HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	積雪の通気抵抗　III ： 低温室の霜の通気抵抗と氷粒の模型化
Author(s)	清水, 弘
Citation	低温科學. 物理篇, 15, 73-79
Issue Date	1956-11-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17913
Type	departmental bulletin paper
File Information	15_p73-79.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Hiromu SHIMIZU 1956 Determination of the Resistance to Air Flow of Snow Layer. III. Air-Flow Resistance of Frost Mass; Idealized Models of Ice Particles. *Low Temperature Science, Ser. A, 15.* (With English résumé p. 79)

積雪の通気抵抗 III

低温室の霜の通気抵抗と氷粒の模型化*

清水弘

(低温科学研究所 気象学部門)

(昭和31年7月受理)

I. まえがき

昨年，積雪の通気抵抗についてしらべてみたところ，積雪についても Darcy の法則の成立つことがわかつた[1]。つまり，積雪層内の空気の流速は，圧力勾配に比例する。又，更に Kozeny の式を用いて比表面積を計算し，積雪粒子を流体力学的に等価な球におきかえてその有効直径の分布を得た。

しかし，この時の測定値は通気抵抗と，積雪の密度だけで，実際の粒子の大きさ・形状に関する測定は皆無であつたため，計算から得られた有効直径と実際の粒子の大きさ・形状との関連については全く未知のまま残された。

そこで，今回はその点について更にしらべようと思い，粒子の形状が比較的簡単な場合を取扱うために，低温室の冷却管についた霜を集めて篩にかけ，粒子の大きさの範囲を限定した試料について測定を行なつた。

通気抵抗の測定は，昨年の測定装置[1]を用いたが，試料両端に加える圧力差がかなり小さいので (1～30 dyne/cm^2)，この測定の精度をあげるために，シリコン DC 200 F (10 c.s.) とアルコールによるチャトック圧力計を用いた。試料の密度は，スプリングバランスによつて直読し，粒子の大きさ・形状の測定には顕微鏡写真を用いた。

第1表 篩

篩 No.	目の粗さ (mm)
1	0.7
2	1.0
3	1.2
4	1.6
5	2.5

II. 測定結果

試料は，低温室冷却管の霜を篩にかけて直接試料台の金網の上に降らせ，直径 40 cm，高さ 5.5 cm のブリキ円筒内に積らせた。顕微鏡写真は，各試料について 20～30 粒を撮影し，キルビメーター及びプラニメーターによつて写真粒子の周長と面積を測つ

* 北海道大学低温科学研究所業績 第336号

第2表 測 定 デ ー タ

試 料	篩 (mm)	通気抵抗 [c.g.s.]/cm³	密 度	写真 平均周長 (mm)	写真 平均面積 (mm²)
M_2	0.7	47.8	0.40	3.4	0.6
M_3	0.7—1.0	16.0	0.38	6.1	2.1
M_4	1.0—1.2	6.8	0.37	9.7	5.2
M_5	1.2—1.6	4.3	0.37	11.8	8.5
M_6	1.6—2.5	2.4	0.32	16.8	15.5

た。通気抵抗の測定は —22.2～—25.9℃ で行なわれたので，各試料の温度による影響は特に考えなかつた。

III. 粒子の模型

以上に得られた結果を用いて，原粒子を流体力学的に等価な簡単な模型におきかえることを試みた。

1. 廻転体模型

まず最初に4種類の模型を考え，これを水の粒としてその比表面積を幾何学的に計算した。

a) ラグビー球型： 写真の粒と等周等積の楕円を長軸のまわりに廻転させた廻転楕円体

b) 円 盤 型： 上と同じ楕円を短軸のまわりに廻転させた廻転楕円体

c) 等周円球型： 写真の粒と等周な円を大円とする球

d) 等積円球型： 写真の粒と等積な円を大円とする球

写真による粒の面積は，その粒のスライドグラス面への投影面積であつて，一断面を表わすものではなく，周長も又同様であるが，普通の写真撮影による方法として，この量をそのまま用いることにした。

各廻転体を作る基準の楕円（長軸 $2a$，短軸 $2b$）及び円（半径 r）は各試料について求めることができる。氷及び試料の密度を夫々 ρ_i，ρ_s とし，試料単位体積中に上記模型粒（1個の体積 V cm³）の或る1種が n 個つまつているとすれば

$$nV\rho_i = \rho_s \qquad \therefore \quad n = \rho_s/V\rho_i \tag{1}$$

従つて，模型粒1個の表面積を S，試料単位体積あたりの比表面積を $\boldsymbol{S}$ とすれば

$$\boldsymbol{S} = nS \tag{2}$$

である。各試料について，各模型粒の大きさ・粒数（試料単位体積中の）及び比表面積（試料単位体積あたり）は第3表の如くである。

又，Kozeny によると，一定断面の細管が試料軸と一定の角度をなしているように束ねられた筒状の多孔物質について，それを通過する流体の速度（Filtergeschwindigkeit）は

第3表　廻転体模型

模型	試料	a 又は r (mm)	b (mm)	n (箇/cm³)	S (cm²/cm³)
ラグビー球型	M_2	0.9	0.2	2200.0	28.6
	M_3	1.5	0.5	256.3	14.9
	M_4	2.4	0.7	81.6	10.4
	M_5	2.8	1.0	34.2	7.5
	M_6	4.2	1.2	13.8	5.3
円盤型	M_2	0.9	0.2	628.6	37.9
	M_3	1.5	0.5	87.2	15.2
	M_4	2.4	0.7	23.7	10.4
	M_5	2.8	1.0	12.2	7.4
	M_6	4.2	1.2	4.0	5.4
等周円球型	M_2	0.5		846.2	26.2
	M_3	1.0		97.9	12.3
	M_4	1.5		28.3	8.0
	M_5	1.9		13.9	6.3
	M_6	2.7		4.2	3.9
等積円球型	M_2	0.4		1641.7	39.4
	M_3	0.8		191.9	16.4
	M_4	1.3		43.5	9.1
	M_5	1.7		19.4	6.6
	M_6	2.2		7.8	4.8

$$v = \frac{1}{K\cdot\eta}\,\frac{p^3}{S_K^{*2}\rho_i^2(1-p)^2}\cdot\frac{\Delta P}{L}$$

で与えられるから，通気抵抗の定義に従つて次式が得られる。

$$S_K^* = \sqrt{\frac{\sigma}{K\eta\rho_i^2}\,\frac{p^3}{(1-p)^2}} \qquad (3)$$

但し　σ：試料の通気抵抗

p：多孔度（氷粒自身の内部に盲穴がないものとして $p=1-\rho_s/\rho_i$）

η：流体の粘性（空気 1.7×10^{-4} poise）

ρ_i：多孔物体の実質部分の密度（氷 0.92 gr/cm³）

S_K^*：試料単位質量あたりの比表面積（cm²/gr）

K：Kozeny の常数と呼ばれ，細管の断面の形によつてきまつた値をとるが，$K=5$ とすれば，試料が粒状物体から成る場合にも，上式のよくあてはまることが実験的に確かめられているので[2]　筆者もこれを用いた。

Kozeny の式から得られる単位体積あたりの比表面積を S_K，単位質量あたりの比表面積を S_K^* とすると

第4表 Kozeny の式から計算るされ比表面積

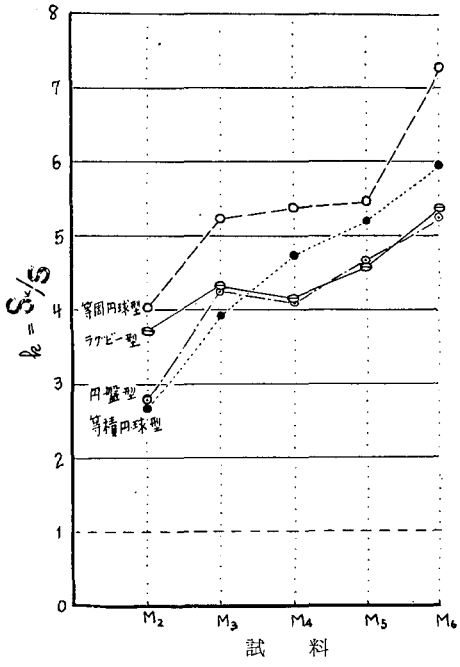
試料	S_K (cm_2/cm_3)	試料	S_K (cm_2/cm_3)
M_2	106.0	M_5	34.4
M_3	64.6	M_6	28.5
M_4	43.3		

$$S_K = \rho_s S_K^* \qquad (4)$$

なる関係があるから各試料について，S_K が求められる（第4表）。ここで S_K と，初めに仮定した模型による比表面積 S との相関をしらべ

$$\frac{S_K}{S} = k$$

を各試料に就いてしらべ，$k=1$ なるものがあれば，原試料をその模型粒子によつておきかえることができる。



第1図 各模型の k

しかし，その結果は第1図のようになつた。つまり，以上のどの模型も流体力学的に等価な結果を与えないばかりでなく，原粒子が大きくなるに従つて，そのずれが一般に増大する傾向を示している。そこで，粒子の大きさによつて k が異なつた値をとる原因を原粒子の写真から調べてみると，大粒子の表面には多くの段又は凹凸が見られて甚だ粗な感じを与えるが，小粒子は比較的滑らかな表面を示している（図版1）。霜粒表面の凹凸の生成機構については，まだよく調べられていないが，一定条件の下では同程度の大きさの凹凸を生ずるとすれば，霜粒の小粒子は篩でふるう時生ずる大粒子の破片か，大粒子への成長の途中であるから，その表面に出来る凹凸の大きさは大小各粒子について大体一様であると解釈される。従つて，その凹凸と同程度の大きさの小粒子は，相対的に表面が比較的滑らかであり，大粒子はその表面に多くの凹凸をもつている。つまり，面の状態について考えてみれば大粒子と小粒子とは非常に異なつた状態を示しているのに，廻転体という寧ろ相似的な模型を用いたために，このようなずれの傾向を生じたのである。

2. 等価模型 ($k=1$) と粒面の粗さ

そこで，原粒子の表面の粗さについてしらべるために，次の4種類の模型を考えた。

a) 楕円体型： 写真の粒と等周等積な楕円に，$k=1$ となるような長さの c 軸を与えた楕円体

b) 等周円盤型： 写真の粒と等周な円に，$k=1$ となるような c 軸を与えた廻転楕円体

c) 等積円盤型： 写真の粒と等積な円に，b) と同じ操作を施したもの

d) 球　　型： 写真の粒の大きさとは無関係に，$k=1$ となるような大きさの球

第5表　等　価　模　型

模　型	試　料	a 又は r (mm)	b (mm)	c (mm)	n (個/cm³)
楕円体型	M_2	0.9	0.2	0.07	8412.7
	M_3	1.5	0.5	0.10	1209.7
	M_4	2.4	0.7	0.15	382.9
	M_5	2.8	1.0	0.18	185.5
	M_6	4.2	1.2	0.19	89.0
等周円盤型	M_2	0.5		0.09	3882.8
	M_3	1.0		0.14	592.7
	M_4	1.5		0.20	176.5
	M_5	1.9		0.25	87.4
	M_6	2.7		0.26	35.9
等積円盤型	M_2	0.4		0.09	6091.9
	M_3	0.8		0.14	925.5
	M_4	1.3		0.20	235.1
	M_5	1.7		0.25	109.2
	M_6	2.2		0.26	54.0
球　型	M_2	0.13			800.0
	M_3	0.20			316.6
	M_4	0.30			154.2
	M_5	0.36			97.4
	M_6	0.38			76.2

各試料について，この4種の模型の大きさと，単位体積中の粒数を幾何学的に計算したのが第5表である。

1. による模型 ($k \fallingdotseq 1$) と，2. による模型 ($k=1$) の単位体積中の粒数を夫々 n_1, n_2 とし，その比 n_2/n_1 を各模型，各試料についてしらべてみると第6表のようになる。

第6表　n_2/n_1

試　料	楕円体型/ラグビー球型	楕円体型/円盤型	球型/等周円球型	球型/等積円球型
M_2	3.8	13.4	0.9	0.5
M_3	4.7	13.9	3.2	1.7
M_4	4.7	16.2	5.5	3.6
M_5	5.4	15.2	7.0	5.0
M_6	6.5	22.3	18.1	9.8

つまり，原粒子の大きさが増すと共に n_2/n_1 が大きくなる傾向が知られる。元来，n_1, n_2 は単位体積中の原粒子の個数を直接表わすものではなく，原粒子の1個が幾粒かの模型粒子によつておきかえられるのであるが，前記のように，原粒子が大きくなつて表面の凹凸が増すとそれに等価な ($k=1$) 模型粒は相対的に微粒化して，個数を増すものと思われる。原粒子面の

凹凸の程度によつて，等価な ($k=1$) 模型粒子の大きさ (a), b), c) に於いては厚さ $2c$, d) に於いては半径 r) がきまつてくるから，逆に等価な模型粒子の大きさから原粒子面の凹凸の程度(粗さ) を推定することができる筈であるが，その定量的な問題については，更に詳しい研究が必要である。次に写真の粒の面積を s, 周長を l としたときの s/c, l/c と，球の半径 r を第7表に示す。

第7表 粒の表面の粗さに関係する量

試料	楕円体型		等周円盤型	等積円盤型	球型
	s/c (cm)	l/c	l/c	s/c (cm)	r (mm)
M_2	0.84	48.0	37.3	0.66	0.13
M_3	2.13	60.6	43.3	1.52	0.20
M_4	3.48	64.5	48.4	2.61	0.30
M_5	4.74	66.1	47.6	3.42	0.36
M_6	8.13	88.5	64.6	5.94	0.38

IV. むすび

通気抵抗の測定によつて，積雪の幾何学的構造を数量的に表現しようと試み，その基本的な段階として，低温室冷却管の霜を篩にかけて粒度の範囲を限定した試料を用いて，通気抵抗の物理的な意味についてしらべた。顕微鏡写真により，各試料の平均的な2次元的形状・大きさを記録し，それと試料の密度とから，流体力学的に等価な模型を種々考えたが，廻転体による原粒子と同程度の大きさの模型粒子については所期の結果(等価性) が得られなかつた。次いで，従来実験的に信用されている Kozeny の式による比表面積を用いて，流体力学的に等価な模型を考えたところ，その模型粒子は原粒子に比べて著しく小さなものとなり，定性的には原粒子面の凹凸の程度が増大するにつれて，模型粒子は微細化した。従つて，等価な模型粒子の大きさが原粒子面の粗さに関係ある量と思われるが，その明確な表示については，更にくわしい研究が必要である。

以上の事柄から，積雪のような多孔物質について，流体の接する面が問題とされる現象に於いては，原試料を簡単な形状の等価な模型におきかえる場合，その個々の模型粒子の大きさは原粒子に比べて一般に非常に小さくなり，数が非常に増大するということを考えなければならない。

おわりに，本研究に際し，種々指導をいただいた石田完助教授，討論助言をいただいた吉田順五教授を中心とする雪氷グループの方々に深く感謝の意を表する。

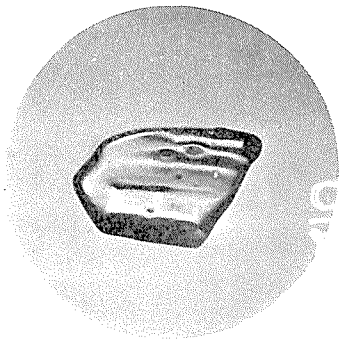
文 献

1) 石田完・清水弘 1955 積雪の通気抵抗 (I). 低温科学，物理篇，*14*, 33.
2) P. C. Carman 1937 Trans. Inst. Chem. Eng., *15*, 150.

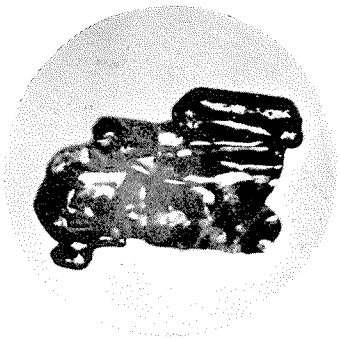
Résumé

The correlation between the resistance to air flow of a porous material and the shape and size of its constituent particles has been studied with respect to an aggregate of ice particles made of the frost grown on the cooling pipe in our low temperature laboratory. With the aid of the experimentally justified formula due to Kozeny, we first computed the specific surface of the sample from the measured values of resistance and porosity, and then tried to deduce equivalent model particles having the same specific surface as the original. The first trial, in which prolate and oblate ellipsoids of revolution and two kinds of spheres each having approximately the same volume as the original particle were assumed, proved a failure, inasmuch as the specific surface came out too small. In order to obtain the coincidence, we were driven to assume ellipsoids or sphere much smaller in volume but much greater in number than the original particles.

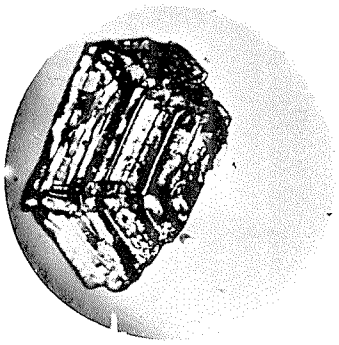
This might presumably have arisen from the roughness of the actual surfaces, the question which will be treated in future investigations.



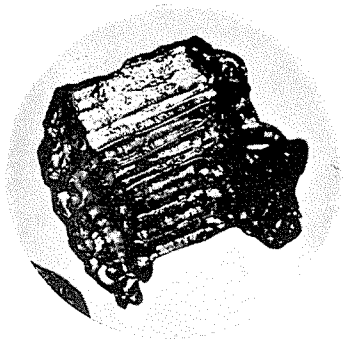
(a) M_2 (×16)



(b) M_3 (×16)



(c) M_4 (×8)



(d) M_5 (×8)

(e) M_6 (×8)