

# ウトナイ湖の湖流と水質拡散に関する数値シミュレーション

Numerical simulation of flows and dispersive behaviours of water quality in lake Utonai

室蘭工業大学大学院  
室蘭工業大学  
株式会社ドーコン  
同上  
同上

○学生員 巻口 義博 (Yoshihiro Makiguchi)  
フェロー 藤間 聡 (Satoshi Tohma)  
正会員 長谷川 裕史 (Hiroshi Hasegawa)  
正会員 長谷川 覚也 (Kakuya Hasegawa)  
正会員 竹村 健 (Takesi Takemura)

## 1. はじめに

ウトナイ湖は図-1に示すとおり北海道苫小牧市東部に位置し、ガン、カモ、ハクチョウ等の渡り鳥の重要な中継地及び越冬地である。湖周辺は自然豊かな湿原域であり、ラムサール条約に登録(1991年登録)され、世界的に重要な自然保護地区となっている。

近年ウトナイ湖周辺では、住宅化、農地開発、ゴルフ場に代表されるリゾート開発、新空港建設など高度に土地利用が進行している。この影響でウトナイ湖への流入量の約50%を占める美々川では、窒素濃度が急増している<sup>1)</sup>。その結果、湖内では栄養塩の流入に伴い、葦などの一年草が繁茂し、それが枯死し湖底に堆積することで水深の減少や水質悪化が引き起こされると考えられる。このような問題に対応し、水質保全を有効に行うために栄養塩などの物質の滞留・拡散傾向を把握することは必要不可欠である。ウトナイ湖は湿原域に存在する浅水湖である。そのため、ウトナイ湖内の流れは周辺湿原域における地下水及び湖上に吹く風により大きく変化すると考えられる。

本研究では、湿原域における地下水及び湖上に吹く風を考慮した湖流の再現計算を行い、ウトナイ湖内の流向・流速を解明する。さらに、美々川流入部にトレーサーを投入した水質拡散予測計算を行い、物質の滞留・拡散傾向を把握する。

## 2. ウトナイ湖の概要

ウトナイ湖は図-2に示すとおり、南北長約1.8km、東西長約2.8km、湖水総面積約2.4km<sup>2</sup>、湖水容量100万m<sup>3</sup>の小さな湖である。流入河川は勇払川、オタルマップ川、美々川、流出河川は勇払川である。図-2は1999年の北海道室蘭土木現業所による観測標高と2000年8月のウトナイ湖平均水位2.09mから求めたウトナイ湖の水深値を示す<sup>2,3)</sup>。この観測結果から、ウトナイ湖は平均水深が約0.8mの浅水湖である。図-3は2000年8月、10月の水温・水質状況を示す。これより、水温は流入出河川と湖内では僅差である。また、ウトナイ湖は浅水湖であるので水温の水深方向の変化は小さい。従って、本研究では水温変化による影響は考慮しない。図-4は図-3に示す観測場所での総窒素濃度(以後T-Nで示す)の経年変化を示す。これより美々川では湖沼環境基準0.2mg/lに比べてT-Nが非常に高く、そのためウトナイ湖内では美々川流入部に近い観測点3でT-Nが非常に高い。

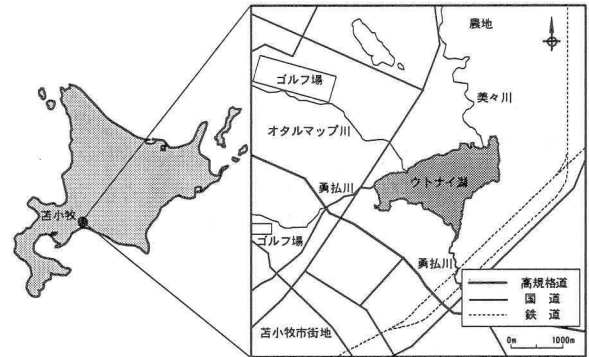


図-1 ウトナイ湖の位置

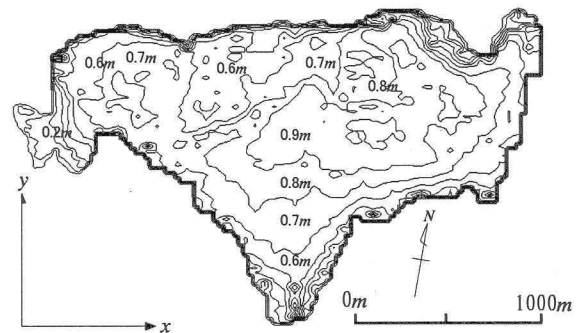


図-2 ウトナイ湖の水深(2000年8月観測)<sup>2,3)</sup>

## 3. 湖流・水質拡散に関する基本方程式

### 3. 1. 湖流の基本方程式

ウトナイ湖の流れに関する基本方程式は、下記の連続式及び運動量方程式を用いる。ここに、解析座標系は、図-2において東方向にx軸、北方向にy軸とする。連続式：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

運動量方程式：

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \frac{\partial (vN)}{\partial y} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} \quad (3)$$

ここに、 $M, N$ は $x, y$ 軸方向の流量フラックス、 $u, v$ は $x, y$ 軸方向の平均流速、 $\tau_x, \tau_y$ は $x, y$ 軸方向のせん断応力、 $\eta$ は水面変動量、 $h$ は静止水深、 $D(=\eta+h)$ は全水深、 $\rho$ は流体密度、 $g$ は重力加速度である。

$x$ 軸方向のせん断応力 $\tau_x$ は、水深が浅い場合、底面に働くせん断応力 $\tau_{bx}$ から水面に作用する風によるせん断応力 $\tau_{sx}$ を引いた値とする<sup>4)</sup>。

$$\tau_x = \tau_{bx} - \tau_{sx} \quad (4)$$

ここで、 $x$ 軸方向の底面せん断応力 $\tau_{bx}$ は次式で与える<sup>5)</sup>。

$$\tau_{bx} = \rho \gamma_b^2 u \sqrt{u^2 + v^2} - \beta \tau_{sx} \quad (5)$$

ここに、 $\beta$ は1.0以下の定数であり、 $\gamma_b$ は底面摩擦係数である。

風による $x$ 軸方向の水面に作用するせん断応力 $\tau_{sx}$ は次式で与える<sup>6)</sup>。

$$\tau_{sx} = \rho_a \gamma_a^2 W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (6)$$

ここに、 $\rho_a$ は空気の密度、 $W_x, W_y$ は $x, y$ 軸方向の風速成分、 $\gamma_a$ は風の水面摩擦係数である。 $y$ 軸方向のせん断応力 $\tau_y$ は $\tau_x$ と同様に計算される。

### 3. 2. 水質拡散の基本方程式

ウトナイ湖内の物質の拡散に関する基本方程式は下記の移流拡散方程式及び物質輸送方程式を用いる。ここに、解析座標系は、図-2において東方向に $x$ 軸、北方向に $y$ 軸とする。

移流拡散方程式：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (7)$$

物質輸送方程式：

$$Q_x = -K_x \frac{\partial C}{\partial x}, \quad Q_y = -K_y \frac{\partial C}{\partial y} \quad (8)$$

ここに、 $C$ は水深方向に平均化された物質濃度、 $u, v$ は $x, y$ 軸方向の平均流速、 $K_x, K_y$ は $x, y$ 軸方向の拡散係数、 $Q_x, Q_y$ は単位時間に単位面積を通過して移動する物質質量である。

流速成分及び物質濃度は、水深方向に平均化した値である。そのため、物質の湖底への沈降あるいは湖底からの巻上げは考慮することができない。従って、本研究で行う水質拡散予測計算は、物質の平面的な拡がりを予測するものである。

### 4. ウトナイ湖の湖流再現計算

ウトナイ湖内の流れを再現計算を行うことで把握し、計算結果と観測値との比較により計算結果の妥当性を検証する。再現期間は降雨による出水時を除く2000年8月17日から23日とする。

本研究では差分法により計算を行うため、計算格子にはウトナイ湖全域を格子間隔25mで分割した等間隔直交格子を用いる。計算に用いる水位は再現期間の湖内平均水位2.04mとする。河川流量は2000年8月12日に4回観測されており、その平均観測流量を用いる<sup>7)</sup>。流入河川に相当する境界格子点には、平均観測流量を格子幅で除した流量

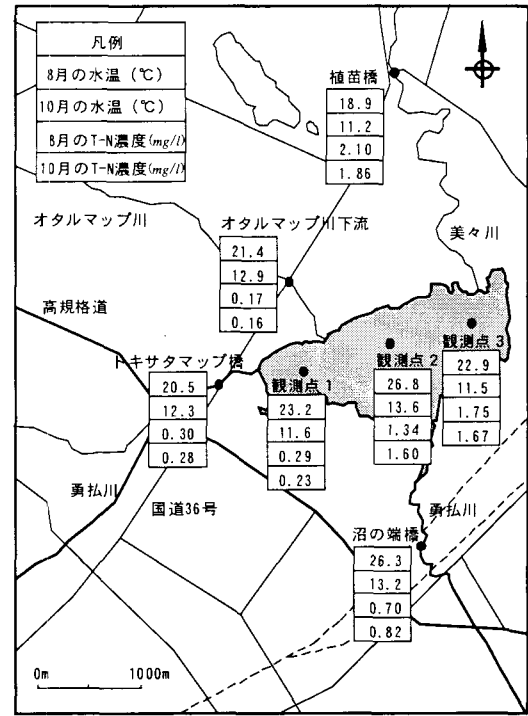


図-3 2000年8月, 10月の水温・水質状況

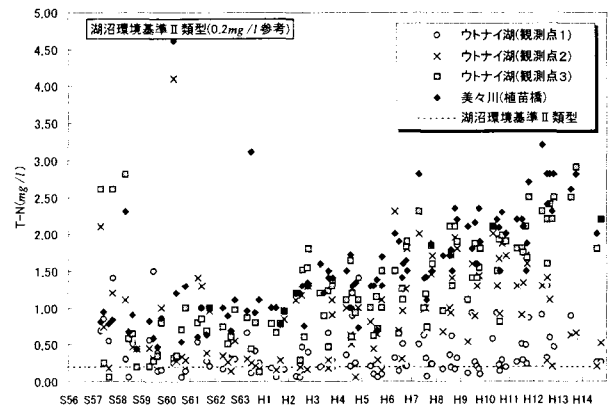


図-4 T-Nの経時変化

フラックスを与える。河川以外の境界格子点には、地下水流量フラックスを与える<sup>8)</sup>。流出河川に相当する境界格子点には、河川及び地下水の流入・流出の収支を考え、河川流入流量フラックスと地下水流量フラックスの総和と等しくする。計算に用いる風は図-5に示すウトナイ湖岸に設置した風向・風速計の観測値とする<sup>9)</sup>。計算条件を表-1に示す。

湖内の流向・流速は、図-5に示すとおり5点で観測されている<sup>10)</sup>。観測結果によれば、図-6に示すとおりNo. 1, No. 2, No. 3, No. 5の地点は、河川流入量の変化が小さいため、流向・流速の変化は小さい。ウトナイ湖中央に設置されたNo. 4の地点は、風の影響を顕著に受けるため、流向・流速の変化が大きくなっている。

再現計算では、これら5点の観測値に基づき、底面摩擦係数や風の水面摩擦係数などのパラメータの同定を行う。そのため、風の影響が湖流に大きく反映されていると考えられるNo. 4の地点を重視してパラメータの同定を行った。

表-1 湖流再現計算条件

項目	計算条件
計算期間	2000年8月17日~23日
流入河川	勇払川0.08m <sup>2</sup> /s
	オタルマップ川0.01m <sup>2</sup> /s
	美々川0.14m <sup>2</sup> /s
流出河川	勇払川0.22m <sup>2</sup> /s
地下水	地下水正味流出フラックス0.01m <sup>2</sup> /s
風	計算期間での観測風向・風速
平均水位	計算期間平均水位2.04m

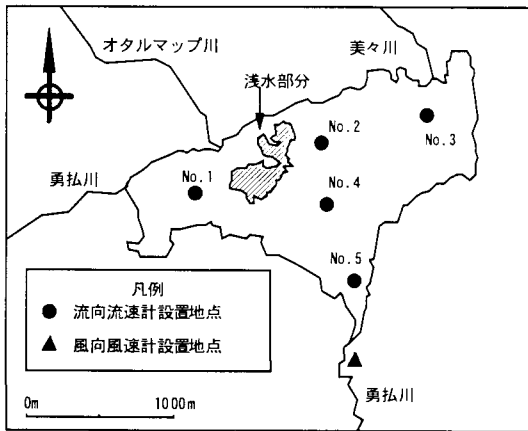


図-5 流向・流速及び風向・風速計設置地点

表-2 再現期間内平均流速比較

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
観測流速(m/s)	0.005	0.021	0.018	0.010	0.055
計算流速(m/s)	0.011	0.012	0.006	0.006	0.059

その結果、風の水面摩擦係数  $\gamma_a=0.036$ 、底面摩擦係数  $\gamma_b=0.051$ 、 $\beta=0.01$  を得た。

表-2は、図-5に示す観測場所での再現期間内の平均観測流速と平均計算流速を示す。これより、計算流速は観測流速と概ね一致した。流向変動成分は、図-6に示すとおり、No. 1, No. 3, No. 4, No. 5において観測値と計算値は概ね一致したが、No. 2において反対の傾向を示した。この原因としては、No. 2観測点左側に位置する浅水部分の影響を適切に表現出来なかったためと考えられる。

### 5. ウトナイ湖の水質拡散予測計算

ウトナイ湖における物質の滞留・拡散傾向を把握するため予測計算においては、美々川流入部に一樣濃度のトレーサーを連続投入し、平面的な濃度分布の時間変化を求める。

予測計算で用いる風は、ウトナイ湖が凍結する冬期を除く4月~11月までの期間において、近傍の苫小牧測候所で1992年~2001年まで観測された風向・風速<sup>1)</sup>を毎正時最頻風向に整理し、これを30日繰り返し与える。流入出河川流量及び地下水、湖内平均水位は、前述の湖流再現計算条件と同一とする。計算条件を表-3に示す。

図-7、8は、それぞれ計算開始から30日後の3時及

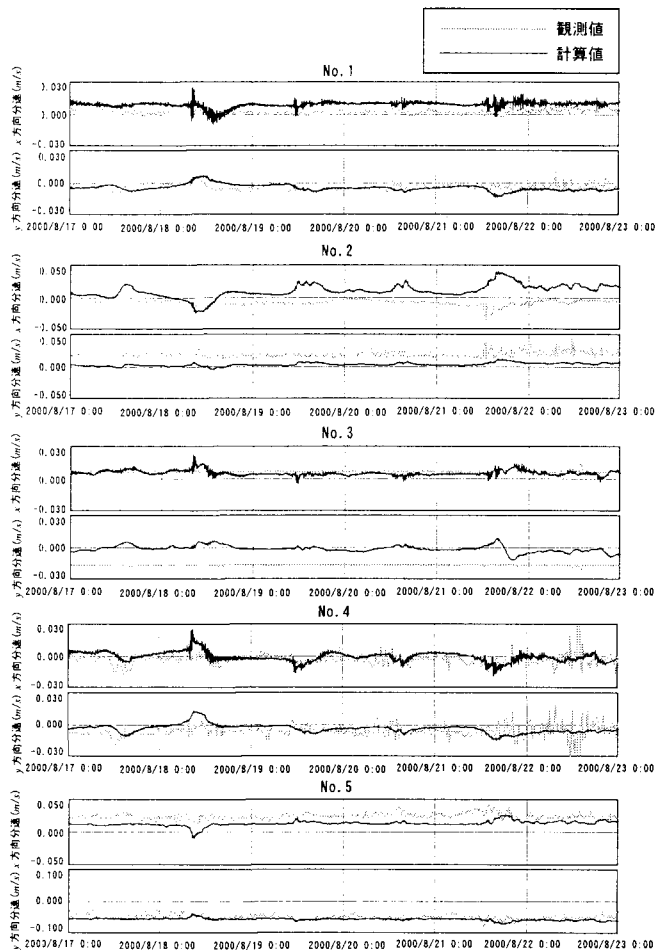


図-6 湖内観測点の流向・流速再現図

表-3 水質拡散予測計算条件

項目	計算条件
計算期間	30日間
流入河川	勇払川0.08m <sup>2</sup> /s
	オタルマップ川0.01m <sup>2</sup> /s
	美々川0.14m <sup>2</sup> /s
流出河川	勇払川0.22m <sup>2</sup> /s
地下水	地下水正味流出フラックス0.01m <sup>2</sup> /s
風	毎正時の卓越風30日繰り返し
平均水位	2.04m
トレーサー	美々川流入部に連続投入
拡散係数	0.1m <sup>2</sup> /s

び12時の湖内流向・流速分布である。3時時点では湖上に北風が吹いており、12時時点では南南東風が吹いている。これより、風向の変化によって湖流の特性は大きく異なることがわかる。特に顕著に現れる湖流の特性としては、風向がNの場合、湖中央部で反時計回りの環流が形成されることである。この環流はウトナイ湖での物質の滞留に大きな効果を及ぼすと考えられる。

図-9、10は、計算開始30日後の3時及び12時のトレーサー濃度分布である。これより、美々川流入部に投入されたトレーサーは、流出河川に向かう流れに運ばれ南下し、勇払川より流出する傾向にあるが、一部は風の変化で生じる環流によって湖中央部に運ばれる。

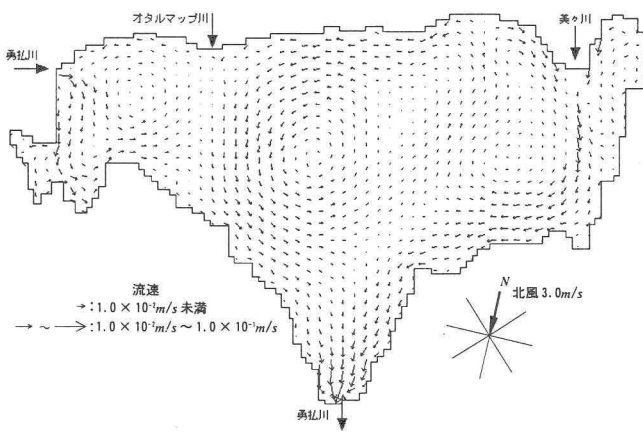


図-7 流向・流速分布30日目3時時点

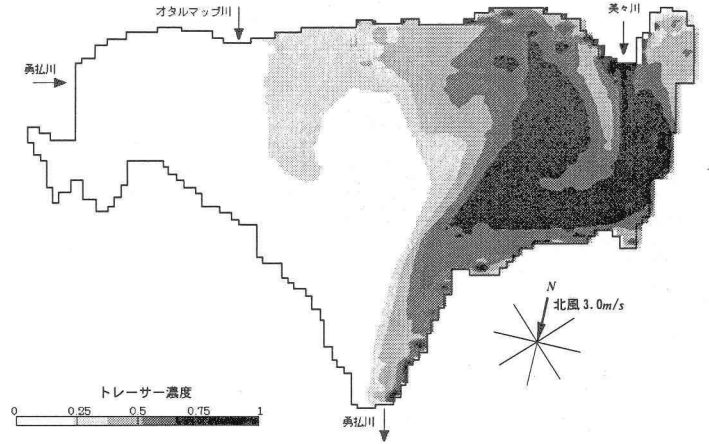


図-9 トレーサー濃度分布投入30日目3時時点

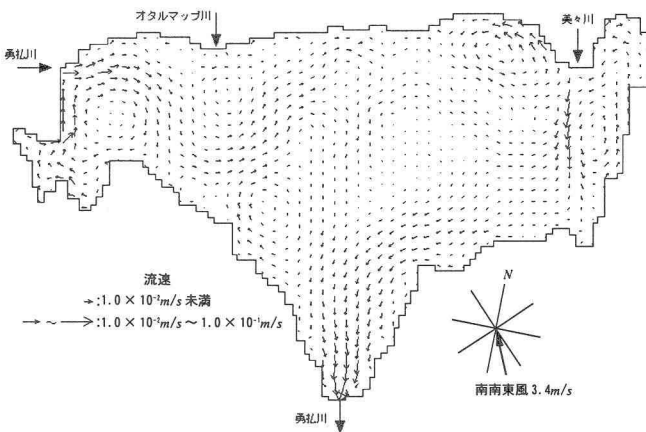


図-8 流向・流速分布30日目12時時点

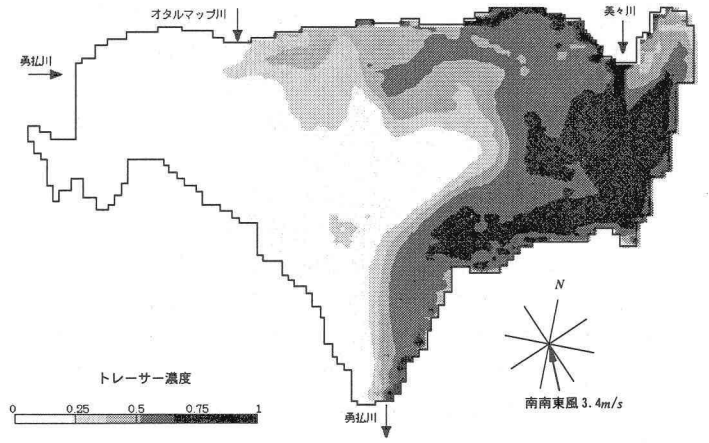


図-10 トレーサー濃度分布投入30日目12時時点

## 6. おわりに

本研究で得られた結論を以下に要約する。

(1) 地下水及び風を考慮した湖流再現計算結果より、平均流速については観測値と概ね一致し、その妥当性が得られた。流向については、No. 2で計算結果と観測値との間に相違が見られたが、湖全体としては良く再現できたと考えられる。

(2) ウトナイ湖の湖流は、風向の変化により大きく異なる。特に風向がNの場合、湖中央部で環流が形成される。

(3) 美々川流入部に投入されたレーサーは、東湖岸に沿って勇払川に向かう流れによって運ばれるため、湖東側では高い濃度分布となる。さらに風の変化で生じる環流によってレーサーが湖中央部に運ばれることが認められる。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、貴重な資料を提供して頂いた北海道室蘭土木現業所治水課長中西由一氏を始め関係者各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 北海道編：勇払川改修工事水質調査，2002.
- 2) 北海道編：勇払川改修工事湖床測量，1999.
- 3) 北海道編：ウトナイ湖管理日報，2000.
- 4) 岩佐義朗：数値水理学，丸善(株)，p.162，1995.
- 5) 前出4)，p.162.
- 6) 前出4)，p.162.
- 7) 北海道編：ウトナイ湖湖内現状調査，pp.19-32，2000.
- 8) 長谷川覚也，長谷川裕史，藤間聡：地下水流動解析を含むウトナイ湖水拡散モデルについて，水工学論文集，第47号，pp.1207-1212，2003.
- 9) 前出7)，pp.2-6.
- 10) 前出7)，pp.7-13.
- 11) 苫小牧測候所：気象記録，1992-2001.
- 12) 岩佐義朗，井上和也，足立敏之：琵琶湖南湖の湖流と拡散に関する数値シミュレーション，京都大学防災研究所年報，第21号B-1，pp.293-305，1978.
- 13) C.A. Brebbia: APPLIED NUMERICAL MODELLING, PENTECH PRESS London Plymouth, pp.125-134, 1977.