冬期有明海における鉛直混合強度の現地観測

In Situ Measurements on Vertical Mixing in the Ariake Bay in Winter

齋田倫範¹・矢野真一郎²・田井明³・志岐慎介⁴・重田真一⁵・小松利光⁶ Tomonori SAITA, Shinichiro YANO, Akira TAI, Shinsuke SHIKI, Shinichi SHIGETA and Toshimitsu KOMATSU

Recently, deterioration of the aquatic environment in the Ariake Bay has been a serious social problem. It is pointed out that a change of vertical mixing caused by decrease of tidal current led to the deterioration. In this study, in order to evaluate vertical mixing in the Ariake Bay quantitatively, in situ measurements on turbulent velocity shear by using a microstructure profiler were carried out. As a result of this study, it is recognized that values of eddy viscosity coefficient K_z in the area off Oura are $10^{-5} - 10^{-1}$ m²/s. On the other hand, relatively large values of K_z are observed in the area off the Shimabara Peninsula, whose value was at least 10^{-3} m²/s. It is concluded that strong tidal current in the area off the Shimabara Peninsula can strengthen vertical mixing.

1. はじめに

内湾をはじめとする沿岸域における鉛直方向の乱流微 細構造は,水環境に大きな影響を与えると考えられる. 例えば,乱れは懸濁物質の凝集やフロックの崩壊を引き 起こすため,乱流特性量を用いたフロックの凝集促進や 崩壊現象の定式化が Winterwerp ら (2006)により行な われている.また,近年では浅海域における植物プラン クトンの分布や増殖に対する乱流微細構造の役割が議論 されている (例えば,Gallager ら,2004).村上ら (2004)は、内湾を対象とした数値シミュレーションを 行なう際に用いる鉛直渦動粘性係数を推定するための乱 流モデルの違いが内湾全体の流れ場の計算結果に非常に 大きく影響することを指摘している.このように乱流微 細構造が沿岸域における種々の環境要因に対して大きな 影響を及ぼしていることは認識されているが,その計測 の困難さから知見が不足している.

このような背景から,従来海洋を中心として行なわれ てきた乱流微細構造の観測が近年では沿岸域でも積極的 に実施されている.例えば,Fisher ら (2002)や Rippeth ら (2001)は ROFI (Region Of Freshwater Influence)に おける流速シアーや乱流混合と成層の相互作用を解明す

1正会員	博(工)	九州大学大学院	学術研究員
2 正 会 員	博(工)	九州大学大学院	准教授
3 学 生 員	修(工)	九州大学大学院	工学府海洋システム
4 学 生 員		工学専攻•日本与 九州大学大学院 工学専攻	- 術振興会特別研究員 工学府海洋システム
5 正 会 員	修(工)	西日本電信電話株式会社	
6フェロー	工博	九州大学大学院 教授	



図-1 有明海の概略図と観測点の位置

るために乱流微細構造プロファイラによる乱流エネルギー 散逸率の周期的な変化に関する観測を行なっている.わ が国においても,別府湾,広島湾,瀬戸内海,英虞湾に おける観測例(高杉ら,1995;橋本・高杉,1998;長尾 ら,2004;長尾ら,2005)がある.しかし,乱流微細構 造の直接測定については未だに観測や解析の方法論が議 論されており(Roget ら,2006),更なる知見の蓄積が 必要といえる.

近年,水環境の悪化が顕著である有明海においても, 塩淡成層の継続による赤潮や貧酸素水塊の頻発化や懸濁 物質の動態変化に伴う透明度の上昇等の諸問題と近年の 潮流流速の減少に起因する鉛直混合力の低下との関連性 が議論されている. 塚本・柳(2002)は数値シミュレー



ション結果から有明海における潮流振幅の変化が成層状 態の変化に及ぼす影響を評価し,有明海湾奥西部で成層 が発達しやすくなったことを示している.また,定量評 価は十分に行なわれていないものの,島原半島沿岸にお ける大きな潮流流速が強い鉛直混合をもたらしているこ とが矢野ら(2004)によって示唆されている.しかしな がら,有明海において乱流微細構造の直接測定を実施し た例は松野・中田(2004)や堤・松野(2008)による諌 早湾口の観測のみである.そこで本研究では,強い鉛直 混合が生じるとされている島原半島沿岸,ならびに成層 が発達しやすくなったとされている有明海湾奥西部にお ける鉛直混合強度の定量評価を目的として,乱流微細構 造プロファイラを用いた有明海における乱流微細構造の 計測を試みた.

2. 観測概要

現地観測は図-1に示す長崎県島原市有明沖のSta.A (32°51′58°N,130°20′58"E;WGS84,平均水深15 m),および佐賀県藤津郡太良町大浦沖のSta.B(32°58 40°N,130°14′54°E;WGS84,平均水深25m)で実 施した.観測項目は両観測ともに乱流微細構造プロファ イラを用いた乱流シアーの測定,超音波ドップラー流速 計(以下,ADCP)を用いた流動観測,ならびに多項目 水質計を用いた塩分・水温観測である.なお,乱流微細 構造プロファイラとしてアレック電子社製TurboMAP9 (以下,ターボマップ)を使用した.ターボマップは主 に乱流の鉛直シアーを512Hzで測定する観測機器であり, 機器の詳細や測定原理についてはWolkら(2002)にお いて述べられている.また,ターボマップによる測定に ついては取得データの信頼性の向上のために一回の測定 につき複数回機器を投入してデータ取得を行なった.

(1) Sta.A (有明沖) における観測

Sta.A における観測は2006年2月18日の半潮汐間(9: 30~16:00)にわたって実施した. 観測当日の大浦検潮 所における潮位変動と観測時間帯を図-2に示す。乱流シ アーの測定は、ターボマップを約0.5m/s で海底から自由 浮上させながら行なった. ADCP による流速の鉛直分布 測定には WorkhorseADCP1200kHz(RD-Instruments 社製) を用いた. ADCP は層厚:0.5m, ブランク:1.0m, サン プリング間隔:2sに設定した.また,多項目水質計 (アレック電子社製 ACL220)による塩分・水温の鉛直 分布測定を併せて実施した.観測実施時の気象はアメダ ス(島原)の気象データによると、2月17、18日の降水 量はいずれも0mmであった. 観測中の風速は図-3に示 すように2~4m/s 程度の北西風であった. 観測実施時の 成層状況として、多項目水質計によって測定された塩分・ 水温から算定した密度の指標であるσ,の分布を図-4に 示す.表層と底層の σ_1 の差が $0.0 \sim 0.8$ 程度であり、混合 した状況下での観測であったといえる.

(2) Sta.B (大浦沖) における観測

Sta.B における観測は2007年2月19日の半潮汐間(11: 00~15:30)にわたって実施した.乱流シアーの測定は Sta.A と同様にターボマップを約0.5m/s で自由浮上させ ながら行なった.ADCP による流速の鉛直分布測定には WorkhorseADCP600kHz(RD-Instruments 社製)を用い た.ADCP の設定は層厚:1.0m,ブランク:1.6m,サン プリング間隔:2sである.また,多項目水質計(ワイ エスアイ・ナノテック社製 YSI6600)による塩分・水温 の鉛直分布測定を実施した.観測実施時の気象は、2月 18,19日の降水量はいずれも0mm であった.観測中の 風速は図-3に示すように4m/s程度の北風であった.成 層状況については、図-4に示すように表層と底層の ot の差が0.3~0.7程度と Sta.A における観測実施時と比較 すると大きな値をとっていたが、顕著な密度躍層は形成



されておらず, 混合した状況下での観測であったと考え られる.

3. データ処理方法

乱流エネルギー散逸率 ε は乱流シアーデータのスペク トルを積分して得られるシアーの分散から式(1)によっ て求められる.そこで、本研究ではターボマップで測定 された乱流シアーより乱流エネルギー散逸率を算出した.

$$\varepsilon = \frac{15}{2} \nu \left(\frac{du'}{dz} \right)^2 = \frac{15}{2} \nu \int_{k_i}^{k_2} \phi(k) dk \tag{1}$$

ここで、u' は水平方向の乱れ速度、zは鉛直座標(上向 きを正)、 ν は海水の動粘性係数、 $\phi(k)$ は乱流シアーの スペクトルである.

乱流シアーのスペクトルを厚さ1m(データ数約1024 個)の層ごとに算出し,求められた乱流シアーのスペク トルを波数 k_1 から k_2 までの積分区間で積分することに より ϵ を算定した.本研究では,厚さ1mの層のデータ を用いてスペクトルを算出しているので k_1 を1cpmとし た.一方, k_2 については,式(2)から求まる Kolmogoroff スケールに対応する波数 k_s (cpm)と k_2 との比較を行い ながら k_2 増加させて計算を繰り返し, k_2 とな。とが等し くなった時点での ϵ を結果として用いた.

$$k_{s} = \left(\frac{\varepsilon}{\nu^{3}}\right)^{\frac{1}{4}}$$
(2)

同様の手法を用いて ε を計算する際にベンチマークと して用いられる Nasmyth スペクトル (Nasmyth, 1970) とのフィッティングを行い,スペクトルが Nasmyth ス ペクトルから大幅にずれる場合はエラーデータとした. また,k。が機器の振動の影響が出現する波数帯よりも 高波数側にある場合には,その波数帯における実際のス ペクトルが波数の増加に伴って Nasmyth スペクトルと 同様の勾配で減少すると考え,Nasmyth スペクトルを積 分することとした.なお、シアーセンサーの計測条件よ り、ターボマップの浮上速度が一定である必要があるた め、浮上速度が一定と見なせる範囲のデータのみを使用 して解析を行っている.よって、ターボマップが加速す る領域である海底面から約4~5m 以内のデータは解析 対象外である.

次に、本研究における鉛直渦動粘性係数K₂の算出法 について説明する. 圧力動揺による乱れの発生と乱れエ ネルギーの拡散の影響は十分に小さいとし、さらに現象 が定常とみなせると仮定すると乱流エネルギー方程式は 式(3)となる.

$$\overline{u'w'}\frac{dU}{dz} + \varepsilon + g\frac{\overline{\rho'w'}}{\rho_0} = 0$$
(3)

ここで、w は鉛直方向の乱れ速度、Uは水平方向の平 均流の速度、gは重力加速度、 ρ 。は海水の平均密度、 ρ' は密度偏差である。第一項は平均流のシアーによる 乱流エネルギーの生成、第三項は浮力フラックスを示す。 両観測とも冬季混合期の観測であり、 σ 、がほぼ一様で あったことから本研究では第三項の影響は他の2項と比 較して十分に小さいと考えた。この場合、鉛直渦動粘性 係数 K_x は以下の式で表現される (Thorpe, 2005).



図-9 鉛直渦動粘性係数K₂の時間変化(左図:2006年2月18日 Sta.A,右図:2007年2月19日 Sta.B)

$$K_z = \varepsilon \left/ \left(\frac{dU}{dz} \right)^2 \right.$$
(4)

ここで,平均流のシアーdU/dzは ADCP により得られた 流速データから幅1m で速度勾配を算出して K_z の算定に 用いた.

4. 結果と考察

図-5,6に鉛直渦動粘性係数K₂の鉛直分布を示す.測 定はSta.A では6セット,Sta.B では5セット実施したが, 各セットにおける計測回数は時間帯によって異なる.ま た,Sta.B 周辺は海底地形の変化が非常に大きい海域で あったため、時間帯によって取得できたデータの範囲が 大きく異なっている.なお、表層付近では波浪の影響に よりターボマップの上昇速度にわずかな加速と減速が生 じていたが併せて図示している.この結果より,Sta.A におけるK₂の値は10⁻³~10⁻¹m²/s であることがわかる.

一方, Sta.B における値は10⁻⁵~10⁻¹m²/s であり, Sta.A と比較すると水深や潮時による変化が顕著であった.特に,底層側ほど大きな値となるような傾向がみられ,中底層では10⁻³~10⁻¹m²/s の値であった.

図-7に ADCP により測定された流速,図-8に乱流エ ネルギー散逸率 ε および ADCP により測定された流速 シアーの二乗値,図-9に鉛直渦動粘性係数K₂の時間変 動を示す.なお、表層、中層、底層の各1点を代表して 示しており、いずれの値も各セットの平均値である. Sta.A では乱流エネルギー散逸率が憩流時に極小値をとっ ており、流速の変化に対応して増減していることが確認 できる.また、上げ潮時以外は乱流エネルギー散逸率が 水深方向にほぼ一様な値となっている.このような潮汐 に対応した乱流エネルギー散逸率の変化は松野・中田 (2004) による諫早湾沖の観測でも捉えられている. し かし、表層(水深3m)と中層(水深5m)では満潮前後 で乱流エネルギー散逸率の値に1オーダー程度の違いが 見られる.上げ潮と下げ潮とで流速シアーの大きさに違 いが見られることから、これは上げ潮と下げ潮の現象の 非対称性を示唆しており、今後一潮汐間にわたる観測を 実施して検証する必要がある. Sta.B では下げ潮時に底 層(水深16m)で乱流エネルギー散逸率が増加している のに対して表層(水深3m)では減少しており、底層と 表層とで1~2オーダーの差を示す時間帯が生じている. また、下げ潮時に中層(水深9m)における乱流エネル ギー散逸率の値が表層や底層と比べて急激に上昇してお り、乱流エネルギー散逸率の変動特性が水深によって異 なっているのが確認できる.これは、下げ潮時に乱流エ ネルギー散逸率の増大と対応するように底層の流速シアー が大きくなっていること、および中層より先に底層側で 流速シアーの顕著な増大が生じていることから乱れのソー

スが海底摩擦であることが一因と考えられる.両測点で 生じる乱流エネルギー散逸率の最大値は,Sta.Bでは下 げ潮後半の中底層で10⁻⁷~10⁻⁶W/kg程度であったのに対 して,Sta.Aでは憩流時以外の時間帯に全層で10⁻⁶~10⁻⁵ W/kgであり,Sta.Bより1~2オーダー大きい値を示して いた.このことは,Sta.Aのほうが高い乱流エネルギー 散逸率が生じやすいことを示しており,これは島原半島 沿岸において生じる大きな潮流流速の影響と推察される.

Sta.A におけるK₂ は水深や潮時によらず10⁻²m²/s 程度 であったが、これは流速シアーの変動と対応するように 乱流エネルギー散逸率が変化していたためである。一方, Sta.B においては、中底層で流速シアーが大きくなる下 げ潮時を除けば表層側で流速シアーが大きくなっていた のに対して,乱流エネルギー散逸率に大きな違いはなく, K_z は水深が大きいほど大きい傾向を示していた. 観測 当日に北風が連吹していたことや ADCP で測定された 北方流速が憩流時においても表層で他の層よりも大きな 南向きの流れを示していたことから、表層の流速シアー は吹送流の影響と考えられる.また,両観測の結果を比 較すると、Sta.Bにおける観測実施時のほうが潮差が大 きかったにも関わらず, K₂は Sta.A のほうが1~3オー ダー程度大きい. これは, 湾奥に流入した河川水による 塩淡成層が島原半島沿岸の大きな潮流流速で弱められる という矢野ら(2004)による報告や Sta.A を含む島原沖 から三角沖を混合水域, Sta.B を含むその北側と東側を 内湾域水域とした青山(1977)の海域分類を支持する結 果となっている.

5. まとめ

2006年2月18日,および2007年2月19日に有明海におい て乱流微細構造プロファイラを用いた観測を実施し,有 明海における鉛直渦動粘性係数の推定を行なった.得ら れた主な結果は以下のとおりである.

- 1)有明沖の乱流エネルギー散逸率は大浦沖より1~2オー ダー大きく、潮汐によく対応した変動を示していた.
- 一方,大浦沖では水深ごとに乱流エネルギー散逸率の 変動特性が異なっていた.
- 2)大浦沖における鉛直渦動粘性係数の値は10⁻⁵~10⁻¹m² /s であり、中底層で比較的大きい値を示していた.
- 3) 有明沖における鉛直渦動粘性係数の値は10⁻³~10⁻¹m² /s であり、大浦沖と比較すると水深や潮時による変化 は小さかった.
- 4)乱流エネルギー散逸率および渦動粘性係数はともに大 浦沖よりも有明沖のほうが大きく、島原半島沿岸にお ける大きな潮流流速によって鉛直混合が促進されるこ とが定量的に示唆された。

本研究で用いた2地点のデータは水深や潮差などの条

件に違いがあるため更なる検討が必要である.今後は, 夏季成層期に一潮汐間の観測を実施し,成層場における や鉛直混合強度の潮汐周期の変動を捉えたい.

謝辞:有明湯江漁協の松本正明氏,宮本雄二氏,ならび に篠塚光信氏には,観測船の傭船に多大なご協力を頂い た.ここに記して深甚なる謝意を表わします.また,本 研究は平成17年度文部科学省重要課題解決型研究「有明 海生物環境の俯瞰的再生と実証実験」(代表:楠田哲也) の一環として行なわれたことをここに付記します.

参考文献

- 青山恒雄:漁業振興の立場からみた内湾水の流動と問題点,沿 岸海洋研究ノート,第14巻,第1-2合併号, pp.36-41, 1977.
- 高杉由夫・安田秀一・肥後竹彦・埜口英昭:沿岸域における鉛 直混合強度-自由浮上式 MSP による測定-,中国工業技術 研究所報告, No.45, pp.23-31, 1995.
- 塚本秀史・柳哲雄:有明海の潮汐・潮流,海と空,第78巻,第 1号, pp.31-38, 2002.
- 長尾正之・橋本英資・高杉由夫:瀬戸内海における鉛直混合強 度の測定,海岸工学論文集,第51巻,pp.946-950,2004.
- 長尾正之・橋本英資・高杉由夫・千葉賢・山形陽一:英虞湾に おける鉛直混合強度の測定,海岸工学論文集,第52巻, pp.341-345,2005.
- 橋本英資・高杉由夫: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, 1998.
- 松野健・中田英昭:有明海の流れ場を支配する物理過程,沿岸 海洋研究,第42巻, pp.11-17, 2004.
- 村上智一・大澤輝夫・伊藤秀文・安田考志: 浅海域の海面境界 層における乱流モデリングの重要性と改良の方向性,海岸 工学論文集,第51巻,pp346-350,2004.
- 矢野真一郎・齋田倫範・橋本泰尚・神山泰・藤田和夫・小松利 光:有明海における潮汐条件に対する流動・成層構造の変 化,海岸工学論文集,第51巻, pp.331-335, 2004.
- Fisher N.R., J.H. Simpson and M.J. Howarth : Turbulent dissipation in the Rhine ROFI forced by tidal flow and wind stress, Journal of Sea Research, Vol.48, pp.249-258, 2002.
- Nasmyth P. W. Coceanic Turbulence, Ph.D. dissertation, University of British Columbia, 1970.
- Rippeth T. P., N. R. Fisher and J. H. Simpson : The cycle of turbulent dissipation in the presence of tidal straining, Journal of Physical Oceanography, Vol. 31, pp.2458-2471, 2001.
- Roget E., I. Lozovatsky, X. Sanchez and M. Figueroa : Microstru cture measurements in natural waters: Methodology and Applications, Progress in Oceanography, Vol.70, pp.126-148, 2006.
- Gallager S. M., H. Yamazaki and C. S. Davis: Contribution of fine -scale vertical structure and swimming behavior to formation of plankton layers on Georges Bank, Marine Ecology Progress Series, Vol.267, pp.27-43, 2004.
- Thorpe S. A.: The turbulent ocean, Cambridge University Press, p.439, 2005.
- Winterwerp J. C., A. J. Manning, C. Martens, T. de Mulder and J. Vanlede : A heuristic formula for turbulence-induced flocculation of cohesive sediment, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol.68, pp.195-207, 2006.
- Wolk F., H. Yamazaki, L. Seuront and R. G. Lueck : A new free -fall profiler for measuring biophysical microstructure, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol.19, pp.780-793, 2002.