

柱状多結晶氷のアコースティック・エミッションに関する研究

内田 武* 橋口 正**
 楠本 韶*** 越智 利彦***
 梶 聖 悟***

Research of Acoustic Emission from Columnar Grained Ice

by

Takeshi UCHIDA*, Tadashi HASHIGUCHI**, Sho KUSUMOTO***
 Toshihiko OCHI*** and Seigo KAJI***

Abstract

Acoustic emission (AE) from the columnar grained ice specimen subjected to the bending load was examined. Two types of specimen, plain and sharply notched, were used. Three point bending tests were conducted at -5°C . The AE transducer was attached to the specimen by pouring a bit of water between the surface of the AE transducer and that of the specimen, which froze into ice and fixed the AE transducer to the specimen. Two different levels of threshold, 25mV and 125mV, were set for "average signal" of AE and the signals which exceeded these levels were counted. The number of thus counted AE signals are expressed as N_{25} and N_{125} , respectively.

The results of this study are as follows;

- (1) In the bending tests of plain specimen the values of N_{25f} and N_{125f} , which expressed the total number of N_{25} and N_{125} until the fracture of the individual specimen, showed a considerable scatter. The scatter decreased as the loading rate increased.
- (2) The calculated value of σ_{AES} , which expressed the stress where AE started, was 0.2~0.4 MPa under low loading rate and 0.1~0.4 MPa under high loading rate.
- (3) In the bending tests of sharply notched specimen, the count of AE signal was less than that of plain specimen.
- (4) The pop-in will be detected by AE.
- (5) The Kaiser effect on AE was observed in the reloading, when the pause time was zero, and it vanished when the pause time was over about three minutes.

1. 緒言

北極圏、寒冷地などでの資源開発に関連して、砕氷船や海洋構造物と海水との相互作用が重要となり、氷の力学的性質を明確にしたいという要求が高まってきている。そこで近年、天然氷の結晶条件を模倣して製

造した人工氷について盛んに検討されるようになってきた。ところが、これまで行われてきた氷の研究では、氷の変形や強度に関するものが多く、氷の破壊挙動に関する研究は比較的少ないように思われる。また、筆者らのこれまでの研究により、氷においても最終破

昭和62年4月30日 受理

*機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

**三菱電機株, 名古屋製作所 (Mitsubishi Electric Co., Nagoya Works)

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

断以前に部分的な破壊（ポップ・イン）が起こることがわかってきたが、それはほとんどが目視による観察に頼っていたため、かなり低負荷速度領域での議論にとどまっていた。そこで、本研究では金属やセラミックス材などで材料評価に用いられ、変形・破壊挙動を知る有力な手法となっているアコースティック・エミッション法（以下AE法）を取り入れ、それにより、ポップ・インをAEとして捕らえ、より高負荷速度領域での議論に拡張することを試みた。

AEは、物体内に貯えられた歪エネルギーの一部が弾性波となって放出される現象であり、応力拡大係数などとよい相関を持つものである。

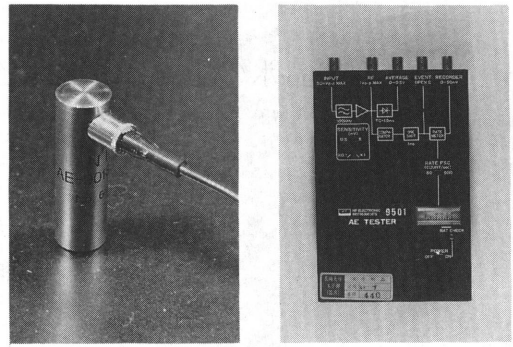
これまで、氷の強度や破壊挙動に対するAEの研究は少ないように思われる。そこで、本研究では、まず基礎実験として、柱状多結晶氷の試験片を用いて試験温度 -5°C で3点曲げを行い、曲げ強さおよび破壊じん性の測定を行い、負荷速度がAE特性に及ぼす影響を調べた。さらに、AE特性と強度、破断面、ポップ・インとの関係およびカイザー効果について検討を加えた。

2. 試験方法

2.1 氷試験片

柱状多結晶氷（Columnar Grained Ice, 以下C. G. I.）の製造は、フリーザ内温度を -20°C 、上面ヒータ電圧を35Wとして先報²⁾に準じ容器の底面から上向きに約35時間をかけて凍結させた。

試験片寸法は、曲げ強さ試験では厚さ $25\times$ 幅 $50\times$ 長さ 250mm 、破壊じん性試験では厚さ $50\times$ 幅 $50\times$ 長さ 250mm である。破壊じん性試験用の試験片は、中央部に厚さ 0.1mm 、先端角 11° のカミソリ刃を切欠き深さ 20mm になるように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



(a) AE sensor

(b) AE tester

Fig. 1 AE sensor and AE tester

有している。得られた試験片の結晶粒径は、成長始めて 5mm 、切欠き底で 10mm 、成長終わりで 12mm となった。

成形された氷試験片は、直接空気に触れることによる昇華変形を防止残留応力の影響を除去するため、試験温度 -5°C の灯油中に一昼夜以上保存した。

2.2 AE測定

AE測定には、 140kHz 付近に共振点を持つPZT（ジルコン酸チタン酸鉛磁器、 $(\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ ）を圧電素子とするAEセンサ（NF社製、AE-901S-OP）を用いてAE信号を検出し、AEテスタ（NF社製、9501）で処理した。Fig. 1 (a), (b)に今回使用したAEセンサとAEテスタを示す。AEセンサで検出された信号は、Fig. 2に示すブロック図の様に信号が処理されてRF信号、Average信号、Event信号、Recorder信号の4信号となって出力される。以下に、それらについて簡単に説明する。

RF信号は、Fig. 3 (a)のような波形で、 100kHz のHPF（ハイ・パス・フィルタ）を経て増幅された信号である。今回の試験では、AEテスタは最大感度で使用しており、INPUTからRF信号までの総合利得

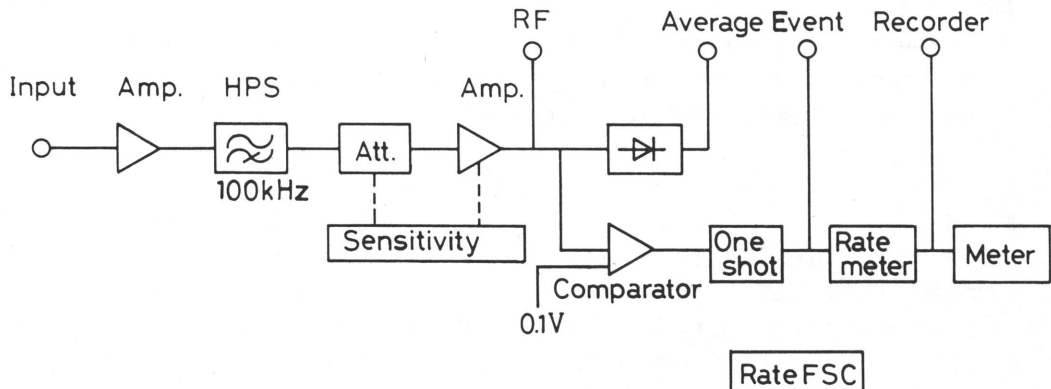


Fig. 2 Block diagram of AE tester

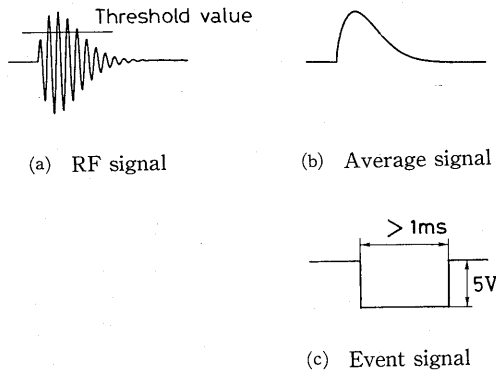


Fig. 3 Output signal from AE tester

を約66dBとしている。

Average 信号は、Fig. 3(b)のような波形で、RF 信号を半波整流した直流（脈流）が出力される。なお、Fig. 4 には、AE テスタに正弦波を入力した時の Average 信号の出力電圧と RF 信号の出力電圧（実効値）との関係を示す。ただし、検波回路の時定数は立ち上りと立ち下がりで異なり、それぞれ約 1 ms、約 1.5ms である。Average 信号は、連続型 AE の場合にはエネルギーを表す重要な AE 特性パラメータであるが、氷の場合のように突発型 AE の場合ではその値の意味するものが不明確である。

Event 信号は、Fig. 3(c)のような波形で、AE 検出レベル設定値（しきい値）を越える AE が検出されると 1 ms 以上の負のパルスが出力される。今回は、このしきい値を 0.05mV に設定している。このパルスを計数したものが AE 発生総数であり、その計数法はイベント計数法の中の休止時間法³⁾に属する。また、AE 振幅の評価には Average 信号も用いているので、このしきい値を Average 信号に換算した値約 25mV を評価基準とした。

Recorder 信号には、しきい値を越える AE のイベント発生率が出力される。

2. 3 試験方法

試験は、低温室に設置された MTS 万能試験機（MTS 社製、容量 10ton）を利用し、試験温度 -5°C 、支点間距離 200mm で 3 点曲げにより曲げ強さおよび破壊じん性の測定を行った。Fig. 5 に計測システムのブロック図を示す。荷重は自作したバネ鋼製のロードセル ($k = 1.571 \times 10^{-1} \text{kgf}/\mu\text{st}$) で検出し、動歪計（三栄測器製、6 M61）で増幅した。荷重信号および AE テスタからの Average 信号と Event 信号を、データレコーダ（TEAC 製、MR-30）に記録した。オシロスコープ（National 製、VP-5230A/S）には予荷重を調節するために荷重信号と、AE 信号の波形を観察す

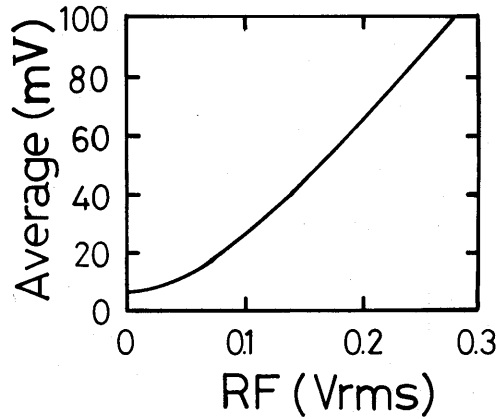


Fig. 4 Relationship of Average signal vs. RF signal

るために RF 信号を接続した。アナライジングレコーダ（横河北辰電機製、Model 3655）には試験負荷速度を監視するために荷重信号と、破壊じん性試験の低負荷速度においては、ポップ・イン発生時のスイッチング⁴⁾も接続した。

データレコーダに記録した荷重信号、Average 信号、Event 信号は、試験後アナライジングレコーダに再生した。その際、アナライジングレコーダのサンプリングタイムは 2 ms とし、Event 信号は 256 カウント毎にリセットする自作のカウンタを用いて計数した。

AE センサは、試験片の上部支点から 60mm 離れた試験片厚さの中心に 0°C の水を接着剤として取付けた。この時、試験片に必要以上の力が加わらないように注意する必要がある。AE センサと AE テスタ間のケー

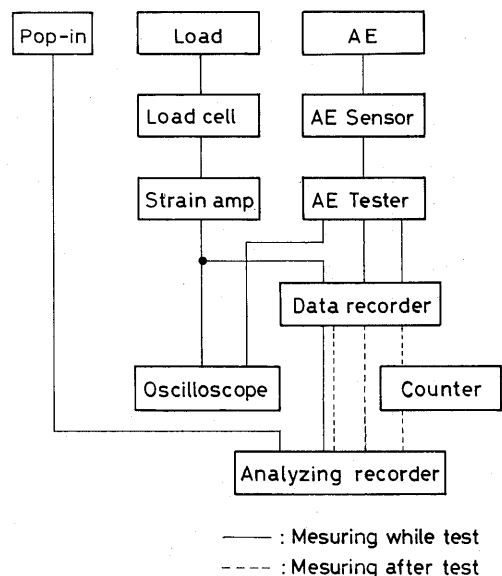


Fig. 5 Block diagram of measuring system

プルはあまり長くすると雑音が入りやすくなるため1 m以内とし、AEテストは-5°Cの低温室に設置した。その際AEテストは発泡スチロール製の箱にヒータと一緒に入れ、箱の内部温度が20°Cとなるようにヒータ電圧を調整した。また、試験機の振動、試験片と試験装置とのこすれ、治具のガタによるAEを防止するため、支点と試験片の間にエグザフレックス（而至歯科工業製）で製作した吸振シートを挿入し、予荷重をかけたあと試験を行った。

試験後、エグザフレックスを用いて破断面のマクロなレプリカを採取し、破断面観察を行った。破壊じん性試験に使用した試験片は、破断面のレプリカ採取後、切欠き直下部分の薄片を作り、ユニバーサルステージを用いてC軸方位を測定した^{9), 7)}。

今回行った試験の強度を評価するに当たり、曲げ強さ試験においては曲げ応力 σ 、破壊じん性試験においては応力拡大係数 K_{Ic} を用い、それぞれ次式によって求めた^{9), 9)}。

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \tag{1}$$

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(a/h) \tag{2}$$

ここで、

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

$$A_0 = 1.090, A_1 = -1.735, A_2 = 8.20,$$

$$A_3 = -14.18, A_4 = 14.57$$

(L/h = 4 の場合)

ただし、Pは荷重、aは切欠き深さ、bは試験片厚さ、hは試験片高さ、Lは支点間距離である。

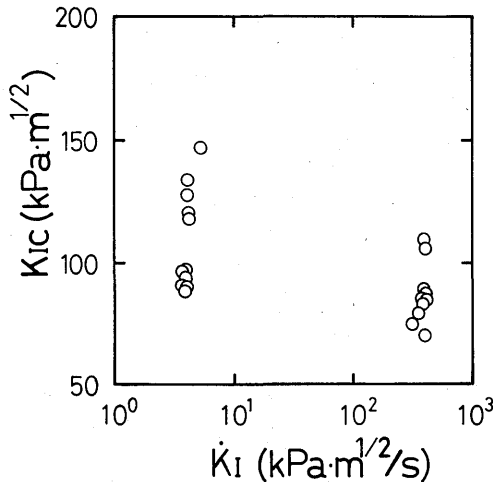


Fig. 6 Relationship of fracture toughness K_{Ic} vs. loading rate K_I

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、便宜的に応力拡大係数を用いて処理している。

3. 試験結果および考察

3.1 概要

Fig. 6, Fig. 7にそれぞれ曲げ強さ試験と破壊じん性試験の結果を強度と負荷速度との関係で示す。

破壊じん性試験は、負荷速度 K_I が $4.2 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ および $390 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ の二か所で行い、それぞれを破壊じん性試験での低負荷速度および高負荷速度と呼ぶことにする。曲げ強さ試験において、通常の試験は Fig. 7に白抜き印で示した負荷速度 $\dot{\sigma}$ が $7.5 \times 10^{-2} \text{ MPa/s}$ および $7.5 \times 10^{-1} \text{ MPa/s}$ の二か所で行い、それぞれを曲げ強さ試験での低負荷速度および高負荷速度と呼ぶことにする。また、カイザー効果を調べるため、 $\dot{\sigma} = 1.1 \times 10^{-1} \text{ MPa/s}$ 付近において黒塗り印で示したように3種の繰り返し荷重をかけて破断させる試験を行った。

通常の曲げ強さ試験の結果は、破壊じん性試験と同様に低負荷速度でバラツキが大きく、高負荷速度ではバラツキが小さくなり、下限値は負荷速度にほとんど影響を受けないことがわかる。

Fig. 8(a), (b)および Fig. 9(a), (b)にそれぞれ曲げ強さ試験および破壊じん性試験での低負荷速度と高負荷速度の計測結果の例を示す。

曲げ強さ試験では25mV以上のAE発生数 N_{25} は、荷重が増加すると共に滑らかに指数関数的に増加するのに対して、破壊じん性試験では発生数自身が少なく

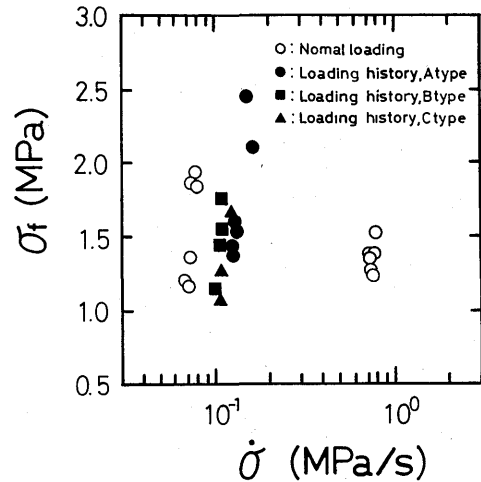


Fig. 7 Relationship of fracture stress σ_f vs. loading rate $\dot{\sigma}$; bending test of plain specimen

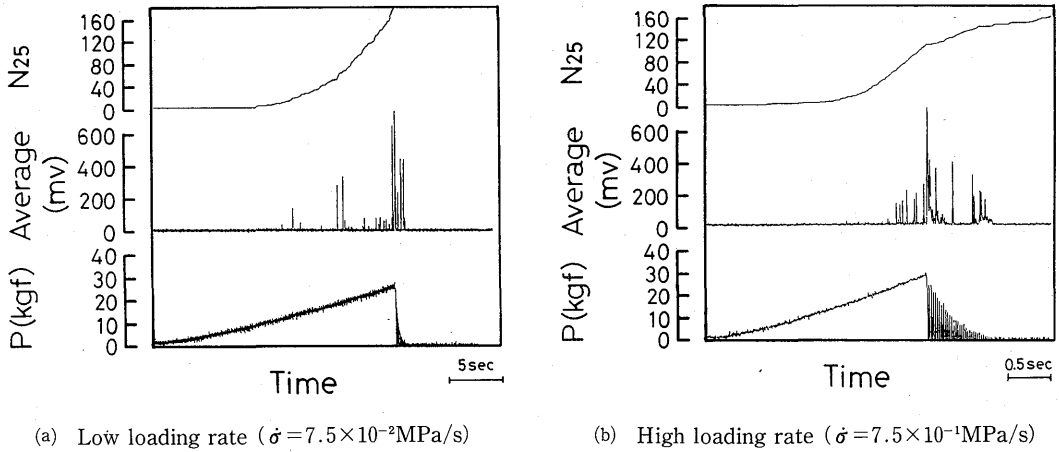


Fig. 8 Example of the recorded AE signal and load; bending test of plain specimen

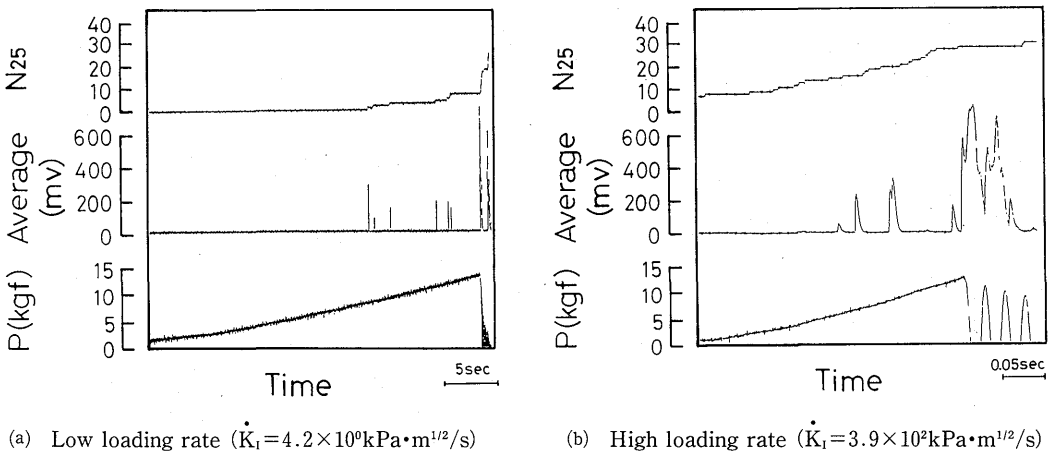


Fig. 9 Example of the recorded AE signal and load; fracture toughness test

増加が不連続で階段状のAE特性となっている。これは、破壊じん性試験では応力が切欠き底に集中して限られた領域からAEが発生するのにに対し、曲げ強さ試験では比較的広範囲からAEが発生しているためだと推測される。

Average信号で観察される様な大振幅AEは、試験方法、負荷速度によらず破断荷重の中ごろから突発的に発生している。ところが、まれに低負荷速度で荷重初期段階からかなり大きなAEが検出される事があった。これは、雑音の可能性があり考慮すべき点である。

以下、AE発生数が少なくその処理が困難な破壊じん性試験でのAEの結果は3.4節、3.5節で述べ、その他の節では曲げ強さ試験でのAEの結果を述べる。

3.2 AE発生総数

Table 1(a), (b)は曲げ強さ試験の結果を示す。Fig. 10

は破断までに発生する25mVおよび125mV以上のAE発生総数 N_{25f} , N_{125f} と負荷速度 $\dot{\sigma}$ の関係を示しており、最大値、最小値、平均値を記している。

この図より、 N_{25f} および N_{125f} のパラツキを見ると、低負荷速度では大きく、高負荷速度では小さくなる。また、平均値を見ると、小振幅AE (N_{25f}) は負荷速度の影響を受けるが、大振幅AE (N_{125f}) は負荷速度の影響をあまり受けないことがわかる。また、Table 1(a), (b)に示した N_{25f} に占める N_{125f} の割合 N_{125f}/N_{25f} の値を見ると、低負荷速度では例外として一つ大きい値があるのでそれを除外して平均すると3.0%、高負荷速度では7.7%となり高負荷速度では低負荷速度の約2.5倍になっている。

Fig. 11は、縦軸に破断応力 σ_f 、横軸に N_{25f} を取ったもので、この図より低負荷速度では、 σ_f が高くなること

Table 1 (a) Data of bending tests in low loading rate; plain specimen

T. P. No.	σ_f MPa	$\dot{\sigma}$ MPa/s	N_{25f}	N_{125f}	a	b	σ_{AES} MPa
401	1.83	8.1×10^{-2}	318	13 (4.1)	4.12	30.3	0.44
402	1.20	6.8×10^{-2}	177	4 (2.3)	3.71	92.5	0.30
403	1.93	7.9×10^{-2}	726	34 (4.7)	3.02	115	0.21
404	1.16	7.2×10^{-2}	104	2 (1.9)	3.19	63.1	0.27
405	1.86	7.4×10^{-2}	106	2 (1.9)	3.10	14.0	0.43
406	1.36	7.4×10^{-2}	46	4 (8.7)	2.44	21.6	0.28

Note; number in parentheses expresses the ratio N_{125f}/N_{25f}

Table 1 (b) Data of bending tests in high loading rate; plain specimen

T. P. No.	σ_f MPa	$\dot{\sigma}$ MPa/s	N_{25f}	N_{125f}	a	b	σ_{AES} MPa
501	1.26	7.4×10^{-1}	126	11 (8.7)	2.58	81.0	0.18
502	1.38	7.7×10^{-1}	136	11 (8.1)	2.79	74.1	0.21
503	1.24	7.6×10^{-1}	143	9 (6.3)	1.97	88.6	0.10
504	1.36	7.3×10^{-1}	108	4 (3.7)	3.81	35.8	0.39
505	1.38	7.2×10^{-1}	139	14 (10.1)	2.30	76.7	0.15
506	1.53	7.9×10^{-1}	84	8 (9.5)	3.39	21.8	0.40

Note; number in parentheses expresses the ratio N_{125f}/N_{25f}

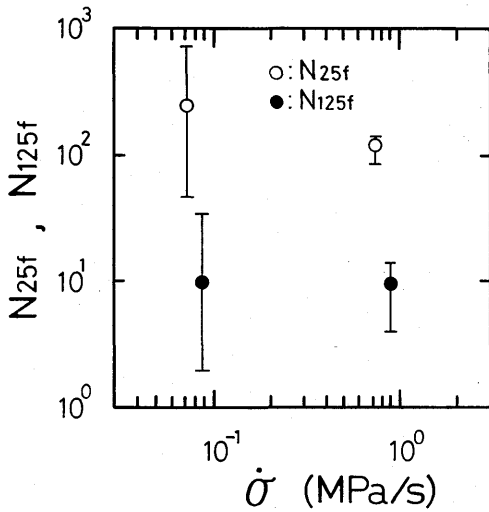


Fig. 10 Relationship of N_{25f} , N_{125f} vs. loading rate $\dot{\sigma}$; bending test of plain specimen

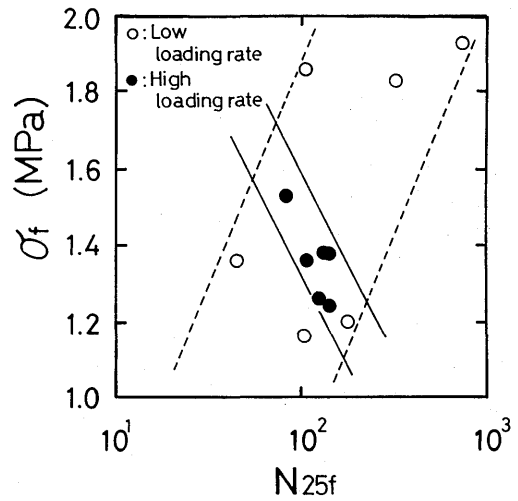


Fig. 11 Relationship of fracture stress σ_f vs. N_{25f} ; bending test of plain specimen

N_{25f} が多くなり、高負荷速度では逆に N_{25f} が少なくなる傾向にあることがわかる。

この様な結果となるのは、低負荷速度では小振幅AEが多く発生すると、それに伴い歪エネルギーを適度に解放することで破断応力は高くなるが、高負荷速度では小振幅AEの割合が少なく、大振幅AEの影響が大きくなり、大量の歪エネルギーが急激に解放されるため破断応力が低下すると思われる。

3. 3 AE発生数と応力

Fig. 12 に AE発生数と応力の関係を示す。この図は、負荷をかけてから破断するまでの応力 σ とその応力に達するまでに発生する25mV 以上の AE発生数 N_{25} を両対数表示したものである。その結果、 N_{25} が5を越える応力域から直線性が見い出された。この直線を次式のように表す。

$$N_{25} = b \cdot \sigma^a \tag{3}$$

なお、a, bの値は、 N_{25} の値が10以上となる範囲での任意の4~5点を選び計算し、Table 1 (a), (b)に付記している。aの値は負荷速度の影響をあまり受けず、平均約3であった。

また、Fig. 12 に示すように(3)式から外挿した $N_{25} = 1$ での応力 σ_{AES} を求め、これをAEが発生し始める応力とした。その結果、低負荷速度では $\sigma_{AES} = 0.2 \sim 0.4$ MPa, 高負荷速度では $\sigma_{AES} = 0.1 \sim 0.4$ MPaとなり、負荷速度が高い方が若干早くからAEが発生するが、負荷速度によらずほとんどの試験で0.4MPa 迄にはAEが発生し始めることがわかった。

Fig. 13 に、 σ_f と σ_{AES} の関係を示す。この図より、 σ_{AES} が高くなるほど、すなわちAEが遅くから発生するほど、低負荷速度では破断応力 σ_f は低く、高負荷速度で

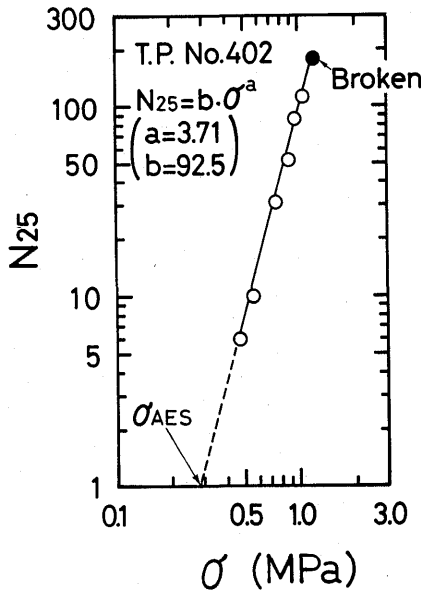


Fig. 12 Relationship of N_{25} vs. σ ; bending test of plain specimen

は逆に σ_f は高くなるのがわかる。

3. 4 AE発生と破断面およびC軸方位

破壊じん性試験の低負荷速度域での破断面を観察すると、切欠き底に発生したき裂が切欠き底に沿って伝播せず丘陵型の破面¹⁰⁾を形成しているものが多く観察され、それらはAEの発生が特に少ない傾向にあることがわかった。

また、破壊じん性試験の低負荷速度域では Average

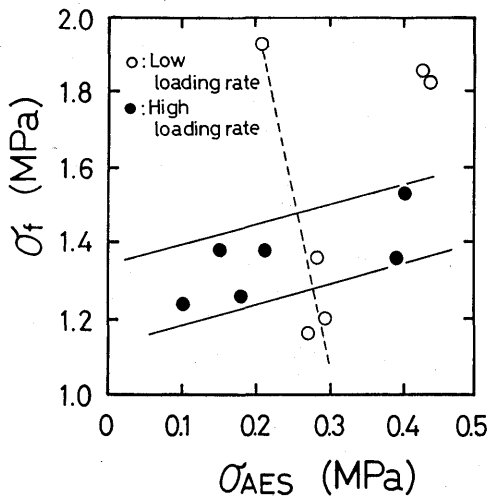


Fig. 13 Relationship of fracture stress σ_f vs. AE starting stress σ_{AES} (calculated); bending test of plain specimen

信号が破断時以外では検出されないものがあった。そこで、そのような試験片の切欠き底の結晶についてC軸方位を調べたところ、C軸と切欠き面のなす角が30~40°のものが多いことがわかった。これは、歪エネルギーの解放がAE発生レベルの低い最大すべり面あるいはそれに近い角度の面でのすべりによって起こるためだと推測される。

3. 5 AEとポップ・イン

氷試験片は透明なので、破壊じん性試験の低負荷速度域で切欠き底付近を注意して観察すると、最終的な破断以前に切欠き底にき裂が発生し停留するのが目視で観察されることがある。この現象は荷重~時間曲線での変化は検出できないがポップ・インの一種と見なせ、これに伴ってかすかな可聴音が観測される。この可聴音は可聴周波数域でのAEの一種と考えられるので、ポップ・インとAEとの対応を調べてみた。

その結果、低負荷速度において明らかにポップ・インが目視観察されると、同時に測定レンジ (Average信号で500mV) を越える大振幅のAEが検出された。すなわち、低負荷速度ではAEを用いてポップ・インの検出ができることがわかった。そこで目視観察が不可能な高負荷速度での試験において測定レンジを越えるAEを調べたところ、10本の試験片中3本に観察され、高負荷速度域でもポップ・イン現象があり、それはAEで検出できると推測される。

次に、ポップ・インの発生時期について調べてみると、低負荷速度で $K_I = 86 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 、高負荷速度で $K_I = 66, 76, 80 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ となり、高負荷速度では低負荷速度より低応力域で発生する傾向にある。これは、低負荷速度では、すべりによって歪エネルギーが解放されるが、高負荷速度では、すべり速度に比べ歪速度が速いため歪エネルギーがすべりによって解放されにくく、蓄積されるため低負荷速度に比べ比較的応力域でポップ・インという現象として現れると推測される。

3. 6 カイザー効果

カイザー効果とは、ある試験体に応力履歴がある場合、前に加えられた最大応力に達するまでほとんどAEが発生しない現象を言い、氷試験片においても成立するか否かを調べると共に、カイザー効果の消失が荷重除去後どの程度の時間で起こるかを調べた。

試験は、同一試験片に繰り返し荷重をかけ、Fig. 14 (a), (b), (c)に示すように、休止することなく次の荷重をかけるAタイプ、負荷と負荷の間に図中に示すような小休止および大休止をとるB、Cタイプの3タイプで行い、それぞれ4本程度の試験片を使用した。

その結果、Aタイプにおいては、数回目の負荷まで

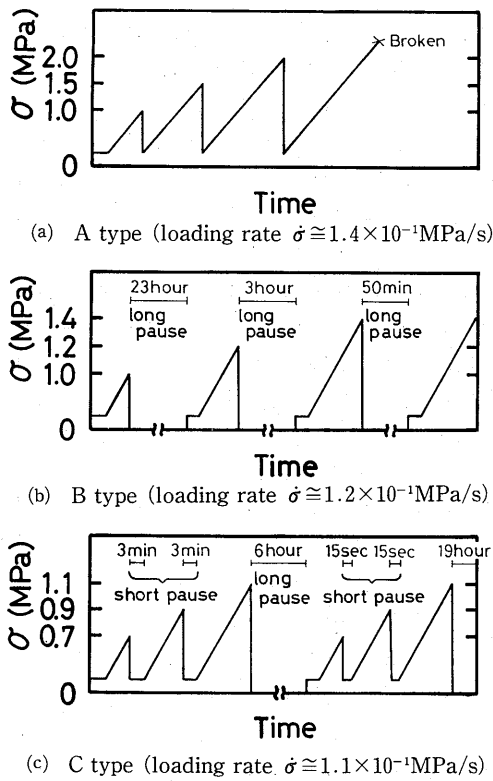


Fig. 14 Loading pattern in Kaiser effect test; bending test of plain specimen

はほぼ完全にカイザー効果が現れた。B、Cタイプにおいては、15秒の小休止ではカイザー効果が現れるが、3分の小休止およびそれ以上の大休止をとればカイザー効果の消失が起こることがわかった。また、Fig. 7に示したように、B、Cタイプの破断応力 σ_f は応力履歴がない試験片の強度にほぼ等しいが、Aタイプだけは σ_f の値が比較的高い。

これは、一般に金属では繰り返し負荷によって起こる加工硬化のあと熱処理を受けるとカイザー効果は消失し元の性質に戻るが、今回行った氷の場合も加工硬化によりAタイプのような結果となるが、 -5°C という氷にとっては融点付近の温度で試験を行ったので、ある程度以上の負荷の休止をとることで熱処理と同様な現象が起こり、カイザー効果が消失しB、Cタイプのような結果となったと推測される。

3.7 AE測定上の問題点

AE計測では、雑音が必要な問題となる。この雑音は、通常電氣的雑音の他に試験機の振動、試験片と試験装置とのこすれ、治具のガタによるもの等が考えられる。

今回行ったAEテスト最大感度の測定では、電氣的

雑音は実験室内の蛍光灯等のスイッチ類のON-OFFである事が確認された。しかし雑音が入ったとしても1回程度と思われ、曲げ強さ試験ではAE発生総数に対して数%以下の無視できる程度であるが、破断じん性試験では数十%以上になることもある。また、雑音は振幅が大きいため、大振幅分布に強く影響を与える。今後、氷の塑性に関連するAEまで測定するには、より高感度の測定を行うと共に雑音についてさらに注意を払う必要がある。

次に、吸振シートの有無によるAEの発生状況をみると低負荷域では差異は観察されなかったが、負荷が高くなり一度AEが発生すると吸振シートが無いものは明らかに発生率が増している。この事より今回の測定においては、試験機の振動の影響はほとんど無く吸振シートはAEの反射波の吸収に役立っていると思われる。

一方、治具のガタを取るための予荷重はAEの発生に影響を与えない程度でなければならない。

4. 結 言

柱状多結晶氷の試験片を用いて、試験温度 -5°C において3点曲げによる曲げ強さおよび破壊じん性の測定を行い、負荷速度がAE特性に及ぼす影響、さらにAE特性と強度、破断面、ポップ・インとの関係およびカイザー効果について検討した。その結果、以下のような知見を得た。

- (1) 曲げ強さ試験において、破断までに発生する25 mV および125 mV 以上のAE発生総数 N_{25f} 、 N_{125f} のバラツキは、低負荷速度で大きく、高負荷速度で小さくなる。
- (2) 曲げ強さ試験において、 N_{25f} と σ_f との関係を見ると、低負荷速度では N_{25f} が増せば σ_f も増すが、高負荷速度においては逆の関係となる。
- (3) 応力 σ とその応力に達するまでに発生した25 mV 以上のAE発生数 N_{25} との間には $N_{25} = b \cdot \sigma^a$ の関係があり、曲げ強さ試験では a の値は3程度となる。
- (4) 曲げ強さ試験において、 $N_{25} = b \cdot \sigma^a$ の関係から外挿して $N_{25} = 1$ での応力をAEが発生し始める応力 σ_{AES} とすると、低負荷速度で0.2~0.4 MPa、高負荷速度で0.1~0.4 MPa となり高負荷速度の方が早くからAEが発生する。
- (5) 曲げ強さ試験で σ_f と σ_{AES} の関係を見ると、遅くからAEが発生する程、低負荷速度では σ_f が低く、高負荷速度では逆に σ_f は高くなる。
- (6) 破壊じん性試験では、丘陵型破面が観察されるものはAE発生数が非常に少なく、最終破断時以外にA

Eが検出されないものはC軸と切欠き面のなす角が30~40°の結晶を多く含む。

(7) AEを用いてポップ・インの検出ができることがわかり、特にこれまで目視観察が不可能であった高負荷速度域においても検出できるものと思われる。

(8) 氷の場合もカイザー効果が現れ、それは約3分程度の負荷の休止で消失する。

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いたします。

参考文献

- 1) 浦辺；氷の破壊靱性，鉄と鋼，67，7（1981），908.
- 2) 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.
- 3) 橋口；多結晶氷のアコースティック・エミッションに関する研究，長崎大学修士論文，（1986）.
- 4) 大坪，小田切；多結晶氷の破壊機構，長崎大学卒業論文，（1986）.
- 5) Chester. C. Langway, Jr; Ice Fabrics and the Universal Stage, U. S. ARMY SNOW ICE AND PERMAFROST RESEARCH ESTABLISHMENT, Technical Report 62, AUGUST, 1958.
- 6) 浜野；偏光顕微鏡の使い方，技報堂，（1970）.
- 7) 内田；氷の結晶方向と破壊靱性に関する研究，長崎大学修士論文，（1984）.
- 8) 石田；き裂の弾性解析と応力拡大係数，培風館，（1979）.
- 9) 岡村；線形破壊力学入門，培風館，（1976）.
- 10) 楠本，木村，高瀬，木寺；大型試験片を用いた柱状結晶氷の破壊じん性の検討，材料，35，395（昭61），887.