

II - 20

季節風によるウトナイ湖の湖流特性

室蘭工業大学 ○学生員 渡辺誠史  
室蘭工業大学 正会員 藤間 聡

1 はじめに

ウトナイ湖は北海道苫小牧市東部の国道36号線と国道234号線に挟まれた地域に位置し、南北長が1.8km、東西長が2.8km、流域面積が2.0km<sup>2</sup>、平均水深が約1.0mである浅水湖であり、その位置を図-1に示す。流入河川はオタルマップ川、トキサタマップ川、美々川で、流出河川は勇払川である。ウトナイ湖の概要としては、野鳥の楽園として知られ周囲の湿原とともに国設鳥獣保護区に指定され、ラムサール条約にも登録されている。しかし、近年、栄養塩を蓄積して富栄養化が進んでいる。また、水深が浅いため底泥が風などにより攪乱されやすく、底泥中の様々な物質が水中に混合して、水質悪化を起こしている。ウトナイ湖を保全するためには汚染源の除去、及び汚染物質の拡散過程を調べることが必要である。

本研究は、ウトナイ湖を水深が一様な浅水湖として考えた湖流解析モデルを構築し、拡散機構の解析に必要な湖流特性を推定することを目的とする。

2 湖流の基礎式

湖流の基礎式は図-2に示すような座標系において次のように表される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + L \cdot u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + D \cdot u + fv \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + L \cdot v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + D \cdot v - fu \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + L \cdot w = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + D \cdot w - g \quad (3)$$

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + L \cdot \rho = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_h \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_h \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_v \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + q \quad (5)$$

ここに、

$$L = u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \quad (6)$$

$$D = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_h \frac{\partial}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( A_v \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (7)$$

図-2において、 $x-y$ 平面は静水面にとり、 $x$ 軸は東を、 $y$ 軸は北を  $z$ 軸は  $x-y$ 平面に直角に上方を正とし、 $z$ は静水面から湖面までの垂直距離、 $h$ は水域の平均水深である。 $u, v, w$ はそれぞれ  $x, y, z$ 軸方向の流速成分、 $p$ は圧力、 $\rho_0$ は平均密度、 $A_x, A_h$ はそれぞれ水平、鉛直渦動粘性係数、 $f$ はコリオリ係数で  $f = 2\Omega \sin\phi$  ( $\Omega$ は地球の自転角速度、 $\phi$ は緯度)、 $g$ は重力加速度、 $K_h, K_v$ はそれぞれ水平、鉛直渦動拡散係数、 $q$ はふく射熱による密度変化の生成項、 $L, D$ は演算子である。

本研究では、以下に示すウトナイ湖の水理特性を考慮して基礎式(1)~(4)式の簡化を行う。

- ①密度は湖全体で一定で、流れは定常とする。
- ②表面波は小さく緩やかであるとして、慣性項を無視する。
- ③湖は浅く、底面摩擦が支配的であるとして水平渦動粘性係数を無視する。
- ④鉛直渦動粘性係数とコリオリ係数を水域全体で一定とする。

①に関しては、ウトナイ湖は水深が浅いので、水面と水底との温度差がほとんどない。密度は主に水温と関係があるため、密度を均一として考えることができる。本研究は、湖流解析モデルに密度が均一と

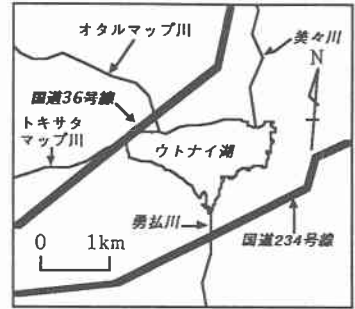


図-1 ウトナイ湖の位置

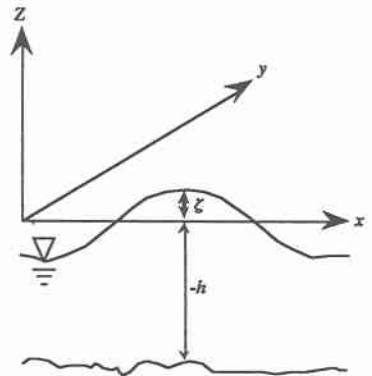


図-2 座標

仮定できる湖に適用されるエクマンタイプの1層モデルを用いた。このモデルは上記②～④の仮定を適用すると次式のように表される。

$$-fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (8)$$

$$fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (9)$$

$$p = \rho_0 g(\zeta - z) \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

鉛直方向に対して流速成分の平均をとるために、水面から水底まで積分すると次式となる。

$$U = \frac{1}{h} \int_{-h}^{\zeta} u \, dz, V = \frac{1}{h} \int_{-h}^{\zeta} v \, dz \quad (12)$$

ここに、 $U, V$ は深さ方向の平均流速である。

(12)式を(8),(9)式に代入すると次式が与えられる。

$$-f h V = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} h + A_v \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{-h}^{\zeta} \quad (13)$$

$$f h U = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} h + A_v \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{-h}^{\zeta} \quad (14)$$

境界条件を水面 $z = \zeta$ で、 $A_v \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_x, A_v \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_y$ 、それ以外の水域で、 $\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\alpha}{h} U, \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\alpha}{h} V$ と置くと次式が与えられる。

$$-f h V = \tau_x - A_v \frac{\alpha}{h} U - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} h \quad (15)$$

$$f h U = \tau_y - A_v \frac{\alpha}{h} V - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} h \quad (16)$$

ここで、 $U, V$ を流れ関数 $\psi$ を用いて表すと、次式が与えられる<sup>2)</sup>。

$$U = \frac{1}{h} \frac{\partial \psi}{\partial y}, V = -\frac{1}{h} \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (17)$$

(17)式を(15),(16)式に代入すると次式ようになる。

$$f \frac{\partial \psi}{\partial x} = \tau_x - \frac{A_v \alpha}{h^2} \frac{\partial \psi}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (18)$$

$$f \frac{\partial \psi}{\partial y} = \tau_y + \frac{A_v \alpha}{h^2} \frac{\partial \psi}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (19)$$

(18)式と(19)式を連立させると湖流の流動方程式を得る。

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \frac{h^2}{A_v \alpha} \left( \frac{\partial \tau_x}{\partial y} - \frac{\partial \tau_y}{\partial x} \right) \quad (20)$$

上式はエクマンタイプモデルの最終的な展開式であり、この式に基づき差分法を用いて計算を行った。

### 3 計算方法

#### 3.1 基礎式の差分化

計算には、差分法を用い、図.3に示すように対象領域を南北36、東西47の格子に分割し、格子幅は50mの正方形とした。

(20)式を差分方程式で表すと次のようになる。

$$\frac{\psi_{i+1,j} + \psi_{i-1,j} + \psi_{i,j+1} + \psi_{i,j-1} - \psi_{i,j} - 4\psi_{i,j}}{k^2} = F \quad (21)$$

ここで、 $k$ は格子幅、 $F$ は(20)式の右辺である。

(21)式より、 $\psi_{i,j}$ を求めると次式で表される。

$$\psi_{i,j} = \frac{1}{4} \left( \psi_{i-1,j} + \psi_{i+1,j} + \psi_{i,j-1} + \psi_{i,j+1} - k^2 F \right) \quad (22)$$

(22)式に基づき各格子点の流れ関数 $\psi_{i,j}$ を求めるためにSOR法を適用した。境界以外の流れ関数の初期値には、 $\psi_{i,j} = 0.001$ を与えた。(22)式を次式のように変形する。

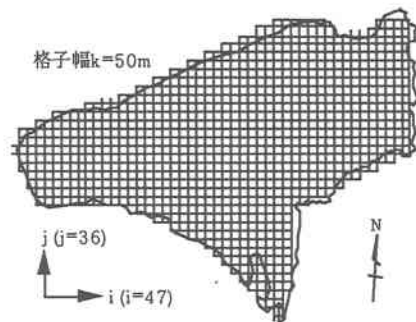


図-3 差分格子

$$\psi_{i,j}^{(k+1)} = \psi_{i,j}^{(k)} + \omega \left[ \frac{1}{4} (\psi_{i-1,j} + \psi_{i+1,j} + \psi_{i,j-1} + \psi_{i,j+1} - k^2 F) - \psi_{i,j}^{(k)} \right] \quad (23)$$

ここに、 $\omega$ は加速緩和係数であり1.2を与え、(23)式を用いて反復計算を行った。

### 3.2 初期・境界条件

初期条件は全水域で水深1.0mを与える。一方、境界条件は、河川流入点においては、流入量を与える。しかし、3流入河川いずれも流量観測は中流域の1点においてのみ行われているため、この値を用いる。1990年から1996年までの7年間の観測値を表-1,2に示す。各河川の流入量は観測期間の平均値を用いた。流出地点における流量は3流入河川の流量の総和とする。流入点以外の境界及び湖底においては不浸透とし境界に垂直な流量は零として与える。

### 4 風のせん断応力

湖流計算を行うには、風のせん断応力と鉛直渦動粘性係数を計算する必要がある。風のせん断応力は、水面せん断応力と底面せん断応力に分けられる。水面せん断応力は次式によって表される。

$$\tau_{0x} = \rho_a \cdot C_{fx} \cdot U_{10x}^2 \quad (24)$$

$$\tau_{0y} = \rho_a \cdot C_{fy} \cdot U_{10y}^2 \quad (25)$$

ここに、 $\rho_a$ は空気密度、 $C_{fx}, C_{fy}$ は水面摩擦係数のx, y成分、 $U_{10x}, U_{10y}$ は水面上10mの高さの風速のx, y成分、 $\tau_{0x}, \tau_{0y}$ は水面せん断応力のx, y成分である。

また、水面摩擦係数 $C_f$ は多数の算定式が発表されているが、本研究ではDeaconnとWebbの式を適用し、次式で表される。

$$C_f = (1.0 + 0.07 U_{10}) \times 10^{-3} \quad (26)$$

一方、底面せん断応力は次式によって表される。

$$\tau_x = \rho_0 \gamma^2 U W - 1.0 \times \tau_{0x} \quad (27)$$

$$\tau_y = \rho_0 \gamma^2 U W - 1.0 \times \tau_{0y} \quad (28)$$

ここで、 $U, V$ は流速成分、 $W$ は $U$ と $V$ の合成速度、 $\gamma^2$ はHansenの潮流観測値 $\gamma^2=0.026$ である。

鉛直渦動粘性係数は次式によって表される。

$$A_v = 0.00055 \times \sqrt{C_f} h U_{10} \quad (29)$$

上記の値を計算するには、平均風速が必要である。しかし、ウトナイ湖では、風の観測は行われておらず、本研究では苫小牧測候所における1990年から1996年までの8,10月の風向、風速データを用いた。8,10月の卓越風向及び平均風速はそれぞれ南東風6.7 m/s、北風6.8 m/sである。

通常、風が湖面に吹き寄せると、湖面に水面勾配が生じ、湖面の各地点で水位差を生じさせる原因となり、コリオリ力が湖流に作用して、流れを右方向に変向させる現象が見られる。しかし、本研究では、湖の各地点での正確な水深の観測データがないため、全水域で水深を一定としたためコリオリ力の影響は考慮しないこととした。

### 5 計算結果

図-2は夏期南東風6.7 m/sを与えた場合の流速分布図を表している。同図に示す結果から美々川の流入口付近で一部南東の風に影響された流れが見られるが、全体的に季節風が湖流に与える影響は小さいと考えられる。また、流入量が多い美々川から勇払川へ向かう卓越した流れが認められる。この湖流特性はオタルマップ川とトキサタマップ川からの流入流量が小さいため、卓越流が発生せず、渦により停滞水域を形成し、美々川から勇払川へ向かう流れには影響を与えなかったと考えられる。この結果、オタルマップ川とトキサタマップ川から流入する流送物質はウトナイ湖の西側に堆積しやすいと考えられる。

図-3は冬期北風6.8 m/sを与えた場合の流速分布図を表している。同図は夏期とほぼ逆向きの風を

表-1 8月の流量データ

8月	トキサタマップ川	オタルマップ川	美々川
90年	0	0.2	2.49
91年	0.15	0.22	2.1
92年	0.01	0.16	1.98
93年	0.11	0.31	2.29
94年	0.13	0.3	2.29
95年	0.73	0.76	3.24
96年	0.07	0.32	2.76
平均	0.2	0.3	2.5

表-2 10月の流量データ

10月	トキサタマップ川	オタルマップ川	美々川
90年	0.32	0.35	2.7
91年	0.26	0.22	2.32
92年	0.18	0.38	2.52
93年	0.03	0.24	2.15
94年	0.12	0.24	2.88
95年	0.14	0.35	2.94
96年	0.37	0.27	3.14
平均	0.2	0.3	2.7

与えた結果であるが、湖流の流向・流速は夏期とほぼ同じ結果が得られた。本解析結果から、ウトナイ湖においては、採用した計算条件下では季節風の風向による明確な影響は認められない。

### 6 今後の課題

本研究の目的は、季節風によるウトナイ湖の湖流特性を把握した後、汚染物質の拡散過程を検討することである。しかし、本解析条件下で流速分布図は、湖内での環流が発生せず、季節風の風向の違いによる湖流の差異を見いだすことができなかった。この原因は、湖全域での水深を一定にしたことにより、湖流に作用するコリオリ力を考慮しなかったためと考えられる。今後は、湖の各地点ごとの正確な水深、風の吹き寄せと及びコリオリ力を考慮した解析モデルを構築し、正確な流速分布図を得ることにより、汚染物質の拡散過程を検討をしていく予定である。

### 参考文献

- 1) 岩佐 義郎：湖沼工学、山海堂、pp106-124,1989
- 2) C.A.Brebbia:Applied Numerical Modelling,pp125-133,1977

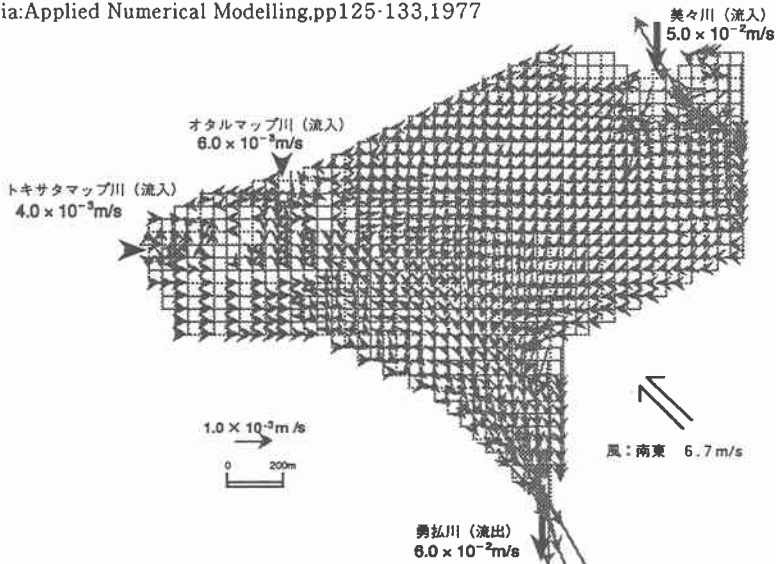


図-4 8月の流速分布図

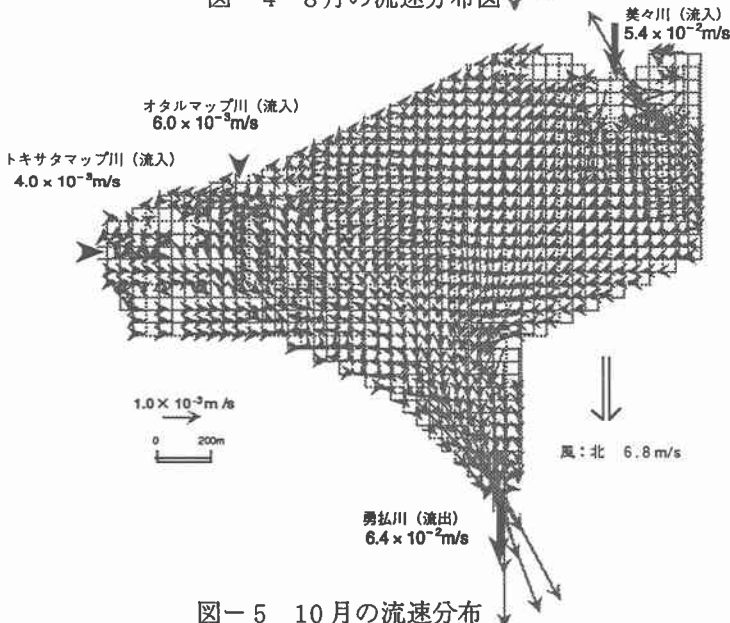


図-5 10月の流速分布