

駿河湾における音響散乱体の時空間変動 — 係留式 ADCP でプランクトンの挙動を観測する試み —

勝間田高明*¹

Time-Space variability of Acoustic Backscatter from Plankton in Suruga Bay

Takaaki KATSUMATA

Abstract

A buoy-mounted upward-looking Acoustic Doppler Current Profiler was deployed on the break off the cape Hagachi where locates the eastern coast of the bay mouth in Suruga Bay, to monitor current variations in the upper ocean. This study used acoustic backscattering strength data of moored ADCP, for investigate the variation of zooplankton in Suruga bay. In surface layer, the acoustic backscattering strength has larger value and decrease by depth. And backscattering strength has seasonal variation and diurnal variation. The backscattering strength was larger value in night-time at the surface layer. The displacement and distribution of scattering matter indicate the displacement and distribution of zooplankton, because scattering matter was moving upward at sunset but was moving downward at sunrise. Zooplankton by detected acoustic backscattering strength has dominant seasonal variation, *i.e.* zooplankton increase in spring season and fall season.

1. はじめに

駿河湾口東部において流動の鉛直分布の把握を目的とした音響ドップラー流速分布計 (ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler) を用いた係留観測が継続的に行われている (勝間田ら, 1999; 安田ら, 2001; 稲葉ら, 2001)。係留式 ADCP を用いて取得したデータは、約880日分が蓄積されており、現在も観測は継続中である。ADCP 観測層の範囲は、期間により若干異なるが海面付近から水深 300 m 層付近までの鉛直的に広範囲を網羅している。また、観測層の間隔は、約 9 m であることから高い鉛直分解能を持つ。測定は、15秒間隔で行われ80回分のアンサンブル平均が20分間隔で内部メモリーに記録される。駿河湾で観測を継続中の ADCP 係留観測データは、観測層の多さ、期間の長さのみならず高い時間分解能も有する。

ADCP の流動測定原理は、ドップラーシフトである。ADCP のトランスデューサーから超音波を鉛直軸に対して 20° の方向に発射し、海水中の散乱体により後方散乱さ

れた超音波を再びトランスデューサーで受信する。受信した音響信号をフーリエ変換し周波数変化、すなわちドップラーシフトを算出する。これにより散乱体の運動を知ることが出来る。またフーリエ変換の区間 (時間間隔) を調整することで複数層の測定が一度に出来る。ADCP は、海水中の音響散乱体の運動が流動のみに支配されると仮定して流速を算出している (RD Instruments, 1989)。

さらに ADCP は散乱体の運動の他に、散乱音響の反射強度 (AGC: Automatic Gain Control) の鉛直分布も連続的に取得する事が可能である。海水中の散乱体としては、懸濁物質、植物プランクトンおよび動物プランクトン等が考えられる。したがって、散乱強度の解析により、これらの散乱体の分布状況および、その挙動も推定できる。散乱体の水平運動に関しては、流動の影響がきわめて大きいので、散乱体自身の遊泳力により行う運動 (自発的運動) の把握は困難である。しかしながら鉛直方向の自発的運動に関しては、鉛直流動がきわめて小さいため、解析が可能と考えられる。ADCP の後方散乱強度 (BS: Backscattering Strength) と動物プランクトンの鉛直運動との関係は、

2005年9月14日受理

*1 東海大学海洋学部清水教養教育センター (The General Education Center, Shimizu, School of Marine Science and Technology, Tokai University)

外洋や内湾域などでも試みられている (Kaneko et al., 1996; Pinot et al, 2001; 橋本ら, 2002)。

外洋での試みとして、西部赤道太平洋において動物プランクトンの日周鉛直運動を ADCP の後方散乱強度により捉え、下向き移動が早朝、上向き移動が夕方に見られ、その速度は 4 cm/s 程度であることが報告されている (Kaneko et al., 1996)。内湾での試みとして、橋本ら (2002) は、瀬戸内海において、音響散乱体の大きさを推定するために 2 種類の異なる周波数の ADCP を設置し後方散乱強度を計測すると共に、実際にプランクトンネットによるプランクトン採取も行い両者の関係を議論し相関係数が最大で 0.835 に達する事を示した。

駿河湾においては、膨大な量の ADCP 係留観測データが存在するにもかかわらず後方散乱強度とプランクトンの関係を議論した報告は未だに無い。そこで、本報告では、この点に着目し駿河湾における ADCP 観測データの有効活用から、後方散乱強度を解析し、プランクトンとの関係を議論する。

2. 観測および解析方法

2.1 係留観測

駿河湾口東部海域に上向きで ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler: 音響ドップラー多層流速計) 係留系を長期間設置し、流動観測を行なった。ADCP の係留観測地点は駿河湾口東部の波勝岬沖合の離岸距離約 7 km (北緯 34 度 40 分, 138 度 40 分) で、水深は約 650m の地点である (Fig. 1)。係留系を設置したのは、1995 年 6 月 13 日から 1996 年 5 月 7 日までの約 329 日間 (約 11 ヶ月) である。ADCP の係留図を Fig. 2 に示す。ADCP 本体は海底のアンカーによって固定され、最上部に取りつけたフロートの浮力によって海底から立ち上がっている。ADCP は本体設置層よりも上層の流動の鉛直分布を一度に観測できる。全期間共に、ADCP が流動の鉛直分布の観測を 20 分間に 80 回行い、そのアンサンブル平均を 20 分間隔で不揮発性メモリーに記録する様に設定を行った。N 回の測定を行って、そのアンサンブル平均を用いる場合、観測誤差は一般に $1/\sqrt{n}$ 倍となることから、より高精度の観測値を得ることが出来る。

2.2 後方散乱強度 (BS) の算出

係留式 ADCP は、超音波を発した後に散乱音響を受信する。この過程で音響には拡散損失および吸収損失が生じる。従って、ADCP が受信した超音波の反射強度 (AGC) と後方散乱強度 (BS) は区別する必要がある。さらに、音響の拡散損失および吸収損失を仮定して反射強度 (AGC) を補正することで後方散乱強度 (BS) を見積もることが可能である。この手法は、近年の研究でも採用

されている (Kaneko et al., 1996; Pinot et al, 2001; 橋本ら, 2002)。算出式 (RD Instruments, 1989) は次式で表せる。

$$BS = K_c(AGC - N_c) + R_c \quad [\text{dB}] \quad \dots(1)$$

$$R_c = 20 \log_{10}(r) + 2\alpha r \quad [\text{dB}] \quad \dots(2)$$

ここでの BS は魚群探知機で用いられる体積後方散乱強度 (VBS: Volume Backscattering Strength) に対応する値である。 K_c は音響強度への変換係数で 150kHz の ADCP の場合、 $0.46 \text{ dBcount}^{-1}$ 程度となる。 N_c はノイズレベルであり、散乱音響が戻ってこないと考えられる最もトランスデューサーから離れた層 (第 40 層) の AGC の全平均値 47.316dB を用いた。 R_c は音響の拡散損失であり、 r はトランスデューサーから各観測層までの距離 (m) である。は水中での音響吸収係数で 150kHz の場合、 0.07 dBm^{-1} 程度となる。

2.3 ADCP データの深度更正

ADCP は設置層の流動の影響を受けることで鉛直移動をする。係留式 CTD による深度データからは最大で 21 m、標準偏差で 0.7m の移動が確認された。ADCP の発する音波の散乱強度は海面で最大となる。従って、ADCP の設置深度は、CTD の圧力記録もしくは散乱強度の極大層から求めることが出来、本観測では 302m となった。観測に使用した ADCP は RD Instruments 社製ナローバンド ADCP で、発振周波数が 153kHz で、トランスデューサー角が 20° である。なお同社の ADCP はトランスデューサー角 30° で標準音速 (1475.1m/s) の時、観測層の間隔が 8.0m となる様に設定されている。今回用いた ADCP のトランスデューサー角は 20° であるため、観測層の間隔 Bl (m) は次式で表される。

$$Bl = 8.0 \times \frac{\cos 20^\circ}{\cos 30^\circ} \times \frac{C}{1475.1} \quad [\text{m}] \quad \dots(3)$$

ここで、 C はトランスデューサー部での水中音速 (m/s) である。

観測層の間隔 (Bl) はトランスデューサー部での水中音速 C の関数であり、さらに水中音速 C は水温、塩分および圧力の関数である。したがって Bl は時間的に変化する。 Bl は (3) 式より、およそ 8.8m 程度となる。観測層はトランスデューサーから $1.5 \times Bl$ (m) 離れた所から始まるので観測最下層は平均で 288m 深となる。

トランスデューサーから発射された音波の散乱は海面で極大 (音響インピーダンスの差が大きくなる) となるため、海面付近において音波ビームのサイドローブの散乱は、メインローブの散乱と比較して無視できなくなる。海面付近でのサイドローブの散乱の影響を受ける層はコンタミネート層と呼ばれ、その海面からの厚さ D_c (m) はトランスデューサーの深度を D (m)、トランスデューサー角を θ とすると次式で与えられる。

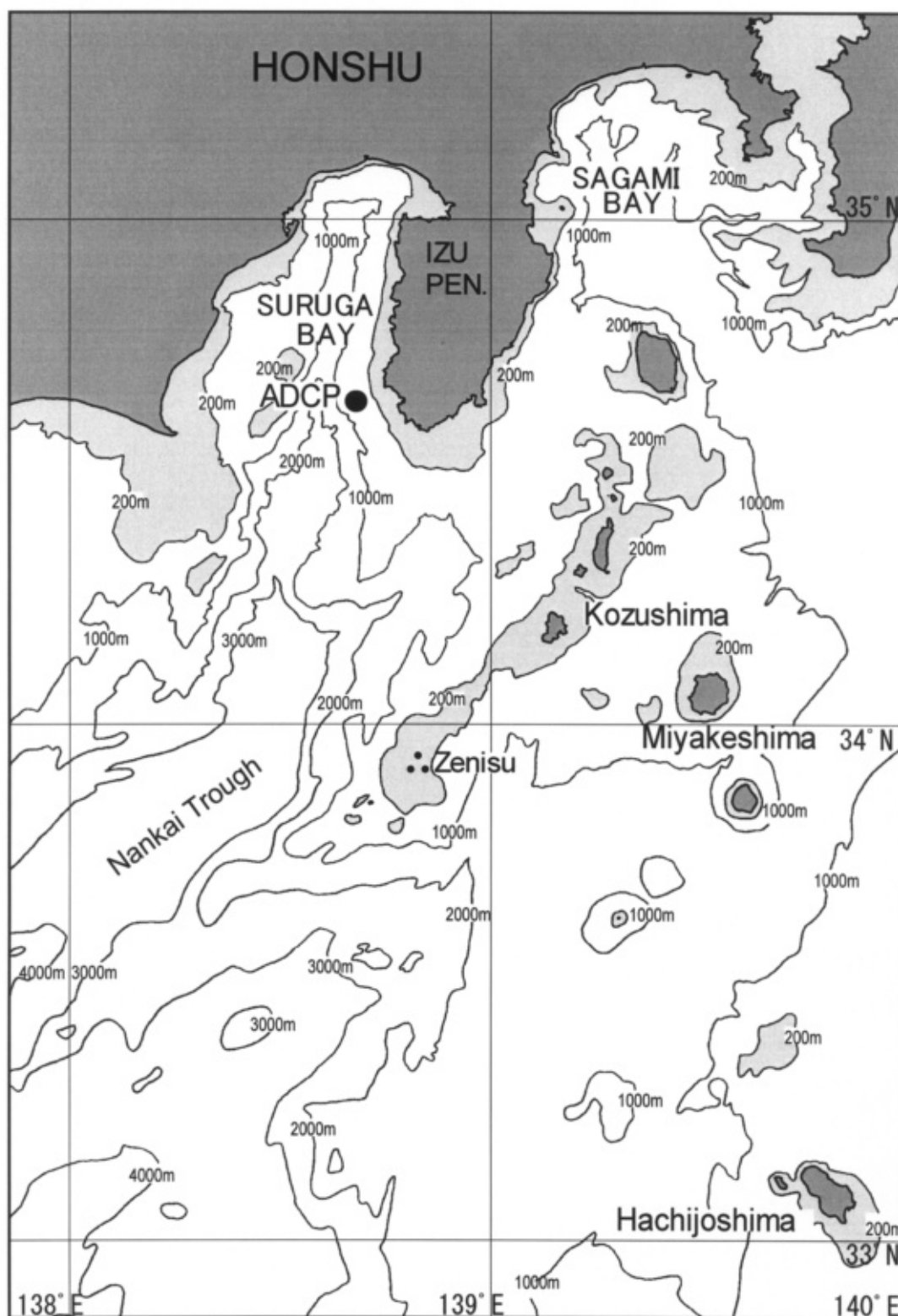


Fig. 1 Bottom topography in and around Suruga Bay and Location of observation station.

(●) Current observation with moored ADCP.

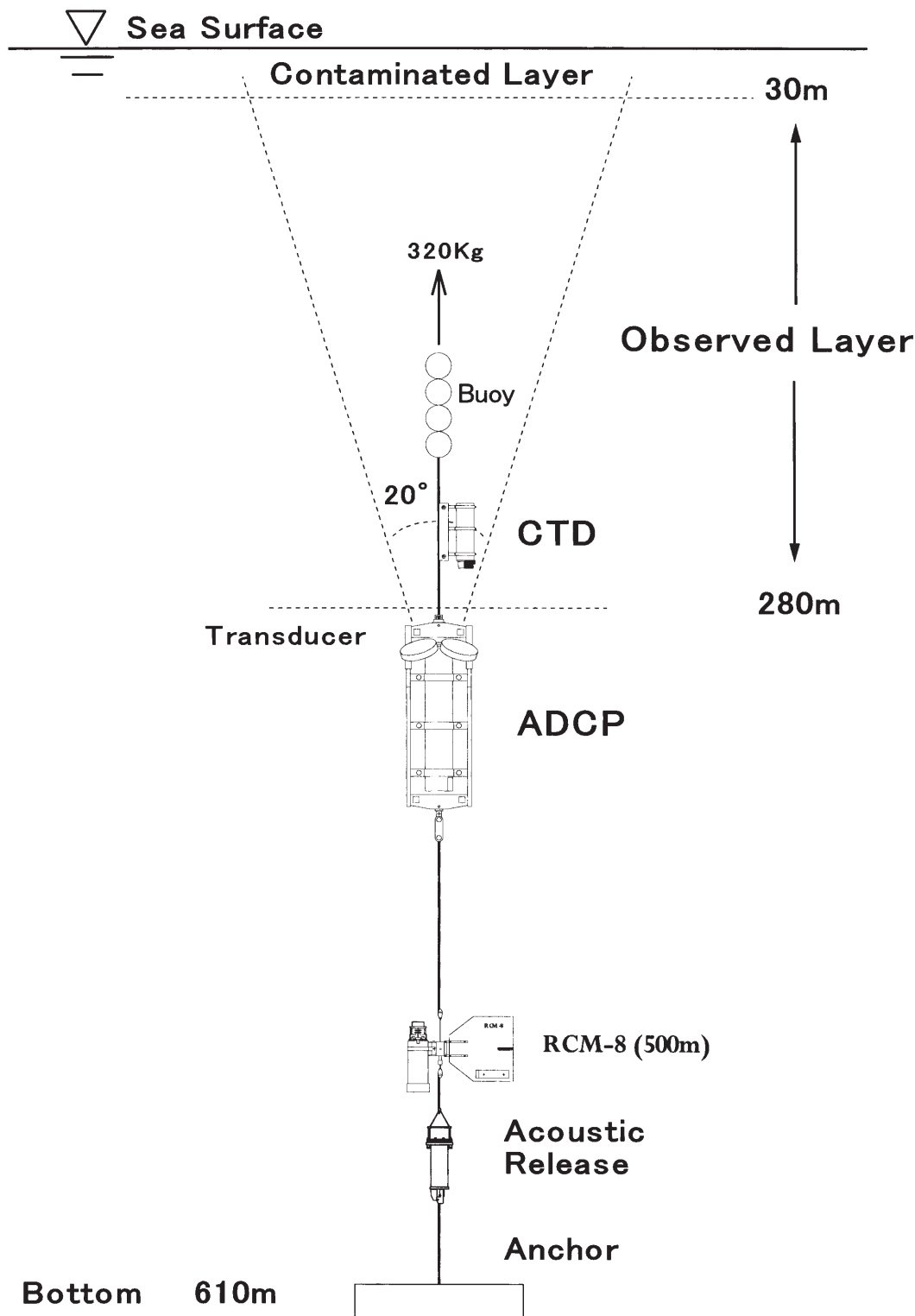


Fig. 2 Schematic figure of a moored upward-looking ADCP.

$$D_c = D(1 - \cos\theta) \quad (\text{m}) \quad \dots(4)$$

各観測期間における ADCP 深度から求めたコンタミネート層の厚さは、約 18m となる。なお、実際に ADCP により取得される流速値が海面からの反射によりコンタミネート層の厚さは、理論的なコンタミネート層の厚さに、観測層 1 層分の厚さを加えた層までである。これは、ADCP が或る層の流速を算出する際に、その層を中心に上下 1 層分のデータを加重平均するためである。したがって各期間における、海面での反射の影響を受けるデータの深度は海面～27m 深までである。

流速データおよび散乱強度 (BS) は、音速により変化する観測層の間隔 (BI) および CTD の圧力記録から分かる ADCP の鉛直移動を考慮して 20 分毎に深度更正を行った。この様にして 30m から観測最下層の 280m まで 10m 間隔の所定層毎の流速時系列を求めた後に流速データおよび散乱強度 (BS) は毎時平均を施した。

2.4 音響散乱体の大きさ

本研究で用いる ADCP の発する超音波は 150kHz の周波数である、水中での音速がおよそ 1500m/s であることを考慮すると、超音波の波長 (λ) は 1 cm 程度である。全長 L の大きさのプランクトンを音響で探知する場合、限界周波数 (L/λ) が一つの目安となる。限界周波数 (L/λ) が 1 以上であるなら、センサーは音響散乱体からの散乱音響を十分に感知することが出来る (古澤, 2001)。限界周波数と典型的なプランクトンの関係を Fig. 3 に示す。これによると今回用いた ADCP の音響では異足類以上の大きさのプランクトンを良好に探知することが推定さ

れる。実際には 150kHz の場合 1 mm 程度の散乱体でも探知することが可能なことが知られている (Pinot, 2001)。よって実際には、かいあし類程度の大きさ (体長 1 mm 程度) のプランクトンであるならば十分に探知可能と考えられる。

3. 結 果

3.1 散乱強度 (BS) の時間的変動

ADCP が実際に観測するのは音響の反射強度 (AGC) であるが、前述の補正式、すなわち (1) 式および (2) 式を用いて観測各層ごとに散乱強度 (BS) を算出した。この場合の散乱強度は、魚群探知機の体積後方散乱強度 (VBS) に対応する。算出された BS の毎時値および 10 日平均値を一例として 30m 層分を Fig. 4 に示す。散乱強度の毎時値に注目すると、1995 年 6 月中旬から 7 月上旬にかけて大きな変動を見ることができる。また日変動が卓越するが、昼夜の 24 時間周期なのか潮汐に伴う 25 時間周期かは判別できない。詳しい解析は、次節にて行う。

散乱強度の 10 日平均値に注目すると、明瞭な季節変動および季節内変動を確認することができる。1995 年 10 月上旬に値の小さな極大、1996 年 4 月上旬に値の大きな極大、および 1995 年 12 月上旬に極小を見ることができる。この季節変動は、一般に知られている植物プランクトンおよび動物プランクトンの個体数の季節変動と類似している事が分かる (Fig. 5)。年に 2 回の極大がプランクトンのブルームとどう関わりを持つかの議論は次章に譲る。

散乱強度には卓越する日周期の他に季節変動が存在した。季節変動の鉛直分布を知るために散乱強度の日平均値

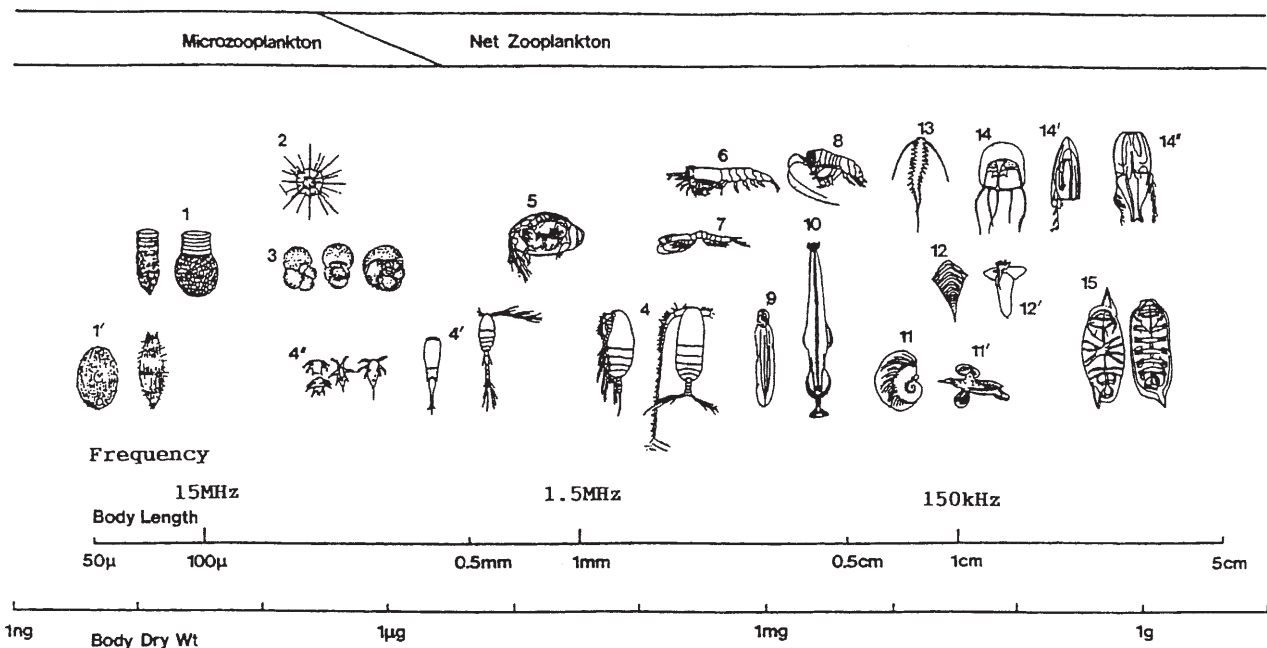


Fig. 3 Typical plankton and sound frequency. (after Furusawa, 1994 and Ikeda, 1987)

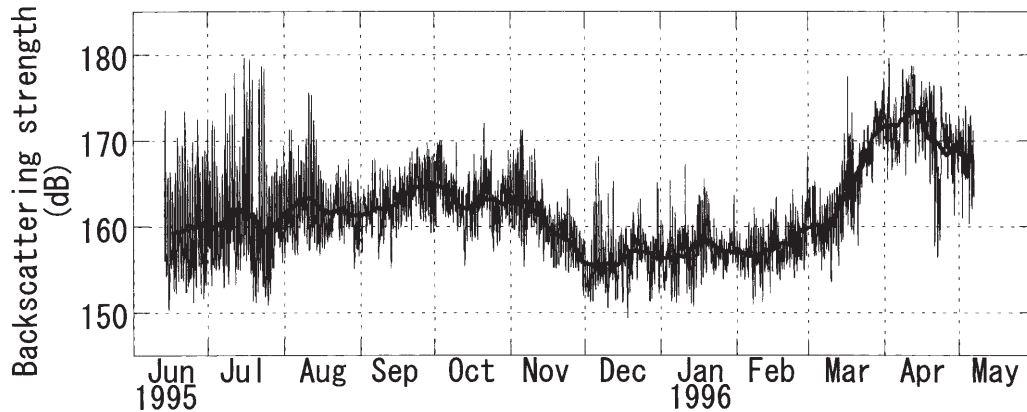


Fig. 4 Time series of backscattering strength. Thin line indicated the hourly, and thick line indicated the 10-day mean.

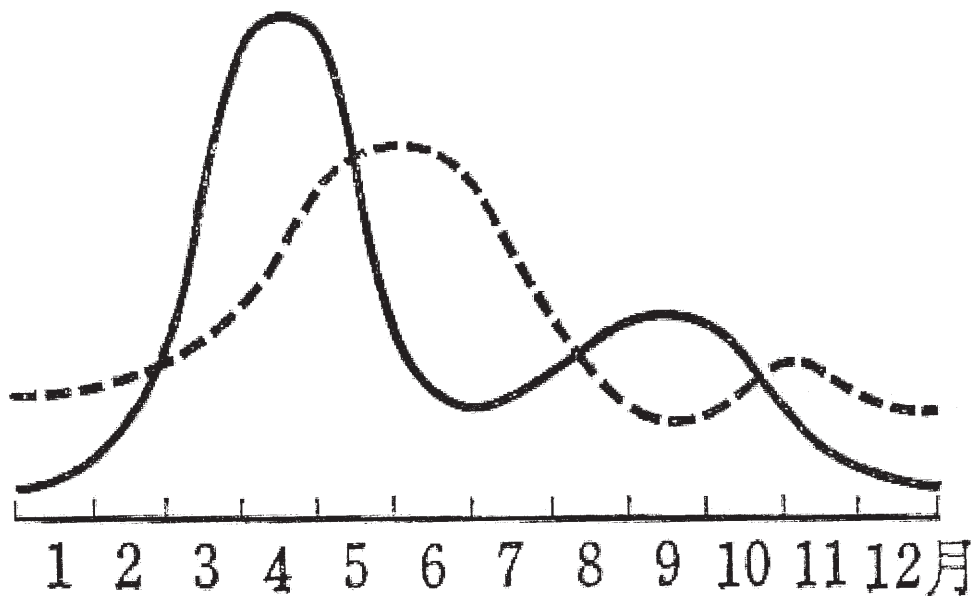


Fig. 5 Seasonal variation of zooplankton and pit plankton. (after Persons and Takahashi, 1973 and Heinrich, 1962)

の深度-時間断面図を Fig. 6 に示す。散乱強度は表層で大きく、下層で小さい鉛直分布をしている。また 100m 層付近を境にして、それ以浅では急激に増大していることが分かる。また 30m 層の散乱強度の時系列から確認できた春（4 月）と秋（10 月）の極大の時期には、散乱強度の大きい層の厚さも大きいことが分かる。この時には、最大で 150m にも達しており、顕著な季節変動を見ることが出来る。散乱強度の季節変動は、一般に考えられている植物および動物プランクトンの季節変動に類似していた。

3.2 散乱強度の周波数特性

散乱強度の時間変動には顕著な日周変動が検出された。しかしながら、この日周変動が潮汐に起因するものなのか昼夜の 24 時間周期に起因するものなのか分からない。そこで、毎時の散乱強度の時系列に対して自由度 8 の FFT 法によるフーリエスペクトル解析を行い、そこから算出された 30m 層のスペクトル密度と周波数の関係を Fig. 7 に

示す。顕著なスペクトルピークが一日周期および半日周期に見られる、これは潮汐に起因するものではなく昼夜といった太陽（地球の自転）周期に起因すると言える。また、14 日周期の卓越したスペクトルピークも見ることが出来る。

散乱強度のスペクトル密度の鉛直分布を知るために Fig. 8 に散乱強度の周波数-深度断面を示す。ただし、図中の数値はスペクトル密度関数に対して log 演算を施したものである。この図は、日周期および半日周期の変動に注目しているが、表層 30m のスペクトル解析と同様に日周期および半日周期の変動が顕著に見られる。日周期の変動は 30m から 200m 層付近にかけて顕著である。一方、半日周期の変動は 30m 付近の表層と 200m 付近で若干の変動が見られる他は大きな変動は見られない。

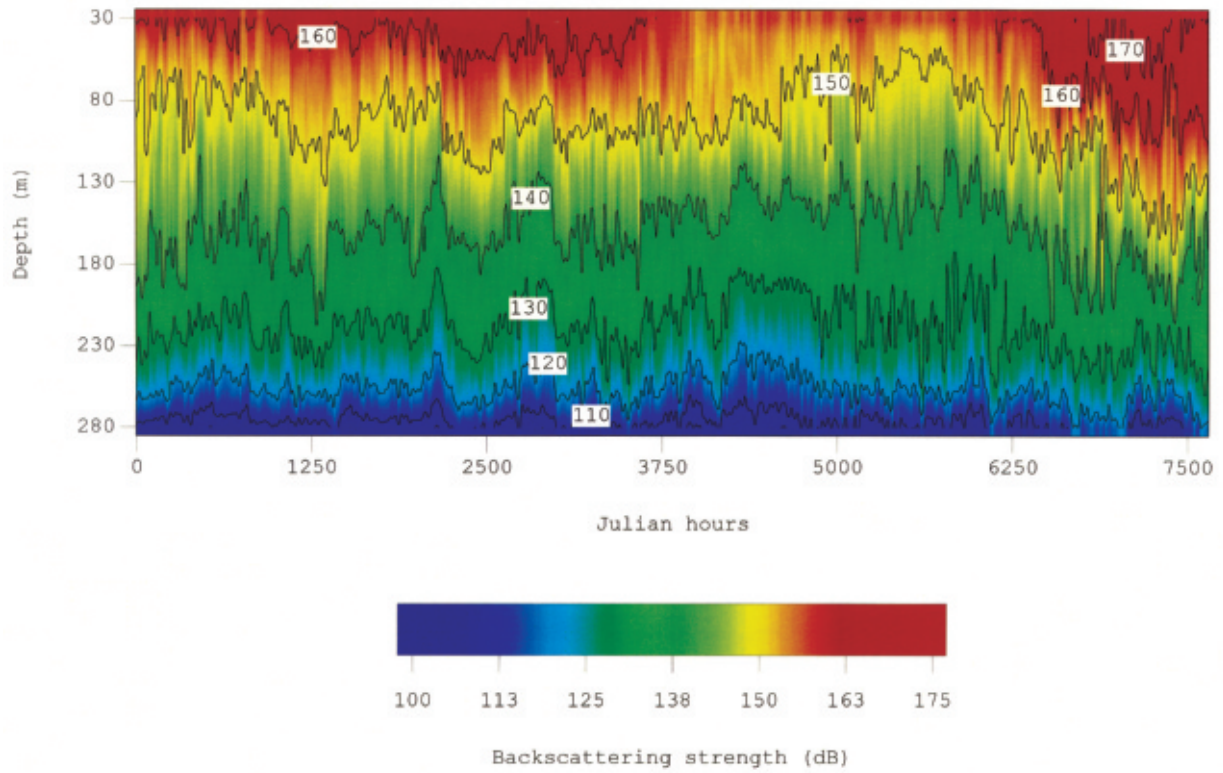


Fig. 6 The isotach of backscattering strength.

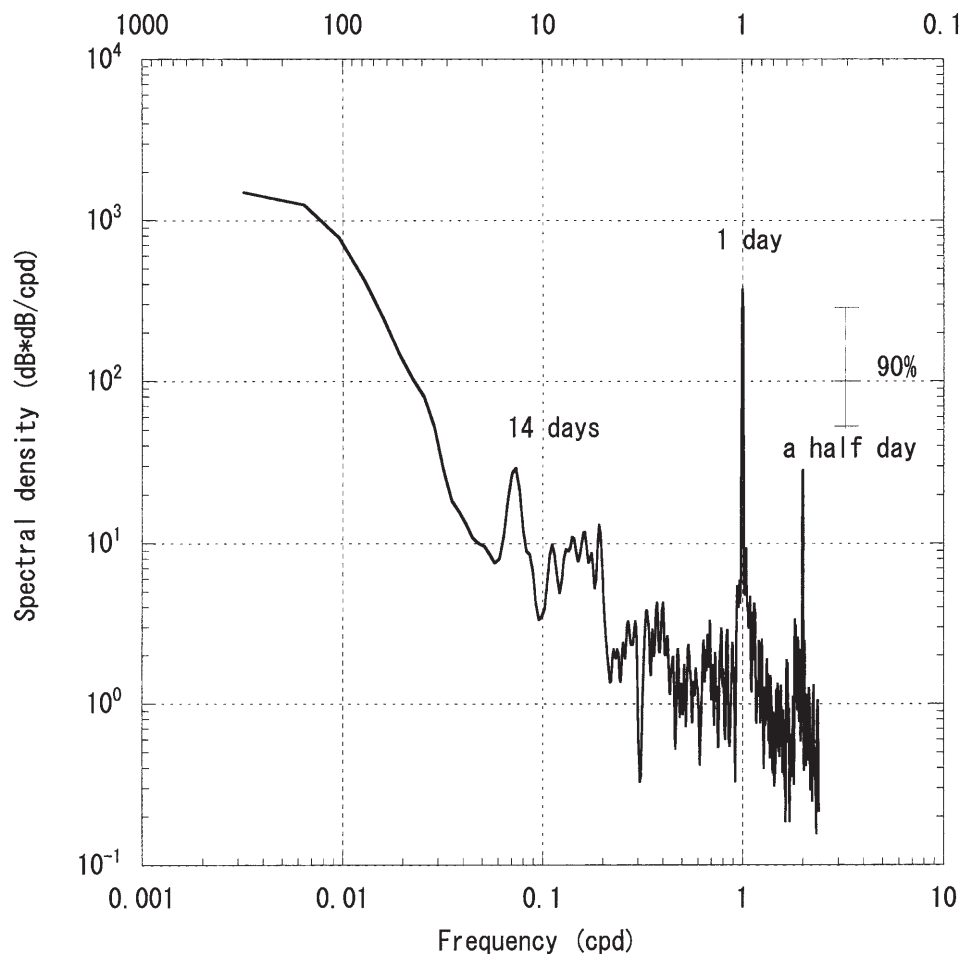


Fig. 7 Spectral density of backscattering strength at 30m level.

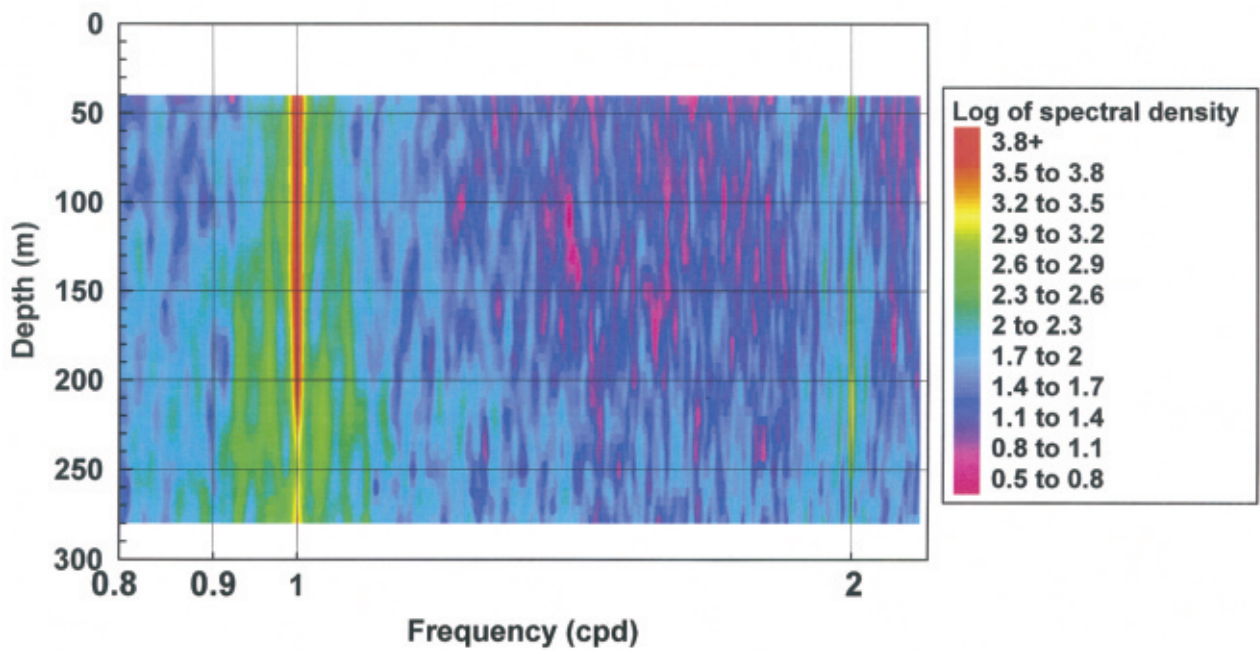


Fig. 8 Vertical profile of spectral density of backscattering strength.

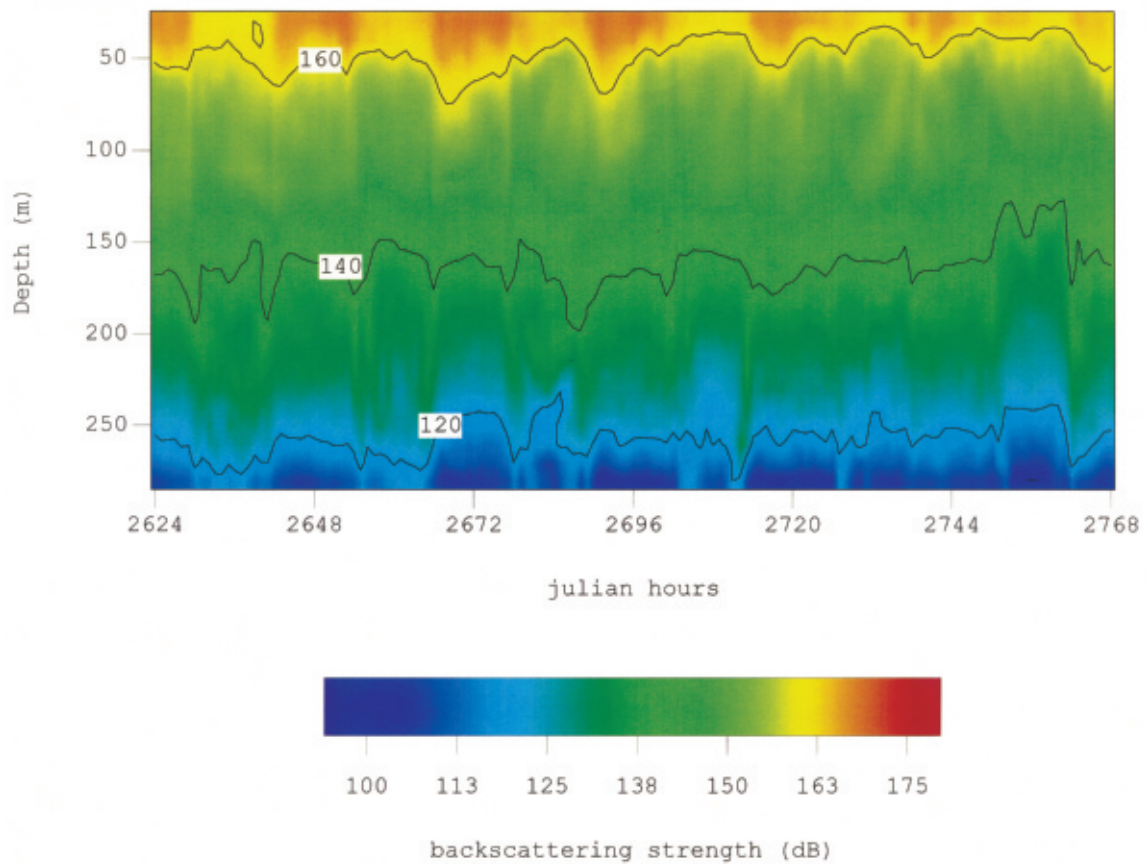


Fig. 9 Isotach of hourly backscattering strength variation at October 1995.

4. 考 察

散乱強度は、表層で大きく春と秋には極大値となる季節変動を持っていた。これは植物プランクトンのブルームと類似した分布および季節変動である。散乱強度の極大のうち秋のものに関して詳細を調べ、この原因を探る。秋の1995年10月1日0時から10月7日0時までの6日間の毎時散乱強度の時間-深度断面図を Fig. 9 に示す。横軸の経過時間2624時間、2648時間、…はそれぞれ10月1日0時、2日0時、…に対応している。表層で散乱強度が大きいのが夜間であることが分かる。これは夜間に散乱体が表層付近に集中しており、昼間には下層に移動したことを示唆する。

この移動を知る手がかりとして同時期の鉛直流動の時間-深度断面図を Fig. 10 に示す。海洋の場合、水平流が卓越するため、水平方向に自力で移動する散乱体の運動は捉えることは不可能である。しかし鉛直流はきわめて小さく、例えば沿岸湧昇流の場合 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ cm/s}$ 程度（勝間田, 1996）であるので、音響散乱体が自力で鉛直運動した場合には捕捉が可能である。Fig. 10 に注目すると、日の出に当たる時間に $-1 \sim -4 \text{ cm/s}$ の大きな速度で表層 50m 付近から最下層付近までのほぼ全層で下降運動が見られ

る。また夕刻の日の入りに対応する時間には 50m 以深で最大でも 1 cm/s と値は小さいが上昇運動が見られる。

散乱体の分布が夜に表層に集中していること、日の出の時刻に自力で下降して日の入りの時刻に自力で上昇している事を考慮すると、散乱強度が捉えたのは植物プランクトンのブルームではなく、動物プランクトンの集中であったといえる。また、150kHz の音波は $0.1 \sim 1 \text{ cm}$ 程度以上の大きさの物体からの散乱が大きいことから動物プランクトンを捉えていたと考えられる。動物プランクトンは一般に、植物プランクトンを餌としているために植物プランクトンのブルームの時期に対応して集中することも考えられる。しかしながら、今回はプランクトンネットによる実態調査を行っていないため、結論づけることは不可能である。

5. 今後の課題

今回は、駿河湾口東部における流動観測によって副次的に得られた散乱強度を解析して、動物プランクトンの日周鉛直運動を捉えることが出来た。しかしながら散乱体が動物プランクトンであることは確からしいが実際にプランクトンネットを曳いたわけではないので検証の点で弱さが残る。また ADCP の超音波が 1 種類であったために散乱体

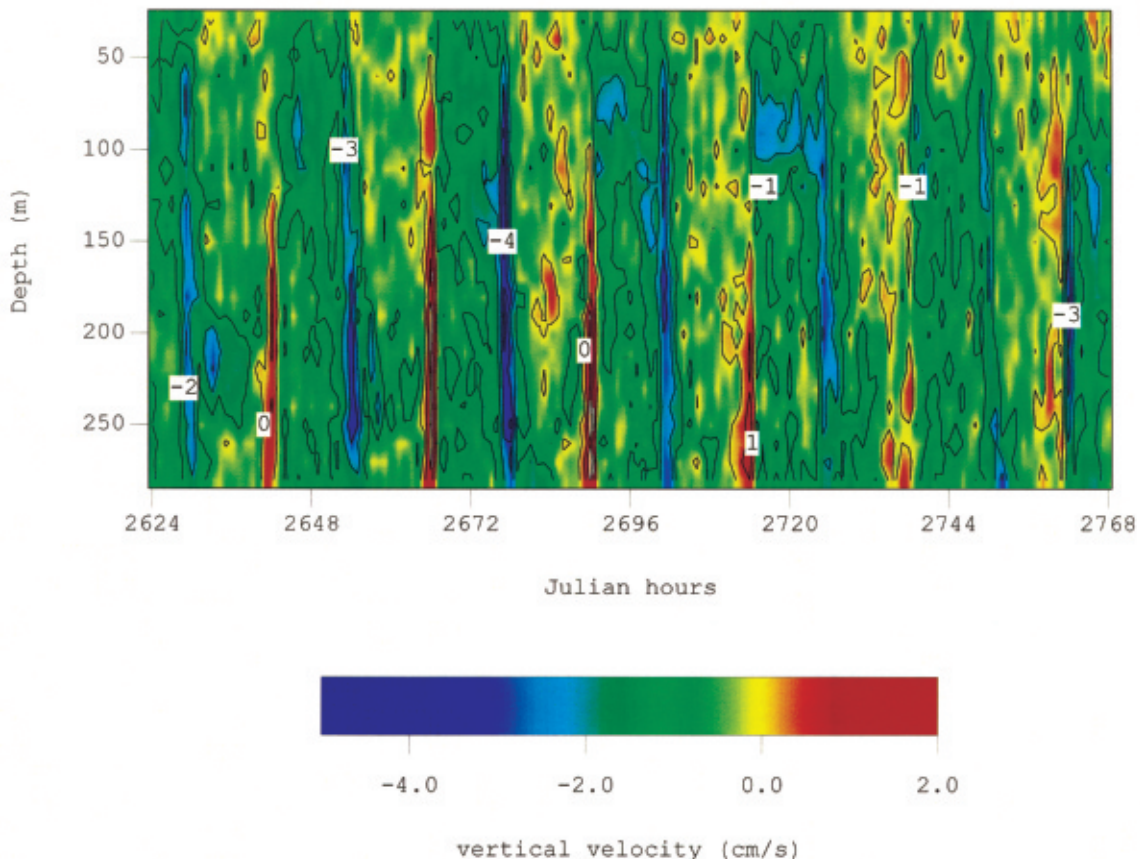


Fig. 10 Isotach of hourly vertical current speed at October 1995.

の正確な大きさも把握できていない。今後は、例えば由比沖に2種類の周波数の ADCP を設置して、桜エビの分布や日周運動および季節変動を観測したいと考える。この場合、流速データをはじめとする海況データや漁獲量、プランクトンネットによる採取量および栄養塩の変動なども総合的に解析することで、多くの可能性を見いだすことが出来ると考える。既往のプランクトンの季節変動に関する研究では、時間的に密でないサンプリングを頼りに議論されてきたが、今後、連続的なデータが蓄積されれば新たな知見が得られると考えられる。また、資源管理に有益な情報も提供することが可能であると考えられる。

謝 辞

本研究を遂行するに当たって、故 稲葉栄生 東海大学名誉教授の海洋観測資料を用いさせていただきました。また、係留系の設置には東海大学技術職員 守屋洋氏、同大学 安田訓啓教授、同大学調査船「望星丸」・「南十字」の乗組員の皆様に大変お世話になりました。また卒業研究のテーマとして ADCP 散乱強度に挑戦し、本報告に対して種まきをしてくれた矢野弦一郎氏、鎌滝美香氏に感謝いたします。本報告は笹川科学研究助成により作成しました。

引用文献

- 古澤昌彦(1994): 水中音響利用の新技術。月刊海洋, **26**, 1, 39-49.
古澤昌彦 (2001): 音で海を見る。成山堂書店, 東京, 182pp.

- 橋本英資, 朱小華, 梁棟, 長尾正之, 吉田みゆき, 高橋由夫 (2002): 内湾における音響散乱強度と動物プランクトンの現存量との関係。海の研究, **11**, 2, 273-284.
Heinrich, A. K. (1962): The life histories of plankton animals and seasonal cycles of plankton communities in the oceans. J. Cons. Int. Explor. Mer, **27**, 15-24.
池田勉 (1987): 動物プランクトン (混合個体群)。日本海洋学会春季大会講演要旨集, 386.
稲葉栄生, 勝間田高明, 安田訓啓 (2001): 駿河湾 300m 層の流動と水温の変動。海洋深層水研究, **2**, 1, 1-8.
Kaneko, A., X.-H. Zhu, and M.-H. Radenac (1996): Diurnal variability and its quantification of subsurface sound scatters in the western equatorial Pacific. J. Oceanogr., **52**, 655-674.
勝間田高明 (1996): 駿河湾の急潮に関する研究。東海大学修士論文, 58pp.
勝間田高明, 稲葉栄生, 川畑広紀 (1999): 駿河湾口東部における係留式上向き ADCP による流動観測。東海大学紀要海洋学部, **48**, 193-207.
T. R. パーソンズ, 高橋正征 (1973): 生物海洋学。三省堂, 東京, 246pp.
Pinot, J.M. and J. Jansa (2001): Time variability of acoustic backscatter from zooplankton in the Ibiza channel (western Mediterranean). Deep-Sea Res., I, **48**, 1651-1670.
RD Instruments (1989): Acoustic Doppler current profilers, Principles of operation - A practical primer. RD Instruments, San Diego, California, 36pp.
安田訓啓, 稲葉栄生, 川畑広紀, 守屋洋, 勝間田高明 (2001): 駿河湾口東部において係留式 ADCP により観測された内部潮流。東海大学紀要海洋学部, **51**, 63-88.

要 旨

駿河湾口東部で係留式上向き ADCP を用いた流動観測を行っている。駿河湾における動物プランクトンの時空間変動を把握する目的で ADCP により得られた散乱強度データを解析した。その結果、散乱強度は表層で大きく下層で小さい鉛直分布を持ち、春と秋に急激に増大した。音響散乱体は顕著な日周変動を持ち、夜間に表層に集中的に分布することが分かった。さらに音響散乱体は日の出と共に下降し、日の入りと共に上昇する。これは動物プランクトンの日周鉛直運動と考えられる。また動物プランクトンは春と秋に増加する季節変動を持っていた。