

CDVP による感潮域における懸濁粒子の現地観測

川 西 澄*・田 原 敏 博**

高い速度測定精度を持つコヒーレント方式の超音波流速分布計を用いて、太田川感潮域 (Sta. A) と広島湾北部域の 3 地点で底面境界層に存在する懸濁粒子 (SPM) の観測を実施した。流動の弱い広島湾北部域の海底境界層と反対に、太田川感潮域では SPM の沈降速度 w_s は底面に向かって増加する傾向を示した。Sta. A の上げ潮時、SPM の乱流拡散係数と渦動粘性係数の比である β は、 w_s/u_* とともに増加し、1 よりかなり大きな値を示した。すべての地点で、流動 (Reynolds 剪断応力) が強いほど w_s は増加し、SPM 濃度と Reynolds 剪断応力に対する w_s の依存性を表すパラメーターの場所による変化は小さかった。

1. はじめに

感潮域に存在する懸濁粒子 (以下 SPM と呼ぶ) は陸域と海域間の物質輸送・循環や貧酸素化などをはじめとする沿岸域の環境問題を考える上で重要な役割を果たしている。SPM の輸送過程を考える上で、沈降速度や拡散係数といったパラメーターに関する知識は重要であるが、現地におけるそうしたパラメーターの観測は不十分で、ブロック化した SPM の挙動は未だよく分かっていない。

本研究では太田川感潮域と広島湾北部域 3 地点の底面境界層において、高い測定精度を有するコヒーレント・ドップラー速度分布計 (以下 CDVP と呼ぶ) を用いて SPM の観測を実施し、乱流特性量とともに SPM の沈降速度と濃度分布、鉛直拡散係数について検討した。

2. 方 法

2001 年から 2003 年にかけて太田川感潮域 (Sta. A) と広島湾北部域の 3 地点 (湾奥 Sta. B, 大野瀬戸 Sta. C, 江田内湾 Sta. D) において、高い精度で SPM の移動速度の測定が可能な CDVP を用いて海底境界層の速度 3 成分と後方散乱強度分布を観測した。観測地点を平均水深と潮流楕円とともに図-1 に示す。CDVP の超音波周波数は 1.5 MHz で鉛直分解能は 3 cm, 時間分解能は 3 秒とした。

CDVP は pulse-to-pulse coherent ドップラー法 (Lhermitte・Serafin, 1984) を使用しており、複数の超音波パルスを短い時間間隔で発射して、後方散乱パルス間の位相差から速度を求めている。この方式は、従来の incoherent 方式と異なり、ドップラーノイズの影響を受けることなく、高精度、高解像度の速度測定が可能である (Zedelら, 1996; Zedel・Hay, 1999)。測定速度にはバイアスがほとんど含まれず、微小な速度も測定できる。CDVP は

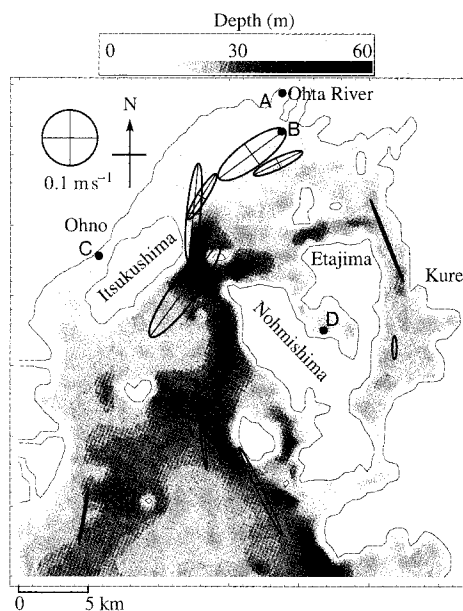


図-1 観測地点と広島湾の水深分布, M₂ 潮流楕円

表-1 観測地点の概要

	Sta. A Ohta floodway	Sta. B Hiroshima bay	Sta. C Ohno seto	Sta. D Etauchi bay
data	Oct. 1-2, 2001	Oct. 7, 2002	January 20, 2003	Oct. 25, 2003
mean depth (m)	2.5	12	8	14
horizontal mean velocity (cm/s)	16	3.1	3.7	1.2
vertical mean velocity (mm/s)	-5.2	-0.80	-2.8	-0.28
mean SOM concentration (g/m ³)	6.5	3.3	3.7	3.2

海水そのものではなく SPM の移動速度を測定していることから、測定された鉛直速度は SPM の沈降速度とみなすことができる。

CDVP の測定範囲は、Sta. A の場合、底面からの高さ $z=0.02\sim 1$ m, Sta. B, C, D の場合、 $z=0.2\sim 1.3$ m とした。Sta. A の観測では、密度の鉛直分布を得る目的で、

* 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

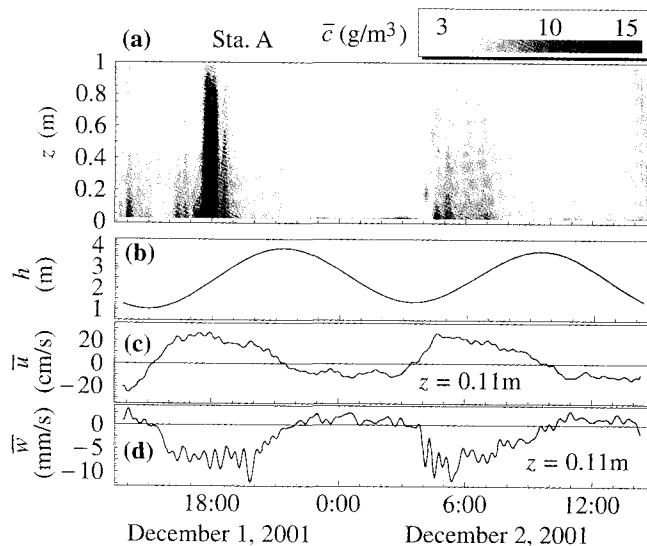


図-2 (a) SPM 濃度の時空間分布, (b) 水深の経時変化, (c) 底層流速の経時変化, (d) 底層鉛直速度の経時変化

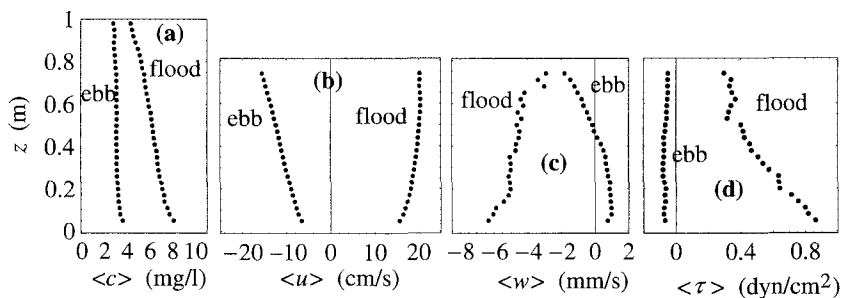


図-3 位相平均値の鉛直分布: (a) SPM 濃度, (b) 主流速, (c) 鉛直速度, (d) Reynolds 剪断応力

パソコンで制御された自動昇降式 CTD (濁度センサー付き) を、底面上 10 cm から 100 cm の間で連続昇降させて測定した。CTD のサンプリング間隔は 1 秒である。移動速度は約 3 cm/s としたので、1 つの鉛直分布を測定するのに必要な時間は約 30 秒である。

Sta. B と Sta. D の観測では、CDVP 測定に加えて、海底上に設置したセディメント・トラップによって SPM の沈降フラックスを測定した。観測に用いたセディメント・トラップは、高さ 25.3 cm, 直径 8.6 cm の円筒を 5 本束ねたものである。SPM 濃度分布を得るため、CDVP の超音波エコー強度を解析して体積後方散乱係数 S_v を求め、採水から求められた SS を使って、 S_v を SPM 濃度に変換した。なお、超音波トランスデューサー近傍における音波の球面拡散からのずれは考慮している (Thorne ら, 1991)。

表-1 に各観測地点の代表的な諸量を示す。平均水深の範囲は 2.5~14 m である。Sta. D (江田内湾) は、平均

水平流速が 1.2 cm/s しかなく、非常に流動が弱い海域である。Sta. A の太田川放水路と比較すると流速は約 1/10 である。

3. 結果および考察

(1) 太田川感潮域における SPM の挙動

Sta. A (太田川放水路) における SPM 濃度分布と水深 h , 河床からの高さ $z=0.11$ m での主流方向平均流速 $\bar{u}$ と鉛直速度 $\bar{w}$ の経時変化を図-2 に示す。平均時間は 30 分である。主流方向流速は上流方向、鉛直速度は上向きを正としている。観測期間内における分派前の太田川流量は 30~80 m^3/s の範囲で変動しており、観測期間平均値は 53 m^3/s であった。観測時、祇園水門の開度は 0.1 m となっており、放水路への平均流入量は 5 m^3/s 程度である。

図-2(a) の SPM 濃度の時空間分布をみると、SPM 濃度は、ほぼ図-2(c) に示した底層流速の増減に対応して

変化している。流速の大きな上げ潮期に SPM 濃度は最大値を示している。また、鉛直方向の測定範囲内の濃度変化は小さく、SPM はよく鉛直混合している。Sta. A は浅いため、潮汐による水深変化は 1~4 m と非常に大きい。このため、図-2(c) に示した流速の経時変化は三角関数から歪み、流速ピークの発生時間は干潮側に寄っている。また、底層では下げ潮流速より上げ潮流速の方が大きいことが分かる。これは、重力循環流と次に述べる密度成層の変動が原因である。太田川放水路は“Tidal Straining”現象 (Simpson ら, 1990) によって密度成層が潮汐周期の間に大きく変化し、上げ潮期は密度成層がほとんどみられないが、下げ潮期になると塩分差による強い密度成層が形成される (川西・筒井, 2004)。これにともない、流速の鉛直分布は下げ潮期と上げ潮期で大きく異なっている (Kawanisi, 2004)。

図-2(d) に示されている鉛直速度の経時変化をみると、下げ潮期でわずかながら鉛直速度が正の値を示している。これは、下げ潮期、河口に向かう上層の低塩分水に下層水が連行されるためであると考えられる。したがって、下げ潮期には SPM は底面に沈降することなく流下していることになる。

図-3 は左から、SPM 濃度 c 、主流方向流速 u 、鉛直速度 w 、Reynolds 剪断応力 τ の位相平均値の鉛直分布である。ただし、CDVP トランスデューサー付近の流速にはスパイクが含まれており、信頼性が低かったので示していない。図-3(a) に示されているように、上げ潮期の SPM 濃度は下げ潮期の 2 倍程度の大きさである。また、下げ潮期、濃度の鉛直勾配は非常に小さい。上げ潮期の SPM 濃度が高い原因は、以下に述べるように、上げ潮期の方が下げ潮期より底面剪断応力が大きく、堆積物の再懸濁が活発になっているためである。

図-3(b) の流速分布をみると、“Tidal Straining”のために、流速分布形は下げ潮期と上げ潮期で大きく異なっている。上げ潮期はほぼ対数分布に従っているのに対し、下げ潮期の流速分布は“対数+直線”則で表される (Kawanisi, 2004)。そのため、底層では上げ潮流速の方が下げ潮流速より大きくなっている。

図-3(c) に示す SPM の鉛直速度から、上げ潮期の SPM の沈降速度が、河床に向かって増加する傾向にあることがわかる。ここには示さないが、流動の弱い広島湾北部域 (Sta. B, C, D) 底層の結果では、図-2(c) の結果とは反対に、海底に向かって減少する傾向を示している (川西・田原, 2003)。このような鉛直分布形の違いは主に乱流強度の違いに起因していると考えられる (Kawanisi, 1999)。

Reynolds 剪断応力 (図-3(d)) は、上げ潮期、河床に向かって増加しており、底面剪断応力は下げ潮期の応力

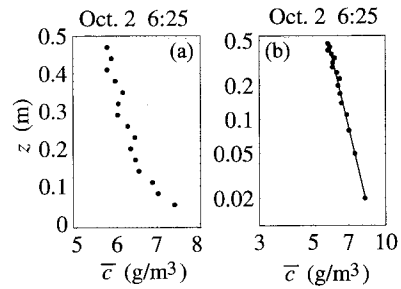


図-4 SPM 濃度の鉛直分布 (Sta. A)

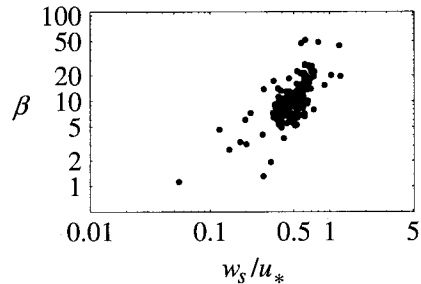


図-5 沈降速度/摩擦速度に対する β の変化 (Sta. A)

に比べて、一桁程度大きい。下げ潮期の Reynolds 剪断応力は小さく、河床からの高さによる変化はほとんど見られない。一般に、ある程度流動が大きく、堆積物の再懸濁が生じているエスチャリー・沿岸域では、沈降フラックスに対して濃度の時間変動と移流項は一桁以上小さく、沈降フラックスが鉛直乱流フラックスとバランスしているとみなせる (例えば Fugate・Friedrichs, 2002)。すなわち、

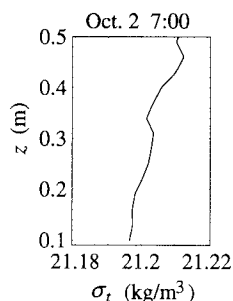
$$-\varepsilon \frac{dc}{dz} - w_s c = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ε は SPM の鉛直乱流拡散係数、 w_s は沈降速度である。 $\varepsilon = \beta \kappa u_* z$ とおき、(1) 式を z で積分すると、濃度分布は

$$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{z}{a} \right)^{\frac{w_s}{\beta \kappa u_*}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表される。ここに、 c_a は底面付近 $z=a$ の濃度である。上げ潮期の河床付近の濃度分布を示したのが、図-4 である。両対数表示した図-4(b) をみると、濃度分布はほぼ直線で (2) 式に従っている。

従来の研究において、SPM の乱流拡散係数 ε と渦動粘性係数 ν_t の比 β は、 w_s/u_* とともに増加することが知られている。沈降フラックスと鉛直乱流フラックスのバランスを仮定し、次式から評価した上げ潮期の河床付近 $z=0.05 \sim 0.17$ m における β と沈降速度と摩擦速度の比 w_s/u_* の関係を図-5 に示す。

図-6 上げ潮時の密度 (σ_t) 分布

$$\beta = \frac{\varepsilon}{\nu_t} = \frac{-\frac{w_s c}{\frac{dc}{dz}}}{\nu_t} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $w_s = -\bar{w}$ とし、 ν_t は乱れエネルギー生成率と速度勾配から評価している (Kawanisi, 2004)。濃度勾配が小さいため、全体的に、 β は従来の結果より大きい。が、 w_s/u_* とともに増加する傾向がうかがえる。大きな β が得られた一因は、Tidal Straining によって上げ潮期に密度成層が不安定状態になっているためと考えられる。すなわち、上げ潮期に高塩分水が遡上してくるが、下層より上層の方が移流速度が大きいため、密度の逆転が起こり、Richardson 数は負となる。自動昇降式 CTD で測定された、上げ潮期における密度鉛直分布の一例を図-6 に示す。河床からの高さとともに密度が増加傾向にあることがわかる。

(2) SPM の沈降速度

表-1 に示した平均鉛直速度は、観測地点によって大きく異なっており、水平流速が小さい場所ほど鉛直速度の絶対値が小さいことがわかる。Burban ら (1990) は分散させた自然堆積物から、実験室で様々な剪断速度と濃度のもとでフロックを生成し、それらの沈降速度を測定している。その結果によると、沈降速度は剪断速度と濃度に強く依存しており、剪断速度と濃度の違いによりフロック径が沈降速度に与える影響が変化している。すなわち、剪断速度と濃度とともに生成されるフロックの密度が増加することを示している。谷本・星加 (1994) による現地観測では、沈降速度が大阪湾で粒径の 0.91~0.97 乗、江田内湾で 0.68~0.77 乗に比例する結果が得られている。これらの結果は、フロックの沈降速度がフロック密度の影響を大きく受けていることを示している。

図-7 に Sta. A における $\bar{c}\bar{\tau}$ と w_s の関係を示す。沈降速度 $w_s (= -\bar{w})$ は $\bar{c}\bar{\tau}$ とともに増加していることが分かる。最小二乗法で求めた両者の関係は、図-7 に示した単位系の場合、 $w_s = 2.6(\bar{c}\bar{\tau})^{0.47}$ である。

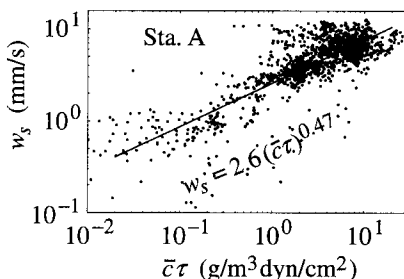


図-7 沈降速度と濃度・Reynolds 剪断応力の関係 (Sta. A)

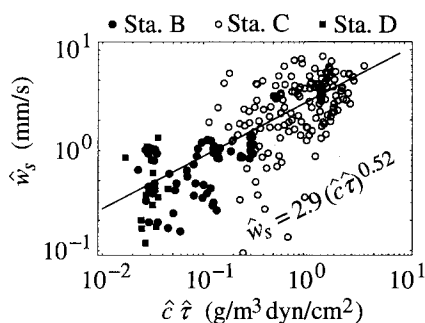


図-8 沈降速度と濃度・Reynolds 剪断応力の関係 (Sta. B, C, D)

図-8 は Sta. B, C, D における沈降速度の鉛直平均値 $\bar{w}_s (= -\bar{w})$ を濃度と Reynolds 剪断応力の鉛直平均値の積 $\bar{c}\bar{\tau}$ に対してプロットした結果であるが、図-7 と同様に、 $\bar{w}_s$ は $\bar{c}\bar{\tau}$ とともに増加していることがわかる。最小二乗法で求めた両者の関係は、 $w_s = 2.9(\bar{c}\bar{\tau})^{0.52}$ である。

以上の結果から、沈降速度の $\bar{c}\bar{\tau}$ に対する依存性を示すパラメーターの場所による変化は小さいことがわかる。川西ら (2002) の観測結果では、流速にともなうフロック径の変化は小さかったことから、Burban ら (1990) が指摘しているように、流体シアと濃度の増大が、生成されるフロックの密度を大きくした結果、沈降速度が増加していると考えられる。

谷本・星加 (1994) は大阪湾で 0.2~15 mm/s、江田内湾で 0.02~3 mm/s の沈降速度を得ており、海水流動の弱い江田内湾が大阪湾に比べて沈降速度が一桁小さくなることを示している。また、沈降速度は季節によって変化し、秋季から冬季における沈降速度は初夏における値の 3~4 倍程度になることを報告している。

海底に設置したセディメント・トラップによる沈降フラックスは、Sta. B と D でそれぞれ、300 g/m²/day と 50 g/m²/day であり、セディメント・トラップ開口部の高さ 25.5 cm の CDVP データから得られた沈降フラックス (Sta. B: 270 g/m²/day, Sta. D: 60 g/m²/day) にほぼ等しい。谷本ら (1990) による燧灘の海底面上に設置した

セディメント・トラップ測定によれば、沈降フラックスは $179 \sim 513 \text{ g/m}^2/\text{day}$ である。

内湾・感潮域の全沈降粒子はただちに堆積物に移行するわけではなく、再浮上と沈降を繰り返しているため、沈降フラックスより堆積フラックスはずっと小さい。これまでに、堆積フラックスは半減期の非常に短い放射性鉛 ^{210}Pb を用いる年代測定法で算定されており(例えば、塩沢ら, 1985; 谷本・星加, 1994), $1.6 \sim 15.9 \text{ g/m}^2/\text{day}$ の値が得られている。

4. おわりに

太田川感潮域と広島湾北部域の3地点において、Coherent Doppler velocity profiler (CDVP) を使用して底面境界層に存在する懸濁粒子 (SPM) の観測を実施した。

底面境界層における SPM の沈降速度 w_s は、レイノルズ剪断応力 τ と濃度 $\bar{c}$ に依存しており、 $\bar{c}\tau$ とともに大きくなる傾向を示した。観測地点による依存関係パラメーターの差は小さく、 w_s は $\bar{c}\tau$ の約 0.5 乗に比例していた。

平均的な沈降速度は、太田川感潮域で 5.2 mm/s 、潮流の弱い江田内湾で 0.28 mm/s であった。また、広島湾北部域の海底付近における懸濁粒子の沈降フラックスは、 $60 \sim 270 \text{ g/m}^2/\text{day}$ となり、セディメント・トラップによって測定された値 $50 \sim 300 \text{ g/m}^2/\text{day}$ と同程度になった。

太田川感潮域の上げ潮時、SPM の乱流拡散係数と渦動粘性係数の比である β は、沈降速度と摩擦速度の比 w_s/u_* とともに増加する傾向を示した。平均的な β の値は 1 よりかなり大きく、SPM はよく鉛直混合していた。またさらに、流動の弱い広島湾北部域の海底境界層の結果とは反対に、懸濁粒子の沈降速度は海底に向かって増加していた。

参考文献

- 塩沢孝之・川名吉一郎・星加 章・谷本照己 (1985): 瀬戸内海における懸濁物質と底質, 沿岸海洋研究ノート, 22 巻, 2 号, pp. 149-156.
- 川西 澄・水野博史・松山幸彦・長井 敏・小谷祐一 (2002): 広島湾北部域における底層懸濁粒子からの音響散乱特性—超音波ドップラー分布計による底層濁度と体積濃度の測定可能性について—, 海の研究, 11 巻, 2 号, pp. 285-293.
- 川西 澄・田原敏博 (2003): 内湾の海底境界層に存在するブロック沈降速度の現地測定, 海岸工学論文集, 50 巻, pp. 956-960.
- 川西 澄・筒井孝典 (2004): 浅水感潮域における密度成層の変動特性, 水工学論文集, 48 巻, pp. 781-786.
- 谷本照己・川名吉一郎・塩沢孝之・星加 章 (1990): 海底境界域における沈降・再懸濁, 沿岸海洋研究ノート, 28 巻, 1 号, pp. 25-33.
- 谷本照己・星加 章 (1994): 大阪湾と江田内湾における懸濁粒子の沈降速度, 海の研究, 3 巻, 1 号, pp. 13-20.
- Burban, P.-Y., Y.-J. Xu, J. McNeil and W. Lick (1990): Settling speeds of flocs in fresh water and seawater, J. Geophys. Res., Vol. 95, No. C10, pp. 18213-18220.
- Fugate, D. C. and C. T. Friedrichs (2002): Determination concentration and fall velocity of estuarine particle populations using ADV, OBS and LISST, Contin. Shelf Res., Vol. 22, pp. 1867-1886.
- Kawanisi, K., P. Nielsen and Q. C. Zeng (1999): Settling and rising velocity of a spherical particle on homogeneous turbulence, Ann. J. Hydraul. Engrg., Vol. 43, pp. 779-784.
- Kawanisi, K. (2004): Structure of turbulent flow in a shallow tidal estuary, J. Hydraul. Engrg., ASCE, Vol. 131, No. 4, pp. 360-370.
- Lhermitte, R. and R. Serafin (1984): Pulse-to-pulse coherent Doppler sonar signal processing techniques, J. Atmos. Oceanic Technol., Vol. 1, No. 4, pp. 293-308.
- Simpson, J. H., J. Brown, J. Matthews and G. Allen (1990): Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification, Estuaries, Vol. 13, No. 2, pp. 125-132.
- Thorne, P. D., C. E. Vincent, P. J. Hardcastle, S. Rehman and N. Pearson (1991): Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices, Mar. Geol., Vol. 98, pp. 7-16.
- Zedel, L., A. E. Hay, R. Cabrera and A. Lohrmann (1996): Performance of a single-beam pulse-to-pulse coherent Doppler profiler, IEEE J. Oceanic Eng., Vol. 21, No. 3, pp. 290-297.
- Zedel, L. and A. E. Hay (1999): A coherent Doppler profiler for high-resolution particle velocimetry in the ocean: laboratory measurements of turbulence and particle flux, J. Atmos. Oceanic Technol., Vol. 16, pp. 1102-1117.