

# サロベツ湿原における植生変化と水文要因の解析

Change of Vegetation and Analysis of Hydrological Processes in Sarobetsu Mire

(独) 北海道開発土木研究所 環境研究室 ○正員 羽山 早織 (Saori Hayama)

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

## 1. はじめに

環境の保全や自然再生が注目される中、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。北海道の北部にあるサロベツ湿原では面積の減少とともに、乾燥化に起因するササの侵入により湿原植生の喪失が懸念されており、その保全が望まれる。

サロベツ湿原では昭和 36 年頃からの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)においてササが急激に拡大しており、その主要因としては地下水位の低下が報告されている<sup>1)</sup>、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<sup>2)</sup>によって提案された。

そこで本研究では、まず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。次に数値フィルターによる河川流量の成分分離に基づき、地下水涵養量の推定をおこなった。これにより、水収支的に妥当な地下水涵養量を地下水シミュレーションに適用することができた。この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。

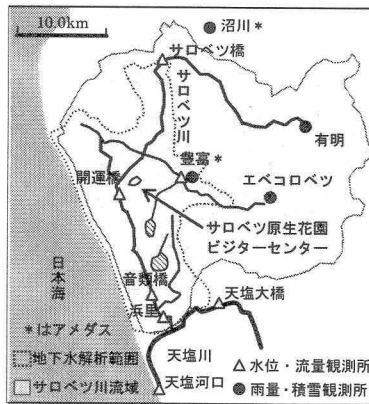


図-1 サロベツ川流域箇所図

## 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)。サロベツ川の流域面積は 655.4km<sup>2</sup> であり、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(とよとみ)アメダスと稚内気象官署のデータを用いた。

## 3. 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植生分類を実施した。画像の選定にあたり、ササ地と湿原域のコントラストが可視的

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)

にも明らかである 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<sup>3)</sup>を用いる。その適用に当たっては、平成 2~6 年で作成された植生図<sup>4)</sup>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し、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、高層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)。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。このとき再分類の結果で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-2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-2 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 5,455,749m<sup>2</sup>(全面積の 62.0%)から 4,690,229m<sup>2</sup>(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 840,809m<sup>2</sup>(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 77,529m<sup>2</sup>(全面積の 0.9%)で、差し引き 763,280m<sup>2</sup>(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。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

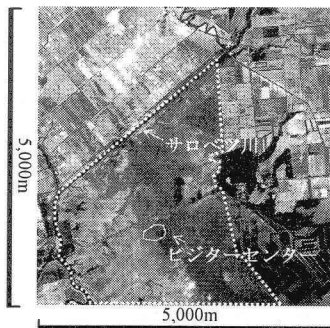


写真-1 再分類の解析範囲とビジターセンター箇所(2000年)

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
心持	
シラビソ・イヌシラビソ	
トマシガ・シラビソ	
ヌカヤ	
ヨシ・ワカシ	ササ地
チヤキヤ・トマシガ	
チヤキヤ	耕作地
裸地	裸地
水域	水域

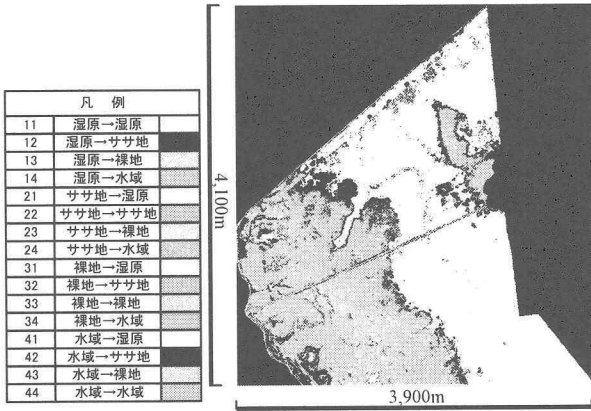


図-2 1977年から2000年の湿原植生の変化  
表-3 分類項目別の変化した面積と割合

1977	2000	1	2	3	4	計
		湿原	ササ地	裸地	水域	
10	4,598,043	840,808	10,244	6,653	5,455,749	(52.2%)
20	77,529	3,144,384	9,340	838	3,232,091	(8.9%)
30	1,810	7,525	14,987	0	24,322	(0.0%)
40	12,847	21,545	128	51,980	86,500	(0.2%)
計	4,690,229	4,014,263	34,699	59,471	8,798,662	(53.3%)

30mとなった。環境庁の調査<sup>5)</sup>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拡大するとの報告もあり、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-3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。また、図-4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、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いる。

このような河川水位・流出高の低下傾向は融雪時期に顕著であることが既往検討<sup>6)</sup>でわかっている。また図-3.4から最大積雪深も若干の減少傾向を示しており、その変化は流出高と河川水位の変化と対応していることがわかる。当該流域では融雪期の流出高は、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。

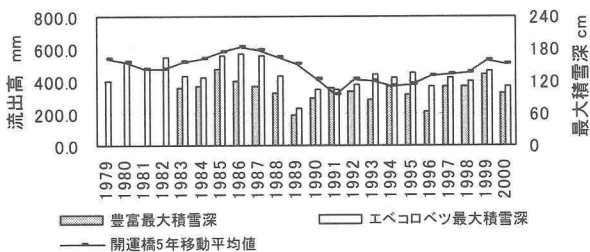


図-3 3-5月の河川流出高の5年移動平均と最大積雪深

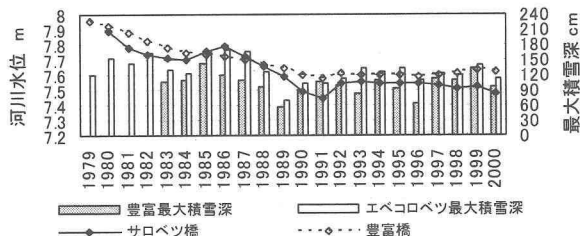


図-4 3-5月の河川水位の5年移動平均と最大積雪深

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、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た。

#### 5. 湿原の涵養機構

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。

##### 5.1 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<sup>7)</sup>によると各成分は次のように表せる。

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

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

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

ここで、 $q_s$ は表面・中間流出流量( $m^3/s$ )、 $q_g$ は地下水流出流量( $m^3/s$ )、 $q$ は実測流量( $m^3/s$ )、 $\beta$ は $q_s$ を負にしないための重み係数( $\leq 1$ )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、 $\delta$ は減衰係数、 $T_c$ は時定数(day)である。 $\delta$ 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。

成分分離の結果の一例として98'年の結果を図-5に示す。また表-4には全流出に占める地下水流出の割合と表面・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出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。

表-4 流出成分が全流出に占める割合(%)

	地下水流出	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%

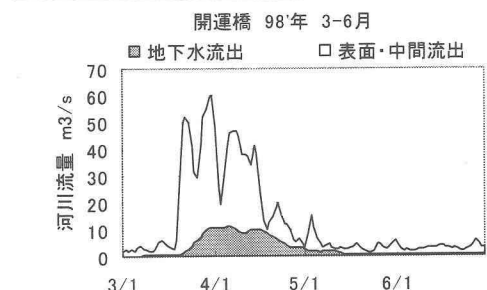


図-5 開運橋の数値フィルターによる流量の成分分離

## 5.2 水収支を考慮した地下水涵養量の推算

地下水への涵養率を算定するため、5.1 節の結果に基づき、図-6 に示すような範囲(開運橋流域と称する図-6 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<sup>6)</sup>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( $m^2$ )、 $\alpha'$  は降雨・融雪量の地下水への涵養率である。また、5.1 節で推定した地下水流出の比率  $\alpha$  ( $=0.24$ ) 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  $\alpha'$  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-6 に示す。

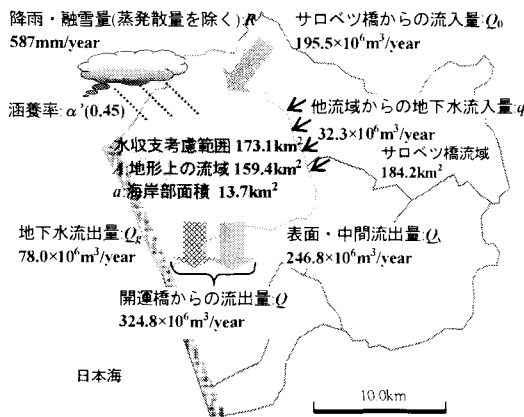


図-6 開運橋流域の水収支概念図

## 6. 地下水シミュレーションモデルによる感度分析

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水位の応答をみた。

### 6.1 地下水解析モデルの概要

シミュレーションは、次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く。

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

ここで、 $h$  は地下水水位( $m$ )、 $T$  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 5.2 節で求めた涵養率(0.45)を降雨・融雪量にかけたものを使用する。

境界条件は解析対象範囲の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、5.2 節で推定した  $q$  に基づき、流量依存の水頭境界として与える。また、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<sup>2)</sup>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のものを使用した。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、そのときの地下水水位が再現できる最適値として推算した。

### 6.2 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。図-7 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。これから、図-7 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-8 は 1985 年と 2000 年の条件による地下水水位計算結果の差を表したものである。

図-8 からサロベツビジターセンター付近では、地下水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地下水水理構造となっていると推察される。

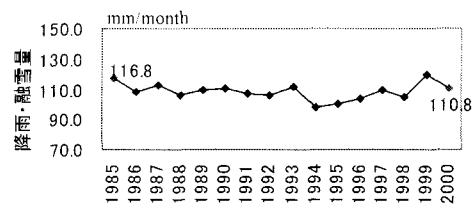


図-7 融雪期降雨・融雪量(月平均)の 5 年移動平均値

### 6.3 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。計算条件として図-4 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、6.2 節と同様に、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。

得られた地下水水位変化量の結果を図-9 に示す。図より河川に沿って地下水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

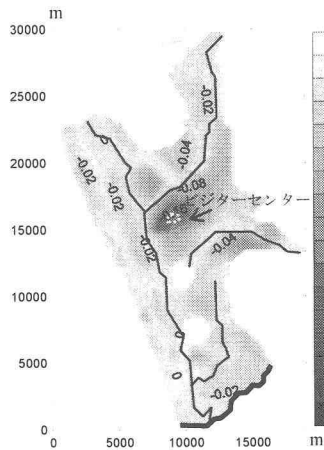


図-8 降雨・融雪量の変化による地下水変化

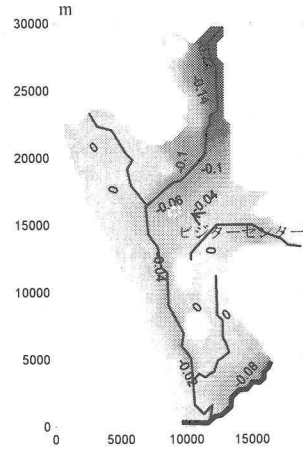


図-9 河川水位の変化による地下水変化

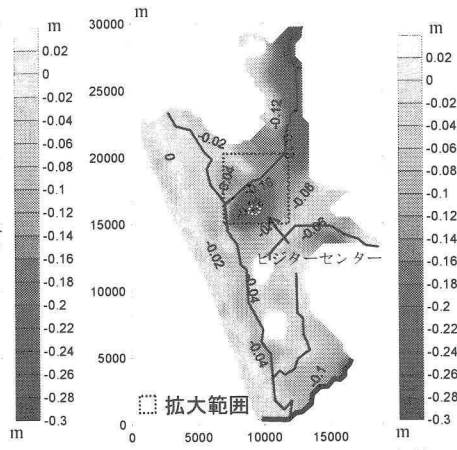


図-10 降雨・融雪量と河川水位の低下による地下水変化

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

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。

#### 6.4 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-10,11である。

図-10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-8と図-9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-11にビジターセンター付近の拡大図(図-10参照)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

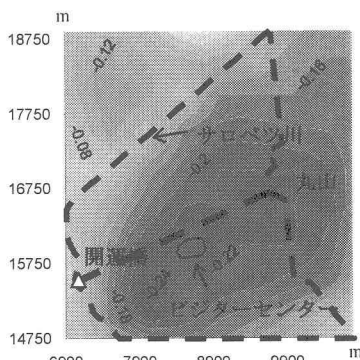


図-11 サロベツビジターセンター付近拡大図

台地(図-11丸山東側:標高約10m)と、西側のサロベツ川(図-11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-2

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) 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。
- 3) 日本測量協会:図解リモートセンシング、1992。
- 4) 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。
- 5) 環境庁自然保護局:第2期調査報告書、1998。
- 6) 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。
- 7) 日野幹雄、長谷部正彦:水文流出解析、森北出版、1985。