

氷の破壊靱性値に対する負荷速度の影響

楠本 韶*・木村 宣夫**
木寺 亨*・梶 聖悟*

Effects of Loading Rate on Fracture Toughness of Ice

by

Sho KUSUMOTO*, Nobuo KIMURA**, Tohru KIDERA*
and Seigo Kaji*

The effects of loading rate on fracture toughness of ice have been investigated using sharply edge-notched specimens by bending at -10°C . The loading rate \dot{K}_I covers from 2.5 up to $3 \times 10^3 \text{ kPam}^{1/2}\text{s}^{-1}$. The notch of specimen was made by molding a razor blade in the specimen in the ice growing process and removing it before the bending test. Two sizes of specimens, section sized $25 \times 25 \text{ mm}$ (small size specimen) and $50 \times 50 \text{ mm}$ (medium size specimen) respectively, were used. Set of about thirty small size specimens or about ten medium size specimens was tested at each test loading rate. The experimental results are as follows.

- (1) A range of \dot{K}_I , $\dot{K}_I > (5 \sim 20) \times 10^2 \text{ kPam}^{1/2}\text{s}^{-1}$, exists where no effect of \dot{K}_I on the fracture toughness K_{Ic} is observed.
- (2) The values of K_{Ic} are lower in higher \dot{K}_I range, and they show a transitional change in a range $\dot{K}_I = 10 \sim 10^2 \text{ kPam}^{1/2}\text{s}^{-1}$.
- (3) The effect of loading rate on the minimum fracture toughness $K_{Ic} \text{ min}$ is very small in full tested \dot{K}_I range both in small and medium size specimens.
- (4) The values of $K_{Ic} \text{ min}$ of small and medium size specimens seems to coincide approximately. The maximum fracture toughness $K_{Ic} \text{ max}$ and the K_{Ic} at 50% cumulative probability of fracture $K_{Ic} \text{ 50}$ of medium size specimens are smaller than these of small size specimens.
- (5) The $K_{Ic} \text{ min}$ obtained is anticipated to be the fracture toughness of large polycrystalline ice containing adequate number of crystals at the front line of the crack or the sharp notch.
- (6) It was found that a vinyl silicone impression material for dentistry is suitable to make replica of the fracture surface for macrofractography.

1. 序 論

1.1 従来の研究

氷の破壊靱性値に対する負荷速度の影響については

これまで、幾つかの研究報告^{1),2),3),4)}がある。また筆者らも先報^{5),6)}において、限られた負荷速度範囲ではあるが実験結果を報告した。

昭和59年4月28日受理

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

**アドバンス開発研究所(株) 東京都府中市 (Advance R & D Co. Ltd, Tokyo)

応力拡大係数 K_I を用いて材料の破壊靱性値 K_{Ic} を求めようとする場合には、実験が小規模降伏の条件を満たしているかどうか重要であり、その判定には通常、試験片の寸法が $B \geq 2.5 (K_{Ic}/\sigma_y)^2$ の条件を満たしているかどうかで行なわれる。ただし B は試験片の厚さ、すなわち試験片の切欠き底の長さである。金属材料の場合には、この切欠きとしては疲労き裂が要求されている。また σ_y は降伏点である。氷を対象とする場合にも金属に準じた取扱いをすべきであるが、 K_{Ic} を求めるために σ_y を求めたり、疲労き裂を入れたりすることは容易ではないため、一般には行なわれず、クリープ域の理論計算の延長として降伏域寸法を推定して K_{Ic} の測定値の有効性を判定しているのが現状のようである^{1),2),3),4)}。

このような現状のもとで、これまで報告されて来た他研究機関での報告を見た限りでは K_{Ic} が応力拡大係数の時間変化で表わした負荷速度 \dot{K}_I の影響を大きく受けるとしたものが殆んどであって、この点については定説化した感さもある。

1.2 本研究の主眼点

本研究は従来と幾分異った立場から標記の問題に対して再検討を加えようとするものであるが、これまでの研究と異なるところは次の点にある。

1.2.1 破壊靱性特性のより詳細な把握

筆者らは予備実験の段階で、①破壊靱性がある負荷速度範囲で急激に変化する、いわゆる遷移領域があること、②その領域以上の負荷速度範囲では破壊靱性値が一定となることを見出した。また、これまでの研究例を検討した結果、それらにも遷移現象が見られたほか、負荷速度 \dot{K}_I の実験範囲が不十分なために安定領域の存在が見過されていた可能性が高いことがわかった。また③試験片の切欠きのつけ方も結果に微妙に影響することも次第に明らかになって来た。そこで、本研究では以上の3点を考慮して、より詳細な特性の把握につとめた。

1.2.2 測定データの下限値の重視

従来の研究例では、筆者らの場合も含めて、データのばらつきが極めて大きいことが多い。これは通常使用されている室内実験用の氷の試験片の製作の都合上、試験片の厚さがせいぜい50mm程度であって、切欠き底に存在する結晶の数も多くて十数個前後であり、破壊が個々の結晶のおかれている状態によって決定されるとすれば、破壊強度に大きな差が生ずるのが当然である。従って、比較的小型の試験片であっても、でき得るかぎり多数の実験によって、破壊靱性下限値を求めておけば、最弱リンク説が成立する場合、十分

多数の結晶粒を含む大型試験片（もしくは氷塊など）の強度はこの値に近づくはずであり、文字通りの多結晶氷の破壊靱性値を求めることになる。このような意味から、本報では従来ほとんど注意を払われていなかった下限値を重視することとした。

1.2.3 最弱リンク説の確認

先に触れた最弱リンク説は、直列に連結された鎖の破壊強度がその中の最も弱いリンクの破断強度によって決まり、これが一般の材料の強度についても当てはまるという説で、脆性材料の場合にはかなりよく成立するといわれている。この説が成立するならば、弱点を含む割合がより大きい大型の試験片の方が小型の試験片よりも弱くなることが予想される。しかし、最弱部で発生した破壊の伝ばや、場合によっては破壊の発生そのものが隣接部分の拘束によって防げられることも十分考えられるので実験的な確認が必要である。

2. 実験方法

2.1 氷試験片

用いた氷試験片は先報⁵⁾と同じく放置凍結法で作った。また寸法効果を見るために、先報と同じ幅25×厚さ25×長さ250mmの小型試験片に加え50×50×250mmの中型試験片を用いた。切欠きも先報と同じく、厚さ0.1mm、先端角度13°のカミソリ刃をあらかじめ切欠き相当位置に装着したアクリル型中に、蒸留水を入れて-15°Cの冷凍庫中で凍結し、試験片成形後にカミソリ刃を抜き取ることによって鋭い切欠きをつけるという方法を用いた。Fig. 1にカミソリ刃の断面写真を示

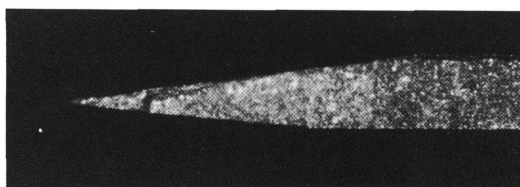
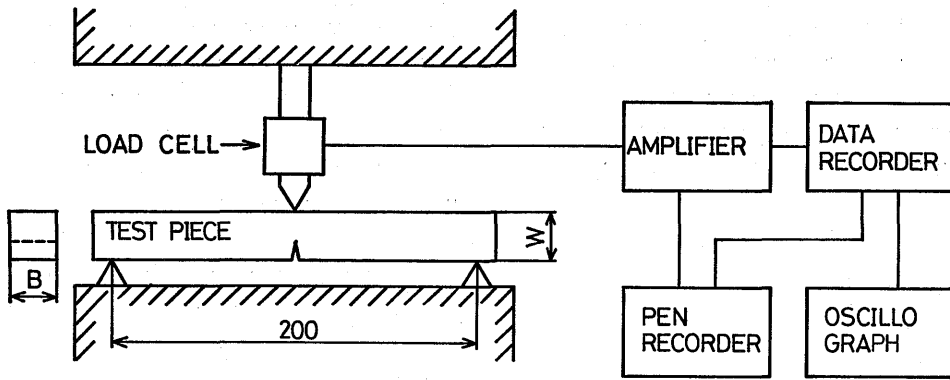


Fig. 1 Section of razor blade to mold the notch (thickness : 0.1mm)

す。成形加工し終った試験片は所定温度の灯油中に一昼夜保存した。用いた試験片の約半数はC軸が凍結方向と一致した粗大結晶氷であったが、残りのほとんどは柱状多結晶氷であった。またごくわずかの数であるがC軸方向が水平方向を向いた粗大結晶氷も含まれていた。

2.2 試験装置

先報では、氷試験片への負荷はスプリングをモータ



Small size specimen : B=25mm W=25mm

Medium size specimen : B=50mm W=50mm

Fig. 2 Bending test apparatus

一を利用して定速で引っ張ることによって与えたが、この方法では高い荷重速度が得られないことから、今回は低温室内に設置されたMTS万能試験機を利用した。また従来の四点曲げ試験と新たに三点曲げ試験を併用した。

測定系の概略を Fig. 2 に示す。試験片へ負荷された荷重は、自作のロードセル（ばね定数 $k \approx 1 \times 10^9 \text{ N/m}$ ）からのひずみ量を動ひずみ計（三栄測器製，6M61，出力 $0.5 \text{ V}/10 \mu\text{st}$ ，周波数特性 DC~2 kHz）によって増幅することによって得られる。荷重-時間曲線を得るために各々の荷重速度の周波数応答性に依じて、動ひずみ計からの信号をデータレコーダ（TEAC 製 MR-30，テープ速度 $1.2 \sim 38 \text{ cm/sec}$ 6 段，周波数特性 DC~10 kHz）に記録させ、その後ペンレコーダあるいは電磁オシログラフ（三栄測器製，5L31，ガルバノメータ DC~260 Hz）に適当な再生スピードで出力させた。荷重速度 \dot{P} 及び応力拡大係数の変化率 \dot{K}_I は再生した信号のグラフの傾きより算出した。荷重速度 \dot{K}_I は $1 \sim 2 \times 10^8 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$ の間で変化させることができた。

試験温度 T は -10°C とした。

2.3 破壊靱性値

破壊靱性値 $K_{Ic}^{(5),(6)}$ 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^{(7),(8)}。

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

ここで応力 σ は

$$\sigma = \frac{3LP}{2BW^2} \quad (2)$$

$f(a/W)$ は試験片形状，荷重様式によって異なり一般に

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

(但し $a/W \leq 0.6$ で 0.2% 以下の誤差)

$A_0 \sim A_4$ の値は Table 1 の通りである。

Table 1 Coefficients in eq. (3)

	L/W	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
3-point bend	4	1,090	-1,735	8.20	-14.18	14.57
	8	1,107	-1,552	7.71	-13.55	14.25
4-point bend	—	1,123	-1,394	7,318	-13,072	13,992

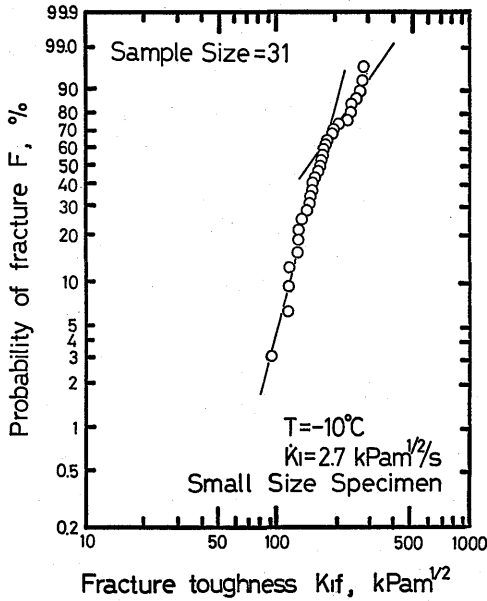
ただし， P は荷重， B は板厚， a は切欠き深さ， W は試験片幅， L は支点間距離である。

2.4 破面観察

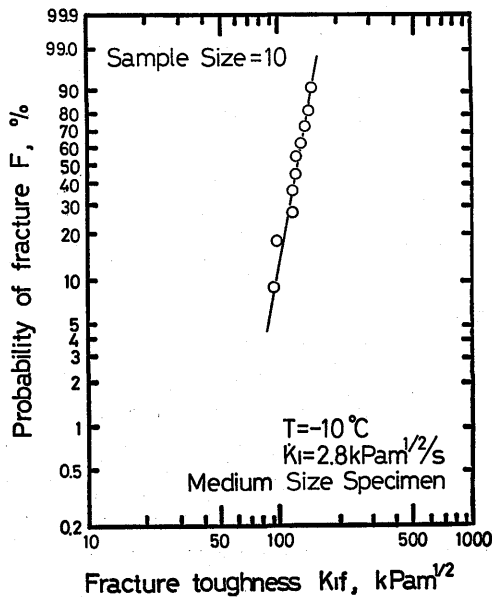
氷の破面を観察しようとする場合，昇華や液化のため，あるいは透明であるということからいろいろの制限があった。このため筆者らは破断面全面のマクロな観察が可能なレプリカ材料を探して来たが，昨年7月歯科用印象材の1つであるエグザフレックス（而至歯科工業製）がこの目的に適した材料であることがわかり，破断面観察に活用している。この材料は付加重合型ビニルシリコン印象材であり，①低温下で発熱せずに硬化すること（ -5°C で約5時間），②収縮率が非

常に少ない(約0.1%),物理的・化学的に安定であることなど、氷の破断面のレプリカ用に非常に適している。

さらに、切欠き先端直下部分の結晶粒の分布の状況を偏光によって観察したが、これと破断面のマクロレプリカを照合することによって破壊発生位置と結晶粒子との関係もかなり明確に把握できるようになった。



(a) small size specimen



(b) medium size specimen

Fig. 3 Examples of Weibull plot

3. 実験結果

3.1 破壊靱性値の取り扱いについて

得られたデータの中から典型的なものについて、サンプルの K_{If} 値をワイブル確率紙上にプロットした例を Fig. 3 (a), (b) に示す。Fig 3 (a) は小型試験片の例で、Fig. 3 (b) は中型試験片の場合である。小型試験片では先報^{5),6)}と同じように折点を有する2直線で表わされる複合型ワイブル分布に従うものと考えられる。しかしながら中型試験片の場合ではほとんどの場合、同図のように直線的であった。

3.2 \dot{K}_I と K_{If} との関係

(1) 小型試験片

Fig. 4 は小型試験片の実験結果である。1つの \dot{K}_I に対して29~32本の試験片を用いて K_{If} を求め、その際に得られた K_{If} 値の最大値 $K_{If}]_{max}$ と中央値 $K_{If}]_{50}$ および最小値 $K_{If}]_{min}$ とをプロットしてある。 $K_{If}]_{max}$ の分布は大きくばらつくので単にバンドで示した。一見してわかるように、 $\dot{K}_I \approx 100$ kPam^{1/2}/s 付近を境として大きな段差がある。主原因は切欠き底の降伏域が低い \dot{K}_I 領域で急増するために生ずる見かけ上の K_{If} の増加によるものと考えられる。

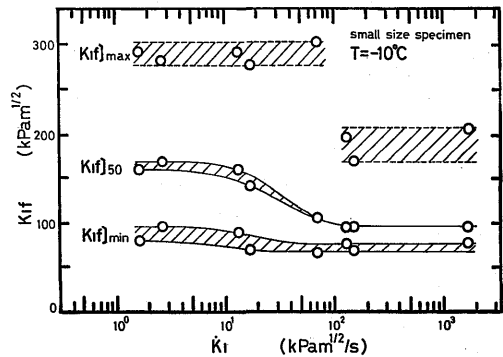


Fig. 4 \dot{K}_I vs. K_{If} relationship of small size specimen

中央値は20~100 kPam^{1/2}/s 付近に遷移領域が見られるが、100 kPam^{1/2}/s 以上では明らかにほとんど一定とみてよい。この値は96~97 kPam^{1/2} となった。なお、低 \dot{K}_I 領域での \dot{K}_I による K_{If} の変化も顕著でなかった。

最後に下限値は多少のばらつきはあるものの、やはり $\dot{K}_I = 10 \sim 100$ kPam^{1/2}/s の中間付近から高 \dot{K}_I 側では一定のバンド66~78 kPam^{1/2} に入っていて、 \dot{K}_I の影響は受けていないものと見てよい。ばらつき幅があるのは確率上の問題である。ワイブルプロットの例を見てもわかるようにこのバンド内で破壊する試験片本

数は少数であり、30個の試験片中1～3個程度に過ぎなかった。中央値付近では同程度のバンド幅±6 kPam^{1/2}の中では10個前後の破壊が生ずるのが普通であった。30個の試験片中に、本実験の条件の下で存在し得る最弱の結晶粒子（結晶粒子の置かれた結晶方向や粒径、隣接粒子との関係、切欠きの程度、その他）が常に存在するとは限らないから、1回の実験の試験数を更に数倍に増さない限り、下限値にばらつきが出るのは止むを得ないと見るべきである。

(2) 中型試験片

(i) $K_{I\dot{f}}$ の上限値および中央値

Fig. 5 は中型試験片について $K_{I\dot{f}}$ の最大値、中央値、最小値をまとめたものである。Fig. 4 で見られたばらつきの幅が急激に減少している。特に最大値の減少が目立っているが、中央値もかなり減少している。この原因の主なものとは小型試験片の場合に切欠き底での降伏域が大きく、見かけ上の $K_{I\dot{f}}$ が大きかったためではないかと思われる。

中央値もある程度減少しており、とくに低 \dot{K}_I 領域での減少が比較的大きいが、低 \dot{K}_I での減少の原因の一部はやはり、切欠き底での降伏域によると考えられる。さらに全 \dot{K}_I 領域を通じて、試験片が大きくなったために、小型試験片に比べて各試験片とも、より弱い状態におかれた結晶粒子を含む確率が高くなったことは確かである。

(ii) $K_{I\dot{f}}$ の下限値、最弱リンク説の検討

序論ですでに言及したように今回の主目的の1つは氷について最弱リンク説が成立するかどうかという点にあった。Fig. 5 の図中には中型試験片の結果と同時に Fig. 4 に示した小型試験片の下限値が再記してある。図からわかるように中型試験片の下限値は小型試験片の下限値のバンド内、あるいはバンドの上部付近

に存在する。

最弱リンク説に従い、かつ破壊の発生を支配するのが切欠き先端に並んでいる個々の結晶粒子（もしくは結晶粒界）の状態であるとするならば、試験片の数を十分多くして求められた小型試験片と、多数の結晶粒を有する中型試験片の下限値は一致するはずである。Fig. 5 の結果はこの説をかなりよく裏付けている。なお、同図で中型試験片の結果が幾分高目に出ているように見えるが、その理由として次の2つが考えられる。すなわち、

(a) 実験値1点を求めるため、小型試験片は約30本、中型試験片は約10本を用いている。小型試験片では1本当たり3～5個、中型試験片では5～9個の結晶粒子が切欠き底にあるので、1点当たりの結晶粒子数は小型試験片で平均120個、中型試験片で平均70個となり、小型の方がより低い下限値が実現する可能性がある。

(b) 1個の結晶にき裂が発生したとき、隣接粒子により拘束されたり、あるいはき裂発生そのものが隣接粒子によって拘束される可能性は中型試験片の方が大きい。

上の(b)は最弱リンク説に対する反対要素である。ただ、これまでの結果からみると(b)の影響が現われているようにも思われる。しかし、いずれにせよ多数の結晶粒を持ったより大型の試験片を用いた場合に、その破壊靱性値が本実験の下限値に近づいて行く可能性は十分確認できた。なお、小型試験片の例からみても、下限値のバンドに入る程度の状態の粒子の出現確率が1%弱ないし3%程度であることから考えると、切欠き底の粒子数が100個程度であるような大型試験片であれば、この下限値付近で大きなばらつきなしに破壊することが予測される。

3.3 破面観察

前述の通り、破断面のレプリカと切欠き底部平面の結晶粒子偏光写真とから破壊の発生と進展の状況はかなり詳細に把握できる。詳細については後報に譲ることとして、ここではその一部について述べる。

3.3.1 き裂の発生

別に行なった柱状多結晶氷の中型試験片で $\dot{K}_I \approx 230$ kPam^{1/2}/sで行なった例をあげると12個の試験片についてき裂発生状況を調べた結果、11個は切欠き底と結晶境界との交差点から結晶粒内に向かって貫粒型のき裂が発生していた。また、発生点のごく近傍でのき裂の進行方向は切欠き面に平行でないのが普通であり、発生点に接した結晶のへき開面に沿ってき裂が進展したものと考えられる。残りの1個だけは粒界型のき裂が生じていた。この場合はC軸方向の異なる2個の結

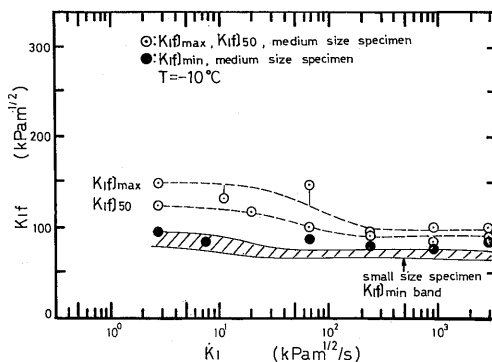


Fig. 5 \dot{K}_I vs. K_I relationship of medium size specimen

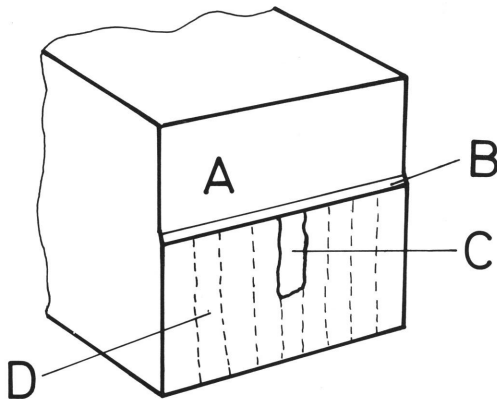


Fig. 6 An observed intergranular crack plane (the only case crack initiation was intergranular, columnar grained ice specimen, schematic).

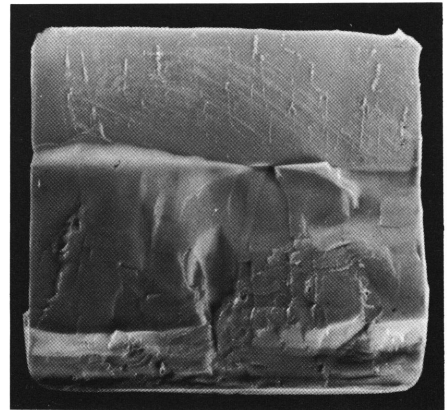
A : notch surface, B : notch surface at the edge of the blade, C : intergranular fracture surface, D : transgranular fracture surface, dotted line : grain boundary

晶間の粒界、幅約 4 mm 、がほぼ完全に切欠き底の線上にあった。また Fig. 6 に示すように、柱状晶の境界面に沿った帯状の粒界破面が長さ約 14 mm にわたって生じており、それから先は粒内破面となっていた。なお粒界破面は粒界面に沿ったなだらかな起伏のある極めて滑らかな面であって、観察に用いた 10 倍程度の拡大鏡ではき裂進展の痕を見出すことが困難なため、他の破面とは比較的容易に区別できる。また、他の場合にはき裂の発生点が明瞭であったのに対して、この場合には切欠き底に沿った 4 mm の幅のどの位置が発生点であるかは区別できなかった。粒界が切欠き底の線と一致したケースは他の試験片でも見られたが、最初のき裂の発生はそこからは生じていない。いずれにせよ、き裂の発生は単に切欠き底の結晶軸方向だけでなく、結晶境界の存在とおそらくはその方向とによって支配される。また、氷の破壊靱性が金属とは逆に結晶粒が大きいほど高くなるという報告^{3),4)}もあるが、試験片寸法が一定の場合、結晶粒が大きいほど結晶と結晶境界の数は少なくなるから、より低強度の点を含む確率も少なくなるはずであって、結晶粒子の寸法効果の原因の 1 つはここにあるものと考えられる。

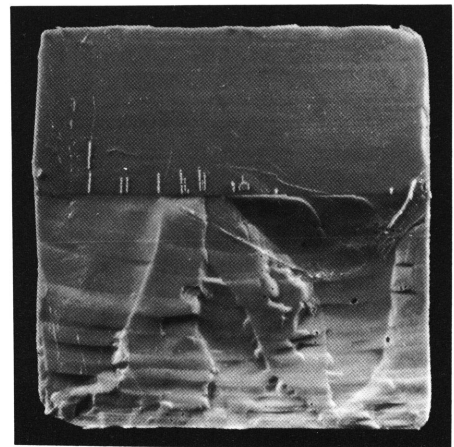
3.3.2 破面形状

破面のマクロレプリカの典型的な例を Fig. 7 (a), (b) に示す。Fig. 7 (a) は低 \dot{K}_I 領域での典型的なもので破面は切欠き底付近から大きく湾曲していることがわ

かる。逆に Fig. 7 (b) は高 \dot{K}_I 領域で K_{Ic} 値が低いものの破面写真で平坦になっているものが多い。これらの破面に共通していることは、進展中のき裂の先端位置を示す筋がき裂の進展方向と直交して、いくつも見られることである。そしてこれらの筋の間隔は切欠き底から遠ざかるにつれて、減少していくことが確認される。このことの詳細な検討は今後の課題であるが、破壊現象が時間的に滑らかな連続的なものでなく、き



(a) fracture at low loading rate ($\dot{K}_I \cong 17\text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$)



(b) fracture at high loading rate ($\dot{K}_I \cong 880\text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$)

Fig. 7 Examples of replica of fracture surface ($\times 1$)

裂が一定距離走っては止まり、また走るというような間欠性を有していると考えられる。

3.4 他の研究例との比較

緒言でも述べたように、本報と同様な主題についての研究例が幾つかあげられる。また、浦辺らはそれらの結果を総合した解説や数式化を試みているが、結論として破壊じん性値が \dot{K}_I によって大きく変化することが述べられている。また、従来の研究例ではいずれも K_{Ic} の平均値を主体とした取扱いがなされている。しかし、本報で述べた通り、破壊じん性の上限值や中央値（平均値に近い値となる）は試験片と結晶粒の寸法次第で大きく変化する可能性があり、これらの影響を無視して、材料定数と見做すことには無理がある。そして、下限値を大形多結晶氷の破壊じん性値—材料定数—と見做す方が、より合理的と考えられる。また下限値を対象とした場合についていえば、負荷速度の影響が非常に小さいことが注目される。

さらに、従来の研究データを詳細に検討してみると、個々の研究者の実験した負荷速度の範囲が充分広くないために、破壊じん性値のせん移領域と一定値領域の存在が把握されなかったように思われる。たとえば、個々の実験データを忠実に結んでみると、せん移領域とそれ以下の \dot{K}_I での実験と考えられる場合、あるいは、せん移領域から一定値領域への移行部付近が主となっていると思われる例などが見うけられる。個々のデータについての詳細は省略するが、多少数値的なことを付記すると、やはり $K=10\sim 100 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$ に遷移領域が存在することがみられる。また $\dot{K}_I=10^8 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$ のオーダーの高 \dot{K}_I 領域では、筆者らのデータとほぼ同程度の K_{Ic} (K_{If}) 値になっているようである。なお、切欠きの入れ方も K_{Ic} (K_{If}) に影響すると考えられるが、筆者らも含めて現在まで氷に疲労き裂を入れて、強度実験を行った例はなく、Gold⁹⁾ のみが比較的鋭いであろうと思われる熱応力によるき裂を入れるという研究について報告している程度である。また、鋸で切込んだ後鋭いナイフなどでさらに切込みを入れる方法^{1),2),3),4)} は一般に用いられているが、筆者らも同様な方法で実験を行なった。その結果については別の機会に報告したい。

4. 結 論

この報告では放置凝固法で作った氷試験片の破壊靱性値 K_{If} に対する負荷速度 \dot{K}_I の影響について $\dot{K}_I=1\sim 2\times 10^8 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$ の範囲にわたって実験的研究を行なった。試験片の切欠きは凍結時に埋込んだカミソリ刃を抜きとって作ったものである。以上の

結果から次のような知見を得た。

1) 小型試験片

① K_{If} の値は全 \dot{K}_I 領域で大きくばらつく。また、 $\dot{K}_I=20\sim 100 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$ にかけて遷移領域があり、この領域で \dot{K}_I の増加とともに K_{If} 値は急激に低下し、 $10^8 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$ 程度以上の実験範囲内では一定値に落ちつく。

② 上述の遷移領域で K_{If} の減少はばらつきの最大値に近いほど著しく、最小値の変化は全 \dot{K}_I 領域にわたってかなり少いことがわかった。最小値も幾分遷移領域を境として低 \dot{K}_I 領域と高 \dot{K}_I 領域との K_{If} 値に差はあるものの、その差は比較的少い。また、いずれの領域でも K_{If} 値は比較的狭いバンド内に収まっている。

2) 中型試験片

① 小型試験片に対して最大値・中央値とも減少しており、このことによってばらつきも著しく減少している。これは切欠き底を横切る結晶粒子数が小型試験片より多いため、各試験片により強度の低い状態の結晶粒子を含む確率が高くなることによると考えられる。また小型試験片と同じように $\dot{K}_I=20\sim 100 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$ に遷移領域が存在する。

② 最小値は小型試験片の下限値のバンド内、あるいはその上部付近に存在する。このことは破壊の発生が最弱リンク説に従うことを裏付けるものであると同時に試験片寸法の影響が非常に少いという点からみても、結晶粒数の十分多い多結晶氷の K_{Ic} 値は今回の小型・中型両試験片で得られた下限値付近に存在し、かつ、その数値は \dot{K}_I の影響が非常に少いといえよう。

3) 大型試験片についての予測

切欠き底の結晶粒子数が100個程度になるような、より大型の試験片を使用すれば、ばらつきは極めて小さくなり、 K_{If} すなわち $[K_{If}]_{\max}$, $[K_{If}]_{50}$, $[K_{If}]_{\min}$ の全部が上記の下限値もしくはこれに近い値になることが予想される。

4) 切欠き先端の鋭さの影響

さらに、遷移領域よりも低 \dot{K}_I の部分の K_{If} が大きい理由として、本実験の切欠きの鋭さがまだ不足していることも考えられるので、さらに鋭い切欠きの場合には遷移領域が低 \dot{K}_I 側に移動することが予測されるが、この点については今後もさらに検討したい。

5) 破面観察に歯科用印象材を用いた結果、忠実な破面のレプリカが得られ、破面全体についてのフラクト

グラフィ的観察が容易に出来るようになった。さらに、この方法と切欠き底部の結晶粒子の偏光写真との照合によって、き裂の発生と伝ばについての知見が得

られた。その一つとして、き裂の発生が結晶粒界から生じていることがあげられる。

6) 結晶粒径が大きいほど試験片の強度が低下するという従来の研究結果は、切欠き底にある結晶粒子数、結晶境界数が大結晶の場合ほど少く、従ってより弱い粒子が含まれる確率が少いことも大きな原因の一つと考えられる。

最後に本研究の実施に当り多くの御援助と御討議を載いた本学真武教授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竹内博文、内田武、研究生の堀田卓伸の諸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) H. W. Liu and K. J. Miller ; Journal of Glaciology, 22 (1979) , 135
- 2) D. J. Goodman ; Physics and Mechanics of Ice. ed. by P. Tryde, (1979) , 129, Springer-Verlag
- 3) H. Hamza and D. B. Muggeridge ; POAC 79, Proceedings 1 (1979) , 697.
- 4) 浦辺 ; 氷の破壊靱性, 鉄と鋼, 67, 7 (1981) , 908.
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 石田 ; き裂の弾性解析と応力拡大係数 (1978) , 179, 培風館
- 8) 岡村 ; 線形破壊力学入門 (1976) , 218, 培風館
- 9) Gold ; Can. J. of Physics, 41, (1963) pp 1712—1728