

## 大村湾における溶存酸素の変化予測に関する研究

西田 渉\*・野口正人\*・富永昌伸\*\*

## Numerical Simulation on Dissolved Oxygen in Ohmura Bay

by

Wataru NISHIDA\*, Masato NOGUCHI\*,  
and Masanobu TOMINAGA\*\*

In Ohmura Bay, several kinds of environmental problems, such as eutrophication, depletion of dissolved oxygen at sea bottom, and so on, are occurred recently. It is necessary to make clear the mechanism on water quality changes from the interdisciplinary viewpoints for recovering the water environment of this bay. In this study, a water quality simulation model is developed focusing on the consumption of dissolved oxygen by organic materials in sediments (Sediment Oxygen Demand :SOD). To ensure applicability of this model to Ohmura Bay, tidal current simulation is firstly carried out. Next, water quality changes, especially dissolved oxygen, are simulated. This developed model predicts the spatial distribution of tidal current and dissolved oxygen to some degree. On the other hand, it is necessary to model the water quality changes due to the chemical and biological reactions under thermal stratification for adequate simulation, in future.

**Key words :** numerical simulation, tidal current, dissolved oxygen, sediment oxygen demand

## 1. はじめに

閉鎖性の強い内湾では、湾口幅が狭く、海水交換がなされにくいために、汚濁物質の蓄積による有機汚濁並びに富栄養化の進行等が問題となっている。長崎県のほぼ中央部に位置する大村湾は極めて閉鎖性の強い湾として知られているが、この湾では、近年、貧酸素水塊の発生による水産業への被害が報告されている<sup>1-3)</sup>。また、公共用水域及び地下水の水質測定結果によると、平成14年度の化学的酸素要求量(COD)の年平均値は2.8mg/l程度であり、長らく環境基準を上回った状態になっている<sup>4)</sup>。そのため、大村湾の水環境の改善に対し、環境基準の水域類型がA類型に指定されると共に、流域からの汚濁負荷量の抑制等によって水環境の維持・改善が図られてきているが、これと併せて、水域の自浄機能の回復・強化に係る施策が、当該水域の環境改善効率を評価した上で、適宜、実施される必要があると考えられる。

そこで本研究では、三次元数値シミュレーションモデルの構築し、大村湾での水質の変化機構の評価を試みることにした。ここで、水質変化については、海底付近での貧酸素化に起因する環境問題が知られていることから、溶存酸素に着目してモデル化している。以降の章では、作成された水量・水質モデルの構成を記し、続いて、底泥内の有機態物質による酸素消費(SOD)が溶存酸素の変化に及ぼす影響について述べることにする。

## 2. 数値モデルの概要

本研究では、計算手法として三次元レベルモデルを用いることにした。まず、流体運動を記述する基礎方程式として、連続方程式及び運動方程式が取り上げられた。また、流体の密度は水温、塩化物イオンによって変化するものとしており、各物理量の収支式が、流体の密度に関する状態方程式と共に基礎方程式として

---

平成 17 年 6 月 24 日受理

\*社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

\*\*大学院生産科学研究科博士前期課程環境システム工学専攻  
(Graduate student, Department of Environmental Systems Engineering)

取り上げられた．なお，実際に解析する式は，後述されるように各式を三次元のコントロールボリュームに対して積分した形式のものである．

つぎに，作成された水質モデルについて，その概念図を示すと図 1 のとおりである．このモデルは水中の溶存酸素の収支に注目しており，溶存酸素を変化させる要因として，水表面からの酸素の供給と溶存性有機態物質の分解による消費が取り上げられている．また，一般に，閉鎖性水域では，水底に堆積した物質の分解による溶存酸素の消費が無視できないと言われることから，底泥の酸素消費として SOD をモデル化している．各基礎式を示すと以下のとおりである．

・連続方程式

$$\frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} + w|_{l-1} - w|_l = 0 \quad (1)$$

・ $x$  方向,  $y$  方向の運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot uh)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot uh)}{\partial y} + uw|_{l-1} - uw|_l \\ &= f_v h - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_x h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_y h \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ & \quad + \varepsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{l-1} - \varepsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_l \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial(v \cdot uh)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot vh)}{\partial y} + vw|_{l-1} - vw|_l \\ &= f_v h - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_x h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_y h \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ & \quad + \varepsilon_z \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{l-1} - \varepsilon_z \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_l \end{aligned} \quad (3)$$

・有機態物質の収支式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Lh}{\partial t} + \frac{\partial(L \cdot uh)}{\partial x} + \frac{\partial(L \cdot vh)}{\partial y} + Lw|_{l-1} - Lw|_l \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x h \frac{\partial L}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y h \frac{\partial L}{\partial y} \right) + K_z \frac{\partial L}{\partial z} \Big|_{l-1} - K_z \frac{\partial L}{\partial z} \Big|_l \\ & \quad - k_L \theta_L^{T-20} f_a Lh + C_{rL} q_r \end{aligned} \quad (4)$$

・水中での溶存酸素の収支式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial(C \cdot uh)}{\partial x} + \frac{\partial(C \cdot vh)}{\partial y} + Cw|_{l-1} - Cw|_l \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + K_z \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{l-1} - K_z \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_l \\ & \quad + k_a \theta_a^{T-20} (C_{\max} - C)h - k_L \theta_L^{T-20} f_a Lh + C_{rC} q_r \end{aligned} \quad (5)$$

ここに,  $u, v, w$ :  $x, y, z$  軸方向の流速,  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ :  $x, y, z$  軸方向の渦動粘性係数,  $K_x, K_y, K_z$ :  $x, y, z$  軸方向の拡散係数,  $h$ : 層厚,  $f$ : コリオリ係数,  $g$ : 重力加速度,  $P$ : 流体の圧力,

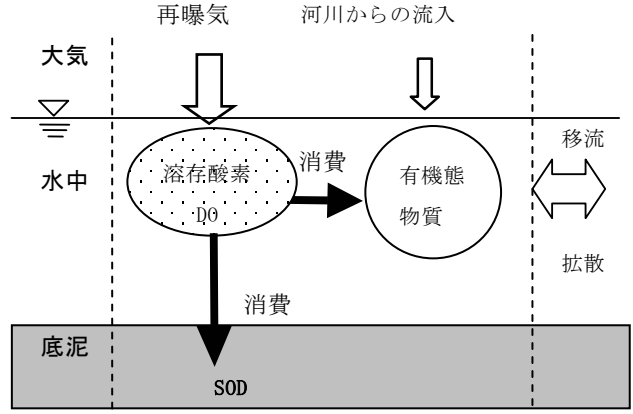


Fig. 1 水質モデルの概念図

$\rho_0$ : 流体の基準密度(水温20℃における密度とした),  $k_a$ : 再曝気係数,  $k_L$ : 水温20℃, 1 気圧における有機態物の分解速度係数,  $\theta_L, \theta_a$ : 反応速度の温度依存性を表すための係数,  $T$ : 水温,  $C$ : 溶存酸素の濃度,  $L$ : 有機態物質の濃度,  $C_{\max}$ : 飽和溶存酸素濃度,  $f_a$ : 有機態物質の分解のD0への依存性,  $C_{rL}$ : 流入河川の有機態物質濃度,  $C_{rC}$ : 流入河川のDO濃度,  $q_r$ : 流入河川の流量, である．底層での運動方程式では, 右辺に水底面での摩擦応力を表す項が現れるが, この摩擦応力については, Manning 則を用いて評価することにした．また, 式(5)の右辺第5項は, 再曝気量に相当しており, 表層のみで評価されることになる．

a) 輸送係数

本モデルを用いてシミュレーションを行うには, モデル中の渦動粘性係数, 乱流拡散係数を適切にモデル化しておく必要がある．まず, 鉛直方向の渦動粘性係数については, 流体の密度は水温, 塩化物イオン濃度によって変化するものとしており, 密度の鉛直分布によって輸送係数が変化するものとした．そこで, 成層の安定度を示す Richardson 数の関数として以下のように取り扱っている．

$$\varepsilon_z = \varepsilon_0 (1.0 + 5.2 Ri)^{-1} \quad (6)$$

ここに,  $Ri$ : Richardson 数,  $\varepsilon_0$ : 中立状態( $Ri=0$ )の鉛直渦動粘性係数, である．水平方向の渦動粘性係数については, Prandtl の混合距離第二仮説に従っている．

つぎに, 溶存酸素や有機態物質の収支式に含まれる鉛直方向の乱流拡散係数についても渦動粘性係数と同様に, MunK and Anderson 型の Richardson 数の関数として表現することにした<sup>5)</sup>．

$$K_z = \varepsilon_z \frac{(1.0 + 10 Ri/3)^{3/2}}{(1.0 + 10 Ri)^{1/2}} \quad (7)$$

乱流拡散係数の水平方向成分については Richardson の 4/3 乗則によって以下のとおりに評価している<sup>6)</sup>。

$$K_x = K_y = K_{H0} \cdot (\Delta)^{4/3} \quad (8)$$

ここに、 $K_{H0}$ ：定数、 $\Delta$ ：水平方向の拡散のスケール、である。なお、実際の計算では、 $\Delta$ =(格子幅： $dx=dy$ )としている。

#### b) 再曝気

水表面からの再曝気係数については、流速と水深の関数として表現している。

$$k_a = k_{a0} \cdot \frac{V^{0.5}}{h^{1.5}} \quad (10)$$

ここに、 $k_{a0}$ ：水温 20℃、1 気圧における再曝気の数値、 $V$ ： $(=\sqrt{u^2 + v^2})$  流速、である。

#### c) 有機態物質の分解

水底付近での有機態物質の分解は、好気性状態でされとは限らないことから、溶存酸素濃度の低下が有機態物の分解速度に与える影響を次のように表現した。

$$f_a = 1 - e^{-\alpha Cb} \quad (11)$$

ここに、 $Cb$ ：水底付近での溶存酸素の濃度、 $\alpha$ ：定数、である。

#### d) 底泥での酸素消費量(SOD)

有機態物を含む底泥では、微生物の活動によって有機態物が分解される中で酸素が消費される。こうした酸素の消費過程は実際には複雑であるが、ここでは、問題を単純化するために、底泥の物理的な性状は均質で、酸素の拡散係数は方向によらず一定と仮定している。また、単位体積あたりの酸素の消費速度についても変化しないものとしてモデル化している<sup>7)</sup>。これによ

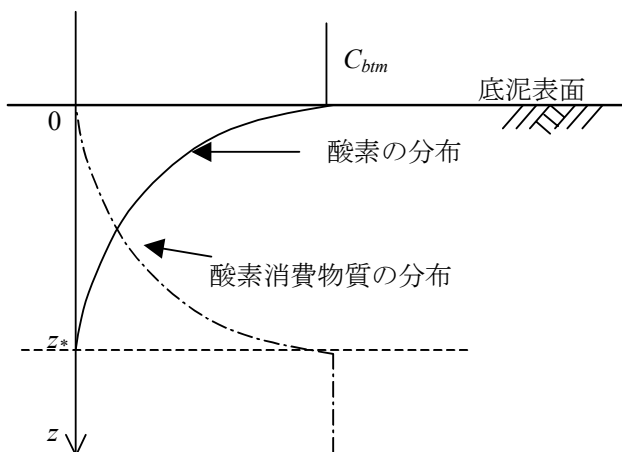


Fig. 2 底泥中の分布モデル

って、底泥中の酸素と酸素消費物質の鉛直分布は、図 2 に示されるとおりとなり、底泥表面を通過して底泥へと輸送される酸素の輸送は、次のように評価される。

$$J = -D \frac{dC}{dz} \Big|_{z=0} = -\frac{3}{5} \frac{C_0}{z_0} \quad (10)$$

ここに、 $D$ ：底泥中の酸素の拡散係数、 $C_0$ ：底層での溶存酸素濃度、 $z_0$ ：酸化層の厚さ、である。

以上に記した方程式を用いて数値シミュレーションを行うためには、各式を離散化する必要がある。ここでは、陽形式の有限差分法として、空間方向に Donor Cell 法を、時間方向に Leap-Frog 法を適用して離散化している。

### 3. 計算条件

計算対象領域は、図 3 に示されるように、大村湾とこれに隣接する佐世保湾とした。差分間隔については、水平方向に  $dx=dy=250m$  とされ、鉛直方向には表層を T.P. -2.0m 以浅とした上で、それ以深を  $dz=10m$  の厚さで分割している。そのため、計算領域の最深部における層数は 4 層となっている。計算時間間隔は、計算の安定条件を考慮して、 $dt=4.0sec$  とした。開境界は佐世保湾の湾口部とし、この境界において、潮位変化として、佐世保湾の M2 分潮に相当する振幅 0.8m、周期 12 時間 24 分の正弦波が与えられた。

初期条件について述べると、水温は表層で 20.0℃、それ以深で 19.0℃とし、これに併せて、 $D_0$  については、設定した各水温に相当する飽和溶存酸素濃度を与えて

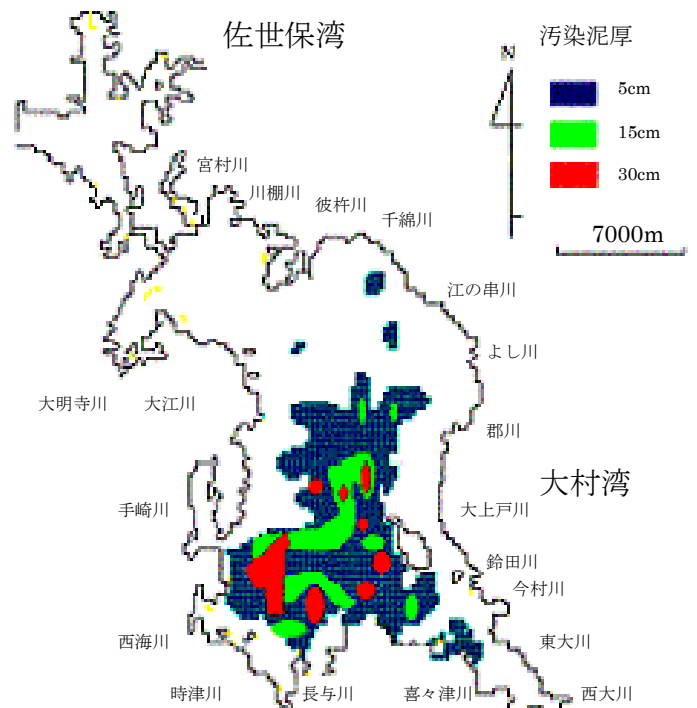


Fig. 3 計算対象領域の概要図と底泥の分布図<sup>8)</sup>

いる．塩化分イオン濃度については，全域で一様に 18,500 mg/l とした．流入河川は図 3 に示される 19 本の流入河川を取り上げており，各河川の DO と有機汚濁物質濃度を既存の報告書を参考に与えた<sup>4)</sup>．なお，今村川，東大川，西大川に関しては，差分間隔の都合上これらの河口を 1 箇所にとりまとめ取り扱ひ，各指標の平均値を与えることにした．水底面の粗度については，計算領域に一様に分布しているものとし，Manning の粗度係数を  $n=0.017\text{sec}/\text{m}^{1/3}$  とした．大村湾の底泥の堆積状況については，既存の報告結果<sup>8)</sup>を参考に定めることとし，図 3 に描かれる位置に溶存酸素の消費を伴う底泥を導入した．

#### 4. 計算結果と考察

##### (1) 潮流シミュレーションの結果

ここで，大村湾内の潮流の予測結果について述べておく．なお，これ以降の図に示される結果は，計算を開始してから 13 日後の結果に相当している．

まず，佐世保湾，針尾瀬戸，大村湾の中央部での潮位の時間変化を示すと図 4 のとおりである．この計算結果によれば，大村湾の潮汐は佐世保湾の潮汐に依りて変化することがわかるが，大村湾内の潮汐変化は，佐世保湾に比べて約 3 時間遅れており，また，振幅は，針尾瀬戸で 0.62m，大村湾の中央部で約 0.50m に減少している．こうした潮位変化は，佐世保湾と大村湾を繋ぐ針尾瀬戸が極めて狭いために一潮汐間に大村湾へ流入する水量が少ないことが理由として上げられる．針尾瀬戸と大村湾での潮位差を比較すると，上潮時には 0.15m 程度であるが，下潮時には 0.35m に達している．また，針尾瀬戸では，上潮時に比べ，下潮時の潮位の時間変化が大きくなるように波形が変化している点が特徴的である．これらの違いも先述の理由によるものと推察される．

つぎに，計算から求められた流速ベクトルの空間分布を示すと図 5，図 6 のとおりである．これらの図は，表層における上げ潮最大時と下げ潮最大時結果である．図によると，大村湾の流速は，針尾瀬戸付近で最も速くなり，比較的速い流れは，湾の中央部までの範囲で現れることがわかる．これは大村湾と佐世保湾の潮位差が一潮汐間をとおして大きく，また，針尾瀬戸の幅が狭いことから，先に考察したように，上潮時には大村湾に流入した水塊が噴流状に急速に広がるためであるといえる．こうした流況は，拡大図に明瞭に表れており，上潮時には流入地点周辺に二つの水平環流も形

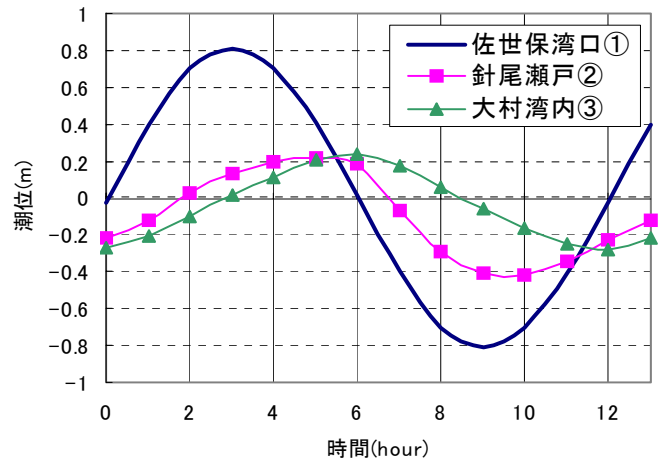


Fig. 4 潮位の時間変化

成されている．その一方で，計算結果によると，大村湾の湾奥部では，潮差が小さく，また計算条件として取り上げた流入河川の流量も然程多くなかったこともあり，顕著な流れは現れていない．以上の計算結果については，過去の研究で報告された大村湾の流れの特徴を捉えており<sup>2)</sup>，本流動モデルによって大村湾の大きな流況はシミュレーションされたものと判断した．

##### (2) 溶存酸素の計算結果

溶存酸素の計算結果について，飽和度の空間分布を示すと図 9 とおりである．この結果から，高濃度の溶存酸素を含む水塊が，針尾瀬戸を通して大村湾へと流入していることがわかる．これは，佐世保湾から針尾瀬戸の海域では，流速が速いことに起因して，海表面からの再曝気量が多く，併せて，鉛直方向の水塊の混合も強いためである．結果として，針尾瀬戸周辺では，第 2 層以深においても溶存酸素の濃度が高くなる傾向を示した．湾の中央部での溶存酸素の濃度が各層で高い値を示しているのは，針尾瀬戸から流入してくる酸素の影響と，この領域では水深が深く，SOD による酸素消費の影響が強く現れていないためであろう．それとは対照的に，湾奥部では次第に溶存酸素の飽和度が減少する傾向にある．これは，針尾瀬戸付近にある飽和度の高い水塊が湾内に流入していないことと共に，流速が小さく再曝気量が少ないことも理由として考えられるが，鉛直方向の水塊の流動が弱く，底泥による酸素の消費が累積的に影響したものと考えられる．

図 10 には，針尾瀬戸付近(①)，湾中央部(②)，湾奥部(③)における溶存酸素の鉛直分布が示されている．溶存酸素の濃度は，いずれの地点でも表層で最も高く，水深方向に次第に減少するが，先述された理由により，

針尾瀬戸付近では表層と底層との濃度差は $0.13\text{mg/l}$ 程度であり、第2層目以深では、ほぼ一様な分布となっている。一方で、とくに湾奥部では、表層と底層との濃度差は約 $0.8\text{mg/l}$ に達しており、本モデルに導入されたSODによる酸素消費が影響したものと考えられる。

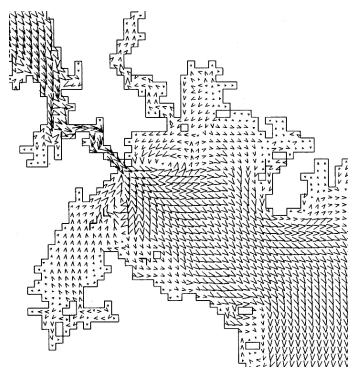
大村湾の溶存酸素の変化について、再曝気や底泥による酸素消費、河川からの酸素消費物質の流入を考慮して評価したが、実際には、これら以外の化学的、生物学的生成要因による酸素の生成・消費を考慮していかなければならないことが今後の課題として上げられる。さらに、本論では取り上げられていないが、大村湾では、夏期に温度成層が形成されることが知られており、季節的な水質の変化を把握するためには、成層条件下における流動・物質変化の機構を適切に取り扱えるモ

デルとして構築していく必要がある。併せて今後の課題としておきたい。

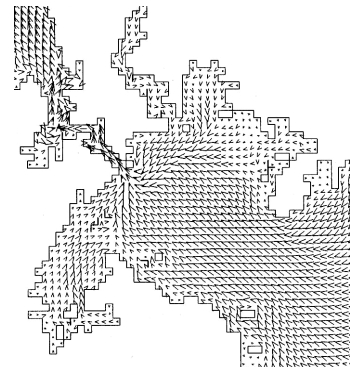
## 5. 結論

本研究では、大村湾の溶存酸素の変化を評価するための数値シミュレーションモデルを作成し、現地への適用を試みた。

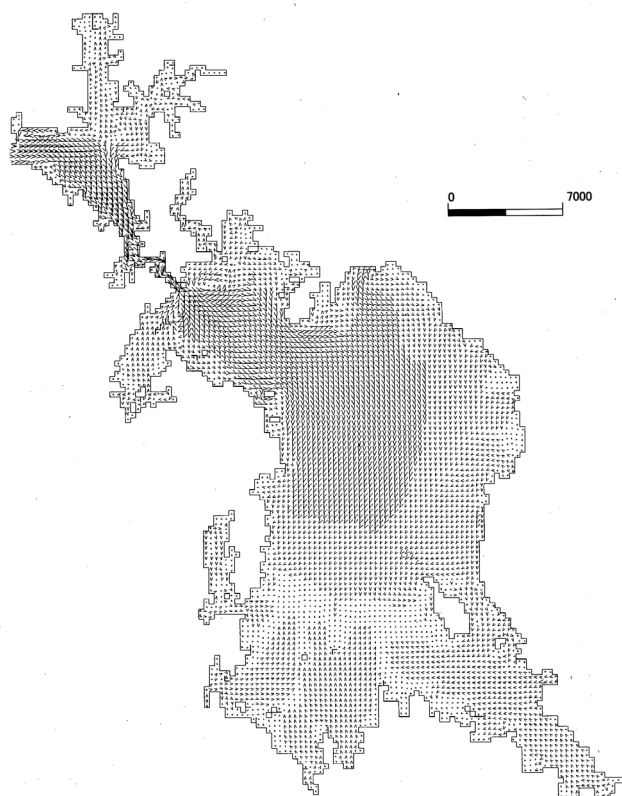
得られた結果から、作成した水質モデルの構成範囲ではあるが、再曝気やSODといった変化の要因が、溶存酸素の分布に与える影響をある程度予測できたものと考えている。しかしながら、大村湾のような閉鎖性の強い水域では、本モデルで定義した以外の溶存酸素の変化過程が存在すると考えられる。より精度の高いシミュレーションを行うためには、季節ごとの流動・水質変化特性



(a) 針尾瀬戸付近の拡大図(表層)

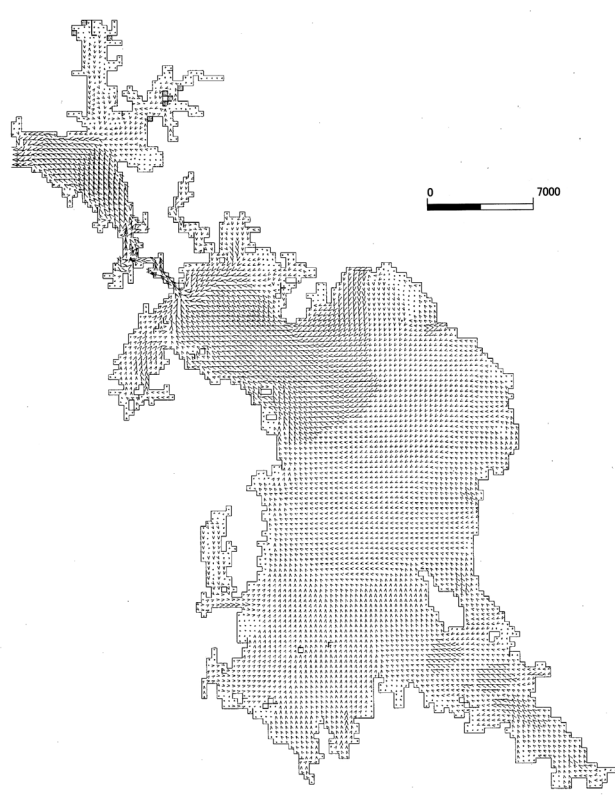


(a) 針尾瀬戸付近の拡大図(表層)



(b) 全域図(表層)

Fig. 5 上げ潮最大時の流速ベクトル



(b) 全域図(表層)

Fig. 6 下げ潮最大時の流速ベクトル

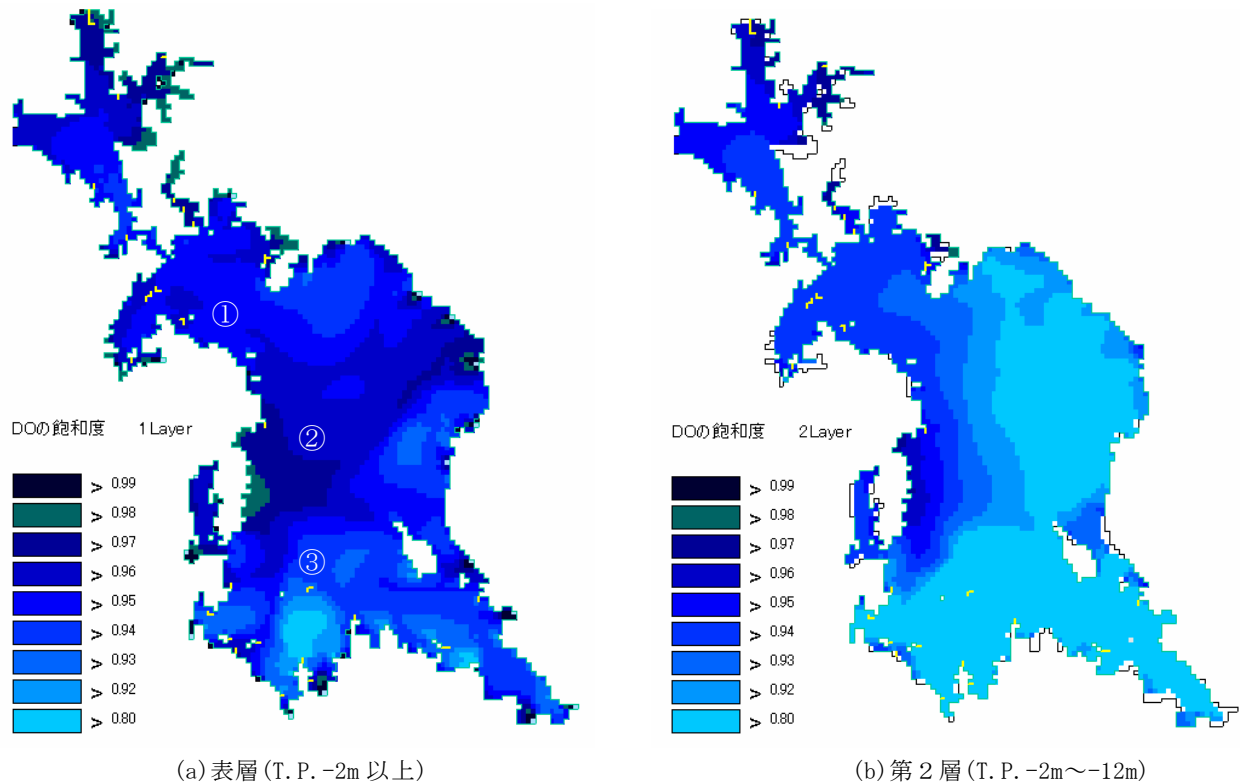


Fig. 9 DOの飽和度の空間分布

を評価できるモデルとして構築する必要がある。今後は、とくに、栄養塩類の物質循環過程や生物活動による生産・消費の影響を考慮したモデルの開発に取り組むと共に、夏期の成層状態下での水質変化の解明について検討を進めたいと考えている。

**謝辞：**大村湾の潮流解析にあたり、本学 冨田彰秀教授から貴重なアドバイスを戴いた。ここに記して深く感謝申し上げます。また、数値シミュレーションに必要なデータ作成等にご協力頂いた本学河川工学研究室の皆様には感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 長崎県県民生活環境部：公共用水及び地下水の水質観測結果, pp. 247-335, pp. 338-427, 2003.
- 2) 福本正：大村湾における流動特性と水質予測に関する研究, 長崎大学大学院海洋生産科学研究科, pp. 3-5, pp. 9-66, 1996.
- 3) 水産庁：海場改良復旧基礎調査報告書, pp. 891-893, 1977.
- 4) 長崎県県民生活環境部：大村湾の現状について, 2003.
- 5) 平野敏行監修：沿岸の環境圏, フジテクノシステム

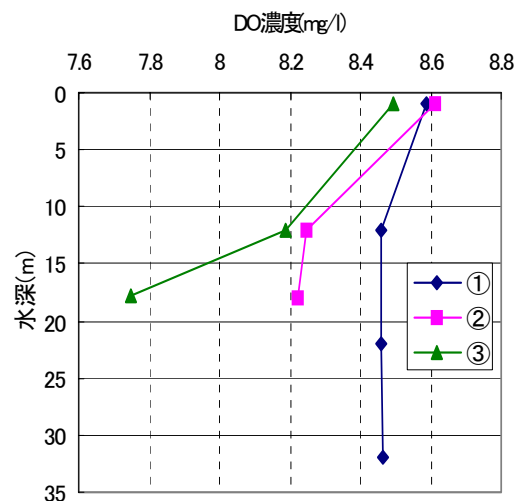


Fig. 10 各層ごとにおける DO の鉛直分布値

- △, pp. 674-680, 1998.
- 6) 有田正光編著：水圏の環境, 東京電気大学出版局, pp. 82-86, 1998.
- 7) 日本水環境学会九州支部：環境保全のための水環境講座(初級編), p. 106, 1998.
- 8) 海洋学会, 沿岸海洋研究部会編：日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版会, pp. 846-850, 1985.