

# 秋季の広島湾北部域における音響散乱と 底層濁度の変動特性

川西 澄<sup>1</sup>・水野博史<sup>2</sup>・高杉由夫<sup>3</sup>・内田卓志<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 広島大学大学院助教授 工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

<sup>2</sup>学生員 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

<sup>3</sup>農博 産業技術総合研究所グループ長 海洋動態モニタリング研究グループ (〒737-0197 呉市広末広 2-2-2)

<sup>4</sup>理博 瀬戸内海区水産研究所室長 生産環境研究室 (〒739-0400 広島県佐伯郡大野町丸石 2-17-5)

周波数 1.5 MHz の超音波ドップラー分布計 (ADP) を用いて、広島湾北部域における音響散乱体と流速の変動特性を観測した。水平流速の変動は半日周期に支配されているにもかかわらず、ADP の後方散乱エネルギー (ABSE) には 1 日周期の変動が明瞭にみられる。表層の ABSE が夜間に増加することから、ABSE の日周期変動は動物プランクトンによって引き起こされていると考えられる。底層の ABSE は、懸濁粒子重量濃度と高い相関を示すとともに、その時間変動は、散乱光式濁度計で測定された濁度の変動と良く一致している。底層では、ABSE の最大は大潮の満潮時に起こり、さらに、ABSE のトレンドは潮差と同じ 2 週間周期の変動を示す。このトレンドは絶対流速と残差流により良好に説明される。

**Key Words:** *suspended particulate matter, zooplankton, acoustic Doppler profiler, acoustic backscatter, turbidity, tidal estuary*

## 1. はじめに

沿岸海域には様々な浮遊・懸濁粒子 (生物, 非生物, 有機, 無機) が存在し, その動態を知ることは沿岸域における物質輸送・循環, 水質や生態系を考える上で重要である。沈降性の懸濁粒子は短期間で海底に堆積するものは少なく, 海底近くに集積し, 海底高濁度層と呼ばれる濁った層を形成していることが多い<sup>1), 2)</sup>。海底高濁度層を形成している懸濁粒子は有機物を多く含んでおり, 栄養塩の循環, 酸素酸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<sup>3)</sup>。長尾ほか<sup>4)</sup> や橋本ほか<sup>5)</sup> は底層における酸素消費速度を連続して測定し, 底質の再懸濁によって, 酸素消費速度が非常に大きくなる可能性を示している。

超音波ドップラー流速分布計 (ADCP) は流速 3 成分の鉛直分布を測定できる優れた観測機器であるが, 流速と同時に得られる水中散乱体からの反射強度を利用して, 水中散乱体である懸濁粒子の分布が推定できることが知られている<sup>6)</sup>。一般に, 沿岸域における水中散乱体の空間分布は不均一性が強く, 時間的な変動も大きいので, 採水による間欠的な測定から海中に存在する散乱体の量を測定することは困難であると考えられる。特に, 対象が動物プランクトンのように大きな遊泳速度を持ち, 単位体積当りの数

が少ないものでは注意深い採水が必要とされる。また, 採水後の処理にも多大な労力を要し, ルーチン的に連続測定を行うことは困難である。こうしたことから, 海洋生物資源量の推定には魚群探知機を改良した計量魚群探知機が活用されることが多い<sup>7)</sup>。外洋では動物プランクトンの分布や鉛直移動が ADCP を使って測定されているが<sup>8)~11)</sup>, 沿岸域での測定例はほとんどない。これは, 沿岸域の散乱体の組成が複雑で多種多様な上, 小さなサイズのものが多いためであろう。最近, Zhu ほか<sup>12)</sup> は別府湾において, 動物プランクトンの日周鉛直運動や濁度を, 0.3 MHz の ADCP を用いて観測している。

散乱理論からわかるように, 超音波の後方散乱から浮遊・懸濁粒子の量を測定するには, 周波数の高い (波長の短い) 超音波を使用する方が有利である。Pieper と Holliday<sup>13)</sup> は南カリフォルニア沖で, 0.5 ~ 3 MHz の超音波を使って動物プランクトン量を測定した結果, 3 MHz の後方散乱が最も動物プランクトン量と相関が高く, 0.5 MHz では散乱が弱く, 低い相関しか得られないことを示している。富栄養化した内湾域におけるプランクトンは, 外洋域に比べて小型のものが多くと考えられ, 従来用いられてきた低周波数の ADCP では浮遊粒子の動態を十分捕らえられない可能性がある。本研究で使用したのは周波数 1.5 MHz の NORTEK 社製超音波ドップラー分布計

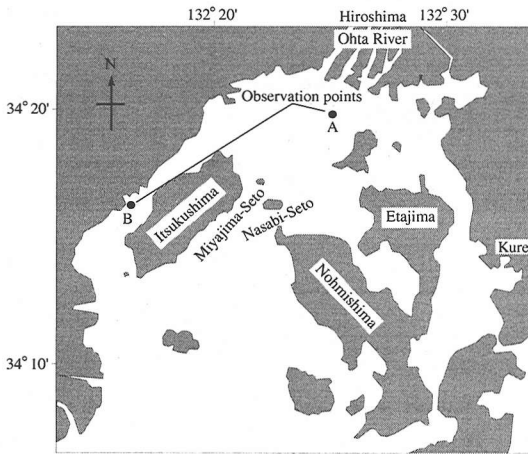


図-1 観測地点

(以下 ADP と呼ぶ) であり、鉱物粒子の場合、粒径が  $20\ \mu\text{m}$  以上であれば良好な感度で懸濁粒子を検出できる<sup>14)</sup>。

沿岸域は水深が小さく、また環境変動が大きいために、動物プランクトンの生態や行動も外洋とは異なる可能性がある。動物プランクトンをはじめとする水中散乱体の動態を明らかにするためには長期にわたる連続観測が不可欠であるが、そのような観測例はほとんどないため、沿岸・内湾域における動物プランクトン・懸濁粒子の動態には不明な点が多い。本論文では、1.5 MHz ADP の後方散乱を利用した懸濁粒子濃度の測定可能性を検討するとともに、13 日間連続的に測定された超音波散乱強度を解析して、河川水の影響が強い内湾である広島湾北部域の水中に浮遊している生物・非生物粒子の鉛直分布とその変動特性を議論する。

## 2. 方法

### (1) 底層の後方散乱エネルギーと懸濁粒子濃度

底層懸濁粒子濃度と超音波の後方散乱エネルギーの対応を調べるため、1997年12月24日12:00~25日14:00にかけて、広島湾北西部のB地点 ( $34^{\circ}16'21''\text{N}$ ,  $132^{\circ}16'9''\text{E}$ ) において、超音波の周波数が1.5 MHz、ビーム傾斜角  $25^{\circ}$  の NORTEK 社製 ADP を海底上に上向きに設置し、後方散乱強度を連続して測定した。測定層の厚さは0.5 m、データの平均時間は10分 (Ping 周波数 8.5 Hz) とした。後方散乱強度と同時に、ADP の第1測定層の位置である海底上1 mで、内径6 mm のビニールチューブに接続した手動ポンプを使って1時間間隔で採水、ろ過 (グラスファイバーフィルター、Whatman GF/F を使用) を行い、懸濁粒子の重量濃度を測定した。測定地点 (B) を図-1 に示す。平均水深は約7.5 mであった。

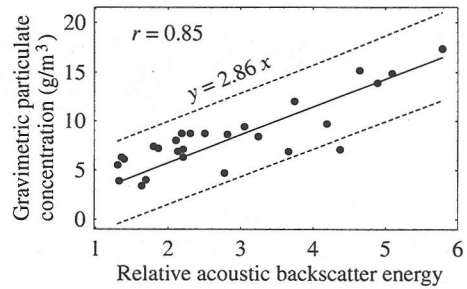


図-2 底層における後方散乱エネルギーと懸濁粒子濃度

### (2) 広島湾北部海域における ADP 連続観測

広島湾北部海域のA地点 ( $34^{\circ}19'49''\text{N}$ ,  $132^{\circ}24'56''\text{E}$ ) において、2000年9月19日12:15~10月2日0:15の間、流速と後方散乱強度の鉛直分布の連続観測を行った。観測地点の平均水深は約17 mである。上述したADPのセンサーヘッドは下向きにして、四隅に浮きを取り付けた矩形のアルミ製のフレームに取り付け、水平移動が最も少ない養殖カキ筏連の端の灯浮標筏に係留した。ADPのトランスデューサーの位置は海面下約0.5 mである。なお、長期にわたる連続測定が可能ないように、筏上に設置したソーラーシステムからADPの電力を供給した。ADPの測定層厚は0.5 m、平均時間は6分とし、データ記録間隔は25分とした。ADP観測と同時に、赤外散乱光度計<sup>15)</sup>を海底上2 mに設置して、底層濁度の連続測定を行った。

ADPを表層に設置したこともあって、センサーに激しい生物付着が起こったので、1週間に1度程度、清掃・点検を行ってデータを回収した。この時、塩分、水温、濁度、蛍光強度の鉛直分布を測定した。なお、表層水温は、ADPのセンサーヘッドに内蔵されている水温センサーで連続記録されている。

## 3. 結果および考察

### (1) 底層の後方散乱エネルギーと懸濁粒子濃度

B地点の底層で測定された、後方散乱エネルギーと懸濁粒子重量濃度の関係を図-2に示す。実線は最小2乗直線 (切片なし)、破線は95%の信頼限界を表している。なお、本論文ではデシベルで表した散乱強度は用いない。なぜなら、散乱強度 (dB) が散乱体の数密度に線形に比例する量ではないからである。ただし、トランスデューサーに固有なパラメータ値 (ソースレベル等) が不明なので、図-2に示した値は体積後方散乱係数に比例する散乱エネルギーを意味している。

測定値は散らばっているが、後方散乱エネルギーと懸濁粒子重量濃度の間には比例関係が認められる (両者の相関係数は0.85)。一般に、沿岸域における懸

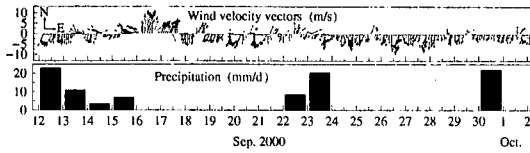


図-3 広島気象台の風と降水量の経時変化

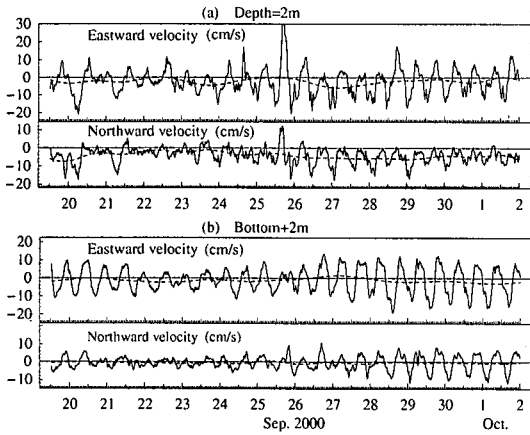


図-4 表層と底層における流速の経時変化

濁粒子濃度の時間、空間変動は大きく、ADPの測定領域と採水の領域が完全には一致していないことを考えると、ADP散乱エネルギーと懸濁粒子重量濃度の対応は良好であると判断される。比例定数は様々な要因で変化する可能性があるが、とりあえず以下の結果では、この観測で得られた比例定数を掛けた後方散乱エネルギー値(以下ABSEと呼ぶ)を用いることにする。

## (2) 広島湾北部海域におけるADP連続観測

### a) 気象、水質と流動の状況

広島気象台における風速ベクトルと降水量の時系列を図-3に示す。9月16日に10m/sを超える強い南風が吹いている。観測中は北北東の風が卓越しているが、一部では海陸風の存在も確認される。日降水量をみると、観測期間中としては22日に約10mm、23日と30日に約20mmの降雨がみられる。また、9月の総降水量は概ね年値並である。

図-4に表層(深さ2m)と底層(海底上2m)における流速の経時変化を示す。ただし、海底上2mの流速値は流速鉛直分布の線形内挿補間によって求めたものである。なお、海底近傍(ADPトランスデューサーから海底面までの距離の10%)はサイドローブ干渉のため測定不能であるので、図-6(c)に示す水深から、本観測期間全てにわたって測定できるのは海底上2mまでである。

海底の位置は後で述べるように、ADPの散乱強度から推算した。図中の破線は、潮汐成分を完全に除去するために、離散Wavelet変換を行って、周期約40

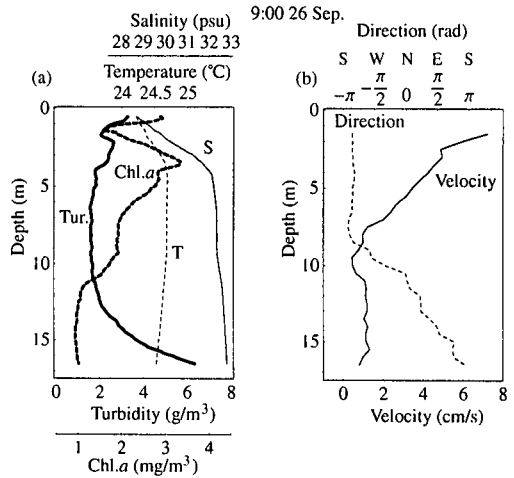


図-5 (a) 水質と(b) 残差流の鉛直分布

時間以下の変動成分をカットした後、逆変換して求めた残差成分の経時変化である。表層、底層とも半日周潮流が卓越しているが、表層の流速にはかなり不規則な変動がみられる。これは主に海上風の影響を受けているためであり、図-3の風速ベクトル経時変化と比べてみると、日周期の海陸風によって半日周潮流が乱されていることがわかる。残差流の流向流速は、風速変動などにより変動しているが、表層では概ね南下流となっている。

9月26日9:00における水質と残差流の鉛直分布を図-5に示す。上層の水質をみると、測定時には冷却期が始まっており、水温は表層の方が、最も水温が高い4m層より約0.5°C低くなっている。ただし、太田川からの淡水の影響で塩分が約3.5psu低くなっているため、安定成層状態は維持されている。濁度は深さ10m付近から海底に向かって上昇しており、海底高濁度層が存在していることがわかる。Chl.aの値は低く、植物プランクトン量は少ない。

図-5(b)に示すように、残差流速は表層で大きく、約8cm/sの南下流となっている。表層から中層にかけて残差流速は直線的に減少しているが、中層以深の流速変化は小さく、1cm/s程度の値を示している。残差流の流向は表層から中層まではほぼ南向きであるが、中層から下では海底に向かって時計回りに回転している。

### b) 後方散乱エネルギー分布の経時変化

ADPのエコーレベルからノイズレベルを除き、伝播損失を補正<sup>6)</sup>した後方散乱エネルギーに、図-2の比例定数を掛けて求めたABSEの経時変化を図-6(a)(b)に示す。図-6(a)の下方にみられる強い散乱は海底からの反射を示しており、潮汐による水深変化を反映している。図-6(c)に、海底から反射する散乱エネルギーから求めた水深変化を広島港の潮位データ(第六海保)とともに示す。両者の対応は良好

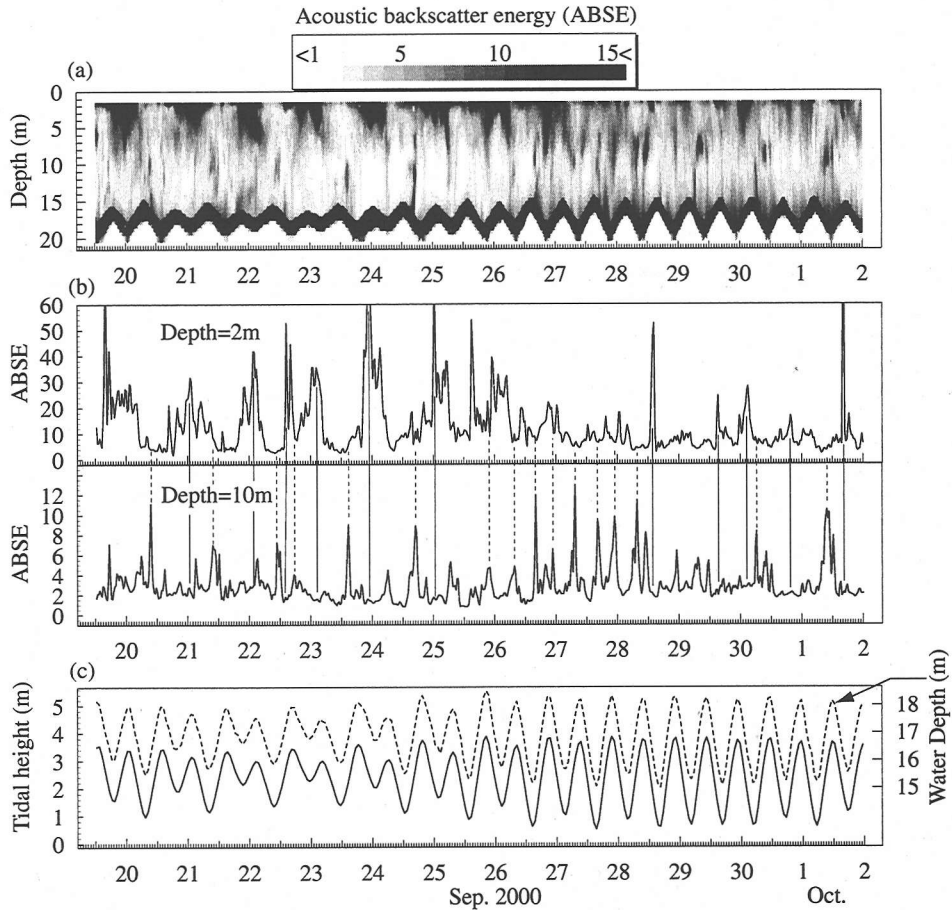


図-6 (a) 後方散乱エネルギー分布, (b) 表層と中層における ABSE, (c) 広島港の潮位 (実線) と推定水深 (破線) の経時変化

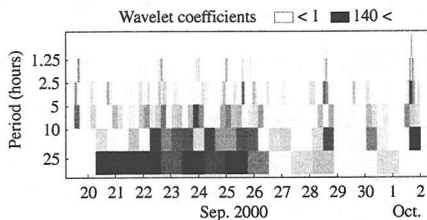


図-7 表層における ABSE の離散 Wavelet 係数

で、センサーヘッドの傾きが大きくなった一部の時間を除けば、水深の推定値に含まれる誤差は ±20 cm 以内に収まっていた。

後方散乱エネルギーの時空間変動は非常に大きく、数十倍の変化がみられる。表層の散乱エネルギーには、観測開始の9月19日から9月27日にかけて、昼間低く、夜に大きくなる日周期変動が明瞭にみられる。周期性を確認するために、深さ2mにおける散乱エネルギーの離散 Wavelet 係数を図-7に示す。9月26日までの期間、周期24時間付近の Wavelet 係数が大

きくなっており、日周期変動が確認される。さらに、半日周期に対応する離散 Wavelet 係数も比較的大きな値を示していることから、半日周潮流による移流の影響もみられる。

半日周潮流が卓越しているため、自己遊泳能力を持たない散乱体であれば、潮流による移流によって、散乱エネルギーは半日周期の変動が卓越すると考えられるが、上述したように散乱の強さが日周期で変化しているのは、夜間に出現する散乱体、恐らく動物プランクトンによるものであると考えられる。広島湾北部海域ではカイアシ類が優占し、特に、小型カイアシ類の *Oithona* 属 (体長0.5mm程度) が多く、非常に高い数密度 (夏季～秋季に最も多く、水柱平均で  $10^5$  indiv./ $m^3$ ) で出現することが報告されている<sup>16)</sup>。鉛直移動する生物粒子としては、鞭毛藻類の存在も考えられるが、動物プランクトンに比べてサイズが一桁以上小さいため、後方散乱断面積が非常に小さく、細胞数密度が相当高くならなければ、図-6(a)(b) のような大きな後方散乱エネルギー (ABSE)

表-1 底層懸濁粒子 (BSPM) と動物プランクトンの音響パラメーター

	BSPM (100 $\mu\text{m}$ )	zooplankton (500 $\mu\text{m}$ )
$\sigma_{bs}$ [ $\text{m}^2$ ]	$9.6 \times 10^{-11}$	$4.1 \times 10^{-9}$
$\sigma_{bs}/V_s$ [ $1/\text{m}$ ]	180	62
$\sigma_{bs}/(\rho_s V_s)$ [ $\text{m}^2/\text{g}$ ]	$1.6 \times 10^{-4}$	$5.8 \times 10^{-5}$

は得られない。さらに、鞭毛藻類は昼間表層に集積し、上述した ABSE の変動パターンと逆であることから、鞭毛藻類からの散乱を検出しているとは考えられない。また、図-5(a) に示したように、週 1 回行った蛍光強度測定からは高濃度の chl. *a* は検出されなかった。表層の強い散乱を引き起こしている散乱体が植物プランクトンである可能性は低い。気泡も音波の強い散乱源となるが、図-3 の風速ベクトル経時変化と比較するとわかるように、風速との相関はないので、表層にみられる強い散乱エネルギーが、砕波による気泡混入によるものとは考えられない。

図-6(b) に示す表層と中層における散乱エネルギーの経時変化をみると、表層で散乱が強い時、中層では散乱が弱くなり、その逆のパターンも起きていることがわかる。こうした表層と中層における散乱エネルギーの変動は、水深全体に散らばっている動物プランクトンが、夜間になると表層に集まる傾向を反映した可能性がある。図-6(a) には、表層にみられる 1 日周期の強散乱領域から下に伸びる一対の縦縞や海底に繋がっている縦線状のエコーがしばしば観察されるが、これらは動物プランクトンの鉛直移動を検出した結果である可能性が高い。

散乱体がすべて等しい後方散乱断面積を持つとすれば、散乱体の数密度と音響パラメータの間には次の関係が成り立つ<sup>7)</sup>。

$$s_v = \rho_v \sigma_{bs} \quad (1)$$

ここで、 $s_v$  = 体積後方散乱係数、 $\rho_v$  = 数密度、 $\sigma_{bs}$  = 後方散乱断面積である。ADP のエコーレベルから求めた後方散乱エネルギーは体積後方散乱係数と比例関係にあるので、式(1)から、散乱体の後方散乱断面積を知れば、後方散乱エネルギーから散乱体の量が求められる。プランクトンに対する後方散乱断面積は、周囲の海水に対して、密度と音速が異なる液体の扁長回転楕円体や球体でプランクトンをモデル化した、回転楕円体モデル<sup>17)</sup> やハイパスモデル<sup>18)</sup> などの散乱モデルを使って求められる。ハイパスモデルによる後方散乱断面積は

$$\sigma_{bs} = 4\pi a^2 d^2 \left[ \frac{2(ka)^4}{2 + 3(ka)^4} \right] \quad (2a)$$

$$d = \frac{1 - \rho_r c_r^2}{3\rho_r c_r^2} + \frac{1 - \rho_r}{1 + 2\rho_r} \quad (2b)$$

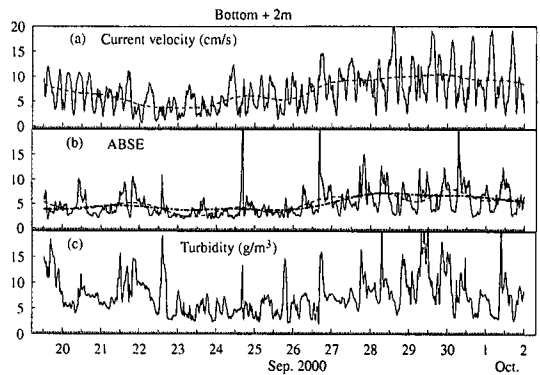


図-8 底層における (a) 絶対流速、(b) ABSE、(c) 濁度の経時変化

のように表される<sup>19)</sup>。ここに、 $a$  はプランクトンの体積と等価な球の半径、 $k = 2\pi/\lambda$  は波数、 $\rho_r$  と  $c_r$  はそれぞれ、プランクトンと海水の密度比と音速比である。式(2)からわかるように、プランクトンの長さ  $L$  と音波の波長の比  $L/\lambda$  が 1 より小さくなるにしたがって、 $\sigma_{bs}$  が急激に小さくなり、 $\sigma_{bs}$  の寸法依存性が増す。すなわち、 $L/\lambda \ll 1$  (Rayleigh 散乱領域) では  $\sigma_{bs} \propto a^2 (ka)^4$  となり、後方散乱断面積は半径の 6 乗に比例する。従って、波長に比べて小さすぎる粒子は散乱が弱く、検出不可能になる。富栄養化した内湾域では小型のプランクトンが多く、その測定には周波数の高い超音波を使う必要がある。ハイパスモデルはプランクトンだけでなく、懸濁粒子一般に対しても使えると考えられる。Thomas ほか<sup>20)</sup> によれば、砂粒子に対する散乱もハイパスモデルでうまく説明できる。式(1)から、散乱体の体積濃度  $c_v$  と重量濃度  $c_g$  についてはそれぞれ、

$$s_v = c_v \sigma_{bs} / V_s \quad (3)$$

$$s_v = c_g \sigma_{bs} / (\rho_s V_s) \quad (4)$$

の関係が成り立つ。ここに、 $V_s$  と  $\rho_s$  は散乱粒子の体積と密度である。

本論文で使用した周波数 1.5 MHz の超音波について、ハイパスモデルを使って求めた音響パラメータを示すと表-1 のようになる。ただし、底層懸濁粒子 (BSPM) 内部の音速は、Hamilton と Bachman<sup>21)</sup> による海底堆積物に関する結果から 1530 m/s を、密度は谷本らの大阪湾における沈降速度の現場測定結果<sup>22)</sup> にストークス則を適用して求めたものを仮定した。また、動物プランクトンについては、密度比と音速比  $\rho_r = 1.04$ 、 $c_r = 1.03$  を仮定した<sup>23)</sup>。表-1 の結果から、動物プランクトンが集まって、個体密度が  $10^6$  indiv./ $\text{m}^3$  程度になれば、体積後方散乱係数は濃度 25 g/ $\text{m}^3$  程度の底層懸濁粒子 (100  $\mu\text{m}$ ) の体積後方散乱係数に相当し、図-6(a)(b) に示したような大きさの散乱エネルギーが得られることになる。

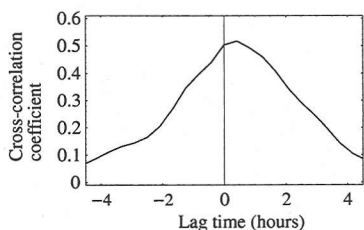


図-9 底層における ABSE と濁度の相互相関係数

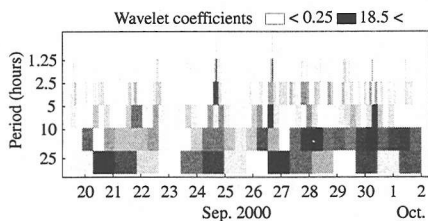


図-10 底層における ABSE の離散 Wavelet 係数

### c) 底層懸濁粒子濃度・ABSE の変動特性

図-8 に海底上 2m における流速の絶対値  $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ 、後方散乱エネルギー (ABSE)、赤外散乱光式濁度計による濁度の経時変化を示す。ただし、濁度計の設置位置は ADP の約 100m 東の海底上 2m である。図中の破線は離散 Wavelet 変換を行って、周期約 40 時間以下の変動成分をカットした後、逆変換して求めた長周期変動 (トレンド) の経時変化である。測定地点はやや離れているが、散乱エネルギーを濁度と比べてみると、両者の時間変動の様子は非常に良く似ていることがわかる。相互相関係数を求めた結果を図-9 に示す。相関係数が最大になるずらし時間は 23 分となっている。この ABSE に対する濁度の遅れが懸濁粒子の移流によるものと考え、移流速度は約 7cm/s となり、図-4(b) から予想される平均的な移流速度と一致する。以上のように、底層では動物プランクトンの量が表層にくらべて少ないため、ADP から得られる後方散乱エネルギーによって、濁度の挙動が把握できることがわかる。

図-10 に示した散乱エネルギー (ABSE) の Wavelet 係数からわかるように、半日周期の変動は観測後半の大潮期で大きく、半日周期潮流による移流の影響が現れている。一部の時間では 1 日周期の変動に対応する Wavelet 係数も比較的大きな値を示しており、動物プランクトンの日周期変動の影響もみられる。図-11 に ABSE と水深、流速の相互相関係数を示す ( $Cor_d$  は水深、 $Cor_u$  は東方向流速、 $Cor_v$  は北方向流速との相互相関係数)。この結果は、ABSE に対して潮位は 1 時間あまり遅れて、流速は 2 時間弱進んでいることを示している。すなわち、図-11 の結果は、満潮の少し前に ABSE が最大となることを意味している。これは、朱ほか<sup>15)</sup> が指摘しているように、広島湾北部海域の底層濁度の空間分布に、南西が高く

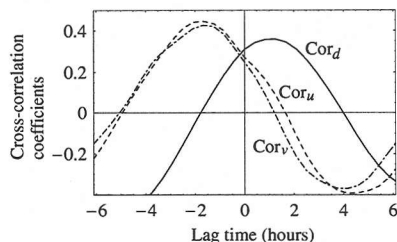


図-11 底層における ABSE と、水深、東方向流速、北方向流速の相互相関係数

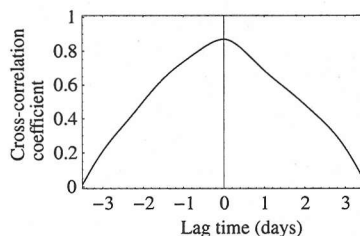


図-12 底層における ABSE のトレンドと絶対流速トレンドの相互相関係数

北東が低い濃度勾配が存在しており、図-4(b) と図-6(c) からわかるように、上げ潮流向が北東方向であるためと考えられる。

図-8(b) に破線で示した ABSE のトレンドの特徴は、朱ほか<sup>15)</sup> による濁度計を用いた底層濁度の観測結果と一致している。すなわち、底層散乱エネルギーのトレンドは、絶対流速のトレンドと同様な変化を示し、大潮小潮に対応して増減していることがわかる。従来の研究<sup>15), 24)</sup> で指摘されているように、海底付近の懸濁粒子は極めて浮上しやすく、弱い流れでも容易に上方へ輸送されると考えられる。

底層懸濁粒子の鉛直乱流フラックスの測定は難しく、その研究例はほとんどないが、川西と余越<sup>25)</sup> による太田川河口での測定では、懸濁粒子の鉛直乱流フラックスが発生する限界流速は極めて小さく、流速に比例して懸濁粒子の鉛直フラックスが増加する結果が示されている。ただし、懸濁粒子濃度の変化に対しては水平移流の影響が大きく、鉛直フラックスと濃度の間には相関はほとんど認められない。

朱ほか<sup>15)</sup> は底層濁度の長周期変動の位相が絶対流速のそれより 2~3 日進んでいると述べているが、底層散乱エネルギーと絶対流速のトレンド間の相互相関を示した図-12 をみると、両者の間に位相差はみられない。次に述べるように、底層濁度の長周期変動は絶対流速の他に、残差流の影響を受けるので、位相差についてははっきりした事が言えない。

次の移流拡散方程式から、懸濁粒子濃度の長周期変動 (トレンド)  $\hat{c}$  の説明を試みる。

$$\frac{\partial \hat{c}}{\partial t} + \hat{u} \frac{\partial \hat{c}}{\partial x} + \hat{v} \frac{\partial \hat{c}}{\partial y} = -\nabla \cdot \vec{F} + \beta \quad (5)$$

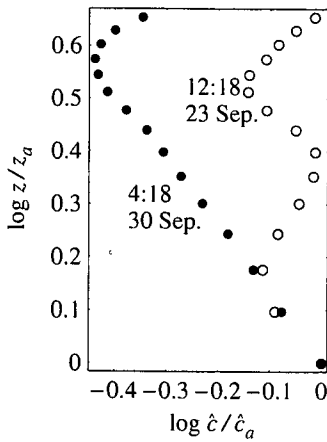


図-13 ABSEのトレンドの鉛直分布

ここに、 $\hat{u}$  は東向きに残差流速、 $\hat{v}$  は北向きの残差流速、 $\vec{F}$  は懸濁粒子の乱流フラックス、 $\beta$  は懸濁粒子の生成率である。 $\hat{c}$  の水平勾配と生成率を一定、乱流フラックスの収束 ( $-\vec{\nabla} \cdot \vec{F}$ ) を絶対流速  $V$  に比例すると仮定して (比例定数 =  $\alpha$ )、時間積分すると、

$$\hat{c} = -\frac{\partial \hat{c}}{\partial x} \int_0^t \hat{u} dt - \frac{\partial \hat{c}}{\partial y} \int_0^t \hat{v} dt + \alpha \int_0^t V dt + \beta t + c_0 \quad (6)$$

となる。式(6)をもとに、重回帰分析を行って求めたABSEの長周期変動を、図-8(b)中に太い一点鎖線で示す。重回帰分析の結果は観測されたトレンドとほぼ一致しており、決定係数として0.78が得られたことから、本観測地点では、絶対流速と残差流速から、底層濃度・ABSEの長周期変動の大部分を説明できることがわかる。

#### d) 海底高濁度層の挙動

図-5(b)に示したように、観測地点には海底高濁度層が存在している。海底高濁度層において、懸濁粒子濃度のトレンドが擬似定常状態にあり、鉛直分布に対する移流の影響を無視し、トレンドに関する鉛直乱流フラックスと、沈降フラックスがバランスしていると仮定すると、

$$\hat{A}_z \frac{\partial \hat{c}}{\partial z} = -w_s \hat{c} \quad (7)$$

ここに、 $w_s$  は懸濁粒子の沈降速度、 $\hat{A}_z$  は鉛直渦拡散係数のトレンドで、Plandtlの混合距離理論を仮定すると、定せん断層内では

$$\hat{A}_z = \kappa \hat{u}_* z \quad (8)$$

のように表される。 $\hat{u}_*$  は底面摩擦速度のトレンド、 $\kappa$  はカルマン定数で約0.4である。式(7)を  $z$  で積分すると、 $\hat{c}$  の鉛直分布は次式で表される。

$$\frac{\hat{c}}{\hat{c}_a} = \left(\frac{z}{a}\right)^{-w_s/\kappa \hat{u}_*} \quad (9)$$

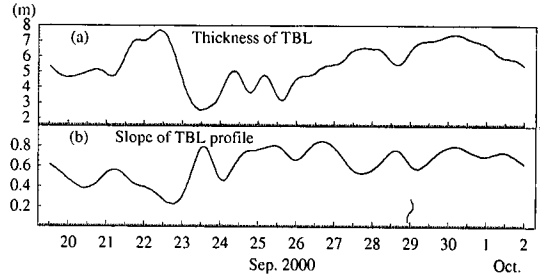


図-14 海底高濁度層の (a) 厚さと (b) 分布の傾きの経時変化

ここに、 $\hat{c}_a$  は海底からの高さ  $z_a$  における残差濃度である。従って、 $\hat{c}/\hat{c}_a$  と  $z/z_a$  の関係を両対数表示すれば、直線になる。

A, B 両地点とも同じ広島湾北部域に属し、水質環境が似ていることから、図-2に示したB地点におけるABSEと底層懸濁粒子濃度の対応関係は、A地点でも成立すると考えられる。さらに、図-8に示したようにABSEと濁度との対応も良好なので、ABSEを懸濁粒子濃度とみなし、図-13に大潮と小潮におけるABSEトレンドの鉛直分布の両対数プロットを示す。

両対数表示した鉛直分布には海底に向かって直線的に散乱エネルギーが増加する領域がみられ、懸濁粒子の鉛直乱流フラックスと沈降フラックスが支配的で、ほぼバランスしていることがわかる。この直線領域を海底高濁度層(TBL)とみなし、その厚さと傾きの経時変化を示すと図-14のようになる。高濁度層の厚さは2.5~7.5mの範囲で変化し、小潮時に最小となる。傾き ( $w_s/\kappa \hat{u}_*$ ) は0.3~0.8の範囲にある。

川西と余越<sup>25)</sup>は海底上25cmの高さで底面乱流境界層の観測を行い、 $u_* = 0.06V$  の関係を得ている。いま仮に  $\hat{u}_* = 0.3 \text{ cm/s}$ 、図-14(b)から  $w_s/\kappa \hat{u}_* = 0.7$  とすると、懸濁粒子の沈降速度  $w_s$  は  $0.084 \text{ cm/s}$  となる。谷本と星加<sup>22)</sup>、谷本と川名<sup>26)</sup>は瀬戸内海における懸濁粒子の沈降速度の現場測定を行い、粒径と沈降速度の関係を検討している。広島湾北部域と同様に河川水の影響が強い大阪湾の結果<sup>22)</sup>によれば、粒径  $100 \mu\text{m}$  の粒子の沈降速度は  $0.06 \sim 0.1 \text{ cm/s}$  であり、上記の値はこの範囲に入っている。

#### 4. おわりに

時空間的に大きく変動する懸濁粒子(生物・非生物)の動態を解明するために、高周波数のADPを使った連続測定は極めて有力な方法である。後方散乱エネルギーに顕著な日周期変動が存在したことから、表層の主要な散乱体が動物プランクトンであると推測されたが、今後、連続的に注意深い採水を行って、プランクトンの種類やサイズとともに個体密度をADP観測と同時に調査する予定である。一般に、内湾の懸濁粒子は多種多様で、後方散乱からその種



類を特定することは困難であろうが、気象やプランクトンの生態に関する情報とともに ADP データを蓄積し、散乱の強さ、散乱の鉛直分布形やその変動周期・パターン等を解析すれば、散乱体の種類の推定もある程度は可能になると思われる。さらに、複数の周波数の超音波を同時に用いれば、粒径分布も推定できる<sup>19)</sup>。なお、植物プランクトンの音響散乱については、研究例がなく、今後の課題である。

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 1.5 MHz の超音波を使用した ADP のエコーレベルに伝播損失補正を施して得られる後方散乱エネルギー (ABSE) によって、内湾における動物プランクトンの日周期変動・鉛直移動を捕らえることが可能である。また底層において、ABSE は懸濁粒子濃度・濁度と高い相関を持ち、ADP によって流速とともに底層濁度・海底高濁度層の時間変動を観測できる。
- 2) 底層における濁度・ABSE の時間変動には半日周潮流に対応した変動のほかに、大潮小潮に応じて増減する長周期変動が存在している。この長周期変動は、残差流による水平移流と、絶対流速に比例すると仮定した乱流フラックスの収束によって説明できる。

謝辞：広島湾北西部の観測にご協力頂いた瀬戸内海海区水産研究所「しらふじ丸」松田船長をはじめ、乗組員各位に深謝します。また、中国工業技術研究所橋本英資主任研究官と長尾正之（博士）には広島湾北部の観測にご協力頂いた。ここに謹んで謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) Kawana, K. and Tanimoto, T.: Turbid bottom water layer and bottom sediment in the Seto Inland Sea, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 40, pp. 175-183, 1984.
- 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) 長尾正之、橋本英資、朱小華、吉田みゆき、高杉由夫：広島湾における酸素消費量の連続測定、土木学会論文集、No. 663/II-53, pp. 109-117, 2000.
- 5) 橋本英資、朱小華、長尾正之、高杉由夫：広島湾の海洋構造に及ぼす風の影響、海と空、第 76 巻、第 3 号、pp. 9-15, 2000.
- 6) 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、pp. 203-210, 1998.
- 7) 飯田浩二：音響計測の現状と課題、月刊 海洋、第 26 巻、第 1 号、pp. 32-38, 1994.

- 8) Flagg, C. N. and Smith, S. L.: On the use of the acoustic Doppler current profiler to measure zooplankton abundance, *Deep-Sea Res.*, Vol. 36, No. 3, pp. 455-474, 1989.
- 9) Plueddemann, A. J. and Pinkel, R.: Characterization of the patterns of diel migration using a Doppler sonar, *Deep-Sea Res.*, Vol. 36, No. 4, pp. 509-530, 1989.
- 10) Fischer, J. and Visbeck, M.: Seasonal variation of the daily zooplankton migration in the Greenland Sea, *Deep-Sea Res.*, Vol. 40, No. 8, pp. 1547-1557, 1993.
- 11) Kaneko, A., Zhu, X. H. and Radenac, M. H.: Diurnal variability and its quantification of subsurface sound scatters in the western equatorial pacific, *J. Oceanogr.*, Vol. 52, pp. 655-674, 1996.
- 12) Zhu, X. H., Takasugi, Y., Nagao, M. and Hashimoto, E.: Diurnal cycle of sound scatters and measurements of turbidity using ADCP in Beppu Bay, *J. Oceanogr.*, Vol. 56, pp. 559-565, 2000.
- 13) Pieper, R. E. and Holliday, D. V.: Acoustic measurements of zooplankton distributions in the sea, *J. Cons. int. Explor. Mer.*, Vol. 41, pp. 226-238, 1984.
- 14) Huhta, C.: Monitoring sediment concentration with ADP and ADV, *SonTek Application Notes*, 1995.
- 15) 朱小華、高杉由夫、橋本英資、安田秀一：広島湾における底層懸濁物質の濃度変動、沿岸海洋研究、第 37 巻、第 1 号、pp. 59-67, 1999.
- 16) Uye, S., Ayaki, Y. and Onbe, T.: Seasonal geographical distribution of zooplankton in Hiroshima Bay and its adjacent waters, the inland sea of Japan, *J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, Vol. 31, pp. 99-119, 1992.
- 17) Furusawa, M.: Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength, *J. Acoust. Soc. Japan*, Vol. 9, No. 1, pp. 13-24, 1988.
- 18) Johnson, R. K.: Sound scattering from a fluid sphere revisited, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 61, pp. 375-377, 1977.
- 19) Greenlaw, C. F.: Acoustical estimation of zooplankton populations, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 24, pp. 226-242, 1979.
- 20) Thomas, L. C., Proni, J. R. and Craynock, J. F.: A simple model for the acoustic cross section of sand grains, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 76, No. 5, pp. 1580-1582, 1984.
- 21) Hamilton, E. L. and Bachman, R. T.: Sound velocity and related properties of marine sediments, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 72, No. 6, pp. 1891-1904, 1982.
- 22) 谷本照己、星加章：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、第 3 巻、第 1 号、pp. 13-20,



- 1994.
- 23) Furusawa, M., Miyanoana, Y., Ariji, M. and Sawada, Y.: Prediction of Krill target strength by liquid prolate spheroid model, *Fish. Sci.*, Vol. 60, No. 3, pp. 261-265, 1994.
- 24) Kawana, K., Tanimoto, T. and Ichiye, T.: Entrainment of bottom sediment in the Seto Inland Sea, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 42, pp. 381-388, 1986.
- 25) 川西 澄, 余越正一郎: 停滞性沿岸域における海底境界層の乱流特性と懸濁粒子の挙動, 海岸工学論文集, 第 45 卷, pp. 956-960, 1995.
- 26) 谷本照己, 川名吉一郎: 現場における懸濁粒子の沈降実験, 中国工業技術試験所報告, 第 18 号, pp. 1-8, 1982.

(2001.1.17 受付)

## VARIABILITY OF SOUND SCATTERS AND BOTTOM-LAYER TURBIDITY IN NORTHERN HIROSHIMA BAY IN AUTUM

Kiyosi KAWANISI, Hirofumi MIZUNO, Yoshio TAKASUGI and Takuji UCHIDA

An acoustic Doppler profiler operating at 1.5 MHz, has been used to observe the variability of sound scatters and velocity in the northern Hiroshima Bay. While the variability of horizontal velocity is dominated by the semi-diurnal tide, diurnal variation of the acoustic backscattered energy (ABSE) is evidence. Since ABSE near the water surface increases at night, the diurnal variability of ABSE is probably caused by zooplankton. The ABSE near the bed highly correlates with the gravimetric concentration of suspended particulate matter. Also, the variability is in good agreement with that of turbidity from an optical backscatter sensor. In the bottom boundary layer, the maximum ABSE occurs at the high water slack of spring tide. Moreover, it seems that the residual trend of ABSE shows the same fortnightly variation as tidal range. The trend of ABSE near the bed is well explained by the current speed and residual current.