

湿原植生の変化をもたらす 水文要因の解析

ANALYSIS OF HYDROLOGICAL PROCESSES RELATED TO WETLAND VEGETATION

羽山早織¹・中津川誠²

Saori HAYAMA and Makoto NAKATSUGAWA

¹正会員 北海道開発土木研究所 環境研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 工博 北海道開発土木研究所 環境研究室長 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

In Sarobetsu Mire, the groundwater level has dropped because of drying. There is concern regarding increase in the area occupied by *Sasa* bamboo and displacement of the original vegetation. The mire basin has seen decreases in snowfall and river water level during the snowmelt season. For mire conservation, it is necessary to understand how changes in the hydrological cycle affect the groundwater in the basin.

In this research, to determine how *Sasa* bamboo has spread, we employed remote sensing data collected over the last 23 years as well as ground truth data. We separated river runoff components to clarify water balance in the basin and estimated rates of rainfall and snowmelt water recharge into groundwater. These estimates were used as simulation inputs. The simulation was designed to analyze groundwater responses to changes in rainfall, snowmelt water volume, and river water level, toward revealing a causal relationship with the increase in *Sasa* bamboo-covered area.

Key Words: wetland, groundwater, remote sensing, *Sasa* bamboo, recharge rate

1. はじめに

環境の保全や復元が注目される中、遊水機能や貴重な動植物の生息の場となる湿原は面積の減少により保全が叫ばれている。北海道の北部に位置するサロベツ湿原も乾燥化に起因するササの侵入によって湿原独自の植生の喪失が懸念されており、その保全策が望まれている。

サロベツ湿原では昭和36年頃から農業用地の開拓に伴い調査が始められてきたが、その中でサロベツ原生花園(図-1)におけるササ地の急激な拡大が報告されている¹⁾。この付近では北海道開発局²⁾がリモートセンシングによる植生状況の把握を試みており、広範囲にわたる高層湿原の分布が特徴として捉えられている。一方、湿原域でのササの侵入については、地下水位の低下が大きな要因として報告されている³⁾。これを背景に、湿原域の観測データを反映できる地下水シミュレーション手法が張ら⁴⁾によって提案された。

地下水の変化に影響を及ぼすものとしては、流域の降水量や積雪の変化、周辺河川水位や流量の変化等が考えられる。それを評価する上で流域全体の水循環を把握し、

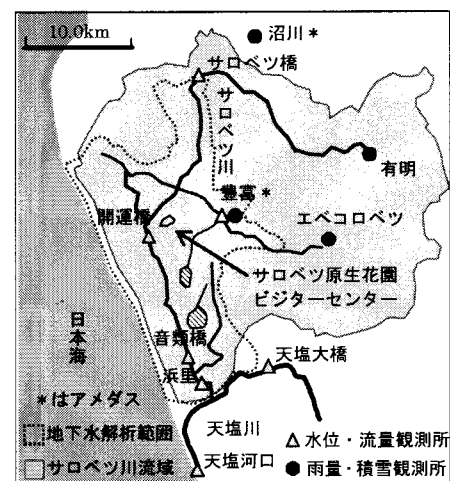


図-1 サロベツ川流域箇所図

地下水への影響をみるが必要となる。

そこで本研究では、過去と現在におけるササの侵入領域を特定することを目的として、航空写真と衛星画像からササ地と湿原植生の判読を実施した。一方、数値フィルターによる河川流出の成分分離に基づき、地下水涵養機構の推定を試みた。すなわち、水収支的に妥当な形で得られた地下水涵養量を地下水シミュレーションに活かすこ

表-1 植生分類に使用した画像

画 像	撮影年月日	バンド数	解像度	備 考
デジタルオルソ	1977年 10月25～27日	3	1m	カラー (国土地理院撮影の空中写真)
IKONOS	2000年10月24日	3	1m	可視光域、パンシャープ化 (日本スペースイメージング社製)

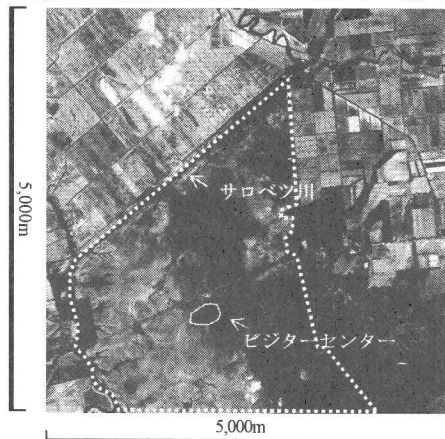


写真-1 再分類の解析範囲とビジターセンター箇所図(2000年)

表-2 植生分類の再分類項目

最尤法による分類項目	再分類項目
トマツ	湿原
ハシキ	
ミカヅキコケ・イボミズコケ	
トマリスゲ・ミズコケ	
ヌマガヤ	
ヨシ・イワナガリヤス	ササ地
チマキササ・トマリスゲ	
チマキササ	
耕作地	裸地
水域	水域

とを目指す。さらにシミュレーションにより、積雪寒冷地の水循環上重要な融雪期の1)降雨・融雪量および2)河川水位の変化に対し、地下水の感度を分析するものである。

2. サロベツ川流域の概要

サロベツ湿原は天塩川の支川・サロベツ川周辺に広がり、利尻礼文サロベツ国立公園の一部に指定されている(図-1参照)。サロベツ川は流域面積655.4km²を有し、流域内のサロベツ原生花園ビジターセンターは初夏には観光客が多く訪れる。

今回の解析には、北海道開発局で設置されている観測所における河川水位・流量、積雪深と豊富(とよみ)アメダスと稚内気象官署のデータ(風速、日射量、日照時間、相対湿度、気温)を用いた。

3. 湿原の植生分類と植生変化

最初に、過去と比較してどの程度ササが湿原内に侵入しているか把握するために、航空写真と衛星画像を用い

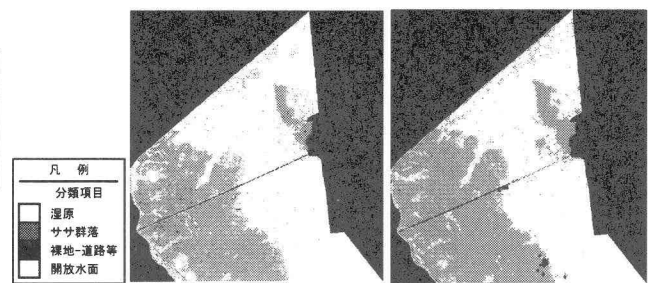


図-2 1977年(左図)と2000年(右図)の再分類結果

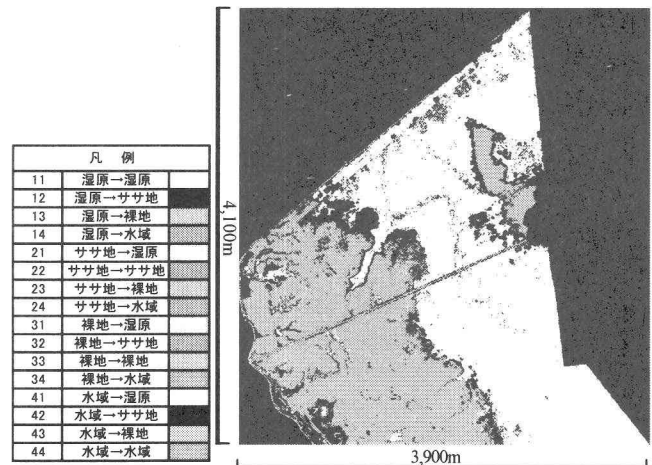


図-3 1977年から2000年の湿原植生の変化

表-3 分類項目別の変化した面積と割合

	1 湿原	2 ササ地	3 裸地	4 水域	計
1977	4,598,043 (52.2%)	840,808 (9.6%)	10,244 (0.1%)	6,653 (0.1%)	5,455,748 (62.0%)
2000	77,529 (0.9%)	3,144,384 (35.7%)	9,340 (0.1%)	838 (0.0%)	3,232,091 (36.7%)
10	1,810 (0.0%)	7,525 (0.1%)	14,987 (0.2%)	0 (0.0%)	24,322 (0.3%)
20	12,847 (0.2%)	21,545 (0.2%)	128 (0.0%)	51,980 (0.6%)	86,500 (1.0%)
計	4,680,229 (53.3%)	4,014,263 (45.6%)	34,699 (0.4%)	59,471 (0.7%)	8,798,662 (100.0%)

て植生分類を実施した。画像の選定にあたってはササ地と湿原域のコントラストが可視的にも比較的明らかである10月に撮影された画像を採用した(表-1)。この際の解析手法としては最尤法⁵⁾を用いる。その適用に当たっては、まず平成2～6年で作成された植生図⁶⁾と現地踏査から植生とバンド値の尤度(条件付確立)を対応づけるトレーニングデータを作成する。次に任意地点で、バンド値の尤度が最大になる植生が何かを判別していく。これを実施した後、さらにササの侵入範囲を特定するため、湿原が広がるビジターセンター付近(写真-1)において、農地や牧草地を除き、再分類をおこなった(表-2)。再分類した結果を図-2に示す。図から、どちらの画像も湿原の西側にササ地(灰色)が、東側に湿原植生(白)が広がっていることが認識された。なお、クロスチェックを兼ねて、バンドのパターンマッチングから判別する方法でも植生分類を実施し、ほぼ同様の結果となることが確認できた。次に再分類した画像を重ね合わせ、ササ地の変化を判定した。このとき湿原と分類されたものは1、ササ地は2、裸地は3、水域は4という数値をデータに与え、下記の式で得られる数値を図-3の凡例に示すように色分けした。

$$LC_{1977} \times 10 + LC_{2000} \quad (1)$$

ここで、 LC_{1977} は1977年の分類結果、 LC_{2000} は2000年の分類結果である。結果は1m×1mの画素毎に5m×5mのフィルターをかけ、その中に含まれる最多値の画像を示す。

図-3より湿原からササ地に変化した箇所(図中の黒い部分)はササ地と湿原域の境界部分で明確に現れている。表-3によると1977年から2000年の間に湿原の面積は5,455,749m²(全面積の62.0%)から4,690,229m²(全面積の53.3%)に減少し、そのうちササ地に変化したものは840,809m²(全面積の9.6%)であり、反対にササ地から湿原へ変化したものは77,529m²(全面積の0.9%)で、差し引き763,280m²(全面積の8.7%,湿原面積の14.0%)が湿原植生からササ地に変化したと推定できた。このことから植生変化のうち湿原植生からササ地への変化に注目できることがわかった。また、ササが侵入した距離としてはビジターセンター付近で、23年間で約30mとなった。環境庁の調査⁷⁾によるとササの拡大速度には年により違いがあるものの一年で119cm拡大する報告もあることから今回の結果はほぼ妥当であると考えられる。

4. 流域水循環の動向

次に流域水循環の動向について示す。図-4は湿原域に最も近い開運橋観測所の3-5月の流出高の5年移動平均値を示しているが、1980年代の後半にかけて減少傾向を示しているのがわかる。また図から最大積雪深も減少傾向を示しており、この変化と流出高の変化が対応しているのがわかる。このような流出高の低下傾向は融雪時期が顕著であることが既往検討⁸⁾でわかっている。また、サロベツ川流域における融雪期の流出高は、年間流出高の約半分を占めることから、積雪量の変化が地下水への涵養量に大きく影響すると考える。

次に図-5は融雪時期である3-5月の河川水位の5年移動平均を示したものである。図から湿原上流に位置するサロベツ橋、豊富橋で大きな減少傾向を示しており、中流に位置する開運橋でも1980年代後半にかけて緩やかではあるが減少傾向を示している。また最大積雪深も河川水位の変化と対応していることがわかる。

以上から、雪の減少と融雪期の河川水位の低下が確認された。これより地下水への影響要因としては、融雪起源の涵養量の変化や、融雪期の河川水位の変化に着目する必要があると考える。

5. 湿原の地下水涵養機構

降水の地下水への涵養は地下水の挙動を把握する上で一つの鍵となるが、広範囲にわたる涵養量を実測することは困難である。そこで本研究ではサロベツ川流域に位

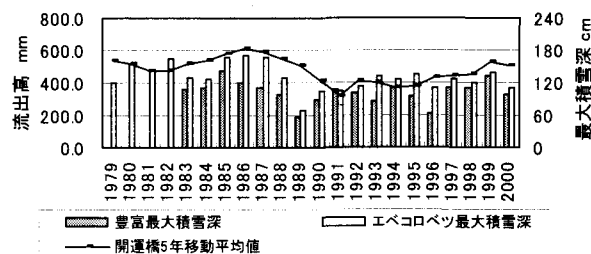


図-4 3-5月の河川流出高の5年移動平均と最大積雪深

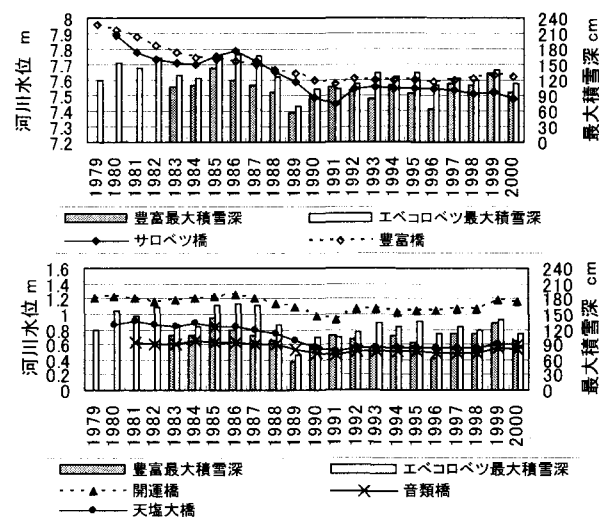


図-5 3-5月の河川水位の5年移動平均と最大積雪深

置する河川流量から成分分離を行い、地下水流出が全流出に占める割合を用いて開運橋流域の水収支を明らかにし、それをもって地下水への涵養率を推定した。

(1) 河川流量の成分分離

流出現象は降雨や融雪の土壌への浸透や貯留などの作用によって、早い成分(表面・中間流出)と遅い成分(地下水流出)に分離することができる。ここで流出成分の分離方法として数値フィルターを利用する。日野ら⁹⁾によると各成分は次のように表せる。

$$q_s(t) = q(t) - q_g(t) \quad (q_s(t) \geq 0) \quad (2)$$

$$q_g(t) = \alpha \sum w(\tau) q(t - \tau) \quad (3)$$

$$w(\tau) = \begin{cases} c_0 \exp(-c_1 \tau / 2) \sinh(\sqrt{c_1^2 / 4 - c_0 \tau} / \sqrt{c_1^2 / 4 - c_0}) & (\tau \geq 0) \\ 0 & (\tau < 0) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 q_s は表面・中間流出流量(m³/s)、 q_g は地下水流出流量(m³/s)、 q は実測流量(m³/s)、 α は q_g を負にしないための重み係数(≤ 1)である。係数 c_0 及び c_1 は次のように示される。

$$c_0 = (\delta / T_c)^2 \quad (5)$$

$$c_1 = \delta^2 / T_c \quad (6)$$

ここで、 δ は減衰係数、 T_c は時定数(day)である。 δ は非振動条件を勘案して2.1とした。また、時定数 T_c はハイドログラフの逓減部の解析等から求める。今回の解析にはサロベツ川流域内で比較的H-Q式の精度が高く、湿原内に位置する開運橋で実施した。この際得られた時定数は21(day)であり、成分分離には83'84'97'98'年の融雪時期(3~6月)の日流量データを用いた。

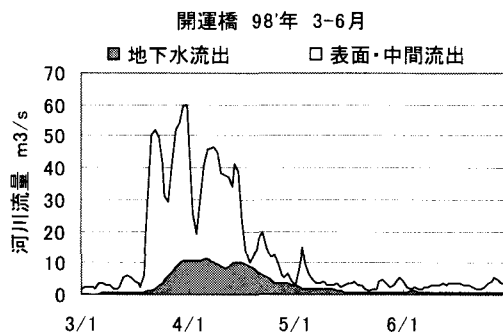


図-6 開運橋の数値フィルターによる流量の成分分離

表-4 流出成分が全流出に占める割合(%)

	地下水流	表面・中間流出
1983	23.7%	76.3%
1984	23.7%	76.3%
1997	23.5%	76.5%
1998	23.6%	76.4%
平均	24%	76%

成分分離の結果の一例として98年の結果を図-6に示す。また表-4には全流出に占める地下水流の割合と表面・中間流出の割合を示す。表-4より、開運橋において地下水流が全流出に占める割合は平均で24.0%となり、湿潤な湿原では表面・中間流出成分が多いことがわかる。

(2) 水収支を考慮した地下水涵養率の推定

地下水への涵養率を算定するため、流出成分分離の結果に基づき、図-7に示すように地下水解析領域(開運橋流域と称する図-7の網掛け部)の水収支を整理した。ここで降雨・融雪量は既報⁸⁾の2層モデルから推算した流域の年平均値(降水量1,201mm/y・蒸発散量614mm/y)を使用した。この際、降雨・融雪量のうち表面・中間流出としては分水嶺より海側にある領域では海へ流れ、それ以外はサロベツ川に集水されると考える。一方、地下水流出としては全てがサロベツ川に流出すると仮定している。したがって、開運橋流域での水収支は以下のように表すことが出来る。

$$Q = Q_0 + q + RA + \alpha' Ra \quad (7)$$

$$Q = Q_s + Q_g \quad (8)$$

ここで、 Q は開運橋流域からの流出量(m^3/y)、 Q_0 は上流端のサロベツ橋流域からの流入量(m^3/y)、 Q_s は開運橋の表面・中間流出量(m^3/y)、 Q_g は開運橋の地下水流出量(m^3/y)、 q は開運橋流域と隣接する他流域からの地下水流入量(m^3/y)、 R は(蒸発散を除いた)降雨・融雪量(m/y)、 A は地形上の流域面積(m^2)、 a は海岸部面積(m^2)、 α' は降雨・融雪量の地下水への涵養率である。また、5節(1)で推定した地下水流出の比率 α (=0.24)を与え、流出成分ごとの収支を考えると、

$$Q_s = (1 - \alpha)Q = Q_0 + (1 - \alpha')RA \quad (9)$$

$$Q_g = \alpha Q = q + \alpha' R(A + a) \quad (10)$$

となる。上記連立式から未知量 q および α' を求めると、 $q=32.3 \times 10^6 m^3/y$ 、 $\alpha'=0.45$ となった。その結果として推定されたものを図-7に示す。

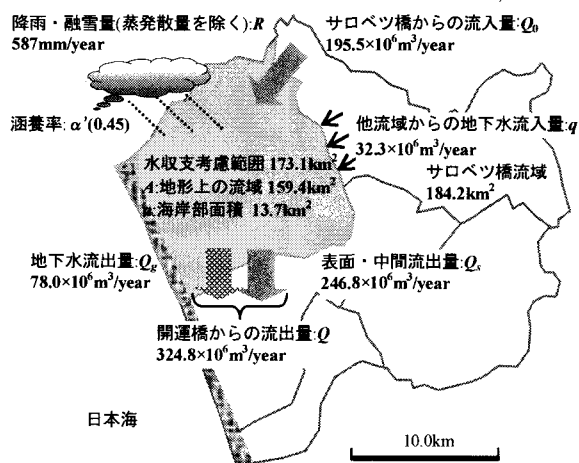


図-7 開運橋流域の水収支概念図

6. 地下水シミュレーションによる感度分析

前節で涵養率が設定されたので、それに基づく地下水シミュレーションを実施する。シミュレーションは1)融雪期の降雨・融雪涵養量(融雪+降雨-蒸発散)のみが変化した場合と、2)河川水位のみ変化した場合、3)その両方が変化した場合について地下水位の応答をみた。

(1) 地下水解析モデルの概要

シミュレーションは、次式に示す二次元定常モデルを図-1に示す解析範囲に適用しておこなう。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = 0 \quad (11)$$

ここで、 h は地下水位(m)、 T は帯水層の透水量係数(m^2/s)、 q は涵養量または揚水量(m/s)である。サロベツ湿原での揚水量は地下水利用がほとんどないものと考えてゼロとしている。涵養量は5節(2)で求めた涵養率(0.45)を降雨・融雪量にかけたものを使用する。

境界条件のひとつは解析対象範囲の河川水位である。ここでは、主要河川の天塩川とサロベツ川、湖沼について実測水位を内挿し、定水頭境界として与える。また、解析対象範囲外からの流入については、5節(2)で推定した q に基づき、流量依存の水頭境界として与える。このほか、海域境界は定水頭境界として0mを与える。

初期水位は、張ら⁴⁾が提案しているROKMT法 (Residual Ordinary Kriging with Modified Trend)を用いて1997年の一斉地下水調査の結果から推定したものを使用した。計算に用いた三角形要素数は1,903個、節点は1,051個である。なお、透水量係数は二次元定常地下水流動モデルにGauss-Newton法を適用し、節点ごとに同定したものに基づく。具体的には2000~2002年の年平均の降雨・融雪量および河川水位を与え、そのときの地下水位が再現できる最適値として推算した。2000~2002年の平均地下水位の計算結果を図-8に示す。また図-9は地下水観測点(図-8参照)での計算結果と実測値の比較を示す。図-9から推定された透

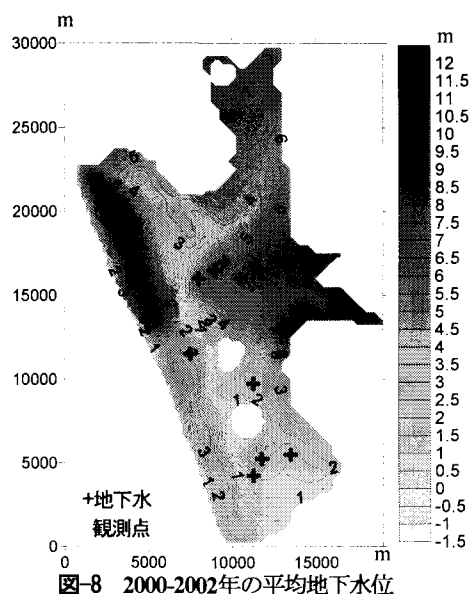


図-8 2000-2002年の平均地下水位

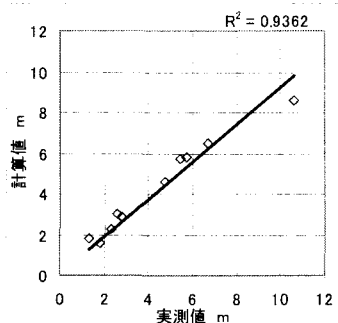


図-9 地下水位の計算値と実測値

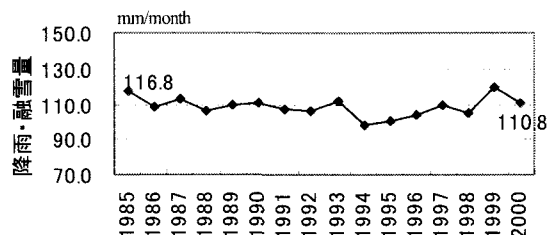


図-10 融雪期降雨・融雪量(月平均)の5年移動平均値

水量係数で地下水位がよく再現されていることがわかる。

(2) 降雨・融雪量の変化による地下水への影響

上記モデルを使用して、まずは降雨・融雪量の変化による地下水の応答をみる。条件設定に先立ち、図-10に2層モデルから推算したサロベツ川流域の融雪期(3～5月)降雨・融雪量を5年移動平均したものを示す。これを勘案し、図-10の1985年の値(83'～87'平均値116.8mm/month)と2000年の値(98'～02'平均値110.8mm/month)を、河川水位は2000年～2002年の平均水位を入力値として設定した。図-11は1985年と2000年の条件による地下水位計算結果の差を表したものである。

図からサロベツビジターセンター付近では、地下水位が過去と比較して16cmほど低下しており、2～4cmと変化が小さい他の箇所と比較して最も影響を受けていることがわかる。このことからサロベツビジターセンター付近では他の箇所よりも降雨・融雪涵養の影響を受けやすい

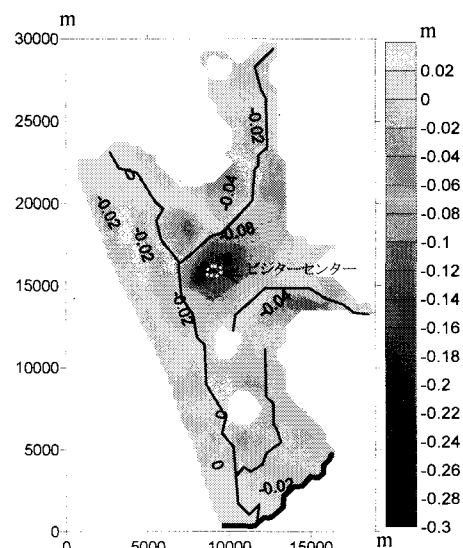


図-11 降雨・融雪量の変化による地下水変化

表-5 使用した実測の河川水位とその変化

3-5月平均水位	83'-87'平均(m)	98'-02'平均(m)	水位変化(m)
サロベツ橋	7.76	7.48	-0.28
豊富橋	7.73	7.62	-0.11
開運橋	1.22	1.17	-0.05
音類橋	0.63	0.54	-0.09
浜里	0.54	0.54	0
天塩大橋	0.84	0.61	-0.23
天塩河口	0.32	0.31	-0.01

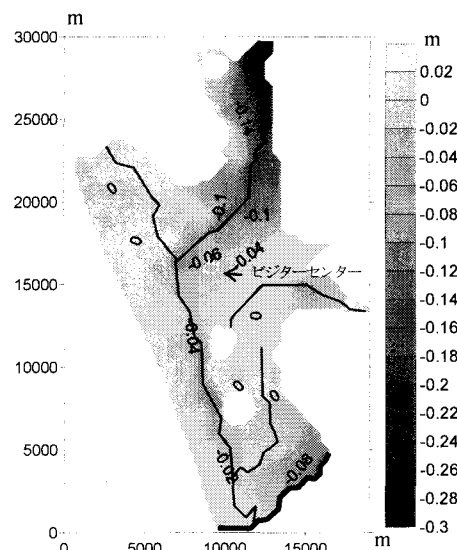


図-12 河川水位の変化による地下水変化

地下水水理構造となっていると推察される。

(3) 河川水位の低下による地下水への影響

次に年間で最も水位が高くなる融雪期(3～5月)に、河川水位が低下することで地下水にどのような影響があるかをシミュレーションする。このときの河川水位は表-5に示す。計算条件としては図-5の1985年(83'～87'年の平均値)と2000年(98'～02'年の平均値)の河川水位を与え、6節(2)と同様に、両者の結果を比較した。なお、ここで用いた降雨・融雪量はいずれも2000～2002年の平均値とした。

得られた地下水位変化量の結果を図-12に示す。図より河川に沿って地下水位が低下しており、河川水位の低下

が大きい上流で22cmと低下が顕著で、下流に行くほどその影響は小さくなる。またビジターセンター付近では6cmの地下水位の低下がみられるが、これはビジターセンターの西側をサロベツ川が流れているために影響を受けているものと考えられる。

(4) 降雨・融雪量と河川水位の変化による地下水変化

さらに降雨・融雪量と河川水位の両者を変化させてその影響をみる。前節の解析で設定した1985年の降雨・融雪量(116.8mm/mon)と河川水位(表-5の83'・87'平均値)による計算結果と、2000年の降雨・融雪量(110.8mm/mon)と河川水位(表-5の98'・02'年平均値)による計算結果について、地下水位の差を示したのが図-13,14である。

図-13から降雨・融雪量と河川水位どちらも変化させたことで図-11と図-12よりも全体的に地下水位が下がっていることがわかる。影響としては河川上流部で24cmの低下、ビジターセンター付近で22cmの低下となっている。

図-14にビジターセンター付近の拡大図(図-13参照)を示すが、ビジターセンターは降雨・融雪涵養の影響を受けるだけでなく、河川からの影響も受けるため、他の箇所と比べると地下水位の感度が大きい箇所ともいえる。

この原因として、当該箇所はビジターセンター東側の台地(図-14丸山東側:標高約10m)と、西側のサロベツ川(図-14開運橋付近:標高約3m)に挟まれ、地形標高が急に低くなる箇所にあるため、地下水が変化しやすいことが考えられる。実際、リモセン解析の結果(図-3参照)から、南北方向に広がるササ地が西から東に向かって拡大しつつあり、本シミュレーションはそれと一致するような地下水位の低下傾向を表せていると考える。

7. まとめ

本研究ではサロベツ湿原周辺を対象として、植生分類と地下水のシミュレーションを実施した。本研究で得られた知見を下記に示す。

- 1) リモートセンシングデータから過去約20年で解析範囲内(約880ha)において湿原面積の14%がササ地に変化したことを判読した。
- 2) 河川流量の成分分離から湿原域の涵養率を推定し、降雨・融雪量の45%が地下水へ寄与していると推定した。
- 3) 降雨・融雪量と河川水位の変化が地下水に及ぼす影響を計算し、これらがリモセンで推定されたササ地の拡大を促す地下水位の低下に関与することを示唆した。

今後は、地下水の非定常解析を通じて季節的な地下水位の動向を把握していきたい。

謝辞： 本研究は国土交通省北海道開発局からの受託研究による補助を受けて行なったものである。また、山梨大学の竹内教授、石平助教授及び中国水利省計画局の張祥

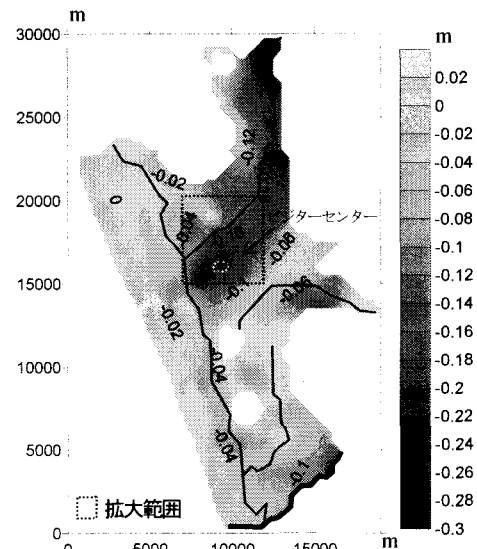


図-13 降雨・融雪量と河川水位の低下による地下水変化

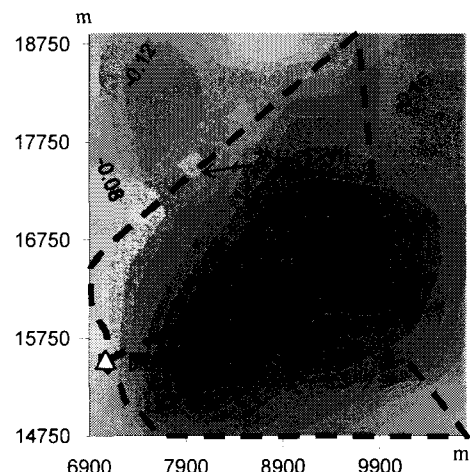


図-14 サロベツビジターセンター付近拡大図

偉氏には多くのご指導をいただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 富士田裕子: サロベツ湿原の変遷と現状、財団法人自然保護助成基金1994・1995年度研究助成報告書, pp.59-71, 1997.
- 2) 北海道開発局: サロベツ総合調査報告書-泥炭地の変遷-, 1978.
- 3) 梅田安治, 辻井達一, 井上京, 清水雅男, 紺野康夫: サロベツ泥炭地の地下水位とササ, 北海道大学農学部邦文紀要, 第16巻第1号, pp.70-81, 1988.
- 4) 張祥偉, 山本直樹, 竹内邦良, 石平博, 中津川誠, 羽山早織: 情報不足条件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, Vol.16.No.4, pp.349-367, 2003.
- 5) 日本測量協会: 図解リモートセンシング, 1992.
- 6) 北海道開発局: サロベツ川流域自然環境調査総合報告書, 1999.
- 7) 環境庁自然保護局, 第2期調査報告書, 1998.
- 8) 羽山早織, 中津川誠, 張祥偉: サロベツ湿原における水循環の把握と地下水への影響, 水工学論文集, 第47巻, pp.175-180, 2003.
- 9) 日野幹雄, 長谷部正彦: 水文流出解析, 森北出版, 1985.

(2003. 9. 30 受付)