

II-18

網走湖内の流れに関する研究

開発土木研究所 河川研究室 正員 金高州吾  
 北海道大学工学部 正員 清水康行

1. はじめに

網走湖は海水と河川水が混ざり合う汽水湖である。流域からの汚濁水流入などで、湖の窒素やリンなどの栄養塩類が増えて富栄養化し、湖の下層は無酸素状態となっている。このような湖の性質から、青潮、アオコの発生が頻発するという問題がある。しかし、一方では汽水性の生物の生息できる環境として、自然環境の維持も望まれており、塩淡水境界層の予測を含めた将来を見通した視点での施策をとることが求められている。こうした逼迫状態にある環境問題に対して今必要なことは、多角的な検討から解決策を模索する取り組みである。そこで、水理現象を解明する一手法として物理現象の数値シミュレーションがある。網走湖の場合、密度流を含めた3次元的な流動の取り扱いが必須であり、こうした数値シミュレーションモデルを構築することが問題解決に対して効果的であると思われる。また、近年における測量機器の技術的な進歩に伴い、密な現地データの取得が可能となり、従来に比べて容易に現象の観察ができるようになった。このため理論的な研究との接続が広がりつつある。著者ら<sup>1)</sup>は過去2年4回にわたり網走湖流出口付近を観測対象として塩水の流入、流出に関して時空間の変化を捉えてきた。

本文は、湖流出口付近における大潮時の塩水侵入時に焦点を絞り、観測結果と計算結果について比較検討を行ったものである。

2. 現地観測の概要

2-1. 観測方法

観測方法は、超音波多層式流速計(ADCP)、水中投入式塩分計、3次元自動追尾装置を組み合わせた手法を用いた。これは、船外機付きの船に計測器を搭載し、その位置を陸から測定するというものである。観測は、定点間を船で循環し、各定点の塩分と流速の測定。また、一定点について塩水侵入開始から塩水侵入が落ち着くまで経過時間変化の測定などを行った。湖の地形は図-2に示すように、川から繋がる滞筋、比較的平坦な場所、湖心に繋がる滞筋に大別できる。観測定点は塩水流が通過すると思われる水深が周囲に比べ深い箇所に、これらの地形を考慮して選定された。なお、定点の観測においては、船の揺れによる誤差を軽減するため、船頭、船尾の双方からの固定を試みている。

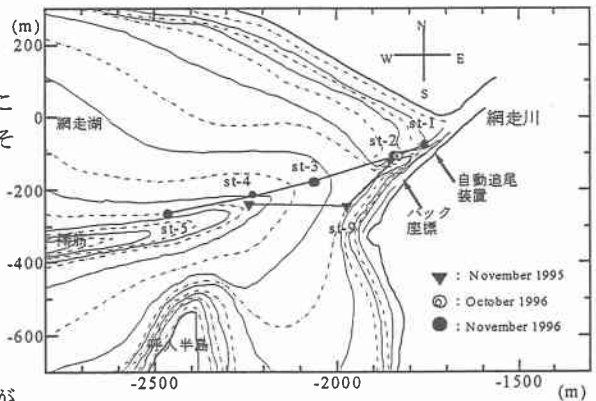


図-1 網走湖流出口付近の概要図

2-2. 塩水侵入時の流況の概説

本報では、塩水の侵入に焦点を当てて報告する。観測は大潮時の潮位がピークに達する時間帯に行ない、潮位の日変動の中で、湖水位との差がピークに達した状態で0.52、0.36、0.28、0.24mの値の観測日には、

The Study for flowing in near the effluence Lake Abashiri

By Shugo KANETAKA, Yasuyuki SIMIZU

湖内に侵入する塩水が確認できている。この中で差が 0.52m という低気圧通過後の高潮時の観測も行なっている。塩水浸入時には、湖水面に写真-1のような潮目が形成され、その下を密度流が逆流するという現象が確認されている。この潮目の平面的な位置は川から繋がる深掘れ箇所に対応しており、潮位と湖水位との差が大きい観測日には、潮目が面的に広くより顕著に現れた。また、これまでの観測結果から、特に密度流は湖底の微地形の影響を強く受けて侵入する様子が確認されている。



写真-1 塩水浸入時の湖水面

### 3. 数値計算の概要

#### 3-1. モデルの概説

モデルの基礎式方程式と境界条件は、以下にまとめて列挙する。(1)式は流下方向、(2)式は横断方向、(3)式は鉛直方向、(4)式は連続式、(5)~(8)式はそれぞれ計算格子の上下流端、河床、水面、河道側壁の境界条件である。鉛直方向の渦動拡散係数  $K_v$  は(9)式で、リチャードソン数  $Ri$  は(10)式でそれぞれ表されている。これらの詳細は大森ら<sup>2)</sup>の報告に記述されている。

基礎式

$$s \text{ 方向: } \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{uv}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial s} \left( \epsilon_h \frac{\partial u}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left( \epsilon_h \frac{\partial u}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \dots (1)$$

$$n \text{ 方向: } \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} - \frac{u^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + \frac{\partial}{\partial s} \left( \epsilon_h \frac{\partial v}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left( \epsilon_h \frac{\partial v}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \dots (2)$$

$$z \text{ 方向: } 0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \dots (3)$$

$$\text{連続式: } \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial n} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots (4)$$

境界条件

$$H|_{i=1} = \text{網走湖(川尻観測所)の水位測定値} \dots (5)$$

$$H|_{i=N} = \text{網走港(検潮所)の観測値}$$

$$\epsilon \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=1} = C_s u \Big|_{z=1} \sqrt{u^2 \Big|_{z=1} + v^2 \Big|_{z=1}} \dots (6)$$

$$\epsilon \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=1} = C_s v \Big|_{z=1} \sqrt{u^2 \Big|_{z=1} + v^2 \Big|_{z=1}}$$

$$\epsilon \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=N} = 0 \dots (7)$$

$$\epsilon \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=N} = 0$$

$$u|_{j=1, N} = 0 \dots (8)$$

$$v|_{j=1, N} = 0$$

$$K_v = K_{v0} \exp(-3 \times Ri) \dots (9)$$

$$Ri = -\frac{g(\partial \rho / \partial z)}{\rho_0 (\partial u / \partial z)^2} \dots (10)$$

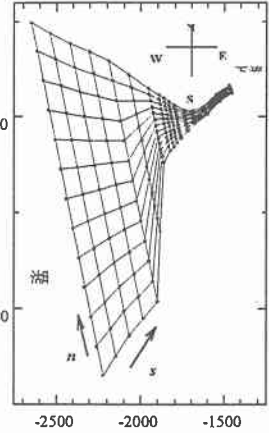
#### 3-2. 計算条件

前節で示した3次元モデルを用いて流出口近傍の観測日の条件に適用し、観測結果との比較を行う。湖の水位、潮位の変動に1時間毎の実測値をそれぞれ、最上流点、河口に与えた。このため計算範囲は、河口から湖流出口にかけて 8km と広範囲にわたる。

表-1 計算条件

項目	値
計算格子数( $s \times n \times z$ )	71 × 13 × 13
渦動粘性係数(水平方向)	0.00001
渦動拡散係数(水平方向)	0
河床摩擦係数	0.007

湖流出口付近の計算格子は図一2のようにし、湖から流出口に向かって  $s$  軸、右岸から左岸に向けて  $n$  軸、鉛直方向に  $z$  軸とした。 $s-n$  曲率座標系の  $\Delta s$ 、 $\Delta n$  を場所的に変化させることによって、近似的にこのような、歪んだ座標に適用しているものである。計算は河口から湖流出口までを流下方向に 71 分割し、特に、流出口については微地形が流速に影響を与えると思われたため、 $s$  方向の格子の間隔を小さくした。横断方向、水深方向は 13 分割である。計算条件は表一1に示す。なお、1/10000 の地形図から読みとった 0.5m 間隔のコンターラインを細かく面的に補間して格子点の標高として割り付けた。



図一2 湖流出口付近  
流出口の計算格子点

#### 4. 観測と計算の結果

観測と計算の諸元は表一2に示した。比較する観測条件は、塩水侵入時のみを対象とした。計算時間は、時間的な影響範囲を考慮して観測日の前1日にも拡張して適用した。

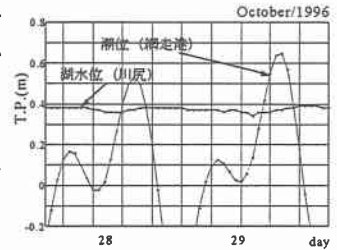
表一2 観測と計算の諸元

以下で観測日別、場所別に比較説明を行う。

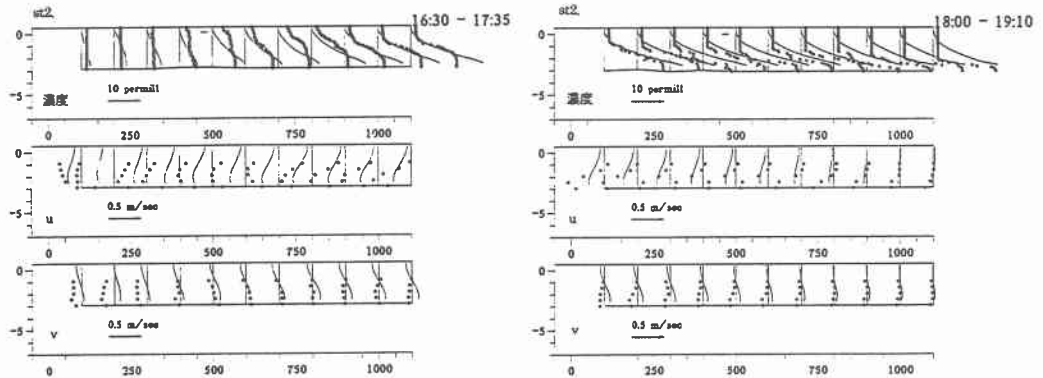
観測日	観測時刻	潮位のピーク	湖の水位	(潮位-湖水位)	計算case	計算時間	初期水位
1995/11/24	16:20-21:30	1.05	0.53	0.52	case1	72	0.09
1996/10/29	14:00-20:00	0.647	0.37	0.277	case2	48	0.05
1996/11/27	13:50-20:00	0.557	0.32	0.237	case3	73	0.06

##### 4-1. 経過時間変化

図一3に case2 の観測時における潮位、湖水位の関係を示す。図一4に st-2 の観測点における水深方向の分布の経時間変化を示す。上から塩分濃度、流下方向流速、横断方向流速の順に示し、計算値を実線、観測値をドットで表した。塩分濃度の水深分布形については実測値を計算値がよく再現している。、時間的な流速分布形の比較によると塩水侵入前は一致するが、塩水侵入後の実測値は完全に模型を示すのに対し、計算による良好な再現性を見い出せなかった。しかし、観測値の塩水侵入時刻の分布に対応して計算値が下方で膨らむ分布を見せ、その傾向を再現している。



図一3 case2の潮位と湖水位との関係



図一4 経過時間変化図

4-2 異なる観測条件下における縦断方向の変化

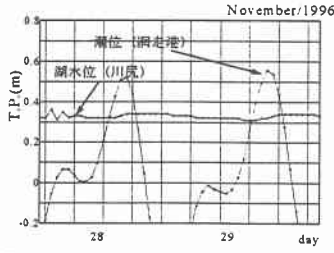


図-5 case3の潮位と湖水位の関係

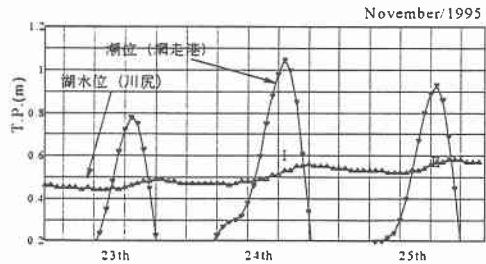


図-6 case1の潮位と湖水位の関係

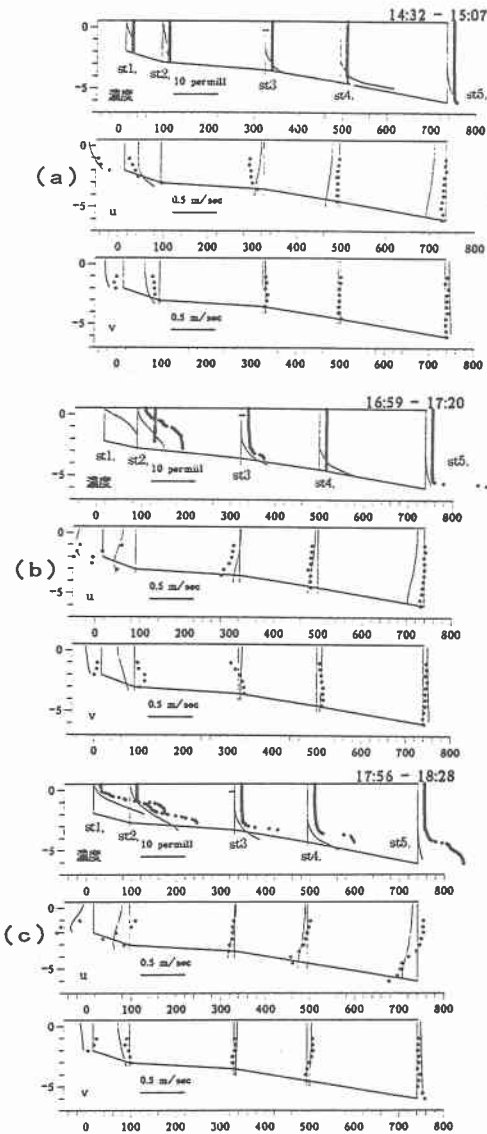


図-7 流下方向の断面図 (case3)

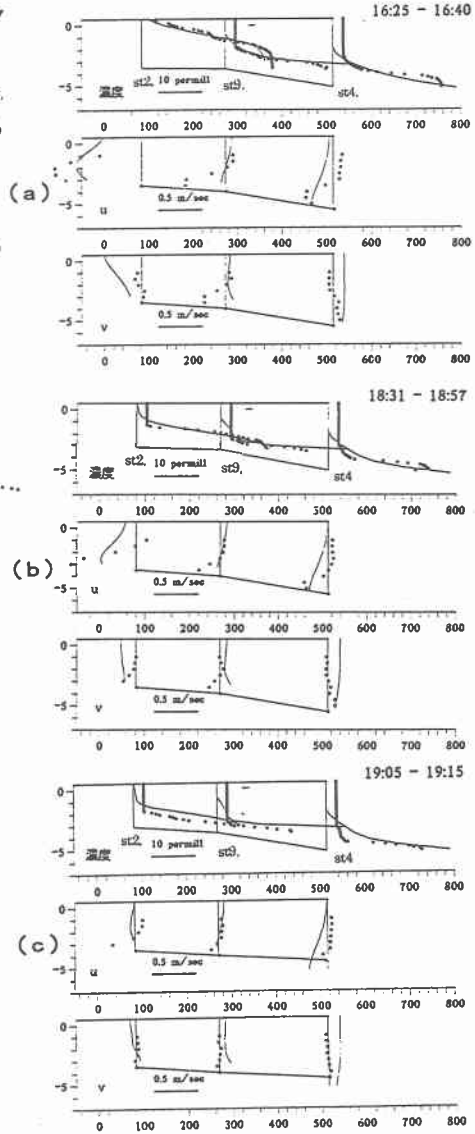
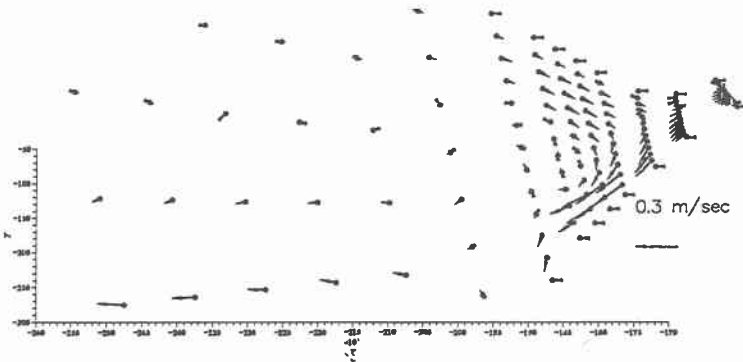


図-8 流下方向の断面図 (case1)

図一五、図一六に case3、case1 の観測時刻と潮位、湖水位の関係図をそれぞれ示す。図一七(a),(b),(c)、図一八(a),(b),(c)に case3、case1 の縦断方向の変化図をそれぞれ示す。上から塩分濃度、流下方向流速、横断方向流速、の鉛直方向の分布図で、st5 が湖心側である。流速分布はおおよそ一致している。また、塩分濃度の水深方向の分布に図一八(a)時間帯を代表とするように実測と計算の適合が見られた。塩水侵入時に Case3 は 10パーミル程度、case1 は 30パーミル程度の濃度が確認できた。いずれの case も塩分濃度の水深方向の分布は実測値と計算値との間に整合性がみられ、時間や縦断方向の場所の変化にも対応していた。これにより、異なる観測条件下においても本モデルによる塩分濃度の再現性が良好であることが示された。

#### 4-3. 平面ベクトル図

図一九は流速の平面ベクトル図で、塩水侵入時刻の流速の計算結果である。水深方向の位置は河床から 2 番目の格子のもので、湖底の微地形の影響を受けて侵入するという観測により確認された様子を再現している。



図一九 平面図 (case3)

#### 5. 考察

特に、経時変化について比較を行った観測定點 (st-2) の位置は、湖への密度流の潜り点近傍にあたり、流下方向には密度流の潜り込み現象、横断方向には密度流の広がりと変化が著しく、複雑な流れを呈する流れ場として知られている。このため流速の大きさに関しては計算比較点の位置を横断的にずらすことによって、一致がみられた。これは、計算格子データ作成の段階における、地形図の信頼性や、地形データの読み取り誤差など、後処理作業段階における限界を示唆するものである。もちろん本観測値は自動追尾装置による精度の高い位置の把握を行った実測値であるため信頼性は高いが、それに見合う詳細な現地情報のモデルへの適用が重要であるように感じた。このため、このような流れ場の再現を目的とするのであれば、モデルへの境界条件のとりこみを地形情報のみに絞っても、観測日に音響測深機等を用いた詳細なデータから、さらに間隔の小さい格子を作成することが前提としてあげられる。

また、現実的にはかなり離れた位置の水位 (川尻観測所) を上流端の水位の境界条件としてモデルに与えていること。実測値には湖内の風により発生した静振や吹層流などの現象を複雑にする要因が含まれていること。潮目上では流速が他の箇所比べて大きいため、船の固定を試みているものの逆流時には船が潮目の境界まで押されて、この境界が観測ポイントとなることなどが、実測と計算の境界の要因となってくる。

しかし、このような現象の実測値を再現することは工学的に非常に興味深いのが、環境問題に対する物理モデルとして、そこまで詳細な精度は求められていない。前節では、異なる観測条件下における塩分濃度の比較において計算と実測が一致をみせている。また、平面ベクトル図による微地形影響を受けた流れを再現している。これらのことはモデルの妥当性を示すものと考えている。

## 6. おわりに

本論文は観測と計算を比較した結果、モデルについては異なる条件の観測日について、時空間的にシビアな視点で比較を行ったにも関わらず、塩分濃度の水深方向分布に良好な一致を見せ、妥当性を示すことができた。侵入塩分量に関して、湖への塩水侵入量の予測を行う際に役立つものと考えている。さらに、湖の塩淡境界層の予測を行う際には、湖の静振や上流の流入量等も考慮に加えた総合的な物理モデルの構築が期待される。

## 参考文献

- 1) 金高州吾・馬場仁志：網走湖流出口付近における塩水挙動の実測，開発土木研究所，no527，1997,4
- 2) 大森隆裕・崇田徳彦・清水康行：河川湾曲部における密度流の運動特性，土木学会北海道支部論文集第53号(B)，1997
- 3) 清水康行：沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する研究，北海道大学博士論文，1990