



Title	雪の粘弾性及び雪の破壊抵抗
Author(s)	吉田, 順五; YOSIDA, Zyungo
Citation	低温科学, 10, 1-11
Issue Date	1953-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17539
Type	departmental bulletin paper
File Information	10_p1-11.pdf



雪の粘弾性及び雪の破壊抵抗*

吉田 順五

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和27年9月受理)

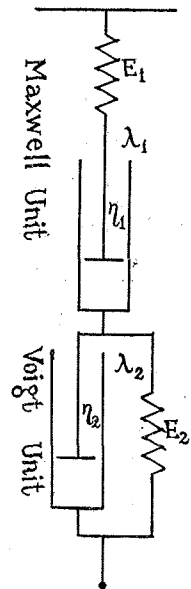
I. 雪の粘弾性

笹谷, 内海と筆者は前に, 積雪の弾性と匍匐性について測定を行った。⁽¹⁾ 野外の積雪層から細長い雪の柱を切りだして垂直に立て, その上に錘をのせる。錘をのせない前の柱の長さを l_0 とし, 錘をのせたために長さが Δl だけ短くなつたとすれば $e = \Delta l/l_0$ が歪であるが, これと歪力 $S = mg/\Delta$ (m は錘の質量, g は重力の加速度, Δ は雪の柱の断面積) とが知られば, 壓縮に関する弾性, 匍匐性 (粘性) の常数が求められるわけである。筆者らは, Δl を光學挺子をつかつて測定し e を決定したのであるが, 錘りをのせた瞬間に, まず e_0 という値の歪が現われた。その後, 錘をのせたままにしておくと, e は一定の速度で増加しつづけたのである。すなわち, de/dt (t は時間を表わす) は 0 でないある常數値をもつていたわけである。以上のことから,

$$E = \frac{S}{e_0}, \quad \eta = \frac{S}{de/dt}$$

を, それぞれ雪の弾性係數, 粘性係數 (或は匍匐係數) として, その値を定めたわけである。

もしも, 厳密に, e_0 が現われた直後から de/dt が一定値の常數値をもつのならば, 雪はレオロジー學者の Markus Reiner 名づけた Maxwell Liquid に屬することになる。⁽²⁾ Maxwell Liquid は第1圖の上半分の, Maxwell Unit と印したような機械模型と同じ性質をもっている。ジグザグの圖は弾性係數 E_1 のスプリングを, その下のピストンとシリンダーとは粘性係數 η_1 の油緩衝器を表わす。この Maxwell Unit を S という力で壓縮するとすれば, 壓縮しはじめた瞬間にスプリングが縮んで, $e_0 = S/E_1$ なる歪を生ずる。そのあとは, スプリングがこの歪を保つ



第1圖
雪の粘弾性模型

* 北海道大學低温科学研究所業績 第170號

たまま、ピストンが一定速度でシリンダーのなかに沈みこんでゆくようになる。このために、Maxwell Unit の歪は $de/dt = S/\eta$ の速度をもつて変化しつづける。したがって、雪に錘をのせて e_0 の歪が現われ、そのあと直ちに一定の de/dt がつづくのならば、雪は Maxwell Unit とおなじ性質を持つわけで、Maxwell Liquid に属することとなる。

以上のようにして、Maxwell Liquid は、ふたつの常數、弾性係數 E と粘性係數 η とをその機械的性質を規定する量としてもっている。そして、なお次のようなことが、Maxwell Liquid の特徴を表わす代表的な現象のひとつとして知られている。Maxwell Liquid に S_0 なる歪力を與えるとまず e_0 の歪が生ずるが、このあと、歪力 S を一定値 S_0 のままにしておかないで、 e_0 の方を一定に保つようにしたとする。歪が e_0 になるように壓縮したあと、その壓縮度が變らないようにするわけである。前には S を一定値に保つておいたため、歪 e は一定速度で増加したが、今はこの増加がおこらない。それゆえ、 S は一定値を保たないで、次第に減少してゆくことになるのであつて、 S の減少の過程は Maxwell Unit の模型をつかつて、

$$S = S_0 e^{-t/\lambda}, \quad \lambda = \eta/E$$

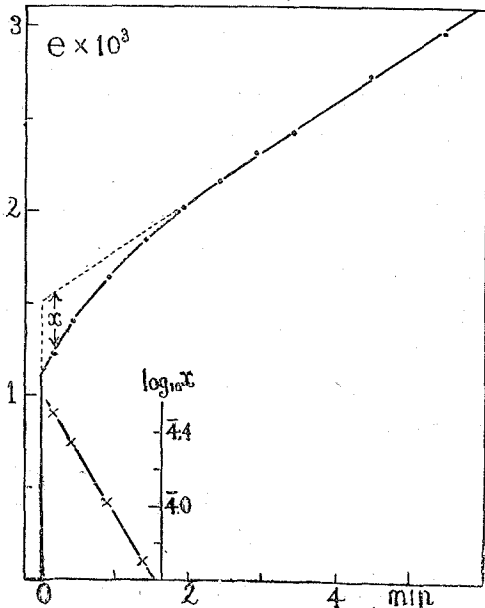
で與えられることが直ちにわかる。(e は自然對數の底を表わす。普通は字 e で表わされるのであるが、字 e は歪を表わすために使つていたので、代りに ϵ を用いた。 λ は時間の元をもつた量で、時間 t が λ にひとしくなれば、 S は S_0 の $1/e$ にへるわけである。また λ が大きいことは、 S の減少が緩慢であることを示す。歪力 S が存在しているということは、物質が緊張していることである。 S が減少して物質の緊張が緩和される速度に關係をもつということから λ は緩和時間とよばれる。

雪を Maxwell Liquid であると考え、筆者らが前に測定して得た雪の E, η から λ を求めると、 λ は1分前後から數分の程度のものである。Maxwell Liquid が弾性と粘性とをもつということは、それが固体と液体との性質を兼ねそなえているということであるが、これに力を加えるとき、その力の繼續時間が λ よりも短かければ固体的性質が優勢に現われ、 λ よりも長ければ液体的性質が優勢に現われるということが證明される。それ故、雪に力を加える場合にも、その繼續時間が1分乃至數分という時間を境として、それよりも短いか長いかによつて、雪は非常に異つた性質を現わすことになるわけである。ただし、ここに取扱つているのは、歪力 S が雪を破壊するほどには大きくないときのこと、雪が破壊をおこすほどに大きい力を加えるときは、これをそのままあてはめるわけにはいかない。

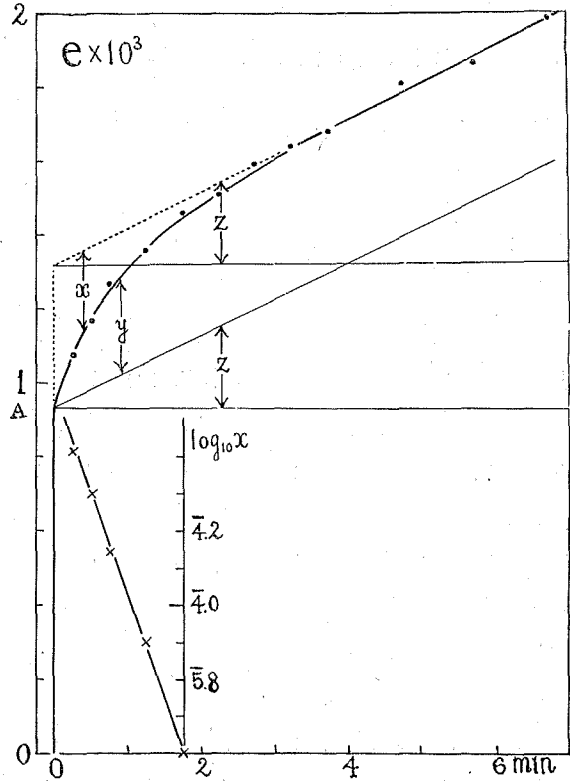
最近、小島賢治が、筆者らのおなじ方法で、雪の歪 e の時間的變化の詳しい測定を行つた。その結果によると、雪は單純な Maxwell Liquid とは少しちがつた性質のものであることがわかるのである。第2圖、第3圖がその二つの實測例である。横軸に時間 t を分單位で、たて軸に $e \times 10^3$ をとつてある。 $t=0$ で錘をかけたのであるが、その瞬間、 e はある値にまで到達し、そのあと徐々に増加してゆく。この増加の速度 de/dt は、はじめはかなり大きいけれども、次第に減少して、2分か3分たつてからあとは一定の値をとるようになる。まえに考えたように、

錘りをかけた瞬間後、直ちに de/dt が一定値をとるのではないわけである。実際にはこのようになっていて、前には、點線で示したような経過で、 e が變化すると見なしていたわけである。

第2、第3圖のような變化を示す物質は、高分子物質のなかに多數見つけられていて、第1圖のような機械模型でその性質が表わされることが知られている。⁽³⁾ Maxwell Unit はスプリングと緩衝器とを直列に組合せたものであるが、これにスプリングと緩衝器とを並列に組合せた Voigt Unit を加えたのがこの模型である。これに力 S をかけたため、全体として歪 e が生じたとすると、 e は Maxwell Unit のスプ



第3圖 雪の歪曲線 (密度 0.182 gr/cm³; 温度 -8.5°C; 壓力 $S 1.09 \times 10^4$ dyne/cm²; $E_1 2.73 \times 10^7$ dyne/cm²; $E_2 2.74 \times 10^7$ dyne/cm²; $\eta_1 3.97 \times 10^7$ dyne min/cm; $\lambda_1 1.45$ min; $\lambda_2 0.67$ min)



第2圖 雪の歪曲線 (密度 0.255 gr/cm³; 温度 -1°C; 壓力 $S 1.18 \times 10^4$ dyne/cm²; $E_1 1.28 \times 10^7$ dyne/cm²; $E_2 2.97 \times 10^7$ dyne/cm²; $\eta_1 11.8 \times 10^7$ dyne min/cm; $\lambda_1 9.2$ min; $\lambda_2 0.76$ min)

リング、緩衝器に生ずる歪 e_1' , e_1'' と Voigt Unit に生ずる歪 e_2 との和にひとしい。すなわち、

$$e = e_1' + e_1'' + e_2$$

である。一方、

$$E_1 e_1' = S, \quad \eta_1 \frac{de_1''}{dt} = S, \quad E_2 e_2 + \eta_2 \frac{de_2}{dt} = S$$

なる関係がある。 S か e か、そのいずれかが時間 t の函数として與えられれば、これらの式により、他方が決定されるわけである。

いま S を不変とし、 $t=0$ で $e=0$ になるように、上の式を満足する e を定めると、

$$e = \frac{s}{E_1} + \frac{s}{E_2} (1 - e^{-t/\lambda_2}) + \frac{s}{E_1} \frac{t}{\lambda_1}$$

$$\lambda_1 = \eta_1/E_1, \quad \lambda_2 = \eta_2/E_2$$

が得られる。そしてこの式はちようど、第2圖、第3圖のグラフに適合しているのである。 y , z , \overline{OA} を第2圖に示したようにとると、

$$\overline{OA} = \frac{S}{E_1}, \quad y = \frac{S}{E_2} (1 - e^{-t/\lambda_2}), \quad z = \frac{S}{E_1} \frac{t}{\lambda_1}$$

とすれば、上の式は全く第2圖のグラフを再現する。圖の x は $se^{-t/\lambda_2}/E_2$ にあたるから、圖の y が上の式の形で與えられるのならば、 $\log_{10}x$ は t と直線的關係になければならない。そして實際に、圖の左下すみに示した通り、 $\log_{10}x$ と t とは非常によく直線的關係を表わしている。

第2圖、第3圖に示されている實際の e の數値をつかい、また實際に加えた歪力 S の値を用いて常數 E_1 , E_2 , η_1 , η_2 などの値を計算したものを、それぞれの圖に記入してある。第2圖の雪は比重 0.255, 温度 -1°C のしまり雪, 第3圖の雪は比重 0.182 温度 -8.5°C のしまり雪である。當然のことであるが、雪の性質、温度がちがうと常數に相違が見られる。 λ_1 , λ_2 は、雪を單純な Maxwell Liquid と考えた場合の緩和時間 λ と全くおなじ物理的意味をもっているわけではないけれども、だいたいに於て、それに近い意味のものである。そして、その大きさの程度は、 λ_1 , λ_2 とともにさきにのべた λ とおなじく、1分前後から數分までのあいだにはいる。それでやはり、雪にかかる力の繼續時間がこの程度の時間にくらべて短かければ雪は固体的性質を、長ければ液体的性質を示すということがいわれる。

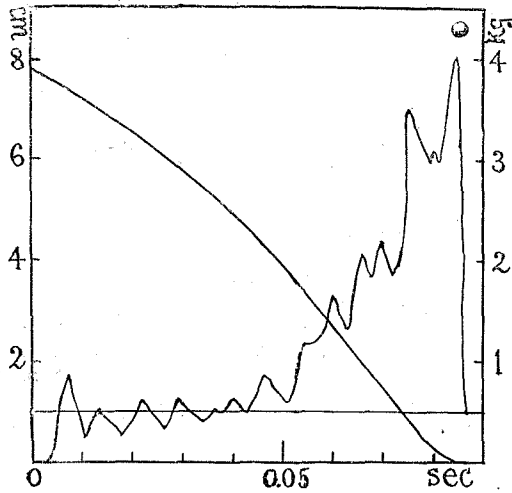
以上のような雪の性質が壓縮について、しかも壓縮の歪力が雪を破壊しない程度に小さい場合についてではあるが、判明したわけである。それにしても雪はかなり複雑な機械的性質をもつことになる。少なくとも、雪の機械的性質を表わすには、四つの常數 E_1 , E_2 , λ_1 , λ_2 (或は E_1 , E_2 , λ_1 , λ_2) が必要とされるわけである。そして、單純な固体または液体とちがつて、おなじ力かけるにしても、その繼續時間により、また變動する力かける場合には力の變動速度により、力に対する反應が固体的であつたり液体的であつたりするわけである。しかし、加えられる力がどんなように變化するとしても、上にあげた式によつて、そのときに生ずる歪 e を數學的に計算することはできるのである。結局雪の機械的性質を考へるときには、いつでも時間的要素をとり入れることが必要で、緩和時間 λ_1 , λ_2 がその時間的要素の標準となるということができらるであらう。

II. 雪の破壊抵抗の間歇性

雪を板で押しのかたり、雪の上に物を落したりする場合、雪は破壊されるが、その際、板や物に及ぼされる雪の抵抗力が時間的に激しい變動を示すことは多くの人から注意されていた。黒岩と筆者とは、大きな雪の塊の上に直径 5 cm の圓筒形の錘を落下させ、錘が雪のなかにめりこんでとまるまでに錘がうける抵抗力をオシログラフで記録し、その結果をすでに報告した。⁽⁴⁾ 錘が雪面に接觸してから停止するまでに 1/10 sec ぐらいの時間がかかるが、オシログラムは、そのあいだに數個から 20 個くらいにわたる急な山と深い谷とを記録している。山の頂きと谷と

の中間点をむすぶ平均線は時間と共に登つてゆき、抵抗力が次第に増大する trend をもつてゐることを示す。そしてこの trend に激しく變動する抵抗力が重疊しているわけである。いま、ここで問題にしようとするのは、このあとの變動抵抗力の成因である。

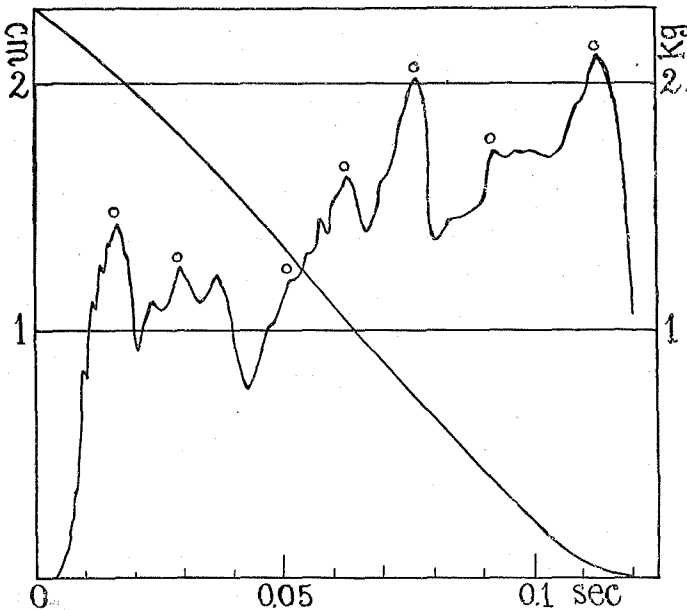
落された錘が雪のなかにめりこんでゆくとき、物体の真下の雪は壓縮されて、物体の下面につづいて、ある厚さの壓縮部分を作りだす。壓縮部分の境界は明瞭な面をなして、物体に及



第4圖 雪の壓縮抵抗 (新雪; 密度 0.15 gr/cm^3 ; 温度 -2°C ; 壓縮率 $5.3\text{cm}/13.1\text{cm}$)

ぼされる反抗力は、この面を通して壓縮部に加えられる力にほかならない。

この壓縮部に、そのまわりの雪がおよぼす力は、壓縮部の底面にその下にある雪が及ぼす圧力 P と、壓縮部の側面を通じてまわりの雪が及ぼす摩擦力 R とにわけられる。變動抵抗力が、この P か R のどちらによつて起されるかが問題であるが、これに關係して次のような測定を行つてみた。錘の半径とだいたいおなじ半径の圓筒形の雪の柱を作り、その圓筒面を丈夫な日本紙で包んで糊づけにする。これに上から錘をおとすと、雪の柱は日本紙でしつかり包ま



第5圖 雪の壓縮抵抗 (しまり雪; 密度 0.26 gr/cm^3 ; 壓縮比 $5.5 \text{ cm}/10.0\text{cm}$)

れているので、側方にはみだすということはなく、垂直方向に縮まるだけである。しかも紙は軟かいのでこの縮みに對して何の影響も與えない。このようにすると壓縮部のまわりには雪がないので R は 0 となり、壓縮部の下面に働く圧力 P だけを反抗力として測定することができる。この方法により、 R を消して P だけをオシログラムにとつたのが第4圖と第5圖とである。

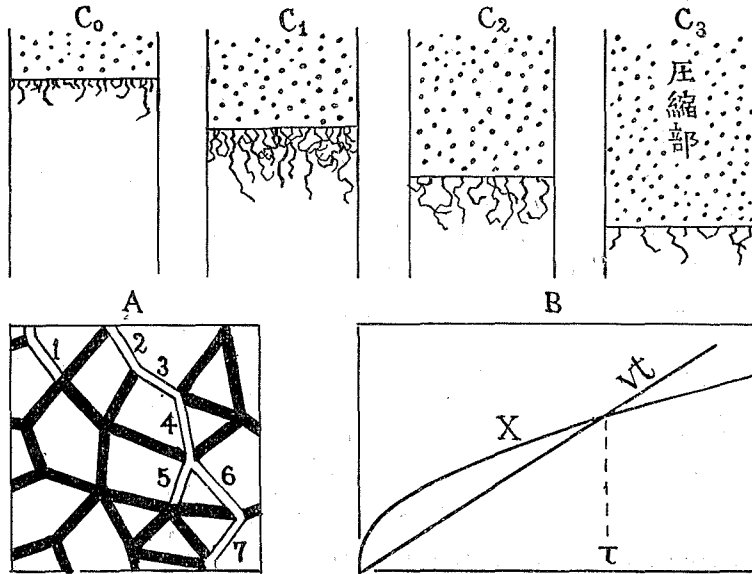
圖のように、 P ははげしく變動し、間歇的に大きな

値を示す。この圖と大きな雪の塊に錘を落した場合の反抗力の圖（掲載は省略）とを比較してみると、trend には大きな差異が認められるけれども、變動部分は、その週期についても振幅についても、だいたい同じ程度であることがわかるのである。それで、變動反抗力は主として P の變動のために現われるものと考えられる。 R も變動するかも知れないが、そうだとするとそれはあまり大きくはないと推定される。

Bowden⁽⁵⁾ は金屬と金屬とのあいだの摩擦力が間歇的な力であることを發見した。したがつていまの雪の場合についても、壓縮部分の側面に働く摩擦力 R に間歇性があるのなら、それは自然なことにように考えられるであろう。しかし、壓縮部分の下面に働く壓力 P に間歇性が現われることは、ちよつとその原因が考えにくいように思われる。これに對して次のようなメカニズムを考えたわけである。

壓力 P の變化するありさまを、ある瞬間に大きな値 P_0 を示し、そのあと t という時間のあいだ小さい値 p をつづけ、ふたたび一瞬間 P_0 の値を示してからまた t のあいだ p の値をつづけるというようなものに單純化して考える。第4圖、第5圖のオンログラムは、このような單純な變化を示していない。しかし、力を測定する装置の固有振動數を十分に大きくとることができないので、事實に於て、 P がここに假定したような單純なものであつたとしても、オンログラムは第4圖、第5圖のようなものになるはずである。（このことについては、木下誠一の論文参照⁽⁶⁾）また、錘の下につづく壓縮部の下面の進行する速度は一定であると假定する。第4圖、第5圖に左上から右の方にかけて斜に下つてゆく線が書いてあるが、これは錘の位置をオンログラムで記録した線である。錘は質量が大きいので、反抗力が變動しても、それに敏感に應ずるよう速度が變動するということはないので、曲線は滑らかである。しかも、圖に示されたように、この位置を表わす曲線はほぼ直線で、錘の落下速度がだいたい一定であることを表わしている。一方、錘の下の壓縮部の厚さは、いつでも、錘が雪のなかに沈んだ深さ、すなわち雪の表面と錘の下面とのあいだの距離にほぼひとしいことが知られている。したがつて、壓縮部の下面の進行速度 v は、錘の速度のほぼ2倍にあたる一定値をとることになり、上の假定がだいたいに於て正しいことがわかるわけである。

壓縮されていない雪の構造は、短い棒状の氷の橋が網の目のように組合せられた、第6圖 A のようなものとして考えることができる。いま、時刻 $t=0$ の瞬間に、 P が大きな P_0 の値をとつたとすると壓縮部の下の雪は大きな衝撃力をうけ、壓縮部と接するところで、氷の橋のいくつかは、たとえばひびがはいるというような破損をうけるであろう。この状態を第6圖の C₀ に示してある。壓縮部の下面に短い毛が生えたようにかいてあるが、この毛は破損された氷の橋を示すものとする。さて、ひとつの氷の橋が破損されると、その橋は力を支える能力を失うので、それが受持つべき荷重が、その附近の氷の橋にかかってくる。そのため、近くの氷の橋がまた破損をうける。このようにして破損は、氷の橋から次の氷の橋へと順につたつてゆくのであろう。たとえば第6圖の A の橋1が破損したとすると、次に2が破損し、あと、



第6圖 破 損 の 傳 播

3, 4, 5, 6, 7 というように破損が傳播する。そして、この破損の傳播は、常に下の方にむかつて進むというようなことはなく、あるときは横の方え、あるときは上の方えと、ちょうど氣体の分子の行うブラウン運動とおなじように進んで行くであらう。ただ、氣体分子の運動はその通つた道の跡を残さないけれども、破損の進行はその跡を残すわけである。

ある時間 t のあいだ、分子がブラウン運動を行つて移動したとき、その移動をある一定方向に投射した長さを x とすると、場合場合により、 x は種々様々な値をとる。しかしその平均値(詳しくは x^2 の平均値の平方根)は \sqrt{t} に比例することが知られている。このことを、いまの雪の場合にあてはめて、 P が P_0 の値をとる瞬間を $t=0$ にとると、氷の橋の破損が下方に傳播した長さの平均値 X は \sqrt{t} に比例することになる。したがつて、 X と t との関係は第6圖 B に示したように拋物線で表わされ、 X の増大速度は、はじめは非常に大きく、 t が大きくなるにつれて次第におとろえてくる。

錘の下の壓縮部の下面は一定速度 v でくだつてゆくが、この場合、壓縮部の下面が進行するところは、すでに氷の橋が數多く破損をうけたところなので、それを破壊壓縮するにしても大きな抵抗はうけない。この小さい抵抗が、大きな P_0 のあとにつづく p となつて現われる。

$x < X$ の範圍を破損部分となづけることにすると、壓縮部の下面は破損部分の進行を追かけることになるが、壓縮部の下面の進行距離は vt にひとしいので、ある t の値 τ で、 X と vt とが一致するようになる。第6圖 B にこの関係が示してある。この状態に達すると、破損部分はすでに壓縮部に併合されてしまい、壓縮部はまだあまり破損をうけていない雪にあらたに直面する。それで、ふたたびここで大きな抵抗 P_0 をうけ、その後は上とおなじことが繰かえ

される。このようにして、大きな P_0 が間歇的に現われ、そのあいだは小さい抵抗力 p が継続するということが説明される。第6圖の C_0, C_1, C_2, C_3 は、この間の状態の變化の経過を示したものである。 C_3 の直後には、ふたたび C_0 の状態が現われる。

以上のことは次のようにして、もう少し數學的に取扱うことができる。いま、時刻 $t=0$ に、 $x=0$ の點から、 x の正の方にむかつてひとつの粒子がブラウン運動を始めるとする。そして、粒子の運動は、 θ という短い時間のあいだに、短い距離 l を直線的に進むという小さい運動が、次々に行われることから成立しているものとする。更にまた、粒子が $x=0$ に戻つてきた場合には、粒子は $x=0$ で反射され、ふたたび、 x の正の方向に運動をはじめるとする。このようなブラウン運動の場合には、時刻 t に於て、粒子が x と $x+dx$ との間にある確率は、

$$W(x, t) dx = \frac{1}{(\pi Dt)^{\frac{1}{2}}} e^{-x^2/4Dt} dx$$

$$D = l^2/2\theta$$

で表わされる。⁽⁷⁾

以上のことを雪の場合にあてはめると、次のようになる。ひとつの氷の橋の破損から出發して、その破損が傳播した道筋を破損線ということにすると、破損線の先端點が粒子にあたる。また、氷の橋の長さが l にあたり、ひとつの氷の橋が破損してから、次のとなりの氷の橋が破損するまでの時間が θ にあたる。更に、 $x=0$ で、粒子が反射することとは、次のようなことにあたる。破損線の先端點は上下左右に亂雑に向きをかえながら進むから、ある場合にはその先端が $x=0$ にまでかえつてくることが起る。すると、 $x=0$ の面上、破損線の先端が達した點の近くにある氷の橋にかかる荷重がふえ、そのうちのひとつが破損をうける。したがつて、 $x=0$ にかえつてきた破損線の先端が、この新たに破損した氷の橋に接続するものを考えれば、破損線は、 $x=0$ で反射するとみてよいことになる。このようにして、粒子の位置に關しての確率を與える上の $W(x, t)$ は、そのまま破損線の先端點の位置についての確率を與えるものとして使うことができるわけである。ただ、ここで破損線の反射は $x=0$ で起るとしているが、實際には進行する壓縮部の下面で反射がおこるのであつて、このために實は、 $W(x, t)$ をそのまま使うことに誤りがおこる。しかし、このことがらを考慮すると問題がむつかしくなるので、今は $W(x, t)$ をそのまま使うことにする。

$t=0$ で、すなわち P が P_0 なる大きな衝撃力となつた瞬間に、壓縮部の下面の單位面積あたり N 個の氷の橋が破損をうけるとすると、そのひとつひとつから破損線が出發する。それから時間 t だけたつたあとを考えると、破損線の先端點はいろいろな値の x をもつており、先端點の分布密度は x が大きいほど小さくなつてゐる。そして、この密度は $NW(x, t)$ で與えられるわけである。それで、 q を1より小さい數として、 N 個の先端點のうち Nq 個だけが X_q より大きな x の値をもつてゐるとすると、

$$Nq = \int_{X_q}^{\infty} NW(x, t) dx$$

なる関係式がなりたつわけである。 $W(x, t)$ に先の式をいれて計算すると、この式は

$$\Phi\left(\frac{X_q}{2\sqrt{Dt}}\right) = 1 - q$$

となる。ここに Φ は誤差積分 $\Phi(x) = 2 \int_0^x e^{-s^2} ds / \sqrt{\pi}$ を表わす。

ひとつの先端點は必ず $x=0$ の面まで一本の破損先でつながっているから、 $x < X_q$ なる範圍には必ず Nq 本以上の破損線が存在している。いま、この Nq 本以上の破損線の存在する部分を破損部と名づけると、 X_q は破損部の長さを表わし、 X_q が時間 t と共に増大する關係は

$$X_q = \sqrt{t} \cdot 2\sqrt{D} \Phi^{-1}(1 - q)$$

で與えられる。前に、破損線の長さの平均値 X を考えて、それが \sqrt{t} に比例して増大することを述べたが、 X_q もまたそれと同様に \sqrt{t} に比例して増大するわけである。またまえには、 $x < X$ の範圍が充分な破損をうけて、その範圍を壓縮部の下面が小さい抵抗 p をうけつつ進行できるものと考えたが、いまは、 Nq 本以上の破損線の存在する破損部に於て、壓縮部の下面が p なる抵抗のもとに進みうるものとする。このようにした方が前の場合に比べて、一般性があることは明かである。前の場合と同様、この場合にも壓縮部の下面はある時間 τ をへれば、破損部の先端に追いついてそこでふたたび P_0 なる衝撃力が現われることになる。そして壓縮部の下面の進行速度を v とすれば、

$$v\tau = \sqrt{\tau} \cdot 2\sqrt{D} \Phi^{-1}(1 - q)$$

の關係が成立する。

q の値は全然わからないが、 $\Phi^{-1}(0.85) = 1$ という簡単な關係があるので、 $q = 0.15$ と假定する。すると、上の式は前に示した $D = l^2/2\theta$ をつかつて

$$\theta = 2l^2/v^2\tau$$

とかきなおされる。 l, v, τ などはその大体の値を求めることができるので、この式によつて θ を決定してみることにしよう。

l は、1本の氷の橋の長さで、だいたい 0.1 cm としてよい。第3圖で、錘は 0.08 sec に 8 cm 落下しているから、落下速度は約 100 cm/sec である。したがつて壓縮部の下面の進行速度 v はその2倍の 200 cm/sec となる。反抗力を表わす曲線は、山谷の連続であるが、山と山とのあいだの平均間隔 0.006 sec が τ である。これらの値をつかつて計算すると、

$$\theta = 0.8 \times 10^{-4} \text{ sec} \quad (\text{第3圖の場合})$$

という値がえられる。第4圖の場合には、 l は前同様 0.1 cm とし、 $v = 40$ cm/sec、 $\tau = 0.016$ sec にとる。 P_0 によつてひきおこされる山としては、圖のなかで小さい圓印をつけたものだけを選んだ。そして、これにより τ をきめた。小さな山がたくさんみられるが、深い谷から急激に上昇している山だけを擇んだわけである。小さい山と山との間隔は 0.005 sec の程度で、これに v をかけると 0.2 cm となる。これは、氷の橋の長さ l の2倍にすぎないから、これらの小さな山

は、氷の橋がひとつひとつ破損されるときにおこる小さなショックのためにでてきたものとして除外したわけである。以上の値により θ を計算すると、

$$\theta = 8 \times 10^{-4} \text{sec} \quad (\text{第4圖の場合})$$

であつて、第3圖の場合の10倍になつている。

ひとつの氷の橋が破損して、その附近にある氷の橋にかかる荷重がましてから、そのうちの1本の橋が破損するまでの時間が θ である。 θ が上に得られたような値になることが、直接實驗的に證明されるか、または別の方面からよく説明されるかによつて、この抵抗力の間歇性についての考えの正否がわかるものと思われるが、いまのところそのいずれをも行うことができない。ただ、第4圖の場合の θ が第3圖の場合の θ に比べて非常に大きいことは、第4圖の雪は密度0.26のしまり雪で氷の橋が太く丈夫であり、第3圖の雪は密度0.15の新雪で氷の橋が細く弱いということと一致している。

文 献

- (1) 吉田順五, 笹谷雅信, 内海威彦 1948 積雪の弾性と匍匐. 低温科学, 4, 11.
- (2) Reiner M. 1949 Twelve Lectures on Theoretical Rheology.
- (3) 例えば Schmidt A. X. & Marlies C. A. 1948 Principles of High-Polymer Theory and Practice (Chemical Engineering Series) §7, Rheology 参照
- (4) 吉田順五, 黒岩大助 1951 衝撃荷重による積雪沈下の経過. 雪氷, 12, 2号, 28~33.
- (5) Bowden F. P. & Tabor D. 1950 The Friction and Lubrication of Solids.
- (6) 木下誠一 1953 雪の中に落下する物体に及ぼされる抵抗. 低温科学, 10, 13.
- (7) 例えば Chandrasekhar S. 1943 Stochastic Problems in Physics and Astronomy. Rev. Mod. Phys., 15, 1. 参照

Résumé

I. Visco-elastic property. A column of snow was compressed by a constant force and the strain e produced was continually observed for some time after application of the force. At the instant the force was applied the strain e attained a finite value e_0 . Then it increased at the varying rate of de/dt . The value of de/dt was comparatively large at first and was reduced to a constant value $(de/dt)_0$ two or three minutes after application of the force. It was found that the relation between the strain e and the time t could be expressed fairly well by the following mathematical formula:

$$e = \frac{s}{E_1} + \frac{s}{E_2} \left\{ 1 - \exp(-t/\lambda_2) \right\} + \frac{st}{E_1 \lambda_1},$$

where s is the stress and $E_1, E_2, \lambda_1, \lambda_2$ are constants. Each sample of snow had its own constants and their values are shown in Fig. 2 and Fig. 3 for two of the snow samples. Such a visco-elastic property of snow is explained rheologically by means of a mechanical model as shown in Fig. 1.

II. Break-down resistance of snow. A column of snow was lined on its cylindrical surface with a sheet of thin and tough paper and was set upright on a force-recording device.

A weight was let fall on this cylinder and the force applied on it was recorded while it was compressed down by the falling weight. The sheet of paper kept the snow column from being scattered away, so that it was compressed without losing its original cross-section. The record showed a varying force fluctuating with large amplitudes superposed on an increasing trend of force. The author supposed that the fluctuating part of force was produced by the following mechanism.

The snow can be considered schematically as consisting of short ice bridges joined together at their ends. With such a structure the snow resists the motion of the falling weight by exerting a large impulsive force P on it but at the same time some of its ice bridges are broken at the bottom of the weight. A broken bridge then brings about another bridge near itself to be broken and this does the same on its neighbour in turn. In this manner the damage of the bridge propagates from one bridge to the one near by just in the same way as a molecule moves about in a gas by Brownian motion. Thus a domain containing some number of broken bridges develops downwards from the bottom of the weight and its height h increases in proportion to \sqrt{t} , where t is the time measured from appearance of the impulsive force P . The weight receives only a small resistance p when it falls through this broken domain after it has experienced the impulsive force P . But it can proceed under this small resistance p only for a while, because it, falling with a nearly constant velocity, overtakes in a time interval τ the front of the broken domain which is proceeding with a decreasing velocity proportional to $d\sqrt{t}/dt$. At this instant the weight encounters the no-broken domain again and experiences the impulsive force P . The train of force groups (P followed by p continuing for a time interval τ) produced in this way is to be considered as the cause of the fluctuating force superposed on the increasing trend of force.