HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北海道北部山地の積雪の化学組成：森林の影響と流域物質収支解明への予備調査
Author(s)	佐藤, 冬樹; 藤原, 滉一郎; 笹, 賀一郎
Citation	北海道大学農学部 演習林研究報告, 53(2), 219-234
Issue Date	1996-09
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21402
Type	departmental bulletin paper
File Information	53(2)_P219-234.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道北部山地の積雪の化学組成

—森林の影響と流域物質収支解明への予備調査—

佐藤　冬樹*　藤原滉一郎**　笹　賀一郎*

Chemistry of Snowpack in the Mountain Area of Northern Hokkaido : An Observation Understanding the Mineral Cycle of the Forest Watershed in Cold and Snowy Region

by

Fuyuki SATOH*, Koichiro FUJIWARA** and Kaichiro SASA*

要　旨

寒冷積雪地帯の山地流域における物質収支の実態を明らかにする一環として，北海道大学天塩・中川地方演習林中の峰・パンケ山地区の流域において積雪調査をおこなった。山頂部を含む全ての調査地点の積雪には Na^+ と Cl^- が主要イオンとして含まれており，流域の標高に関わりなく海塩の強い影響を受けていた。また，山頂部の新雪にも NH_4^+ や NO_3^- が含まれ，平野部でおこなわれている酪農の影響が500 m以上の高標高地点まで現れていた。

新雪や積雪に含まれる化学成分は，標高よりも地表の植生条件に影響を受けており，周囲が森林の調査地点の濃度は無立木地の調査地点よりも高かった。このことは，海塩などの乾性降下物を捕捉することによって，樹木が周囲の積雪の化学的性質に影響を与えていることを示している。また，調査流域全体の積雪は酸性化しており，春期融雪によって大量の酸性融雪水(acid shock)の発生する可能性が考えられた。しかし，周囲が森林の調査地点では無立木地よりも積雪内の H^+ 含量は半減しており，乾性降下物を捕捉することにより，森林が積雪の酸性度をある程度中和しているようである。

キーワード：酸性雪，乾性降下物，山地森林流域，物質収支，森林機能

1996年3月29日受理. Received March 29, 1996

*北海道大学農学部附属演習林

The Hokkaido University Forests, Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060

**山形大学農学部生物環境学科森林資源学講座

Section of Forest Resources, Faculty of Agriculture, Yamagata University, Tsuruoka 997

はじめに

北海道北部は道内でも有数の多雪地帯である[1]。積雪は寒冷地における重要な環境因子であり，人間生活のみならずその地域における森林生態系の構築に大きな影響をおよぼしている。雪と森林の関係については，樹木に関する雪圧害や山地流出現象について重点的に研究され[2)3)]，筆者等も北海道北部を中心にこれらに関した研究および報告をおこなってきた[4)5)6)]。

一方，地球的規模での大気汚染の進行により，北海道においても酸性雪の降下現象が顕著に観測されるようになり[7)]，酸性積雪の森林流域生態系に与える影響についても検討する必要性も生じている。筆者等の研究フィールドである北海道北部においても，酸性雪の降下は常態化している[8)]。また，降雪量の多いことから考えると，この地域は酸性融雪水などにより流域生態系の破壊される可能性は高いと予想される。しかし，山地における積雪量や積雪に含まれる化学成分の空間変動は大きく[9)]，積雪の融解にともなって森林流域に流れ込む汚染物質の量も，場所により大きく異なると考えられる。本報告は，積雪地帯の流域における物質収支解明のための一助として，道北地域の北海道大学天塩・中川地方演習林の山地流域でおこなった，積雪水量と化学成分に関する調査結果をもとに，積雪の化学成分に与える森林の影響について検討をおこなったものである。なお，同時におこなった積雪水量と低地における降雪の化学成分の空間変動の調査結果については別途報告している[10)11)]。

1．調査地域の概要と試料の分析方法

山地森林流域における積雪の化学組成に関する調査は，北海道大学天塩地方演習林の中の峰地区と中川地方演習林のパンケ山地区の流域を対象におこなった。この地域は天塩山地の主脈の北端部に位置し，標高400～500 mの主として蛇紋岩より構成されている低山地帯にある。調査流域を設定した中の峰は，蛇紋岩特有の円みを帯びた山体であり，パンケ山の山体は白亜紀堆積岩で構成され，蛇紋岩山体より突き出た標高631 mの孤立峰である（写真-1，2）。調査は中の峰とパンケ山の西向き斜面の流域に，それぞれ行程一日の観測コースを設けておこなった。調査地への移動は雪上車を使用したが，山頂部などの雪上車の登れない高標高地域での観測にはスキーを使用し，調査用具を人力で運搬しながらおこなった（写真-3，4）。調査時期は，当地域の積雪深の最大となる，1991～1993年の2月下旬に設定し，一冬期一回とし，合計3回の調査をおこなった。

積雪の採取は，1991年の調査では流域の概査をかねて主に表層部の新雪を対象におこなった。また，1992年と1993年の調査は，積雪内における化学成分の分布についても把握するため，積雪層を表層より20 cmごとに分画して採取した。ただし，1992年の調査試料については異常値が多く，今回の検討対象とはしなかった。

採取した積雪試料はビニール袋に入れて実験室に持ち帰り，室温で融解後pHと電気伝導

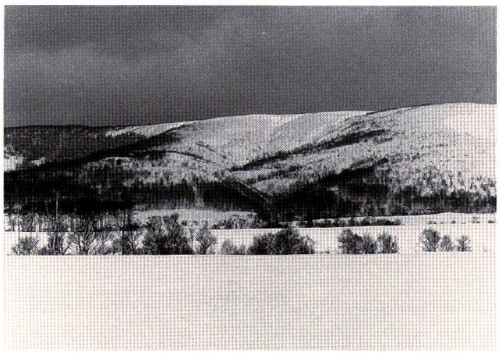

写真-1　中の峰地区の調査流域
正面の流域がA流域，左側の流域がB流域。

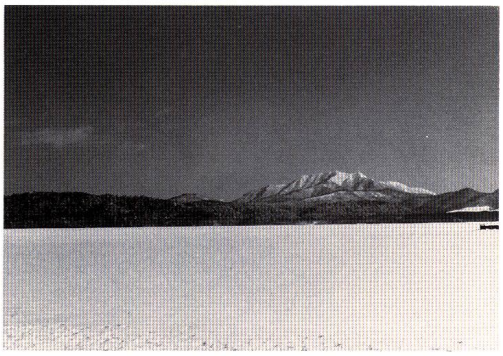

写真-2　パンケ山地区の調査流域（標高25 mの天塩川付近より撮影）
調査は天塩川沿いの低地より，パンケ山（正面）の山頂（標高631 m）にかけておこなった。

写真-3　パンケ山頂（標高631 m）
急斜面の山頂付近は，山スキーで観測用具を運搬しながらの調査となった。

写真-4　パンケ山頂直下の積雪調査（標高600 m）
山頂付近は－10℃以下でしかも強風の場合が多く，積雪の断面観察にも困難がともなう。冬期の野外調査に興味を示すのはなぜか女子学生が多い。

度（EC）を測定した。測定後の試料水は，0.22 μmのメンブレンフィルターでろ過し，そのろ液についてイオン分析をおこなった。測定したイオンはNa^+，NH_4^+，K^+，Ca^{2+}，Mg^{2+}，Cl^-，NO_3^-，SO_4^{2-}の各イオンで，分析にはイオンクロマトグラフィー（東亜電波：ICA-3000）を用いた。

2．結果と考察

1）中の峰地区における新雪の化学組成

中の峰地区（図-1）は，天塩地方演習林で様々な流域観測をおこなっている，通称A流域（ササ地主体）とB流域（森林主体）より構成され，降雪をもたらす西寄りの風に対して風衝斜面となっている。この調査は，積雪水量調査と同時におこなっているので，図中には積雪の採

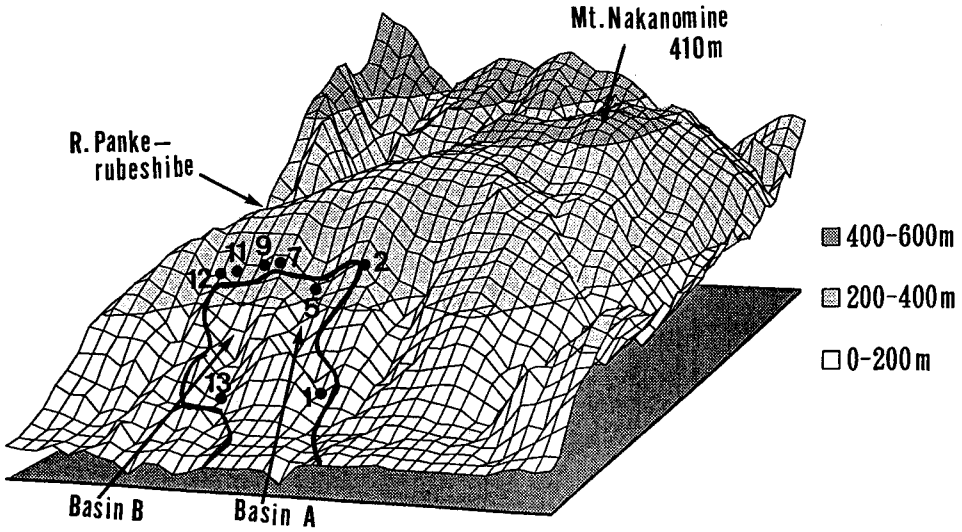

図-1　中の峰地区の調査地点

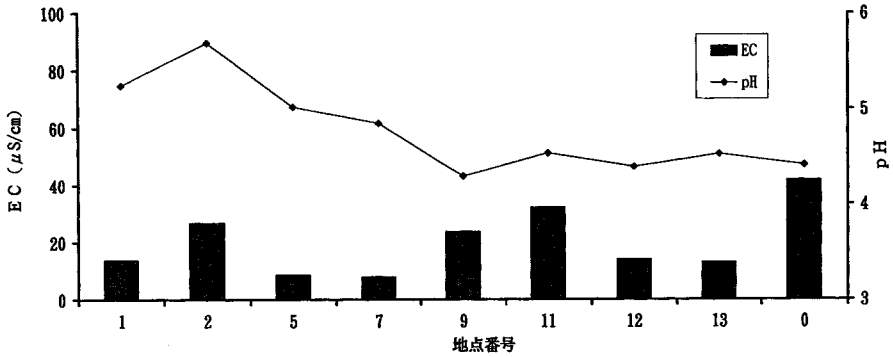

図-2　1991 年調査における中の峰地区の新雪の pH と電気伝導度（EC）

取・分析をおこなった地点の番号のみ示した。地点 1（標高 85 m）と地点 13（標高 105 m）は中の峰Aおよび B 流域の流出量を観測する量水堰，地点 2 は標高 250 m の A 流域の南端部にある蛇紋岩の円みを帯びた凸型山腹斜面にある。積雪観測は，地点 2 と同じ標高を維持しながら，A・B 両流域を横断するように地点 12 までおこなった。地点 5 は地点 2 の北側にある地すべりでできた凹地中央部，地点 7 は A 流域と B 流域の境界尾根，地点 9 ～12 は B 流域に設定した調査地で，地点 9，11 は林縁部，地点 12 は森林内にある。各調査地の植生は，地点 2 と 9 は山火事跡のダケカンバ散生林，地点 5 と 7 は無立木地，地点 11 と 12 はアカエゾマツ純林，量水堰のある地点 1 と 13 は広葉樹林（ケヤマハンノキ，ダケカンバ）である。

図-2 に，1991 年の調査における積雪表層（新雪）の pH と電気伝導度を示した。森林主体

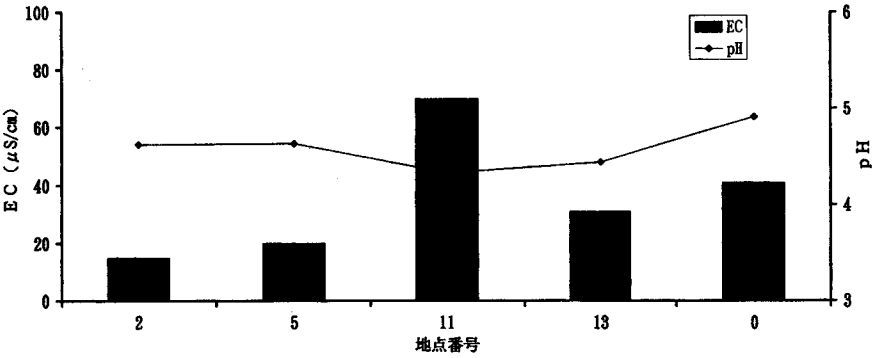

図-3　1993年調査における中の峰地区の新雪のpHと電気伝導度（EC）

であるB流域（地点9～13）の新雪のpHは約4.5で，低地の地点0（演習林庁舎における新雪，標高25m）と同様の値であったのに対し，A流域の新雪のpHは5.0～5.5とやや高い値を示した。電気伝導度は，流域の凸部で周囲が樹木で囲まれている地点（地点2，9，11）の新雪で高く，凹部（地点1，5，13）や凸部でも周囲が無立木地（地点7）の新雪で低い傾向にある。また，周囲が樹木に囲まれていても，地点13のように密林の内部では新雪の電気伝導度は低かった。このような傾向は，1993年の調査でも認められ（図-3），新雪のpHはA流域（地点2，5）の新雪でやや高かった。また，電気伝導度はアカエゾマツ林縁部の地点11における新雪で特に高い値を示した。

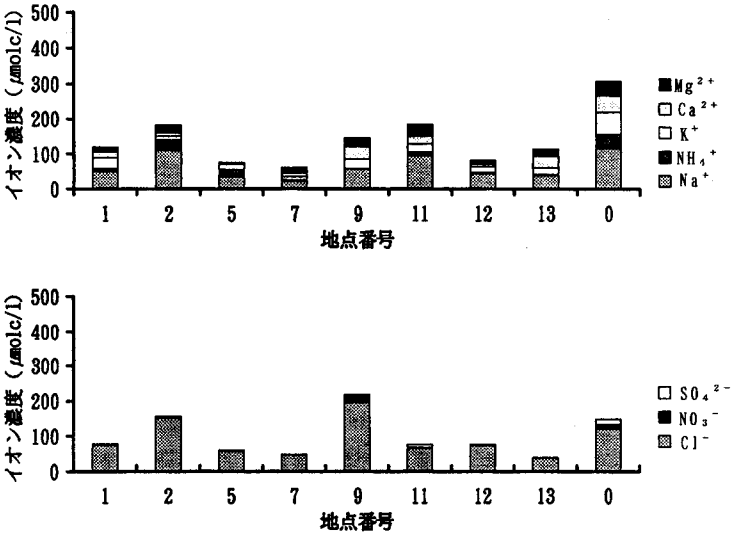

図-4　1991年調査における中の峰地区の新雪のイオン組成

新雪中のイオン組成をみると（1991年：図-4，1993年：図-5），すべての地点でNa^+とCl^-の濃度が高くなっており，海塩の影響を強く受けていた。また，電気伝導度の高い地点2，9，11などでは同じ海塩成分であるMg^{2+}の濃度も高くなっていた。これに対し，非海塩性の成分であるNH_4^+も中の峰地区のすべての調査地点で認められ，低地でおこなわれている酪農の影響が，調査をおこなった山地流域にまでおよんでいることがわかった。

全体的に見ると，中の峰地区の新雪は，低地にある演習林庁舎（地点0）における新雪と比較してイオン濃度の低い場合が多い。しかし，中の峰地区内部で比較すると，標高の低い地点1や13のイオン濃度は標高の高い地点11などに比べるとむしろ低くなっており，新雪のイオン濃度は標高以外の条件に影響されていることが推定された。標高250 m付近の調査地を見た場合，イオン濃度の高いのは尾根筋で，しかも森林の存在する場所であった。この斜面は，西寄りの風に対して風衝斜面となることから，新雪の化学組成に影響を与える要因として，調査地の地形を考慮しなければならない。しかし，同じ凸型風衝斜面である地点7のイオン濃度は，他の凸型斜面上の調査地点（地点2，9，11）よりも低くなっていた。新雪の化学成分全てが海塩を含んだ降雪として流域に沈着するならば，流域内の同一標高・地形上における新雪の濃度・化学組成は類似しているはずである。しかし，同じ凸型風衝斜面にありながらイオン濃度に差を生じていることは，地形以外の要因が関与している可能性がある。特に，無立木地の尾根と森林の存在する尾根とで新雪のイオン濃度・組成の異なることから，樹木の有無が新雪の化学的性質に影響を与える要因として考えられる。

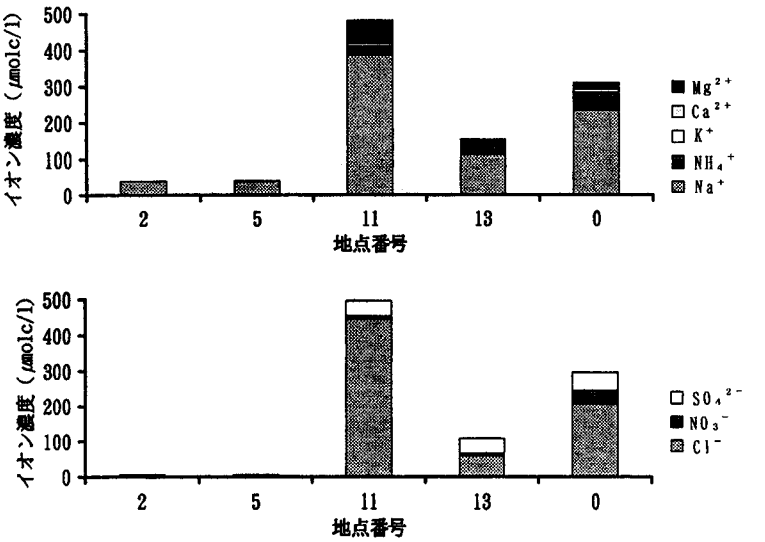

図-5　1993年調査における中の峰地区の新雪のイオン組成

筆者等は，別途報告した低地の新雪に関する広域調査の結果[11]より，新雪に含まれる化学成分は安定ではなく，選択的溶出や乾性降下物の沈着によりその化学的性質は容易に変化することを指摘した。調査時（2月28日）の新雪は，2月24日に降った雪であり，降雪直後から約4日のタイムラグがある。したがって，調査した新雪の化学組成について検討するためには，新雪中におけるそれらのプロセスを考慮する必要がある。選択的溶出については，中の峰地区の新雪の Na^+, Cl^-, SO_4^{2-} の濃度が地点0と比較して減少していることより，その関与は推定できる。しかし，地点ごとの溶出状況については今回のデータのみでは推測することは困難であった。

一方，乾性降下物について佐久間[12]は，B流域における夏季の物質循環の研究から，アカエゾマツの樹体自身が海塩をはじめとする乾性降下物の沈着に効果を持つことを指摘している。調査地区は強風の影響下にあり日本海から飛来した海塩が，アカエゾマツやダケカンバの

樹体表面に沈着することは十分に考えられる。アカエゾマツの林縁部である地点11において観測された，1993年の特に高い Na^+ と Cl^- 濃度（図-5：Mg^{2+} についても同様）は，乾性降下物に対する樹木の捕捉効果が，冬季でも発現されていることを示唆するものと考えられた。地点2と9は落葉広葉樹であるダケカンバを主体とする山火事跡の二次林であり，地点2はその散生林であるが，それでも新雪に含まれる化学成分の濃度は高かった。このことは，たとえ着葉していなくても，枝を含め樹体が海塩などの乾性降下物を捕捉していることを示しており，乾性降下物に対する樹木の捕捉効果は以外に大きいと考えられた。

2）パンケ山地区における新雪の化学組成

パンケ山地区の調査地点を図-6に示した。調査地はパンケナイ川に沿っており，地点1は天塩川との合流点，地点2・3はパンケナイ川沿いの谷の中，地点4・5は川から天塩山地主稜へ向かう支尾根でアカエゾマツ林の中である。地点6～9は天塩山地主稜部であり，地点8はアカエゾマツ，地点9はダケカンバの散生林で，残りは無立木地である。地点11はパンケ山頂，地点10はパンケ山頂直下斜面でともにハイマツ帯となっている。

図-7に1991年の調査における積雪表層（新雪）のpHと電気伝導度の結果を示した。新雪のpHは6～6.5の間にあって地点ごとの差は認められなかった。また，中の峰地区における新雪のpHと比較すると約2単位ほど高い状態にあった。電気伝導度は100～400 μS/cmの間にあり，中の峰地区の新雪に比較して約10倍の極めて高い値となっていた。地点ごとにみると，

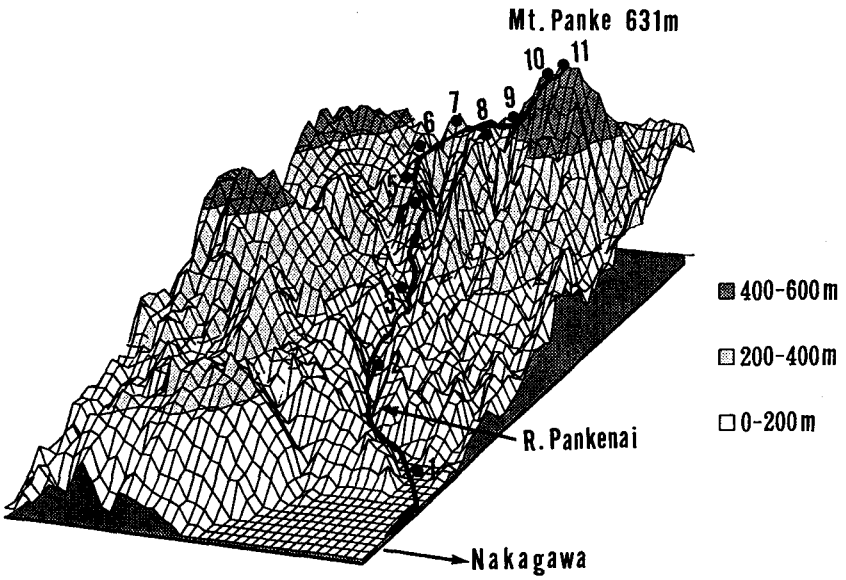

図-6　パンケ山地区の調査地点

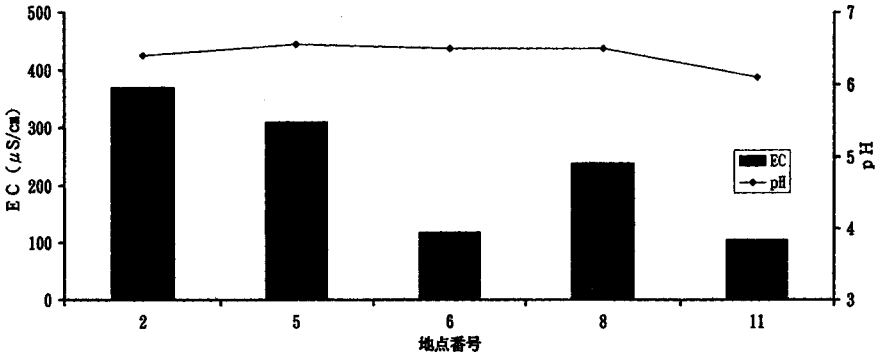

図-7 1991年調査におけるパンケ山地区の新雪のpHと電気伝導度（EC）

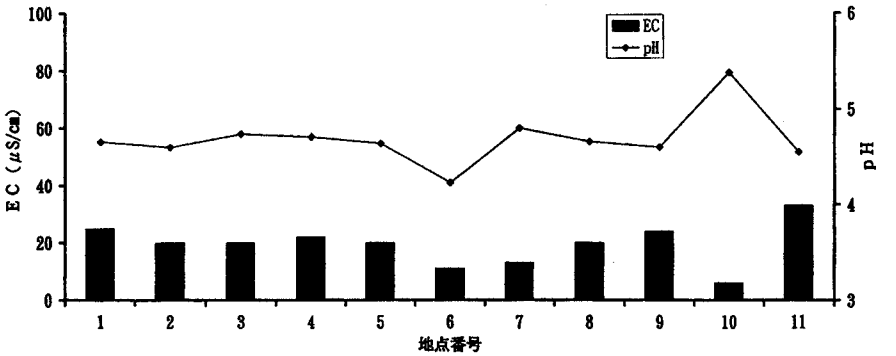

図-8 1993年調査におけるパンケ山地区の新雪のpHと電気伝導度（EC）

山麓部の地点2で最高値をとり，標高の高くなるにつれて電気伝導度は低下して山頂部の地点11で最低値となった。これに対し，1993年の調査における新雪のpHの電気伝導度には，1991年に認められたような中の峰地区との大きな差は無かった（図-8）。また，この年は地点10を除き新雪のpHは流域内における地点間変動は小さく，電気伝導度も地点6・7でやや低い傾向はあるものの，1991年のような地点間における大きな違いは認められなかった。

1991年の新雪に含まれる化学成分の濃度は，伝導度の値を反映して極めて高く（図-9），特に Na^+ と Cl^- は地点1で約2,000 $\mu mol_c/l$，それ以外の地点でも高濃度に含まれており，強い海塩の影響を示していた。また，Na^+ と Cl^- 以外の海塩由来成分（Mg^{2+}，SO_4^{2-}，Ca^{2+}，K^+）などの濃度も上昇していた。さらに，非海塩成分である NO_3^- も各地点の新雪に含まれており，山頂部の地点11では600 m以上の標高にもかかわらず NH_4^+ も新雪中に存在していた。1993年の調査における新雪は一転して低濃度となり（図-10），Na^+ や Cl^- は主要イオンとなってはいたがそれらの濃度は1991年の調査時の1/20に減少していた。その他の海塩由来成分の濃度

も著しく低く，検出されなかった成分も多かったが，SO_4^{2-}はほとんどの地点に10～20 $\mu mol_c/l$程度含まれていた。また，NH_4^+やNO_3^-については含まれている地点といない地点が混在し，標高による違いは認められなかった。

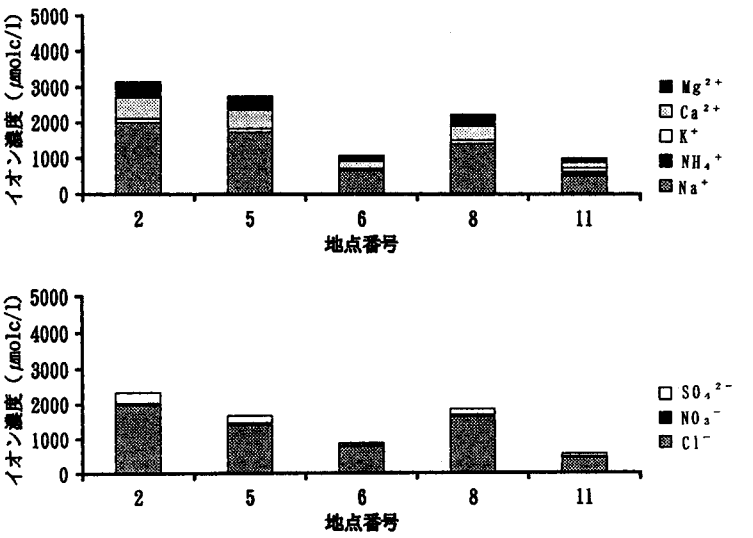

図-9　1991年調査におけるパンケ山地区の新雪のイオン組成

地点9・10は標高600 m以上の南北にのびる天塩山地の主稜部とパンケ山頂部新雪であるが，その地点においてもNa^+とCl^-は主要イオンとなっており，海塩の影響は標高に関わらず流域の新雪の化学組成に反映されている。一般に，高標高の地域では大気は清澄であり，含まれているイオン濃度も低くなると報告されている[13)14)]。しかし，日本海とオホーツク海に大きく半島状に突き出た道北地域にあるパンケ山付近では，降雪に含まれる化学成分の濃度を標高との関係で単純化して捉えることは難しいようである。また，山頂部の積雪にもNH_4^+やNO_3^-が含まれており，中の峰地区と同様に低地でおこなわれている酪農の影響が山頂部を含む広い範囲におよんでいた。一方，1993年の調査の新雪(図-10)について，強風により積雪の状況が常に変化している山頂部の地点10・11を除くと，地点6・7の化学成分の濃度が低くなっていた。地点6～9は稜線部の調査地であり，地点6と7は無立木地，地点8と9はアカエゾマツやダケカンバの散生林である。このことから考えると，パンケ山地区においても新雪に含まれる化学成分の変動は，標高よりも植生

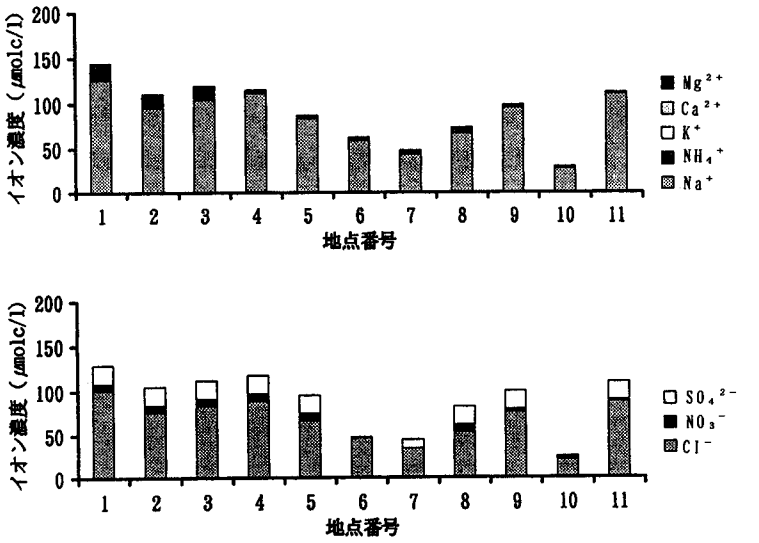

図-10　1993年調査におけるパンケ山地区の新雪のイオン組成

などの地表面の状態に依存していると結論できる。

ここで，1991年の新雪の化学組成が中の峰地区と際だって異なっている理由について考えてみる。中の峰地区の調査において降雪直後の試料とみなした，天塩地方演習林庁舎の降雪の電気伝導度は約40 μS/cmであった。パンケ山地区の新雪の電気伝導度は100～370 μS/cmであり，中の峰地区と同様の雪がパンケ山地区の新雪として採取されたとは考えがたい。しかし，天塩地方演習林でおこなっている一降雪ごとの分析結果をみると，2月16・17日に電気伝導度で200 μS/cm以上の降雪を記録していた。パンケナイ川流域の地点2や5では電気伝導度の値が約300 μS/cmであり，天塩演習地方演習林における観測地よりも1.5倍程度高い。ただし，この時の降雪は発達した低気圧の影響による猛吹雪による降雪であり，純粋な新雪は強風により吹き飛ばされて採取できず，代わりに降雪採取用の容器の中に堆積していた，地吹雪によって再移動してきた雪を採取・分析した値である。したがって，実際の降雪に含まれる化学成分の濃度はさらに高かったと考えられることから，パンケ山地区で新雪として採取した試料はこの猛吹雪の時の降雪であると判断した。その後，天塩地方演習林庁舎付近では20 cm程度の積雪があったが，約15 km程度しか離れていないにもかかわらず，パンケ山地区ではこの降雪が新雪として認識されなかったことは，雪の降り方が不均一である一つの証拠であろう。

この猛吹雪による新雪は，海塩を大量に含んでおり，電気伝導度の値が著しく高かった(観測を開始した1990年12月から1995年4月までの最高値)。しかし，天塩地方演習林で観測されたこの新雪のpHは約4.5であり，図-7に示した調査流域における新雪のpHと比較するとかなり低い。また，この吹雪以前にはpH 6以上の降雪は観測されていないことから，積雪の混合によるpHの上昇は考えられず，この流域で観測された6以上の新雪のpH値は，何らかの物質の混合によると考えられる。図-11に調査流域の新雪と天塩地方演習林で観測された1991年2月16・17日の猛吹雪（図中の▲印）の降雪中における，Na^+に対するCa^{2+}とSO_4^{2-}の関係を示した。1991年の雪は海塩の影響を強く受けていることは前に述べたが，調査流域におけるSO_4^{2-}は海塩中におけるNa^+とSO_4^{2-}の比を示す直線上にほぼ位置しており，高濃度のSO_4^{2-}は海塩の混入によることを明瞭に示している。

これに対し，1991年調査の新雪に含まれるCa^{2+}は海塩中のNa^+とCa^{2+}の比を示す直線より遥か上方に位置しており，流域の新雪に海塩以外のCa^{2+}の混入のあったことを示している。道北地域における非海塩性のCa^{2+}の降下については筆者等の降雪の化学組成に関する観測でも認められており[16]，その起源は大陸方面から飛来する長距離移動大気汚染物質と推定されている。ただし，その場合非海塩性のSO_4^{2-}濃度も上昇している場合が多い。しかし，調査流域の新雪の場合には非海塩性SO_4^{2-}はほとんど含まれていないことから，長距離移動汚染物質混入の可能性は小さいと考えられる。

一方，非海塩性Ca^{2+}は$CaCO_3$のような形で混入する場合も多く[15]，その場合HCO_3^-の生成により新雪のpHの上昇する可能性は高い。また，都市などではCa^{2+}はセメント工場などの

発生源の周囲に局所的な分布を示すことなどが知られている[17)18)]。観測地の南西側には中川町の市街地があり，小規模ながらコンクリートブロックの製造工場と採石場もあるため，その影響とも考えられる。しかし，この吹雪の時の風向は北北東であり，調査地の南西側にある市街地とは逆方向の風向きであった。なお，調査地の北側には天塩山地東麓に中頓別や浜頓別の市街地もある。ただし，この場合には天塩演習林庁舎の降雪にもその影響が現れる可能性が高いが，図-11に示したように演習林庁舎の降雪ではそのような関係は認められなかった。

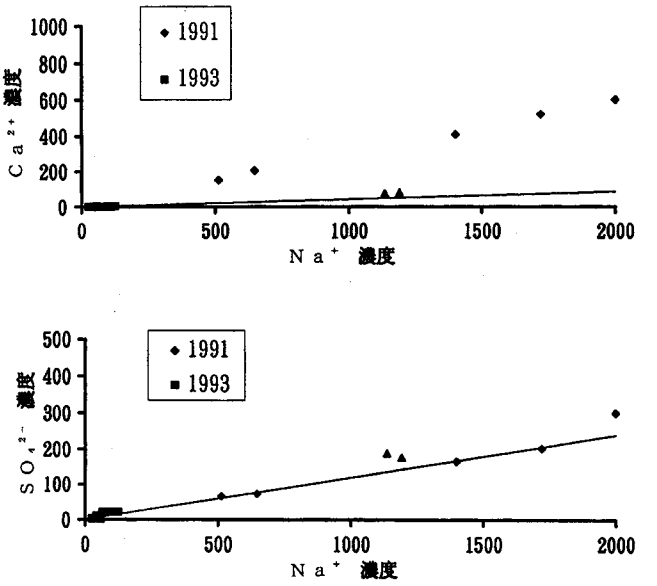

図-11　パンケ山地区の新雪中の Na^+ と Ca^{2+} および SO_4^{2-} との関係

（▲印は1991年2月16・17日の降雪　天塩地方演習林調査における値。図中の単位は $\mu mol_c/l$）

以上述べてきたように，1991年の調査のパンケ山地区の新雪には非海塩性の Ca^{2+} が高濃度で含まれており，それが新雪のpHを上昇させる原因となっていた。この非海塩性 Ca^{2+} の混入は，10 km以上離れた周囲の市街地から吹雪にともなう強風により飛来した，短距離移動汚染物質の混入による局地的な現象と推察された。このことは，山地森林流域の山頂部であっても，新雪の化学組成は気象条件によって短距離移動汚染物質の影響を強く受ける場合のあることを示している。積雪は，降水よりも化学組成や流域におけるインプットの総量を把握し易いという考えに立って，今回の山地森林流域における新雪の化学組成の調査を計画した。しかし，この程度の調査ではその実態把握が困難であり，より詳細な調査・観測が必要と思われる。

3）山地流域の積雪に含まれる化学成分量と森林の影響

これまでは，一降雪時の化学成分の空間変動に限定して検討してきた。しかし，山地における積雪の状況は，風や雪の移動に強く影響を受けるため，一冬季全体の化学成分の降下量について地点ごとの特徴を把握するためには不十分である。そこで，パンケ山地区の稜線部の調査地で，積雪断面内における化学成分の分布調査をおこない，積雪層全体に含まれる成分量の比較をおこなった。図-12に主な調査地点におけるpHと電気伝導度の断面分布を示したが，電気伝導度は断面内で不均一な値を示し，化学成分の濃度は積雪層位間で大きく異なることを示している。また，地点6・8・9の積雪断面下層部には電気伝導度で50 $\mu S/cm$ 以上の大きな値を

示す層位があり，そこのpHは上層のpHに比較して大きく低下していることが認められた。

これに対し，パンケ山頂直下の地点10では，他の地点のような電気伝導度の大きな断面変化や下層部でのpH低下を示さなかった。調査地の積雪の状況については別途報告しているが[10]，地点6・8・9の積雪は水平な層状構造で，風成層とみられる層は少ない。これに対し，地点10の積雪は風成層とみられる斜め構造が主体となっており，この地点の積雪は安定ではなく，風により激しく動いていると推定されている。したがって，地点10の積雪断面内における化学成分の分布状況が他の地点と異なっていることは，周囲の雪が移動・再堆積したことや，風による雪の混合による断面内の化学成分の均一化などによるものと考えられた。このような山頂部における積雪は，風の状態に強く影響されるため年次変動も大きいと予想され，稜線部などの積雪の化学組成より山頂部の状態を推定することは困難であると考えられる。

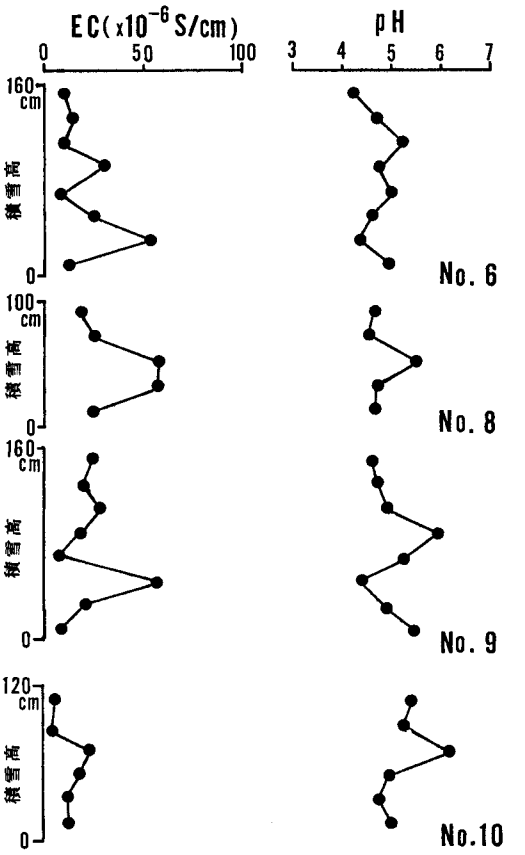

図-12　パンケ山地区の稜線部の積雪断面内のpHと電気伝導度（EC）

右下の数字は地点番号

電気伝導度の値を反映して，積雪断面内の化学成分も大きな変動を示した（図-13・14）。この中で，Na^+とCl^-が主要イオンとなっていることは，この地域の積雪全体が海塩の影響を強く受けていることを示すものである。また，積雪下層部で化学成分の濃度の高い地点6・8・9ではその部分のアニオン総量に占めるNO_3^-やSO_4^{2-}の割合も上昇していた。積雪表層に堆積した降雪の化学成分は，その場所には安定に存在せず，マイクロスケール的な凍結—融解の繰り返しにより，降雪粒子自体よりも先に下方へ移動することは，選択的溶出（preferential elution）として知られている[19]。その結果，積雪断面内における化学成分の不均一性がより明瞭になることはこれまでにも報告されており[20]，今回の調査で観測された，積雪断面下部における化学成分濃度の上昇も，選択的溶出による化学成分の移動・再分配によっていると考えられる。また，この集積部位におけるpHの低下は，酸（H^+）も同様に移動・集積していることを示している。調査時期は2月下旬の最大積雪期であったが，この地域の春期融雪は3月中旬に

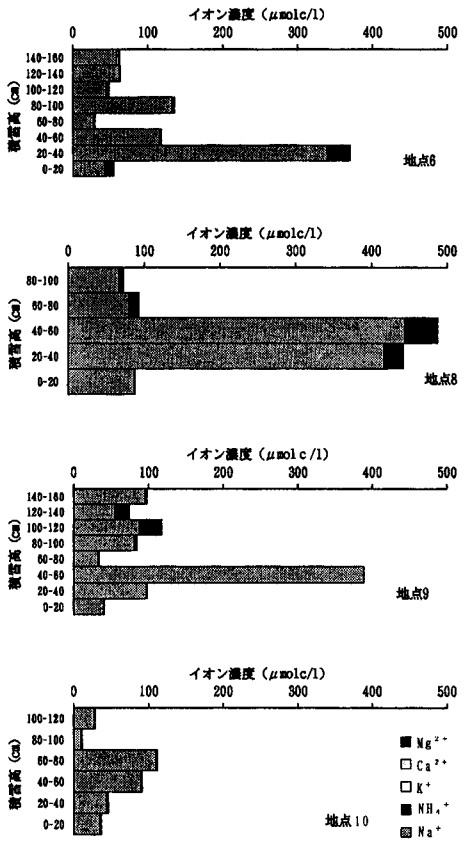

図-13　パンケ山地区稜線部の積雪断面内におけるカチオンの分布

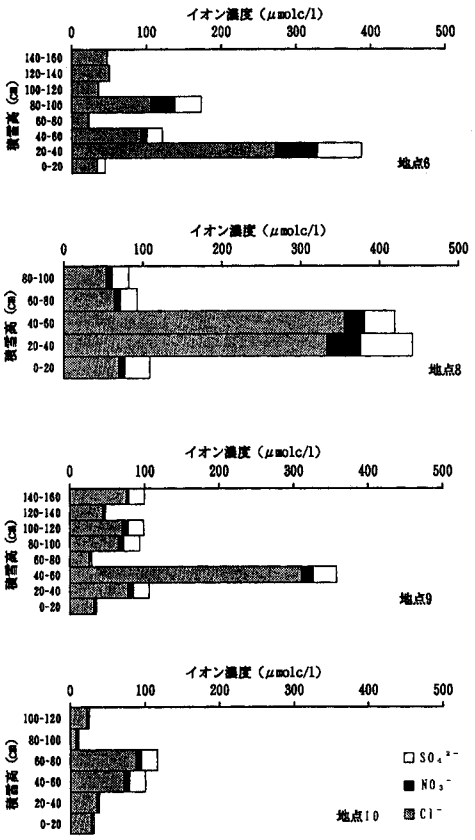

図-14　パンケ山地区稜線部の積雪断面内におけるアニオンの分布

開始される場合が多い。このpHの低い部位が積雪最下部に達し，積雪下面融雪水として積雪層より徐々に流亡する以前に春期融雪の発生が起こると，pHの低い（すなわち酸性度の高い）融雪水の大量発生（acid shock）につながっていくと考えられる。

次に，積雪断面の化学分析結果と降雪水量の観測結果をもとに，積雪の融解にともなって流域に流入する化学成分量について考察する。表-1に断面調査をおこなった4地点の積雪全層の積雪水量と化学成分量を示した。地点別にみると，アカエゾマツ散生林である地点8では，降雪水量は稜線部の3地点の中では最も少ないのに，積雪内に含まれている化学成分量はH^+を除き最も多かった。このことは，新雪の調査において周囲に森林のある地点で化学成分の濃度の高かったことと一致しており，乾性降下物の捕捉による森林の積雪の化学成分に与える影響として解釈できる。逆に，無立木地である地点6に比較して積雪中のH^+量が半減していることは，捕捉された塩基類により積雪内の酸が中和されたためと思われる。先の広域調査において，新雪のpHを下げる要因としてNH_4^+沈着の可能性を述べたが[11]，地点8においてもNH_4^+量が多くなっており，積雪の酸性度の低下に寄与していることも推定される。また，周囲がダ

ケカンバの散生林となっている地点9は，アカエゾマツの散生林である地点8に比較して塩基類の量は少なかった。この原因として，ダケカンバは落葉広葉樹であり，冬季の樹体に葉は付着していないこと，あるいは針葉樹の葉の比表面積が大きく，より多量の乾性降下物の付着や，葉からの成分の溶出が起き易いことなどが挙げられる[21)22)]。

表-1　パンケナイ川流域の積雪中に含まれる化学成分量（mol_c/ha）

地点名	積雪水量 (mm)	H^+	Na^+	NH_4^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
地点 6	625	144.3	638.9	33.0	2.0	5.8	8.4	511.0	76.5	101.6
地点 8	390	73.7	852.9	55.5	1.8	2.3	15.4	682.3	72.7	167.4
地点 9	590	84.3	644.5	35.6	2.3	4.4	6.7	515.6	35.7	89.1
地点 10	210	16.9	109.5	1.9	0.5	1.0	1.7	87.6	7.9	17.5

これに対し，地点10に代表される山頂部は積雪水量も稜線部の約1/3～1/2と少なく，そのため積雪の融解により流入する化学成分量も少ない。積雪に含まれているH^+の量を比較すると，稜線部の地点6で144 mol_c/haであったのに，山頂部は16 mol_c/haと約1/10程度であった。このことは，環境汚染にともなう降雪の酸性化の影響は山頂部よりも稜線部で顕在化しやすいことを示している。一方，山頂部では汚染物質であるNH_4^+やNO_3^-の量は1/10以下であり，積雪全体としてみた場合には，人為の影響は稜線部に比較して小さくなっている。特に，NH_4^+は降雪直後の新雪中にはある程度存在していたのに，積雪全体としてみた場合には重要ではなかった。このことは，山頂部で絶えず積雪が移動していることと無縁ではなく，積雪の移動速度が大きいために乾性降下物との反応時間が十分ではなかったことなども関連していると考えられる。

あ と が き

一般に，山地における降水は，周囲からの人為の影響をあまり受けないため，低地における降水と比較すると清澄であると考えられている。しかし，今回調査した北海道北部の山地流域では，山頂部の雪さえも海塩の影響を強く受け，積雪の化学成分に関しては低地と大きな差はなかった。また，降雪の酸性化は北海道北部においても普遍的な現象であることも確認された。むしろ，NH_4^+やNO_3^-などが山頂付近の積雪にも含まれており，酪農の影響はかなり広範囲に，しかも標高の高い地点にまでおよんでいたことは予期しないことであった。

冬季は低温のため樹木からの化学成分の溶出が起こり難く，積雪の化学組成に与える森林の影響は小さいと考えていた。しかし，今回の調査結果より，散生林あるいは落葉した広葉樹であっても，周囲の積雪の化学組成にある程度影響をおよぼしていることがわかった。強い季節風の吹くこの地域では，日本海やオホーツク海からの海塩が乾性降下物として飛来し，樹木に沈着する現象が頻繁に起こっており，結果として周囲の積雪の化学成分の濃度は上昇すると考えられる。乾性降下物の降雪の化学組成に与える影響については，低地における新雪の調査

でも指摘したが，山地の森林流域では樹木が乾性降下物を捕捉して，その影響をさらに強めていると思われる。これに，選択的溶出の発生や，NH_3 ガスの雪面への吸着などもあわせて考えると，冬季の森林流域における積雪を仲介とした物質の動態は，夏季に劣らずダイナミックであると言えよう。

調査した森林流域の積雪は全体的に酸性化していたが，酸の流入による土壌の酸性化の程度は，積雪水量の多い谷筋～稜線部で高い。むしろ，山頂部は強風による雪の移動が激しいために積雪水量は少なく，酸性化の程度は稜線部に比較すると著しく小さかった。また，無立木地に比較して，樹木の存在する地点では，積雪に含まれる酸の量は少なく，この場合森林の存在は流域の酸性化を抑える方向へ作用すると考えられる。ただし，乾性降下物に含まれる酸性物質の量が多くなると，乾性降下物を捕捉する森林の存在は，流域の酸性化を促進する方向へ作用する可能性もあり，乾性降下物に対する森林の効果の検討には注意深い論議が必要と考えられた。

謝　　辞

この観測は，北海道大学演習林のプロジェクト研究の一環としておこなっており，多くの職員と学生・院生諸氏の協力を受けて実施されたものである。また，調査には，文部省科学研究費［課題番号　02201103，03201105，04201103（代表者　秋田谷英次）・同 04454078（代表者藤原滉一郎）］を費用の一部にあててておこなった。また，図の作成には北海道大学天塩地方演習林横山美由紀嬢および高知大学農学部森林科学科吉井直子君の協力をいただいた。記して謝意を表する。

参 考 文 献

1）大川　隆（1992）　北海道の動気候，246 pp，北大図書刊行会

2）小野寺弘道（1990）　雪と森林，81 pp，林業科学技術振興所

3）小島賢治（1982）　低温多雪地域の冬期積雪下面における融雪量，—時間変化と年による差異—，低温科学，物理篇 **41**，99-107

4）藤原滉一郎，小野寺弘道（1976）　北海道大学中川地方演習林における積雪観測資料（1969/70～1972/73），北大演業務試料 **16**，1-48

5）FUJIWARA, K. (1985)　Studies a planting indicator of forest land covered with heavy snow, 北大演研報 **42**(4)，769-784

6）藤原滉一郎，佐藤冬樹，笹　賀一郎（1994）　寒冷積雪地帯の小流域における冬期流出の特性，水文・水資源学会誌 **7**(6)，503-511

7）荒木邦夫，加藤拓紀，田渕修二，野口　泉，高橋英明，坂田康一，青井孝夫（1988）　酸性雪に関する調査研究（第3報），北海道公害防止研究所報 **15**，73-81

8）佐藤冬樹，笹　賀一郎，藤原滉一郎，桝本浩志（1992）　道北地方における降雪の化学性と小河川の水質（Ⅰ），—冬期渇水期の小河川の水質—，第103回日本林学会発表論文集，601-602

9）TRANTER, M., DAVIS, T. D., ABRAHAMS, P. W., BLACKWOOD, I., BRIMBLECOMBE, P. and

VINCENT, C. E. (1987) Spatial variability in the chemical composition of snowcover in a small, remote Scottish catchment, Atmospheric Environment, **21**(4), 853-862

10) 藤原滉一郎, 笹　賀一郎, 佐藤冬樹（1994） 北海道大学天塩・中川地方演習林付近の積雪分布, 北大演研報, **51**(1), 74-88

11) 佐藤冬樹, 笹　賀一郎, 藤原滉一郎（1996） 北海道北部低地の新雪に含まれる化学成分の地域変動, —選択溶出と NH_4^+ 沈着の影響—, 北大演研報 **53**, （投稿中）

12) 佐久間敏雄（1994） 森林生態系における物質循環と土壌—植生系の役割, 日林北支論 **42**, 1-11

13) 仙石鐵也, 原　光好, 森澤　猛, 石塚和裕（1994） 亜高山帯針葉樹林における酸性雨の観測と実態, 森林立地 **36**(2), 64-72

14) THOMAS, J. S. and DAVID, J. P. (1987) Variation of wet deposition chemistry in Sequoia National Park, California, Atmospheric Environment, **21**(6), 1369-1374

15) 鶴田治雄（1994） 酸性雨 3　酸性雨はどのようにして生じるのか, 土肥誌 **65**(1), 81-91

16) 佐藤冬樹, 笹　賀一郎, 藤原滉一郎（1994） 天塩地方演習林露場における降雪の化学組成, 平成 4 ～ 5 年度文部省科学研究費補助金（一般B　寒冷地の森林地帯における流量と水質変動）研究成果報告書, 17-32

17) 鈴木啓助（1984） 札幌における積雪中の化学物質濃度の空間分布, 地理学評論 **57-A**(5), 349-361

18) ALLAN, R. J. and JOHNSON, I. R. (1978) Alkaline snowfalls in Ottawa and Winnipeg, Canada, Atmospheric Environment, **12**, 1169-1173

19) JOHANNESSEN, M. and HENRIKSEN, A. (1978) Chemistry of snow meltwater: Changes in concentration during melting, Water Resour. Res., **14**(4), 615-619

20) WILLIAMS, W. M. and MELACK J. M. (1991) Solute chemistry of snowmelt and runoff in an alpine basin, Sierra Nevada, Water Resour. Res., **27**(7), 1575-1588

21) 佐久間敏雄, 冨田充子, 柴田英昭, 田中夕美子（1994） 酸性沈着の影響下にある広葉樹林, 針葉樹林生態系における硫黄の分布と循環 I：乾物現存量と硫黄の分布, 土肥誌 **65**(6), 677-683

22) 佐久間敏雄, 冨田充子, 柴田英昭, 田中夕美子（1994） 酸性沈着の影響下にある広葉樹林, 針葉樹林生態系における硫黄の分布と循環 II：沈着・排出および系内の循環, 土肥誌 **65**(6), 684-691

Summary

The purpose of this study was to clarify mineral cycling of the mountain watershed in cold and snowy region. A snow survey was undertaken in the watersheds of Nakanomine and Panke area, both located, respectively, in Tesio and Nakagawa Experimental forest, Hokkaido University. Na^+ and Cl^- were dominant ionic species in all the snowpack investigated, which indicated the strong influence of sea salts over the mountain watersheds. In addition, the presence of NH_4^+ and NO_3^- in the snowpack of Mt. Panke (631 m) suggested the migration of evacuation of dairy farming managed in lowland area to the high elevation area (above 500 m) of the watersheds.

The presence of forests strongly affected the concentration of the chemical components in the new snow and the snowpack of the watersheds. The ionic concentration of the snow samples collected in the forest area of the watershed was higher than that on the non-forest area. This result indicates that trees adsorbed the dry deposits such as sea salts and resulted in the increase of the ionic concentration of the snowpack.

The snowpack of the watersheds was very acidic, so that "acid shock" was considered to occur during spring snowmelt period. In the forest area of the watersheds, however, the amount of H^+ showed remarkable decrease compared with non-forest area. It seems that the forest of this watersheds partly neutralize the acidity of the snowpack by adsorbing sea salts and alkaline dry deposits such as NH_4^+.