

大型試験片を用いた柱状結晶氷の破壊じん性の検討<sup>†</sup>

楠 本 韶\* 木 村 宣 夫\*\*  
高 瀬 徹\* 木 寺 亨\*\*\*

## Study of Fracture Toughness of Columnar Grained Ice Using Large Specimens

by

Sho KUSUMOTO\*, Nobuo KIMURA\*\*, Tooru TAKASE\*  
and Tohru KIDERA\*\*\*

The effects of loading rate and specimen size on the fracture toughness  $K_{Ic}$  of columnar grained ice have been investigated at  $-10^{\circ}\text{C}$ . Notched bend specimens with the section size of  $50 \times 50 \text{ mm}$  (medium size specimen) and  $200 \times 50 \text{ mm}$  (large size specimen) were used. The notch of specimen was made using a thin razor blade embedded in the mold. Several tests were carried out at each test condition, and probabilistic nature of fracture toughness was also investigated.

The results obtained are as follows.

(1) The value of  $K_{Ic}$  decreased as  $\dot{K}_I$  increased, and there was a transition in the range of  $\dot{K}_I \approx 10-100 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$ . The value of  $K_{Ic}$  was not substantially affected by  $\dot{K}_I$  in the high  $\dot{K}_I$  region beyond the transition.

(2) Scatter of  $K_{Ic}$  for the large size specimens was considerably small compared with that for the medium size specimens.

(3) The minimum value of  $K_{Ic}$  was not affected by the specimen size in the low  $\dot{K}_I$  range. However, in the high  $\dot{K}_I$  range, the minimum value of  $K_{Ic}$  of a large specimen showed a little higher value than that of a medium specimen.

(4) The size effect was analyzed from the view point of the "weakest link theory". It was observed that the experimental data did not agree with the theoretical prediction in the range of low values of  $K_{Ic}$ .

(5) The relation between  $\dot{K}_I$  and  $K_{Ic}$  was compared with other experimental data on a similar kind of ice. Considerable difference in  $K_{Ic}$ , especially in the low loading rate range, was observed. The reason is not yet clear, and more studies are needed.

キー・ワード：破壊じん性，負荷速度，寸法効果，氷

## 1 緒 言

氷の破壊じん性値  $K_{Ic}$  に対する負荷速度の影響については、これまでにも幾つかの報告がある。筆者らもさきに平滑部断面寸法  $25 \times 25 \text{ mm}$  の小型試験片および  $50 \times 50 \text{ mm}$  の中型試験片を用いて負荷速度  $\dot{K}_I \approx 1 \sim 2000 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$  のかなり広い範囲にわたって、三点曲げ試験によって  $K_{Ic}$  を求める実験を行った。その結果、 $\dot{K}_I \approx 20 \sim 100 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$  付近に  $K_{Ic}$  の値が急変する遷移領域があり、実験の範囲では、遷移領域よりも高い  $\dot{K}_I$  の範囲で  $K_{Ic}$  に対する  $\dot{K}_I$  の影響が少ないことを見出した。また、中型試験片の  $K_{Ic}$  のばらつきが小型試験片にくらべて少ないこと、およびばらつき

の下限は小型試験片にくらべて幾分高めであるが、ほぼ同じレベルであることを述べた。

本報では前報より幾分広い  $\dot{K}_I \approx 0.8 \sim 5000 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$  の範囲内で上記寸法の中型試験片の他に平滑部断面寸法  $200 \times 50 \text{ mm}$  の大型試験片を用いて行った実験結果について述べる。なお、本報の実験に用いた氷は前報と異なって、後述の方法で作った多結晶柱状氷である。多結晶柱状氷を用いた理由は結晶粒子径が制御しやすいこと、および従来の他の研究例のほとんどがこの種の氷を用いていて、結果が比較しやすいためである。

<sup>†</sup> 本報を「氷の破壊じん性に及ぼす負荷速度の影響 (第2報)」(Effect of Loading Rate on Fracture Toughness of Ice, II) とする。原稿受理 昭和60年11月2日 Received Nov. 2, 1985

\* 正 会 員 長崎大学工学部 長崎市文教町, Faculty of Engineering, Nagasaki University, Bunkyo-machi, Nagasaki

\*\* 正 会 員 (株)アドバンス開発研究所 府中市緑町, Advance Research and Development Co. Ltd., Midori-machi, Fuchu

\*\*\* 長崎大学工学部 (現在, 三菱エンジニアリング(株)), Faculty of Engineering, Nagasaki University, Bunkyo-machi, Nagasaki

\*1 前報<sup>1)</sup>でも述べたように、高負荷で破壊した場合、小規模降伏の条件が満足されないケースも生じているのではないと思われるが、便宜的に線形破壊力学の応力拡大係数  $K_I$  の計算式によって、破断荷重から求めた値を用いている。

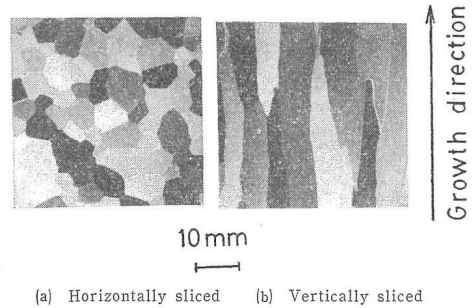
### 2 実験方法

#### 2.1 試験片

多結晶柱状氷は従来報告されている方法<sup>1)~4)</sup>に於いて製作した。すなわち、 $-10^{\circ}\text{C}$ の低温室内で市販の氷かき器で氷を削り、やはり市販のふるいによって粒径  $2\text{ mm}$  以下の氷だけを集めて種氷とする。これを $-10^{\circ}\text{C}$ に冷却したアクリル製の試験片製造用枠の底面に、およそ  $5\text{ mm}$  程度の厚さになるまで散布する。つぎに、霧吹きによって  $0^{\circ}\text{C}$ の蒸留水を種氷が透明になるまで一様に散布して完全に凍結するまで放置する。そのあと、 $0^{\circ}\text{C}$ の蒸留水を注入しフリーザ内に設置し、底面から上向きに氷を成長させ、気泡の少ない透明な氷を得た。試験片の切欠きは次の方法で作った。すなわち、厚さ  $0.1\text{ mm}$ 、先端角度  $11^{\circ}$  のカミソリ刃をあらかじめアクリル製の切欠き相当位置に装着し、これを試験片成型後に抜き取って切欠きとした。切欠きの深さは中型・大型試験片ともに  $20\text{ mm}$  とした。大型試験片の場合は刃の抜き出しが難しいので、これを容易にする目的で、刃先  $5\text{ mm}$  を残して刃の両面にそれぞれ厚さ  $0.4\text{ mm}$  のビニルテープを貼ったものを用いた。したがって、これを抜き出したあとには幅  $0.9\text{ mm}$  の矩形切欠きの先端に深さ  $5\text{ mm}$  の刃形切欠きができています。なお、刃を抜き取る際には無理がかからないように、刃の片面（大型試験片では片側のビニルテープの面）に沿って薄刃のノコギリで試験片に、深さ  $10\sim 12\text{ mm}$  の切込みをつけてから抜き取った。このため、この部分は切欠きの溝幅が中型試験片では約  $0.8\text{ mm}$ 、大型試験片では  $1.5\sim 1.7\text{ mm}$  となっている。

なお、刃の抜き取りは試験片の外形を成型後 $-10^{\circ}\text{C}$ のケロシン中に一昼夜保存して成型後の残留応力を除去した後にいった。試験片の偏光写真を Fig. 1 に示した。Fig. 1 (a)は水平断面で、凍結方向に垂直である。Fig. 1 (b)は垂直断面で、凍結方向を含む断面である。結晶の平均粒径は約  $5\text{ mm}$  であった。中型試験片寸法は厚さ  $50\text{ mm}$  × 高さ  $50\text{ mm}$  × 長さ  $240\text{ mm}$ 、大型試験片寸法は  $200\text{ mm}$  ×  $50\text{ mm}$  ×  $250\text{ mm}$  とした。

#### 2.2 多結晶柱状氷のC軸方位分布



(a) Horizontally sliced (b) Vertically sliced  
Fig. 1. Thin cross sections of columnar grained ice specimen.

氷結晶は六方晶系をなし、ミラー指数 (0001) 面が基底面で、この面と垂直な方向にC軸がある。得られた試験片の結晶成長方向と氷の結晶主軸 (C軸) の分布との関係を知るために、樋口によるエッチピット法を用いた。その結果、今回用いた試験片は、成長方向に対して  $60\sim 90^{\circ}$  の間でランダムに、C軸方位を持つ多結晶柱状氷で構成されていることがわかった。

#### 2.3 試験装置

実験は $-10^{\circ}\text{C}$ の低温室内で三点曲げ試験で行った。支点間距離  $L$  と試験片高さ  $B$  との比  $L/B$  は4として、通常使われている応力拡大係数の式<sup>7,8)</sup>を用い、破壊時の最大荷重から破壊じん性値  $K_{Ic}$  を求めた。試験機はMTS 万能試験機 (容量:  $10\text{ t}$ ) を用いた。荷重の検出には長円形リングにひずみゲージを貼ったもの (ばね定数:  $1.5 \times 10^5\text{ N/m}$ ) を主として用いた。

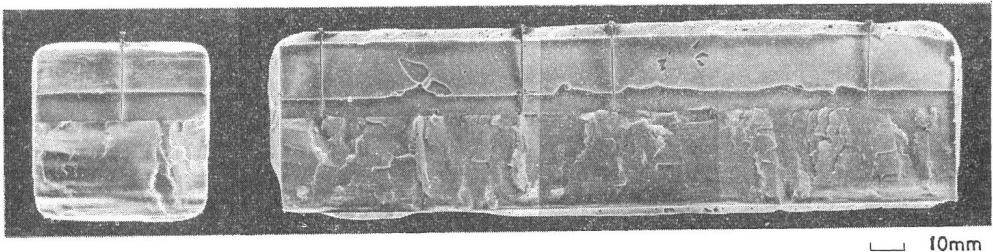
#### 2.4 破面観察

破断面の観察は歯科用印象材を用いて作ったレプリカ<sup>5)</sup>について行った。

### 3 実験結果と考察

#### 3.1 破壊状況

Fig. 2 (a), (b)はそれぞれ中、大型試験片のマクロレプリカの例である。同図では省略したが、破面は荷重速度が低い場合には凹凸が目だっており、また  $K_{Ic}$  が高い場合ほど、後述の丘陵型破面が現れる傾向がある。図(a)で切欠き面に見られる段差は前述のカミソリ刃抜き出し時のノコギリによる切込みの跡であり、図(b)の



(a) Medium size specimen  $\dot{K}_I = 4.29 \times 10^3\text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$ ,  $K_{Ic} = 87.3\text{ kPam}^{1/2}$   
(b) Large size specimen  $\dot{K}_I = 2.06 \times 10^3\text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$ ,  $K_{Ic} = 83.4\text{ kPam}^{1/2}$   
Fig. 2. Examples of replica of fracture surface (pins indicate the start points of cracks).

場合はカミソリ刃に貼ったビニルテープの跡である。このレプリカから色々な情報が得られるが、ここでは曲げ試験中に観察されたことと併せて次記の二つの項目について簡単に述べる。

(1) き裂の発生 Fig. 2 (a)では切欠き底の一点から発生したき裂が、後出の特殊な場合を除いて、切欠き底に沿って広がって行き、切欠き底全長に広がったのちに垂直方向に進行して行った状況が見られる。また、垂直方向への進行の途中時点でき裂の前端位置は結晶ごとに少しずつ差が見られる。同図(b)は大型試験片の例である。(a)、(b)を比較して最も大きな差は、中型試験片のき裂の発生点が多くの場合1点なのに対して、大型試験片のそれが複数個である点である。また、前報<sup>5)</sup>とおなじく多くのき裂は結晶境界から発生した粒内き裂であった。

氷試験片は透明なので、 $\dot{K}_I$ が例えば数十  $\text{kPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s}$ 以下というような低負荷速度の場合には、よく注意するとき裂の発生を目視が可能であって、破断荷重の65~80%の低い荷重ですでに部分的なき裂の発生が観測される場合があった。これはポップインの1種であるが、荷重-時間(負荷方法は変位制御)の記録上では変化が検出できなかった。発生後のき裂の進展状況については観察方法が難しいが、検討中である。

(2) 丘陵型破面 低負荷速度でしかも比較的高い  $K_{Ic}$  で破壊した試験片では、特徴のある破面を示す場合がしばしば見受けられた。Fig. 3はその典型的な例のスケッチである。同図の切欠き底の中央付近で発生したき裂が左方向では切欠き底を伝はずに、丘陵面を形成しながら矢印方向に進行している。また丘の頂上から両側のふもと方向に広がったき裂のうち、片側のき裂は切欠き面へと抜けている。丘の上部は極めて滑らかであって、よほど注意しないと、ルーペを用いても、き裂の進展の痕跡を見出すことが難しい場合が多い。また結晶境界も他の破面のように鋭い段差など

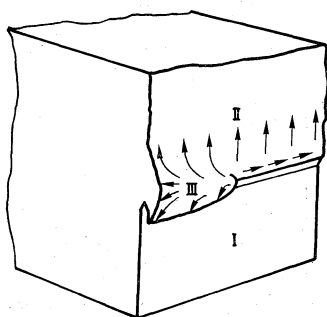


Fig. 3. Hill-shaped fracture surface (I: notch surface, II: fracture surface parallel to I, III hill-shaped fracture surface. Arrows indicate the directions of crack extension, schematic).

がなく平滑で、なだらかな起伏として認められる程度である。なお、丘の高さは  $\dot{K}_I$  が低いほど、また、 $K_{Ic}$  が高いほど大きい。このことから、筆者らはこの破面がき裂先端の降伏域と密接な関係をもっているのではないとも考えているが、まだ、想像の域を出ていない。しかし、氷の降伏現象が複雑で、筆者らの知る範囲では、き裂先端の降伏域の状況がクリーブデータを利用した計算による推定<sup>4)</sup>しかなされていない現在、興味ある現象である。

### 3・2 $\dot{K}_I$ と $K_{Ic}$ との関係

Fig. 4, 5 は中型および大型試験片について得られた  $\dot{K}_I$  と  $K_{Ic}$  との関係を示す実験結果である。なお、Fig. 5 には比較のために中型試験片のばらつきの範囲を併記した。これらの図から次のことが言える。

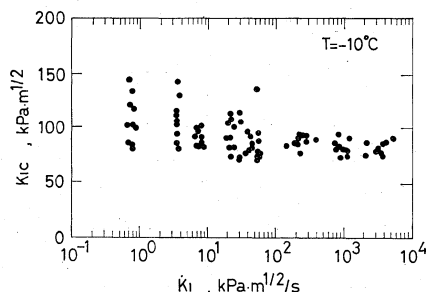


Fig. 4. Effect of loading rate on  $K_{Ic}$  values; medium size specimen.

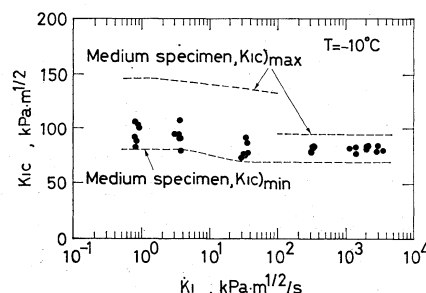


Fig. 5. Effect of loading rate on  $K_{Ic}$  values; large size specimen.

(i) 中型、大型両試験片とも  $\dot{K}_I \approx 10 \sim 100 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s}$  付近に遷移領域があり、これを境として低負荷速度側では  $K_{Ic}$  が大、高負荷速度では  $K_{Ic}$  が小となっている。また、前報<sup>5)</sup>と同じく高負荷速度側で  $K_{Ic}$  に対する  $\dot{K}_I$  の影響は小さい。

(ii) Fig. 5 に示す通り、大型試験片のばらつきは中型試験片にくらべて約半分程度とかなり小さくなる。また、低負荷速度の領域において、大型試験片の  $K_{Ic}$  の最大値 ( $107 \sim 108 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) は中型試験片の最大値 ( $143 \sim 146 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) よりも低くなり、さらに両者の下限値は約  $81 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  となってほぼ一致する。一

方高負荷速度側では, 大型試験片の最大値 ( $\approx 85 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) は中型試験片 ( $92\sim 96 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) より低下するが, 最小値は大型試験片で  $78\sim 82 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , 中型試験片で  $74\sim 78 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  で, 大型試験片の方が幾分大きい結果となっていた。

### 3.3 最弱リンク説に基づく検討

以上の結果からわかるように, 破壊じん性値にはあきらかに試験片寸法の影響がある. 本報ではその影響を最弱リンク説に従って統計的に検討した結果について述べる. これには内部に欠陥が分布した平滑試験片の強度分布についての手法をき裂先端の線上に欠陥が分布している場合の強度問題に置き換えて適用すればよい。

まず, 切欠き底に存在し得る欠陥の破壊じん性値  $x$  の分布がワイブル分布であるとすると, 分布関数  $F_0(x)$  は次式で表される。

$$F_0(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x-x_0}{\xi}\right)^\epsilon\right\} \quad (1)$$

ここで,  $x_0$  は位置母数,  $\xi$  は尺度母数,  $\epsilon$  は形状母数である. また, 切欠き底の単位長さ当たりの欠陥の数を  $\alpha$  とすると, 切欠き先端部の長さ  $B$  の間に存在する欠陥数は  $\alpha B$  である. そして,  $x$  の母集団の中から任意に選んだ  $\alpha B$  個の  $x$  のうちの最小値の分布関数が試験片の破壊じん性値  $K_{Ic}$  の分布関数となる. この最小値の分布関数は次式で与えられる。

$$F_m(x) = 1 - \{1 - F_0(x)\}^m \quad (2)$$

$$m = \alpha B_m$$

$$F_l(x) = 1 - \{1 - F_0(x)\}^l \quad (3)$$

$$l = \alpha B_l$$

ここで,  $F_m(x)$ ,  $F_l(x)$  は中, 大型それぞれの個々の試験片のき裂先端部の線上に並んでいる欠陥部の強度の最小値の分布関数, すなわち, 試験片の破壊じん性値の分布関数であり,  $B_m$ ,  $B_l$  は中, 大型試験片のき裂先端部の長さ, すなわち試験片の厚さである。

式(2), (3)から  $F_0(x)$  を消去すると, 次式が得られる。

$$F_l(x) = 1 - \{1 - F_m(x)\}^{B_l/B_m} \quad (4)$$

ここで, 本報の場合は  $B_l/B_m = 4$  である。

式(4)は中, 大型試験片の  $K_{Ic}$  ( $\equiv x$ ) の分布関数の換算式である。

Fig. 6 には本報の実験結果を示してあるが, それぞれ,  $K_{Ic}$  に対する  $\dot{K}_I$  の影響の少ない高負荷速度領域の実験値をまとめて示してある. これらの図で中型試験片の実験結果を結ぶ直線を  $F_m(x)$  として用い, 式(4)によって  $F_l(x)$  を計算すると点線のようなになる. 同図から分るように, 大型試験片の実験結果は  $K_{Ic}$  の値が大きい場合には計算値と一致し,  $K_{Ic}$  が小さいほど計算値よりも大きい. 下限値付近では大型試験片の

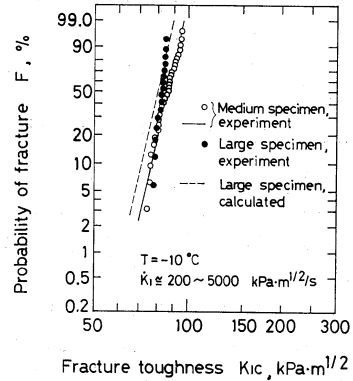


Fig. 6. Comparison of the calculated Weibull distribution of  $K_{Ic}$  of large specimens with the test results; calculation from the data of medium size specimens, based on the "weakest link theory".

方が幾分大きくなる傾向が見られる。

このような計算値と実験値とのくい違いが生じた理由は, 氷試験片の破壊のメカニズムがまだよく分らない現時点では明確ではない. ただ, 前述のき裂発生についてのレプリカの調査および曲げ試験中の観察の結果からみると, とくに大型試験片の場合, 最弱欠陥で発生したき裂が必ずしも急速に全断面の破壊につながるとは限らないようであって, この点からみても, 今の場合, 最弱リンク説はそのままでは適用し難い。

### 3.4 従来の実験値との比較

Fig. 7 は従来<sup>4)</sup>の報告に見られる実験値を浦辺らがまとめたものを再整理し, 本報の結果と対比したものである. 混雑を避けるために, 平均値のみを示したが, 各データとも特に低負荷速度になるほどばらつきが大きい. たとえば, Liu<sup>1)</sup>らの場合,  $T = -8^\circ\text{C}$ ,  $\dot{K}_I = 2.4 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s}$  の点での  $K_{Ic}$  の最大値は約  $300 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , 最小値は約  $110 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  である.  $\dot{K}_I$  が  $100 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s}$  を越す領域でのばらつきは報告によってまちまちであり, 詳細は省略する。

同図の実験点を結ぶ線は筆者らが実験値の傾向を見

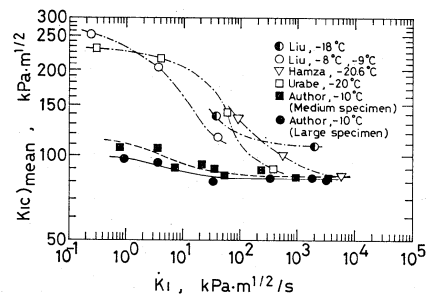


Fig. 7. Comparison of the present data with other reports; chain lines connecting the plots are drawn by the present authors.

るために画いたものである。結び方に筆者らの主観が入っているかもしれないが、従来の報告での実験はいずれも、“低負荷速度領域+遷移領域”もしくは“遷移領域+高負荷速度領域”で行われているようである。なお、 $\dot{K}_I$  が  $\approx 10\,000\text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$  より大きい場合、 $K_{Ic}$  が急激に下がっているデータもあるが、本図では除外した。同図を見た場合とくに顕著なのは低負荷速度領域での  $K_{Ic}$  の値についての本報と他報告との数値の差である。それぞれの研究は実験条件が少しずつ異なっており、このような差が出た原因についての判断は慎重を要する。氷の  $K_{Ic}$  への影響因子として例えば、試験片の切欠き先端の加工方法、リガメント幅も含めた試験片寸法、その他どちらかという、比較的把握しやすい事項もあるが、それ以外に、理由は明りょうではないが氷の凍結速度が  $K_{Ic}$  に大きな影響を与えるという例も報告されて<sup>3)</sup>おり、いずれにせよ、今後の検討が必要である。

#### 4 結 言

前報<sup>5)</sup>で用いた氷は粗大結晶のものが多く、また断面寸法が  $25 \times 25\text{ mm}$  (小型) および  $50 \times 50\text{ mm}$  (中型) 試験片の破壊じん性について報告した。今回は柱状結晶氷について、断面寸法  $50 \times 50\text{ mm}$  (中型) および  $200 \times 50\text{ mm}$  (大型) 試験片を用いて負荷速度および試験片寸法が破壊じん性に及ぼす影響を調べた結果、次のような知見を得た。

(1) 前報での放置凍結氷の場合と同じく、 $\dot{K}_I \approx 10 \sim 100\text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$  付近に  $K_{Ic}$  の急変する遷移領域が存在する。この領域より大きな  $\dot{K}_I$  では実験の範囲で  $K_{Ic}$  に対する  $\dot{K}_I$  の影響は少ない。また全領域を通じて  $K_{Ic}$  の最小値に対する  $\dot{K}_I$  の影響は少ない。

(2) 中型試験片にくらべて大型試験片のばらつきは約  $1/2$  と大幅に減少した。しかし、 $\dot{K}_I \approx 200 \sim 5\,000\text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$  の範囲での検討例で、 $K_{Ic}$  の値の低下の程度は単なる最弱リンク説に基づく予想値より少なかった。

た。なお、大型試験片の  $K_{Ic}$  の下限値は中型試験片の下限値とくらべた場合、低負荷速度領域ではほぼ一致し、高負荷速度領域では幾分上昇した。

(3) レプリカ上での観察によると中型試験片のき裂の出発点は一箇が普通であり、大型試験片ではこれが複数個となっている。き裂の伝ばのメカニズムはまだよく分からないが、大型試験片の  $K_{Ic}$  の低下が最弱リンク説の予想値より小さいことと関連が深いものと考えられる。

最後に、本研究の実施に当って多くのご援助とご討議を頂いた北九州工業高等専門学校長(当時、長崎大学工学部長)真武友一先生、当学、今井康文教授、ご支援頂いた(株)アドバンス開発研究所、安藤司文博士に厚くお礼申し上げる。また熱心に研究に協力された本学、内田 武、梶 聖悟の両君ならびに学生諸君に心から謝意を表する次第である。

(昭和60年6月28日 第3回破壊力学シンポジウムにて講演)

#### 参 考 文 献

- 1) H. W. Liu and K. J. Miller, *J. Glaciology*, **22**, 135 (1979).
- 2) D. J. Goodman, "Physics and Mechanics of Ice", ed. by P. Tryde, p. 129 (1979) Springer-Verlag.
- 3) H. Hamza and D. B. Muggeridge, *POAC*, **1**, 697 (1979).
- 4) 浦辺浪夫, 鉄と鋼, **67**, 908 (1981).
- 5) 楠本 韶, 木村宣夫, 内田 武, 高瀬 徹, 材料, **35**, 659 (1986).
- 6) H. Higuchi, *Acta Metallurgica*, **6**, 636 (1958).
- 7) 岡村弘之, "線形破壊力学入門", p. 218 (1976) 培風館.
- 8) 石田 誠, "き裂の弾性解析と応力拡大係数", p. 179 (1978) 培風館.
- 9) 岡村弘之, 板垣 浩, "強度の統計的取扱", p. 137 (1976) 培風館.