

浅水感潮域における水中音響散乱体の変動特性

VARIABLE CHARACTERISTICS OF SOUND SCATTERS IN SHALLOW TIDAL ESTUARY

川西 澄¹・水野 博史²
Kiyosi KAWANISI, Hirofumi MIZUNO

¹ 正会員 工博 広島大学助教授 工学部第四類 (〒739-8527 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 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

A downward-looking acoustic Doppler current profiler (NORTEK's 1.5MHz ADP), suspended by floats and connected to an oyster raft, has been used to observe the variability of sound scatters in Hiroshima Bay. Several-days records of acoustic backscatter and three components of velocity have been obtained in summer 2000 at 34°18'37" N, 132°23'57" E in the north area of Hiroshima Bay. The acoustic backscattered energies (ABEs) change greatly during the observations. While the variability of horizontal velocity is dominated by the semi-diurnal tide, diurnal variations of ABE are evidence. Since ABEs increase at night, the diurnal variability of ABEs is probably caused by zooplankton. However, the daily vertical zooplankton migration is not clear. Analysis of the temporal variations of ABE show also the existence of semi-diurnal variations that are associated with tidal current. The zooplankton abundance during the neap tide is larger than that during the spring tides.

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

1. はじめに

沿岸海域にはさまざまな懸濁粒子(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の水質や生態系を考える上で重要である。海洋では海水中の生物の時空間分布や生態を連続的に観測する手段として, 魚群探知機で代表される水中音響リモートセンシングが極めて有効な方法として用いられている¹⁾。

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²⁾。散乱体の量と同時に流速(散乱体の移動速度)が測定できることには重要な意味がある。すなわち, 散乱体の量が変化したとき, それが移流によるものなのか増殖や捕食, 沈降などによるものなのか, 流速データが同時に得られていなければ判断できない。

一般に, 沿岸感潮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^{1), 3)}。

外洋では動物プランクトンの分布や移動速度がADCPを使って測定されているが⁴⁻⁷⁾, 沿岸感潮域での測定例はほとんどない。これは沿岸域の懸濁粒子の組成が複雑で, 多種多様であるためであろう。最近, 兼田ら⁸⁾は愛媛県南部の内海において, 外洋起源の冷水侵入によって引き起こされる動物プランクトンの日周鉛直運動を, ADCPを用いて観測している。

沿岸感潮域は水深が小さく, また環境変動が大きいため, 動物プランクトンの生態や行動も外洋とは異なっている可能性がある。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, 感潮域における動物プランクトンの動態には不明な点が多い。

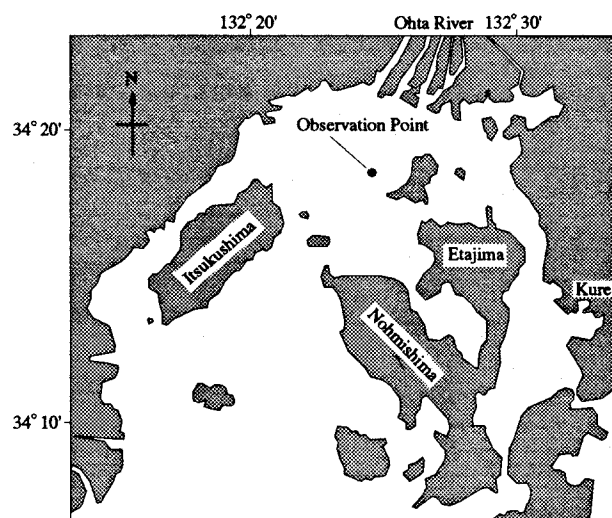


図-1 観測地点

本研究の目的は、水深約 18m の広島湾北部海域において行った数日間の連続観測から得られた ADCP の散乱強度を解析することによって、水中散乱体（動物プランクトン）の動態を明らかにすることである。

2. 方法

広島湾北部海域において、NORTEK 社製の超音波ドップラー流速分布計（以下 ADP と呼ぶ）による連続観測を行った（図-1）。観測地点（34°18'37" N, 132°23'57" E）の平均水深は約 18m、観測期間は 2000 年 7 月 18 日 12:00～7 月 22 日 12:00 と 9 月 2 日 12:00～9 月 11 日 12:00 である。

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 50cm である。なお、長期にわたる連続測定が可能のように、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 を表層に設置したこともあって、夏季の観測では、センサーに激しい生物付着が起こる。このため、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、蛍光光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。本来なら海底上に ADP を固定して計測するのが望ましいが、広島湾では底引き網漁が行われているため、長期にわたる海底設置は困難である。使用した ADP の周波数は 1.5 MHz、ビーム傾斜角 25° である。ビームが傾斜しているので、水平方向の空間分解能がセンサーからの距離によって 0.5～8m まで変化するが、約 30 分の移動平均を行っているため、空間分解能の差は問題にならないと思われる。

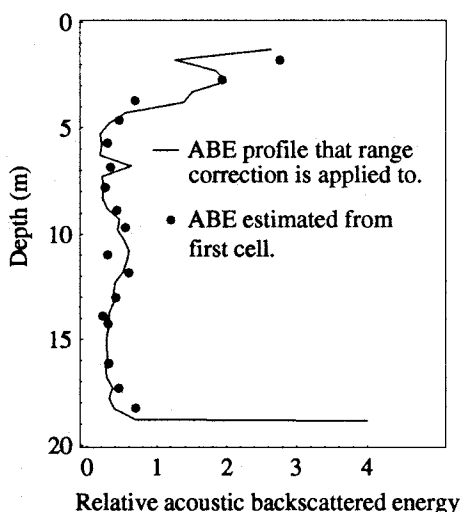


図-2 伝播損失を補正した後方散乱エネルギー (ABE) の鉛直分布

る。7 月と 9 月の観測の測定層厚と平均時間はそれぞれ、1.0m と 5 分、0.5m と 6 分である。データ記録間隔は 7 月の場合 30 分、9 月で 25 分とした。

3. 結果および考察

(1) 超音波の伝播損失の評価

海洋生物資源量を計測するための計量魚群探知機には、音波の距離減衰を正確に補正する回路が組み込まれており、散乱体の体積密度（単位体積当りの散乱体の数）に比例する体積後方散乱係数が計測される¹⁾。

同様な量を ADP で測定するためには、ADP で受信されるエコーレベルに正確な音波の伝播損失補正を施す必要がある。音波の拡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補正量 Rc は、

$$Rc = 20 \log r + 2\alpha r \quad (1)$$

のように表される^{2),4),7)}。ここで、 r = ADP 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。吸収率 α の値は、Francois and Garrison⁹⁾ の式によって求められるが、1.5 MHz 以上の高周波の場合、 α がいくらかになるのかよくわかっていない。川西ら²⁾ は広島湾における濁度との比較から、 $\alpha = 0.59 \text{ dBm}^{-1}$ を得ている。

実際に (1) 式でうまく補正されるのかどうかを確認するために、流動が弱く、散乱体の時間変動が小さいと考えられる江田島湾で、ADP センサーの鉛直位置を変えてエコーレベルの測定を行った。図-2 は $\alpha = 0.6 \text{ dBm}^{-1}$ として (1) 式の伝播損失補正を施した後方散乱（実線；ADP センサーを下向きにして表層から測定）と ADP センサーの深さを変えて測定した第 1 測定層の後方散乱（黒丸）を比較したものである。両者の一致は良好であり、海水による音波の

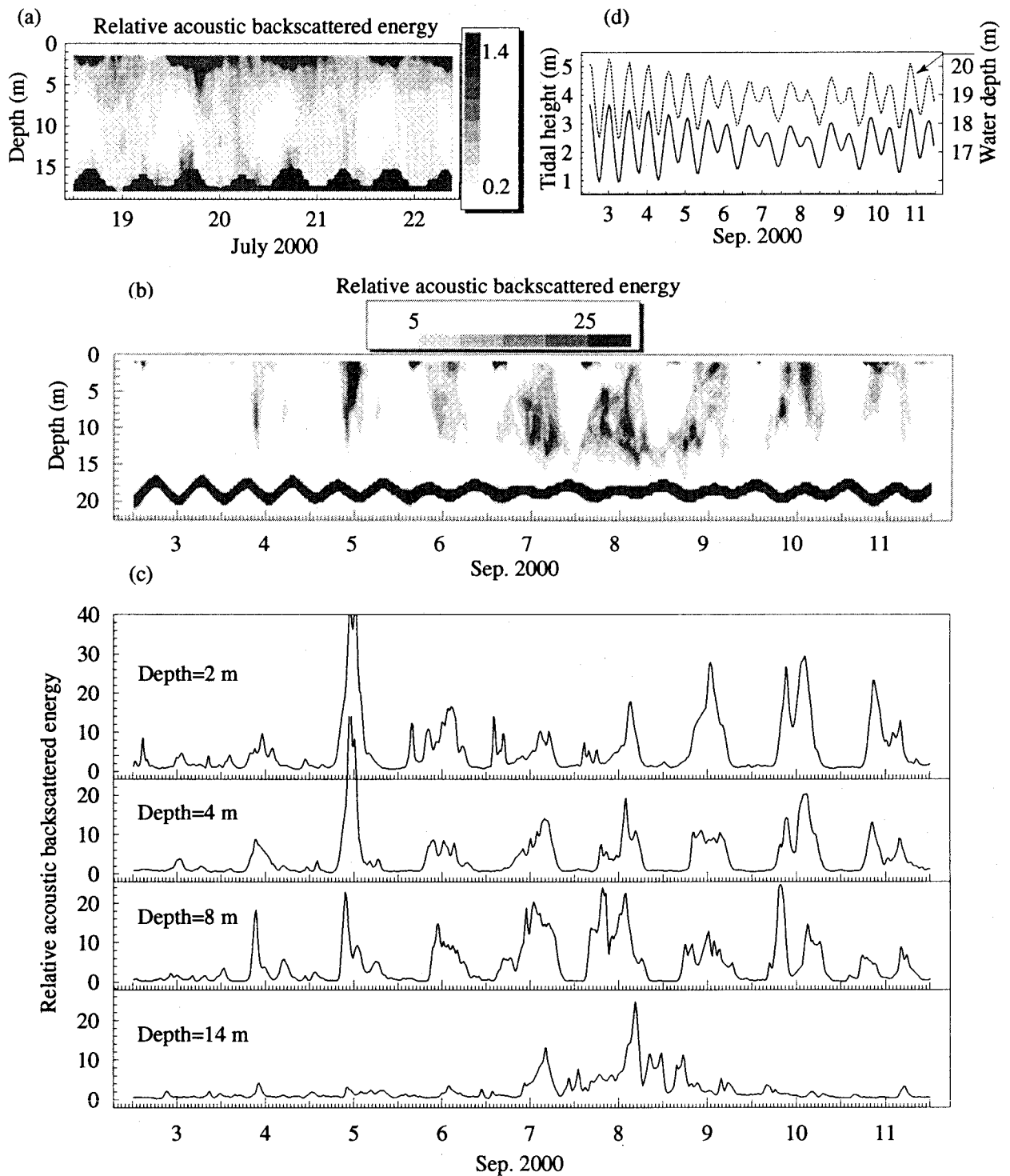


図-3 後方散乱エネルギー分布の経時変化 ((d) 9月の広島港の潮位(実線)と推定水深(破線)の経時変化)

吸収率 α を約 0.6 dBm^{-1} とした (1) 式を用いて伝播損失の補正が可能であることがわかる。深さ 1.5 m では両者の対応が悪いが、これは測定中に散乱体の量が大きく変化したためと考えられる。

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) が散乱体の体積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、本論文で示した値は相対的な散

乱エネルギーを意味している。

(2) 後方散乱エネルギーの変動特性

ADPのエコーレベルからノイズレベルを除き、(1) 式で表される伝播損失を補正した後方散乱エネルギー分布の経時変化を図-3(a)-(c)に示す。散乱体がすべて等しい後方散乱断面積を持つとすれば、散乱体の体積密度と音響パラメータの間には次の関係が成り立つ¹⁾。

$$s_v = \rho_v \sigma_{bs} \quad (2)$$

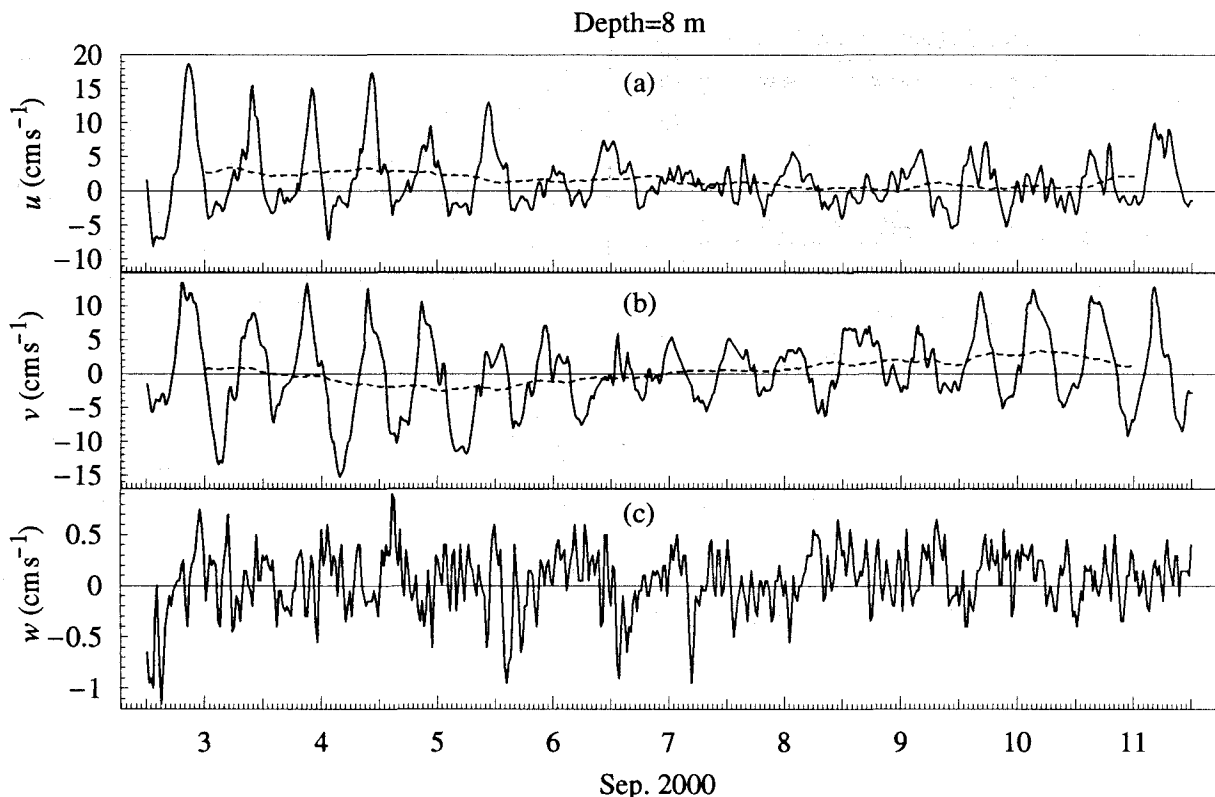


図-4 中層における流速の経時変化

ここで、 s_v = 体積後方散乱係数、 ρ_v = 体積密度、 σ_{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、(2)式から、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（体積密度）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¹⁰⁾やハイパスモデル¹¹⁾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

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

$$d = \frac{1 - \rho_r c_r^2}{3\rho_r c_r^2} + \frac{1 - \rho_r}{1 + 2\rho_r} \quad (4)$$

のように表される。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、 ρ_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。(3)式からわかるように、プランクトンの長さと言波の波長の比 L/λ が1より小さくなるにしたがって、 σ_{bs} が急激に小さくなり、 σ_{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。一方、 $L/\lambda > 1$ の場合、長い体をもつプランクトンではその姿勢によって後方散乱断面積 σ_{bs} が大きく変化する¹⁰⁾。そこで、 $L/\lambda \approx 1$ の

関係を満足する周波数を用いるのが散乱体の体積密度を推定するのに最適であると考えられている¹⁰⁾。本論文で使用したADPの周波数は1.5MHzなので、 $\lambda = 1\text{ mm}$ である。

図-3からわかるように、後方散乱エネルギーの時空間変動は非常に大きく、その変動幅は2桁にも及んでいる。ただし、図-3(a),(b)の下方にみられる強い散乱は海底からの反射で、潮汐による水深変化を反映している。9月の海底付近の散乱エネルギーから推算した水深変化と広島港の潮位データの比較を図-3(d)に示す。両者の対応は良好で、水深の推定値に含まれる誤差は $\pm 15\text{ cm}$ 以内に収まっていた。図-3(a)に示した7月の観測結果を見ると、昼間は過去の観測結果²⁾と同様、中層で最も散乱が弱くなっているが、夜間は中層での値が増加し、昼間にくらべて一様な鉛直分布となっている。このように中層における散乱体の体積密度には昼間低く、夜高くなる日周期変動が存在していることがわかる。また、表層には間欠的に強い散乱が見られる。

9月の散乱エネルギー図-3(b),(c)の最大値は7月のその20倍以上の大きさを示している。7月の中層と同様、4日以降の後方散乱エネルギーには昼間低く、夜に大きくなる日周期変動が明瞭にみられる。ただし、底層では散乱が弱く、周期的な変動はみられない。表層には7月と同様、間欠的に強い散乱がみられるが、広島気象台の風速データとの相関はなく、特別強い風が吹いたこともなかったので、表層

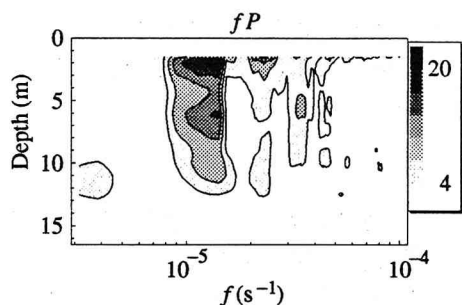


図-5 後方散乱エネルギーの時間変動のスペクトル

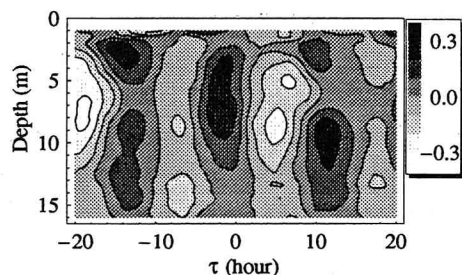


図-6 後方散乱エネルギーと南北方向流速変動の相互相関係数

にみられる強い散乱が波浪の碎波による気泡混入によるものとは考えられない。また、鉛直移動する渦鞭毛藻は、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、細胞密度が相当高くならなければ、図-3(b),(c)のような大きな後方散乱エネルギーは得られない。広島水試による有害プランクトン調査結果によれば、7月21日に深さ5mで180 cells/mlの *Gymnodinium miki-motoi* が観測されているものの、9月の調査では検出されていない。従って、表層の強い散乱は、動物プランクトンまたは大型の珪藻により引き起こされている可能性が考えられるが、週一回行った蛍光光度測定からは高濃度の chl-a は検出されなかったため、植物プランクトンの可能性は低い。

図-4は中層における流速成分 (a) 東西 u , (b) 南北 v , (c) 鉛直方向 w の経時変化を示したもので、東方向、北方向、鉛直上向きを正としてある。破線で示したのは25時間の移動平均値(残差流)である。図-4に示すように、半日周潮流が卓越しているので、潮流による散乱体の移流によって、散乱エネルギーは半日周期の変動を示すと考えられる。事実、底層濁度などは半日周期の変動を示ことが報告されている¹²⁾。それにもかかわらず、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すなわち、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、非常に高い密度(夏季に最も多く、水柱平均で 10^5 indiv./m³)で出現することが報告されている¹³⁾。

小潮期の9月7日～9日は動物プランクトンの出

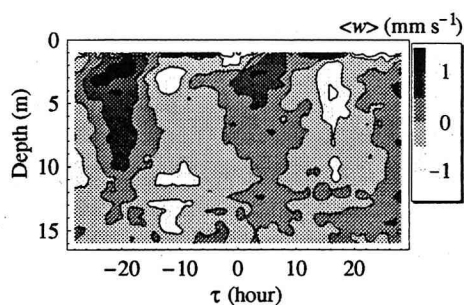


図-7 鉛直速度の条件付き平均値

現している時間が長く、下層では昼間でも強い散乱がみられる。小潮期にプランクトンが活発に増殖しているようにもみえる。さらに長期にわたるデータをみないとはっきりした事は言えないが、動物プランクトンの体積密度が潮流の強さに関係している可能性がある。

図-5は後方散乱エネルギー変動のスペクトルを示したものである。予想どおり、底層以外では1日周期のところに強いピークが見られるが、さらに半日周期のところにもピークが確認される。スペクトルピークの大きさは上層で大きくなっている。下層では図-3(c)からもわかるように、変動の周期性は弱い。

図-4(b)に示した南北方向の流速と図-3(c)の散乱エネルギー経時変化を比べてみると、上げ潮($v > 0$)で散乱が強くなり、下げ潮($v < 0$)で弱くなる傾向がみられる。そこで、後方散乱エネルギー変動 ABE' と南北方向の流速変動 v' の相互相関係数

$$\frac{1}{\sigma_{ABE} \sigma_v} \int_0^T ABE'(t, z) v'(t + \tau, z) dt \quad (5)$$

を求めてみた(図-6)。ここに、 T はデータ長、 z は深さ、 σ_{ABE} と σ_v はそれぞれ、 ABE' と v' の標準偏差である。昼間は散乱体の量が少なく、潮流との相関が小さいため、相互相関係数の値は大きくないが、 ABE が最大、最小になる約2時間前に、 v が最大、最小になっていること、すなわち、満潮と干潮時の少し前に動物プランクトンの体積密度が極大と極小を示すことが確認できる。このことから、観測地点の南側のほうが北側より動物プランクトンの量が多い可能性が考えられる。

残差流の南北方向成分を見ると、小潮の前後で南向きから北向きに变化している。したがって、残差流により、高密度の動物プランクトンが観測地点に運ばれてきたために、小潮期にプランクトン量が増えたとは考えにくい。

水深の大きな海域では、動物プランクトンが夜間になると下層から上層に移動し、上昇、下降のタイミングは明暗すなわち、日の出、日没と一致することが知られているが、上に示した結果からはこのような日周鉛直運動は確認できない。図-3(b)に示したように、9月の底層では散乱が弱く、海底付近の動物

プランクトンは少ないようである。浅海域での連続観測例はほとんどないのでよくわからないが、外洋とは動物プランクトンの生理、生態や行動が異なっている可能性がある。

動物プランクトンの体積密度と鉛直速度との関係を確認するため、後方散乱エネルギー ABE を検出関数とした鉛直速度 w の条件付平均

$$\langle w \rangle (\tau, z) = \frac{\int_0^T \text{ABE}(t, z) w(t + \tau, z) dt}{\int_0^T \text{ABE}(t, z) dt} \quad (6)$$

を求めた結果を図-7 に示す。ラグタイム 0 における鉛直速度の条件付平均値の値は小さく、ほとんど動物プランクトンの体積密度と鉛直速度の間に関連はないように思われる。ただし、散乱の強さが最大になってから約 4 時間後に上昇速度が最大になり、およそ 16 時間後に下降速度が最大になる傾向がみられる。これが何を意味するのか今のところよくわからない。今後、動物プランクトンの生理、生態や行動といった側面から散乱強度の変動を捉え、検討したい。

5. おわりに

夏季の広島湾北部海域において行った数日間の ADP 連続観測から、水中散乱強度の時空間変動を解析し、散乱体の動態を調べた。本研究で得られた主な結果は以下の様である。

- 1) ADP の後方散乱エネルギーの時空間変動は非常に大きく、2 桁程度変化する。後方散乱エネルギーの経時変化には、昼間より夜間の方が大きくなる日周期変動が認められる。このことと渦鞭毛藻が少なかったことから、観測された主要な散乱体は動物プランクトンであると考えられる。
- 2) 水深の大きな海域と異なり、動物プランクトンの日周鉛直運動は確認されない。後方散乱エネルギーには日周期変動に加えて、散乱の強い夜間、潮流に対応した半日周期変動も観測される。
- 3) 小潮期は大潮期より、動物プランクトンの出現している時間が長く、鉛直方向の分布も広い。
- 4) 本論文で使用した 1.5 MHz の ADP の場合、海水による音波の吸収率を約 0.6 dBm^{-1} とした伝播損失補正を施せば、体積密度（単位体積あたりの散乱体の数）を求めるのに必要な後方散乱エネルギー（体積後方散乱係数に比例）が得られる。

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、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体積密度を ADP 観測と同時に調査する予定である。

謝辞：プランクトンに関する貴重な助言を頂いた瀬戸内海区水産研究所の内田卓志博士ならびに松山幸彦研究員に感謝します。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 古澤昌彦：水中音響利用の新技术—プランクトン計測を中心として—，月刊 海洋，第 26 巻，第 1 号，pp. 32-38，1994。
- 4) 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(3), pp. 455-474, 1989.
- 5) Plueddemann, A. J. and Pinkel, R.: Characterization of the patterns of diel migration using a Doppler sonar, *Deep-Sea Res.*, Vol. 36(4), pp. 509-530, 1989.
- 6) Fischer, J. and Visbeck, M.: Seasonal variation of the daily zooplankton migration in the Greenland Sea, *Deep-Sea Res.*, Vol. 40(8), pp. 1547-1557, 1993.
- 7) 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.
- 8) 兼田淳史・武岡英隆・村山裕一・小 泉善：ADCP によって測定された懸濁物の日周鉛直運動—内海における bottom intrusion に伴う環境の変化—，2000 年度日本海洋学会春季大会講演要旨集，p. 297，2000。
- 9) Francois, R. E. and G. R. Garrison (1982): Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *J. Acoust. Soc. Am.*, **72**(6), 1879-1890.
- 10) Furusawa, M.: Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength, *J. Acoust. Soc. Jpn.*, Vol. 9(1), pp. 13-24, 1988.
- 11) Johnson, R. K.: Sound scattering from a fluid sphere revisited, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 61, pp. 375-377, 1977.
- 12) 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。
- 13) Uye, S., Y. Ayaki 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.

(2000.10.2 受付)