



Title	積雪粒子のタッピング圧縮
Author(s)	水野, 悠紀子; MIZUNO, Yukiko; 黒岩, 大助 他
Citation	低温科学. 物理篇, 24, 111-131
Issue Date	1966-03-22
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18038
Type	departmental bulletin paper
File Information	24_p111-131.pdf



積雪粒子のタッピング圧縮*

水野悠紀子・黒岩大助

(低温科学研究所 物理学部門)

(昭和40年9月受理)

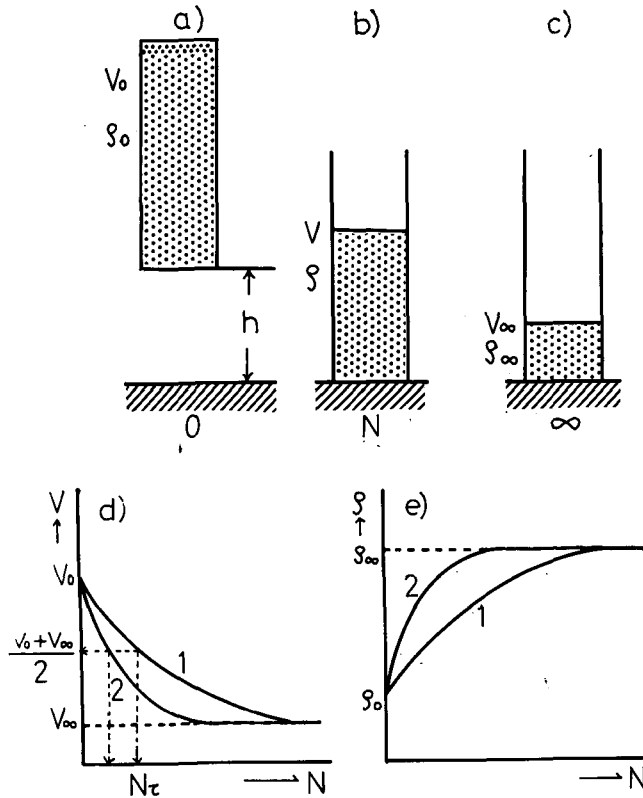
I. 序

積雪の力学的性質は、それを構成している個々の雪粒子の粒径、形、粒度、粒子相互の固着力などに関係する。自然の積雪に力を加えると、積雪は容易に圧縮されて体積を減じ、見かけ密度の増大がおこる。一般に粉体を圧縮するときの容積変化のプロセスは、温度や圧力だけでなく、粉体の空隙率や空隙の空間的分布、粒子の結合度などが大いに関係する。直径の等しい球形粒子が理想的に充填されたときの空隙率は、幾何学的計算から正方粗充填のときは、47.64%、六方粗充填では39.54%、六方最密充填ならば25.95%である。しかし、実験によると全く固着力のない等大球の金属球をどんなにうまくつめた場合でも、空隙率は40%以下にはならないといわれている。その主な理由はとなり合った粒子と粒子が互いに力学的に支え合ういわゆる橋かけ作用、又は *arching* によって空隙を大きくしているからである。このような橋かけの作用は、粒子の形が不規則で表面粗度が大きいほど、また粒子の固着力が強いほど大きいであろう。積雪粒子の場合、通常の冬の気温は低いといっても融点に極めて近いから、雪粒子は、焼結によって互いに固く結びつく。このような積雪粒子の性質は、積雪をタッピングという操作で圧縮してゆくときに顕著な効果を表わすであろう。この報告は積雪粒子を一定の容器に入れ、これにくり返し衝撃を与えて充填してゆくときのかさべり度、充填される速さなどを測定し、これらが雪質や温度によってどのように変わるかを調べたものである。もし、かさべり度、充填されてゆく速さなどが雪質によってかなりの違いがあるとすれば、これらを雪質を記述する新しい物理量として使用しうる可能性がある。

II. 粉体の圧縮

粉体を一定の容器につめ、一定の高さ h から落とすと体積を減じ、見かけ密度は増大する。このような充填の仕方をタッピングという。容器につめた粉体の初めの体積を V_0 、みかけ密度を ρ_0 とし、これを一定の高さ h から落とす (第1図 a)。この操作を何度かくり返すと粉体はだんだんとつまって体積を減じ、みかけ密度は増大してゆくが、やがていくらタッピングをくり返してもこれ以上体積が縮まらないという最終の状態に達する。これが第1図の c である。最終の体積を V_∞ とし、タッピング回数 N に対する体積変化の様子を概念的に表わしたのが

* 北海道大学低温科学研究所 業績第756号



第1図 タッピング圧縮の模式図

a), b), c) はある高さ h から落すとき、回数が増すに従って体積が減少し、やがて最終値に達することを示す

d), e) はタッピング回数 N に対する体積及び密度の変化を概念的に示す

第1図 d) の曲線 1 である。みかけ密度と N との関係として表わすとちょうど逆になって e) 図の曲線 1 のようになる。粉体の種類によっては曲線 2 で表わしたように、はやくつまってゆくものもあるであろう。いま、 N 回のタッピングをほどこしたときの体積を V として

$$r = \frac{V_0 - V}{V_0} \quad (1)$$

という量を定義し、 r をかさべり度 (あるいは体積歪) とよぶことにすると、 N と r との間には

$$r = \frac{a \cdot bN}{1 + bN} \quad (2)$$

という関係が経験的になりたつ事が川北¹⁾ 及びその他の人々によって見出されている。ここに a , b はそれぞれの粉体について特有な数値である。定数 a , b はそれぞれ次のような意味を持っている。(2) 式において $N \rightarrow \infty$ とすれば、 $r \rightarrow a$ となり、これは無限回タッピングをほどこしたときの最終のかさべり度 r_∞ に等しいと見なすことができる。つまり r_∞ は (1) 式の定義から

$$r_{\infty} = \frac{V_0 - V_{\infty}}{V_{\infty}} = a \quad (3)$$

である。

次に b の意味を考えてみよう。(3) 式の関係をも (2) 式の a に代入すると

$$b = \frac{(V_0 - V)}{N(V - V_{\infty})} \quad (4)$$

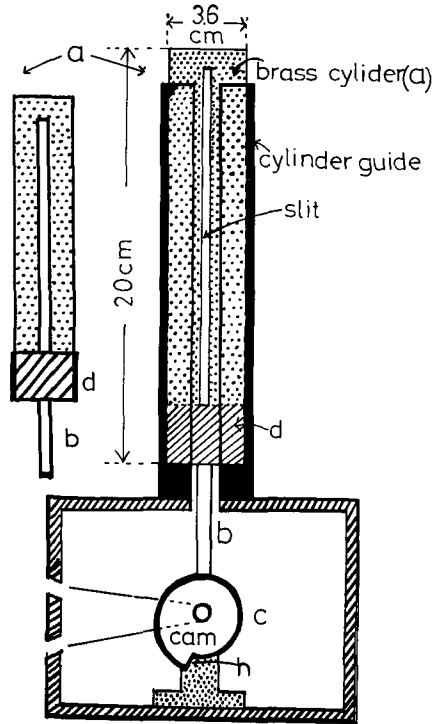
が得られる。いま $V_0 - V = V - V_{\infty}$ 、すなわち $V = 1/2(V_0 + V_{\infty})$ に等しいタッピングの回数を N_r とすれば、 b はとりもなおさず

$$b = \frac{1}{N_r} \quad (5)$$

で与えられる。換言すれば、 b は粉体の体積がタッピングを開始してから最初の体積と最終の体積の和の $1/2$ に縮まるのに必要なタッピングの回数の逆数で、これは粉体の充填のされやすさ、または流動性を表わす目安となるもので、いわば充填速度係数というべきものである。 b が大きい程第1図 e の曲線 2 のようにはやい速度でつまるであろう。最終のかさべり度 a 、充填速度係数 b は容器の大きさ、落す高さなどを一定にすれば、それぞれ粉体に特有な値をとるのである。積雪については、この種の測定はなされていない。この論文の目的は、いろいろの雪質について a, b の値がどのように変わるか、落す高さ h 、温度、積雪粒子の大きさ、容器の内壁の影響などをいろいろ変えて調べてゆくことにする。

III. 実験装置

積雪をタッピング圧縮する場合、どんな容器を使用し、どんな高さから落せばよいか、これまでに資料はない。それでとりあえず実験は第2図に示すような簡単な装置でおこなうことにした。 a は試料をつめる容器で直径 3.6 cm、高さ 20 cm の真鍮の円筒である。底の部分 d は充填した後の試料をとり出すためにとりはずしができるようになっている。また真鍮容器の側面には図のように約 1 cm の幅のスリットを付け、タッピングごとに積雪の圧縮された高さが読みとれるようになっている。容器の底には、木の棒 b がとりつけてあって、その一端がベークライト製のカムに接している。カムの回転と共に持ち上げられた容器は切り込みの所で突然落下し、連続的な衝撃が容器に加



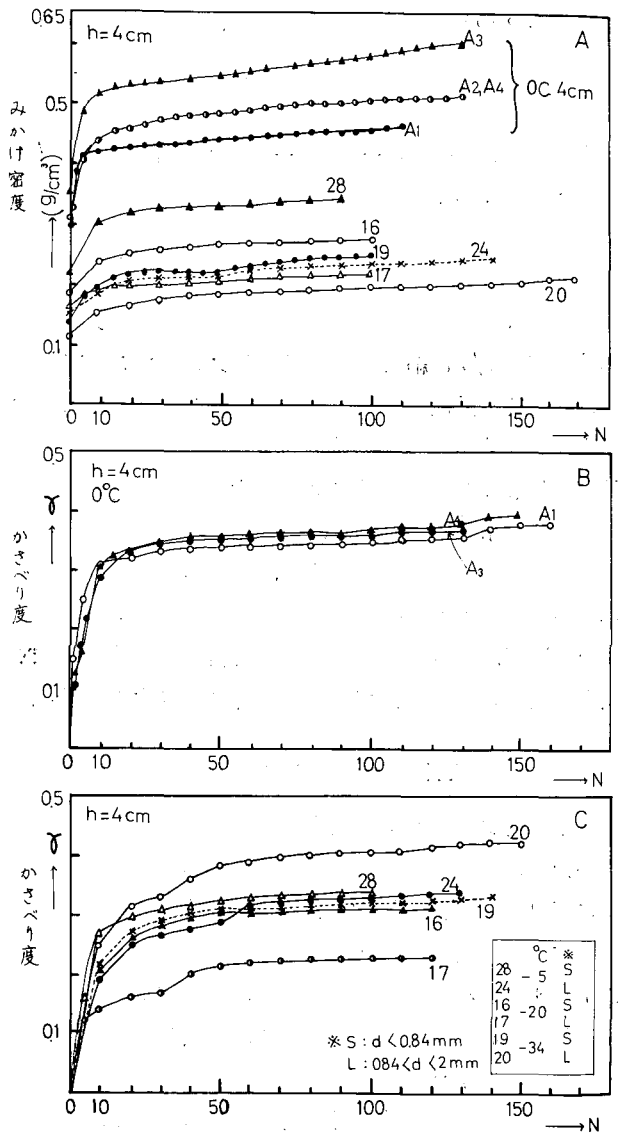
第2図 弱いタッピング圧縮をする際使用したカムの装置、この実験ではカムの切りこみ h は 4 cm である

えられる。実験に於いては、カムの回転を 30 r.p.m. とし、切り込み h の深さは 4 cm とした。この装置は主に積雪を弱いタッピングで圧縮するのに使用した。今一つの方法は長さ 85~155 cm のガラス管、又は、ブリキの筒を垂直に立て、これを案内として同じ容器を落下させる。このように高い距離から容器を落とすと強い力でタッピングを行なうことになる。前者のタッピング装置を使用した場合には、5 回ごとにその容積を読みとり、後者の落下距離を長くした場合の実験に於いては 1 回ごとの容積変化を読みとった。

IV. 実験結果

1. 落下距離の小さい場合のタッピング充填

円筒容器に雪をつめ、一定の高さから落とすと中の雪はその衝撃によってつまる。タッピングの回数を重ねると雪の容積は次第に減ってみかけ密度は増してゆく。まず第 2 図の装置を使って積雪粒子のタッピング回数に対するかさべり度を、温度と粒径を変えて調べてみよう。試料は次のようにして作成した。低温室の中でしまり雪の 2 つのブロックをこすり合わせて粒子をばらばらにほぐす。これを篩によって粒子の大きさを 0.84~2 mm の範囲のものとして 0.84 mm 以下のものとの 2 つのグループに分ける。仮に前者を大粒子、後者を小粒子とよぶことにする。ばらばらにした雪粒子を円筒容器に流し込みなるべく一様な密度になるように



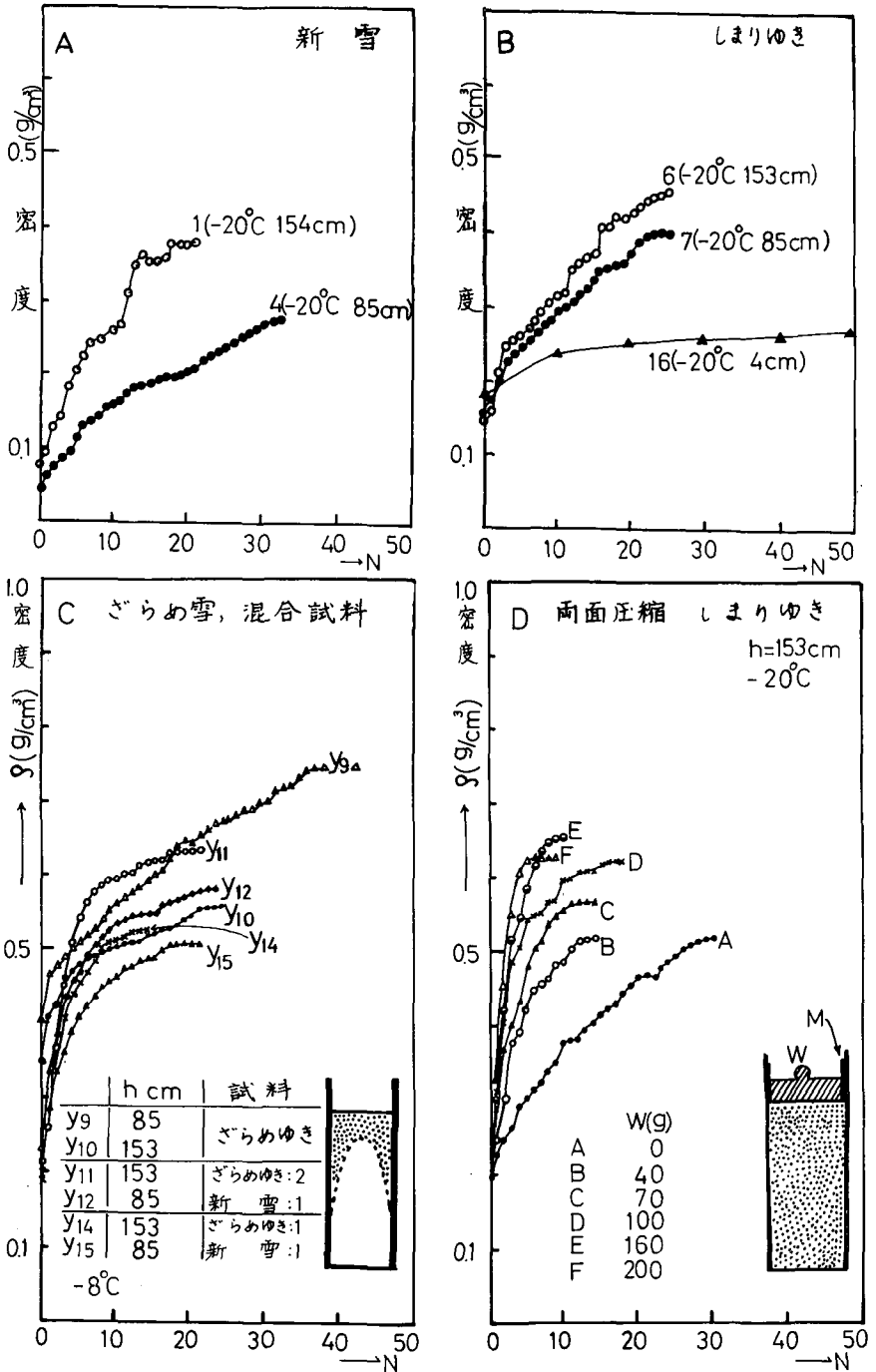
第 3 図 A: $h=4$ cm とした場合の見かけ密度の変化とタッピング回数 N との関係を示す
 B, C: かさべり度とタッピング回数 N との関係を示す。曲線に記した番号の温度及び粒径区分は C 図右下に記入してある

つめ、第 2 図の装置でタッピングする。第 3 図 A はその結果で、縦軸はみかけ密度、横軸はタッピングの回数で、第 3 図 B, C は A の測定値をかさべり度 γ にかきかえてプロットしたも

のである。実験したときの温度、試料の粒径は第3図Cの右下に表示してある。たとえば試料番号、28と24は、実験したときの温度は共に -5°C で前者は小粒子(S)、後者は大粒子(L)である。SとLは前述したように粒子の直径が 0.84 mm 以下のものと、 $0.84\sim 2\text{ mm}$ の範囲のものを表わす記号である。第3図Aの中で A_1, A_2, A_3, A_4 と記号を付けたものは、特に 0°C での融けつつある雪粒子に対するタッピング実験で、粒子はぬれており節分けするのが困難であったので、粒径の表示はしていない。第3図に見られるごとく、積雪粒子はタッピング回数 N が増すに従い、容積を減じ、みかけ密度が増し、やがて一定値に近づいてゆくが、その近づき方は、温度が低いほどゆるく、温度が高くなる程早い。極端な場合として融点では初めの10回ぐらいでほとんど飽和値に達してしまう。最初容器に試料をつめるとき、なるべく一定密度になるようにつめると比較に便利であるが、それは技術的に難しい。従って第3図Aの $N=0$ での値は試料によっていろいろであるが、かさべり度になおしたB、Cでは各曲線の零点がそろって表示されるので、充填の温度依存性が見やすくなる。温度が低いところでは、最終のかさべり度 γ_{∞} に達するのに30~50回のタッピングを必要とするのに、融点では初めの10回以内にほとんど最終値に達してしまう。すなわち、しまり雪の充填速度係数 b は温度が高い程大きくなってゆく。又、 b の値は粒径によっても差がある筈であるが、第3図の曲線を見ただけではわからない。これらの曲線をもとにして a と b の値を求めるわけであるが、詳しくは第3節に述べる。

2. 落下距離の大きい場合のタッピング圧縮

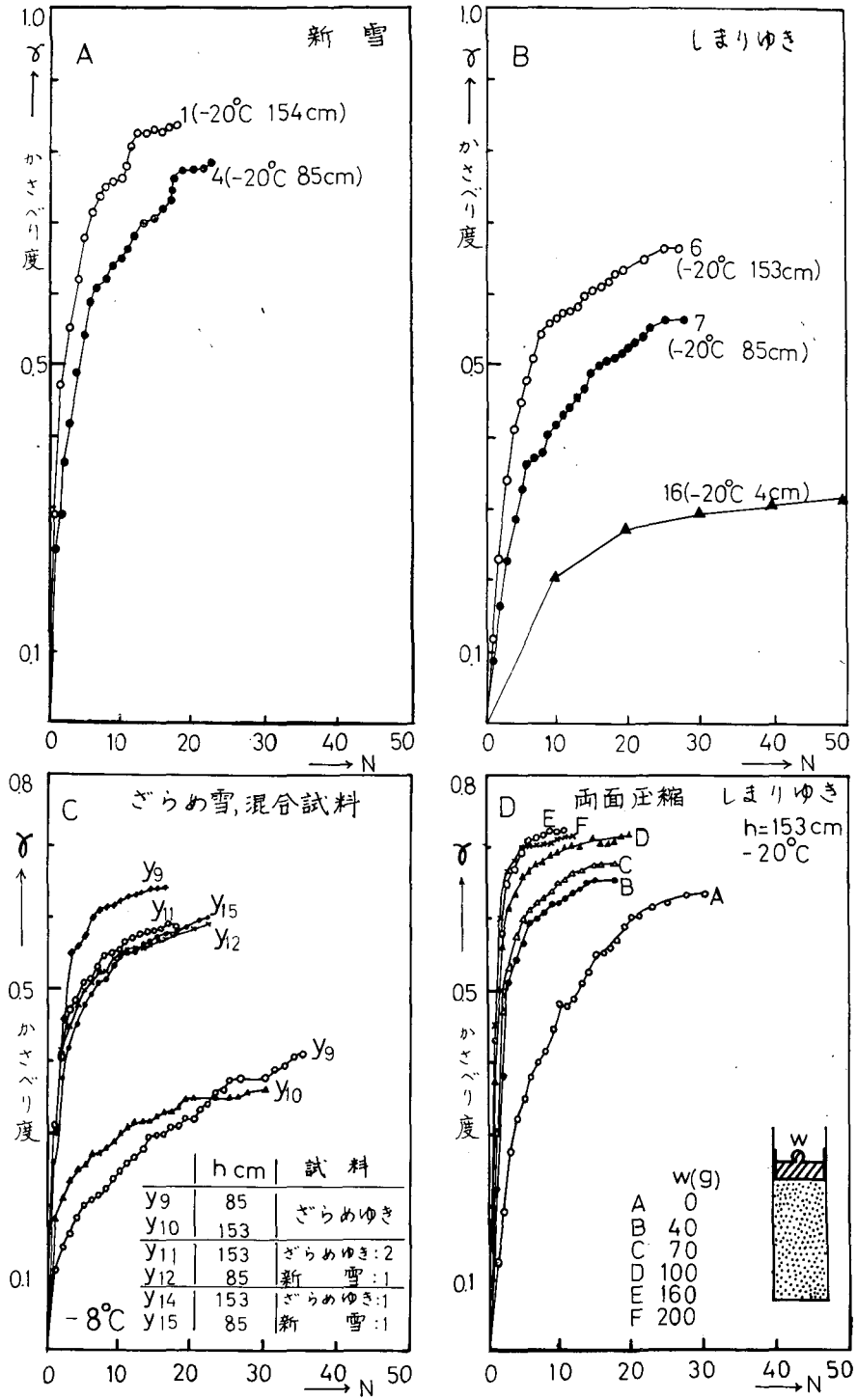
雪をつめた容器を落して雪をタッピング圧縮する場合、雪にかかる力は容器を落す高さが高い程大きい。前節の実験では、落す距離 h は 4 cm であったが、今度は $h=153\sim 155\text{ cm}$ と 85 cm というように落下距離を大きくした場合の充填について述べる。第4図Aは、樹枝状結晶の新雪を $h=154\text{ cm}$ 、 85 cm の高さからタッピングしたときのみかけ密度の変化、Bはしまり雪をつぶしてばらばらにしたもの、Cは大粒のざらめ雪と、そのざらめ雪に新雪を一定の比率で混合したものにつき高さを変えて測定したもの、Dは高さ $h=153\text{ cm}$ を一定に保ちタッピングする筒の中に適当なおもり W を入れて試料を上下から同時に圧縮できるようにした場合のみかけ密度の増加を図示したものである。まず新雪の場合のA図について落下距離 h に対する見かけ密度の増加を調べてみると、曲線1、4に示すように落下距離が大きいほど一定のタッピング回数に対する見かけ密度が大きくなる。このことは雪にかかる衝撃力が大きいほど密に圧縮されることを意味する。この場合気付いたことであるが曲線1に示すようにみかけ密度の変化はなめらかではなく、ところどころ急に段階的に増加してゆく。曲線4も一見なめらかであるが、細かく見ると段階的に増加している。このような圧縮過程の段階的变化は積雪をピストンで単軸圧縮する際にもしばしば見られる現象で、圧縮過程に塑性的な要素と破壊的な要素が介在するために生ずるものと考えられる。第4図Bは、しまり雪を構成している粒子についての結果である。曲線6と7とはそれぞれ h を 153 cm と 85 cm にしたときの密度の増加曲線で、曲線16は比較のために $h=4\text{ cm}$ のデータを書き加えた。温度はいずれも -20°C である。3本の曲線が示すように、落下距離をパラメーターとしたタッピング回数に対するみかけ



第4図 落下距離を大きくした場合のみかけ密度の変化を
 タッピング回数 N との関係で示す

密度の増大は h と共に大きくなる。また h が大きくなると、曲線 6 のようにみかけ密度の増加曲線にはっきりと階段的变化が見られる。この階段的变化は後節で説明するように充填層の断面をつくって、その内部構造を調べるとはっきりとわかるのである。第 4 図 C は大つぶのざらめ雪とこれに新雪をある比率で混入した雪についての実験である。天然につもっている積雪の下層には、しばしば大粒のざらめ雪の層がある。そのようなざらめ層を切り出しつぶしてばらばらにし、容器につめ、落す距離を 85 cm としてタッピングした。このときの温度は -8°C である。みかけ密度は曲線 y_9 に示すように、段階的にどんどん上昇し $N=40$ ではほぼ一定値に達したが、このときのみかけ密度の値は 0.75 であった。見かけ密度が 0.75 というと空隙率にして約 18% である。これは等大球の理想的な最密充填の空隙率 26% をはるかに下廻る数字である。この場合、最初の充填密度は 0.41 であった。このざらめ雪は粒径が 2~3 mm の大粒のものであったが、勿論これ以下の粒径を持つ小さなものも混っている。それ故、等大球の充填とはみなされないが空隙率が 18% に達したということは単なる幾何学的充填だけでなく、粒子自身に塑性変形がおこり、より密に充填されたと考えてよいであろう。その証拠を充填層断面の顕微鏡写真によって示すことにする。落下距離 $h=85$ cm のとき、ざらめ雪の見かけ密度が 0.75 に達したとすれば、落下距離を更に大きくすれば一層圧縮されてより高い密度が得られそうに思われるが必ずしもそうではない。第 4 図 C で曲線 y_{10} は高さ $h=153$ cm として同じ温度でタッピングしたものである。この場合は $N=30$ ではほぼ一定値に達し、見かけ密度は 0.56 以上には増えなかった。この理由は、この場合のように h が大きすぎると容器の中の雪は図の右下のスケッチに示すように、上側の部分（点を打った部分）が衝撃の度にはね上って充填されなかったからである。粒子に働らく力積は容器の底の方が大きく、上の方ほど小さい。従って雪は底の方からだんだん充填されてゆく。ざらめ雪のような場合には最も密な状態を得るには、タッピングの高さをあまり高くしてはならない。この図に示した y_{11} , y_{12} , y_{14} , y_{15} は、このざらめ雪に樹枝状結晶の新雪を混合したもので、混合比は y_{11} , y_{12} が重量比で 2:1, y_{14} , y_{15} は 1:1 の割合に混合した試料について高さ h をそれぞれ 153 cm と 85 cm にしてタッピングをほどこしたものである。ざらめ雪にこれと全く異質の雪を混合すると、充填速度はもとのざらめ雪だけの場合よりも速くなってゆく。詳しくはかさべり度になおした第 5 図で説明する。これまでのタッピングの仕方では雪は衝撃のたびに下の方から順につめられてゆく。ここでタッピングの仕方を変えて雪の上にも一定のおもりを載せて上下両面から圧縮できるように工夫したのが第 4 図 D に示す実験である。右下のスケッチに示すように円筒容器の内側にかかる小さな筒 M を入れ、既知のおもり W を載せて容器を落した瞬間に試料の上下両面から同時に圧縮できるようにしてタッピングしたものである。試料はしまり雪で h は 153 cm の高さに一定に保った。第 4 図 D で曲線 A は $W=0$ の場合であり、先に述べた第 4 図 B の曲線 6 と大差ない。雪の上面に載せるおもりを 40 g, 70 g, 100 g, 160 g, 200 g と増してタッピングした時の曲線がそれぞれ B, C, D, E, F である。予想通りおもりの大きさに比例して見かけ密度、及びその増加速度は大きくなる。

第 5 図の A, B, C, D は、第 4 図のタッピング回数に対する見かけ密度の変化をかさべり



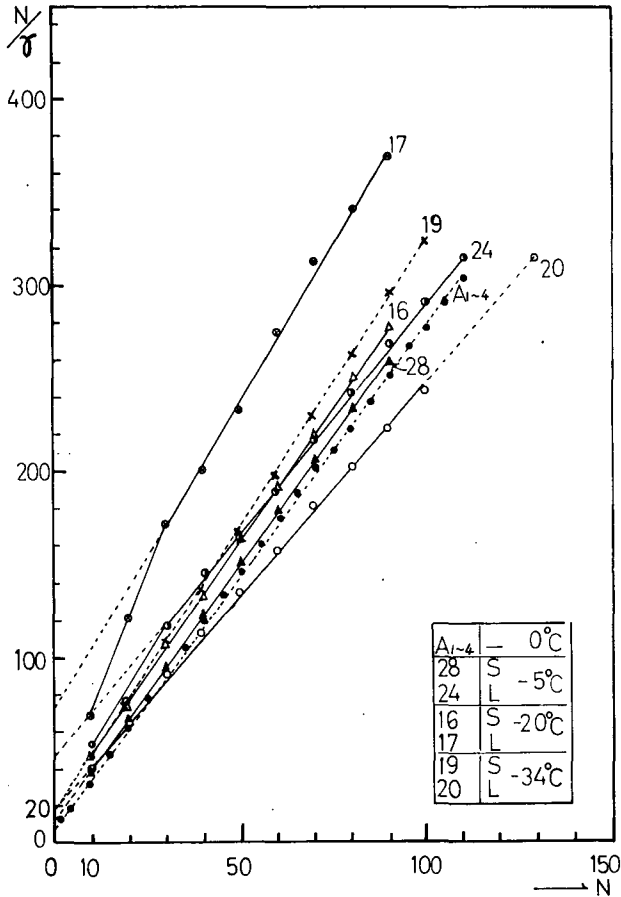
第5図 4図に示した試料を、かさべり度 γ とタッピング N との関係で示す

度 r の変化になおしたものである。かさべり度になおしてみると図から明らかなように、同じ N の値に対するかさべり度は新雪の場合が最も大きく、次いでしまり雪、ざらめ雪の順である。特に第5図Cに見られるように、純粋なざらめ雪のみに対するかさべり度は y_9, y_{10} のように低いですが、これに新雪を一定の割合で混合すると、そのかさべり度は曲線 $y_{11}, y_{12}, y_{14}, y_{15}$ のように急に増してゆく。D はおもりを載せた場合のかさべり度を示す。

3. 積雪粒子の最終圧縮率とそのつまりやすさ

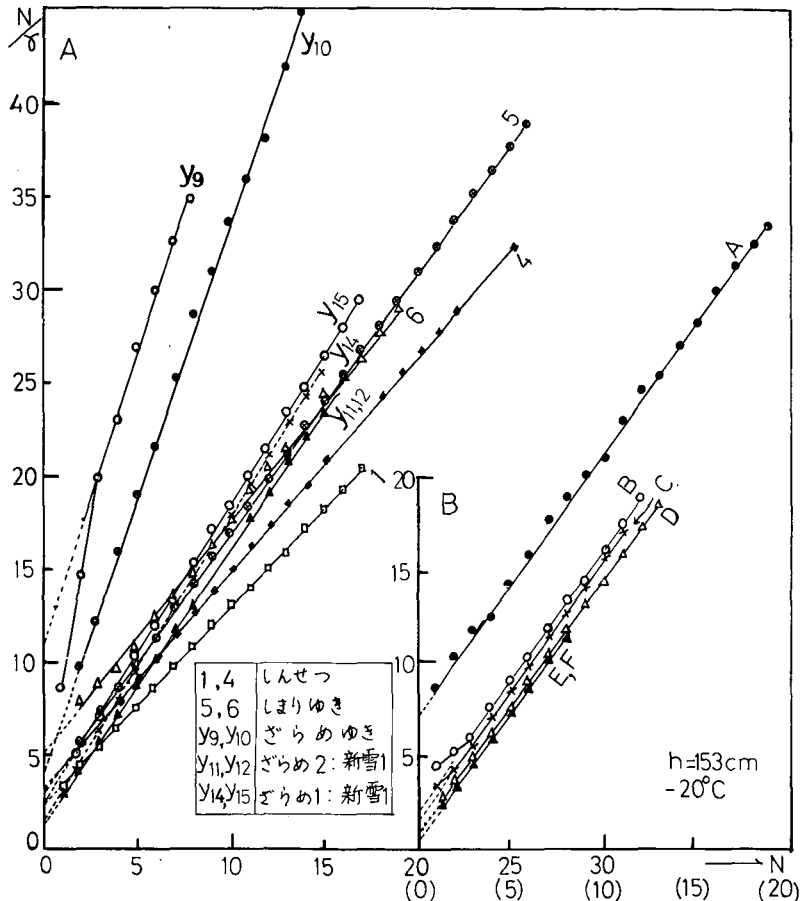
いろいろな雪質の雪粒子を一定の容器につめ、落下距離と温度をいろいろ変えて充填したとき、タッピングの回数 N と雪のかさべり度 r との関係は第3図～第5図に示した。もしこれらの関係が(2)式によって表わされるならば、われわれはそれぞれの試料に対する a 及び b を求めることができる。 a 及び b を求めるには次のようにする。すなわち、(2)式を変形すると

$$\frac{N}{r} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a} N \tag{6}$$



第6図 落下距離の小さい場合 ($h=4\text{cm}$) のタッピング圧縮に於ける N/r と N との関係

となる。それ故、測定された N/r と N との関係をプロットした曲線の勾配と曲線が縦軸を切る長さから a , b が求められる。第6図及び第7図はそれぞれ落下距離が小さい場合と大きい場合の結果で、縦軸に N/r , 横軸に N をとって図示したものである。わずかの例を除いてほとんどすべてのデータがよく直線の上に乗っている事がわかる。すなわち雪粒子の場合にも(2)又は(6)式の関係がなり立っているのである。それでこれらの直線の横軸に対する勾配から $1/a$ が、また直線が縦軸を切る点の値から b の値が求められる。 a の値は(3)式に示すように $N \rightarrow \infty$ におけるかさべり度を意味するから直線の傾斜が大きいほど最終かさべり度は小さい。また b の値は(5)式の意味するように雪の粒子のつまりやすさ、すなわち充填速度の大小を表わす係数である。 b が大きいほど雪は速く充填され、 b が小さいほど充填される速度は遅い。第1表 ($h=4$ cm) 及び第2表 ($h=85 \sim 155$ cm) はこのようにして求めた各々の試料の a 及び b の値である。表中の試料番号はこれまでの図に示したものと一致する。まず第1表の $h=4$ cm の低い位置からタッピングしたしまり雪の充填特性を見よう。大粒子L (大きさが $0.84 \sim 2$ mm



第7図 落下距離の大きい ($h=153$ cm, $h=85$ cm) 場合の
タッピングにおける N/r と N との関係

第1表 落下距離の小さい場合のタッピング圧縮に用いた
試料の諸性質と充填特性 a, b

試料番号	温度 (°C)	粒径区分	密度 (g/cm ³)		空隙率		a	b
			初期	最終	初期	最終		
28	-5	S*	0.223	0.344	0.757	0.628	0.37	0.24
24	-5	L**	0.155	0.25	0.832	0.728	0.38	0.1
16	-20	S	0.186	0.27	0.798	0.706	0.35	0.18
17	-20	L	0.165	0.22	0.821	0.760	0.33	0.045
19	-34	S	0.140	0.25	0.848	0.728	0.33	0.25
20	-34	L	0.114	0.21	0.876	0.771	0.42	0.11
A ₁	0	—	0.292	0.485	0.683	0.466	0.35	0.45
A ₂		—	0.315	0.56	0.658	0.390	0.35	0.45
A ₃		—	0.362	0.601	0.606	0.348	0.35	0.45
A ₄		—	0.316	0.53	0.658	0.425	0.35	0.45

$h=4$ cm

* S: $d < 0.84$ mm

** L: $0.84 < d < 2$ mm

第2表 落下距離の大きい強いタッピング圧縮に用いた
試料の諸性質と充填特性 a, b

試料番号	雪質	温度 (°C)	高さ h (cm)	密度 (g/cm ³)		空隙率		a	b
				初期	最終	初期	最終		
1	新雪	-20	154	0.061	0.38	0.934	0.587	0.93	0.54
4	"	-20	85	0.056	0.285	0.939	0.696	0.87	0.17
6	しまり雪	-20	153	0.142	0.455	0.845	0.544	0.75	0.30
7	"	-20	85	0.172	0.405	0.813	0.554	0.70	0.17
y ₉	ざらめ	-8	85	0.415	*0.76	0.549	0.175	0.35	0.50
y ₁₀	"	-8	153	0.352	*0.56	0.614	0.39	0.35	0.72
y ₁₁	ざらめ1:新雪1	-8	153	0.260	0.62	0.717	0.325	0.62	1.08
y ₁₂	"	-8	85	0.230	0.61	0.750	0.337	0.62	1.07
y ₁₄	ざらめ1:新雪1	-8	153	0.210	0.56	0.772	0.392	0.67	0.98
y ₁₅	"	-8	85	0.215	0.52	0.766	0.434	0.62	0.68
A	上部荷重 (g) しまり雪 0	-20	153	0.191	0.51	0.791	0.458	0.67	0.22
B	" 40	-20	153	0.188	0.51	0.793	0.445	0.67	1.06
C	" 70	-20	153	0.191	0.56	0.793	0.390	0.75	1.11
D	" 100	-20	153	0.179	0.62	0.805	0.325	0.75	2.22
E	" 160	-20	153	0.179	0.64	0.805	0.30	0.75	2.22
F	" 200	-20	153	0.179	0.62	0.805	0.325	0.75	2.22

の範囲にあるもの)でも小粒子 S (0.84 mm 以下のもの)でも a の値は温度によってそれ程変化しない。平均すると $a=0.37$ である。すなわち、 $h=4$ cm では無限回タッピングを与えると容積は最初のその 37% が圧縮される。しかし b の値にはかなり系統的な変化が見られる。 b の値は全温度領域にわたり、小粒子の方が大粒子よりも常に大きい。つまり、小粒子の方が大粒子よりも充填されやすい。また温度が融点になって雪の粒子が水を含んでくると、 b の値は 0.45 となり温度の低い場合に比べて非常につまりやすいということを示している。

ところでタッピングする高さ h を 153 cm にすると a, b の値は $h=4$ cm に比べて大きくなる。

例えば第 2 表で試料番号 6, 7 のしまり雪に注目すると、 a, b の値は同じ温度における $h=4$ cm のときのそれらに比べてはるかに大きいのである。即ち $h=4$ cm では a の平均値は 0.37 であったが $h=153$ cm では、 $a=0.725$ 、 $h=85$ cm では $a=0.7$ となり同じ雪でも落下距離を大きくすれば最終かさぶり度も充填速度も共に大きくなってゆく。また第 2 表から新雪の最終かさぶり度は $h=153$ cm で 90~93% で最も大きく、ざらめ雪のそれは 35% で最も小さいことがわかる。充填速度係数は逆に新雪、しまり雪、ざらめ雪の順で大きくなる。即ちつまりてゆく速さは、不規則で表面粗度の大きい新雪よりも球形に近い単純な形のざらめ雪の方が速い。このようにして a, b の値に雪質の特性が可成りはっきり表われてくるのは注目されてよい。なお第 2 表のざらめ雪 (試料番号 y_9, y_{10}) において $h=153$ cm のときの最終充填密度 (* 印を付したもの) が予想に反して $h=85$ cm の時の値よりも小さい。これは例外でこの場合は第 4 図 C のスケッチで示したように充填されてゆく試料の上部の雪が衝撃のたびに飛散して充填されなかったのが主な原因である。ざらめ雪だけならば a の値は小さいが、これに新雪を混合すると a の値はより大きくなる。第 2 表 A~F は荷重を載せた両面圧縮の場合のデータで当然の事ながら最終かさぶり度も充填速度係数も共に荷重に比例して大きくなってゆく。

4. 積雪粒子の充填速度係数

積雪をタッピング充填したときのタッピング回数 N と、かさぶり度 r の変化を表わす式として (2) 式又は (6) 式が使用された。しかしこれらの式は粉体の充填特性を表わす唯一の表現ではない。第 1 図 e の略図に示したように、また第 3, 第 4 図の実測値の示すように雪のみかけ密度はタッピングの回数と共に指数函数的に最終密度に近づいてゆく。すなわち、初期密度を ρ_0 、 N 回のタッピング後に於ける密度を ρ_n とすれば、

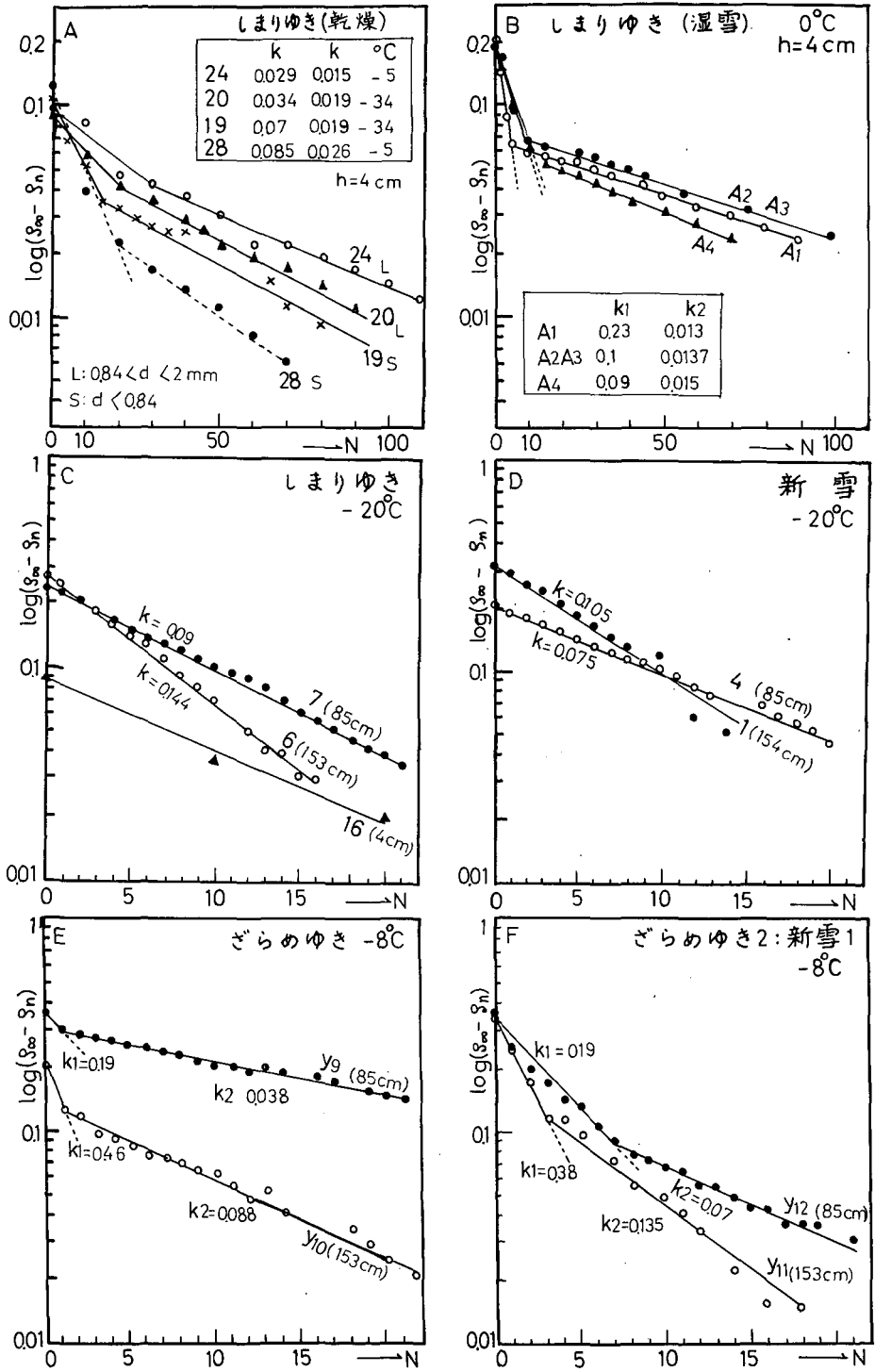
$$\rho_\infty - \rho_n = (\rho_\infty - \rho_0) \exp(-kN) \quad (7)$$

という関係で表わすこともできるであろう。ここに k は充填の速度を表わす定数であって k が大きいほど雪のつまり方は早い。従って (7) 式で積雪粒子の密度変化を表わすとすると k は (4) 式における b と同じ意味を持つ定数で b と k とは比例すべきものと考えられる。本節ではこれまでのデータを (7) 式の表現によって表わしてみよう。そのためにはまず $\ln(\rho_\infty - \rho_n)$ と N との関係をプロットすればその曲線の傾斜から k が求められる。ところで ρ_∞ の値は $N \rightarrow \infty$ に

於ける最終の見かけ密度である。実験で N を充分大きくしてもみかけ密度に近づかない場合には (3) 式より

$$a = \frac{V_0 - V_\infty}{V_0} = \frac{\rho_0^{-1} - \rho_\infty^{-1}}{\rho_0^{-1}}, \quad \text{従って } \rho_\infty = \frac{\rho_0}{1-a} \quad (8)$$

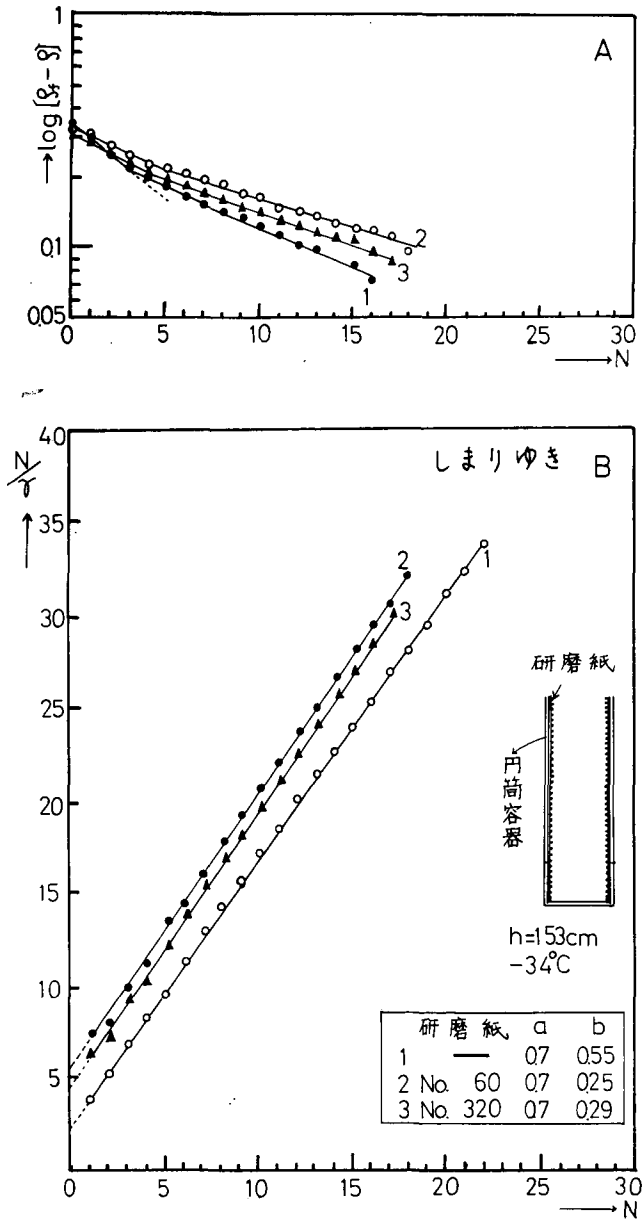
という関係があるから先に求めた a の値を代入して ρ_∞ を求めればよい。第 8 図の A, B, C, D, E, F は $\ln(\rho_\infty - \rho_n)$ を縦軸に N を横軸にとってプロットしたものである。これらの図に見られるように両者の関係は一本の直線で表わされるものと、傾斜の異なる 2 本の直線で表わされるものがあることがわかる。この後者の例に入るものは、充填の機構が N と共に変わることを意味する。たとえば第 8 図 A は $h=4$ cm の場合の大粒子 L (0.84~2 mm) と小粒子 S (<0.84 mm) のみかけ密度の変化の対数とタッピング回数 N との関係で、いずれも N が小さいところで急勾配となっており、 k が大きく、 N が大きいところでは k は小さくなってゆく。これらの値をそれぞれ k_1, k_2 として表わす。温度が -5°C でも -34°C でも大粒子の k は小粒子のそれよりも小さい。言い換えると小粒子の方が大粒子よりも速くつまる。このことは既に前節第 1 表の b の値の比較で述べたが、このように k の値で表現するとより明瞭になる。 k の値の変化は、充填機構の変化と関連しており、多分タッピングの初めに於いてはまず粒子と粒子の橋かけ、又は、*arching* による大きな空隙 (若浜²⁾ の表現によれば積雪の団粒構造にもとづく弱線) が破壊されてつまる。そしてある程度つまってからは、粒子は互いに押し合い寄り合っただんだん充填されてゆくものと想像される。第 8 図 B はとけつつある雪をタッピング充填したもので、雪はしめり、粒子の表面は薄い水膜でおおわれている。この場合もタッピングの初めで曲線の傾斜は大きく、 $k=0.1\sim 0.23$ という値をとるが、 $N=10$ 以後はゆるくなって傾斜は $1/10$ に減る。このように同じしまり雪でも乾燥している場合 A と、ぬれている場合 B とでは充填速度に差が表われるが、それはタッピングの初期だけであって、ある程度つまってしまると、それ以降の充填の機構はぬれ雪でも乾いた雪でも大差はない。充填機構を表わす定数 k はまた、当然のことであるが高さ h を変えれば変わる。第 8 図 C は同じしまり雪を -20°C で高さ h を 4 cm, 85 cm, 153 cm と 3 段階に変えた場合の変化を示す。明らかに h が大きくなるほど曲線の傾斜は大きい。第 8 図 D は新雪の k の値を、又、E はざらめ雪のそれぞれ $h=85$ cm, $h=153$ cm に於ける k の値である。図 C, D, E に示すように落下距離を大きくすると、 $\ln(\rho_\infty - \rho_n)$ と N との関係は 1 本の直線で表わされ、充填機構が単純になることを意味する。しかし、このような場合でも雪質の極端に異なる 2 種類の雪を混合した試料について実験すると、曲線は再び傾斜の異なる 2 本の直線で構成されるようになる。このような一例が第 8 図 F に示されている。ざらめ雪だけの場合は E 図のように、ほぼ 1 本の直線であったがこれに樹枝状結晶で構成される新雪を重量比で、ざらめ 2 に対して、新雪 1 の割合でよく混合して充填すると、F に示すようにはっきりと異なる 2 つの傾斜を持つ曲線に変わる。これはとりもなおさず、新雪という異質の雪の混入によって、ざらめ雪の充填機構に変化がおこったことを意味するものである。



第8図 種々の雪の $\ln(\rho_\infty - \rho_n)$ と N との関係

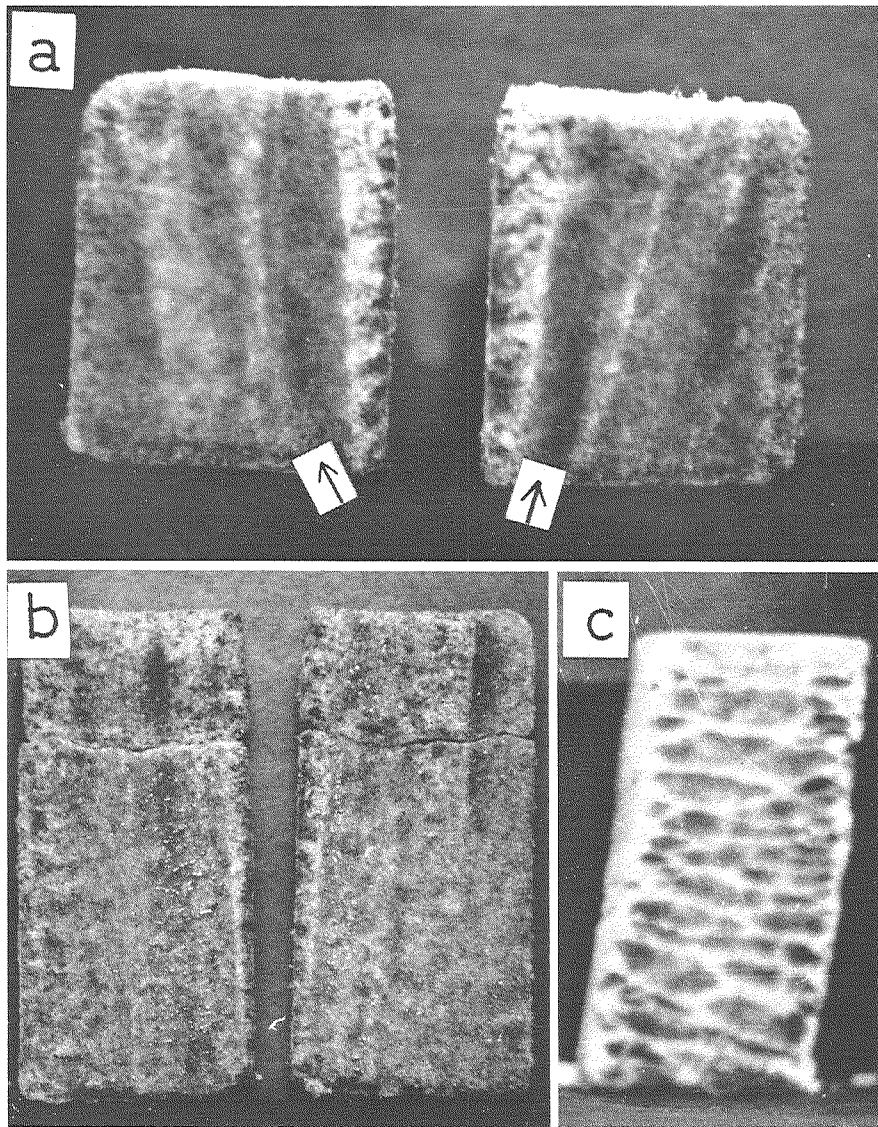
5. 充填に及ぼす器壁の影響と充填層の内部構造

タッピングによる充填過程に於いて、容器を落す高さが最終かさべり度 a 、及び充填速度係数 b 又は、 k の値に大きく影響を持つことがわかった。それならば、雪を充填する容器の内壁の粗度もまた、充填過程に大きな影響を持つであろう。その点を確かめるために、円筒容器の内壁に粗さの異なる2種類の研磨紙をはり付け、故意に内壁を粗くしてこれが充填過程に



第9図 器壁の粗度による充填特性の変化

どのような効果を持つか調べてみた。第9図Bに於いて、曲線1は従来の真鍮容器（内壁には研磨紙をはりつけていない）にしまり雪を入れ、 $h=153\text{ cm}$ でタッピングをしたときの N/r と N との関係である。曲線2は容器の内壁に粒子の大きさが $0.5\sim 0.6\text{ mm}$ 位の粗い研磨紙 No. 60をはり付けた場合、曲線3は粒子のずっと細かい研磨紙 No. 320をはり付けた場合の結果である。この図から明らかごとく、故意に器壁を粗くした曲線2と3の横軸に対する傾斜は、曲線1とほとんど変わらない。すなわち、壁の粗度は、積雪粒子の最終かさぶり度 a にはほとんど



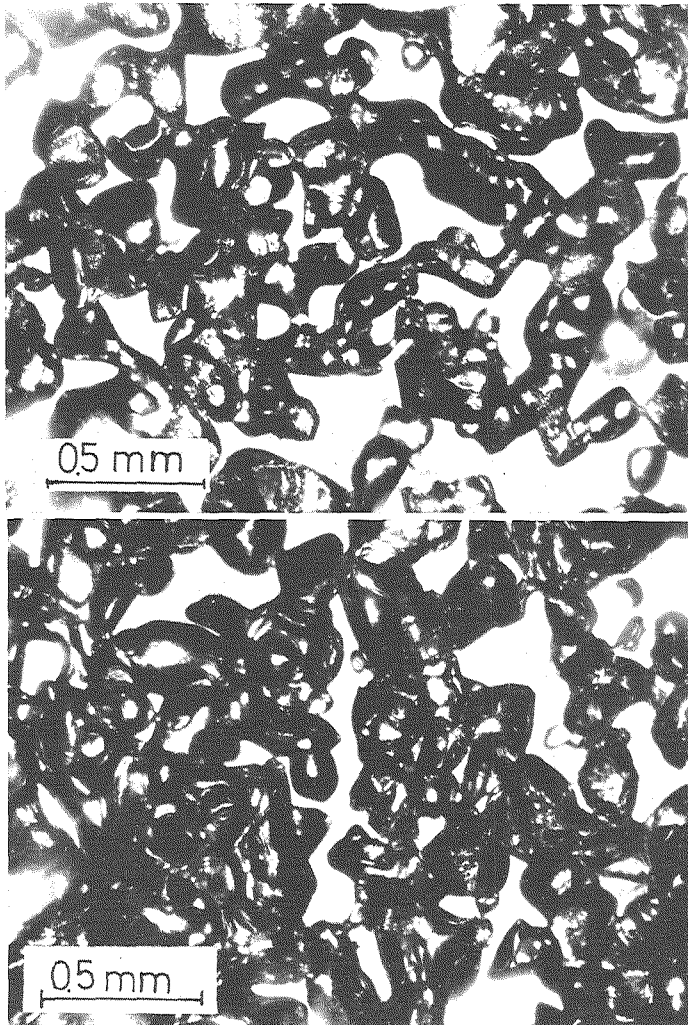
第10図 タッピング充填した雪の断面構造

a, b: 新雪

c: しまり雪

ど影響を与えないことがわかる。ところが曲線2及び3が縦軸を切る点の長さは曲線1のそれよりも大きい。このことから容器の内壁の粗度は、充填速度にはかなりの影響を与える事がわかる。これは $\ln(\rho_\infty - \rho_n)$ と N との関係を図示した第9図Aを見ればより明らかになる。すなわち、曲線2の傾斜は曲線1の傾斜に比べはるかにゆるくなっている。

最後にタッピング圧縮された雪粒子の内部構造を調べてみよう。雪を円筒容器につめ、これをある高さから落して衝撃を与え充填してゆくとき、雪が筒の中でどのようなつまり方をするかは一応調べておくべき問題である。雪のつまり方は雪質によっても、又衝撃の与え方によっても異なるであろう。まず新雪を容器につめ、これを高さ153 cmの垂直に立てたブリキ製の筒を案内として落す。約50回タッピングをくり返してかさべり度が最終値に達してから筒



第11図 雪粒子充填後の顕微鏡写真。アニリン法薄片、
粒径0.84 mm以下、 $h=4$ cm、 -20°C

の中の雪をとり出し縦半分のにこぎりで切断する。切断面が鏡面对称になるように並べてからインクを噴霧し熱線であぶると第 10 図 a のような模様が現われた。インクに濃く染まった部分は、特に密につまっている部分である。この試料の場合、容器を落す度に矢印で示した底の部分に衝撃がくり返されるとみえて雪は不均質なつまり方をしていることがわかる。タッピングによる充填過程から積雪に特有な性質をひき出そうとする場合、このようなつまり方はのぞましくない。円筒容器は筒型の案内を通して落すわけであるが、その場合に容器は多少傾いて落ちるので底面のある特定の場所がいつも衝撃を受ける可能性がある。それで容器を落す向きを変えながら底の部分がまんべんなく一様に衝撃されるように注意すると、第 10 図 b のようになってほぼ均一なつまり方をすることがわかった。それで実験はすべてこのような均質充填が得られるように注意しておこなわれた。ところで積雪粒子がしまり雪のようにまるい粒子になると、充填の様子は新雪の場合と異なってくる。第 10 図 c は、しまり雪の充填構造を示すものでインクの濃淡の縞模様が見られる。この疎密構造は第 4 図又は第 5 図に示したように、しまり雪のみかけ密度がタッピングの回数を重ねるごとに段階的に増大していったことに対応するものと考えられる。このような最終充填層の構造を、アニリン法で作った薄片にして顕微鏡で観察してみると、第 11 図 a のように一つ一つの粒子は互いに緊密に固着し合い、あたかも年代を経た古い雪のようにつながり合っている。充填する前の粒子はすりつぶした上、更に 0.84 mm の篩を通してばらばらにしたものであった。通常 -20°C という低温では雪の自然焼結速度は非常に遅い。従って顕微鏡写真に見られる太い *ice-bond* は、タッピングの間に塑性変形によって粒子間の固着が促進されたと考えられ、単なる幾何学的充填ではないことがわかるであろう。

さきに、われわれが充填速度係 k の解析から、タッピングの終りの段階ではこのような機構で充填が進むといった事の一つの実証である。

V. 実験結果の考察

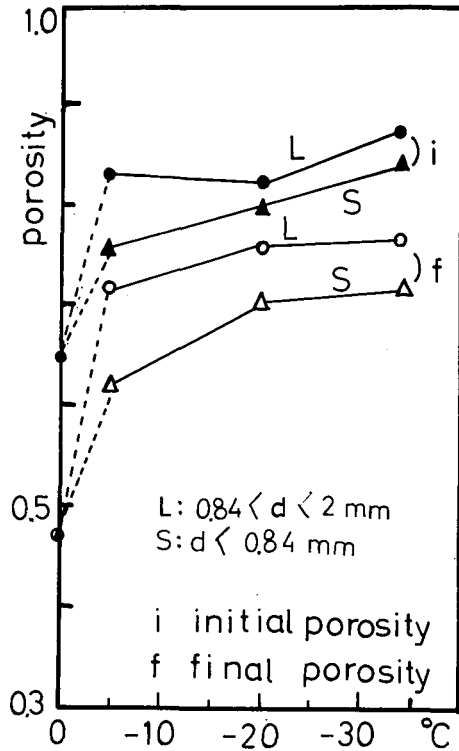
雪を一定の容器に入れ落下距離を 4 cm, 85 cm, 153 cm と 3 階段に変え、又、温度をいろいろ変えてタッピング圧縮したときの最終かさべり度、充填される速さなどを測定し、それらが雪質とどのような関係にあるかを調べた。いずれにしても、充填の様子は、雪粒子の粉体的性質、特に、粒形、大きさ、表面粗度、固着力などによって影響される。まず容器に雪粒子を何等特別な衝撃を加えることなく静かに流し込んだとしよう。この場合、粒子が互いに固着せず附着力のないものであっても粒子は互いに力学的に支え合っている、*bridge*、又は *arch* を形成する。そのために空隙率は一般に等大球の理想的充填のそれよりも大きい。第 12 図で i と記した 2 つの曲線は篩分けした大粒子と小粒子の雪粒子を種々の温度で静かに流し込んだときの空隙率の変化を示す。この際、衝撃は一度も与えていない。一般的傾向として大粒子の空隙率は、小粒子のそれに比べて大きく、又、温度が低いほど空隙率は大きいと言える。即ち雪粒子を静かに容器の中に流し込んだ場合、粒子径が大きいほど *arch* を形成しやすいと考えられる。温度が高くなると、雪粒子相互の固着力、又は、附着力は小さくなってゆくと考えら

れるので* 温度が融点に近づくほど上から次々にそそぎ込まれる粒子は互いに亘って空隙を埋め、空隙率は減ってゆくものと考えられる。特に、融点では雪は湿り、粒子の表面は薄い水膜でつまれると、その水膜は一種の潤滑剤として働かし、流動性を増すために一層充填されやすくなるであろう。同図に f と記した2本の曲線は比較のために $h=4\text{ cm}$ でタッピングしたときの最終空隙率を示した。最終空隙率も又、大粒子の方が小粒子よりも大きいが、温度が高くなり融点に近づくと共に、充填度は高くなることを示している。

雪の最も代表的な試料として、新雪しまり雪、ざらめ雪の3種類について落下距離 h を 4 cm , 85 cm , $153\sim 155\text{ cm}$ の3段階に変え、温度をいろいろに変えてタッピングしたときの最終かさべり度 a , 充填速度係数 b , 初期空隙率, 最終空隙率など一かつして第1表及び第2表に示した。これらの量は勿論充填するときの高さ h を適当に定めておかない限り、これらの値を直ちに雪質と関連する物理量として取扱う

わけにはゆかない。タッピングの高さをいくらに定めたらよいかは今後の問題である。 $h=4\text{ cm}$ のときは篩分けした大小2種類のしまり雪の粒子について行なったのであるが最終かさべり度 a の値にはほとんど差異は認められないが、 b の値は大粒子の方が小粒子のそれよりも小さい。いいかえると、大粒の充填速度は小粒子のそれよりも小さいのである。3種類の雪質のそろっている落下距離の大きい $h=153\text{ cm}$ 及び $h=85\text{ cm}$ の場合を比べると、新雪の場合が最大で $a\approx 0.9$, 即ち、 $h=153\text{ cm}$ の場合には V_0 は最初の充填容積の約10%に縮んでしまうほどである。その次はしまり雪の粒子で $a\approx 0.7\sim 0.75$, 最もかさべり度の小さいのがざらめ雪で約0.35の程度である。しかし b の値はざらめ雪, 新雪, しまり雪の順である。

b は前節4項の表現に従えば、充填速度係数 k に関連する量である。 k は充填機構によって変化する。細かく分析すると、 k は同じ種類の雪でも一般にタッピングの初めと終りで異なる



第12図 雪粒子を静かに容器内にそそぎ込むときの空隙率と温度の関係

* 雪粒子相互の附着に関する直接測定はない。Jensen, Hosler の実験では2つの氷球をひき離すのに要する力は温度上昇と共に大きくなるように見える。しかしこれは附着力自身が温度上昇と共に増大するのではなく、焼結によって接触面積が増大すると解釈すべきである。Jellineck の実験では、単位面積あたりの氷の附着力は温度上昇と共に小さくなる。それ故、接触させた2つの氷球を互いに亘らせてひき離しながら固着力を測定すると温度上昇と共に小さくなるであろう。

った2つの値を取り、充填機構がタッピングの途中で変化する事を示す。はじめは主に表面粗度に起因する橋かけ作用などによる大きな空隙、又は空洞が破壊される事によって充填が進行する。やがて比較的一様につまんで互いによく接触してしまふとそれから後は衝撃が加えられる度に接触点で相対的な迂りや小さな破壊を生じつつゆるい速度で充填が進んでゆくと考えられる。次に第2表の N を充分大きくしたときの最終空隙率に注目しよう。 $h=153$ cm のときの値を見ると新雪の最終空隙率は0.59、しまり雪のそれは0.4~0.5の程度で配位数8の等大球の六方粗充填の空隙率0.41に比べるとこれよりも大きい。しかし、ざらめ雪、又はこれに新雪を混合した試料の最終空隙率は0.4以下で0.18という小さな値を持つものまでである。等大球の六方最密充填の空隙率が配位数8で26%であるという点から考えて、積雪粒子がこのような緊密な充填状態に達してしまうのは異径粒子の混合充填がおこっていることと、充填機構が単なる幾何学的充填ではなく、接触部を中心として粒子自身の内部に少しずつ塑性変形がおこり充填されていったと考えられる。

文 献

- 1) 川北公夫 1964 粉体の化学. 第1報粉体の圧縮. 法政大学工学部研究集報第1号. 17-31; 粉体の化学. 第3報粉体圧縮式の比較. 法政大学工学部研究集報第1号. 36-47.
- 2) 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**, 54-57.

Summary

A compression was applied to various kinds of snow particles by tapping. A cylindrical container filled with snow particles was dropped repeatedly from a height of 4 cm using an apparatus illustrated in Fig. 2. As shown schematically in Fig. 1, the initial volume of snow filled in the container V_0 decreases exponentially with the number of tapping N and tends to the definite value V_∞ . The following correlation has been found between "strain of volume" τ and number of tapping N ;

$$\tau = \frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{a \cdot bN}{1 + b \cdot N} \quad (1)$$

where V is a volume of snow at a tapping number N , a and b are numerical constants. The numerical constants a and b have the following physical meanings. When N approaches infinity, equation (1) becomes

$$\tau_\infty = \frac{V_0 - V_\infty}{V_0} = a \quad (2)$$

As shown in equation (2), the constant a means the final strain of volume. Substituting of (2) into (1) gives

$$b = \frac{V_0 - V}{N(V - V_\infty)} \quad (3)$$

and N is taken to the number of tapping at which V decreases to $1/2(V_0 + V_\infty)$, b equals $1/N\tau$. Therefore the value b is inversely proportional to N and is closely correlated to the velocity of compression of snow by tapping.

Values a and b of various kinds of snow particles were measured by changing the height of dropping. In order to apply stronger compression to snow than that given by the apparatus shown in Fig. 2, the container was dropped from heights of 85 cm and 154 cm. The following results were obtained. When snow samples were dropped from the height of 4 cm, value a was almost independent of the grain size of snow, but value b of large-grain snow was found to be smaller than that of small grain (see Table 1).

For dropping from heights of 85 cm and 154 cm, values of a were 0.9 for newly fallen snow, 0.7~0.75 for compacted snow, and 0.35 for granular snow. The values of b increased in the order granular>compacted>newly fallen snow.

The internal structure of compacted snow by tapping was investigated by making a cross-section or thin section of each sample, and discussed in connection with tapping processes.