

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

MEASUREMENTS OF CONCENTRATION, PARTICLE SIZE AND FLUX
OF SUSPENDED PARTICULATE MATTER WITH ACOUSTIC DOPPLER
VELOCIMETER AND OPTICAL BACKSCATTER SENSOR

川西 澄¹・山本 洋久²・余越 正一郎³
Kiyosi KAWANISI, Hirohisa YAMAMOTO and Shoitiro YOKOSI

¹ 正会員 工博 広島大学助教授 工学部第四類 (〒739 東広島市鏡山 1-4-1)

² 学生員 広島大学大学院 工学研究科環境工学専攻 (〒739 東広島市鏡山 1-4-1)

³ 正会員 工博 広島大学教授 工学部第四類 (〒739 東広島市鏡山 1-4-1)

Simultaneous measurements of velocity and concentration of suspended particulate matter (SPM) have been carried out using an acoustic Doppler velocimeter (ADV). Since the acoustic backscatter is a strong function of particle size, the size information is drawn from measurements supplemented by an optical backscatter sensor (OBS). In the settling experiment, the SPM concentrations estimated from a combination of ADV and OBS show good agreement with the gravimetric particulate concentrations. Field measurements have been performed in the bottom boundary layer of the Ota river estuary. The SPM concentrations measured by a combination of ADV and OBS are in good agreement with those from seawater samples. The mean size from the ADV/OBS response ratio is 5.5–7 μm . The concentrations and turbulent fluxes of SPM increase with the shear stress. The concentration profiles are also obtained from ADCP echo intensity.

Key Words: *suspended particulate matter, particle size, mean and turbulent fluxes, acoustical and optical backscatter, tidal estuary*

1. はじめに

沿岸水域における水質や生態系などを考える上で、懸濁粒子に関する知識は海水流動とともに重要であり、従来から多くの研究が行われている¹⁻³⁾。懸濁粒子濃度を知るには、採水を行って濾過懸濁粒子の重量を測定するのが確実であるが、非定常性が高い沿岸水域では、迅速なサンプリングが必要なため、古くから光学式濁度計が使われてきた。

一方、超音波の散乱を利用して懸濁粒子濃度を測定する方法もあり、懸濁粒子濃度の鉛直分布を高い分解能で連続観測できる超音波後方散乱分布計 (acoustic backscattering profiler) も開発されている⁴⁾。ただし、光学式、超音波式とも正確な濃度を求めるためには懸濁粒子の粒径に関する情報が必要であるため、最近では複数の周波数の超音波を用い、周波数による散乱特性の違いを利用して、懸濁粒子濃度と粒径の鉛直分布を同時に測定することが試みられている⁵⁾。古川ら¹⁾は瀬戸内海において、懸濁粒子濃度とともに、水中照度と透明度・濁度の関係か

ら、粒径に関係する懸濁質係数を定義して、この係数と貝類養殖との関係を論じている。また、Agrawal and Pottsmith⁶⁾はレーザー回折を利用した現地用粒径分析装置を開発し、大陸棚で懸濁粒子の粒径分布を海中で直接測定している。

ところで、懸濁粒子濃度と流速が同時に測定できれば底質の輸送や水質の理解に大いに役立つと思われる。Kawanisi and Yokosi⁷⁾は米国 SonTek 社製の超音波ドップラー流速計 (ADV)⁸⁾を用いて、懸濁粒子濃度と流速の同時測定を試みているが、粒径に関する情報が得られていないために、その濃度測定には曖昧さが残されている。本論文では、Kawanisi and Yokosi⁷⁾の方法を改良し、超音波と赤外線の散乱特性の違いを利用して平均粒径を推定した上で、懸濁粒子濃度を流速と同時に測定している。またさらに、ADCP の超音波散乱強度から、懸濁粒子濃度の鉛直分布を推定している。

2. 方法

2. 方 法

(1) 現地観測

太田川河口域において、海底上に設置したSonTek社製の超音波ドップラー流速計(ADV)と浅海用設置型ADCPによる連続観測を行った。観測地点(34°21'08" N, 132°24'22" E)は太田川放水路河口の約500 m沖で、平均水深は約10 m、観測日時は1996年11月11日8:40~17:00である。

底層の流れと懸濁粒子濃度を同時測定するため、ADV、散乱光式濁度計(北斗理研; MA-1001, 時定数0.1秒; 以下ではOBSと呼ぶ)、採水用のビニールチューブを海底設置用フレームに取り付け、測定領域の中心が海底上25 cmの高さになる様にセットした。ただし、お互いの干渉を避けるため、ADV、OBSと採水口的位置は水平方向に約15 cm離してある。ADVの姿勢検出用コンパス・2軸傾斜角センサーとOBSのデータはADVのサンプリング(周波数20 Hz)に同期させてAD変換し、連続記録した。なお、採水は0.81~3時間間隔でハンディ真空ポンプを用いて行った。持ち帰ったサンプルは濾過(濾紙:Whatman GF/C)して懸濁粒子濃度を測定した。

以上の測定に加え、ADCPを用いて流速と散乱強度の鉛直分布を測定した。本研究で使用したADCPの超音波周波数は1.5 MHz、ビーム傾斜角25°である。ADCPのセンサーヘッドは海底直上に上向きで設置し、測定層厚50 cm、2分平均のデータを連続記録した。最も海底に近い測定層の中心位置は海底上80 cmである。また、ADCPのセンサーヘッドには水温と圧力(水深)センサーが組み込まれている。

(2) 懸濁粒子の沈降試験

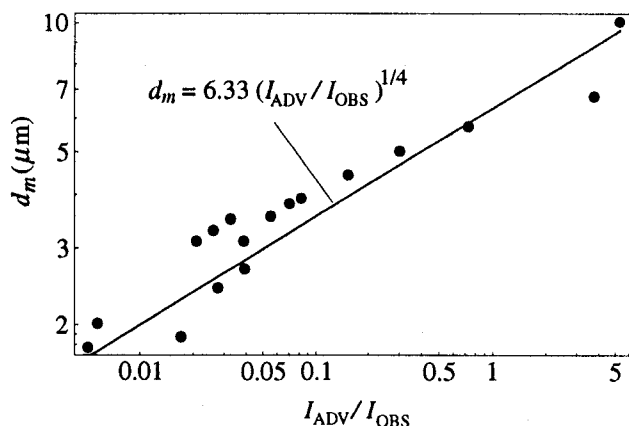
ADVとOBSの散乱強度と濃度、粒径の関係を調べるため、ADVとOBSを設置した水槽内で現地底泥を気泡が混入しないように注意し、攪拌・懸濁させた後放置して、懸濁粒子の沈降にともなう濃度と粒径分布の変化をADVとOBSの後方散乱強度とともに72時間測定した。なお、濃度と粒径分布は後述する方法で、採水サンプルから求めた。

ADVはプローブ中央部の送波器から10 MHzの超音波を放射し、その送波器から5 cm離れた体積0.25 cm³の領域の散乱体から返ってくる音圧を、ドップラーシフトとともに3つの受波器で検出する。散乱体からの散乱強度 I_{ADV} は、受波器から得られるエコーレベルを EL 、ノイズレベル(音波を放射していないとき得られるエコーレベル)を NL とすると、 EL, NL が0.43 dB単位で記録されるので、

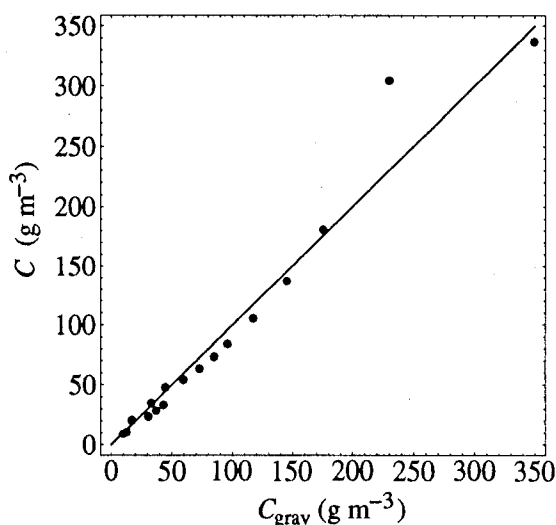
$$I_{ADV} = 10^{0.43 EL} - 10^{0.43 NL} \quad (1)$$

から求められる。なお、本研究では散乱強度 I_{ADV} として3つの受波器のデータを平均したものを用いた。

懸濁粒子の重量濃度はビニールチューブを介して採水したサンプルをWhatman GF/F濾紙で濾過し



図一1 ADVとOBSの散乱強度の比と平均粒径の関係



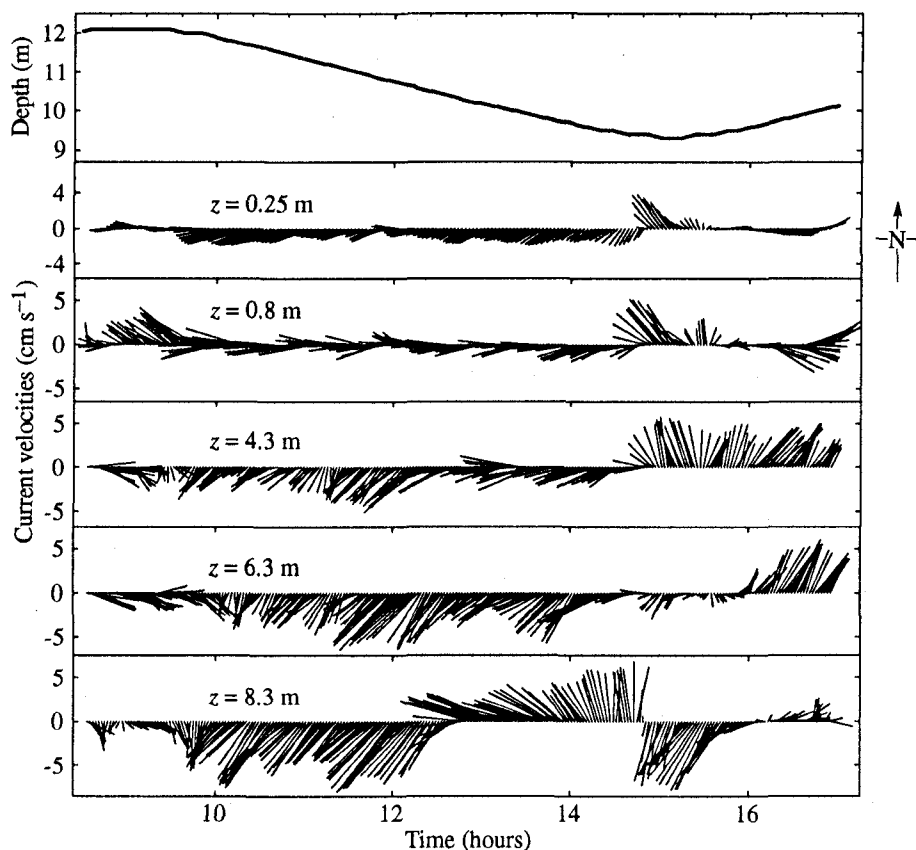
図一2 採水サンプルと散乱強度から求めた懸濁粒子濃度の比較

て求め、粒径分布は採水サンプルをレーザ回折/散乱式粒度分布計(堀場製作所, LA-910)にかけて測定した。採水間隔は0.02~25時間である(実験開始付近では濃度と粒径分布の変化が激しいので、採水間隔は短くした)。なお、ADVとOBSの測定領域および採水口的位置は互いに干渉しない範囲内で出来るだけ近付けて設置した。

3. 結果および考察

(1) ADVとOBSの後方散乱特性

現地底泥を用いた沈降試験中に、懸濁粒子濃度は252~9.6 g m⁻³、平均粒径は10~1.8 μmの範囲で変化した。この程度の粒径ではADVの超音波はレイリー散乱、OBSの赤外線(波長:940 nm)はミー散乱を起こす。従って、 C_n, d_n をサイズクラス n における粒子濃度と粒径とすると、ADVとOBSの散乱強度と濃度との関係はレイリー散乱、ミー散乱理論



図—3 水深と水平流速ベクトルの経時変化

からそれぞれ,

$$I_{ADV} \propto \sum_n d_n^3 C_n, \quad (2)$$

$$I_{OBS} \propto \sum_n d_n^{-1} C_n \quad (3)$$

のように表される. 懸濁粒子の粒度分布の標準偏差が平均粒径 d_m に比べて小さければ, 散乱強度と濃度との関係は近似的に

$$I_{ADV} \propto d_m^3 C, \quad (4)$$

$$I_{OBS} \propto d_m^{-1} C \quad (5)$$

と見なせる. 従って, 懸濁粒子の平均粒径は

$$d_m \propto (I_{ADV}/I_{OBS})^{1/4} \quad (6)$$

のように, ADV と OBS の散乱強度の比から推定できる.

図—1 は沈降試験から求めた I_{ADV}/I_{OBS} と平均粒径の関係を示したものである. ほぼ(6)式の関係が成立しており, ADV と OBS のデータから懸濁粒子の平均粒径が推定可能である.(6)式と(4)又は(5)式より, I_{ADV}/I_{OBS} と懸濁粒子濃度 C の関係は

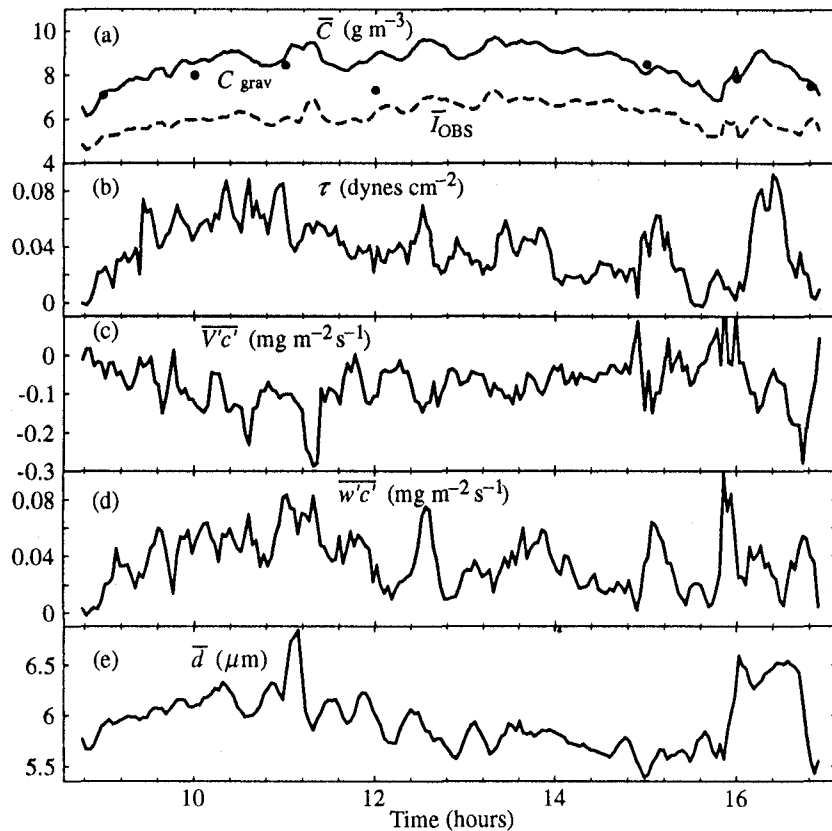
$$C = 1.52 I_{OBS}^{3/4} I_{ADV}^{1/4} \quad (7)$$

となる. ただし, 比例係数は最小2乗法によって決定した. 上式によって求めた C と採水サンプルから求めた濃度 C_{grav} を比較した結果が図—2である. 両者の対応は良好で, 粒径が変化しても散乱強度から懸濁粒子濃度が求められることがわかる.

(2) 太田川河口域の流動と懸濁粒子

水深と水平流速ベクトルの経時変化を図—3に示す. なお, 太田川からの淡水流入量は少なく, 観測地点の塩分濃度は30 psu程度であった. 水深はADCPのセンサーヘッドに内蔵されている圧力計から得られたもので, 水深は9~12 mの範囲で変化している. 海底からの高さ $z = 0.25$ mの流速はADVによって測定されたもので, それ以外はADCPによるものである. 観測地点は広島湾奥に位置するため, 大潮にもかかわらず流動は弱く, $z = 0.25$ mの高さにおける最大流速は 5 cm s^{-1} 程度である. 流速と流向は海底からの高さと時間により複雑に変化しているが, 下げ潮期には南西方向の流れが卓越している. 満潮付近では, 下層と中・上層で流れの向きは反対で, 下層の流速変化の位相が進んでいることを窺わせる. また, $z = 8.3$ mでは中・下層の流れと異なり, 下げ潮の後半に北西から北向きの流れがみられる.

図—4 (a) は底層($z = 0.25$ m)における懸濁粒子濃度(10分平均)の経時変化を示したものであるが,

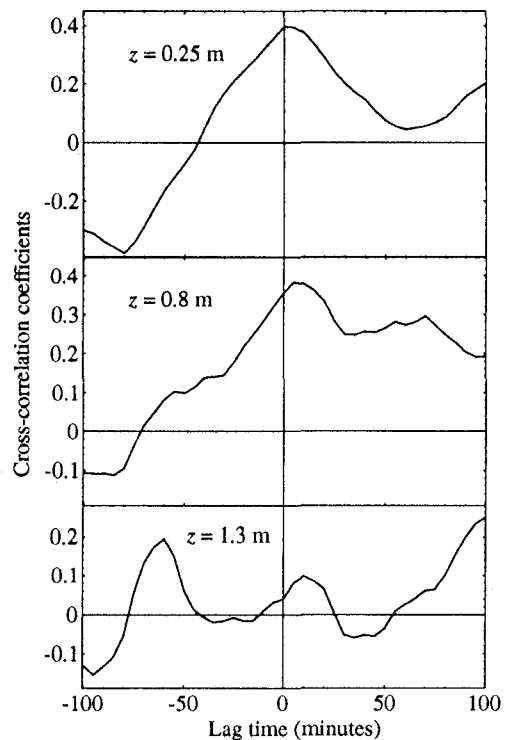


図一4 底層における懸濁粒子濃度，剪断応力，濃度の乱流フラックス，平均粒径の経時変化

(7)式によって求めた懸濁粒子濃度 $\bar{C}$ と採水による値 C_{grav} は良く一致している。OBSは平均粒径約 $4\mu\text{m}$ のカオリン懸濁液で検定してあったため，懸濁粒子濃度を過小評価している（前述した沈降試験によって， $C = 0.238 d_m I_{\text{OBS}}$ の関係が得られており，後述する推定粒径を使えば $\bar{C}$ にはほぼ一致する）。ADVによって測定したレイノルズ剪断応力の経時変化を図一4 (b)に示す。この剪断応力はレコード長10分のデータから渦相関法によって求めたもの $(-\rho \overline{V'w'})$ である。ここで， V' ， w' はそれぞれ，主流方向，鉛直方向流速の変動成分である。海水流動が微弱であるため，剪断応力の値は小さく，最大でも $0.09 \text{ dynes cm}^{-2}$ 程度である。

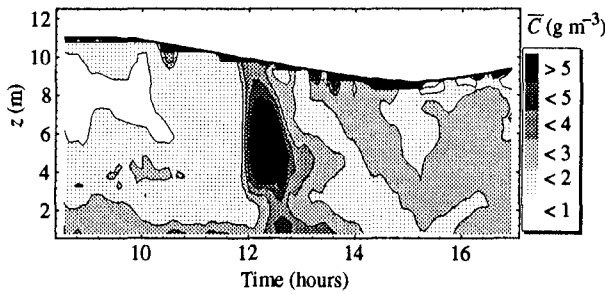
剪断応力と懸濁粒子濃度との相関を調べた結果を図一5に示す。ただし，海底上 0.8m と 1.3m における相関係数は後述するように，ADCPの散乱音波強度から求めた懸濁粒子濃度を使っている。剪断応力が小さいにもかかわらず，底層 $(z \leq 0.8\text{m})$ の懸濁粒子濃度の変化は剪断応力と相関があり，底面剪断応力の増減にともない，海底面付近の懸濁粒子が浮上と沈降を繰り返していることがわかる。海底上 1.3m では相関係数は小さく，流れによる海底付近からの巻き上げの影響の強い浮泥層の厚さは 1m 程度であると考えられる。

図一4 (c)，(d)はADVから求めた懸濁粒子濃度の乱流フラックスの経時変化である。ほとんどの時

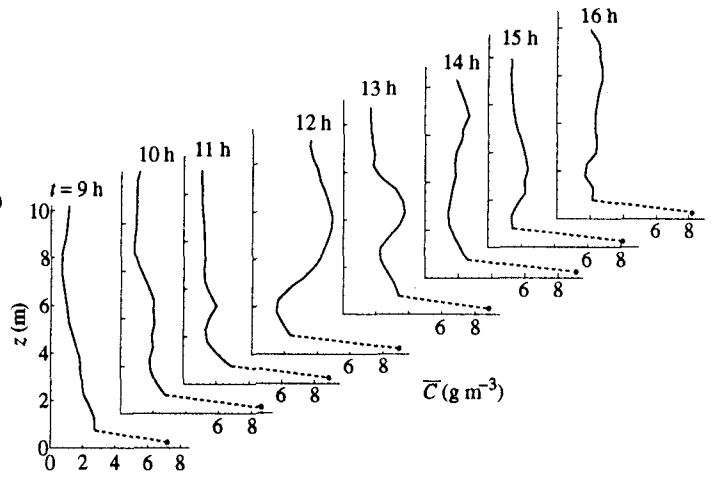


図一5 レイノルズ剪断応力と濃度の相関係数

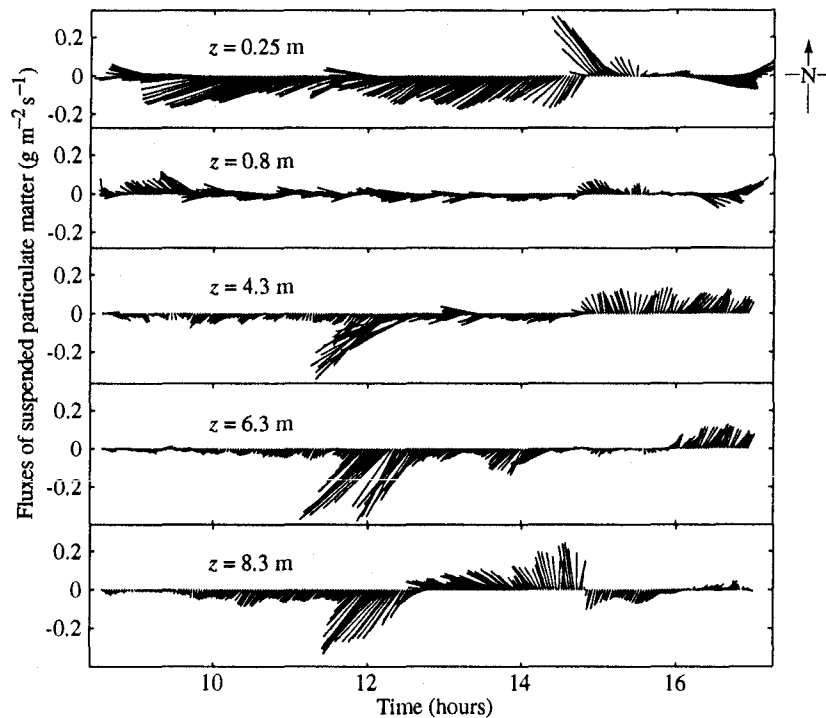
間で，主流方向の乱流フラックス $\overline{V'c'}$ は負，鉛直方向のフラックス $\overline{w'c'}$ は正であり，高濃度の流体が低速上昇流(ejection)に，低濃度の流体が高速下降流(sweep)



図—6 懸濁粒子濃度の時空間分布



図—7 懸濁粒子濃度の鉛直分布経時変化



図—8 懸濁粒子濃度フラックスの経時変化

に結び付いていることを示している。前述したように、ADV と OBS の散乱強度の比から懸濁粒子の平均粒径を推定できる。図—1 中に示した回帰式を使って求めた平均粒径の経時変化を図—4 (e) に示す。平均粒径の変化は大きくないが、図—4 (b) に示した剪断応力と正の相関がみられる。なお、古川ら¹⁾は瀬戸内海で測定した懸濁質係数から、平均粒径が $2.4 \sim 5 \mu\text{m}$ であると推測している。

図—4 (e) に示すように、懸濁粒子の粒径変化は小さいことから、濁度と懸濁粒子濃度の相関は高く、両者は比例関係にあった。従来の研究でも、比例係数は場所や季節によって変化するものの、濁度は懸濁粒子濃度にほぼ比例することが報告されている^{3,9)}。ところで川西ら¹⁰⁾は、広島湾北西部において ADCP

で受信される後方散乱強度を、次式のように、音波の広がりや海水の吸収による伝播損失を考慮して補正し、懸濁粒子の散乱強度を求めている。

$$10 \log I_{\text{ADCP}} = \log (10^{0.46EL} - 10^{0.46NL}) + Rc \quad (8)$$

ここに、 EL = ADCP で受信されるエコーレベル、 NL = ノイズレベル (音波を放射していないとき得られるエコーレベル)、 Rc は音波の広がりや海水による吸収にともなう音波の伝播損失に関する修正項で、

$$Rc = 20 \log r + 2\alpha r \quad (9)$$

のように表される。ここで、 r = ADCP のトランスデューサーから測定層までの距離、 α = 海水による音波の吸収率である。川西ら¹⁰⁾の結果によれば、補

正後の後方散乱強度は濁度計（本研究で用いたものと同一）の値とよく一致しており、ADCPによって流速とともに濁度の測定が可能であることが示されている。そこで、底層における濁度と懸濁粒子濃度の比例係数と川西ら¹⁰⁾の結果を用いて、ADCPの後方散乱強度から懸濁粒子濃度を算出した。なお、音波の吸収率 α は0.59 dB/mとした¹⁰⁾。

図—6, 7はこうして求めた懸濁粒子濃度分布の経時変化を示したものである。図—7に示した鉛直分布にはADVによって測定された底層における濃度も示されている。ただし、ADCPはサイドロープ干渉のため水面付近の測定が出来ないので、水面から水深の15%の領域は除いてある。時刻12~13時に、中層付近に濃度の極大が見られる。この原因はよく分からないが、観測時広島港で埋め立て工事が行われていたので、その影響かもしれない。濃度分布の時間的な変化はかなり大きく、満潮付近では海底に向かって増加しているが、干潮付近では海底付近まで一様な分布となっている。また、どの時刻でも海底近傍で急激に濃度が増加していることがわかる。

平均流速と濃度を乗じて求めた懸濁粒子フラックスの経時変化を示したのが図—8である。図—3に示した流速に対応して、粒子フラックスの分布は複雑に変化している。図—7に示したように、海底面近傍で濃度が急激に大きくなっているため、流速が小さくてもフラックスは大きく、また剪断応力との相関もあるため、懸濁粒子・底質の輸送過程などを考える上で、海底面近傍の測定は欠かせないものと思われる。

5. おわりに

超音波ドップラー流速計と散乱光式濁度計の後方散乱強度から懸濁粒子の濃度、粒径、フラックスの測定を太田川河口域（広島湾湾奥）で試みた。本研究で得られた主な結果は以下の様である。

- 1) 同時測定されたADVとOBSの散乱強度を利用すれば、小型懸濁粒子の濃度と平均粒径が測定可能である。
- 2) 底層におけるレイノルズ剪断応力の値は小さいが（最大でも $0.09 \text{ dynes cm}^{-2}$ ）、剪断応力と懸濁粒子濃度、乱流フラックスの間には正の相関が認められる。ただし、剪断応力と相関の認められる

濃度は海底上1 m程度までのものに限られる。

参考文献

- 1) 古川 厚・野上和彦・久岡 実・小笠原義光・岡本 亮・小林歌男：海中懸濁物質並びに主としてその点からみた貝類養殖場の特性に関する研究，内海区水研報，第14巻，pp.1-151, 1961.
- 2) 塩沢孝之・川名吉一郎・星加 章・谷本照己：瀬戸内海における懸濁物質と底質，沿岸海洋研究ノート，第22巻，第2号，pp.149-156, 1985.
- 3) 星加 章・谷本照己・三島康史：大阪湾における懸濁粒子の特性，中国工業技術研究所報告，第47巻，pp.15-26, 1996.
- 4) Young, R. A., Merrill, J. T., Clarke, T. L. and Proni, J. R.: Acoustic profiling of suspended sediments in the marine bottom boundary layer, *Geophysical Research Letters*, Vol.9(3), pp.175-178, 1982.
- 5) Hay, A. E. and Sheng, J.: Vertical profiles of suspended sand concentration and size from multifrequency acoustic backscatter, *J. Geophys. Res.*, Vol.97 (C10), pp.15,661-15,677, 1992.
- 6) Agrawal, Y. C. and Pottsmith, H. C.: Laser diffraction particle sizing in STRESS, *Contin. Shelf Res.*, Vol.14(10/11), pp.1101-1121, 1994.
- 7) Kawanisi, K. and Yokosi, S.: Characteristics of suspended sediment and turbulence in a tidal boundary layer, *Contin. Shelf Res.*, Vol.17(8), pp.859-875, 1997.
- 8) Lohrman, A., Cabrera, R. and Kraus, N. C.: Acoustic-Doppler velocimeter (ADV) for laboratory use, *Proc. of Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation*, Buffalo, New York, 1994.
- 9) Takematu, N., Okami, N., Kishino, M., Fukuda, M. and Sasaki, T.: The distribution of suspended matter in sea water off coast of Tokai-mura, *La mer*, Vol.9(4), pp.252-259, 1971.
- 10) 川西 澄・内田卓志・松山幸彦・余越正一郎：浅海域におけるADCPを用いた濁度分布の観測，沿岸海洋研究，第35巻，第2号，1998（印刷中）。

（1997.9.30 受付）