

地下水流動および海陸風を考慮した ウトナイ湖の水質拡散特性について

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF WATER QUALITY IN LAKE UTONAI, JAPAN CONSIDERING EFFECTS OF GROUNDWATER FLOW AND SEA-LAND WIND

竹村 健¹・長谷川 覚也²・長谷川 裕史³・藤間 聡⁴
Takeshi TAKEMURA, Kakuya HASEGAWA, Hiroshi HASEGAWA and Satoshi TOHMA

¹ 正会員 株式会社ドーコン 河川部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4番1号)

² 正会員 工修 株式会社ドーコン 河川部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4番1号)

³ 正会員 株式会社ドーコン 河川部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4番1号)

⁴ フェロー会員 工博 室蘭工業大学工学部 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27番1号)

The area of this study, Lake Utonai, is in eastern Tomakomai, Hokkaido, Japan. In recent years, the lake has been experiencing the ecological eutrophication resulted from nutrient salts and fine sediments from the rivers, which will damage the ecosystem. The lake water is affected by sea-land wind from costal regions, and by groundwater flow, due to the lake's shallow depth. This study proposed a water quality model and a water flow model for the shallow lake, considering effects of groundwater flow and sea-land wind.

Key Words : Lake Utonai, groundwater flow, sea- land wind

1. はじめに

ウトナイ湖を含む湿原地域は、図-1に示す北海道苫小牧市東部に位置し、ラムサール条約に登録(1991年)された自然保護区域である。しかしながら、近年美々川やウトナイ湖周辺では、住宅地、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み、栄養塩や微細土砂の流入による生態系への影響が懸念されている。

本研究は、ウトナイ湖における環境保全対策の客観的評価法の確立を目的として、物質移動の定量表現を可能とする地下水流動を取り込んだ精度の高い水質拡散モデルを構築した。本モデルの活用法としては、水質悪化要因の分析及び汚濁源対策や樹林帯等による負荷軽減効果の定量化が可能になると考えている。

ウトナイ湖は、湖自体が湿原の一部であり、湖内の流れが湿原域における地下水の影響を強く受ける浅水湖である。このため、従来の湖のみを扱うモデルによる湖流解析に、湖岸境界部での地下水流の影響をいかに取り込むかが課題であった。

本論文は、長谷川らが行った地下水流動解析¹⁾を含む

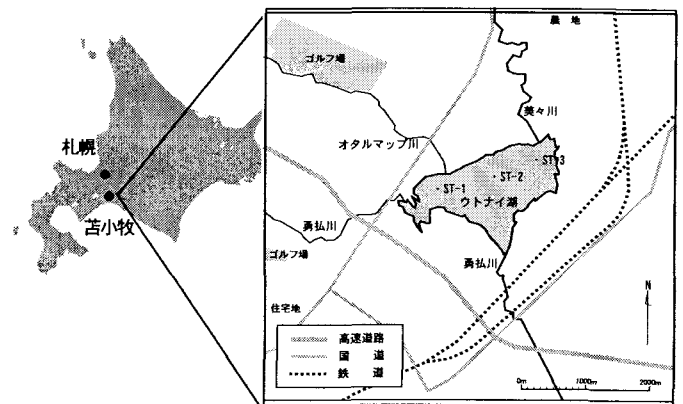


図-1 ユトナイ湖の位置

ウトナイ湖内の流れの解析モデルを基礎とし、平成12年調査による境界条件(地下水位、風向、風速、河川の流入量の観測値)を用い、再現計算を実施した。その結果、全ての境界条件を取り込んだ解析結果が最も再現性が高い結果となり、地下水流動についてもその透水量が概ね再現されていることを確認した。また、検証を行った地下水流動モデル及び湖流解析モデルに水質拡散モデルを取り込むことで、湖内における水質拡散を再現し、水質予測シミュレーションを実施した。

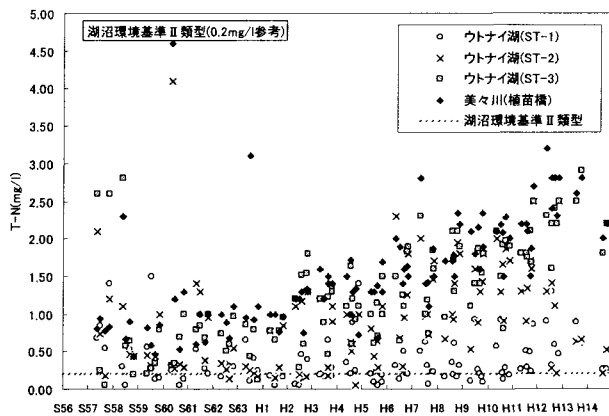


図-2 T-N 経年変化

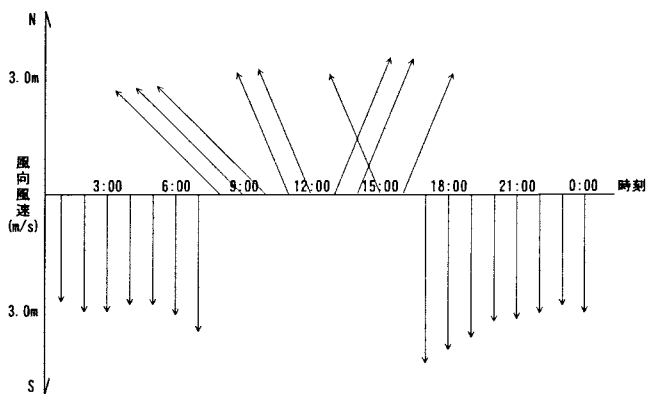


図-3 毎正時最頻風向(苫小牧測候所)

2. ウトナイ湖を含む湿原域の特性

ウトナイ湖は図-1 に示すとおり、流域面積は約 117 km²、東西長約 2.8km、南北長約 1.8km、湖水面積約 2.4km²、湖水容量約 100 万 m³ の海跡湖で流入河川は美々川、勇払川、オタルマップ川、流出河川は勇払川である。

ウトナイ湖における湖流・水質拡散特性を考える上で必要となる地下水、海陸風、流入出河川及びウトナイ湖の水温・水質について概説する。

(1) 地下水

ウトナイ湖周辺の地形は、北側に長沼低地、西側に野幌丘陵、東側に馬追丘陵があり、ウトナイ湖は勇払低地に位置している。

地質状況は、恵庭・樽前降下軽石層が分布し、その下層に支笏火山噴出物層が分布している。なお、樽前降下軽石層は透水係数が非常に高いことが知られている。

美々川流域やウトナイ湖周辺の湿原域とそこに形成される自然環境は、主として支笏火山噴出物層を帯水層とした地下水により維持されている。しかし、図-2 に示すとおり近年において特に美々川の水質汚染が顕著であり、ウトナイ湖の富栄養化や湿原域における地下水汚染の懸念がある。

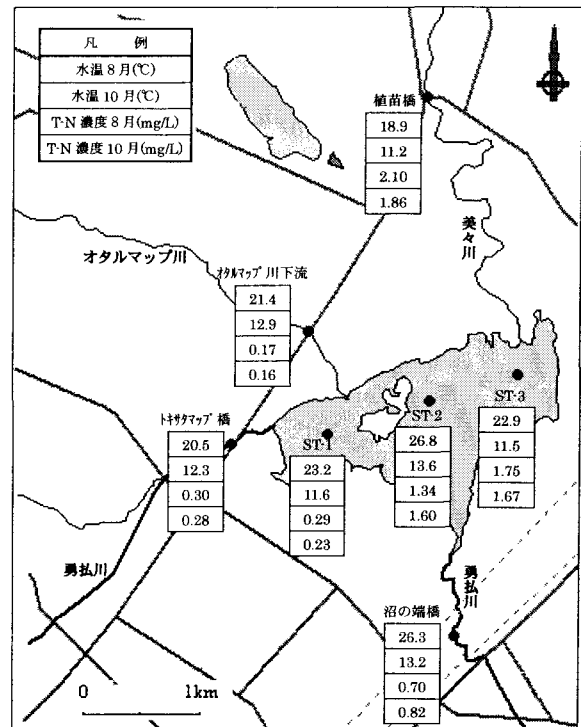


図-4 水温・水質の状況(平成 11 年 8 月, 10 月)

(2) 海陸風

水深 1m 程度の浅水湖であるウトナイ湖は、海岸から内陸側に直線距離で約 5km に位置し、また、海岸からウトナイ湖までは低平地が続くため、海と陸の熱容量の違いにより発生する海陸風が卓越しやすく、湖流にも影響を及ぼしていると考えられる。ウトナイ湖が結氷する冬期間を除く 4 月～11 月までの期間において、近傍の苫小牧測候所における 1992～2001 年の過去 10 年間の毎正時最頻風向を整理した結果を図-3 に示す。夜間は陸風、昼間は海風の発生頻度が高く、海陸風が卓越していることを確認した。

(3) 流入出河川及びウトナイ湖の水温・水質

水温については、図-4 のとおり流入出河川と湖内の水温差がわずかであることから、解析は水温一定の条件とした。

美々川における T-N 濃度は年々増加傾向にあり、その数値は非常に高く、またウトナイ湖においても美々川流入部付近で増加傾向にある。今回の水質拡散予測シミュレーションでは、美々川合流部にある濃度のトレーサを与えて、湖内での濃度変化を確認する。

3. 地下水流動解析

ウトナイ湖および美々川の涵養は地下水（TP で概ね 2m～10m）が主であり、地下水の流入流出が湖流に与える影響が大であることから、当該区域の水質拡散を正確に推定するには地下水の影響を考慮する必要がある。

表-1 地下水流動解析諸元

項 目	使用データ
平均地下水位 m	平成 8 年 1 月 1 日～12 月 31 日
地下水位 h	平成 8 年 8 月 1 日～8 月 31 日
解析領域	12km×12km(144km ²)
観測井数 N	27 地点

本研究では、ウトナイ湖近傍域の地下水流量ベクトルの把握およびウトナイ湖への平均的な地下水流入・流出量を予測するため、ウトナイ湖及びその周辺域を対象とした地下水流動解析を行った。解析諸元を表-1 に示す。

(1) モデル基礎式

本解析モデルは、必要とする情報が複数地点の観測地下水位 h のみと極めて少ない資料より地下水流量ベクトルの平面分布を予測できる点が特徴的である。

任意地点の地下水位 h は、観測期間における平均値 m と変動成分 z の和として(1)式で表す。平均値 m は、領域内で空間分布を有するとして平面位置座標 x, y の多項式(2)式による空間トレンドとして近似する。変動成分 z は、クリギング²⁾と呼ばれる(3)式の線形回帰式より推定する。同回帰式における重み係数 λ_0^i は、(4)式および(5)式から推定する。(4)式における $\gamma(d)$ は、二点間における状態変数の差の分散を定義する指標であり、バリオグラムと呼ばれる。以上により地下水位 h の空間分布を決定する。

$$h(x, y, t) = m(x, y) + z(x, y, t) \quad (1)$$

$$m(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + \dots + a_{k-2}x^2y^{n-2} + a_{k-1}xy^{n-1} + a_ky^n \quad (2)$$

$$z^*(X_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_0^i z(X_i) \quad (3)$$

$$\gamma(d) = \frac{1}{2N(d)} \sum_{i=1}^N [z(X_i + d) - z(X_i)]^2 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_0^i \gamma(X_i - X_j) + \mu = \gamma(X_i - X_0) \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_0^i = 1 \quad (j = 1, \dots, N)$$

ここに、 x, y ：平面位置座標、 t ：時間、 a ：トレンド多項式の係数、 k ：トレンド項数、 n ：多項式の次数、 $z^*(X_0)$ ：非観測地点 X_0 における地下水位推定値、 $z(X_i)$ ：観測地点 X_i における地下水位観測値、 λ_0^i ： $z(X_0)$ の重み係数、 $\gamma(d)$ ：バリオグラム、 $z(X_i)$ ：観測地点 X_i における地下水位、 d ：地下水位観測点からの距離、 $N(d)$ ：観測点数を示す。

透水量係数の空間分布は、(1)式で得られた地下水位 h より、次式で示す平面二次元定常地下水流動方程式から推定する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T(x, y) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T(x, y) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q(x, y) = 0 \quad (6)$$

表-2 理論バリオグラム定式化

項 目	解析結果
階級	1000m 刻み
適用半径	3100m 以内
理論バリオグラム	$\gamma(d) = 2.31 \times 10^{-7}d + 7.41 \times 10^{-4}$

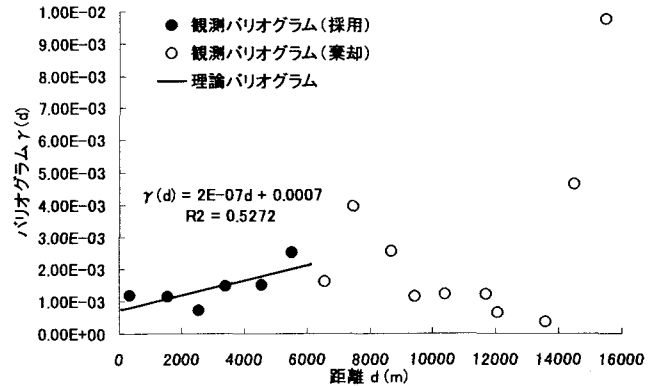


図-5 地下水位変動の理論バリオグラム

ここに、 $h(x, y)$ は地下水位、 $T(x, y)$ は透水量係数、 $Q(x, y)$ はかん養量や揚水量を示す。

(2) 流量ベクトル平面分布の推定

a) 解析条件

地下水流動解析の解析対象領域は、ウトナイ湖を含むその周辺域 12km×12km とした。地下水位は十分な資料が存在する平成 8 年調査結果を採用し、平均地下水位 m は 1 月 1 日～12 月 31 日の 1 年間の観測データ、地下水位 h は 8 月 1 日～8 月 31 日の平均値を使用した。

b) 地下水位 h の平面分布の推定

平均地下水位 m は、観測値との残差平方和、 $AIC^3)$ (赤池情報量基準) 及び流域状況との適合性から多項式(2)で示すトレンド次数 n を 4 次として、各係数 a_i を決定することにより推定した。

地下水位変動量 z は、観測バリオグラム値を求めるため観測点間の距離を 1000m 刻みで階級分けを行う。得られたバリオグラムの結果を表-2 および図-5 に示す。同図から距離約 6200m まで理論バリオグラムは線形を有していることが認められる。したがって、推定する地点から半径 3100m の円に内在する観測点の値のみ(5)式に適用した。

以上の考察より推定した地下水位と観測地下水位を図-6 に示す。解析で求めた推定地下水位と観測地下水位は概ね一致し、再現性を有していると判断した。

次に、推定地下水位と地下水流動解析により推定した地下水流量ベクトルの比較結果を図-7 に示す。地下水流量ベクトルは、推定地下水位コンターに対して直交し、北東および北西方向から美々川およびウトナイ湖に流入することが認められる。

ここで、地下水流動解析において推定した透水係数 k の妥当性を検証する。透水係数 k の算定は、推定地下水

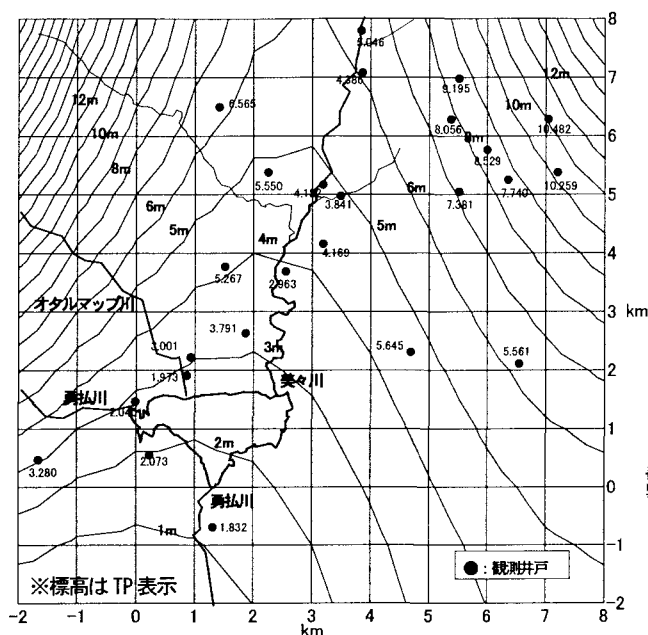


図-6 観測水位と解析地下水位コンター (TP)

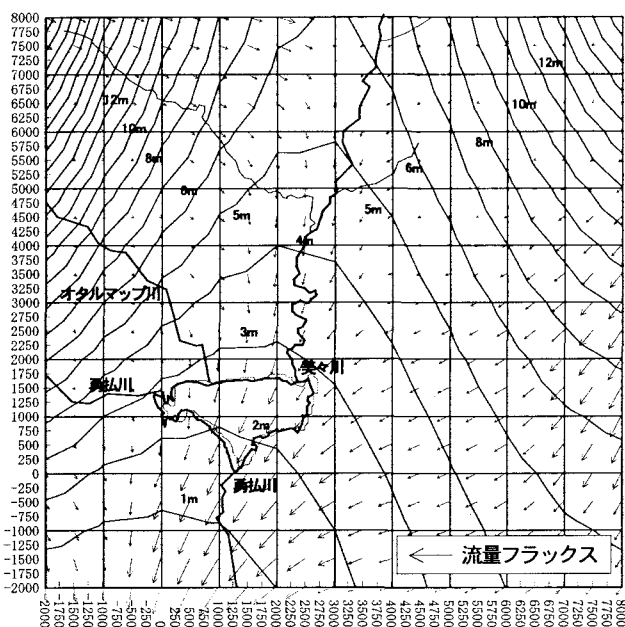


図-7 推定地下水位と地下水流量フラックスの比較

位 h と不透水層面から帯水層厚 B を求め、透水量係数 T を帯水層厚 B で除すことで求めた。本モデルで推定した透水係数と美々川流域における代表的な構成地質の現地試験結果資料⁴⁾との比較を表-3に示す。現地試験結果は、帯水層では $5 \times 10^{-1} \sim 2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ の範囲を示し、低透水層、難透水層では $6 \times 10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$ の範囲を示す。帯水層を対象とした計算値は、 $1 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ にあり、現地試験結果の範囲に収まることから透水係数の値は正確に推定されているといえる。

表-3 現地試験値と計算値の透水係数比較⁴⁾

条 件	透水係数 k (cm/s)	地質区分
現地試験結果	構成地質 Spfl _{1,3}	$2 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$
	構成地質 Spfa _{1,2}	5×10^{-1}
	構成地質 Spfl _{7,10}	7×10^{-2}
	構成地質 B _{B,C}	6×10^{-5}
	構成地質 F _M	1×10^{-6}
計算値	$1 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-2}$	帯水層

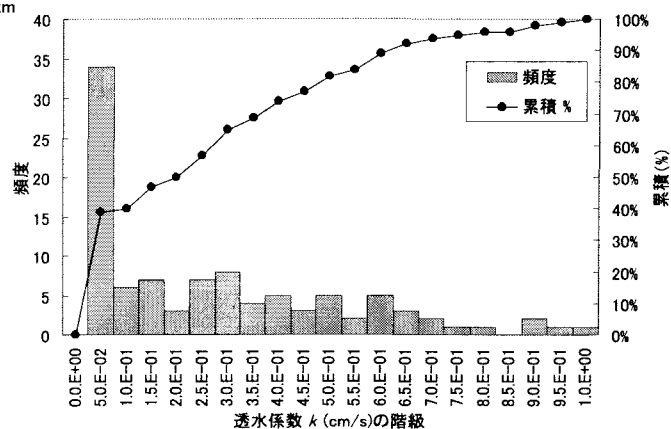


図-8 透水係数推定値のヒストグラム

表-4 再現計算条件

項目	計算条件
計算期間	平成12年8月17日～23日の6日間
流入河川	勇払川 $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ 美々川 $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$ オタルマップ川 $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$
流出河川	勇払川 $0.22 \text{ m}^3/\text{s}$
地下水	流入流出を考慮
風	毎正時観測風向・風速
平均水位	期間平均水位 2.04 m

4. ウトナイ湖流再現計算

本研究において構築した湖流解析モデルは、平水時での時系列変化が小さい河川流量、地下水流量及びウトナイ湖水位を定常条件として解析を行った。一方、風向・風速は、毎正時の観測風向・風速値を1時間おきに变化させ、湖流解析を実施した。解析結果の妥当性は、実績観測結果との比較により検証を行った。

再現計算の対象期間は、降雨による出水時を除く平成12年8月17日～23日を対象とした。河川流量は平成12年8月12日に4回観測が行なわれており、平均観測流量として与えた。風はウトナイ湖岸に設置した風向・風速計の毎正時観測風向・風速値を与えた。湖内の流向・流速計の設置地点は図-9のとおり、5地点で観測が行なわれている。観測結果によれば、No1, No2, No4, No5の地点は、河川流入の影響が大きい、流向・流速の変化は小さい。

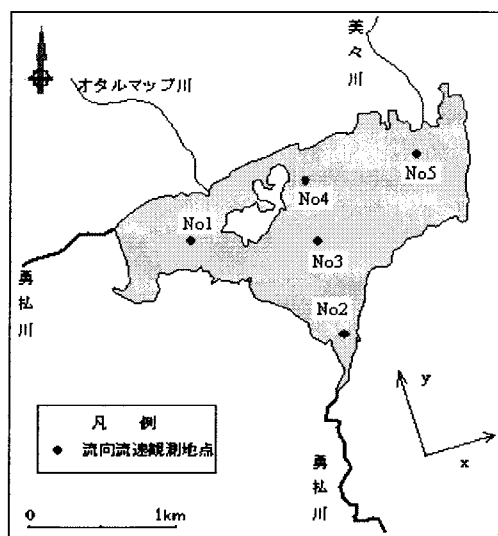


図-9 流向流速計設置地点

表-5 再現期間内平均流速比較

	No1	No2	No3	No4	No5
観測流速(m/s)	0.005	0.055	0.010	0.021	0.018
計算流速(m/s)	0.011	0.059	0.006	0.012	0.006

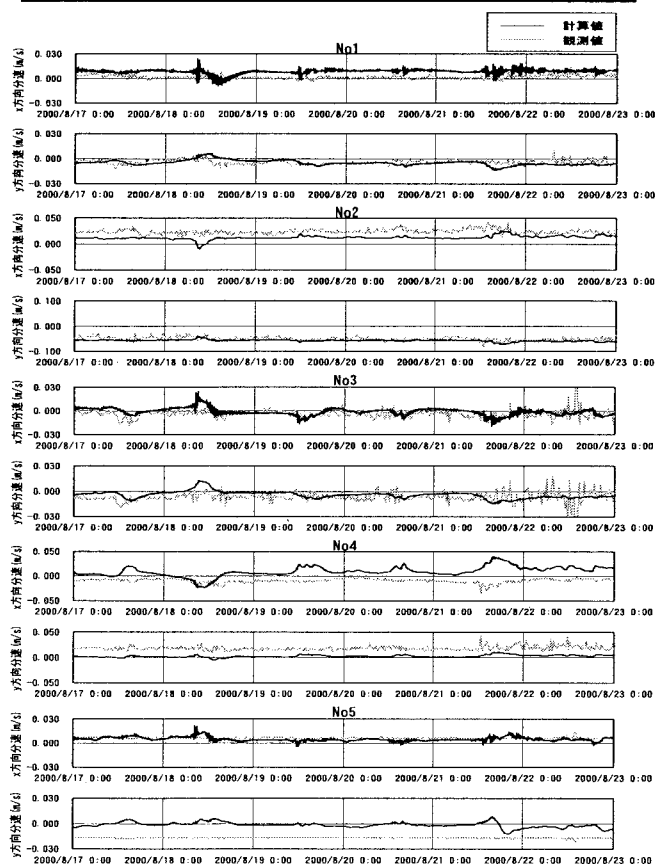


図-10 湖内観測点の流向流速再現図

また、ウトナイ湖中央部に設置された No3 の地点は、風の影響を遮断する施設が無い場合、流向・流速の変化は、大きくなっている。計算条件を表-4 に示す。湖流解析の基礎式は、流速成分を平面的にとらえ水面変動による圧力差を考慮可能な 2 次元非線形長波方程式を採用した。

表-6 予測計算条件

項目	計算条件
計算期間	30日間
Δt	4sec
流入河川	勇払川 $0.08\text{m}^2/\text{s}$ 美々川 $0.14\text{m}^2/\text{s}$ オタルマップ川 $0.01\text{m}^2/\text{s}$
流出河川	勇払川 $0.22\text{m}^2/\text{s}$
地下水	流入流出を考慮
風	毎正時の卓越風向30日間繰り返し
平均水位	2.04m
トレーサ	美々川流入部に連続注入
拡散係数	$0.1\text{m}^2/\text{s}$

計算メッシュ間隔は 25m とする。

再現計算では、これら 5 地点の観測データに基づき、湖床粗度係数や風の水面摩擦係数などのパラメータ同定を行うが、特に No3 の地点は、風の影響が湖流に反映されているため、重視してパラメータの同定を行った。表-5 に示す再現計算結果は、平均流速に関し概ね一致したと考えている。しかしながら、図-10 に示す流向変動成分は、十分な再現精度を有していない地点が存在する。特に No4 は、流向成分が反対の傾向を示しており、その原因として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ている。

5. ウトナイ湖の水質拡散予測シミュレーション

汚染物質の滞留・拡散特性を把握することを目的とし、地下水流入及び海陸風を外的条件による、予測シミュレーションを行った。海陸風は、近隣の苫小牧測候所における毎正時の最多風向を 30 日間繰り返し与えた。

なお、表-6 に示すとおり、流入・流出河川の流量及び地下水、湖内の水位に関しては、前述の再現計算条件を使用した。計算結果を図-11, 12 に示す。図-13, 14 は計算開始 30 日目の湖流及びトレーサの滞留・拡散状況を示している。ウトナイ湖における水質拡散シミュレーションを行った結果、美々川の流入部から投入したトレーサはゆっくりと南下し、湖南側の勇払川へ流出していく傾向にあるが、風の変化に伴い湖流も変動するため、一部が湖の中央部で発生する環流に捉えられ滞留し、濃度が高くなる結果となった。

6. おわりに

本研究は、地下水流動を境界条件に取り入れた浅水湖を対象とした水質拡散モデル開発のために行った。解析上重要な要因となる湖周辺の地下水流動解析モデルには、

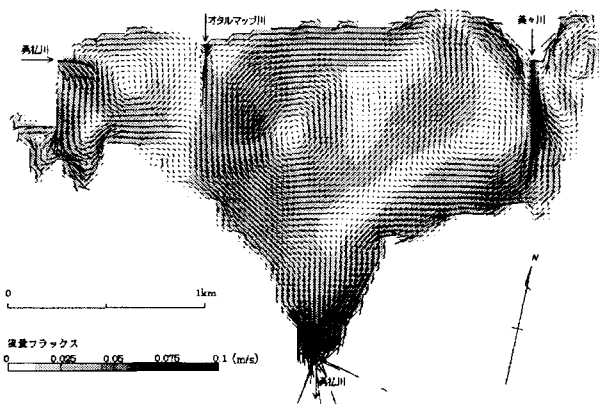


図-11 流向流速結果 30 日目 6 時時点

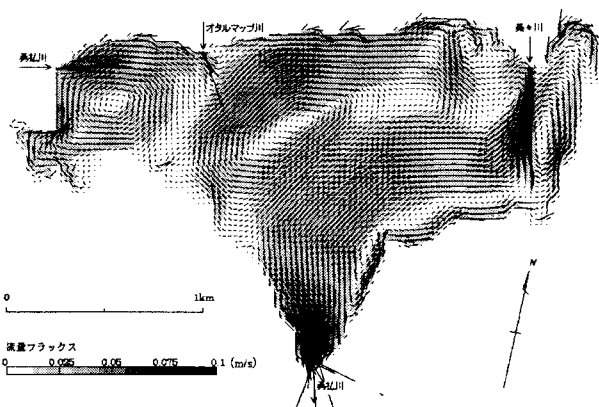


図-12 流向流速結果 30 日目 18 時時点

バリオグラム理論を適用するとともに、解析により得られた推定透水係数は実測値とほぼ一致し、高い適用性であることを実証した。また、地下水流動を考慮したウトナイ湖流解析モデルを用い、平成 12 年 8 月の湖流ベクトルについて実測値と比較した結果、平均流速については概ね一致した。さらに、水質拡散現象を再現するモデルについては、湖北側に位置する美々川からトレーサを注入し、その濃度分布域を確認したが、湖東側に南下する流れに伴われ高い濃度を有する区域がみられた。さらに湖中央部には風向変化に伴い環流が生じ、トレーサがこの環流に補足され比較的濃度の高い部分が発生した。これらは、観測結果による濃度の高い分布域とも比較的一致する結果となった。

今後、時間的な変化についても追従可能なモデルを開発することでウトナイ湖の水質拡散定量評価モデルの構築が可能であると考えている。また、汚濁源対策や樹林帯による水質改善対策について評価を行うとともにサロベツ湿原や釧路湿原についても解析する予定である。

謝辞：本研究を行うにあたり、ウトナイ湖周辺の地下水位データを提供して頂いた国土交通省北海道開発局石狩川開発建設部千歳川河川事務所の関係各位に対し、ここに記して謝意を表します。

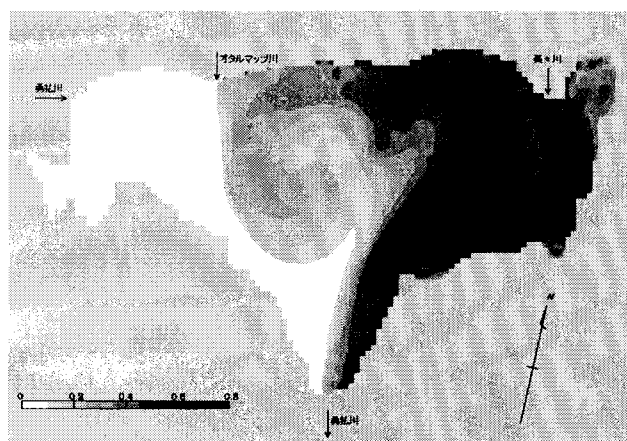


図-13 トレーサ濃度（注入 30 日目 6 時時点）

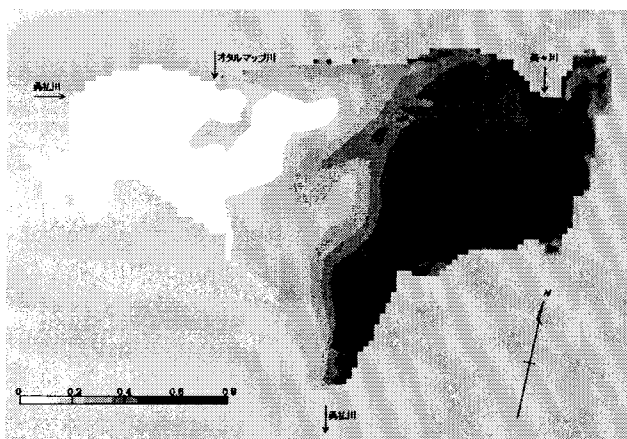


図-14 トレーサ濃度（注入 30 日目 18 時時点）

参考文献

- 1)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.
- 2)Delhomme, J. P. : Kriging in the Hydrosociences, *Advances in Water resources*, vol.1, No.5, pp.251-266, 1978.
- 3)T.R.マッカーラ，三浦功，田尾陽一：計算機のための数値計算法概論，pp.225-231，1972.
- 4)千歳川放水路地下水工法調査委員会報告書，pp.21，2001.
- 5)一松信，戸川隼人：数値解析における誤差，pp.113-125. 1975.
- 6)藤間聡，中田満洋：空間分布構造を有する透水係数の統計的推定法，日本地下水学会会誌，第 28 巻，第 1 号，pp.15-24，1986.
- 7)和田麻衣子，藤間聡：不均質帯水層における地下水パラメータの推定に関する研究，土木学会北海道支部論文報告集，pp.254-259，2000.
- 8)岩佐義朗著：湖沼工学，山海堂，pp.118-122，1990.
- 9)Ghislain de Marsily : Quantitative Hydrogeology, *ACADEMIC PRESS*, pp.284-337, 1986.
- 10)C.A.Brebbia : APPLIED NUMERICAL MODELLING, *ENTECH PRESS LONDON PLYMOUTH*, pp.125-130, 1978

(2003 年 9 月 30 日受付)