

論文

雪氷化学的手法による山岳地域の冬季降水量算定

鈴木啓助¹⁾²⁾, 池田 敦^{1)*}, 兼子祐人²⁾,
鈴木大地²⁾, 槇 拓登²⁾

要 旨

北アルプス西穂高岳付近の標高2352m地点で2010年1月11日に積雪試料を採取し、山岳地域における冬季降水量を雪氷化学的手法により推定した。降雪の化学特性のひとつめは、降雪中の Na^+ 濃度と対流混合層の高さとの間に良好な相関が認められることである。つまり、降雪中の海塩起源物質濃度は冬型の気圧配置時に高くなる。ふたつめは、降雪中の人為起源の酸性物質濃度は南岸低気圧や日本海低気圧による降水で高くなることである。さらに、降雪中の酸性物質の割合は低気圧性の総観場で高くなる。積雪深が399cmの積雪層から化学的に特徴的な9層が抽出された。そのうち、3層は冬型の気圧配置によってもたらされ堆積したと考えられ、他の6層は低気圧性の雪雲によってもたらされたと考えられる。それぞれの層が形成されたと考えられる日付が、気象条件を参照して同定された。次に、隣り合うふたつの層の間の8期間の積雪水量を算出し、気象庁による観測降水量と比較検討した。その結果、積雪水量は調査地域の北西の観測地点における期間降水量との相関が高く、南東の観測地点の期間降水量とは良好な相関が認められなかった。これらの関係は、調査地域における冬季の気象条件を考慮すれば妥当な結果である。

キーワード：海塩起源物質，人為起源物質，積雪水量

Key words: sea salt material, anthropogenic material, water equivalent of snow

1. はじめに

我が国の日本海側地域は世界でも極めて稀な多雪地帯として知られ、そこでは降雨にもまして降雪によってもたらされる多量の降水が水資源として極めて重要になる。シベリア大陸には、冬季の強い放射冷却によって背の低い熱の高気圧が形成される。南側に聳えるチベット・ヒマラヤ山塊に阻まれるために南下できずに、太陽高度の低い冬期間にその勢力は次第に強化される。そのシベリア高気圧から東側に吹き出す寒冷で乾燥した気塊は、暖流である対馬海流が北上する日本海に流れ込むと、下層から熱と水蒸気の供給を受けて不安

定となり、次々と積雲対流を生み、それが次第に成長してわが国の日本海側地域に上陸する。この積雲内では、豊富な水蒸気と寒冷な温度によって降雪粒子の形成が盛んである。さらに、脊梁山脈にぶつかり強制上昇させられることにより多量の降雪をもたらすことになる。そのため、わが国の脊梁山脈には、世界的にも稀なほどの大量の雪が堆積し、春になるとともにそれが融け、貴重な水資源となっている。雪は冬期間流域内に堆積することにより天然の白いダムとしての役割を果たしている。山岳地域では低地よりも多くの降雪があることは定性的には推定されているが、定量的にはほとんど明らかになっていない。山岳地域では冬季の降水量計による計測はほとんど行われていないのである。降雨についても同様で、気象庁による降水量観測所が暖候期のみ山岳地域に開設されていたが、人員削減の影響もあり現在も観測が継続されているのは御嶽山（降水量のみの通年観

1) 信州大学山岳科学総合研究所

〒390-8621 長野県松本市旭 3-1-1

2) 信州大学理学部

〒390-8621 長野県松本市旭 3-1-1

* 現在：筑波大学生命環境科学研究科

〒305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1

測, 標高: 2195 m) のみである。気象庁による 2 番目の高標高の降水量観測地点は、野辺山の 1350 m である。しかしながら野辺山では、積雪深の観測が無く、積雪深も含めた有線ロボット気象計としては、日光の 1292 m が最高所である。次いで、菅平の 1253 m である。継続的に観測され公表されている気象庁の積雪深の記録は、高標高地点では全く存在せず、前述の日光、菅平と標高 1230 m の草津、1142 m の阿蘇山、1130 m の開田高原の 5 カ所のみが 1000 m 超の標高での積雪深の観測地点である。なお、(独)防災科学技術研究所雪氷防災研究センターでは、妙高笹ヶ峰 (1310 m) をはじめとする積雪地域での積雪深観測を実施している (山口・阿部, 2007)。これらを含めても、山岳地域における積雪深ないし降水量の観測は極めて少数の地点に限られている。山岳地域の降雪を含めた降水量を定量的に把握し水収支を明らかにすることは、水資源の観点からも重要であるにもかかわらず、このことは憂慮すべきことである。

我が国における降雪量が、地球温暖化とともに減少すると予測結果も報告されている (井上・横山, 1998; 井上ら, 2001; Inoue and Yokoyama, 2003)。しかしながら、これらは低地における観測データを用いて行った研究であり、標高の高い山岳域でも同様なことが言えるかどうかは疑問である。つまり、冬期間にも降雨が観測されたり、気温がプラスになり融雪が起こったりする温暖積雪地では、雪か雨かの気温の閾値前後の値を示すことが多いからである。このような地点では、わずかの気温の増減によって、雪が雨になったり雪が多くなったりもする。つまり温暖化すれば、降水量が同じでも、降雪粒子が落下の途中で融解し降雨となるため、降雪量は減少しそうである。しかしながら、今後 100 年間で数℃の気温上昇によっても、雪か雨かの気温の閾値前後の気温まで上昇しないと予測される標高の高い山岳域では降雪量が増加することも考えられる。井上・横山 (1998) では、北緯 41.5°以北の北海道においては、温暖化を仮定した 100 年後でも降雪量はほとんど変化がないと述べられている。しかし、予測結果の図からは、北海道の海岸沿いで降雪量が減少し、山岳域では逆に降雪量が増加していることが読み取れるのである。文部科学省ら (2009) においても、「降

雪量は北海道を除く地域で減少する。この理由は、東北以南では温暖化に伴って雪ではなく雨として降る場合が増える一方、北海道では温暖化しても雪が降るには十分に寒冷なため、温暖化による大気中の水蒸気量の増加により、降雪量が増加するものと考えられる。」と述べられているが、東北以南でも標高の高い地点では、「温暖化しても雪が降るには十分に寒冷なため」北海道と同様に降雪量は増加すると考えるのが妥当である。

気象庁の観測データを用いて近年の累積降雪深変動を検討した結果でも、北海道・寿都でのみ有意に増加傾向が認められ、累積降雪深が有意に減少している地点の多くは、冬季平均気温が 3℃以上である。これらの地域の冬季平均気温は雪/雨の判別気温に近く、僅かな気温変化によって降水が雪か雨かの形態変化をすると考えられ、近年の気温上昇によって累積降雪深が減少しているのである (石井・鈴木, 2011)。

近年の気温上昇によっても、雪/雨の判別気温よりは十分に低温である標高の高い山岳域では、継続的には積雪深が全く計測されておらず、降雪量についてはまったく不明である。これまでの積雪深観測の空白域である山地の積雪深観測が、(独)防災科学技術研究所雪氷防災研究センターによって実施されるようになった (Shimizu and Abe, 2001; Yamaguchi *et. al.*, 2007)。しかし、この観測も妙高笹ヶ峰の 1310 m が標高の最高地点である。我が国の水資源として、さらに天然の白いダムとしての遅延効果も併せ持つ降雪が、今後どのように変動するかを予測するためには、早急に標高の高い地点での降雪量 (冬季降水量) をきちんと観測するか、量的に算出する方法を構築する必要がある。

そこで、降雪の化学的性質が気象条件によって異なる (鈴木・遠藤, 1994a, 1994b; Suzuki and Endo, 1995, 2001 など) ことを利用して、積雪層ごとに降雪日を同定し、それに基づいて山岳地域における降雪量 (冬季降水量) を算出する方法を提案する。

降雪とともに沈着した化学物質は、融雪がなければ堆積した層に保存される (Suzuki, 1982) ということが、本手法の前提条件となる。降雪粒子に取り込まれる化学物質の起源は、大別すれば海塩起源、地殻起源、人為起源、生物活動起源などになる。わが国の中央に位置する中部山岳地域は、3000

m 級の山々が聳え立ち、日本海側から太平洋側まで連なる山塊である。そのため、冬型の気圧配置の際には、北アルプス（飛騨山脈）で多くの降雪があり、南岸低気圧による降雪では南アルプス（赤石山脈）でもまとまった積雪が得られる。また、冬季の北西季節風に乗って黄砂が運ばれてきたり（名古屋大学水圏科学研究所, 1991）、中国大陸から人為起源物質がもたらされる（大泉ら, 1991; 北村ら, 1993; 本山ら, 2000）。さらには、南岸低気圧によって、わが国の中部以西の都市域からの人為起源物質が運ばれてくることになる。標高が高く気温が低いことから、融雪が始まる前の山岳地域の積雪中には、これらの化学物質が長期間にわたり保存されている。つまり、積雪を掘削し、積雪層を詳細に調査すれば、初冬から掘削時までの湿性および乾性沈着物が時系列的に復元できることになる。これら積雪層の特徴的な層位に堆積時の日付を入れることができれば、上下のふたつの層位間の積雪水量は、その間の降水量に相当することになる。本稿では、雪氷化学的手法によって算出した冬季

降水量が、アメダス観測点での降水量といかなる関係になるのかを検討し、その妥当性も検証する。

なお、積雪層の形成時期を推定する試みは、積雪の酸素同位体を用いた Watanabe *et al.* (1986) や遠山ら (2005) の研究、化学成分濃度を用いた木戸ら (1997) などにおいてもなされている。

2. 研究方法

2.1 積雪層の採取と分析

ここで提案する方法は、降雪後に融けずに継続して堆積している積雪であることが前提となることから、できるだけ高標高で気温が低いことが要求される。また一方では、高標高の稜線付近では強風のため降雪が堆積せずに吹き流されてしまうという問題もある (Tanaka and Suzuki, 2008)。さらに、安全に留意しながら積雪調査を実施することも大切である。そこで、できるだけ標高が高く、かつ連続的に降雪が堆積し、比較的安全な調査ができる場所として、北アルプス西穂高岳付近の標高 2352 m 地点を選定した (図 1)。新穂高温

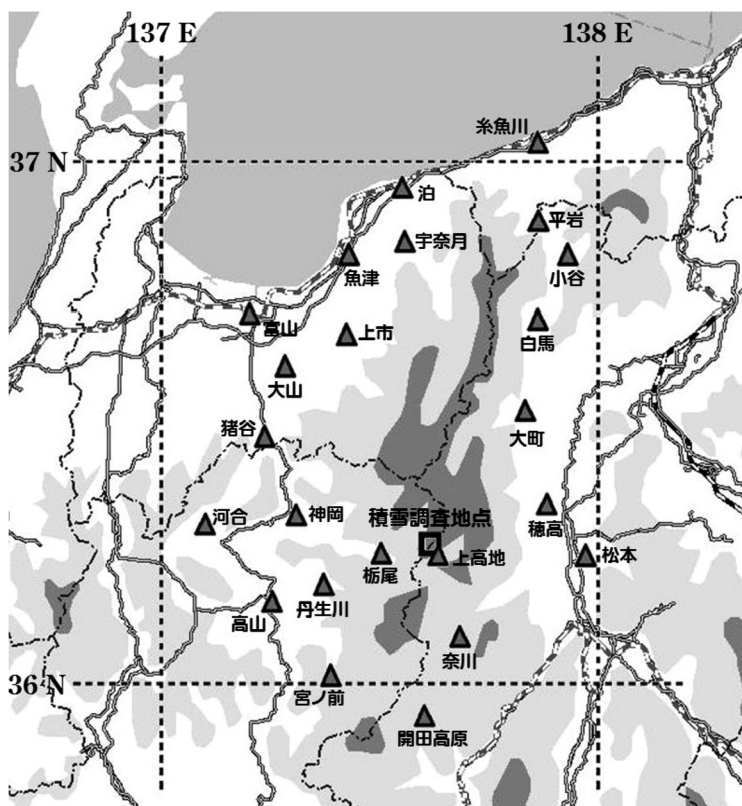


図 1 積雪調査地点の位置と解析に用いた気象庁の降水量観測地点。

泉からロープウェーで標高 2156 m 地点まで冬期間でも容易にアクセスでき、かつ調査地点の近傍には冬期間も営業している西穂山荘があるため、天候の急変にも安全に対応できる。

調査地点における積雪層化学調査は 2010 年 1 月 11 日に実施した。現場では、積雪表面から掘削し、積雪層位を観察した後、雪温・密度を測定し、深度 3 cm ごとに積雪層を採取した。今回は、積雪表面から 399 cm 深までの雪試料を採取した。なお、積雪全層で雪温は氷点下であった。積雪試料は密封式のビニール袋 (WHIRL-PAK) に入れ、保冷箱で信州大学の実験室まで運び、化学分析を行うまで冷凍庫で保存した。分析の際には、融解した後ろ過し、pH および電導度を測定した。さらに、イオンクロマトグラフ (DIONEX: ICS-2000) により主要イオン濃度 (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) を測定した。これらの操作はすべてクリーンルーム実験室で行った。

2.2 気象データ

雪氷化学的手法により算出した冬季降水量の妥当性を検討するために、気象庁の気象統計情報 (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>) から、図 1 に示す 23 地点の降水量データを使用した。横山ら (2003) が報告しているように、降水量計の捕捉率は助炭の有無や風速によって変動することが知られており、風速による補正式も提案されている。しかしながら、ここで使用する気象庁の観測地点では降水量のみ測定されている場合があるため、風速による補正は行っていない。

3. 結果

3.1 雪試料の化学分析結果の検証

採取・分析した全ての雪試料について、その化学分析の妥当性を検討する。水試料についての化学分析結果の妥当性は、一般にイオン・バランスと電導度バランスによって評価される。つまり、水に溶存しているイオンは、その陽イオンと陰イオンは等量でなければならないということと、溶存イオンはそれぞれの濃度に対応する電導度を示すので、すべてのイオンが示す電導度の総和は、電導度計によって測定した電導度と一致するはずであるということに基づく。

雪試料の化学分析結果について、pH から換算した H^+ も含めた陽イオン総量と陰イオン総量との関係を図 2 に示す。低濃度から高濃度まで様々な濃度が得られているが、統計的にも 1:1 であることが確認できる。

電導度計で測定された雪試料の電導度と、各イオン濃度から算出した電導度の総和との関係を図 3 に示す。両者の関係についても、1:1 であることが統計的にも確認される。このことから、今回

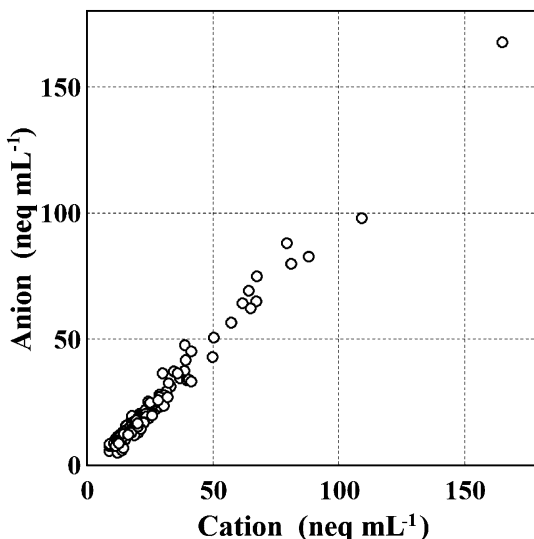


図 2 積雪試料中の陽イオン総量と陰イオン総量の関係。

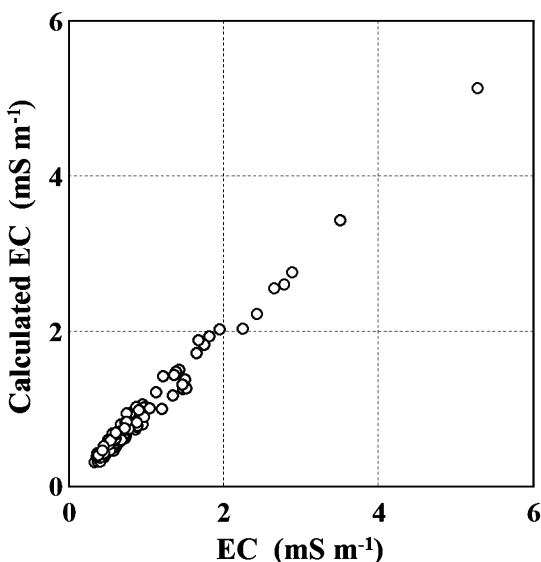


図 3 積雪試料の電導度 (EC) とイオン濃度から計算された電導度の関係。

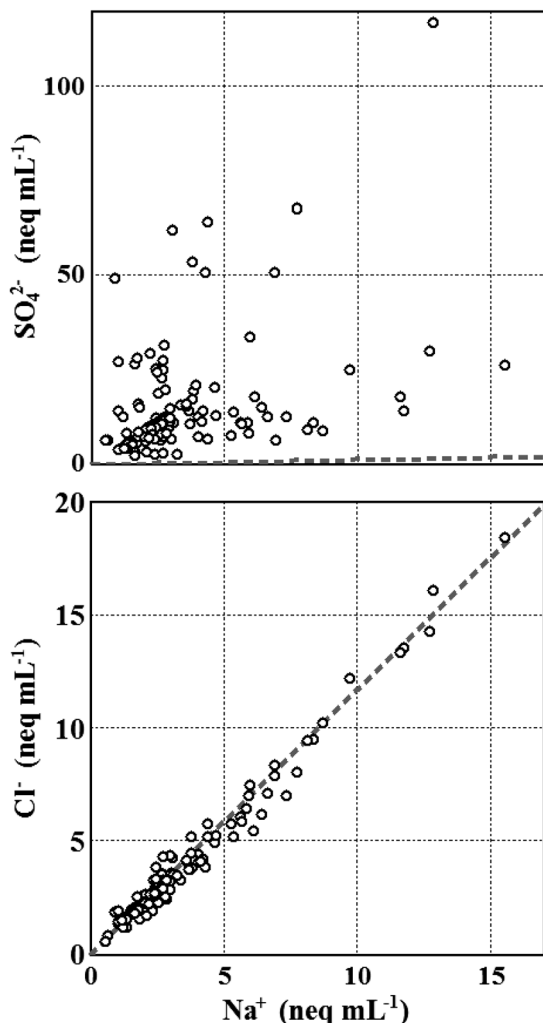


図 4 積雪試料中の Na^+ 濃度に対する Cl^- 濃度と SO_4^{2-} 濃度の関係。図中の破線は、海水中のそれぞれの濃度比を示す。

の雪試料の化学分析結果は妥当であると言える。

3.2 雪試料の化学的特性

次に、雪試料の化学的特性を検討する。まず、雪試料に含まれる化学成分の起源を考える。雪試料中の Na^+ 濃度に対する Cl^- 濃度と SO_4^{2-} 濃度との関係を図 4 に示す。ふたつの図中の破線は、それぞれの海水中における濃度比を表している。ほとんどの雪試料中の Na^+ 濃度と Cl^- 濃度の関係は、海水中の濃度比と一致することから、ふたつのイオンは海塩起源であると考えられる。一方、雪試料中の SO_4^{2-} 濃度は、すべての試料で海水起源と考えられる濃度よりも高いことから、 SO_4^{2-} はほ

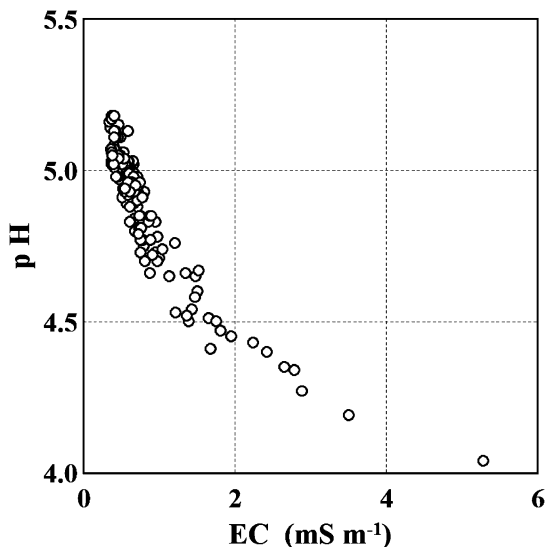


図 5 積雪試料の電導度 (EC) と pH の関係。

とんどが非海塩起源であると言える。北アルプスの標高 2352 m 地点まで、多くの人為起源の汚染物質が輸送されていると考えられる。それぞれのイオン濃度の高低については後述する。

雪試料の電導度と pH の関係を図 5 に示す。雪試料の電導度が高い値を示すのに従い pH は低下し、電導度が低下すると pH は高くなる。このことは、電導度が高い (溶存イオン総量が多い) 時には酸性を示す成分が多くなることを示す。純水のみの降水の pH は、大気中の二酸化炭素の影響により 5.6 を示すが、降水粒子に大気中の酸性物質や中和物質が捕捉されることにより、そのバランスから降水の pH が決まってくる。酸性物質と中和物質のバランスを酸性化指標 (AI) と呼び、次の式 (1) で表現される。

$$\text{AI} = (\text{NO}_3^- + \text{nssSO}_4^{2-}) - (\text{NH}_4^+ + \text{nssCa}^{2+}) \quad (1)$$

つまり、降水中の NO_3^- 濃度と nssSO_4^{2-} (非海塩起源—non sea salt—の SO_4^{2-}) 濃度の和が大きければ酸性となり、 NH_4^+ 濃度と nssCa^{2+} 濃度の和が大きければ酸性が中和されることを示している。雪試料についての酸性化指標と H^+ 濃度の関係を図 6 に示す。両者には極めて良好な正の相関が認められ、式 (1) の右辺の 4 種のイオン濃度によって降雪試料の pH がほぼ決まっていること

になる. 図 6 における両者の回帰式から酸性指標の値がゼロの場合の pH の値を計算すると 5.43 となる. 酸性降水の基準値である $\text{pH}=5.6$ よりも若干酸性であることから, 式 (1) の 4 種以外にも酸性化指標に影響するイオン種が存在することを考える必要がありそうである.

3.3 積雪層ピット調査結果

積雪表面から 399 cm 深まで 3 cm 間隔で密度を

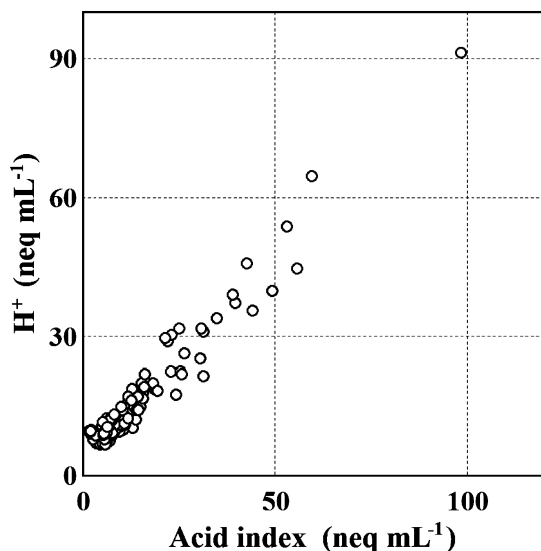


図 6 積雪試料の酸性化指標と H^+ 濃度の関係.

測定し, さらに同じ深度の積雪試料を採取したが, 密度, 電導度 (EC) および pH の深度分布を図 7 に示す. 表面近くの密度は 0.1 g cm^{-3} 以下であるが, 深度が増すごとに密度も大きくなり, 100 cm 以深では 0.3 g cm^{-3} 前後となり, 一部には 0.4 g cm^{-3} 程度の密度も観測された. 前述したように, 積雪試料の電導度と pH は鏡像関係にあるため, 電導度の高い層は pH が低下し, 電導度の低い層は pH が高くなっている.

図 8 には, Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} の陰イオン濃度の深度分布を示す. 層ごとの 3 種の陰イオン濃度の大小は, 一部の深度で同期しているようにみえる箇所もあるが, 必ずしも一致していない. NO_3^- , SO_4^{2-} 濃度が最も高い 306~309 cm 深の層は図 7 の電導度の値が最も高く, pH は最も低くなっている. 全体的に, NO_3^- と SO_4^{2-} の濃度は変動が似通っているが, 異なっている層も見られる. 図 7 と図 8 に示すように, 層ごとの細かい変動が認められることから, 表層から 399 cm 深までは降雪時の化学的性質を保持していると考えられる.

4. 考 察

4.1 降雪粒子の化学的特性と気象条件

積雪層に記録された化学的情報から, 積雪層を形成した降雪がもたらされた気象条件を推定する

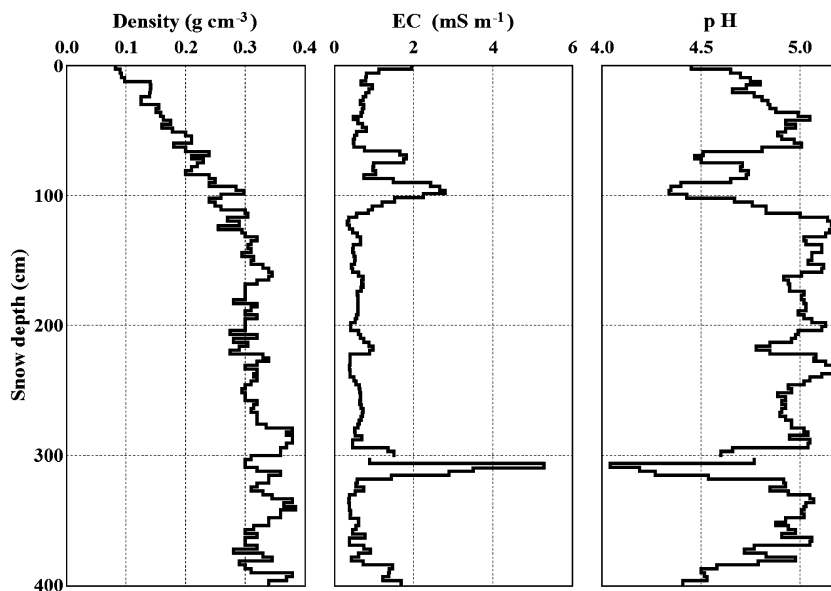


図 7 積雪中の密度, 電導度 (EC) と pH の深度分布.

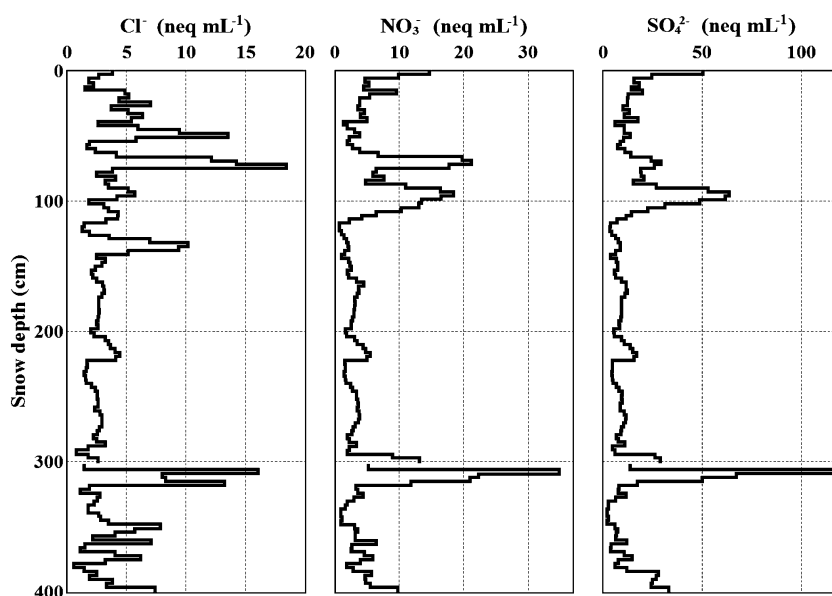
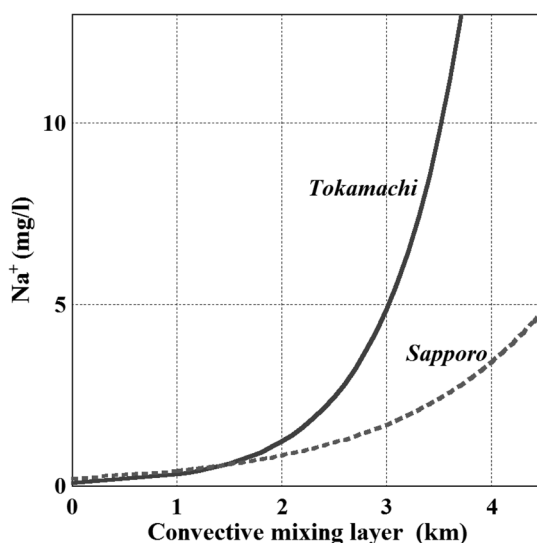


図 8 積雪中の陰イオン濃度の深度分布。

ことができる。その前提となる気象条件と降雪粒子の化学的特性との関係について以下に説明する。

鈴木 (1983) は、降雪の原因となる低気圧の位置によって、札幌に降る雪の Na^+ 濃度が異なることから、層雲から降る雪では Na^+ 濃度が低く、対流性の積雲から降る雪では Na^+ 濃度が高くなることを見だし、雪雲の対流混合層の高さと降雪中の Na^+ 濃度との間にはある一定の関係があることを明らかにした。つまり、対流混合が活発であればあるほど雪結晶と海塩粒子が衝突する確率が高くなり、結果として降雪中の Na^+ 濃度が高くなるのである。その後、十日町で同様の研究を行い (鈴木・遠藤, 1994a), 十日町においても雪雲の対流混合層の高さと降雪中の Na^+ 濃度との間には明瞭な関係があることを明らかにした (図 9)。対流混合層が高くなるのは当然ながら積雲であり、西高東低の冬型の気圧配置の際の雪雲である。雪雲の対流混合層が同じ高さであっても、十日町の方が札幌よりも降雪中の Na^+ 濃度が高くなるが、その原因としては、冬型の気圧配置の際に十日町の風上である日本海の幅が、札幌の風上の日本海の幅よりも広いために、対流混合の継続時間が長いためであると考えられる。つまり、対流混合が長く続けば、雪結晶がより多くの

図 9 降雪時の対流混合層の高さと降雪試料中の Na^+ 濃度の関係 (鈴木・遠藤, 1994a より)。

海塩粒子を併合するため降雪中の Na^+ 濃度が高くなる。

調査対象地域の降雪粒子に取り込まれる化学物質の起源として、海塩起源の他に主要なものは人為起源である。人間活動によって大気中に放出された硫黄酸化物や窒素酸化物が、降雪粒子に取り込まれることにより、降雪中の NO_3^- や SO_4^{2-} の濃度が高くなる。十日町における降雪中の陰イオ

ン組成を図 10 に示す (鈴木・遠藤, 1994b). 海塩起源である Cl^- は, 前述のように冬型の気圧配置による降雪では割合が多く, 日本海低気圧や南岸低気圧による降雪では割合が少なくなっている. 一方, 日本海低気圧や南岸低気圧による降雪では, NO_3^- や SO_4^{2-} の割合が多くなっている. 特に, 南岸低気圧による降雪では, NO_3^- や SO_4^{2-} の割合が 8 割近くに達する場合もある.

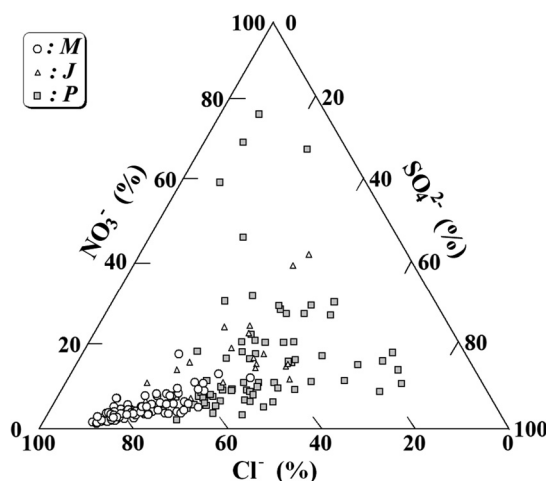


図 10 降雪時の気象条件ごとの降雪試料中の陰イオン組成 (鈴木・遠藤, 1994b より).
M: 西高東低の冬型の気圧配置, J: 日本海低気圧, P: 南岸低気圧.

以上のことから, 各積雪層の化学的特性を検討することにより, 降雪時の気象条件を推定することができる. さらに, 積雪層累重の法則を考慮することにより, ある特定の積雪層が形成された降雪日を同定することが可能となる.

4.2 降雪日の同定

調査地点における表層から 399 cm 深までの Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} の陰イオン濃度の深度分布に特徴的な層位として, 図 11 に示すような A から I までの 9 層を抽出する. また, A から I までの各層の陽イオン及び陰イオンの組成を図 12 に示す. B, F, I の各層は Cl^- 濃度が比較的高く, NO_3^- , SO_4^{2-} 濃度が低くなっている. さらに, 陽イオンでは Na^+ の割合が, 陰イオンでは Cl^- の割合が比較的大きく, $\text{Mg}^{2+} \cdot \text{Ca}^{2+}$ と $\text{NO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ の割合がそれぞれ小さくなっている. このことから, B, F, I の各層は西高東低の冬型の気圧配置でもたらされた降雪によって形成された層であると考えられる. この 3 層以外の層は, Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} の各濃度が比較的高かったり (D, G, H の各層), いずれの濃度も高くはなかったりするが, 陰イオン組成で見ると A, C, D, E, G, H の各層は, Cl^- の占める割合が小さく, NO_3^- と SO_4^{2-} の割合が大きくなっており, 日本海低気圧ないしは南岸低気圧によってもたらされた降雪の

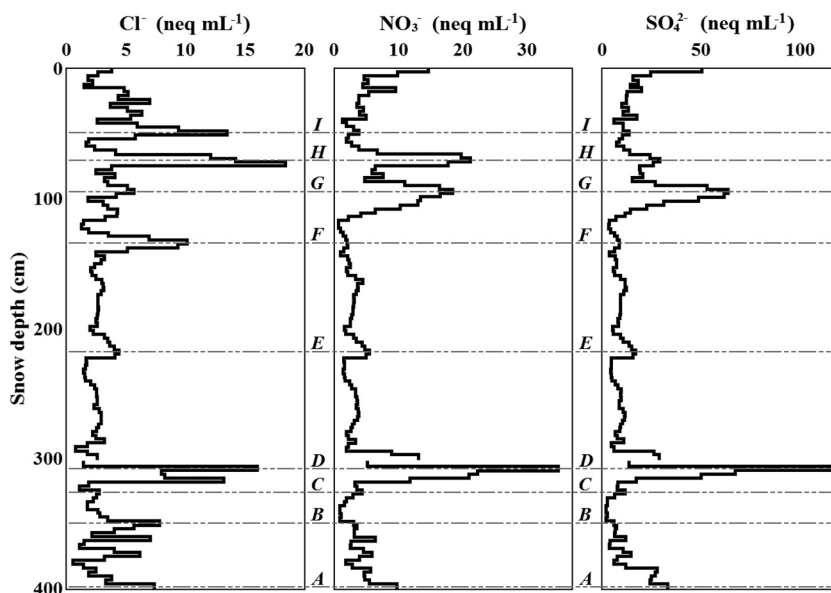


図 11 積雪中の陰イオン濃度の深度分布と降雪日を同定した層位.

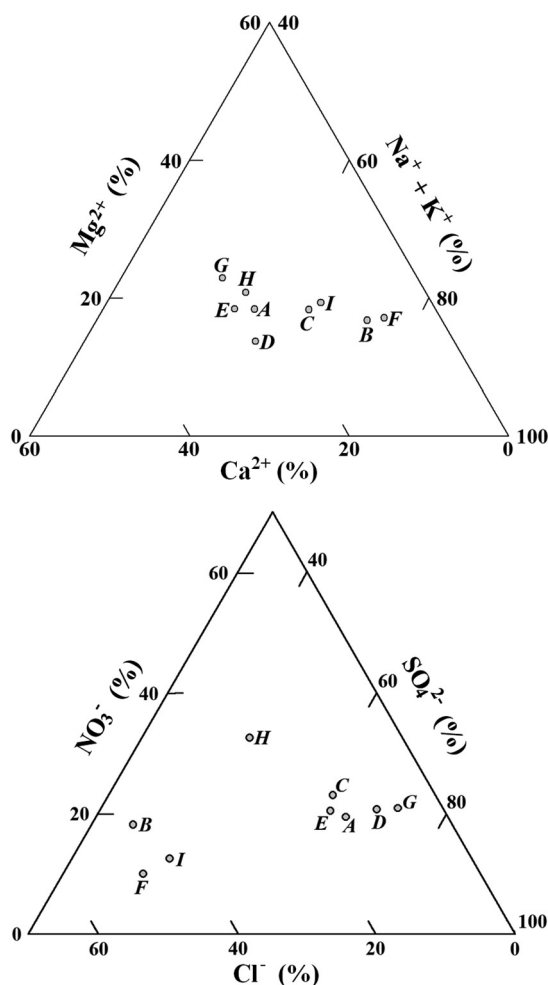


図 12 降雪日を同定した層位のイオン組成。
図中のアルファベットは図 11 の層位に対応。

特徴を示している。

抽出された 9 層について、それぞれの化学的性質から降雪日を同定するが、その際には気象庁の天気図 (<http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html>) と、調査地点の南東約 2.5 km に位置する気象庁のアメダス降水量観測地点 (地点名: 上高地, 緯度: 北緯 36.247°, 経度: 東経 137.633°, 標高: 1510m) での観測結果を参照する。

A 層から I 層までのそれぞれについて同定された日付に対応する天気図を図 13 に示す。B, F, I の各層は、2009 年 11 月 28 日、2010 年 1 月 1 日そして 2010 年 1 月 6 日の降雪に相当すると考えられるが、いずれも西高東低の冬型の気圧配置となっており、2010 年 1 月 1 日と 6 日は強い冬型と

なり、降雪中の Cl^{-} が陰イオンに占める割合も大きくなっている。陰イオンに占める NO_3^{-} の割合が比較的大きい H 層は、2010 年 1 月 4 日から日本海を北東進した低気圧によって、太平洋側の人口および工業の集積地域から吹き寄せられた気塊の影響と考えられる。その後も継続して降雪となったが、低気圧の北東進とともに冬型の気圧配置に移行し、対流活動の強い積雲からの降雪の際に I 層を形成したものと考えられる。

気象庁 (2009) によれば、当該期間では 2009 年 12 月 26 日に黄砂が観測されている。ここでは E 層に相当する。E 層では、黄砂層の特徴である Ca^{2+} や SO_4^{2-} の濃度は必ずしも高くはないが、図 12 に示す陽イオンの組成を見ると、9 層の中では Ca^{2+} の割合が最も高くなっている。

ここでは、化学的に特徴のある積雪層の形成された日の同定に、天気図と近傍での降水量観測結果を用いたが、さらに客観的な同定が可能となる手法を開発する必要がある。

4.3 気象庁による観測降水量と積雪水量との関係

調査地点における積雪表面から 399 cm 深までの 9 つの積雪層に堆積した日付を入れることができた。3 cm 深ごとの各積雪層の密度を計測していることから、同定されたふたつの降雪日間の積雪水量を算出することができ、その値は期間降水量に相当する。なお、積雪表層は調査日である 2010 年 1 月 11 日とする。降雪日間に相当する期間における気象庁の観測降水量を図 1 に示す地点ごとに集計し、その中から、宇奈月と松本における期間降水量と調査地点における積雪水量との関係を図 14 に示す。宇奈月における期間降水量と調査地点における積雪水量との間には極めて高い相関が認められ、その相関は高い確率で有意である。ここで、宇奈月と松本での期間降水量との関係を示したのは、後述するように相関係数が最大と最小の地点である。

調査地点における積雪水量と宇奈月における期間降水量との間の相関係数が 0.96 を示すことから、調査地点における冬期間の降水パターンは、約 60 km 北方に位置する宇奈月の降水パターンとほとんど同期していることになる。宇奈月の平均年間降水量は 3593.6 mm であり、11 月から 4 月までの寒候期の降水量は 1921.2 mm に達する。

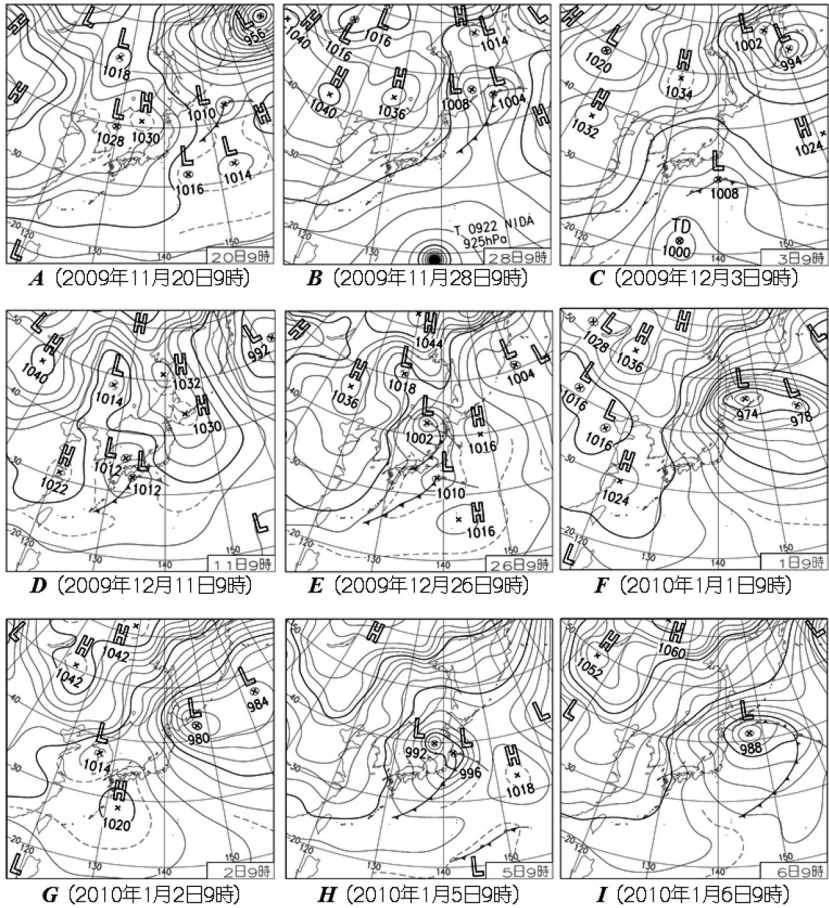


図 13 同定された降雪日の地上天気図。
それぞれの天気図のアルファベットは図 11 の層位に対応。

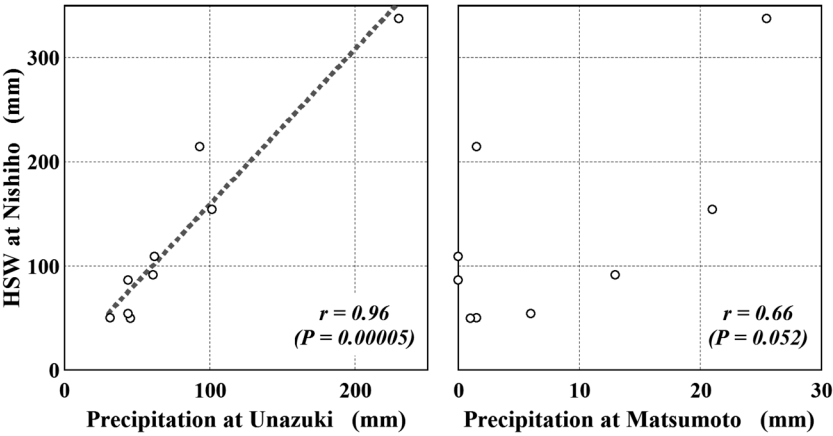


図 14 宇奈月と松本で気象庁により観測された期間降水量と調査地点における積雪水量 (期間降水量) の関係。

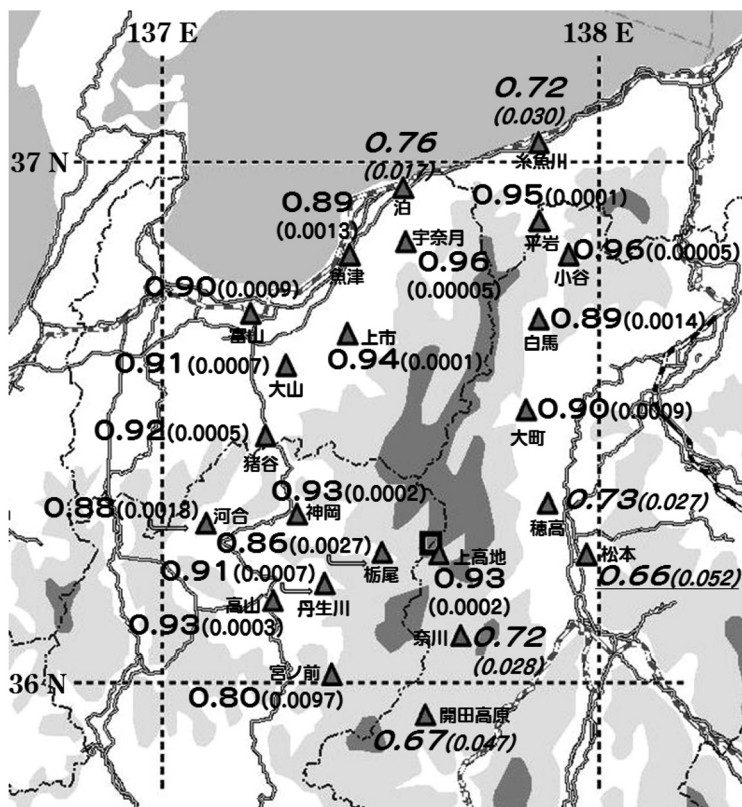


図 15 調査地点における積雪水量（期間降水量）と気象庁により観測された期間降水量との相関係数と p 値（括弧内）。相関係数が斜体で示されている地点とは 5% 水準で有意，相関係数と p 値が斜体かつ下線で示されている地点とは 5% 水準で有意性無し，それ以外の地点とは 1% 水準で有意。

それに対して，調査地点での積雪水量は約 1.5 倍あることから，高標高地点での冬季降水量がいくに多いのかが類推できよう。

一方，調査地点の約 30 km 東方に位置する松本の期間降水量と積雪水量の間には有意な相関が認められない。調査地点で降水が認められても松本では降水が観測されないことの多いことがわかる。松本で冬期間に降水が観測されるのは，南岸低気圧の通過時であることが多く，冬型の気圧配置の際には降水は観測されず，晴天のことが多いことによると考えられる。

調査地点における積雪水量とそれに相当する期間降水量との相関係数および p 値を，気象庁による観測地点ごとに図 15 に示す。これによると，調査地点の西から北側にかけての地点とは有意な高い相関係数を示すのに対して，東から南側の地点

とは有意ながらも低い相関係数を示すことがわかる。特に，松本とは先述のように有意な相関が認められない。松本に加え穂高・奈川・開田高原の各地点は北アルプスの東側に位置し，冬型の気圧配置時の雪雲である背の低い積雲が 3000 m 級の山々を越えることができないことが多いために，これらの地点における期間降水量が調査地点における積雪水量とは良好な相関を示さないものと考えられる。それに対して，北アルプスの稜線や調査地点の西から北側に位置する地域では，冬型の気圧配置によっても，南岸低気圧や日本海低気圧によっても同じように降雪が観測されるということになる。このことは，冬季の気象条件から考えても論理的に納得できることであり，このことから，本方法による冬季降水量（積雪水量）の算定法が妥当であることが裏付けられる。

前述の宇奈月では降・積雪深が観測されていないが、調査地点の積雪水量と降水量が同程度に高い相関を示す小谷では、降水量と降・積雪深の観測がなされている。小谷では宇奈月よりも降水量が少なくもあり、調査地点における積雪水量は小谷での降水量の約 2.6 倍に達する。小谷では、冬季にも降雨となることがあるため、単純な比較はできないが、小谷の年間累積降雪深の平均値は 897 cm であり、2010 年冬季 (2009 年 11 月～2010 年 4 月) の累積降雪深は 784 cm であることから、調査地点での累積降雪深は平均的には約 2300 cm、2010 年冬季には 2000 cm を超えると考えられる。初冬や晩春のように、小谷では降雨でも調査地点では降雪となることから、さらに多くの降雪深となっていることが容易に推定できる。ちなみに、気象庁の観測地点で最も累積降雪深が大きいのは酸ヶ湯 (標高: 890 m) であると考えられるが、酸ヶ湯における年間累積降雪深の平均値は 1780 cm であり、調査地点ではそれを遙かに超える降雪深が観測される可能性が大きい。

5. まとめ

山岳地域における降雪量は、山地生態系に対する環境要因としてや水循環のひとつの要素としてのみならず、白いダムといわれる水資源としても極めて重要であるにも関わらず、観測によるデータの集積が全くなされておらず、憂慮すべき現状である。そこで、気象条件によって降雪の化学的性質が異なることを利用して、山岳地域の積雪層に降雪した日付を入れ、それから降雪量 (冬季降水量を) 算出する方法を提案した。

これまでの研究によって、西高東低の冬型の気圧配置の際の積雪からの降雪では、対流混合の度合いによって降雪中の海塩起源物質濃度が規定されることや、南岸低気圧や日本海低気圧による降雪では、降雪中の陰イオンに占める NO_3^- や SO_4^{2-} の割合が大きくなることが明らかになっている。

このことを前提として、北アルプス西穂高岳付近の標高 2352 m で、2010 年 1 月 11 日に採取した積雪表層から 399 cm 深までの各積雪層の化学的特性を検討したところ、9 つの層の降雪日を同定することができた。そして、ふたつの積雪層の

間の積雪水量をその間の降雪量とみなし、調査地点の周囲の気象庁による降水量観測値との比較を試みた。その結果、調査地点の西から北側の観測地点との相関は極めて良好であり、これらの地域における降水パターンとは良く同期していることが明らかとなった。それに対して、調査地点の東から南側にかけての観測地点とはそれほど良好な相関が認められない。これらの地域で冬季に降水が観測されるのは、おもに南岸低気圧によるのみであることに起因すると考えられる。周囲の降水量観測結果との間に示されたこれらの関係は、冬季降水時の気象条件と整合的であり、本方法の妥当性が裏付けられた。

ちなみに、本方法による算出によれば、標高 2352 m の調査地点では、累積降雪深が 2000 cm を超えると結論づけられる。

謝 辞

本研究の野外調査に際しては、西穂山荘の村上文俊氏、栗澤 徹氏、河野孝司氏を初めとする皆様に大変お世話になりました。ここに感謝いたします。

文 献

- 井上 聡・横山宏太郎, 1998: 地球環境変化時における降積雪の変動予測. 雪氷, **60**, 367-378.
- Inoue, S. and Yokoyama, K., 2003: Estimates of snowfall depth, maximum snow depth, and snow pack conditions in Japan by using five global warming predicted data. Journal of Agricultural Meteorology, **59**, 227-236.
- 井上 聡・横山宏太郎・大野宏之・川島茂人, 2001: 地球環境変化時における降積雪の変動予測 (続報) 一国内主要河川流域における降雪水量の変動. 雪氷, **63**, 489-499.
- 石井洋之・鈴木啓助, 2011: 日本における降雪深変動の地域性とその要因. 日本水文科学会誌, **41**, 27-37.
- 木戸瑞佳・長田和雄・矢吹裕伯・飯田 肇・瀬古勝基・幸島司郎・対馬勝年, 1997: 立山・室堂平における積雪層の堆積時期の推定. 雪氷, **59**, 181-188.
- 気象庁, 2009: 2009 年黄砂観測日および観測地点の表. http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/kosahp/kosa_table_2009.html
- 北村守次・杉山 実・大橋哲二・中井信之, 1993: 硫黄安定同位体比から見た石川県の降水中硫酸イオンの起源の推定. 地球化学, **27**, 109-118.

- 文部科学省・気象庁・環境省, 2009: 温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」, 65pp.
- 本山玲美・柳澤文孝・小谷 卓・川端明子・上田 晃, 2000: 山形のエアロゾルと湿性降水物に含まれる非海塩性硫酸イオンの硫黄同位体比. 雪氷, **62**, 215-224.
- 名古屋大学水圏科学研究所, 1991: 大気水圏の科学—黄砂, 328pp., 古今書院.
- 大泉 毅・福崎紀夫・森山 登・漆山佳雄・日下部実, 1991: 硫黄同位体比から見た大気降水物中硫黄の供給源—新潟県の場合—. 日本化学会誌, 1991, 675-681.
- Shimizu, M. and Abe, O., 2001: Fluctuation of snow cover on mountainous areas in Japan. *Annals of Glaciology*, **32**, 539-541.
- Suzuki, K., 1982: Chemical changes of snow cover by melting. *The Japanese Journal of Limnology*, **43**, 102-112.
- 鈴木啓助, 1983: 札幌における降雪の化学的性質—とくに海水起源物質濃度の成因について—. 地理学評論, **56**, 171-184.
- 鈴木啓助・遠藤八十一, 1994a: 冬季降水中の海塩起源物質濃度と気象条件. 雪氷, **56**, 233-241.
- 鈴木啓助・遠藤八十一, 1994b: 十日町市における冬季降水中の酸性物質濃度変動. 季刊地理学, **46**, 161-172.
- Suzuki, K. and Endo, Y., 1995: Relation of Na⁺ concentration and d18O in winter precipitation with weather conditions. *Geophysical Research Letters*, **22**, 591-594.
- Suzuki, K. and Endo, Y., 2001: Oxygen isotopic composition of winter precipitation in central Japan. *Journal of Geophysical Research*, **106**, 7243-7249.
- Tanaka, M. and Suzuki, K., 2008: Spatial variability of snow water equivalent in a mountainous area of the Japanese Central Alps. *Journal of Geophysical Research*, **113**, F03026, doi: 10.1029/2006JF000711.
- 遠山和大・鈴木悟郎・佐竹 洋・川田邦夫・飯田 肇, 2005: 酸素同位体比を用いた山岳地積雪の堆積時期推定. 雪氷, **67**, 319-330.
- Watanabe, O., Kanamori, N., Sugimoto, A., Iida, H. and Higuchi, K., 1986: Regional characteristics of snow cover in the mountain region of central Japan. *J. Earth Sci. Nagoya Univ.*, **34**, 67-108.
- 山口 悟・阿部 修, 2007: 平成 18 年豪雪における山地積雪の特徴—近年の山地積雪の変動の中で—. 雪氷, **69**, 53-59.
- Yamaguchi, S., Abe, O., Nakai, S. and Sato, A., 2007: Recent snow cover fluctuations in the mountainous areas of Japan, *IAHS Publ*, **318**, 116-125.
- 横山宏太郎・大野宏之・小南靖弘・井上 聡, 川方俊和, 2003: 冬季における降水量計の捕捉特性. 雪氷, **65**, 303-316.

Estimation of winter precipitation at a mountainous site by snow chemical analysis

Keisuke SUZUKI^{1) 2)}, Atsushi IKEDA^{1)*}, Yuto KANEKO²⁾,
Daichi SUZUKI²⁾ and Takuto MAKI²⁾

1) Institute of Mountain Science, Shinshu University

Asahi 3-1-1, Matsumoto 390-8621

2) Faculty of Science, Shinshu University

Asahi 3-1-1, Matsumoto 390-8621

** Present affiliation: Graduate School of Life and Environmental
Sciences, Tsukuba University*

Ten-noudai 1-1-1, Tsukuba 305-8572

Abstract: In this study, the winter precipitation at a mountainous site was estimated with the help of the chemical properties of the snow layer present at the site. The first basic precondition for the chemical properties of the snow is that there should be a relationship between the Na⁺ concentration in the snow and the mixing height of the convective layer. In other words, the concentrations of materials having a sea-water origin that are present in the snow should be high under winter monsoon pressure conditions. The second basic precondition for the chemical properties of the snow is that the concentration of anthropogenic, acidic materials in the snow should be high under low-pressure conditions of the Pacific coast and/or the Japan Sea. That is, a high content rate of acidic materials should be observed in the snow under low-pressure conditions. Nine characteristic snow layers were extracted from the entire snow cover (399 cm in depth). Three of the nine layers were found to have precipitated and formed under winter monsoon pressure conditions. The remaining six layers were found to have precipitated and formed under low-pressure conditions. Precipitation dates were identified for all nine layers using the information on weather conditions. The water equivalent of snow for eight periods was calculated for two extracted layers. The water equivalent of snow at the study site was examined with the precipitation observed by the Japan Meteorological Agency. The water equivalent of snow at the study site showed a high correlation coefficient with the observed precipitation in the northwestern area. On the other hand, the water equivalent of snow at the study site showed less correlation with the precipitation observed at the southeastern points. These relationships are considered reasonable, given the weather conditions of the study site in the winter season.

(2011 年 3 月 29 日受付, 2011 年 6 月 16 日改稿受付, 2011 年 7 月 27 日最終改稿受付,
2011 年 7 月 27 日受理, 討論期限 2012 年 3 月 15 日)