



Title	手廻し遠心分離器による雪の含水率の測定
Author(s)	大浦, 浩文; 木下, 誠一
Citation	低温科学. 物理篇, 12, 61-72
Issue Date	1954-03-30
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/17876">http://hdl.handle.net/2115/17876</a>
Type	bulletin (article)
File Information	12_p61-72.pdf



[Instructions for use](#)

## 手廻し遠心分離器による雪の含水率の測定\*

大浦浩文 木下誠一

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和29年3月受理)

### I. は し が き

積雪が濡ると、雪の粒子は水の膜で覆われ、従つて粒子間をつなぐ氷橋は弱くなる。このため、濡つてない時に比べて、弾性、粘性、破壊強度等の機械的性質が、濡り氣の多少で非常に異なつた様子を示す。従つて、雪の含水率を調べることは、積雪の研究上重要なことであつて、その測定の方法には、体積差法<sup>1)</sup>、浮力差法<sup>2)</sup>、熱量計法<sup>3)</sup>、電気抵抗法<sup>4)</sup>、電媒常数法<sup>5)</sup>、潜熱法<sup>6)</sup>、遠心分離法<sup>7)</sup>等<sup>8)</sup>がある。最近莊田<sup>9)</sup>はこれらの測定法を一括して、比較議論をしている。

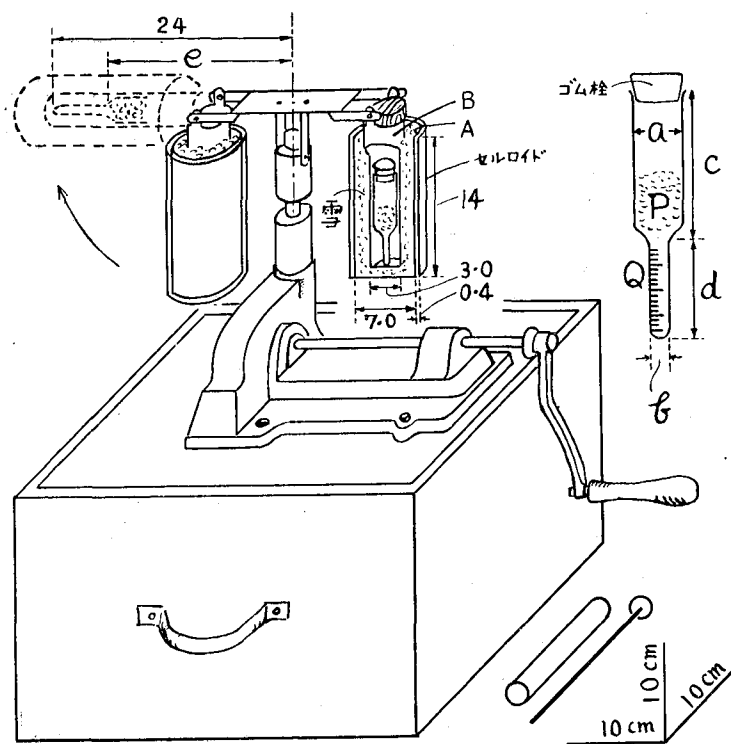
積雪の含水率を測定する際には、野外で手軽に使用出来ることが望まれる場合が多いが、この點では遠心分離法が最も簡便と考えられる。遠心分離法には、黒田・古川<sup>10)</sup>、四手井<sup>11)</sup>の方法があるが、吉田は廻轉する雪の部分、 $0^{\circ}\text{C}$  に保つことで、氣温が  $0^{\circ}\text{C}$  以上の野外でも使える器械を設計した。筆者等は、この器械で 1951 年 3 月末、低温科学研究所中庭の雪について、實驗を行つた。

### II. 測 定 器 械

雪が濡ると、雪粒は水の膜で覆われるが、この水の膜が雪粒についている力としては、水と氷との分子間引力のほかに、水の表面張力が考えられる。雪粒との間にはさまれている水や、雪粒からたれ下つている水はすべて表面張力の働きによる。遠心分離法はこのような力に打ち克つて、水が動き出す加速度を與え、動き出した水を 1 箇所に集めて、その分量から含水率をきめる方法である。

まず、徑の 2.4 cm 両端があいてるブリキ圓筒を、雪の中につつこんで、雪の棒を切取る。この雪の棒を長さ 3 cm 位にきつて、第 1 圖のような、先の細長くなつたガラス等に入れる。太い部分 P は徑 2.5 cm で、細長い先端部分 Q は徑 0.6 cm である。試料の雪は P 部に圖のように入る。ガラス管の目方は 33 gr 前後のもので、試料の雪の目方は、ガラス管に入れたまま天秤で測つた目方から、ガラス管の目方を差引いて得られる。遠心分離された水は、Q 部分にたまり、その表面に記してある豫め檢定された目盛から、水の量を直ちに讀取ることが出来る。

\* 北海道大學低温科学研究所業績 第 252 號



第1圖 遠心分離器

A, B: アルミニウムの筒 P: 試料を入れるガラス管 Q: 目盛り細管  
 大きな試料管  $a=2.5$  cm,  $b\approx 0.6$  cm (内法),  $c=8$  cm,  $d=5$  cm,  $e=19$  cm.  
 小さな試料管  $a=2.2$  cm,  $b\approx 0.6$  cm (内法),  $c=7$  cm,  $d=3$  cm,  $e=21$  cm.

手廻しの遠心分離器は、第1圖に示してある。ハンドルを1回廻せば、ギヤの働きで軸が8回廻るようになってゐる。廻轉軸の先に取りつけてある腕の両端に、試料を入れる部分が一つずつぶら下つてゐる。従つて、一度に二つの試料について測定が出来る。試料を入れる部分はアルミニウムで出来た二重の壁を持つた圓筒で、内側の圓筒 B は上に述べたガラス管が丁度入る大きさである。二つの圓筒の間には、雪をつめて  $0^{\circ}\text{C}$  に保ち、試料がとけないようにしてある。尙外側の圓筒 A の外側には更に少しすき間をあけて、セルロイドの圓筒が張つてある。又ガラス管にはゴム栓をし、内側の圓筒 B には木の蓋をする。廻轉實驗中には外氣との熱交換がはげしくなるので上のような用心が必要である。蓋にも雪を使うと、尙よいであろう。(釜淵の林業試験場では既に使つてゐるとのことである<sup>1)</sup>)。

この器械は頑丈な木の箱(縦 27 cm, 横 40 cm, 高さ 24 cm)に入れて携行し、測定の現場で箱から取出して、この箱に器械をビス止めにする。(第1圖) この箱を臺にしてハンドルで手廻しするわけである。

試料の雪を入れるガラス管は、第2圖のような木の箱の中のブリキ圓筒の穴にしまつておく。この箱は下側からも、開けられるようになっていて、豫め雪をつめておいて、ガラス管を  $0^{\circ}\text{C}$

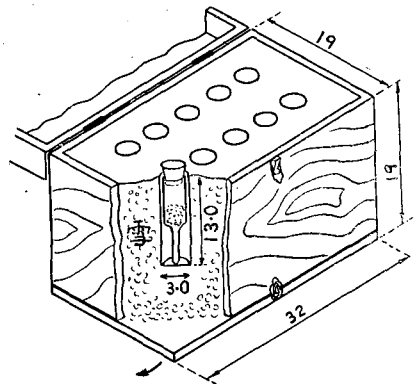
に保つようにする。従つて、雪をガラス管に入れる際に、とけることはないわけである。

測定の間には、遠心分離器を入れた箱と、ガラス管を入れた箱と、天秤とを持つて行けばよい。

### III. 実験結果

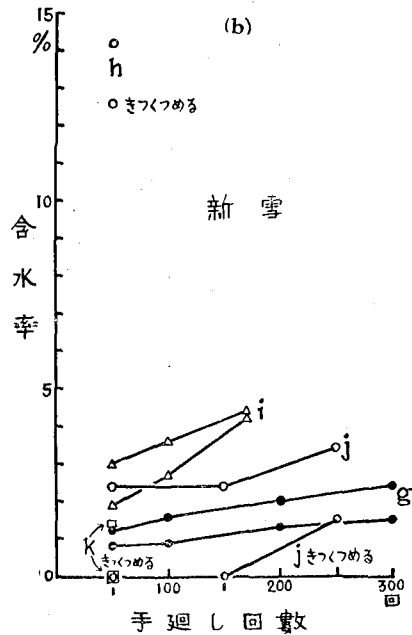
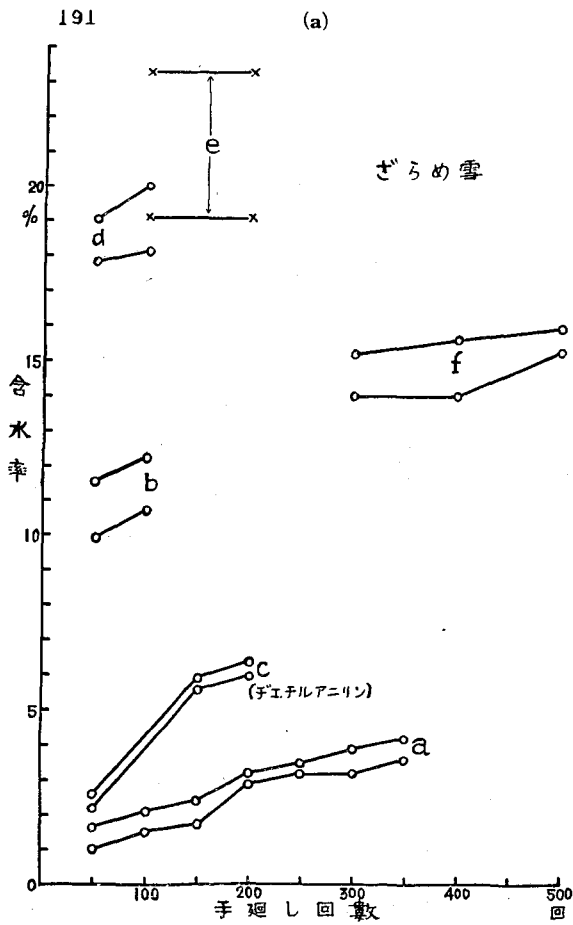
1951年3月末、低温科学研究所中庭の雪について黒岩の電媒常数法<sup>b)</sup>による測定と並行して、筆者等の手廻し遠心分離器による測定が行われた。

手廻しの速度は50回(400廻轉)を大体35秒で廻す速さで、50回手廻しをしてから、自然にとまるのをまつて、ガラス管を取り出し、讀取りを行つた。尙試料によつては、50回毎に取出して、讀取

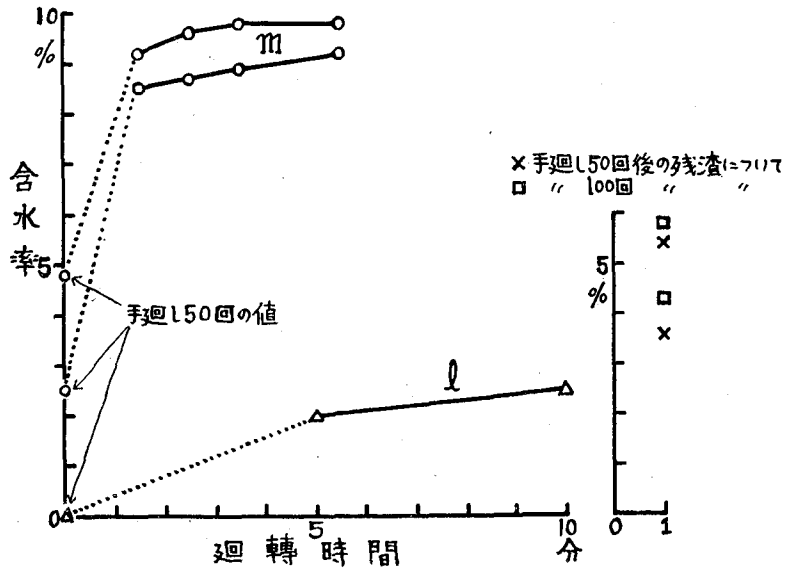


第2圖 ガラス管を入れる箱

をし、それを數回繰返した。又同じ雪についても、試料の目方を變えたり、ガラス管に入れる際にわざときつくつめたり、室温の異なるところで實驗をしたりしてみた。又更に市販の電気モーターによる遠心分離器(4000廻轉/分)にかけ、遠心加速度を數十倍にし



第3圖 (a) ざらめ雪についての實驗結果 (b) 新雪についての實驗結果



第4圖 モーター遠心分離器による実験結果

て測定を行つた。以下に得られた結果を表とグラフに示す。

尙1951年3月15, 16, 17日宗谷村のなだれ現場の調査の際に、この手廻し遠心分離器による方法で、雪の含水率の測定が行われた<sup>12)</sup>。以上の実験から次のことが解つた。

(1) 手廻しの回数をます毎に、分離される水の量がふえて来る。そのふえ方は含水率にして0~2.5%である。(実験3, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 15, 16) 特に、ガラス管の中にジエチルアエリンを注いで、分離される水がジエチルアエリンの下にたまるようにした場合(黒田, 古川の方法<sup>10)</sup>)には、そのふえ方が多くて、4%に達した。(実験6)

(2) 同じ雪でも分量を多くとつた方が含水率が多く出る。(実験3, 8)

(3) きつくつめた方が含水率が少く出る。(実験11, 13, 14)

(4) 実験室の温度が0°C以上のために、試料の雪がとけて、含水率が多く出る割合は、3°Cでは0.5%以内、18°Cでは1.5%以内である。従つてこのための誤差は無視してよい。(実験15, 16)

(5) 電気モーターによる遠心分離では、手廻しで水をとつた残りの雪についても、尙4~6%位の水を分離することが出来る。(実験18, 19は手廻しで水をとつた残りの雪を使った。実験20は同じ雪について、手廻しと電気モーターの二つの方法で行つた。従つて兩者の差4.4%と6%が手廻しでとれなかつた分である。実験17は手廻しでは全く水のとれなかつたものである。)

以上のことがどんな原因で起るのか、又この手廻し遠心分離器をどういう基準で使うべきかについて次節で簡単な考察を加えてみよう。

第1表 1951年低温科学研究所中庭の雪についての実験結果

日	時	雪質	室温	実験 番 号	試料 目方	グラフ 番 号	得られた含水率									
							1 度目	2 度目	3 度目	4 度目	5 度目	6 度目	7 度目			
3月 27日	15時	ざらめ		1	gr 4.9 4.8		% 6.9 3.1	(特にことわらないものは1度に 50廻轉した)								
"	15時 7分	"		2	6.1 6.0		6.9 7.2									
3月 28日	11時	"	1.5°C	3	6.2 5.0	a	1.6 1.0	2.1 1.5	2.4 1.7	3.2 2.9	3.5 3.2	3.9 3.2	4.2 3.6			
	13時27分	"	"	4	3.8 4.9	"	0 0	0 0	0 0							
	14時55分	"	"	5	5.8 5.5	b	9.8 11.5	10.7 12.2								
	15時	"	"	6	6.3 5.7	c	2.2 2.6	5.6 100回 5.8	6.0 6.4	(デエチルアエリン を用いた)						
3月 29日	15時30分	"		7	3.2 3.1	d	17.8 19.0	18.1 20.0								
	15時55分	"		8	3.0 2.2	e	23.3 100回 19.1	23.3 100回 19.1								
	16時	"		9	3.2 2.5	f	14.0 300回 15.2	14.0 100回 15.6	15.3 100回 16.0							
3月 30日	10時	新 雪	2°C	10	5.3 2.5	g	0.76 1.2	0.9 1.6	13.2 100回 2.0	1.51 100回 2.24						
	11時55分	"	"	11	3.5 3.2	h	12.6 14.2	きつくつめる								
	13時50分	"	"	12	2.5 2.4	i	3.0 1.9	3.6 70回 2.7	4.4 4.2							
	16時27分	"	"	13	2.9 3.4	j	2.4 0	2.4 100回 0	3.4 100回 1.5	きつくつめる						
	16時44分	"	"	14	3.1 3.4	k	1.3 0	きつくつめる								
4月 2日	11時	低温室の濡 つてない霜	3°C	15	1.6 2.0		0 0	0 0.5								
	11時13分	"	18°C	16	2.4 1.7		0 0	1.6 1.2								

以後は電気モーターによる実験

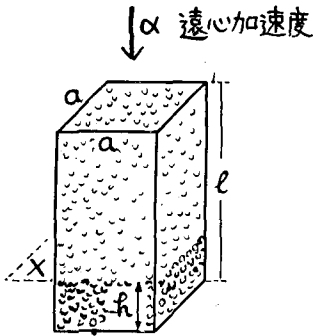
4月 3日	13時	低温室の霜	-1°C	17	6.2	l	→ 2.02 5分	→ 2.5 5分								
	14時	手廻し50回 で脱水した ざらめ	"	18	2.8 2.4		→ 3.6 モーター1分	→ 5.4								
	15時20分	手廻し100 回で脱水し たざらめ	"	19	5.4 3.6		→ 4.3 モーター1分	→ 5.8								
4月 4日	16時20分	ざらめ	"	20	2.1 1.2	m	→ 4.8 手廻し50回	→ 2.2								
	"	"	"		2.6 2.3	"	→ 9.2 1.5分	→ 9.8 2分	→ 9.2	同じ雪から 試料をとる						

## IV. 考 察

遠心分離法で、雪粒間の空隙及び雪粒の表面にある水を分離するには、どれ程の廻轉速度が必要なのか、又どれ位の時間廻轉を続けなければならないのかということが問題になつて来る。そこで次のような簡単な考察をして、實驗の結果と比較しながら、一應妥當と思われる線を出してみよう。

## 1. 雪 の 模 型

まず第5圖のような底面が一辺の長さ  $a$  の正方形で、高さが  $l$  の積雪塊について、簡単な模



第 5 圖

積雪塊 (縦、横  $a$ 、高さ  $l$ 、空隙に残つた水の高さ  $h$ 、空隙に残つた水の面  $X$ )

ならんでいるから、この積雪塊にある總雪

粒数は  $\frac{1}{4\sqrt{3}} \frac{a^2 l}{r^3}$  個である。従つて、

雪粒だけでしめる体積は  $\frac{1}{4\sqrt{3}} \frac{a^2 l}{r^3} \times$

$\frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{\pi}{3\sqrt{3}} \times a^2 l$ 、質量は  $\frac{\pi}{3\sqrt{3}} \times$

$a^2 l \times 0.9 = \frac{\sqrt{3}}{10} \pi \times a^2 l$  である。積雪塊

の体積は  $a^2 l$  であるから、密度は  $\frac{\sqrt{3}}{10} \pi$

$= 0.54$  である。同様に第6圖(a)のような

並び方では密度は  $0.47$  となる。實際に遠

心分離器にかけられて、つまつた雪の密度

を測つたところ、 $0.5 \sim 0.55$  なので、大体こ

の模型でよいと考えられる。

## 2. 表面張力の效果

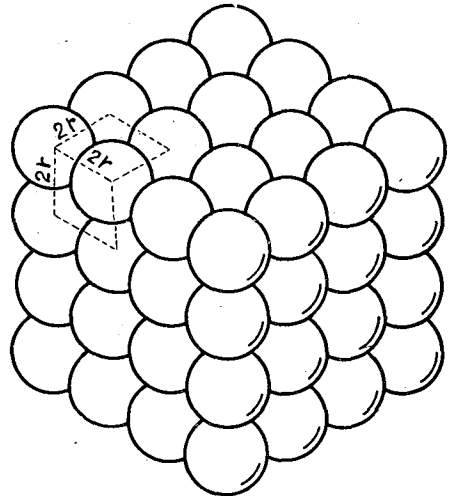
今この積雪塊をガラス管の  $P$  部に入れ

型を使つて調べてみよう。雪粒はすべて半径  $r$  の球であると假定し、第6圖(a)或いは(b)のように並んでいるものと考える。(a)圖はたて、よこ、高さのどの方向にも  $2r$  の間隔で球が並んでいる場合であり、(b)圖はたて、よこの間隔は  $2r$  であるが、高さの方向には、(a)圖の場合よりつまつていて間隔は  $\sqrt{3}r$  である。この並び方はかなりつめられた状態であるが、ここでは重力の加速度より遙かに大きい遠心加速度が作用しているので、雪粒はこの模型のような状態につまつていると考えてもよいであろう。

このような模型の時の密度を計算してみよう。第6圖(b)

のように並んでいる場合、第5圖の積雪塊に含まれる粒子の

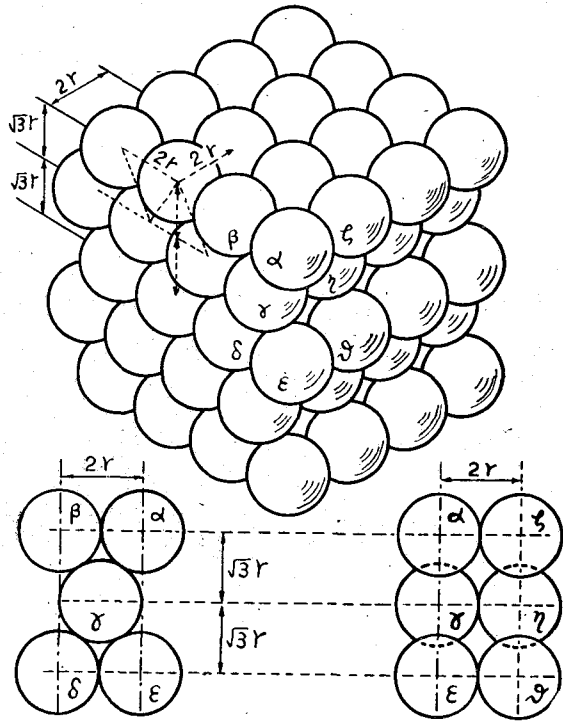
数は、たて、よことも  $(a/2r)$  個、高さの方向に  $(l/\sqrt{3}r)$  個



第 6 圖 (a) 積 雪 模 型

(水平面、鉛直面共に四角型、雪粒中心間の間隔は縦、横、高さ共に  $2r$ )

て、遠心加速度  $a$  を作用させると、雪粒間の空隙及び雪粒表面についている水は、底の方に押しやられる。底から抜け出た水は、ガラス管の Q 部にたまる。併し尙空隙に残る水が、第 5 圖のように、 $h$  の高さの X 面までである。この残つた水にかかる体積力 (加速度  $a$  の場における) は、X 面の表面張力で支えられてつりあつている。X 面における水と雪粒との境界線の長さは、空隙全部に水がたまるのであるから、X 面による雪粒の断面の周りの長さに等しい。X 面による雪粒の断面の周りの長さとしては、積雪塊の各水平面による雪粒の断面の周りの長さの平均を使うのが妥當である。第 6 圖 (b) のような並びの場合すなわち鉛直面上では雪粒が三角型に並んでいて水、平面上の相隣を二粒子間の空隙に、その上及び



第 6 圖 (b) 積雪模型

(水平面四角型、鉛直面三角型、雪粒間の空隙は縦、横、共に  $2r$ 、高さは  $\sqrt{3}r$ )

下の粒が入り込んでいることを考えに入れて計算すると、それは  $\frac{\pi^2}{3} r^2$  である。(第 6 圖 (a) の場合、すなわち、鉛直面上で四角型に並んでいる時の周りの長さの平均は  $\frac{\pi^2}{2} r$  である。) 又 X 面にある雪粒数は  $\frac{1}{4} \frac{a^2}{r^2}$  個であるので、水の表面張力を  $\sigma$  dyne/cm とすると、X 面の表面張力によつて水を支える力は、 $\frac{1}{4} \frac{a^2}{r^2} \times \frac{\pi^2}{3} r \times \sigma \approx 1.42 \frac{a^2 \sigma}{r}$  である。

各水平面における平均の空隙の面積を  $s$  とすると、 $h$  の高さまでたまつた水の量は  $hs$  gr である。遠心加速度  $a$  の場ではこの水にかかる力は  $hsa$  dyne でこれが上に述べた表面張力で支えられているのであるから  $1.42 \frac{a^2 \sigma}{r} = hsa$ 、したがつて、遠心加速度  $a$  で尙残る水の量  $hs = 1.42 \frac{a^2 \sigma}{ar}$  gr、高さ  $h = 1.42 \frac{a^2 \sigma}{ars}$  cm である。

$s$  は雪の密度  $\rho_s$  がわかつておれば簡単に算出できる、すなわち氷の密度を 0.9 とすれば、 $\rho_s/0.9$  は、雪の中で氷が占める体積であり  $1 - (\rho_s/0.9)$  が  $s$  を與える。第 6 圖 (b) の場合には  $s = 0.40$  である。

従つて、 $h$  は  $3.7 \frac{\sigma}{ra}$  cm である。それ故、遠心加速度  $a$  が大きい程、又雪粒の半径  $r$  が大きい程、効率がよいことになる。 $hs$  と  $h$  は積雪塊の高さ  $l$  には無關係になるので、 $l$  を大きく、即ち雪の分量を多くすると、残る水の割合が小さくなり、従つて誤差も小さいわけであ



る。前節 III の (2) は雪の分量が多いと分離される水も多く、含水率が多く出ることの例である。

この手廻し遠心分離器では廻轉の腕の長さが、雪の中央まで 17 cm、廻轉速度は 35 秒間に 400 廻轉であるから、

$$a = 17 \times \left( \frac{2\pi \times 400}{35} \right)^2 = 1.07 \times 10^5 \text{ cm/sec}^2$$

又  $a = 2 \text{ cm}$ 、 $0^\circ\text{C}$  における水の表面張力は  $75.6 \text{ dyne/cm}$ 。従つてこの手廻し遠心分離法で、残る水の量は  $hs = 1.42 \frac{a^2 \sigma}{ra} = 4.0 \times 10^{-3} \frac{1}{r} \text{ gr}$  高さは  $h = 3.7 \frac{\sigma}{ra} = 2.54 \times 10^{-3} \frac{1}{r} \text{ cm}$  である。

$r = 0.5 \text{ mm}$  のざらめ雪については、残る水の量は  $0.08 \text{ gr}$ 、高さは  $0.5 \text{ mm}$ 。即ち一番底にある雪粒の半分程が水に浸る位のものである。

$r = 0.2 \text{ mm}$  の新雪については、残る水の量は  $0.2 \text{ gr}$ 、高さは  $1.3 \text{ mm}$ 。即ち、底の 3 層程の雪粒が水に浸る位のものである。

測定では、 $3 \sim 6 \text{ gr}$  の雪をとつたので、ざらめ雪では  $1.5 \sim 3\%$ 、新雪では  $3 \sim 7\%$  だけ眞の値よりも少ない含水率が得られることになる。

### 3. 分子間引力の効果

雪粒表面に水と水との分子間引力のために、残る水の量について考える。表面が平面の場合に、厚さ  $d$  の液体の膜の表面分子を引き離すに要する壓力を  $p$  とすると、 $p \propto \frac{1}{d^3}$  で、 $10^{-5} \text{ cm}$  の厚さの液体の膜の表面分子を引き離すに要する壓力は、大抵  $10^8 \text{ dyne/cm}^2$  であることが知られている<sup>13)</sup>。しかるに實驗では、加速度が  $1.07 \times 10^5 \text{ cm/sec}^2$  であるので、表面に残る水の膜の厚さは、 $10^{-4} \text{ cm}$  以下であることが簡単な計算によつて解る。従つて、この分子間力によつて保有される水の量は、 $r = 0.5 \text{ mm}$  のざらめ雪で、 $0.6\%$  以下、 $r = 0.2 \text{ mm}$  の新雪で、 $1.5\%$  以下である。それ故、雪粒表面に水と水との分子間引力のために、残る水の量については測定誤差の範囲内と考えてよい。

### 4. 粘性の効果

前節 III (1) で述べたように、廻轉している時間を長くすると、次第に分離される水が多くなつて行く傾向がある。そこで遠心加速度  $a$  が作用している間に、水が雪粒間の間隙をぬつてガラス管の Q 部に達するまでに、大体どの位時間がかかるかについて、簡単な考察を試みる。この現象に一番きいて来るのは、一番狭い間隙である。第 6 圖の模型では、一番狭い間隙は、鉛直面の三角型での近接 3 箇の圓の間である。今近接 3 箇の圓の内接圓をとつて、それを一番狭い間隙とする。その半径  $R$  は、 $R = \left( \frac{2\sqrt{3}}{3} - 1 \right) r = 0.155 r$  である。半径  $R$ 、長さ  $l$  の圓管が、雪の中をつらぬいてゐるとして、單位時間にその断面を流れる流量は  $\frac{\pi \rho \times \rho a l}{8\eta l} R^4$  ( $\eta$  は水の粘性係数、 $\rho$  は水の密度  $= 1$ 、 $\rho a l$  は圓管の両端における壓力差) 即ち、 $\frac{\pi a}{8\eta} R^4$  である。又この圓管の数は、水平面内にある雪粒数  $\frac{a^2}{4r^2}$  に大体等しいと考えて、單位時間に Q 部に流れ

る水の量は、

$$\frac{\pi a}{8\eta} R^4 \times \frac{1}{4} \frac{a^2}{r^2} = 1.12 \times 10^{-2} a r^2 \text{ gr/sec.}$$

ここで、 $\eta = 0.02$  C.G.S. 単位、 $a^2 = 4 \text{ cm}^2$ 。

従つて、遠心加速度や雪粒の半径が大きい程流れ易い。半径が小さくなると、その二乗で流れ難くなる。

$a = 1.07 \times 10^5 \text{ cm/sec}^2$  を代入すると、流量は  $1.2 \times 10^3 r^2 \text{ gr/sec}$  である。従つて、 $r = 0.5 \text{ mm}$  のざらめ雪では、 $3 \text{ gr/sec}$ 。 $r = 0.2 \text{ mm}$  の新雪では、 $0.48 \text{ gr/sec}$ 。測定は数 gr の雪について行うのであるから、分離される水の量は高々  $1 \text{ gr}$  のものである。従つて、ざらめ雪では  $0.3 \text{ sec}$ 、新雪でも  $2 \text{ sec}$  の間の廻轉でよいということになる。併し、實際の雪の構造は簡単なものではなく、水の通る路も極めて複雑である。而も、流量が間隙の大きさの四乗に比例するのであるから、以上のような簡単な議論ではすまされないが、30 秒も廻せば充分であろう。

前節 III (1) に述べたように、廻轉の回数をまして行くと、分離される水がふえて行く例があるが、これは上の理由よりもむしろガラス管の出し入れの際に、手の熱が傳つたり、 $0^\circ\text{C}$  以上の外氣にふれたりするために、とけた量であると考えられる。特に、ジェチルアニリンを使つた場合には、粘性の効果がかなりきいて來ると思われる。それについて、次に述べよう。

##### 5. 雪を油に浸した場合の効果

ジェチルアニリンは化學常數表を見ると、水に溶けない油で比重は  $0.934$  となつてゐるが、實際筆者等が使つたものは、水は勿論のこと氷も沈むといつたもので、少なくとも比重は  $0.92$  以下のものであつた。このような場合における流量はどうなるであろうか。この場合には、圓管の兩端における壓力差は  $\rho a l$  ではなく、これに油による壓力が加わる。油の密度を  $\rho_a$  とすると、油によつて  $\rho_a a l$  の壓力差が上向きに加わるので、全体としては壓力差が  $(\rho - \rho_a) a l$  となる。即ち、前の場合の  $(\rho - \rho_a) / l$  倍になる。 $\rho_a$  はほぼ  $0.9 < \rho_a < 1$  であるから、 $(\rho - \rho_a) / l \leq \frac{1}{10}$  である。従つて、平衡状態に達するまでの時間が 10 倍以上になる。第 3 圖 (a) のグラフ c を見ると、最初の 50 回から次の 150 回まで、含水率が急にふえているが、これは最初の 50 回の手廻しでは、水が完全に分離されないで、まだ残つてゐることを示している。即ち、油に雪を浸すことは、油の比重が水に近ければ近いほど、平衡状態に達する時間が長くなる。云いかえれば、水を分離するのに長い時間を要することになるわけである。又、平衡状態においても、油を使うことは得でない。水と油との界面張力が水と空氣の場合の値に等しいとすると、雪を油に浸したために、界面張力によつて支え得る水の容積は一定であるのに、その浮力によつて支え得る水の量がふえるため、結局平衡状態でも尙雪に残る水の量が多くなる。従つて、水のぬげが悪いということにもなるわけである。要するに、ジェチルアニリンを使う場合には、かなり廻轉時間や廻轉速度をふやさなければならない。

しかし、試料を入れるガラス管の下についている細管 Q に、ジェチルアニリンのような、比

重が水と氷との中間にあつて、水を溶かさぬ油を入れておけば、雪から分離されて溜つた水と、試料からたまたま落ちて来た雪粒のかけらとがまぎつてしまうとゆうような不都合はさけることができる。

## 6. つめ方の効果

ガラス管に雪をつめる場合に、わざときつくつめると、雪粒間の間隔がせばめられるので、2. の表面張力の効果で述べたように、X 面における雪粒個数も、雪粒の断面の周りの長さもふえ、従つて表面張力で支えられる水の量がます。即ち分離されずに残る水の量がふえる。又間隔がせまくなることから、4. の粘性の効果で述べたように、水が非常に流れにくくなる。即ち分離するのに時間がかかることになる。

この例が、実験 11, 13, 14 にある(前節 III の (3))。即ち、新雪をそのまま入れた方が、14.2%, 2.4%, 1.3% であるのに對して、わざときつくつめて入れた方は、同じ雪について夫々 12.6%, 1.5%, 0% というように含水率が少く出ている。

## 7. 手廻し遠心分離器で分離されない水の量についての實驗的考察

以上の簡単な考察から、遠心加速度を大きくした方が、即ち速く廻した方が、又雪粒は大きい方が、残る水の量も少なく、水が分離されるに要する時間も短かいことが解る。従つて、この手廻し遠心分離法としては、手廻し 50 回を、大体 30 秒位で行い、それで得た値に、前述の毛管現象のために残ると思われる値を加えれば、ざらめ雪については相當に正確な値が得られるわけである。

つぎに遠心加速度を更に大きくして、出来るだけ完全に水を分離し、前述の補足の値を検定してみることにした。そのために、市販の電氣モーターによる遠心分離器で實驗をした。この遠心分離器の廻轉速度は 1 分間に 4000 廻轉で、腕の長さは 8cm であるから、遠心加速度は  $8 \times \left( \frac{2\pi \times 4000}{60} \right)^2 \div 1.4 \times 10^6 \text{ cm/sec}^2$  である。これは手廻しの約 15 倍であるから、雪に残される水の量は  $\frac{1}{15}$  に減り、殆んど全部水が分離されると考えて差支えない。この時の實驗は、室温  $-1^\circ\text{C}$  の冷蔵庫で行われた。その結果は表の實驗 17, 18, 19, 20 にある。前節 III (5) に述べたように、手廻しでとれなかつた水は、ざらめ雪については 5% 位のものである。

従つて、手廻し 50 回で得た値に、5% を加えたものを、雪の含水率ときめれば、2~3% の誤差の値が得られる。このことは、同時に同じ雪について測定をした黒岩の電媒常數法で得られた値と比較しても、同じことが認められた<sup>5)</sup>。黒岩の電媒常數法では、蓄電器に濕つた雪をつめて測つた電媒常數から、その蓄電器を低温室 ( $-11^\circ\text{C}$ ) に入れて、雪の含んでいる水分を完全に凍らせて再び測つた電媒常數を差引いた値、即ち雪が濕つているためにふえた電媒常數の増加分が、雪の密度一定の場合には、含水率に比例するということから、逆に含水率を求めるのであるが、この測定値と、筆者等の手廻し遠心分離器の 50 回手廻しで得られた値との間には、5~6% のずれが認められた。これは上述のように、手廻し遠心分離法では、5% 位分離されな

いで、雪中に残る水分があるということで説明がつく。尙詳細については黒岩の論文を参照されたい。

## V. む す び

手廻し遠心分離器は、手廻りであり、且つ取扱いが簡単であるので、野外測定用としては将来性があると思われる。併し、その際、遠心力の不足から脱水しきれない水があることを忘れてはならない。この残る水がどの位あるかを、実験的に又理論的に求めた。ここで使われた手廻しの遠心分離器の遠心加速度は、 $10^6 \text{ cm/sec}^2$  であつたが、この器械で約 35 秒かけて分離される水の量を雪の重量で割つて、含水率を出した。試料は更に雪で囲んで廻轉中に気温の影響を除くように工夫してある。この様にして得られた値と、モーターによる遠心分離器（遠心加速度  $1.4 \times 10^6 \text{ cm/sec}^2$ ）を使つて得た値とを比較した。

又含水率に比例する値が電媒常數法で得られるが、電媒常數法と手廻し遠心分離法とを使つて、同じ雪について同時に測定して得られた値を比較した。これ等の二つの比較からいずれも 5% 前後の水が、手廻し遠心分離法ではまだ残つてゐることが明らかになつた。

一方、理論的な考えによつて、表面張力によつて保持されている水は、半径 0.5 mm のざらめ雪では 1.5~3%, 半径 0.2 mm のしまり雪では 3~7% であることが解つた。従つて、実験で脱水されずに残つてゐる 5% 前後の水は、主に表面張力の作用であることが解つた。

表面張力で保持される水の量は、遠心力に逆比例するから、約 15 倍の遠心力をもつモーター遠心分離器では、事實上完全に脱水されたと考えてよい。そしてあとに氷と水との分子間力によつて保持されている水（たかだか 1%）が残るだけになる。

實驗に當つては、試料の分量が一定な場合には、底面積が小さい程、従つて高さが高い程残る水の量の割合が少なくなる事を考えに入れた方がよい。又加えるべき補正の値を一定にするには、試料の形を常に一定にした方がよい。

終りにこの實驗に當つていろいろ指導して下さつた吉田順五教授に感謝する。

## 文 献

- 1)~4) は文献 9) に紹介されている。
- 5) 黒岩大助 1951 積雪の誘電的性質. 低温科學, 8, 1.
- 6)~8) は文献 9) に紹介されている。
- 9) 莊田幹夫 1952 雪の含水率測定. 雪氷, 13, No. 4, 1.
- 10) 黒田正夫・古川巖 1952 遠心分離による積雪含水量の測定. 雪氷, 13, No. 5, 10.
- 11) 四手井綱英 未發表.
- 12) 吉田順五 1951 宗谷村なだれ調査報告.
- 13) Frenkel, J., 1946 Kinetic Theory of Liquids.

## Résumé

The free water content in snow has an important bearing upon its thermal, electrical, optical and acoustical properties, not to speak of its mechanical property. Accordingly, it is necessary for an investigator who wants to study a snow cover to measure the free water content in the snow. Up to this time, many investigators have attempted to measure it by various methods, for example, the calorimeter method, the volume change method, the buoyancy change method (in these methods, the large latent heat, the change of specific volume, appearing with the phase change from ice to water is utilized), the mechanical separator method (the free water is separated from snow grains by gravitational force or centrifugal force) and the dielectric constant method.

The most convenient method to be used for the field work will be the one using the centrifuge turned by hand, since the apparatus is portable and no technical skill is demanded. In this paper, the results of measurement by a hand-operated centrifuge (400 rotations per 35 seconds) are shown as well as those obtained by the centrifuge which was turned by electric motor (4000 rotations per minute) (cf. Figs. 3, 4 and Table 1.) A sample of snow is put in a glass cylinder which has a thin tube at its bottom for collecting the water separated from the snow grains by centrifugal force. The ratio of the weight of collected water to the weight of initial snow gives the free water content. The glass cylinder is covered with snow while it is being rotated in order that the sample may be held at 0°C against the higher temperature of the surrounding air.

Acceleration exerted on the snow sample is about  $1.1 \times 10^5$  cm/sec<sup>2</sup> in the case of the hand centrifuge and  $1.4 \times 10^6$  cm/sec<sup>2</sup> in the case of motor centrifuge. After the operation of 35 sec by hand centrifuge, the snow sample was again subjected to the action of motor centrifuge and it was found that more free water corresponding to about 5% of snow sample was separated afresh (cf. Fig. 4). On the other hand, considerations bearing on the relative values of free water content obtained by the dielectric constant method showed that the true value must be about 7% larger than that obtained by means of the hand centrifuge<sup>5)</sup>.

The amount of remaining water which can not be separated by an acceleration of a given value owing to the actions of intermolecular force and surface tension is calculated under a simple assumption that all snow grains are ice spheres of radius  $r$  arranged as shown in Fig. 6. For the acceleration of about  $10^5$  cm/sec<sup>2</sup> it was found that the amount of free water bound to the ice spheres by intermolecular force is not more than 0.6% for firm snow ( $r=0.5$  mm) and 1.5% for settled snow ( $r=0.2$  mm).

The sample of snow used for the experiment weighed about 3-6 gr and it is shown that it should hold in its interior by the action of surface tension an amount of water corresponding to about 1.5-3% of the total weight of snow for  $r=0.5$  mm and 3-7% for  $r=0.2$  mm. These values are for the acceleration of  $10^5$  cm/sec<sup>2</sup>. As the amount of water held by surface tension is inversely proportional to the acceleration, it follows that the water suspended under the acceleration  $1.4 \times 10^6$  cm/sec<sup>2</sup> does not exceed 1%.

From these considerations, one will find that all free water is separated by motor centrifuge within the range of experimental error and the water (5-7%) remaining after hand centrifuge is chiefly due to the surface tension.

When centrifugal force is applied, the water will begin to flow along the surfaces of the ice grains under the resistance of viscosity. By the calculation based on a simple model shown in Fig. 6, it is found that the time it takes to attain the equilibrium state does not exceed 2 seconds. For the complex structure of the natural snow it must take much more time, but it is very improbable that it will exceed 35 seconds which is the time during which the centrifugal force is being exerted in the experiment.