

石狩川水系における冬期の水資源量の高度観測と将来予測

北海道大学大学院 工学研究院 土木工学部門

北海道大学大学院 工学研究院 土木工学部門

北海道立総合研究機構 エネルギー・環境・地質研究所

岡 地 寛 季

山 田 朋 人

大 屋 祐 太

石狩川水系における冬期の水資源量の高度観測と将来予測

岡地 寛季¹・山田 朋人²・大屋 祐太³

Hiroki OKACHI, Tomohito YAMADA, Yuta OHYA

¹ 北海道大学大学院 工学研究院 土木工学部門 特任助教

² 北海道大学大学院 工学研究院 土木工学部門 教授

³ 北海道立総合研究機構 エネルギー・環境・地質研究所 研究職員

要 旨

積雪深や積雪相当水量（SWE）の観測は、水資源管理や雪崩リスク評価、気候モデルの検証において重要である。寒冷地では気温が氷点下となる期間が長く、降雪は積雪として地表に蓄積され、春の融雪期に大量の水資源として流出する。実際、石狩川水系では年間総流入量の約半分が融雪期に集中しており、積雪の量や性質を把握することは、流域内の水資源量把握、雪害のリスクマネジメントにおいて不可欠である。積雪は気象条件により雪質や層構造が変化し、融雪の流出特性や雪崩、交通障害などの影響を与える。雪質は降雪時の気温・湿度に依存し、「中谷ダイヤグラム（Nakaya, 1954）」が示すように結晶構造はこれらの条件で決まる。気候変動により降雪粒子の性質が変化する可能性もあるため、降雪および積雪の詳細な観測と分析が求められている。

本研究では、札幌市に設置したディストロメーターにより降雪粒子の物理特性を観測、および定山溪ダム上流域において積雪断面観測を実施した。さらに、乾雪・湿雪に対する沈降圧密モデルの比較を通じて、積雪密度と圧縮粘性係数の関係を導出し、SWE推定の高度化を目指した。

《キーワード：石狩川；降雪；積雪；融雪；断面観測；ディストロメータ》

本研究課題は豊平川上流域定山溪ダム上流での積雪断面観測による積雪の経年変化特性の分析と平野部におけるディストロメータを用いた観測、および積雪の物理特性に関しての三つの研究により構成される。以下に、それぞれの研究成果を記述する。

1. 積雪断面観測データから得られる積雪内の密度・温度鉛直分の特徴

北海道大学 岡地寛季, 山田朋人

1. はじめに

積雪深や積雪相当水量 (Snow Water Equivalent: SWE) の観測はその地域における水資源量の把握や雪崩の発生リスク評価、物理モデルの評価において重要である。積雪相当水量とは、全ての積雪が融けて水になった際の水量を長さの次元で表現する物理量である。積雪の重さが観測されている場合は水の密度を用いることで、積雪相当水量を推定することが可能である。あるいは、積雪深と積雪の鉛直平均密度から積雪相当水量を推定することが可能である。積雪相当水量は冬期に積雪として蓄えられる水資源として寒冷地の水文や、またアイスアルベドフィードバックのように積雪を考慮した気候学において重要な役割を担う。本研究は北海道における人口200万人を有する都市の札幌近郊で観測を実施した。本研究の観測場所は定山溪ダムの上流域に位置する。同流域である豊平川には、多目的ダムである豊平峡ダムと定山溪ダムがある。両ダムは、融雪期の直前に貯水量が最低となり、春先に流入する多量の融雪水を貯め、初夏の各種用水を確保している。そのため、同地域において積雪相当水量の観測や、観測手法の発展、及び積雪相当水量の推定手法の確立は不可欠である。本研究では、積雪の内部構造の変化を捉えるために定山溪における観測地点での積雪断面観測結果をもとに、積雪内の密度・温度鉛直分布の変化を分析した。本研究内容は岡地・山田¹⁾の内容で構成される。

2. 観測の概要と観測データ

開発局・豊平川ダム統管理事務所の定山溪流木処理場で行った。同地点は石狩川水系小樽内川の定山溪ダムの上流に位置し、標高は400 m程度である。本研究では、2007年から2022年までの全15シーズンに渡り、合計82回の積雪断面観測を実施した。このデータの中から、2011年から2012年の冬期における積雪密度と積雪温度の鉛直分布を分析に使用した。積雪観測では、気温、ライシメータによる積雪重量、積雪の底面からの融雪量を用いた積雪相当水量、電波による積雪深の計測を実施した。

本研究では断面観測時に密度と温度の鉛直分布を観測した。観測にはシャベル、雪ベラ、メジャー、密度サンプラー、電子計りを用いた。積雪断面観測は積雪に幅1から2m程度の穴を掘り、鉛直断面を作り、積雪の堆積の様子を測定する手法である。穴の奥行きは積雪の多いところほど大きくなるが、少なくとも1m程度は必要である。観測する断面は、直射日光を受けないように選定する。また、その面を乱さないように丁寧に掘る必要があり、観測断面側の積雪表面を歩いたり、雪を投げ捨てると表面付近の積雪が乱れるため、注意が必要である。穴を掘ったのちに、シャベルや雪ベラを用いてなるべく垂直に、断面を圧縮しないように仕上げる。

積雪断面を整えたのち、積雪深、気温と密度の観測を実施する。積雪深はメジャーを用いて計測する。気温と密度は深さ10 cmごとに計測する。雪温は、温度計を積雪表面に平行に差し込み計測する。積雪表面付近の計測では、日射の影響を受けるため、ショベルなどで日陰を作る。密度の計測では雪ベラと密度サンプラー、電子計りを利用する。温度影響を最小限に保つため、雪ベラと密度サンプラーは雪に埋設することで測器の温度を下げておく。積雪断面に垂直に密度サンプラーを突き刺す。密度サンプラーから上の雪を雪ベラで除去する。密度サンプラーで取り出した積雪の重さを電子計りで計測する。密度サンプラーの体積で、重さを除した値が積雪密度となる。

本研究では利用しないが積雪断面観測時には、積雪断面に着色した水を散布し、積雪層の層構造の観測を実施する。これにより、積雪層の雪質や硬度による区別が明瞭となる。また、ルーペ等を用いて積雪の粒の大きさや形状を観測する。また、手で直接触ることにより積雪の硬度を層ごとに調べる。本研究の対象としてないが、積雪内には氷板が形成されることがあり、氷板の厚みと形成される高さを記録する。

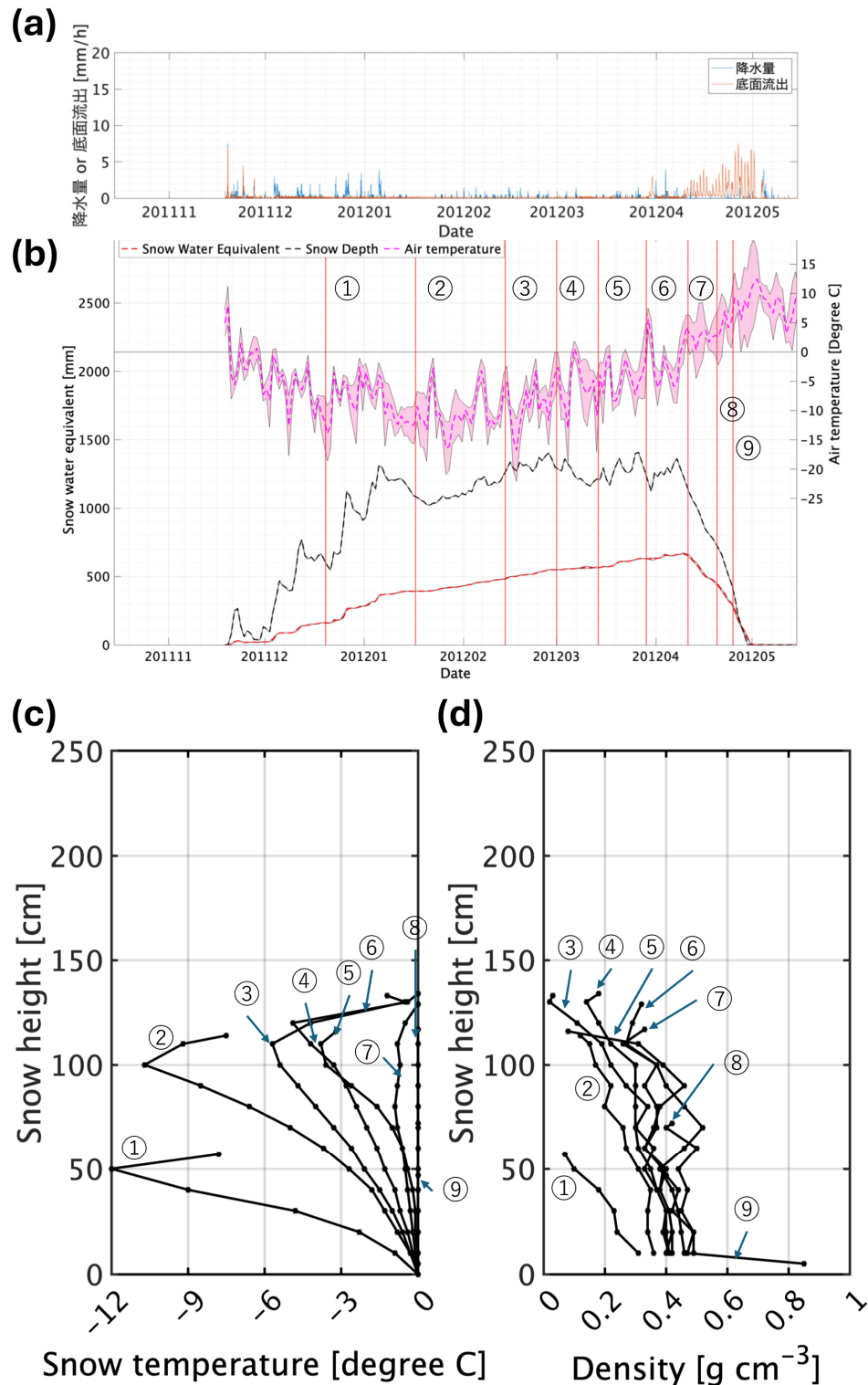


図-2 2011-2012シーズンの観測結果 (a) 降水量と底面流出の時系列 (b) 気温と積雪深、積雪相当水量の時系列を示す。積雪断面観測で実施した、(c) 積雪温度の鉛直分布と (d) 積雪密度の鉛直分布を示す。番号は(b)に示した観測時点と一致する。

3. 結果

図-2に2011-2012年シーズンの観測結果を示す。図-2 (a) に降水量と底面流出量、図-2 (b) に積雪深、積雪相当水量、気温の時系列を示す。図中の赤線と数字は図-2 (c), (d) に示す断面観測結果のタイミングを示す。図-1 (c) は雪温の鉛直分布、図-2 (d) は積雪密度の鉛直分布を示す。降水量と積雪深を比較すると、降水が発生した際に積雪深が増加する特徴がわかる。しかし、2011年11月中旬から下旬にかけては積雪深が一度増加するが、気温が高いためすぐに融雪し、底面流出として溶け出していることがわかる。シーズンの終わりになり気温が高くなると、積雪深が減少し、底面流出が4月ごろから始まる。

同シーズンにおいて断面観測を9回実施した。その結果を図-2 (c), (d) に示す。気温の鉛直分布は観測日の外気温に応じて変化し、特に積雪表面付近で顕著である。積雪表面から積雪内部へ温度を調べていくと、積雪温度は低下していくが、概ね10 cm から20 cm程度の深さにおいて極小値が存在する。その傾向はシーズン初期における観測結果では明瞭にみられるが、シーズン後半では、積雪内部の温度変化が小さくなる。一方、積雪密度は上層が最低値を示し、下層にいくにつれて積雪密度は増加する。また、冬期のシーズン初期から終盤にかけて、密度は全体的に増加し、最終的にはほぼ鉛直一様な密度分布へ変化する。

4. まとめ

本研究は、積雪内の水資源の推定において重要である、積雪内部の密度及び温度の観測結果の一例を紹介した。積雪の観測は継続的な観測が必要であるが、詳細な観測をするためには積雪断面観測が有効である。1シーズンにおいて断面観測結果の表層は、その日の気温や直近の降雪の影響による影響が大きいと考えられるが、密度の鉛直分布はシーズン序盤は上層から下層に進むにつれて密度増加率が高い一方で、シーズン後半に向けてその増加率は小さくなり、概ね一様な密度となる傾向がみられた。これは、積雪内部構造が融雪期に近づくにつれて全層一様なざらめ雪となるためである。発表においては過去15シーズンで82回実施した観測結果の特徴をまとめて紹介する。

【謝辞】

本研究は科研費基盤研究 (B) 23K22864, ArCs II (Arctic Challenge for Sustainability), 文部学省「気候変動予測先端研究プログラム」JPMXD0722680734 の支援を受け実施された。また国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所には、観測データの提供を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 岡地寛季, 山田朋人, 2024: 積雪断面観測データから得られる積雪内の密度・温度鉛直分布の特徴, 水文・水資源学会／日本水文科学会 2024年度研究発表会要旨集, PS-1-32.

2. 石狩川下流域における降雪粒径分布観測と雪質分類に基づく気象特性解析

北海道立総合研究機構 エネルギー・環境・地質研究所

大屋祐太

1. はじめに

石狩川水系における年間総流入量の約半分は融雪期であることから、水資源としては冬季の降雪に由来する¹⁾。積雪寒冷地域では地上気温が氷点下となる時間が長く、降雪はすぐには融けず、積雪として地表に蓄積される。積雪は降雪時から積雪期間の気象条件によって雪質を変質させ、層構造を形成する。そのため、同じ降雪量あるいは積雪深であっても密度や層構造が多様となり、融雪までの時間発展が異なるため、水資源としては融雪時の流出特性に影響を及ぼす他、山岳地域では雪崩、市街地では交通網の混乱など、積雪の特性に起因するさまざまな影響が生じる。

積雪における雪質を考える時、降雪直後の雪層は通常、新雪として定義される。しかし、実際には降雪においても雪質の違いは存在し、降雪粒子の結晶構造に大きく依存する。「中谷ダイヤグラム²⁾」では、雪結晶の形態が温度と湿度によって決定されることを示している。したがって、気象条件が異なれば結晶構造も変わるため、結果として地上に到達する雪質、および積雪・変質過程も変化する。社会的な影響としては、気候変動の影響を受けて新雪として地上に到達する雪質自体も変化することが想定されるため、降雪粒子の雪質および気象条件を把握することは、水資源管理や防災の観点からも重要である。

本研究では、石狩川水系の下流域に位置する札幌市にディストロメーターを設置し、降雪粒子の粒径および落下速度の個数を観測した。得られたデータに基づき、降雪時の雪質の違いとそれに関連する気象状況の特徴、およびその発生頻度を分析した。

2. 観測方法と解析手法

2.1. 観測地点の概要

本研究の観測は、札幌市に位置する北海道立総合研究機構エネルギー・環境・地質研究所の敷地内で実施した。観測機器として、クリマテック株式会社製のレーザー式ディストロメーター(CTC-LPM)を使用した。CTC-LPMは、降水粒子の粒径および落下速度を高精度で測定可能であり、冬季環境下でも安定した性能を有することが確認されている³⁾。同機器は、メーカーによる点検後、研究所本館屋上(地上約10 m)に設置した(図-1)。データ記録には、専用のデータロガーを用い、1分間隔の積算値を取得した。2023-2024年シーズンではmicroSDカードに、2024-2025年シーズンではクラウド通信サービスを介してデータを保存した。なお、風防オプションは使用しなかった。

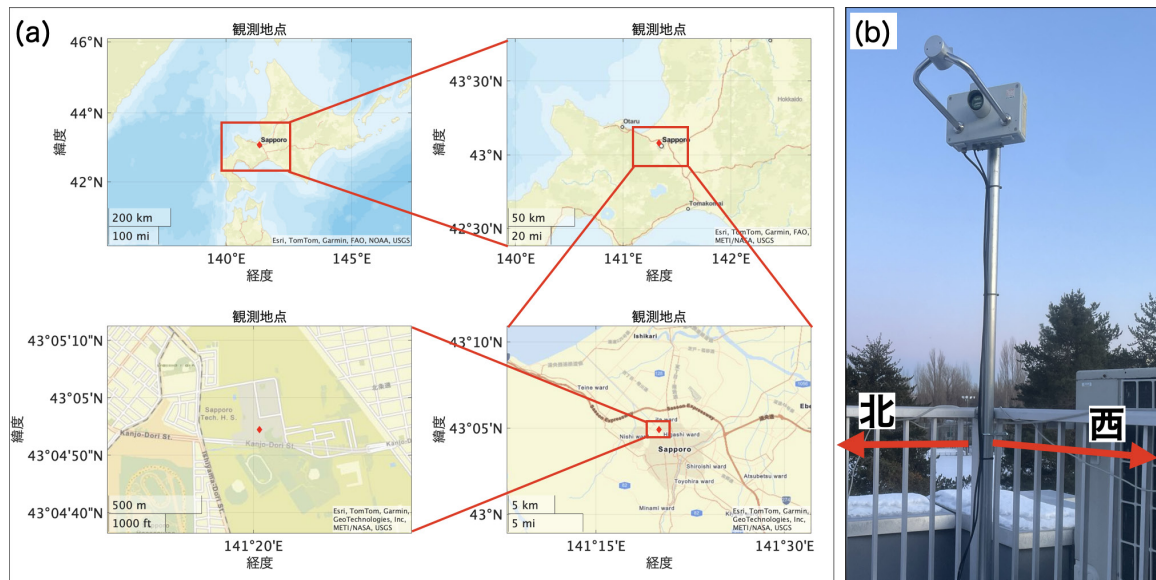


図-1 観測地点および観測機器の設置写真

(a) 周辺地図と観測地点（菱形）の位置関係, (b) 観測機器の設置状況

2. 2. 使用した気象データ

気象データとして、同研究所が維持・管理する国設札幌大気環境測定所の観測値を使用した。これらのデータは、環境省大気汚染物質広域監視システム「そらまめくん」で公開されている。また、降雪量の推定には、敷地内に設置した積雪重量計の変化量を利用した。推定に用いた積雪重量計の観測概要については、大屋ら⁴⁾を参照されたい。

高層気象データは、観測地点から約2 km離れた札幌管区気象台で午前9時と午後9時に実施されるラジオゾンデ観測のデータを使用した。これらのデータは、University of Wyomingのウェブサイトで公開されているものを取得した。さらに、三次元気象データとして、気象庁のメソ数値予報モデルGPV (MSM) データを使用した。これらのデータは、京都大学生存圏研究所の生存圏データベースから取得した。

2. 3. 雪質分類手法

ディストロメーターで得られた粒径および落下速度データは、粒径を22区分、落下速度を20区分に分類し、各組み合わせにおける粒子数をマトリクス形式で記録した。

降雪粒子の雪質分類には、Kohonen⁵⁾自己組織化マップ (Self-Organizing Map, SOM) を用いた機械学習による客観的なパターン認識を適用した。SOMは、多次元データを非線形写像により二次元のマップに変換する手法である。具体的には、各観測時刻における粒子数のマトリクスを全体の粒子数で正規化し、440次元の入力ベクトルを作成した。SOMのマップサイズは5×5の25ユニットとし、各ユニットの初期位置ベクトルはランダムに設定した。学習過程では、各入力ベクトルと全ユニットの位置ベクトルとのユークリッド距離を計算し、最も距離が小さいユニット（勝者ユニット）を特定した。次に、勝者ユニットおよびその近傍のユニットの位置ベクトルを、以下の更新式に基づいて調整した。

$$\mathbf{m}_{iN}(t+1) = \mathbf{m}_{iN}(t) + h_{ciN}(\xi_j - \mathbf{m}_{iN}(t))$$

ここで、 $\mathbf{m}_{iN}(t), \mathbf{m}_{iN}(t+1)$ は時刻 $t, (t+1)$ におけるユニット N の位置ベクトル、 ξ_j は入力ベクトル、 h_{ciN} は勝者ユニット c とユニット i との間の近傍関数と呼ばれ、入力ベクトルと勝者ユニットの距離と学習係数によって値が決まる。この更新を1万回繰り返し、学習率を徐々に減少させながらSOMを構築した。最終的に、得られた二次元マップに基づき、各観測時刻の降雪イベントを分類した。

3. 結果と考察

3. 1. 雪質別の粒径分布特性

図-2は、本研究の観測結果を示している。図-2 (a) および (b) は、ディストロメーターによる降雪粒子数の計測結果および積雪重量計の差分から推定した降水量の時系列変動を表している。図-2 (c) および (d) は、それぞれ2024年1月1日13時台と2024年1月7日22時台における粒径別落下速度の粒子数分布を示している。2024年1月1日は気温が -5°C 以下と低かったため、粒径が小さく落下速度が 1 m/s 以下の粒子に集中する乾雪の特徴を示した。一方、2024年1月7日は最高気温が 5°C に達し、湿雪の特徴を示した。湿雪の場合は粒径が 1 mm を超える大きな粒子も存在し、粒径が増加するにつれて落下速度も速くなった。これらの結果から、同じ観測地点でも気象条件によって異なる雪質の降雪が生じることが確認された。

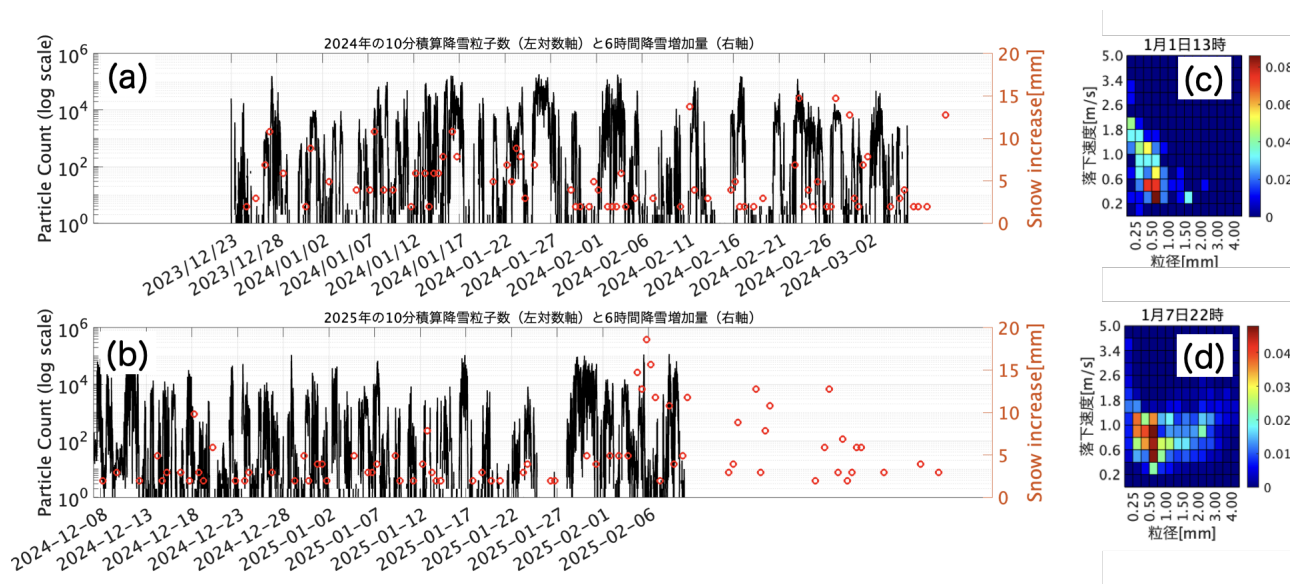


図-2 ディストロメーターによる観測結果

(a) 2024年の観測の時系列と降雪イベント、(b) 2025年の観測の時系列と降雪イベント、
(c) 2024年1月1日の粒径-落下速度分布、(d) 2024年1月7日の粒径-落下速度分布

図-3は、自己組織化マップ (SOM) により降雪イベントを分類した結果を示している。ヒートマップは各ユニットの粒径-落下速度のマトリクスを示している。この結果から、下側に位置するユニットは降水強度が 5 mm/h 以上の大雪イベントを含む日が系統的に多く、雪質の特徴としては、左下側は落下速度および粒径には多様な分布が存在する (TypeA, 水色) 物に対して、右下側は粒径が大きくなるにつれて、落下速度は遅くなる降雪粒子に集中する (TypeB, 青色) 特徴を有する。またTypeAの中でもとりわけ降雪量が多いユニットX1Y1をTypeA' (桃色) として大雪ユニットとして扱った。一方で、SOMマップの上側に行けば降雪量は少ないイベントが集中しており、とりわけX4Y5は降水強度が 5 mm/h 以上の大雪イベントが存在しない少雪ユニット (緑色) とした。

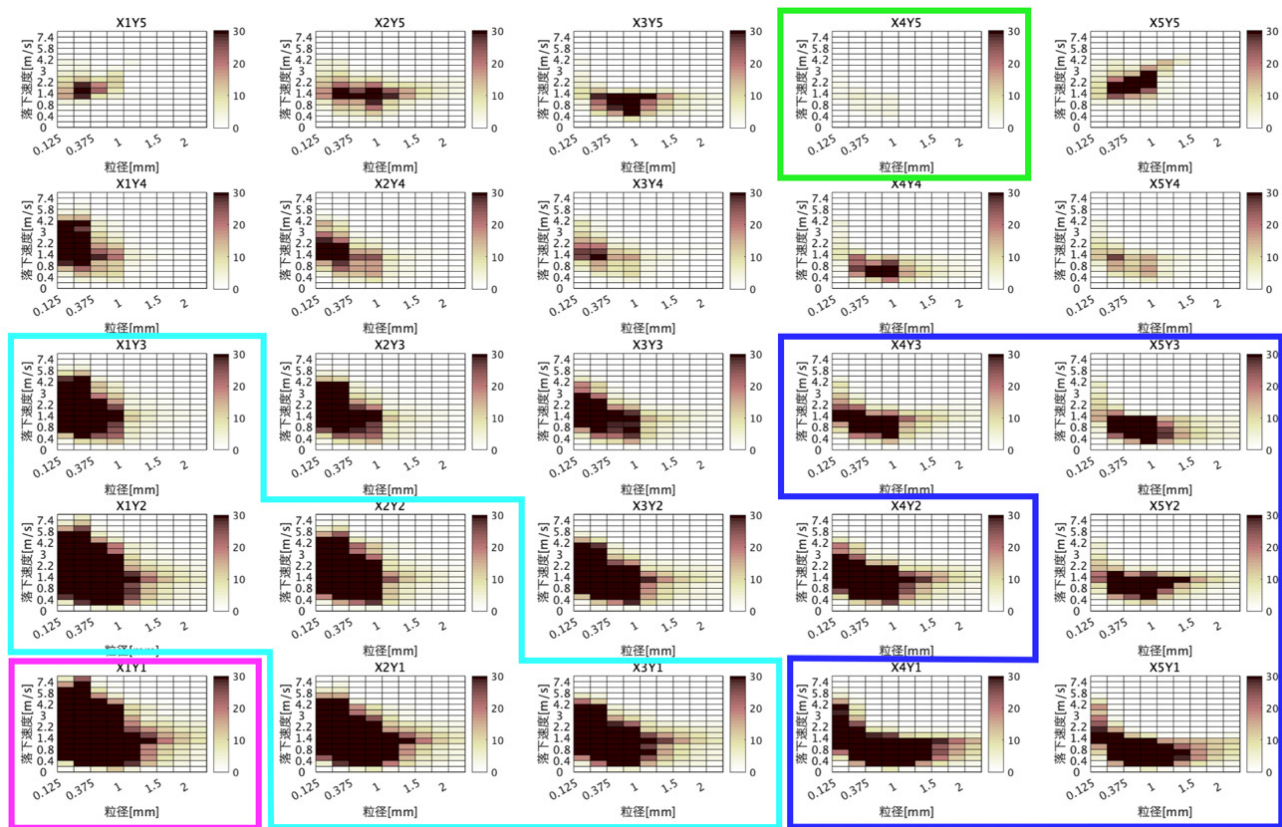


図-3 SOMにより作成した二次元マップと各ユニットの粒径-落下速度分布

3. 2. 雪質別気象条件の特性

図-4は、各ユニットに分類された降雪イベントのうち、ラジオゾンデが打ち上げられる前後3時間（6時から12時，18時から24時）のイベントのみを平均した気象要素の鉛直プロファイルを示す。比較的濡れ雪も含むType Aは水色，乾き雪のみで構成されるType Bを青色で，大雪のX1Y1と少雪のX4Y5はそれぞれ桃色と緑色で示した。図-4 (a), (b) は地上から高層における風向・風速を表しており，特に雪が多いType A', A, Bにおいては水蒸気供給源である800から1000m高さにおいて風向が310度から320度，すなわち西北西から北北西の風が卓越しており，その中でも大雪のものほど同高さでの風速が強い。一方で少雪イベントについては，270度以下，すなわち弱い南寄りの西風で特徴付けられる。図-4 (c), (d) は気温，湿度の鉛直プロファイルを表している。ここではTypeAとTypeBに系統的な差異が見られ，乾き雪が多く粒径の増加とともに落下速度も減少するTypeBは，粒径と落下速度が共に大きな湿った雪も含むTypeAに対して，地上から上空までの気温と湿度が低いことが読み取れる。これらの結果から，本手法で分類した粒径分布においても気温が低く，湿度も低い気象条件では乾き雪が卓越し，氷点下でありながら気温が高く，湿度が高い気象条件では湿った雪質も多く含むことがわかった。特に大雪イベントにおいては地上から高さ500m以下の雲底における相対湿度が非常に高く，降雪粒子の蒸発が制限されていたことも示唆される。

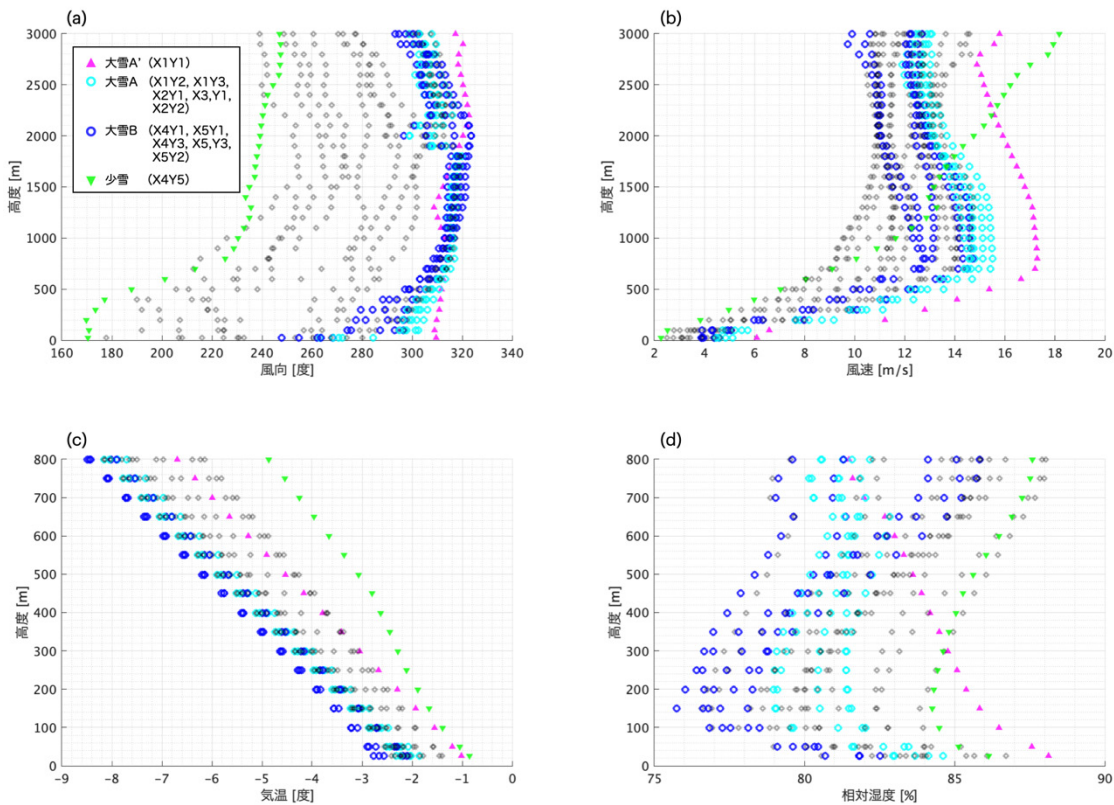


図-4 湿雪イベントと乾雪イベントにおける気象観測の比較

(a) 地上気温・湿度・風速, (b) 気温の鉛直プロファイル

3. 3. 総観規模気象場の特徴

図-5はTypeAのTypeBのユニット平均, X1Y1ユニット, X4Y5ユニットに対する総観気象場のコンボジット解析結果である。図-5 (a) は, Type Aの海面更正気圧 (黒実線) と降雪イベントに対する偏差 (色塗りつぶし) を表しており, 北海道付近に等圧線が集中する典型的な西高東低冬型気圧配置であると同時に, 全降雪イベントの平均に対しても強い気圧傾度, 特に北海道の北東に位置する低気圧性循環が強い。このことから比較的湿った大気収束場が石狩川流域下流に発生することで, 湿った雪を含む大雪イベントが発生しやすい循環場であることがわかる。同様に図-5 (b) においては, TypeBの総観場を示す。TypeAに対して北海道の北西側の高気圧偏差が強く, 北東側の低気圧偏差が弱い特徴を有する。このことから, 同タイプにおいては, シベリア由来の北風が卓越することで, 低温低湿の大気状態となり, 乾き雪が支配的な降雪分布になることがわかる。最も降雪量が多いX1Y1ユニットにおいては, Type Aをさらに強化されたような循環場であるが, 西において, 北側の沿海州での気圧偏差は負であり, 朝鮮半島から南側での気圧偏差が正の南北勾配を有しており, 東側に位置する強い低気圧性循環に加えて, 日本海の南西からの暖湿大気が強まることで強い収束域がもたらされたことが示唆される。同パターンは, 既往研究⁶⁾とも整合的であり, 対流圏下層から上層におけるパターンを見ても, 同地方に大雪をもたらす総観場を表している (図は省略)。図-5 (d) はX4Y5ユニットの総観場であり, 降雪時においても冬型が弱まる循環場においては, 比較的少ない雪となった。なおこの分類方法においては, 石狩湾岸に発生する小規模な低気圧や南岸からの低気圧による大雪は含まれていない。

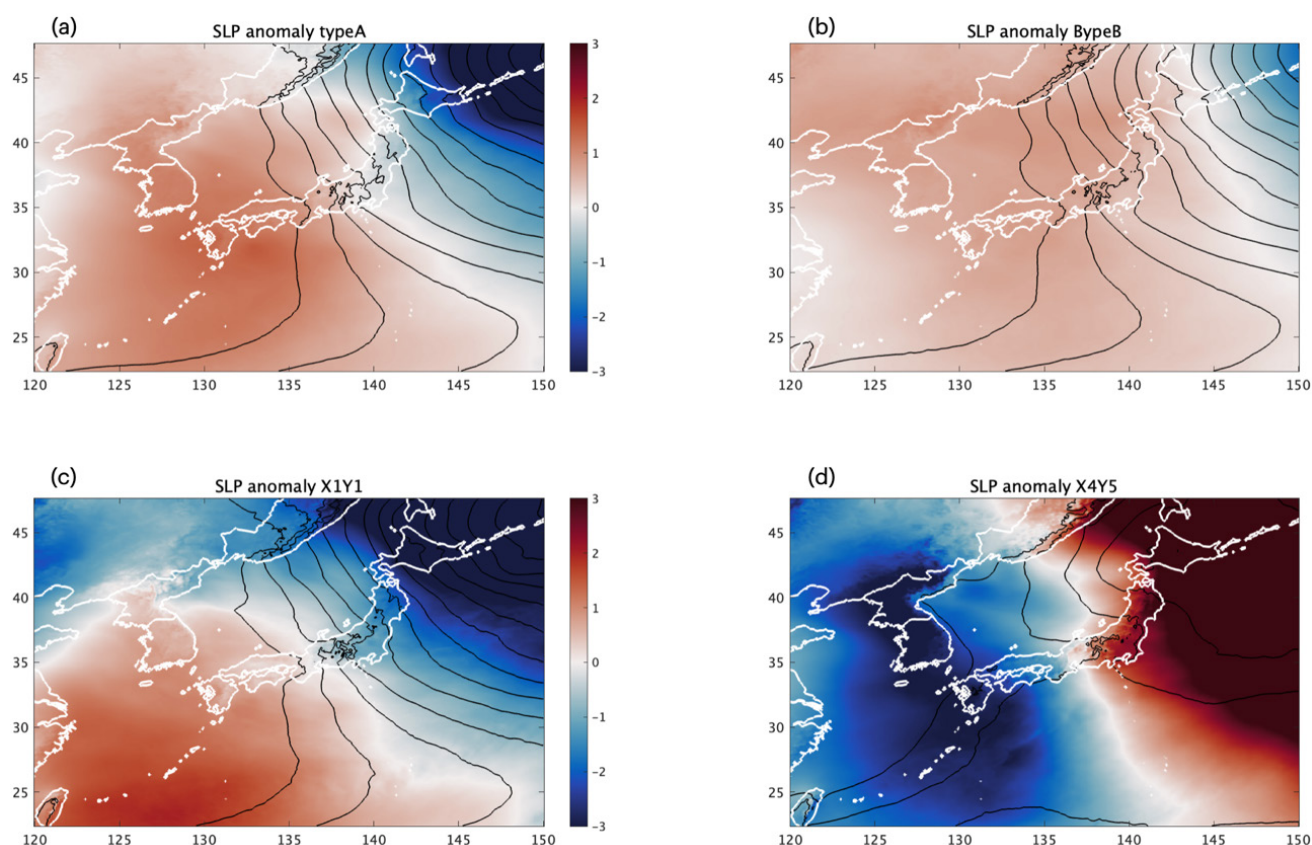


図-5 代表的なユニットにおける総観場の比較

- (a) TypeAの海面更正気圧および降雪時平均に対する偏差,
- (b) TypeBの海面更正気圧および降雪時平均に対する偏差,
- (c) X1Y1の海面更正気圧および降雪時平均に対する偏差,
- (d) X4Y5の海面更正気圧および降雪時平均に対する偏差

4. まとめ

本研究では札幌で降雪をもたらした事例に対して、雪質の自動判別を行い、大気状態を比較した。これにより、札幌圏で大雪をもたらす事例については、湿った雪を含む多様な降雪粒子で構成されるType Aと乾いた雪が支配的なType Bに分類した。分類した降雪イベントにおける大気鉛直プロファイルと海面更正気圧の水平勾配を比較したところ、両者は典型的な西高東低の冬型気圧配置でありながら、Type Aは東側の低気圧性循環が強く、相対的に高温高湿、極端な大雪を多く含むことに対して、Type Bは大陸性の高気圧が卓越し、低温低湿な環境場で乾いた降雪をもたらすことがわかった。今後は観測期間を延長し、他地点のデータとの比較を行うことで本結果の普遍性を検証する必要がある。また、気候変動の影響を含めた気候モデルを用いた解析を実施し、将来予測における雪質変化の評価および水資源管理への応用を図ることを計画している。

参考文献

1. 山田朋人, 豊平川流域における積雪による水資源の特徴と経年特性, 「流域を対象とした過去・将来における水資源の利用可能性」, 研究所紀要(X X X V), 146-155, 2024.
2. NAKAYA, Ukichiro. Snow crystals: natural and artificial. Harvard university press, 1954.
3. 中井専人ら, 光学式ディストロメーター観測に基づく固相および液相の降水粒子自動分類. 天気, 2023, 70.1: 5-11.

4. 大屋ら, 積雪重量計を用いた札幌市における 2023–2024 年冬季の観測について, 北海道の雪氷, 第43号p.123–124, 2024.
5. KOHONEN, Teuvo. The self-organizing map. *Proceedings of the IEEE*, 78.9: 1464–1480, 1990.
6. FARUKH, M. A.; YAMADA, Tomohito J. Synoptic climatology associated with extreme snowfall events in Sapporo city of northern Japan. *Atmospheric Science Letters*, 2014, 15.4: 259–265.

3. 積雪の圧縮粘性係数と積雪密度の関係式の導出

北海道大学 岡地寛季, 山田朋人

1. はじめに

積雪寒冷地において積雪は春から初夏にかけての水資源として重要である。積雪を水資源として換算する時に用いる積雪相当水量を求める際に重要な物理量は積雪密度と積雪深の2つである。本研究ではこれまでに提案された積雪の沈降圧密モデルのうちかわき雪とぬれ雪に対するモデルを比較することにより、圧縮粘性係数と積雪密度の関係を導出した。2章では、これまでに実施した積雪観測の概要を示し、3章では圧縮粘性係数と積雪密度の関係の導出を記す。4章でまとめと今後の展望を述べる。本研究は岡地・山田¹⁾の内容で構成される。

2. 積雪観測の概要

積雪観測は札幌市南区にある北海道開発局・豊平川ダム統管理事務所の定山溪流木処理場において、2005年から2024年に冬期集中測を実施した。同地点は石狩川水系小樽内川の定山溪ダムの上流に位置し、標高は400 m程度である。同観測サイトはこの観測データは1時間毎の合計値もしくは平均値が記録され、山間地における気象・積雪の変化を見ることができる長期観測を実施した貴重なデータである²⁾⁻⁵⁾。観測項目は付録として表-1に示した。

表-1 測定項目

観測項目	計測機器名	単位
融雪量	ライシメータ 転倒ます型流量計	mm/hr
積雪重量	積雪重量計	kg/m ²
降水量	雨雪量計	mm/hr
積雪深	積雪深計	cm
気温	温度計	℃
湿度	湿度計	%
風速	風速計	m/s
下向き短波放射	短波放射計	W/m ²
下向き長波放射	長波放射計	W/m ²
上向き短波放射	短波放射計	W/m ²
上向き長波放射	長波放射計	W/m ²
積雪表面温度	放射温度計	℃

3. 圧縮粘性係数と積雪密度の関係式の導出

3. 1. かわき雪の沈降圧密モデル

かわき雪に対する粘性圧縮による積雪の沈降圧密は

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{W}{\eta} \quad (1)$$

ここで ρ は密度[kg/m³]、 W は応力[N/m²]、 η は圧縮粘性係数[N・s/m²]、 t は時間[s]である。ある積雪層の厚みを h [m]とし、融雪がないとすれば、 $h\rho = \text{const.}$ となるため、

$$\frac{dh}{dt}\rho + h\frac{d\rho}{dt} = 0 \quad (2)$$

となる。そのため、(1) 式は

$$\frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = -\frac{W}{\eta} \quad (3)$$

と置き換えることができる。圧縮粘性係数 η は積雪密度を用いた複数の表現方法が提案されている⁶⁾。

3. 2. むれ雪の沈降圧密モデル

本節では杉森・伊藤⁸⁾が提案した濡れ雪における沈降圧密モデルを説明する。これは圧縮変化指数という値を元に圧密による積雪深の時間変化を推定するモデルである。ある層の雪ブロックを考える。以下の式は雪ブロックに応力 W がかかっている時の運動方程式である。

$$\frac{W}{g} \frac{d^2x}{dt^2} = F(x) - W \quad (4)$$

ここで、 g は重力加速度、 $F(x)$ は雪ブロックに発生する抵抗力である。 W はブロックに対する上載荷重によるものであり、 W/g は上載荷重の質量を表すことになる。 $F(x)$ は互いに接触し塑性変形をしている枝の間に発生する摩擦力とみなすものである。応力の蓄積はないものとする。

3. 3. 圧縮粘性係数 η と k^* の関係

圧縮粘性係数 η 、 k^* 、密度 ρ には以下の関係がある。

$$k^*\eta = \frac{\rho}{\rho_f - \rho} \quad (5)$$

式 (1) と式 (4) を用いることで上式の導出が可能となるが、同モデルの適用範囲はそれぞれかわき雪及びむれ雪であり、本研究ではこれまで継続的に実施した観測データを用いて同モデルの適用可能性を検討する。

4. まとめ

積雪の圧密過程はさまざまな外力により複雑な時間変化をする。しかし、積雪の水資源量として推定する際には積雪深と積雪内部の密度推定が必要である。本研究では、既往研究で示されたかわき雪とむれ雪の積雪の沈降モデル両者を用いることで圧縮粘性係数と密度の関係を示した。今後は、積雪の集中観測により得られた観測データを用いて同モデルの適用範囲を検討する。

参考文献

- 1) 岡地寛季, 山田朋人, 2024: 札幌定山溪における積雪観測と圧縮粘性係数と積雪密度の関係式の導出, 令和6年度雪氷研究大会講演要旨集, 218.
- 2) 西原照雅, 谷瀬敦, 2017: 積雪分布のパターンの類似性に着目した積雪分布の推定手法の検討. 土木

学会論文集 B1 (水工学), 73 (4), I_37-I_42, 2017.

- 3) 正岡由仁, 岡地寛季, 山田朋人: 積雪内の氷板形成における気象条件の影響, 令和2年度土木学会北海道支部論文報告集, 77, B-30, 2021.
- 4) 長谷川禎史, 山田朋人: 豊平川流域における積雪水資源の特性に関する研究, 令和4年度土木学会北海道支部論文報告集, 79, B-04, 2023.
- 5) 岡地寛季, 山田朋人. 2023: 2016 年から 2020 年冬季における誘電センサーを用いた積雪観測と誘電特性を考慮した積雪相当水量の推定手法, 土木学会論文集, 79 (27), 23-27020.
- 6) Shinojima, K. 1967: Study on the visco-elastic deformation of deposited snow. Physics of Snow and Ice: proceedings, 1 (2), 875-907.
- 7) 遠藤八十一・大関義男・庭野昭二, 1990: 低密度の雪の圧縮粘性係数と密度の関係, 雪氷, 52, 267-274.
- 8) 杉森正義・伊藤文雄, 2000: 濡れ雪の沈降圧密モデルについて: 福井大学地域環境研究教育センター研究紀要「日本海地域の自然と環境」No.7, 15-24