# ラグランジュ・ブイを用いた潮間帯での 渦動粘性係数・渦拡散係数の時空間分布推定

## Estimation of Eddy viscosity and Eddy Coefficient in Internal Regions using Lagrangian Acoustic Drogue

西 敬浩<sup>1</sup> · 郷原慎一郎<sup>2</sup> · Charles Lemckert<sup>3</sup> · 外村隆臣<sup>4</sup> 山本浩一<sup>5</sup> · 濱田孝治<sup>6</sup> · 山田文彦<sup>7</sup>

### Takahiro NISHI, Shinichiro GOHARA, Charles LEMCKERT, Takaomi HOKAMURA Koichi YAMAMOTO, Takaharu HAMADA and Fumihiko YAMADA

Time-space distributions of the internal velocity were measured in Ariake Sound using Lagrangian-Acoustic Drogue for Intertidal environments (LAD-IT). The turbidity distributions were calculated using backscattering data of ADCP by solving the sonar equation. Time-space distributions of both the eddy viscosity and eddy diffusion coefficients were estimated using those of both the velocity and the turbidity. The estimated results indicated that the both coefficients changed temporally and spatially. The order of magnitude of the eddy viscosity was  $10^{-3}$ - $10^{-2}$  and that of the eddy coefficient was  $10^{-5}$ - $10^{-4}$ . These orders were in good agreement with the conventional studies. The results indicate LAD-IT is adequate for estimating time-space distributions of eddy viscosity and eddy diffusion coefficients in the field.

#### 1. はじめに

極浅海域での底質輸送や地形変化予測の数値モデルに おいて,底質輸送パラメータである渦動粘性係数や渦拡 散係数を推定することは非常に重要である.しかしなが ら,これらのパラメータを決定する上で重要な浮遊物質 の特性は,潮汐,波浪,河川流入,浮遊物質濃度(SSC), 塩分,温度,化学的要因など複雑な環境要因によって支 配されている(Winterwerp, 2006; Yamada ら, 2009).こ れらの複雑な環境を室内実験で再現するのは非常に困難 であるため,底質輸送パラメータの推定にあたっては, 対象とする現地において計測を行う必要がある.

最近では,乱流微細構造から渦動粘性係数や渦拡散係 数を推定する研究例が報告されている.例えば,齋田ら (2008)は現地で乱流微細構造を計測し,エネルギー散 逸率から底質輸送パラメータの推定を試みている.しか しながら,乱流微細構造の直接計測には,特殊な観測機 器を必要とし,さらに観測機器の特性上から観測海域や 深度が制限される.そのため,本研究では,より簡易な 計測機器を開発し,干潟上のような極浅海域を対象とし た底質輸送パラメータの推定手法の提案とその精度検証

1	正会員	修 (工)	(株)アルファ水工コンサルタンツ
2	学生会員		熊本大学大学院 自然科学研究科
3	正会員	Ph.D	グリフィス大学准教授
4	正会員		熊本大学工学部 技術部
5	正会員	博 (工)	山口大学准教授 理工学研究科
6	正会員	博 (工)	佐賀大学准教授 有明海総合プロジェクト
7	正会員	博 (工)	熊本大学教授 大学院自然科学研究科

を目的とする.

従来の底質輸送パラメータの観測手法としては、定点 によるオイラー計測が主流であるが、浮遊物質が局所的 な巻き上げによるものか,あるいは,流れに伴って移流 してきたものか判別が困難である.そのため、底質輸送 パラメータを精度良く推定するためには、ラグランジュ 計測手法との組み合わせが有効な手段となる. 内湾にお けるラグランジュ計測手法として, Schacht・Lemckert (2007) は、Lagrangian Acoustic Drogue (LAD) を開発し、 浮遊物質の3次元輸送特性の現地観測を行った.LADは、 4つのベーンを有したフロート式ブイにDGPS・ADCP・ CTD センサーを搭載したものである.本研究では、西ら (2008)により極浅海域用に小型・軽量化したLADを用 いて現地観測を行った.その際,濁度の時空間分布を計 測する手法としては, ADCPで計測された反射強度から ソナー方程式を用いて濁度を算定する方法を用いた.本 研究ではADCPで計測された流速とともに渦動粘性係数, 渦拡散係数の時空間分布の推定を試みた.本論文は、最 初に観測機器の概要, 濁度の推定方法の検証, 現地観測 結果から推定した渦動粘性係数、渦拡散係数の検証、最 後にまとめという構成となっている.

#### 2. 観測機器の概要

本研究では、極浅海域の潮間帯で濁度・流速の時空間 分布を計測するために、ラグランジュ計測による現地観 測を行った。ラグランジュ計測では観測機器が周囲の水 塊と同一速度で運動することが前提条件となり、この水



塊に追随する機器の性能をWater Tracking Ability (Niller ら, 1995) と呼ぶ. Schacht・Lemckert (2007) は, LAD についてWater Tracking Abilityを保障する機器の形状の 検討を行い,水深4.5mまで濁度・流速の時空間分布を計 測可能であることを確認した. そのため,本研究では LADの形状 (ブイの形状,ベーンの寸法など)を採用し, 極浅海域で計測できるよう小型・軽量化の改良を行っ た. この改良した機器を, LAD for Intertidal environments (LAD-IT) と呼び,これ以降LAD-ITと記述する. LAD-ITの主構造は,4枚のベーン(高さ510mm,幅348mm, ステンレス製)と浮体で構成されており,さらに,濁 度・流速の時空間分布を計測するため,浮体上部には GPSを設置し,下部に流速・流向・反射強度を計測する 超音波式流速分布計 (Aquadopp Current Profiler; Nortek 社製)を設置した(図-1).

本研究で使用した ADCP は Bottom Tracking (対地速度 計測)機能を有していない.そのため,ブイ上部に設置 した GPS の軌跡から表面流速を算定し,その表面流速に Aquadopp-ADCPで計測した流体内部の相対速度を加算し て流速分布を測定した.この流速分布の計測精度に関し て,西ら (2008) は外力要因が異なる一方向流場と波浪 場で検証を行っており,その精度は±10%以内であるこ とを確認している.

#### 3. 現地観測概要

現地観測は,熊本市白川河口域に広がる潮間帯上で行った(図-2).現地における大潮時の平均潮位差は3.86m で,平均有義波高は0.2m,有義波周期は3秒である.今 回の観測は2009年10月10日で,観測時の潮汐は小潮, 気象条件は晴れで観測期間中の最大風速は10.4m/sであった.観測は上げ潮時(9:10~10:40),上げ潮から 下げ潮(11:15~13:38(満潮:12:54),下げ潮時 (13:43~15:00)の3回に別けてLAD-ITを投入し観測



図-2 現地観測場所及びLAD-ITの軌跡図(2回目)

を行った.また、今回の観測ではLAD-ITの周辺にGPS を搭載した小型ブイを10個同時に配置し、LAD-ITの空 間代表性の確認を行った.さらに、観測中はLAD-ITか ら10mほど距離を確保し船で追跡して、15分おきに電気 伝導度の鉛直分布を水面から0.2mピッチで水底まで計測 し、同時に表層と海底付近の2点で採水を行った.

観測場所の水深は約3.0mであるため、ADCPは層厚 0.2mで20層計測できるよう設定し、超音波の周波数を 2MHzとして1分毎に東西流速、南北流速、鉛直流速、反 射強度を測定した.また、GPSは1秒間隔でLAD-ITの緯 度経度を計測するよう設定した.小型ブイのGPSに関し ても同様の設定で計測を行った.

#### 4. データ解析手法

#### (1) ADCPの反射強度を用いたSS濃度の推定方法

ADCPの反射強度から海水中の散乱体量を推定するに は式(1)が用いられる(飯田, 1994).

ここで $I_{er}$ ,  $I_{o}$ はトランスデューサーの受波強度と送波強度 (W/m<sup>2</sup>),  $\alpha$ は吸収係数 (dB/m), R (=r/cos $\theta$ ) は音軸上でのトランスデューサーから散乱体までの距離 (m) (rは測定層までの距離,  $\theta$ はトランスデューサーの傾斜角 (本計測機器では15°),  $\rho_{s}$ は散乱体の数密度 (個/m<sup>3</sup>),  $\sigma_{bs}$ は散乱体群の平均後方散乱断面積 (m<sup>2</sup>), cは海水中の音速 (m/s),  $\tau$ は超音波のパルス幅 (s),  $\psi$ は等価理想ビーム幅 (Sr) を示す.式 (1) をdB表記にすると式 (2) のソナー方程式となる.

$$SV = RL + TL - (SL + A)$$
 .....(2)

ここで、SV (=10logs<sub>v</sub>=10log ( $\rho_s \cdot \sigma_{bs}$ )) は体積後方散乱 強度、RL (=10log $l_e$ ) は受波レベル (ADCPが記録する反 射強度), SL (=10logI<sub>0</sub>) は送渡レベル, TL (=20logR+2 $\alpha$ R) は球面拡散と海水の吸収による伝搬損失を示す.ここで, 式 (2) においてRLはADCPの反射強度より得ることが できるが, 計測される反射強度は単位が count のためソ ナー方程式へ適用するためにdBへ変換する必要がある. 本研究で使用したADCPでは0.45dB/count なので,この 値から計測値をdBへ変換した.TLのうち吸収減水項で ある2 $\alpha$ Rにおける $\alpha$ はソープの式(式(3))を用いて算 出し, $\alpha$ =1.25を使用した(海洋音響学会,2004).

```
\alpha = f^{3}[3.01 \times 10^{-4} + \{43.7/(4100 + f^{2})\} + \{0.109/(1 + f^{2})\}] \times 10^{-3}
(3)
```

ここで、fはトランスデューサーより発射される超音波の 周波数 (kHz) である.本研究ではADCPの周波数を 2MHzと設定したので $f=2.0 \times 10^3$  (kHz) となる.また、式 (2)の (SL+A) はセンサー特性により決定されるが、本 研究では矢野ら (2003) にならって49.2dBとした.また、 反射強度は3つのトランスデューサーの平均値とした.

#### (2) 渦動粘性係数と渦拡散係数の算出方法

渦動粘性係数(N<sub>2</sub>)及び渦拡散係数(K<sub>2</sub>)は、それぞ れ式(4),(5)から算出する.なお,式(4)はレイノ ルズ応力の定義式であり、平均流速の鉛直勾配との比例 関係を仮定した式である.また,式(5)は乱れによる 濁度の鉛直方向の輸送が平均濁度の鉛直勾配に比例する と仮定した式である.



ここで, u, wは水平, 鉛直方向の瞬間流速, ū, wは水 平, 鉛直方向の平均流速, u', w'は乱れの水平, 鉛直成 分, u', w'は流速の乱れ強度, sは瞬間濁度, sは平均濁 度, s'は濁度の乱れ成分を示す.

式 (6) から渦動粘性係数 (*N*<sub>2</sub>) 及び渦拡散係数 (*K*<sub>2</sub>) は式 (7) で求めることができる.



本研究で使用した Aquadopp-ADCP は2MHz で流速,反 射強度の計測を行っているが,出力値は1分毎の平均値 である.そのため,水平,鉛直方向流速と濁度の平均値 は7分間の移動平均から算定し,乱れ成分は計測値から の差分値とした.また,ADCP は0.2m ピッチで計測を行 っているため,流速,濁度の鉛直勾配は上下のセルの差 分から平均した値とする.式(8)にn番目の鉛直勾配の 算定式を示す.

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{n} = \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{n} = \left\{\left(\frac{u_{n} - u_{n-1}}{0.2}\right) + \left(\frac{u_{n+1} - u_{n}}{0.2}\right)\right\} \times \frac{1}{2}$$
(8)

ここで, *u*<sub>n</sub>はn番目のセルの水平方向流速を示す. 濁度 の鉛直勾配についても式(8)と同様の方法で算定する.

#### 5. 観測結果と考察

#### (1) LAD-ITで計測した軌跡及び流速分布

図-2に2回目の投入時(上げ潮から下げ潮)のLAD-IT と小型ブイの軌跡図を示す. LAD-ITと小型ブイは全て南 に流れ、同様の挙動をしている. このことから, LAD-IT の空間代表性が確認できる.内部流速はGPSで計測され た表層流速とADCPで計測された相対速度を足し合わせ て計測する. 図-3(a), (b) に2回目投入時の東西方向流 速,南北方向流速の時空間分布を示す,この図で,正の 値(+)はそれぞれ東向き、北向きの流速を示し、負の 値(-)はそれぞれ西向き、南向きの流速を示す.また、 海底面については15分おきに測定した水深と、LAD-IT のADCPから得られた反射強度が64.7count未満となる水 深を比較し、決定した. LAD-ITの軌跡と流速分布を比較 すると,南北方向流速に関しては,表層の流速は南向き の流速が卓越しており、LAD-ITの軌跡と一致する.また、 東西方向流速に関しても,投入直後から満潮時までは東 向きの流速が卓越し,満潮後は西向きの流速が卓越して おり、南北方向流速と同様にLAD-ITの軌跡と一致する.

#### (2) ADCPの反射強度を用いたSS 濃度の推定結果

ADCPの反射強度からSS濃度を推定するために、本研 究では採水サンプルをLAD-ITの計測と同時に行った. ADCPの反射強度からSS濃度を推定するのに、式(2) より反射強度を用いて算定した体積後方散乱強度(SV) と採水サンプルのSS濃度との相対関係を調べた.図-4に 採水サンプルのSS濃度と体積後方散乱強度の相関図を示 す.式(2)において、センサー特性に依存する(SL+A) は49.2dBを用いた結果、回帰直線は式(9)となり、こ の時の相関係数はr=0.60となった.

 $SS = 0.119 \times SV + 8.80$  .....(9)

上記の算定式を用いて算出した2回目投入時の濁度の時空間分布を図-3(c) に示す.この図から濁度のオーダーは3~8mg/l程度で,水深方向に増加していることが確認できる.これは,潮汐流や波浪によって底面で砂粒子が巻き上げられ,粒径が小さい浮遊砂が、水深の浅い箇所においても沈降せずに移流していると考えられる.



図-3 流速と濁度の時空間分布(第2回投入時)

#### (3) 渦動粘性係数・渦拡散係数の時空間分布の推定結果

LAD-ITで計測された流速と、反射強度より推定した濁 度の時空間分布から式(6),(7)を用いて渦動粘性係数, 渦拡散係数の時空間分布を推定した.図-5(a),(b)に推 定した渦動粘性係数,渦拡散係数の時空間分布を示す. 図-5(a)から、渦動粘性係数は満潮時においても有意な 値を示すことが確認できる.通常,潮汐が卓越する箇所 では満潮時刻後に憩潮が存在し、特に水平方向流速が小 さくなり、渦動粘性係数も小さくなると考えられる.し かし、本研究対象地域は白川が流れており、満潮時に岸 向きから沖向き(東向きから西向き)に流速は変化する が, 白川の影響によって常に河口側への流速(南向き) が存在し、満潮時でも水平方向流速が存在する.この特 徴は、山田ら(2009)の観測結果とも一致する. 観測時 間中,水平方向流速が常に存在することにより,満潮時 においても渦動粘性係数が有意な値をとると考えられる. 従来の実海域における渦動粘性係数の推定は、主に水深 が100m程度以上の外洋で実施されており、流速データか ら変分推定法により推定した研究例が多い(Yu and O'brien, 1991). これらの解析結果は, 場所による変動は あるものの渦動粘性係数のオーダーは10-2~10-3程度であ る. また, 坂井(1999) は水深が25m程度の福島沖合海 域で,アドジョイント法を用いて渦動粘性係数の鉛直分 布を推定しており、そのオーダーは10<sup>-3</sup>程度で、水深3m 付近で最大値となることを示している.また,本研究の 対象箇所である潮間帯干潟の研究では,齋田ら (2008) が乱流微細構造プロファイラを用いて渦動粘性係数の鉛 直分布を推定しており,そのオーダーは10<sup>3</sup>~10<sup>-1</sup>程度で あることを示している.本研究で推定した渦層粘性係数 のオーダーも10<sup>3</sup>~10<sup>-2</sup>で,従来の研究のオーダーとほぼ 同程度であった.しかし,本研究は従来の研究と異なり, 時空間分布で渦動粘性係数の推定を試みており,その結 果,渦動粘性係数は時空間的に一定,一様ではなく時間 的,局所的に変化していることが確認できた.

図-5(b)から、渦拡散係数は、底面付近で高い値となることが確認できる.これは、本観測期間中において底





図-5 渦動粘性係数と渦拡散係数の時空間分布の推定結果(第2回投入時)

面付近で濁度の値が高く,時空間的な変動をしているの に対して,水深が浅くなるとほとんど変化は見られない. そのため,渦拡散係数も濁度の時空間分布に追随し,底 面付近では高い値となり,水深が浅くなるにつれ濁度の 変化が小さくなるので低い値となると考えられる.一般 的に鉛直渦拡散係数の推定には,乱流微細構造プロファ イラを用いてエネルギー散逸率を測定する観測方法が用 いられるが,機器の特性上,観測海域や深度が限定され る.近年, expendable current profiler (Nagasawa 6, 2002) やCTDプロファイラを用いて鉛直渦の代表スケールを推 定する方法などが提案されている.従来の研究結果にお ける渦拡散係数のオーダーは10<sup>5</sup>~10<sup>4</sup>程度で,本研究の 推定結果と一致している.本提案手法では,渦動粘性係 数を濁度から直接推定しているが,従来の研究結果と同 等の結果を得ることが可能である.

#### 6.まとめ

本研究では、LAD-ITでラグランジュ計測による極浅海 域での流速,及び反射強度からソナー方程式を用いて濁 度の時空間分布を計測する簡易手法を提案した.さらに, 計測された流速,濁度の時空間分布から渦動粘性係数と 渦拡散係数の推定手法についても提案した.今回推定さ れた渦動粘性係数,渦拡散係数のオーダーは,従来の研 究結果で示されたオーダーとほぼ同程度であり,本研究 で用いた簡易な計測機器でも渦動粘性係数,渦拡散係数 を精度良く推定することが可能であることが確認された.

一般的に渦動粘性係数,渦拡散係数は空間的に一様で あるとされている(Yang and Hamrick, 2003).しかし, 本研究で得られた結果では局所的に変動が見られ,一様 でないことが確認できる.そのため,今後は現地観測で 得られた渦動粘性係数,渦拡散係数を数値モデルに反映 させ,その精度向上について検討を行う予定である.

#### 参考文献

飯田浩二(1994):音響資源調査法の基礎,月刊海洋, 26,pp.602-610.

海洋音響学会(2004):海洋音響の基礎と応用, pp.33.

- 齋田倫範・矢野真一郎・田井 明・志岐慎介・重田真一・小 松利光(2008):冬季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.
- 坂井伸一(1999):鉛直1次元同化モデルによるパラメータ評 価の試み,水工学論文集,第43巻, pp.839-844.
- 西 敬浩・ Charles Lemckert, · Andres Payo · 外村隆臣・山本 浩一・濱田孝治・山田文彦 (2008): ラグランジュ・ブイ を用いた極浅海域での浮遊輸送特性の3次元計測,海岸 工学論文集,第55巻, pp. 1441-1445.
- 矢野真一郎・多田彰 秀・押川英夫・中村武弘・赤木洋勝・松 山 明 人 ・ 冨 安 卓 滋 ・ Rudolf Rajar, ・ Milena Horvat (2003) :水俣湾における底泥動態の現地観測、海岸工学 論文集, 50, pp. 1006-1010.
- 山田文彦・ 白川雄一郎・穴井広和・草合良友・坂西由弘・山 本浩一・小林信久(2009):シルト・粘土の質量に基づく 土砂収支法の提案と河口潮間帯干潟への適用,海岸工学 論文集,第56巻, pp.476-480.
- Nagasawa, M., T, Hibiya., Y, Niwa., M, Watanabe., Y, Isoda., S, Takagi., and Y., Kamei. (2002): J. of Geophysical Research, 107, C123221.
- Niller, P.P., S,A. Sybrandy., Bi, K., Poilain, P.M. and D, Bitterman. (1995): Measurement of the water following capability of holey-sock and TRISTAR drifters, Deep Sea Research, I, 45, pp. 1951-1964.
- Schacht, C. and C, Lemckert. (2007): A new Lagrangian-Acoustic Drogue (LAD) for monitoring flow dynamics in an estuary: a quantification of its water-tracking ability, J. of Coastal Research, SI50, 420-426.
- Winterwerp, J.C. (2006): Stratification effects by fine suspended sediment at low, medium and very high concentrations, J. of Geophysical Research, 111, C05012
- Yamada F., N, Kobayashi, Y, Sakanishi. and A, Tamaki. (2009): Phase averaged suspended sediment fluxes on intertidal mudflat adjacent to river mouth, J. of Coastal Research, 25, pp. 350-358.
- Yang, Z. and M, J. Hamrick. (2003): Variational inverse parameter estimation a long-term tidal transport model, Water Resource Research, 38, 1204.
- Yu, L. and J, J. O'brien. (1991): Variational estimation of wind stress drag coefficient and the oceanic eddy viscosity profile, J. of Physical Oceanography, 21, pp.709-719.