



Title	積雪における変形速度と変形形式との関係 III
Author(s)	木下, 誠一; KINOSITA, Seiiti
Citation	低温科学. 物理篇, 19, 135-146
Issue Date	1960-12-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17972
Type	departmental bulletin paper
File Information	19_p135-146.pdf



積雪における変形速度と変形形式との関係 III*

木 下 誠 一

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和 35 年 8 月受理)

I. 緒 言

積雪の柱を定速度で圧縮する場合、圧縮速度がある限界値より大きいと、柱の端面で破壊が起つて、柱は高さを減じ、圧縮速度がその限界値より小さいと、破壊は起らず、柱全体にわたつて起る塑性変形によつて、柱は高さを減ずる。破壊をともなう変形か、或いは塑性変形かの変形形式の違いで、雪の応力の大きさ、時間的変化が全く違う。この現象は、雪を色々な大きさの定速度で圧縮しつつ、ストレンゲージを用いた受圧計で、力を測定して、いわゆる硬化曲線を求めた結果として、見出されたのである。それについては、既にこの論文と同じ題目の論文 I¹⁾、II²⁾ において詳しく述べた。

前の論文では、圧縮速度の範囲が、1~700 mm/min であつたが、その後、最小速度 0.02 mm/min まで測定を行なつた。また、密度 0.45~0.47 の硬いしまり雪についての実験を補足した。得られた結果に本質的な違いはなかつたのであるが、雪の弾性率、粘性率、緩和曲線その他について、多くのデータが得られたので、ここに整理して発表する。

II. 弾性率及び粘性率の求め方

既に前の論文^{1),2)} で述べたように、雪の円柱を限界速度以上の定速度で圧縮して、破壊が起るときには、雪の応力 p と時間 t との関係を表わす曲線は、第 1 図 (a) のような鋸歯状曲線になる。それぞれの鋸歯の谷から頂まで、応力は直線的に増大し、この部分の変形はほぼ弾性的である。それで、斜めに右上に向つて上昇する部分の傾斜から、弾性率 E は

$$E = \frac{\frac{dp}{dt}}{\frac{v}{l}} \quad (1)$$

として計算される。ここに、 v は圧縮速度で、 l は円柱の高さである。

圧縮速度が更に大きくなると、応力曲線は鋸歯の横幅も、高さの差も小さくなり、遂に細かい変動をもつ連続曲線になる。このようなときの破壊を第 2 種破壊とよんだのであるが、こ

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 575 号

の場合には、もはや上と同じ方法では弾性率 E を求めることは出来ない。

限界速度以下の定速度で圧縮して、塑性変形が起るときには、応力 p と時間 t との関係を表わす曲線は第1図(b)のようになる。

始めの AB 部分では、力の増大が急であるが、B 以後はゆるやかである。AB 部分の変形は、ほぼ弾性的で、B 点で降伏が起り、B 点以後は塑性的な変形になる。

AB 部分の応力曲線の傾斜から、弾性率 E が破壊の場合と同じく、(1)式から計算される。塑性領域においての雪の圧縮に対する抵抗を

表わす量として、粘性率 $\eta = p/(v/l)$ が考えられるが、第1図(b)のように、 p は時間と共に増大するので、 η もまた増大する。即ち、硬化が起る。それで、色々な場合の粘性率を比較する便宜のため、歪が5% になつたときの η の値

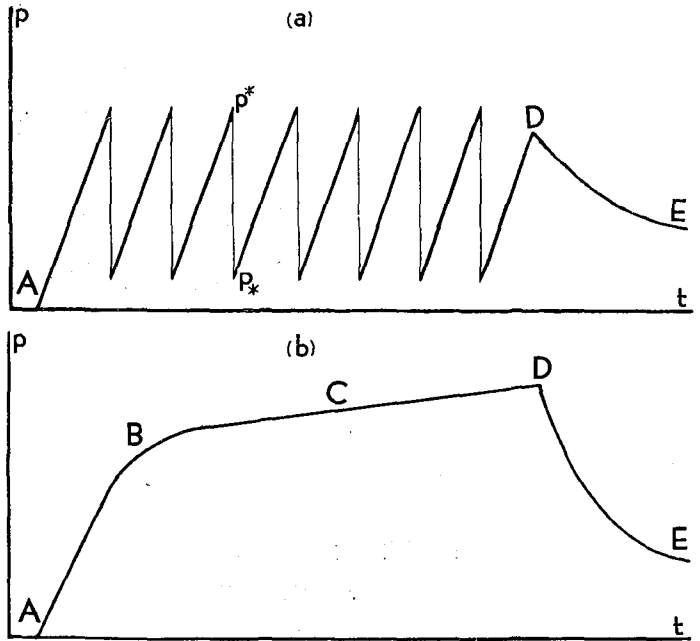
$$\eta = \frac{p_0}{\frac{v}{l}} \quad (2)$$

を規準値としてとることにする。ここに、 p_0 は歪が5% のときの応力の値である。

次に、これまでの実験から得られた弾性率 E と粘性率 η とが、雪の温度 T 、雪の密度 ρ 及び圧縮歪速度 $\dot{\epsilon} = v/l$ とどんな関係にあるかについて述べる。

III. 弾 性 率

(1) 弾性率 E と雪の温度 T との関係 実験は 0°C 附近から -25°C までの温度範囲で行なつたが、この温度範囲内では、弾性率 E の温度 T による変化は殆んど認められなかつた。同じ温度で同じ条件のもとに実験しても、得られる弾性率 E の値には、多少の変動があるが、温度を変えたときにみられる E の値の違いは、大体この変動の範囲内にあつた。ただ、温度が低い程、弾性率が多少大きくなる傾向が見られる程度であつた。



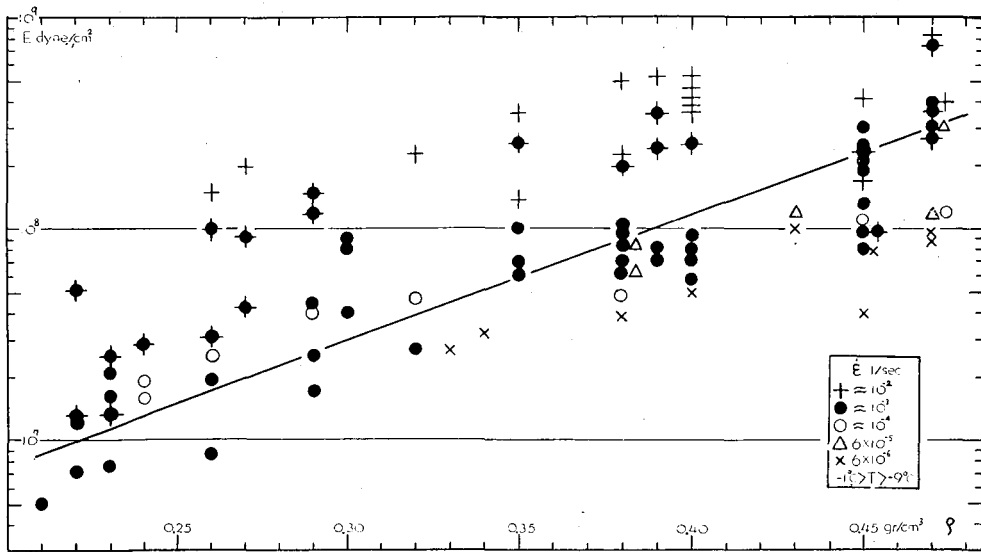
第1図 雪の円柱を定速度で圧縮するときの、応力 p と時間 t との関係(模式図)。(a)破壊変形。(b)塑性変形。Aで圧縮をはじめ、Dでとめる。DEは緩和曲線。

(2) 弾性率 E と雪の密度 ρ との関係 第2図は、雪の温度 T が $-1^\circ\text{C} > T > -9^\circ\text{C}$ のときの E と ρ との関係で、五つの歪速度 $\dot{\epsilon} \approx 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 6 \times 10^{-5}, 6 \times 10^{-6} \text{ 1/sec}$ について夫々別の記号で示してある。 E は塑性変形、破壊変形どちらであるにしても、(1)式から計算されたものである。 $\dot{\epsilon} \approx 10^{-2}$ の十字印の場合は、圧縮速度が大きく破壊変形が起つた。 $\dot{\epsilon} \approx 10^{-3}$ の場合を表わす黒円印のときは、破壊変形になることも、塑性変形になることもあつた。圧縮速度が、限界圧縮速度附近にあつたからである。それで、破壊変形が起つた場合は、黒円印と十字を重ね、塑性変形の起つた場合には、黒円印だけにして、両方の場合を区別した。

歪速度 $\dot{\epsilon}$ が同じなら、 ρ が大きい程、 E も大きい。黒円印で表わされた $\dot{\epsilon} \approx 10^{-3} \text{ 1/sec}$ のときの E と ρ との関係は、ほぼ第2図に書きいれた斜めの直線

$$\log E = 5.9\rho + 5.7 \quad (3)$$

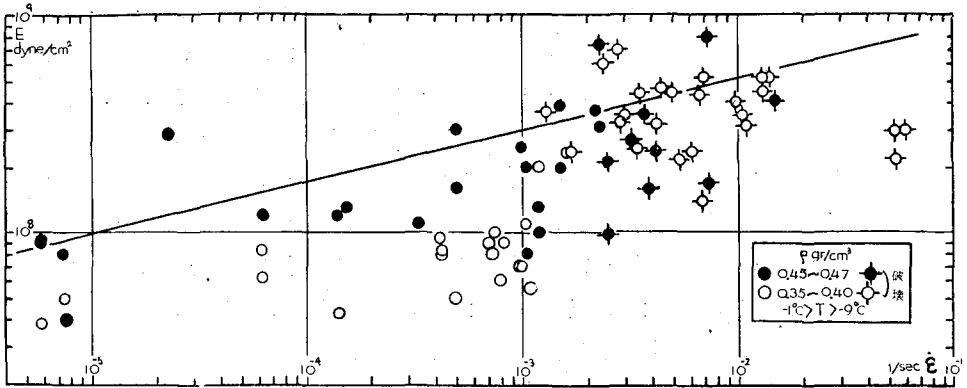
で表わされる。ここで、 E は dyne/cm^2 、 ρ は gr/cm^3 の単位で表わされている。



第2図 弾性率 E と密度 ρ との関係

十字印と黒円に十字を附した印は破壊変形、他は塑性変形

(3) 弾性率 E と歪速度 $\dot{\epsilon}$ との関係 第3図は E と $\dot{\epsilon}$ との関係を、 $-1^\circ\text{C} > T > -9^\circ\text{C}$ の温度範囲について白円印と黒円印で、 $\rho = 0.37 \sim 0.4$ 、 $\rho = 0.45 \sim 0.47$ の雪を区別して示したものである。第2図と同じく、破壊変形が起つたときには、十字記号を重ねた。図から解るように $\dot{\epsilon} \approx 2 \times 10^{-3} \text{ 1/sec}$ が限界速度である。(限界速度を歪速度 $\dot{\epsilon} = \frac{v}{l}$ で表わすべきか、圧縮速度 v で表わすべきか問題であるが、前の論文 II²⁾ の p. 17 にあるように、圧縮速度 v で表わした方がよいのかもしれない。しかし、ここでは圧縮歪速度 $\dot{\epsilon}$ を用いる。第3図の関係を導いた実験では、圧縮される雪の円柱の高さ l は $7 \sim 15 \text{ cm}$ だつたので、限界圧縮歪速度 $2 \times 10^{-3} \text{ 1/sec}$ に対

第3図 弾性率 E と歪速度 $\dot{\epsilon}$ との関係

応する限界圧縮速度 v^* は、ほぼ 12 mm/min となる。))

同じ密度、同じ温度のしまり雪では、歪速度が大きい程、弾性率も大きい。従つて、弾性率とはいつても、完全な意味のものでない。その関係は $\rho=0.47$ の雪について、ほぼ第3図の斜めの直線で表わされる。その式は次で与えられる。

$$\log_{10} E = 0.24 \log_{10} \dot{\epsilon} + 9.2 \quad (4)$$

ここで、 E は dyne/cm²、 $\dot{\epsilon}$ は 1/sec の単位で表わされている。

(4) E と ρ 、 $\dot{\epsilon}$ との関係 上にあげた (3)、(4) の実験式を E (dyne/cm²) と ρ (gr/cm³) 及び $\dot{\epsilon}$ (1/sec) との関係を表わす一つの式にまとめると、次のようになる。

$$\log_{10} E = 5.9\rho + 0.24 \log_{10} \dot{\epsilon} + 6.4 \quad (5)$$

ただし、乾いたしまり雪に限るのであつて、 ρ 、 T 、 $\dot{\epsilon}$ は、 $0.1 < \rho < 0.5$ 、 $-30^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C}$ 及び $10^{-6} < \dot{\epsilon} < 10^{-1}$ の範囲にあるものとする。

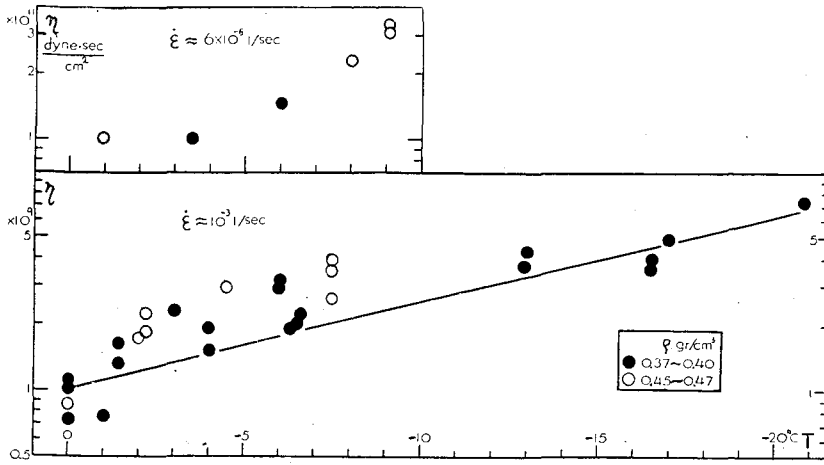
IV. 粘 性 率

(1) 粘性率 η と雪の温度 T との関係 第4図は、密度 $\rho=0.37\sim 0.4$ 、 $\rho=0.45\sim 0.47$ の乾いたしまり雪について、歪速度 $\dot{\epsilon} \approx 10^{-3}$ 、 6×10^{-6} 1/sec のとき、 η と T との関係を、片対数グラフに示したものである。 η は、先に述べたように、圧縮歪が5%のときの値である。同じ密度、同じ歪速度では、温度が低い程、粘性率は大きい。 $\rho=0.4$ 、 $\dot{\epsilon} \approx 10^{-3}$ /sec のときの、 η と T との関係は、ほぼ第4図の直線で表わされる。数式にすれば、

$$\log_{10} \eta = -0.04 T + 9 \quad (6)$$

である。 η は dyne·sec/cm²、 T は °C で表わされている。

(2) 粘性率 η と雪の密度 ρ との関係 第5図は、 η と ρ との関係を、片対数グラフで示したものである。四つの歪速度 $\dot{\epsilon} \approx 10^{-3}$ 、 10^{-4} 、 6×10^{-5} 、 6×10^{-6} 1/sec について、夫々別の記



第4図 粘性率 η と温度 T との関係

号で示してある。同じ温度、同じ歪速度では、密度の大きい程、粘性率も大きい。その関係は温度 $T \approx -4^\circ\text{C}$ 、歪速度 $\dot{\epsilon} \approx 10^{-3} 1/\text{sec}$ のときには、ほぼ図の直線で表わされる。その式は次で与えられる。

$$\log_{10} \eta = 4.6\rho + 7.32 \quad (7)$$

ここで、 η は $\text{dyne}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$ 、 ρ は gr/cm^3 の単位で表わされている。

(3) 粘性率 η と歪速度 $\dot{\epsilon}$ との関係 $-1^\circ\text{C} > T > -9^\circ\text{C}$ のしまり雪について、密度 $\rho = 0.47, 0.45, 0.37 \sim 0.4$ の三つの場合にわけて、 η と $\dot{\epsilon}$ との関係を、両対数グラフで示したのが第6図である。同じ温度、同じ密度では、歪速度が小さい程、粘性率は大きい。 $\rho = 0.4$ 、 $T \approx -4^\circ\text{C}$ のときの η と $\dot{\epsilon}$ との関係は、ほぼ図の直線で表わされ、

$$\log_{10} \eta = -0.87 \log_{10} \dot{\epsilon} + 6.55 \quad (8)$$

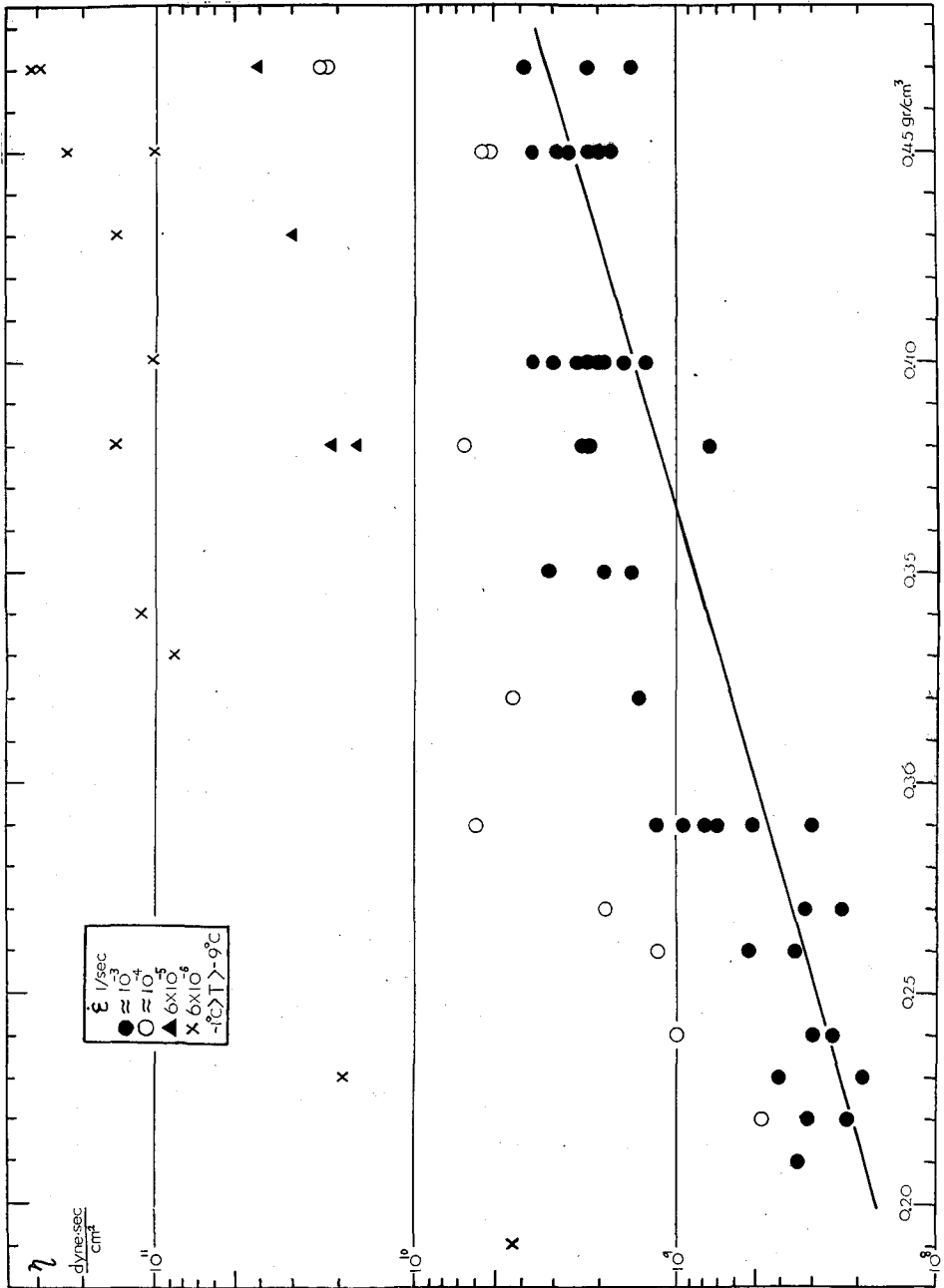
で与えられる。ここで、 η は $\text{dyne}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$ 、 $\dot{\epsilon}$ は $1/\text{sec}$ の単位で表わされている。なお、 $\dot{\epsilon}$ は限界歪速度 $2 \times 10^{-3} 1/\text{sec}$ より小さいものとする。

小島³⁾は、積雪の自然沈降から、積雪の粘性圧縮の場合の粘性率を求めた。それによると $\rho = 0.4$ 、 $T = 0^\circ \sim -5^\circ\text{C}$ のときに、 η は $10^{12} \text{ dyn}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$ の程度、圧縮歪速度 $\dot{\epsilon}$ は $10^{-7} 1/\text{sec}$ の程度であつた。筆者が実験に用いた最小圧縮歪速度は $6 \times 10^{-6}/\text{sec}$ であるが、実験式(8)を $\dot{\epsilon} = 10^{-7} 1/\text{sec}$ まで延長して計算すると、小島の得た値とよく一致する。従つて、(8)式は少なくとも $\dot{\epsilon} \approx 10^{-7} 1/\text{sec}$ の圧縮歪速度まではあてはまると考えられる。

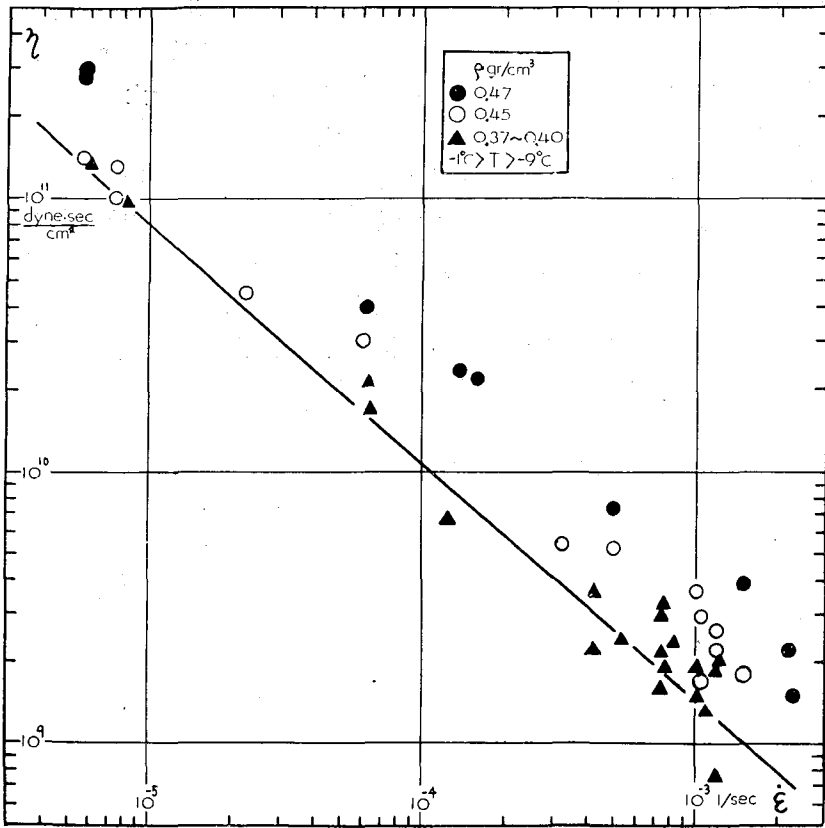
(4) η と T 、 ρ 、 $\dot{\epsilon}$ との関係 (6), (7), (8) の実験式から、 $\eta (\text{dyne}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2)$ と $T (^\circ\text{C})$ 、 $\rho (\text{gr}/\text{cm}^3)$ 及び $\dot{\epsilon} (1/\text{sec})$ との関係を一つの式で表わすと、次のようになる。

$$\log_{10} \eta = -0.04 T + 4.6\rho - 0.87 \log_{10} \dot{\epsilon} + 4.55 \quad (9)$$

ただし、雪は乾いたしまり雪でなければならない。温度 T 、密度 ρ 、圧縮歪速度 $\dot{\epsilon}$ の範囲は、



第5図 粘率 η と密度 ρ との関係



第 6 図 粘性率 η と歪速度 $\dot{\epsilon}$ との関係

$-30^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$, $0.1 < \rho < 0.5$, $10^{-7} < \dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}^{**}$ ($\dot{\epsilon}^{**}$ は限界歪速度 $= \frac{v^{**}}{l}$) である。

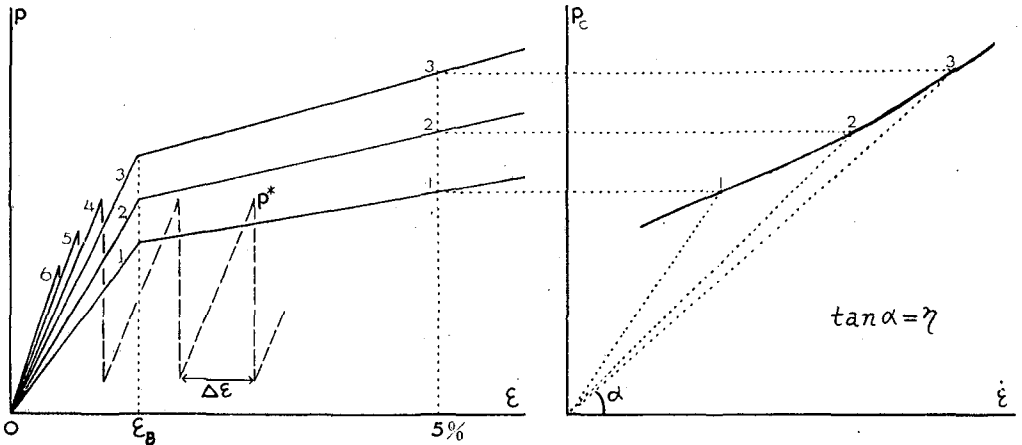
V. 応力-歪及び応力-歪速度関係の模式図

雪の柱の圧縮塑性変形の応力-時間曲線の模式図は第 1 図 (b) に示した通りであるが、曲線の傾斜がゆるやかになり始める B 点、即ち降伏が始まる点での歪 ϵ_B は、温度、圧縮歪速度によつて殆んど変わらない。 $0^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$, $10^{-3} \text{ 1/sec} \sim 10^{-6} \text{ 1/sec}$ にわたる温度、圧縮歪速度の広い範囲に対しても、多少の変動はみられるが、殆んど一定で $0.01 \sim 0.02$ の範囲内にある。この事実と、今までに述べて来たこととを組合せると、積雪の圧縮に関する硬化曲線の概観が、第 7 図の模式図で与えられる。

第 7 図の左の図が硬化曲線で、縦軸には圧縮される雪の柱の応力 p が、横軸には時間 t に比例して増大する圧縮歪 ϵ がとつてある。曲線に附した番号の 1, 2, 3, 4, 5, 6 は、その順に、圧縮歪速度 $\dot{\epsilon}$ が大きくなることを示す。1, 2, 3 は塑性変形, 4, 5, 6 は破壊変形である。(5) 式によつて、弾性率 E は歪速度 $\dot{\epsilon}$ と共に来ますので、 ϵ の小さい左の端近くでは、各曲線は番号の順

に上に位置する。塑性変形の場合には、一定の ϵ の値 ϵ_B の所で、降伏が起り、 ϵ_B 点より右では曲線の上昇はゆるやかになる。破壊変形4, 5, 6の場合には、歪 ϵ が降伏歪 ϵ_B に達しないうちに、破壊が始まり、破壊が起る毎に、応力 p は最小値にくだつては、また大きくなり、鋸歯状の硬化曲線が書かれる。鋸歯の先端にあたる応力 p の最大値 p^* が破壊強度であるが、この破壊強度は塑性変形と破壊変形とを分つ限界歪速度近く、曲線3の降伏歪 ϵ_B における応力の値よりも常に小さい。又破壊強度は歪速度 $\dot{\epsilon}$ が大きくなる程、4, 5, 6の曲線の最大値が、その順にさがっているように、減少する。(前の論文 II²⁾の第6, 7図参照)。

塑性変形の1, 2, 3について、歪 ϵ がある一定値、例えば5%に達したときの応力 p と、歪速度 $\dot{\epsilon}$ との関係を示したのが、第7図の右側の図の斜め上に上昇する実線である。粘性率 η は、この実線上の点と原点とを結ぶ線の傾斜角 α の正切に等しい。



第7図 積雪における応力—歪及び応力—歪速度の関係の模式図

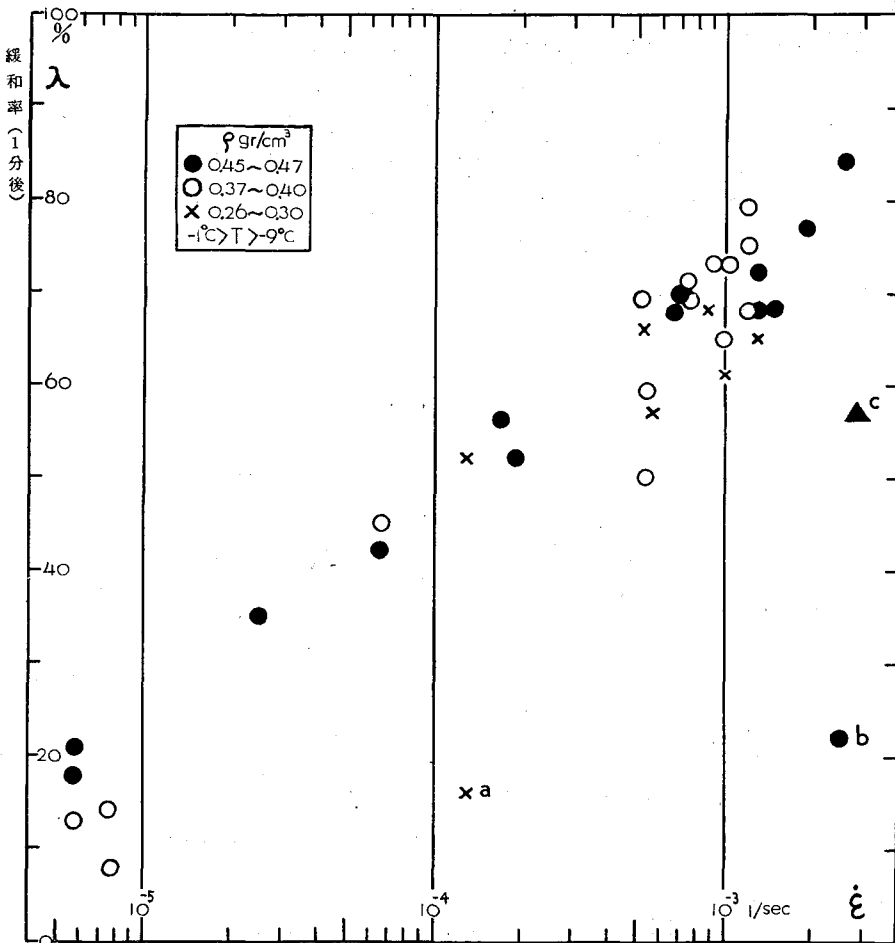
1, 2, 3, 4, 5, 6の順に歪速度が大きくなる。1, 2, 3は塑性変形。4, 5, 6は破壊変形。

VI. 応力緩和現象

雪を定速度で圧縮し、歪を増大して行くと、第1図の曲線で示されるように、応力 p は時間 t によつて変化するが、D点で急に圧縮装置のモーターをとめて、積雪の歪を一定値におさえると、応力 p は急に減少を始める。この応力緩和は、 $e^{-t/\tau}$ の形をとり、又積雪の密度、温度で違うことが大浦¹⁾及び筆者²⁾によつて解つた。しかし、その後の筆者の実験によつて、応力緩和現象は積雪の密度、温度のみならず、応力を発生させる歪の増大速度 $\dot{\epsilon}$ によつても大きな影響をうけることが解つた。更に同じ歪速度で圧縮するにしても、圧縮を継続する時間の長短によつても違う。しかし、今回は圧縮継続時間の差を余り大きくはとらず、D点での歪、即ち最終歪を3%から20%の範囲内に限つて、応力緩和に対する歪増大速度 $\dot{\epsilon}$ の影響のみを考えることとする。第8図がその影響を示すグラフである。緩和の速さを表わす目安として、圧縮をとめたときの最終応力 p_0 とそれから1分後の応力 p_1 との差 $p_0 - p_1$ と p_0 との比 $(p_0 - p_1)/p_0$

λ を用い、それを縦軸にとつてある。横軸は歪増加速度 $\dot{\epsilon}$ である。 $\dot{\epsilon}$ が 10^{-5} 1/sec位のときには、 λ は15%位であるが、 $\dot{\epsilon}$ がその100倍の 10^{-3} 1/secになると、 λ は70%にもふえてしまう。即ち $\dot{\epsilon}$ が大きい程、緩和が速い。(最終歪が60%近くにも達するような大きな変形を与えた場合には、 λ は $\dot{\epsilon}$ の大小に拘らず、20%近くなる。第8図のa, bの点はその例である)。

第8図にある測定点は、三角印のC点を除いて、すべて始めの圧縮が塑性変形であつた場合のものである。実は、圧縮が破壊変形で起るときは、圧縮速度が大きいので、モーターをとめても、雪の圧縮はその瞬間にはとまらない。圧縮装置の惰性のため、圧縮速度は徐々に減少し、圧縮が完全にとまるのには、2乃至3秒かかる。従つて、破壊変形によつて圧縮したとは



第8図 1分後の緩和率 λ と歪速度 $\dot{\epsilon}$ との関係

圧縮をとめたときの最終応力を p_D 、それから1分たつたときの応力を p_1 とすると、 λ は $(p_D - p_1)/p_D$ で表わされる。圧縮をとめたときの最終歪 ϵ_D は0.03~0.2である。ただし、特にa, bの印をつけたものでは、 ϵ_D が夫々0.53, 0.59である。cをつけた測定点は、密度0.24, 温度 -3.2°C での破壊変形。

いつでも、実は、圧縮がとまる前の2乃至3秒は、圧縮速度の遅い塑性変形になつてしまう。それで、破壊変形のとときの本当の緩和曲線は仲々得られない。ところが、いちど、圧縮装置のプリーが偶然途中で外れて、破壊変形が行なわれている途中で、圧縮が急にとまったことがあつた。測定点Cは、そのときの値である。ほぼ同じ速度の塑性変形の場合の値より小さい。(測定点Cの場合の歪増加速度 $\dot{\epsilon}$ は 3×10^{-3} 1/secで、破壊変形と塑性変形とを分つ臨界圧縮歪速度に近い。それで、このあたりの点では塑性変形も破壊変形も起る)。

破壊変形のとときの最終歪は、第7図に $\Delta\epsilon$ として表わした鋸歯の幅である。 $\Delta\epsilon$ は 10^{-3} 程度で、塑性変形のとときの最終歪に比べると、非常に小さい。測定点Cの値が、同じ $\dot{\epsilon}$ についての塑性変形の場合の値と違うのは、この最終歪の大きな差によるものと思われる。事実、このように最終歪が小さければ、変形は塑性変形ではなく、弾性的なものに近い。

VII. 湿つた雪の粘性率

前節までに述べたことは、すべて 0°C 以下の乾いた雪に関するものであつた。この節では、湿つた雪の柱を圧縮して得られた実験結果について述べる。実験は温度 0°C 、密度0.28の雪が湿っている場合と、乾いている場合とについて行なわれた。湿つた雪の含水率は、結合熱量計⁵⁾によつて測定した。得られた結果を第1表に示す。

第 1 表

温 度	含水率	圧縮速度 v	歪速度 $\dot{\epsilon}$	変形形式	歪5%のときの粘性率 η	歪5%のときの応力 p_c
0°C	2.6%	11.5 mm/min	1.3×10^{-3} 1/sec	塑 性	$5.9 \times 10^7 \frac{\text{dyne} \cdot \text{sec}}{\text{cm}^2}$	80 gr/cm ²
"	"	18 "	2 "	"	3.4 "	72 "
"	"	28 "	3.3 "	"	2.2 "	72 "
"	"	60 "	7 "	"	1.5 "	107 "
"	0	3.8 "	0.42 "	"	6.4×10^8 "	300 "
"	0	11.5 "	1.3 "	破 壊		130* "
"	0	28 "	3 "	"		90* "

* 印は破壊強度 p^* (第V節参照) である。

湿つていなければ、破壊変形が起る臨界圧縮速度 v^* は 10 mm/min 位なのに、湿つた場合には、圧縮速度 v が 60 mm/min になつても破壊変形にはならず、塑性変形を続ける。表に現われているように、歪5%のときの粘性率 η は湿ると、湿つていなかった場合の1/10以下になる。しかし、圧縮速度が大きくなると η が、減少するという点では、第6図に示した乾いた雪の場合と同じである。

補 遺

筆者及び若浜が最近考案した簡単な積雪薄片の製作法⁹⁾を利用して、圧縮した雪の柱から

薄片を作り、その組織の変化を調べてみた。そのうちの二三の例は既に報告されている⁷⁾。一方、若浜⁸⁾は予め自然のしまり雪から薄片を切取つて、その薄片を顕微鏡で観察しているままで、横から圧縮し、雪の組織が変つて行く過程を詳しく調べている。筆者の実験で、圧縮を終つた雪の塊からとつた薄片についても、若浜の実験の場合に得られるものと、同じように思われる組織の変化が観察された。

終りに、この研究に際し色々とお御指導をいただいた吉田順五教授、又種々御助言をいただいた低温科学研究所雪氷研究グループの方々、に感謝の意を表します。この実験の一部は雨竜郡母子里において行なわれたのであるが、その際多くの便宜を与えられた北大演習林母子里看守所に対して、厚く御礼を申し上げます。なおこの研究に要した費用の一部は文部省科学研究費によるものである。

文 献

- 1) 木下誠一 1950 積雪における変形速度と二つの変形形式 (塑性変形, 破壊変形) との関係. 低温科学, 物理篇, **16**, 139.
- 2) 木下誠一 1958 積雪における変形速度と変形形式との関係 II. 低温科学, 物理篇, **17**, 11.
- 3) 小島賢治 1958 積雪層の粘性圧縮 IV. (かたしまりゆきの粘性係数について). 低温科学, 物理篇, **17**, 53.
- 4) 大浦浩文 1957 雪洞の天井を支える梁にかかる力. 低温科学, 物理篇, **16**, 55.
- 5) 吉田順五 1959 積雪含水率測定用熱量計. 低温科学, 物理篇, **18**, 17.
- 6) 木下誠一・若浜五郎 1959 アニリン固定法による積雪の薄片. 低温科学, 物理篇, **18**, 77.
- 7) Kinoshita, S. & Wakahama, G. 1960 Thin sections of deposited snow made by the use of aniline. Contributions from the Institute of Low Temperature Science, **No. 15**, 35.
- 8) 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 II (積雪薄片の定速度圧縮). 低温科学, 物理篇, **19**, 73.

Résumé

For the last several years, the author has been studying the plastic and destructive deformations of snow by compressing pillars of snow at constant speeds v of different magnitudes. The results of the experiments were reported in his previous papers (references (1), (2)). He found that the pillars of snow were subjected to destructive compression when v was above a certain critical speed v^* while it underwent plastic compression when v was below v^* .

(1) The curves in Fig. 1 of the text show how the stress p induced within the snow by the compression changes with time t . In the case of destructive compression the stress p shows saw-teeth oscillation between a maximum p^* and a minimum p_* as shown in Fig. 1 (a), while in the case of plastic compression p rises rapidly at first to be followed by a prolonged gentle rise as shown in Fig. 1 (b). The elastic coefficient E of the snow can be determined from the slope dp/dt of the rising portions of the

saw-teeth and of the initial rapidly rising part AB of the curve in Fig. 1 (b). $E=(dp/dt)/(v/l)$, where l is the height of the snow pillar. In the case of plastic compression another physical constant, viscosity coefficient η , is introduced which concerns the slowly increasing part BCD of the curve in Fig. 1 (b). The viscosity coefficient η is defined as $\eta=p/\dot{\epsilon}$, where $\dot{\epsilon}=v/l$ is the strain rate. Actually η is not a constant because p changes with time. For the sake of comparison the magnitude of η will be represented by its value at the strain ϵ of 5%.

The relations of E and η to the snow temperature T , the snow density ρ and the strain rate $\dot{\epsilon}$ are shown in Figs. 2, 3, 4, 5 and 6. The elastic coefficient E is independent of T but increases with increasing ρ and $\dot{\epsilon}$. The viscosity coefficient η increases rapidly with decreasing T . An increase in ρ or a decrease in $\dot{\epsilon}$ causes η to increase. Those relationships can be represented by the formulas

$$\log_{10} E = 5.9\rho + 0.24 \log_{10} \dot{\epsilon} + 6.4 \quad (1)$$

$$\log_{10} \eta = -0.04 T + 4.6\rho - 0.87 \log_{10} \dot{\epsilon} + 4.55 \quad (2)$$

where E , η , T , ρ and $\dot{\epsilon}$ should respectively be counted by the units of dyne/cm², dyne-sec/cm², °C, gr/cm³ and 1/sec. Formula (1) is available within the ranges of $-30 < T < 0$, $0.1 < \rho < 0.5$ and $10^{-6} < \dot{\epsilon} < 10^{-1}$, while formula (2) within $-30 < T < 0$, $0.1 < \rho < 0.5$ and $10^{-7} < \dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}^*$. Here $\dot{\epsilon}^* = v^*/l$ is the critical strain rate.

(2) With the plastic compression the strain ϵ_B at point B in Fig. 1 (b) at which the slope of the stress curve becomes gentle is almost constant (0.01-0.02) irrespective of the values of T , ρ and $\dot{\epsilon}$. The maximum stress p^* of the destructive compression increases with decreasing v but never exceeds that p which the snow exhibits at the strain ϵ_B when it is subjected to plastic compression at the critical speed v^* . Those facts, together with the results described in the previous section (1), permit the general feature of $p-\epsilon$, $\dot{\epsilon}$ curves to be schematically represented by the diagrams of Fig. 7. In this figure the numerals 1 to 6 attached to the lines stand in the increasing order to strain rate $\dot{\epsilon}$.

(3) When the compression of snow is stopped after the snow has been strained to some extent ϵ_D , the stress p begins to decrease rapidly as shown by the curves DE of Fig. 1 with no change occurring in the strain. This is the phenomenon of stress relaxation. Let the rate of relaxation be represented by the ratio $\lambda = p_1/p_D$, where p_D and p_1 are respectively the values of p at the moment of and one minute after stoppage of the compression. The dependency of λ upon ρ and T is very weak as compared to that upon $\dot{\epsilon}$. Fig. 8 shows the relation between λ and $\dot{\epsilon}$.

(4) When snow gets wet, the critical speed v^* increases. For instance, a wet snow of density 0.28 and of free water content 2.6% could be compressed plastically even at such a large speed as 60 mm/min while the same snow, when dry at 0°C, began the destructive compression at the speed 11.5 mm/min. The tendency of η to decrease with increasing $\dot{\epsilon}$ is the same with wet snow as with dry, but the value of η is, for the same $\dot{\epsilon}$, much smaller with wet than with dry snow.