海域モニタリングに適した ADCP を用いた濁度の鉛直分布計測手法

学生員 新井 励* 正員 中谷 直樹*
正員 奥野 武俊*

Measurement Method of Turbidity Depth Profiles using ADCP for Monitoring of Coastal Sea Area

by Rei Arai, *Student Member* Naoki Nakatani, *Member*
Taketoshi Okuno, *Member*

Summary

At stormy weather, dredging and filling operation and so on, the water with high concentrations of solids arises in coastal sea area. Growth of seaweed and algae is obstructed to interrupt sunlight by water with this high turbidity. To make matters worse, sediments has the character to adsorb the nutrient and organic matter on those surfaces. Water involved high concentration of solids with nutrient and organic matter make seawater and seabed polluted. In order to improve them, it is very important to measure the spatial and temporal variability of solids dynamics and to monitor the coastal environment.

In this study, the authors proposed a new measurement method of solids depth profiles by using Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP). Authors regarded the propagation of ultrasonic waves as inverse problems in underwater and modeled these factors, which influences the propagation of ultrasonic waves. By using ADCP and optical turbidity sensor, the depth profile of the solids concentration can be measured. Since ADCP can be obtained the three-dimensional velocity, the present method is suitable for monitoring in order to understand the solids dynamics in seawater.

1. 結 言

出水時における河川からの流入や浚渫埋立工に伴う高濁度水が引き起こす沿岸海域における透明度の低下は、海藻や藻類の磯焼けや養殖被害の要因の一つと考えられている。また、浮遊懸濁物質は、海水中における各種の有機物質や無機物質を吸着しながら沈降し、堆積する¹⁾。このため、富栄養化された海域における過剰な浮遊懸濁物質は底質を汚泥化するだけでなく、栄養塩の溶出や巻き上げによる再浮上により底層の水質をさらに悪化させ、底生生物を死滅させることもある。このような沿岸海域における濁りは、生態系や漁業生産に大きく影響を及ぼしているため、その時間的、空間的変動を計測し、把握することは重要である。

従来、海域における濁度の計測は、採水による測定や光学式濁度計が用いられてきた。採水による測定では時間的、空間的変動の連続的な測定は困難であり、光学式濁度計を使うと濁度を精度良く計測できるものの、ある特定の計測点における計測、いわゆる点計測であるため、空間分布の変動の大

きな河口域や、底泥の巻き上げが顕著な海域の濁度の鉛直分布を計測するためには複数台の計測器を設置する必要がある。そのため、海域における濁度の詳細な鉛直プロファイルを長期間計測するためには膨大なコストが必要となり実用的ではない。

最近、懸濁物質による音波の散乱強度を計測することで濁度の鉛直分布を計測する手法がいくつか提案されている。例えば、横山ら^{2), 3)}、川西ら⁴⁾は、水中を伝搬する音波の伝搬損失を水による吸収と音波の拡散によるものと考え、いわゆるソナー方程式を用いることで、超音波流速計(ADCP)により沿岸海域における濁度の鉛直プロファイルを算出している。しかしながら、それらの手法では、機器特性や懸濁物質特性といった計測環境下における音波伝搬の影響だけでなく、時間変動する懸濁物質自体による減衰も考慮されていないため、十分に音波伝搬を表現できていないと考えられる。

Thorne ら^{5), 6)}、Hay ら^{7), 8)}や Vincent ら⁹⁾は、懸濁物質による吸収や音響散乱の影響も考慮した、Thorne ら¹⁰⁾や Souza ら¹¹⁾によりまとめられた音響伝搬モデルを用いることで精度良く海域における濁度の鉛直分布計測を行っており、橘田ら¹²⁾も河川や沿岸海域において ADCP により土砂動態を計測している。しかし、これらのいずれの手法においても機器特性に関するパラメータや懸濁物質の粒子径や形状といっ

*大阪府立大学大学院工学研究科

原稿受理 平成 20 年 1 月 21 日

たパラメータはキャリブレーション時に決めるため、台風のような粒子径の急激な変化が生じるようなイベント発生時や、計測機器の電圧降下時といった機器特性の急激な変化がある場合には、安定して濁度を計測することは難しい。また、海表面における音波の散乱の影響も考慮していないため、海表面付近における濁度分布を精度良く計測するには至っていない。

沿岸海域における表層は、植物プランクトンの一次生産の活動領域であることから、生態系や物質循環を把握する上で重要な領域である。また、沿岸海域における懸濁物質の動態を把握する上で極めて重要な海域の1つとなる河口域において、高濃度の懸濁物質を伴う河川水が海水表層に流入してくることを考えると、表層近傍における懸濁物質濃度を計測し、把握することは非常に意義のあることである。

海表面における音響散乱をモデル化したものとしては、Chapman ら¹³⁾や Schulkin ら¹⁴⁾によって提案された実験式があり、これがソナー設計等に広く用いられている。この式は、精度良く海面における音響散乱を推定することを可能とするものの、風浪による海面波を想定しており、海面上の風速値が必要であり、現地において長期計測を行うためには、継続的に海面上の風速の計測値が必要となるという、難しい問題がある。

本研究では、懸濁物質濃度が水中の音波伝搬に与える影響を考慮したモデルに対して、ADCPと光学式濁度計による計測値を統合的に用いることで、海水中における濁度の鉛直プロファイルを非接触計測する手法を提案する。本計測手法は、粒子の形状や音波放射強度の機器特性の影響を受け難いため、調査対象海域における計測環境が変動しても精度良く濁度の鉛直分布を安定して計測することが可能である。また、海面上における風速値を用いずに、海面における音響散乱を表現した新たなモデルを構築し、表層近傍における濁度分布もADCPを用いて計測することで、海域モニタリングに適した、濁度の鉛直分布を安定して長期計測することが可能となる手法を提案する。

2. 音響伝搬理論

一般に、音波の伝搬は音場中の微小粒子の振動が疎密波として伝送される現象として説明される。微小粒子の振動により単位面積あたりに働く力の変化は音圧と呼ばれているが、音源の振動に対してこの振動が線形応答であると仮定すれば、非粘性流体音場中を伝搬する音圧 P は式(1)のように解析的に求められる。

$$P = \frac{P_0 r_0}{r} e^{-\alpha r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (1)$$

式(1)は、音源から距離 r_0 (m)離れた位置における基準音圧 P_0 が、音源からの距離 r (m)まで角振動数 ω (rad/s)、波数 k (m⁻¹)で振動しながら減衰係数 α (dB/m)によって決まる指数関数で減衰しながら伝搬することを表している。音源から放射された音波は Fig.1 に示すように、海水中を拡散および吸収されながら伝搬し、距離 r の位置における粒子半径 d (m)の懸濁物質により吸収、散乱される。散乱された音波は、放射された時と同様に海水中において吸収、拡散されながらトランスデューサーで受信される。このため、受信される音圧はそれらの積で表され、ピストン音源の指向性の関数を $D(\theta, \phi)$ としたときの伝搬式は式(2)のようになる。なお、ここで F は粒子の形状関数と呼ばれ、粒子形状による音響散乱特性を表した式である。

Fig.1 Propagation of sound transmitted by acoustic Doppler current profilers.

$$P = \frac{dP_0 r_0}{2r^2} F D^2 e^{-2\alpha} e^{j2(\omega t - kr)} \quad (2)$$

Hay ら¹⁵⁾や Thorne⁶⁾らは、式(2)より、パルス長 τ (m)の音波が水中に放射されたときの、粒子半径 d の浮遊懸濁物質により散乱される音圧と浮遊懸濁物質濃度 M (ppm)との関係式を解析的に求め、詳細に実験することでその検証もおこなった。この関係式を式(3)に示す。ここで、 R_s 、 T はセンサの受信感度および電圧変換係数を表している。音源は直径 T_s (m)の円形ピストン音源であるとし、音源の指向性はベッセル関数を用いることで表現している。また、 ψ は音源付近における音波伝搬の近距離補正係数である。

$$V = R_v T I = R_v T <P> = \left\{ \frac{k_s k_t}{\psi r} \right\} M^{1/2} e^{-2r\alpha}$$

$$k_s = \frac{F}{\sqrt{d}} \quad (3)$$

$$k_t = R_v T \frac{0.96 P_0 r_0}{k T_r} \left[\frac{3\pi c}{16} \right]$$

ここで、 $c(\text{m/s})$ は水中における音波の伝搬速度を、 I は音圧の時間平均 $<P>$ である音響強度レベルを示す。受信された音響強度レベルは電圧 V に変換され、音波伝搬は、その 2 乗の対数である音響エネルギーの線形足し合わせで表現することが出来るため、式(3)の音圧から音響エネルギーの式を導くと、式(4)となり、いわゆるソナーの式により浮遊懸濁物質による音響散乱の式を表現することが可能となる。

$$\log M = 0.1 \times \{Kc(E - Er) + 2r\alpha + 20 \log \psi r\} - 2 \log k_s k_t \quad (4)$$

ここで $Kc(\text{dB/count})$ は計測値 $E(\text{count})$ を音響エネルギーに変換する係数であり、本研究で用いた ADCP のセンサー温度から求めることが可能である¹⁶⁾。また、 $Er(\text{count})$ は参照値と呼ばれ計測環境により変化する値である。

3. 計測手法

3.1 音響伝搬モデル

ADCP により海水中の音響散乱を計測し、式(4)を用いれば、海水中の浮遊懸濁物質の音響学的な体積濃度 M の鉛直分布を非接触で計測することは理論的に可能である。しかし、式(4)に含まれる各種パラメータは計測環境や計測機器により異なり、一意に決定することは困難である。そこで、本研究では各パラメータをモデル化、あるいは他の計測機器との統合的な計測手法を用いることで、モニタリングに適した、安定した計測手法を提案する。

式(4)中の減衰係数 $\alpha (\text{dB/m})$ は音波が伝搬する音場について考える。海水による吸収 α_w 、および海水中に含まれる浮遊懸濁物質による吸収や散乱時の減衰 α_s に依存することを考えると、これは式(5)のように表現できる。

$$\alpha = \alpha_w + \alpha_s \quad (5)$$

海水による音波の吸収は真水の場合と異なり、海水に含まれる硫酸マグネシウムや炭酸マグネシウムなどの物質による化学的緩和を考慮する必要がある、古くから各種の式が提案されている。本研究では式(6)で示されるような Shulkin¹⁷⁾や Liebmenn¹⁸⁾により求められた周波数と吸収係数の近似式

を用いる。ここで $f(\text{kHz})$ は音波の周波数を示し、 $f_T(\text{kHz})$ は緩和周波数と呼ばれ、水温 T により決まる値である。

$$\alpha_w = \frac{f}{91500} \left[\frac{1.86 S f_T f}{(f_T^2 + f^2)} + \frac{2.68 f}{f_T} \right]$$

$$f_T = 21.9 \times 10^6 \left(\frac{1520}{273 + T} \right) \quad (6)$$

浮遊懸濁物質による音波の減衰は、吸収 α_1 と散乱 α_2 の二つの物理現象を考慮する必要がある。異なる形状の懸濁物質による音波の吸収は、式(7)に示す Urlick が求めた、粒子密度 $\rho_w(\text{gm}^3)$ と海水密度 $\rho_s(\text{gm}^3)$ および動粘性係数 $\nu_w(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ で表現される式を用いる¹⁹⁾。なお、右辺の対数で表される係数は nepers/m から dB/m に単位を変換するための定数である。

$$\alpha_1 = (10 \log e^2) \frac{Mk(\sigma - 1)^2}{2\rho_s} \left[\frac{s}{s^2 + (\sigma + \delta)^2} \right]$$

$$\sigma = \frac{\rho_s}{\rho_w}, \quad \delta = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{9}{(2\beta d)} \right] \quad (7)$$

$$s = \frac{9}{4\beta d} \left[1 + \frac{1}{\beta d} \right], \quad \beta = \left[\frac{kc}{s\nu_w} \right]$$

Hay らは各種形状の懸濁物質による音波の散乱を実験することで、正規化した粒子の散乱断面積 χ と粒径から粒子の散乱による音波の減衰量を式(8)のようにモデル化した²⁰⁾。本研究では懸濁物質による音響エネルギーの減衰量は、 $\alpha_s = \alpha_1 + \alpha_2$ と表されることから式(7)、(8)を用いてモデル化する。

$$\alpha_2 = (10 \log e^2) \frac{3M\chi^2}{4d\rho_s}$$

$$\chi = \frac{1.1(4/3)k_a x^4}{[1 + 1.3x^2 + (4/3)k_a x^4]} \quad (8)$$

$$x = kd, k_a = 0.18$$

音源付近における音圧は音源表面の要素からの寄与の総和として計測されるため、前述したような遠距離音場における指向性関数により表現することが出来ない。いわゆる Rayleigh 散乱領域と呼ばれる近距離音場における散乱強度は音源からの直接波と輪郭波の干渉効果により大きく変動し、実際の受信強度は球面拡散を想定したものより小さくなることが知られている。この影響は Downing らにより詳細に調べられており、実験的に求められた式(9)を用いることで、近距離音場における懸濁物質の散乱強度を補正することが可能となる²¹⁾。

$$\psi = \frac{1 + 1.35z + (2.5z)^{3.2}}{1.35z + (2.5z)^{3.2}} \quad (9)$$

$$z = \frac{r}{r_n} \quad r_n = \frac{\pi T r^2}{\tau}$$

3.2 海面反射の影響

ADCP を海底に設置し、海水中の散乱強度を計測する際には、サイドローブとメインローブにおける海面反射波の影響を受けることが考えられる。また、メインローブにおけるパルス長に相当する反射強度は、サイドローブに比べ大きいものである。しかしながら、その指向性は非常に高く、海面に斜めに入射し、トランスデューサーとは反対側に反射されることから、ADCP で計測される観測層において、表層の1部にしか影響を及ぼさないため、観測層における全体の強度としてはサイドローブによる反射波の影響と同程度であると考えられる。そこで、本研究ではサイドローブとメインローブによる影響は同程度であるとみなす。ADCP から放射された音波が海面反射により影響を及ぼす伝播過程を Fig.2 に示す。一般に ADCP では放射した音波が各水深において散乱され、トランスデューサーにおいて受信されるまでの時間から観測層の水深を算出する。そのため、同一層における散乱強度はトランスデューサーから音波が伝搬した距離の等しい位置における散乱強度を計測していることになる。すなわち、海面反射波による影響を受ける領域とは、放射音波の片側のサイドローブが海面に到達してから、メインローブが海面に到達するまでの時間ともいえる、その領域は、波高 h 、角振動数 ω 、波数 k の正弦波の波が海面にあるとき Fig.2 で示すグレーの領域となる。この領域の水深方向の割合を β 、ADCP による計測値の中で海面反射による信号値を Es とすると、ADCP の信号値には、海面からの影響の鉛直分布 βEs が含まれるため、その分を除去する必要がある。ここで I_{max} と Es は、音波の伝搬過程を式(4)と同様に考えることで、式(10)のような関係式が得られる。なお、 r' はセンサーからの

距離ではなく、音波が伝搬した距離を表したのものであり、海面までの伝搬距離に反射距離を足し合わせた値である。

$$I_{max} = 0.1 \times \{KcEs + 2r'\alpha + 20 \log r'\} - 2 \log k_u$$

$$k_u = R_v T \frac{0.96 P_0 r_0}{k T_r} \left\{ \frac{\pi c}{4} \right\} \quad (10)$$

また、水深方向の割合 β は、メインローブが海面に到達するまでの距離 R_l とサイドローブが海面に到達するまでの距離 R_0 の差分から式(11)のように求めることができるため、海面による反射による影響の鉛直分布は式(12)のようになる。

$$\beta = \begin{cases} \int_0^{2\pi} \{R_l(Z, h, x, t) - R_0(Z, h, x, t)\} \cos \theta dt & (R_l > R_0) \\ 0 & (R_l \leq R_0) \end{cases}$$

$$R_0 = \frac{Z + h + h \sin(\omega t - kx)}{\cos \gamma - \sin \gamma \tan \tau}$$

$$R_l = \frac{Z + h + h \sin(\omega t - kx)}{\cos \theta - \sin \theta \tan \tau} \quad (11)$$

$$I_s = \beta(Z, h, x, t) I_{max} \quad (12)$$

ここで R_l の値は Fig.3 に示すように幾何学的に求めることができ、 θ はトランスデューサーから放射される音波のメインローブの法線に対する入射角を、 τ は海面勾配を表している。また R_0 も同様に求めることができる。

Fig.3 Schematic of main-lobe range.

Fig.2 Schematic representation of backscattering from sea surface

以上より、海水中における ADCP から放射された音波が懸濁物質による散乱の影響を受けてトランスデューサーにより受信されるまでの海面反射の影響を除いた音響伝搬式は、式(4)より海面の影響 βEs を除いた式(13)で表される。またこの βEs に式(10)、(12)を代入することで式(14)のように表現することが可能となる。

$$\log M = 0.1 \times \{Kc(E - \beta Es - Er) + 2r\alpha + 20 \log \psi r\} - 2 \log k_s k_t \quad (13)$$

$$\log M = 0.1 \times \{Kc(E - Er) + 2r\alpha + 20 \log \psi r - \beta(I_{\max} - 2r'\alpha - 20 \log r')\} - 2 \log k_s k_t - 2\beta \log k_u \quad (14)$$

3.3 音響伝搬モデルの解法

横山らや川西らは、キャリブレーション時や計測後に、式(4)中の未知数、 k_s 、 k_t 、および係数 0.1 を変数とし、濁度計による計測値との最適化手法等を用いて、これらのパラメータを決定し、定数として扱うことで濁度の鉛直分布を ADCP により計測してきた。しかし、 k_s は懸濁物質の物理的特性を、また k_t はセンサー感度や電力量などの計測機器自体の特性を表しているパラメータであり、荒天時や埋立浚渫工実施時に発生する、イベント発生時における計測環境の急激な変化が予想される際にはこれらのパラメータは大きく変動するため、定数として与えることは合理的でない。そこで、ADCP と同時に光学式濁度計を用いることで、これらのパラメータを考慮せずに ADCP の散乱強度から濁度の鉛直分布を計測できる計測手法を提案する。ADCP は、水深方向の多層における懸濁物質による散乱強度を計測できるため、計測時における水深方向に懸濁物質の粒径分布や特性が一定であると仮定すると、任意の観測層 n における散乱強度と懸濁物質の関係式は、式(15)のようになり、各層ごとの偏差は式(16)のような簡単な漸化式で表現することができる。この式は音波伝搬過程における散乱強度の伝搬方向距離に対する微分方程式を離散的に表現したものであり、計測環境により変動するパラメータは時間変動するものの、空間方向 r については一定であるため消去される。空間方向の差分で表現すれば、いずれかの観測層における濁度を光学式濁度計により計測し、初期値として扱うことで、漸次的に各観測層における濁度をもとめることが可能となることわかる。

$$\log M_n = 0.1 \{Kc(E_n - Er) + 2r_n \alpha_n + 20 \log \psi_n r_n - SL_n\} - 2 \log k_s k_t - 2\beta \log k_u \quad (15)$$

$$SL_n = \beta_n (I_{\max} - 2r'_n \alpha_n - 20 \log r'_n)$$

$$\log M_{n+1} = 0.1 \{Kc(E_{n+1} - E_n) + 2(r_{n+1} \alpha_{n+1} - r_n \alpha_n) + 20 \log \frac{\psi_{n+1} r_{n+1}}{\psi_n r_n} - (SL_{n+1} + SL_n)\} + \log M_n \quad (16)$$

4. 現地実験結果および考察

本研究では、Fig.4 に示すように大阪湾最奥部に位置し垂直護岸で囲まれた極めて閉鎖性の強い海域である兵庫県尼崎港で実験を行った。港内には人工干潟や閉鎖性干潟、浮体式藻場等の水質浄化を目的とした実験施設が施工されているものの下水処理場の排水を通じて陸域からは負荷が流入し続け、水質・底質が著しく悪化している。このため多様な有機態、無機態の懸濁物質が存在すると想定される海域である。計測は、Fig.5 に示すように港内南西部に位置する人工干潟から 5m 程南東に離れた地点において、2006 年 6 月 12 日 11 時から 13 日 16 時までの大潮時に実施した。計測地点は満潮時で水深が 3m、干潮時は 1.8m 程度と浅い海域である。本計測において用いた超音波流速計は RD Instruments 社製 Broad Band Work Horse ADCP sentinel 周波数 1200kHz を、光学式濁度計にはアレック電子社製の Compact-CLW を用いた。ADCP より得られる濁度の鉛直分布、および本研究で開発した表層付近における音響伝搬モデルの検証のため、アレック電子社製の Compact-CTD により計測地点付近における濁度の鉛直分布を計測した。また、ADCP と濁度計の設置は Fig.5 に示すように ADCP を海底上向きに設置し、その立ち上げロープに濁度計を海面下 1 m の位置に係留することで、ADCP と濁度計ともに 10 分間隔で計測した。ADCP は筐体高さおよびファーストブランクと呼ばれるセンサー近傍における不観測領域があるため、底上 83cm より海面まで計測し、計測層厚は 0.1m 間隔で計測した。

Fig.4 Location of the observation field in Osaka bay.

Fig.5 Schematic view of observation field.

本研究で用いた海面近傍における音響伝搬モデルの妥当性を検証した。ADCPのトランスデューサーから表層付近までの伝搬距離 r と減衰係数を求め、濁度の鉛直分布計測値(M_n)とADCPで得られた散乱強度(E_n)を用いることで式(16)から海面反射強度 SL_n を求める。 SL_n を正規化することで式(15)の反射強度の鉛直分布比である β を実験より求め、式(11)と比較した。実験時における波浪は、湾内ということもあり、極めて穏やかであり、波高0.1m程度の中で、ADCPの観測水深が1m時(水深1.8m)に3回、2m時に1回の計4回実施した。反射強度の影響が最大となる水面下0.1mの値をTable 1に、その最大値により正規化した反射強度の鉛直分布比を、水深1m, 2mの2ケースについてFig.6に示した。なお、ADCPのトランスデューサーの放射角は 20° であることから、 $\theta=20^\circ$ 、 $\gamma=0^\circ$ とし、波浪の波数($k=3.23\text{m}^{-1}$)は観測した周波数(0.5Hz程度)から、微小振幅波理論における分散関係式より算出した。いずれのケースにおいても反射強度の鉛直分布関数 β が反射波の影響を十分に表現できていることが確認できた。また、Table 1からもわかるように反射強度の最大値はほぼ一定であり、これらの平均値(0.7dB)からの最大誤差(0.04dB)を濁度に換算しても1度に満たないことから、最大反射強度を0.7dBとした。

Fig.6 Backscattering intensity from sea surface measured by ADCP and estimated by present model (β).

Table 1 Maximum values of intensity (dB) at depth of 0.1m.

I_{max}
0.74
0.75
0.66
0.66
Average: 0.70

以上より式(16)で示される音響伝搬モデルを用いることで、ADCPの散乱強度から濁度の鉛直分布を求めた。その結果をFig.7に示す。計測期間を通して濁度は1~7ppm前後であり、12日、13日の14時前後の低潮時において、海面付近に比較的高い水塊が観測された。

Fig.7 Result of turbidity-depth profiles at the observation field.

ADCPにより濁度の鉛直分布を十分に計測できているか確認するため、CTD計により計測した濁度の鉛直分布と比較したものをFig.8に示す。顕著な濁度の鉛直変化は見られないものの、いずれの計測値も0~5ppmで推移しており、海面反射による影響も精度良く計測できている結果が得られた。また、横山らにより提案されているモデルと比較した結果をFig.9に示す。前述したように横山らのモデルには計測環境の影響を受ける定数があり、本計測海域とは計測環境が異なるため、濁度のレベルが大きく異なる結果となった。また、本手法では海水や懸濁物質による影響等を詳細に考慮したモデルを用いたため、精度良く濁度の鉛直分布を推定できたと考えられる。

本計測手法によりADCPにより計測された濁度と光学式濁度計との相関を示したものをFig.10に示す。相関係数は0.87、回帰式の勾配は0.97であり光学式濁度計と非常に高い相関を示した。

Fig.8 Depth profiles of turbidity measured by ADCP and optical-turbidity meter.

Fig.9 Comparison between estimated results of the present method and Yokoyama method.

Fig.10 Correlation of turbidities measured by optical turbidity meter and ADCP.

5. 結言

本研究では、音波の海表面における散乱過程を物理モデルで表現することで音響伝搬モデルを構築した。また、ADCPと光学式濁度計から得られる計測値を統合的に用いることで、海水中の浮遊懸濁物質の濃度分布を計測する手法を提案した。また、実海域において本計測手法を適用することにより、海水中の懸濁物質濃度の鉛直分布を計測することで、その有効性を示した。

本手法は、懸濁物質の散乱強度を ADCP により流速と同時に計測するため、海水中の濁度の鉛直分布のみならず、その動態を非接触で計測、把握することが可能となり、濁りのモニタリングには極めて有効な手法である。

参考文献

- 1) 山本浩一, 二村貴幸, 坂野章, 日下部隆昭, 末次忠司, 横山勝英: 濁度計による懸濁態栄養塩負荷推定に関する研究, 河川技術論文集, 第9巻, 2003, pp. 515—520
- 2) 横山勝英, 宇野誠高, 森下和志, 河野史郎: 超音波流速計による浮遊土砂移動量の推定方法, 海岸工学論文集, 第49巻, 2002, pp. 1486-1490
- 3) 横山勝英, 藤田光一: 多摩川感潮域の土砂動態に関する研究, 水工学論文集, 第45巻, 2001, pp. 937-942
- 4) 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, pp.203-210
- 5) P. D. Thorne, P. J. Hardcastle and R. L. Soulsby, “Analysis of acoustic measurements of suspended sediments”, Journal of Geophysical Research, 98C1, 1993, pp. 899-910
- 6) P. D. Thorne, S. Sun, J. Zhang, I. Bjorno and T. Mazoyer, “Measurements and analysis of acoustic backscattering by elastic cubes and irregular polyhedra”, Journal of the Acoustic Society of America, 102(5)(Pt. 1), 1997, pp. 2705-2713
- 7) A. E. Hay and J. Sheng, “Vertical profiles of suspended sand concentration and size from multifrequency acoustic backscatter”, Journal of Geophysical Research, 97C10, 1992, pp. 15661-15677
- 8) A. E. Hay and D. Wilson, “Rotary sidescan images of nearshore bedform evolution during a storm”, Marine

- Geology, 119, 1994, pp. 57-65
- 9) C. E. Vincent, S. W. Marsh, M. P. Webb and P. D. Osborne, "Spatial and temporal structures of suspension and transport over megaripples on the shore face", *Journal of Geophysical Research*, 104C5, 1999, pp. 11215-11224
- 10) P. D. Thorne and D. M. Hanes, "A review of acoustic measurement of small-scale sediments processes", *Continental Shelf Research*, 22, 2002, pp. 603-632
- 11) A. Souza, L. Alvarez, T. Dickey, "Tidally induced turbulence and suspended sediment", *Geophysical Research Letters* 31, 20, 2004, pp. L20309 1-5
- 12) 橘田隆史, 岡田将治, 新井励, 下田力, 熊田康邦: ADCPを用いた河川流況計測法における課題と国内外における応用観測事例, *河川技術論文集*, 第12巻, 2006, pp. 133-138
- 13) R. P. Chapman and J. H. Harris, "Surface backscattering strengths measured with explosive sound sources", *Journal of Acoustic Society of America*, 34(10), 1962, pp. 1592-1597
- 14) M. Shulkin and R. Schaffer, "Backscattering of sound from the sea surface", *Journal of Acoustic Society of America*, 36, 1964, 1699-1708
- 15) A. E. Hay, "Sound scattering from a particle-laden turbulent jet", *Journal of Acoustic Society of America*, 90, 1991, pp. 2055-2074
- 16) RDI, "Calculating absolute backscatter in narrow band ADCPs", Filed service technical paper 003, 1998, pp. 1-24
- 17) M. Schulkin and H. W. Marsh, "Sound absorption in sea water", *Journal of Acoustic Society of America*, 34, 1962, pp. 864-865
- 18) L. N. Liebermann, "Origin of sound absorption in water and in sea water", *Journal of Acoustic Society of America*, 20, 1948, pp. 868-873
- 19) R. J. Urlick, "The absorption of sound in suspensions of irregular particles", *Journal of Acoustic Society of America*, 20(3), 1948, pp. 283-289
- 20) A. S. Schaafsma and A. E. Hay, "Attenuation in suspensions of irregularly shaped sediment particles: a two-parameter equivalent spherical scatter model", *Journal of Acoustic Society of America*, 102(3), 1997, pp. 1485-1502
- 21) A. Downing, P. D. Thorne and C. E. Vincent, "Backscattering from a suspension in the nearfield of a piston transducer", *Journal of Acoustic Society of America*, 97, 1995, pp. 1614-1620
-