



Title	積雪の通気抵抗 (第1報)
Author(s)	石田, 完; ISHIDA, Tamotsu; 清水, 宏 他
Citation	低温科学. 物理篇, 14, 33-42
Issue Date	1955-12-30
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17896">https://hdl.handle.net/2115/17896</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	14_p33-42.pdf



## 積雪の通気抵抗\* (第I報)

石田 完 清水 弘

(低温科学研究所気象部門)

(昭和30年10月受理)

### I. ま え が き

積雪の中を空気がどの程度通るかと言うことについては、黒田・工藤・松下<sup>1),2)</sup>の測定がある。ここで通気度は、一定量の空気が一定量の積雪中を通過する時間によつてあらわされている。外国の例では、E. Meyer-Peter と P. Niggli<sup>3)</sup>は積雪の性質をあらわす一つの基本量として、他の測定と同時に通気度を必らず求めているが、ここで言う Luftdrucklässigkeitsziffer と云うのは、積雪層の中に空気の単位の圧力勾配を与えたとき、生ずる空気の流れの速度をもつてしている。我々は積雪の音響の性質を調べてゆく上に、積雪中を空気が定常的に流れるときの抵抗を知らなければならなくなつたので、この通気度、或いは通気抵抗の測定を試みたのであるが、これを測定してゆくうちに、E. Meyer-Peter 等の例に見られるように積雪の通気度、或いは通気抵抗は、積雪の密度と同じように、或いはそれ以上に重要な積雪の基本的な物理量であることが判り、今後その測定方法を確立してゆくための準備としてもこの研究を進めたのである。

積雪中の空気の通り具合をあらわす量としては、前述のように今まで色々な量が定義されているが、我々はその量を通気抵抗  $\sigma$  として次の如く定義した。すなわち、積雪中に一定断面積で長さ  $L$  cm の筒を考え、その両端の面に空気の圧力差  $4P$  dyne/cm<sup>2</sup> をあたえたとき、生ずる筒の軸方向の定常的な空気の流れの速度 (= 単位時間の流量/断面積) を  $v$  cm/sec とすると、次の関係が得られるとした。

$$\frac{4P}{L} = \sigma \cdot v \quad (1)$$

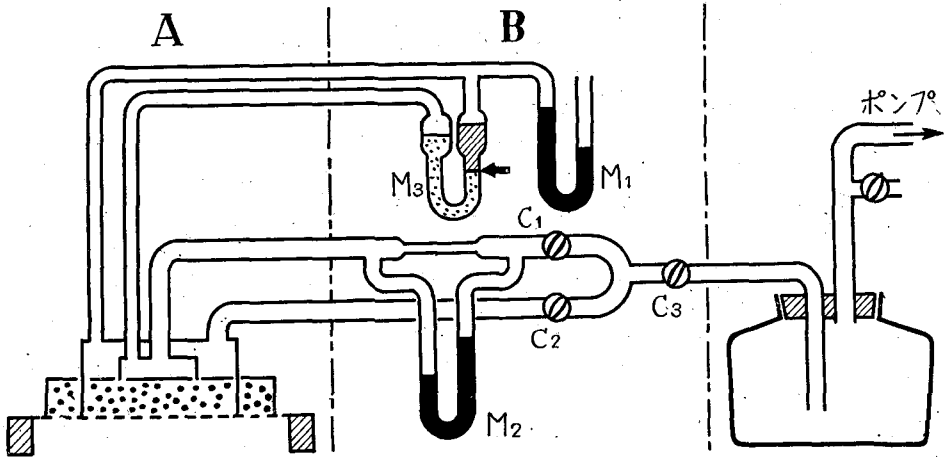
従つて、通気抵抗  $\sigma$  の単位は g/sec·cm<sup>3</sup> である。(1)式は一般に Darcy の法則とよばれているが、これは色々な種類の多孔物質について、Reynolds 数  $Dv\rho/\eta$  ( $D$ : 物質粒子の平均直径, cm,  $v$ : 流体の速度, cm/sec,  $\rho$ : 流体の密度, g/cm<sup>3</sup>,  $\eta$ : 流体の粘性係数, poise) が 1 以下であれば

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第 289 号

よく成立つことが知られている<sup>4)</sup>。積雪に於ても、我々の測定で(1)式が満足されることが判つた。

## II. 測定装置

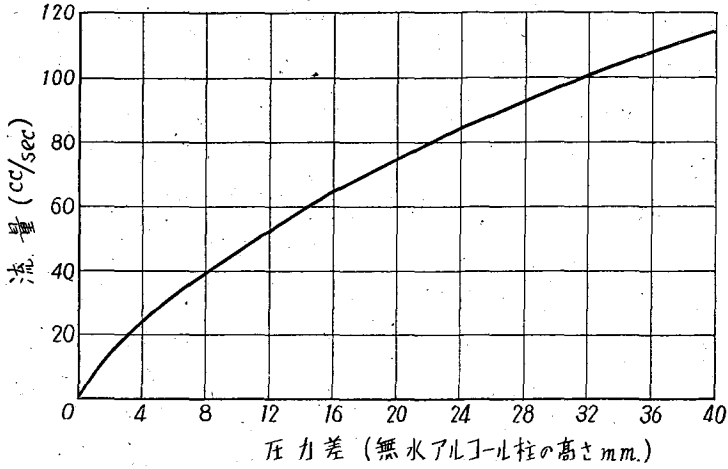
装置全体の模式図を第1図に示す。Aは資料をセットする部分の断面図で、金網を張つた台の上に、サンプラーによつて積雪から切りだされた厚さ5.5 cm, 縦, 横夫々30 cmの方形板状の資料を乗せる。その上に真鍮製の二重になつた円筒形の腕をかぶせる。外側の腕は直径20 cmで、これを縁が金網に達するまで資料に押込むと、内側の直径10 cmの腕は、その縁が資料に丁度5 mmだけ食込むようになってゐる。そこで $C_1 \cdot C_2 \cdot C_3$ のcockを適当に開いて真空ポンプで引くと、資料の下面から資料を通つた空気は、内側の腕と外側の腕とに分れて流れるが、そのときcock  $C_1$ と $C_2$ を調節して、内・外の腕の中の圧力を全く等しくする。その平衡



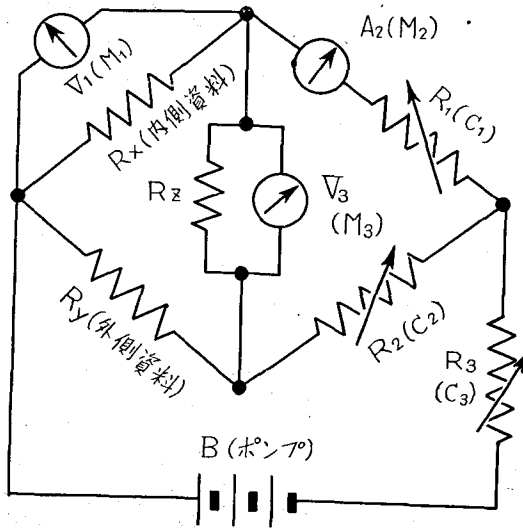
第1圖 測定装置の模式図

は圧力計  $M_3$  で見るが、これは無水アルコールとシリコン DC 200 F (10 c.s.) とによる二液圧力計で、その感度は  $14 \text{ dyne/cm}^2$  の圧力差で二液の境界面が  $1 \text{ mm}$  移動する程度である。内・外の腕内の圧力が等しくなつた所で、資料の両端面にかかる圧力差は圧力計  $M_1$  (ゲッチングン型圧力計) で読み、内側の腕から引かれる空気の流量、すなわち、厚さ 5.5 cm, 断面積  $5^2\pi \text{ cm}^2$  の円筒形の資料を通過する空気の流量は流量計  $M_2$  で測る。流量計は内径 3 mm, 長さ 10 cm のガラス管の両端の圧力差をゲッチングン型圧力計で測るもので、圧力計の指数と流量との関係は、肺活量計によつて較正した (第2図)。

このような二重腕を用いた目的は、単に資料を円筒形の容器に入れただけでは、積雪中の構造とは異なつた、資料と容器壁との間に来る通気抵抗が、資料自身の通気抵抗に並列に加わることを避けるためである。この装置の動作を理解するために、等価な電気回路におきかえて見ると第3図のようなブリッジ回路になる。圧力差を電位差、気流を電流におきかえると、



第2圖 流量計の較正曲線：流量と圧力計の指度との関係



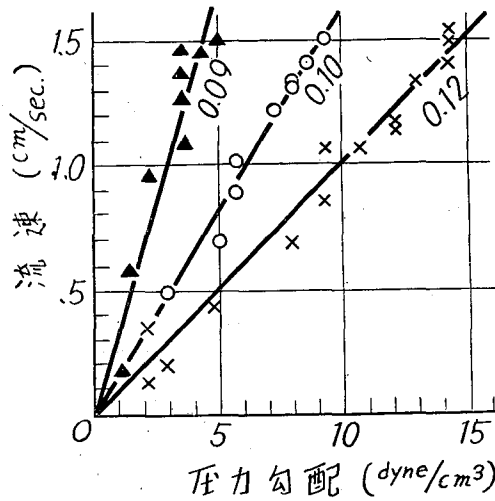
第3圖 測定装置と等価な電気回路

通気抵抗は電気抵抗におきかえられる。すなわち、 $R_x$  は容器内の内側の資料の通気抵抗、 $R_y$  は容器内の外側の資料の通気抵抗、 $R_z$  は内側と外側の資料の間の通気抵抗、 $R_1 \cdot R_2 \cdot R_3$  は夫々、コック  $C_1 \cdot C_2 \cdot C_3$  の通気抵抗に相当する。 $R_1 \cdot R_2$  を調節して  $V_3$  の電位差を零にすると、 $R_z$  が有限であつても、そこを流れる電流がないから、 $R_2$  の影響がなくなる。そこで  $V_1$  の電位差と  $A_2$  の電流から  $R_z$  を求めるわけである。

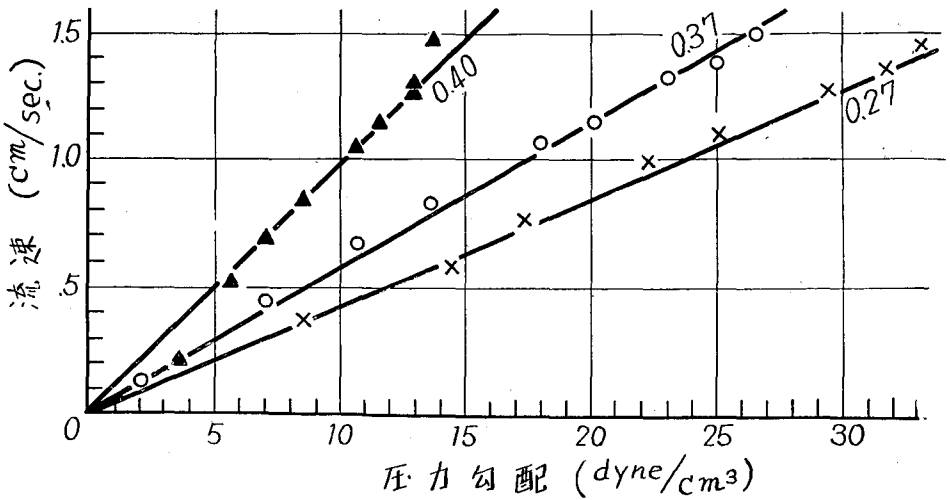
### III. 実験の結果

実験の準備の関係で、資料は1955年3月2日から4月6日の間に降つた新雪、或いはその間に積つていた積雪から取つた。実験中の気温は大体、 $-2^{\circ}\text{C}$  から  $-5^{\circ}\text{C}$  であつたが、さら

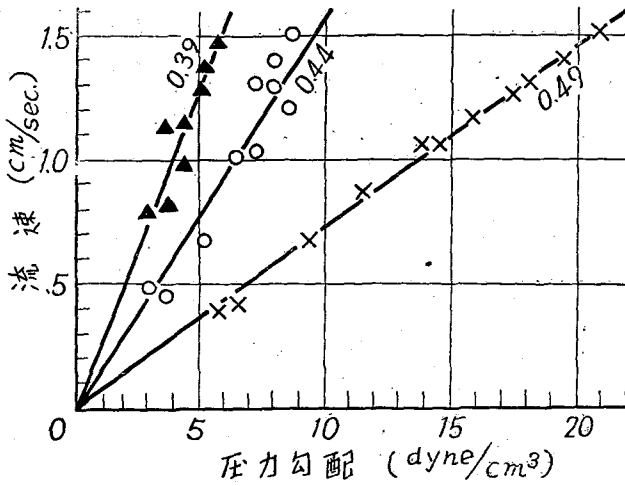
めゆきの場合では+9°Cのこともあつた。その時でも、装置の資料を置く部分(第1図のAの部分)のまわりは厚い雪の壁で全体を覆つて、その気温は0°C以上にならないように注意した。実験結果のうち、いくつかの例が第4・5・6図であるが、資料を外見上から大体、しんせつ・しまりゆき・ざらめゆきの三つに分類して示した。一つの資料については、圧力差を大体10点かえて流速を測つた。その間に要する時間は10分間位である。これを見ると、圧力勾配が15  $\text{dyne/cm}^2$ 位までは Darcy の法則をよく満足していることが判る。通気抵抗 $\sigma$ は第4図ないし第6図の直線の傾斜から求められる。このようにして今迄に得られたすべての通気抵抗と、その資料の密度との関係を図示すると第7図のようになる。これから定性的に雪質と通気



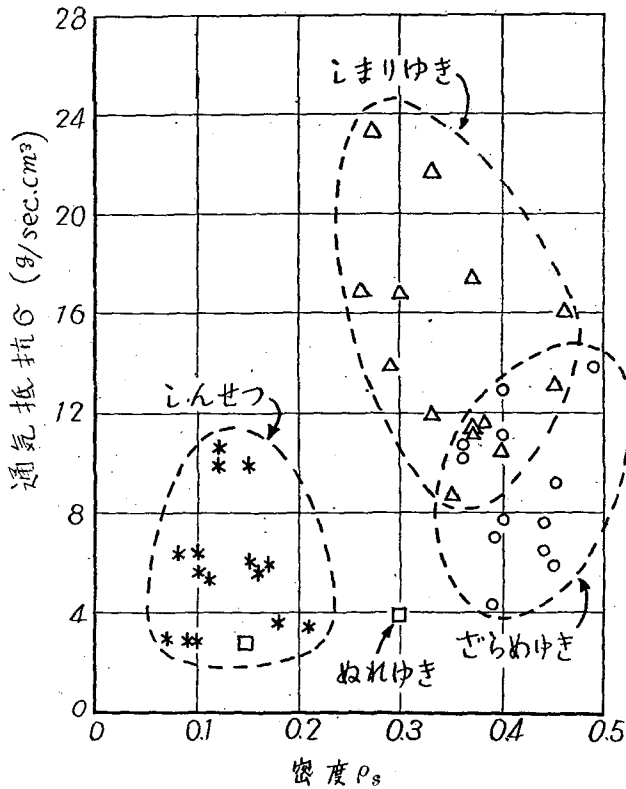
第4図 しんせつ(密度0.09, 0.10, 0.12) に対する流速と圧力勾配との関係



第5図 しまりゆき(密度0.27, 0.37, 0.40) に対する流速と圧力勾配との関係



第6圖 ざらめゆき (密度 0.39, 0.44, 0.49) に対する流速と圧力勾配との関係



第7圖 積雪の通気抵抗と密度との関係

第 1 表

雪 質	密 度	通気抵抗
しんせつ	小	小
しまりゆき	中	大
ざらめゆき	大	中

抵抗との関係をまとめてみると第1表のようになるが、更に測定数をふやせば、もつとこまかい雪質の分類と通気抵抗との関係を求めることが出来るであろう。

以上の結果はすべて、空気を積雪層に垂直に通した場合であるが、積雪の構造上から、層に平行な通気抵抗と、垂直な通気抵抗とは明らかに異なるであると想像されるので、その実験も試みた。しかし同じ資料について、層に平行な場合と、垂直な場合の両者の通気抵抗を測ることは出来なかつたので、出来るだけ同一な積雪と思われる二つの資料を用いるわけであるが、そのことが困難であつたため、これまでには、まだ少数の結果しか得られていない。その例を第2表に示すが、同一の層に於ても、大体鉛直方向より、水平方向の方が空気が通りやすいようである。当然のことであるが、しまりゆきの中にざらめゆきの薄い層があるような資料では、鉛直方向の通気抵抗は、しまりゆきの大きな通気抵抗と、ざらめゆきの小さな通気抵抗とが直列になつてい

と考えられるから、殆んどしまりゆきのものと同じ大きな通気抵抗であるが、水平方向の通気抵抗は、しまりゆきの大きな抵抗と、ざらめゆきの小さな抵抗が並列になり、全体ではざらめゆきと同じ程度の小さな通気抵抗になつて、鉛直方向・水平方向で通気抵抗に大きな差が出る。

第 2 表

雪 質	密度	通 気 抵 抗	
		垂直方向	水平方向
しまりゆき	0.26	16.8	9.9
しまりゆき	0.13	23.2	13.1

IV. 積雪粒子の比表面積と有効直径

一定の断面形 (面積  $f$ ) を持つ、長さ  $L_e$  の細管の中を流体が定常的に流れる場合、その管の両端に  $\Delta P$  の圧力差が与えられたときの流速  $v_p$  (Poregeschwindigkeit) は層流域では

$$v_p = \frac{m^2}{K_0 \eta} \frac{\Delta P}{L_e} \tag{2}$$

となることは、よく知られている。ここで  $\eta$  は液体の粘性係数、 $m$  は mean hydraulic radius とよばれるもので

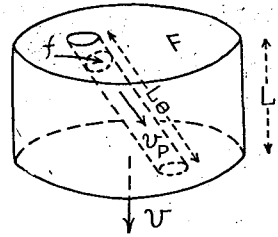
$$m = \frac{\text{管の断面積}}{\text{断面の周囲の長さ}}$$

である。例えば、半径  $r$  の円形の断面では  $m=r/2$  となる。 $K_0$  は断面の形だけによつて定まる無次元の数で、円形断面では  $K_0=2$ 、その他の断面形では第3表のような値をとる。

第 3 表

	円 環 (径比=2)	楕 円 (径比=2)	正 方 形	正 三 角 形
$K_0$	2.976	2.222	1.775	1.667

次に断面積  $f$ 、長さ  $L_e$  の細管が  $n$  本たばねられたような構造の多孔物質を考えて見る (第8図)。その断面積は  $F$ 、長さは  $L$  で、その両端面に  $\Delta P$  の圧力差が与えられたとき、この多孔物質を単位時間に通過する流量を断面積  $F$  で除した速度  $v$  (Filtergeschwindigkeit) は次の式で与えられねばならない。



第8圖

$$v = v_p \cdot p \cdot \frac{L}{L_e} \quad (3)$$

ここで、 $p$  は多孔度であつて、考えている多孔物質全体の体積を  $V$ 、その多孔物質の実質部分の体積を  $V'$  とすれば

$$p = \frac{V - V'}{V} \quad (4)$$

であるが、今、全体の体積は  $V = F \cdot L$  で空孔の体積は  $V - V' = n(L_e/L) \cdot f \cdot L = n \cdot L_e \cdot f$  であるから次の関係式をうる。

$$\frac{nf}{F} = p \cdot \frac{L}{L_e} \quad (a)$$

今、多孔物質を単位時間に通過する流量を  $Q$  とすれば

$$Q = v \cdot F = v_p \cdot nf \quad (b)$$

であるから、この (a) と (b) を組合せば (3) 式が得られる。

次に、この多孔物質の場合の mean hydraulic radius を計算するために、比表面積  $S$  を導入する。 $S$  は多孔物質単位質量あたりの、流体が接する表面積であつて、単位は  $cm^2/g$  である。mean hydraulic radius  $m$  は空孔の全体積と、空孔の全表面積との比とも考えられるから、実質部分の密度を  $\rho_s$  とすると

$$m = \frac{p \cdot V}{S \cdot \rho_s (1-p) V} = \frac{p}{S \rho_s (1-p)} \quad (5)$$

となる。(2)・(3)・(5) 式を組合せると、筒状の多孔物質を、筒の軸方向に流れる流体の速度 (Filtergeschwindigkeit) は次の式のようになる。

$$v = \frac{1}{K \cdot \eta} \cdot \frac{p^3}{S^2 \rho_s (1-p)^2} \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (6)$$

ここで、 $K$  は

$$K = K_0 (L_e/L)^2 \quad (7)$$

であつて、Kozeny の常数とよばれる。(6) 式は、一定の断面の細管が軸と一定の角度をなしてたばねられたような筒状の多孔物質について導かれたものであるが、粒状の物質の集りであるような多孔質、例えば砂のようなものに対しても、よくあてはまることが実験的に確かめられ

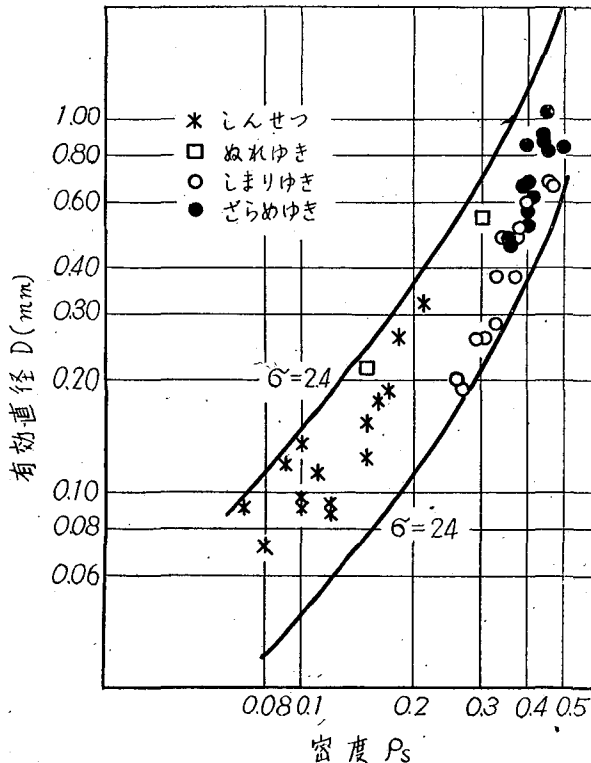
ている<sup>5)</sup>。粒状物質の場合には  $K=5$  であり<sup>6)</sup>、他の繊維状の多孔質では  $K=5\sim 6$  であるといわれている<sup>6)</sup>。

我々の積雪の場合に於ても、(6)式があてはまるものとして、積雪の比表面積  $S$  を計算してみた。 $S$  は(1)と(6)から

$$S = \sqrt{\frac{\sigma}{K\eta\rho_i^2} \cdot \frac{p^3}{(1-p)^2}} \tag{8}$$

であつて、積雪の通気抵抗  $\sigma$  の測定値から求められる。ここで、空気の粘性係数 ( $0^\circ\text{C}$ )  $\eta=1.7 \times 10^{-4}$  poise、氷の密度  $\rho_i=0.9$ 、 $K=5$  とした。多孔度  $p$  は積雪の密度を  $\rho_s$  とすると、 $p=1-(\rho_s/\rho_i)$  から求めた。 $S$  の値は、ざらめゆきの  $70 \text{ cm}^2/\text{g}$  から、しんせつの  $900 \text{ cm}^2/\text{g}$  の範囲であつた。尚、他の物質では、 $S$  は unbeaten pulp で平均  $3800 \text{ cm}^2/\text{g}$ <sup>6)</sup>、砂で  $300\sim 10,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ <sup>7)</sup> である。

ひとつの積雪を、すべて直径の等しい氷の球の集りであると仮定すると、比表面積  $S$  から、そのような有効直径  $D$  (単位  $\text{mm}$ ) を計算することが出来る。今、 $1 \text{ g}$  の積雪中に直径  $D \text{ mm}$  の氷の球が  $n$  箇ふくまれているとすると、そのような球の全体積と全表面積との比は



第 9 圖 積雪粒子の有効直径と密度との関係

$$\frac{\frac{\pi}{6} D^3 \times 10^{-3}}{\pi D^2 \times 10^{-2}} = \frac{1}{S} \frac{1}{\rho_i}$$

であるから

$$D = \frac{60}{\rho_i} \cdot \frac{1}{S} = \frac{200}{3S} \text{ (mm)} \quad (9)$$

となる。第7図の通気抵抗  $\sigma$  から有効直径  $D$  を求めて、資料の密度との関係をあらわしたのが第9図である。図に示した二つの曲線は通気抵抗  $\sigma = 2.4 \text{ g/sec} \cdot \text{cm}^3$  と  $\sigma = 24 \text{ g/sec} \cdot \text{cm}^3$  の場合の計算値であつて、今までに得られた積雪粒子の有効直径は、この二曲線の間に分布する。

## V. む す び

二重椀の資料容器を用いて、自然の積雪にかなり近い状態で雪の通気抵抗を測ることが出来た。この通気抵抗、或いはそれから計算によつて得られる比表面積、又は有効直径は雪質の分類によつて非常に有効な量であると思われるが、まだ資料数が不足なため決定的なことは云えない。測定装置を更に実用的にするためには資料の容器を普通の一重の円筒形にした方が装置全体が簡単になるが、そのときに問題になる資料と容器壁との間の通気抵抗は、比表面積で考えてゆくと容器壁の比表面積は簡単に求められるから補正も容易に出来ると思われる。この考えに従つて現在野外用の通気抵抗の測定装置を試作中であり、更に多くの資料についての結果を後報に報告するつもりである。

おわりに本研究について絶えず助言、討論を戴いた吉田順五教授を中心とする雪氷研究グループの諸研究員に対してあつく感謝の意を表する。

## 文 献

- 1) 黒田正夫・工藤清・松下実 1942 積雪の通気度. 雪氷, 4, 1.
- 2) 黒田正夫 1949 積雪の物理的性質. 雪氷十年, 70.
- 3) E. Meyer-Peter und P. Niggli 1939 Schneemechanik mit hinweisen auf die Erdbaumechanik. Beiträge 2. Geolo. Schweiz, Hydro., Lief., 3, 86.
- 4) G. H. Fancher and J. A. Lewis 1933 Flow of Simple Fluids through Porous Materials. Ind. Eng. Chem., 25, 1139.
- 5) P. C. Carman 1937 Trans. Inst. Chem. Eng., 15, 150.
- 6) J. C. Brown 1950 Determination of the Exposed Specific Surface of Pulp Fibers from Air Permeability Measurements. Tappi, 33, 130.
- 7) F. M. Lea and R. W. Nurse 1939 The Specific Surface of Fine Powders. J. Soc. Chem. Ind., 58, 277.

## Résumé

A reliable method for measuring and studying the flow of air through snow layer was presented. The resistance experienced by air flowing stationally through snow layer was determined experimentally on many kinds of snow. General relation shown in the

Table below was found between the kinds of snow and the resistance of air flow.

Kinds of Snow	Snow Density	Air Flow Resistance
new snow	small	low
settled snow	middle	high
granular snow	large	middle

It was found that the flow of air through snow layer closely resembled that through granular porous materials, such as sand. The specific surface  $S \text{ cm}^2/\text{g}$  and the mean hydraulic diameter  $D \text{ mm}$  of the ice particles composing snow were determined by means of the following equation which Kozeny had set up for the permeability of granular beds and Carman modified later:

$$S = \frac{60}{\rho_s D} = \sqrt{\frac{\sigma}{K \eta \rho_s^2} \frac{p^3}{(1-p)^2}},$$

where  $\sigma$  is the air flow resistance in  $\text{g}/\text{sec} \cdot \text{cm}^3$ ,  $p$  the porosity of the bed,  $\rho_s$  the density of material composing the bed in  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,  $\eta$  is the coefficient of viscosity of permeating fluid in poise, and  $K$  is a dimensionless figure commonly known as the Kozeny constant. The present authors believe that the specific surface and mean hydraulic diameter will present themselves as useful characteristics representing the properties of snow such as the snow density.