

氷の破壊じん性に関する統計的研究†

木村 宣夫* 楠本 詔** 内田 武***
安藤 司文**** 越智 利彦****

Statistical Study on Fracture Toughness of Ice

by

Nobuo KIMURA*, Sho KUSUMOTO**, Takeshi UCHIDA***
Shimon ANDO**** and Toshihiko OCHI****

A method to express the distribution of the experimental results of fracture toughness of ice was investigated by postulating the Weibull distribution with three parameters. The data were taken from the previous experiments conducted to study the effect of loading rate on the fracture toughness^{9),10)}. Weibull parameters were estimated by several estimation methods^{11),12)} and the parameters obtained were compared with each other. The effect of loading rate together with that of specimen size on the parameters were discussed at three loading rate ranges. It was confirmed that the parameters estimated were closely related to the experimental value of fracture toughness.

Key words : Fracture toughness, Loading rate, Size effect, Ice, Statistics

1 はじめに

氷の力学的性質の1つとしての、破壊じん性値については、これまでも色々な角度からいくつかの研究機関によって議論されて来た¹⁾⁻⁸⁾。また筆者らも先に、粗大結晶氷および柱状多結晶氷試験片を用いて破壊じん性値の負荷速度依存性を調べ、その結果について報告した^{9),10)}。その結果、それらの測定値には通常の金属材料に比べると、かなり大きなバラツキがあることが明らかになった。また、負荷速度全体について見ると低負荷速度領域ではバラツキが大きく、その後 $\dot{K}_I=10\sim 100 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ の遷移領域を経て、高負荷速度領域になるほどバラツキの減少が見られた。

これらのバラツキの原因として筆者らは、低負荷速度領域における著しく大きなバラツキについては、き裂先端部での降伏およびクリープによる塑性変形の発生によるのではないかと考えた。

また高負荷速度領域においてもバラツキが存在することから、このバラツキの原因は、試験片を構成する氷の結晶粒子の寸法が例えば直径数 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く、試験片寸法と結晶粒子の寸法比が著しく小さいということにあるのではないかと考えた。すなわち試験片寸法が小さいと、き裂底にある結晶粒の数が相対的に少ないために、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のである。従って、より大型の試験片ほど、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、より強度の低い状態の結晶粒子を含む確率が高くなり、測定データのバラツキも少なくなることを予想した。

また、先の報告⁹⁾においても、破壊じん性値の分布がワイブル分布に従うと仮定して議論した。しかしながら、得られたデータの分布が2母数ワイブル分布で与えられたり、複合型ワイブル分布で与えられたり、首尾一貫した取り扱いができなかった。そこで本報告では前報^{9),10)}で得られたデータを用いて、新たに3母数ワイブル分布を導入した統計的取り扱いを行ない、形状母数、尺度母数、位置母数の各々を求めた。また、このデータ処理による3母数ワイブル分布の母数推定を行うに当たり、位置母数の取り扱いにより、色々な推定法が考え出されているので、本報告でもいくつかの推定法を用いてこれらの比較検討を行なった。

次にこれらの母数推定法で得られた値についてカイ平方適合度検定を行ない、それぞれの推定値の妥当性を調べた。

更に、得られた各母数に関し、負荷速度依存性を検討し、各母数の物理的意味について考察した。またこの際、試験片の種類および試験片寸法による差異につ

† 本報を「氷の破壊じん性に及ぼす負荷速度の影響 (第3報)」(Effects of Loading Rate on Fracture Toughness of Ice, III) とする。

原稿受理 昭和63年11月14日 Received Nov. 14, 1988

* 正会員 メリタジャパン(株) 東京都港区芝公園, Melitta Japan Ltd., Shiba-Koen, Minato-ku, Tokyo
** 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 北九州工業高等専門学校 北九州市小倉南区志井, Shii, Kokuraminami-ku, Kitakyushu
**** 長崎大学工学部 長崎市文教町, Faculty of Engineering, Nagasaki University, Bunkyo-machi, Nagasaki

いても調べた。

2 試験片および実験方法

今回検討した試験片は、結晶粒径が5~30 mm 程度の各種寸法の粗大結晶氷 (Large Grained Ice, 以下 LGI と略す) と平均結晶粒径約 5 mm の柱状多結晶氷 (Columnar Grained Ice, 以下 CGI) の2種類を用いた。それぞれの試験片の作製法は第1報, 第2報に示すとおりである。また試験片寸法として LGI の場合、供試体の平滑部断面寸法が25×25 mm の小型試験片 (LGI-S) と 50×50 mm の中型試験片 (LGI-M) の2種類, CGI の場合 25×50 mm の小型試験片 (CGI-S) と 50×50 mm の中型試験片 (CGI-M) および 200×50 mm の大型試験片 (CGI-L) の3種類を用いた。ここで用いた略記号の説明を Table I にまとめた。

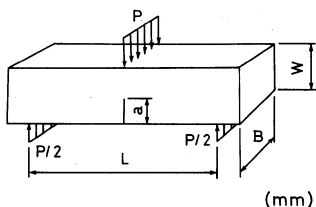
試験片の中央部には厚さ 0.1 mm, 先端角度 11° をなすカミソリ刃を埋め込んだ後、これを引き抜くことによって作製した鋭い切欠き部がある。底面から成長した粗大結晶氷や、種氷から成長した柱状結晶氷がカミソリ刃位置に達したときに、カミソリ刃表面から新たな結晶が成長して刃先付近の結晶構造が乱されると言うことも懸念されるが、断面の偏光写真からみ限り、このような現象は生じないことが確認されている。

実験は -10°C の低温室内で MTS 万能試験機を用い3点曲げ試験によって行なった。試験片形状および寸法については Fig. 1 に示す通りである。

Table I. Specimens.

Specimen type	Production method	Crystal structure	Specimen size
LGI-S	Non-seed	Large grain	Small
LGI-M	Non-seed	Large grain	Medium
CGI-S	Seed	Columnar grain	Small
CGI-M	Seed	Columnar grain	Medium
CGI-L	Seed	Columnar grain	Large

LGI: Large Grained Ice, CGI: Columnar Grained Ice



	L	B	W	a
LGI-S	100	25	25	10
LGI-M	200	50	50	20
CGI-S	200	25	50	20
CGI-M	200	50	50	20
CGI-L	200	200	50	20

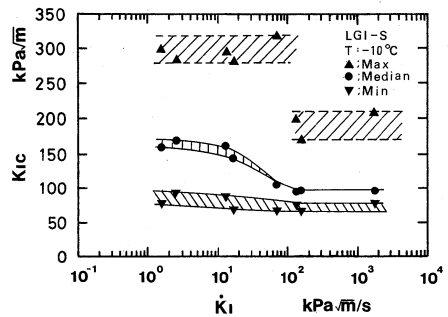
Fig. 1. Dimension of specimens.

3 実験結果および考察

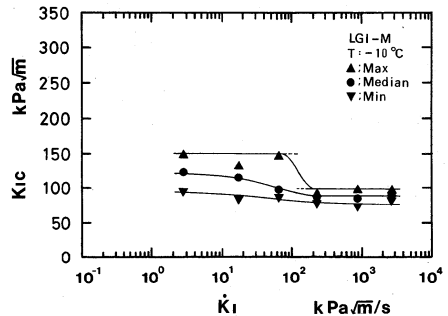
3.1 破壊じん性値の負荷速度依存性

本研究においては各試験片についてクロスヘッド速度を一定として荷重-時間曲線を記録した。荷重-時間曲線は破断に至るまで直線性を保っていた。低負荷速度の場合、ポップインが認められる場合もあったが、これは荷重記録上には現れなかった。

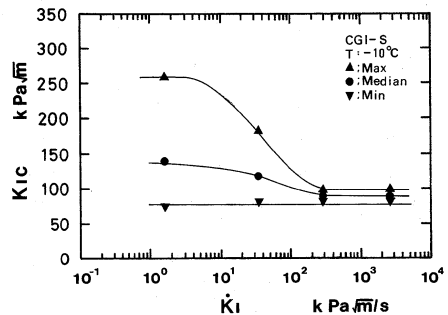
更に、この低負荷速度領域でのき裂の発生、進展のメカニズムについての完全な把握は今のところ行われていないが、本報告では破断荷重(最大荷重)の値から、線形破壊力学的手法により計算した K_I を便宜的に K_{Ic} として取り扱った。なお、ポップインについては1~2個の結晶にわたって、深さ3~4 mm 程度のき裂が入ったままとどまっていることも認められたが、 K_{Ic} の値の計算に際してはこの影響は無視した。



(a) LGI small size specimens (LGI-S).



(b) LGI medium size specimens (LGI-M).



(c) CGI small size specimens (CGI-S).

Fig. 2. Effect of loading rate on K_{Ic} values.

各試験片ごとの K_{Ic} の負荷速度依存性のグラフを Fig. 2(a) ~ Fig. 2(e) に示す. ここでは各負荷速度 \dot{K}_I で測定した K_{Ic} の最大値, 中央値, 最小値をそれぞれ $\blacktriangle \bullet \blacktriangledown$ で示している. すでに述べたように, これらの測定データ K_{Ic} は負荷速度 \dot{K}_I に強く依存している. すなわち, $\dot{K}_I = 10 \sim 100 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ にかけて \dot{K}_I の増加とともに K_{Ic} が急激に減少する遷移領域が存在することが明らかとなっている. このことから, 全負荷速度領域を便宜上 $\dot{K}_I < 10 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ の低負荷速度領域, $\dot{K}_I = 10 \sim 100 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ の遷移領域, $\dot{K}_I > 100 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ の高負荷速度領域の3つの範囲に区分して, 各々の測定データについて調べた. 測定値は Fig. 2からも明らかなように, 低負荷速度領域では大きなバラツキを示すが, 高負荷速度領域ではバラツキも小さく K_{Ic} の値は安定している. また最小値は全負荷速度領域にわたって $K_{Ic} = 70 \sim 100 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}$ 前後に収束していることが分かる. また高負荷速度領域では $K_{Ic} = 70 \sim 80 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}$ の辺りに存在していることが明らかになった.

Fig. 3 に各種試験片の K_{Ic} の負荷速度依存性を, 各々の中央値の分布により示した. この図からも明らかなように, 各試験片に共通して $\dot{K}_I = 10 \sim 100 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ に遷移領域が存在していることが分かる. この遷移領域の存在理由は今のところ明らかではないが, 検討中である. 次に $\dot{K}_I > 100 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ の高負荷速度領域では Fig. 2 で述べたのと同様安定した値を有することが分かる. そして全負荷速度領域を通じて

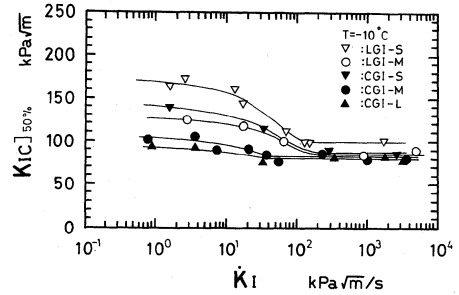


Fig. 3. Effect of loading rate on median K_{Ic} values for various type specimens.

同一結晶構成であれば, 試験片寸法の大きいものほど, K_{Ic} は低いプロフィールを描き, また全体の変化の割合も小さいことが分かった.

3・2 3母数ワイブル分布の母数推定

氷の破壊じん性値の分布が3母数ワイブル分布でよく表されると考えて, それらの各母数の推定を行なった. 3母数の推定法として色々な手法が提案されており, これらについては田中らによってまとめられている. 今回筆者らは田中らによる母数推定法を利用して ① 2母数ワイブル分布に対する最小自乗法, ② 最適直線配置法, ③ 相関係数法, ④ 逐次近似最小自乗法, ⑤ 最尤法による推定を行なった.

すなわち, 3母数ワイブル分布の分布関数として

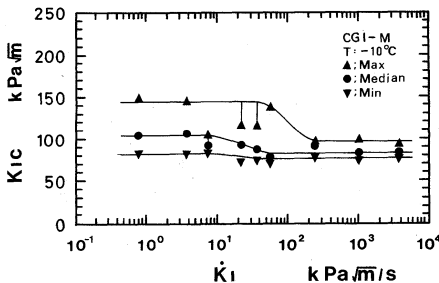
$$F(x) = 1 - \exp[-(x-c)/b]^a \quad (1)$$

を与える. ここで $\ln(x-c) = X$, $\ln \ln[1/(1-F(x))] = Y$ とおくと式(1)は

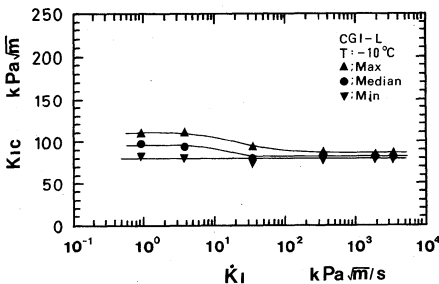
$$X = Y/a + \ln b \quad (2)$$

となる. また n 個の標本 X_i に対して2次元格子点 (X_i, Y_i) が決定される. ここで $c=0$ の時, 式(2)と格子点 (X_i, Y_i) との残差自乗和 Q が最小になるようにして2母数を決定する方法を ① 2母数ワイブル分布に対する最小自乗法という. また残差自乗和 Q に関係している相関係数を最大にするような位置母数 c を決めてから, 線形回帰を行ない, 形状母数 a , 尺度母数 b を決定する手法を ③ 相関係数法とする. また格子点 (X_i, Y_i) の直線性のみを考慮して, 最良の直線性を与える位置母数 c を決定した後 a, b を最小自乗法で求める方法が ② 最適直線配置法である. ④ 逐次近似最小自乗法は, 位置母数として実測値の最小値 X_{\min} から出発して行き, 真の位置母数の値 c との差を許容値以下にするように, 逐次近似して, この最良値 c から, 他の a, b を求めるものである. 最後に ⑤ 最尤法による母数推定法はもっとも馴染みのある手法の一つで, 尤度関数

$$L = C \prod_{i=1}^n f(x_i) \\ = C \prod_{i=1}^n a/b |x_i - c|/b|^{a-1} \exp[-(x_i - c)/b]^a \quad (3)$$



(d) CGI medium size specimens (CGI-M).



(e) CGI large size specimens (CGI-L).

Fig. 2. Effect of loading rate on K_{Ic} values.

Table II. Weibull parameters of LGI-S specimen.

\dot{K}_I kPa \sqrt{m}/s	K_{Ic} kPa \sqrt{m}				COV %	Weibull Parameter			T. P. size	
	mean	max	min	F (50 %)			a	b		c
<10	176.5	292.8	79.0	164.3	31.4	①	3.91	193.7	0.0	60
						②	2.56	140.0	51.5	
						③	2.23	128.2	62.6	
						④	2.17	129.3	62.4	
						⑤	1.98	116.9	72.3	
10~100	147.6	303.7	66.5	130.1	37.9	①	3.62	161.4	0.0	95
						②	1.78	96.6	60.3	
						③	1.76	96.0	60.8	
						④	1.69	97.1	60.9	
						⑤	1.54	91.8	65.1	
>100	102.8	206.7	69.3	95.3	25.3	①	6.23	109.6	0.0	97
						②	1.67	37.9	68.1	
						③	1.73	38.4	67.6	
						④	1.64	38.9	67.7	
						⑤	1.42	37.4	69.0	

を与え、これから3元連立方程式を導出し、これを解くことにより、最尤推定値 a, b, c を求めるものである。ここで C は定数である。

母数推定の典型例として LGI-S の場合を Table II に示す。負荷速度の値は $\dot{K}_I < 10$ kPa \sqrt{m}/s の低負荷速度領域、 $\dot{K}_I = 10 \sim 100$ kPa \sqrt{m}/s の遷移領域、 $\dot{K}_I > 100$ kPa \sqrt{m}/s の高負荷速度領域の3つの領域に分割して、それぞれの平均値を示している。また K_{Ic} については平均値、最大値、最小値、中央値を与えている。ここで C. O. V. は変動係数を表している。ワイブル分布の3つの母数はそれぞれ、 a は形状母数、 b は尺度母数、 c は位置母数で表した。最後に T. P. size は用いたデータのサンプル数（ある負荷速度条件におけるデータ数）を示す。①の2母数ワイブル分布に対する最小自乗法では $c=0$ となっており、全体を一直線で近似するものである。LGI-S の場合②以下 a, b, c とも母数推定法による差は顕著ではなく、ほぼ一致していると見なしてよい。

Table III. Weibull parameters of various type specimens by the correlation coefficient method.

	$\dot{K}_I < 10$ kPa \sqrt{m}/s			$\dot{K}_I = 10 \sim 100$ kPa \sqrt{m}/s			$\dot{K}_I > 100$ kPa \sqrt{m}/s		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
LGI-S	2.23	128.2	62.6	1.76	96.0	60.8	1.73	38.4	67.6
LGI-M	6.81	132.2	0.0	1.58	33.9	78.1	4.80	37.0	54.3
CGI-S	2.11	127.6	43.8	1.17	44.7	78.2	1.51	9.3	80.7
CGI-M	0.91	21.6	80.7	1.20	20.3	69.8	2.77	19.6	68.3
CGI-L	3.31	34.1	63.9	0.80	8.3	73.0	11.6	28.4	55.0

次に LGI-S に関して低負荷速度領域と高負荷速度領域において、各種母数推定法から得られた理論分布と実測値を Fig. 4 (a), (b) にそれぞれ比較したものを示す。①2母数ワイブル分布に対する最小自乗法以外は実測データとよく一致しているものと思われる。

図表には示していないが他の試験片による結果も大略同じである。しかし①②③で $c=0$ になるが④⑤では0にならないと言った場合など（例えば LGI-M の低負荷速度の場合など）、試験片本数の多少に係わるのではないかと思われるものも存在する。

以上の結果から、これらの各

種推定法の内では、②最適直線配置法、③相関係数法、④逐次近似最小自乗法、⑤最尤法が比較的似通った値をとり、また実測値ともよく一致していることが明らかとなった。また参考のため Table III に相関係数法で得られた各種試験片およびそれぞれの負荷速度領域でのワイブルパラメータの値を示した。

3・3 適合度の検定

現在までに得られた破壊じん性値に対して JSME 基準その他でよく利用されているカイ平方適合度検定を適用した。

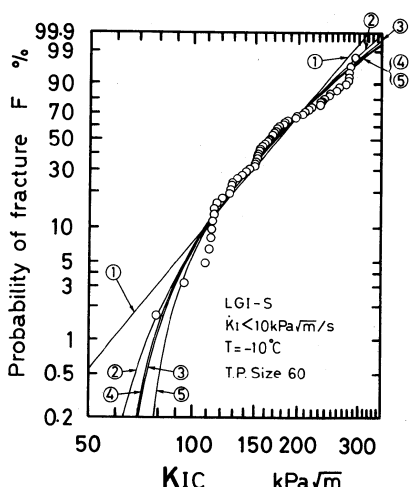
ここで理論分布として3母数ワイブル分布を仮定する。本報告においては、標本空間を5つの階級に分割し、各階級における母集団の確率 $p_j (j=1, 2, \dots, 5)$ を等しくした。すなわち、階級の境界値を小さい順番に x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 とおくと

$$p_j = F(x_j) - F(x_{j-1}) = 0.2 \quad (j=1, 2, 3, 4, 5) \tag{4}$$

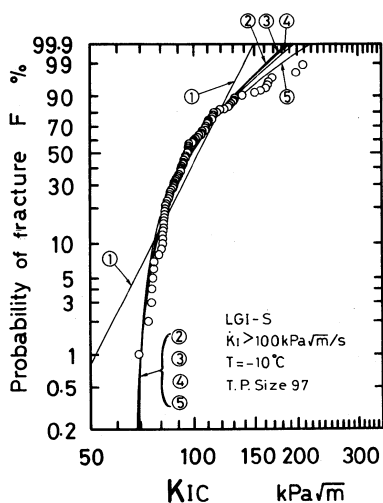
となる。ただし、 $x_0=0, x_5=\infty$ である。適合度の検定のために求めなければならないカイ平方 χ^2_0 は

$$\chi^2_0 = \sum (O_j - E_j)^2 / E_j \tag{5}$$

で表される。ここで E_j は観測数の期待値で、 $E_j = np_j = 0.2n$ 。また O_j は各区分における実際の観測数である。 $F(x)$ を r 個の母数で表したとし、また有意水準の値を α とする。このとき式(5)のカイ平方 χ^2_0 の値を自由度 $\phi = k - r - 1$ (k は階



(a) Lower loading rate range ($\dot{K}_I < 10 \text{ kPa}\sqrt{\text{m/s}}$).



(b) Higher loading rate range ($\dot{K}_I > 100 \text{ kPa}\sqrt{\text{m/s}}$).

Fig. 4. Comparison of the estimated Weibull distribution curves with the experimental results for LGI-S specimen.

級の数)の $\chi^2(\phi, \alpha)$ と比較して

$$\chi_0^2 < \chi^2(k-r-1, \alpha) \quad (6)$$

であれば、得られた測定データは仮定した3母数ワイブル分布の母集団から抽出された標本であると言う仮説は正しいとして受け入れることにする。今回筆者ら

が採用したパラメータは $k=5, r=3$, としたので自由度は $\phi=1$ となる。なお、有意水準 $\alpha=0.05, \alpha=0.01$ に対してカイ平方の値は $\chi^2(1, 0.05)=3.84, \chi^2(1, 0.01)=6.63$ とする基準値を与える。

カイ平方適合度検定については Table IV に式 (6) の条件を 5% の有意差の下で満たすものに○印を付けておいた。またここでは示していないが χ^2 検定の結果有意差 1% の場合①を除いてすべて適合していることが明らかとなった。しかしながら有意差 5% になると全てに共通して適合しているような推定法は見あたらず、唯一絶対的な推定法というのは考えられないことが分かった。しかしながらこれらの内では、②最適直線配置法、③相関係数法、④逐次近似最小自乗法、⑤最尤法は① 2母数ワイブル分布に対する最小自乗法と違って、互いによく一致した値をとることが分かった。また LGI-S, LGI-M よりも CGI-S, CGI-M, CGI-L の場合の方が適合度を満たしている場合が多かった例も見られるが、これらはサンプル数の大きさにもよると考えられる。この点については期待値が小さいときのカイ平方検定の有効性などについても議論されており、今後の検討課題である。

3・4 各母数の負荷速度依存性

材料はそもそも、ある限度以下では必ず破壊しないという固有の強度を有しているものと考えられる。材料の強度分布を例えば3母数ワイブル分布に従うとした場合、この固有の最低限の強度というものが、位置母数と考えられるのである。しかしながら、位置母数を含む3母数ワイブル分布の母数推定の困難さから、一般には位置母数を無視した、2母数ワイブル分布によるデータ処理が行われている。しかし、2母数ワイブル分布においては、サンプルによりワイブル確率紙上で一直線で与えられる単一ワイブル分布で表されたり、2直線で近似されるような複合型ワイブル分布で表されたりと、サンプルによって首尾一貫性がなく、氷の破壊のメカニズムを明らかにするには一定の限界が考えられた。しかしながら、これらが3母数ワイブル分布に従うと考えると、滑らかな曲線で表現することができることが分かった。すなわち、本研究で得られた5種類の試験片の大部分はこのような曲線で代表

Table IV. Results of the χ^2 test for various type specimens.

	$\dot{K}_I < 10 \text{ kPa}\sqrt{\text{m/s}}$					$\dot{K}_I = 10 \sim 100 \text{ kPa}\sqrt{\text{m/s}}$					$\dot{K}_I > 100 \text{ kPa}\sqrt{\text{m/s}}$				
	①	②	③	④	⑤	①	②	③	④	⑤	①	②	③	④	⑤
LGI-S		○	○		○				○	○		○	○	○	
LGI-M	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
CGI-S	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○
CGI-M		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
CGI-L	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○

されることが確認された。

まず実例として, LGI-S について検討してみる。Fig. 5 (a) に示す様に, 2 母数ワイブル分布で考察した場合には ① 2 母数ワイブル分布に対する最小自乗法による方法で得られるように, 形状母数 a は単調に増加傾向を示す。しかしながら位置母数 c を導入することによって, ②~⑤ の推定法によるとパラツキを表す形状母数 a は $\dot{K}_I=10\sim 100 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ の遷移領域の範囲で明確な減少傾向を示し, 低負荷速度および高負荷速度領域では明確な変化を示さずほぼ一定のプロフィールを描くことが分かった。

次に尺度母数 b の負荷速度依存性を Fig. 5 (b) に示した。① と ②~⑤ との差から明らかなように, 尺度母数 b は位置母数 c の導入によって位置母数 c の値だけ減少方向にシフトしていることが分かる。また 2 母数の場合と同様に負荷速度の増加につれて, プロフィールは減少している様子が示されており, 特に $\dot{K}_I=10\sim 100 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ にかけて遷移領域も見られ, 高負荷速度領域においてほぼ一定値をとる。

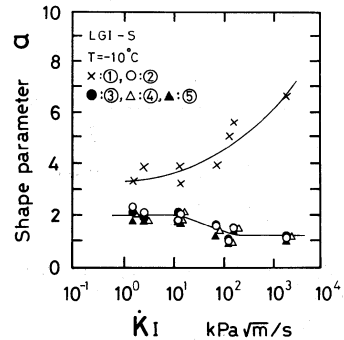
最後に, Fig. 5 (c) に示したように, 位置母数 c に関して ① はすべて 0 という値をとっているが, ②~⑤ の各推定法に関しては $\dot{K}_I < 100 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ においてパラツキが大きいにも係わらず, 高負荷速度領域でパラツキが収束していることが分かる。

また高負荷速度領域においてのみ着目すると, 位置母数 c に関しては ① の 2 母数ワイブル分布に対する最小自乗法では 0 であるが, ② ③ ④ ⑤ とほぼ一致し $60\sim 80 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}$ に収束している。更に全体を通して, 平均として $c=70\sim 80 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}$ に分布していることも分かる。

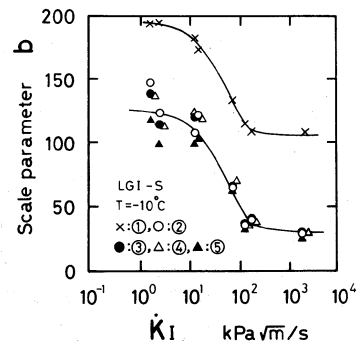
次に, 3 母数ワイブル分布で考えた場合の各パラメータの変化を ③ 相関係数法により各種試験片ごとにプロットしたものを Fig. 6 (a)(b)(c) に示した。ここでは先に LGI-S の場合において検討したこととほぼ同じ様な傾向が見受けられる。Fig. 6 (a) では形状母数 a を示している。ここではパラツキもあり, 一定の傾向はつかみきれないが, 形状母数は負荷速度の高低に係わらず測定値の大部分が $a=1\sim 2$ の付近のバンド内にあることが分かる。また試験片の種類による差異は今回の場合認められなかった。ここで図の右上に示したように, CGI-M, CGI-L については得られた形状母数の値が大きく, 図面内に入らなかったためその値の数値を記した。

Fig. 6 (b) は Fig. 5 (b) と同じ様に尺度母数を示している。またプロフィールも同様な傾向を示しており, $\dot{K}_I=10\sim 100 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ に遷移領域が見られる。そして, この遷移領域を越す高負荷速度領域においては $b=10\sim 20 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}$ の値を得ることが分かった。

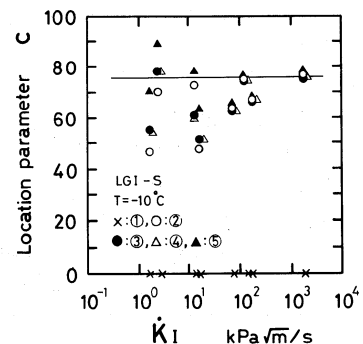
更に, 尺度母数の大きさに関して, LGI-S $>$ LGI-M $>$ CGI-S $>$ CGI-M $>$ CGI-L という傾向が見られた。また LGI-S と LGI-M, あるいは CGI-S, CGI-M, と CGI-L の関係から試験片寸法の大きいものが, また LGI-S, CGI-S および LGI-M, CGI-M の関係から, 切欠き底にある結晶粒子数が多いものほど尺度母数が減少しており, このことは切欠き底にある結晶粒子数の相対増が, 破壊の確率を高めているも



(a) Shape parameter a.



(b) Scale parameter b.



(c) Location parameter c.

Fig. 5. Effect of loading rate on Weibull parameters for LGI-S specimen.

×=①: least square method, ○=②: optimum linear configuration method, ●=③: correlation coefficient method, △=④: iterative least squares method, ▲=⑤: maximum likelihood method.

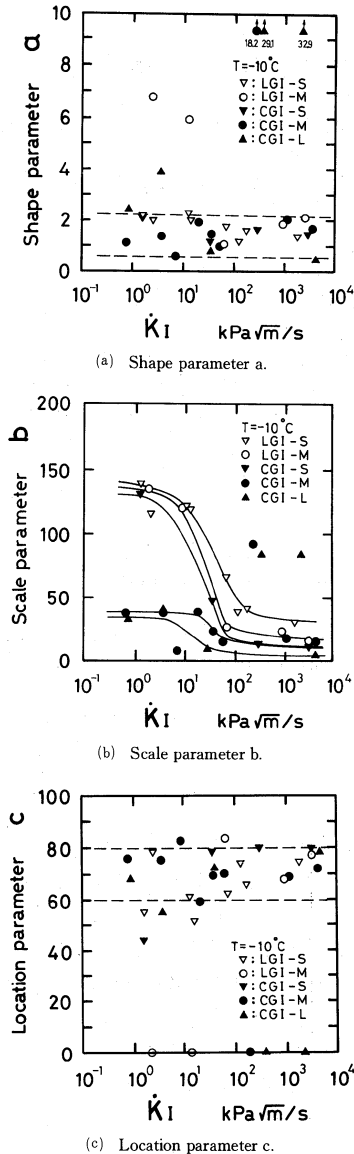


Fig. 6. Effect of loading rate on Weibull parameters for various type specimens by the correlation coefficient method.

のと思われる。

位置母数に関しても、Fig. 6(c)に示すように、試験片の種類によらず、また負荷速度にもよらず、ある一定の傾向と言うものはみられないが、 $c=60\sim 80$ $\text{kPa}\sqrt{\text{m}}$ 付近のバンドに収束していることが確認される。この値は $3\cdot 1$ 節で明らかとなった破壊じん性値 K_{Ic} の下限値の分布の値によく似ており、何等かの関係の存在を示唆しているものと思われる。

4 結 論

鋭い切欠きを持った粗大結晶粒氷 (LGI)、柱状多結晶氷 (CGI) 試験片を製作し、各々2~3種の試験

片寸法に仕上げ、試験温度 -10°C において曲げ試験による破壊じん性値のワイブル分布を調べ、3母数を推定した。母数推定に当り、いくつかの推定法を適用して以下のような知見を得た。

(1) 破壊じん性値 K_{Ic} は $\dot{K}_I=10\sim 100$ $\text{kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ に遷移領域があること、 $\dot{K}_I>100$ $\text{kPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ では安定した値を有することが分かった。

(2) 全負荷速度を通じて同一結晶構成であれば、試験片寸法の大きいものほど小さい値を取ることが分かった。

(3) 3母数ワイブル分布の母数推定法としては① 2母数ワイブル分布に対する最小自乗法、② 最適直線配置法、③ 相関係数法、④ 逐次近似最小自乗法、⑤ 最尤法を行ない、②~⑤の値がほぼ一致した。

(4) 試験片寸法に係わらず、低負荷速度領域と高負荷速度領域において形状母数 a 、位置母数 c には変化の兆候は見られず、 $a=1\sim 2$ のバンド付近に、 $c=60\sim 80$ のバンド付近に存在し、尺度母数 b は負荷速度、試験片寸法の増加とともに減少する傾向が見られ、高負荷速度領域では $b=10\sim 20$ の値を有していることが分かった。

(5) 位置母数 c と破壊じん性値の下限値は何等かの関係のあるものと考えられる。

最後に本研究の実施に当たって、熱心に研究に協力された長崎大学工学部梶聖悟技官に心から謝意を表する次第である。

(昭和63年5月26日 日本材料学会第37期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) L. W. Gold, Canadian Journal of Physics, **41**, 1712 (1963).
- 2) L. W. Gold, Journal of Glaciology, **19**, 197 (1977).
- 3) D. J. Goodman, Physics and Mechanics of Ice, ed. by P. Tryde, p. 129 (1979) Springer-verlag.
- 4) D. J. Goodman and D. Tabor, Journal of Glaciology, **21**, 651 (1987).
- 5) H. Hamza and D. B. Muggeridge, POCA 79, Proc. 1, p. 697 (1978).
- 6) H. W. Liu and K. J. Miller, Journal of Glaciology, **22**, 135 (1979).
- 7) 浦辺浪夫, 鉄と鋼, **67**, 7 (1981).
- 8) N. Urabe, T. Iwasaki and A. Yoshitake, Cold Regions Science and Technology, **3**, 29 (1980).
- 9) 楠本 韶, 木村宣夫, 内田 武, 高瀬 徹, 材料, **35**, 659 (1986).
- 10) 楠本 韶, 木村宣夫, 高瀬 徹, 木寺 享, 材料, **35**, 887 (1986).
- 11) 田中道七, 酒井達雄, 材料, **28**, 13 (1979).
- 12) 酒井達雄, 田中道七, 材料, **29**, 17 (1980).
- 13) 日本機械学会, JSMES 002-1981 “統計的疲労試験方法”, p. 86 (1981) 日本機械学会.
- 14) 岡村弘之, 板垣 浩, “強度の統計的取り扱い”, p. 48 (1976) 培風館.
- 15) G. W. Snedecor and W. G. Cochran, “統計的方法”, p. 508 (1982) 岩波書店.