



Title	カナダ東部、北方針葉樹林地における融雪水の流出 II : 科学物質の流出過程
Author(s)	鈴木, 啓助; SUZUKI, Keisuke; 石井, 吉之 他
Citation	低温科学. 物理篇, 51, 93-108
Issue Date	1993-03-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18616">https://hdl.handle.net/2115/18616</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	51_p93-108.pdf



## カナダ東部, 北方針葉樹林地における融雪水の流出 II\* —— 化学物質の流出過程 ——

鈴木 啓 助

(東京都立大学理学部)

石井 吉之・兒玉 裕二・小林 大二

(低温科学研究所)

H. G. Jones

(ケベック大学)

(平成4年11月受理)

**Abstract :** Studies on the physical and chemical characteristics of snowmelt were carried out at a boreal forest, eastern Canada, in 1991. Concentrations of  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  of precipitation in a forest were lower than that in an open area. The losses of  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  were considered to be affected by biological activities of the forest. Only the open area showed a diurnal variation in the concentration of chemical substances in snowmelt water. The hydrograph of snowmelt is separated into "old water" (meltwater in the lower snowpack) and "new water" (meltwater percolated from surface snow layer) by the concentration of  $\text{H}^+$ . The separated "old water" is the major component of early snowmelt runoff of a day. "New water" is the major component of the recession limb of the hydrograph.

**要旨 :** 融雪におよぼす森林の影響を検討するために, カナダ東部北方針葉樹林地において, 融雪水の流出機構に関する調査を行なった。森林内外に気象・融雪に関する観測機器を設置し, その他の測定方法も内外で同一にして調査を行なった。その結果, 森林内外の降水中の  $\text{NH}_4^+$  と  $\text{NO}_3^-$  の窒素化合物濃度については林内で林外より低濃度になっており, 生物活動による化学変化および消費が推察された。また, 積雪下面融雪水中の溶存物質濃度は, 林外でのみ日変化が明瞭であり, 日変化のパターンは  $\text{H}^+$  と  $\text{NO}_3^-$  が同じで,  $\text{Ca}^{2+}$  と  $\text{SO}_4^{2-}$  はそれと逆の変動パターンを示す。林外での積雪下面融雪水の水量と  $\text{H}^+$  濃度による流出成分分離の結果, 各融雪日の融雪初期には, 積雪下層の積雪内部融雪水が, 押し出し流によって流出し, その後に積雪表面から供給された当日の融雪水が流出すると考えられる。

**Key words :** acid water, biological activity, boreal forest, chemical substances, hydrograph separation

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第 3630 号

キーワード：化学成分濃度，酸性融雪水，生物活動，北方針葉樹林，流出成分分離

## I. 緒 言

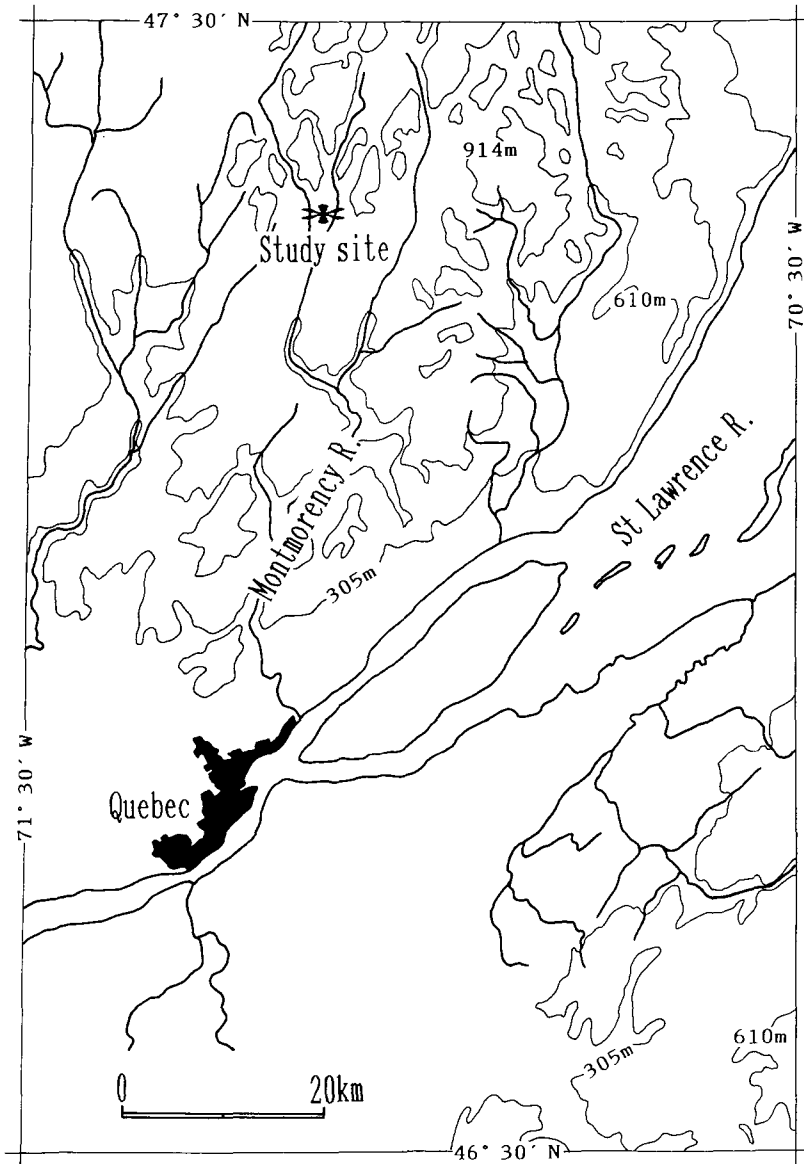
寒冷積雪地域では、降水や乾性沈着によってもたらされた化学物質は、融雪期まで積雪中に蓄積される。堆積時には、積雪粒子の変態にともない化学物質のマイクロな移動があり、粒子の外側に化学物質が析出される。積雪表面での融雪により、融雪水が積雪中を流下する過程では、積雪粒子表面の化学物質を選択的に溶かし込むため、融雪水中の化学物質濃度は増大する。このため、 $H^+$ 濃度を示す pH は、積雪よりも低い値を示すことになる。つまり、降水や乾性沈着によって積雪にもたらされた酸性物質が、融雪水中ではより高濃度になり、融雪水の pH も積雪より低くなる。このような理由により、冬期間積雪に覆われるカナダ東部やスカンジナビアで、酸性降水の生態系への影響がより深刻になっている。

酸性融雪水の生態系への影響については、いろいろ報告されている<sup>2-6)</sup>。しかしながら、融雪水の特性が生態系によっていかに変質しているかについてはほとんど研究されていない。森林の存在によって、その内外では積雪深分布や気温・日射量などの気象要素に差異の生ずることが知られている。その結果として、融雪特性にも森林の影響が及んでいることが考えられる。カナダ東部内陸の積雪中には、 $Cl^-$  などの海塩起源物質に比べて、 $NO_3^-$  や  $SO_4^{2-}$  などの人為起源による融雪水の酸性化に寄与する物質の割合が大きい。さらに、カナダ東部には、密な針葉樹林が広く分布している。そのため、森林の存在による融雪水の酸性化に対する影響を検討するのに好都合である。カナダ東部北方針葉樹林内外で、融雪水に関する調査を行ったのでその結果を報告する。

## II. 調査方法

調査は河川流出まで含めて行なったため<sup>7)</sup>、小流域を調査対象とした。対象流域は、ケベック市の北約 60 km にあるラバル大学モンモレンシー演習林内の小流域である(第 1 図)。流域の出口は、北緯 47°17' 西経 71°10' に位置する。流域全域が balsam fir の極相林で覆われており、一部に white birch が分布している。流域の出口付近の一部のみが樹林に覆われていない。その地点を林外とし、balsam fir に覆われた地点を林内として、森林内外での積雪期間の気象観測(1990 年 10 月 30 日～1991 年 5 月 9 日)および融雪期の積雪・融雪水に関する調査(1991 年 4 月 21 日～5 月 9 日)を行なった。測定項目および測定方法を第 1 表に示す。測定項目・測定方法は、森林内外で同一である。

融雪水調査のために、森林内外にそれぞれ 1 m×4 m の大きさの積雪ライシメータを 1990 年 10 月末に設置した。降雪はライシメータ上に乱されることなく直接堆積する。融雪期に融雪水が積雪中を通過し、積雪下面つまりライシメータに達すると、融雪水は地中に埋設されたパイプによって集められ、バケット式の流量計とパルスカウンターによって融雪水量が自動計測さ



第1図 調査対象地域の位置

れる。また、自動採水器によって、定期的に融雪水を採取した。さらに、流路末端に pH センサーを設置し、融雪水の pH をモニターした。なお、ライシメータや流路はすべてプラスチック類で作成した。

降水の採取法は、鈴木<sup>8)</sup>と同様であるが、開口面積 660 cm<sup>2</sup>のプラスチック容器を、林外に 2 個、林内に 3 個設置した。それらに入った降水を、回収後林内・林外ごとに混合し、それぞれ内外の降水とした。

第1表 測定項目および測定方法

測定項目	測定方法	測定間隔
気象		
風向・風速	風車型風向風速計 (KDC-ST21)	10分
気温・湿度	白金抵抗・静電容量式(強制通風) (KDC-ST13)	10分
日射	シリコンフォトダイオード式 (IKS-35K)	10分
積雪深	雪面反射光式 (KDC-ST42)	
地温(0.3m, 1.3m)	サーミスタ式 (KDC-ST1)	
融雪水 (積雪ライシメータ:1m×4m)		
融雪水量	バケツ式(500ml) (J-271:KDC-UP)	10分
pH(自記)	プリアンプ内蔵・内部液無補給型 (DKK6430:KDC-US)	10分
pH・電導度	自動採水器:ガラス電極法・電極法 (ケベック大学)	
溶存イオン濃度	自動採水器:	3~8時間
陰イオン	イオンクロマトグラフ (ケベック大学)	"
陽イオン(酸添加)	イオンクロマトグラフ (東京都立大学)	
積雪		
雪面低下量		1日1回以上
積雪水量		"
含水率・密度	秋田谷式	"
採雪		2~3日
pH・電導度	ガラス電極法・電極法 (ケベック大学)	
溶存イオン濃度		
陰イオン	イオンクロマトグラフ (ケベック大学)	
陽イオン(酸添加)	イオンクロマトグラフ (東京都立大学)	
降水		適宜
pH・電導度	ガラス電極法・電極法 (ケベック大学)	
溶存イオン濃度		
陰イオン	イオンクロマトグラフ (ケベック大学)	
陽イオン(酸添加)	イオンクロマトグラフ (東京都立大学)	

積雪全層の採取は、内径が68mmで長さ2mのグラスファイバー製の円筒を用いて行なった。分析処理の数量的制限により、林外では3~5点、林内では変動が大きいので5~10点で採取した。

本調査地では、商用電源を使用することができないので、すべて電池駆動による機器を使用した。化学分析用の試料は、速やかにケベック市のケベック大学に運び、積雪は分析直前に融解した。試料はミリポアフィルターにて濾過した後、pHおよび電導度を測定し、陰イオン( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ )濃度をイオンクロマトグラフによって測定した。試料の一部には酸を添加し、日本に持ち帰り、陽イオン( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ )濃度を東京都立大学でイオンクロマト

グラフによって測定した。

### III. 調査結果

#### 1. 森林内外での積雪期の気象

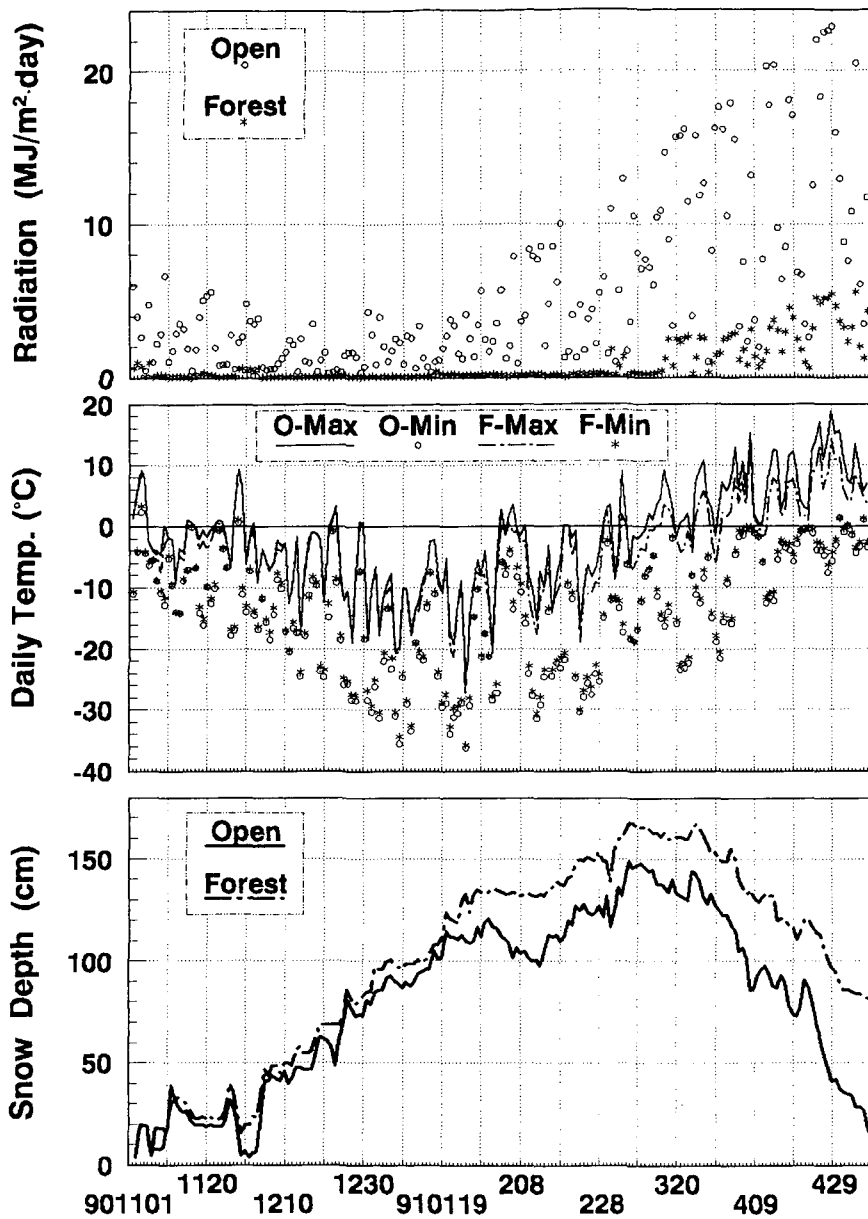
気象観測項目のうち、日射量、日最高・最低気温、積雪深について、観測期間中における林内と林外の差異を第2図に示す。北緯47度を越えていることもあり、冬至の前後は林外でも日射量が少なくなっている(第2図上段)。また、密な針葉樹に覆われているため、太陽高度の低い2月末頃までは林内に到達する日射量は極めて少ないことがわかる。3月に入ると林内でも日射量が観測されるようになるが、林外に比べると格段に小さい値である。春先の融雪の進行は日射量の大小によっても影響されるが、この図からも森林内外で融雪に差異の生じることが推察される。

日最高・最低気温を第2図中段に示す。11月中旬に日最高気温が林外で林内よりも高い日が数日間みられるが、その後2月初旬まで日最高気温に大きな差異が観測されない。しかし、その間も日最低気温は、林外よりも林内の方が若干高くなっている。2月以降は、日最高気温に明瞭な差が認められるようになり、林内で林外よりも数℃低くなる。日最低気温は、林内で林外よりも高く、気温の日較差は、林内よりも林外の方が大きくなっていることがわかる。樹木の断熱材としての効果が気温の変化に現れている。ちなみに今冬の最低気温は1月25日の $-36.2^{\circ}\text{C}$ である。5月に入っても、日最低気温が氷点下を示す日が多く、融雪期にも未明には積雪表面で再凍結が起こっていることがわかる。

森林内での積雪深は、場所による変動が大きいために、観測点の代表性が問題になる。融雪期には林内の数ヶ所で積雪深の測定を継続的に行なったが、その平均値と今回林内の観測点とした場所の積雪深の自動観測結果に大きな差異が認められない。そのため、代表性については地点選定が成功したといえる。森林内外での積雪深の変化を第2図下段に示す。1月下旬までは、林内の方がわずかに積雪深が大きいですが、差異がそれほど明瞭ではない。2月上旬に林外の日最高気温が $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ まで上昇した日が3日ほどあり、そのために林外の積雪上層で圧密が起こり、積雪深が減少している。その際に生じた森林内外での積雪深の差異が4月初めまで持続している。融雪の開始とともに差が大きくなり、4月下旬からの活発な融雪は林外で顕著であり、林外の積雪深の減少が急速である。その差は、日射量や気温などの気象条件の違いによって生じたものである。森林内外での融雪熱収支量の差については前報<sup>7)</sup>で報告した。

その他の気象要素の森林内外での差異としては、風速において明瞭である。つまり、林内では林外に比べて風速が極端に弱くなっている。このことも融雪のスピードに差異の生じる要因のひとつである。

以上のように、森林の存在が積雪期の気象に大きく影響を及ぼしていることが明らかである。そのことが、以下に述べる融雪の森林内外での違いにも作用してくるのである。



第2図 森林内外における気象要素の変化

## 2. 森林内外での降水中の溶存物質濃度

降水の採取は、林外では4月20日から、林内では4月23日から始め、5月8日まで行なった。それぞれの採取時間、降水量、pH、電導度および溶存物質濃度を第2表に示す。

降水ごとの各項目の変動が大きいが、森林内外の両者を比較すると、降水量では林外の方が大きくなっている。pHは林内の方がわずかに低く、電導度は林内で高くなっている。ほとんど

第2表 森林内における降水のpH, 電導度および溶存物質濃度

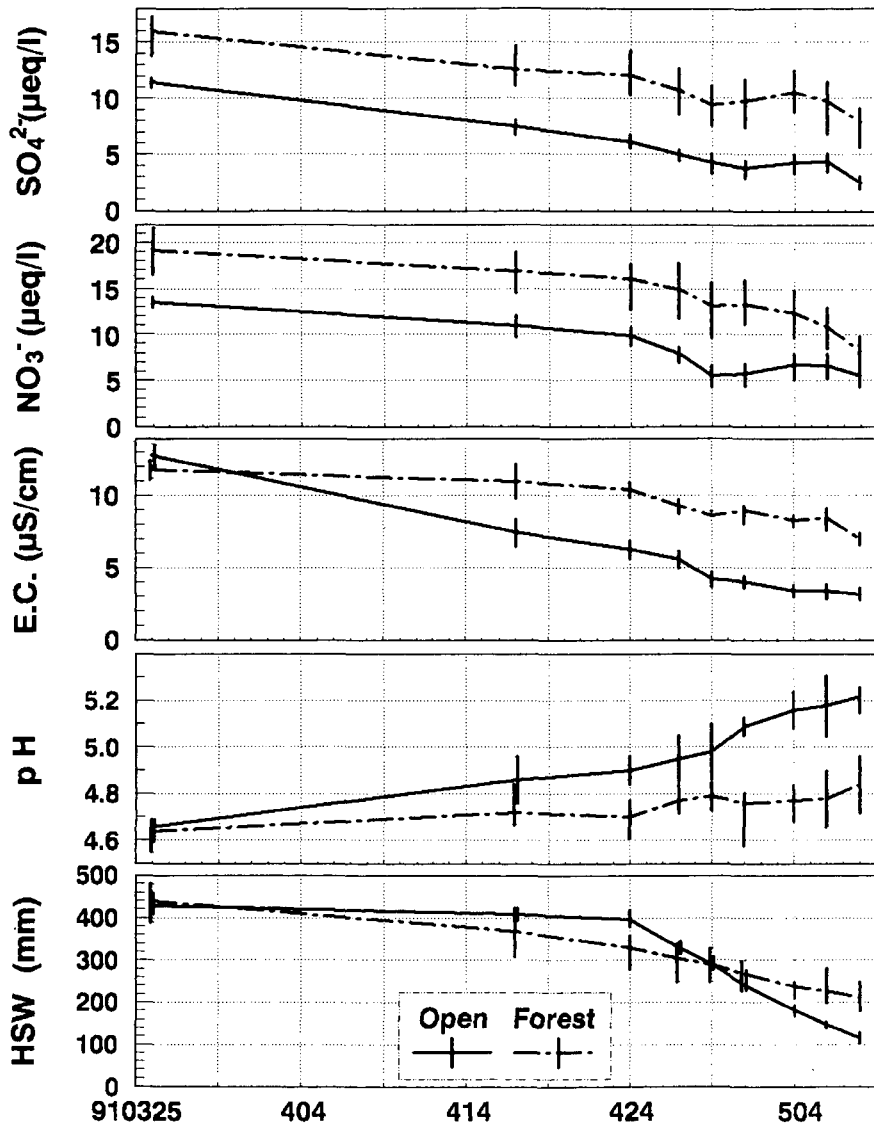
	Sampling Period		Prec.	pH	$\lambda_{25}$	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	
			mm		$\mu\text{S/cm}$	$\mu\text{eq/l}$	$\mu\text{eq/l}$	$\mu\text{eq/l}$	$\mu\text{eq/l}$	$\mu\text{eq/l}$	$\mu\text{eq/l}$	$\mu\text{eq/l}$	$\mu\text{eq/l}$	
Open														
O-1	4/20	900~4/21	900	4.8	4.63	9.9	1.54	0.36	0.27	1.30	3.08	0.96	16.34	8.20
O-2	4/21	900~4/22	900	11.0	5.27	3.5	0.43	0.36	0.10	0.59	2.50	1.27	8.82	2.96
O-3	4/22	900~4/23	900	11.5	4.61	9.4	1.87	1.97	0.41	0.43	3.70	1.81	9.16	16.91
O-4	4/23	900~4/24	900	5.0	4.80	13.1	2.98	0.70	1.73	3.84	38.32	3.78	23.30	47.28
O-5	4/39	900~5/01	900	3.8	4.35	28.2	7.63	29.08	4.49	6.66	29.87	4.85	40.93	59.55
O-6	5/01	900~5/02	1500	14.5	4.70	13.5	1.09	15.12	0.13	5.81	12.02	1.83	23.21	29.27
O-7	5/02	1500~5/03	700	2.7	4.73	11.6	0.52	0.99	0.15	2.47	4.74	1.27	14.31	25.34
O-8	5/06	1800~5/07	1600	12.1	4.56	14.5	0.35	13.41	0.16	3.29	3.88	1.07	20.76	29.94
O-9	5/07	1600~5/08	900	3.4	4.59	10.3	0.70	5.84	0.15	1.65	2.99	1.52	11.52	24.28
Forest														
F-1	4/23	900~4/24	900	2.8	4.66	19.2	7.91	0.00	19.67	14.24	55.33	8.24	17.13	60.23
F-2	4/30	900~5/01	900	1.9	4.26	39.1	11.12	0.00	27.06	23.28	66.50	13.76	23.09	107.35
F-3	5/01	900~5/02	1500	7.1	4.40	28.7	5.28	0.00	18.78	19.75	45.32	5.70	10.39	81.64
F-4	5/02	1500~5/03	900	1.2	4.72	13.5	1.75	0.20	9.02	10.58	20.18	3.24	7.90	38.33
F-5	5/06	1800~5/02	1600	10.6	4.49	18.0	1.41	0.44	11.62	10.64	20.69	4.15	4.08	39.06
F-6	5/07	1600~5/08	900	2.3	4.40	21.3	1.40	0.00	12.78	8.67	13.98	3.38	5.06	44.43

の溶存物質濃度は、林内の方が高くなっているが、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度は林外の方が高い。樹木の枝葉には、乾性沈着による物質や樹木起源の物質が付着しているため、林内の降水中の溶存物質濃度が、林外よりも高いのは理解し易い。しかしながら、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度は林外の方が高くなっている。これは次のように考えられる。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>などの窒素化合物は生物活動によって消費される。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>は硝化菌によってNO<sub>3</sub><sup>-</sup>に変化するから、林内の降水中にNH<sub>4</sub><sup>+</sup>が検出されなかったり、極めて低濃度であるのは、降水時から分析のための濾過までの間に硝化されたものと考えられる。その時間間隔はほとんどが1日以内であり、長くても2日以内であった。濾過後は酸を添加しているので微生物活動は考えられない。林内で採取された降水には、前述のようにエアロゾルや生物起源の物質が混入しており、濁っていることが多い。その中に硝化菌が含まれていたものと考えられる。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>が硝化されるのであるから、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度は増加しそうであるが、林内ではNO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度も低くなっている。これは、降水が樹冠に達し、降水採取容器に捕捉され、分析されるまでの間に生物活動によって消費されたためと考えられる。林外で採取される降水では、この過程で生物の混入する確率が極めて低いために、林内とで大きな差異が生ずるものと考えられる。

林内の降水の採取は、樹木の影響を知るために、balsam firの樹冠の直下に採取容器を設置したために、林内の特性が過大評価されている可能性がある。

### 3. 森林内外での積雪中の溶存物質濃度

森林内外での積雪全層の採取・分析を、融雪最盛期には2~3日間隔で行なった。なお、林内の積雪分布はばらつきが大きく、特に枝葉密度の大きな樹木の近傍では、積雪水量が極端に小さくなる。前述のように、分析処理の数量的な制限により、多数の点での積雪全層の採取・分析が不可能であった。そのため、林内の積雪全層の採取は、おもに樹幹と樹幹の間で行なった。積雪水量、pH、電導度、 $\text{NO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ 濃度の森林内外での変化を第3図に示す。図にはそれぞれ平均値とともに最大値、最小値を示す。3月26日には、積雪水量に森林内外での差はほと



第3図 森林内外における積雪全層の積雪水量、pH、電導度および $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度

んどなく、4月に入ると林内では次第に減少を始める。林外では、4月24日まで積雪水量の減少量は少なく、それ以降急激に減少し、活発な融雪が起きていることがわかる。4月27日までは林外の積雪水量が林内を上回っているが、5月1日には逆転し、林内の方が大きくなる。森林内外での積雪水量の減少速度の差異が顕著である。

積雪全層のpHは融雪とともに増加しており、積雪中の $H^+$ 濃度が減少していることがわかる。融雪によってpHの低い融雪水が流去した結果、積雪自体は次第にpHが高くなっていく。増加の割合は、林外の方が林内よりも大きく、融雪の進行速度の差に対応している。積雪全層の電導度は融雪によって低くなり、積雪は融雪とともに不純物を排出し、末期には林外の積雪は蒸留水に近い値を持つようになることがわかる。つまり、積雪粒子の変態と融雪水の流下を繰り返すことによって、粒子は次第に $H_2O$ のみの結晶になる。林内では融雪の速度が遅いため、電導度の減少も林外に比べて緩やかである。

積雪全層の $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 濃度は、ともに林内で林外より高く、融雪の進行によって濃度が低くなっている。5月初めに再び濃度が増加するのは、比較的濃度の高い降水がもたらされたためである。融雪最盛期の林内での $NO_3^-$ 濃度の減少が、比較的大きくなっている。これは、降水について述べたように、生物活動による影響と考えられる。第4図に示すように、融雪期の林内の積雪は、落葉や木々の枝などのために汚れている。これらの中には藻類や昆虫が生息しており、活発な生物活動が認められる。それらの生物活動によって、積雪中の窒素化合物が消



第4図 森林内の積雪表面写真

費される。林内では林外に比べて、積雪中の生物密度が大きいために  $\text{NO}_3^-$  濃度の減少が速やかになっているものと考えられる。

#### 4. 森林内外における融雪水の量および質の差異

##### (1) 融雪水量・pH・電導度

観測期間中における森林内外の積雪ライシメータによって得られた、融雪水量および融雪水の pH・電導度の変化を第 5 図に示す。電導度は、採水した融雪水について測定した。融雪水量は森林内外とも明瞭な日変化を示している。降雨による融雪以外の場合には、林外で 11 時頃まで融雪水量が少なく、それ以降急激に融雪水量が増加を初め、16~17 時頃にピーク水量を記録する。林内では、増水を始める時間が林外より 2~3 時間遅れ、ピーク水量も 16~19 時頃に観測される。日最高気温を記録するのが、森林内外とも 13~14 時頃であるから、この遅れは積雪深および積雪の層構造の差異によるものと考えられる<sup>9)</sup>。

5 月 2 日未明や 5 月 7 日未明の融雪水量増加は、降雨に対応したものである。この降雨による水量の増加時には、森林内外での水量はほとんど同じであるが、日射や気温による融雪の際にはピーク水量に大きな差異が認められる。日射量や日中の気温が林外で大きいことと対応している。

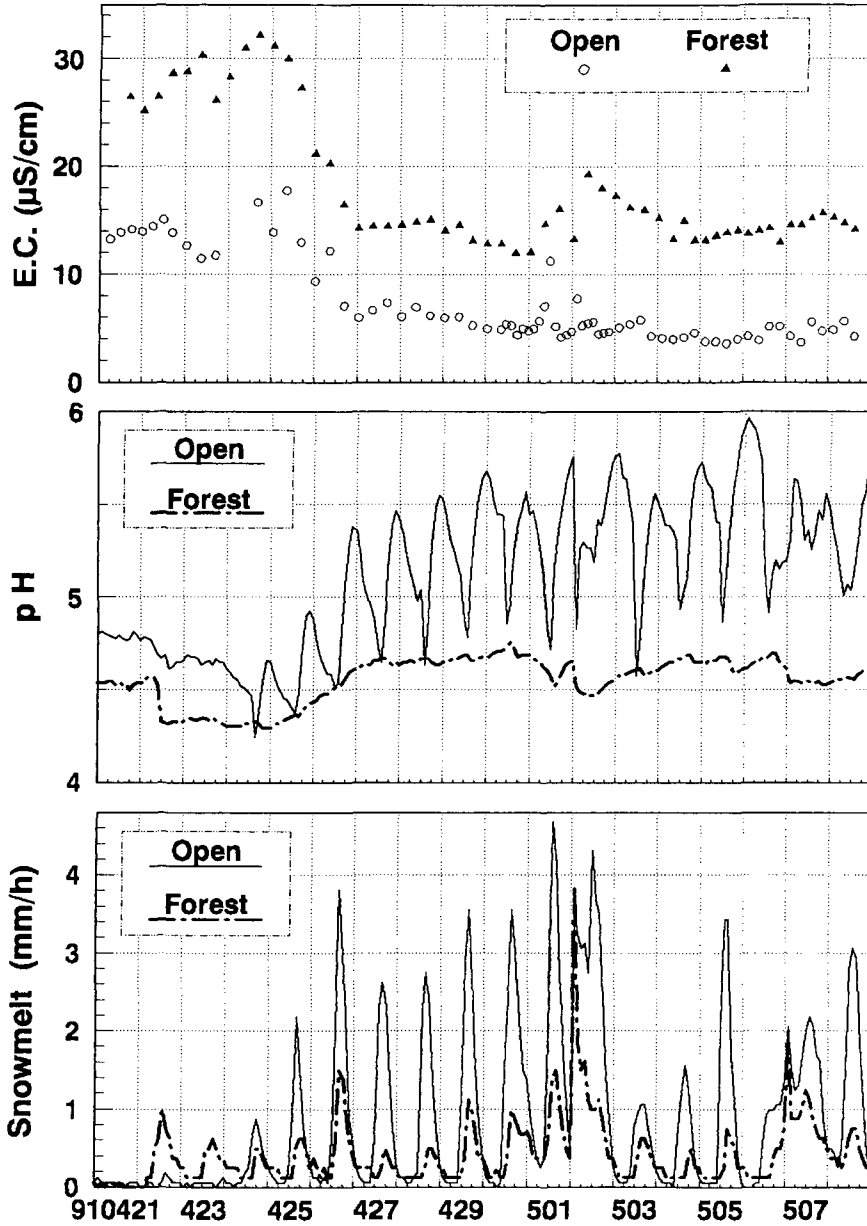
融雪水の pH の変化では、林外での変動の振幅の大きさが顕著である。林外の融雪水の pH は 4 月 24 日まで大きな変動は認められないが、24 日午後の融雪水量の増加時に、融雪水の pH が急激に低下している。融雪初期に極めて酸性の強い融雪水が流出している。それ以降は、明瞭な日変化を示すが、全体的には pH がわずかずつ増加している。これは、前述の積雪全体の pH が次第に高くなっていることと対応する。融雪水量と pH の日変化の位相には若干のずれがある。融雪水量は、11 時頃まで減少傾向にあるが、融雪水の pH は 14 時頃まで低下を続ける。そして、pH が最も高くなるのは 21~23 時頃である。この位相のずれは、融雪水の流出機構に関わっていると考えられる。考察については後述する。

林内の融雪水の pH は、4 月 22 日の融雪水の増加時に急激に低下し、その後 2 日間安定している。24 日以降は、林外の融雪水の pH の日最低値の変化に追随するように林内の融雪水の pH は変化している。しかしながら、林内の融雪水の pH は、林外にみられるような明瞭な日変化を示さず、降雨後にわずかに低下することを除けば比較的安定的である。積雪全体の pH は、林内で林外より低く、融雪の進行による増加量も小さいことは前述した。それに対応して、林内の融雪水の pH は林外よりも低く、融雪の進行にともなう変化も林外より小さい。

融雪水の電導度は、融雪水中に溶存しているイオンの量に対応する値であるが、一般的に林内の方が林外よりも大きく、溶存するイオンの濃度が林内で大きいことを示している。融雪初期には森林内外とも電導度が比較的大きいが、融雪最盛期には安定した値を示す。林外の融雪水の電導度は、pH に見られたような明瞭な日変化を示さない。

##### (2) 溶存物質濃度

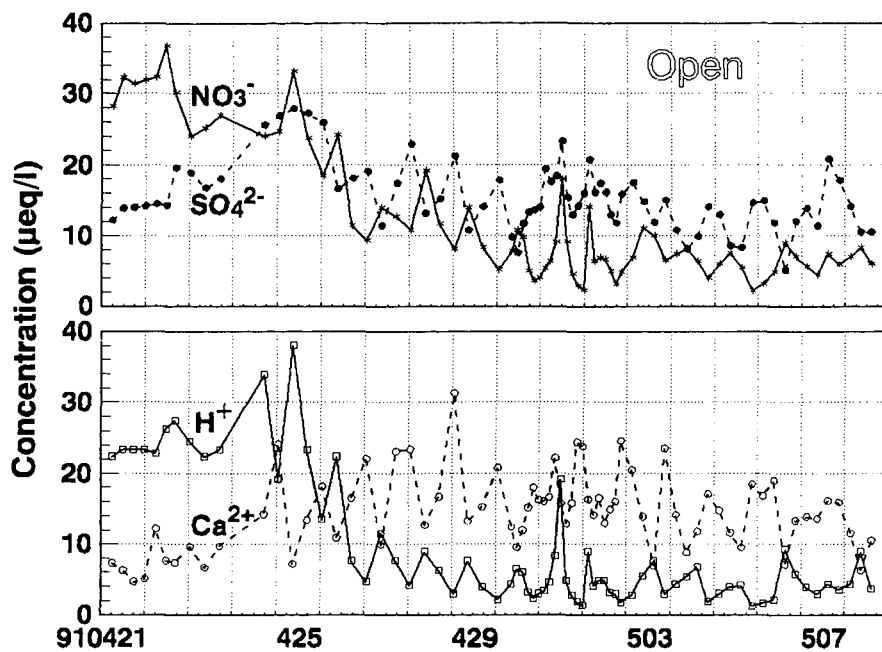
森林内外の融雪水について、定量分析を行なったそれぞれの溶存物質濃度、および pH の分析値から求めた  $\text{H}^+$  濃度を検討すると、陽イオンでは  $\text{H}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、陰イオンでは  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  が



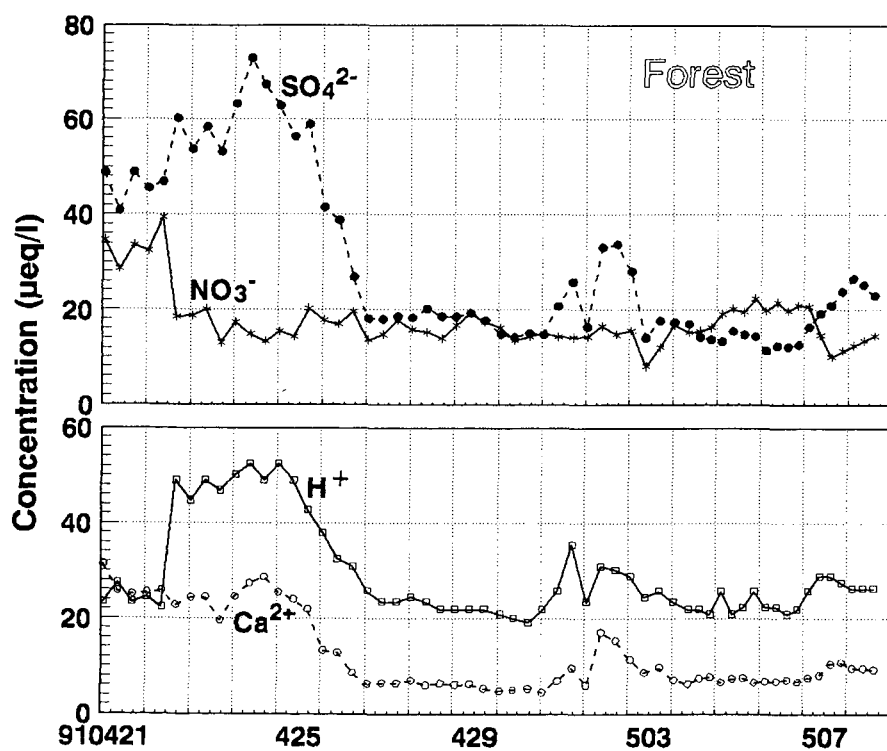
第5図 融雪水量および融雪水のpH, 電導度の変化

当量濃度で優先する。そこで、その4種類のイオン濃度について森林内外での変化を第6, 7図に示す。

林外での融雪水中の溶存物質濃度は、融雪初期に高く、後半には降雨時を除けば比較的低くなる。それぞれの溶存物質濃度は明瞭な日変化を示すが、イオンごとに変動パターンが異なっている。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度は午前中に高く、深夜に低くなる。しかし、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は逆に午前中に低く深夜に高くなっている。陽イオンについては、H<sup>+</sup>がNO<sub>3</sub><sup>-</sup>と同じパターンであり、Ca<sup>2+</sup>はSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>と対応する。H<sup>+</sup>濃度とNO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度の測定期間中の相関係数は0.944であり、極めて高い相関を有し



第6図 林外の融雪水中の溶存物質濃度変化



第7図 林内の融雪水中の溶存物質濃度変化

ている。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>がH<sup>+</sup>と対になっていると考えられ、林外の融雪水の低酸性化に寄与しているのは、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>である。Ca<sup>2+</sup>濃度とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度は、全期間では相関係数がそれほど高くないが、融雪最盛期の変動パターンの対応が良く、対をなすイオンであると考えられる。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の変動パターンの差異の要因については後述する。

林内では、融雪初期に溶存物質濃度が高くなっているが、4月27日以降は比較的安定した濃度を示し、日変化もほとんど認められない。5月1, 2日の変動は降雨にともなうものである。さらに、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の変動パターンの違いも顕著ではない。

## IV. 考 察

### 1. 林外における融雪水の流出機構

融雪最盛期には、林外の融雪水量および融雪水中のイオン濃度が明瞭な日変化を示す。融雪水量の日変化は、日射や気温の日変化と対応する。では、融雪水中の溶存物質濃度の日変化は、いかにして形成されるのであろうか。また、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の変動パターンが逆の位相を示すのは、なぜなのであろうか。これらの問題について本章で検討を行なう。前述のように、融雪水のpHを連続的に計測したので、融雪水中のH<sup>+</sup>濃度についても、連続的な変化を捉えることができる。そこで、鈴木・小林<sup>10)</sup>が行なった流出成分分離の手法を用いて、融雪水の流出形成機構について考察を加える。

融雪最盛期に積雪下面から流去する融雪水の大部分は、積雪表面で形成され、積雪中を流下したものである。巨視的には、熱収支解析により得られる積雪表面で融解した量と、積雪から流去する水量は、日単位では一致する<sup>11)</sup>。しかしながら、微視的には、融解によって形成された融雪水が、すべて翌日の朝までに流去するとは考えにくい。融雪最盛期には、未明に積雪表面で再凍結が起こっていても、積雪内部には含水層があり、水が保持されていることから裏付けられる。すなわち、前日から積雪内部に存在している水と、当日積雪表面から供給された水とが混合して積雪下面から流去すると考えることができる。そこで、ふたつの成分による流出分離を試みる。

前日から積雪内部にある水を“ふるい水”，当日積雪表面で形成された水を“あたらしい水”と呼ぶならば、次の連立方程式が成立する。

$$Q = Q_n + Q_o$$

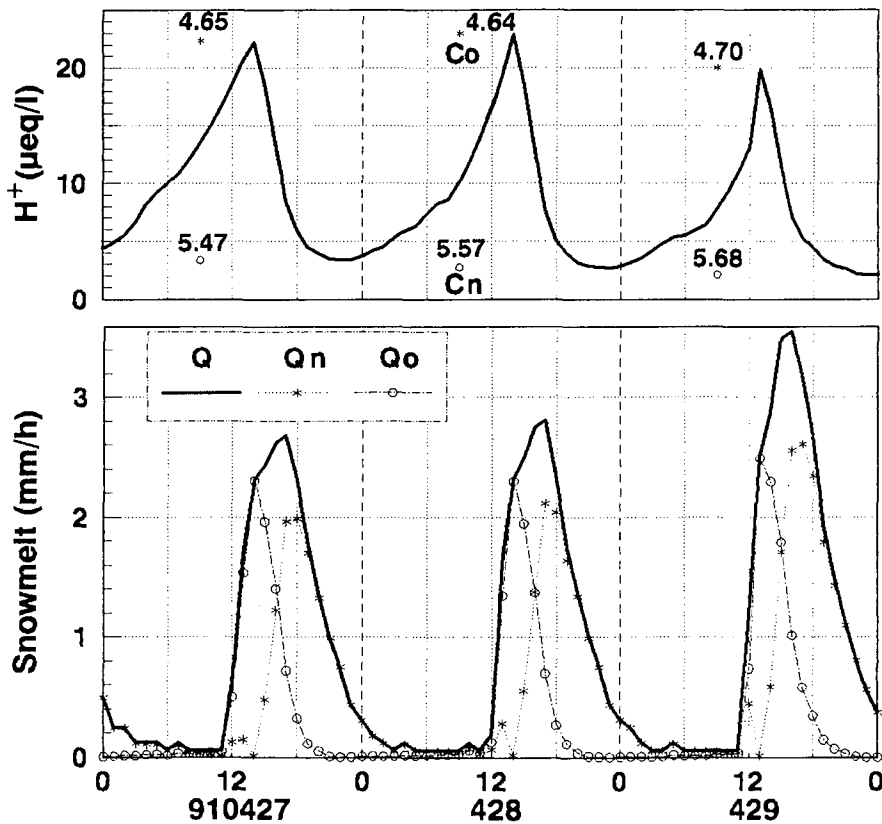
$$C \cdot Q = C_n \cdot Q_n + C_o \cdot Q_o$$

ここで、 $Q$ ：積雪下面融雪水量、 $C$ ：融雪水中のH<sup>+</sup>濃度、 $Q_n, Q_o, C_n, C_o$ はふるい水とあたらしい水の流出成分およびそれぞれのH<sup>+</sup>濃度である。 $Q$ と $C$ は測定により得られている。 $C_n$ と $C_o$ が得られれば、未知数がふたつの連立方程式を解くことができる。

晴天の続いた4月27~29日における、林外での融雪水量と融雪水のH<sup>+</sup>濃度の変化を第8図に示す。積雪表面層では、融雪の進行によってH<sup>+</sup>濃度は次第に減少している。そこで、積雪下面融雪水中のH<sup>+</sup>濃度の日最高値は、ふるい水のH<sup>+</sup>濃度( $C_o$ )であると仮定する。次に、あた

らしい水の  $H^+$ 濃度 ( $C_n$ )として,  $C_o$ より小さな値を与え連立方程式を解くと,  $C_n$ が  $C_o$ に近ければ,  $Q_n$ や  $Q_o$ が負の値になる。負の流量は現実的でないので,  $Q_n$ や  $Q_o$ がすべて正となるような最大の  $C_n$ を求めることができる。対象とする3日間とも, 9時に積雪下面融雪水量が最低となるので, 9時を融雪日の日界とする。上述のようにして求めた  $C_o$ と  $C_n$ を, 各融雪日ごとに与え, 連立方程式を解いた結果を第8図に示す。それぞれの  $C_o$ と  $C_n$ およびそれらを pHに換算した値を図中に示す。 $C_n$ は次第に濃度が低下しており, 積雪表面では融雪の進行によって雪粒子がより純粹になることと調和的である。

流出成分分離の結果, 各融雪日の融雪初期には前日から積雪内に存在した水が流去し, その後遅れて当日の融雪水が流去する様子が明らかとなった。ふるい水が最初に流去する現象は, 河川流出で考えられている押し出し流に相当するものである。積雪下面融雪水量の変化を詳細



第8図 融雪最盛期の林外の融雪水量,  $H^+$ 濃度変化および流出成分分離結果

に検討すると, 増加速度は一定でなく, 急激な増加の後増加速度が緩やかになり, ピーク水量を迎える。流出成分分離結果によれば, 最初の急激な増加はふるい水の流出によってもたらされ, 日最大融雪水量はあたらしい水の寄与によって形成されている。積雪表面で供給された当日の融雪水のみによって, 積雪下面融雪水量が形成されているとすれば, このハイドログラフの折れ曲がり是不自然であり, 説明しにくい。ところが, イオン濃度の異なる水の混合によって積雪下面融雪水量が形成されているとすれば, 速やかな押し出し流とその後の浸透流によ

て説明可能である。

## 2. 融雪水中の溶存物質濃度の日変化

融雪最盛期における積雪下面融雪水の  $H^+$ 濃度の日変化は、積雪下層の積雪内部融雪水の  $H^+$ 濃度が、積雪表面で形成される融雪水の濃度よりも高いとすれば説明可能であることが明らかとなった。同様に、 $NO_3^-$ イオンについても積雪内部の分布を推定することができる。ところが、積雪下面融雪水中の  $Ca^{2+} \cdot SO_4^{2-}$  濃度については日変化のパターンが  $H^+$ や  $NO_3^-$ と逆であった。この変動を説明するには、積雪下層の積雪内部融雪水中の  $Ca^{2+} \cdot SO_4^{2-}$  濃度が、積雪表面で形成される融雪水の濃度よりも低いことが必要である。積雪表面に新たな物質の供給がなければ、積雪表面の雪粒子は次第に不純物を排出していくので、積雪表面で形成される融雪水中の濃度が高くなることはない。そこで、積雪表面に  $Ca^{2+} \cdot SO_4^{2-}$  が供給されている可能性が考えられる。

融雪の進行によって積雪から流去したイオンの損失分と、積雪下面から流下したイオンの総量は一致するはずである。ところが、両者を別々に求めて比較すると、 $NO_3^-$ については、損失分が流下した総量を上回る。特に林内においてこの傾向が顕著である。これは、前述のように、生物活動によって消費されたと考えることができる。一方、 $SO_4^{2-}$ は損失分よりも流下した総量が多くなる。このことから、 $SO_4^{2-}$ は大气からの乾性沈着によって積雪表面に供給されていると考えることができる。これらの、融雪にともなう積雪中のイオン収支については稿を改めて報告する。積雪下面融雪水中の  $SO_4^{2-}$  濃度変動およびイオン収支におけるアンバランスから、乾性沈着による積雪表面への  $SO_4^{2-}$  イオンの供給が活発に行われていると考えられる。

## V. ま と め

カナダ東部北方針葉樹林地において、融雪水の流出機構に関する調査を行なった。森林内外に同一の観測機器を設置し、調査方法も同一にして、融雪におよぼす森林の影響を考察した。

降水の森林内外における差異は明瞭であるが、とくに  $NH_4^+$ と  $NO_3^-$ の窒素化合物については興味深い。ともに、林内で林外より低濃度になっており、生物活動による化学変化および消費が推察される。

積雪全層の融雪期における変化では、積雪水量や pH、電導度の変化が、林内で林外よりも緩やかである。積雪全層の  $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$  濃度は、ともに林内で林外より高く、融雪の進行によって濃度が低下する。融雪最盛期の林内での  $NO_3^-$ 濃度減少が大きいのは生物活動の影響と考えられる。

積雪下面融雪水中の溶存成分濃度は、林外でのみ日変化が明瞭である。しかし、日変化のパターンは  $H^+$ と  $NO_3^-$ が同じで、 $Ca^{2+}$ と  $SO_4^{2-}$ はそれと逆の変動パターンを示す。

林外での積雪下面融雪水の水量と  $H^+$ 濃度の連続測定結果を用いて、流出成分の分離を行なうと、積雪下層の積雪内部融雪水の  $H^+$ 濃度が、積雪表面で形成される融雪水の濃度よりも高ければ、水量と  $H^+$ 濃度の変動を説明することができる。さらに、各融雪日の融雪初期には、積雪

下層の積雪内部融雪水が、押し出し流によって流出し、その後に積雪表面から供給された当日の融雪水が流出すると考えられる。融雪水のハイドログラフの折れ曲がりについても、ふたつの流出成分を考えることにより説明が可能となる。

現地調査に協力して頂いた東京都立大学大学院生の五十嵐誠氏に感謝いたします。この研究には文部省科学研究費（課題番号 02041003・03455020）の一部を使用した。

#### 文 献

- 1) Suzuki, K. 1982 Chemical changes of snowcover by melting. *Jap. J. Limnol.*, **43**, 102-112.
- 2) Beamish, R. J. and Harvey, H. H. 1972 Acidification of the La Cloche Mountain Lakes, Ontario, And resulting fish mortalities. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **29**, 1131-1143.
- 3) Jeffries, D. S., Cox, C. M. and Dillon, P. J. 1979 Depression of pH in lakes and streams in central Ontario during snowmelt. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **36**, 640-646.
- 4) Minns, C. K. 1981 Acid rain: a preliminary estimate of the risk to Ontario's inland fisheries. *Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences*, No 1622, 36 p.
- 5) Overrein, L. N., Seip, H. M. and Tollan, A. 1981 Acid precipitation effects on forest and fish. *Reclamo*, Oslo, 175 p.
- 6) Papineau, M. 1987 Effects of acid precipitation on a boreal forest ecosystem : ion budgets and changes in water chemistry for the Laflamme Lake Watershed. Environment Canada, Quebec, 108 p.
- 7) 石井吉之・鈴木啓助・兒玉裕二・小林大二 1992 カナダ東部、北方針葉樹林地における融雪水の流出 I -融雪特性と流出応答-。低温科学, 物理篇, **51**, 77-92.
- 8) 鈴木啓助 1983 札幌における降雪の化学的性質。地理学評論, **56**, 171-184.
- 9) Kobayashi, D. and Motoyama, H. 1985 Effect of snow cover on time lag of runoff from a watershed. *Annals of Glaciology*, **6**, 123-125.
- 10) 鈴木啓助・小林大二 1987 森林小流域における融雪流出の形成機構。地理学評論, **60**, 707-724.
- 11) Ishikawa, N., Motoyama, H. and Kojima, K. 1986 Estimations of snowmelting rate in a small experimental site. In Proc. Cold Regions Hydrology Symposium, American Water Resources Association, 305-312.