

JAERI-M

4 8 0 0

アコースティック・エミッションによる非破壊  
検査法についての基礎実験

1 9 7 2 年 4 月

藤村 勸・鎌田 裕・中新威彦

菅井 正晴

日 本 原 子 力 研 究 所  
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M 4800

アコースティック・エミッションによる非破壊検査法  
についての基礎実験

日本原子力研究所東海研究所動力試験炉部  
動力試験炉技術課

藤村 勲・鎌田 裕・中新 威彦  
菅井 正晴

(1972年4月5日受理)

J P D Rでは、原子炉圧力容器の供用期間中における検査を過去2回にわたって実施してきたが、将来もこれを実施する必要がある。その場合に、この検査を能率的かつ効果的に実施するための1つの方法として、Acoustic Emission による検査法が注目されている。米国では、すでに試験的ではあるが圧力容器の検査に対する適用例も報告されている。

ここに報告するものは、この検査法をJ P D Rに適用する目的で、その適用の可能性の確認と、適用に当って必要な技術的なdataを得るために、その第1段階として実施した平板試験片(引張試験による)による実験結果のまとめである。

この報告の中で、Acoustic Emission による検査法が原子炉圧力容器に適用できるであろうこと、それが有効な方法であることがわかる。また、適用に当って注意すべき点も整理されている。

Experiments on NDI-Technique by Acoustic Emission

Tsutomu FUJIMURA, Hiroshi KAMATA, Takehiko NAKANII, Masaharu SUGAI

JPDR Engineering Section, Div. of JPDR, Tokai, JAERI

(Received April 5, 1972)

The results of experiments on the (non-destructive) acoustic emission method for in-service inspection of reactor pressure vessels are described.

It is considered that the method is useful and effective for the in-service inspection of JPDR: for there are reports made for such a feasibility in the United States. In the JAERI, experiments have been made on the Acoustic emission method since 1970.

Acoustic emission is produced in the specimens (JIS-G3101, SS-41) by means of a tensile machine (Armsler type, 10 ton). In the acoustic emission apparatus made in JAERI, two systems of same performance are used for simultaneous measurement of an acoustic emission.

The feasibility of the acoustic emission method for in-service inspection of reactor pressure vessels was thus confirmed; and further other useful data could also be obtained.

## 目 次

1 ま え が き .....	1
2 実験の方法 .....	2
2-1 引張試験機 .....	2
2-2 AE測定装置 .....	2
(1) 検 出 部 .....	2
(2) 増 巾 部 .....	2
(3) データ処理部 .....	3
2-3 試 験 片 .....	3
3 実験結果と検討 .....	5
3-1 AE信号波形についての実験 .....	5
3-2 AE発生特性についての実験 .....	6
(1) 単純引張試験 .....	6
(2) Kaiser効果についての実験 .....	8
(3) 一定荷重ホールド中のAE発生 .....	8
(4) 疲労欠陥からのAE発生 .....	8
(5) 欠陥の進展とAEの発生 .....	8
4 あとがき .....	10
(1) 問 題 点 .....	10
〔位置測定精度, 回復効果, 材料とAE信号の相異, 最適周波数等〕	
(2) 今後の実験計画 .....	11

## 補 遺

1 Acoustic Emissionということ。 .....	12
2 AEの歴史 .....	12
3 AEの発生と伝播 .....	12
4 AEの検出 .....	12
5 AE信号の種類 .....	13
6 AEの応用分野 .....	13
7 世界の現状 .....	13

## 参 考 文 献

## 図 面 リ ス ト

Fig. 1	試験片の取付方法	17
Fig. 2	測定系ブロック図	17
Fig. 3	A E 検出部詳細	18
Fig. 4	増巾部周波数特性	19
Fig. 5	試験片形状及検出器配置図	20
Fig. 6	同時到達A E 信号選択回路構成	20
Fig. 7	同時到達信号波形	21
Fig. 8	ずれ到達信号波形	21
Fig. 9	主成分周波数の 2ch 間の相関々係	22
Fig.10	信号到達ずれ時間度数分布	22
Fig.11	荷重に対するA E 発生特性	23
Fig.12	時間に対するA E 発生特性	24
Fig.13	伸びに対するA E 発生特性	24
Fig.14	A E 発生特性 (A 5 3 3 B 材)	25
Fig.15	ディスクリレベルとA E 発生特性	25
Fig.16	Kaiser 効果 (その 1)	26
Fig.17	Kaiser 効果 (その 2)	26
Fig.18	Kaiser 効果 (その 3)	27
Fig.19	一定荷重保持中のA E 発生特性	27
Fig.20	疲労クラックの進展に伴うA E 発生特性	28
Fig.21	疲労欠陥を有する試験片のA E 発生特性	29
Fig.22	A E 発生が零であるサイクルの連続数の度数分性	29

## テーブル・リスト

Table. 1	A E 信号の立上りに関するデーター	15
Table. 2	疲労クラック進展に伴う各サイクル毎のA E 発生数	16

# 1 ま え が き

J P D Rの原子炉圧力容器の検査は、ボロスコープ、電気抵抗法、超音波探傷法および液体浸透探傷法などで実施されているが、最近注目されているアコースティック・エミッションによる方法を加味することにより、この検査はより能率的かつ効果的にそして一層完全に近いものが期待される。

すなわち、J P D Rの原子炉圧力容器のように使用中における原子炉圧力容器の検査(In-Service Inspectionと呼ばれ「ISI」と略称)はASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XIにも規定されているように圧力容器の全面検査と体積検査が必要であるが、前者についてはアコースティック・エミッションによる方法(Acoustic Emission以下「AE」と略記)以外に非破壊検査的な手段での方法が見当らない。また、後者については、電気抵抗法と超音波探傷法が考えられるが、これらはいずれも極めて非能率的であると同時に技術的な問題点または測定範囲にある種の制限がある。

いま、AE法の採用によって、全体的な検査を行ない欠陥の有無とその存在場所を知り、欠陥部についてだけ上記の電気抵抗法と超音波探傷法によって欠陥の量的測定を行なうことにより、この種の検査は大きく改善される。

また、従来の検査方法では、検査自身が非能率的であるだけでなく、圧力容器内外の構造物による検査への障害(能率面と検査の可否)と検査者に対する放射線被曝など避けられない問題があるが、AE法の併用により、これらが相当回避できる。

次に、AE法の最も特徴として考えられることは、従来の非破壊検査法が、欠陥の形而的な測定であるのに対して、AE法は、材料評価を含む欠陥の検査である。前者は欠陥の静的な検査であり、後者は欠陥の動的な検査であると言えよう。

AE法による欠陥検査技術の実用性については、米国で圧力容器への適用例が2～3例あり、また、AE法による非破壊検査装置を製作販売しているメーカーもすでに3社を数えることができる。

以上の様な特徴を有するAE法を原子炉圧力容器の検査に適用することを目標として、このために文献調査と必要な基礎実験すなわち、測定法、AE信号のPick up法、AE信号の特性、応力とAEの関係、AEの性質および欠陥の位置検出の可否などについて、引張試験機を用いて平板試験片から発生するAE信号について実験を行った。

AE信号には「連続型」(Continuous Acoustic Emission)と「突発型」(Burst type Acoustic Emission)とがあるが、こゝでは、欠陥検査が目的であることから、後者の「突発型AE」を対象とした。

1970～1971にかけて、平板試験片によるAE法についての基礎的な実験が一通り終了した。こゝに報告するものは、これを整理したものである。

## 2 実験の方法

実験の方法としては、Fig. 20の実験を除き次の要領で実施した。すなわち、平板試験片に単調に増加する引張荷重を与えて破断させ、この間に発生するAE信号によって実験を行った。単調に増加する引張荷重の与え方としては、引張試験機（アムスラー型10 ton）の油圧供給バルブの開度を一定に保つことによって、これを行ない破断までその開度を保持した。ただし荷重を一定に保持する場合と減少させる場合には、油圧供給バルブの開度を調節した。

上記方法によれば、試験片が全体的に弾性域にある間は、引張速度が大体一定にできる特徴がある。したがって実験データにはそれぞれこの引張速度“ $v^*$ ”の値を記入してある。

以上の方法によって実施した実験の機器などは、大別して、①引張試験機、②試験片、③AE測定装置からなり、それらは次の通りである。

### 2-1 引張試験機

引張試験機は、原研、材料試験室に設置してある東京衝機製造所製アムスラー型10 ton万能試験機で、繰り返し引張試験が可能である。荷重は油圧で制御され、試験片の取り付けはFig. 1に示すように、チャックによってくわえ込む方式である。

また、本試験機は、クロスヘッドの動き（試験片の全体的な伸び）と荷重との関係をグラフ用紙に描く機能が附属されている。クロスヘッドの動きは金属線を介して伝達され、回転量に変換され4倍に拡大されて描かれる。

### 2-2 AE測定装置

AE測定装置の構成と特性の概要をFig. 2に示す。

#### (1) 検出部

AE信号のPick upは、圧電素子を試験片の1部表面に直接々着して振動量を検出する方式である。圧電材料はPZT-5系のものが現在では最も高い変換能率を有していることからこの系統の圧電素子が使用された。

圧電素子の試験片に直接接着することにより、AE信号の減衰が少なくできるという点では好ましいが、反面AE信号の測定が不可能な程に雑音レベルが大きくなるため、止むを得ず、圧電素子は厚さ2mmのアクリル板を介して試験片に取り付け、これによって圧電素子と試験片は絶縁された。

さらに、引張試験機設置場所での誘導雑音レベルが大きく、これを除去するために、圧電素子を銅箱にて完全シールドを施した。

これらの処置によって、圧電素子PZTの感度が犠牲になった。

カップラントは、アラルナイトとグリセリンを用いたが、アロン $\alpha$ やサロールなどいずれも差異は認められなかった。

検出器とその取り付けの詳細をFig. 3に示す。

#### (2) 増巾部

圧電素子により電気信号に変換されたA E信号を増巾するには、電圧増巾方式と電荷増巾方式との2通りの方式が考えられるが、実用性の点（原子炉圧力容器の検査の場合を考えると検出器と前置増巾器は近接して配置できないかも知れないこと）、これにともなう、検出器と前置増巾器間の距離が長くなることによって生ずる問題を避けること）から電荷増巾方式を採用することとした。

低荷重領域における低周波ノイズによる過飽和入力で増巾器が誤動作する（引張試験の実施中、低荷重領域でA E信号が断続的になる現象が時々発生し、この原因は試験片、チャックおよびチャックホルダを含む系で100Hz近傍の共振振動が生じ、これが増巾されて大きな入力信号となって増巾器に作用することがわかった。）ので、これを防止するために、前置増巾器の入力端にRCによる高域濾波器を設けた。この高域濾波器を含む入力端からデータ・レコーダーを経てA E信号選択回路の入力端までの総合周波数特性をFig. 4に示す。

A E信号は数KHz～数MHzまでの広い周波数スペクトラムを有していると言われているが本実験では、150KHz近傍におけるA Eの信号成分を検出している。

### (3) データ処理部

引張試験機によって実験を行なう場合、A E信号の発生は試験片に作られた欠陥部からだけでなく、試験片をホールドするチャック部からも発生していることが認められた。

チャック部から発生するA E信号は、除去したいわけで、出来れば発生しない様にしようと考えたが、容易に実施できる方策が見出されなかったため、電気回路によって、特定信号（欠陥部からのA E信号）を選択する方法を採用した。

具体的には、A E測定系をFig. 2に示すように同じもの2系統を用意し、検出器をFig. 5に示すように人工欠陥部から等距離の場所に配置して、2つの検出器に同時に到達するものを所望のA E信号として選択する方法である。

同時に到達するA E信号の選択回路の構成をFig. 6に示す。

A E信号は一定波高レベル以上のものだけが処理されるようにディスクリ・レベルが設定された。

最終的なA Eの発生数についての計数処理は、一度Data Recorderに記録したものを、後日再生し、Scalerによって計数することによって行われた。

## 2-3 試験片

本実験に使用した試験片の材料は、SS-41(JIS)とA533B(AS TM)で、Fig. 19に示すデータ以外は全てSS-41材によって実験したものである。

SS-41試験片は、厚さ3.2mm、大きさ914mm×1829mmの一般構造用圧延鋼板(JIS-G3101, SS-41)から、A533B材試験片は75mm厚さの圧延材からそれぞれ切り出してFig. 5に示す様に作成したものである。

この様な試験片の場合、不連続面が存在するため、局所的な応力集中が起こり、この部分が他の領域に先立ちA Eを発生することが予想されるが、引張試験機に附属している「伸び測定装置」は試験片の全体的な伸びを示しているので、試験片の全体的な伸びに対するA Eの発生現象に注目することとした。



JAERI-M 4800

試験片の全体的な伸びだけを測定するという概略的な方法だけでなく、たとえば Strain Gauge を用いて局部的に試験片材料の変化を知る方法もあるが、この場合、Gauge の接着剤のひび割れによる A E を発生するため（試験の結果）実験に支障となるので、これを使用しなかった。

### 3 実験結果と検討

#### 3-1 AE信号波形についての実験

Fig. 5に示す切欠き深さ15.2mmの両側切欠き試験片（材質SS-41材）について単調増加の引張荷重を加え、この場合に得られた21ヶのAE信号についてオシログラフにその波形を描かせ、この波形について次のような解析を試みた。

なお、オシログラフにAE信号波形を描かせるためには、Data Recorderを2台用いて周波数変換を行っている。

- 1) 同時到達AE信号とずれ到達AE信号の間には、明瞭な波形的な差異は認められない。

Fig. 7はAE信号の発生源が試験片切欠き部と推定される同時到達AE信号の代表的な波形例を、Fig. 8にAE信号の発生源が異なる場合の（引張試験機のチャック部）ずれ到達AE信号の代表的な波形例をそれぞれ示す。

この結果から、定期的ではあるが、欠陥の存在場所（AEの発生場所）を測定できることもわかる。

- 2) 検出されるAE信号の周波数は単一であるとはいいがたいが、主成分周波数\*は同一信号内では大体一定である。また、Fig. 9に示すように主成分周波数は発生するAE信号毎に異なる。Fig. 9からわかるように、2つの測定系間に主成分周波数に関して相関関係が認められない事実から判断すると、AE信号発生毎にその周波数分布が異なると思われる。
- 3) 主成分周波数は、100~170KHzの間に分布し、これは圧電素子の非固定時（素子単体の意）の共振周波数（150KHz）に近いものである。
- 4) AE信号波形は立ち上り部に2つの形がある。すなわち、急峻に立ち上るものと徐々に立ち上るものである。

Table 1に示す様に、後者の波形は信号の発生点から検出点（検出器の位置）までの距離が40mm程度では観測できないが、180mm程度になると観測されることから考えて、2種類以上の板波モードが存在し、それらの伝播速度が異なることに起因するとも考えられる。

この様に2種類の波形が観測されたが、このようなAE波形は試験片の幾何学的形状に大きく影響される可能性が大きく、圧力容器の場合にも平板試験片の場合と同様な波形が得られるとは断言出来ない。

- 5) AE信号は、単純な減衰波形となる場合は少なく、Fig. 8に見られる様に、うなり現象で観測される様な波形となることが多い。

このために、1ヶのAE信号を2ヶまたはそれ以上の信号として測定する恐れもあるが、データの処理の際、検波後の積分回路定数の選定（大きくする）によって解決できる。

- 6) 引張試験機による実験では、試験片の切欠き部とチャック部でAEを発生する。

Fig. 10は、2つの測定系で観測された信号の相互間の時間差をオシログラフ上で読みとり、時間差（信号源から検出器までのAEの到達時間差）の度数分布を求めたもので、こ

\* 主成分周波数は100  $\mu$ sec間における大きい波の波数から求めたものである。

の結果から、A E 信号の到達時間差が  $30 \sim 60 \mu\text{sec}$  のものが観測されていないことからチャック部からの A E も含まれていることがわかる。

また、A E 信号の到達時間差による A E 信号の発生位置を決定するに当っては、立上りが除々に立ち上る様な A E 信号波形の場合には、Fig. 10 中の (A) 部よりも (B) 部の時刻\*を採用した方がその集中度が高いこともわかる。

いま、Fig. 10 より信号到達ずれ時間の平均値 (A) 部による場合は  $120 \mu\text{sec}$ 、(B) 部による場合は  $150 \mu\text{sec}$  と 2 ケの検出器間の距離 ( $360 \text{ mm}$ ) から A E 信号の伝播速度を求めると

(A) 部による場合;  $3,000 \text{ m/sec}$

(B) 部による場合;  $2,400 \text{ m/sec}$

となり、いずれにしても、これらは鋼材中における横波速度 ( $3,200 \text{ m/sec}$ )、縦波速度 ( $5,900 \text{ m/sec}$ ) よりも小さく、板波の形で伝播しているものと推察できる。

次に、実用時における欠陥の位置 (A E の発生源) の測定精度について推定してみると (Fig. 10 より)

- 信号のばらつき;  $\pm 20 \mu\text{sec}$

- A E の伝播速度;  $2,400 \text{ m/sec}$

より、位置決定の最大誤差は  $\pm 5 \text{ cm}$  程度となる。

しかし、板波にあっては、その種類とそれらの周波数によって、その伝播速度が異なるという性質があるので、上記の位置決定誤差がそのまま圧力容器にも適用できるかどうかは疑問である。一方、実際の欠陥検査では、1 ケの欠陥から得られる A E 信号の個数は相当多くなり、これを統計的に処理することにより、欠陥の位置測定の精度は、さらに向上できることが期待できよう。

### 3-2 A E 発生特性についての実験

#### (1) 両側切欠き試験片の単純引張試験

##### i) A E の発生と材料の変形

切欠き深さ  $15.2 \text{ mm}$  及び  $5 \text{ mm}$  の S S - 4 1 材試験片 (Fig. 5 左参照) について得られた A E 信号の応力に対する発生特性を負荷歪曲線を併記して Fig. 11 に示す。

ここで、A E 発生数とは、減衰を伴った波形全体を 1 ケと計数する方式での計数値であり、カウンターによって測定される。また、A E 発生率は、カウンターで測定された計数値を単位荷重当りの A E 発生数として算出したものである。

この A E 発生特性の著しい特徴は、ある応力レベルに達すると、A E の急増現象がみられることである。そしてこの急増点は、応力-歪曲線の直線部から外れる点とよく一致している。すなわち、試験片が塑性変形を始める点で A E が急増することがわかる。

ちなみに、この急増点について数値的に解析を試みると、グラフから、切欠き深さ  $5 \text{ mm}$

\* (A) の時刻は、Fig. 10 中の波形図で、ノイズレベルと明らかに区別できる A E 信号のはじまりであり、(B) の時刻は Fig. 10 中の波形図で最大波高における時刻である。

の試験片の場合には3.4ton、切欠き深さ15.2mmの試験片の場合には0.88tonがそれぞれA E数の急増点における荷重である。これは単位面積当りの荷重に換算すると、各々35kg/mm<sup>2</sup>、30kg/mm<sup>2</sup>となる。一方、SS-41の引張強さは41~50kg/mm<sup>2</sup>で、35kg/mm<sup>2</sup>、30kg/mm<sup>2</sup>は、この値より小さいが、これは試験片の有する切欠きによって、応力集中が起こるためと考えられる。(試験片の切欠きによる応力集中係数は、高々2位であるから、35kg/mm<sup>2</sup>、30kg/mm<sup>2</sup>の値は妥当なところであろう。)

また、切欠きの先端部の角(edge)では、細かくみると、かなり鋭いコーナー部分もあり、この部分では切欠き全体の応力集中より高い応力の集中が予想される(応力集中係数は~数10)が、こゝでの細かい塑性変形が、A Eの急増点以下の応力でのA Eの発生に作用しているものと判断される。しかし、この細かい塑性変形は量的には、切欠き部全体の塑性変形に比べると、ずっと少ないから、A Eの発生については、Fig.11のようになるものと予想される。

以上の実験結果から、Burst型A Eは塑性変形によって発生し、材料中の部分的な塑性変形が起こった場合でも検出できると判断される。

## ii) A Eの発生割合

次に、時間に関するA Eの発生特性をFig.12に示す。

上記A Eの急増現象は、このグラフからも明白であるが、実験中、カウンターに表示されるA E数を観察することによっても明瞭に確認された。

試験片の破断寸前で、A E数は増加現象を示すが、その発生率は、降伏点直前のそれに比べ、かなり小さい。

## iii) A Eの最大発生点

試験片の伸びに対するA Eの発生特性をFig.13に示す。

この結果から、A Eの発生密度が高い部分は塑性域でかつ、荷重歪曲線の荷重が増加する領域である。

また、降伏点前の塑性域で発生率が最大となり、荷重歪曲線で荷重の増減がみられず、伸びの進行する領域ではA Eの減少が起こると言える。

## iv) A 5 3 3 B材の引張試験によるA E発生特性

A 5 3 3 B材についてA Eの発生特性をFig.14に示す。

この場合にもSS-41材の場合と同様に、試験片が全体として塑性域に入るとA Eの急増現象が現われる。

なお、試験片全体として塑性域に入る以前に、A Eの発生率のPeakがみられるのは、応力集中に基き、切欠き部の塑性変形がその原因と考えられる。

このA 5 3 3 B材の引張試験を実施するに当り、SS-41材の実験に使用した圧電素子よりもさらに高感度のものを使用しなければならなかった。この事実から、被検査体の材料により、発生するA Eの大きさ(エネルギー)には大きな差異のあることが明らかである。

## v) ディスクリ・レベルとA Eの発生特性

同時信号選択回路(A Eの)には、ノイズをカットし、一定レベル以上のA E信号のみ

を処理するようになっている。

このディスクリ・レベルを変化させた時の、SS-41材の荷重に対するAE発生特性をFig.15に示す。

この結果から、AEの急増現象は、AE信号の高さの選択レベルには無関係であることがわかる。

## (2) Kaiser効果についての実験

AEの発生特性について「Kaiser効果」と呼ばれる現象がよく知られている。

この現象は、ある応力を加えた後、再び応力を加えた場合、応力レベルが以前に加えた応力レベルを超えないとAEの発生が認められないという非可逆的な現象である。

この現象が突発型AEについても存在するものか否か必ずしも明らかでないので、これを確かめるために実験を実施した。

試験片は切欠き深さ5mm（両側）のSS-41材（Fig.5の左）を用い、実験結果をFig.16,17および18に示す。

これらの結果から、Kaiser効果は、厳密なものではなく、荷重を加える以前の最高荷重までAEの発生は皆無ではなく、以前の最高荷重の直前からAEの発生が認められる。しかし、そのAEの発生率は極めて小さいものであることがわかった。

また、一度荷重を加えた後、或る時間放置した場合にも、Kaiser効果の回復作用は見出せなかった。

## (3) 一定荷重Hold中のAE発生

試験片を一定荷重に保持した時のAEの発生状況をFig.19に示す。

この結果から、AEの発生率は時間に対して指数函数的な減少をすることがわかる。

この事実から試験片の塑性変形が完了するまでにはかなりの時間を必要とすることがわかる。

## (4) 疲労欠陥からのAE発生

Fig.5に示す両側切欠き深さ5mmの試験片に繰り返し荷重を加え、疲労クラックを発生させ、一たん荷重を下げ、単純引張荷重試験を実施した場合に発生するAEについて、その関係を求めるとFig.20のようになる。

この実験結果は、疲労クラックを発生させるために加えた繰り返し荷重に相当する荷重の範囲内でも、欠陥部から僅少ではあるがAEの発生が認められるということを示している。

（このことは、原子炉圧力容器にAE法を適用する場合運転圧力の範囲内での加圧による検査の可能性を考えるのに重要な指針を示している。）

## (5) 欠陥の進展とAEの発生

Fig.5に示す深さ5mmの両側切欠き試験片に繰り返し荷重を加え、疲労欠陥を発生させ、かつこれを進展させて破断に至るまでのAEの発生状況をFig.21に示す。

AEの発生は、応力が最高値付近で認められ、図中に示すように（A）と（B）の荷重の加え方によって、AEの発生特性が大きく異なっていることがわかる。

（A）の場合、荷重の繰り返し数が少ない領域でかなりのAEが発生し、荷重の繰り返し数の増加と共に減少する傾向がみられる。これは繰り返し荷重が21 cycle/minとかなり早い  
ため、試験片の1部が応力集中によって1 cycle目から塑性域に入っていること。一方(3)で述

べた様に塑性変形を完了するのに相当の時間を要する 相当数の繰り返し荷重を要する意  
荷重の繰り返し数が増大（後期）することによって、A Eの発生数が荷重の繰り返し数ととも  
に増大している。これは、その曲線がクラックの進展を示す一般的なものとして極めてよく類似  
していることからクラックの進展に基づくA Eの発生数と判断される。（雑音でないことは  
チェックした。）

次に、このA E信号の発生すなわち、クラックの進展が荷重の繰り返し数とともに一様に発  
生しているかまたは断続的に発生する傾向が強いものかを調べるため、荷重の繰り返し数毎の  
A E発生数をTable 2に示す。

この表からわかるように、総A E発生数126個中、連続的A E発生数は78個である。

荷重の繰り返しが1 cycleの間に発生するA Eが零であるような荷重の繰り返し数(cycle)  
の連続数の度数分布をFig. 22に示す。この目から、A Eの発生を伴わない荷重の繰り返し数  
の連続数が小さい程、その度数が多いことがわかる。

以上の事実から、A Eの発生すなわち欠陥の進展は、極めて断続的な現象であると言えよう。

## 4 あ と が き

Burst Type の A E 信号は、塑性変形によって発生するものであることと、この Type の A E についても Kaiser's Effect が顕著に認められることなどが実験によって確かめられた。

疲労欠陥が存在する場合、以前の応力レベルより高い応力を与えれば、欠陥の検出は確実であることも解かめられた。(何らかの手段例えば熱的な作用によって、Kaiser's Effect に対する回復効果が期待出来れば、以前の応力以下で目的を達し得るであろう。)

疲労クラックの進展中における A E の発生特性を知ることができた。

極めて rough ではあるが、欠陥の位置を検知することができることも平板上では可能であることを確かめた。

以上の実験を通して、A E の測定系については一応確立された。(ただし、位置決定その他データの処理的なものについては手をつけていない。)

上記諸実験から、A E 法を圧力容器の検査に適用することは最も有効な手段であり、それは可能であると言えるが、実際に適用するに当っては、いくつかの解決すべき問題がある。

これらの問題点とこれらの解決と実用を考えての今後の実験計画を次に整理して示す。

## (1) 問 題 点

## i) 欠陥位置の測定精度

欠陥の位置 (A E の発生場所というのが正確) をどの程度の精度で決定できるかという点について、平板では  $\pm 50 \text{ mm}$  程度の範囲で可能であるような data を得たが、圧力容器にもそのまま適用できるか否か疑問である。

これは、A E が縦波、横波、表面波および板波などの混在したもので、その伝播は媒質の形状や大きさなどによって影響を受ける。また、一方、A E の検出に用いる圧電素子についてもその振動モードは定まっており、その取り付け方 (方向とか取り付ける媒体物など) にもいろいろな方法が考えられる。すなわち、これら A E 波と圧電素子の取り付け方法によって精度の向上が考えられる。将来は A E の発生点とその点における A E 数との統計的処理も加味することにより、より効果が期待されよう。

## ii) S/N の向上と材料による A E レベルの相異

SS-41 材と A533B 材では、A E の大きさが大きく異なることから、検査するものと同一材料について得られる信号レベルを把握することと併せて、特にプラントにあっては、プラント・ノイズのレベルをも考慮した S/N の向上を計る必要がある。

(特に、連続型の A E に取り組むに当っては一層配慮すべきである。また、現在、Pre-Amplifier に電荷増巾型を用いていることから考えれば、圧電素子は電気的静電容量の小さいものを採用することも 1 つの方法として考えられる。)

## iii) 最適周波数と Noise について

原子炉圧力容器の検査に当っては、圧力容器に加圧する時、種々の原因による A E 信号様な Noise が考えられ、これらの対策として A E 検出器の周波数の選択とかその取付位置の選定など考慮しなくてはならない。

## IV) 計数されるべきA E 信号

本実験において計数されたA E 信号はすべて、1ケのA E (減衰振動波形を1ケとする意) 1ケの計数として取り扱っているが、開放されるA E のエネルギーに関連したdataを得ようとする場合には、A E 信号の波高に着目するのも1つの方法であり、この方法を採用するには、増巾器系の飽和特性により正しいdataが得がたい。これはA E 信号の波高分布が極めて広く分布していることも関係することである。

この様にA E 信号のAmplitudeに着目するには技術的にも問題を含むため、別の方法として、A E 信号の減衰振動波形中の個々の振動波の数を計数することが考えられる。

これらの点については、今少し検討の余地が残されている。

## V) Kaiser's Effect の回復効果

原子炉压力容器は高温高圧下で使用され(定格出力時)、これをA E によって検査しようとする場合、Kaiser's Effect を考慮すれば、定格圧力以上の圧力を与える必要が考えられるが、(これがプラントの安全上許容されるか否かにもよるが)出来れば、定格圧力以下で、A E 法の適用が可能であることが望ましい。そのためには、压力容器を加熱することまたは、1ヶ月位の放置される時間のいずれかによってKaiser's Effect の回復効果を期待したい。

## (2) 今後の実験計画

- i) 立体(压力容器状)的なもので、平板試験片との相異点を確かめる(欠陥の検出の可能性、欠陥の量的測定の可能性、欠陥の位置測定の可否\*とその精度の向上法など)。
- ii) Kaiser's Effect の回復効果についての実験(特に熱的效果について)
- iii) 各種材料とA E の相異について(S B 材, S S 材, ステンレスなど)
- iv) 計数方法についての実験(減衰振動波形とその波形中の個々の波数との差異)
- v) J P D R プラントノイズの測定

以上の実験項目について、昭和47年度より実施する予定で、压力容器、各種試験材については、昭和46年度手配済みである。しかし、実験は人員の関係もあってJ P D R-Ⅱ出力上昇試験終了後に着手することになる。

---

\* 多チャンネル波高分析器に採用されている方式を考えればよい。



## 補

## 遺

## 1 Acoustic Emissionということ

アコースティック・エミッション (Acoustic Emissionを通常AEと略されている) と云ばれる現象は、早くから現象そのものは知られていたが、その研究は歴史が浅く、したがってAEの発生機構について必らずしも明確でないと云われている現状もあってか、これらに用いられる用語などについても定義されていない。

しかし、AEとは「固体の変形及び破壊にともない解放されるエネルギーによって音響パルスを発生し伝播する現象」というのが一般的の様である。

Acoustic Emission という用語についても、1958年 Schofield によって始めて用いられて以来、多くの人々の間で用いられてきているが、AE信号の周波数分布は可聴周波帯よりむしろ超音波帯が主であることから、Acoustic (一般に可聴音を意味しているのが普通) と言う言葉は適当でないということから「Stress Wave」と云う用語を採用している研究グループもある。

## 2 AEの歴史

AE現象は、錫に変形を与えたとき、可聴音を発することは昔から「錫鳴り」(Tin Cry) として知られていた。しかし、研究対象とされることはなかった。

AEに関する研究は、1950年代初期にドイツの Kaiser に始まり、その後約10年間は研究が必らずしも活発でなかった。

1960年代後期になって、AEの応用の可能性についての認識が深まり、その研究は米国を中心に活発化し、現在では、欠陥検査及び溶接モニタの面で実用化の段階に入りつつある。

## 3 AEの発生と伝播

材料中で変形または破壊によって発生した音響パルスは波動となり、横波、縦波および表面波、場合によっては板波の形で材料中を伝播する。これらの波は、伝播速度や伝播にともなう減衰などそれぞれ異なり、反射毎に波のモード変換も起こる。このために、伝播中の現象は極めて複雑なものとなる。

AE信号の検出は、この様にして伝播して来たものを材料表面で検出することとなり、観測する現象には伝播過程での影響による成分が常に含まれていることとなる。

また、発生点では、瞬時的な現象であった音響パルスが検出点では、短時間ではあるが持続性のある現象としてとらえることができる。

## 4 AEの検出

材料中を伝播してくるAE波を検出するには、データ処理上の容易さの点からも通常圧電材料を使用して、電気信号の形で検出される。得られる信号の周波数は数KHzから数MHzまでも広く分布していると云われている。

通常、低周波領域では、機械的振動などによるノイズ成分が多く、高周波領域では、AE信号の減衰が大きいいため、高域濾波器などを使用して、100KHz~2MHzの範囲内における周波数のAE信号が多く用いられている。

A E波を検出する方法には、A E波を加速度の形で検出する方法（加速度検出器）と振動量の形で検出する方法（圧電素子を直接々着する）とがあるが、前者は、使用周波数限界が200 KHz まであり、後者は直接々着方式であるため周波数的な制限は特にない。

## 5 A E信号の種類

電気信号に変換されたA E波には、「Continuous Type Acoustic Emission」（連続型A E）と「Burst Type Acoustic Emission」（突発型A E）の2つがある。前者は、連続雑音の様な波形でその大きさは一般に小さく、これは低い応力レベルから発生し、応力レベルの増加とともに振巾および発生数が増加すると云われ、その発生因は、材料中における転位（Dislocation）によるものと考えられている。後者の突発型A Eは、減衰振動波形で、その発生因は、主として塑性変形および割れの発生または割れの進展によるものと考えられている。また、突発型A Eは連続型A Eに比べ、信号のレベルも大きく検出し易い特徴を有する。

欠陥の存在場所を知る様な目的の場合には、連続型A Eではその信号波形の性質からわかるように信号の検出器への到達時間差を知ることが困難なため、この様な目的の場合には突発型A Eを対象とせざるを得ない。

## 6 A Eの応用分野

A Eを用いる応用としては、将来はより拡大することが十分予想されるが、現在、適用を試みられているものを含めて考えられる適用分野は次のとおりである。

- i) 圧力容器などの欠陥検査、欠陥の進展モニターおよび破壊の予知など。
- ii) 材料の破壊機構（塑性変形、脆性破壊、疲労または応力、腐蝕割れなど）の研究手段。
- iii) 溶接割れの検出とモニター。

## 7 世界の現状

A Eの開発が最も進んでいるのは米国であり、具体的には、Jersey Nuclear Company, Dunegan Research Corporation, Nortecなどが主な装置の製造販売メーカーとして挙げることができるほか、A E法による検査を委託される会社としては、古くからA Eについて研究に着手していたAerojet General CorporationとJersey Nuclear Companyを挙げることができる。なお、欠陥の位置検出についての実的な技術は、Battele Northwest Lab.とJersey Nuclear Companyが優れているようである。これらの中、Aerojet General Corporationでは、A Eの発生数と欠陥の進展量との間の関係を実験的に確かめ、クラック進展モニターとして利用できることを報告している。

また、原子炉圧力容器をはじめ、いくつかの圧力容器に対するA E法の適用例も報告されており、1971の1月に制定されたASME Boiler & Pressure Vessel Code Section XIでもNuclear In-Service Inspectionの方法として、A E法とAcoustic or Ultrasonic Holographyによる方法に対する期待を明記している。

一方、わが国においては、昭和44年末、日本高圧力技術協会に「A E委員会」（委員長 東大、尾上守夫）を発足させ、以来、3ヶ月に2回位の割合で研究討論をはじめ関連の調査が進められており、同委員会では、1971年8月30日より同年9月10日まで米国におけるA Eについての開発状況の調査のために調査団を派遣した。

わが国で研究開発に取り組んでいる機関としては、

JAERI-M 4800

- I) 圧力容器関係 ; 原研をはじめ三菱重工業㈱が1971年より着手。
  - II) 材料試験関係 ; 新日本製鉄㈱, 三菱重工業㈱, ㈱神戸製鋼
  - III) 核燃料検査 ; 動燃(Nortecの装置を入手)
  - IV) 船舶関係 ; 運輸省船舶技研(Nortecの装置入手)
  - V) 航空宇宙関係 ; 東大航空宇宙研
  - VI) 検出器関係 ; 東京芝浦電気㈱, 東大生研
- などを挙げることができる。

























	信号の時間関係 及 立上り特性	AE 信号個数		
		0.15 ton 附近で 1.17 sec 間	0.32 ton 附近で 1.12 sec 間	1.62 ton 附近で 0.57 sec 間
到達時間 ずれ信号	CH-1  CH-2 	2	1	0
	 	1	0	0
	 	5	9	0
	 	5	1	1
	 	0	0	0
	 	0	0	0
	 	0	0	0
	 	0	0	0
到達時間 同時信号	 	0	17	22
	 	0	0	7
	 	0	7	17
	 	0	4	15

Table-1 AE 信号の立上りに関するデータ

[illegible]

サイクル数 : 7551 から 8068 サイクルまで 518 サイクル

AE発生数 : 126 個 (518サイクル間)

AE発生割合：4.11 サイクルに1個

連続的AE発生数: 78 ( )印で示してあるもの)

欠陷狀況：

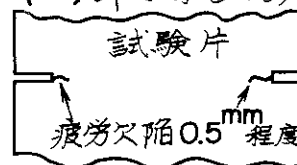


Table. 2 疲労クラック進展に伴う各サイクル毎のAE発生数

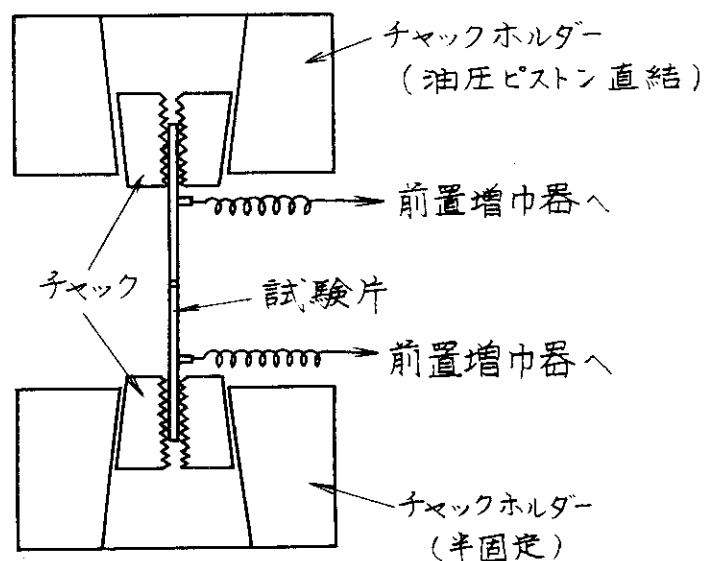
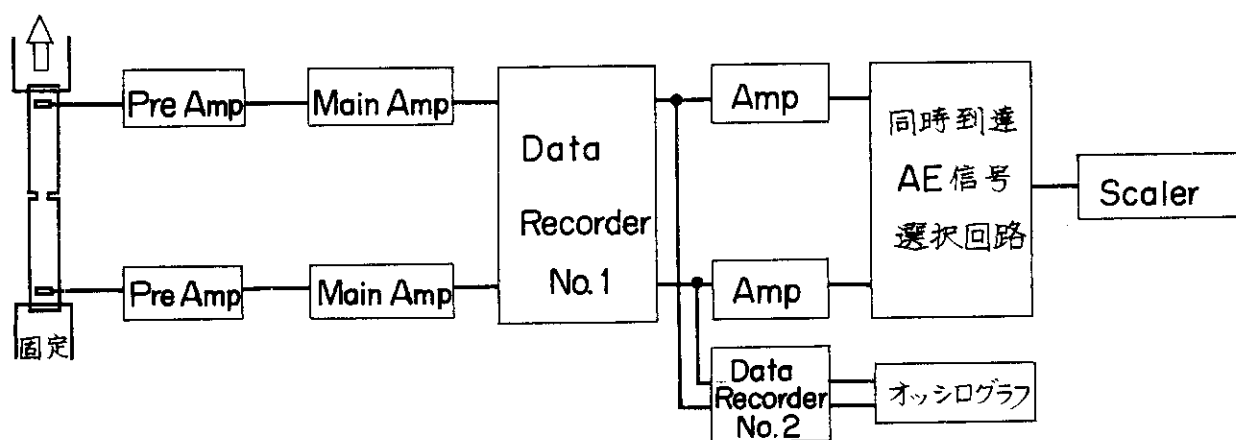


Fig-1 試験片取付方法



Pre Amp : 原研モジュール, 電流増巾型, 増巾度  $1V/PC$ ,  
応答周波数  $3KHz \sim 750KHz$  (3db down)

Main Amp : 原研モジュール, 最大利得 5250, 最大出力  $\pm 12V$   
応答周波数  $3Hz \sim 4.3 MHz$ , Filter 効果投入可能

Data Recorder : No.1 TEAC製 R410 No.2 TEAC製 R200

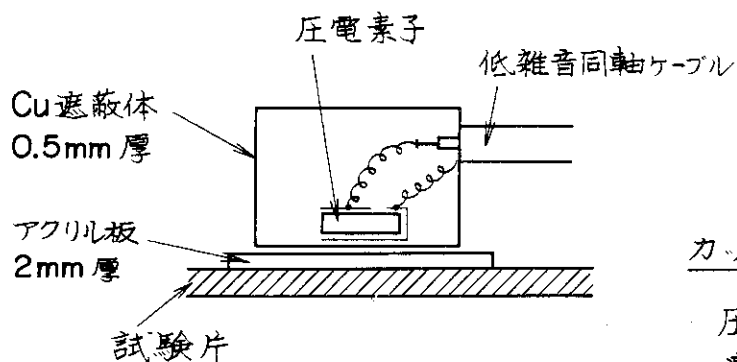
Amp : Main Amp に同じ

同時到達AE信号選択回路: 自作

Scaler : 原研モジュール

オシログラフ: 横河 2902 型

Fig. 2 測定系ブロック図



カップラント；

圧電素子・遮蔽体間：アラルダイト  
遮蔽体・アクリル板間：アラルダイト  
アクリル板・試験片間：グリセリン

検出部を試験片に固定するため  
ビニールテープを使用し巻いて  
締付けた。

使用した圧電素子；

i) SS-41 枚に使用したもの

日本特殊陶業製 PZT 系 圧電素子

形状：長方形  $20 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$

$f_R$ ：156 KHz

$R_0$ ：22  $\Omega$

$\Delta f / f_R$ ：0.12

$C_x$ ：4600 PF

ii) A533B 枚に使用したもの

村田製作所製 PZT 系 圧電素子

形状：円型  $10 \text{ mm} \phi \times 5 \text{ mmH}$

$f_R$ ：219 KHz

$C_x$ ：630 PF

$K_c$ ：67 %

Fig. 3 AE 検出部詳細

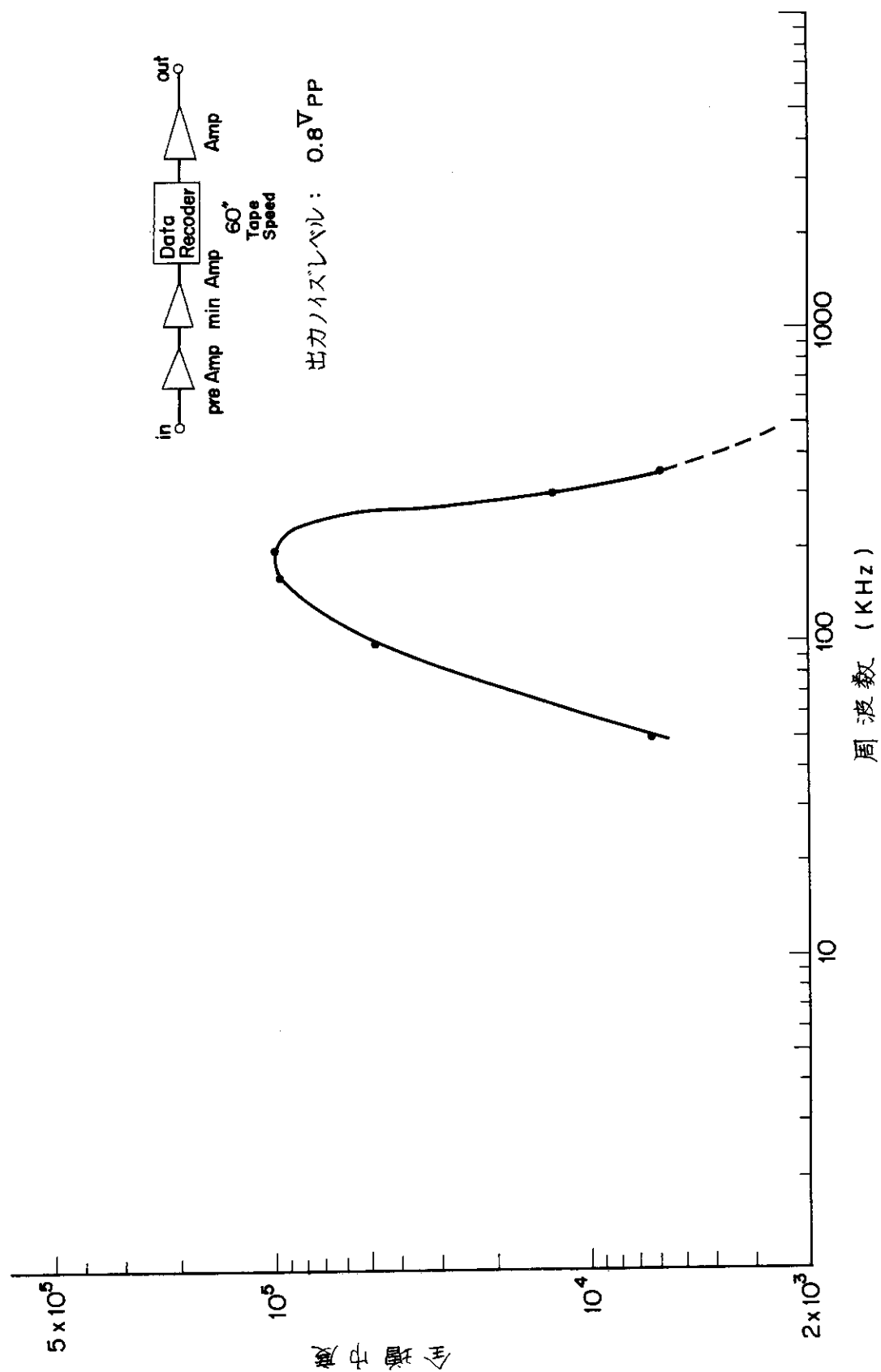


Fig. 4 増巾部周波数特性



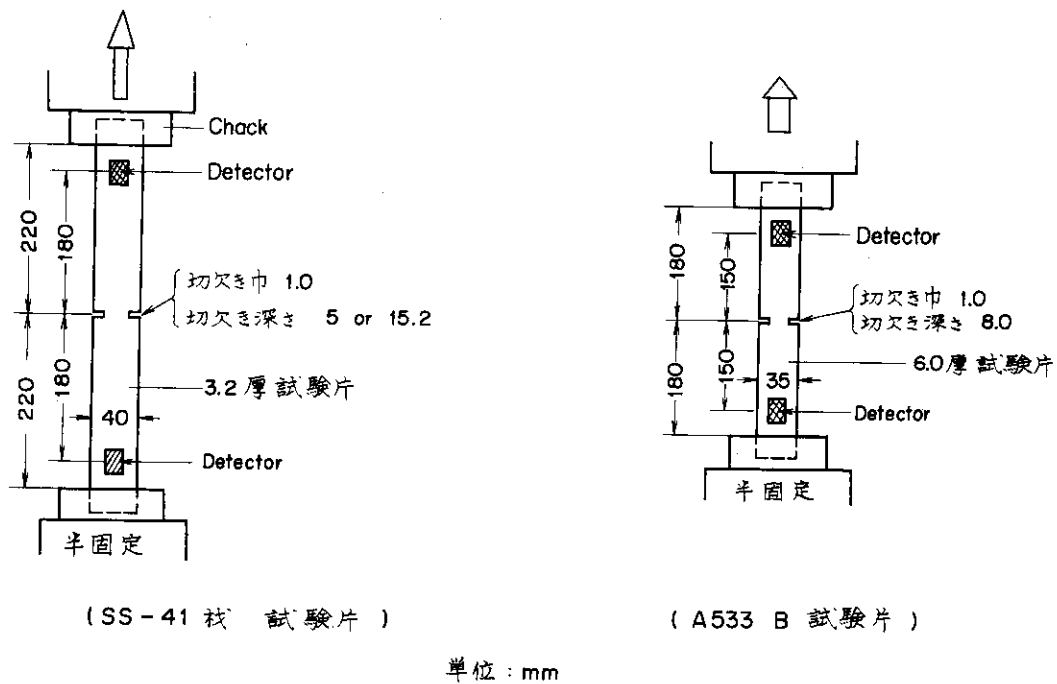


Fig. 5 試験片形状及検出器配置図

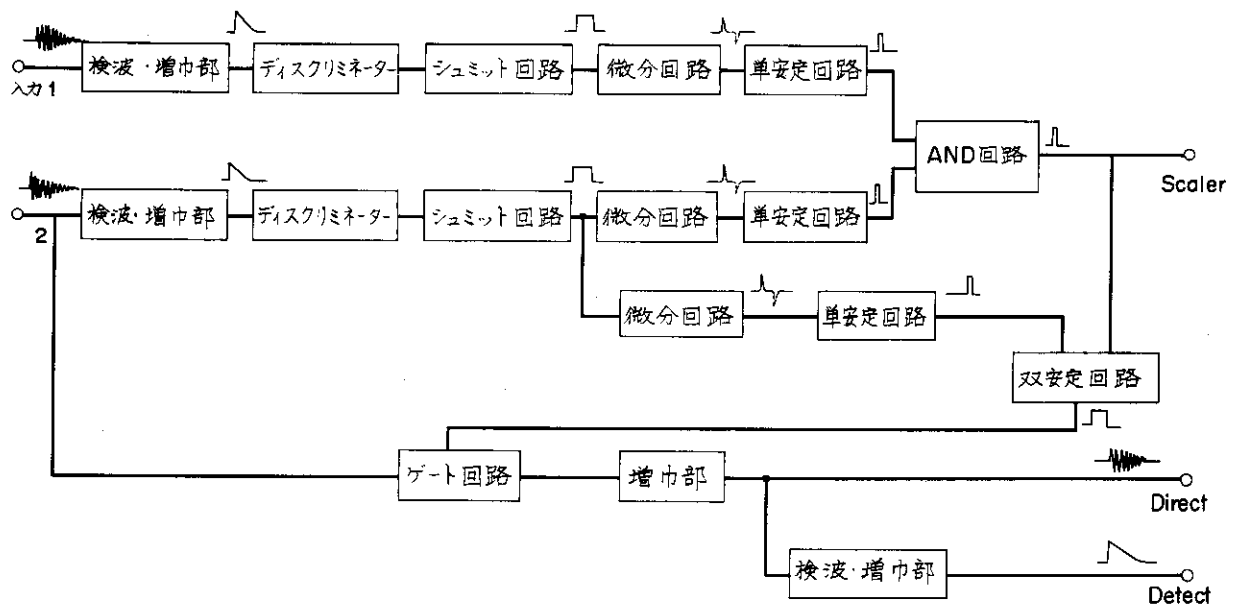


Fig. 6 同時到達 AE 信号 選択回路 構成

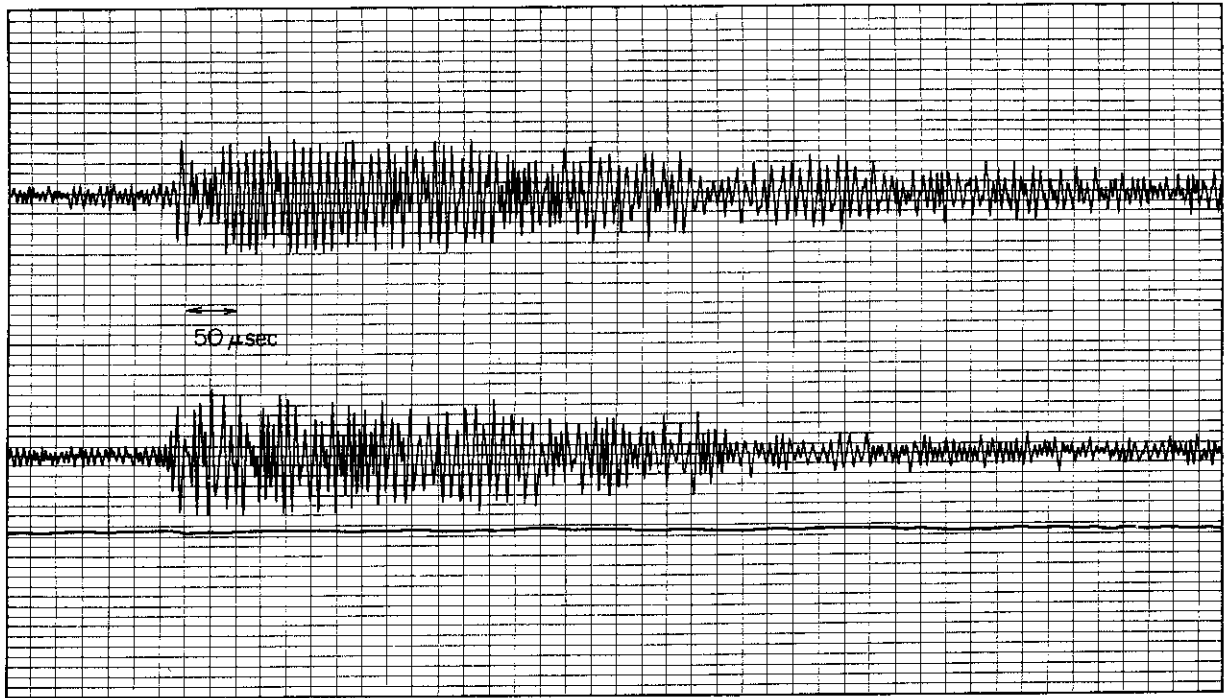


Fig. 7 同時到達信号波形

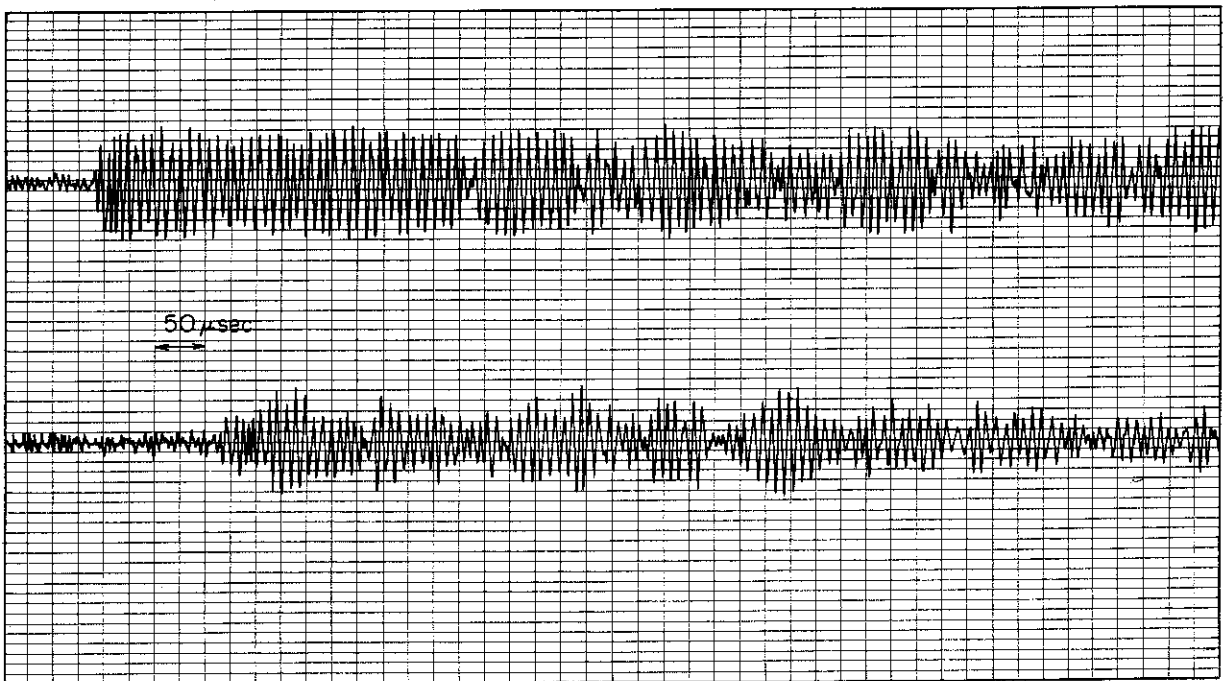


Fig. 8 ずれ到達信号波形

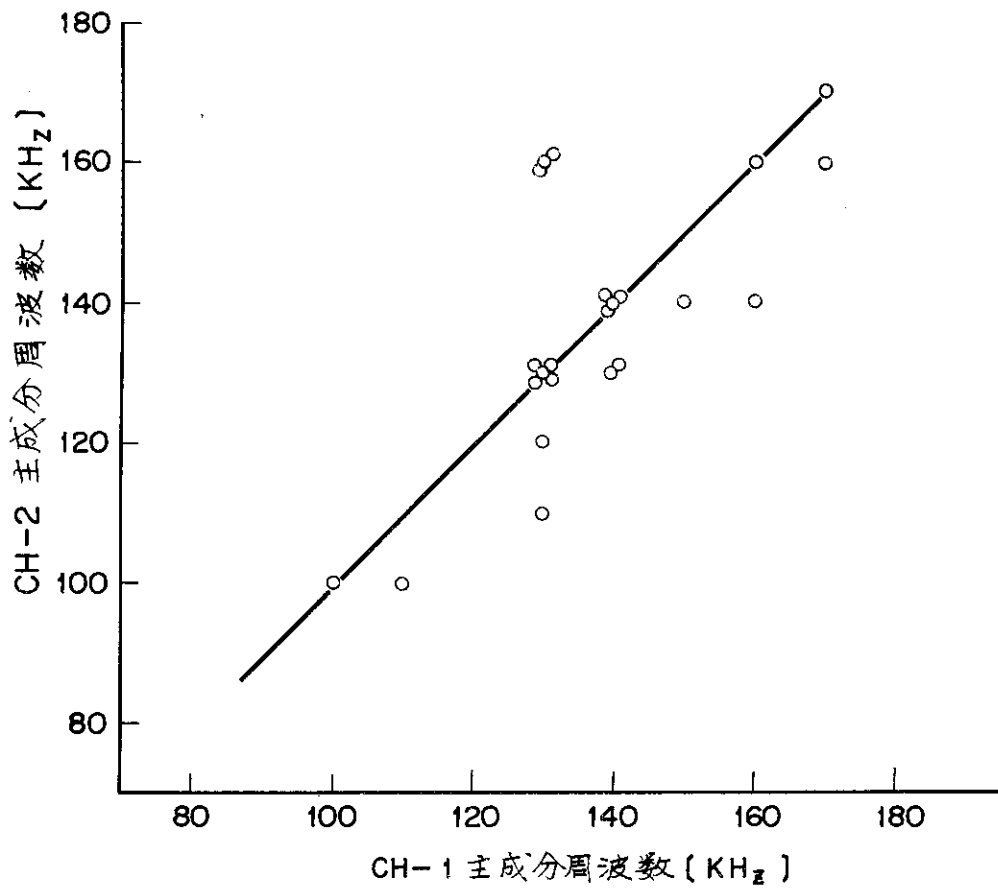


Fig. 9 主成分周波数の2チャンネル間の相関関係

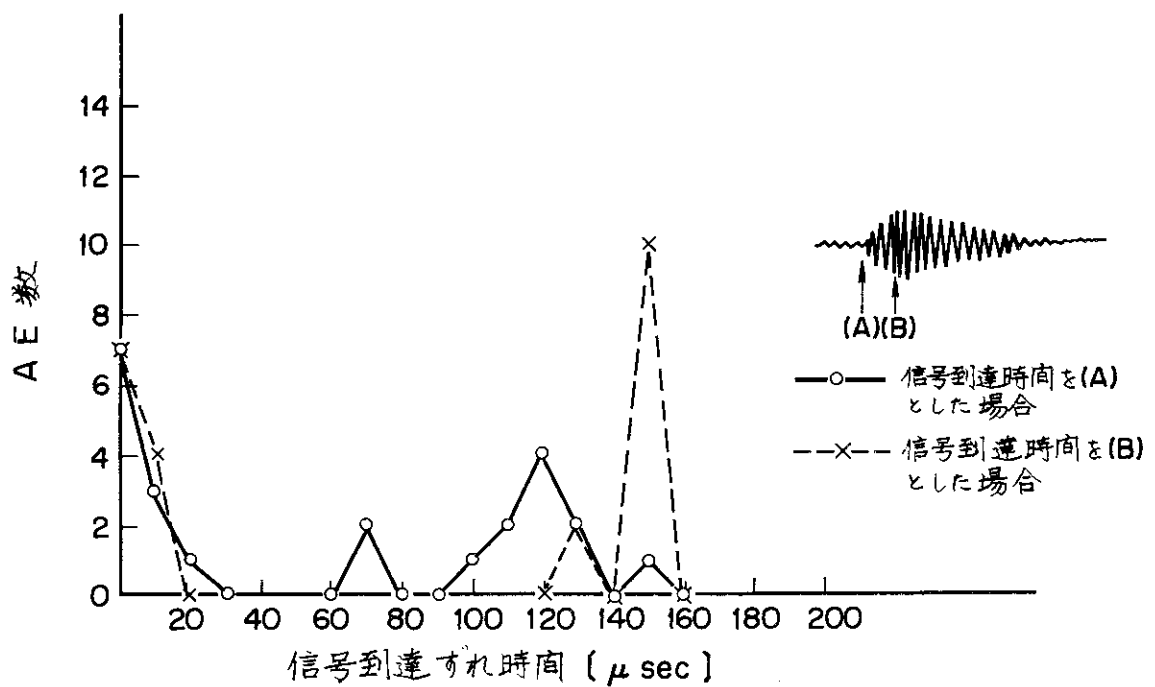


Fig. 10 信号到達ずれ時間度数分布

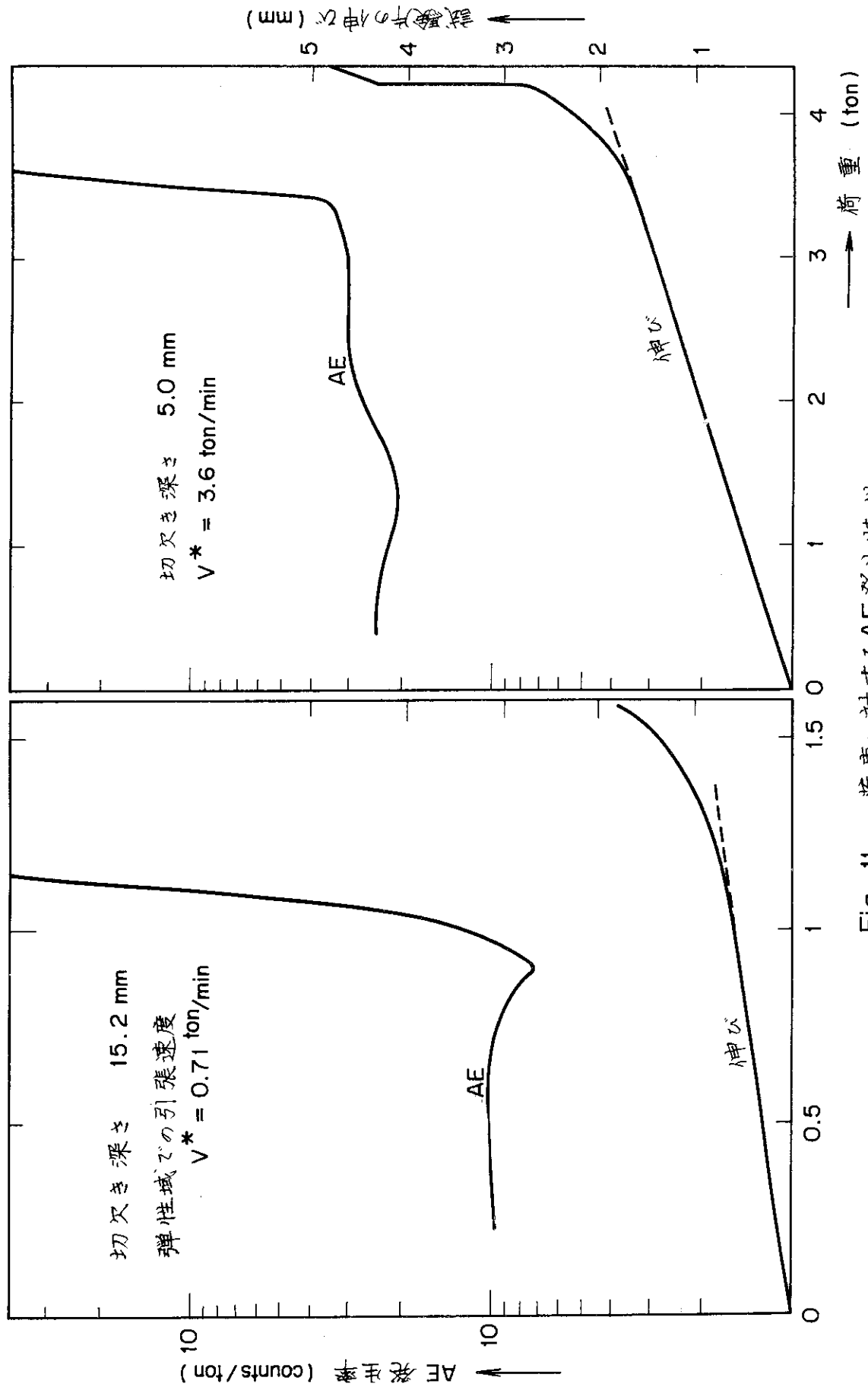


Fig. 11 荷重に対するAE発生特性

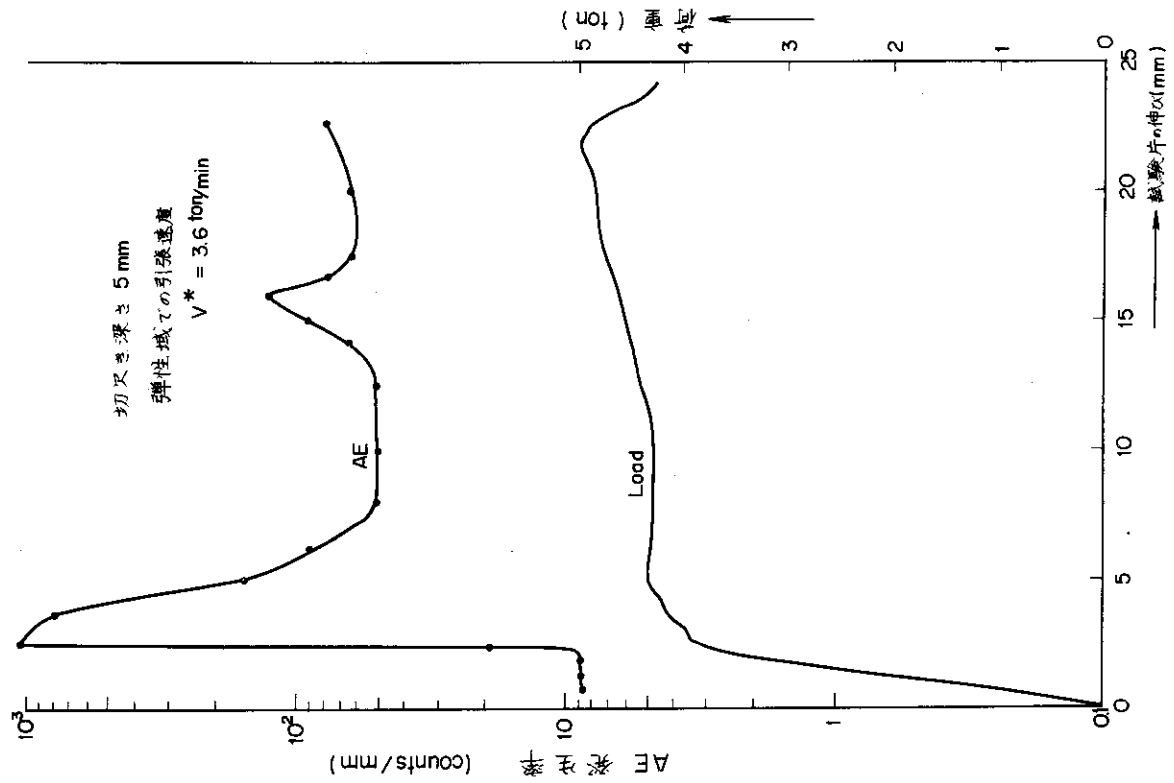


Fig. 13 伸長に対するAE発生特性

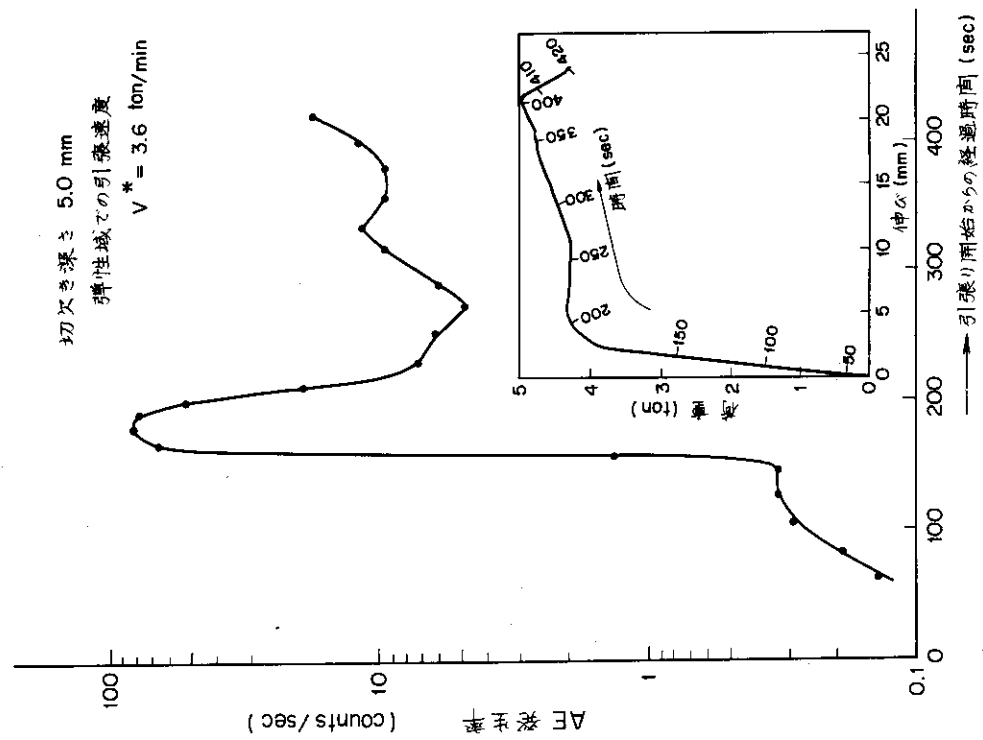


Fig. 12 時間に対するAE発生特性

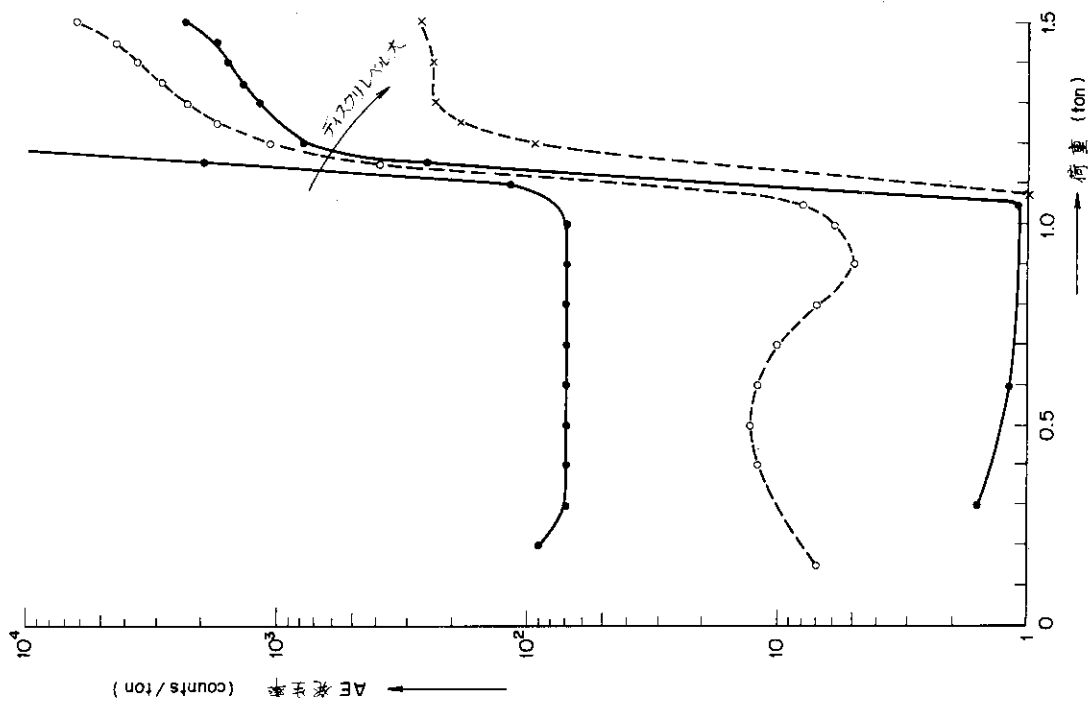


Fig. 15 種々のディスクリベリによるAE発生特性

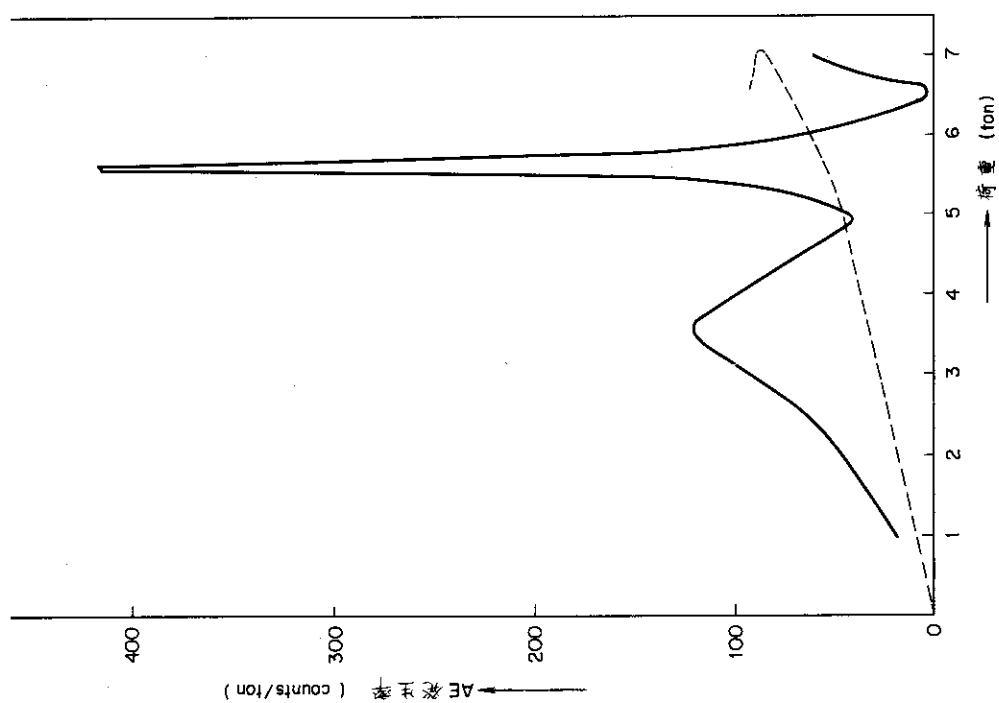


Fig. 14 AE発生特性 (A533B板)

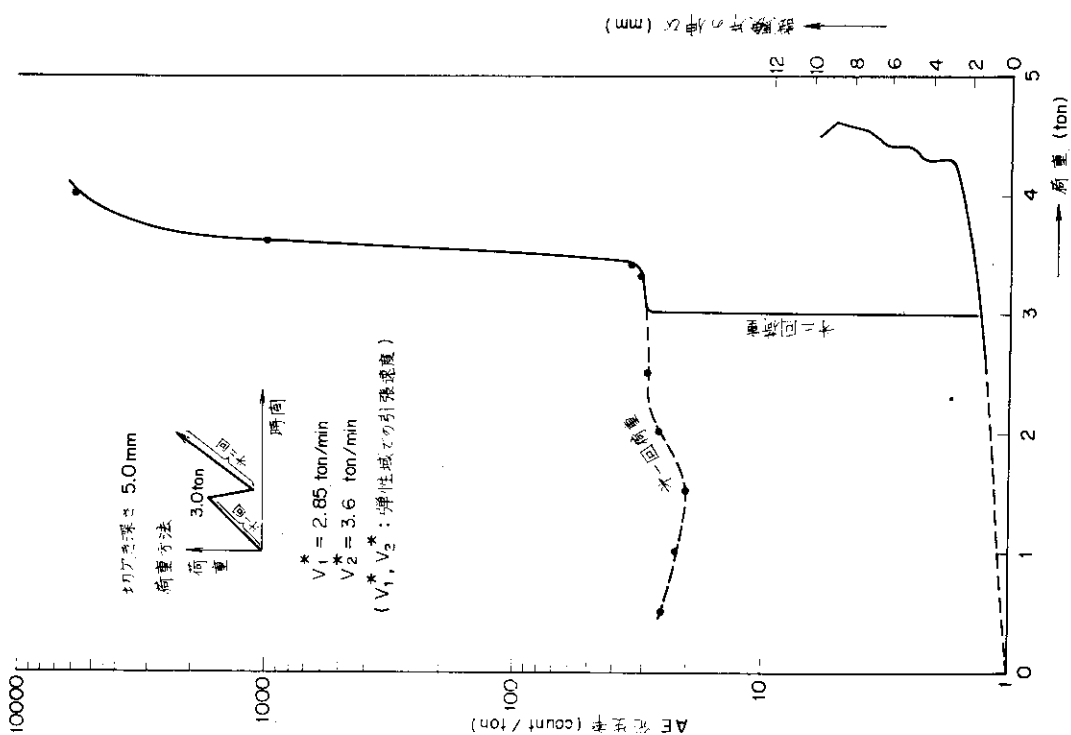


Fig. 16 Kaiser 効果 (その1)



Fig. 18 Kaiser 効果 (その3)



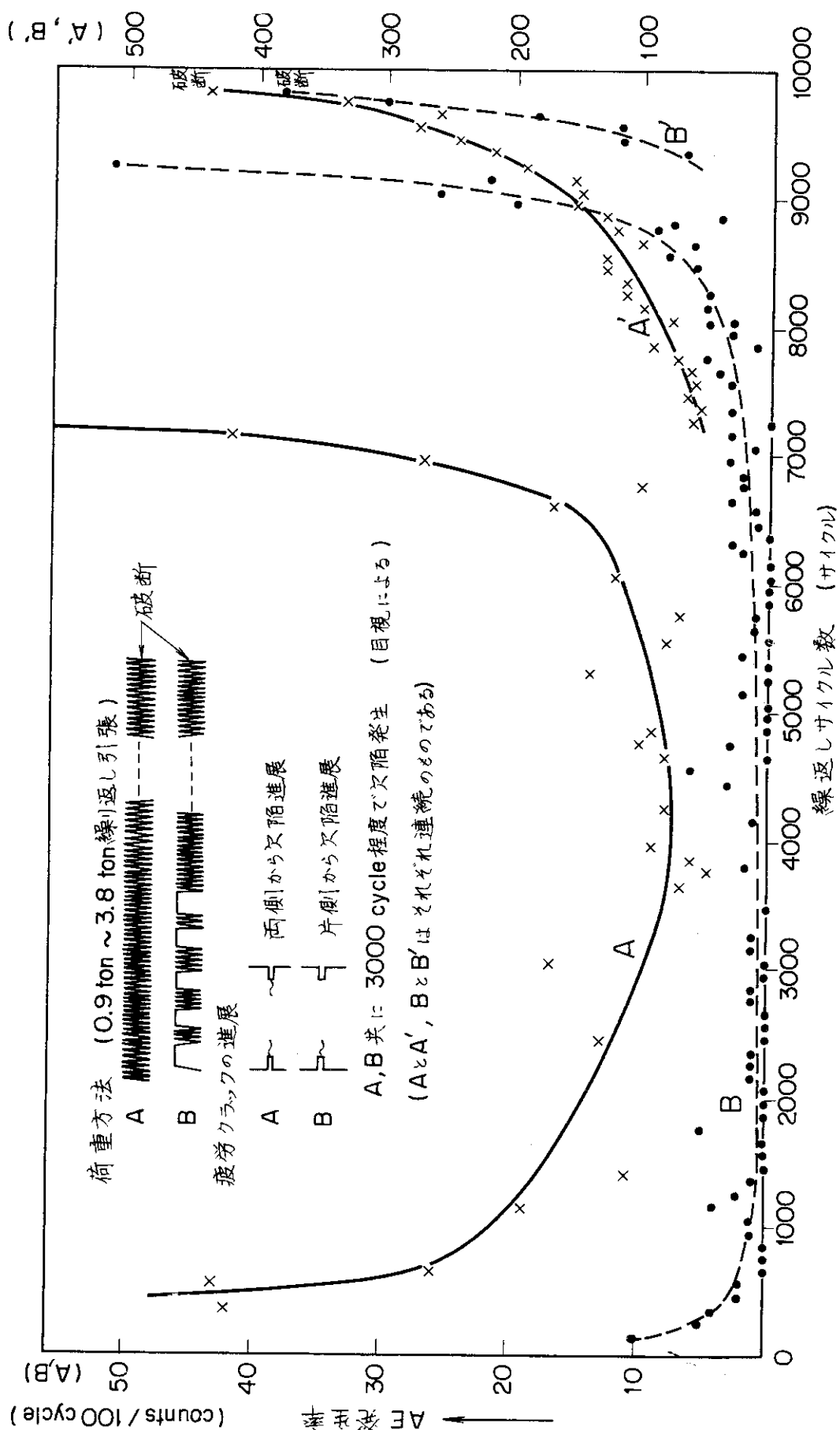


Fig. 20 疲労クラックの進展に伴う AE 発生特性

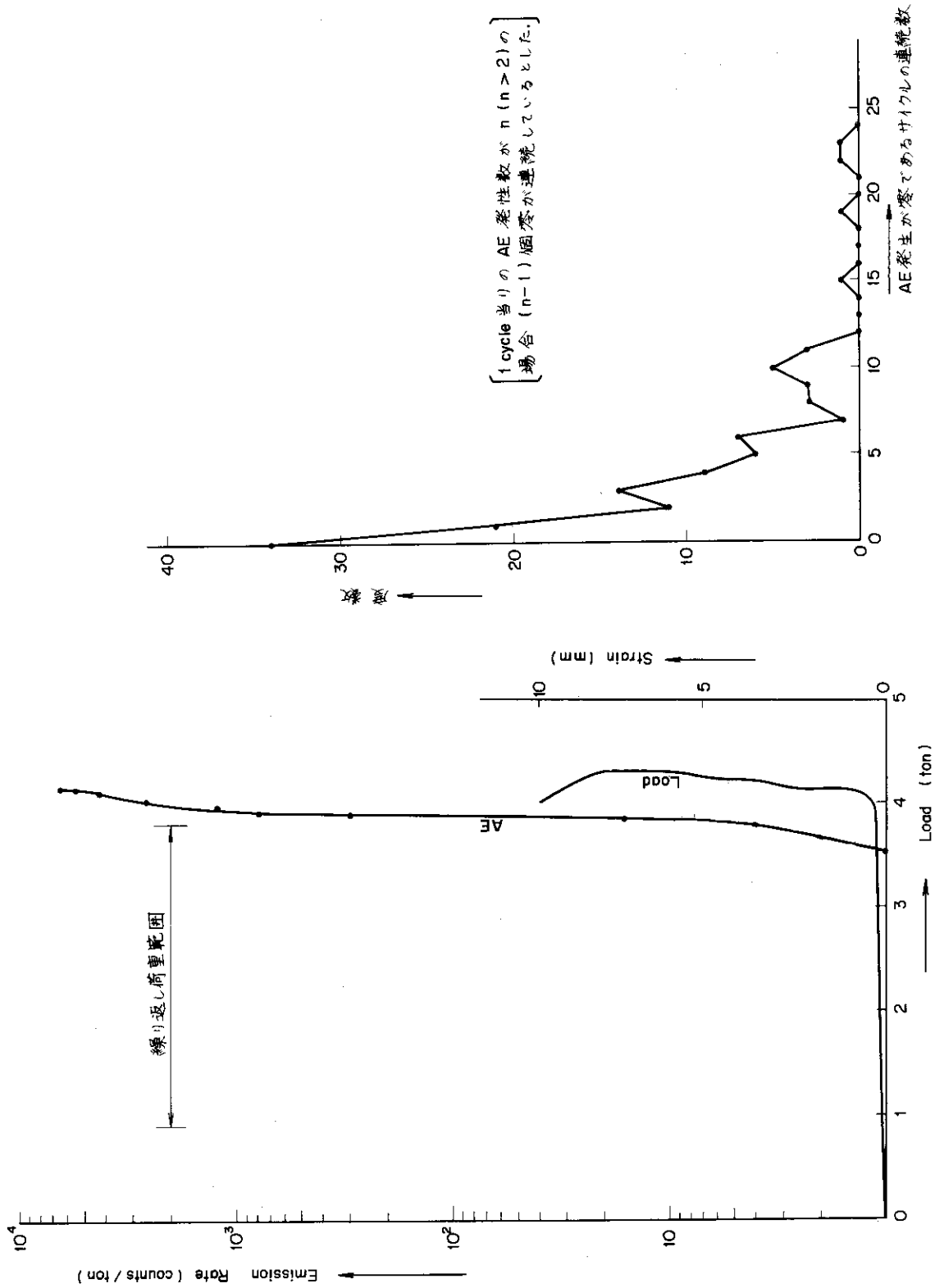


Fig. 21 疲労欠陥を有した試験片のAE発生特性

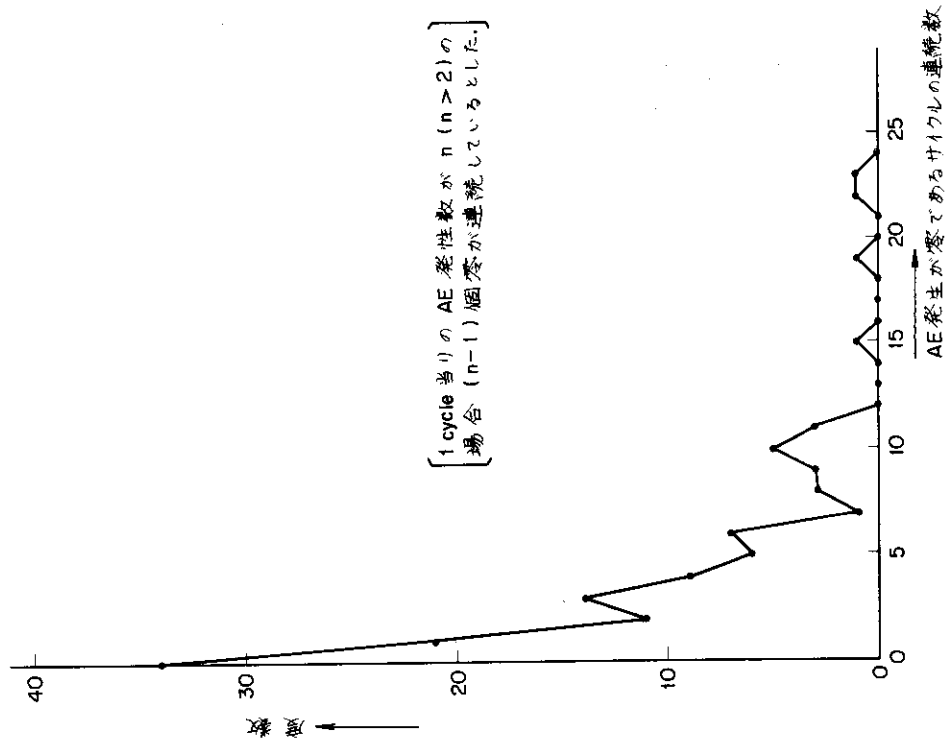


Fig. 22 AE発生が零であるサイクルの連続数の度数分布

## 参考文献

1. D.L.Parry, D.L.Robinson, "Incipient Failure Detection by Acoustic Emission A Development and Status Report, IN-1398, July 1970.
2. E.V.Waite, "Acoust--A Digital Program for Acoustic Triangulation of Spherical Vessels", IN-1369, March 1970.
3. E.V.Waite, K.V.Moore, "Acoust--A Digital Program for Acoustic Triangulation of Nuclear Vessels", IDO-17280, Nov. 1968.
4. P.H.Hutton, "Acoustic Emission Detection in the Presence of Hydraulic Noise", BNWL-933, Dec. 1968.
5. P.H.Hutton, "Nuclear Reactor System Noise Analysis Dresden-1 Reactor", BNWL-867, Oct. 1968.
6. P.H.Hutton, "Integrity Surveillance of Pressure Systems by Means of Acoustic Emission", Proceeding of First International Conference on Pressure Vessel Technology, Delft, Sept. 1969.
7. P.H.Hutton, "Detection of Incipient Failure in Nuclear Reactor Pressure Systems using Acoustic Emission", BNWL-997, April 1969.
8. P.H.Hutton, "Acoustic Emission in Metal as an NDT Tool", Material Evaluation, July 1968, pp.125-129.
9. H.L.Dunegan, D.O.Harris, C.A.Tatro, "Fracture Analysis by Use of Acoustic Emission", Journal of Engineering Fracture Mechanics, Vol. 1, June 1968, pp.105-122.
10. H.L.Dunegan, D.O.Harris, A.S.Tetelman, "Detection of Fatigue Crack Growth by Acoustic Emission Techniques", Material Evaluation, Oct. 1970, pp.221-227.
11. H.L.Dunegan, D.O.Harris, "Acoustic Emission--A New Nondestructive Testing Tool", UCRL-70750, Jan. 1968.
12. W.W.Gerberich, C.E.Hartbower, "Some Observation on Stress Wave Emission as a Measure of Crack Growth", International Journal of Fracture Mechanics, Vol.3, Sept. 1967.
13. C.E.Hartbower, W.G.Reuter, P.P.Grimmins, "Stress Wave Characteristics of Fracture Instability in Constructional Alloy", IIW-Documment, IX-700-70.
14. R.K.Steele, A.T.Green, C.S.Lockman, "Acoustic Monitoring of Hydrotests" Proceedings of a Symposium at Lockheed, Sept. 1966, pp.361-
15. A.T.Green, C.E.Hartbower, "Detection of Incipient Failure Pressure Vessel by Stress Wave Emission", International Symposium on NDT of Nuclear Power Reactor Components, Rotterdam, Feb. 1970.
16. A.T.Green, "Stress Wave Emission and Fracture of Prestressed Concrete Vessel Material", AGC-4190, June 1969.
17. C.E.Fich, "Acoustic Emission Signal Analysis in Flat Plate", BNWL-1008, April 1969.
18. A.Nielsen, F.G.Latham, N.Kirby, "Acoustic Emission from Steel Pressure Vessel", TRG Report-1983, April 1970.
19. J.R.Fredrick, "Acoustic Emission as a Technique for Nondestructive Testing", Material Evaluation.