

小川原湖の塩水流入特性に関する数値解析

NUMERICAL ANALYSIS OF SALINE INTRUSION IN LAKE OGAWARA

西田 修三¹ ・ 佐野 俊幸² ・ 川井 晴至³ ・ 中辻 啓二⁴

Shuzo NISHIDA, Toshiyuki SANO, Seiji KAWAI and Keiji NAKATSUJI

¹ 正会員 工博 大阪大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

² 学生会員 大阪大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

³ 大阪大学 工学部土木工学科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

⁴ 正会員 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

Numerical analyses using a quasi-three dimensional hydrodynamics model were made to investigate a saline intrusion and flows around the shallow mouth of the Lake Ogawara. Compared with field data, the model was proved to represent peculiar behavior of the saline intrusion, and numerical results showed that geographical features of the lake mouth greatly affected the characteristics of saline intrusion. By the calculation of salinity flux at downstream boundary, it was found that net amount of salinity remaining in the lake after the first tidal cycle was about 50% of the intrusion salinity. Moreover, contrary to our prediction, the numerical results revealed that digging of the lake mouth would not necessarily cause the increase of saline inflow.

Key Words: brackish lake, saline intrusion, tidal transport, and numerical analysis

1. はじめに

汽水湖はその特異な水環境から豊かで多様な生態系を有し、良好な漁場として古来より利用されてきた。汽水湖において形成される生態系は塩分環境に大きく依存し、その保全と予測には塩水の侵入・循環過程を把握する必要がある。例えば、汽水湖の重要な水産資源であるヤマトシジミは外海水と湖水が微妙に混じり合う浅水域に生息し、水位バランスと地形構造で決定される塩分環境に大きく左右される。本研究が対象とする小川原湖の湖口浅水域も、ヤマトシジミの生息・産卵に適した良好な塩分環境を形成している。山室¹⁾によれば、汽水湖沼での多毛類や貝類の分布は、動物を採集したときの底層水の塩分との関係で形成されたのではなく、それらの幼生が拡散する時期の塩分や流れの有無が生き残りに影響し、その後の成体分布の大枠が決定されると述べている。また、菊地²⁾は、河口に生息する底生生物の研究において、幼生が底層に生じる高塩分水の逆流を利用して上流側に遡上し、生息域から下流に流下するの

を防いでいると報告している。

その一方で、小川原湖は豊富で安定した水量を有することから、利水のための淡水化が計画されていたが、用水の将来需要の低下や生態系保全の見地から計画の見直しが諮られている。また、小川原湖は広大な湖面積を有するため、治水面からは大きな洪水緩和機能をもつとも言える。しかし、ひとたび高水位に達すると河道部に繋がる下流端がボトルネックとなり、また、感潮域であることも作用して、迅速かつ十分な排水がなされない。その結果、湖岸周辺が長期間にわたり浸水状態が続くことになり、総合的な治水対策から河道部とともに湖口の改修も必要となる。しかし、疎通能向上のための拡幅や掘削等の地形改変は平水時の塩水遡上を促進し、湖内の塩分環境を急変させ生態系に多大な影響を及ぼすことが懸念される。

本研究では、小川原湖湖口の流動と塩水の流入流出機構を明らかにするために、準3次元流動モデルを用いた解析を行う。モデルの適用性を現地観測データを用いて評価し、塩水挙動の解析を行う。また、地形改変が及ぼす流動と塩分環境の変化についても、モデル計算によりその影響を明ら

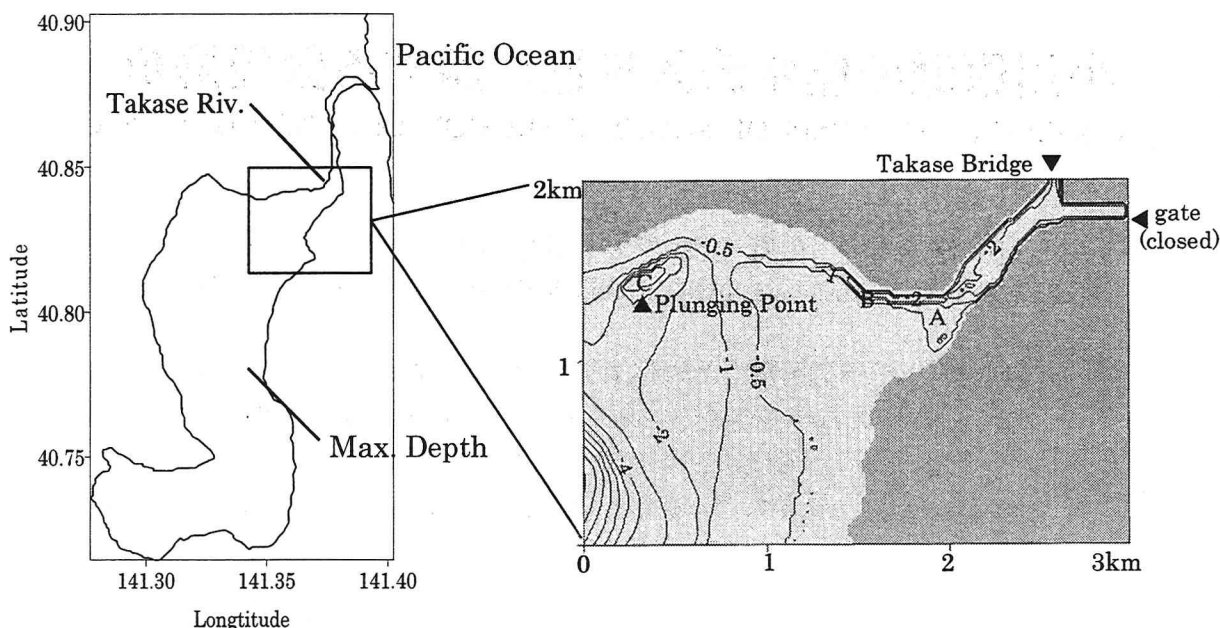


図-1 小川原湖湖口浅水域

かにする。

2. 湖口塩分環境の実態

青森県東部に位置する小川原湖(図-1)は、湖面積 63km²、平均湖水位 T.P+0.4m、平均水深 11m、最大水深 25m を有し、高瀬川の河口上流 6.6km の感潮域に位置する汽水性の湖である。大潮時には湖水位と外海水位の逆転により塩水が河道部を遡上し、流入した塩水の一部が湖内に貯留される。そして、約 20m 以深の底層に貯留された塩水が徐々に上層に拡散し、濃度約 1~2psu の表層水が河道部を流出することにより、長期的な塩分バランスが保たれている。塩水の流入量は主として湖水位と潮位によって決定されるが、高瀬川を遡上し湖内に流入した塩水の多くは転流後その大半が流出し、残存した一部の流入塩水が湖内に貯留される。このような湖口における塩水挙動の特性は地形構造と大きく関わっていることが観測によって確認されている^{3),4)}。しかしながら、石川ら⁵⁾、長尾ら⁶⁾が述べているように、こうした塩水侵入は年に数回しか起こらない間欠的な現象であり、降雨や気圧など不確定な気象因子に左右されるため流入の予測は難しい。さらに、その時空間特性を明らかにするに十分な観測データは現在のところ少ない。

これまで、湖口浅水域の塩水侵入に関しては 1993 年 7 月と 11 月³⁾、2000 年 7 月⁴⁾にそれぞれ 1 週間程度の観測を実施している。湖口浅水域に

水温計を多点配置し、また、要所に塩分計を数点設置し連続計測することにより、流入塩水の挙動を捉えている。図-2 は、流入塩水の拡がり状況を捉えた水温分布の一例である。図中の時間は、高瀬橋(河口上流約 5.5km、湖口下流約 1.0km、図-1 参照)において逆流を感知してから経過時間を表している。また、この期間、水温 19℃の水塊は塩分約 25psu の流入塩水に、水温 24℃は 2psu の流出湖水にほぼ対応している。同図より高瀬川を遡上し湖内に流入した塩水が、湖口浅水域の北側の渚に沿って湖内に侵入している様子がよくわかる。一方、転流後は南側の水塊も集めながら北側浅水域に一部塩水を残すように、高瀬川に流出することも観測結果から明らかになっている。このように湖口では渚の存在により、湖内に流入した塩水の多くは再び高瀬川に戻され、河道部複断面と同様な挙動を示すことがわかった。

図-3 は、後述の数値計算の境界とした高瀬橋に設置された流速計(ADP)と水温計(MDS-T)によって得られた鉛直構造の経時変化を示したものである。なお、図-3(a)に示す流速値は正值が順流を、負値は逆流を表している。逆流の最大流速は 90cm/s(断面平均 60cm/s)、順流は 60cm/s(断面平均 40cm/s)を示し、逆流時の流速値が大きいことが認められる。また、ここでは図示しないが、断面平均流速の時系列は、順流時に浅水効果により多少歪んだ波形を示すものの、潮汐に対応して概ね半日周期の sin 波形状を示していた。なお、断面平均流速の算定には西田ら⁸⁾の方法を用いている。さらに、水

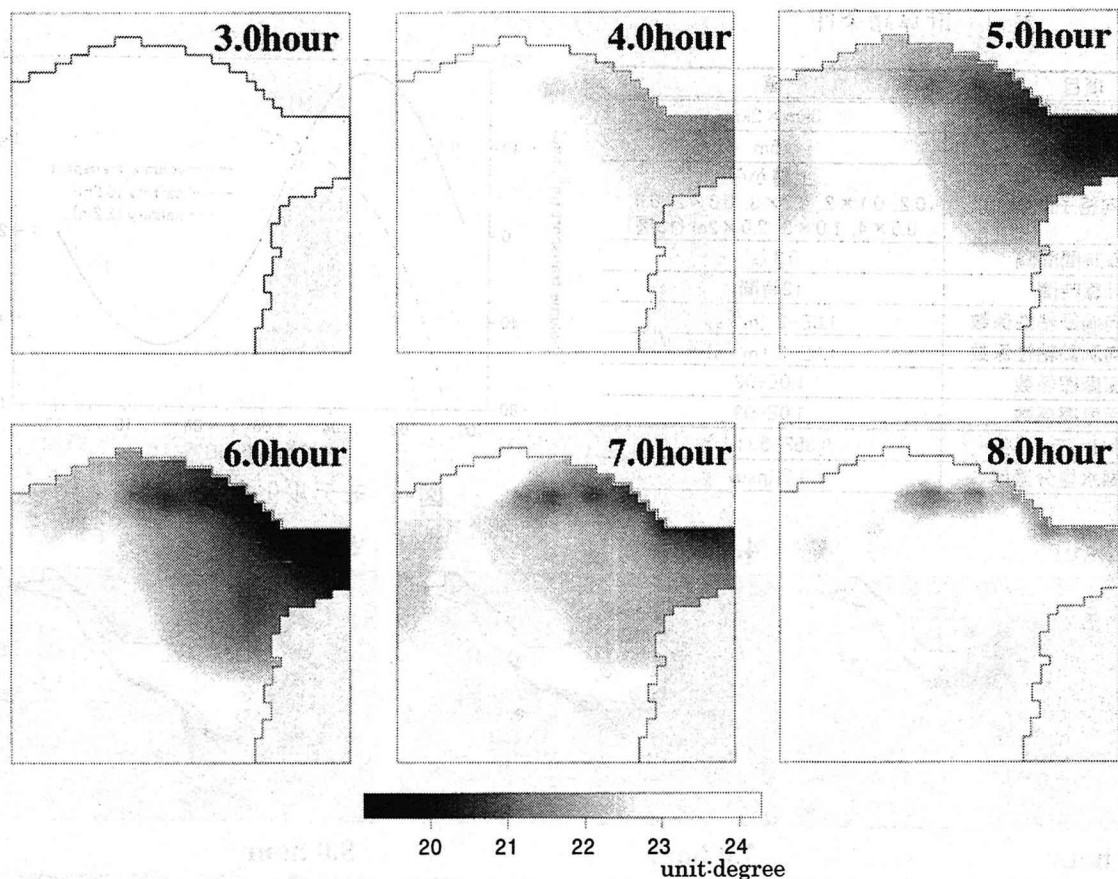


図-2 塩水の侵入にともなう湖口の水温変化（2000年7月3日）

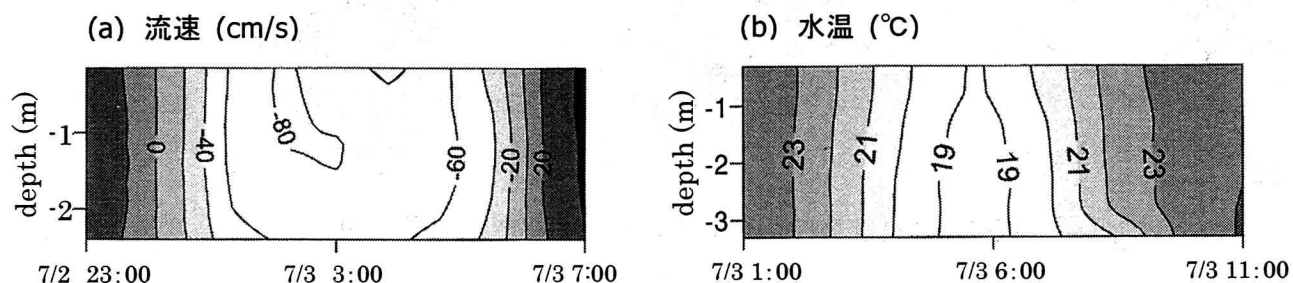


図-3 高瀬橋における流速・水温構造の経時変化（2000年7月3日）

温構造は、逆流時間の経過とともに水温が低下し、鉛直方向にも勾配を有することがわかる。一方、順流に転じると、底層に低温の高塩分水塊を残しながら流出していることがわかる。

3. 数値計算方法

数値シミュレーションは放水路（閉扉）を含む湖口浅水域 $3\text{ km} \times 2\text{ km}$ の計算領域で行った。計算領域の大半が 1 m 以浅であり、さらに狭小な滞筋を表現するために、水平方向の計算格子幅は 25 m 、鉛直方向は上層から 0.2 m , $0.1\text{ m} \times 2$, $0.2\text{ m} \times 3$, $0.3\text{ m} \times 2$, 0.4 m , $0.5\text{ m} \times 4$, $1.0\text{ m} \times 3$, $2.0\text{ m} \times 2$ の計18層の不等間

隔とした。全域で塩分 1.5 psu の静止状態を初期条件とし、時間ステップ 0.3 秒 で順流半潮汐（6時間）の助走計算を行った後に、1潮汐（12時間）の計算を実施した。流動モデルは準3次元モデル（ODEM, 中辻⁹⁾）を用いた。ただし、今回の計算では、渦動粘性係数は水平及び鉛直ともに $1.0 \times 10^{-2} (\text{m}^2/\text{s})$ の一定値とし、また底面摩擦係数は 1.0×10^{-2} とした。その他、詳細を表-1に示す。

境界条件に関しては、高瀬橋において実測された流速と水温・塩分構造の特性を考慮し、図-4のような単純なモデル化を行った。まず、流速は逆流と順流のピーク値が異なることを考慮して、

(1) 式に示す半日周期の正弦関数を組み合わせた非対称形で与えた。なお、境界で設定したメッ

表-1 計算諸条件

項目	値
計算領域	3km × 2km
x, y方向格子間隔	25m
z方向格子間隔	上層から 0.2, 0.1 × 2, 0.2 × 3, 0.3 × 2, 0.4, 0.5 × 4, 1.0 × 3, 2.0 × 2m (18層)
計算時間間隔	0.3 (s)
計算時間	12時間
水平方向渦動粘性係数	1.0E-2 (m ² /s)
鉛直方向渦動粘性係数	1.0E-2 (m ² /s)
底面摩擦係数	1.0E-02
壁面摩擦係数	1.0E-03
コリオリパラメータ	9.35E-5 (1/s)
初期湖水塩分濃度	1.5 (psu)

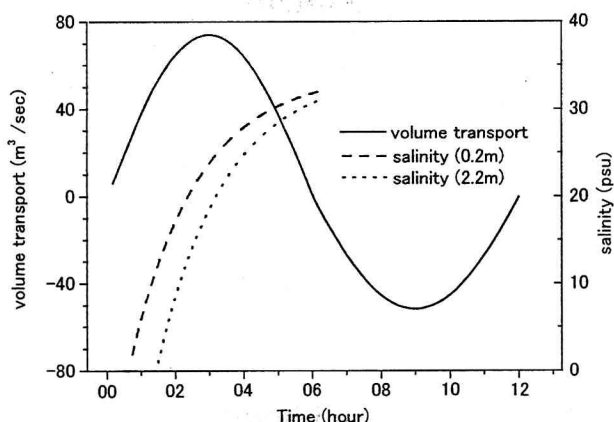


図-4 モデル化された境界条件

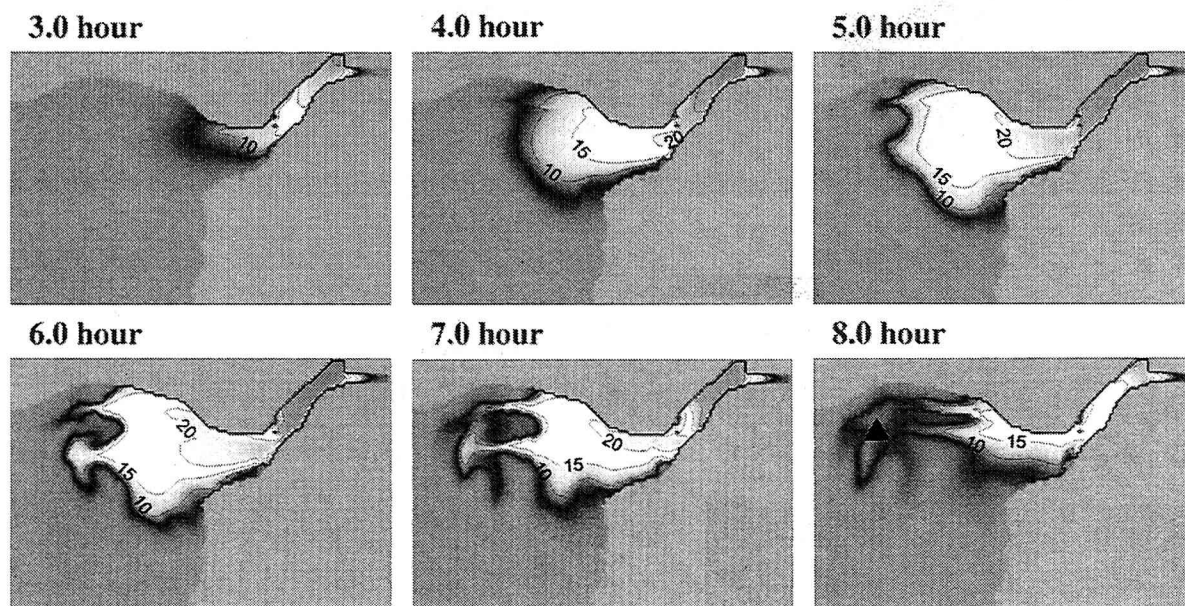


図-5 数値計算による塩水侵入状況 (図中単位: psu)

ユ数は水平方向に3つであり、壁面の逓減を考慮できないため、ここでは流速を断面一様に設定した。塩水濃度は実測された塩水フロントの緩混合形態を考慮して、(2)式に示すように各水深の塩分上昇を指数関数で近似し、さらに各水深におけるフロント感知時刻に底層から表層まで線形に1時間の時間差(位相差)を与えた。ただし水平方向は一様とした。

$$Q(t) = Q_0 \sin(2\pi t/T) \quad (1)$$

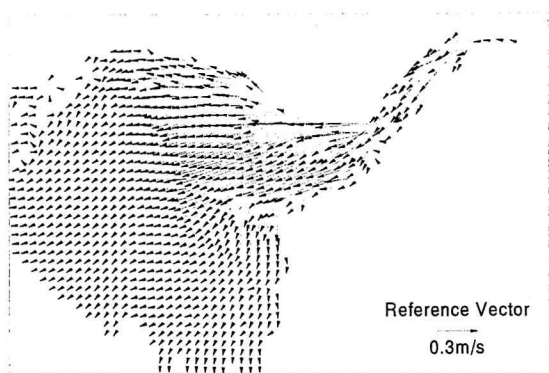
$$S(t,z) = S_0 \exp(-\alpha t + \beta(z)) \quad (2)$$

ここで、 Q_0 :最大流量(逆流75m³/s, 順流55m³/s)
 T :周期(12時間), S_0 :海水の塩分濃度(34psu),
 α :時間変化係数(0.5), $\beta(z)$:水深方向の位相変化(最大1時間)。

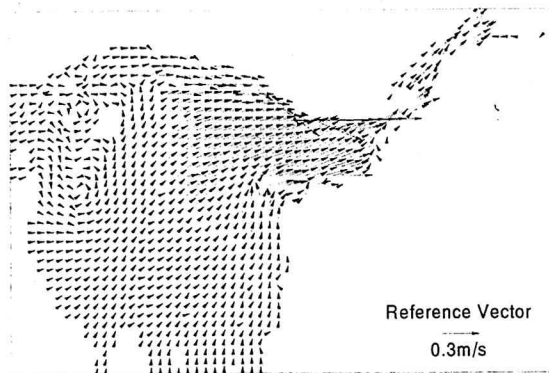
4. 計算結果

(1) 塩水挙動の解析

図-5は、計算によって得られた底層部の塩水侵入状況である。時間は逆流開始からの経過時間を示している。逆流3時間後に塩水フロントが湖口に到達し、その後北岸寄りの湾に沿って流入している様子が計算においても再現されている。その後、転流により塩水フロントは後退するが、潜り点付近や湾に塩水が残存し、さらに、潜り点(図中▲)付近の塩水塊が重力密度流となって斜面を下る様子も確認できる。図-6は、逆流および順流最強時の表層流動ベクトルを示したものである。逆流時には、河道部において約30cm/sを示しているが、湖口から湾に沿って500mにわたり50cm/s以上の強い流動が生じていることから、狭小な湾筋に



(a) 逆流最強時



(b) 順流最強時

図-6 逆流及び順流最強時における表層流動ベクトル

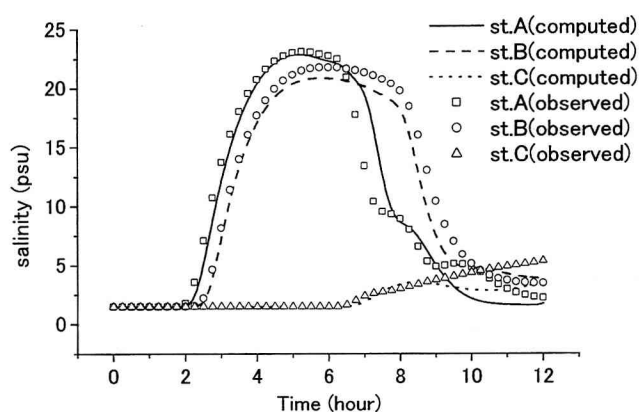


図-7 測点A, B, Cにおける底層塩分濃度の経時変化

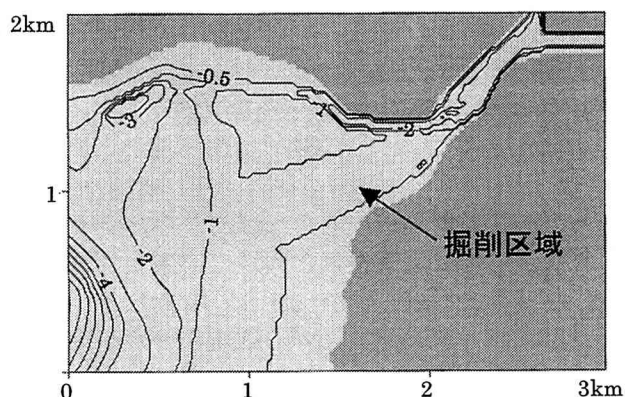


図-8 水路掘削後の湖口浅水域

よる流速の増大が塩分輸送に大きな役割を果たしていることがわかる。一方、順流時には、湖口浅水域においてほぼ様な流速で流出していることがわかる。図-7には計算結果とともに、1993年11月13日に図-1に示した測点A～Cにおいて実測された塩分の経時変化もあわせて図示した。実測流量が無い場合、この時の河口と湖の水位差からピーク流量を予想する⁸⁾と、おおよそ逆流 $80\text{m}^3/\text{s}$ 、順流 $60\text{m}^3/\text{s}$ と得られ、計算条件とほぼ同程度であった。なお、測点Aは湖口、測点Bは滞筋、測点Cは塩水の潜り点付近を代表している。塩分濃度のピーク値は、湖口において約 22psu 、潜り点付近では約 5psu である。実測結果と計算結果には良い対応が見られ、特に、流出時に測点Aが測点Bより塩分濃度が早く低下している特性が計算結果にも現れている。これは、逆流時には塩水がフロントをもって流入するのに対し、順流時には湖口浅水域では周囲の水塊を取り込みながら流出していることを意味している。また、転流後にも測点Cの塩分濃度が上昇しているのは、潜り点近辺に到達した水塊が湖心に向けて流下することによるものである。ここで、最終的に湖内に貯留される塩

分量を定量的に評価するため、高瀬橋における通過塩分量を算定した。その結果、今回のケースでは総流入塩分量が $1.1 \times 10^7 \text{kg}$ に達するのに対し、約半分の $0.5 \times 10^7 \text{kg}$ が湖に残存することがわかった。ただし、本結果は一潮汐のみの計算から得られた塩水の初期流入に関する結果である。湖口浅水域に残留する塩分量も含まれるため、長期的に湖内に貯留される塩分量はこれより減少するものと考えられる。また、数潮汐連続して起こる塩水流入の詳細を把握するためには、河道部境界における流入塩水の境界条件を適切に与える必要があり、今後の課題と考えている。

(2) 地形改変による流動変化

塩水流入に及ぼす地形の影響を知るために、一例として洪水時の疎通能向上に向けた掘削を想定し、図-8に示すように、湖口に水深 0.9m の漸拡水路を掘削した仮想地形の場合のシミュレーションを行った。なお、掘削体積は $1.8 \times 10^5 \text{m}^3$ である。図-9に見られるように、塩水フロントは掘削した水路に沿って流入し、滞筋への流入が減少する。転流後、一部塩水塊は掘削部から沖の斜面を流下す

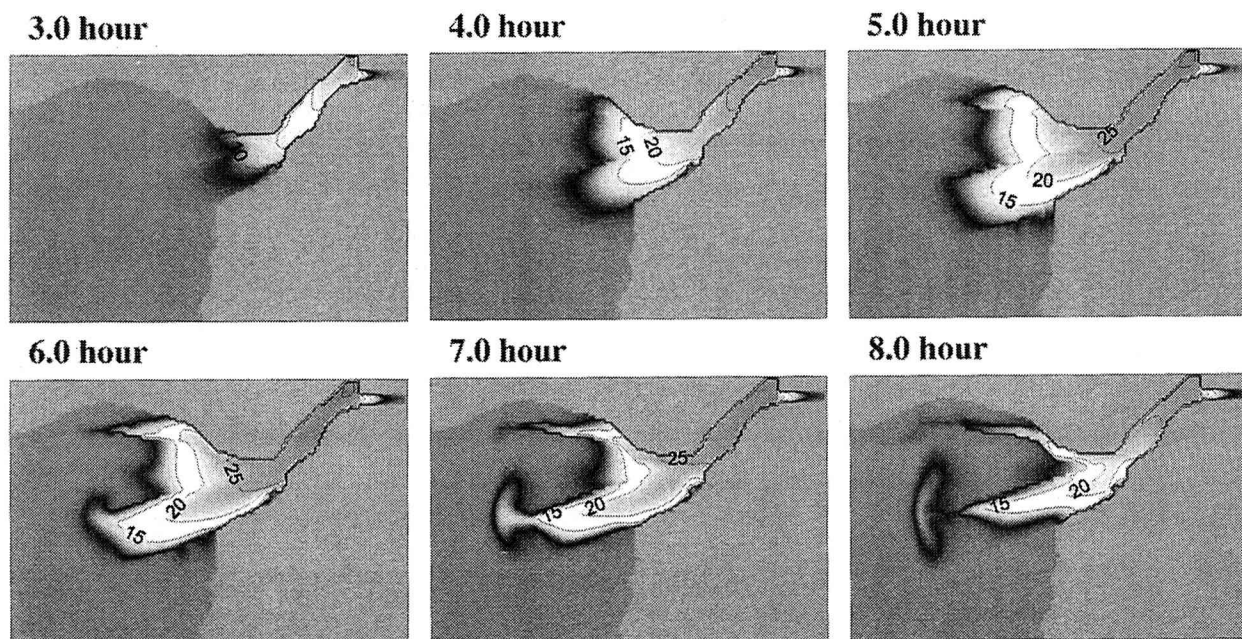


図-9 掘削地形における塩水侵入状況 (図中単位: psu)

るものの、現況地形のような滞筋からの流下は見られなかった。現況地形と同様に通過塩分量を算定したところ、総流入塩分量 $1.1 \times 10^7 \text{ kg}$ に対して残存量は $0.35 \times 10^7 \text{ kg}$ と得られ、現況より残存量が低下することがわかった。これは、湖口掘削によって湖内への塩水の実質流入量が増加するであろうという予測に反し、掘削による湖口の容量増加が塩水の一時的な貯留の役割を果たし、塩水フロントの潜り点への到達を遅らせ、最終的に塩水の実質流入量が減少することに起因している。

5. おわりに

小川原湖の湖口浅水域における塩水流入特性について、数値計算による解析を試みた。その結果、湖口浅水域の地形構造に依存した塩水流入の特性を捉えることができた。また、高瀬橋において通過塩分量を算定することで、湖内に貯留される塩分量の定量的な評価も行うことができた。

さらに、地形改変のシミュレーションも試み、水路掘削が塩水侵入に大きな変化を与えていることが明らかになった。特に、湖口掘削が必ずしも塩水流入量の増加を引き起こさないという興味深い結果が得られた。この結果は、塩分環境を変えることなく疎通能向上のための地形改変が可能であることを示唆しており、環境保全と治水の両立を目指す河川湖沼管理上、有益な知見と考えられる。

合開発工事事務所から貴重なデータの御提供と観測に際し御高配を頂いた。また、小川原湖漁業協同組合には観測に際し多大な御協力を頂いた。記して感謝の意を表するとともに、本研究の一部は文部省科学研究助成の補助を受けて実施できたことを付記する。

参考文献

- 1) 山室真澄：日本の汽水性海跡湖における多毛類・貝類の分布とそれを規定する環境条件，東京大学大学院理学系研究科地理学専門課程修士論文，p106，1986.
- 2) 菊地泰二：海産ベントス幼生生態学の現状，月刊海洋，23，pp.617-622，1991.
- 3) 西田修三：小川原湖の塩分流入過程に関する現地観測，土木学会東北支部技術研究発表会，pp.131-132，1995.
- 4) 鶴田泰士 他：小川原湖における塩水流入の現地観測，水工学論文集，vol.45，2001.
- 5) 石川忠晴 他：小川原湖に侵入する計算モデルの検討，水工学論文集，vol.35，pp.191-196，1991.
- 6) 長尾正之 他：小川原湖への塩分侵入現象の確率統計的考察，水工学論文集，vol.40，pp.583-588，1996.
- 7) 藤原広和 他：高瀬川の複断面河道部における塩水遡上特性，水工学論文集，vol.44，pp.1005-1010，2000.
- 8) 西田修三・中辻啓二：緩混合河川における流量と塩分輸送量の算定，水工学論文集，vol.43，pp.869-874，1999.
- 9) 中辻啓二：海洋閉鎖性海域，数値流体力学，第4巻，第4号，pp.306-332，1996.

謝辞：本研究を実施するにあたり、建設省高瀬川総

(2000.10.2 受付)