

II-51

河川湾曲部における密度流の運動特性

北海道大学工学部 学生員 大森隆裕  
 北海道開発局開発土木研究所 正員 崇田徳彦  
 北海道大学工学部 正員 清水康行

1. はじめに

北海道東部に位置する網走湖は、オホーツク海より塩水が網走川を遡上して流入するため、上層部に淡水層、下層部に塩水層という二成層状態を成している。この塩水層は無酸素状態であり、近年の降雨量の減少によって塩淡水境界層が上昇しつつある。そのため、塩水層に起因するアオコ、青潮の発生が頻繁に見られるようになり、漁業等、周辺環境に悪影響を与えて社会問題となっている。このような湖の現象については、以前より山田らの研究グループによって観測、解析が行われている<sup>1)</sup>。著者らは、網走川の大曲地区(網走湖下流約1km)の大湾曲部における流れに着目し、現地観測を過去3回行っている<sup>2)</sup>。これらの観測では、湾曲部特有の2次流や、網走港の潮位変化による流れの変化、それに伴う塩水楔の遡上の様子などを表した実測値を得ることに成功し、これらを整理、処理した結果に基づき現象の実体を明らかにすべく、解析を試みている。特に、1996年8月の大潮時に行われた網走川現地観測では、この湾曲部に数ヶ所測線を設置し、ADCP(Acoustic Doppler Current Profilers)による3次元的な流速分布と、STD(Salt Temperature Depth)による塩分濃度の同時計測を、湾曲の頂点部分で継続的にを行い、湾曲部における順流、逆流、及び密度流の様子を確認できる観測結果が得られた。このような現象の影響を考え、予測を行うためには現地の水理学的特性を含む良好なモデルを構築することが必要である。

本研究では、網走川大曲地区の大湾曲部において非定常流、密度変化、地形データ等を考慮した 3

次元流れモデルを導く事に努めており、今後、大潮時の観測で得られた値との比較を行い、このモデルの適合性を検討する予定である。

2. 3次元モデルの導出

網走川の地形データを用い、河道上に図-2のような計算格子を設定する。格子の方向は、流下方向をs軸、これと直行する横断方向(右岸から左岸に向かう向き)をn軸、鉛直上方向をz軸と定義する。基礎式としては、流れの運動方程式(1)~(3)、連続の式(4)、拡散方程式(7)、水位変化dHの導出式(10)、拡散係数 $K_v$ の導出式(13)、微小時間dtの導出式(17)(18)、他、境界条件を与え、(1)~(4)、(7)式については各種差分法を用いて展開を行う<sup>3)4)</sup>。また、このモデルでは網走港の潮位変動、及び網走湖水位の観測値をそれぞれ上流端、下流端の境界条件として与えている。これらの差異により網走川の流向、塩水遡上の状態が決定される。以下に使用する基礎式を示す。非定常状態での3次元流れの運動方程式は、(1)~(3)式のように表される。

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

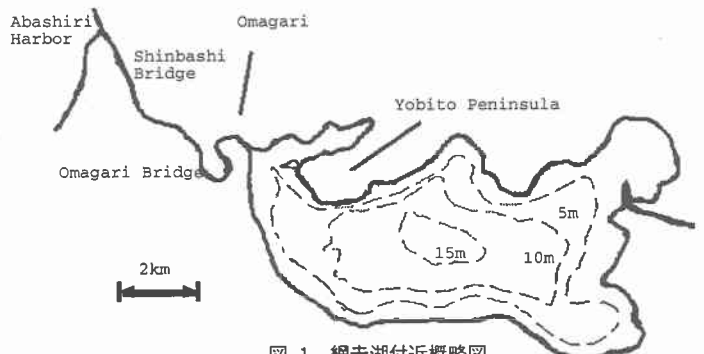


図-1 網走湖付近概略図

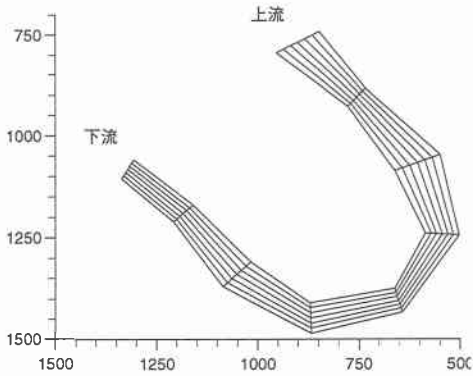


図-2 網走川大曲地区湾曲部の計算格子図

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

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

$$\frac{\partial u}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial n} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

(1)式は流下方向、(2)式は横断方向、(3)式は鉛直方向の運動方程式であり、(4)式は連続の式である。ここで、 $t$  は時間のパラメータ、流速  $u, v, w$  は、それぞれ、 $s, n, z$  方向の流速成分、 $r$  は曲率半径、 $\rho$  は密度、 $p$  は圧力、 $\epsilon_h, \epsilon_v$  はそれぞれ水平方向、鉛直方向の渦動粘性係数、 $g$  は重力加速度をそれぞれ表している。(1)式は風上差分により展開するが、その際、非定常項を用いて流速  $u$  を次のように導く。

$$u|_{t+dt} = u|_t + A * dt \quad (5)$$

この式中  $dt$  は微小時間を表し、 $A$  は以下のように(1)式の非定常項以外の項の集合体である。

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

(2)式についても同様の展開を行い、 $dt$  毎の流速  $v$  を導く。

$$v|_{t+dt} = v|_t + B * dt \quad (6)$$

この時、 $B$  は上式同様に、非定常項以外の項の集合体である。

圧力  $p$  は(3)式を前進差分法で展開することにより求まる、式中の密度  $\rho$  は、後述するが、時間  $t$  により変化する値であるので、その点を考慮しなければならない。

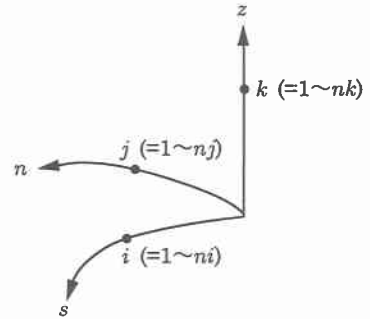


図-3 計算格子上の  $s, n, z$  軸座標

(4)式は流速  $w$  を求める式である。これは、流体中の微小体の流量収支を考えた連続式であり、流速  $w$  は前進、後退の2通りの差分法で求めた値を平均化して用いる。

密度の3次元的、非定常変化を表す拡散方程式

は、以下の(7)式に示される、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial s} + v \frac{\partial \rho}{\partial n} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} = K_h \frac{\partial^2 \rho}{\partial s^2} + K_h \frac{\partial^2 \rho}{\partial n^2} + K_v \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} \quad (7)$$

式中、 $K_h, K_v$  はそれぞれ水平方向、鉛直方向の渦動拡散係数を表している。この式も、(1)(2)式同様に、非定常項を考慮した式に直す、

$$\rho|_{t+dt} = \rho|_t + C * dt \quad (8)$$

$C$  は(5)(6)式同様に、非定常項以外の項の集合体である。

水位  $H$  を求めるには、微小時間  $dt$  の水位変化量  $dH$  を用いて次のように求める、

$$H|_{t+dt} = H|_t + dH \quad (9)$$

$dH$  は、以下の式に示すように、 $s, n$  方向の流量収支の変化量が、 $z$  方向の流量収支の結果となり、それが  $dH$  で表される、とする。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial (j u dz)}{\partial s} + \frac{\partial (j v dz)}{\partial n} \quad (10)$$

水深  $h$  はこの水位  $H$  と地形データから得られた河床高との差より導かれる。

$$h = H - \eta \quad (11)$$

また、曲率半径  $r$  は現地の地形データの座標に用いられている  $x, y$  を使い次式のように示される。

$$\frac{1}{r} = -\frac{1}{1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2} \frac{d}{ds} \left( \frac{dy}{dx} \right) \quad (12)$$

ここでは  $r$  を便宜的に逆数としている。

鉛直方向の渦動拡散係数  $K_v$  は(13)式のように表される

$$K_v = K_{v0} \exp(-3 * Ri) \quad (13)$$

ここで、 $K_{v0}$ は中立状態時( $Ri=0$ )の渦動粘性係数であり、 $Ri$ はリチャードソン数で、以下の式で表される

$$Ri = \frac{g(\partial\rho/\partial z)}{\rho_0(\partial u/\partial z)^2} \quad (14)$$

式中、 $\rho_0$ は淡水の密度である。

微小時間 $dt$ の決め方は、まず流体速度と波の伝播速度との合計を上回る速度を設定する

$$\frac{dx}{dt_s} \geq u + \sqrt{gh} \quad (15)$$

$$\frac{dy}{dt_n} \geq v + \sqrt{gh} \quad (16)$$

これより $dt_s$ 、 $dt_n$ の範囲を示す式は以下の(17)(18)式のようになる

$$dt_s \leq \frac{dx}{u + \sqrt{gh}} \quad (17)$$

$$dt_n \leq \frac{dy}{v + \sqrt{gh}} \quad (18)$$

この $dt_s$ 、 $dt_n$ のうち小さい方の値を $dt$ として選択する。そして、初期条件で設定した時間 $t$ まで $dt$ 毎に計算を繰り返していく。

境界条件について説明する。河道の上流端、下流端の境界条件は、著者らが網走川大曲地区にて行った大潮時観測と同時期の、8/27~8/29における網走湖水位、網走港潮位のそれぞれ1時間毎の測定値(図-4)をそれぞれ上流端、下流端として使用する。

$$H|_{x=0} = \text{網走湖水位測定値}$$

$$H|_{x=L} = \text{網走港潮位測定値}$$

河床の境界条件は、(1)(2)式中のせん断力を示す項を、以下のように摩擦係数 $C_b$ を用いて表す

$$\varepsilon \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{k=z_f} = C_b u \sqrt{u^2 + v^2} \Big|_{k=z_f}$$

$$\varepsilon \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{k=z_f} = C_b v \sqrt{u^2 + v^2} \Big|_{k=z_f}$$

水面の境界条件は、(1)(2)式のせん断力の項を0とおくことにより与えられる

$$\varepsilon \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{k=N_f} = 0$$

$$\varepsilon \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{k=N_f} = 0$$

河道側壁の境界条件は、流速 $u$ 、 $v$ ともに0として与えている。

$$u|_{j=1, N_j} = 0$$

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

また、初期条件としては、水深一定( $h=0.5\text{m}$ )、密度は全域にて淡水( $\rho=1.0\text{g/cm}^3$ )、と定めている。

### 3. 大潮時観測の概要

この章では、3次元流れモデルとの比較をする、大潮時観測についての説明を行う。

この観測は1996年8月27日午後10時~8月29日午前10時の期間で行われた。この期間は網走港の干満の潮位差が約1mに及ぶ大潮のため塩水楔が遡上し網走湖まで到達することが予想され、対象の湾曲部でも塩淡二層流が観測されると考えられた。図-5のコンター図を見るとわかるように、観測対象地である網走川大曲地区は、湾曲部の内側が浅く外岸の水深が深い。つまり、2次流がよく発達している事を示している。よって、観測目的は、湾曲部における二層流時の主流、2次流の流れの特徴をとらえる事にあった。観測するに当たり、図-6の地図に示す位置に、ほぼ河道中心線に直角方向にワイヤーを6本設置し、これを測線とした。各測線においてワイヤーに沿いつつ5m~10m間隔で流速及び塩分濃度の計測を行った。流速観測にはADCP(2400Hz)、塩分濃度観測にはSTD(メモリー塩分計)が用いられた。観測は、4~5人乗りのボートで、各測点毎に測線のワイヤー及び錨でボートを固定して行われた。また、流速データのサンプリングは、各測点上で水深方向に15cm間隔で深度及び北方 東方 鉛直の流速成分として行われ、計測時間を全て3分間とした。尚、ADCPの特性上、水面下50cmは計測不能であるため、この区間の流速データは皆無である。塩分濃度データのサンプリングは、深度及び塩分濃度を水深方向に10cm毎に計測し行った。観測時間は、塩水遡上が予想された満潮時の前後、具体的には8月27日夜~28日早朝、28日夜~29日早朝に設定した。

また、同一断面内における流れの非定常変化を連続的に把握するために、27日夜から28日早朝にかけては測線4に、28日夜から29日早朝にかけては測線5に重点を置いて連続観測

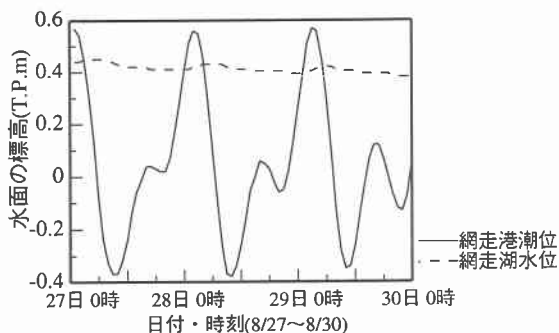


図-4 8/27~8/29の網走港潮位

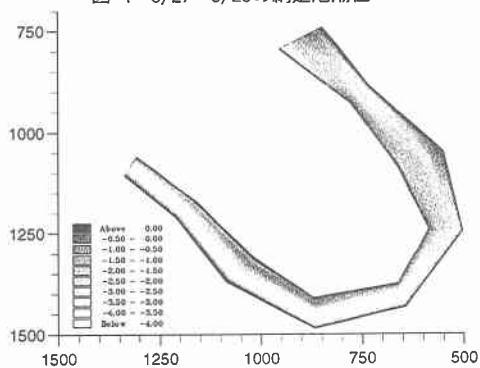


図-5 網走川大曲地区における水深コンター図



図-6 網走川大曲地区の測線位置

を実施した。その結果の一部を図-7に示す。この図は、8/29日5:07~5:34、測線5にて流向が逆流から順流に変化した直後の時間帯における、塩分濃度分布及び流速 $u$ 、 $v$ の断面内分布を表したものである。これから、水面付近で淡水、河床付近では塩水の塩淡二層流の存在が解る。また、流速 $v$ については、淡水層と塩水層とで互い違いの向きの2次流が形成されていることが解り興味深い。

この観測結果を考慮し、3次元流れモデルを実行する際に必要な各種定数を表-1のように求める。

表-1 3次元モデルの計算条件

項目	値
格子数(s×n×z)	58×13×13
計算時間	72(hour)
渦動粘性係数(鉛直方向)	$1e-4(m^2/s)$
渦動粘性係数(水平方向)	$0.005(m^2/s)$
渦動拡散係数(水平方向)	$0.001(m^2/s)$
河床摩擦係数	$0.001(m^{-1})$

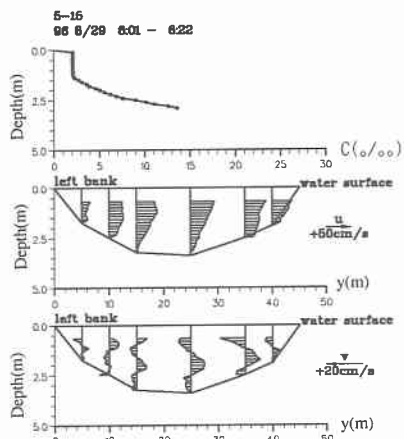


図-7 測線5、順流時における流速 $u$ 、 $v$ の断面図

#### 4. まとめ

今回の研究は、網走川における塩淡二層流状態時を含む、3次元流れモデルの構築を検討したものである。今後は、網走川大曲地区で大潮時期に行った現地観測の結果を参考にしつつ、3次元モデルに改良を加え、その適合性を高めていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 池永均, 山田正, 内島邦秀, 大島伸介, 向山公人, 近藤浩一: 網走湖における塩淡二成層の形成と挙動に関する研究, 水工学論文集, 第40巻, pp. 589-594, 1996.
- 2) 池永均, 山田正, 内島邦秀, 大島伸介, 向山公人, 近藤浩一: 網走川における塩水遡上に関する研究, 第23回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp. 326-327, 1996.
- 3) 井上和也, 岩佐義郎, 木下昌樹: 沿岸水域における埋立が河口からの洪水流出に及ぼす影響の解析, 京都大学防災研究所年報, pp. 153-167, 1991.
- 4) 清水康行: 開発土木研究所報告, 1991.