

超音波ドップラー流速分布計による 干潟上の浮遊堆積物の観測

MEASUREMENT OF SUSPENDED SEDIMENT ON TIDAL FLAT WITH AN ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILER

川西 澄¹・横山智弥²・水野雅光³・福岡捷二⁴
Kiyosi KAWANISI, Tomoya YOKOYAMA, Masamitsu MIZUNO
and Shouji FUKUOKA

¹ 正会員 工博 広島大学大学院准教授 工学研究科社会環境システム (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

² 学生員 広島大学大学院博士課程前期 工学研究科社会環境システム (同上)

³ 正会員 国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所 (〒730-0013 広島市中区八丁堀 3 番 20 号)

⁴ フェロー会員 工博 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

Acoustic Doppler current profilers (aDcps) offer the potential for measuring suspended sediment concentration profiles. In recent years, aDcps operating at a few megahertz frequency have been able to measure velocity and backscattered signal profiles with a high degree of temporal and spatial resolution. Moreover, the blanking distance near the transducer becomes short. As a result, the aDcps may attain high-resolution measurements of suspended sediments in the bottom 1-2 m above the bed. However, a modification needs to be made to account for the complex beam pattern close to the transducer (near-field). In the present study, the backscattered signal of an aDcp operating at 2 MHz is examined. The backscattered signal profiles corrected using the near-field function by Thorne give close agreement with suspended sediment concentration profiles on the tidal flat in an estuary.

Key Words: *suspended sediment concentration, acoustic backscatter, mud flat, tidal flow, estuaries*

1. はじめに

超音波ドップラー流速分布計は流速とともに後方散乱の強さを測定できるため、懸濁粒子の輸送を研究するための強力なツールと考えられている^{1,2)}。これまでは比較的水深の大きな水域で用いられてきたため、トランスデューサー近くの測定できない不感知領域が問題になることは少なく、トランスデューサーからある程度離れた位置からの鉛直分布が測定されてきた。最近では数 MHz の高周波数を用いた高分解能の製品が開発され、不感知距離も短くなっている。こうした製品を使えば底面境界層内の流速と懸濁粒子濃度を高い解像度で測定できる可能性がある。しかしながら、トランスデューサー近くの超音波の拡がり方は複雑で、球面拡散からずれることが知られている³⁻⁶⁾。この領域は *near-field* と呼ばれており、適切な補正を行わないと超音波分布計から正しい濃度分布は得られない。

本論文では、Nortek 社製の超音波ドップラー流速

分布計 (2MHz-Aquadopp Profiler, 以下 AqPr と呼ぶ) のデータに *near-field* 補正を行って、干潟上の浮遊堆積物濃度の鉛直分布と浮遊堆積物フラックスの連続観測を試みた結果を報告する。

2. 超音波の後方散乱理論

物性が一様な懸濁粒子の数密度の分布を $N(r)$ とすると、超音波が球面状に拡がれば、トランスデューサーで受信される後方散乱波の振幅の RMS 値 $\langle P_b \rangle$ は

$$\langle P_b \rangle \propto \frac{[N(r)AP_\ell]^{1/2}}{r^2} \exp[-2r(\alpha_w + \alpha_s)] \quad (1)$$

のように表される³⁾。ここで、 r はトランスデューサーから測定層までの距離、 A は超音波ビームの断面積、 P_ℓ は超音波パルスの長さ、 α_w と α_s はそれぞれ、水と懸濁粒子による音波の吸収係数である。

$N(r)$ を懸濁粒子の体積濃度に比例する体積後方散乱係数 $s_v(r)$ で置き換えると

$$\langle P_b \rangle \propto \frac{[s_v(r)P_\ell]^{1/2}}{r} \exp[-2r(\alpha_w + \alpha_s)] \quad (2)$$

となり、次式から $s_v(r)$ を求めることができる。

$$s_v(r) \propto \frac{\langle P_b \rangle^2}{P_\ell} r^2 \exp[4r(\alpha_w + \alpha_s)] \quad (3)$$

式 (3) は、トランスデューサーの出力が一定の場合であるが、トランスデューサーへの電力が内蔵バッテリーから供給されている場合、動作時間とともにバッテリーが消耗し、供給電圧が低下する影響を考慮する必要がある。供給電圧の変化を補正した体積後方散乱係数は

$$s_v(r) \propto \frac{\langle P_b \rangle^2}{P_\ell V^2} r^2 \exp[4r(\alpha_w + \alpha_s)] \quad (4)$$

で評価できる。ここで、 V はトランスデューサーへの供給電圧である。

水による音波の吸収係数 α_w は周波数の 2 乗に比例する⁷⁾。一方、懸濁粒子による音波の吸収係数は

$$\alpha_s = (1/r) \int_0^r \zeta M(r) dr \quad (5)$$

で与えられる。ここで、 $M(r)$ は懸濁粒子濃度である。パラメーター ζ は主に、超音波の波数 k と粒子半径 a によって変化し、Sheng・Hay⁸⁾ によれば

$$\zeta = \frac{1}{\rho a} \left[\frac{\beta(k a)^4}{\{1 + (k a)^2 + (4/3)\beta(k a)^4\}} \right] \quad (6)$$

で評価される。 β は粒子の密度と圧縮率によって決まるパラメーターである。

懸濁粒子の濃度が高くなると懸濁粒子による音波の吸収を考慮する必要が生じ、後方散乱から濃度を推定するには繰り返し計算が必要になる⁹⁾。

音波が球面状に広がるのはトランスデューサーから少し離れた位置からで、この領域は **far-field** と呼ばれている。一方、トランスデューサーに近い領域は **near-field** と呼ばれ、この領域では音波の広がり方が複雑で球面拡散からずれることが知られている³⁻⁶⁾。Thorne ら³⁾ は、球面拡散からのずれを補正する関数として次式を提案している。

$$\psi = \begin{cases} 1 & \text{for } r > \varepsilon r_n \text{ (farfield)} \\ \frac{2 + (\varepsilon r_n/r)}{3} & \text{for } r < \varepsilon r_n \text{ (nearfield)} \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 $r_n = \pi a_t^2 / \lambda$ 、 a_t はトランスデューサーの半径、 λ は超音波の波長である。パラメーター ε は Thorne ら³⁾ によれば、2 程度の大きさである。式 (7)

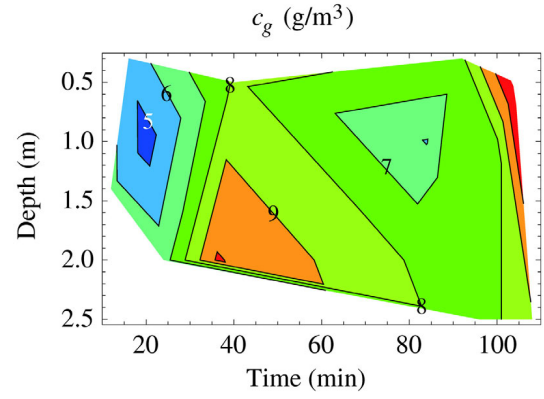


図-1 採水濾過から求めた上層における浮遊堆積物濃度

の補正関数を用いると、**near-field** まで含めた体積後方散乱係数は

$$s_v(r) \propto \frac{\langle P_b \rangle^2}{P_\ell V^2} r^2 \psi^2 \exp[4r(\alpha_w + \alpha_s)] \quad (8)$$

で評価される。

3. キャリブレーション結果

本研究で使用した超音波ドップラー流速分布計 (AqPr) のトランスデューサーの半径は 1.4 cm、周波数は 2 MHz なので、 r_n は 0.821 m となり、 $\varepsilon = 2$ とすると、**near-field** の範囲はトランスデューサーから 1.64 m までとなる。

太田川放水路に形成されている河岸干潟上の連続観測に先立ち、比較的、懸濁粒子濃度が一樣に近い観測地点の上層において後方散乱データを収集し、採水濾過から求めた重量濃度 c_g と比較した。採水は内径 6 mm のビニールチューブを通して真空ポンプで吸引して行った。キャリブレーションを実施した場所は、後述する河岸干潟観測と同じ河口から 2.8 km 上流の地点である (図-4)。

図-1 に c_g の分布を、図-2 に後方散乱データを示す。AqPr のアンプ値から求めた音波の振幅の 2 乗平均値は体積後方散乱係数 s_v に比例するので、以後これを s_v と呼ぶことにする。超音波分布計は橋から水面付近につり下げて下向きに測定を行った。平均時間は 2 分、不感距離と層厚はともに 10 cm、パルス長は 11 cm である。

図-2 中の黒点は補正なし、青点は球面拡散と水による吸収を補正、赤点はさらに **near-field** 補正を施した結果である。対象フィールドである放水路における平常時の懸濁粒子濃度は低いので、懸濁粒子による音波の吸収は無視した。

当然のことながら、補正なしの場合はトランスデューサーから離れるにしたがって (深さが増加するにつれて) 体積後方散乱係数 s_v は減少している。球面拡散と水による吸収の補正を行った場合は逆に、深

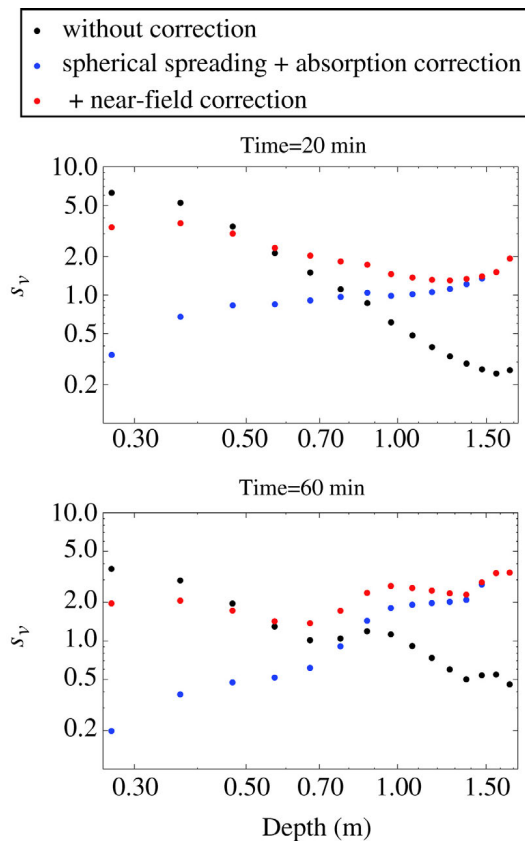


図-2 体積後方散乱係数に比例する AqPr の後方散乱データ分布

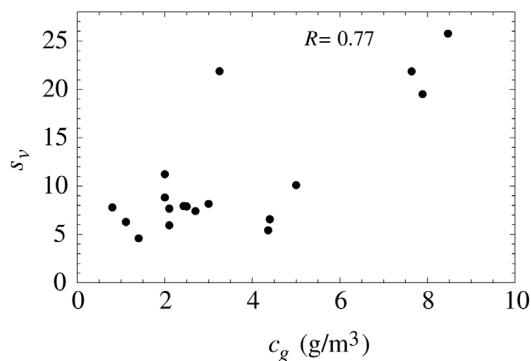


図-3 補正後の後方散乱データと採水から求められた浮遊堆積物濃度の関係

とともに s_v は増加する分布となっている。図-1 に示す重量濃度 c_g の鉛直方向変化は小さく、これらの s_v の分布とは一致しないことがわかる。球面拡散と水による吸収の補正に加えて、near-field 補正を行った分布（赤点で示す）は、採水から求めた濃度分布と同様に一様になっていることから、near-field 補正が有効であることがわかる。

図-3 はすべての補正を施した s_v と c_g の関係を示したものである。粒径をはじめとする粒子物性の変化やポンプ採水サンプルから得られた c_g に含まれている誤差、採水位置と散乱領域が完全に一致していないことなどのために、データのばらつきは大きいですが、両者の間には比例関係が認められる。相関係数は 0.77 である。

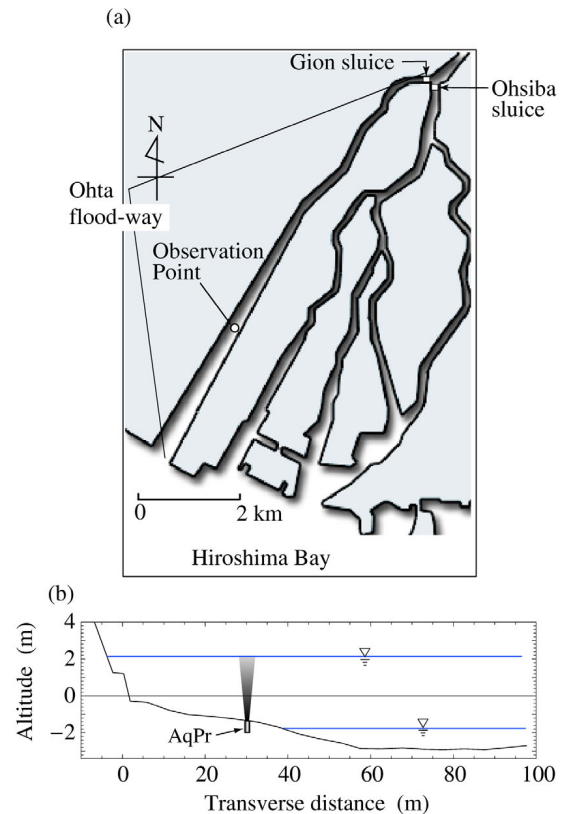


図-4 観測地点 (a) と AqPr の設置状況 (b)

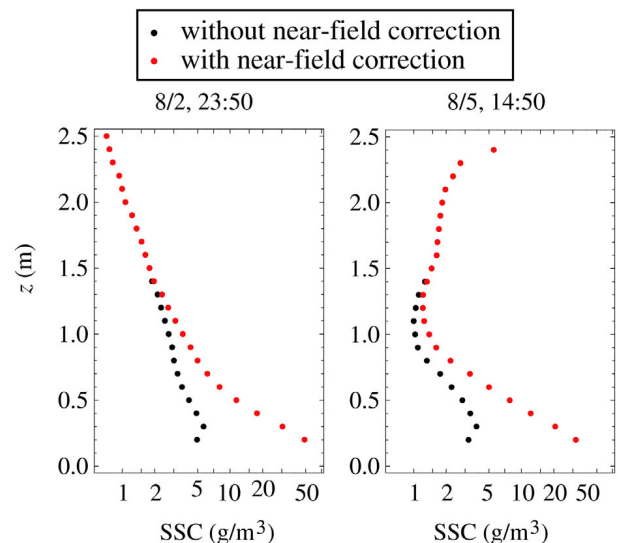


図-5 浮遊堆積物濃度 (SSC) の鉛直分布

4. 河岸干潟における懸濁粒子の濃度と輸送特性

河口から 2.8 km 上流の左岸沿いに形成されている干潟上で流速と後方散乱の鉛直分布を連続測定した。平均時間は 420 秒、記録間隔は 1200 秒、不感知距離と層厚はともに 10 cm、パルス長は 11 cm である。観測地点を図-4(a) に示す。放水路の堤防法線は河口から約 5.5 km 上流まで直線である。AqPr は図-4(b) に示すように左岸干潟に上向きで埋設した。図-4(b) 中に示す 2 つの水面の位置は高高潮と低低潮時のもの

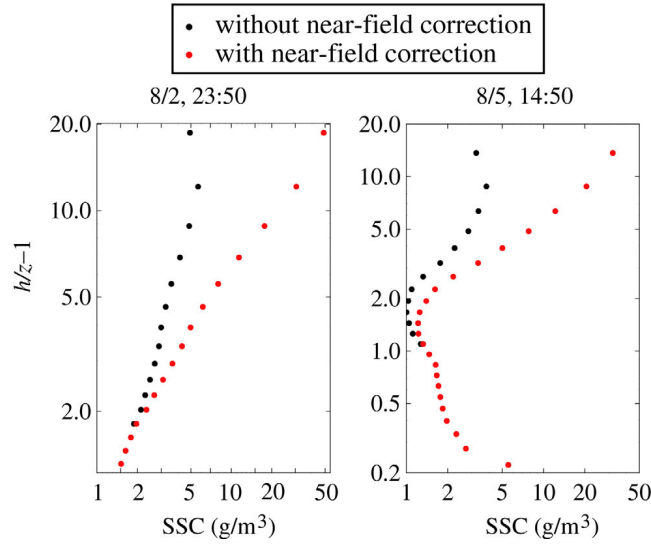


図-6 浮遊堆積物濃度 (SSC) の鉛直分布. 鉛直座標は $\log_{10}(h/z - 1)$.

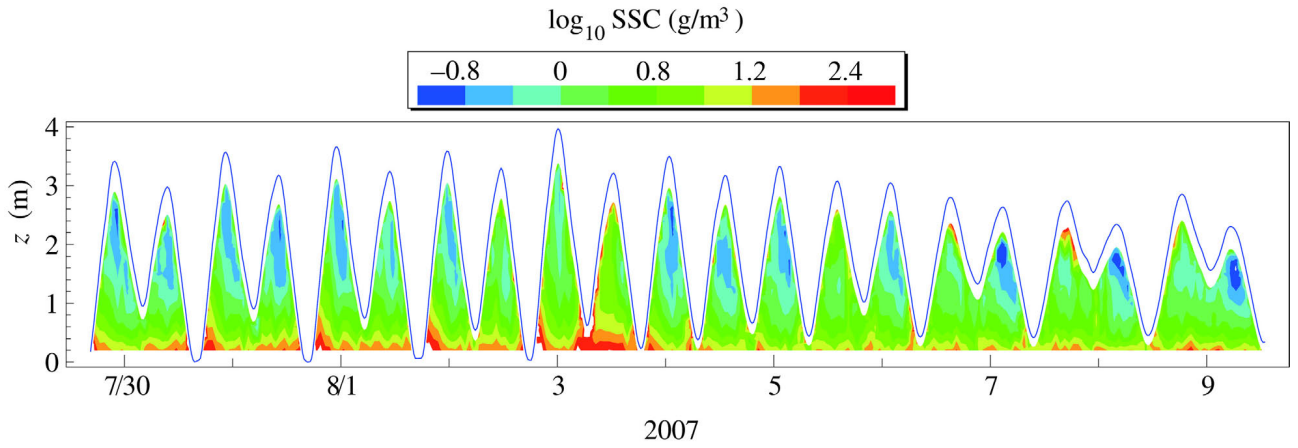


図-7 干潟上の浮遊堆積物濃度 (SSC) の時空間分布

である。

図-3 のデータから最小 2 乗法を用いて比例係数を求め、超音波分布計から上述した補正を行って得られた s_v を浮遊堆積物濃度 (SSC) に換算した。

図-5 に典型的な SSC の鉛直分布を示す。鉛直座標 z は干潟表面からの高さである。near-field 補正を施さない場合の結果も黒点で示してある。赤点で示す near-field 補正を行った結果では、干潟表面に向かって SSC が増加しているのに対し、near-field 補正なしの結果は干潟表面付近で濃度が減少する不自然な分布となっている。Rouse 分布との適合性をみるために、鉛直座標を $\log_{10}(h/z - 1)$ としてプロットしたものが図-6 である。 h は水深である。流れ場と濃度場は非定常で完全な平衡状態にはないが、補正後の分布は干潟表面からある高さまで直線的に減少していることから、濃度分布が Rouse 分布で近似できることがわかる。

大潮から小潮にかけて観測された浮遊堆積物濃度の時空間変動を図-7 に示す。ただし、水面からの音波の反射によって正しく測定できない水面付近は除いてある。平常時、浮遊堆積物の濃度変化は潮流に

よる河床堆積物の巻き上げによって起こっているもので¹⁰⁾、潮流の大きな大潮期に高い濃度がみられる。濃度のピークは低低潮の直後に発生しているが、これは水路中央での観測結果¹⁰⁾と同様である。全体に満潮から下げ潮中期にかけて上層の濃度が非常に小さくなっているが、特に小潮期は、低高潮から低低潮にかけて最も濃度が低くなっている。これは直前の潮差が非常に小さく、上げ潮流速が弱いことが原因である。

干潟上の浮遊堆積物フラックスの水路中央方向と下流方向成分を次式で評価した。

$$SSF_X = \int_{z_1}^{z_2} SSC(z) u(z) dz \quad (9a)$$

$$SSF_Y = \int_{z_1}^{z_2} SSC(z) v(z) dz \quad (9b)$$

ここで、 u, v は水路中央方向と下流方向の流速である。積分の下限 z_1 は超音波分布計の第 1 測定層の高さ、上限 z_2 は水面からの音波の反射の影響がない最上測定層の高さで、本研究の場合、それぞれ次式で与えられる。

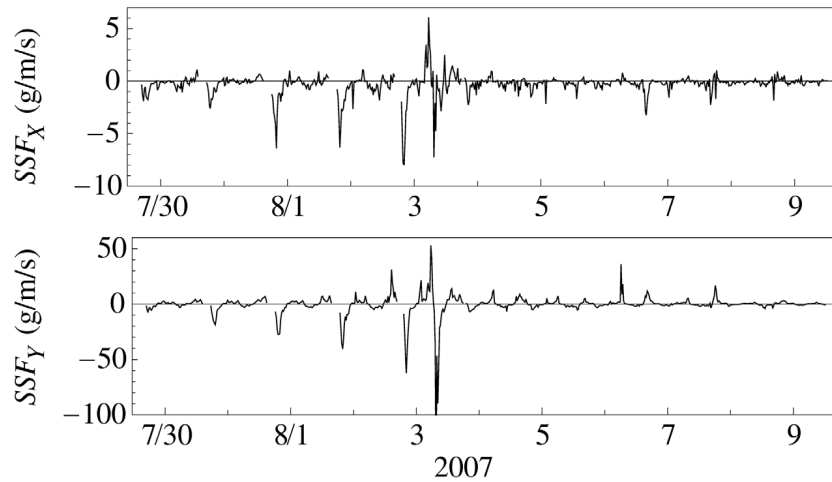


図-8 全観測期間の浮遊堆積物フラックスの経時変化

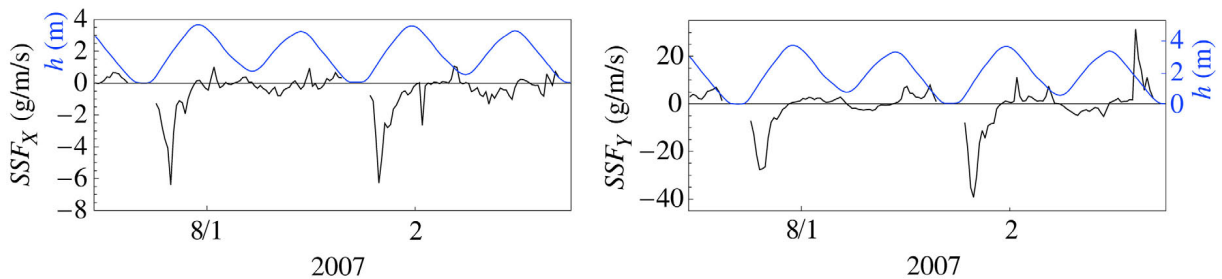


図-9 水深と浮遊堆積物フラックスの経時変化

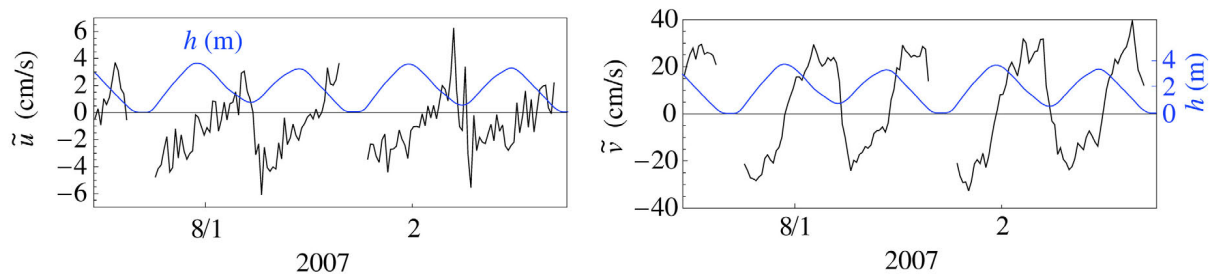


図-10 水深と深さ平均流速の経時変化

$$z_1 = 0.2 \text{ m}; \quad z_2 = h \cos 25^\circ - 0.1 \text{ m} \quad (10a, b)$$

式(9a, b)から求めた浮遊堆積物フラックスの経時変化を図-8に示す。大きなフラックスが間欠的に発生しているが、左岸方向、下流方向輸送を示す負のピークが卓越している。図-9は一部の期間を拡大したものであるが、これをみると、低低潮後の上げ潮初期に大きな負のピークが発生していることがわかる。すなわち、浮遊堆積物は冠水後、干潟上では上流方向だけではなく、堤防方向にも輸送されていることになる。

図-10に示す深さ平均流速の経時変化をみると、潮汐に応じて主流方向だけではなく横断方向にも周期的な流れが発生していることがわかる。上げ潮の間、横断方向流速は左岸方向であり、平均流速は上げ潮直後が最も大きい。下げ潮時の横断方向流速は中央方向に向いているが、上げ潮時の左岸方向流速より小さい。

図-11に SSF_X と SSF_Y の累積値

$$\sum_{i=1}^n SSF_X(t_i) \Delta t; \quad \sum_{i=1}^n SSF_Y(t_i) \Delta t$$

の経時変化を示す。ここで、 n はデータ数、 Δt はデータ時間間隔(1200秒)である。図-8から予想されるように、横断方向のネットの浮遊堆積物輸送は左岸方向である。

一方、主流方向成分をみると、大潮期には上流方向、中潮期には下流方向に輸送されていることがわかる。小潮期の輸送量はほとんど0である。

レーザープロファイラーによる干潟地形の調査を行った結果、出水時に干潟は浸食されるが¹¹⁾、平常時にしだいに土砂が堆積し地盤高が回復し、長期的には干潟地形が安定していることがわかっている。上述した浮遊堆積物の横断方向輸送は、こうした事実を説明するものである。

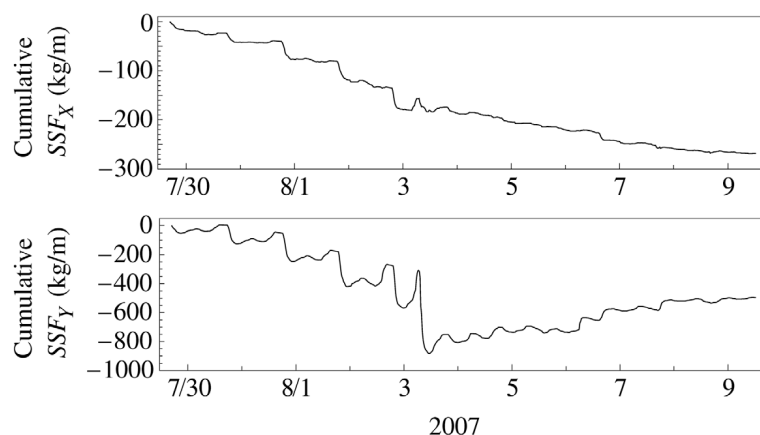


図-11 浮遊堆積物フラックスの累積値の経時変化

5. 結論

トランスデューサー近くで起こる音波の球面拡散からのずれを補正し、干潟に埋設した超音波ドップラー流速分布計 (Nortek 社製, 2MHz-AqPr) により、干潟上境界層の浮遊堆積物濃度分布を流速分布とともに測定した。Thorne ら³⁾ によって与えられている補正関数を用いた結果、AqPr のセンサーヘッド付近でも後方散乱から浮遊堆積物濃度分布を測定可能であった。

太田川放水路の河岸干潟における連続観測の結果、浮遊堆積物は干潟の冠水後、上流方向に加えて堤防方向にも輸送されていた。下げ潮期の水路中央方向に向かう輸送量は小さく、浮遊堆積物のネットの横断方向輸送量は堤防方向であった。

謝辞：本研究の一部は 科学研究費基盤 C (課題番号：18560499, 研究代表者：川西 澄) および (財) 河川環境管理財団 河川整備基金の補助を受けて実施したものである。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- Holdaway, G. P., Thorne, P. D., Flatt, D., Jones, S. E. and Prandle, D.: Comparison between adcp and transmissometer measurements of suspended sediment concentration, *Contin. Shelf Res.*, Vol. 19, pp. 421-441, 1999.
- 川西 澄・水野博史：浅水感潮域における水中音響散乱体の変動特性, 水工学論文集, 第 45 巻, pp. 1045-1050, 2001.
- Thorne, P. D., Vincent, C. E., Hardcastle, P. J., Rehman, S. and Pearson, N.: Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices, *Marine Geology*, Vol. 98, pp. 7-16, 1991.
- Downing, A., Thorne, P. D. and Vincent, C. E.: Backscattering from a suspension in the near field of a piston transducer, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 98, pp. 7-16, 1994.
- Thorne, P. D. and Hanes, D. M.: A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes, *Contin. Shelf Res.*, Vol. 22, pp. 603-632, 2002.
- Hill, D. C., Jones, S. E. and Prandle, D.: Derivation of sediment resuspension rates from acoustic backscatter time-series in tidal waters, *Contin. Shelf Res.*, Vol. 23, pp. 19-40, 2003.
- Fisher, F. H. and Shimons, V. P.: Sound absorption in sea water, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 62, pp. 375-377, 1977.
- Sheng, J. and Hay A. E.: An examination of the spherical scatterer approximation in aqueous suspensions of sand, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 83(2), pp. 598-610, 1988.
- Lee, T. H. and Hanes, D. M.: Direct inversion method to measure the concentration profile of suspended particles using backscattered sound, *J. Geophys. Res.*, Vol. 100(C2), pp. 2649-2657, 1995.
- Kawanisi, K., Tsutsui, T., Nakamura, S. and Nishimaki, H.: Influence of tidal range and river discharge on transport of suspended sediment in the Ohta floodway, *J. Hydroscience and Hydraulic Engineering*, Vol. 24(1), pp. 1-9, 2006.
- 川西 澄：河川感潮域における浮遊土砂動態と河岸干潟の地形と底質の変動に関する研究, 河川整備基金助成事業報告書, No.17-1215-28, 2005.

(2007.9.30 受付)