

超音波ドップラー流速計を用いた感潮域の 流動と懸濁物質濃度の現地観測

川 西 澄*・小 谷 英 史**・余越正一郎***

1. はじめに

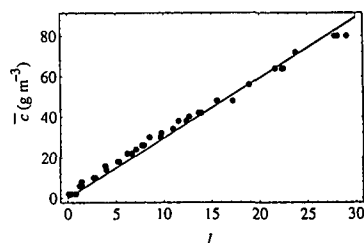
感潮域の水環境を考えるうえで海水流動や溶存物質とともに懸濁粒子の挙動を知ることが重要であり、これまでに多くの研究が行われてきた。潮流による懸濁粒子の再浮上・沈降、堆積過程などを明らかにするには流速と懸濁物質濃度を同時に測定しなければならない。電磁流速計と散乱光式濁度計を組み合わせた従来の方法では、流速と濁度の測定領域が一致しないため、乱流フラックスが正確に測定できない恐れがある。またさらに、測定領域が大きいため底面近傍の測定も困難である。こうした問題を克服する測器として超音波ドップラー流速計(ADV)が考えられる。

本研究の目的は、太田川放水路と大野瀬戸における現地観測から、流速と懸濁物質濃度の同時測定に対するADVの有用性を示し、流速3成分と懸濁物質濃度の鉛直分布を連続的に観測し、レイノルズせん断応力、懸濁粒子の乱流フラックスや沈降速度などを求め、感潮域における流動と懸濁粒子の挙動を明らかにすることである。

2. 太田川放水路における観測

(1) 観測概要

1995年7月18日7:30~16:15にかけて広島市の太田川放水路の河口から2.5 km上流の水路中央部において流速、塩分濃度、水深の連続観測をおこなった。観測地点は前報(川西ら, 1995)と同じである。流速測定には米国 SonTek 社製の超音波ドップラー流速計(ADV)を使用した(Lohrmanら, 1994)。ADVに2軸傾斜・方位角センサーを取り付け、河床に設置した圧力変換器から得られる水深 h の変化にあわせて測点の高さ z を変化させ(相対高さ $z/h=0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$)、平均、乱流量の時空間($t-z$)における分布を得た。ただし、流速の主流方向 u 、主流方向に直角な水平方向 v 、鉛直方向成分 w は、ADVから得られる流速3成分の値と



図一 後方散乱強度と平均懸濁物質濃度の関係

傾斜・方位角の値を使って求めた。

ADVは10 MHzの超音波ビームを放射し、水中に存在する懸濁粒子によって散乱される超音波のドップラーシフトを利用して流速を測定するため、流速とともに超音波の後方散乱強度が同時に得られる。本研究では、この後方散乱強度から懸濁物質濃度を求めている。ADVはその送波器から5 cm離れた体積 0.25 cm^3 の領域(サンプリングボリューム)の流速3成分と後方散乱強度を、25 Hzのサンプリング周波数で測定できる。このようにADVは時空間における高い分解能を有しているので、従来の測器では不可能であった底面のごく近傍の領域における乱流測定が可能である。またさらに、境界とサンプリングボリュームの距離が25 cm以下であれば、サンプリングボリュームから境界までの距離を1 mm以下の精度で測定可能である。

現地における砂泥およびカオリンを用いて、ADVの散乱強度と懸濁物質濃度の関係を調べた結果、両者の間には良好な比例関係が認められた。88 μm のふるいにかけた砂泥を用いた場合の後方散乱強度 I と平均浮遊砂泥濃度 $\bar{c}$ の関係を図一に示す。

(2) 流速、塩分濃度と懸濁物質濃度の経時変化

各測点における平均流速 $\bar{u}$ 、水深 h 、平均塩分濃度 $\bar{s}$ 、平均懸濁物質濃度 $\bar{c}$ の経時変化を図二に示す。図中のプロット点番号は河床に最も近い測点を1とし水面に向かって順番に付けた測点番号である。ただし、上げ潮の流速を正にしてある。観測時、祇園水門の開度は10 cmで淡水の流入はわずかであるが、7月22日の夕方から7月24日の朝にかけて祇園水門が開けられ放水されていたために、通常より10 psu程度塩分濃度は低い状態にあ

* 正会員 工博 広島大学助教授 工学部第四類

** (株) 沼池組

*** 正会員 工博 広島大学教授 工学部第四類

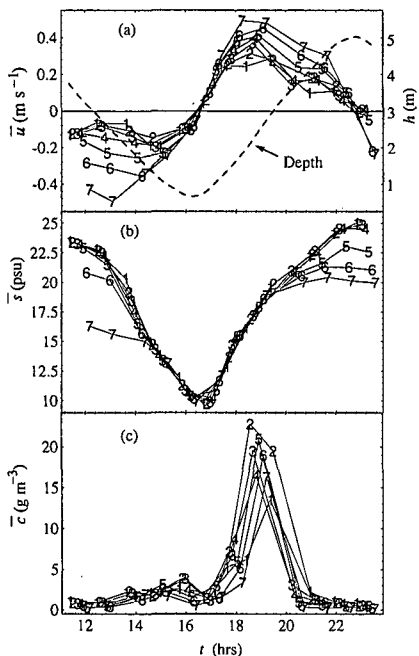


図-2 平均流速、水深、平均塩分濃度と平均懸濁物質濃度の経時変化

る。このため、重力循環流が通常より強く、下げ潮時における底層の流速は通常より小さく押さえられ、逆に、表層の流速は大きくなっている。

干潮付近における塩分濃度の鉛直方向変化は小さく、強混合状態にあるが、満潮付近の上層には濃度勾配がみられ、特に、下げ潮初期（観測開始付近）の表層の濃度勾配はかなり大きい。懸濁物質濃度は潮汐によって引き起こされている往復流に対応して変化しており、河床の砂泥が浮上と堆積を繰り返していることがわかる。ただし、主流方向の密度勾配と非線形効果による潮汐波の変形のために、下げ潮時の底層における流速とレイノルズせん断応力は上げ潮時に比べて小さく、河床堆積物の浮上はわずかである。上げ潮時、懸濁物質濃度の最大は河床に最も近い $z/h=0.02$ の測点ではなく、一つ上の $z/h=0.05$ の測点で起きているが、この理由は今のところよくわからない。図-2(c)に示した懸濁物質濃度の大きさは後方散乱光式濁度計を用いて行った観測結果（Kawanishiら、1993）と同程度で、経時変化の特性も良く一致していることから、ADVは懸濁物質濃度の測定にも十分使用できると思われる。

(3) 懸濁物質濃度の乱流フラックスと沈降速度

5分間の各データレコードから求めた懸濁物質濃度の乱流フラックスの経時変化を図-3に示す。5分間のレコード長は乱流フラックスの評価に十分な長さとは言いが、観測方法の制約からやむをえない。

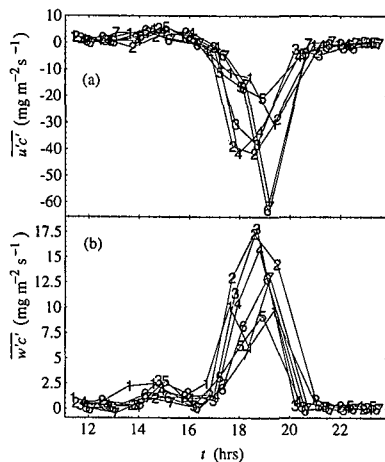


図-3 懸濁物質濃度の乱流フラックスの経時変化

平均流速が正のとき主流方向の乱流フラックスは負であり、正の濃度変動が低速上昇流と結び付いていることがわかる。主流方向の乱流フラックスの大きさは鉛直フラックスの約3倍である。

懸濁物質の輸送方程式は、流速と濃度場が水平方向に一樣で鉛直方向の平均流がなければ、

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{w}'c'}{\partial z} - \frac{\partial w_s \bar{c}}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

(1)式を河床付近から水面に向かって積分し、水面での濃度フラックスを0とすると、沈降速度 w_s は

$$w_s(\xi, t) = \frac{1}{c(\xi, t)} \left[-\frac{\partial}{\partial t} \int_{\xi}^h \bar{c}(z, t) dz + \bar{w}'c'(\xi, t) - \bar{c}(h, t) \frac{\partial h}{\partial t} + \bar{c}(\xi, t) \frac{\partial \xi}{\partial t} \right] \quad (2)$$

から求められる。(2)式から求めた沈降速度の経時変化を図-4に示す。ただし、 h のかわりに $0.8h$ までの積分値を用いている。

沈降速度は憩流時付近で小さくなるだけでなく、平均流速と懸濁物質濃度が最大になる時刻でも減少している。また、沈降速度が最も大きくなるのは上げ潮の減速時である。こうした沈降速度の変動には底面せん断応力、流速シア、懸濁粒子の aggregation 等が関係していると

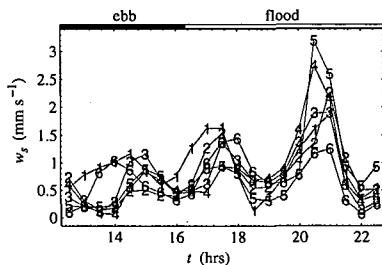


図-4 沈降速度の経時変化

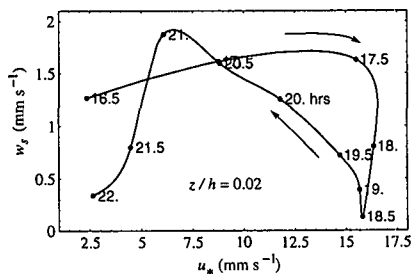


図-5 摩擦速度と沈降速度の関係

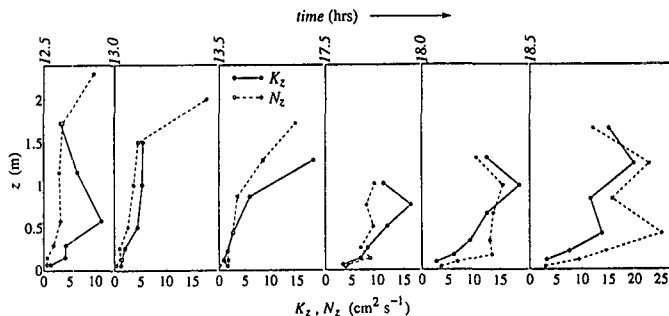


図-7 鉛直拡散, 渦粘性係数の分布

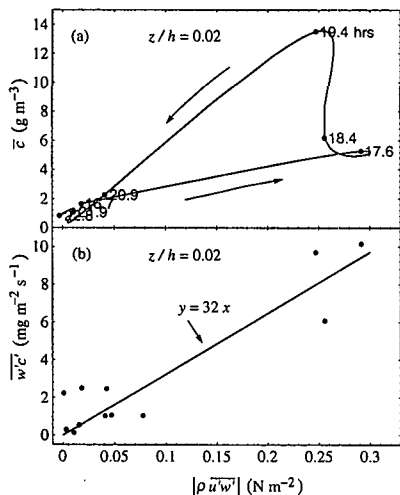


図-6 レイノルズ応力と平均懸濁物質濃度, 鉛直乱流フラックスの関係

考えられる。

図-5は上げ潮時における $z/h=0.02$ での摩擦速度と沈降速度の関係を示したものである。プロット点の数字は時間を、矢印は時間の経過方向を示している。上げ潮初期には摩擦速度の増加とともに沈降速度も大きくなっているが、摩擦速度が最大になる付近で急激に沈降速度が小さくなる。その後、摩擦速度の減少とともに再び沈降速度は増加し、上げ潮流速の減速時に最大となった後、満潮にかけて急激に減少している。摩擦速度が最大になる付近で沈降速度が小さくなるのは、強いせん断によってフロックが破壊されるためと考えられる。せん断応力が減少するにつれて再びaggregationが起り、沈降速度が大きくなっていると推察される。

上げ潮時における $z/h=0.02$ でのレイノルズせん断応力と懸濁物質の濃度の関係を図-6(a)に、全観測期間における鉛直乱流フラックスとの関係を図-6(b)に示す。懸濁物質濃度はせん断応力の最大より2時間程度遅れて最大になっている。こうした履歴特性はsettling lagとして知られているおり底面と測点の距離がその原因の一つ

と考えられているが、本研究の場合、きわめて底面に近いところで測定されていることから、別な機構として上述した沈降速度の変化が考えられる。一方、鉛直乱流フラックスには懸濁物質濃度のような位相差はなく、せん断応力にはほぼ比例して変化している。Lavelleら(1984)は現地と実験室における底面せん断応力と底面付近の鉛直乱流フラックス(Erosion Rate)の関係をまとめている。それによると、図-6(b)の結果と後で述べる大野瀬戸の結果(図-12(b))はテムズ川の結果と同程度である。

図-7は懸濁物質濃度の鉛直拡散係数 K_z の鉛直分布の経時変化を示したものである。図にはスペクトルピーク法(川西ら, 1995)によって求めた鉛直渦粘性係数 N_z (破線)もあわせて示してある。 K_z は濃度の鉛直乱流フラックスとRouse分布をあてはめて求めた濃度の鉛直勾配から評価したもので、Rouse分布との適合がわるかった時間の分布は除いてある。 K_z と N_z の大きさはほぼ同程度で、分布形も似ている。

3. 大野瀬戸における観測

(1) 観測概要

1995年8月29日9:10~18:00にかけて広島湾西北部に位置する大野瀬戸において流速, 超音波の散乱強度, 塩分濃度, 水温の鉛直分布と水深の連続観測を行った。大野瀬戸は厳島と大野町の間の長さ約9 km, 幅0.5~1.7 kmの海峡である。観測は大野町側から約400 m沖に係留されているカキ筏から測器を吊して行った。観測地点(34°16'N, 132°16'E)を図-8に示す。観測方法は太田川放水路と同様であるが、さらに $z/h=0.9$ の測点を加えられている。

観測されたADVの後方散乱強度は太田川放水路におけるものにくらべて1オーダー小さく、懸濁物質が浮遊砂泥と異なる密度の小さな粒子から成っていると考えられた。そこで、重い砂泥を除いて濃度試験を行った。しかしながら、現地とは粒径が異なっている可能性があるため、散乱強度から求められた濃度値には曖昧さがある

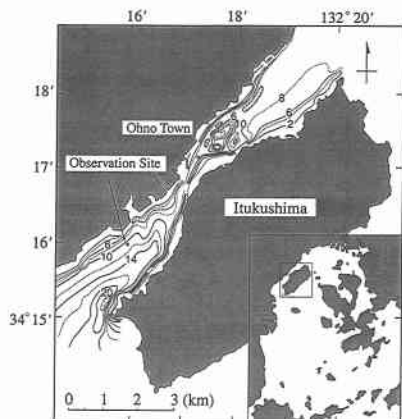


図-8 大野瀬戸と観測地点

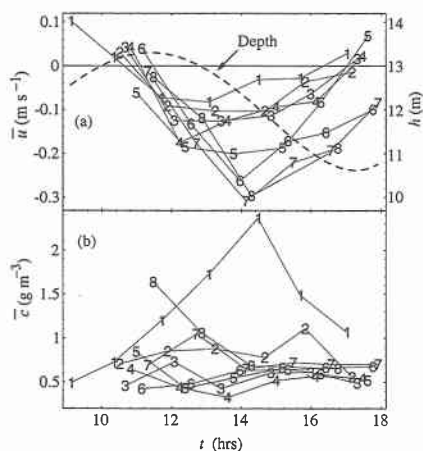


図-9 平均流速と平均懸濁物質濃度の経時変化

が、光学式の濁度計でも事情は同じである。

(2) 流速、レイノルズせん断応力と懸濁物質濃度の経時変化

図-9 に平均流速と懸濁物質の平均濃度の経時変化を示す。ただし、最も底面に近い測点1を除く最初のデータセットと5番目と最後のデータセットの最上測点8は欠測となっている。底層の最大平均流速は表層のそれにくらべて2時間近く進んでいる。ここには示さないが、水深平均流速の最大は14時に起きている。測点1と8では他の測点にくらべて大きな懸濁物質の濃度変化がみられる。測点8の懸濁物質はプランクトンであると考えられ、測点1の懸濁物質の経時変化とは異なった変化を示している。

平均懸濁物質濃度の1時間ごとの鉛直分布を図-10に示す。いずれの時間でも海底付近で濃度の上昇がみられ、海底高濁度層の存在が確認される。こうした懸濁物質濃度の分布特性は瀬戸内海の多くの地点で観測されて

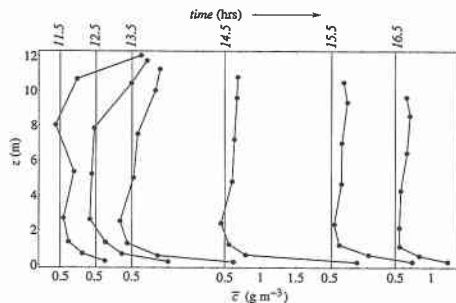


図-10 平均懸濁物質濃度の鉛直分布

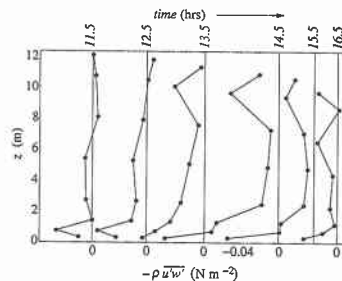


図-11 レイノルズせん断応力の鉛直分布

いる(Kawana ら, 1984)。図-10 から、海底高濁度層の厚さは1.5~2.0 mである。満潮付近には上述したように水面付近にもプランクトンによると思われる高濁度層がみられるが、時間の経過とともに消滅している。

図-11 は図-10 と同じ時刻におけるレイノルズせん断応力の鉛直分布を示したものである。レイノルズせん断応力は海底上2 m付近から海底に向かって急激に増加しており、底面近傍(最も下の測点の高さは17~30 cm)でも constant stress layer の存在は確認できない。したがって、底面せん断応力を正しく評価するためには海底に非常に近い位置で測定しなければならないことがわかる。

海底近傍($z/h=0.02$)におけるレイノルズ応力と平均懸濁物質の濃度および鉛直乱流フラックスの関係を図-12に示す。ただし、鉛直乱流フラックスが負になったデータ(満潮付近)は図-12(b)には示していない。鉛直乱流フラックスが負になったのは、流れが弱い憩流時、懸濁物質が流れに追従せず、ADVによって測定された鉛直流速が懸濁物質の沈降速度に近いものになったためと考えられる。懸濁物質濃度、鉛直乱流フラックスともせん断応力とともに増加しており、太田川放水路でみられたようなせん断応力に対する懸濁物質濃度の遅れは認められない。

(3) 懸濁物質の沈降速度と鉛直拡散係数の経時変化 懸濁物質の沈降フラックスと鉛直乱流フラックスのバ

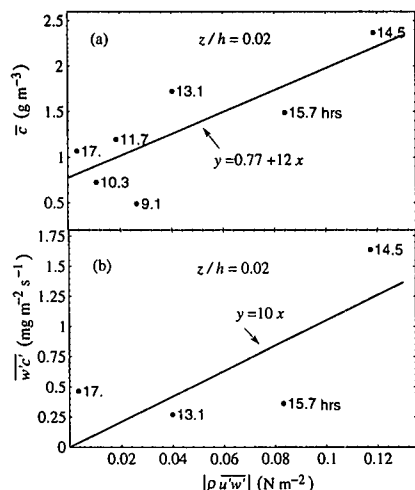


図-12 レイノルズ応力と平均懸濁物質濃度、鉛直乱流フラックスの関係

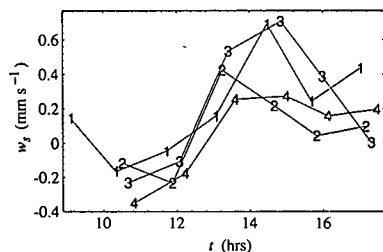


図-13 沈降速度の経時変化

ランス $w_s \bar{c} = \overline{w'c'}$ を仮定して求めた沈降速度 w_s の経時変化を図-13に示す。満潮付近では、前述したように鉛直乱流フラックスが負になっているため、 w_s も負になっており意味の無いものになっている。沈降速度は水深平均流速、底面せん断応力とともに増加する傾向がみられる。沈降速度の最大は約 0.6 mm s^{-1} と太田川放水路のものに比べかなり小さく、瀬戸内海で観測されているもの(谷本ら, 1982)と同程度であり、前述したように、懸濁物質の密度は小さいと考えられる。

図-14(a) に太田川放水路と同様にして求めた底層における拡散係数 K_z の鉛直分布を示す。13.5 時における K_z は海底からの高さとともに直線的に増加しているが、他の時刻では 0.6 m の高さまで K_z はほぼ一定である。図-14(b) に、観測期間中にみられた典型的な海水密度

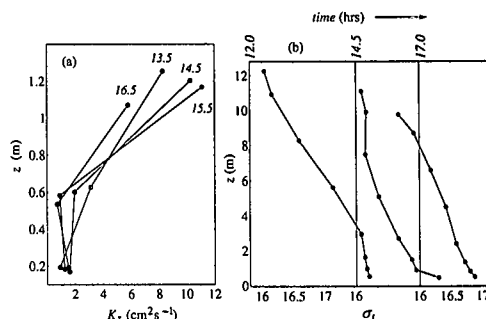


図-14 鉛直拡散係数と海水密度の鉛直分布

の鉛直分布を示す。13.5 時までは 12 時と同様な密度分布をしており、底層における密度の鉛直勾配は小さい。一方、14.5~16.5 時は 14.5 時と同様な分布で、上層の密度勾配が小さくなるかわりに底層では密度勾配が大きくなっている。こうした底層の密度成層が高さ 0.6 m 付近までの K_z の増加を押さえしている一因と考えられる。

4. おわりに

太田川放水路と大野瀬戸において ADV による流速と懸濁物質濃度の同時測定を試みた。懸濁物質の輸送特性を明らかにする上で ADV は強力なツールであり、特に、従来の方法では不可能であった底面近傍における懸濁物質濃度や乱流フラックスの直接測定が可能であることがわかった。

参考文献

- 川西 澄・前木 郷・余越正一郎 (1995): 河口内における往復流の鉛直構造, 海岸工学論文集, 第 42 巻, 1 号, pp. 411-415.
- 谷本照己・川名吉一郎 (1982): 現場における懸濁粒子の沈降実験, 中国工業技術試験所報告, No. 18, pp. 1-8.
- Kawana, K. and T. Tanimoto (1984): Turbid bottom water layer and bottom sediment in the Seto Inland Sea, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 40, pp. 175-183.
- Kawanisi, K. and S. Yokosi (1993): Measurements of turbulence and suspended sediment in tidal river, J. Hydraul. Engrg., ASCE, Vol. 119, No. 6, pp. 704-724.
- Lavelle, J. W., H. O. Mofjeld, et al. (1984): An in situ erosion rate for a fine-grained marine sediment, J. Geophys. Res., Vol. 89, No. C4, pp. 6543-6552.
- Lohrman, A., R. Cabrera, et al. (1994): Acoustic-Doppler velocimeter (ADV) for laboratory use, Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation, Buffalo, New York, pp. 351-365.