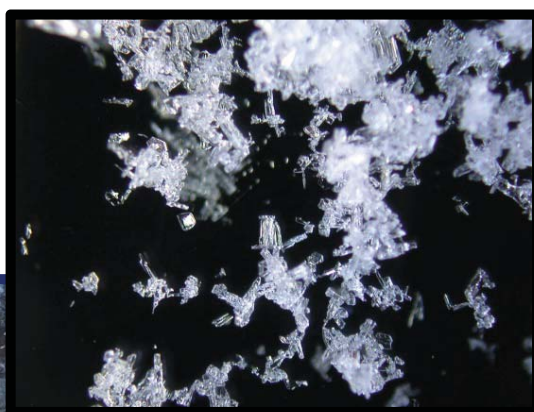


# 第4回 積雪モデルに関する ワークショップ

「積雪中の物質移動のモデル化にむけた研究」

## 講演Abstract集

2013/3/18 - 19



## プログラム

3月18日(月)

14:00-14:10 主催者挨拶、事務連絡

セッション1

14:10-14:50 降雨と融雪が重なって生じる積雪水文現象の観測と実験  
(北海道大学 低温科学研究所 石井吉之)

14:50-15:30 斜面における融雪と積雪底面流出量  
(新潟大学 災害・復興科学研究所 河島克久)

15:30-15:50 休憩

セッション2

15:50-16:30 積雪中の化学物質動態  
(信州大学 山岳科学総合研究所 倉元隆之)

16:30-17:10 花粉を指標とした積雪融解にともなう数 $10\mu\text{m}$ サイズ粒子の移動  
(国立極地研究所 新領域融合研究センター 中澤文男)

17:10-17:30 議論

3月19日(火)

セッション3

9:30-10:10 積雪の通気度と積雪構造の関係  
(野外科学株式会社 荒川逸人)

10:10-10:50 積雪の比表面積と水分移動  
(防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター 山口悟)

10:50-11:30 積雪中における水、物質移動のモデル化  
(防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター 平島寛行)

11:30-12:00 総合討論

12:00-12:10 閉会の挨拶

# 目次

## セッション1

- 降雨と融雪が重なって生じる積雪水文現象の観測と実験 ..... 1  
(北海道大学 低温科学研究所 石井吉之)
- 斜面における融雪と積雪底面流出量 ..... 3  
(新潟大学 災害・復興科学研究所 河島克久)

## セッション2

- 積雪中の化学物質動態 ..... 7  
(信州大学 山岳科学総合研究所 倉元隆之)
- 花粉を指標とした積雪融解にともなう数  $10\mu\text{m}$  サイズ粒子の移動 ..... 9  
(国立極地研究所 新領域融合研究センター 中澤文男)

## セッション3

- 積雪の通気度と積雪構造の関係 ..... 11  
(野外科学株式会社 荒川逸人)
- 積雪の比表面積と水分移動 ..... 13  
(防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター 山口悟)
- 積雪中における水、物質移動のモデル化 ..... 15  
(防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター 平島寛行)

# 降雨と融雪が重なって生じる積雪水文現象の観測と実験

石井 吉之

北海道大学低温科学研究所

ishii@pop.lowtem.hokudai.ac.jp

## 1. はじめに

融雪期にまとまった雨が降ると河川は著しく増水する。あたかも雨によって融雪が促進されて増水したかのように見えるが、一般に雨滴自体による融雪量は小さい。降雨時には、比較的気温と湿度が高く、風速が強いことや、凝結潜熱の増大、蒸発熱損失の抑制、夜間の雪面冷却の抑制などの二次的効果によって融雪が進む。しかし、それでも降雨時の融雪量は晴天時の融雪量に比べて小さい。融雪量が小さいにもかかわらず、なぜ著しい河川増水が起きるかについては十分に理解されていない。また、降雨を伴った融雪出水において積雪がどのような役割を果たすかについても、積雪内での貯留が効く例と効かない例との相反する結果が報告されており、よくわかっていない。

我々の研究室では、降雨と融雪が重なって生じる融雪洪水の発生メカニズムと、この時に積雪が果たす役割を明らかにするために、2003年に北海道北部の母子里試験地、2008年に札幌市郊外の豊平川上流域(定山溪ダム試験地)で、野外観測データに基づいた研究を行ってきた。しかし、いずれの場合にも融雪期には総雨量20mm程度のイベントしか起こらず、明確な結論は得られていない。そこで、2011年と2012年の融雪期に、雪面上に模擬的に降雨を散布することにより、積雪底面流出や積雪内部での水貯留の実態を実験的に明らかにすることを試みた。

## 2. 模擬降雨散水実験

1年目の実験は2011年4月5~7日に行なった。期間中の積雪深は100~80cm、気温は-6.0~+9.9℃で推移した。前年の秋に地表面に1m×1mの積雪ライシメータを設置しておき、融雪期にはライシメータ真上の雪面に直径70~80cmの円形状に噴霧ノズルによって微水滴を散布した。実験は3回行い、各回の総散布量(総雨量)、平均雨量強度、散布時間はそれぞれ1回目が25L(25mm)、35mm/h、43分、2回目が60L(60mm)、23mm/h、159分、3回目が200L(200mm)、34mm/h、356分であった。積雪底面流出量は実験1ではゼロ、実験2では実験中から翌日にかけて約1.5L(流出率3%)、実験3では200Lも散水したにもかかわらず流出量はゼロであった。実験3において積雪底面流出がゼロであった理由については次のように考えた。積雪内に供給される水量が少ないうちは、水は雪粒間に保持されるが、供給水量が増加し、下方への浸透速度(強度)以上の水が加わってくると、雪粒間の水はもはや下方ではなく、多くの水を保持できる層内を水平方向に流れるようになる。つまり、散布する水の量が多くなると散いた水は積雪内を水平方向に流れるようになり、鉛直下方の積雪底面からは流出しなかった。

2年目の実験も、ある程度の融雪が進み、積雪深が100cm程度になった時期に行なおうとした。ところが、2012年の融雪期は、4月上旬は寒気の影響を受けて融雪が遅れ、4月

15日になっても積雪深は170cmもあった。2011年に比べ2倍近い積雪深であったが、4月16～17日に2011年と同じ方法で2回の実験を行った。この時の積雪深は170～164cm、気温は-1.9～+12.5℃で推移した。総散布量（総雨量）、平均雨量強度、散布時間はそれぞれ1回目が170L（170mm）、35mm/h、295分、2回目が120L（120mm）、33mm/h、220分である。積雪深が多いので2011年以上に水平方向の流れが生じやすく、積雪底面流出量は観測されないことが予想されたが、1回目は散水開始後50分で積雪底面流出が現れ、総散布量170Lに対し総流出量は46L、流出率は27%であった。2回目も同様に散水開始後90分で積雪底面流出が現れ、総散布量120Lに対し総流出量は48L、流出率は40%であった（図1）。散水した岩内海洋深層水（脱塩水）の水素同位体比は+1‰、実験前の全層積雪の水素同位体比は実験1、2とも-93‰であった。積雪底面流出水の水素同位体比は、実験1では流出開始時の-86‰から散水終了時には-26‰まで重くなった。同様に実験2では流出開始時の-109‰から終了時には-34‰になった。散水量と流出量がほぼ定常となった時点で散水を終了したが、終了時における積雪底面流出水に含まれる模擬降水の割合は、水および同位体収支式より、実験1では71%、実験2では63%と見積もられ、概ね6～7割であった。

これまでの融雪水の積雪内浸透に関する研究では、化学成分や水の安定同位体をトレーサーに用いることによって、晴天日や弱い降雨時（総雨量20mm程度）には積雪内部に貯留されていた水が押し出されるように積雪底面から流出し、その割合は9割以上に及ぶと言われていた。しかし、顕著な降雨と融雪が重なった時にはこうした流出過程とは異なることも指摘されていた。今回の実験では、積雪上に総量120～170mmの降雨があった時には、降ってきた降水の概ね6～7割が積雪底面から流出することが明らかになった。

3. おわりに

2011年の実験では積雪底面流出が全く観測されなかったのに対し、2012年の実験では撒いた水量の27～40%が積雪底面から流出し、流出水の6～7割は撒いた水そのものであるという対照的な結果が得られた。2ヶ年の結果を無理なく説明できる結論を出すには、なお検討の余地がある。今後、積雪内で水平方向の水みちとなる氷板や大粒のザラメ雪層ができる前後で、融雪水の浸透がどのように変化するかを明らかにするために、水平方向の顕著な水みち層が発達する前（積雪深150cm程度）と後（同80cm程度）とで模擬降雨散水実験を比較するなどの追試が必要であろう。

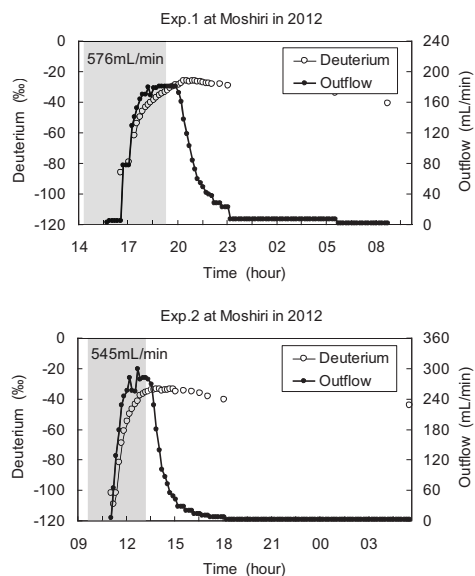


図1. 2012年の1、2回目実験における積雪底面流出量と重水素同位体比の時間変化（灰色部は上方に記した一定強度で模擬降雨を散布した時間帯）



# 斜面における融雪と積雪底面流出量

河島 克久<sup>1</sup>・伊豫部 勉<sup>1</sup>・外狩 麻子<sup>2</sup>

<sup>1</sup>新潟大学災害・復興科学研究所

<sup>2</sup>東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター

## 1. はじめに

雪崩災害や融雪土砂災害などは基本的に斜面上で発生するものであり、雪氷防災の観点からは斜面積雪の性状や動態に関してより深い知見が求められる。著者等は、鉄道における融雪期の斜面災害の防止・軽減に資することを目的とした研究の一環として、2006年から毎年、新潟県魚沼市大白川において融雪期に平地と斜面で同時に積雪断面観測を行ってきた。その結果、斜面積雪は平地積雪に比べて「層構造が単純」、「ざらめ化の進行が早い」、「密度・硬度が小さい」という特徴があることが明らかになった。また、平地積雪の性状は北向き斜面と南向き斜面の中間に位置するわけではなく、極端に言えば、雪が平地に堆積したか斜面に堆積したかという違い自体が積雪性状の相違をもたらしており、斜面方位による相違はさほど大きくない。このような斜面積雪の特徴は、斜面の方が平地よりも早い時期に融雪水の地中流出が生じることや、斜面の積雪強度が平地よりも小さいこと等を示唆している可能性があり、融雪期の雪崩災害や融雪土砂災害を考える上で重要なポイントである。そこで、斜面と平地における日射量・融雪量の違いについての検討を始めるとともに、2010年からは斜面と平地において積雪ライシメータを用いた積雪底面流出量の同時観測を新潟県魚沼市大白川において開始させた。

## 2. 斜面と平地における日射量・融雪量の比較

融雪に係わる熱収支構成要素の中で斜面と平地で大きく異なるのは日射量である。これは、斜面と平地では直達日射の入射角が大きく異なる場合があるからである。本研究では、大白川の緯度経度において斜面方位・傾斜が異なる仮想的斜面を設定し、直達日射計データを用いて斜面積雪に与えられる下向き短波放射量を推定した。また、この下向き短波放射量を Temperature-Radiation Index Melt Model に入力し、斜面積雪の表面融雪量を推定した。これらの推定値を平地と比較することによって斜面積雪の融雪に関して理解を深めることとする。

### 2.1 斜面積雪に与えられる日射量の計算手順

斜面における日射量を推定するにあたり用いた基本的な考え方の概要と仮定は次の通りである。まず、平地及び斜面における下向き短波放射量はそれぞれ次式で表される。

$$K_{\downarrow} = I_b \cos Z + D \quad (1)$$

$$K_{s\downarrow} = I_b \cos Z' + D_s \quad (2)$$

ここで、 $K_{\downarrow}$ は平地における下向き短波放射量、 $I_b$ は直達日射量、 $Z$ は太陽の天頂角、 $D$ は平地における散乱日射量である。また、 $K_{s\downarrow}$ は斜面における下向き短波放射量（斜面に対して垂直なフラックス） $Z'$ は斜面に対する直達光の入射角、 $D_s$ は斜面における散乱日射量である。大白川では $K_{\downarrow}$ と $I_b$ は観測データが存在する。また、 $Z$ と $Z'$ は計算によって求めることが可能である。そこで、斜面における下向き短波放射量 $K_{s\downarrow}$ を求めるために、本研究では $D=D_s$ という仮定をおいた。そうすることによって、式(1)から $D(=D_s)$ を求め、それを式(2)に代入するこ

とで  $K_{s\downarrow}$  を算出できる。

## 2.2 計算の種類

本研究では、緯度経度を大白川観測地の緯度経度とし、以下に示す仮想的斜面に対して 2012 年 3 月 1 日～5 月 9 日を対象として計算を行った。

### ①斜面における日の出・日の入時刻

平地

東斜面・傾斜 30°，西斜面・傾斜 30°，南斜面・傾斜 30°，北斜面・傾斜 30°

南斜面・傾斜 10°，南斜面・傾斜 20°，南斜面・傾斜 40°

### ②斜面における日射量（下向き短波放射量）

東斜面・傾斜 30°，西斜面・傾斜 30°，南斜面・傾斜 30°，北斜面・傾斜 30°

南斜面・傾斜 10°，南斜面・傾斜 20°，南斜面・傾斜 40°

### ③斜面における表面融雪量

平地

東斜面・傾斜 30°，西斜面・傾斜 30°，南斜面・傾斜 30°，北斜面・傾斜 30°

南斜面・傾斜 10°，南斜面・傾斜 20°，南斜面・傾斜 30°，南斜面・傾斜 40°

## 2.3 計算結果の概要

### (1)斜面における日の出・日の入時刻

斜面方位別にみると、東斜面と西斜面において日中時間帯が顕著に短い。南斜面は 3 月から 5 月にかけて日中時間帯の長さあまり変化しないことが特徴である。一方、北斜面の日の出・日の入時刻は平地とほとんど差がない結果となった。斜面傾斜による違いは南斜面についてのみ計算したが、結果的には傾斜 10～40°の範囲では差異はほとんどみられなかった。

### (2)斜面における日射量の斜面方位による違い

いずれの斜面方位においても、曇天・降水日の日射量は平地と斜面で大差はない。これは、曇天・降水日には直達日射量が小さく、しかも散乱日射量が斜面方位や平地によらず同じと仮定しているためである。一方、晴天日には斜面方位によって大きな差異が認められる。その特徴は、東斜面では平地よりも早い時刻に日射量のピークが出現し、逆に西斜面では遅い時刻に日射量のピークが出現することである。また、南斜面と北斜面ではピーク時刻は平地とほぼ同じであるが、南斜面では特に融雪初期に平地よりも日射量が著しく大きく、北斜面では融雪期間を通して小さいことがあげられる。

### (3)斜面における日射量の斜面傾斜による違い

いずれの斜面傾斜においても、前項と同様に曇天・降水日の日射量は平地と斜面で大差はない。晴天日では、傾斜が大きくなるに従って日射量が平地よりも大きくなる傾向が特に融雪初期に顕著にみられる。ただし、傾斜 30°と 40°ではほとんど差がない。

### (4)斜面における表面融雪量

日射量の計算結果を用いて斜面における表面融雪量を計算し図 1 に示す（斜面傾斜 30°）。積算融雪量で見ると、どの方位でも平地（1444mm）よりも大きい値を示しており、中でも南斜面が最も大きい。日射量が小さい北斜面でも平地より積算値が大きいことについては、日の出・日の入時刻の計算結果とともに今後十分な検討が必要である。一方、南斜面について斜面傾斜

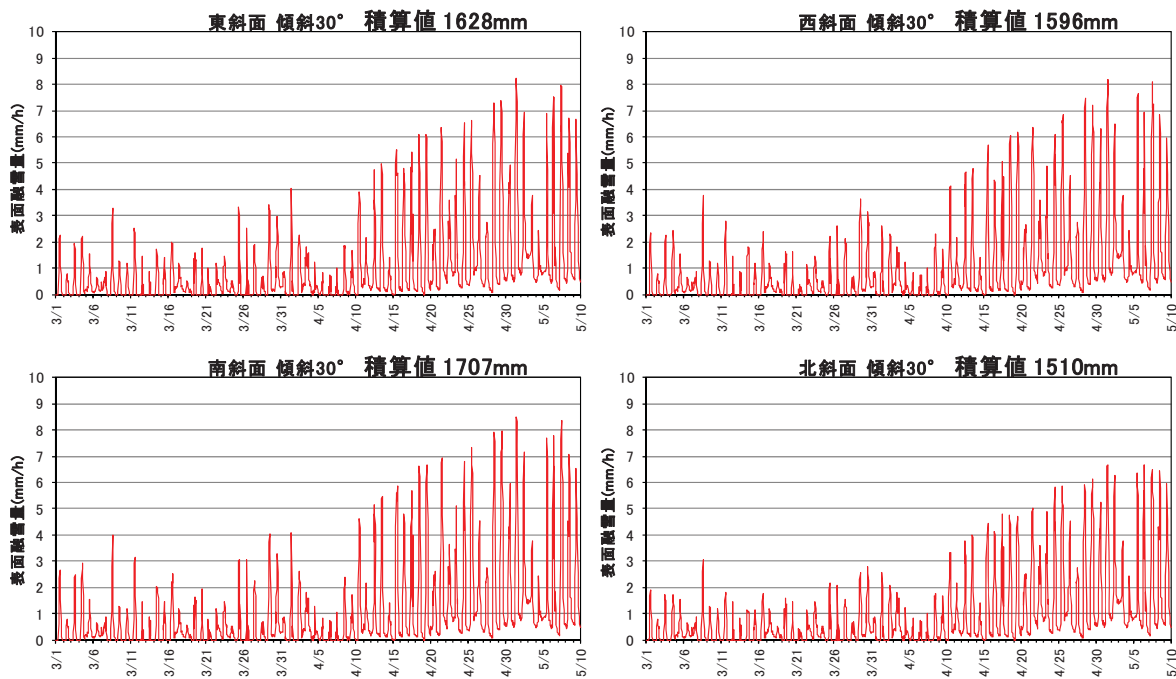


図1 斜面方位による表面融雪量の違い（斜面傾斜 30°）

による違いをみたところ、いずれの傾斜でも平地よりも積算融雪量が大きくなっており、傾斜が増すにしたがって積算値も増大することが分かった。

### 3. 斜面と平地における積雪底面流出量観測

#### 3.1 平地における観測結果

2012年融雪期における平地の積雪ライシメータによる積雪底面流出量の観測結果を図2に示す。積雪水量等の時間変化から、遅くとも3月上旬には、表面融雪に伴う積雪底面流出が起こっていたと推定されるが、enclosed 処理（ビニールシート被覆）を行った3月26日までのデータには顕著な積雪底面流出は観測できなかった。enclosed 処理を行う前の unenclosed type のライシメータによる観測では、積雪層内における融雪水の側方流出や、積雪層の負圧の影響による end effect が実際に生じており、積雪底面流出を捉えることができなかったものと考えられる。一方、ビニールシート被覆が完了した3月27日以降では、強いピークを持つ日変動がほぼ連続的に観測されている。

ライシメータ直上の積雪柱にビニールシート被覆を施してから積雪柱が完全に融けきるまでの期間（3月26日15:00～5月13日0:00）までの積雪底面流出量の積算値と3月26日15:00の積雪水量（3回の実測値の平均）および3月26日15:00～5月13日0:00の降水量を比較したところ、両者は完全に一致していた。2010年、2011年の観測でも、ビニールシート被覆以降の両者の比はそれぞれ1.03、0.97となっており、enclosed 処理によって確実に積雪底面流出量を測定できることが分かる。

#### 3.2 斜面における観測結果

斜面における積雪底面流出量の観測結果を図3に示す。2012年5月4日には斜面ライシメータ上の積雪が部分的に融けきってしまったため、グラフでは5月3日までを表示している。



斜面では2月から顕著な流出が認められる(2月8~10日, 2月23~27日)。その後2月28~3月3日には流出が一旦止まるが, 3月4日以降再開している。4月の上旬までは降雪と降雨が繰り返しもたらされたため, 日変化が明瞭でない日が多いが(多くが降雨に対応した散発的な流出), 4月中旬以降は日変化が明瞭に現れるようになった。

平地の積雪ライシメータに enclosed 処理を施した3月26日以降について両者を比べると, 変動パターンは類似しているものの, 平地に比べて斜面の流出量(特にピーク時)が小さいことが特徴的である。これは, enclosed 化されていない斜面ライシメータでは融雪水・雨水の取り逃しが生じている可能性がある。もう一つの特徴として, ピーク流出量や最低流出量の出現時刻が, 斜面の方が0~9時間程度遅いことがあげられる。この特徴は, 融雪初期において特に顕著であり, 融雪に伴う全層雪崩の発生を考える上で重要である。

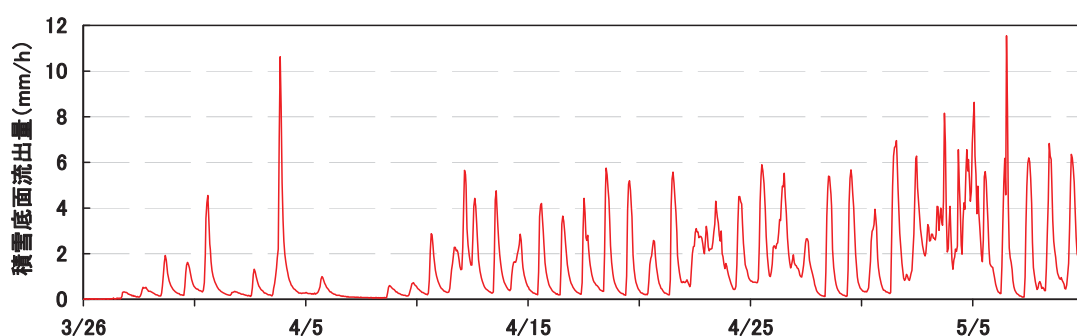


図2 平地における積雪ライシメータ観測による積雪底面流出量の変化

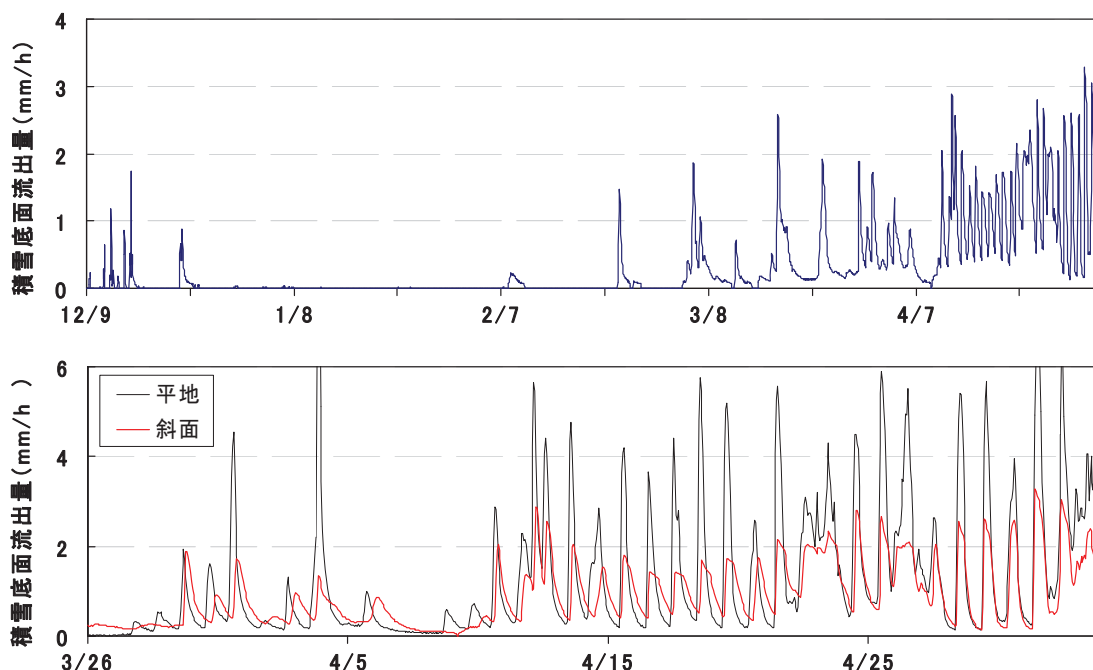


図3 斜面における積雪ライシメータ観測による積雪底面流出量の変化

# 積雪中の化学物質動態

倉元隆之

信州大学 山岳科学総合研究所

kuramoto@shinshu-u.ac.jp

## 1. はじめに

降雪には、海塩などの自然起源物質、人間活動によって排出された人為起源物質といった、さまざまな化学成分が含まれている。降雪や乾性沈着によってもたらされた化学物質は融雪期まで積雪中に蓄積され、融雪期に集中的に流去するため、融雪水が流れ込む河川や湖沼が酸性化するという現象も報告されている。

日本海側地域から脊梁山脈である中部山岳地域にかけては、多雪な地域である。そのため、この地域の水循環およびそれに伴う物質循環には雪が大きく関わっている。したがって、一般に環境変化に弱いとされる、山岳地域における水圏の環境動態を正しく理解するためには、降雪・積雪の影響を評価することが重要となる。中部山岳地域では、積雪は主に冬型の気圧配置時と南岸低気圧によってもたらされる。これまでの研究によって、降雪の化学特性は気象条件により異なることが分かっている（鈴木・遠藤, 1994a,b など）。積雪は、融雪が始まるまで降雪時に蓄えた化学成分を各層に保存している（Suzuki, 1982）。そのため、最深積雪期に積雪観測を行うことで、気象条件の違いと採取した積雪に含まれる化学的指標をもとにして、各積雪層の堆積時期を推定することができる（遠山ほか, 2005 ; 鈴木ほか, 2011）。一方で、積雪中に含まれる化学成分は、海からの距離や地形、標高などの影響を受ける（田中・鈴木, 2007）ため、同一の降水イベントによる積雪であっても、積雪の化学特性は観測地点によって異なることが予想される。

そこで、本報告では中部山岳地域の多地点において積雪断面観測を実施した結果に基づき、積雪に含まれる化学成分の空間分布と積雪中での化学物質の動態について紹介する。

## 2. 方法

積雪試料の採取は、樹木による遮りや人間活動による攪乱がない広く平らな場所で行った。各観測地点では、積雪断面観測を行い、積雪密度と雪温を積雪表層から 3 cm 間隔で測定した。化学分析用の雪試料は、ステンレス製のサンプラーを用いて、積雪表層から 3 cm ごとに連続採取した。採取した試料は、密閉したサンプル袋に入れて、融解させずに信州大学まで持ち帰った。試料は変質を防ぐために分析時まで冷凍保存した。分析直前に実験室において室温で試料を融解した後、pH と電気伝導度の測定を行い、主要イオン濃度 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) の測定は、イオンクロマトグラフを用いて行った。

## 3. 結果

図に中部山岳地域で採取した新雪中の pH と電気伝導度の関係を示す。pH に着目すると、新雪試料の pH は 4.0~5.3 の範囲にプロットされており、全ての試料が酸性降水の基準で

ある pH 5.62 を下回った。降雪直後に観測を行ったことから、降雪後の乾性降下物の影響はほとんど無視できる。よって、研究対象地域の広域で冬季に酸性降水がもたらされていることが分かった。pH の高い試料では電気伝導度が低く、pH が低い試料では電気伝導度が高くなった。このことから、pH の高い試料では化学成分が少ない。それに対し、pH の低い試料には化学成分が多く含まれており、それらの化学成分には、酸性化に寄与する成分が含まれていると考えられる。

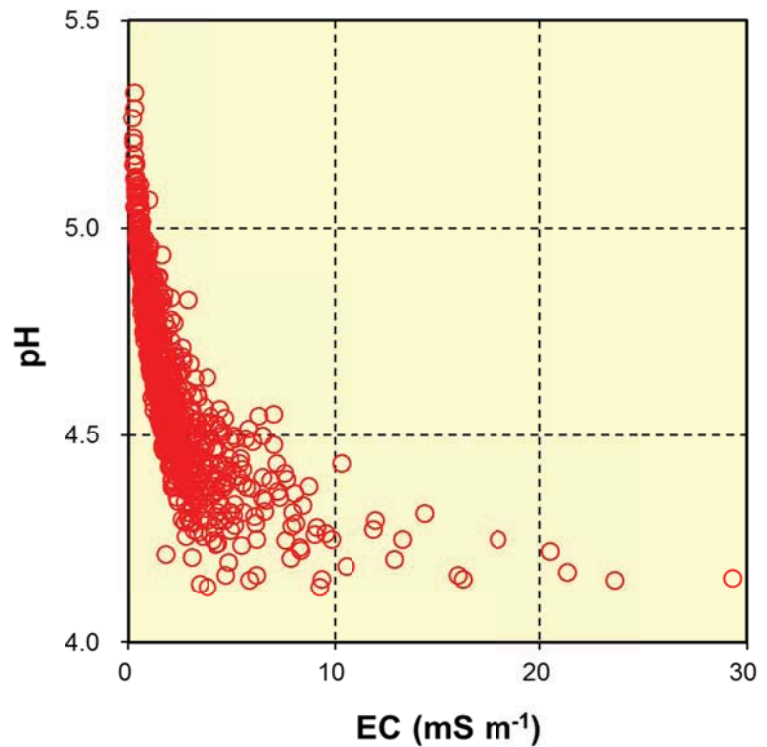


図 新雪試料の pH と電気伝導度の関係

#### 引用文献

- Suzuki, K. (1982): Chemical changes of snow cover by melting. *The Japanese Journal of Limnology*, **43**, 102-112.
- 鈴木啓助・遠藤八十一(1994a): 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.
- 鈴木啓助・遠藤八十一(1994b): 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・池田敦・兼子祐人・鈴木大地・槇拓登(2011): 雪氷化学的手法による山岳地域の冬季降水量算定. 雪氷, **73**, 281-294.
- 田中基樹・鈴木啓助 (2007): 山岳積雪中の化学成分の空間分布とその成因. 雪氷, **69**, 371-381.
- 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.

# 花粉を指標とした積雪融解にともなう数 10 $\mu\text{m}$ サイズ粒子の移動

中澤 文男

国立極地研究所 新領域融合研究センター

nakazawa@nipr.ac.jp

## 1. はじめに

山岳積雪に含まれる花粉は、積雪層の堆積時期を推定する際に有効であることが近年の研究から明らかになってきた。花粉は種類によって飛散時期が異なるため、堆積時期の異なる積雪層からは異なる種類の花粉が検出される。山岳積雪中で検出される花粉濃度ピークは、その花粉が調査地周辺で最も飛散していた時期、すなわち周辺植生の花期と同期して出現していると考えられる。Nakazawa *et al.* (2004) では、花粉を指標とすることで融解を経験している積雪やアイスコアの年層を決定できることを示した。花粉の粒径は一般に 10 ~ 200  $\mu\text{m}$  と大きく、積雪中に融雪水が浸透した場合でも、花粉粒はもとの深さに留まることができると考えられる。しかしながら積雪融解に伴う花粉粒の挙動に関する研究はほとんどおこなわれていない。とりわけ融解が急速に進行した場合や水みちが形成されているところでの花粉濃度ピークの大きさ・形の変化はほとんど知られていない。積雪やアイスコアの年層を、花粉を指標に決定する際は、この変化を理解しておく必要がある。本話題提供では、長野県乗鞍高原でおこなった積雪融解にともなう花粉濃度ピークの変化に関する研究を紹介する。そして、融雪期における積雪中の固体微粒子の移動について考察する。

## 2. 方法

積雪試料は、2005 年 3 月~4 月および 2006 年 3 月~5 月の融雪期に、休暇村乗鞍高原（長野県松本市安曇、北緯 36.12 度、東経 137.61 度、標高 1590 m、図 1）にて、9 cm および 3 cm ごとに連続して採取した。本研究では試料に含まれる日本スギ (*C. japonica*) の花粉を分析対象とした（図 2）。日本スギの花粉は 2 月下旬~4 月頃に飛散する。乗鞍高原は、積雪が 4 月の終わりまで残るため、本研究に適した地域である。試料は融解後、20 ml を直径 13 mm、孔径 1  $\mu\text{m}$  の親水性 PTFE フィルターでろ過した。花粉を捕集したフィルターを遠沈管に移し、フッ酸、硫酸を加え、夾雑物である土壌粒子や有機物の分解をおこなった。その後、反応液を再度フィルターろ過し、フィルターごとプレパラートにした。プレパラートは全面を顕鏡し、スギ花粉の数を計数した。

## 3. 結果および考察

積雪深は、各年とも 4 月~5 月の融雪にともない減少した。その期間中、積雪表面で検出された花粉濃度ピークは表面で留まり続けた。このことは、花粉粒が融解水と異なり下層へ移動しづらいことを指しており、さらに表層で濃縮されていると考えられた。しかしながら、積雪が消失間近になると花粉濃度ピークは小さくなった。ピークの下層で花粉濃度の上昇は観察されなかったため、この結果は花粉粒が積雪表面で再分配されている可能性を示唆する。また、水みちが形成された所においても花粉濃度ピークは表層で保持されていた。以上のこのことから、花粉粒は著しい融解が生じた場合でも下層へ流されにくいと考えられる。しかしながら粒子は水平方向への再分配、すなわち凹部への移動により、ピークの大きさは変化すると考えられる。

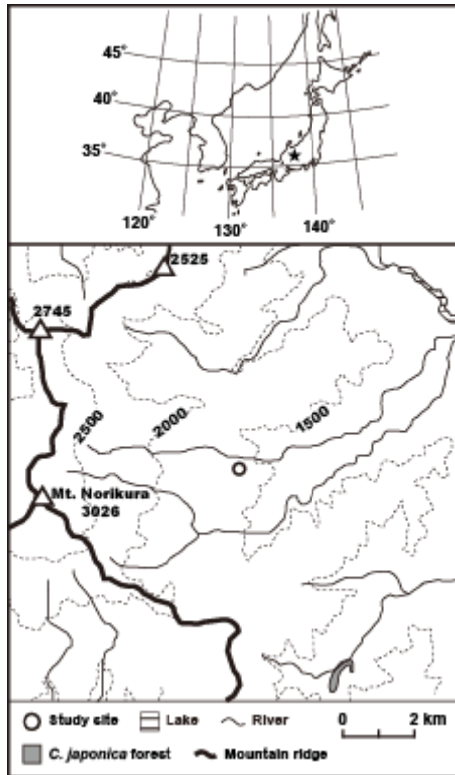


図1. 調査地点の地図



図2. 日本スギ (*C. japonica*) 花粉の顕微鏡写真 (スケールバーは 10  $\mu\text{m}$ )

#### 参考文献

Nakazawa, F., K. Fujita, J. Uetake, M. Kohno, T. Fujiki, S. M. Arkhipov, T. Kameda, K. Suzuki, and Y. Fujii (2004), Application of pollen analysis to dating of ice cores from lower latitude glaciers, *Journal of Geophysical Research*, 109, F04001, doi:10.1029/2004JF000125.



# 積雪の通気度と積雪構造との関係

荒川逸人

野外科学株式会社

h.arakawa@yagai.co.jp

## 1. はじめに

積雪の通気度は積雪内の空気の通りやすさを表す物理量であり、流体の影響を除いた固有透過度 (Permeability,  $k$ ) に変換することで、積雪内の対流、大気-積雪の物質移動、融雪水の浸透などの重要な物理過程の議論に利用される。また、 $k > 0$  で雪、 $k = 0$  で氷をわける指標となる重要な物理量である。Permeability は多孔質体の形状のみに依存することから、これまでに積雪の構造と関連付ける試みが多くおこなわれてきた。

本講演では、permeability と粒径との関係を示す最も知られた Shimizu の式について話題と、海外における 3 次元解析による permeability の解析事例を紹介し、今後の課題について議論する。

## 2. Shimizu の式と粒径

Permeability は密度だけの関数にはならず、粒径を含めて関連付けがおこなわれてきた。最も有名な式は Shimizu(1970)の式である (表 1)。Shimizu の式は雪質が限定されて求められた式であり、他の雪質に合わないといった指摘がされてきているが、逆にこれに取って代わる関係式もまだ現れてはいないのが現状である。Shimizu の式が受け入れられてきているのは、十分な測定数があって粒径の定義も明確であるためであると筆者は考えている。Shimizu の粒径は、単一径  $D_0$  の球粒子がランダム配列しているとし、薄片上に現れた粒子数から推定される。他にも条件があるが、粒子の表面積の変化が少なくすむとみられる。Shimizu 以降、実測から関係式を導出した研究としては、Sommerfeld et al.(1993)の新雪・こしまり雪 15 試料、荒川ら(2010)の 6 種類 144 試料がある。粒径については、Sommerfeld et al.(1993)は SSA (比表面積) で代用し、荒川ら(2010)は Run-length (粒子の平均太さ) を利用した。数値解析としては、Calonne et al.(2012)の 6 種類 35 試料の 3 次元構造データから Permeability を導出した事例がある。ここでは、粒径は SSA から球粒子として算出されている。式を並べてみるとわかるように、粒径にかかる係数は粒径の測定方法に依存する。また、密度にかかる係数の絶対値は複雑な粒子形状の雪質が含まれると大きくなる傾向がある。

表 1. 固有透過度の回帰式

Description	Equation	Grain size	Snow Type (ICSSG)
Shimizu	$k = 0.077D_0^2 \exp(-0.0078\rho_s)$	$D_0$ : Circle diameter in the cross section	DF, RG
Sommerfeld	$k = 0.65S_V^{-2} \exp(-0.01015\rho_s)$	$S_V$ : SSA unit per volume	PP, DF
Arakawa	$k = 1.706D_g^2 \exp(-0.0131\rho_s)$	$D_g$ : Run-length	PP, DF, RG, FC, DH, MF
Calonne	$k = 3.0r_{ES}^2 \exp(-0.0130\rho_s)$	$r_{ES}$ : Equivalent sphere radius	PP, DF, RG, FC, DH, MF

### 3. 迂回率

Zermatten et al.(投稿中)は、荒川ら(2010)の積雪試料を X 線 CT により 3 次元構造を解析し、DPLS (Direct pore level simulation) という数値計算によって通気度を算出し、荒川ら(2010)の通気度データと比較をおこなっている。計算と実測の差は 2.7% から 42% で平均で 23% であった。計算過程で流路が求まるため、サンプル試料との比から迂回率  $\tau_Z$  が求められる。一方、荒川ら(2010)でも Darcy 則と Hagen-Poiseuille 流を組み合わせた簡易な円管束モデルから迂回率  $\tau_A$  を算出している。両者を比較すると、 $\tau_Z=1.14\sim 1.22$ 、 $\tau_A=1.31\sim 2.68$  となり、円管束モデルの迂回率の方がはるかに大きい結果であった。試料を往復するような長さの流路があるとは考えにくく、流れに関与していない間隙の影響などを含んでいると考えられる。

また、Darcy 則を拡張し、レイノルズ数  $Re$  の変化に対する圧力勾配についても検討し、 $Re < 1$  では圧力勾配がほぼ一定になることを示している。さらに、この  $Re$  と  $\tau_Z$  の関係を示しており、 $Re < 1$  では  $\tau_Z$  はほぼ一定であるが、 $Re \geq 1$  となると  $\tau_Z$  が小さくなるという傾向が示された。流速が大きくなると管の形状に沿わず、直線的に流れることが示唆された。

### 4. 今後の課題

Shimizu の式に代表されるような Permeability の関係式は扱う雪質と粒径の定義によって係数が変わってくる。オールラウンド対応であれば、密度にかかる係数は -0.013 程度で良いかもしれない。粒径については、粒径の定義が研究者によって異なるので、統一した粒径測定法を議論する必要がある。

迂回率が 3 次元計測によってわかってくれば、これまで未知であった流れに関与しない間隙についての定量的に把握ができるようになり、有効間隙率が導かれるようになることが期待される。

世界的にみても実測数は限られており、間隙の構造把握のためには、通気度の計測と積雪構造の測定の実験データセットを増やすことが必要である。

#### 参考文献

- Shimizu, H., 1970: Air permeability of deposited snow. Contrib. from Insti. Low Temp. Sci., A22 32pp.
- Sommerfeld, R. A. et al., 1993: Permeability measurements on new and equitemperature snow. Water Res. Res., 28(8), 2485-2490.
- 荒川ら. 2010: 季節積雪の固有透過度と微細構造に関する諸因子との関係. 雪氷, 72(5), 311-321.
- Calonne, N., et al. 2012: 3-D image-based numerical computations of snow permeability: links to specific surface area, density, and microstructural anisotropy. Cryosphere, 6, 939-951.
- Zermatten et al. : Comparison between measured and tomography-based simulated porosity, specific area and permeability of snow. *Submitted*.

# 積雪の比表面積と水分移動

山口 悟

防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

yamasan@bosai.go.jp

## 1. はじめに

積雪内部の水の移動を考える際には、飽和透水係数 ( $K_s$ ) と不飽和透水係数 ( $K$ ) が重要となる。積雪の  $K_s$  に関しては、積雪の密度 ( $\rho_s$ ) と粒径( $d$ )の関数として取り扱うことが多い<sup>1)</sup>。一方積雪の  $K$  に関する直接測定はほとんど行われていない<sup>2),3)</sup>。Yamaguchi ら<sup>4),5)</sup>は、 $K$  に関係する物理パラメータの一つである積雪の水分特性曲線(WRC)の測定を、 $\rho_s$ 、 $d$ 、雪質を変えたサンプルで測定し、ざらめ雪の WRC は  $\rho_s/d$  というパラメータを用いてモデル化できる可能性を示す一方、積雪の WRC は雪質にも依存する可能性を示唆した。それらの結果に山口ほか<sup>6)</sup>は、土壌分野で  $K$  のモデルとしてよく利用されている van Genuchten-Muelem モデル(以後 VG-M モデル)を用いて、積雪の  $K$  のモデル化を行い、VG-M モデル内のパラメータである連結統合係数  $l$  (間隙の屈曲による影響と空隙同士の連結確率を与える空間的配置の相関を補正する係数) を適正に選ぶこと、すなわち  $l$  の積雪特性依存性を明らかにすることが重要であることを指摘した。

このように現在のところ積雪の  $K_s$  並びに  $K$  は、 $\rho_s$  と  $d$  でモデル化するのが一般的である。しかし実際には  $K_s$  並びに  $K$  は、 $\rho_s$ 、 $d$  だけではなく雪質 (雪粒子の形状) や雪粒子の結合状態にも関係すると考えられる。従って、より現実に近い形で  $K_s$  並びに  $K$  をモデル化するためには、それらの情報も含んだ他の物理量を用いるのが望ましい。本講演では、Yamaguchi ら<sup>4),5)</sup> 並びに山口ほか<sup>6)</sup>の結果を、 $\rho_s$  や  $d$  を使うのではなく、積雪の比表面積(SSA)を用いて改めて解析を行い、それを基に SSA で積雪内部の水の移動をモデル化が可能かに関して議論する。

## 2. 積雪の比表面積

比表面積(SSA)は、粉体などの多孔質物質の組織構造を表す物理量の一つで、単位質量もしくは単位体積当たりの粉体粒子の表面積のことである<sup>7)</sup>。従って雪粒子のサイズだけではなく、形状や結合状態も反映した物理量であるため、積雪内部の物質移動のモデル化には適している変数であると考えられる。先行研究として、Sommerfeldら<sup>8)</sup>が積雪の通気度を SSA を用いてモデル化を試みている例がある。積雪の SSA の測定に関しては、日本では“片薄片による画像解析<sup>9),10)</sup>”が未だ主流であるが、近年著者らによってフィールドで観測ができることを念頭に、ガス吸着法 (BET法)<sup>11)</sup>や近赤外カメラを用いた方法(NIR法)<sup>12)</sup>による SSA の測定が試みられている。本研究の積雪の SSA 測定においては NIR 法を用いた。

## 3. 結果と考察

表 1 に粒径の異なる 3 種類のざらめ雪で測定された WRC,  $K_s$  ならびに  $K$  のモデル化の際に必要なパラメータの値と NIR 法から求めた SSA を示す。なお WRC のモデル化には以下の van Genuchten モデル (以下 VG モデル)

$$S_e = \frac{\theta_v - \theta_v^r}{\theta_v^s - \theta_v^r} = (1 + |\alpha h|^n)^{-m} \quad m = 1 - 1/n \quad (1)$$

を用いた。ここで、 $S_e$ は有効飽和度、 $\theta_v$ は体積含水率、 $\theta_v^r$ は残留体積含水率、 $\theta_v^s$ は飽和体積含水率、 $\alpha$ 、 $n$ 、 $m$ はWRCの形状を与えるパラメータである。また $K$ のモデル化に関しては以下のVG-Mモデル

$$K(S_e) = K_s S_e^l (1 - (1 - S_e^{1/m})^m)^2 \quad (2)$$

を用いた。ここで $l$ は連結結合係数である。

NIR法で求めたSSAと各パラメータとの関係を見てみると、SSAが減少すると $\alpha$ と $K_s$ は増加傾向を示したのに対し、 $n$ の値は減少した。一方 $l$ とSSAの間には明確な相関がみられなかった。これは、今回使用した $K$ の実測値はバラつきが大きく、必ずしも今回求めた $l$ の値が統計的に有意とは言えないことが影響している可能性もある。今後様々なSSAを持った積雪（異なった雪質や粒径等）でWRC、 $K_s$ 、 $K$ の測定を行いデータの蓄積をする必要があるが、今回の結果は、SSAを用いて積雪内部の水の移動がモデル化できる可能性を示唆している。

表1 SSAと各パラメータとの関係

	バルク的な情報		NIR法	$K_s$	VGモデル		VG-Mモデル
	粒径(mm)	密度(kg m <sup>-3</sup> )	SSA(mm <sup>-1</sup> )	m s <sup>-1</sup> (x10 <sup>-3</sup> )	$\alpha$	n	$l^*$
サンプル1	1.1	549	9.1	2.4	9.1	11.9	-0.6
サンプル2	1.5	548	6.4	3.5	12.8	8.2	0.2
サンプル3	2.1	545	6.0	4.6	17.2	6.7	-0.7

\*最小二乗法で決定したが、実験データが少ないため統計的に有意ではない可能性。

#### 参考文献

- 1) 清水, 1960. 積雪の通気抵抗 IV: 積雪の通気度. *低温科学, 物理篇*, **19**, 165-173
- 2) 杉江・成瀬, 2000. 積雪の不飽和透水係数の測定. *雪氷*, **62**, 117-127.
- 3) Yamaguchi and Sato, 2007. A study of the unsaturated hydraulic conductivity of snow. *International Symposium on Snow Science [Abstract]*, IGS, Moscow, 54.
- 4) Yamaguchi et al., 2010. Water retention curve of snow with different grain sizes. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **64**, 87-93.
- 5) Yamaguchi et al., 2012. Dependence of the water retention curve of snow on snow characteristics. *Ann. Glaciol.*, **53**, 6-12
- 6) 山口ほか, 2012. 積雪内部の水分移動に関する実験的研究. *日本水文科学会誌*. **42**, 89-100.
- 7) 雪氷辞典, 1990. 古今書院. pp196.
- 8) Sommerfeld et al., 1993. Permeability measurements on new and equitemperature snow. *Water Res. Res.*, **28**, 2485-2490.
- 9) 成田, 1969, 積雪の比表面積の測定I. *低温科学, 物理篇*, **27**, 77-86.
- 10) 成田英器, 1971: 積雪の比表面積の測定 II. *低温科学, 物理篇*, **29**, 69-79.
- 11) Legagneux et al., 2002. Measurement of the specific surface area of 176 snow samples using methane adsorption at 77 K. *J. Geophys. Res.*, **107**(D17), 4335. doi:10.1029/2001JD001016.
- 12) Matzl and Schneebeli, 2006. Measuring specific surface area of snow by near-infrared photography. *J. Glaciol.* **52**, 558-564

# 積雪中における水、物質移動のモデル化

平島寛行

防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

hirasima@bosai.go.jp

## 1. はじめに

積雪中における水分移動のモデル化は、全層雪崩や融雪災害、積雪中における不純物移動の予測等において重要である。しかしながら、現在の積雪モデルにおいて、積雪内部の水の移動過程は十分に組み込まれていない。本講演では積雪モデルにおける水分移動計算の現状及び、水みち形成を再現するために新たに開発している多次元水分移動モデルについて説明する。また、そのモデルを用いて不純物の移動計算を試みた例を示す。

## 2. 積雪モデルにおける水分移動計算の現状

防災科研では、積雪変質モデル SNOWPACK を用いて雪氷災害発生予測を行っている。モデルにおける水分移動過程をより現実に近いものにするため、毛管力の測定結果等から構築された経験式を導入して、積雪中における水分移動過程の改良を行ってきた<sup>1)</sup>。それにより、含水率や積雪底面からの水の流出量の再現性が向上した<sup>2)</sup>。一方で、水みち過程を考慮できない1次元のモデルでは、水が積雪底面に到達するタイミングが遅れるなど、融雪災害の予測等に応用するには限界があった。

## 3. 水みちモデルの開発

水みち形成過程を再現するため、多次元的水分移動モデルを開発した。基本式は1次元の時と同じダルシー式を用いているが、式(1)のように重力項を傾斜角 $\theta$ の関数で表現する事で、斜面積雪中の水の移動にも対応させた(図1)。

$$\begin{aligned} q_z &= K \left( \frac{dh}{dz} + \cos\theta \right) \\ q_x &= K \left( \frac{dh}{dx} + \sin\theta \right) \end{aligned} \quad (1)$$

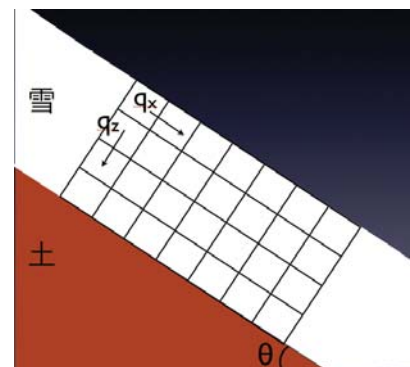


図1. 2次元水分移動モデルの模式図(斜面)

モデルの2次元化により、水平方向や斜面に平行な方向への水分移動が計算されるようになったものの、水みちの形成は再現できなかった。そこで、積雪の不均一性を組み込むため、各グリッドごとに乱数を発生させて密度及び粒径のばらつきを与えた。また、Katsushima et al., 2013<sup>3)</sup>の実験結果に基づいて、乾き雪に水が浸透する際に影響する水侵入サクションを導入した。その結果、図2のように、特に粒径が変わる層境界において水みちが形成される過程が再現された。



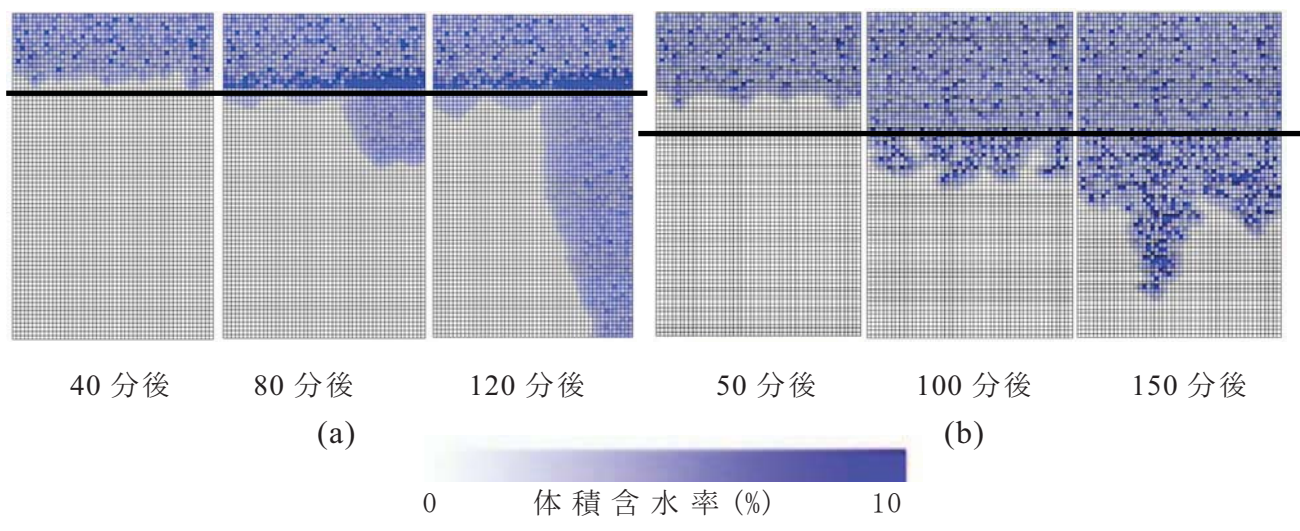


図2. 上下で粒径の異なる層を設定して10mm/hの水を供給した時の含水率分布の時間変化。1cm×1cm サイズ、50×80のグリッドで計算。太線は粒径の異なる層の境界、色の濃さは体積含水率を表す。下字は水供給開始からの経過時間 (a)上:粒径1.1mm 下:粒径2.6mm (b)上:粒径1.1mm 下:粒径0.5mm。

#### 4. 不純物移動のモデル化への応用

溶解性の不純物は主に水に伴って移動するため、本モデルを応用して不純物の移動を計算する事も可能である。現在は不純物移動の計算に取り組み始めた段階であるが、今後、吸着や移流、拡散に関するパラメータを定式化する事ができれば、積雪中の不純物移動を正確に予測できるようになることが期待できる。

#### 5. まとめ

現在の水みち過程を考慮していない1次元の積雪モデルでは水の底面到達のタイミングが遅れる等の問題があるため、多次元モデルを構築し、不均一成分や水侵入サクシヨンの影響を導入して水みち形成を再現した。本モデルを実験、観測に基づいて改良する事で、積雪中の不純物移動の予測も可能になることが期待できる。

#### 参考文献

- 1) Hirashima et al. (2010) Numerical modeling of liquid water movement through layered snow based on new measurements of the water retention curve. Cold. Res. Sci. Tech. 64. 94-103.
- 2) 平島ら (2011) 積雪水分移動モデルの湿雪全層雪崩予測への応用, 寒地技術論文・報告集 27, 33-36.
- 3) Katsushima et al. (2013) Experimental analysis of preferential flow in dry snowpack. Cold. Res. Sci. Tech. 85. 206-216.



**NIED**

National Research Institute for  
Earth Science and Disaster Prevention