

## 積雪の間隙特性に関する一考察

荒川逸人 (野外科学株式会社), 和泉 薫 (新潟大学災害復興科学センター),  
河島克久 (新潟大学災害復興科学センター), 石井吉之 (北海道大学低温科学研究所)

### 1. はじめに

積雪の間隙は, 融雪水の浸透や空気の対流などと密接に関連しており, その構造を知ることは非常に重要である. しかし, 間隙は目に見えないために, その特徴量を表すことは難しく測定事例が少ない. その中でも固有透過度は巨視的に間隙の特徴を示すことができる物理量である. 固有透過度の実験式は粒径と密度で表される<sup>1)2)</sup>ことが多く, 微視的な間隙特性を反映できていない. これが可能となれば積雪内の流体の移動を解明する足掛かりになると考えられる. そこで本研究では, 手始めに単一径の円管束モデルを考え, これに流路がどれだけ遠回りをしたかを示す迂回率や流動に関与しないよどみ部分を考慮に入れ, これらと雪質との関係について論じることを目的とする.

### 2. 円管束モデル

#### 2.1 モデルの概要

図-1aに示すように, 断面積 $A_s$ , 長さ $L_s$ の積雪試料の中に, 直径が $d_T$ , 長さ $L_T$ の円管が $n_T$ 本あるような単一径の円管束モデルを考える. 円管は直線で屈曲していないものとする. また, 図-1bのように, 円管内で流体の流れに関与する部分としない部分を分け, 流動に関与する部分も円管になるとし, 流動に関与する直径の比率 $R_a$  (以下, 径比) を与えると. この時, 流動に関与する直径は $R_a d_T$ となる.

#### 2.2 モデルにおける諸物理量

図-1で示した円管束モデルでは, 以下のように, 間隙率 $\phi$ , 体積比表面積 $SSA_v$ , 水理学的半径 $r_H$ が求められる.

$$\phi = \frac{\pi (d_T / 2)^2 L_T}{A_s L_s} \times n_T \quad (1)$$

$$SSA_v = \frac{\pi d_T L_T}{A_s L_s} \times n_T \quad (2)$$

$$r_H = \frac{\phi}{SSA_v} = \frac{d_T}{4} \quad (3)$$

また, 円管の長さ $L_T$ と積雪試料の長さ $L_s$ の比を迂回率 $\tau$ として定義する. すなわち,

$$\tau \equiv \frac{L_T}{L_s} \quad (4)$$

である. これは, 流路がどれだけ長くなり,

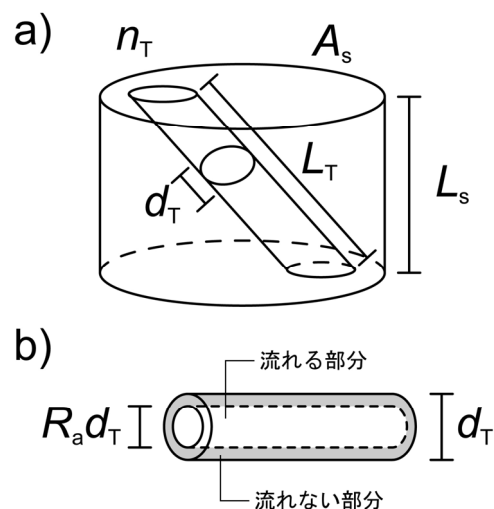


図-1 単一径の円管束モデル. a)は積雪試料全体, b)は円管における流動部分と非流動部分を示す.

流体が最短距離である試料長に対して遠回りした程度を示す。

### 2.3 Hagen-Poiseuille の法則と Darcy の法則

単一径の円管を流れる粘性流体の流速はHagen-Poiseuilleの法則に従う。すなわち、円管の流動に関与する部分の直径は $R_a d_T$ で与えられるので、円管 1 本あたりの平均流速 $v_p$ は、

$$v_p = \frac{(R_a d_T / 2)^2 \Delta P}{8\eta L_T} \quad (5)$$

と表される。ここに、 $\Delta P$ は試料両端にかかる圧力差、 $\eta$ は粘性係数である。このとき、円管 $n_T$ 本における流量 $Q$ は、

$$Q = n_T \pi \left( \frac{R_a d_T}{2} \right)^2 v_p \quad (6)$$

となる。一方、円管束モデルは多孔質媒体の流れを表す Darcy の法則が成り立つとすれば、流量 $Q$ は以下のように表すことができる。

$$Q = A_s \frac{k \Delta P}{\eta L_s} \quad (7)$$

ここに、 $k$ は固有透過度である。式(5)と式(6)より、迂回率 $\tau$ と径比 $R_a$ との関係が求められる。

$$\frac{\tau}{R_a^2} = \sqrt{\frac{\phi}{32k}} d_T \quad (8)$$

ただし、適用範囲は $\tau > 1$ 、 $0 < R_a \leq 1$ である。 $\tau/R_a^2$ の意味するところは、流路の長さ  
と流動に関与する面積の比である。仮に $\tau/R_a^2$ が定数ならば、流路が長い程、円管全体  
を使って流体が流れることを示す。すなわち、よどみが少なくなるといえる。しかし、  
迂回率 $\tau$ と径比 $R_a$ は共に未知数であり、現時点ではこの2つの物理量を求めることはで  
きないため、 $\tau/R_a^2$ についての議論しかできない。 $\tau/R_a^2$ の値は、式(8)の右辺にある3  
つの物理量の測定によって求められる。間隙率 $\phi$ は密度 $\rho_s$ の測定から、固有透過度 $k$   
は通気度の測定から、そして円管直径 $d_T$ は式(2)から求められ、体積比表面積 $SSA_v$   
は片薄片試料の画像解析によって求められる。

### 3. データ

2005/06～2007/08の3冬期において、北海道内の7地点で積雪断面観測を実施した。  
観測項目は、雪質、通気度測定、積雪試料採取である。これらの測定方法の詳細につ  
いては、Arakawa *et al.*<sup>3)</sup>を参照されたい。表-1は、観測結果の概要である。観測した  
積雪試料は147試料で、全て乾き雪であった。通気度の測定から固有透過度 $k$ が算出さ  
れ、積雪試料から片薄片試料が作成されて画像解析によって体積比表面積 $SSA_v$ が求め  
られた。密度 $\rho_s$ の範囲 $48-494 \text{ kg m}^{-3}$ に対して、固有透過度 $k$ は $2.2-209.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 、  
体積比表面積 $SSA_v$ は $1.9-9.2 \text{ mm}^{-1}$ であった。

表-1 測定結果概要. ひとつの層で2つの雪質と判断したものは、それぞれの雪質に集計している.

雪質	試料数	密度 $\rho_s$ [kg m <sup>-3</sup> ]	固有透過度 $k$ [×10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> ]	体積比表面積 $SSA_v$ [mm <sup>-1</sup> ]
新雪	6	48 - 161	20.2 - 82.2	2.7 - 5.8
こしまり雪	23	114 - 296	6.1 - 104.5	2.7 - 6.6
しまり雪	21	160 - 494	2.2 - 39.0	4.3 - 9.2
こしもざらめ雪	30	133 - 456	9.6 - 112.1	1.9 - 6.6
しもざらめ雪	49	176 - 408	36.3 - 209.2	1.5 - 4.0
ざらめ雪	18	318 - 492	7.5 - 65.2	1.9 - 5.2
全体	147	48 - 494	2.2 - 209.2	1.9 - 9.2

#### 4. 結果と考察

##### 4.1 雪質別の $\tau/R_a^2$

図-2 は雪質別の  $\tau/R_a^2$  である. 全体の平均は 2.12 で最小値が 1.03 で最大値が 3.80 であった. 雪質別の平均値と比較すると, こしもざらめ雪やしもざらめ雪は, 全体の平均値よりも小さい傾向にある. これは, 迂回率  $\tau$  が小さく流路が短い, 若しくは  $R_a^2$  が大きくよどみ域が小さいことを示す. これに対して, 新雪, しまり雪, ざらめ雪は

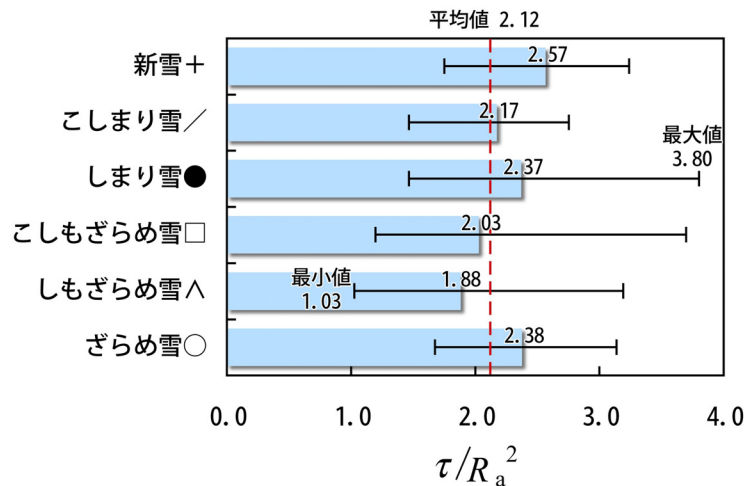


図-2 雪質別の  $\tau/R_a^2$

2.37-2.57 と相対的に大きい値である. これらは逆の傾向となり, 流れる距離が長くなっている, 若しくはよどみ域が大きいことを示している.

##### 4.2 迂回率 $\tau$ と径比 $R_a$ との関係

図-3 は,  $\tau/R_a^2$  の関係を迂回率  $\tau$  と径比  $R_a$  の散布図に描き直したもので, 雪質別の  $\tau/R_a^2$  の平均値の曲線, および最小値 (1.03) と最大値 (3.80) の曲線が示されている. しまり雪とざらめ雪はほぼ同じ値のために重なっている. 積雪試料は  $\tau/R_a^2 = 1.03$  と  $\tau/R_a^2 = 3.80$  の曲線で囲まれた領域のどこかにプロットされるはずである. しかし, 前述したとおり, 迂回率  $\tau$  と径比  $R_a$  は未知の物理量であるために, プロットすることができない. ただし, 迂回率  $\tau$  については, 積雪の微細構造を示す物理量であることから, 将来的には測定できる可能性が大きい. そうすれば径比  $R_a$  が求められ, 有効間隙率といった水理学的にも重要な物理量が算出できるようになると考えられる.

さて,  $\tau/R_a^2$  の平均値は新雪 (2.57) → こしまり雪 (2.17) → しまり雪 (2.37) となっており, 新雪としまり雪の中間的存在であるこしまり雪の値が新雪としまり雪の間に入っていない. これは定性的であるが, 以下のように説明できると考えられる. 新雪は (結晶構造によって異なるだろうが) 一般的に他の雪質よりも複雑な結晶構造であ

る。このため、径比 $R_a$ は小さくなることが考えられる。つまりよどみ域が大きくなる。更に、密度 $\rho_s$ が小さいことから、よどみ域が大きくても迂回率 $\tau$ は小さくなると予想される。つまり、新雪の曲線の中でも左下寄りとなると考えられる。一方、しまり雪は、粒子が球形に近づきよどみ域が小さくなることが予想される。すなわち、径比 $R_a$ が大きくなる。また、密度は新雪に比べて相対的に大きいことから、迂回率 $\tau$ は大きくなる。つまり、しまり雪の曲線の右上寄りとなる。こしまり雪はその間に位置する。等温変態によって新雪結晶の複雑な形状から単純な形状に変化することから、迂回率 $\tau$ が大きくなるよりも、よどみ域が小さくなる方が卓越すると考えられる。つまり、 $\tau/R_a$ がまずは小さくなっていく。その後、こしまり雪は球形粒子に近づき圧密による密度増大も加わって迂回率が大きくなり、 $\tau/R_a$ が大きくなるのではないかと推察される。

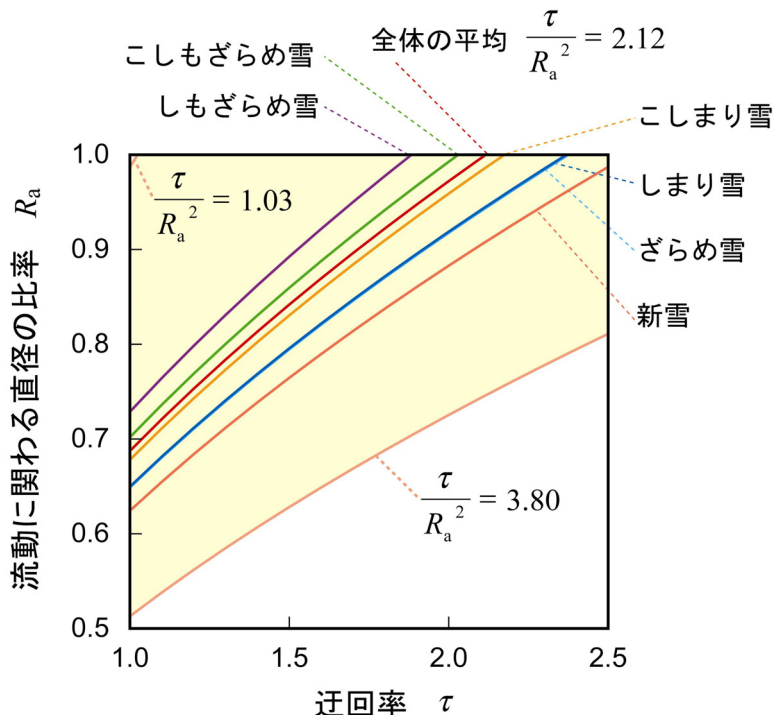


図-3 迂回率 $\tau$ と流動に関わる直径の比率 $R_a$ との関係

### 5. まとめ

迂回率 $\tau$ と流動に関わる直径の比率 $R_a$ を組み込んだ単一径の円管束モデルを構築した。2つのパラメータはどちらも未知数であることから、 $\tau/R_a$ の値を求めるのみとなったが、間隙の特徴を使って、雪質の特徴を説明することができた。今後、構造解析などによって迂回率が求められれば、よどみ域の算出が可能となり、積雪内の流体の移動についての理解がより一層深まると考えられる。

#### 【参考・引用文献】

- 1) Shimizu, H., 1970: Air Permeability of Deposited Snow. Contributions from the Institute of Low Temperature Science, A22, 32pp.
- 2) 荒川逸人・和泉薫・河島克久・石井吉之：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，投稿中。
- 3) Arakawa, H., Izumi, K. Kawashima, K. and Kawamura, T., 2009: Study on quantitative classification of seasonal snow using specific surface area and intrinsic permeability. Cold Reg. Sci. Tech., 163-168. doi:10.1016/j.coldregions.2009.07.004.