

諫早湾干拓調整池における短期開門調査時の 水温の変化予測に関する研究

西田 渉*・鈴木誠二*

Numerical Simulation of Water Temperature Changes due to the In- and Out-flow through Gates in Isahaya Pond

by

Wataru NISHIDA* and Seiji SUZUKI*

In order to make clear the water temperature changes in Isahaya Regulation Pond, heat budget model was developed regarding the heat exchange at water surface. This model was applied to the real water body to simulate the temporal and spatial variations of flows and water temperature caused by the intake of seawater. Calculated results show that the introduced seawater flows in lower layer towards innermost area, and induces the vertical circulation flow in this pond. Accordingly, water temperature distribution are strongly affected by the up- and down-welling flows as well as the heat exchanges at water surface.

Key words : Numerical simulation, Water temperature, Isahaya Pond

1. 序論

閉鎖性水域の水環境を良好な状態に維持・管理するには、外部負荷と内部負荷の削減が不可欠である。前者に関しては、このほど湖沼法にも明記されたように、点源からの汚濁負荷だけではなく非点源汚濁負荷に関する定量評価と効果的な対策が必要とされる。一方で、各種の外部負荷の削減策を展開するには、それらによる水環境の改善効果を予め把握しておく必要がある。受水域の水質応答を定量的に予測する手法を構築しておくことが望まれる。

諫早湾干拓調整池及びその周辺水域では、水質の変化機構を明らかにし、効果的な水管理手法を構築するためのモニタリング調査が現在も継続的に実施されている^{1,2)}。著者らも、同水域の水質の変化機構を評価するために、これまでに現地観測や数値モデルの開発を行うと共に予測精度の向上に努めてきた³⁻⁵⁾。ただし、これまでの結果から、構築した数値モデルの予

測精度の向上を図るには、比較的短い間隔で収集された調査結果に基づいて数値モデルの妥当性と輸送係数の評価を検討する必要があるものと考えている。そこで本研究では、干拓調整池の水質モニタリングが時空間的に密に実施された2002(平成14)年の短期開門調査結果を取り上げて、数値モデルの妥当性を検討することにした。具体的には、まず、水温変化の予測モデルを作成した。つぎに、短期開門調査の初期期間を対象に現地に適用し、この期間の流動と水温の変化を評価することとした。

2. モデルの概要

2.1 支配方程式

計算対象とする諫早湾干拓調整池については、最深部の水深が3m程度の比較的浅い水域であるが、後述するように、モデルの検証を水温の鉛直分布に関する報

平成20年6月27日受理

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

告結果に基づいて評価することから，計算手法として 3次元レベルモデルを採用している．

このモデルでは，連続方程式，運動方程式，水温の収支式を基礎方程式として取り上げている．さらに，計算対象期間に海水が導水されたことで塩化物イオンの濃度分布が鉛直方向に大きく変化することから，塩化物イオンに関する収支式も基礎方程式に加えている．以下に中間層に対する連続方程式と運動方程式を示す．

・連続方程式

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

・運動方程式：x 軸方向

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

・運動方程式：y 軸方向

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

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 ：中間層の層厚， 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．流体の密度に関しては，水温と塩化物イオンによって変化するものとし，圧力項にその影響を反映させている．

水温の収支式は生成項を備えた移流拡散方程式の形で表現されている．生成項に考慮した熱量の収支には，水表面での短波放射，大気からの長波放射，水体からの長波放射，顕熱，潜熱，といった五つの現象が取り上げられた．なお，短波放射に関しては，水表面で一部が吸収され，残りが Lambert-Beer 則に従って各水深部の水塊に供給されるものとしている．以下に表層に対する熱量の収支式を示す．

・熱量の収支式

$$\begin{aligned} \frac{\partial Th_s}{\partial t} + \frac{\partial(T \cdot uh_s)}{\partial x} + \frac{\partial(T \cdot vh_s)}{\partial y} - Tw|_l \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h_s \frac{\partial T}{\partial y} \right) - K_z \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_l \\ + \frac{1}{\rho C_p} (H_{SS} + H_{LA} - H_{LW} - H - E + H_{SB}) + T_r q \end{aligned} \quad (4)$$

ここに， T ：水温， h_s ：表層の層厚， K_x, K_y, K_z ： x, y, z 軸方向の乱流拡散係数， ρ ：流体の密度， C_p ：流体の比熱， H_{SS} ：短波放射量， H_{LA} ：大気からの長波放射量， H_{LW} ：水表面からの長波放射量， H ：顕熱量， E ：潜熱量， H_{SB} ：Lambert-Beer 則に従う水中への短波放射の供給量， T_r ：流入河川の水温， q_r ：流入河川の流量，である．

水表面で各熱収支は，次の式で評価した．

$$H_{SS} = (1 - \alpha_s) \beta H_{S0} \quad (5)$$

$$H_{LA} = \varepsilon \sigma (T_{air} + 273)^4 (A + 0.031 \sqrt{e_{air}}) \quad (6)$$

$$H_{LW} = \gamma_1 \varepsilon \sigma (T + 273)^4 \quad (7)$$

$$H = B \gamma_2 f(U_w) (T - T_{air}) \quad (8)$$

$$E = \gamma_2 f(U_w) (e_s - e_{air}) \quad (9)$$

ここに， α_s ：アルベド， β ：水表面における短波放射の吸収率， H_{S0} ：全天日射量， 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， B ：ボ - エン係数， $f(U_w)$ ：風速(U_w)に依存した鉛直方向の輸送係数， e_s ：飽和水蒸気圧，である．なお， γ は各輸送量を補正するために導入した係数である．

鉛直方向の渦動粘性係数と乱流拡散係数については，密度成層の形成による輸送量の低下を表現するために，以下に示す Webb 型と Munk-Anderson 型の Richardson 数の関数として表現している．

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{z0} \frac{1}{1.0 + 5.2 Ri} \quad (10)$$

$$K_z = \varepsilon_z \frac{(1.0 + 10.0 Ri)^{0.5}}{(1.0 + 10.0 Ri / 3.0)^{1.5}} \quad (11)$$

ここに， Ri ：Richardson 数， ε_{z0} ：中立状態における渦動粘性係数，である．

数値シミュレーションにあたって，各基礎方程式は陽形式の有限差分法を使って離散化している．なお，移流拡散方程式の移流項の離散化に関しては，UTOPIA スキームに基づく手法とした．UTOPIA スキームでは流動状況に応じて風上性を持たせながら隣接する三つのセルの値を使って対象とする物理量の空間分布を放物線近似して境界面での値を算出し，流入・流出量を評価することを基本としている．ここでは，流出入量の評価について，近似後の放物線を流入セル側に積分することで算出された量を用いることにした．ただし，別途行った試行計算の結果から，積分値のままではオ

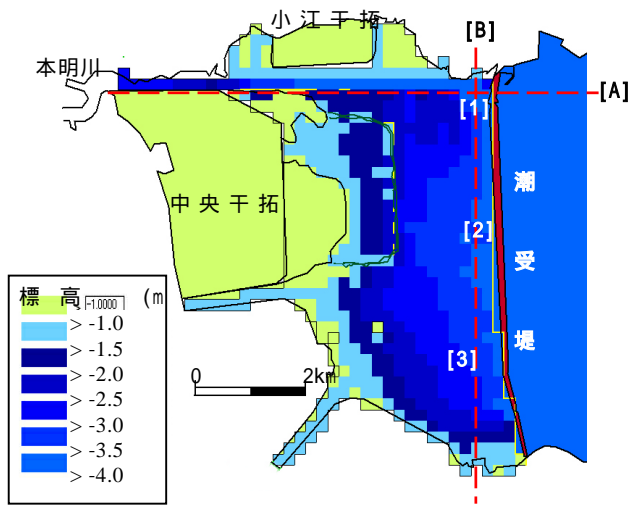


Fig. 1 諫早湾干拓調整池の概要図

一バーシュート等を発生させることが明らかになったため、近似曲線の極値の空間座標に応じた Limiter を適用させることで、その問題の解決を図った。

2.2 計算条件

計算対象とした諫早湾干拓調整池の概要を示すと、Fig.1 のとおりである。計算にあたり、この領域を水平方向に $dx=dy=200\text{m}$ の差分格子で覆った。鉛直方向には平均管理水位が T.P. -1m であること、また、水門操作による水位の低下を考慮して、表層を T.P. -1.5m 以上とし、それ以深を $dz=0.25\text{m}$ の厚さで分割した。計算時間間隔は $dt=2.0\text{sec}$ とした。

短期開門調査は 2002(平成 14)年 4 月 24 日～5 月 20 日にかけて行われているが、今回の計算では開門調査開始から 6 日間を対象期間とした。干拓調整池の水温と塩化物イオン濃度の初期値は、開門調査開始時点の報告値を与えた⁶⁾。北部排水門と南部排水門からの貯留水の排水量と海水の導水量については、実績報告値から算出した流量と流速を時系列データとして排水門地点の格子の境界面に与えている。短波放射量や大気温等の気象条件に関わる値は、気象庁長崎観測所の報告値⁷⁾とし、日射量と気温を正弦波分布(ただし日没後の日射量は零)するものとして評価した。

3. 計算結果と考察

3.1 干拓調整池内の流れ

まず、2002(平成 14)年 4 月 28 日と 29 日に実施された海水の導水時と貯留水の排水時における水平方向の流速ベクトルの空間分布を示すと Fig.2 のとおりである。なお、これらの結果は表層の計算値である。図に示された結果から、北部・南部排水門を導水・排水操作することで、操作条件に応じた流れが干拓調整池のほぼ全域で発生することがわかる。流向と流速については、水門の開度が同一であっても、北部排水門の水門幅が広く、導水・排水量が南部排水門に比べて多いことから、北部水域での流れが速くなっており、この排水門から調整池の中央部や奥部へ広がるように分布する。海水の導水時において、本明川の河口部付近の

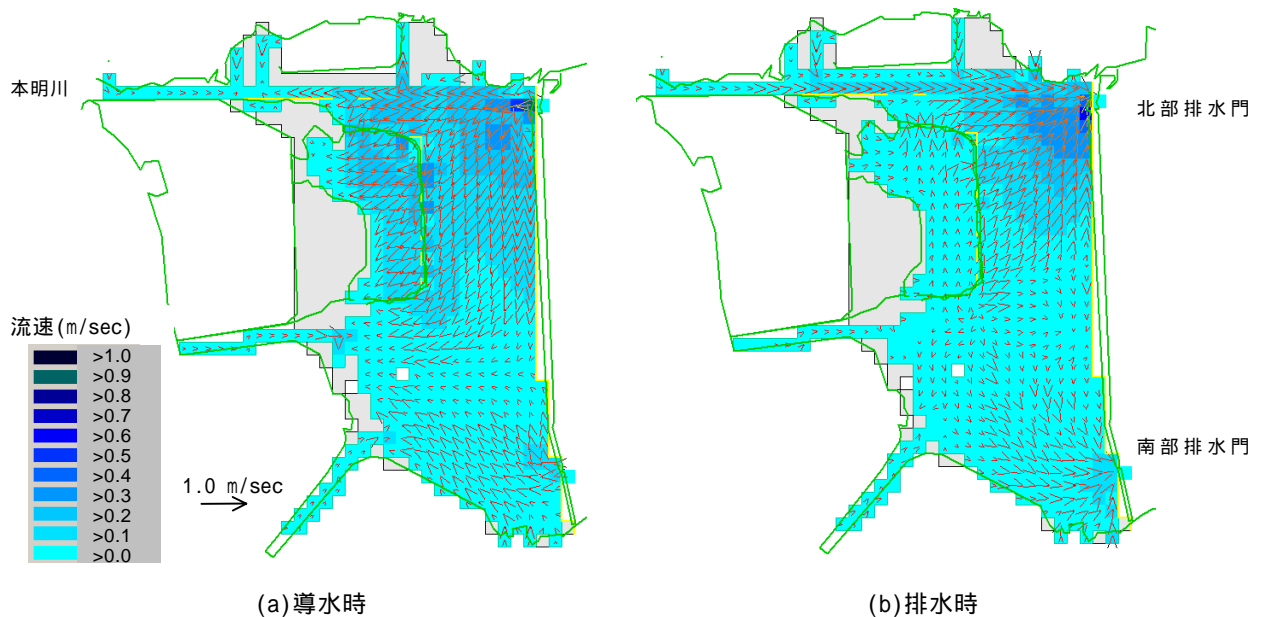


Fig. 2 表層における流速ベクトルの空間分布

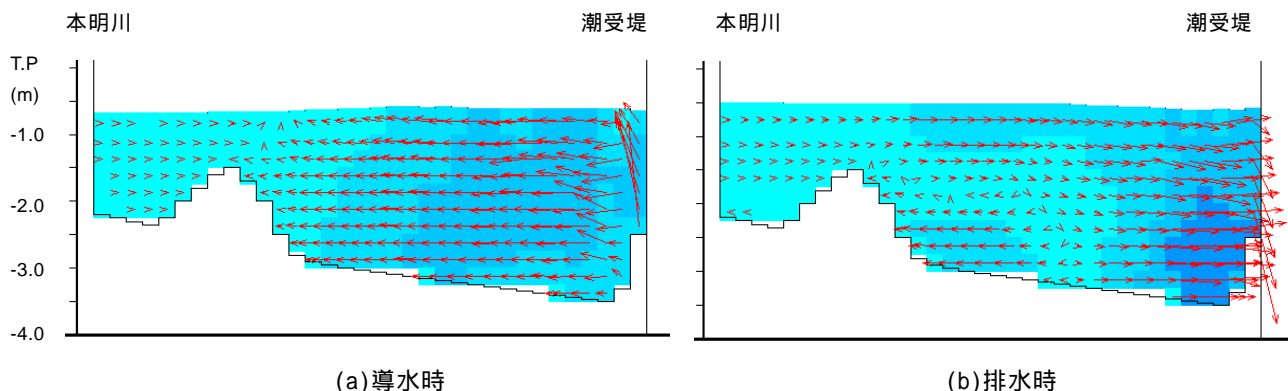


Fig. 3 東西方向の断面[A]における流速ベクトルの空間分布

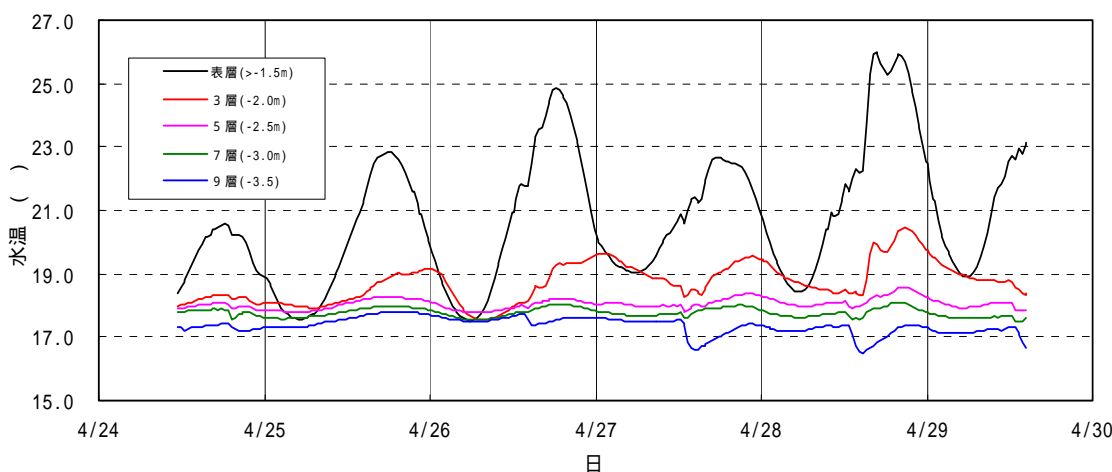


Fig. 4 地点[2]での水温の時間変化

流れが逆向きになるが、これは、後述するように底層を河口部へ進行する海水を補うように表層付近の水が流動したためである。

つぎに Fig.3 に鉛直方向の流速ベクトルの空間分布を示す。なお、この鉛直分布は Fig.1 の東西方向の断面[A]における結果である。導水・排水時に排水門は下端から高さ 1m までが開開口部となるため、両排水門前面では底層付近の流速が速く、0.7m/sec 程度となる。また表層では、導水と排水の状況に応じて鉛直上向きと下向きの流れが発生する。この断面では、導水時に北部排水門から調整池の奥部へ向う流れが生じるが、本明川の河口部にあるマウンド状の地形によって下層を進行する流れが遮られ、また本明川からの密度の低い河川水が上層を流下するために、上層と下層で流向が逆転している。図に示された排水時には、表層の流下速度が大きいため、この断面内に鉛直環流が形成されることが示されている。以上から、干拓調整池の水深は比較的浅いものの、排水門の下層からの導水と排水や、上層と下層の密度差に影響を受けた流れが発生することが明らかにされた。

3.2 水温の変化

計算から求められた水温の時間変化は Fig.4 のとおりである。これらの結果は、Fig.1 に示した潮受堤の中央部付近の地点[2]における各層での変化を示している。この結果から、表層付近の日平均水温は時間の経過とともに高くなる傾向にあるが、水表面での熱交換現象の時間変化のために、顕著な日変化が現れる。すなわち、深夜から早朝にかけて長波放射や顕熱輸送等によって熱が大気中に放出されることで、表層の水温が下層の値程度まで低下することが示されている。底層付近についても日変化があるものの、その変化量は上層ほどには大きくない。排水門操作に起因しては、導水によって干拓調整池の水深が増すために短波放射の供給による水温の上昇幅が小さくなる。また、底層付近にあっては、干拓調整池内の貯留水よりも水温の低い海水がこの地点付近まで浸入することで水温が低下することが示されている。一方で、排水操作後に関しては、導水後とは逆の理由で表層の水温の上昇が大きくなる。ただし、底層付近には顕著な変化は現れず、短波放射の供給や上層水との混合・拡散によって、比

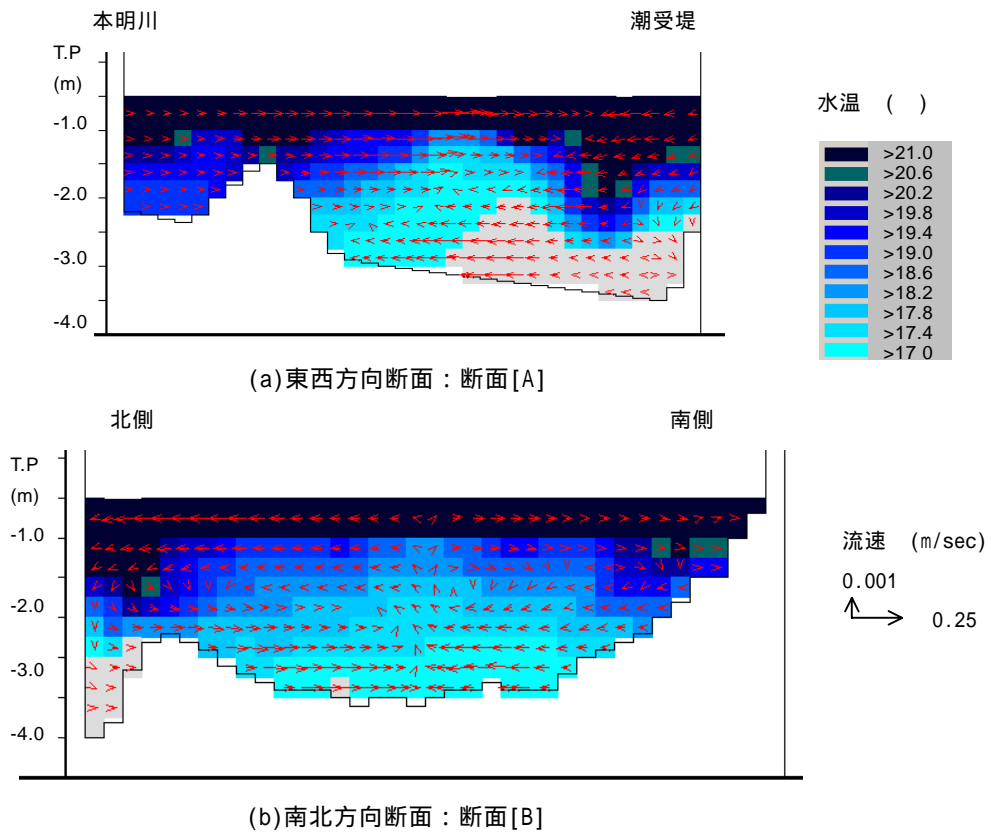


Fig. 5 流速ベクトルと水温の鉛直分布

較的緩やかに水温が上昇する。

ここで、水温の鉛直方向の空間分布を示すと Fig.5 のとおりである。これらの結果は、Fig.1の東西線[A]と南北線[B]の断面の分布であり、2002(平成14)年4月29日に実施された導水操作終了から約1時間経過した後の結果である。いずれの結果も排水門を既に閉じた後であるものの、干拓調整池の内部には依然として導水によって生じた流れが現れている。断面[A]では、水底部を本明川の河口方向に向う流れがあり、この進入水の先端部の上層では、これによる水の動きを補う逆向きの速い流れが生じている。水温は表層で高いが、排水門付近や進入水の後部には鉛直下向きの流れが生じ、表層付近の水塊が下部へ輸送されるために中層での水温が高くなる。断面[B]においても、導入水が底層付近を干拓調整池の奥部へ流入するために底層部の流速が速い。また、同図の中央部で北部と南部の排水門からの流入水が出会うことで鉛直上向きの流れが生じる。これら底層と中央部の鉛直方向の流れによって、北部と南部の水域には、それぞれ反時計回りと時計回りの環流が発生している。その結果、北岸と南岸付近の水温は水深1m程度までが20以上になるが、中央部では底層の低温の水塊が上部に輸送されるために、中層においても水温が低い。

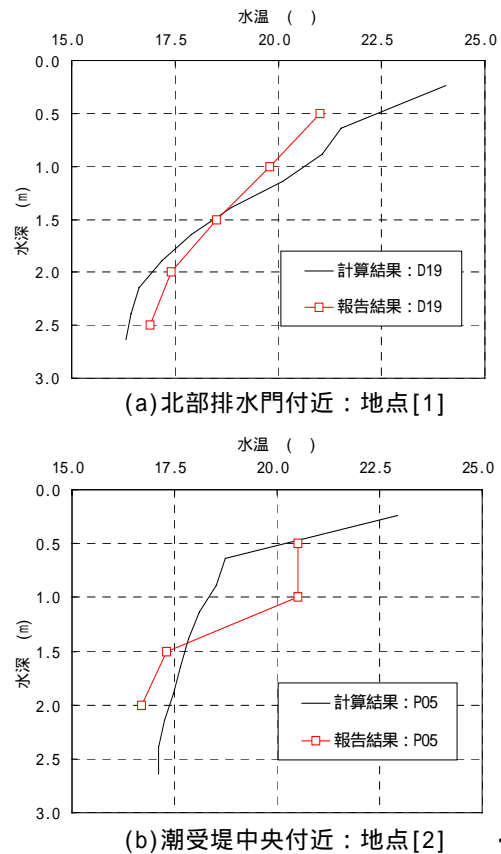
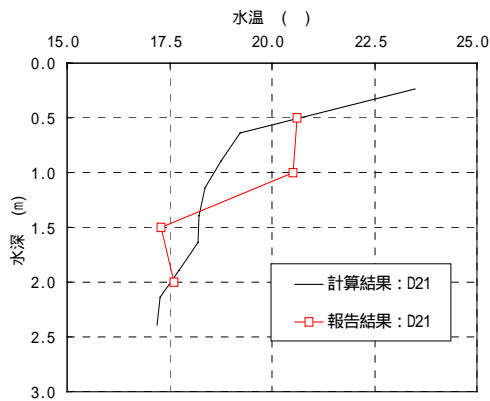


Fig. 6 水温の計算結果と報告結果の比較



(c)南部排水門付近：地点[3]

Fig. 6 水温の計算結果と報告結果の比較(つづき)

ここで、干拓調整池の三つの地点における報告結果と計算結果を示すと Fig.6 のとおりである。これらの結果から、各地点においても水深が深くなるにつれて水温が低くなる定性的な傾向を再現できている。報告結果との差は低層で比較的小さいが、水深 1m 付近において 2.5 程度となり、水温躍層の位置が両者で異なっている。こうした差を生じる要因としては、水表面での熱交換量の時間変化や鉛直方向の輸送係数の値等、計算条件の設定に関する問題が挙げられる。さらに今回のモデルには水平面に風応力が考慮されていないために、風による鉛直方向の流動機構や混合層厚の変化が表現されていなかったことも大きな違いを生じた原因と考えられる。

4. 結論

諫早湾干拓調整池における短期開門調査期間の水温変化を明らかにするために、水表面での熱収支を考慮した数値モデルを構築し、現地へ適用した。

この結果、計算対象期間の干拓調整池の流れは、排水門の操作状況に応じて時空間的に変化し、ほぼ全域

で流れが発生することが示された。また、排水門の底部が開口されるために流れの鉛直分布が大きく変化し、導水後には水温も流動構造に依存して時空間的に変化することが示された。計算結果と報告結果との比較から水温の定性的な変化は再現できたものと考えている。今後は、より精度の良い結果が得られるよう、前章の末尾で述べた課題の解決に取り組んでいきたい。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、諫早湾締切干拓地域で実施されているモニタリング結果を参照させて戴いた。九州農政局の関係各位に記して深謝申し上げます。また、本学河川工学研究室諸氏には、データの整理等を手伝って戴いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 九州農政局諫早湾干拓事務所：諫早湾からの新たな一歩，パンフレット，p.19,2005.
- 九州農政局：ホームページ資料，2008.
(URL <http://www.maff-kyushu-nn.go.jp/>)
- Noguchi, M., Solomatine, D.P. and Nishida, W.: Calibration of Water Quality Model by Global Optimization Techniques, Proc. 5th Int'l Conf. on Hydroinformatics, Vol.1, Press, pp.464-469, 2002.
- 西田渉，松下紘資，野口正人，D. P. Solomatine：遺伝的アルゴリズムによる水質モデルの検定とその適用性に関する研究，水工学論文集，第48巻(2)，pp.1321-1327, 2004.
- 西田渉，野口正人，松田良寛，岡崎久典：閉鎖性水域における水質変化の予測に関する研究，長崎大学工学部研究報告，第35巻，65号，pp.108-113, 2005.
- 九州農政局：“短期開門調査報告書”，pp.1-75, 2003.
- 気象庁：“ホームページ資料”，2008.
(URL <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)