

論文

釧路湿原の地下水位分布の推定

福士 陽子 (室蘭工業大学大学院)

和田 麻衣子 (室蘭工業大学大学院)

藤間 聡 (室蘭工業大学)

河内 邦夫 (室蘭工業大学)

Estimation of groundwater distribution in Kushiro Wetland

Yoko FUKUSHI (Muroran Institute of Technology)

Maiko WADA (Muroran Institute of Technology)

Satoshi TOHMA (Muroran Institute of Technology)

Kunio KAWAUCHI (Muroran Institute of Technology)

Abstract

The area of this study, Kushiro Wetland, is the largest wetland in Japan. It is known as an important habitat for various precious animals, such as Japanese crane, and provide many benefits for the people. However, about 20% of the wetland area has been disappeared for 50 years, and the ecosystem has heavily damaged, because the wetland was affected by artificial development.

Then, This study is useful in preserving the wetland, it proposed a way to estimate of groundwater distribution. The measurement points of groundwater are limited the locations and the number of it. So, in this study, we use these points effectively, and estimate groundwater distribution in Kushiro Wetland.

Key words : wetland, groundwater

E-mail : s1121189@mmm.muroran-it.ac.jp

1. はじめに

釧路湿原では、社会経済活動の急激な拡大の影響により、過去50年間で湿原面積の約2割が消失した。また、湿原への土砂や栄養塩類の流入により、湿原植生はヨシ群落からハンノキ林へと急激に変化し、湿原生態系や景観の劣化が進行している。このような変化は、流域の開発による直接的な影響及び負荷の増大によるものと推定されるが、これらが複合的に作用することによる水循環系の変化が最も大きな要因であると考えられる。特に、地下水位の低下は湿原の乾燥化や植生の変化に直接的に影響するため、地下水位の分布状況の把握が湿原の保全・再生に密接に関連するものと考えられる。

そこで、本研究では、湿原の保全に関して最も重要な要因の一つである地下水に着目し、限られた地下水位の観測データのみを用いて非観測地点の地下水位を合理的に推定し、解析対象領域内の地下水位の分布状況を把握す

ることを目的とする。

2. 釧路湿原の特性

釧路湿原は、図-1に示すように、釧路市の北約5kmに位置する総面積18,290haの日本で最も広い湿原である。この広大な湿原は、国の天然記念物に指定されているタンチョウ等の希少動物を含む、多種多様な野生生物の生息の場となっている。こうした湿原としての価値が認められ、1980年にはラムサール条約登録湿地に、また1987年には国立公園に指定された。さらに、湿原は、保水・浄化機能、地域気候を緩和する機能等、人間にとっても重要な役割を果たし、地域の人々に様々な恵みをもたらしてきた。

このように、釧路湿原は、野生生物の生息地として世界的に重要な位置を占めており、人間の生活・活動にとっても多くの利益をもたらす、将来的に保全すべき貴重な自然資源である。

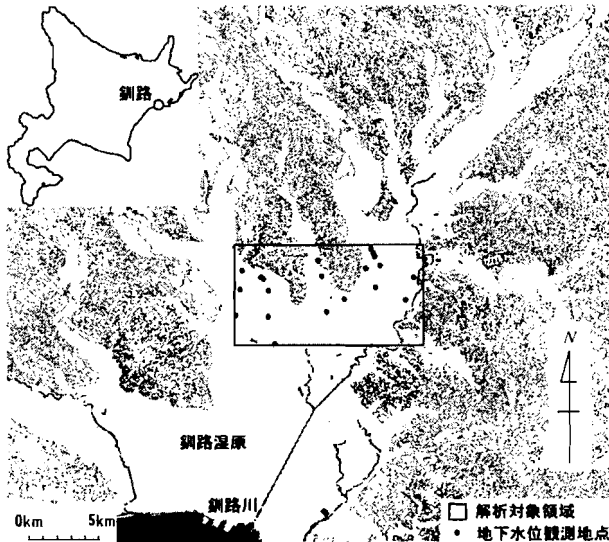


図-1 釧路湿原の位置および地下水観測地点

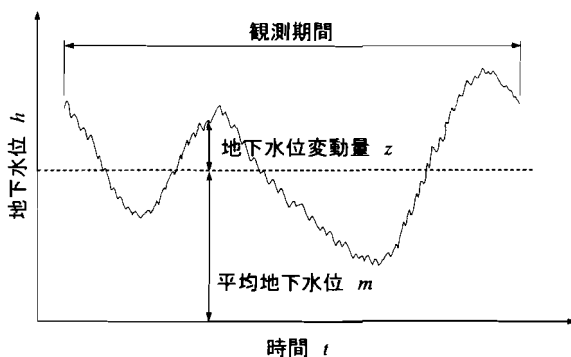


図-2 地下水水位の構成

3. 解析方法

本研究では、ある観測地点における観測期間中の地下水水位データをカルマンフィルタ理論の平滑化手法によって誤差処理し、得られた値をその地点における観測値とする。次に、非観測地点における地下水水位を確率統計的に求めるため、図-2に示すように、観測期間中の地下水水位 h を平均地下水水位 m と地下水水位変動量 z に分離して考える。平均地下水水位 m は、観測期間を通して一定値であるので、 AIC (赤池情報量基準) を用いた多項式により求める。地下水水位変動量 z は、時間的に変化するため確率変数と捉え、クリギング法を用いて推定する。2つの手法により求められた値を(1)式に代入し、非観測地点における地下水水位 h を求める。

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

ここに、 x, y : 平面位置座標、 t : 時間とする。
それぞれの手法についての詳細を以下に述べる。

3.1 観測地下水水位の誤差処理

本解析における結果の信頼性は、地下水水位の観測精度に支配される。観測誤差が大きい場合には、後に地下水に関するパラメータを同定する際に誤差が伝播し、推定する解が最適値に収束せず、発散を起こす可能性が生じる。

従って、カルマンフィルタ理論の平滑化手法¹⁾を用いて、観測誤差を統計的に処理し、この誤差に起因する推定精度の低下を防ぐ。

3.2 平均地下水水位の推定

平均地下水水位 m は、解析対象域内で空間的トレンドを有するものとして、平面位置座標 x, y の多項式(2)式により近似する。

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

ここに、 a_i : トレンド多項式のパラメータ、 k : パラメータ数、 n : 多項式の次数とする。

(2)式を適用する際、次数 n を事前に把握できないことが問題となる。一般に、高次多項式ほど残差平方和を小さくすることができ、見かけの当てはまりはよくなる。しかし、カルマンフィルタによる誤差処理を行っても完全に誤差を分離することはできないため、必要以上にパラメータ数の多いモデルでは、観測誤差を忠実に再現することになってしまう。逆にパラメータ数が少なすぎると、真の構造が表現されず、得られる情報に偏りが生じる。そこで、その中間にある最も適切なモデルを選択する客観的な評価基準として、(3)式で定義される AIC を導入する。

$$AIC = N \log Q + (n+1)(n+2) + N \log(2\pi e / N) \quad (3)$$

ここに、 N : 観測地点数、 Q : 残差平方和とする。

AIC は、パラメータの持つモデルの悪さを比較するための指標であり、同一データについて AIC が大きいほど悪いモデルであるとされる。

3.3 地下水水位変動量の推定²⁾

任意の非観測地点 X_0 における地下水水位変動量 z は、下記の(4)式の線形回帰式により推定する。同式における重み係数 λ_0^i を求めるために統計的手法を適用する。その際、一般的に確率変数の統計的性質のうち、平均と分散が一定であるとする弱定常を仮定する。しかし、実現象において地下水の分散は解析領域が広がるに伴い増加する傾向を呈し、厳密には弱定常仮定は成立しない。そこで、分散の一定条件を弱めて、ある距離 d 離れた2点間の地下水水位変動量の差の分散を表すセミバリオグラムが2点の位置に関わらず一定であるとする。セミバリオグラムを定義する(5)式と、制約条件(6)、(7)式を用いて重み係数 λ_0^i を決定する。

$$z'(X_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_0^i z(X_i) \quad (4)$$

$$\gamma(d) = \frac{1}{2N(d)} \sum_{i=1}^{N(d)} [z(X_i + d) - z(X_i)]^2 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_0^i \gamma(X_i - X_j) = \gamma(X_i - X_0) \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_0^i = 1 \quad (i = 1, \dots, N) \quad (7)$$

ここに、 $z'(X_0)$: 非観測地点 X_0 における地下水水位変動量

の推定値, $z(X_i)$: 観測地点 X_i における地下水位変動量の観測値, λ_0 : $z(X_i)$ の重み係数, d : 非観測地点と観測地点との距離, $\gamma(d)$: セミバリオグラム, $N(d)$: 観測地点数を示す.

また, 推定に偏りがなければ, 次の(8)式で表す偏差 BI は0になり, 推定誤差分散が残差の分散と一貫性を持っていれば, (9)式で表す相対分散比 RV は1となる.

$$BI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [z(X_i) - z'(X_i)] = 0 \quad (8)$$

$$RV = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{z(X_i) - z'(X_i)}{\sigma} \right]^2 = 1 \quad (9)$$

このとき, 推定誤差分散 σ^2 は, 次式で与えられる.

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_0 \gamma(X_i - X_0) \quad (10)$$

4. 解析対象領域・期間

本研究では, 図-1に示す湿原の中心部を解析対象領域とする. 解析対象領域を拡大したものが図-3であり, 同図の20地点において, 2001年12月20日から2002年1月10日までの22日間に観測された地下水位のデータについて誤差処理を行い, 得られた値を用いて地下水位分布の推定を行う.

5. 解析結果

5.1 観測地下水位の誤差処理

図-3の観測点13において観測された地下水位を, カルマンフィルタ理論の平滑化手法により誤差処理した結果を図-4に示す. 同図に見られるように, 平滑化後には観

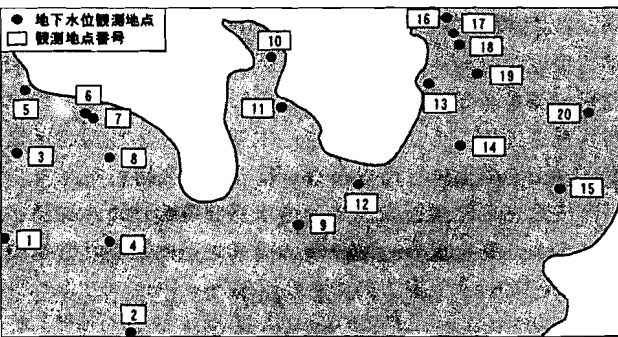


図-3 地下水位観測地点と観測地点番号

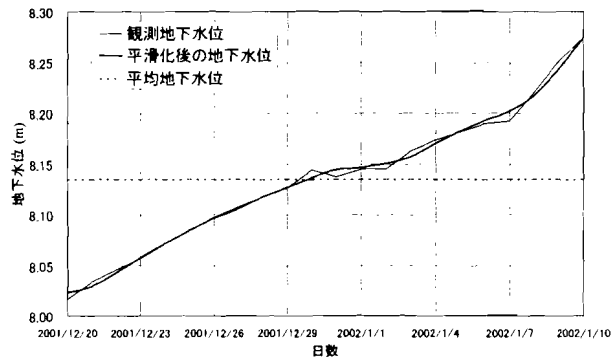


図-4 観測点13における観測地下水位の平滑化

測値の変動が滑らかになり, 不確実性が減少していることが認められる.

5.2 平均地下水位

平均地下水位に関しては, (2)式で表す1次から5次までの多項式について最適次数を検討した. 表-1に, 各次数のAICと残差平方和の値を示す. AIC, 残差平方和ともに最小となるのは5次であるが, 5次多項式による分布状況を見ると, 観測点の少ない部分で極端に大きい値や負の値が生じ, 妥当ではないと考えられる. そこで, 次に値の小さい4次多項式を採用し, 下記の(11)式を用いて平均地下水位を求める.

$$m(x, y) = 0.980 + 1.90x + 2.81y - 0.440x^2 - 1.05xy - 0.241y^2 + 0.0583x^3 + 0.0231x^2y + 0.231xy^2 - 0.0879y^3 - 0.00226x^4 - 0.000584x^3y - 0.000974x^2y^2 - 0.0171xy^3 + 0.130y^4 \quad (11)$$

5.3 地下水位変動量

地下水位変動量は, 観測セミバリオグラムを求めるため, 観測地点間距離を1.3km刻みで階級分けし, 階級内平均距離および観測セミバリオグラムを算出した. 得られたセミバリオグラムの結果を図-5に示す. 実線は, 観測セミバリオグラムから目視により定式化した理論セミバリオグラムである. 同図から, 距離約10kmまでは直線

表-1 トレンド多項式の各次数のAICおよび残差平方和

次数	AIC	残差平方和
1次	57.354	1.082
2次	56.213	0.476
3次	58.760	0.254
4次	51.911	0.0365
5次	45.408	0.00434

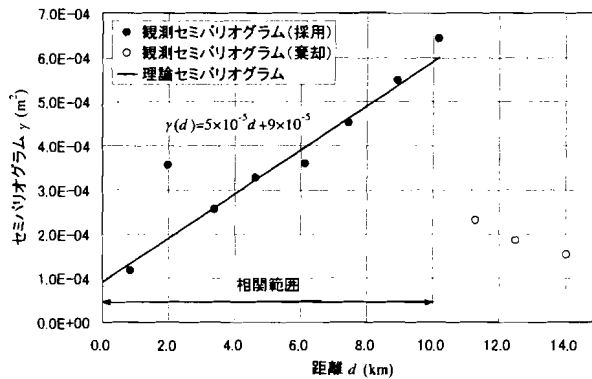


図-5 地下水位変動量のセミバリオグラム

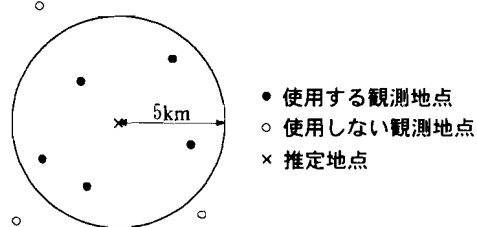


図-6 推定に用いる観測地点

的相関が見られる。そのため、図-6に示すように、推定する地点から半径5kmの円に内在する観測点の値のみを(6)式に適用して重み係数を決定し、(4)式を用いて地下水位変動量の推定を行った。

また、理論セミバリオグラムが正しく任意地点における地下水位変動量を推定しているか否かを検証するため、各観測地点において当該点から半径5kmの円に内在する観測地点の地下水位変動量を用いて推定を行った。その結果をまとめたものが表-2である。これらの値より、(8)

表-2 観測値³⁾と計算値の比較

観測地点番号	観測地下水位 (m)	計算地下水位 (m)	誤差	推定誤差分散
1	5.339	5.334	0.005	0.000394
2	4.253	4.266	-0.013	0.000440
3	6.162	6.152	0.010	0.000313
4	4.865	4.870	-0.005	0.000327
5	6.843	6.869	-0.026	0.000347
6	5.914	5.904	0.010	0.000285
7	5.488	5.489	-0.001	0.000283
8	5.382	5.388	-0.006	0.000288
9	3.656	3.615	0.041	0.000357
10	6.417	6.422	-0.005	0.000345
11	4.517	4.526	-0.009	0.000315
12	5.401	5.424	-0.023	0.000331
13	8.147	8.162	-0.015	0.000279
14	7.169	7.125	0.044	0.000308
15	5.883	5.889	-0.006	0.000404
16	9.939	9.943	-0.004	0.000287
17	9.944	9.956	-0.012	0.000257
18	9.431	9.410	0.021	0.000253
19	8.798	8.801	-0.003	0.000272
20	6.476	6.490	-0.014	0.000399

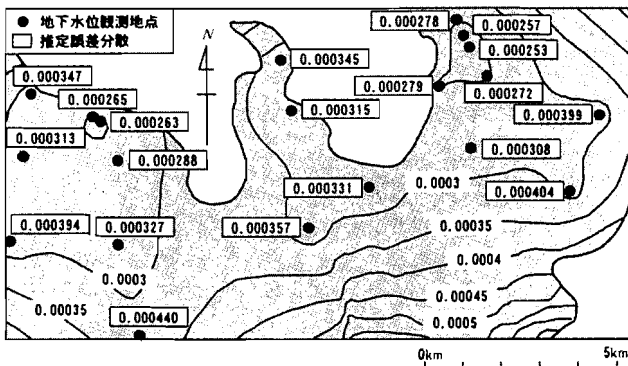


図-7 セミバリオグラムによる推定誤差分散の分布

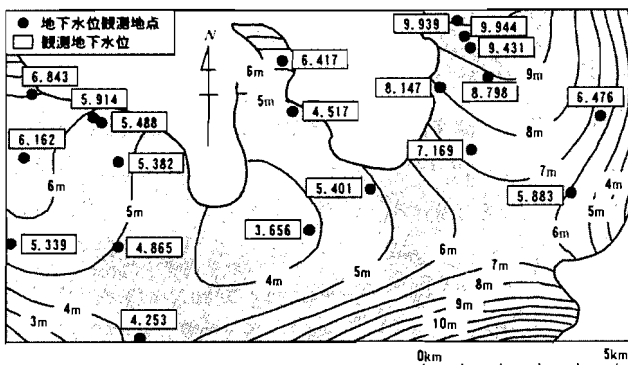


図-8 計算地下水位分布および観測地下水位³⁾
(2002年1月1日)

式で示す偏差は-0.00055、(9)式で表す相対分散比は1.0007となり、二つの条件を十分な精度で満足している。

さらに、セミバリオグラムによる推定誤差分散の分布を示したものが図-7であり、観測点が密な部分に関しては、推定誤差分散が小さい値になっており、推定精度が高いことを示している。しかし、観測点の配置が疎である部分や観測点が存在しない部分では推定誤差分散の値が大きく、新たな観測点の配置が望まれる。

5.4 地下水位

以上の考察により求めた平均地下水位と地下水位変動量を用いて(1)式から推定した地下水位の分布と2002年1月1日の観測地下水位を図-8に示す。同図より、観測点が密な部分では、観測地下水位と計算地下水位がほぼ一致しており、良好な再現性を有していることが認められる。しかし、解析対象領域の南東部においては、観測点が存在しないため、地形的に起こり得ないと考えられる水位上昇が見られる。

これらのことから、解析対象領域の南東部や推定精度の低い観測点の付近に新たな観測点を配置し、観測データを得ることにより、解析精度はさらに向上するものと考えられる。

6. おわりに

本研究では、限られた地下水位の観測データのみを用いて、解析対象領域内における地下水位分布の推定を行った。その結果、解析による地下水位の分布がほぼ実現象を再現していることが認められた。

しかし、観測データが存在しない南東部においては妥当な結果が得られず、また、観測点が疎な部分についても推定精度が低いことが確認された。従って、その付近の観測データを得ることにより、さらに有用な地下水位の分布状況を把握することができ、本解析手法が湿原の保全を行う上での重要な指標となり得ると考えられる。

今後はさらに解析を進め、透水係数等の地下水に関するパラメータを求め、流向・流速等の地下水流動特性を明らかにしていく予定である。

参考文献

- 1) 片山徹 (1983) : 応用カルマンフィルタ, 朝倉書店, pp.16-121.
- 2) Ghislain de Marsily (1986) : Quantitative Hydrogeology, ACADEMIC PRESS, pp.284-337.
- 3) 北海道開発局 (2003) : 釧路湿原地下水位データ.
- 4) 福土陽子, 和田麻衣子, 藤間聡 (2003) : 釧路湿原の地下水位分布の推定, 平成15年度土木学会北海道支部論文報告集, 第60号, pp.316-317.
- 5) 藤間聡, 中田満洋 (1986) : 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.

(2004年5月14日受付, 2004年6月14日受理)