

# 船体取付型 ADCP によるシルトおよび微細砂の濃度の 時空間変動の現地観測

泉宮 尊司\* ・ 國田 知基\*\* ・ 泉 正 寿\*\*\*  
永松 宏\*\*\*\* ・ 石橋 邦彦\*\*\*\*\*

## 1. 緒 言

現地海浜において、海浜流と浮遊砂濃度を同時に測定することは、地形変化のメカニズムを解明する上で重要なことである。近年、ADCP 等現地観測機器の発達によって、空間的な流速場や濃度の計測が可能となり、3次元海浜流速場等種々の新たな知見が得られてきている(たとえば、山下ら, 1998)。しかしながら、浮遊物質の濃度に関しては、粘土やシルトあるいはプランクトンなどの微粒子の計測が殆どであり(宗景ら, 1995; 川西ら, 1998)、砂粒子を含む濃度測定は殆ど行われていない。また、浅海域での観測では、海底設置型の ADCP が用いられることが多く、浮遊砂濃度の高い海底面近くのデータが得られないといった欠点がある。

そこで本研究では、まず現地用の浮遊砂サンプラーを作製し、浮遊砂濃度および粒径を測定すると同時に、船体取付型 ADCP を用いて後方散乱強度を測定して、それらの関係を調べる。さらに、ADCP の 4 つのビーム到達距離を用いて、船体動揺を同定すると共に、この動揺を利用して任意の高さにおける浮遊砂濃度の時空間変動を推定することを本研究の目的とする。

## 2. 現地観測およびその方法

### 2.1 浮遊砂サンプラーの作製

本研究では、浅海域(水深 5 m~10 m 程度)で浮遊砂濃度が精度よく測定できるように、図-1 に示すような現地用浮遊砂サンプラーを作製した。この浮遊砂サンプラーは、内径 50 mm のアクリルパイプと 2 つの蓋からなっており、2 つの蓋は流れを阻害しないように、2 本のロープで下方に吊るされている。採水時にこのロープを引き上げることで蓋が締められ、パイプの側面に取り付けられた O リングとロープに係るテンションにより、採水した海水が漏れないような仕組みとなっている。このような浮遊砂サンプラーを、図-2 に示すように海

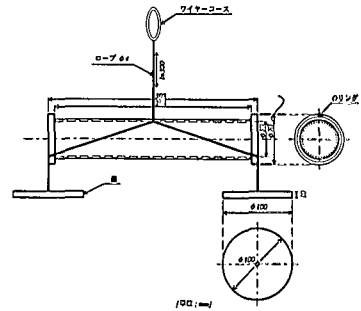


図-1 浮遊砂サンプラーの寸法

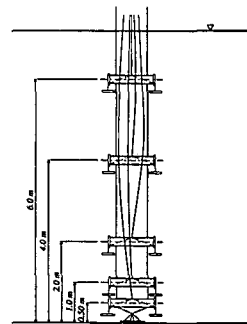


図-2 浮遊砂サンプラーの設置位置

底面から 0.5 m, 1 m, 2 m, 4 m, 6 m の高さに設置して採水した。

### 2.2 現地観測の概要

現地観測は、1998 年 10 月 27 日に新潟海岸の日和山の沖合いで実施した。小型漁船の右舷に船体取付型 ADCP (発信周波数: 600 kHz, 発射角度:  $\theta_0 = 20^\circ$ , ビーム幅半減半角:  $\Delta\theta = 1.5^\circ$ ) を設置し、観測現場までそのままの状態観測しながら行った。トランスデューサの喫水深は、1.0 m であった。測定場所は 3 地点で、それらの位置の平均水深は、10.16 m (St.1), 9.26 m (St.2) および 6.81 m (St.3) である。採水は、上述の浮遊砂サンプラーを左舷より投入して行った。観測の精度を上げるために、採水は原則として 1 地点 3 回行うこととし、それぞれ約 500 cc を採取して持ち帰った。

浮遊砂濃度は、採水量と懸濁物質の重量を測定し、重

\* 正会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科  
\*\* 新潟大学大学院自然科学研究科  
\*\*\* 正会員 国際航業(株)日野技術所  
\*\*\*\* 国際航業(株)日野技術所  
\*\*\*\*\* 正会員 新潟大学技官 工学部建設学科

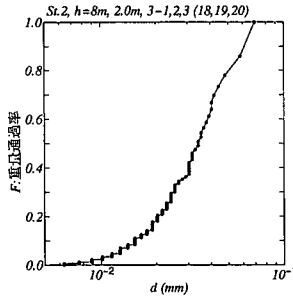


図-3 浮遊砂の粒度分布 (St.2, z=2 m)

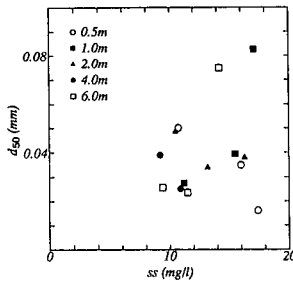


図-4 浮遊砂濃度と平均粒径  $d_{50}$  との関係

量濃度 (mg/l) として算定した。粒度分析については、光学顕微鏡の映像をビデオプリンタに出力して、実際にサイズを測定することにより行った。サンプル毎に少なくとも 30 個以上の粒子のサイズを測定し、1 測定位置につき 100 個以上の粒子測定を行うことにより、データの変動が小さくなるようにした。その結果、 $d_{50}$  の値として、0.02 mm から 0.08 mm の範囲内の値が得られた。

図-3 は、St.2 の海底面から 2 m の高さで得られた浮遊砂の粒度分布曲線である。この浮遊砂の  $d_{50}$  は約 0.03 mm で、細粒径側に尾を引くような分布形状になっていることが分かる。図-4 は、測定された浮遊砂濃度と平均粒径  $d_{50}$  との関係を示したものである。データにばらつきは見られるものの、浮遊砂濃度が高いほど平均粒径も大きくなる傾向が認められる。

### 3. 船体動揺および測定位置の同定

#### 3.1 船体動揺の同定

船体取付型 ADCP を用いると海底面の近くまで測定できる反面、船の動揺により流速などの測定位置が変動するといった欠点がある。しかしながら、船体の動揺が完全に同定できれば、計測間隔が 50 cm でも任意の位置で計測ができることになる。ADCP のデータには、4 つのビームの到達距離があるので、これを利用することにより、船体動揺の同定がほぼ可能となる。

一般に船体の動揺には、前後揺 (surging)、左右揺

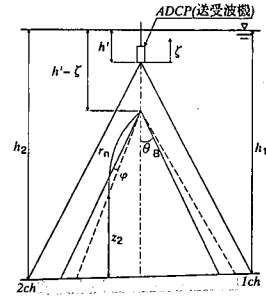


図-5 船体動揺によるビーム到達距離と測定位置の変化

(swaying) および上下揺 (heaving) 等 6 自由度の揺れがあるが、図-5 に示すように海底傾斜が極めて小さい場合には、ビーム到達距離の変化に有意に影響を及ぼすのは、heaving, rolling および pitching の 3 つである。それらを、それぞれ  $\zeta$ ,  $\phi$  および  $\psi$  と表すことにする。ここで、船体の動揺角がいずれも小さく、 $\cos \phi \approx 1$  および  $\cos \psi \approx 1$  が成立するものとする。3 つの動揺は各チャンネルのビーム到達距離を用いて容易に解くことができる。heaving  $\zeta$  は、次式で与えられる。

$$\zeta = \frac{\cos \theta_B}{4} \sum_{i=1}^4 (r_i - \bar{r}_i) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\bar{r}_i$  は、各チャンネルの時間平均された到達距離である。rolling angle  $\phi$  は、各チャンネルの到達距離  $r_i$  の変化  $\Delta r_i$  およびその絶対平均値  $\Delta r_{\bar{i}}$  を用いて、

$$\Delta r_i = r_i - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 r_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta r_{\bar{i}} = \frac{1}{2} (|\Delta r_i| + |\Delta r_j|) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{r_1 + r_2}{2} \cos \theta_B \cdot \phi = \Delta r_{12} \cdot \text{sign}(\Delta r_1) \quad \dots\dots\dots (4)$$

と表されるため、直接的に算定することができる。

$$\phi = \Delta r_{12} \cdot \text{sign}(\Delta r_1) \frac{2}{(r_1 + r_2) \cos \theta_B} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $\text{sign}(x)$  は変数の符号を表す。pitching angle  $\psi$  も同様に求めて、

$$\psi = \Delta r_{34} \cdot \text{sign}(\Delta r_3) \frac{2}{(r_3 + r_4) \cos \theta_B} \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。式 (5) および式 (6) により算定された動揺角  $\phi$  および  $\psi$  が十分に小さく、その余弦値が 1 とみなせる場合に、本手法の仮定が成立し、適用可能と判断されることになる。

#### 3.2 測定位置の同定

図-5 に示すように、ADCP の喫水深を  $h'$ , heaving を  $\zeta$  とすると、トランスデューサの平均海面からの位置は、 $h' - \zeta$  となる。いま、その位置から  $r_n$  だけ離れた位置を測定しているとき、rolling angle が  $\phi$  (1-2 チャンネル方

向の揺れ), pitching angle が  $\psi$  (2-3 チャンネル方向の揺れ) であったとする。動揺角  $\phi$  および  $\psi$  が十分に小さいとすると, 各チャンネルの測定位置 ( $z_i$ : 海底面からの高さ) は,

$$z_1 = h_1 - h' + \zeta - r_n \cos(\theta_B + \phi) \dots\dots\dots (7)$$

$$z_2 = h_2 - h' + \zeta - r_n \cos(\theta_B - \phi) \dots\dots\dots (8)$$

$$z_3 = h_3 - h' + \zeta - r_n \cos(\theta_B + \psi) \dots\dots\dots (9)$$

$$z_4 = h_4 - h' + \zeta - r_n \cos(\theta_B - \psi) \dots\dots\dots (10)$$

となる。ここに,  $h_i (i=1, \dots, 4)$  は  $i$  チャンネルのビームの海底面に到達する位置の平均水深である。

このように3種類の動揺を考慮することにより, 測定位置を決めることができるが, サイドローブの海底面からの強い反射により測定不能域ができることが知られている。その測定不能域の高さ  $z_c$  は,

$$z_c = (h - h' + \zeta)(1 - \cos \theta_B) \dots\dots\dots (11)$$

で与えられる。ここで, 平均水深  $h=10$  m, 喫水深  $h'=1$  m, 発射角度  $\theta_B=20^\circ$ , heaving  $\zeta=0$  m とすると,  $z_c=0.54$  m となる。同じく平均水深  $h=6$  m では,  $z_c=0.30$  m となる。

3.3 船体動揺の算定結果

図-6 は, 上述の方法により St.1 ( $h=10.16$  m) の heaving, rolling および pitching を算定した結果を示したものである。図中の実線は heaving を m 単位で, 1点鎖線は rolling angle, 破線は pitching angle を度で示している。どちらの動揺角も  $\pm 2^\circ$  程度以内で極めて小さ

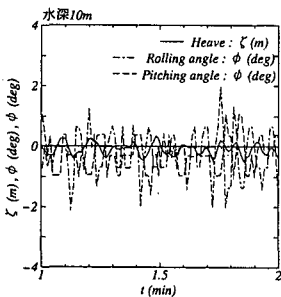


図-6 heaving, rolling および pitching の変化

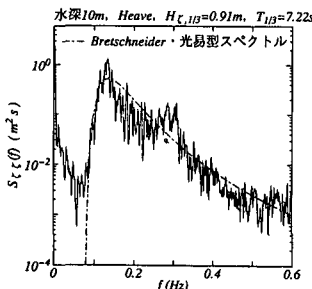


図-7 heaving のスペクトル

く, 前述の仮定が満たされていることが分かる。

図-7 は, heaving のスペクトルを示したものである。この図の鎖線は, heaving の二乗平均値から推定された有義波高  $H_{\zeta,1/3}$  を用いて, Bretschneider・光易型スペクトルを求めたものである。heaving のスペクトルにもかかわらず, 波浪の標準スペクトルにかなり類似しているのは, 波の波長に比べて船が小さく, 上下揺れが水面波形状に近かったためであると考えられる。ちなみに, 現地観測地近くの小針浜沖合いの水深 18 m で信濃川下流工事事務所で観測された有義波高は  $H_{1/3}=0.80$  m, 有義波周期は  $T_{1/3}=7.25$  s で,  $H_{\zeta,1/3}=0.91$  m,  $T_{\zeta,1/3}=7.22$  s と殆ど一致している。

4. 浮遊砂濃度の推定

4.1 後方散乱強度と浮遊砂濃度との関係

海水中に浮遊砂が存在すると, 超音波の散乱が生じ後方の受波器にその散乱が受信される。本研究で用いた ADCP の発信周波数は, 600 kHz で波長約 2.5 mm であり, 浮遊砂の平均粒径  $d_{50}$  が 0.02 mm から 0.08 mm 程度であるので, レーラー散乱の範囲内である。レンジ方向に正規化された反射強度  $\sigma$  は, 次式で与えられる。

$$\sigma(\text{dB}) = 0.43I + 20 \log_{10} r + 2\alpha r \dots\dots\dots (12)$$

ここに,  $I$  は ADCP に記録されるカウント値 (0~255),  $r$  は ADCP から観測位置までの距離,  $\alpha$  は超音波の吸収係数 (dB/m) である。上式は正規化された値なので, 測定水深が異なる場合には海底面からの反射強度が異なり絶対値を比較することができない。また, ノイズレベルが地点あるいはチャンネルによって異なると散乱体が同じでも値が違ってくることになる。そこで, スケール変換およびノイズレベルを考慮して, 次式で後方散乱強度を算定することにした。

$$\sigma_1(\text{dB}) = 10 \log_{10} A_k \{10^{0.043I} - 10^{0.043N_k}\} + 20 \log_{10} r + 2\alpha r \dots\dots\dots (13)$$

ここに,  $A_k$  は地点毎に異なるスケール変換値,  $N_k$  はノイズレベルのカウント値である。上式において,  $A_k=1.0$ ,  $N_k=0$  とすると, 式(12)に一致し,  $A_k=1.0$  とすると川西ら (1998) が用いた関係式に一致する。ここで,  $\log$  関数の中の  $10^{0.043I}$  でくくり,  $\log(1-x) = -x, (x \ll 1)$  の関係式を用いると,

$$\sigma_1(\text{dB}) = 0.43I + \Delta_k + 20 \log_{10} r + 2\alpha r \dots\dots (14)$$

なる関係式が得られる。ここに,  $\Delta_k$  は観測地点毎にことなる定数で,

$$\Delta_k = 10 \log_{10} A_k - \frac{10}{\log_e 10} 10^{-0.043(I-N_k)} \dots\dots (15)$$

で表される。つまり,  $\Delta_k$  はレンジ方向に正規化された値をもとに戻す定数であり, 浮遊砂濃度が同じで海底面からの反射強度が異なるデータを補正するものである。し

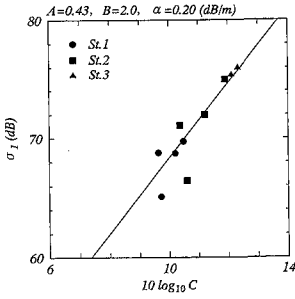


図-8 後方散乱強度と浮遊砂濃度との関係

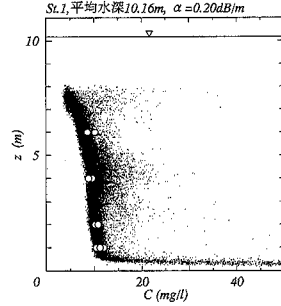


図-9 浮遊砂濃度の鉛直分布の比較 (St.1)

たがって、各地点毎に式 (12) を用いて正規化された散乱強度を算定し、それと浮遊砂濃度との関係を両対数グラフにプロットし、それぞれの直線群が一致するように、 $\Delta_k$  の値を決めてやればよいことになる。なお、超音波の吸収係数については、西村 (1977) を参考に 0.20 dB/m とした。

図-8 は、このようにして得られた後方散乱強度と浮遊砂濃度との関係を示したものである。浮遊砂濃度に関しては、3 回測定された濃度の算術平均値を用い、後方散乱データについては時間平均値を用いている。低濃度のところでデータのばらつきが大きい、ほぼ一意的な関係が得られており、後方散乱強度から浮遊砂濃度を推定することが可能である。

#### 4.2 浮遊砂濃度の時空間変動

前節に述べた方法により得られた検定結果を用いて、浮遊砂濃度の鉛直分布を推定したものを、図-9 および図-10 に示す。この図の小さなドットは、ADCP の後方散乱強度から得られた 20 数分間の濃度を示している。データの高さ  $z$  は、式 (7) から式 (10) により得られた各チャンネルの高さの平均値を用いている。○印は、浮遊砂サンプラーによって測定された濃度を表している。実測濃度との対応は全般的には良好であるが、ADCP の近傍ではやや差異がみられ、後方散乱強度から算定された値が小さくなっている。

海底面から 0.5 m 以下の所で濃度が高くなっているのは、サイドロブの海底面からの反射の影響でこのような結果となっているのであり、正確な値ではない。また、所々にかなり高い濃度を示すデータが存在するが、これは一種のスペックルノイズと考えられ、信頼度は低いものと思われる。

図-11 および図-12 は、ADCP の後方散乱強度から推定された浮遊砂濃度の時間変化を示したものである。図-11 は、St.1 の平均高さ  $z=1.42$  m の濃度変化、図-12 の方は St.2 の同じく平均高さ  $z=1.02$  m の濃度変化を示したものである。前者では濃度変化は小さく、平均して 10 mg/l から 11 mg/l の変動であるのに対し

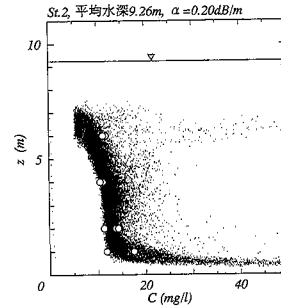


図-10 浮遊砂濃度の鉛直分布の比較 (St.2)

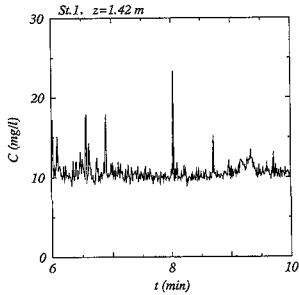


図-11 浮遊砂濃度の時間変化 (St.1,  $z=1.42$  m)

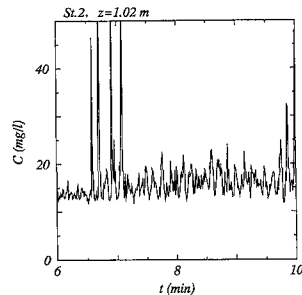
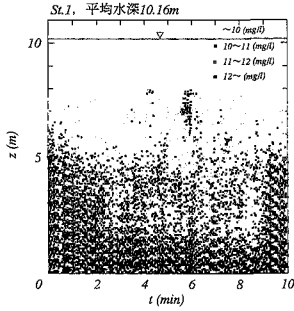
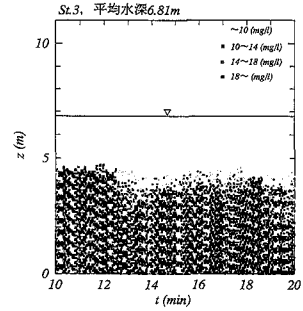
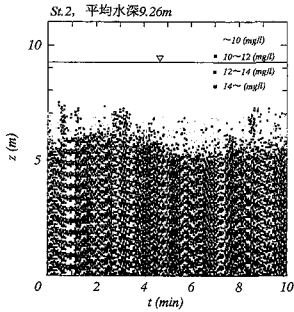


図-12 浮遊砂濃度の時間変化 (St.2,  $z=1.02$  m)

て、後者では 13 mg/l から 22 mg/l 程度の変動が生じており、波浪に対応した濃度変化が認められる。なお、両図に見られるスパイク状の濃度変化は、前述したスペ

図—13 浮遊砂濃度の時空間変動 (St.1,  $h=10.16$  m)図—15 浮遊砂濃度の時空間変動 (St.3,  $h=6.81$  m)図—14 浮遊砂濃度の時空間変動 (St.2,  $h=9.26$  m)

クルノイズの一種と考えられ、値自体は正確なものではないと思われる。

船体の動揺を考慮して測定位置を算定し、後方散乱強度より浮遊砂の濃度の時空間変動を示したのが、図—13から図—15である。各測定地点によって濃度変動の大きさが異なるため、スケールを変えて記号をプロットしている。また、これらの図の白い部分は、測定値が得られなかった地点である。船体の動揺を考慮すると、ほぼ任意の高さの濃度変動が得られていることが分かる。図—14の St.2 の濃度変動には数分周期の波打った変動が見られ、長周期波の影響を受けているものと思われる。また、図—15の St.3 の濃度変動には、海底面からパースティングのように高い濃度の浮遊砂が巻き上げられている様子が伺える。

## 5. 結 論

船体取付型 ADCP を用いて船体動揺の同定を行うと共に、後方散乱強度よりシルトあるいは微細砂の濃度の

推定を行ったところ、以下の事柄が明かとなった。

(1) ビーム到達距離を用いて、heaving, rolling および pitching の3つの動揺が推定でき、反射強度の測定位置が正確に算定できることが分かった。推定された Heaving のスペクトルは、波浪のスペクトルに類似しており、実測された有義波高および有義波周期の値にほぼ一致していることが確かめられた。

(2) ADCP の後方散乱強度の時間平均値と実測された濃度との間には、ほぼ一意的な関係があり、後方散乱強度から浮遊砂濃度を推定することが可能であることが分かった。推定された濃度の時空間変動より、長周期の変動や海底面から巻き上げられる様子が明かとなった。

(3) 後方散乱強度より推定された濃度の時間変動には、4つのビームの平均化処理をしてもスペックルノイズが残るため、このノイズの除去法を考える必要がある。また、推定精度を上げるためにも、浮遊砂濃度が存在する場合の超音波の吸収係数をいかに推定するかが課題として残されている。

## 参 考 文 献

- 川西 澄・山本洋久・余越正一郎 (1998): 超音波流速計と散乱光式濁度計を用いた懸濁粒子の濃度、粒径、フラックスの測定, 水工学論文集, 第42巻, pp. 559-564.
- 西村 実 (1977): 海洋物理 I, 海洋科学基礎講座, 第3章, 東海大学出版会, pp. 38-81.
- 宗泉志浩・田村圭一・中川倫寿 (1995): ADCP 観測による浦の内湾の差し込みの流れ構造と浮遊物質分布, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1091-1095.
- 山下隆男・加藤 茂・路 明・安田孝志・飯野智彦 (1998): ADCP により長期連続観測した海浜流の鉛直分布とその強風、波浪応答特性, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 201-205.