

単結晶氷および多結晶柱状氷の破壊じん性

楠 本 韶*・高 瀬 徹*
 内 田 武**・木 寺 亨***
 梶 聖 悟*

Fracture Toughness of Single Crystal Ice and Columnar Grained Ice

by

Sho KUSUMOTO*, Tohru TAKASE*, Takeshi UCHIDA**,
 Tohru KIDERA*** and Seigo KAJI*

Fracture toughness of single crystal ice and columnar grained polycrystal ice was investigated using sharply edge-notched specimens by three point bending at -10°C . The loading rate \dot{K}_I ranged from 1.0 to $3.8 \times 10^4 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$. The notch of the specimens was made by pressing the edge of a razor blade on the bottom of the saw cut slot. Three types of single crystal ice specimens were made, in which C-axis of the crystal placed at an angle θ equaled 0° , 45° or 90° with the notch plane respectively.

Experimental results show that the effects of \dot{K}_I on the fracture toughness is very little in the range $\dot{K}_I > 30 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$. The results of the study of the experimental data in the range $\dot{K}_I > 30 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ are summarized as follows;

- (1) K_{Ic} values of $\theta=0^{\circ}$ and $\theta=90^{\circ}$ specimens are nearly equal, and they are higher than that of $\theta=45^{\circ}$ specimens.
- (2) Fracture toughness of columnar grained polycrystal ice specimens calculated from the K_{Ic} data of the single crystal ice specimens based on the weakest point theory was higher than that of the experiment.

1. 緒 言

筆者らは先報⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾において、多結晶氷を用いて限られた負荷速度範囲による氷の破壊じん性値に対する負荷速度の影響についての実験結果を報告した。本研究では、切欠き底の結晶粒数が1個である単結晶氷 (Single crystal ice) を用いて、氷のC軸方向と破壊じん性値の関係を調べた。合わせて、種氷を用いて製

造する多結晶柱状氷 (Columnar grained ice) による実験も行い、単結晶氷との強度比較を行った。

得られた結果の整理には極値統計的手法によって、ワイブル確率紙を用いて検討した。また、破断後採取した破面レプリカを用いて、き裂の発生と破面形状を観察した。

昭和60年5月8日 受理

*機械工学第二学科 (Department of Mechanical Engineering II)

**機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

***菱電エンジニアリング(株)福岡市 (Ryoden Engineering Co. Ltd, Fukuoka city)

2. 実験方法

2.1 試験片の製作

今回用いた氷試験片には、単結晶氷 (S.C.I.) と多結晶柱状氷 (C.G.I.) を使用した。単結晶氷試験片は、C軸と切欠き面のなす角 θ が 0° 、 45° または 90° になるように3種類の試験片を製作した。また、切欠き加工は最初にノコで作った切欠きの先端部に、さらにカミソリ刃を圧入する新しい方法を用いた。

2.1.1 単結晶氷試験片

まず単結晶氷製造について説明する。Fig. 1に今回用いた単結晶氷製造装置(断面図)を示す。十分にしゃ沸し、中に溶け込んだ空気を除去し常温にもどした蒸留水を容器A(縦220×横220×高さ350mm)に入れ、底板なしの内容容器D(縦52×横52×高さ230mm)を容器Aに9本セット後、容器A・Dに付着した気泡をできるだけいねいにスポイト等で除去し、 -15°C のフリーザ内に放置する。なお、内容容器Dは頭部に直径1mm程度の穴を有し、容器外の結晶軸の影響を受けることなく内容器に単結晶氷が得られる。

容器Aの底面は、容器底部の蒸留水温度が約 4°C になるようヒータで加熱し、この時側面からの凍結を防ぐため側面をヒータで加熱する。また、容器上面を低温空気で冷却することで下向き凍結¹⁵⁾を行った。凍結スピードは10mm/dayとし、取出しまでに約25日を要し、1回の取出しで試験片27本分の単結晶氷が得られた。しかし、時として2~3個の結晶粒を含む場合もあった。下向き凍結を行った理由は次の通りであ

る。すなわち、水の密度が 3.98°C で最大となり、従来筆者らが用いていたC.G.I.製造法である上向き凍結を行うと対流が起り蒸留水が乱れて、非常に不完全な単結晶氷ができるためである。なお、凍結の際の水の体積膨張による蒸留水の逃げ道として容器底部にパイプ(H₃)を取付けた。

単結晶氷 $\theta=0^\circ$ 試験片の製作は次のようにした。取出した単結晶氷から $52\times 52\times 52\text{mm}$ の水ブロックを切り出し、ホットプレートで成形し試験片中央部とし、持ちしろ部分には $52\times 52\times 100\text{mm}$ に成形したC.G.I.を接着する。この作業は -10°C の低温室で行った。接着する面に#32のふるいでふるった氷をはさみ込み、 0°C の蒸留水をスポイトで注入して接合し、最終的形狀($50\times 50\times 250\text{mm}$)にはホットプレートで成形した。

切欠き形成は、カミソリ刃埋込¹⁾ではカミソリ刃の平面が結晶成長方向と一致しない場合には成長が乱されて単結晶氷が得られないため、今回はカミソリ刃圧入という方法を試みた。すなわち、単結晶氷の中央にC軸方向に厚さ0.38mmのノコで約15mm切り込み、そこに厚さ0.15mm・先端角度 13° のカミソリ刃を挿入し、これに荷重を加えて氷母材に圧入する。カミソリ刃圧入は、負荷したまま -1°C の灯油中に24時間放置することで行った。

単結晶氷 $\theta=45^\circ$ 試験片および $\theta=90^\circ$ 試験片は、カミソリ刃の圧入方向をC軸と 45° および垂直にすることで製作した。但し、 $\theta=45^\circ$ 試験片において単結

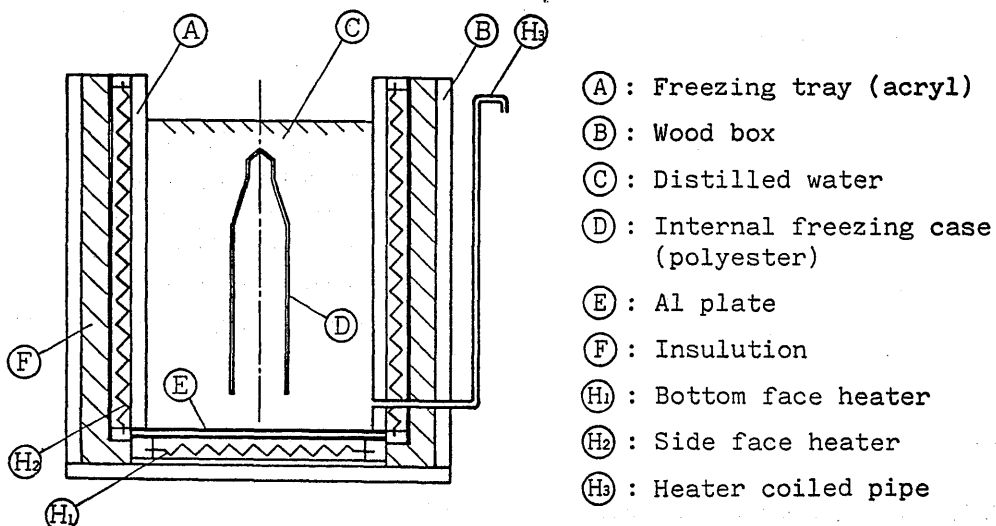


Fig. 1 Manufacturing equipment of single crystal ice (Schematic)

晶氷製造の制約のため試験片寸法は、厚さ35×高さ50×長さ250mmとした。

Fig. 2 に今回用いた単結晶氷試験片の模式図を、また Fig. 3 に試験片の偏光写真を示す。

2.1.2 多結晶柱状氷試験片

多結晶柱状氷は、先報²⁾と同じく種氷を用い上向き凍結で製作した。取出しまでに約35時間を要し、1回の取出して試験片12本が得られた。切欠きは、厚さ0.1mm・先端角度11°のカミソリ刃をあらかじめ製造過程でセットしておくカミソリ刃埋込試験片と、厚さ0.15mm・先端角度13°のカミソリ刃を結晶成長方向に圧入するカミソリ刃圧入試験片の2種とし、試験片寸法は厚さ50×高さ50×長さ250mmとした。Fig. 3 (g), (h) に、多結晶柱状氷試験片の偏光写真を示す。なお、切欠き面と結晶成長方向とのなす角を α とする。

全ての単結晶氷試験片および多結晶柱状氷試験片は、製作後残留応力の除去と空気中での昇華による試験片形状の変化を防ぐため、曲げ試験予定温度(-10°C)で灯油中に一昼夜以上保存した。

2.2 単結晶氷のC軸方位分布

単結晶氷試験片を製作するに当たって、まずC軸方位

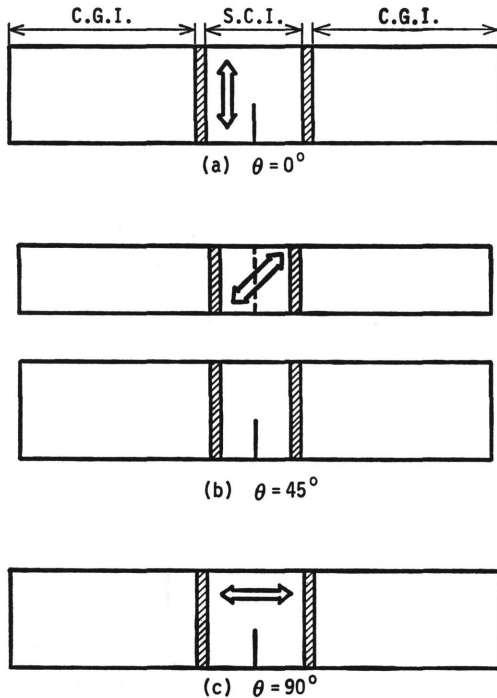


Fig.2 Schematic configuration of single crystal ice specimens; arrows denote C-axis direction

分布の測定を行った。先報¹⁾²⁾のエッチピット法・干渉色法に Fig. 4 に示す4軸ユニバーサルステージ³⁾を用いる方法を加え、3法によるC軸方位測定を行った。ユニバーサルステージは、2枚の偏光板の間で氷薄片を立体的に種々の方向に回転させ、偏光板を通過した光の振動方向と氷薄片を通過した光の振動方向を一致させることによりC軸方位を測定する装置である。本装置は自作したものである。

これら3法の比較によると、エッチピット法と干渉色法は観察角度が極端に違うものがあるが、エッチピット法とユニバーサルステージによる方法は良い相関が得られた。これは、干渉色法において偏光装置の調整不良と思われる。また、エッチピット法は広い範囲の観察が容易に行えるため、今回はエッチピット法により単結晶氷のC軸方位(θ)を決定した。ここで、 θ には $\pm 15^\circ$ の許容範囲を設け単結晶氷 $\theta=0^\circ \cdot \theta=45^\circ \cdot \theta=90^\circ$ 試験片とした。

2.3 実験方法

低温室内に設置された MTS 万能試験機 (容量10 ton) を利用し、 -10°C のもとで3点曲げ試験を行った。先報³⁾ではエッジ先端角度 60° のものを利用したが、今回はステンレス丸鋼を使用した。ロードセルは自作のステンレス鋼製ロードセル (バネ定数 $k=550 \text{ kgf/mm}$ および $k=1.27 \times 10^3 \text{ kgf/mm}$) と特注のバネ鋼製ロードセル (バネ定数 $k=6 \text{ kgf/mm}$ および $k=15 \text{ kgf/mm}$) を負荷速度により使い分けることで使用した。動ひずみ計 (三栄測器製, 6M61) は出力 $0.5\text{V}/10\mu\text{st}$ ・周波数帯域 DC~2kHz であり、アナライジングレコーダ (横河北辰電機製, Model 3655)

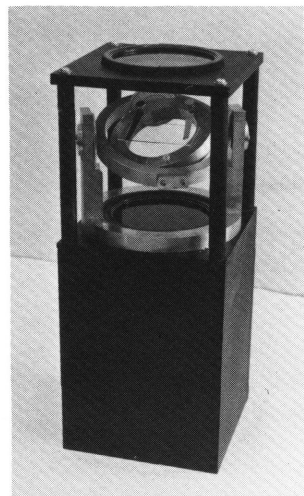


Fig. 4 Universal stage

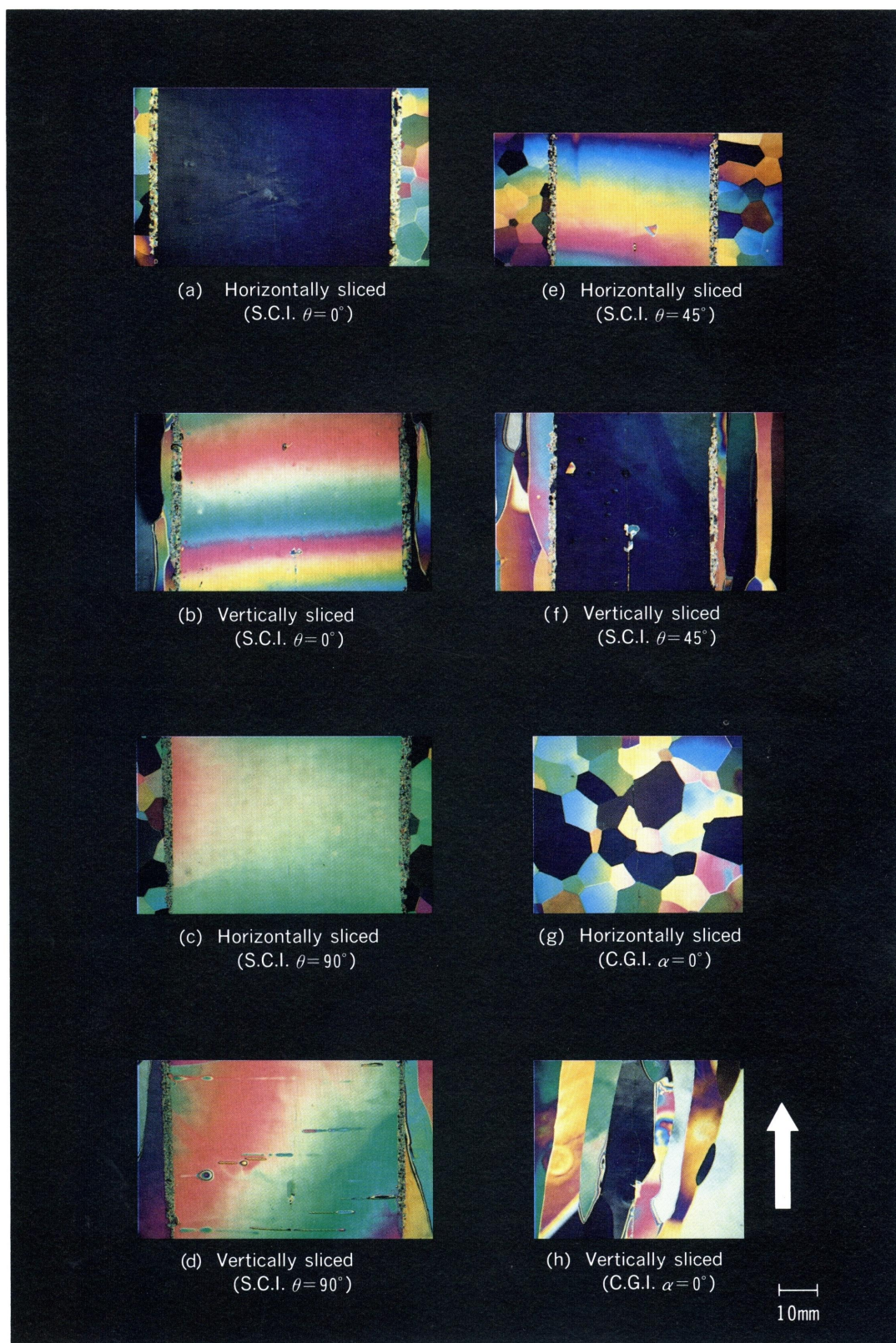


Fig. 3 Sliced specimens; polarized light, the arrow denotes crystal growth direction

は、周波数帯域 DC~20kHz のものを用いた。

試験片へ負荷された荷重は、ロードセルからのひずみ量を動ひずみ計によって増幅しアナライジングレコーダへ入力することで、負荷荷重~時間線図が精度よく得られる。荷重速度 \dot{P} および応力拡大係数の変化率 \dot{K}_I は、出力された線図の傾きにより算出した。負荷速度 \dot{K}_I は、 $1.0 \sim 3.8 \times 10^4 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ の間で変化させることができた。

試験後直ちに、先報³⁾で報告した歯科用印象材の1つであるエグザフレックス（而至歯科工業製）を用いて破面レプリカを採取した。

破壊じん性値 K_{If} を求める場合に用いる応力拡大係数 K_I の算出は次式を用いた。

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{h}\right) \quad (1)$$

ここで、応力 σ は

$$\sigma = \frac{6M}{bh^2} = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (2)$$

また、 $f(a/h)$ は試験片形状・荷重様式によって異なり、曲げ試験の場合、一般に、

$$f\left(\frac{a}{h}\right) = A_0 + A_1\left(\frac{a}{h}\right) + A_2\left(\frac{a}{h}\right)^2 + A_3\left(\frac{a}{h}\right)^3 + A_4\left(\frac{a}{h}\right)^4 \quad (3)$$

(但し、 $\frac{a}{h} \leq 0.6$ で 0.2%以下の誤差)

式(1)~式(3)で、 P は荷重、 L は支点間距離、 b は試験片厚さ、 h は試験片高さ、 a は切欠き深さである。また式(3)中の $A_0 \sim A_4$ の値は、 (L/h) によって決まり、3点曲げ・ $(L/h) = 4$ の場合、 $A_0 = 1.090$ 、 $A_1 = -1.735$ 、 $A_2 = 8.20$ 、 $A_3 = -14.18$ 、 $A_4 = 14.57$ となる⁷⁾。

3. 実験結果

3.1 多結晶柱状氷試験片における切欠き形成と K_{If} との関係

Fig. 5は多結晶柱状氷におけるカミソリ刃圧入試験片とカミソリ刃埋込試験片の実験結果である。1つの \dot{K}_I について K_{If} の最大値・中央値・最小値をまとめたものである。どちらの試験片の場合も、 $\dot{K}_I = 5 \sim 30 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ 付近を境として遷移領域が見られるが、 $\dot{K}_I > 30 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ では負荷速度の影響がないことがわかる。カミソリ刃圧入試験片の方がカミソリ刃埋込試験片より K_{If} 値は高くなっており、特に低速域 ($\dot{K}_I < 20 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$) において顕著に現われている。この主原因は、カミソリ刃圧入による刃先付近の

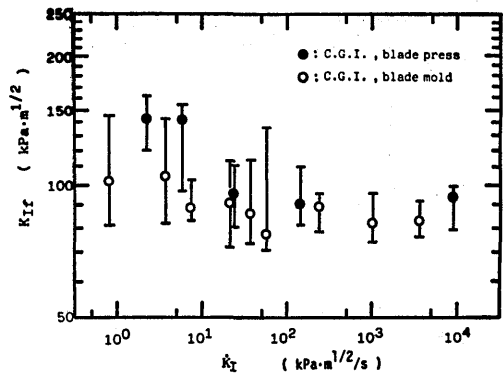


Fig. 5 \dot{K}_I vs. K_{If} relationship of C. G. I.

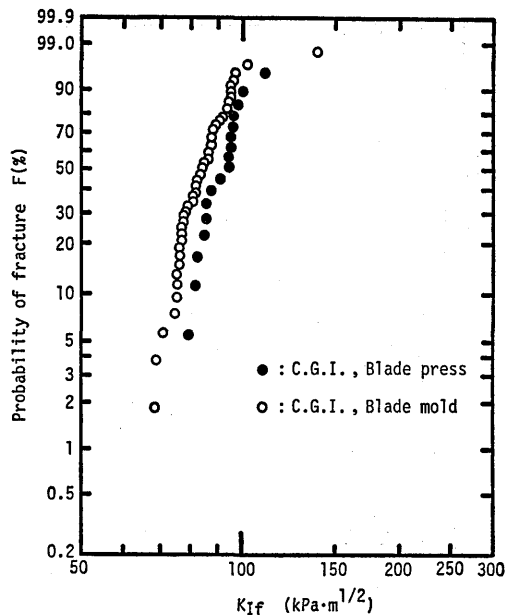


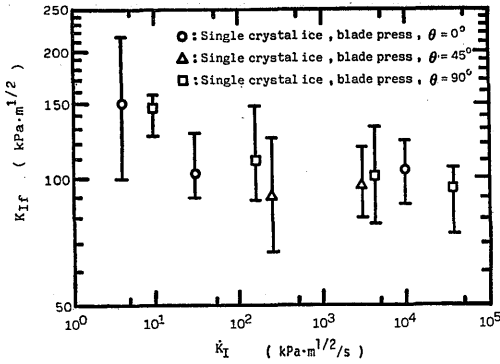
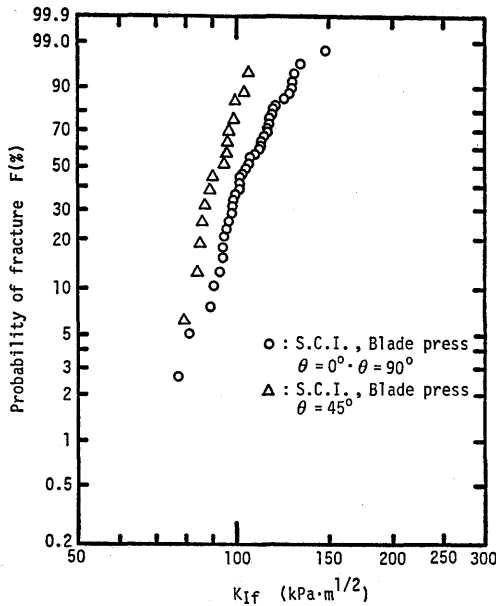
Fig. 6 Weibull plots of C. G. I. ($\dot{K}_I > 30 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$)

氷の塑性変形、再結晶、残留応力の影響などが考えられる。

Fig. 6は、 K_{If} 値がほぼ一定となる $\dot{K}_I > 30 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ について、それぞれの試験片でのワイブルプロットを示す。明らかに、カミソリ刃圧入の方が強度的に強くなっており、その差は $10 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 程度である。

3.2 単結晶氷試験片におけるカミソリ刃圧入方向と K_{If} との関係

Fig. 7は、単結晶氷試験片における実験結果である。 $\theta = 0^\circ \cdot \theta = 45^\circ \cdot \theta = 90^\circ$ 試験片それぞれにおいて、 $\dot{K}_I = 20 \sim 1.0 \times 10^4 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ では負荷速度に影響なく、 K_{If} 値はほぼ一定である。 $\dot{K}_I < 20 \text{ kPa} \cdot$

Fig. 7 \dot{K}_I vs. K_{IIF} relationship of S. C. I.Fig. 8 Weibull plots of S. C. I. ($\dot{K}_I=20\sim 1.0\times 10^4$ kPa \cdot m $^{1/2}$ /s)

$m^{1/2}/s$ では K_{IIF} 値は増加し、 $\dot{K}_I > 1.0 \times 10^4$ kPa \cdot m $^{1/2}/s$ では K_{IIF} 値はやや減少する傾向が見られるが、取扱いが複雑になるため本論文においては負荷速度の影響が見られない。 $\dot{K}_I=20\sim 1.0\times 10^4$ kPa \cdot m $^{1/2}/s$ について議論する。Fig. 8 は、この範囲での実験結果のワイブルプロットである。 $\theta=0^\circ$ と $\theta=90^\circ$ の K_{IIF} 値はほぼ同じとなったのでまとめて $\theta=45^\circ$ の強度と比較してある。明らかに $\theta=45^\circ$ の強度は、 $\theta=0^\circ$ および $\theta=90^\circ$ の強度より弱いことがわかる。このことは、Michel¹⁰⁾ が行った単結晶氷の引張試験において、引張軸と基底面のなす角が 45° の時引張応力が最小となり、 0° および 90° に近づくにつれて引張応力は大きくなることによく一致する。すなわち、六方晶系

をなす氷の破壊においてもある程度のすべりを必要とし、最も低い応力ですべりが起る 45° 試験片が 0° および 90° 試験片より K_{IIF} 値が低くなるものと思われる。

3. 3 単結晶氷と多結晶柱状氷の強度比較

今回使用した多結晶柱状氷は、C軸方位が任意の氷の集合体である。そこで、最弱リンク説に基づいて多結晶氷強度を推定し多結晶氷実験値および単結晶氷実験値との比較・検討を行う。

単結晶氷試験片において任意の傾き角 θ での K_{IIF} 値を次のように近似する。

$$K_{I\theta} = K_{I0} - a \cdot \sin 2\theta \quad (4)$$

ここで、 K_{I0} は単結晶氷 $\theta=0^\circ \cdot 90^\circ$ 試験片の K_{IIF} 値、 a は $\theta=0^\circ \cdot 90^\circ$ 試験片と $\theta=45^\circ$ 試験片の K_{IIF} 値の差である。また、ワイブル分布での $\theta=0^\circ \cdot 90^\circ$ の累積破壊確率 $F(K_{I0})$ は、

$$F(K_{I0}) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{K_{I0}}{\xi_0} \right)^{\epsilon_0} \right\} \quad (5)$$

ここで、 ϵ_0 、 ξ_0 は $\theta=0^\circ \cdot 90^\circ$ での形状および尺度のパラメータである。任意の傾き角 θ での累積破壊確率 $F(K_{I\theta})$ は、式(4)および式(5)より

$$F(K_{I\theta}) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{K_{I\theta} + a \cdot \sin 2\theta}{\xi_0} \right)^{\epsilon_0} \right\} \quad (6)$$

従って、 θ が $0^\circ \sim 90^\circ$ 内で任意に存在し、その発生確率が等しい場合、すなわち多結晶氷の累積破壊確率を最弱リンク説に基づいて計算すると次式が導かれる。

$$\begin{aligned} F(K_I) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} F(K_{I\theta}) d\theta \\ &= 1 - \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp \left\{ - \left(\frac{K_{I\theta} + a \cdot \sin 2\theta}{\xi_0} \right)^{\epsilon_0} \right\} d\theta \quad (7) \end{aligned}$$

また、今回用いた単結晶氷 $\theta=45^\circ$ 試験片は氷製造の制約上、試験片厚さ 35mm を用いたが強度比較をするには他試験片と同寸法 (厚さ 50mm) に補正を行う必要がある。氷の強度が最も弱い欠陥の強度により決まり、その欠陥数は試験片厚さに比例すると考える

$$F' = 1 - (1 - F'')^{50/35} \quad (8)$$

ここで、 $F'' \cdot F'$ は厚さ 35mm および厚さを 50mm に補正を行った累積破壊確率である。

Fig. 8 で示した単結晶氷 $\theta=0^\circ \cdot \theta=90^\circ$ の実験値を 2 直線近似し、式(7)中の ϵ_0 および ξ_0 を求め、 $\theta=0^\circ \cdot \theta=90^\circ$ と厚さを 50mm に補正を行った $\theta=45^\circ$ の K_{IIF} 値の差 a を変数として式(7)を計算すると多結晶氷強度が推定される。

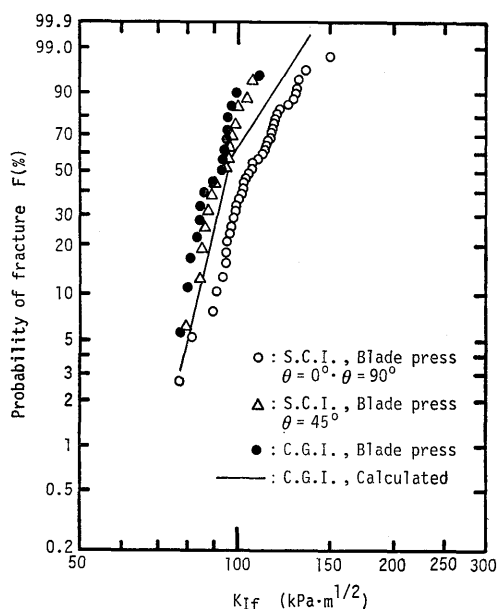


Fig. 9 Weibull plots of S.C.I., C.G.I., and estimated toughness line of C.G.I.

Fig. 9 は、単結晶氷 $\theta=0^\circ \cdot \theta=90^\circ$, $\theta=45^\circ$ および多結晶柱状氷の実験値と式(7)による多結晶氷強度の推定を示す。図から明らかなように、多結晶柱状氷の強度は推定した多結晶氷強度より弱い結果となった。この理由として、多結晶氷の場合の結晶粒界からのき裂発生が考えられる。先報⁹⁾のように、多結晶柱状氷では結晶粒界を起点としたき裂の発生が、結晶粒内からのき裂発生よりも多いことが観察されており上記の理由づけを支持している。また、多結晶柱状氷の強度は単結晶氷 $\theta=45^\circ$ の強度と同程度であったが、この点についてはさらに充分な検討を要する。

3. 4 破面観察

先報⁹⁾で報告したエグザフレックスを使用して、比較的忠実な破面レプリカが得られた。破面レプリカと切欠き底部平面の偏光写真からき裂の発生と破面形状を観察した。用いたレプリカは、単結晶氷 $\theta=0^\circ$ が11個・ $\theta=90^\circ$ が14個・ $\theta=45^\circ$ が10個・多結晶柱状氷が17個および不完全単結晶氷(2~3結晶粒を含む)が14個である。Fig.10 は、高 K_{If} 域での代表的なレプリカ写真である。

(1) 単結晶氷

単結晶氷の場合、多結晶柱状氷に比べ明らかに平坦な破面である。多結晶柱状氷は、破壊する結晶面が結晶ごとに方向が異なるので当然と言える。

$\theta=0^\circ \cdot \theta=90^\circ$ では、1 箇所に入ったき裂が全体へ

伝播しており、 $\theta=45^\circ$ では起点がはっきりせず、幅をもってき裂が発生しているように見える。

(2) 不完全単結晶氷(2~3結晶粒を含む)

不完全単結晶氷については、詳細な観察を行うまでには到っていないが、14個の試験片破面レプリカについてき裂発生点が粒界か粒内かを調べた。その結果をTable 1 に示す。なお、表中○で囲んだものは、き裂発生部の隣接結晶粒子軸がほぼ等しいことを示している。この結果から見る限りでは、粒界からのき裂発生数が過半数の試験片で見られることにより、き裂発生源としての結晶粒界の重要性が認められる。

(3) 多結晶柱状氷

多結晶柱状氷の場合、き裂は1~2箇所から発生しており、前述の通り単結晶氷に比べはるかに起伏が激しく結晶粒界を示す縦筋が見られる。

多結晶柱状氷は、単結晶氷 $\theta=0^\circ \cdot \theta=90^\circ$ より強度的に弱い。つまり、き裂の発生は単に切欠き底の結晶方向だけでなく、結晶粒界の存在とその方向が影響を与えると考えるべきである。

また、一般に全てに共通して言えることは、

(i) 進展中のき裂の先端位置を示す横筋がき裂進展方向と直交していくつも見られることである。これは、き裂の進展・停止がくり返すような間欠的な破壊が起っていることを示している。

(ii) 破壊じん性値 K_{If} が高い方が破面の起伏が大きくなり、特に低 K_{If} ・高 K_{If} おいて切欠き底付近からの湾曲が多く見られる。これは、低 K_{If} 域において塑性域が急増することにより見かけ上の K_{If} 値が増し、破壊はその塑性域に沿って起るためだと思われる。

Table 1 Observation of crack start of 2 or 3 crystal grained ice, number in parentheses expresses number of crystal grains

Crack start	Number of specimens	Fracture toughness K_{If} [$kPa \cdot m^{1/2}$]			
grain boundary	4	86 (2)	94 (2)	111 (2)	123 (2)
grain boundary and in grain	4	91 (2)	93 (2)	112 (3)	115 (3)
in grain	6	94 (3)	95 (2)	104 (2)	111 (3)
		114 (2)	116 (3)		

(A) $\theta=0^\circ$
(B) $\theta=90^\circ$

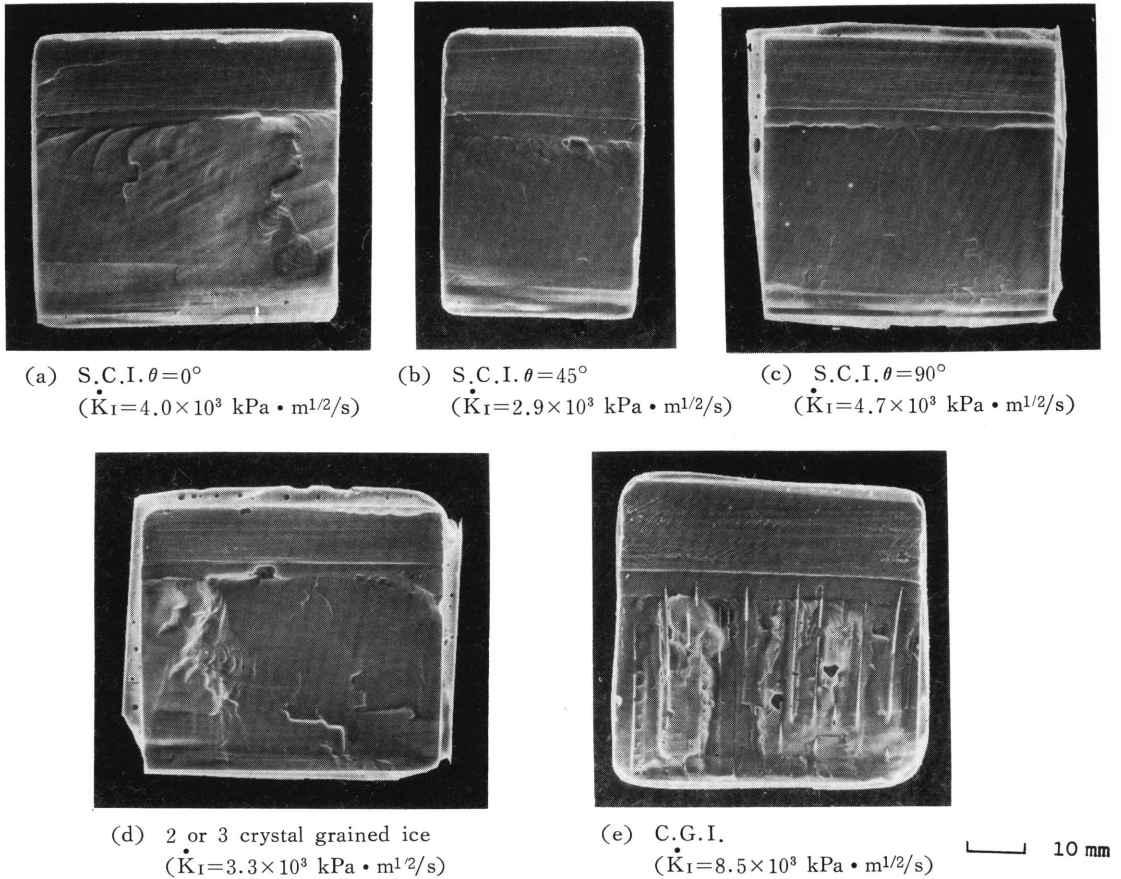


Fig. 10 Examples of replica of fracture surface; fracture at high loading rate
 $(\dot{K}_I = 2.9 \times 10^3 \sim 8.5 \times 10^3 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s})$

以上に示すように、単結晶氷においては θ に関係なく平坦なぜい性破面を示した。この破面がどういう結晶面となっているかについては、今後さらに十分な検討をする予定である。

4. 結 論

単結晶氷異方性試験片および多結晶柱状氷の破壊じん性について負荷速度 $\dot{K}_I = 1.0 \sim 3.8 \times 10^4 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ の範囲で実験的研究を行った。試験片切欠きは、単結晶氷ではカミソリ刃圧入としてC軸と切欠き面のなす角 θ が $0^\circ \cdot 45^\circ \cdot 90^\circ$ の3種を用い、多結晶柱状氷では従来のカミソリ刃埋込とカミソリ刃圧入の2種を用いた。得られた破壊じん性値 K_{Ir} の関係を統計論的手法で整理し、次のような知見を得た。

1) 単結晶氷製造

今回、上面を冷却し底面と側面を加熱することで下方凍結させて製造した。この方法で気泡が少ない単結

晶氷が得られたが、時として2~3個の巨大結晶からできている氷も含まれた。

2) C軸方位の分布

C軸方位の分布測定には、エッチピット法・干渉色法およびユニバーサルステージを用いる方法の3法を用いた。この3法の比較により、エッチピット法で求めたC軸方位 θ の妥当性がわかった。

3) 多結晶柱状氷試験片

①カミソリ刃埋込とカミソリ刃圧入のどちらの場合も、 $\dot{K}_I = 5 \sim 30 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ 付近を境としてせん移領域が存在し、また $\dot{K}_I > 30 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ では負荷速度の影響がなく破壊じん性値 K_{Ir} は、ほぼ一定となる。

②カミソリ刃圧入の方が、カミソリ刃埋込より強度的に強く、特に低 \dot{K}_I ($\dot{K}_I < 20 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$)において顕著に現われる。

4) 単結晶氷試験片

それぞれの θ での試験片において、 $\dot{K}_I = 20 \sim 1.0 \times 10^4 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ では \dot{K}_I の影響がなく K_{II} 値は、ほぼ一定となる。この範囲において、 $\theta = 0^\circ$ と $\theta = 90^\circ$ は強度的にはほぼ同程度であるが、 $\theta = 45^\circ$ は $\theta = 0^\circ \cdot \theta = 90^\circ$ より弱いことがわかった。

5) 単結晶氷試験片と多結晶柱状氷試験片の強度比較
単結晶氷 $\theta = 0^\circ \cdot \theta = 90^\circ$ と $\theta = 45^\circ$ の強度から最弱リンク説に基づいて多結晶柱状氷の強度推定を行ない、実験値との強度比較を行った。その結果は、多結晶氷実験値は推定値より弱く、単結晶氷 $\theta = 45^\circ$ の実験値と同程度であることがわかった。

6) 破面観察

一般に六方晶系では C 軸に垂直な面、すなわち基底面がぜい性破面となる。ところが、単結晶氷では $\theta = 0^\circ \cdot \theta = 45^\circ \cdot \theta = 90^\circ$ の破面について巨視的差異は見られず、平坦なぜい性破面を示した。多結晶柱状氷では、1~2 箇所からき裂が発生しており起伏が激しく結晶粒界を示す縦縞が見られる。

破面観察によると、結晶粒界はき裂発生源として働くものと考えられる。

最後に、本研究の実施に当り多くの御援助を載いた本学真武教授(当時)に厚く御礼申し上げる。また、本実験に協力された大学院学生の伊藤重幸君および卒業研究の学生諸君に謝意を表わす次第である。

参 考 文 献

- 1) 楠本, 木村, 木寺, 梶, 竹内; 粗大結晶氷の破壊靱性, 長大工研究報告, 13, 21 (昭58), 123
- 2) 楠本, 木村, 木寺, 梶, 竹内; 柱状結晶氷及び層状氷の破壊靱性; 長大工研究報告, 13, 21 (昭58), 133
- 3) 楠本, 木村, 木寺, 梶; 氷の破壊靱性値に対する負荷速度の影響, 長大工研究報告, 14, 23 (昭59), 121
- 4) 若浜; 氷の曲げ試験, 低温科学物理編, 17, (昭33), 87
- 5) 東; X線回折顕微法による氷の研究, 理学電機ジャーナル, 10, 1, (昭54), 6
- 6) Chester C. Langway Jr.; Ice Fabrics and The Universal Stage, U. S. Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment, Technical Report 62, (1958)
- 7) 岡村; 線形破壊力学入門, (昭51), 218, 培風館
- 8) Bernard Michel; The Strength of Polycrystalline Ice, Canadian Journal of Civil Engineering, 5, 3, (1978), 285