

高瀬川の浅瀬が塩水遡上に与える影響について

AN INFLUENCE OF A SHALLOW WATER AREA ON THE SALT WATER INTRUSION IN RIVER TAKASE

和光一紀¹・中山恵介²・石川忠晴³

KAZUKI WAKO, KEISUKE NAKAYAMA and TADAHARU ISIKAWA

¹学生会員 東京工業大学大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

²正会員 工博 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 総合理工学研究科 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

This paper describes the application of the MEL1D-MB to duplicate the discharge and salinity at the upstream end of River Takase which has a large shallow water area in the middle of the river. Because of the large tidal amplitude compared to the maximum water depth of the river that is almost one third of the maximum water depth, it may be difficult to compute the flow field of River Takase by using ordinal three-dimensional model based on finite difference method. However, the model based on finite volume method may enable us to compute the flow field with high accuracy of the conservation of mass. Therefore, we decided to apply the MEL1D-MB based on finite volume method to compute salinity distribution in River Takase. The results obtained from the MEL1D-MB agreed well with the field observation results and the application of the MEL1D-MB is found to be possible to reproduce the salinity distribution in River Takase.

Key Words : MEL1D-MB, The Takase River, finite volume method, salt wedge, shallow water area

1. はじめに

青森県東部に位置する高瀬川は、汽水湖である小川原湖と太平洋を結ぶ河道延長6.6kmの感潮河川である。高瀬川の塩水遡上現象とそれに伴う小川原湖内での塩分循環は、同湖の水質や生物に大きな特色を与えている。一方で、小川原湖の治水安全度は低く、高瀬川の改修などによる疎通能力向上が将来的に考えられる可能性がある。しかし、低水路の掘削や河道の拡幅などによる河道改変は、常時の塩水遡上を変化させる恐れがある。そのため塩水遡上時の流動と高瀬川河道地形との関係をあらかじめ把握しておく必要がある。

このような背景から2002年8月、高瀬川中下流部に広がる高水敷を観測対象水域とした現地観測が行われてい

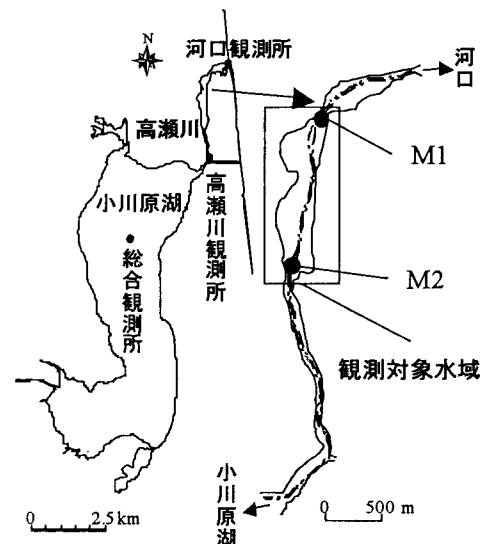


図-1 高瀬川の位置と形状

る¹⁾。この観測において、塩水遡上時の流動に対する河道地形の影響を捉えることができたが、河道改変の環境

影響評価を行うには、現地観測で得られたデータをもとに、塩分流動状態の変化の予測を行う必要がある。

そのためには高瀬川河道における塩水流動をシミュレーションする数値モデルの開発が必要となる。しかし同河道では潮汐にともなう水深変化が浅部(高水敷)の水

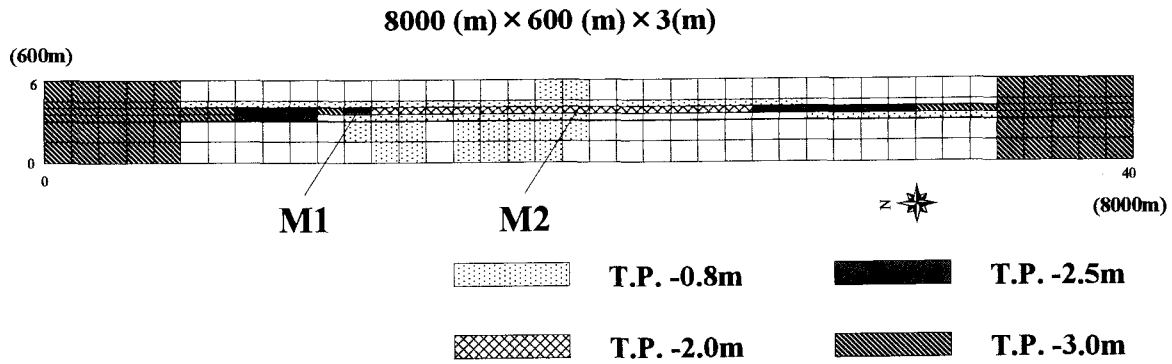


図-2 計算に用いた高瀬川河道地形

深に対して相対的に大きく、また滞筋が狭小で深淺の差が大きいことから、実物の河道形状をそのまま反映した三次元流動計算は多大の計算負荷を生じる恐れがある。そこで本研究では、簡便で計算負荷の小さい高瀬川流動モデルの開発を目標としている。

小川原湖への塩分侵入量を計算する、簡便なモデルとして、流量を積分して海水フロントの擬似的位置を求めるモデルが提案されている²⁾。しかし、このモデルは半経験的なモデルであり、必ずしも高瀬川内部の流況を再現するものではないため、河道形状変更の影響評価に用いることはできない。

計算負荷が小さく、比較的精度よく流況の再現ができるモデルとして、MEL1D-MBが提唱されている³⁾。このモデルは鉛直方向に層分割されたボックスモデルであり、東京湾や瀬戸内海などの内湾の、中長期的な水質評価モデルとして使用されている。東京湾や瀬戸内海では、鉛直1次元のボックスを横断方向、または縦断方向に、1次元的に連結して二次元計算が行われている。そこで本研究では、ボックスを横断方向と縦断方向に2次元的に連結し3次元計算を行い、現地観測結果を再現し、湖内への塩分侵入量の長期予測モデルとしてのモデルの実用性を検討した。

2. モデルの概要

(1) 基礎方程式

MEL1D-MBモデルは、流速を潮汐成分と傾圧成分に分け、潮汐成分は長波成分のみ考慮した連続の式と運動方程式により決定されるものとし、傾圧成分は残りの項による運動方程式、連続式とを連立して求める。成分を分けて計算することにより、それぞれの成分の計算に対する最適な時間積分間隔を与えることができ、計算を効率よく行うことができる。

潮汐成分流速を u_{tide} 、傾圧成分流速を u_{bc} とすると、ブシネスク近似と静水圧近似を施した運動方程式、連続の式、水温、塩分の移流・拡散方程式から、式(1)から式

(6)が導かれる。

潮汐成分

$$\frac{\partial}{\partial t}(h+\eta) + \frac{\partial}{\partial x}\{u_{tide,i}(h+\eta)\} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_{tide,i}}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x_i} \quad (2)$$

傾圧成分

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{bc,i}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} \{(u_i + u'_i)(u_k + u'_k)\} \\ = -g \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{1}{\rho} \int \rho' dz \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} \{(T + T')(u_k + u'_k)\} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} \{(C + C')(u_k + u'_k)\} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

ここで、 u_i , u_j , u_k , u'_i , u'_j , u'_k は x , y , z 方向流速とその変動成分、 h , η は平均水位とその変動成分である。

水平方向と鉛直方向の乱流モデルについては、空間アスペクト比が大きいため、分離して考えることにする。すなわち、鉛直方向には成層を考慮した2方程式乱流エネルギーの式を基礎とし、水平方向には1方程式乱流エネルギーの式を基礎として考える。なお、これらの式には定常乱流状態の仮定が用いられている。

$$E_v = \left[\frac{l_v}{C_s} \left\{ \frac{K_{mv}}{\text{Pr}_t} N^2 + \frac{K_{mv}}{2} \left(\frac{\partial |u|}{\partial z} \right)^2 \right\} \right]^{2/3} \quad (7)$$

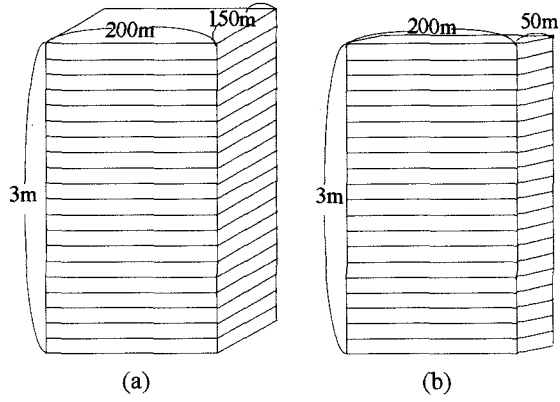


図-3 計算に用いたメッシュサイズ

$$K_{mv} = C_m E_v^{1/2} l_v \quad (8)$$

$$K_{hv} = \frac{K_{mv}}{Pr_t} \quad (9)$$

$$E_h = \frac{C_m}{2C_\varepsilon} |u|^2 \quad (10)$$

$$K_{mh} = C_m E_h^{1/2} l_h \quad (11)$$

$$K_{hh} = \frac{K_{mv}}{Pr_t} \quad (12)$$

$$Pr_t = Pr \cdot \left(1 + \frac{0.3 \cdot l_v N^2}{E_v} \right) \quad (13)$$

$$\begin{cases} C_m = 0.0865 \\ C_\varepsilon = 0.845 \\ Pr = 0.42 \end{cases} \quad (14)$$

ここで、 K_{mv} 、 K_{hv} 、 K_{mh} 、 K_{hh} は、それぞれ鉛直渦粘性係数、鉛直拡散係数、水平渦粘性係数、水平拡散係数、 l_v 、 l_h はそれぞれ鉛直方向、水平方向の代表スケール、 Pr_t は乱流プラントル数(Pr はプラントル数)、 C_ε 、 C_m はLES定数である。

(2) 計算領域および境界条件

計算に用いた地形構造を図-2に示す。計算領域は河口から沖へ1 km、湖口から湖心へ1 kmをそれぞれ上流端、下流端とした。また、図-3(a)、(b)に示すような200×150×0.15(m)、200×50×0.15(m)の、二種類のメッシュを混在させて40×60×20個用いた。河口から湖にむけてx座標をとり、右岸側から左岸側にむけてy座標をとった。

境界条件として上流端に塩分32.0 psu、下流端に塩分0 psuを与えた。水位は、上流端、下流端にそれぞれ河

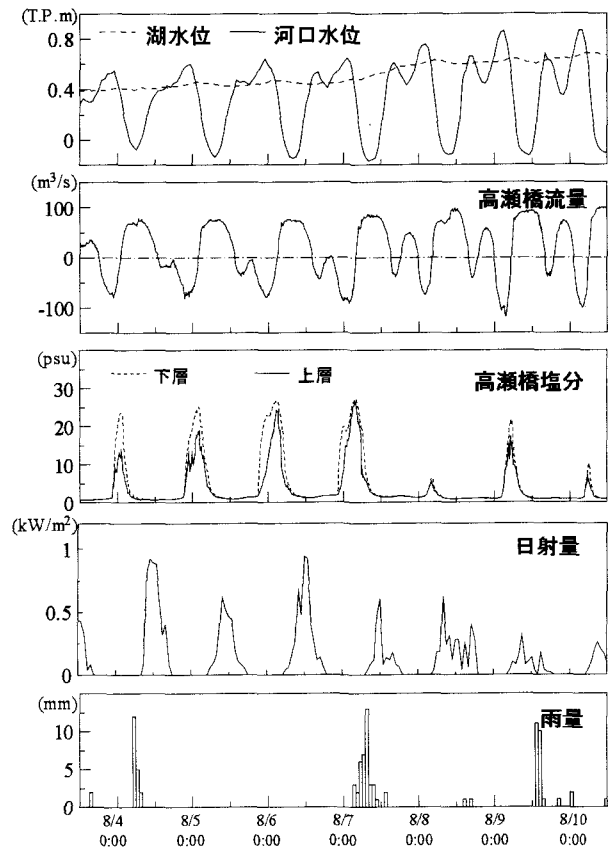


図-4 研究対象期間における湖水位、河口水位、高瀬橋流量、高瀬橋塩分、日射量、雨量。

口水位、小川原湖水位を与えた。気象条件については、現地観測期間中における八戸での気温、蒸気圧、風速、雲量、全天日射の実測データを与えた。それらのデータをもとに、潜熱、顕熱、日射、長波放射を計算し、水表面での熱の出入りを再現した。なお、初期状態としては、水温0℃、塩分0 psuとして与え、2日間の助走期間の後に現地観測結果と比較した。

3. 昨年の観測結果と計算結果

(1) 昨年の観測の概要

現地観測は2002年8月3日から8月10日の期間に行われた。図-1に示す高瀬川観測所(以降高瀬橋地点)では、常時、塩分、流速を計測しており、小川原湖総合観測所、河口観測所では、水位を計測している。観測期間中の水理諸量を図-4に示す。浅瀬の上流側(湖口側)と下流側(河口側)の滞筋に浅瀬をはさむようにしてサーミスターチェーンを設置し(上流側をM2、下流側をM1とした(図-1参照))、塩分水温計をそれぞれ河床から10 cmと190 cm、10 cmと150 cmの位置に設置し、それらの間に水温計を20 cm間隔で取り付けた。また、浅瀬には水温計、塩分水温計を設置して観測を行った。データの解析の際には塩分水温計における塩分と水温の相関から、水温計のデータを塩分に置換した¹⁾。

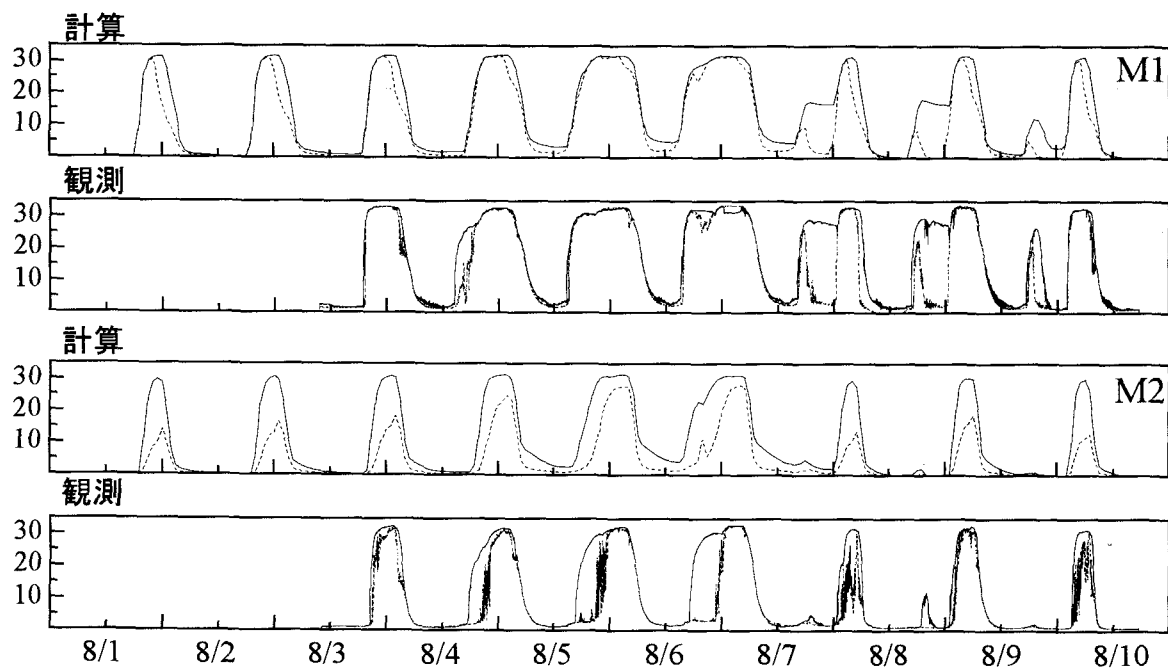


図-5 M1, M2地点における上層下層の塩分の時系列 (2002年8月1日から8月10日まで) .
観測結果と数値シミュレーションによる再現計算結果.

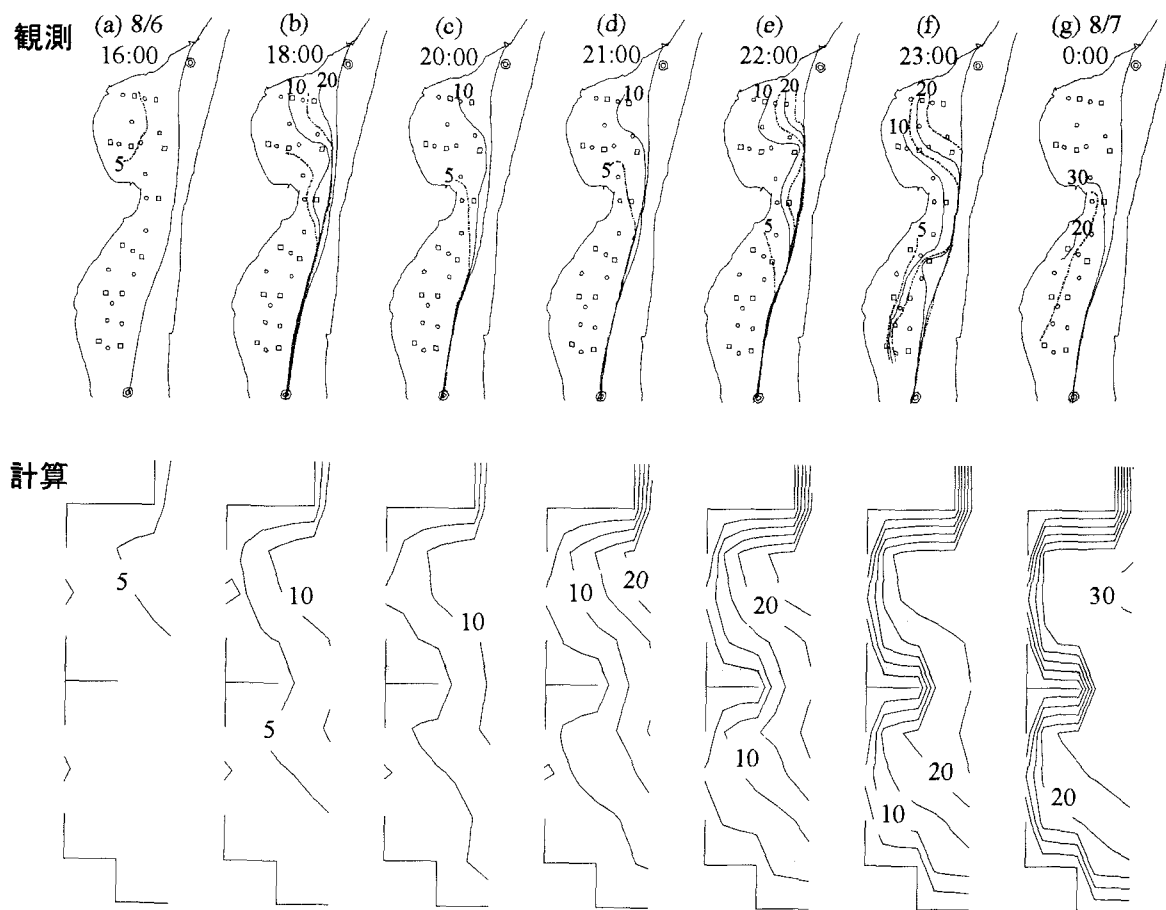


図-6 高瀬川浅瀬における塩分コンターの時間変化 (2002年8月6日16:00から8月7日0:00まで) .
観測結果と数値シミュレーションによる再現計算結果.

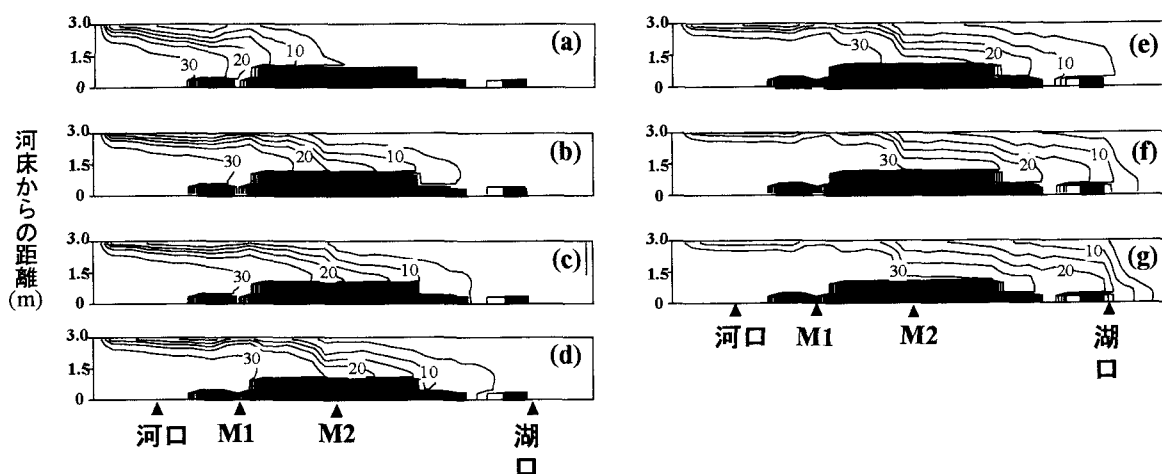


図-7 滞筋における塩分コンターの時間変化 (2002年8月6日16:00から8月7日0:00まで)

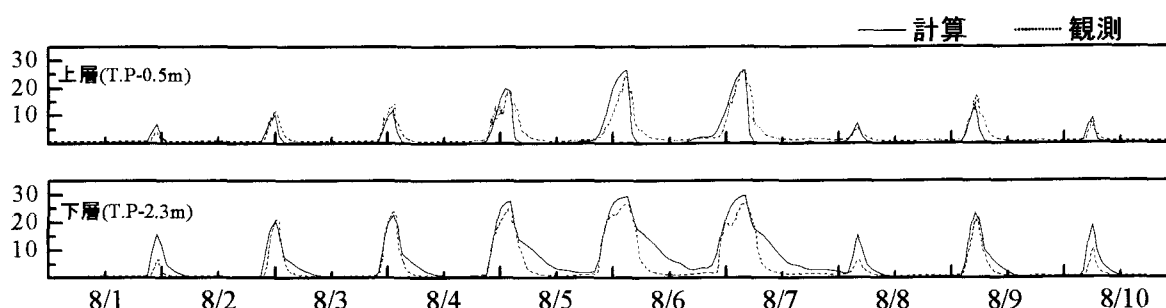


図-8 高瀬橋地点の上層下層の塩分の時系列 (2002年8月1日から8月10日まで)。
点線：観測結果，実線：数値シミュレーションによる再現計算結果。

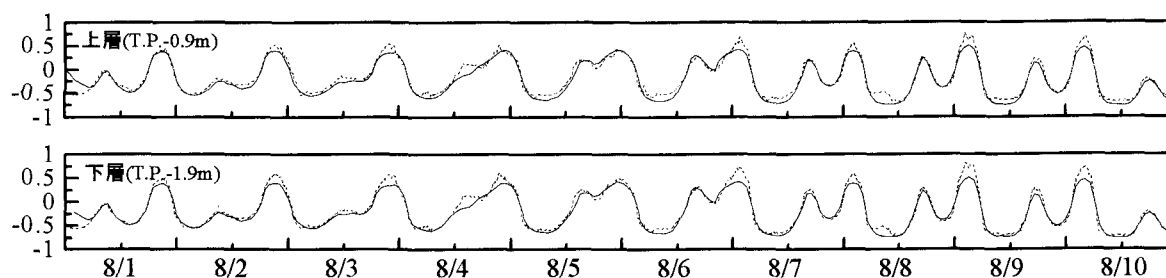


図-9 高瀬橋地点の上層下層流速の時系列 (2002年8月1日から8月10日まで)。
点線：観測結果，実線：数値シミュレーションによる再現計算結果。

(2) 現地観測結果と数値シミュレーションによる再現計算結果の比較

図-5に観測期間中のM1, M2地点における塩分の時系列データの計算値と観測値を示す。実線は下層値を、破線は上層値を示す。なお、計算値は、上層、下層の塩分計設置水深に対応するセルの値を示している。

観測期間を通して塩水遡上が起きており、M1地点とM2地点において特異な塩分時系列が得られている。例えば、8月7日15:00から8日0:00にかけてM1地点では下層に塩分20以上の水塊、上層には塩分0付近の水塊が存在し

ており、上下層ではっきりとした成層が形成されている。一方、M2地点では同様な現象が5日15:00から6日0:00にかけて発生している。その後は、両地点とも塩分濃度が同じ値を示している。数値シミュレーションによる計算結果は、この傾向をよく再現できている。

観測期間を通して最も塩水遡上が顕著であったのは、8/6-8/7にかけてである。その期間の塩水遡上時の浅瀬部での塩分コンターを、観測結果、計算結果を並べて図-6 (a)-(g)に示す。また、同時刻における滞筋の縦断塩分コンターの計算結果を図-7 (a)-(g)に示す。

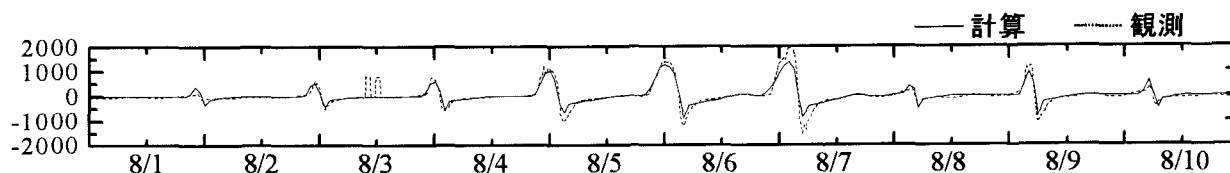


図-10 高瀬橋地点の塩分フラックス（2002年8月1日から8月10日まで）。

点線：観測結果，実線：数値シミュレーションによる再現計算結果。

成田らは、高瀬川の塩水遡上時の混合形態の差異について以下のように考察している。中規模の塩水遡上では、中下流部浅瀬に貯留されている河川水が滞筋表層に遅れて流出するために浅瀬よりも上流の地点では成層状態が顕著になる。一方、日潮不等の大きな場合には、第一満潮により浅瀬部分の河川水が塩水に置換されるため、大規模な塩水遡上の生じる第二満潮時には全層混合状態になりやすい。

図-6、図-7を見てみると、数値シミュレーション結果は、観測で示された日潮不等による塩水侵入の傾向を再現しているといえる。例えば、8/6 16:00～8/7 22:00にかけて滞筋への塩水侵入が顕著であり、浅瀬への塩水侵入が大規模になるのは日潮不等の高高潮をむかえる8/6 22:00を過ぎてからである。また、計算では8/6 16:00～8/7 22:00までの浅瀬での塩分値が、観測結果と比べて規模の大きなものとなっているが、これは横断方向のメッシュ数が数個しか存在していないため塩分の伝達が速くなってしまうことが原因ではないかと考えられる。しかし、本研究で用いているモデルは、高瀬橋地点での塩分量の推定を目的としたモデルであり、空間的に厳密な塩分の分布を再現することを目的としていないため、ある程度傾向を把握できている点は評価できると考えられる。また、図-7から、滞筋での塩水楔の挙動を見てみると、M2地点の直前で、成層状態が顕著になっていることが分かる。これは、M2地点で、浅瀬に貯留された河川水が滞筋表層に流出し成層状態を顕著にするという、昨年の推察を裏付ける結果である。

(3) 高瀬橋地点におけるモニタリングデータと計算値の比較

高瀬橋地点（高瀬川観測所、図-1参照）では常時、塩分、流速のモニタリングが行われている。そのモニタリングデータと計算結果を図-8～図-10に示す。図-8は高瀬橋地点の塩分を、図-9は同地点の流速を表す。また、これらの値から計算される同地点における塩分フラックスを、図-10に示す。図中実線が計算値、破線は実測値である。

この地点は湖口に近く、ここで得られるデータは、湖への侵入塩分を評価するうえでの指標となる。図-8、図-9、図-10から、塩分、流速、塩分フラックスの計算結果はモニタリングデータをよく再現しており、この計算モデルで湖への侵入塩分の評価をおこなえる事を示している。

4. まとめ

- (1) 少ない計算格子 $40 \times 6 \times 20$ を用い、MEL1D-MBにより三次元計算を行ったが、M1とM2地点における観測結果を良好に再現することができた。
- (2) 鉛直方向に細かなメッシュを与え、成層構造の再現性向上を促した結果、浅瀬における塩分の空間分布もある程度良好に再現できた。
- (3) 小川原湖に注ぎ込む塩分濃度の検討のため、高瀬橋における流速と塩分濃度の比較を行った結果、MEL1D-MBが塩分フラックスの推定に対して有力なモデルとなることが分かった。

謝辞：コードの変更には、国土政策総合研究所交流研究員高尾敏幸氏（株式会社エコー）に御助力いただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 成田舞，石川忠晴，藤原広和，和光一紀：高瀬川中下流部の浅瀬が塩水遡上に及ぼす影響について，水工学論文集，第47巻，pp.955-960，2003。
- 2) 石川忠晴，坂井雅之，小沢康彦：小川原湖に侵入する塩分の計算モデルの検討，水工学論文集，第35巻，pp.191-196，1991
- 3) 古川恵太，中山恵介，岡田知也，宮野仁：環境施策に資する内湾域の総合的な環境把握を目指したMEL1D-MBモデルの構築，国土技術政策総合研究所研究報，NO.1, pp.1-16，2001。

(2003. 9. 30受付)