

閉鎖性内湾における夏期密度成層形成時の海水交換と鉛直混合に関する研究

陸 眞姫¹・青木伸一²・大谷 聡³

浜名湖の北西部に位置し潮汐の影響を受ける閉鎖性内湾である猪鼻湖において、夏の密度成層期における流れと塩分・水温の詳細な観測を行った。得られたデータおよび気象データを用いて、浜名湖との湖水交換特性および湖内の鉛直混合特性について考察した。湖水交換については、淡水流入や潮汐の影響よりも、風の影響が大きく、交換流量は淡水流入量の 5 倍程度であることがわかった。また湖内の鉛直混合についても、風によるせん断流の発生に起因する鉛直混合が支配的であると推察された。塩分の鉛直フラックスについては、観測値からの直接推定、ボックスモデルおよび乱流拡散モデルによる推定を行ったが、差異が大きく、塩分の鉛直輸送メカニズムを定量的に明らかにするまでには至らなかった。

1. はじめに

浜名湖の北西部に位置する猪鼻湖(図-1)は、瀬戸と呼ばれる幅 75 m 程度の狭水路で浜名湖とつながっている。外海(遠州灘)からは十数キロメートル離れているものの、潮汐の影響を強く受け、大潮時の最大潮位偏差は 60~70 cm 程度(外海の約 50%)に及び(有田ら, 2005)、冬期には塩分が 30 psu を越える。したがって、汽水湖というよりは閉鎖性内湾と呼ぶ方がふさわしい。

猪鼻湖は、慢性的な富栄養状態にあり、夏期には大規模な貧酸素水塊が底層に発生し、生物の生息環境を悪化させている(青木ら, 2001, 2002)。これまでの観測結果により、夏期の一次生産は湖内のリン濃度と相関が高いことがわかっており(青木ら, 2004)、夏期の密度成層形成時のリンの動態を把握することが富栄養化対策の出発点となる。しかしながら、密度成層下での物質輸送に関係する湖内の流動や鉛直混合特性については不明な点が多い。特に、貧酸素水塊の形成によって底泥から溶出した高濃度のリンの挙動、すなわち浜名湖とのリンの交換や底層から表層に運ばれるリンの輸送については明らかでなく、富栄養化・貧酸素化対策を講じる上で解明すべき重要な物理過程である。

本研究は、夏の密度成層形成時期の浜名湖と猪鼻湖との海水(湖水)交換過程、および猪鼻湖内での鉛直混合過程を定性的・定量的に明らかにすることを目的として行ったものである。以下では、流れと塩分の詳細な現地観測データをもとに、塩分をトレーサーとして物質輸送を論じている。

2. 現地観測の概要

2005 年 7 月末から約 2ヶ月間、猪鼻湖において流動および塩分・水温の集中的な観測を行った。観測項目、観測方法、観測期間、使用機器等については表-1 に示す通りである。まず、猪鼻湖と浜名湖の湖水交換を明らかにするために、両者をつなぐ狭水路(瀬戸、水深約 15 m)で、ADCP (Nortek 社製 Aquadopp、湖底設置)による流速の鉛直プロファイルの連続観測を行った。測定間隔は 10 分、鉛直方向分割幅は 1 m である。ADCP の設置期間中、CTD (アレック電子製、CompactCTD)を用いて塩分、水温等の鉛直分布を 10 数回測定した。これらの観測結果および観測期間中の降雨量を用いて、瀬戸を通しての淡水のフラックスを調べ、浜名湖との湖水交換メカニズムと交換流量を明らかにした。また、平均的な湖水の流動と塩分の輸送過程を把握するために、猪鼻湖内数点において、塩分の鉛直分布を高頻度に測定した。これらの結果を用いて、移流のみでモデル化した

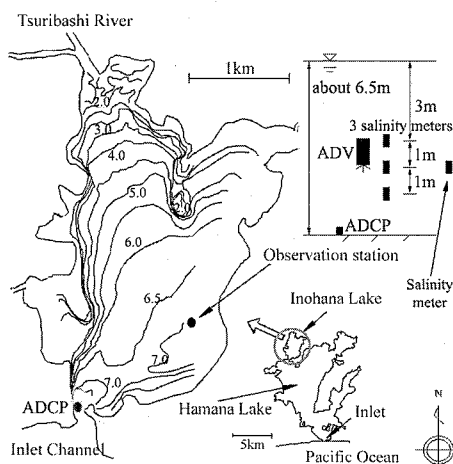


図-1 猪鼻湖と観測地点

1 工修 豊橋技術科学大学大学院環境生命工学専攻
2 正会員 工博 豊橋技術科学大学教授
3 豊橋技術科学大学大学院建設工学専攻

簡易なボックスモデルにより平均的な流動場を求め、上記の交換流量と比較した。また、潮汐および風による短期的な密度場の挙動を調べる目的で、湖内数点で約30分ごとに12時間のCTD連続観測を2回実施した。

さらに、密度成層期における塩分の鉛直輸送を直接測定することを目的として、湖内南東部定点（最深部付近、図-1参照）でADCP（湖底設置）を用いた水平流速の鉛直プロファイルおよび塩分（鉛直方向3点）の定点連続観測を行った。同時に、ADV（Nortek社製Vector）による3次元流速（水深約-4m地点、サンプリング周波数8Hz、10分/30分のバースト観測）および塩分（1Hz）の同時連続観測を実施した。ADVと塩分計の配置状況は図-1中に示す通りである。

表-1 観測項目と観測期間

Item	Periods	Instrument
Velocity	Aug. 9-13, Aug. 18-21, Aug. 24-28, Sep. 2-12	ADV (Sampling rate: 8 Hz, recorded for 10 minutes every half an hour)
	Jul. 31-Sep. 23	ADCP (in Lake, Profile interval: 600 sec, 50 cm interval vertically)
	Jul. 31-Sep. 17	ADCP (in Channel, Profile interval: 600 sec, 100 cm interval vertically)
Salinity	Aug. 9-11, Aug. 18-20, Aug. 24-26, Sep. 2-4	Salinity meter (at water depth of -4 m, 1 sec interval)
	Jul. 31, Aug. 4, 5, 9, 14, 18, 23, 24, 28, Sep. 2, 17, 26	CTD (1-20 times/day observation, 10 cm interval vertically)
	Sep. 1-28	Salinity meters (at water depth of -3, -4 and -5 m, 1 min interval)

3. 猪鼻湖と浜名湖の湖水交換について

(1) 平均流の特徴

猪鼻湖と浜名湖をつなぐ狭水路（瀬戸）で観測された流速の時系列を25時間移動平均したものを図-2に示す。図中、上段の図には表層（0m～-3m）の、下段の図には中層（-4m～-7m）の流速を、それぞれ猪鼻湖に流入する流れを正として表示してある。上段の図には、観測期間中の降雨量および日平均風速も示している。これより、表層の平均流は、淡水流入（降雨）よりも風と非常によく対応しており、風速の大きな8月25日付近と9月6日付近（いずれも日平均風速4m/s程度、最大風速10数m/s）で表層流速が大きくなっていることがわかる。前者と後者では流れの向きが逆になっているが、これは前者の卓越風向きがN、後者がSE方向であることに起因している。一方、中層での平均流は、8月

25日付近では表層と方向が逆転しているのに対し、9月6日付近では強風の継続とともに流向が変化しており、いずれも風の影響を強く受けて平均流が変化していることが読み取れる。これらより、瀬戸での平均流は、淡水流入によってエスチュアリー循環的に誘起される流れではなく、風によって流れが決定づけられていることが確認できた。この事実は、浜名湖との湖水交換が風の影響を強く受けることを意味しており、夏期の風の条件によって物質循環や水質が影響を受ける可能性を示唆している。

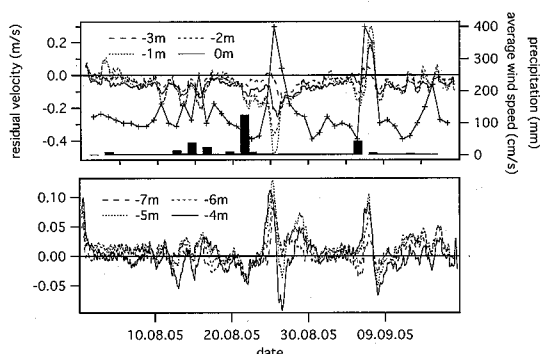


図-2 瀬戸での25時間移動平均流速および平均風速、降雨量

(2) 淡水の流れと交換流量

図-3は瀬戸での諸量の鉛直分布を示したものである。図中「流量」は、観測期間中の水深ごとの流速の平均値と各水深の流水断面積を用いて求めた平均流量の鉛直分布である。これより、平均的には表層および底層で浜名湖へ流出、中層で猪鼻湖に流入する方向の流れが卓越していることがわかる。ただし、これらの積分値は $-19.8 \text{ m}^3/\text{s}$ （浜名湖に流出）となっており、期間中の総降雨量（327.5 mm）と流域面積（ $7 \times 10^7 \text{ m}^2$ ）から求めた平均流量 $-5.5 \text{ m}^3/\text{s}$ に比べるとかなり大きく見積もられていることがわかった。ADCPは瀬戸の最深部に置かれているが、実際には瀬戸横断方向に流速の差異が

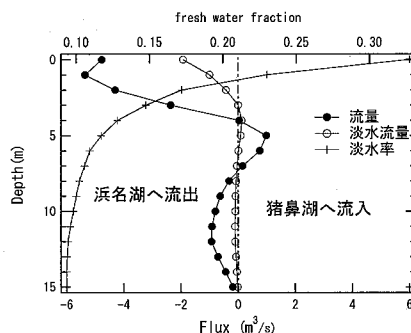


図-3 瀬戸での流量と淡水率の鉛直分布

あるために、この誤差が生じたと考えられる。

そこで、期間中に測定した瀬戸での塩分 S (psu) から淡水率 f ($f = (S_0 - S) / S_0$, $S_0 = 35$) の鉛直分布を求め、水深ごとの流量に乗ずることによって淡水流量の鉛直分布を観測インターバルごとに求めた。図-3 中には、全期間平均の淡水率と淡水流量の分布を示しているが、淡水のほとんどは表層 (−3 m まで) で輸送されていることがわかる。その平均流量は $-3.8 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、降雨量から推算した淡水流量 $-5.5 \text{ m}^3/\text{s}$ に近い値である。これより、表層の流量については、ADCP の測定値から概ね推定できていると考えられ、上述した流量の誤差は、主に中層・底層に起因していると思われる。また、実測した淡水流量を −3 m までの総流量と比較すると、表層では、淡水流量のおよそ 5 倍程度の水量が浜名湖との間で交換されていることがわかった。

4. 猪鼻湖内の鉛直混合特性について

(1) 長期的な塩分・密度構造の変化

図-4 は、図-1 に示す湖内観測点における約 2ヶ月間の塩分の時間変化を、水位変動、風速 (10 分間平均値) および日降雨量とともに示したものである。図中、塩分については 5 種類のデータがプロットされている。すなわち、−3 m、−4 m、−5 m に固定した塩分計 (図-1 参照) による連続データ (1 min 間隔)、および期間中に行った 12 回 (日) の CTD による鉛直プロファイル観測から求めた、上層 (0 m ~ −3 m) および下層 (−3 m ~ −6 m) の平均塩分である。また、図-5 は、図-4 の横軸の 245 日付近までの期間について、CTD による塩分と水温の鉛直分布から求めた湖水密度 (シグマティータ) のコンター図である。

224 日 (8 月 12 日) から 2 週間ほど続く降雨の影響で上層の塩分と密度は 235 日付近に最も低くなったが、この間、下層の塩分・密度はほとんど変化がなかった。その後、237 日 (8 月 25 日) の強風時を機に上層の塩分が上昇し、下層の塩分は低下している。特に、−4 m での塩分の連続記録を見ると、強風が観測されている 237 日および 250 日に急激に低下しており、上下層の混合には風の影響が大きいことが確認できる。

鉛直混合に及ぼす潮汐 (潮流) の影響については、湖内の潮汐に大潮・小潮の差が大きく現れていないことから明確ではないが、一潮汐間の密度場の変化は小さいこと、風が強い時期には強い密度成層が維持されていることなどから、風に比べるとその効果は小さいことが予想される。ただし、風によって一旦混合された密度場を維持する効果は有しているものと思われる。

(2) ボックスモデルによる平均流量の推定

これまでの議論により、浜名湖との湖水交換および湖

内の上下層の鉛直混合には、風が大きく寄与しており、物質 (塩分) の輸送は風による短期間の乱れや流動に大きく依存していることが予想された。ここでは、平均的な物質輸送の取り扱いがどの程度妥当であるかを調べるために、移流のみでモデル化した単純なボックスモデルによる解析結果と実測値の比較を行う。ボックスモデルは、図-6 に示すように、猪鼻湖を上下 2 層のボックスに分け、各層の平均塩分 S_1 , S_2 および河川流入量 Q_R を用いて、塩分の保存式から、平均的な湖内上下層の交換流量 (Q_{12} , Q_{21}) および瀬戸上下層における浜名湖との交換流量 (Q_{13} , Q_{42}) を求めるものである。以下の解析では、数日間隔で行われた CTD による湖内の塩分観

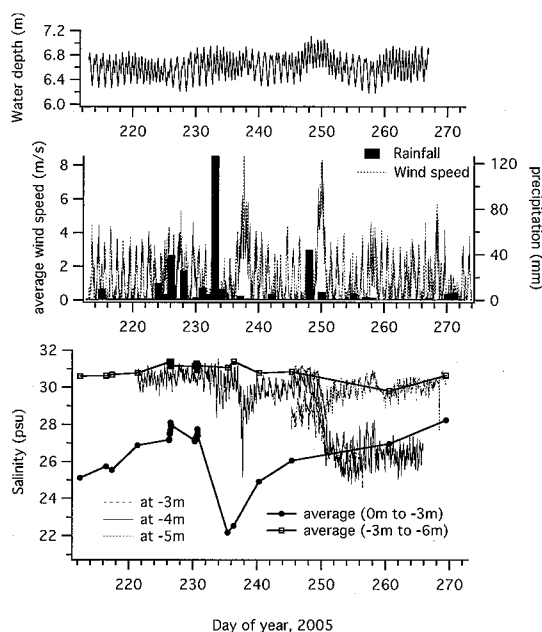


図-4 湖内の水位、風・降雨および塩分の時間変化

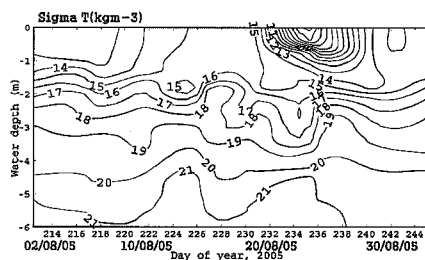


図-5 密度構造の長期的な変化

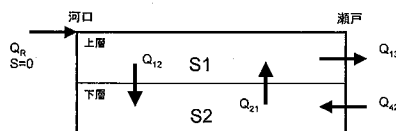


図-6 ボックスモデルの概念図

測データを用い、連続する2回の観測における塩分の変化量からその間の平均流量を算定している。

図-7は、瀬戸表層の平均流量 Q_{13} (浜名湖への流出量) と湖内下層から上層への鉛直方向平均流 Q_{21} を示したものである。前者については実測値を一緒に示しているが、ボックスモデルの結果は観測値に比べてかなり大きな値になっている。また、ボックスモデルでは河川からの淡水流入量に比例する形で流量が変動しているのに対して、実測結果には風の影響が大きく現れており、モデルにより予測された平均流は実際の流れとはかなり異なる特性を示すことがわかる。

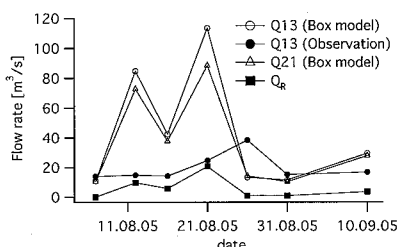


図-7 ボックスモデルによる平均流量と観測値の比較

(3) 短期的な鉛直フラックスの推定

図-8は、湖内で ADCP により観測した水平流速の絶対値を25時間移動平均した値を、時間と水底からの鉛直距離に対してコンター図としてプロットしたものである。図-4に示した風と比較すると、風速が大きくなっている8月25日に水深-1.5m付近に、同じく9月6日には水深-3m付近に強い水平流速が観測されている。しかしながら、水深-4m以下の流れには風の影響があまり及んでいないことがわかる。また、流速の鉛直成分の25時間移動平均値には、風の影響はほとんど見られなかった。これより、風による短期的な鉛直混合は、風によって上層に発生するせん断流によって生じる乱れにより誘起されていることが推察できる。

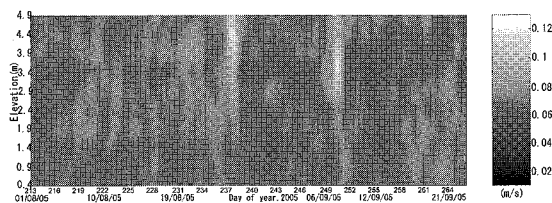


図-8 湖内の水平流速の25時間移動平均値

湖内の塩分の鉛直フラックスを定量的に明らかにするために、ADVによる3次元流速と塩分の同時観測データ(それぞれ8Hzおよび1Hzのサンプリング)を用いて塩分フラックスの計算をおこなった。流速 w およ

び塩分 s は、式(1)のように表すことができる。

$$w = \bar{w} + W + w', s = \bar{s} + S + s' \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $w(s)$ = mean velocity (salinity), $W(S)$ = wave velocity (salinity), $w'(s')$ = turbulent velocity (salinity) である。塩分フラックスは、次式の w, s の積を時間平均して求めた。

$$J_{s1} = \frac{\rho}{1000} \overline{ws} \dots \dots \dots (2)$$

なお、 $\rho/1000$ は実用塩分 psu を濃度に変換するための係数である。

なお、乱れ成分のみによる塩分フラックスを推定するために、0.2 Hz 以下の低周波数データを除去した場合についても計算した(Chanson ら, 2005; Yuk ら, 2005)。すなわち、

$$J_{s1}(\text{filtering}) = \frac{\rho}{1000} \overline{w's'} \dots \dots \dots (3)$$

以上の直接測定とは別に、風による turbulent dissipation を算定し、これから鉛直渦拡散係数を推定する方法で鉛直フラックスを求めた。turbulent dissipation ε は式(4)で与えられる(Turner, 1973; Sharples ら, 2003)。

$$\varepsilon = u_*^3 / \kappa z \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 z は水深、 $\kappa = 0.41$ は Kármán 定数である。 u_* は摩擦速度で、式(5)から得られる(Imberger・Patterson, 1990; Sharples ら, 2003)。

$$u_* = (\rho_A / \rho)^{1/2} C_D^{1/2} U_{10} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 U_{10} は風速、 ρ_A は空気密度である。 C_D については、 1.3×10^{-3} を用いた。また、鉛直渦動拡散係数 (K_z) は、 ε と水温、塩分のデータを用いて式(6)のように得られる。

$$K_z = \gamma \frac{\varepsilon}{N^2} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 N はバイサラの振動数 ($N^2 = -(g/\rho)(\partial\rho/\partial z)$) であり、本研究では、 $\partial\rho/\partial z$ を水深 -3, -4, -5 m での密度を用いて求めた。また ρ は水深 -4 m での値を用いた。なお、 γ はフラックスリチャードソン数に related 係数で、ここでは $\gamma = 0.2$ とした。鉛直渦動拡散係数と塩分勾配から、鉛直塩分フラックスは式(7)で求められる(Peters・Bokhorst, 2001)。

$$J_{s2} = -\frac{\rho}{1000} K_z \frac{\partial s}{\partial z} \dots \dots \dots (7)$$

図-9は、式(3)と式(7)から求めた塩分の鉛直フラックスを、2日間のデータについてプロットして比較したものである。式(3)により観測値から直接求めたフラックスは、負の値(鉛直下向き)となっている場合も見られるが、風速の増加に伴って大きくなる傾向を示しており、その大きさは式(7)によるものと同程度

となっている。

表-2には、式(2)を用いて観測値から直接求めた鉛直塩分フラックスと、ボックスモデルにより求めたフラックスの期間中の平均値を示している。直接測定値から推定したフラックスは平均的に鉛直下向きになっており、さらにボックスモデルで求めた値よりも2オーダー程度大きくなっている。湖内底層で局所的に塩分フラックスが下向きであることはあり得ないことではないが、フラックスの大きさから見て、計測誤差である可能性が高い。この原因として、ADVによる流速計測の限界、ADVと塩分計のサンプリング周波数の不一致の問題などが考えられる。

また、これらの値を図-9に示したフラックスの値と比較すると、ボックスモデルによる推定値でも、乱流拡散として推定した値に比べると2オーダー程度大きな値になっていることがわかる。4.(2)で述べたように、ボックスモデルによるフラックスの推定精度には問題があるが、密度成層時の塩分の鉛直輸送は、風による乱流拡散のみでは説明できないことが推察された。

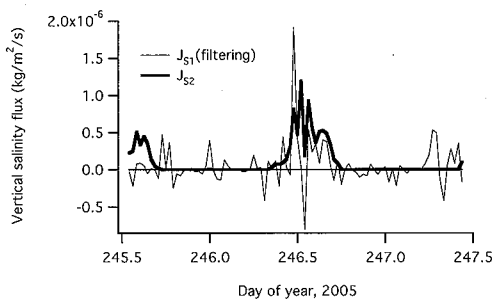


図-9 実測値を用いた直接計算と乱流拡散モデルによる鉛直塩分フラックスの比較

表-2 実測値を用いた直接計算とボックスモデルによる鉛直塩分フラックスの比較(unit: $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

Period	ADV	Box model
Aug. 9~11	-0.0446	0.0006
Aug. 18~20	-0.0407	0.0008
Aug. 24~26	-0.0452	0.0001
Sep. 2~4	-0.0471	0.00009

5. あとがき

本研究で得られた主な知見は下記の通りである。

- 1) 浜名湖と猪鼻湖を結ぶ狭水路(瀬戸)での湖水交換に対しては、風の影響が支配的である。淡水の浜名湖への流出は風の影響を受けて表層のみで生じており、瀬戸での湖水交換流量は淡水流量の5倍程度に及ぶ。

- 2) 湖内の鉛直混合についても、潮汐や降雨の影響よりも風の影響が支配的である。

- 3) 簡易なボックスモデルによる検討では湖水の交換流量を過大に見積もる。また、ボックスモデルでは風による混合過程を適切に表すことができない。

- 4) ADCPと塩分計による塩分の鉛直フラックスの直接推定を試みた。その結果、0.2 Hz以下の変動成分を除去した流速・塩分のデータを用いると、乱流拡散モデルによる推定値と近い値を得た。ただし、これはボックスモデルによる鉛直塩分フラックスの予測値よりも2オーダー程度小さな値であった。

今後は、瀬戸での交換流量に及ぼす風の影響を明確にするとともに、今回十分明らかにすることができなかった鉛直混合メカニズムについて、湖内の多点で面的にとらえるなど、さらなる検討が必要である。

最後に、本研究を行うにあたり静岡県柑橘試験場西遠分場には多大なご協力をいただいた。また、本研究は、科学研究費、基盤研究(B), No.17360234「流域・内湾・外洋系の長期的環境変化からみた内湾環境問題の構造—浜名湖を対象として」(研究代表者:青木伸一)の補助を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 青木伸一・福本直樹・岡本光雄(2001): 猪鼻湖における底層貧酸素水のエアレーション効果の検討, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1066-1070.
- 青木伸一・水野 亮・有田 守(2004): 潮汐の影響を受ける汽水湖での夏期の貧酸素水塊の形成と栄養塩収支に関する研究, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 921-925.
- 青木伸一・水野 亮・岡本光雄(2002): 猪鼻湖における貧酸素水塊の消長に及ぼす気象擾乱の影響, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1036-1040.
- 有田 守・青木伸一・片岡三枝子(2005): 浜名湖今切口の固定化による湖内の潮汐と海水交換特性の変化, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 201-205.
- Chanson, H. M. Trevethan and S. Aoki(2005): Acoustic Doppler velocimetry (ADV) in a small estuarine system. Field experience and "despiking", Proceeding of XXXI IAHR Congress, pp. 3954-3966.
- Imberger, J. and J. C. Patterson(1990): Physical limnology, Adv Appl Mech Vol.27, pp. 303-475.
- Peters, H. and R. Bokhorst(2001): Microstructure observations of turbulent mixing in a partially mixed estuary. part II: salt flux and stress, Journal of Physical Oceanography, Vol.31, No. 4, pp. 1105-1119.
- Sharples, J., M. J. Coates and J. E. Sherwood(2003): Quantifying turbulent mixing and oxygen fluxes in a Mediterranean-type, microtidal estuary, Ocean Dynamics, Vol.53, pp. 126-136.
- Turner J. S. (1973): Buoyancy effects in fluids, Cambridge University Press, 368 p.
- Yuk J. H., S. Aoki and S. Otani(2005): An estimate of the eddy viscosity and eddy diffusivity in a stratified estuary, Proc. of PACON2005, p. A36.(abstract).