



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	積雪の塑性波
Author(s)	佐藤, 篤司; SATO, Atsushi; 若浜, 五郎 他
Citation	低温科学. 物理篇, 34, 59-69
Issue Date	1977-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18298
Type	departmental bulletin paper
File Information	34_p59-69.pdf



積 雪 の 塑 性 波*

佐 藤 篤 司

(北海道大学大学院理学研究科)

若 浜 五 郎

(低温科学研究所)

(昭和51年10月受理)

I. ま え が き

雪国における雪の諸問題と関連して、積雪の力学的性質は広範に調べられてきた。しかしこれらは主として静的ないしは1 m/s以下の低速度で雪を圧縮するときのものであった。

近年、雪国における交通の高速化が進められるに伴い、鉄道や道路における高速除雪が問題になってきた。吉田¹⁾は、高速プラウ除雪の理論を展開し、積雪内を伝播する塑性波速度が積雪の高速変形において基本的に重要であることを指摘している。しかし、衝撃力を加えられたときに積雪が示す力学的挙動を調べた実験には、古くから吉田²⁾、木下³⁾らの研究があるが、そのときに積雪内を伝播する塑性波に関するものはほとんど見当たらない。

一般に、固体に降伏応力より大きな力を衝撃的に加えると、弾性波に続いて、一種の応力波が固体内を伝播することが知られている。この応力波は固体に塑性変形をおこしつつ進み、波が通過した後に永久変形を残す。この波を塑性波という。塑性波の研究は実用的な要請から金属材料について古くから広く行なわれその理論的な考察も進んできた⁴⁾。

積雪の塑性波に関する実験的研究としてはNapadensky⁵⁾(1963)がグリーンランド氷床のフィロンについて行なったものがある。この研究は雪の塑性波に関する世界最初のものであるが密度が0.5 g/cm³以上の硬い雪だけについてしか行なわれなかった。

高速除雪などで実際に問題となるのは、主に新雪やしまり雪であるが、この種の雪についての実験は全くない。衝撃圧縮変形や塑性波の研究はまた、なだれの発生や伝播とも関連して重要であろう⁶⁾。そこで筆者らは、密度が0.17~0.49 g/cm³、含水率が0~17%の範囲の種々の積雪について、塑性波の発生、伝播の実体を直接観察すると共に、塑性波速度、塑性波に伴なう積雪内部の圧力などを実験的に求め、従来知られている理論と比較した。

塑性波の伝播を含む積雪の衝撃圧縮変形の挙動は16 mm高速度カメラで撮影し、観察した。また、圧力変換器を雪のなかに埋めこんで、塑性波速度および圧力の測定を行なった。以下にそれを報告する。

* 北海道大学低温科学研究所業績第1793号

II. 実験装置および方法

1. 積雪試料と衝撃装置

自然積雪のなるべく様な層を選び、そこから高さ 20 cm、底面 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ のブロックを切り出して試料とした。試料の前面に、あらかじめ 1 mm 幅の黒線を 2 cm 間隔に、カーボンブラックの粉を用いて印しておく。試料の上面に衝撃を与えると、この黒線が次々に変位する。それによって塑性波の伝播を調べた(第1図)。

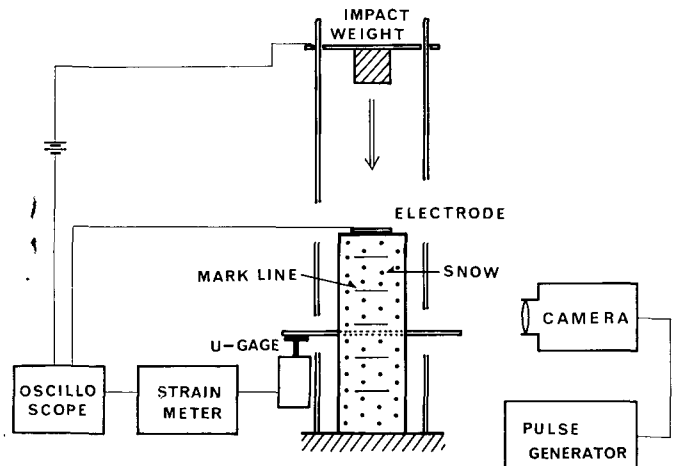
衝撃は重錘を落下させて行なった。重錘には、高さ、直径とも 5 cm のアルミ製 (706 g) または真鍮製 (1.26 kg) の円柱を用いた。雪試料の上方 2 m の高さから、2 本の鋼線ガイドに沿って落下した重錘は、雪に衝撃圧縮を与える。衝撃速度は $4.3 \pm 0.2 \text{ m/s}$ であった。

雪の密度が 0.3 g/cm^3 を越えると、衝撃によって雪塊が破壊することが多い。そこで、密度が 0.3 g/cm^3 以上の雪のばあいは、試料を管に入れた衝撃試験も行なった。円筒サンプラーを用い、自然積雪の様な層から水平方向に円柱試料をとり出し、表面に 2 cm 間隔の黒線を印したのち、内径 4 cm、高さ 34 cm のアクリル管に入れた。この試料の上に金属円柱をのせ、これをハンマーでたたいて衝撃圧縮を起した。衝撃速度は 2.5 m/s のていどであった。

2. 塑性波速度と応力の測定

a) 高速度映画による測定

積雪試料が衝撃圧縮される様子を 16 mm 高速度カメラ (HYCAM Red, Lake Laboratories Inc. USA) で撮影した。照明には 500 W のフラッドランプ 3~4 個を用いた。パルス発生器から発振された信号を 1 ms に 1 回、フィルムに入れ、フィルムの走行速度を決めた。実験は 3,400~4,500 コマ/秒で撮影された。



第1図 積雪の衝撃実験装置の略図

こうして撮ったフィルムは、フィルム解析装置を用いて解析した。

b) 圧力変換器による測定

積雪試料が衝撃圧縮を受けると、塑性波が発生し、試料内部を伝播する。その波先は応力を伴って進行するので、適当な圧力変換器で積雪内を伝播する塑性波速度を測定することができる。そこで直径 2 mm のアルミ管を水平に雪試料につき通し、外部に出た一端を圧力変換器 (U-ゲージタイプ圧力変換器、共和電業 120 T-2000 A) の感部と接触させておく。圧力変換器はブリッジボックス、動歪計を経てシンクロスコープに接続される(第1図)。

重錘が落下して試料の上端に接触した瞬間にシンクロスコープのトリガーがかかり、塑性波の波先に伴う圧力がアルミ管に達した時の波の立ち上りを写真にとって記録する。試料上端

からアルミ管までの距離はあらかじめわかっているため、これと波の立ち上りまでに要した時間から、塑性波速度 U を求めた。

c) 塑性波に伴う応力の測定

上記の圧力変換器を雪のブロックの内部に埋め込んだ。変換器の感部には面積が 1 cm^2 の薄い黄銅製の円板を取り付け、雪粒との接触をよくした。これによって、雪内部を進行する塑性波に伴う応力を直接測定することができる。測定器の固有振動数と外力の振動数が等しいときには共鳴現象がおこるので、その補正を考慮しなければならない。今回使用した測定器の固有振動数は 2 kHz で、観測された応力波の振動数 $300 \sim 600 \text{ Hz}$ よりずっと大きいので、補正の必要はなかった。

III. 実験結果

1. 塑性波速度, 衝撃速度, 粒子速度

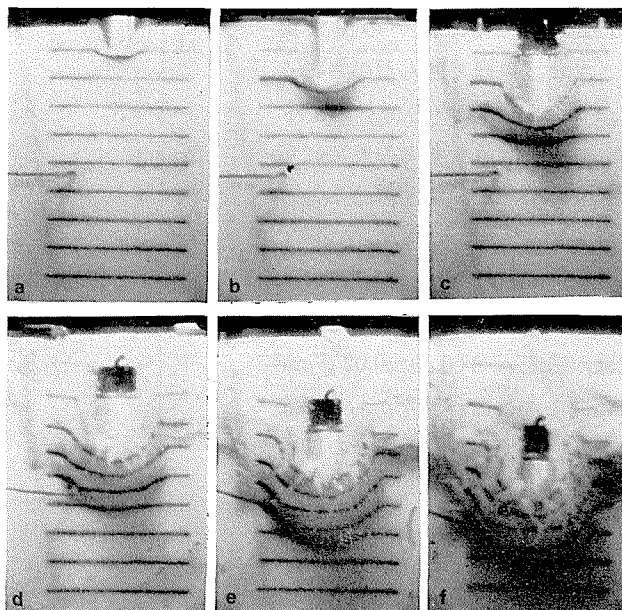
16 mm 高速度映画に撮影した写真のうち、圧縮の開始から 5 ms ごとに選び出した写真を第2図に並べて示した。重錘の進行とともに、黒線が変位、移動し、塑性波が伝播する様子がわかる。フィルムを解析して塑性の走時曲線を求めた一例が第3図である。横軸は圧縮が開始されてからの時間、縦軸は試料の上面からの距離である。図中、黒四角は試料表面の各黒線が変位を開始した時刻を示す。従って、これら黒四角を結んだ太実線の傾斜が塑性波速度 U を与える。このばあい、密度が 0.18 g/cm^3 のこしまり雪に対する U は 6.2 m/s であった。

図中、白丸を結ぶ破線は重錘の雪内部への進行を示す。曲線の傾斜から、試料上端近くでの衝撃速度が 4.3 m/s だったことがわかる。また、各黒四角から走る細実線は、各黒線の変位速度、すなわち、各深さでの粒子速度を与える。試料上端近くの粒子速度 u は、衝撃速度に等しいが上端から遠ざかるにつれ、 u は次第に減少している。

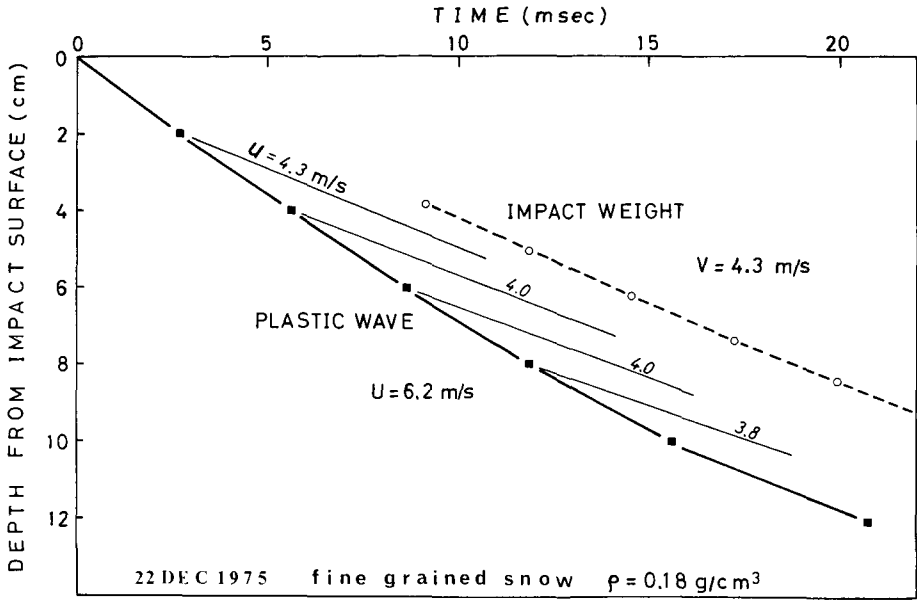
高速度映画で求めた塑性波速度と、圧力変換器で求めた値を比較すると、両者がほぼ一致することがわかった。それで、多くの実験は、実験方法が簡単で易しい圧力変換器法を用いて行なった。

2. 塑性波速度 U と雪の密度 ρ_0 との関係

密度が $0.17 \sim 0.49 \text{ g/cm}^3$ のいろいろなしまり雪に、衝撃速度 $4.3 \pm 0.2 \text{ m/s}$ で衝撃を加えたときに発生した塑性波の速度を雪の密

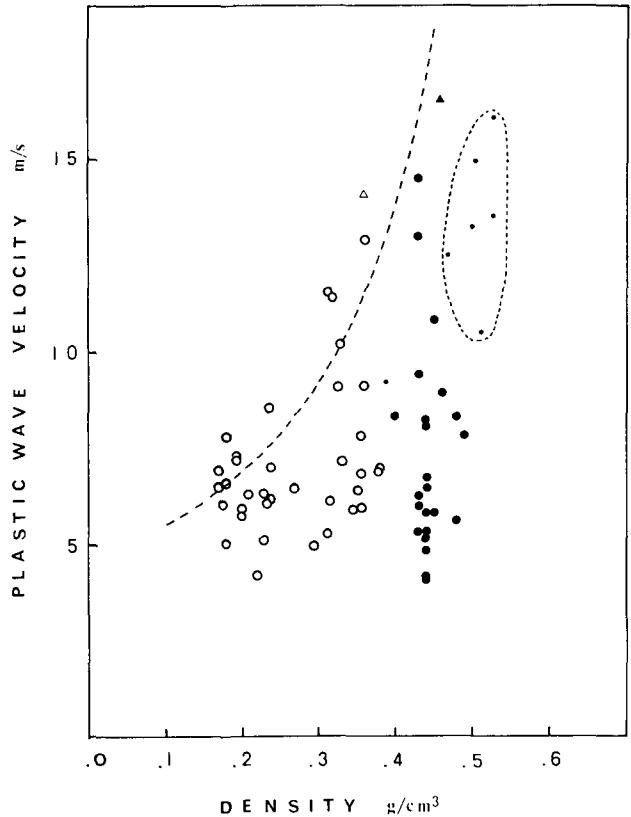


第2図 雪を伝播する塑性波。高速度カメラで撮影した映画から、 5 ms 毎にとりだしたもの。雪の表面に付した黒線の間隔は 2 cm



第3図 塑性波の走時曲線(太実線)の例。黒四角から出る細実線は各深さでの雪粒の粒子速度を、白丸を結ぶ破線は重錘の雪の中における移動を示す

度に対して記入したのが第4図である。白丸は乾き雪、黒丸は湿雪を示す。三角印は、後述の亚克力円筒につめたばあいの値である。また、点線で囲んだ小さな点は、Napadensky⁵⁾のデータを外挿して求めた値を参考のために示したものである。測定値はかなり分散しているが、乾き雪については、密度の増加に伴ない塑性波速度も増加しているのがわかる。湿雪は、密度 ρ_0 が $0.43 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ の範囲しか行なわれなかったが塑性波速度 U が $4 \sim 15 \text{ m/s}$ の間に

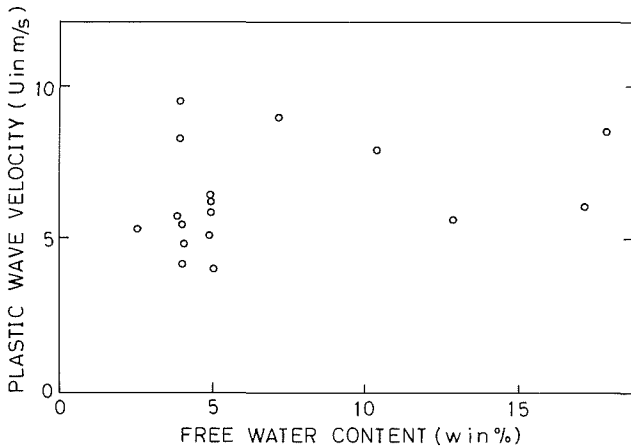


第4図 塑性波速度と密度との関係。白丸は乾き雪(温度 -10°C)、黒丸はぬれ雪についての値。三角は亚克力管内につめた雪についての値。破線で囲んだ小さな黒点はNapadenskyのデータを外挿して求めた値

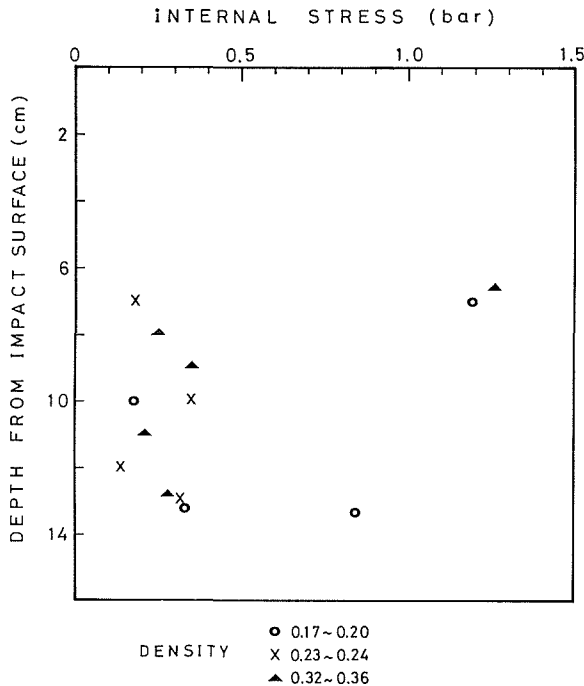
ひろがっていて、 U が ρ_0 によってきまらないことを示している。

3. 塑性波速度 U と雪の含水率 w との関係

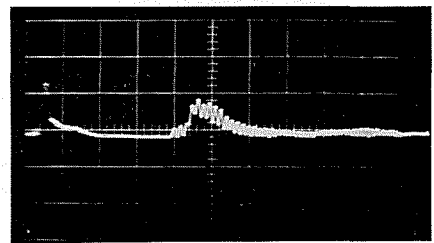
融雪期に、自然積雪から切り出したぬれしまり雪について塑性波速度 U を求めた。雪の密度 ρ_0 は $0.43\sim 0.44\text{ g/cm}^3$ でほぼ同一であるが、含水率 w は $2.6\sim 17.7\%$ の範囲にあった。 U と w の関係を第5図に示した。 U は w によってあまり変化せず、ほぼ一定ということができよう。 U と ρ_0 との関係は上述の通り、同じ ρ_0 の雪でも、 U は大幅に異なる。また、第4図に見られるように、湿雪の U は、乾き雪に比べて一般に小さい。



第5図 塑性波速度と雪の含水率との関係



第7図 雪試料のいろいろな深さにおいて観測された塑性波の圧力



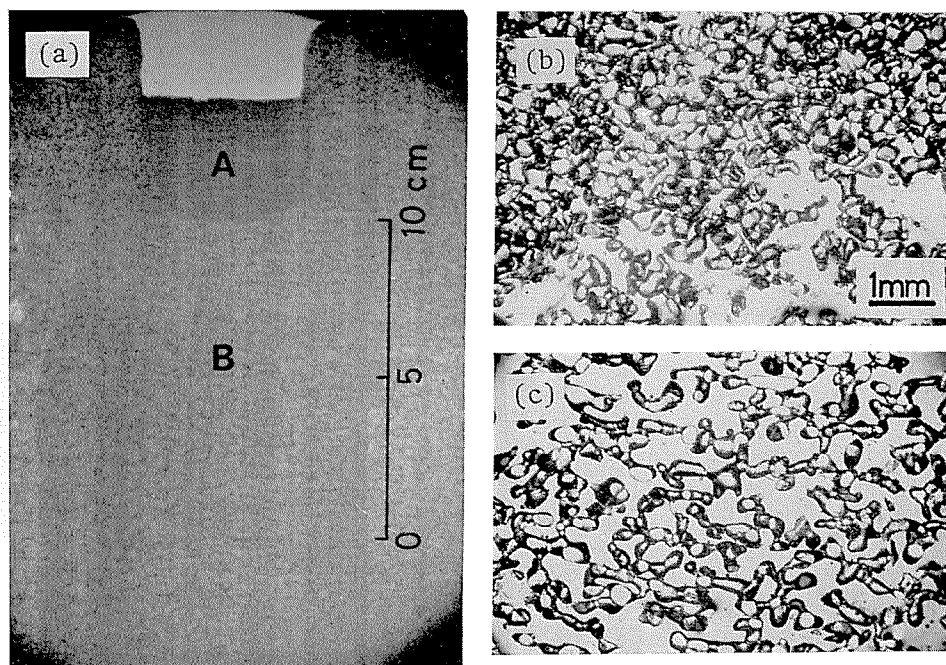
第6図 シンクロスコープに記録された塑性波の波形。走引速度は 3 ms/div

4. 塑性波に伴う圧力

塑性波の圧力の測定に際しては、重錘は衝撃面から 4 cm 沈下すると止るようにした。しかし、多くのばあい 4 cm より浅いところで重錘は止った。圧力変換器を衝撃面から 6.5 cm ないし 13.5 cm の深さに埋め込んで圧力を測定した。シンクロスコープに記録された波形の例を第6図に示す。記録された波の振幅から換算して求めた圧力を測定器の深さに対して示したのが第7図である。得られた最大圧力は 1.3 bar であるが、多くのばあい $0.1\sim 0.4\text{ bar}$ の間であった。測定器の埋め込みの深さや雪の密度圧力に対する依存性はあまり認められなかった。しかし、錘の沈下量の大きいときに大きな圧力が検出される傾向が認められた。

5. 衝撃圧縮による積雪の構造、組織および密度の変化

衝撃直後の試料から厚さ $5\sim 10\text{ mm}$ の鉛直薄片を切り出し、透過光で



第8図 (a): 衝撃を与えた雪試料から切り出した薄片を透過光でみたところ。“A”と印した部分は強く圧縮されているが、その下の“B”部分は圧縮の形跡は見られない。(b): “A”, “B”の境界線附近から切り出した顕微鏡薄片。(c): “B”部分から切り出したもの

観察した。重錘の直下には第8図(a)のAに見られるような圧密部分が生ずるが、その下に続く部分Bには変化は認められなかった。

次に、この試料を用い、各部分の密度を測定した。方法は成瀬ら⁷⁾にならい、深さ方向に1 cm 間隔で密度を求めた。この試料の初期密度は 0.30 g/cm^3 であったが、衝撃による圧密部Aの上部では 0.61 g/cm^3 、下部で 0.49 g/cm^3 であった。その下のB部分では密度の増加は認められなかった。

圧縮部Aとその下のBとの境界附近から鉛直薄片を切り出し、顕微鏡の下で、雪の組織に生じた微細な変化を調べた。第8図(b)は上半部が圧縮部、下半分が非圧縮部、同図(c)は非圧縮部の顕微鏡写真である。圧縮部では、雪粒の連結部が破断して雪粒が非常に密に詰まっているのに対し、非圧縮部ではいかなる変化も認められない。塑性波の伝播に伴って生ずる密度変化が、突然終って、そこから先は何の変化も起きなかったことを示している。

IV. 考 察

塑性波が物体中を進行するに伴ない、塑性波波面の前後で、物体の密度、圧力、そして物体を構成する粒子の速度が変化するであろう。今、これらの間の関係について考えてみよう。

積雪が衝撃圧縮を受けると、先ず弾性波が発生、伝播する。ついで塑性波が伝播するのだが、その速度は一般に弾性波速度より遙かにおそいので、塑性波が通過する時には、弾性波の通過に伴って生じた変化はすべて元に復し、圧力、粒子速度はともに0になっていると考えて

よい。塑性波の通過の前後における質量保存および運動量保存から、次の関係式が導かれる (Rankine-Hugoniot の関係式)。

$$\begin{cases} \rho_1 = \rho_0 / (1 - u/U) & (1) \\ P_1 = \rho_0 uU = \rho_0 (1 - \rho_0 / \rho_1) U^2 & (2) \end{cases}$$

ここで ρ_0 , ρ_1 はそれぞれ塑性波の通過前後の雪の密度, u , U はそれぞれ粒子速度, 塑性波速度, P_1 は塑性波に伴う圧力である。粒子速度 u は第3図のところでのべたように衝撃速度 U は等しいとしてもよい。

初期密度 ρ_0 の雪に衝撃速度 u で衝撃圧縮したときに観測された塑性波速度 U を(1)式に代入して塑性波前面に伴う密度 ρ_1 を求めてみると, $\rho_0 = 0.18$ (g/cm³) の雪のばあい, $\rho_1 = 0.50 \pm 0.05$, $\rho_0 = 0.24$ の雪では, $\rho_1 = 0.55 \pm 0.03$ となり, これらの値は実験的に求めた ρ_1 とよく一致している。

しかし, $\rho_0 \geq 0.3$ の雪に対して計算してみると, 一般に $\rho_1 > 0.8$ となり, 時には氷の密度 0.917 をこえてしまう。こんなに密度が大きくなることは今の実験では到底考えられないし, また, 薄片観察の上でも認められなかった。

雪粒の最密充填密度は 0.60 g/cm³ のていどであることはよく知られている⁹⁾。雪を圧縮して密度を 0.6 g/cm³ にすることは, 時間をかけて雪粒自身に塑性変形を起させるか, 爆発等による強大な圧力をかけない限り実現できない。従って, ρ_1 が 0.6 g/cm³ を越える時は, 塑性波波面で破壊が起り, 雪全体が巨視的に壊れてしまうと考えるてもよからう。事実 $\rho_0 > 0.3$ g/cm³ の雪のばあいは, ほとんど例外なしに試料が破壊してしまった。これに対して, $\rho_0 < 0.3$ g/cm³ の雪は, 衝撃による巨視的破壊はほとんど観測されなかった。

上の(1)式を書き直して次式が得られる。

$$U = u / (1 - \rho_0 / \rho_1) \quad (3)$$

この式から, 塑性波速度 U は, 衝撃速度 u が大きいほど, また, ρ_0 が最密充填密度 ρ_1 に近いほど大きくなるのがわかる。もし, $\rho_0 = \rho_1$ なら U は無限大となる。

われわれの実験では, $u = 4.3 \pm 0.2$ m/s とほぼ一定値にしたので, ρ_1 を例えば 0.6 g/cm³ と考えると, U は雪の密度 ρ_0 によってきまってしまう。第4図の破線は, $\rho_1 = 0.6$ g/cm³ としたときの U と ρ_0 との関係を示したものである。実験で得られた値はかなり分散はしているが, 傾向としては, この曲線に合っているとみてもよからう。

次に, 塑性波に伴う圧力 P_1 は(2)式を用いて見積ることができる。雪の初期密度 ρ_0 と, 観測で得られた u , U をこの式に代入すると, P_1 は 0.03~0.29 bar の範囲となる。一方, 圧力変換器を用いて実測された値は, 第7図に示したように, 0.1~0.4 bar のていどであった。これは, 計算値よりも幾分大きい, ほぼ一致したとみて差支えなからう。

積雪の圧縮破壊強度は 100~300 g/cm², すなわち 0.1~0.3 bar のていどであるから, 塑性波に伴う圧力によって雪粒間の結合が破壊され, 充填されると考えられる。

V. ま と め

積雪内を伝播する塑性波に関する実験的研究は、従来、密度 ρ_0 が 0.5 g/cm^3 程度の硬い雪（極地氷床フィルム）についてのものがただひとつあるのみであった。今回われわれは、 ρ_0 が $0.17 \sim 0.49 \text{ g/cm}^3$ 、含水率が $0 \sim 17\%$ の範囲のいろいろな積雪に衝撃を与え、雪のなかを伝わる塑性波を調べた。塑性波は 16 mm 高速度カメラで撮影され、その伝播の様子が直接観察された。また、圧力変換器を雪に埋めこんで、塑性波速度および塑性波に伴う圧力を測定した。

実験で得られた塑性波速度および圧力は、かなりばらつきが大きかったが、理論から期待される値にはほぼ一致することがわかった。

この実験では、衝撃速度が 4.5 m/s 以下の比較的小さい速度で行なわれた。今後はもっと大きな速度で衝撃を与えたときの塑性波の挙動に関する実験研究が行なわれるべきであろう。

本研究は筆者の一人、佐藤篤司が北海道大学大学院理学研究科修士課程地球物理学専攻の修了研究として行なったものである。

研究を行なうに当って、低温科学研究所応用物理学部門の方々から終始、暖かい協力をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表わす。

文 献

- 1) 吉田順五 1974 ブラウ除雪の理論, I-II. 低温科学, 物理篇, **32**, 39-70.
吉田順五 1975 ブラウ除雪の理論, III-V. 低温科学, 物理篇, **33**, 39-90.
- 2) 吉田順五, 黒岩大助 1950 衝撃荷重による積雪の沈下の経過. 雪氷, **12**, 28-33.
- 3) 木下誠一 1955 衝撃による積雪の破壊, I. 低温科学, 物理篇, **14**, 95-111.
- 4) H. Kolsky and W. Prager 1954 Stress waves in anelastic solids. Symposium held at Brown University, 1953. Springer-Verlag, 342 pp.
- 5) Napadensky, H. 1963 Dynamic response of snow to high rates of loading. Amour Research Foundation of Illinois Institute of Technology, ARFD 246, Final Report p. 1-56, Data Report, p. 1-203.
- 6) Mellor, M. 1968 Avalanches. U. S. A. CRREL Monograph III-A 3 d, p. 1-215.
- 7) 成瀬廉二, 遠藤八十一, 成田英器, 山田知充 1962 南極昭和基地附近の内陸地域で採集された 10 m 深の積雪コア解析. 南極資料, 第 45 卷, 33-45.
- 8) 水野悠紀子, 黒岩大助 1956 積雪粒子のタッピング圧縮. 低温科学, 物理篇, **24**, 111-131.

Summary

When snow is pushed very fast by a moving body, a plastic wave is generated at the head of the body. If the velocity of the moving body becomes close to that of the plastic wave, the snow may exert a great resistive force against the body as described by Yosida¹⁾. It is, therefore, important to study the dynamic behaviour of snow at a high rate of deformation, which takes place when a snow plough is used on the highway, a train runs on the railroad covered with snow, or an avalanche occurs.

Detailed processes of high-rate deformation of snow was studied by laboratory

experiments made on impulsive compression of snow.

Rectangular parallelepiped blocks of snow, 20 cm in height at $10 \times 10 \text{ cm}^2$ in top-surface area, were cut out from homogeneous snow layers of a snow pack. The density of snow ranged from 0.17 to 0.49 g/cm^3 . Guided by thin metal wires, a cylindrical metal weight of 1 kg in weight, was freely dropped from a height of 2 m above the top surface of the snow block to hit the top surface. This strong hit generated not only elastic waves but also a plastic wave in the snow. Fracturing of snow often took place when the snow density exceeded 0.3 g/cm^3 . Though an elastic wave is invisible, a plastic wave advancing through the snow can be directly observed by successive displacements of the dark lines marked at an interval of 2 cm on the front surface beforehand (Figs. 1 and 2). The propagation of a plastic wave through the snow block was observed by 16 mm slow-motion films taken at approximately 42000 frames per second. The front velocity of a plastic wave was obtained by analyzing the films. Together with the direct observation of the plastic wave, the pressure accompanying the front of this wave was detected and the velocity of this was obtained by a pressure-detecting device embedded beforehand in the snow block, which was connected to an oscilloscope (Fig. 1). The plastic wave velocity obtained was compared with that obtained from the slow-motion films for one and the same snow sample; it was confirmed that these two agreed fairly well with each other.

(1) *Dependence of snow density on plastic wave velocity*

The travel-time curve of a plastic wave propagating through a fine-grained snow of 0.18 g/cm^3 in density is shown, as an instance, in Fig. 3 by a thick solid line running through solid squares. The gradient of this curve gives the front velocity, U , of the plastic wave in the snow; the value of U in this case is 6.2 cm/s for the impact speed of 4.3 m/s. The dark-marked lines on the snow surface move downwards, which are shown by solid thin curves originating from the solid squares. The gradient of each thin curve gives the particle velocity, u , of snow immediately after the passing of the plastic wave. For the same impact speed the value of u ranges from 4.3 m/s at the upper portion of the snow block, the same as the impact speed, to 3.8 m/s at depths of 8–10 cm below the top surface.

Plastic wave velocities obtained for various kinds of dry snow were plotted by open circles against the snow density in Fig. 5. Solid circles were those for wet snow, whereas small dots enclosed by a dashed line were those derived from Napadensky's data⁵. Though these plots are widely scattered, it is seen from this figure that the plastic wave velocity, U , for dry snow increases with the increase of the density, ρ_0 , of snow: U is 6.5 m/s for $\rho_0=0.2 \text{ g/cm}^3$; U is $12 \pm 2 \text{ m/s}$ for $\rho_0=0.4 \text{ g/cm}^3$.

(2) *Dependence of free water content of snow on plastic wave velocity*

The plastic wave velocity, U , was measured for wet snow with the free water content, w , which ranged from 2.6 to 17.7%, by using wet snow samples cut out from fine-grained snow layers of a melting snow pack whose density ranged from 0.43 to 0.44 g/cm^3 . The velocity U was plotted against the free water content w in Fig. 6, and also against the snow density ρ_0 in Fig. 5 with solid circles. As seen in these figures, there is no distinct correlation between U and w , but U is, in general, smaller

than that for dry snow of the same density.

(3) *Changes in density and structure of snow caused by impaction*

Thin sections 1 cm thick were cut out from a snow block after each impact so that changes in the structure of snow caused by the impact are examined. It was observed under a transmitted light that the snow immediately below the indented weight was heavily compacted by the impact as illustrated by "A" in Fig. 9 (a). The structure of the underlying snow ("B" in Fig. 9 (a)) seems to remain unchanged, which was verified by a microscopic examination of the texture (Fig. 9 (c)).

Immediately after the impaction, the density of snow was measured at an interval of 1 cm throughout the snow, sample which had an original density of 0.30 g/cm³. The density of the heavily compacted portion was found much larger than that of the original snow as seen in Fig. 9 (b) and (c), but it decreased from 0.61 g/cm³ at the top down to 0.49 g/cm³ at the bottom of the portion. The density of snow in the underlying portion "B" was, however, kept the same as the original density.

(4) *Comparison of the observed density of the heavily compacted portion with that predicted from the theory of the plastic wave*

When a plastic wave is propagating through snow, the density of the snow should abruptly be increased by the arriving of its wave front. Since the pressure, P , in the snow and the particle velocity, u , of the snow are respectively zero before the arriving of the wave front, following formulae can be derived from conservation of mass and momentum of snow (Rankine-Hugoniot relations):

$$\rho_1 = \rho_0 / (1 - u/U) \quad (1)$$

$$P_1 = \rho \cdot U \cdot u = \rho_0 (1 - \rho_0/\rho_1) \cdot U^2 \quad (2)$$

where ρ_0 and ρ_1 are the density of snow respectively before and immediately after the passage of the plastic wave front, U is the velocity of the wave front and u is the particle velocity of snow.

The density ρ_1 of snow at the wave front was calculated by using formula (1) for various snow samples with different densities. For instances, $\rho_1 = 0.50 \pm 0.05$ g/cm³ for snow of $\rho_0 = 0.18$ g/cm³ and $\rho_1 = 0.55 \pm 0.03$ g/cm³ for $\rho_0 = 0.24$ g/cm³. For a higher density of snow ($\rho_0 = 0.3$ g/cm³), the calculated value of ρ_1 generally exceeds 0.8 g/cm³ or even becomes 0.917 g/cm³, i.e., the density of ice. This is, however, most unlikely to occur in snow. It is well known that the density of snow at the closest packing of snow grains is 0.60 g/cm³. To attain a higher density of snow than 0.60 g/cm³, it is necessary to compress the snow to allow the plastic deformation of snow grains. This implies that the density associated with the plastic wave front cannot exceed the density of snow at the closest packing: $\rho_1 = 0.6$ g/cm³. When the value of ρ_1 exceeds 0.6 g/cm³, macroscopic fracturing would occur at the wave front. Such macroscopic fracturing was actually observed fairly frequently at the time of impact running through the entire snow block whose density was larger than 0.3 g/cm³.

The above formula (1) can be rewritten as follows:

$$U = u / (1 - \rho_0/\rho_1) \quad (3)$$

This formula shows that the plastic wave velocity becomes larger when the impact

velocity u is larger or the initial snow density ρ_0 approaches ρ_1 , the density of snow at the closest packing. If ρ_0 equals ρ_1 , then U becomes infinite. In the experiments, the impact velocity u was taken as 4.3 ± 0.2 m/s, so that the plastic wave velocity U is a unique function of the initial snow density ρ_0 , provided that ρ_1 is fixed at a constant value such as 0.6 g/cm³. The curve in a dashed line in Fig. 5 indicates the relation between U and ρ_0 when $\rho_1 = 0.6$ g/cm³. Though the observed values are widely dispersed, it may be said that they fit predicted curve as a general tendency.

(5) *Pressure associated with the plastic wave*

The pressure P_1 associated with the plastic wave can be estimated from formula (2) by substituting the observed values of U and u , together with the initial density of snow ρ_0 . The values of P_1 thus obtained ranges from 0.03 to 0.29 bars. These values of pressure were compared with those obtained from the direct measurements. The observed values of P_1 ranged mostly from 0.1 to 0.4 bars. Though the observed values are slightly larger than those estimated from the theoretical formulae, the order of magnitude of P_1 was found to be 0.1 to 0.3 bars. Since the compressive strength of the snow is 0.1-0.3 bars, breaking of ice bonds between snow grains or microscopic fracturing of snow could occur at the arrival of the plastic wave front.