

高解像度ドップラー流速分布計を用いた内湾表層における鉛直混合パラメーターの測定

川 西 澄*・森 泰 二**

沿岸域における鉛直混合パラメーターを測定し、分布を把握することは、沿岸域の流動特性や環境問題を考える上で非常に重要だが、鉛直混合パラメーターの実測は困難で、その詳細はいまだ明らかでない部分が多い。よって、内湾表層において高解像度流速分布計と自動昇降式水質計を用いて乱流量の直接測定を試みた。測定した鉛直混合パラメーターは表層では海面を吹く風にかなり影響をうけており、密度成層の影響も多少受けていた。鉛直渦動粘性係数は $0.1 \sim 15 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、鉛直渦拡散係数は $0.02 \sim 1 \text{ cm}^2/\text{s}$ となった。安定化関数 S_M は $0.1 \sim 0.4$ の値となり、既往のモデルで使われている値はそれより小さいため、渦動粘性係数を過小評価している可能性がある。

1. はじめに

沿岸域での環境問題を解析、予測するためには乱流運動による混合過程を介して起こされる物質の輸送機構を把握しなければならない。その中でも鉛直混合はプランクトンの挙動や粒子の鉛直輸送など、環境問題に直接的に関わってくる部分が多い。鉛直渦動粘性係数や鉛直渦拡散係数などの鉛直混合パラメーターは鉛直混合強度の尺度として用いられ、これらの値の詳細な分布を捉えることは鉛直混合を考える上で非常に重要である。

しかし、実海域で乱流量の時空間分布を直接測定することは容易ではなく、その実態は未だ明らかでない部分が多い。その現状を打開すべく Stacey ら (1999) や橋本・高杉 (1998) が ADCP や MSP を用いて鉛直混合パラメーターを推測してきた。そこで本研究では、非常に高い時空間分解能をもつ、pulse-to-pulse coherent ドップラー法を使用した高解像度ドップラー流速分布計とパソコン制御の自動昇降ウィンチによって鉛直移動する水質計を用いて、沿岸域の表層部において流速と密度の鉛直分布の測定を行い、鉛直渦動粘性係数や鉛直渦拡散係数などの鉛直混合パラメーターを直接測定することを試みる。さらに観測結果から、海面を吹く風や、表層に生じる密度成層が乱流場や鉛直混合パラメーターに与える影響を考察する。

また、乱流モデルを用いた数値シミュレーションの精度を向上するために観測結果を用いて、既往のモデルが実現象に基づいたものであるかどうかを評価するために、Mellor・Yamada (1982) のクロージャーモデルで使われる安定化関数 S_M について検討する。

2. 観測概要

図-1 に示す広島湾大野瀬戸の観測点において、牡蠣いかに隣接している作業いかだの上で観測を行った。

観測期間は2002年8月5日13:00～8月6日13:00(中潮)で、約24時間にわたって、流速と密度の連続測定を行った。測定機器として、3成分の流速測定に Nortek 社製の高解像度ドップラー流速計(以下 HRCP と呼ぶ)を使用し、密度については、パソコン制御による自動昇降式ウィンチに取り付けたアレック電子製の TPM クロロテックを上下させることで鉛直分布を測定した。測定機器は、それぞれいかに上から吊した。設置状況は図-2 に示す。HRCP はセンサーを下向きにして海面から3mの深さに設置し、海面からの深さ3.1mから4.6mまでの流速の鉛直分布(セルサイズ0.03m)を3秒間隔で連続測定した。観測点の水深は13～15mである。また TPM クロロテックは海面から3～5mの深さを片道約40秒で連続的に上下させた。TPM クロロ



図-1 広島湾の観測点

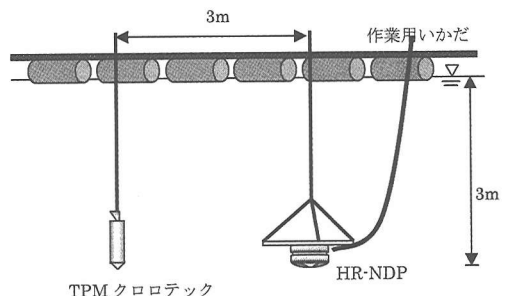


図-2 観測機器の設置状況

* 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

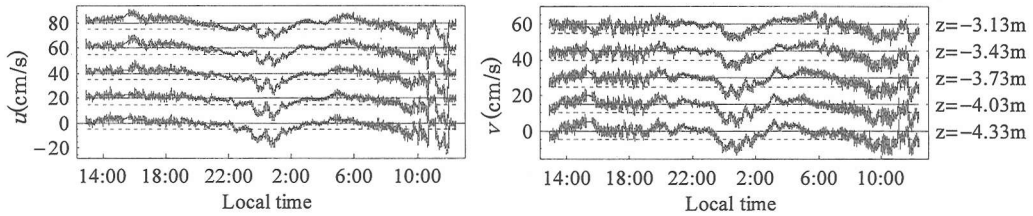


図-3 流速の経時変化

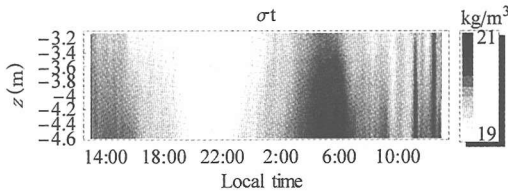


図-4 密度の経時変化

テックのサンプリング間隔は1秒、昇降速度は約0.05 m/sである。なお、8月5日の15:10頃からの約30分間はトラブルのため流速データが欠損している。

3. 結果と考察

(1) 流速と密度の経時変化

図-3に流速(東西方向, 南北方向), 図-4に密度(σ_t)分布の経時変化を示す。流速データには、何箇所かスパイクが存在していたため、これを除去し、ウェーブレット変換を用いて、平均流を得た。また密度データについては、ウィンチによって水質計が上下移動する片道分を1 profile としたため、測定インターバルを約40秒として鉛直分布を測定したことになる。

この海域では基本的には潮流の影響により、上げ潮時には北東方向、下げ潮時には南西方向となっている。流れの方向は地形によって決定されている。図-3を見ると、北東流よりも南西流の方が流速が大きくなっている(最大流速・北東: 約10 cm/s, 南西: 約25 cm/s)。観測終盤で不自然な流速の変動が見られるが、これは船が観測地点付近を通ったためである。密度については時間経過と共に緩やかな変化が見られ、観測点が感潮域で、広島湾に流れ込む淡水の影響を受けていることが分かる。図-5に平均速度勾配と密度勾配の経時変化を示す。密度勾配が大きくなっている時間帯では速度勾配も大きい傾向が見られる。

(2) 乱流量及び鉛直混合パラメータの算出

HRCPによって得られた流速データを、カットオフ周期20分の離散Waveletsフィルターを用いて、次のように平均流速成分と乱れ変動成分に分離した。

$$u = \bar{u} + u', \quad \bar{u}' = 0 \quad (1)$$

この乱れ変動成分を用いてレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$,

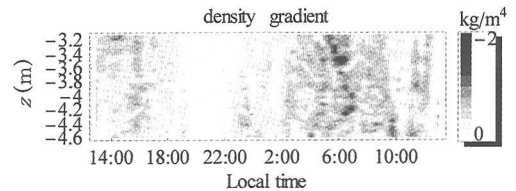
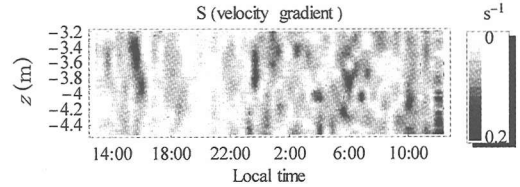


図-5 速度勾配と密度勾配の経時変化

$-\overline{v'w'}$ や乱れエネルギー q を求めた。ここで u , v , w はそれぞれ東西方向, 南北方向, 鉛直方向の流速である。乱れエネルギー q は次式で表される。

$$q = \sqrt{u'^2 + v'^2 + w'^2} \quad (2)$$

鉛直渦動粘性係数は以下のように、乱れエネルギー生成率 P と平均速度勾配 S から評価する。乱れエネルギー生成率 P は

$$P = -\left(\overline{u'w'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \overline{v'w'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

平均速度勾配 S は

$$S = \left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

である。鉛直渦動粘性係数 K_M は P と S から次式で求められる。

$$K_M = \frac{P}{S^2} \quad (5)$$

また、鉛直渦拡散係数 K_H はフラックスリチャードソン数 R_f と乱れエネルギー生成率 P , プルントーパイサラ振動数 N を用いて次式で表す。

$$K_H = R_f \frac{P}{N^2} \quad (6)$$

フラックスリチャードソン数 R_f については測定していないため、ここでは R_f に定数0.2を与えることで渦拡散係数を推算することにする。

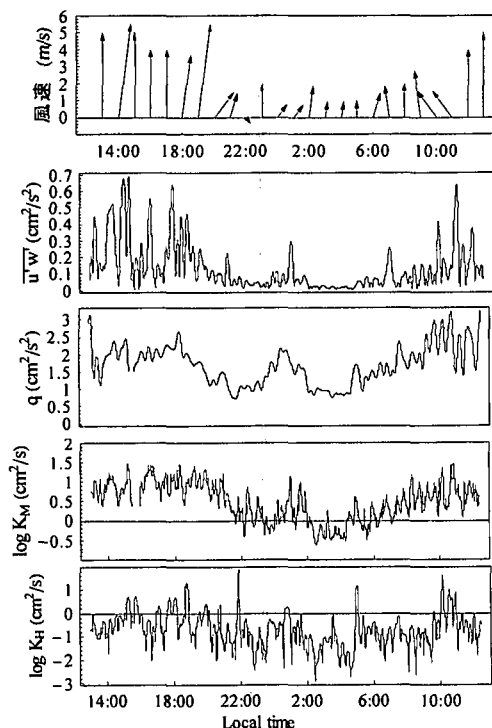


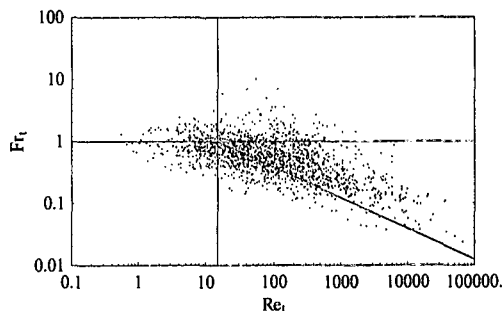
図-6 風と代表的な乱流量の経時変化

乱れエネルギー生成率 P 及び鉛直渦動粘性係数 K_M を計算するときに理論的にはありえない負の値が生じることがところどころであった。解析の際の問題か、測定機器による問題かははっきりしないが、措置として、絶対値を取り正の値として算出した。

図-6に風と代表的な乱流量、鉛直混合パラメータ(深さ3.3 m)の経時変化を示す。風の経時変化には大竹市のアメダスデータを用いた。

風は日中強く、夜間は弱いという傾向があり、観測期間中はほぼ全時間帯において南よりの風であった。これまでの観測から観測点の大野瀬戸は地形の影響により、風向は北東もしくは南西になることがわかっている。この観測期間中は南西の風が吹いていたと考えられる。この風と、レイノルズ応力、乱れエネルギーなどの乱流量の経時変化を比較してみると、これらの乱流量の時間変動は風速の時間変動にほぼ一致することがわかる。これは海面を吹く風が乱流場に乱れエネルギーを供給していることを示している。また風速が同程度の時間帯では、密度勾配が大きいほど鉛直渦動粘性係数は小さくなっている。これは密度成層が鉛直混合を抑えている結果である。

鉛直渦動粘性係数 K_M と鉛直渦拡散係数 K_H はそれぞれおよそ $0.1 \sim 15 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $0.02 \sim 1.0 \text{ cm}^2/\text{s}$ という値をとり、これらの値の変動範囲はほぼ1オーダーとなった。

図-7 Re_t - Fr_t 平面

また、2つのパラメーターの差は約10倍ほどである。

(3) 乱流状態の把握

Ivey・Imberger (1991) は成層水域での乱流状態を表わすためのパラメーターとして乱流レイノルズ数 Re_t と乱流フルード数 Fr_t を定義している。

$$Fr_t = \left(\frac{1}{3} \frac{S^{3/2}}{N^{3/2}} \right)^{2/3} = 0.48 Ri^{-1/2} \dots \dots \dots (7)$$

$$Re_t = 4.3 \frac{P}{\nu S^2} = 4.3 \frac{K_M}{\nu} \dots \dots \dots (8)$$

$$Fr_t = \left(\frac{P}{\nu N^2} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (9)$$

Re_t - Fr_t 平面を3つの領域に分け、乱流の状態を把握すると、

- (1) Region I ($Re_t > 15.5$ and $Fr_t > 1$): 等方性乱流で、成層の影響だけを穏やかに受ける領域。
- (2) Region II ($Fr_t > 3.9$ and $Fr_t < 1$): 成層の影響を受け、Region I よりも非等方性が強い。内部波が存在しうる領域。
- (3) Region III ($Fr_t < 3.9$): 浮力フラックスがゼロとなり、内部波のみが残る領域。

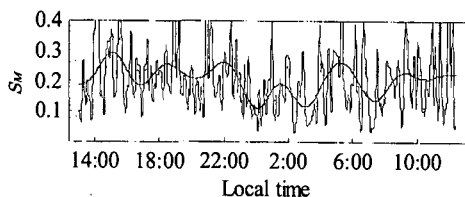
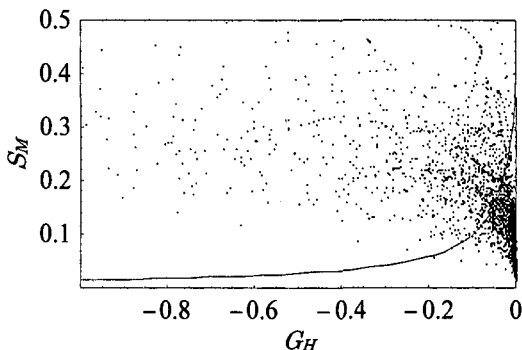
の3領域に分けられる。今回の観測では乱流レイノルズ数 Re_t は $10^{-1} \sim 10^5$ 、乱流フルード数は $10^{-2} \sim 10^1$ 程度の値となった。図-7に示した Re_t - Fr_t 平面にプロットした点はRegion I: 20%, Region II: 40%, Region III: 40%という割合になっていて、観測した海域では成層の影響を受けた乱流状態になっていると言える。

(4) 鉛直渦動粘性係数のモデル化

渦粘性のモデルとして k - ϵ 、 k - l 、 k - ω などの2方程式モデルがあり、このうち k - ϵ モデルが最も代表的であるが、比較的大きなスケールの渦を取り扱う大気や海洋での数値計算では、 k - l モデルが用いられている。Mellor-Yamadaモデルにおいても k - l モデルが使われており、渦粘性係数は

$$K_M = l q S_M \dots \dots \dots (10)$$

と表わされる。 l は乱れ長さスケール、 S_M は安定化関数である。 $l = l_m$ (混合距離) という仮定を用いて観測結果

図-8 S_M の経時変化図-9 S_M と G_H の関係

から安定化関数 S_M を算出した。 S_M はおよそ 0.1~0.4 の値をとり、ADCP と CTD を用いた Stacey ら (1999) の研究と同程度の値となった。図-8 に安定化関数 S_M の経時変化を示す。理論的には、安定化関数 S_M は成層の影響を考慮するためのモデルとして取り入れているものであるが、観測結果の密度勾配や成層強度と比較してもはっきりとした関係は得られなかった。観測期間中の密度勾配はそれほど大きいものではなかったため、それほど影響をうけなかったのかもしれない。

また Galperin ら (1987) は $P=\varepsilon$ の仮定を用いて S_M を成層強度を表わす関数 G_H によって表わした。 G_H は、ブルントーバイサラ振動数 N と乱れエネルギー q , 乱れ長さスケール l を用いて、次式で表される。

$$G_H = \frac{N^2 \cdot l^2}{q^2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

そこでその関係と、観測結果から $l=l_m$ の仮定を用いて算出したものとを比較してみた。 S_M と G_H の関係を図-9 に示す。実線は Galperin らが導いた関係である。図に示すように全く異なる結果となった。これは、算出過程を考えれば観測結果のような分布になるのは当然のことで、 $l=l_m$ の仮定が不適切、もしくはモデルを構築する際に用いた仮定が不適切であると考えられる。どちらにせよ、Galperin らが求めた式が示すような小さな値にはならず、既往のモデルでは鉛直渦動粘性係数は過小評価されている可能性がある。

4. おわりに

高解像度ドップラー流速分布計と自動昇降式の水質計を用いて内湾表層の乱流構造を観測した。得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 算出した鉛直渦動粘性係数はおよそ 0.1~15 cm^2/s 、鉛直渦拡散係数はおよそ 0.02~1 cm^2/s となった。変動範囲はほぼ 1 オーダーである。これらの値は過去に行われた他の観測機器を用いた結果と同程度の値であった。
- (2) 表層部の鉛直の乱れは海面を吹く風の影響を強く

受ける。密度成層による影響については、今回は相対的に風の影響の方が大きく、密度勾配もさほど大きくはなかったため、はっきりしたことはいえない。

- (3) 観測結果から算出した安定化関数 S_M は 0.1~0.4 の値をとった。これは従来のモデルで使われている値より大きく、モデルの鉛直渦動粘性係数は過小評価されている可能性が大きい。

今回、HRCF を用いた鉛直混合パラメーターの測定を試みたが、この方法には乱流量を直接測定ができるという長所とともに、いくつかの問題点も挙げられる。たとえば測定レンジが小さいことや測定誤差の問題が考えられる。今回の観測では、鉛直方向の測定レンジは 1.5 m で、観測点の水深はおよそ 13~15 m であった。全水深をカバーした測定ができれば良いのだが、HRCF は鉛直方向にせいぜい 2 m ほどしか測定できないのでそれは不可能である。よって、これからポイントを絞った測定を何度も繰り返し、データを積み重ねることが必要である。

参 考 文 献

- 橋本英資・高杉由夫 (1998): 浮上式 MSP による内湾の鉛直混合強度の測定, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 966-970.
- Galperin, B., L. H. Kantha, S. Hassid and A. Rosati (1987): A Quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 45, No. 1, pp. 55-62.
- Ivey, G. N. and J. Imberger (1991): On the nature of turbulence in a stratified fluid. Part I, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 21, pp. 650-658.
- Mellor, G. L. and T. Yamada (1982): Development of turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 20, No. 4, pp. 851-875.
- Stacey, M. T., S. G. Monismith and J. R. Burau (1999): Observation of turbulence in a partially stratified estuary, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 29, pp. 1950-1970.