

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信  
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

# 融雪水量を気象データから推定する

春先になると全層雪崩や土砂崩壊など、融雪水や降雨が原因と考えられる災害が発生することがあります。これらの災害に対して巡回警備などのソフト対策を有効かつ効率的に実施するためには、地表面へ供給される融雪水量の把握が重要となりますが、融雪水量を直接観測するにはコストやメンテナンスの面で課題がありました。こうした課題を解決するため、著者らは、気温、降水量、風速、日照時間の4要素について最寄りのアメダスの気象データを用いて融雪水量を簡易的に推定する方法の検討を進めており、ここでは、その内容について紹介します。

## 融雪期にみられる災害

積雪地域では春先になると積雪表面で融雪が進み、融雪水が連続的に積雪へ浸透します。また、近年では冬期に一時的な気温上昇やまとまった降雨が観測されることがあります。例えば、2009年1月23日に札幌で最高気温が7.6℃まで上昇し、同時に18.5mmの降雨量が観測されました。こうした雨水や融雪水（ここでは、積雪期の雨水と融雪水の総量を融雪水量と呼ぶことにします）が積雪底面から地表面に流出すると、積雪や地盤の強度低下を招き、全層雪崩や土砂崩壊の発生危険度が高まることが定性的に知られています<sup>1)</sup>。そのため、積雪期の融雪水量を把握することは鉄道防災の観点から線路巡回や運転規制を考えるうえで重要となります。

## 既往の融雪水量の算出方法

融雪水量を求める方法は、専用の観測機器により実測する方法と気象要素から推定する方法の2通りに大別されます<sup>1), 2)</sup>。このうち、実測する方法には「積雪水量法」や「ライシメーター法」があります（図1）。積雪水量法とは、

地表面に大型の重量計を設置し、その重量変化から融雪水量を捉える方法です。ライシメーター法は、地表面に設置した大型容器によって融雪水量を捉える方法です。いずれの方法も機器設置に10m<sup>2</sup>程度の広い用地が必要であるほか、正確な測定を継続するためには機器の維持管理に十分な注意が必要となります。そのため、これらの機器を鉄道沿線の融雪災害が危惧される全ての地点へ設置することはコストやメンテナンスの面で現実的ではありません。一方、気象要素から融雪水量を推定する方法には、「ディグリー・デー法」があります。こちらは、融雪水量と気温との関係の経験則に基づいて、気温から融雪水量を算出する方法です。ただし、ディグリー・デー法で求まる融雪水量には、雨水が含まれないため、雨量については別途加算する必要があります。このように、ディグリー・デー法の入力データは気温のみであるため、データの取得が容易であり、かつ実測に比べてコスト面でも優れていることから、過去には全層雪崩に対する線路巡回や雪崩警備の出動基準、運転規制の発令基準への適用が検討され



**栗原 靖**  
Yasushi Kurihara  
前 防災技術研究部  
気象防災研究室  
研究員  
【専門分野】 鉄道の気象、  
雪氷災害対策



**穴戸 真也**  
Masaya Shishido  
防災技術研究部  
気象防災研究室  
副主任研究員  
【専門分野】 鉄道の気象、  
雪氷災害対策



**高橋 大介**  
Daisuke Takahashi  
防災技術研究部  
気象防災研究室  
研究員  
【専門分野】 鉄道の気象、  
雪氷災害対策

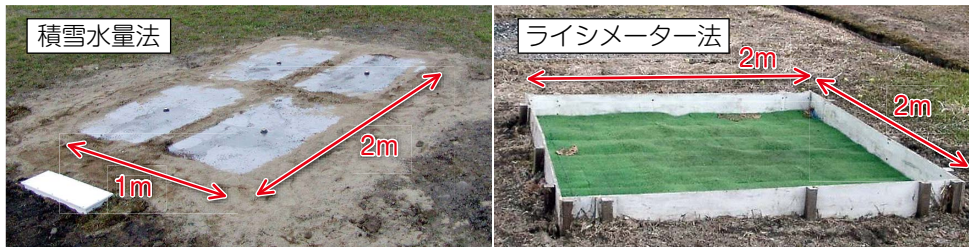


図1 融雪水量の観測方法 (左：積雪水量法，右：ライシメーター法)

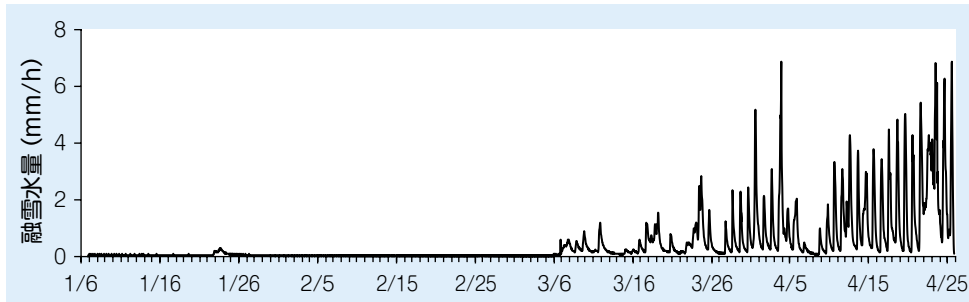


図2 融雪水量の時系列変化 (ライシメーター法)

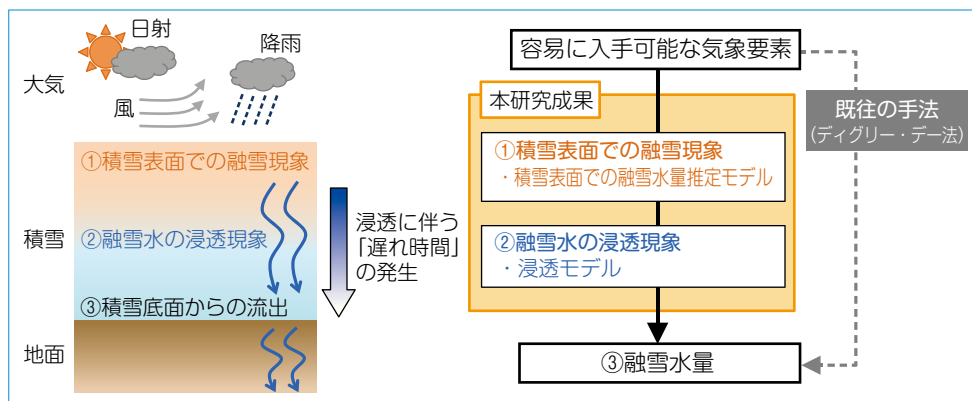


図3 融雪現象の概念図および融雪水量の推定フロー

てきました<sup>1)</sup>。しかしながら、ディグリー・デー法は、通常1日から1週間単位の融雪水量を求める際に用いる方法であり、現在の鉄道防災で求められる1時間分解能で融雪水量を算出するには、精度の面で課題がありました。そこで、著者らは最寄りのアメダスなどから容易に入手できる気温、降水量、風速、日照時間の気象4要素を用いて、融雪水量を1時間単位で推定する方法を検討しました。

### 気象・融雪水量観測

融雪水量の推定方法の作成と検証に必要なデータを手入手するために2012年1月6日から4月25日まで、塩沢雪害防止実験所(新潟県南魚沼市)

の観測露場(平たん地)で実施した気象・融雪水量観測について紹介します。観測項目は、気温、湿度、気圧、降水量、風向・風速、積雪深、正味放射量(短波放射量、長波放射量それぞれの上下方向)の気象要素とライシメーター法による融雪水量の実測値です。観測結果の一例として、融雪水量の時系列変化を図2に示します。3月上旬から融雪水量が観測され始め、その後、大きな時間変動を描きながら連続的に融雪水量が観測されていることがわかります。観測期間の総融雪水量は1232mmであり、融雪水量の日最大値は81.6mm、日最小値は0.0mm、また融雪水量の時間最大値は6.9mm、時間最小値は0mmといったように、

融雪水量は時期のみならず、1日の中でも大きく変化することが明らかになりました。

### 融雪水量の推定方法

融雪水量の推定方法を検討するにあたり、はじめに融雪現象について考えてみます。融雪現象は概念的に図3に示すように、①日射などによる積雪表面での融雪、②積雪層内の浸透、③積雪底面からの流出からなります。したがって、積雪表面で融雪が生じてから積雪底面へ流出するまでには浸透に伴う「遅れ時間」が生じます。そのため融雪水量を細かい時間分解能で、かつ精度良く推定するためには、(1)積雪表面での融雪量(以後、積雪表面での融

表1 入力要素の比較

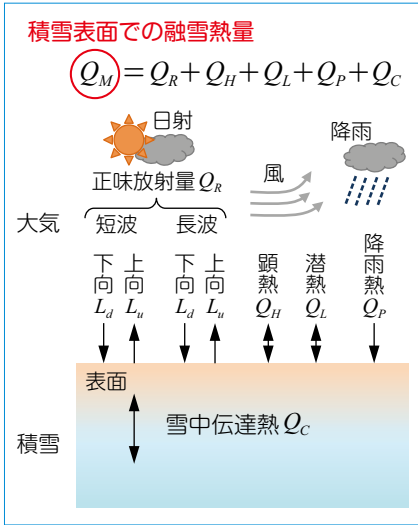


図4 熱収支法概念図

▼既存の推定手法 (熱収支法)

各熱量	推定に必要な気象要素
正味放射量 $Q_R$	長短波放射量 (気温, 降水量, 日照時間, 雪温など)
顕熱 $Q_H$	気温, 風速, 飽和水蒸気圧, 空気密度など
潜熱 $Q_L$	気温, 風速, 水蒸気圧, 空気密度など
降雨熱量 $Q_P$	気温, 降水量, 風速, 湿球温度, 飽和水蒸気圧など
雪熱伝達熱 $Q_C$	積雪構造 (物性値) など

▼今回作成した推定手法

各熱量	推定に必要な気象要素
正味放射量 $Q_R$	気温, 降水量, 日照時間
顕熱 $Q_H$	気温, 降水量, 風速
潜熱 $Q_L$	気温, 降水量, 風速
降雨熱量 $Q_P$	気温, 降水量, 風速
雪熱伝達熱 $Q_C$	他の要素に比べて熱量が小さいため, 一律 $0W/m^2$ で与える

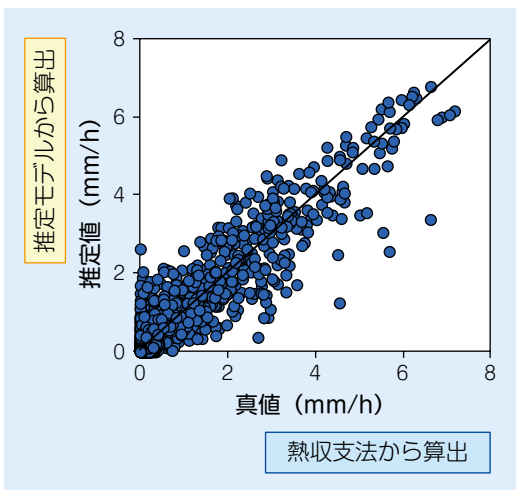


図5 積雪表面での融雪水量の推定結果

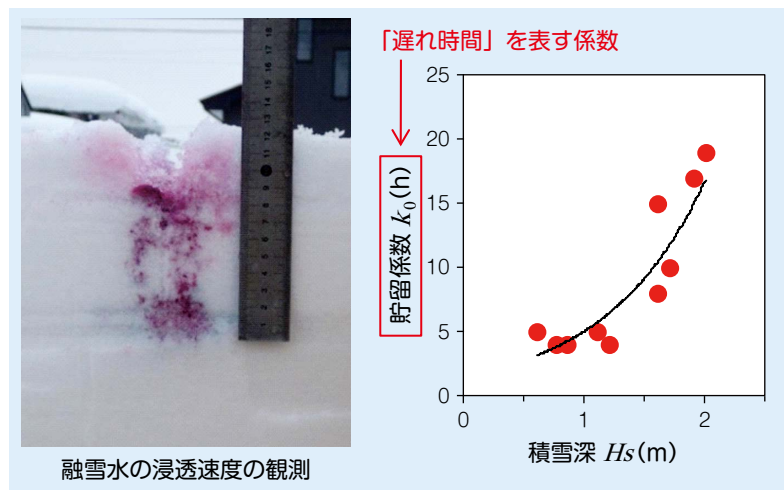


図6 融雪水量観測の実施状況 (左), および遅れ時間と積雪深との関係 (右)

雪水量と呼ぶことにします)を精度良く推定したうえで、(2)融雪水の浸透過程(浸透に伴う遅れ時間)を考慮することが重要となります。そこで、気象・融雪水量観測、ならびに既往の研究成果に基づいて、それぞれの現象を再現するためのモデルを作成しました。

(1) 積雪表面での融雪現象

積雪表面での融雪水量については、既往の熱収支法<sup>例えは3)</sup>に基づき算出しました。熱収支法とは名前の通り、積雪表面における熱収支から融雪水量を計算する方法で(図4)、細かな時間分解能で積雪表面での融雪熱量から融雪水量を推定することができます。しかしながら、観測が難しいと言われる正味放射量をはじめ、気温、降水量、日

照時間、飽和水蒸気圧など非常に多くの入力要素が必要となるため、これらの観測網を鉄道へ展開することは現実的ではありません。そこで、気象・融雪水量の観測結果、ならびに既往の研究成果<sup>例えは3), 4)</sup>をこの熱収支法に取り込み、最寄りのアメダスなどから入手できる気温、降水量、風速、日照時間の気象4要素から積雪表面での融雪水量を推定できる「融雪水量の推定モデル」を作成しました(表1)。

ここで、上記モデルの推定精度を調べるために、従来の熱収支法から求めた積雪表面での融雪水量(これを真値とする)と比較して、相関分析を行いました(図5)。その結果、1時間あたり最大で3.3mm/hの差があるものの、

決定係数は0.87と両者には強い相関があり、真値に対する二乗平均平方根誤差(RMSE)は0.5mm/hでした。また、観測期間全体の積雪表面での融雪水量の積算値を比較すると、真値が1202mmであるのに対してモデルから得られる値は1266mmであり、両者は概ね一致しました。このことから、本研究で作成した気象4要素から推定する積雪表面での融雪水量の推定モデルは、多くの気象要素を必要とする熱収支法で推定した値をおおむね再現できることがわかりました。

(2) 融雪水の浸透現象

融雪水の浸透現象については、①融雪水の浸透過程を表現するモデルと②遅れ時間を表現する2つのモデルを組

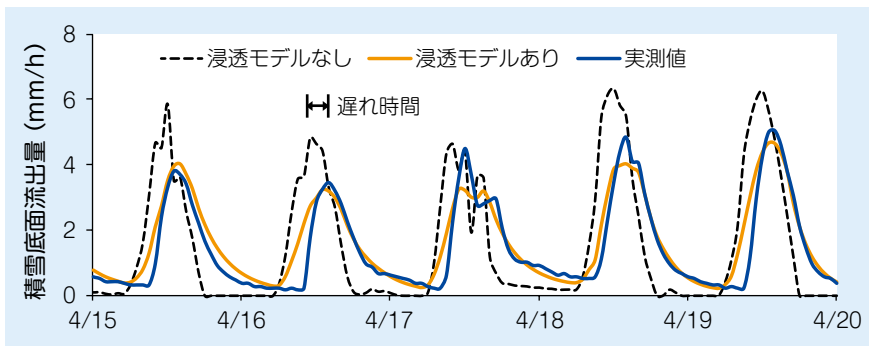


図7 融雪水量の時系列変化

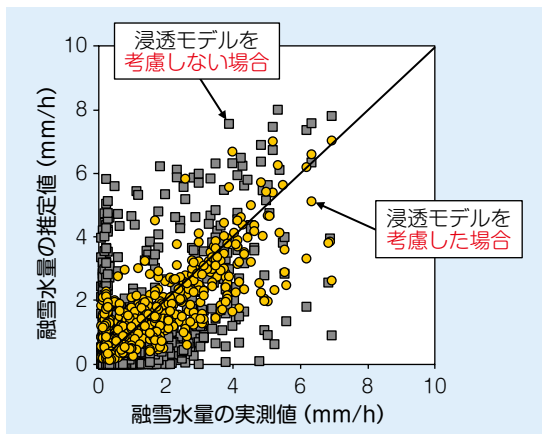


図8 融雪水量の推定結果

み合わせた「浸透モデル」を作成しました。

1つ目の融雪水の浸透過程を表現するには、雪温が必要になります。具体的には、積雪層内に雪温0℃未満の層があった場合、積雪表面で得た熱エネルギーはその層の温度上昇に使われ、融雪水が再凍結することがあります。再凍結に使われるエネルギー消費量を計算するため、既存の積雪性状モデル(参考文献<sup>5,6)</sup>の入力値に新たに積雪表面で得た熱量(融雪水量)を加え、雪温の影響を考慮した融雪水量を推定できるように改良を加えました。

2つ目の融雪水量の浸透に伴う「遅れ時間」については、融雪水量の観測結果より、遅れ時間と積雪深の間に良

い相関関係がみられたことから、既往の研究<sup>7)</sup>を参考に遅れ時間を積雪深の関数で表現することとしました(図6)。

### 融雪水量の推定結果

これまでに示した一連のモデルから算出した融雪水量と塩沢雪害防止実験所で得られた観測値との比較結果を図7に示します。積雪表面における「融雪水量の推定モデル」と浸透に伴う遅れ時間を考慮する「浸透モデル」を組み合わせることで融雪水量のピーク値、ピークの出現時刻ともに実測値を良く再現できるようになりました。図8は観測期間全体を通して実測値と推定値を比較した結果です。両者の値は1時間あたり最大で4.3mm/hの差があり

#### 積雪性状モデル

積雪観測結果に基づき、気温と降水量データのみから積雪各層の質量や密度、層厚といった積雪の物性値を算出できるモデルです。なお、積雪層は、便宜上、1時間に1層形成されると考えます。

ますが、実測値に対する二乗平均平方根誤差(RMSE)は0.5mm/hであり、積雪浸透モデルを考慮することにより浸透モデルを考慮しない場合に比べて、融雪水量の推定値の標準誤差を約50%低減させることができました<sup>8)</sup>。

### おわりに

本稿では、全層雪崩や土砂崩壊といった融雪期の災害に影響を及ぼす融雪水量の推定方法を紹介しました。この方法はアメダスから得られる気象4要素のみを入力データとするものであり、1時間単位で融雪水量を推定することができます。

今後は融雪水量と全層雪崩や土砂崩壊の発生との関係を整理し、気象データを用いた災害発生危険度評価方法の開発に取り組んでいきます。RRR

### 文献

- 1) 河島克久, 飯倉茂弘, 杉山友康, 遠藤徹, 藤井俊茂: 気温を用いた融雪量の簡易推定方法の開発, 鉄道総研報告, Vol.16, No.8, pp.35-40, 2002
- 2) 日本雪氷学会北海道支部編: 雪氷調査法, 北海道大学図書刊行会, pp.137-152, 1991
- 3) 近藤純正: 地表面に近い大気の科学, 財団法人東京大学出版会, pp.137-165, 2000
- 4) 山崎剛, 田口文明, 近藤純正: 積雪のある森林小流域における熱収支の評価, 天気, Vol.41, 1994
- 5) 遠藤八十一, 小南裕志, 山野井克己, 竹内由香里, 村上茂樹, 庭野昭二: 降水量データから積雪深と密度を推定する方法, 雪氷, Vol.66, No.1, pp.17-25, 2004
- 6) 水津重雄: 激しい降雪による乾雪表層雪崩危険度モデル, 雪氷, Vol.64, No.1, pp.15-24, 2002
- 7) 中津川誠, 工藤啓介, 星清: 積雪貯留を考慮した汎用的な融雪流出解析, 水工学論文集, Vol.48, pp.37-42, 2004
- 8) 栗原靖, 宍戸真也, 飯倉茂弘, 高橋大介, 鎌田慈: 融雪水の積雪底面流出量の推定手法, 鉄道総研報告, Vol.27, No.11, pp.29-34, 2013