HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	積雪の引張速度と変形形式の関係　Ｉ：歪速度２．６／day～２．５×１０２／dayでの雪の変形と破断
Author(s)	成田, 英器
Citation	低温科學. 物理篇, 35, 67-75
Issue Date	1978-03-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18327
Type	bulletin (article)
File Information	35_p67-75.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Hideki NARITA 1977 Uniaxial Tension of Snow I. —Strain Rate and Fracture— *Low Temperature Science, Ser. A, 35.* (With English Summary p. 75)

積雪の引張速度と変形形式の関係 I*

—— 歪速度 2.6/day～2.5×10^2/day での雪の変形と破断 ——

成 田 英 器
(低 温 科 学 研 究 所)

(昭和 52 年 10 月受理)

I. ま え が き

斜面に積った雪は，接地面でゆっくり滑ると同時にたえず斜面下方に向って塑性的に流動している。斜面のうちでも，傾斜の急なところでは流動は速く，ゆるやかな所ではおそい。また，斜面の一つの場所でも，地面近くではおそく，雪面に近づくにつれて速い。このような雪の流動の速度は，積雪内のいろいろな場所における最大の剪断歪速度又は主歪の速度に一致していると考えられる。天塩地方演習林における南斜面中腹の積雪での測定によると，主歪の方向は，時間の経過とともにかなり変動し，主歪速度の大きさは 10^{-3}～10^{-5}/day 程度の伸び，又は縮みであった[1)~3)]。また，秋田谷[4)] は，この実験地の南斜面の積雪で，10^{-2}/day の伸びの歪速度の時に，雪に割れ目が発生したことを見出している。

なだれの発生に先立つ雪の割れ目は，斜面を横切って，等高線の方向にあらわれることが多く[5)~8)]，このような割れ目は，雪が引き延されておこるのであるから，斜面の最大傾斜方向の伸びの歪速度の大きさと雪の破壊との関係に注目すべきであろう。

雪の変形速度（歪速度）と破壊については，すでに木下[9)] が測定を行っているが，この測定は円柱形の雪を軸方向に圧縮する一軸圧縮の測定であった。雪の引っ張り試験は，篠島[11),12)] によって行われた。篠島の測定は円柱形の雪を一定の力で引っ張る一定荷重の一軸引っ張りのものであった。

筆者は長さ 12.5 cm の雪の円柱を 2.6/day～2.5×10^2/day の範囲の一定の歪速度で引っ張る試験を行い，歪速度と雪の破壊をしらべたので報告する。

II. 実験装置と試料の取付け

1. 実 験 装 置

第 1 図に実験装置の略図を示した。図の S は円柱形の雪の試料である（長さ 12.5 cm，直径 5.0 cm）。この試料を，深さ 1 mm の溝を 1 mm 間隔に同円心状に切った真鍮ブロック D_1, D_2（直径 5.0 cm，高さ 2.0 cm）に凍り着かせた。D_1 は引張り型荷重計（容量 50 kg のロードセル）L に，D_2 はモーター M の減速機部につながる引張棒 A にそれぞれ連結してある。A の上下方向の速度（変形速度）はモーター M の減速機部 B と歯車 X と Y の比を変えることによって任意に

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 1854 号

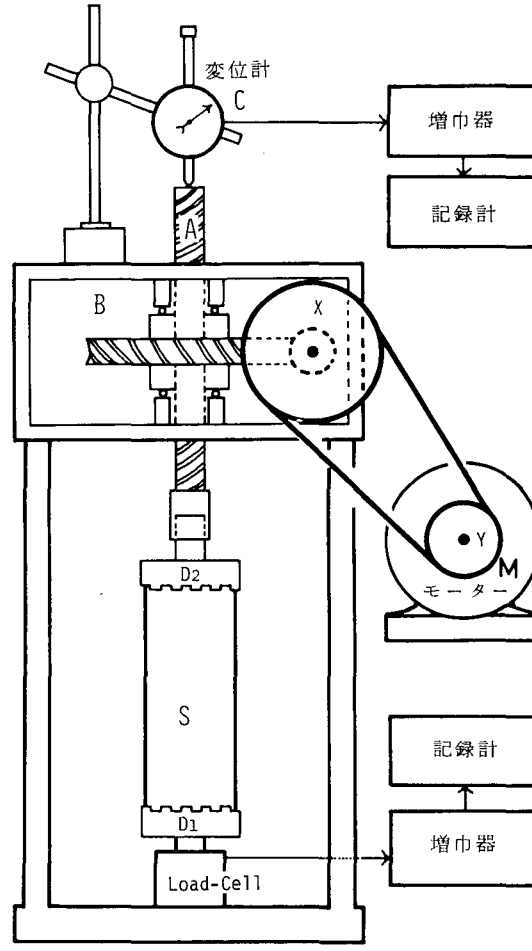
えらぶことができる。今回の実験では，引張り速度は0.22～16.2 mm/min，歪速度にして2.6 /day～2.5×10^2/day になった。

試料の伸びは，電気式変位計Cを用い，増幅器を経て自記記録された。試料の引っ張りにともなう雪の反抗力もロードセルLを用い，変位と同じ記録器に記録された。

2. 試料とその取付け

構造的に一様な試料をえらぶことと試料を装置に確実に取付けることは雪の引っ張りの試験では特に注意しなければならないことである。

自然積雪に穴を掘り，雪穴の壁から積雪層に直角な雪の板を切り取り，太陽光または電球の光に透かしてみる。細かな層構造がみられないことを確めてから10～20 cm の厚さをもつ雪の塊りを切り取った。この雪を −10°C の低温実験室に持ち込み，雪全体が一様な温度になるまで放置した。円筒形のサンプラーを雪の層に平行に押し込み，円柱の雪試料を切り出し，長さ 12.5 cm に切り，真鍮ブロック D_1, D_2 に凍り着かせた。



第1図 一軸圧縮・引張実験装置の略図

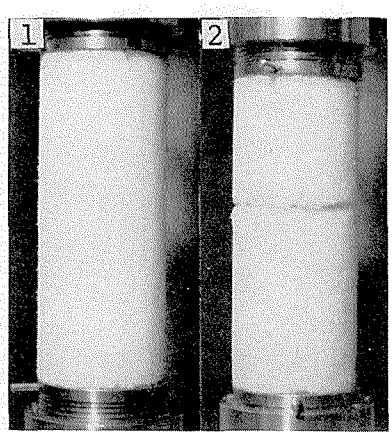
凍着方法は，D_1, D_2 をヒーターで温め，D_1, D_2 の表面がサーミスター温度計で +0.5°C になったところで円柱雪試料の底面に着ける。このばあい，D_1, D_2 と試料の接触面を平行にすることと，D_1 D_2 と円柱雪試料の中心軸を一致させなければならない。そのために，直線性のよいアルミ・アングル上に D_1, 雪試料，D_2 の順にならべ，D_1, D_2 を手で静かにすべらせて雪試料に密着させた。D_1, D_2 が雪を 1 mm ほど融かしこんだところで止め，そのまま放置した。このようにすると，D_1, D_2 の溝の中は氷で埋まり，雪の円柱の端は厚さ 1 mm 以下の氷板となって，43.2 kg の引っ張りに耐えた。雪の引っ張り試験はすべて −10°C でおこなわれた。

III. 引張の歪速度と破壊形式との関係

雪の円柱を，斜面上の自然積雪が一般に変形している歪速度より極めて速い 2.6/day～2.5×10^2/day の歪速度で引張ると様々な形式で雪は破壊した。それらの破壊の型は二種類に大別することができた。

第2図の写真は密度 0.370 g/cm^3，温度 −10°C のしまりゆきを 7.1×10/day の歪速度で引

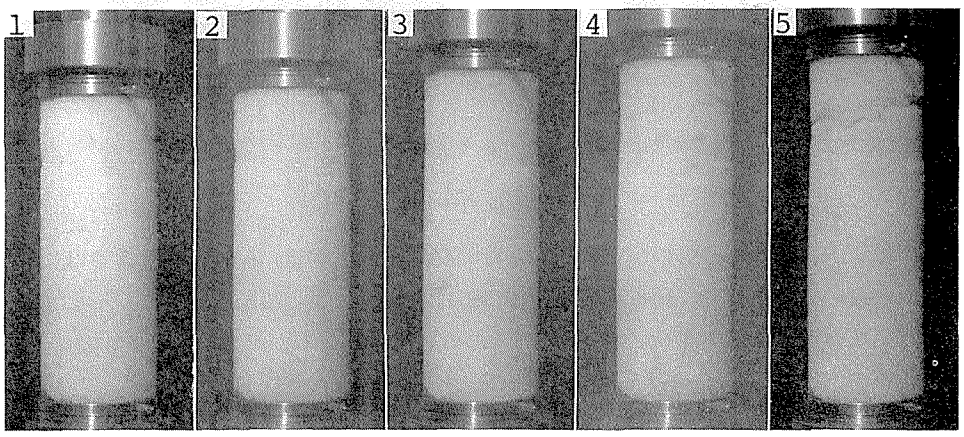
張った場合の破壊を示すものである。円柱は中間附近で引張方向とほぼ直角な面で，二つに破断した。各々の円柱の直径は破断前の直径とほとんど等しく，雪の塑性変形が無視できるほど小さかった。また，第IV節で詳しく述べるように，この場合の応力—歪曲線は破断に至るまで直線的であった。したがって，この破壊の形式は脆性破壊といえる。この種の破壊は歪速度 8/day～2.5×10^2/day の範囲で起きた。



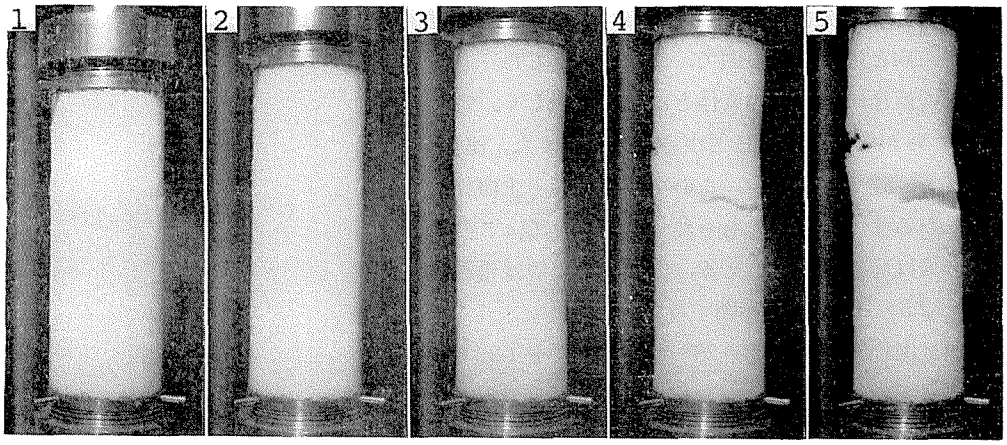
第2図　脆性破壊．密度 0.370 g/cm^3，歪速度 7.1×10/day (引張速度 5.6 mm/min)，反抗力 7.8 kg で破壊，温度 −10°C．1) 引張開始前，2) 破壊後

第3図の写真は密度 0.298 g/cm^3 の雪を 1.22×10/day の歪速度で引き延ばした場合である。雪の円柱を 10.1% ほど引延ばしたところで中間附近に二，三の小さな割れ目が生じた。さらに 10.4% 伸ばしたところで割れ目の一つが急に成長し破断した。歪速度 2.71/day の場合を第4図に示した。雪円柱にはひずみ約 5% のところで小さな割れ目が生じはじめ，ひずみ 7.7% にいたると試料全体に多数の小さな割れ目ができた。さらに，10% ほど引延ばしたところで，二，三の割れ目が大きく成長し，雪円柱は曲がり13.3% 伸ばしたところで破断した。この多数の小さな割れ目は脆性破壊のばあいの破壊面と同様に引張軸方向にほぼ直角にならんだ。第5図にその例をかかげた。雪円柱に白っぽく見える筋が小さな割れ目である。この割れ目の部分の薄片写真を第6図に示した。写真の空孔 (c) 部が割れ目である。割れ目以外の部分でも雪を構成していた氷の橋が引張軸方向 (写真の上下方向) に引き延ばされているのが認められる。

第3，4図の例はいずれも雪が塑性的に引き延ばされてから破断したもので，この破壊は延性破壊といってよいであろう。第3図の破壊形式は引張りの歪速度 7.3/day～2.3×10/day の範囲，第4図のそれは歪速度 2.6～7.3/day の範囲で起きた。

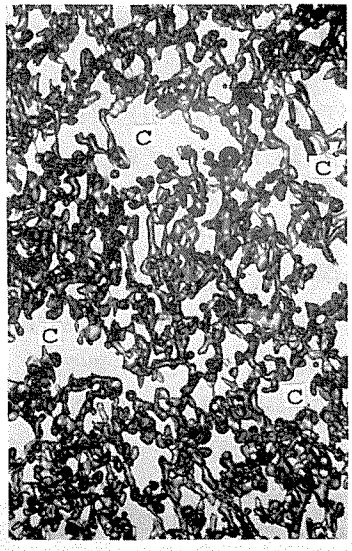


第3図　延性破壊—1．密度 0.298 g/cm^3，歪速度 1.22×10/day (引張速度 1.02 mm/min)，最大反抗力 30.3 kg，反抗力 24 kg 力で破壊，1) 引張開始前，2) ひずみ 1.7%，3) 5.8%，4) 10.1%，5) 10.4%



第4図 延性破壊—2. 密度 0.441 g/cm³, 歪速度 2.71/day (引張速度 0.23 mm/min), 最大反抗力 38.1 kg, 反抗力 3.3 kg で破断, 1) 引張開始前, 2) ひずみ 0.9%, 3) 7.7%, 4) 10.0%, 5) 13.3%

第5図 延性破壊の小さな割れ目の発生, 雪円柱に白っぽく見える横縞がそれである

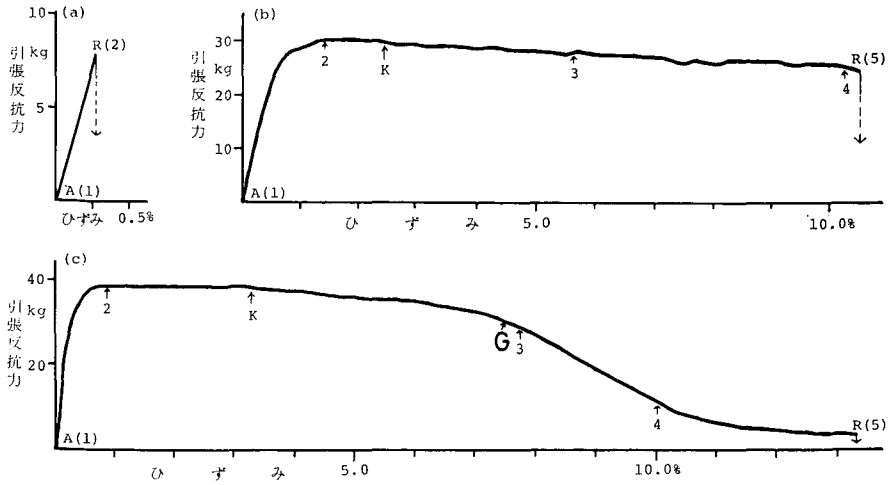


第6図 第5図の割れ目部分の薄片写真。写真の上下方向が引張方向, c の部分がクラック。雪粒子は軸方向に伸ばされている

IV. 反抗力—歪曲線

雪円柱を引き延ばすと雪のひずみにともない反抗力が生ずる。反抗力の大きさは歪速度, 雪の密度の違いで異なるが, 反抗力—歪曲線の形は歪速度によって殆んど定まってしまった。得られた反抗力—歪曲線を第7図 (a), (b), (c) に示した。(a), (b), (c) の何れの図においても附記した印 A は雪円柱を引きのばしはじめた瞬間, R は破断した瞬間を示す。

第7図 (a) は脆性破壊を起こした場合の曲線である。この曲線は第2図のときのもので, 反抗力は破断に至るまで直線的に増大した。第7図 (b) は第3図のときの曲線で, 曲線上に記した A (1), 2, 3, 4 (5) にあたる雪円柱の状態は第3図の写真 1, 2, 3, 4, 5 である。K 点は引張



第7図 引張反抗力—歪曲線. (a) 引張歪速度 7.2×10/day, 雪の密度 0.370 g/cm³, (b) 引張歪速度 1.22×10/day, 雪の密度 0.298 g/cm³, (c) 引張歪速度 2.71/day, 雪の密度 0.441 g/cm³

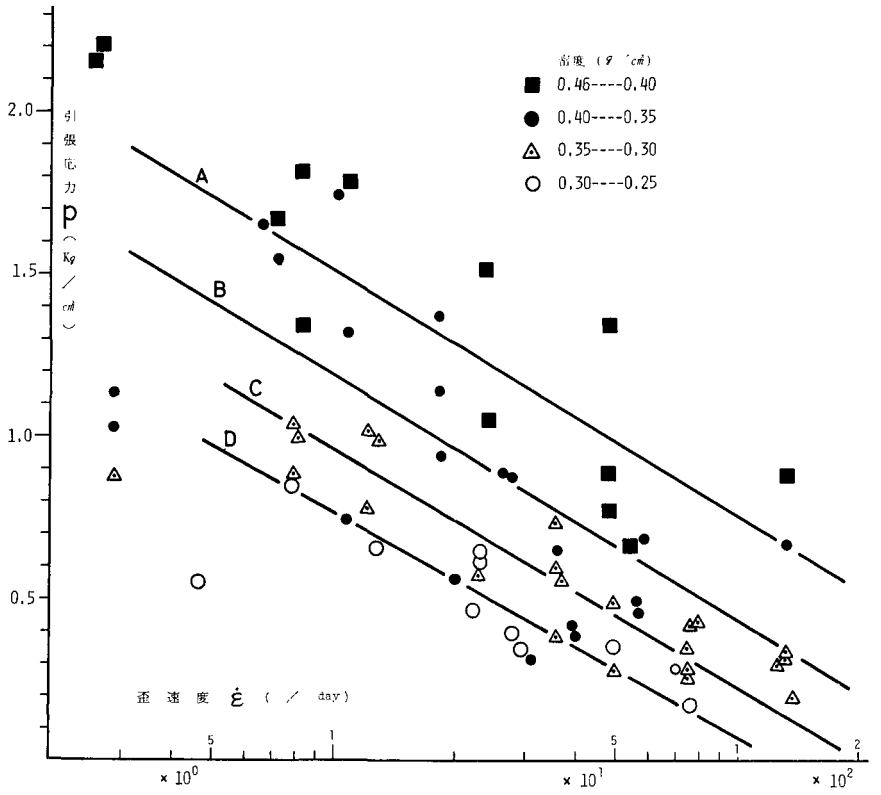
反抗力が最大値から減少し出すところである。曲線は最初ひずみとともに直線的に増大し，降伏点を経て最大力抗力に達する。さらにこの反抗力を保ちながら雪円柱は引き延ばされ，2.6% (K 点) ほど伸ばされたところから除々に反抗力は減少していく。この点から外見上にはみえない微小割れ目が実際に発生し出すのであろう。そして，反抗力が約 20% 減少したところで破断した。同様に，第 7 図 (c) は第 4 図のときの曲線で，曲線上の A (1), 2,……は第 4 図の写真 1, 2,……に対応する。この反抗力—歪曲線は，G 点まで第 7 図 (b) と同じ形をし，これをすぎると外見上にみえる微小割れ目を多数発生させて反抗力が急に減少する形である。そして，多数の割れ目の二，三が大きく成長し，破断に至る。第 7 図 (b) の 4 の位置は割れ目がみえはじめるところであった。このことから，G 点は変形上前記の 4 の位置と同じであろう。(b) と (c) の図の違いは G 点附近で破断するか，しないかであった。

後者の二つの破壊形式はいずれも反抗力—歪曲線の最初の直線的に変化する部分を通りすぎてからの現象であった。第 III 節でも述べたように，これらは明らかに延性破壊といえるであろう。

V. 変形速度と最大引張応力，伸張率，雪の密度との関係

1. 変形速度と最大引張応力

雪円柱を引張ったときの反抗力は変形とともに第 7 図のように変化した。各試料の実験の反抗力—歪曲線から，雪が破断に至るまでに反抗力 F が最大を示す値を記録紙から読み取り，これを雪円柱の断面積で割ったものを軸方向の応力 p として第 8 図に示した。反抗力 F が最大値に達した後，雪に小さな割れ目が発生し，雪は伸び，反抗力が低下すると考えられる。雪に割れ目が出来れば，雪の中の応力分布はかなり変化すると思わなければならないが，割れ目ができるまでの応力は雪の試料全体についてほぼ一様と考えて F の最大値から求めた p を採用したのである。横軸は歪速度 $\dot{\varepsilon}$ (/day) である。図の四本の直線 A, B, C, D はそれぞれ密度



第8図 最大引張応力と歪速度の関係

0.46～0.40, 0.40～0.35, 0.35～0.30, 0.30～0.25 g/cm^3 の雪についての歪速度と最大応力の関係である。これらの直線は次の式で表わすことができる。

$$p_A = -0.68 \log \dot{\varepsilon} + 2.21 ,$$

$$p_B = -0.73 \log \dot{\varepsilon} + 1.95 ,$$

$$p_C = -0.72 \log \dot{\varepsilon} + 1.67 ,$$

$$p_D = -0.70 \log \dot{\varepsilon} + 1.47 .$$

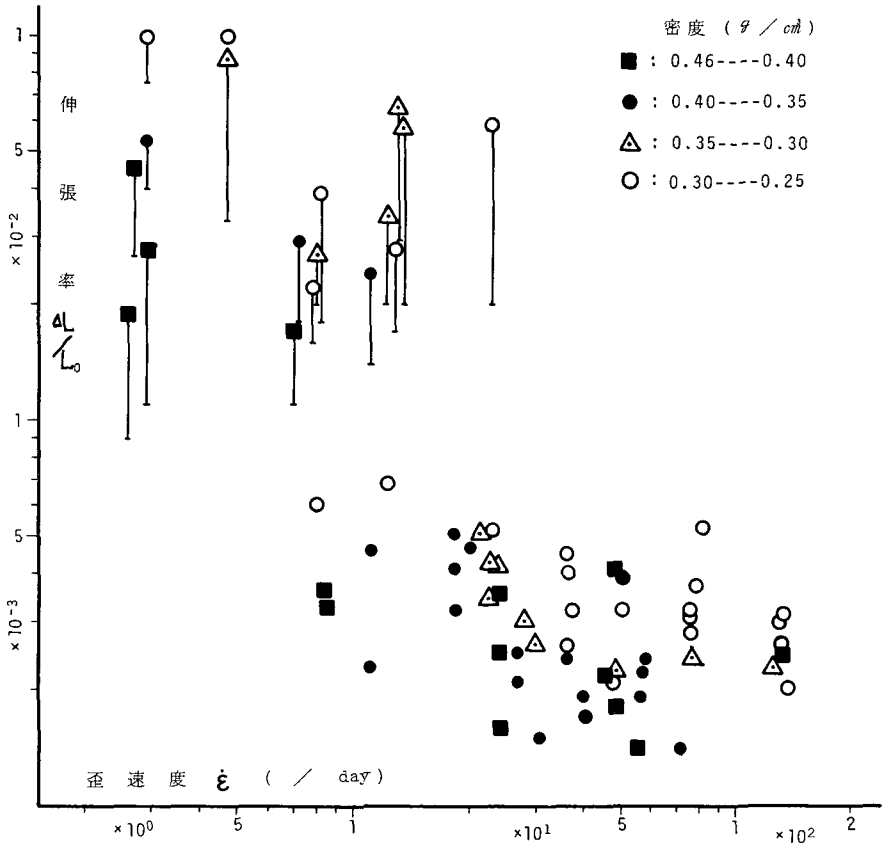
但し, p の単位は kg/cm^2, $\dot{\varepsilon}$ の単位は day^{-1} である。

最大応力は歪速度が小さくなるとともに増加, 密度が大きいと, その最大応力も大きな値を示すことができる。

2. 変形速度と伸張率との関係

雪をどのくらい引き延ばすと割れ目または破断を生ずるかという問題は, たとえば, なだれ予知などの基礎資料として欠くことのできないものである。それで, 雪円柱に破断, または割れ目が生ずるまでの伸び率 $\Delta L/L_0$ (L_0 は初期の試料の長さ, ΔL は伸びの長さ) を調べた。

ΔL は, 脆性破壊を起こしたばあいは破断するまでの伸び, 延性破壊を起こした場合は, 最大反抗力が持続しそれが減少しはじめるところ (K 点) の伸びとした。延性破壊における破断は, 小さな割れ目が生じたと思われるところから数 % 伸びた所でおこった。小さな割れ目は



第9図　雪円柱の伸張率と歪速度との関係

雪を構成している氷の橋の切断の結果である。これはもとの雪の組織を大幅に変化させ，そして引張反抗力を急に弱める原因となる。延性破壊の場合，反抗力が最大に達してから減少しはじめるとき微小割れ目が発生しはじめていると先に考えた。それで，この場合の ΔL は K 点までの伸びとした。

第9図に伸張率 $\Delta L/L_0$ と歪速度との関係を示した。図の中の点に下向きの線を附記したものは延性破壊の場合で，線の下端は反抗力が最大に達したところでの伸張率である。

ΔL の値は，脆性破壊の場合 0.1 mm 程度，延性破壊の場合数 mm 程度であった。$\Delta L/L_0$ の値としては各々 10^{-3}, 10^{-2} のオーダーであった。第9図によると歪速度が大きいほど雪円柱の伸び率は小さく，密度が大きいほど伸び率は小さくなることがわかる。また，延性破壊が起こる歪速度は雪の密度 0.35 g/cm³ 以下では 2.3×10/day 以下，0.35 以上では 1.×10/day 以下であった。ただし，第7図 (b) のような型の反抗力—歪曲線を示す場合の歪速度の範囲 7.3/day～2.3×10/day では脆性破壊も同時に起こり得た。そして，歪速度 7.3/day 以下では密度の大きさによらずすべて延性破壊を引き起こした。

3. 脆性破壊を引き起こした限界歪速度と密度との関係

前項で述べたように，破壊形式は歪速度と雪の密度によって変わる。それで，歪速度と雪

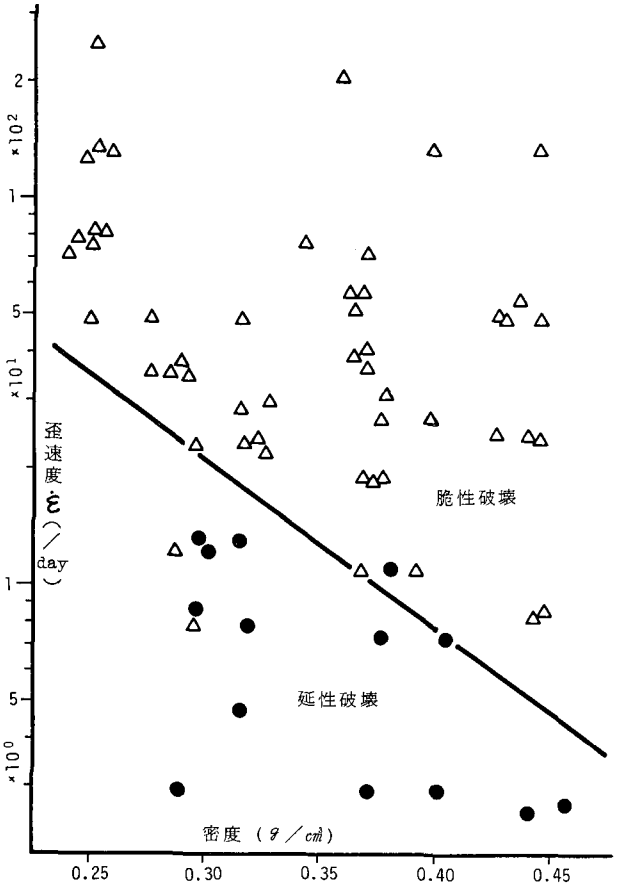
の密度を脆性破壊と延性破壊を区別して第10図に示した。この図から，二つの破壊形式は次の式を境に区別された。

$$\log \dot{\varepsilon} = -4.4\,\rho + 2.66$$

但し，$\dot{\varepsilon}$ と ρ の単位はそれぞれ day^{-1} g/cm^3 である。

VI. ま と め

斜面の雪はある特定な場所で破壊し，なだれ現象を引き起こす。特に全層なだれなどのきっかけとなる最初の割れ目の発生は積雪内に引張応力が働き，きわめて大きな歪速度で変形するためにちがいない。この引っ張りに対する雪の振舞い（変形形式）をみるために，雪の円柱の試料で一軸定速度引張実験を行った。試料は温度 −10°C のしまりゆきで，密度 0.24〜0.46 g/cm³，引っ張りの歪速度は 2.6〜0.25×10/²day であった。



第10図 歪速度と密度との関係

歪速度 2.3×10/day 以上では脆性破壊，2.3×10〜7.3/day では脆性破壊と延性破壊，7.3〜2.6×10/day では延性破壊のみが起った。そして，最大引張反抗力は歪速度が小さいほど大きく，雪の密度が大きいほど大きな値を示した。

特に，延性破壊の場合ひずみ 6〜8% のところから雪円柱に多数の小さな割れ目が生じ，雪をさらに引き延ばすとその中の二，三が大きく成長して破断に至った。これらの小さな割れ目は雪円柱全体に一様に発生し，引張軸方向に直角なものであった。

今回の実験は，自然積雪の一般の変形速度よりも極めて大きな変形速度のもとで行われた。したがって，さらに自然の変形速度に近い速度での実験をも進める必要がある。また，0°C 附近までの温度依存性も調べなければならない。

終りに，本報告を書くにあたり藤岡敏夫教授，木下誠一教授には本報告の推敲に多大の御指導を，また，秋田谷英次助手にはこの実験に関して有益な助言をいただいた。あわせて感謝の意を表します。

本実験に使用した一軸圧縮引張試験機の作製は本研究所実験工場・金属工作室新堀邦夫技官によるものであった。ここに記して感謝します。

本実験は，雪崩観測実験室（問寒別）の低温実験室で行われ，費用の大部分は文部省雪崩事業費から支出された。

文　献

1) 小島賢治 1960 斜面積雪の粘性流動 I. 低温科学，物理篇，**19**，147-164.
2) 清水 弘 1968 斜面積雪の内部歪 I. 低温科学，物理篇，**26**，143-168.
3) 秋田谷英次・川田邦夫 1971 斜面積雪の挙動の研究 II. 低温科学，物理篇，**29**，135-149.
4) 秋田谷英次 1975 斜面積雪の挙動の研究 V. 低温科学，物理篇，**33**，103-108.
5) 成田英器・清水 弘 1974 雪崩観測実験室附近のなだれ分布 I. 低温科学，物理篇，**32**，資料集，40-54.
6) 成田英器・清水 弘 1975 雪崩観測実験室附近のなだれ分布 II. 低温科学，物理篇，**33**，資料集，35-46.
7) 成田英器・清水 弘 1976 雪崩観測実験室附近のなだれ分布 III. 低温科学，物理篇，**34**，資料集，27-38.
8) 荘田幹夫 1964 なだれ発生機構の研究. II —ヘリコプターによる新雪系なだれの観測—. 国鉄，塩沢雪実験所，1-26.
9) 木下誠一 1957 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**，139-166.
10) 篠島健二 1961 雪の圧縮および引伸粘性係数の測定予備試験. 鉄道技術研究報告，**184** 号，施設篇，**63** 号，1-13.
11) 篠島健二 1962 雪の粘弾性的取扱い. (1) 静荷重試験による円柱状試料の圧縮，引張りおよびずり粘弾性係数の測定. 鉄道技術研究報告，**328** 号，施設篇，**137** 号，1-56

Summary

This work was performed with an aim to observe tensile deformation and fracture of snow by means of a uniaxial tension test of a columnar snow sample. The strain rate $\dot{\varepsilon}$ of tension was chosen within the range of 2.5/day～2.6×10^2/day. It was found the snow deformation took place in two different manners in accordance with the value of $\dot{\varepsilon}$ in this range in relation to $\dot{\varepsilon}^*$, which can be emprically obtained namely, deformation for $\dot{\varepsilon}>\dot{\varepsilon}^*$ and that for $\dot{\varepsilon}<\dot{\varepsilon}^*$ were represented "brittle fracture" and "ductile fracture", respectively.

— brittle fracture —

The value of $\dot{\varepsilon}^*$ in this case was about 8/day. A relation between resisting tensile force and strain is shown in Fig. 7 (a) (the vertical and the horizontal axis show the resisting force and the strain, respectively.). The appearance of this fracture is shown in Fig. 2.

— ductile fracture —

The value of $\dot{\varepsilon}^*$ in this case was about 7.3/day. Relations between resisting force and strain are shown in Figs. 7 (b) and (c). These two kinds of deformation and fracture are shown in Figs. 3 and 4. In the former case, rupture occurred immediately after two or three small cracks appeared in a columnar snow sample. In the latter case, many small cracks appeared throughout the entire sample as a strain reached 6～8%; out of the many small cracks two or three grew gradually, until rupture took place when the strain reached approximately 13%.

The values of the maximum tensile stress increased with decreasing strain rate $\dot{\varepsilon}$ and increasing density (Fig. 8). Also, the elongation of a columunar snow sample was within a range of 10^{-2}～10^{-3} until rupture or appearance of small cracks were observed.