

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

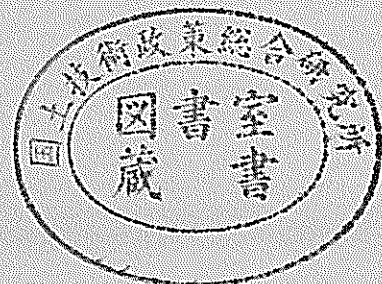
REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL.39      NO.2      June 2000

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第39巻 第2号 (Vol. 39, No. 2), 2000年6月 (June 2000)

## 目 次 (CONTENTS)

1. Numerical Study on the Flow Characteristics of Tide-Induced Jet  
..... Jong-Chun PARK, Tomonari OKADA, Keita FURUKAWA,  
Keisuke NAKAYAMA and Yasushi HOSOKAWA ..... 3  
(潮汐噴流の流れ特性に関する数値的研究  
..... 朴 鍾千・岡田知也・古川恵太・中山恵介・細川恭史)
2. Compressive Behavior of Sensitive Ariake Clays  
..... Zhenshun HONG and Takashi TSUCHIDA ..... 27  
(鋭敏な有明粘土の圧縮特性に関する一考察  
..... 洪 振舜・土田 孝)
3. 内湾域の水環境に影響を及ぼす物理的要因に関する考察  
— 瀬戸内海総合水質測定調査データによる解析 —  
..... 宮野 仁 ・日比野忠史・中山恵介・岡田知也・細川恭史・浅井 正 ..... 47  
(Estimates of Physical Factors Influencing on Enclosed Shallow Water Environments  
— Water Exchange Analysis Based on the Data Sets of Comprehensive Investigations in Seto Inland Sea,  
Japan —  
..... Masashi MIYANO, Tadashi HIBINO, Keisuke NAKAYAMA, Tomonari OKADA,  
Yasushi HOSOKAWA and Tadashi ASAI)
4. 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  
..... 岡田知也・中山恵介・日比野忠史・細川恭史 ..... 73  
(A Quantitative Evaluation of the Influence of External Waters on the Water Environment of Ohfunato Bay,  
Japan  
..... Tomonari OKADA, Keisuke NAKAYAMA, Tadashi HIBINO and Yasushi HOSOKAWA )
5. ケーソン式岸壁の地震時変形に及ぼす上下動の影響について  
..... 野津 厚・上部達生・風間基樹・三籐正明 ..... 99  
(Effect of Vertical Ground Motions on Deformation of Caisson Quay Wall During Earthquake  
..... Atsushi NOZU, Tatsuo UWABE, Motoki KAZAMA and Masaaki MITOU)
6. 海洋環境下における再生コンクリートの耐久性に関する研究  
..... 早川健司・山路 徹・濱田秀則 .....153  
(A Study on Durability of Recycled Concrete under Marine Environment  
..... Kenji HAYAKAWA, Toru YAMAJI and Hidenori HAMADA)

## 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

岡田知也\*・中山恵介\*・日比野忠史\*\*・細川恭史\*\*\*

### 要 旨

湾内の流動および水質変動を数値計算を用いて評価・予測する際には、湾外の境界条件を与える必要がある。既往の研究により湾外の境界条件の変動が湾内水質の変動に影響を与えていることは明かにされている。しかしながら、湾外の境界条件の変動に対してどの程度の水質変動が湾内に起こるかについては、今のところ定量的な評価はなされていない。本研究では、そうした影響伝播をモデル化し、湾内水質の長期再現計算を試み、湾外の水質変動が湾内水質へ与える影響の評価を行った。

長期再現計算には鉛直1次元モデルを採用し、境界条件は実測値を用いて与えた。モデル中において湾外水の影響は潮汐による海水交換率と湾内外の密度差に起因する海水交換として表現した。密度差に起因する海水交換率のモデル定数の決定には、ブルームのようなフロントでの非定常混合が卓越している現象に対しても精度よく解くことができる非静水圧3次元モデル(CIP-LES-SF)を用いた。このモデル化により湾内外の鉛直方向の密度分布に対して、湾外の湾内への密度差に起因する海水交換率が算出可能となった。

底層部のDO濃度の変動に着目し長期再現計算を行った結果、大船渡湾の底層部の貧酸素水塊の形成・消滅時期に対し、密度差に起因する海水交換の寄与が大きいことが明らかとなった。また、その発生頻度はそれほど多くは無いものの、海水交換率は非常に大きく、潮汐による交換時間は約60日であるのに対し、密度貫入による交換時間は1～3日であることが示された。

キーワード：大船渡湾，湾外水，鉛直1次元モデル，非静水圧3次元モデル，海水交換，海水交換率，貧酸素水塊

\*海洋環境部 環境評価研究室

\*\*海洋環境部 主任研究官

\*\*\*海洋環境部 環境評価研究室室長

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 運輸省港湾技術研究所

電話：(0468)44-5018 FAX：(0468)44-6243 e-mail:okada@ipc.phri.go.jp

## **A Quantitative Evaluation of the Influence of External Waters on the Water Environment of Ohfunato Bay, Japan**

**Tomonari OKADA\***  
**Keisuke NAKAYAMA\***  
**Tadashi HIBINO\*\***  
**Yasushi HOSOKAWA\*\*\*\***

### **Synopsis**

When currents and water quality variations in a bay are evaluated or forecasted using a numerical simulation model, it is necessary to assign model boundary conditions outside the bay. Previous research has shown that changes in density conditions outside the bay can induce a significant change in the water quality in the bay. To date, no quantitative evaluation of this effect has been performed yet. In this research, the influence was modeled with water quality in the Ohfunato Bay, Japan which is one of the typical enclosed bays. The temporal changes of the boundary condition were determined by field measurements and were imposed on the numerical calculation.

A one-dimensional vertical model was used for the long-term calculation. Boundary conditions were determined from field measurements. The influence was expressed in the model as a seawater exchange rate which is caused by tide and the density difference between inside and outside of the boundary. For the determination of seawater exchange rates caused by the density difference, a non-hydrostatic three dimension model (CIP-LES-SF) was used. This model is able to express unsteady mixing at density fronts and in plumes.

Special attention was paid to the evaluation of the change of dissolved oxygen in the bottom layer. It became clear that the contribution of the sea water exchange by the density difference was large to the formation and the disappearance time of anoxic water at the bottom layer in the bay. The exchange rate is very large despite the rarity of these events occurrence. The exchange time by the density intrusion from outside the bay is 1 to 3 days compared to the exchange time by tide of about 60 days.

**Key words:** Ohfunato bay, outside bay, one-dimensional vertical model, non-hydrostatic three dimension model, seawater exchange, rate of seawater exchange, anoxic water

---

\* Research Engineer of Environmental Assessment Laboratory, Marine Environmental Division

\*\* Senior Research Engineer of Marine Environmental Division

\*\*\* Chief of Environmental Assessment Laboratory, Marine Environmental Division

3-1-1, Nagase Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-44-5018 Fax : +81-468-44-6243 e-mail:okada@ipc.phri.go.jp

## 目 次

要旨 .....	73
1. はじめに .....	77
2. 大船渡湾観測結果 .....	78
2.1 観測地点および観測方法 .....	78
2.2 観測結果 .....	79
3. 3元静水圧LESモデルによる貫入の再現と検討 .....	80
3.1 基礎式－3次元LESモデル .....	80
3.2 鉛直フラックスの成層を考慮した評価 .....	81
3.3 計算領域と条件 .....	82
3.4 計算結果 .....	83
3.5 交換率 .....	85
4. 鉛直1次元モデルを用いた長期再現計算 .....	87
4.1 基礎式 .....	87
4.2 再現計算の結果および考察 .....	92
5. おわりに .....	97
参考文献 .....	97

## 1. はじめに

従来、湾内の流動シミュレーションや水質の変化予測・評価の主流は平面2次元計算によってシミュレートされた潮汐残差流に基づくものであった。内湾の多くは水平スケールに対して鉛直スケールが比較的小さいため、多くの現象に対し平面2次元計算は有効かつ妥当な手法であった。しかしながら、湾内への河川からの淡水流入が湾内流動に及ぼす影響に関する研究、内部潮汐波に関する研究等が進むに連れ、鉛直方向の密度構造が湾内流動および水質変化にもたらす影響は非常に強いことが知られてきた。また、水質の悪化が問題となる夏期においては、閉鎖性水域は鉛直方向に強い成層を形成し、鉛直方向の密度勾配は流れおよび水質を支配する主要な因子となっている。特に底層の貧酸素化は密度成層の形成と強く関連していることから、鉛直密度構造に大きく支配されている。したがって、対象水域・現象によっては3次元静水圧モデル、さらには3次元非静水圧モデルを用いて鉛直方向の影響を考慮した計算を行う必要性が求められる。モデル構成が精緻になれば、当然、境界条件の与え方も精緻になる。従来の平面2次元モデルによる流動計算では湾口の境界条件として水位変動さえ与えれば十分であったのに対し、鉛直方向の密度勾配を考慮した3次元モデルを使用する際には、境界における鉛直方向の情報も必要となる。現状では、湾外の状況は殆ど変化しないという仮定もしくは変化するとしてもその影響はそれほど湾内の流動および水質の変化に影響を与えることはないという仮定の下、鉛直方向に一律な条件を与えるか、もしくはある一時期の観測結果を定常値として用いるのが限界である。

一方、観測による現象把握の重要性および数値モデルの検証の為、さらには観測技術の向上も後押しし、多くの観測が実施されるようになってきた。その結果、冬期の東京湾の海水交換のメカニズムとして潮汐運動そのものよりも大潮・小潮による影響の方が支配的であること<sup>1)</sup>、東京湾における外洋からの暖水塊による内湾水温の突発的な上昇<sup>2)</sup>、湾外水の進入による湾内底層部のDO濃度の突発的な上昇<sup>3),4)</sup>等、これまで何故このような突発的な水質変動が発生するかが不明であった現象が湾外の現象の影響伝播の結果として説明され始めている。

しかしながら、これまでのところ、それらの現象は依然として観測事例にとどまっているものが多く、外湾の影響を端的にモデル化し定量的に評価している例は少ない<sup>1)</sup>。そこで本研究では、日本沿岸の中でも水温・塩分の非定常性が比較的強い三陸沿岸<sup>3)</sup>に位置する大船渡湾

に対し、湾外水の変動に対する湾内への影響をモデル化し、湾内水質の長期再現計算を試み、湾外の水質変動が湾内水質変動へ与える影響の定量的評価を行うこととする。

本報において、2章では、大船渡湾における観測結果から、湾内外の密度差によって湾外水が湾内に貫入する現象（以下、密度貫入と呼ぶ）があること、湾内の水温・塩分は湾軸方向に一様であり鉛直1次元モデルが適用可能であることを示す。4章で行う長期再現計算では、湾外水の影響は潮汐による海水交換と密度貫入による海水交換として表現している。そこで、3章では、この密度貫入による海水交換に関するモデル定数を非静水圧3次元モデル（CIP-LES-SF）を用いてまず決定している。次に4章では、3章で得られた密度貫入に関するモデル定数を鉛直1次元モデルを適用し、湾内の水温、塩分およびDO濃度の長期再現計算を行っている。最後に5章で、本報のまとめを行う。

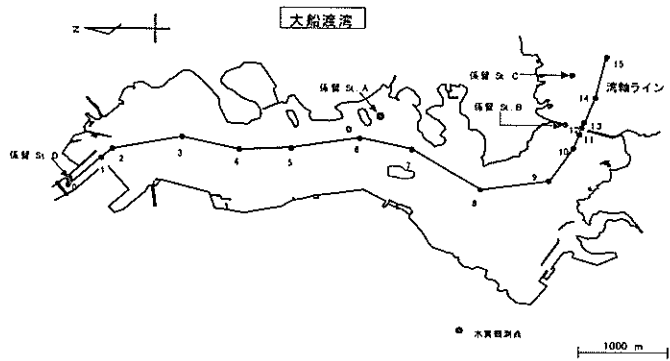


図-1 大船渡湾の形状と観測地点

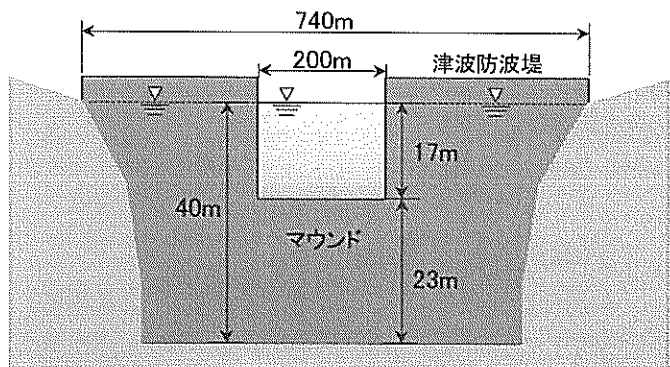


図-2 大船渡湾の湾口部の形状

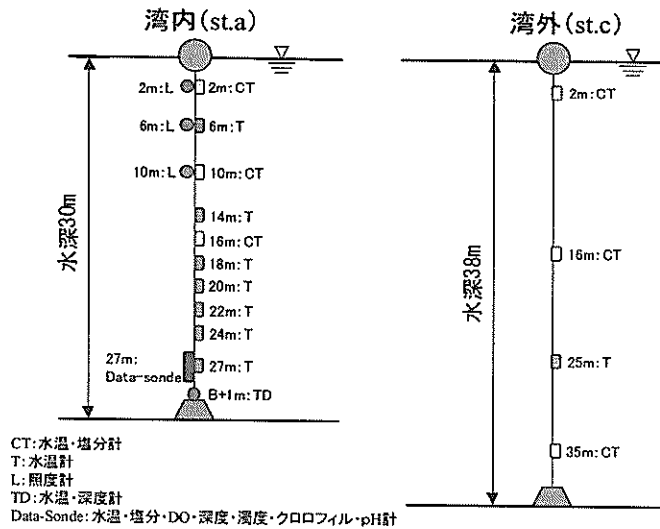


図-3 st.A,Cにおける水質計の設置状況

表-1 広域観測の実施日

第1回	1998年 4月 6,7日
第2回	1998年 5月 25日
第3回	1998年 7月 15,16日
第4回	1998年 8月 21日
第5回	1998年 9月 22日
第6回	1998年 10月 20,21日
第7回	1998年 12月 22日
第8回	1998年 3月 18日
第9回	1998年 7月 17,18日
第10回	1998年 9月 24,25日

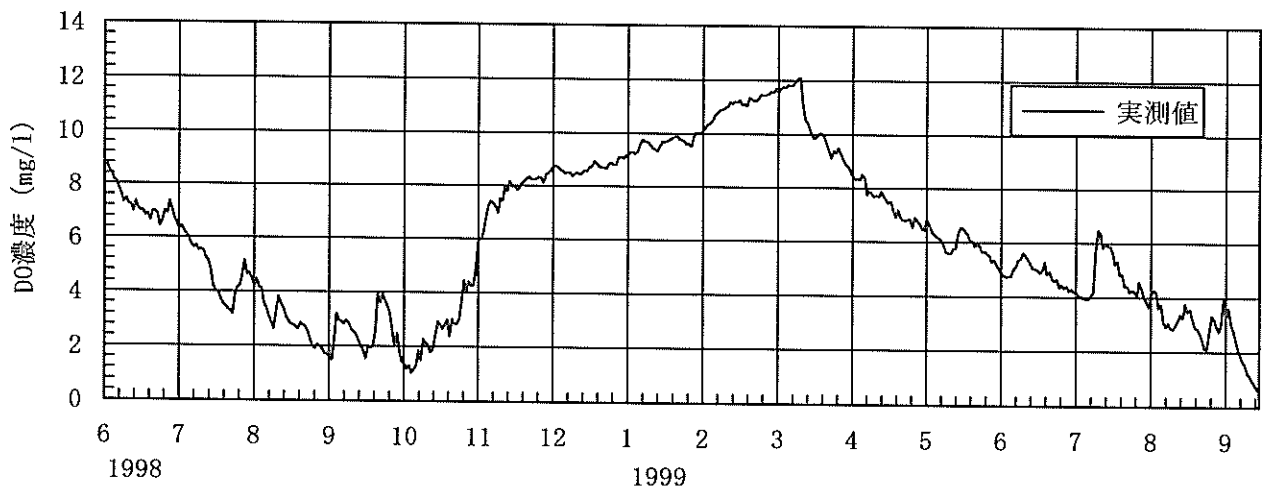


図-4 DO濃度の時系列変化 (st.Aの底層から1mの上)

## 2. 大船渡湾観測結果

本章では、大船渡湾で実施されたDO濃度の連続観測および水温・塩分の広域観測の結果から、湾外からの影響によって起こったと考えられる現象について示す。なお、大船渡湾における観測によって得られた現象の詳細な説明については日比野ら<sup>3)</sup>によって既に示されているので、本報では省略する。

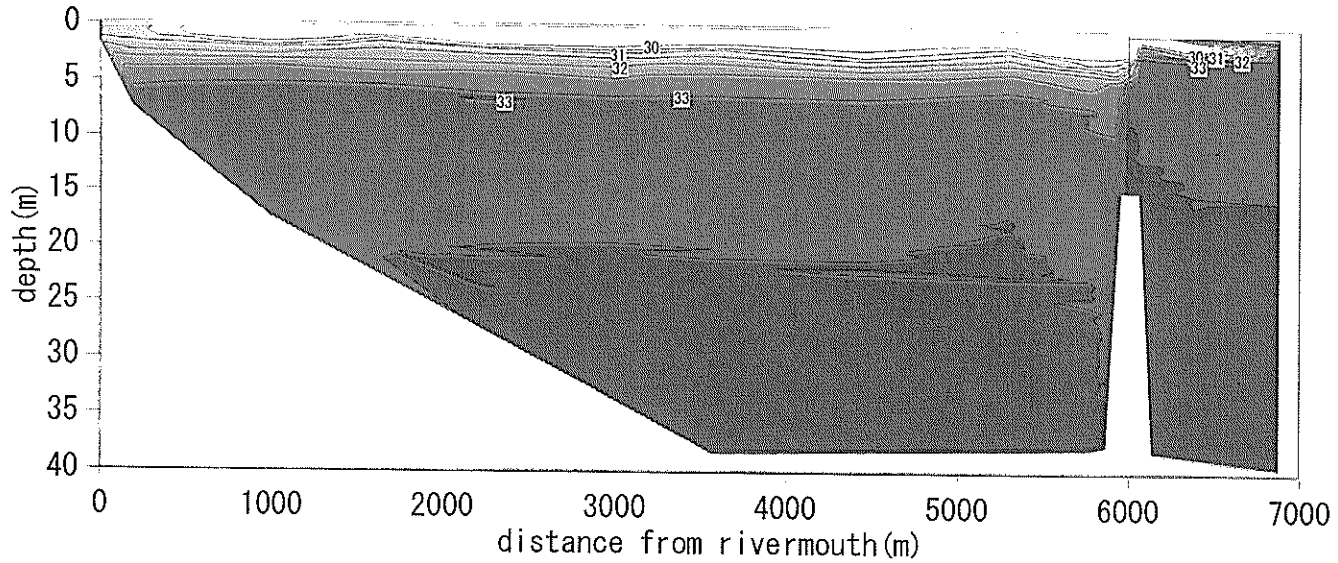
### 2.1 観測地点および観測方法

大船渡湾の形状と観測地点を図-1に示す。大船渡湾の湾軸に沿った長さは7km、横幅は2kmであり、大船渡湾は湾軸方向に細長い形状をしている。また、大船渡湾は三陸沿岸の特徴であるリアス式の湾であるため、湾の規模に対して水深は大きく、平均水深は20m、最大水深

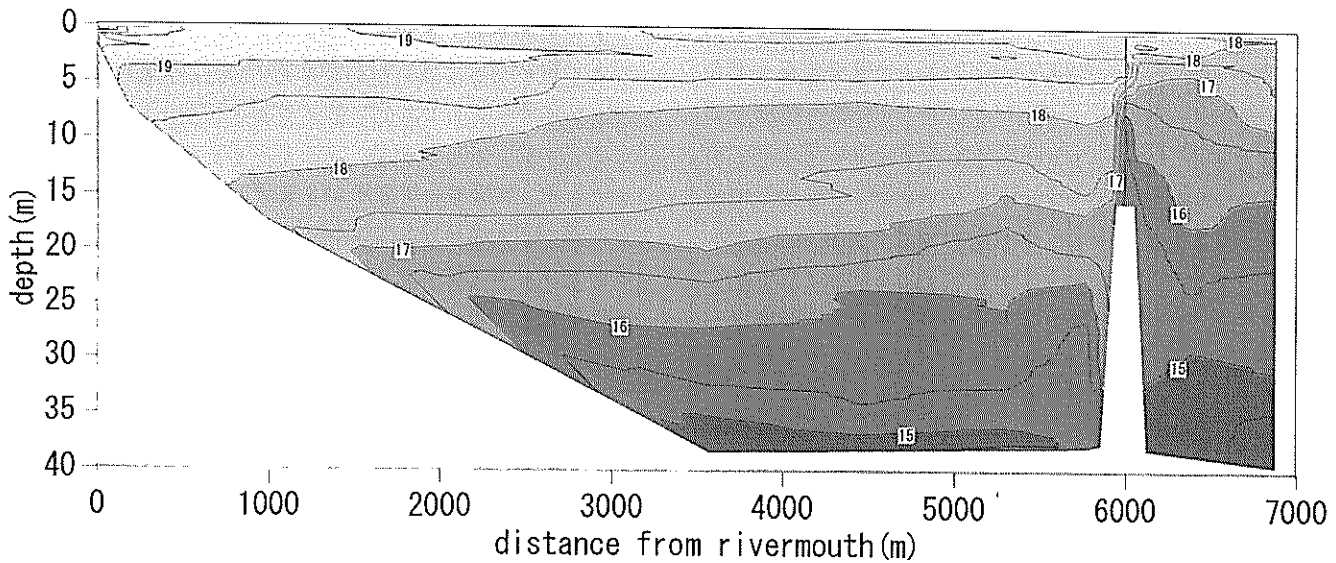
は湾口部付近の中央部において40mである。湾口部には津波防波堤が設置されており、湾口部の開口幅は200mと非常に狭いものとなっている。開口部には図-2に示す様にマウンドがあり、さらに開口部を狭いものとしている。

観測は1998年6月から1999年10月までの期間に行われた。図-1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。データの採取間隔は10分である。図-3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設置することにより、鉛直方向の分布の時系列変動を十分把握できるようになっている。

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、クロロフィル、DO等の鉛直分布を測定した。測定にはALEC社製



(a) 塩分



(b) 水温

図-5 広域観測結果 (1998年10月20日)

ACL1183-PDKを使用した。表-1は広域観測の実施日の一覧を示す。

## 2.2 観測結果

### (1) 連続観測

図-4はst.Aの底泥から1m上に設置された溶存酸素計で計測されたDO濃度の時系列変動を示したものである。

大船渡湾ではDO濃度が3mg/lを下回る貧酸素状態が夏期において発生していることが分かる。通常、閉鎖性水域では、貧酸素水塊の形成の主な要因は夏期の湾内水

温上昇、成層化による底層への溶存酸素供給量の低下、および底泥を含む底層における酸素消費量の増大である。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。しかし、大船渡湾におけるDO濃度の変遷を見ると、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が分かる。また、春先きから秋口にかけてのDO濃度の低下時に突発的なDO濃度の上昇がしばしば発生していることが見られる。これらの特徴は、内湾水温の年毎の違いだけでは説明できず、



なんらかの外的な影響が及んでいることを示している。

## (2) 広域観測

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の湾軸に沿った距離を示す。横軸6000m地点にマウンドがちょうど位置する。

10月の観測結果であるが、大船渡湾の塩分および水温は、鉛直方向に明確な成層を形成している。また、水温の分布図から、湾外の水塊がマウンドを超え、湾内に進入した際には湾外よりも下層に侵入している様子が分かる。これは、湾外の表層水が湾内の表層水より重いため、湾外水が湾内に侵入する際に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。本報において、このような湾内外の密度差によって発生する貫入現象を密度貫入と呼ぶこととする。

さらに、コンターライン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はほぼ一様であると言える。この一様性はここに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唆している。

## 3. 3次元非静水圧 LES モデルによる貫入の再現と検討

本章では、3次元非静水圧モデル<sup>9)</sup>を用いて、2章で示した湾外と湾内の密度差によって発生する密度貫入について検討し、密度貫入による海水交換のモデル化を行う。成層した湾内への外湾水の貫入はブルームと想定され、せん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。

このモデルの大きな特徴としては、以下の点が挙げられる。

- 1) 地形をステップ状に扱うことにより、鉛直座標変換を用いた計算において現れる過度な鉛直拡散を抑えることができる。
- 2) 自由表面の扱いに Arbitrary Lagrangian Eulerian 法 (ALE 法: メッシュの切りなおし) を用いることにより、レベルモデルにおいて現れる大きな潮位変化に

よる計算の不具合を生じない。

- 3) 非静水圧モデルを用いることにより、ブルームの進入など急激な密度の変化が生じる現象を再現することができる。
- 4) 非常に安定した成層場における鉛直フラックスの算定に、Second-Order Closer (SOC<sup>10)</sup>)を用い、さらに、より成層が強いときには著者らによる推定式を用いており、非静水圧の条件とともに、貫入等といった現象を再現することができる。
- 5) 水平方向のメッシュに関して写像変換を用いて湾を再現することで、これまでよく用いられてきた矩形メッシュによる湾形状の再現による、計算の誤差を取り除くことができる。
- 6) 対流項の計算にCIP法を用いることにより、限られたメッシュ数により生じる温度、塩分の不連続面の対流項による数値計算誤差(人工粘性)を抑えることができる。これにより、それほど多くのメッシュを用いなくとも、対流項を高精度に評価することができる。

### 3.1 基礎式—3次元 LES モデル

式(1)~式(4)に、ブシネスク近似された、基礎方程式を示す。式(1)は連続の式、式(2)は運動方程式、式(3)は熱輸送方程式、式(4)は塩分輸送方程式である。

(Continuity equation)

$$\frac{\partial u_{ri}}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

(Momentum equation)

$$\frac{\partial u_{ri}}{\partial t} + u_{rk} \frac{\partial u_{ri}}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \delta_{rs} g(\beta\theta_r - \beta_s\theta_{sr}) + \rho\nu\nabla^2 u_{ri} \quad (2)$$

(General equation of heat transfer)

$$\frac{\partial \theta_r}{\partial t} + u_{ri} \frac{\partial \theta_r}{\partial x_i} = \kappa\nabla^2 \theta_r \quad (3)$$

(General equation of salinity transfer)

$$\frac{\partial \theta_{sr}}{\partial t} + u_{ri} \frac{\partial \theta_{sr}}{\partial x_i} = \kappa_s \nabla^2 \theta_{sr} \quad (4)$$

ここで、 $i, k=1\sim 3$ :  $x, y, z$ 方向、 $u_{ri}$ : 流体の流速、 $p$ : 圧力、 $g$ : 重力加速度、 $\theta_r$ : 温度、 $\theta_{sr}$ : 化学ポテンシャルで記述されるかそれに近い挙動をするスカラー量(ここでは仮に塩水とする)、 $\beta$ : 温度に関する浮力換算係数、

$\beta_s$ : 塩水に関する浮力換算係数,  $\nu$ : 動粘性係数,  $\kappa$ : 温度に対する拡散係数,  $\kappa_s$ : 塩水に対する拡散係数である。

式(1)–式(4)で示される基礎方程式中の動粘性係数, 温度の拡散係数, 塩分の拡散係数は, それぞれ分子間力での粘性, 小スケールでのエントロピー, 化学ポテンシャルの差に起因するものである。そのため, 小さなメッシュレイノルズ数で計算を行わなければ, 以上の方程式を正確に解くことは出来ない。そこで著者らは, メッシュ以下の乱流エネルギーを等方性の理論から推定し, スケールによる問題を解消することができる手法として提案されている, large-eddy simulation (以下 LES モデル) を用いることとした。

以下, 簡単な LES モデルに関する説明を行う。式(5)–式(7)は, 式(1)–式(4)中で示された流速, 温度, 塩分に関する変数を, ある空間・時間における平均値とその偏差に分離したものである。

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (5)$$

$$\theta_r = \bar{\theta} + \theta_r' \quad (6)$$

$$\theta_{sr} = \bar{\theta}_s + \theta_{sr}' \quad (7)$$

ここで, 'がない場合: 空間平均値, 'がある場合: 空間平均値からの変動量である。

式(5)–式(7)を, 式(1)–式(4)に代入し, 以下に示される空間フィルターを用いることにより, 式(9)–式(12)を得ることが出来る。

(Filter function)

$$\tilde{f}(x) = \int_{\gamma} G(x - \xi) \tilde{f}(\xi) d\xi \quad (8)$$

(Continuity equation)

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

(Momentum equation)

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = & -\frac{\partial R_{ik}}{\partial x_k} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \\ & + \delta_{i3} g (\beta \theta - \beta_s \theta_s) + \nu \nabla^2 u_i \end{aligned} \quad (10)$$

(General equation of heat transfer)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_k \frac{\partial \theta}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( K_h \frac{\partial \theta}{\partial x_k} \right) + \kappa \nabla^2 \theta \quad (11)$$

(General equation of salinity transfer)

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial t} + u_k \frac{\partial \theta_s}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( K_h \frac{\partial \theta_s}{\partial x_k} \right) + \kappa \nabla^2 \theta_s \quad (12)$$

ここで,  $f$ : resolved field における値,  $R_{ij}$ : 空間レイノルズ応力である。

式(2)と式(10)の差を取り, 偏差成分を掛け合わせるにより式(13)で示される, サブグリッドスケール (SGS) での乱流エネルギーの輸送方程式を得ることができる。

(Turbulent energy equation)

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + u_k \frac{\partial E}{\partial x_k} + \overline{u_i' u_k'} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = & \frac{\partial}{\partial x_k} \left( K_h \frac{\partial E}{\partial x_k} \right) \\ & + \delta_{i3} g (\beta \overline{u_i' \theta'} - \beta_s \overline{u_i' \theta_s'}) - C_\epsilon E^{3/2} \Delta \end{aligned} \quad (13)$$

ここで,  $E$ : SGS 乱流エネルギーである。

式(9)–式(13)を解く際, レオナルド応力 (Leonard Stress) に関する項は省略し, Deardorff<sup>9)</sup> による 1 方程式 LES モデルを基に, 乱流成分に関して以下の定義を用いる。

$$R_{ik} = \overline{u_i' u_k'} \quad (14)$$

$$\overline{u_i' u_k'} = \delta_{i3} \frac{2}{3} E - K_m \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \quad (15)$$

$$\overline{u_i' \theta'} = K_h \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \quad (16)$$

$$\overline{u_i' \theta_s'} = K_h \frac{\partial \theta_s}{\partial x_i} \quad (17)$$

$$K_m = C_m E^{1/2} \Delta \quad (18)$$

$$K_h = Pr_t K_m \quad (19)$$

ここで,  $Pr_t$ : プラントル数,  $C_\epsilon$ ,  $C_m$  は LES 定数<sup>9)</sup> であり, 以下の値を用いた。

$$C_\epsilon = 0.845 \quad (20)$$

$$C_m = 0.0856 \quad (21)$$

$$Pr_t = 0.420 \quad (22)$$

### 3.2 鉛直フラックスの成層を考慮した評価

成層場では, 安定した成層の場合, 成層の度合いにより鉛直方向の拡散係数が大きく変化する。本研究では, 基礎方程式として 1 方程式 LES モデルを用いている都合

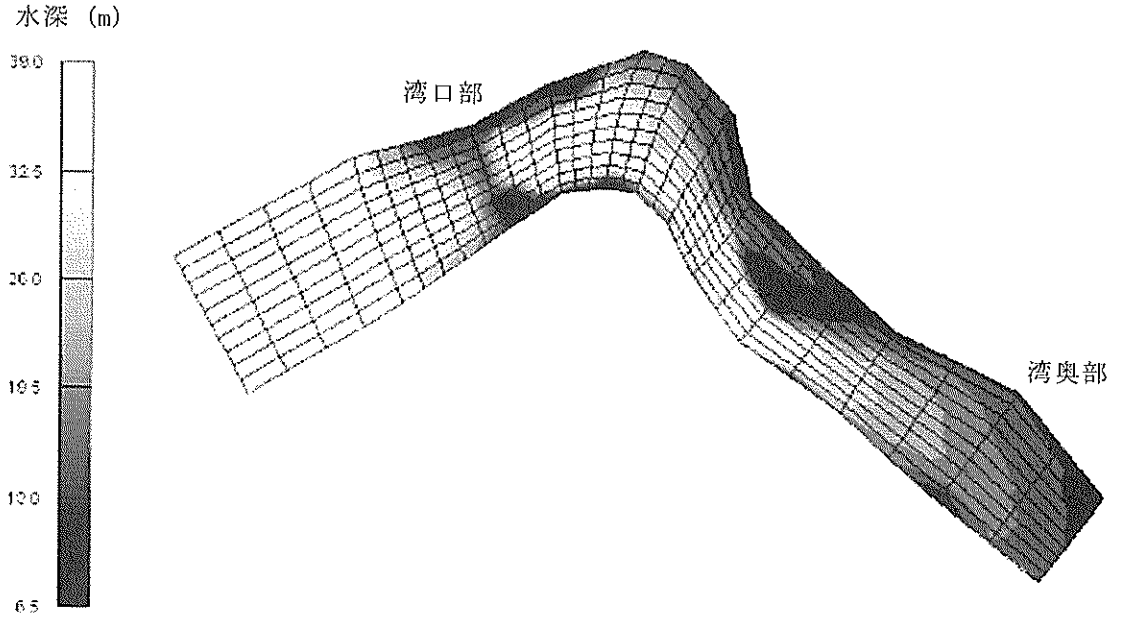


図-6 計算に用いたメッシュの平面図

上,鉛直方向の拡散係数の変化を,成層度を考慮し非定常な変化をするものとして,基礎方程式中に含めることができない。しかし, Schumann<sup>9)</sup>らは,代数近似された Second-Order Closure (SOC) モデルを基に鉛直拡散係数の決定を行い,鉛直方向のスカラー量に対するフラックスの式を以下のように扱っており,本報においても同様の取り扱いを行った。

$$Pr_t = (1 + 0.3\Delta^2 N^2 / E) \frac{C_m}{C_r} \quad (23)$$

$$N^2 = \beta_0 g \frac{\partial \Theta}{\partial z} \quad (24)$$

### 3.3 計算領域と条件

#### (1) 計算領域

本計算手法は,任意境界における計算を可能とするため,写像変換を用いて基礎方程式を解いている。デカルト座標から任意座標へ変換し,チェーンルールを用いる際,以下の楕円型偏微分方程式を用いて,両者の関係を決定する。そうすることにより,両者の間に一対一の対応をつけることができ,計算に有利な,滑らかなメッシュを作成することができる。

$$\xi_{xx} + \xi_{yy} + \xi_{zz} = P(\xi, \eta, \zeta) \quad (25)$$

$$\eta_{xx} + \eta_{yy} + \eta_{zz} = Q(\xi, \eta, \zeta) \quad (26)$$

$$\zeta_{xx} + \zeta_{yy} + \zeta_{zz} = R(\xi, \eta, \zeta) \quad (27)$$

図-6, 7に,大船渡湾のメッシュの平面図と鳥瞰図を示す。両図共に左側が湾口で右側が湾奥であり,図-6中の凡例は水深を示す。メッシュ数は,縦断30×横断10×鉛直13である。

#### (2) 計算条件

湾内外でポテンシャルが異なる場合,湾内外で同じ層の水塊の密度差により湾外の水塊が湾内に貫入してくる。その貫入の形態は,大きく以下の二つに分類できる。

##### ① case1 :

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。

##### ② case2 :

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。

ここで,湾外,湾内とは,マウンド直上を境界として区別している。

海水の密度は塩分と水温によって決定されるが,本計算においては,塩分は一様とし,密度差は温度のみによって決定されるものとした。図-8, 9に, case1, case2における湾内,湾外における温度の鉛直分布を示す。マウンド頂上は,およそ底面から18mに位置する。

case1は,湾外の水塊がマウンド頂上以下の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, case2は,湾外の水塊が全て表層に貫入するケースである。潮

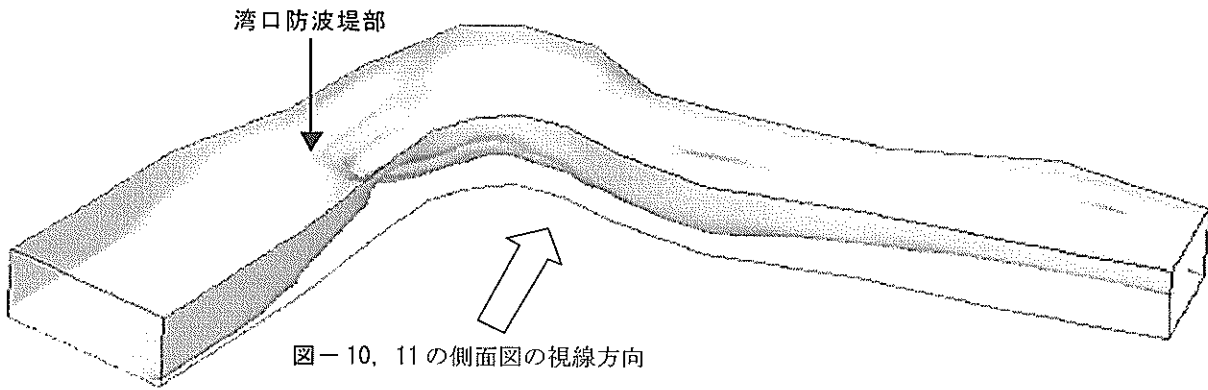


図-7 計算に用いたメッシュの鳥瞰図

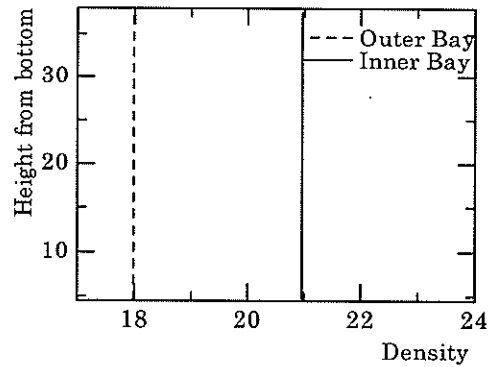
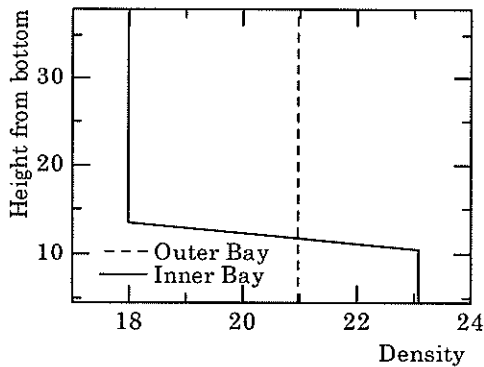
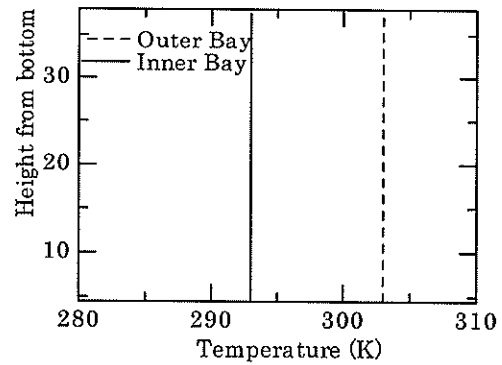
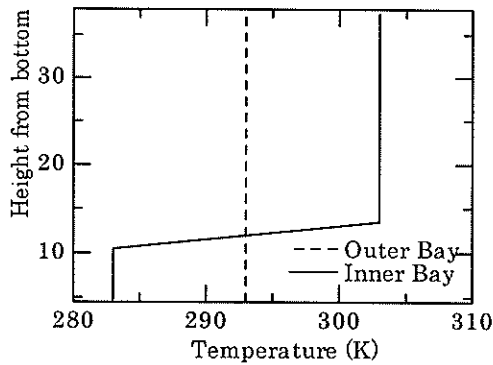


図-8 case1の初期条件

図-9 case2の初期条件

位の変化は、周期12時間、振幅1.6mを与えた。計算は実時間で2日間分（4潮汐分）行った。

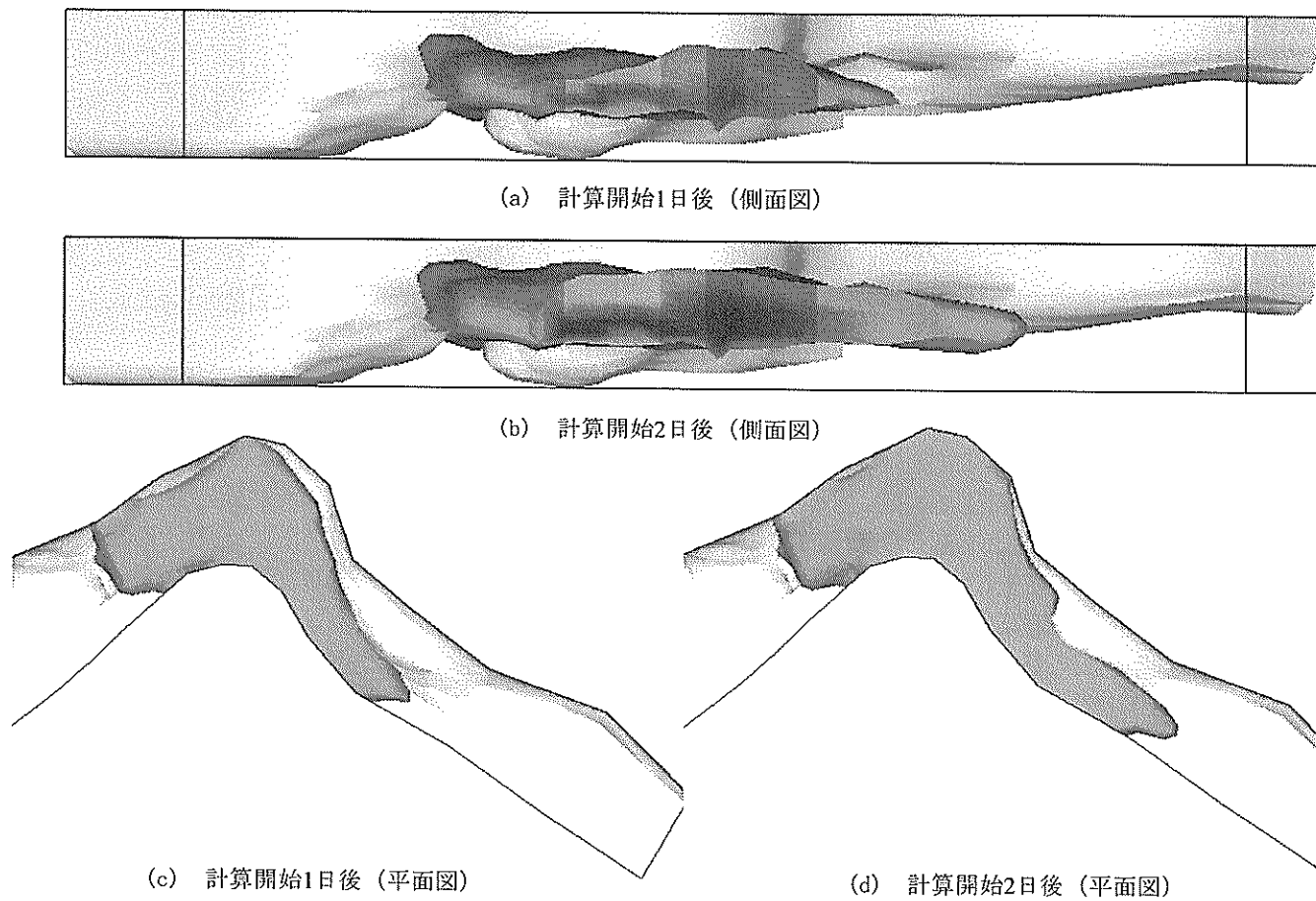
### 3.4 計算結果

#### (1) case1

図-10(a)~(d)に、1日後、2日後における温度の2℃低下した等値面の側面図、平面図を示す。側面図は、図-7の矢印で示される方向から描かれたものであり、手前の地形は図化の際に障害となるため、描画していな

い。

1日後、2日後の計算結果両図とも、貫入している密度流のフロントはその形を保つ弱混合形態であることが分かる。これは、湾外からの水塊の侵入が、フロントでの激しい混合を起こしながら進むものではなく、あるレベルの層に比較的安定して侵入してくるものであることを示している。2日後の計算結果から、湾外水がわずかな時間で湾奥まで侵入すること、交換率が大きいことなどが分かる。



図一 10 case1における1日, 2日後における温度低下2°Cの等値面

(2) case2

case1と同様に, 温度が2°C上昇した等値面の側面図, 平面図を図一11に示す. case1に比べ, より薄く, より湾奥まで貫入しているが, 同じ割合の温度低下, 上昇域の体積の比較を行うと, case2の方が貫入量としては若干少なくなっていた. この現象に関しては, 次節の交換率の推定で詳しく述べる. 貫入の形態としては, case1と同じく, 弱混合の形態を示していることが分かる. ここで, 貫入速度に関して, BRITTER & SIMPSON<sup>10)</sup>を参考に検討を行う.

case1において, 12時間後, 貫入距離およそ1.5km, 温度低下6°Cの層厚3m, 開口部200mに対して湾横断距離1.5kmであった. ゆえに, 内部フルード数は, 以下のよう導かれる.

$$\frac{U}{\sqrt{g'h}} = \frac{1500/(12 \times 3600) \times 7.5}{\sqrt{0.015588 \times 3}} = 1.20 \quad (28)$$

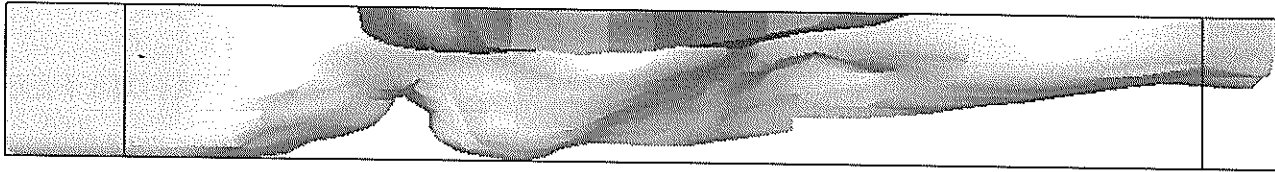
密度の異なる安定な条件に対する2流体間の界面に貫入してくる密度流の内部フルード数と後続部における厚さおよび水深比の関係を実験および解析した BRITTER

& SIMPSON<sup>10)</sup>の研究によると, およそ内部フルード数1.3が得られ, 式(28)で得られる値よりも若干大きくなるが, ほぼ一致した結果が得られる. 鉛直方向の渦粘性係数0.00060 m<sup>2</sup>/sを基に, 乱流レイノルズ数を計算すると, 約1300と小さく, これからもプルームが, 弱混合形態であったことが分かる.

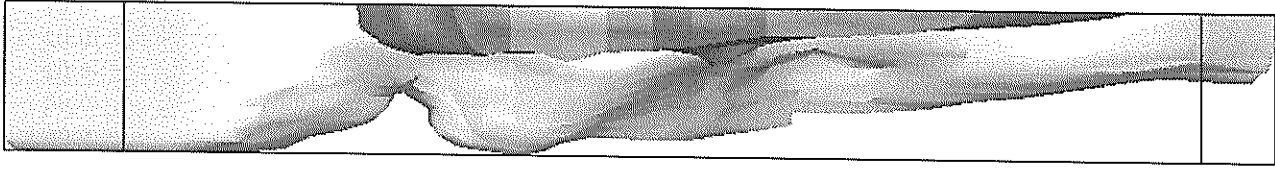
case2について, 同様な計算を行うと, 12時間後, 貫入距離およそ2km, 温度上昇3°Cの層厚3m, 開口部200mに対して湾横断距離1kmであり, 内部フルード数は, 以下に示されるものとなる.

$$\frac{U}{\sqrt{g'h}} = \frac{2000/(12 \times 3600) \times 5}{\sqrt{0.009614 \times 3}} = 1.36 \quad (29)$$

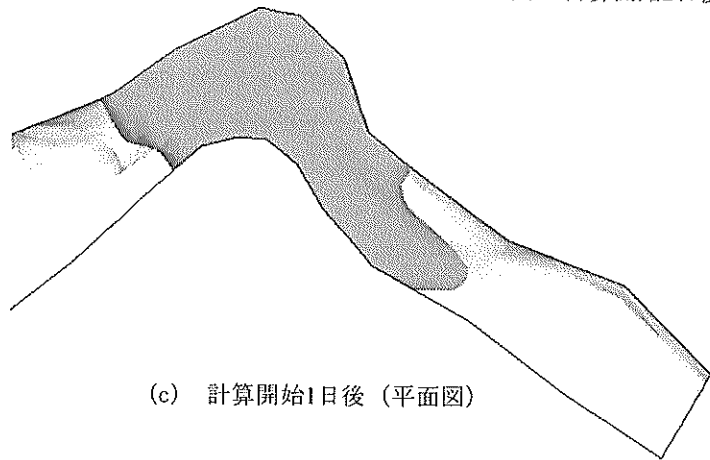
ここで, 温度低下3°Cを用いたのは, 上層への貫入は, 下層への貫入に比べフラックスが小さかったため, 6°C上昇面を基準面にとることが出来なかったためである. BRITTER & SIMPSON<sup>10)</sup>によると, 内部フルード数は, およそ1.2であり, case1と同様, ほぼ一致している. レイノルズ数は, 鉛直方向の渦粘性係数を0.54 m<sup>2</sup>/sとして, およそ1290であった. case1と同様に, 乱流レイノ



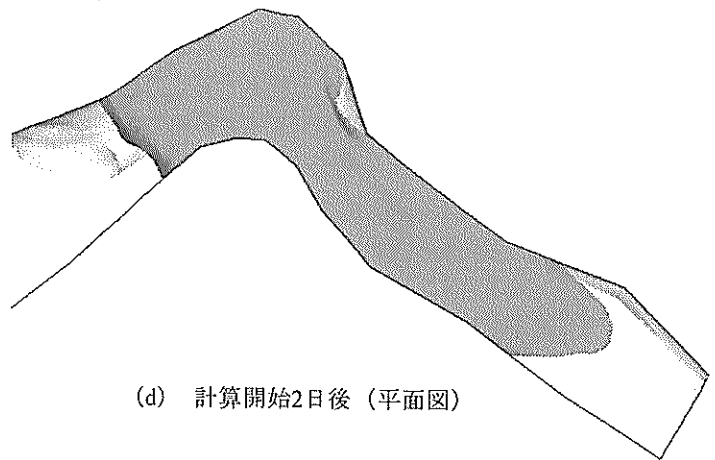
(a) 計算開始1日後 (側面図)



(b) 計算開始2日後 (側面図)



(c) 計算開始1日後 (平面図)



(d) 計算開始2日後 (平面図)

図-11 case2における1日、2日後における温度低下2°Cの等値面

ルズ数が比較的小さく、弱混合形態で貫入していたことが分かる。

### 3.5 交換率

マウンドを境界として、湾内を3m毎13層に分離し、各層の体積を計算すると、表-2が得られる。表層の容積は、底層に比べておよそ12倍の容積である。貫入は、case1の場合には第5層目に、case2の場合には第13層目に起こる条件であったことが、図-10, 11から分かる。

#### (1) case1

第5層目には、マウンドを越える第7層目以上7層分の湾外水塊が貫入する。表-3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5層目を基準とした容積の違いを加味した温度の変化(第5層基準温度変化)を示す。第5層基準温度変化は、式(30)により計算するものとする。

$$\Delta T_i' = \Delta T_i \frac{V_j}{V_i} \quad (30)$$

ここで、 $T_i$ :  $i$ 層目の温度、 $j$ : 基準となる層である。

表-2 底層を第1層、表層を第13層として3m毎に計算された湾内容積

Layer	Volume (m <sup>3</sup> )
1	1170000
2	1840000
3	2980000
4	3440000
5	4310000
6	5890000
7	7080000
8	9240000
9	11600000
10	13080000
11	13680000
12	13740000
13	13740000

弱混合形態での貫入とはいえ、第6層目の第5層基準温度変化は第5層目のものと比べて大きく、貫入による交換率の大きさが分かる。第5層基準温度変化は、総合すると-40.7°Cであり、第5層に貫入してくる7層の各層との温度差の総計-70°Cの、約60%に達していた。

表-3 case1における各層の温度変化と第5層を基準とした各層の温度変化(単位:°C)

Layer	温度変化	第5層基準温度変化
1	-0.03	-0.01
2	0.73	0.31
3	3.87	2.68
4	7.17	5.72
5	-6.71	-6.71
6	-6.60	-9.01
7	-5.73	-9.41
8	-4.35	-9.33
9	-2.62	-7.04
10	-1.33	-4.02
11	-0.73	-2.33
12	-0.34	-1.10
13	-0.14	-0.45
Total		-40.70

鉛直1次元モデルでは、 $n$ 層目の湾外水が $i$ 層目の貫入に貫入する場合の $i$ 層目の変化は、式(31)で示される。

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = -\lambda_{r_i}(T_i - T_{out_n}) \quad (31)$$

ここで、 $T_i$ : $i$ 層目の湾内水温、 $\lambda_{r_i}$ : $i$ 層目の交換率、 $T_{in_i}$ : $i$ 層目の湾内水温の初期値、 $T_{out_n}$ : $n$ 層目の湾外水温の初期値である。式(31)は、初期の温度差( $T_{out_n} - T_{in_i}$ )を用いて、以下のように交換率を導く式へと計算される。

$$\lambda_{r_i} = \frac{1}{t} \ln \left( \frac{T_{out_n} - T_{in_i}}{T_{out_n} - T_i} \right) \quad (32)$$

ここで、湾外水は第5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、全層に渡った(湾外はマウンド上の7層)熱量を考慮すると、式(32)は次式で現される。

$$\lambda_{r_5} = \frac{1}{t} \ln \left( \frac{\sum_{i=1}^7 T_{out_n} - \sum_{i=1}^{13} T_{in_i}}{\sum_{i=1}^7 T_{out_n} - \sum_{i=1}^{13} T_i} \right) \quad (33)$$

表-3の結果を用いると $\lambda_{r_5}$ は0.43 1/dayであり、交換率の逆数である交換時間は第5層目において2.30日となる。

## (2) case2

湾外マウンド高さ以上の水塊が、表層(13層)に貫入することから、ここでは基準となる層を13層とし、表-4に、各層の温度変化と、第13層を基準とした第13層基準温度変化を示す。第13層基準温度変化は、総合すると10.2°Cであり、第13層に貫入してくる7層の各層との

表-4 case2における各層の温度変化と第13層を基準とした各層の温度変化(単位:°C)

Layer	温度変化	第13層基準温度変化
1	-0.01	0.00
2	-0.03	0.00
3	-0.04	-0.01
4	-0.05	-0.01
5	-0.05	-0.02
6	-0.04	-0.02
7	-0.01	0.00
8	0.09	0.06
9	0.32	0.27
10	0.78	0.74
11	1.52	1.51
12	2.93	2.93
13	4.75	4.75
Total		10.21

表-5 case1, case2における各層のポテンシャル差を考慮した交換時間(単位: dayKg<sup>1/2</sup>/m)

Layer	case1	case2
1	3.75	5.64
2	5.88	8.82
3	9.50	14.26
4	10.98	16.48
5	13.74	20.64
6	18.78	28.20
7	22.59	33.92
8	29.45	44.22
9	36.98	55.53
10	41.69	62.60
11	43.60	65.48
12	43.80	65.78
13	43.80	65.78

温度差の総計70°Cの、約15%であった。case1と同様な計算を行い、交換時間を求めると、case2では、第13層目において12.7日であった。

## (3) 交換時間

case1, case2それぞれに対して、湾外水が各層に貫入する場合の交換時間を表-5に示す。case1に対しては5層の値を、case2に対しては13層の値を基準として、各層の体積に基づいて換算された交換時間に、 $\Delta\rho H$  ( $\Delta\rho$ :湾内外の密度差、 $H$ :次章の図-12で定義される $H$ )を掛けて、湾内外のポテンシャル差を考慮した交換時間としたものである。表中の値の鉛直1次元モデルへの適用に関しては時節で述べることにする。

#### 4. 鉛直1次元モデルを用いた長期再現計算

本章では、3章によって決定された密度貫入による海水交換率（交換時間）を利用して、湾内の水温、塩分およびDO濃度の長期再現計算を行う。2章の観測結果において指摘したように、大船渡湾の形状は湾軸方向に細長くかつ水深が大きい上に湾内水質は湾軸方向にほぼ同様であるので、湾内における現象を鉛直1次元に単純化したモデルを用いることとする。

##### 4.1 基礎式

###### (1) 鉛直1次元モデル

水温  $T$ 、塩分濃度  $S$ 、DO濃度  $C_{DO}$  に対する鉛直1次元方程式<sup>11)</sup>は次式で表される。

(水温)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left( AK_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{h}{\rho C_p} + (\lambda + \lambda_r) \cdot (T_{OUT} - T) \quad (34)$$

$$h = - \frac{\partial Aq(z)}{\partial z} \quad (35)$$

$$q(z) = (1 - \beta) \cdot Q_s \cdot \exp(-\kappa z) \quad (36)$$

境界条件

$$\text{表層: } -K_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_r}{\rho C_p} \quad (37)$$

$$\text{底層: } K_z \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (38)$$

(塩分濃度)

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left( AK_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) + (\lambda + \lambda_r) \cdot (S_{OUT} - S) \quad (39)$$

(DO濃度)

$$\frac{\partial C_{DO}}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left( AK_z \frac{\partial C_{DO}}{\partial z} \right) + \left( \frac{dC_{DO}}{dt} \right)^* + (\lambda + \lambda_r) \cdot (C_{DO_{OUT}} - C_{DO}) \quad (40)$$

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 ( $^{\circ}C$ )、 $\beta$ :水面に到達する有効短波放射  $Q_s$  のうち水表面の極薄い層に吸収される割合（残りは指数的に水深方向に減衰しながら到達）、 $\kappa$ :消散係数、 $Q_r$ :大気との全熱交換量 ( $cal/m^2/day$ )、 $C_p$ :比熱 ( $cal/g^{\circ}C$ )、 $K_z$ :鉛直渦動粘性係数 ( $m^2/s$ )、 $S$ :塩分濃度、 $C_{DO}$ :DO濃度 ( $mg/l$ )、 $(dC_{DO}/dt)^*$ :DOの生成・消滅項である。添え字のOUTは湾外水を意味しており、今回の解析においては、外海水のデータとして実測値を採用している（(2)参照）。また、 $\lambda$  ( $1/day$ ) は各層に対する海水交換量の割合であり（以下、海水交換率）、 $1/\lambda$  ( $day$ ) は交換に要する時間（以下、交換時間）を意味する。 $\lambda_r$  ( $1/day$ ) は密度貫入による海水交換率を意味する。

今回の解析においてDO濃度を計算した目的は、湾内の物質循環を検討するためではなく、主に貧酸素水塊の生成・消滅時期およびその機構と湾外との関係を明らかにするためである。よって、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。

$$\text{表層: } C_{DO} = 0.9 \cdot C_{DO_{sat}} \quad (41)$$

$$\text{底層: } \left( \frac{dC_{DO}}{dt} \right)^* = -D_1 \quad (42)$$

$$D_1 = SOD20 \cdot \theta_s^{T-20} \frac{A_b}{A_s \cdot \Delta z} \quad (43)$$

ここで、 $C_{DO_{sat}}$ :飽和DO濃度 ( $mg/l$ )、 $D_1$ :酸素消費項<sup>12)</sup>、 $SOD20$ : $20^{\circ}C$ の時の底泥の酸素消費量 ( $mg/m^2/day$ )、 $\theta$ :温度補正係数、 $T$ :水温 ( $^{\circ}C$ )、 $A_s$ :各層の層平均された水面積 ( $m^2$ )、 $A_b$ :各層の底面積 ( $m^2$ )（表-6参照）、 $\Delta z$ :層厚 ( $m$ )である。なお、底泥の酸素消費  $SOD20$  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適用した ( $SOD20=1500mg/m^2/day$ )。また、表層のDO濃度は常に飽和DO濃度の90%とした。

###### (2) 海水交換率

図-12に示すような、静止した密度  $\rho_1$  の流体の下を密度  $\rho_2$  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<sup>13)</sup>。簡単のため粘性は無視する。そのとき、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  $H$  を用いて



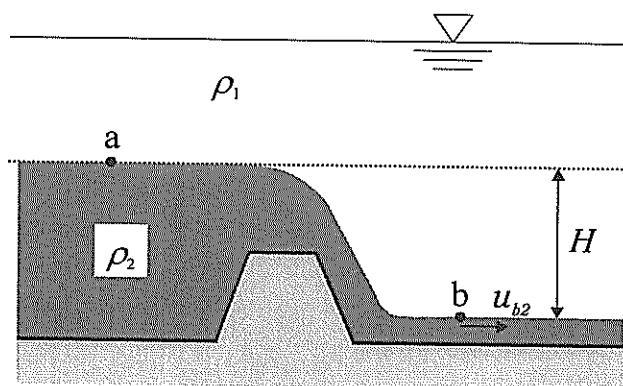


図-12 シルを超える2層流

表-6 各層の平均された水面積と底面積

層	平均水面積 $A_s$ (km <sup>2</sup> )	底面積 $A_b$ (km <sup>2</sup> )
1	6.90	0.44
2	6.10	1.16
3	5.23	0.58
4	4.65	0.57
5	4.05	0.63
6	3.10	1.27
7	2.18	0.57
8	1.72	0.34
9	1.41	0.30
10	1.11	1.26

$$u_{b2} \approx \sqrt{\Delta\rho \cdot H} \quad (44)$$

の関係で表すことができる。

計算では、上述の関係を利用し、3章で得られた密度貫入による海水交換率の値に、密度差と水位差から計算される流速を掛けて各層、各時間に対する海水交換率を計算した。例えば図-13において、湾外の第3～6層が湾内の第10層（3章では第4層目に対応する）に貫入する場合、密度差  $\Delta\rho$  と水位差  $H$  は

$$\Delta\rho = \left| \frac{1}{4} \sum_{s=3}^6 \rho_{OUT}(N) - \frac{1}{8} \sum_{s=3}^{10} \rho_{IN}(N) \right| \quad (45)$$

$$H = \Delta z \cdot 7層 \quad (46)$$

である。また、貫入する層厚が4層の場合には、貫入速度は4倍になるとした。したがって、図-13で示されるような場合の貫入速度は、3章の表-5の値を用いて

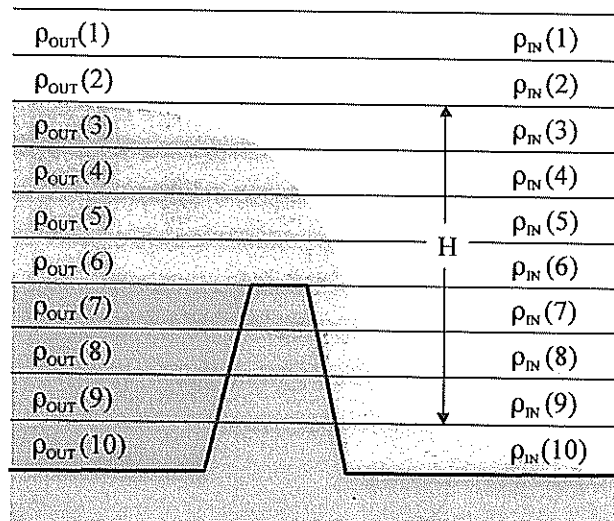


図-13 密度貫入による海水交換のイメージ図

$$\lambda_r = \frac{1}{a} \cdot \sqrt{\Delta\rho \cdot H} \cdot 4 \quad (47)$$

ここで、

$$a = (\text{表-5, Layer4})$$

で表される。

(3) 境界条件および初期条件

湾外水の水温・塩分の境界条件は図-1中のst.Cのデータを採用した。図-14, 15はst.Cにおける水温と塩分の時系列の生データを示したものである。塩分の時間変動は非常に大きく、特に減少方向の変動は激しい。10分間で1pus以上の変動がしばしば見られる。このような現象はst.Cにおいては実際に起こっている現象かもしれないが、湾外水の代表値としては適さないと判断し、2日間の移動平均（図-16参照）からの偏差が1pus以上のデータを移動平均値とする補正を行った。図-17は補正後の時系列である。時間的な勾配の大きな変動はほとんど除去されていることが分かる。したがって、計算には図-17のデータを用いた。

湾外水のデータは水深2m, 16mおよび30mの3層で測定された。図-15で見られたように、水深2m層の塩分のデータは河川水、雨水等の影響により、他の層と比べて値は低く変動は異なっている。一般に、このような河川水等の影響は表層に限られている。したがって、水深2mより浅い水深の値は水深2mのデータ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のデータ、第2, 3, 4, 5層は水深16mのデータ、第10層は水深30mのデータ、第6, 7, 8, 9層は水深16mのデータと水深30mのデータの線形補間した値を用いた。

水温、塩分およびDO濃度の初期条件は1998年5月27

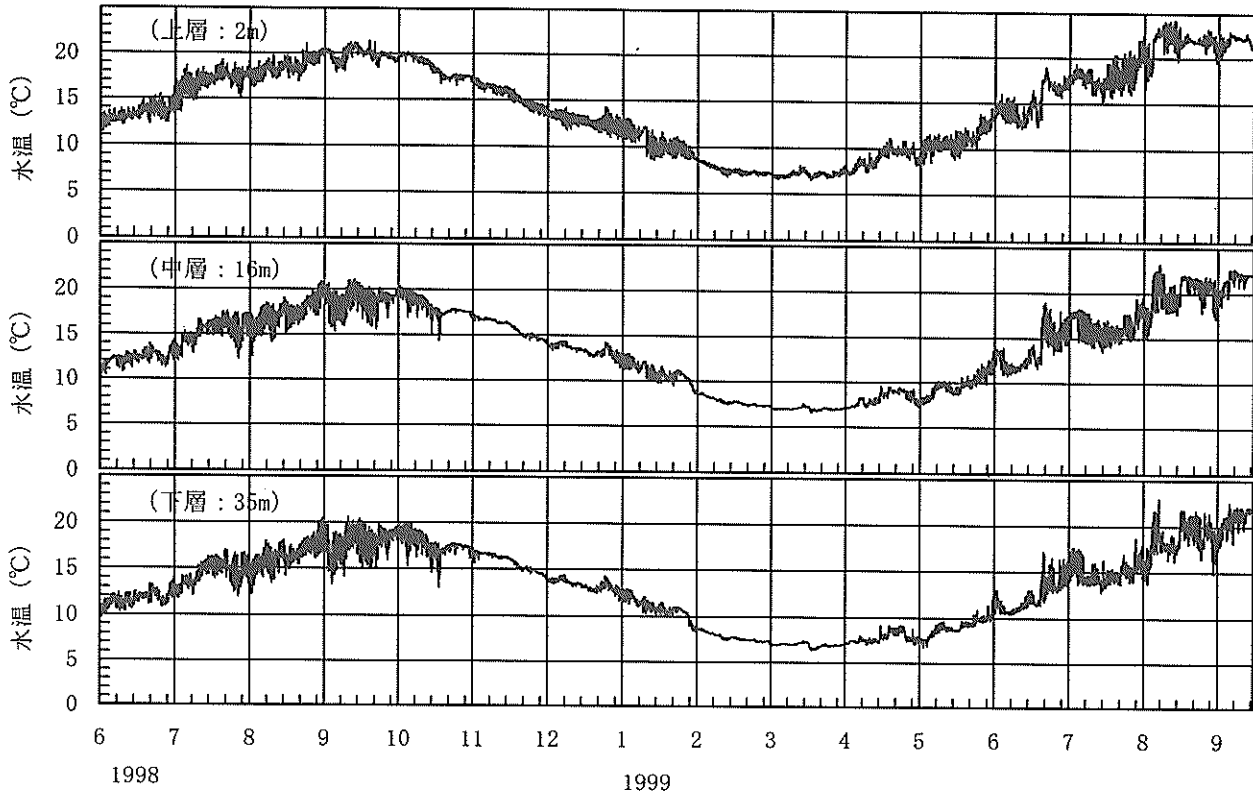


図-14 st.Cにおける水温の時系列データ (補正なし)

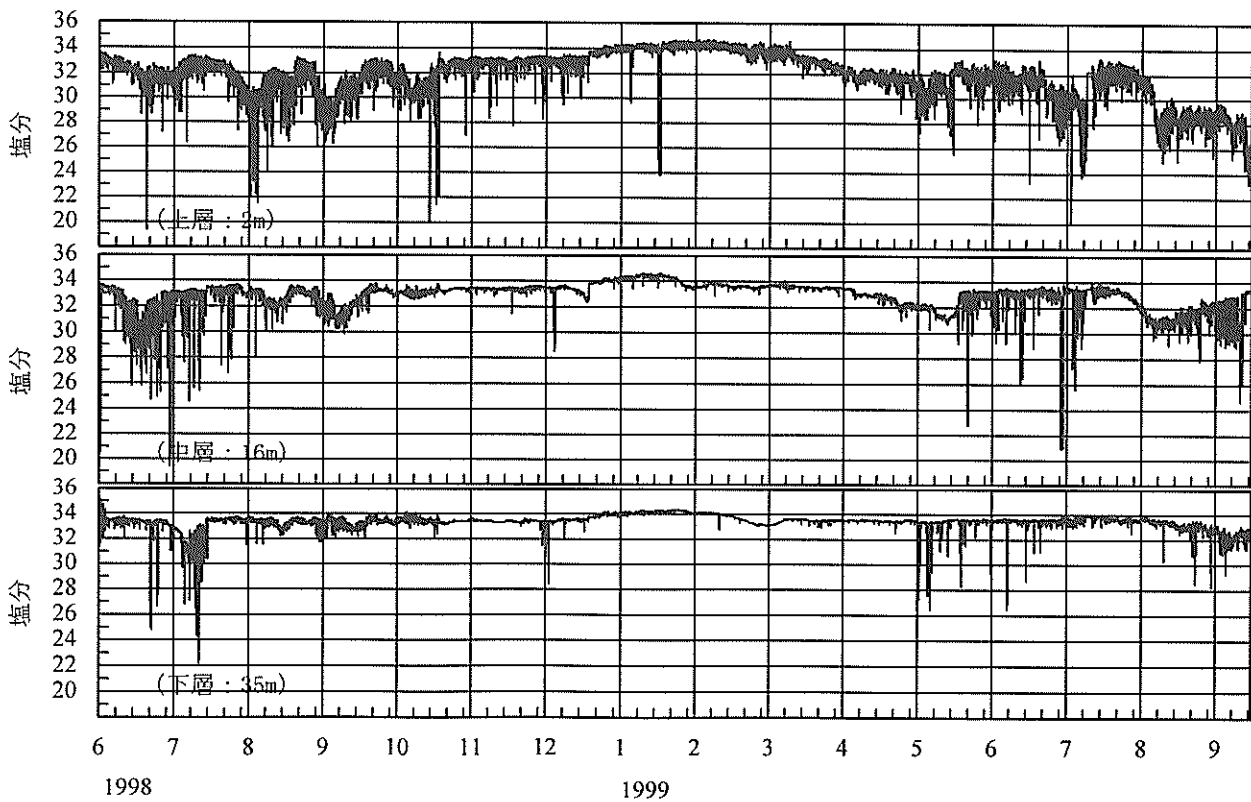


図-15 st.Cにおける塩分の時系列データ (補正なし)

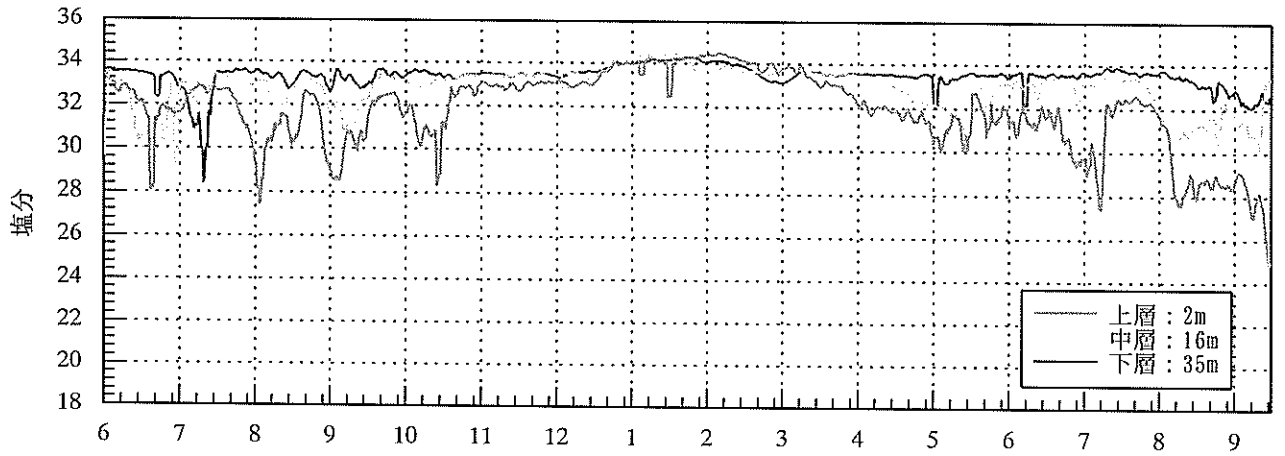


図-16 st.Cにおける塩分の時系列データに2日間の移動平均を施したデータ (1998.6~1999.9)

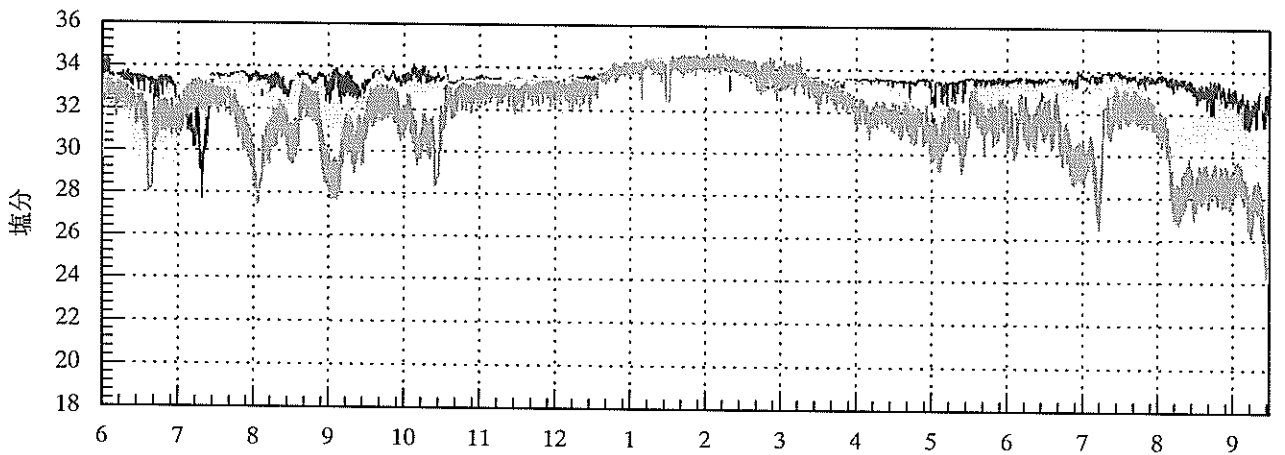


図-17 st.Cにおける塩分の時系列データ (補正後) (1998.6~1999.9)

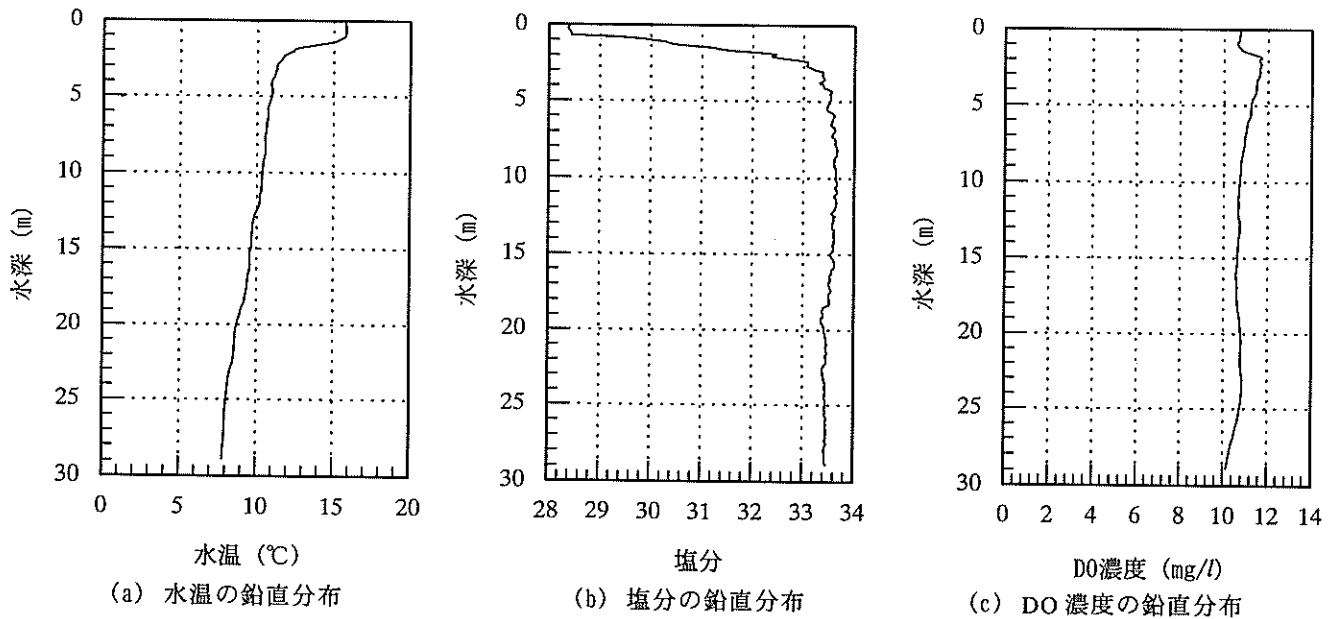


図-18 水温、塩分およびDO濃度の計算に対する初期条件 (st.A,1998.5.27)

表-7 パラメータ値

$\beta$	0.4
$\kappa$	0.276
$r$	0.04
$\varepsilon$	0.96
$\sigma$	$1.171 \times 10^{-7}$ cal/cm <sup>2</sup> /day/deg <sup>4</sup>

表-8 鉛直拡散係数の  $R_i$  数依存性の提案式<sup>14)</sup>

	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Munk and Anderson <sup>15)</sup>	10/3	3/2	1
Sundaram and Rehm <sup>16)</sup>	0.1	1	1
Newbold and Liggett <sup>17)</sup>	0.00176	0.5	1
Deardorff <sup>18)</sup>	50	1	1
Henderson-Sellers <sup>19)</sup>	37	1	2

日に行った広域観測で得られた鉛直分布を用いた。図-18にそれぞれの鉛直分布を示す。水温・塩分ともに水深3m付近に躍層が形成されているが、DO濃度に対しては躍層は見られず、底層においてもDO濃度は高い値を示している。

(4) 大気からの熱フラックス

大気からの熱の授受は有効日射量 $Q_s$ 、長波放射による有効逆放射量 $Q_n$ 、潜熱輸送量 $Q_E$ および顕熱輸送量 $Q_C$ を考慮した。全熱交換量 $Q_T$ は

$$Q_T = Q_s + Q_n + Q_E + Q_C \quad (48)$$

で表すことができる。ここで、

$$Q_s = (1 - r) \cdot I \quad (49)$$

$$Q_n = -\varepsilon \sigma \theta_s^4 (0.39 - 0.058 e_s^{0.5}) (1 - k_c C^2) - 4\sigma \theta_s^3 (\theta_s - \theta_a) \quad (50)$$

$$Q_E = -L \rho E \quad (51)$$

$$Q_C = R Q_E \quad (52)$$

$$L = 597.1 - 0.57 T_s \quad (53)$$

$$E = 1.037 \times 10^{-2} U \cdot (e_s - e_a) \quad (54)$$

$$R = 0.66 \frac{(\theta_s - \theta_a)}{e_s - e_a} \quad (55)$$

$$e_s = (4.583 + 0.3525 T_s + 0.007182 T_s^2 + 0.0003775 T_s^3) \times \frac{1013}{760} \quad (56)$$

$$\theta_a = 0.89(\theta_s - \theta_i) + \theta_i \quad (57)$$

$$e_a = 1.055 \cdot e_i \quad (58)$$

であり、 $r$ : 素面でのアルベド、 $I$ : 日射量 (cal/cm<sup>2</sup>/day)、 $\varepsilon$ : 有効放射率 (黒体放射と水塊の放射の比)、 $\sigma$ : ステ

ファン・ボルツマン定数、 $C$ : 雲度、 $\theta_s$ : 表面水温 (K)、 $\theta_a$ : 水面付近の気温 (K)、 $\theta_i$ : 地表面の気温 (K)、 $e_a$ : 水面付近における大気の水蒸気圧 (mb)、 $e_i$ : 地表面における大気の水蒸気圧 (mb)、 $k_c$ : 緯度による係数、 $\rho$ : 水塊の密度 (g/cm<sup>3</sup>)、 $E$ : 蒸発速度 (cm/day)、 $R$ : ボーエン比、 $T_s$ : 表面水温 (°C)、 $e_s$ :  $T_s$  に対する飽和水蒸気圧 (mb)、 $U_i$ : 風速 (m/s) である。それぞれの採用値を表-7に示す。大気との全熱交換量を計算するためのデータとして、気温・蒸気圧・風速・雲量に関しては大船渡気象台の日平均値を、全天日射量に関しては宮古気象台の日平均値を用いた。

(5) 鉛直拡散係数

鉛直拡散係数 $K_z$ には次式を用いた。

$$K_z = K_{z0} \cdot f(R_i) \quad (59)$$

ここで、定数 $K_{z0}$ 、Richardson number  $R_i$  および成層化関数  $f(R_i)$  は

$$K_{z0} = 1.0 \times 10^{-3} \quad (60)$$

$$R_i = \frac{(\Delta \rho / \rho_a) g L}{U^2} \quad (61)$$

$$(R_i) = (1 + \alpha R_i')^{-\beta} \quad (62)$$

である。成層化関数のパラメータ値には幾つか提案されているが (表-8 参照)、ここでは Deardorff のパラメータ値 ( $\alpha = 50$ ,  $\beta = 1$ ,  $\gamma = 1$ ) を採用した。

(6) パラメータ値、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、計算ケースおよび境界条件を表-9、10および11に示す。

計算は3ケース行った。ケース1は湾外との海水交換をまったく考慮しない場合、ケース2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、ケース3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 (図-19 参照)。

なお、各ケースに対して用いられた潮汐による海水交

表-9 計算条件

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

表-10 計算ケース (単位:  $\lambda=1/day$ )

ケース1	湾外水との海水交換なし ( $\lambda=0$ )
ケース2	湾外水との海水交換あり ( $\lambda=1/60$ )
ケース3	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

表-11 境界条件

外海	
水温	st.Cのデータ (日平均)
塩分	st.Cのデータ (日平均)
DO	全層 8mg/l
水表面	
水温	大気からの熱の授受 (日平均)
河川	
水温	考慮しない
塩分	考慮しない

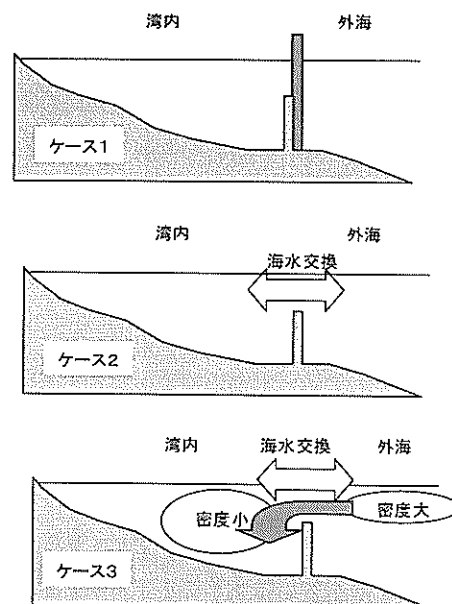


図-19 各計算ケースのイメージ

換率は表-11に示すとおりであり、外海水が内湾の同一密度層に侵入する時の海水交換率は式(4.13)の関係から求めた値とした。

#### 4.2 再現計算の結果および考察

##### (1) 水温

図-20は大船渡湾のst.A(図-1参照)における1998年6月～1999年9月までの水温の鉛直分布の時系列変化を示したものである。図中のデータは水深2m, 6m, 10m, 14m, 16m, 20m, 24m, 28mにおける10分間隔で得られたデータを日平均したものを用いている。

実測結果から、大船渡湾において全層に渡って水温が低くなるのは冬から春にかけて(2月～4月)であり全層にわたり8℃である。逆に水温が最も高くなるのは、上・中層では、夏から秋にかけて(8月～10月)であり、表層で22℃、中層で20℃まで上昇する。下層では、表層からの熱の伝達が遅れ、11月に最大となり16℃まで上昇する。また、湾口にマウンドがあるにもかかわらず継続的な強い水温躍層は現れず、8月に水深15m層付近に見られる程度である。

図-21(a)はケース1の計算結果であり、大気からの熱の授受のみを考慮した場合である。実測値と比較すると、夏期の表層水温は大きく、低層水温は小さくなって

いる。また、水温躍層の水深は実測に比べ高い水深になっている。

図-21(b)はケース2の計算結果であり、大気からの熱の授受に加え、潮汐に伴う海水交換により外海との熱の授受を考慮した場合である。夏期の表層水温はケース1に較べれば多少低くなったものの依然として高めである。しかしながら、水温躍層の位置は一致しており、全体的には実測値と比較的良く一致する。したがって、大船渡湾の水温に対して外海との熱の交換は大きな影響を持っていることが分かる。

図-21(c)はケース3の計算結果である。ケース1, 2と比較すると、表層の水温は実測値に近くなっている。また10, 11月の16℃および18℃ラインの比較から、熱の下層方向への伝達が大きくなっていることが分かる。したがって、ケース3で考慮した密度貫入による海水交換の効果は、大気からの熱量による表層水温の上昇は抑制する一方で、中層および底層へ熱を供給する働きがあることが分かる。

##### (2) 塩分

図-22は水深16m地点における湾内外の塩分濃度の実測値とケース2, 3の計算値の時系列変化を示したものである。ケース2, 3の計算値はともに実測値の急激な変動には追従していないものの、湾外の変動に従い、

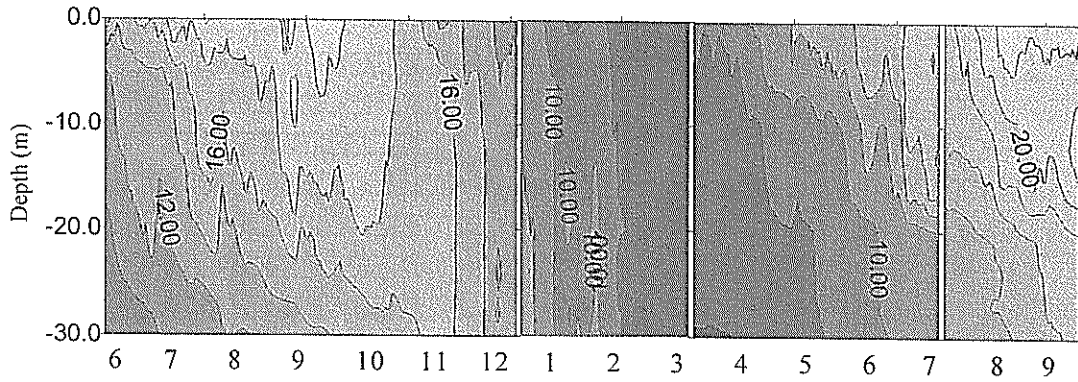


図-20 st.Aにおける水温（観測値）の鉛直分布の時系列変化（1998年6月1日～1999年9月23日）

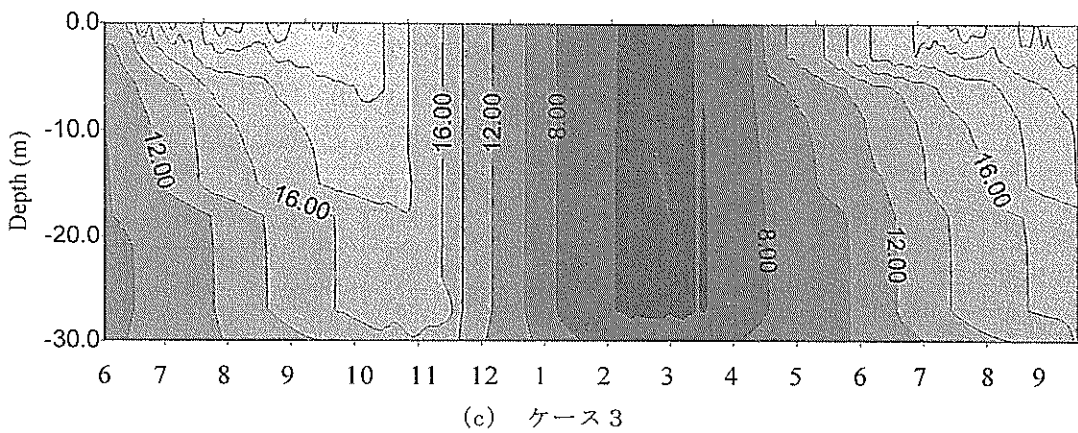
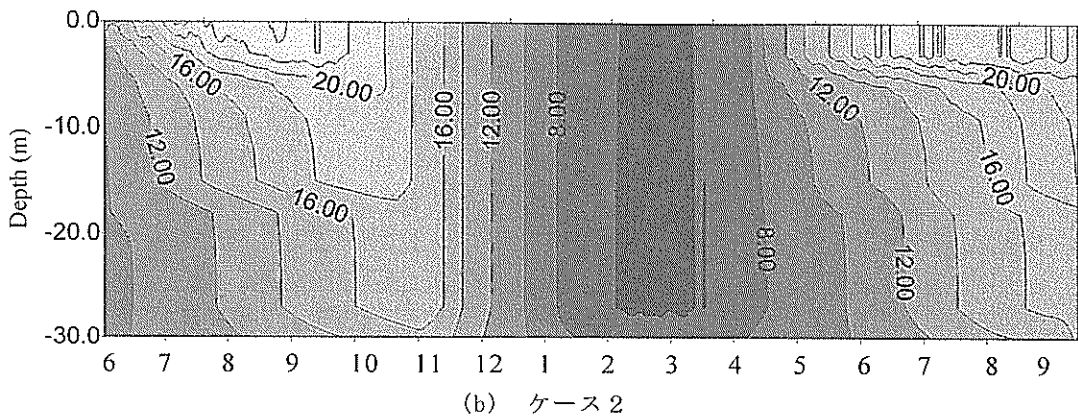
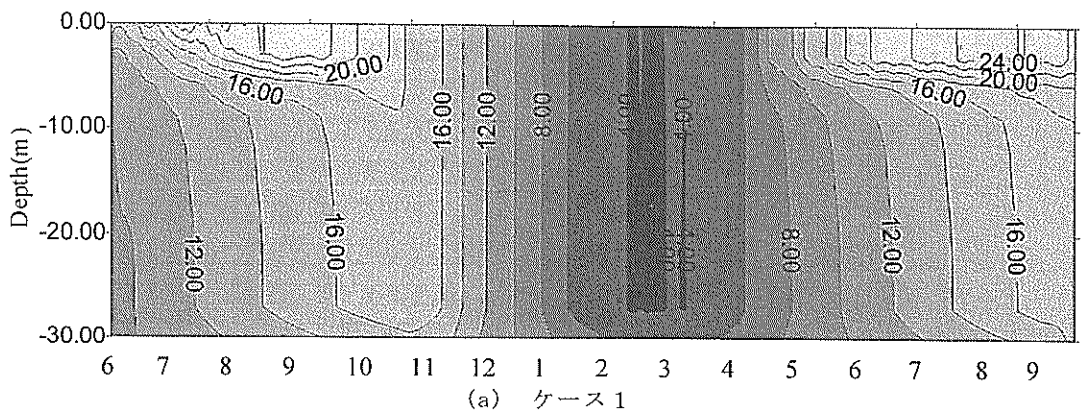


図-21 水温の鉛直分布時系列変化の計算結果

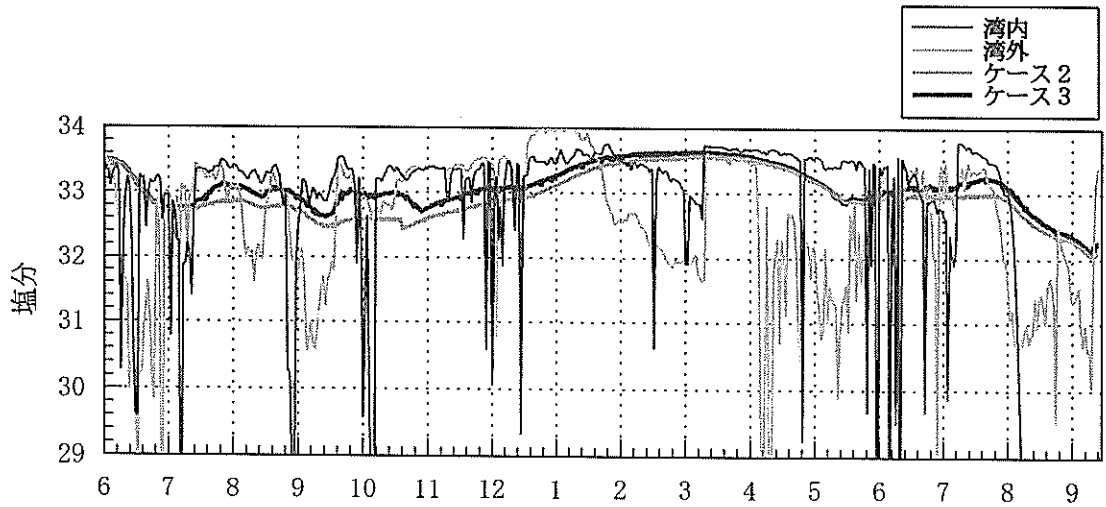
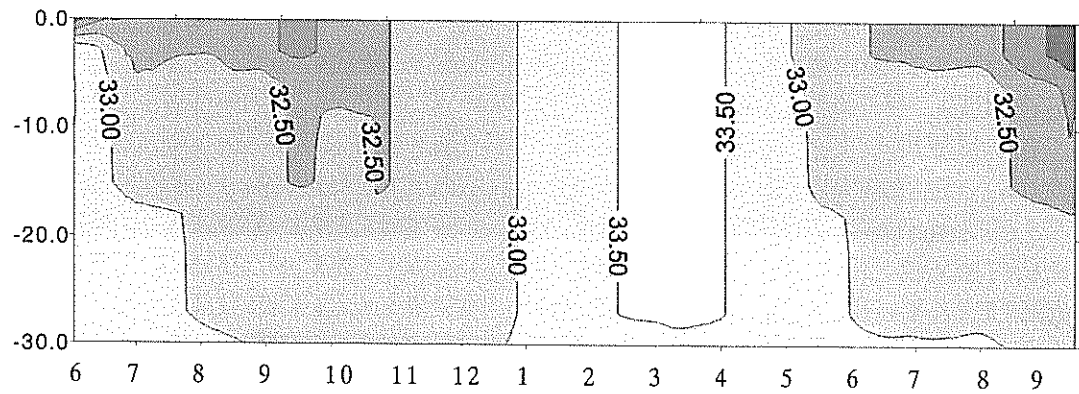
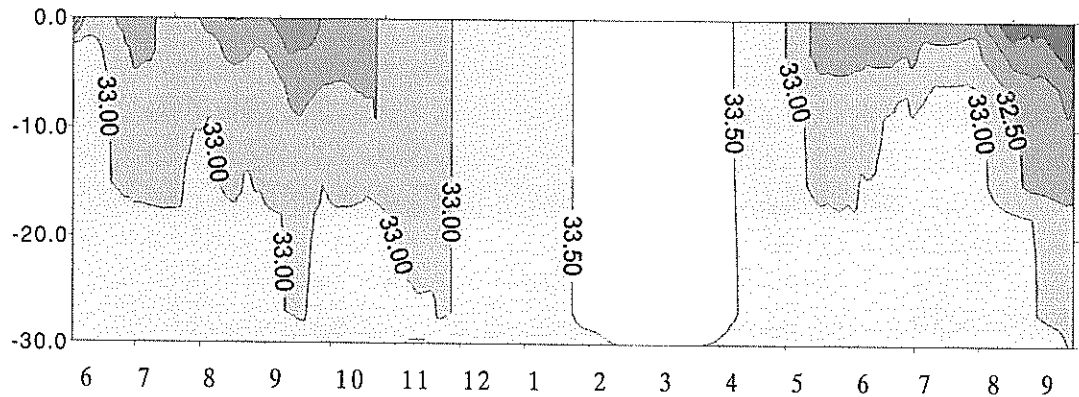


図-22 st.A (水深16m)における湾内外の塩分濃度の実測値とケース2, 3の計算値の時系列変化 (1998年6月1日~1999年9月23日)



(a) ケース2



(b) ケース3

図-23 塩分の鉛直分布時系列変化の計算結果

湾内と比較的一致していることが分かる。ケース2とケース3を比較すると、ケース3の方が全体的に塩分濃度は大きく、より実測値と一致していることが分かる。

図-23(a), (b)はケース2とケース3の計算結果を鉛直分布の時系列として示したものである。夏期においてケース3の方がケース1より大きな塩分濃度を示してい

る。これは密度貫入を考慮することによって、湾外の重い密度(高塩分)の水塊が湾内下層に流入したためと考えられる。

### (3) DO濃度

図-24は水深27m地点のDO濃度の実測値とケース2およびケース3の計算値の時系列変化を示したものであ

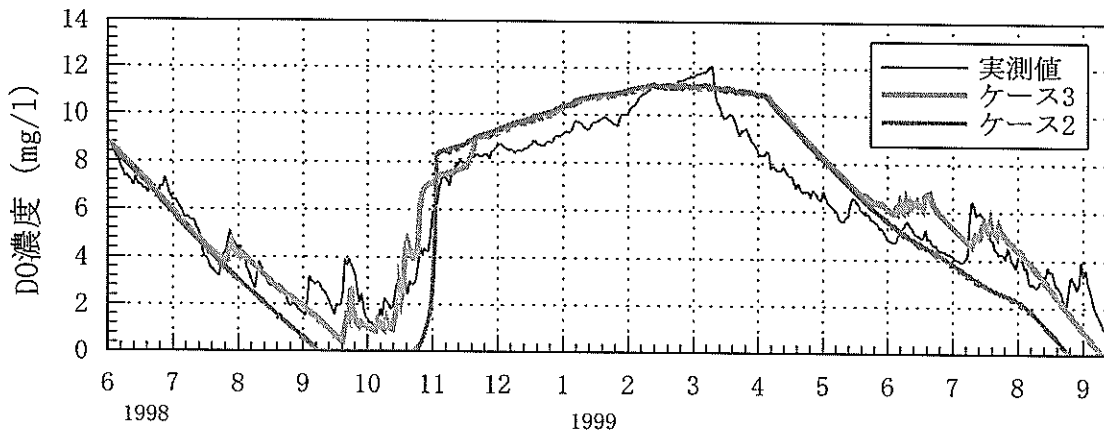
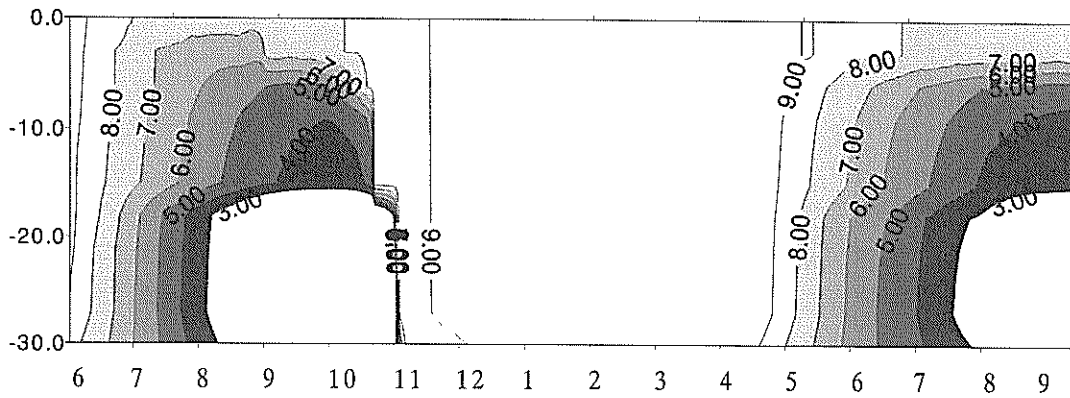
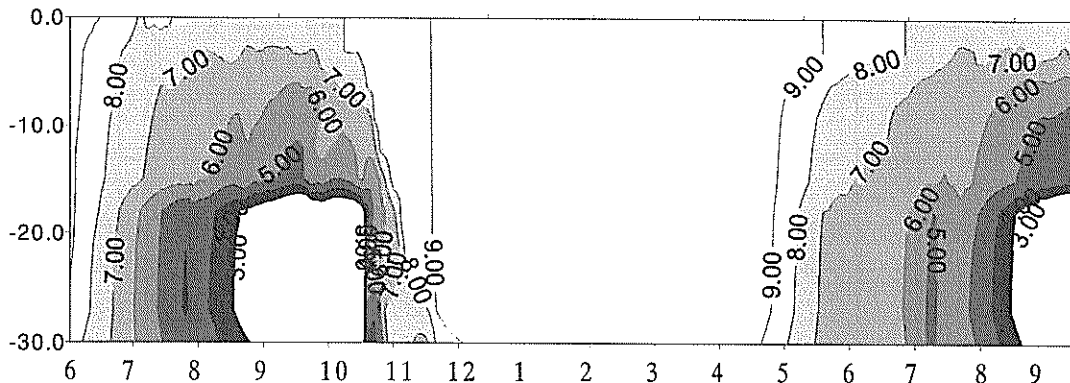


図-24 DO濃度(水深27m)の時系列変化



(a) ケース2



(b) ケース3

図-25 DO濃度の鉛直分布の時系列変化

る。ケース2では、9月中旬から11月までDO濃度は0mg/lであるのに対し、ケース3のDO濃度は0mg/lに至っていない。実測で観測された1mg/l程度の急激な上昇は、ケース3において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。また、ケース3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、ケース2と比較すると、貧酸素水塊形成に対する勾

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ことが分かる。したがって、ケース3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機構の一つであることが分かる。

図-25にDO濃度の鉛直分布の時系列変化を示す。DO濃度3mg/l以下の領域は白抜きで示されている。ケース



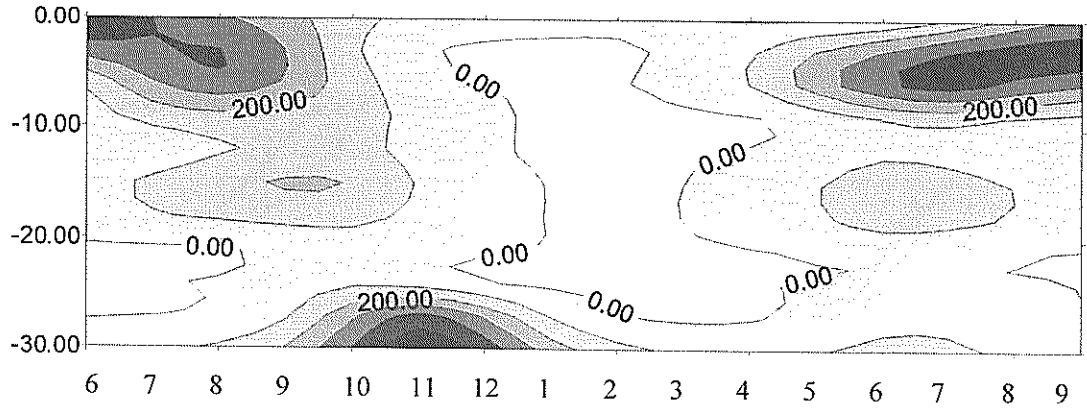


図-26 貫入時間 (単位: 日) の鉛直分布の時系列変化

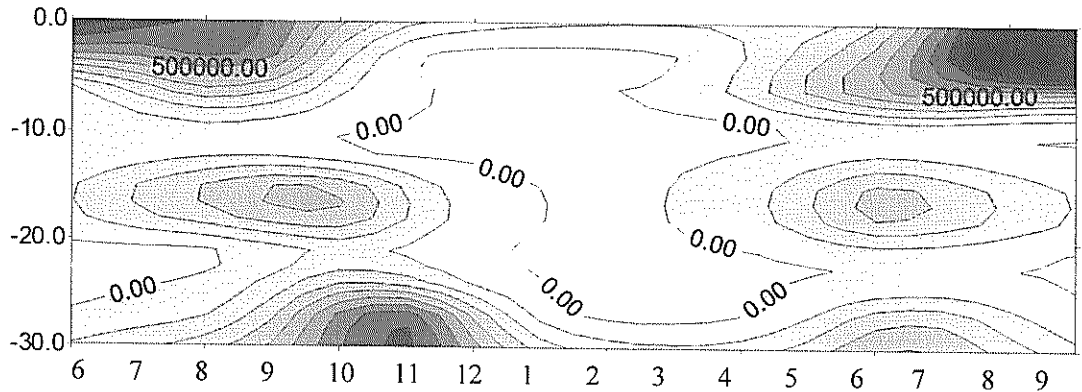


図-27 貫入エネルギーの鉛直分布の時系列変化

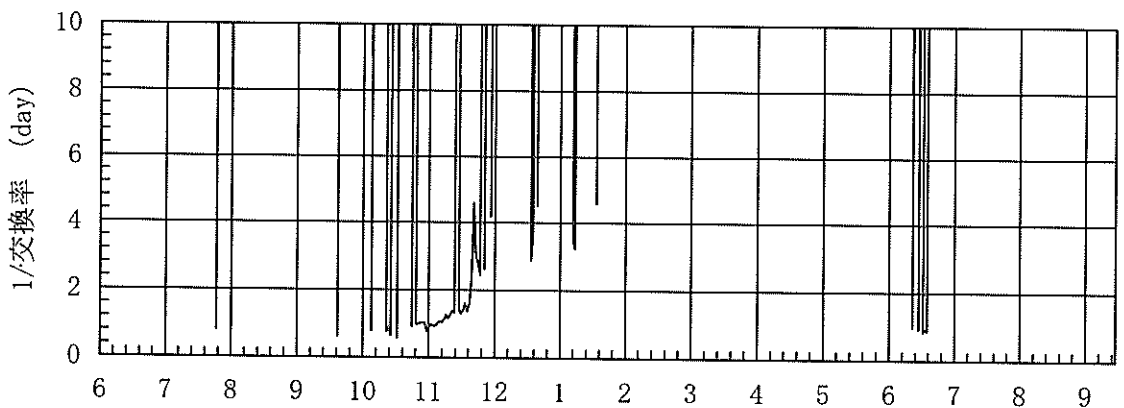


図-28 底層部における (1/交換率) の時系列変化

2ではDO濃度3mg/l以下の貧酸素層が水深10mまで及んでいるのに対し、ケース3では貧酸素層は15mに抑制されていることが分かる。したがって、大船渡湾においては密度貫入による海水交換があることによって、貧酸素水塊の期間の縮小に加え、貧酸素水塊層の縮小がなされていることが分かる。

(4) 貫入頻度

図-26は湾外水が湾内のどの層に貫入するかを、計算結果から1ヶ月当りの貫入時間を各月で算出しコンター図として示したものである。ただし、N層から貫入する場合は貫入時間はN倍と換算した。

また、図-27は貫入時間に加え密度差と水位差を考慮した次式で定義される1ヶ月当りの(位置)エネルギー

$$\Delta\rho \cdot g \cdot H \quad (63)$$

の1ヶ月積分した値を示したものである。

図-27から1998年における底層部への貫入は10,11月に発生しているのに対し,1999年は7月に発生していることが分かる。通常,閉鎖性の水域においても,秋は鉛直方向の循環が促進されることにより表層水と底層水は混合し貧酸素化は崩壊する。そのため,1998年の貧酸素水塊の崩壊は貫入によって半月程度早められているが,それほど大きな影響を及ぼしていないと考えられる。それに対して,1999年における貫入エネルギーは7月に大きく,そのため1999年の貧酸素水塊の形成が遅れたことが分かる。

図-28は底層部の密度貫入による交換率の逆数の時系列変化を示したものである。ここで,交換率の逆数は交換時間を意味する。湾口マウンドの影響が小さい表層部の交換時間は約60日程度であるのに対して,底層部の交換時間(1/交換率)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(交換率は非常に大きく)なっている。

このように,底層部への湾外水の貫入は1年の内ある一定期間に集中して起こり,年毎にその時期には微妙な差異がある。しかもその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がほとんど働か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。

さらに,2年間のみデータ解析であるが,大船渡湾における密度貫入は夏期から秋期に集中し冬期には殆ど発生しないことが分かる。また密度貫入は表層および底層に卓越し中層へは弱いことが分かる。

## 5. おわりに

大船渡湾において,3次元非静水圧モデルを用いて湾外水が内湾水に及ぼす影響をモデル化した。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) 大船渡湾の海水交換機構は潮汐によるものと湾内外の密度に起因するものに分けられる。
- 2) 3次元非静水圧モデルを用いることによって,密度差に起因する海水交換率(密度貫入)に関するモデル常数が決定された。
- 3) 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,湾内底層部のDO濃度の長期再現が実

現された。

- 4) 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。
- 5) 密度貫入が発生する時期は年毎に異なることが明らかとなった。そして,密度貫入は底層だけではなく表層に対しても大きな影響を与えていることが分かった。
- 6) 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。

(2000年3月31日受付)

## 参考文献

- 1) 日比野忠史,野村宗弘,岡田知也,古川恵太:東京湾における密度構造の変化と流れ場,港湾技術研究所報告,第39巻第1号,2000,pp25-55.
- 2) 日向博文,吉岡建,八木宏,灘岡和夫:冬期東京湾における黒潮系暖水波及の実態解析,海岸工学論文集,第46巻,1999,pp1001-1005.
- 3) 日比野忠史,豊田政史,西森和男,細川恭史,鶴谷広一: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,1999,pp3-36.
- 4) 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: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,1999,pp1051-1055.
- 5) 中山恵介,佐藤圭洋:LESモデルによる水平面上張り出しプルームの解析,土木学会論文集, No. 628, 1999, pp. 97-114.
- 6) Schmidt, H. and Schumann, U.: Coherent structure of the convective boundary layer derived from large-eddy simulations, *J. Fluid Mech.*, Vol.200, 1989, pp.511-562.
- 7) Deardorff, J.W.: Stratocumulus-Capped Mixed Layers Derived from a Three-Dimensional Model, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol.18, 1980, pp.495-527.
- 8) Lilly, D.K., Waco, D.E. and Adelfang, S.I.: The representation of small-scale turbulence in numerical

- simulation experiments, *Proc. IBM Sci. Comput. Symp. on Environmental Science*, 1967, pp.195-210.
- 9) Schumann, U. : Subgrid Length-Scales for Large-Eddy Simulation of Stratified Turbulence, *Theoret. Comput. Fluid Dynamics*, Vol.2, 1991, pp.279-290.
- 10) Britter, R.E. and Simpson, J.E. : A note on the structure of the head of an intrusive gravity current, *J. Fluid Mech.*, Vol.112, part 3, 1981, pp.459-466.
- 11) 柳町武志：閉鎖性水域の密度成層構造と溶存酸素収支に関する研究，九州大学大学院工学研究科修士論文，1997.
- 12) Stefan, H.G and Fang, X.: Dissolved Oxygen Model for Regional Lake Analysis, *Ecological Modelling*, Vol.71, 1994, pp.37-68.
- 13) 椿東一郎：水理学 II，森北出版，1974，272p.
- 14) 中村由行，西田克司，早川典生，西村肇：沿岸域における鉛直拡散係数の推定法に関する研究，海岸工学論文集，第36巻，1989，pp809-813.
- 15) Munk, W. H. and E. R. Anderson: Notes on a theory of the thermocline, *J. Mar. Res.*, Vol.7, 1948, pp.276-295.
- 16) Sundaram, T. R. and R. G. Rehm: Formation and maintenance of thermoclines in temperate lakes, *A. I. A. A. J.*, Vol. 9, 1971, pp.1322-1330.
- 17) Newbold, J. D. and J. A. Liggett: Oxygen depletion model for Cayuga Lake, *Proc. A. S. C. E. J. Environ. Eng. Div.*, Vol.100, 1974, pp.41-59.
- 18) Deardorff, J. W.: Empirical dependence of the eddy coefficient for heat upon stability above the lowest 50 m, *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 6, 1967, pp.631-643.
- 19) Henderson-Sellers, B.: A simple formula for vertical eddy diffusion coefficients under conditions of nonneutral stability, *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, 1982, pp.5860-5864.