

英虞湾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**
千葉 賢*** ・ 山形陽一****

英虞湾で夏季に鉛直混合強度の観測を行った。その結果、鉛直方向の平均値でみると、鉛直渦動拡散係数 K_z の範囲は、 $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ であり、湾口部が高く、湾奥部では小さい値だった。また、湾口部と湾奥部のエネルギー逸散率を比較したところ、やや湾口部が高い程度であった。しかし、成層強度を示すバイサラ周波数の二乗 N^2 は、 K_z が最大だった湾口部では 10^{-7} から 10^{-4} s^{-2} であるのに対して、 K_z が最小だった湾奥部では 10^{-4} から 10^{-3} s^{-2} に集中しており、湾奥部で成層強度が強いという結果が得られた。以上のことから、湾奥部で強い成層が発達していたことが、湾奥部で K_z が小さかった原因と考えられた。

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(橋本・高杉, 1998)、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と予想される。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、水深の浅い沿岸域での鉛直混合強度測定に適した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、周防灘、広島湾で測定を行っている(高杉ら, 1996; 橋本・高杉, 1998; Nagao ら, 2002)。一方、長尾ら(2004)は、日本を代表する半閉鎖性海域である瀬戸内海の東部・西部海域でMSPの発展型である自由浮上型海洋鉛直微細構造測定装置(TurboMap4)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。

本研究では、英虞湾を対象として、夏季に鉛直混合強度の実態把握を目的とする観測を行った。リアス海岸を有する三重県志摩半島の英虞湾では、三重県地域結集型共同研究事業のもとで様々な環境修復技術に関する研究が行われている。その研究の重要な柱のひとつとして、英虞湾環境動態シミュレーションモデルの開発研究が進められている。ここで問題となるのは、数値計算の高精度化に必要な現地観測データであり、特に成層した現場海域における鉛直混合強度の実態については、鉛直混合強度の直接計測が困難であるために知見が不足している。

そこで、本研究では、英虞湾環境動態シミュレーション

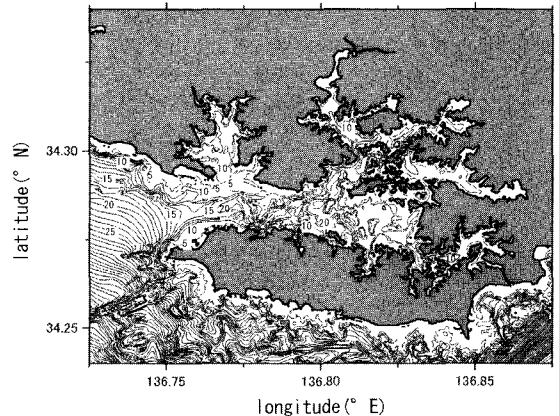


図-1 英虞湾平面図と等水深線図。データは(財)日本水路協会海洋情報研究センターが作成した「沿岸の海の基本図シェープファイル」による。

ンモデルの高精度化に必要な資料を得るために、夏季に鉛直混合強度の観測を行った。そして、英虞湾内で得られた海洋鉛直微細構造データから、同湾の鉛直渦動拡散係数(K_z)等の混合パラメータを求め、結果について検討した。

2. 調査地域・方法

(1) 三重県英虞湾の概要

図-1に英虞湾の平面図と等水深線図を示す。英虞湾は三重県志摩半島南部の湾で、隆起海食台地が沈降した典型的なリアス海岸で、沈降量が大きかった東部(湾奥)では数多くの小島を持ち、それとは対照的に西部の湾口部では島がまったくない(藤本, 1984)。同湾は波静かな静穏な湾であり、真珠養殖地として世界的に有名な湾として知られている。

次に湾形状からみた英虞湾の特徴を述べる。「日本の閉鎖性海域(88海域)環境ガイドブック」(国際エメックスセンター, 2001)によると、英虞湾の湾口幅は5.7 km、面積は42 km²、湾内最大水深は37 m、湾口最大水

* 正会員 (独法)産業技術総合研究所 地質情報研究部門

** (独法)産業技術総合研究所 地質情報研究部門

*** 正会員 四日市大学 環境情報学部

**** 三重県科学技術振興センター水産研究部

深29 mである。湾内最大水深が湾口最大水深よりも大きいことからわかるように、湾口部は浅く、シル (sill) が形成されている。また、上記の幾何学パラメータから計算される同湾の閉鎖度指標は1.45である。閉鎖度指標は次式で定義される (国際エメックスセンター, 2001)。

$$\text{閉鎖度指標} = (S^{1/2} \cdot D_1) / (W \cdot D_2) \cdots \cdots (1)$$

ここで、 W : 海域の入り口の幅、 S : 海域内部の面積、 D_1 : 湾内最大水深、 D_2 : 湾口最大水深。

この閉鎖度指標の値が大きいと湾の閉鎖性は高いと判断され、流入負荷量や内部負荷量が環境容量を超えた場合に富栄養化しやすい。水質汚濁防止法では閉鎖度指標の値が1を越えた湾を排水規制対象としており、閉鎖度指標だけから判断すれば英虞湾も対象となる。

前述のように、英虞湾はリアス海岸により波静かな湾となっており、これが英虞湾を真珠養殖の適地としている。しかし一方で、養殖業から出る負荷物質は、湾口部のシルのために簡単には湾外に排出されず、これが海底環境の悪化を誘発する一つの要因になっているとも考えられる。

(2) 観測地点と観測方法

今回の調査では、前述の自由浮上型海洋鉛直微細構造測定装置 (TurboMap4) を使用した (長尾ら, 2004)。その他、観測では超音波ドップラー流速プロファイラーを用いて、海中流速の鉛直分布を計測した。層の厚さは1 mとした。この流速データは、各観測点での水平方向の平均流速シアやリチャードソン数を計算するために利用する。このほか、水質計 (アレック電子製) により、水温、塩分、クロロフィル a (ウラニン換算)、DO、pH、濁度の鉛直分布を測定した。

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、流速の鉛直シアデータのスペクトルを積分して得られるシアの分散、ならびに式 (2) により求められる。

$$\varepsilon = \frac{15}{2} \nu \overline{\left(\frac{du'}{dz} \right)^2} \cdots \cdots (2)$$

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バイサラ周波数 N は、水温と塩分から計算される密度 ρ と、式 (3) より計算される。

$$N^2 = - \frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \cdots \cdots (3)$$

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^2 と ε を式 (4) に

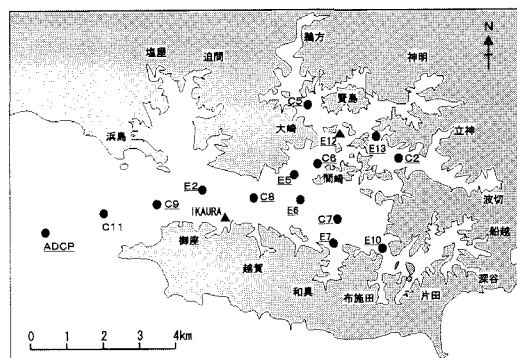


図-2 英虞湾平面図と観測地点。添え字は観測地点名を表す。鉛直混合強度観測を試みた測定点のうち、取得できた観測地点を●で、取得できなかった点を▲で示す。また、地点名に下線を付した地点では、水質計による観測を実施した。

代入して計算される。

$$K_z = \gamma \frac{\varepsilon}{N^2} \cdots \cdots (4)$$

ここで、 γ はフラックスリチャードソン数に関係した係数で、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約70 cmの厚さを持つ層に分け、それぞれの層ごとに式 (2) ~ 式 (4) を用いて ε と K_z を計算した。

このほか、成層流体中で乱れが発達しうるかどうかの目安となる局所リチャードソン数 Ri は、式 (5) で定義される。

$$Ri = \left(- \frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \right) / \left(\frac{dU}{dz} \right)^2 = N^2 / \Omega^2 \cdots \cdots (5)$$

ここで、 U は水平方向の平均流速、 Ω は dU/dz を示す。

図-2 に英虞湾の地図と観測地点を示す。観測は2004年8月4日に実施した。当日の月齢は17.2で、尾鷲港における午前の満潮の時刻は7:36、午後の干潮の時刻は14:09だった (海上保安庁, 2003)。観測は、この午前の満潮から干潮に向かう下げ潮の中で、9時から15時まで6時間かけて行った。観測では、前述の TurboMap4 を使い、英虞湾の湾口部から湾奥部の16地点で原則2回ずつ測定を行った。そして、観測後に微細構造データの確認を行い、流速の鉛直シアデータが良好な24プロファイル (14地点分) について K_z の鉛直分布を計算した。なお、海面付近では波により、また海底付近では切り離し直後の影響により、装置自体の不安定な動きがシアに影響を及ぼしていた。そのため、今回は海底側と海面側のデータを一部除いて解析した。

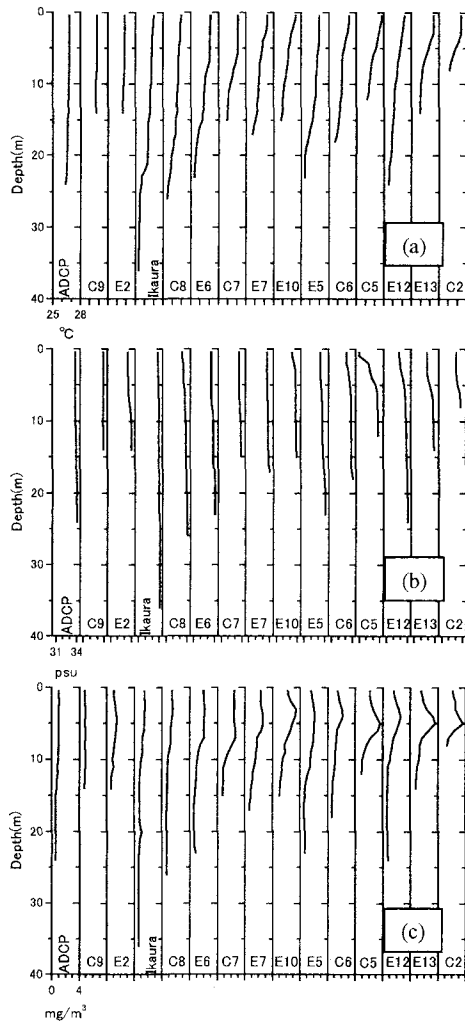


図-3 各地点の(a)水温、(b)塩分、(c)クロロフィル *a* の鉛直分布

3. 結果と考察

(1) 場所的な水温、塩分、流速などの違い

図-3は、水質計と ADCP で測定を行った地点の水温、塩分、クロロフィル *a*、流速である。なお、Stn.C11では水質を計測していない。プロファイルの左端の Stn. ADCP (湾口部) から Stn.E10までのデータは、湾の南側に沿った湾口から湾奥の定点のデータである。また、Stn.E5から Stn.C2までのデータは、湾の中央部から北側までの湾奥部のデータである。前に述べたとおり、全てのデータを得るために6時間かかったので、図-3のプロファイルは同一時刻のデータではないが、場所的な水質鉛直分布の傾向を述べることは許されるだろう。

水温(図-3(a))からみると、Stn.ADCP, Stn. C9, Stn. E2の水温成層は他の地点に比べて発達していない。一

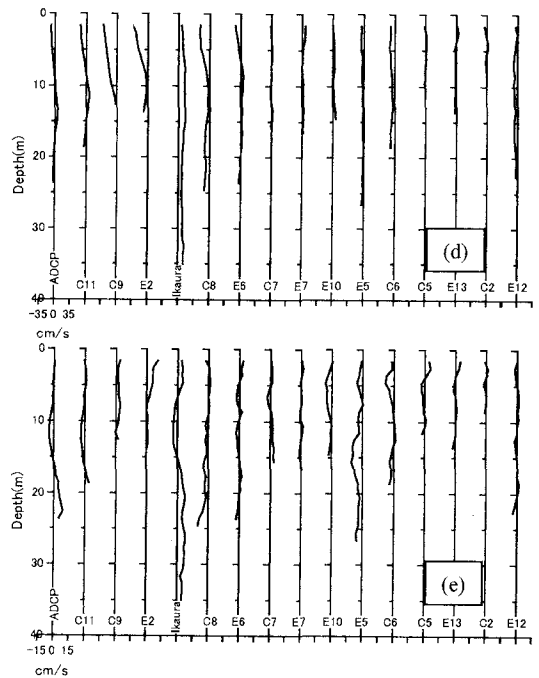


図-3 (続き) 各地点の(d), 東方流速, (e) 北方流速の鉛直分布。イカウラのデータは干潮からやや遅れた時刻に取得した。

方、この3地点の塩分(図-3(b))をみると、成層しており、特に水深11 mに弱い境界があるように見える。また、Stn.C9と Stn.E2には水平方向に塩分の差がある。したがって、Stn.C9と Stn.E2の間を境に、海水は湾口部と湾奥部に大きく分けられる。図-1, 2によると Stn. C9の付近はシルにあたるので、シルが水温・塩分の水平分布の境になっていると言える。

次に、Stn.E2よりも東側の定点の塩分と水温のデータをみる。陸水の影響を強く受けて塩分が低下している層は、場所によって異なるが、7 m程度までには及んでいると考えられる。また、表層に混合層が発達している地点(Stn.C7, C2)がある一方で、混合が進まず連続成層になっている地点も多い。これは、英虞湾がリアス海岸を有する湾であり、地形が複雑で風の影響が入江ごとに違うため、また陸水の影響を受けやすい地点とそうでない地点があるためだと考えられる。

クロロフィル *a* (図-3(c))は、表層が高く、下層で低い。また、湾奥部の定点では、クロロフィル *a* の最大値は海面直下でなく、水深2 mから7 mの位置に現れる。この位置は塩分・水温の躍層の位置に当たるように見える。

東方流速、北方流速(図-3(d),(e))をみると、各観測地点の流速は全水深に対して一様でなく、上下で逆向きに流れている場合もある。一方、各地点の水温、塩分

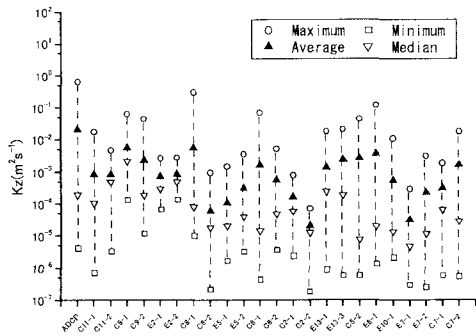


図-4 プロファイルごとの K_z の分布. 同じ地点で二つのプロファイルを示す場合は C11-1, C11-2 のように表した.

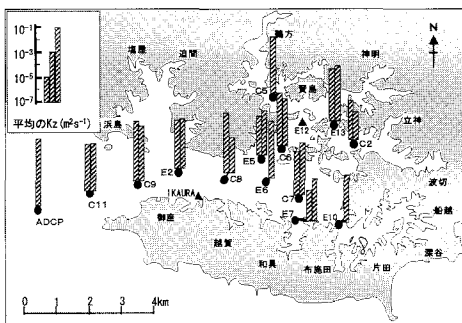


図-5 鉛直渦動拡散係数 (K_z) の鉛直平均値の分布.

の鉛直分布は図-3(a), (b)で示したとおり成層していた. この成層が, 流速の鉛直方向の不均一性に関係していると考えられる. また, 観測時間が6時間と長く, 潮汐の状況が各地点の観測時に異なるので比較は難しいが, Stn.C8, Stn.E2の流速は他地点に比べ大きかった. 各地点の流速分布のより詳細な解釈は重要ではあるが, これは今後の課題としたい.

(2) 鉛直渦動拡散係数 (K_z) の鉛直平均値の平面分布

図-4は, シアーデータが良好だった24プロファイルについて, K_z の最大・最小・平均・中央値をプロファイルごとにまとめたものである. 同じ地点で二つのプロファイルを示す場合は Stn.C11-1, Stn.C11-2と区別して示した. また, 英虞湾の鉛直混合強度の平面分布を見るために, プロファイルごとに K_z の鉛直平均値を求め, 図-5に対数で表示した.

平均値でみると, 最大の K_z のオーダーは $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ であり湾口部 (Stn. ADCP) で観測された. 一方, 最小の K_z のオーダーは $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ のオーダーで, 湾奥部の Stn. C8-2, C2-2, E7-1で観測された. 以上より, 英虞湾の K_z の平均値は $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ の範囲にあり, また湾口部で大きく, 湾奥ではそれより小さい値を取ることがわかった.

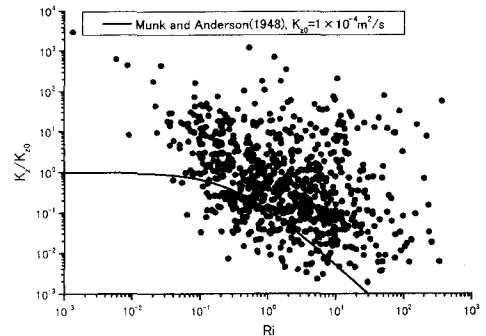


図-6 鉛直渦動拡散係数 K_z とリチャードソン数 Ri

なお, Stn.C8で2回測定した結果, K_z の平均値のオーダーは1回目が $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, 2回目が $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ であり2オーダー違う. また, E7-1, E7-2も同様で, 1回目が $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, 2回目が $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ であり, 1オーダー違う. このように同じ地点で2回測っても, 値が同オーダーに収まらない場合があった. この理由として, 測定中に船が流されて同一地点で測定できなかったことや, 平均化に使った K_z の鉛直分布の違いなどが考えられるが, 詳細な検討は今後の課題としたい.

(3) リチャードソン数 (Ri) と鉛直渦動拡散係数 (K_z)

Munk・Anderson (1948) は, 観測と理論の結果に着目して K_z をリチャードソン数 Ri の関数として表した (宇野木, 1993).

$$K_z = K_0(1 + 3.33 \cdot Ri)^{-1.5} \dots \dots \dots (6)$$

ここで, K_0 は成層がない状態の鉛直渦動拡散係数である. この式では成層安定度が増すと鉛直混合が弱くなることが考慮されている. 図-6には今回の解析で求められた K_z/K_0 と Ri の関係を示した. ここで, $K_0 = 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ と仮定した. Ri の値が大きくなり成層の安定性が増すにつれて K_z/K_0 の値は小さくなる傾向が認められる. しかし, 値のばらつきは大きく, 地点ごとの混合特性が平均的な成層構造と平均流速のシアー (du/dz) 以外の要因の影響を受けていることを示唆している. なお, 成層構造そのものは鉛直混合自体の影響を受けて変わっている (松野・中田, 2004) ことから, 地形が複雑に変化する沿岸域で K_z の一般化を行うためには, 混合の形態と K_z の実測値の関係についてデータを蓄積することが必要になる.

(4) 湾口と湾奥の微細構造と鉛直渦動拡散係数

図-7は湾口部の Stn.ADCP と湾奥部の Stn.C2-2 (Stn.C2で2回目に取得したプロファイル) の混合パラメータを示している. 両地点の水深は大きく違うので, パラメータの比較は難しいが, 定性的な違いは次の通りである. ε の範囲は Stn.ADCP が 10^{-9} から 10^{-6} W/kg ,

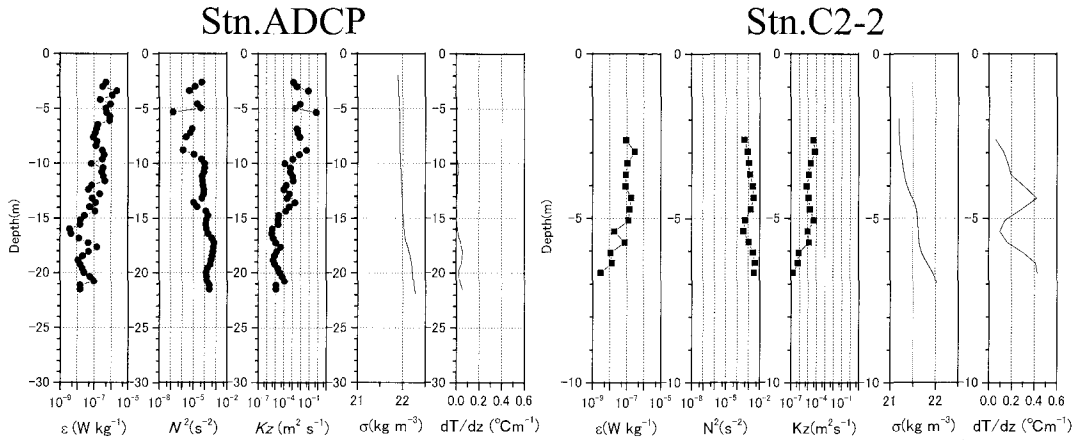


図-7 湾口部(Stn.ADCP)と湾奥部(Stn.C2-2)の混合パラメータの比較。

Stn.C2-2は 10^{-9} から 10^{-7} W/kgであり、ややStn.ADCPの値が大きいと考えられる。しかし、成層の強さを示す N^2 の範囲は両者の間で大きく異なる。 N^2 は、Stn.ADCPで 10^{-7} から 10^{-4} s $^{-2}$ の範囲に広く分布しているのに対して、Stn.C2-2では 10^{-4} から 10^{-3} s $^{-2}$ に集中して分布している。したがって、湾奥部のStn.C2-2では湾口部のStn.ADCPよりも成層強度が強いことがわかる。このため、式(4)で定義される K_z の値が、成層が強い湾奥部のStn.C2-2で小さな値となったと考えられた。

4. ま と め

英虞湾で夏季に鉛直混合強度の観測を行った。その結果、鉛直方向の平均値でみると、鉛直渦動拡散係数 K_z の範囲は、 10^{-5} ~ 10^{-2} m 2 /sであり、湾口部で高く、湾奥部では小さい値をとることがわかった。また、湾口部と湾奥部のエネルギー逸散率を比較したところ、やや湾口部が高い程度であった。しかし、成層強度を示すパイサラ周波数の二乗 N^2 は、 K_z が最大だった湾口部では 10^{-7} から 10^{-4} s $^{-2}$ であるのに対して、 K_z が最小だった湾奥部では 10^{-4} から 10^{-3} s $^{-2}$ に集中しており、湾奥部で成層強度が強いという結果が得られた。以上のことから、湾奥部で強い成層が発達していたことが、湾奥部で K_z が小さくなる原因と考えられた。

謝辞：英虞湾の観測にあたっては、三重県地域結集型共同研究事業コア研究室、ならびに三重県科学技術振興センター水産研究部の支援を受けた。また、海岸線と等水深線データは、(財)日本水路協会 海洋情報研究センター

の「海の基本図シェープファイル」を利用した。なお、TurboMap4の設計製作に対して、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」の助成を受けた。また、本研究は三重県地域結集型共同研究事業「閉鎖性海域における環境創生プロジェクト」の一部として行われた。以上、ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 宇野木早苗(1993)：沿岸の海洋物理学，東海大学出版会，672p.
- 海上保安庁(2003)：平成16年潮汐表第1巻，446p.
- 国際エメックスセンター(2001)：日本の閉鎖性海域（88海域）環境ガイドブック，国際エメックスセンター，177p.
- 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，No. 47，中工研報告，pp. 1-14.
- 長尾正之・橋本英資・高杉由夫(2004)：瀬戸内海における鉛直混合強度の測定，海工論文集，第51巻，pp. 946-950.
- 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.
- 藤本利治(1984)：平凡社大百科事典第1巻，平凡社，p. 167，1287p.
- 松野健，中田英昭(2004)：有明海の流れ場を支配する物理過程，沿岸海洋研究，第42号，第1号，pp. 11-17.
- Munk, H. W. and E.R. Anderson(1948): Notes on a theory of the thermocline, J. Marine Research, Vol.7, pp. 276-295.
- 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. 870p.