

広島湾北部海域における吹送流の鉛直構造と水質の変動特性

川 西 澄*・木 村 隆 弘**

1. はじめに

潮流の弱い閉鎖性内湾では、吹送流が湾内の物質輸送に重要な働きをしており、しばしば強風によって水質が大きく変化することが報告されている(湯浅ら, 1995; 高杉ら, 1998; 橋本ら, 2000)。過去の現地観測(高杉ら, 1998)によると、風の状態が同じでも発生する吹送流の鉛直構造は、時間によって大きく異なっている。淡水流入量や潮流振幅の変化などに伴う海洋構造の変化によって、吹送流の鉛直構造は大きく変わると考えられるが、その実態は十分明らかになっていない。

本研究は閉鎖性内湾である広島湾北部海域において、NORTEK 社製の超音波ドップラー分布計(以下 ADP と呼ぶ)と TPM クロロテック(アレック電子製)によって、流速分布と水質の変動を長期間連続的に観測し、潮汐振幅の大小や気象条件が吹送流の鉛直構造に与える影響と発生した吹送流による水質変動を明らかにすることを目的とする。

2. 方 法

図-1 に示す広島湾北部海域の A 地点(34°19'49"N, 132°24'56"E)において、2000 年 10 月 14 日 10:35~11 月 18 日 9:45 の間、流速の鉛直分布の連続観測を行った。観測地点の平均水深は約 17 m である。厳島と能美島の間にある宮島・奈佐美瀬戸が広島湾北部海域の主な開口部となっており、東側は呉湾に繋がっている。上述した ADP のセンサーヘッドは下向きにして、水平移動が最も少ない養殖カキ筏連の端の灯浮標筏に係留した。ADP のトランスデューサーの位置は海面下約 0.5 m である。ADP の測定層厚は 0.5 m、平均時間は 6 分(Ping 周波数 8.5 Hz)とし、データ記録間隔は 25 分とした。

ADP 観測と同時に、深さ 4 m に係留した TPM クロロテックを使用して、水温、塩分、濁度、クロロフィル蛍光を連続測定した。また、1 週間に 1 度、測器の清掃・点検を行い、合せて濁度とクロロフィル蛍光の鉛直分布

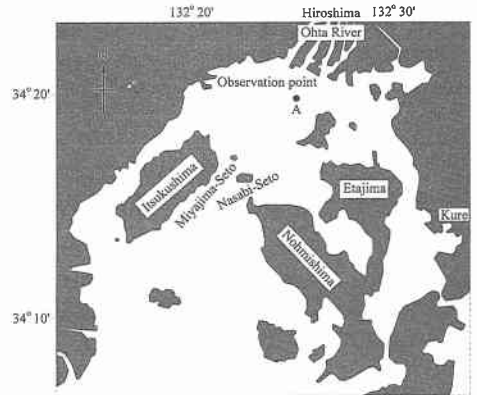


図-1 観測地点

を測定した。

なお、表層水温は、ADP のセンサーヘッドに内蔵されている水温センサーで連続記録されている。

3. 結果および考察

(1) 風と流速の経時変化

広島気象台における 1 時間毎の日降水量と風、ADP によって測定された東方向流速の経時変化を図-2 に示す。図-2(a)の日降水量をみると、11 月 1 日に 40 mm、2 日に 30 mm 程度の降雨がある。図-2(b)の風速ベクトルをみると、10 月 18 日に $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ を超える北北東の風が吹いている。観測期間は北よりの風が卓越しているが、一部、海陸風にともなう南よりの風も確認される。

図-2(c) に示す東方向流速の経時変化をみると、深さ 1.5 m と 10 m では流速変動の様子が異なっている。すなわち、深さ 10 m では半日周期および大潮小潮の変動が明瞭に現れているのに対して、深さ 1.5 m の表層では半日周潮流の変動がみられるものの、その変動はかなり不規則である。これは主に海上風の影響を受けているためであり、図-2(b)の風速ベクトル経時変化とくらべてみると、風向と流向の組み合わせによって、表層の潮流が減衰、増幅されていることがわかる。

(2) 水温、濁度、クロロフィル a の経時変化

図-3 に深さ 4 m における水温、濁度、クロロフィル a

* 正 会 員 工 博 広島大学助教授 大学院工学研究科 社会環境システム専攻

** 学生会員 広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻

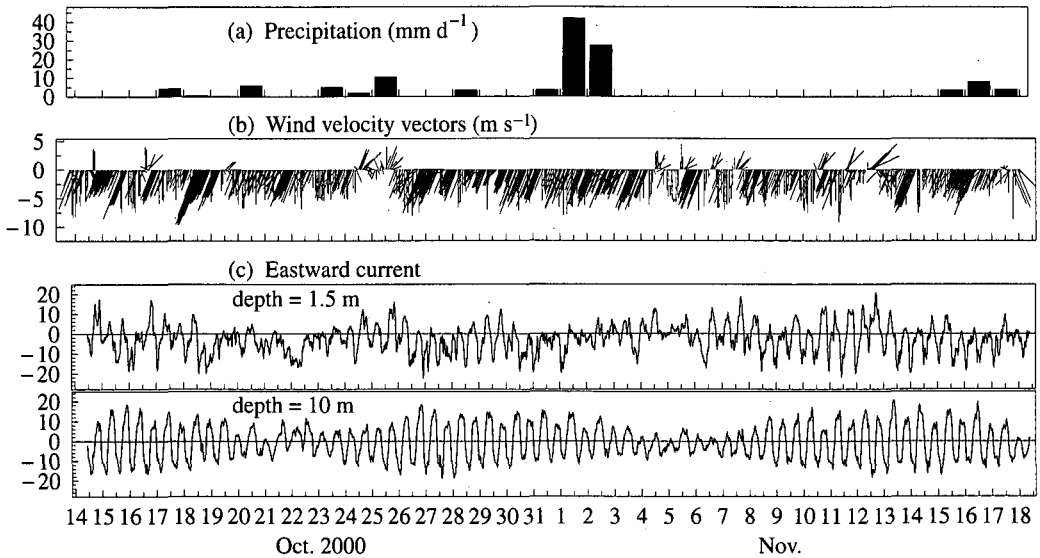


図-2 日降水量と風（広島気象台）および東方向流速の経時変化

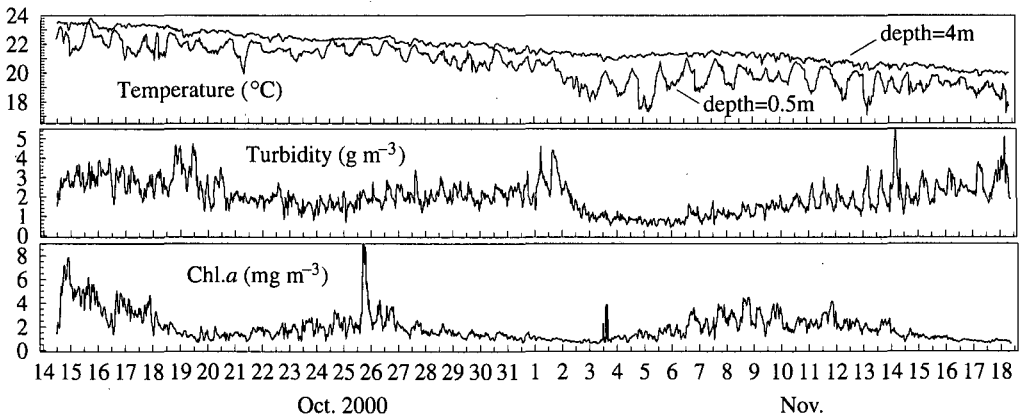


図-3 深さ 4 m における水温、濁度、Chl. a の経時変化

の経時変化を示す。ただし、同時に測定された塩分は生物付着により、塩分センサーの洗浄前と洗浄後で塩分値が変化しており、信頼性に欠けるので示さない。なお、図-3 には、ADP の水温センサーによって測定された表層（深さ 0.5 m）の水温も示してある。

観測期間は冷却期に入っているため、表層の方が水温が低く、観測開始時から終了時までに約 4°C の水温低下がみられる。深さ 4 m の水温変動にくらべ、ADP の水温センサーによって測定された表層の水温は変動が大きく、日射の影響が現れている。深さ 4 m と 0.5 m の水温差は小潮期より大潮期の方が大きい傾向があるが、これは潮流の大きさに伴う鉛直渦拡散係数の変化を反映した結果と考えられる。

11 月 2 日から 6 日にかけて水温と濁度が大きく低下しているが、これは 11 月 1 日と 2 日の降雨に関係してい

る可能性がある。クロロフィル a は北風が弱まった 25~26 日に $9\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ の最大値を示している。また、長周期の変動をみると、若潮期にクロロフィル濃度が大きくなる傾向が見られるが、理由は良くわからない。

(3) 残差流と水質の変動特性

図-4 に平均風速ベクトルの経時変化と東方向残差流の時空間（深さ-時間）分布を示す。平均風速と残差流は、離散 Wavelets 変換行って、周期約 30 時間以下の変動成分をカットした後、逆変換して求めたものである。残差流の東方向成分は日によって大きさはもちろん、符号も変化している。平均風速の変動と比べてみると、上層では北風が強くなると、西方向成分が、北風が弱くなると、逆に東方向成分が発生する傾向がある。一方、下層の残差流には上層と反対の変動がみられ、鉛直循環流が発生している。

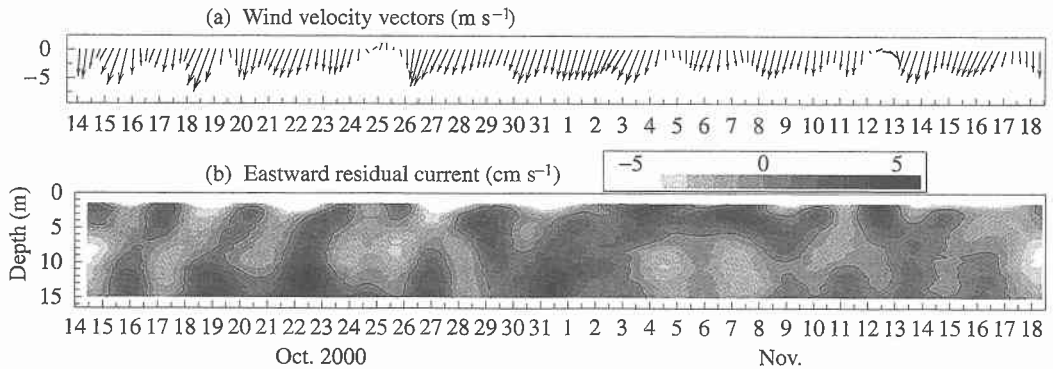


図-4 平均風速ベクトルの経時変化と東方向残差流の深さ-時間分布

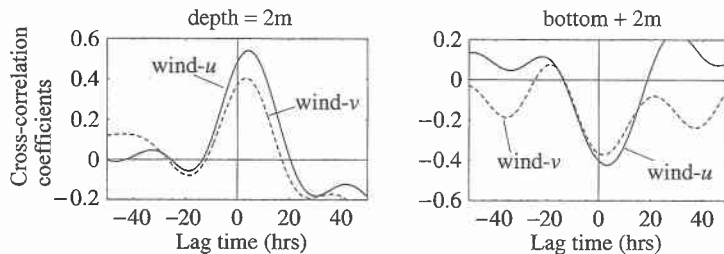


図-5 平均風速の北方成分と東方向残差流の相互相関係数

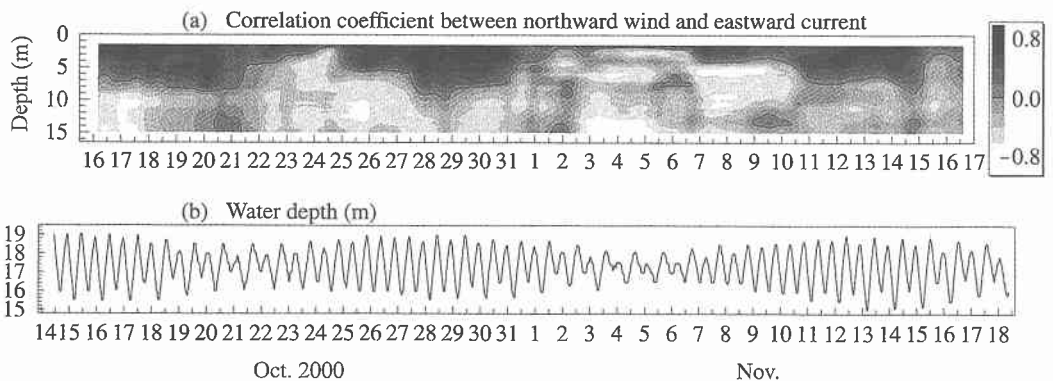


図-6 北方風速変動と東方向残差流の相互相関係数の深さ-時間分布

平均風速の北方向成分と残差流の相互相関係数を、深さ 2 m と海底上 2 m について求めた結果を図-5 に示す。上述したように、上層と下層では風に対する応答が逆になっている。北方向風速との相関は残差流の東方向成分 u の方が北方向成分 v より高い。風速に対する流速の応答遅れは約 5 時間である。

高杉ら (1998) は本研究と同一地点で海底近傍と深さ 3 m と 7 m 層を測流し、北北東の風が吹いた時の流れについて報告しているが、その結果によると、深さ 7 m 層の流れの方向は、同様な風が吹いても表層と同じ方向の場合と逆の場合がある。風に対する流れの応答が時間的

にどのように変化しているのかを調べるため、相関の高かった北方向風速の時間変動と東方向残差流の時間変動の相互相関係数を、2 時間おきに長さ 4 日間のデータを取り出して計算し、相互相関係数の時空間(深さ-時間)分布を求めた。結果を水深の時系列とともに図-6 に示す。実線のコンターラインは相関係数=0 を示している。

図-6 から、風速変動に対し正の相関を示す海水の厚さは、時間とともに大きく変化しており、潮汐にともなう水深変化と比較すると、正の相関領域は大潮で厚く、小潮で薄くなる傾向のあることがわかる。吹送流の鉛直構造は風の強さと吹送時間や海洋構造によって変化する

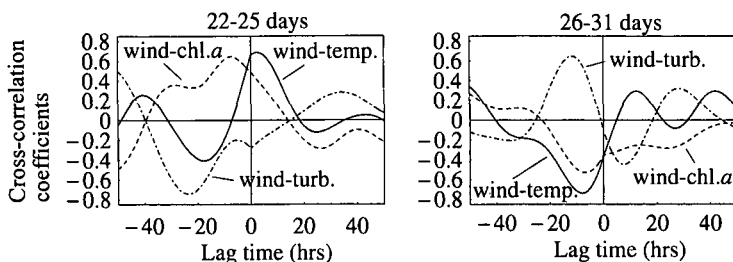


図-7 北方向風速変動と深さ4mの水質の相互相関係数

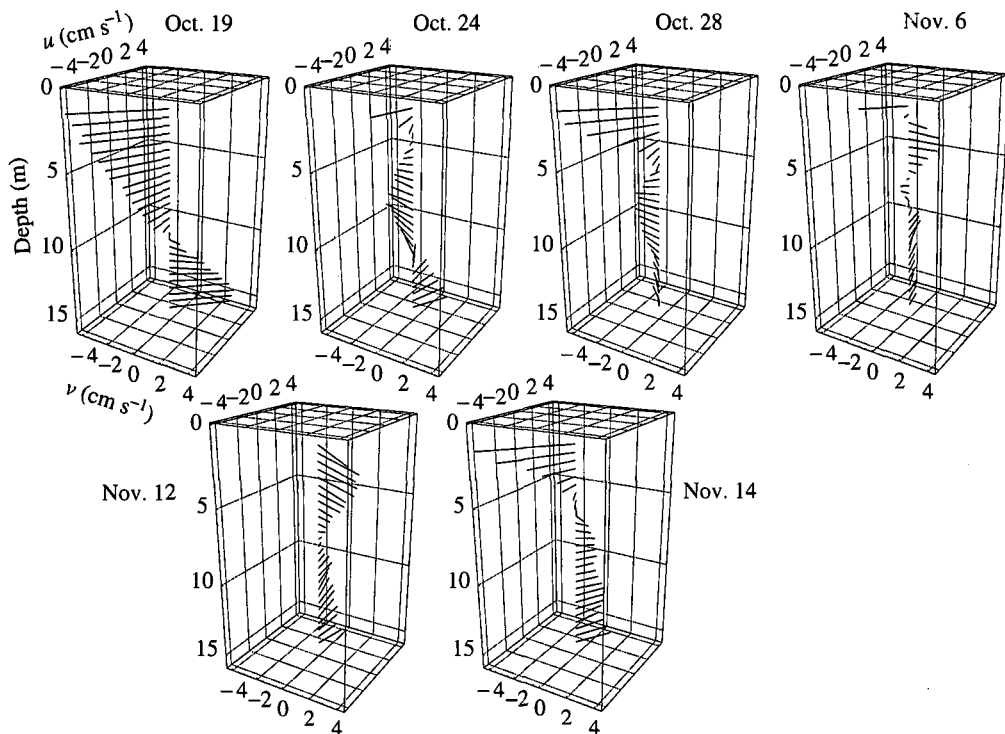


図-8 残差流の鉛直分布

と考えられるが、図-6の結果は、潮流振幅の大小によって、鉛直渦粘性係数の分布や密度成層状態が変化し、吹送流の鉛直構造が大きく変っていることを示唆している。

11月はじめは風速変動に対し正の相関を示す海水の厚さが非常に薄くなっているが、これは潮汐が観測期間中最も小さかったことに加えて、図-2に示したように、11月はじめにまとまった降雨があり、密度成層が強くなっていたためと考えられる。

水質計を係留した深さ4mでは風による流れが大潮期と小潮期で異なるため、風が引き起こす水質変動も大潮期と小潮期では異なることが予想される。図-7は北向き風速の変動に対する水温、クロロフィルa、濁度の相互相関係数である。吹送流の鉛直構造の変化（風に対

する残差流の応答の仕方）に応じて、風速変動に対し正の相関を示す場合と負の相関を示す場合がある。すなわち、風速と水温、クロロフィルaの変動の相関係数は、風速と吹送流速の変動が正の相関を示す深さに水質計がある場合、正、そうでない場合、負となっている。

吹送流による水平移流により水質変動が起きていると考えると、観測地点の西側の方が東側より水温、クロロフィルaが低いことになる。残念ながら、水質の空間分布が観測されていないのははっきりした事は言えないが、水温について言えば、観測時は冷却期であり、湾の西側で水深が小さいため、水温低下が東側より速いと考えられ、過去の観測結果（第六海保水路部、1997）でも、湾の西側で水温が低くなっている。濁度と風速変動の相関係数は、ラグ0で小さく、風との関係ははっきりしな

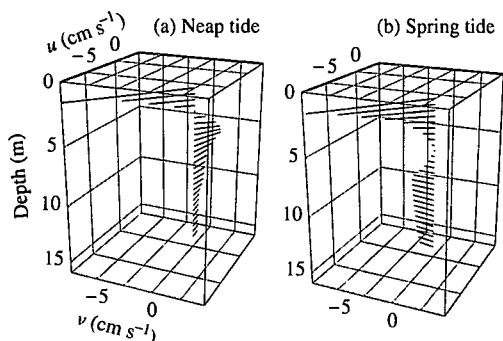


図-9 小潮、大潮時の残差流の鉛直分布 (数値実験結果)

い。

(4) 残差流の鉛直構造の変動特性

観測期間にみられた典型的な残差流の鉛直分布を図-8に示す。

図-4から分かるように、11月12日を除いて、北または北北東の平均風が吹いている時のものである。潮汐振幅が大きく、図-6に示した表層の正の相関領域が厚い時(10月19, 28日, 11月14日)と、潮汐振幅が小さく、表層の正の相関領域が薄い時(10月24日, 11月6日)の流速分布を比べると、表層における深さ方向の流速、流向の変化に違いがみられる。すなわち、潮汐が小さく表層の正の相関領域が薄い時は、表層で流速と流向の深さ方向変化が急激である。11月6日は、前述したように、潮汐振幅が観測中最も小さくなっているのに加え、11月はじめの降雨の影響も加わって表層の速度勾配が非常に大きくなっている。観測期間中最大の風が吹いた直後の10月19日は、流向の反転する深さが10m付近にまで下がっている。以上のように、気象条件に加えて潮汐振幅の大小が残差流(吹送流)の鉛直構造に大きく影響していることがわかる。風の弱い11月12日の上層における流向は、北風の吹いている時と異なり、南東から東方向で、風が流動場に与える影響が非常に大きいことがわかる。

吹送流に対する潮汐振幅変化の影響をみるため、広島湾の湾口部(大島瀬戸、諸島水道、柱島水道)で4大分潮を与えて、平均的な初冬の河川流量と熱収支条件のもとで、風速 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の北北東の風を与えて、M-Yレベル2.5の乱流モデル(Mellor・Yamada, 1982)が組み込まれているPOM(Blumberg・Mellor, 1987)を使って1ヶ月の計算を行った。水平格子間隔は600mとし、鉛直方向は σ 座標を用いて15層に分けた。外部時間ステップは

0.2秒、内部時間ステップは6秒とした。1ヶ月間の計算の最後の潮汐2周期分を平均した結果を図-9に示す。ただし、観測値との比較のため、ADPの測定深度における値を、15層の計算結果を内挿補完して求めて表示してある。

風が吹き去る方向に流れる表層の層厚は、図-9(a)の小潮時の方が図-9(b)に示した大潮時のものより薄く、潮汐振幅の大小が吹送流の鉛直構造に、観測結果と同様な影響を与えることがわかる。小潮時の残差流分布は、図-8に示した11月6日に観測された分布に近く、大潮時の残差流分布は、10月28日に観測された分布をほぼ再現している。

4. おわりに

閉鎖的な広島湾北部域において、1ヶ月にわたる流速分布と水質の連続測定を行い、残差流(吹送流)と水質の変動の実態把握を行った。吹送流の鉛直構造は様々な要因で変化するが、同様な風が吹いても大潮と小潮では発生する吹送流の鉛直構造は大きく異なっており、これに対応して風に対する水質変動も異なっていた。吹送流の鉛直構造を変化させる要因の1つは、潮汐・潮流振幅の大小による鉛直粘性係数の変化だと考えられ、M-Yレベル2.5の乱流モデル(POM)を使った数値実験結果は、ある程度観測結果を説明できた。

水質変動や生物輸送を考える上で、吹送流の正確な鉛直構造に関する知識は必要不可欠であり、今後、鉛直構造の支配要素の1つである鉛直粘性係数の実態を明らかにし、精度の良い流動予測につなげてゆく必要がある。

参考文献

- 高杉由夫・埜口英昭・安田秀一(1998): 広島湾における風による鉛直循環流と底泥プランクトンシスト分布, 水産海洋研究, 62巻, 3号, pp. 187-198.
- 第六管区海上保安本部水路部(1997): 広島湾の海洋環境 そのIV, 118p.
- 橋本英資・朱小華・長尾正之・高杉由夫(2000): 広島湾の海洋構造に及ぼす風の影響, 海と空, 76巻, 3号, pp. 9-15.
- 湯浅一郎・山崎宗広・橋本英資・宝田盛康・田辺弘道(1995): 広島湾・呉湾における貧酸素水塊の分布と歴史, 中国工業研究所報告, 44巻, pp. 9-17.
- Blumberg, A. F. and G. L. Mellor (1987): A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, Three Dimensional Coastal Ocean Models, American Geophysical Union, Washington, D. C. pp. 1-16.
- Mellor, G. L. and T. Yamada (1982): Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space Phys., Vol. 20, pp. 851-875.