現地観測による島原半島沿岸の 鉛直混合強度の評価

EVALUATION OF VERTICAL MIXING BY IN SITU MEASUREMENTS OFF THE COAST OF SHIMABARA PENINSULA

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

 ¹正会員 博(エ)九州大学大学院学術研究員 工学研究院環境都市部門(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)
²学生員 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)
³学生員 修(エ)九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻・日本学術振興会特別研究員 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

⁴修(工)西日本電信電話株式会社(〒540-8511 大阪府大阪市中央区馬場町3-15) ⁵正会員 博(工)九州大学大学院准教授 工学研究院環境都市部門(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744) ⁶フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

In recent years, it is pointed out that red tide and oxygen depression in Ariake Bay are resulted from strong density stratification which is supposed to be closely related to vertical mixing. In this study, in order to clarify vertical mixing phenomenon in Ariake Bay, turbulent energy dissipation rate ε and vertical eddy diffusivity K_{ρ} are evaluated. ε is measured in field observations with the use of a microstructure profiler. Both of ε and K_{ρ} vary significantly in a vertical direction in neap tide. On the other hand, temporal variation rather than spatial one is dominant in spring tide. It is concluded that turbulence structure in Ariake Bay differs considerably depending on tidal range.

Key Words : Ariake Bay, microstructure, vertical mixing, tidal current, energy dissipation rate

1.はじめに

有明海はわが国の代表的な閉鎖性内湾の一つであり、 かつては「豊饒の海」と称されるほど高い生産性を誇っ ていた.しかし,赤潮や貧酸素水塊の大規模化といった 水環境の問題が近年深刻化している^{1),2)}.有明海の水環 境悪化の一因として密度成層の強化が挙げられているが, これには潮流の減少に伴う鉛直混合強度の低下が影響し ていると宇野木・佐々木³⁾は指摘している.有明海の潮 流については,島原半島沿岸で潮流が減少していること が西ノ首ら4の現地観測によって示されている.また, 佐賀県太良町沖の海域を除いて潮流が減少しているとい う数値シミュレーション結果(例えば,灘岡・花田⁵や 藤原ら⁽⁾)も報告されている.しかしながら,鉛直混合 強度の定量的な評価や近年の潮流減少と成層強化との因 果関係についての議論は未だ十分に行われていない.こ のことから,鉛直混合を支配する乱流微細構造を把握す ることは有明海の水環境を考える上で重要といえる.

実海域における乱流微細構造の測定は,海洋において





古くから行われてきた.1968年にGrantら⁷⁾によってホッ トフィルムを用いた方法で測定が行われたのが最初であ り,その後,様々な機器を用いて微細構造が測定され, その比較が行われてきた(例えば, Moumら⁸).また, Fisherら⁹やRippethら¹⁰などによって沿岸域における観測 も行われている.わが国においても瀬戸内海,英虞湾な どにおける観測例11, 12, 13) や構造物によって生じる乱れ に関する検討例¹⁴⁾などがある.有明海における乱流微細 構造の観測例としては,松野・中田¹⁵による自由落下式 の乱流微細構造プロファイラを用いたエネルギー散逸率 の測定や齋田ら¹⁰が諫早湾口北側と南側で実施した冬季 の渦動粘性係数の評価がある.有明海の潮差は最大で約 6mに及び主に大潮小潮周期で変化するため,潮汐条件 や潮時によって潮流の大きさやそれに伴う鉛直混合強度 が大きく異なる.そこで本研究では,夏季成層期の有明 海における鉛直混合強度の一潮汐間の変動特性と潮汐条 件による違いを把握することを目的として,アレック電 子社製乱流微細構造プロファイラTurboMAP9(以下, ターボマップ)を用いて潮差の異なる条件下で2回の現 地観測を行った.

2. 観測概要

観測は,2007年8月24日(中潮)および2007年8月30日 (大潮)に一潮汐間にわたって行った.観測点は,図-1 に示す有明と長洲を結んだ直線上の点C1(32°51 56 N,130°21 27 E)である.この海域は矢野ら¹⁷⁾ により島原半島沿岸に生じる大きな潮流流速によって強 い鉛直混合がもたらされると指摘されている海域である. 鉛直微細構造の測定は,まずターボマップに錘を付けた 状態で海底まで沈め,着底を確認した後に錘を切り離し て海面に向かってターボマップを約0.5m/sで自由浮上さ せながら行った.この操作を観測中に繰り返し行い,中 潮期の観測で119回,大潮期の観測で71回の測定を実施 した.併せて,超音波ドップラー流速計(RD- Instruments社製Workhorse ADCP 600kHz)による平均流 の流向・流速の連続測定,多項目水質計(アレック電子 社製ACL220)による30分毎の塩分・水温測定ならびに1 時間毎の風向・風速測定を行った.観測当日の大浦にお ける潮位変動を図-2に示す.なお,図中のハッチは観測 時間帯を示す.

アメダス(島原)における観測実施日の降水量および 風速は,8月24日にそれぞれ0mm,1~4m/s,8月30日に それぞれ4mm,3~4m/sであった.成層状況については, 8月24日の表層と底層の海水密度の差が3~4kg/m³程度 であった.一方,8月30日の海水密度の差は1kg/m³程度 であり,8月24日の観測と比べて成層が弱い状況での観 測であった.なお,8月30日の観測においては機器の不 調と雷のため,6:00~9:00と13:00~14:30に測定を中断し た.

3.データ処理方法

ターボマップによってサンプリング周波数512Hzで測 定された乱れ速度u'の鉛直シアをフーリエ変換して得 られるパワースペクトルφ(k)から,等方性を仮定して 導かれる以下の式(1)を用いて層厚1m毎にエネルギー散 逸率εを算出した.

$$\varepsilon = \frac{15}{2} \nu \left(\frac{du'}{dz}\right)^2 = \frac{15}{2} \nu \int_{k_1}^{k_2} \phi(k) \ dk \tag{1}$$

ここで, ν は動粘性係数であり,ターボマップによっ て測定された塩分,水温の値を用いて層毎に算定した. 本研究では,乱流シアのスペクトルを算出する際の層厚 を1mに設定したため k_1 は1m⁻¹とした.さらに,式(2)から 求まるKolmogoroff スケールの波数 k_s と k_2 との比較を行 いながら k_2 を変化させて計算を繰り返し, k_2 と k_s とが等 しくなった時点での ε を結果として用いた.

$$k_s = \left(\frac{\varepsilon}{\nu^3}\right)^{1/4} \tag{2}$$

また, k₂が機器の振動によって生じるノイズの波数 (波数300m⁻¹付近)よりも高波数側にある場合には,そ れ以降の区間のスペクトルが波数の増加に伴って後述す るNasmythスペクトル¹⁸⁾と同様の勾配で減少すると考え, Nasmythスペクトルを積分した.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表層側約7割 程度の範囲のデータのみを使用して解析を行っている.

4. 観測結果

(1) 乱流シアのパワースペクトル乱流シアのパワースペクトルのベンチマークとして,



観測データより導かれたNasmythスペクトルや理論より 導かれたPanchev and Kesichスペクトル(以下, P.K. ス ペクトル)がある¹⁹. P.K.スペクトルは, ピークよりも 高波数側で波数の増加に伴ってNasmythスペクトルより も急激に減少する、本観測により測定された乱流シアか ら算出されたパワースペクトルとこれらのスペクトルと の比較を行った.8月30日(大潮期)のデータから水深5 mのシアデータを潮時毎に抽出して算出したパワースペ クトルにNasmythスペクトルとP.K.スペクトルをフィッ ティングさせた結果を図-3に示す.これらより,いずれ の測定においてもパワースペクトルがNasmythスペクト ルやP.K.スペクトルと同様に波数50m⁻¹付近でピークをと り,その後波数の増加に伴ってエネルギーが減少してい くことがわかる.潮流流速が大きい時間帯(8/30 14:24) には,14:24のスペクトルのようにピークよりも高波数 側でP.K.スペクトルに近い勾配で減少する傾向がみられ た. 一方,潮流流速が小さくなる憩流時(8/30 9:51) には, Nasmythスペクトルに沿って減少する傾向を示していた. 同様の傾向は8月24日(中潮期)の結果においても確認 された.このことは,一般的にベンチマークとして Nasmythスペクトルが用いられることが多いが,有明海 のように潮流が卓越する非定常性の強い沿岸海域ではシ アスペクトルの形状が潮時によって変化し, Nasmythに 対応した形にならない場合がある可能性を示唆している. この点については,今後さらにデータを蓄積して詳細に 検討したい.

(2) エネルギー散逸率の変動特性

図-4、図-5に中潮期,大潮期におけるエネルギー散逸 率 ε および σ (海水密度(kg/m³)から1000を引いた値)のイ ソプレット図を示す.なお,いずれも大浦の潮位変動に 対応させてデータを図示してあり,図中の水面の変化が 観測当日の大浦の潮位変動と一致している.そのため, 海底側にデータのない時間帯が生じている.特に,ター ボマップは等速直線運動を始める水深が測定毎に異なる ため,海底側のεの表示範囲が大きく変化している.中 潮期の水深5m付近に形成されていた密度躍層の影響に よりターボマップの上昇速度にわずかな加速・減速が生 じていたが併せて図示している.中潮期の結果において はεの鉛直方向の変化が顕著であり,特に下げ潮時の水 深5mおよび水深15m付近にεが大きい層がみられる.ま た,上げ潮時(16:00付近)には中層でεが10⁹~10⁻⁸ W/kg程 度の小さい値をとり,表層に向かって大きくなっている. 表層の大きな値は波による影響と密度躍層によるターボ マップの速度変化の影響の両方が考えられる.一方,大 潮期においては中潮期の結果と比べて潮時による €の変 化が顕著であり,下げ潮最強時に ε~10⁻⁵ W/kg,満潮の 意流時に $\varepsilon \sim 10^8$ W/kg , 干潮の憩流時に $\varepsilon \sim 10^6$



W/kg程度の値を示している.同じ憩流時でも満潮と干 潮とでは層全体でεの値に2オーダー程度の違いがみら れた.大潮期と中潮期を比較してみると,憩流時には明 確な違いは確認できないが,最強時については大潮期の ほうが2オーダー程度εの値が大きかった.

平均流とエネルギー散逸率 ε の関係を評価するために 図-6に平均流流速と ε ,図-7に平均流シアと ε の関係を 示す.大潮期である8月30日の平均流シアが大きい範囲 において ε が小さい値を示さない傾向が確認できる.平 均流シアと ε の間でケンドールの順位相関検定を行うと 大潮期には τ =0.258 (P < 0.0001) となっており,比較的 高い正の相関を示している.それに対して中潮期である 8月24日の場合には τ =-0.085 (P=0.598) となり,ほぼ無 相関であった.平均流流速と ε との関係においても大潮 期に τ =0.324 (P < 0.0001),中潮期 τ =-0.004 (P=0.248) と なっており,平均流シアの場合と同様に大潮期にのみ正 の相関がみられた.平均流流速の値を0.1m/s毎に区分し て ε の相乗平均値を算出し,図-6に示した平均流流速と ε の関係をプロットし直したものを図-8に示す.前述の とおり大潮期にのみ平均流流速と ε との間に正の相関が あるため,大潮期に平均流流速の増加に伴って ε が増加 しているのに対し,中潮期には ε に大きな変化がみられ ない.また,実際には図-6に示すように ε の値にばらつ きがあるが,平均値で比較すると0.1 ~ 0.6m/sの範囲にお いては同じ流速であっても大潮期のほうが中潮期よりも ε が大きくなっている.このことから,潮差が小さい場



合には,大きな流速が生じないためにエネルギー散逸率 が小さくなるだけではなく,成層が維持されやすいこと などの影響も相まって大きなエネルギー散逸率が生じに くくなると推察される.潮差と浮力供給の関係によって この海域の密度分布やエネルギー散逸率の変動特性がど のように変化するかについては今後観測データの蓄積が 必要である.

(3) 渦拡散係数について

ターボマップによって測定されたエネルギー散逸率を 用いて以下の式(3)より渦拡散係数を算出した.

$$K_{\rho} = \Gamma \frac{\varepsilon}{N^2} \tag{3}$$

ここで、「はフラックスリチャードソン数の関数となるが、本研究ではOsbom²⁰を参考に0.2と定めた.N²は式(4)で定義される浮力振動数であり、多項目水質計で測定し

た塩分と水温から算定されるρを用いて求めた.

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \tag{4}$$

図-9,図-10に各観測における K_ρ のイソプレット図を示す.なお,図中の白く抜けている部分は,層内での浮力振動数が負となっていたため K_ρ を求められなかった層を示す.中潮期の結果において K_ρ は10⁵ m²/s程度でほぼ一様であるが,多くの時間帯に水深5m付近で K_ρ が10⁷ m²/s程度と他の層に比べて低くなっていた.これは,図-4からも分かるように観測実施時の密度躍層の位置と一致しており,躍層付近での鉛直方向の混合が抑制されていることを表していると考えられる.また,大潮期の結果からは潮時によって K_ρ が大きく変動していることが確認できる.特に,満潮の憩流時に10⁶ ~ 10⁴ m²/s付近で変動している.一方,下げ潮時には10³ m²/s程の値を示し,大きな潮流流速によって混合強度が急激に大き

5.まとめ

本研究により有明海島原半島沿岸におけるエネルギー 散逸率および渦拡散係数の一潮汐間の変動を把握するこ とができた.以下に得られた知見をまとめる.

- ・エネルギー散逸率の一潮汐間の変動特性は、潮差の違 いによって大きく異なる.
- ・大潮期の満潮時で10⁻⁹ W/kg, 干潮時で10⁻⁷ W/kg 程度と なっており,同じ憩流時においてもエネルギー散逸率 には2オーダー程度の違いがみられる.
- ・潮差が小さい場合には平均流流速および平均流のシア とエネルギー散逸率との間に相関はないが,潮差が大 きい場合にはいずれとも正の相関がみられる.
- ・渦拡散係数は,成層した状況下では多くの層で10⁻⁵ m²/s 程度の値を取ったが, 躍層付近で鉛直方向の混合が抑 制されるため10⁻⁷ m²/s と他の層より小さい値を示した.
- ・潮差が大きい場合 , 潮流最強時に渦拡散係数は10⁻³ m²/s ·程度の大きな値を示したのに対して,憩流時には10⁻⁶ ~10⁴m²/s 程度であった.

今後,さらにデータを蓄積することにより有明海の混 合強度を規定する物理的要因を抽出し,有明海における 潮流の減少と成層強化との関連性を定量的に評価したい. 13) 長尾正之,橋本英資,高杉由夫,千葉賢,山形陽一:英虞

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,および九州大学環境流体力学研究室の学生 の方々には観測の際に多大なご協力を頂きました.ここ に記して深甚なる謝意を表します.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 として行われたことをここに付記します.

参考文献

- 1) 堤裕昭,木村千寿子,永田紗矢香,佃政則,山口一岩,高 橋徹,木村成延,立花正生,小松利光,門谷茂:陸域から の栄養塩負荷量の増加に起因しない有明海奥部における大 規模赤潮の発生メカニズム,海の研究,第15巻,pp.165-188, 2006.
- 2) 濱田孝治,速水祐一,山本浩一,大串浩一郎,吉野健児, 平川隆一,山田裕樹:2006年夏季の有明海奥部における大 貧酸素化,海の研究,第17巻,pp.371-376,2008.
- 3) 宇野木早苗,佐々木克之:有明海異変の発生システムにつ いて,海の研究,第16巻, pp. 319-328, 2007.
- 4) 西ノ首英之,小松利光,矢野真一郎,齋田倫範:諫早湾干 拓事業が有明海の流動構造へ及ぼす影響の評価,海岸工学 論文集,第51巻, pp. 336-340, 2004.

- 5) 灘岡和夫,花田岳:有明海の潮汐振幅減少要因の解明と諫 早堤防締め切りの影響,海岸工学論文集,第49巻,pp.401-405, 2002.
- 6) 藤原考道,経塚雄策,濱田孝治:有明海における潮汐・潮 流の原因について,海の研究,第13巻,pp.403-411,2004.
- 7) Grant H.L., A. Moilliet, W.M. Vogel. Some observations of the occurrence of turbulence in and above the thermocline, Journal of Fluid Mechanics, Vol.34, part3, pp.443-448, 1968.
- Moum J.N., M.C. Gregg, R.C. Lien, M.E. Carr, Comparison of 8) Turbulence Kinetic Energy Dissipation Rate Estimates from Two Ocean Microstructure Profilers, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol.12, pp.346-366, 1995.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 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 .
- 14) 中山恵介,岡田知也,古川恵太:円柱による乱れが河口の 塩水浸入に与える影響評価,水工学論文集,第50巻, pp.1387-1392, 2006.
- 15) 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.
- 16) 齋田倫範, 矢野真一郎, 田井明, 志岐慎介, 重田真一, 小 松利光:冬期有明海における鉛直混合強度の現地観測,海 岸工学論文集,第55巻,pp.421-425,2008.
- 17) 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.
- 18) Nasmyth, P. W., Oceanic Turbulence, Ph. D. thesis, The University of British Columbia, 69p, 1970.
- 19) Panchev, S., and Kesich, D., Energy spectrum of isotropic turbulence at large wavenumbers, Comptes rendus de l'academie bulgare des Science, pp.627-630, 1969.
- 20) Osborn, T. R., Estimates of the local rate of vertical diffusion from dissipation measurements, Journal of Physical Oceanography Vol.10 pp.83-89, 1980.

(2008.9.30受付)

くなっていることが確認できる.