研 究

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

木 下 誠 一*

The Relation between the Deformation Velocity of Snow and Two Types of its Deformation (Plastic and Destructive).

SEIICHI KINOSHITA

(Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan)

Abstract

The resisting force of snow against the compression to which it was subjected was registered electrically. The speed v of compression was chosen within the range 1~40 mm/min. It was found that the snow was deformed in two different manners according to whether v lies above or below a value v^* . When $v > v^*$ the snow was deformed in a destructive manner being fractured intermittently on the surface through which the compressive force was applied to it. The curve of resisting force p took an appearance of the teeth of a saw (fig. 5 (b), (c)); the sudden depressions of the curve at the right end of each tooth correspond to the intermittent fractures. The time interval t^* between two successive ruptures, that is, the breadth of one saw-tooth of the curve of resisting force, multiplied by v gives the displacement x^* of the compressing plate during the interval. x^* is almost equal to or a few times as large as the size of the ice particles composing the snow.

When v was gradually lowered the saw-teeth on the curve became broader and broader, their height increasing slowly at the same time, and finally when v passed v^* over to its smaller side the teeth became so broad and flat that no depression representing the fracture occurred. In the latter case the snow was continuously deformed in a plastic manner. The resisting force p continued to rise at first rapidly and then slowly without any discontinuous depression (fig. 5 (a)).

§ 1 緒 言

物体を雪の上に落すと、物体は雪の中にめりこんでとまる。この場合、雪に働く力は衝撃的な力で、雪は短時間のうちに大きな変形を起し破壊する。一方、地上に深く積った積雪は、その自重によって数十日の間に徐々に沈降し、その際の変形は上記の落体による破壊変形と同程度の大きさに迄達する。しかし、この場合には破壊は全然起らない。落体による破壊の際の雪の変形速度は非常に大きく、自重による緩慢な沈降の際の雪の変形速度は非常に小さい。このように、雪は同じ程度の大きさの変形をうけるとしても、変形速度の大きいときには、破壊的に変形し、小さいときには、破壊しないで塑性的に変形する。従って、雪の変形形式は雪の変形速度によって変る筈である。それでこのような二つの異なる変形形

式が変形速度とどのような関係にあるか、又そのときの雪の反抗力がどんなものであるかを、雪を異なる速度で圧縮して調べてみた。

§ 2 実験装置

第1図が実験装置の略図である。Fはその表面に食紅で目盛をかきこんだ雪の円柱で、これをその上にある圧縮板Eで圧縮する。雪の円柱をのせている台Gは、雪の圧縮抵抗力を測る器械である。2枚の隣青銅板 a, b (厚さ 1 mm) の圧縮反抗力による変形を、a の表と裏に夫々 2枚づつ ($\alpha, \alpha; \beta, \beta$) はったストレングージ 4枚をブリッジに組んで、電流に変え、増幅して、電磁オシログラフ又はマイクロレコーダーによって記録する。XYZZは厚さ 23mm の鋳鉄板で組んだ頑丈な枠である。モーターMは 2 段の減速装置A, B を介して歯車Cをゆるやかに廻転し、圧縮板Eを下端につけて螺旋棒Dを徐

* 北海道大学低温科学研究所

々に下降させる。モーターの廻転速度を変えたり、2段階リーの連結ベルトの組合せを変えたりして、Eの下降速度を1~40mm/min, の間の任意の値にすることが出来る。雪の圧縮抵抗が100kgをこえない限り、Eの下降速度に変動は認められなかった。

第1図 実験装置

雪の試料としては、積雪層から切取った直径2.7~6cm, 高さ5~10cmの雪の円柱を用いた。雪の円柱の側面の所々には、食紅の粉で目印をつけた。圧縮が行われている間に、時々写真を撮り、この印の間の縮み方を検討して、雪の円柱の局所的な変形の様子を調べた。又円柱の他に雪塊をも用いた。受圧板Gの上に雪塊を置いて、Eが雪塊の中心にめぐりこんで行くときの雪の反抗力を記録した。このときには、圧縮をうけた雪塊について、圧縮板で作られた穴の中心を通る面で雪塊を切断し、その断面に色水を霧吹きで吹きかけ、ガスの焰であぶって、雪の変形の有様を検討した。(以後、この操作を、雪塊断面の色水検査と呼ぶことにする)

§ 3 圧縮速度と変形形式との関係の観察

圧縮速度が小さいときには、雪は全体として塑性的にほぼ一様に縮んで行く(塑性変形)。第2図の写真は、密度0.38, 温度-3°Cのしまり雪の円柱を4.8mm/minの速度で圧縮した場合を示すものである。円柱の表面につけた9コの食紅で、円柱を10コに区分してあるが、各区分の圧縮率を調べると次の表のようになった。(区分番号は上から順につけた)。

区分番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
圧縮率	62	78	75	58	58	59	61	52	61	59

各区分の圧縮率は完全におなじではないが、だいたい是一致的している。したがって、雪の柱はほぼ一様に圧縮されたと考えてよいだろう。

雪塊の場合は、圧縮板を中心として雪塊の表面が摺鉢

形に凹む。第4図(A)の写真は、密度0.26, 温度-1.8°Cのしまり雪の雪塊を2.6mm/min, の速度で圧縮して、その断面を色水検査したものである。凹みの下の部分が濃く着色してはいるが、着色部の輪廓は明瞭でなく周囲に拡散している。柱の場合と同様に、この場合にも亦、変形は雪の連続性が保持されたままの塑性変形である。従って、はっきりした圧縮部が出来ないわけである。

圧縮速度が大きいときには、雪は破壊しながら変形して行く(破壊変形)。第3図の写真は、第2図と同じ雪の円柱を約5倍速い24.5mm/minの圧縮速度で圧縮した場合を示している。雪の柱はその下面で破壊し、破壊して粉になった雪は柱の周囲に押出されて受圧板の上に堆積する。破壊されずに残っている柱の部分は、その表面につけた印の間隔が殆ど変化していない。即ち、柱自体は圧縮されずに(多少の圧縮は受けるであろう)、その端から破壊によって欠けて行くという形式で、柱全体の長さを短縮して行くのである。雪の柱の破壊は、上端面又上下両端面で同時に、起ることもあり、ある程度圧縮が進むと、柱が縦に割れることが多い。

雪塊の場合には、圧縮板の部分だけが雪の中に沈み、鉛直の壁をもった穴が出来る。そして穴の底の下には、はっきりした境界をもった圧縮部が発達する。これは圧縮板の下が雪が破壊されたことを示すものである。第1図(b)の写真は、同図(a)と同じ雪について圧縮速度を2倍の5.2mm/minにしたときの雪塊断面である。色水検査の結果、真黒な圧縮部分がはっきりと現れた。

§ 4 雪の反抗力に現れる二つの変形形式の違い

雪の円柱の場合も雪塊の場合も共に、塑性変形と破壊変形とは、雪の反抗力が全く違った様子を示した。得られた反抗力の記録の写真を第5図に示す。反抗力曲線に附記した印Aは、圧縮板が雪に接触した瞬間、Dは圧縮板の下降を停止した瞬間を示す。D以後は反抗力の緩和曲線である。

塑性変形の場合の反抗力曲線は連続曲線で、第5図(a)のように始めは急に上昇するが、暫くたつと緩かに滑らかに上昇するようになる。

破壊変形の場合の反抗力曲線は鋸歯状曲線で、第5図(b), (c)のように鋸の歯に似た形の反復になる。(b)はあまり圧縮速度の大きくない場合の反抗力曲線で、記録速度のおそいマイクロレコーダーでとったものである。圧縮速度を大きくすると、マイクロレコーダーの記録では、反抗力曲線が不規則に変動する統続曲線になって見える。しかし記録速度のはやい電磁オシログラフを使えば、(c)のようにやはり、鋸歯状曲線がえられる。

第2図 塑性変形。密度0.38, 温度 -3°C , 圧縮速度4.8mm/min, 最大反抗力82kg ($4\text{kg}/\text{cm}^2$) に達する

(塑性変形のときは、オッシログラフで記録しても曲線はやはり滑かな連続曲線である)。一つの鋸歯の右端の不連続な陥没が起るごとに破壊が起っているのである。

反抗力の大きさは塑性変形の場合の方が破壊変形の場合より大きい。例えば密度0.38, 温度 -3°C のしまり雪では、塑性変形の第2図に示されているように最大反抗力が82kg ($4\text{kg}/\text{cm}^2$) にまで達した。しかし同じ雪の第3図の破壊変形では最大反抗力が17kg ($1\text{kg}/\text{cm}^2$) にしか達しなかった。又第4図の雪塊の場合も(a)の塑性変性では28.5kg ($1.04\text{kg}/\text{cm}^2$) に達した

第3図 破壊変形。密度0.38, 温度 -3°C , 圧縮速度24.5mm/min, 最大反抗力17kg ($1\text{kg}/\text{cm}^2$)

第4図 (a) 塑性変形。密度0.26, 温度 -1.8°C , 圧縮速度2.6mm/min, 最大反抗力28.5kg ($1.04\text{kg}/\text{cm}^2$) に達する
(b) 破壊変形。密度0.26, 温度 -2.3°C , 圧縮速度5.2mm/min., 最大反抗力9.4kg ($0.34\text{kg}/\text{cm}^2$)

が、(b)の破壊変形では最大が9.4kg ($0.34\text{kg}/\text{cm}^2$) にすぎなかった。

変形速度が連続的に変って行った場合、一方の形式から他方の形式にどのように移行するかが問題になるが、このことを反抗力曲線について、変形速度を大きな値か

ら小さな値に減らして行く場合について説明する。変形速度の大きい破壊変形の際に現れる鋸歯状曲線の隣り合った鋸歯の間隔は、速度の減少と共に次第に広く、且つ高さは次第に高くなって行く。その様子を第6図の上段(a)(b)(c)に模式的に示してある。速度が更に小さくな

第5図 (a) 塑性変形. マイクロレコーダーの記録, Aで圧縮板が雪面に達し, Dで圧縮を止める
(b) 破壊変形. マイクロレコーダーの記録
(c) 破壊変形. 電磁オシログラムの記録
(d) 始め破壊変形していたのが, 塑性変形に移行する

ると, 鋸歯の幅は益々広くなって, ついに鋸歯の右端の陥没, すなわち雪の破壊が, 観測時間中には現われなくなる。反抗力曲線は(d)(e)のように緩かに上昇する連続曲線になり, ここに雪の変形は塑性変形となるわけである。従って, 破壊変形から塑性変形への移行に対応する限界圧縮速度は観測時間の長さによって変る。いまここでは, 観測時間を10分から20分位として, その時の限界速度を v^* で表わすことにする。

第6図 圧縮速度と変形形式との関係の模式図

§5 測定結果

(1) 反抗力 p と圧縮速度 v との関係 (第7図)。 v が小さい塑性変形のときには, p は連続的に上昇して行く。従って図には圧縮を中止した時の p の最大値を印し, 印の下には点線をつけ, 印の上には矢印をつけた。点線は始め小さかった p がこの印の所まで増大したことを示すためのものである。 v が大きい破壊変形のときは, 反抗力曲線が鋸歯状になるが, 鋸歯の頂と谷とに当る p の値 p^* , p_* を印し, その二つを実線で結んだ。 v が限界速度 v^* 近くときには, 始め破壊変形をしていたのが, 塑性変形に移行するが多い。第5図(d)はそのような場合の一例である。この場合には, 前半の破壊変形の最終段の鋸歯の頂と谷とを表す印の上に, 点線でつないだ矢印のある印をつけた。矢印のある点が圧縮を中止したときの p の値である。

又筆者は, この実験と平行して, 雪の上に円筒形の錘を落とし, 雪を衝撃的に変形する実験も行い, その短い衝撃過程における雪の反抗力をオシログラムにとった。落下する錘が雪を圧縮する速度は, この実験に比べて非常に大きく, 平均毎秒数十mmの程度である。それで, そ

第7図 反抗力 p と圧縮速度 v 及び歪増加速度 v' との関係, p^* は鋸歯の頂, p_* は鋸歯の谷, v^* は限界速度

のときの雪の反抗力の平均値を、速度のスケールを別に
して、図の右端に書き入れた。

第7図を全般的に見ると、 v が v^* より大きい破壊変形
の領域では、 v が大きい程 ρ が小さくなる傾向がある。
又 v が v^* より小さい塑性変形の領域では、 ρ は非常に大
きい。変形形式の違いを定める限界速度 v^* は、硬い雪で
7~13mm/min, 軟かい雪で3~8mm/minの範囲にある。

(第7図の最上段の雪は円柱についてのものであるが、
これでは、横軸に圧縮速度そのものをとらず、歪の増加
速度 v' をとってある。円柱の始めの高さを l_0 , ある時刻
での高さを l とすると、 $s = (l_0 - l) / l_0$ として、 $v' =$
 ds/dt である。各点の傍につけた数字が圧縮速度 v その
ものである。)

実験に用いた雪の温度範囲は、 $0^\circ\text{C} \sim -9^\circ\text{C}$ であって、
温度が高い程 ρ が小さくなる傾向が見られる。第7図の
上段と中段とでは、黒い印で 0°C の場合を示しているが、
このとき雪は湿っていた。湿った雪の場合には、破壊変
形の際に v が大きくなると、反抗力がはっきりした鋸歯状
を示さず、むしろ連続曲線に近い様子を示した。従って
 ρ^* と ρ とがほぼ一致し、図では一点で示されている。
このときの変形の様子をみると、円柱の上端面で破壊が
起る場合、上端面から押出された雪は、すぐには落下せ
ず、柱の上端から側方に舌の形になって垂れて下った。

(2) 破壊変形の際の鋸歯状反抗力曲線の鋸歯の幅 t^* ,
 x^* と圧縮速度 v との関係 (第8図, 第9図)。第8図は
各鋸歯の時間間隔と t^* と v との関係を示す。一つの反抗
力曲線について t^* は一定値ではなく、ある値の範囲に
分散するので、その分散範囲を実線の長さで示し、平均
値に印をつけてある。 v の増大と共に t^* は急激に減少す
る。 v が小さいところで、上向きの矢印をつけたものは
圧縮の途中で破壊変形から塑性変形に移行したものであ
る。第9図では t^* の代りに、鋸歯の幅として圧縮の進行
した距離 x^* を使ってある ($x^* = t^* v$)。 x^* も v の増大と
共に減少するが、その減少のしかたは t^* に比べると遥
かに緩慢である。 x^* の値は0.1mmから高々1mm位の
範囲で、雪の粒子の大きさと同じ程度である。従って雪
は大体それを構成している粒子の大きさの程度の圧縮を
うける度毎に破壊することになる。

(3) 各鋸歯の上昇部の傾斜から計算される弾性率は
 $10^7 \sim 10^8 \text{ dyne/cm}^2$ の程度で、静的な実験から得られた
値と同じ程度であった。

第8図 鋸歯の幅 t^* と圧縮速度 v との関係

第9図 鋸歯の幅 x^* と圧縮速度 v との関係

(4) 塑性変形の際の連続的に緩かに上昇する反抗力曲
線の、後半部の反抗力の値から計算される粘性係数は
 $10^8 \sim 10^9 \text{ dyne} \cdot \text{sec/cm}^2$ の程度で、自然の積雪層の沈降か
ら計算した値 $10^{10} \sim 10^{11} \text{ dyne} \cdot \text{sec/cm}^2$ に比べると小さい。

(5) 雪の圧縮をとめると、反抗力の緩和曲線 (第5図
のD以後) が得られる。1分位までは、この曲線は $\exp$
($-a\sqrt{t}$) で表される (t は時間, a は常数)。

尙、この実験の報告は「低温科学」第16輯物理篇にも
掲載してあるので、詳しくはそれを参照されたい。終り
に、色々御指導下さった吉田順五教授に感謝の意を表
す。