

内湾域に存在する海中懸濁粒子からの音響散乱

川 西 澄*・松 山 幸 彦**

プランクトンと底泥懸濁粒子の散乱実験を行い、超音波ドップラー分布計の後方散乱強度から海中懸濁粒子の量を推定するために必要となる、懸濁粒子の音響パラメーターを評価した。サイズが同じなら、動物プランクトンは植物プランクトンより 4 倍程度後方散乱断面積が大きくなることが分かった。秋季に行った広島湾大野瀬戸の 24 時間観測では、1.5 MHz の体積後方散乱係数 S_v は上層で大型渦鞭毛藻である *Ceratium furca* の細胞密度に対応していた。中層以深の S_v は底泥の再懸濁粒子濃度に対応していると考えられ、 S_v は濁度、体積濃度にほぼ比例していた。

1. はじめに

超音波ドップラー流速分布計から得られる後方散乱強度分布には、海中懸濁粒子に関する情報が含まれており、これまでに、動物プランクトン量や濁度との関連性が指摘されている。著者らはこれまでに、広島湾底層の後方散乱エネルギーフラックス (ABSE) が、底層の濁度、懸濁粒子濃度に比例していることや上層で動物プランクトンの日周変動に対応した ABSE の変動がみられることを報告してきた (川西ら, 2001a; 川西ら, 2001b)。しかし内湾域の懸濁粒子は多種多様であり、それらに対する音響パラメーターを評価しなければ、観測された ABSE から懸濁体量に関する定量的な情報を引き出すことは難しい。これまでに大型の動物プランクトンの散乱特性に関する研究はあるが、植物プランクトンの音響散乱特性を調べた研究はない。

本研究では内湾に生息する動植物プランクトンや底泥粒子の音響パラメーターを明らかにする。また、広島湾北部域で体積後方散乱係数とプランクトンの種類・サイズと個体密度を観測し、高周波数超音波分布計によるプランクトン量の測定可能性を示す。

2. 方 法

(1) 懸濁粒子の散乱実験

Nortek 社製超音波ドップラー流速計 NDV (10 MHz の音波を使用) の後方散乱強度を解析し、懸濁粒子 (プランクトンと底泥粒子) の音響パラメーターを評価した。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ーの間には次の関係が成り立つ。

$$S_v = \rho_v \sigma_{bs} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 s_v = 体積後方散乱係数、 ρ_v = 散乱体の数密度、 σ_{bs} = 後方散乱断面積である。後方散乱強度 I は体積後方散乱係数 S_v に比例すると考えられるが、測器固有の超音

波トランスデューサーの感度などが分からないので、 I と S_v 間の比例定数は不明である。そこで、密度と音速が既知で後方散乱断面積がわかっているポリスチレン粒子 (粒径 500 μm) を用いて、粒子の数密度と後方散乱強度の関係を調べ、後方散乱強度から体積後方散乱係数への変換係数を決定した。

散乱実験で使用した動物プランクトンは節足動物門に属する *Artemia salina* とマガキ *Crassostrea gigas* の卵、植物プランクトンは渦鞭毛藻類の *Heterocapsa circularisquama* と *Gymnodinium mikimotoi*、珪藻類の *Chaetoceros didymus*, *Skeletonema costatum*, *Ditylum brightwellii* である。また、秋季に広島湾北部域で採取した底泥コアの表層部を懸濁させて底泥粒子の実験試料とした。以上の各試料を濾過海水を満した攪拌容器に一定量ずつ加え、NDV の散乱強度を測定した。

(2) 現 地 観 測

広島湾北西部海域の大野瀬戸において、2001 年 9 月 17 日 12:00~18 日 12:00 にかけて 24 時間の連続観測を行った。観測地点を図-1 に示す。流速と後方散乱強度の鉛直分布は Nortek 社製の超音波ドップラー分布計 (NDP, 周波数 1.5 MHz) によって測定した。NDP のセンサーヘッドは下向きにして、養殖牡蠣の作業役に係留した。NDP のトランスデューサーの位置は海面下約 0.5 m である。NDP の測定層厚は 0.5 m、平均時間は 2 分 (Ping 周波数 8.5 Hz) とし、連続してデータを記録した。

NDP 観測と平行して、TPM クロロテック (アレック電子) を用いて、90 分間隔で水温、塩分、濁度、クロロフィル蛍光強度の鉛直分布を測定した。さらに、深さ 14 m の位置に Laser In-Situ Scattering Transmissometer (Sequoia 社 LISST-25) を係留して、懸濁粒子の体積濃度と平均粒径の連続測定を行った。LISST-25 の記録間隔は 5 秒である。表層のプランクトンの同定・計数用の試料は、深さ 2 m の海水を真空ポンプによって採水して得られた。試料は 20 μm のプランクトンネットを装着した濃縮装置 (有効面積 95 cm^2) を使って重力下で濃縮後、中性ホルマリンによって保存し、実験室に持ち帰って同定・計数に供した。

* 正会員 工博 広島大学助教授 大学院工学研究科社会環境システム専攻

** 農博 瀬戸内海区水産研究所赤潮環境部

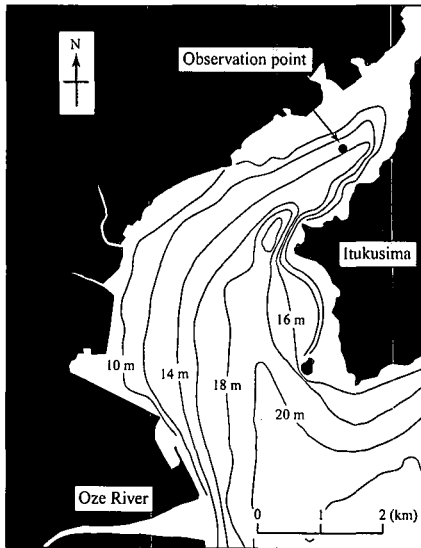


図-1 観測地点

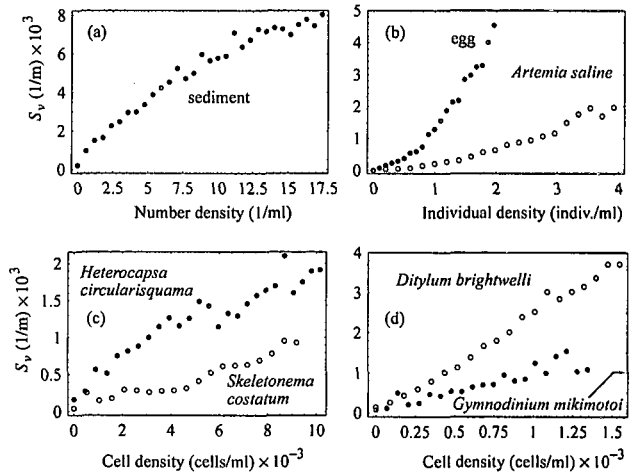


図-2 懸濁粒子の数密度と体積後方散乱係数

3. 結果および考察

(1) 懸濁粒子の音響散乱特性

図-2(a)に底泥懸濁粒子の数密度とNDVによって測定された体積後方散乱係数 S_v の関係を示す。底泥懸濁粒子の散乱実験は分散剤を加えない状態でを行い、懸濁粒子の平均粒径は $25\ \mu\text{m}$ 、湿潤密度は $1.28\ \text{g}/\text{cm}^3$ であった。図-2(a)から体積後方散乱係数は懸濁粒子の数密度に比例して増加していることがわかる。図-2(b)に*Artemia saline*の幼生と卵、図-2(c)に*Heterocapsa circularisquama*と*Skeletonema costatum*、図-2(d)に*Gymnodinium mikimotoi*と*Ditylum brightwellii*の個体・細胞数密度と体積後方散乱係数の関係を示す。底泥懸濁粒子と同様に、個体・細胞密度と体積後方散乱係数の間に比例関係が確認できる。

懸濁粒子に対する後方散乱断面積 σ_{bs} は、周囲の海水に対して、密度と音速が異なる液体の球体で懸濁粒子をモデル化したハイパスモデル (Johnson, 1977) 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

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

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

のように表される (Greenlaw, 1979)。ここに、 a は懸濁粒子の体積と等価な球の半径、 k は波数、 ρ_r と c_r はそれぞれ、懸濁粒子の海水に対する密度比と音速比である。ハイパスモデルは動物プランクトンによる後方散乱をモデル化したものであるが、泥粒子のような懸濁粒子に対

して用いても問題は無いと考えられる (Thomas et al., 1984)。

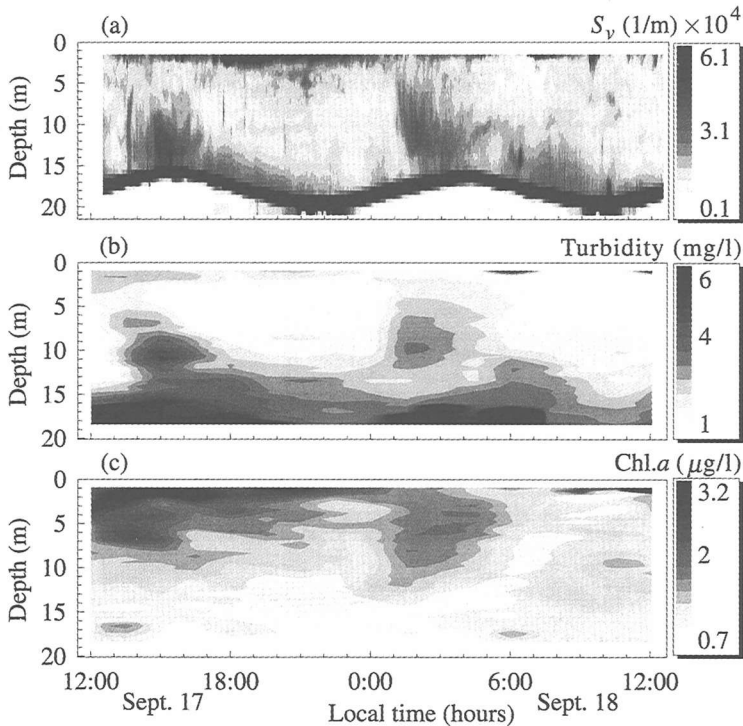
図-2の結果に最小2乗法を当てはめて式(1)から後方散乱断面積を評価し、式(2)のJohnsonのハイパスモデルを使って d を求め、現地観測で用いたNDPが使用している周波数1.5 MHzの超音波に対する後方散乱断面積 σ_{bs} を推定した結果を表-1に示す。

表-1から懸濁粒子の海水に対する密度比と音速比から決まるパラメーター d の絶対値は、植物プランクトンで0.02~0.03、動物プランクトンで0.05程度であることがわかる。なお、Foote(1990)によるオキアミの密度・音速比から得られる $|d|$ は0.044である。以上の結果から、式(2)のハイパスモデルによれば、サイズが同じなら動物プランクトンは植物プランクトンより4倍程度 σ_{bs} が大きいことになる。散乱実験を行った植物プランクトンの中では*Heterocapsa circularisquama*が最も大きな $|d|$ を示しているが、これは細胞表面にセルロース質の鎧板を有しているためと考えられる。細胞が10個程度連鎖している*Chaetoceros didymus*と*Skeletonema costatum*の後方散乱断面積は、連鎖しているものを1個体と考えると表-1の σ_{bs} より1桁大きくなる。表-1の a は実験時の連鎖を考慮したものを示しており、括弧内の数値が細胞1個の等価半径である。*Artemia saline*の卵は硬い殻に覆われているため、幼生に比べると2倍程度 $|d|$ が大きい。

表-1に示したプランクトンでは、周波数1.5 MHzの超音波に対する σ_{bs} は動物プランクトンの方が植物プランクトンより 10^6 倍程度大きくなっている。ただし、後述するように植物プランクトンでも*Ceratium* spp.のよう

表-1 プラクトンと底泥懸濁粒子の音響パラメーター

	$a(\mu\text{m})$	$\sigma_{bs}(\text{m}^2)$ for 1.5 MHz	$ d $	density, concentration	$S_v(\text{l/m})$
<i>Artemia salina</i>	150	2.9×10^{-10}	0.053	$10^4 \sim 10^7 \text{ l/m}^3$	$10^{-6} \sim 10^{-3}$
<i>Artemia salina</i> (egg)	138	1.0×10^{-9}	0.12		
<i>Crassostrea gigas</i> (egg)	27.5	2.2×10^{-14}	0.051	$10^4 \sim 10^7 \text{ l/m}^3$	$10^{-10} \sim 10^{-7}$
<i>Heterocapsa circularisquama</i>	12.5	8.7×10^{-17}	0.034	$10^2 \sim 10^4 \text{ cells/ml}$	$10^{-6} \sim 10^{-6}$
<i>Gymnodinium mikimotoi</i>	14	5.3×10^{-17}	0.02	$10^2 \sim 10^4 \text{ cells/ml}$	$10^{-9} \sim 10^{-6}$
<i>Skeletonema costatum</i>	20(8)	7.9×10^{-17}	0.025	$10^2 \sim 10^3 \text{ cells/ml}$	$10^{-8} \sim 10^{-5}$
<i>Chaetoceros didymus</i>	14(8)	1.3×10^{-17}	0.022	$10^2 \sim 10^4 \text{ cells/ml}$	$10^{-9} \sim 10^{-7}$
<i>Ditylum brightwellii</i>	27.5	4.5×10^{-15}	0.023	$10^3 \sim 10^4 \text{ cells/ml}$	$10^{-8} \sim 10^{-6}$
Suspended sediment	12.5	3.6×10^{-13}	2.2	$5 \mu\text{l/l}$ (6.39 mg/l)	2.2×10^{-4}

図-3 体積後方散乱係数と濁度, Chl. a の水深-時間分布

に大型のものでは後方散乱断面積が大きく、海中に存在する細胞密度の高さから主要な散乱体となる場合もある。底泥懸濁粒子の密度と音速は海水のそれらと大きく異なるため、その $|d|$ は植物プランクトンの $|d|$ より2桁大きい値を示している。なお、表-1には、広島湾北部域で考えられる個体密度・濃度とそれに対応する S_v の値も示してある。ただし、*Artemia salina* に対しては小型カイアシ類で考えられる個体密度を記入してある。

(2) 大野瀬戸における音響散乱と懸濁粒子

NDPのエコーレベルにノイズ、伝播損失補正を施し

て得られた後方散乱エネルギーフラックス (ABSE) を、(1) で示した底泥懸濁粒子の散乱実験の結果とLISST-25によって測定された底層懸濁粒子の体積濃度を使って体積後方散乱係数に変換した。体積後方散乱係数の深さ-時間分布を図-3(a)に示す。図-3(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た波形を示している。図-3(b)と図-3(c)はそれぞれTPMクロロテックを昇降して得られた濁度とChl. a の深さ-時間分布である。

体積後方散乱係数 S_v と濁度の分布をみると、両者とも

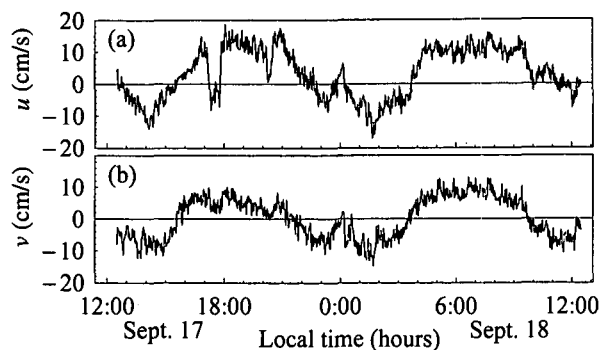


図-4 深さ 10 m における流速の経時変化

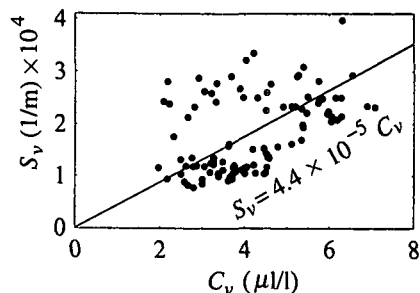


図-5 深さ 14 m における体積濃度と体積後方散乱係数の関係

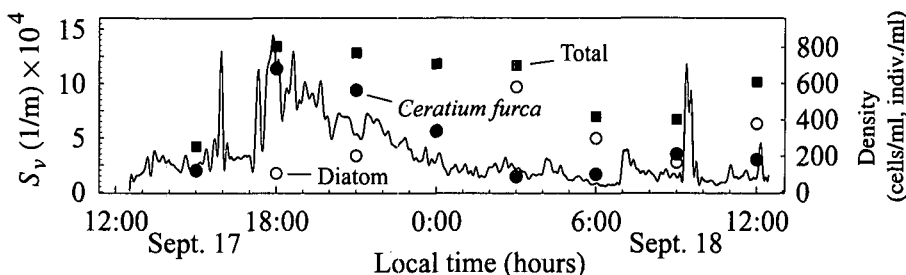


図-6 深さ 2 m における体積後方散乱係数とプランクトン密度の経時変化

干潮時付近で深さ 10 m 付近を中心として値の大きい領域がある。最大値を示す時間は、図-4 に示した深さ 10 m における流速の東 (u)、北 (v) 方向成分の時系列と比較すると、下げ潮の最大流速の発生時間より少し遅れている。図-1 から分かるように、観測地点の北東部には幅約 500 m の狭窄部があり、下げ潮時にここで発生した濁質が観測地点に運ばれて来た結果、 S_v と濁度が大きくなったと考えられる。図-3(c) の Chl. a の分布と S_v 、濁度分布の相違は、中層以深の主な散乱体は植物プランクトン以外の懸濁粒子であることを示している。

図-5 は深さ 14 m における懸濁粒子の体積濃度 C_v と体積後方散乱係数 S_v の関係をプロットしたものであるが、川西ら (2002) が示しているように C_v と S_v の間には正の相関が認められる。ただし、NDP と LISST-25 のデータは、周期 10 分以下の変動成分を離散 Wavelets フィルターで取り除いてある。

図-3(a) をみると、17 日の 18:00 を中心として表層部に強い音響散乱がみられる。深さ 2 m で 90 分間隔のポンプ採水を行い、プランクトンの同定・計数を行った結果と 2 m 層の S_v の経時変化を図-6 に示す。図-5 と同様、 S_v は Wavelets フィルターで周期 10 分以下の変動成分を取り除いてある。検鏡の結果、大型渦鞭毛藻である *Ceratium furca* と珪藻類が優占しており、動物プランクトンの個体数は少なかった。プランクトンの体長は

100~200 μm のものが卓越していた。

図-6 をみると、NDP の体積後方散乱係数の経時変化は *Ceratium furca* のそれによく似ていることがわかる。一方、珪藻類との間には正の相関はみられない。*Ceratium furca* の長さ 100~200 μm でその細胞は硬い鋸板で覆われている。同じ渦鞭毛藻である *Heterocapsa* の音響パラメーター $|d|=0.034$ を使い、等価半径 $a=60$ μm とすると、*Ceratium furca* の後方散乱断面積 σ_{bs} は 10^{-12}m^2 となる。この σ_{bs} を使うと、細胞密度 500 cells/ml で体積後方散乱係数 S_v は $5 \times 10^{-4}\text{m}^{-1}$ となり、図-6 に示された S_v の大きさを説明できる。これは体長 500 μm 程度の動物プランクトンが 10^6indiv./m^3 の個体密度で存在した時の体積後方散乱係数に匹敵する。著者らによる広島湾北部域の観測によると、しばしば ABSE が上層で日周変動を示したが、本研究の変換係数を使って ABSE を S_v に変換すると、 S_v の最大値は $10^{-4} \sim 10^{-3}/\text{m}$ となった。表-1 に示したように、珪藻の σ_{bs} は *Ceratium furca* の σ_{bs} に比べて 4 桁程度小さく、観測中の細胞密度が同程度であったことから、体積後方散乱係数に対する珪藻類の寄与は殆どないと考えられる。

図-7(a) に体積後方散乱係数 S_v と濁度、Chl. a の相互相関係数の鉛直分布を示す。中層以深の S_v の時間変動は濁度と相関が高く、上層では Chl. a と相関が高い。濁度との相関が高い深さ 10 m における濁度と S_v の関係

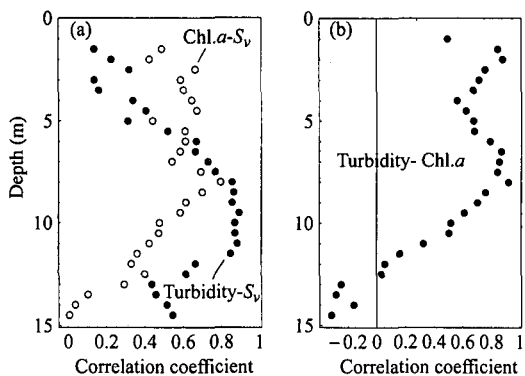


図-7 (a)体積後方散乱係数と濁度, Chl. *a* の相関係数 (b)濁度と Chl. *a* の相関係数

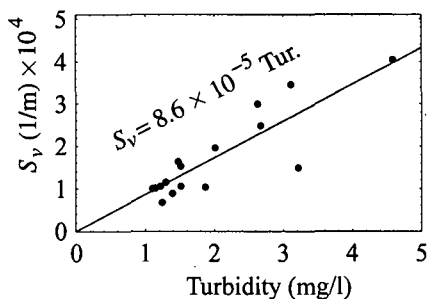


図-8 深さ 10 m における濁度と体積後方散乱係数の関係

を図-8 に示す。両者の間には比例関係が認められる。懸濁粒子の大きさが数十 μm と大きいと、表-1 に示した底泥粒子の散乱実験結果と比べると濁度計の指示値は重量濃度を過小評価している。図-7(b) に示したのは濁度と Chl. *a* の相互相関係数の鉛直分布である。濁度と Chl. *a* の相関は上層で高いが、中層以深では低くなっている。図-7(a) (b) の結果から、上層の主な散乱体は植物プランクトンであるのに対して、中層以深の散乱体としては底泥の再懸濁粒子、デトリタス、動物プランクトンなどが考えられる。表-1 の散乱実験の結果からすると、底泥の再懸濁粒子からの散乱で、図-3(a) に示されている中層以深の体積後方散乱係数の大きさを説明できる。

4. おわりに

内湾域に存在する主な懸濁粒子である動植物プランクトン、底泥懸濁粒子の音響パラメーターを評価した。また、広島湾において 1.5 MHz 超音波の音響散乱分布に加えて、プランクトン、濁度、底層懸濁粒子の体積濃度の 24 時間連続観測を行い、超音波ドップラー分布計で測定された体積後方散乱係数に寄与する散乱体について考察した。得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 懸濁粒子の海水に対する密度比と音速比から決まるパラメーター d の絶対値は、植物プランクトンで 0.02~0.03、動物プランクトンで 0.05、底泥粒子で 2.2 程度である。
- (2) 周波数 1.5 MHz の超音波に対する後方散乱断面積 σ_{bs} は、体長 500 μm 程度の動物プランクトンで

10^{-10} 、渦鞭毛藻類 (大きさ 25 μm 程度) や珪藻類で 10^{-17} ~ 10^{-16} のオーダーであり、植物プランクトンの σ_{bs} は動物プランクトンの σ_{bs} に比べてかなり小さい。ただし、植物プランクトンでもサイズ次第では動物プランクトンに匹敵する散乱を引き起こす。

- (3) 広島湾北西部の大野瀬戸の観測では、中層以深の体積後方散乱係数 S_v の時間変動は濁度変動と相関が高く、上層では Chl. *a* の変動と相関が高かった。深さ 2 m では大型渦鞭毛藻である *Ceratium furca* の細胞密度が S_v に良く対応していた。植物プランクトンの散乱実験の結果とハイパスモデルから *Ceratium furca* の後方散乱断面積 σ_{bs} は 10^{-12}m^2 程度と考えられ、この σ_{bs} を用いて 2 m 層の S_v を説明できた。

参 考 文 献

- 川西 澄・水野博史・高杉由夫・内田卓志 (2001a): 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, 土木学会論文集, 691/II-57 号, pp. 143-151.
- 川西 澄・水野博史・内田卓志 (2001b): 1.5 MHz 超音波ドップラー分布計を用いた感潮域における懸濁粒子の動態観測, 海岸工学論文集, 48 巻, pp. 1096-1100.
- 川西 澄・水野博史・松山幸彦・長井 敏・小谷祐一 (2002): 広島湾北部域における底層懸濁粒子からの音響散乱特性—超音波ドップラー分布計による底層濁度と体積濃度の測定可能性について—, 海の研究, 11 巻, 2 号, pp. 285-293.
- Foote, K. G. (1990): Speed of sound in (*Euphausia superba*), J. Acoust. Soc. Am., Vol. 87, No. 4, pp. 1405-1408.
- Greenlaw, C. F. (1979): Acoustical estimation of zooplankton populations, Limnol. Oceanogr., Vol. 24, pp. 226-242.
- Johnson, R. K. (1977): Sound scattering from a fluid sphere revisited, J. Acous. Soc. Am., Vol. 61, pp. 375-377.
- Thomas, L. C., J. R. Proni, et al. (1984): A simple model for the acoustic cross section of sand grains, J. Acous. Soc. Am., Vol. 76, No. 5, pp. 1580-1582.