

# 2001～2003年の北海道北部暑寒別川における酸性雪の影響

渡辺 智治・安富 亮平・今田 和史

北海道立水産孵化場

## Effects of Acid Snow to the Chemical Profiles of the Shokanbetsu River, Northern Hokkaido, Japan during 2001-2003

Tomoharu Watanabe, Ryouhei Yasutomi, and Kazusi Imada

Hokkaido Fish Hatchery, Kitakashiwagi 3-373, Eniwa, Hokkaido 061-1433, Japan

**Abstract** Slight acidification of stream water was continually observed in a tributary of the Shokanbetsu River system in northern Hokkaido, Japan, during the snowmelt season through 2001-2003. Alkalinity and pH began to decrease as soon as atmospheric temperature rose through February-March. Furthermore, alkalinity and pH showed the lowest values when flow was at its maximum in the tributary through March-April. The lowest pH was 6.74 in the main stem, 6.57 in the tributary, and 6.28 in a rillet of the tributary through 2001-2003. Although the pH of the tributary was low, it was exposed up to neutralization in the main stem. EC reached a peak of over 10 mSm<sup>-1</sup> in March during the early snowmelt season. Most water quality indices of the tributary recorded a maximum or minimum value through evening to night after the maximum flow during the snowmelt season. It was considered that the lower pH of 6.28 observed in the Shokanbetsu River system may affect the physiological condition of salmonid fish.

**Key words** : 酸性雪, 融雪水, pH, 暑寒別川, シロサケ

2001年に積雪量の多い北海道北部日本海側の暑寒別川水系において水質調査を行ったところ, 融雪初期の3月にpHの低下や他の溶存イオンの変動を観測し, 小規模ながら河川水の酸性化が認められた(渡辺ら, 2004)。さらに北海道日本海側のコックリ湖(蘭越町), 当丸沼(神恵内村), および奥沢貯水池(小樽市)においても, 融雪増水時の湖水または貯水のpH低下が報告されている(阿賀ら, 2000; Aga *et al.*, 2001)。特にコックリ湖においては, 経年的に酸性化している兆候を示すデータが得られつつある(阿賀, 2004)。

酸性雨被害が古くから知られているヨーロッパや北米諸国においては1960年代頃から酸性雨や酸性雪によって陸水域が酸性化し, サケ科魚類での被害が報告

されている(Cowling, 1982)。北欧ノルウェーでは1960年代頃から春季の融雪増水時期に酸性雪が多量に流出して河川水のpHが急激に減少する現象が見られ, Snowmelt acidic shockと定義されており, サケ科魚類において血中ナトリウムおよび塩素が減少し, 大きな被害が出ている(Leivestad and Muniz, 1976)。北海道においては陸水の酸性化が進行しはじめて間もないものと予測されるが, ヨーロッパや北米のような状況まで陸水の酸性化が進行した場合, 北海道の主要産業種であるシロサケ*Oncorhynchus keta*や希少種のイトウ*Hucho perryi*をはじめとした北海道に生息するサケ科魚類に与える影響が懸念される。

近年, 酸性降下物の原因物質である二酸化硫黄SO<sub>2</sub>

および窒素酸化物 $\text{NO}_x$ の排出が中国、台湾、および朝鮮半島など東アジア地域で増大し、わが国の特に日本海側地域へ酸性雨や酸性雪として影響を及ぼしていることが判明している(環境庁, 1997)。日本海側の山陰地方においては冬季に非海塩由来(non-seasalt, nss-)の硫酸イオン $\text{nss-SO}_4^{2-}$ および $\text{SO}_3^{2-}$ が高濃度になる(山口ら, 1991)。また、北陸地方および東北地方の日本海側においても冬季に $\text{nss-SO}_4^{2-}$ の降水量が増加している(北村, 1991, 大泉, 1991)。

野口ら(1999)およびNoguchi *et al.* (2001)による北海道における積雪調査では、日本海側の積雪は $\text{H}^+$ 濃度が高く $\text{H}^+$ 蓄積量が多く、原因として長距離輸送された大気汚染物質の影響が考えられるとしている。また、摩周湖における殺虫剤成分のヘキサクロロシクロヘキサン(HCH)濃度は、中国でHCHが使用禁止となった1984年以降減少しており、大気の流れ線解析からも大陸方面からの輸送が重要となっている(田中, 2004)。今後においても東アジア地域の経済活動によって排出される硫酸酸化物 $\text{SO}_x$ や窒素酸化物 $\text{NO}_x$ 等の酸性物質が増大することが予想される。

2001年に北海道北部暑寒別川支流において雪融け時期に小規模な河川水の酸性化現象を観測したが(渡辺ら, 2004)、酸性化がどの程度継続しているかは不明であった。このため2001年からさらに引き続き2003年まで暑寒別川水系において水質調査を実施し、暑寒別川における融雪期河川水の酸性化について観測した。

また、融雪時期は日中の温度上昇に伴い、雪融けの進行が急激に変化することから、融雪増水時における水質の日間変動を明らかにすることを試みた。ここでは、これらの結果をまとめて報告する。

## 材料および方法

### 調査地域の概要

暑寒別川(北海道増毛町)は、北海道北部日本海に流出する河川で、暑寒別岳(1,491m)、群別岳(1,376m)、および浜益岳(1,258m)等の山岳から成る増毛山地が水源である(Fig. 1)。暑寒別川の流路延長は26.0km、流域面積は99.2 $\text{km}^2$ 、暑寒別川一次支流根の沢川の流路延長は2.6km、流域面積は2.5 $\text{km}^2$ である(北海道土木協会, 1995)。暑寒別川流域はわが国でも有数の多雪地帯であり(渡辺ら, 2004)、北海道立水産孵化場道北支場(北海道増毛町, Fig. 1)で観測している積雪量が

2003年には270cmまで達している(Fig. 2)。

### 河川水質の測定と分析方法

河川水質の観測を、2001年2月27日から2003年7月23日まで行った。融雪期の3月から6月は1~10日おきに採水し、その他の時期は月に1~2回採水した。融雪増水が顕著であった2001年4月29日は6時から18時までの間に1~2時間おきに採水した。さらに2002年4月14日は0時から24時までの間に2~4時間おきに採水した。採水場所は、暑寒別川本流(St. 1)、暑寒別川一次支流根の沢川(St. 2)、および暑寒別川二次支流根の沢川枝沢(St. 3)の3箇所である(Fig. 1)。調査地点の詳細は、渡辺ら(2004)に示すとおりである。

2002年4月14日から2003年7月23日にかけて、根の沢川(St. 2)および根の沢川枝沢(St. 3)においてJIS1点法で流量を計測した。4月14日は0時から24時の間に2時を除いて2時間おきに流速を測定した。川幅を20cm毎に区切り、最後の区間は川幅までの端数の長さを測定し、区間境目毎に水深を測り、6割水深部において流速計(Yokogawa, CR-7)を使用して3回測定しその平均値から流速を求めた。

水質分析項目のうち、水温、pH、および電気伝導度(Electric conductivity, EC)は採水地点で測定し、アルカリ度は採水後速やかに研究室で分析した。2001年4

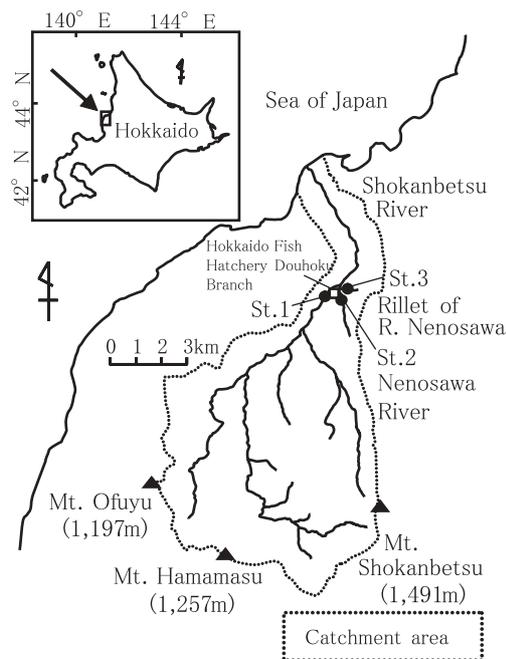


Fig. 1 Sampling sites in the Shokanbetsu River system and their catchment area.

北海道北部河川における酸性雪の影響

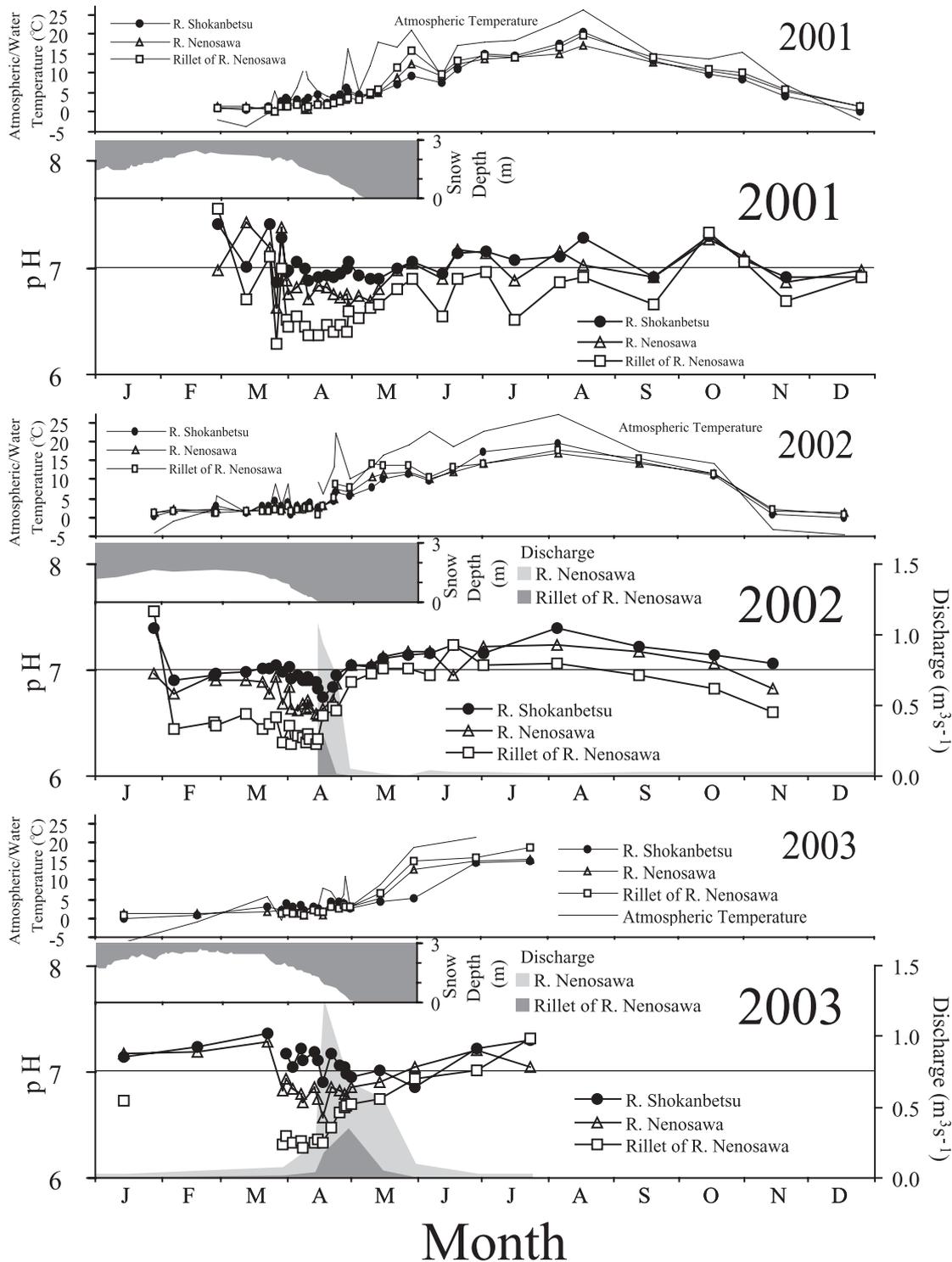


Fig. 2 Seasonal changes in atmospheric and water temperatures (upper) and pH (below) in the Shokanbetsu River system from February 2001 to July 2003. Graphs in the middle of each year show the snow depth measured at the Hokkaido Fish Hatchery Douhoku Branch.

月29日に採水したサンプルのみは、採水したサンプルを冷蔵輸送してSiO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, およびPO<sub>4</sub><sup>3-</sup>を測定し、残りを冷凍保存して後日NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, およびMg<sup>2+</sup>を分析した。分析方法は渡辺ら(2004)と同様である。

2002年7~11月まで道北支場敷地内に直径20cmの漏斗と1Lポリ瓶を設置して日界を9時として降雨を採取した。採取した雨水は、雨量を計測しpHおよび電気伝導度を測定した。

2002年2月15日及び2003年3月21日に道北支場近くの暑寒別川右岸河川敷で積雪を採取した。積雪の採取および分析は、渡辺ら(2004)の方法と同様で、雪表面から地面までを30~55cmの幅で切り出し、融雪水のpHおよび電気伝導度を測定した。

気温デ-タは道北支場に設置してあるデジタル温度計の記録を用いた。

## 結 果

### 河川水質の経年変化

Fig. 2に2001年から2003年にかけての暑寒別川本流および支流河川における気温、水温、積雪量、流量、およびpHの変化を示した。積雪量は1月から消雪までを示し、流量は支流2地点における2002年4月14日以降の測定結果を示した。暑寒別川本流(St. 1)の水温は、冬季に0.1℃まで下がり、夏季には20℃を超えた。根の沢川(St. 2)および根の沢川枝沢(St. 3)の水温は、冬季でも1℃台であったが、3月から気温がプラスに転じると雪融け水の影響で0℃台まで低下した。2001年の道北支場の積雪量は245cmに達したが、2002年は少なく165cmであった。2003年は近年では最も積雪量が多く270cmに達した。積雪が消失した日は、2001年が5月7日、2002年が4月15日、2003年が5月2日であった。根の沢川および枝沢の流量は、流量の計測を始めた

2002年4月14日および4月28日が最も多く、その後根の沢川では5月以降、枝沢では4月中旬以降に急激に減少した。枝沢においては、7~9月の間水量が減少し流量を計測できなかった。2003年に最大流量に達した日は、根の沢川が4月17日、枝沢が4月28日であった。その後、根の沢川では6月上旬に急激に水量が減少し、枝沢では5月下旬に水量が激減した。

全地点のpHは、夏季から冬季にかけてpH7程度の中性付近で推移した。しかし、降雨時に採水した2001年7月16日、9月19日、および11月20日の枝沢ではpHが6.51, 6.66, および6.69と低かった。本流においては各年共にpHが中性付近で推移したが、3~5月の融雪期にpH6.9を下回ることがあった。根の沢川および枝沢のpHは、2001年および2003年では3月下旬に急激にpHが低下していたが、2002年においては2月からpHの低下を観測した。また、2001年および2003年では5月にpHが中性に上がっていたが、2002年は4月中旬以降にpHが中性へ上がっていた。いずれの年においても3~5月の融雪期には、融雪後融雪水が河川に到達する時間がより短い支流でpHが低下していた。

2001年から2003年に暑寒別川本流および支流河川水で観測した年毎の最低pHとその観測日をTable 1に示した。本流(St. 1)のpHは、2001年が6.87, 2003年が6.86であったが、2002年は6.74とやや低下した。この最低pHを観測した2002年4月17日は大雨にともない融雪も進み激しく増水していた。支流根の沢川(St. 2)では2002年および2003年でpHが6.57まで低下した。3地点中最もpHが低下したのは、根の沢川枝沢(St. 3)で、2001年および2003年では6.28まで低下し、2002年でも6.30まで低下した。

Fig. 3に2001年から2003年にかけての暑寒別川本流および支流河川における電気伝導度およびアルカリ度の変化を示した。2001年3月の電気伝導度は調査期間中最も高く、本流が12.4 mSm<sup>-1</sup>, 根の沢川が16.0 mSm<sup>-1</sup>,

**Table 1** Lowest value of pH in the Shokanbetsu River system from 2001 to 2003.

Year	R. Shokanbetsu (Main stem)		R. Nenosawa (Tributary)		Rillet of R. Nenosawa (Rillet)	
	Date	pH	Date	pH	Date	pH
2001	Mar 26	6.87	Mar 26	6.63	Mar 26	6.28
2002	Apr 17	6.74	Apr 15	6.57	Apr 2	6.30
2003	May 30	6.86	Apr 17	6.57	Apr 8	6.28

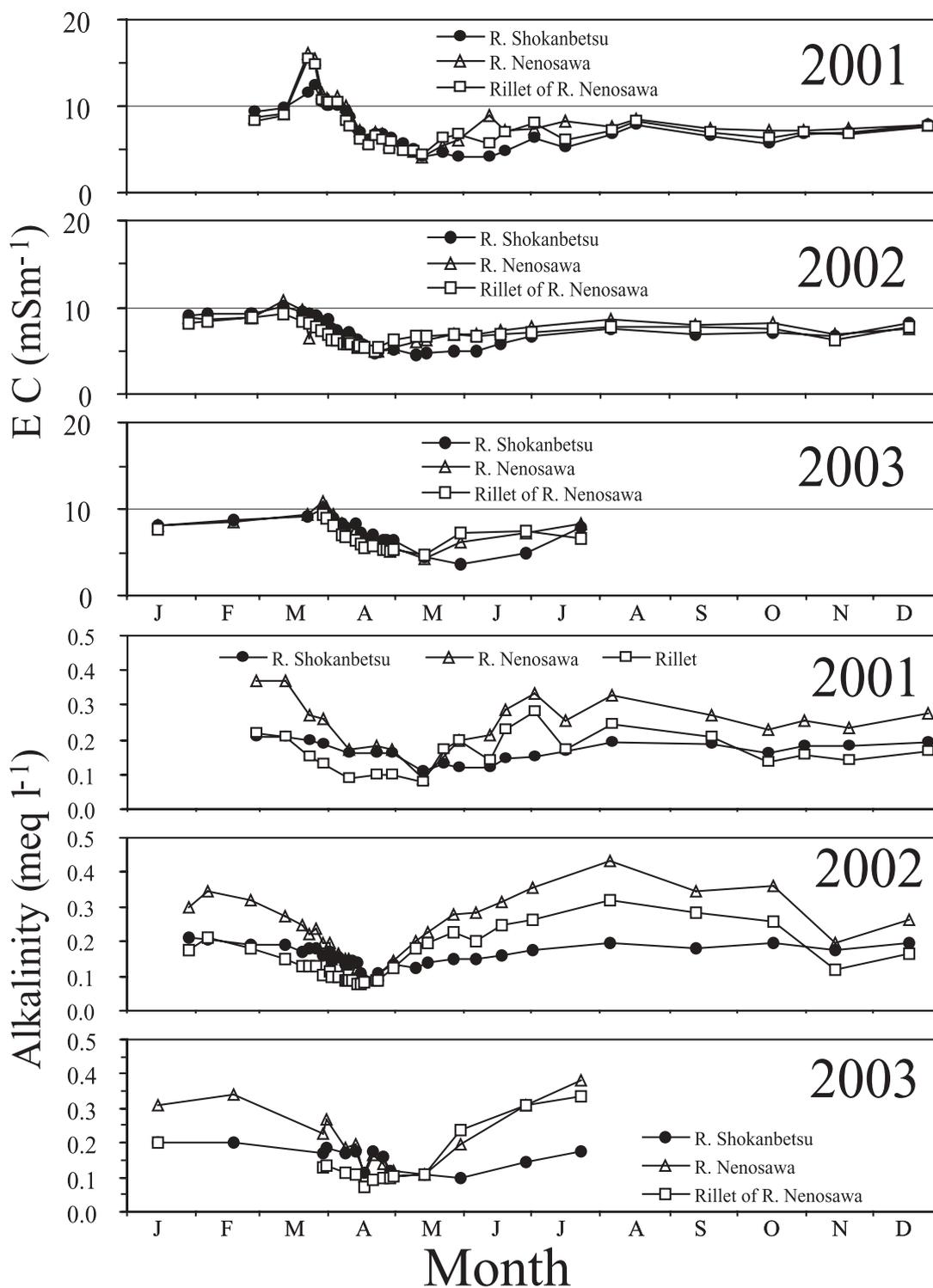


Fig. 3 Seasonal changes of EC (upper) and alkalinity (below) values in the Shokanbetsu River from February 2001 to July 2003.

枝沢が $15.3 \text{ mSm}^{-1}$ であった。2002年および2003年についても3月に各地点共にその年の最高値を観測したが、2001年より低く $10.0 \text{ mSm}^{-1}$ 程度であった。3月を過ぎると電気伝導度は急激に減少し、2002年では4月に各地点共に最低値を観測し、2001年および2003年では5月に最低値を観測した。アルカリ度は各年共に概ね夏季から冬季にかけて高いが、3月に減少し始めた。2001年全地点および2003年本流は5月に最低値を観測し、2002年全地点と2003年根の沢川および枝沢は4月に最低値を観測した。アルカリ度の最低値は、本流が2002年4月17日の $0.09 \text{ meq}^{-1}$ 、根の沢川が2001年5月13日の $0.09 \text{ meq}^{-1}$ 、枝沢が2003年4月17日の $0.07 \text{ meq}^{-1}$ であった。

#### 融雪増水期の河川水質の日中変化

##### 2001年4月29日 6～18時

Fig. 4および5に2001年4月29日6時から18時にかけての暑寒別川本流および支流河川の気温、水温、および各水質項目における日中の変化を示した。2001年4月29日の気温は、朝6時の最低気温 $3.6^{\circ}\text{C}$ から上昇し続け11時に最高気温 $16.8^{\circ}\text{C}$ に達して、その後夕刻18時には $7.2^{\circ}\text{C}$ まで降下した (Fig. 4)。水温の変化は、暑寒別川本流 (St. 1) が $3.4 \sim 6.8^{\circ}\text{C}$ 、根の沢川 (St. 2) が $3.0 \sim 6.8^{\circ}\text{C}$ 、および根の沢川枝沢 (St. 3) が $1.6 \sim 4.6^{\circ}\text{C}$ であった。枝沢では、最低水温を観測したのが朝6時ではなく夕刻16時であった。アルカリ度は、本流と根の沢川が同様な変化を示し、昼から漸減し夕刻に最低値に達した。枝沢ではさらに低い数値を示し、夕刻15時に3地点中の最低値 $0.08 \text{ meq}^{-1}$ を示した (Fig. 4)。本流および根の沢川のpHは、昼に最高値 (7.11, 6.87) を示した後漸減し、夕刻18時に最低値 (6.89, 6.64) を示した (Fig. 4)。枝沢のpHは、朝6時に最低値6.43を示し、9時から18時まででは $6.52 \sim 6.59$ の間で推移した。3地点の電気伝導度はいずれも午前中は変化がほとんど見られなかったが、昼から夕刻にかけて大きく減少した (Fig. 4)。電気伝導度の最低値は15時の枝沢で $4.78 \text{ mSm}^{-1}$ であった。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Nは、根の沢川と枝沢では昼から漸増し夕刻に最高値を示した (Fig. 4)。本流は根の沢川・枝沢より高い値で推移し、朝の最高値 $0.452 \text{ mg}^{-1}$ から漸減し17時に最低値を示した。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>においても、本流は根の沢川・枝沢より高い値で推移し、最高値は本流12時の $6.42 \text{ mg}^{-1}$ であった。枝沢の10時において一時的に急激にSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>が増加した (Fig. 4)。この10時に一時的に急激に値が増加する現象は、Mg<sup>2+</sup>、

Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、およびCl<sup>-</sup>についても観測された (Fig. 5)。SiO<sub>2</sub>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、およびCl<sup>-</sup>は、全地点で概ね日中に最高値を示し、夕刻に最低値を示す傾向が見られた (Fig. 5)。SiO<sub>2</sub>およびCa<sup>2+</sup>は本流が高く、雪が融けて間もない支流ほど低い値を示した。Na<sup>+</sup>およびCl<sup>-</sup>は逆に支流が高い値を示した。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-NおよびPO<sub>4</sub><sup>3-</sup>は、午前中は低い値で推移したが、夕刻に急激に増加した。K<sup>+</sup>は測定可能な下限値を下回り測定できない試料が多かった。

##### 2002年4月14日 0～24時

Fig. 6に2002年4月14日における暑寒別川本流および支流根の沢川の気温、水温、積雪量、流量、電気伝導度、アルカリ度、およびpHの日周変化を示した。2002年4月14日の気温は、0時に最低気温 $1.6^{\circ}\text{C}$ を観測し、14時に最高気温 $11.2^{\circ}\text{C}$ を観測した。夕刻から気温が低下し続け20時には $2.3^{\circ}\text{C}$ まで低下し、24時は $3.0^{\circ}\text{C}$ であった。暑寒別川本流 (St. 1) の水温は0時および22時に最低水温 $3.1^{\circ}\text{C}$ を、12時および14時に最高水温 $6.1^{\circ}\text{C}$ を観測した。根の沢川 (St. 2) の水温は、最低が20時および22時の $2.8^{\circ}\text{C}$ 、最高が12時の $5.7^{\circ}\text{C}$ であった。根の沢川枝沢 (St. 3) は、最低が0, 4, 20, 22, および24時の $2.7^{\circ}\text{C}$ 、最高が12時の $4.6^{\circ}\text{C}$ であった。道北支場敷地の積雪は、観測開始時の0時の $18 \text{ cm}$ から終了時の24時の $8 \text{ cm}$ まで $10 \text{ cm}$ 減少した。根の沢川の流量は、8時には最少流量 $0.29 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ であったが、10時から増水し始め16時には最大流量 $0.68 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ に達して、その後漸減した。枝沢においても同様な変動が見られ、最少流量は4～8時の $0.04 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ で、最大流量は18時の $0.13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ であった。電気伝導度、アルカリ度、およびpHは概ね、枝沢が最も低い値で、本流が最も高い値で推移した。各地点の電気伝導度の最低値は、枝沢が14時、根の沢川が16時、および本流が18時であった。電気伝導度の最低値は14時の枝沢で、 $54.8 \text{ mSm}^{-1}$ であった。アルカリ度は午前中では変化が小さかったが、昼以降減少し16～18時に最低値を示した。アルカリ度の最低値は、16時の枝沢で $0.08 \text{ meq}^{-1}$ であった。本流のpHは、 $6.89 \sim 7.00$ の間で推移し、22時に最低値を観測した。根の沢川のpHは、0時から $6.7$ 程度で推移し、12時に最高値 $6.81$ に達した後24時の最低値 $6.59$ まで漸減した。枝沢のpHは0時～10時まで $6.4$ 程度で推移し、8時が最高値 $6.47$ であった。12時から漸減し16時に最低値 $6.30$ を観測した。

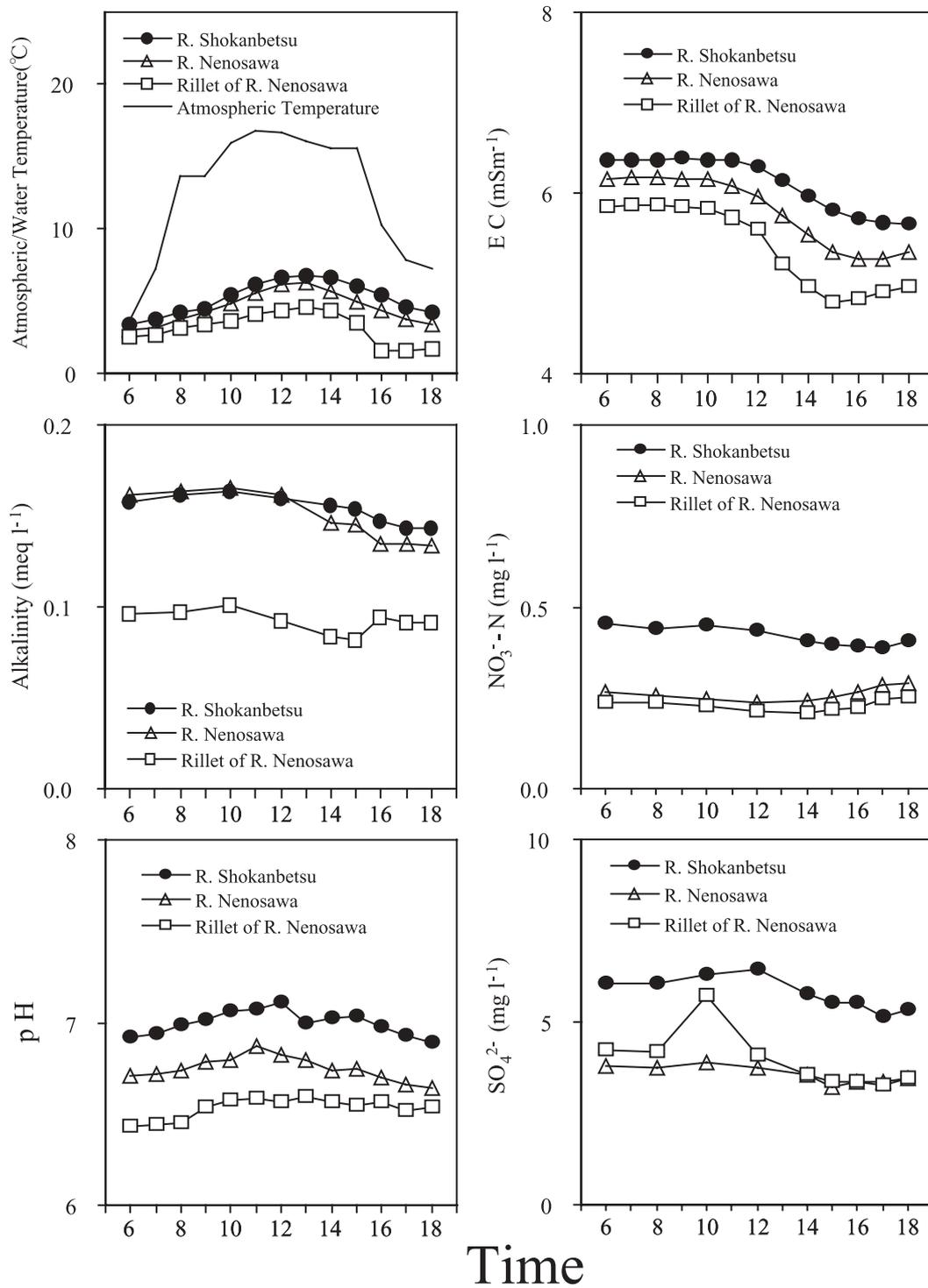


Fig. 4 Change in atmospheric and water temperatures and water quality indices (alkalinity, pH, EC, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) in the Shokanbetsu River on 29 April 2001.

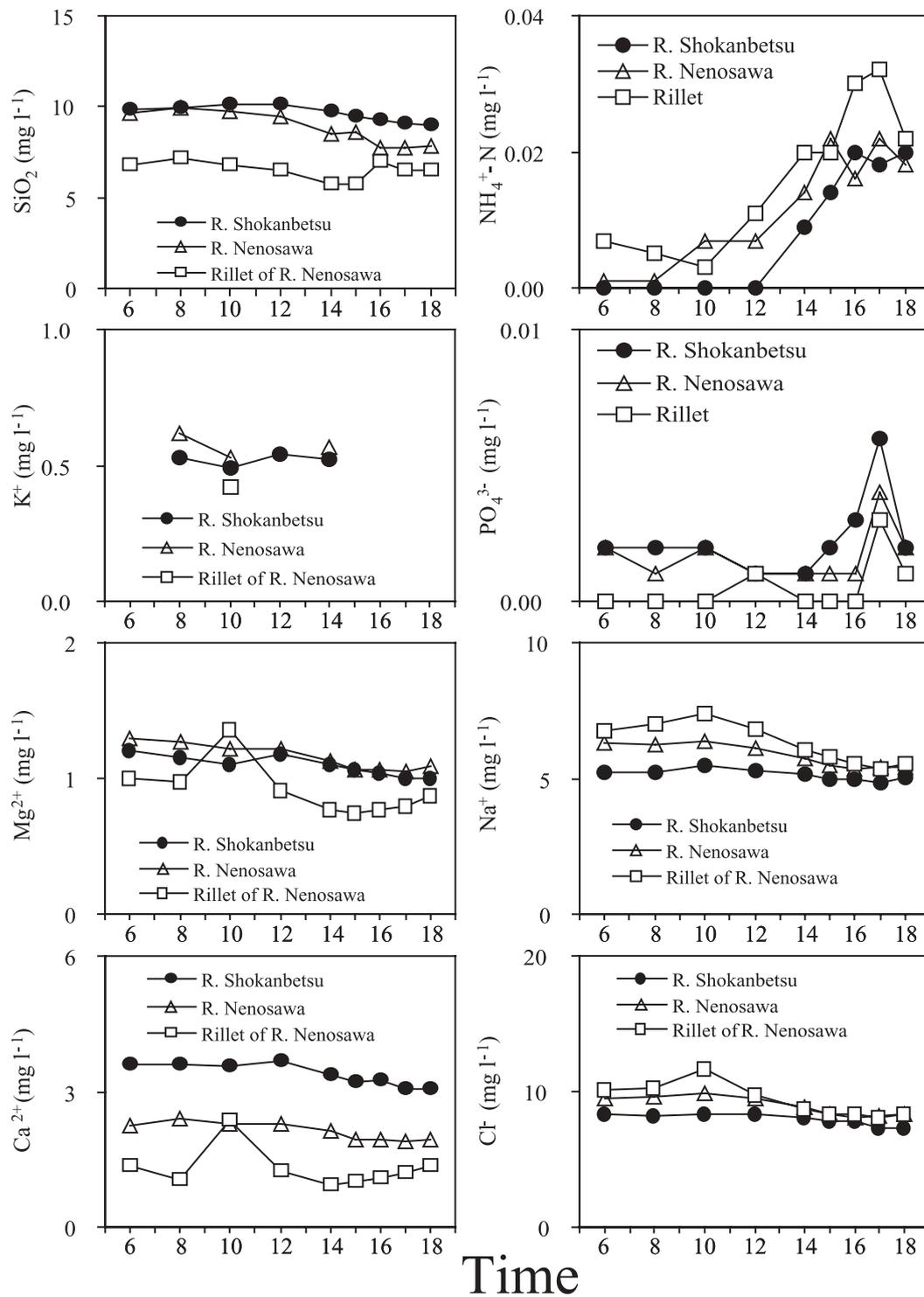
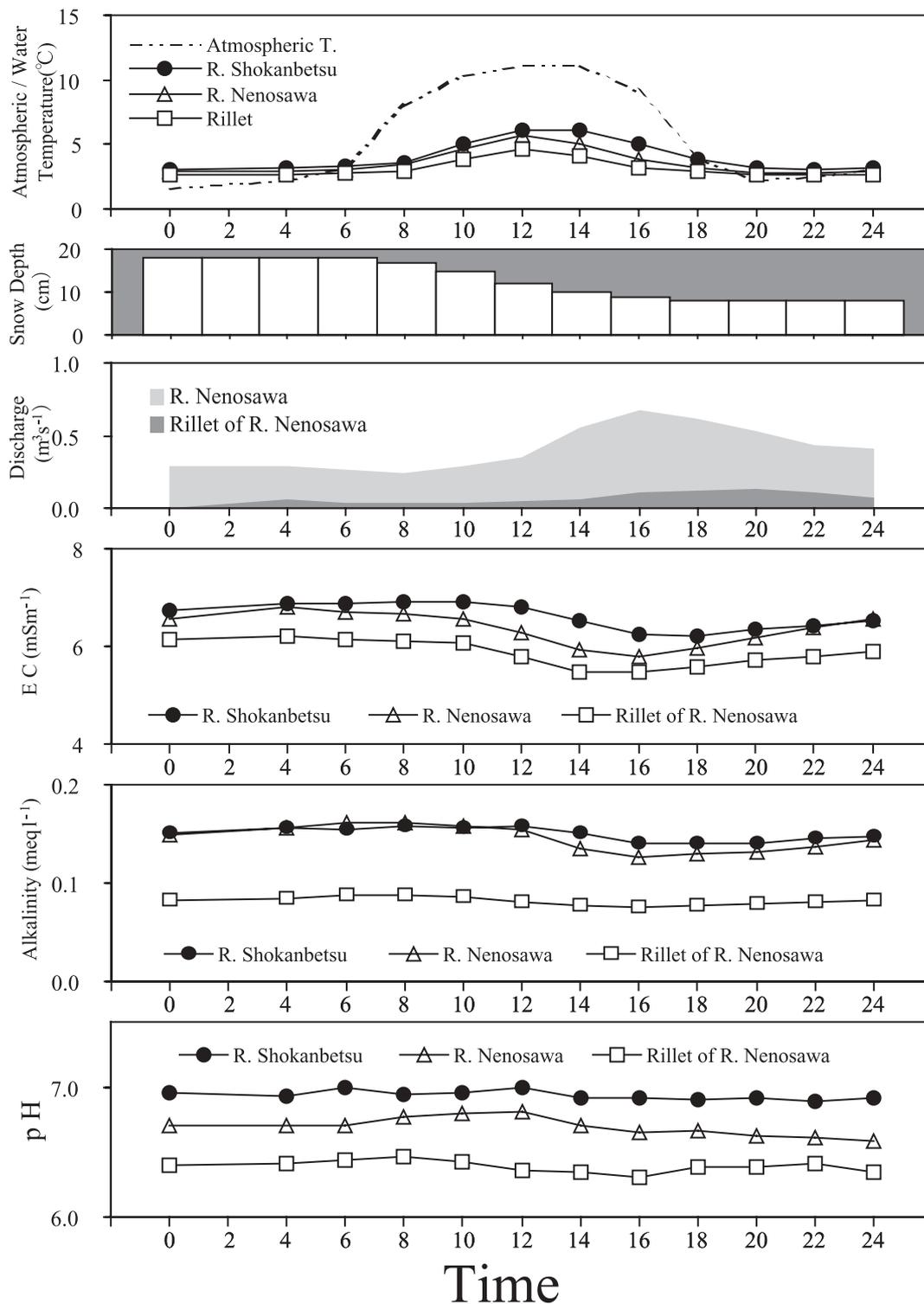


Fig. 5 Change in water quality indices (silicate, phosphate, cation and anion) in the Shokanbetsu River on 29 April 2001.

北海道北部河川における酸性雪の影響



**Fig. 6** Diel changes in atmospheric and water temperatures (upper), discharge, EC, alkalinity, and pH (below) in the Shokanbetsu River system, and snow depth (second upper panel) at the Hokkaido Fish Hatchery Douhoku Branch on 14 April 2002.

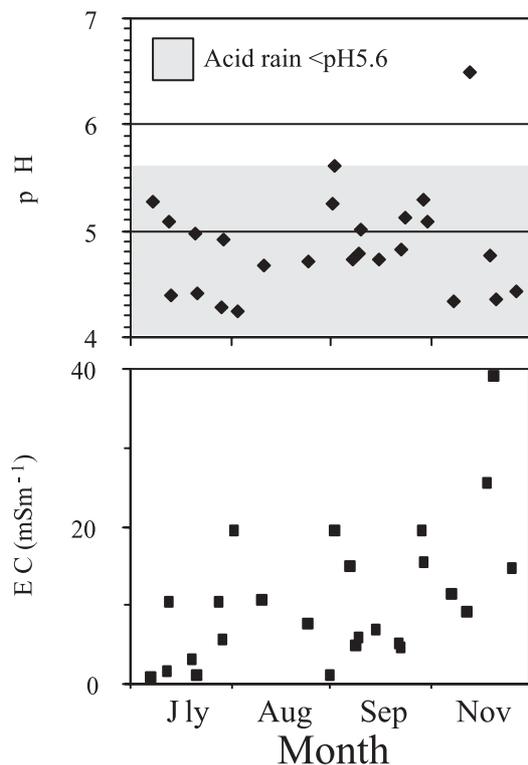


Fig. 7 pH (upper) and EC (below) values of rain water at the Hokkaido Fish Hatchery Douhoku Branch from July to November, 2002.

Table 2 EC and pH values of meltwater from surface to bottom layer, collected at a shore of the Shokanbetsu River, 2002 and 2003.

Date	Hight from bottom (cm)	Size (Width × Depth × Hight) (cm)	Melt water Volume (L)	pH	EC (mSm <sup>-1</sup> )
2002	184 ~ 150	30 × 30 × 30	6.45	4.55	3.39
2.15	150 ~ 110	30 × 30 × 30	8.94	4.44	3.73
	110 ~ 77	30 × 30 × 30	12.07	4.85	2.99
	77 ~ 50	30 × 30 × 25	12.25	4.38	4.93
	50 ~ 25	30 × 30 × 25	8.59	4.46	6.02
	25 ~ 0	30 × 30 × 20	7.05	5.02	3.41
2003	230 ~ 195	30 × 20 × 35	7.81	4.75	5.01
3.21	195 ~ 140	20 × 15 × 55	6.42	4.61	6.67
	140 ~ 90	20 × 15 × 50	6.35	4.61	5.47
	90 ~ 45	20 × 15 × 45	6.92	4.73	4.97
	45 ~ 0	20 × 15 × 45	6.55	5.13	3.41

### 降雨および積雪の水質分析

Fig. 7に2002年7月から11月にかけての雨水のpHおよび電気伝導度を示す。降雨の観測は8月が7回、9月が3回、10月が11回、および11月が5回実施し、合計26回であった。雨水のpHは4.25～6.49の範囲であり、電気伝導度は0.9～39.1mSm<sup>-1</sup>の範囲であった。酸性雨に区分されないpH5.6以上の降雨は、2002年10月2日と11月12日に観測した2回のみであった。

Table 2に2002年2月15日および2003年3月21日に採取した積雪の融雪水pHおよび電気伝導度を示す。2002年2月15日の積雪採取層毎のpHは4.38から5.02の範囲でpH5.6以下と定義される酸性雪であった。同様に2003年3月21日の積雪pHは4.61から5.13の範囲で酸性雪であった。電気伝導度の範囲は2002年2月15日が2.99～6.02mSm<sup>-1</sup>で、2003年3月21日が3.41～6.67mSm<sup>-1</sup>であった。

### 考 察

1872年に英国のSmithにより初めて酸性雨Acid rainという言葉が使われ、現在では、pH5.6以下の降水が酸性雨(雪)として考えられている(環境庁, 1997)。2002年7～11月にかけて道北支場で採取した降雨は2回を除いて酸性雨であった。近年日本国内各地でヨーロッパや北米並みのpH4.8程度の酸性雨が恒常的に観測され、北海道北部日本海に位置する利尻島においてもpH4.8～4.9の酸性雨が観測されている(環境庁, 1997)。

また、2002年および2003年に暑寒別川河川敷で採取した積雪は、pH4.44～5.13の酸性雪であった。暑寒別川流域の西に位置する雄冬岬(増毛町)で1992, 1996, 1999, および2000年に調査した積雪もpH4.55～4.70の酸性雪であった(Noguchi *et al.*, 2001)。このように暑寒別川流域、雄冬岬、および利尻島において酸性雨(雪)が観測されていることから、北海道北部の日本海に面する地域では、酸性雨や酸性雪が恒常的に降下していることが推測される。渡辺ら(2004)は、2001年の暑寒別川河川敷の積雪Na<sup>+</sup>:Cl<sup>-</sup>比が海水の比に類似していたことから、積雪成分に冬季の北東季節風による日本海からの風送塩が含有されていると考えた。暑寒別川流域に吹き込む北東季節風の風上は大陸方面である。山口ら(1991)や北村(1991)が本州の山陰および北陸の日本海沿岸地域で観測した結果、大陸方面を通過する気流があった時や冬季の北東季節風が卓越する時

に降水の酸性化が見られるという報告からも、大陸からの酸性物質が冬季の北東季節風により北海道の日本海沿岸地域にまで達していることが推測される。

2001～2003年の暑寒別川水系の河川水は、3月の融雪初期に電気伝導度が $10.0\text{mSm}^{-1}$ を超えると共に、pHやアルカリ度が急激に低下した。2001年では、電気伝導度が本流で $12.4\text{mSm}^{-1}$ を示し、支流で $15.0\text{mSm}^{-1}$ を超えていたが、 $\text{NO}_3^-$ -Nや $\text{SO}_4^{2-}$ も同時に急増していた(渡辺ら, 2004)。本州日本海に流出する阿賀野川水系阿賀川の源流域(福島県)における水質調査では、1993年2月7日午後電気伝導度が増大し、pHが5.63まで低下した(鈴木, 2004)。ノルウェーでは融雪期に流量が最大となる前の融雪初期段階で $\text{H}^+$ や $\text{SO}_4^{2-}$ が最大値となることが報告され、pH shockと定義されている(Johannessen *et al.*, 1980)。融雪初期段階は、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、および $\text{H}^+$ の急増により魚類への影響が最も懸念される時期と考えられる。融雪初期の3月は、秋に産卵するサケ科魚類の稚魚の浮上期と一致する。太平洋サケ属*Oncorhynchus*において発眼卵期から孵化後の若魚まで耐酸性を調べた結果、浮上期に最も耐酸性の低いことが証明されている(Rombough, 1983, 生田ら, 1992)。サケマスを飼育する上で、飼育魚が3月に浮上し飼育水に河川水を利用している場合は、酸性度が最も強い融雪初期の酸性融雪水に警戒する必要がある。暑寒別川流域の積雪は、2001年および2003年では積雪が多く、2002年では少なかった。積雪量に応じて河川水の酸性化時期も変化が見られ、おおよそではあるが雪が多い2001年および2003年では酸性化時期が3～5月であり、雪が少ない2002年では酸性化時期が2～4月であった。このように河川水の酸性化時期は積雪量に対応して変動した。

本研究において、融雪増水期の日間の水質変動を調査した結果、支流において夕刻から夜間にかけて流量が最大となると共に、pHおよびアルカリ度が最小値に達し、 $\text{NO}_3^-$ -Nが最大に達して河川水が最も酸性化することが明らかとなった。今後、融雪期の河川水の酸性化を評価する際は、夕刻に採水することが重要である。わが国のサケ増殖事業においては、シロサケを春に放流するが、今後酸性化が進行した場合においても春季融雪期の夕刻に最も河川水が酸性化することが懸念されるため、シロサケの河川放流には時刻による環境変化にも注意していく必要がある。

ヨーロッパや北米東部地域において化石燃料の燃焼、金属の精錬、および産業発展に伴い発生する硫酸また

は硝酸エアロゾルが増加した結果、環境が酸性化し、魚類では急激な斃死、成長の減退、骨格異常が発生し、とりわけ繁殖が阻害されている(Haines, 1981)。ヨーロッパや北米において、酸性環境がサケ科魚類に与える影響について調べた研究が多数報告されている。Rombough(1983)は太平洋サケ属稚魚の耐酸性を24時間半数致死pH(LC<sub>50</sub>)によって評価し、降海性が強い魚種ほど耐酸性が低いとしている。同様に生田ら(1992)は、わが国に生息するサケ科魚類の稚魚期の耐酸性を評価し、降海性が強い太平洋サケ属で耐酸性が低く、河川生活性が強いイワナ*Salvelinus leucomaenis*で耐酸性が高い傾向があることを報告している。北海道の主要産業種であるシロサケやカラフトマス*O. gorbusha*は、浮上して間もなく降海することから、比較的耐酸性が低いものと考えられる。

Ikuta(2000)は、陸水の酸性化が淡水魚類へ与える影響を要約し、環境水のpHが4.5以下に下がると浸透圧調節が阻害されるとしている。シロサケ稚魚をpH5以下の硫酸酸性水に24時間曝露すると血中ナトリウムが減少した(Watanabe *et al.*, 1995)。同様に暑寒別川流域の酸性雪を融解した酸性水(pH4.89)にシロサケ稚魚を曝露すると24時間後には血中ナトリウムが減少し、72時間後には死亡する個体も出現した(渡辺ら, 2004)。本研究で融雪期の暑寒別川河川水質を調べた結果pHの低下が見られたが、本流では6.74までの低下に留まり、支流でも6.28までの低下であった。pH6前半の酸性水では浸透圧調節は阻害されないが、ヒメマス*O. nerka*およびブラウントラウト*Salmo trutta*の母川回帰や繁殖行動が阻害され(Ikuta *et al.*, 2001, Kitamura and Ikuta, 2000, 2001)、北米のfathead minnow(*Pimephales promelas*)およびfinescale dace(*Phoxinus neogaeus*)において捕食者に対する警告フェロモンの分泌が抑制される(Brown *et al.*, 2002)。このようにpH6前半の酸性水においても魚類に対する影響が考えられ、酸性融雪水が暑寒別川や他の北海道日本海に面する河川に生息する魚類へ与える影響が懸念される。また、わが国では北海道のみに生息する希少魚のイトウは、春に河川を遡上し産卵するが、酸性融雪水を忌避して産卵場所への回帰を中断することも考えられる。本研究により北海道北部暑寒別川支流において融雪期に小規模な酸性化が経年的に発生していることが判明した。現段階では融雪期の暑寒別川河川水のpHは6.28までの低下に留まっているが、今後大陸からの酸性物質の輸送が継続した場合、さらに酸性化が進行す

る恐れがある。陸水の酸性化が急激に進行した場合、酸性融雪水が北海道のサケ増殖事業へ与える影響が最も懸念される。今後は北海道の特に日本海沿岸地域において融雪水の酸性化状況を監視し、水生生物との係わりについて注視していく必要がある。

## 要 約

1. 2001～2003年にかけて北海道北部暑寒別川水系において河川水の水質を調査した結果、融雪初期3月末にpHおよびアルカリ度が低下する共に、電気伝導度が増加しており、小規模な河川水の酸性化が経年的に継続して観測された。
2. 各水質項目は、暑寒別川本流、支流根の沢、支流根の沢枝沢の順で最大または最小の極値が大きくなり、雪が融けてから流出するまでの時間がより短い支流で強く酸性化していた。
3. 各調査地点の最低pH値は、暑寒別川本流がpH6.74（2002年4月17日）、支流根の沢がpH6.57（2002年4月15日、2003年4月17日）、支流根の沢枝沢がpH6.28（2001年3月26日、2003年4月8日）であった。
4. 2001～2003年の暑寒別川河川水において融雪初期に酸性融雪水による小規模な酸性化が継続して観測された。しかし、pHの低下は支流においても6.28に留まったことから、暑寒別川に生息する魚は酸性雪による致命的な影響を受けていないものと考えられる。
5. 融雪増水期の支流においては、日間の流量が最大となる夕刻から夜間にpHおよびアルカリ度が最小値に達し、 $\text{NO}_3^-$ -Nが最大に達して河川水が最も酸性化した。

## 謝 辞

本文中の北海道立水産孵化場道北支場積雪量の一部は、松田清治氏が観測した積雪記録を使用させていただいた。また、水産孵化場の河村博元増毛支場長（現さけます資源部長）、新谷康二前増毛支場長（現養殖病理部長）、および宮本真人元増毛支場増殖科長（現さけます資源部）には本研究の遂行に配慮いただいた。北海道環境科学研究センターの野口泉氏、西野修子氏、および坂田康一環境科学部長には文献収集に際して便宜を図っていただくと共に本研究に関する情報提供をいただいた。ここに記して厚くお礼申し上げます。

## 文 献

- 阿賀裕英・野口泉・三上英敏・五十嵐聖貴・藤田隆男・坂田康一 (2000). 北海道における酸性雨陸水影響調査の現状．北海道環境科学研究センター所報，27, 46 - 59.
- Aga, H., Noguchi, I. and Sakata, K. (2001). Aquatic chemistry of a reservoir during the thaw season. *Water, Air, and Soil Pollution*, **130**, 811 - 816.
- 阿賀裕英 (2004). 酸緩衝能の低い日本海側小湖沼での酸性化モニタリング．北海道環境科学研究センター所報，31, 93 - 96.
- Brown, G. E., Adrian, J. C., Jr., Lewis, M. G. and Tower, J. M. (2002). The effects of reduced pH on chemical alarm signaling in ostariophysan fishes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **59**, 1331 - 1338.
- Cowling, E. B. (1982). An historical perspective on acid precipitation. Acid rain/Fisheries (R. E. Johnson, ed.), pp. 15 - 31. American Fisheries Society, Bethesda.
- Haines, T. A. (1981). Acidic precipitation and its consequences for aquatic ecosystems: A Review. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **110**, 669 - 707.
- 生田和正・鹿間俊夫・織田三郎・奥本直人 (1992). サケ科魚類の発眼卵と稚魚の耐酸性評価. *Bull. Natl. Res. Inst. Aquaculture*, **21**, 39 - 45.
- Ikuta, K., Yada, T., Kitamura, S., Ito, F., Yamaguchi, M., Nishimura, T., Kaneko, T., Nagae, M., Ishimatsu, A., Iwata, M. (2000). Recent studies on the effects of acidification on fish in Japan. *Global Environmental Research*, **4(1)**, 79 - 87.
- Ikuta, K., Munakata, A., Aida, K., Amano, M. and Kitamura, S. (2001). Effects of low pH on upstream migratory behavior in land-locked Sockeye salmon *Oncorhynchus nerka*. *Water, Air, and Soil Pollution*, **130**, 99 - 106.
- Johannessen, M., Skartveit, A. and Wright, R. F. (1980). Streamwater chemistry before, during and after snowmelt. Proc. Int. conf. ecol. Impact acid precip., Norway 1980. SNSF project, 224 - 225.
- 環境庁地球環境部 (1997). 「酸性雨 - 地球環境の行方」 (環境庁地球環境部監修), 中央法規, 東京.
- 北村守次 (1991). 北陸地区における酸性雨現象の実態.

- 公害と対策. **27(2)**, 46 - 49.
- Kitamura, S. and Ikuta, K. (2000). Acidification severely suppresses spawning of hime salmon (land-locked sockeye salmon, *Oncorhynchus nerka*). *Aquatic Toxicology*, **51**, 107 - 113.
- Kitamura, S. and Ikuta, K. (2001). Effects of acidification on salmonid spawning behavior. *Water, Air and Soil Pollution*, **130**, 875 - 880.
- Leivestad, H. and Muniz, I. P. (1976). Fish kill at low pH in a Norwegian river. *Nature*, **259**, 391 - 392.
- 野口泉・加藤拓紀・酒井茂克・岩田理樹・秋山雅行・大塚英幸・坂田康一・阿賀裕英・松本寛 (1999). 酸性雪およびその陸水への影響. 「酸性環境の生態学」(佐竹研一編), pp. 226 - 236. 愛智出版, 東京.
- Noguchi, I., Katou, T., Sakai, S., Iwata, R., Akiyama, M., Ohtsuka, H., Sakata, K., Aga H. and Matsumoto, Y. (2001). Snowcover components in northern Japan. *Water, Air, and Soil Pollution*, **130**, 421 - 426.
- 大泉毅 (1991). 東北地区における酸性雨の実態. 公害と対策. **27(2)**, 32 - 36.
- Rombough, P. J. (1983) Effects of low pH on eyed embryos and alevins of Pacific salmon. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **40**, 1575 - 1582.
- 鈴木啓助 (2004). 渓流水の酸性化をもたらす融雪水. 地球環境. **9(1)**, 49 - 60.
- 社団法人北海道土木協会 (1995). 「北海道河川一覧」(北海道土木部河川課監修), p. 55. 社団法人北海道土木協会, 札幌.
- 田中敦 (2004). 有機汚染物質. 「摩周湖モニタリングデータブック」(国立環境研究所地球環境研究センター・北見工業大学・北海道環境科学研究センター編), pp. 27 - 30. 国立環境研究所, 茨城.
- Watanabe, T., Ida, H. and Iwata, M. (1995). Serum ion regulation in Pacific salmon exposed to short term acidwater stress during seaward migratory and post migratory seasons. *Fisheries Science*, **61(2)**, 353 - 354.
- 渡辺智治・安富亮平・今田和史 (2004). 融雪水が小河川の酸性化とシロサケ稚魚およびサクラマス幼魚の浸透圧調節機能へ与える影響. 北海道立水産孵化場研報. **58**, 41 - 51.
- 山口幸祐・田中文夫・多田納力・中尾允・五明田孝・原宏 (1991). 山陰地区における酸性雨現象の実態と推移. 公害と対策. **27(2)**, 56 - 62.