

大船渡湾における底層 DO 濃度の変動に及ぼす湾外の影響

岡田 知 也* ・ 中山 恵 介* ・ 日比野 忠 史**
細川 恭 史*** ・ 古川 恵 太****

1. はじめに

図-1 は大船渡湾の底層部における DO 濃度の時系列変動を示したものである。通常、閉鎖性水域における貧酸素水塊の形成の主な要因は、夏期の湾内水温上昇に伴う底泥を含む底層における酸素消費量の増大および成層化による表層から底層への溶存酸素供給量の低下である。したがって、外的な要因が働かない限り貧酸素水塊はその水域の特性によって決定され、毎年ほぼ決まった時期に発生し、その規模も同程度であり、またほぼ同じ時期に消滅する。図中においては、1998 年に比べ 1999 年の方が貧酸素水塊の形成時期が遅れていることや、春先から秋口にかけての DO 濃度の低下時に数日スケールの急激な DO 濃度の増減がしばしば発生していることから、なんらかの外的な影響が大船渡湾の底層部に及んでいるものと考えられる。

従来までの研究では、湾内水質に及ぼす湾外の影響は交換率として表現され、その交換率は潮汐周期よりも長い時間スケールの平均値として扱われる場合がほとんどであった。しかしながら近年の観測技術の向上に伴い、数日スケールの現象が内湾（特に閉鎖性内湾）の水環境を瞬間的ではあるが大きく変えることが観測により指摘されている（例えば、日比野ら（1999）、日向ら（2000））。

一方、大船渡湾のように湾口部にシルを有する閉鎖性内湾の交換率に関しては、例えば Mazda（1985）によって川平湾および浜名湖が検討されている。また、上野ら（1999）は湾口部にシルを持つ英虞湾において、2、3 日の短い時間スケールで動的に変化する現象を、湾口部における観測値を利用して再現計算を行っている。

そこで本研究では、湾外の影響をモデル化することによって、図-1 で示されるような現象を再現し、湾外の影響を定量的に評価することを試みる。本研究で用いた手法の特徴は、湾外水が内湾水に及ぼす影響を 3 次元非静水圧モデルを用いてモデル化しそれを鉛直 1 次元モデル

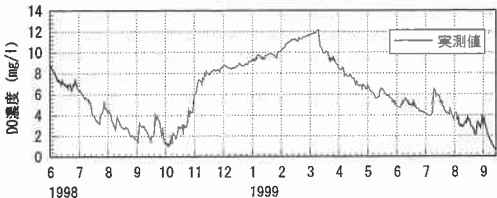


図-1 大船渡湾の底層 (st. A, 水深 30 m 地点) における DO 濃度の時系列

に組み込んでいること、および、湾外の境界条件として連続で得られた実測値を用いていることである（岡田ら、2000）。

2. 大船渡湾観測結果

2.1 観測地点および観測方法

大船渡湾の形状と観測地点を図-2 に示す。大船渡湾の湾軸に沿った長さは 7 km、横幅は 2 km であり、大船渡湾は湾軸方向に細長い形状である。また、湾の規模に対して水深は大きく、平均水深は 20 m、最大水深は湾口

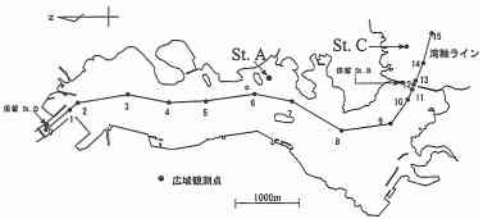


図-2 大船渡湾の形状と観測地点

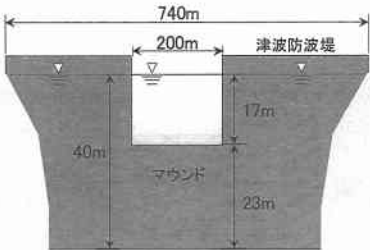


図-3 マウンドの形状

* 正会員 博(工) 運輸省港湾技術研究所海洋環境部環境評価研究室
** 正会員 博(工) 広島大学助教授 工学部第四地域環境工学講座
*** 正会員 博(工) 運輸省港湾技術研究所海洋環境部部長
**** 正会員 工 修 運輸省港湾技術研究所海洋環境部環境評価研究室
室長

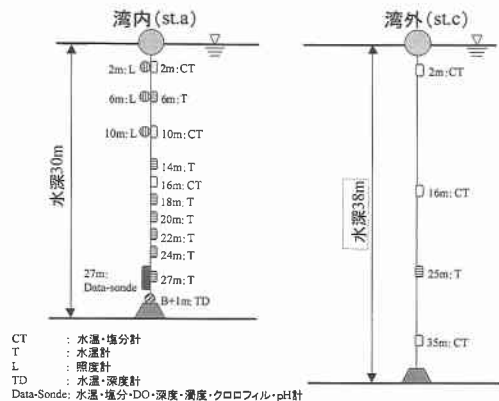


図-4 連続観測実施地点における水質計の配置

部付近の中央部において 40 m である。湾口部には津波防波堤が設置されており、湾口部の開口幅は 200 m、水深はマウンドがあるため 17 m と非常に狭くなっている (図-3 参照)。

観測は 1998 年 6 月から 1999 年 10 月の期間に行われた。図-2 中の st.A および st.C において、水温、DO 濃度および塩分の長期連続観測を行った。データは 10 分間隔で採取されている。図-4 は st.A および st.C における水質計の設置状況を示したものである。特に st.A においては鉛直方向に水質計を密に配置し、鉛直分布の時系列変動を十分把握できるようにした。

また、約 2 ヶ月毎に湾軸に沿った線上 15 点における観測 (以下、広域観測) を行い、水温、塩分、Chl-a、DO 濃度等の鉛直分布を測定した。測定には ALEC 社製 ACL 1183-PDK を使用した。

2.2 観測結果

図-5(a), (b) に 1998 年 10 月の塩分と水温の広域観測の結果を示す。両図は湾軸に沿った観測線における鉛直分布を示したものであり、縦軸は水深、横軸は河口から湾口へ湾軸に沿った距離を示す。湾口部 (マウンド) は横軸 6000 m 地点に位置する。

湾外の水塊がマウンドを超え湾内に進入する際には、湾外水は湾外よりも下層に進入していることが分かる。このことは、同水深における湾外水と湾内水を比較すると湾外水の方が重い、湾外水が湾内に進入する際に下層の自分自身と同密度層を選択して進入した結果と考えられる。本研究において、このような湾内外の密度差によって発生する進入現象を密度貫入と呼ぶこととする。

さらに、等値線が水平に走っていることから塩分および水温共に湾軸方向に一樣であると言える。この一樣性は、ここでは示していない他の時期の広域観測結果においても同様に見られた。このことは、密度貫入現象も

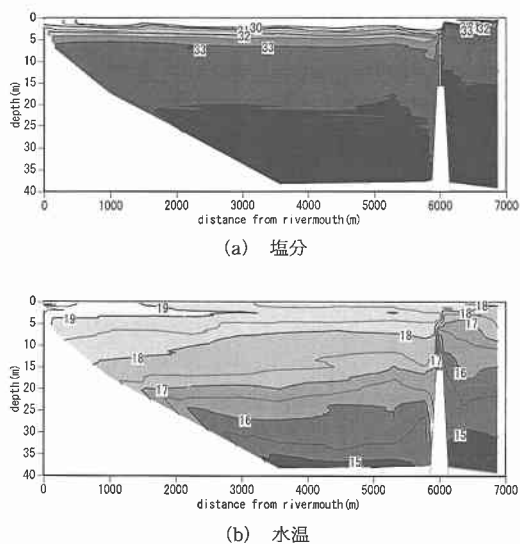


図-5 広域観測結果の一例 (1998 年 10 月)

含め、大船渡湾内の水質変動に対して鉛直 1 次元モデルが十分適用可能であることを示している。

3. 鉛直 1 次元モデルを用いた長期再現計算

3.1 基礎式

(1) 鉛直 1 次元モデル

水温 T 、塩分 S 、DO 濃度 C_{DO} に対する鉛直 1 次元方程式は次式で表される。

(水温)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left(AK_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{h}{\rho C_P} + (\lambda + \lambda_r) \cdot (T_{OUT} - T) \quad \dots\dots\dots (1)$$

(塩分濃度)

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left(AK_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) + (\lambda + \lambda_r) \cdot (S_{OUT} - S) \quad \dots\dots\dots (2)$$

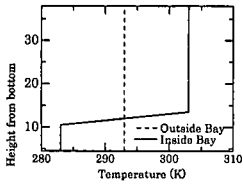
(DO 濃度)

$$\frac{\partial C_{DO}}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left(AK_z \frac{\partial C_{DO}}{\partial z} \right) + \left(\frac{dC_{DO}}{dt} \right)^* + (\lambda + \lambda_r) \cdot (C_{DO,OUT} - C_{DO}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

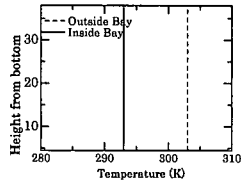
ここで、 z : 鉛直方向座標 (水表面を原点にして下向きに正)、 A : 各層の水面積 (m^2)、 T : 水温 ($^{\circ}C$)、 h : 大気との全熱交換量 ($cal/m/day$)、 C_P : 比熱 ($cal/g^{\circ}C$)、 K_z : 鉛直渦動粘性係数 (m^2/s) (Deardorff, 1980)、 S : 塩分、 C_{DO} : DO 濃度 (mg/l)、 $(dC_{DO}/dt)^*$: DO の生成・消滅項である。添え字の OUT は湾外を意味しており、本研究においては、外海水のデータとして実測値を採用している ((3) 参照)。また、 λ ($1/day$) は各層に対する潮汐運動による海水交換量の割合であり (以下、交換率)、

表一 貫入形態の場合分け

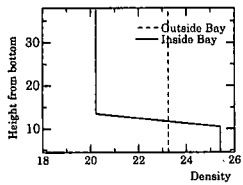
case 1	湾外の水塊が同じ層の水塊より重く、より低い層へ貫入してくる場合。
case 2	湾外の水塊が同じ層の水塊より軽く、より高い層へ貫入してくる場合。



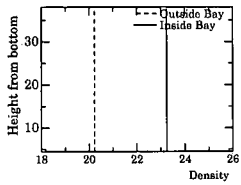
(a) 水温



(b) 密度



(a) 水温



(b) 密度

図-6 case 1 の初期条件

図-7 case 2 の初期条件

$1/\lambda$ (day) は交換に要する時間 (以下, 交換時間) を意味し, λ_r (1/day) は密度貫入による交換率を意味する。

本研究において DO 濃度を計算した主な目的は, 湾内の物質循環を検討するためではなく, 湾外の密度変動が底層の DO 濃度の変動に及ぼす影響を検討するためであるので, DO 濃度の生成・消滅項の計算に対しては次式で示される簡素化されたモデルを用いた。

$$\text{表層: } C_{DO} = 0.9 \cdot C_{DOsat} \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{底層: } \left(\frac{dC_{DO}}{dt} \right)^* = -D_1 \dots\dots\dots (5)$$

$$D_1 = SOD20 \cdot \theta_s^{T-20} \frac{A_B}{A_s \cdot \Delta z} \dots\dots\dots (6)$$

ここで, C_{DOsat} : 飽和 DO 濃度 (mg/l), D_1 : 酸素消費項, $SOD20$: 20°C の時の底泥の酸素消費量 (mg/m²/day) (Stefan, 1994), θ : 温度補正係数, T : 水温 (°C), A_s : 各層の層平均された水面積 (m²), A_b : 各層の底面積 (m²), Δz : 層厚 (m) である。なお, 底泥の酸素消費量 $SOD20$ の値は, 底層の酸素消費も底泥の酸素消費に含ませているため, 一般に用いられている値よりも比較的大きな値を採用した ($SOD20 = 1500$ mg/m²/day)。因みに, 村上 (1998) は大船渡湾の底泥の酸素消費速度として 480 mg/m²/day を用いている。また表層の DO 濃度は, 常に飽和 DO 濃度の 90% とした。

(2) 密度貫入による交換率

静止した密度 ρ_1 の流体の下を密度 ρ_2 の重い流体 ($\rho_2 > \rho_1$) が潜ってシルを超えて流れる 2 層流を考えると (た

表二 計算による各層の温度変化

(a) case 1			(b) case 2		
Layer	温度変化	第 9 層基準 温度変化	Layer	温度変化	第 1 層基準 温度変化
1	-0.12	-0.39	1	4.07	4.75
2	-0.29	-0.94	2	2.51	2.51
3	-0.63	-2.00	3	1.30	1.29
4	-1.14	-3.45	4	0.67	0.63
5	-2.25	-6.03	5	0.27	0.23
6	-3.73	-8.00	6	0.08	0.05
7	-4.91	-8.07	7	-0.01	0.00
8	-5.66	-7.72	8	-0.03	-0.02
9	-5.75	-5.75	9	-0.04	-0.02
10	6.15	4.90	10	-0.04	-0.01
11	3.32	2.30	11	-0.03	-0.01
12	0.63	0.27	12	-0.03	0.00
13	-0.03	-0.01	13	-0.01	0.00
Total		-34.89	Total		8.74

だし粘性は無視する), 地点 b における重い流体の流速 u_{b2} は密度差 $\Delta\rho$ と水位差 ΔH を用いて

$$u_{b2} \approx \sqrt{\Delta\rho \cdot \Delta H} \dots\dots\dots (7)$$

の関係で表すことができ, 貫入速度は密度差と水位差の 1/2 乗に比例する。

a) 3 次元非静水圧モデル

成層した湾内への湾外水の貫入はブルームと想定され, セン断層によって示される界面においては, 密度が鉛直方向に大きく変化していることが推測される。基礎方程式には, 1 方程式 LES モデルを用いた非静水圧, 自由表面, 成層場での計算が可能なモデル (中山, 2000) を採用した。成層が強く安定した場合の鉛直方向の拡散に関しては, Schmann (1991) のプラント・バイサラの浮力振動数によるプラントル数の変化を考慮した。

b) 計算条件

湾内外でポテンシャルが異なる場合, 同じ層の湾内外での密度差によって湾外水が湾内に貫入する。その貫入の形態を表一に示すように二つに大別した。

case 1 は湾外の水塊がマウンド上面下レベルにある密度の急変面へ貫入してくるケースであり, case 2 は湾外の水塊が全て表層に貫入するケースである。なお, マウンド上面は底面から 21 m としている。また, 海水の密度は塩分と水温によって本来決定されるべきものであるが, 本計算においては塩分は一律とし, 密度差は水温のみによって決定されるものとした。図-6, 7 の (a) および (b) に, case 1, case 2 における湾内外の水温および密度の鉛直分布を示す。

計算では, 潮位の変化は周期 12 時間, 振幅 1.6 m とし, 実時間で 2 日間分 (4 潮汐分) の計算を行った。鉛直方向には最大水深 39 m, 3.0 m 間隔で 13 層に分割した。

c) 計算結果

本計算条件では, case 1 の場合には第 9 層への, case 2 の場合には第 1 層への貫入が確認された。以下におい

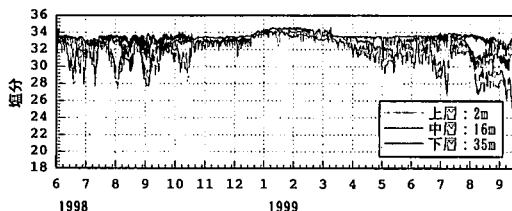


図-8 境界条件として用いた塩分の連続データ

て2日後の各層における水温変化から交換率を算出する (Bitter and Simpson, 1981).

i) case 1

マウンドを越える第6層以上6層分の湾外水塊は第9層に貫入した。表-2に各層における初期状態からの温度の変化と、貫入層である第9層目を基準とし容積の違いを考慮した温度の変化 (第9層基準温度変化) を示す。第9層基準温度変化は式 (8) で定義される。

$$\Delta T_i = \Delta T_i \frac{V_i}{V_j} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 T_i : i 層目の温度、 j : 基準となる層である。第9層基準温度変化は、総合すると -34.9°C である。

鉛直1次元モデルでは、 n 層目の湾外水が i 層目に貫入する場合の i 層目の水温変化は、式 (9) で示される。

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = -\lambda_{ri}(T_i - T_{\text{out}n}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 T_i : i 層目の湾内水温、 λ_{ri} : i 層目の交換率、 $T_{\text{in}i}$: i 層目の湾内水温の初期値、 $T_{\text{out}n}$: n 層目の湾外水温の初期値である。初期の温度差 ($T_{\text{out}n} - T_{\text{in}i}$) を用いて式 (9) から交換率を表すと次式になる。

$$\lambda_{ri} = \frac{1}{t} \ln \left(\frac{T_{\text{out}n} - T_{\text{in}i}}{T_{\text{out}n} - T_i} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、湾外水は第9層のみに貫入し、他の層の水温の増減は拡散によるものと仮定し、全層に伝わった (湾外はマウンド上の6層) 熱量を考慮すると、式 (10) は次式となる。ただし湾外水に対しては、湾内との海水交換に関与するマウンド上の6層のみを考慮する。

$$\lambda_{r9} = \frac{1}{t} \ln \left(\frac{\sum_{n=1}^6 T_{\text{out}n} - \sum_{i=1}^{13} T_{\text{in}i}}{\sum_{n=1}^6 T_{\text{out}n} - \sum_{i=1}^{13} T_i} \right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

表-2(a)の結果を用いると λ_{r9} は0.43 1/dayであり、交換時間は第9層目において2.3日となる。

ii) case 2

湾外の水塊が、表層 (第1層) に貫入することから、基準となる層を第1層とし、表-2(b)に、各層の温度変化および第1層を基準とした第1層基準温度変化を示す。第1層基準温度変化は、総合すると 8.7°C である。case 1と同様な計算を行い交換時間を求めると、第1層

表-3 計算条件

水深	30.0 m	鉛直層数	10 層
層厚	$\Delta z = 3.0$ m	時間刻み	$\Delta t = 60$ s
計算期間	1998年6月1日～1999年9月23日		

表-4 計算ケース (単位: $\lambda = 1/\text{day}$)

case A	湾外水との海水交換あり ($\lambda = 1/60$)
case B	湾外水との海水交換あり ($\lambda = 1/60$) 密度貫入による海水交換あり

目において12.7日であった。

したがって、case 1, case 2それぞれの場合に対して計算結果を基準として、式 (7) の関係を用いて湾外水が各層に貫入する場合の交換率を表現すると

case 1

$$\lambda_{ri} = \lambda_{r9} \frac{\sqrt{\Delta \rho_i \Delta H_i} V_9}{\sqrt{\Delta \rho_9 \Delta H_9} V_i}$$

case 2

$$\lambda_{ri} = \lambda_{r1} \frac{\sqrt{\Delta \rho_i \Delta H_i} V_1}{\sqrt{\Delta \rho_1 \Delta H_1} V_i}$$

となる。ここで、 i は湾内への貫入層であり、 $\Delta \rho \Delta H$ は湾内外のポテンシャル差を意味する。

(3) 境界条件

湾外水の水温・塩分の境界条件はst.Cにおける連続データを時間補正した図-8に示されるデータを用いた。水深方向には、水深2mより浅い水深の値は水深2mの値に関連しないものとし、各層の境界条件として、第1層は水深2mの値、第2, 3, 4, 5層は水深16mの値、第10層は水深30mの値、第6, 7, 8, 9層は水深16mの値と水深30mの値の線形補間した値を用いた。

(4) 計算条件およびケース

計算は1998年6月1日から1999年9月23日までの期間を対象として行った。計算条件および計算ケースを表-3および4に示す。case Aは湾外との海水交換は考慮しているが、密度貫入による海水交換を考慮していない場合であり、case Bは外海水と海水交換と密度貫入による海水交換を考慮した場合である。潮汐による海水交換率は両ケース共に60日とした。

3.2 計算結果および考察

(1) DO濃度

図-9は水深27m地点のDO濃度の実測値とcase Aおよびcase Bの計算値の時系列変化を示したものである。case BはDO濃度の減少勾配および絶対値共に非常に良く一致している。特に、case Aと比較すると、貧酸素水塊の形成に対する勾配 (DO濃度の減少勾配) および貧酸素水塊が消滅する時期が良く一致している。した

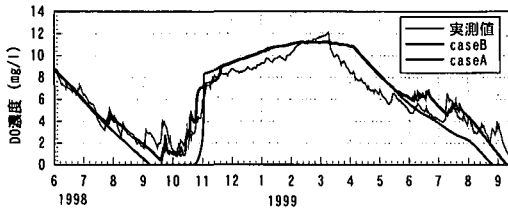


図-9 底層 DO 濃度の観測値と計算値の比較

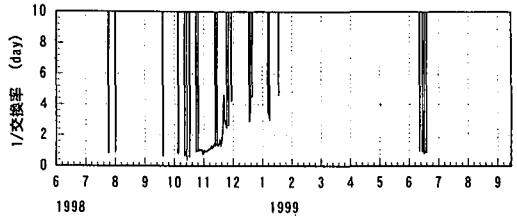


図-10 底層における交換時間 (1/交換率)

がって、case B で考慮された密度貫入による海水交換は、大船渡湾における湾内底層の貧酸素水塊の形成・消滅に関して非常に重要な要因の一つであることが分かる。また、実測で観測された 1 mg/l 程度の急激な上昇は、case B においてのみ再現されていることから、密度貫入の影響であることが分かる。

(2) 貫入頻度

図-10 は底層部の密度貫入による交換率の逆数（交換率）の時系列変化を示したものである。湾口マウンドの影響がそれほど及ばない表層部の交換時間（60 日）に対して、底層部の交換時間は密度貫入が発生することによって約 1～3 日程度と非常に短時間になっている。

このように、底層部への湾外水の貫入はそれほど高い頻度ではないが、交換率は非常に大きいため、湾口マウンドの影響により潮汐に伴う海水交換機能がほとんど及ばない底層部における貧酸素水塊の形成・消滅の時期に決定的な影響を及ぼしていると言える。

4. おわりに

大船渡湾において、湾外水が内湾水に及ぼす影響を 3 次元非静水圧モデルを用いてモデル化した。そのモデルを鉛直 1 次元モデルに導入して、長期の湾内底層 DO 濃度の再現計算を行ない、湾外水が湾内に及ぼす影響の支配要因を定量的に評価し、湾外からの密度貫入の重要性を指摘した。得られた主要な結果を以下に示す。

- 1) 3 次元非静水圧モデルを用いて決定されたモデル常数と湾外の実測データを用いることにより、鉛直 1 次元モデルによる湾内底層部の DO 濃度の長期再現が実現された。
- 2) 大船渡湾の底層部の貧酸素水塊の形成・消滅時期に対し、密度貫入による海水交換の寄与が大きいことが明らかとなった。
- 3) 密度貫入の発生頻度は低いものの、密度貫入による

底層部の交換時間は 1～3 日であることが示された。この値は湾口マウンドが存在しない表層部の交換時間 60 日と比較して非常に短く、潮汐に伴う海水交換が湾口マウンドの影響によってほとんど働かない底層部の DO 濃度の変動に対して密度貫入は強い影響を及ぼしていることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 上野成三・灘岡和男・高山百合子・片倉徳男・岡田美穂・関根義彦・勝井秀博 (1999): 水環境の動的変化に着目した英虞湾の現地観測, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 1051-1055.
- 岡田知也・中山恵介・日比野忠史・細川恭史 (2000): 大船渡湾における湾外水の密度変動が湾内水環境に及ぼす影響の定量的評価, 港湾技術研究所報告, 第 39 巻, 第 2 号, (印刷中).
- 日向博文・灘岡和夫・八木 宏・田淵広嗣・吉岡 健 (2000): 黒潮流路に伴う高温沿岸波及時における成層期東京湾の流動構造と熱・物質輸送特性, 土木学会論文集, (印刷中).
- 日比野忠史・豊田政史・西森和男・細川恭史・鶴谷広一 (1999): 海面水位の変動が内湾域の水環境に及ぼす影響—大船渡湾での貧酸素水塊の形成と消滅機構—, 港湾技術研究所報告, 第 38 巻 3 号, pp. 3-36.
- 村上和男 (1998): 閉鎖性内湾域の海水浄化にかかわる水理・水質環境に関する研究, 港湾技術研究所資料, No. 900, 142 pp.
- 中山恵介 (2000): 成層場における固液混相流 LES モデルの開発, 水工学論文集, 第 44 巻, pp. 879-884.
- Britter, R. E. and J. E. Simpson (1981): A note on the structure of the head of an intrusive gravity current, J. Fluid Mech., Vol. 112, part 3, pp. 459-466.
- Deardorff, J. W. (1980): Stratocumulus-Capped Mixed Layers Derived from a Three-Dimensional Model, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 18, pp. 495-527.
- Schumann, U. (1991): Subgrid Length-Scales for Large-Eddy Simulation of Stratified Turbulence, Theoret. Comput. Fluid Dynamics, Vol. 2, pp. 279-290.
- Stefan, H.G. and X. Fang (1994): Dissolved Oxygen Model for Regional Lake Analysis, Ecological Modelling, Vol. 71, pp. 37-68.
- Mazda Y. (1985): Vertical Two-Dimensional Mechanism of Tidal Exchange in a Bay with a Sill-Entrance, J. of the Oceanographical Society of Japan, Vol. 41, pp. 225-234.