

(4) 融雪期における山地森林域河川からの栄養塩流出

NUTRIENTS RUN-OFF FROM THE FOREST RIVER CATCHMENT DURING THE SNOW MELTING PERIOD

橋 治国^{*}、安藤正治^{**}、大森博之^{***}、飯田真也^{****}、梅本延彦^{*****}

Harukuni TACHIBANA, Masaharu ANDO, Hiroyuki OHMORI, Shinya IIDA, Nobuhiko UMEMOTO

ABSTRACT; Water quality of River Ogawa of Sapporo, located in the northern island of Japan, was analyzed from the data taken every day (every week in winter) from September, 1986 till August, 1988. R. Ogawa (catchment area: 11km², length: 7.0km, average flow<at sampling point>: about 0.8m³) is flowing down the forest mountain, Mt. Muine (1461m). In this report, we focused the specific behaviors of nutrients during the snow melting period. Results are ;

(1) The rate of water load during this season was about 60% of yearly discharge. The rate of nutrients loads was surpassed 60%.

(2) Most of nutrients of this period were scrubbed out from soil and some of them were eluted out from accumulated matters.

(3) Nitrogen flew out mainly in dissolved form (almost as nitrate) and phosphorus in particulate one.

(4) The mean water quality of this period was in meso-eutrophic condition.

(5) Run-off pattern of chemical components during this period which were arranged by $L = C \cdot Q = c \cdot Q^n$ (L: chemical component load, C: concentration, Q: flow, c, n: constant) showed nearly the same tendency as one through the whole year. Concentrations of nutrients, except ammonium, became dense as the flow increased ($n > 1$). Concentration of ammonium and ordinary inorganic components was stable or somewhat decreased. ($n = 1$ or < 1)

KEYWORDS; Nutrients, Snow-melting, Forest river, Eutrophication

1 緒言

北国の春には、冬の間に降り積もった雪が解けて、多量の水と、雪中や土壌中に蓄積されてきた様々な物質が河川に流出してくる。このため河川や湖沼・ダム湖の生態系は非積雪地域と異なる季節変化を示し、水を利用したり管理する方法も独特なものとなる。また融雪水は、貴重な水資源として見直されるようになってきており、その質も水資源の価値を決める重要なファクターとして注目されようとしている。しかし水資源の管理と関連した融雪期水質の実態についての本格的な調査例は皆無に近い。そこで筆者らは、この融雪期における水質変化現象を理解し、さらに期間中の水質保全や水利用方法を検討するための基礎研究の第一歩として、山地森林域内の河川の水質について、栄養塩を中心として通年的な調査を行った。(参考文献1)、2)で経過を発表) 本論文では融雪水の水質の特徴と流出負荷特性について調査・解析した結果について報告する。本研究は、栄養塩の河川流出量から森林内での循環や負荷発生・質変換機構などを推定することが可能なことから、森林の生態系の活動を知り、森林の管理方法を検討するためにも意義がある。

^{*}北海道大学工学部衛生工学科 Department of Sanitary Eng., Hokkaido University ^{**}大林組、Obayashi Co., Ltd. ^{***}北海道地下資源調査所、Geological Survey of Hokkaido ^{****}札幌市衛生局、Health and Sanitation Bureau of Sapporo city ^{*****}札幌熱エネルギー公社、Sapporo Energy Supply Co., Ltd.

2 研究方法

山地森林域河川の水質は、森林の植生・土壌や地形・地質など地理的条件、降雨・降雪の有無やその継続時間・強度などの水文条件や流況、季節的条件など様々な要因に支配され、その変化特性は複雑である。そこでまず必要なのは、ケーススタディであれ、その実態把握のための通年的な連続調査が必要である。解析のポイントは

その後に決められるものである。筆者らは、2年間、冬期間の約1週間から10日間隔の採水を除いて、毎日採水して水質データの蓄積を行った。降雨時には、数時間間隔の採水を行い、流出と対応した水質変化も把握できるよう計画を立てた。本論文では、データの整理と特性を記述しやすい融雪期に限って述べることにする。融雪期間は、年間の流量変動パターンから4月から5月とした。なお四季の区別についても流量変動を基本として考えたため、表1のように均等な月数としなかった。

2. 1 調査水域：

豊平川水系薄別川上流の小川集水域を対象とした。(図1) 小川は石狩川水系内の豊平川の上流域を流れる1級河川で、集水域面積 11.0km²、流路延長 7.0kmの小河川である。本川は無意根山(海拔1461m)と長尾山(1205m)を水源とし、豊平川支流の薄別川に合流する。急峻な上流部はエゾマツ・シラカバ・ハンノキなどの樹木に覆われ、川岸周辺はハンノキ・カンバ・マツ・ヤナギ・ヤチダモなどが繁茂している。集水域はすべて山地として区分され、平地は存在しない。集水域の地質は、新第三紀の火山岩・堆積岩を基盤に、第四紀の安山岩質溶岩が覆ったものである。岩石は崩壊しやすく、荒廃河川の様相を呈している。集水域内の山々は春遅くまで雪に覆われている。

2. 2 調査方法：

小川の下流末端を調査(採水)地点(370m)とし、1986年4月より予備調査を、同年9月より1988年8月まで連続調査を行った。従って、1986年9月～1987年8月を1986年度、1987年9月～1988年8月までを1987年度と区分することとした。通年的には週1度(冬期は10日間隔)を原則として現地にてかけて採水したが、春から秋にかけては自動採水器(ISCO-1680)を設置し、1日1回の定時採水を行ったほか、流量変動と対応させて1日12回以内の採水ができる体制をとった。

2. 3 水文・気象データ：

調査地点の流量と降水量については、現地観測データのほか、同じ地点で測定されている北海道開発局薄別観測所のデータを用いた。気温と水温は、地中温度計を現場に設置して連続観測した。積雪深は薄別観測所のデータを用いた。

2. 4 水質分析項目：

富栄養化関連成分(全窒素、全リン、形態別窒素・リン、有機炭素、COD、SSなど)と主要無機成分(塩化物イオン、硫酸イオン、アルカリ度、比色珪酸など)の約30項目を対象とした。なお試料中の栄養塩が低濃度であり、さらに採水および保存期間中の変質によって、一部試料の定量が不可能となった。

Table 1 Classification of seasons

Snow melting period (Spring)	April, May
Summer	June, July, August
Autumn	September, October, November
Winter	December, January, February, March

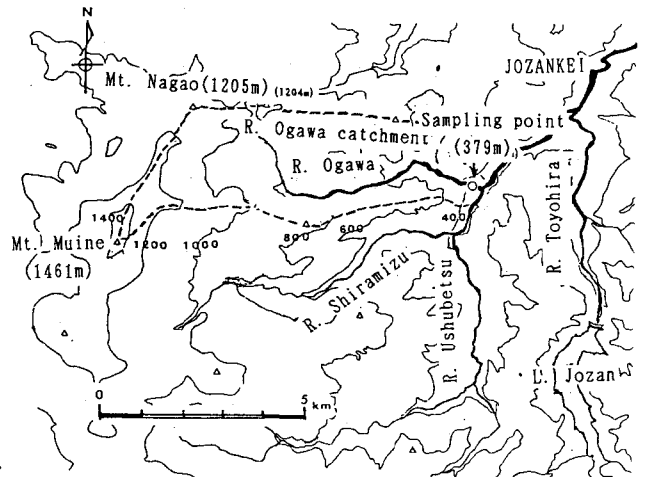


Figure 1 Map of the River Ogawa catchment

3 結果および考察

融雪期の水質調査は1987年と1988年に実施したが、水質の経時変化については1988年の例を中心に説明する。1987年も1988年とほぼ同様な水質変化パターンを示した。1989年の自動採水機による連続採水は、4月8日から開始した。

3. 1 融雪期における水文・水質観測結果

(1) 水文条件と流量変化について

調査地点の積雪深の変化を図2に示した。平均気温マイナス10.2℃の3月に約1.5mあった積雪深は、4月8日には84cmとなり、以後気温の上昇と共に急激に減少して、中旬の19日には認められなくなった。調査地域では春遅くまで雪が認められる。調査山頂部の雪は5月中旬頃まで遠望できた。調査地点の日流量年図（北海道開発局による。）を図3に示した。融雪期4、5月の流出量が多く、1988年では総量に対して53.5%に達する。1986、1987年度としてはそれぞれ56.4、60.1%となった。（表4参照）なお本調査地点の1988（1987）年の平均流量、平水流量、豊水流量、渇水流量はそれぞれ0.78（0.76）、0.23（0.24）、0.85（0.54）、0.04（0.04） m^3/s で、河況係数は $310.5 < \text{最大流量} 12.42 \text{m}^3/\text{s} / \text{最小流量} 0.04 \text{m}^3/\text{s} > (465.7 < 13.97 / 0.03 >)$ と高く、

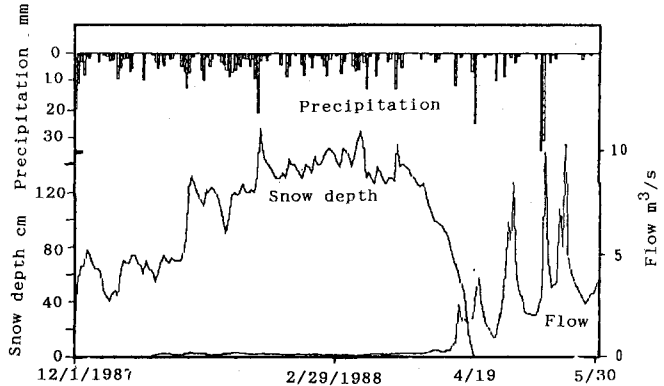


Figure 2 Changes of snow depth and precipitation (measured at sampling point)

小さな荒れた川といえる。このような流況の小川の調査地点における1988年の融雪期間中の時刻流量変化を気温・水温・降水量とともに 図4【<気温[破線]・水温>（1）、降水量（2）、流量（3）】に示した。期間中には番号で示した5回の増水を認めることができる。時刻流量の変化を、気温と降水量の変化と対応させると、I（4月11日～15日）、II回目（4月18日～21日）とIV回目（5月12日～15日）は気温の上昇と降雨が、III回目（4月26日～5月6日）とV回目（5月17日～5月22日）は気温の上昇が流

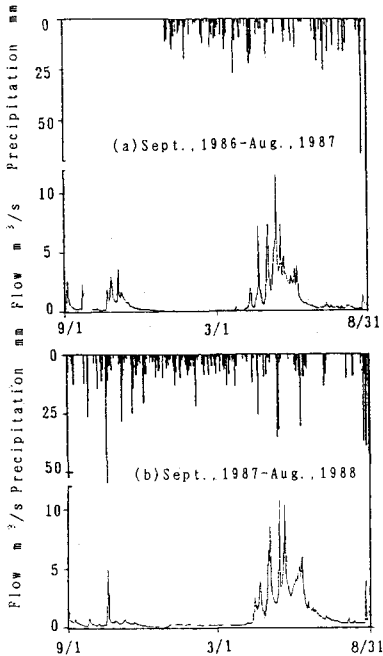


Figure 3 Daily flow (9/1/1986-8/31/1988)

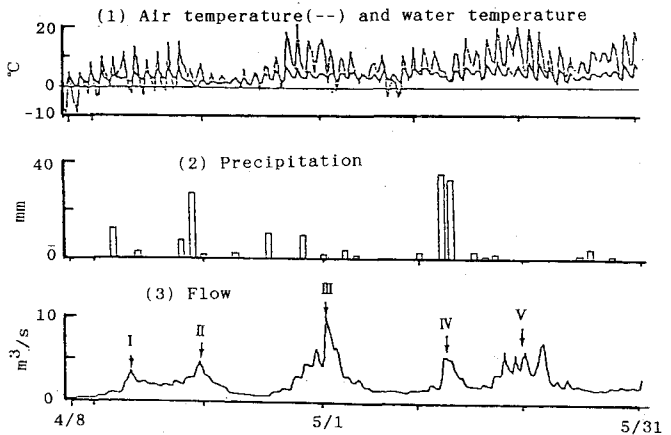


Figure 4 Changes of (1) air temperature(--) and water temperature, (2) precipitation, (3) flow

量増加の原因といえる。Ⅲ、Ⅴ回目の流量変化時には、気温の日変化が水温と流量に影響していることが明確に認められる。期間中の最大流量は、Ⅲ回目の5月1日に $10.6\text{m}^3/\text{s}$ であった。5月末には、流量は $2\text{m}^3/\text{s}$ で安定して流れるようになった。写真1は4月上旬、写真2は5月上旬の流況を示している。



Photo. 1 Sampling point
(Early in April)

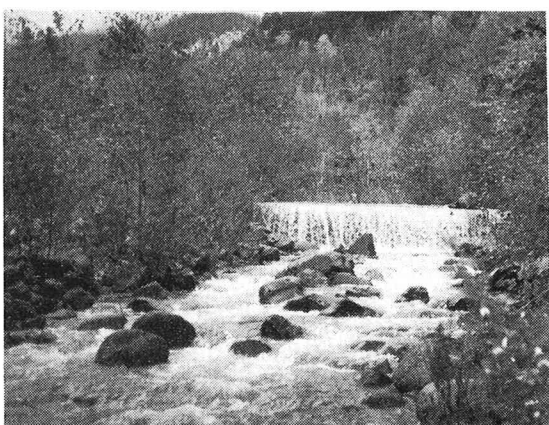


Photo. 2 Sampling point
(Early in May)

(2) 電気伝導度と主要無機成分について(図5【電気伝導度(1)、陰イオン(2)、陽イオン(3)】)

融雪期間の水質成分と水のマクロ的な動態把握のために、電気伝導度と主要無機成分の水質変化について述べる。

溶存成分量の目安である電気伝導度(Cond.)は、融雪初期の $90\mu\text{mho}/\text{cm}$ から漸次低下し、融雪後期には $50\mu\text{mho}/\text{cm}$ となった。増水期間中には、一時的な電気伝導度の低下も観察される。融雪期が終了すると徐々に上昇し、8月末には $80\sim 100\mu\text{mho}/\text{cm}$ に回復した。

期間中に実施した集中採水時の流量と電気伝導度の関係を 図6【(1)

～(4)】に示したが、流量の増加に伴う電気伝導度の低下が明らかである。最大流量時のデータを含む(2)図からは、流量に対する電気伝導度の変化がヒステリシス的で、また徐々に濃度が低下する傾向があり、地下水に対し融雪水の割合が次第に増す様子が理解できる。

主要一般無機成分については、硫酸イオン(SO_4^{2-})とカルシウムイオン(Ca^{2+})が電気伝導度と対応して変化し存在割合が高いことがわかる。塩化物イオンやナトリウムイオンなどの他の成分の濃度変化はこれら2成分に比較すると小さい。硫酸イオンとカルシウムイオン濃度の変化の原因は、豊羽鉾山鉾床(新第三期中新世熱水性鉾脈)からの湧水がこれら成分の主要な点源として存在するためである。多流量時にこれらの成分は希釈されることになる。塩化物イオンやナトリウムイオンは、降雪中に含まれる割合が高いため濃

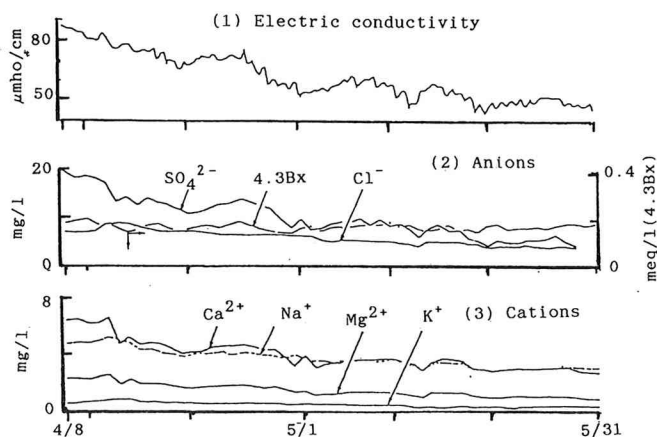


Figure 5 Changes of (1) electric conductivity, (2) anions and (3) cations.

度変化が小さい。図7の陰イオンの構成比に示したように、融雪とともに硫酸イオンの割合が低下し平均的な河川水質に移行することがわかる。

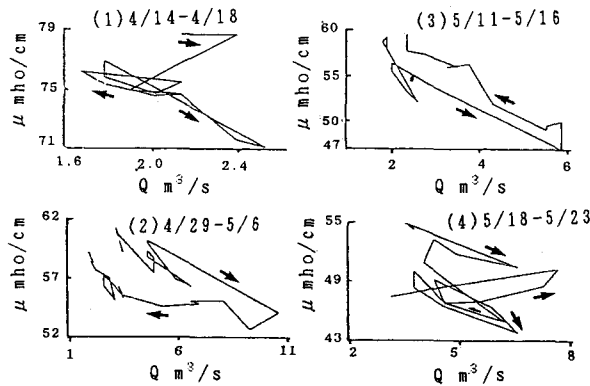


Figure 6 Relationship between flow(Q) and electric conductivity

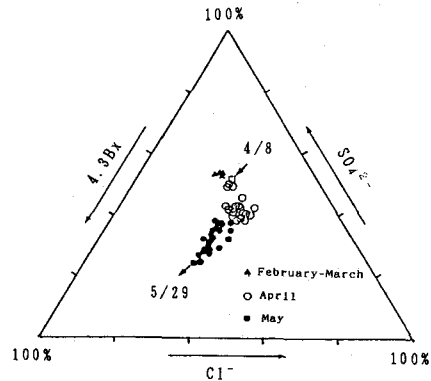


Figure 7 Ratio of anionic components during the snow melting period.(1988)

(3) 懸濁物質 (SS)・有機炭素について (図8【SS (1)、有機炭素 (2)】)

SSについては、初期の3回の増水時に流量と対応した濃度の増加が認められる。これは流量増加時の一般的な現象といえる。(例えば3)) 4.5回目の増水時に濃度が増加していないのが逆に特異的である。後半の融雪は山間部の融雪が卓越した結果、土壌洗いだしの影響が小さかったことによるためであろう。このことは、流量増加による水質成分の洗い出し作用が、河川内よりも河川への流出過程で行われることを実証していることになる。有機炭素については、全有機炭素(TOC)が2回目の増水以降にSSに対応して変化する傾向にある。溶溶性(DOC)について大きな変化が無いので、懸濁成分の流出と対応していることになる。なお1回目の増水において、SSおよび後述の懸濁態リンの濃度が高いことから、下流域の地表面の土壌粒子の流出が卓越し、続いて2回目以降、森林内に堆積する有機炭素が流出したものといえる。

(4) 窒素・リン化合物について (図9【窒素 (3)、リン (4)】)

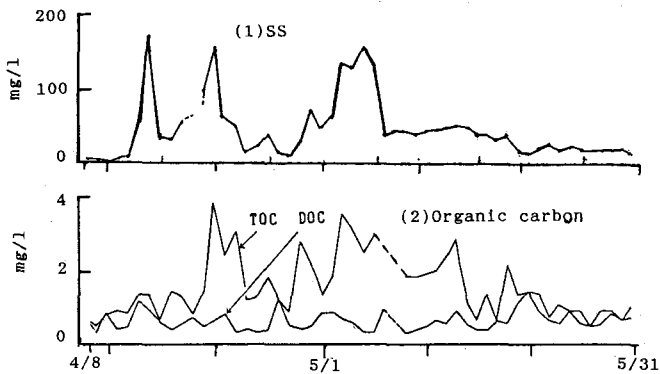


Figure 8 Changes of (1)SS and (2)organic carbon

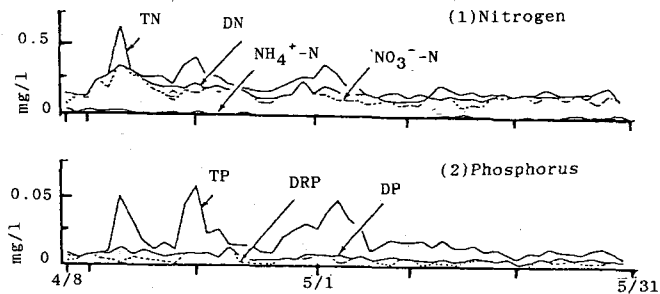


Figure 9 Changes of (1)nitrogen and (2)phosphorus

窒素・リン化合物は、電気伝導度や一般無機成分など融雪に伴ってその値や濃度が減少するパターンとはかなり異なった傾向を示す。全窒素(TN)・全リン(TP)濃度でみると、融雪初期の増水時に増加が認められ、地表あるいは地中蓄積物の洗い出し効果が認められる。これらの流出パターンはSSに近く、懸濁態成分の流出によることは明かで、リン($PP = TP - DP$)で顕著である。地表を流れる融雪水がその掃流力で剝離・運搬してくる

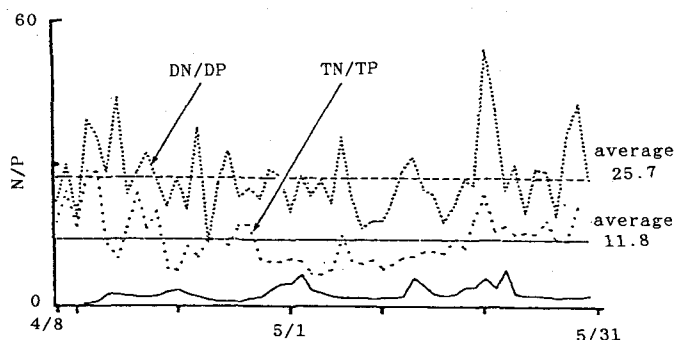


Figure 10 Changes of N/P(TN and DN)

わけである。また増水初期の高濃度の硝酸態(NO_3^-)窒素が特徴的である。土壌で酸化蓄積した分が流出してくるものといえる。また窒素については、Ⅱ、Ⅲ回目の増水期に溶存有機態(DN-TIN)濃度が増し、土壌有機層からの流出を確認した。これはTOCの変動と対応している。溶存態リンについては、全リン(DP)としての変化は小さいが、流量増加時の反応性リン(DRP)濃度がⅠ・Ⅲ回目には減少、Ⅱ回目には増加するなど複雑な挙動をすることが認められた。なおⅠ、Ⅲ回目、特にⅠ回目に、高い溶存態有機リン($DOP = DP - DRP$)濃度が観察されたが、これは土壌表面蓄積分が懸濁物質や溶存有機物と共に流出したものと推測される。融雪後期の増水時における栄養塩濃度の増加はほとんど認められないが、地表が植物に覆われた山岳域からの融雪出水といえる。図10にN/Pを示したが、未ろ過試料とろ過試料はともに変動幅が小さく、栄養塩は比較的安定した形態で流出してくる。ろ過試料の平均値は未ろ過試料で11.8、ろ過試料で25.7となった。これは懸濁成分としてリンが流出してくることによる。

3. 2 融雪期の平均水質について

表2-(1)、(2)に季節的な平均水質を2年間についてまとめたものである。融雪期の栄養塩濃度は、流量が多いにもかかわらず年平均値を越え、夏期の値に近い。融雪期のTN濃度(1987年0.222mg/l、1988年0.236mg/l)は中栄養湖(0.1~0.7mg/l)、TP(0.012mg/l、0.020mg/l)は富栄養湖(0.01~0.09mg/l)の栄養塩レベル⁴⁾にあり、下流水域の生態系への影響は大きいといえる。有機炭素や塩化物イオンにも同様な傾向が認められる。有機炭素については、栄養塩と同じ様な流出機構がその原因といえよう。塩化物イオンについては、雪中にトラップされていたためであろう。なお後述する栄養塩流出負荷量から流量加重平均値を融雪期と通年に限って挿入したが、懸濁態成分について算術平均値が小さくなる傾向はあるものの、大差ないことがわかる。表3に1987年度について年間と融雪期における水質成分濃度の変動係数を比較して示した。変動係数は融雪期においてすべて小さく、その程度は栄養塩で大きく、主要無機イオンで小さい。特に反応性に富むアンモニア態窒素($NH_4^{3+}-N$)や溶存態リン(DP、DRP)での変動係数の低下が著しい。積雪や土壌中で蓄積した成分が流出する融雪期の濃度変動は他の時期に比較してかなり小さく特徴的である。

図11-(1)~(5)は、融雪期の平均水質について週毎にその変化を示したもので、第1周目の値を基準にしたものである。流量(1)が第4週から7週にかけて3倍以上になるが、第8、9週には2.5、2.4に低下し、安定する。窒素成分(3)や溶存態リン(4)そして無機イオン(2)ではなだらかに低下する。溶存炭素(2)やアルカリ度(2)はほぼ一定である。これらに対し全リン(4)や全有機炭素(2)さらに反応性リン(4)は第3、4週で最高となり、再度低下する。全リンや全炭素は図11-(5)のようにその懸濁態分の変化がSSと対応しており、懸濁物質の流出に支配されていることがわかる。特に微量ではあるが有機炭素で顕著である。植物遺体が流出してくるものといえる。溶存態反応性リンの変化の原因は定かではないが、SSや懸濁態成分の変化パターンに近いことから、この成分の土壌からの溶出等も一因といえる。

Table 2-(1) Seasonal and yearly mean concentrations of components(1986.9-1987.8)

Numbers* of samples. 59	Seasonal mean				Yearly mean		
	Autumn	Winter	Snow melting period	Summer			
			(weighted with flow)		(weighted with flow)		
	21	55		86	221		
Cl ⁻	4.6	4.7	7.2	6.4	4.5	5.2	5.7
SO ₄ ²⁻	13.1	17.4	11.2	8.9	10.7	11.9	9.6
Na ⁺	3.8	5.1	4.8	4.3	3.9	4.1	4.0
K ⁺	0.7	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5
Ca ²⁺	4.4	6.4	4.6	4.0	4.2	4.4	4.0
Mg ²⁺	1.7	2.1	1.7	1.4	1.3	1.5	1.4
SiO ₂	15.4	20.6	11.4	10.2	17.1	15.3	12.1
DOC	1.7	1.2	0.9	1.0	1.4	1.3	1.2
POC	0.7	0.1	0.3	0.5	0.3	0.4	0.5
TOC	2.4	1.3	1.2	1.5	1.7	1.8	1.7
NH ₄ ⁺ -N	0.013 (11.6)	0.013 (15.1)	0.026 (28.4)	0.023	0.024 (15.9)	0.020 (15.3)	0.019
NO ₂ ⁻ -N	0.004 (3.6)	0.003 (3.5)	0.004 (2.9)	0.004	0.004 (2.6)	0.004 (3.0)	0.004
NO ₃ ⁻ -N	0.095 (84.8)	0.070 (81.4)	0.110 (78.4)	0.116	0.123 (81.5)	0.108 (81.6)	0.106
TIN	0.112 [88.2]	0.086 [100.0]	0.140 [70.7]	0.143	0.151 [91.0]	0.133 [84.1]	0.130
DON	0.015 [11.8]	0.000 [0.0]	0.058 [29.3]	0.058	0.015 [9.0]	0.025 [15.5]	0.045
DN	0.127 <69.4>	0.086 <94.5>	0.198 <89.2>	0.201	0.166 <70.9>	0.158 <75.5>	0.175
PON	0.056 <30.6>	0.005 <5.5>	0.024 <10.8>	0.058	0.068 <29.1>	0.051 <24.3>	0.061
TN	0.183	0.091	0.222	0.258	0.234	0.209	0.236
DBP	0.006 (85.7)	0.003 (100.0)	0.002 (50.0)	0.003	0.002 (66.7)	0.003 (75.2)	0.003
DOP	0.001 (14.3)	0.000 (0.0)	0.002 (50.0)	0.002	0.001 (33.3)	0.001 (26.4)	0.002
DP	0.007 <53.8>	0.003 <27.3>	0.004 <33.3>	0.005	0.003 <13.6>	0.005 <27.9>	0.005
PP	0.006 <46.2>	0.008 <72.7>	0.008 <66.7>	0.015	0.019 <86.4>	0.012 <72.1>	0.014
TP	0.013	0.011	0.012	0.020	0.022	0.016	0.020

Table 2-(2) Seasonal and yearly mean concentrations of components(1987.9-1988.8)

Numbers* of samples. 78	Seasonal mean				Yearly mean		
	Autumn	Winter	Snow melting period	Summer			
			(weighted with flow)		(weighted with flow)		
	18	56		90	240		
Cl ⁻	4.9	5.2	6.2	5.7	3.6	4.9	5.2
SO ₄ ²⁻	13.0	18.8	10.5	8.5	14.2	14.2	9.5
Na ⁺	4.3	4.4	3.9	3.6	3.6	4.1	3.6
K ⁺	0.7	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6
Ca ²⁺	4.6	5.3	4.1	3.7	3.3	4.9	3.9
Mg ²⁺	1.7	1.9	1.6	1.4	1.3	1.7	1.4
SiO ₂	15.3	19.4	11.4	10.8	14.7	15.9	11.2
DOC	1.1	0.9	0.7	0.8	1.1	1.0	1.0
POC	0.4	0.1	0.9	1.0	0.8	0.5	0.9
TOC	1.5	1.0	1.6	1.8	1.9	1.5	1.9
NH ₄ ⁺ -N	0.029 (25.2)	0.014 (15.4)	0.009 (5.6)	0.009	0.024 (14.7)	0.019 (15.3)	0.014
NO ₂ ⁻ -N	0.002 (1.7)	0.001 (1.1)	0.002 (1.2)	0.002	0.002 (1.2)	0.002 (1.3)	0.002
NO ₃ ⁻ -N	0.084 (79.0)	0.077 (84.6)	0.149 (92.5)	0.151	0.137 (84.0)	0.106 (83.5)	0.138
TIN	0.115 [85.2]	0.091 [91.0]	0.161 [85.6]	0.162	0.163 [100.0]	0.127 [91.0]	0.154
DON	0.020 [14.8]	0.009 [9.0]	0.027 [14.4]	0.025	0.000 [0.0]	0.013 [9.0]	0.020
DN	0.135 <90.6>	0.100 <90.1>	0.188 <79.9>	0.187	0.163 <74.1>	0.139 <82.6>	0.173
PON	0.014 <9.4>	0.011 <9.9>	0.048 <20.3>	0.056	0.057 <25.9>	0.029 <17.4>	0.051
TN	0.149	0.111	0.236	0.243	0.220	0.169	0.224
DBP	0.003 (60.0)	0.004 (57.1)	0.005 (71.4)	0.006	0.002 (18.2)	0.003 (45.6)	0.004
DOP	0.002 (40.0)	0.003 (42.9)	0.002 (28.6)	0.002	0.009 (81.8)	0.005 (54.4)	0.002
DP	0.005 <62.5>	0.007 <77.8>	0.007 <35.0>	0.007	0.011 <52.4>	0.008 <55.2>	0.006
PP	0.003 <37.5>	0.002 <22.2>	0.013 <65.0>	0.015	0.010 <47.6>	0.006 <44.8>	0.012
TP	0.008	0.009	0.020	0.022	0.021	0.014	0.019

(:):per cent of TIN and DP, < >:per cent of TN and TP, []:per cent of DN

* Numbers of some components are lesser than these value.

Table 3 Variation coefficients of components
(Standarddeviation / mean value)
(Numbers of samples *192~239、**55~56)

1987.9~1988.8 Snow melting P.(1988)		
Cl ⁻	0.253	0.207
SO ₄ ²⁻	0.235	0.368
SiO ₂	0.233	0.149
(By colorimetric method)		
Alkalinity(μsBx)	0.109	0.086
DOC	0.982	0.420
TOC	0.729	0.538
NH ₄ ³⁺ -N	0.958	0.498
NO ₂ ⁻ -N	0.460	0.467
NO ₃ ⁻ -N	0.431	0.371
TIN	0.381	0.350
DN	0.355	0.273
TN	0.456	0.375
DRP	1.150	0.502
DP	0.861	0.286
TP	0.806	0.619

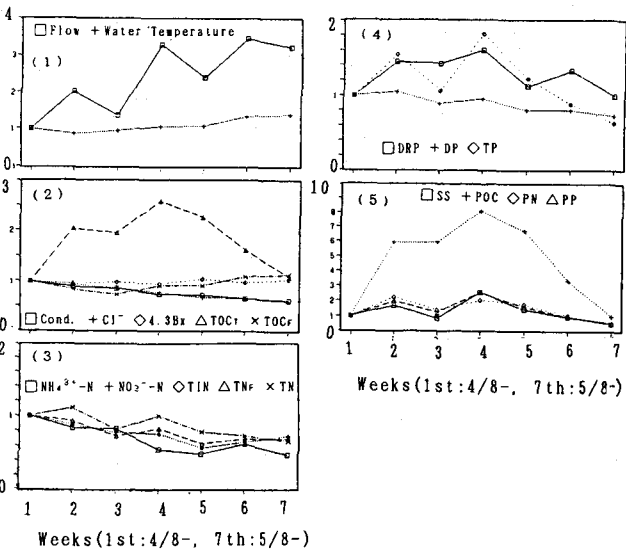


Figure 11 Changes of weekly mean concentrations of main components(Based on the first week concentrations.)

3. 3 栄養塩の流出負荷量について

表4-(1)、(2)に1987年度と1988年度の比流出負荷量を季節別に示した。融雪期の栄養塩流出負荷については特徴は、2ヶ月でも年間負荷の60%に達する流量のために、また前述のように栄養塩については濃度が年平均値に近いため、流出負荷量が莫大になることである。全窒素・全リンの流出負荷の年間に占める割合60~70%と流量の割合を越えた。形態別でも多くが全窒素・全リンと同じ傾向にあったが、1988年のアモニア態窒素が38.1%と低いのが例外である。アモニアは、元来低濃度であり、反応性に富むため、気象条件や流況に左右されやすいといえる。また一般に増水時に濃度の増加が認められる懸濁態の窒素(PON)やリン(PP)などの懸濁態成分についてはより高い流出負荷が期待されたが、実際には流量の占める割合と大差なかった。融雪流出では降雨時に示されるような土壌表面物質の洗い出し作用が小さいため、この期間の成分流出は積雪期間中に蓄積されたものが主になるといえる。このことは流量を含め、冬期の負荷が数%であることで了解される。栄養塩以外の成分でも流量とほぼ同じか若干低い割合で流出した。溶解態炭素(DOC)の割合が低い、低温のため冬期貯留分が少ないためと推察できる。年間流出量2000mmは、札幌の平均的な降水量約1200mmより1.7倍とかなり多いが、これは山地特有の降雨や降雪が原因であろう。

なお全窒素・全リンの流出負荷量を全国の森林地域のものと比較すると、幾分多いことがわかった。このことは、山岳域の特徴であるかもしれないが、北国の森林も富栄養化の潜在的な引金となっていると理解しておくべきであろう。

3. 4 融雪期栄養塩の流出パターン

栄養塩を中心として水質成分の流出特性を全試料と1988年融雪期のものについて、 $L = m \cdot Q^n$ 型(L:成分流出量<濃度×流量> g/s、Q:流量 m^3/s 、c, n:定数)で整理し、表5に示した。全試料と融雪期の流出パターンには余り大きな差がないのが特徴である。指数nは主要無機イオンで小さいが、栄養塩については、 NH_4^{3+} -Nを除き1以上である。流量の多い融雪期は、水系に対する大きな負荷発生期といえる。注目されるのは窒素として存在割合が高い NO_3^- -Nで、相関係数が融雪期でも0.95(全試料、0.93)と大きく、森林での生産速度が大で、また土壌や積雪中に蓄積することがわかる。また懸濁態リン(PP)については、n値が1.50とSSの例(n=1.78)に近く、リンが懸濁物質に含有されて流出してくることがわかる。 NH_4^{3+} -Nは1

Table 4-(1) Seasonal and yearly specific loads of components.
(1986.9-1987.8) (*: $\times 10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{day}$, **: $\times 10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{year}$)

	Autumn kg/km ² /day	Winter kg/km ² /day	Snow melting period kg/km ² /day	Summer kg/km ² /day	(1986.9-1987.8) kg/km ² /year
Q	5.5*	0.6*	19.7*	4.4*	2130**
%	21.4	3.3	56.4	19.9	
Cl ⁻	26.5	15.3	126.3	19.5	12000
%	19.1	3.0	54.0	14.9	
SO ₄ ²⁻	66.0	9.4	174.6	35.5	20500
%	26.4	5.6	52.0	16.0	
Na ⁺	20.5	2.7	84.0	2.2	8570
%	19.6	3.8	59.8	16.8	
K ⁺	3.8	0.3	10.0	2.2	1160
%	26.6	3.5	52.5	17.4	
Ca ²⁺	23.8	3.4	71.8	15.8	8570
%	22.9	3.6	55.4	17.9	
Mg ²⁺	9.2	1.2	27.2	5.0	3010
%	25.0	4.7	55.2	15.2	
SiO ₂	76.4	10.9	200.0	63.7	25600
%	24.4	5.1	47.6	22.9	
DOC	8.8	0.7	19.7	5.3	2500
%	28.8	3.3	48.3	19.6	
POC	4.0	0.1	10.2	2.1	1150
%	39.7	1.0	52.1	15.1	
TOC	12.8	0.7	29.9	7.4	3650
%	28.9	2.4	59.0	18.7	
NH ₄ ⁺ -N	0.064 (11.6)	0.008 (17.4)	0.458 (18.3)	0.088 (15.0)	0.116 (15.3)
%	12.4	2.3	66.2	19.1	
NO ₂ ⁻ -N	0.021 (3.9)	0.002 (3.5)	0.086 (3.0)	0.015 (2.6)	0.024 (3.1)
%	20.2	2.3	60.9	15.5	
NO ₃ ⁻ -N	0.466 (84.8)	0.037 (78.9)	2.276 (80.7)	0.484 (82.4)	0.619 (81.6)
%	18.9	2.0	51.4	19.7	
TIN	0.550 (81.1)	0.047 (100.0)	2.819 (71.2)	0.585 (78.2)	0.758 (84.1)
%	16.3	2.0	52.2	19.5	
DON	0.128 (19.9)	0.000 (0.0)	1.139 (28.8)	0.161 (21.8)	0.260 (15.5)
%	11.1	0.1	73.3	15.9	
DN	0.678 (61.9)	0.047 (95.9)	3.958 (77.8)	0.746 (72.1)	1.017 (74.1)
%	15.0	1.5	65.0	18.5	
PON	0.417 (38.1)	0.002 (4.1)	1.132 (22.2)	0.288 (27.9)	0.356 (25.9)
%	25.3	0.2	53.1	20.4	
TN	1.096	0.049	3.080	1.034	1.374
%	17.9	1.2	51.9	19.0	
DRP	0.025 (69.6)	0.002 (100.0)	0.055 (55.0)	0.006 (37.5)	0.017 (56.6)
%	33.2	4.4	54.0	8.4	
DOP	0.011 (14.3)	0.000 (0.0)	0.045 (45.0)	0.010 (62.5)	0.013 (43.4)
%	19.6	0.2	59.0	21.1	
DP	0.036 (41.9)	0.002 (50.0)	0.100 (25.3)	0.016 (14.8)	0.030 (26.3)
%	27.5	2.5	56.1	13.8	
PP	0.050 (36.1)	0.002 (50.0)	0.295 (74.7)	0.032 (85.2)	0.084 (73.7)
%	13.3	0.5	58.5	21.5	
TP	0.086	0.004	0.394	0.108	0.114
%	17.0	1.0	59.0	24.0	

() : per cent of TIN and DP, < > : per cent of TN and TP, [] : per cent of DN

Table 4-(2) Seasonal and yearly specific loads of components.
(1987.9-1988.8) (*: $\times 10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{day}$, **: $\times 10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{year}$)

	Autumn kg/km ² /day	Winter kg/km ² /day	Snow melting period kg/km ² /day	Summer kg/km ² /day	(1987.9-1988.8) kg/km ² /year
Q	3.6*	0.6*	17.1*	3.9*	1740**
%	18.6	3.9	60.1	17.5	
Cl ⁻	17.8	2.8	97.7	13.9	9020
%	19.0	3.9	56.1	12.1	
SO ₄ ²⁻	43.6	8.9	145.0	33.6	16600
%	24.0	6.5	53.5	16.0	
Na ⁺	15.0	2.4	61.5	11.6	20800
%	21.5	4.7	59.2	14.5	
K ⁺	2.7	0.3	9.5	2.1	6820
%	23.8	3.7	56.5	15.8	
Ca ²⁺	15.6	2.9	62.6	15.5	2470
%	20.8	5.2	56.0	18.0	
Mg ²⁺	6.0	1.0	24.4	3.9	6330
%	21.9	5.1	50.4	12.9	
SiO ₂	51.1	10.5	184.9	45.7	1030
%	22.3	6.2	54.2	17.3	
DOC	5.6	0.5	15.0	4.4	1710
%	29.6	3.4	46.4	20.5	
POC	2.5	0.0	17.6	3.1	1560
%	15.2	0.0	56.8	15.8	
TOC	8.2	0.5	30.6	7.5	3270
%	22.9	1.9	57.1	18.2	
NH ₄ ⁺ -N	0.037 (21.8)	0.008 (15.7)	0.147 (5.3)	0.060 (9.1)	0.087 (8.8)
%	37.7	4.0	38.1	20.2	
NO ₂ ⁻ -N	0.007 (1.6)	0.001 (2.0)	0.035 (1.2)	0.005 (0.9)	0.009 (1.2)
%	19.2	2.9	55.6	14.3	
NO ₃ ⁻ -N	0.343 (76.7)	0.042 (82.3)	2.588 (83.5)	0.585 (90.0)	0.682 (90.0)
%	13.0	2.2	65.5	19.2	
TIN	0.448 (85.1)	0.051 (100.0)	2.770 (86.5)	0.680 (99.6)	0.757 (88.6)
%	15.3	2.3	63.2	19.2	
DON	0.078 (14.9)	0.004 (0.0)	0.431 (13.5)	0.003 (0.4)	0.097 (11.4)
%	20.8	1.5	71.1	9.7	
DN	0.526 (83.4)	0.055 (91.7)	3.201 (77.1)	0.653 (71.4)	0.854 (77.2)
%	15.9	2.2	64.8	17.1	
PON	0.105 (18.6)	0.005 (4.1)	0.953 (22.9)	0.282 (28.6)	0.252 (22.8)
%	10.7	0.6	65.4	23.2	
TN	0.631	0.060	4.154	0.914	1.106
%	16.7	1.9	56.9	19.5	
DRP	0.011 (68.8)	0.002 (66.6)	0.094 (76.3)	0.007 (30.4)	0.021 (68.5)
%	13.8	3.7	75.9	8.9	
DOP	0.005 (31.2)	0.001 (33.4)	0.029 (23.7)	0.015 (69.8)	0.010 (31.5)
%	11.3	3.3	51.0	34.4	
DP	0.016 (40.0)	0.003 (75.0)	0.123 (32.9)	0.022 (31.7)	0.031 (34.0)
%	12.9	3.5	68.0	15.6	
PP	0.024 (60.0)	0.001 (25.0)	0.250 (67.1)	0.047 (68.3)	0.061 (66.0)
%	10.5	0.7	71.5	17.3	
TP	0.040	0.004	0.373	0.088	0.092
%	11.3	1.7	70.9	19.7	

() : per cent of TIN and DP, < > : per cent of TN and TP, [] : per cent of DN

以下と希釈流出型であり、相関係数も0.83(全試料)、0.68(融雪期)と小さいことから、冬期蓄積量に限界があり、また負荷発生速度も環境要因によって変わることが推測される。主要無機イオンについては、3-1-(2)で述べたように、点源型で供給されるものが多いため、nが1より小さい。

4 結論

積雪域森林小河川(札幌市郊外・小川集水域)の水質成分を栄養塩を中心に、その水質変化特性や流出特性について、下流の水環境の影響や富栄養化制御という立場から、調査を行った。現在、2年間の膨大な通年調査データの整理を行っている。今回は、融雪増水時の水質変化と通年データとの比較から融雪期水質の特徴について報告した。結果についての要約は以下のとおりである。

融雪増水について

○融雪増水を4月上旬から5月下旬に認めたが、この期間の流出量は年間の60%に達した。融雪出水量は、気温と降雨量に対応して変動しながら減少した。

融雪期の水質変化について

○流量に対し、一般無機成分(塩化物イオン、硫酸イオンなど)と、その他の栄養塩や有機炭素などは異なった濃度変動パターンを示した。一般成分は湧水由来型からその融雪水による希釈型に変遷する。栄養塩や有機炭素は、SSなどと同様に土壌表面および貯留成分流出型で、増水時に多量に流出した。懸濁態リンでこの傾向が顕著である。

○融雪初期増水時の高濃度の栄養塩流出は、融雪後期には認められなかった。後期には地表が植物に覆われた山岳域からの出水が優占するためといえる。

○融雪期間中は、窒素は溶存態、リンは懸濁態が優占的な形態として流出した。溶存態窒素としては、硝酸態が優占した。溶存態有機栄養塩は初期の増水時に高濃度で観察されたが、土壌蓄積分の流出と推測された。N/Pからは、栄養塩構成物質は比較的安定した構造を持つことがわかった。

融雪期の平均水質について

○融雪期の平均水質は夏の平均水質に近く、リンについては富栄養化の、窒素については中栄養レベルにある。

○融雪期の毎週の平均水質の変化から、溶存栄養塩の漸下的な、すこし急な一般無機成分の濃度低下を、そして懸濁態栄養塩の懸濁物質濃度に対応した変化を観察した。

融雪期の栄養塩流出負荷と流出パターンについて

○融雪期の流量負荷は年間負荷の60%程度を占めたが、栄養塩についてはアンモニア態窒素を除いて、流量負荷以上の流出を認めた。一般無機成分は、流量負荷に等しいくらい若干少ない。

○融雪期の水質成分の流出パターン($L(C \cdot Q) = m \cdot Q^n$ 型の整理。)は、通年的な傾向とはほぼ同じであ

Table 5 Relationships between flows and loads of components
($L = c \cdot Q^n$, L:Load of component(g/s), Q:Flow(m^3/s), c,n:Constant)
* CC: Correlation coefficient

	1986.9-1988.8				Snow melting period(1988)			
	c	n	CC*	Numbers of samples	c	n	CC*	Numbers of samples
Cl ⁻	5.10	1.06	0.99	433	6.38	1.00	0.98	48
SO ₄ ²⁻	10.2	0.80	0.98	435	11.40	0.72	0.95	51
Na ⁺	3.88	0.95	0.99	425	4.03	0.90	0.99	50
K ⁺	0.59	0.91	0.99	424	0.60	0.93	0.99	50
Ca ²⁺	4.13	0.88	0.99	420	4.45	0.82	0.99	50
Mg ²⁺	1.43	0.94	0.98	419	1.72	0.83	0.98	50
SiO ₂	12.8	0.86	0.99	433	11.97	0.89	0.99	48
(By colorimetric method)								
DOC	0.96	0.97	0.91	422	0.59	1.11	0.95	52
TOC	1.50	1.05	0.93	435	1.26	1.20	0.93	52
					0.64	1.19	0.71	44
NH ₄ ⁺ -N	0.014	0.89	0.83	431	0.57	0.81	0.82	53
NO ₂ ⁻ -N	0.0025	1.06	0.91	436	0.0014	1.14	0.92	53
NO ₃ ⁻ -N	0.10	1.03	0.93	438	0.14	1.06	0.95	53
TIN	0.13	1.02	0.95	439	0.15	1.05	0.95	53
DN	0.16	1.08	0.97	430	0.18	1.02	0.95	53
TN	0.20	1.11	0.96	427	0.21	1.08	0.96	53
					0.036	1.16	0.69	42
DRP	0.0025	1.06	0.87	440	0.0043	1.11	0.91	53
DP	0.0047	0.99	0.87	439	0.0071	1.00	0.97	53
TP	0.012	1.09	0.88	438	0.015	1.22	0.92	53
					0.0066	1.50	0.88	53
SS					180	1.78	0.87	56

った。栄養塩はアンモニアを除き、流量に対し濃度増加型を示した。この傾向は懸濁態で著しい。有機炭素もほぼ同様なパターンである。一般無機成分は、濃度一定型か幾分濃度希釈型の傾向が認められた。窒素の中で優占的な硝酸態窒素のnもほぼ1で、森林内で大量に生産・蓄積されるされることがわかった。

融雪期に大量の水質成分がかなりの高濃度で流出することを、栄養塩はじめ多くの成分で見つけることができた。今後の融雪水質の調査研究の意義を指摘できたと思う。また栄養塩濃度が融雪の時期や地点と密接に関連することも明らかにできた。このことはダム湖の水質管理の重要性を提案できたと思う。ダム取水の分別取水である。今後、年流出負荷との関連、森林からの負荷発生機構など解析を続けたい。本研究を継続するにあたり、水質工学研究室の学生・卒業生諸氏、北海道大学土木工学科 森 明巨、黒木幹男両先生、北海道開発局石狩川建設部のご協力・ご援助を得た。心から謝意を表します。

《参考文献》

- (1) 橋 治国、安藤正治、大森博之「連続採水による森林小河川の水質特性解析」(9~11月<1986、1987年>)、土木学会北海道支部論文報告集、45巻、p401、1989
- (2) 例えば 橋 治国他 「森林集水域からの水質成分の流出特性(I)(II)(III)」、学会年次学術研究講演会講演概要集、<p932、1987>、<p902、1988>、<p900、1989>
- (3) 橋 治国他 「汚濁河川における有機物の挙動に関する研究-石狩川についてに一考察4-」、第12回衛生工学研究討論会講演論文集、p102、1976
- (4) 坂本充「淡水域の富栄養化、水圏の富栄養化と水産増殖」、p9、1975、恒星社厚生閣

【積雪水と雨水の水質】 調査期間に、降雪と降水の採取とその化学分析を行った。以下に積雪水(降雪を溶かしたもの。1987年12月~1988年3月)と雨水(1987年9月~1988年5月)の平均水質(算術平均)を示す。

		単位 mg/l * 7977 th						
	サンプル数	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
積雪水	12~14	4.6	2.3	2.4	0.2*	1.3	0.4	
雨水	5~8	1.8	2.3	1.6	0.2	0.5	0.4	
		NH ₄ ³⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	DN	TN	DRP	DP TP
積雪水	0.19	0.008	0.15	0.35	0.37	0.004	0.005	0.013
雨水	0.16	0.001	0.16	0.31	0.34	0.006	0.011	0.015