



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	雪の中に落下する物体に及ぼされる抵抗
Author(s)	木下, 誠一; KINOSITA, Seiiti
Citation	低温科学, 10, 13-25
Issue Date	1953-03-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17540">https://hdl.handle.net/2115/17540</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	10_p13-25.pdf



## 雪の中に落下する物体に及ぼされる抵抗\*

木 下 誠 一

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和27年9月受理)

### I

積雪の上に錘を落とすと、錘はある深さだけ雪の中に突入してとまる。錘は雪を押しわけ壓縮しながら沈んで行くが、その時錘は雪から反抗力をうけるので、あるところでとまるわけである。このように雪が衝撃的に壓縮される場合、反抗力はその過程の短い時間の中でどんな變化を示すかを、吉田、黒岩<sup>(1)</sup>の行つたのと同じ方法で色々の雪について調べてみた。

この場合の錘の運動は、 $x$  を雪の上面と錘の下端との距離とすると、

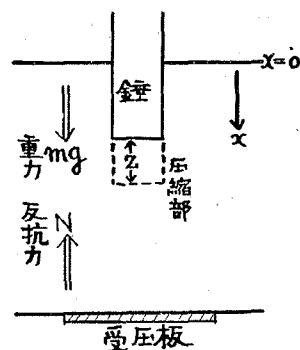
$$m\ddot{x} = mg - N \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。但し  $m$  は錘の質量、 $g$  は重力の加速度、 $N$  は雪が錘に及ぼす反抗力である。(第1圖)

この反抗力  $N$  はstress として、雪の粒と粒とをつなぐ氷橋を通じて雪中に擴がつて行く。それで、ある深さに受壓板をおくと、その深さに達した stress を測ることが出来るわけであるが、ここでは雪の塊全体を受壓板の上のせて、その上に錘を落とし、雪の塊の全底面に傳わつて来る力を測定した。

錘が雪の中に落下して行くとき、その位置が時間と共にどう變化して行くか、即ち雪の縮み方 (strain) が時間と共にどう變化して行くかも測定した。かくして、stress, strain の兩方の測定記録が得られることとなり、積雪の力學的性質の一端を推測出来る。

錘として、徑 4.8 cm、長さ 12 cm、重さ 2 kg の眞鍮圓筒と、徑 6 cm、長さ 16 cm、重さ 5 kg の鉛圓筒とを用いた。試料として、野外の積雪層から切りとつた、高さ 10~30 cm、たてよこ 15~25 cm の雪の塊を用いた。錘の始めの高さは、その下面が雪の表面から 0~7 cm 上にあるようにとつた。



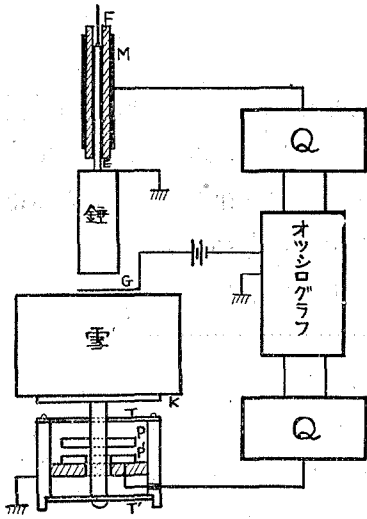
第1圖

### II

第2圖に測定装置の略圖を示す。受壓板 K は徑 12 cm の金屬圓板で、その中心の棒は弾力

\* 北海道大學低温科学研究所業績 第175號

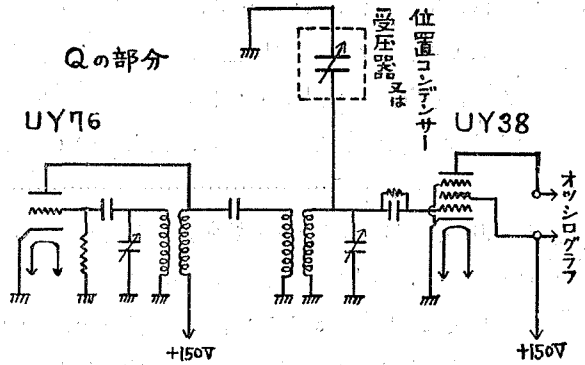
の強い2枚の鋼鉄圓板 T, T' に支えられている。K に上から力がかかると、K はその力に比例したある距離だけさがる。それで K にとりつけた金属圓板 P と、固定したエポナイト圓板にのつた金属圓板 P' とのすきまがせばまり、P, P' で出来る蓄電器の電気容量がふえる。この外力に応じて電気容量の變化する蓄電器を第3圖のような電気回路につなぐ。圖の左半分は UY76 により4メガサイクル位の振動數で振動する發振器で、これと UY38 を含む右半分の同調回路が couple されている。受壓器の電気容量がふえると、この同調がずれて UY38 の陽極電流が變化する。この電流變化を電磁オツシログラフに記録すれば、結局外力の記録が得られるわけである。



第 2 圖

るわけである。

靜的な力を加える場合には、オツシログラフに現われる電流が外力に比例するように出来る。併し受壓器



第 3 圖

自身はひとつの振動系であるので、餘り急激な外力の變化にはその變位が應じられなくなつて、電流の大きさが正しく力を表わさないようになる。今受壓板に傳わつて來た力を  $F(t)$  とし、極板 P の變位 (これは正確にオツシログラフの振れに比例させることが出来る) を  $\xi$  で表わすと、

$$\ddot{\xi} + 2\epsilon\dot{\xi} + n^2\xi = kF(t) \dots\dots\dots (2)$$

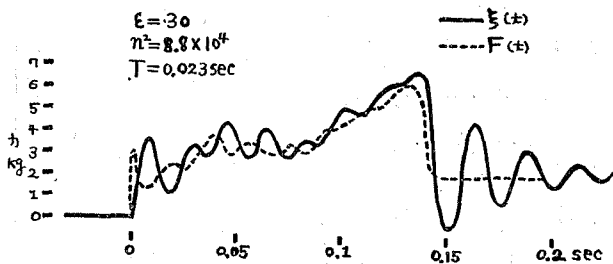
の式がなりたつ。但し  $\epsilon, n^2$  は錘、雪を含めた振動系の常數、 $t$  は錘が雪表面に達してからの時間、 $k$  は比例常數である。即ち  $\xi$  は  $F(t)$  に比例しないのである。ただ靜的な力  $F$  がかかっている時は  $\ddot{\xi}$  も  $\dot{\xi}$  も 0 になり  $\xi$  は  $F$  に比例する。

この式に含まれている常數  $\epsilon, n, k$  などは、次のようにして決めることが出来る。錘が止まつた時  $t = \tau$  であつたとすれば、 $t > \tau$  に對しては、 $N = mg = F$  である。従つて、 $t > \tau$  の範圍では  $\xi$  は固有週期  $2\pi/\sqrt{n^2 - \epsilon^2}$  の自由減衰振動をして、一定な  $\xi_0 (= kmg/n^2)$  に近づいて行く。それ故、 $t > \tau$  でのオツシログラフに現われた減衰振動の曲線から、 $\epsilon, n, k$  などが決められる。固有週期には錘の質量、雪の塊の質量が影響を及ぼすが、大體 0.02~0.035 sec の範圍であつた。受壓器だけの固有週期は 0.005 sec で、錘や雪の質量のため、週期は數倍にますわけである。

この測定の目的は  $\tau > t > 0$  について、變動のはげしい  $F(t)$  を知ることであるが、それに

はオツシログラフから  $\xi(t)$  が解るので、この  $\xi(t)$  から  $\dot{\xi}$ ,  $\ddot{\xi}$  を求め (2) 式を使つて  $F(t)$  を計算すればよい。ただ  $\xi(t)$  の變化が單純で、 $\dot{\xi}$  や  $\ddot{\xi}$  が小さく無視してよい場合には、簡単に  $F(t) \propto \xi(t)$  と考えてよい。 $\xi(t)$  の變化が多少複雑な場合について、 $\dot{\xi}$  と  $\ddot{\xi}$  を求め  $F(t)$  を決めた例が第4圖に示してある。この圖によると  $\xi(t)$  は  $F(t)$  に對して、曲線の山の所が少し遅れるだけで大体同じ形をしている。従つて、上述のような計算を一々しなくても  $\xi(t)$  から  $F(t)$  の大体の傾向は推測出来るわけである。

反抗力  $N$  が積雪中を stress として傳わつて行く速さは、100 m/sec の程度で、10~30cm の雪を傳わるには、0.001 sec 程度しかかからない。従つて受壓器に現われる力  $F(t)$  が



第4圖

反抗力  $N(t)$  に遅れる時間は無視出来るわけで、 $F(t)$  はそのまま  $N(t)$  を表わすものと考えてよい。

錘の位置の時間的變化を記録するには、次の方法を用いた。第2圖に示すように、錘に細い金屬棒  $E$  をとりつけ、この棒  $E$  がエポナイトの中空圓筒  $F$  を通り抜けるようにする。この  $F$  にはブリキの圓筒  $M$  がかぶせてあつて、 $E$  と  $M$  とは蓄電器を形作るのので、 $E$  が  $F$  中を抜けて落ちて行くと電気容量が減つて行く。この電気容量變化を受壓器の場合と全く同じ方法で、オツシログラフに記録すれば、錘の位置の變化が得られる。

第2圖の  $G$  は雪の表面にねかせた細い針金で、錘が雪表面に接觸した瞬間を記録するのに使う。オツシログラフの振動子としては、 $F(t)$  と位置の記録には  $H$  型を、接觸瞬間の記録には  $A$  型を用いた。

### III

色々の雪質の雪について、色々變つた條件で實驗をしたが、次に夫々の代表的な二、三の例について、その特徴を述べよう。第1表に、以下に示す測定例についての諸條件をとりまとめて示してある。

#### (a) 新雪 (第5圖, 第6圖)

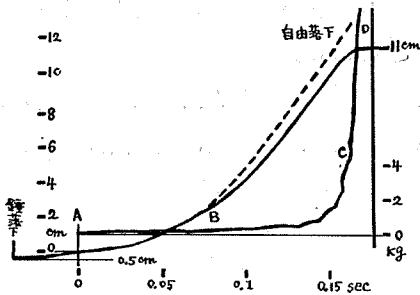
一般に新雪に現われる特徴は

- (i) 錘が雪表面に達した瞬間 (圖の  $A$  點) では、 $F(t)$  が 0 で、なお  $\frac{dF}{dt}$  も 0 のようである。
- (ii)  $F(t)$  は  $t$  がすすむにつれて、次第に増加して最大値に達し、その直後急激に減少する。

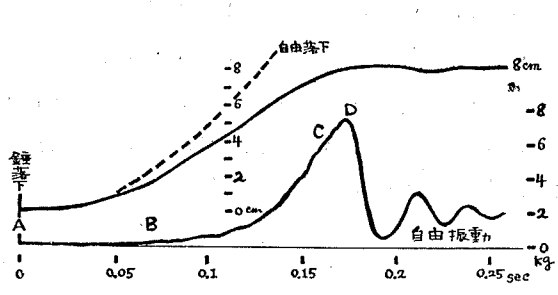
第5圖, 第6圖の曲線を圖に印した  $A, B, C, D$  により、 $(A-B), (B-C), (C-D), (D)$  以後の四つの範圍にわけて考えてみよう。 $(A-B-C)$  の範圍で、 $\xi(t)$  の變化は單純なので、 $F(t) \propto \xi(t)$  と考えてよい。

第 1 表

	年月日時	雪 質	密度	雪温 °C	気温 °C	錘の始りの 位置 (当表面上) cm	雪の 厚さ cm	沈下 した 厚さ cm	残つた 雪の 厚さ cm	錘が雪の 中を沈めた 時間 sec	壓縮部 の厚さ cm	
第4圖	1951. 2.14 P.M. 3.20	しまり雪	0.25	-3.5	-7.0	5.5	17.5	10.2	7.3	0.139	3	
第5圖	1951. 2. 8 P.M. 2.00	新 雪	0.10	-1.0	-1.5	0.5	11.5	11	0.5	0.17	受壓板に 達する	
第6圖	1950.12. 8 P.M. 4.00	〃	0.15	-2.6	-5.0	0	13	8	5	0.18	4	
第8圖	1951. 1.24 P.M. 2.00	しまり雪	0.20	-4.0	-4.1	4	14	11	3	0.14	受壓板に 達する	
第9圖	1951. 2. 7 P.M. 2.00	か いた しきり雪	0.32	-2.2	-3.2	8	14	2	12	0.028	不明	
第10圖	1952. 3.10 P.M. 4.00	しまり雪	0.28 0.35	-1.0 -1.0	-0.5	4.5	26	20	6	0.108	2	
第11圖	1951. 1.16 P.M. 2.00	〃	0.17 0.28	-1.2 -2.0	+2.3	2.5	15.5	11.2	4.3	0.189	3	
第12圖	1952. 3.13 A.M.11.30	〃	0.31 0.33	-3.0 -3.0	-0.5	0	22	2		0.15		硬度計を落す
第13圖	1951. 3. 1 A.M.10.30	しめつた 雪	0.5	0	+2.8	4	15	3	12	0.045	4	雨がしみこんで いる (降雨中)
第14圖	1951. 2.15 A.M.11.00		0.29	-9.6	-6.8	4.5	14.5	1.7	12.8	0.037	不明	新雪0.08をつ めて固める
第15圖	1951. 2.26 P.M. 1.00		0.43	-0.5	-3.0	2	15	14.3	0.7	0.243	受壓板に 達する	しまり雪0.31を 砕いてつめる



第 5 圖



第 6 圖

範囲 (A—B): 第5圖では  $t=0$  から  $t=0.08$  sec まで, 第6圖では  $t=0$  から  $t=0.07$  sec までがこの範囲である。

$F(t)$  は殆んど 0 である。新雪では互につながりのない雪粒が軽くつまっているだけなので, この範囲では錘に反抗力が殆んど働かない。従つて, 錘は殆んど自由落下をしているのと同じである。このことは錘の位置の記録からも確かめられる。

範囲 (B—C): 第5圖では  $t=0.08$  sec から  $t=0.16$  sec まで, 第6圖では  $t=0.07$  sec から  $t=0.16$  sec までがこの範囲である。

この範囲では  $F(t)$  が時間と共に少しづつましている。即ち錘が沈むにつれて反抗力もまして来る。従つて自由落下からの違いも段々大きくなって来る。

錘が雪の中を沈んで行くと、その下の雪は壓縮され、錘の下面に續いてある厚さの壓縮部分が出來て行く。この壓縮部分は錘と同じ圓筒形をしている。錘に及ぼされる反抗力は、この壓縮部のまわりにある處女雪が、圓筒形の境界面を通して壓縮部に加える力である。この力は壓縮部の底面にその下にある處女雪が及ぼす壓力  $P$  と、壓縮部の側面を通じてまわりの雪から及ぼされる摩擦力  $R$  とにわけられる。この摩擦力  $R$  は、壓縮部 (速度は錘の速度に等しく、 $\dot{x}$ ) と、そのまわりの雪 (静止) との間に速度差があるために起るものと考えられる。これによる抵抗は錘の速度に關係するので、吉田、黒岩によれば<sup>(1)</sup>、速度抵抗といわれる。新雪では  $P$  は小さいと考えられる。それで、反抗力  $N$  はその全部がこの  $R$  であると假定して、この際の摩擦係数がどの位のものになるか計算してみよう。

壓縮部の厚さは時間的に増して行くが、いまそれを  $x$  で表わす。又簡單のために、壓縮部の密度  $\rho'$  は時間的に變化せず一定であると假定する。處女雪の密度を  $\rho$ 、錘の斷面積を  $S$  とすると、 $(x+z)\rho S$  の質量の雪が  $x\rho'S$  に壓縮されるのであるから、

$$(x+z)\rho S = x\rho'S \text{ で、}$$

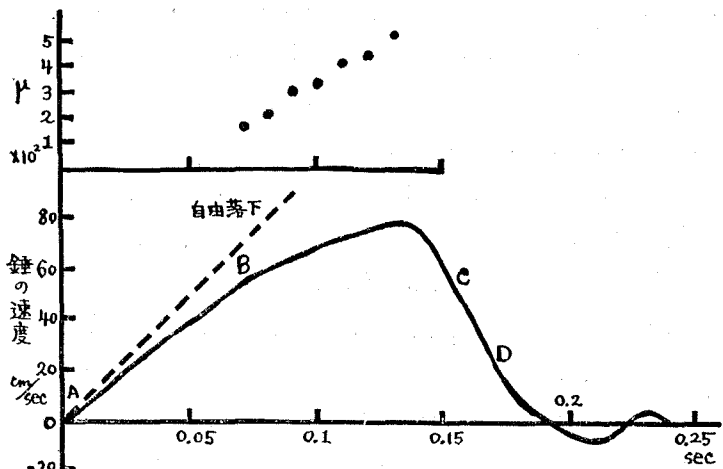
$$x = \frac{\rho}{\rho' - \rho} z \dots\dots\dots (3)$$

の關係が得られる。摩擦による抵抗  $R$  は、壓縮部分の側面積  $xl$  ( $l$  は圓筒の切口の周の長さ) と、錘の速度  $\dot{x}$  と、摩擦係數  $\mu$  との積であるから、

$$xl\dot{x}\mu = \frac{\rho}{\rho' - \rho} xl\dot{x}\mu = R \dots\dots\dots (4)$$

なる關係がなりたつ。摩擦係數  $\mu$  ( $\text{dyne/cm}^2\text{sec}^{-1}$ ) はある面の兩側でその面に沿つて  $1\text{cm/sec}$  の速度差があるときに、單位面積について働く摩擦力の値を示すわけである。第6圖の新雪では、錘が雪の中に  $8\text{cm}$  沈んで止まり、そのときの壓縮部の厚さは  $4\text{cm}$  であつた。これから、 $\rho' = 0.45$  が得られる。なお、 $l$  は  $15\text{cm}$  である。錘の位置の記録から、 $x$  と  $\dot{x}$  を定め、上の式により、色々な時刻につ

いてのを  $\mu$  計算すると、第7圖に示すようになる。即ち  $\mu$  は一定でなく、錘が雪の中に沈んで行くとともに、直線的にかなり急にまして行く。従つて、反抗力  $N$  が全部摩擦力  $R$  であるとの假定は正しくなかつたとも考えられ、殊に錘が止まる時間  $t = \tau$  に近づけ



第 7 圖

ば摩擦力  $R$  の他に底面に働く圧力  $P$  がかなり大きくなることは疑いのないことである。この  $P$  については後で述べる。

範囲 (C—D): 第5圖では  $t=0.16$  sec から  $t=0.17$  sec まで、第6圖では  $t=0.16$  sec から  $t=0.18$  sec までがこの範囲である。

第5圖ではオウソグラフの振れが scale out する程、反抗力  $N$  が大きくなっている。これは壓縮部の下面が受壓板に達したからである。吉田、黒岩によれば<sup>(1)</sup>、この大きな抵抗は壓縮抵抗といわれ、錘の位置の記録からも、ここで錘の落下運動が急激に鈍いとめられていることが解る。第6圖では實驗後錘の下の雪の断面をきりとつてみたら、壓縮部の厚さは4 cmで、その下には受壓板との間にまだ1 cmの厚さの處女雪があつた。従つて、壓縮抵抗は現われず、速度抵抗だけで終つている。第7圖にこの場合の速度のグラフを示してあるが、速度は極大値になつてから、ほぼ0.06 secの時間をかけて徐々に0まで下つている。即ち、この場合には、壓縮抵抗がないので、錘の落下運動は摩擦抵抗によつて徐々に減速されたわけである。速度の極大値のあとは、負の加速度が生じ、 $\ddot{a} < 0$  となるが、(1)式から  $N - mg = -m\ddot{a} > 0$ 、即ち  $N > mg$  なる結果が得られる。 $mg$  はこの場合2 kgで、第6圖の力が2 kgの線をこえる時刻は、第7圖の速度の極大値の時刻 ( $t=0.135$  sec) と一致している。又第7圖から、 $\ddot{a}$  を求め、 $mg - m\ddot{a}$  を計算すると、 $t=0.16$  sec で7 kg程になるが、これは第6圖の力の極大値、 $t=0.17$  sec で7.4 kgと數値的によく一致する。この時間の遅れは、IIに述べた測定器自身の性質によるものである。

錘が最後の位置 ( $x=8$  cm) に達するのは、 $t=\tau=0.18$  sec である。その間に、重力が錘に與えた力積は、 $mg\tau=3.5 \times 10^5$  dyne sec である。又反抗力  $N$  が錘に與えた力積は  $\int_0^\tau N dt$  で、この値を力のグラフから面積計で測つてきめると  $\int_0^\tau F(t) dt = 3.2 \times 10^5$  dyne sec となる。 $mg\tau = \int_0^\tau N dt$  でなければならぬのであるが、事實これら兩方の値は大體よく一致している。これらの事實は、この測定法がかなり正確であることを示すものである。

最後の位置 ( $x=8$  cm,  $\tau=0.18$  sec) に達してからも、錘は0.015 sec ( $t=0.195$  sec) の間に、尙2 mm ( $x=8.2$  cm) 沈み、その後0.022 sec たつて ( $t=0.217$  sec) 約5 mmはね上つている ( $x=7.7$  cm)。更に0.023 sec 後 ( $t=0.240$  sec) に、最後の位置  $x=8$  cm になつている。このはね上りは壓縮部の雪の弾性によるものと考えられる。

範囲 (D 以後): 第5圖では  $t=0.17$  sec 以後、第6圖では  $t=0.18$  sec 以後がこの範囲である。この範囲では、 $F(t)=0$  で、受壓器と錘と雪とを含めた系はそれに固有な自由減衰振動をする。

(b) 一様なしまり雪 (第8圖, 第9圖)

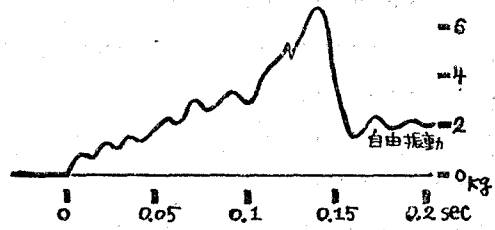
(1) 錘が雪の表面に達した瞬間に、 $F(t)$  が現われ、 $\left(\frac{dF}{dt}\right)_{t=0} > 0$  である。このようなことは吉田、黒岩によれば<sup>(1)</sup>、破損抵抗によつて起ることになる。

(2)  $F(t)$  に0.005~0.03 secの間隔で細かい山が現われている。

(3) 餘りかたくないしまり雪では、細かい變動をならすと、 $F(t)$  は  $t$  がますにつれて次第に増加し、ある時刻で最大値に達し、その後急に小さくなる。(第8圖)

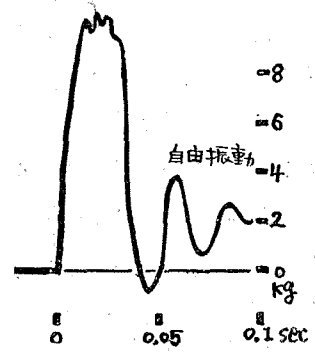
(b) かたしまり雪では錘が雪に接触した瞬間に大きな破損抵抗が現われ、 $F(t)$  は大体一定値を保つたまま最後まで連続く。(第9圖)

(c) のことについては次のような説明が與えられる。しまり雪は降り積つてから暫くたつた雪で、雪粒同志が短い氷橋でつながれた構造をもっている<sup>(3)</sup>。破損抵抗は錘が雪の表面に達してから、0.01 sec 程の短い間にすでに現われる。この短い間では錘の沈下は高々數 mm 程度のものにすぎないので、strain は小さい。併し、錘が雪の表面に達した時現われる第一撃の衝撃は、かなり深くまで達していると考えられる。まず、しまり雪に第一撃が加えられると、錘の下面に接する所で雪粒同士をつなぐ氷橋が破損し、この破損はそれに続く氷橋に次々に傳わつて行く。この傳わり方は、吉田によれば<sup>(4)</sup>、丁度



第 8 圖

擴散の現象に於ける傳播と同じものと考えられ、吉田は一つの氷橋の破損から次の氷橋の破損までの時間は、 $10^{-4}$  sec の程度であるという結果を出した。一方、氷橋の長さは 0.1 cm の程度なので、これから破損は  $10^8$  cm/sec の程度の速さで、一つの氷橋から次の氷橋へと傳わると考えられる。従つて、破損が擴散現象のように傳わるとしても、この第一撃の段階で數 cm の程度の範囲にまで、破損が及んでいくことになる。stress は雪の中を一樣に 100m/sec の程度の速さで傳わるので、この短い間にも受壓板まで傳わり、力の記録の遅れは無視出来る。破損抵抗はこうして現われるのであるが、(a) の新雪では氷橋がまだ出来ていないために、現われなかつたのである。



第 9 圖

次にこの破損した氷橋は、錘の沈下とともに完全に破壊され、粒と粒との間隙がうめられる。こうして破損部分は次々と壓縮部にくり入れられて行く。この氷橋の破壊は壓縮部の下面で行われるが、この下面の進む速さを  $V$  とすると、單位時間に破壊される氷橋の數は  $V$  に比例する。一方、一つの氷橋を破壊するにはある大きさの impulse が必要なので<sup>(5)</sup>、氷橋の破壊のために  $V$  に比例する抵抗が現われることになる。(3) 式がなりたつような簡単な場合には、

$$V = \frac{d}{dt}(x+z) = \frac{\rho'}{\rho' - \rho} \dot{x} \dots\dots\dots (5)$$

で、破壊抵抗は錘の速度に比例する。そして壓縮部の進行速度  $V$  は錘の進行速度  $\dot{x}$  よりも大きい。

この破壊抵抗は前述の壓縮部の底面に働く壓力  $P$  であつて、上のことにより、

$$P = \lambda \frac{\rho'}{\rho' - \rho} \dot{x} \dots\dots\dots (6)$$

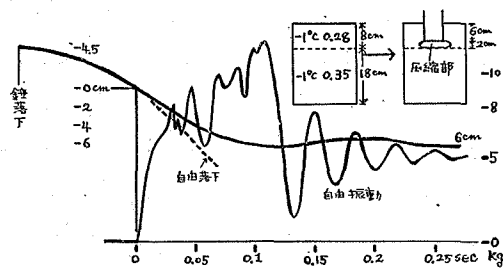
$\lambda$  は比例の常數

とすることが出来る。このように破壊抵抗は錘の速度に關係するので、速度抵抗の一種と考えられる。即ちしまり雪では速度抵抗として、(4) 式の内部摩擦による抵抗と (6) 式の破壊抵抗とがあるわけである。

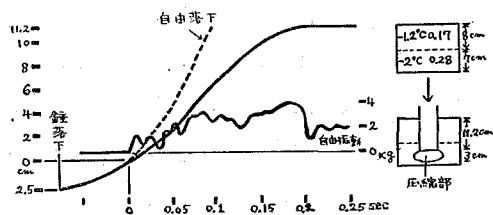
餘りかたくないしまり雪にみられる (a) の特徴は、上に述べた破壊速度抵抗のために現われるものと考えられる。

(a) で述べたような  $F(t)$  にみとめられる間歇性については吉川の詳しい理論的な報告がある<sup>(4)</sup>。それによると、上述のように氷橋の破損の傳わり方は擴散現象と同じく考えられ、それと壓縮部の進み方が違うため、ある所で壓縮部の下面が破損部の先端に追いつく。すると、そこで大きな反抗力が現われる。この大きな力で又破損が起り、上のことがくりかえされて、反抗力に間歇性が生ずるとして説明されている。又小島の顯微鏡での觀察によると<sup>(6)</sup>、破損された雪粒は、そのいくつかが集まつてグループをつくり、そのグループ同士が相互に位置を変えるため、すきまが出来る。次に壓縮部が進んで來る場合、このグループ同士のつながりを保つ極限の強度をこえる impulse に達すると、崩れてすきまがうめられ壓縮されたことになる。つまり壓縮部の出來方に不連続な段階があり、破壊抵抗にも間歇性が現われる。 $\xi(t)$  の間歇的な山と山との間隔は 0.015 sec 位のものが最も多い。雪がかたくなり氷橋が強くなるに従い、この間隔は短く 0.004 sec 位のものまで現われるようになる。これ以下の時間間隔の細かい變動もまた、この種の問題を取扱う上に重要なものであるが、II で述べた測定器自身の性質から、これ以下の細かい變動があるかどうかを見つけることは今のところ出来ない。

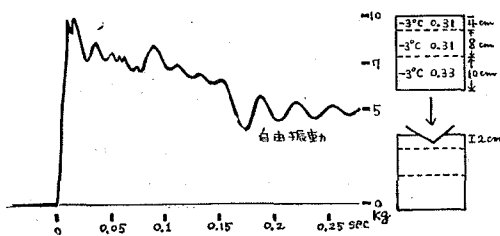
(c) いくつかの層が重なつたしまり雪 (第 10 圖, 第 11 圖, 第 12 圖)。



第 10 圖



第 11 圖



第 12 圖

前項 (b) に述べた特徴がこの場合にも現われている。特に (a) の細かい  $F(t)$  の變動は、(b) の場合よりも顯著である。その他に、しまり雪が層をなしていることのために、壓縮部が層と層との境界でくいとめられていることが多いということが見られる。このことは、錘がとまつてから雪の断面を切つてみるこ

により確められる。

一度降雪があつて暫く降雪がなく積つたまましていると、表面で昇華が盛んに起り、明らかに内部とは異なる薄層が表面に出来る。その後又降雪があつて同じことがくりかえされると、この種の薄層で境されたいくつかの層の重なつた積雪が出来あがる。又層はその境界で互にはがされ易いが、境界の層はそれ自身横のつながりが強いのが普通である。従つて、錘の下の壓縮部の先端が境界に達する場合には、ここを突き抜けるのに特に強い impulse が必要となり、ここで壓縮部の下への進行がくいとめられて、壓縮部が横の方へ擴がつて行くことが多い。第10圖に、この壓縮部の廣がつた様子のスケッチをしてある。壓縮部が境界層に當つて横の方へ廣がつたのち、境界を抜けて行くと、その時に強い反抗力が働くわけである。このことのためにも反抗力に大きな變動が現われるはずで、實際に第11圖の反抗力のグラフは大きな變動を示している。

第10圖では、錘が最後の位置 ( $x=6\text{ cm}$ ,  $t=0.108\text{ sec}$ ) に達してから、 $0.082\text{ sec}$  後 ( $t=0.19\text{ sec}$ ) に約  $6\text{ mm}$  はね上り ( $x=5.4\text{ cm}$ )、その後  $0.05\text{ sec}$  ( $t=0.024\text{ sec}$ ) で最終位置 ( $x=6\text{ cm}$ ) になつてゐる。このはね上りには、第6圖と同じく壓縮部の弾性による現象である。はね上りの量が大きいのは、壓縮部の密度の大きいこと及び錘の與えた impulse が大きいことなどのためであろう。

今迄は、すべて、底の平らな圓筒形の錘を使つた例であるが、第12圖は錘として圓錐形の積雪硬度計を使つた場合である。重量をますために  $4\text{ kg}$  の鐵塊を圓錐の上ののせた。今迄のと違つて著しいことは、まず最初に著しく大きい反抗力が現われ、その後は反抗力が次第に小さくなつて行くことである。この圓錐形の積雪硬度計は廣く使われているので、それに及ぼされる反抗力と雪の性質との關連を研究することは重要なことと考えられる。併しまだこの方面の研究は餘り、行つていないのでここにはただ一例をあげるのにとどめる。

#### (d) 濕つた雪 (第13圖)

第10圖と同じ型である。濕つた雪では雪の粒子が水の薄層で蔽われているため、氷橋が弱く、壓縮部の成長速度が大きい。そのため、反抗力の間歇性は一般にしまり雪よりも著しい。錘の沈下の際に壓縮する雪の量も大きく、これの量的な關係は後に述べる。

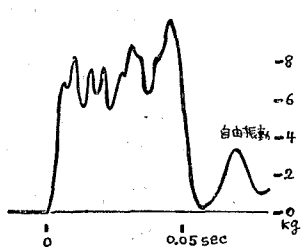
#### (e) 新雪をつめて固めたもの (第14圖)

粒同士互につながらぬ新雪 (密度  $0.08$ ) を  $20\text{ cm}$  角の容器につめて (密度  $0.29$ ) それを受壓板の上ののせ、それに上から錘を落した。この場合には、始めから雪全体が壓縮部の状態になつてゐるわけである。併し、この状態ではただ雪が積み重ねられているだけで、これを衝撃壓縮すれば、各雪粒子の互に接觸し合つてゐる稜や角は破壊されて、雪は第2段の壓縮をうけることとなる。齋藤の報告によれば<sup>(7)</sup>、第1段の壓縮過程というのは、雪粒同士をつなぐ本來の氷橋を破壊して押しつめることである。この押しつめられた雪粒子は、積み重なつて、各粒子の稜や角で接觸し合い、この接觸部が第2次の橋をつくる。第2段の壓縮過程というのは、

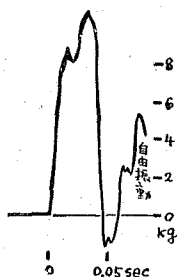
この第2次の橋を破壊することである。この第2段の壓縮に要する力は、第1段の壓縮に要する力の數倍以上である。第14圖で、錘の沈下の少ない割に大きな力の山が、始めから現われてそれだけで終っているのは、同じ密度のしまり雪の場合に、第10圖のようであると比べると、明らかに第2段の壓縮が始めから行われていることを示すものである。

(f) しまり雪を砕いてつめたもの (第15圖)

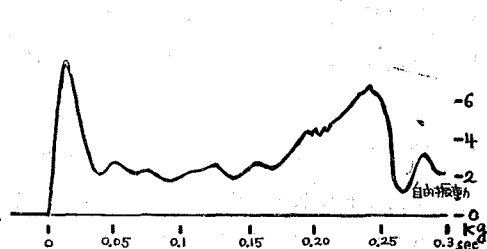
氷襖のよく發達している硬いしまり雪 (密度0.31) を完全に砕いて、(e)の場合と同じく容器につめたもの (密度0.43) である。個々につながりのない、大きな、角の少ない粒子が、つめられているので、この雪は始めから第1段の壓縮をうけているわけである。この粒子相互の接觸面積は (e)の場合に比べて大きい。この場合の破損は粒子相互の接觸部が破損をうけることなので、第一撃をうけて生ずる破損抵抗は非常に大きい。第15圖で始めに獨立した高い山が現われているのは、このためである。つぎに、約0.13 secの間、大体錘と同じ重力の2 kgの力が續いている。即ちこの範圍では、錘は加速度のない状態で落下している。その後、0.07 sec程、壓縮抵抗が生じて錘はとまる。



第13圖



第14圖

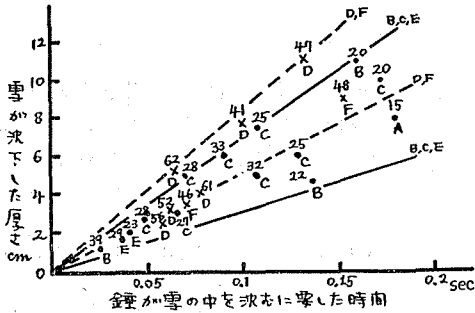


第15圖

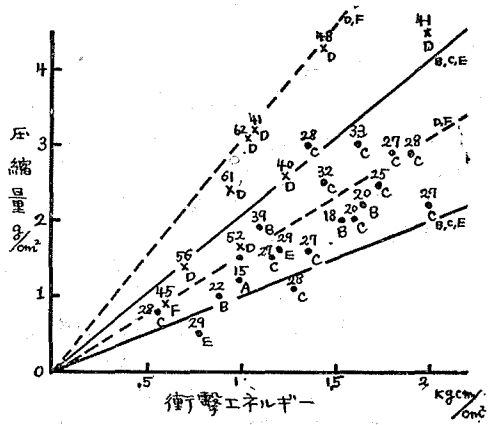
IV

以上の實驗で得られたいくつかの量について相互の關係を調べてみる。第16圖は錘の、雪の中に沈んだ深さと、それに要した時間との關係を示す。第17圖は錘の衝擊に費したエネルギーと、壓縮されて体積の減つた分の雪の質量との關係を示す。即ち、錘が始めの高さから、雪の中に突入してとまる迄に、落下した距離  $L$  と、 $mg$  ( $m$ は錘の質量、 $g$ は重力の加速度) との積と、雪の沈下した厚さ  $S$  と雪の始めの密度  $\rho$  との積、との關係である。各グラフの點の數字は雪の密度の小數以下を示すもので、例えば、41は密度0.41の意味である。又Aは新雪、Bは一樣なしまり雪、Cはいくつかの層が重なっているしまり雪、Dは濕つた雪、Eは新雪をつめて固めたもの、Fは硬いしまり雪を砕いてつめたものを表わす。この二つの圖に集めたものは、壓縮部が受壓板に達しない場合のものだけである。

第16圖をみると、密度の小さいもの程、圖の右上邊の方に點が位し、錘の沈みもそれに要した時間も大きいことを示している。併し、各點は大体原點を通る直線の近くに分布し、錘が雪の中を進む平均の速さが、密度の差にかかわらず大体一定していることが解る。この速度は、



第 16 圖



第 17 圖

B, C, E では、30~70 cm/sec D, F では 50~80 cm/sec である。第 17 圖は、1 kgcm/cm<sup>2</sup>

の衝撃エネルギーについて、B, C, E では、1~2 g/cm<sup>2</sup> の雪が壓縮され、D, F では、1.5~3 g/cm<sup>2</sup> の雪が壓縮されていることを示している。B, C, E と、D, F とは、二つのグループを作っているが、D, F が、B, C, E に比べて、各粒子相互のつながりが弱いためである。D は濡った雪で、融解のため氷橋が弱くなっており、F は硬いしまり雪を砕いてつめたもので、各粒子は新雪などに比べて、角がとれて圓味があるため、第 2 段の壓縮をする場合に、粒子相互の摩擦が小さく、従つて氷橋の弱い D と同じグループに入ると考えられる。新雪をつめた E が、氷橋の強い B, C のグループに入るのは、F とは逆に、各粒子が角ばっているため、粒子相互の摩擦が大きいからであろう。又明らかに第 2 段の壓縮だけと考えられる E が、他の雪の衝撃壓縮に比べて、特に大きい衝撃エネルギーを要していないことから、この衝撃壓縮では、錘がとまる迄には、結局第 2 段の壓縮がすべての雪で行われていることが解る。

この實驗は、1951, 1952 の 2 箇年の冬に行われたもので、いろいろと御指導をいただいた吉田順五教授、應用物理學部門の方々へ厚く感謝の意を表する次第である。

文 献

- (1) 吉田順五, 黒岩大助 1950 衝撃荷重による積雪沈下の経過. 雪氷, 12, 2 號.
- (2) 吉田順五, 笹谷雅信, 内海成彦 1948 雪面の弾性と衝劔. 低温科學, 4, 11.
- (3) 齋藤鍊一 1949 積雪粒子の構造と力學的性質. 氣象集誌, 23.
- (4) 吉田順五 1953 雪の粘弾性と破壊抵抗. 低温科學, 10, 1.
- (5) (3) と同じ
- (6) 小島賢治 未發表
- (7) (3) と同じ

## Résumé

When a body is dropped on the surface of snow it is stopped after it has fallen into the snow some distance from its surface. The resistive force  $R$  which the body receives from the snow in this short period was measured by the following way. A block of snow was placed on an electrical condenser which changed its capacity in proportion to the force applied on it. A cylindrical block of brass was dropped on the surface of the snow and the variation of the capacity of the electrical condenser was recorded on an electromagnetic oscillograph. It is obvious that its record gave the resistive force  $R$  applied on the falling brass block.

The record showed that the falling body was stopped about one tenth of a second after it had touched the surface of the snow. The mode of variation of the resistive force  $R$  during this time was very complicated but it could be roughly divided into the following three stages.

First stage: A large value of  $R$  appears during a short period after the falling body touched the surface of the snow. Appearance of this stage is supposed to be due to production of failures in the ice bridges connecting the ice particles with which the snow underneath the falling body is composed. This stage will be called the stage of "failure resistance".

Second stage: In the last part of this stage the resistive force  $R$  is nearly equal to the weight of the falling body. This fact suggests that the falling body receives in this stage a resistive force which increases with the increase of its falling velocity and in consequence it attains the terminal velocity in the last part of this stage. This stage will be called the stage of "velocity resistance".

Third stage: The resistive force  $R$  increases gradually, attains a large value and then suddenly drops to zero. This behavior of  $R$  suggests that the snow underneath the falling body is packed to its extreme compactness in this stage. The  $R$  in this stage will be called "packing resistance".

Experiments were made on the snow of several types and different characteristics shown by each snow type will be described below.

### (A) Soft snow (Fig. 5, 6)

In this case failure resistance does not appear since ice bridges have not yet grown. Velocity resistance increases gradually from zero to a maximum value with increasing time. It is noted that the resistive force is not applied directly on the falling body but on the column of compressed snow produced by the falling body underneath it. The resistive force on this column is composed of two parts. The one part is the frictional shearing stress which acts on its boundary side surface and the other is the pressure resistance which acts on its base plane. Assuming that the pressure resistance is small compared with the frictional one, the frictional coefficient of it is found to be about  $1\sim 5 \times 10^2$  dyne per unit area per unit velocity difference. The packing resistance appears when the base of the column of compressed snow touches the plate on which the block of snow is placed.

### (B) Homogeneous compact snow (Fig. 8, 9)

Resistive force grows rapidly from zero to an appreciable magnitude as soon as the falling body touches the surface of the snow. This is the failure resistance in the first stage. The velocity resistance in the second stage is not continuous, but its curve has a zigzag feature with many peaks and troughs. Its trend, however, shows that its mean value grows gradually starting from the value attained by the failure resistance.

### (C) Aggregation of several compact snow layers (Fig. 10, 11, 12)

The main feature of this snow type is almost similar to that of (B). The zigzag feature of velocity resistance is more conspicuous.

## (D) Wet snow (Fig. 13)

Since snow particles are covered by water films and the ice bridges connecting them are weakened in this case, it needs smaller force to break down them. Therefore, the subsidence depth of the falling body is larger than that in the cases of (B) and (C).

## (E) Packed soft snow (Fig. 14)

Snow particles are adhered to each other and the feature of this snow type is the same as that of firm compact snow.

## (F) Snow sample formed by packing snow particles which are produced by crushing a block of firm compact snow. (Fig. 15)

Since snow particles are not connected by ice bridges but only contact with each other, there is no resistive force to be expended for breaking down ice bridges. Therefore, the subsidence depth of the falling body is large as in the case of (D). Failure resistance appears as an isolated sharp impulse.

In the cases of (B), (C), and (E) the average velocity of the falling body is 30~70 cm/sec, whereas in the cases of (D) and (F) it is 50~80 cm/sec. (Fig. 16)

The total energy  $E$  given to the snow by the falling body is equal to  $mgL$ , where  $m$  is the mass of the falling body,  $g$  the acceleration of gravity and  $L$  the total distance fallen by the falling body. Let the subsidence depth, that is, the distance from the snow surface to the base of the falling body after it has been stopped, be  $l$  and the density of the snow in its original state be  $\rho$ . Then the ratio  $(F/A)/l\rho$  ( $A$  is the sectional area of the falling body) is found to be 1-2 kg-cm/gr in the cases of (B), (C) and (E) and 1.5-3 kg-cm/gr in the cases of (D) and (F). (Fig. 17).