



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	氷の熱応力の測定
Author(s)	高橋, 徹; TAKAHASHI, Toru; 若浜, 五郎 他
Citation	低温科学. 物理篇, 33, 29-37
Issue Date	1976-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18272
Type	departmental bulletin paper
File Information	33_p29-37.pdf



氷の熱応力の測定

高橋 徹

(北海道大学大学院 理学研究科)

若浜 五郎

(低温科学研究所)

(昭和50年10月受理)

I. ま え が き

冬季、寒冷地方では、河川、湖沼、海洋の表面が凍結して、厚さが数 cm ないし、数 m の氷板ができる。自然界に存在するこれらの板状氷では、気温の変化、日射などによってその温度が常に変化する。この温度変化のため水体内部には常に熱応力が発生し、時には氷体が破壊するに至る。諏訪湖の「おみ渡り」や南極氷床内部で観測される氷震の原因は熱応力によって起こると考えられている。

氷の熱応力の研究は極寒地における河水、湖氷上の交通、運輸の問題や氷がダム湖岸の構造物に及ぼす力と関連して、その重要性が屢々指摘され、その実験的研究もいくつか報告されている。たとえば、カナダの Gold¹⁾ は温度が 6°C 以上も異なる 2 個の氷塊を直接接触させ、氷に発生するクラックをくわしく観察した。氷にこのような熱ショックを与えたばあい、氷の表面附近には大きな温度勾配が生じ、水体内に非一様な歪がおこって氷の表面近くが破壊する。現象は瞬間的に進行し、従って、氷の弾性的性質だけが主に関与する。Gold は熱伝導論と弾性論を用いて氷に生ずる熱応力の大きさを計算で求め、30~40 kg/cm² の値を得た。

しかし天然のばあいには、このように急激な温度変化がおこることはほとんどない。天然では一分間にせいぜい 0.1 ないし 1°C ていどの割合で水体全体が一様に昇温または降温することが多い。このように温度変化が比較的小さいばあいには、単に氷の弾性的性質だけでなく粘性的性質もまた、氷の熱応力の大きさをきめる支配的な因子となる²⁾。しかし、このようなばあいの熱応力に関する実験的研究は従来ほとんど行なわれたことがない。

そこで筆者らは氷の熱応力に関する基礎的資料を得るため、二種類の多結晶氷、及びアラスカのメンデンホール氷河の単結晶氷から切り出した円柱状の氷全体の温度を一定速度で変化させたとき氷に発生する熱応力の時間的な変化を測定した。今回は、実験の都合で、氷の温度を上昇させる昇温試験のみを行った。以下にその結果を報告する。

II. 氷の試料

実験に用いた試料は、結晶粒の大きさの異なる二類の多結晶氷（市販氷、ゆき氷）及び単結

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 1714 号

晶水のブロックから氷用旋盤を用いて直径 3.0 cm (単結晶氷は 2.0 cm), 長さ 15 cm の円柱試料に仕上げた (単結晶は 10 cm)。

市販氷の試料は, 気泡のない透明なブロックから切り出した。市販氷は, 直径約 1 cm の柱状結晶からできているが, 円柱試料は柱状結晶が円柱試料軸に垂直になるように切り出したので円柱の任意の横断面には常に 3~5 個の細長い結晶が含まれていた。各結晶の主軸は結晶の柱に垂直な面内にある。

ゆき氷の試料は, 雪を 0°C の水に浸したのち凍結させて作成したものである。水体内部には小さな気泡を多く含み全体として不透明で密度は 0.88 g/cm³ であった。結晶粒の平均直径は約 1 mm 程度, 結晶主軸方位は乱雑に分布していた。

単結晶氷は, アラスカのメンデンホール氷河の単結晶氷のブロックから切り出した。氷に生ずる熱応力によって底面すべりができる場合とできない場合とを考慮して, 結晶主軸方位が円柱試料の軸から 72°, 及び 90° 傾いたものを用いた。いろいろな昇温率で熱応力を求める一連の実験で, 同一の試料が焼鈍してはくり返し使用された。

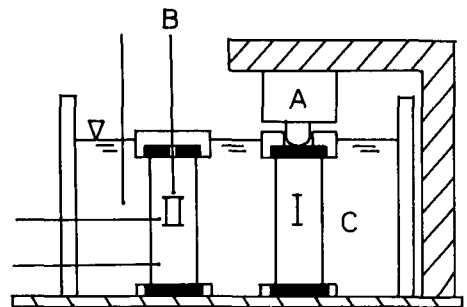
III. 実験装置と方法

実験に用いた装置を第 1 図に模式的に示した。ケロシンを入れた底が鉄製で周囲がアクリル製の容器内に, 同一のブロックから切り出した同一寸法の氷の円柱試料 I, II を立てた。熱応力の測定には氷 I が用いられ, 氷 II は温度測定に用いた (単結晶氷の測定では, 温度測定用の氷は市販氷を用いた)。試料の上下にはステンレス鋼の円板を凍着させ, その周囲をアクリルの板で断熱した。また氷の中心と表面から 1.0 cm とケロシン中の温度を熱電対を用いて連続的に記録した。実験中, 氷 I の試料は氷 II と全く同じ温度変化をするものと考えた。

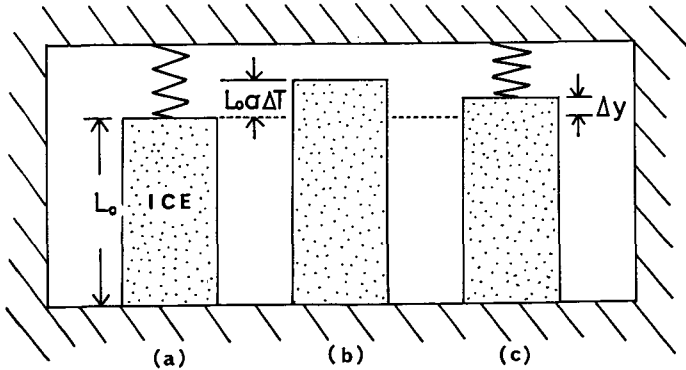
厚い鉄柱に固定されたロードセル A (容量 50 kg) の高さを調整して, その先端が氷 I の上面に凍着させたステンレス鋼の上面を圧して氷に力を加える。この力は時間とともに減少し, この減少速度から各試料の応力緩和時間を測定した。

容器内のケロシンは, ラウダ恒温装置 TUK-30 D の冷却液循環装置を用いて循環させ, 温度設定つまみを調節して -24.5°C から -2°C まで一定速度で上昇するようにした。昇温率は, 毎分 2.0, 1.0, 0.5, 0.3, 0.2°C に選んだ。このときの温度上昇の直線性は相関係数 0.97 ないし 0.99 であった。

ケロシンを循環させて氷にこのような温度上昇を与えたとき, 氷の内部の温度は表面の温度よりも常に遅れて上昇する。昇温率 \dot{T} が 1.0°C/min のとき氷柱の表面と中心との温度差は約 2°C であり, 昇温中この温度差は一定であった。以後, 温度というときには, 氷の表面の温



第 1 図 氷柱 I は熱応力測定用のロードセル A とともに上下を丈夫な金属の柱で束縛されている。氷柱 II は温度測定用の試料で, 熱電対 B がうめこまれている。氷柱を入れた容器内のケロシン C は, 温度制御用循環器によって循環される



第2図 測定系の模式図。(a)は初期の状態,(b)は上端が自由な氷柱の温度が ΔT 上昇したときの氷の伸び,(c)はロードセルによって氷の上端が押えられ、氷の伸びが(b)のばあいより小さくなる状態を示している

度を指すことにする。

温度が -2°C に達した後、約30分間その温度に保った。温度変化に伴って氷に生ずる応力は、ロードセルAを介して実験の間じゅう連続的に記録させた。

以上に述べた装置を用いて、実験で得られた熱応力曲線を解釈する場合、力の測定系をあらかじめ考察しておく必要がある。何故なら、この測定系では、氷と直列に連結したロードセルを介して力を測っているからである。第1図で示したように氷Iの上下は、鋼鉄製の丈夫な枠で固定されている。ロードセルで記録された最大の力は45kgだったがこの程度の力が鉄枠に加わった時に生ずる鉄枠の変位は氷の数千分の一にすぎない。また、この系で温度が変化するのは氷だけであり、ロードセル、鉄枠は一定温度(室温 -15°C)に保たれているので熱膨脹はない。以上のことから上下が剛体で押えられている氷、ロードセルの系と考えてよい。第2図にこの系を模式的に示した。図(a)は、温度を上昇させる前の長さ L_0 の氷の柱がバネで表わしたロードセルと直列に連結し上下は剛体で押えられている。温度を ΔT 上昇させたとき、もしロードセルがなくて氷が自由に熱膨脹できるとすれば、図(b)のように、 $L_0\alpha\Delta T$ だけ伸びる。ここで α は氷の線膨脹係数である。実際には、バネ定数 K のロードセルが介在しているから、ロードセルは $\Delta y = F/K$ だけ縮められる。ここで F は氷、ロードセル系に生じた圧縮力、すなわち記録計に記録された力で、これを氷柱の断面積 S で除した値(F/S)が熱応力である。従って、氷柱の変位量 Δx は、

$$\Delta x = L_0\alpha\Delta T - F/K \tag{1}$$

となり、氷柱の歪を ϵ とすれば、

$$\epsilon = \alpha\Delta T - (S\sigma/KL_0) \tag{2}$$

ここで σ は発生した熱応力($\sigma = F/S$)である。

一方、氷をヤング率 E の弾性体とすると、氷に生じた熱応力 σ と歪 ϵ との間には、 $\epsilon = \sigma/E$ の関係がある。これを(2)式に代入して、

$$\sigma = \frac{\alpha \Delta T}{(1/E + S/KL_0)} = \frac{E\alpha \Delta T}{1 + \left(\frac{S}{L_0} \cdot \frac{E}{K}\right)} \quad (3)$$

という関係が得られる。この式で、 E, α, K は物質定数であり、 L_0, S は実験で定まる定数だから、熱応力 σ は温度変化 ΔT に比例することを示している。しかし、熱応力が単に温度変化や氷の性質だけで定まらず、使用するロードセルによっても違ってくることがわかる。今回、筆者らが行なった実験では $\left(E: \frac{KL_0}{S}\right)$ の比がどの程度であるかを確かめておく必要がある。ヤング率 E は、万能試験機を用い、熱応力の実験における氷の歪速度に近い値 $\dot{\epsilon} \sim 6 \times 10^{-5} \text{ min}^{-1}$ で一軸圧縮試験を行なって $1 \sim 4 \times 10^9 \text{ dyn/cm}^2$ 、平均 $2 \times 10^9 \text{ dyn/cm}^2$ の値を得た。一方、ロードセルのバネ定数 K は、万能試験機で荷重を与えつつ、変位をダイヤルゲージで読みとって求めたところ $K \sim 3.2 \times 10^9 \text{ dyn/cm}$ であった。 $L_0 = 15 \text{ cm}$ 、 $S = 7.07 \text{ cm}^2$ であるから、 $\sigma = 0.8 E\alpha \Delta T$ 、従って氷が剛体にはさまれた時に比べて、約 0.8 倍の熱応力しか発生しないことがわかる。この実験では、温度を一定速度で上昇させたので昇温を始めてからの経過時間を t とすると、温度上昇 ΔT は、 $\Delta T = \dot{T}t$ で与えられる。 \dot{T} は昇温率である。従って (3) 式は、

$$\sigma = A\Delta T = A\dot{T}t \quad (4)$$

となり、熱応力 σ は時間と共に直線的に増加するはずである。ここに、 $A = E\alpha \left(1 + \frac{SE}{L_0K}\right)$ 。

事実、次節で述べる実験結果は、 σ は t に比例して増加するが、昇温の途中から次第に $d\sigma/dt$ は減少し始める。これは、氷が弾性体ではなく、粘弾性体であるためと考えられる。

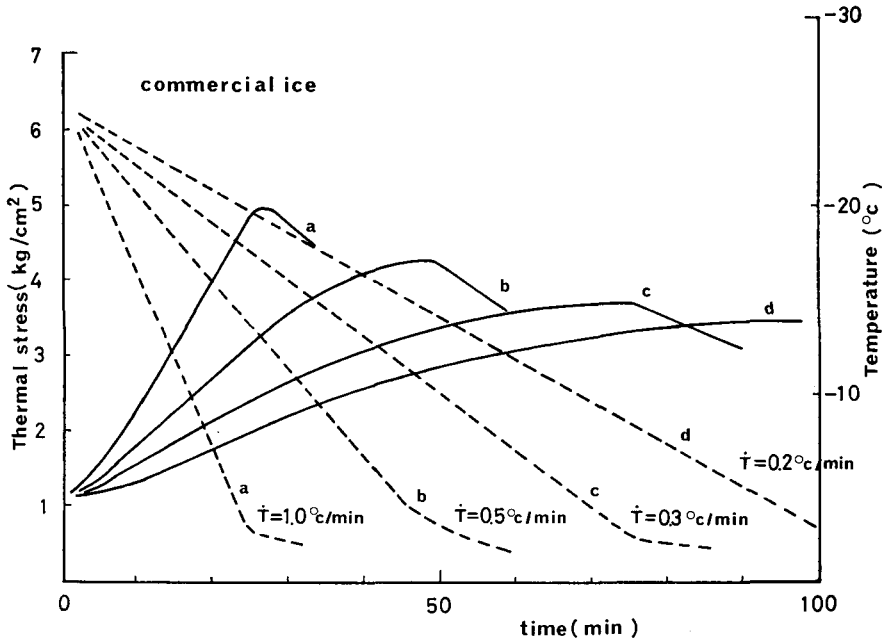
IV. 実験結果

1) 市販氷 (柱状粗大結晶粒の試料)

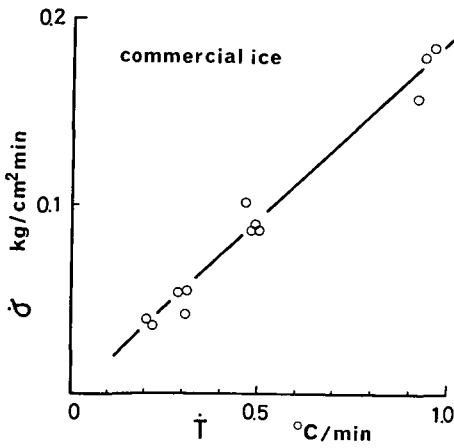
第 3 図に、昇温率 \dot{T} を毎分、 1.0° 、 0.5° 、および 0.2°C で破線のように温度を上昇させた時に生ずる熱応力の時間的変化を、それぞれ実線で示した。昇温の初期には、熱応力 σ は時間と共に一定速度で増加する。熱応力の増加速度 $\dot{\sigma}$ は、第 4 図に示したように昇温率 \dot{T} に比例して増大する。以上のことは (4) 式 $\sigma = A\dot{T}t$ を時間で微分した式 $\dot{\sigma} = A\dot{T}$ から当然予想される。このことから、熱応力は昇温初期には昇温率 \dot{T} に依存しないで温度変化 ΔT だけに依存する。しかし、第 3 図に示したように、やがて $\dot{\sigma}$ は減少しはじめ温度が -2°C になって昇温を止めた直後から応力は減少し始めた。昇温中における $\dot{\sigma}$ の減少は、昇温率 \dot{T} が 1.0°C/min の時にはほとんど観測されなかったが、 \dot{T} が 1.0°C/min 以下では、 \dot{T} が小さいときほど顕著におこる。また、温度を -24.5° から -3°C に上げたときに生じた熱応力を第 6 図に白丸で示した。上部の破線は昇温初期の $\dot{\sigma}$ がそのまま保たれて増加したと考えたときの最終値を示している。 $\dot{T} = 0.2^\circ\text{C/min}$ のときに発生した熱応力の大きさ $\Delta\sigma$ が 2.4 kg/cm^2 に対して、 $\dot{T} = 1.0^\circ\text{C/min}$ のとき $\Delta\sigma$ は 3.5 kg/cm^2 程度であった。

2) ゆき氷

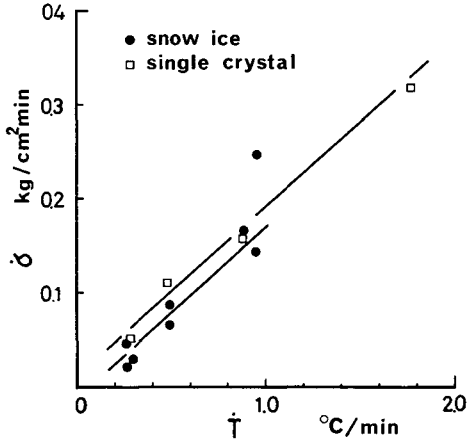
ゆき氷も一般的な傾向は、市販氷の場合と類似している。熱応力の初期の増加速度 $\dot{\sigma}$ は第 5 図に黒丸で示したように昇温率 \dot{T} に比例して増大し、その比例定数は市販氷のばあいにはほぼ等しい。ただ同一の昇温率では、発生する熱応力 $\Delta\sigma$ はかなりばらついているが、一般に市販



第3図 市販氷の試験をいろいろな昇温率 \dot{T} で破線のように温度を上昇させたときの熱応力の時間的変化 (実線)



第4図 市販氷の試料に生じた熱応力の初期応力増加速度 $\dot{\sigma}$ と昇温率 \dot{T} の関係

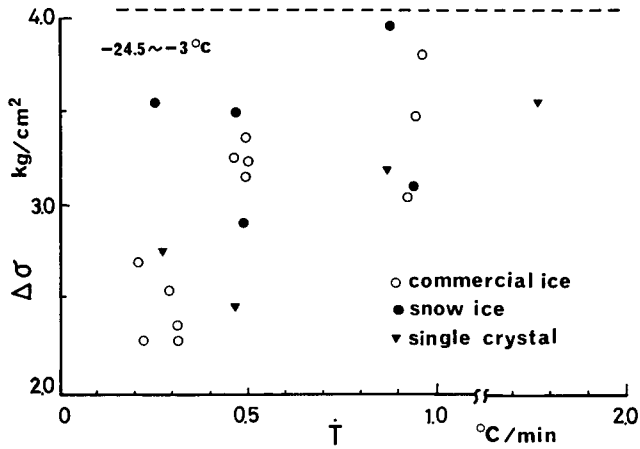


第5図 ゆき氷および単結晶氷の初期応力増加速度 $\dot{\sigma}$ と昇温率 \dot{T} との関係。黒丸；ゆき氷，四角；単結晶氷

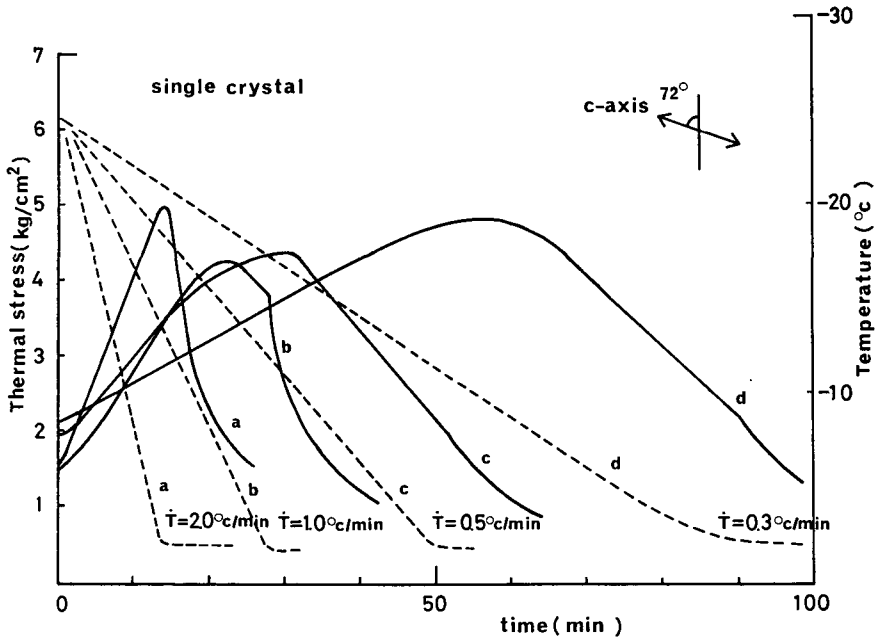
氷のばあいよりも大きかった (第6図の黒丸)。また昇温率が $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 以下のばあいでも昇温中に熱応力は最後まで直線的に増加し $\dot{\sigma}$ の減少はほとんど認められなかった。

3) 単結晶氷

昇温率を毎分、 2.0° 、 1.0° 、 0.5° および 0.3°C にしたときの熱応力曲線を第7図に示した。この単結晶氷は、結晶主軸 (c 軸) の方向が試料軸方向と 72° 傾いていた。単結晶氷についての特徴は昇温中にすでに最大応力のピークが現われることである。また熱応力 $\Delta\sigma$ は昇温率を変え



第6図 市販氷とゆき氷の試料を種々の昇温率 \dot{T} で -24° から -3°C まで温度を上げたときに生じた熱応力 $\Delta\sigma$ 、破線は、応力緩和がおこらないとした時に到達すべき熱応力の値。単結晶氷のピーク応力の値も示してある。



第7図 種々の昇温率 \dot{T} で温度を破線のように上昇させた時、単結晶氷試料に生じた熱応力の時間変化 (実線)

でもあまり変化しなかった (第6図の黒三角形)。特別なばあいとして、c軸が試料軸方向と直交する試料について熱応力を測定した。このばあいは温度が -2°C になっても応力緩和を起こさず、熱応力は 10 kg/cm^2 にも達した。

4) 氷の組織の変化

使用した氷の各試料について、実験の前後で試料の縦断面および横断面にそって薄片を切

り出し、偏光のもとで氷の組織の変化の有無を調べた。単結晶氷、市販氷、ゆき氷を通じて再結晶その他、目に見えるような変化は認められなかった。しかし、ゆき氷の測定の際、初期応力を加えたとき上端からクラックを発生したためと考えられる音が聞こえた。このため応力の緩和時間 τ が大きく変化した。たとえば、 -16.5°C では $\tau=360$ 分だった試料について -24.5°C で2回の測定を行なったところ1回目は $\tau=220$ 分だったものが2回目は46分に変化した。ゆき氷に発生した熱応力 σ が同一の昇温率のばあいでもかなりばらついているのは(第6図)、微細なクラックが発生したための応力緩和によるものと考えられる。これら3種類の試料は、 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ というかなり大きな昇温率のばあいでも巨視的な破壊は示さなかった。

V. む す び

市販氷とゆき氷の熱応力の特徴は極めて類似しているが、ゆき氷の熱応力が市販氷のそれより大きかった。これは、ゆき氷の結晶粒が市販氷のものよりはるかに小さく、従って結晶粒界の比表面積が非常に大きいので結晶粒界に集積した氷の結晶転位の散逸速度が市販氷に比べてずっと小さいためと考えられる。

単結晶氷は結晶粒界がないので、応力緩和が起こりやすい。このため、昇温中にすでに応力緩和の効果が強く現われ、昇温途中でピーク応力に達し、応力が降下し始める。c軸が、氷の試料軸と角 θ で交わる単結晶氷が、一軸応力 σ を受けているとき、結晶底面にはたらく剪断応力 τ は、 $\tau=\frac{1}{2}\sigma\sin 2\theta$ で与えられる。いま、 $\theta=72^{\circ}$ であるから、 $\tau=0.29\sigma$ で与えられる。この単結晶氷の σ が減少しているときの熱応力 σ は $\sigma\sim 3\text{ kg}/\text{cm}^2$ であった。その時の τ は、 $\tau\sim 0.9\text{ kg}/\text{cm}^2$ で、これは若浜³⁾が求めた氷の臨界剪断応力 $0.2\sim 0.5\text{ kg}/\text{cm}^2$ をはるかに越えている。従って、底面すべりによる塑性変形が進行することができ、応力緩和が能率よく起こり得る。

今回の実験では最大 $2.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ という大きな昇温率を与えたにも拘らず、氷体の巨視的な破壊は起こらなかった。自然界ではこのように急速に氷体全体の温度が上昇することはほとんどないので、昇温による熱応力で氷体が破壊することは、まずあり得ない。南極氷床での氷震や北極圏ツンドラ地帯でのクラックの発生などは、温度が急降下するとき起こるといわれている。氷や雪の破壊が昇温時ではなく降温時におこる原因として次の2つの点が考えられる。第一は、昇温時には、昇温とともに応力緩和が急速になるので熱応力があまり大きな値になり得ないのに対し、降温時には温度下降のと共に応力が緩和し難くなり熱応力が昇温時に比べてずっと大きな値に達することである。第二は、氷体に生ずる応力が昇温時には、圧縮なのに対し、降温時は引張りとなる。氷の引張り強度は圧縮強度より数倍も小さいために、降温時における引張り破壊が起りやすい。

このように、氷の熱応力の問題は、実際問題を考えると、昇温時よりも降温時のほうがより重要と考えられる。今回は実験の都合で昇温時しか行なわれなかったので、降温時における熱応力の実験は今後の課題として残された。

この研究を行うにあたって多大な御協力をいただいた応用物理学部門のかたがたに厚く感謝の意を表わします。なお、この研究は筆者の1人高橋徹が北海道大学大学院理学研究科修士課程でおこなったものである。

文 献

- 1) Gold, L. W. 1963 Crack formation in ice plates by thermal shock. *Can. J. Phy.*, **41**, 1712-1728.
- 2) 吉田順五 1972 氷の物理的性質. 冷凍と空調, **138**, 45-51.
- 3) 若浜五郎 1962 氷の塑性変形について, II. 低温科学, 物理篇, **20**, 77-100.

Summary

Thermal stress is more or less induced by the change of ice temperature at any time in a laterally confined sheet of ice such as lake ice. Once the stress exceeds the strength of the ice, the sheet can be broken by fracturing of ice. Some laboratory experiments concerning the thermal stress of ice have hitherto been made in connection with wintertime transportation on the frozen surface of the river, lake and sea in cold regions. Most of them, however, have been restricted to a thermal shock, which causes cracks and fractures in ice.

The thermal stress of ice induced at a smaller rate of temperature change was measured in the present experiment for the clarification of the degree of dependence of the changing rate of temperature as well as the structure and texture of ice on its thermal stress. Ice samples each with a shape of a cylindrical column, 3 cm in diameter and 15 cm in height, were prepared by lathing blocks of three kinds of ice: large-grained ice, snow-ice averaging 1 mm in grain size, and single-crystal ice. As for the large-grained ice, samples were cut out from a block of commercial ice comprising column-shaped crystals with the size of 3 cm or longer in their long axes, which were arrayed in one direction, so that their axes were perpendicular to the cylindrical columns of the samples.

Two ice samples, columns I and II, of the same origin and dimensions, were vertically placed in a kerosene bath C as schematically shown in Fig. 1. Column I was confined by a thick metal frame at both ends in order that the induced thermal stress in the ice was measured through a load cell A when the temperature was changed. The ice temperature was raised from -24.5°C up to -2.0°C at five constant warming rates, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0 and $2.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$, by circulating the kerosene by the use of a Lauda TUK-30 D temperature controlling and circulating device. The distributions of ice temperature in ice during an experiment were obtained by thermo-couples previously embedded very close to the surface, at the center and the end portion of column II. The difference in temperature between the surface and the central portion of the ice was approximately 2°C throughout the rise of temperature. In the present work, the thermal stress was measured only when the ice was warmed.

Thermal stresses obtained for large-grained ice are illustrated in Fig. 3, in which temperature changes and induced thermal stresses are respectively indicated by broken lines and solid curves. When the warming rate was larger than $1.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$, the thermal stress linearly increased with the lapse of time until the warming was stopped. A marked relaxation of stress was observed immediately after the stop of the warming. For the warming rate less than $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, the rate of thermal stress which increased in the beginning gradually decreased with the lapse of time due to the effect of stress

relaxation. Thermal stresses observed for snow-ice were similar to those obtained for the large-grained ice except that the maximum stress attained was a little larger than that of the large-grained ice and that the effect of stress relaxation during the warming of the snow-ice was not so remarkable as that observed for the large-grained ice. These differences may be attributed to the larger specific area of the grain boundaries in snow-ice in which dislocations do not easily move.

Thermal stresses observed for a single crystal of ice were illustrated in Fig. 7. The crystallographic *c*-axis was inclined by 72° from the axis of the ice column. It should be noted that the thermal stress began to decrease and it formed a peak during the continuation of warming as seen in this figure. Since dislocations in a single crystal of ice move very easily, the relaxation of stress may overcome the increase of the stress induced by the warming of the ice. On the contrary, in case of a single crystal of ice whose *c*-axis was at a right angle to the axis of the ice column, the thermal stress linearly increased up to approximately 10 kg/cm^2 at -2°C and no effect of the relaxation of stress was observed during the warming of the ice. In this case, no shear stress is generated on the basal plane of the ice and dislocations cannot move to yield the ice any plastic deformation.

No formation of cracks or fractures was observed in any ice column even when the warming rate was larger than 1.0°C/min .