

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

川 西 澄*・水野博史**・内田卓志***

1. はじめに

感潮域に存在している様々な懸濁粒子(生物, 非生物)は, 栄養塩の循環, 貧酸素化や赤潮の発生などに密接に関係していると考えられ, その動態を知ることが感潮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。一般に, 感潮域における懸濁粒子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, 採水などによる間欠的な測定から海中に存在する懸濁粒子(プランクトンを含む)の動態を把握することは困難である。

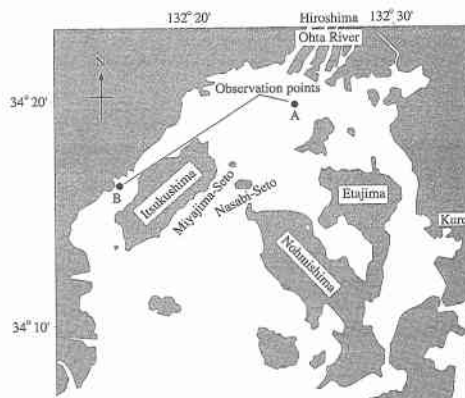
外洋では動物プランクトンの分布や鉛直移動が ADCP を使って測定されているが(Flagg ら, 1989), 沿岸域では散乱体の組成が複雑で多種多様な上, 小さなサイズのものが多いため, その測定例はほとんどない。Pieper ら (1984) は南カリフォルニア沖で, 0.5~3 MHz の超音波を使って動物プランクトン量を測定した結果, 3 MHz の後方散乱が最も動物プランクトン量と相関が高く, 0.5 MHz では散乱が弱く, 小さな相関しか得られないことを示している。富栄養化した内湾域におけるプランクトンは, 外洋域に比べて小型ものが多いと考えられ, 従来用いられてきた低周波数の ADCP 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。

本研究は周波数 1.5 MHz の NORTEK 社製超音波ドップラー分布計(以下 ADP と呼ぶ)によって連続的に測定された後方散乱をソナー方程式を用いて解析し, 感潮域における懸濁粒子の動態, 分布や輸送機構を明らかにすることを目的とする。

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°16'21"N, 132°



図一 観測地点

16°9'E) において, 超音波の周波数が 1.5 MHz, ビーム傾斜角 25° 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, 散乱光式濁度計で濁度を測定するとともに, 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 (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) を図一に示す。

(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°19'49"N, 132°24'56"E) において, 2000 年 10 月 14 日 10:35~11 月 18 日 9:45 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, 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。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, 深さ 4 m で塩分, 水温, 濁度, クロロフィル蛍光を連続測定するとともに, 動物プランクトンを調査した。また, 1 週間に 1 度, 測器の清掃・点検を行い, 合せて濁度とクロロフィル蛍光の鉛直分布を測定した。

* 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

** 学生会員 広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻

*** 理博 (独)水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所 室長 生産環境研究室

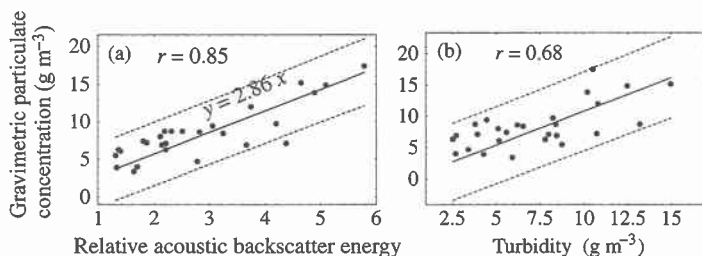


図-2 底層における後方散乱エネルギーと懸濁粒子濃度

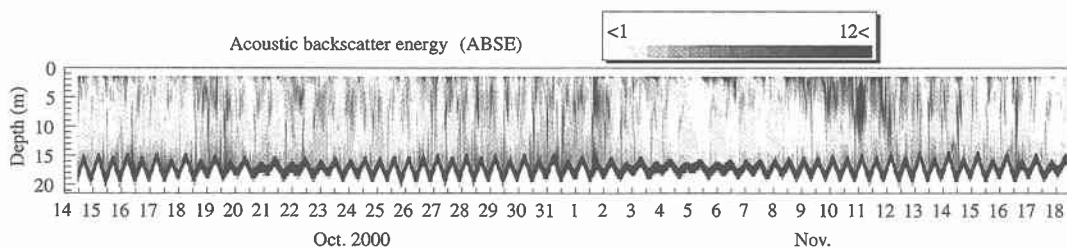


図-3 後方散乱エネルギー (ABSE) の水深-時間分布

動物プランクトン同定・計数用の試料は2000年10月24日11時に網目70 μm の北原式プランクトンネットを用いて海底から表層までの鉛直曳きを行うことによって得られた。試料はルゴール・ヨード液で固定後、持ち帰って沈殿濃縮し、同定・計数に供した。

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、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(川西ら, 2001)し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ソースレベル・受信感度が不明なので、図-2(a)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。図-2(a)に示すように、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。相関係数は0.85であり、図-2(b)に示した濁度計による濁度と懸濁粒子重量濃度間の相関係数0.68より高い。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) 気象の状況

広島気象台における風と降水量の時系列を調べた結果、風と降水量の状況は以下のようであった。観測中是一部、海陸風にともなう南よりの風が確認されるが、全体に北よりの風が卓越しており、10月18日の風が最も強く、 10 ms^{-1} 程度の北北東の風が観測されている。日降水量をみると、11月1日に40 mm、2日に30 mm程度の降雨が記録されている。

b) 後方散乱エネルギーの水深-時間分布

ADPのエコーレベルにノイズ、伝播損失補正を施し、図-2(a)の比例定数を掛けた後方散乱エネルギー値(ABSE)の水深-時間分布を図-3に示す。図-3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。

後方散乱エネルギーは水深方向にも時間的にも大きく変動しているが、時間変動には周期性が見られる。すなわち、広島湾は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している。これに加えて、2000年7月と9月に広島湾北部域で観測された結果(川西ら, 2001)と同様、日周期の変動も確認され、例えば小潮で潮流による移流の影響が弱い11月上旬をみると、昼間低く、夜に大きくなる日周期変動が明瞭にみられる。後述するABSE変動のスペクトルにも1日周期のピークが確認される。散乱の強さが日周期で変化しているのは、夜間に多く出現する散乱体、恐らく動物プランクトンによるものであ

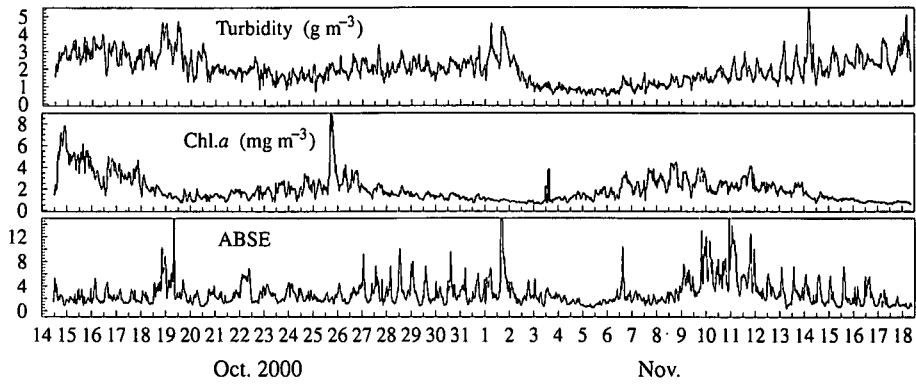


図-4 深さ 4 m における濁度, Chl. a, ABSE の経時変化

ると考えられる。

2000 年 10 月 24 日 11 時の調査によると、動物プランクトンの中で個体数の多かったのは、カイアシ類のノープリウス期幼生、*Oithona davisae* (雌)、二枚貝類のアンボ期幼生、*Oikopleura* sp., *Oithona* 属のコペポダ期幼生及びフジツボ類のノープリウス期幼生などであり、いずれも $5 \times 10^3 \text{ indiv. m}^{-3}$ 以上が観察された。特にカイアシ類のノープリウス幼生は $5.3 \times 10^4 \text{ indiv. m}^{-3}$ と動物プランクトン中最大密度を記録した。これらの優占的な動物プランクトンの体長は概ね 100~600 μm であり、*Oithona davisae* (雌) が体長 500 μm 前後で比較的大型であった。なお、動物プランクトン全個体の数密度は $1.52 \times 10^5 \text{ indiv. m}^{-3}$ であった。

植物プランクトンは、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、細胞数密度が相当高くならなければ、大きな ABSE は得られないと考えられる。さらに、深さ 4 m でのクロロフィル蛍光の連続測定や週 1 回行ったクロロフィル蛍光の鉛直分布測定からは高濃度の chl. a は検出されなかったもので、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。

図-4 に深さ 4 m で測定された濁度, Chl. a, ABSE の経時変化を示す。各測定量の経時変化は互いに異なっており、散乱体の種類の違いを反映している。図-5 に示す分散 σ^2 で無次元化した ABSE 変動のスペクトル $P(f)$ には、半日周潮に対応する顕著なピークの他に、日周潮より周期の短い 1 日周期のピークがみられ、主な音響散乱体が生物粒子であることを示唆している。

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。

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

ここで、 S_v は体積後方散乱係数、 ρ_v と σ_{bs} はそれぞれ、散乱体の数密度と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、(1) 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球体でプランクトンをモデル化した、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

$$\sigma_{bs} = 4\pi a^2 \left[\frac{2(ka)^4}{2+3(ka)^4} \right] \left(\frac{1-\rho_r c_r^2}{3\rho_r c_r^2} + \frac{1-\rho_r}{1+2\rho_r} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

のように表される (Greenlaw, 1979)。ここに、 a はプランクトン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、プランクトンと海水の密度比と音速比である。(2) 式からわかるように、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。

(1) 式から、散乱体の重量濃度 C_g については

$$S_v = C_g \sigma_{bs} / (\rho_s V_s) \quad \dots\dots\dots (3)$$

の関係が成り立つ。ここに、 V_s と ρ_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粒径 100 μm の底屑懸濁粒子 (BSPM) と、体積が粒径 400 μm の球に等価な粒子と仮定した動物プランクトンに関する音響パラメータを示すと表-1 のようになる。ただし、BSPM 内部

表-1 底屑懸濁粒子 (BSPM) と動物プランクトンの音響パラメータ

	BSPM (100 μm)	zooplankton (400 μm)
σ_{bs} [m^2]	9.6×10^{-11}	4.1×10^{-9}
$\sigma_{bs}/(\rho_s V_s)$ [$\text{g}^{-1} \text{m}^2$]	1.6×10^{-4}	7.5×10^{-5}

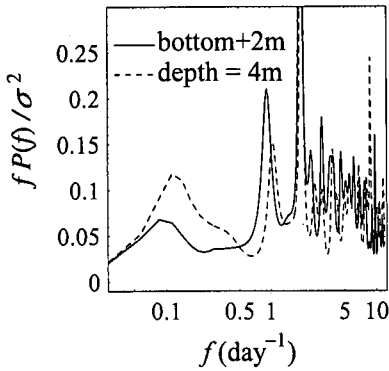


図-5 ABSE変動のエネルギースペクトル

の音速は、Hamilton ら (1982) による海底堆積物に関する結果から 1530 ms^{-1} を、密度は谷本ら (1994) の大阪湾における沈降速度の現場測定結果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 (Furusawa ら, 1994)。2000 年 10 月 24 日 11 時の ABSE の水深平均値は約 2.5 であった。これがすべて動物プランクトンによる散乱と考え、表-1 のパラメータを使うと、動物プランクトンの個体密度は $1.5 \times 10^5 \text{ indiv. m}^{-3}$ 程度となり、前述した調査結果と一致する。

c) 底層懸濁粒子濃度・ABSE の変動特性

図-6 に海底上 2 m における流速の絶対値 $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ と後方散乱エネルギー (ABSE) の経時変化を示す。図-5 に示したように、底層の ABSE 変動のスペクトルには日周潮、半日周潮に対応する顕著なピークがみられ、潮流による移流によって、底層懸濁粒子濃度が変動していることがわかる。また、後述する月齢に対応する長期変動のピークも図-5 に確認される。前述したように、底層では深さ 4 m と異なり、日周潮に対応して 1 日周期よりやや周期の長いピークがみられる。

図-7 に ABSE と水深、東方向流速 u 、絶対流速 V の相互相関係数を示す。図-7 の結果は、満潮時に ABSE が最大となり、絶対流速と ABSE の間には相関がほとんどないことを示している。満潮時に ABSE が最大となる

のは、朱ら (1999) 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、南西が高く北東が低い濃度勾配が存在しているためと考えられる。

図-6 にみられる ABSE の長周期変動の特徴は、朱ら (1999) 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長周期変動は、絶対流速の長周期変動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。Kawana ら (1986) が指摘しているように、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、川西ら (1995) 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。

ここで、底層懸濁粒子濃度 c の変動の説明を、次の移流拡散方程式から試みる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = -\vec{\Gamma} \cdot \vec{F} + \beta \quad \dots\dots\dots (4)$$

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

$$c = -\frac{\partial c}{\partial x} \int_0^t u dt - \frac{\partial c}{\partial y} \int_0^t v dt + a \int_0^t V dt + \beta t + c_0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。(5) 式をもとに、重回帰分析を行って求めた ABSE の変動を図-6 中に破線で示す。ただし、 c の水平勾配と生成率を一定としていることからあまり長期のデータに適用するのは適当でないで、11 月 1 日以前と以降に分けて (5) 式をあてはめた。仮定に無理があるので、決定係数は前半で 0.38、後半で 0.32 とあまり高くないが、(5) 式で、底層濃度・ABSE の変動をある程度説明できることがわかる。

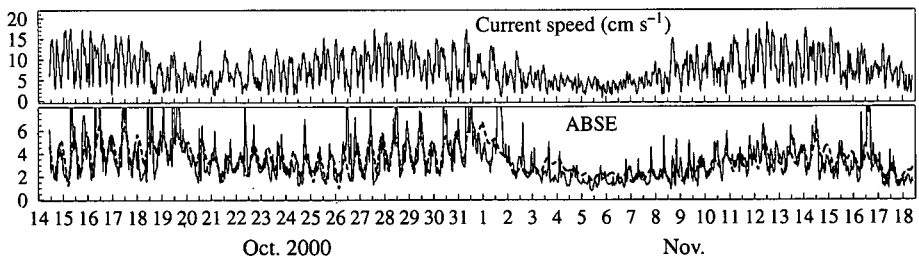


図-6 底層 (海底から 2 m) における絶対流速と ABSE の経時変化

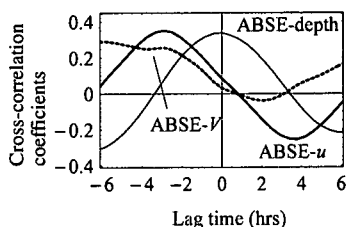


図-7 底層における ABSE と水深、東方流速、絶対流速の相互相関係数

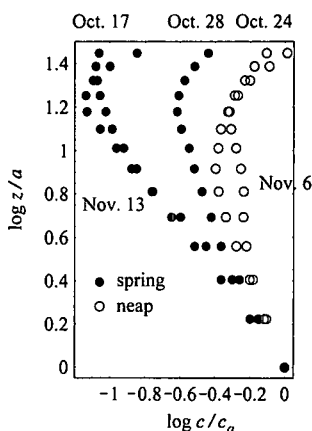


図-8 ABSE の長周期変動成分の鉛直分布

潮汐成分を除いた懸濁粒子濃度の長周期変動成分 $\hat{c}$ 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、長周期変動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、 $\hat{c}$ の鉛直分布は次式で表される。

$$\frac{\hat{c}}{\hat{c}_a} = \left(\frac{z}{a} \right)^{-w_s / \kappa \hat{u}_*} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 z は海底からの高さ、 w_s は懸濁粒子の沈降速度、 $\hat{u}_*$ は底面摩擦速度の長周期変動、 κ はカルマン定数、 $\hat{c}_a$ は海底からの高さ a における濃度である。(6) 式から、 $\hat{c}/\hat{c}_a$ と z/a の関係を両対数表示すれば、直線になる。図-2 の結果から、ADP で測定された下層の ABSE を懸濁粒子濃度とみなし、図-8 に大潮と小潮における ABSE 長周期成分の鉛直分布の両対数プロットを示す。長周期変動成分は、完全に潮汐成分を除くため、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。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

を示唆している。

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。周波数 1.5 MHz の超音波に対する主要な散乱体は上層では動物プランクトン、下層はデトリタス等の懸濁粒子であると考えられる。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。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。

謝辞：観測にご協力頂いた瀬戸内海区水産研究所調査船「しらふじ丸」の松田船長、「せと」の後藤技官をはじめ、乗組員各位に深謝します。

参考文献

- 川西 澄・余越正一郎 (1995): 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, 45 巻, pp. 956-960.
- 川西 澄・水野博史 (2001): 浅水感潮域における水中音響散乱体の変動特性, 水工学論文集, 45 巻, pp. 1045-1050.
- 朱 小華・高杉由夫・橋本英資・安田秀一 (1999): 広島湾における底層懸濁物質の濃度変動, 沿岸海洋研究, 37 巻, 1 号, pp. 59-67.
- 谷本照己・星加 章 (1994): 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, 3 巻, 1 号, pp. 13-20.
- Flagg, C. N. and S. L. Smith (1989): On the use of the acoustic Doppler current profiler to measure zooplankton abundance, Deep-Sea Res., Vol. 36, No. 3, pp. 455-474.
- Furusawa, M., Y. Miyano, et al. (1994): Prediction of Krill target strength by liquid prolate spheroid model, Fish. Sci., Vol. 60, No. 3, pp. 261-265.
- Greenlaw, C. F. (1979): Acoustical estimation of zooplankton populations, Limnol. Oceanogr., Vol. 24, pp. 226-242.
- Hamilton, E. L. and R. T. Bachman (1982): Sound velocity and related properties of marine sediments, J. Acous. Soc. Am., Vol. 72, No. 6, pp. 1891-1904.
- Johnson, R. K. (1977): Sound scattering from a fluid sphere revisited, J. Acous. Soc. Am., Vol. 61, pp. 375-377.
- Kawana, K., T. Tanimoto, et al. (1986): Entrainment of bottom sediment in the Seto Inland Sea, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 42, pp. 381-388.
- Pieper, R. E. and D. V. Holliday (1984): Acoustic measurements of zooplankton distributions in the sea, J. Cons. int. Explor. Mer., Vol. 41, pp. 226-238.