

# 圧縮指数の変化特性を利用した札幌定山溪における積雪圧密過程

Snow compaction process with characteristic of compressive index in Jozankei, Sapporo

北海道大学大学院工学院 ○学生員 細井遵敏 (Nobutaka Hosoi)  
 北海道大学大学院工学研究院 正員 山田朋人 (Tomohito Yamada)  
 寒地土木研究所 正員 西原照雅 (Terumasa Nishihara)

## 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。しかし、積雪がもたらすのは水資源としての恩恵だけではない。積雪は交通障害や雪崩などを発生させ、春先には降雨を伴った融雪が洪水や河川氾濫を引き起こすこともある。

雪を水資源として換算する時に用いる積雪相当水量[mm]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。積雪深は航空観測などで広範囲を一定の精度をもって観測することが可能である<sup>2)</sup>が、積雪密度は時期や場所、深さの違いによって変化が激しい。例えば著者らが定山溪で行った観測において、新雪の密度は $0.06\text{g/cm}^3$ を示した一方で、圧密された積雪の密度は $0.3\text{g/cm}^3$ から $0.6\text{g/cm}^3$ の範囲を示した。

本研究では積雪相当水量を推定する時に重要な密度と積雪深の変化に関わる、圧密という現象に観測と数値解析モデルという2つの方法を用いてアプローチする。

## 2. 使用データ

2005年以降、定山溪ダム観測サイト（北海道札幌市南区、標高400m）において寒地土木研究所が観測を実施している。この観測データは1時間ごと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出来る貴重なデータである。同観測サイトでは寒地土木研究所が設置した温度計などで気象条件を測るとともに、積雪重量計や $2\text{m} \times 2\text{m}$ のライシメーターを用いて積雪に関する観測を行なっている。

また、観測機器が設置されている観測サイトでは積雪層の時間変化を見るために、積雪断面観測も行われている。積雪断面観測は、積雪に鉛直方向の穴を掘ることで氷板や弱層などの積雪の層構造や高さごとの雪中温度、積雪密度、雪質などを調べるための観測手法である。定山溪ダム観測サイトにおいて、積雪断面観測は2007年度から行われており、2016年度からは著者らも参加している。現地で行われている観測項目は付録として表-1に示した。

## 3. 圧密の推定

積雪の圧密量を推定するためのモデルとして、本研究では杉森・伊藤(2000)が提案した濡れ雪における沈降圧密モデルを採用した。これは従来の圧縮粘性係数とは異なる圧縮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。このモデルの根幹となる式の制約上、降雪および底面流出が出現しない期間にのみ適用できる。そのため最初に、13年分の気象・積雪観測データから以下の3つの条件を満たす期間を抽出した。

・積雪が30cm以上ある  
 ・降水のない期間が24時間を超える  
 ・底面流出量が十分に小さい

3つ目の条件で、底面流出の閾値を8.5時間ごとに $0.25\text{mm}$ 以下と定めた。これは厳冬期にあっても地熱の影響を底面から受け、わずかに底面流出量が存在しているからである。定山溪の観測サイトでは9時間毎に $0.25\text{mm/m}^2$ の底面流出量を観測している。

無降水・無流出期間の抽出結果を図-1に示す。条件を満たした期間は121事例存在し、継続時間の最大値は213時間、最小値は24時間である。また、無降水・無流出期間の継続時間が1日(24時間)以上2日(48時間)未満であるのは、6割を超える75事例であり、4日(96時間)以上続いた事例は6事例である。

次に、抽出した121事例のうち、期間の最初と最後の積雪深の観測値を比較して、値が減少している109事例に関して圧密による積雪深の変化を求めた。取り除いた12事例のうち、期間の最初と最後で積雪深の値が変化しなかったものが3事例、積雪深が増加していた事例が9事例である。

積雪深の変化を求める式は次の式(1)と式(2)である。

$$\frac{d\rho(t,z)}{dt} = k \cdot W(z) (\rho_f - \rho(t,z)) \quad (1)$$

$$\rho(t,z)h(t,z) = \rho_0(0,z)h_0(0,z) \quad (2)$$

本モデルは鉛直層を有し、式(1)は上層からの荷重によって層が圧密されて密度が時間変化することを表している。

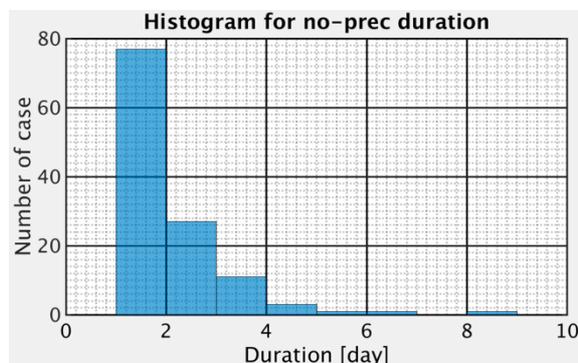


図-1 無降水・無流出期間のヒストグラム。13年分の気象・積雪観測データから3つの条件を満たす期間を抽出した。横軸は無降水期間[日]を、縦軸は事例数を表す。

る。式中の $\rho$ [g/cm<sup>3</sup>]は積雪密度、 $t$ [h]は時刻、 $z$ は積雪表面を1として上から数えた層番号、 $k^*$ [m<sup>2</sup>/(N·h)]は圧縮指数、 $W$ [N/m<sup>2</sup>]は積雪重量、 $\rho_f$ [g/cm<sup>3</sup>]は積雪の最終密度を表す。最終密度は積雪断面観測の結果から0.6g/cm<sup>3</sup>を採用した。

式(2)は式(1)で求めた密度の変化を積雪深の変化に換算する式である。 $h$ [cm]は積雪深を表し、添字の0は観測から得た初期値を意味する。この式は密度と積雪深の積で表される積雪相当水量が一定であるという仮定のもとで任意の時間に成立する式であり、本モデルが降水および底面流出のない期間のみを対象とする理由である。

圧縮指数を算定するに当たって、初期条件としていくつかの物理量を与える必要がある。ここでは、積雪重量[kg/m<sup>2</sup>]を積雪深[cm]で割ったものとして全層平均密度[kg/m<sup>3</sup>]を算出し、各層に全て同じ値を与えた。上層からの荷重[N/m<sup>2</sup>]は各層の密度と高さの積の総和として与えた。また、圧縮指数は、全層一定かつ無降水・無流出期間中に変化しないものとして計算した。モデル結果と観測データを比較し、よく一致した圧縮指数を当該期間の圧縮指数として定めた。

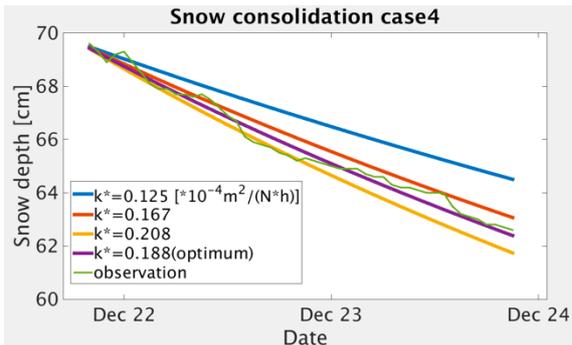


図-2 圧縮指数を算定した結果の一例。横軸は時間を、縦軸は積雪深を表す。圧縮指数 $k^*$ の値が大きいほど、単位時間あたりの積雪深の減少が大きいことを意味する。

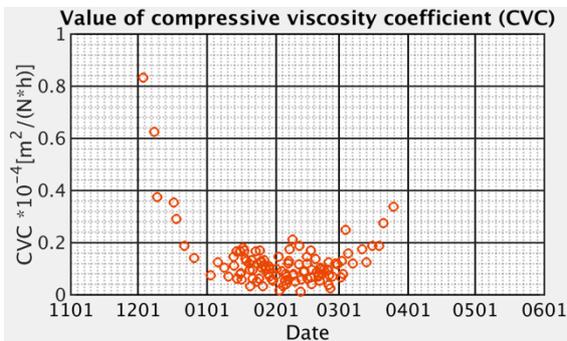


図-3 圧縮指数を時系列に並べた図。13年分109事例の全てをプロットした。横軸は無降水・無流出期間の開始時刻を表し、縦軸は圧縮指数[m<sup>2</sup>/N/h]を表す。

#### 4. 圧縮指数の算定結果

図-2に圧縮指数を算定した結果の一例を示す。図に示している事例の無降水期間は2005年12月21日20時から49時間で、当該期間の平均圧縮指数は $k^* = 0.188 \times 10^{-4} [m^2/(N \cdot h)]$ である。観測値とモデルの計算値を比較すると、観測値は様々な圧縮指数の値を取りながら、圧密されていることがわかる。このことから、全層平均・時間平均の圧縮指数ではなく、時事刻々と変化する圧縮指数が必要であることが推察される。

図-3は全109事例における圧縮指数の値を時系列で一覧にしたものである。図から圧縮指数の値は積雪期間が始まると時間と共に減少し、積雪期間中頃はある一定の範囲に収まり、積雪期間が終わりに近づくにつれて増加することがわかった。

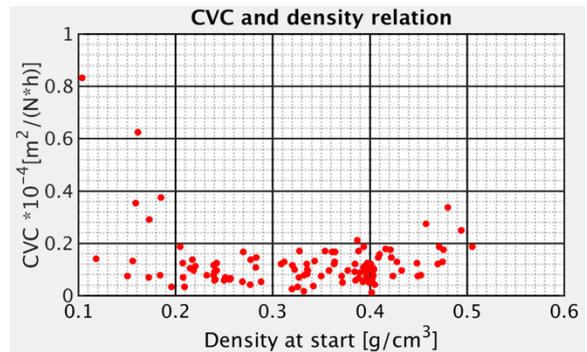


図-4 圧縮指数と無降水期間開始時の全層密度との関係を示した図。

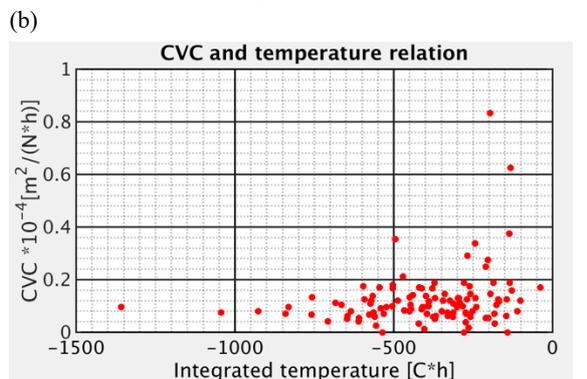
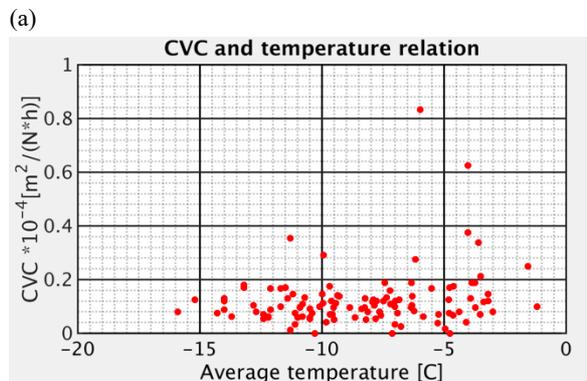


図-5(a) 圧縮指数と無降水期間の平均気温との関係を示した図。(b) 圧縮指数と無降水期間の積算気温の関係を示した図。

5. 圧縮指数と積雪・気象観測結果との関係

先行研究<sup>4)</sup>では圧縮粘性係数と積雪密度の関係が述べられており、杉森らは圧縮指数と圧縮粘性係数の関係を式(3)によって表した。

$$k^* \eta = \frac{\rho}{\rho_f - \rho} \quad (3)$$

式中の $\eta$  [ $N \cdot h / m^2$ ]は圧縮粘性係数を表す。

図-4 では圧縮指数と無降水期間開始時の全層平均密度の関係を示している。縦軸の圧縮指数が  $0.1 \cdot 10^{-4}$  から  $0.2 \cdot 10^{-4} [m^2 / (N \cdot h)]$  の範囲において、横軸の密度は  $0.1$  から  $0.6 g/cm^3$  まで様々な値を取ることがわかる。一方、 $0.2 \cdot 10^{-4} [m^2 / (N \cdot h)]$  を超える圧縮指数をとる密度は限られている。これは圧密されやすい新雪が積もる時期は全層平均密度が小さいかつ圧縮指数が大きくなりやすく、積雪深の現象が著しい融雪時期は密度が大きくなるからだと推察される。

また、4 章の結果から季節によって圧縮指数の値が変わることがわかっている。観測しているデータにおいて季節によって顕著に変化するものは気温である。そのため圧縮指数と無降水期間中の平均気温との関係を図-5(a)に、圧縮指数と無降水期間中の積算気温との関係を図-5(b)に示した。平均気温

6. 融雪を考慮した圧縮指数

圧縮指数を用いて通期の積雪圧密を計算するとき、積雪期間での式の適用と融雪期間での式の適用とを可能にする必要がある。ここでは融雪期間でのモデルの適応可能性を考える。

式(1)において上層から受ける圧力が融雪によって変化するため、式(4)のように書き換えられる。

$$\frac{d\rho(t, z)}{dt} = k^* W_2(t, z) (\rho_f - \rho(t, z)) \quad (4)$$

式(1)との違いは上層から受ける圧力  $W_2(t, z) [N/m^2]$  が時間によって変わることである。

また、融雪量を底面からの流出であると考えたとき、質量保存則である式(2)は式(5)のように書き換えることが可能である。

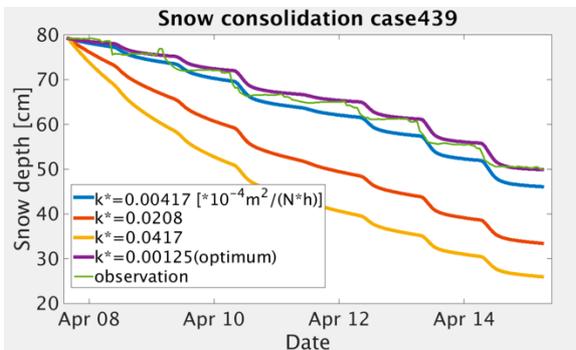


図-6 融雪を考慮した場合の圧縮指数を算定した結果の一例。横軸は時間を、縦軸は積雪深を表す。圧縮指数  $k^*$  の値が大きいほど、単位時間あたりの積雪深の減少が大きいことを意味する。

$$\rho(t, z) h(t, z) = \rho_0(0, z) h_0(0, z) - \rho_w \sum_{t=0}^t BR(t) \quad (5)$$

式中の  $\rho_w [g/cm^3]$  は水の密度、 $BR(t) [mm]$  は時刻  $t$  における底面流出量である。観測された底面流出量を計算開始時刻から積算することによって、時刻  $t$  における積雪相当水量を算出することが可能になる。

上層からの荷重が上層にある積雪の重さに重力加速度をかけたものであることは自明であるため、式(4)は式(5)を用いて式(6)のように書き換えられる。

$$\frac{d\rho(t, z)}{dt} = k^* (\rho_f - \rho(t, z)) \left( \rho_0(0, z) h_0(0, z) - \rho_w \sum_{t=0}^t BR(t) \right) \quad (6)$$

初期値として積雪深、積雪重量の観測値を用い、境界条件として各計算時間の底面流出量の観測値を与えた。

その結果を図-6 に示す。図に示した事例の計算開始時刻は 2019 年 4 月 7 日 16 時から 182 時間で当該期間の圧縮指数は  $k^* = 0.00125 \times 10^{-4} [m^2 / (N \cdot h)]$  である。

図-7 は計算時刻における底面流出量の観測結果である。図-6 と図-7 とを見比べると、計算された積雪深が減少している時刻だけでなく、積雪深の観測値が減少している時刻と底面流出量が観測されている時刻が一致している。また、積雪深の減少速度から、融雪時期の積雪深の減少量は圧密よりも底面流出によるものが大きいと言える。

7. まとめ

本論文では観測データと数値モデルから、杉森・伊藤<sup>1)</sup>が提案した無降雨・無流出期間の圧縮指数を求めた。また、それらを複数の観測年に適応することで、季節と指数との間にある一定の関係があることを発見した。また、様々な観測データと圧縮指数の関係を図化することで、圧縮指数の値と気象データとの関係性を説明することを試みた。

さらに、物理式を改良することで、融雪を伴う時期における積雪の圧密をモデル化し、観測データと比較することで一定の精度を持ちうることを示した。

今後は現在、層平均かつ時間平均で一定として与えて

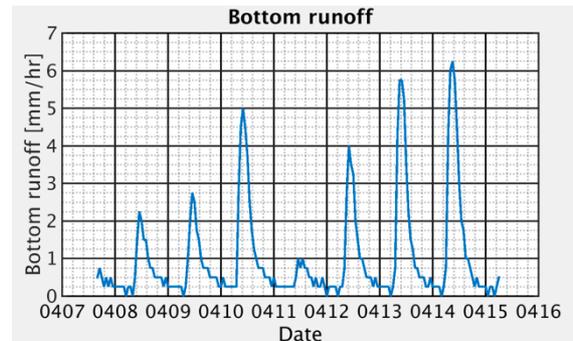


図-7 事例番号 439 (図-6) と同じ期間における底面流出量の観測値。

いる圧縮指数を層ごとに値を変化させる、時間によって値を変化させるなどをして、無降雪期間終了時の積雪深だけでなく、無降雪期間中の積雪深を再現できるようにすることを目標とする。

また、融雪を伴う圧密の検証事例数を増やすことで、季節特性などを述べられるようにするほか、降雪・降雨を伴う期間にも式を適用できるように工夫する。

8. 付録

8.1 観測項目一覧

定山溪ダム観測露場において実施している観測項目と計測機器について一覧表にした。表-1 は寒地土木研究所が行っている気象・積雪観測の測定項目である。表-2 は 2016 年度と 2018 年度に北海道大学が行った誘電式含水率計による観測項目を示している。また誘電式含水率計の写真は図-8 に示した。表-3 は断面観測で観測している観測項目である。



図-8 誘電式含水率計の写真。白いロープが計測機となっている。

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 <sup>2</sup>
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	長短波放射計	W/m <sup>2</sup>
下向き長波放射		W/m <sup>2</sup>
上向き短波放射		W/m <sup>2</sup>
上向き長波放射		W/m <sup>2</sup>
積雪表面温度	放射温度計	℃

表-2 測定項目

観測項目	計測機器名	単位
積雪深	超音波積雪深計	cm
全層平均含水率	誘電式含水率計	%
全層平均含氷率		%
全層平均密度		g/cm <sup>3</sup>
積雪相当水量		mm
50cm 高さ含水率		%
50cm 高さ含氷率		%
50cm 高さ密度		g/cm <sup>3</sup>
積雪相水量		mm
50cm 高さ含水率		%
50cm 高さ含氷率		%
50cm 高さ密度		g/cm <sup>3</sup>
積雪相当水量		mm

表-3 測定項目

観測項目	計測機器名	単位
積雪深	巻尺	cm
層別雪中温度	温度計	℃
層別密度	スノーサンプラー 秤	g/cm <sup>2</sup>
含水率	温度計 秤	%
雪質		
断面構造		

謝辞：本論文は基盤研究(B) 19H02241 と基礎研究(B)17KT006607 の一部である。また、本研究は土木研究所寒地土木研究所の観測データを使用させていただいた。

9. 参考文献

- 1)北海道開発局 釧路開発建設部：平成 30 年 3 月 8~9 日の低気圧に伴う降雨による釧路川の出水概要【速報板】、2018
- 2)西原照雅・中津川誠・浜本聡、2012：航空レーザ測量を活用したダム流域の積雪深分布の推定：河川技術論文集第 18 巻、465-470
- 3)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
- 4)小島賢治、1957：積雪層の粘性圧縮 III：低温科学物理篇 16、167-196