

## 多結晶氷の破壊じん性値に及ぼす切欠き深さの影響

内 田 武\*・楠 本 韶\*\*  
越 智 利 彦\*\*・梶 聖 悟\*\*

## Effects of Notch Depth on Fracture Toughness of Polycrystalline Ice

by

Takeshi UCHIDA\*, Sho KUSUMOTO\*\*  
Toshihiko OCHI\*\* and Seigo KAJI\*\*

The effects of notch depth on fracture toughness  $K_{IC}$  of C. G. I. (Columnar Grained Ice) were investigated using four types of sharply edge-notched specimens which had the ratio of the depth  $a$  of the notch to the height  $h$  of the specimen, 0.2, 0.4, 0.5 and 0.6, respectively. The notch of specimen was made by molding a thin razor blade (thickness 0.1mm, tip angle  $9^\circ$ ) into the specimen in the process of the ice growing and removing it before test. Section size of specimen was 50mm $\times$ 50mm. Three point bending tests were conducted at two points of the loading rate  $\dot{K}_I$ , about 3 kPa $\cdot\sqrt{m}$ /s (low loading rate) and about 200 kPa $\cdot\sqrt{m}$ /s (high loading rate). Testing temperature was  $-10^\circ\text{C}$ .

The results are as follows;

- (1) The effects of notch depth on the maximum fracture toughness  $K_{IC\text{max}}$ , the median of fracture toughness  $K_{IC\text{50\%}}$  and the minimum fracture toughness  $K_{IC\text{min}}$  were hardly observed. The value of  $K_{IC\text{min}}$  was not affected by the loading rate  $\dot{K}_I$ .
- (2) The fracture surface changed from smooth to rough as the  $K_{IC}$  value became higher.
- (3) The values of the ratio of the pop-in fracture toughness  $K_P$  to the fracture toughness  $K_{IC}$  ( $K_I$  at maximum load) showed wide scatter and the mean value was about 76%.
- (4) The pop-in crack has 2~3mm depth and is extending along the bottom of the notch across 1~3 crystal grains.
- (5) Start of the fracture of the specimen seems to have no correlation with the position of the first pop-in crack.

## 1. 緒 言

破壊強度については、船舶の砕氷、航空機・船舶への着氷、凍土の強度などの工学的問題の解決が進められており、極地での油田発掘事業・資源開発に伴い、砕氷船、海洋構造物に働く氷の力の評価などに取り組む技術者にとっても、氷の力学的性質を知ることが不可欠となっている。

我々は、これまで柱状多結晶氷 (Columnar Grained Ice, 以下C. G. I.) を用いて、平滑部断面寸法は様々に異なるが、切欠き深さ  $a$  と試験片高さ  $h$  の比 (以下  $a/h$  値) が0.4である試験片を製作して実験を行い、試験片寸法、負荷速度、試験温度などの違いによる最終破断破壊じん性値 (以下  $K_{IC}$  値) への影響<sup>1), 2), 3), 4)</sup> を検討してきた。その一つ、 $K_{IC}$  値に対する負荷速

昭和63年4月30日受理

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

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

度の影響として、 $K_{IC}$ 値の下限値は負荷速度の影響を受けずば一定であるが、 $K_{IC}$ 値の上限値は、負荷速度が $100\text{kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ 前後で、急変する遷移領域が存在する。また、その遷移領域を境にして、低負荷速度域では $K_{IC}$ 値のバラツキが大きいが、高負荷速度域ではそのバラツキが小さくなることがわかっている。

一方、JSMEの規格では、破壊じん性試験を行う場合、 $a/h$ 値は0.5以上とされている。また、C.G.I.試験片の場合、金属とは違い切欠き底に存在する結晶粒数が少なく、断面寸法が $50\times 50\text{mm}$ では10数個程度である。そこで、一つの実験条件について、数多くの試験片を用いる必要があるが、切欠き深さを $a/h$ 値が0.5程度まで深くすると、試験片製作の都合上、その本数確保に多大な労力と時間を要する。そのため、JSMEの規格には準じないが、 $a/h$ 値が0.4である試験片を用いることで、これまでに数多くの試験を行ってきた。

本報告では、断面寸法 $50\times 50\text{mm}$ のC.G.I.を用いて、JSMEの規格に準じた $a/h$ 値が0.5と0.6の試験片、これまで試験してきた $a/h$ 値0.4の試験片および切欠き深さがこれまで以上に浅い $a/h$ 値0.2の試験片の4種の切欠き深さの試験片について試験を行ったものである。試験温度は $-10^\circ\text{C}$ 、負荷速度は、低負荷速度 ( $\dot{K}_I \doteq 3\text{kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ ) と高負荷速度 ( $\dot{K}_I \doteq 200\text{kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ ) の2ヶ所とした。得られた結果より、 $K_{IC}$ 値に対する切欠き深さの影響と共に、これまで試験してきた $a/h$ 値0.4の結果の有効性について述べる。また、低負荷速度については、ポップインの観察にも力を入れており、これまでにない数多くのデータが得られたので、ポップイン破壊じん性値に対する切欠き深さの影響、ポップイン発生位置と最終破断に到らせたき裂発生位置等についても述べる。得られた破壊じん性値には、バラツキが多いので、結果の取扱いに当っては、極値統計的手法によってワイブル確率紙を用いて議論を行った。

## 2. 試験方法

### 2.1 氷試験片

試験に用いたC.G.I.の製造は、フリーザ内温度 $-25^\circ\text{C}$ 、上面ヒータ消費電力 $34\text{W}$ として、先報<sup>1),2)</sup>に準じ容器の底面から上向きに約40時間をかけて凍結させた。

試験片寸法は、厚さ $50\text{mm}\times$ 高さ $50\text{mm}\times$ 長さ $240\text{mm}$ である。試験片中央部には、厚さ $0.1\text{mm}\cdot$ 先端角度 $9^\circ$ のカミソリ刃を所定の切欠き深さ(10, 20, 25,  $30\text{mm}$ )となるように加工し、あらかじめ試験片製造過程で埋め込み、試験直前に抜き取ることによって得られる鋭い切欠きを有している。抜き取りにくい試験片については、カミソリ刃側面に沿って薄刃のノコギリ(刃厚

$0.38\text{mm}$ , MILCO製)を用いて側溝を入れ抜き取った。得られた試験片の切欠き底にある結晶粒数は $5\sim 20$ 個、平均粒径は約 $5\text{mm}$ であった。

成形された試験片は、直接空気に触れることによる昇華変形を防ぎ、残留応力の影響を除去するため、試験温度 $-10^\circ\text{C}$ の灯油中に一昼夜以上保存した。

### 2.2 試験方法

試験は、低温室に設置されたMTS万能試験機(容量 $10\text{ton}$ , MTS社製)を利用し、試験温度 $-10^\circ\text{C}$ 、支点間距離 $200\text{mm}$ で3点曲げにより、破壊じん性値の測定を行った。Fig. 1に、試験・計測系の概略図を示す。

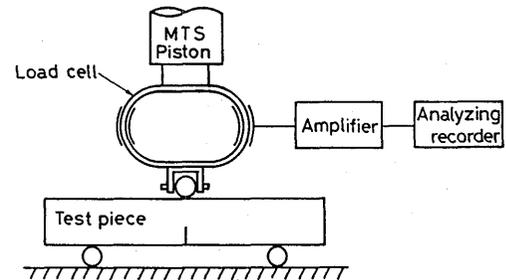


Fig 1 Measuring system of bending test

荷重は、自作したバネ鋼製ロードセル(荷重換算係数 $k=1.571\times 10^{-2}\text{kgf}/\mu\text{st}$ )で検出した。

緒言にも述べたように、これまで行ってきた氷の破壊じん性の試験は、JSME規格外である $a/h$ 値が0.4の試験片を用いたものであった。

そこで、今回は断面寸法が $50\times 50\text{mm}$ のC.G.I.を用いて、JSMEの規格に準じた、 $a/h$ 値が0.5(切欠き深さ $a=25\text{mm}$ )と0.6( $a=30\text{mm}$ )の試験片、これまで試験してきた $a/h$ 値0.4( $a=20\text{mm}$ )の試験片および切欠き深さがこれまで以上に浅い $a/h$ 値0.2( $a=10\text{mm}$ )の試験片の4種の切欠き深さの試験片について試験を行ったものである。負荷速度 $\dot{K}_I$ は、これまでに得られた結果より、 $\dot{K}_I \doteq 100\text{kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ 付近に $K_{IC}$ 値の上限値が急変する遷移領域が存在し、その両側の領域では $K_{IC}$ 値およびそのバラツキが、それぞれほぼ一定であることがわかっている。従って、低負荷速度( $\dot{K}_I \doteq 3\text{kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ )と高負荷速度( $\dot{K}_I \doteq 200\text{kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ )の2ヶ所の負荷速度で試験を行った。得られた結果より、 $K_{IC}$ 値に対する切欠き深さの影響と共に、これまで試験してきた $a/h$ 値0.4の結果の有効性を確認することができる。

ポップインが発生したときの破壊じん性値(ポップイン破壊じん性値、以下 $K_P$ 値)について、これまでに、ポップイン観察を行った試験回数が、不十分であった。そこで今回は、低負荷速度( $\dot{K}_I \doteq 3\text{kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ )において、切欠き深さを変えた全ての試験片についてポップイン

を観察した。これにより、これまで以上にポップインについて深く追求し、得られた結果を統計的に整理して、 $K_{IC}$ 値に対する切り欠き深さの影響、ポップイン発生位置と最終破断に到らせたき裂発生位置等についても調べた。

試験後、直ちに歯科用印象材（而至歯科工業製）を用いて、破断面レプリカを採取した。このレプリカと、切欠き底直下部分の偏光写真との照合により、き裂発生位置と結晶粒子との関係を調べた。

破壊じん性値 $K_{IC}$ 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<sup>5),6)</sup>。

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

ここで、応力 $\sigma$ は、

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

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

$$f(a/h) = A_0 + A_1(a/h) + A_2(a/h)^2 + A_3(a/h)^3 + A_4(a/h)^4 \quad (3)$$

(但し、 $a/h \leq 0.6$ で0.2%以下の誤差)

式(1)~(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点曲げかつ $L/h = 4$ 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。

なお、低負荷速度で破壊させた時、小規模降伏の条件が満足されていない場合も生じていると思われるが、便宜的にこの応力拡大係数を用いて処理している。

ワイブルプロットする際、その累積破壊確率 $F$ は、平均ランク法

$$F_i = i/(n+1) \quad (4)$$

を用いた。ここで、 $n$ は試験片本数、 $i$ は1から $n$ までの整数である。また、バラツキの度合を調べるために、変動係数 (Coefficient of Variation, 以下C. O. V.)を用いた。

$$C. O. V. = \sigma_{-1}/\mu \quad (5)$$

ここで、 $\sigma_{-1}$ は標準偏差(不偏分散平方根)、 $\mu$ は平均値である。

### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊じん性値に対する切欠き深さの影響

切欠き深さ $a$ が、10, 20, 25, 30mm, 負荷速度 $\dot{K}_I$ が、3, 200kPa $\sqrt{m}/s$ の条件について、それぞれ20本程度の

Table 1 Effects of notch depth on fracture toughness  $K_{IC}$

(a) Low loading rate ( $\dot{K}_I \approx 3 \text{ kPa}\sqrt{m}/s$ )

Notch depth a (mm)	$K_{IC}$ (kPa $\sqrt{m}$ )				C.O.V. (%)	Sample size
	max	mean	50%	min		
10	161.5	97.1	94.8	75.2	24.51	20
20	163.0	99.8	94.4	78.5	20.70	20
25	149.5	105.1	108.7	74.3	18.87	20
30	167.4	97.8	92.7	72.1	21.11	20

(b) High loading rate ( $\dot{K}_I \approx 200 \text{ kPa}\sqrt{m}/s$ )

Notch depth a (mm)	$K_{IC}$ (kPa $\sqrt{m}$ )				C.O.V. (%)	Sample size
	max	mean	50%	min		
10	111.4	86.1	83.1	74.9	12.50	20
20	96.7	85.4	85.8	75.3	6.92	20
25	121.9	87.2	83.8	73.2	13.86	20
30	96.6	83.2	81.0	73.8	8.53	19

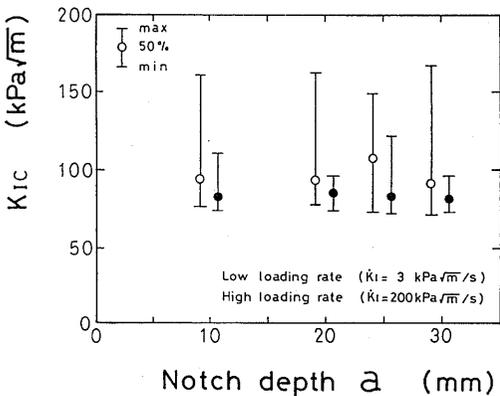


Fig. 2 Fracture toughness  $K_{IC}$  vs. notch depth a

試験片を用いて実験を行った。Table 1(a), (b)は、低負荷速度および高負荷速度での実験結果を示している。また、Fig. 2は、低負荷速度(○印)および高負荷速度(●印)における $K_{IC}$ 値と切欠き深さ $a$ の関係を示したもので、それぞれ上限値、中央値、下限値を記している。

低負荷速度において、Table 1(a), Fig. 2の○印に示すように、切欠き深さ $a$ に関わりなく破壊じん性値の下限值 $K_{IC|min}$ は、ほぼ75kPa $\sqrt{m}$ 、中央値 $K_{IC|50\%}$ は、ほぼ95kPa $\sqrt{m}$ であり、 $K_{IC}$ 値に対する切欠き深さの影響はない。また、C.O.V.値はすべて20%前後であり、 $K_{IC}$

値のバラツキも切欠き深さに影響されない。

高負荷速度において、Table 1(b), Fig. 2の●印に示すように、 $K_{IC}$ 値の下限値、中央値は、ほぼ74, 83  $kPa\sqrt{m}$ で切欠き深さの影響を受けない。C.O.V.値については、切欠き深さの変化に対して、多少の差があるが、これは試験片本数20本程度の内、数本についての $K_{IC}$ 値が、他のものより高いために生じることで、試験片本数を増やすことで回避できるものと思われる。

負荷速度の差異による比較を行うと、 $K_{IC}$ 値の下限値は負荷速度の影響は受けず、ほぼ75 $kPa\sqrt{m}$ 、中央値は、負荷速度の増大で95 $kPa\sqrt{m}$ から、83 $kPa\sqrt{m}$ へ減少しており、C.O.V.値も減少することがわかる。ここで得られた結果は、これまでに試験してきたC.G.I.、断面寸法50×50mmの結果<sup>3), 4)</sup>と同じ傾向であり、これまで行ってきた $a/h$ 値が0.4での試験結果は、有効であることがわかる。

### 3.2 ポップイン破壊じん性

Fig. 3に、ポップイン荷重による破壊じん性値

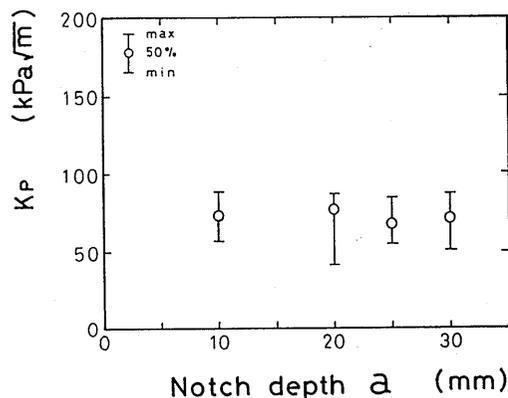


Fig. 3 Pop-in fracture toughness  $K_P$  vs. notch depth  $a$ ; low loading rate ( $\dot{K}_I \approx 3kPa\sqrt{m}/s$ )

$K_{I|POP-IN}$  (以下  $K_P$  値) と切欠き深さ  $a$  の関係を示す。ここでいうポップイン荷重とは、ポップイン (部分的な破壊) が目視により確認された試験片について、一つ目のポップインが発生したときの荷重のことである。試験片においては、2ヶ所以上に発生するものもあるが、ここでは便宜上一つ目の発生をポップインと見なすものとする。今回の実験では、どの切欠き深さの試験片においても、試験片本数20本前後の内、約半数の試験片にポップインが確認された。Fig. 3より、 $K_P$  値に対する切欠き深さ  $a$  の影響はみられず上限値  $K_{P|max}$   $\approx 87kPa\sqrt{m}$ 、下限値  $K_{P|min}$   $\approx 51kPa\sqrt{m}$ 、中央値  $K_{P|50\%}$   $\approx 72kPa\sqrt{m}$  であり、バラツキも含めてほぼ一定の値を示している。また、最終破断荷重より求めた破壊じん性値  $K_{IC}$  と比較するために、Fig. 2の○印と比べてみる

と、それぞれの切欠き深さについて、破壊じん性値のバラツキがかなり小さくなるのがわかる。このことより、切欠き先端での部分的破壊 (ここで言うポップイン) は、切欠き深さに関係なく、最終破断に至るかなり以前に発生し、しかも、それが発生する荷重範囲は、かなり狭いことが言える。

また、多結晶氷の強度が3母数ワイブル分布に従うものとする、累積破壊確率  $F$  は次式で与えられる。

$$F = 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{K_{IC} - C}{B} \right)^A \right\} \quad (2)$$

ここで、 $A$  は形状母数、 $B$  は尺度母数、 $C$  は位置母数である。筆者らは、これまでに試験してきた様々な断面寸法の試験片より得られた結果から、これら3母数の推定を行っている。これによると、位置母数  $C$  は、ほとんどの場合  $K_{IC}$  値の下限値にほぼ一致し、その値は、断面寸法の差異による影響をあまり受けない材料定数と見なし得る可能性があることがわかってきた。また、今回得られた  $K_{IC}$  値について、これら3母数の推定を行ってみても位置母数  $C$  の値は、下限値とほぼ一致している。このことから考慮すると、今回得られた  $K_P$  値の中央値が72 $kPa\sqrt{m}$  であり、 $K_{IC}$  値の下限値の75 $kPa\sqrt{m}$  とほぼ一致することより、 $K_P$  値の中央値を多結晶氷の材料定数と言えるのかもしれない。しかし、この点については、今後十分な検討を要する。

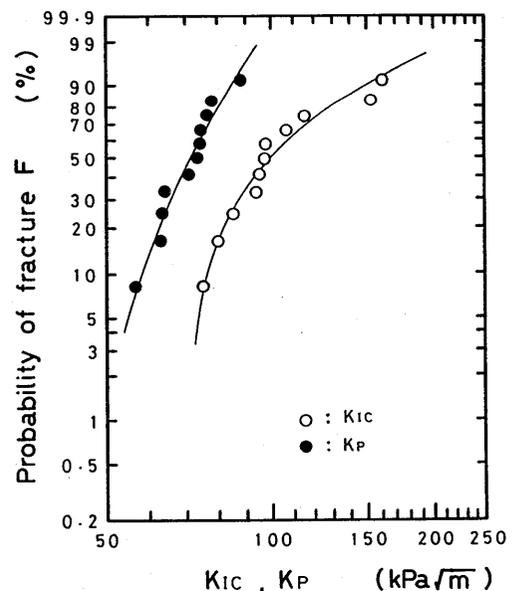


Fig. 4 Example of weibull plot of  $K_P$  and  $K_{IC}$ ; low loading rate ( $\dot{K}_I \approx 3kPa\sqrt{m}/s$ ), notch depth  $a=10mm$

Fig. 4は、切欠き深さが10mmの試験片において、ポップインが確認できた試験片について、 $K_P$  値と  $K_{IC}$  値を同一のワイブル確率紙上にプロットした例である。図

中には、相関係数法により求めたワイブル3母数を用いて描いたスムーズカーブも示している、この場合、試験片20本の内11本にポップインが観察され、 $K_P/K_{IC}$ は75.5%である。この傾向は、切欠き深さに関係なく現れ、 $K_P/K_{IC}$ の平均値は、76%となった。

次に、氷の破壊じん性試験において、金属の場合の規格<sup>7)</sup>を、そのまま適用してみる。すなわち、金属の破壊じん性試験において、試験片の最終破断荷重 $P_{max}$ と、ポップイン荷重 $P_P$ の関係が、 $P_{max}/P_P \leq 1.1$ の範囲にある時、 $P_P$ 値を用いて $K_P$ 値を計算し、試験片厚さ $b$ および切欠き深さ $a$ が、 $b, a \geq 2.5 (K_P/\sigma_c)^2$ の条件を満たすとき、その $K_P$ 値を平面ひずみ破壊じん性 $K_{IC}$ として認めている。Fig. 5は、これに従って今回の実験

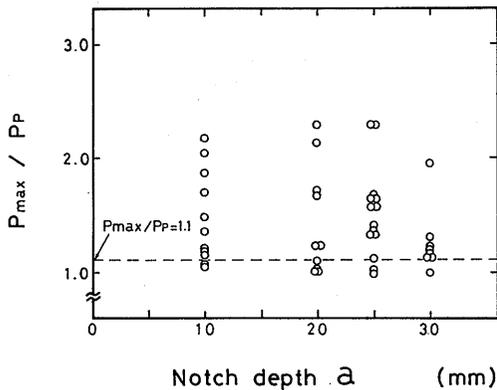


Fig. 5 Ratio of the pop-in load to the maximum load vs. notch depth  $a$ ; low loading rate ( $K_I \doteq 3 \text{ kPa}\cdot\text{m/s}$ )

で得られた $P_{max}/P_P$ の値を切欠き深さ別に示したものである。この図を見ると、 $P_{max}/P_P \leq 1.1$ の範囲内には、ほとんどのものが入っており、今回求めた $K_P$ 値は、 $K_{IC}$ 値として認められないことになる。しかし、金属の破壊じん性試験における $P_P$ の定義は、荷重〜クリップゲージ変位曲線上での、荷重低下部の値および5%オフセット値を $P_P$ としているが、氷試験片では荷重低下部が現れないので、クリップゲージを用いて $P_P$ を判断するのが難しい。それに加え、金属の場合のポップイン荷重と、氷の場合の目視観察によりポップインと判定したときの荷重の関係がよくわからないことより、その規格をそのまま適用してよいかどうか、まだ疑問が残る。この点についても、より一層の検討が必要である。

### 3.3 破面観察

#### 3.3.1 き裂発生位置

今回使用した、断面寸法が50mm×50mmのような、比較的寸法の小さな多結晶氷試験片の破壊は、切欠き先端の最弱の結晶、または結晶粒界からき裂が生じ、そ

れが進展して、破断するものと考えられている。

破断面レプリカを観察すると、多くの破面にき裂条痕が観察される。この条痕は、切欠き先端のある一点より放射状に広がっているため、逆にたどってき裂発生位置を推定することができる。

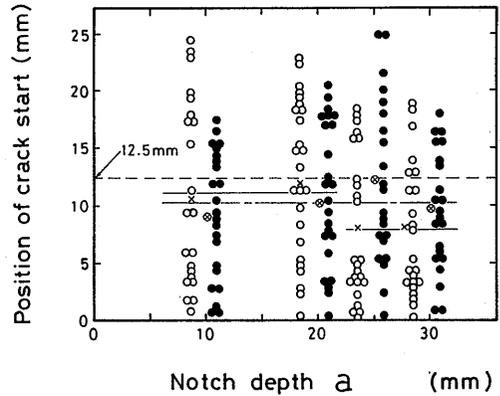


Fig. 6 Position of crack start which developed to the complete fracture (distance from the center of notch)

○: low loading rate  $K_I \doteq 3 \text{ kPa}\cdot\text{m/s}$   
●: high loading rate  $K_I \doteq 200 \text{ kPa}\cdot\text{m/s}$

Fig. 6は、縦軸を破断面レプリカの観察により推定した、最終破断に到らせたき裂の発生位置（切欠き底中央からの距離）、横軸を切欠き深さとして表したものである。き裂発生位置が12.5mmでの破線は、き裂が切欠き底に沿って均等に発生した場合の、その平均値を表している。図中、低負荷速度および高負荷速度でのき裂発生位置をそれぞれ○印、●印で示し、その平均値を×印、×印で示している。また、切欠き深さ毎の平均値を実線、一点破線で結んでいる。これによると、き裂発生位置は、低負荷速度の場合は切欠き深さによって11.0mmと7.4mmの二段に分れるが、高負荷速度の場合は切欠き深さによらず10.3mmでほぼ一定である。しかし、どちらの場合も最終破断に到らせたき裂の発生位置は12.5mmの破線より下側、つまり試験片の中央部付近に多く存在することがわかる。その発生割合は、試験片中央部が約7割で、のこり3割が試験片縁部によるものであった。これは、試験片の中央部と縁部では、応力状態が異なることが原因であると考えられる。

また、破断面の形状を観察すると、 $K_{IC}$ 値が大きくなるに従い、滑らかな破面から、凹凸の激しい荒れた破面へと推移して行き、切欠き深さが浅いものほどその傾向が顕著に現れている。この破断面形状の評価については、これまでにも行っているが、全て目視によるものなので、これを数値的な評価として表すことが、今後期待される事柄である。

### 3.3.2 ポップイン発生位置

低負荷速度 ( $\dot{K}_I \approx 3\text{kPa}\cdot\text{m}/\text{s}$ ) での実験に於て、目視により、ポップインの発生位置及びその形状を観察した。ポップインは同一試験片中で複数個存在するものもあるが、試験片破断に大きな影響を与えると思われる1つ目のポップインについて、その発生位置(切欠き底中央からの距離)を、切欠き深さ別に表したものが、Fig. 7である。図中、ポップイン発生位置を○印

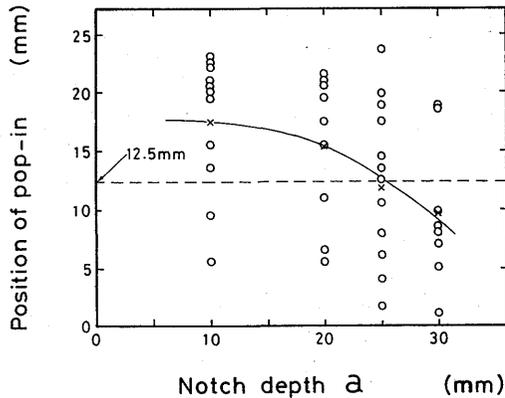


Fig. 7 Position of pop-in (distance from the center of notch); low loading rate ( $\dot{K}_I \approx 3\text{kPa}\cdot\text{m}/\text{s}$ )

で、その平均値を×印で示し、切欠き深さ毎の平均値を実線で結んでいる。また、発生位置12.5mmの地点を破線で示している。これによると、切欠き深さが深くなるに従い、ポップイン発生位置は試験片縁部から中央部へ推移していることがわかる。また、切欠き底最縁部から5mmの区間に着目してみると、その発生頻度に、大きな変化が現われ、切欠き深さが10, 20, 25, 30mmと大きくなるにつれて、45, 30, 7, 0%と急激な変化を示し、特に切欠き底最縁部近傍でのポップイン発生が、切欠き深さと大きな関わりを持っているようである。

なお、目視によるポップイン発生位置のスケッチと破断面レプリカおよび切欠き底直下部分の偏光写真とを照合することで、43個の試験片についてポップイン発生状況の観察を行った。それによると、一つ目のポップインは切欠き先端と結晶粒界との交点から発生しているものがほとんどであり、そのポップインが1結晶粒内へのき裂伝播として観察されたものが16個、隣接した2~3結晶にわたったき裂となっているものが24個あり、残りはよくわからなかった。一つ目のポップインの幅は1.5mm~26mm、深さ1.0mm~9.5mmであり、平均すると幅6.4mm、深さ2.2mmであった。また、観察されたポップインの平均発生数は、1試験片で約2ヶ所であるが、4ヶ所以上で発生しているものも4個で見られた。

次に、ポップインが観察された試験片について、一つ目のポップイン発生位置と最終破断に到らせたと判断されたき裂の発生位置の相関について述べる。Fig.

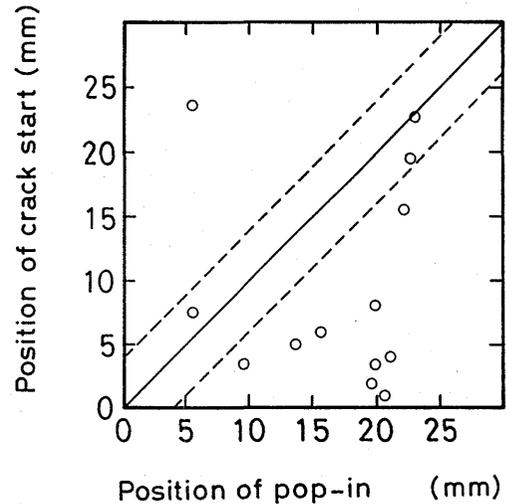


Fig. 8 Position of crack start which developed to the complete fracture vs. position of pop-in; low loading rate ( $\dot{K}_I \approx 3\text{kPa}\cdot\text{m}/\text{s}$ ), notch depth  $a = 10\text{mm}$

8に、その例として切欠き深さが10mmの場合を示している。図中、実線をはさむ破線は、同一条件下での試験に於て発生した、一つ目のポップインの幅の平均値をとり、グラフ上の実線に幅をもたせたものであり、この破線に挟まれた部分は、ポップイン発生位置と、最終破断に到らせなき裂発生位置がほぼ等しいことを表している。この図より、一つ目のポップイン発生位置と、最終破断に到るき裂発生位置は、必ずしも一致せず、むしろ最終破断に到るき裂は最初のポップインとは無関係に試験片の中央部寄りの位置から発生している場合が多い。これは、他の切欠き深さの試験片の場合にも言えることで、その一致する割合は3割程度であった。

## 4. 結言

試験片断面寸法50×50mm、切欠き深さ10, 20, 25, 30mmの4種類の柱状多結晶氷の試験片を用いて、試験温度 $-10^\circ\text{C}$ 、負荷速度 $\dot{K}_I$ が $3\text{kPa}\cdot\text{m}/\text{s}$ (低負荷速度)と $200\text{kPa}\cdot\text{m}/\text{s}$ (高負荷速度)の条件下で、三点曲げ試験を行い、多結晶氷の強度および破壊機構に関して研究を行った。特に低負荷速度においては、ポップイン観察も行った。

以上の研究の結果、以下の知見を得た。

## (1) 破壊じん性値に対する切欠き深さの影響

負荷速度2種類のどちらの場合にも、それぞれ、破壊じん性値 $K_{IC}$ の上限値、中央値および下限値に対する切欠き深さの影響はみられない。また、 $K_{IC}$ 値の下限値は、負荷速度の影響を受けない。これより、これまでに試験してきた、 $a/h$ 値が0.4での結果が、有効であることが確認できた。

## (2) ポップイン破壊じん性値

低負荷速度でのポップイン観察試験より、一つめのポップイン発生時の応力拡大係数の値、いわゆるポップイン破壊じん性値 $K_P$ は、最終破断時の破壊じん性値 $K_{IC}$ に対し76%程度の比率であった。

## (3) き裂発生位置

破面観察により、最終破断に到らせたき裂の発生位置は、試験片の切欠き底中央部付近に多く存在していることがわかった。これは、試験片の中央部と縁部では、応力状態が異なり、縁部では平面応力状態、中央部では平面歪状態であることによるものと考えられる。

## (4) 破壊じん性値の破面に及ぼす影響

低負荷速度、高負荷速度ともに、破壊じん性値 $K_{IC}$ が大きくなるにつれて、破面が、滑らかな破面から、凹凸の激しい荒れた破面へと推移して行き、その傾向は切り欠き深さが浅いほど顕著に現れる。

## (5) ポップイン観察

ポップインは、結晶粒界から発生し1結晶内あるいは2~3結晶にわたって伝播している。ポップイン発生位置は、切欠き深さが大きくなるに従い、試験片縁部から中央部へと推移していく。また、最終破断に到るき裂の発生位置は、一つ目のポップインの発生位置とはあまり関わりがないようである。

最後に、本研究の実施に当り熱心に協力された卒業研究の学生に感謝致します。

## 〈参考文献〉

- 1) 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 (1983), 133.
- 2) 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 (1984), 121.
- 3) 楠本, 木村, 高瀬, 木寺; 大型試験片を用いた柱状多結晶氷の破壊じん性の検討, 材料, 35, 395 (1986), 887.
- 4) 伊藤; 氷の破壊じん性に対する試験片寸法および負荷速度の影響, 長崎大学修士論文, (1985).
- 5) 石田; き裂の弾性解析と応力拡大係数, 培風館, (1979), 179.
- 6) 岡村; 線形破壊力学入門, 培風館, (1976), 137.
- 7) 金沢, 越賀; 脆性破壊Ⅱ = 破壊靱性試験, 培風館, (1978), 62.