



Title	積雪の通気抵抗 IV : 積雪の通気度
Author(s)	清水, 弘; SHIMIZU, Hiromu
Citation	低温科学. 物理篇, 19, 165-173
Issue Date	1960-12-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17974
Type	departmental bulletin paper
File Information	19_p165-173.pdf



積雪の通気抵抗 IV*

— 積雪の通気度 —

清水 弘

(低温科学研究所 気象学部門)

(昭和 35 年 7 月受理)

I. まえがき

以前、著者らは積雪の通気抵抗 σ と、密度 ρ_s の関係をしらべた¹⁾。これによると σ - ρ_s ダイアグラムは、雪質によつて3つの領域に分布することがわかつた(第1図)。しかし、雪質の定義は主観的なものであり、殊にその境界は不明確なものである。又、密度の等しい積雪に於いて σ の大きな分散が見られたが、これの量的な説明はできなかつた。

その後、積雪の薄片又は断面観察の方法が考案され^{2),3)}、積雪の内部構造がしらべられるようになった。筆者は Red Paste³⁾ による断面観察を利用して、この σ の分散の説明を試みた。

尚、これまで通気抵抗 σ なる量を考へてきたが、今後は通気度 B なる量を取扱ふことにする。 B は、多孔物体内の流体の流れに関する Darcy の法則により次のように定義する。

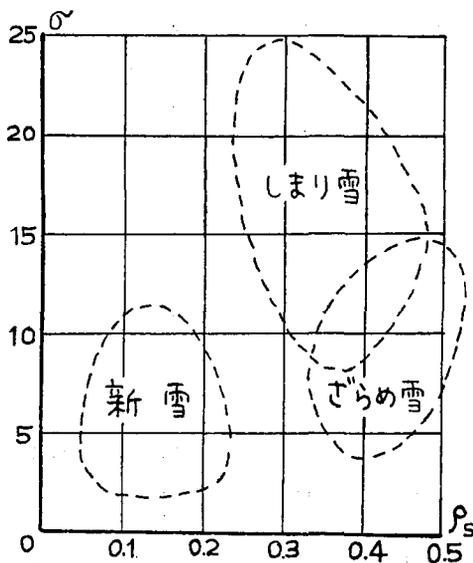
$$B = \frac{1}{\sigma} = \frac{v}{dP/dx} \quad (1)$$

dP/dx = 積雪内の圧力勾配 [dyne/cm³]

v = 流速 [cm/sec] 圧力勾配に垂直な単位断面積を単位時間に通過する流量

B = 通気度 [cm·sec⁻¹/dyne·cm⁻³]

この測定にはポータブルフローメーターを用いた。その原理は、既に報告した σ メータ⁴⁾



第1図 通気抵抗 σ と積雪密度 ρ_s との関係

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 562 号

と同じであるが、その後小型軽量化され (大きき約 $7\text{ cm} \times 17\text{ cm} \times 20\text{ cm}$, 重量約 1 kg), 操作及び測定精度が改良された。

II. 測定結果

試料は 1959 年 2 月, 3 月に於ける北海道北母子里と昆布の積雪を用いた。

各試料について, 通気度 B , 積雪密度 ρ_s を測定した。更に測定後の試料から積雪小塊 (大きき $15\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 5\text{ mm}$) を切り出して Red Paste で固定し, 低温室に持帰つて片面研磨による断面観察をした。観察法は顕微鏡写真を用いて, 単位断面積内に含まれる積雪粒子数 n を測定した (第 1 表)。

第 1 表 測 定 値

試料	等密度 グループ	ρ_s	ϵ	B (c.g.s)	n (個/cm ²)	ϵ/n (cm ²)	ρ_s/n (cm ²)
M 5	A	0.45	0.51	7.2×10^{-2}	216.2	2.35×10^{-3}	2.01×10^{-3}
6	A	0.43	0.53	6.7	256.1	2.06	1.68
7	A	0.43	0.53	4.8	333.4	1.59	1.29
8	A	0.45	0.51	4.8	283.7	1.80	1.58
9	F	0.22	0.76	11.2	309.8	2.45	0.71
10	F	0.22	0.76	12.4	305.7	2.49	0.72
11	E	0.26	0.71	11.8	291.0	2.44	0.89
12	D	0.33	0.64	6.8	376.0	1.70	0.88
13	C	0.35	0.62	5.5	412.5	1.48	0.85
14	C	0.37	0.60	6.8	300.8	2.00	1.23
15	B	0.39	0.58	4.4	408.7	1.42	0.96
16	C	0.37	0.60	6.8	390.2	1.54	0.95
17	D	0.33	0.64	7.0	357.7	1.79	0.92
18	B	0.41	0.56	9.7	222.2	2.52	1.86
19	D	0.31	0.66	14.4	199.3	3.31	1.56
21	C	0.35	0.62	7.1	334.4	1.86	1.05
22	C	0.36	0.61	5.2	412.5	1.48	0.87
23	B	0.41	0.55	4.2	404.6	1.36	1.01
28	C	0.35	0.62	5.5	463.0	1.34	0.76
29	D	0.30	0.67	8.4	354.9	1.89	0.85
30	E	0.24	0.74	13.9	260.0	2.85	0.92
31	F	0.21	0.77	13.9	286.1	2.69	0.73
32	D	0.30	0.67	8.2	347.2	1.93	0.86
33	B	0.48	0.48	5.8	294.5	1.63	1.63
34	B	0.40	0.57	12.1	156.2	3.65	2.55
35	D	0.33	0.64	13.7	179.8	3.56	1.84
36	A	0.45	0.51	4.4	287.6	1.77	1.56

試料	等密度グループ	ρ_s	ϵ	B (c.g.s.)	n (個/cm ²)	ϵ/n (cm ²)	ρ_s/n (cm ²)
M37	A	0.44	0.52	6.2×10^{-2}	229.8	2.26×10^{-3}	1.91×10^{-3}
38	B	0.41	0.55	7.9	196.1	2.80	2.09
39	A	0.44	0.52	4.5	331.8	1.57	1.32
40	B	0.40	0.57	6.1	343.8	1.66	1.16
41	B	0.39	0.58	5.8	330.9	1.75	1.18
42	B	0.39	0.58	4.6	450.0	1.29	0.87
43	C	0.37	0.60	6.4	337.5	1.78	1.10
44	D	0.33	0.64	7.0	357.6	1.79	0.92
45	D	0.31	0.66	6.8	412.3	1.60	0.75
46	E	0.26	0.71	11.0	302.2	2.35	0.86
47	E	0.25	0.72	10.0	359.9	2.00	0.69
K17	B	0.42	0.54	14.2	134.0	4.03	3.13
18	A	0.45	0.51	5.6	217.9	2.34	2.06
19	A	0.47	0.49	6.0	250.8	1.95	1.88
20	A	0.46	0.50	7.1	191.1	2.62	2.41
21	B	0.40	0.57	4.7	401.6	1.42	1.00

III. 等密度グループと多孔構造及び粒度

半径 r_0 、長さ L の真直な円管内の流れは Poiseuille の法則により次のように表わされる。

$$Q = \frac{\pi r_0^4}{8\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (2)$$

Q = 流量 [cm³/sec]

μ = 流体の粘性係数 [poise]

ΔP = 圧力差 [dyne/cm²]

この管が n 本束になった場合は

$$Q = n \frac{\pi r_0^4}{8\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (3)$$

となり、通気度は前の定義により

$$B = n \frac{\pi r_0^4}{8\mu} = \frac{n\pi r_0^2}{8\mu} r_0^2 \quad (4)$$

で現わされる。

単位長の試料について考えると多孔度 ϵ は

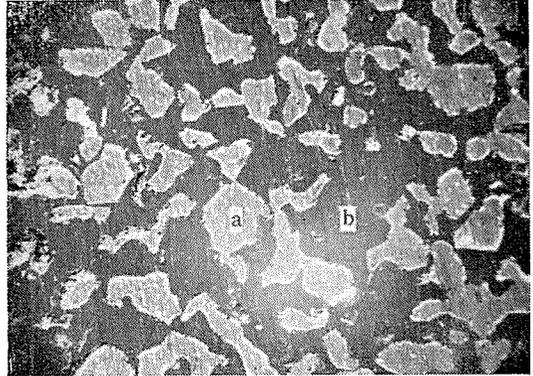
$$\epsilon = n\pi r_0^2 \quad (5)$$

であるから、(4)は

$$B = \frac{\epsilon}{8\mu} r_0^2 = \frac{1}{8\pi\mu} \frac{\epsilon^2}{n} \quad (6)$$

となり、等多孔度の試料でも構成円管の細いものほど通気度の小さいことがわかる。

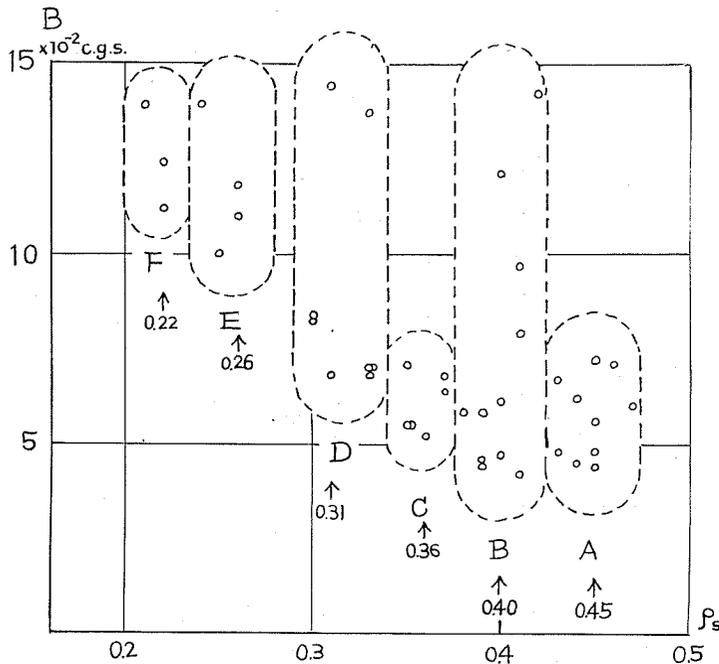
積雪の多孔構造は複雑で、これを簡単な等価模型におきかえることは難しい。第2図は、Red Paste 法の片面研磨片による積雪の断面であるが、その空孔は縦横に連結して網目構造をなしている。これに対して、いわゆる積雪粒子もアイスブリッジでつながれた網目構造をなしている。ここで積雪の多孔構造の等価模型を曲管の束と考



第2図 Red Paste 法による積雪断面
 $\rho_s = 0.36$ ($\times 11$)
 a: 積雪粒子 b: 空孔部

えてみよう。そして、その曲管の平均的な太さを、第1近似として次のように定義する。積雪の単位断面積に平均 n 個の積雪粒子が含まれている場合、その空孔部分も n 個の小部分に分割されて居り、その平均的な断面積は ϵ/n である。ここで ϵ は多孔度を表わし、次のように定義される。

$$\epsilon = \frac{V_s - V_i}{V_s} = 1 - \frac{\rho_i}{\rho_s} \quad (7)$$



第3図 密度 ρ_s と通気度 B の関係、及び等密度グループ

V_s = 積雪の体積

V_i = 氷の体積

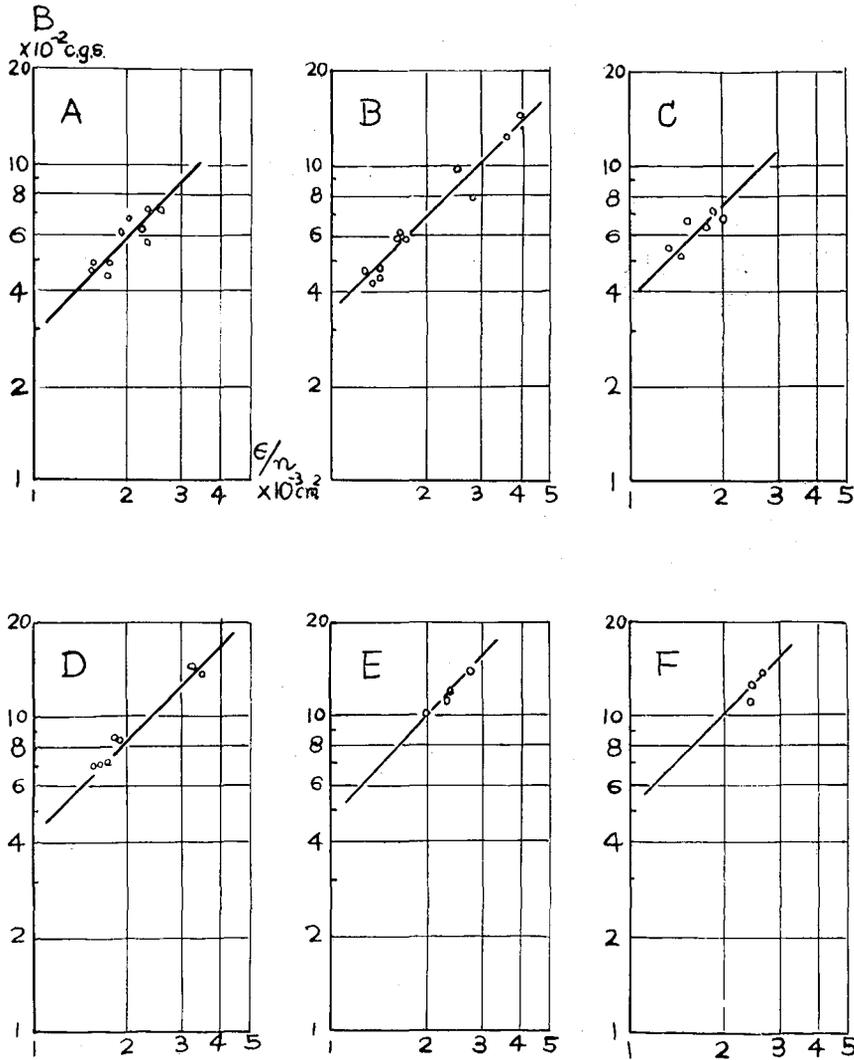
ρ_i = 氷の密度 = 0.92 gr/cm³

このような管の太さの定義は、等密度試料に於いて積雪粒子が小さくてその数が多いときは、細い空孔が多数存在することを示している。

多孔度は本来体積計算によるものである。しかし多孔構造が完全に無秩序であるならば、任意の断面についての面積多孔度は全体についての体積多孔度と完全に一致し、無秩序でない場合でも面積多孔度の平均

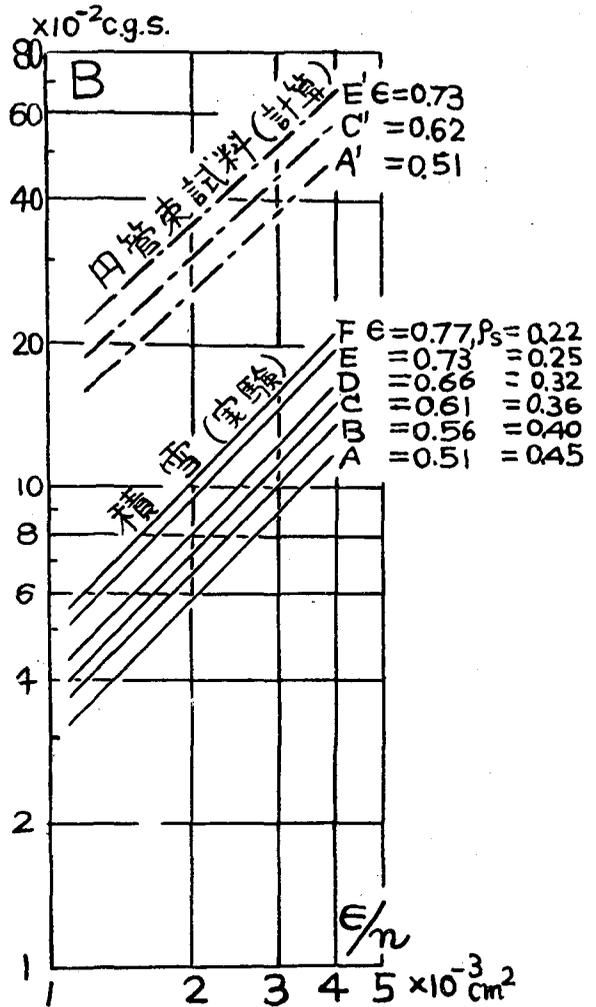
値はやはり体積多孔度と一致する。

そこで、Red Paste で固定した各試料について 15~20 枚の断面を片面研磨法によつて顕微鏡観察をし n を測定した。又、多孔度 ϵ を (7) より積雪密度から計算して、 ϵ/n を求めた。(第 1 表) そして、等多孔度試料における通気度の分散をしらべるために、全試料を第 3 図のように大体密度の等しい 6 つのグループ A, B, C, …… F に分け、各グループについて通気度と空孔の太さの関係をしらべた。これを第 4 図に示す。



第 4 図 各密度グループについての、通気度 B と管径 ϵ/n の関係

この結果をまとめたのが第5図の実線であるが、各等密度グループ A, B, C, …… について、空孔が細くなると多孔度が等しくても通気度の減少することがわかる。尚第5図の鎖線 A', C', E' は, A, C, E, と等しい多孔度の真直な円管束試料の通気度と管の太さとの関係を計算によつて求めたものである。これによると、等多孔度の積雪と円管束試料とをしらべると、積雪の通気度は円管束試料の約 1/4 であることがわかる。これは等価模型として円管束試料を構成するとき積雪の断面にあらわれる1つの粒が1つの円管を伴なうと考えたからで、もし1つの粒子が2個又はそれ以上の円管を伴なうとし(粒子が正三角形の網目の頂点にあるとすれば、1個の粒子は2個の空孔を伴なう。又、空孔の断面が円形でない場合、等価模型として何本かの細管でおきかえて考える)、円管の曲りくねりのために長さは試料の厚さの1.5~2倍になるものとすれば、このような円管束試料の通気度は、かなりその積雪の通気度に近い値を示すことになるであろう。

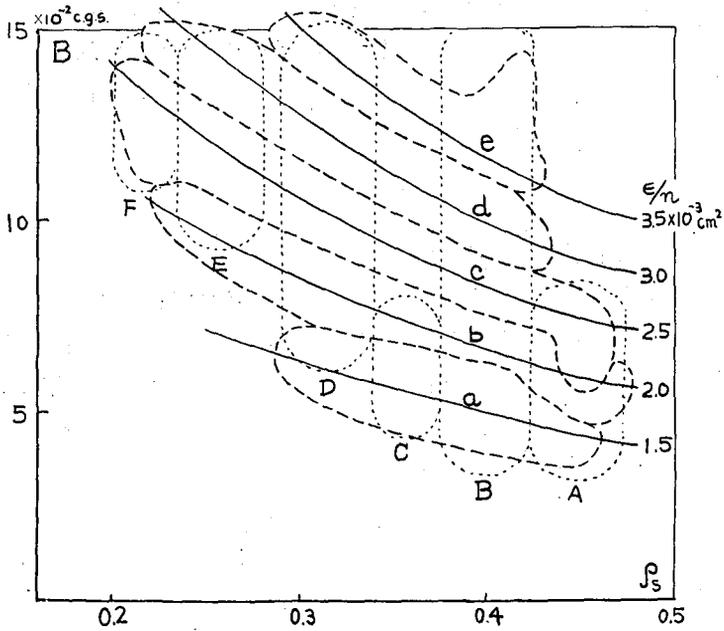


第5図 管径と通気度との関係

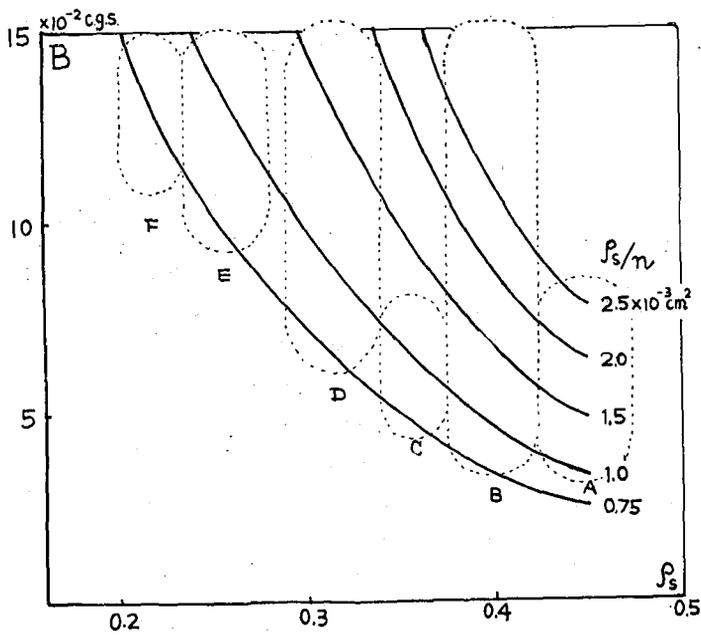
又、積雪の $B \sim \epsilon/n$ 関係の勾配は円管束試料にくらべてやや急である。これは積雪の場合同じ ϵ に対して n が増加すると、即ち曲管が細くなると、その屈曲や壁の凹凸が隘路を作り易いことを示していると考えられる。尤も、この傾向は空孔が細くなつたとき顕著に現われるから、 $B \sim \epsilon/n$ 関係は単純な直線関係ではないと思われるが、そのことについては更に精密な実験に俟たなければならない。

以上の関係を用いて、第2図の $B - \rho_s$ 関係に管径 ϵ/n をパラメーターに書入れたのが第6図である。このパラメーターにより、各等密度グループ A, B, …… F は更に等管径グループ a, b, …… e に分けられる。

又、積雪粒子の粒径について通気度の分散を考えてみよう。管径の場合と類似な考え方に



第6図 管径 ϵ/n を媒介変数としたときの、積雪密度 ρ_s と通気度 B の関係
A, B, …… F は等密度グループ。a, b, …… e は等管径グループ



第7図 粒度 ρ_s/n を媒介変数としたときの、積雪密度 ρ_s と通気度 B の関係

より、積雪の断面に於ける2次元的な密度は、少なくとも平均的には ρ_0 に等しくなる。平均粒度を ρ_0/n と定義して、第2図の $B-\rho_0$ 関係にパラメーターとして導入すると第6図の関係が得られた。これを用いれば、密度と通気度を測定することにより、積雪の平均粒度を推定することができる。

IV. む す び

積雪は、いわゆる積雪粒子がアイスブリッジで連結された網目構造を形成している。従つて断面観測の場合、粒子として測定されたものの中にはアイスブリッジの切口なども含まれるし、又、完全に独立した積雪粒子たるものは存在し得ない。そのため積雪粒子という用語はその意味に不明確さを含む。しかし、積雪の構造を考える場合、いわゆる粒子構造を考えることが好都合な場合もあるので、条件付で粒子の取扱いをした。前節の最後に述べた粒度 ρ_0/n についてもその点の考慮が必要である。

最後に、この研究にあつて直接御指導をいただいた大浦教授と、吉田教授を中心とする低温研究所雪氷グループの方々に深く感謝の意を表する。

文 献

- 1) 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.
- 2) 清水 弘 1958 Red Paste 法による積雪の薄片 I. 低温科学, 物理篇, **17**, 81.
- 3) 木下誠一・若浜五郎 1959 アニリン固定法による積雪の薄片. 低温科学, 物理篇, **18**, 77.
- 4) 石田 完・清水 弘 1956 積雪の通気抵抗 II. ポータブル σ メーター. 低温科学, 物理篇, **15**, 63.

Résumé

Air permeability of deposited snow has been studied. It has been found that snow masses having the same density ρ_0 do not always show the same permeability. In this paper, this phenomenon is analysed in every detail. First a simple model was considered instead of actual snow. It was a bundle of straight circular pipes, each of them with a radius of r_0 , and length of L . The number of pipes in unit area of a cross section was n . The flow of fluid in a pipe is determined by Poiseuille's law.

$$Q = \frac{\pi r_0^4}{8\mu} \cdot \frac{4P}{L}$$

Q is the flow rate of fluid in cc per unit time, μ is the viscosity of it in poise and $4P$ is the pressure difference between the two ends of the pipe in dynes per cm^2 . The permeability B of this bundle of pipes is defined as follows:

$$B = \frac{nQ}{\frac{4P}{L}} = \frac{n\pi r_0^4}{8\mu} = \frac{\epsilon}{8\mu} r_0^2 = \frac{1}{8\pi\mu} \cdot \frac{\epsilon^2}{n}$$

where

$$\epsilon = n\pi r_0^2$$

ϵ is the porosity which is defined as the ratio of the volume of pore to the volume of the whole porous body. For actual snow $\epsilon = 1 - \rho_s/\rho_i$, where ρ_i is the density of ice; therefore snow masses having the same density have the same porosity. It can be seen in this equation that B decreases rapidly as r_0 decreases even in the case when ϵ is constant. B changes in proportion to the cross sectional area of a pipe ϵ/n .

The number n for a model corresponding to a real snow sample was determined under the following assumption that n is the same to the number of snow particles per unit area of cross section of deposited snow. A cross section of deposited snow was obtained by the aid of the red paste method²⁾ and the number of snow particles was counted on the photomicrograph of the section.

The author arranged all snow samples according to their density into six equi-density groups A, B, ..., F. For each group of snow sample, B changes nearly in proportion to ϵ/n as was also found for the model. This relation is shown in Figs. 4 and 5. They show the fact that for the snow having the same density, or ϵ , the smaller the size of snow particle, the lower the air permeability. This relation was plotted in the $B-\rho_s$ diagram and obtained as shown in Fig. 6. By the use of this relation one can presume the average pore size of deposited snow only from its B and ρ_s .

By analogous consideration, using average particle size of deposited snow ρ_s/n instead of pore size as the parameter of $B-\rho_s$ relation, the average particle size of deposited snow can be estimated only from its B and ρ_s as shown in Fig. 7.