

粗大結晶氷の破壊じん性および試験片寸法の影響†

楠 本 韶* 木 村 宣 夫**
内 田 武* 高 瀬 徹*

Study of Fracture Toughness of Coarse Grained Ice
and the Effect of Specimen Size

by

Sho KUSUMOTO*, Nobuo KIMURA**, Takeshi UCHIDA*
and Tooru TAKASE*

The effect of loading rate on fracture toughness of ice has been investigated using sharply edge-notched specimens by bending at -10°C . The loading rate \dot{K}_I ranged from 1 to about 10^3 kPam^{1/2}/s. The notch 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 25×25 mm (small size specimen) and 50×50 mm (medium size specimen) respectively, were used. About thirty small size specimens or about ten medium size specimens were tested at each loading rate. The experimental results were as follows.

(1) The values of K_{Ic} were lower in the higher \dot{K}_I range, and there was a transition in the range of $\dot{K}_I = 10 - 100$ kPam^{1/2}/s.

(2) The effect of \dot{K}_I was found to be very small in the range of \dot{K}_I larger than 100 kPam^{1/2}/s.

(3) The effect of loading rate on the minimum value of fracture toughness K_{Ic} was small in the whole range of \dot{K}_I tested for both small and medium size specimens.

(4) The minimum K_{Ic} values of small and medium size specimens seem to coincide each other approximately. The maximum and the median K_{Ic} values of medium size specimens were smaller than those of small size specimens.

(5) It was found that a vinyl silicone impression material being used for dentistry was suitable to make replica of the fracture surface for macrofractography.

キー・ワード：破壊じん性，氷，負荷速度

1 緒 言

近年、北極圏、寒冷地での資源開発に関連して、砕氷や海上構造物に働く氷の力の評価など、氷の力学的性質についての工学的知識が求められるようになってきた。このため、国内の関連大企業でも大規模な研究投資が行われつつある現状である。

氷の破壊じん性値に対する負荷速度の影響については、これまでに幾つかの報告がある。^{1)~4)}しかし、その測定値には、通常の金属材料にくらべると、かなり大きなばらつきがある。ばらつきの原因の一つは、試験片を構成する氷の結晶粒の寸法がたとえば直径数 mm というように、通常の金属材料の結晶粒径よりもはるかに大きいことにある。すなわち、試験片寸法が小さいと、き裂底にある結晶粒が少ないために、試験片の破壊の発生源となるき裂底での最弱結晶の強度が試験片ごとに大幅に異なる可能性が考えられる。したがっ

て、より大形の試験片ほど、き裂底での結晶粒子の強度分布についての試験片相互間の差は少なくなり、データのばらつきも少なくなることが予想される。

負荷速度が小さくなると比較的小さい負荷でも、降伏あるいはクリープによる、き裂先端部での塑性変形が生じやすくなる。いまの場合、上記のとおり結晶粒子の状態（結晶方位・粒子径等）は試験片ごとにかなり差があり、このため塑性変形の程度にも試験片ごとにかなりの差が生じて、これが破壊強度のばらつきを大きくする原因ではないかと考えられる。しかし、この点については、現在のところ推測の域を出ず、確証はない。

これらの問題点についてはいずれも試験片寸法が関係してくるので、筆者らは表記の題目の下で、小、中、大 3 種類の寸法の試験片を用いて実験的研究を進めているが、本報ではそのうち、小、中 2 種類の寸法の試

† 本報を「氷の破壊じん性に及ぼす負荷速度の影響（第 1 報）」(Effect of Loading Rate on Fracture Toughness of Ice, I) とする。
原稿受理 昭和60年8月2日 Received Aug. 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

験片について得られた結果の一部を報告する。

2 実験方法

2.1 氷試験片

用いた氷試験片は、蒸留水を単に容器に入れた状態で -15°C の冷凍庫内に入れて底面から上方向に凍結させて作ったものであって、筆者らが放置凍結法と呼んでいる製水方法である。寸法効果を見るために、幅 $25 \times$ 厚さ $25 \times$ 長さ 250 mm の小型試験片と $50 \times 50 \times 250 \text{ mm}$ の中型試験片を用いた。切欠きは、Fig. 1 に示すような厚さ 0.1 mm 、先端角度 11° のカミソリ刃をあらかじめ切欠き相当位置のアクリル製枠に装着し、氷の凍結、試験片成形後にカミソリ刃を抜き取ることによって得られた。成形加工し終わった試験片は所定温度(-10°C)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(結晶の基底面に垂直な結晶軸)が凍結方向と一致した粗い結晶粒を持った氷であったが、残りは柱状多結晶氷であった。また、C軸が水平方向に向いている粗結晶粒氷もわずかであるが含まれていた。

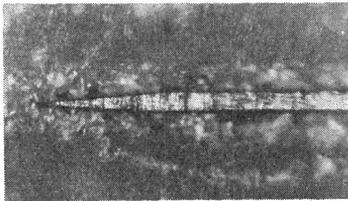


Fig. 1. Section of razor blade to mold the notch. (Thickness : 0.1 mm , tip angle : 11°)

2.2 試験装置

実験は低温室内(-10°C)で、MTS 万能試験機(容量 10 t)を用いて、4点曲げ、3点曲げ試験で行った。測定系の概略をFig. 2に示す。試験片に負荷された荷重は、荷重計(ばね定数 $k \approx 1 \times 10^6 \text{ N/m}$)からのひずみ量を動ひずみ計(三栄測器製、6M61)によって増幅して得られた。この信号はデータレコーダ(TEAC製、MR-30)に記録し、周波数特性に応じてペンレコーダ(松下電器製、VP-6361A)あるいは電磁オシログラフ(三栄測器製、5L31)に適当な再生速度で出力した。荷重速度 \dot{K}_I は再生した信号のグラ

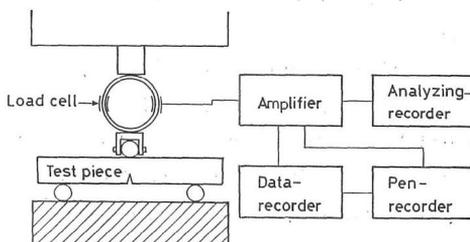


Fig. 2. Measuring system of bending test.

フの傾きから算出した。

2.3 破壊じん性値

本実験の試験片の切欠きは正確にいえばき裂ではないが、便宜上き裂と同じに取扱って、破壊じん性値は線形破壊力学の手法に従って計算して、 K_{Ic} で表し、応力拡大係数 K_I は次式で計算した。

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

ここで応力 $\sigma = 3LP/2BW^2$ 、 $f(a/W)$ は試験片形状、負荷様式によって異なる形状因子、 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。 $f(a/W)$ の数値については文献に詳しいので、ここでは省略する。

2.4 破面観察

氷の破面を観察しようとする場合、昇華・その他によって凹凸の細部形状が時間経過とともに不鮮明になるため、あるいは透明で観察しにくい、などの理由からいろいろの制約があった。このため等者らは破面全体のマクロな観察が可能なレプリカ材料を探した結果、歯科用印象材の1種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、破面観察に用いている。この材料は付加重合型ビニルシリコン印象材であり、低温下で発熱せずに硬化すること(-5°C で約5時間)、収縮率が小さいこと(約 0.1%)、物理的・化学的に安定であることなど、氷の破面のマクロレプリカ用として有効である。

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、これと破面の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。

3 実験結果および考察

3.1 破壊じん性値の確率分布

得られた破壊じん性をワイブル確率紙上にプロットした典型例をFig. 3(a), (b)に示す。Fig. 3(a)は小型試験片で、Fig. 3(b)は中型試験片の場合である。小型試験片ではサンプル数が30前後で、折点を有する2直線で表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(サンプル数10前後)、図のように直線の場合が多かった。なお、粗結晶氷と、柱状多結晶氷との強度には特に差が認められなかったため、本報では両者を区別せずに取り扱うこととした。

3.2 破壊じん性値 K_{Ic} の荷重速度 \dot{K}_I 依存性

3.2.1 小型試験片 Fig. 4は小型試験片の結果である。サンプル数は各々の荷重速度に対して30前後であるが、図には最大値、中央値、最小値を示してある。これを見てわかるように、最大値の分布は $\dot{K}_I \approx 100 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$ 付近を境として大きな段差が存在する。低い \dot{K}_I 領域では切欠き底での塑性域が大きくなって

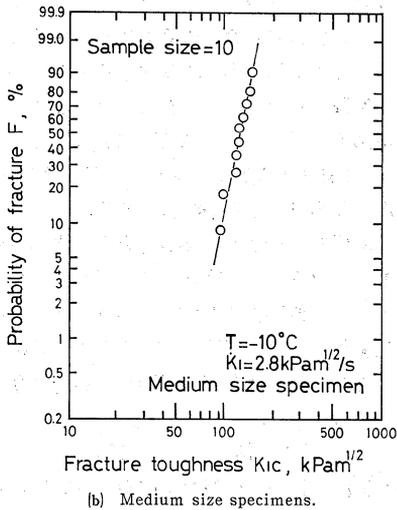
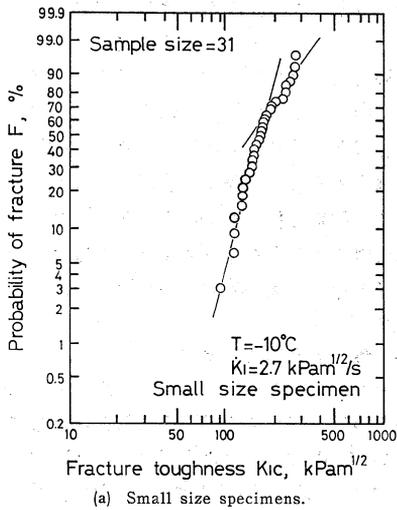


Fig. 3. Examples of Weibull plot of fracture toughness values.

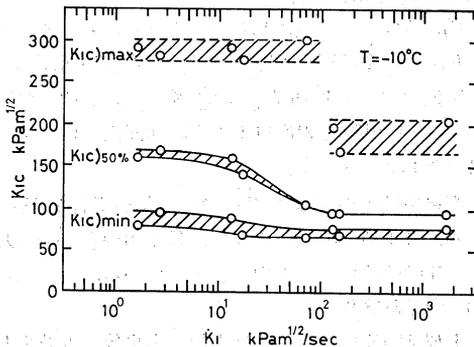


Fig. 4. Effect of loading rate on K_{Ic} values in small size specimens.

小規模降伏の条件を満足しなくなり、大きめの K_{Ic} 値が得られる可能性があるが、今のところはっきりした論拠はない。

中央値は $\dot{K}_I=20\sim 100 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$ 付近に遷移領域が見られるが、 $100 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$ 以上でほとんど一定で、 $K_{Ic}=96\sim 97 \text{ kPam}^{1/2}$ であった。

最後に最小値は多少のばらつきはあるものの、 $\dot{K}_I\sim 10\sim 100 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$ の中間付近から高 \dot{K}_I 側では狭いバンド $K_{Ic}=66\sim 78 \text{ kPam}^{1/2}$ に収まっていて、 \dot{K}_I の影響はほとんど無視してよい。最小値の分布のバンド内で破壊する試験片は少数であり、30個のサンプル中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 $\pm 6 \text{ kPam}^{1/2}$ の中には10個前後の破壊が生ずるのが普通であった。

3.2.2 中型試験片 Fig. 5 は中型試験片について K_{Ic} の最大値・中央値・最小値をまとめたものである。 $\dot{K}_I\sim 10 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$ 付近は \dot{K}_I の値が一定ではなくばらついている。小型試験片で見られたばらつきの幅は著しく減少しており、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。減少の原因は、試験片寸法の増加によって、弱い状態におかれた結晶粒子を含む確率が大きくなったことのほか、前記したように小型試験片の場合に切欠き底での降伏域が大きくて、見掛け上の K_{Ic} が大きかったことにもよるのではないかと考えられる。

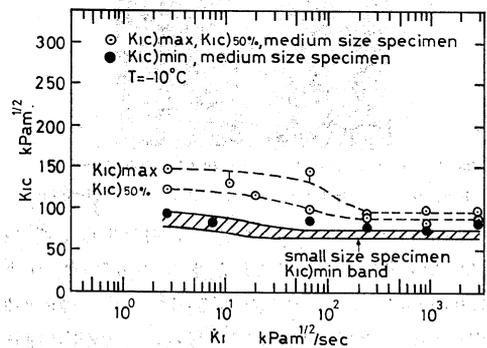


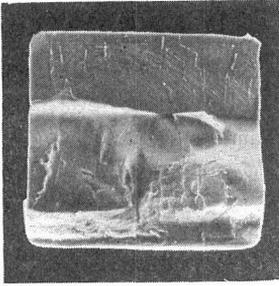
Fig. 5. Effect of loading rate on K_{Ic} values in medium size specimens.

同図には、Fig. 4 で示した小型試験片の最小値のバンドを再記してある。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帯内、あるいは帯の上部付近に存在する。

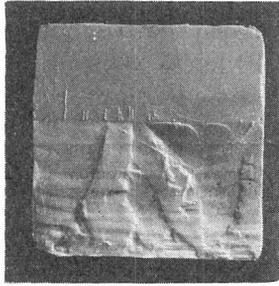
最弱リンク説に従い、かつ破壊の発生を支配するのが切欠き先端に並んでいる個々の結晶粒子（もしくは結晶粒界）の状態であるとするならば、試験片の数を十分多くして求められた小型試験片と、多数の結晶粒を有する中型試験片の下限値は一致するはずであり、Fig. 5 の結果はこの説をかなりよく裏付けていると思われる。なお、同図で中型試験片の結果が幾分高目に出ているが、その理由はまだ明確ではない。

3・3 破面観察

3・3・1 破面形状 破面のマクロレプリカの典型的な例を Fig. 6 (a), (b)に示す. Fig. 6 (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. Fig. 6 (b)は高 \dot{K}_I 領域で K_{Ic} が低いものの破面で平坦になっているものが一般的である. なお, これらの破面には共通してき裂が間欠的に進展, 停止を繰り返したことを示すと考えられる筋が, 進展方向と直交して, 幾つも観察された.



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



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

Fig. 6. Examples of replica of fracture surface.

3・3・2 き裂発生点の考察 き裂発生点を調べるために別途作製した柱状多結晶氷の中型試験片の $\dot{K}_I \approx 230 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$ での12個の試験片について破面の偏光写真やエッチピットの観察を行った. その内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って貫粒型のき裂の発生が認められ, 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おり, この場合はC軸方向の異なる2個の結晶間の粒界, 幅約4mmがほぼ完全に切欠き底の線上にあった. 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確であったのに対して, この場合には切欠き底に沿った約4mm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生じていない. すなわち, き裂の発生は単に切欠き底の結晶軸方向だけでなく, 結晶粒界の存在とおそらくはその方向とによって支配される. なお, 氷の破壊じん性が金属とは逆に結晶粒径が大きくなる程高くなるという報告もある.³⁾⁴⁾ 試験片寸法が一定の場合, 結晶粒径が大きい程結晶粒・結晶粒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一つはここにあるものと考えられる.

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は幾つかの研究例があるが, それらを総合して破壊じん性値が \dot{K}_I によって大きく変化すると述べた解説もある. 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り扱いがなされているが, 本報で述べたように, 破壊じん性値の最大値や中央値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, 材料特性と見なすことはまだ問題がある. そして, 本実験の場合最小値の分布(下限値)に着目する限り, 試験片寸法や負荷速度の影響がかなり小さいことが注目される.

なお, 本研究も従来の個々の研究も, 氷結晶の種類, 試験温度, ひずみ速度の範囲, き裂(または切欠き)の入れ方, その他試験条件に差があり, それらの影響が, 実験結果に微妙に影響しているため, 直接の比較が難しい面があり, 諸要因の影響については今後さらに検討して行きたい.

4 結 言

放置凍結法で作った小型および中型試験片の破壊じん性値 K_{Ic} に対する負荷速度 \dot{K}_I の影響について, 次のような知見を得た.

(1) 小型試験片

① K_{Ic} 値は全 \dot{K}_I 域にわたって大きくばらつく. 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_{Ic} 値は急激に低下し, $10^2 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$ 程度以上の実験範囲内では \dot{K}_I の影響はきわめて小さい.

② 遷移領域での K_{Ic} の減少は最大値の場合が最も著しく, 最小値の変化は少ない. 最小値は全 \dot{K}_I にわたって比較的狭いバンド内に収まっている.

(2) 中型試験片

① 小型試験片にくらべて最大値・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, 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 $\dot{K}_I=20\sim 100 \text{ kPam}^{1/2}/\text{s}$ に遷移領域が存在する.

②最小値は小型試験片で得られた下限値のバンド内、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ある程度従うことを裏付けている。

(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前後の個数になるようなより大型の試験片を使用すれば、ばらつきはさらに小さくなり、 K_{Ic} すなわち最大値・中央値・最小値の分布すべてが上記の下限値もしくはこれに近い値に収束することも予想されるが、実験的な確認が必要である。

(4) 切欠き先端の鋭さの影響

遷移領域より低 K_I 域での K_{Ic} 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 K_I 側に移動する可能性も考えられるが、残された問題である。

(5) 破面観察に歯科用印象材を用いた結果、忠実な破面のマクロレプリカが得られ、破面全体についてのフラクトグラフィ的観察が容易にできるようになった。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。

最後に、本研究の実施に当り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校長（当時、本学工学部長）真武友一先生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、木寺 亨（当時）、梶聖悟の両君および学生諸君に心から謝意を表する次第である。

（昭和58年5月24日 日本材料学会第32期学術講演会にて講演）

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* 79, Proc. 1, p. 697 (1979).
- 4) 浦辺浪夫, 鉄と鋼, **67**, 908 (1981).
- 5) 楠本 韶, 木村宣夫, 木寺 亨, 梶 聖悟, 竹内博文, 長崎大学工学部研究報告, **13**, 123 (1983).
- 6) 楠本 韶, 木村宣夫, 木寺 亨, 梶 聖悟, 竹内博文, 長崎大学工学部研究報告, **13**, 133 (1983).
- 7) 楠本 韶, 木村宣夫, 木寺 亨, 梶 聖悟, 長崎大学工学部研究報告, **14**, 121 (1984).
- 8) 岡村弘之, "線形破壊力学入門", p. 218 (1976) 培風館.
- 9) 石田 誠, "き裂の弾性解析と応力拡大係数", p. 179 (1978) 培風館.
- 10) H. Higuchi, *Acta Metallurgica*, **6**, 636 (1958).