

内湾の海底境界層に存在するフロック沈降速度の現地測定

川 西 澄*・田 原 敏 博**

実海域で海水とともに運動している状態での懸濁粒子の沈降特性は良く分かっていない。そこで、パルスコヒーレント方式の超音波流速計を用いて、広島湾北部域の海底境界層に存在する懸濁粒子の沈降速度を実測した。海底近傍では、懸濁粒子の沈降速度は海底に向かって減少していた。またさらに、海水流動（流速勾配・Reynolds 剪断応力）が大きいほど沈降速度は増加することが明らかとなった。懸濁粒子の沈降フラックスは、過去に ^{210}Pb 法を用いて測定されている堆積フラックスの数十倍の大きさであり、堆積物に移行するのは沈降粒子のごく一部にとどまり、堆積確率はかなり小さな値となることが推察された。

1. はじめに

内湾におけるフロック化した懸濁粒子の多くは、短期間で海底に堆積することはなく、海底近くに集積して海底高濁度層を形成し、栄養塩の循環、貧酸素化や赤潮の発生などに密接に関係していると考えられる。懸濁粒子の輸送過程を考える上で、沈降速度は重要なパラメータであるため、多くの研究者によって調べられてきたが、海水とともに運動しているフロックの沈降速度がどのようなパラメータにどのように依存しているのかは未だよく分かっていない。

谷本・星加 (1994) は海底付近における懸濁粒子の沈降速度とフロック粒径を現場で実測できる装置（沈降筒内の粒子をカメラ撮影）を考案し、沈降速度と粒径に関する貴重なデータを示している。Hill ら (1994) は Sediment Transport Events on Shelves and Slopes (STRESS) program の一部として沈降箱を現地に設置し、微細な堆積物の沈降速度を測定している。

これらの研究は海底付近に存在する粒子の静水中における沈降速度を測定したものであり、沈降速度の鉛直分布は不明であるし、乱流境界層内における粒子の沈降速度は静水中のものと異なる可能性があることから (Kawanisi ら, 1999), 海水とともに運動している粒子の速度を直接測定する必要がある。

本研究では、広島湾北部域の海底境界層において、パルスコヒーレント方式の高解像度超音波ドップラー流速分布計（以下 HRCP と呼ぶ）と超音波ドップラー流速計（以下 ADV と呼ぶ）により、高い精度で流速（実際には懸濁粒子の移動速度）を観測し、懸濁粒子の沈降速度と鉛直フラックス、濃度の鉛直分布、海水流動がこれらに与える影響などを考察する。

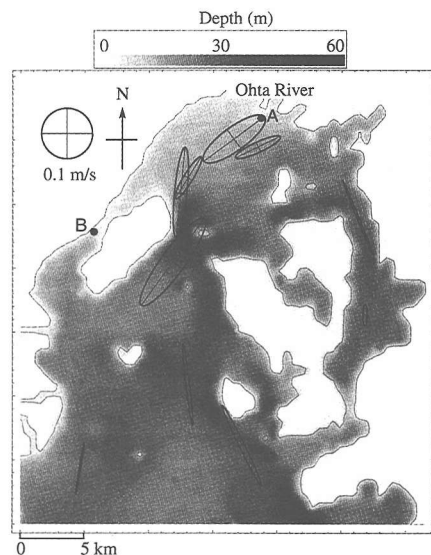


図-1 観測地点と広島湾の水深分布, M_2 潮流槽円

2. 方 法

図-1 に示す広島湾北部域の 2 地点（太田川河口域 Sta. A, 大野瀬戸 Sta. B）において、HRCP と ADV を用いて海底上 1.4 m の高さまでの範囲の流速 3 成分と後方散乱強度分布を連続測定した。また、懸濁粒子の重量濃度を求めるため、海底から 0.5 m と 1 m の高さで 1 時間ごとに採水を行った。採水サンプルは実験室に持ち帰り、GF/C で濾過した。A 地点と B 地点の観測期間はそれぞれ、2002 年 12 月 7 日 10:37~15:24 と 2003 年 1 月 20 日 21:30~21 日 12:28 である。HRCP の鉛直分解能は 3 cm, 時間分解能は 3 秒とした。また、サイドロープ干渉のために HRCP で測定できない海底のごく近傍のデータを得る目的で、ADV を海底面上に設置した。

HRCP と ADV 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

* 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

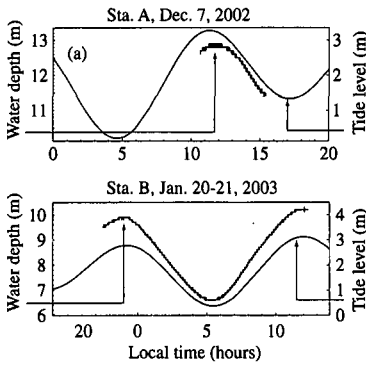


図-2 水深の経時変化

ス間の位相差から流速を求めている。2パルスの場合、次式の関係から超音波ビームに沿った流速 V が得られる。

$$V = \frac{\phi C}{4\pi f \Delta t}, \quad \phi \in [-\pi, \pi] \quad (1)$$

ここで、 ϕ は受信パルス間の位相差、 C は音速、 f は超音波周波数、 Δt はパルスの時間間隔である。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、高解像度の流速測定が可能である (Zedel ら, 1996)。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。さらに流速計で測定されているのが、散乱体である懸濁粒子の移動速度であることから、HRCP や ADV によって測定される鉛直速度 w は、次式で表されるように、懸濁粒子の平均的な鉛直速度に相当していると考えられる。

$$w = \frac{1}{S_v} \sum_i \sigma_i \rho_i w_i \quad (2)$$

ここに、 σ_i 、 ρ_i 、 w_i はサイズクラス i の粒子の後方散乱断面積、数密度、鉛直速度で、 $S_v = \sum_i \sigma_i \rho_i$ は体積後方散乱係数である。

3. 結果および考察

図-2(a) (b) に HRCP の圧力変換器で測定された A、B 両地点における水深の経時変化を示す。図-2 には広島港の予測潮位をあわせて表示している。平均水深は A 地点で約 12 m、B 地点で約 8 m である。両観測とも中潮であるが、日潮不等と地形効果のため、観測期間内の潮差は A 地点の約 2 m に対し、B 地点は約 3 m となっている。冬季であるため淡水流入量は少なく、両地点とも平均塩分は 33 psu 弱であった。また、平均水温は A 地点で 15.6°C、B 地点で 10.5°C であった。

図-3 と 4 はそれぞれ、A 地点と B 地点における平均測定量の鉛直分布の経時変化を示したものである ((a) 水平流速 $\bar{V} = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}$; u は東西方向、 v は南北方向流速、

(b) 懸濁粒子濃度 $\bar{c}$ 、(c) 鉛直速度 $\bar{w}$ 、(d) 懸濁粒子の鉛直フラックス F)。平均時間は 30 分、表示間隔は図-3 の場合 15 分、図-4 の場合 30 分である。横軸の目盛りは各鉛直分布の 0 を示している。懸濁粒子濃度は採水サンプルから求めた重量濃度を使って、HRCP のエコー強度を解析して得られる体積後方散乱係数を濃度に変換して求めたものである。また、懸濁粒子の鉛直フラックス F は沈降フラックスと拡散フラックスの和として次式で評価した。

$$F = \bar{w}\bar{c} - K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \quad (3)$$

ここで、 K_z は懸濁粒子の鉛直拡散係数である。海底境界層の K_z はある高さまでは直線的に増加し、その後一定値と見なせることが知られている (Lavelle・Mofjeld, 1983)。すなわち、

$$K_z = \kappa u_* z \quad z \leq \delta \quad (4)$$

$$K_z = \kappa u_* \delta \quad z > \delta \quad (5)$$

底面摩擦速度 u_* は水平流速の鉛直分布に“対数-直線”則を当てはめて評価した。結果は図-5 の (b) に示してある。なお、決定係数が 0.9 以上の割合は、A 地点の場合 60%、B 地点の場合 80% であった。谷本ら (1990) による瀬戸内海の観測によれば $\delta = 50$ cm である。本論文でも彼らと同様に、 $z \leq 50$ cm では $K_z = \kappa u_* z$ 、 $z > 50$ cm では $K_z = \kappa u_* \delta$ と仮定した。

両地点とも平均流速は小さく、10 cm/s を超えることはない。ただし、B 地点では、A 地点より大きな流速勾配がみられる。A 地点の結果を見ると、満潮付近では濃度分布はほぼ一様であるが、流速の増加とともに海底に向かって増加する分布を示している。一方、図-4(b) をみると、B 地点では間欠的に濃度が海底に向かって増加しているが、ほとんどの時間でほぼ一様な分布となっている。

図-3(c)、4(c) に示す鉛直速度は、多くの時間で海底に向かって増加(沈降速度は減少)している。また、B 地点の沈降速度 ($= -\bar{w}$) は A 地点の数倍の大きさを示している。A 地点における懸濁粒子の鉛直フラックス分布をみると、測定範囲内では海底からの高さによる変化は少なく、ほぼ一様な分布を示している。一方、B 地点では沈降速度が海底に向かって減少する傾向を反映して、海底付近では海底からの高さとともに鉛直フラックスの絶対値が増加する分布が多くみられる。なお、A、B 地点とも流れが弱いため、(3) 式の右辺第 2 項で表される乱流拡散フラックスは小さく、沈降フラックスが鉛直フラックスのほとんどを占めている。

水平流速、懸濁粒子濃度、鉛直速度の鉛直平均値と底面摩擦速度の経時変化を図-5 に示す。両地点とも、流速が弱い場合水平流速・摩擦速度と懸濁粒子濃度との関連

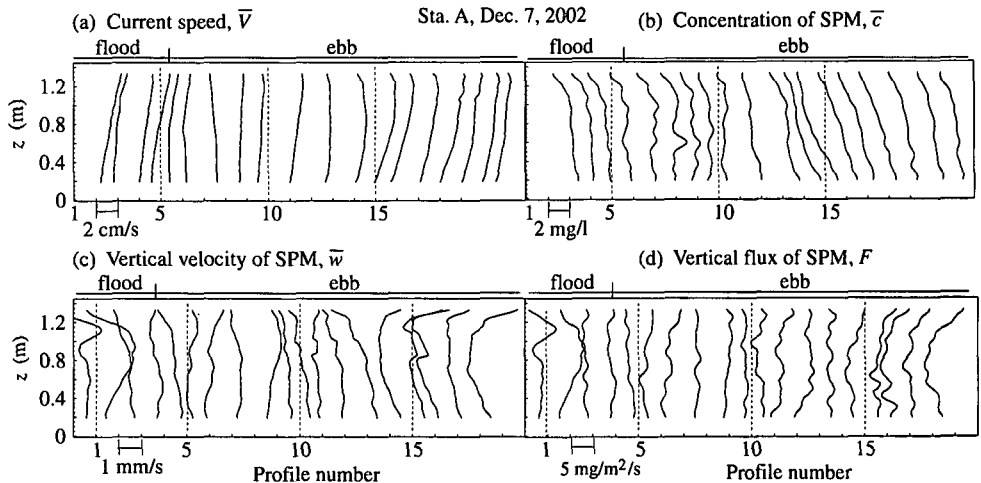


図-3 A地点における鉛直分布の経時変化：(a) 水平流速，(b) 懸濁粒子濃度，(c) 沈降速度，(d) 懸濁粒子の鉛直フラックス

は認められないが、沈降速度($= -\bar{w}$)は水平流速・摩擦速度とともに増加する傾向がある。

Thorn (1981) によれば、濃度が 1 g/l 以下では、沈降速度 w_s は凝集の効果も含めて、粒子の濃度が高いほど大きくなり、

$$w_s = k_1 c^m \dots\dots\dots (6)$$

の経験式が提案されているが、図-5に示した測定結果からは、濃度とともに沈降速度が増加する傾向は確認できない。

B地点の8時～9時にかけて大きな濃度変動がみられるが、これはパッチ状の懸濁粒子分布の水平移流によって引き起こされたものと考えられる。

図-6に両地点の観測期間で平均した平均鉛直分布を示す((a) 水平流速，(b) 懸濁粒子濃度，(c) 鉛直速度，(d) 懸濁粒子の鉛直フラックス)。冬季観測結果であるので懸濁粒子濃度は低い。B地点の方がA地点より水平流速勾配が大きく、沈降速度($= -\langle w \rangle$)も大きくなっている。谷本・星加(1994)は大阪湾で $0.2 \sim 15 \text{ mm/s}$ 、江田内湾で $0.01 \sim 1.2 \text{ mm/s}$ 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1オーダー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。

沈降速度($= -\langle w \rangle$)は海底からの高さによって変化し、海底に近づくにつれて減少している。これはフロクが海底近傍の強いシアや海底との接触によって破壊されるためだと考えられる。図中の●はADVによる測定値を示しており、測定高さは 1.3 cm と 7 cm である。Burbanら(1990)はフロクの沈降実験を行い、流体シアと粒子濃度が w_s に大きな影響を与えることを示し

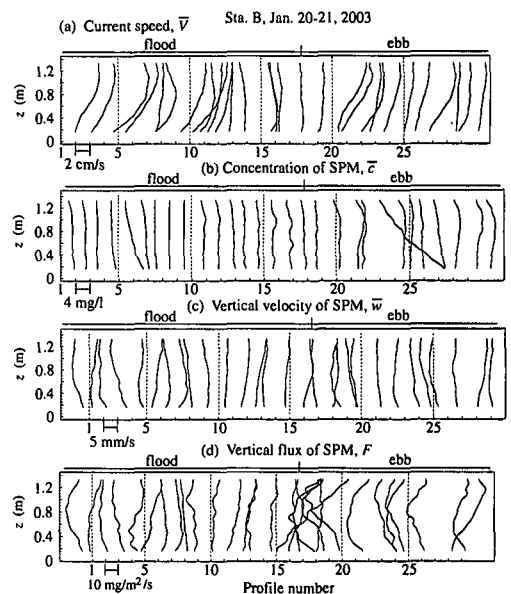


図-4 B地点における鉛直分布の経時変化：(a) 水平流速，(b) 懸濁粒子濃度，(c) 沈降速度，(d) 懸濁粒子の鉛直フラックス

ている。

図-7に示すように、沈降速度の鉛直平均値 $\bar{w}_s (= -\bar{w})$ は濃度と Reynolds 剪断応力の鉛直平均値の積 $\bar{c}\bar{\tau}$ とともに増加していることがわかる。ただし、Reynolds 剪断応力は、サンプリング間隔3秒のHRCFデータから求めているので、いくぶん過小評価されている可能性がある。最小二乗法を $\bar{w}_s$ と $\bar{c}\bar{\tau}$ に適用した結果、図-7に示した単位系の場合、

$$\bar{w}_s = 2.9(\bar{c}\bar{\tau})^{0.44} \dots\dots\dots (7)$$

の関係が得られた。Burbanら(1990)の実験データでは、

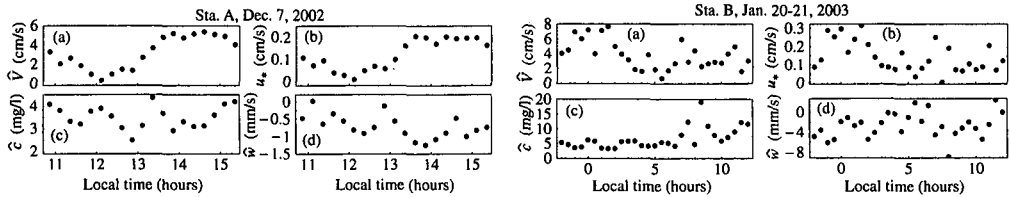


図-5 鉛直平均値の経時変化：(a) 水平流速，(b) 底面摩擦速度，(c) 懸濁粒子濃度，(d) 鉛直速度

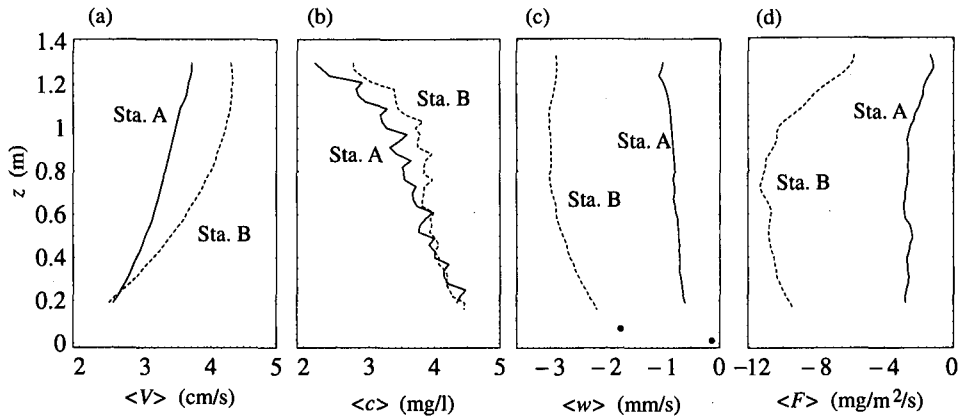


図-6 平均鉛直分布：(a) 水平流速，(b) 懸濁粒子濃度，(c) 鉛直速度，(d) 懸濁粒子の鉛直フラックス

$w_s = 2.42(ct)^{0.22}$ の関係になる。川西ら (2002) の観測結果では、流速にともなうフロック粒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。

地点 A と B で濃度に大きな差はないが、沈降速度が大きい B 地点における懸濁粒子の鉛直フラックスの絶対値は A 地点の 3 倍程度となっている。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 179~513 g/m²/day である。本観測では図-6(d) から、鉛直フラックスの絶対値は A 地点で 259 g/m²/day、B 地点で 778 g/m²/day 程度の大きさである。

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おり、Krone (1962) によれば堆積フラックス D は

$$D = w_s \bar{c} P \quad \dots\dots\dots (8)$$

のように表される。ここで、 P は堆積確率で底面剪断力の増加とともに減少する関数である。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²¹⁰Pb 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), 1.6~15.9 g/m²/day の値が得られている。これら堆積フラックスの大きさは、本研究で測定された懸濁粒子の鉛直フラックスの数十分の一である。

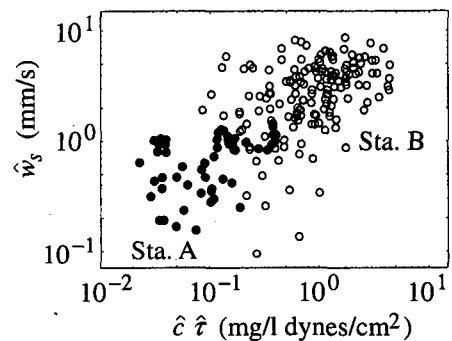


図-7 沈降速度と Reynolds 剪断応力、濃度の関係

谷本・星加 (1994) による燧灘の観測でも、再浮上・沈降フラックスは、堆積フラックスの 4.1~10.4 g/m²/day に対し、222~461 g/m²/day となっており、本研究の結果と同様、懸濁粒子の鉛直フラックスは堆積フラックスより遙かに大きい。以上の結果から、(8) 式の堆積確率 P はかなり小さな値をとることがわかる。

4. おわりに

広島湾北部域の 2 地点の海底境界層 ($z \leq 1.4$ m) において、流速とともに懸濁粒子の濃度、沈降速度、鉛直フラックスの鉛直分布を HRCF を用いて測定した。

海底近傍では、懸濁粒子の沈降速度は海底に向かって

減少していた。またさらに、海水流動（流速勾配・Reynolds 剪断応力）が大きいほど沈降速度は増加し、鉛直平均した沈降速度とレイノルズ剪断応力、濃度の間には $\bar{w}_s = 2.9(\bar{c}\bar{\tau})^{0.44}$ の関係が認められた。

平均的な沈降速度は、潮流の弱い太田川河口域 (Sta. A) で約 0.7 mm/s、大野瀬戸 (Sta. B) で約 2.7 mm/s であった。また、懸濁粒子の鉛直フラックスの絶対値は A 地点で約 259 g/m²/day、B 地点で約 778 g/m²/day の大きさであった。これらの値は過去に ²¹⁰Pb 法を用いて測定されている堆積フラックスの数十倍の大きさであり、沈降粒子のごく一部が堆積物に移行し、堆積確率はかなり小さな値となることが推察された。

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.
- 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.
- Hill, P. S., C. R. Sherwood, R. W. Sternberg and A. R. M. Nowell (1994): *In situ* measurements of particle settling velocity on the northern California continental shelf. Contin. Shelf Res., Vol. 14, No. 10/11, pp. 1123-1137.
- 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.
- Krone, R. B. (1962): Flume studies of the transport of sediment in estuarial processes, Final Report. Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, Berkeley.
- Lavelle, J. W. and H. O. Mofjeld (1983): Effects of time-varying viscosity on oscillatory turbulent channel flow, J. Geophys. Res., Vol. 88, pp. 7607-7616.
- 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.
- Thorn, M. F. C. (1981): Physical processes of siltation in tidal channels: an engineering guide, hydraulic modelling applied to maritime engineering problems. ICE, London, pp. 47-55.
- 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.