

積雪の固有透過度と比表面積

荒川逸人 (野外科学株式会社)

はじめに

積雪断面観測における雪質の決定に際しては、観測者による微妙な違いが発生し、特に雪質混在の場合など意見が分かれることが多い。仮に、雪質を何かしらの物理量で数値化し表現することができれば、観測者間で積雪断面観測データの共有、過去の積雪断面観測データの利用がしやすくなるであろうし、積雪変態モデル等の雪質決定の足がかりと成りうるとも考えられる。

そこで筆者は、多孔質体(積雪)の形状を表すパラメータである固有透過度と比表面積について測定をおこない、雪質を決定することができるかどうか検討し、積雪断面観測方法への応用を考察した。

1. 測定方法

(1) 固有透過度

固有透過度は、積雪の通気性や透水性を表すパラメータで、飽和透水係数と異なり、流れる流体に依存しない係数である。粒径や空隙とも密接な関係がある。

積雪の固有透過度を求めるためには、まずは積雪の飽和透水係数を測定する必要がある。積雪の飽和透水係数は、図1に示すような変水位透水計によって測定をおこなった。この透水計は、スタンドパイプと積雪試料の断面積の比が $a:A=4:1$ となっている。積雪試料内を流す流体は灯油を利用した。

$t=t_1$ から $t=t_2$ の間に、スタンドパイプ内の水位が $h=h_1$ から $h=h_2$ に変化したとすれば、積雪の飽和透水係数 K は、

$$K = \frac{AL}{a(t_1 - t_2)} \ln \frac{h_1}{h_2} \dots\dots\dots (1)$$

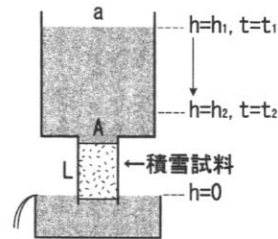


図1. 変水位透水計概念図

ここに、 L は積雪試料の長さある。積雪を流れる灯油の密度 ρ_k と粘性係数 η も測定し、固有透過度 k は、

$$k = K \frac{\eta}{\rho_k g} \dots\dots\dots (2)$$

と求めることができる。ここに、 g は重力加速度である。

(2) 比表面積

比表面積は、単位体積あたりの表面積で、粒子の大きさや粒子の形の複雑さによって決まる係数である。

比表面積は、積雪試料の片薄片写真から求めた。片薄片は、フタル酸ジメチルで固定し、スタンプラックによる着色したものを作成した。多結晶体の切断面に任意の間隔の平行線を引いたとき、

$$S = \frac{2N}{L} \dots\dots\dots (3)$$

によって求める Smith と Guttman の方法を

利用した(成田, 1969). ここに, N は平行線と結晶境界の交点数, L は平行線の総延長である.

(3) 積雪試料

本研究では, 人工氷球, しまり雪, こしまり雪, しもざらめ雪, ざらめ雪の5種類の雪質で測定をおこなった. 人工氷球は, 蒸留水を霧吹きで液体窒素に向けて噴霧して作成した. 人工氷球については, 粒径との関係を見るためにふるい分けもおこなった. 人工氷球以外は自然積雪で, 旭岳や母子里におけるスノーピット内で測定をおこなった. このうち, しまり雪, こしまり雪, しもざらめ雪に関しては, 片薄片作成に失敗したため, 比表面積の測定はできず, 固有透過度の測定のみとなった.

2. 測定結果

(1) 固有透過度と密度

図2は密度と固有透過度の結果である. こしまり雪からしまり雪へは, 密度の増加とともに固有透過度が減少する傾向が見られる. また, しまり雪からざらめ雪へは, 密度の増加とともに固有透過度の増加の傾向がみられる. しもざらめ雪は, 固有透過度が大きい.

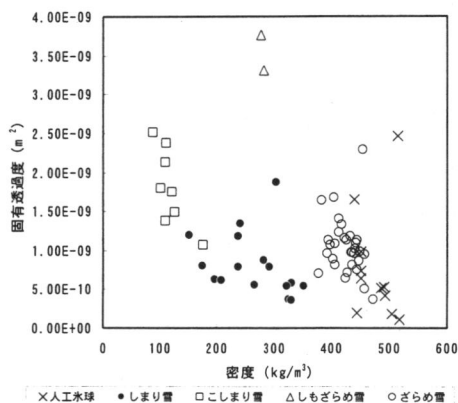


図2 密度と固有透過度

図3は, 既往研究との比較である. 清水(1960)および Sommerfeld *et al*(1993)は, 通気度計による測定である. Shimizu(1970)によれば, 通気度計による測定と透水計による測定のそれぞれから求められる固有透過度は同等に扱うことができることを示しており, これら既往研究のデータと本研究のデータとを比較検討することは可能である. 既往研究と比較してみると, 他の研究よりも同密度では固有透過度が小さい傾向にあるようにみられるが, $400 \sim 500 \text{ kg/m}^3$ では清水(1960)とほぼ同じ傾向であるし, $200 \sim 400 \text{ kg/m}^3$ では, Sommerfeld *et al*(1993)と同じ傾向を示している. また, 150 kg/m^3 付近でも清水(1960)のデータが小さい場合もあることから, 測定値としては特に問題はないと考えられる.

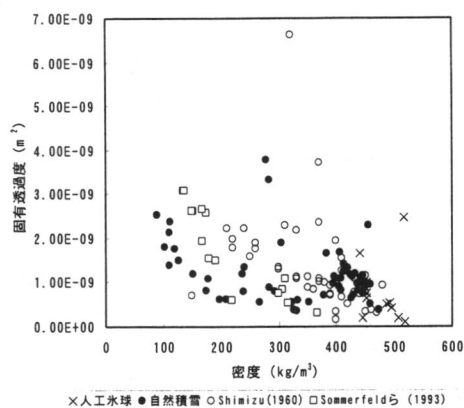


図3 既往研究との比較

(2) 粒径との関係

図4は, 人工氷球における固有透過度と比表面積を粒径と比較したものである. 粒径は, ふるいの中央値で代表させ, その範囲を示した.

その結果, 固有透過度と粒径とは, 良い2次相関が得られた.

$$k = 0.141d^2 + 0.615 \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$R^2 = 0.961$$

一方、比表面積と粒径とは、良い相関が得られなかった。

$$1/S = 0.0635d + 0.146 \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$R^2 = 0.305$$

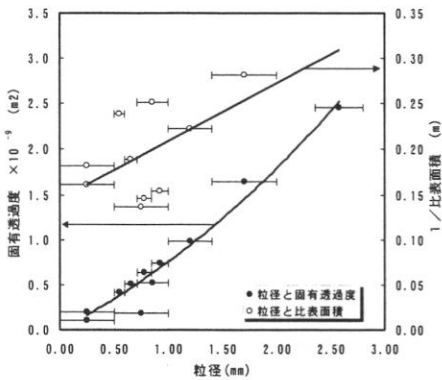


図4 粒径との関係

3. 考察

Shimizu(1970)は、固有透過度 k を決める際に、同密度でグループ分けをおこない、それぞれのグループにおいて、粒径と相関がよいことを示し、

$$k/d_0^2 = 0.077e^{-0.0078\rho_s} \quad \dots\dots\dots(6)$$

を得た。ここに、 d_0 は平均粒径 (m)、 ρ_k 積雪の乾き密度 (kg/m^3) である。もともと Zunker による比表面積の定義は、 $S=1/d$ というように粒径（ここでは、重量比によって求まる有効径）と一意的であるので、この関係を式(6)に組み込めば、

$$kS^2 = 0.077e^{-0.0078\rho_s} \quad \dots\dots\dots(6')$$

となる。式(6')の左辺には形状を表す無次元の項となるが、右辺は密度に依存する無

次元の項となっている。つまり、密度が多孔質体（積雪）の形状を決めるということを示すことになると考えられるため、この式の形には疑問が生じた。そこで式(6')は、

$$kS^2 = C \quad \dots\dots\dots(7)$$

という密度に依存しない式となる方がよいと考えた (C は定数)。しかし、この場合、 k と S による散布図を作成すると、異なる雪質の領域が重なってしまい、雪質を決定することができなかった。やはり、雪質を決定する為には、形状を決める要素だけではなく、質量による要素も必要であるのではないかと考え直した。そこで、密度を含む比表面積 S^* (単位重量あたりの表面積)、

$$S^* = S/\rho_s \quad \dots\dots\dots(8)$$

を利用することとした。密度が要素に加わったことによって、同じ比表面積でも、新雪のように比較的軽量なものは、形状が複雑であることを示すし、しまり雪のように比較的重いものは、形状は単純（球形に近い）で粒子数が多いことを示すと考えられる。

図5は、固有透過度 k_0 と比表面積 S^* による散布図であり、雪質の領域が重なることがなくなった。データ数が少ないが、得られたデータによって雪質を非常に大ざっぱに区分するとすれば、しまり雪とざらめ雪は比表面積が $18\text{m}^2/\text{kg}$ で区分でき、新雪としまり雪は固有透過度は $2.5 \times 10^{-9}\text{m}^2$ で区分することができた。

この区分方法では、新雪は「通気性が比較的良く、結晶形が複雑で表面積が大きい」、しまり雪は「通気性は比較的悪く、粒径が小さく表面積が大きい」、ざらめ雪は「通気性は比較的悪く、粒径が大きく表面積が小さい」と意味づけができることがわかった。しもざらめ雪に関しては測定がないが、「通気性が比較的良く、表面積が小さい」領域

(図5左上の方)に来ることが予想される。

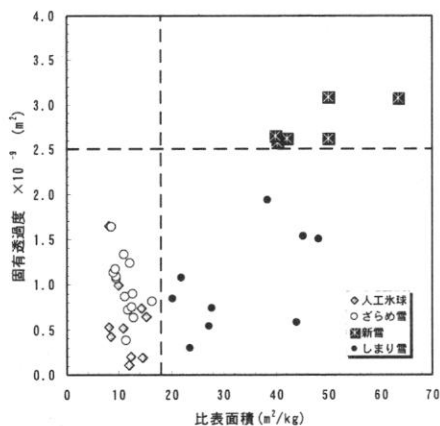


図5 比表面積と固有透過度

固有透過度と比表面積の2つのパラメータから、雪質決定の可能性があることがわかったが、積雪断面観測において固有透過度と比表面積を測定することは、事実上不可能である。しかし、人工氷球による測定で、比表面積は粒径との良い相関が得られなかったものの、固有透過度と粒径は概ね良い2次相関が得られた。比表面積はもとの定義が粒径から決められていることから、測定数を多くすることによって良い相関をえられると考えられる。

すなわち積雪断面観測において、粒径の測定方法が重要であり、どのような代表粒径を現地観測で測定するかを考える必要がある。そうすれば、粒径と密度から比表面積、粒径から固有透過度を求めることによって、雪質を決めることができると考えられる。

4. まとめと課題

(1) 積雪の固有透過度と比表面積を測定したところ、固有透過度と比表面積から雪質を特定することができる可能性を示すことができた。

(2) 積雪断面観測においては固有透過度と比表面積は事実上測定不可能であるが、粒径との関連性が高いと考えられるので、粒径との関連を詳しく調べる一方で、粒径の測定方法について検討する必要がある。

(3) 今後、しもざらめ雪の測定もおこない、データ数を増やす必要がある。

謝辞

本研究は、筆者が1992～1994年の修士課程在籍期間に行った研究の未発表データを取りまとめたものである。当時の北海道大学低温科学研究所雪害科学部門の秋田谷英次先生(北の生活館館長)、成瀬廉二先生(北海道大学助教授)、白岩孝行先生(北海道大学助教授)、福澤卓也先生(故人)には熱心なご指導、有益なご助言を頂きました。また、同じ研究室であった西田顕郎氏(筑波大学助教授講師)と八久保晶弘氏(北見工業大学助教授)には片薄片撮影に関して、尾関俊浩氏(北海道教育大岩見沢校助教授)、坂井亜規子氏(名古屋大学)、川島由載氏(株式会社ドーコン)にはフィールド調査において大変お世話になりました。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 清水弘, 1960: 積雪の通気抵抗 IV—積雪の通気度—, 低温科学(物理編), 19, 165-173
- 成田英器, 1969: 積雪の比表面積の測定 I, 低温科学(物理編), 27, 77-86
- Shimizu, H., 1970: Air Permeability of Deposited Snow, Contributions from the Institute of Low Temperature Science, A-22
- Sommerfeld, R.A. and Rocchio, J.E., 1984: Permeability Measurement on New and Equitemperature Snow, Water Resources Reserch, Vol.29(8), 2485-2490