論文

微生物活動による積雪中の化学物質濃度変化と緑藻の培養実験

鈴木啓助¹⁾, 渡辺泰徳²⁾

要 旨

林冠環境の異なる3地点(コナラ林, アカマツ林, 林外)において, 積雪中の化学的特性および生物量の変化を調べた。積雪中の主要陰イオン濃度および粒子状有機炭素・有機窒素濃度は, アカマツ林内でコナラ林内, 林外よりも高くなっている。各地点とも積雪中の主要陰イオン濃度および電導度は, 積雪期間中次第に低下する。しかしながら, 積雪中の PO_4^{3-} 濃度および粒子状有機炭素・有機窒素濃度は, いずれの地点でも融雪期に増加する。また, 積雪中のpHおよび酸素同位体比は融雪によって増加する。積雪中のクロロフィルaとフェオフィチンaの濃度は, アカマツ林内においてコナラ林, 林外よりも高い。また, アカマツ林内のクロロフィルa濃度は融雪期に増加し, 雪氷藻類の活動が融雪期に活発になることを示している。積雪融解試料に緑藻と栄養塩類を添加した培養実験の結果, いずれの地点の試料でも NO_3^- , SO_4^{2-} と PO_4^{3-} 濃度は減少し, 藻類によって消費されている。アカマツ林内の試料による培養実験では, 他の地点の試料に比べてクロロフィルa濃度の増加が大きくなる。また, 本実験の結果によると, 窒素が藻類成長量の制限要因になっている可能性がある。

キーワード: 温暖積雪地域, 融雪, 雪氷藻類, クロロフィル, 培養実験

Key words: snowy temperate area, snowmelt, snow algae, chlorophyl, incubation experiment

1. はじめに

降雪-積雪-融雪-河川(湖沼)にいたる過程での化学物質の動態は, 積雪地域での物質循環や陸水生態系に大きな影響を及ぼす。積雪粒子の変態過程で化学物質が粒子表面に析出し, それを融雪水が選択的に運搬することにより, 融雪初期の融雪水中には積雪よりも高濃度の化学物質が含まれることになる(Johannessen and Henriksen, 1978; Suzuki, 1982)。積雪-融雪過程での化学物質の高濃度化の度合いは, 物質によって異なる。Tranter *et al.* (1986)によるスコットランドにおける融雪水の調査結果では, NO_3^- と SO_4^{2-} が Cl^- に先がけて流去する事が示され, 鈴木・遠藤(1991)による新潟県・十日町市における調査では, 融雪水中の NO_3^- 濃度が積雪中の濃度の7倍以上も高濃度になることが報告された。さらに,

融雪水中の Cl^- と SO_4^{2-} は積雪中の濃度の3倍程度であることも示された。また, 北海道・母子里での, 融雪水量が明瞭な日変化を示す時期の観測によれば, 夜間に積雪表面で再凍結が起きると, 日中の融雪水量の増加とともに, H^+ 濃度が増加(pHが低下)することが明らかになった(鈴木, 1991)。

以上のことをまとめると, 積雪-融雪過程での融雪水の酸性化は NO_3^- の動態に大きく影響を受けていると考えることができる。しかしながら, 融雪時には, 積雪中から NO_3^- などの一部が消失することも報告されている(Hoham *et al.*, 1989; Jones, 1991; Suzuki *et al.*, 1994)。特に針葉樹林内の積雪において顕著であり, 林内降水中においても, 1日以内に NH_4^+ と NO_3^- の一部が消失すると報告されている(Suzuki *et al.*, 1994)。これらの研究では, Nを含むイオンのみが消失することから, 微生物による消費の可能性が指摘され, 独立栄養生物である藻類の働きが, 雪氷中での窒素化合物の動態に関与していることが考えられる。そ

1) 信州大学理学部

〒390-8621 松本市旭 3-1-1

2) 東京都立大学大学院理学研究科

〒192-0397 八王子市南大沢 1-1

こで、鈴木・渡辺(1996)は、積雪融解試料による培養実験を行い、針葉樹林内の試料でのみ NO_3^- 濃度が減少することを確認した。また、針葉樹林内の試料による緑藻の添加実験で、2週間でクロロフィルaとして $14.7 \mu\text{g/l}$ の緑藻が増加し、Nとして $220 \mu\text{g/l}$ が消費されることを明らかにした。その際に、広葉樹林内の積雪融解試料中にも NO_3^- が含まれているにもかかわらず、緑藻の増加量が抑制されるのは、Pが制限要因になっている可能性が指摘された。

そこで、本研究では積雪融解試料に緑藻を添加するとともに、NとPについても添加実験を行い、緑藻の繁殖に及ぼすNおよびPの役割を検討する。

2. 研究方法

積雪試料の採取および積雪・融雪に関する野外調査は、福島県南会津郡田島町において行った。当地域の植生は、コナラ・ミズナラを主とする落葉広葉樹二次林が優占し、一部にアカマツ林が分布する。調査期間は、1995年12月から1996年4月にかけての冬季間である。

気象観測露場は、標高754 mの尾根部に設置した。露場において、気温を通風型の白金抵抗測温体で、積雪深を雪面反射光式積雪深計(KADEC-S6)で、降水量を転倒マス式雨雪量計で自動計測した。また、融雪水量を、 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ の積雪ライシメータと転倒マス式流量計によって自動計測した。

コナラ林内とアカマツ林内および林外において、積雪全層をAdirondack式採雪器で採取した。コナラは冬季に落葉するが、アカマツは冬季も落葉しないため、林冠環境が両林内で大きく異なる。両林内においては積雪の空間変動を考慮し、5点で積雪全層を採取した。林内の積雪深はこれら5点の平均値を用い、積雪試料はすべてを混合して林内の試料とした。林外の積雪は、鈴木(1993)と同様にテニスコート上で採取した。テニスコート面はほぼ水平のため、林外積雪は原則として1点で採取した。積雪試料は、融解後ガラス繊維濾紙(Whatman: GF/F)で濾過し、濾紙上の粒状物質について有機炭素、有機窒素および植物色素の分析を行った。有機炭素と有機窒素はCHNコ

ーダー(Yanaco, MT-5)で定量した。植物色素は、メタノール抽出後、蛍光法によりクロロフィルaとフェオフィチンaを測定した。積雪融解試料の一部はグルタルアルデヒドで固定し、DAPI染色した後、蛍光顕微鏡を用いて生物観察とバクテリアの計数を行った。さらに、積雪融解試料の濾液中の主要化学物質濃度はイオンクロマトグラフ(DIONEX: DX-500)で、 PO_4^{3-} 濃度はモリブデン青法で測定した。酸素同位体比は質量分析計(Finnigan MAT: delta S)によって測定した。

さらに、積雪融解試料での藻類およびNとPの添加実験を行った。実験に用いた積雪試料は1996年4月5日に採取した。コナラ林内、アカマツ林内および林外で採取した積雪の融解試料各100 mlに、諏訪湖の湖水から単離培養した緑藻(*Scenedesmus acuminatus*)を添加し、NとPはそれぞれ NO_3^- -Nとして 5 mgN/l 、 PO_4^{3-} -Pとして 1 mgP/l となるように添加した。緑藻の量としては、あらかじめ無機培養液(培地は改変デトマー培地)で培養した*S. acuminatus*を蒸留水で2回遠心洗浄し、各試料につき約2000細胞を添加した。この初期添加量は、培養後の藻類成長量に対し無視できる量である。これらの試料を入れた三角フラスコはインキュベータ内で、温度 5°C および照度 5000 lx に保ち培養した。暗所での培養実験の結果(鈴木・渡辺, 1996)では、主要陰イオン濃度に全く変化が認められなかったため、今回は暗所についての実験は実施しなかった。

3. 結果および考察

3.1 調査期間の気象条件

1995～96年冬季の調査地における降水量、気温、積雪深、融雪水量の変化を図1に示す。降水量は、気温 3°C を閾値として、降雨と降雪に分別して図示する。気温は日最高気温と日最低気温を、積雪深は毎日9時の値を図示する。また、融雪水量は1日当たりの流出高として示す。

1995～96年冬季は11月9日に最初の積雪30 cmを記録した後、12月初めまでは積雪－融解を繰り返したが、12月7日に16 cmを記録し積雪継続期間に入った。12月中旬までは、気温の上昇や降雨のために融雪が起こっている。しかし、1月に入ってから降雨もほとんどなく、順調に

図1 調査地における日降水量、日最高・最低気温、積雪深、積雪下面融雪水量の変化。

Fig. 1 Variations of daily precipitation, air temperature, snow depth and snowmelt runoff during the winter season in 1995-1996.

積雪深が増加し、2月3日に1995～96年冬季の最深積雪深157 cmを記録した。研究対象地域は温暖積雪地であり、冬季間にも気温の上昇や降雨により融雪が頻繁におこる(鈴木, 1995)。1996年も1月15日、2月14日前後には、降雨および気温の上昇により積雪下面に達する融雪が起こった。その後、3月中旬までは安定した降雪があり、積雪深も継続して1 mを越えていた。3月15日頃からは気温の上昇と降雨が頻発し、融雪が活発になり、30日に1995～96年冬季の最大日融雪水量40.0 mm/dayを記録した。4月初頭には一時的な低温と降雪により融雪量が減少したが、再び気温の上昇により順調に融雪が進行し、4月10日に積雪が消失した。

3.2 積雪中における電導度、pHおよび酸素同位体比の変化

コナラ林内とアカマツ林内および林外において

図2 林外 (open), コナラ林内 (deciduous) およびアカマツ林内 (coniferous) における積雪深と積雪中の電導度 (E.C.), pHおよび酸素同位体比の変化。

Fig. 2 Variations of the snow depth and electric conductivity, pH and oxygen-isotopic composition of the total snow pack at the open site, the deciduous forest site and the coniferous forest site.

採取した、積雪全層中の電導度、pHおよび酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) の変化を、採取時の積雪深の変化とともに図2に示す。

コナラは落葉しているため、林外とコナラ林内の積雪深は観測期間を通してほぼ同じ値で推移する。それに対して、落葉しないアカマツ林内では常に林外およびコナラ林内よりも積雪深が小さくなっている。アカマツ林では、降雪時の樹冠遮断量が大きくなっていること示す。

積雪全層中の電導度はアカマツ林内>コナラ林内>林外の順で高い値を示すが、すべての地点で積雪期間を通して減少傾向にある。これは、積雪中の化学物質が融雪により選択的に流下するために (Suzuki, 1982), 積雪全層の電導度が減少するものと考えられる。特に温暖積雪地域では冬季間にも融雪が起こるために、湿性および乾性降下物

として積雪に供給された化学物質が蓄積されにくい(鈴木・遠藤, 1991). 会津田島においても, 図1に示したように冬季間に融雪が起こっており, そのために積雪全層の電導度が減少する. H^+ イオン濃度も減少するため, 積雪全層中のpHは積雪期間を通して増加傾向にある.

積雪全層中の $\delta^{18}O$ はどの地点においても融雪の進行とともに増大している. 水の相変化により同位体組成は変化する(O'Neil, 1968)が, 融雪現象を考えれば, 雪粒子が融解し液相の水になる際に, 液相の方が $\delta^{18}O$ がより小さくなる. そのため, 積雪の $\delta^{18}O$ は次第に大きくなり, 結果として融雪水の $\delta^{18}O$ も融雪の進行に従い大きくなる. 融雪期における積雪と融雪水中の $\delta^{18}O$ が, 次第に大きくなる現象はStüchler *et al.* (1986)および鈴木(1993)によっても報告されている.

3.3 積雪中における化学物質濃度の変化

コナラ林内とアカマツ林内および林外において採取した, 積雪全層中の陰イオン濃度および粒子状の有機炭素(POC), 有機窒素(PON)の濃度変化を図3に示す. Cl^- , SO_4^{2-} 濃度は地点による差異があまりなく, 積雪期間を通して減少傾向にある. これは, 前述した電導度の変化と同様な機構による. NO_3^- 濃度は林外およびコナラ林内では積雪期間を通して減少傾向にあるが, アカマツ林内では1月8日と3月4日に大きな値を示す. アカマツ林は冬季間も枝葉面積が大きく, 積雪中への化学物質の集積を大きくしている. つまり, 降雪が枝葉に一時貯留される際に, 蒸発の効果で化学物質が濃縮されたり, 乾性沈着による化学物質の捕集を枝葉がより効率的に行い, 降水時にはそれらを取り込みながら落下するために, アカマツ林内の積雪中で NO_3^- 濃度が高くなることが多いと考えられる.

積雪中の PO_4^{3-} 濃度は主要陰イオン濃度とは異なる変動を示す. 林外の積雪中では積雪期間を通して PO_4^{3-} 濃度が検出限界以下である. コナラ林内およびアカマツ林内においても3月19日まで PO_4^{3-} 濃度が検出限界以下である. 3月26日から両林内の積雪中から PO_4^{3-} 濃度が検出されるようになる. 特に, アカマツ林内においては4月5日に $29.7 \mu g/l$ の PO_4^{3-} 濃度を示す. 積雪中における PO_4^{3-} の供給源として, 有機物の微生物分解

図3 林外, コナラ林内およびアカマツ林内における陰イオン濃度と粒子状有機炭素・窒素濃度の変化.

Fig. 3 Variations of concentrations of anions, particulate organic carbon and particulate organic nitrogen of the total snow pack at the open site, the deciduous forest site and the coniferous forest site.

による生成の可能性が指摘されている(Jones and Sochanska, 1985)が, 本研究においても, アカマツ林内やコナラ林内で PO_4^{3-} 濃度が高いことから, 積雪中に検出される PO_4^{3-} は有機物の分解による二次生成物であると考えられる.

POCおよびPONの濃度変化は, PO_4^{3-} 濃度の変化と同様な傾向を示す. 林外積雪中のPOCとPONは積雪期間を通して低濃度であるが, 融雪末期にはわずかに濃度が増加する. 積雪期間中のコナラ林内では, POC, PONともに林外同様に低濃度であるが, 積雪初期と融雪期には林外よりも高濃度になる. アカマツ林内では積雪中のPOCおよびPON濃度が他の地点よりも大きく, 融雪期には時間とともに増加する. このことから,

アカマツ林内では融雪期に樹冠・樹幹からの有機物の供給が活発であることがわかる。

3.4 積雪中における生物量の変化

積雪中における生物量の指標として、クロロフィルaとフェオフィチンa濃度およびバクテリア数を測定した。それぞれの、林外、コナラ林内、アカマツ林内の積雪中における変化を積雪水量の変化とともに図4に示す。積雪中のクロロフィルaは光合成を行う藻類あるいは植物の生物量に対応し、フェオフィチンaはそれらの藻類が活性を失った量および落葉中のクロロフィル分解産物量を示すと考えられる。

融雪期に入るまで林外とコナラ林内では積雪水量がほぼ同じ値で変動する。アカマツ林内の積雪水量は、林外・コナラ林に比べて4～6割しか観測されず、降雪時の樹冠遮断量の大きさがわかる。融雪期に入ると、林外の方がアカマツ林、コナラ林よりも積雪水量の低下速度が大きいのは、積雪表面に達する日射量および積雪上での風速の差異によって、融雪がより進行するためであると考えられる。しかしながら、図2に示した融雪期の積雪深は、林外とアカマツ林内で大きな差異が認められない。このような積雪深と積雪水量の変化傾向の違いが、何に起因するのは今後の検討課題である。

積雪中のクロロフィルa濃度は、アカマツ林内でコナラ林内や林外よりも高い。林外の積雪中のクロロフィルa濃度は、対象期間を通してきわめて低い値を示し、林外の積雪中では、融雪最盛期にも藻類の活動の痕跡を確認することができない。コナラ林内の積雪中のクロロフィルa濃度も、3月末までは林外同様低い値を示すが、融雪期には増加する。アカマツ林内の積雪中では、クロロフィルa濃度が他の地点よりも対象期間を通して高く、2月19日には一時的に $0.85\mu\text{g/l}$ まで増加する。これは前述のように2月13～15日に気温の上昇によって一時的な融雪が起こったことに対応する。アカマツ林内では一時的な融雪によっても藻類の活動が活発になることが確認された。アカマツ林内のクロロフィルa濃度は融雪期には $1.38\mu\text{g/l}$ まで増加し、藻類が活発に繁殖していることがわかる。

積雪中のフェオフィチンa濃度は、林外および

図4 林外、コナラ林内およびアカマツ林内における積雪水量 (HSW) と積雪中のクロロフィル a、フェオフィチン a 濃度およびバクテリア数の変化。

Fig. 4 Variations of the water equivalent of snow (HSW), concentrations of chlorophyll-a and phaeophytin-a and the amount of bacteria in total snow pack at the open site, the deciduous forest site and the coniferous forest site.

コナラ林内では対象期間を通して低い値を示す。アカマツ林内の積雪中のフェオフィチンa濃度は、3月中旬まで $4\mu\text{g/l}$ 以下で推移するが、融雪最盛期には $8.73\mu\text{g/l}$ まで増大する。フェオフィチンaはクロロフィルの分解産物の指標と考えられ、クロロフィルa濃度とフェオフィチンa濃度の比は、活性のある藻類で高く、分解途上のもので低くなる。湖沼のプランクトンなどでは、この比が通常1～10の範囲のことが多い。しかしながら、本研究ではアカマツ林内においても比が0.3以下であり、一般の陸水に比べると藻類の活性が低いことがわかる。また、積雪中への樹皮などの混入が、この比を低くしている可能性もある(鈴木・渡辺, 1996)。

積雪中のバクテリア数は、一部の試料について

は測定することができず、図4に示す試料についてのみ測定した。前年の調査では、積雪中のバクテリア数は、アカマツ林内>コナラ林内>林外の順であり、どの地点でも積雪初期から融雪期にかけて時間の経過とともに増加する傾向にあった(鈴木・渡辺, 1996)が、今冬季の変動は複雑である。林外では基本的にバクテリア数が少ないが、2月19日には一時的に増加している。これは一時的な融雪に対応するが、林外の積雪中のクロロフィルa量は特に増加しているわけではなく、両者の関係は現段階では不明である。コナラ林内のバクテリア数は融雪末期まで時間とともに減少するが、融雪末期にはクロロフィルa量の増加と同期してバクテリア数も増加している。アカマツ林内のバクテリア数は積雪初期と融雪期に大きくなっている。特に、融雪期のバクテリア数の増加はクロロフィルa量の増加と同期している。

顕微鏡による定性的な観察では、前報(鈴木・渡辺, 1996)と同様に、アカマツ林内の積雪中に各種の微生物の存在が確認される。主なものとしては、従属栄養生物である菌(カビ)類と細菌類、独立栄養生物であるシアノバクテリア(らん藻)と珪藻・緑藻である。積雪初期には珪藻類が比較的多いが、融雪期には緑藻とらん藻の比率がやや高くなる傾向が見られる。

3.5 積雪融解試料の培養実験

培養実験に用いた積雪試料は、融雪末期の4月5日に採取した。それぞれの地点における積雪試料の初期条件として、濾液中の陰イオン濃度、試料中に粒状で含有する有機炭素、有機窒素、クロロフィルa、フェオフィチンaの各濃度およびバクテリア数を表1に示す。ここに示した項目で SO_4^{2-} 濃度を除く他の項目は、アカマツ林内>コナラ林内>林外の順になっている。主要陰イオン濃度では、林外と林内との差が2倍以下であるが、

PO_4^{3-} 濃度ではアカマツ林内の高濃度が顕著である。さらに、有機炭素、有機窒素の濃度は、陰イオン濃度に比べて林外とアカマツ林内の差が大きく、それぞれ4.3, 5.6倍となっている。一方、藻類の活動に関連するクロロフィルa濃度は、林外に比べてコナラ林内で10.8倍、アカマツ林内では23倍にも達している。化学物質濃度の林外との差異にも増して、藻類の繁殖は、林内で林外よりも格段に活発であることを示している。

積雪融解試料による培養実験は、緑藻のみを添加した場合、緑藻と NO_3^- -Nとして5 mgN/lとなるようにNを添加した場合、緑藻と PO_4^{3-} -Pとして1 mgP/lとなるようにPを添加した場合、緑藻と5 mgN/l, 1 mgP/lとなるようにNおよびPを添加した場合、何も添加しない場合の5例について行った。さらに、この実験は溶存化学物質濃度測定用(28日間)とクロロフィルa測定用(29日間)で別個に行った。

積雪融解試料による培養実験のうち溶存化学物質濃度についての結果を図5に示す。いずれの地点の試料においても、 Cl^- 濃度はどの場合の添加実験でもほとんど変化しない。 SO_4^{2-} 濃度は緑藻とPの添加の場合は、いずれの地点の試料でも変化しないが、緑藻とNの添加実験では次第に減少し、アカマツ林内の試料については21日目と28日目の間で消失している。緑藻とN, Pを添加した場合は SO_4^{2-} 濃度の減少速度が大きく、林外とコナラ林内の試料では、14日目と21日目の間で消失している。Hoham *et al.* (1989)によっても、藻類の繁殖する積雪中で SO_4^{2-} 濃度の減少が観測されており、藻類の同化作用による SO_4^{2-} の消費が考えられる。

緑藻とNの添加による培養実験では、林外とコナラ林内の試料での NO_3^- 濃度はほとんど変化

表1 培養実験に用いた積雪融解試料の初期条件。

Table 1 Initial conditions of snow meltwater in the incubation experiment.

site	Cl^- (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)	PO_4^{3-} ($\mu\text{g/l}$)	POC (mg/l)	PON (mg/l)	Chl-a ($\mu\text{g/l}$)	Phaeo-a ($\mu\text{g/l}$)	Bacteria (10^5 cell/ml)
open	1.06	0.09	0.28	0.0	2.05	0.07	0.06	1.34	0.48
deciduous	1.40	0.13	0.50	5.5	3.61	0.21	0.65	1.65	3.00
coniferous	1.46	0.16	0.42	29.7	8.88	0.39	1.38	8.49	7.50

図5 培養実験による積雪融解試料中の陰イオン濃度の変化. 図中のSは緑藻, Nは NO_3^- -N, Pは PO_4^{3-} -Pを示す.

Fig. 5 Concentration changes of anionic species in the snow meltwater in the incubation experiment. S: *Scenedesmus acuminatus*, N: NO_3^- -N, P: PO_4^{3-} -P.

しないが, アカマツ林内の試料では28日間で約5割まで減少することが認められる. さらにPを添加した場合には, いずれの地点の試料でも NO_3^- 濃度が減少する. とくに, アカマツ林内の試料では, 14日目と21日目の間で NO_3^- が消失している.

また, 緑藻とPの添加による培養実験では, いずれの地点の試料でも PO_4^{3-} 濃度の減少量が少なく, アカマツ林内の試料でも28日間で2割減少するにすぎない. さらにNを添加した場合には, いずれの地点の試料でも PO_4^{3-} 濃度が減少する. とくに, アカマツ林内の試料では, 21日目と28日目の間で PO_4^{3-} が消失している.

緑藻とN, および緑藻とPのそれぞれの添加実験の差異として, アカマツ林内の試料に緑藻とNを添加した場合の28日間での NO_3^- 濃度の減少の割合(52%)が, 緑藻とPを添加した場合の PO_4^{3-} 濃度の減少の割合(22%)よりも大きいこ

図6 培養実験による積雪融解試料中のクロロフィルa濃度の変化. 図中のSは緑藻, Nは NO_3^- , Pは PO_4^{3-} を示す.

Fig. 6 Concentration changes of chlorophyll-a in the snow meltwater by the incubation experiment. S: *Scenedesmus acuminatus*, N: NO_3^- , P: PO_4^{3-} .

とから, 研究対象の積雪試料ではNが制限要因になっている可能性がある.

積雪融解試料による培養実験のうちクロロフィルa濃度についての結果を図6に示す. 地点ごとに図示したが, クロロフィルa濃度のスケールは同一である. いずれの地点の試料でも, 何も添加しない場合, 緑藻のみを添加した場合, 緑藻とPを添加した場合ではクロロフィルa濃度に大きな変化が見られない. 緑藻とNを添加した場合には, いずれの地点の試料でも7日目までにクロロフィルa濃度が増加する. しかし, その後の増加量はそれほど大きくはない. 緑藻とPにNも添加した場合には, いずれの地点の試料でも17日目まではクロロフィルa濃度が急激に増加する. しかし, 17日目以降29日目まではクロロフィル

a濃度が逆に減少する。17日目までに急激に緑藻が繁殖した結果、 SO_4^{2-} が消失したり NO_3^- 、 PO_4^{3-} ともに濃度が減少し、それ以降の繁殖が制限された結果である。緑藻とN、および緑藻とPのそれぞれの添加実験の差異として、いずれの地点の試料でもPを添加した場合には、クロロフィルa濃度はほとんど変化しないが、Nを添加した場合にはクロロフィルa濃度は増加し緑藻の繁殖が活発になる。このことから、研究対象の積雪試料ではNが制限要因になっている可能性がある。

現場の積雪では考えられない高濃度のNとPを添加したにもかかわらず、クロロフィルa濃度の増加量がアカマツ林>コナラ林>林外の順に大きくなることから、初期条件としての積雪に栄養塩の条件以外にも何らかの要因が隠されているといえる。

4. まとめ

温暖積雪地域の、林冠環境の異なる3地点（林外、コナラ林、アカマツ林）において、積雪中の化学的特性および生物量の変化を調べた。さらに、積雪融解試料を用いて、緑藻およびN、Pを添加した培養実験を行った。

積雪全層中の電導度は、すべての地点で積雪期間を通して減少傾向にある。これは、積雪中の化学物質が融雪により選択的に流下するためである。本調査地域のような温暖積雪地域では冬季間にも融雪が起っており、そのために積雪全層の電導度が減少する。 H^+ イオン濃度の減少によって、積雪全層中のpHは増加傾向を示す。積雪全層中の $\delta^{18}\text{O}$ はどの地点においても融雪の進行とともに増大する。

積雪全層中の Cl^- 、 SO_4^{2-} 濃度は地点による差異があまりなく、積雪期間を通して減少するが、 NO_3^- 濃度は林外およびコナラ林内では積雪期間を通して減少傾向にあり、アカマツ林内では一時的に大きな値を示すことがある。アカマツ林は冬季間も枝葉面積が大きいので、樹冠の効果によりアカマツ林内の積雪中で NO_3^- 濃度が一時的に高くなることがあると考えられる。積雪中の PO_4^{3-} 濃度は主要陰イオン濃度とは異なる変動を示す。いずれの地点でも3月19日までは PO_4^{3-} 濃度が

検出限界以下であるが、3月26日からは林内の積雪中から PO_4^{3-} 濃度が検出されるようになる。積雪中における PO_4^{3-} の供給源は、有機物の微生物分解による二次生成物であると考えられる。

アカマツ林内では積雪中のPOCおよびPON濃度が他の地点よりも大きく、融雪期には時間とともに増加し、アカマツ林内では融雪期に樹冠・樹幹からの有機物の供給が活発であることを示している。

アカマツ林内での積雪中のクロロフィルa濃度は、コナラ林内や林外よりも高く、一時的な融雪によってもアカマツ林内では藻類の活動が活発になることを示している。クロロフィルa濃度とフェオフィチンa濃度の比から、アカマツ林内においても一般の陸水に比べると藻類の活性は低いことが示唆された。融雪期のバクテリア数の増加はクロロフィルa量の増加と同期する。

積雪融解試料による培養実験では、 Cl^- 濃度はどの場合にも変化しない。 SO_4^{2-} 濃度は緑藻とN、Pを添加した場合には減少速度が大きい。緑藻とNを添加した場合には、アカマツ林内の試料の NO_3^- 濃度が28日間で約5割まで減少する。さらにPを添加した場合には、アカマツ林内の試料では14日目と21日目の間で NO_3^- が消失する。また、緑藻とPの添加による培養実験では、アカマツ林内の試料でも PO_4^{3-} 濃度が28日間で2割減少するにすぎない。さらにNを添加した場合には、アカマツ林内の試料では21日目と28日目の間で PO_4^{3-} が消失する。

緑藻とNを添加した場合には、いずれの地点の試料でも7日目までにクロロフィルa濃度が増加するが、その後の増加量はそれほど大きくはない。緑藻とNにPも添加した場合には、いずれの地点の試料でも17日目まではクロロフィルa濃度が急激に増加する。しかし、17日目以降29日目まではクロロフィルa濃度が逆に減少する。緑藻とPを添加した場合には緑藻の繁殖があまり活発にならないことから、研究対象の積雪試料ではNが制限要因になっている可能性がある。

現場の積雪では考えられないほど高濃度のNとPを添加したにもかかわらず、クロロフィルa濃度の増加量がアカマツ林>コナラ林>林外の順に大きくなることから、初期条件としての積雪に

栄養塩の条件以外にも何らかの要因が隠されているといえる。その要因について詳細に検討することが今後必要である。

雪氷上での藻類の増殖は、アルベドを低下させ、雪氷の融解に正のフィードバックをもたらすことが考えられ、地球温暖化に関連しても今後さらに研究を進展させるべき課題のひとつである。

謝 辞

国立極地研究所の東久美子氏および2名の匿名査読者には有益な助言をいただいた。ここに謝意を表します。

本研究の一部には、文部省科学研究費（課題番号：08874049，研究代表者：鈴木啓助）の一部を使用した。

文 献

- Hoham, R. W., Yatsko, C., Germain, L. and Jones, H. G., 1989: Recent discoveries of snow algae in Upstate New York and Quebec Province and preliminary reports on related snow chemistry. *Proceedings of the 46th Annual Eastern Snow Conference*, 196-200.
- Johannessen, M. and Henriksen, A., 1978: Chemistry of snow meltwater: changes in concentration during melting. *Wat. Resour. Res.*, **14**, 615-619.
- Jones, H. G. and Sochanska, W., 1985: The chemical characteristics of snow cover in a northern boreal forest during the spring runoff period. *Ann. Glaciol.*, **7**, 167-174.
- Jones, H. G., 1991: Snow chemistry and biological activity: a particular perspective on nutrient cycling. *Seasonal Snowpacks*, eds. Davies, T. D., Tranter, M. and Jones, H. G., Berlin, Springer-Verlag, 173-228.
- O'Neil, J. R., 1968: Hydrogen and oxygen isotope fractionation between ice and water. *Journal of Physical Chemistry*, **72**, 3683-3684.
- Stichler, W., Herrmann, A. and Rau, R. G., 1986: Modeling snowmelt runoff using environmental isotope and conventional methods. *Modelling Snowmelt-Induced Processes*, ed. Morris E. M., IAHS Publication No. 155, 231-244.
- Suzuki, K., 1982: Chemical changes of snow cover by melting. *Jap. J. Limnol.*, **43**, 102-112.
- 鈴木啓助, 1991: 融雪水中の溶存成分濃度の日変化. *雪氷*, **53**, 21-31.
- 鈴木啓助・遠藤八十一, 1991: 十日町市における酸性の融雪水. *森林立地*, **33**, 71-75.
- 鈴木啓助, 1993: 融雪水の酸素同位体組成変化と積雪の層構造. *雪氷*, **55**, 335-342.
- Suzuki, K., Ishii, Y., Kodama, Y., Kobayashi, D. and Jones, H. G., 1994: Chemical dynamics in a boreal forest snowpack during the snowmelt season. *Snow and Ice covers*, eds. Jones, H. G., Davies, T. D., Ohmura, A. and Morris, E. M., IAHS Publication No. 223, 313-322.
- 鈴木啓助, 1995: 温暖積雪地における渓流水質変動. *地学雑誌*, **105**, 1-14.
- 鈴木啓助・渡辺泰徳, 1996: 生物活動による積雪中の窒素化合物の消費. *雪氷*, **58**, 295-301.
- Tranter, M., Brimblecombe, P., Davies, T. D., Vincent, C. E., Abrahams, P. W. and Blackwood, I., 1986: The composition of snowfall, snowpack and meltwater in the Scottish highlands - evidence for preferential elution. *Atmos. Environ.*, **20**, 517-525.

**Chemical changes of snowpack by microbiological activity
and incubation experiment of *Scenedesmus acuminatus***

Keisuke SUZUKI¹⁾ and Yasunori WATANABE²⁾

1) Faculty of Science, Shinshu University

Asahi 3-1-1, Matsumoto 390-8621

2) Graduate School of Science, Tokyo Metropolitan University

Minami-Ohsawa 1-1, Hachioji 192-0397

Abstract: Variations of chemical characteristics and biological activity in snowpacks were studied at an open site, a deciduous forest site and a coniferous forest site. Concentrations of major anions, particulate organic carbon and particulate organic nitrogen in the snowpack, were higher at the coniferous forest site than at either the open site or the deciduous forest site. Concentrations of major anions and electric conductivity gradually decreased during the study season. Concentrations of PO_4^{3-} , particulate organic carbon and particulate organic nitrogen in the snowpack increased while oxygen-isotopic composition and pH in the snowpack gradually increased as the snowmelt progressed. Concentrations of chlorophyll-a and phaeophytin-a in the snowpack were higher at the coniferous forest site than at either the open site or the deciduous forest site. Concentration of chlorophyll-a in the snowpack at coniferous forest site increased during the snowmelt season probably due to high activity of snow algae. Present incubation experiment on *Scenedesmus acuminatus* suggests that NO_3^- , SO_4^{2-} and PO_4^{3-} of the samples are consumed by *S. acuminatus*. Concentration of chlorophyll-a in the snowpack at coniferous forest site increase more than at both the open site and the deciduous forest site by the incubation experiment. Growth of *S. acuminatus* is considered to be restricted by the amount of nitrogen.

(1999年12月28日受付, 2000年2月8日改稿受付, 2000年3月8日受理, 討論期限2000年11月15日)