関係式はほとんど変わらないが、乱れを含むことから相関係数は 0.788 であった。後半の擾乱の大きい期間も含めた 25 時間のデータによると、10 分間平均値と 20 秒平均値による相関係数  $R^2$  は、それぞれ、0.848 と 0.682 であった。



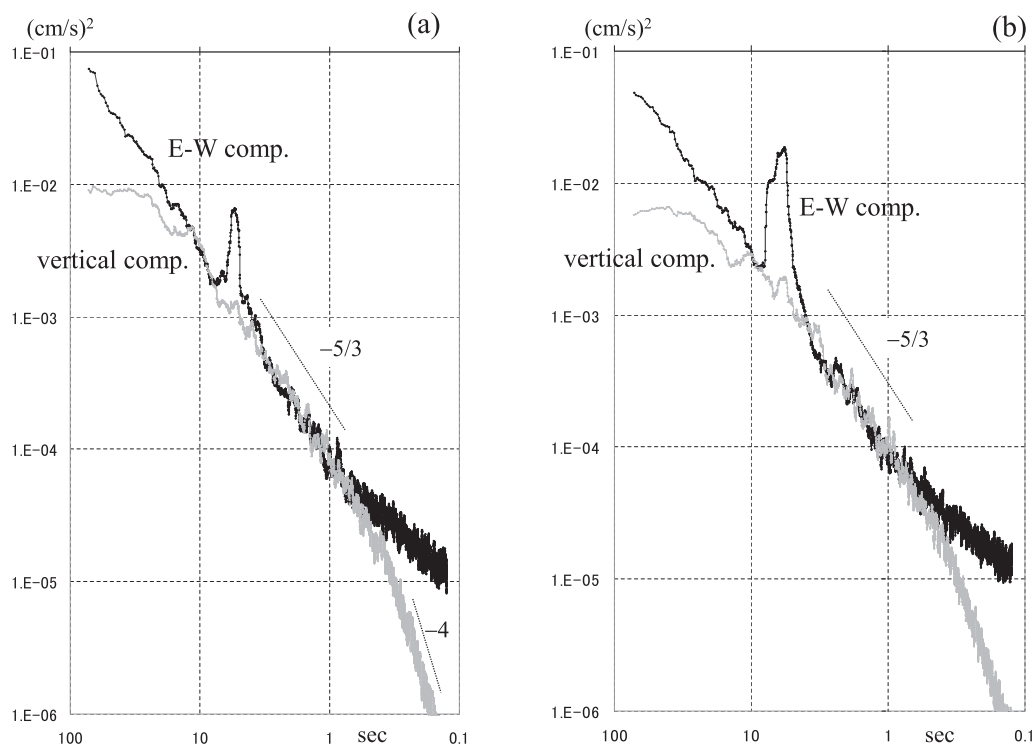


Fig. 10. Power spectra of the E-W and vertical components of current measured in 16 Hz. (a) the data duration is 30 minutes at flood flow (from 18 : 30 to 19 : 00) and (b) at the ebb flow (from 0 : 30 to 1 : 00).

までの6時間)と関連しているようである。この区間でこのような相違が生じた原因については、現時点では推測の域を出ないが、風波による擾乱が著しく強くなって、通常の再懸濁を引き起こすSSとは異なる物質まで巻き上がったことによるのではないかと考えている。従って、Fig. 8の散布図を描くときにはこの区間を除いた。

前節で、上げ潮時と下げ潮時における再懸濁の違いについて述べたが、さらに詳細を把握するために、上げ潮時と下げ潮時のそれぞれにおける流れのパワースペクトルを比較した。Fig. 10の(a)と(b)に、9月2日18時30分から19時00分まで(上げ潮最盛時)、および、9月3日01時00分から01時30分まで(下げ潮最盛時)の、主軸方向に近い東西方向成分(細く濃い線)と鉛直成分(太く薄い線)のパワースペクトル分布を描いた。16Hzで測定しているために30分間で28800個と多数のデータがあることから、そのままフーリエ解析(調和解)を行い、その係数から得られる振幅を二乗してそれをパワーとした。得られたパワーは特に高周波数のところでは

つきが大きいことから、見やすくするために、この図は50個の移動平均をとって描いている。横軸の数値は周期に換算して表した。

Fig. 10(a)の上げ潮最盛時のスペクトルは、Fig. 7に示した流れの区間を含んでおり、その中の東西方向成分に現れていた5秒前後の周期的な変動が、このスペクトル分布にも明瞭に現れている。この原因に関しては、論文などによる学術的な根拠は検索できなかったが、広島湾を観測している研究者からも5秒から8秒程度の周期の変動がたびたび観測されたとの情報が得られ、太平洋側から侵入する“うねり”ではないかと考えている。うねりのような波動であるとするれば、後で示す乱流フラックスに関わる現象ではないとして、この変動は無視して以下の解析を進めている。

Fig. 10の中の約5秒周期のピークを除くと、(a)と(b)の両図とも、水平方向成分と鉛直方向成分のパワースペクトルは、周期換算で0.5秒から10秒の間でほとんど一致して $-5/3$ 乗則に乗っており、このスケールでは等

方性の乱流になっていると考えられる。また、両図とも、鉛直方向成分については、20秒から30秒程度のところでパワーは抑えられているが、水平方向成分については、さらに長い周期のところまで $-5/3$ 乗則に乗っている様子が認められる。このときの潮流の強さが15 cm/s程度であることから、渦の大きさも推算できる。

鉛直方向成分のパワーが周期換算で20秒から30秒のところで抑制されている事に関しては、密度成層の状態も関連すると思われるが、観測期間中は海底上数m以内においては、CTDによる水温・塩分ともほとんど一様で、有意な水温成層や塩分成層は認められなかった。この抑制されたパワーの値は、下げ潮最盛時に比べて上げ潮最盛時の方が2倍近く大きく現れている。

周期換算で0.5秒よりも短いところでは、鉛直成分は粘性の影響を受けたかのように大きな減衰率を伴って $-4$ 乗に近い傾斜でパワーは落ちている。粘性領域として理想的な $-7$ 乗則には届かないが、Grant *et al.* (1962) に示された潮流中で実測したときのエネルギー減衰率に近い傾斜を示している。周期換算で0.5秒の渦のサイズは、主軸方向の平均流速が15 cm/s程度であることを考慮すると、7 cm程度に相当すると見積もられる。

水平方向成分については、流速計を固定して Euler 的に計測した影響が現れ、短周期領域でのスペクトルの傾斜(減衰率)は逆に抑えられている。つまり、エルゴード的ではない乱れが流れに運ばれてくることから、ドップラー効果のように乱れの周期は短くなり(周波数は高くなり)、Euler 的計測によって本来の周期におけるパワーが短い周期にシフトし、見かけ上パワーの減衰率が抑制されたものと考えられる。

#### 4.3 物質フラックスについて

音響散乱強度から濁度への換算式が得られたことで、物質フラックスの定義から、濁度と流れの積によって SS の移流フラックスを算出することができる (Fischer *et al.*, 1979 など)。一般に乱流の中で物質が拡散する過程を考えると、まず、流れや濁度は、それぞれ乱流を取り除いた平均値(以下、乱流平均値)と乱流に係わる偏差値(以下、乱れ成分)に分けることができる。周防

灘のように潮汐周期平均流(以下、残差流、または、残差成分と呼ぶ)を伴う潮流が卓越する海域では、流れと濁度の乱流平均値は、さらに、残差成分とそれからの偏差成分ともいえる振動成分に分けられる。流速の一向成分を  $u$ 、濁度を  $C$  とし、乱流平均を添字  $a$ 、乱流に係わる偏差成分(乱れ成分)にダッシュ'をつけ、さらに、残差成分と振動成分を、それぞれ、添字  $S$  と  $T$  で表すと、定点で測定された流れと濁度は次のような形で分解して表現することができる(とされている (Fischer *et al.*, 1979)。ただし、振動成分は、調和解析結果にもあるように実際には複数存在するが、ここでは簡単にして理解を容易にするために、次のように、一成分のみを取り上げて展開する。

$$u(t) = u_a(t) + u'(t) = u_s + u_T(t) + u'(t) \quad (1)$$

$$C(t) = C_a(t) + C'(t) = C_s + C_T(t) + C'(t) \quad (2)$$

濁度に関わる SS の移流フラックス  $u(t)C(t)$  を乱流平均した  $[uC]_a$  は、 $u_a C_a + [u'C']_a$  のように2つの成分に分解することができる。乱流平均したプロセスに注目すると、後者は乱流拡散によるフラックスとして、これ以後、“乱流フラックス”と呼び、前者を“移流フラックス”とする。

さらに、移流フラックスを周期平均すると  $[u_a C_a]_s = u_s C_s + [u_T C_T]_s$  のように分解することができる。この右辺の第1項は横断面を横切る通過流があれば、それによる輸送量と平均流のシアーに引き起こされる分散係数に関わるもので、第2項は振動成分による海水交換に関わるフラックスと振動成分のシアーによる分散係数に関わるものである。これらそれぞれのフラックスは、この観測で使用した Vector 流速計のデータから計算上は導き出すことはできるが、1測点のみの値は意味をもたない。流れのシアーの強い海底近傍では移流フラックスは鉛直的な変動が大きく、Yasuda (2004) にも述べているように、鉛直方向や断面内の有意な領域で積分(または平均)することによって、分散係数などの物質輸送に関わる物理量になるといえる。

#### 4.4 SSの乱流フラックスとその時間変動

拡散係数は、濃度分布の統計的分散値の時間変化率で定義される。拡散に関わる乱流フラックスは、本来、Lagrange的に測定されるもので、Euler的に固定点で測定されたデータから乱流フラックスを求めるときには、何らかの問題が生じるおそれがある。また、離散値として得られたデータであるために、基礎データの個々の時間間隔や乱流平均をする時間の長さがフラックスの値に影響するのではないかと考えられる。流れは、通常は定点でEuler的に測定するため、Fig. 10のパワースペクトルを見ると、周期換算0.5秒以下では主流方向成分は減衰率が抑制され、鉛直方向成分は $-5/3$ 乗よりも減衰率は大きくなって、等方的な乱れの他に粘性の影響が出ていると考えられる。このようなことから、本報では0.5秒平均値を乱流フラックスに関わる基礎データとして第一段階のフラックスの解析を試みた。

Fig. 11は、乱流フラックスを算出するための平均時間（以下、乱流平均時間）を30秒と5分および30分にした場合の東西と鉛直の各方向の乱流フラックスの25時間変動で、それぞれ、(a)、(b)、(c)に描いた。(a')は、(b)との比較など、変動が分かり易いように(a)を10個（5分間に相当）の移動平均で描きなおしたものである。フラックスに関わる物質濃度は、ここでは濁度を用いているため、これらのフラックスはSSのフラックスと見なすことができる。また、Vector流速計は海底上に固定して定点で計測しているために、水平方向成分については流れ（乱流平均流）とは逆方向のフラックスが得られるが、鉛直方向成分に関しては、乱流平均流はほとんどないために、全時間に亘って正（上向き）のフラックスを示している。乱流平均時間を30分間にするると、鉛直方向のフラックスとは異なり、水平方向のフラックスは、平均流の弱いとき（憩流時周辺のとときでFig. 5による）に大きく変動していることがわかる。

乱流平均時間を30秒間にした(a)と5分間の場合の(b)の鉛直方向フラックスを見ると、どちらもフラックスは平均流が強いときに大きく現れており、その値はお互いに近いようで、乱流平均時間を30分間にした(c)の場合でも近い値を示しているように見受けられる。ちなみに、(a)、(b)、(c)の鉛直方向フラックスの25時間

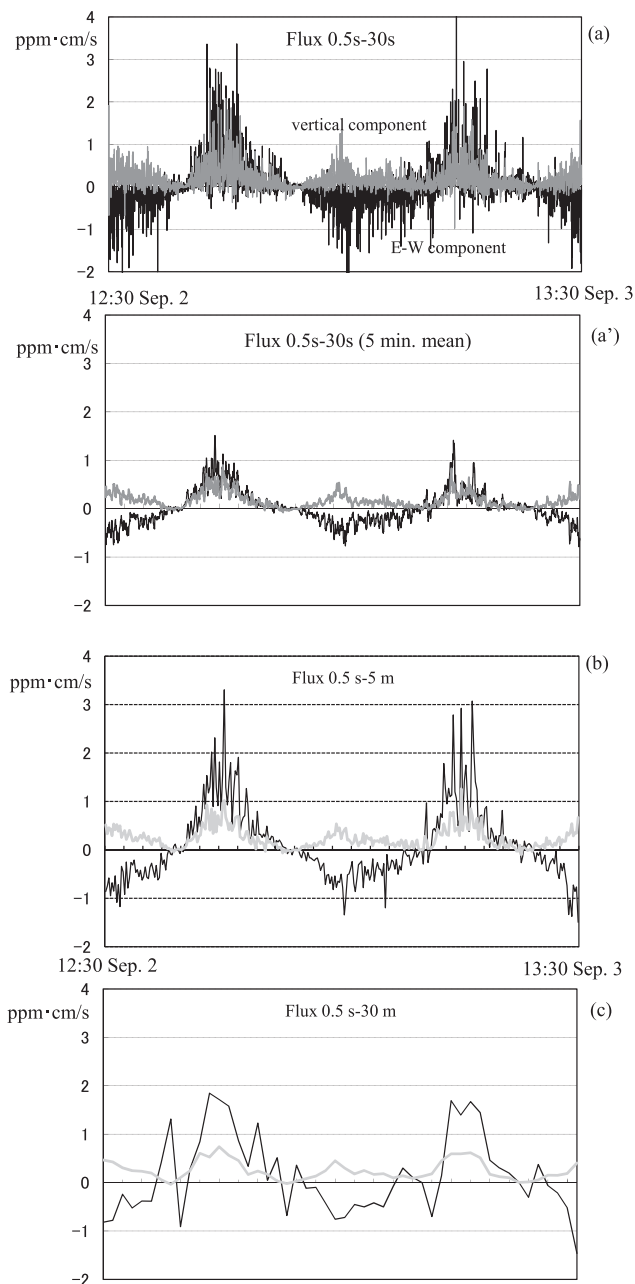


Fig. 11. Temporal variations of turbulent SS flux in E-W (black line) and vertical (light line) directions. Time interval of basic data (turbulent component) is 0.5 seconds. (a) Turbulent averaging time is 30 seconds, (a') its running mean over 10, (b) turbulent averaging time 5 minutes and (c) 30 minutes.

平均値は、それぞれ、0.166 ppm・cm/s, 0.172 ppm・cm/s, 0.250 ppm・cm/s であった。最適な乱流平均時間をここで明示することはできないが、Fig. 10 で示した鉛直流のパワースペクトルが、周期換算で 20~30 秒以上では、パワーが増加しないことと何らかの関連があると考えている。

基礎データを作る時の平均時間（基礎データの時間間隔）については、比較のために、平均時間を 5 秒と 30 秒にして基礎データを作り、5 分間で乱流平均した場合の各方向の乱流フラックスを Fig. 12 に描いた。これらと基礎データを 0.5 秒毎とし乱流平均時間を 5 分とした Fig. 11(b) と比較すると、基礎データの時間間隔が長くなるとフラックスの値は小さくなるようである。

風向風速の計測同様、潮流も固定点で Euler 的に測定することは一般的な方法ではあるが、Fig. 11 と Fig. 12 にも見られるように、水平方向のフラックスは乱流平均された潮流の方向とは逆の方向に現れている。Lagrange 的に平均流に乗って乱れを測定した場合には、乱流フラックスは濃度勾配の負の方向に生じるはずであるが、ここでは固定点で測定されたために、Euler 的な平均流による移流フラックスがその方向の乱流フラックスよりも大きくなり、逆方向のフラックスが見かけ上現れたと考えられる。Euler 的に測定された流れと物質濃度に基づく乱流フラックスの問題点などに関して検討考察された文献は見いだせなかったが、乱流平均された流れやそれによる移流フラックスと何らかの関係があると考えられる。本報では再懸濁を対象として鉛直方向の乱流フラックスに着目したことから、水平方向の乱流フラックスの議論は次に譲りたい。

Fig. 13 には、16 Hz のものを 8 個で平均した 0.5 秒間平均値を基礎データにして、乱流フラックスのための平均時間を 1 分間にした場合の鉛直乱流フラックスと、潮位および潮流の流速値（絶対値；潮流ベクトルを  $v$  とすると  $[v^2]^{1/2}$  の値）を描いた。フラックスについては、見やすくするために 10 分間で移動平均したものも太く淡い線で描いた。潮位変動を見ても日潮不等が非常に小さいことが認められ、上げ潮時と下げ潮時の潮流の強さもほとんど同程度であることがわかるが、Fig. 11 や Fig. 13 の鉛直フラックスでも示されているように、下げ潮時に比べて上げ潮時の方が鉛直フラックスが大きい

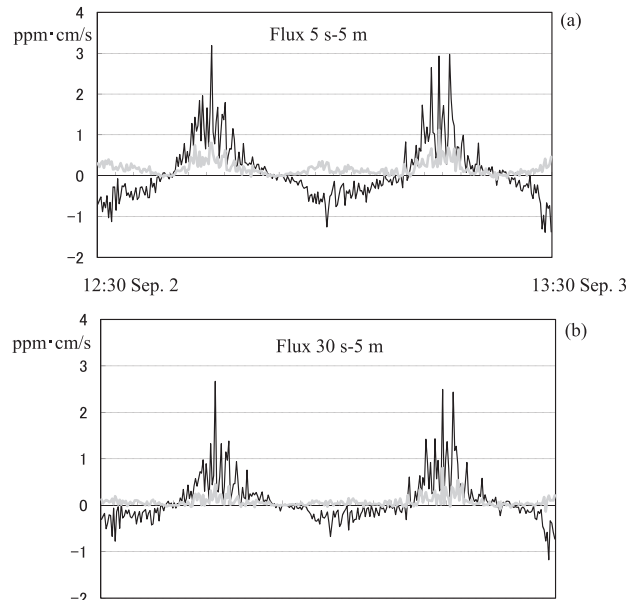


Fig. 12. The same figure as Fig. 11(b) but the time interval of basic data is 5 seconds in (a) and 30 seconds in (b).

ことが明瞭に認められる。

2005 年と 2007 年の観測結果から、大潮期には、潮流による再懸濁が引き起こされていることが明らかになり、再懸濁の程度は、下げ潮時よりも上げ潮時で大きいことが示された。2008 年の大潮期観測からは、上げ潮時において、流れの鉛直方向成分のパワースペクトルは大きく、さらに、鉛直乱流フラックスも大きいことが導き出された。これらの現象は、潮流の乱れが下げ潮時に比べて上げ潮時で大きいことを表しているが、他の海域でも同様のことが起きているのであろうか？ このことは沿岸海域の底泥輸送を考えると非常に重要なプロセスになると考えられる。つまり、潮汐が定常波に近い海域において、上げ潮時に再懸濁が大きいということということは、潮時平均すると再懸濁された物質は湾奥部や岸寄りに輸送されることになり、沿岸に向かって底泥は堆積される傾向にあるといえる。また、定常波に近い海域においては、上げ潮時は潮位が次第に高くなる時に当たり、このことが乱れを大きくする原因になっていると推測される。その根拠に関しては、Schlichting (1961) の教科書などに、流れが徐々に狭いところ（断面積の小

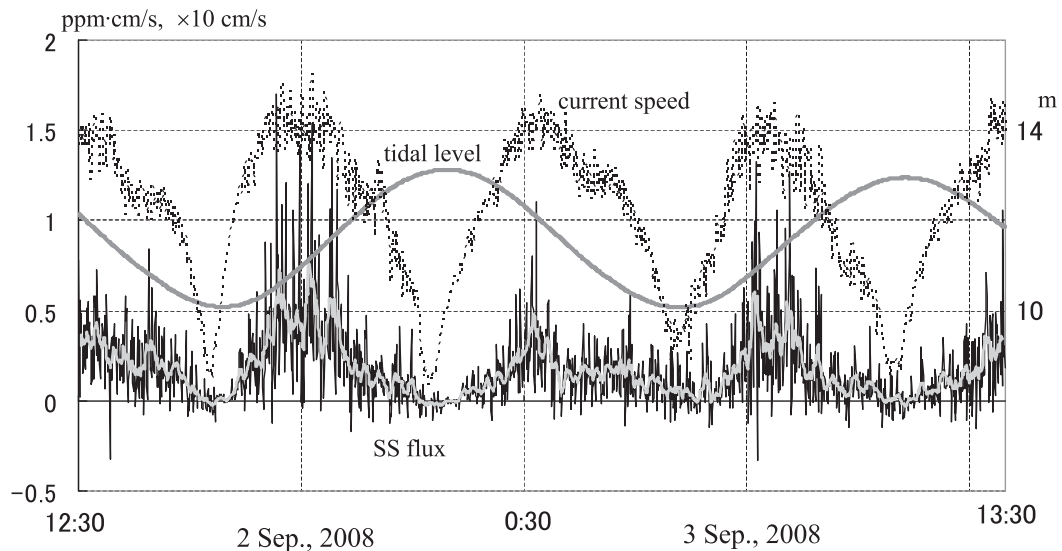


Fig. 13. Temporal variations of vertical turbulent SS flux, tidal level and current speed. Turbulent averaging time for flux is one minute and light and thick line indicates ten minute running mean. Tidal level and current speed are drawn on one minute average.

さい方)に向うときには流れは整流されて乱れが抑えられるが、広い方に向かうときには乱れが生成されやすいことが記されている。この海域のように、潮汐が定常波に近く、上げ潮時に潮位が増加する場合には、流れの領域が時間とともに鉛直方向に広がることから、流れが広い方向に向かう場合に対応すると考えられる。下げ潮時は、逆に流れの領域が徐々に狭くなる傾向にあり乱れは抑えられているのではないかと考える。乱流に関する理論的な考察も弱く拡大解釈の感も否めないが、ここに記したことに関しては、“潮位変動を伴う振動流中の乱流の振る舞い”，つまり，“tidal inletにおける乱流現象”の解明ということで、理論の構築と共に、さらに詳しくデータを解析する必要があると考えている。

## 5. おわりに

以上、この研究において次のようなことが明らかになった。

(1) 観測海域の周防灘においては、大潮期およびその前後では潮位変動に引き起こされる潮流が優勢であるが、小潮期には潮流よりも非周期的な流れが顕著に現れやすい。

(2) 潮流による底泥の再懸濁は中潮期から大潮期にかけて明瞭に認められるが、小潮期に生じた優勢な流れは、中潮期の流れよりも大きいときでも再懸濁を引き起こしにくい。

(3) 2005年の再懸濁は、潮流の強さに対応してM4潮周期で見られるが、2007年は片潮的に上げ潮期に優勢な再懸濁が顕著に認められた。また、濁度の平均値は2007年の方が低かった。

(4) Vector流速計は海底上に固定して、流れや音響散乱強度をEuler的に測定したため、水平方向の乱流フラックスは、潮流による移流の方向とは逆の方向に生成されたが、鉛直方向のSSの乱流フラックスは、ほとんど常に上向きで、実質的な輸送量を表していると考えられた。

(6) SSの鉛直方向乱流フラックスは、潮流の強さに対応して変動するが、下げ潮の時よりも上げ潮時で大きい値になった。

(7) 上げ潮時と下げ潮時に16 Hzで測定した流れのパワースペクトルは、周期換算で0.5秒から10秒の間では、等方性乱流が成立しているようで、水平の主流方向と鉛直方向のパワーは一致して $-5/3$ 乗則が認められた。

(8) 周期が0.5秒よりも短い領域では、鉛直方向成分



は粘性の影響を受けたかのようにパワーの減衰率が-4乗程度と増加した。主流方向成分に関しては、減衰率は逆に抑制され、固定点で測定したことの影響が見られた。

- (9) パワースペクトルの鉛直方向成分は、周期 20~30 秒でパワーは抑えられ、上げ潮最盛時と下げ潮最盛時と比較すると、上げ潮の時の方が 2 倍近く大きく、乱流フラックスの強さと対応しているようであった。

周防灘豊前海域における当観測結果によると、下げ潮時よりも上げ潮時に再懸濁を起こしやすいことが示され、底泥は下げ潮時よりも上げ潮時の潮流に輸送されやすいことが推測される。このことは、底泥は再懸濁によって湾奥部や陸岸の方向に輸送されることを暗示している。観測に協力いただいた豊前海区海洋環境保全協議会の湯浅豊年氏によると、豊前海の海岸は埋め立てを進める前は広い干潟があったとのことで、さらに、Fig. 1 の豊前海に面する荻田港や簗島港などでは、底泥が堆積しやすく、航路維持のための浚渫工事が絶やせないとのことである。本報告は 1 測点のみの観測結果で、今後、測点を増やしてこのプロセスを全海域的に明らかにし、モデルに適用できる形にして提示することができればと考えている。また、学術論文においては、メカニズムやプロセスなどを理論に基づいて示す必要があると考えるが、気象条件などによって複雑で変化しがちな現場海域の現象を、現段階ではここまでしか提示できなかった。しかしながら、Vector 流速計という高性能の流速計を実際の沿岸海域に設置して、乱れや物質フラックスをこのように解析した報告はほとんどないようで、本報告が今後の沿岸海洋環境の研究発展にも貢献できればと思う次第である。

## 謝 辞

豊前海区海洋環境保全協議会事務局長の湯浅豊年氏には、係留系設置などの現地観測に際して、豊前海の漁業協同組合の理解を得られるように準備段階から積極的に協力を頂いた。外部予算が伴わない中で、(独)水産大学校水産流通経営学科のスタッフの経常経費予算を融通していただいて観測を実施することができ、この度の貴

重なデータを得ることができた。また、九州大学応用力学研究所教授 松野 健博士には、Turbo-Map (落下式微細構造測定装置) による乱流計測の観点から貴重なコメントをいただき、さらに、当時、(独)産業技術総合研究所中国センターの高杉由夫博士からは潮流の乱れや瀬戸内海に侵入するうねりに関してコメントをいただいた。これら関係各位にこの場を借りて厚くお礼申し上げます。

## References

- Butman, B., M. Nobei and D.W.Folger (1979): Long-term observations of bottom current and bottom sediment movement on the Mid-Atlantic Continental Shelf. *J. Geophys. Res.*, **84**, 1187-1205.
- Fischer, H. B., E. J. List, R. C. Y. Koh, J. Imberger and N. H. Brooks (1979): *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press, New York, 483 pp.
- Grant, H. L., R. W. Stewart and A. Moilliet (1962): Turbulence spectra from a tidal channel. *J. Fluid Mech.*, **12**, 241-268.
- Kawana, K., T. Tanimoto and T. Ichiye (1984): Entrainment of bottom sediment in the Seto Inland Sea in summer. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **42**, 381-388.
- 岸本充史, 安田秀一, 鬼塚 剛, 高島創太郎, 河野史郎, 湯浅豊年 (2007): 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—. 水産大学校研究報告, **56**, 47-60.
- 中川康之, 三谷正人, 友田伸明, 松本英雄 (2007): 周防灘北部沿岸域における浮遊泥の輸送特性. 海岸工学論文集, **54**, 446-450.
- Sanford, L.P., W. Panageotou and J.P. Halka (1991): Tidal resuspension of sediments in Northern Chesapeake Bay. *Mar. Geol.*, **97**, 87-103.
- Sanford, L.P. (1993): Wave forced resuspension of upper Chesapeake Bay muds. *Estuaries*, 1-16.
- Schlichting, H. (1961): *Boundary-Layer Theory*. Translated by J. Kestin. McGraw-Hill, New York, 747 pp.
- Senjyu, T., H. Yasuda, S. Sugihara and M. Kamizono (2001): 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.
- 山口哲昭, 安田秀一, 鬼塚 剛, 伊沢瑞夫, 高島創太郎, 河野史郎, 湯浅豊年 (2009): 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. 水産大学校研究報告, **58**, 179-189.
- Yasuda, H., T. Higo and Y. Takasugi (1997): Generation of high turbidity layer in the Seto Inland Sea. *J. Coast. Res.*, Special Issue **25**, 31-40.
- Yasuda, H. (2004): Analytical study of longitudinal mass flux due to the shear effect in a tidal basin. *J. Oceanogr.*, **60**, 587-596.
- Yasuda, H. (2009): 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.

## Tidal Re-Suspension Process and Analysis of SS Flux in Suonada, the Seto Inland Sea

Hidekazu Yasuda<sup>†1</sup>, Tetsuaki Yamaguchi<sup>†2</sup>,  
Shiro Kawano and Sotarou Takashima<sup>†3</sup>

### Abstract

Fortnight field experiments at the stationary observation point in the Suonada sound, the Seto Inland Sea were carried out at the late summer, when diurnal inequality of tides is rather small like the early spring, to reveal the physical process of the environment near the basin floor. It has been recognized from the experiments that tidal currents were dominant and tidal re-suspension was induced around the spring tide and that temporary currents except tidal currents were generated and re-suspension due to such currents was not observed around the neap tide even when they were rather strong. While tidal re-suspension around the spring tide was induced quarter-diurnally relating to the tidal current speed, the semi-diurnal variation was also recognized which came in view clearly at the flood flow. To investigate such a re-suspension process more minutely, 25 hour field-experiment was carried out using a highly accurate current meter by which the current and turbidity can be measured in 16 Hz. It has been clarified that the power spectrum was larger by one and half times at the flood flow than at the ebb flow and further that the vertical turbulent flux of SS was also larger at the flood flow than at the ebb one.

**Key words:** Suonada sound, tidal re-suspension, power spectrum, SS turbulent flux

(Corresponding author's e-mail address: yasuda@fish-u.ac.jp)

(Received 23 April 2010; accepted 24 August 2010)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2010)

---

<sup>†1</sup> Graduate School of Fisheries Science, National Fisheries University  
Nagata-Honmachi, Shimonoseki 759-6595, Japan

Corresponding author's e-mail address : yasuda@fish-u.ac.jp

<sup>†2</sup> Graduate student of Fisheries Science, National Fisheries University  
(now Yamaguchi Municipal Fisheries Corporation)

<sup>†3</sup> Kyushu Office of IDEA Inc.