

柱状結晶氷及び層状氷の破壊靱性

楠 本 韶*・木 村 宣 夫*
 木 寺 亨*・梶 聖 悟*
 竹 内 博 文**

Fracture Toughness of Columnar Grained Ice and Laminated Ice

by

Sho KUSUMOTO*, Nobuo KIMURA*, Tohru KIDERA*

Seigo KAJI* and Hirofumi TAKEUCHI**

Fracture Toughness has been investigated on two types of polycrystalline ice, C. G. I. (columnar grained ice) and Lam. I. (laminated ice). The method of making C. G. I. bending specimens with a sharp notch was similar to that of L. G. I.¹⁾ (large grained ice) except the surface condition of the bottom plate where ice crystal growth starts. In this experiment, upper surface of the bottom plate was covered with ice granules. A bit of water was added to fill the clearances of the granules forming a flat ice plane. Lam. I. specimens were made, using molds float on the coolant of the temperature -10°C . Distilled water was put in the mold by a syringe a little at a time forming a Lam. I. block. This work has been done at room temperature.

C. G. I. parallel specimens have been tested at temperature -10 and -30°C with three fixed loading rate conditions $\dot{K}_I=0.1, 1.0, \text{ and } 10 \text{ MPam}^{1/2}/\text{min}$ in four point bend test. The effects of temperature and loading rate on the fracture toughness were observed. The results show that the fracture toughness decreases as loading rate \dot{K}_I increases, and have a tendency to decrease as temperature T decreases. Two types of C. G. I. orthogonal specimens were tested in four point bending at -10°C and $\dot{K}_I=1.0 \text{ MPam}^{1/2}/\text{min}$. These results were compared with the case of L. G. I. specimen already reported¹⁾. The fracture toughness of Lam. I. specimen was also obtained at -10°C in cantilever bending and three point bending.

1. 結 言

著者らはさきに放置凍結した粗大結晶氷 (Large Grained Ice) を試験片として4点曲げ試験を行い、破壊靱性値を求め、その温度、負荷速度、凍結方向及び結晶主軸方向の違いによる影響について報告¹⁾した。

本報告では、製造方法の異なる多結晶氷試験片を用いて破壊靱性値を求めた。今回用いた多結晶氷は2種類で、まず柱状結晶氷 (Columnar Grained Ice) の4点曲げ試験を行い破壊靱性値を求め、L. G. I. 試験片と同様にその温度依存性、負荷速度依存性を調べた。また、

昭和58年4月30日受理

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

**機械工学専攻 (Graduate Student, Mechanical Engineering)

積層法によって作った層状氷試験片を用いて、片持・3点曲げ試験を行い破壊靱性値を求めた。さらに、これらの結果について、我々の研究と関連があると思われる他の研究者による結果と比較検討を行った。得られた結果はばらつきが多いので、取り扱いにあた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. 試験片の製作

2. 1 柱状結晶氷試験片

柱状結晶氷 (Columnar Grained Ice) は、我われが Seeding 法と呼んでいる方法を用いて作ったが、先ず試験片中央切欠き方向と結晶成長方向が平行な、C. G. I. 平行試験片 ($\alpha=0^\circ$) について説明する。

まず -10°C の低温室で (i) あらかじめ環境温度に冷却された容器 (縦 $280 \times$ 横 $320 \times$ 高さ 100mm) のアルミニウム製底板に、電動かき氷機で作った種氷を $3 \sim 5\text{mm}$ 位の厚さになるようにまき、(ii) 噴霧機で 0°C の蒸留水を、種氷が透明になるまで一様に散布し凍結させる。(iii) (ii) で得られた凍結面上に、底板なしの亚克力製枠 (長さ $250 \times$ 幅 $25 \times$ 高さ 60mm) をセットし、枠の内面と枠にとりつけたカミソリ刃にはテフロン系ワックスを塗布しておく。(iv) これを -15°C に保たれた冷凍庫に移し、 0°C の蒸留水を気泡ができないように注意しながら、カミソリ刃が水中に隠れるまで注ぎこむ。なお、カミソリ刃は、刃先が下向きになるように亚克力製枠に装着した。この場合、側面からの凍結を防ぐため、発泡スチロール製の断熱材で容器の四方を囲った。また底面には台としてあらかじめ冷却しておいた鉄板を用いた。容器の上蓋にニクロム線ヒータを取りつけ、高さ方向に温度勾配をつけ底面から上方向に一方向に氷を成長させた。これによっておよそ35時間で気泡を含まない透明な氷ブロックが得られた。枠から抜き取った氷ブロックは -10°C の低温室でホットプレートを用いて、不必要部分を溶解しながら成形した。試験片成長方向と切欠きは Fig. 1 に示す。試験片がどのような結晶粒で構成されているかは Fig. 2(a), (b) によってわかる。これは、試験片を厚さ 1mm の薄片にして直交ニコル下で観察した写真である。Fig. 2(a) は成長方向から観察したもので、結晶粒の色の違いは c 軸方向の差を示しており、前報¹⁾ の試験片の c 軸がほぼ一方向であったのと大きな差のあることがわかる。(b) は成長方向に垂直な方向から観察した写真である。単位面積あたりの結晶粒を数えることによって、C. G. I. 試験片は平均粒径 2.9mm の

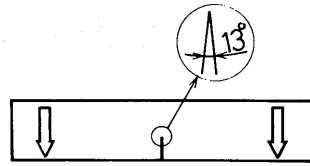


Fig. 1 Growth direction and a notch shape ; parallel specimen, arrows denote crystal growth direction

柱状結晶で構成された多結晶氷であることがわかる。本図の場合にも結晶ごとの c 軸方向の違いがよくわかる。

C. G. I. 直交試験片 ($\alpha=90^\circ$) については、先に報告した¹⁾ L. G. I. $\alpha=90^\circ$ と同様に特殊な試験片枠を用いて、試験片中央部のみを作る。この場合、種氷を枠の底部のみに作った S I (S は Seeding の略) とカミソリ刃にも種氷を作った S II の 2 種類の試験片を作った。各々の結晶粒は Fig. 2(c), (d) の偏光写真で示すような形状になっている。S I では、Fig. 2(c) に見られるように、丁度カミソリ刃の上側だけが L. G. I. のような粗大結晶になっていることがわかる。

次にこの試験片中央部に持ちしろ部分を接着・成形することによって直交試験片が得られる。

成形後、各試験片は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形を防ぐため曲げ試験予定温度 (-10°C , -30°C) で一昼夜保存した。

2. 2 層状結晶氷試験片

層状結晶氷 (Laminated Ice) の作り方は以下のとおりである。まず塩化カルシウム水溶液 (29.9wt %) を冷媒液として常に -10°C に保っておく。次にこの冷媒液に試験片形状に打ち抜きのなされた発泡スチロール製の枠を浮かべ、その内側に亚克力製枠をセットする。この亚克力製枠の底部には、厚さ 0.3mm のトタン板を貼りつけてある。その中に注射器で少し水を加え底部から凍結させる。その際、水の表面部分が凍結してしまわない内に次の水を注ぐ、この操作を10回前後行うことによって約2~4時間で氷ブロックが出来る。最終的な形状はカッターナイフで荒削りをし、サンドペーパー (No.80, 180, 280, 1000cw) で仕上げを行った。試験片中央部の切欠きはアルミニウム箔やカミソリ刃を用いた。このようにして仕上げた試験片氷の形状・寸法を Fig. 3, Fig. 4 に示す。Fig. 3 は切欠きを持った片持曲げ試験片で、Fig. 4 は3点曲げ試験片を示す。また Fig. 2(e), (f) には、積層法によって作った



(a) Horizontally sliced (C. G. I. $\alpha = 0^\circ$) (d) Central part of Seeding II (C. G. I. $\alpha = 90^\circ$)
 (b) Vertically sliced (C. G. I. $\alpha = 0^\circ$) (e) Horizontally sliced (Lam. I.)
 (c) Central part of Seeding I (C. G. I. $\alpha = 90^\circ$) (f) Vertically sliced (Lam. I.)

Fig. 2 Sliced specimens ; polarized light, arrows denote growth directions

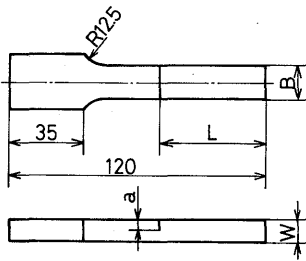


Fig. 3 Dimensions of cantilever specimen

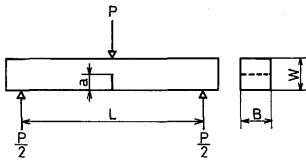


Fig. 4 Dimensions of three point bend specimen

氷の偏光写真を示す。平均粒径は4.7mmである。

3. 柱状結晶氷の c 軸方位分布

柱状結晶氷を薄片にして偏光装置で観察すると Fig. 2(a)~(d)のような、薄片内の各々の結晶粒が色づいて見える。この干渉色を市販の干渉色図表^{2),3)}と比較することにより、各々の結晶粒のレタレーション R を求めることができる。Fig. 5⁴⁾に氷の薄片の結晶粒の c 軸と白色光の入射方向との関係の概略図を示す。よく知られているように、レタレーション R には次の関係が成り立つ。

$$R = t(n_2 - n_1) \tag{1}$$

ここで、 t は試料氷の厚さ、 n_1, n_2 は c 軸と入射光の

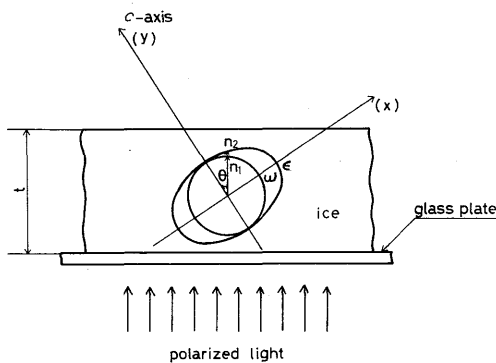


Fig. 5 Relation between c-axis of ice and incident light⁴⁾

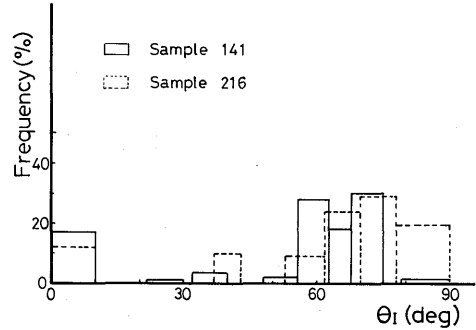


Fig. 6 Distribution of c-axis determined from interference colour method

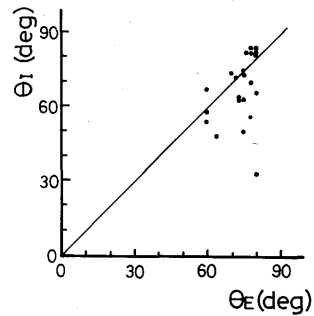


Fig. 7 Correlation figure θ_e and θ_1

なす角を θ としたときの常光と異常光の屈折率である。(1)式より、 R と t がわかると複屈折率 $n_1 - n_2$ が求まる。また Fig. 5 から、氷の主屈折率 ω, ϵ と n_1, n_2 との関係は

$$n_1 = \omega, n_2 = \frac{\omega \cdot \epsilon}{\sqrt{\omega^2 \sin^2 \theta + \epsilon^2 \cos^2 \theta}} \tag{2}$$

である。計算を実行するにあたって氷の主屈折率 ω, ϵ は波長 $\lambda = 589.3\text{nm}$ での値 $\omega = 1.3091, \epsilon = 1.3104$ を用いた⁵⁾。これより容易に θ を求めることができる。

Fig. 6 に代表的な 2 つの試験片の結晶成長方向に対する c 軸分布のヒストグラムを示す。頻度は規格化してある。これから、柱状結晶氷では、成長方向に対して $60 \sim 90^\circ$ 付近に c 軸方位が分布していると考えられる。

エッチピット法を用いて⁶⁾、c 軸分布 θ_e を調べた結果と干渉色による方法で求めた θ_1 との関係を図 7 に示す。技術的な問題もあり、完全な相関は得られなかったが、 θ_1, θ_e が $60 \sim 90^\circ$ 部分に分布している様子がわかる。

4. 曲げ試験方法

実験は低温室内で行った。C. G. I. 試験片については、4点曲げ試験を行った。平行試験片 ($\alpha = 0^\circ$) については、負荷速度として応力拡大係数の時間変化 \dot{K}_I を $0.1 \pm 0.01, 1.0 \pm 0.1, 10 \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{min}$ の3種類を選んだ。試験温度は -10°C 及び -30°C の2種類について行った。直交試験片 ($\alpha = 90^\circ$) は、 $\dot{K}_I = 1.0 \pm 0.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{min}$ 、温度 -10°C で2種類の試験片 (S I, S II) で行った。試験片寸法は Fig. 8 に概略図を示す。ここで $L = 200, B = 25, W = 25, a = 10 \text{ mm}$ である。

層状試験片は、片持・3点曲げ試験を行った。負荷速度は $\dot{P} = 1 \sim 2 \text{ kgf}/\text{min}$ となるようにした。試験温度は -10°C で行った。

3点曲げ試験の応力拡大係数 K_I の計算は次式による⁷⁾。

$$K_I = \sigma_0 \sqrt{\pi a} \cdot f(a/w) \quad (3)$$

ここで $\sigma_0 = 3LP / 2B^2$

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

である。 $f(a/w)$ の係数 A_i は L/B によって決定される⁷⁾。

片持曲げに関しては、 K_I の一般的な計算式がないのでせん断応力の影響を無視して、曲げモーメントのみを考え、純曲げの場合の次式によって K_I を計算した。

$$K_I = \sigma_0 \sqrt{\pi a} \cdot f(a/w) \quad (5)$$

ここで $\sigma_0 = 6M / W(W - a)^{3/2}$

$$f(a/w) = 1.122 - 2.781(a/w) + 5.888(a/w)^2$$

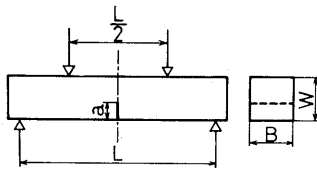


Fig. 8 Shape of specimen for four point bend test

$$-7.839(a/w)^3 + 5.625(a/w)^4 - 1.641(a/w)^5 \quad (6)$$

5. 結果と考察

5. 1 $K_{I,F}$ の負荷速度依存性 (C. G. I.)

通常破壊靱性値としては K_{Ic} が用いられるが、本実験の場合巨視的には最大荷重で破壊しているものの、pop-in その他破壊発生時の詳細な観察を行うに至らなかったので $K_{I,F}$ で表わした¹⁾。得られた柱状結晶水試験片による測定結果を Table 1 に示す。表の $K_{I,F}$ 値は累積破壊確率 F が50%時の値と算術平均値を示す。また変動係数 c. o. v. = σ / μ を示した。ここで μ は平均値、 σ は標準偏差を表わす。

以上のことから各データをワイブル確率紙上で整理することを試みた。Fig.9 (a), (b) はそれぞれ試験温度 $T = -10^\circ\text{C}, -30^\circ\text{C}$ での C. G. I. $\alpha = 0^\circ$ の負荷速度依存性をワイブル確率紙上にプロットしたものである。

負荷速度は \dot{K}_I を $0.1, 1.0, 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} / \text{min}$ として比較した。各々のグラフは折点を有しており、完全な直線では表わされなかった。折点部分より右側、 $K_{I,F}$ の大きい部分ではクラック先端部分での塑性変形が著しく、線形破壊力学が成り立たない範囲と考えられる。これは、 $T = -10^\circ\text{C}$ と -30°C とを比較すると温度の低い方が折れ曲り方が少ないことから推測できる。しかしこれらの温度は融点に非常に近いことから、より低温領域での結果の考察が必要である。

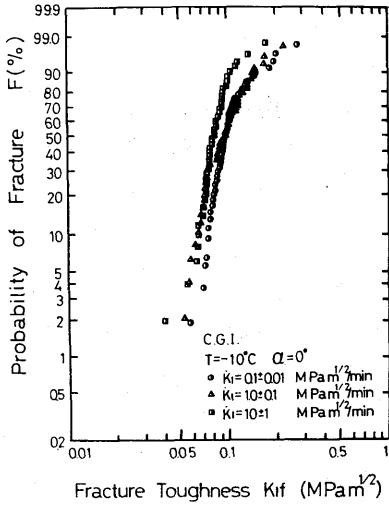
また試験温度が -10°C であろうと -30°C であろうと、負荷速度 \dot{K}_I の増加に対して、 $K_{I,F}$ が漸減しており、グラフでは全体的に左側にシフトしていることがわかる。この傾向は既に報告した、粗大結晶水 (L. G. I.) 試験片の結果¹⁾ と一致している。

5. 2 $K_{I,F}$ の温度依存性 (C. G. I.)

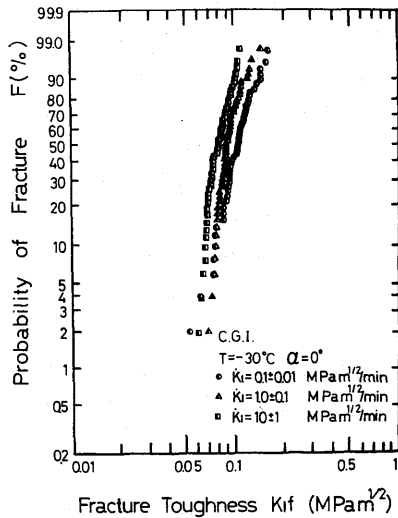
負荷速度 \dot{K}_I が $0.1, 1.0, 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} / \text{min}$ とした場合の $K_{I,F}$ の温度効果を調べた。Table 1 から明らか

Table 1 $K_{I,F}$ values for C. G. I. $\alpha = 0^\circ$

Temp. (°C)	\dot{K}_I (MPa·m ^{1/2} /min)	$K_{I,F}$ (MPa·m ^{1/2})		c. o. v. (%)	No.
		F (50%)	μ		
-10	0.1	0.098	0.108	35.4	52
	1.0	0.098	0.103	33.4	47
	10	0.083	0.085	22.8	49
-30	0.1	0.102	0.102	27.8	45
	1.0	0.091	0.095	16.9	51
	10	0.081	0.082	15.3	53



(a) T = -10°C



(b) T = -30°C

Fig. 9 Effects of loading rate (C. G. I. $\alpha = 0^\circ$)

るように、 $T = -30^\circ\text{C}$ の方が -10°C よりも若干小さな $K_{I,r}$ 値をとるが、明確ではない。またばらつきは変動係数 c. o. v. に示すように $\dot{K}_I = 0.1 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} / \text{min}$ のとき $T = -10^\circ\text{C}$ で 35.4%、 $T = -30^\circ\text{C}$ で 27.8%、 $\dot{K}_I = 1.0 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} / \text{min}$ のときそれぞれ 33.4% と 16.9%、 $\dot{K}_I = 10 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} / \text{min}$ のときそれぞれ 22.8% と 15.3% という値をとり、温度が高い程ばらつきが大きい。Fig. 10 に $\dot{K}_I = 10 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} / \text{min}$ の場合での $K_{I,r}$ の温度依存性を示す。以上から \dot{K}_I が小さい程、 T が高い程

$K_{I,r}$ は増大する傾向がある。ワイブル確率紙上で見ると単に右側に移動するとは限らず、両側に広がる例もある。このことについては今後の検討を要する。

5. 3 C. G. I. 直交試験片 ($\alpha = 90^\circ$) の $K_{I,r}$

負荷速度 $\dot{K}_I = 1.0 \pm 0.1 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} / \text{min}$ 、温度 $T = -10^\circ\text{C}$ の条件での直交試験片 ($\alpha = 90^\circ$) の場合の結果を Table 2 に示す。S I 試験片の $K_{I,r}$ の平均値は $0.100 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 、S II 試験片の場合 $0.108 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ で、 $F = 50\%$ での値は各々 $0.097, 0.103 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ で S II の方が若干大きい値をとっているが有意差はないと思われる。Fig. 11 にこれらの結果と C. G. I. $\alpha = 0^\circ$ の結果を示す。この図で見る限り、S I、S II と同じような性質をもっているのではないかと思われる。

5. 4 層状氷試験片の $K_{I,r}$

積層法によって作った切欠きを有する層状氷 (Lam. I.) を用いて、片持・3点曲げ試験を行った結果を Table 3 に示す。片持曲げの場合 $K_{I,r}$ は $F = 50\%$ で

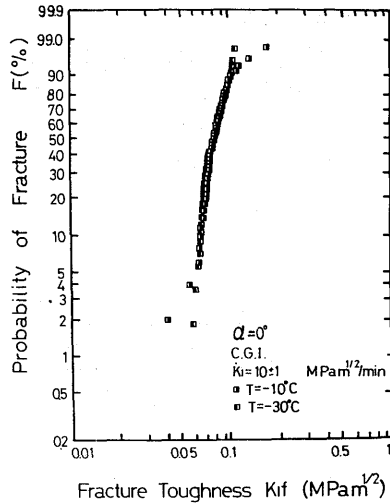


Fig. 10 Effects of temperature (C. G. I. $\alpha = 0^\circ$, $\dot{K}_I = 10 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} / \text{min}$)

Table 2 $K_{I,r}$ values of C. G. I. $\alpha = 90^\circ$; $\dot{K}_I = 1.0 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} / \text{min}$, $T = -10^\circ\text{C}$

T. P	$K_{I,r} (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$		c. o. v. %	No.
	F (50%)	μ		
S I	0.097	0.100	20.2	46
S II	0.103	0.108	18.1	50

0.114MPa・m^{1/2}, 平均値は0.114MPa・m^{1/2}で, 3点曲げでは $F=50\%$ が0.112MPa・m^{1/2}, 平均値0.117MPa・m^{1/2}であった。これらの試験では \dot{P} を一定になるようにし, K_{Ic} についてはあまり考慮しなかったが, 3点曲げの場合 K_{Ic} は0.3~2.1MPa・m^{1/2}/minの範囲であり, また片持ちの場合は, K_{Ic} が約1~12MPa・m^{1/2}/minと広がっている。しかし得られた結果のオーダーは, 4点曲げ試験によって得たC.G.I.の K_{Ic} と同じであることがわかる。各々のデータを

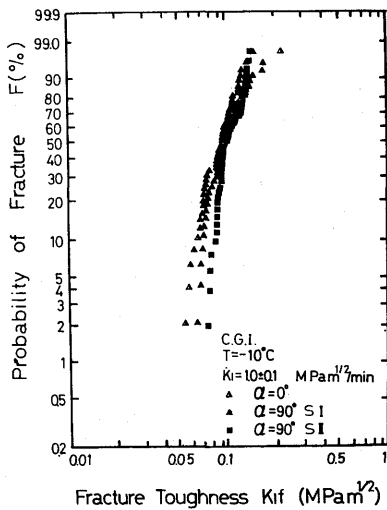


Fig. 11 The fracture toughness distribution of C. G. I. $\alpha=90^\circ$ (Seeding I and Seeding II) and C. G. I. $\alpha=0^\circ$; $K_{Ic}=1.0\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{min}$, $T=-10^\circ\text{C}$

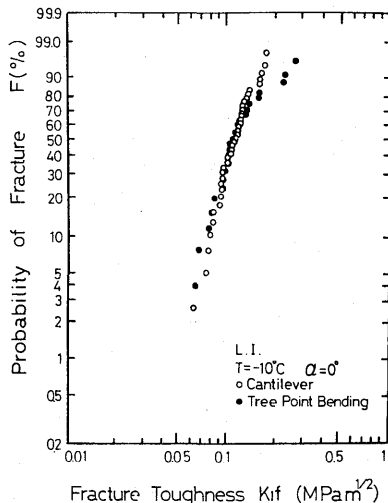


Fig. 12 The fracture toughness K_{Ic} of Lam. I.

ワイブル確率紙上にプロットしてみると, Fig. 12のようになる。この場合も一部分のデータが折点より右側に存在していることがわかる。

5. 5 L. G. I. 試験片との比較

各温度条件・負荷速度条件を一定にした時の K_{Ic} をC. G. I. $\alpha=0^\circ$ とL. G. I. $\alpha=0^\circ$ について比較する。Table 4に各々の K_{Ic} 値を比較したものを示す。表から温度 $T=-30^\circ\text{C}$ の時は, C. G. I.とL. G. I.の K_{Ic} 値には明確な有意差が存在し, L. G. I.の方がC. G. I.より低い K_{Ic} 値を示す。一方 $T=-10^\circ\text{C}$ では, $K_{Ic}=0.1\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{min}$ の時に $T=-30^\circ\text{C}$ の結果と逆の傾向を示し, また $K_{Ic}=1.0, 10\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{min}$ においては有意差は見出せなかった。Fig. 13(a), (b)に $K_{Ic}=1.0\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{min}$, $T=-10, -30^\circ\text{C}$ の場合についてワイブル確率紙上にデータを整理しなおした。

また直交試験片の場合について, L. G. I. $\alpha=90^\circ$, C. G. I. $\alpha=90^\circ$ (S I, S II)の比較をFig. 14に示す。3種類とも有意差はないと考えられる。

以上の検討において, 試験片の切欠きの方向と結晶成長方向及びc軸方向との関係が K_{Ic} にどのように影響を与えるのかについて調べて来た。すなわち, L.

Table 3 K_{Ic} Values of Lam. I.; $T=-10^\circ\text{C}$

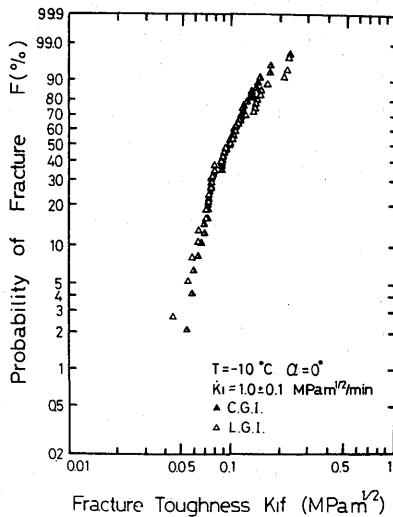
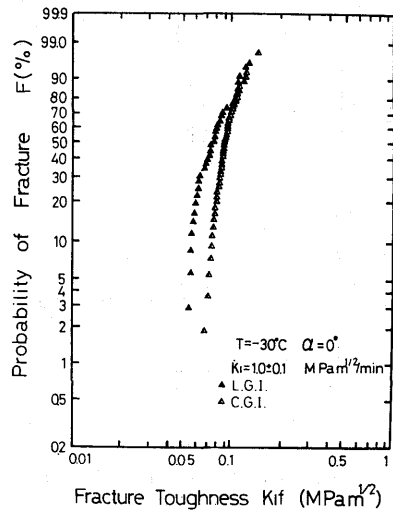
T. P	K_{Ic} (MPa・m ^{1/2})		c. o. v. %	No.
	F (50%)	μ		
Cant.	0.114	0.114	24.8	38
3 P. B.	0.112	0.117	41.1	24

G. I. $\alpha=0^\circ$ は切欠き面とc軸方向が一致しており, L. G. I. $\alpha=90^\circ$ は切欠き面はc軸に垂直で劈開面と一致している。またC. G. I. $\alpha=0^\circ$ は切欠き面に対してc軸方向が $60^\circ\sim 90^\circ$ 方向にランダムに分布しているし, $\alpha=90^\circ$ は $0^\circ\sim 30^\circ$ に分布している。 K_{Ic} を評価する場合C. G. I.はL. G. I.ほど単純ではなく試験片の結晶粒径サイズやc軸の傾きの分布などの複雑な要因が寄与することが考えられるが, これらの要因の影響についての検討は今後の課題である。

また, 我々の利用した試験温度は -10°C と -30°C であるが, 各々の絶対温度を氷の融点 $T_m=273\text{K}$ で割ると0.96, 0.89であり, 通常の金属材料では非常に高温領域での実験値と考えられる。このことから, より低温域での破壊靱性実験が必要であろうと考えられる。

Table 4 K_{I_f} values of C. G. I. $\alpha=0^\circ$ and L. G. I. $\alpha=0^\circ$

Temp. (°C)	\dot{K}_{I_f} (MPa · m ^{1/2} /min)	K_{I_f} (MPa · m ^{1/2})			
		C. G. I.		L. G. I.	
		F (50%)	μ	F (50%)	μ
-10	0.1	0.098	0.108	0.123	0.142
	1.0	0.098	0.103	0.097	0.108
	10	0.083	0.085	0.076	0.085
-30	0.1	0.102	0.102	0.083	0.084
	1.0	0.091	0.095	0.077	0.082
	10	0.081	0.082	0.063	0.066

(a) $T = -10^\circ\text{C}$ (b) $T = -30^\circ\text{C}$ Fig. 13 Comparison of K_{I_f} distribution between C. G. I. $\alpha=90^\circ$ (Seeding I and $\dot{K}_I=1.0\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{min}$

Goodman⁸⁾は粒径5~10mmの柱状結晶氷の4点曲げ試験を行って K_{Ic} を算出しているが、この結晶粒は c 軸が成長方向に対して水平方向に分布しているといっており、我々のC. G. I. $\alpha=0^\circ$ と若干異っている。彼の報告には $T=-11^\circ\text{C}$ での K_{Ic} 値が載せてあるので、我々の手でワイブル確率紙上にプロットしたグラフをFig. 15に示す。Goodmanの実験では \dot{K}_I は一定ではなく、 $10\sim 250\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{min}$ と大きくばらついており、我々の条件とは直接的には比較できないが、平均値 $K_{Ic}=0.119\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ であり、我々のC. G. I. $\alpha=0^\circ$ 、 $\dot{K}_I=10\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{min}$ 、 $T=-10^\circ\text{C}$ の結果 $0.085\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ より大きい。しかし、Fig. 15に示すようにグラフには折点が存在しており、我々の結果と一致している。

6. 結論

柱状結晶氷の4点曲げ試験による破壊靱性値 K_{I_f} の負荷速度依存性、温度依存性等について次のような知見を得た。すなわち、本実験の温度、負荷速度の範囲において

- (1) L. G. I. 試験片と同様、負荷速度の増加に対して破壊靱性値 K_{I_f} は減少する。
- (2) C. G. I. $\alpha=0^\circ$ では $T=-30^\circ\text{C}$ と -10°C とでは K_{I_f} に明確な有意差は認められなかった。
- (3) C. G. I. $\alpha=90^\circ$ について $\dot{K}_I=1.0\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{min}$ 、 $T=-10^\circ\text{C}$ でSeeding I, Seeding IIの2種類の直交試験片を用いて破壊靱性値を求めたが有意差は認められなかった。

また、層状氷の片持・3点曲げ試験を負荷速度 \dot{P} が

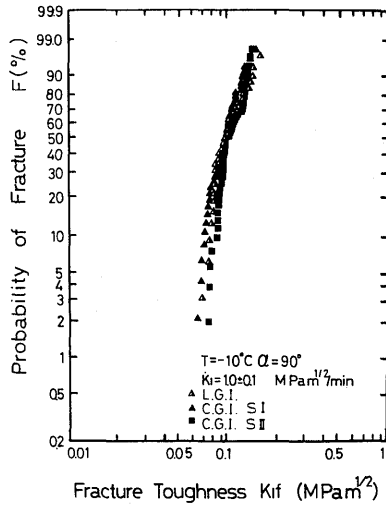


Fig. 14 Comparison of K_{Ic} distribution between C. G. I. $\alpha = 90^\circ$ (Seeding I and Seeding II) and L. G. I. $\alpha = 90^\circ$; $K_I = 1.0 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{min}$, $T = -10^\circ\text{C}$

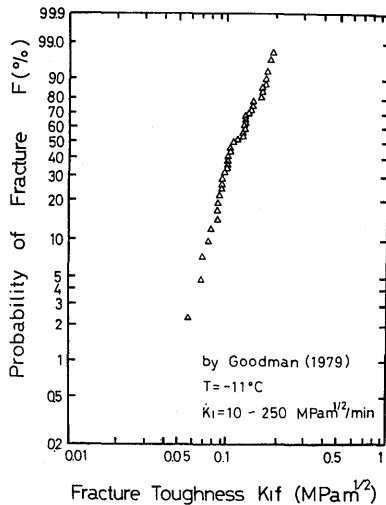


Fig. 15 The fracture toughness values by Goodman D. J.⁸⁾

一定の条件で行ったが、 K_{Ic} については4点曲げ試験によるC. G. I.あるいはL. G. I.試験片と同じオーダーの値が得られた。

本研究について多大の御尽力、御討議などを戴いた機械工学科真武教授、今井助教授に厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 楠本, 木村, 木寺, 梶, 竹内; 長大工研究報告, Vol.13, No21 (昭58-8)
- 2) 浜野; 偏光顕微鏡の使い方 (昭45), 81, 技報堂.
- 3) 坪井; 偏光顕微鏡 (昭45), 160, 岩波書店.
- 4) 文献2) p. 74.
- 5) 森野編; 化学便覧-基礎編II-(昭46), 1114, 丸善.
- 6) Higuchi. K ; THE ETCHING OF ICE CRYSTALS. Acta Metallurgica, vol. 6 (1958), 636.
- 7) 岡村; 線形破壊力学入門 (昭51), 218, 培風館.
- 8) Goodman. D. J. ; Critical Stress Intensity Factor (K_c) Measurements at High Loading Rate for Polycrystalline Ice, Proceedings of the IUTAM Symposium on the Physics and Mechanics of Ice., Copenhagen, August 6-10 (1979), 129.

