



Title	大雪ダムの結氷調査
Author(s)	小野, 延雄; ONO, Nobuo
Citation	低温科学. 物理篇, 34, 173-179
Issue Date	1977-03-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18309">https://hdl.handle.net/2115/18309</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	34_p173-179.pdf



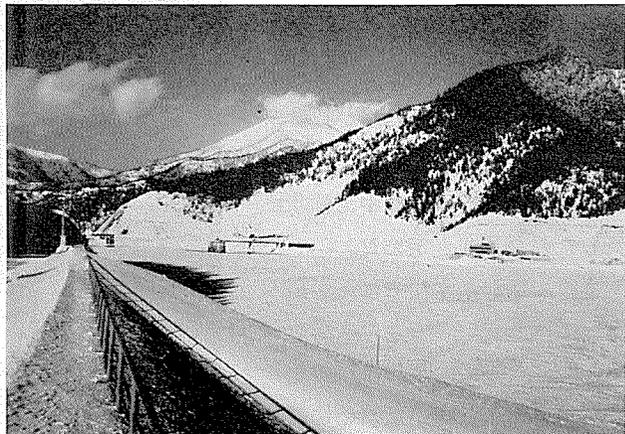
## 大雪ダムの結氷調査\*

小野 延雄  
(低温科学研究所)  
(昭和51年10月受理)

### I. ま え が き

大雪ダムは石狩川の上流をせき止めたロックフィルダムである。旭川から北見に抜ける国道39号線が層雲峡の大函から石北峠に向かうところにあつて、そこから枝分かれして帯広に至る国道273号線は、そのダムのえん堤の上を通り、岸の山腹をトンネルで抜けている。長さ440 m、高さ86 mのえん堤により、総貯水量6,600万トン、貯水面積約3 km<sup>2</sup>の人造貯水湖ができた。

この大雪ダムの貯水面は、冬にはほぼ全面が氷結する。第1図はその結氷状況を示す写真である。左側に国道273号線のトンネルが見え、対岸にはダムの管理所とその上を走る国道39号線が見える。中央やや左には取水塔があり、凍りついた貯水面の氷が水位低下につれて下がる時、塔に力がかかるのを防ぐために、水中に空気を送って噴出し、上昇流を起して塔の周囲に開水面を維持している。



第1図 大雪ダムの結氷状況 (1976. 1. 28)

この報告は、1976年1月下旬に行なつた、大雪ダムの氷の結晶粒構造の観察と、その水中に生じていた応力状態の測定結果について述べたものである。

### II. ダム結氷の結晶粒構造の観察

#### 1. Michel-Ramseier による淡水氷の結晶粒構造の分類

Michel と Ramseier<sup>1)</sup> は、河や湖の氷の結晶粒構造を分類し、まず氷層を初期結氷 (primary ice)、それから下方に成長する氷 (secondary ice)、初期結氷の上にてできる上積氷 (superimposed ice) の三つに分けた。そして、結晶粒の形や大きさ、結晶主軸 (c 軸) の向き、あるいは生成状況などを考慮して、さらにそれぞれを P1~P4, S1~S5, T1~T3 に分類した。

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第1796号

P1はc軸が鉛直で不規則な形をもつ比較的大きな結晶粒からなる氷に対して名付けられ、静かな水面がゆっくり氷でおおわれたときにできる。P2はc軸が鉛直あるいはいろいろの向きを示す針状や樹枝状の結晶粒からなる氷であり、静かな水面が速く凍るときにできる。そして、動揺する水面に水中から浮かび上った氷晶がたまり、たがいに凍りついてできた表面層をP3、水面に降雪が浮かんで凍った表面層をP4とした。

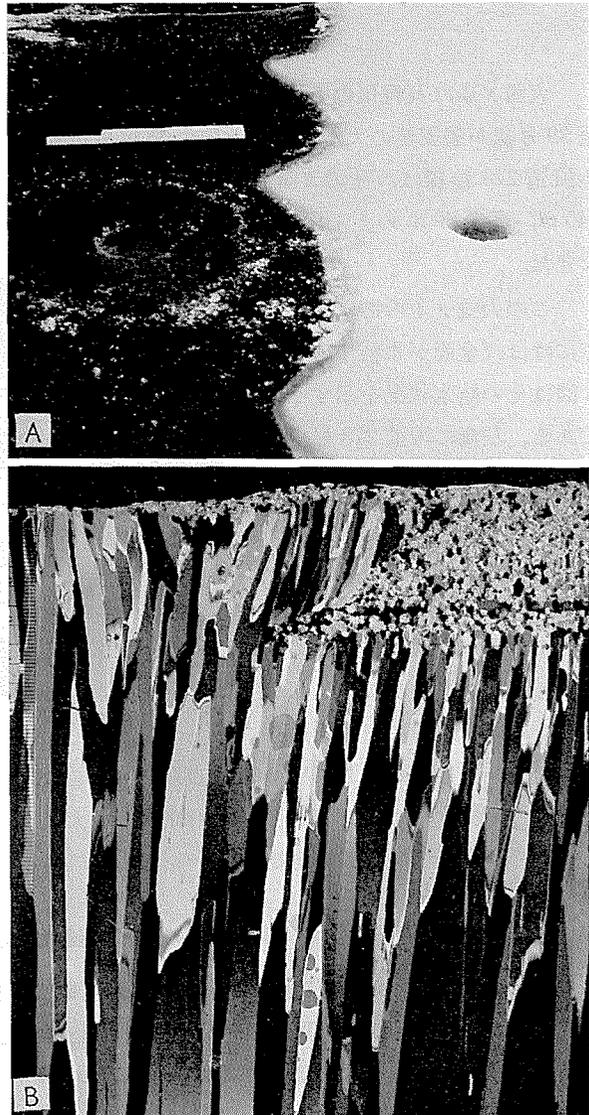
これらの初期結氷から下方に伸びる層については、深さとともに結晶粒の大きさを増す柱状結晶の層をc軸の向きによって三つに分け、c軸が鉛直のものをS1、c軸が水平のものをS2、c軸が水平でしかもある方向にそろっているものをS3と名付けた。下面に氷晶がたまって氷泥ができ、それが凍ったものをS4、水位低下などにより、その氷泥中の水が抜け落ちてから凍ったものをS5とした。

上積氷は、初期結氷の上に積った雪に水がしみあがって凍ったゆき氷をT1、しみあがった水が抜け落ちてから凍ったものをT2、初期結氷上に水の層ができその中で柱状に成長した氷をT3と定めた。

また、割れた氷片や氷泥が積み重なって凍り着いてできた氷層をRで示した。そして、それぞれの型の結晶粒構造を生成時の気象条件や水理条件と関係づけて考察している。

## 2. 大雪ダムの氷の結晶粒構造

調査時の氷の厚さは、中央部の平坦な氷で約45cmであった。氷の下の水温分布は、氷の下面で $0^{\circ}\text{C}$ 、2mで $+1.0^{\circ}\text{C}$ 、4m以深では $+1.5^{\circ}\text{C}$ のほぼ一定値を示していた。温度躍層が氷の下面から0.5~2mの深さに見られた。その深さが場所によって変わることから、取水塔での空気噴出による強制対流の影響が広い範囲におよんでいることが推測できた。



第2図 A: 透明な氷と不透明な氷の境界  
B: 境界をはさむ氷の鉛直断面 (表層の約15cm)

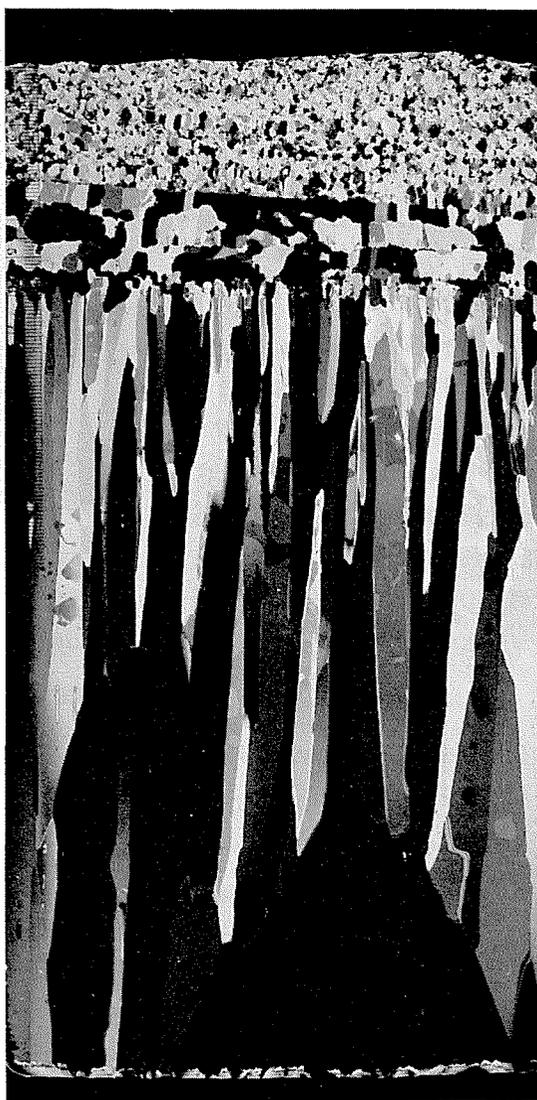
ダム中央部の平坦な氷の上には、5~10 cmの厚さの積雪がサスツルギと呼ばれる起伏模様を作っていた。そのところどころに雪の吹き払われた氷が露出していた。この露出している氷には、透明な氷の部分と気泡を多く含む不透明な白い氷の部分とがあり、その境界は明瞭な場合が多かった。第2図Aはその境界の写真であり、透明な氷が半径20~30 cmの円弧を連ねながら不透明な氷に食い込んでいた。写真に見られるように透明な氷と不透明な氷とに穴をあけ、それを結んで境界を横切る氷試料を採取した。

その氷の上層部約15 cmの鉛直断面を偏光で示したのが、第2図Bである。右側の不透明な氷の表層には、2.5~3 cmの深さに初期結氷P2の層が見られる。その下にはS2の型の氷が伸び、上にはゆき氷T1の層がある。ところが左側の透明な氷には上積氷の層が見られない。

このことはダム貯水面が全面で一様に表面から凍りはじめたのではなく、雪を載せた氷が水面に浮いていた時期があったことを示している。第2図Bには、中央上部から斜め右上に向かうくさび形のゆき氷のない部分が見られる。このくさび形の部分は、第2図Aには三日月状の模様として現われている。これは、積雪の重みで初期結氷が沈んで水面があがり、氷の縁の積雪が侵食された部分であり、後から水が凍ったT3型の氷である。透明な氷もゆき氷の載った氷も、下層はともにS2型の柱状結晶の氷であり、深くなるにつれて粒径を増し、45 cmの厚さの底の部分では5 cm前後の粒径を示していた。

両岸やダム管理所横の降り口付近には、第1図の写真にも見られるように、ダム水位の低下につれて岸の高いところから順に底がつかえたことを示す氷が残っていた。すなわち、岸の高いところほど座礁している氷の厚さが薄く、水面に近づくにつれて氷の厚さが増していた。

座礁していた厚さ約35 cmの氷の上層部約27 cmの鉛直断面を第3図に示した。左上のものさしからわかるように、上層に3 cmの厚さのゆき氷T1があり、その下に初期結氷P2が2~3層重なっ

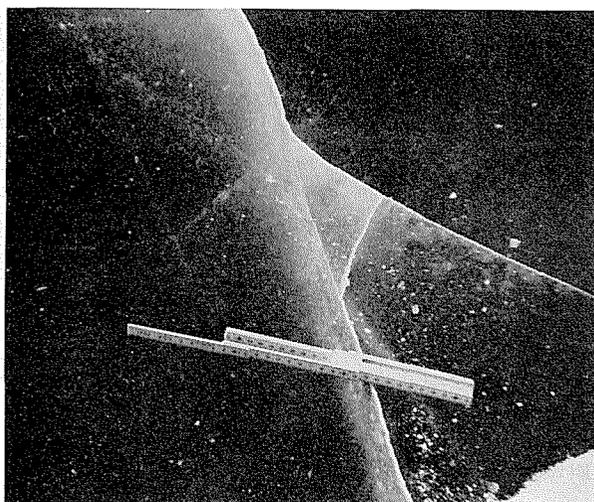


第3図 座礁していた氷の鉛直断面(厚さ約35 cmの氷の上層約27 cm)

たと見ることのできる層がある。それから直径 5 mm 位の柱状に伸びはじめる氷 S2 が見られ深さと共にその径が増していく。そして 20 cm 以深には急速に大きくなった結晶粒が写っている。この結晶粒はこの断面の横上層で発生したものであり、底面近くでは 15~20 cm の粒径となっていた。エッチピットを作って結晶主軸の向きを調べたところ、この結晶粒の c 軸はほぼ水平であり、またその周囲の結晶粒もほぼ水平のものが多かった。

### III. 氷中の応力状態の測定の試み

ダム中央の透明な氷の表面には、いろいろな方向に走る熱割れ目が観察された。第 4 図はその写真であり、深さの異なる割れ目が交差したり、他の割れ目でくい止められたりするのを見ることができる。大雪ダムでは、晴れた日には夜間放射で冷えた空気が谷沿いに移流してきて明け方には冷え込み日中は昇温するので気温の日変化がかなり大きい。山岡・藤田<sup>2)</sup>の報告には、日振幅が約 15 度に達する例が示されている。



第 4 図 氷の表層に見られる熱割れ目

このように気温が大きく変化するとき、氷層の表面温度は気温につれて変化するが、下層の温度はゆっくりした変化を示すので、表層の氷の熱膨脹は下層によって拘束される。熱膨脹が拘束されて生じる応力状態は熱応力と呼ばれる。熱割れ目は熱応力が引張り破壊強度を越えたときに発生すると考えることができる。

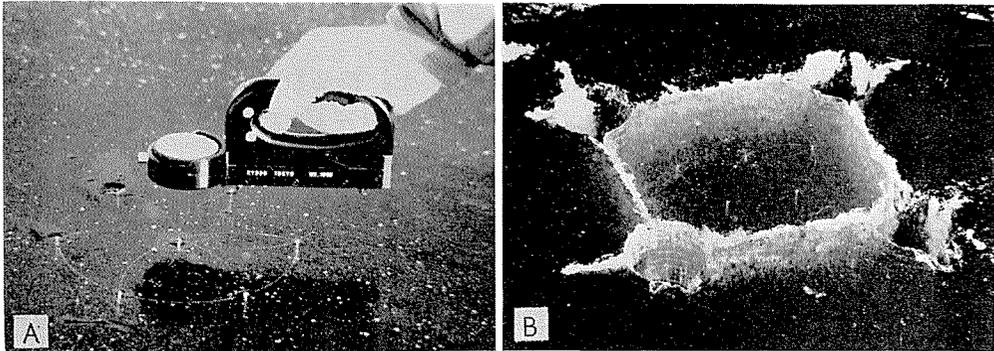
純水の線膨脹率を  $\beta$  とし、温度変化を  $\Delta\theta$  とすれば

$$\Delta l/l = \beta \Delta\theta \quad (1)$$

の熱膨脹を生じる。この熱膨脹が完全に拘束されたときに生じる応力  $p/s$  は、純氷の弾性率を  $E$  とするとき

$$p/s = E \cdot \Delta l/l = E \cdot \beta \cdot \Delta\theta \quad (2)$$

で与えられる。純水の線膨脹率はおよそ  $5 \times 10^{-5} \text{ deg}^{-1}$  であり、純氷の弾性率および引張り強度は、例えば Pounder<sup>3)</sup> によれば、それぞれ  $9.8 \times 10^{10} \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-2}$  ( $=10^5 \text{ kgw} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) および  $15 \sim 30 \text{ kgw} \cdot \text{cm}^{-2}$  程度である。これらの値から、熱膨脹を完全に拘束したときに生じる応力が引張り強度に等しくなるような温度変化は、 $3 \sim 6 \text{ deg}$  程度であることがわかる。実際には下層の氷も温度変化をしているし、表層の伸び縮みが下層を伴って起っているから、表層の氷の熱膨脹は完全には拘束されていない。それゆえ、熱割れ目が生じるときには、表層にはこれより大きな急激な温度変化が起っていると考えられる。



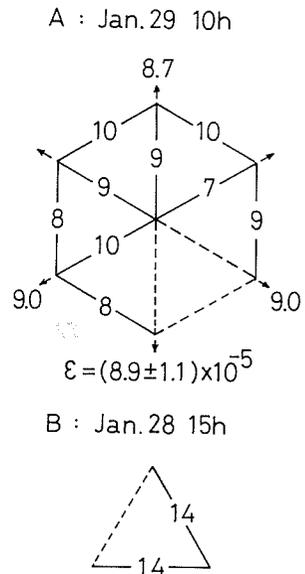
第5図 A: 微小ひずみ計と標点格子  
B: 標点格子の周囲を切った状況

実際に水中に生じている拘束応力状態を知るために、氷の表面に標点を格子状に埋めて、それらの標点間の距離を微小ひずみ計で測定し、つぎにその周囲を切って応力を解放させたのち再びそれらの距離を測って氷の伸び縮みを求めた。第5図Aは鋼球標点の埋設状況と微小ひずみ計とを示す写真であり、Bは標点格子の周囲を切った状況を示す写真である。微小ひずみ計は、氷の表面に埋め込んだ直径1.6mmの鋼球標点に、内径がこれより若干小さい鋼製円管が接するときの適合性のよさを利用して測るものである。標準長100mmを最小目盛1/1000mm、測定範囲 $\pm 1$ mmのダイヤルゲージを使って読むもので、 $1 \times 10^{-5}$ を最小単位としてひずみを知ることができる。このひずみの最小単位は、0.2 degの温度変化で生じる氷の熱膨脹に相当する。

ダム中央部の透明な氷では、表面温度が $-5^{\circ}\text{C}$ 前後のとき標点格子の周囲を切るによりおよそ $9 \times 10^{-5}$ の伸びが見られた。三角形を組み合わせた標点格子の各辺についてそれぞれ数回ずつの測定を行なって平均値を求めた。その結果を第6図Aに示してある。平均値の標準偏差が $\pm 2 \times 10^{-5}$ を越す辺は点線で表わした。

第6図Bは岸近くの氷で測った例であり、 $14 \times 10^{-5}$ の伸びを生じた。表面温度は $-5.3^{\circ}\text{C}$ であった。岸近くでは、岸で底がつかえた氷の影響で、熱応力以外の拘束応力を生じていることも考えられる。

これらの $9 \times 10^{-5}$ および $14 \times 10^{-5}$ の伸びを拘束していた応力は、氷の弾性率を $10^5 \text{ kgw} \cdot \text{cm}^{-2}$ とすると、それぞれ9および $14 \text{ kgw} \cdot \text{cm}^{-2}$ となる。これらは伸びの場合であるから圧縮力が作用していたことになるが、その値は引張り強度と同程度の大きさに達していた。このことから、温度降下時に縮みが起る場合、通常温度変化でも第4図に見られるような熱割れ目を生じる可能性があることが推測できる。



第6図 周囲を切ることにより生じた標点格子の伸び (A: ダム中央, B: 岸近く)

#### IV. 結 語

1976年1月下旬に、大雪ダムの結氷調査を行なった。結晶粒構造の観察には、Michel-Ramseier の分類の適用を試みた。そして、その氷の生成状況を考察した。また表層に生じている応力状態を測る試みを行ない、氷の引張り強度に近い大きさの圧縮応力が作用していたことを知った。このような表層に生じる応力状態の測定は、その後アラスカ北岸の海水でも試みたが<sup>4)</sup>、今後さらに続けて行ないたいと考えている。

この調査は昭和50年度科学研究費自然災害特別研究「雪氷による河川災害に関する研究」の分担研究として行なったものである。研究代表者の北海道大学工学部山岡勲教授、藤田睦博助教授、ならびに北海道開発局旭川開発建設部大雪ダム管理所の早川博所長はじめ所員の方々には現地調査にあたって種々の御教示と御便宜とをいただいた。ここに記して深く感謝の意を表わします。また大学院生の白沢邦男君には現地調査を、納口恭明、斎藤隆両君には結晶粒構造観察用の試料作成を手伝っていただいた。ここに謝意を表します。

#### 文 献

- 1) Michel, B. and Ramseier, R. O. 1971 Classification of river and lake ice. *Canad. Geotech. J.*, **8**, 36-45.
- 2) 山岡 勲・藤田睦博 1975 貯水池表層結氷の氷圧測定. 昭和50年度日本雪氷学会秋季大会講演予稿集, 209.
- 3) Pounder, E. R. 1965 *Physics of Ice*. Pergamon Press, 151 pp.
- 4) 小野延雄 1976 北極圏海水調査. III. 海水の表層に生じる熱応力状態の測定. 低温科学, 物理篇, **34**, 221-226.

#### Summary

The Daisetsu dam is an artificial reservoir constructed at the source of the Ishikari river in the central part of Hokkaido. The surface of the reservoir is covered with ice in winter. A study of the ice was carried out in January 1976 with respect to both crystallographic observations and thermal stress measurements.

The thickness of the ice was about 45 cm at the level ice near the center of the reservoir. Both clear ice and bubbly white ice were found in patches of bare ice among the snow-covered ice surface as are seen in Fig. 2-A. Shown in Fig. 2-B is a vertical section of the boundary part between the clear ice and the bubbly ice observed under a crossed polaroid. Granular ice called snow ice in the surface layer of the bubbly white ice was formed by freezing of deposited snow soaked in overflowed water. On the other hand, no snow ice was seen in the surface layer of the clear ice. It is considered from this figure that the surface was not covered uniformly with ice in the first stage of ice formation. The ice in the lower layer consisted of an interlocking aggregate of columnar crystals, which usually increase in size with depth. A large grain of ice crystal was found in the lower layer of an anchored shore ice (Fig. 3).

The ice temperature of the surface layer alters with the change of air temperature, whereas the temperature of the lower layer changes gradually. Thermal expansion or contraction of the surface layer is therefore restrained by the lower layer. To

measure the restraint thermal expansion in the surface layer a strain meter was used and steel balls were embedded on the ice surface. Each distance between the two adjacent balls on the surface was measured both before and after the cut out of the ice block (Figs. 5-A and 5-B). Expansions of  $9 \times 10^{-5}$  and  $14 \times 10^{-5}$  by the cutting out of the block were observed as represented in Fig. 6. Restrained stresses called the thermal stress in these cases are equal to 9 to 14  $\text{kgw} \cdot \text{cm}^{-2}$  with the use of the value  $10^5 \text{kgw} \cdot \text{cm}^{-2}$  ( $=9.8 \times 10^{10} \text{dyn} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) for Young's modulus. These values are almost in the same magnitude as the value of tensile strength of fresh water ice. It is then expected that in the case of contraction with rapidly falling temperature, thermal cracks occur in the surface layer as observed in the clear ice (Fig. 4).