

しもざらめ雪の固有透過度の測定

荒川逸人（野外科学（株）／新潟大学大学院），
和泉 薫，河島克久（新潟大学），河村俊行（北大低温研）

1. はじめに

固有透過度とは多孔質体の通気度に空気の粘性係数を乗じて求められ，その次元は $[L^2]$ となり多孔質体の形状に依存する量である．固有透過度は積雪内で起こる対流や融雪水浸透などの物理過程を支配し（Albert *et al.*, 2000），これらを定量的に評価するには不可欠なパラメータである（Sommerfeld and Rocchio, 1993）．Shimizu（1970）は新雪，しまり雪，ざらめ雪の通気度を測定をおこなったが，力学的に脆弱であり雪崩発生機構を考える上でも重要であるしもざらめ雪の測定をおこなっていない．しもざらめ雪の発達に係わる温度勾配は積雪内の空気の対流と密接な関係があることから（Akitaya, 1974），しもざらめ雪の固有透過度の測定をおこなうことは意義が大きい．そこで本研究ではしもざらめ雪の通気度を測定し固有透過度を求め，同時にプッシュプルゲージによる硬度の測定をおこなったので，この結果について報告する．

2. 観測地点

2007/08 冬期を通して，えにわ湖，阿寒湖畔など北海道内 7 箇所でももざらめ雪中心に積雪観測をおこなった．特に，えにわ湖では図 1 に示すようにほぼ 1 週間ごとに積雪観測を実施した．観測項目は，層構造，雪質，密度 ρ_s ，固有透過度 k ，硬度 H （プッシュプルゲージ）である．

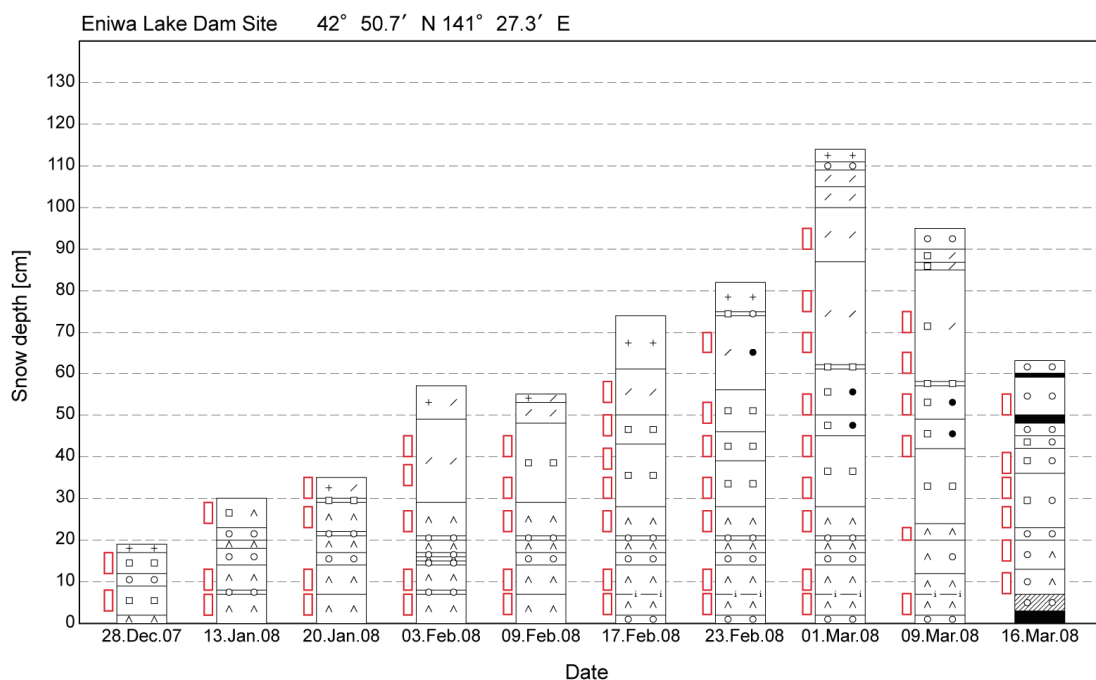


図 1 えにわ湖における積雪断面観測結果．
層構造の左側の四角は通気度測定位置を示す．

3. 通気度の測定方法

固有透過度は積雪の通気度測定をおこなうことで求められる。通気度計は Shimizu(1970)を参考に二重管式通気度計を製作した(図2)。通気度はダルシー則によって求められ、積雪試料に空気を流し、その流量 Q と試料の両端にかかる圧力勾配 $\cdot P/Ls$ によって求められる。

$$\frac{Q}{A} = \frac{k \Delta P}{\mu Ls} \quad (1)$$

ここに、 Q は流量、 A は試料測定部分の断面積、 $\cdot$ は粘性係数、 $\cdot P$ は試料両端の圧力差、 Ls は試料長さで、 $k/\cdot$ は通気度を表す。ここで求められた通気度に粘性係数 $\cdot$ を乗じて固有透過度 k を求める。

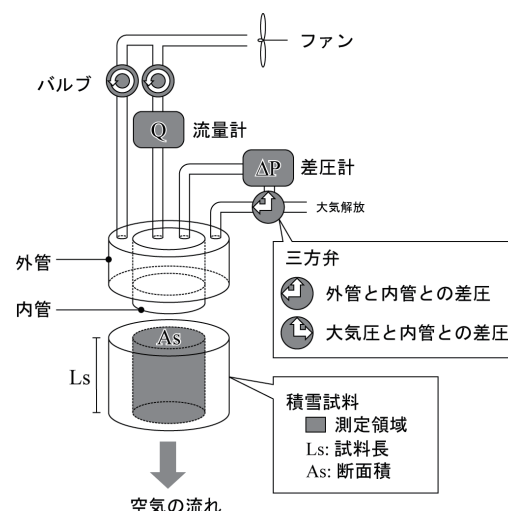


図2 通気度計概念図

4. 結果と考察

4-1. 密度と固有透過度との関係

図3は密度 ρ_s と固有透過度 k の関係を示したものである。図3の R_i 領域は等温変態過程の雪質の領域(以下、しまり系)、 R_g 領域は温度勾配変態過程の雪質の領域(以下、霜系)、 R_m 領域は融解再凍結過程の雪質の領域を示す。 R_i 領域は密度増加とともに固有透過度の単調減少が見られるが、 R_g 領域や R_m 領域では密度との関連がみられない。

4-2. 硬度と固有透過度との関係

図4は硬度 H と固有透過度 k の関係を両対数で示したものであり、全体的に見ると硬度増加に対して固有透過度減少であることがわかる。間隙率の大きい新雪やこしまり雪、個々の間隙が大きいと考えられるしもざらめ雪などは、硬度が小さく固有透過

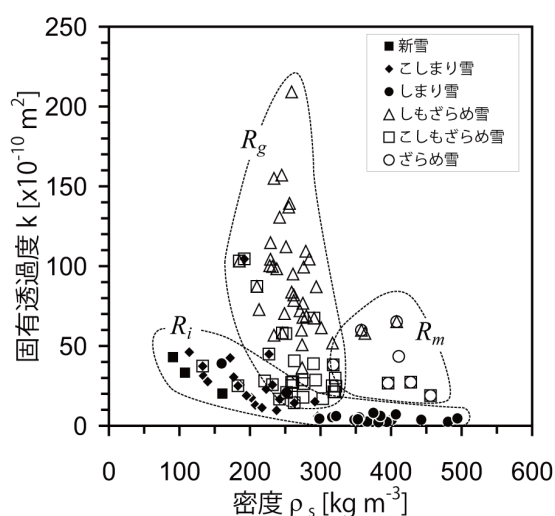


図3 密度と固有透過度との関係

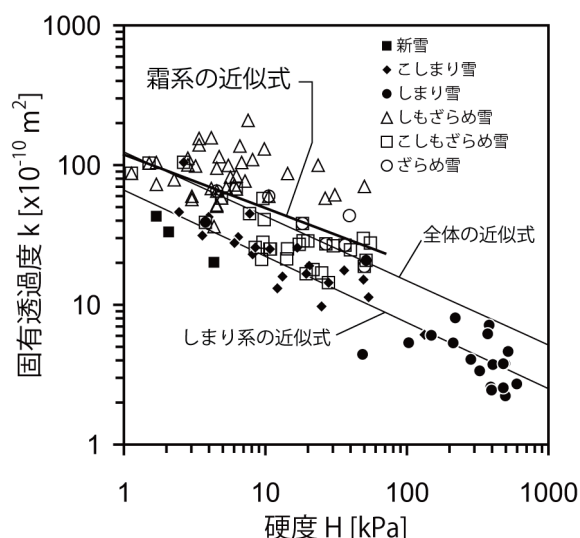


図4 硬度と固有透過度との関係

度が大きいことがわかる．硬度 H と固有透過度 k の関係を， $\log_{10} k = a \log_{10} H + b$ で近似すると，全雪質，しまり系，霜系の決定係数 R^2 はそれぞれ，0.5343，0.8697，0.3604 となった．しまり系の雪質では硬度と固有透過度との間に良い相関関係が得られるが，霜系に関しては相関関係が良くないことがわかった．

4-3. 密度と硬度との関係

図 5 は密度と硬度の関係である．図 5 の細線は Takeuchi *et al.* (1998) によるしまり雪において硬度が密度の 4 乗に比例するという関係式で，

$$H = 1.31 \times 10^{-8} \rho_s^4 \quad (2)$$

である．本研究のしまり系の密度と硬度との関係を調べると，比例定数が 1.15×10^{-8} ，決定係数 $R^2 = 0.8181$ となり，式(2)の関係とほとんど同じ結果が得られた．霜系に関しては， $R^2 = 0.4200$ となり相関関係が良くなかった．ところが，図 5 で霜系であっても式(2)の曲線に近いものが存在することがわかる．便宜的にしまり系と霜系を分ける目安の線を引くと，しまり系側に分けられた霜系は，乗載積雪による圧密が認められるこしもざらめ雪で，乗載積雪があっても充分発達してほとんど圧密しないしもざらめ雪の場合は該当しないことがわかった．図 1 のえにわ湖の例でみると，2008 年 2 月 17 日の 28～43cm のこしもざらめ雪をはじめとして，それ以降えにわ湖で観測されたこしもざらめ雪が全て含まれている．そこで，しまり系側に分けられたこしもざらめ雪をしまり系に含めてみても，式(2)の比例定数は 1.18×10^{-8} ，決定係数 $R^2 = 0.8073$ となり，ほとんど変わらない結果となった．残りの霜系に関して密度と硬度との関係を調べると，

$$H = 0.93 \times 10^{-9} \rho_s^4 \quad (R^2 = 0.6764) \quad (3)$$

で図 5 の太線となり相関関係も良くなり，圧密が認められない霜系に関しては，比例係数がしまり系のほぼ 10 分の 1 であることがわかった．

4-4. 硬度と固有透過度との関係（霜系を分けた場合）

硬度と固有透過度との関係に圧密の影響を考慮してみることにする．4-2. のように硬度 H と固有透過度 k の関係を， $\log_{10} k = a \log_{10} H + b$ で近似してみると，傾き a ，切片 b および決定係数 R^2 は表 1 のようになった．しかしながら，霜系を分けた効果はみられず，どちらかといえば相関が悪くなる結果となった．

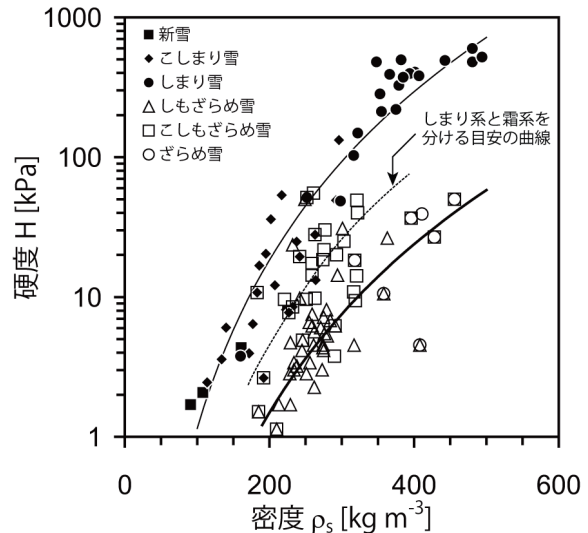


図 5 硬度と固有透過度との関係

表 1 硬度と固有透過度の近似式の係数と決定係数

雪 質	傾き a	切片 b	決定係数 R^2
全雪質	-0.460	-7.906	0.5343
しまり系雪質	-0.474	-8.179	0.8697
しまり系+圧密したこしもざらめ雪	-0.492	-8.053	0.7148
霜系雪質	-0.384	-7.924	0.3604
圧縮しない霜系雪質	-0.402	-7.879	0.3599

5. まとめ

主にしもざらめ雪を対象として、固有透過度、硬度、密度の測定をおこない、しもざらめ雪やこしもざらめ雪の霜系雪質に関して、以下のことがわかった。

- 1) 霜系に関して密度と固有透過度は明確な関係が見られない。
- 2) 硬度増加で固有透過度減少の傾向はあるものの相関が良くない。
- 3) 密度と硬度との関係から、乗載積雪により圧密が認められる霜系と認められない霜系に分けた。これにより圧密が認められない霜系の密度（の 4 乗）と硬度の近似式の比例定数はしまり系の 10 分の 1 の大きさであることがわかった。
- 4) 霜系雪質を分けた硬度と固有透過度との関係について考察したが、明確な関係を見出せなかった。

構造を反映する固有透過度については、硬度と深い関係があると考えられるが、霜系の場合、明確な関係が見られなかった。通気度測定時に同じ層の積雪試料をフタル酸ジメチルによって固定しているので、今後、片薄片試料作成により、Run-Length 法による粒径や間隙幅の情報を取得（荒川ら，2006）して粒径や間隙幅との関連付けをおこなう予定である。

参考文献

- Akitaya, E., 1974: Studies on Depth Hoar. Contributions from the Institute of Low Temperature Science. A26, 1-67
- Albert, M.R, Shultz E.F. and Perron Jr., F. E., 2000: Snow and firn permeability at Siple Dome, Antarctica. Annals of Glaciology. 31, 353-356.
- 荒川逸人, 尾関俊浩, 川田邦夫, 和泉薫, 河島克久, 河村俊行, 2006: 固有透過度と比表面積による雪質の定量的分類. 寒地技術論文・報告集, 22, 6-11.
- Shimizu, H., 1970: Air Permeability of Deposited Snow. Contributions from the Institute of Low Temperature Science, A22, 1-32
- Sommerfeld, R. A. and Rocchio, J. E.: Permeability Measurements on New and Equitemperature Snow. Water Resources Research, 29(8), 2485-2490
- Takeuchi, Y., Nohguchi, Y. Kawashima, K. and Izumi, K, 1988: Measurements of snow hardness distribution. Annals of Glaciology, 26, 26-30.