HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	積雪の比表面積の測定　II
Author(s)	成田, 英器
Citation	低温科學. 物理篇, 29, 69-79
Issue Date	1972-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18171
Type	departmental bulletin paper
File Information	29_p69-79.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Hideki NARITA 1971 Specific Surface of Deposited Snow II. *Low Temperature Science, Ser. A, 29.* (With English Summary p. 78)

積雪の比表面積の測定 II*

成田英器
(低温科学研究所)

(昭和46年9月受理)

I. まえがき

積雪にほった雪穴の壁には，上からしんせつ，こしまりゆき，しまりゆき，ざらめゆき，しもざらめゆき等の種類の雪の層状に堆積しているのをみることができる。これらの雪はいずれも積もったばかりの時にはしんせつで，積もった後，時間がたつにつれて，雪粒の形，大きさ，雪粒同志の結合の仕方がかわり，すなわち，雪粒の変態によって形づくられたものである。積雪の成層構造は，雪の堆積の順序をあらわすとともに，各層の雪の変態過程の段階，歴史をもあらわしている。雪壁の雪に指でさわってみれば，変態によって雪の性質も変化したことを知ることができる。したがって，積雪粒子の状態をしらべれば，雪の性質を知るための手がかりがえられるであろう。

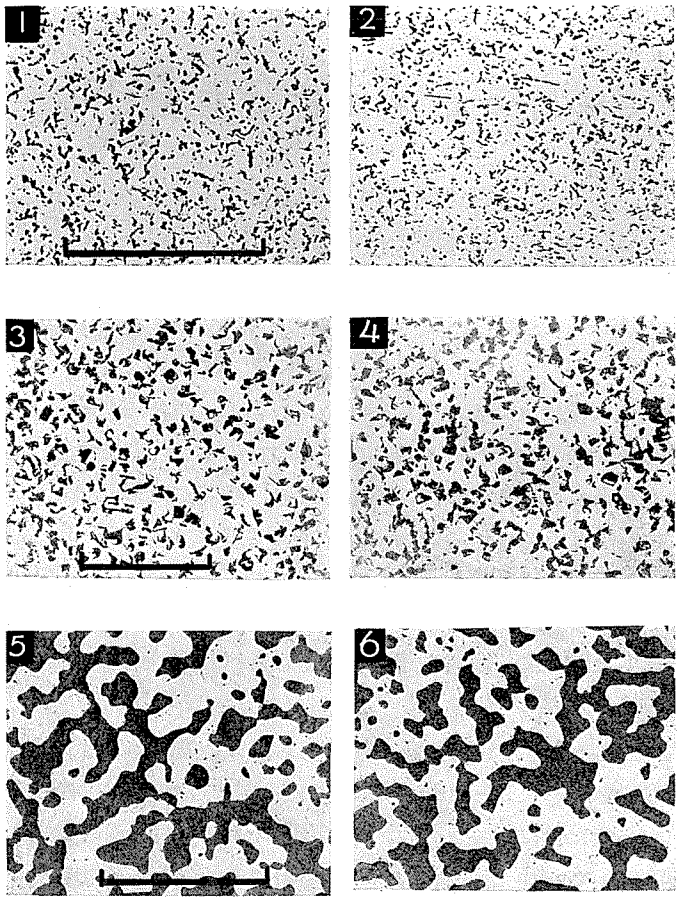
著者は先に[1]，しまりゆきの比表面積，すなわち，単位質量のしまりゆきにふくまれている積雪粒子の表面積をしらべ，$10\sim10^2\,cm^2/g$ の値をえた。この値は，石田[2]，清水[2),3)]がしまりゆきの通気抵抗からえた値に近く，また，渡辺[4)]がオレイン酸の分子吸着からえた値とも一致した。著者の方法は，Smith と Guttmann[5)] の岩石にふくまれる鉱物粒子の比表面積を計算する理論を利用したものである。アニリンで固めた積雪の一面を平らにして写真をとり，引き伸ばした写真の上に間隔 d の平行線を引く。平行線の延長を L，平行線を切断された雪の粒子の周辺線との交点の数を N とすると，$2N/L$ が単位体積当たりの比表面積を与える。

著者は Smith と Guttmann の方法を使ってしまりゆき以外の密度が $0.05\sim0.70\,g/cm^3$ の各種の雪について，比表面積を求め，密度の増加とともに，比表面積がどのように変化するかをしらべたので報告する。

II. 試　　料

平行線の延長 L と間隔 d を決めるための各雪質の試料の切断面を第1図に示した。第1図の写真1), 2)はしんせつで，降り積もってから3日後採取したものである。降雪結晶の形がいくぶん残ってはいるが，かなりの結晶はまるみをおびている。密度は $0.07\,g/cm^3$ である。写真3), 4)はしもざらめゆきで，角ばった結晶がみられるが，こしまりゆきから変態したもので，脆く，硬度は $100\,g/cm^2$ であった。写真5), 6)はざらめゆきで，日射で部分的にとけた後再凍結したものである。

* 北海道大学低温科学研究所業績　第1144号



第1図 各雪質の切断面

写真の黒い部分が氷である。1) しんせつの水平断面，2) しんせつの鉛直断面，3) しもざらめゆきの水平断面，4) しもざらめゆきの鉛直断面，5) ざらめゆきの水平断面，6) ざらめゆきの鉛直断面，1, 3, 5にある黒枠が1 cmで，それぞれ2, 4, 6と同じ

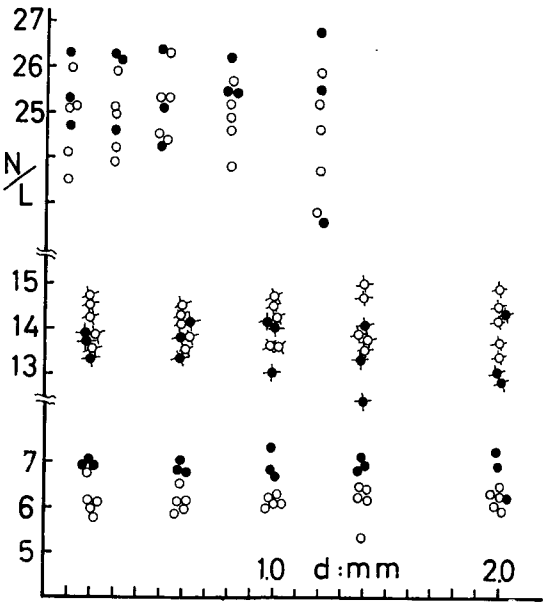
III. 測定と結果

積雪層から，一辺が約3 cm程度の立方体の試料を切り出し，−10°Cの部屋で液体のアニリンにひたす。この試料を−25°Cの部屋におき，アニリンを凍結させてから，ミクロトームで，試料が積雪として地上にあった時の雪面に平行な面と直角な面を削り出す。氷の部分にウォター・ブルーの粉を付着させると，氷の部分だけが濃く着色され，アニリンの部分との区別が明瞭になる。ミクロトームで削られる厚さは，しんせつ20 μ，しもざらめゆき45 μ，ざらめゆき70 μであった。写真は拡大写真撮影装置で撮影した。

先に述べたように，積雪の比表面積をSmithとGuttmannの方法で求めるばあい，平行線の長さLと間隔dをどの程度にすればよいかをきめなければならない。この論文では，前の論文[1]と同じように，平行線の長さと間隔を$2N/L$が一定値になるLとdを求めた。一方，実際の比表面積を，各々の切断面に現われてくる氷粒の周長と試料の厚さから求め，$2N/L$の値と比較した。

最初に，積雪層に平行に切られた「水平切断面」50 枚と，直角に切られた「鉛直切断面」30 枚の写真から，測定用の試料として，10 枚毎に 1 枚ずつ，それぞれ 5 枚と 3 枚をえらんだ。したがって，しんせつ，ざらめゆき，しもざらめゆきを，それぞれ 0.2 mm, 0.7 mm, 0.45 mm の厚さで削ったとおなじことになる。それらの切断面を図版 I, II に示した。あらかじめ印画紙に引き伸ばした写真上に，雪の切断面で 0.1 mm に相当する間隔の平行線を引いた透明紙をのせ，その試料の面全体について平行線と境界線の交差数 N をかぞえた。平行線一本の長さは，しんせつ，ざらめゆき，しもざらめゆきで，それぞれ 1.67 cm, 2.23 cm, 2.50 cm であった。ここで，d と L の長さは引き伸ばした写真の上での寸法ではなく，試料の寸法に換算した長さをとってある。実際の測定は引き伸ばした写真上で行なわれるのであるから，透明紙の上での寸法は引き伸ばしの倍率を掛けた長さになる。

論文 I[1] と同じ方法で，平行線の間隔を変えて N/L 値を計算した結果を第 2 図に示した。この図ばかりでなく以後の図においても，○ 印が水平切断面，● 印が鉛直切断面での値である。どの雪質においても，間隔 d が 0.1 mm 以下のとき，N/L 値のばらつきは 10% 程度である。間隔を広げてゆくと，試料の面積は一定であるから，L の長さは短くなる。N/L のばらつきは大きくなる。この傾向は，粒径の小さい粒子ほど著しく，しんせつでは 1.0 mm 以上広げると急に N/L 値はばらつきの幅が大きくなるが，粒径の比較的大きいざらめゆきでは，d を 2.0 mm まで広げても，N/L 値のばらつきは，$d=0.1$ mm のときとほとんど変わらない。このように，各々の雪質で，d をある限界以下に小さくしても，N/L のばらつきは，ほぼ一定になってしまう。第 2 図から，それぞれの雪質について，d の値として，しんせつで 0.8 mm，ざらめゆきで 2.0 mm，しもざらめゆきで 1.0 mm 以下にとるとよいことがわかる。これらの値のときの N の数は，それぞれ 900, 200, 900 個程度であった。しまりゆきは論文 I[1] から，N/L 値を 10% 程度のばらつきにおさえるとしたら，d は 1.2 mm，N は 400 個程度である。以上のこと



第 2 図 平行線の間隔 d による N/L 値の変化。最上部 ($N/L=25$ を中心とした点) はしんせつ，中間部 (○, ●印) はしもざらめゆき，最下部 ($N/L=6$ を中心とした点) はざらめゆきについての値である

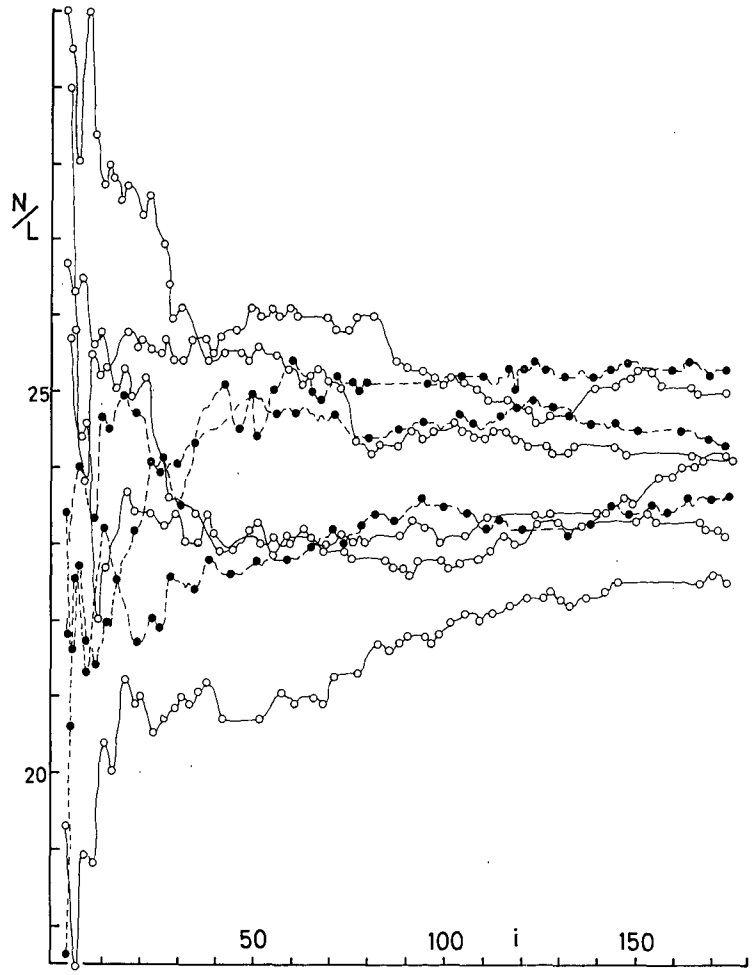
第 1 表 各雪質について，とりうる最大の間隔 d と，そのときの N, L, 測定面積の比較

	d (mm)	N (個)	L (cm)	測定面積 (cm²)
しんせつ	0.8	900	36	1.67×1.75=2.92
しまりゆき	1.2	400	23	1.35×1.70=2.29
ざらめゆき	2.0	200	30	2.23×2.0 =4.46
しもざらめゆき	1.0	900	62	2.50×2.50=6.25

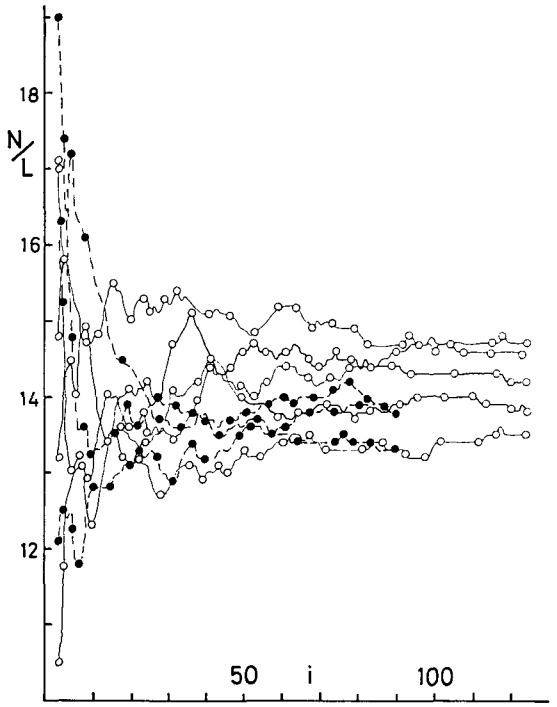
を第1表にまとめた。

以上のことは，一定面積で平行線の間隔をちぢめていって，N/L 値を一定値に近づけることであった。次に平行線の間隔を 0.1～0.2 mm にして，平行線の長さ L を長くしていき，すなわち，平行線の本数を増やして，N/L 値を計算し，L をどの程度のばすと，N/L 値が一定に近づくかを調べてみよう。

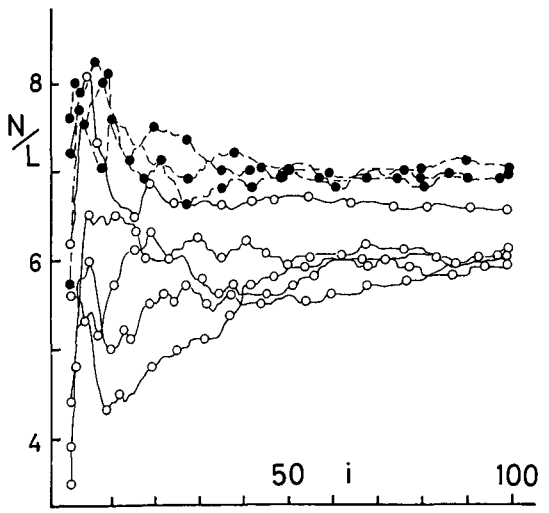
平行線の一本の長さは前と同じで，間隔はしんせつ 0.1 mm，ざらめゆきとしもざらめゆきは 0.2 mm とした。平行線一本毎についての N/L 値は非常にばらつくが，それを加え合わせてゆくと，N/L 値は一定値に近づいてゆく。その様子を第 3, 4, 5 図に示した。横軸に平行線の本数 i，縦軸に $\sum_i N_i/L_i$ をとった。図の○印と●印は，それぞれ水平切断面と鉛直切断面での値である。平行線の本数 i を増してゆくと，すなわち，L を長くしてゆくと，N/L 値が一定値に近づいてゆくことがわかる。各々の曲線に注目してみると，最初 L の小さい間，N/L 値は非



第3図 しんせつにおける N/L と平行線（一本の長さ 1.67 cm）の数 i との関係。$d=0.1$ mm



第4図 しもざらめゆきにおける N/L と平行線（一本の長さ 2.50 cm）の数 i との関係。d=0.2 mm



第5図 ざらめゆきにおける N/L と平行線（一本の長さ 2.23 cm）の数 i との関係

常に変動する。しかし，やがて変動の振幅は小さくなり，N/L 値は一定値に近づく。各々の切断面から求められた N/L 値の最終値は少しばらついている。それぞれの曲線の変動が少なくなり，ばらつきが10% 程度になる i の数は，第3, 4, 5図から，しんせつ100本，ざらめゆき40本，しもざらめゆき60本とみることができる。すなわち，L の長さで，それぞれ167 cm，89.2 cm，154 cm である。このときの N の数は，約4000, 530, 2200個程度である。論文 I[1] で求めたしまりゆきの値を加えて，以上の結果を第2表に示した。

第2表 d を小さくしたときの，各雪質の N と L，測定面積の比較

	d (mm)	N (個)	L (cm)	測定面積 (cm^2)
しんせつ	0.1	4000	167.0	1.67
しまりゆき	0.1	2900	162.0	1.62
ざらめゆき	0.2	550	89.2	2.68
しもざらめゆき	0.2	2200	154.0	3.00

第1表と第2表を比べてみると，第1表の方法では N と L が第2表より小さいにもかかわらず，N/L は一定値に近づいた。第2表では d すなわち平行線の間隔をちぢめたために，N/L の値が一定値に近づくまでに L の値を大きくし，平行線の数を増さなければならなかった。このように，第1表と第2表で L の値はかなり異なり，しまりゆきについては第2表の L は第1表の L の約8倍になったにもかかわらず，測定面積には，それほど大きな差異はない。すなわち，N/L が一定値になるためには一定の測定面積が必要なことが判る。

以上のことは積雪粒子の分布が必ずしも一様ではなく，場所的に粒子の集まった所と疎な所があることを示している。事実，若浜[6]は，しまりゆきのように積雪のうちでは最も均質

で一様性に富んでいる雪の中にも，団粒構造があることを示している。したがって，d の値は第2表のようにあまり小さくとらないで，第1表の d 程度にとり，試料の面積全体を使って測定した方が N, L の小さい値で一定値を得ることになる。

以上のように，積雪層の水平，鉛直切断面で一方向に平行線を引いて N/L 値を求めた結果，両方ともわずかのばらつきはあるが，一定値に近づくことがわかった。しかし，しまりゆきのように構造的に等方性な積雪に対して，Smith と Guttmann の式は適用できたが[1]，いままで異方性をもっているといわれているしんせつやしもざらめゆきでは，この方法によって，その異方性があらわれてくるかどうかが問題である。それで，平行線の方向を，水平，鉛直の両切断で 0°, 30°, 60°, 90°傾けて N/L を求めてみた。それらの結果を第3表にかかげた。

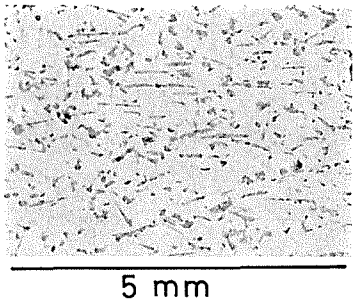
第3表 平行線の方向と N/L の比較

			0°のときの N/L	30°のときの N/L	60°のときの N/L	90°のときの N/L	$\bar{\theta}$(平均値)
しんせつ	鉛直切断面	#1	25.3	25.0	23.0	20.9	23.6
		#2	24.3	25.1	21.1	19.4	22.5
		#3	23.7	22.9	21.0	19.9	21.9
	水平切断面	#1	24.1	23.7	23.8	24.0	23.9
		#2	23.1	23.2	23.1	26.3	23.9
		#3	24.1	22.8	24.1	24.5	23.9
しもざらめゆき	鉛直切断面	#1	11.8	13.7	9.6	13.5	12.2
		#2	13.8	13.6	13.3	14.9	13.9
		#3	12.3	13.8	13.7	12.9	13.2
	水平切断面	#1	13.8	13.5	13.5	14.1	13.7
		#2	14.2	15.0	14.2	14.1	14.4
		#3	13.5	13.4	13.4	13.9	13.6
ざらめゆき	鉛直切断面	#1	6.9	6.6	6.9	6.7	6.8
		#2	6.9	7.1	6.8	6.9	6.9
		#3	6.3	7.5	7.3	7.1	7.2
	水平切断面	#1	6.0	6.3	6.6	6.7	6.8
		#2	6.0	6.1	6.6	6.7	6.3
		#3	6.1	6.4	6.5	6.5	6.4

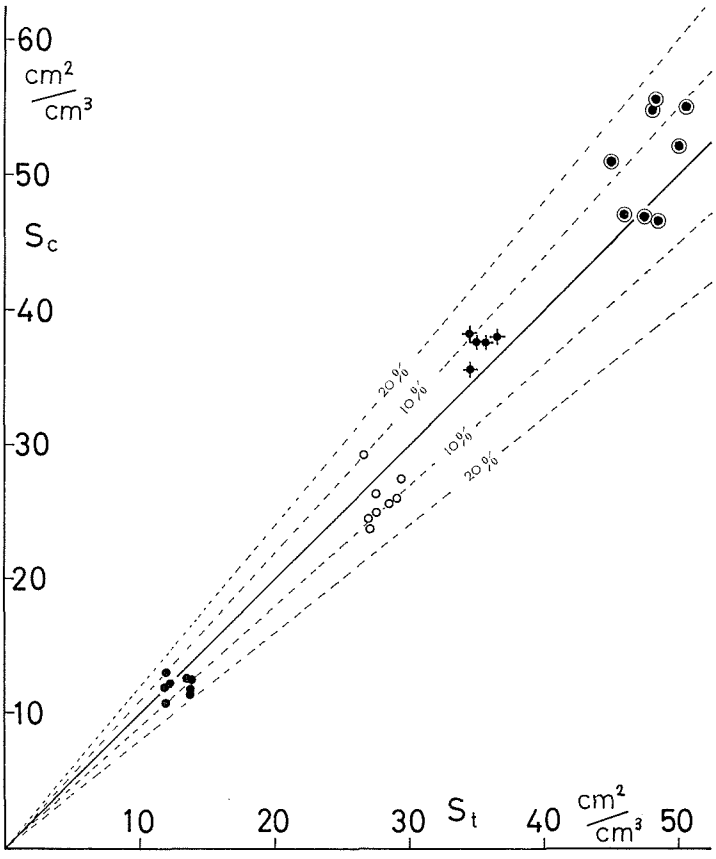
第3表には，一つの雪の一つの断面について三個の試料が使われているが，その結果を比べてみると，しんせつが，平行線の方向によって，最もばらついている。しかし，このばらつきはこの方法でえられる N/L の本来のばらつきの範囲内に入っていると見ることができる。しもざらめゆきにしても全体的に数 % 程度のばらつきである。したがって，種々な雪質に対して，Smith と Guttmann の方法を用いるばあい，L を十分長くとるか，平行線の間隔 d を十分小さくとると，それらの異方性は敏感にきいてこないことがわかった。今回使ったしんせつは，降雪後3日経った試料で，樹枝状結晶がわずか残っていたものであった。また，しもざらめゆきは，Skelton 型，Solid 型[7]の粒形をしたものであった。これらのことから，降雪直後のしんせつ（第6図）を除いて，Smith と Guttmann の統計，確率的方法は積雪に利用できる

ことがわかった。

いままで求めてきた値が，真の比表面積とどの位の誤差があるか調べておく必要がある。真の比表面積の大きさは，論文 I[1] と同じように，切断面上に現われてくる氷粒の周辺を製図用のロットリングペンでなぞり，そのときのインクの消耗量から周長を求めた。一方，ミクロトームで一回に削られる試料の厚さがわかっているから，真の比表面積を求めることができる。真の比表面積の値と N/L から統計的に求めた値の関係を第7図に示した。縦軸に真の比表面積 S_c，横軸に統計的に求めた比表面積 S_t の値をとってある。両者が一致すると，図の実線上にのることになる。図から，15% 以内の精度で比表面積 S_t が得られることがわかる。



第6図　降雪直後の積雪の水平切断面，樹枝状結晶の枝が平行に重なり合っている



第7図　真の比表面積 S_c (cm²/cm³) と N/L から統計的方法で求めた比表面積 S_t (cm²/cm³) との関係

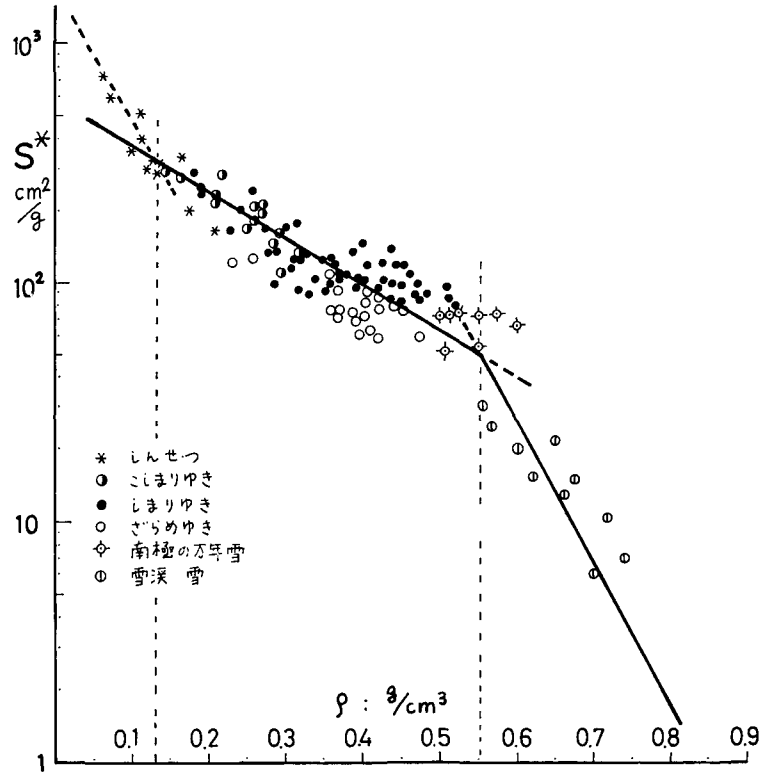
IV. 積雪の比表面積

III 節の結果を利用して，密度が 0.06 から 0.70 g/cm³ までの雪の比表面積を調べた。比表面積は，単位体積当たりの表面積 s でも，又単位重量当たりの表面積 s^* でも表わされ，$s=\rho s^*$ である。ρ は雪の密度である。$2N/L$ 値から求めた比表面積 s を第 4 表にまとめた。測定した積雪全体についての比表面積の大きさは 5～75 cm²/cm³ の範囲であった。雪質によって，しんせつからざらめ化するにつれて比表面積の大きさは小さくなっているが，その傾向は著しくはない。

第 4 表 各雪質の単位体積当りの比表面積 (cm²/cm³)

雪　　質	密　度 (g/cm³)	比表面積 (cm²/cm³)
しんせつ	0.05～0.15	35～60
こしまりゆき	0.15～0.25	40～75
しまりゆき	0.25～0.50	35～60
ざらめゆき	0.30～0.50	25～40
雪渓のざらめゆき	0.55～0.70	5～15

単位重量当たりの比表面積を求め第 8 図に s^* (cm²/g) と密度 ρ との関係を示した。第 4 表と第 8 図のしんせつは，降ったばかりの雪をのぞき，少し変態したものについて測定した。図の * 印はしんせつである。◑印はこしまりゆき，● 印はしまりゆき，○印はざらめゆきである。このざらめゆきは，粒子の大きいもので，ざらめゆきにしもざらめゆきが混ったものも含まれている。密度が 0.55 g/cm³ 以上の雪は，一冬で消えてしまう平地の積雪には見られない。



第 8 図 単位重量当りの比表面積 (cm²/g) と密度の関係

このような密度の雪は，雪渓の雪か，極地の古い雪に見られる。◎印は大雪山系の雪渓の一つである「雪壁雪渓」のざらめゆきである。この雪渓は，夏になっても融けきらずにあるため，雪渓内部の雪は2乃至4年前に積もった雪である[8]。従って，春になって消える一年雪に比べると非常に変態している。また，⊙印は南極大陸でボーリングを行なったときに採取された万年雪の試料である。

比表面積と密度との関係は，第8図によると，三つの部分にわかれている。すなわち，しんせつの部分，しまりゆき，ざらめゆきの部分，変態の進んだざらめゆきの部分である。特に密度 0.55 g/cm^3 以上の雪では，比表面積は急に減少する傾向にある。同様な傾向は，第4表の比表面積の単位体積当たりの値にも見られる。また，同じ密度でも，粒形や粒径が異なった比表面積の違いは，しまりゆきとざらめゆきの比表面積の値にあらわれている。

C. Benson は積雪 (snow) と万年雪 (firn) との境界を密度 0.55 g/cm^3 としている[9]。また，中谷がグリーンランド氷冠で積雪の弾性率を測定した結果，弾性率と密度との関係の傾向は密度 0.55 g/cm^3 を境にして異なっていた[10]。このようなことから，比表面積は，積雪の構造を表わす一つの量であることを示唆している。

第8図から，ρ と s^* の関係式は次のようになった。

$$\log_{10} s^* = -5.26\rho + 3.21, \qquad \rho < 0.15$$
$$\log_{10} s^* = -1.85\rho + 2.72, \qquad 0.15 < \rho < 0.55$$
$$\log_{10} s^* = -5.56\rho + 4.78, \qquad 0.55 < \rho < 0.83$$

V. あ と が き

Smith と Guttmann が統計，確率的に求めた式を使って，積雪の比表面積の測定を試みた。しんせつ，しもざらめゆきのような構造的に異方性のある雪質においても，この方法は，使えることがわかった。積雪の切断面上に平行線を引き，その間隔を 0.1～0.2 mm にしたばあい，しんせつ，ざらめゆき，しもざらめゆきの各雪質では，平行線の長さを 167 cm, 89.2 cm, 154 cm 程度，そのときの交差数 N が 4000, 550, 2200 程度にとればよい。また，各雪質で，平行線の間隔を 0.8 mm, 2.0 mm, 1.0 mm としたばあい，交差数は各々 900, 400, 900 個程度とれば，その雪の比表面積を表わしていることがわかった。

密度 0.06～0.70 g/cm^3 の範囲での単位体積当たりの比表面積 s (cm^2/cm^3) は 5～75 cm^2/g の範囲であり，単位重量当たりの比表面積 s^* (cm^2/g) は 8～1000 cm^2/g の範囲であった。

最後にこの論文を書くに当たって，種々の御指導をいただいた本研究所藤岡敏夫教授に感謝の意を表します。

この研究は雪崩の研究に対する文部省特別事業費で行なわれた。

文　献

1) 成田英器 1969 積雪の比表面積の測定 I. 低温科学，物理篇，**27**, 77–88.
2) 石田　完・清水　弘 1955 積雪の通気抵抗 (第I報). 低温科学，物理篇，**14**, 33–42.

3) 清水 弘 1956 積雪の通気抵抗 III. 低温科学, 物理篇, **15**, 73-79.
4) 渡辺善八 1970 積雪の比表面積の測定. 日本雪氷学会, 昭和45年度秋季全国発表大会予稿集, 15.
5) Smith, C. S. and Guttmann, L. 1953 Measurement of internal boundaries in three-dimensional structure by randam sectioning. *J. Metals*, **5**, No. 1, 81-87.
6) 若浜五郎 1960 積雪の薄片を応用した積雪の組織と内部歪の研究 I. 低温科学, 物理篇, **19**, 37-72.
7) 秋田谷英次 1964 しもざらめゆきの研究 I. 低温科学, 物理篇, **23**, 67-74.
8) 若浜五郎・清水 弘・秋田谷英次・成田英器・田沼邦雄・山田知充・成瀬廉二・北原武道・佐藤尚之・石川信敬・河村俊行 1969 大雪山の雪渓調査 IV. 低温科学, 物理篇, **27**, 181-194.
9) Benson, C. S. 1962 Stratigraphic studies in the snow and firn of the Greenland Ice Sheet. *SIPSE Res. Rept.*, **70**, 1-89.
10) Nakaya, U. and Kuroiwa, D. 1966 Physical properties and internal structure of Greenland Snow. *In* Physics of Snow and Ice, Part **2** (H. Ôura, *ed*), Inst. Low. Temp. Sci., Sapporo, 953-971.

Summary

After pieces of snow 2.5×2.5×2.5 cm in dimension had been reinforced with solidified aniline, they were shaved successively by a microtome along the surfaces parallel and perpendicular to the surface of the snow cover. The thickness of each piece of shavings d_i was 20 μ for new snow, 70 μ for granular snow and 45 μ for the snow of depth hoar. After each shaving, the snow surfaces were rubbed by the powder of water blue which dyed only the surfaces of the cross section of the ice particles (Pl. I, II).

The specific surface of snow, that is, the total area of the surface of ice particles in unit volume or in unit weight of snow, was measured on enlarged photographs of each surface of the snow pieces by the following methods:

(1) On each photograph, the length l_i of the periphery of the ice particles was measured. $\sum l_i d_i$ gave the surface area of the ice particles of the snow.

(2) Parallel lines with the distance d were drawn on the photograph and the number of the points of intersection N of these lines at the peripheries of the ice particles was counted. According to the theory of Smith and Guttmann, $2N/L$ is equal to the specific surface s. L is the total length of the parallel lines and l_i, d and L are measured by the original scale of the snow pieces.

To get the specific surface s by the method (2), it was necessary to determine the distance of the parallel lines d and their total length L for each type of snow. Series of measurements gave the following values to d and L:

	d (mm)	N	L (cm)	surface area of snow pieces (cm^2)
new snow	0.8	900	36	2.92
compact snow	1.2	400	23	2.92
granular snow	2.0	200	30	4.46
depth hoar	1.0	900	62	6.25

When the values of d and L were taken as those listed above, the two different methods (1) and (2) gave the equal values of s to the same piece of snow.

Using the theory of Smith and Guttmann, the author determined the specific surface s^* which is the total surface area of ice particles in one gram of snow. The relation

of the specific surface and the density of snow was expressed as follows:

$$\log_{10} s^* = -5.26\rho + 3.21 \quad \text{for} \quad \rho < 0.15,$$
$$\log_{10} s^* = -1.85\rho + 2.72 \quad \text{for} \quad 0.15 < \rho < 0.55,$$
$$\log_{10} s^* = -5.56\rho + 4.78 \quad \text{for} \quad 0.55 < \rho < 0.83,$$

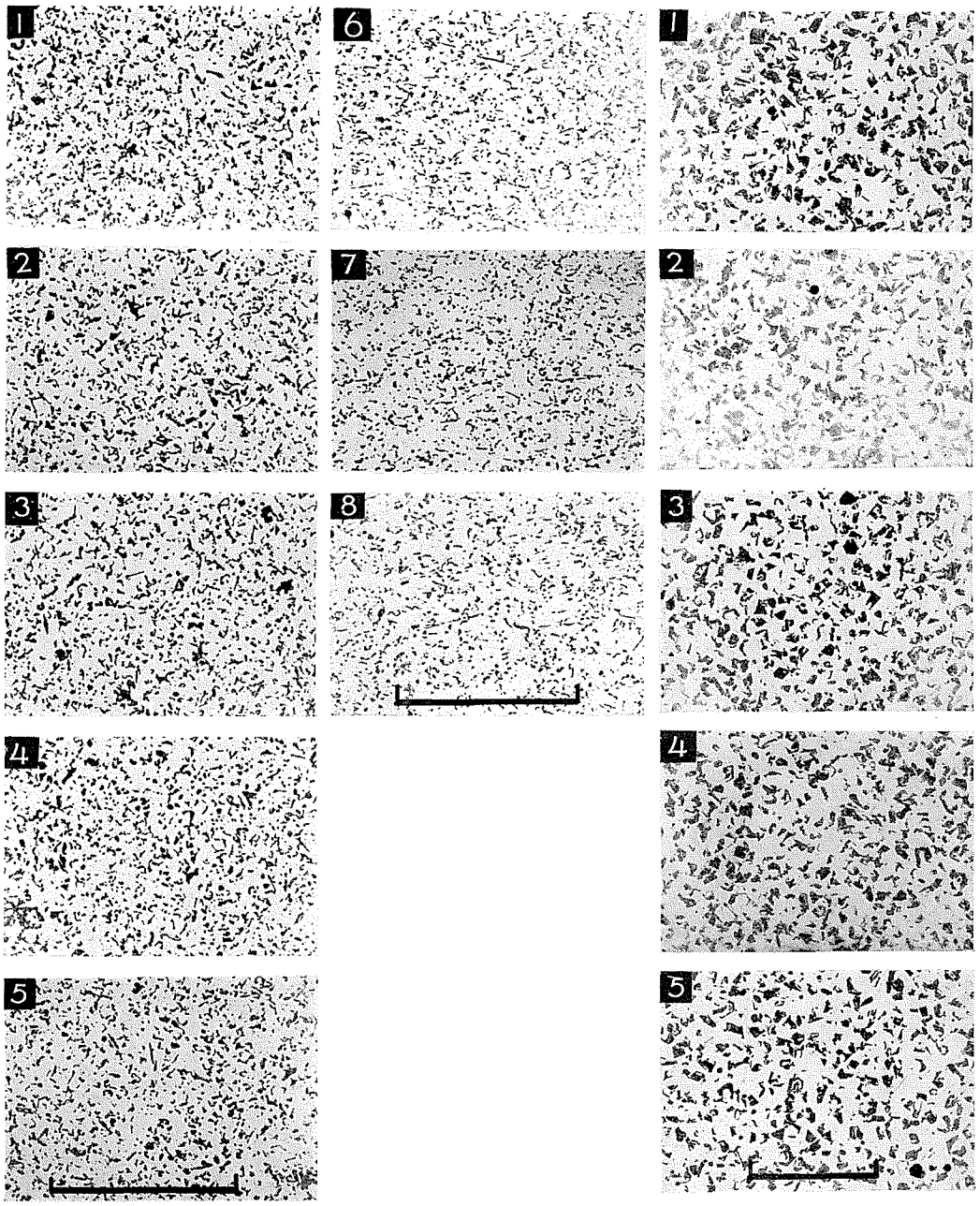
where s^* and ρ were measured by cm^2/g and g/cm^3 respectively.

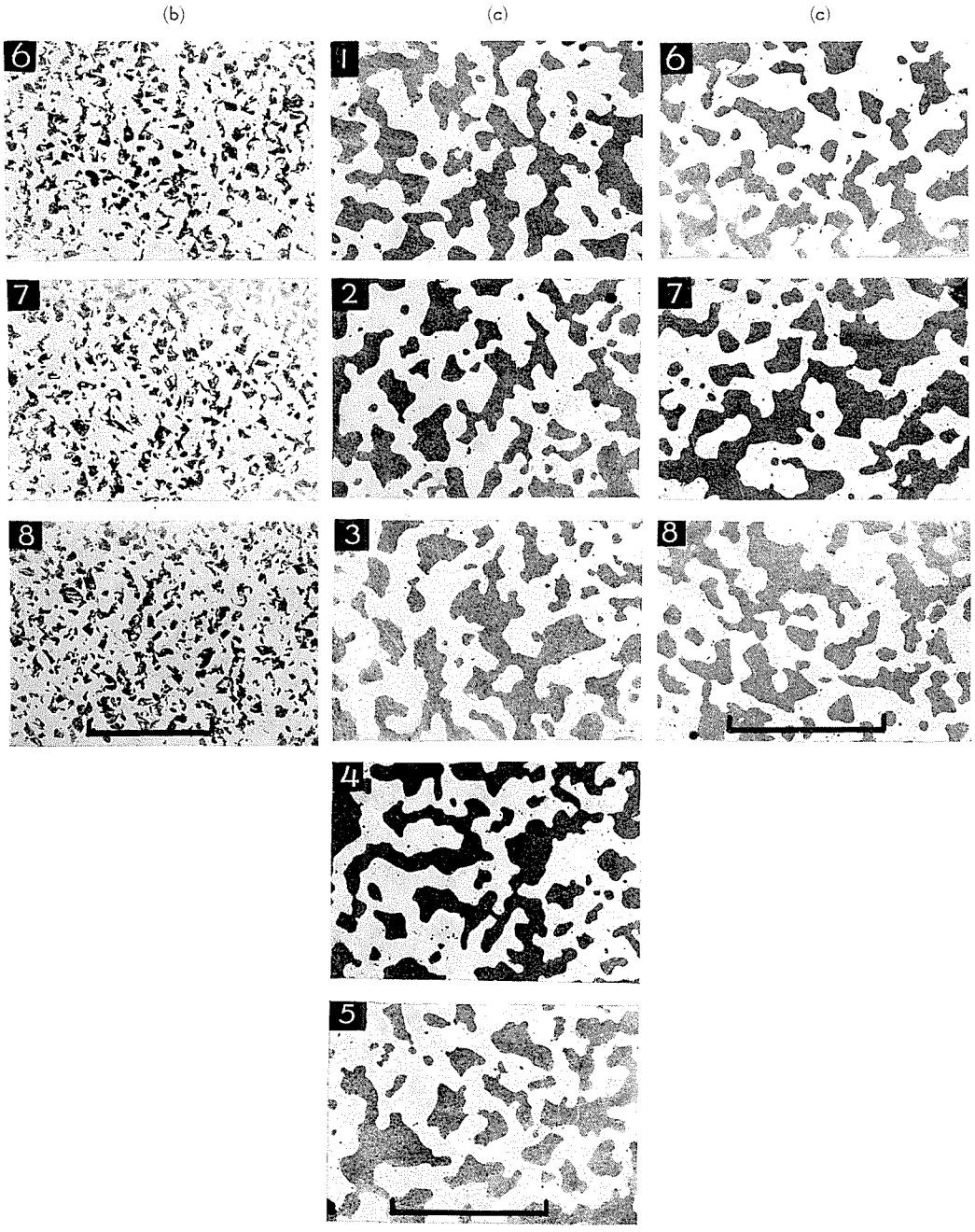
図 版 説 明

L と d を決めるために使われた各雪質の両断面。

(a), (b), (c) はしんせつ，しもざらめゆき，ざらめゆきである。各雪質の 1～5 番は水平切断面，6～8 番は鉛直切断面である。しんせつ，しもざらめゆき，ざらめゆきを，各々 0.2 mm, 0.45 mm, 0.7 mm の厚さで削った連続切断面である。各列の一番下の写真につけた黒枠が 1 cm で，(a) の 1～5, 6～8, (b) の 1～5, 6～8, (c) の 1～5, 6～8 はそれぞれ同じ倍率

(a)　(a)　(b)




(b)
(c)
(c)
6
1
6
7
2
7
8
3
8
4
5