



Title	尾瀬沼スノーjam調査
Author(s)	藤岡, 敏夫; HUZIOKA, Tosio; 田畑, 忠司 他
Citation	低温科学. 物理篇, 21, 95-115
Issue Date	1963-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17998
Type	departmental bulletin paper
File Information	21_p95-115.pdf



尾瀬沼スノージャム調査*

藤岡敏夫

(低温科学研究所 応用物理学部門)

田畑忠司

(低温科学研究所 海洋学部門)

木下誠一

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和37年10月受理)

I. 緒言

尾瀬沼は、群馬、福島の県境に位置し、阿賀野川水系只見川の水源である。標高は1661 mでわが国の堰止湖中最高度にあるものの一つである。沼面積は1.78 km²、最大水深は9 mである。尾瀬沼の気候は裏日本型に属し、冬期非常な多雪である。沼近くの陸地では、最大積雪深が4 mにも達する。沼は12月上旬に薄く結氷するが、その後連日多量に降る雪の重みで、この氷は積雪をのせて次第に水中に沈降し、浮力と水面上の積雪の重量が平衡を保つ。気温は低く-20°Cにもなることが稀ではないが、水面上の多量の積雪の防熱効果のため水面で氷が発達せず、全層雪のまま、水中に没する。この水中に懸垂する雪をスノージャムと呼んでいる。北海道にもいくつかの湖沼があるが、尾瀬沼に比べて降雪量が少ないので、スノージャムと呼ばれるような氷はまだ知られていない。

筆者等は、昭和37年1月末尾瀬沼に赴き、スノージャムの実態について、種々の測定調査をおこなった。スノージャムについては、その鉛直断面を詳細に観察し、雪密度、硬度を測定し、又薄片を作って微細な顕微鏡組織を観察した。水面上の積雪についても、温度、密度を測定し、薄片を作って、組織を観察した。以上の観察及び測定は、1月29日と30日の2日にわたっておこなわれた。29日の測定点は、沼山荘近くの岸より約100 mの湖上、水深2.5 mのところ、30日の測定点は、沼の取水口近くの岸より約100 m、水深3.7 mのところであった。2点のあいだの距離は300 m位である。

それらの結果を総合して、スノージャムの発達の機構について、考察を加えた。

すなわち、スノージャムは、はじめ水面上にあった積雪が水中に沈降してつくられるのであるが、この過程で、積雪が水面に近づくと、沼の水がしみこんで、水しみ雪になる。この水

* 北海道大学低温科学研究所業績 第637号

しみ雪の時期がスノージャム生成の主要時期であることが解った。

以下に次の順序で、その結果について報告する。

II. スノージャム

- 1) スノージャムの構造の観察
- 2) スノージャムの雪密度
- 3) スノージャムの硬度
- 4) 水面上の積雪
- 5) スノージャムの力学的平衡
- 6) スノージャムの内部組織
- 7) スノージャムの発達機構の考察

III. 陸地の積雪

- 1) 測定結果
- 2) 小島の“積雪層の粘性圧縮”の理論との比較

IV. 沼と陸地の積雪の関係

- 1) 氷総重量
- 2) 沼の水面上積雪の特徴

II. スノージャム

1月末の尾瀬沼は、平坦な広々とした雪原の様相を呈し、沼を蔽う積雪は水面上80 cmの厚さに達していた。そのうち、最下層の5 cmに沼の水がしみていた。沼の水の下に厚さ120 cmのいわゆるスノージャムがあった。スノージャムの底には、青氷が2.4 cmあり、その下は沼の水であった。

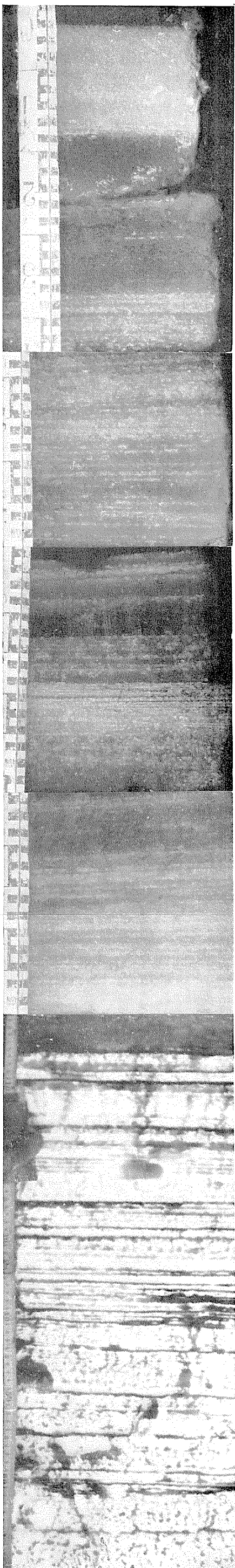
1. スノージャムの構造の観察

まず、沼の水面上に没しているスノージャムの鉛直断面を観察した。この鉛直断面を露呈させるには、次のようにした。すなわち、積雪を除き、水面から50 cm位の深さまでのスノージャムを取除き、沼の水面上に50 cm×150 cmの開水面を作る。この穴の一つの鉛直側面を幅30 cmほど、水面から底の青氷まで平らに削る。その断面にそって、上から30 cm位毎に、スノージャムを薄く(5 cm厚位)初取り、次々に浮び上らせる。浮んできたスノージャムの鉛直断面を水平にして、上から下まで順にそろえて開水面に並ばせる。水から取出すと、スノージャム内に含まれている水が脱落して、全体が白くみえ、層構造が解らなくなる。しかし、水に浮べておけば、その層構造をみることができる。こうして、沼の水面上に露呈したスノージャムの鉛直断面が第1図(a)の写真である。観察を行なった2箇所のスノージャムの厚さ、構造等は殆んど同じであったので、ここには1月29日に観察したものを示した。

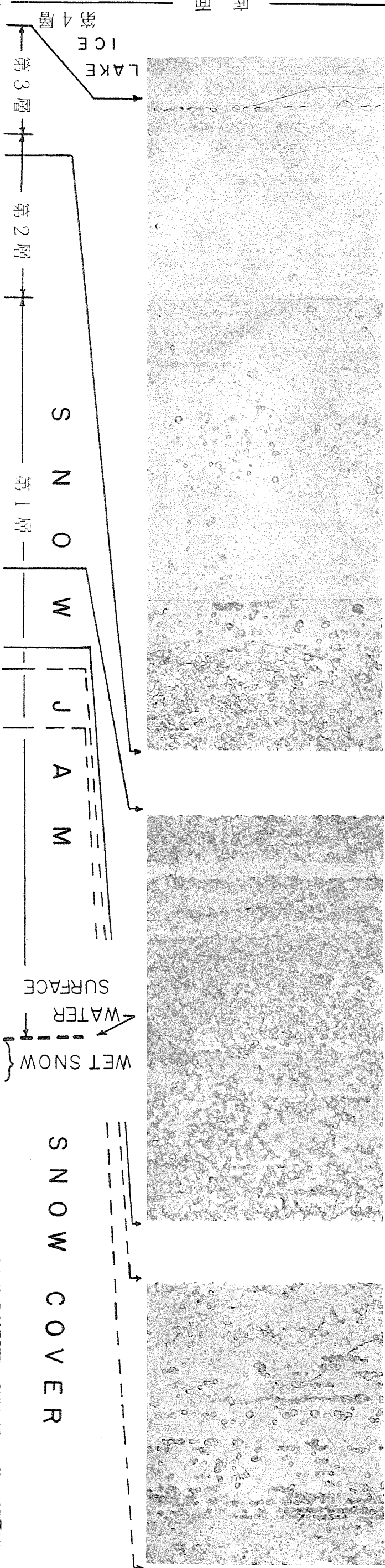
又、第1図の(b)及び(c)には、スノージャムの薄片(厚さ約1 mm)の実物大写真及び同じ薄片を交叉偏光板の間に挿入して撮した写真を示した。前者で不定形あるいは円形の模様は気

× 1/5

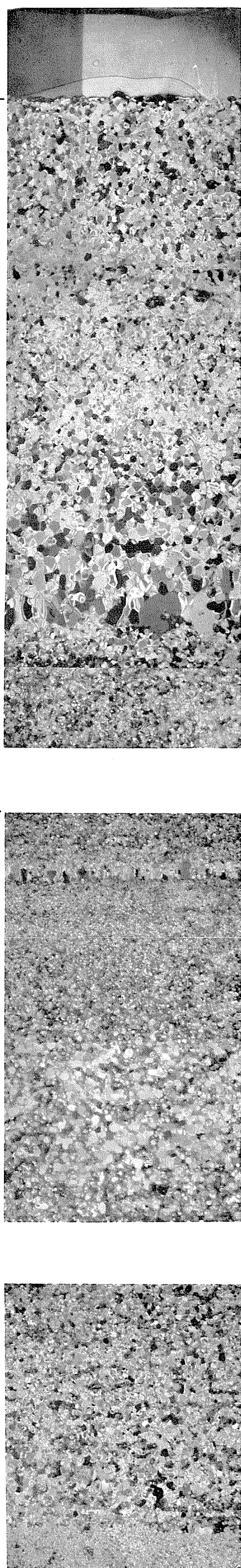
(a)



(b) × 1



(c) × 1



第1図 スノージャム及び湖上積雪の鉛直断面

泡をあらわしており、後者の模様のひとつひとつはジャムの氷の個々の結晶粒をあらわしている。この薄片は次のようにして作られたものである。まず、スノージャムを水中から引上げ、その中に含まれている水を落す。しかし、この水を全部除去することは出来ない。水を少し残したままで放置して残った水を凍らせる。そして、鉋で薄く削るのである。厚さ1 mm ほどにすることは容易である。この方法の詳細については、田畑・小野の論文¹⁾を参照されたい。

第1図(a)の写真から解るように、スノージャムの構造は次の4つの部分に大別される。すなわち、第1層は層状構造の顕著な部分で、表面から85 cmの厚さをもっている。第2層は半透明な部分で、第1層に続き、厚さは約18 cmである。第3層は白色を呈し、層状構造がはっきりしない部分で、厚さは14 cmである。第4層はスノージャムの底の透明な、いわゆる青氷の層で、厚さは2.4 cmである。

第1層には、第1図(a)の写真にみられるように、数mmごとに顕著な層状構造がみられる。写真で白くみえるところには、気泡が含まれている。気泡はそれぞれ列をなして水平に並び、層状構造を形成している。気泡の大きさは、同じ列内では、ほぼ一様であるが、列が異なると、大きさも間隔も異なる。

第1図(b)の薄片の写真では、この層状構造は、その一部分においてだけみられる。後に述べるように、スノージャムには、平均すると、氷のほかに体積比でほぼ5%の気泡とほぼ30%の水が含まれている。薄片をつくるために、スノージャムを水中からひきあげて、含まれていた水の一部を落したので、薄片中にはスノージャム内にもともと存在して、層状構造を形成していた気泡のほかに、脱落した水の体積に等しい空気も含まれていることを注意しなければならない。このために、第1図(a)でみられる層状構造は、薄片では、ごく一部分でしか認められないのである。

第1層のスノージャムの大部分は、軟かくて指先で容易に穴をあけることができるほどであった。ただ、第1図(b)にみられる厚さが2~4 mmで気泡が殆んどない透明な層と、気泡が層状に並んでいる部分は、硬かった。第1図(c)から解るように、第1層の大部分では、氷の結晶粒の大きさは0.5~1 mmである。硬い部分では、氷の結晶粒の大きさは1~1.5 mmで、比較的大きい。この結晶粒は、湖水の表面が凍結してできる場合の氷の結晶粒と同じである。このことから、これらの硬い部分は、それらの部分がちょうど水面にあったときに形成された氷の層であると推定される。

第2層はほぼ18 cmの厚さで、半透明な軟かい部分である。この層には、気泡が非常に少ない。又、薄い氷層が3つある。ただし、薄片の写真では、実際のスノージャム内には存在しない多数の気泡があらわれている。結晶粒の大きさは、第1層中の軟かい部分とほとんど同じである。

第3層は14 cmの厚さで、気泡が多く含まれているために白くみえる。第1図(b)からも解るように、直径0.1~0.5 mmの孤立した無数の球形の気泡が全層にわたって無秩序に分布しており、層状構造はほとんどみとめられない。この層は上から下まで通常の多孔質の氷と同じ

硬さである。結晶粒は、第1、第2の層における結晶粒の数倍の大きさで、層の上部では特に大きく、直径3 mm に達するものもある。平均密度は、空気中に引きあげて測定した結果では、ほぼ 0.91 gr/cm^3 であった。

第4層はスノージャムの底の透明な青氷層で、厚さは2.4 cm である。この青氷には気泡がほとんど含まれておらず、密度は純氷の密度 0.917 gr/cm^3 に近い。この層は沼の水面の初結氷(昭和36年12月5日)のときに、形成されたものである。

第1図(a)の上側には、水面上積雪の鉛直断面を示してある。これは、インクで着色した断面の写真である。着色の方法は、藤岡の「積雪観測法 I²⁾」(雪氷23巻6号)に詳細に述べられている。最下層の5 cm には沼の水がしみこんでいる。積雪にはほぼ1 mm ごとに、インクによる縞が水平に列をなして現われている。積雪のこのような層状構造は、積雪内部組織の僅かな違いにもとづくものである。

2. スノージャムの雪密度

スノージャムの組成は、氷と空気と水である。そのうちで氷がしめる体積比を α とすると、 $\alpha\rho_i$ (ρ_i は氷の密度 0.917 gr/cm^3) は、スノージャム 1 cm^3 中に氷がしめる質量で、これをスノージャムの雪密度とよぶことにする。この雪密度を吉田が考案した結合熱量計型積雪含水率を用いて測定した。それを用いた積雪含水率測定法の詳細については、吉田の論文³⁾を参照されたい。その方法の概略は次の通りである。

一定体積 $v \text{ cm}^3$ のスノージャムを採取器でとり、適当に水をきって、積雪含水率計の雪入れ容器に入れる。この容器に入った試料の氷の総量を測るわけである。つぎに、一定量の既知の温度の湯を入れたもう一つの容器と、いまのスノージャムを入れた容器とを結合し、上下さかさまに数回ゆり動かすことによって、湯とスノージャムとを混合させる。そして、最終の温度を測るのである。試料の中に含まれる氷の総量 $\alpha\rho_i v \text{ gr}$ は次の式で与えられる。

$$\alpha\rho_i v = \frac{1}{79.6} \left\{ (T_1 - T_2)(W_A + w_A) - T_2(W_B + w_B) \right\}$$

ここで、 W_A はじめに容器に入れた湯の目方

w_A その容器の水当量

W_B 採取したスノージャムの目方

w_B スノージャムを入れた容器の水当量

T_1 はじめの湯の温度

T_2 混合後の温度

である。

測定の一例。水面下11~14 cm のスノージャムについて。

$$W_A = 271.7 \text{ gr,}$$

$$w_A = 16.6 \text{ gr,}$$

$$W_B = 86.5 \text{ gr,}$$

$$\alpha\rho_i v = 58.3 \text{ gr,}$$

$$v = 101 \text{ cm}^3,$$

$$w_B = 9.9 \text{ gr}, \quad \text{雪密度 } \rho_s = \alpha \rho_i = 0.577 \text{ gr/cm}^3,$$

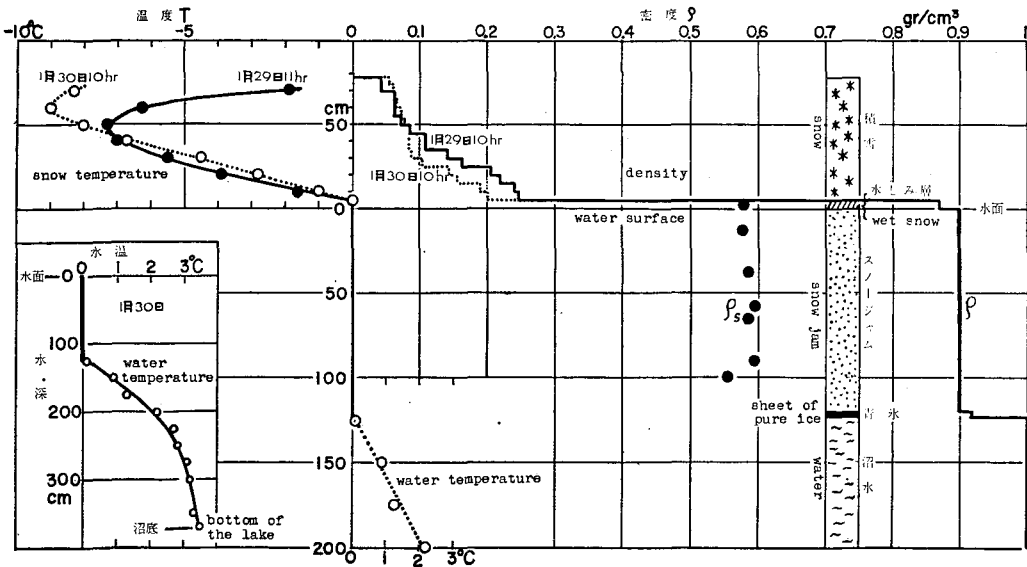
$$T_1 = 48.0 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \alpha = 0.63$$

$$T_2 = 23.9 \text{ }^\circ\text{C}$$

求めるのは、スノージャムに含まれる氷の量だけで、水の量を問題にしていない。したがって、スノージャムを採取するときには、適当に水をきってよいわけである。上の方法で測定したスノージャムの雪密度 ρ_s の値を、第2図右側の密度分布グラフのほぼ中央に黒丸印で示す。第1図の断面写真からも解るように、スノージャムの上部には、2乃至3mmごとに層状構造がみられる。それで、雪密度も、その層ごとにかなり違っているものと思われる。しかし雪密度を測定するときには、試料採取が3cmの厚さにわたるものであったため、その厚さの間の平均のスノージャムの雪密度が得られたのである。したがって、測定値には、層状構造の特徴があらわれていない。

雪密度の測定は、鉛直断面を観察した2箇所のスノージャムについておこなわれた。測定の回数は少なかったが、2箇所ともスノージャムの上から下まで深さに関係なく、雪密度は0.57~0.59 gr/cm³であった。したがって、スノージャム内で氷のしめる体積比 α は、0.63~0.64である。

スノージャムの底面の青氷は、氷だけで水や空気を含まないから、その密度は、純氷の密度0.917 gr/cm³にひとしい。



第2図 尾瀬沼の積雪とスノージャムの密度、温度及び沼の水温度分布。 ρ_s はスノージャムの雪密度。気温1月29日11時 -6.6°C 、30日10時 -9.7°C

3. スノージャムの硬度

スノージャムという言葉から軟かいという印象をうけるが、実際にスノージャムがどの位の硬さのものか、木下式硬度計⁹⁾を用いて、その硬度を測った。この方法は、硬度を求めようとする物体に、ある高さから錘を落とし、凹んだ穴の深さを測って硬度を求めるものである。このときの硬度の値は、衝撃圧縮に対する抵抗値を表す。スノージャムの最上層(ちょうど水面)の硬度の値として、 1.04 kg/cm^2 が得られた。木下の測定によると、この値は密度 0.32 gr/cm^3 位の乾いたしまり雪の硬さと同じ程度である。さきに述べたように、スノージャムの雪密度は 0.59 gr/cm^3 であるが、一般に、密度が 0.4 gr/cm^3 以上の乾いたしまり雪では、硬度が数 gr/cm^2 であることが珍しくない。したがって、スノージャムは非常に軟かい雪であるということができる。又水面に氷がはる他の例として、海氷があるが、海氷の硬度は $10\sim 30 \text{ kg/cm}^2$ という大きな値である。このことから、スノージャムを水に浮ぶ氷と考えた場合にも、非常に軟かい氷であるとしなければならない。

人間がその上を歩いて靴が沈まない雪の硬度は、ほぼ 0.5 kg/cm^2 で、このスノージャムの硬度 1.04 kg/cm^2 の半分である。したがって、スノージャムは軟かいとは云っても、その上を歩いて、靴が沈まない程度の硬さである。

4. 水面上積雪

第1図(a)に、水面上積雪の断面写真を示してあるが、厚さ 78 cm で、その最下層 5 cm に水がしみこんでいる。1月29日と30日に測定した密度 ρ 、温度 T を、第2図に示す。又、水しみ層については、密度 ρ の他に、雪密度 ρ_s も、2. に述べた方法で測定した。1月29日と30日で測定地点が違ったため、両日の測定結果に多少の違いがあった。

第2図から解るように、水しみ層のすぐ上では、密度はたかだか 0.20 乃至 0.24 gr/cm^3 にすぎないのに、水しみ層で急に 0.87 gr/cm^3 と大きくなっている。水がしみたために、密度が大きくなったのは勿論であるが、その水を除いて氷だけの密度 ρ_i をみても、 0.58 gr/cm^3 という大きな値を示している。そして、この値はスノージャムの雪密度にひとしい。

積雪の温度は、1月29日11時と30日10時に測られた。水面上 $50\sim 60 \text{ cm}$ の温度が最低で、それより下では、次第に高くなりながら、水しみ層にいたっている。水しみ層の温度は勿論 0°C であるから、積雪内の温度勾配は、かなり急である。このため、水面上積雪は陸地の積雪とは違った特徴をもつのであるが、そのことは、後の第IV節の2で述べる。

水中のスノージャムと青氷の温度は、勿論 0°C で、青氷の下の水の温度は、29日の測定地点では、沼の底 $2 \text{ m } 50 \text{ cm}$ まで 0°C のままであった。しかし、30日の測定地点では、深さとともに上昇し、沼の底 $3 \text{ m } 70 \text{ cm}$ では、 3.5°C であった。その水温分布は第2図の中央下部と左下隅の枠内に示してある。

5. スノージャムの力学的平衡について

スノージャムは沼水に懸垂されて、力学的平衡を保っている。つまり、水面上積雪の重量と、水中にあるスノージャムによる浮力とがつりあっているわけである。その状態を理論的に

考察し、あわせて、スノージャムに含まれている気泡の量を推定する。又、スノージャム中の応力の垂直分布を求める。

第3図の右側に示すように、スノージャムは氷 α ・空気 β ・水 $1-\alpha-\beta$ の体積比で構成されているものとする。単位断面積のスノージャムの柱を考えると、この柱は上面に、水面上積雪重量 $w \text{ gr/cm}^2$ 、下面に静水圧 $\rho_w g D \text{ gr/cm}^2$ (ρ_w は水の密度 1 gr/cm^3 、 g は重力の加速度、 D はスノージャムの厚さ) をうけている。そして、弾性的なつりあいの状態にあるとする。この柱に生ずる歪は、単軸歪であるから、 x, y 軸を水平面内に、 z 軸を水面から鉛直下方にとると、

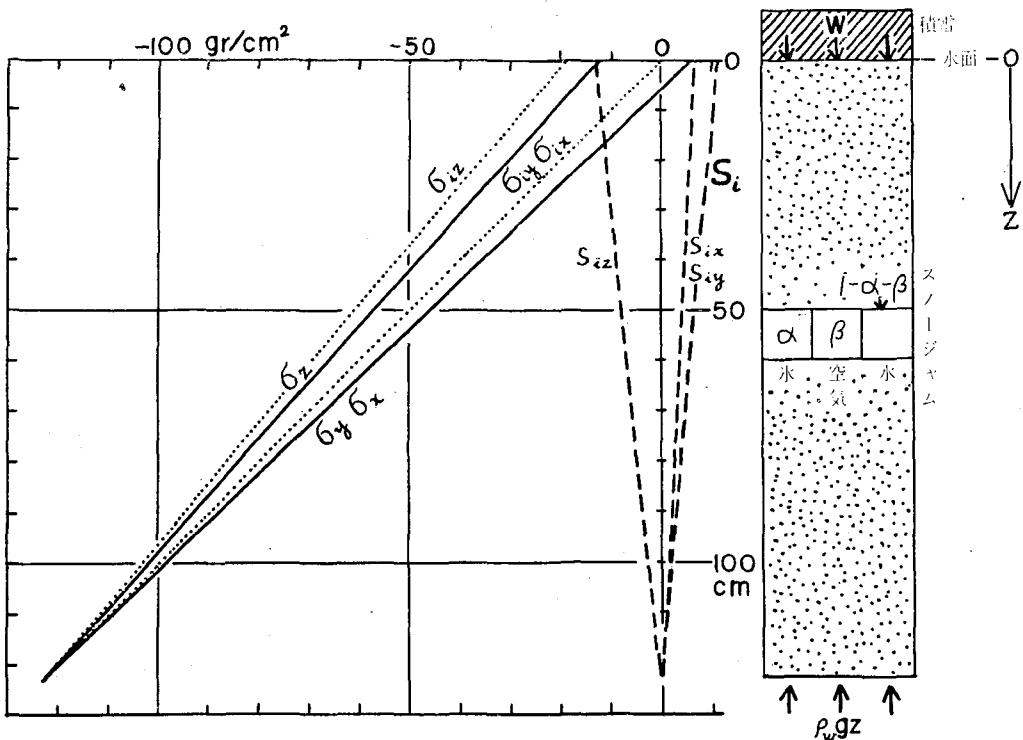
$$\epsilon_x = \epsilon_y = 0, \quad \epsilon_z \neq 0,$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \lambda \epsilon_z, \quad \sigma_z = (\lambda + 2G) \epsilon_z$$

となる。 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ はそれぞれ x, y, z 軸方向の歪成分、 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ はそれぞれ x, y, z 軸方向の応力成分である。又、 λ, G はそれぞれラーメの常数及び剛性率をあらわす。定義から、

$$\left(\lambda + \frac{2}{3}G\right) \Delta = -p \text{ (静水圧)},$$

ただし $\Delta = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$ である。



第3図 スノージャム組成の模式図と応力分布。ただし、 $\alpha = 0.64, \beta = 0.047, w = 12.3 \text{ gr/cm}^2, D = 123 \text{ cm}$ とする。

したがって、 $\left(\lambda + \frac{2}{3}G\right)\epsilon_z = -\rho_w gz$,

$$\sigma_x = \sigma_y = -\rho_w gz - \frac{2}{3}G\epsilon_z, \quad (1)$$

$$\sigma_z = -\rho_w gz + \frac{4}{3}G\epsilon_z. \quad (2)$$

応力の平衡の式は

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + \rho Z = 0, \quad (3)$$

ここで、体積力 $\rho Z = \{\alpha\rho_i + (1-\alpha-\beta)\rho_w\}g = -\{\alpha(\rho_w - \rho_i) + \beta\rho_w\} + \rho_w g$.

境界条件は

$$z=0 \text{ で, } \rho_z = -w,$$

$$z=D \text{ で, } \sigma_z = -\rho_w gD.$$

以上から (3) 式を解くと、

$$\sigma_z = \int_0^z \{\alpha(\rho_w - \rho_i) + \beta\rho_w\}g dz - \rho_w gz - w, \quad (4)$$

$$w = \int_0^D \{\alpha(\rho_w - \rho_i) + \beta\rho_w\}g dz. \quad (5)$$

(1) 式から

$$\sigma_x = \sigma_y = -\frac{1}{2} \int_0^z \{\alpha(\rho_w - \rho_i) + \beta\rho_w\}g dz - \rho_w gz + \frac{w}{2}. \quad (6)$$

α, β の平均値 $\bar{\alpha}, \bar{\beta}$ ($\bar{\alpha} = \frac{1}{D} \int_0^D \alpha dz, \bar{\beta} = \frac{1}{D} \int_0^D \beta dz$)

を使うと、(5) 式から

$$\frac{w}{gD} = \bar{\alpha}(\rho_w - \rho_i) + \beta\rho_w = 0.083\bar{\alpha} + \beta \quad (7)$$

が得られる。

実測の結果によると、スノージャム内の氷がしめる体積比の平均値 $\bar{\alpha}$ はほぼ 0.64 であった。1月29日の測定では、 $w = 13.3 \text{ gr/cm}^2$, $D = 123 \text{ cm}$ (青氷 3 cm を含めて) であるから、(7) 式からスノージャム内の気泡がしめる体積比の平均値 $\bar{\beta}$ は 0.055 になる。又、1月30日の測定では、 $w = 11.8 \text{ gr/cm}^2$, $D = 123 \text{ cm}$ であるから、 $\bar{\beta}$ は 0.043 になる。スノージャムには平均 5% 前後の気泡が含まれていることになる。そして、残りのほぼ 31% が水なのである。空気は互に孤立した気泡の形で含まれているが、水は互に連結している。その証拠にスノージャムを水中から取出すと、水がぬけ落ちる。

いま、かりに α, β をスノージャム全層にわたって一様と仮定し、密度 $\rho (= \alpha\rho_i + (1-\alpha-\beta)\rho_w)$ と応力の分布を求めてみる。簡単のために、 $\alpha = 0.64$, $\beta = 0.047$, $w = 12.3 \text{ gr/cm}^2$ として計算した例を示す。スノージャムの雪密度 ρ_i は 0.59 gr/cm^3 になるが、全体としての密度 ρ は 0.9 gr/cm^3 になる。第2図の密度分布には、スノージャムの密度 ρ として、この 0.9 gr/cm^3 の値を太い実線で示した。密度 ρ は、その下の青氷が 0.917 gr/cm^3 , 更にその下の沼の水が 1 gr/cm^3 である。

(6) 式及び (4) 式から

$$\sigma_x = \sigma_y = -1.05z + 6.15, \quad (8)$$

$$\sigma_z = -0.9z - 12.3. \quad (9)$$

(8) 式と (9) 式で表わされる応力の分布を第3図左側のグラフに実線で示す。応力の絶対値は、深さとともに直線的にまし、 $z = D$ のスノージャム下面では、 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = -\rho_w gD (= -123 \text{ gr/cm}^2)$, すなわち静水圧に等しい。

スノージャム内の実質の水部分には、どんな応力が働いているかを考えてみよう。氷のつながりは複雑であるが、今かりに、鉛直方向に一様につながっているとす。その場合に、氷に作用する応力 σ_{ix} , σ_{iy} , σ_{iz} は次のようになる。 σ_{ix} , σ_{iy} は静水圧であるから、

$$\sigma_{ix} = \sigma_{iy} = -\rho_w gz \quad (10)$$

又、 σ_{iz} は $\sigma_z = \alpha\sigma_{iz} + (1-\alpha)\sigma_w$ の関係から求められる。 σ_w は静水圧で $-\rho_w gz$ にひとしい。

$$\sigma_{iz} = -\rho_i gz + \frac{\beta}{\alpha} \rho_w gz - \frac{w}{\alpha}. \quad (11)$$

実質の水部分の変形に關与する応力偏差分 s_{ix} , s_{iy} , s_{iz} は、

$$s_{ix} = s_{iy} = \sigma_{ix} - \sigma = -\frac{1}{3} \left(\rho_w - \rho_i + \frac{\beta}{\alpha} \rho_w \right) gz + \frac{1}{3} \frac{w}{\alpha}, \quad (12)$$

$$s_{iz} = \frac{2}{3} \left(\rho_w - \rho_i + \frac{\beta}{\alpha} \rho_w \right) gz - \frac{2}{3} \frac{w}{\alpha}. \quad (13)$$

ここで、 $3\sigma = \sigma_{ix} + \sigma_{iy} + \sigma_{iz}$ である。

又、剪断応力強度 $S_i \left(= \sqrt{\frac{1}{2}(s_{ix}^2 + s_{iy}^2 + s_{iz}^2)} \right)$ は、

$$S_i = - \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \rho_w - \rho_i + \frac{\beta}{\alpha} \rho_w \right) gz + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{w}{\alpha}. \quad (14)$$

前と同じく、 $\alpha = 0.64$, $\beta = 0.047$, $w = 12.3 \text{ gr/cm}^2$ を入れて計算すると、

$$\sigma_{ix} = \sigma_{iy} = -z, \quad (15)$$

$$\sigma_{iz} = -0.84z - 19.2, \quad (16)$$

$$s_{ix} = s_{iy} = \frac{w}{3\alpha} \left(-\frac{z}{D} + 1 \right) = -0.052z + 6.4, \quad (17)$$

$$s_{iz} = \frac{2w}{3\alpha} \left(\frac{z}{D} - 1 \right) = 0.104z - 12.8, \quad (18)$$

$$S_i = -\frac{w}{\sqrt{3}\alpha} \left(\frac{z}{D} - 1 \right) = -0.09z + 11.1 \quad (19)$$

となる。これらの値を第3図左側の応力分布グラフに、それぞれ示した。 σ_{ix} , σ_{iy} , σ_{iz} は深さとともに、絶対値が大きくなり、下面では静水圧にひとしい。 s_{ix} , s_{iy} , s_{iz} , S_i は、深さとともに絶対値が小さくなり、下面では0である。つまり、下面では静水圧だけが働くので、応力偏差分はないのである。

6. スノージャムの内部組織

スノージャムの薄片を作つて、その内部組織を顕微鏡で観察した。薄片の製作には、木下・若浜が考察したアニリン法⁵⁾を用いた。この方法は、スノージャムを面積 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 、厚さ 1 cm ほど切りとり、出来るだけ水を落してから、 -5°C 位のアニリンに浸し、更に冷してアニリンを固らせてから薄く削る方法である。水面下 67 cm 、 93 cm の2箇所から、試料を採取し、上記アニリン法で薄片を作つた。その写真の一部を第4図1, 2, 3, 4に写す。図の1, 2が、水面下 67 cm のスノージャムで、2は1と同じところの偏光写真である。3, 4は水面下 93 cm のスノージャムである。いずれも、水平にとつた薄片で厚さ 0.3 mm 位である。写真からも解るように、スノージャムの氷部分では大きさ $0.5 \sim 1\text{ mm}$ の氷の結晶が集合体をなしている。普通の多結晶氷では、結晶境界は直線的であるが、スノージャムでは、結晶境界が彎曲しているのがめだつ。特に3, 4の深い方のスノージャム薄片のほぼ中央には、結晶境界がひどく曲りくねっているのがみとめられる。これは結晶境界の移動がさかんに起つている証拠である。

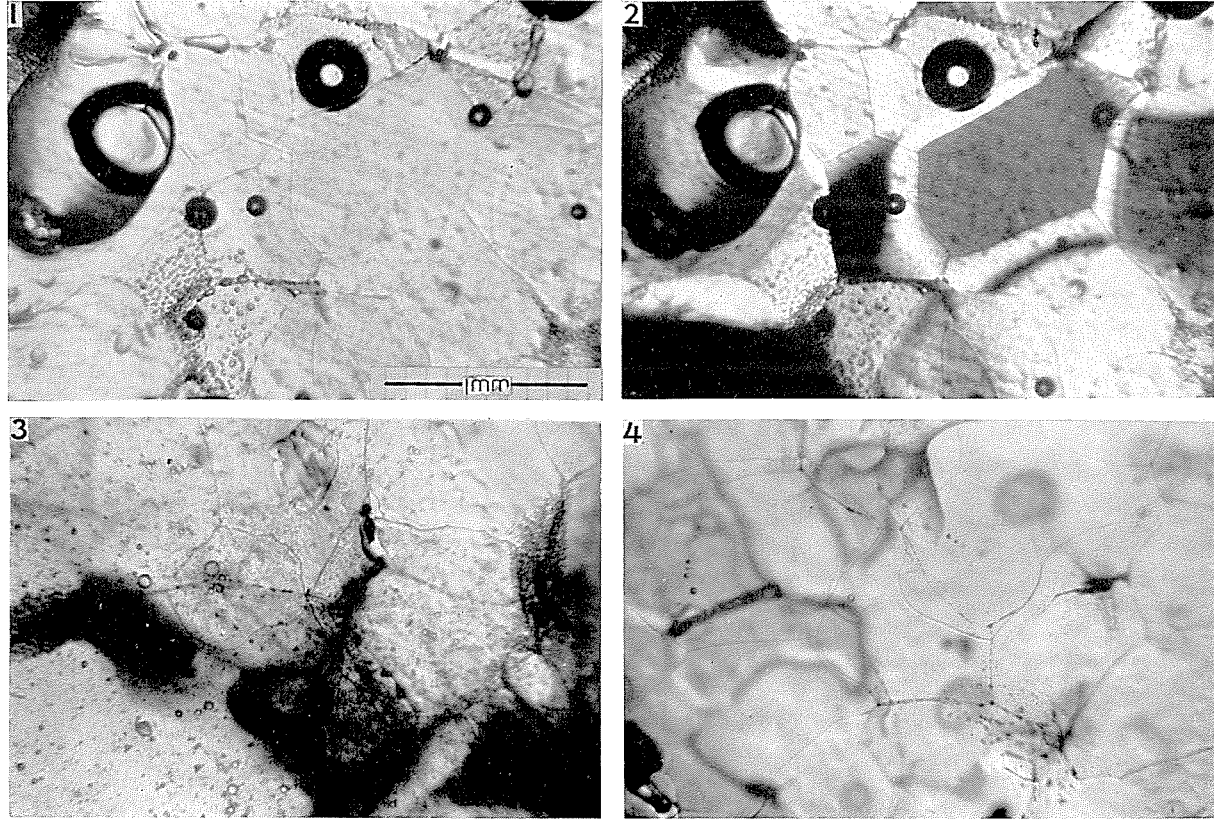
7. スノージャム発達機構の考察

(a) 水面上積雪のうちで、水しみ層のすぐ上の層の密度は、 0.2 gr/cm^3 及び 0.24 gr/cm^3 であるが、その下の水しみ層では、雪密度は 0.58 gr/cm^3 である。このように水がしみた層では、雪密度は急激に増大しているのであるが、その理由として、二つのことがあげられる。その一つは、水しみ層のしみ水が凍るための氷量増加である。又、もう一つは、雪が縮んで、みかけ上密度がますことである。

前者のしみ水が凍る量は次のようにして求められる。水が氷になると潜熱を放出する。この熱は下の方の全層 0°C で温度勾配のないスノージャム内に伝導することはなく、全部上方の温度勾配がある積雪内へ放出される。 dt 時間に生成される氷の量 dm は、

$$L \frac{dm}{dt} = - \left(k \frac{\partial T}{\partial \xi} \right)_{\xi=0} \quad (20)$$

の式から与えられる。ここで、 L は氷の融解潜熱、 $k \cdot T$ はそれぞれ雪の熱伝導率と温度である。又 ξ は水しみ層の上限から積雪の方へ鉛直上方にとつた高さである。積雪の熱伝導率 k



第4図 スノージャムの薄片の写真。厚さ0.3 mm。1,2 水面下65 cm。2は1の偏光写真。3,4 水面下93 cm。

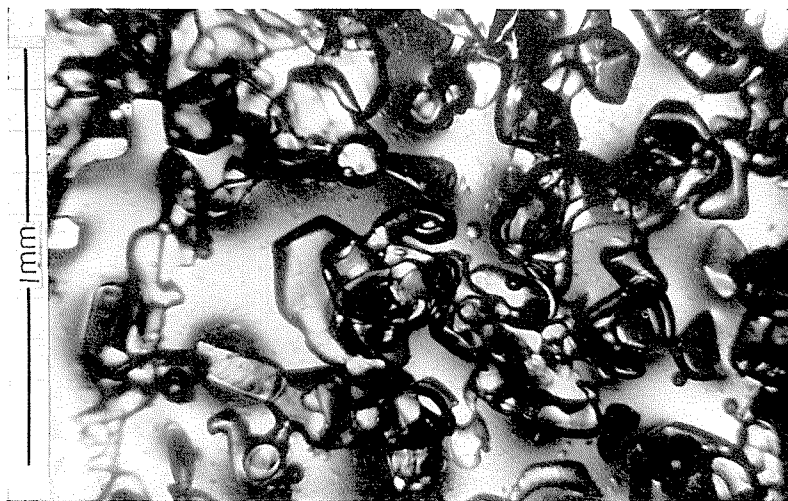
cal/sec·cm²°Cと密度 ρ gr/cm³ との関係を求めた吉田の式⁶⁾

$$\log_{10} k = -4 + 2\rho \quad (21)$$

から、雪の密度 ρ を 0.24 gr/cm³ として k を求めると、 k は 0.0003 cal/sec·cm²°C になる。水しみ層上限における温度勾配 $\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z=0}$ を第2図1月29日の場合について求めると、 $-0.27^\circ\text{C}/\text{cm}$ になる。したがって(20)式から、 $\frac{dm}{dt} = 0.088 \text{ gr}/\text{cm}^2 \cdot \text{day}$ になる。ところで、スノージャムの成長速度を一定なものとする、初結氷時の12月5日から57日間で120 cmの厚さにまでなったのであるから、その成長速度は2.1 cm/dayである。このことから、水しみ層で、しみ水が凍るためにふえる密度増大分を求めると、僅か0.04 gr/cm³ にすぎない。

したがって、水しみ層になって雪密度が急激に大きくなる原因としては、積雪に水がしみたために強く縮むことが考えられる。密度0.2 gr/cm³ほどの積雪に水がしみて、僅かの荷重で直ちに縮み、密度が3倍近くにもなったことになる。ところがこのときの荷重は僅かに7.5 gr/cm² (1月29日測定点)及び9.0 gr/cm² (1月30日測定点)にすぎない。このような小さい荷重で密度が3倍にも増大することはあり得ないように思われるが、このことは実際に起こることで、実験室においても確かめられている⁷⁾。すなわち、密度0.3 gr/cm³のしまり雪の円壱を0°Cの水の中に浸すと、僅か15 gr/cm²の荷重でも、雪の円壱は急速に縮む。その縮み方は、時間がたつにつれ、ゆるやかにはなるが、一日もたつと、高さが約半分になり、密度は0.56 gr/cm³にもなる。

スノージャムが連続的に沈降し、その沈降速度が一定であると仮定すると、水しみ層内でしみ水が凍結するための雪密度の増大分は非常に少ないことがわかった。しかし実際には、降



第5図 沼の水面上積雪。水しみ層のすぐ上の軟かいしまり雪の薄片。密度0.2 gr/cm³。

雪の中断その他の原因でスノージャムの沈降がある期間停止することがあるであろう。観測時のスノージャム上の積雪中の温度分布から求めた水しみ層での氷の発生速度 $\frac{dm}{dt}$ は $0.088 \text{ gr/cm}^2 \cdot \text{day}$ である。また、水しみ層の雪密度は 0.58 gr/cm^3 である。したがって、厚さ 4 mm の氷層ができるためには、 1.5 日スノージャムの沈降が停止すればよいことになる。沼の畔での降雪の観測結果によれば、この程度の期間降雪が中止したことは時々あった。スノージャム中には、第1図(b)に示したように、厚さが 4 mm 以下の氷層がいくつか見られるが、それらの層はこのようにして形成されたものであると考えられる。

(b) スノージャムの大部分は、第1図(a)から解るように、微細な層状構造をなしているが、 3 cm ほどの厚さをとって雪密度を測ると、その全層にわたって雪密度はほぼ 0.59 gr/cm^3 である。水しみ層が水中に没したのがスノージャムである。水中に没しても、温度は 0°C のままで変ることがないから、水中で新しく氷がふえることはない。しかし、前項で述べたように僅かな荷重でも水しみ雪は縮み易いものであるから、水中に没するにつれて雪密度は増大しそうに考えられる。ところが、雪密度は、すでに述べたように、水しみ層も、又、スノージャム全層も、殆んど同じである。その理由として、次のことが考えられる。まず、前項でのべたように、時間が経つにつれて縮み方が次第に遅くなることである。又、塑性論によると、剪断応力強度 S_s がある限界値をこすと、急速な変形が始まるわけであるが、スノージャムの場合では、第3図に示したように、深くなるにつれ、剪断応力強度 S_s が小さくなる。すなわち、ますます縮みにくくなる。しかも、実験⁷⁾によると、氷部分の多い密度 0.47 gr/cm^3 のしまり雪を、 0°C の水中に浸して、定速度で圧縮すると、 150 gr/cm^2 の圧縮力(ほぼ剪断応力強度に等しい)までは殆んど縮まないが、それをこすと、急速に縮む。スノージャムの場合には、剪断応力強度は高々 11 gr/cm^2 であるから、弾性的な圧縮だけをうけていると考えてよいであろう。この意味で先の2の考察も正しいのである。

(c) 水しみ層の密度は 0.87 gr/cm^3 で、そのうち氷だけによる密度(雪密度 ρ_s)は 0.58 gr/cm^3 であった。したがって、水しみ層の中には空気が 8% も含まれている。水しみ層のすぐ上の積雪の密度は 0.2 gr/cm^3 及び 0.24 gr/cm^3 であるから、この積雪には 78% 及び 74% の気泡が含まれている。それがその直下の水しみ層では僅か 8% に激減し、更にその下のスノージャムでは 5% に減る。

水しみ層のすぐ上の積雪の薄片の写真を第5図に示す。細長い氷の網目組織をなしている。空隙の大きさは $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$ である。このような積雪組織に水が浸みこんで、圧縮されたのが水しみ層である。

水しみ層の厚さは 5 cm であった。一方、毛細管の直径が 0.3 mm なら、水は 5 cm の高さまで上昇することが知られている。したがって水しみ層の中に存在する大きな隙間には水が浸み込むことはできないが、その周囲の直径 0.3 mm 以下の複雑に連結している隙間はすべて水で充たされていると考えられる。そのために水しみ層内には周囲を氷と水で取囲まれた比較的大きな気泡だけが残り、空気の体積が 8% になる。しかも第1図(a)にもみられるように、積雪

内にはインクを吸い込みやすい、すなわち、空隙のせまい層が数 mm 間隔で平行にならんでいる。このような層の隙間は水で充たされてしまうので、それらの層の中間の部分でだけ気泡が残る可能性がある。したがって、水しみ層内でも気泡はほぼ平行にならび、それらがそのまま水中に没して、スノージャムの中に第1図(a)に見られるような気泡の列ができるのであろう。なお、積雪の組織には、雪粒のつまり方の密な所と疎な所があることは若浜⁹⁾ がくわしく報告している。

個々の水の結晶は、積雪では、0.1 mm 以下の大きさであるのに、スノージャムのほぼ中央部では、その十倍以上の大きさになっている。スノージャムが水中に沈降する過程において氷粒の成長が起るのであろう。事実、スノージャム組織内に結晶境界が曲りくねっているのがみとめられたが、これは氷粒成長が起っている一つの証拠である。又、一方、Emden の実験⁹⁾ では、氷のこまかい粒子の集合体を、0°C の密閉容器内に放置すると、数週間てくるみ大の氷粒子ができることを述べている。

(d) 以上のことからスノージャムの発達過程をまとめると、次のようになる。

- (1) 冬のはじめに沼の水面に青氷がはる。
- (2) その後に降る雪は、その重さで青氷とともに水中に沈下する。沈下の途中で、雪が沼の水面に近づくと、沼の水が雪にしみこむ。
- (3) 雪(密度は 0.2 gr/cm³ ぐらい)に水がしみると、僅かの荷重で直ちに縮み、0.58 gr/cm³ ほどの密度になる。
- (4) 降雪が続いて水面上荷重が増大しつづあるときは、水しみ雪内の水が凍ることはほとんどなくて、そのまま水中に沈下する。そして、気泡を含むスノージャムになる。降雪が中断して水面上荷重が変らなければ、水しみ雪が停滞し、水しみ雪の上限で氷層がつくられる。この氷層がその後の降雪で、水中に沈下すると、スノージャム内に氷層として現われる。つまり、降雪が続くか、中断するかで、スノージャムの層構造がつくられる。
- (5) いちど水中に没すると、弾性的なつりあいを保ったままで、密度は変らない。したがって、スノージャムの本体は、ほとんど水しみ雪において作られる。
- (6) スノージャムの氷粒は次第に大きくなって行く。

III. 陸地積雪

沼のスノージャム調査と併せて、沼の岸近くの陸地(沼山荘附近)で積雪を調べた。ここは北海道よりも積雪量が多いので、積雪の密度分布が、北海道のそれと違うものであるかどうか検討した。

1. 測定結果

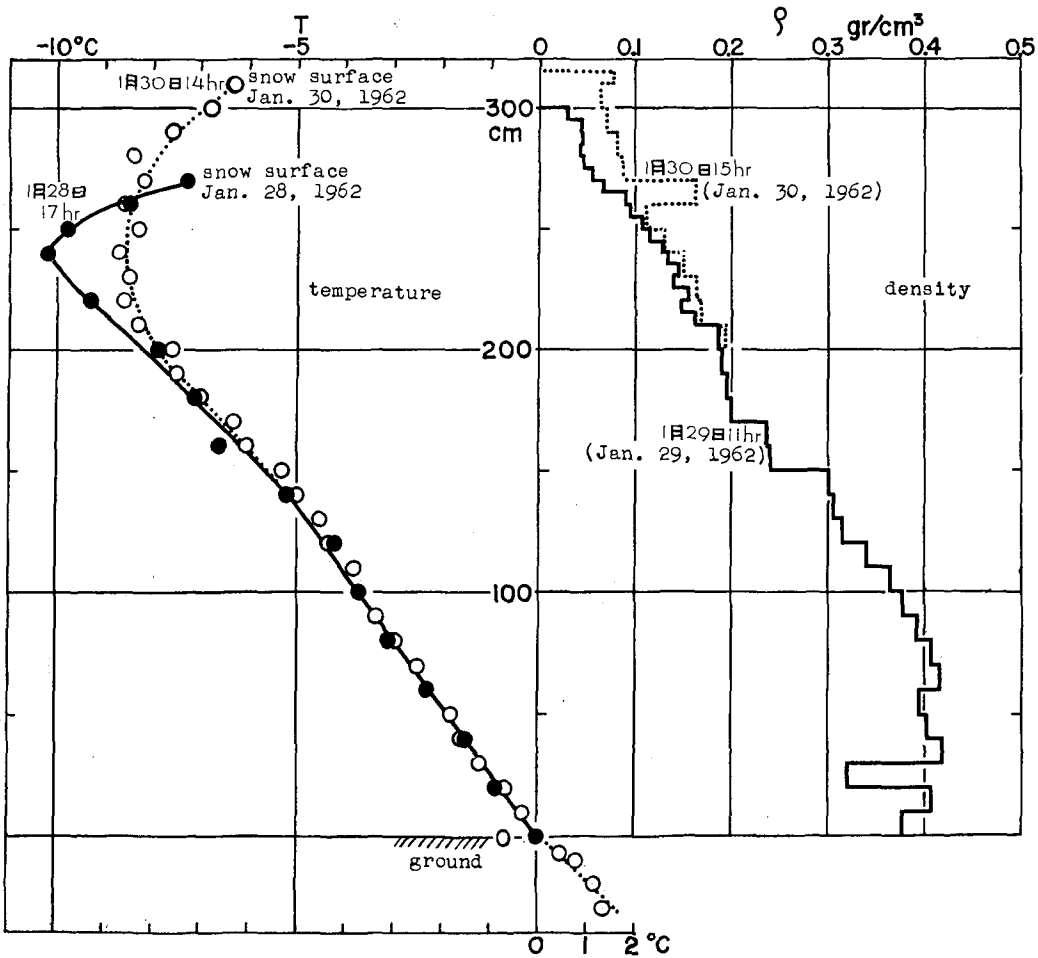
1月29日午前10時には、積雪深は3mであった。その後翌日の午後2時までには、3.6 gr/cm²の降雪があり、積雪深は3m 15cmに増した。1月28日、29日、30日に測定した積雪の温

度、密度の垂直分布を第6図に示す。筆者らの北海道母子里における観測によると、積雪深2mのときには、最大密度が0.45 gr/cm³であった。ところが、ここでは3mもの積雪深でありながら、最大密度はそれより小さい0.42 gr/cm³であった。

地温を測って、地面附近の地温分布から地面での融雪量を推定した。地面で dt 時間にとける雪の量を dm とすると、単位時間当りの融雪量は

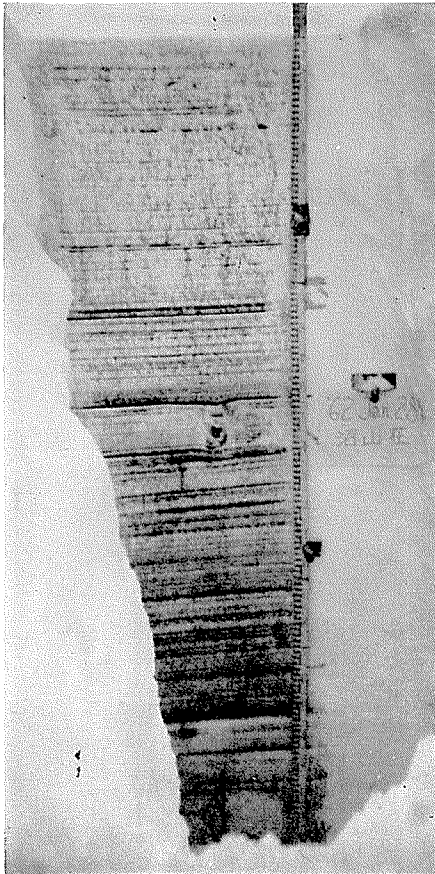
$$L \frac{dm}{dt} = \left(k_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \right)_{z=0} - \left(k_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (23)$$

で与えられる。ここで、 L は氷の融解潜熱 79.6 cal/gr, $k_1 \cdot k_2$ はそれぞれ土及び雪の熱伝導率 $T_1 \cdot T_2$ はそれぞれ土及び雪の温度、 z は地面からの高さである。地面のすぐ上の雪の密度 ρ を 0.4 gr/cm³ とし、吉田が求めた式 (21) から、雪の熱伝導率 k_2 を求めると、



第6図 陸地積雪の密度・温度分布

1.25 gr/cm²·day であるから、実測された ρ_{\max} の値 0.42 gr/cm³ は小島の理論とよく合っている。小島は北海道の積雪試料にもとづいて理論をたてたのであるから、尾瀬の雪も密度の増し方の点では北海道の雪と変りなく、ただ降雪強度が強いために、密度増大が遅れるのである。



第7図 陸地積雪の着色断面。
1月28日午後4時

第7図に積雪の着色断面の写真を示す。ほぼ1 mm ごとに顕著な層構造をなしているのが解る。又第8図に積雪の薄片（水平にとったもの）の写真を示す。1は地上100 cm のしまり雪で、2は地上5 cm のざらめ雪である。ともに密度は 0.38 gr/cm³ で氷粒子が網目をなしてつながっている。氷粒子はしまり雪では細長い（大きさ 0.1~0.2 mm）、ざらめ雪では大きい（大きさ 0.2~0.4 mm）。木下^{5),11)}・若浜^{5),8)}が北海道の積雪において調べた薄片の写真と比べて、顕著な違いは認められない。

IV. 沼と陸地の積雪の関係

沼のスノージャムと岸近くの陸地の積雪とを調べたのであるが、両者を比較してその氷総重量と積雪密度、温度勾配等について検討を加えた。

1. 氷総重量

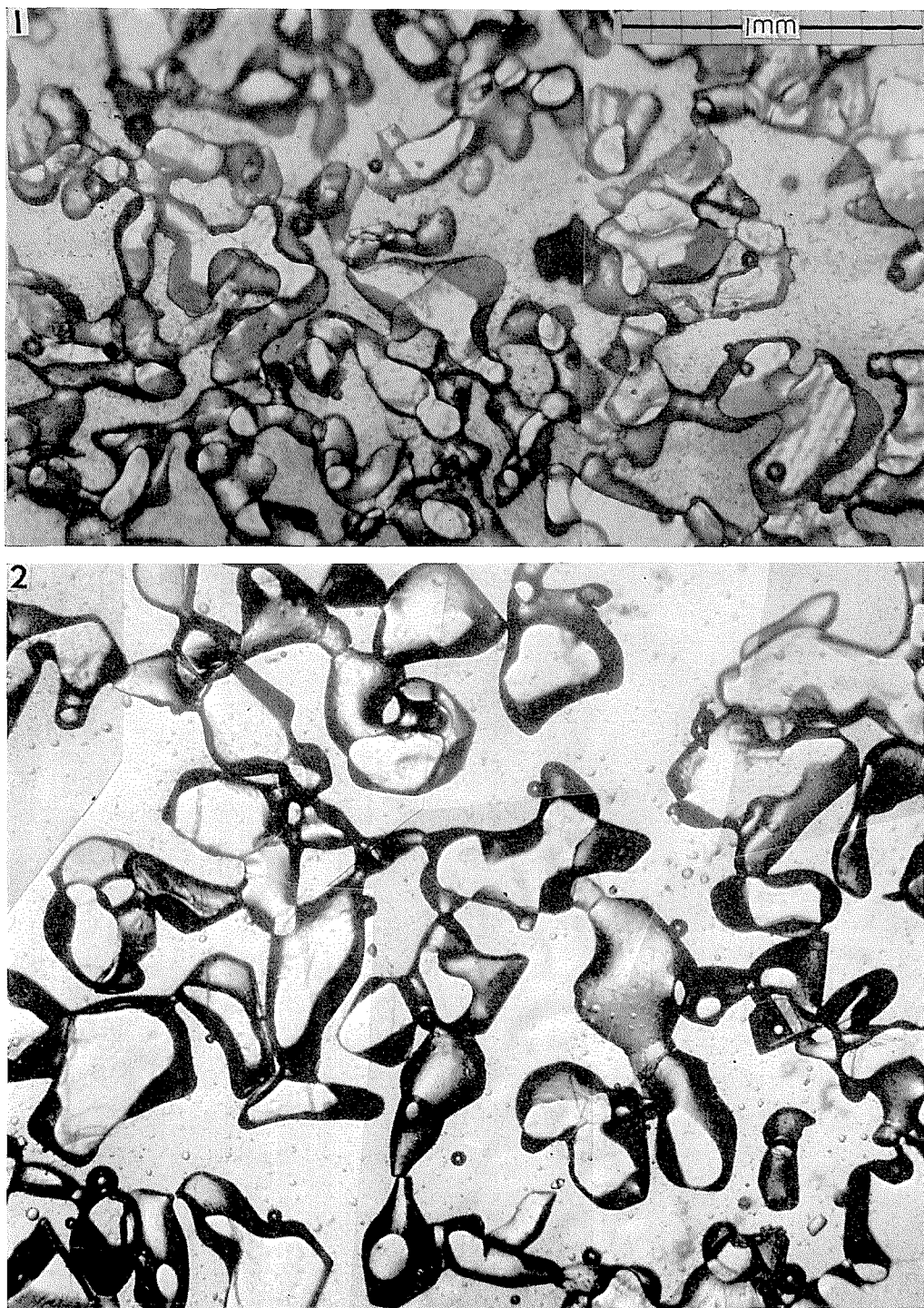
沼では、水面上の積雪のうち水しみ層より上の積雪重量は 9.0 gr/cm² 及び 7.5 gr/cm² である。厚さ 5 cm の水しみ層では、雪密度が 0.58 gr/cm³ であるから、その氷重量は 2.9 gr/cm² になる。又、スノージャムの氷重量はほぼ 71 gr/cm² である。これは、スノージャムの上から下まではほぼ一定な雪密度 0.59 gr/cm³ に厚さ 120 cm（青氷を除いて）をかけて得られた。又、水しみ層の上の境界で生成される氷の量

は第II節の7.(a)で述べたように、0.088 gr/cm²·day であるから、結氷時の12月5日から1月末までの57日間では、その境界で 5 gr/cm² の氷が新しく作られたことになる。以上から、沼に降った全降雪重量は、9 或いは 7.5+2.9+71-5 = 78 或いは 76.5 gr/cm² になる。

ところで、その57日間に陸地に降った雪は、平均の降雪強度 1.25 gr/cm²·day から計算すると、71 gr/cm² になる。

計算の近似にもとづく誤差や、陸地の積雪測定地域誤差を考慮すると、沼に降った雪と沼の近くの陸地に積った雪とは、ほぼ同じ量であるとしてよいであろう。

2. 沼の水面上積雪の特徴



第 8 図 陸地積雪の薄片。1. 地上 100 cm のしまり雪，密度 0.38 gr/cm^3 ，2. 地上 5 cm のざらめ雪，密度 0.38 gr/cm^3 。

(a) 沼の水面上積雪のうち、水しみ層より上の部分の積雪重量は、1月29日の測定点で、 9.0 gr/cm^2 、30日の測定点で 7.5 gr/cm^2 である。最下層の密度は29日のが 0.24 gr/cm^3 、30日のが 0.20 gr/cm^3 である。一方、陸地では、1月29日には、表面から90 cmまでの積雪重量が 9 gr/cm^2 で、その最下層密度は 0.16 gr/cm^3 である。又、30日には、表面から70 cmまでの積雪重量が 7.5 gr/cm^2 で、その最下層の密度は 0.13 gr/cm^3 である。ともに、沼の上の積雪で同じ荷重に対応する層の密度 $0.24, 0.20 \text{ gr/cm}^3$ に比べると、かなり小さい。

ところで、沼では水しみ層の上の温度は、ほぼ 0°C であるが、陸地の対応する層では、その温度が両日ともに、 -8.5°C である。積雪が粘性的に縮む場合、温度の高い方が縮み方が速いことが知られている^{12),13)}。すなわち、同じ積雪重量の荷重の下では、温度の高い方が速く縮む結果、密度が大きいのである。沼の積雪の方が温度が高いため、同じ重量の下で大きな密度の層が現われているわけである。

(b) 上記の対応する積雪層で、温度勾配を比べてみる。沼では、水しみ層のすぐ上の積雪の鉛直下向きの温度勾配は、1月29日、30日とも、ほぼ 0.27°C/cm である。陸地の対応する層では、鉛直下向きの温度勾配は、1月29日の場合が 0.07°C/cm 、30日の場合が 0°C/cm である。沼の方が、温度勾配はるかに大きい。それで、沼の水しみ層のすぐ上の積雪内部では陸地の積雪内部に比べると、水蒸気の移動がはげしい筈である。したがって、その組織の中には、霜の生成がみられる筈である。水しみ層のすぐ上の積雪の薄片を第5図に示したが、事実その写真の中央右よりに霜がみとめられる。

結 び

スノージャムは、湖水に降り積った雪が、積雪の状態のまま水中に沈んでできると考えられている。我々は、尾瀬沼のスノージャムについて種々の調査をおこない、その実態をほぼ把握することができた。そして、スノージャム形成に際して、積雪が水中に沈下する前に水しみ雪の状態をとるのであるが、その時期にスノージャムの本体のほとんどが作られることが解った。

この研究は、日本雪氷学会尾瀬地域総合調査の一環としておこなわれたものである。研究に際していろいろ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。又、観測の機会と便宜を与えて下さった東京電力株式会社八木沢事務所長服部正一氏、及び日本雪氷学会企画委員の諸氏、特に石原健二氏、福井篤氏に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 田畑忠司・小野延雄 1962 種々の氷の結晶主軸方向の分布の測定. 低温科学, 物理篇, **20**, 199-214.
- 2) 藤岡敏夫 1961 積雪観測法 I. 雪氷, **23**, 179-183.
- 3) 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.
- 4) 木下誠一 1960 積雪の硬度 I. 低温科学, 物理篇, **19**, 119-134.

- 5) 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.
- 6) 吉田順五・岩井裕 1950 積雪塊の熱伝導率の測定. 低温科学, **3**, 79-87.
- 7) 木下誠一 1963 0°Cの水に浸した雪の圧縮 I. 低温科学, **21**, 13-22.
- 8) 若浜五郎 1960 積雪の薄片を応用した積雪の組織と内部歪の研究 I. 静荷重による積雪薄片の圧縮. 低温科学, 物理篇, **19**, 37-72.
- 9) Emden, R. 1890 Über das Gletscherkorn. d. schweiz. Naturf. Ges., Zürich, 1-44.
- 10) 小島賢治 1957 積雪層の粘性圧縮 III. 低温科学, 物理篇, **16**, 167-196.
- 11) 木下誠一 1960 積雪層の組織の変態過程. 低温科学, 物理篇, **19**, 111-118.
- 12) 小島賢治 1954 積雪の粘弾性. 低温科学, 物理篇, **12**, 1-13.
- 13) 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.

Résumé

Every winter Gunma and Fukushima Prefectures, Honshu, are covered with deep snow (more than four meters) in their mountainous areas and lake Oze (altitude: 1661 m, area: 1.78 km², maximum depth: 9 m) located on their boundary is filled with "snow jam" which is a mixture of snow, water and many small air bubbles. The present authors made researches on the texture of that snow jam and found that in its formation the layer of wet snow which lay just above the water surface played an important role.

Photograph (a) on the right side of Fig. 1 shows a vertical section of the snow jam together with that of the snow cover lying upon it. The broken line indicates the level of the water surface. The section of the snow cover, the portion above the broken line, was coloured by spraying diluted ink. The section of the snow jam, the portion extending below the broken line, was photographed in such a way that a flat piece 5 cm thick cut vertically from the snow jam was floated horizontally on the water surface which appeared in a hole made through the snow jam. The bottom of the snow jam was found to be at a level 120 cm below the water surface while the snow cover on the jam was 80 cm thick. As seen from the photograph, the texture of the snow jam is not the same from top to bottom. To observe the texture of the snow jam the flat piece was taken out from the lake water and cut into thin slices (1 mm thick). During these processes the water which was included within the snow jam dripped off partly and the remainder was frozen. The photographs in columns (b) and (c) to the left of the center line of Fig. 1 show those slices cut out of different portions of the jam in their natural size. (Column (b): through natural light, (c): through polarized light.) Although the spaces between the ice grains of the original snow are filled with the frozen water, the photographs, especially those through polarized light in column (c), indicate that the original snow was compressed very much. That compression occurred, as will be mentioned below, when the snow drew up the lake water just before it sank into the water. The difference in character of different portions of the jam lies in the differences in size and arrangement of air bubbles as well as in those of ice crystals composing it. There was found, at the bottom of the snow jam, a layer 2.4 cm thick of pure ice containing no air bubbles. This was the sheet of ice formed on the water surface at the beginning of the winter.

The texture of the jam can more clearly be seen in the microphotographs of Fig. 4 which were taken by thinning the slices to 0.3 mm. Ice of Photos. 1 and 2 was 67 cm below the water surface while Photos. 3 and 4 are of ice at the depth of 93 cm. Very small air bubbles are seen to be distributed in more or less regular manner. The boundaries of ice crystals are bent, which indicates that the crystals were still in the process of recrystallisation.

The density ρ of snow jam as it is in water is given in the right part of Fig. 2 by the thick line together with that of the snow lying on the jam. The solid circles marked ρ_s give dry density of the jam, that is, the amount of ice contained in 1 cm³ excluding air and water. The values of ρ_s were determined by the use of the calorimetric method (Ref. 3). Density of the snow was less than 0.24 gr/cm³ except at the bottom where it was wet as a result of drawing up the lake water. The layer of wet snow was 5 cm thick and had a density as large as 0.87 gr/cm³. Dry density ρ_s of the wet snow was the same as that of the snow jam, that is, 0.58 gr/cm³ which is more than twice the maximum density of the dry snow lying on the wet snow. It was shown by an experiment made later in the authors' laboratory (Ref. 7) that wet snow is very plastic and can easily be compressed to the above value of ρ_s by a weight equivalent to that of the dry snow on lake Oze. Then it will be concluded that the snow contracted while it stayed as a layer of wet snow just above the water surface and sank into the water to become snow jam. But some modifications other than the contraction could be imposed upon the wet snow before it sank. As shown by the temperature diagram of Fig. 2, there was a steep temperature gradient within the dry snow above the wet layer, which means that heat was always escaping from the wet layer upwards through the dry snow. That escape of heat must have caused the water contained in the wet layer to freeze. It is shown by calculation that an ice sheet 4 mm thick would be formed in the wet layer in one day and a half when the downward movement of the whole mass of snow and jam stopped during an interval of no snow fall. There were found in the snow jam some ice sheets such as shown in the middle photographs in columns (b) and (c) of Fig. 1. Such must have been formed in the above way.

The total weight of the snow cover above the water surface was equilibrated by the buoyancy of the snow jam in the water. It was deduced from the equation of equilibrium that the snow jam included air bubbles amounting to 5% of its total volume.

Fig. 7 illustrates a section (coloured with ink) of snow cover lying on the ground near the lake. The snow cover was three meters deep; the right and left figures are respectively the vertical distributions of its density and temperature. The maximum density is 0.42 gr/cm³ as seen in the figure. That value is in accord with the value given by Kojima's formula (Ref. 12) relating the density distribution within any snow cover at any time to the mean rate of snow falls which have occurred previous to that time.