

II-55

森林集水域からの栄養塩の流出 (II)

-融雪期の北海道大学付属演習林簾舞試験地を対象として-

北海道大学工学部	正員	橋 治国
北海道大学工学部		筒井 誠二
北海道大学工学部		美口 博子
北海道大学工学部		久保 毅
北海道大学農学部付属演習林		藤原晃一郎

1. 緒言

筆者らは、これまで森林域内河川の水質を調査・解析し、森林集水域からの栄養塩流出特性とこれらを基礎とした森林からの栄養塩発生機構について検討を加えてきた。^{1)~6)} その結果、森林から流出する栄養塩はけっして低い濃度ではなく下流水域を富栄養化させるレベルにあること、また森林への栄養塩の複雑な供給システムからすると流出水中の栄養塩の組成が安定しており、それには森林の生態系が密接に関連していること等を明らかにしてきた。また一連の調査を通じて、北国の森林河川水質は、積雪期とその後の融雪期の栄養塩の流出特性に大きく影響されており、特異的な性質であることがわかった。このことは北国の水資源や水環境を保全する場合に十分に理解しておかなければならない。筆者らはこの積雪・融雪期の河川水質の特徴について、森林の保全状況や植生と関連させて調査を開始した。今回は、人工林ではあるが、自然の近い状態が保たれている北海道大学農学部付属演習林簾舞試験地での、融雪期の水質変動について報告する。

2. 調査対象河川と集水域 (図1)

北海道大学農学部付属演習林簾舞試験地内小河川を調査対象とした。本試験地は、石狩川水系豊平川支流の簾舞川流域内にあり、札幌市からは南西約15kmの位置にある。試験地は、標高562mの小峰の北西斜面にあり、面積は19.1haである。標高350m以上は急傾斜(約48%)でそれ以下では緩傾斜(約24%)となり、標高270m付近で湧水をみる。水質調査地点は標高250mの位置とした。調査地点より上流300~400mに川の流れをみるが、一定しない。本試験地は、1887年北海道庁から譲渡されたものであるが、北海道と大学間を数度管理替えされた歴史を持ち、最終的には1986年北海道大学の植物園から整理換されたものである。もともと森林であったと推定されているが、北大開学80周年事業でカラマツが植栽されたといわれており、30年生以上であると考えられる。現在の林況は、調査地点付近には群状のカラマツ林があるが、上部の斜面はイタヤ類、シナノキ、ハルニレ等の広葉樹に若干のエゾマツ、トドマツ等の針葉樹が混ざった密林である。⁷⁾ 林床はクマイザサで占められる。細流に沿っては、湿性の草本が群落を形成する。⁸⁾

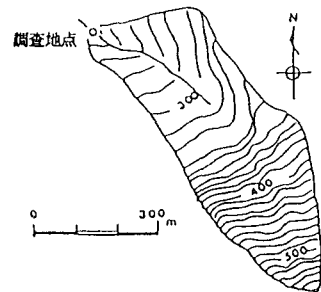


図1 簾舞試験地集水域

Runoff of Nutrients from Forest Watershed (II)

by Harukuni TACHIBANA, Seiji TSUTSUI, Hiroko MIGUCHI, Takeshi KUBO and Kouichirou FUJIWARA

3. 調査方法

3. 1 採水方法と現場観測

1990年7月より調査を開始し、現在も継続している。本調査での基本的な採水は週に1回を原則としたが、冬期間(1990～91年)は月に1～2回の採水を行った。

研究対象とした融雪期間(1992年4月3日～6月4日)は、自動採水器(ISC0-1680)を使用して1日2回(0時と12時)行ったが、化学分析は12時に採取した試料について行った。流量*、気温・水温*、および雨量**については、調査地点近くに設けられた北大農学部附属演習林(*)および気象月報(**)(日本気象協会北海道本部、小金湯観測所)のデータを利用した。

3. 2 分析項目

今回は富栄養化関連成分(形態別の窒素およびリン化合物など)と塩化物イオンなど一般水質成分を分析対象とした。

4. 結果及び考察

4. 1 気象と流況について

〔年間の概況(1991年)〕 気温は、夏期の日平均で最高20.0℃(8月21日)まで上昇し、冬期は欠測したが、採水調査時に計測した気温では2月に-7℃程度まで下降した。水温は、夏期の日平均値が最高16.6℃(8月21日)、冬期は最低2.1℃(12月27日)を観察した。年降水量は、1199mmであった。観測地点での流量は、平水量1.09 l/s、最大値は39.26 l/s(4月16日)、最小値は0.21 l/s(8月18日)で、河況係数は187となる。豊水量1.58 l/s、低水量0.45 l/s、渇水量0.23 l/sとなった。

〔融雪期<集中採水期間>〕(図2、図3) 4月初旬の日平均気温は4～5℃であったが徐々に上昇し、5月下旬には13℃近くになる。水温の変化は、3月下旬で6～7℃で、5月下旬に12℃に上昇したが気温に較べると緩慢である。河川水温へは地温の影響が大きいと推察される。河川流量は、この温度上昇と降水に対応して増加したが、2度のピークを記録したのち、減少した。最大流量は、2度目のピーク時(ピークII、4月21日)の16.5 l/sである。最初のピーク時(ピークI)は水温が低く、また電気伝導度やSS濃度が低いことから、ピークIIの流出には融雪水そのものの寄与が高いと推測される。

4. 2 水質成分の融雪期流出量と年間流出量

筆者らの本集水域の通年調査(1990年10月～翌年9月)⁵⁾から、窒素成分は、増水時に高濃度となるために流量が多くなる春(融雪期)と秋に高濃度となり、一方リン成分は増水時に低濃度となるため夏と冬に高濃度となることを明らかにした。しかし水質成分としての流出負荷量は高流量が長期間継続する融雪期では非常に大きくなる。融雪期(4～6月)の流出量の年間総流出量(1990年10月～1991年9月)に占める割合は、流量57.3%で、栄養塩ではTN 59.5%、TP 53.1%に達し、融雪期流出水の環境への影響の無視できないことがわかる。

4. 3 融雪期間中の各水質成分の変化

①主要無機イオンおよびSSの濃度変化(図4～図6)

主要無機イオン濃度の指標となる電気伝導度(EC)はピークIまで流量増加に伴って徐々に上昇する。その後流量は一時減少するが、電気伝導度はさらに緩やかに増加する。流量ピークIIに対応して電気伝導度は上昇し、高い状態を長期間保ちながら漸減する。一方大気起源の塩化物イオンの濃度変化は小さい。これらのことから融雪後期には土壤中から流出してくる無機成分量の多くなることがわかる。SSは流量増加時に高濃度になるが、降雨時に比較して⁴⁾融雪期のピークI、IIでのSS濃度は、流量増加の割合にはSSの増加量が小さい。

②窒素成分の濃度変化(図7～図10)

全窒素(TN)は、ピークIIから少し遅れて濃度が上昇して最大濃度となる。その後、TN濃度は緩やかに減少する。ピークI、IIの直後の濃度増加はおもに懸濁態の流出によるものであるが、その後継続する高濃度の原因は溶存態によるところが大である。TNの大部分を占める溶存態窒素(DN)や硝酸態窒素(NO_3^- -N)の

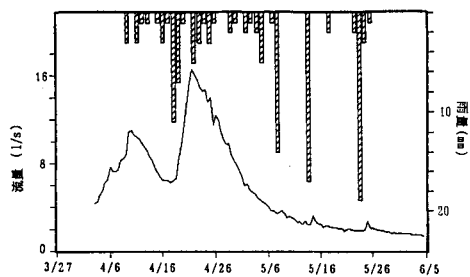


図2 融雪期間中の流量および雨量

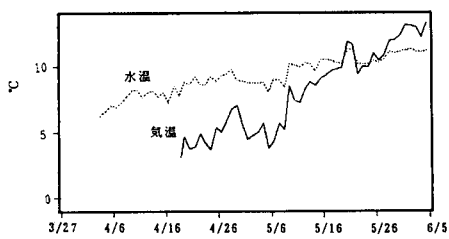


図3 融雪期間中の気温および水温

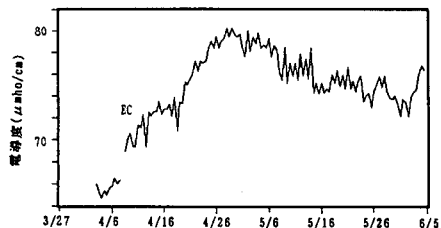


図4 融雪期間中の水質変化(EC)

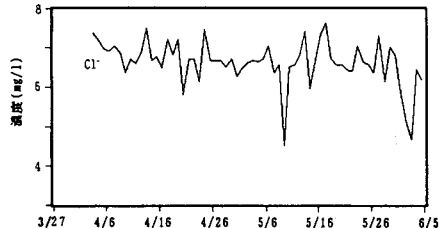


図5 融雪期間中の水質変化(Cl⁻)

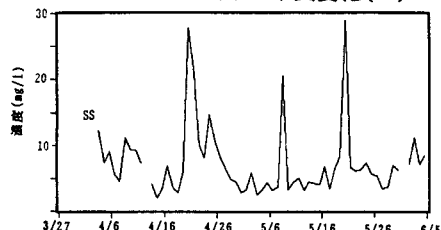


図6 融雪期間中の水質変化(SS)

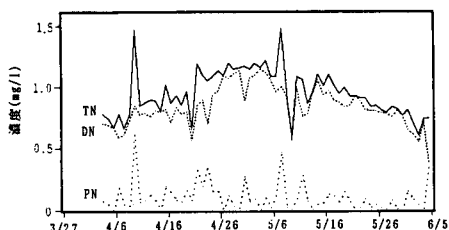


図7 融雪期間中の水質変化(TN, DN, PN)

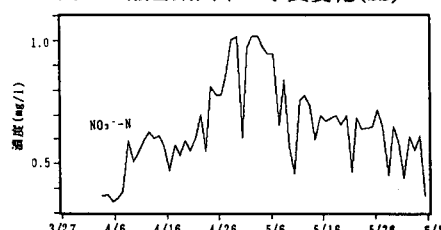


図8 融雪期間中の水質変化(NO₃⁻-N)

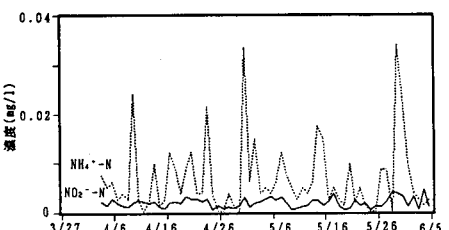


図9 融雪期間中の水質変化(NH₄⁺-N, NO₂⁻-N)

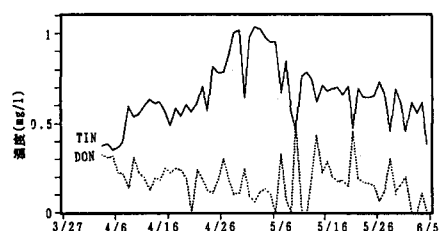


図10 融雪期間中の水質変化(TIN, DON)

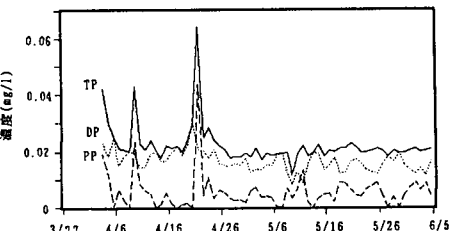


図11 融雪期間中の水質変化(TP, DP, PP)

表1 各成分の変動係数(標準偏差/平均値) 年間: '91.9~'92.8 融雪期: '92.4.3~'92.6.4

	TN	DN	PN	NO₃⁻-N	NO₂⁻-N	NH₄⁺-N	TP	DP	PP	TRP	DRP	PRP	Cl⁻	SS
年間	0.31	0.30	1.01	0.32	0.46	0.67	0.27	0.26	1.27	0.27	0.28	0.88	0.04	0.99
融雪期	0.20	0.19	1.06	0.27	0.47	1.07	0.32	0.26	1.15	0.14	0.25	0.93	0.09	0.73

濃度変動は、TNと似ているが、流量増加に対する時間的な応答はTNよりも大きい。これは応答がはやいPNと遅いDNの濃度変動が併せて進行するからである。アンモニア態窒素 (NH_4^+-N) については、低濃度で特徴ある変化は認められなかった。アンモニア態窒素は、冬期間も微生物的に酸化されやすい環境にあることがわかる。

③ リン成分の濃度変化 (図11)

全リン (TP) 濃度は、流量増加時に著しい増加をみるが、その他の期間は安定しており、融雪後期へと徐々に減少する。これはピークI、IIに流量増加と対応して懸濁態リン (PP) の増加が認められるが、溶存リン (DP) 濃度が融雪期間中に安定しているためである。

④ N/P比の変動と栄養塩の流出 (図12、図13)

TN/TP比は、ピークIへの流量変化に対応して大きくなるが、その後小さくなるが、ピークIIでは60~70と著しく大となり、その後は緩やかに減少する。溶存態でのDN/DP比は、TN/TP比にくらべて変化が激しい。これらは前述のとおり窒素とリンの濃度変化の差異が明瞭に示されたもので、特に溶存態窒素 (DN) の流出に関連していることは明らかである。DN/DP比の増加の速度がピークIよりピークIIではよいのは、一旦DN濃度が高まるとその水への溶出の応答がはよくなるためと考えられる。PN/PP、PN/SS、PP/SS比は分析精度の問題からばらつきが大きく、解析が難しい。

⑤ 栄養塩濃度の変動係数と流出特性 (表1) 全窒素 (TN)、溶存態窒素 (DN)、硝酸態窒素 (NO_3^--N) の変動係数 (標準偏差/平均値) は、年間に比べて融雪期は小さい。懸濁態窒素 (PN) では差はない。リンでは溶存態リン (DP) と溶存態反応リン (DRP) では両者の値に差がないが、全リン (TP) で融雪期間の変動係数が大きく、全反応リン (TRP) で融雪期間の変動係数が小さい。融雪期間中、溶存態窒素が高濃度で安定して流出するのに対し、リンでは融雪期間是非反応性リンの流出が変動を優占することになり、生物活動と関連した特異性が小さい。Cl⁻では変動係数は、通年、融雪期ともに非常に小さく差もあまりない。これは、降水に由来するためであろう。SSの変動係数は、融雪期に小さくなっている。

4. 4 融雪期における栄養塩流出負荷量の変化

4. 4. 1 融雪期の概要

窒素、リンの流出負荷量の変化を図14、図15に示す。窒素では、流量ピークIに対応して、懸濁態窒素 (PN) の負荷量が増えるためにTNの負荷量が増える。ピークIでは、DNも増加するがあまり明確ではない。ピークIIでも懸濁態窒素の濃度増加による全窒素 (TN) のピークができ、その

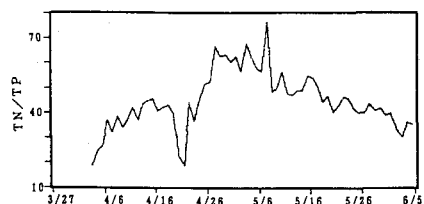


図12 融雪期間中の水質変化(TN/TP)

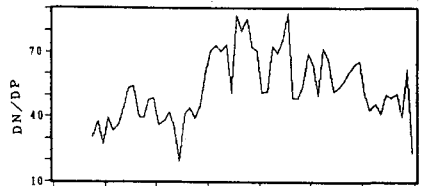


図13 融雪期間中の水質変化(DN/DP)

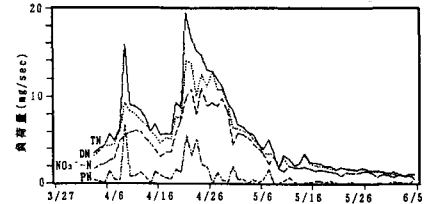


図14 融雪期間中の流出負荷量変化 (TN, DN, PN, NO_3^--N)

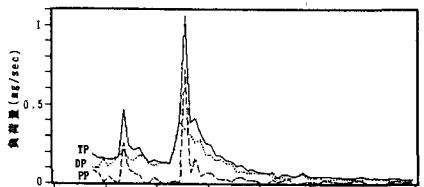


図15 融雪期間中の流出負荷量変化 (TP, DP, PP)

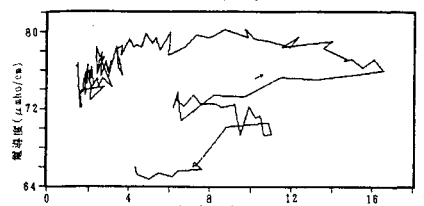


図16 融雪期間中のヒステリシス(EC)

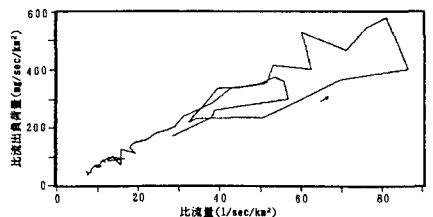


図17 融雪期間中のヒステリシス(Cl⁻)

後は、DN（特に NO_3^- -N）の高流出負荷量の持続により、TNの高流出負荷量は維持される。その後を維持するのが特徴である。リンは、冬期間が高濃度であるため、窒素ほど大きな流出負荷量の変化は無いが、ほぼ窒素と同様な変化パターンを示す。しかしピークIIの懸濁態リン（PP）の流出負荷量の増加はSSと同様に著しく、洗い出される懸濁物質にリンがかなり含まれていることがわかる。

4. 4. 2 融雪期の水質成分の流出の履歴

① 無機イオンおよびSS（図16～図18）

電気伝導度の流量との関係は、図中の矢印で示したように、反時計回りの関係で、流量増加後も減少しない。塩化物イオン（ Cl^- ）は大きな反時計回りのヒステリシスとなるが、流量のピーク前後の同一流量に対する濃度差が小さく、軌跡はかなり歪んだ楕円になっている。SSの場合は、反時計回りでピークIIの増加時の流出負荷量が小さいことが特徴的であり、ピークIでSS成分が流出したと考えられる。本森林集水域では、表面蓄積物が少なく、土壌中の蓄積物の多いことがわかる。

② 窒素成分（図19～図21）

TN、DN、 NO_3^- -Nの流量との関係は、すべて大きな反時計回りとなる。流量遅減後は、流量増加前の状態に戻る。TNは、流量のピークの1日後に流出負荷量が最大となる。これは前述のように懸濁態成分の寄与によるものであり、その後は漸次減少している。DN、 NO_3^- -Nでは流量のピーク後1週間程度は変動をしながらも、流出負荷量は高い状態が続く。土壌浸透水の水質への寄与は非常に大きいことがわかる。

③ リン成分（図22、図23）

TP、DPともに反時計回りの動きをするものの、窒素とは異なり、流量のピーク前後の軌跡はかなり一致している。濃度変化の小さいことによる流出量への影響が明確である。

5. 結論

融雪期には、高流量にもかかわらず窒素化合物は高濃度でありその流出量も大量である。リンは低濃度であるが流出量は大きい。融雪期には、森林内の土壌や地下水中に蓄積・貯蔵された栄養塩が融雪と共に大量に流出してくることがわかった。栄養塩を形態別にみると、流量のピーク時には懸濁態栄養塩の濃度が高くなり、流量ピーク後は窒素については溶存態（主に硝酸態）の濃度が高くなり漸次減少するが、リンでは溶存態の濃度変化は窒素ほど小さくなく、また安定している。同じ栄養塩でも森林土壌中の存在状態に差のあることがわかった。融雪期の窒素濃

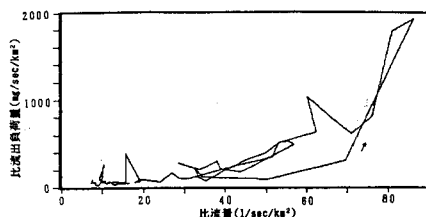


図18 融雪期間中のヒステリシス(SS)

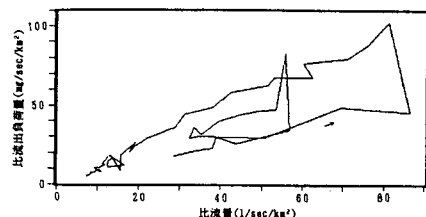


図19 融雪期間中のヒステリシス(TN)

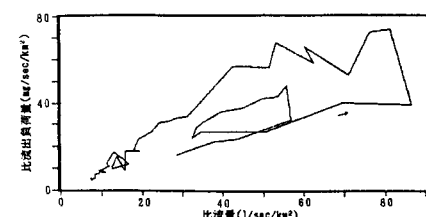


図20 融雪期間中のヒステリシス(DN)

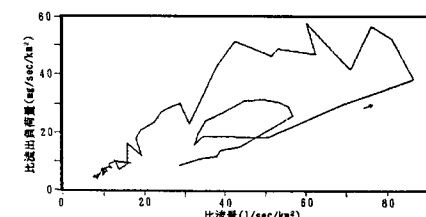


図21 融雪期間中のヒステリシス(NO_3^- -N)

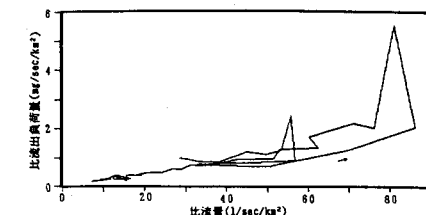


図22 融雪期間中のヒステリシス(TP)

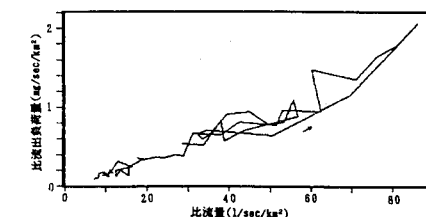


図23 融雪期間中のヒステリシス(DP)

度の変動係数は年間のものよりかなり小さく、融雪期の流出のメカニズムは特異的なものであることもわかった。しかし本水域で最も特徴的なことは、懸濁態栄養塩が流量増加時に濃度や流出負荷量を増すが、その増加の程度が他の地域に比較するとは小さいことであり、これが植生が豊かな森林の特徴と推測できることである。

今後は融雪期の水質成分の流出機構をさらに明らかにすると共に、大量に流出する栄養塩による下流閉鎖水域の生態への影響について調査を続けて行きたい。

〔謝辞〕 本研究の遂行に当たり北海道大学低温科学研究所 小林大二先生の多大なご援助とご協力を得た。ここに記して謝意を表します。

〔参考文献〕

- (1)橋 治国、遠藤 浩、久保貴司 森林集水域からの水質成分の流出特性 (V)、土木学会年次講演会講演概要集第2部、第46 回、P134-P135、1991 (9) (大阪)
- (2)橋 治国、安藤正治、大森博之、飯田真也、梅本延彦 融雪期における山地森林域河川からの栄養塩流出、衛生工学研究論文集、27、p33~43、1991
- (3)Harukuni Tachibana, Masaharu Ando and Hiroyuki Ohmori Water Quality During the Snow Melting Period, Report of Third International Symposium on Cold Region Development, 11 pages, Edmonton, Alberta, Canada, 1991
- (4)橋 治国、遠藤 浩、久保貴司、藤原滉一郎 森林集水域からの栄養塩の流出－夏季の北海道大学付属演習林簾舞試験地を対象として－、土木学会北海道支部論文報告集、48、p631~636、1992
- (5)橋 治国、筒井誠二、遠藤 浩、久保貴司 森林河川水質の季節変化、1992年水文・水資源学会研究発表会要旨集、p122~125、1992
- (6)橋 治国、久保 毅、遠藤 浩、筒井誠二 融雪期の森林河川水質－北海道大学付属演習林簾舞試験地を対象として－、寒地技術シンポジウム'92講演論文集、8、p339~344、1992
- (7)菱沼勇之助、笹木重和、林 進 豊平川試験地の森林概況、北海道大学農学部演習林試験年報、No.4、p59-92、1987
- (8)桜田純司、梅田安治、辻井達一、藤原滉一郎、長谷川 栄 山地小流域の流況特性の変化に関する研究 (1)、北海道大学農学部演習林研究報告、44、p245~279、1987