

4. 流域の水・物質循環系について

テーマ：釧路湿原の水循環について

発表者：(独)北海道開発土木研究所 環境研究室長 中津川 誠

釧路湿原における水収支を考慮した地下水解析

Analysis of ground water considering water balance in the Kushiro mire

(株) ドーコン 河川部 ○正会員 工藤 啓介 (Keisuke Kudo)

(独) 北海道開発土木研究所 環境研究室 正会員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)

1. はじめに

釧路湿原は近年湿地面積が減少し、ハンノキ林の拡大によって植生が急激に変化している。この要因として、湿原周辺域での開発による土砂流入による乾燥化や地下水位の変化などが考えられているが、現時点では科学的な因果関係が十分理解されていない状況にある。

そこで本研究では、釧路湿原における水循環及び地下水の動向を把握することを目的として、気象・水文観測データを用いて長期熱・水収支モデルより流域水収支及び地下水涵養量を推定し、さらに地下水シミュレーションにより釧路湿原内の地下水解析を実施した。

2. 釧路湿原の概要

北海道東部を流れる釧路川は、流域面積2,510km²、幹川流路延長154kmの大河川である。上流端を屈斜路湖から発し、途中オソベツ川などの主要支川と合流しながら釧路湿原を貫流し太平洋に注いでいる(図-1参照)。

釧路川下流域に広がる釧路湿原は、面積18,290haに及び日本有数の広大な湿原であり、平成5年にラムサール条約に登録された世界的にも注目される湿地である。湿原は標高が20m以下、ほとんどが2~5mと低く、表面に1~4mの泥炭が敷き詰められている。



図-1 釧路川流域及び釧路湿原の概要

3. 流域水収支及び地下水涵養量の推定

3.1 長期熱・水収支モデルによる水文諸量の推定

本研究では、口澤ら¹⁾の研究などで採用実績があり、モデルの妥当性が確認されている長期熱・水収支モデルを用いて、釧路湿原内に設置されている北海道開発局管轄の釧路川流域水位流量観測所、雨量テレメータ、雪裡樋門及び気象庁管轄の釧路気象官署、アメダス観測所で

観測されている気象・水文データより、地表面(土壌面または積雪面)と植被層各々の熱収支から蒸発散量、積雪量(積雪深及び積雪水量)、融雪量を算出し、流域水収支及び地下水涵養量の推定を行った。

なお解析対象範囲を釧路湿原内で指定されている遊水地区域(105km²: 図-1 参照)及び釧路川の水位流量観測所(屈斜路、弟子屈、標茶、広里)の支配流域とし、解析対象年数を2000~2003年の計4ヵ年とした。また、解析メッシュは国土数値情報の3次メッシュ(約1km×1km)とし、解析メッシュ毎に気象値及び基本定数を設定し、長期熱・水収支モデルの入力条件とした。なお基本定数のうち、森林の効果を表す葉面積指数LAIについては、石井ら²⁾によるLAI月別値を用い、バルク輸送係数及び蒸発効率については、近藤³⁾によって提案されている地被状態毎の文献値を参考にした。この他アルベド、積雪密度の設定については、羽山ら⁴⁾のサロベツ湿原を対象とした研究を参考にした。

3.2 流域水収支の推定

長期熱・水収支モデルにより推定した蒸発散量、積雪量、融雪量をもとに、流域水収支の検証を行った。表-1に解析対象範囲における2000~2003年の4ヵ年平均流域水収支の検証結果を示す。遊水地区域の降雨量は882mm、降雪水量は249mmとなっており、降雨量と降雪水量の合計から蒸発散量296mmを差し引いた有効降水量は834mmとなった。有効降水量と各流域からの流出高(水位流量観測所で観測された流量を流出高に換算)の差分は10~100mm程度となっており、流域水文諸量の推定がほぼ妥当になされていると考える。

表-1 流域水収支の検証結果(単位: mm/year)
(2000~2003年の平均値)

流域名	釧路川	遊水地	釧路川	釧路川	釧路川	釧路川	
基準地点	(流域全体)	(流域全体)	屈斜路	弟子屈	標茶	広里	
降雨量 (A)	867	882	779	766	818	867	
降雪水量 (B)	349	249	456	456	419	357	
蒸発散量 (C)	植被層	35	63	4	8	14	27
	高断高免	163	146	181	181	175	165
	地表面	55	88	35	34	35	49
	総蒸発散	253	296	220	223	224	241
有効降水量 (D=A+B-C)	963	834	1026	1021	1013	982	
流出量 (E)	—	—	915	911	982	965	
誤差 (D-E)	—	—	111	110	31	17	

3.3 河川流量の成分分離

釧路湿原における地下水涵養量を推定するにあたり、日野ら⁵⁾による数値フィルターを利用し、表面・中間流

出成分の推定を行った。なお減衰係数は非振動条件を勘案して2.1とし、時定数は遊水地区域に流入する河川に設置されている水位流量観測所(五十石、岩保木、広里、下久著呂、雪裡、幌呂)の2000～2003年の日流量データを用いて、ハイドログラフの非洪水期(10～2月)の減速部から設定した。図-2に2003年の広里水位流量観測所における成分分離結果を示す。全流出に占める地下水流出成分の割合は、遊水地区域に流入する河川で70～80%程度となっており(表-2参照)、釧路湿原を含む釧路川流域の水環境は地下水が大きな役割を担っているといえる。

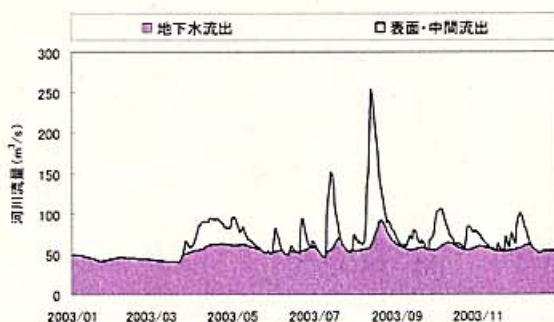


図-2 河川流量の成分分離(広里:2003年)

表-2 全流出に占める地下水流出成分の割合

流域名	釧路川	釧路川	釧路川	久著呂川	雪裡川	幌呂川
基準地点	五十石	岩保木	広里	下久著呂	雪裡	幌呂
2000	79.14%	79.72%	76.39%	62.14%	72.60%	75.66%
2001	85.64%	87.91%	84.92%	71.73%	82.35%	85.22%
2002	82.65%	83.94%	81.34%	60.87%	68.20%	72.13%
2003	77.21%	84.73%	79.64%	71.71%	77.80%	72.16%
平均	81.26%	84.08%	80.57%	66.61%	75.24%	76.34%

3. 4 地下水涵養量の推定

地下水への涵養率を算定するため、流出成分分離の検討結果をもとに、遊水地区域の水収支を整理した。また降雨・融雪量として、3.2節で推算した釧路湿原遊水地区域の有効降水量834mm/yを使用した。この際、上流域の五十石、下久著呂、雪裡、幌呂及び湿原残流域からの流入量及び湿原域直下流の広里からの流出量を考慮すると、広里での水収支は以下のように表すことができる。

$$Q = \sum_{i=1}^5 Q_i + RA \quad (1)$$

$$Q = Q_s + Q_g \quad (2)$$

ここで、 Q は広里からの流出量(m^3/y)、 Q_i は上流域(五十石、下久著呂、雪裡、幌呂、湿原残流域)からの流入量(m^3/y)、 Q_s は広里の表面・中間流出量(m^3/y)、 Q_g は広里の地下水流出量(m^3/y)、 R は有効降水量(m/y)、 A は遊水地区域面積(m^2)である。また3.3節で推定した地下水流出の比率 a (広里で0.81)を与え、流出成分ごとの収支を考えると、

$$Q_g = (1-a)Q = \sum_{i=1}^5 [Q_i \times (1-a_i)] + (1-a')RA \quad (3)$$

$$Q_g = aQ = \sum_{i=1}^5 (Q_i \times a_i) + a'RA \quad (4)$$

となる。ここで、 a_i は表-2から得られる各流入河川における地下水流出の平均比率である。上記連立式から遊水地区域の涵養率 a' を算出した結果 $a'=0.92$ となり、遊水地区域にもたらされる降雨・融雪の大部分が地下水とし

て涵養されることがわかった。図-3に遊水地区域の水収支模式図(2000～2003年の4カ年平均)を示す。

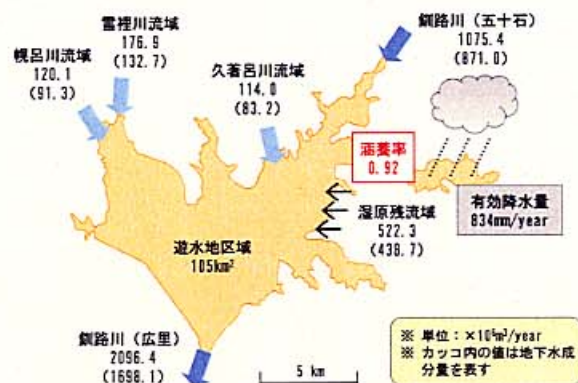


図-3 水収支模式図(2000～2003年の4カ年平均)

4. 地下水解析

4. 1 解析モデル及び解析範囲

本研究では、釧路湿原内に設置されている地下水観測井(図-4参照)で2000～2003年に観測された地下水位データを用いて、初期地下水位及び初期透水係数を面的に推定した後、流域外からの流入量や境界条件を考慮し、式(5)に示す二次元非定常地下水モデルにより地下水解析を実施した。

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q \quad (5)$$

ここに、 h は地下水位(m)、 S は貯留係数($=0.25$)、 T は透水量係数(m^2/d)、 q は涵養量または揚水量(m/d)である。

なお解析対象範囲は、釧路川と山間部に囲まれた湿原域(図-4に示す実線の範囲)とし、解析対象年数を2000～2003年の計4カ年とし、各月における平均地下水位を推定することとした。また、解析メッシュは250m×250mの矩形の半分とし、2041個の節点と3797個のメッシュ(三角要素)で構成した。各節点の標高は、国土地理院の数値地図50mメッシュ標高より設定した。



図-4 地下水観測井位置

境界条件としては、定水頭境界(河川、排水路及び湖沼)と流量依存境界を設定した。主要河川の釧路川、久著呂川、雪裡川、幌呂川については、観測河川水位データと地盤高をもとに、水位を節点毎に内挿して定水頭境界とした。また解析対象範囲外からの流入については、流量依存境界節点の地盤高が高い箇所では流入量も大きくなるよう重みづけを行い、3.4節で得られた湿原残流域からの地下水流入量及び平成16年11月に実施した湧水量調査の際得られた湧水量をもとに、流入量を設定した。

4.2 初期地下水位の推定

初期水位は、張ら⁶⁾が提案する ROKMT 法を用いて推定を行うこととした。ある時刻での地下水位は、任意地点 x で式(6)によって与えられる。

$$h(x) = m(x) + \varepsilon(x) \quad (6)$$

ここに、 $m(x)$ は空間トレンド成分、 $\varepsilon(x)$ は空間構造に依存する確率変数である。 $m(x)$ は地下水位のトレンドであり、各観測地点の地下水位データを用いて、式(7)のような多項式からなる回帰式によって推定する。

$$m(x) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4x^2 + a_5xy + a_6xz + a_7y^2 + a_8yz + a_9z^2 + \dots \quad (7)$$

ここに、 x, y は座標、 z は地形標高(m)、 $a_0, \dots, a_9$ は係数で重回帰分析によって求める。

本研究では、2000年1月の平均地下水位データ及び平均河川水位データより、式(7)より得られる一次の空間トレンドを差し引いて剰余を計算し、この剰余が正規分布に従うという前提で、Variogram による Kriging 法を用いて剰余の空間分布を推定した。Variogram による Kriging 法を用いた地下水空間分布の推定については、藤間ら⁷⁾による釧路湿原での研究実績があり、良好な推定結果が得られている。なお推定した剰余が正規分布に従わない場合、Kolmogorov-Smirnov(K-S)検定を用いて剰余の分布をテストし、式(7)のトレンド方程式の次数を増やすような試行錯誤過程を繰り返した。

面的に推定した剰余と空間トレンドを足し合わせて、初期地下水位の空間分布を推定した。設定した初期地下水位を図-5に示す。また推定した初期水位が実際の地下水位観測データを再現できているか検討するため、地下水位観測データと設定した初期地下水位を比較した結果を図-6に示す。推定した初期地下水位は概ね再現できおり、これを地下水シミュレーションの初期地下水位として採用した。

4.3 初期透水係数の推定

式(5)の二次元地下水流は式(8)でも表される。

$$T\nabla^2 h = q \quad (8)$$

ここに、 $\nabla^2 h$ は地下水位のラプラス演算子である。

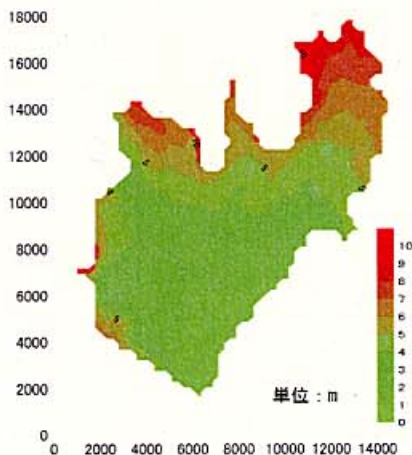


図-5 初期地下水位の空間分布

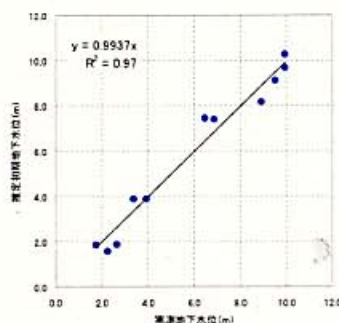


図-6 地下水位観測データと推定初期水位の比較
(2000年1月)

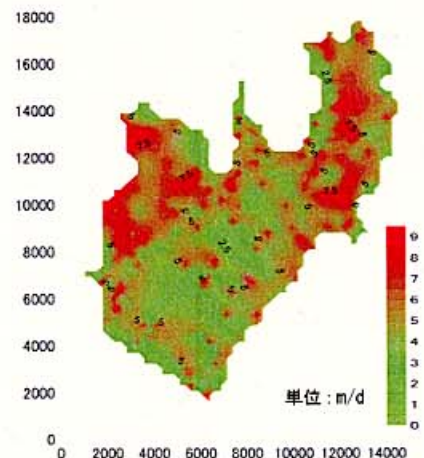


図-7 透水係数の空間分布

各節点の地下水位より式(8)のラプラス演算子が算出できることから、透水量係数は式(9)より逆算した。

$$T = \frac{q}{\nabla^2 h} = \frac{q}{\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right)} \quad (9)$$

なお透水量係数を計算する際、釧路湿原内で過去に実施された現場透水試験結果(表-3 参照)と帯水層厚を考慮して下記の制約条件を導入した。

$$T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \quad (10)$$

ここに、 $T_{\min}$ と $T_{\max}$ は透水量係数の下限値および上限値であり、現場透水試験結果から得られた透水係数に帯水層厚を乗じて設定した。この上限と下限値の制約条件を満足する透水量係数が仮に n 個あればその対数を取り、正規分布に従えば、 $\log T$ に関する Kriging 法によって任意地点での透水量係数を推定することとした。

表-3 現場透水試験結果

現場透水試験	対象層	透水係数(cm/s)	透水係数(m/d)
最大値	砂礫、細砂	1.05E-02	9.07
—	泥炭、シルト質砂	4.99E-03	4.31
最小値	砂質シルト、シルト	9.02E-07	7.79E-04

なお帯水層については、釧路湿原の土質断面図及び山崎⁸⁾による研究成果を参考に、第四紀完成新世時代の地層を不圧帯水層(最大層厚約80m)と見なし、4.2節で推定した初期水位から第四紀完成新世時代の地層の基底面標高を引いて算出した深度を帯水層厚(約20~60m)とした。

式(8)の q を長期熱・水収支モデルより推定した有効降水量(834mm/year)に3.4節で算出した涵養率をかけた1日当りの涵養量とし、これをラプラス演算子で除し透水量係数を算出し、帯水層厚で除し透水係数を設定した。設定した透水係数を図-7に示す。空間分布の推定結果より、久著呂川、雪裡川、幌呂川など解析対象範囲の上流付近で透水係数が高い値を示しており、湿原内は概ね透水係数が低い値を示していることが把握できた。なお泥炭の透水係数に関しては、梅田⁹⁾による研究実績があり、北海道の高位泥炭土の分解度と透水係数の関係より、泥炭の透水係数は $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-5}$ (cm/s)程度となっている。空間分布により設定した透水係数は、概ね梅田が

算出した透水係数の範囲内となっており、透水係数の設定が妥当であると考えられる。

4. 4 地下水シミュレーション

4.2節及び4.3節で設定した初期地下水位及び透水係数をもとに、二次元非定常地下水モデルにより地下水シミュレーションを実施した。図-8に釧路湿原内に設置されている観測井NO.3501における地下水位(2002年3月～2003年12月)の再現計算結果を示す。

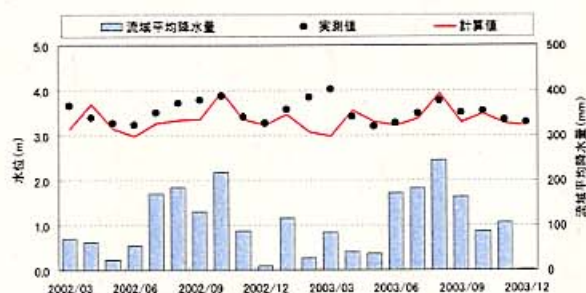


図-8 降水量と地下水位(実測値、計算値)の季節変動

(観測井 NO. 3501 : 2002 年 3 月～2003 年 12 月)

二次元非定常地下水モデルによる計算結果より、実際の地下水位観測データを概ね再現しており、モデルに与えた入力条件が妥当であると考えられる。また、地下水位と降水量の季節変動が同様の傾向となっていることが把握できた。これは釧路湿原において降雨・融雪の地下水への涵養が大きいことによるものであり、3.4節で推定した地下水涵養率が妥当であるといえる。

次に平均地下水位計算結果をもとに、2001～2003年の3カ年における5月(最小値)と10月(最大値)の月別平均地下水位の差分を变化量として算出し、図-9に示す。また月別平均地下水位が最大となる2002年10月の各要素の流速ベクトルを算出し、図-10に示す。図-9より、久著呂川、雪裡川、幌呂川の釧路湿原への流入部付近及び遊水地右岸築堤の堤内側で特に地下水位の変動が大きいことが把握できた。また図-10より、釧路湿原内における流水の動向を把握することができた。図-11に1996年

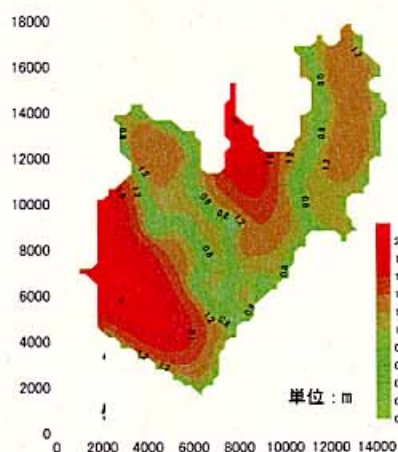


図-9 地下水位変化量の空間分布
(2001～2003年の月別平均地下水
の5月と10月の差分)

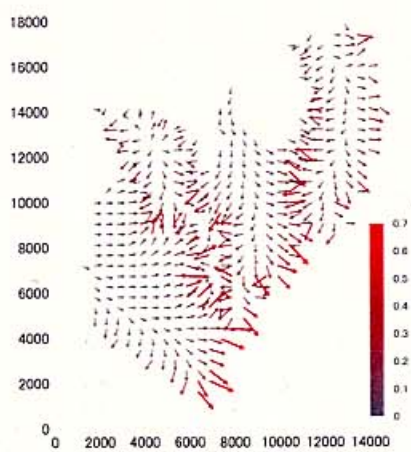


図-10 流速ベクトルの空間分布
(2002年10月)



図-11 釧路湿原の植生
(釧路湿原自然再生協議会
HPより)

における釧路湿原内のハンノキ林の繁茂状況を示す。図-9と図-11の比較より、ハンノキ林が繁茂している箇所では地下水位の変動が大きく、ハンノキ林の拡大と地下水位の変動状況が関係しているものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、長期水・熱収支モデルを用いて釧路湿原の流域水収支及び地下水涵養量の推定し、推定結果をもとに地下水解析を行った。今後、諸条件の推定精度の向上を図り、継続的に研究を行っていきたい。

謝辞：本研究を行うにあたり、釧路開発建設部治水課に協力をいただいた。また、本研究は平成16年度北海道開発局受託研究費の補助を受けて行ったものである。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 口澤寿ら：熱・水収支を考慮した流域スケールの積雪と蒸発散の推定,北海道開発土木研究所月報報文,pp59-71,1997.
- 2) 石井孝ら：衛星データによる葉面積指数 LAI の推定水文・水資源誌,vol.12.No.3,pp.210-220,1999.
- 3) 近藤純正編著：水環境の気象学,朝倉書店,1994.
- 4) 羽山早織ら：サロベツ湿原の地下水環境と植生変化について,北海道開発土木研究所月報報文,612,pp3-20,2004.
- 5) 日野幹雄,長谷部正彦：水文流出解析,森北出版,1985.
- 6) 張祥偉ら：情報不足下での広域地下水の非定常流動解析手法に関する研究-サロベツ湿原を例として-,水文・水資源学会誌,60,pp316-317,2003.
- 7) 藤間聡ら：釧路湿原の地下水分布の推定,土木学会北海道支部論文報告集,Vol.16.No.4,pp349-367,2003.
- 8) 山崎暁：釧路平野の地下水,地下水技術,Vol.34.No.12,pp5-17,1992.
- 9) 梅田安治：泥炭土,アーバンクボタ・JUNE,久保田鉄工株式会社,1985.