HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	三軸圧縮に於ける雪の変形
Author(s)	成田, 英器
Citation	低温科學. 物理篇, 25, 49-61
Issue Date	1967-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18060
Type	departmental bulletin paper
File Information	25_p49-61.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Hideki NARITA 1967 Deformation of Snow under Triaxial Compression *Low Temperature Science, Ser. A, 25.* (with English Summary. p. 61)

三軸圧縮に於ける雪の変形*

成田英器
(低温科学研究所　雪害科学部門)

(昭和42年8月受理)

I. まえがき

積雪の力学的性質は，木下[1),2),3)]をはじめ多くの人達によって調べられているが，その大部分は円筒形の雪を軸方向に圧縮する実験，すなわち，一軸圧縮試験によるものである。しかし，自然に積っている雪は一方向の力だけをうけているわけではない。それ故に，円筒形の雪を，軸方向に定速で圧縮すると同時に，まわりからも力を加え，雪の圧縮反抗力と変形を調べる実験を行なった。この種の試験は，土質関係ではすでに行なわれているもので，三軸試験とよばれ，そのための機械も，三軸試験機として開発されている。今回の実験は，土の試験に作られた三軸試験機を利用して行なった。

実験にはしまりゆきを使った。雪の密度は 0.37～0.39 g/cm^3，雪温度は −7.0～−10.0°C の範囲，圧縮速度は 1.3，3.0，5.0 mm/min の三種類，側圧は 0～1.0 kg/cm^2 であった。

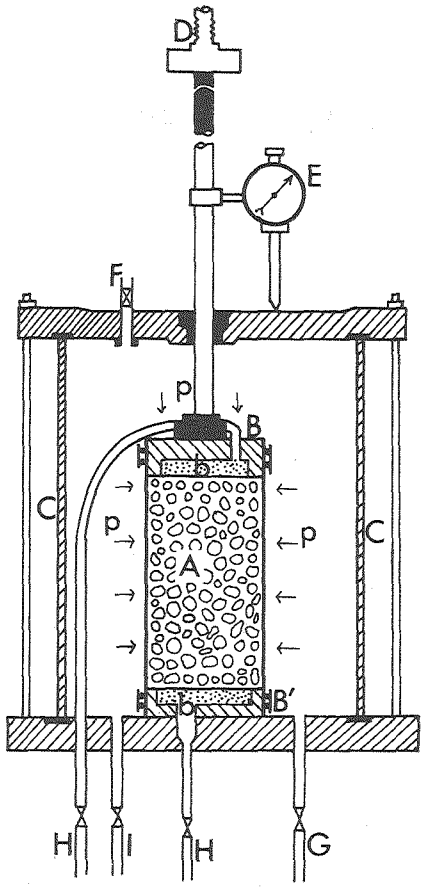
II. 実験装置

第1図 (a) に，三軸圧縮機の中心部，圧縮室を示した。積雪から切り出された円筒形の雪 A は，まわりをゴムの外套膜（ゴムスリーブ）でつつまれ，2枚の板 B，B′ に上下をはさまれて，三軸圧縮室におさめられる。第1図 (b) に，雪がセットされた写真をのせた。C は，透明なアクリル樹脂の円筒で，上下を金属板でおさえてある。雪とアクリルの筒との間の空間は，土の試験では水がみたされるが，凍結防止のため 60% のエチレン・グリコール水溶液がみたされた。排気口 H を開き，給排水口 I から液を入れ，液をみたした後 H をとじて G に連結された圧縮機によって雪に側圧が加えられる。雪 A をつつむゴムの袋はエチレン・グリコール水溶液が雪に浸みこむのを防ぐもので，上下の端はゴム輪で上下の板にしめつけられている。

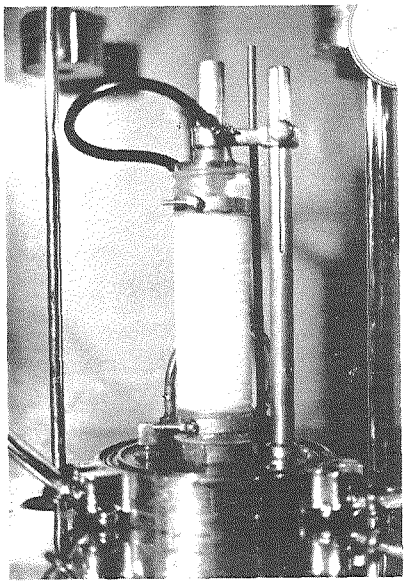
三軸圧縮室の上蓋を貫いて，雪に荷重を加える棒が通り，力を電気的に測る荷重計（ロード・セル）D，雪の縮みを測るダイヤル・ゲージ E がとりつけられている。荷重計の電気出力は増幅器（歪測定器）をへて，記録計にみちびかれた。雪 A が軸方向に圧縮されて，雪の体積が変化すると，雪の中から押し出された空気は B，B′ に組みこまれている多孔質の板 b，を通って三軸圧縮室の外にみちびかれ，その量は水銀マノメーター（第8図）で測られる。

円筒形の雪 A は，軸方向と積雪層が平行になるように採取した。雪試料の薄片を第2図

* 北海道大学低温科学研究所業績　第840号



(a)

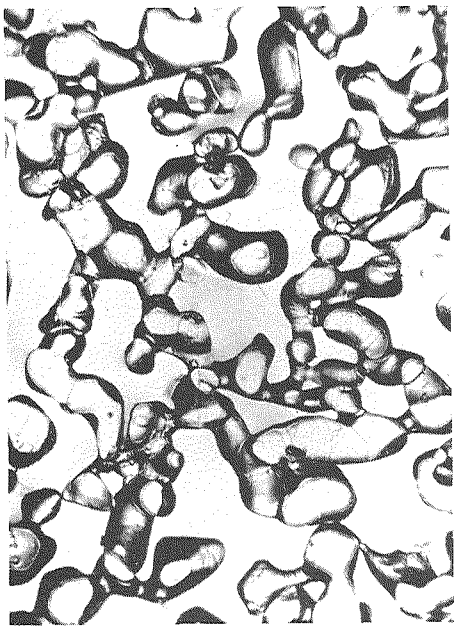


(b)

A：雪試料　B：上板　B′：下板　*b*：多孔質の板　C：アクリル樹脂製の筒　D：荷重計　E：ダイヤル・ゲージ　F：空気抜き　G：圧縮機へ　H：排気口　I：給排水口

第1図　三軸圧縮室

に示した。2月に低温室に納めたしまりゆきで，約−25°Cで3ヶ月保存されていたものである。円筒形の雪を圧縮するばあい，試料の歪は一般に次の2つの理由によって一様にはおこらない。すなわち，試料の端は，雪と板との間の摩擦力のために変形が拘束されることと，試料そのものが一様ではなく，組織の疎，密の部分が存在するためである。Taylor[4]の土の結果によると，三軸試験の試料の大きさは，高さと直径の比が2:1がよいとされている。土の試験では高さ9～17 cm，直径3.5～7 cmが標準となっている。筆者は，高さ12.5 cm，直径5.0 cm



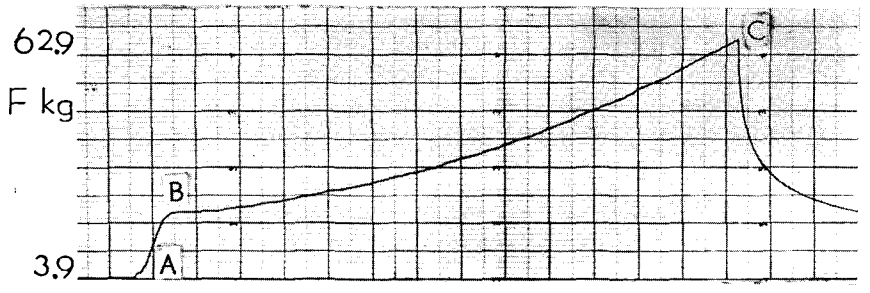
第2図　しまりゆき（雪試料）の薄片
密度 0.375 g/cm³

の試料を用いた。高さと直径の比は 5:2 である。

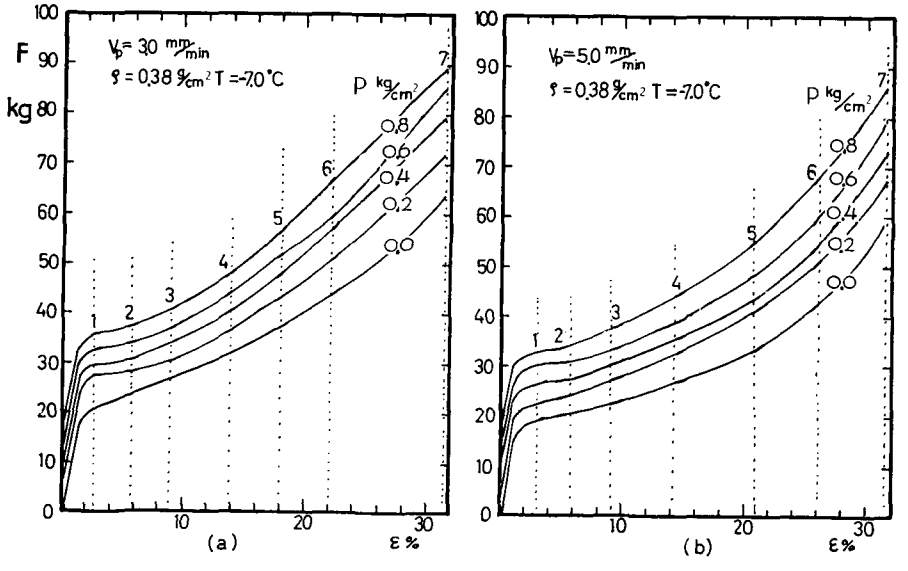
雪円筒は三軸圧縮室におさめられ，エチレン・グリコールがみたされて，圧縮機によって側圧が加えられる。雪の円筒を軸方向に圧縮する棒の直径は，雪の直径よりも細く 1/5 である。このために，エチレン・グリコールに圧力を加えると，雪には側圧と同時に軸方向にも側圧の 1/13 の圧力が加わることになる。雪は側圧によって，軸方向にも縮むが，縮む速度は時間とともに減少し，やがて一定の縮みに近づく。その状態になってから軸方向に圧縮をはじめた。

III. 反抗力一歪曲線

第 3 図に記録の一例を示した。縦軸は雪の圧縮反抗力 F，横軸は時間であるが，定速圧縮であるから，圧縮がおこなわれている範囲で軸方向の歪 ε をあらわすことにもなる。図にみられるように，原点 A から軸方向の圧縮をはじめると，反抗力 F は B まで直線的に大きくなり



第 3 図　反抗力一歪曲線
側圧 $p=0.2$ kg/cm² 　圧縮速度 3.0 mm/min の場合



第 4 図　反抗力一歪曲線
a) 圧縮速度 3.0 mm/min　b) 圧縮速度 5.0 mm/min

第1表 $p=0$ を基準にとった時の $p=0.2$, …, …, 0.8 kg/cm² の反抗力

a

p (kg/cm²)	1 ε (kg)	2	3	4	5	6	7
0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	5.6	5.8	3.2	5.4	6.0	6.3	7.0
0.4	8.4	8.6	7.5	9.3	10.7	12.3	15.2
0.6	10.2	10.2	9.1	11.7	14.7	13.8	20.8
0.8	14.1	14.1	13.9	17.3	19.7	21.8	26.1

b

p (kg/cm²)	1 ε (kg)	2	3	4	5	6	7
0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	3.8	3.8	5.3	5.2	7.0	9.1	8.1
0.4	6.3	6.5	8.5	8.2	10.2	13.6	12.8
0.6	10.8	10.5	10.1	12.8	15.2	16.2	19.2
0.8	14.0	13.8	15.1	17.8	20.9	25.7	25.8

表の上欄の 1, 2, 3, …, 7 は第4図の点線で示した歪 1, 2, 3, …, 7 に対応する

B をすぎてから後ゆるやかに増す。C で圧縮をやめると，反抗力 F は時間とともに緩和する。原点 A が 0 でないのは，前にものべたように，側圧を加えると軸方向にも圧力が加わるからである。いまの場合，側圧 p は 0.2 kg/cm² であった。この曲線の形は一軸圧縮のばあいの反抗力曲線と同じ形になった。これらの曲線を圧縮速度別にまとめて第4図に示した。縦軸は反抗力 F，横軸はひずみ ε，曲線上の数字は側圧 p である。図 (a), (b) はそれぞれ圧縮速度 3.0, 5.0 mm/min で軸方向に圧縮したものである。反抗力 F は側圧が大きくなれば，一軸圧縮のばあいの反抗力—歪曲線を平行移動させたように増大する結果となった。一軸圧縮の反抗力 F と比較した三軸の反抗力の詳しい増大値を第1表に示した。表 (a) は圧縮速度 3.0 mm/min のばあいで，側圧 0.2 kg/cm² のとき，反抗力はひずみ ε が 2.4% で 5.6 kg，32% で 7.0 kg。側圧 0.8 kg/cm² のとき，ひずみ 2.4% で 14.1 kg，32% で 26.1 kg となっている。ひずみが増してゆくと，反抗力の増加も大きくなる傾向がみられた。このことは，圧縮速度 5.0 mm/min のばあいにも同じことがいえる。

IV. 粘性係数と側圧との関係

雪に力を与えると，一般に第3図のような反抗力—歪曲線がえられる。最初はひずみに対して反抗力は直線的に急激に増大し，その後ゆっくりと，曲線を画いて増大する。そこで直線部分の反抗力の増し方 $\Delta F/\Delta\varepsilon$ と 5% 圧縮したときの粘性係数 η を計算した。

1. $\Delta F/\Delta\varepsilon$ と側圧との関係

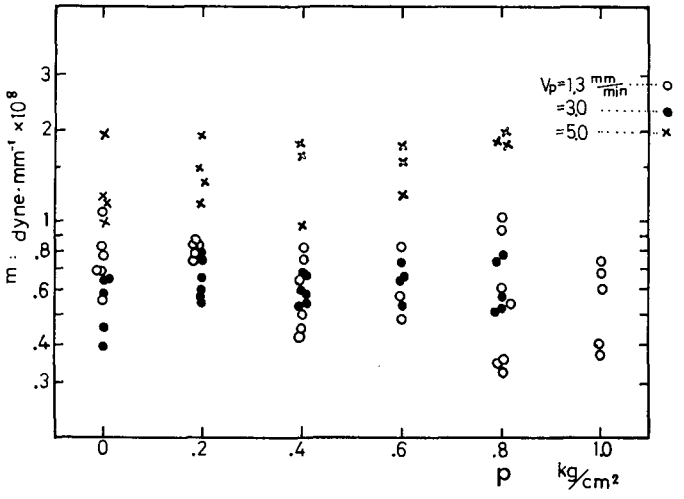
氷の弾性限界荷重は 200 g/cm² である[5]。いま，かりに氷の弾性限界荷重が雪の実質部分の氷についてあてはまると考えて換算してみると，雪の密度は 0.375 g/cm³ であるから雪の弾性限界荷重は $200\times0.375\div0.917=82$ g/cm² となる。0.917 (g/cm³) は氷の密度である。

II 節でのべたように，雪円筒には，軸方向に圧縮する前に，側圧によって 200 g/cm²～800 g/cm² の圧力が軸方向にも加わる。この値は雪の弾性限界の 2.5 倍以上に当っている。したがって，第 3 図の A–B の直線部分は，弾性限界をこえた部分でおこっていることになる。

筆者は，直線部分の勾配と側圧の関係を知るために次の式を計算した。

$$\Delta F/\Delta\varepsilon = m \qquad (1)$$

この式の計算値を第 5 図に示した。縦軸は m，横軸は側圧 p である。図の中の ○，●，×印は，それぞれ圧縮速度 1.3，3.0，5.0 mm/min のものである。側圧 p が 0～1.0 kg/cm² の範囲で m は 3×10^7～2×10^8 dyne/mm の範囲にちらばっていて，側圧による m の変化はみられなかった。しかし，圧縮速度 5.0 mm/min では，1.3，3.0 mm/min のときの値にくらべて，m は大きくなっている。すなわち，反抗力 F の増し方は大きいことになる。



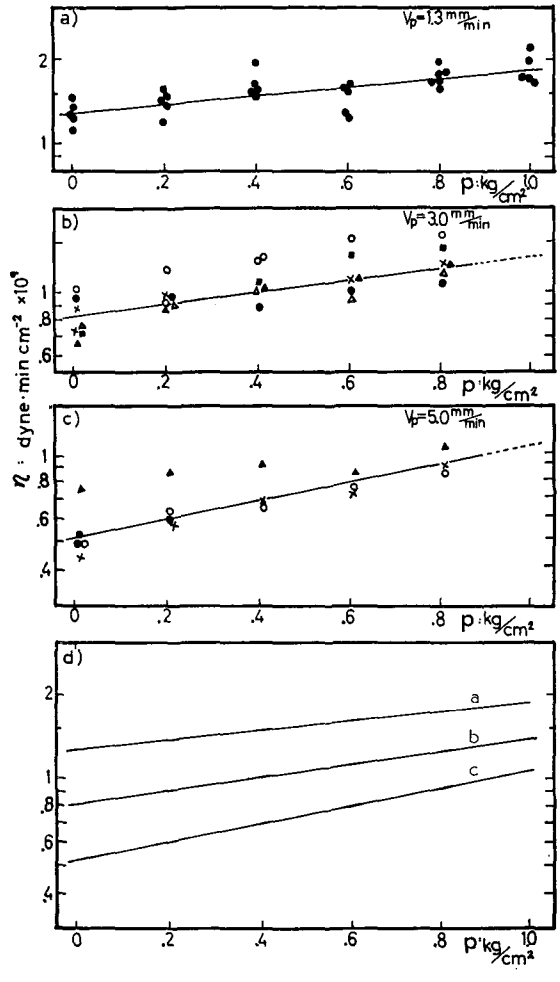
第 5 図　第 3 図の A–B 部分の反抗力増し方 $\Delta F/\Delta\varepsilon=m$ と側圧 p との関係

2. 5% 圧縮したときの粘性係数 η と測圧 p との関係

先に知られているように[6]，雪には粘性が存在する。粘性係数を η とすると，η は次の式で表わされる。

$$\eta = \frac{F}{\left(\frac{v}{l}\right)} \qquad (2)$$

ここで，F は雪の圧縮反抗力，v は圧縮速度，l は雪円筒の高さである。第 4 図で示したよう



第6図 5% 圧縮したときの粘性係数 η と側圧 p との関係

に，圧縮反抗力は側圧によって変る。そこで，側圧による粘性係数のちがいを次にもとめてみた。第6図に粘性係数 η と側圧 p との関係を示した。それぞれの値は (2) 式を使って計算した。F は 5% 圧縮したときの雪の反抗力である。第6図の (a), (b), (c) は各々圧縮速度 1.3, 3.0, 5.0 mm/min のときのグラフである。(b), (c) の中の同じ印は円筒形の雪を採取した積雪層が同じであることを示している。

p が 0 のときの η の値は，木下の行なった一軸圧縮の結果と一致している。図からわかるように，側圧が大きくなると，$\log \eta$ と p との間には直線関係があらわれた。それぞれの直線を式であらわすと，次のような実験式がえられる。η, p の単位は各々 dyne·min/cm², kg/cm² である。

圧縮速度 1.3 mm/min のとき

$$\log_{10} \eta = 10.9 + 0.07\, p$$

3.0 mm/min　のとき

$$\log_{10}\eta = 8.9+1.07\,p$$

5.0 mm/min　のとき

$$\log_{10}\eta = 8.7+1.72\,p$$

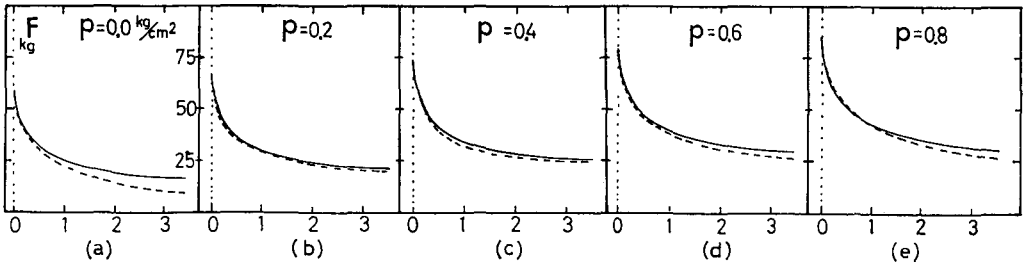
次に圧縮速度と粘性係数についてしらべた。第6図 (d) に，それぞれの圧縮速度についてえられた結果を合わせてかいた。側圧 p が 0 では，各圧縮速度の η の値は 5.2×10^8, 8.0×10^8, 12.0×10^8 dyne·min/cm² で，側圧 0.8 kg/cm² では 9.3×10^8, 12.2×10^8, 17.0×10^8 dyne·min/cm² である。側圧が 0～0.8 kg/cm² の範囲では，圧縮速度によって，η の増し方は異なり，圧縮速度を増すと粘性係数は大きくなる傾向にあった。

V. 圧縮反抗力の緩和

第 III 節でのべたように，雪をゆっくりおしてゆき，圧縮をとめると，雪の圧縮反抗力は次第に減少する。このことは，すでに一軸圧縮試験で知られていることである。一軸圧縮のばあい，緩和曲線は次の型の式で表わされる。

$$F = F_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \qquad (3)$$

ここで，τ は緩和時間とよばれるもので，圧縮をやめたときの圧力 F_0 が F_0/e (e は自然対数の底) に減少するまでの時間がある。 第7図に圧縮速度 3.0 mm/min で 32～34% 圧縮したときの緩和曲線を示した。 図 (a), (b), (c), (d), (e) はそれぞれ側圧 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 kg/cm² の緩和曲線である。縦軸は反抗力 F, 横軸は時間 t である。実線は記録された緩和曲線である。この曲線から，緩和時間をもとめると第2表のごとくになる。緩和時間は側圧が大きくなるに



第7図　反抗力緩和曲線

実線：観測値　点線：計算値 $\left(F=F_0\exp\left(\frac{t}{\tau}\right)^{-\frac{1}{3}}\right)$

第2表　反抗力緩和時間 τ と側圧 p との関係

	p=0 kg/cm²	0.2	0.4	0.6	0.8
3.0 mm/min	77 sec	100	108	172	200
5.0 mm/min	56	68	102	115	135

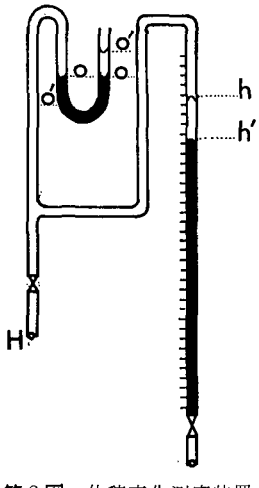
したがって長くなり，側圧 p が 0 と 0.8 kg/cm² のときの緩和時間をくらべると約3倍も長くなっている。この緩和時間 τ の値をつかって，(3) 式を次のような型にして計算したのが点線である。

$$F = F_0 \exp\left(\frac{t}{\tau}\right)^{-\frac{1}{3}} \qquad (4)$$

筆者は，圧縮をやめてから3～4分，反抗力の緩和を記録したが，(4) 式で計算された点線と実線とはよく一致した。圧縮速度 5.0 mm/min のときも同じ結果がえられた。

VI. 側圧と雪の半径の増加との関係

第 II 節で説明したように，ゴムスリーブにつつまれた雪円筒に側圧を加え，軸方向に圧縮すると，雪の中の空気はおし出される。この空気の量を第8図に示した油入りの U 字管と水銀マノメーターで測定した。油入り U 字管の一方の口は雪に通じ，他の一方は外に開いていて，実験のはじめ，両方の管の油の位置を水平にしておく。このときの水銀マノメーター中の水銀柱の高さを h とする。雪円筒から空気がおし出されると，U 字管の油の位置がかわるが，水銀マノメーター中の水銀柱の高さを h' まで下げ，U 字管の油の位置をはじめの状態までもどすと，$(h-h')\times$ 管の断面積が雪円筒からおし出された空気の量になる。

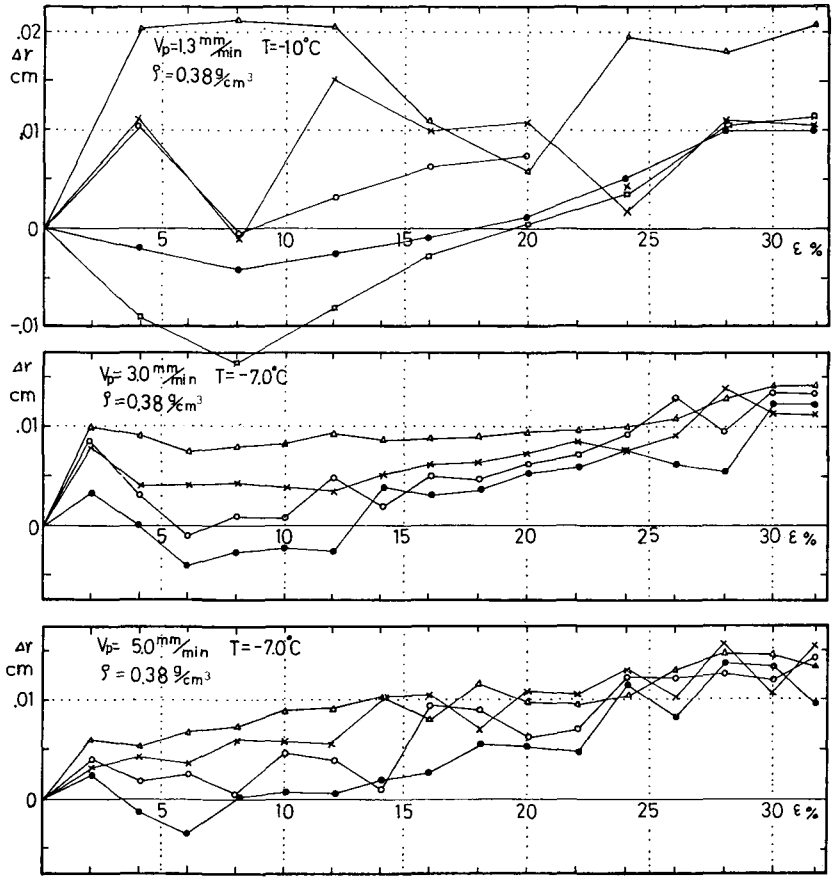


第8図 体積変化測定装置

雪円筒を圧縮して，横方向にふくれも，ちぢみもしなかったばあいには，排出される空気の量は $\pi r^2 \cdot \Delta h$ となる。r は雪円筒の半径，Δh は圧縮量である。しかし，実際に押し出されてくる空気の量は $\pi r^2 \cdot \Delta h$ とは等しくない。雪円筒は，横方向にふくらんだり，ちぢんだりしているわけである。それで，排気量をもとに雪円筒半径の増加を計算した。計算は圧縮された雪円筒が，端の影響をうけないで，一様にふくらむか，ちぢむものと仮定して行なった。雪円筒からおし出される空気の量は，2.5 mm 圧縮されるごとに測定し，それから半径の増加分 Δr を計算した。したがって，いまもとめられた値は，軸方向に 2.5 mm 圧縮した毎の半径の増加分である。

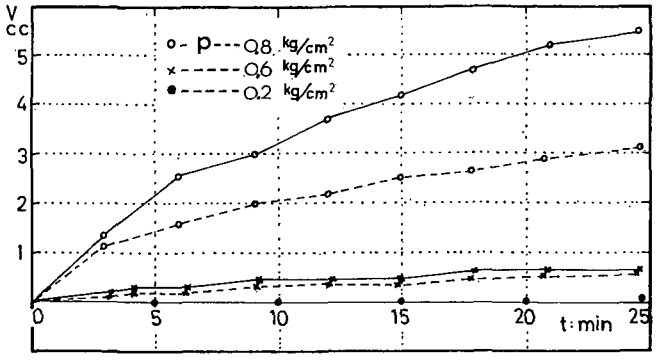
第9図に半径の増加 Δr とひずみ ε，側圧 p の関係を示した。縦軸は半径の増加 Δr，横軸はひずみ ε である。△，×，○，● の印は側圧 p が 0,2，0.4，0.6，0.8 kg/cm² のときのものである。約 32% まで圧縮される途中の Δr の値を示してある。側圧 0.2，0.4 kg/cm² のばあい半径の増加はほぼ一定で，ひずみ ε が増すとともに横方向に雪円筒はふくらんでいく。しかし，側圧が 0.6，0.8 kg/cm² になると，14% 圧縮されるまでは，Δr の値は負か，0 に近い値となっている。そして，14% 以後の圧縮に対しては，Δr は他の側圧のばあいと同じように増大していく。圧縮する前の雪の密度は 0.375 g/cm³，14% 圧縮したときの雪の密度は約 0.44 g/cm³ であった。

いま，側圧 0.8 kg/cm² では，Δr は負の値，すなわち，雪円筒の径は細くなった。円筒形



第9図　半径の増加 Δr と側圧との関係

△：$p=0.2\,\mathrm{kg/cm^2}$　×：$p=0.4\,\mathrm{kg/cm^2}$　○：$p=0.6\,\mathrm{kg/cm^2}$
●：$p=0.8\,\mathrm{kg/cm^2}$　□：$p=1.0\,\mathrm{kg/cm^2}$



第10図　軸方向に圧縮しないで，雪のまわりに一様な力を加えたときの体積変化

実線は総排気量，点線は軸方向の縮みによる排気量を表わす

のまわりから圧力を加えるのであるから，円筒が細くなることは当然予想されることである。それで，側圧だけによる円筒の変形をしらべ，その結果を第 10 図に示した。縦軸に排気量，横軸に時間をとった。先にのべたように，雪円筒に側圧を加えると，雪は軸方向にも，横方向にもちぢむ。実線は水銀マノメーターで測定した値で，軸方向と横方向にちぢんだために雪円筒からおし出されてくる空気の量である。

第 10 図の点線はダイヤル・ゲージで測った軸方向のちぢみに雪円筒の底面積を掛けた値である。したがって，実線と点線の値の差は横方向にのみちぢんだためにおし出された空気の量となる。○，×，● の印はまわりの圧力がそれぞれ 0.8, 0.6, 0.2 kg/cm² のときの値である。側圧 0.2, 0.6 kg/cm² の場合，雪円筒はほとんどちぢんでいない。しかし，側圧 0.8 kg/cm² のときは雪円筒は細くなっている。側圧を加えて 6 分後の排気量から Δr を計算してみると，毎分 0.02 mm 細くなったことになる。軸方向に圧縮するばあい，側圧を加え，雪の変形がおちついた後軸方向の圧縮が始められるため，側圧を加えてから 6 分後の軸方向のひずみ ε は，圧縮速度が 1.3, 3.0, 5.0 mm/min のばあい，それぞれ 6%, 14%, 24% となる。

このようにえられた側圧による円筒の横のちぢみを第 9 図の Δr に補正しても，側圧 0.8 kg/cm² において，Δr が負の値を示す部分が存在する。したがって，雪円筒は軸方向に圧縮したために，細くなったことになる。

VII. ポアソン比

一様な太さの棒の両端に力を加えて引き伸ばし，または押し縮めると，逆に横方向には縮みまたは伸びる。いま，座標系として，円筒座標を使い，円筒の半径方向に r，円周方向に θ，軸方向に z をとり，それぞれの座標方向の歪みを ε_r, ε_θ, ε_z，応力を σ_r, σ_θ, σ_z とする。雪の円筒は，軸方向と円筒のまわりから，それぞれ一様な力をうけているのであるから，円筒の上下の端における板との間の摩擦を無視すれば，雪円筒の内部の各点における応力及び歪の主軸は r, θ, z 方向になる。いま，かりに雪の変形が弾性的におこっているとすれば，応力と歪との関係は

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \lambda\Delta + 2G\,\varepsilon_r \\ \sigma_\theta &= \lambda\Delta + 2G\,\varepsilon_\theta \\ \sigma_z &= \lambda\Delta + 2G\,\varepsilon_z \end{aligned} \qquad (5)$$

である。ただし，λ, G はそれぞれラーメの常数，剛性率で Δ は体積歪で

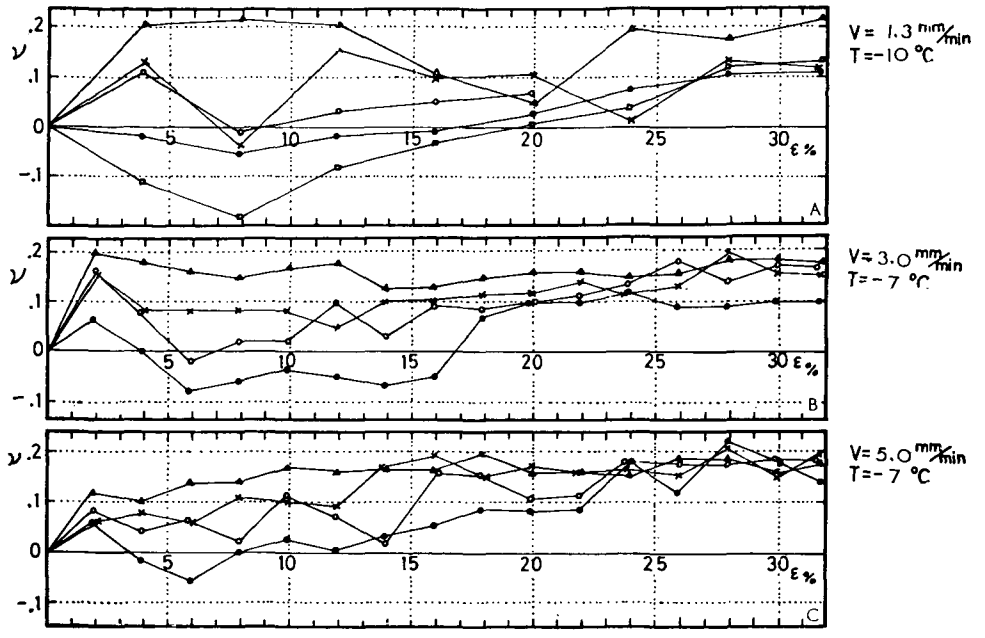
$$\Delta = \varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z$$

である。そして，ポアソン比 ν は

$$\nu = -\frac{\lambda}{2(\lambda+G)} \qquad (6)$$

で与えられる。(5) 式は応力，歪の増加分についても成り立ち，歪の増加分についてのポアソン比も (6) 式で与えられる。

(5), (6) 式は雪が弾性変形したばあいの式であるが，この式に実験でえられた F, r, Δr,



第11図　塑性ポアソン比 ν と円筒の軸方向のひずみ ε 側圧 p との関係（雪の密度は 0.38 g/cm³）
△, ×, ○, ●, □ の印は各々側圧 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 kg/cm² である

p, 雪から押し出された空気の量を使って計算したポアソン比の結果を第 11 図に示した。雪は塑性変形しているのであるから，塑性ポアソン比とよぶべき値である。第 11 図に ν とひずみ ε, 側圧 p の関係を示した。縦軸は ν, 横軸に ε をとった。△, ×, ○, ●, □ の印はそれぞれ側圧 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 kg/cm² のときの値である。側圧 0.2 kg/cm² では，ν の値は 0.14～0.20 の範囲で，若浜[7] が雪の薄片を一方向に圧縮したときの塑性ポアソン比 0.25～0.35 にくらべると小さい。また，側圧 0.8 kg/cm² では，圧縮速度 1.3 mm/min のとき，ひずみ 8% で −0.06 そして，16% 近くまで負の値を示している。圧縮速度 3.0 mm/min ではひずみ 2% で +0.06, 4% で 0, 16% までは −0.08～−0.03 の範囲で負の値を示し，圧縮速度 5.0 mm/min においてはひずみ 4～8% の間，負の値を示した。図 (a), (b), (c) をくらべると，側圧 0.8 kg/cm² のときの ν の負の値を示す範囲は，圧縮速度が大きくなるにしたがって，だんだん狭くなる傾向がみられた。また，側圧によって，ν の値は各々ちがう値を示した。

吉田[8] は，一様な斜面の積雪の内部応力が斜面に垂直な成分のみの関数であるという仮定のうえに立って，一様な斜面の積雪の内部応力を理論的にもとめた。そして，実際の斜面のいろいろな積雪層の匍匐速度から積雪内部の応力を求めた結果について，積雪の地面附近の層において，負のポアソン比をえている。筆者の実験においては，円筒形の雪のまわりに 0.8 kg/cm² の側圧を加えたばあい，ν の値は負になった。

VIII. あ と が き

雪円筒の側面に一定な圧力を加えながら，軸方向に一定な速度で圧縮する実験をおこなった。側圧は 0～1.0 kg/cm^2 の範囲，圧縮速度は 1.3，3.0，5.0 mm/min の三種類である。雪はしまりゆきで，密度は 0.37～0.39 g/cm^3 であった。試料は高さ 12.5 cm，直径 5.0 cm であった。その結果，次のことがわかった。

1) 反抗力—歪曲線は側圧 p を加えたばあいも，一軸圧縮のときの曲線と同じ形をとる。そして，側圧 p が大きくなるにしたがって，軸方向の反抗力は $p=0$ のときの曲線を F の大きい方へ平行移動させたように増大するが，圧縮ひずみ ε が大きくなると，反抗力の増し方も大きくなった。

2) 反抗力—歪曲線の直線部分の勾配は 3×10^7～2×10^8 dyne/mm の範囲にちらばっていて，側圧によるちがいはみられなかった。

3) 5% 圧縮したときの粘性係数と側圧の関係は，粘性係数 η を対数にとると，$\log\eta$ と p との間には直線関係がみられる。すなわち，側圧が増すと粘性係数も増大した。

4) 反抗力緩和曲線は $F=F_0\exp\left(\frac{t}{\tau}\right)^{-\frac{1}{3}}$ で表わされ，緩和時間 τ は側圧が大きいと長くなった。圧縮速度 3.0 mm/min では $p=0.0$ kg/cm^2 のとき $\tau=77$ 秒，$p=0.8$ kg/cm^2 では $\tau=200$ 秒であった。

5) 塑性ポアソン比 ν は側圧 0.2 kg/cm^2 のばあい，0.14～0.20，側圧 0.8 kg/cm^2 のとき，ひずみ 0～4% の間で 0～−0.06 となった。また，側圧によって，ν の値は 0.20～−0.09 の範囲をとった。

この研究に関して御指導を賜った北海道大学低温科学研究所藤岡敏夫教授に心から感謝いたします。また，実験結果の討論に際し，有益な助言と批判をして下さった北海道大学低温科学研究所の諸氏に深く感謝いたします。

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**，139–166.
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**，11–30.
3) 木下誠一 1960 積雪における変形速度と変形形式との関係 III. 低温科学，物理篇，**19**，135–146.
4) Taylor, D. W. 1941 Seventh progress report on shear to U. S. Engineers. Massachusetts Institute of technology Publication; P. W. Rowe and L. Barden 1964 Importance of Free Ends in Triaxial Testing. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Divisions. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. No. SM 1, 1–27 による.
5) 若浜五郎 1962 氷の塑性変形について II. 低温科学，物理篇，**20**，77–100.
6) 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**，11–16.
7) 若浜五郎 1960 積雪の薄片を応用した積雪組織の内部歪の研究 II. 低温科学，物理篇，**19**，73–95.
8) 吉田順五 1963 一様な斜面上の積雪の内部応力. 低温科学，物理篇，**21**，1–12.

Summary

Experiments of triaxial compression of snow was carried out by use of a testing machine of soil. Cylindrical sample of snow, 5.0 cm in diameter and 12.5 cm in height, was set in the testing chamber (Fig. 1) and compressed axially with constant speeds V (1.3, 3.0 and 5.0 mm/min) under a lateral pressure p ($0\sim1.0$ kg/cm^2). The lateral pressure was applied by a compresser using ethylene glycol. A rubber envelope covered the snow tightly to protect the snow against the intrusion of liquid ethylene glycol. The air in the snow sample was kept at atmospheric pressure, and the change of volume of the snow sample was measured by the volume of air Va squeezed out of the snow. Experiment was conducted at temperatures $-7.0\sim-10.0$°C. The snow samples were compact snow of which density was $0.37\sim0.39$ g/cm^3. Microstructures of the snow samples were shown in Fig. 2.

The axial compressive force F, which is equal to the risistive force of snow against compression, was measured electrically by a load-cell and recorded on an electrionic recorder. Figure 3 is an example of the recorded risistive force F. The recording paper runs from right to left with a constant speed, and the abscissa represents the axial strain ε_a of snow which was compressed with constant speed V. The resistive force F increased rapidly in the first stage of the compression from A to B and then gradually from B to C showing quasi-elasticity and plasticity of snow. At point C, the compression was stopped and F decreased exponentially. When the lateral pressure p was applied, the axial risistive force increased and F-ε_a curves transfered upward. This shows the snow became hard or more viscous. The coefficients of compressive viscosity $\eta=F/(V/\mathrm{h})$ at 5% of axial strain were presented in Fig. 6, where h is the height of cylindrical snow. η increased with the lateral pressure p and are represented as follows;

$$\begin{aligned} \text{at } V &= 1.3 \text{ mm/min}, \quad \log_{10}\eta = 10.9 + 0.37\ \mathrm{p}, \\ V &= 3.0 \text{ mm/min}, \quad \log_{10}\eta = 8.9 + 1.70\ \mathrm{p}, \\ V &= 5.0 \text{ mm/min}, \quad \log_{10}\eta = 8.7 + 1.72\ \mathrm{p}. \end{aligned}$$

As mentioned above, compression of snow was stopped at C in Fig. 3 and thereafter the resistive force F decreased according to relaxation of stresses in the snow. The stress relaxation was prolonged with the increase of lateral pressure as shown in Fig. 7. In the figure, the solid lines show the relaxation of F and the dotted lines represent $F=F_0 \exp(t/\tau)^{\frac{1}{3}}$. Time of rleaxation τ under the lateral pressures 0, 0.2, 0.4, 0.6 and 0.8 kg/cm^2 were calculated in Table 2. The time of relaxation τ increased with lateral pressure and decreased with the increase of the velocity of axial compression.

The axial and lateral compression decreased volume of the snow sample and it was measured by the volume of air Va squeezed out from the snow at every 2.5 mm of axial strain. The radial expansion Δr calculated from Va were shown in Fig. 9. In the figure, some of Δr showed negative values at high lateral pressure especially when the snow was compressed axially at low speed. These negative values of Δr can be considered as the result of the radial compression under a high lateral pressure. But some of the plastic poisson's ratio ν in Fig. 11 calculated from the experiment also did take negative values.