

大村湾における水温とD₀の変化予測 に関する研究

西田 渉^{*}・野口正人^{*}・鈴木誠二^{*}

Numerical Simulation on Water Temperature Dissolved Oxygen in Ohmura Bay

by

Wataru NIDHIDA^{*}, Masato NOGUCHI^{*} and Seiji SUZUKI^{*}

In Ohmura Bay, lots of environmental issues have been emerged. It is considered that the decrease of dissolved oxygen near the sea bottom will be caused due to the thermal stratification. In this study, a three-dimensional simulation model was developed focusing the water temperature and dissolved oxygen, and it was applied the periods of forming and deforming thermal stratification. From calculated results obtained under the period of forming stratification, vertical distribution of dissolved oxygen was influenced on the thermal stratification. On the other hands, in period of deforming the stratification, concentration of dissolved oxygen around sea bottom are becoming high as the stratification is weaker.

Key words : *Ohmura Bay, water temperature, dissolved oxygen, numerical simulation*

1. はじめに

長崎県本土のほぼ中央に位置する大村湾は“ 琴の海 ”とも呼ばれ、その穏やかな流況から、県民にうるおいと安らぎを与える場として、また、真珠養殖を始めとした水産業の場として、愛され利用されてきている。その一方で、当水域では赤潮の発生や夏期の貧酸素化が水環境管理上の問題となっている。こうした現象の発現要因としては、一つ目に、後背地の人間活動に由来した同化許容量を超える汚濁物質の流入、二つ目に、この湾が二重閉鎖的であるために蓄積した汚濁物質が水域内部の生産活動を強く刺激していること、等があげられる。もちろん大村湾の環境管理に携わる関係機関にあっては、これまでも、適宜、必要な施策を講じてきているわけであるが、今後も大村湾の水環境を維持、改善させるには、流域圏管理の観点からの管理方策の継続的な展開が不可欠と考えられる。

本研究では、先述の汚濁要因のうち内部負荷に関連して、とくに水温成層の形成による湾内の溶存酸素の変化を取り上げる。すなわち、海底付近での貧酸素水化について、前報¹⁾で底泥による酸素消費(SOD)の影響を数値シミュレーションの結果をとおして検討したが、夏季の水温成層の発達期が底層での溶存酸素濃度の低下に寄与するものとされている。そこで、新たに熱量に関する収支モデルを開発し、これまでに開発してきた数値モデルに導入することで水温成層が溶存酸素の鉛直分布の遷移過程に与える影響を予測・評価することとした。具体的な計算条件は後述のとおりであるが、水温成層の発達期と消滅期の二つを取り上げて、とくに発達期については水温成層の変化を報告値に基づいて再現計算する。また、各々の期間における鉛直方向の溶存酸素の濃度変化について考察する。

平成 19 年 6 月 22 日受理

^{*} 社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

2. モデルの概要

流体運動と水温，溶存酸素の計算については，三次元レベルモデルが適用されている．以下に各モデルの概要を述べる．

2.1 流体運動に関するモデル

基礎方程式は連続方程式と運動方程式である．また，流体の密度は，水温と塩化物イオン濃度の関数とした状態方程式によって評価されている．計算に用いる方程式のうち，中間層に対する連続方程式と運動方程式を示すと次のとおりである．

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

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

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

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， h : 層厚， f : コリオリ係数， g : 重力加速度， P : 流体の圧力， ρ_0 : 流体の基準密度（水温 20 における密度），である．なお，渦動粘性係数については，基本的に Prandtl の混合距離モデルの形で評価されているが，鉛直（ z 軸）方向成分については，Richardson 数の関数とした Webb 型の評価式を導入して水温成層の強さに応じた抑制効果を表現している．水底面での摩擦応力については，Manning 則が適用された．

2.2 溶存酸素の収支モデル

溶存酸素の収支モデルでは，生成項を有する移流拡散方程式が用いられている．

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(C \cdot uh)}{\partial x} + \frac{\partial(C \cdot vh)}{\partial y} + C \cdot w|_{l-1} - C \cdot w|_l \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + K_z \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{l-1} - K_z \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_l + Src \cdot h \end{aligned} \quad (4)$$

ここに， C : 溶存酸素濃度， K_x, K_y, K_z : x, y, z 軸方向の乱流拡散係数， Src : 生成量，である．ここで，乱流

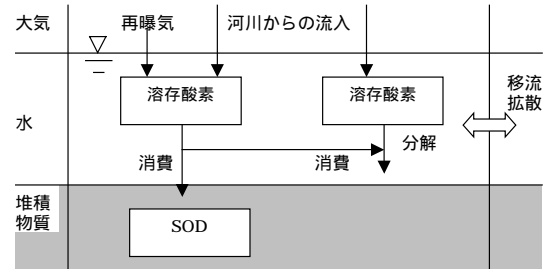


Fig.1 溶存酸素の収支
(再曝気と河川からの流入は表層で，SOD による消費は底層で考慮される)

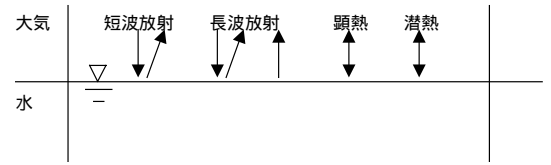


Fig.2 水表面における熱収支

拡散係数について，水平方向成分は Richardson の 4/3 乗則で，鉛直方向成分は，Munk and Anderson 型の関数として評価されている．溶存酸素の生成項については，Fig.1 に示されるように，水表面からの酸素供給の再曝気，水中の有機態物質の分解による消費，堆積物質内の有機態物質の分解による消費(SOD)といった効果が考慮された．各成分の具体的な評価式は前報と同じであり，そちらを参照されたい¹⁾．

2.3 熱量の収支モデル

熱量の収支は，溶存酸素と同様に，生成項を有する移流拡散方程式で表現されている．

ここで，熱量の生成項については，表層において Fig.2 に描かれる五つの効果に取り上げられている．ただし，短波放射は，全層に対して Lambert-Beer 則に従う熱供給(H_{ST})が考慮された．具体的な評価式を示すと次のとおりである．

短波放射(H_S)

$$H_S = \beta(1 - \alpha)H_{S0} \quad (5)$$

$$H_{ST} = H_S (e^{-kz_l} - e^{-kz^2}) \quad (6)$$

大気からの長波放射(H_{La})

$$H_{La} = \varepsilon \sigma (T_{air} + 273)^4 (A + 0.031 e_{air}^{0.5}) \quad (7)$$

水面からの長波放射(H_{Lw})

$$H_{Lw} = \varepsilon \sigma (T + 273)^4 \quad (8)$$

顕熱(H_T)

$$H_T = c_f f(U_w) (T - T_{air}) \quad (9)$$

潜熱(H_E)

$$H_E = f(U_W) (e_s - e_{air}) \quad (10)$$

ここに, α : 水表面におけるアルベド, β : 水表面における吸収率, H_{SO} : 全日射量, ε : 放射体の放射率, σ : Stefan-Boltzmann 定数, T_{air} : 大気温, A : 係数, e_{air} : 大気の蒸気圧, T_s : 水温, c_l : ボ - エン係数, U_W : 水表面上で測定された風速, e_s : 表層の水温に相当する飽和水蒸気圧, k : 水中における短波放射の減衰率, $Z1$, $Z2$: 水表面から各層の上面と下面までの深さ, である.

これまでに述べた各基礎方程式の離散化にあたっては, 陽形式の有限差分法によって離散化されており, 差分格子に Staggered 格子系を採用したうえで, 時間軸方向の差分には Leap-Frog 法が, 空間方向の差分には Doner Cell 法が, 適用されている.

3. 計算条件

計算領域は, Fig.3 に示される大村湾と佐世保湾とし, 開境界を佐世保湾湾口としている. これらの海域を水平方向に $dx=dy=250m$ の差分格子で覆い, 鉛直方向には表層を T.P. -2.0m 以深として, それ以深を $dz=1.5m$ の層厚で分割した. 時間差分間隔は $dt=4.0sec$ である. 流入河川として 19 本の河川を取り上げている. 水底面の粗度は計算領域に一樣と仮定し, Manning の粗度係数を $n=0.015sec/m^{1/3}$ とした.

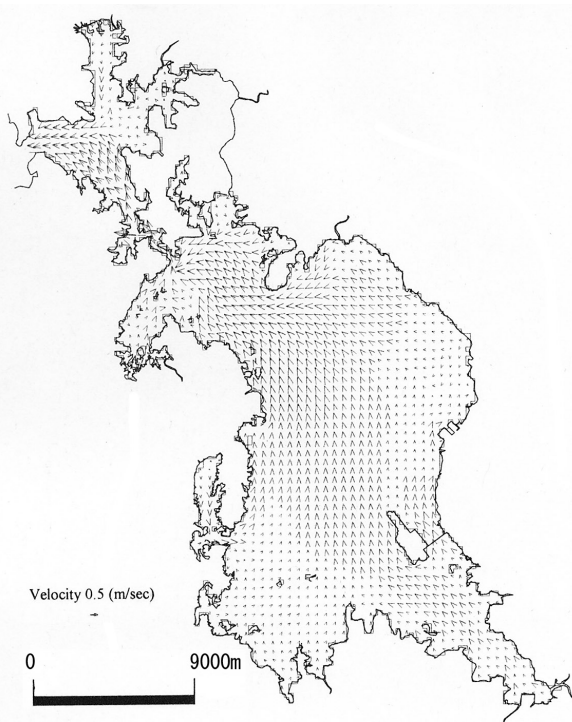


Fig.3 流速ベクトルの空間分布(表層 下げ潮)

計算期間は, 計算結果と実測結果比較する必要性があることから, 福本の論文を参考に²⁾, 大村湾における水温の時空間変化に関する観測が集中的に行なわれた 1994 年(平成 6 年) 6 月 24 日 ~ 7 月 22 日(成層の発達期), 同年 8 月 25 日 ~ 10 月 4 日(成層の消滅期)の二つの期間とした. 初期条件は, 計算開始日に相当する観測結果を参考に各層ごとに与えている. 海面上の大気の状態は気象庁による報告結果とし³⁾, 全日射量, 気温, 湿度, 風速の時間変化が与えられた. 河川からの流入水の水温, 溶存酸素濃度, 有機態物質濃度については文献値を参考に与えた⁴⁾.

4. 成層発達期の計算結果と考察

まず, 計算から得られた表層における流速ベクトルと水温の空間分布を示すと, Fig.3 と Fig.4 のとおりである. また, Fig.4 に記入された Line A-A と Line B-B における鉛直方向の空間分布を示すと, Fig.5 のとおりである. なお, これらの図は, 1994 年 7 月 22 日の下げ潮最強時に相当する結果である.

大村湾では, 主に佐世保湾での潮汐に応じた流れが現われる. 計算結果によると, 針尾瀬戸付近について, 上げ潮最強時の流れは湾口から西よりに湾奥へ向うようである. 下げ潮最強時には, Fig.3 に示されるとおり表層では, この瀬戸の西側に比較的速い流れがあるが, 主に東側から反時計回りに佐世保湾へと向く流れ

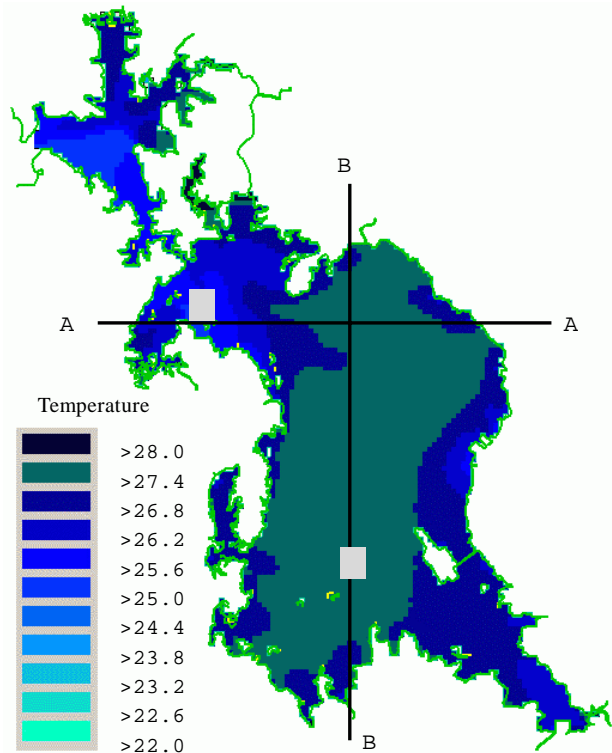
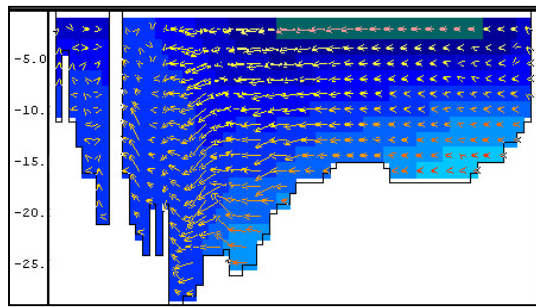
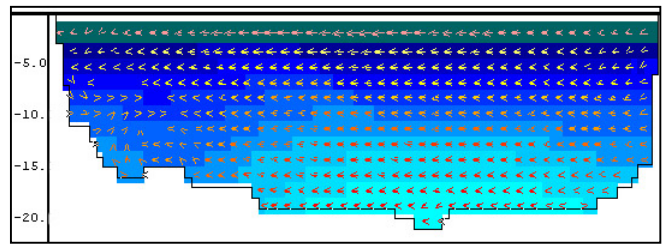


Fig.4 水温の空間分布(表層 下げ潮)

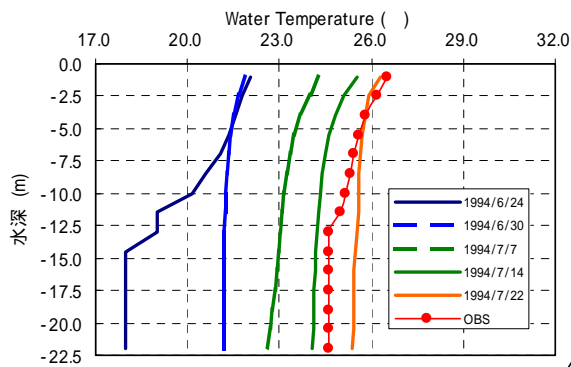


(a) A-A 断面

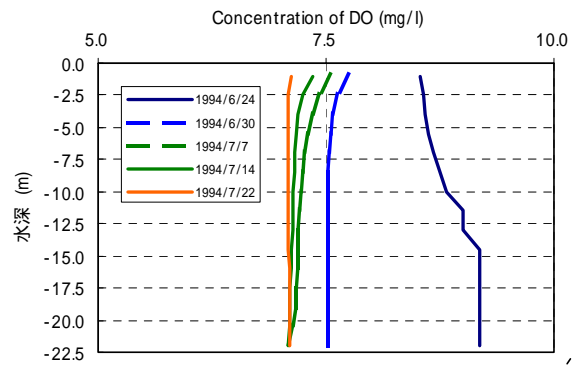


(b) B-B 断面

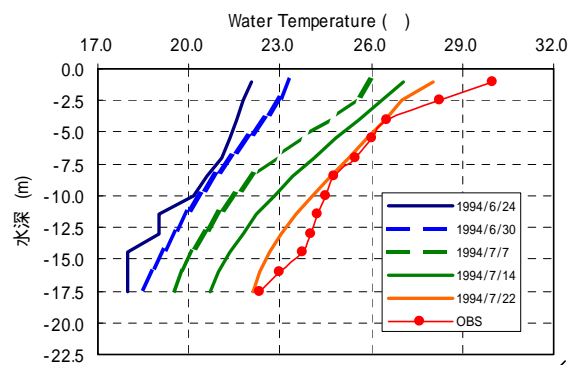
Fig.5 流速ベクトルと水温の鉛直分布



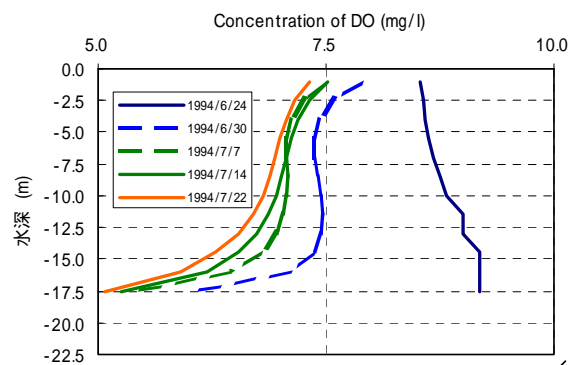
(a) 地点



(a) 地点



(b) 地点



(b) 地点

Fig.6 水温の鉛直分布の時間変化

が発生している。流速ベクトルの鉛直分布を Fig.5 にみると、針尾瀬戸付近では海底の地形の起伏が大きいこともあり、複雑な流れが現われている。鉛直方向の流速ベクトルの大きさから、各層間の海水混合の程度が強いことが推察される。大村湾の湾中央部から湾奥部については、潮差が 0.5m 程度であること、海底の起伏も針尾瀬戸付近ほどには大きくないことから、表層と鉛直方向の流速は数 cm/s 以下であり、極めて穏やかな流れとなっている。

水温の計算結果について述べると、表層において、大村湾の湾中央部の水温が高く、沿岸部および針尾瀬戸付近で低い。沿岸域にあっては、計算条件に考慮された河川水の流入によるものであり、流入河川の数が

Fig.7 水温の鉛直分布の時間変化

多い東岸から南東岸にかけて水温の低下の度合いが強くなっている。針尾瀬戸付近に関しても湾中央部と比べて 2 程度低い。この海域は、先述したように鉛直方向の流動が大きく、表層の海水が水温の低い中層から底層の海水と混合した結果であると考えられる。このことは水温の鉛直分布からも推察される。その一方で、湾の中央部では表層と中層及び底層との水温差が大きく、水温成層が形成されているようである。

ここで、鉛直方向の水温分布について、時間的変化過程を示すと Fig.6 のとおりである。これらの計算結果については、Fig.4 に記された地点と地点における値である。いずれの地点においても、水表面からの熱供給によって水温が全体的に上昇している。地点

では、初期に与えられた表層と底層間の水温差が、計算を開始してから7日後に、ほとんどなくなっており、計算終了時には約 0.9 となる。地点 について、時間の経過とともに全層の水温が上がるが、表層での上昇が早く、最終的に底層との水温差が 6 程度に達している。以上の水温の計算結果については、与えられた計算条件と算出された大村湾内の流動構造を考えると、ほぼ妥当な結果と判断できそうである。さらに Fig.6 に併記された観測結果(OBS)と比較すると、計算結果は、地点 の底層部、また、地点 では表層部において低く予測する傾向にあり、海上の気象条件や各種の輸送係数の評価において検討を要するが、再現性は比較的良好なものと考えている。

つぎに、溶存酸素の計算結果について、地点 と地点 における鉛直方向の濃度の時間変化を示すと、Fig.7 のとおりである。これらの図をみると、初期に有機態物質を水域に一樣に与えたことで、有機態物質の分解による酸素消費のために、初期濃度から低下している。鉛直分布の時間変化についてみると、地点 では表層と底層で濃度に差はあるものの、先に述べた流動構造の影響によって鉛直方向に、ほぼ一樣に分布する結果となっている。地点 については、水表面での再曝気によって表層の濃度が高くなる傾向にあるが、時間の経過とともに形成した水温の鉛直分布に応じて上層と下層の輸送が抑制されるようである。同様に

SOD による酸素の低下の影響も小さくなることがわかる。以上の計算結果から、早崎瀬戸周辺の溶存酸素の濃度分布には鉛直流動の与える影響が大きいが、流れの穏やかな湾の中央部では、水温成層の影響が無視できないことが予測できたものと思われる。

5. 成層消滅期の計算結果と考察

成層の消滅期として計算された表層における流速ベクトルと水温の空間分布の結果を示すと、Fig.8 と Fig.9 のとおりである。また、Fig.10 には Line A-A と Line B-B での鉛直分布が示されている。なお、これらの図は、1994 年 9 月 22 日の下げ潮最強時の結果である。

大村湾の流れについて、成層発達期の結果と比べると、針尾瀬戸付近と湾の北部で流速が速く、湾の中央部および湾奥部で遅くなることが類似するが、南西部海域において、反時計回りに沿岸を北上する流れが発生することがわかる。表層における水温は全域で低くなる。これは、計算期間中の平均気温と最大短波放射がそれぞれ 10%, 20%程度低くなり、水面からの長波放射や顕熱等の形態で表層の熱が大気に放出されたためであると考えられる。水温の鉛直方向の分布についても Fig.10 に示されるとおり、湾のほぼ全域で表層と底層との差が小さく(地点 と地点 で約 0.1)になっており、計算初期の水温成層が消滅したことが確認でき

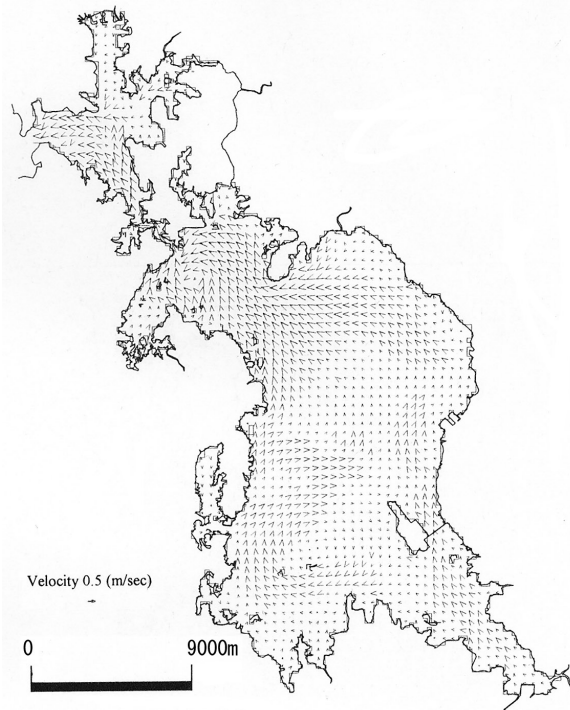


Fig.8 流速ベクトルの空間分布(表層 下げ潮)

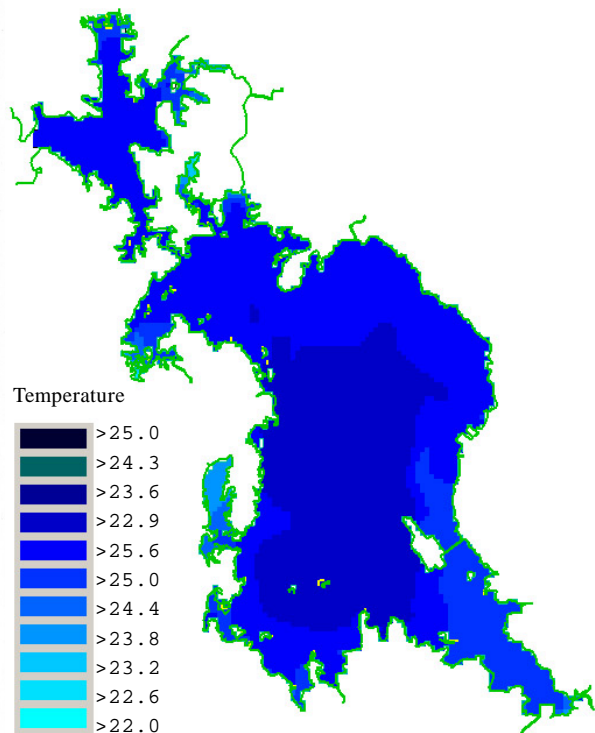


Fig.9 水温の空間分布(表層 下げ潮)

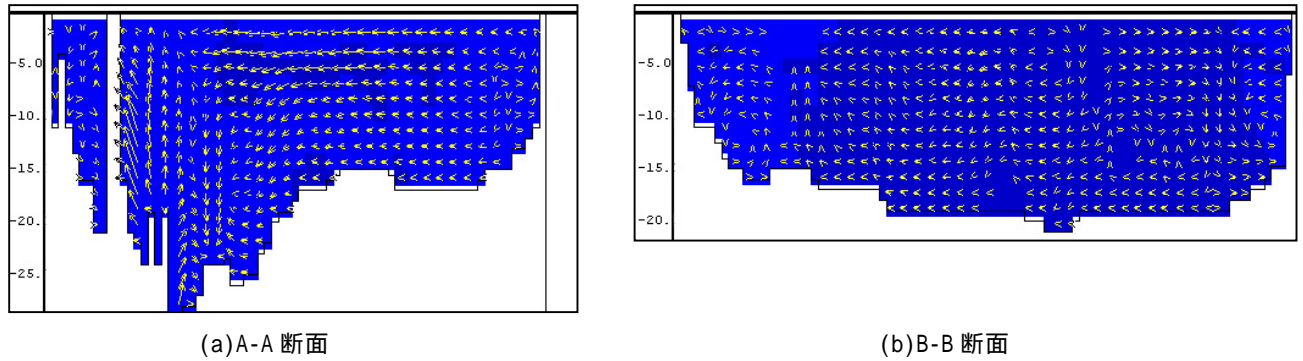


Fig.10 流速ベクトルと水温の鉛直分布

る．この図には，湾の南部で鉛直方向の流動が生じていることも示されている．

ここで，溶存酸素濃度の計算結果について，地点と地点での鉛直分布を示すと Fig.11 のとおりである．地点では，初期の底層部の濃度が低かったこともあり，計算の開始からしばらくの期間に底層の濃度勾配が大きいが，一ヶ月後には一様な分布となる．針尾瀬戸に近い地点においては，その流動構造から比較的早く地点と同様の分布になる．これらの結果から，早崎瀬戸付近では流れ場の特性に影響された時空間変化を示すが，大村湾の中央部や湾奥部においては，気象条件の季節的变化に応じた熱収支や流動構造の遷移などによって，変化することが予測された．

6. おわりに

本研究では，大村湾における水温と溶存酸素濃度について，水温成層の発達期と消滅期における時空間変化を数値モデルで予測・評価した．

ここで行った二種類の計算結果から，大村湾は針尾瀬戸付近のように，季節違いに関わらない鉛直方向の混合の強い海域と，水温成層による鉛直流動・拡散の抑制が無視できない湾の中央部や湾奥部とに大別されることが予測された．とくに後者の海域については，成層の程度が水中の物質輸送に強い影響をもたらすことが予想された．今後は，より精度の良いシミュレーションを行なうために，輸送係数の評価手法を精査するとともに，気象条件をはじめとする境界条件等について検討したいと考えている．

謝辞：本研究を遂行するにあたり，気象庁のホームページから公開されているデータを利用させて頂いた．ここに記して深謝申し上げます．また，計算のとりまとめ等にご協力頂いた本学河川工学研究室の皆様感謝の意を表します．

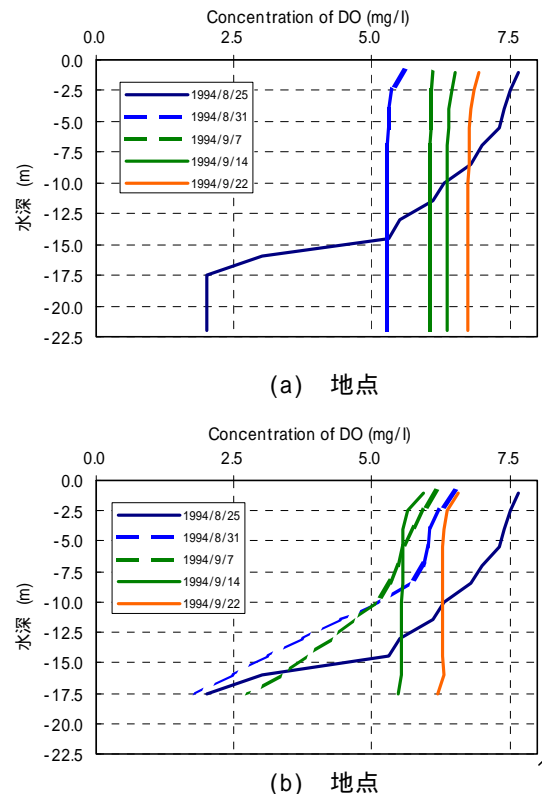


Fig.11 水温の鉛直分布の時間変化

参考文献

- 1) 西田 渉，野口 正人，富永昌伸：大村湾における溶存酸素の変化予測に関する研究，長崎大学工学部研究報告，第 35 巻，第 65 号，pp.114-119, 2005.
- 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，長崎大学学位論文，p.214, 1997.
- 3) 気象庁：ホームページ公開資料
(<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)
- 4) 長崎県民生活環境部：公共用水及び地下水の水質観測結果，長崎県民生活環境部，1994.