

小川原湖に侵入する塩水傾斜プルームの 3次元数値流動解析

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL FLOW ANALYSIS OF THE INCLINED SALINE PLUME INTRUDING INTO LAKE OGAWARA

中村恭志¹・眞貝憲史²・石川忠晴³

Takashi NAKAMURA, Norihito SHINKAI and Tadaharu ISHIKAWA

¹正会員 理博 東京工業大学大学院准教授 総合理工学研究科環境理工学創造専攻
(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259番)

²工学 東京工業大学大学院修士課程 総合理工学研究科人間環境システム専攻
(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259番)

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

A three-dimensional simulation was conducted on an inclined saline plume in Lake Ogawara. Because the plume in the actual lake had a far larger spatial scale than that in the laboratory experimental flume, many field measurements had been conducted eagerly to grasp the plume's physical features such as the entrainment coefficient. However, the past field measurements were spatially limited along the expected flow line of the plume, and the three-dimensional spatial features such as the plume's width and actual path on the inclined slope are not grasped in detail. In this work, by conducting a numerical simulation of the plume with the actual three-dimensional topographic condition of Lake Ogawara, the three-dimensional features of the inclined saline plume was investigated. The numerical results showed the plume changes its flow direction according to change of lakebed, and its width is kept several hundreds meters.

Key Words : Lake Ogawara, inclined saline plume, three-dimensional flow simulation, entrainment coefficient

1. はじめに

小川原湖は青森県東部に位置する汽水湖である。ヤマトシジミを始めとした豊富な水産資源を産出する水域となっている。小川原湖は最深部で水深26mと海岸に近い汽水湖としてはかなり深い湖である。小川原湖の水位は海水面との水位差が小さく、海水位が湖水位より高くなる場合に時折全長約6kmの高瀬川を通じて海水が湖内へ侵入する。侵入した塩水は塩水傾斜プルームを形成しつつ傾斜面を深部に向けて流下していく。その結果、通年で塩分成層が形成され、10psu以上の高塩分水層が底層付近に存在している。

塩水層内部は常に嫌気状態であり、未分解の有機物、硫化物や種々の栄養塩などが溶解しており、魚類・貝類

など水生生物は生息できない水質となっている。秋季から冬季にかけて継続的に吹く強風により、下層の塩水塊の一部が上層混合層に連行されることが明らかとなっている^{1,2)}。現在のところ上層の体積の方が塩水層よりはるかに大きい為、底層塩分水の連行による上層の水環境への大きな影響は見受けられない。しかし原因は不明であるが、1999年から2009年の10年間で躍層水深が20mから16m付近へ上昇したことが観測されており²⁾、今後地球温暖化などの影響で海水位が上昇した場合、小川原湖への海水侵入の頻度が増加して、さらに塩水層が上昇する可能性がある。それに伴い、下層塩水層から上層への連行輸送量が増加して湖の水環境を破壊することが懸念される状況にある。

下流河道工事により塩水躍層が上昇した北海道網走湖では、富栄養化によるアオコ、青潮の発生など水質障害

が既に顕在化³⁾しており、このような状況が小川原湖で生じる前に塩水層の今後の変化を予測し、対策を図ることが肝要である。そのためにはまず、底層塩水層の供給源である塩水傾斜プルームについて基本的な特性を把握することが必要である。

小川原湖における塩水成層に関わる研究は過去に势力的に行われており^{4,5)}、塩水傾斜プルームに関しては長尾⁶⁾と石川⁷⁾が現地観測の結果とプルーム流下の連行係数の推算について報告している。しかしこれら観測では、想定される流路に沿った観測による流下及び鉛直方向の鉛直二次元的なプルーム性状の把握に留まっており、三次元的に変化する斜面形状の影響やプルームの横断方向特性などについて検討はなされていない。そこで本研究では三次元密度流数値モデルを適用した再現計算を行い、実際の小川原湖斜面地形上での塩水傾斜プルームの流動状況を把握することを試みた。またプルームの基本特性を表す連行係数について計算結果から算出を行い、既往の現地観測による値との比較・検討も行った。

2. 対象水域の概要

(1) 小川原湖の概要

小川原湖の形状を図-1(a)に示す。湖面積(63.2km²)では我が国で第11位の湖である。平均水深は約11m、最大水深は約26mである。主要な流入河川はいずれも南西部に流入し、流出河川は北東部の高瀬川のみである。高瀬川の途中からは人工放水路が太平洋まで開鑿されているが、洪水時以外はゲートが閉じられている。常時の湖水位はT.P.0.3m~0.5m程度で、大潮時に潮位が湖水位を長時間上回ると塩水が高瀬川を遡上し、小川原湖へ流入する。この塩水侵入は気圧変動など気象因子の影響によりかなり不規則に生じるが、過去の調査では6~7月及び11月~1月に大規模な侵入が生じ易いことが知られている⁸⁾。小川原湖に侵入した塩水は、水深5m以浅の浅瀬を通過する際に湖水の下に潜り込み、その後、図-1(a)の斜線で示した斜面を塩水傾斜プルームとなって流下していき、湖心部に塩分層を形成する。

(2) 塩水傾斜プルームの観測例

石川と長尾らにより塩水傾斜プルームの現地観測が過去数回行われている。このうち、1992年6月29日から7月2日の間に行われた観測ではプルーム流下の観測に成功しており⁶⁾、本研究で用いる数値解析モデルの検証に観測結果を使用することが出来る。測点(St.A~D)の位置を図-1(b)に示す。図-2の滞筋縦断形状に示すように、測点は約1/250のほぼ様な斜面勾配上に直線的に配置されており、浅瀬からSt.Aの間の上流側では斜面勾配はやや急となっている。各測点にはメモリー式サーミスタチェーンが配置され水温の経時変化が測定される一方、

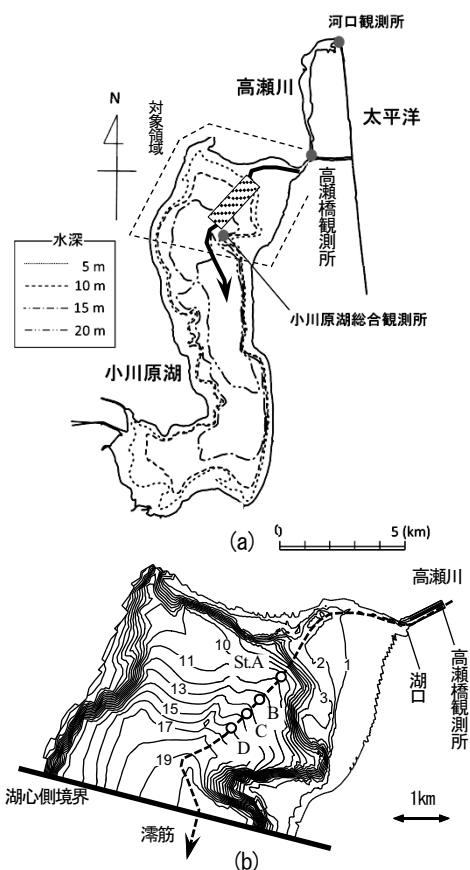


図-1 小川原湖の(a)概況と(b)研究対象領域の水深図

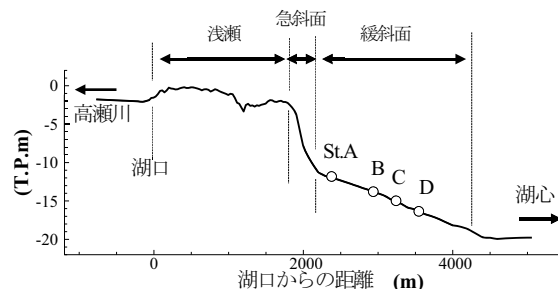


図-2 湖底標高の縦断形状

船による移動観測でSt.A~D地点での塩分・水温鉛直分布と、St.Bにおいて流速鉛直分布が測定されている。

3. 塩水傾斜プルームの数値解析

(1) 数値解析モデルの概要

数値モデルには筆者らが開発した貯水池流動モデル Tokyo Institute of Technology – Water Reservoir Model (TITech-WARM)を使用した⁹⁾。基礎方程式は三次元非圧縮・非静水圧 $k-\epsilon$ 乱流方程式を用い、塩分と水温の輸送方程式を連立させて、流速、塩分、水温、乱流諸量、及び水位の空間分布の時間変化を解析する。方程式の離散化には高精度補間法のCIP法と動的適合格子のSoroban格子¹⁰⁾を使用しており、過去に小川原湖における密度躍層付近での混合解析²⁾や、利根川汽水域における塩水流

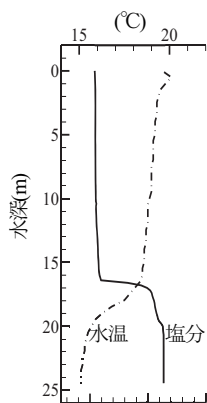


図-3 塩分・水温鉛直分布

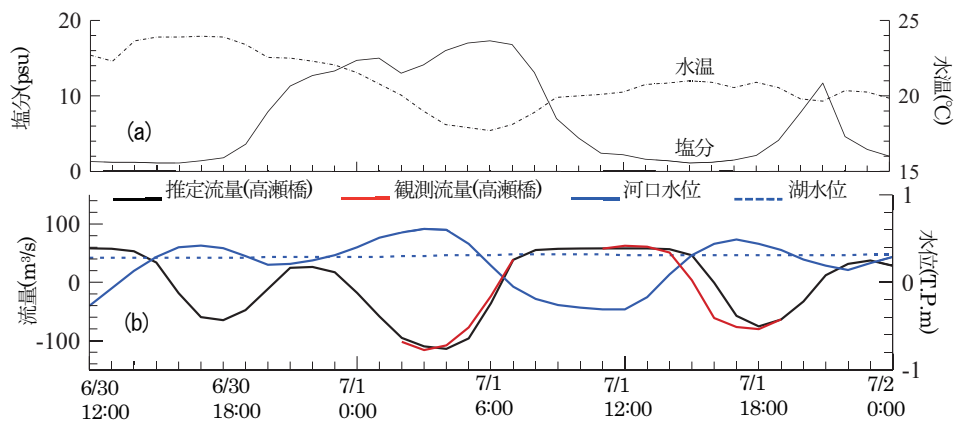


図-4 高瀬橋観測所における水理諸量。(a) 観測塩分(実線)と水温(破線)，(b) 観測流量(赤線)及び河口・湖水位から推定した流量(黒線)。

動解析¹¹⁾で密度流現象を精度良く再現した実績がある。

(2) 計算条件

長尾らによる1992年夏期の集中観測では7月1日未明から午前中にかけて大規模な塩水プルームの発生が観測されている。そこで、計算の対象期間を観測期間を含む1992年6月30日12:00～7月2日0:00とし、計算条件は以下の様に設定した。

a) 地形条件

3次元計算の高計算負荷を避け、斜面を出来るだけ細かい格子で表現するために、計算領域は図-1(b)に示す湖北東部のみに限定し、高瀬橋観測所と河口より5kmの範囲とした。湖底面標高は湖沼図から読み取り設定した。滞筋に沿ったプルーム流路方向の格子間隔 Δx は斜面付近で15mと細かくし、それ以外では100m間隔とした。滞筋の横断方向には一律に $\Delta y=10m$ とした。Soroban格子は動的適合格子であり、鉛直方向の格子点間隔は密度界面付近で密となるよう各計算ステップで調整されるが、鉛直方向の格子間隔が平均して15cm程度となるように格子点数を設定した。

b) 初期条件

湖最深部において7月1日6:00に観測された水温・塩分鉛直分布(図-3)を水平方向に一樣として設定した。水深17m付近に塩分躍層が存在する。流速は一律に零とした。水位は一律に観測湖水位0.28T.P.mを与えた。

c) 水面・河床面上の境界条件

水面上の格子点では風応力と日射などによる水温変化が入力気象データから計算される。風向・風速は、小川原湖総合観測所における毎時観測データを計算領域に一律に与え、気温・湿度・雲量・全天日射量の毎時間データは付近の気象庁八戸特別地域観測所の観測値を与えた。

湖底面上では摩擦応力 $\tau=C_D \rho U^2$ を課した。ここで U と ρ は底面流速及び密度であり、底面摩擦係数 C_D は小川原湖の塩水傾斜プルームについて底面境界層の観測流速値から長尾らが算出した値($C_D=0.004$)を使用した⁶⁾。

d) 上下流端での境界条件

上流の湖心側の境界は湖内部に位置しており、境界条

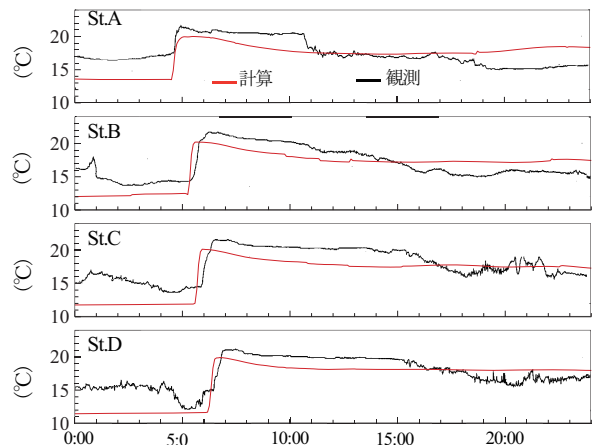


図-5 測点St.A～Dにおける湖底面70cm上方での水温時系列変化。横軸は7月1日の時刻。

件を観測値などから設定することは出来ない。境界面上で水塊の流入を許す自由境界条件を課したところ湖水体積の不自然な減少が生じ安定に計算できなかった。そこで、湖心側の境界では水塊の流出・流入が無いと仮定して計算を行った。なお、計算領域の湖水体積に対して流入流出量は小さく、湖水位の変化はほとんど見られなかった。

下流の高瀬川側の境界では塩分、水温、及び流量の時系列データを境界条件として課した。境界上に位置する国土交通省高瀬橋観測所による毎時観測データを塩分と水温については利用した(図-4(a))。一方、流量に関する観測データとしては、高瀬橋観測所で断続的に計測された流速値しかない。高瀬橋地点における流水断面積を乗じることで算出した観測流量値を図-4(b)に赤実線で示す。負値が湖に向かう方向である。湖と河口の水位が逆転する期間に逆流が生じていることは確認できるが、欠損期間が大きい。鶴田らは1997年と1998年の観測データを整理し、湖及び河口での水位から高瀬橋地点での流量を推算する経験式を提案している¹²⁾。そこで、彼らの方法を計算対象期間に適用し、湖及び河口での水位から高瀬川流量を推算した。図-4(b)に推算された流量を黒実線で示す。速度変動の時刻に若干の差異が見られるが、塩分侵入の生じた期間では観測流量の時間特性を良く再

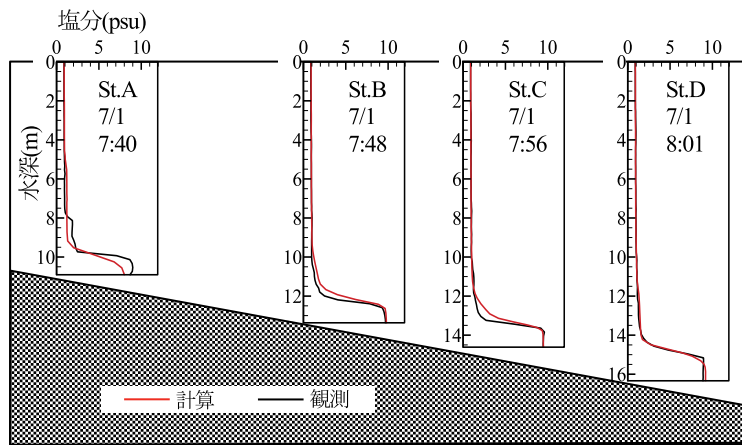


図-6 塩分鉛直分布の比較

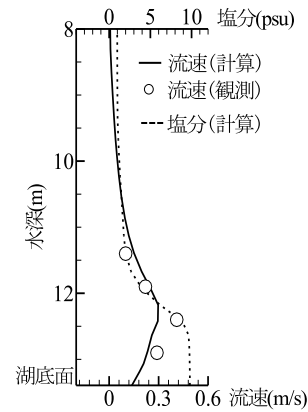


図-7 St.Bでの塩水傾斜ブルームの流速と塩分分布(7月1日7:48).

現している。図-4(a)に示すように6月30日18時から7月1日12時の間に塩分濃度が増加しているが、図-4(b)に示すように大規模な逆流が生じているのは日潮不等の第二低潮から高潮(6月30日22時～7月1日7時)にかけてであり、この期間に塩水傾斜ブルームが生じている。

(2) 計算結果

a) 現地観測との比較

図-5に測点St.A～Dにおける湖底面上70cmでの水温時間変化の比較を示す。赤線が計算結果、黒線が観測値である。解析対象期間の流入塩水温は湖底部の湖水温より高い。そのため、4:30～6:00の間に測点St.AからSt.Dの順に、塩水フロントの通過に伴う水温上昇が生じている。その時刻は計算の方が20分程度早くなるなど若干の差異が認められるが、各測点間の時間差は観測結果と良く一致しており、測点の位置する斜面上でのブルームフロントの速さを良く再現できている。なお、塩水フロント通過前に水温の観測結果が計算より高い値を示しているのは、計算対象期間の前日に発生した塩水傾斜ブルームの一部が滞筋内に薄く残っているためだと考えられる。塩水フロントが通過してしばらく時間が経過した後について、図-6に塩分分布の、図-7にSt.Bでの流速鉛直分布の観測結果との比較を示す。図-2の縦断形状に示すように斜度の遷移領域に近いSt.Aで塩分分布に差異が見受けられるが、ほぼ様な斜面勾配に位置するSt.B～St.Dでは観測結果と良く一致しており、St.BからSt.D間での塩水層厚のわずかな増加が確認できる。これは流下に伴う湖水のブルーム内への連行に起因すると考えられる。また、図-7に示すようにブルーム流速の最大値はやや低く見積もられているが、流動層厚が塩分層厚に比べ厚く、流速は密度界面上で最大値を取るなど、既往の研究^{6),7),13),14)}で示されている塩水傾斜ブルームの一般的特性を再現していることが確認できる。

b) 塩水傾斜ブルームの3次元特性

図-8に計算領域全域と測点の位置する緩斜面を拡大し、

塩分が7psu以上の水塊のみを描いた結果を示す。逆流開始後、浅瀬を通過した塩水は7月1日3:00ごろにSt.A手前の急斜面を流下し始め(図-8(a))、5:00ごろSt.A付近の緩斜面に流入する(図-8(b))。St.Aの南東側には浅瀬が張り出しており、それに遮られて図-8(b)の赤矢印のように西向きに流向を変化させて、St.A～Dの位置する最深線の西側斜面にも広がりつつ流下していくなど、湖沼地形の3次元性の影響を強く受けていることがわかる。図-9に斜面上での流下が最も活発であった時間について、St.Bにおける滞筋に垂直な横断方向について流下方向流速と塩分の分布を示す。ブルーム内塩分濃度は9psu程度で比較的一様である一方、横断方向には500m程度の広がりを持って幅広く流下している。一方、図-10に示すように、St.A～Dの測点が位置する斜面への塩水流入が終わる11:00ごろには、西側斜面上に位置する縦断線β上では滞筋(α)よりも高塩分となっており、滞筋から外れた縦断線β上で高塩分ブルームの流下が継続することが確認できる。これは流下方向の斜度が、滞筋(斜度4.0‰)に対して高塩分水が残る縦断線β(斜度3.5‰)の方が緩く、図-9(b)に示すように縦断線βの方が流下速度が低下し、比較的緩やかに流下するためだと考えられる。

c) 塩水傾斜ブルームの特性

図-11(a)には7月1日8:30でのSt.Bにおける、塩分・流速・乱流エネルギーの鉛直分布を示す。流速はブルームの塩分界面上で最大値を取り、周辺水との速度差によるシアにより塩分界面上方で乱流エネルギーが増加している。この乱流による鉛直混合により周辺水の連行が生じ、図-11(b)の塩分鉛直分布に示すようにSt.BとSt.D間でブルーム厚が増加していることが確認できる。通常、連行によるブルーム流量の増加は代表流速に比例すると仮定し、その比例係数である連行係数 E を指標として連行の強さを表している。塩水傾斜ブルームは連行により希釈され湖水との密度差を減少させながら流下していくことから、湖に侵入した塩水のうちの程度が底層塩水層へ貫入するのかを予想するには、連行の強度を把握することが重要となる。そのため、 E と成層強度を示す

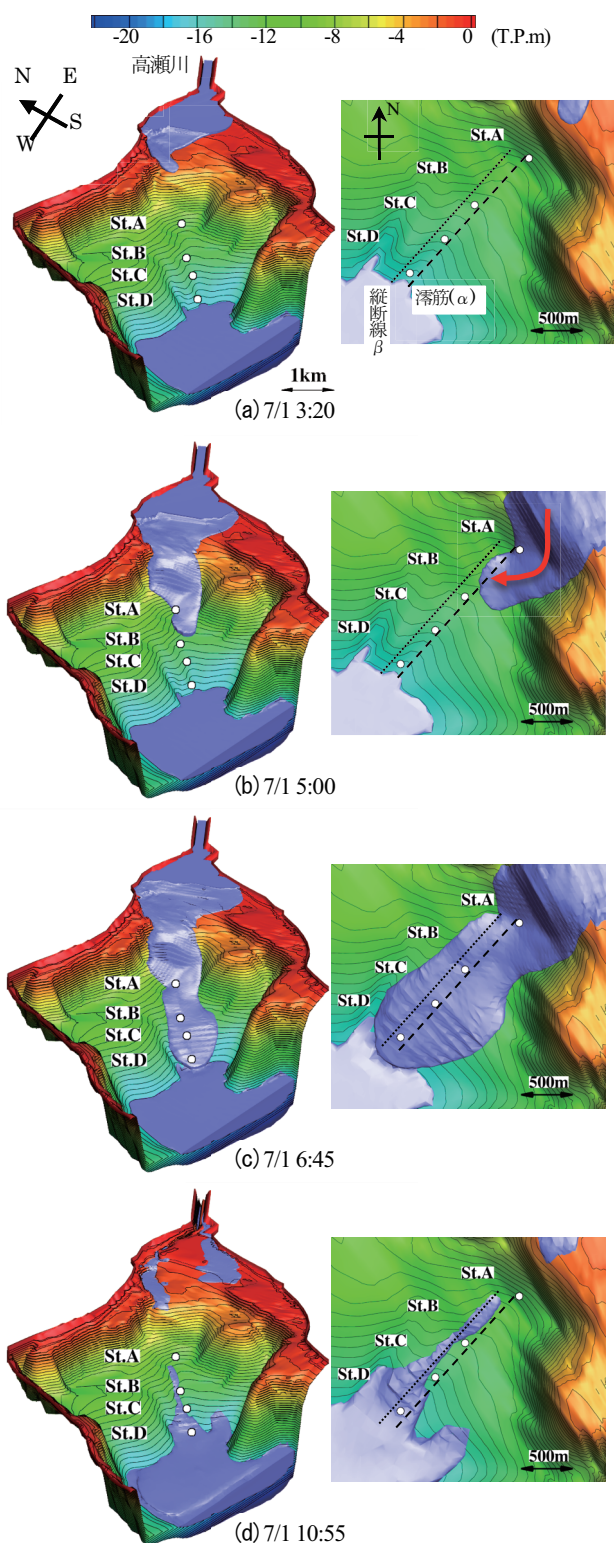


図-8 塩水傾斜プルームの空間分布。塩分7psu以上の水塊のみ青色で描いている。(a)～(d)の各パネルの左側は計算領域全体を、右側は測点が配置された緩斜面付近を拡大して示している。

チャードソン数 R_i との関係(連行則)が精力的に調べられてきている^{13),14)}。そのうち長尾と石川らは、高 R_i 数領域での連行係数の値を小川原湖での現地観測データから算出し、従来の低 R_i 数領域での実験で支持されていた連行則¹⁵⁾と異なり、 $R_i > 1$ となる高 R_i 数領域では E は指数関数的

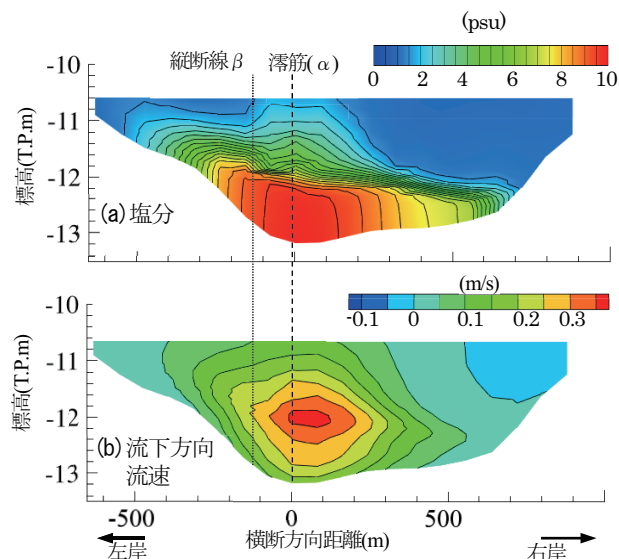


図-9 St.Bを通る横断面内での(a)塩分、(b)流下方向流速分布(7月1日6:45 図-8(c)と同時刻)。滞筋底面付近の一部のみ描いている。流速は湖心に向かう方向を正值とし、図-8における滞筋(α)及び縦断線 β の位置も合わせて示す。

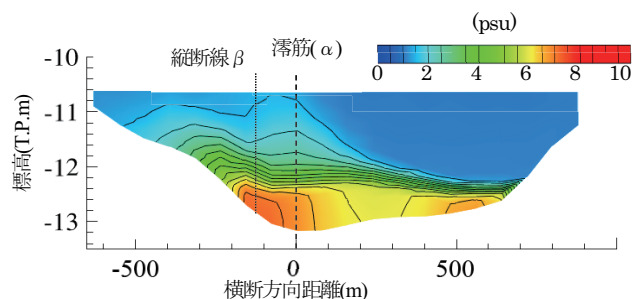


図-10 St.Bを通る横断面内での塩分分布(7月1日10:55 図-8(d)と同時刻)。

に急減する可能性があることを指摘している^{6),7)}。しかしながら彼らの研究では、連行係数は塩分濃度の空間変化から間接的に推算されており、プルームの流量値から直接算出することは行われていない。そこで本研究では、解析結果の流速分布からプルーム流量を計算して、連行係数の算出を行い、長尾と石川らの結果と比較することとした。図-12に本研究の計算結果から算出した連行係数 E を□で示す。プルームの非定常性を出来るだけ排除するため、プルームが流下した期間のうち塩分が比較的安定して停留値を取った期間(7/1 8:30)の計算結果を用いた。EllisonとTurnerの定義¹³⁾に従いプルームの流下流量をSt.BとSt.Dについて流速鉛直分布から算出し、流下に伴う時間差を考慮した上で、2点間の流量差から連行係数を算出した。図-12の●は長尾と石川らにより小川原湖の現地観測より算出された値⁶⁾を、○は福島¹⁴⁾による低 R_i 数領域に対する $k-\epsilon$ モデルでの傾斜プルームの数値計算結果を示しており、実線は長尾と石川らにより示唆された経験式($E=0.09\exp(-5R_i)$)である⁶⁾。計算結果から算出された値は●の小川原湖の観測から算出した値⁶⁾と近く、高 R_i 数領域で E は急減するとした連行則を支持しているように見える。

4. まとめ

3次元数値解析により小川原湖斜面上での塩水傾斜プルームの流下特性について調べた。計算の結果、急斜面から緩斜面への遷移域で地形により流向を変化させること、緩斜面上では数百メートル幅で広く流下すること、横断方向でプルームの流下速度の空間偏差が存在することなど斜面地形の影響によりプルームが3次的性状を持つことなどを確認した。また、連行係数を計算結果から算出したところ、小川原湖での現地観測データによる既往の結果と同程度となり、高 R_i 数領域で E は急減するとした連行則と調和的な結果となった。

謝辞：本研究を実施するにあたり、国土交通省東北地方整備局高瀬川河川事務所には数値解析に必要な各種観測データなどのご提供をいただいた。また、株式会社建設技術研究所の鶴田泰士、劉銘環、および笹島悠達の各氏には様々なご助言と便宜を賜った。ここに記して深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 湖沼技術研究会：湖沼管理のための流動機構調査，河川環境管理財団，2003.
- 2) 笹島悠達，石川忠晴，中村恭志，鶴田泰士，天野光歩，遠藤真一：小川原湖の密度躍層付近における流動混合の構造について，水工学論文集，第53巻，pp.1279-1284，2009.
- 3) 池永均，山田正，向山公人，大島伸介，内島邦秀：網走湖の塩水化の機構と塩淡水二成層の長期変動特性に関する研究，土木学会論文集，No.600/II-44，pp.85-104，1998.
- 4) 西田修三，佐野俊幸，中辻啓二：汽水湖における流動構造と物質循環過程，海岸工学論文集，第48巻，pp.1116-1120，2001.
- 5) 鶴田泰士，石川忠晴，西田修三，成田舞，藤原広和：小川原湖におけるヤマトシジミの繁殖環境について，土木学会論文集，No.705/II-59，pp.175-187，2002.
- 6) 長尾正之，石川忠晴，長島伸介：小川原湖に発生する傾斜プルームの現地観測と連行係数の推算，土木学会論文集，No.579/II-41，pp.105-114，1997.
- 7) 石川忠晴，長尾正之，長島伸介：小川原湖に発生する傾斜プルームの連行係数に関する考察，水工学論文集，第40巻，pp.595-600，1996.
- 8) 長尾正之，西部隆宏，石川忠晴，山浦勝明：小川原湖への塩分侵入現象の確立的考察，水工学論文集，第40巻，pp.583-588，1996.
- 9) 中村恭志，戸田真仁，渡部一人，石川忠晴：3次元貯水池数値流動モデル“TITech-WARM”の開発と釜房貯水池への適用，土木学会論文集B1(水工学)，第69巻，pp.I_775-I_780，2013.
- 10) Yabe, T., Mizoe, H., Takizawa, H., Moriki, H., Im, H. N., Ogata, Y.: Higher-order schemes with CIP method and adaptive

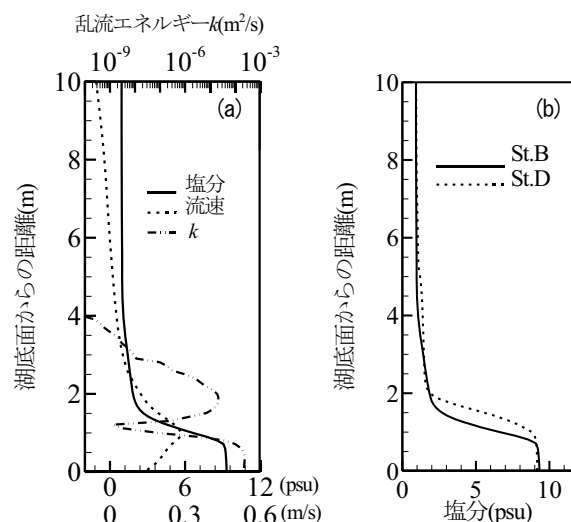


図-11 塩水傾斜プルームの鉛直分布(7月1日8:30).
(a) St.Bにおける塩分，流速，乱流エネルギー k ，
(b) St.B及びSt.Dにおける塩分鉛直分布比較。

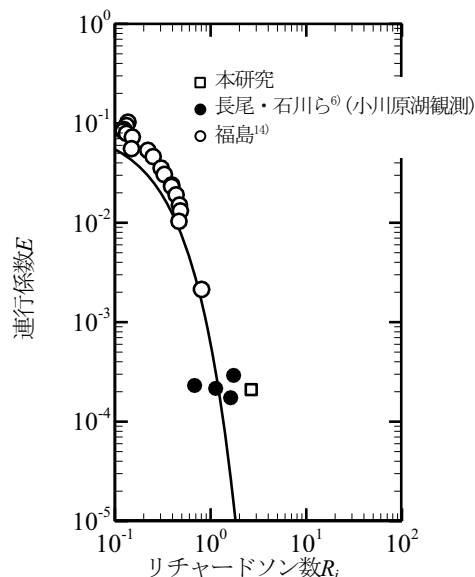


図-12 連行係数とリチャードソン数の関係。
福島(○)と長尾ら(●)のデータはそれぞれ文献14と6から引用した。

Soroban grid towards mesh-free scheme, *J. Comput. Phys.*, Vol. 194, pp.57-77, 2004.

- 11) 許曉飛，中村恭志，小林侑，小島崇，石川忠晴：CIP-Soroban 3次元流動モデルによる利根川感潮域塩水流動解析，水工学論文集，第56巻，pp.1555-1560，2012.
- 12) 鶴田泰士，石川忠晴，西田修三，藤原広和，村井禎美：小川原湖への海水侵入現象に関わる水理データの整備と復元，水文・水資源学会誌，第14巻，pp.13-26，2001.
- 13) Ellison, T. H. and Turner, J. S.: Turbulent entrainment of stratified flows, *J. Fluid Mech.*, Vol.6, pp.423-448, 1959.
- 14) 福島祐介：乱流モデルによる傾斜壁面密度噴流の解析，土木学会論文集，No.399/II-10，pp.66-74，1988.
- 15) 須賀寛三，高橋晃：淡塩二層流の連行係数，土木学会第31回年講，pp.383-384，1976.

(2013. 4. 4受付)