HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	水を含んだ積雪の変態
Author(s)	若浜, 五郎
Citation	低温科學. 物理篇, 23, 51-66
Issue Date	1965-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18020
Type	departmental bulletin paper
File Information	23_p51-66.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Gorow WAKAHAMA 1965 Metamorphisms of Wet Snow. *Low Temperature Science, Ser. A, 23.* (With English Summary p. 64)

水を含んだ積雪の変態*

若浜五郎
(低温科学研究所　応用物理学部門)

(昭和39年12月受理)

I. まえがき

つもったばかりの積雪は「しんせつ」とよばれ，雪の結晶の機械的な集合体にすぎない。融解あるいは融雪水の滲透が全くないという条件下では，「しんせつ」は，しまりつつ，微細な組織の「しまりゆき」に変る。この変化の過程については，従来，吉田の研究[1]をはじめ，いくつかの秀れた報告がある。筆者はさきに，「しんせつ」が融解・再凍結によって「ざらめゆき」に変化する過程を顕微鏡下で観察し，その結果を文献(2)に報告した。その結果，気温が高かったり，強い日射をうけたりして，積雪表面が融解し，一度でも水を含むとその部分の雪は「ざらめ」化することがわかった。逆に，全く水を含むことなく積雪成層の一部を形成するときは「しまりゆき」となる。北海道や本州山岳部などでは，厳冬期に気温が0°C以上になることがほとんどない。それで「しんせつ」はすべて「しまりゆき」となり，積雪全層が厚い「しまりゆき」で形成される結果となる。

このような厚い「しまりゆき」も，融雪期に入って積雪表面で強い融雪がおこり，とけ水が「しまりゆき」の層全体に一様にしみこむようになると，「しまりゆき」の粒はかなり急速に大きくなり，組織の粗い「ざらめゆき」に変る。筆者は1959年以来，毎冬，当研究所構内の積雪観測をおこなっているが，2月に厚さが30～50 cmもあった「しまりゆき」の層が，3月，融雪が進むにつれ，全層がざらめ化して行くようすを観察した。ざらめ化の初期には，1 mmていどの大きさであった雪の粒が，時がたつにつれて粗大化し，融雪末期には，3～4 mmの大粒ざらめゆきもしばしば見られた。

このような「しまりゆき」のざらめ化の現象は一般によく知られているものの，その過程や機構に関する報告はあまり見当らない。この問題はまた，純物理学的にみても興味ある問題である。それは，ざらめ化の過程が氷の融点0°Cでおこる現象で，厳密な意味での「融点現象」だからである。また，この現象は，外部との間に熱の出入が全くないという限定された条件下でおこるので，熱力学的にみて一見不思議な現象に思われる。

筆者はさきの報告[2]で，「しまりゆき」のざらめ化の過程について，ごく簡単に論じた。そのご，昭和38年1月の北陸豪雪の際にもこのことが問題となり，早急な解決がのぞまれた。それで，水を含む雪の変態に関するいくつかの実験をはじめた。まだ実験の途中の段階で不明

* 北海道大学低温科学研究所業績　第705号

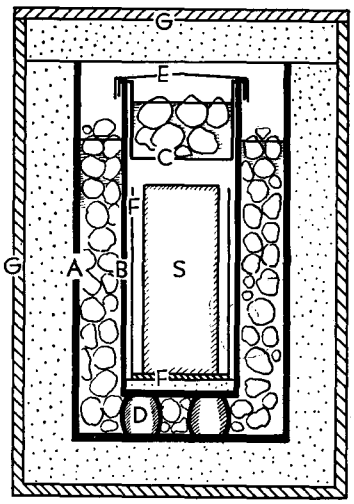
な点も多いが，これまでに得られた結果のいくつかを，野外の自然積雪についておこなった観察結果とともに報告する。

II. 実験の装置と方法

「しまりゆき」が「ざらめゆき」に変態する過程を追跡するために，直接観察と間接法の二通りをおこなった。前者は，水を含ませた「しまりゆき」の薄片を0°Cの温度に保ちつつ，顕微鏡の下で組織の変化する過程を直接観察，追跡する方法である。小島の方法[3]で厚さ1mmていどの薄片を「しまりゆき」の塊から切りだして試料とした。この直接法で行なった実験はまだ回数が少ないので，くわしい結果は別の機会に報告することとし，ここでは参考程度にのべるにとどめる。

間接観察では，「しまりゆき」の塊を0°C恒温槽内に保ち，適当な時間間隔をおいて薄片を切りだし，その顕微鏡組織の変化を追跡した。それとともに，密度，含水率，吸水能などの積雪基本量をも適宜測定した。

第1図は，「しまりゆき」の塊を長時間0°Cに保つための0°C恒温槽である。直径25cm，深さ30cmのブリキ缶Aの中央に，直径12cm，深さ20cmの銅製円筒Bをおく。Bには真鍮製の脚Dがとりつけてあって，Bの底が直接Aに接触しないようにしてある。Bの上部には深さ6cmの銅製の中蓋Cがはめられ，さらに蓋Eがかぶせてある。容器B内のFは，直径10cmの銅製円板で，その両端には2本の針金F′をとりつけてある。これは，試料の雪の塊Sを，Bからとり出したり，B内に入れたりする際に，雪をこわさぬよう，また，雪に直接手がふれないようにするために使う。Bの底には，断熱用スチロポールの板が敷いてある。ブリキ缶Aの周囲は厚さ5cmの断熱用スチポールでとりかこみ，全体はベニヤ製の木箱G内に収納されている。



第1図 雪の試料Sを0°Cに保つための0°C恒温槽。A；ブリキ缶，B；銅製円筒，C；銅製中蓋，D；B円筒の脚，E；上蓋，F；円板，F′；円板Fにとりつけた針金，G；木箱。GとAとにはさまれた点をまぶした部分は厚さ5cmの断熱壁

実験をはじめる前に，まず，銅製円筒Bとブリキ缶Aとの間の空隙，および，内蓋C内に，図に示したように，水と氷の混合体を入れる。−5°Cの低温室内に約一昼夜放置した「しまりゆき」の塊S（直径8cm，高さ12〜13cmの円柱状のもの）を円板F上にのせ，針金F′をつまんで容器B内に入れ，内蓋C，蓋Eをする。Eの上には，ぬらした雪をつめ，その上から断熱用スチロポールをとりつけた木箱の蓋G′をする。この箱を，温度が+2°Cの低温室内におく。断熱がよいのと，外気温が0°Cに近いために，缶Aや内蓋C内の氷は，なかなかとけない。2日に1度の割合で，A内の水をサイフォンを利用して適当に排除し，代りに氷を補給しておくていどで充分である。試料Sを

B内に入れてから約一昼夜そのまま放置し，雪全体が0°Cになったのをたしかめてから次の6通りのばあいについて雪の組織の変化を観察した。

a) 「しまりゆき」を全然ぬらすことなく，B内に入れて，単に長時間0°Cに保ったばあい。

b) 10%ていどの含水率をもつように，あらかじめ0°Cの水を霧吹きで試料に吹きつけたばあい。

c) B内にさらに氷と水との混合体を入れた容器を入れ，その中に雪の試料全体を完全に浸してしまったばあい。試料は多数の孔をあけた銅製容器に収め，氷と衝突して試料がこわれないようにした。

d) 上のそれぞれのばあいの雪に100 gr-wt/cm^{2}ていどの静荷重を与えたばあい。

以上いづれのばあいにも，試料を容器B内に入れてから1日後，2日後，3日後，5日後，7日後という日をおいて「しまりゆき」の塊から薄片試料を切りだし，偏光顕微鏡で写真をとった。a), b)のばあいには，時々，密度や含水率をも測定した。

積雪の組織の時間の経過に伴う変化は，薄片の偏光顕微鏡写真から求めた。粒度分析器(ツァイス製TGZ 3型粒度分析器)を用いて，薄片の写真上に現われた積雪粒子の平均直径および粒子間の結合部の太さを測定した。しかし，図版Iの写真を見てもわかるように，1個の積雪粒子の領域は必ずしも判然としたものではない。それで筆者は原則として，結晶粒界を境にして1個1個の粒子を区切り，その大きさを測定した。また，粒子間結合部の太さを求める際にも，結合部の不明瞭なばあいが多い。しかし，粒子間結合部のくびれた部分には，通常結晶粒界が存在するので，原則として，結晶粒界の幅をもって結合部の太さとした。くびれた部分で粒界が不分明なときは，最も細い部分の幅を採用した。

こうして粒子の大きさと粒子間結合部の太さの分布を求め，さらに，粒子1個あたりの結合部の数，粒子の大きさと結合部の太さとの関係をも調べた。第2図，第3図にはえられた粒径分布曲線などをかかげたが，1本の頻度分布曲線をうるために用いた統計量は，400個前後であった。Jellinek[4]らは，このようなばあいの統計には，400個ていどの粒子を測定すれば充分であるとのべている。

乾いた「しまりゆき」のばあいは別として，水を含んだ雪の薄片を作成する際には，含まれていた水が凍結するため，粒子の大きさを過大評価するおそれがある。しかし，薄片用の試料として5～6 mmていどの厚さのものを切りだし，吸取紙の上にしばらくのせておけば，含水率を数%ていどにすることは容易である。事実，この方法で水をぬいた雪について，結合熱量計[5]で含水率を測定したところ，3.6%の値がえられた。このていどの水が積雪内にのこっていたとして，薄片作成の過程でそれが凍結したとしても，粒子の大きさには事実上関係がない。たとえば，直径が1 mmの粒子からなる積雪の含水率が5%で，水が雪粒子の表面に一様に膜状に分布していたとすると，水の膜の厚さは約0.005 mmとなる。この水膜がそのまま凍結したとしても，それによる雪粒の直径の増加分はわずか1%にすぎない。これは，雪粒子の大きさの分布を求める際に，無視できる量である。

III. 実験結果

前節でのべた方法により，1：乾いた「しまりゆき」，2：4〜5% の含水率をもつ「ぬれしまりゆき」，3：水に浸した「しまりゆき」，4：荷重をかけた水浸しの「しまりゆき」を，それぞれ 0°C に保ったばあいの積雪の顕微鏡組織を追跡した。以下に，それぞれの結果についてのべる。

1. 乾いた「しまりゆき」を 0°C に保ったばあい

図版 I-1 の写真に，密度 ρ が 0.387 gr/cm^3 の「しまりゆき」の塊から切りだした薄片の顕微鏡組織を示す。この雪を，水でぬらすことなく，単に 0°C に保ちはじめてから約 5 昼夜後に切りだした薄片の写真を図版 I-2 にかかげた。これらの写真を比較すると，あまり顕著な差異はみとめられないが，粒子が多少大きくなり，粒子の形がややなめらかになったことがわかる。また，粒子間の結合部が時間とともに太くなった。このことを量的に示すために，上記の粒度分析器を用いて，各薄片について粒子の平均直径と結合部の太さの分布を求め，第 2 図にそれをまとめた。

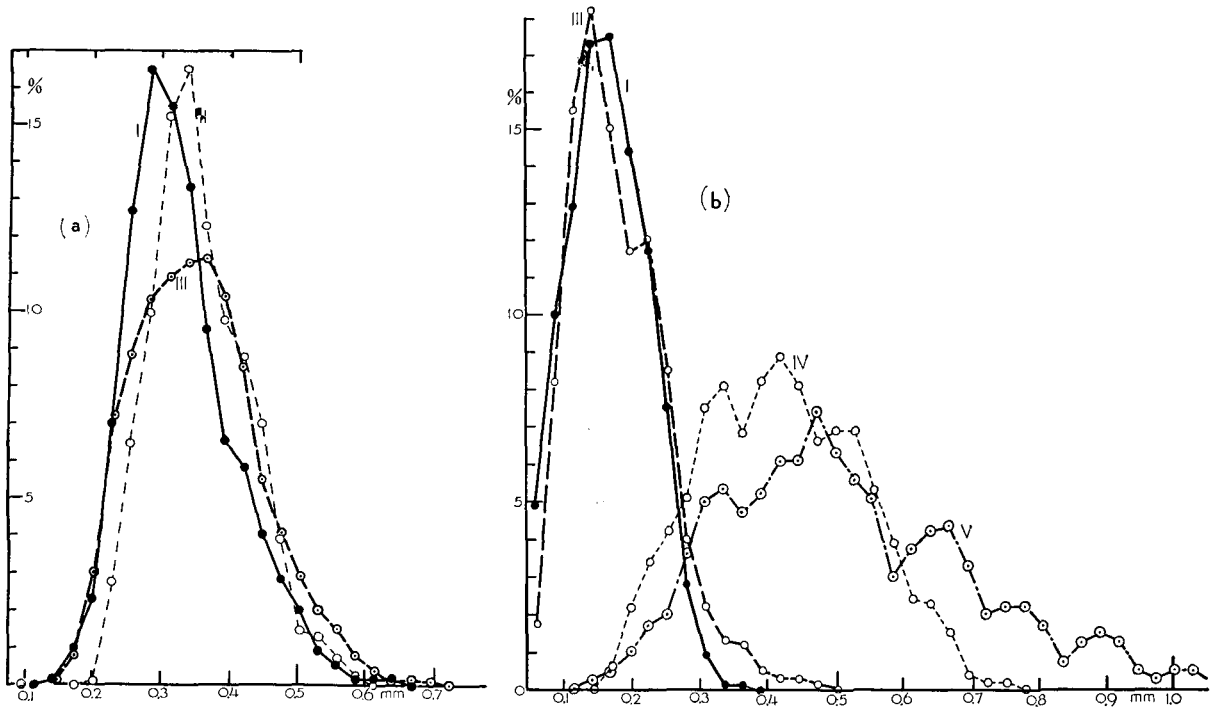
第 2 図 **a** の黒丸を実線でつないだ曲線 I は，実験開始直前の「しまりゆき」(図版 I-1 の雪) についてえられた粒径分布曲線である (統計に用いた粒子の総数は 402 個)。頻度の最大は直径が 0.3 mm の粒で，全体の 50% は直径が 0.30±0.05 mm の範囲に入っている。直径が 0.20 mm 以下の小さな粒子，および 0.50 mm 以上の比較的大きな粒子はいづれも全体の 4% にも達しない。

白丸を細い破線でつないだ曲線 II は，0°C の恒温槽内に放置してから 2 昼夜後の粒径分布曲線である。粒径が 0.5 mm 以上の部分では曲線 I と差異はみとめられないが，0.5 mm 以下の部分では，全体として大きい方に 0.025 mm くらいずれている。つぎに，実験開始 5 日後の太い破線で書いた曲線 III (図版 I-2 の雪) と曲線 I とをくらべると，粒径が 0.23 mm 以下の部分はほとんど同一で，差異はみとめられない。しかし，粒径が 0.5 mm 以上の比較的大きな粒子が，はじめの約 2 倍の 8% を占めているのがめだつ。全体の傾向としては粒径が大きい方にずれ，曲線 II と同様，平均粒径として 0.03 mm くらい大きくなった。雪粒子を単純に球形と考えると，5 日の間に体積として約 32% 増加したことになる。

つぎに，粒子間の結合部の太さに注目してみよう。第 2 図 **b** の左側，黒丸を実線で結んだ曲線 I は実験開始直前の太さの分布，白丸を太い破線でつないだ曲線 III は実験開始 5 日後の分布である。これらの曲線 I, III は，それぞれ，図 **a** の曲線 I, III に対応する。図 **b** の曲線 I と III とを比較すると，0°C に保つことにより，0.1 mm 以下の細い結合部が減少し，逆に 0.25 mm 以上の太い結合部が増加したことがわれる。しかし，以上のべた粒子の大きさと粒子間結合部の太さの変化は，顕著な変化とはいわれない。すなわち，雪をただ単に 0°C に保つだけでは，雪の組織に急激な変化はおこらないことがわかったわけである。

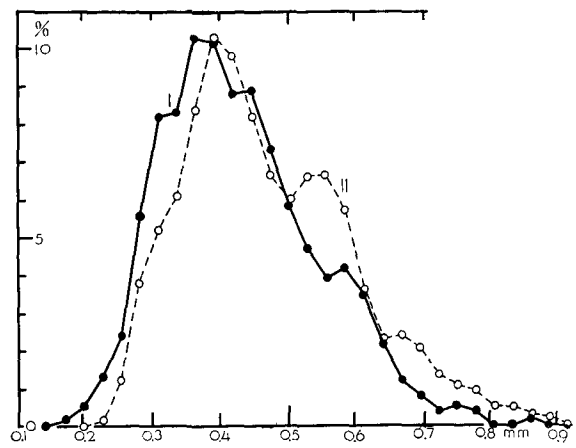
2. 数パーセントの含水率をもつ「ぬれしまりゆき」を 0°C に保ったばあい

図版 I-3 の写真に，密度が 0.35 gr/cm^3 の「しまりゆき」の顕微鏡組織を示す。この雪を



第2図　**a** 乾いた「しまりゆき」(密度 0.387) を 0°C に保ったばあいの粒径分布の時間的な変化を示す。曲線 I は実験前の分布。曲線 II は 0°C の恒温槽に保ってから 2 昼夜後。曲線 III は同 5 昼夜後。**b** 曲線 I, III; **a** の曲線 I, III に対応する粒子間結合部の太さの分布。曲線 IV, V; 0°C の水に浸けた雪の粒子間結合部の太さの分布で，第 4 図の曲線 IV, V に対応する

0°C 恒温槽内に数時間放置したのち，噴霧器で 0°C の水をふきつけ，含水率にして 4% の水を与えた。そのまま，0°C 恒温槽内に放置してから約 3 昼夜後にきりだした薄片の写真を図版 I-4 にかかげた。試料に用いた雪は，元来比較的粒の大きな雪であったが，水でぬらして放置したのちの写真 4 では，さらに大粒化している。それと共に，写真 3 では，雪の粒が角張ったものが多いが，写真 4 では粒の形がなめらかになったのが目立つ。これらの薄片について，粒度分析器を用いて平均粒径分布を求めた結果を第 3 図に示した。図に実線でひいた曲線 I は実験開始前の粒径分布，破線でかいた曲線 II は，0°C に 3 日間保ったのちの「ぬれしまりゆき」の粒径分布曲線である。平均粒径は曲線 I については 0.395±0.07 mm，曲線 II については 0.440±0.07 mm である。粒子を球形と考えると，粒子の体積にして 3 日間に 38% 増加したことになる。乾いた「しまりゆき」のばあいの体積増加はまえにのべたように 5 日間に 32% であった。「ぬれしまりゆき」では，これにくらべて大粒化の速度が多少早いといえる。



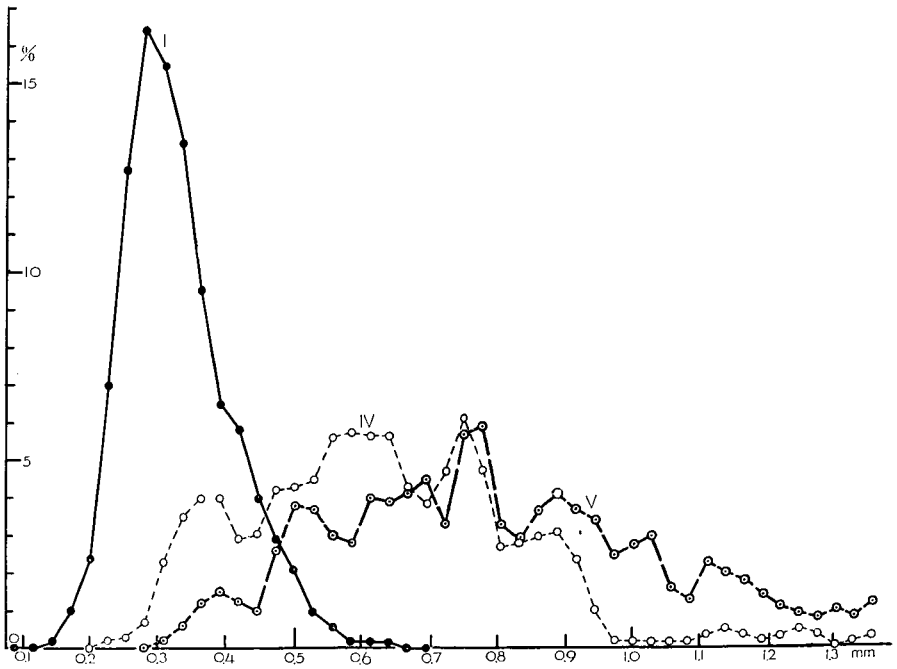
第 3 図 数%の含水率をもつ「ぬれしまりゆき」を 0°C に保ったばあいの粒径分布の変化を示す図。実線で示した曲線 I は密度 0.35 gr/cm³ の「しまりゆき」の粒径分布曲線。それが 3 日後には破線の曲線 II の粒径分布に変った

粒径のほかに，粒子間結合部の太さの分布も測定した。実験開始前の雪では，結合部の太さが 0.22±0.04 mm だったのが，3 日後には 0.27±0.04 mm となった。全般的に粒子間結合部も太くなったといえる。

3. 「しまりゆき」を 0°C の水に浸したばあい

上の **1**, **2** では，「しまりゆき」の組織の粗大化は，あまり顕著ではなかった。しかし，雪全体を 0°C の水に浸けてしまうと，粒子が急速に粗大化し，かつ球形化する。図版 II-5 は，図版 I-1 の雪と同じ雪の薄片の組織で，密度は 0.387 gr/cm³ である。この雪を 0°C の水に浸したまま 0°C 恒温槽内におき，3 日後に切りだした薄片の組織が図版 II-6 の写真である。図版 II-5 とくらべて，3 昼夜の間に顕著な組織の変化をおこしたことがわかる。さらに水に浸けてから 6 日後にしらべた顕微鏡組織を図版 II-7 にかかげた。粒子はさらに大粒化し，粒の形はほとんど球形で，粒子間の結合部は太く，結晶粒界が直線状なことが目立つ。

第 4 図には，粒度分析器を用いて求めた粒径分布の時間的変化の有様を示した。実線の曲線 I は水に浸ける前の「しまりゆき」の粒径分布曲線で，第 2 図 **a** の曲線 I と同一である。すなわち，粒径分布は 0.30±0.05 mm であった。白丸を細い破線でつないだ曲線 IV は，水につけてから 3 日後の粒径分布曲線で，平均粒径は 0.60±0.14 mm である。2 昼夜の間に粒径にして 2 倍，体積にして 8 倍に増加したことになる。水に浸けてから 6 日後の太い破線でかいた曲



第4図　雪を0°Cの水に浸して保ったばあいの，粒径分布の時間的変化を示す図。曲線I；水につける前（図版II-5の雪についてえられたもの），曲線IV；水につけてから3日後（図版II-6に対応）。曲線V；同6日後（図版II-7に対応）。このばあいの粒子間結部の太さの変化は第2図**b**に示した

線Vについて平均粒度を求めると0.76±0.18 mmとなる。6昼夜の間に粒径で2.5倍，体積にして，約16倍も増加したことになる。一方，粒子間結合部の太さの分布曲線を，前に掲げた第2図**b**の曲線IV，Vで示した。これらの曲線は，第4図の曲線IV，Vにそれぞれ対応する。粒径のみならず，粒子間結合部も，3日後ではじめの0.15 mmから約2.8倍の0.42 mmに，6日後で3.2倍の0.48 mmに増加したことになる。

4.　「しまりゆき」を水に浸け，荷重をかけたばあい

第1図に示した0°C恒温槽内に，底面が7 cm角，厚さが2 cmの直方体の「しまりゆき」を入れ，0°Cの水を雪全体にしみこませた。雪は，密度が0.46 gr/cm³の「かたしまりゆき」であった。つぎに，この雪の上面におもりを静かにのせ，約100 gr-wt/cm²の静荷重を与えた。このばあい，雪の側面には何の束縛も加えなかった。荷重を加えてから3日後と7日後に試料から小さな薄片を切りだして顕微鏡組織を調べた。図版II-8の写真は3日後の組織である。「しまりゆき」本来のもつ組織がかなりつぶれて，組織内部に気泡をとりこんだ部分がみられる。いくつかの積雪粒子が融合して大きな氷の粒になっているのが目立つ。たとえば，図にPと印した粒子は，直径が0.5 mmていどの小さな結晶粒が約10個集って，全体としては，直径が2 mm以上の大粒子になっている。実際の氷の粒は，三次元的なひろがりをもっているのでこの氷の粒を構成する結晶粒の総数はもっと多いにちがいない。

荷重をかけてから7日後に切りだした薄片の顕微鏡組織を図版II-9に示した。大きな気泡を多数含んでいるが，全体としてはすでに立派な一枚氷になっていた。したがって，薄片を作成するにもアニリンで固定せず，そのままで鉋をかけることができた。

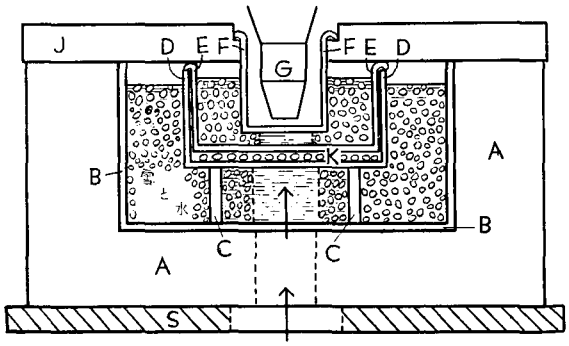
荷重3日後の図版II-8と，7日後の図版II-9とをくらべると，この間に組織が氷化しただけでなく，結晶粒がかなり成長したことがわかる。

以上本節でのべてきたように，「しまりゆき」を0°Cに保っておくと，粒子が大粒化することがわかった。しかし，ただ単に，雪を0°Cに保つか，あるいは雪に数%ていどの水を与えて0°Cに保ったばあいには，あまり急速な大粒化はみられなかった。これに反し，雪全体を0°Cの水に浸したばあいは，粒子は急速に大きく成長し，球形化した。また，水に浸けたまま静荷重を与えると，雪は1週間くらいの間に氷に変った。

このような雪の組織の変化はすべて，一辺が10 cmていどの角柱状の雪の塊を0°Cに保ちつつ，ある日数をおいて薄片を切りだしてはその顕微鏡組織を調べたものである。これは，いはば間接的な研究方法であって，もっと直接的な方法で雪の組織の変化を調べることが更にのぞましい。それには，雪の薄片を0°Cに保ちつつ，顕微鏡の下で直接観察をすればよい。次に水に浸した雪の組織の変化を顕微鏡の下で直接観察した結果についてのべる。

5. 0°Cの水に浸した雪の組織におこる変化の顕微鏡による直接観察

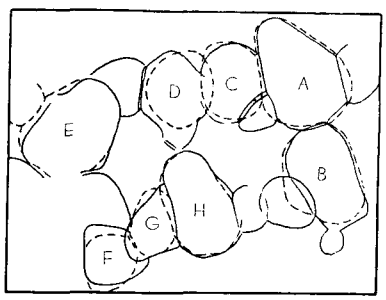
第5図に，0°Cの水に浸した雪の組織におこる変化を顕微鏡の下で直接観察するための装置を略図で示した。図の最下部，斜線をほどこした部分Sは，偏光顕微鏡の載物台である。Sと，図の上方，顕微鏡の対物レンズGとの間の部分が，小型の0°C恒温槽である。断熱用の容器A（スチロポール製）のなかに入れた円筒形のガラス容器Bの内部に，さらにガラス容器Dを入れる。Dはプラスチック製の脚Cで支えられている。BとDとの間には，あらかじめ雪と水との混合物をつめておく。容器Dの底に，小島の方法[3]で作成した厚さ1 mmの「しまりゆき」の薄片Kを静かにおく。薄片に0°Cの水を浸みこませたのち，雪と水との混合物をつめたガラス容器EをDの上からかぶせる。この際，D，Eの底の間には，厚さ1.5 mmの間隙ができるようにあらかじめ設計してある。E内のFと印した部分は，顕微鏡の対物レンズGがぬれるのを防ぐためのガラス容器である。全体に，断熱材で作った蓋Jをかぶせる。雪の薄片Kの周囲は，雪と水との混合物でとりかこまれてはいるが，顕微鏡観察用の光の路だけは雪をのぞき，水だけにしてある。



第5図 0°Cの水に浸した積雪の薄片組織におこる変化を顕微鏡の下で直接観察するための装置の略図。A；断熱容器，B，E；ガラス容器Dの底においた薄片Kを0°Cに保つための雪と水との混合物ををつめるガラス容器，F；顕微鏡の対物レンズGを保護するガラス容器，F；断熱材で作った蓋，S；顕微鏡の載物台

この装置を用いて，厚さが1 mm

の「しまりゆき」の薄片組織におこる変化を観察した結果の例を図版 III に示した。図版 III-10 は，密度 0.35 gr/cm³ の「しまりゆき」の薄片の水にひたす前の写真である。この薄片に 0°C の水をしみこませた直後の同一部分の写真が図版 III-11 である。図版 III-12 は同じ薄片の他の部分であり，水に浸して約 2 分後の状態である。この部分は，水につけてから 1 時間 20 分後には図版 III-13 の写真のようになった。この写真に A, B, C …… と印した粒子は図版 III-12 に A, B, C などと印した粒子にそれぞれ対応する。写真 13, 14 を比較すると，多少とけたり，あるいは，結合の弱い粒子が水の中を動いて視界から去ったもののあったことがわかる。しかし，粒子 A, B, E, H などは多少丸味をおび，大きくなったように見える。このことを確かめるため，写真 12, 13 を重ねて第 6 図を作った。実線は，水に浸して 2 分後の写真 12 にみられる粒子の形，破線は，1 時間 20 分後の写真 13 での同じ粒子の形を示す。この図からただちに立体的な粒子の形，体積等が水に浸したことによってどう変ったかを完全に知ることはできない。しかし，少くとも平面的に見た限りでは，粒子 A, B, H などは成長して大きくなったと考えられる。



第 6 図　図版 III-12, 13 の写真で，A, B, C などと印した粒子を重ねた図。実線は，水に浸して約 2 分後の粒子の形，破線は，1 時間 20 分後の同一粒子の形を示す。水に浸したことによって，粒子 A, B, H などが成長して大きくなったことがわかる

このような粒子の成長がなぜおこったかを推論する前に，この薄片と外部との間に熱の出入があったかどうかを確かめる必要がある。第 6 図をみてわかるように，薄片 K の中央部は，顕微鏡で観察するため，雪をとり除いた 0°C の水だけでとりかこんである。この実験をおこなったときの室温は +4°C だったので，この水の部分を通して薄片に外部から熱が流入した可能性がある。それで，実験装置一切を −5°C の低温実験室内に移してみた。もし，このような熱の出入があったとすれば，薄片 K と共存する 0°C の水が凍結するにちがいないからである。

図版 IV-14 は，密度が 0.35 gr/cm³ の「しまりゆき」をばらばらにした状態の写真である。これを −5°C の低温実験室内で 0°C の水につけた直後の写真が図の 15 である（粒子が水の中を移動したので，図の 14 と 15 は同一部分ではない）。約 2 時間後に写真 16 のようになった。雪粒は一般に大粒化し，同時に，あるものには結晶面が現われた。その後，雪粒と共存する水は，ガラス容器 E の底と接触する部分から凍結しはじめ，実験開始 3 時間半後には，接触部分附近だけが全面凍結した。この実験で，薄片 K と外部との間に熱の出入が多少ともあることがわかった。それゆえ，室温が +4°C での上記の実験では，逆に，薄片 K に熱が流入し，雪粒を一部とかした可能性が強い。しかし，融けることはあっても凍結は絶対におこりえない。それにも拘らず，図版 III-12 の粒子 A, B, E, H などが形をかえ，幾分成長して大きくなったのである。このような雪粒の成長は図版 IV-17 にさらによくみられる。この写真は 0°C の水に浸した雪粒を −5°C の低温室内に入れて，いったん図の 16 の状態にしたのち，装置全体を +2°C の

室内に移し，約18時間放置したのちにとったものである。雪粒に現われた結晶面は消失し，粒は大きく成長し，球形化した。この実験でも，＋2℃の室内に移してからは，熱の出入，従って融解の可能性は多少はあるが，凍結の過程はない。このような粒子の大粒化，球形化の詳細に関しては，まだ不明な点が多いので，ここではふれない。しかし，融解の過程が多少加わったとしても，0℃の水に浸った雪粒が急速に大きくなることだけは確かなようである。

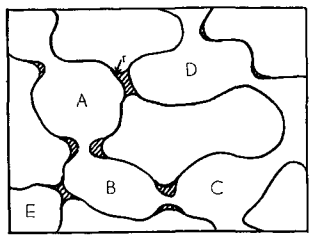
IV. 考　　察

春，融雪期になると，積雪表面で強い融解がおこり，とけ水は厚い積雪全体にしみこんで全層がぬれる。積雪の表面附近は直接外気にふれ，また，日射あるいは夜間輻射，外気からの水蒸気の凝結，外気への昇華蒸発などにさらされる。それゆえ，積雪表面附近は，常に融解，凍結をくりかえし，粒子は次第に大きく成長する。これが「温暖変態」といわれる過程である。一方，積雪内部の深いところでは，日射，輻射，外気温の変化などが直接伝達しない。雪は単に水を含み，0℃に保たれるだけで，外部との間の熱交換がない。何故なら，今注目している雪の層の周囲はぬれた雪でとり囲ませているので，熱はそのぬれ雪にすべて吸収されるからである。積雪内部はこの意味で，完全な断熱体でとりかこまれているといってもよい。それにも拘らず，積雪層内部の「しまりゆき」が水を含むと，大粒化して「ざらめ雪」となる。これは，氷が水と共存し，融点という特別な温度に保たれるときにおこる一種の温暖変態と考えられる。このようなことが確かにおこるか否かを知るために，外部との間の熱の出入がないようにして，「しまりゆき」を0℃に保ってみたのである。その結果，第II節**1**でのべたように，乾きしまりゆきを単に0℃保ったばあいには，雪粒は5日間に30%ていど体積が増加した。また，含水率が数%ていどの「ぬれしまりゆき」のばあいには，3日間に40%ていどの体積増加率がえられた。このような粒子の大型化がなぜおこるのだろうか。

積雪は第2図**a**の曲線が示すような分布をもつ大小さまざまの粒子が三次元的に連結した組織をもつ。積雪が平衡状態へと進む過程でおこる変化は，系全体としての表面自由エネルギーが減少する方向に向かうはずである。このためには，大粒子が小粒子を食って，大粒化すればよい。今のばあい，積雪の試料には熱の出入がないので融解・凍結はおこりえず，従って試料全体としての質量は不変に保たれるように変化しなければならない。大粒化すると同時に粒子が球形化することによって，表面エネルギーを低めることも期待される。これは図版I-2, I-4, II-6, 7などに実際にみられた。積雪を0℃に保つと，粒子が大粒化，球形化するのは，エネルギー的にいえばこのように説明できる。勿論，上にのべたことは，零度以下任意の温度についても成り立つ。しかし，温度が低いほど粒子におこる変化がおそいので，0℃以下の温度では，目にみえるような組織の変化がなかなか進行しないのであろう。

雪が数%ていどの水を含んだばあいには，積雪粒子間に，水の表面張力による力が働くことが考えられる。第7図のA，B，Cと印した部分は積雪の粒子，A，B間，A，D間などに斜線をほどこした部分は水，それ以外の部分は空隙である。水は，図に示したように，積雪組織内の狭い部分や粒子間結合部のくびれた部分などにとくに保持される。これらの水は滑車の車

輪の面に似た表面を形成する。外に凹な，滑車面に対応する表面の曲率半径を r，車輪の半径に対応する曲率半径を R，水の表面張力を γ とすると，水の表面張力による水内部の圧力降下 Δp は，$\Delta p=\gamma\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{R}\right)$ である。一般に $r<R$ のことが多いであろう。r と R とが同じていどの大きさなら，Δp はごく小さい値になるが，$r\ll R$ なら，$\Delta p\approx\gamma\left(\frac{1}{r}\right)$ となる。$r=0.1$ mm，0.05 mm のばあい ($r\ll R$)，Δp はそれぞれ，7.5 gr-wt/cm^2，15 gr-wt/cm^2 となる。このような力で粒子同士が引き合い，粒子の融合，塑性変形によって大粒化を促進することは充分考えられる。事実，Butkovich[6] らは，氷が 10 gr-wt/cm^2 ていどの低応力下でも匍匐し，変形することを見出している。たとえば，図の粒子 A，D 間，B，E 間の狭隘部にたまった水は，それぞれ隣り合う粒子同士を引きつけるであろう。また，粒子 A，B 間，B，C 間の粒子結合部にたまっている水は，結合部を太くする役割を果すであろう。事実，第 III 節第 2 項でのべたように，水を含んだ「しまりゆき」の粒子間結合部の太さは幾分増加した。しかし，第 III 節第 1 項でのべたように，水を含まない乾いた「しまりゆき」のばあいでも，粒子間結合部の太さは多少増加の傾向がみられた。これは，氷の粒子間の焼結作用がすすんだ結果と考えられる。黒岩[7] や Kingery[8] は氷の焼結現象を研究し，それが表面拡散あるいは体積拡散によっておこるとのべている。黒岩は −2.5°C〜−20°C の温度範囲で実験を行ない，温度が高いほど焼結速度が大きいことを示した。従って，氷のとりうる最高の温度，つまり融点 0°C での焼結速度は，−2.5°C での速度よりさらに大きいにちがいない。これは空孔を媒介としておこる物質の移動が，温度が高いほど速くなることからも期待される。



第 7 図　数% の水を含んだ「しまりゆき」の組織の略図。図に A, B, C…… と印した部分が雪の粒子斜線をほどこした部分が雪に含まれた水。その他の部分は空隙である

以上の説明は，含水率が 0〜数% の「しまりゆき」のばあいについてであった。類似のことが水に浸けた「しまりゆき」についてもいえるが，次の点で違っている。(i)；雪を水に浸したばあいの表面エネルギーは，氷と水との界面エネルギーとなり，氷と空気との間の界面エネルギーよりも小さくなる。(ii)；粒子間のせまい部分にたまった水の表面張力による圧力低下でひきおこされる粒子間の引き合いは，水に浸けたばあいにはありえない。これら (i)，(ii) はいずれも粒子の大粒化あるいは融合にとって不利な条件である。しかし事実は逆で，雪を空気中で 0°C に保ったばあいよりも，水に浸けたときの方が粒子の大型化ははるかに急速であった。その原因は今のところ不明であるが，雪と共存する 0°C の水が，物質移動の担い手としての役割を演じている可能性は考えられる。

積雪が 0°C の水に浸ると，粒子が大粒化，球形化することは，湖沼上に浮かぶ厚い積雪層の水に浸った部分に自然現象としてみられる。たとえば，北海道北部の雨竜ダムの湖水[9]，福島県の尾瀬沼[10] などで観察されている。水につかった雪はスノージャムとよばれ，大粒で粒子間の結合のゆるいやわらかい雪である。雨竜ダムのばあい，粒経は 1〜2 mm，尾瀬沼では 1〜1.5 mm であった。

雪が水を含むと，0°C の乾いた雪にくらべて力学的に弱くなることが知られている。木下[11]は 0°C の乾いた雪，湿った雪，0°C の水に浸した雪の柱を圧縮し，それぞれの圧縮力を測定した。それによると，同じ密度に対する圧縮力は，水に浸したばあいが最も小さく，次いで湿った雪，乾いた雪の順であった。雪が水に浸ったばあいに弱くなるのは，雪が水の中で急速なざらめ化をおこし，図版 II-6 の状態に近づくからであろう。湿った雪と乾いた雪のちがいについては，まだ説明できない。

次に，水に浸った雪に荷重を加えたばあいについて簡単に考察を加えてみる。数年来，秋期2回にわたり，筆者らは富山県の劔岳・立山地区に散在する雪渓の調査[12]を行なった。調査の対象は主に劔沢の沢頭ちかくにある通称「はまぐり雪」(海抜約 2700 m の地点) であった。この雪渓は長さ 60 m，幅 30 m，厚さが数 m ていどのごく小さなものであったが，調査の結果全体が雪でなく，氷であることが判った。このような小規模な雪渓にも拘らず，全体が氷化しているのは，雪が水を含み，かつ，荷重が加わっていたためと考えられる。昭和 38 年 5 月上旬の観測によると，当時，はまぐり雪は，厚さが 30 m 以上の雪で蔽われていた。この積雪の平均密度を 0.4 gr/cm^3 とすると，積雪下部では約 1 kg-wt/cm^2 の圧力が働くことになる。筆者の実験では，100 gr-wt/cm^2 ていどの圧力で水を含んだ雪は 1 週間で氷化した。このことから考えて，はまぐり雪の雪が氷化したのは当然といえる。今年(39 年) 8 月下旬におこなった北海道中央部の大雪山に存在する雪渓の調査[13]でも，表面下 2 m 以下のところで，雪はほとんど氷化していた。大雪山のばあい，最大積雪深は 5〜6 m と推測されるので，積雪底部での圧力は，雪の平均密度を 0.35 gr/cm^3 として 200 gr-wt/cm^2 のていどである。これも，積雪を氷化するのに充分な圧力といえる。ただし，この際注意しなければならないのは，圧力さえ大きければ温度は −10°，−20°C という低温度下でも雪は氷化しうることである。

木下の実験[14]が示すように，積雪に数百 kg-wt/cm^2 という大きな圧力を加えると，−18°C といった低温度下でも，ごく短時間のうちに雪は氷に転化してしまう。自然状態でも，このようなことは，いくらでもみられる。たとえば，南極大陸やグリンランドの氷冠の，年平均気温が −20°C といった寒い所でも，50〜100 m の深さの部分で雪は氷になっている[15]。シュムスキーによると，深さ 50 m で雪のうける圧力は 3.5 kg-wt/cm^2 のていどである。また，50 m の深さでの雪は，つもってから数十年の長年月にわたって塑性圧縮されて氷になったのである。これに反し，木下の実験で 1 時間ていどの短時間内に雪を氷に転化しえたのは，南極などにおける圧力の 100 倍もの強大な圧力を雪に加えたからにほかならない。一方，「はまぐり雪」で雪のうける圧力が南極よりずっと小さいにも拘らず，数ケ月の間に雪が氷化したのは，雪が水を含み温度が 0°C だったことによると考えられる。筆者の行なった実験は，「はまぐり雪」の氷化のばあいと条件が類似しているので，この種の雪渓の氷化の説明になるであろう。

要するに，積雪はあるていどの荷重をうければ，いずれは氷化するのである。数百 kg-wt/cm^2 ていどの大きな荷重であれば，−20°C の低温度下でも 1 時間のうちに雪は氷化する。数 kg-wt/cm^2 ていどの荷重では，南極でのように長年月かかって氷化する。一方，温度が 0°C に近ければ，100 gr-wt/cm^2 ていどの荷重でも，雪は数日間で氷化するのである。荷重の大きさと

雪が氷化するまでの時間との関係，およびその温度依存性はまだえられていないが，将来実験的に求められるであろう。

V. 要　　約

積雪が水を含み，0°C に保たれると，融解・凍結の過程がなくても粒子は平均として大きくなり，「しまりゆき」は「ざらめゆき」に変態することが知られている。筆者はこのことを実験的に調べるために，積雪を，外部との間に熱の出入がないようにして 0°C に保った。乾いた雪，湿った雪，水に浸した雪およびそれに荷重をかけたばあいについて実験した結果，今までに次のような結果がえられた。

1　密度が 0.35～0.39 gr/cm³ ていどの乾いた「しまりゆき」および含水率が数%の湿った雪を 0°C に保ったばあい，粒径は多少の増加を示したが，顕著な増加はみとめられなかった（第 2 図，第 3 図）。乾いた雪のばあい，平均的にいって，粒子の体積は 5 日間に 30% ていど増加した。湿った雪では，粒子の体積は 3 日間に 40% ていどの増加率で，乾いた雪のばあいよりも増加率が多少大きいていどであった。

2　粒径の増大とともに，粒子間結合部の太さもわずかではあるが増加した（第 2 図 **b**）。

3　積雪を 0°C の水に浸したばあいは，図版 II-5，6，7 に示したように，顕著な粒径の増加がみとめられ，粒子は球形化した。平均的にいって，粒径は 3 日間に約 8 倍，6 日間に約 16 倍となった。粒子間結合部もこの間に 3 倍ちかく太くなった（第 4 図，第 2 図 **b**）。

4　積雪を 0°C の水に浸けたばあいについて，顕微鏡の下で直接観察をおこなった。図版 III-12，13 に示したように，0°C の水に浸けてからわづか 1 時間 20 分後には，積雪粒子のうちのいくつかに成長がみられた（第 6 図）。

5　積雪を 0°C の水に浸け，さらに 100 gr-wt/cm² ていどの荷重を加えたところ，数日間で雪は氷に転化した。図版 II-8，9 にそれを示した。日本の山岳部に散在する雪渓のいくつかが氷化しているのは，この実験結果によって説明されるだろう。

おわりに，この研究を進めるにあたり，いろいろと御指導をいただいた吉田順五教授に厚く御礼申し上げます。この研究に用いた費用の一部は，文部省科学研究費から支出された。

文　　献

1) Yosida, Z. et al. 1955 Physical properties of deposited snow. I. Contributions from the Institute of Low Temperature Science, No. ***7***, 19–74.
2) 若浜五郎 1963 積雪内における融雪水の移動 I. 低温科学，物理篇，***21***，45–74.
3) 小島賢治 1958 積雪層の粘性圧縮 IV. 低温科学，物理篇，***17***，53–64.
4) Jellinek, H. H. G. and Schlueter, W. 1957 Particle size distribution of pulverized snow. SIPRE Research Report ***29***, 1–8.
5) 吉田順五 1959 積雪含水率測定用熱量計. 低温科学，物理篇，***18***，17–28.
6) Butkovich, T. R. and Landauer, J. K. 1960. Creep of ice at low stresses. SIPRE Research Report, ***72***, 1–6.
7) 黒岩大助 1960 積雪の Ice-Bonding にともなう弾性率，内部摩擦の変化ならびに氷の焼結機構に関する研究. 低温科学，物理篇，***19***，1–36.

8) Kingery, W. D. 1960 Regelation, surface diffusion, and ice sintering. Jour. Appl. Phys., ***31***, 833-838.
9) 木下誠一・若浜五郎 1959 アニリン固定法による積雪の薄片. 低温科学, 物理篇, ***18***, 77-96.
10) 藤岡敏夫・田畑忠司・木下誠一 1963 尾瀬沼スノージャム調査. 低温科学, 物理篇, ***21***, 95-115.
11) 木下誠一 1963 0°C の水に浸した雪の圧縮 I. 低温科学, 物理篇, ***21***, 13-22.
12) 吉田順五 1964 立山の万年雪の雪氷学的調査. 北アルプスの自然, 35-54, 富山大学学術調査団.
13) 木下誠一ほか 1965 大雪山の雪渓調査 (第1年度). 低温科学, 物理篇, ***23***, 121-128.
14) 木下誠一 1962 塑性圧縮による積雪の氷への転化. 低温科学, 物理篇, ***20***, 131-157.
15) Шумский, П. А. 1955 Основы Структурного Ледоведения. Академия Наук СССР. Москва. 492 pp.

Summary

Granular snow is generally believed to be the product of the repeated day time melting and night time freezing of newly fallen snow. There is, however, another kind of granular snow formed by changes in old compact snow during the melt season. When this snow is soaked by melt water permeating the snow cover, the ice grains become bigger and bigger, and the texture changes from the fine texture of compact snow into the coarse texture of granular snow. Such changes in texture must be unaccompanied by heat transfer, since no temperature gradient can be produced in wet snow.

In order to see how wet compact snow changes to granular snow, a cylinder of snow was placed in a box and maintained at 0°C as is shown in Fig. 1. In this figure, S is the snow sample and A, B and C are cylindrical copper vessels containing water and small blocks of ice (pebble-like figures), G is a wooden case, and the dotted areas indicate foam-styrene used for thermal insulation. The entire apparatus was placed in a cold room maintained at +1°～+4°C. Every other day, thin sections were cut from the cylinder of snow and were examined with a polarizing microscope (Plate I～III).

Four series of experiments were carried out, using (1) dry compact snow at 0°C, (2) wet compact snow containing about 3-5 weight percent of free water, (3) compact snow immersed in water at 0°C, (4) compact snow immersed in water at 0°C and loaded with a weight.

The size of the ice grains and the thickness of the bonds connecting them were measured on microphotographs using a particle size analyser.
The results obtained may be summarized as follows:

1 Dry compact snow at 0°C (ρ; 0.387 g/cc)

Photo. 1 Pl. I shows the original microscopic texture of compact snow. Photo. 2 Pl. I was taken 5 days after the snow was placed in the box at 0°C. There is no remarkable change in the texture. In Figs. 2 **a** and **b**, the solid lines I indicate the particle size distribution (Fig. 2 **a**), and the distribution of the bond thicknesses (Fig. 2 **b**) in the original snow, and the broken line III those after 5 days at 0°C. The mean increase in volume of snow particles was found to be about 30% in 5 days.

2 Compact snow (ρ; 0.35 g/cc) with 3～5% of free water added.

The change of the particle size distribution in three days is shown in Fig. 3. The ice grain volume increased about 40% during that time. Photos. 3 and 4, Pl. I are the

extures before and after the experiment.

3 Compact snow (ρ ; 0.46 g/cc) immersed in water of 0°C.

Photographs 5, 6, and 7 in Pl. II show the microscopic textures of compact snow ›efore, 3 days, and 6 days after the immersion. Unlike in the previous two cases, great :hanges occurred in the texture. The ice grains grew rapidly and became spherical, and he bonds between them increased in area. In Fig. 4 and in Fig. 2 **b**, curves I, IV and /, distributions of ice grain size and bond diameter are given for the same three times: ›efore, 3 and 6 days after the immersion. The mean ice grain volume increased as much s 27 times within a week in this case.

4 Compact snow immersed in 0°C-water under load ($\rho=0.46$ g/cc)

A cylinder of compact snow immersed in water of 0°C was loaded with a weight, ;iving a stress of about 100 gr-wt/cm^2. After three days, groups of ice grains united to nake larger grains, as shown in Photo. 8, Pl. II. Grain P consists of more than ten riginal grains. After one week, the snow changed into ice with a number of closed or lmost closed pores as shown in Photo. 9, Pl. II.

In the experiments described above the sequence of changes occurring in the snow ould not be seen directly. In order to see the process of ice grain growth in detail, a hin section K of compact snow was placed between two glass vessels D and E (Fig. 5), urrounded by a mixture of snow and water. The whole apparatus was put on the stage of a polarizing microscope of which the objective lens is labelled G in the figure. Exeriments were carried out in a cold room at +1°～+4°C. Photos. 10, 11, 12 and 13, Pl. II, are one portion of a thin section just before, just after, 2 minutes after, and about 80 ninutes after immersion in water at 0°C. Some of the ice grains in Photo. 12 have diminshed in size or wholly disappeared in Photo. 13, while others have become more or less pherical and have grown larger. These changes are shown more clearly in Fig. 6, drawn y the superposition of these two photographs. The full lines indicate the initial ice rains (Photo. 12), and the dotted lines show them 80 minutes after immersion (Photo. 13). `he four photographs in Pl. IV. show how the ice grains of crushed snow change when ne crushed snow is soaked in water at 0°C. Photos. 14, 15 and 17 were taken just efore, about 20 seconds and 12 hours after the immersion. Note how rapidly the ice rains change in shape and size. When the experiment was conducted in a cold room at -5°C, crystallographic faces began to appear on some grains (Photo. 16).

図版説明

図版 I

1, 2　乾いた「しまりゆき」(密度 0.39) を 0°C に保ったばあいの顕微鏡組織の時間的変化を示す図。実験開始前の組織 (図の 1) が，5 日後には図の 2 のようになった

3, 4　密度 0.35の「しまりゆき」(図の 3) に数%の水を含ませてから 0°C に保ったばあい。3 日後には図の 4 のようになった

図版 II

5, 6, 7　密度 0.39 の「しまりゆき」(図の 5) を 0°C の水に浸し，0C° 恒温槽内に保つと，3 日後に図の 6，6 日後には図の 7 のように組織が変化した

8, 9　密度 0.46 の「しまりゆき」を水に浸け，さらに 100 gr-wt/cm² の静荷重を与えて 0°C に保ったばあい，3 日後に図の 8，7 日後には図の 9 のようになった。図の 9 は，気泡を含んでいるが，氷になっている

図版 III

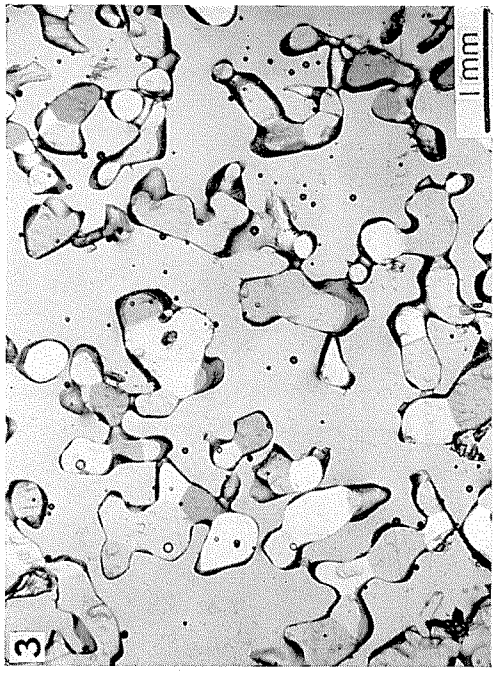
10, 11　小島式の方法でつくった厚さ 1 mm の積雪の薄片 (図の 10) を 0°C の水につけた直後の顕微鏡組織を図の 11 に示す

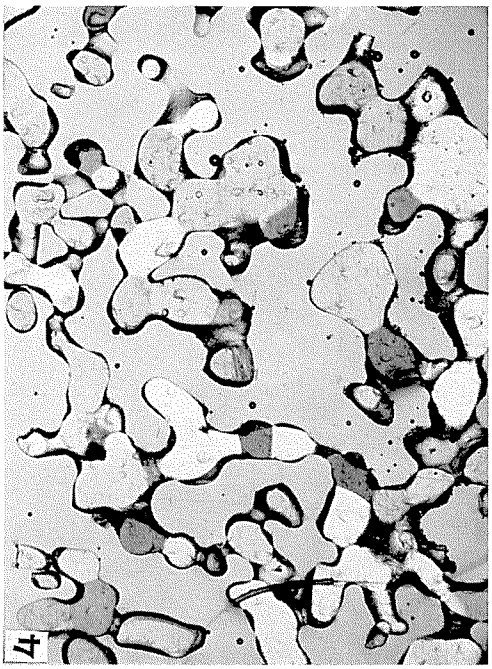
12, 13　水につけてから約 2 分後の組織図の 12 に A, B, C …… と印した粒子のあるものは，1 時間 20 分後の同一部分の写真，図の 13 で，いく分成長したのがみられる

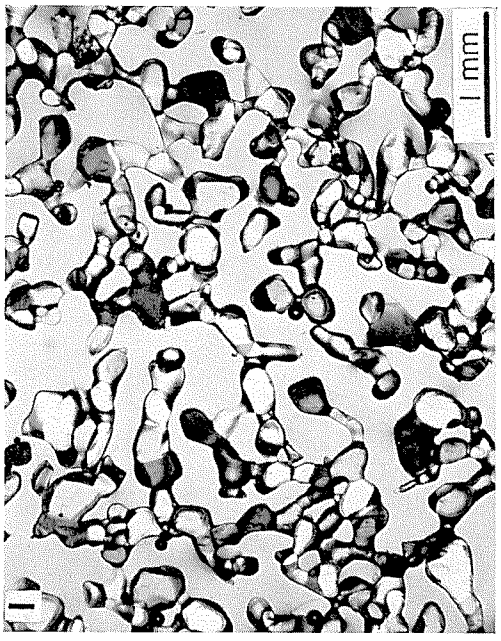
図版 IV

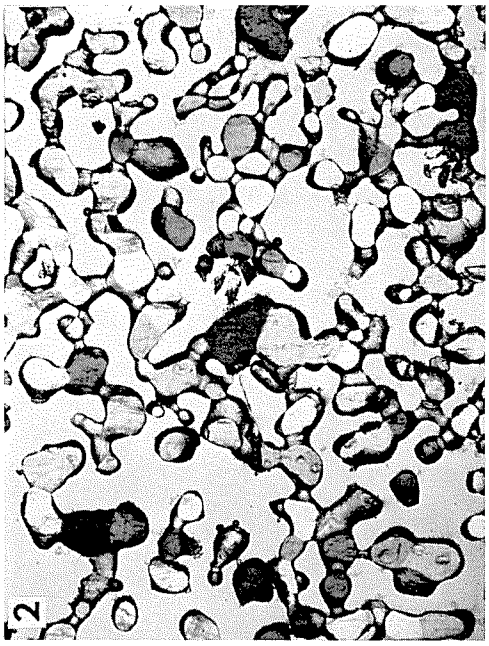
14, 15　図の 14 は，密度 0.35 の雪をばらばらにくづした状態。これを 0°C の水に浸けた直後の写真が図の 15 である

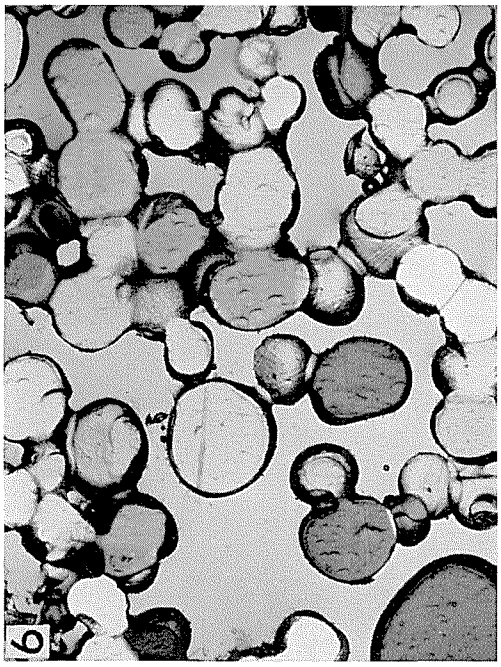
16, 17　図の 15 に示した雪粒と水との混合物を含め，装置一切を −5°C の低温室内に入れてから約 2 時間後に，雪粒は図の 16 のように変化した。雪粒が成長し，結晶面が現われた。この状態のとき，装置一切を再び +2°C の室内に移し，約 18 時間後にとった写真が図の 17 である。粒子は大きく成長すると同時に球形化した

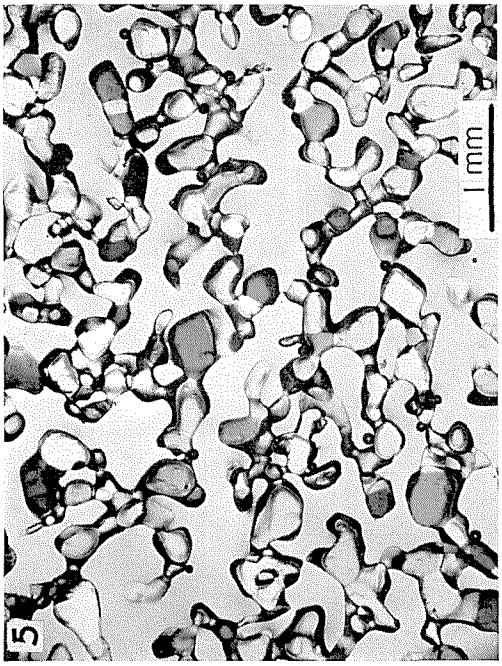

1mm
3

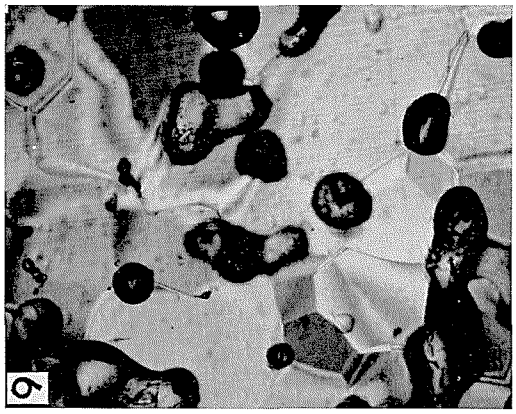

4

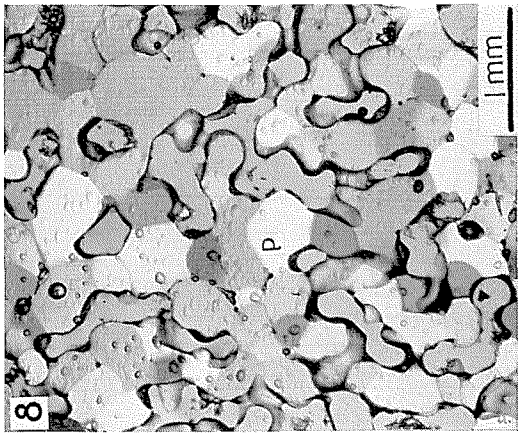

1mm
1

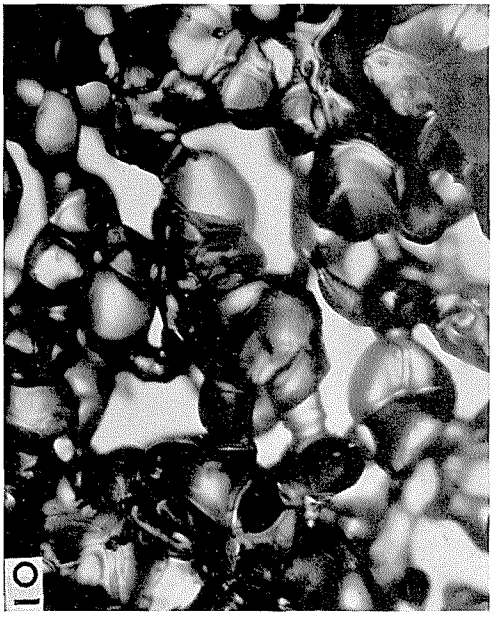

2



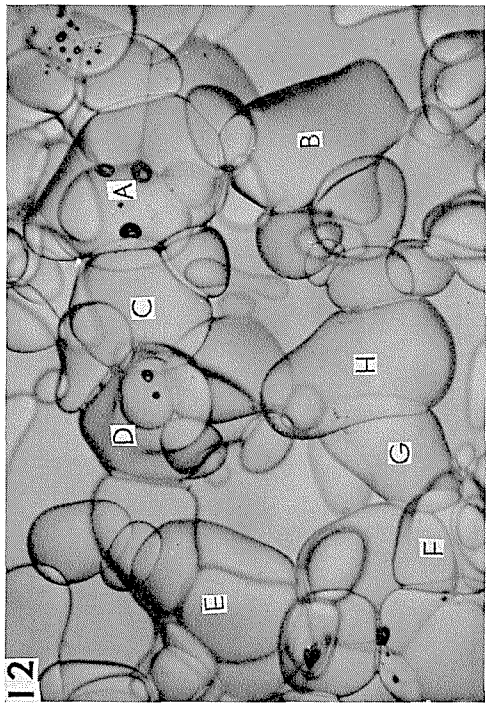

1mm



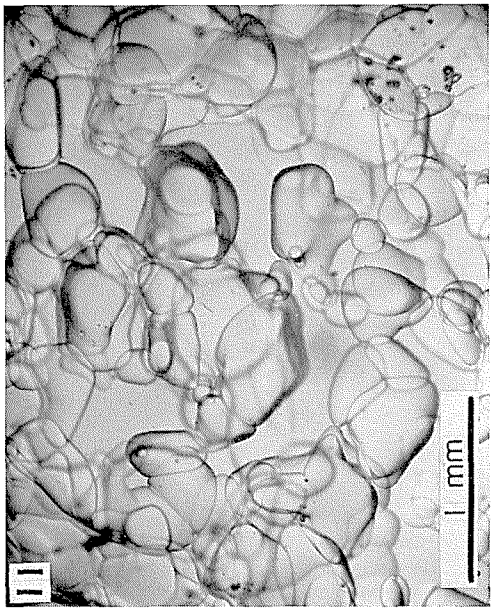

P
1mm



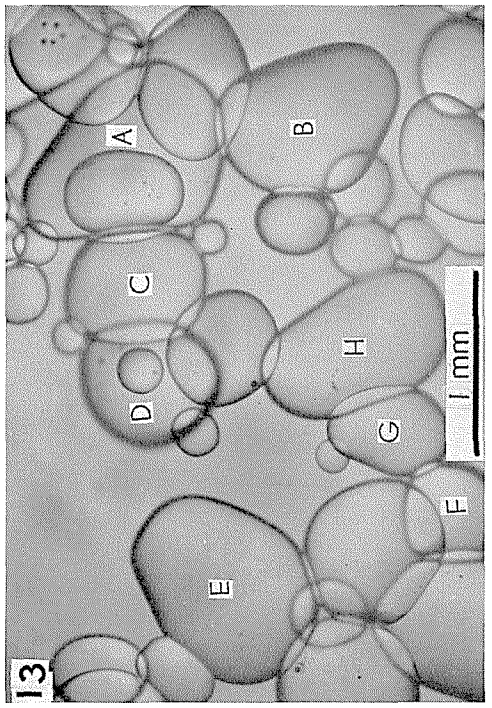
10



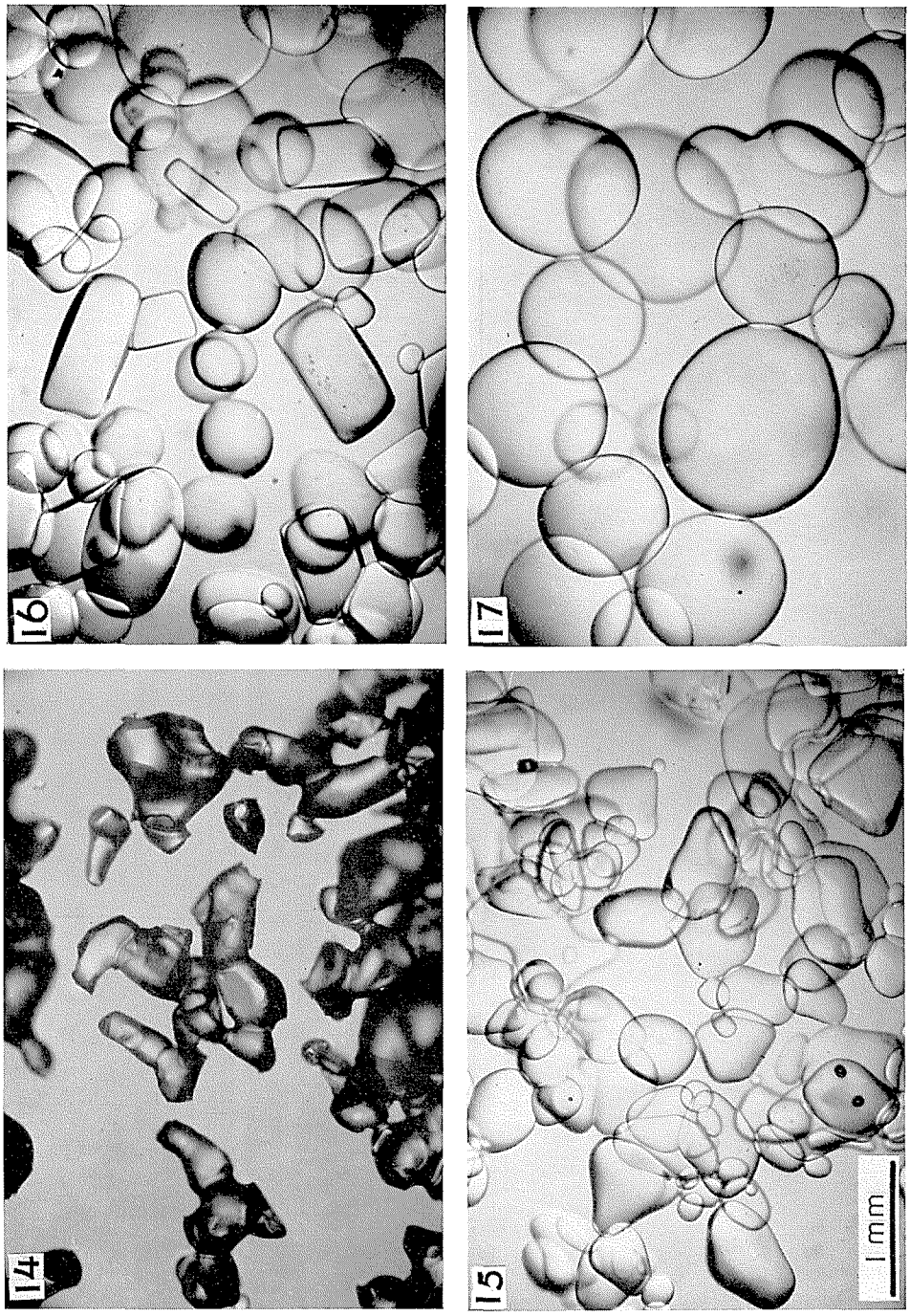
12



11



13


14
15
16
17
1 mm