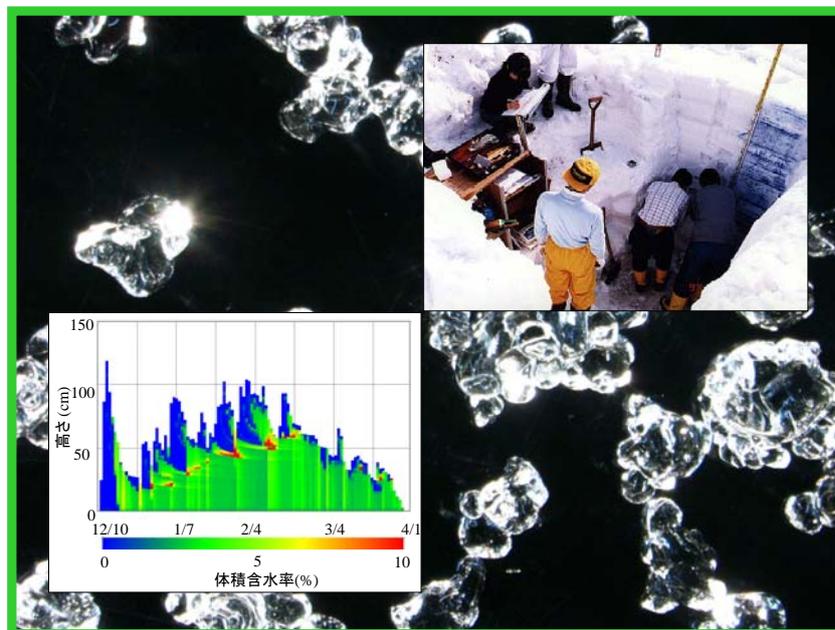


# 第三回 積雪モデルに関する ワークショップ

「積雪モデルの現状と今後の発展に向けた研究」

## 講演Abstract集

2012/02/29





## プログラム

10:00-10:15 主催者あいさつ、事務連絡

### セッション1

10:15-10:55 積雪モデルの開発

(東北大学 山崎 剛)

10:55-11:35 積雪変態・アルベドプロセスモデルの開発

—精度検証と積雪不純物が融雪に及ぼす影響評価—

(気象研究所 庭野 匡思)

11:35-12:15 積雪変質モデルを用いた雪崩発生予測の現状と課題

(防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター 平島 寛行)

12:15-13:30 休憩

### セッション2

13:30-14:10 降雪結晶の観測と積雪モデルへの反映の展望

(北海道大学 中村 一樹)

14:10-14:50 水みちの形成理論と実験

(富山高等専門学校 勝島 隆史)

14:50-15:00 休憩

### セッション3

15:00-15:40 MRI を用いた積雪微細構造及び含水率の測定

(防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター 安達 聖)

15:40-16:20 個別要素法を用いた微細構造視点の力学計算

(岐阜大学 森口 周二)

16:20-16:40 総合討論

## 目次

### セッション1

- 積雪モデルの開発 ..... 1  
(東北大学 山崎 剛)
- 積雪変態・アルベドプロセスモデルの開発  
ー精度検証と積雪不純物が融雪に及ぼす影響評価ー ..... 3  
(気象研究所 庭野 匡思)
- 積雪変質モデルを用いた雪崩発生予測の現状と課題 ..... 5  
(防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター 平島 寛行)

### セッション2

- 降雪結晶の観測と積雪モデルへの反映の展望 ..... 7  
(北海道大学 中村 一樹)
- 水みちの形成理論と実験 ..... 9  
(富山高等専門学校 勝島 隆史)

### セッション3

- MRIを用いた積雪微細構造及び含水率の測定 ..... 11  
(防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター 安達 聖)
- 個別要素法を用いた微細構造視点の力学計算 ..... 13  
(岐阜大学 森口 周二)

# 積雪モデルの開発

山崎 剛

東北大学大学院理学研究科  
yamaz@wind.gp.tohoku.ac.jp

## 1. はじめに

積雪モデルは、雪崩などの防災をはじめ、大気モデルの下部境界である陸面モデルの一部、水文モデルにとっての入力部を担う融雪モデルなどさまざまな目的で開発されている。その目的に応じて、モデルの複雑さや構造は異なる。本話題提供では、内外の積雪モデルの簡単なレビュー、積雪モデルの相互比較とそれから明らかになったモデルの問題点、今後研究すべきこと、最後に新しく提案したアルベドパラメタリゼーションの紹介をする。

## 2. 積雪モデルのレビュー

大きく分けて簡便なモデルと多層モデルに分けることができる。簡便なモデルとしては、いわゆるデグリーデー法など気温や降水量のみで堆積量・融雪量を評価する方法や、熱収支を扱うが積雪を1層として扱うモデルなどがある。一方、多層モデルは積雪の微細構造の再現を目指し、可能な限り積雪を物理的に取り扱い、積雪内部の構造も計算できるものが多い。こちらは積雪プロセスの研究や雪崩の予測などを目的とする場合が多く、より現実的に積雪を表現できるが、多くの入力データやパラメータを必要とする傾向がある。多層モデルとしては、**SNTHERM**, **CROCUS**, **SNOWPACK** などが広く知られている。国内でもいくつかの多層モデルが開発されている。多層モデルは様々な要素を計算できるが、時として特定の項目に関しては、それに特化した簡便モデルの方が再現性は良好な場合もある。

## 3. 積雪モデルの相互比較

やや古い話題となるが、2000～2003年に実施された積雪モデルの国際相互比較 **SnowMIP** の結果を紹介する。24のモデルが参加し、4つのサイトについて積雪のシミュレーション結果の比較が行われた(Etchevers et al., 2004)。日本から参加した3モデルはいずれも観測より早く消雪する傾向があった。アルベドの取り扱いが問題として指摘されている。結果は <http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/snow/index.html> でも見ることができる。

最近、兒玉らによって札幌（北大低温研）のデータを用いて日本で使われている4つのモデルの比較が実施された。結果として、どのモデルも年によって挙動が異

なり，再現性の良し悪しは一概に論じられないことがわかった。

#### 4. 新しいアルベドのパラメタリゼーション

新見（2010）は日射を可視と近赤外を分けて，それぞれの降雪後の反射率低下を評価し，気温と降水量からアルベドを推定する新しいパラメタリゼーションを考案した（図1）。可視・近赤外は一般には測定されていないため，アメダスでも測定されている日照時間から可視・近赤外比を推定する方法も試みた。この方法は他の地点での検証等に課題が残るものの，気温，降水量，日照時間からアルベドを推定でき，実用的価値があると考えられる。また，新雪の深さを考慮する方法も検討した。

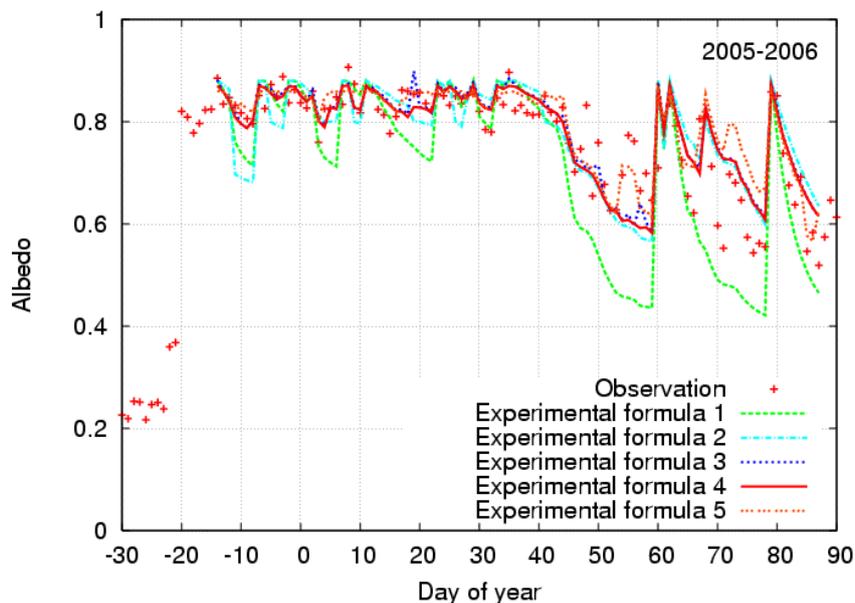


図1 2005-2006年の札幌における積雪アルベドの実験式による計算と実測の比較（新見，2010）。formula 3: 可視，近赤外を分ける方法，formula 4: 可視・近赤外比を日照時間から推定する方法，formula 4: 新雪の深さを考慮する方法。

#### 5. まとめと今後の課題

積雪モデルは適用する地域のみならず年によっても，出力の挙動が異なり，まだ万能といえるモデルは存在しない。日本では湿雪が卓越する地域が多く，温暖化に伴い世界的にも湿雪の存在期間は長くなると考えられる。そのため，今後は特に湿雪にも強いモデルの開発が望まれる。積雪の最重要パラメータであるアルベドの研究は，物理的な扱いと実用的な側面の両方から研究を進める必要がある。また，森林地帯での積雪の扱いや吹雪などに伴う質量移動など，積雪の面的な分布に関わる研究も重要である。

#### 参考文献

新見幸奈，2010：積雪アルベドの推定方法に関する研究。東北大学修士論文。

# 積雪変態・アルベドプロセスモデルの開発 —精度検証と積雪不純物が融雪に及ぼす影響評価—

\*庭野匡思<sup>1</sup>, 青木輝夫<sup>1</sup>, 朽木勝幸<sup>1</sup>, 保坂征宏<sup>1</sup>, 兒玉裕二<sup>2</sup>

<sup>1</sup>気象研究所, <sup>2</sup>極地研究所

\* mniwano@mri-jma.go.jp

## 1. はじめに

我々は全球気候モデルの陸面過程の高度化を目的として、積雪の物理プロセス研究を行っている。特に、大気—積雪相互作用に大きな影響を与える積雪アルベドの計算精度向上は我々の重要な目標の一つである。本講演では、その研究を通して我々が開発した積雪変態・アルベドプロセスモデル (Snow Metamorphism and Albedo Process; “SMAP”) と呼ぶ次元の多層積雪モデルについて計算精度の紹介を行う。また、SMAP を用いた感度実験により、ブラックカーボンやダストなどの積雪不純物が融雪に及ぼす影響を示す。

## 2. SMAP の概略と計算精度

SMAP は、雪面熱収支、雪中熱伝導、水分移動、融解・再凍結、圧密、積雪変態などといった代表的な積雪物理過程を考慮している。一般に積雪アルベドは積雪粒径と積雪内部に取り込まれた積雪不純物の濃度に強く依存するが、SMAP ではそれらの効果を陽に考慮して積雪アルベドを計算している。モデルの駆動に必要な入力データは一般的な積雪モデルとほぼ同様であるが、加えて積雪不純物濃度を必要とする。図 1、及び図 2 に、2007-2008 冬期の北大低温研露場において取得した気象データと積雪不純物濃度を入力して SMAP を実行した結果を観測結果と比較して示す。計算された積雪深と積雪アルベド (図 1) は観測をよく再現している。積雪深については、相関係数 ( $r$ ) が 0.986、二乗平均誤差 ( $RMSE$ ) が 0.064 m、平均誤差 ( $ME$ ) が 0.045m であった。一方積雪アルベドについては  $r$  が 0.898、 $RMSE$  が 0.051、 $ME$  が -0.007 であった。雪質 (図 2) については、厳冬期に内部で主にしまり雪が観測されている点や融雪期に全層でざらめ雪が観測されている点などについて、モデルは大まかに観測を再現している。一方、1 月中旬から 2 月中旬にかけて下層で観測されたしもざらめ雪は再現されていない。このことは、積雪変態過程を中心に改良の余地が依然として残されていることを示唆している。

## 3. 積雪不純物が融雪に及ぼす影響

積雪不純物が札幌の融雪に与える影響を調べるために、積雪不純物濃度をモデル

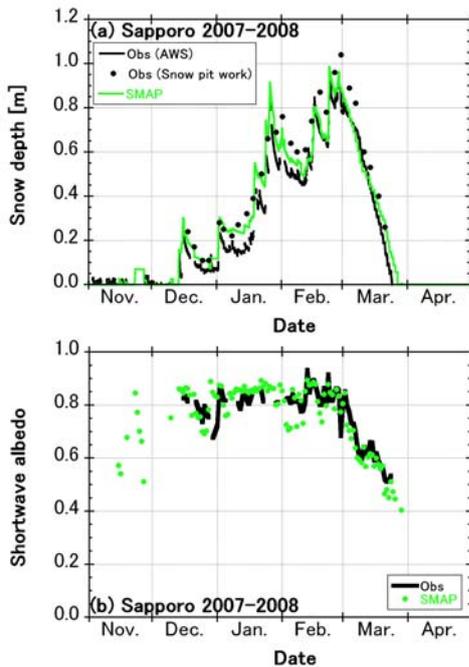


図1 2007-2008 冬期の札幌における SMAP の計算結果と観測との比較。(a)積雪深、(b)積雪アルベド。

に入力しない感度実験 (PURE) を実施した。PURE の計算結果と標準実験 (CTL ; 図 1、及び図 2 の結果と同様) の計算結果との比較を図 3 に示す。CTL と PURE の消雪日の変化に着目すると、2007-2008 冬期の札幌における融雪が積雪不純物によって約 19 日早められていることが分かる。また、不純物有り・無しによる変化は厳冬期 (11 月~2 月) よりも融雪期 (3 月~4 月) において顕著である。実際、CTL と PURE の間の雪面

短波放射収支の差 (積雪不純物の放射強制力に相当) を評価すると厳冬期において  $3.73 \text{ W/m}^2$ 、融雪期において  $25.85 \text{ W/m}^2$  であった。これらの値は CTL で計算された各期間の雪面短波放射収支のそれぞれ 5.26%、21.96% を占めていた。以上の結果は、積雪不純物の影響が札幌においては特に融雪期において大きいことを示すと同時に、積雪アルベドが不純物に依存するモデルを組み込んだ気候モデルにとって積雪不純物量を正しく予測することが気候モデルの精度保証の鍵を握ることを示唆している。

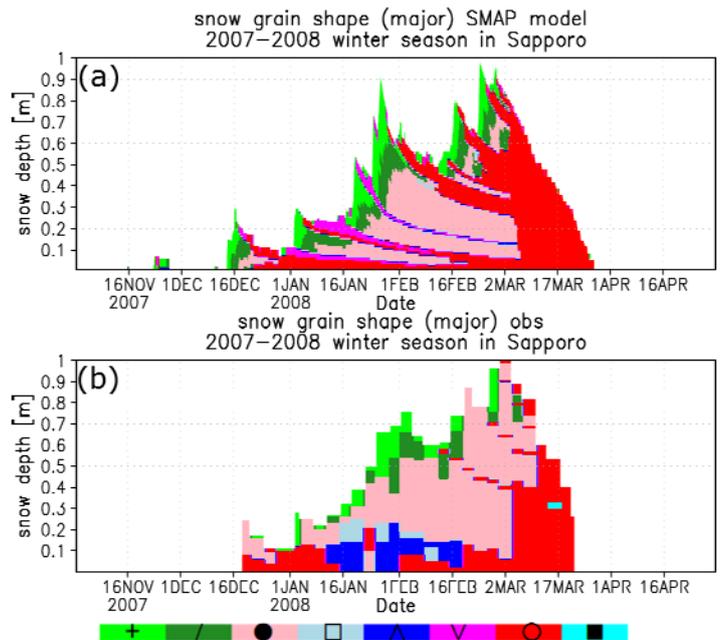


図2 2007-2008 冬期の札幌における雪質の比較。(a)SMAP の計算結果、(b)観測。

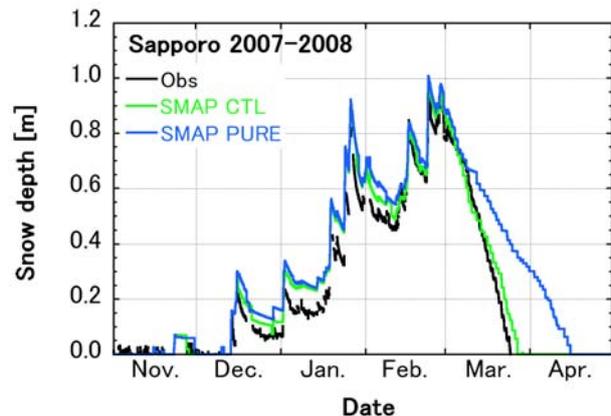


図3 積雪不純物濃度を SMAP に入力して計算した結果 (CTL) と入力せずに計算した結果 (PURE) の比較。

# 積雪変質モデルを用いた雪崩発生予測の現状と課題

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

防災科学技術研究所では、雪氷災害予測の一環として、積雪変質モデルを用いた雪崩発生予測を行っている。本講演では、現段階の積雪変質モデルで考慮している過程とその再現性、雪崩の発生予測精度について説明するとともに、今後必要と考えられる研究について議論する。

## 2. SNOWPACK で考慮している過程

積雪変質モデル(SNOWPACK)は他の積雪モデルと同様、気象要素を入力して積雪状態を計算するモデルであるが、雪崩の発生予測を主目的とするため、主に内部の層構造を重視しており、雪質やせん断強度等の計算を行う。図1に積雪変質モデルの概略図を示す。SNOWPACKはスイス雪・雪崩研究所で開発されたモデルであるが、国内における観測の結果に基づいたアルベドやせん断強度の計算式を導入することで、日本の雪に対する再現性の向上が進められてきた。本モデルで雪崩を予測する際には、せん断強度とせん断応力の比である積雪安定度を用いており、図2に示すように積雪安定度が小さい値をとる層が存在するとき、雪崩の危険性が高くなるといった指標を用いている。

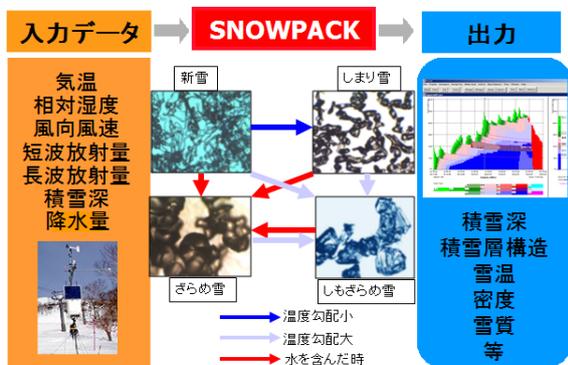


図1 積雪変質モデル (SNOWPACK)の概略図

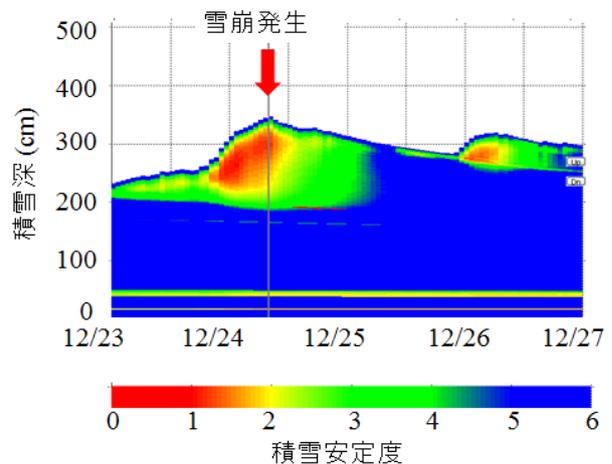


図2 SNOWPACK で再現した積雪の不安定化 (新潟県津南町で雪崩が発生した時の積雪の例)

防災科研では雪崩の予測精度を向上させるため、積雪の弱層のせん断強度の見積もりや積雪中の水分移動過程について改良を進めている。

せん断強度の見積もりについては、発達段階または安定化の段階におけるこしもざらめ雪の連続的なせん断強度の変化についてモデル化を進めている。雪氷防災実験棟において温度をコントロールした条件下でしもざらめ雪を作成するとともに、定期的にせん断強度を測定して時間変化をまとめて定式化された結果（阿部ほか, 2007, 2009）をモデルに導入することで、発達段階および回復段階におけるこしもざらめ雪のせん断強度を再現できるようにした。

また、積雪中の水分移動過程は、雪の毛管力や透水係数の密度・粒径依存性の実験結果を導入することで、毛管力により水のたまる層の再現や、積雪の底面流出量の再現性等の向上が見られた。これらの結果を雪崩発生予測に応用して精度向上を進めている。

### 3. モデルの2次元、3次元化にむけて

モデルの改良により雪崩予測精度の向上が見られた一方で、マクロな実験結果と1次元モデルを用いた雪崩予測の方法では、再現できることに限界がみられてきた。雪は温度、水蒸気、液体水の条件により複雑に変化し、それにより時々刻々と微細構造や強度も変化していく。現在のバルク的な測定や1次元のモデルでは、三次元的な微細構造を考慮した雪の変質やその破壊現象、水みちを通った不均一な水分移動を考慮することは困難であり、より精度を向上させるには2次元、3次元のモデルの開発が必要である。本講演では、現在開発に着手している積雪微細構造モデルについて紹介し、議論を進める予定である。

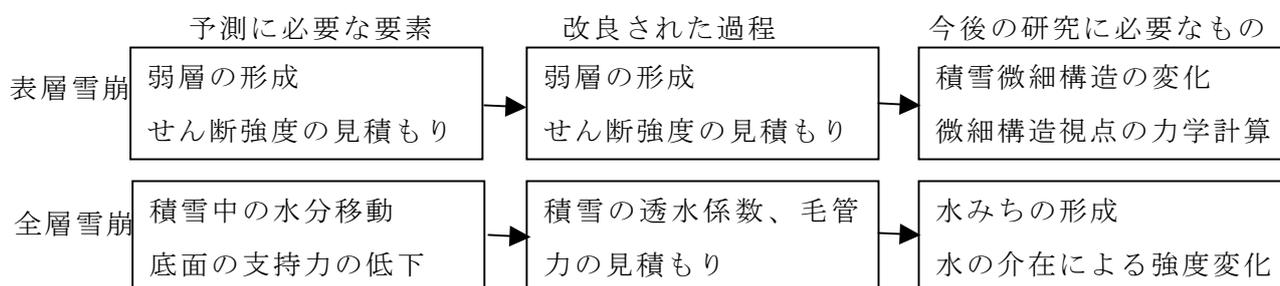


図3 積雪モデルの現状と今後の研究課題

阿部ほか(2007): こしもざらめ雪の剪断強度の定式化, 寒地技術論文・報告集, 126-129.

阿部ほか(2009): 等温変態下における霜ざらめ雪の剪断強度の回復実験, 雪氷研究大会講演要旨集, p231

# 降雪結晶の観測と積雪モデルへの反映の展望

中村一樹

北海道大学大学院 地球環境科学研究院

kazuki.snow@ees.hokudai.ac.jp

## 1. はじめに

降雪結晶の形状が、表層雪崩の弱層形成に関係することはよく知られている。山口ら（2004）は、新潟県長岡市に降るあられを積雪モデル **SNOWPACK** に入力し、弱層の再現を試みている。しかし、その他の降雪結晶の形状の違いを積雪モデルの積雪変態過程に反映しているモデルはなく、現時点で、降雪結晶の形状による弱層の形成を再現できる積雪モデルは存在しない。

そこで、本報告では、降雪結晶の形状と積雪内での変態過程を観測し、降雪結晶の形状の違いを積雪モデル **SNOWPACK** へ反映するために現在進めている研究内容を紹介する。

## 2. 方法

北海道中央部に位置するトマム山（山頂 N43°04'34", E142°36'00", 標高 1239m）の南東斜面の頂上近く 1088m 付近に観測サイトを設定し、2011 年 3 月の気圧の谷通過（中村ら, 2011）、2012 年 2 月低気圧通過時（未発表）の降雪イベントから 2 週間、集中的に降雪、積雪、気象の観測を行った。観測要素を表 1 に示す。なお、山頂の観測との対比と補足の目的で、580m 地点でも気象：積雪深機器観測、降雪雲観測、積雪断面観測（週に 1~2 度程度）を行った。

表 1 トマム山での観測要素一覧

要素	観測頻度
降雪（1088m 地点での降雪結晶写真撮影）	気圧の谷及び低気圧通過時 1~2 日間の降雪時毎時
積雪（断面観測、積雪深、積雪結晶写真撮影、硬度、弱層検出、せん断強度測定）	気圧の谷及び通過から 2 週間（1 日~数日毎）
気象・積雪深機器観測（風向、風速、気温、湿度、日射量、気圧、積雪深）	10 分毎
降雪雲（観測カメラにて連続撮影）	1 分毎

## 3. 結果

雪崩弱層の形成に関わる降雪結晶の形状に大きく関係しているのは、降雪結晶への雲粒の付着であると考えられる。例えば、降雪結晶のうち、雪崩弱層を形成する

のは、雲粒が付着していない雲粒なし新雪結晶とあられである（例えば、海原ら、2011）。あられは、降雪結晶に雲粒が付着して球形になったものである。

一方、雲粒が適度に付着している降雪結晶は、雲粒なし降雪結晶やあられより早くせん断強度が大きな丈夫な積雪に変化すると考えられる。

降雪結晶写真撮影観測から得られた降雪結晶の例を図1に示す。

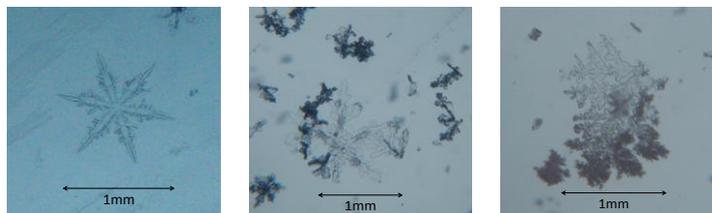


図1 2011年3月8日～9日の降雪結晶（左：雲粒なし結晶、中央：雲粒なし結晶・雲粒付き結晶混在、右：雲粒付き結晶・あられ）

観測した2事例では、気圧の谷や低気圧の接近時に雲粒なし結晶が降り、最接近から通過時にかけて、雲粒の付着の少ない結晶、雲粒の多い結晶、あられが降った。これらの降雪と積雪の対応付けを行い、該当層の積雪変態過程の密度、せん断強度（硬度測定からの変換またはシアーフレーム測定）の変化経過を観測した。

#### 4. 研究の展望と課題

新たな提案として、雲粒なしを0、あられを1とする降雪結晶への雲粒付着の割合を雲粒付き率（仮）と名付け、雲粒の付着度合に対応するせん断強度と密度の関係を定式化することを考えている。

今後の課題として、結晶写真から雲粒付き率を定量化することや、確定した数式をSNOWPACKに組み込み、観測結果で検証することが考えられる。

また、中村ら（2011）で一部を試みているように、雲粒付き率を反映した降雪結晶の形状を気象モデルから推定する方法の開発も解決すべき課題のひとつである。（参考文献）

- 1) 山口悟・Michael Lehning・Charles Fiez・Gerald Spreitzhofer・中井専人・石坂雅昭・佐藤篤司（2004）：積雪変質モデル(SNOWPACK)の改良 -アルベド・あられ層-, 2004年度（社）日本雪氷学会北信越支部研究発表会予稿集。
- 2) 中村一樹，佐藤友徳，藤吉康志，西村浩一（2011）：北海道山岳域での雲粒なし降雪結晶による弱層の形成について，雪氷研究大会（2011・長岡）講演要旨集，p.37.
- 3)海原拓哉，八久保晶弘，尾関俊浩，西村浩一，秋田谷英次（2011）：しもざらめ雪・あられ・降雪結晶からなる弱層のせん断強度変化の観測例，雪氷，**73**，133-142. 謝辞

本研究は、環境省環境研究総合推進費（S-8-1(2)）、文部科学省気候変動適応研究推進プログラム(RECCA)、及びIFES-GCOEモデリングタスクフォースの一環として実施された。観測サイト設定で株式会社星野リゾート・トマムに協力いただいた。

# 水みちの形成理論と実験

講演者名 勝島隆史

所属 富山高等専門学校

e-mail katusima@nc-toyam.ac.jp

## 1. 研究背景と目的

積雪内の水みちは、粒径の大きな層の上に粒径の小さな層が上載する場合の層境界や、氷板との境界、乾き雪への浸透の先端部から、水みちが発達することが既往研究により報告されている。しかし、水みちが形成される際の定性的な条件が示されているのみであり、詳細な条件について分かっていない。そのため、水みちの形成や水みちによる水分移動を、物理過程に基づいてモデル化し、積雪数値モデルに組み込む事は現時点で難しい。一方で土壌物理学の研究分野では、積雪と同様の層境界から水みちが発達することが示されている。水みちの形成は、浸透の先端部である浸潤前線の不安定性の問題であると認識されており、浸潤前線が平坦な形状を維持できずに部分的に屈曲し、屈曲した部分が選択的に成長する事によって、水みちが形成するとしている。浸潤前線が不安定となり、水みちが形成・発達する条件は、以下に示す2つの条件が、主として提案されている。

- ・ 浸潤前線後面の含水率や、間隙中の毛管圧であるマトリックポテンシャルの鉛直上方への減少する勾配
- ・ 浸潤前線の移動速度、飽和透水係数、浸潤前線先端の表面張力の関係

また、初期含水率が0に近い土壌や、粒径が大きな土壌では、浸潤前線が前進するためのマトリックポテンシャルの閾値として機能する水侵入圧が存在することが示されている。水侵入圧が存在する土壌では、単一層の土壌においても、浸潤前線先端での高い含水率やマトリックポテンシャルが形成され、1つめの条件に示した勾配が形成される。更に、粒径の大きな層の上に粒径の小さな層が上載する際の層境界の上部では、個々の層の水侵入圧の違いにより、この勾配が形成される。一方で積雪においては、融雪や降雨による水がもたらされる前の積雪では含水率を持っていない。そのため、積雪においても土壌と同様に水侵入圧が存在し、水侵入圧の存在が水みちの形成に大きく関係している可能性が高い。

本研究では、積雪内での水侵入圧の存在を確認するとともに、土壌物理学で示されている水みちの条件が、積雪内の水みちの条件として使用できるかを確認するための実験を行い、考察を行った。そして、積雪と土壌との相違点を考察した。

## 2. 手法

水侵入圧および1つ目のマトリックポテンシャルの勾配による水みちの形成条件を確認するには、浸潤前線の先端と、その上部におけるマトリックポテンシャルを測定する必要がある。今回は、乾いた雪へ浸潤前線が移動する際の、マトリックポテンシャルの時間変化を任意の点で測定する事で、水侵入圧と浸潤前線の上部におけるマトリックポテンシャルの勾配の測定を試みた。含水率の勾配は、今回の検討対象としなかった。マトリックポテンシャルの時間変化の測定には、テンシオメータを用いた。あらかじめ乾いた雪に直接挿入したテンシオメータを用いて測定する実験では、浸潤前線や水みちがテンシオメータに接触しない場合には、マトリックポテンシャルの時間変化をテンシオメータによって測定できない。そこで、あらかじめ湿った雪を乾いた雪の上に載せ、これらの境界の直上の湿った雪にテンシオメータを挿入してマトリックポテンシャルを測定した。湿った雪は、乾いた雪と同一の雪試料により作成した。次に、色水による浸透実験を行って浸透パターンを確認し、マトリックポテンシャルの勾配と水みち形成との関係について確認を行い、水みちの形成条件について考察を行った。また、2つ目の条件に対して、浸潤前線先端の表面張力の代わりに測定した水侵入圧を使用し、浸潤前線の移動速度の代わりに供給水フラックスを使用して、水みちの形成条件の検討を行った。

## 3. 結果とまとめ

粒径の大きな試料では、時間の経過とともにマトリックポテンシャルが減少する振る舞いが測定された。マトリックポテンシャルが減少する状態は、マトリックポテンシャルが鉛直上方に減少する勾配に対応していると考えられる。また、減少に転じた時点のマトリックポテンシャルの最大値は、水侵入圧に相当すると考えられる。この時の最大値は、同程度の粒径を持つ砂に比べ若干低い値であり、最大値と減少後の値の差は、砂に比べ小さな値の差であった。また、この試料を用いた色水による実験では、水みちの形成が確認された。一方、粒径の比較的小さな試料では、時間の経過とともにマトリックポテンシャルが増加し、一定の値へと漸近する振る舞いが測定され、水侵入圧は確認することは出来なかった。また、色水を用いた実験では均一な浸透が確認された。これらの事から、積雪においても、粒径の比較的大きな積雪層では水侵入圧が存在する事が確認された。また、マトリックポテンシャルが鉛直上方へ減少する勾配は、積雪内の水みちの形成条件として合致する事が確認された。次に、2つ目の条件に対して、実験結果を用いて水みちの形成条件の検討を行ったところ、提案されている式の定数を調整することで、今回の水みち形成の有無を概ね表現することが出来た。また、通常の降雨や融雪によって発生する供給水フラックスの範囲においては、供給水フラックスの大きさは、水みちの形成の条件に対してほとんど影響しておらず、浸潤前線の先端の水侵入圧の大きさが、水みち形成の条件に影響していることが示された。

# MRI を用いた積雪微細構造及び含水率の測定

安達聖

(独) 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

stradc@bosai.go.jp

## 1. はじめに

我々は 0 °C 以下の低温室で運用が可能な雪氷用コンパクト MRI の開発を行ってきた。これまでに、1 T 小型永久磁石を用いた MRI では、雪氷の 3 次元データセットを空間分解能(100  $\mu\text{m}$ )<sup>3</sup> で取得することを可能にした。また、0.12 T 小型永久磁石を用いた MRI では、ぬれ雪中の水の分布を可視化し、取得した MR 画像に MRI による骨量解析手法を応用することで積雪内の含水率の計測が可能になった。本発表では、MRI を用いた積雪微細構造の可視化と、ぬれ雪中の含水率計測手法について報告する。

## 2. MRI による積雪微細構造の撮像

積雪の微細構造の MRI 撮像には図 1 に示す -5 °C の低温室に設置された永久磁石を使用した。静磁場強度は 1.0 T、静磁場均一領域は 30 mm 球、ギャップ間隔は 60 mm である。撮像方法には強制回復スピンエコー法を用いた。

サンプルは、-20 °C の低温室で保管および加工を行った。積雪試料の空隙にドデカンを充たし、ドデカンが完全に凍結したのち、外径 24 mm、長さ 100 mm の円筒のサンプルホルダーの収まるよう削りだした。その後、サンプルを -5 °C の低温室でドデカンが完全に凍結されるまで放置し、真空ポンプでサンプル内の気泡を取り除き、空隙がドデカンで充たされた状態で撮像を行った。図 2 にしもざらめ雪を空間分解能(100  $\mu\text{m}$ )<sup>3</sup> で撮像した 2 次元 MR 画像を示す。



図 1 1 T 小型永久磁石

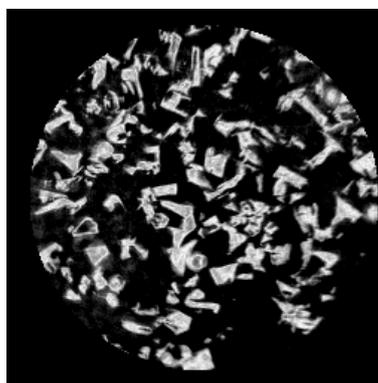


図 2 しもざらめ雪 MR 画像

### 3. MRIによるぬれ雪中の含水率計測

含水率計測には図3に示す $-1^{\circ}\text{C}$ の低温室に設置された永久磁石を使用した。静磁場強度は $0.12\text{ T}$ 、静磁場均一領域は $100\text{ mm}$ 球、ギャップ間隔は $17\text{ cm}$ である。撮像方法にはスピンエコー法を用いた。

サンプルフォルダーには直径 $105\text{ mm}$ 、高さ $163\text{ mm}$ の円筒形の容器を使用した。積雪試料はサンプルフォルダーの側面に接しない大きさに加工しサンプルフォルダーに収めた。積雪試料の側面から流入しないようにサンプルフォルダーの側壁に沿って $5\text{ mol/m}^3$ の濃度の硫酸銅水溶液を注入し、積雪試料底面から毛管力によって染み上がらせた。



図3 0.12 T 小型永久磁石

MR画像からの含水率の計測手法には、骨量計測に使用されている低分解能MRI法を採用した。積雪内の含水率は以下の式で求められる。

$\rho_c$  : 積雪試料の平均画素強度,  $\rho_{e1}$  : 溶液部分のみの平均画素強度,  $\rho_p$  :  $\rho_c$ と同じ範囲の標準ファントムの平均画素強度,  $\rho_{e2}$  :  $\rho_{e1}$ と同じ範囲の標準ファントムの平均画素強度である。標準ファントムには $5\text{ mol/m}^3$ の濃度の硫酸銅水溶液をサンプルフォルダーに満たしたものを使用した。

図4, 5にぬれ雪中の含水率計測の一例を示す。自由水面から高さ $3\text{ cm}$ までほぼ同じ含水量を示し、 $3\text{ cm}$ 以上からは高くなるに伴い含水量が減少していく様子がわかる。

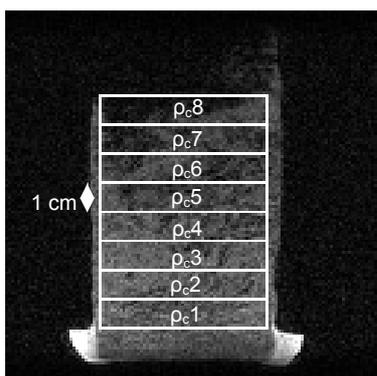


図4 ぬれ雪 MR 画像の選択範囲

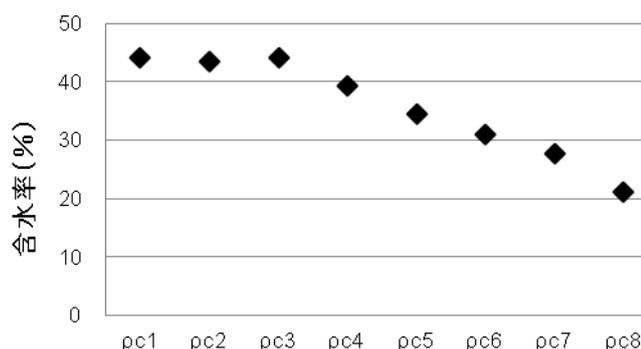


図5 試料内の含水率 (選択範囲は図4に相当)

### 4. まとめ

雪氷用コンパクトMRIを用い、積雪微細構造の高分解撮像および、ぬれ雪中の含水の率計測が可能になった。今後、さらにMRIの雪氷分野への応用を提案することを目指す。

# 個別要素法を用いた微細構造視点の力学計算

森口周二

岐阜大学

s\_mori@gifu-u.ac.jp

## 1. はじめに

近年の計算機能力の著しい向上に伴い、現象の予測やメカニズム解明などに数値計算が多用されるようになってきた。個別要素法 (DEM) も広く利用されている数値解析手法の一つであり、地盤工学<sup>1)</sup>、海岸工学<sup>2)</sup>、雪工学<sup>3)</sup>など、様々な分野で利用されている。本稿では、DEM による微視的な視点に基づいた粒状材料の流動や透水挙動を対象とした数値解析について紹介する。

## 2. DEM による粘性成分を有する材料のモデル化

個別要素法 (DEM) では、図 1 に示すように、球要素の間に粒子間力モデルを設定し、球要素が接触した場合に斥力を計算する。さらに、各時間で各球要素の運動方程式を解くことで粒状体全体としての挙動を表現する。DEM で雪や地盤材料をモデル化する場合には、粘性成分の表現が必要であるため、図 2 に示すような粒子間に引力を導入する必要がある。図 3, 4 は、仮想斜面上の雪崩のシミュレーションであり、粒子間の引力を考慮した場合としない場合の結果を示している。

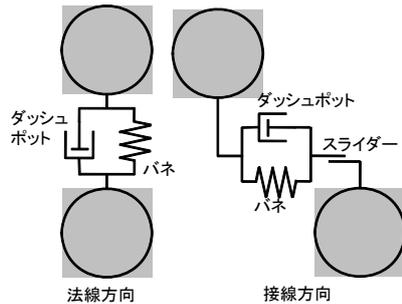


図 1 DEM の粒子間力モデル

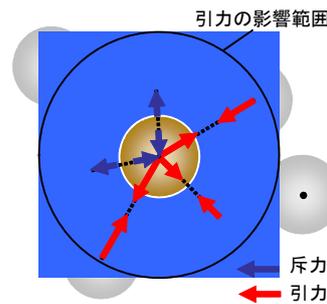


図 2 粒子間の斥力と引力

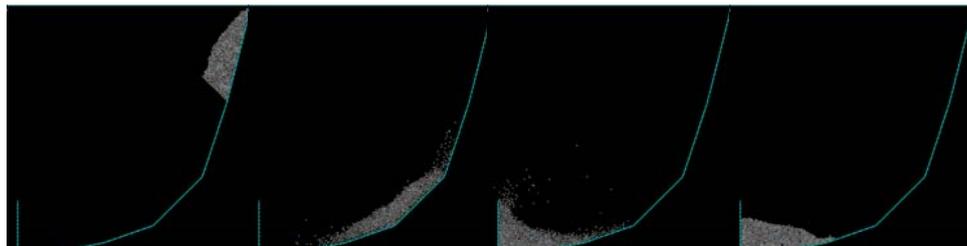


図 3 仮想斜面上の流動シミュレーション (引力なし)

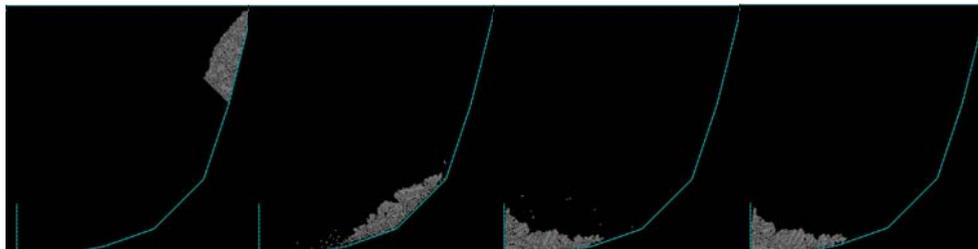


図 4 仮想斜面上の流動シミュレーション (引力あり)

## 3. 粒子形状の影響

オリジナルの DEM では、球形の粒子要素を基本とするが、実際の粒状体には形

状があり，ミクロな形状の影響がマクロ挙動に及ぼす影響は予想以上に大きい．ここでは，図5のような解析モデルを用いた粒状材料の流動解析の結果を示す．先述のように，オリジナルのDEMは球形粒子要素を基本とするが，図6に示すように，球形粒子を連結することで非球形粒子を表現することが出来る．図7は異なる時間の流動に伴う層厚変化を示したものであり，(a)は球形粒子要素を，(b)は非球形粒子要素を用いた場合の結果である．これらは全く同じ解析パラメータを用いているにも関わらず，これほど大きな違いが生じる．つまり，DEMで実際の現象を表現するには，粒子形状についても考慮すべきであることがわかる．

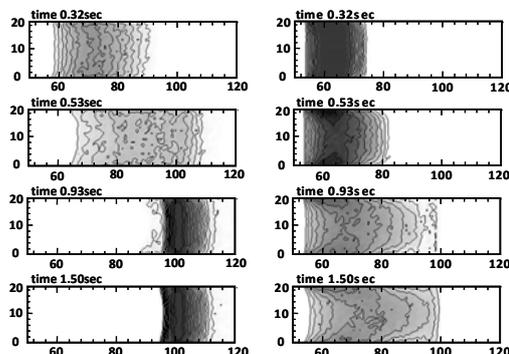
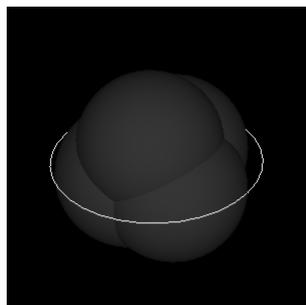
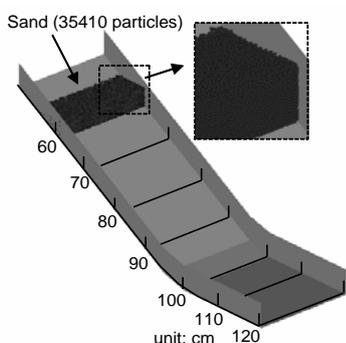


図5 流動解析モデル      図6 非球形粒子      (a) 球形粒子      (b) 非球形粒子  
図7 流動解析結果

#### 4. 粒状材料内部の透水挙動の再現

DEMと流体解析を連成させることで，材料の内部を流れる流体の挙動を表現することが可能となる．図8,9は，粒状体内部の透水挙動を再現する解析のモデルと，解析結果から得られた中心断面の流速ベクトル図を示したものである．粒径や導水勾配を変化させて解析を実施し，実験的に得られている透水係数の経験式等と傾向が一致することを確認している．

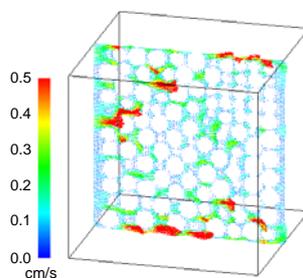
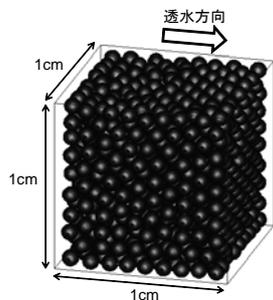


図8 透水解析モデル      図9 中央断面の流速ベクトル図

#### 5. まとめ

個別要素法は，様々な分野で利用されており，複雑な現象に対して工学的な解を与える道具の1つとして期待される．しかし，最適なパラメータや粒子形状の決定法などには未だ課題が残る．特に雪工学の分野では，材料特性は非常に複雑であるため，DEMの適用についてはより詳細な検証とデータの蓄積が必要と考えられる．

#### (参考文献)

1. 野並他，粒状体の変形・強度特性に与える粒子形状の影響に関する二次元個別要素法による検討，土木学会論文集，No.799，III-72，pp.51-63，2005.
2. 原田他，固液混相乱流モデルの捨石群の沈降・堆積過程計算への適用例，土木学会論文集B，Vol.66，No.1，pp.25-34，2010
3. 小林他，個別要素法を用いた屋根雪の滑動と破談の再現と応答性状，日本建築学会全国大会学術講演概要集，pp.53-54，2008.





**NIED**

National Research Institute for  
Earth Science and Disaster Prevention