



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	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)
Author(s)	小島, 賢治; KOJIMA, Kenji
Citation	低温科学. 物理篇, 17, 53-64
Issue Date	1958-12-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17943
Type	departmental bulletin paper
File Information	17_p53-64.pdf



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)

小島賢治

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和33年7月受理)

I. はしがき

積雪層が雪自身の重さのために塑性的に圧縮されながら、温度が 0°C に昇ることなく、新雪から普通の「しまりゆき」へと変化する場合、雪層の圧縮粘性係数 η と層の密度 ρ との間には

$$\eta = \eta_0 \exp[k\rho] \quad (1)$$

の関係がある。ここで、 η_0 と k とは常数である。すなわち、 $\log \eta$ は密度 ρ に比例して増大する。第III報^{1),2)}ではこのことを利用して、積雪の沈降や積雪内の密度の分布を計算で求める方法を報告した。ただ、この第III報でも述べたように、札幌の「しまりゆき」の粘性係数は雪層の密度が 0.4 gr/cm^3 を越えて更に大きくなるにつれ、密度増加に対する粘性係数増加の割合が、(1)式であらわされるより更に大きくなる傾向が見られたのである。しかし、札幌では積雪量もあまり多くはないし、融雪期も3月はじめには既に始つてしまうので、それまでに密度が 0.4 をこえるのは、地面に近い下層のごく一部の雪である。それに、密度が 0.4 をこえても 0.45 までは達しないうちに融雪水を含んで「ぬれゆき」になる場合が多い。したがって、積雪の沈降を計算ずくとしても、このことは大きな影響を及ぼさない。しかし、山地の雪の多い地方では、密度 0.4 以上の雪は、積雪の内部で決して少なくない。3月上旬の積雪について見ると、密度が 0.4 ないし 0.5 gr/cm^3 の範囲にある「かたしまりゆき」の層は全積雪量の(水量にてし)半分以上を占めている。従つて、(1)式を積雪深が 2 m を越えるような地方の雪の沈降の問題に応用するためには、(1)式が $\rho=0.4\sim 0.5$ の範囲に対してもあてはまるか否かを、そのような地方の雪について確かめておく必要がある。それで、北大雨竜演習林母子里(もしり)看守所構内の積雪について観測を行つた。

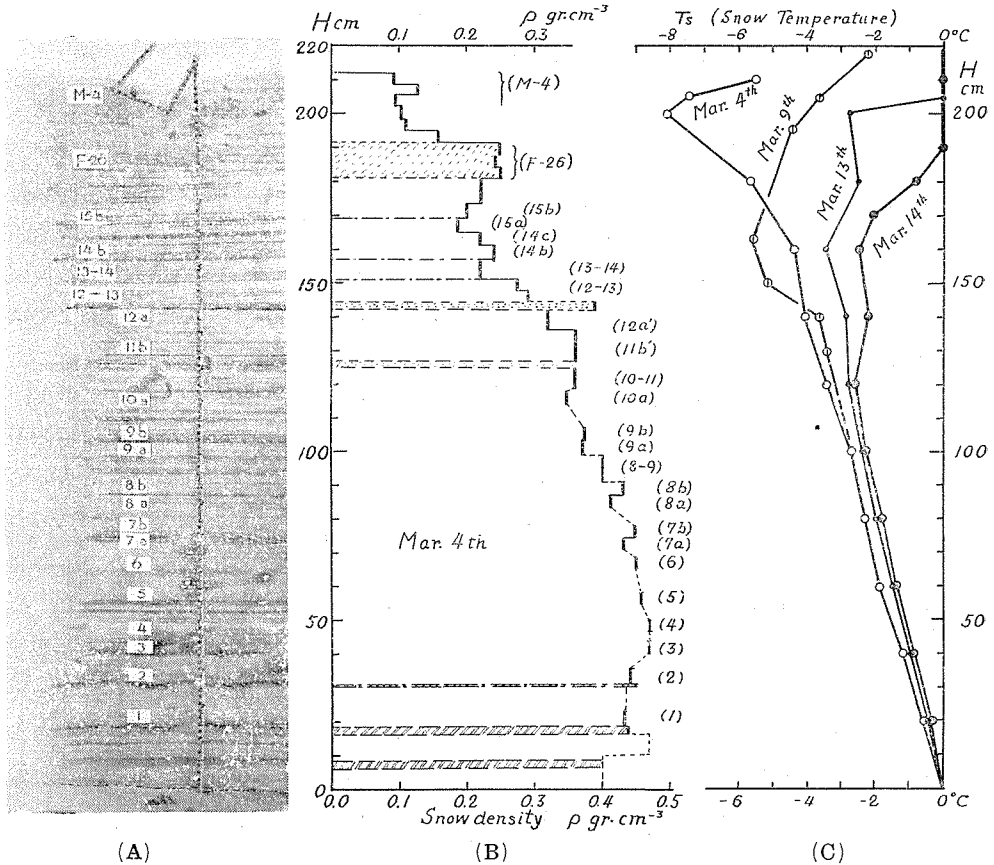
母子里は積雪が例年 2 m をこえる深雪地である。10日余の滞在期間に、特に密度の大きい雪の層に着目して、それらの密度の時間変化を測定し、それから圧縮粘性係数を求めた。その結果、密度が 0.5 gr/cm^3 に近い「かたしまりゆき」に於いても、粘性係数 η と密度 ρ との関係はほぼ(1)式であらわして差支えないことがわかつた。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第448号

II. 積雪の密度変化の測定法

今年 (1958) 北大演習林母子里看守所に滞在したのは 3 月 3 日から 15 日までである。そのうち 3 月 4 日、9 日及び 14 日に積雪中に穴を掘り、穴の壁によつて積雪全層の断面測定を行った。第 1 図 (A) の写真は穴の鉛直の壁にインクの薄い水溶液を霧にして吹かけた有様である。(積雪 212 cm)。積雪の層状組織を示すインクの縞模様は 10 日後までも保たれている。ただし、縞の間隔は圧縮によつてちぢむ。それで、この縞を目印にして同じ雪のあとを追うことが出来る。同じ雪の層について、日を措いて密度を測定すれば、その雪の圧縮の速度がわかるわけである。

密度を測つた雪の試料は厚さ 3.0 cm、底面 6.0×5.8 cm² の直方体である。いつもこの大きさの雪が切取れるように作ったサンプラーを雪の壁に水平に差込んで試料を採り、これを密度計として作ったバネ秤で秤量した。秤の目盛は密度が直読み出来るように刻んであり、小数点



第 1 図 (A) 1958 年 3 月 4 日母子里の積雪の断面 (層状組織を出すためにインクの霧をかけてある)。(B) 密度の垂直分布 (3 月 4 日)。(C) 積雪温度の垂直分布。

以下2桁まで目盛つてあるが、3桁目まで読取つた。

第1図の写真につけた番号は密度を測定した部分の位置をあらわしている。濃くはつきりした縞に下から順に番号をつけたが、写真で8a, 8bなどがあるのは、8番目インクの縞のすぐ下と、すぐ上とで密度を測定したことを表わしている。又12-13とあるのはインク縞No.12とNo.13との間にはさまれた層全体の平均密度を測つたという意味である。ただし、積雪表面から1m下までの上層部では、縞模様に関係なく、すき間無く連続的に密度を測定した。上層部にF-26と記した層は2月25~26日に降積つたと推定される雪で、M-4は3月3~4日の降雪で形成された層である。F-26の境は明瞭なインクの縞として現われなかつた。しかし、この層ができるとき風が強かつたためか、層の中には水平から傾いた細かいインクの線がたくさん現われ、その上、層全体が薄茶色に色づいていたので区別が出来た。

第1図(B)に3月4日(初回)に測定した密度の垂直分布を示した。密度の測定値の近くに記入してある番号は左側の雪の壁の写真につけた番号とそれぞれ対応している。

このような密度測定を5日毎に3回行つたが、後の2回の測定では前回の壁の影響を避けるために、前回より1m以上掘り進んで新しい鉛直の壁を作り、これについて同様の測定をくりかえした。初回の測定と層の対応を間違えぬようにするため、断面にあらわれたインクの縞をスケッチしておいたほか、初回の壁の一部(北向きの面)をインクの縞をつけたまま残しておき、主要なインク縞にマッチの軸木を1本ずつさし込んでおいた。次回の断面測定の際は、新しい測定壁面ともとの壁との間の雪の壁いちめんインクの霧をかけ、そこにあらわれる縞に沿ってマッチの軸木からたどつて行けば、容易に対応する層を決定することが出来る。札幌市内の積雪の切口では、ざらめ層や煤煙で出来る多数の縞がついているので、上に述べたような手順は必要がない。しかし、山間の深雪地帯ではこのようにしないと、数日間を隔てた断面測定で、対応する層を決定することは困難である。

測定場所としては地面の凹凸の影響をさけるため、母子里看守所構内のテニスコートを選んだ。

雪の壁をたいらに仕上げ、第1図のような雪の切口の写真をとるためには相当の時間がかかる。その間に雪の温度は外気に接して変化するのであろう。それで、雪の温度は、荒削りの鉛直面が大体出来上つたときに直ちに測定した。第1図(C)に4日、9日、13日及び14日の雪の温度の垂直分布を示した。著しい融雪が始つたのは13日からで、13日、14日に上層部が0°Cになつているのはこの融雪のためである。しかし、地面から190cmの高さまでは14日も0°C以下であり、密度測定値に含水量の影響はなかつた。

3月4日における雪質は殆んど全層にわたり融雪水の影響を受けたことのない所謂しまりゆきであつた。ただ、地面から30cmの高さには氷板があり、その下には融雪(12月上旬)によつて出来た「ざらめゆき」が2層あつた。これらは第1図の写真では明らかでないので、密度分布図に2重斜線を施して示した。密度分布図には上層部のF-26層、No.15(F-23)およびNo.11のインクの縞にあたる位置に破線の水平線で区切つた中に、こまかい斜線を記入したも

のがある。これらは「ざらめ」ではなく、雪と共に空から降ってきた塵(黄砂か?)で茶色に色づいていた層である。No. 12の部分には黒い雪の層があつたが、これも「ざらめ」ではない。これらは測定の日印として便利であつた。

云うまでもなく、インクをかければ雪の密度はかわる。密度の測定は、第1図の写真の左側に白く残されているように壁に、インクをかけない部分を残しておき、そこから試料をとつて行つた。

III. 密度の時間的变化と圧縮粘性係数

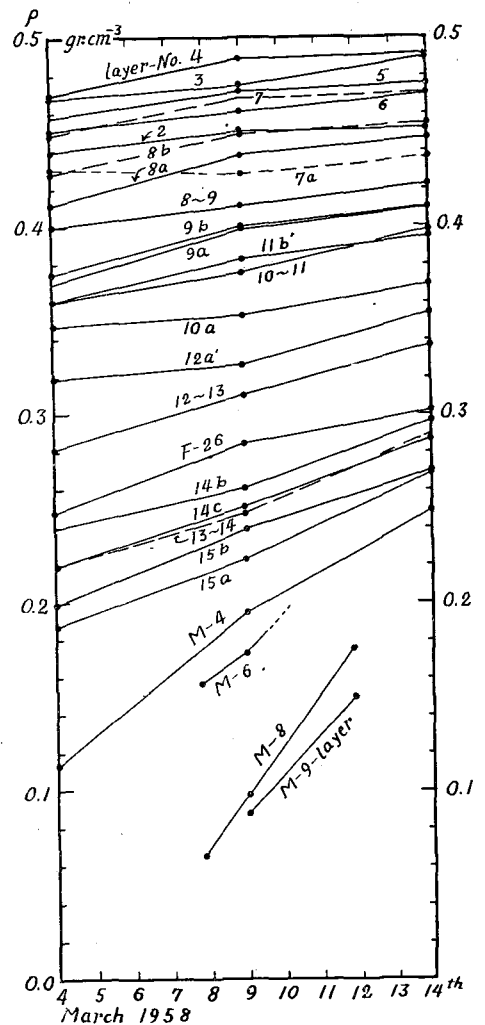
或るひとつの雪層の密度が Δt 日間に圧縮のために ρ から $\rho + \Delta\rho$ まで増加したとする。 Δt 日間の丁度中間での雪層の密度を $\bar{\rho}_m$ とし、この層が Δt 日間に受けた荷重の平均を \bar{w} として

$$\frac{1}{\Delta t} \left(\frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}_m} \right) = \frac{\bar{w}}{\eta} \quad (2)$$

によつて、この層の粘性係数の Δt 日間に於ける平均の値 η を求めることにした。下層に行くほど雪はかたく、 ρ の変化はおそい。それで Δt として下層の「かたしまりゆき」に対しては10日、他の大部分の層に対しては5日と10日との両方を、新雪に対しては1日ないし3日をとつた。

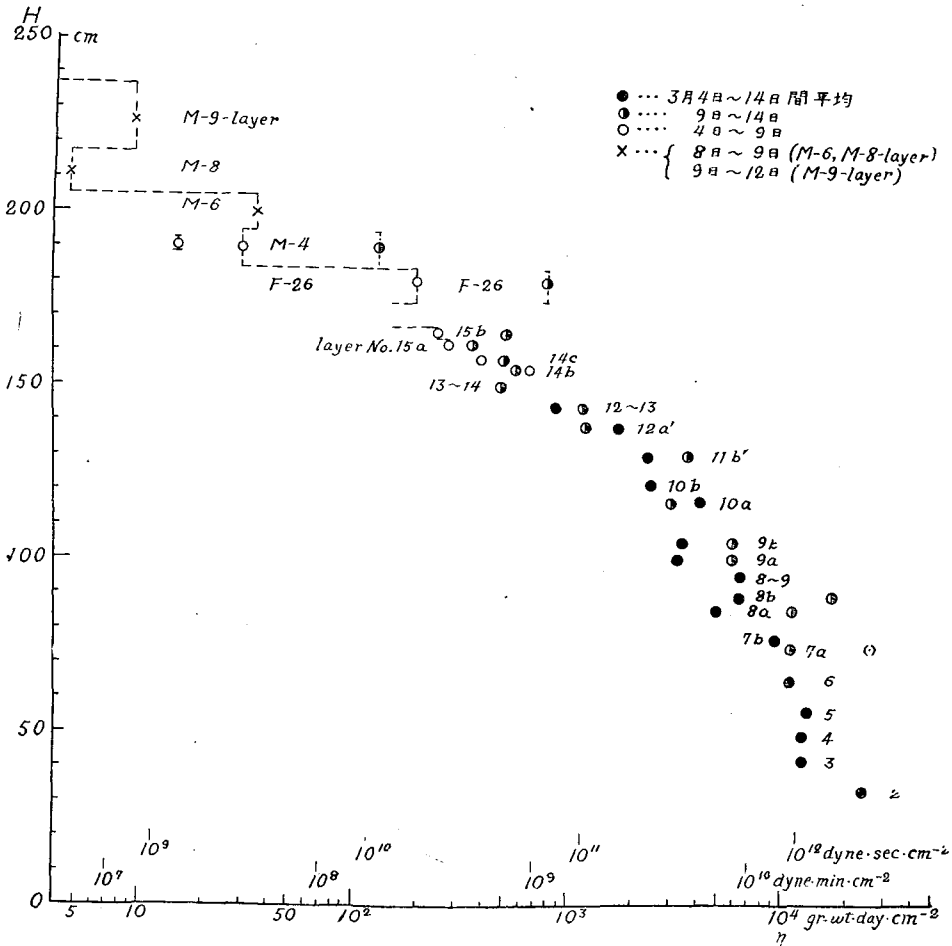
第2図は第1図に番号をつけて示した各層の3月4日、9日及び14日における密度の測定値である。層毎に5日毎の測定値を直線で結んである。M-6、M-8及びM-9層はそれぞれ3月6日、8日及び9日に降積つた層である。これらは3月14日にはすでに融雪水に侵されてしまつたので、降つてから1日或いは3日間の密度変化だけが記入してある。

第2図に示した各層の密度変化の斜向は層によつてかなり不規則に違つている。あるものは10日間の前半の密度変化が後半のそれより小さく(例えば層 No. 13, No. 7a), 又、あるものは逆に前半の密度増加が後半より非常に大きい (No. 4)。密度変化を測定した期間中の降雪



第2図 各層の密度の3月4日、9日及び14日における測定値。(層毎に測点を直線で結んで密度増加の傾向を示した。)

水量は約 6 gr/cm^2 で、4日から10日までほぼ直線的に増加し、それ以後殆んど降雪はなかつた。したがつて、雪にかかる圧力変化は規則的であつて、この変化はどの層にも同時に影響したはずである。一方、雪の温度は上層部では著しく変動したが、地面から120 cmの高さまでは $0^\circ \sim 0.8^\circ \text{C}$ 上昇したに過ぎない。従つて、温度変動が小さくしかも規則的であつたこの部分の雪については、総てのグラフが同じ傾向で変化しているのなら、そこに物理的な原因があるであらう。しかし、このようにグラフ毎に変化の傾向が違ふことは、そこに偶然誤差が入つていたことを示すものと思われる。密度測定の際ももちろんある。雪の同じ断面にあらわれたひとつの層の中となりあう数箇所の密度の測定値には、それらの平均値に対して $\pm 0.005 \text{ gr/cm}^3$ 程度の偏差が屢々観測された。しかし大部分の誤差は測定日が変わるごとに測定場所が1 mほど違つたことに起因するものと考えられる。このことを考慮して、密度変化のおそい下層 (No. 1



第3図 もしりの積雪の圧縮粘性係数 η の垂直分布。縦軸 H は各層の3月9日における位置 (地面からの高さ) をあらわす。

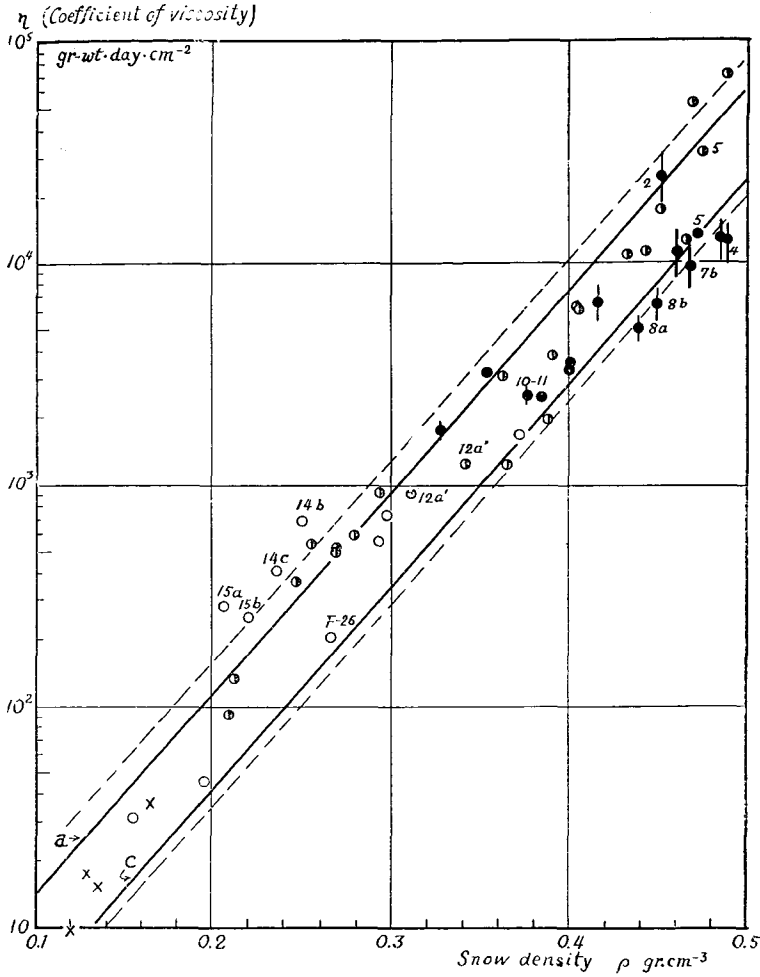
～No. 6) に対しては4日から14日までの10日間の密度増加 $\Delta\rho$, 中層 (No. 7～No. 12～13) に対しては4～14日及び9～14日間の $\Delta\rho$ を用いることにした。各層が受けた雪圧は Δt 日間の平均値 \bar{w} を用いた。すなわち, $\bar{w} \cdot \Delta t$ が Δt 日間に層が受けた積算荷重 $\int_{\Delta t} w(t) dt$ に等しくなるように \bar{w} をきめた。降雪による圧力変化を受け易い No. 13 より上の層に対しては10日間を前半と後半とに分け, それぞれについての密度増加を別々に採用することにした。

以上のようにして Δt , $\Delta\rho$, ρ_m 及び \bar{w} の値を各層毎に定め, (2)式によつて各層の圧縮粘性係数を求め, 粘性係数の垂直分布として示したのが第3図である。縦軸は地面から測つた各層の高さで測定期間10日間の間すなわち3月9日における層の中央の高さであらわしてある。横軸は粘性係数 η を対数目盛であらわした。図に示した粘性係数が10日間の平均であるか, 或いはその前半の5日間の平均をあらわしているか等の区別は, 図にも説明してあるように, 印の形を変えて示した。

第3図にみられる $\log \eta$ の高さによる変化の傾向と第1図の密度の垂直分布の傾向とが非常によく似ていることから, 今回の測定結果についても $\log \eta$ が ρ に比例して増すことがうかがわれるのである。このことは次の第4図によつて一層明らかに示される。

第4図は雪層の密度 ρ と $\log \eta$ との関係を示したものである。 η の値は第3図に掲げたのと同じ値で, ρ はこれらの η の値を求めるのに用いた ρ_m である。図の測点をあらわす○印, ×印等の意味第3図におけるのと同じである。図に2本の太い実線で示した直線 a, c は札幌の積雪にあつたように $k=21.0 \text{ cm}^3/\text{gr}$, $\eta_0=1.60$, $0.60 \text{ gr-wt} \cdot \text{day}/\text{cm}^2$ とおいた場合に(1)式であらわされる直線である。札幌では, ひとつひとつの層について, それが降積つたばかりの新雪から「しまりゆき」へと変化する数10日間にわたり測定が行われた。そうして各層について得られた $\log \eta - \rho$ 直線は互に平行で, それらは第4図の直線 a, c の間に入った(第III報参照)。稀に特に η が大きいか小さくて, $\log \eta - \rho$ 直線が a, c の間に入らないこともあつたが, そのようなものでも破線で示した2本の直線の間には入つたのである。今日の母子里の測定結果も, 図にみる通り, ほとんどすべての測定点が破線のあいだに落ちている。ただ, はじめにも述べたとおり, 札幌での測定結果では, 雪の密度が $0.4 \text{ gr}/\text{cm}^3$ 以上になると, この直線関係から外れて急に η が大きくなる傾向が見られたのである。しかし, 今回の母子里での測定結果によれば, 第4図にあきらかなように, 密度が0.5に近い「かたしまりゆき」に於いても測定点は2本の破線の間落ちる。なお, 第4図の測点の一部につけた縦棒は, 4日と14日とに於ける密度測定値に夫々1% (密度 0.500 に対して $\pm 0.005 \text{ gr}/\text{cm}^3$) の誤差があつた場合に生ずる粘性係数の誤差範囲を数例について示したものである。この誤差は密度変化がおそい ($\Delta\rho$ が小さい) 堅い雪ほど大きい。

母子里の雪については, おなじ雪の層を長期間追跡したわけではないから, 以上の結果から同一層の η と ρ とが(1)式に従うように変化すると云うことを直接には結論出来ないわけである。しかし, 多くのしまり雪の層についての広い密度範囲に亘つての測定結果が第4図のようになつたことは, 同一の雪層に関する変化も密度0.5まで第1式に従うことを示唆するもの

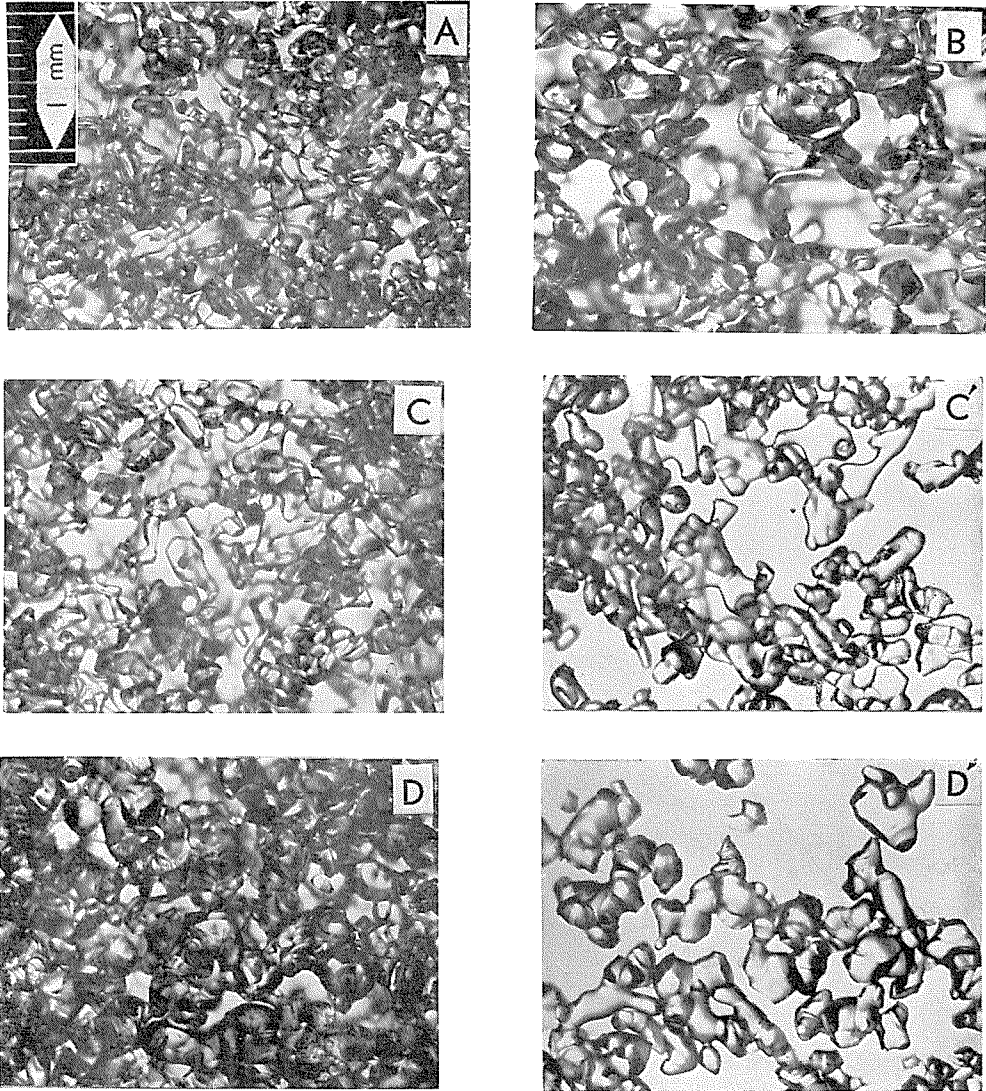


第4図 各層の圧縮粘性係数 η と密度 ρ との関係

と考えることは出来るであろう。従つて、第III報に報告したような積雪密度の垂直分布或いは積雪深の時間的变化等を予報するにあつて、密度の大きい「かたしまりゆき」の層についても η と ρ との関係として(1)式を用いてよいであろう。

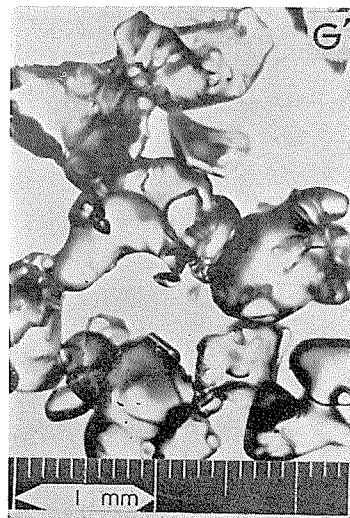
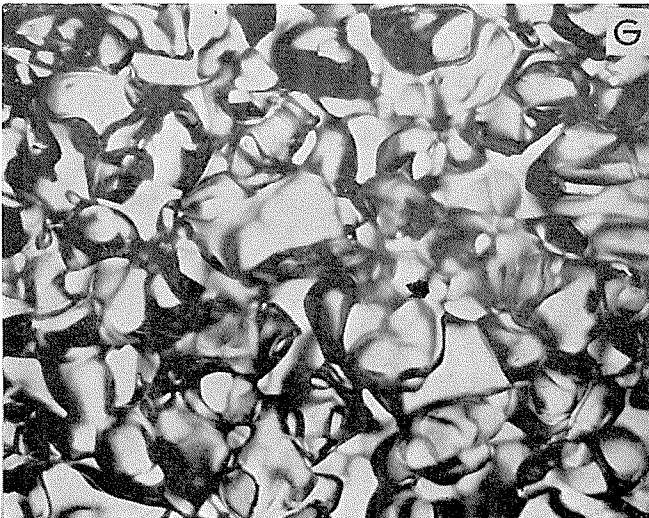
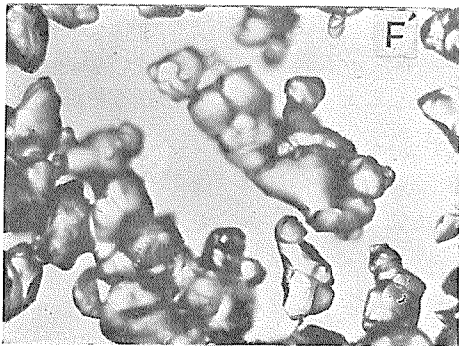
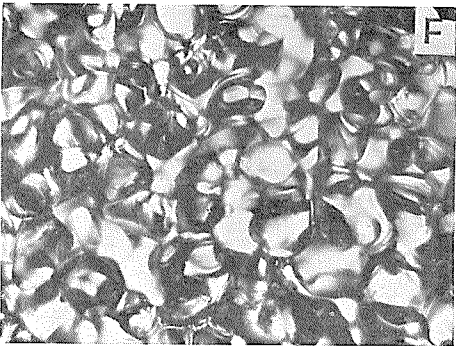
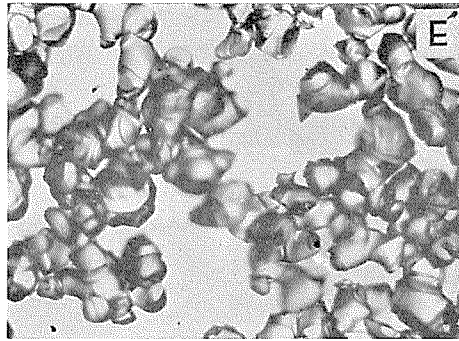
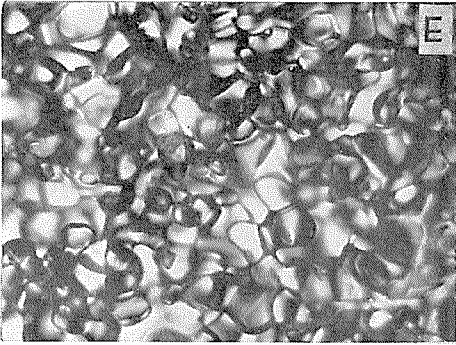
IV. 各層の粒子構造

第5図に、母子里において粘性係数を求めた28個の層の中6層をえらんで、その雪粒子の顕微鏡写真を示した。写真AからGまでの7枚は雪の粒子間の結合を乱すことなく1.0~1.2mmの厚さの積雪薄片を各層から切りとり、スライドガラスの上に寝かせて顕微鏡写真に撮影したものである。これらの薄片は鉛直方向に切りとつたのであつて、各写真の上方が実際の雪の鉛直上方にあたる。薄片を雪から切りとるには、二つの方法を用いた。比較的密度の小



第 5 図 積雪の粒子構造の顕微鏡写真。写真 C'~G' はそれぞれ C~G の雪からくずした雪粒。いずれも 3 月 4 日の雪の切口から採つた。

写 真	層番号	密 度 (gr/cm ³)	粘性係数 (gr-wt·day/cm ²)
A	F-26	0.24	2.1×10^2
B	15 a	0.18	2.9×10^2
C	13-14	0.22	5.1×10^2
D	11 b	0.36	2.4×10^3
E	8 b	0.43	6.5×10^3
F	3	0.47	1.3×10^4
G	1	0.43	$> 2 \times 10^4$



さい A, C 及び D の場合は片刃のかみそり刃をつけたナイフで切った。もろい雪 B 及び特にかたい雪 E, F, G は電流を通じた直径 0.1 mm のニクロム線で融かし切った。ニクロム線は Π 字型のエポナイト板に糸鋸のような形に張った。電流は 300 mA 程度であるが、母子里では電源に乾電池 (4.5 V) を用いた。このカッターが案内によつて鉛直方向に自由に動くようにしておき、カッターの自重で 3 cm/min の速度で雪のなかに沈み込み乍ら雪をとかし切るようにした。装置のくわしいことは別の機会に報告する予定である。

第 5 図の写真 A, B, C は粘性係数が 10^2 程度の例として掲げ、D 及び E は η が 10^3 程度、F 及び G は 10^4 程度の雪の粒子構造の例として掲げた。B の雪は密度が 0.18 gr/cm³ である。A, C は密度範囲 0.2~0.3, C 及び D は 0.3~0.4, E は 0.4~0.45, F は 0.45~0.50 のしまりゆきの構造を代表するものとしてよい。最後の写真 G は地面の上 20 cm の高さの層 No. 1 (第 1 図参照) の粒子構造を示す。この層では、これより上にあつた「しまりゆき」より粒が大きく、粒の間隙も大きい。そして密度はそれより上の層 No. 2~No. 7 より小さい。しかし粘性率は測定した 28 個の層のうち最大であつた。密度変化が小さいほど粘性係数は大きいわけであるが、この No. 1 の層だけは 10 日間の密度変化が測定誤差の範囲内にあるほど小さかつた。そのため第 3 図にも η の値をあげてない。

第 5 図の右側の C' から G' までの写真は、それぞれその左側の写真 C~G の雪から雪粒をくずしてスライドガラスの上に撒き、C~G 等と同じ倍率で撮影したものである。雪粒ひとつひとつの形と大きさの分布を知るためには、雪の構造をこわして粒をばらばらにした C'~G' の方が便利かも知れない。ただし、ここで雪粒として何を考えるか、すなわち積雪を構成する雪粒の定義に関してはいろいろ問題があると思われる。粒子構造をくずすことなしに薄片を作る上述の方法には、まだ幾分改良を加える必要があるように思われる。

最近、Fuchs⁹⁾ は雪の粒子構造を酸化チタン微粉 (ビニール製品に用いる白色顔料) を混ぜたレプリカ被膜で固定し、空隙部分に 0°C の水をしみ込ませた上、再び凍らせた試料をミリングマシンで薄く削る方法を報告した。又、中谷教授は雪の粒子構造の空隙部分に 8% レプリカ溶液を充填したまま、マイクロームで切断することによつて雪の薄片を作つた。その後、清水弘⁹⁾ はベンガラをまぜたペースト状のレプリカ液を雪の空隙部分に充填し、このレプリカ液を乾燥凝固させた試料をこまかいサンドペーパーでみがいて薄片を作ることに成功した。これらの方法は雪の構造の一平面による正確な切断面を見得る点ですぐれている。しかし、上述の筆者の方法は操作が簡単であるし、それに、つめ物をしないで切つた薄片をそのまま圧縮試験の供試体として用いる予定があるので、当分この方法も続ける考えである。

V. む す び

この報告の前に続く第 I 報から第 III 報までの雪の粘性圧縮に関する研究では、密度 0.4~0.5 gr/cm³ の「かたしまりゆき」と密度 0.1 以下の新雪についての測定が不充分であつた。そこで、今年 (1958) は北海道雨竜郡幌加内村母子里 (もしり) の深さ 2 m 余、水量 700 mm 以上に

達する積雪につき、これを構成する各雪層の10日間の縮みを測定して、密度が特に大きい雪の粘性係数を求めた。一方、札幌では、前の報告に述べたのと同じ方法で積雪各層の粘性縮みを追跡測定すると共に、特に、密度の小さい新雪について、降りつもつている最中の密度と厚さの変化及び降り止んで後2~3日間の圧縮の様子について従来よりくわしく調べた。この報告では、このうち母子里における測定結果だけを述べたのである。

実は、昨年(1957)も7日間の前後に母子里でおなじことを試みたが、初めての経験のため測定場所の選定と層追跡の手順とを誤つて目的を達しなかつたのである。今回はII節で述べたような測定上の手筈をさだめ、その通り実行して一応所期の成果を得ることが出来た。

終りに、此の研究を指導されている吉田教授に厚く感謝すると共に、測定上の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ここに御礼を申述べる。費用は文部省科学研究費に依つた。

文 献

- 1) 小島賢治 1957 積雪層の粘性圧縮 III. 低温科学, 物理篇, 16, 167.
- 2) Yosida, Z. and Colleagues 1958 Physical studies on deposited snow. IV. Mechanical properties. (3), Contributions from the Institute of Low Temperature Science No. 13, 55.
- 3) Fuchs, A. 1956 Preparation of plastic replicas and thin sections of snow. SIPRE Technical Report 41.
- 4) 清水 弘 1958 Red Paste 法による積雪の薄片. 低温科学, 本誌, 88.

Résumé

In the previous paper—Viscous compression of natural snowlayers. III.—the author reported the results of studies on the natural contraction of the snow layers composing snow cover deposited at Sapporo. He determined from the observed contraction of snow layers the coefficient of viscosity η and found that η of any snow layer was connected to its density ρ by the formula

$$\eta = \eta_0 \exp(k\rho). \quad (1)$$

In this formula k is a constant having the value $21.0 \text{ cm}^3/\text{gr}$ common to all snow layers while η changes in value from one snow layer to another within the range $0.6 \sim 1.6 \text{ gr-wt-day/cm}^2$ although it remains constant for one and the same layer. It should be noticed, however, that formula (1) holds only for the layers of compact snow and that its validity was ascertained only for the density ρ less than 0.4 gr/cm^3 . In Sapporo the snow cover seldom exceeds the thickness of one meter and its weight is not enough to compress the compact snow to a density larger than 0.4 gr/cm^3 . But it is not impossible but that snow becomes denser than that value by changing from compact snow into granular one with the approach of spring. That change is caused by partial thawing. Then the coefficient of viscosity η comes to have a value much larger than that given

by formula (1).

In order to see whether the linear relation (1) between $\log \eta$ and ρ still holds or not for the compact snow having a density larger than 0.4 gr/cm^3 , observations were made on the snow cover in the village Moshiri. There the snow cover was deeper than two meters and the compact snow layers composing lower portions had been compressed to such an extent as to have densities far exceeding 0.4 gr/cm^3 . The period of observation was only eleven days from 4th to 14th of March, 1958, but the contraction of snow layers during that period was just large enough to allow the coefficient of viscosity η to be determined for the dense compact snow. The value of each layer is plotted in Fig. 3 of the text against the height above surface of ground. Fig. 4 shows the relation between η and ρ . The parallel straight lines running obliquely in Fig. 4 represent formula (1) for different values of η . Those straight lines were constructed so as to fit the observation at Sapporo. The observed points of Moshiri also lie within the long and narrow region bounded by the straight lines for the range of density extending beyond the value of 0.4 gr/cm^3 . At Moshiri, unlike at Sapporo, η and ρ could not be pursued on one and the same snow layer through the long period while they grew from their initial small values. But the fact shown in Fig. 4 may be taken as a guarantee for the supposition that the relation between η and ρ of one and the same snow layer will be represented by formula (1) even beyond $\rho=0.4 \text{ gr/cm}^3$ provided that the snow continues to be compact snow.

The structure of ice networks made up of ice grains within snow was observed under a microscope. For that purpose a thin plate of the thickness $1.0\sim 1.2 \text{ mm}$ was cut out from each of the snow layers without damage to the structure of the networks. The cut could be made by a sharp knife in the case of moderately soft compact snow. For the hard and dense compact snow use was made of a fine nichrome wire heated by an electric current of 0.3 A . It was stretched on an ebonite frame and was left to penetrate slowly into the snow by the weight of the frame cutting the snow by melting. The electric current was fed by a portable dry cell of 4.5 V . The microphotographs to the left in Fig. 5 show the ice networks of several snow layers at Moshiri while those to the right show the ice grains obtained by crushing the networks on the left. The marks (F-26, 15 a etc.) attached to the photographs indicate the snow layers of which the designations are given in the photograph of Fig. 1.