



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	積雪の Liquid Permeability について
Author(s)	黒岩, 大助; KUROIWA, Daisuke
Citation	低温科学. 物理篇, 26, 29-52
Issue Date	1969-03-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18077">https://hdl.handle.net/2115/18077</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	26_p29-52.pdf



## 積雪の Liquid Permeability\*

黒岩大助

(低温科学研究所 物理部門)

(昭和43年10月受理)

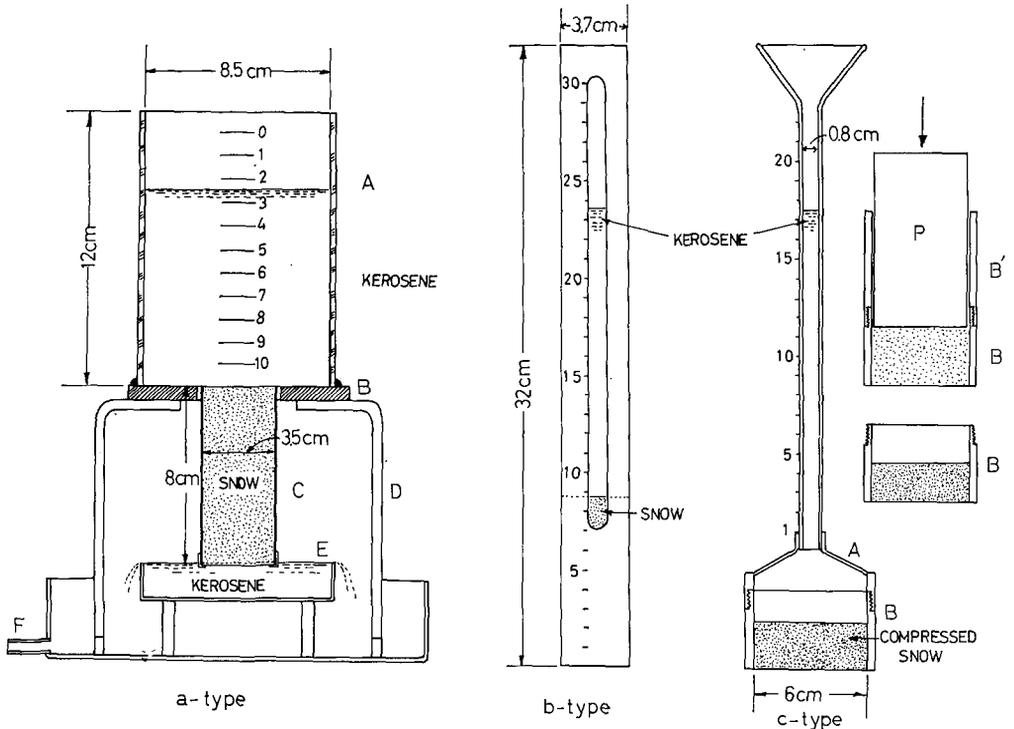
### I. ま え が き

雪のなかを空気が通過するときにおける抵抗、すなわち通気抵抗、またはその逆数としての通気度 (Air Permeability) は、積雪地方では雪の下の植生などと関連して重要な問題の一つである。また、グリーンランドなどの極地では氷冠内部の積雪層を通して冷たい空気をポンプで吸い上げ、発電機その他の熱機関を冷却し、同時に暖房に利用することが試みられている。このような実用上の要請から積雪の通気度は古くから、Bader その他の人々<sup>1)</sup> (1939)、石田・清水<sup>2)</sup> (1955)、Bender<sup>3)</sup> (1957) など多くの人々によって測定されてきた。しかし積雪の液体の流れに対する抵抗、すなわち“Liquid Permeability”はほとんど測定されていない。春先になって融雪水が積雪層のなかを浸透し、どのように移動してゆくかは融雪機構を知るうえにもっとも重要な問題の一つである。積雪の融雪水に対する抵抗、またはその逆数としての透水係数を測定しようとする、理想的には完全に 0°C に保たれた雪に 0°C の水を通さなければならない。雪と水との間にわずかでも温度差があると凍結または融解がおこって測定中に雪の構造が変化してしまうおそれがある。しかし、現実には、融雪水は積雪の構造を変えながら浸透、移動する。それはそれで甚だ興味ある問題の一つであるが、積雪の透水係数として再現性のある値をうることは困難であろう。雪や水、または装置全体を完全に熱的平衡に保って実験を行なうということはかんたんなようで実はかなり厄介な問題の一つである。それでわれわれは、水の代りに雪と同じ温度に予冷したケロシンを使うことにし、ケロシンの流れに対する Permeability を測定してみた。ケロシンに対する Permeability がわかれば、その値から積雪の水に対する透水係数を“推定”することは可能になるであろう。ケロシンは氷をほとんどかさないから測定中に雪の構造組織を変えることはないと考えられる。したがってケロシン Permeability は積雪の空隙構造を知るうえに一つの重要な手がかりを与えることになる。

### II. 測定装置

第1図は試作した3種類のケロシン Permeameter の略図を示す。測定原理は、土壌工学でよく使用されている変水位透水計と同じである。定水位透水計の原理を採用しなかった主な理由は、変水位の方が野外測定の場合、装置が単純化しやすいと考えたからである。この図で

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第936号



第1図 試作した3種類のケロシン Permeameter

a: 低密度用 b: 中密度用 c: 高密度用

a, b, c はそれぞれ低密度 ( $0.15 \sim 0.35 \text{ g/cm}^3$ ), 中密度 ( $0.35 \sim 0.45 \text{ g/cm}^3$ ), 高密度 ( $0.45 \text{ g/cm}^3$  以上) の積雪の Permeability (以下これをたんに  $k$  とかく) を測定するために設計されたものである。もっとも、この密度の適用範囲はそう厳密なものではない。自然の積雪ならば大抵 a の装置で十分間に合うし、実験室で人工的に圧密した高密度の雪の  $k$  を測定しようとするとき c が便利である。

まず、低密度用の a-型について説明する。A は内径 8.5 cm, 高さ 12 cm のガラス製のメスシリンダーでその表面には 1 mm 間隔で目盛がきざんである。このシリンダーは、厚い真鍮板の板 B に、ケロシンをとかさなない接着剤でつよく接着されている。C はサンプラーを兼ねた試料保持のためのステンレス製の円筒で、直径は 3.5 cm, 長さは 8 cm である。C を自然の積雪層に挿入し、雪の組織を乱さないように静かに切り取る。目方を測ってみかけ密度を測定し、円筒の一端を B にネジこむ。円筒の他の端には、C を B にとりつけたとき、中の試料が抜け落ちないように大きな孔のあるキャップをはめこんでおく。C を B にとりつけ装置全体を D の上に乗せると、C の先端が丁度約 1 mm だけケロシンを満した受皿 E のケロシンのなかに浸るように設計されている。こうしてシリンダー A のなかに予め雪と同じ温度に冷しておいたケロシンを静かに注ぎこむ。ケロシンは C のなかの雪の試料を通過して受皿 E から溢流する。溢れ出たケロシンは F から外に排出される。

いま、シリンダー A の断面積を  $A' \text{ cm}^2$ 、試料のそれを  $A \text{ cm}^2$  としよう。ケロシンが流れ始めると受皿 E のケロシンのレベルを基準として測ったシリンダー A のなかのケロシンの head  $H(\text{cm})$  は、時間と共に減少してゆくから、A のなかを流れるケロシンの流量  $Q'(\text{cc/sec})$  は

$$Q' = -\frac{dH}{dt} A' \quad (1)$$

で与えられる。ところでシリンダー C のなかの試料を通して流れるケロシンの流量  $Q(\text{cc/sec})$  は、よく知られたダルシーの法則がなりたつとすれば

$$Q = kiA \quad (2)$$

によって与えられる。ここに  $k$  は雪の Permeability,  $i$  は試料にかかるケロシンの動水勾配で試料の長さを  $L(\text{cm})$  とすれば

$$i = \frac{H}{L} \quad (3)$$

である。連続の条件により  $Q=Q'$  であるから

$$-\frac{dH}{dt} A' = k \frac{H}{L} A \quad (4)$$

がなりたつ。いま、シリンダー A のなかでケロシンの head が  $H_1 \rightarrow H_2$  まで落ちるに要する時間を  $\Delta t$  として(4)式を積分すると

$$-A' \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H} = k \frac{A}{L} \int_0^{\Delta t} dt, \quad k = 2.3 \frac{LA'}{\Delta t A} \log_{10} \frac{H_1}{H_2} \quad (5)$$

となる。 $A', A, L$  は一定であるからケロシンの head が  $H_1 \rightarrow H_2$  に減るまでの時間  $\Delta t$  を測定すれば  $k$  が算出できることになる。 $k$  の [元] は  $\text{cm/sec}$  である。

**b-型**は、**a-型**にくらべると簡単で、長さ 32 cm、内径 3.7 cm、厚さ 0.6 mm の真鍮の円筒である。円筒にはケロシン head の下りを測定するために幅 1 cm、長さ 20 cm の窓が軸方向にあってある。勿論、窓の内側には透明なプラスチックのうすい板がはりつけてあってケロシンはこぼれることはない。この円筒の下部を積雪に挿入し、適当な長さの試料を切りとる。これを垂直に予めケロシンを満した受皿に立て、円筒の下端が約 1 mm ぐらい基準面のケロシンのなかに浸るようにする。つぎに円筒の上端から予冷したケロシンを注ぎ、窓を通してケロシンのレベルが一定の距離を降下するに要する時間をストップウォッチで測定する。

**c-型**は、自然積雪の  $k$  の測定用として設計したものではなく、実験室のなかで人工的に圧密した高密度の雪の  $k$  を測定するために設計されたものである。試料は円筒 B のなかで圧密され、とり出さないでそのまま Permeability が測定可能である。くわしい測定は 5) 節でべる。

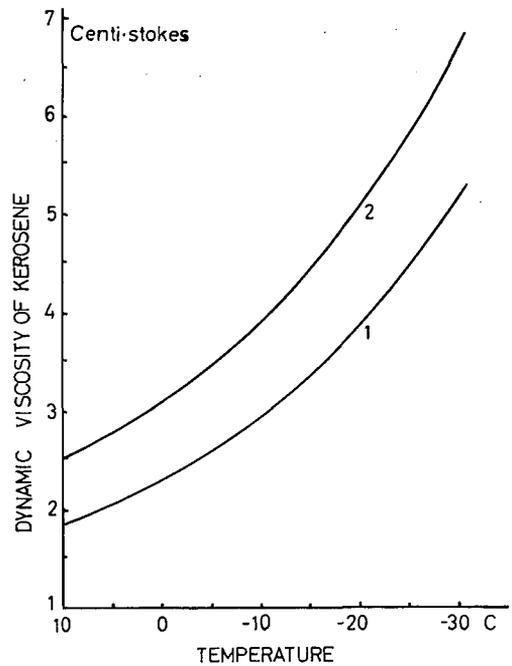
以上 3 種類の permeameter をみて気をつくことは、最初にケロシンを注入するシリンダーの断面積  $A'$  と、試料の断面積  $A$  との比が、**a-型**では  $A'/A > 1$ 、**b-型**では  $A'/A = 1$ 、**c-型**では  $A'/A < 1$  になっている点である。これは、ケロシンのレベルの降下速度を適当におそくして、

ストップウォッチで  $\Delta t$  を精度よく測定できるようにするためである。

つぎに  $k$  の測定値に対するケロシンの温度補正についてのべよう。Permeability は一般に試料を通して流れる流体の動的粘度に逆比例する。流体の粘度は温度によって大きく変るから野外のいろいろな温度で測定した値を比較するときは、一定温度の値に換算しておくと便利である。このときは、 $k$  に換算すべき温度と測定時の温度とにおけるケロシンの粘度の比をかければよい。

第2図は昭和35年度版の東洋経済新報社発行の無機、有機工業材料便覧からぬき出したケロシンの粘度の温度特性を示す。ケロシンは一般に複雑な炭化水素の化合物であり粘度の測定値も成分比によっていろいろに変る。図において曲線1及び2は夫々通常の灯油の粘度の温度変化の上限と下限を示すもの

である。われわれの使用したケロシンは市販の灯油であったから、曲線2の温度変化をするものと考えられるもので、以下測定値の換算には曲線2の特性を使用することにした。



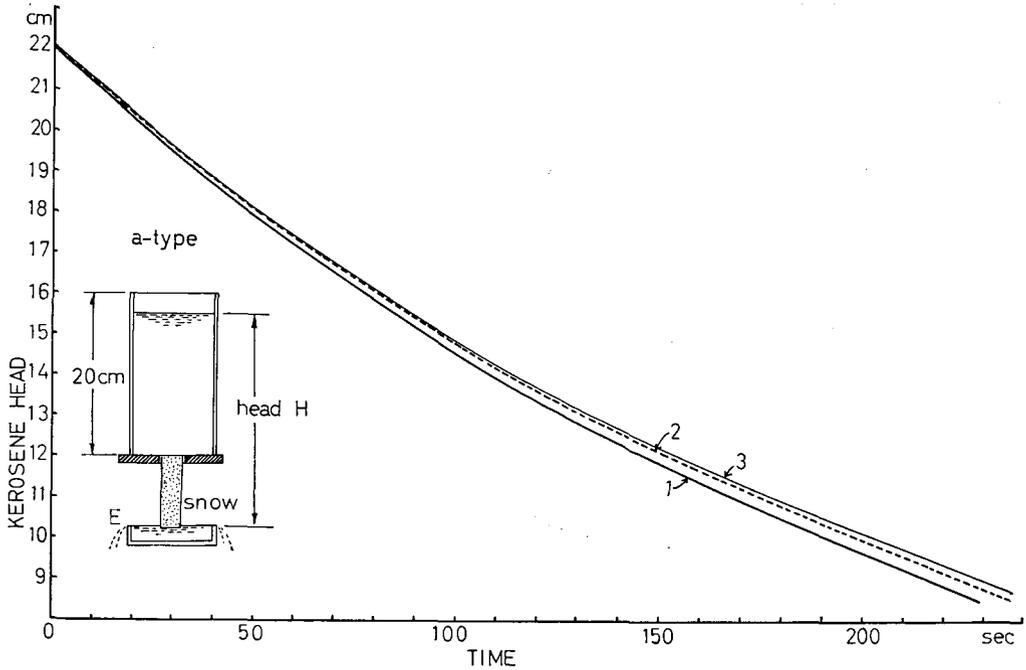
第2図 ケロシンの粘性係数の温度特性

### III. 実験結果

#### 1) ダルシーの法則の適用性と測定値の再現性

試作された3つの Permeameter は、何れも変水位透水計の原理によることはさきにも述べた。したがって測定中試料にかかるケロシンの head は時間と共に刻々に変ってゆく。この方式では雪のなかのケロシンの流れは“ダルシーの法則”に従うということが仮定されている。ダルシーの法則は(2)式に示すごとく、動水勾配  $i$  によって  $k$  は変らないことを仮定している。われわれの装置では雪にかかるケロシンの head は時間と共に変化してゆくので、もし雪の  $k$  が  $i$  によって変化するものとすればもはやダルシーの法則はなりたたなくなる。この点は一応検討しておく必要があるであろう。 $k$  は(5)式で与えられるから、積雪がダルシーの法則を満足しておれば、 $k$  は  $\log_{10} H_1/H_2$  及び  $\Delta t$  の値の如何にかかわらず一定であるべきである。そこでまずこの点をたしかめてみた。

このテストには a-型の Permeameter を使用した。試料にかかる動水勾配  $i$  をなるべく大きく変化させるためシリンダー A はとくに長さ 20 cm のものを使用した。したがって試料にかかるケロシンの head は最大、22 cm から最低 9 cm に変った。試料は密度  $0.35 \text{ g/cm}^3$  の粒子の細かいかたしまり雪を使用した。第3図の曲線1はシリンダー A にケロシンを一ぱい注



第3図 ケロシン head 時間的变化

いだ直後から、その head (受皿 E の基準面から測る) が時間と共にどのように降下してゆくかを示したものである。測定温度は  $-6^{\circ}\text{C}$  であった。head の減少速度は最初は大きい時間がたつと共に小さくなってゆく。シリンダー A のなかのケロシンのレベルが 5 cm の距離を降下するのに必要とする時間  $\Delta t$  をこのカーブから任意の  $H_1, H_2$  について求め  $k$  を算出し比較してみよう。すなわち  $H_1=20.9\text{ cm}$  から  $H_2=15.9\text{ cm}$  に降下するのに必要な時間  $\Delta t$  は 67 sec,  $H_1/H_2=1.32$  であり、これから  $k$  を算出すると  $k=0.272$  となる。このあとケロシンが  $H_1=14.9\text{ cm}$  から  $H_2=9.9\text{ cm}$  に降下するに要した時間は  $\Delta t=99\text{ sec}$  である。この場合は  $H_1/H_2=1.5$  であるから  $k=0.276$  となる。このはじめの測定値とあとの測定値とでは明らかに試料にかかる動水勾配は異なっているが、えられた  $k$  の値はほとんど相等しい。カーブの中間の  $H_1 \rightarrow H_2$  のいろいろな値についての測定値も同様である。このことからわれわれの装置ではダルシーの法則がほぼ満足されているといえよう。

ところで第3図の点線2は、第1回の測定の後、再びケロシンを満して同じ試料について head の時間的变化を測定したものである。点線は実線と重ならないでわずかに右にずれている。曲線3、は同じ試料に対する第3回目の head-時間曲線である。このあと同じテストを数回くり返したが、その後の head の時間的变化曲線はほとんど全部、曲線3、と重なって大きなズレはみられなかった。このことは、雪からサンプルを切りとって Permeability の測定をくりかえすと、第1回目または第2回目の値とそれ以後の値とでは測定値に多少のくいちがいがでることを意味する。

そこでこの点をはっきりさせるために、いろいろな雪質と密度の試料について測定をくりかえした場合の  $k$  の値の再現性を検討してみた。まず、シリンダー A にそそぐケロシンの量を一定にして (つまり試料にかかるケロシンの head を一定にして)、ケロシンのレベルが  $H=13.9$  cm から  $H_2=8.9$  cm に降下するに必要な時間  $\Delta t$  を雪質と密度の異なるいろいろな雪についてそれぞれ 7~8 回くりかえし測定した値を第 1 表に示す。たとえば密度  $\rho=0.227$  の粒子の細かいしまりゆきについて 8 回テストをくりかえすと、 $\Delta t$  の値は初めの 1, 2 回の値が小さいが 3 回目以後は大体一定値におちつく。3 回目から 8 回目までの 6 回の平均値は 51.2 sec である。この値をつかって算出した  $k$  の値は 0.58 である。第 1 回目と第 2 回目の  $\Delta t$  の値は 3 回目以後の  $\Delta t$  の平均値に比べると約 5 sec ほど短い。 $\Delta t=45$  sec として  $k$  を算出すると 0.65 となって第 3 回目以後の値に比べて約 10% 大きい。次に密度  $\rho=0.357$  のしまり雪の場合も同じような傾向があって、初めの 1, 2 回のテストでの  $\Delta t$  の値は、第 3 回目以後の値の平均値 114.1 sec に比べると数秒短い。3 回目以後の平均値  $\Delta t=114.1$  sec をつかって  $k$  を算出すると 0.26 となる。しかし、大粒子のザラメ雪については、 $\Delta t$  の値ははじめからほとんど同じでしまり雪のような変化はみられなかった。7 回くりかえしたテストの  $\Delta t$  の平均値から算出した  $k$  の値は密度 0.395 のザラメ雪に対しては 2.11 であり、密度 0.492 のザラメ雪に対しては 1.92 であった。なぜ粒の細かいしまり雪の場合に、初めの 1, 2 回目の  $\Delta t$  の値が 3 回目以後の値よりも短かく測定されたかという点については次のような 2 つの理由が考えられる。その一つはステンレス製のサンプラーを雪のなかに挿入して試料を切り出すとき、試料の表面には小さな氷のカケラや切屑が付着していてケロシンが流れはじめると、このような小さな氷のカケラや切屑はケロシンとともに流されてゆき、そのあるものは氷の粒子と粒子との間のせまい空隙を埋めたり別の場所に移動してひっかかったりすることがありうる。しかしケロシンをくり返し流すと 2~3 回目あたりから、これらの切屑は落ちつくべきところに落ちついてその後は移動しないものと考えられる。大粒子のザラメ雪をサンプリングした場合にも当然小さな氷のカケラができ

第 1 表 ケロシン head が  $H_1=13.9$  cm から  $H_2=8.9$  cm に降下するのに必要な時間  $\Delta t$  の変化

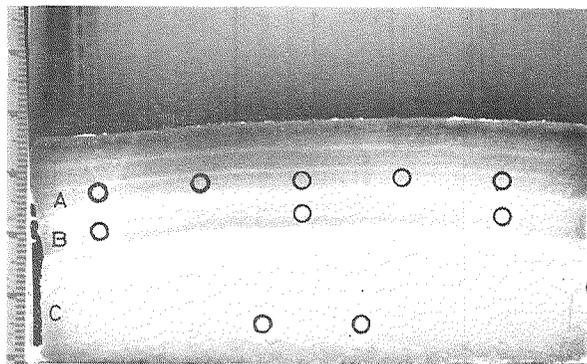
No. of test	Fine grained snow		Coarse grained snow	
	$\rho=0.227$	$\rho=0.357$	$\rho=0.395$	$\rho=0.492$
1	45.0 sec	101.2 sec	13.5 sec	15.0 sec
2	45.8	110.1	14.0	15.0
3	49.2	114.0	14.0	16.0
4	49.0	114.5	14.8	15.7
5	49.2	113.6	14.0	16.0
6	50.0	114.5	13.8	15.3
7	49.5	114.2	14.0	15.5
8	50.2			
$k$	0.58	0.26	2.11	1.92

るはずであるが、ザラメ雪の場合は密度が大きい割には空隙が大きいので氷のカケラはケロシンと共に流出し、途中の空隙にひっかかったり、または空隙を埋めて抵抗を増すということがないものと考えられる。したがって初めから  $\Delta t$  はほとんど同じであると考えられる。第2の理由としては次のようなことが考えられる。ケロシンの温度は予め雪と同じ温度に予冷してあるが、測定中に温度が変わることもありうる。もしケロシンの温度に  $\pm 1^\circ\text{C}$  の変化があったとすると、 $\Delta t$  の値は大ざっぱに言って  $\pm 3\sim 4\%$  の差が生ずるのであろう。もし、第1表の  $\Delta t$  の変化がケロシンの温度変化によるものとすれば  $\Delta t$  は増えることもあれば減ることもありうる筈である。しかし、われわれの測定では、 $\Delta t$  の値は第1回目と第2回目の値が“常に”第3回目以後の値に比べて小さく観測されたのである。したがって、第2の理由はケロシンに急激な温度変化をあたえない限りあまり影響はない。それで、われわれの実験では、すべて同一試料について少なくとも7~8回テストをくりかえし、第1回目及び2回目の値を除き、第3回目以後の  $\Delta t$  の平均値をつかって  $k$  を算出することにした。

## 2) 自然積雪層における水平方向の Permeability と粒子構造

自然の積雪には明瞭な成層構造がみられることはよく知られている。一つの縞と縞との間隔、又は層と層との間の厚さはほぼ1回の降雪量をあらわすと考えられる。層の厚さが一定で水平に一様に広がっている層は大体均質で密度の水平分布を測ると大体一定の値がえられる。ところがみかけ密度は一定であっても他の物理的性質、たとえば破壊強度などは、同一層内でもかなりバラつくことが多い。これは積雪は一見均質にみえても、その粒子の形やその空間的つながりかたによって物理的性質がひどく異なるためである。同じような物理量の構造依存性はケロシン Permeability,  $k$  についてもいえるであろう。

そこで、まず、自然積雪層について水平方向の Permeability—以下これを  $k_h$  とかく—の水平分布、その雪質によるちがいを調べてみよう。第4図は典型的な自然積雪の成層構造を示す。この試料は新潟県長岡市の科学技術庁雪害実験所の  $-15^\circ\text{C}$  の低温室に約1カ月保存してあった自然積雪である。積雪の厚さは35~40 cm で上半分はしまり雪、下半分はザラメ雪である。試料をたてにうすく切って背後から電灯で照明すると、写真のように成層構造がみられる。上半分のしまり雪にみられる層は水平でなく僅かに



第4図 自然積雪の層構造 (長岡), ○印はサンプリングの位置を示す

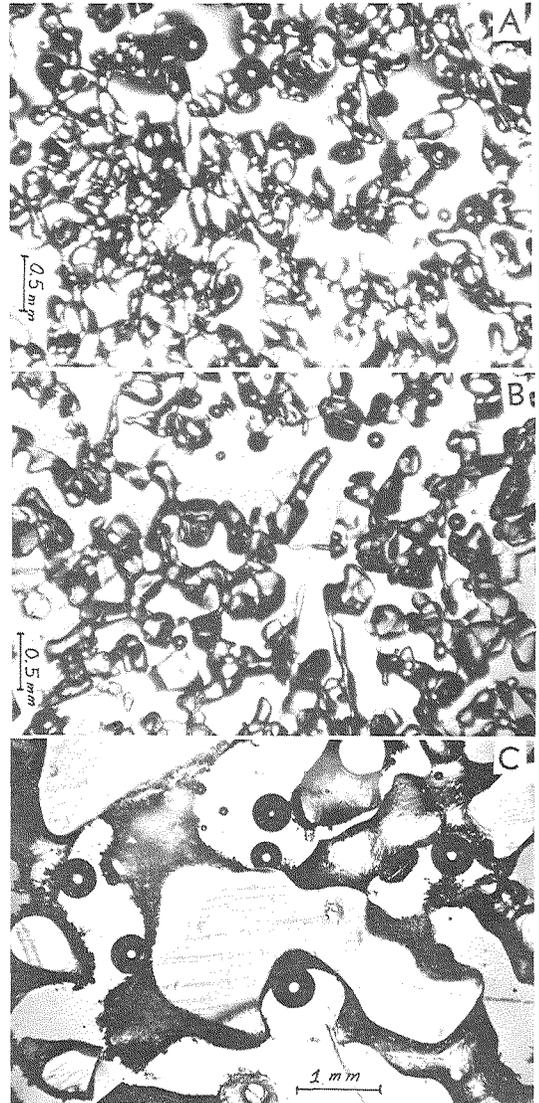
カーブしているが、これは、もと積っていた地面が平らでなかったためと考えられる。しまり雪のなかから代表的な2つの層を選び、これに **A**, **B** と名前をつけ、ザラメ雪を **C** としよう。**A** 層にそって左の端から15~17 cm の間隔で5カ所、**B** 層にそって約30 cm の間隔で3カ所、

第2表 積雪層に沿って測った  $k_h$  の水平分布

A-layer... $k_h$ (cm/sec)	0.692	0.650	0.615	0.590	0.526	ave=0.615
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.227	0.232	0.236	0.236	0.239	ave=0.234
B-layer... $k_h$ (cm/sec)	1.39	1.18	1.17	ave=1.27		
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.234	0.241	0.241	ave=0.238		
C-layer... $k_h$ (cm/sec)	2.05	2.11	ave=2.08			
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.395	0.395	ave=0.395			

C層では代表的な2カ所をえらんで水平方向にサンプリングし、その各々の層について  $k_h$  及び密度を測定したのが第2表である。層に沿ってつけた丸印はサンプリングの位置を示す。この表にみられるように、A層の  $k_h$  の値は、左から右にむかって僅かであるが減少している。これと反対に密度の測定値は左から右にむかって増加している。同様な傾向がB層の  $k_h$  及び密度についてもみられる。 $k_h$  の減少と密度の増加が系統的である点から判断して、これは多分雪のつもりかたに原因があるものと考えられる。ところで、A層とB層との  $k_h$  の平均値を比べてみると、密度はほとんど等しいのにA層の値はB層の値の約1/2である。また、A層の  $k_h$  の値を密度の大きいC層のザラメ雪の  $k_h$  に比べるとその約1/3である。常識的には密度が大きくなれば空隙率が小さくなってケロシンの流れに対する抵抗がふえ、 $k$  の値は小さくなると考えられるが、 $k$  の値は必ずしもみかけ密度によらないことを暗示する。

第5図、A、B、Cはそれぞれ、A層、B層、C層から試料を切り取り、アエリン法でつくった薄片の顕微鏡写真である。A層とB層とはみかけ密度の等しいしまり雪ではあるが、粒度が異なっていることがわかる。更にC層のザラメ雪にいたってはその粒径は、A、B両層に比べてはるか



第5図 第4図の積雪層 A、B、C の層構造を示す薄片写真

に大きい。この顕微鏡写真と第2表の測定結果とから、密度が同じでも粒度がちがえば  $k$  の値が非常に異なるということがわかるであろう。

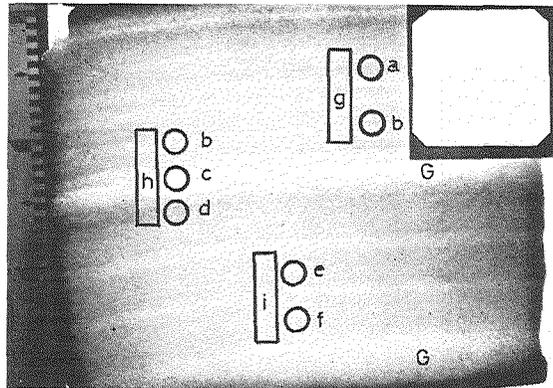
3) 自然積雪層の水平及び垂直方向の Permeability

積雪は層構造をしているから、表面でとけた融雪水は決して一様には浸透しない。積雪が Liquid Permeability をそれぞれ異なる多層構造からなりたつとき、それらを垂直に貫いて上から下に流れるケロシンの流れに対する合成されたみかけの Permeability  $K_{eff}$  は

$$\frac{H}{K_{eff}} = \frac{h_1}{k_1} + \frac{h_2}{k_2} + \frac{h_3}{k_3} + \dots \quad (6)$$

で与えられる。ここに  $k_1, k_2, k_3, \dots$  及び  $h_1, h_2, h_3, \dots$  は各層の Permeability 及び厚さである。 $H$  は全積雪深で  $H=h_1+h_2+h_3, \dots$  である。この関係は一つの層の  $k$  は一定であるとして簡単に求められる。(6) 式の関係が自然の積雪層に対してどの程度になりたっているかを調べてみよう。

第6図は自然積雪の成層構造を示す。一見して均質な水平に走るいくつかの層がみえる。これらの層のなかで **G** と印した層がザラメ雪である他は、すべて粒子の細かいしまり雪である。これらの層に上から順に **a, b, c, d, e, f**, と名前をつけ、それぞれ水平方向にサンプリングして  $k_h$  と密度とを測定する。次にサンプラーを **a** 層と **b** 層を垂直につらぬくように挿入し、サンプル **g** を切り取る。



第6図 自然積雪の層構造 **a, b, c, …f** は水平サンプリング, **g, h, i** は垂直サンプリング

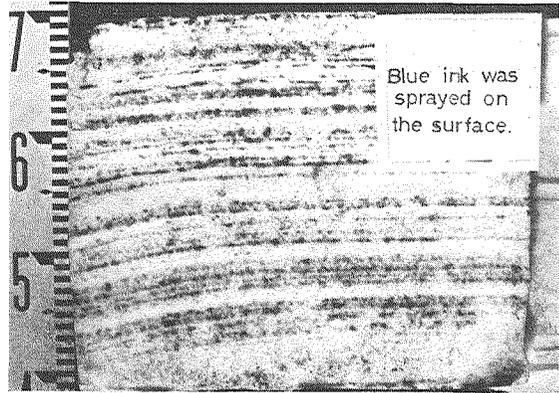
また、**b** 層、**c** 層、**d** 層を垂直につらぬくようにサンプラーを挿入してサンプル **h** を、**e** 層と **f** 層とを貫ぬいてサンプル **i** を切り取る。このようにして垂直方向に切ったサンプルの Permeability  $k_{eff}$  とみかけ密度とを実測し(6) 式の関係がなりたつかどうかを調べた。結果は第3

第3表 水平方向の permeability  $k_h$  と垂直方向の permeability  $k_{eff}$  との関係

Sample	Density	$k_h$	Snow Grain	Sample	Density	$k_{eff}$ (observed)	$k_{eff}$ (calculated)	
<b>a</b>	0.225	0.587	fine	} <b>g</b> ……………	0.225	0.478	0.612	
<b>b</b>	0.216	0.635	fine		} <b>h</b> ……………	0.236	0.490	0.597
<b>c</b>	0.236	1.44	coarse	} <b>i</b> ……………		0.238	0.468	0.587
<b>d</b>	0.234	0.460	fine					
<b>e</b>	0.243	0.530	fine					
<b>f</b>	0.232	0.656	fine					

表に示す。この表のなかで垂直に切りとったサンプルの全長  $H$  はそれぞれ  $H=8\text{ cm}$  であるが、切り取られた各層の厚さは次の通りである。

サンプル <b>g</b>	{	a 層の厚さ 4 cm
		b 層の厚さ 4 cm
サンプル <b>h</b>	{	b 層の厚さ 3 cm
		c 層の厚さ 2 cm
		d 層の厚さ 3 cm
サンプル <b>i</b>	{	e 層の厚さ 4 cm
		f 層の厚さ 4 cm

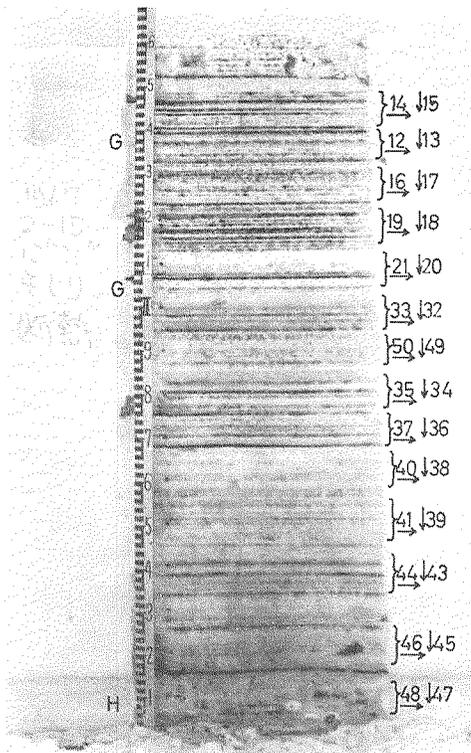


第7図 第6図の雪にインキをかけ層構造を明示したもの

第3表にみられるごとく、垂直サンプル **g**, **h**, **i** の Permeability を (6) 式によって計算した値は、その実測値と一致していない。この主な理由は積雪層の不均質構造にもとづくものと考えられる。

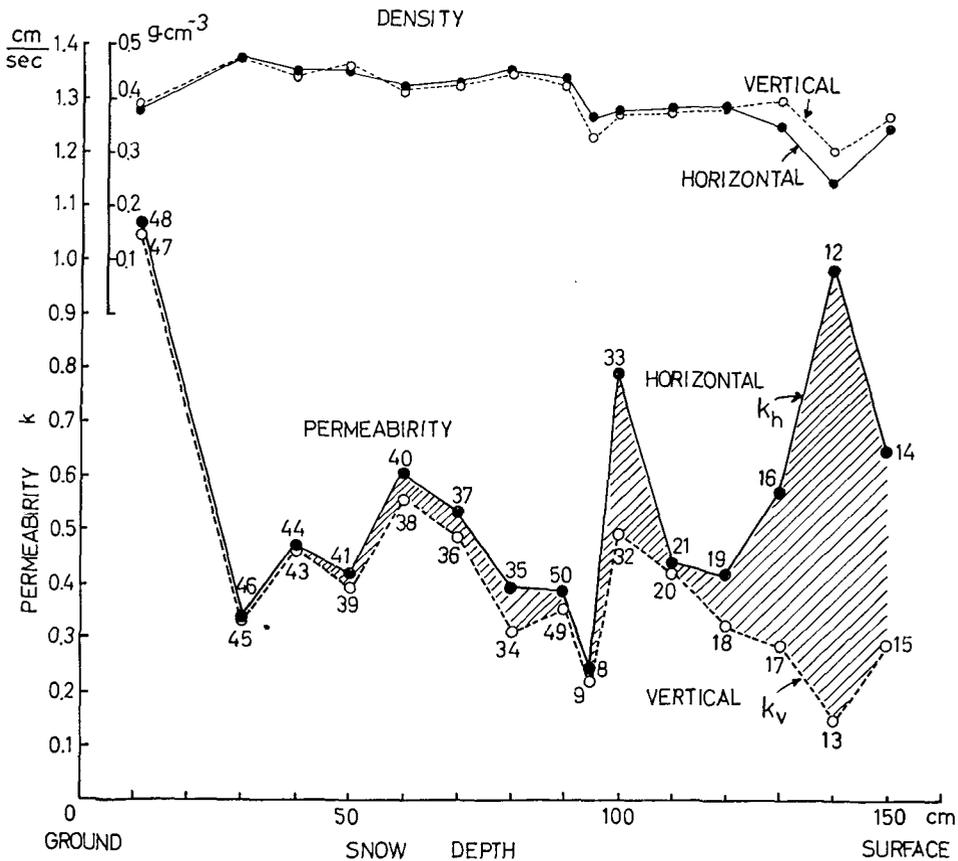
第7図は、第6図の雪にインキを吹きつけトーチランプであぶって成層構造をよりくわしく

示したものである。インキをかけないまえには一見均質にみえていた **a**, **b**, **c**, ... **f** の層のなかにも第7図にみられるごとく、より微細な層構造があることがわかる。したがってわれわれがさきに直径 3.5 cm のサンプラーで各層から水平に切り取って測定した  $k_h$  の値は決して均質な試料の値ではなく、更にいくつかの細かい層の平均の値を示すものであることがわかる。すなわち、一つの層のなかでも水平方向と垂直方向の Permeability は異なるであろう。それ故、**a**, **b**, **c**, ... の各層をそれぞれ均質とみなして計算した  $K_{eff}$  の値がその実測値と一致しなかったのは当然であるといえる。このように自然積雪は外見上均質にみえる層であっても、意外に微細な層構造からなりたっていて不均質である。したがって積雪層から一定の大きさの試料を切り取ってある物理量を測定する場合、その物理量がとくに構造敏感な量であるときは、とくに“均質”の定義を明確にしておく必要がある。



第8図 北母子里，北大演習林構内の積雪，数字はサンプルの番号，矢印は水平及び垂直方向のサンプリングを示す

第8図は1967年2月14日の北海道北母子里の北大演習林事務所構内の積雪の断面を示す写真である。この雪について地上から約150 cmの高さまで、その代表的な層を直径3.5 cm、長さ8 cmのサンプラーで水平方向と垂直方向にサンプリングしてケロシン Permeability を測定した。第8図で **S** はしまり雪、**G** はざらめ雪、**H** は霜ざらめの層であった。層につけた番号はサンプルの番号で数字のそばにつけた水平及び垂直方向の矢印は、そのサンプルが層に水平または垂直方向にサンプリングされたことを示す。たとえば地上150 cmの高さにある層で No. 14 は水平に、No. 15 は垂直にサンプラーをさしこんで括弧の部分の雪の層をサンプリングしたことをあらわす。第9図に、このようにして測定した水平及び垂直方向の Permeability の値を太い実線と点線で示す。測定したときの温度は  $-9^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$  であったが、この図では第2図のケロシンの粘度の温度特性を考慮し、すべて  $-5^{\circ}\text{C}$  の値に換算した値がプロットされている。横軸は積雪深を示す。各点に附した番号は、第8図の写真の各層のサンプル番号である。また、第9図には水平及び垂直方向のサンプルのみかけ密度が細い実線と点線で示されている。この図をみると、全層にわたってつねに  $k_h > k_v$  がなりたっているが、 $k_h$  と  $k_v$  の差は表



第9図 北大演習林構内の積雪の水平及び垂直方向の Permeability の変化。横軸は積雪深を示す

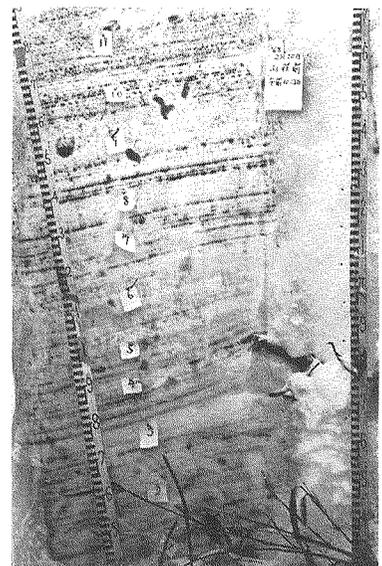
面に近いほど大きく、深くなるにしたがって小さくなってゆくことがわかる。これは多分、積雪は深くなると自重によって圧密されるため、Permeability の値の不均質性がだんだん失われてゆくためであろう。 $k_h$  と  $k_v$  の差の最も大きいのはサンプル No. 12 と No. 13 であるが、これはよく注意してみると地上約 138 cm のところにザラメ層があり、そのザラメ層とすぐうえのしまり雪の層との境界にうすい氷板が入っていたのである。したがって、このうすい氷板を垂直につらぬいてサンプリングされた No. 13 の  $k_v$  の値が No. 12 の  $k_h$  に比べて極端に小さく測定されたものと考えられる。このような境界は上の方から浸透してくる融雪水に対しては“止水面”として作用するであろう。また、第 9 図にみられるごとく、地上 90~100 cm の間にも Permeability の値に急な段落が見出される。(第 8 図の写真でいえば 9~100 cm の間でインクの染りかたが急にちがっている部分である。) ここでもうすいザラメ雪の層がしまり雪の層にはさまれていた。ここではざらめ雪としまり雪との境界には顕著な氷板は観察されなかったが、 $k$  の値の大きな段落が暗示するように、この境界も止水面として作用する可能性がある。 $k$  の値の大きな段落は地面に近い霜ざらめ層 (サンプル No. 47, 48) とそのすぐ上のしまり雪 (サンプル No. 45, 46) との間にも見出される。多分この境界も止水面として作用するであろう。第 9 図をみると密度は表面から地面まで大きな凹凸なしに一樣に増してゆくが、Permeability はところどころ雪質の変化に応じて大きな段落を示しつつ変化してゆく。

#### 4) 高山地帯の積雪の Permeability

平地に積ったいわゆる里雪と、山岳地帯の積雪、いわゆる山雪とは、そのおかれている立地条件や気象条件が大いに異なるため、積雪粒子の変態、ひいては雪質に大きなちがいが生ずるであろう。そこでわれわれは 1968 年 2 月 18 日~24 日の間、北海道湧駒別、教育大学附属の大雪山科学研究所に基地をおいて大雪山における高地積雪を調べた。

##### i) 大雪山科学研究所構内の積雪

大雪山科学研究所は、北海道中央部にそびえる大雪山系の一つ旭岳の中腹、海拔約 1,020 m の湧駒別にある。ここは海岸から遠くはなれているため、厳冬期には雲粒のつかないきれいな雪の結晶がふるところで有名である。第 10 図は研究所の構内の積雪 (1968 年 2 月 20 日) の断面を示す。積雪深は約 190 cm であった。地面に近い層から順次番号をつけ全体を 11 の層に分けた。写真で表面に近い第 11 番目と第 10 番目の層が目視観測でもはっきりと樹枝状結晶の形をとどめていて、まだ十分に変態のすすんでいない新雪の層であった。第 9 番目の層以下がいわゆるしまり雪になっていた。Permeability の測定は、1 つの層から 2 カ所水平方向にサンプリングし  $k_h$  を求め、その平均値をとってその層の Permeability

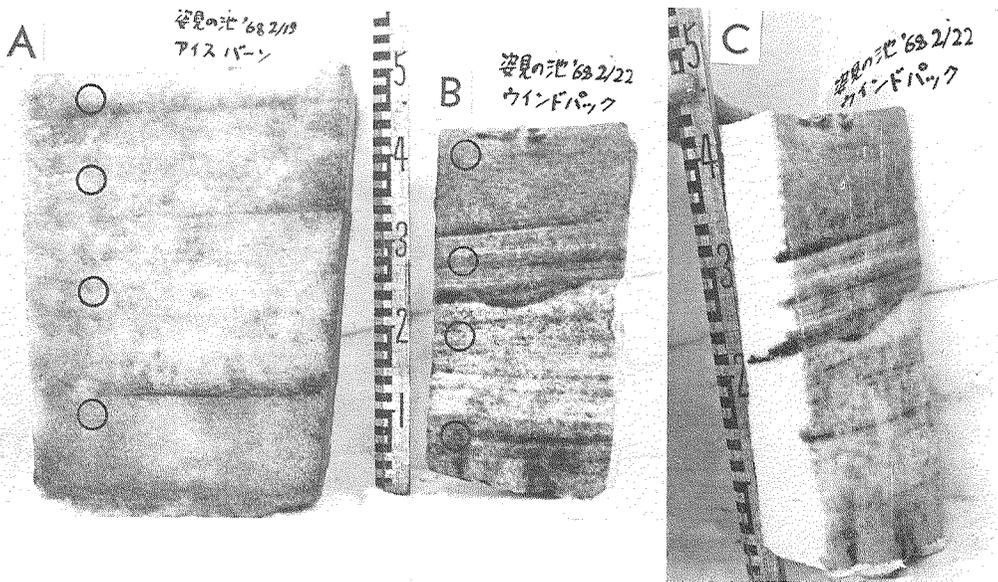


第 10 図 大雪山科学研究所構内の積雪

とみなした。表面に近い第11層と10層とは密度があまりにも小さくてサンプリングできなかつたので除外した。また最下層の0番目の層はほとんど霜ざらめ化しており、サンプラーを挿入すると組織が崩れ、サンプリングすることは不可能であった。測定した各層の  $k$  と  $\rho$  の値は、それぞれ第9層  $k=1.26$  ( $\rho=0.2$ )、第8層  $k=1.44$  ( $\rho=0.25$ )、第7層  $k=1.05$  ( $\rho=0.29$ )、第6層  $k=0.363$  ( $\rho=0.34$ )、第5層  $k=0.437$  ( $\rho=0.38$ )、第4層  $k=0.394$  ( $\rho=0.38$ )、第3層  $k=0.398$  ( $\rho=0.4$ )、第2層  $k=0.335$  ( $\rho=0.42$ )、第1層  $k=0.470$  ( $\rho=0.42$ ) であった。

ii) Wind Packed Snow (風圧雪) とアイスバーン (硬化雪) の Permeability とその内部構造

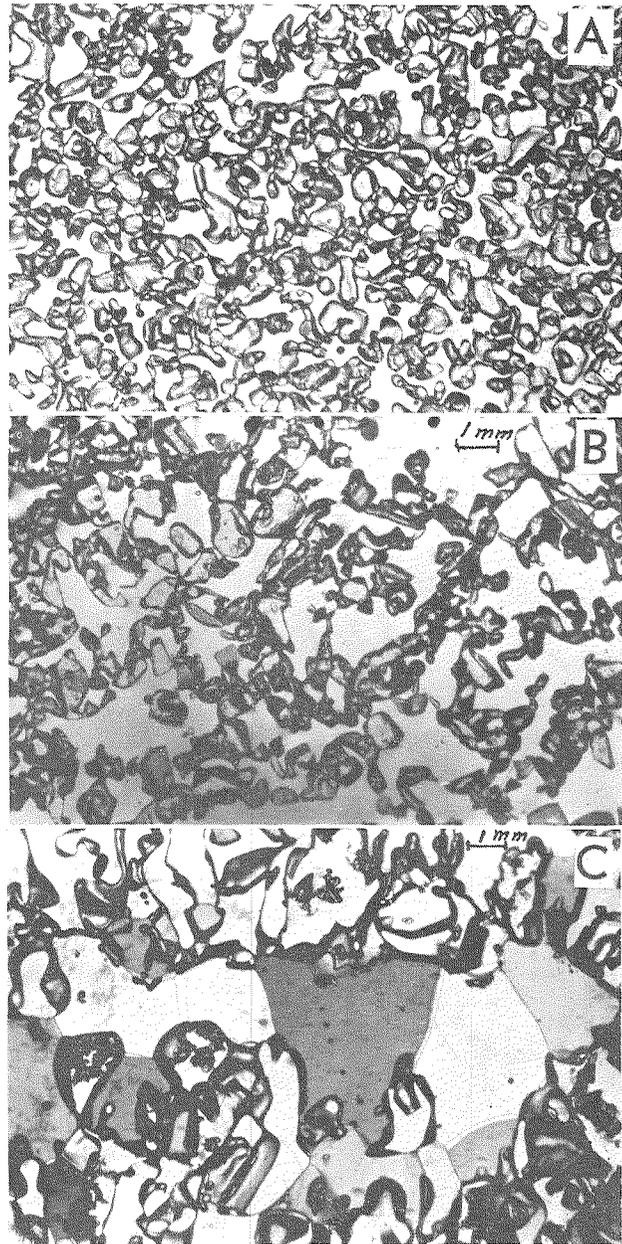
冬期、山岳をスキーで旅行すると、しばしば、いわゆる Wind Packed Snow (風圧雪) といわれる堅雪や、アイスバーンとよばれている硬化雪にでくわすことがある。風圧雪というのは文字から解釈すると風圧によっておしかためられた雪ということになるが、一見して粒子の細かい緻密な組織をもつ風成雪の一種で、しまり雪のカテゴリーに入るものと思われる。表面はしばしば風蝕による漣紋があったり、ときにはサスツルギを形成していることもある。われわれの観測によれば密度は  $0.4\sim 0.5$  で、木下式硬度計によると表面硬度は  $4\sim 5\text{ kg/cm}^2$  で、ときには  $9\text{ kg/cm}^2$  を記録することもあった。しかし、このような緻密で硬い層は大体表面から  $20\text{ cm}$  の深さまででその下の雪は硬度も密度もずっと小さくなっていった。アイスバーン (氷でできた道という意) とよばれている硬化雪は、風圧雪とは一見して異なる堅雪である。表面は比較的なめらかでよく山岳の尾根筋に発達しており、快晴の日に遠望すると日光を反射してキラキラと輝やしていることが多い。密度は大体  $0.5$  前後であるが粒子は風圧雪に比べるとはるかに大きく、また  $2\sim 3\text{ cm}$  毎に氷板をはさんでいた。硬度はすこぶる大きくて  $10\text{ kg/cm}^2$  に達



第11図 大雪山におけるアイスバーン (硬化雪) 及び Wind Packed Snow (風圧雪) の成層構造

することがある。勿論スキーの edge やストックの先端もつきささらないぐらいの堅雪である。くわしい記述は文献<sup>9)</sup>を参照されたい。

第 11 図 (A と B) は大雪山の主峰旭岳 (2,290 m) の 7 合目の姿見池 (1,700 m) 附近に見出された硬化雪と風圧雪から適当な大きさのブロックを切り取りインキで着色して成層構造を示したものである。硬化雪は姿見池をかこむ尾根のやや上方の常に風によって吹きさらされているような場所に発達していた。硬化雪の厚さは約 50 cm、風圧雪の深さは約 170 cm であった。第 11 図でいずれもブロックの上側が表面である。風圧雪をみると、表面から約 20 cm のところに、はっきりとした組織の粗密を示す境界がある。第 11 図 (C) はインキをかけた直後の風圧雪の側面を示すが、インキがこの境界に沿って深く内部に浸入していることがわかる。このあとの測定で示すようにこの境界の上と下とでは、Permeability に大きな差があってここが止水面になりうることをわかる。写真にみられるごとく風圧雪には平行に走る細かい縞模様を観測される。インキに濃く染まっている上半分は、下半分の雪が積ってからその上に積ったものであるが、そのなかにみられる無数の縞は界面の形とは無関係に直線で互に平行である。これは、この場所では、雪が平地におけるように静かに一様に積ったのではなく、劇しい風にもなう飛雪の沈積によって形成されたことを示しているようである。これに反し左側の硬化雪のブロックはインキをかけても風圧雪のようなはっきりした成



第 12 図 大雪山風圧雪 (A 及び B) 及び硬化雪 (C) の薄片の顕微鏡写真

層構造を示す境界がある。このあとの測定で示すようにこの境界の上と下とでは、Permeability に大きな差があってここが止水面になりうることをわかる。写真にみられるごとく風圧雪には平行に走る細かい縞模様を観測される。インキに濃く染まっている上半分は、下半分の雪が積ってからその上に積ったものであるが、そのなかにみられる無数の縞は界面の形とは無関係に直線で互に平行である。これは、この場所では、雪が平地におけるように静かに一様に積ったのではなく、劇しい風にもなう飛雪の沈積によって形成されたことを示しているようである。これに反し左側の硬化雪のブロックはインキをかけても風圧雪のようなはっきりした成

層構造はみられなかった。硬化雪の粒子は風圧雪のそれにくらべてはるかに大きく、ざらめ雪に似た粒子が互に太い氷の橋でつながり、かつ、2~3 cm 毎に表面に平行に走る氷板をはさんでいた。第 12 図は、風圧雪及び硬化雪の組織を示す顕微鏡写真である。A は風圧雪のブロックの中央の境界のすぐ上側のインキに濃く染っている部分の組織、B は境界の下側のインキに染っていない部分の組織である。境界より上側は下側に比べはるかに緻密であることが一目りようぜんである。C はアイスバーン（硬化雪）の薄片の偏光顕微鏡写真で、中央に横に一つ列につながっている比較的大きな氷粒の列は水平に走る氷板の一部である。第 12 図から硬化雪と風圧雪の組織が如何に異なっているかわかるであろう。

第 4 表 風圧雪の  $k_h$  と空隙率との関係

Sample	Depth (cm)	$k_h$	Density	Porosity
1	2	0.132	0.487	0.470
2	14	0.136	0.509	0.445
3	23	0.588	0.343	0.657
4	30	0.314	0.399	0.564

第 4 表及び第 5 表に第 11 図の硬化雪及び風圧雪のブロックについて測定した  $k_h$  及び密度、空隙率の値を示す。試料番号は表面よりそれぞれ適当な深さのところでサンプラーを水平に挿入してサンプリングしたもので、その位置は第 11 図の写真にそれぞれ○印で示した。第 4 表の風圧雪のデータをみると中央の境界をはさんでサンプリングした試料 2 及び 3 の  $k_h$  の値に大きな差があることがわかる。境界から下の部分の Permeability は上の部分のそれに比べてはるかに大きく、Permeability の不連続があるのである。

第 5 表 大雪山アイスバーン（硬化雪）の  $k_h$  と空隙率との関係

Sample	Depth (cm)	$k_h$	Density	Porosity
1	2	0.270	0.487	0.469
2	14	0.128	0.524	0.429
3	25	0.067	0.529	0.424
4	40	0.490	0.395	0.569

このことは第 12 図 A と B の顕微鏡組織からもうなづけよう。また第 5 表にみられるごとく、硬化雪の  $k_h$  の値は、その粒度が平地のざらめ雪に似てすこぶる大きいにもかかわらず、意外に小さい（こころみにこの値を第 2 表に示す平地のざらめ雪の  $k_h$  の値と比べてみよ）。硬化雪の粒度は風圧雪の粒度にくらべてはるかに大きい。しかしその  $k_h$  の値は第 4 表の風圧雪のそれとほとんど同じで非常に小さいのである。この点は高地に形成される硬化雪の一つの特徴として大いに注目されるべきであろう。われわれの観測によれば、大雪山姿見池付近では、硬化雪と風圧雪とのおかれている立地条件や気象条件にそれほど大きな差があるとは思われなかった。立地条件にそんなに大きな差がないのに、なぜ構造がまるで異なる硬化雪や風圧雪が形成されるか、この二つの雪の形成機構の解明は将来の興味ある研究課題の一つであると思われる。

##### 5) 自然積雪の Permeability と空隙率

以上、われわれは平地及び山岳の自然積雪についてケロシン Permeability を測定してきた。雪質は、新雪、しまり雪、ざらめ雪、霜ざらめ、風圧雪、硬化雪などあらゆる種類にわたっている。Liquid Permeability の値は雪質が同じならば大体密度の増大に逆比例して小さく

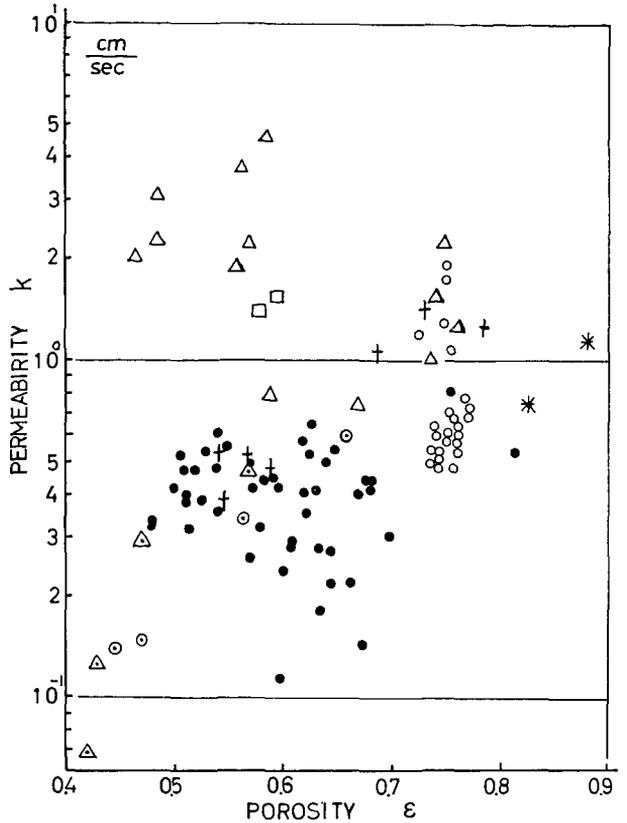
なるが、密度が同じでも雪質が異なると  $k$  の値は大幅に異なることをたびたび注意してきた。同じようなことは通気度についてもなりたち、すでに Bader et al.<sup>1)</sup> (1939), 石田・清水<sup>2)</sup> (1955) によって報告されている。ケロンン Permeability についても同様であることを示すために、これまでに測定した  $k$  の全測定値を地域別、雪質別に区別して空隙率 (空隙率  $\varepsilon = 1 - \rho/\rho_i$ ,  $\rho$  は積雪密度,  $\rho_i$  は純水密度) に対して図示したのが第 13 図である。 $\varepsilon$  の範囲は 0.4~0.9 である。

第 13 図にみられるとおり、\* 印の新雪と □ 印の霜ざらめとは、前者があまりにも密度が小さく、後者はあまりにも粒子の結合力が弱いために、自然のままで組織に何の変化もあたえないでサンプリングすることが困難であったため測定値の数はいたって少ない。● 印と ○ 印及び + 印は測定した場所は異なるがしまり雪をあらわす。高地積雪の風圧雪 (◎ 印) は雪質の点からいけばしまり雪に属する

が、△ 印の硬化雪は粒度の点からいけばザラメ雪のカテゴリーに入るものと思われる。第 13 図をみると、粒度の小さいしまり雪の  $k$  はほとんど 0.1~1.0 の間に分布しているが、粒度の大きいざらめ雪の  $k$  はその大部分が 1~4 の間に分布している。但し、硬化雪 (△ 印) は粒度が大きいにもかかわらずその値は小さく、しまり雪のグループに近いところに分布している。第 13 図をみると自然積雪の Permeability はみかけ密度、換言すれば空隙率だけではきまらないことを示している。

5) 人工的に圧密した雪の Permeability

前節までは平地と高地とにおける自然積雪の Permeability についてのべた。しかし日本における厳冬期の自然積雪の密度はたかだか 0.1~0.5 の範囲である。しかし、南極グリーンランドのような極地では積雪の厚さは数千メートルに達し、密度は深さと共に増大して次第に氷の密度



FINE GRAINED SNOW	COARSE GRAINED SNOW
● Kitamoshiri	△ Nagaoka
○ Nagaoka	□ Depth hoar (Kitamoshiri)
◎ Wind packed snow	△ Hard snow (Mt. Daisetsu)
+ Mt. Daisetsu	

第 13 図 いろいろな雪質の Permeability と空隙率との関係

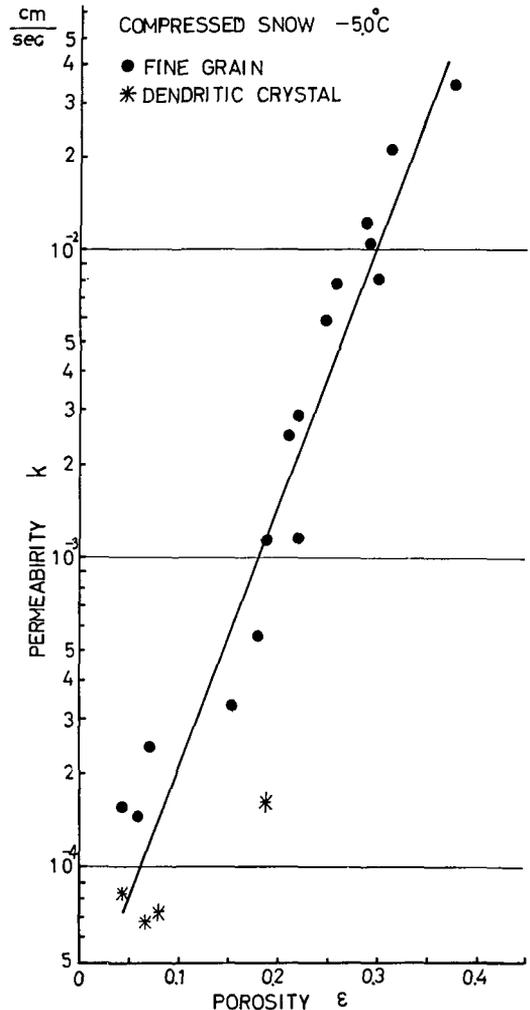
0.917 に近づいてゆくことが知られている。積雪を氷の粒と空気との混合物と考えると、密度が 0.5 以下では、氷の粒が空気のなかに分散した系とみなすことができる。しかし、密度が増して次第に氷のそれに近づいてゆくにつれて立場は逆転し、氷のなかに空気が気泡となって分散する系に移ってゆく。この遷移過程を Permeability の立場からながめるのも興味あることである。積雪の内部の空隙が互に連絡して網目のようにつながっている限り、密度の増大と共に(或いは空隙率の減少と共に)  $k$  の値は小さくなっていても  $k=0$  になることはないであろう。しかし、空隙が球形の気泡となって孤立し、氷のなかに分散しはじめると、みかけ密度が純氷の値よりはるかに小さくても  $k=0$  となりうる。事実、M. Perutz と G. Seligman<sup>4)</sup> (1939) は顕微鏡による観察からアルプスの氷河水では密度が 0.82~0.84 で気泡の孤立化がおこることを見出し、C. Langway<sup>5)</sup> (1958) はグリーンランドの氷河水のなかにふくまれている気泡の内部圧力の測定から、気泡の孤立化は密度 0.828 でおこるであろうと報告した。彼等は顕微鏡観察と同時に通気度を測定したわけではないから、果してこの密度で通気度が 0 になるかどうかはわからないが、氷河学者のなかには気泡の孤立化、すなわち  $k=0$  になるときの密度をもって積雪と氷を区別しようとする考えもあるようである。Bader et al. はグリーンランドの氷冠の積雪の通気度を測定したが、彼等の測定値を密度に対してプロットした曲線を外推して  $k=0$  となる密度を“推定”すると 0.77 という値がえられる<sup>7)</sup>。この値は、前記の顕微鏡による観測からえられた気泡の孤立化のおこる密度に比べるとはるかに小さい。木下<sup>8)</sup> (1962) が積雪を人工的に圧密しつつ薄片をつくって顕微鏡で観察したところによると、密度が 0.78 に達したとき気泡の孤立化がおこったことを報告しているから、密度 0.77 で積雪の通気度が 0 になるということもありうるかもしれない。

われわれはケロンン Permeability  $k$  が 0 になる限界の密度を求める目的で、人工的に圧密した積雪について  $k$  を測定してみたのでその結果についてのべる。自然積雪の  $k$  を測定する場合、われわれは第 1 図の装置 **a-** 又は **b-**型を使用してきた。何れもサンプラーを自然の雪に挿入して試料を切り取るわけであるが、その際、サンプラーの内壁と試料との間に多少のすきまができるのはさけられない。しかし、雪の密度が小さい間は空隙の占める割合が実質部の占める割合よりも大きいのでサンプラーの内壁と試料とのすきまによって導入される Permeability の測定誤差は、サンプラーと試料との接触面積をできるだけ大きくすることによってある程度防ぐことができる。しかし、積雪の密度が大きくなって、Permeability の値が小さくなってゆくと、試料とサンプラーの接触不良にもとづく誤差はだんだん無視できなくなるであろう。それでわれわれは圧密した積雪をサンプラーで切り取って  $k$  を測定するという方法をやめて、第 1 図 **c** の装置を考案したのである。**c** の方法では、サンプラー B (内径 6 cm, 高さ 4 cm, 肉厚 3 mm の丈夫な真鍮の円筒) に既知量の雪をつめる。雪を充填するときは B をかるくタッピングしながら一樣につめる。つぎに B と内径が同じで圧縮用のピストンの案内となる別の円筒 B' を B につなぐ。つぎにピストンを挿入して電動圧縮機で静かに試料を圧密してゆく。われわれの場合圧縮速度は  $-5^{\circ}\text{C} \sim -6^{\circ}\text{C}$  の温度で 5~6 時間で約 1 cm の割合であった。適当な時間圧密してからピストンを抜くと、ここに高密度の雪ができあがる。最初に充填した既知量の

雪がどの厚さまで圧密されたかを測定してみかけ密度を算出する。次に B' を外しビュレット管のついた A を B にネジ込み、装置全体をケロシン受皿に垂直においてから、漏斗から予冷したケロシンをそそぎこむ。ケロシンは B のなかの試料を通過して流れるからビュレット管のなかのケロシンの面が下る。面が一定距離を降下する時間を測定する。この方式では試料は容器 B のなかで圧密され、そのままの状態で  $k$  が測定されるから、試料と B の内壁との接触不良に起因する誤差はほとんど問題にはならないであろう。

第 14 図は  $-5^{\circ}\text{C} \sim -6^{\circ}\text{C}$  の低温室で人工的に圧密した空隙率が 0.5 以下の雪についてケロシン Permeability を測定したものである。●印はしまり雪、\*は樹枝状結晶からなる新雪についてのデータを示す。この図を第 13 図の自然積雪のしまり雪の  $k$ - $\epsilon$  の関係と比べると、自然のしまり雪では空隙率の 0.4~0.9 の変化に対し、 $k$  は  $10^{-1} \sim 1$  の範囲に分散しているが、14 図では空隙率の 0~0.4 の変化に対し  $k$  は  $10^{-1} \sim 10^{-5}$  の広範囲に変化していることがわかる。われわれが電動圧縮機で圧密することのできた最小の空隙率はしまり雪で 0.043 (みかけ密度で 0.878) であったが、それでも  $k$  の測定値は  $1.56 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$  を示しケロシンに対し Permeable であった。まえにグリーンランドの自然積雪では、密度 0.77 (空隙率で  $\epsilon=0.16$ ) で通気度が 0 になることが期待されるとのべた。しかし、われわれの実験では密度 0.878 に達してもなおかつケロシンに対し Permeable であったのである。このことは積雪を通過する流体が空気ではなくてケロシンであるということによるちがいでなく、実験に使用した試料自身の内部構造によるちがいである。

グリーンランドの氷冠の積雪は自重によって圧密されるにすぎない。しかし、それは長期にわたってアンニールされていて内部の空隙は球形の気泡となって完全に氷のなかに孤立していると考えられる。しかし、われわれの試料は圧密してからあまり時間をおかないですぐ測定しているから、大部分の空隙はお互に顕微鏡的な channel (通路) で連絡されていて孤立化は完



第 14 図 人工的に圧密した雪の空隙率と Permeability との関係

全でないと考えらるべきであらう。事実、実験終了と共に試料をとりだして破壊してみると、内部にケロシンがしみわたっていることがわかるのである。しかし、人工的に圧密した試料でも一定温度で十分時間をかけてアンニールすると  $k$  の値は小さくなってゆくであらう。第 14 図で\*印で示した 4 個のデータはふってきたばかりの樹枝状結晶からなる新雪をタッピングしつつ B につめ、圧密した試料について測定したものである。測定値は少ないが圧密した新雪の  $k$  は同じ空隙率のしまり雪のそれよりも一そう小さいことがわかる。これは樹枝状結晶は圧密が進行するとともにその底面を圧縮軸に対し垂直にそろえ始める。したがって樹枝状結晶の複雑な形は比較的単純な形のしまり雪の粒子よりもケロシンの流れに対しはるかに大きな抵抗となるであらう。

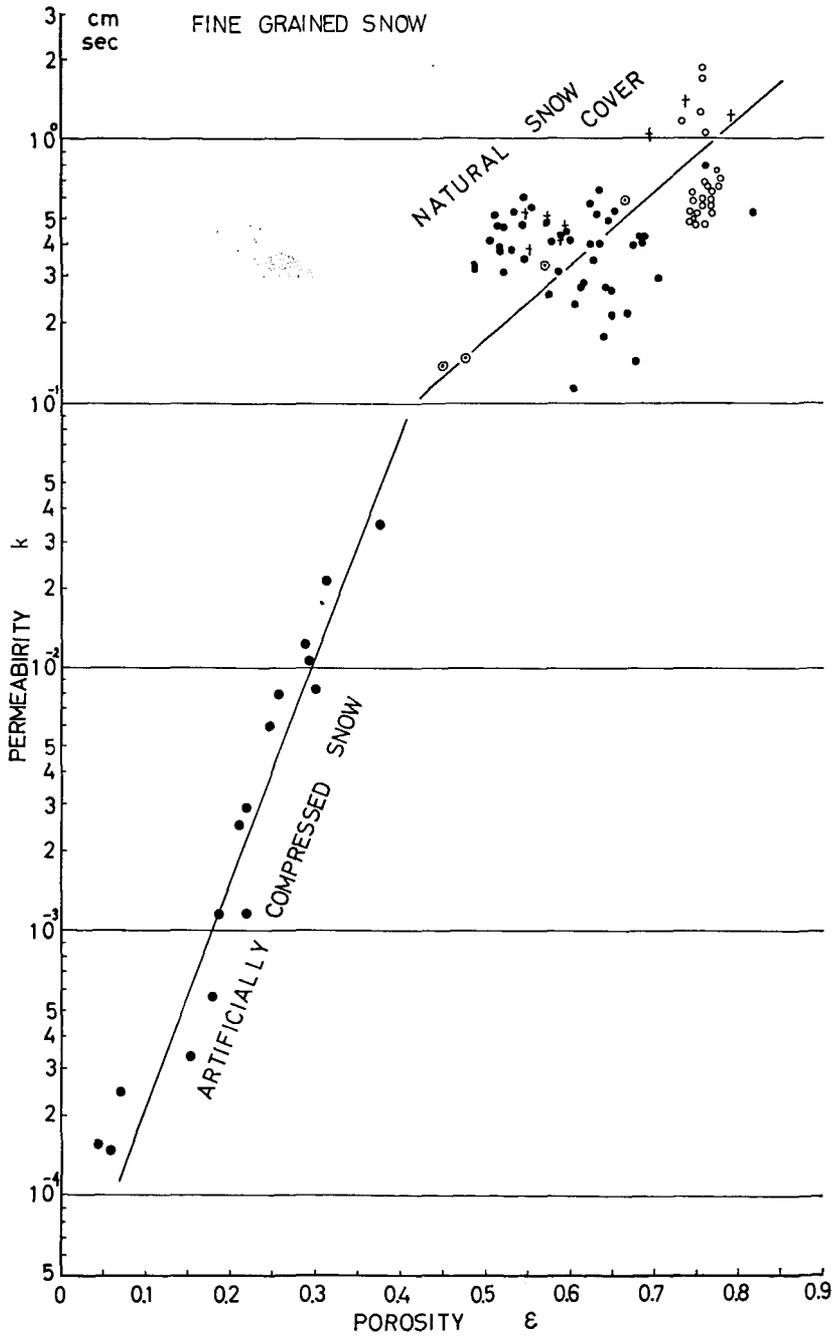
## VI. 討 論

われわれはこれまでの実験で、自然積雪の Permeability  $k$  と密度とはほとんど関係がないことを示した。しかし、雪質が同じならば、密度の増大と共に  $k$  の値が減少する傾向があることも述べた。第 15 図は第 13 図の自然積雪の  $k$ - $\epsilon$  の関係からしまり雪に関するデータだけを取りだし、これに第 14 図の人工的に圧密したしまりゆきの  $k$  のデータをつけ加えて、空隙率の全範囲 0~0.9 にわたって図示したものである。このように広い範囲の空隙率に対し図示してみると空隙率の減少と共に  $k$  の値が如何に減少してゆくかがよくわかるであらう。また、その減少の割合を注意すると空隙率が大体 0.4 附近を境にして急に様子が変ることがわかる。空隙率が 0.4 の雪はみかけ密度でいえば 0.55 である。この値はバラバラにしたしまり雪の粒子を容器に入れ、あまり大きな衝撃をあたえないでタップしながら充填してゆくとき到達しうる限界の密度と大体相等しい<sup>9)</sup>。この密度はしまり雪の粒子がそれ自身変形することなく空間を埋め密に充填されうる限界の値であると考えてよいであらう。この密度以下では空隙の占める割合が粒子の占める割合よりも大きいので粒子のつながりかた、いかえると粒子の空間的配位の自由度が増してゆく。このことが空隙率 0.4~0.9 の範囲で  $k$  の値が大きくバラつき、いろいろな値をとりうる原因となると考えられる。密度がこの限界値をこえた試料を圧密すると粒子は自由にうごけないので、自から塑性変形をおこしつつのこりの空隙をうめてゆくことになる。このことが空隙率が 0.4 以下で  $k$  が  $\epsilon$  に対し指数函数的に減少してゆく原因の一つであると考えられる。いかえると  $\epsilon=0.4$  を境にして圧密の機構が変化することになる。

積雪の Permeability は構造依存性のつよい物理量である。このような構造依存性のつよい物理量を、空隙率のような一個の変数で正確に表現することはむずかしい。Bader et al. (1939) は測定した積雪の通気度  $k$  と空隙率  $\epsilon$  との間には、経験的に次の関係式がなりたつことを見出した。

$$k = \frac{a\epsilon N}{N-\epsilon} \quad (6)$$

ここに、 $a$  及び  $N$  は常数である。(6) 式をみると  $N$  は通気度が無限大になるときの空隙率を意味する。 $a$  は、Bender (1957) が雪やガラス玉、土粒子の通気度と空隙率との関係を解析した



第 15 図 自然しまりゆきと圧密したしまり雪の Permeability と空隙率との関係

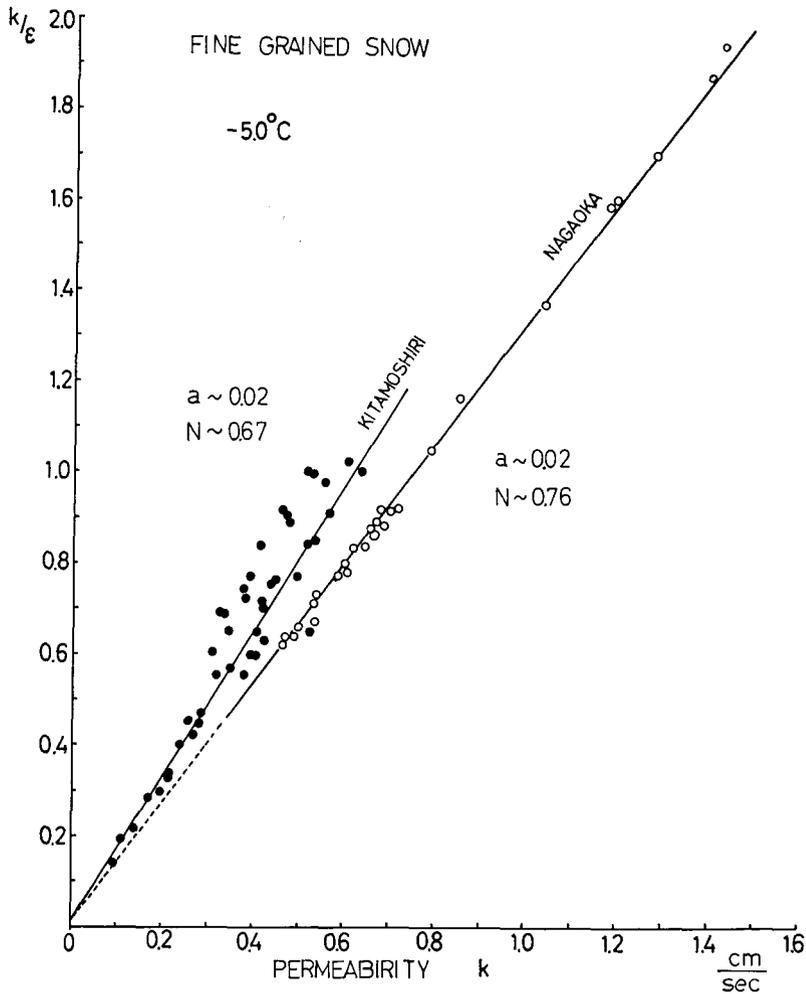
結果によると平均粒度と関係がある常数といわれている。そこでもし、積雪のケロシン Permeability と空隙率との関係が(6)式で表わされるものとすれば、この式をつかっているいろいろな雪質に対する  $a$  や  $N$  を求めることができるわけである。

(6)式は

$$\frac{k}{\varepsilon} = a + \frac{1}{N}k \tag{6}'$$

とかきなおすことができるから、常数  $a$  及び  $N$  は  $k/\varepsilon$  の値を  $k$  に対してプロットすることによって求められる。

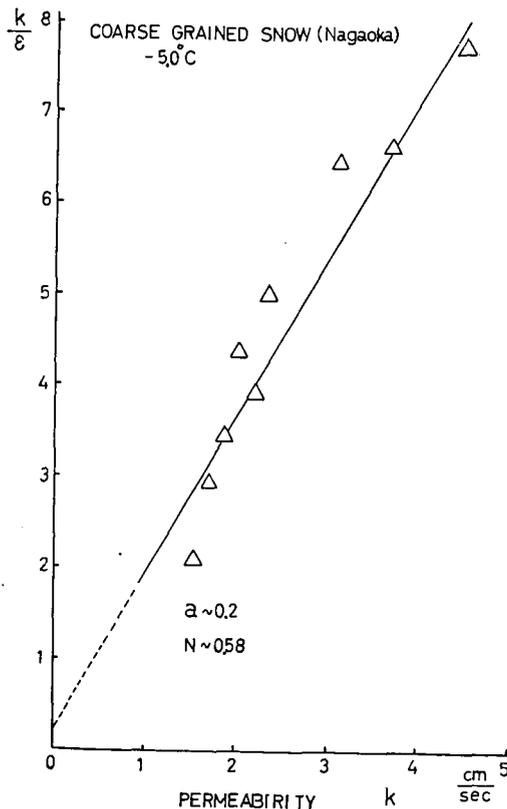
第16図は北母子里北大演習林構内の自然積雪のしまり雪(黒丸)と、長岡雪害実験所の  $-15^{\circ}\text{C}$  の低温室に約1カ月間保存されていたしまり雪(白丸)についてそれぞれ  $k/\varepsilon$  の値を  $\varepsilon$  に対しプロットしたものである(データはすべて  $-5^{\circ}\text{C}$  の温度に換算した)。黒丸も白丸もよ



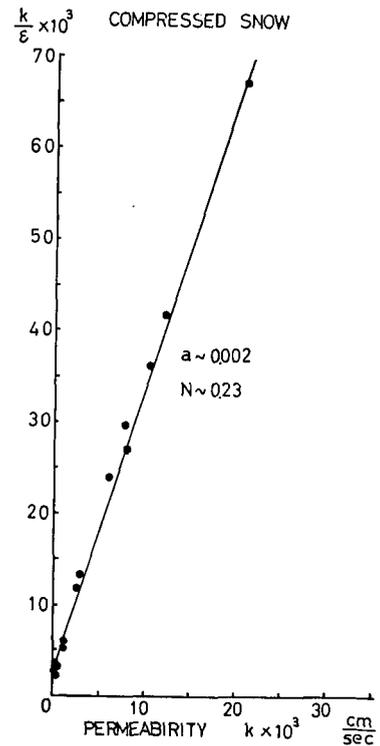
第16図 しまり雪の  $k/\varepsilon$  と  $k$  との関係

く直線 1 及び 2 の上の上のっていることがわかる。直線の勾配と直線が縦軸を切る截片とから求めた  $a$  及び  $N$  の値は夫々図のなかに示してある。北母子里のしまり雪も長岡のしまり雪も、ともに  $a$  の値は 0.02 であったが  $N$  の値が異なっている。まえにのべたように  $N$  は  $k$  の値が無限大になるときの空隙率である。北母子里のしまり雪についていえば空隙率が 0.67 すなわち密度でいえば 0.36 のとき  $k$  が無限大になるという結果になる。実際問題としてこれは明らかに矛盾である。そこでもし  $N=1$ , すなわち、空隙率が 1 のとき  $k$  が無限大になるとすればデータは勾配が  $45^\circ$  の直線のうえにのるべきである。したがって  $N$  の物理的意味はすこぶるあいまいである。しかし、 $N$  の意味はともかくとして同じ雪質のしまり雪であっても、地域別にプロットすると勾配の異なった直線の上のるのは甚だ興味深い。

第 17 図は粒子の大きいざらめ雪の  $k/\varepsilon$  と  $k$  との関係を示す。データはかなりバラついてはいるがこの図から  $a$  と  $N$  の値を推定すると  $a \approx 0.2$ ,  $N \approx 0.58$  となって、ざらめ雪の  $a$  の値はしまりゆきのそれよりも大きい。また、第 18 図は、しまり雪を人工的に圧密した試料について  $k/\varepsilon$  と  $\varepsilon$  との関係を示す。図にみられるようにデータはよく直線の上の上のっている。直線の勾配と縦軸の截片とから求めた  $a$  及び  $N$  の値は、自然積雪のそれらに比べるとはるかに小さい。



第 17 図 ざらめ雪の  $k/\varepsilon$  と  $k$  との関係



第 18 図 圧密した雪の  $k/\varepsilon$  と  $k$  との関係

Bender (1957) がいろいろな粒度  $d$  の雪について通気度を測定し、 $a$  と  $d$  との関係を調べたところによると、 $a$  の値は  $a=16.8d^{1.63}$  となることを見出した。われわれは  $a$  と粒度との関係をくわしく解析していないのでケロシン Permeability の場合の  $a$  と粒度の関係はよくわかっていない。しかし、第 16, 17 図に示したごとく、自然積雪のしまり雪の  $a$  の値は 0.02 であり、ざらめ雪のそれは 0.2 であった。しかし同じ粒度のしまり雪を人工的に圧密した試料の  $a$  の値は第 18 図のごとく 0.002 で一桁小さかった。この結果から直にしまり雪は圧密されると平均粒度が小さくなると解釈するのは適当ではない。なぜかという圧密すると再結晶がおこって平均粒度はむしろ大きくなってゆくからである。したがって (6) 式を空隙率が 0.4 以下の圧密された雪についてあてはめるときは、圧密される機構が異なるため  $a$  は別の意味に解釈されるべきである。

## V. 結 語

積雪の内部構造に変化を与えることなしに Liquid Permeability を測定するために 3 種類のケロシン Permeameter が試作された。原理は変水位透水計と同じであるが、積雪からサンプルを切り取り、予め  $0^{\circ}\text{C}$  以下の一定温度に冷したケロシンを通過させて  $k$  を測定する方式のものである。ケロシンは雪をとかさなから測定中に雪の内部構造が変わることはない。したがって同一試料につきくり返し測定することができる。測定は同一試料に対して 7~8 回くり返し最初の 1, 2 回目の値をのぞいて平均値を求めた。第 1 回目と第 2 回目の測定値が第 3 回目以後の値に比べ約 10% くらいがうることが多かったが、これはサンプリングのときに試料の表面に附着している氷の切屑が空隙をうめるためである。

新潟県長岡、北海道の北母子里の北大演習林の積雪、大雪山の高地積雪などについて  $k$  の値を実測した。このほか、実験室で人工的に雪を圧密し、空隙率が 0~0.4 の範囲の試料について  $k$  を測定した。第 13 図に示すごとく、空隙率が 0.4~0.9 の間にある自然積雪のうち、しまり雪の  $k$  の値は  $10^{-1}$  と 1.0 の間に分散し、ざらめ雪の  $k$  は 1.0~4.0 の間に分散していることがわかった。自然積雪の  $k$  の値は空隙率よりも雪質によって大きく変る。実験室でしまり雪を人工的に圧密した試料では  $k$  の値は空隙率が 0.4 $\rightarrow$ 0 の間に減少するにしたがって  $10^{-1}\rightarrow 10^{-4}$  に指数関数的に減少した。第 13 図のいろいろな雪の  $k$  の値はすべて  $-5^{\circ}\text{C}$  における値に換算して示されている。これらの値に  $-5^{\circ}\text{C}$  におけるケロシンの粘度と  $0^{\circ}\text{C}$  における粘度との比をかけると  $0^{\circ}\text{C}$  における  $k$  の値を知ることができる。第 2 図の曲線 2 によると  $0^{\circ}\text{C}$  におけるケロシンの動的粘度は 3 centi storks であるから絶体粘度では、ケロシンの密度を 0.8 として 2.4 centi poise となる。 $0^{\circ}\text{C}$  の水の粘度は 1.8 centi poise であるから  $0^{\circ}\text{C}$  におけるケロシン Permeability の値から  $0^{\circ}\text{C}$  の水の透水係数を推定するためには更に  $0^{\circ}\text{C}$  におけるケロシンと水の粘度比をかければよい。また、ケロシンと空気との粘度比をかければ  $0^{\circ}\text{C}$  における積雪の通気度が推定できるわけである。

この研究を行なうにあたり科学技術庁防災センター長岡雪害実験所の故福井第 1 研究室長

及び中村第2研究室長には研究室の利用について大いに便宜をはかっていただいた。また実際の測定には大学院学生鈴木重尚、佐藤尚之、北原武道の諸君をわずらわした。ここに記して感謝の意を表わす。尚、この研究費の一部は北海道庁科学研究補助金によってまかなわれた。

## 文 献

- 1) Bader, H. et al. 1939 Der Schnee und Seine Metamorphose (Snow and its metamorphism), Beitrage zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, Hydrologie, Lieferung 3, Bern; 1954, *SIPRE Trans.*, **14**, 1-313.
- 2) 石田 完・清水 弘 1955 積雪の通気抵抗 (第1報). 低温科学, 物理篇, **14**, 33-42.
- 3) Bender, J. A. 1957 Air permeability of snow. *SIPRE Res. Rept.*, **37**, 1-19
- 4) 黒岩大助・他 1969 オリンピック調査. 低温科学, 物理篇, **26**, 249-267.
- 5) Perutz, M. and Seligman, G. 1939 A crystallographic investigation of glacier structure and mechanism of glacier flow. *Proc. Roy. Soc. (London)*, **A 172**, 335-359.
- 6) Langway, C. 1958 Bubble pressure in Greenland glacier ice. Symposium Chamonix, *IUGG, Intern. Assoc. Sci. Hydrol., Publ.* **47**, 336-349.
- 7) Mellor, M. 1964 Properties of Snow, Cold Regions Science and Engineering. Part III: Engineering Section A. CRREL, Hanover, N. H., 105 pp.
- 8) 木下誠一 1962 塑性圧縮による積雪の水への転化. 低温科学, 物理篇, **20**, 131-157.
- 9) 水野悠紀子・黒岩大助 1966 積雪粒子のタッピング圧縮. 低温科学, 物理篇, **24**, 111-131.

## Summary

Three types of kerosene permeameters were designed to measure the liquid permeability of snow without giving any disturbance to the original snow stratification. The principle of these kerosene permeameters is analogous to the ordinary falling head method used in soil physics. A reproducible value of kerosene permeability of snow can be obtained even when many tests were repeated on the same specimen of snow, because the solubility of ice in kerosene is negligibly small below the melting point of ice.

A number of measurements were made for various types and densities of snow and all data were reduced to the values of permeability at a given temperature ( $-5^{\circ}\text{C}$ ), taking into account the temperature dependence of the kerosene viscosity. The value of kerosene permeability of snow ranged between  $10^{-1} \sim 8 \times 10^{-1}$  cm/sec for fine grained snow, and  $8 \times 10^{-1} \sim 4$  cm/sec for coarse grained snow. No definite correlation was found between the permeability and porosity of the natural snow (Fig. 13), but the value of kerosene permeability of artificially compressed snow was decreased exponentially with decreasing porosity (Fig. 14).