

瀬戸内海における鉛直混合強度の測定

長尾正之*・橋本英資**・高杉由夫***

沿岸域での鉛直混合の強さは、成層の形成・崩壊、粒子の鉛直輸送、潮汐フロントや密度流の変化といった物理過程に深く関わっている。また、プランクトン挙動等の生物過程にも大きな影響を与えている。しかし、海洋構造が複雑に変化する沿岸海域で鉛直混合強度を計測した例は少なく、その実態はほとんど明らかになっていない。そこで、本論文では、日本を代表する瀬戸内海の東部・西部海域で海洋鉛直微細構造を測定し、夏季の成層構造と鉛直混合強度の分布について検討した。その結果、海中の鉛直渦動拡散係数 K_z は一様でなく、また K_z の平均値は海域間により 10 倍から 100 倍の違いが認められ、変化に富んでいることがわかった。また、広島湾奥部では K_z の値は他海域に比べて小さく、これが内湾の植物プランクトン鉛直分布を支配している可能性が示唆された。

1. はじめに

沿岸域での鉛直混合の強さは、成層の形成・崩壊、粒子の鉛直輸送、潮汐フロントや密度流の変化といった物理過程のほか、プランクトン挙動等の生物過程にも大きな影響を与えている（橋本・高杉, 1998）。しかし、外洋域での直接計測に比べれば、海洋構造が複雑に変化する沿岸海域で鉛直混合強度を直接計測することは難しい。このため、外洋観測とは異なる観測方法が求められる。

この問題を受けて、国内では、高杉ら（1995）が、沿岸域での鉛直混合強度測定に有利な自由浮上型の海洋鉛直微細構造測定装置（Micro-Scale Profiler, MSP）を設計・試作し、別府湾で測定を行った。また、その後、周防灘において密度躍層の内部とその前後で鉛直渦動拡散係数が大きく異なること（高杉ら, 1996; Nagao ら, 2002）、成層期の広島湾・呉湾では躍層中の鉛直混合強度が小さく、これが海底の貧酸素化の原因と考えられること、および鉛直渦動拡散係数の鉛直分布は多層構造を有すること（橋本・高杉, 1998）が、MSP による観測で明らかとなった。このように、MSP により個々の沿岸域の鉛直混合強度を得ることが可能となった。また、MSP で測定された鉛直混合強度と成層強度あるいは貧酸素水塊発生等の環境問題との関連も、これら研究の中で論じられている。

一方、たとえば複数の自治体にまたがって沿岸域全体の環境政策を立案する場合には、個別の内湾よりもさらに広い空間スケールで鉛直混合強度分布の把握（マッピング）を行っておくことが、今後は必要になると考えられる。また、この鉛直混合強度のマッピング作業の成果は、たとえば海峡部で発生する潮流渦の影響を取り込んだ高精度数値計算の構築や、外洋環境変動が内海へ与える影響（たとえば、藤原ら, 2003）を詳細に検討する場合等に対して、重要な基礎資料となる。

そこで、本研究では、広いスケールに対する鉛直混合強度のマッピングの手始めとして、日本を代表する瀬戸内海の東部・西部海域で海洋鉛直微細構造を測定し、夏季の成層構造と鉛直混合強度の分布について検討した。なお、観測では自由落下式の海洋鉛直微細構造測定装置と、MSP の発展型である自由浮上型鉛直微細構造測定装置を用いた。後者は新しい測器であるため、第 2 節で簡単に紹介する。

2. 調査地域・方法

(1) 自由浮上式海洋鉛直微細構造測定装置 Turbo Map4

図—1 に、(a) 自由浮上式海洋鉛直微細構造測定装置 TurboMap4 の概観と (b) 鉛直混合強度の測定方法を示す。この装置は、特に水深が浅く河川水および人間活動の影響を受けやすい沿岸域を対象として、鉛直混合強度、水温、水深、塩分、濁度および植物プランクトン量を、海底から海面まで数 mm 間隔で取得するために製作した。装置先端には、乱流強度を測定するシアープローブ、水温計（高/低感度）、水深計、塩分測定用の電気伝導度計、光を利用した濁度計と植物プランクトン量を測定するクロロフィル計が取り付けられている。なお、シアープローブは海中の水平方向流速の鉛直傾度（シアア, du/dz ）を直接計測するセンサーである。観測時には、図—1(b) に示す通り、この TurboMap4 に下向きの力を与えるために重りを取り付け、観測船より海面から海中に投下する。その後、装置下端が海底に達すると自動的に重りが切り離され、それ自身の浮力により装置は一定速度（70 cm/s~100 cm/s）で海中を上昇する。その際、計測データは内部メモリーにサンプリング周波数 256 Hz で記録される。鉛直方向のデータ取得間隔は浮上速度によるが、3 mm~4 mm である。そして、TurboMap4 を観測船に回収後、パソコンにデータを取り込み、乱流強度の解析を行う。

(2) 観測地点と観測方法

図—2 に瀬戸内海の地図と観測地点を示す。ここで、

* 正会員 博(工) (独法)産業技術総合研究所
** 正会員 (独法)産業技術総合研究所
*** 農 博 (独法)産業技術総合研究所

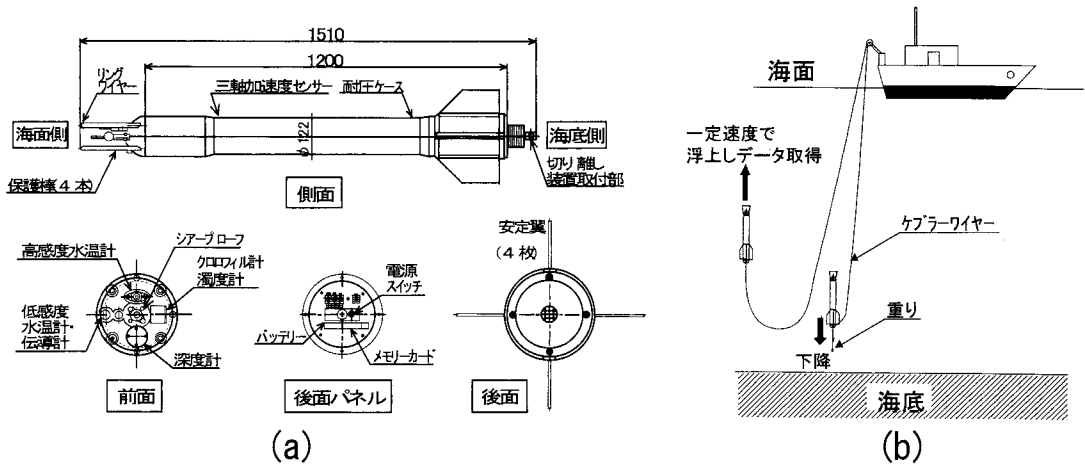


図-1 (a) 自由浮上式海洋鉛直微細構造測定装置 TurboMap4 の概観と (b) 鉛直混合強度の測定方法。

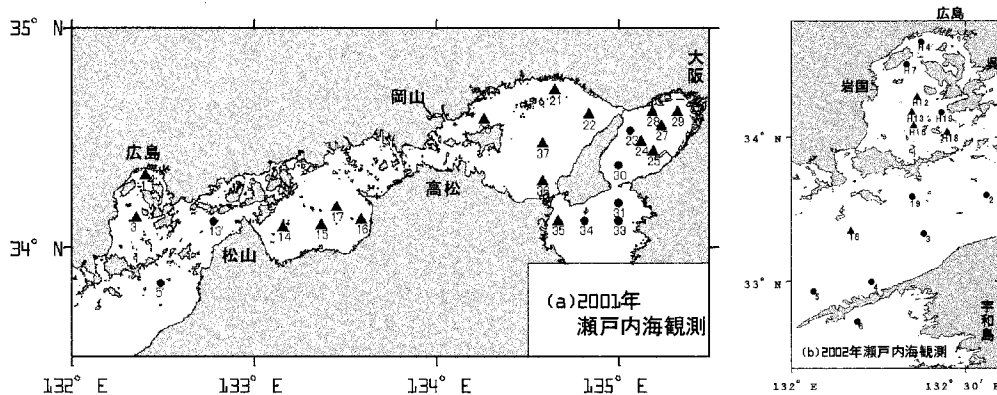


図-2 瀬戸内海の平面図と観測点。(a) 2001年観測時、(b) 2002年観測時。鉛直混合強度が取得できた観測点を●で、そうでなかった点を▲で示す。海岸線データは(財)日本水路協会資料を利用。

図-2(a)は2001年の観測海域を、また図-2(b)は2002年の観測海域を示す。観測は、2001年7月24日から30日(期間①)と2002年7月8日から12日(期間②)に実施した。このうち、期間①では図-2(a)に示す地点で、また期間②では図-2(b)に示す地点で観測を実施した。

この調査では、2台の海洋鉛直微細構造測定装置を使用した。一台は前述の TurboMap4 で、浅海域の計測に適している。また、残る1台は自由落下型の TurboMap (Turbulence Ocean Microstructure Acquisition Profiler, アレック電子製)で、大深度での観測に適している。なお、TurboMapのセンサーおよび測定周波数は前述の TurboMap4 と同一であるため省略する。この他、観測では超音波ドップラー流速プロファイラー (Workhorse ADCP 600 kHz, RD Instruments 製)を用いて、海中流速の鉛直分布を計測した。

次に、鉛直混合強度の計算について概略を示す。エネルギー逸散率 ϵ は、流速の鉛直シアードータのスペクト

ルを積分して得られるシアアの分散 $\overline{(du'/dz)^2}$ 、ならびに式(1)により求められる。

$$\epsilon = \frac{15}{2} \nu \left(\frac{du'}{dz} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 u' は水平流速の乱れ、 z は鉛直座標(上向きを正)、 ν は海水の動粘性係数である。

また、成層の静的安定性の指標であるパイサラ周波数 N は、水温と塩分から計算される密度 ρ と、式(2)より計算される。

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \quad (2)$$

ここで g は重力加速度である。

鉛直渦動拡散係数 K_z は、この N と ϵ を式(3)に代入して計算される。

$$K_z = \gamma \frac{\epsilon}{N^2} \quad (3)$$

ここで、 γ はフラックスリチャードソン数に関係した係

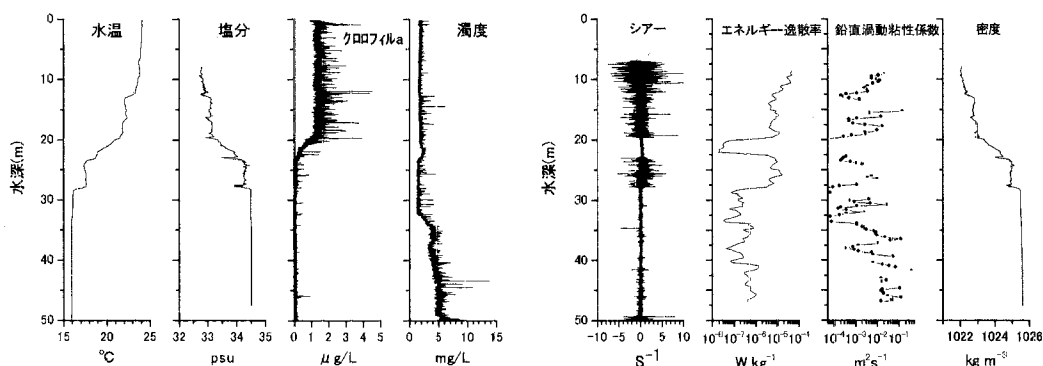


図-3 紀伊水道での鉛直微細構造と鉛直混合強度の測定例 (2001年観測, Stn. 31).

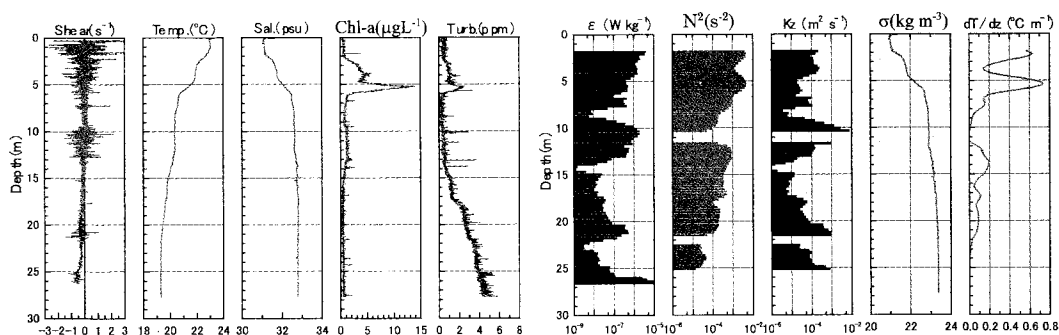


図-4 広島湾奥部の微細構造と鉛直混合強度の測定例 (2002年観測, Stn. H7).

数で, 一般に 0.2 以下の値と考えられているが, 以降の解析では $\gamma=0.2$ とした (橋本・高杉, 1998). なお, 実際の計算では, 鉛直微細構造データを一定厚さを持つ層に分け, それぞれの層ごとに式 (1) と式 (3) を用いて ε と K_z を計算した.

3. 結果と考察

まず, 個々の観測例について述べる. 図-3 に 2001 年に紀伊水道内の Stn. 31 で測定した微細構造の記録を示した. 水深 28 m を境に, 水質が上下層に大別できることがわかる. そして, 上層内には水温・塩分・密度がほぼ一様な区間と, 層内の水温・塩分・密度が変化している区間が混在している. 特に, 水深 20~22 m の区間では, 乱れの強さを示すシアールとエネルギー逸散率 ε がその上下の層の値に比べて非常に小さく, この区間では混合が進んでいないことがわかる. この結果は, 紀伊水道内で, 沿岸域由来の海水と外洋起源の海水が鉛直方向に交互に存在し, それらが部分的に鉛直混合して新たな水塊を作る様子を捉えていると考えられる. 一方, 図-4 は広島湾奥部の Stn. H7 における微細構造と鉛直混合強度の例である. 図-4 によれば, 鉛直方向の K_z の値が 10^{-5}

m^2/s 以下から $10^{-3}\text{m}^2/\text{s}$ の範囲に広く分布していることがわかる.

図-5 は, (a) 2001 年と (b) 2002 年の観測毎に K_z の最大・最小・平均・中央値を地点毎 (取得プロファイル毎) にまとめたものである. 図-5 によれば K_z の平均値は, 海域間で 10 倍から 100 倍の差があり得ることがわかる.

以上より, K_z の平均値は鉛直方向に一律でなく, また海域間で大きさに大きな違いがあり, 変化に富んでいることがわかった.

このほか, 図-4 から, 広島湾奥部に近い Stn. H7 では, 海面から水深 5 m までは河川水の影響が強く低塩分であること, また水深 5~6 m に水温・塩分躍層が存在し, ここにクロロフィル a のピークと濁度の弱いピークが存在することがわかる. なお, 図-5(b) によると広島湾北部の Stn. H4, Stn. H7 の K_z の値は他海域より比較的小さく, 他海域よりも停滞性が強いことを示している. この停滞性の強さは, 図-4 に示した成層構造・クロロフィル a 分布の維持につながっている可能性がある.

なお, 参考のため成層する場所を支配するパラメタ H/U^3 (Simpson・Hunter, 1974; Fearnhead, 1975; 柳,

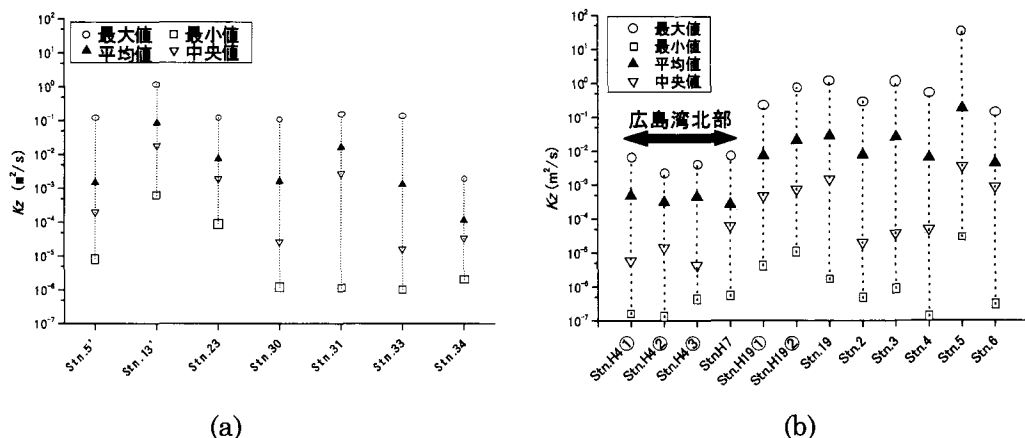


図-5 地点毎の K_z 。(a) 2001 年, (b) 2002 年観測。取得成功プロファイルのみを対象。また, K_z の鉛直プロファイルから正值のみを抽出し, その中の最大・最小・平均・中央値を示した。

表-1 各観測点の水深 H , 平均水平流速 U , および $\log_{10}(H/U^3)$

2001 年	H (m)	U (m/s)	$\log_{10}(H/U^3)$
Stn. 5	59.0	0.706	2.2
Stn. 23	49.0	0.325	3.2
Stn. 30	49.2	0.305	3.2
Stn. 31	48.3	0.232	3.6
Stn. 33	54.1	0.221	3.7
Stn. 34	45.0	0.215	3.7

2002 年	H (m)	U (m/s)	$\log_{10}(H/U^3)$
Stn. H4 ①	12.7	0.074	4.5
Stn. H4 ②	12.6	0.087	4.3
Stn. H4 ③	12.6	0.084	4.3
Stn. H7	26.6	0.071	4.9
Stn. H19 ①	30.2	0.100	4.5
Stn. H19 ②	30.5	0.099	4.5
Stn. 19	51.9	0.536	2.5
Stn. 2	36.3	0.165	3.9
Stn. 3	43.3	0.337	3.1
Stn. 4	56.5	0.743	2.1
Stn. 5	69.4	0.377	3.1
Stn. 6	59.4	0.290	3.4

1994) を計算し表-1 に示した。この値が小さい海域のほうが成層が破壊されやすい。ここで, H は観測時の水深とした。また本来なら U としては代表性のある現場の潮流振幅を U として用いるべきだが, ここでは ADCP で観測された東向流速 u_E , 北向流速 u_N を用いて $U = (u_E^2 + u_N^2)^{1/2}$ により求めた。表-1 から, 広島湾奥部の H/U^3 の値は他海域と比較すると大きく, 成層が維持されやすく停滞性の強い場所であることがわかる。

4. ま と め

海洋構造が複雑に変化する沿岸海域で鉛直混合強度のマッピングを実施するため, 日本を代表する瀬戸内海の東部・西部海域で海洋鉛直微細構造を測定し, 夏季の成層構造と鉛直混合強度の分布について検討した。その結果, 海中の鉛直渦動拡散係数 K_z は一様でなく, また K_z の平均値は海域間により 10 倍から 100 倍の違いが認められ, 変化に富んでいることがわかった。また, 広島湾奥部では K_z の値は他海域に比べて小さく, これが内湾の植物プランクトン鉛直分布を支配している可能性が示唆された。今後は, 局所リチャードソン数等の混合パラメタと鉛直混合強度との関係性を調べるとともに, 微細構造を使った沿岸環境の評価法につなげたいと考えている。

謝辞: 瀬戸内海での鉛直混合強度観測は, 広島大学生物生産学部附属練習船「豊潮丸」の教育航海の中で行われた。同船の郷秋雄船長と乗組員の方々, ならびに広島大学大学院生物圏科学研究科 上真一教授に厚く感謝の意を表する。また, 館澤みゆき氏, 神徳優子氏, 石田佐知子氏は観測作業に協力して下さい。アレック電子株式会社 矢津敏弘氏, Fabian Wolk 氏, Li Hua 氏には, TurboMap4 の製作ならびにツール提供でご協力いただいた。以上の方々に対し厚くお礼申し上げる。なお, 図-2 の作成には, (財)日本水路協会の資料を利用した。また, 本研究の一部は, 2001 年度科振費若手任期付研究員支援制度「海洋鉛直微細構造による内湾環境の診断評価」により行ったことを付記する。

参考文献

- 高杉由夫・安田秀一・肥後竹彦・埜口英昭 (1995): 沿岸域における鉛直混合強度—自由浮上式 MSP による測定—, 中工研報告, No. 45, pp. 23-31.
- 高杉由夫・安田秀一・肥後竹彦・埜口英昭 (1996): 周防灘西部における海洋構造と鉛直混合強度の分布, 中工研報告, No. 47, pp. 1-14.
- 橋本英資・高杉由夫 (1998): 浮上式 MSP による内湾の鉛直混合強度の測定, 海工論文集, 第 45 巻, pp. 966-970.
- 藤原建紀・小林志保・高志利宣 (2003): 瀬戸内海の窒素・リンの輸送と起源の現地観測, 海工論文集, 第 50 巻, pp. 951-955.
- 柳 哲雄 (1994): 沿岸海洋学—海の中でのものはどう動くか—改定版, 恒星社厚生閣, pp. 70-74, 154 p.
- Fearnhead, P. G. (1975): On the formation of fronts by tidal mixing around the British Isles, *Deep-Sea Res.*, Vol. 22, pp. 311-321.
- Nagao, M., E. Hashimoto, M. Yoshida and Y. Takasugi (2002): Turbulent measurements of the coastal shallow waters with a free-rising Micro-Scale Profiler, *Advances in Fluid Modeling and Turbulence Measurements*, World Scientific, pp. 453-460, 870 p.
- Simpson, J. H. and J. R. Hunter (1974): Fronts in the Irish Sea, *Nature*, Vol. 250, pp. 404-406.
-