

論文

季節積雪における体積比表面積と微細構造との関係

荒川逸人¹⁾²⁾, 和泉 薫³⁾, 河島克久³⁾, 河村俊行⁴⁾

要 旨

積雪の比表面積は積雪の微細構造を反映することから非常に重要なパラメータの一つである。これまでに比表面積は実験的に密度と関連づけられているが、雪質、密度領域などによって利用条件が限定されている。本研究では、積雪の微細構造に関わる粒径や間隙幅と比表面積とを関連づけることを目的として、様々な雪質の季節積雪（密度 $88\sim 494\text{ kg m}^{-3}$ の乾雪）について片薄片試料を作成し、その画像解析をおこなった。体積比表面積は立体学的手法、平均粒径と平均間隙幅は Run-Length 法によって求めた。その結果、体積比表面積は密度や平均粒径とはそれぞれ単独では有意な関係がみられなかったが、これらを組み合わせることで、雪質によらない一つの関係式が求められた。この関係式は立体学的手法による比表面積に比べ約 13% 過大評価であった。一方、平均間隙幅と体積比表面積については雪質によらず反比例の関係があることがわかった。以上により粒径と間隙幅と密度の関係が明らかになった。

キーワード：比表面積，粒径，間隙幅，積雪の微細構造，Run-Length 法

Key words: specific surface area, grain size, pore size, snow microstructure, run-length method

1. はじめに

自然積雪の中では、積雪の変態や光の散乱のような物理過程、不均一化学反応のような化学過程が起きている。積雪内で起こるこのような過程をモデル化する上で比表面積は重要なパラメータである (Kerbrat *et al.*, 2008)。また、同雪質、同密度の雪であっても、積雪の力学的強度のように雪の微細構造が影響して大きな差異が生じることもあり、このような場合、比表面積を使えば関連づけやすいと言われている (渡邊, 1983)。

比表面積とは「積雪の単位体積あるいは単位質量あたりに含まれる雪粒子の表面積の総和」であり、本研究では前者を体積比表面積 SSA_v と呼

び、後者を質量比表面積 SSA_m と呼ぶこととする。単位はそれぞれ、 mm^{-1} 、 cm^2g^{-1} がよく使われている。両者は積雪密度 ρ_s によって換算される。 SSA_m の値は、粒子形状が複雑である場合や粒径の小さい粒子が多数存在する場合に大きくなり、粒子形状を反映する。しかし、 SSA_m は単位質量あたりの表面積であるため、粒径のような長さの次元をもつ物理量と直接比較するには不向きである。そのため本研究では単位体積あたりの表面積を表す SSA_v を用いることとする。

2. 比表面積に関する既往研究

2.1 比表面積の測定手法

これまでに比表面積に関して様々な測定手法が報告されている。代表的なものとしては、統計理論に基づき片薄片写真の画像解析をおこなう立体学的手法（以下、立体法）による比表面積 S_{stereo} (成田, 1969; Matzl, 2006)、BET 吸着等温式を利用したメタン吸着法（以下、吸着法）による比表面積 S_{BET} (Legagneux *et al.*, 2002)、X 線を利用

1) 野外科学株式会社

〒065-0043 札幌市東区苗穂町 12 丁目 2 番 39 号

2) 新潟大学大学院自然科学研究科

〒950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050

3) 新潟大学災害復興科学センター

〒950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050

4) 北海道大学低温科学研究所

〒060-0819 札幌市北区北 19 条西 8 丁目

した断層撮影法 (以下, X 線法) による比表面積 $S_{\mu\text{CT}}$ (Coléou *et al.*, 2001) などが知られている. 最近では, 測定手法の違いによる比表面積の比較研究がおこなわれている. 比較の際には, 手法によって解像度が異なることから, 解像度毎に表面積を求めて比較がおこなわれている. Matzl (2006) は質量比表面積について, $10\mu\text{m}$ 以上の解像度で $S_{\text{stereo}}=1.001S_{\mu\text{CT}}$ であることを示し, Kerbrat *et al.* (2008) は $50\sim 700\text{cm}^2\text{g}^{-1}$ の範囲の質量比表面積について $30\mu\text{m}$ 以上の解像度であれば, $S_{\mu\text{CT}}=1.03S_{\text{BET}}$ であることを示した. このように, $10\sim 30\mu\text{m}$ 程度の解像度で比表面積を求める場合には, 測定手法の違いによって大きく異なることはないことが示されている. 吸着法や X 線法の研究は進んではいるものの, これらの測定装置は非常に高価で複雑な機械であるため, 従来どおり立体法に依存することになる. しかし, 立体法であっても片薄片試料作成には低温室が必要であり, しかも野外観測における比表面積測定方法は確立されていない. 現場で比表面積がわかれば, 積雪の微細構造を反映する力学的強度や融雪水の浸透機構といった物理過程との関連づけが可能と考えられる.

2.2 密度との関連付けについて

比表面積は積雪密度 ρ_s と関連づけられることが多い. 成田 (1971) は $\rho_s=60\sim 700\text{kg m}^{-3}$ の新雪・こしまり雪・しまり雪・ざらめ雪・雪渓や水河の万年雪について 3 つの密度領域に分けて SSA_m の実験式を求めた.

$$\begin{aligned} \log_{10}SSA_m &= -5.26\rho_s + 3.21 \quad (\rho_s < 0.15) \\ \log_{10}SSA_m &= -1.85\rho_s + 2.27 \quad (0.15 < \rho_s < 0.55) \quad (1) \\ \log_{10}SSA_m &= -5.56\rho_s + 4.78 \quad (0.55 < \rho_s < 0.83) \end{aligned}$$

単位は, SSA_m は cm^2g^{-1} , ρ_s は g cm^{-3} である. 式 (1) は密度領域を 3 分割しているものの, 成田 (1971) も述べているように, 同じ密度でもしまり雪とざらめ雪では異なる比表面積となっている. 渡邊 (1983) は $\rho_s=100\sim 500\text{kg m}^{-3}$ の乾きしまり雪と乾きざらめ雪の 2 種類の雪質について密度と体積比表面積との関係式を導いたが, これを他の雪質に拡張することは困難と考えられる. Dominé *et al.* (2007) は積雪モデルへの応用の観点から, 野外観測で季節積雪の比表面積を求める方法として, $SSA_m = a \ln(\rho_s) + b$ の関係式を提案し, 係数 a , b の値を堆積してからの経過時間, 雪質, 風速等から定義している. このように, 比表面積を密度のみで関連づけるためには複雑な条件設定が必要である. また, 雪質による判別の場合, 定量的に判別することが難しい. そこで本研究では積雪の微細構造と比表面積との関係を明らかにすることを目的とし, 積雪の片薄片写真の画像解析から平均粒径と平均間隙幅を求め, これらと体積比表面積との関連を調べ考察をおこなった.

3. 体積比表面積と粒径・間隙幅の測定

3.1 積雪試料

表 1 に示したように, 4 冬期の北海道内各地と 2005/06 冬期の富山県室堂平の積雪試料を用いた. 密度 $88\sim 494\text{kg m}^{-3}$ の乾き雪を対象とし, 新雪, こしまり雪, しまり雪, こしもざらめ雪, しもざらめ雪, 凍結したざらめ雪と, 季節積雪に見られるほとんどの雪質を測定した. また, 片薄片試料の観察面は積雪状態での水平面とした.

3.2 積雪の片薄片試料の作成

積雪の片薄片試料作成方法および解析手法に関しては, 荒川ら (2006) の方法を用いた. 間隙を充填す

表 1 使用した積雪試料の概要. 全体の行の密度範囲は測定された全雪質の密度範囲, 試料数は合計値を示す.

雪	質	密度範囲 kg m^{-3}	総数	試料数				場所	
				冬期				北海道内	室堂
				1993/94	2005/06	2006/07	2007/08		
新	雪	88~186	12	—	2	7	3	12	—
こしまり	雪	114~296	18	—	2	3	13	16	2
しまり	雪	195~494	19	—	13	1	5	12	7
こしもざらめ	雪	155~369	26	—	7	7	12	26	—
しもざらめ	雪	213~363	42	—	—	2	40	42	—
ざらめ	雪	318~492	18	10	1	—	7	18	—
全	体	88~494	135	10	25	20	80	126	9

る固定液は有機溶媒のフタル酸ジメチル(化学式： $C_6H_4(COOCH_3)_2$)である。融点は $+5.5^{\circ}C$ であるが、 $-5^{\circ}C$ 以下まで過冷却するため、積雪を固定できる。また、融点が高いため、 $-10^{\circ}C$ 程度の低温室で作業することが可能である。着色剤はスタンブラック B (化学式： $C_{29}H_{24}N_6$) を利用した。スタンブラック B は油溶性であるためフタル酸ジメチルが着色される。間隙部分を着色することによって、固定液に生ずる気泡というノイズを取り除くことができる (Hachikubo *et al.*, 2000)。

固定された積雪試料をマイクロームを使って表面をきれいに削り、顕微鏡を利用して写真撮影した。撮影時には、積雪試料(厚さ 15~20 mm 程度)の下からの透過光によって雪粒子を明るくさせ、積雪の上部から散乱光を当てて表面の反射や陰を取り除いて撮影した。これによって、画像はノイズの少ない白黒画像に近くなり、画像処理時の手間を軽減することができる(図 1)。

3.3 立法法による体積比表面積の計測

本研究では成田(1969)の提案した立法法に従い SSA_v を求めた。図 2 に示すように、片薄片写真上に等間隔に平行線(以下「試験線」)を m 本引き、矢印の向きを走査方向と呼ぶ。試験線の長さ l [mm] は写真幅の実距離である。試験線の総延長(実距離)を L [mm] とし、試験線と雪粒子界面との交点数を N [個] とすると、次式により SSA_v が求められる。

$$SSA_v = \frac{2N}{L} \quad (2)$$

実際の作業はパソコンでの画像処理となる。作成された片薄片写真は、ノイズ除去などの処理後、2 値化されて 1 bit の Bitmap ファイル(以下、白黒 Bitmap)に変換される。白黒 Bitmap は画像データ部分が 1 と 0 で構成され、本研究では 0 が黒色で間隙、1 が白色で雪粒子としている。データが (1, 0) あるいは (0, 1) のように並んでいる場所が積雪粒子の表面に相当するため、その個数を数えることによって交点の総数 N [個] が求められる。試験線の総延長 L は ml で求められる。試験線間隔は間隔が狭いほど真値に近くなるので 1 pixel とした。これは画像によるが 0.005

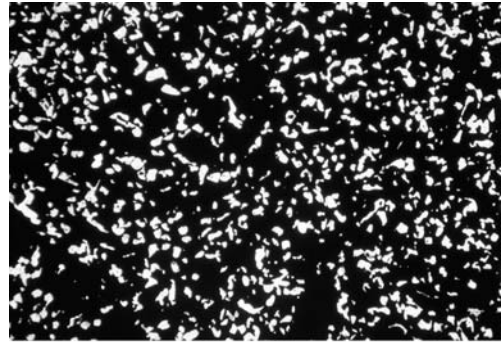


図 1 積雪の片薄片画像(こしまり雪の例)。白い部分が雪粒子を示す。

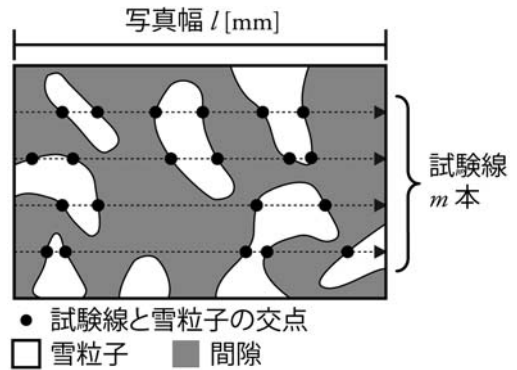


図 2 立法法による体積比表面積 SSA_v の求め方。 l は写真幅で試験線の実距離。 m は等間隔に引かれた試験線の本数。

~0.014 mm に相当し、十分な解像度を確保していると考えられる。このように求めた各試料の N と L を式(2)に代入して SSA_v を求めた。

3.4 Run-Length 法による粒径と間隙幅の計測

前述の白黒 Bitmap に Run-Length 法と呼ばれる画像処理をおこない粒子と間隙の大きさを求めた。Run-Length 法とは、図 3a, 3b に示すように、ある濃度を持った直線の出現頻度を試験線の方向毎に求める方法で、骨梁構造の評価方法の一つとして用いられる(例えば、大松, 1998; 勝原, 2006)。これは Object Intercept Length とも呼ばれている (Rick and Albert, 2004)。白黒 Bitmap において「ある濃度」とは白色(1 のデータ)または黒色(0 のデータ)を示す。白色が連続する部分は粒子の Run-Length であり、これを粒径 RL_g と定義した。また、黒色が連続する部分は間

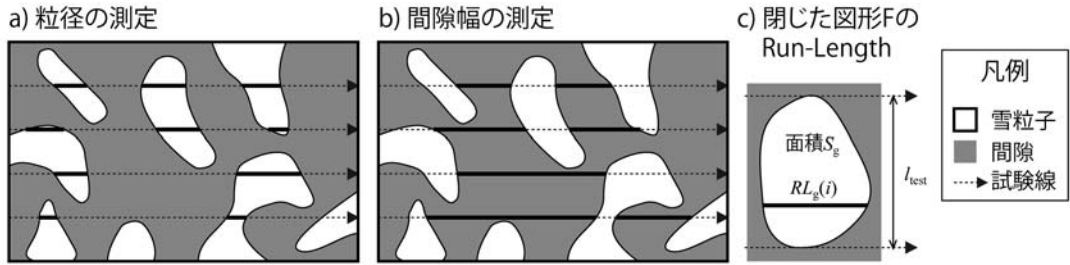


図 3 Run-Length 法による a) 粒径と b) 間隙幅の求め方. 太線が計測部分. c) 閉じた図形 F における Run-Length の求め方. $RL_g(i)$ は i 番目の試験線が測定した RL_g , S_g は図形 F の面積, l_{test} は F を走査する最初の試験線と最後の試験線の距離.

隙の Run-Length であり, これを間隙幅 RL_p と定義した. 立体法と同様に試験線間隔を 1 pixel にすると, 各試料について RL_g と RL_p はどちらも 1~2 万個程度測定され, 本研究ではその平均値である平均粒径 d_g と平均間隙幅 d_p を利用した. d_g の特徴として, 目視観測による粒径よりも小さくなる傾向がある. これは画像上で閉じた図形に Run-Length 法をおこなう場合にみられるものである. いま 1 個の粒子に着目し, 図 3c に示すような閉じた図形 F の平均粒径 d_F を求めることを考える. S_g は図形 F の面積, $RL_g(i)$ は図形 F を測定する i 番目の試験線によって求められた RL_g , l_{test} を F を走査する最初の試験線と最後の試験線間の距離とすると, d_F は $RL_g(i)$ の総和をその走査回数, すなわち試験線本数 n で除したものであり, $n \rightarrow \infty$ のとき以下のように定義できる.

$$d_F = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n RL_g(i) = \frac{S_g}{l_{test}} \quad (3)$$

更に, 試験線間隔を Δd とすれば, $l_{test} > \Delta d$ の条件で $\Delta d(n-1) = l_{test}$ が成立する. $n > 1$ であれば, $\Delta d = l_{test}/(n-1)$ となることから $l_{test} =$ 一定の下, $n \rightarrow \infty$ のとき $\Delta d \rightarrow 0$ が成立し, 試験線間隔が限りなく狭くなり Run-Length の真値を得られることが示される. さて, 一例として直径 d の円について d_F を求めてみると, $S_g = (\pi/4)d^2$, $l_{test} = d$ であるので式(3)より $d_F = (\pi/4)d$ となり, 円の直径 d よりも約 0.785 倍小さくなるのがわかる.

また, Run-Length 法は間隙のように閉じていない図形にも利用できるのが利点であるといえる.

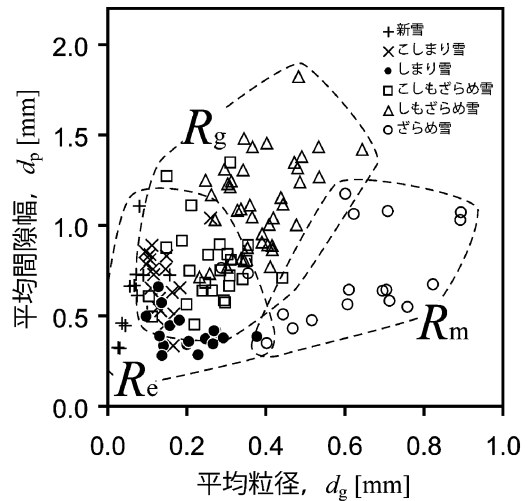


図 4 平均粒径 d_g と平均間隙幅 d_p との関係.

表 2 各領域の平均粒径 d_g と平均間隙幅 d_p の範囲

領域	d_g (mm)	d_p (mm)
R_e	0.03~0.38	0.28~1.11
R_g	0.11~0.64	0.45~2.26
R_m	0.29~0.89	0.35~1.17
全体	0.03~0.89	0.28~2.26

4. 結 果

4.1 平均粒径と平均間隙幅

図 4 は Run-Length 法で得られた平均粒径 d_g と平均間隙幅 d_p の関係であり, 変態過程ごとに 3 つに領域区分したものである. 図中の R_e は新雪・こしまり雪・しまり雪で等温変態過程, R_g はこしもざらめ雪・しもざらめ雪で温度勾配変態過程, R_m はざらめ雪で融解凍結変態過程の雪質の領域を示し, 表 2 に各領域の d_g と d_p の範囲を示す.

3 領域とも互いに重なる部分があるが、それぞれ次のような特徴がある。領域 R_e は、平均粒径と平均間隙幅がともに小さい領域である。その中で、新雪とこしまり雪の平均粒径はしまり雪よりも小さい傾向を示し、平均間隙幅はしまり雪と同程度かそれより大きい。これは新雪やこしまり雪に見られる樹枝状結晶の枝の太さが粒径に反映されているためと考えられる。領域 R_g と領域 R_m は領域 R_e に比べると平均粒径、平均間隙幅が大きい領域であるが、両者を比べると領域 R_g は平均間隙幅が大きく、領域 R_m は平均粒径が大きい。このように平均粒径 d_g と平均間隙幅 d_p の関係は雪質をある程度表現できるといえる。また、 $d_p/(d_g+d_p)$ は間隙率に相当することから密度とも関係が深く、平均粒径 d_g と平均間隙幅 d_p と密度 ρ_s の 3 者は密接な関係があると考えられる。

4.2 密度・平均粒径・平均間隙幅と体積比表面積

図 5 は密度 ρ_s 、平均粒径 d_g 、平均間隙幅 d_p と体積比表面積 SSA_v との関係的雪質別に示したものである。図 5a は密度 ρ_s との関係であるが、ばらつきが大きく雪質ごとに傾向も異なる。図 5b の平均粒径 d_g との関係では、こしまり雪、ざらめ雪、しもざらめ雪は粒径増加に対して SSA_v の単調減少傾向が見られるが、それ以外は粒径増加に対して明確な減少傾向は見られず、同程度の粒径に対して SSA_v は幅をもっている場合が多い。密

度 ρ_s や平均粒径 d_g はそれぞれ単独では雪質の違いによる比表面積の違いが強く表れており、一つの関係式で表すことができない。一方、図 5c の平均間隙幅 d_p と SSA_v との関係では、平均間隙幅増加に対して SSA_v は減少している傾向が認められ、雪質の違いによるばらつきが少ないといえる。

5. 考 察

5.1 平均粒径と体積比表面積の関係

体積比表面積 SSA_v は質量によって重み付けされた粒径である有効径 d_w を用いて、

$$SSA_v = \frac{1}{d_w} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{d_i}} \tag{4}$$

と定義される (例えば、酒井, 1965)。ただし、 d_i は粒径、 g_i は d_i の粒子サンプル全質量に占める重量百分比である。有効径は多孔質体を代表する粒径のうちの一つであるから、有効径ではなく平均粒径 d_g に関して式 (4) のような反比例の関係が利用できると考えられる。そこで、ここでは式 (4) に係数 C_g [無次元] を用いて、

$$SSA_v = C_g \frac{1}{d_g} \tag{5}$$

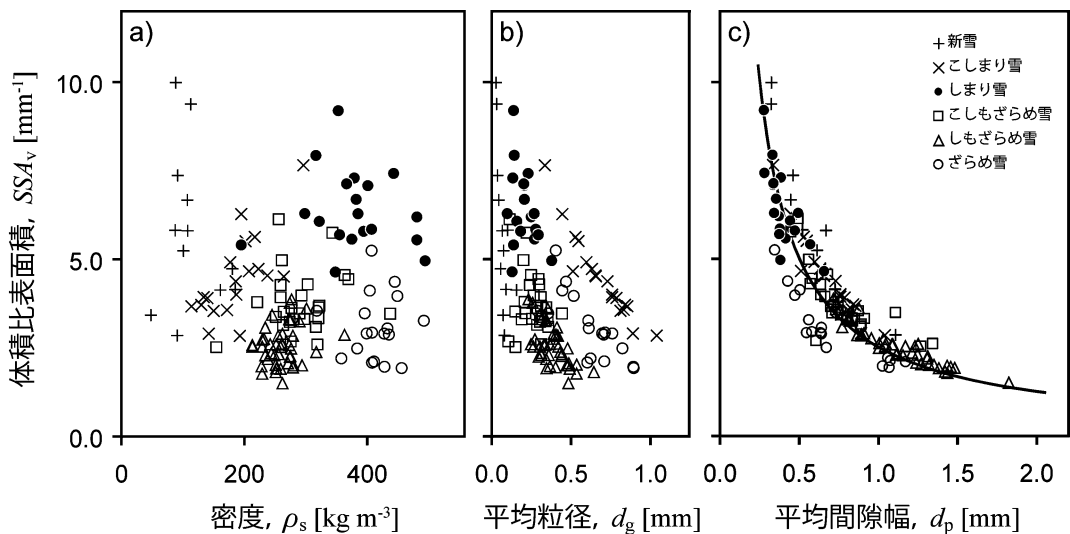


図 5 体積比表面積 SSA_v と a) 密度 ρ_s , b) 平均粒径 d_g , c) 平均間隙幅 d_p との関係。

と表すことにする. 図 5b で示したように, 同程度の粒径に対して SSA_v は幅をもっている場合が多い. これは, 雪粒子の形状や充填の違いが影響していると考えられる. そこで, 今回立体法により測定した SSA_v と Run-Length 法で測定した d_g から C_g を求め, これと現地で測定した密度 ρ_s との関係を探ると,

$$C_g = 0.2435e^{0.0048\rho_s} (R^2 = 0.7498) \quad (6)$$

という関係が得られた. ここに, R^2 は決定係数 (R は相関係数) で, 約 75% と十分大きなことから, C_g は密度 ρ_s と関係の深い係数であることが確認された (図 6). このときの密度範囲は $88 \sim 494 \text{ kg m}^{-3}$ である. 本研究では対象外であるが, 多年性積雪などの高密度積雪に関しては, 圧密過程が異なるので, C_g は異なる値を示すことが予想される. 式 (6) を式 (5) に代入すると,

$$SSA_v = \frac{0.2435e^{0.0048\rho_s}}{d_g} \quad (7)$$

となり, 体積比表面積 SSA_v は密度 ρ_s と平均粒径 d_g の 2 つのパラメータで関連づけることができた. なお, 式 (6) で示される式 (7) の分子部分は, 密度 $88 \sim 494 \text{ kg m}^{-3}$ に対して $0.37 \sim 2.61$ と変化する. 一方, 平均粒径 $0.03 \sim 0.89 \text{ mm}$ に対して $1/d_g$ は $33.3 \sim 1.12$ と変化的ことから, SSA_v は粒径に敏感なパラメータであると言える. 特に粒径が小さい領域で顕著である.

5.2 式 (7) の検証

図 5 で示した平均粒径 d_g と密度 ρ_s を使って, 式 (7) により体積比表面積 SSA_{est} を求め, これを, 立体法による体積比表面積 SSA_{stereo} と比較した (図 7). 両者の関係は,

$$SSA_{est} = 1.128SSA_{stereo} (R^2 = 0.7127) \quad (8)$$

となり, 立体法に比べて約 13% 過大評価であることがわかった. これは, 式 (7) を用いて SSA_v の代わりに, SSA_{stereo} を代入して逆算される平均粒径と比べて, Run-Length 法で求めた d_g は約 13% 小さい粒径であると解釈することができ, 閉じた

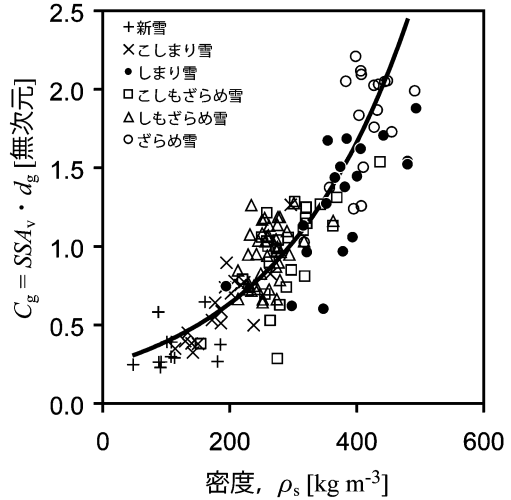


図 6 係数 C_g と密度 ρ_s との関係.

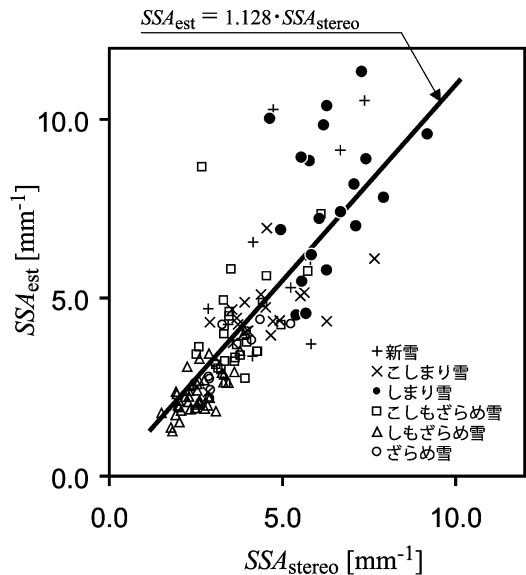


図 7 立体法による体積比表面積 SSA_{stereo} と式 (7) から求められる体積比表面積 SSA_{est} との関係.

図形の RL_g は目視の粒径に比べて小さく見積もられることと関連があると考えられる.

次に, 式 (1) から計算される質量比表面積を密度を用いて体積比表面積に変換し, これと式 (7) から求めた体積比表面積との比較をおこなった. 図 8 は, 式 (7) から求めた体積比表面積 SSA_{est} (●印) と式 (1) から求めた体積比表面積 SSA_{est}

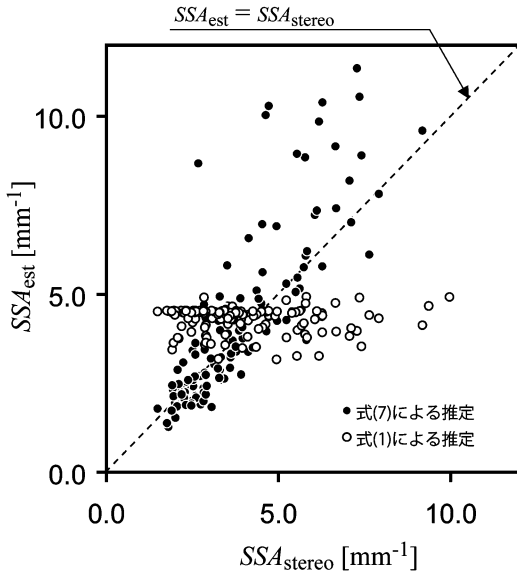


図 8 立体法による体積比表面積 SSA_{stereo} と式(7)を用いた推定値 (●) および式(1)を用いた推定値 (○) との関係。

(○印) を立体法による体積比表面積 SSA_{stereo} と比較したものである。○印の場合、 SSA_{est} は SSA_{stereo} との決定係数 R^2 が 0.0212 であったが、●印の場合、 SSA_{est} は SSA_{stereo} との決定係数 R^2 が 0.7108 とはるかに相関が強かった。

5.3 平均間隙幅と体積比表面積との関係

ところで、雪粒子と間隙は粒子の表面を介して表裏一体の関係であるため、粒子の立場からでも間隙の立場からでも同様に比表面積が求められると考えられる。間隙部分を粒子とみなせば、式(5)は平均間隙幅 d_p に対しても適用できる。このときの係数を C_p とする。図 5c に示した d_p と SSA_v の関係は反比例の関係で近似され、密度や雪質にかかわらず係数 C_p は 2.573 (定数) となった。すなわち、

$$SSA_v = \frac{2.573}{d_p} \quad (R^2 = 0.8193) \quad (9)$$

であり、 d_p と SSA_v の関係は密度や雪質によらないということ、式(9)によって約 82% 説明できることが示された。

ここで、 d_p と SSA_v との関係が「密度や雪質に

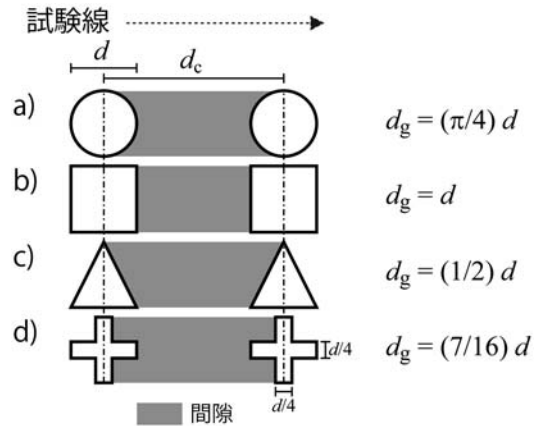


図 9 間隙幅が粒子形状の違いの影響を受けるかどうかを考察するための模式図。4 種類の図形は、a) 円形、b) 正方形、c) 二等辺三角形（底辺、高さともに d ）、d) 十字形（枝の太さ： $d/4$ ）で一辺が d の正方形に入る大きさ。 d_c は粒子の中心間距離。また、各図形の Run-Length (平均粒径 d_g) を右側に示す。

よらない」ということについて簡単な図形を用いて考察した。図 9 は異なる粒子形状について平均間隙幅 d_p が粒子形状の違いの影響を受けるか考察するための模式図で、4 種類の図形（円形、正方形、二等辺三角形、十字形）と式(3)によって求めた平均粒径 d_g を示したものである。それぞれの図形は一辺が d の正方形に収まる大きさで、それぞれの図形が試験線の走査方向に 2 つ並んでいる。この中心間距離を d_c とすれば、平均間隙幅 d_p は

$$d_p = d_c - d_g \quad (10)$$

で求められる。平均粒径 d_g は粒子形状によって大きく変化し、それに伴い密度も変化する。しかし、密度があまり大きくなく $d_c \gg d_g$ のような積雪の場合には、式(7)は近似的に $d_p = d_c$ となり、平均間隙幅 d_p は粒子形状の違いによる影響を受けにくくなる。一般的な積雪に当てはめてみると、しまり雪やざらめ雪のように密度の大きい積雪は、粒子形状が球形に近くなっており粒子形状の差の影響が少なくなると考えられる。新雪やこしまり雪などのように密度が小さい場合は、上述し

たように間隙は粒子形状の影響を受けにくくなる。こしもざらめ雪やしもざらめ雪はその中間的な存在と考えられる。従って、季節積雪全体で見ると、平均間隙幅は密度や粒子形状の影響を受けにくいパラメータと考えることができ、図 5c のような結果が得られたと考えられる。

5.4 平均粒径と平均間隙幅と密度との関係

体積比表面積 SSA_v は式 (7) や式 (9) で示したように、平均粒径 d_g からでも平均間隙幅 d_p からでも関連づけることができた。前述したように、粒子と間隙は粒子表面を介して表裏一体の関係であるから、式 (7) と式 (9) の右辺は等号で結ぶことができる。このとき d_g/d_p は密度 ρ_s の指数関数で表されるが、決定係数は求められないことから統計的な説明ができない。そこで、図 4 で示された全データについて d_g/d_p と ρ_s との関係性を調べたところ、

$$\frac{d_g}{d_p} = 0.0622 e^{0.0058 \rho_s} \quad (R^2 = 0.7577) \quad (11)$$

の関係が得られ、図 4 で示された平均粒径と平均間隙幅との関係が式 (11) によって約 76% 説明できることが示された。前節で述べたように、平均粒径 d_g が雪質によって形状が変化してその大きさを変えても、密度 ρ_s が小さければ、平均間隙幅 d_p は大きくなって、平均間隙幅 d_p は雪質の違いによる粒子形状の影響を受けにくくなるということが、式 (11) として定式化されたといえる。

6. まとめ

本研究では、積雪を構成する粒子や間隙という微細構造と比表面積とを関連づけることを目的として、積雪の片薄片写真の画像解析をおこなった。体積比表面積は立体法、平均粒径と平均間隙幅は Run-Length 法によって求めた。

体積比表面積は、密度や平均粒径とはそれぞれ単独では有意な関係がみられず、「雪質による」パラメータであることが示された。体積比表面積は有効径の逆数で定義されるが、有効径の代わりに平均粒径を与えたところ、このときの係数は密度とよい関係があることがわかり、式 (7) に示したように、体積比表面積を平均粒径と密度の 2 つのパラメータによって関係づけることが可能となっ

た。これにより、従来の密度のみの関係式では適用できなかったこしもざらめ雪やしもざらめ雪についても同一の関係式で表現できるようになった。また、立体法で求めた体積比表面積と比較して約 13% 過大評価となり、Run-Length 法では閉じた図形の平均粒径が過小評価されることとの関連性が示唆された。

一方、粒子や間隙のどちらからも同じ値の比表面積が求められることを考えることによって、体積比表面積と平均間隙幅とは式 (9) のような反比例の関係を求めることができ、「密度と雪質によらない」関係が示された。この関係は、密度が大きい時は球形粒子として一種類の雪質として扱えることと、密度が小さい時は密度と粒子形状の影響を無視できることであることによって説明でき、式 (11) によって定式化することができた。

今後の課題として、Run-Length 法による粒径と実際の粒度測定との関連付けが必要であり、これによって本研究によって求められた式 (7) (9) (11) の野外観測での利用が可能となる。谷川ら (2008) によれば、Run-Length 法による粒径と彼らの提案する光学的粒径とが近い値とされ、今後の検証を期待するところである。現地において比表面積の測定が可能となれば、積雪の微細構造が影響するような積雪の力学的強度、融雪水の浸透機構、積雪の音響特性等の諸特性の解明へ繋がるのが期待される。

謝 辞

本稿を執筆するにあたり、北海道教育大岩見沢校 (現札幌校) 尾関俊浩准教授、富山大学極東地域研究センター川田邦夫教授、元北海道大学低温科学研究所成瀬廉二博士、同成田英器博士には、低温室の利用に関して、大変お世話になりました。野外科学株式会社飯沼弘一氏には、野外調査の一部を手伝って頂きました。2 人の査読者および雪氷編集担当の阿部 修博士からは詳細かつ的確なコメントを頂くことができ、本稿に反映させることができました。本研究の一部は平成 17 年度、18 年度、19 年度北海道大学低温科学研究所共同研究 (一般研究「積雪構造の定量化に関する研究」) によりおこなわれました。ここに記して感謝申し上げます。

文 献

- 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.
- Coléou, C., Lesaffre, B., Brzoska, J.-B., Ludwig, W. and Boller, E., 2001: Three-dimensional snow images by X-ray microtomography. *Annals of Glaciology*, **32**, 75-81.
- Dominé, F., Taillandier, A.-S. and Simpson, W.R., 2007: A parameterization of the specific surface area of seasonal snow for field use and for models of snowpack evolution. *J. Geophys. Res.*, **112**, F02031, doi: 10.1029/2006JF000512.
- Hachikubo, A., Arakawa, H., Nishida, K., Fukuzawa, T. and Akitaya, E., 2000: Section planes of snow specimens visualized with sudan black B. *Polar Meteorology and Glaciology*, **14**, 103-109.
- 勝原慎介, 2006: 3D 骨梁波の軽量モデリング. 大阪大学修士論文, 55p, <http://oshiro.bpe.es.osaka-u.ac.jp/thesis/master/2005/katsuhara.pdf> (参照 2007-10-15).
- Kerbrat, M., Prinzer, B., Huthwelker, T., Gäggeler, H. W., Ammann, M. and Schneebeli, M., 2008: Measuring the specific surface area of snow with X-ray tomography and gas adsorption: comparison and implications for surface smoothness. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 1261-1275.
- Legagneux, L., Cabanes, A., and Dominé, F., 2002: Measurement of the specific surface area of 176 snow samples using methane absorption at 77K. *J. Geophys. Res.*, **107**, No. D17, 4335, doi: 10.1029/2001JD001016.
- Matzl, M., 2006: Quantifying the stratigraphy of snow profiles. PhD thesis, ETH Zurich, 78pp.
- 成田英器, 1969: 積雪の比表面積の測定 I. 低温科学, 物理篇, **27**, 77-86.
- 成田英器, 1971: 積雪の比表面積の測定 II. 低温科学, 物理篇, **29**, 69-81.
- 大松浩一郎, 1998: 3次元画像処理を用いた骨梁構造定量的評価方法の開発. 奈良技術大学修士論文, 72pp, <http://chihara.aist-nara.ac.jp/public/research/thesis/master/98/omatsu9651019.pdf> (参照 2007-10-15).
- Rick, U. and Albert, M., 2004: Microstructure of west antarctic firn and its effect on air permeability. CREEL TR-04-16, U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N. H., 18-23.
- 酒井軍治郎, 1965: 地下水学. 東京, 朝倉書店, p283.
- 谷川朋範・八久保晶弘・青木輝夫, 2008. 積雪粒子の比表面積と光学的等価粒径の関係. 雪氷研究大会 (2008・東京) 講演要旨集, p49.
- 渡邊善八, 1983: 積雪の力学的性質と雪崩の発生に関する研究. 東北大学学位論文, 316pp.

Relationship between specific surface area per unit volume and microstructure of seasonal snow cover

Hayato ARAKAWA¹⁾²⁾, Kaoru IZUMI³⁾, Katsuhisa KAWASHIMA³⁾,
Toshiyuki KAWAMURA⁴⁾

1) *Yagai-Kagaku Co., Ltd.*

12-2-39, Naebo-cho, Higashi-Ku, Sapporo, 065-0043

2) *Graduate School of Science & Technology, Niigata University*

8050, Ikarashi 2-no-cho, Nishi-ku, Niigata 950-2181

3) *Research Center for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University*

8050, Ikarashi 2-no-cho, Nishi-ku, Niigata 950-2181

4) *Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University*

Kita-19, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060-0819

Abstract: The specific surface area per unit volume (SSA_v) of snow samples of various types was measured by the stereological method, and the mean grain size (d_g) and the mean pore size (d_p) of the samples were measured by the run-length method. These samples were collected at several sites in Hokkaido Prefecture and at one site in Toyama Prefecture, Japan, over the four winters. All snow samples were dry, with densities (ρ_s) ranging between 88 and 494 kg m⁻³. SSA_v ranged from 1.50 to 9.98 mm⁻¹, d_g from 0.03 to 0.89 mm, and d_p from 0.28 to 2.26 mm. We obtained the prediction formula for SSA_v using d_g and ρ_s ; $SSA_v = 0.2435 d_g^{-1} e^{0.0048 \rho_s}$. Additionally, SSA_v was found to be inversely proportional to d_p . The prediction formula is sensitive to d_g rather than ρ_s . While it overestimated SSA_v by approximately 13% in comparison with the stereological method, it was able to accurately estimate the variation of the SSA_v caused by the difference between snow types.

(2008年7月9日受付, 2008年8月29日改訂受付, 2008年9月19日再改稿受付,
2008年11月10日再々改稿受付, 2008年11月12日受理, 討論期限2009年7月15日)