

分置

J225 78-02  
JWES AE-78-02

昭和52年度動力炉・核燃料開発事業団委託研究

## 高速炉構造材料のA E特性に関する試験研究

本資料は 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。

2001. 7. 31

[技術情報室]

### 成 果 報 告 書

1978年6月

社団法人 日本溶接協会  
原子力研究委員会  
F A E 小委員会

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

I  
≠ 225 78-02

JWES AE-78-02



1978年6月

## 高速炉構造材料のA E特性に関する試験研究

日本溶接協会原子力研究委員会

F A E 小委員会

### 要

### 旨

本試験研究は高速増殖炉一次冷却系配管の供用中連続監視にA E技法を適用するための、構造材料の材料試験中のA E特性を測定した結果である。

第1章には、この試験研究の目的と、実施にあたったF A E小委員会の構成を録している。

第2章には、A E計測法の概要、特に変換子の校正法についてまとめている。

第3章には、試験研究に用いたSUS 304、SUS 316、Cr-Mo鋼の塑性変形にともなうA E挙動がまとめている。

第4章は、SUS 304、SUS 316に関し、疲労き裂進展にともなうA E挙動が応力位相と関係づけて示されている。

第5章では、上記結果の評価と検討を、そして第6章では結論と今後の指針が与えられている。

Experimental Study of Acoustic Emission Behaviours of Structural  
Materials for Fast Breeder Reactors.

FAE Subcommittee

Atomic Energy Research Committee

The Japan Welding Engineering Society.

Abstract

Acoustic Emission signals of structural materials for FBR during plastic deformation and fatigue crack propagation are studied in detail, for the purpose to apply the Acoustic Emission technique to on-line-monitoring for FBR.

In the first chapter the purpose and organization of this sub committee are described.

The second chapter represents the calibration method of transducers which are used in this subcommittee.

In the chapter three, the characteristics of AE signals during plastic deformation for Sus 304, Sus 316 and Cr-Mo steel are summarized. The chapter four is the results of AE during fatigue crack propagation for Sus 304 and Sus 316, of which results are represented in connection with cyclic stress phase. Evaluation of the obtained results is summarized in chapter 5, and viewpoint for further study is presented in chapter 6.

# 高速炉構造材料のA E特性に関する試験研究

## 目 次

概 要	7
F A E小委員会名簿	9
第1章 緒 言	10
1.1 試験研究の目的	10
1.2 試験研究の内容	11
1.3 試験研究の規模及び期日	11
第2章 F A E標準変換子と絶対感度校正	12
2.1 緒 言	12
2.2 A E変換子の感度	12
2.3 A E変換子の相互校正	12
2.4 F A E標準校正法	13
2.5 F A E標準変換子	14
2.6 結 言	15
第3章 平滑材のA E特性	22
3.1 常温単軸引張りのA E特性	23
3.1.1 SUS304 ひずみ速度と回復の影響	23
3.1.2 SUS304 鋭敏化ならびに溶体化処理の影響	33
3.1.3 2¼Cr-1Mo鋼 歪速度と回復の影響	51
3.1.3.2 2¼Cr-1Mo鋼 歪速度と回復の影響	63
3.1.4 SUS316 歪速度の影響	74
3.2 高温単軸引張りのA E特性	84
3.2.1 SUS304 温度、歪速度、荷重保持時間の影響	84
3.2.2 SUS304 鋭敏化ならびに溶体化処理と温度の影響	106
3.2.3 2¼Cr-1Mo鋼 温度と回復の影響	117
3.3 常温、高温における繰り返し変形過程のA E特性	123
3.3.1 SUS304 のA E特性	123
3.3.2 SUS316 のA E特性	124

第 4 章	切欠き材の疲労き裂進展に伴う A E	133
4.1	SUS304 片側切欠き材の A E 特性	134
4.1.1	目 的	134
4.1.2	試験方法	134
4.1.3	実験結果	134
4.1.4	結果の評価	135
4.2	SUS304 環状切欠き材の A E 特性	145
4.2.1	目 的	145
4.2.2	試験方法	145
4.2.3	A E 試験の結果	145
4.2.4	結果の評価	146
4.3	SUS316 片側切欠き材の A E 特性	152
4.3.1	目 的	152
4.3.2	試験方法	152
4.3.3	A E 試験の結果	153
4.3.4	結果の評価	155
第 5 章	試験結果の総括と評価	176
5.1	平滑材の A E 特性	176
5.1.1	試験実施機関	176
5.1.2	実験結果のまとめ	176
5.2	切欠き材の疲労き裂進展に伴う A E 特性	178
5.2.1	試験実施担当機関	178
5.2.2	実験結果のまとめ	178
5.3	試験結果の評価	179
5.3.1	A E 信号の有効性	179
5.3.2	A E 発生状況	180
5.3.3	温度の影響	181
5.3.4	応力位相と A E 信号の関係	181
5.3.5	き裂進展量と A E	181
5.3.6	A E 信号処理とその表示	182
第 6 章	結 言	183

# 概 要

## 1. 題 目

高速炉構造材料のA E特性に関する試験研究

## 2. 研 究 目 的

高速炉における冷却材バウンダリの構造健全性の供用中監視方法としてA E技法を適用するためには、まず高速炉構造材料の疲労損傷を主とする材料挙動とA E信号の定性的及び定量的相関についてデータを蓄積する必要がある。そこで主要な高速炉構造材料であるSUS304, SUS316及び $2\frac{1}{4}$ Cr - 1Mo鋼について、そのA E基本特性を把握するための試験研究を行った。

## 3. 業 務 範 囲

- (1) A E材料試験法の確立
- (2) 材料試験片の製作
- (3) A E材料試験
- (4) 報告書の作成

## 4. 業 務 内 容

### 4.1 A E材料試験法の確立

従来A E材料試験は実施機関によりまちまちの方法がとられていたが、標準となる試験法を確立する。特に検出素子(A Eトランスデューサ)の取付方法を含めた試験法の選定は、採取されるデータに大きな影響を及ぼすので、4.3項の試験を実施するに当って、その標準的な方法を定めるとともに、トランスデューサの較正も可能な限りはかるものとする。

### 4.2 材料試験片の製作

SUS304, SUS316及び $2\frac{1}{4}$ Cr - 1Mo鋼に関して、4.3項に示す試験を実施するために必要な材料試験片を製作した。

### 4.3 A E材料試験

下記(1)に示す材料について(2), (3)に示す試験を実施した。ただし(3)項はSUS304 SUS316について実施した。

#### (1) 材 料

SUS304, SUS316,  $2\frac{1}{4}$ Cr - 1Mo鋼

#### (2) 単軸引張圧縮時のA E特性

次の各パラメータとA E放出特性との相関を定性的かつ定量的に把握した。

a) 温度；室温～600℃

b) ひずみ速度； $4 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-5}$  /sec 程度

c) 熱処理

(3) 疲労損傷過程における A E 放出特性

温度をパラメータとして疲労損傷時における A E 放出特性を定性的に把握した。

5. 実施場所及び報告書の作成

本実験業務を行うため、日本溶接協会原子力研究委員会では、F A E 小委員会を設立し、試験を担当し、報告書を作成した。

以上



## F A E 小 委 員 会 名 簿

	氏 名	所 属
主 査	飯 田 国 広	東京大学 工学部船舶工学科
副 主 査	尾 上 守 夫	東京大学 生産技術研究所
幹 事 長	岸 輝 雄	東京大学 宇宙航空研究所
幹 事	金 原 勲	東京大学 工学部船舶工学科
"	榑 昌 英	船舶技術研究所
"	仲 佐 博 裕	(財)電力中央研究所 エネルギー環境技術研究所
"	羽 田 野 甫	東京工業大学 精密工学研究所
"	森 康 彦	日本大学 生産工学部
中 立 委 員	石 井 勇 五 郎	日本大学 工学部
"	小 倉 信 和	横浜国立大学 基礎工学研究施設
"	藤 村 理 人	高温構造安全技術研究組合
"	宮 園 昭 八 郎	日本原子力研究所 構造強度研究室長
委 員	中 島 玉 雄	石川島播磨重工業(株) 技術研究所基礎技術部
"	藤 岡 芳 朗	川崎重工業(株) 技術研究所理化学研究室
"	高 橋 英 司	(株)神戸製鋼所 中央研究所, 第七研究室
"	渡 辺 哲 夫	新日本製鉄(株) エンジニアリング事業本部技術協力事業部
"	門 田 安 弘	新日本製鉄(株) 基礎研究所
"	白 岩 俊 男	住友金属工業(株) 中央技術研究所
"	有 井 満	東京芝浦電気(株) 第1原子力システム部技術主幹
"	丸 山 温	日本鋼管(株) 技術研究所計測研究室
"	西 岡 章 夫	(株)日立製作所 日立研究所第3部
"	中 村 哲 男	三菱重工業(株) 高砂研究所電子技術研究所
委 託 者 側 委 員	岡 林 邦 夫	動力炉核燃料開発事業団 高速増殖炉開発本部
"	永 田 敬	動力炉核燃料開発事業団 高速炉安全性試験室

# 1 章 緒 言

## 1.1 試験研究の目的

原子炉圧力容器、及び配管系の供用前、供用中の監視法として Acoustic Emission (AE) 法が注目され、ASME, ASTM 等においても、その標準化が準備される段階に近づいている。この AE 法を FBR 1 次冷却系配管の供用中の安全監視への適用は、AE 法本来の有する構造要素を遠隔、且つ広範囲に監視しうる可能性の故に、実用化に向けての期待は大きいといえる。

この AE 法に関する研究は、世界各機関において精力的に進められているが、未だ軽水炉においてさえ供用中監視への適用例は少なく、FBR の機器への適用は、その報告例は皆無に等しい現状である。本委員会は、51 年度に AE 法実用化のための調査活動を行い、その成果は、「AE 実用化のための予備調査」(J 225-77-03, JWES-AE-7702) としてとりまとめられている。この調査は、

- (1) 構造材料の AE 基本特性
- (2) 構造要素の基本的音響特性
- (3) 背景雑音
- (4) AE 変換子
- (5) AE 信号処理法

の 5 項目に分けて行われたが、その結果、位置評定等を中心問題にした計測機器は、一応のレベルに到達しているのに対し、生じた信号の評価法 特に AE の材料特性の定量化に未知の要素が多く、この事が、AE 法をして実機適用の大きな障害となっていることを指摘してきた。この状況は、単に原子力機器への AE 法適用の問題点ではなく、広く他の構造要素への AE 法適用における問題点であり、JCAE (日本 AE 委員会) においても、広くこの方向の研究が進められつつある。又、この領域の研究は広く諸外国、特に米国においては、NRC の AE 研究の Phase B として取りあげられ、AE 研究の最重点課題として計画されている。

本試験研究では、このような現況に鑑み、FBR 1 次冷却系に使用が考えられる構造部材の平滑試験片、切欠き試験片の変形、き裂進展に伴う AE 材料特性を実験的に把握することを中心課題として、そこに到る AE 計測法の標準化をも目的として試験を進め、よって FBR の供用中試験への AE 適用の方法を確立することを目的としている。

この試験研究では、2 ヶ年を目的としており、本年は、(1) AE 変換子校正法の確立、(2) 変形に伴う AE 挙動を明確にするとともに、一部 (3) 疲労き裂進展に伴う AE の測定を行った。

## 1.2 試験研究の内容

### 1.2.1 変換子の校正と測定法（2章）

現在、A E変換子の校正法は、標準化されたものは未だ確立されていない。米国 N.B.S. 等を中心に近い将来、標準校正法の提案がなされる状況にあるが、これらに対応しつつ、且つ我が国独自の手法を確立すべく、大型鋼片を使用した絶対校正法を採用して、本試験研究に使用した変換子の校正を行った。用いた変換子は、本委員会ですべてに開発した高感度 140 KHz 共振型である。

又、新たに開発された  $\text{LiNbO}_3$  高温変換子の使用も考慮にいれ、東芝より提供された変換子についての校正も進めた。又、高温における A E測定のための導波棒の形状、寸法、及び取り付け法に關しての標準化をも行っている。

### 1.2.2 平滑材の A E特性（3章）

用いた材料は、SUS304, SUS316,  $2\frac{1}{4}$  Cr - 1 Mo 鋼である。試験片は、丸棒試験片であり、両端部に変換子を直接、又は導板棒を介して取りつけている。

常温単軸引張り試験では、ひずみ速度の影響、及び Kaiser 効果を考慮しての回復の影響を明確にすることを目的としている。又、材料因子として溶体化処理、鋭敏化処理の影響を求めている。

高温単軸引張り試験では、温度、ひずみ速度の影響と同時に、高温において荷重保持時間の影響を明らかにすることを目的としている。

繰り返し変形過程の A E特性は、再降伏（バウシソナー効果）との関係、及び繰り返し数の影響を明らかにしようとしたものである。

### 1.2.3 切欠き材の疲労き裂進展に伴う A E特性（4章）

片側切欠き材、及び環状切欠き材を用いて、き裂進展に伴う A Eにおよぼす温度、保持時間、荷重速度、繰り返し荷重の影響を明らかにすべく試験を行った。本年は、SUS304, SUS316, を用いた試験研究を行い、応力位相と A Eの発生挙動の関係を調べることにより、疲労過程に生ずる A E信号の意味を明確にせんとしたものである。

## 1.3 試験研究の規模、及び期日

本研究は、前掲に示す参加者によって実施された。本試験研究を遂行するために、日本溶接協会原子力研究委員会内に F A E小委員会を設置し、研究の実施、試験結果の検討、報告書の作製など本試験研究に關するすべての仕事を担当した。

本試験研究は、動力炉・核燃料開発事業団より、昭和52年7月1日付の委託依頼を受けて実施したものである。

試験研究実施期日は、昭和52年7月1日に開始し、昭和53年5月31日に完了した。結果の検討を重ね、本報告書がまとめられたのは昭和53年6月である。

## 2章 F A E標準変換子と絶対感度校正

### 2.1 緒言

A Eの定量的な評価や異なった装置で得られたデータの比較を行うためには、使用したA E測定系の特性が定量的に把握されていることが必要である。非破壊検査法として従来から知られている超音波探傷法では、基準となる傷を含んだ標準試験片を用いて、探傷機の送受波の総合的な感度を規正することによって、超音波変換子（探触子）単体の特性が不明であっても、その目的を達成することが可能である。これに対し、A E変換子は専ら受波の目的に供されるので、その特性が明らかでないA E測定系全体の特性を決定し得ないことになる。A E法を確立して行く上で、A E変換子の感度校正が重要な意味を有する所以である。

### 2.2 A E変換子の感度

A E弾性波を検出して電気信号に変換するA E変換子の特性は、入射弾性波の大きさPに対する出力電気信号の大きさEの比  $E/P$  によって表現される。A E変換子のこの特性を予め求めておけば、変換子の出力電気信号の大きさから入射弾性波の大きさを決定することが可能になるので、これを“絶対感度”と呼ぶことにする。

変換子の絶対感度は、基本的には、既知の大きさの弾性波が入射したときの出力電気信号を測定することによって与えられる。従来、A E変換子の校正を行う目的で、電気スパークやサンドブラストなどによって生ずる音を音源として、A E変換子を励振したときの出力電気信号を測定する方法が広く行われてきた。しかし、この音源によって生ずる弾性波の大きさや周波数分布は必ずしも明確ではなく、再現性も十分満足されるものではないので、相対的な感度の目安が得られるだけで、絶対感度を決定することはできなかった。

絶対感度の基準となる弾性波の大きさの尺度として、空中音響の分野では“音圧”が採用されることが多い。しかし、媒質の表面に取り付けて使用するA E変換子の場合には、媒質表面における弾性波の音圧の定義が困難であるという問題が生ずる。A E変換子の絶対感度の基準には、入射弾性波の変位に着目した尺度を採用すべき旨の提案がなされている。(H. Hatano and E. Mori: Acoustic-Emission Transducer and its Absolute Calibration, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 59, No.2, p. 344 (1976))

### 2.3 A E変換子の相互校正

通常のA E変換子は、その素子として圧電材料でできた振動子を用いているので、受波器の他に、電気信号を印加して弾性波を発生する送波器としての動作も行う。このような可逆変換子の絶対感度校正は、空中音響や水中音響の分野で古くから実用化され、国際標準に採用されている相互校正法によって行うことができる。Fig. 2-1に示したように、3個の変換子について、独立な3個の

送受波の組み合わせを構成し、各々の組み合わせについて送波器に印加した電圧  $E_0(n)$  と受波器の発出力電圧  $E_0(n)$  を測定する。次に、各変換子の自由インピーダンス  $Z_f(n)$  を測定すると、例えば、変換子 I の受波感度は次式によって与えられる。

$$M_0(I) = \frac{1}{H} \frac{Z_f(1) \cdot Z_f(3)}{Z_f(2)} \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{E_0(2)}{E_s(1)} \cdot \frac{E_s(2)}{E_0(3)} \cdot \frac{E_0(1)}{E_s(3)} \right)^{1/2} \dots \dots (1)$$

ここで  $H$  は Reciprocity Parameter と呼ばれ、伝搬媒質、弾性波のモード、感度の単位に依存するパラメータである。相互校正法では、変換子に入射する弾性波の大きさの直接の測定を行わないで絶対感度を決定し得るが、予め Reciprocity Parameter を測定条件に合わせて導出する必要がある。

大型圧力容器などの構造物では、表面波（レーリー波）のモードで A E 弾性波が変換子に入射する確率が高いことに着目して、実用に供される A E 変換子の絶対感度校正法として、金属ブロックの表面波音場における相互校正法が考案されている。（H. Hatano and E. Mori : 前出文献）この校正法は、その後各国で追試が行われ、音響測定の標準機で有名な Bruel & Kjaer 社のグループは、従来発表された A E 変換子の種々の校正法を比較検討した結果、最も妥当で満足し得る方法であろうとの評価を下している。（B. K. Christoffersen and T. R. Licht : Acoustic Emission Transducers — New Calibration and Construction Methods, 6th Meeting of the European Working Group on Acoustic Emission, Rome, Italy (Sept. 1977)）

#### 2.4 F A E 標準校正法

今回の実験では、A E 計測の対象が材料試験に限定されているので、A E 変換子の軸方向から入射する縦波に対する感度が重要になるものと考えられる。F A E 標準校正法として、金属ブロック中の縦波音場を利用した相互校正法を採用した。A E 変換子の受波感度を、A E 変換子を置くべき位置における入射弾性波の変位速度を  $V_0$  (m/s) として、

$$M_0 = \frac{E_0}{V_0} \quad (V/m/s) \quad \dots \dots (2)$$

によって定義したときの Reciprocity Parameter は、次式によって与えられる。

$$H = \frac{2 f (1+\sigma) (1-2\sigma)}{\ell E (1-\sigma)} \quad (s/kg) \quad \dots \dots (3)$$

但し、 $f$  は周波数、 $\ell$  は送受波器間隔（媒質の厚さ）、 $E$  と  $\sigma$  は媒質のヤング率とポアソン比である。（H. Hatano, J. Ohsumi and E. Mori : 未発表論文）

相互校正を実施する場合、直接波と媒質表面で生ずる反射波が重なって受波器に入射すると、測定誤差の原因になる。吸音ゴムを媒質表面に接着して反射波の発生を抑えることもあるが、その完

全を除去は困難である。そこで媒質として大きな金属ブロックを用い、直接波と反射波の伝搬時間差に基づいた両者の判別を行うことにした。つまり、送波器に印加する電圧信号を、一定の継続時間  $\tau_1$  以上であれば、直接波に対する受波器の出力信号が、反射波と区別して測定される。Fig. 2-2 には、断続正弦波を用いた校正における計測タイミングの説明図を示す。

縦波音場における相互校正を行う際の媒質となるブロックは、東工大の設計に基づき、FAE委員会の依頼により新日本製鉄が製作を担当した。Fig. 2-3 にブロックと支持架台を示す。校正を行う AE 変換子は、ブロックの両面の中央に対向して取り付ける。このブロックでは、送波器から受波器に直投入射する純波と、ブロックの端面で1回反射した後に入射する純波の伝搬時間差は約 0.1 msec. である。校正に用いる断続正弦波の継続時間  $\tau_1$  を 0.1 msec. に設定した。なお、この継続時間  $\tau_1$  は、絶対感度校正の周波数分解能を決定する。

AE 変換子の絶対感度校正を行うための種々の測定と演算を自動的にを行い、結果を記録するためのシステムが新日本製鉄で開発され、今回の FAE 標準校正に供された。Fig. 2-4 にシステムの構成図を、Fig. 2-5 にその外観を示す。

## 2.5 FAE 標準変換子

実験の供試材のオーステナイト系ステンレス鋼は、その積層欠陥エネルギーが小さいことに対処して、塑性変形に伴う AE は著しく微弱であると考えられる。(H. Hatano: Acoustic Emission and Stacking Fault Energy, Journal of Applied Physics, Vol. 48, No. 10, P. 4397 (1977)) 今回の実験に使用する AE 変換子には、高い受波感度と、同一規格品の間の特性のバラツキの小さいことが、特に要求されよう。

最高 600°C に達する試験温度での AE 測定を行うため、常温用の圧電セラミック振動子を用いた変換子に、機械的導波棒を組み合わせたものを、一応の FAE 標準変換子とした。また、耐温度特性の優れたニオブ酸リチウム単結晶振動子を用いた変換子を、試験片に直接取り付けて使用方法についても検討を行った。

### (1) 圧電セラミック製変換子

Fig. 2-6 には、直径 10 mm、厚さ 10 mm の円筒状圧電セラミック製振動子を金属製のケースに収めた AE 変換子を示す。変換子前面の保護板も金属製であるので、試験片や導波棒への接合に強固な接着剤を用いた場合でも変換子の反復使用が可能である。この変換子は、東工大の設計に基づき目黒計器製作所で製作され、各実験参加者に配布された。

この FAE 標準変換子について、前記の校正システムを用いて絶対感度校正を行った結果を、Fig. 2-7 に示す。変換子単体の共振周波数が 140 KHz 付近であることに対応して、170 KHz 付近で受波感度が大きなピークを形成している。100-300 KHz のバンドパスフィルタを用いて、この感度のピークを利用した高感度の検出を行うことにした。製作した AE 変換子間の特性のバラツキが特に小さいこと、受波感度が著しく高いことが注目されよう。

この変換子と組み合わせて使用する機械的導波棒を Fig. 2-8 に示す。材質は 304 ステンレス鋼を用い、全長の標準は 30 cm とした。機械的導波棒の直径の最大値と、変換子に使用した圧電振動子の半径が、いずれも検出する弾性波の波長に比して小さいので、導波棒を用いたことによって生ずる検出感度の低下は微小である。導波棒のホーン部と A E 変換子の接合は、接着、又はカップラントを介した圧着とし、導波棒先端は銀ロウ付で試験片に取り付けた。常温の実験の場合でも、高温の実験のデータとの直接の比較を行い得るよう、導波棒を併用した検出を原則とした。

#### (2) ニオブ酸リチウム製変換子

キューリ点の高い (1210 °C) ニオブ酸リチウム ( $\text{LiNbO}_3$ ) 振動子を用いた A E 変換子が東芝で試作され、実験に供された。Fig. 2-9 には、この変換子の基本構成を示す。振動子は保護のためにステンレス製容器の中に納められ、対象物からの音波を効率良く伝えるために、ダイヤフラムに接着されている。容器には高温用同軸ケーブル (MI ケーブル) がつながれている。この変換子は、700 °C の高温でも使用することができる。

製作した変換子の絶対感度校正を、前記の F A E 標準校正法によって行った結果を Fig. 2-10 に示す。受波感度は 350 KHz 付近で最大となり、バラッキも少ない。

この感度は常温での値であるが、使用温度範囲内で感度低下は約 20 % であるので、使用上問題はないと考えられる。

この A E 変換子の試験片への接合には、常温ではグリースをカップラントとして使用している。高温では、アルミナやシリカを主成分としたウルトラボンドやスミセラムを用いることができる。

## 2.6 結 言

A E 変換子と、その絶対感度校正法の標準化についての有益な指針が得られた。今後、F B R 等における A E 法適用の実用化を推進するためには、大型の金属ブロックを用いたより完成度の高い絶対感度校正システムの確立、耐環境性の一層優れた A E 変換子の開発が望まれよう。

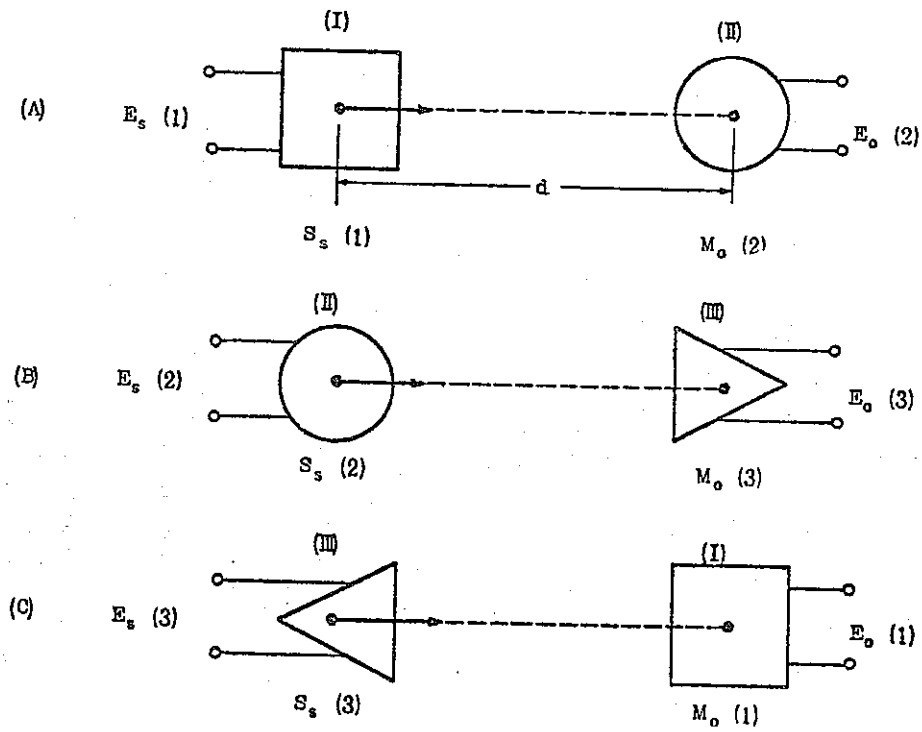


Fig.2-1 Principle of reciprocity calibration.

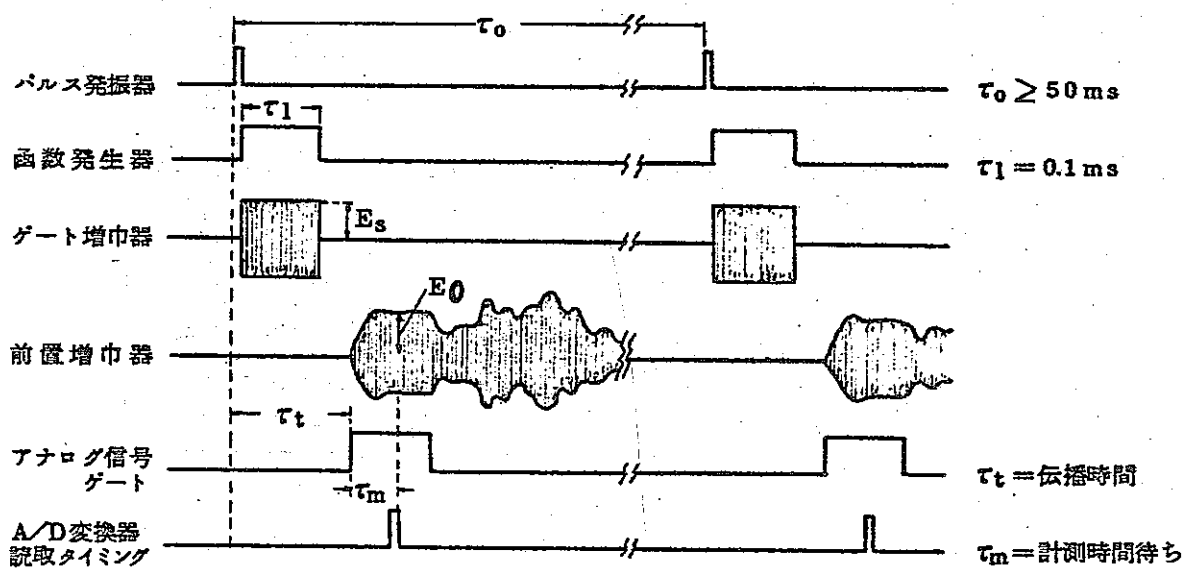
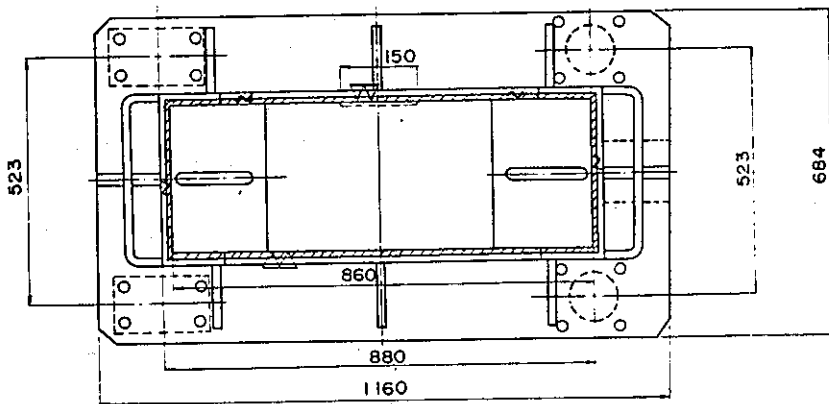
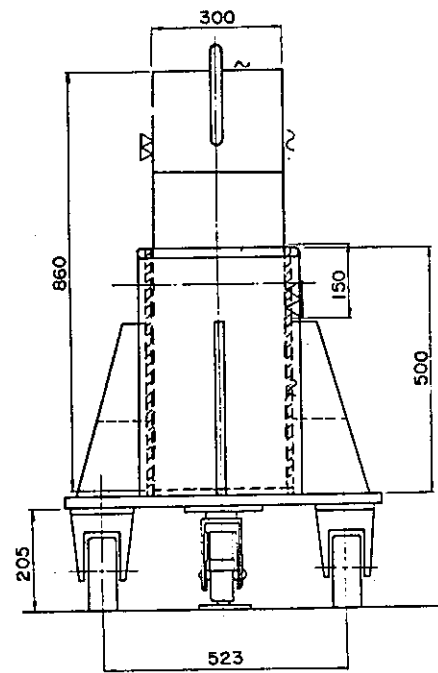
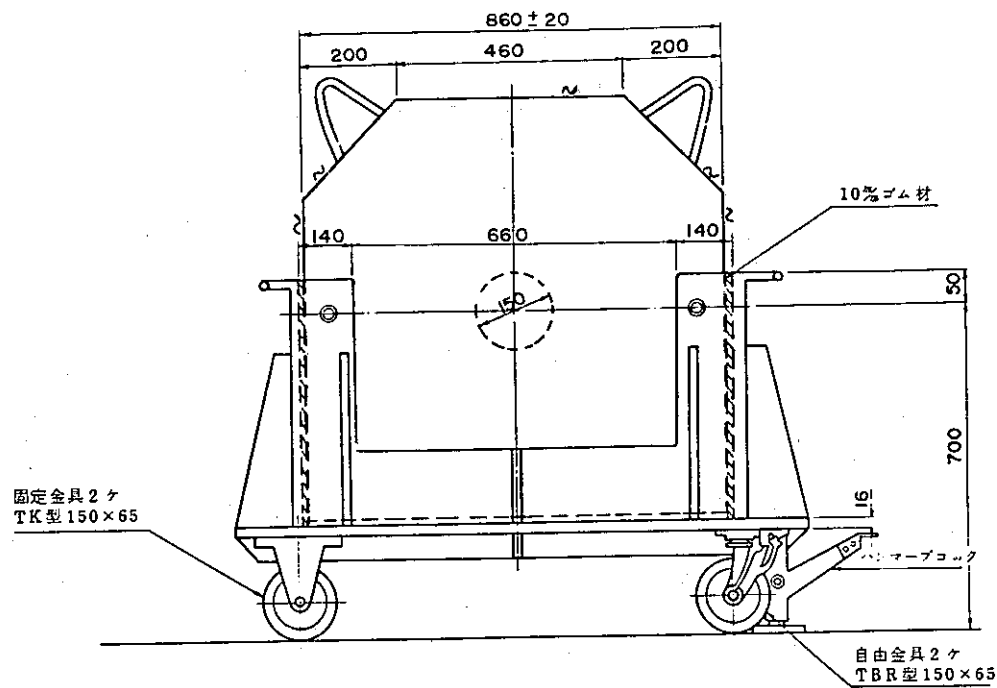


Fig.2-2 Calibration of AE transducers using pulsed-sine waves.





スチールブロック本体諸元  
 材質：S35C  
 寸法：860mm×860mm×300mm 2隅角溶し  
 重量：1.742Kg  
 製造法：50ton 塩基性電気炉にて溶製し、6ton 鋼塊を造塊。  
 再加熱後8000tonプレス及び1500tonプレスにて鍛造。  
 総合鍛錬比は8<sup>5</sup>相当。  
 焼準(850~950℃)、焼戻し(550~650℃)後、機械加工。  
 UST：中央部500mm市について2MHz、V15-23-50φで  
 欠陥エコー高さ20%以下  
 波長：2MHzにてλ3-50%  
 製作所：新日本製鉄㈱ 工作事業部 鍛造部

Fig.2-3 Steel block used for calibrating AE transducers.

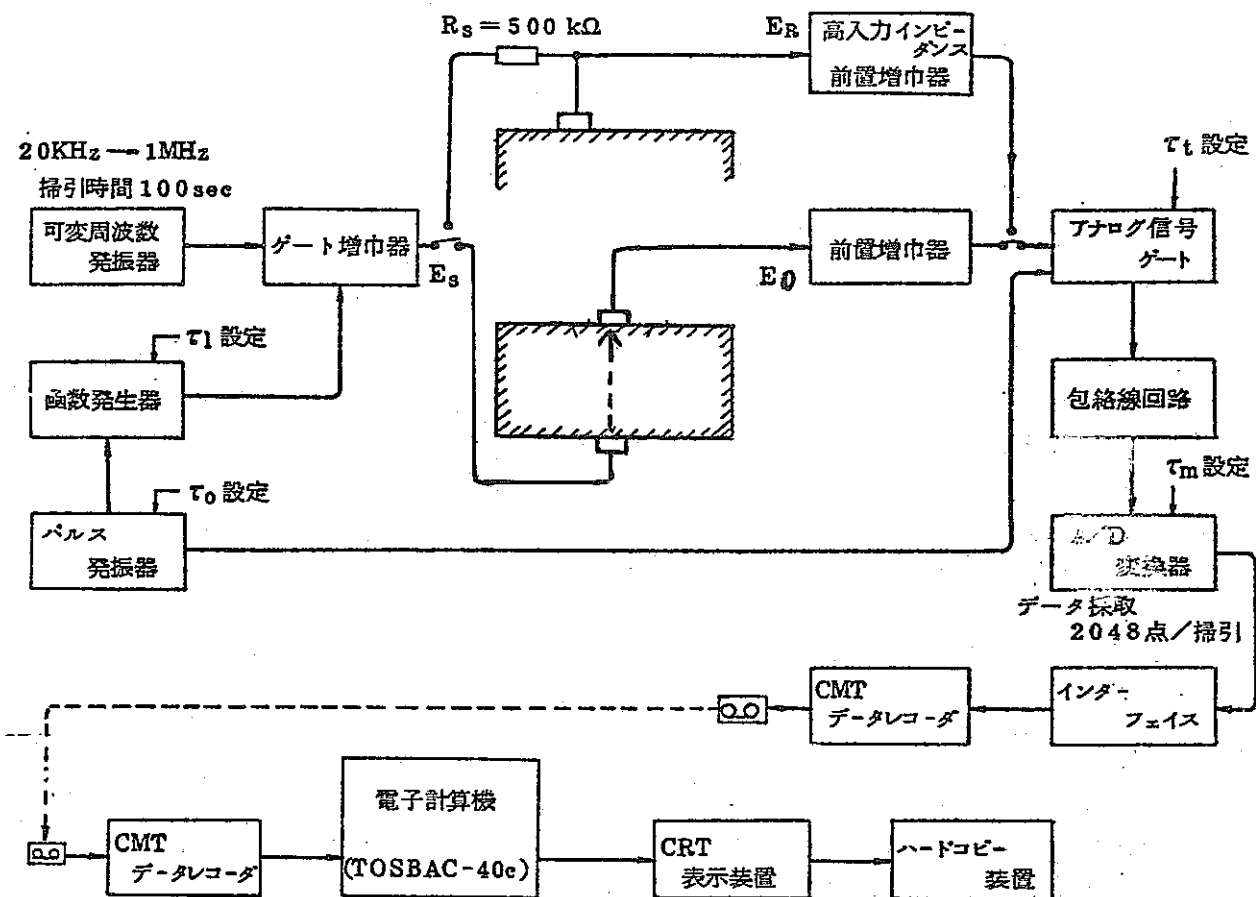


Fig.2-4 Blockdiagram of calibration system.

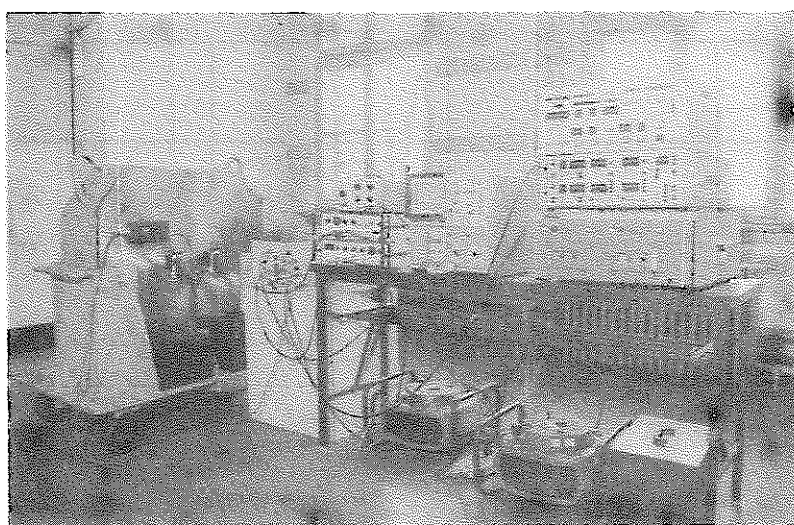


Fig.2-5 Instrumentation set-up for calibrating AE transducers.

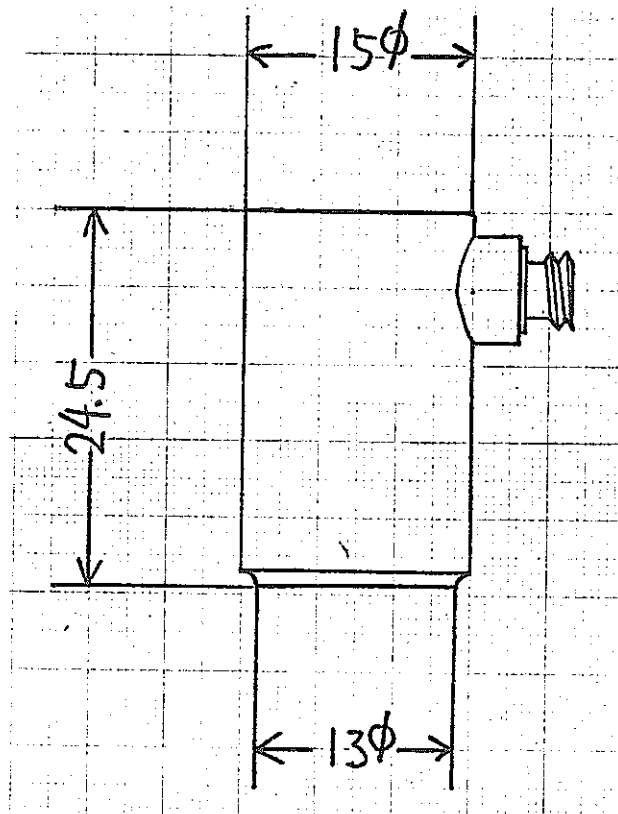


Fig.2-6 AE transducer using a piezoelectric-ceramic vibrator.

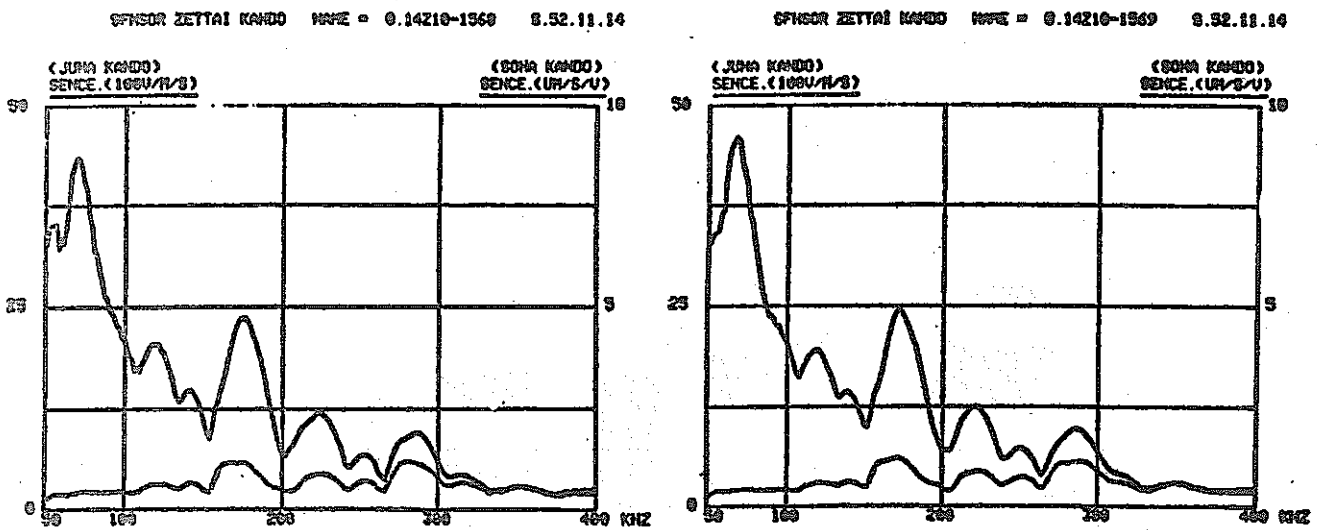


Fig.2-7 Absolute sensitivity of AE transducers using a piezoelectric-ceramic vibrator.

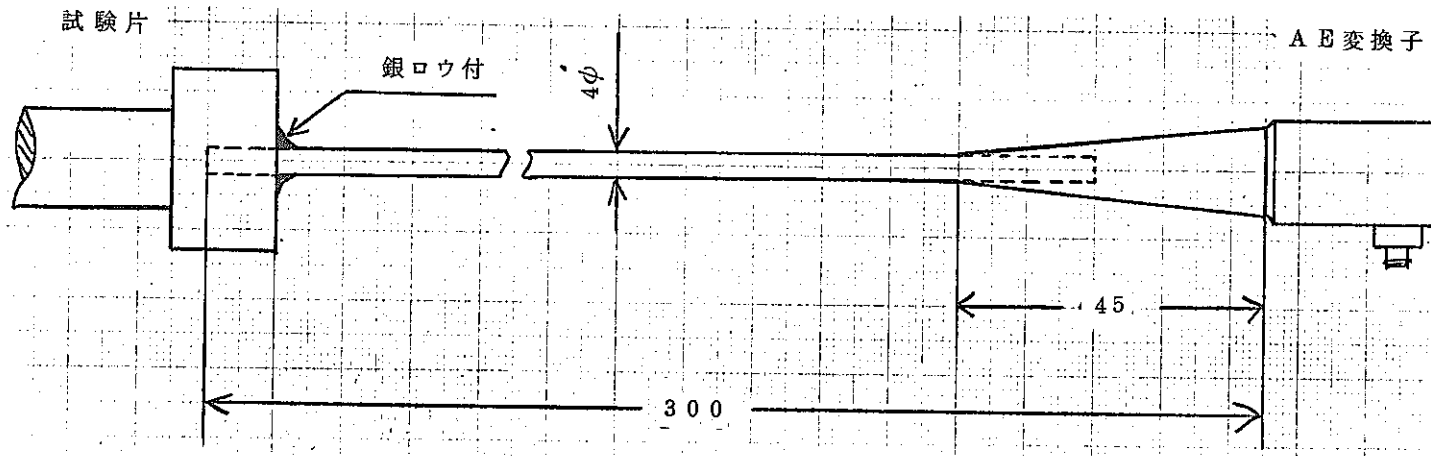


Fig.2-8 Mechanical wave guide for detecting AE under severe conditions.

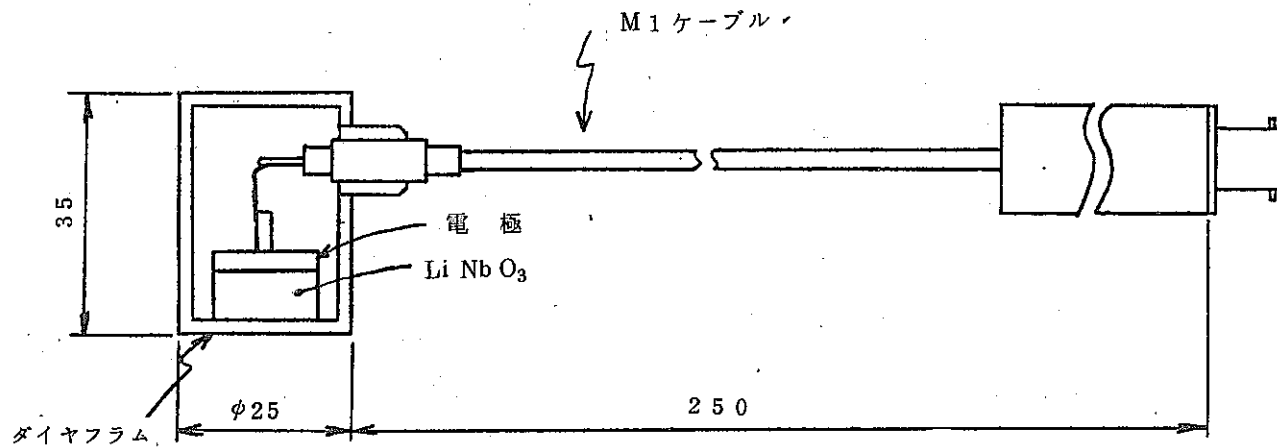
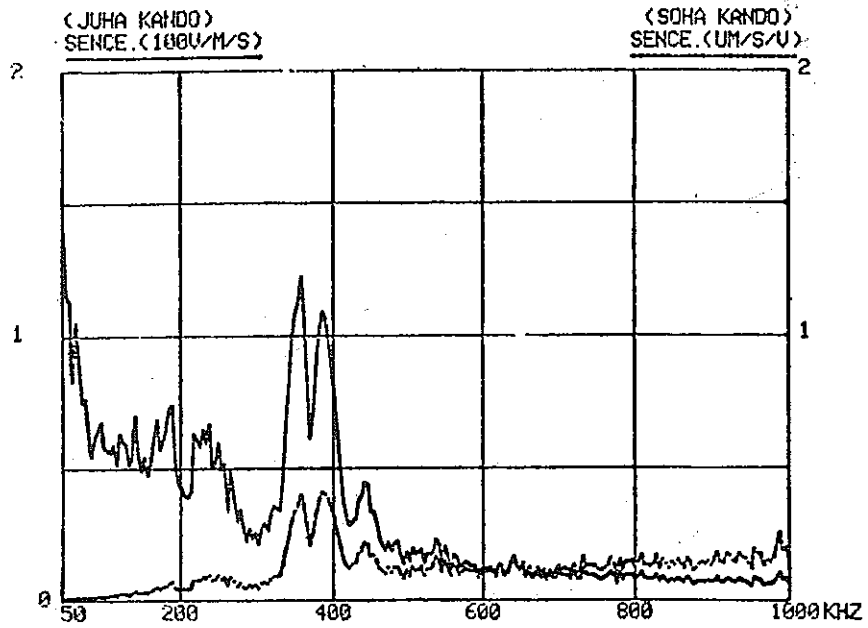


Fig.2-9 AE transducer using a Li-Nb crystal.

SENSOR ZETTAI KANDO NAME = TOSHIBA-3 9.53.2.9



SENSOR ZETTAI KANDO NAME = TOSHIBA-4 9.53.2.9

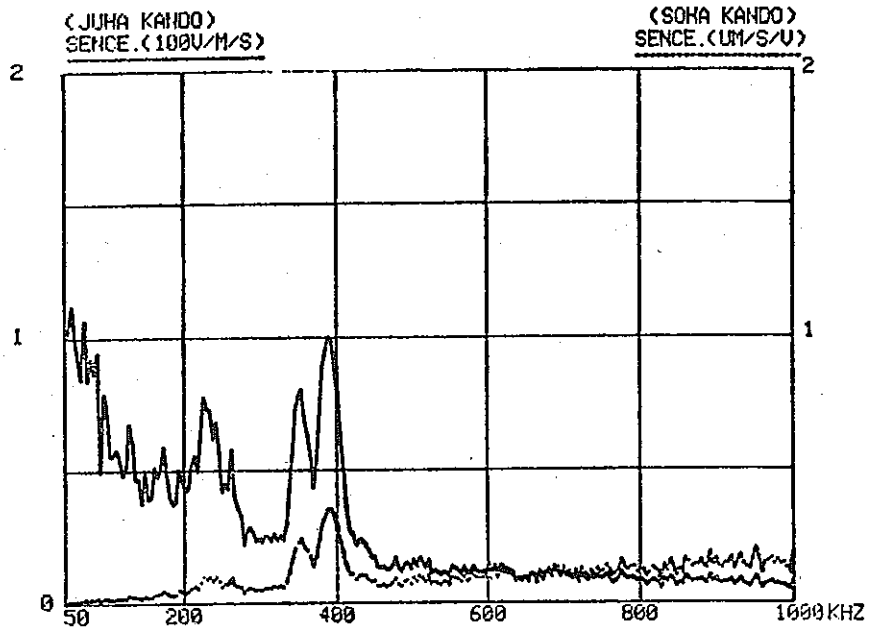


Fig.2-10 Absolute sensitivity of AE transducers using a Li-Nb crystal.

### 3 章 平滑材の A E 特性

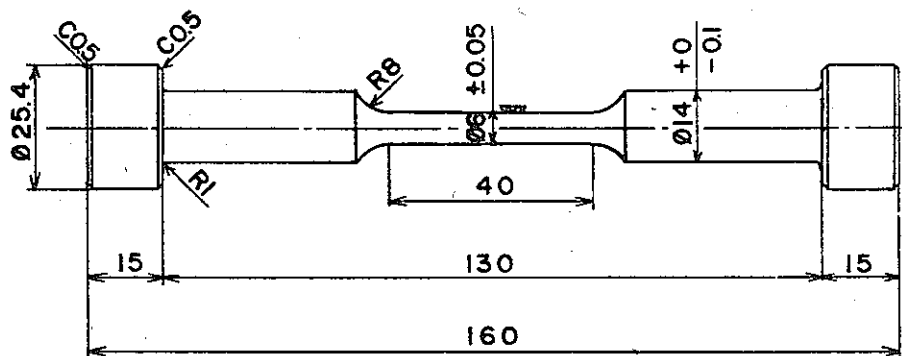
供試材 SUS304、SUS316、2¼Cr-1Mo 鋼の化学成分を Table 3-1 に示す。

本委員会で定めた FAE 標準試験片の形状と寸法を Fig. 3-1 に示す。

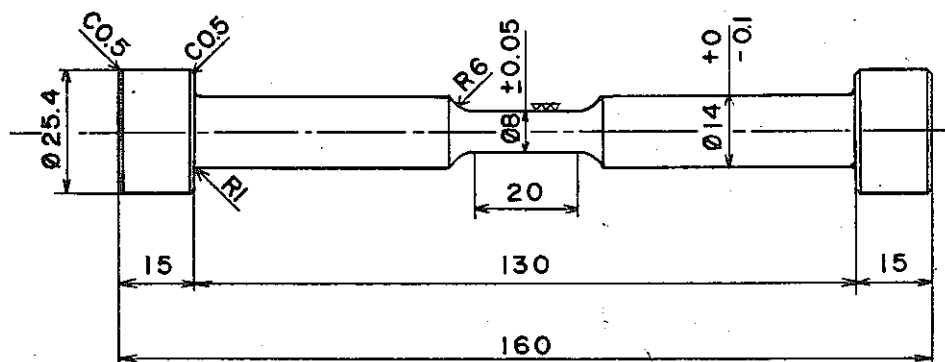
Table 3-1. Chemical composition of the steels used (wt.%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUS304*	0.06	0.41	1.72	0.029	0.019	8.86	18.31	
SUS316*	0.08	0.29	1.35	0.022	0.021	11.11	16.13	2.34
2¼Cr-1Mo	0.12	0.25	0.55	0.010	0.010		2.13	0.91

\* Heat treatment 1050°C WQ.



(a) Tensile specimen.



(b) Tension-Compression specimen.

Fig.3-1 FAE standard specimens.

### 3.1 常温単軸引張りのA E特性

#### 3.1.1 SUS304 ひずみ速度と回復の影響

##### (1) 試験目的

室温下の引張試験によって、塑性変形に伴うA Eに及ぼす引張ひずみ速度の影響ならびに10%予加工材のKAISER効果回復に対する熱処理による影響を求める。

##### (2) 供試材とその熱処理、試験片形状

供試材はFAE小委員会から支給されたオーステナイト系SUS304ステンレス鋼である。試験片形状はFIG.3.1.1-1に示すごとく平行部直径8mmの平滑試験片である。14φ部の4.1φ(深さ5mm)の孔は導波棒取付用である。ひずみ速度の影響を調べる試験片(No.1~3)の熱処理は支給のままである。

回復の影響を調べる試験片(No.4,5)は10%の引張予加工後に300°C×30min、600°C×30minの時効熱処理を実施した。

##### (3) 材料試験条件及び材料試験装置

ひずみ速度の影響は $\dot{\epsilon}=4\times 10^{-2}$ 、 $4\times 10^{-3}$ 、 $4\times 10^{-4}$ /Sの3条件、回復の影響はすべて $\dot{\epsilon}=4\times 10^{-4}$ /S一定の条件のもとで調べた。この場合ひずみ速度はクロスヘッド間の変位速度から決定した。実験雰囲気はすべて室温下、大気中である。なお、試験片のチャック部からの雑音排除のため引張試験前に治具に組込んだ状態にてチャック部のみに予荷重を加えた。ただし、試験片No.2のみは予荷重法の代わりにテフロンパッキンを介して治具に組込んだ。使用した材料試験機は島津製のオートグラフIS10Tであり、荷重及び変位を計測した。

##### (4) A E計測方法

A Eの計測系はFIG.3.1.1-2に示す。用いたA E装置は日立エンジニアリング製のAE200(2ch)である。装置仕様、計測条件等表3.1.1-1のデータシート中に示した。A E計測は導波棒使用方式であり、試験片に銀ロウ付けされたホーン付き導波棒(4φ×300L:本委員会指定の形状、SUS304)に変換子をアロンアルファにて接着して行なった。

##### (5) A E試験の結果

ひずみ速度の影響を調べた結果をFIG.3.1.1-3~6にそれぞれ示す。FIG.3.1.1-4、5は同一ひずみ速度であるが後者はテフロンパッキンを用いて引張たものである。回復の影響を調べた結果をFIG.3.1.1-7、8に示す。

##### (6) 結果の評価

図示したデータは一応の雑音対策をして得たものであるが、それを完全に弁別して得たデータでないのここでは結論を誤らないためにも傾向を指摘するにとどめる。

ひずみ速度の影響: FIG.3.1.1-3~6のリングダウン計数及びRMSと応力ひずみ曲線との比較からひずみ速度の影響をみると、A Eは負荷の直後から降伏応力近辺ならびにひずみ硬化過程の後半において多い傾向がうかがわれ、一方、ひずみ硬化過程の中期及び最大荷重点到達付近ならびにネッキング過程ではA Eは少ないように思われる。このようにひずみ速度が異なっても

A Eに顕著な差はみられないが、しかし、ひずみ速度が遅い方がR M S電圧値は幾分低くなる傾向はうかがわれる。ただし、変形挙動そのものはひずみ速度によって異なりひずみ速度が速いほど破断時または最大荷重到達時での発生ひずみは小さい傾向が認められる。

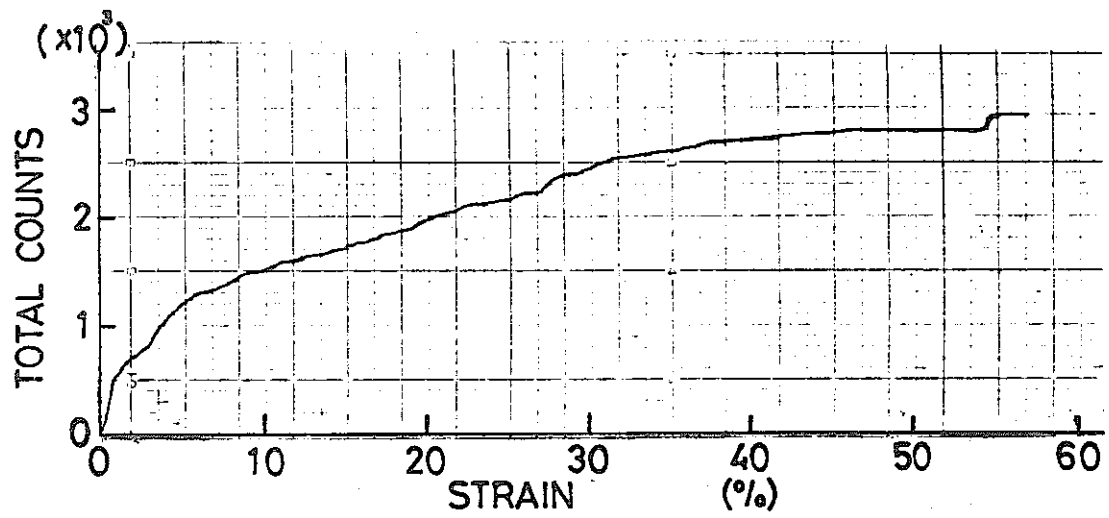
回復の影響：300℃熱処理材（No. 4）及び600℃熱処理材（No. 5）では前者より後者が処女材（No. 3）に近い挙動を示しているようである。



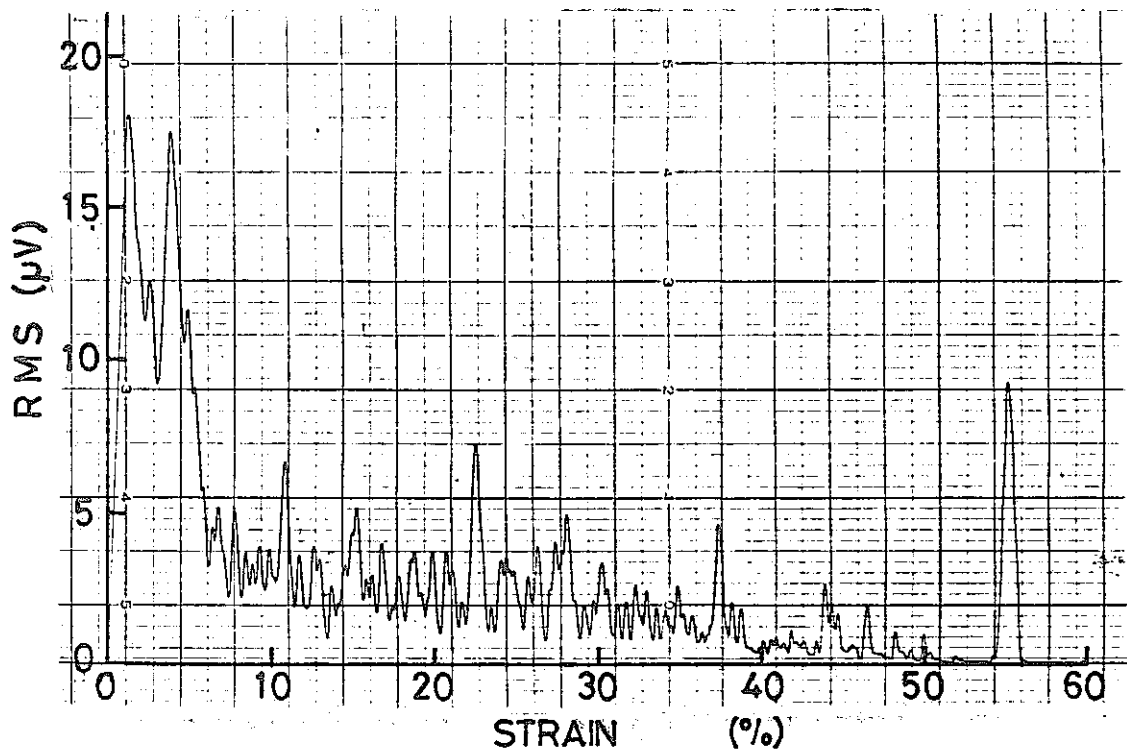
F A E A E 計測データシート

引張荷重による平滑材のA E試験		データ番号		責任者名		榎本邦夫	
		記入年月日		1978年5月 <sup>22</sup> 日 ~ <sup>27</sup> 日		所属会社名	
				(株)日立製作所			
試験材料	SUS304	試験雰囲気	大気中	試験場所	日立研究所		
試験装置	オートグラフIS-10T	材料熱処理	受入れのまま、時効処理	試験片形状	8φ平滑		
試験目的	A E特性に及ぼす引張ひずみ速度ならびに回復の影響を調べる。						
試験片番号	1	2	2'	3	4	5	
条件 条件 試験 試験	試験温度	RT	RT	RT	RT	RT	RT
	ひずみ速度	$4 \times 10^{-2}/S$	$4 \times 10^{-3}/S$	$4 \times 10^{-3}/S$	$4 \times 10^{-4}/S$	$4 \times 10^{-4}/S$	$4 \times 10^{-4}/S$
					10%加工後 300°C×30分	10%加工後 600°C×30分	
条件 条件 試験 試験 条件	ひずみ 保持時間	引張側					
		圧縮側					
	周波数						
	抑制方法				印荷波形		
A E 計測			A E 計測装置	A E モニタリング計測装置 AE200 (2ch)			
試験片番号	1	2	2'	3	4	5	
子 線 意	変換子名と番号	014Z10-1663, 1667	014Z10-1576, 1667	014Z10-1575, 1576	014Z10-1663, 1667	014Z10-1576, 1667	014Z10-1576, 1667
	校正曲線						
	取付箇所(導波棒)	φ4ホーン付	φ4ホーン付	φ4ホーン付	φ4ホーン付	φ4ホーン付	φ4ホーン付
	接着法(カップラント)	アロンアルファ	アロンアルファ	アロンアルファ	アロンアルファ	アロンアルファ	アロンアルファ
増 幅 器	前置増幅器	33dB	33dB	33dB	33dB	33dB	33dB
	主増幅器	50dB	50dB	50dB	50dB	50dB	50dB
フィルター・周波数帯域	100~500KHz	100~500KHz	100~500KHz	100~500KHz	100~500KHz	100~500KHz	
トリガーレベル	60μV	60μV	60μV	60μV	60μV	60μV	
R. M. S. 電圧	FIG.311-3	FIG.311-4	FIG.311-5	FIG.311-6	FIG.311-7	FIG.311-8	
リングダウン	FIG.311-3	FIG.311-4	FIG.311-5	FIG.311-6	FIG.311-7	FIG.311-8	
振幅分布							
エネルギー分布							
波形観察							
その他( )							
	前置増幅器	主増幅器		フィルター※		位置標定手法	
型 式	AE211	AE220	型 式		分解能		
メーカ	HEC	HEC	メーカー名	HEC	範囲		
ダイナミックレンジ	60dB	40dB	周波数帯域				
備 考	※主増幅器内蔵						

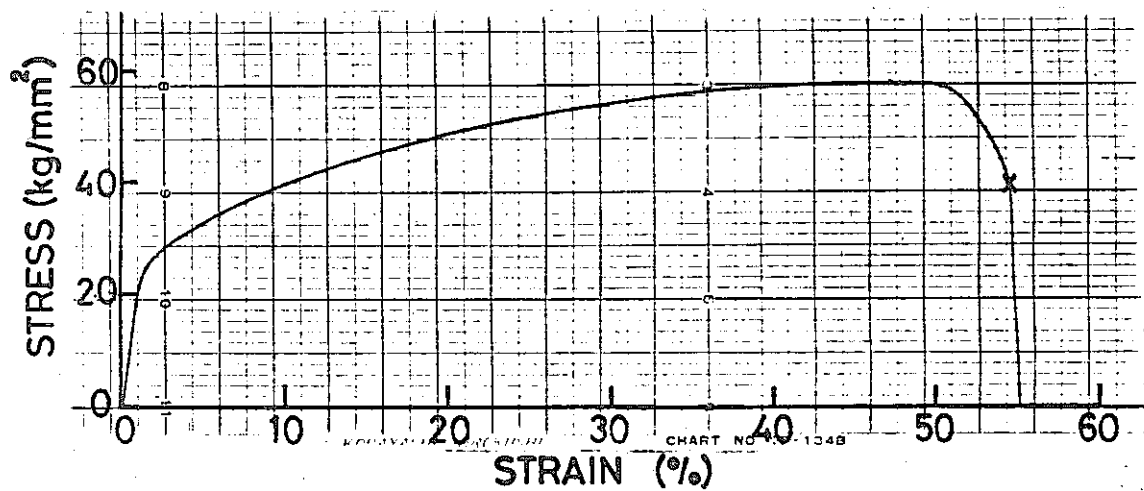




(a) RING DOWN COUNTS vs. STRAIN

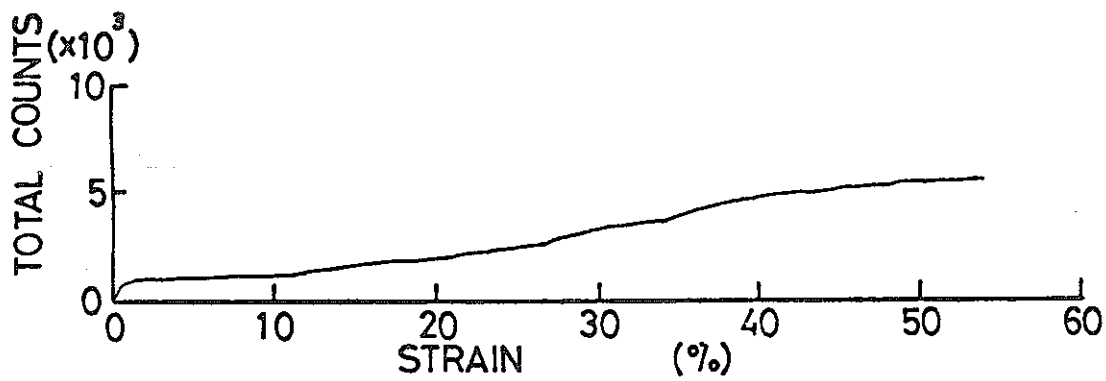


(b) RMS vs. STRAIN

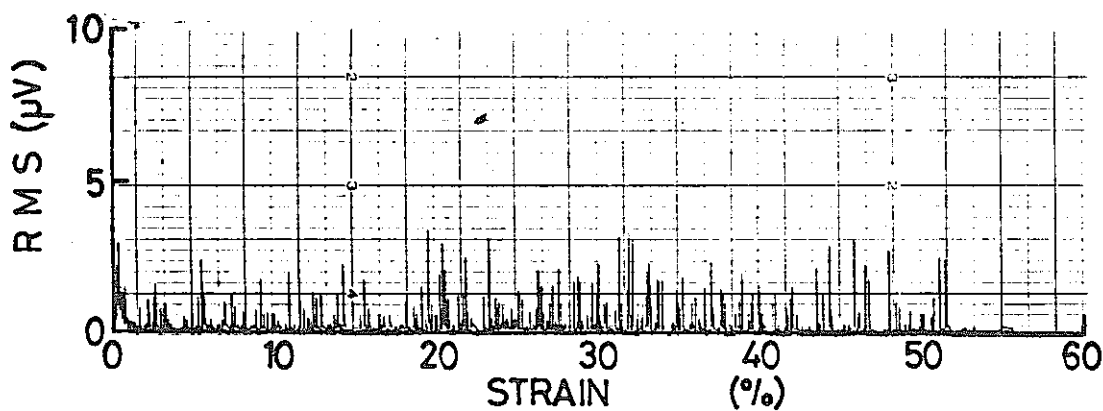


(c) STRESS vs. STRAIN

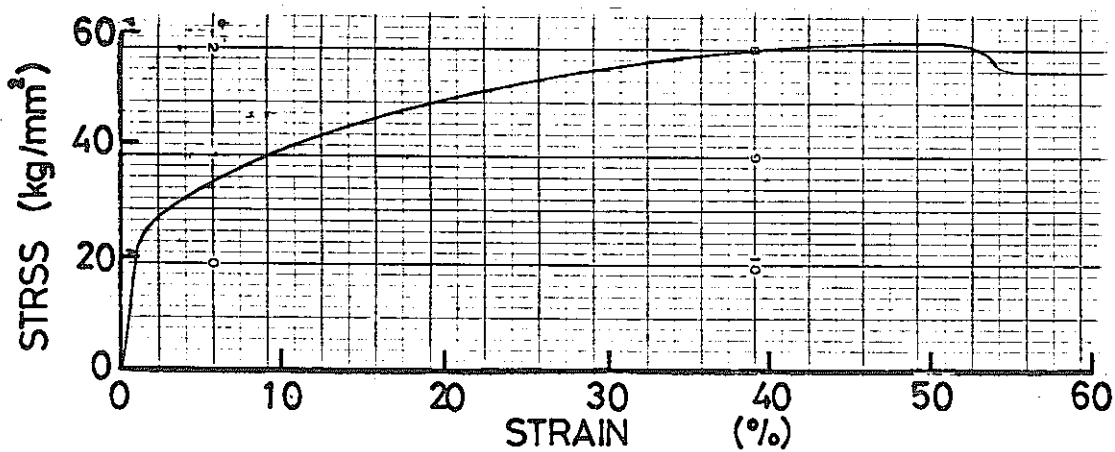
FIG. 311-3 ACOUSTIC EMISSION OF SPECIMEN NO.1 DURING TENSILE TEST  
 $(\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-2}/\text{s})$



(a) RING DOWN COUNTS vs. STRAIN

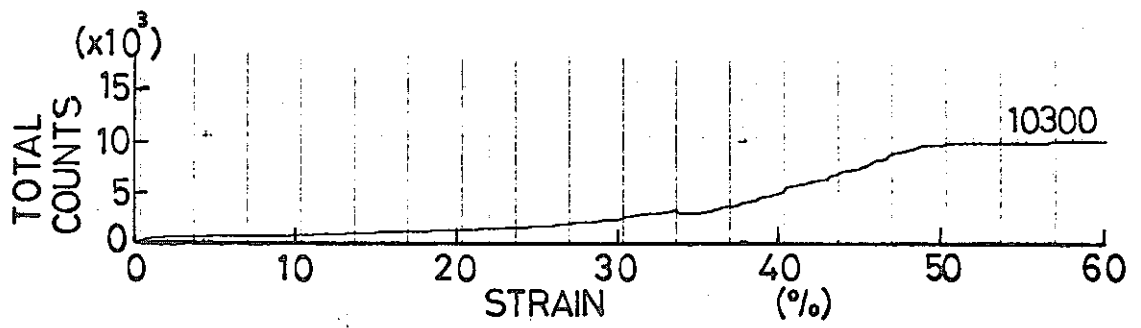


(b) RMS vs. STRAIN

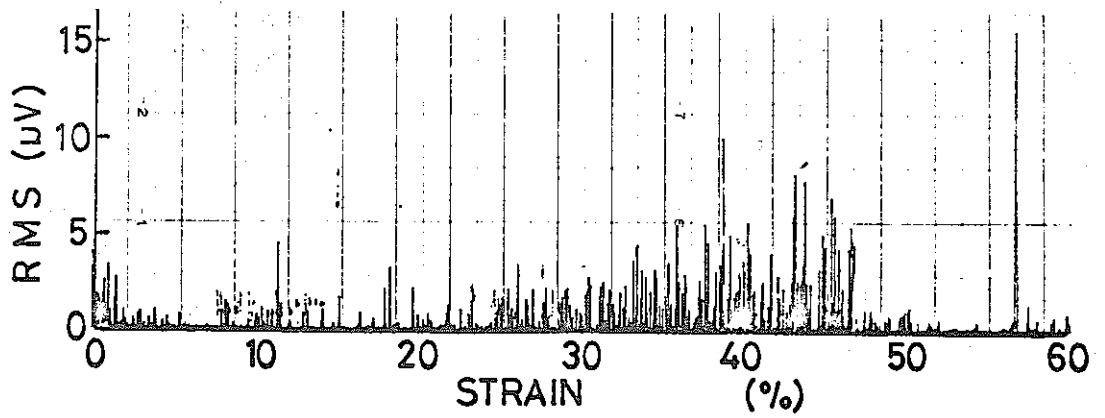


(c) STRESS vs. STRAIN

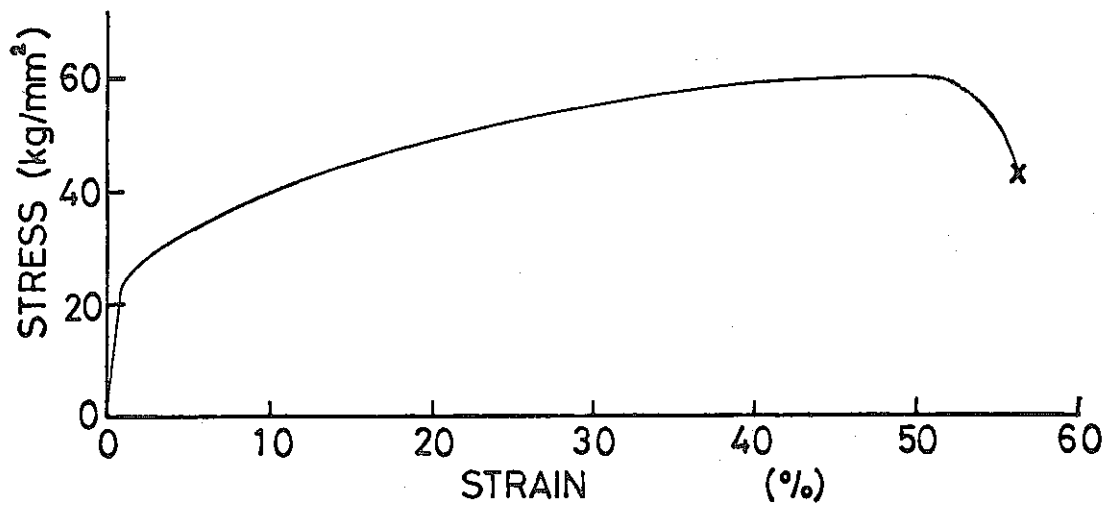
FIG.3.11-4 ACOUSTIC EMISSION OF SPECIMEN NO.2 DURING TENSILE TEST  
( $\dot{\epsilon}=4 \times 10^{-3}/s$ )



(a) RING DOWN COUNTS vs. STRAIN

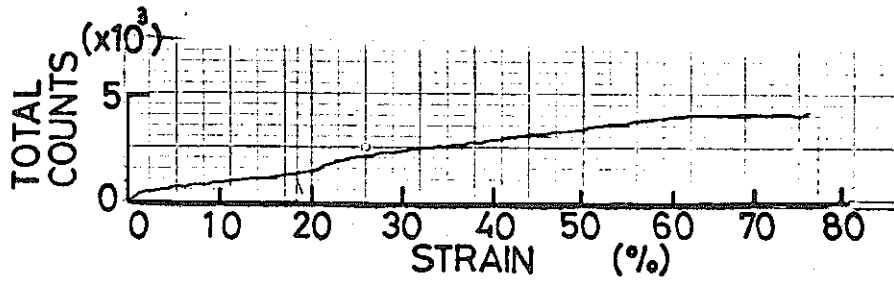


(b) RMS vs. STRAIN

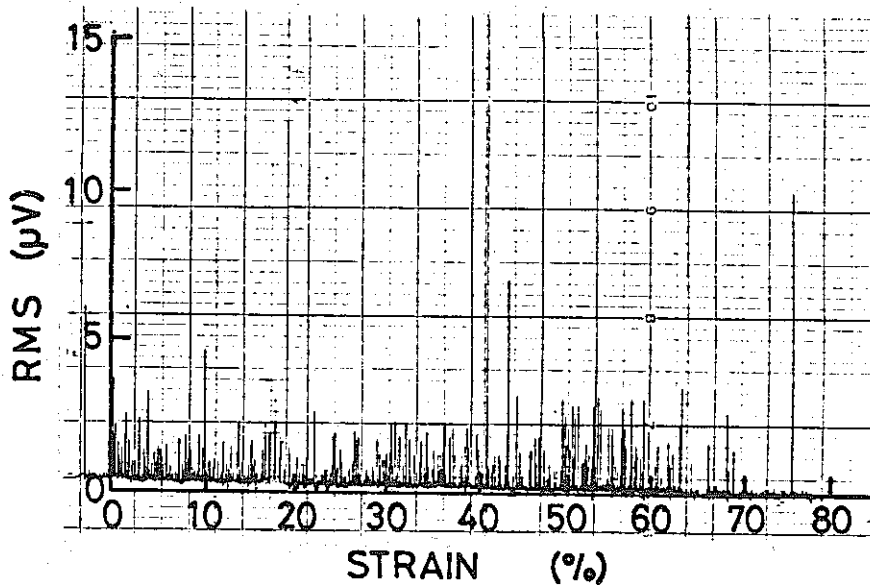


(c) STRESS vs. STRAIN

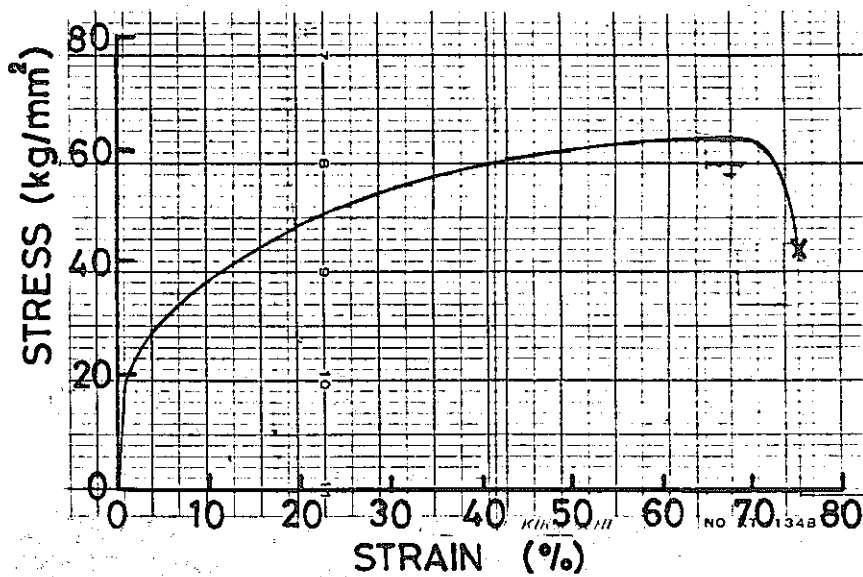
FIG. 3.1.1-5 ACOUSTIC EMISSION OF SPECIMEN NO.2<sup>o</sup> DURING TENSILE TEST ( $\dot{\epsilon}=4 \times 10^{-3}$  /s)



(a) RING DOWN COUNTS vs. STRAIN

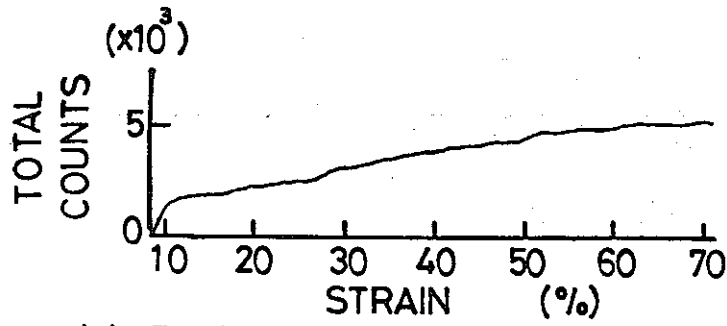


(b) RMS vs. STRAN

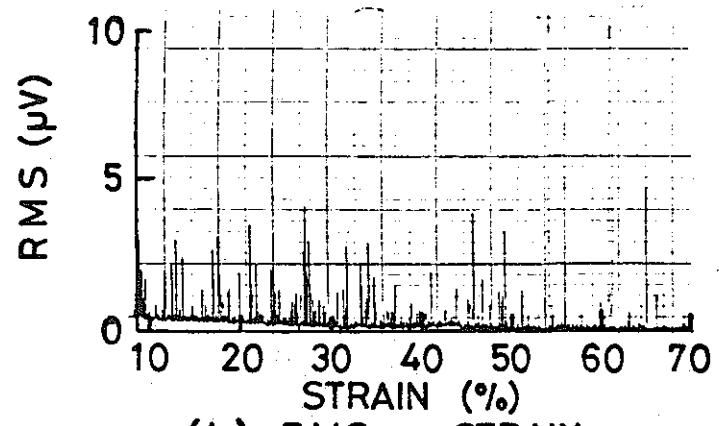


(c) STRESS vs. STRAIN

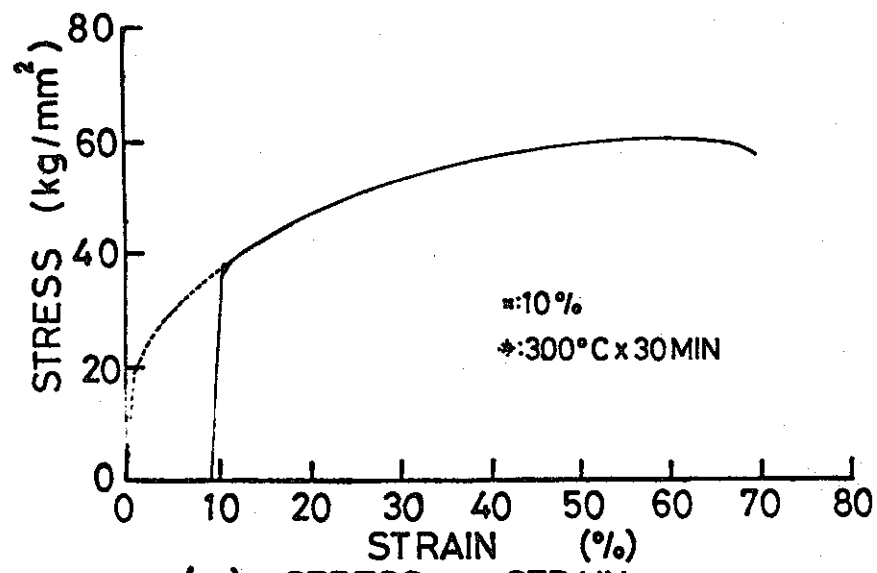
FIG. 3.11-6 ACOUSTIC EMISSION OF SPECIMEN NO.3 DURING TENSILE TEST ( $\dot{\epsilon}=4 \times 10^{-4}$  /s)



(a) RING DOWN COUNTS vs. STRAIN

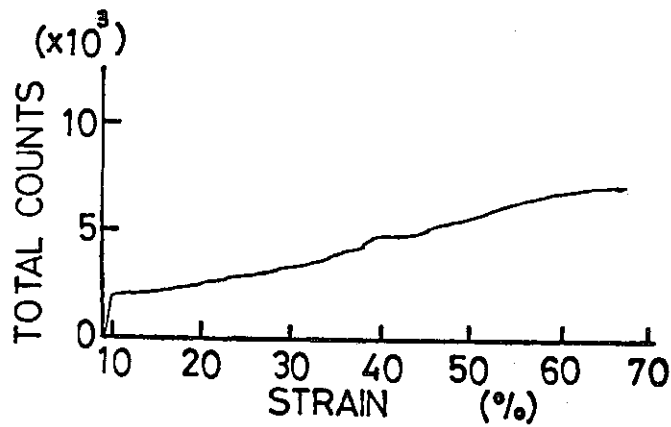


(b) RMS vs. STRAIN

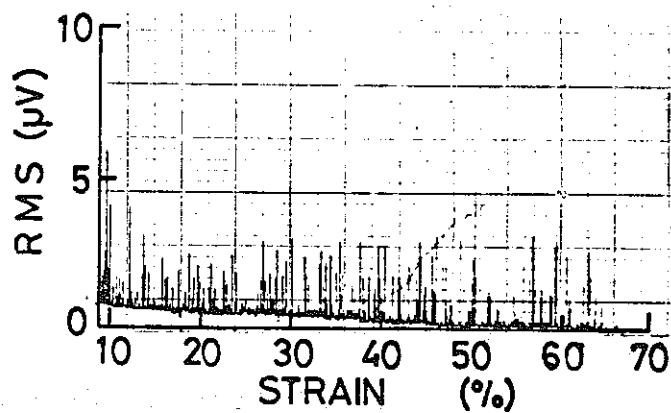


(c) STRESS vs. STRAIN

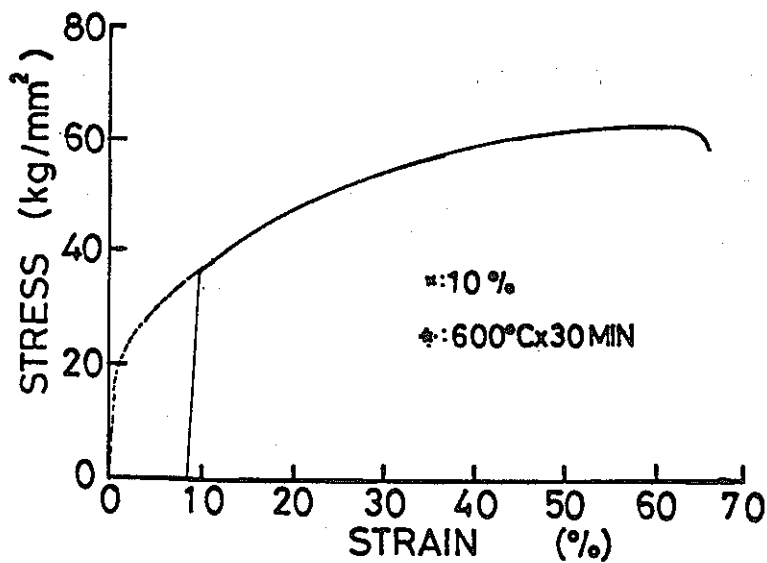
FIG. 3.11-7 ACOUSTIC EMISSION OF PRE-STRAINED\* AND ANNEALED\* SPECIMEN NO.4 DURING TENSILE TEST ( $E=4 \times 10^4$ /s)



(a) RING DOWN COUNTS vs. STRAIN



(b) RMS vs STRAIN



(c) STRESS vs STRAIN

FIG.3.1.1-8 ACOUSTIC EMISSION OF PRE-STRAINED\* AND ANNEALED\* SPECIMEN NO.5 DURING TENSILE TEST ( $E=4 \times 10^{-4}/s$ )



### 3.1.2 SUS304 鋭敏化ならびに溶体化処理の影響

#### (1) 試験目的

SUS304 鋭敏化並びに溶体化処理の影響

#### (2) 供試材

1. 試験片形状 図 3.1.2-1
2. 熱処理条件 表 3.1.2-1

#### (3) 材料試験条件

力学的条件	丸棒単純引張
環境条件	恒温恒湿室内(空气中)
クロスヘッド速度	0.5 mm/min
歪速度	$2.08 \times 10^{-4}$ strain/sec
雰囲気温度	室温(20°C)

引張試験結果を表 3.1.2-2 に示す。

#### (4) AE計測方法

(a) AE計測機器 図 3.1.2-2

(b) 変換子及び導波棒取り付け法

導波棒形状 図 3.1.2-3

取り付け状況 図 3.1.2-4

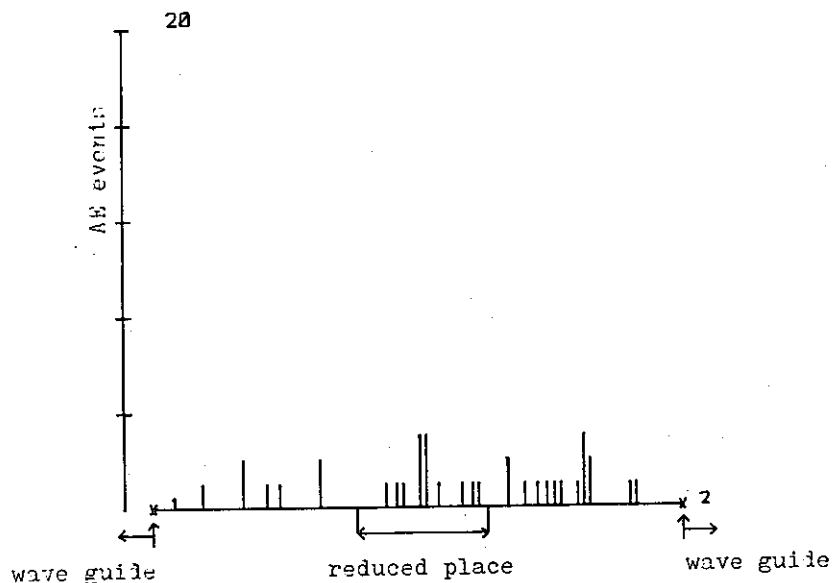
導波棒と試験片との取付部はエポキシ樹脂系接着剤を介してネジ込み式とし、センサーと導波棒とはシアノアクリレート系接着剤を用いた。

(c) 位置標定

手法 一次元の時間差測定による数値計算

分解能 2.3 mm

表示法 表示例を示す。



(d) A Eエネルギー解析項目

1. 位置標定

しきい値  $61 \mu V_{P-P}$   
音速  $4600 \text{ m/sec}$

2. 事象数

サンプリング間隔 A E イベント  $20 \text{ sec}$   
stress  $2 \text{ sec}$

3. 波高分析

減衰定数  $0.85 \times 10^{-2}$   $1/\text{mm}$

4. 波形観察および周波数分析

使用装置 biomation 製 8100 型 トランジェントレコーダー

(e) データ処理装置

CPU ..... YHP 製 2112 型

(5) 結果の評価

鋭敏化処理および溶体化処理材の室温引張においては、降伏・引張強さ・伸び・A Eの発生状況等にほとんど差はなかったが、しいて差をあげれば  $1250^\circ\text{C}$ 、0.5 hour 溶体化処理材の降伏以後のA E発生状況が一様でかつ発生量がやや多かった。

また、A E波形の周波数分析の結果は、各試験条件の間に、有意差は認められなかった。

F A E A E 計測データシート

平滑材のAE特性		デタクト番号			責任者名	丸山 温	
		記入年月日	1978年5月29日		所属会社名	日本鋼管	
試験材料	SUS 304	試験雰囲気	空気中		試験場所	三重県工業技術センター	
試験装置	島津オートグラフ	材料熱処理	Table 3.1.2-1		試験片形状	丸棒引張試験片	
試験目的	鋭敏化並びに溶体化処理材の常温時のAE特性を調べる。						
試験片番号	#1	#2	#3	#4			
試験条件	試験温度	R. T.	R. T.	R. T.	R. T.		
	ひずみ速度	$2.08 \times 10^{-4}$	$2.08 \times 10^{-4}$	$2.08 \times 10^{-4}$	$2.08 \times 10^{-4}$		
	熱処理	600°C×24hr	700°C×1hr	1100°C×0.5hr	1250°C×0.5hr		
試験条件	引張側						
	圧縮側						
	周波数						
	抑制方法				印荷波形		
A E 計測		A E 計測装置	NKK AE Monitoring System				
試験片番号	#1	#2	#3	#4			
試験条件	変換子名と番号	No. 1586 1587	1586 1587	1586 1587	1586 1587		
	校正曲線						
	取付箇所(導波棒)	4φホーン付	4φホーン付	4φホーン付	4φホーン付		
	接着法(カップラント)	アロンアルファ	アロンアルファ	アロンアルファ	アロンアルファ		
増幅器	前置増幅器	40dB	40dB	40dB	40dB		
	主増幅器	46dB	46dB	46dB	46dB		
フィルター・周波数帯域	100KHz H.P.	100KHz H.P.	100KHz H.P.	100KHz H.P.			
トリガーレベル	$61 \mu V_{P-P}$	$61 \mu V_{P-P}$	$61 \mu V_{P-P}$	$61 \mu V_{P-P}$			
R. M. S. 電圧	-	-	-	-			
リングダウンor事象数	3.1.2-5	3.1.2-7	3.1.2-9	3.1.2-15			
振幅分布	3.1.2-6	3.1.2-8	3.1.2-10	3.1.2-16			
エネルギー分布	-	-	-	-			
波形観察			3.1.2-13, 14 (含, 周波数分析)				
その他(位置標定)			3.1.2-11, 12				
	前置増幅器	主増幅器		フィルター		位置標定手法	
型式	1801		型式		分解能	2.3mm	
メーカー	D/E	小野測器	メーカー名	小野測器	範囲		
ダイナミックレンジ	74dB		周波数帯域	100KHz H.P.			
備考	ノイズレベル 最大 $40 \mu V_{P-P}$						

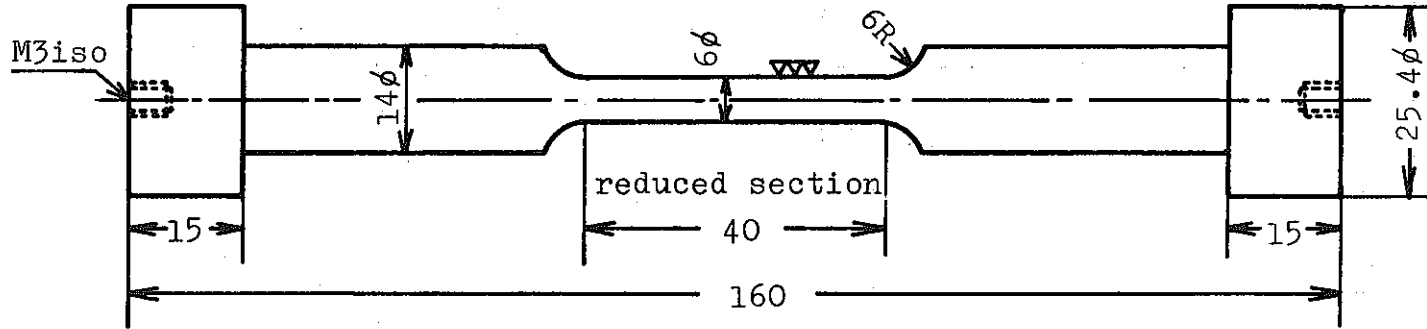


Fig.3.1.2-1 Tensile Specimen

Table 3.1.2-1 Condition of Heat Treatment

heat treatment	sensitization		solution treatment	
	600° c, 24hour	700° c, 1hour	1100° c, 0.5hour	1250° c, 0.5hour
test NO.	#1	#2	#3	#4

Table 3.1.2-2 Results of the Tensile Test

test NO. (heat treatment)	dimension of tensile specimen		tensile test		
	diameter (mm)	gage length (mm)	yield point (kg/mm <sup>2</sup> )	tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	elongation (%)
#1 (600° c, 24hour)	6.00	40	19.5	71.1	92.5
#2 (700° c, 1hour)	6.00	40	19.5	69.7	85.0
#3 (1100° c, 0.5hour)	6.00	40	20.2	67.6	85.0
#4 (1250° c, 0.5hour)	6.00	40	18.7	65.4	87.5

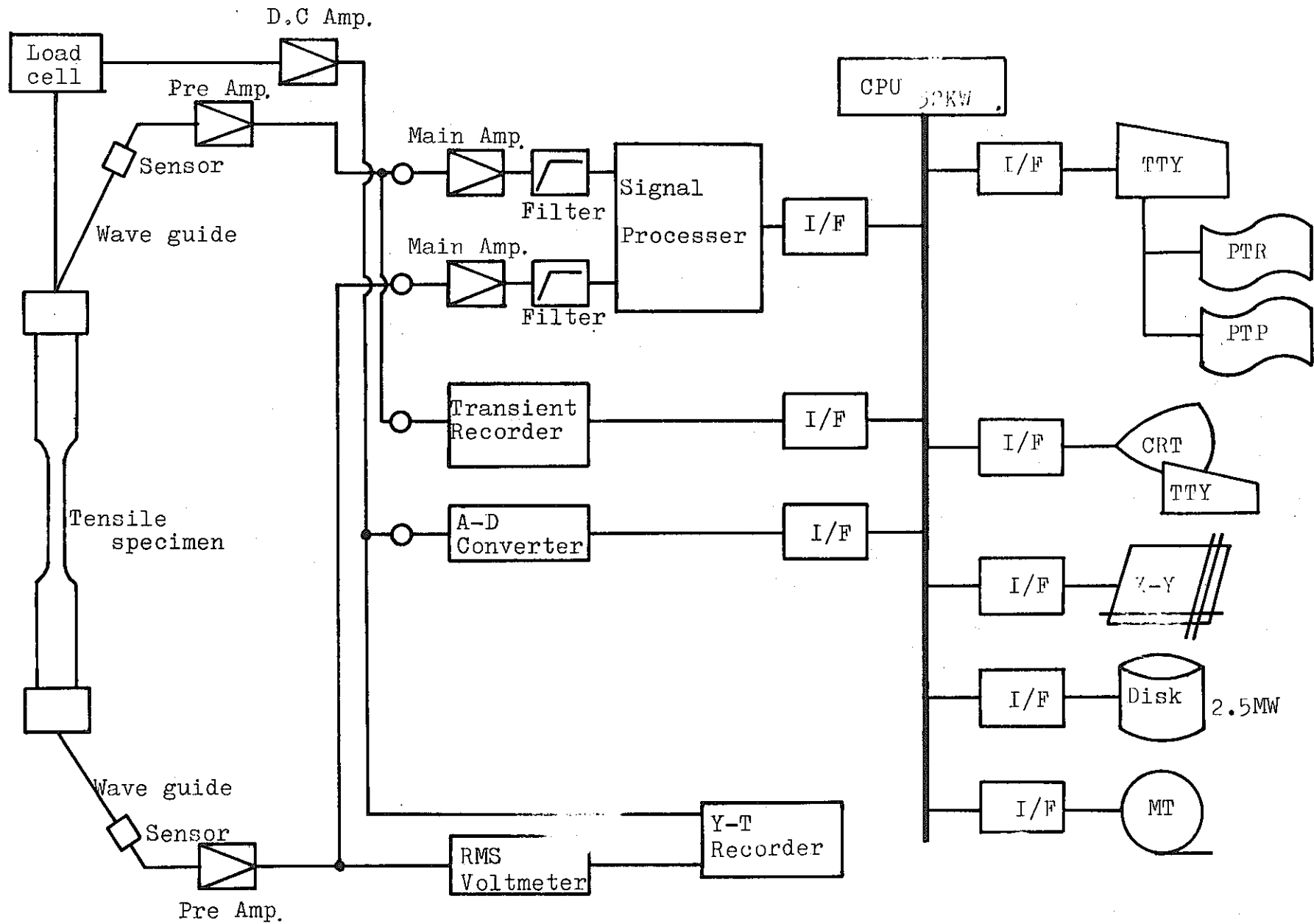


Fig. 3.1.2-2 Block Diagram of the AE Instrumentation System

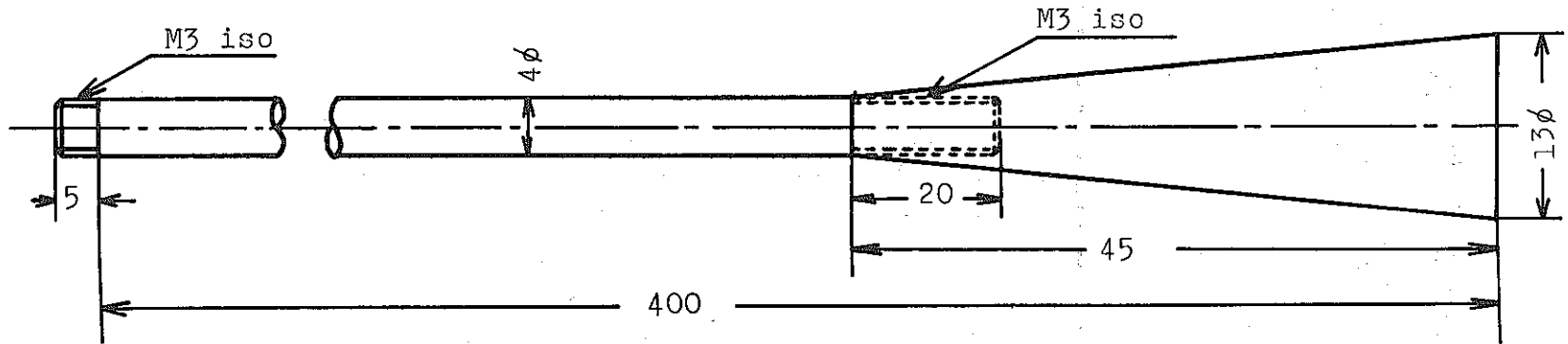


Fig.3.1.2-3 Wave Guide

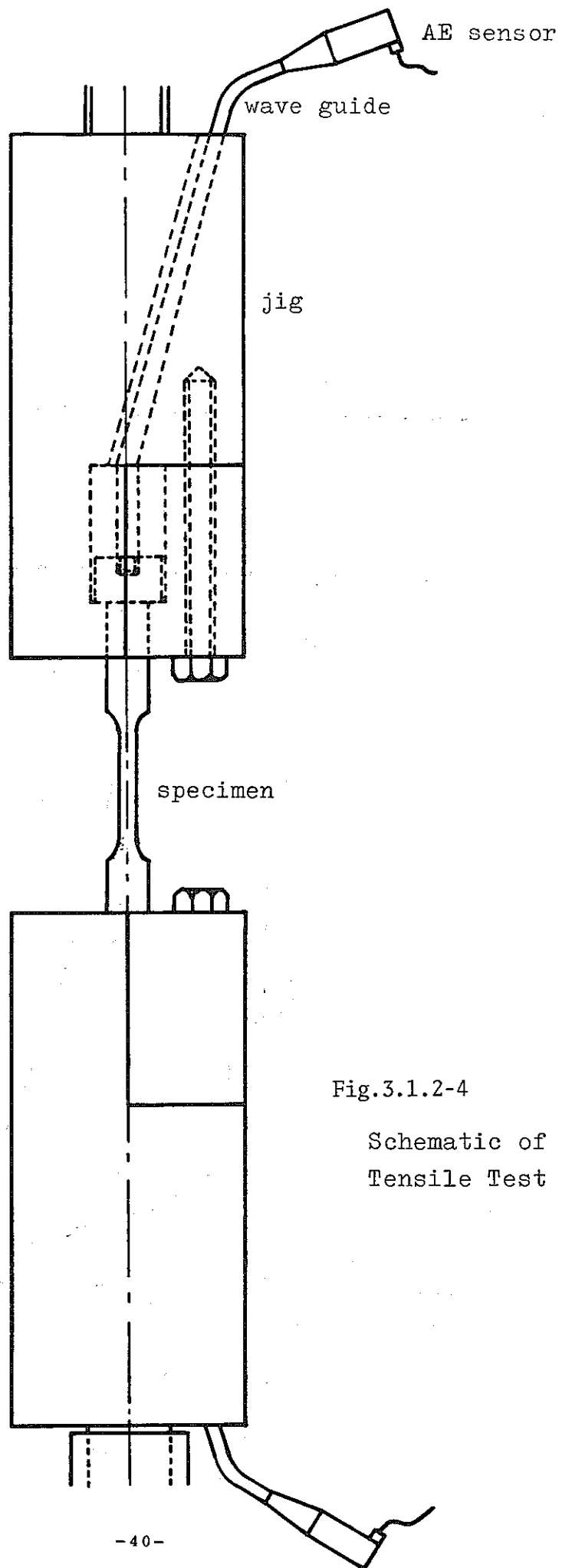


Fig.3.1.2-4  
Schematic of the  
Tensile Test



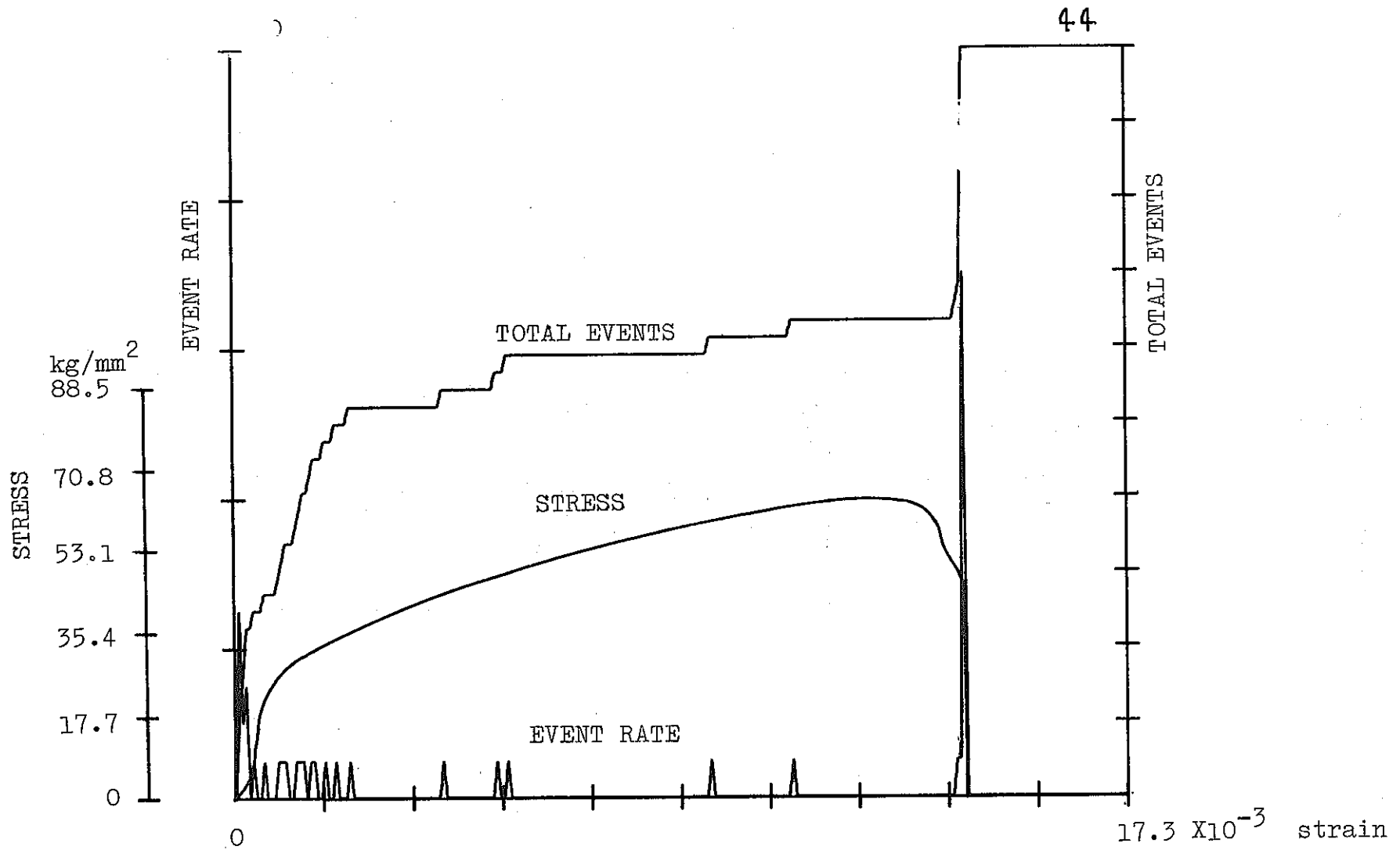


Fig.3.1.2-5 AE Event Rate Curve (#1:600°c,24hour)

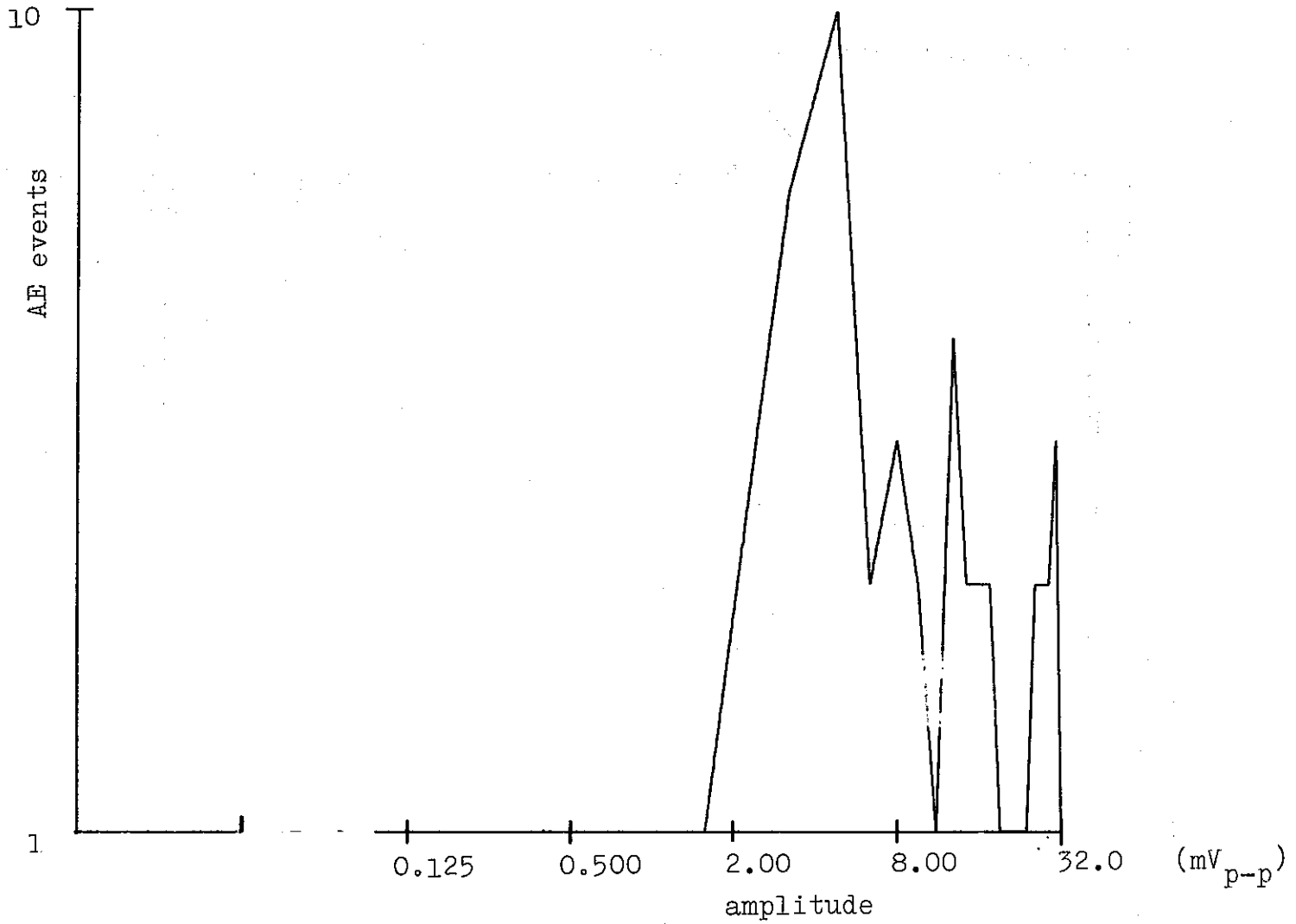


Fig.3.1.2-6 Amplitude Distribution  
(#1:600°c,24hour)

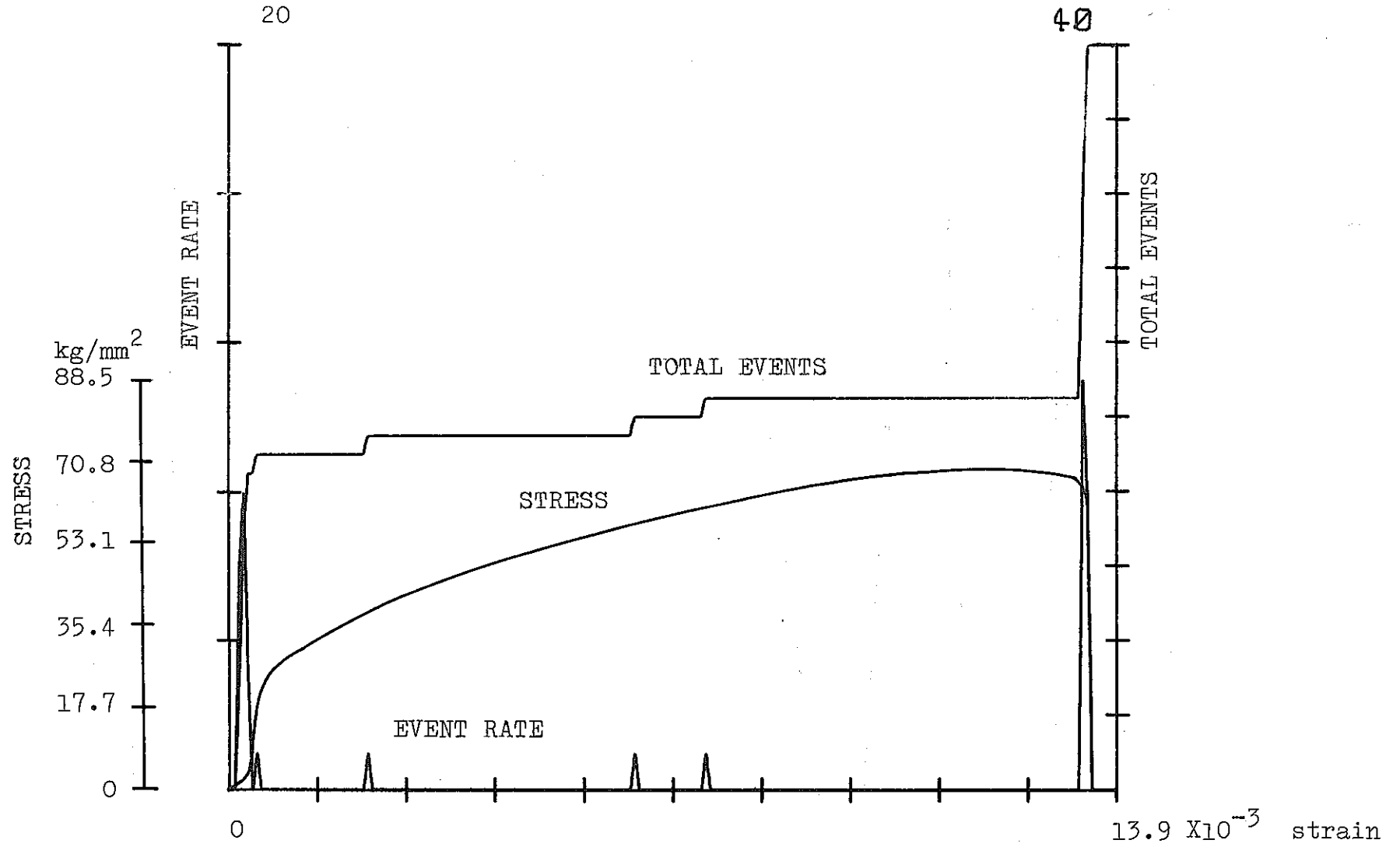


Fig.3.1.2-7 AE Event Rate Curve (#2:700°c,1hour)

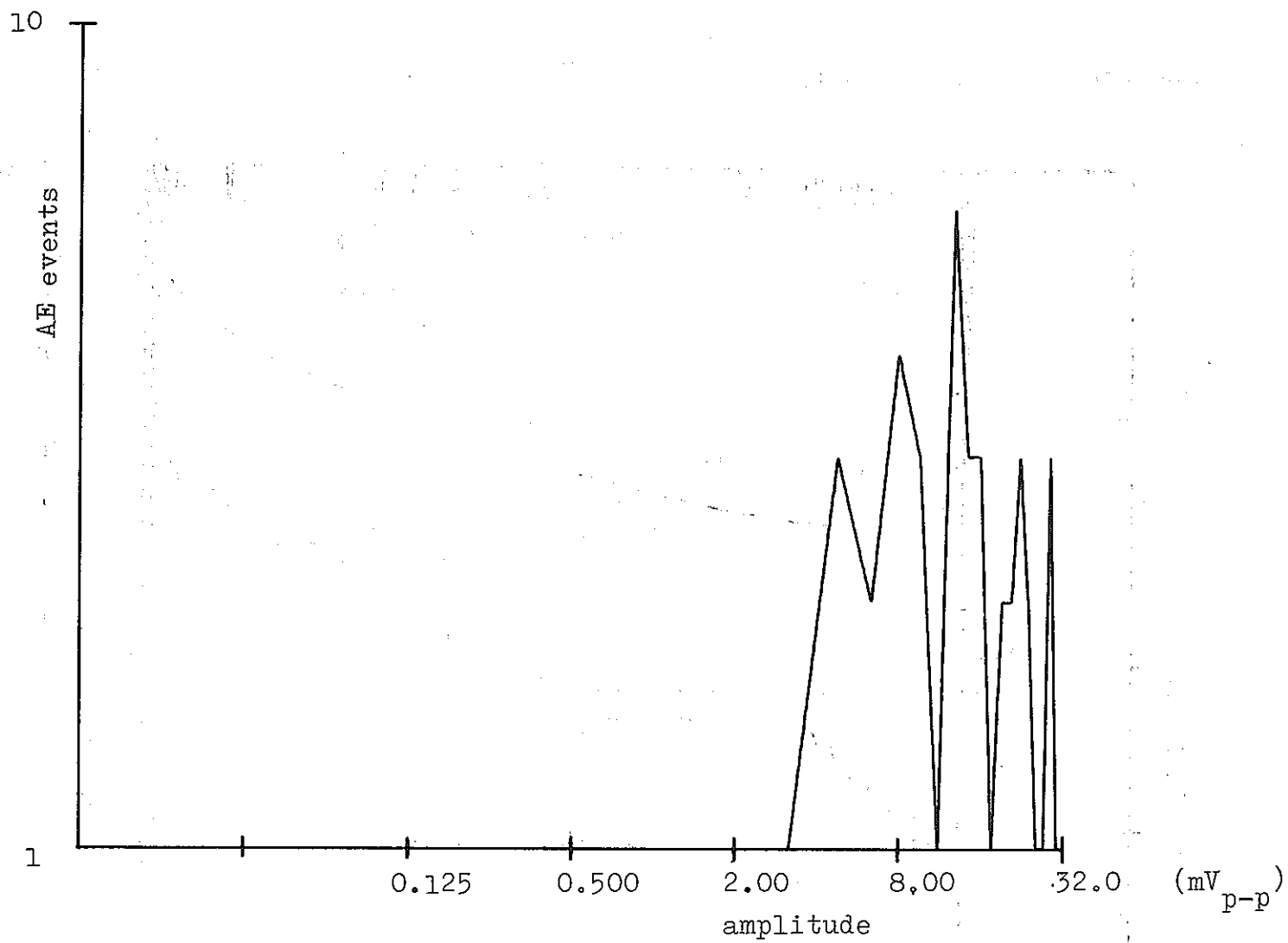


Fig.3.1.2-8 Amplitude Distribution  
(#2:700° c, 1hour)

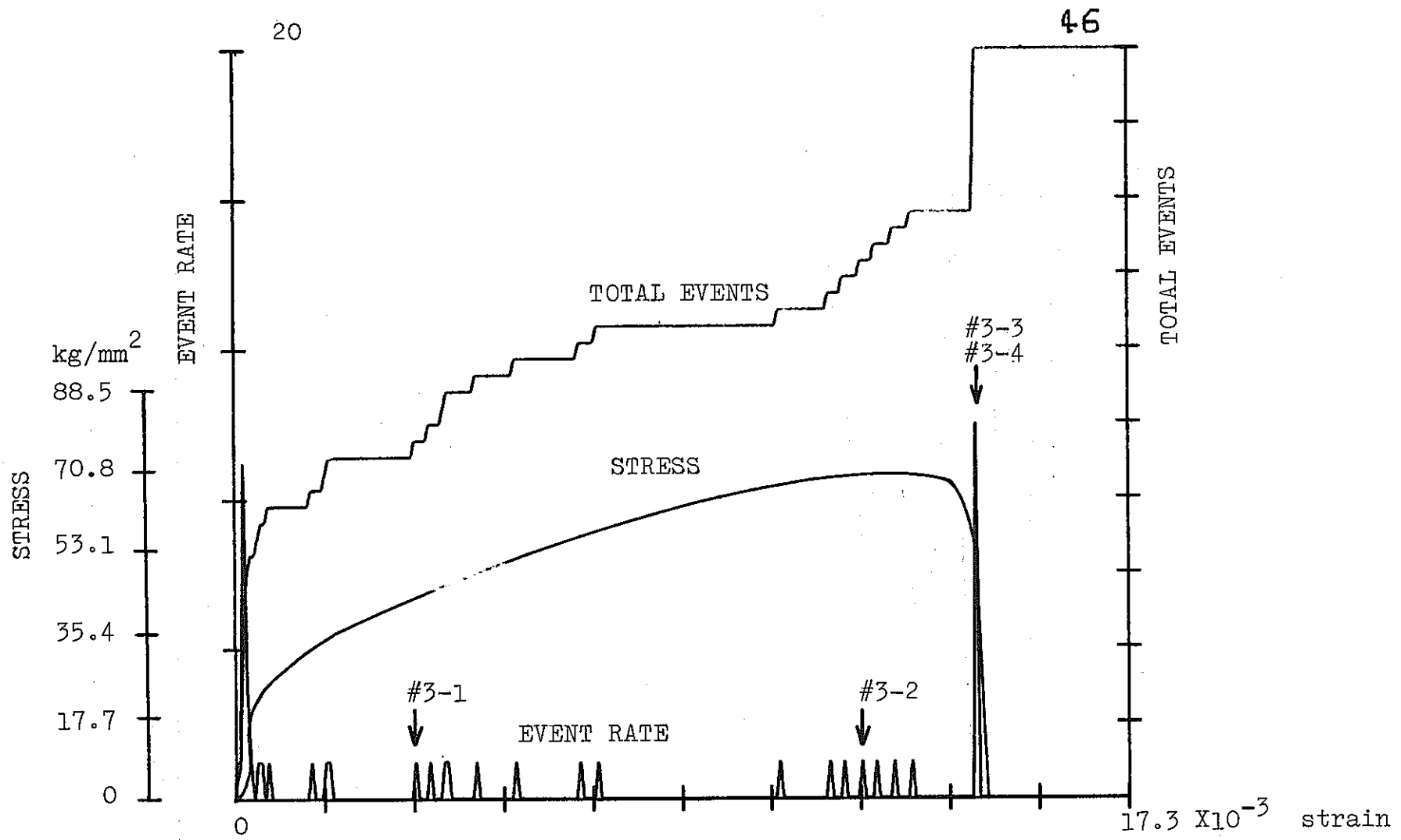


Fig.3.1.2-9 AE Event Rate Curve (#3:1100°C,0.5hour)

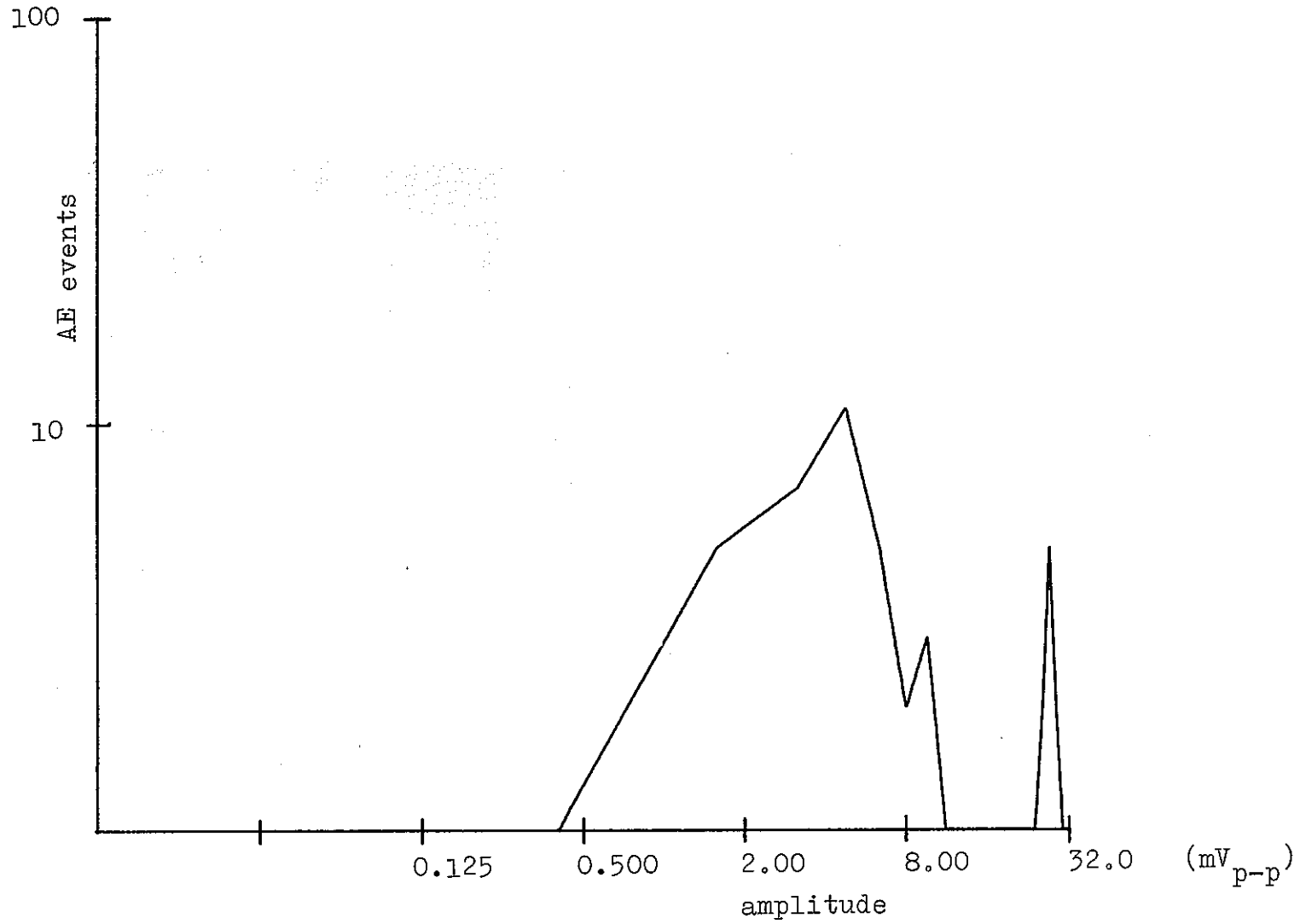


Fig.3.1.2-10 Amplitude Distribution  
(#3:1100°C:0.5hour)

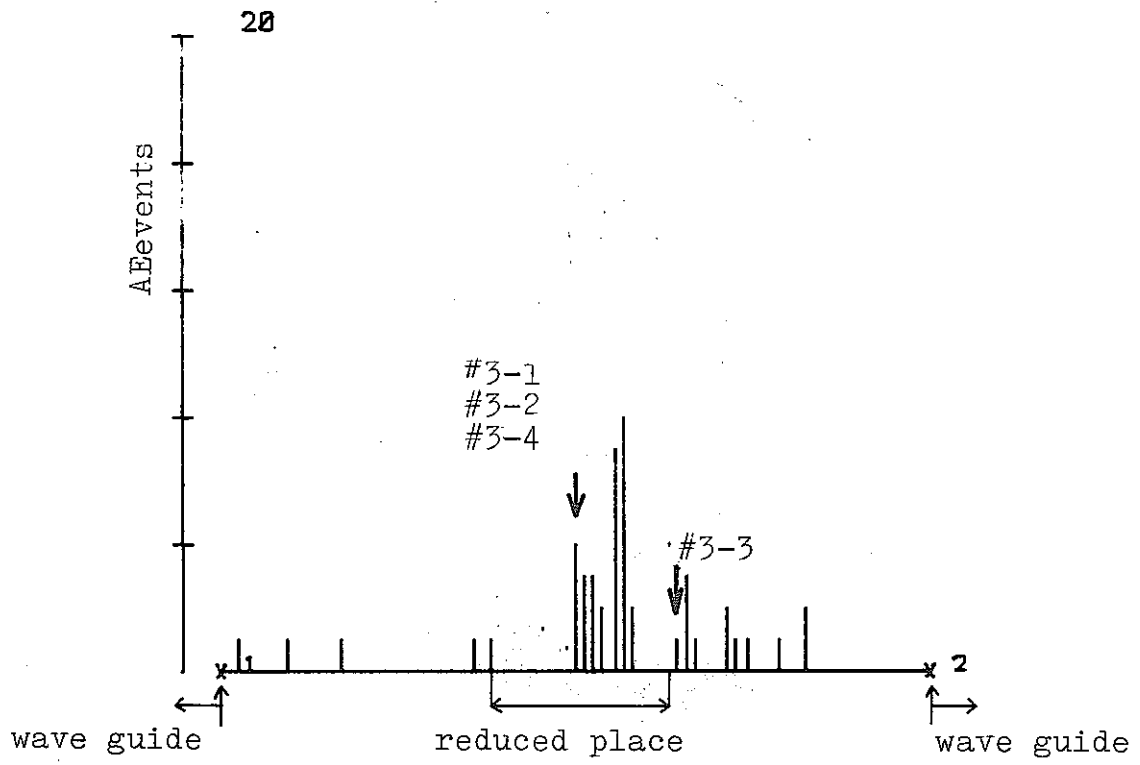


Fig.3.1.2-11 AE Source Location  
 (#3:1100°c:0.5hour)

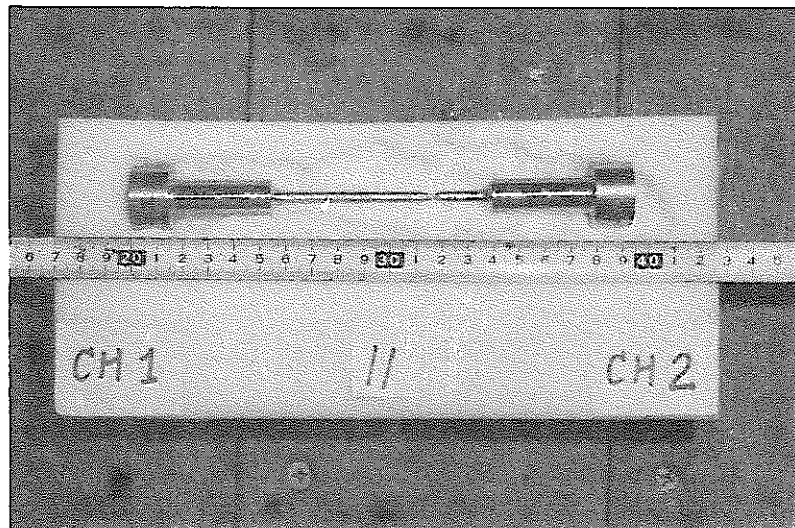
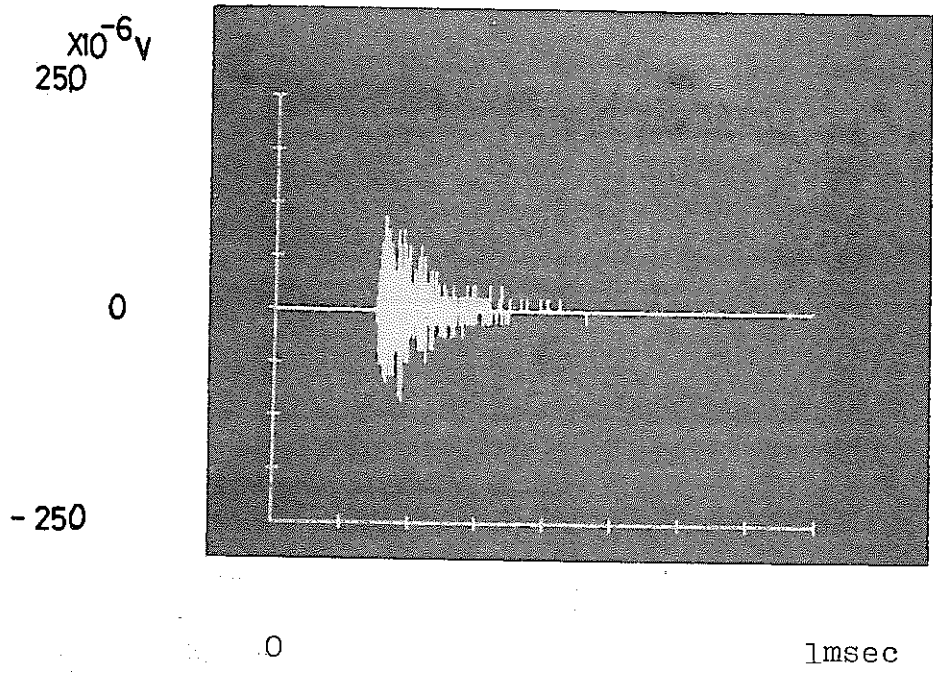


Fig.3.1.2-12 Specimen (#3:1100°c:0.5hour)



CONTINUOUS TIME  
 Fig.3.1.2-13 AE Waveform (#3-1:1100°c,0.5hour)

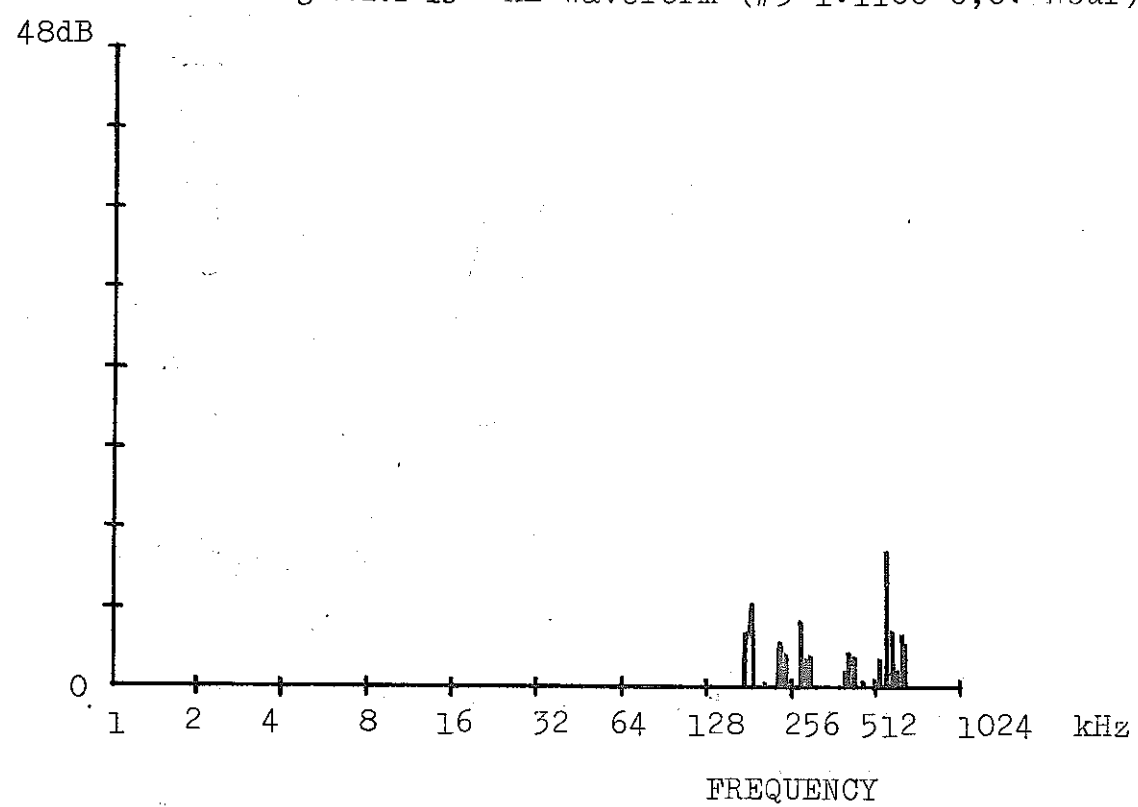


Fig.3.1.2-14 Frequency Spectrum  
 (#3-1:1100°c,0.5hour)



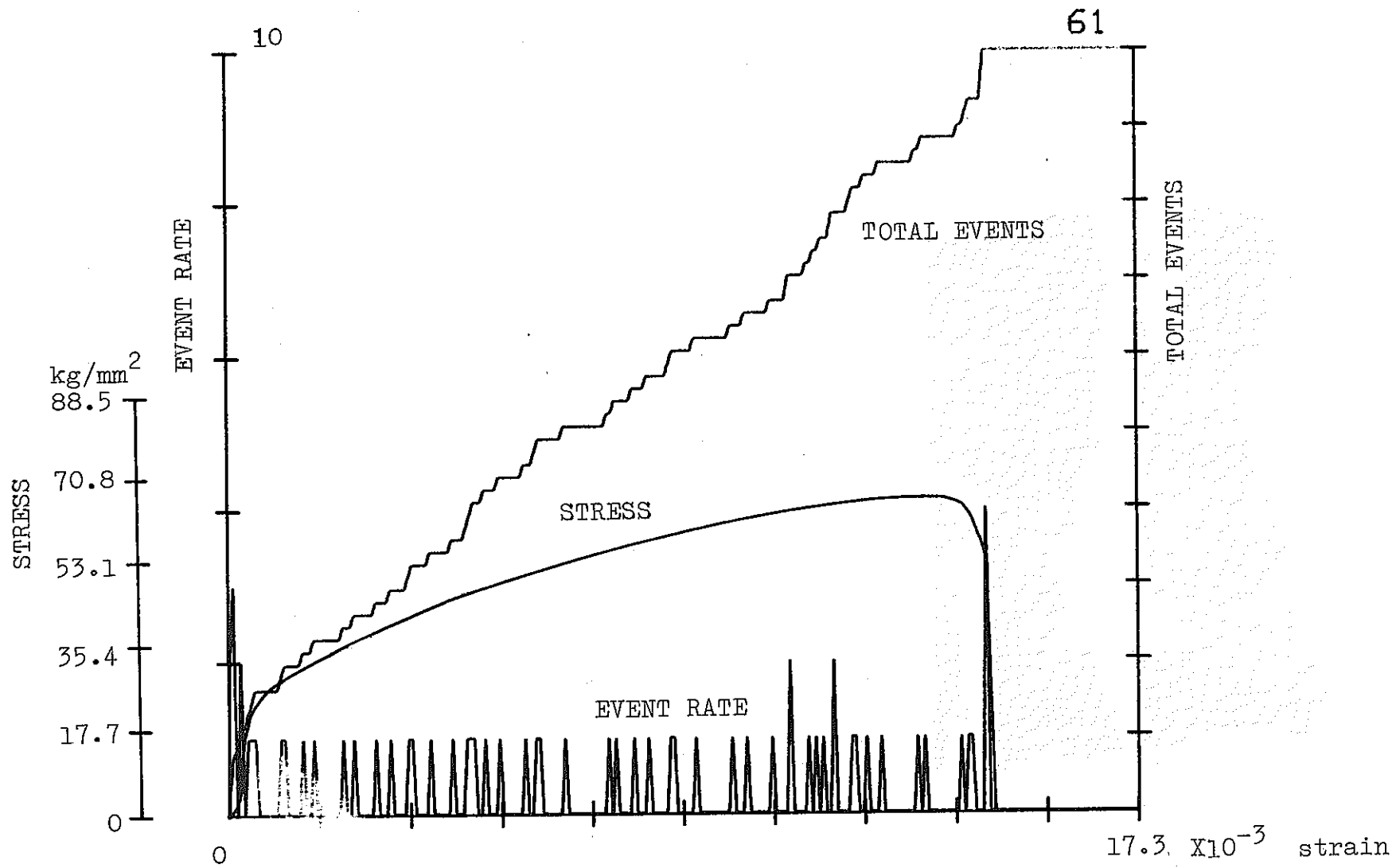


Fig.3.1.2-15 AE Event Rate Curve (#4:1250° c,0.5hour)

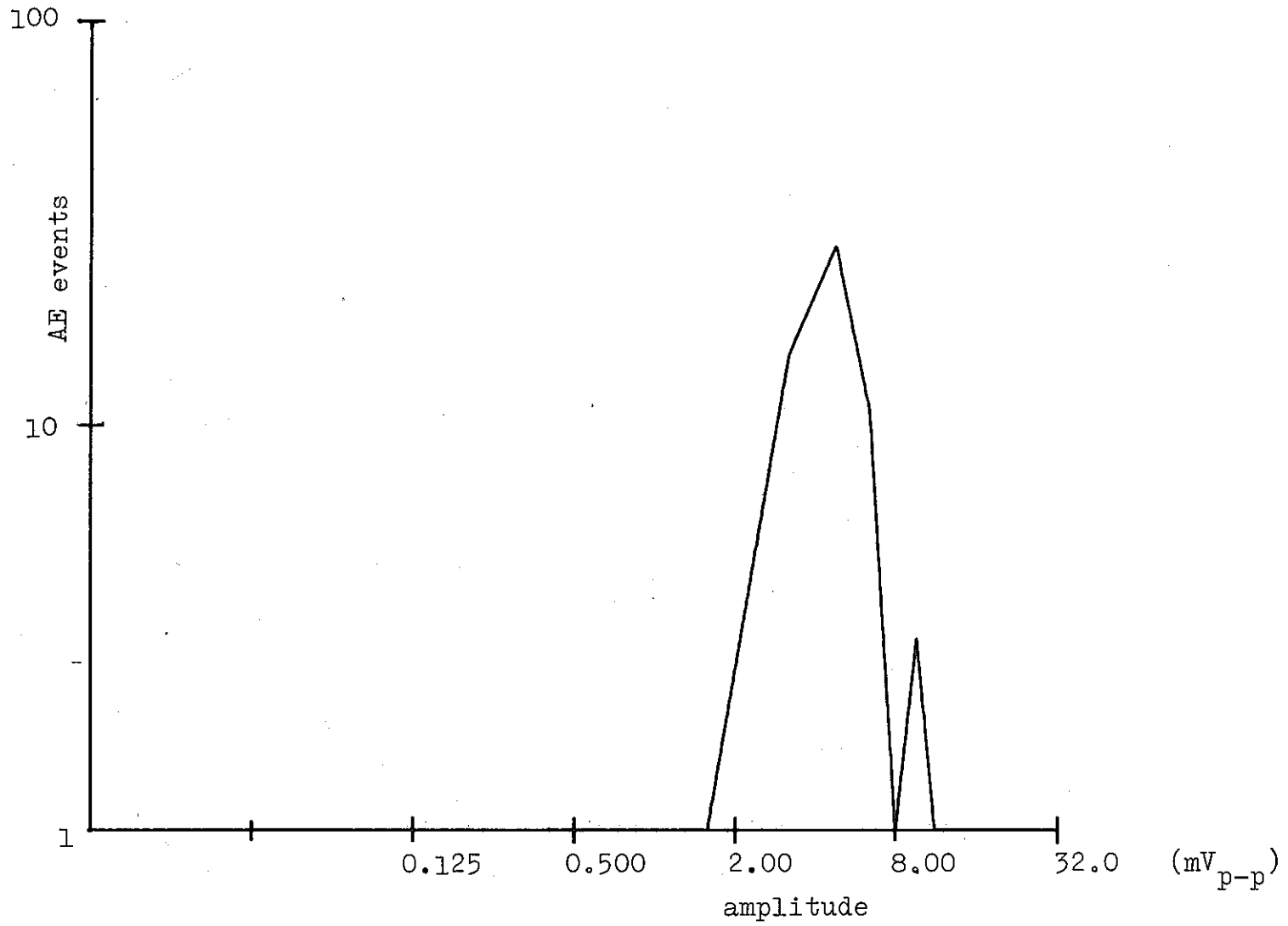


Fig.3.1.2-16 Amplitude Distribution  
(#4:1250° c, 0.5hour)

### 3.1.3 2 ¼ Cr-1 Mo 鋼 歪速度と回復の影響

#### (1) 試験目的

2 ¼ Cr-1 Mo 鋼の平滑材の常温単軸引張り変形にともなう A E の発生状況について、歪速度ならびに高温保持 (300°C×30min、630°C×30min.) による回復の影響を検討する。

#### (2) 供試材とその熱処理、試験片形状

##### (a) 供試材

2 ¼ Cr-1 Mo 鋼 (圧延材、板厚：25.4mm)

##### (b) 熱処理条件

受け入れまま

##### (c) 試験片形状

図 3.1.3-1 に示す。

#### (3) 材料試験条件

##### (a) 歪速度 (常温) の影響について

$4 \times 10^{-2}$ 、 $4 \times 10^{-3}$ 、 $4 \times 10^{-4}$

##### (b) 回復の影響について

1)  $4 \times 10^{-4}$  で約 13% 変形 → 除荷 → 300°C×30min, 熱処理 →  $4 \times 10^{-4}$  で破断まで引張り。

2)  $4 \times 10^{-4}$  で約 13% 変形 → 除荷 → 630°C×30min, 熱処理 →  $4 \times 10^{-4}$  で破断まで引張り。

#### (4) A E 計測方法

##### (a) A E 計測器

A E 計測機器のブロック図を図 3.1.3-2 に示す。

##### (b) 使用変換子とそれらの校正曲線

0.14Z10-1577 (校正曲線は図 3.1.3-3 に示す。)

0.14Z10-1578 ( " " )

##### (c) 変換子及び導波棒の取り付け法と配置

変換子は試験片との接触面を除き、すべて絶縁用ビニールテープで覆い、試験片の両端に接着剤 (D/E 製、AC-V9) で取り付け、ビニールテープで固定した。なお、機械的・電気的雑音を防ぐために試験片と固定治具の間にも絶縁用ビニールテープを巻いた。取り付け方法の詳細を図 3.1.3-4 に示す。

##### (d) 位置標定の手法と表示法

位置標定は両変換子間の A E 到達時間差より求めた。

##### 1) 時間差測定 of 分解能

$10^{-7}$  sec

##### 2) 測定範囲

時間差に制限を設けることにより、測定範囲を限定した。なお位置標定には縦波と横波の両方の速度を用いた。

(e) A E エネルギー解析項目とその方法

- 1) R. M. S. 電圧 (時定数: 100 m sec.)
- 2) リングダウン計数率 (しきい値: 30  $\mu$ V)
- 3) 事象総数 (デッドタイム: 1 m sec., 横波-平行部のみ)

(5) A E 試験の結果

各条件につき、数例の試験を行なっているが、それらの代表例を図 3.1.3-5 ~ 図 3.1.3-15 に示す。

(a) 歪速度の影響

各種歪速度で引張り試験を行なった場合の A E 計測結果を示す。

表 3.1.3-1

歪速度 ( $1/\text{sec.}$ )	応力-変位線図および R. M. S. 電圧	リングダウン計数率および事象総数	引張り強さ ( $\text{Kg}/\text{mm}^2$ )
$4 \times 10^{-2}$	図 3.1.3-5	図 3.1.3-6	7 3.5
$4 \times 10^{-3}$	図 3.1.3-7	図 3.1.3-8	7 2.5
$4 \times 10^{-4}$	図 3.1.3-9	図 3.1.3-10	7 2.4

これらの結果に示すように、降伏点近傍で R. M. S. 電圧とリングダウン計数率がピークをもち、以後、加工硬化時には断続的な A E の発生がみられるが、加工硬化時の事象総数にはそれほど変化が認められないことより、これらの大部分は油圧式試験機の雑音によるものと思われる。

(b) 位置標定

A E の実際の伝播速度が不明なので、横波 ( $3240\text{m}/\text{sec.}$ )、縦波 ( $5950\text{m}/\text{sec.}$ ) の両方を用いて位置標定した結果の一例を図 3.1.3-11 に示す。横軸の距離は引張り前の試験片長さに相当する。

(c) 回復の影響

$300^\circ\text{C} \times 30\text{min.}$ 、 $630^\circ\text{C} \times 30\text{min.}$  での熱処理前後の A E 計測結果を示す。なお、歪速度は  $4 \times 10^{-4}$  とした。

$300^\circ\text{C} \times 30\text{min.}$ 、 $630^\circ\text{C} \times 30\text{min.}$ 、いずれの場合も熱処理後の方が降伏時の RMS 電圧のピークは低い、リングダウン計数率、事象総数については、あまり変化はみられない。

表 3.1.3 - 2

試験条件	応力-変位線図およびR.M.S.電圧	リングダウン計数率および事象総数	引張り強さ ( $\text{Kg}/\text{mm}^2$ )
約13%変形	図 3.1.3-12	図 3.1.3-13	—
300°C×30min, 保持後引張り	図 3.1.3-12	図 3.1.3-13	68.7
約13%変形	図 3.1.3-14	図 3.1.3-15	—
630°C×30min, 保持後引張り	図 3.1.3-14	図 3.1.3-15	71.0

## (6) 結果の評価

## (a) 歪速度の影響

- 1) RMS電圧とリングダウン計数率の計測結果ならびにシンクロによる波形観察結果を総合すると、降伏点直前より主として連続型のAEが発生し、降伏点近傍でピークを示すが、加工硬化時には連続型がほとんどみられなくなり、突発型のAEがわずかに発生するようになる。
- 2) 歪速度が大きくなるにつれてAEは連続型、突発型とも大きくなる傾向にあるが、発生数そのものはほとんど変わらない。
- 3) 歪速度と降伏時のRMS電圧のピーク値 ( $\sqrt{V_s^2 - V_N^2}$ 、 $V_s$ : 実測電圧、 $V_N$ : 雑音電圧) との関係を図 3.1.3-16 に示す。ここに示すように対数でプロットしたピーク電圧と歪速度との間には直線関係がみられる。

## (b) 位置標定

破断部が中央付近ということもあって、破断位置の標定は横波、縦波のいずれの場合にも、ほぼ一致している。(破断位置は伸びを考慮して補正計算すると約 5.2 mm である。)

## (c) 回復の影響

## 1) 300°C×30min, 熱処理した場合

熱処理後のAE発生は、それ以前の付加応力レベルまで、ほとんど認められないので、あたかもこの条件では回復が起こらず、カイザー効果が認められるようにも思われるが、熱処理後の応力-変位線図に示されるように材質的にもかなり変化している(靱熱脆性域)ので、このデータだけで断定するわけにはいかない。

## 2) 630°C×30min, 熱処理した場合

応力-変位線図に示すように、熱処理により材料自体は回復していると思われるが、AEに関しては、元の状態より連続型AEの発生が減少している。これはもともと630°C×30min, 熱処理した場合にAEの発生が少ないのか、それともAEの回復現象がこの熱処理条件では不十分であるのか、両方の可能性が考えられる。

F A E A E 計測データシート

2 1/4 Cr-1Mo 歪速度と回復の影響		データ番号			責任者名	高橋 英 司	
		記入年月日	1978 年 3 月 19 日		所属会社名	神戸製鋼所	
試験材料	2 1/4 Cr-1Mo	試験雰囲気	空 気 中		試験場所	中央研究所 (大久保)	
試験装置	島津製作所・油圧式引張試験機	材料熱処理			試験片形状	平滑丸棒試験片	
試験目的		2 1/4 Cr-1Mo 鋼の平滑材の常温単軸引張り変形にとり、A E の発生状況について、歪速度ならびに高温保持 (300°C × 30 min., 630°C × 30 min.) による回復の影響を検討する。					
試験片番号		No. 7	No. 5	No. 3		No. 11	No. 12
条件 試験	試験温度	R. T.	R. T.	R. T.		R. T.	R. T.
	ひずみ速度	4 × 10 <sup>-2</sup>	4 × 10 <sup>-3</sup>	4 × 10 <sup>-4</sup>		4 × 10 <sup>-4</sup>	4 × 10 <sup>-4</sup>
条件 試験 変 形 後 の 試 験	みずみ保持時間					約 13% 変形後 300°C × 30 min 熱処理	約 13% 変形後 630°C × 30 min 熱処理
	引張側						
	圧縮側						
	周波数						
抑制方法				印荷波形			
A E 計測		A E 計測装置		MODEL1032, MODEL920 (D/E) M-172TA (NF), Rate Counter (自社製)			
試験片番号		No. 7	No. 5	No. 3		No. 11	No. 12
子 機 変	変換子名と番号	0.14Z10 1577, 1578	0.14Z10 1577, 1578	0.14Z10 1577, 1578		0.14Z10 1577, 1578	0.14Z10 1577, 1578
	校正曲線						
	取付個所	試験片両端	試験片両端	試験片両端		試験片両端	試験片両端
	接線法 (カップラント)	AC-V9 (D/E)	AC-V9 (D/E)	AC-V9 (D/E)		AC-V9 (D/E)	AC-V9 (D/E)
増 幅 器	前置増幅器	40 dB	40 dB	40 dB		40 dB	40 dB
	主増幅器	40 dB	40 dB	40 dB		40 dB	40 dB
フィルター・周波数帯域		100KHz~1MHz	100KHz~1MHz	100KHz~1MHz		100KHz~1MHz	100KHz~1MHz
トリガーレベル		30 μV	30 μV	30 μV		30 μV	30 μV
R. M. S. 電圧		Fig 3.13-5	Fig 3.13-7	Fig 3.13-9		Fig 3.13-12	Fig 3.13-14
リングダウン 事象数		Fig 3.13-6	Fig 3.13-8	Fig 3.13-10		Fig 3.13-13	Fig 3.13-15
振幅分布		-	-	-		-	-
エネルギー分布		-	-	-		-	-
波形観察							
その他 (位置標定)				Fig 3.13-11			
		前置増幅器	主増幅器		フィルター		位置標定手法
型 式		1801	1302	型 式	1801-316B	分解能	ΔT = 10 <sup>-7</sup> sec.
メーカ		D/E	D/E	メーカー名	D/E	電 圧	試験片全体
ダイナミックレンジ		74 dB	約 60 dB	周波数帯域	100KHz~1MHz		
備 考	雑音レベル: 4.2 μV						

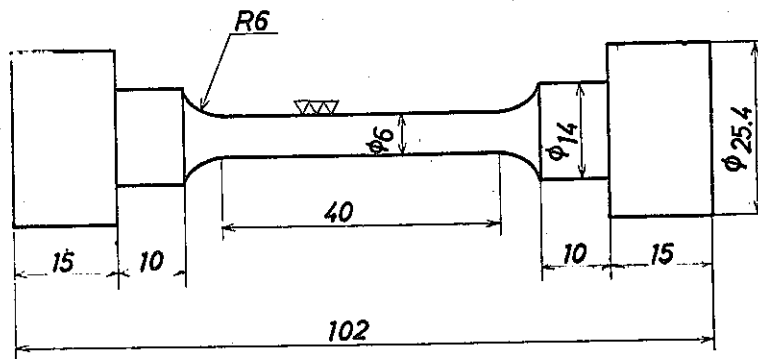


Fig.3.1.3-1 Shape and dimensions of test specimen.

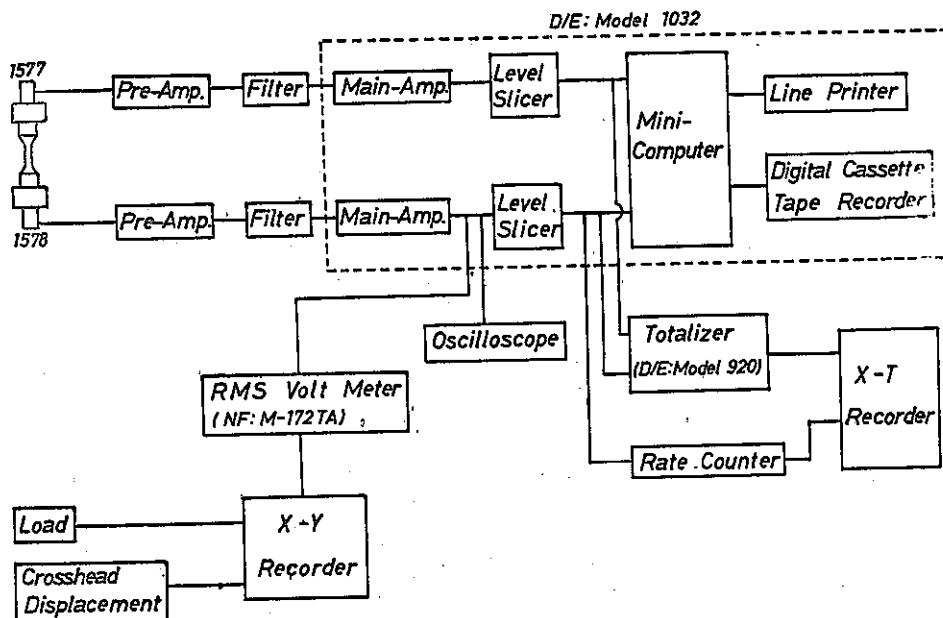


Fig.3.1.3-2 Block diagram of AE monitoring system.

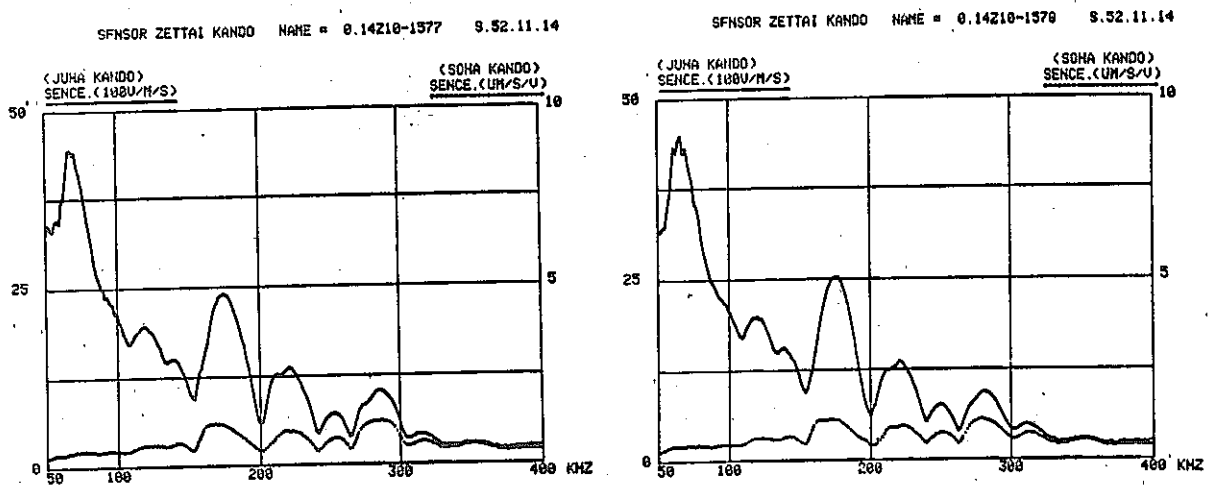


Fig.3.1.3-3 Calibration curve of used transducers.

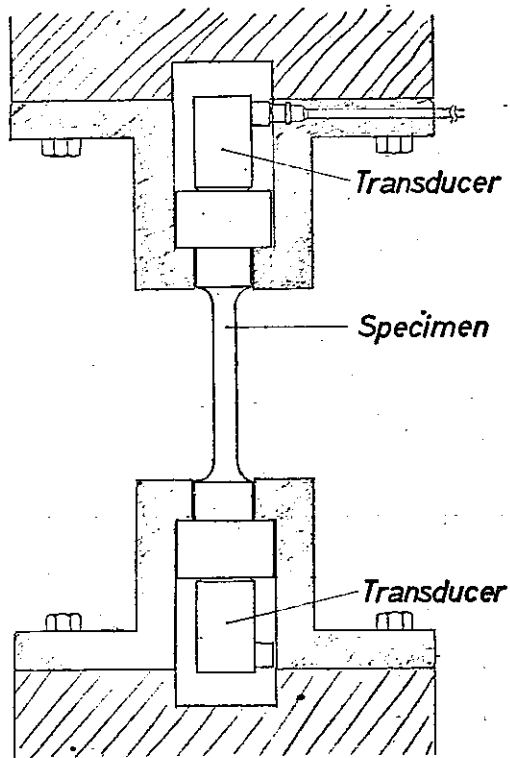


Fig.3.1.3-4 Schematic diagram for setting of specimen and transducers.

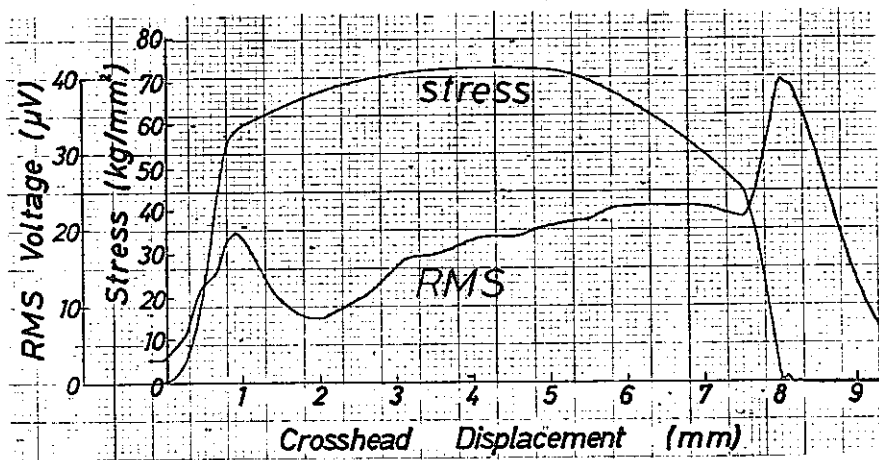


Fig.3.1.3-5 Stress and RMS voltage as a function of crosshead displacement. ( $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^2$  )

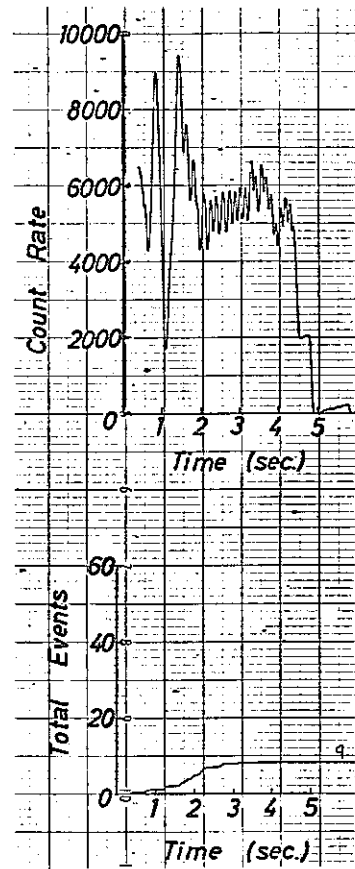


Fig.3.1.3-6 Ringdown count rate and total event counts as a function of time. ( $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^2$  )



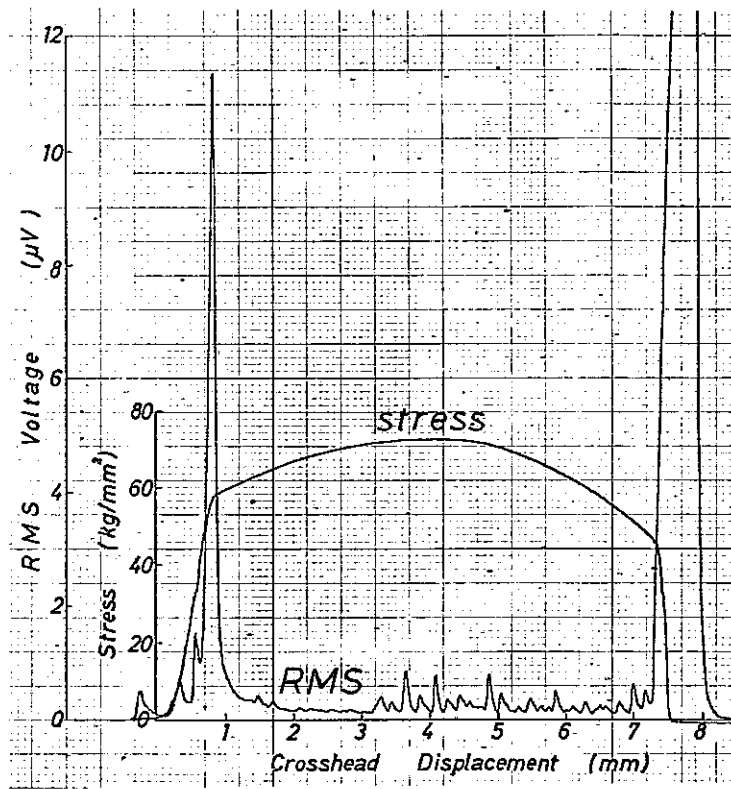


Fig.3.1.3-7 Stress and RMS voltage as a function of crosshead displacement. ( $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^3$ )

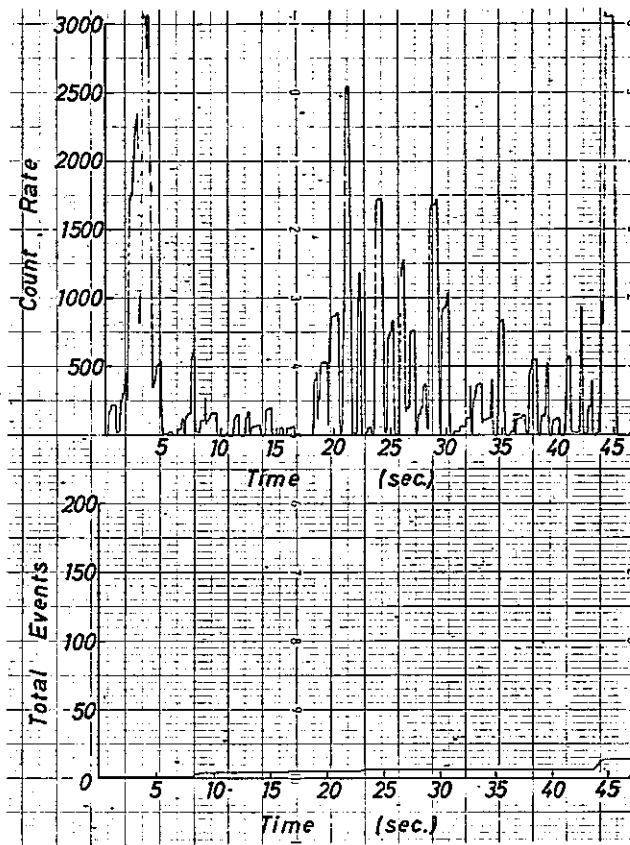


Fig.3.1.3-8 Ringdown count rate and total events as a function of time. ( $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^3$ )

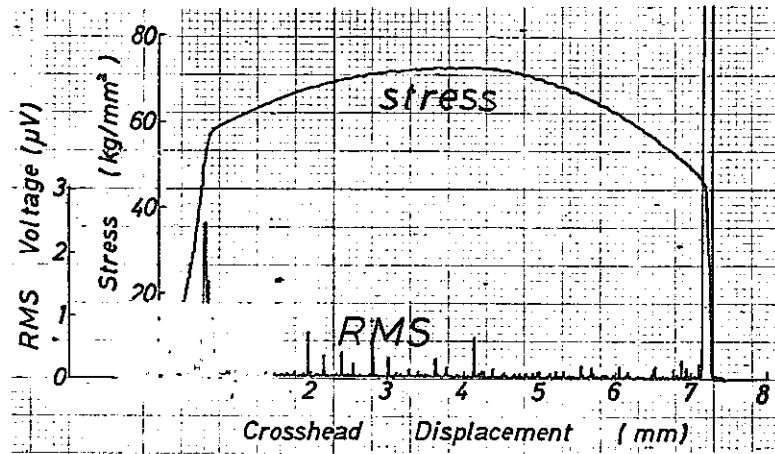


Fig.3.1.3-9 Stress and RMS voltage as a function of crosshead displacement. ( $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^4$ )

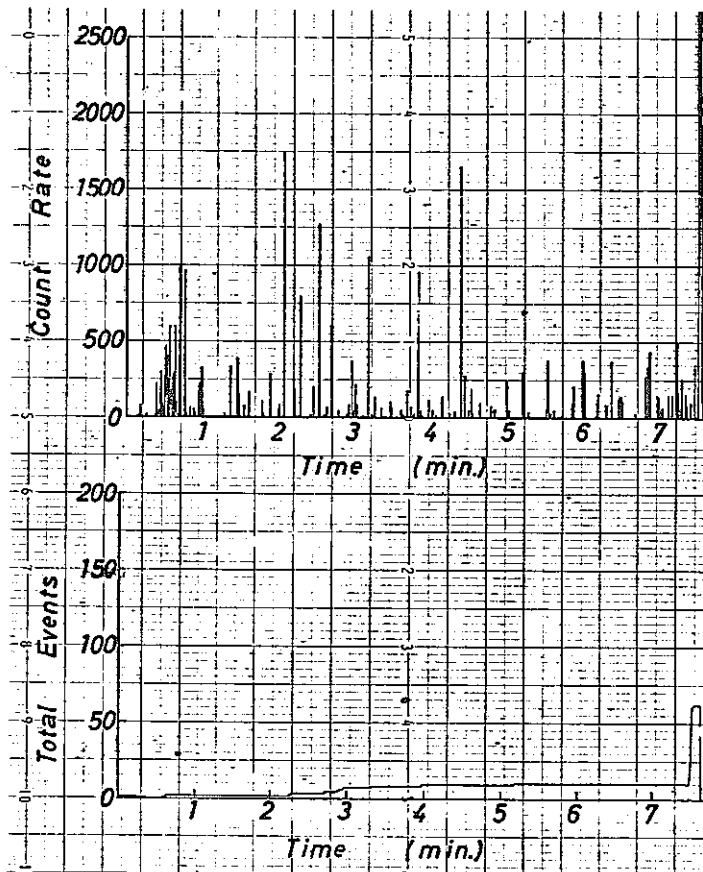


Fig.3.1.3-10 Ringdown count rate and total events as a function of time. ( $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^4$ )

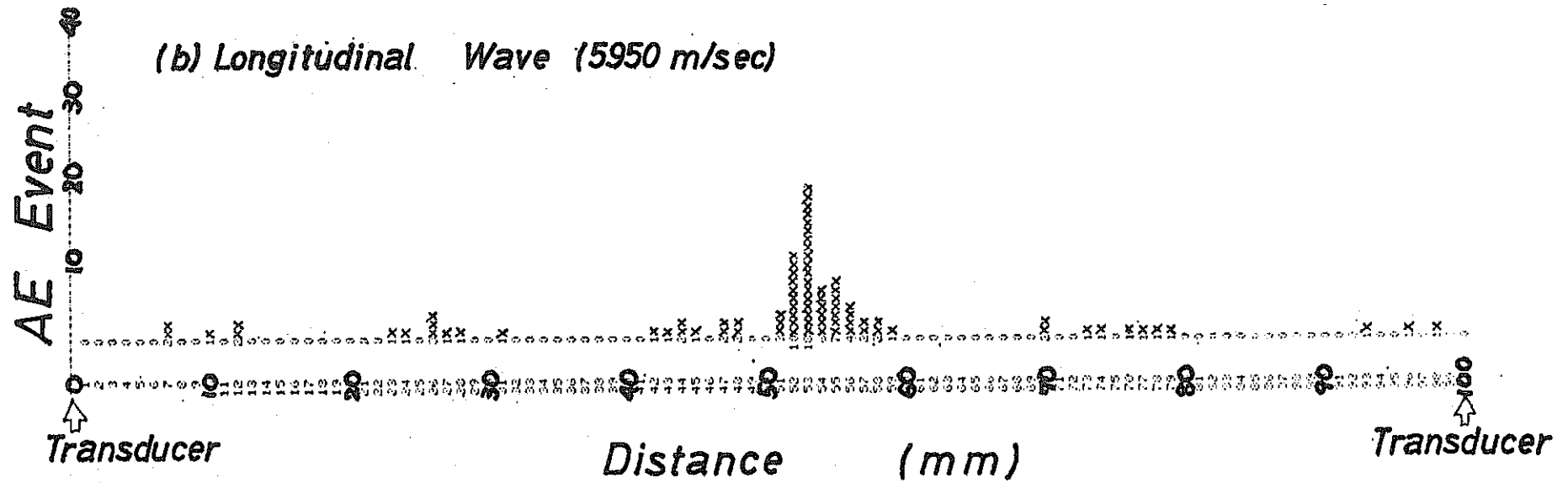
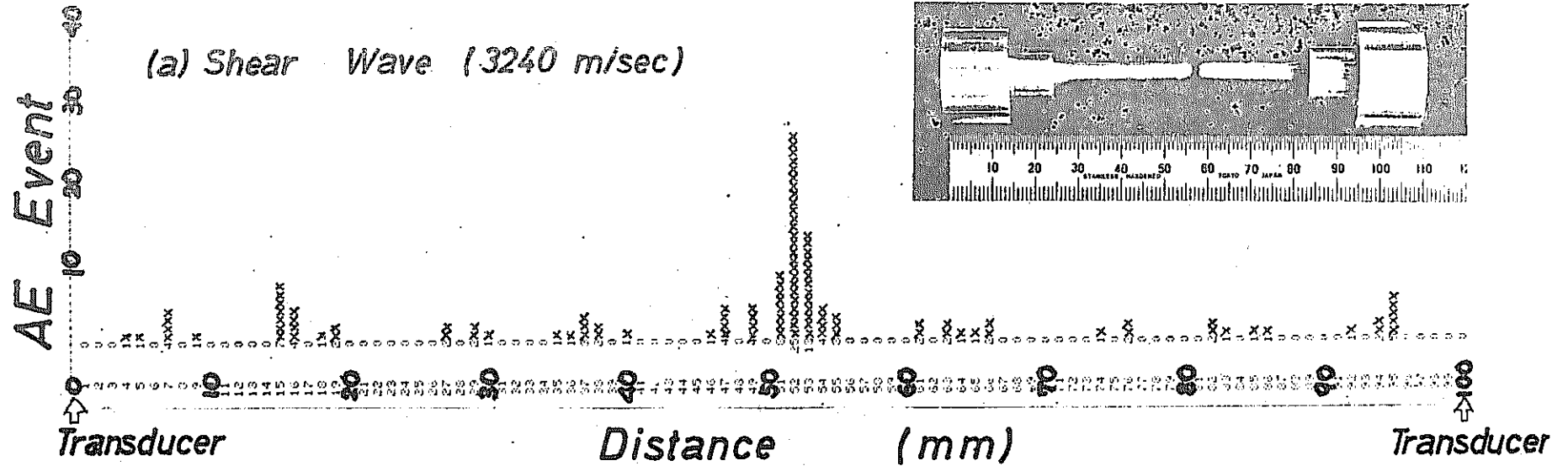
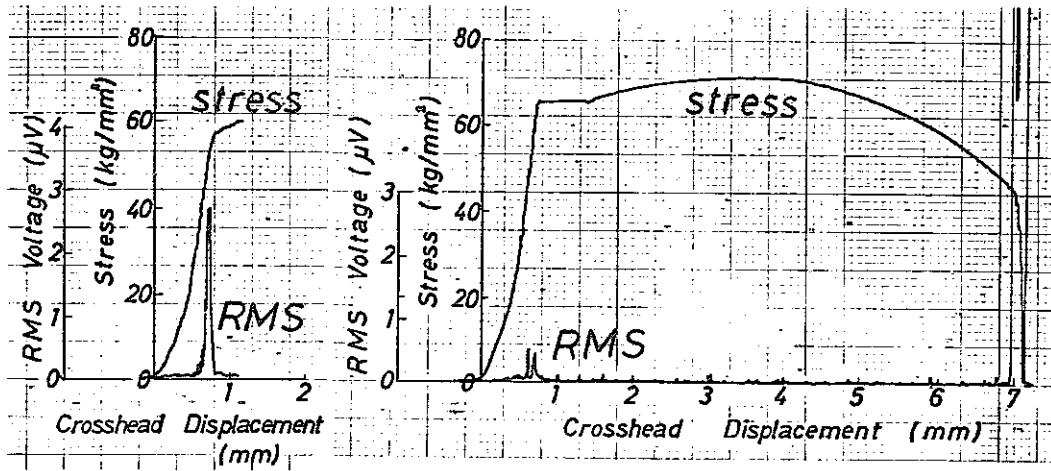
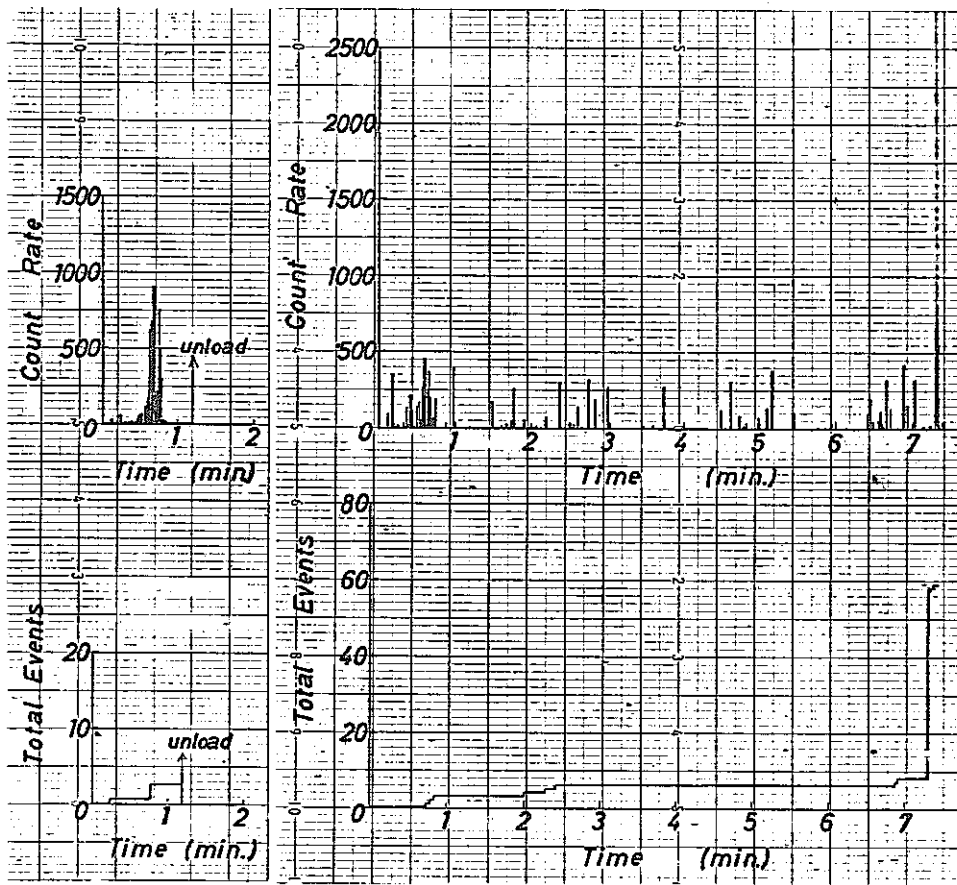


Fig.3.1.3-11 Examples of AE source location. ( $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^4$  )



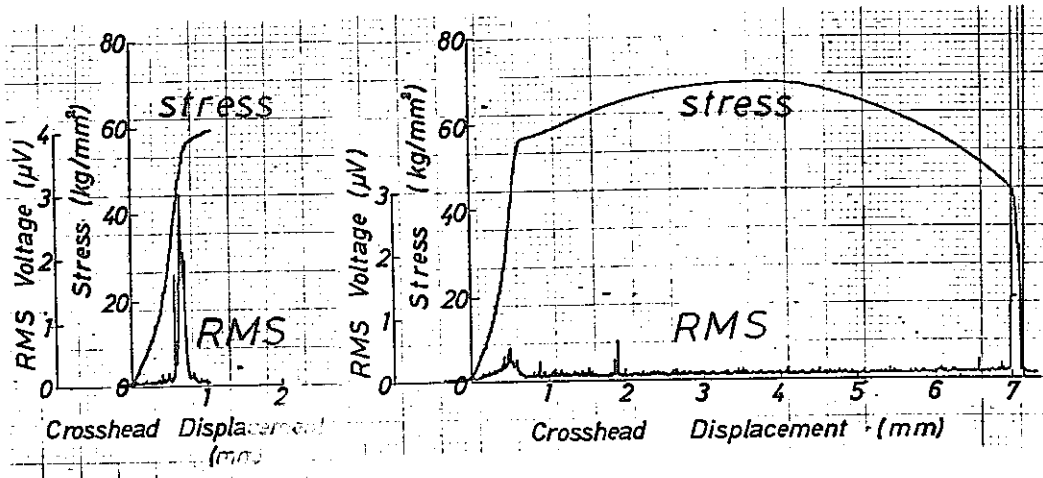
(a) before heat treatment                      (b) after heat treatment

Fig.3.1.3-12 Stress and RMS voltage as a function of crosshead displacement. ( 300°C x 30 min )



(a) before heat treatment                      (b) after heat treatment

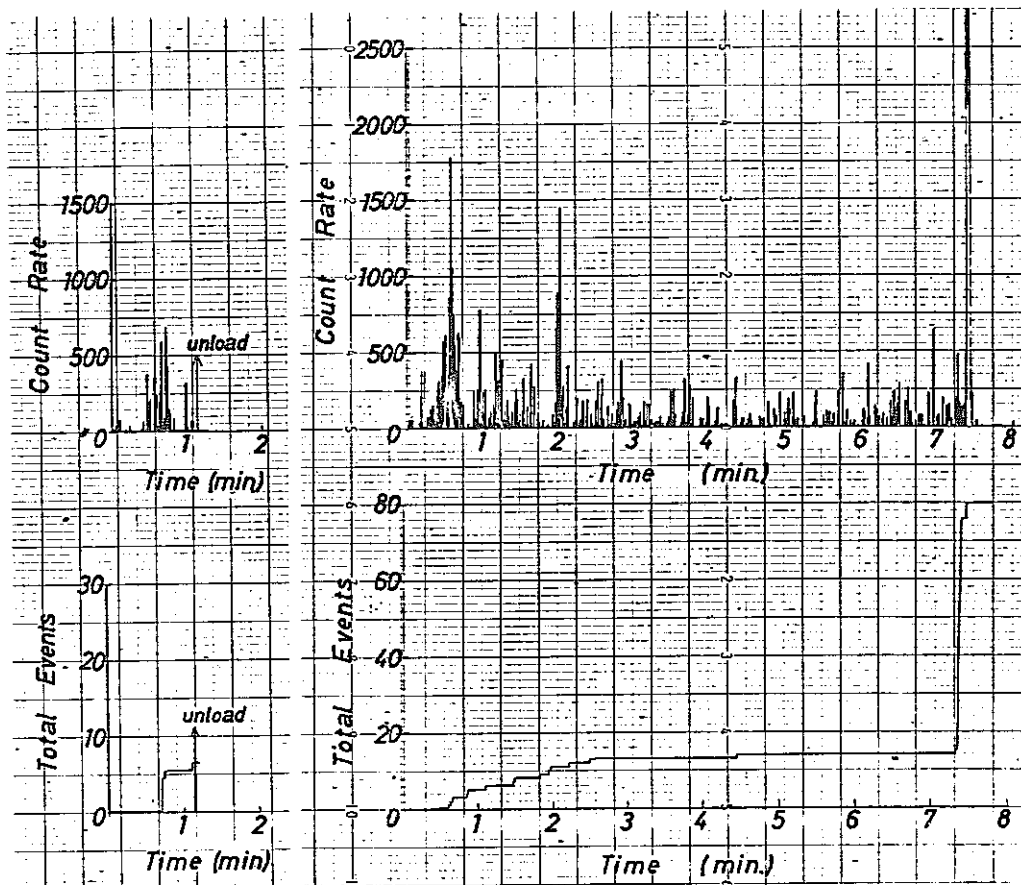
Fig.3.1.3-13 Ringdown count rate and total events as a function of time. ( 300°C x 30 min )



(a) before heat treatment

(b) after heat treatment

Fig.3.1.3-14 Stress and RMS voltage as a function of crosshead displacement. ( 630°C x 30 min )



(a) before heat treatment

(b) after heat treatment

Fig.3.1.3-15 Ringdown count rate and total events as a function of time. ( 630°C x 30 min )

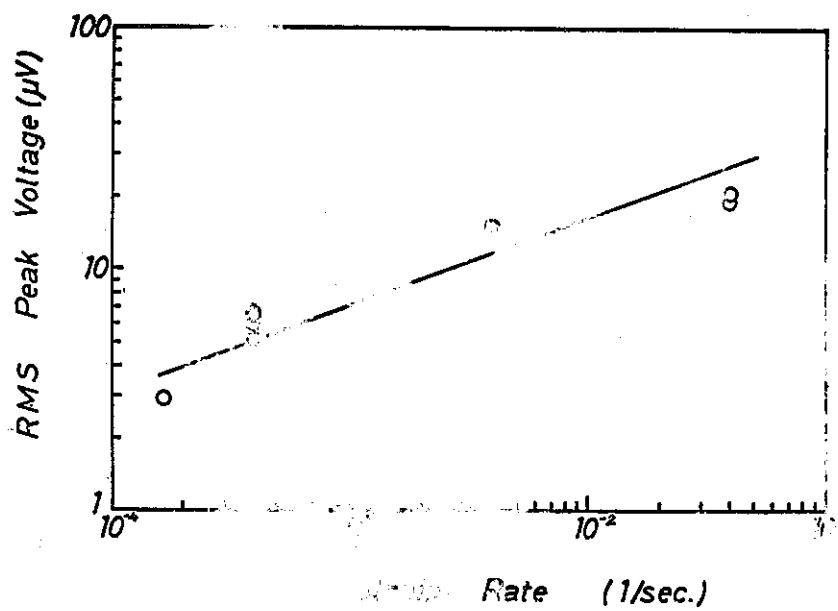


Fig.3.1.3-16 The relation between strain rate and RMS peak voltage.

### 3.1.3.2 2¼Cr-1Mo 鋼 歪速度と回復の影響

#### (1) A E計測上の考慮事項

##### (a) ノイズ除去のための考慮

試験片で発生するA Eのみを検出するため試験片と治具の間に2 mm厚さのゴム板を挿入してノイズを検出しないよう努めた。

##### (b) 包絡線検波値とR. M. S. 電圧

2¼Cr-1Mo 鋼のように突発型A Eと連続型A Eを出す場合の計測においてR. M. S 値では突発型の出方を知ることが出来ないので包絡線検波を行い、ピーク検出に近い(準ピーク検出)検出を試みたが、充放電時定数の最適化、および記録計のレスポンス等が今後の検討課題として残っている。

##### (c) 事象数の検出

突発型の事象は1~2 msec程度の持続時間を持っている。この試験ではデッドタイムを0.5 msecに選定したので結果的に事象を多く数えている。従って真の事象数は本試験結果の¼程度ではないかと推定される。

#### (2) 歪速度の影響

##### (a) 波形観察

(i) 降伏点の直前に連続型A Eが見られるが、その他の箇所で発生するA Eは殆ど突発型である。高速引張時の包絡線検波グラフ(Fig. 3.1.3.2-3)ではあたかも連続波が最初から出ているように見受けられるが、これは記録計のレスポンスの限界によるものであり波形観察に見られるように(①)降伏点直前を除き突発型である。

(ii) 降伏点直前の連続波A Eの振巾は歪速度の増大と共に増大している。

##### (b) A E事象

荷重最大付近で突発型A Eがみられる。歪速度 $3.5 \times 10^{-3} / \text{sec}$ までは弾性範囲内では指数関数的に増加するが、 $3.5 \times 10^{-2} / \text{sec}$ になると直線的増加に近づいている。

#### (3) 回復の影響

##### (a) A E事象

(i) トータルカウントは余り変化はない。

(ii) 降伏点以前で荷重の比較的小さいときに、A Eの急増個所がみられる。

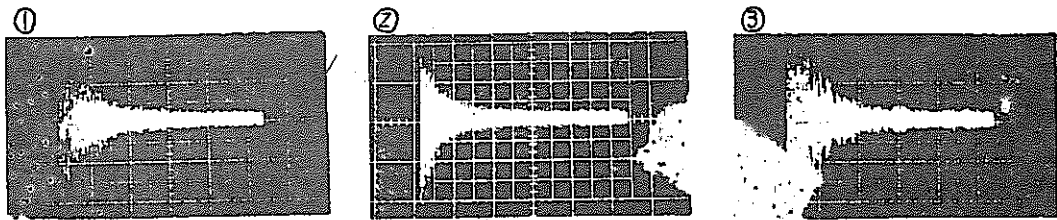
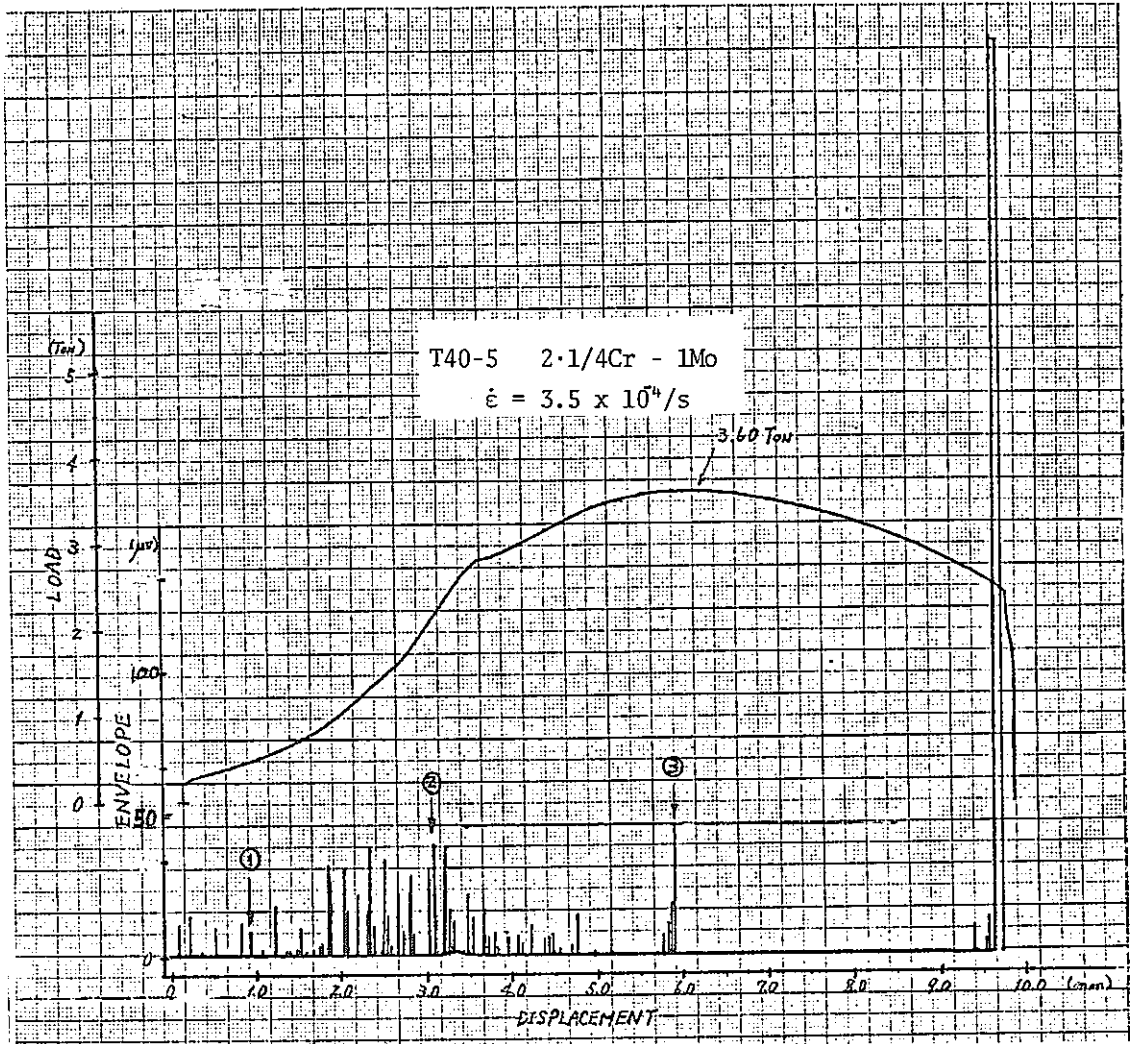
(iii) 最大荷重点以降のA Eは極めて少ない。

等の特徴がみられる。

F A E A E 計測データシート

単純引張時歪速度と回復の影響		データ番号		責任者名	中村哲男		
		記入年月日		1978年5月	日		
試験材料	2 1/4 Cr-1Mo		試験雰囲気	空気中		所属会社名	三菱重工業株式会社
試験装置	島津オートグラフ10Ton用		材料熱処理			試験場所	高砂研究所
試験目的		歪速度をパラメータとした引張試験時のAE特性および予歪後熱処理による回復がAEにおよぼす影響を調査する。					
試験片番号	T40-5	T30-5	T20-4	T43-5	T46-5		
試験条件	試験温度	R.T	R.T	R.T	R.T	R.T	
	ひずみ速度	3.5×10 <sup>-4</sup>	3.5×10 <sup>-3</sup>	3.5×10 <sup>-2</sup>	3.5×10 <sup>-4</sup>	3.5×10 <sup>-4</sup>	
	熱処理条件				5%予歪後 300°C×1H	5%予歪後 600°C×1H	
試験条件 疲労試験	ひずみ保持時間	引張側					
		圧縮側					
	周波数						
	抑制方法			印荷波形			
A E 計測			A E 計測装置	A E 計測装置-4チャンネル(自社製)			
試験片番号	T40-5	T30-5	T20-4	T43-5	T46-5		
変換子	変換子名と番号	0.14 Z10 1592	0.14 Z10 1592	0.14 Z10 1592	0.14 Z10 1592	0.14 Z10 1592	
	校正曲線						
	取付箇所(導波棒)	試験片上端	試験片上端	試験片上端	試験片上端	試験片上端	
接着法(カップラント)	ビニールテープ (ワセリン)	ビニールテープ (ワセリン)	ビニールテープ (ワセリン)	ビニールテープ (ワセリン)	ビニールテープ (ワセリン)		
増幅器	前置増幅器	40dB	40dB	40dB	40dB	40dB	
	主増幅器	35dB	35dB	35dB	35dB	35dB	
フィルター・周波数帯域	100KHz~	100KHz~	100KHz~	100KHz~	100KHz~		
トリガーレベル	125μV	125μV	125μV	125μV	125μV		
R.M.S. 電圧	-	-	-	-	-		
事象数	Fig. 3132-6	Fig. 3132-7	Fig. 3132-8	Fig. 3132-9	Fig. 3132-10		
振幅分布	-	-	-	-	-		
エネルギー分布	-	-	-	-	-		
波形観察	Fig. 3132-1	Fig. 3132-2	Fig. 3132-3	-	-		
その他(包絡線検波)	Fig. 3132-1	Fig. 3132-2	Fig. 3132-3	Fig. 3132-4	Fig. 3132-5		
	前置増幅器	主増幅器		フィルター		位置標定手法	
型式	-	-	型式	-	分解能		
メーカー	自社製	自社製	メーカー名	自社製	範囲		
ダイナミックレンジ	60dB	60dB	周波数帯域	H.P.F 100KHz			
備考							





X: 1 ms/DIV, Y: 1.2 V/DIV

Fig. 3.1.3.2-1

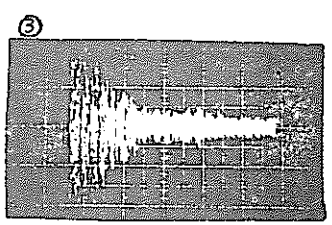
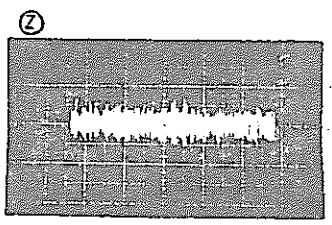
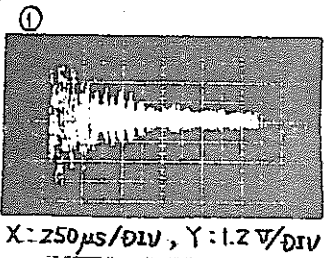
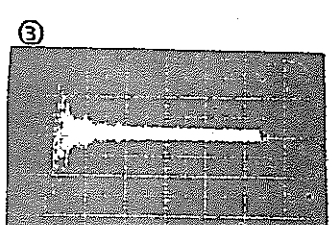
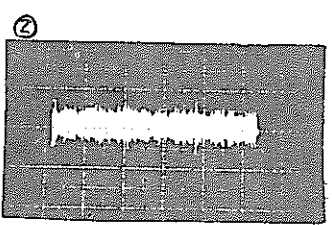
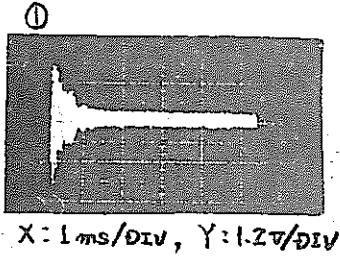
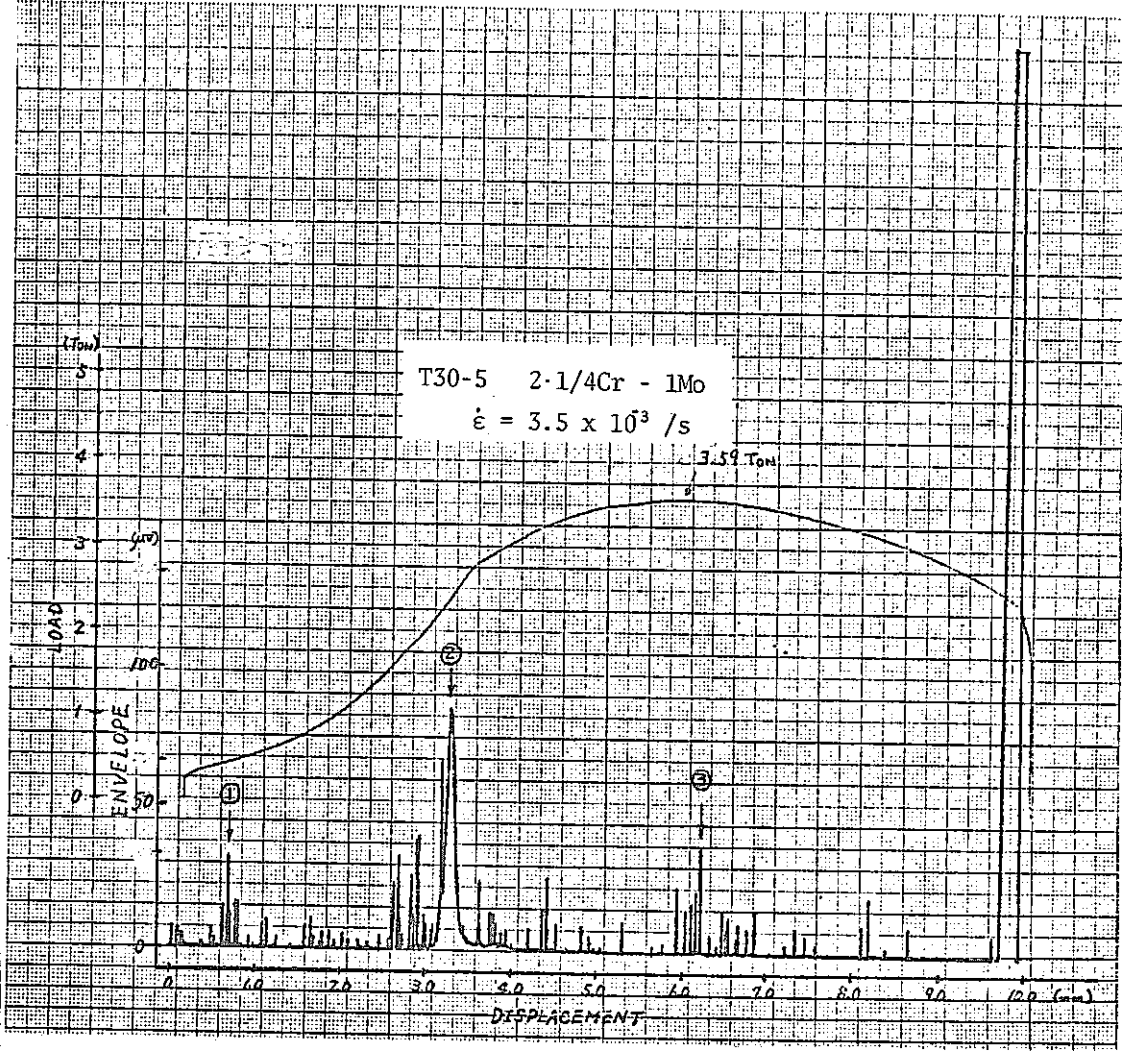


Fig.3.1.3.2-2

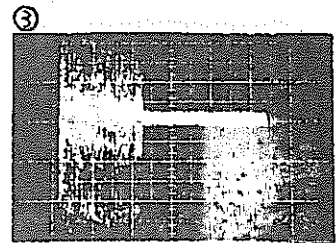
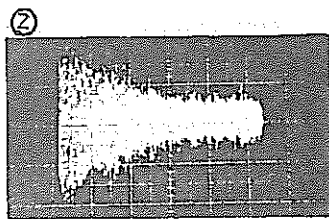
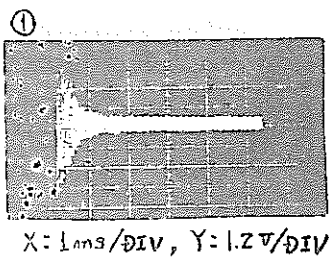
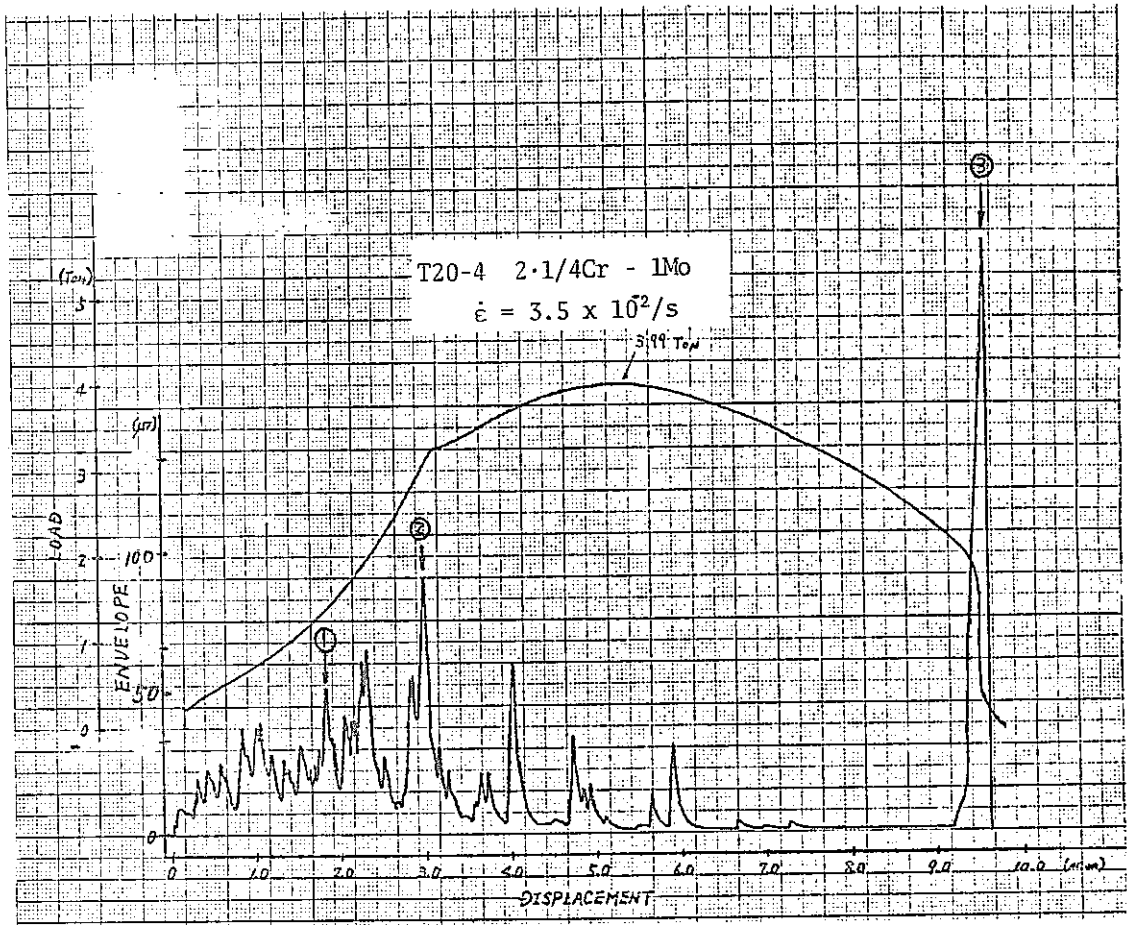


Fig. 3.1.3.2-3

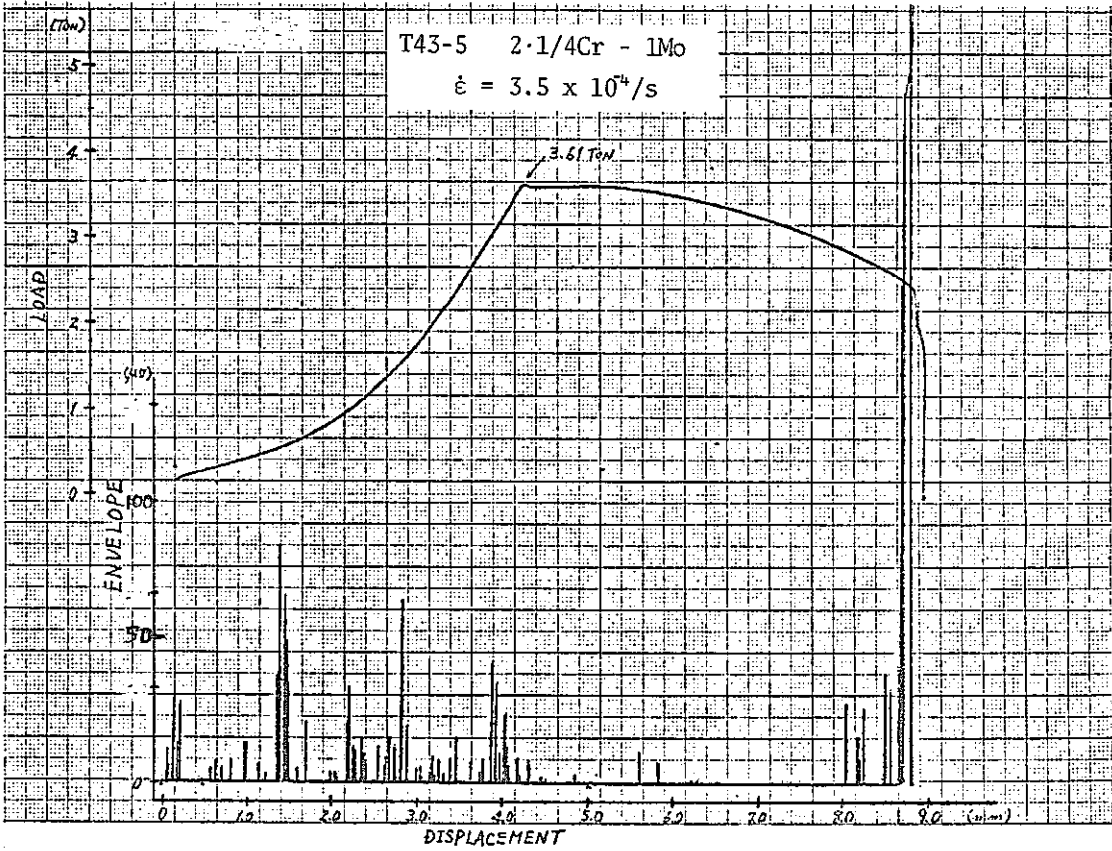


Fig.3.1.3.2-4

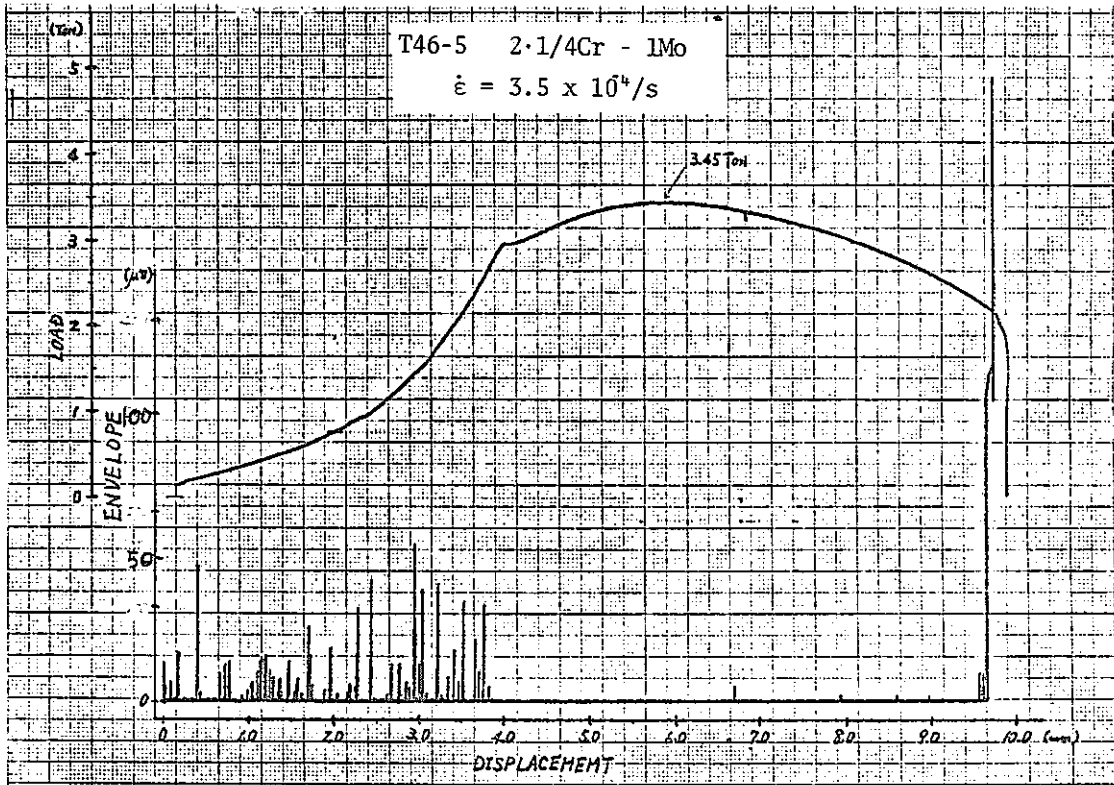


Fig.3.1.3.2-5

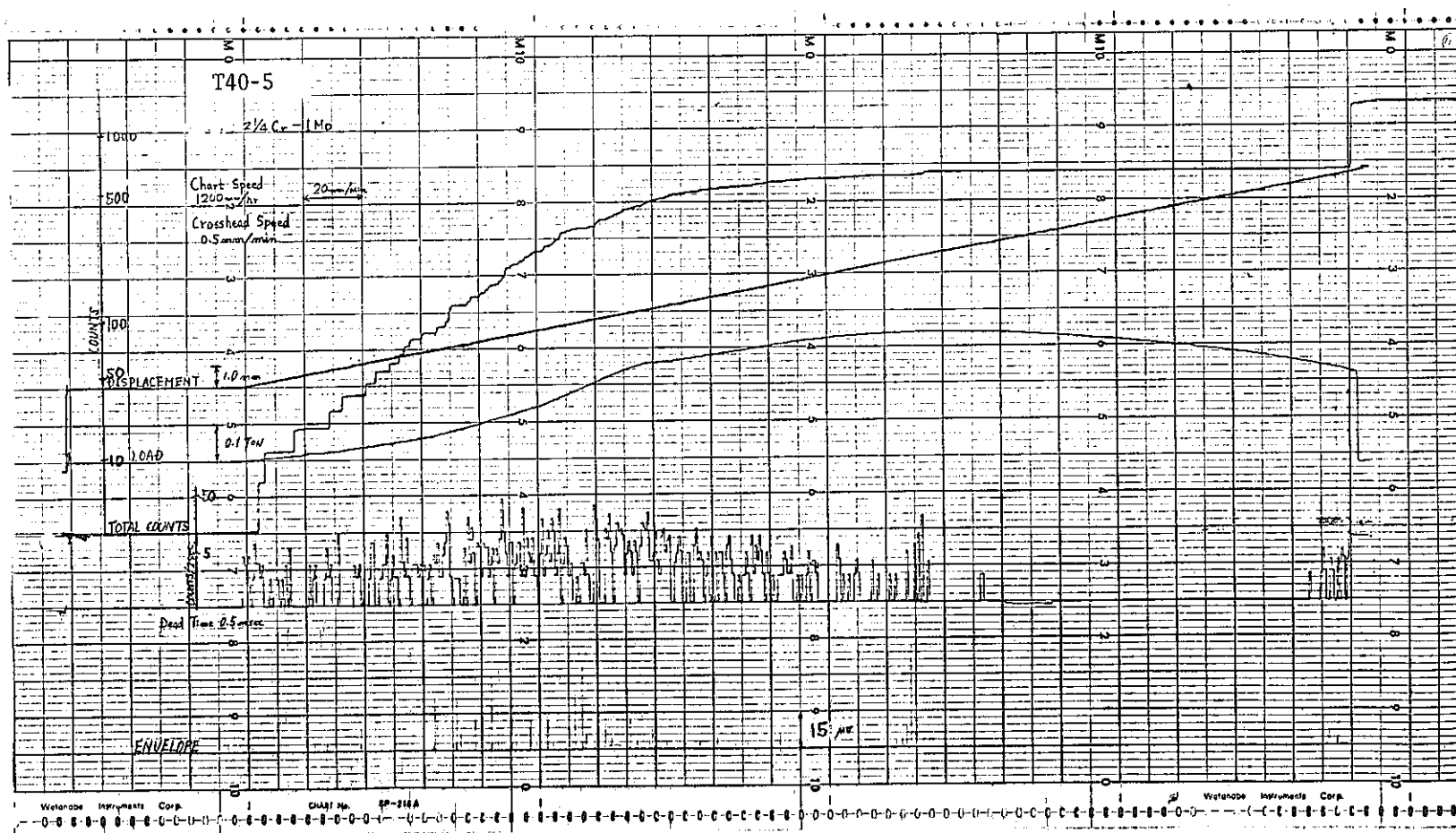


Fig. 3.1.3.2-6

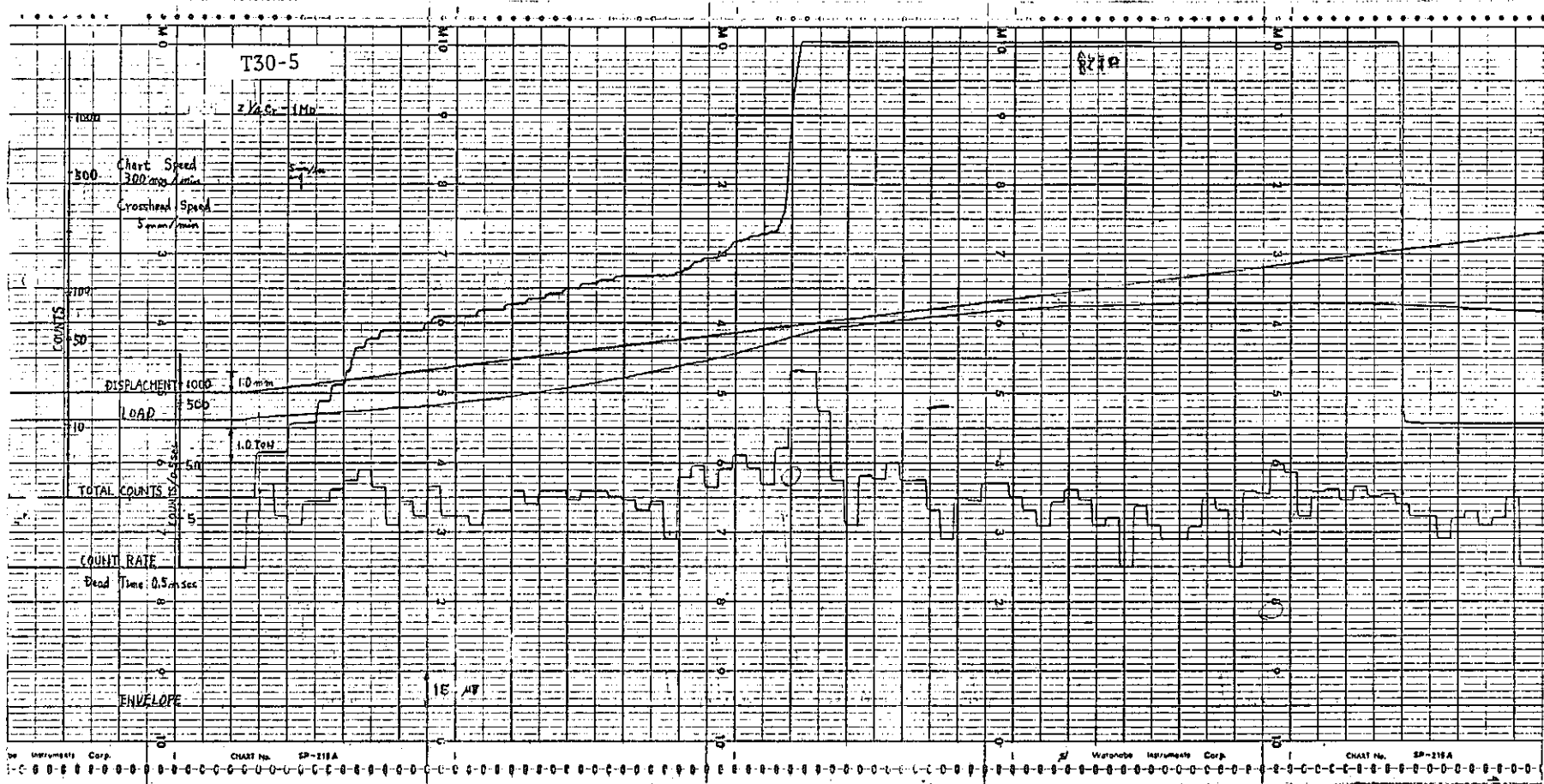


Fig.3.1.3.2-7

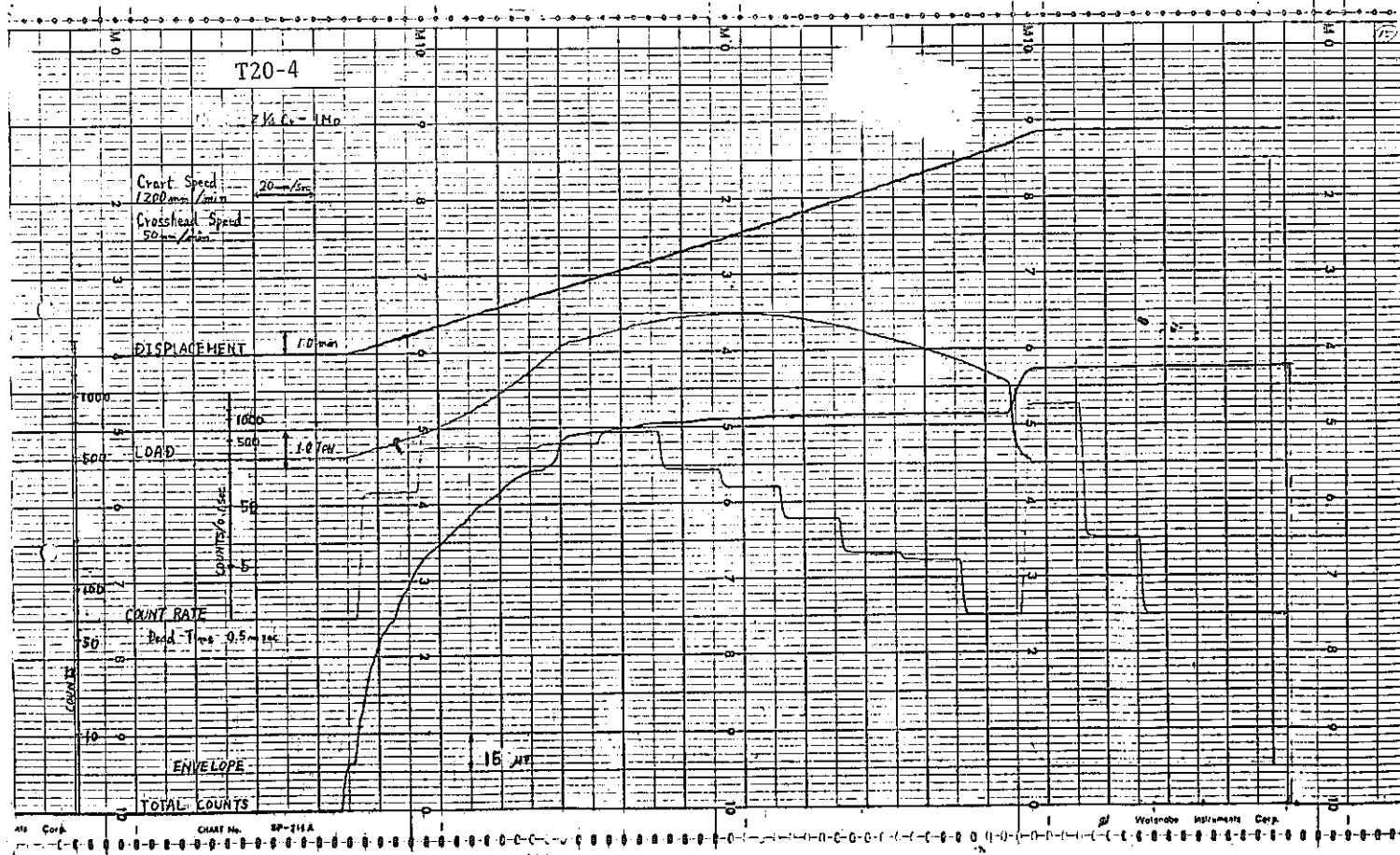


Fig.3.1.3.2-8

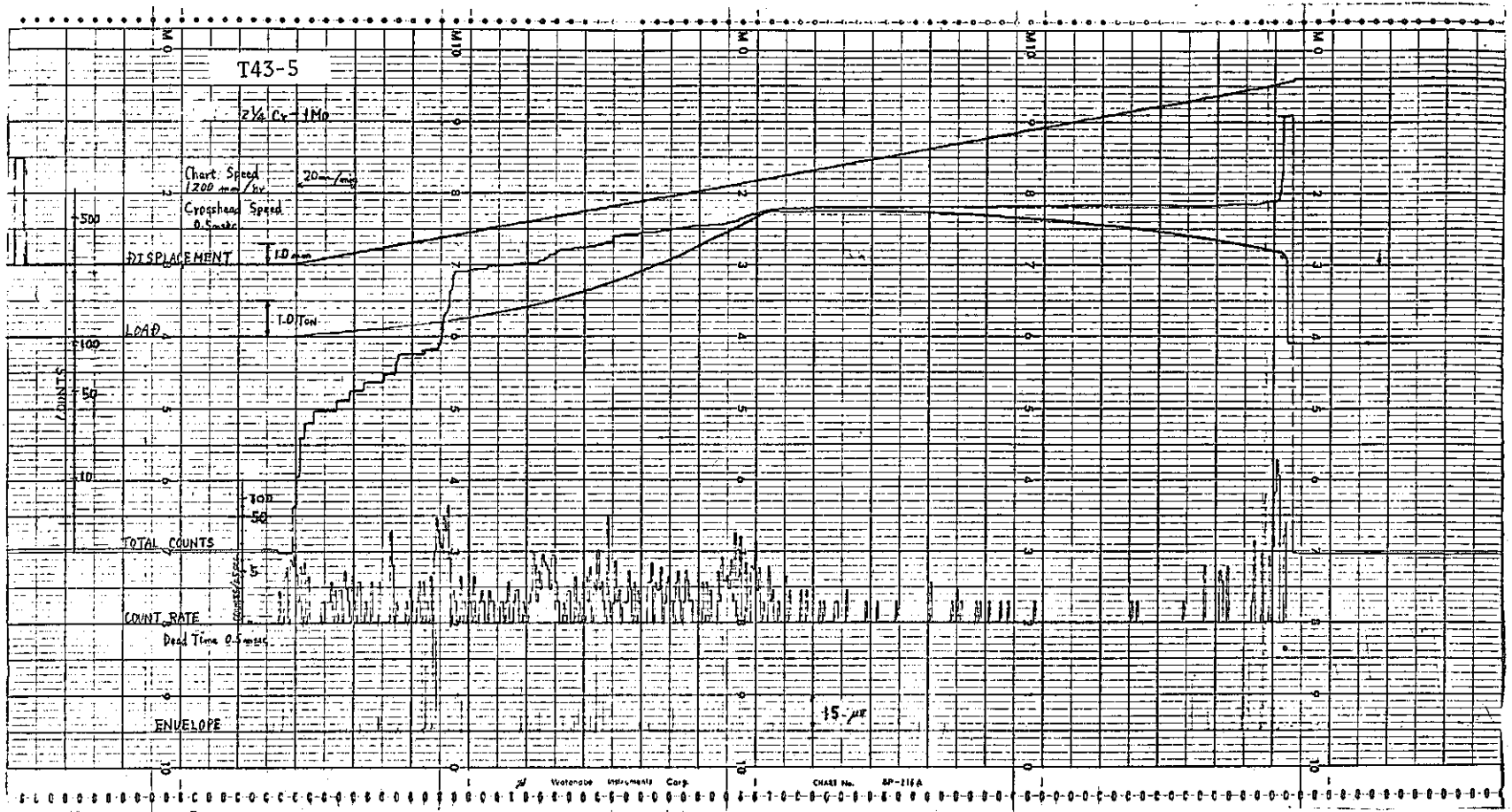


Fig. 3.1.3.2-9



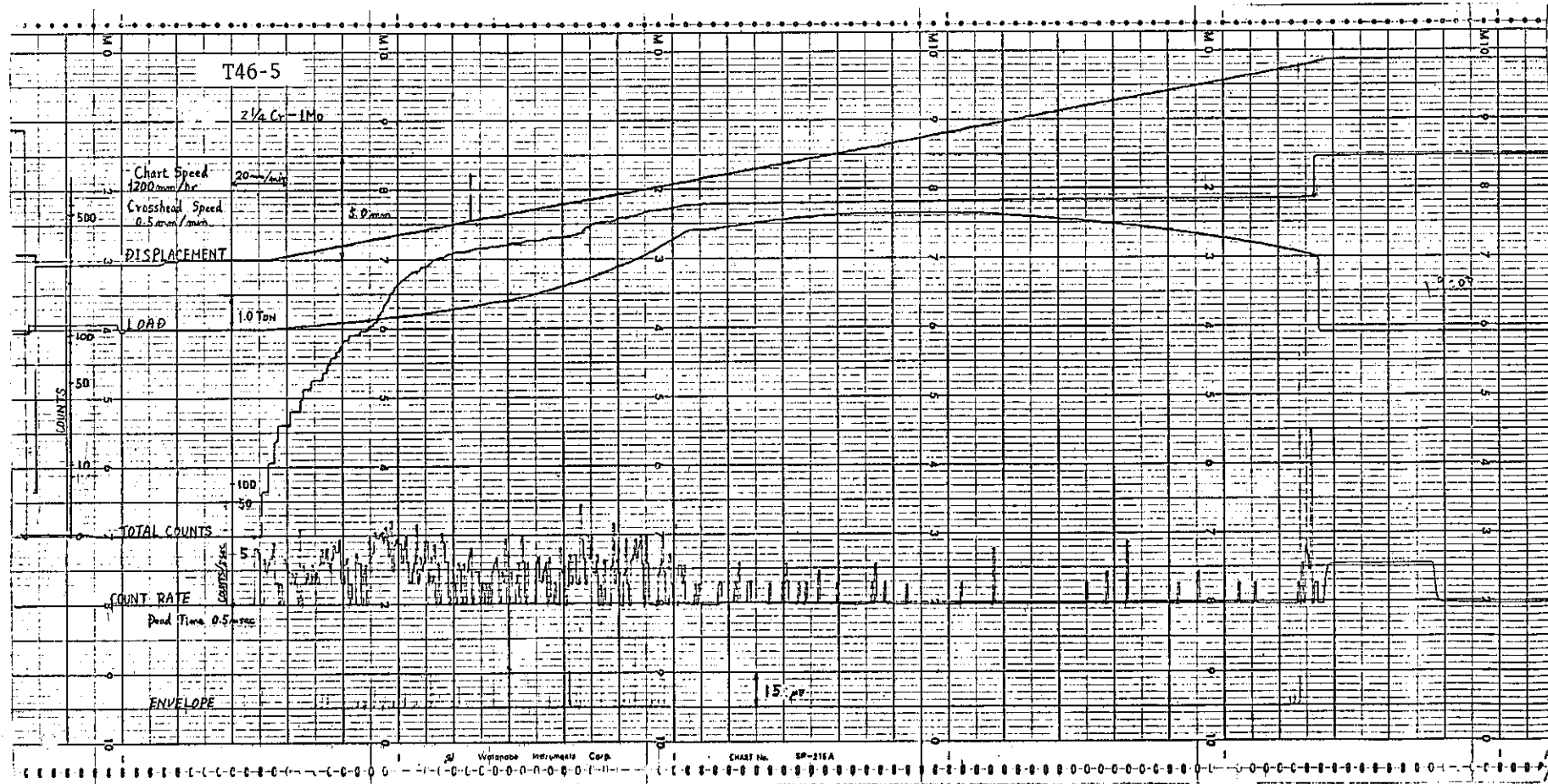


Fig.3.1.3.2-10

### 3.1.4 SUS316 歪速度の影響

#### (1) 試験目的

SUS316の丸棒平滑試験片を用い、常温単軸引張りのA E特性に及ぼす歪速度の影響を調べた。

#### (2) 供試材及び試験片形状

供試材：SUS316

試験片形状：FAE小委員会標準試験片 (Fig. 3.1.4-1)

#### (3) 材料試験装置と計測法

試験装置：島津製作所製オートグラフIS-5000

記録装置：理研電子製XYレコーダーD73BP

#### (4) 材料試験条件

雰囲気：大気中

温度：室温

歪速度： $4.2 \times 10^{-4}$ 、 $8.3 \times 10^{-4}$ 、 $2.1 \times 10^{-3}$ 、 $4.2 \times 10^{-3}$  [ $S^{-1}$ ] の4通り。

#### (5) A E計測方法

A Eの計測項目は、試験片の中央平行部から発するA E信号の総イベント数と、リングダウン計数(トータル)、及びそれらのイベントの振幅分布である。

横軸を時間に取り、縦軸に応力、イベント数、リングダウン計数をXYペンレコーダーで記録する。

全体の簡単なブロック図をFig. 3.1.4-2に示す。また以下に各計測機器をその用途と共に記す。

#### (a) 変換子

◦ D/E社製 D9203 (共和電業製CC-15Aで接着)

◦ FAE小委供試変換子 No. 1573 ( " )

#### (b) 前置増幅器

◦ D/E社製 801P (40dB)

◦ D/E社製 802P (60dB)

#### (c) フィルター及び主増幅器

◦ D/E社製 301 (100KHzハイパスに設定)

◦ D/E社製 302 (100KHzハイパスに設定)

301、302ともフィルターと主増幅器を内蔵しており、利得は0~60dB可変である。更に301にはリングダウン計数のカウンターも内蔵されている。

#### (d) 分布解析器

◦ D/E社製 920

一次元の位置標定を行ない、事象数の位置分布解析を行なう。また試験片平行部より発せられた信号の解析を命令する信号を外部メモリーに出力する。

#### (e) 外部メモリー

◦ D/E社製 922×2機

2機とも920によって試験片平行部から発せられたと弁別された事象についてのみ解析を

行う。

1機は、事象の最大振幅とその振幅の事象数の解析を行なう。ただし最大振幅の計測は、振幅検波器（921）が行なっており、その結果が入力されている。

他の1機は、事象に含まれるリングダウン計数とその計数を持つ事象数の解析を行なう。また、その事象に含まれるリングダウン計数をパルス化して301へ送信する。即ち、920によって、試験片平行部より発せられたと判断された事象は、922によってその事象に含まれるリングダウン計数が計測され、その計数を301の内蔵カウンターへ入力する事により、位置標定されたリングダウン計数を計測できる事になる。

(f) 振幅検波器

◦ D/E社製 921

事象の最大振幅を対数化して922へ出力する。

921への入力信号は前置増幅器から出力された信号であるから、主増幅器の利得に左右されない。

(6) A E試験の結果

実験は5本の試験片について行った。それぞれの歪速度、総利得、応力40〔Kg/mm<sup>2</sup>〕時でのリングダウン計数をTable 3.1.4-1に示す。表中のリングダウン計数は前述のように、試験片平行部より出たA E信号のものである。

(a) 波形 オシロスコープにより観察された波形は、応力が試験片に加えられると大振幅の突発型A Eが多発したが、位置標定によりこれらの信号は全て試験片のつかみ部からの雑音である事が判り、A E信号の解析からは除去された。更に応力が増加し降伏応力に達した瞬間から小振幅の突発型A Eが多数発生し、位置標定により試験片平行部からの信号である事が確認された。軟鋼の平滑試験片の降伏時のA Eは連続型であり、これは突発型A Eが多発するために連続的な様相を呈すると考えられるが、SUS316の場合は、降伏時に於てもA Eの発生頻度が小さく、かつ小振幅で突発型のA Eとして観察される。しかし、小振幅であっても突発型であるという特徴の為に位置標定が可能となり、試験片のつかみ部から発生する雑音と平行部からのA E信号の弁別を可能にしている。

(b) 位置標定

位置標定は、試験片両端部に変換子を取りつけて行なった。一方の端面の相対座標を0、他方を100となるように設定し、試験片全長を100分割して位置標定をした。試験片平行部の相対座標は40~60である事がわかり、位置標定の結果40~60の範囲に入った信号だけを処理すれば試験片のつかみ部からの雑音を除去でき、かつ平行部からのA Eを取り損わない事が判った。

また電氣的雑音が入る可能性が小さい環境で実験を行なったが、万一に備え、電源、試験機、試験片、前置増幅器、A E解析器、ペンレコーダー等のアースを取り万全を期した。No. 3の試験片の位置標定の例をFig. 3.1.4-3に示す。試験片平行部からの信号が明瞭に分布してい

るのがわかる。またつかみ部からの雑音は0と100に集中し、かなりの数になっている。他の試験片についても位置標定は同様な結果を示した。

(c) 歪速度の影響

Table 3.1.4-1 に示したように、No. 1～No. 3 は増幅率が同じで歪速度だけを変化させて計測した。No. 1 の結果を Fig. 3.1.4-4 に示す。応力が降伏応力に達するとリングダウン計数、イベント数ともに増加し始める。塑性歪が増加するにつれてリングダウン計数が増加するが、ほぼ応力に沿って増加しており、リングダウン計数が塑性仕事に比例していると言える。即ちリングダウン計数を  $N$ 、応力  $\sigma$ 、塑性歪  $\epsilon_p$  とすれば

$$N \propto \int \sigma d\epsilon_p$$

の関係があり、両辺を時間  $t$  で微分すれば

$$\frac{dN}{dt} \propto \sigma \frac{d\epsilon_p}{dt}$$

となり、完全弾塑性体の場合、降伏後には

$$\sigma = \sigma_y \quad (\text{降伏応力})$$

であるから結局

$$\frac{dN}{dt} \propto \frac{d\epsilon_p}{dt}$$

となり、リングダウン計数率と塑性歪速度が比例するという従来の報告に一致している。

またリングダウン計数とイベント数は平行して増加しており、塑性歪の大きさに拘らず、A E 信号は同じ性質のものである事がわかる。

Fig. 3.1.4-5 に No. 3 の結果を示す。No. 3 は No. 1 の 5 倍の速度で負荷したのであるが、結果は No. 1 のものとほとんど相違のないものになっている。No. 2 についても Table 3.1.4-1 に示したように同様な結果となったので図を省略する。

以上の事より、リングダウン計数は塑性仕事に比例し、その比例定数は歪速度に影響されない事がわかる。

Fig. 3.1.4-4、5 は試験機の引張速度より求めた公称歪であり、実際に歪ゲージ等により求めた歪ではないので応力-歪曲線としては不備な点がある。従って、No. 1、2、3 の試験結果を横軸を応力、縦軸を A E リングダウン計数にとって書き直したのが Fig. 3.1.4-6 である。図でわかるように、応力が等しい点に於ては、歪速度が増すと、リングダウン計数が増す傾向が見られる。

(d) 振幅分布

事象の最大振幅を測定し、ある振幅を持った事象がいくつ有るかを分析する。振幅は変換子出力電圧を取る。

ある最大振幅  $V_p$  における事象数の密度関数を  $n_e$  とし、 $n_0$ 、 $m$  を定数として、次の式を仮定する。

$$n_e = n_0 V_P^{-m}$$

ここで、ある振幅  $V_P$  以上の振幅を持つ事象の総数を  $N$  とすれば、 $m > 1$  の条件の下で

$$N = \int_{V_P}^{\infty} n_e dV_P = \frac{n_0}{m-1} V_P^{-m+1}$$

が成り立つ。ここで両辺の対数を取れば

$$\log N = \log \frac{n_0}{m-1} - (m-1) \log V_P$$

従って横軸に電圧振幅の対数、縦軸にその電圧振幅以上の振幅を持つ事象数の対数を取れば、負の傾き  $(m-1)$  を持つ直線となる。

Fig. 3.1.4-7 は No. 1、No. 3 の結果を図示したものであり、歪速度が増すと、A E の活性がやや高く得られる傾向を示している。しかし、傾きを見るとほとんど一致しており、歪速度により  $m$  の値が変化しないことを示している。

#### (7) 結果のまとめ

SUS316 の場合、小振幅突発型の A E が発生し、雑音と A E を弁別するのに位置標定は有効であった。

歪速度の変化による、リングダウン計数（トータル）及び振幅分布の変化は、いずれも、歪速度が増すと A E の活性が高くなる傾向を示した。

F A E A E 計測データシート

歪速度の影響		デグレート番号			責任者名	飯田 国 広	
		記入年月日	1978 年 5 月 24 日		所属会社名	東大工学部	
試験材料	SUS 316	試験雰囲気	空 気 中		試験場所	"	
試験装置	島津 IS-5000	材料熱処理	支 給 材		試験片形状	丸棒平滑試験片	
試験目的	歪速度を変化させた時の A E 特性の変化を調べる。						
試験片番号		1		2		3	
件 条 験 試	試験温度	R. T.		R. T.		R. T.	
	ひずみ速度	$8.3 \times 10^{-4}$		$2.1 \times 10^{-3}$		$4.2 \times 10^{-3}$	
件 条 験 試 疲 勞 劣 化	みずみ時間	引張側					
	みずみ時間	圧縮側					
	周波数						
	抑制方法			印荷波形			
A E 計 測			A E 計 測 装 置	D/E社製 A E 計測システム			
試験片番号		1		2		3	
子 線 装 置	変換子名と番号	D/E 9203	1573	D/E 9203	1573	D/E 9203	1573
	校正曲線						
	取付個所(導波棒)	試験片の両端面					
増 幅 器	接着法(カップラント)	CC15A	CC15A	CC15A	CC15A	CC15A	CC15A
	前置増幅器	40 dB	60 dB	40 dB	60 dB	40 dB	60 dB
増幅器	主増幅器	47 dB	27 dB	47 dB	27 dB	47 dB	27 dB
フィルター・周波数帯域		100kHz.	High Pass				
トリガーレベル		主増幅器の出力で 1 V					
R. M. S. 電 圧							
リングダウンor事象数		Fig. 3.1.4-4	-	-	-	Fig. 3.1.4-5	
振 幅 分 布		Fig. 3.1.4-7	-	-	-	Fig. 3.1.4-7	
エネルギー分布							
波 形 観 察							
その他(ロケーション)						Fig. 3.1.4-3	
		前置増幅器	主増幅器		フィルター		位置標定手法
型 式	801P, 802P	301, 302		型 式		分 解 能	
メ ー カ ー	D/E	D/E		メ ー カ ー 名		範 囲	
ダイナミックレンジ	40, 60 dB	60 dB		周波数帯域			
備 考							

F A E A E 計測データシート

歪速度の影響		データ番号	2/2		責任者名	飯田 国広		
		記入年月日	1978年 5月 24日		所属会社名	東大工学部		
試験材料	SUS 316		試験雰囲気	空気中		試験場所	"	
試験装置			材料熱処理	支給材		試験片形状	丸棒平滑試験片	
試験目的								
試験片番号		4		5				
条件 試験 条件	試験温度	R. T.		R. T.				
	ひずみ速度	$4.2 \times 10^{-4}$		$4.2 \times 10^{-4}$				
条件 試験 条件 試験 条件	ひずみ保持時間	引張側		圧縮側				
	周波数							
	抑制方法				印荷波形			
A E 計測			A E 計測装置		D/E社製 A E 計測システム			
試験片番号		4		5				
子 装 置	変換子名と番号	D/E 9203	1573	D/E 9203	1573			
	校正曲線							
	取付箇所(導波棒)	試験片の両端面						
	接着法(カップラント)	CC15A	CC15A	CC15A	CC15A			
増 幅 器	前置増幅器	40dB	60dB	40dB	60dB			
	主増幅器	45dB	25dB	51dB	31dB			
フィルター・周波数帯域	100 KHz High Pass							
トリガーレベル	主増幅器の出力で1V							
R. M. S. 電圧								
リングダウンor事象数	Table 3.1.4-1							
振幅分布								
エネルギー分布								
波形観察								
その他( )								
	前置増幅器	主増幅器		フィルター		位置標定手法		
型 式	801P, 802P	301, 302		型 式		分解能		
メーカ	D/E	D/E		メーカ名		範囲		
ダイナミックレンジ	40, 60dB	60dB		周波数帯域				
備考								





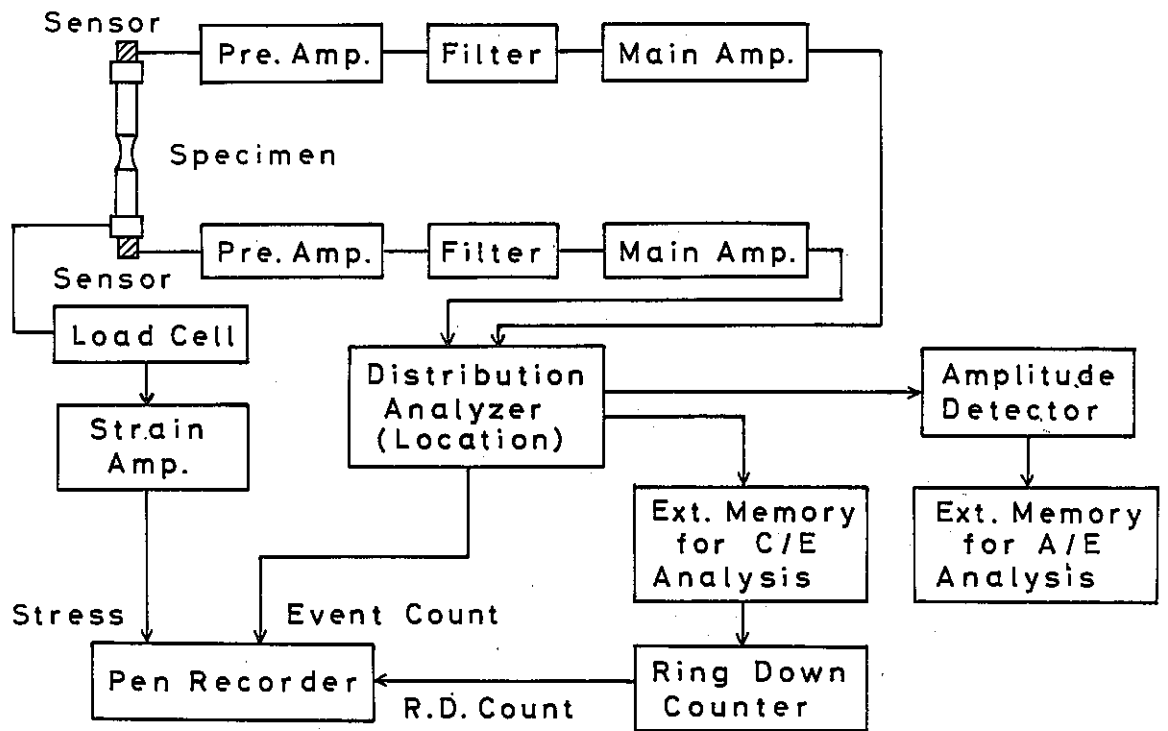


Fig.3.1.4-2 Experimental Arrangement

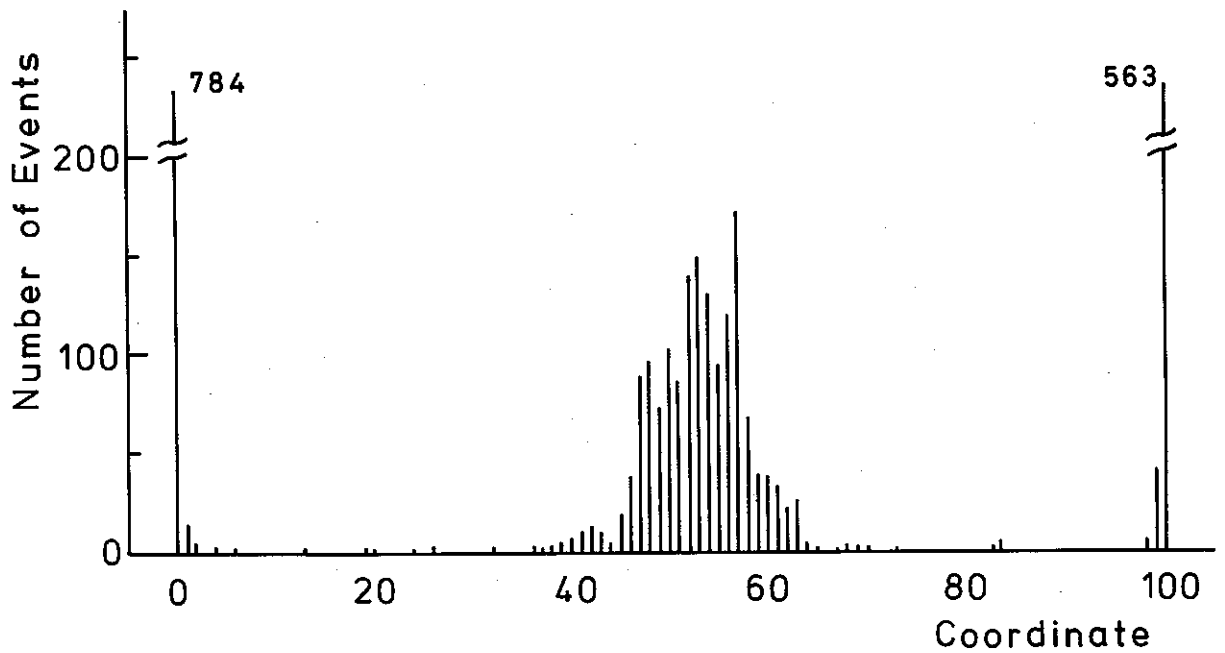


Fig.3.1.4-3 One Dimensional Location  
( Specimen No.3 )

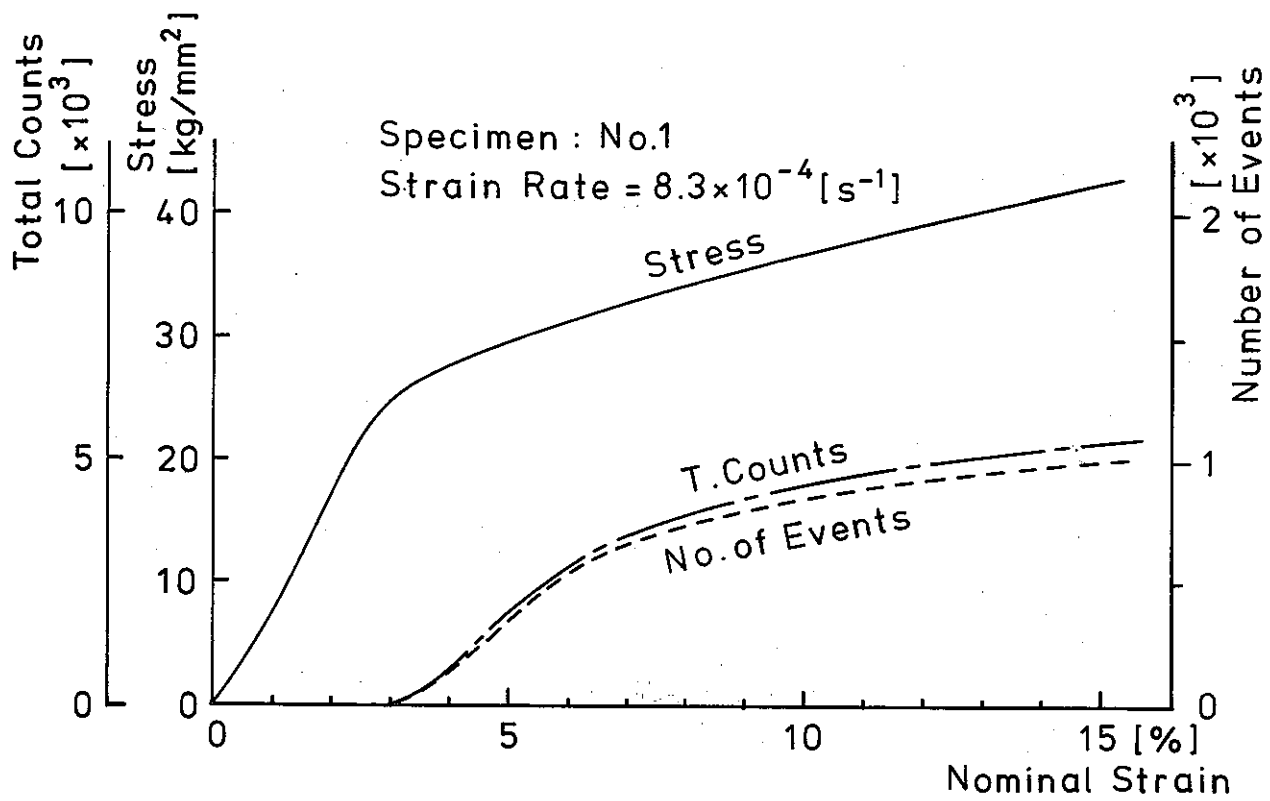


Fig. 3.1.4 - 4 Experimental Results of SUS316

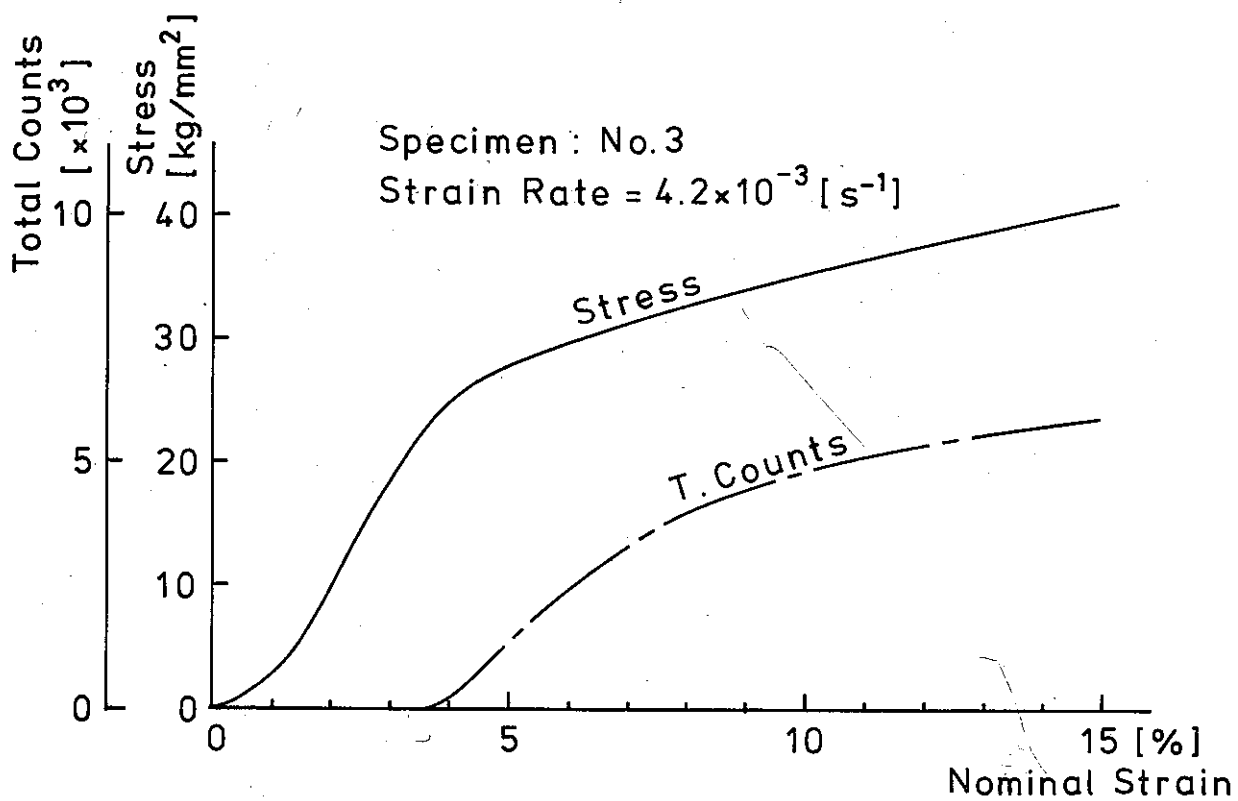


Fig. 3.1.4 - 5 Experimental Results of SUS316

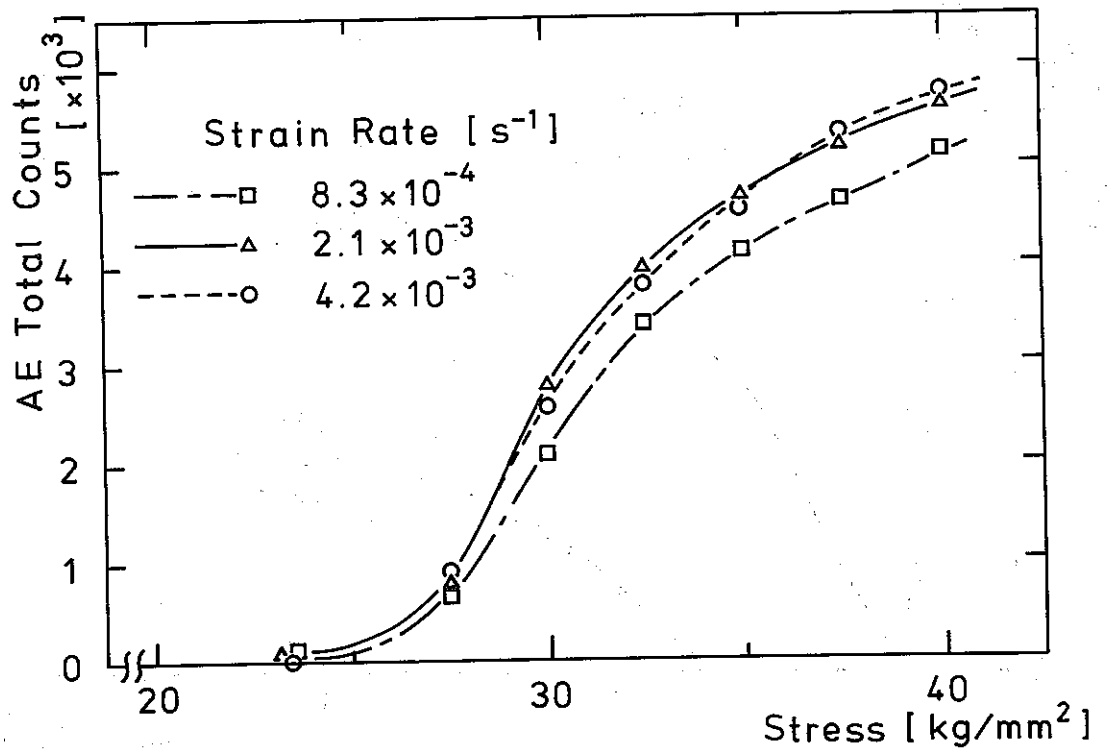


Fig. 3.1.4-6 Relationship between AE Total Counts and Stress

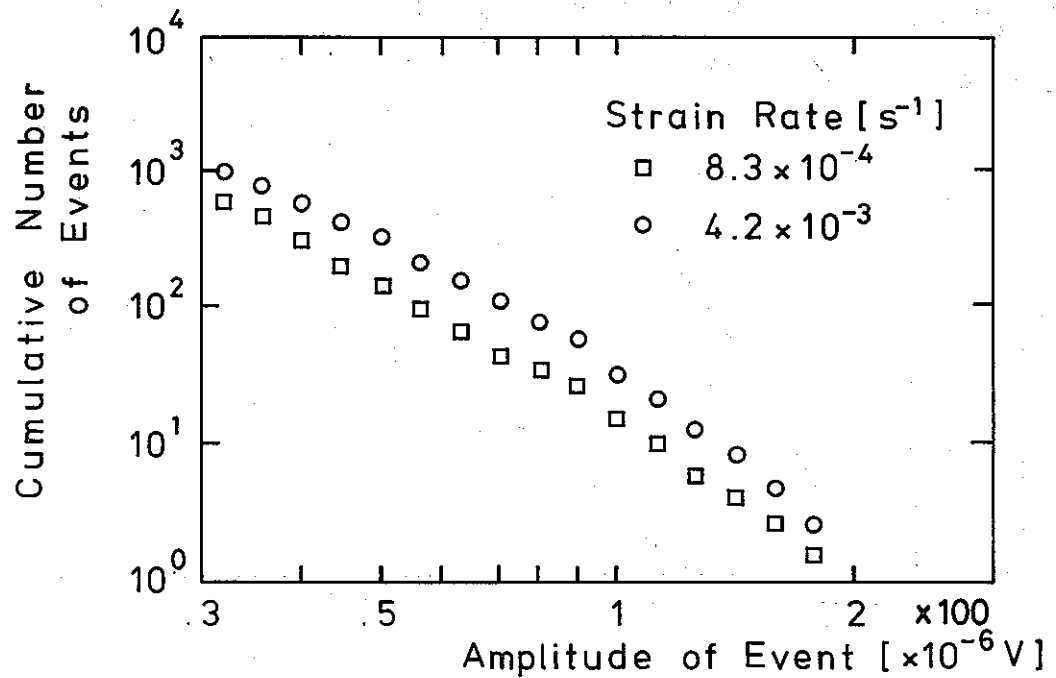


Fig. 3.1.4-7 Log Cumulative Distribution

## 3.2 高温単軸引張りのA E特性

### 3.2.1 SUS304 温度、歪速度、荷重保持時間の影響

#### (1) 試験目的

SUS304丸棒試験片を用いて単軸引張試験を実施し試験温度および歪速度の変化によるA E発生特性への影響と、引張荷重の除荷および保持によるA E特性の回復の影響（カイザー効果）を調査する。

#### (2) 試験片形状

本試験で用いた丸棒試験片はF A E小委員会で規定された標準試験片で、平行部長さは40 mm、直径は6 mm φである。

#### (3) 材料試験装置

本試験に用いた引張試験機はインストロン社製フロアー型万能試験機で最大引張荷重は5トンである。試験片の加熱装置として、最大容量1.5 KWの電気炉（発熱体3段巻、内径85 mm φ、外径350 mm φ、全長380 mm）とインストロン社製XD1017-100型温度制御器を使用した。

引張荷重は試験機に内蔵された記録計で記録した。試験片の温度は試験片の平行部に外径1 mm φのシース型熱電対（I C）を取付け、その出力を横河電機製2809型デジタル温度計で測定し、試験温度に到達してから約1時間温度保持したのち試験を行なった。

試験片平行部の歪量は直接測定することが出来ないため、試験機のクロスヘッド移動速度の設定値から計算によって求めた。

#### (4) 材料試験条件

本試験の試験条件をA E測定条件と共にF A E標準データシートに示す。

主な試験条件として、試験温度は室温および300℃、500℃、600℃の4点で、歪速度は $4 \times 10^{-4}$ 、 $4 \times 10^{-3}$ 、 $4 \times 10^{-2}$ の3点で、試験方法としては一定の歪速度で荷重低下または破断まで試験を行なう単調引張試験と、最初に約5%の歪量まで引張り、ここで荷重をゼロに戻し一定の休止時間をおいて再び荷重をかけるカイザー効果試験、および最初に約5%の歪量まで引張荷重を与え、そこで荷重を一定時間保持して再び荷重を増加させる荷重保持試験の3種がある。なお、本試験の予備試験として同一試験片形状の純銅試験片（Cu）と、SUS304試験片（SUS）の室温における単調引張試験（歪速度 $4 \times 10^{-4}$ ）を実施した。

#### (5) A E計測方法

##### (a) A E計測機器

本試験に使用したA E計測装置はダネガン／エンデブコ社製の1032D型で、そのブロック図を図3.2.1-1に示す。

RMS特性の測定にはN F社製M-172TA型交流電圧計と渡辺測器製SR-601型記録計を使用した。

(b) 使用変換子とその校正曲線

本試験で使用したA E検出器はF-A-E小委員会より支給された0.14Z10型(S.N.1579)で、その感度校正曲線を図3.2.1-2に示す。

(c) 導波棒の取付け法

本試験で使用した導波棒は直径4mmφ、全長300mmのSUS304材で、試験片の端面に深さ約5mmの穴を明け、そこへ導波棒先端を挿入して銀ロウ付けした。導波棒の他端にはホーン形の検出器取付座を同じく銀ロウ付けし、この取付座への検出器の接着にはアロン・アルファを使用した。

(d) 前置増幅器と主増幅器

本試験で使用したプリアンプはダネガン社製1801型で周波数帯域100KHz~2MHz(-3dB)、増幅度40dB、ダイナミックレンジは74dBである。

また、入力インピーダンスは20KΩで、入力換算雑音は5μV(rms)以下である。

主増幅器はダネガン社製1302型で周波数帯域は100KHz~2MHz(-1dB)、増幅度は最大60dBまで1dBステップで可変であり、スレッシュホールド電圧値も0~3Vまで可変である。また、デッドタイムは1~50msまで設定可能である。

(e) A E解析項目とその方法

1) RMS電圧

RMS電圧は主増幅器のモニター用出力を交流電圧計で直流に変換し、ペン書きレコーダに記録した。なおRMS電圧は検出器出力に換算した。

2) リングダウン計数

各イベントごとにスレッシュホールド1V(ピーク値)以上のリングダウン計数値をフロッピー・ディスクに記録し、あとの解析プログラムにより、トータルでもレートでも表示できる。

なお、カウントレート表示の場合のサンプリング間隔は、最大時間の100分の1になる。

本試験では検出器が1個のためA E発生位置の標定は実施しなかったが、位置標定ができればウィンドウ処理により特定位置のA E発生レートが解析できる。

3) 振幅分布特性

プリアンプからの出力信号は921型振幅検出器でそのピーク電圧を測定し、これを対数変換して0~100dBの振幅値に分割される。

基準値(0dB)は100μVで、最大値(100dB)は10Vに相当する。

A Eイベント発生ごとにその最大振幅値をフロッピー・ディスクに記録しておき、あとの解析プログラムで振幅値1dB毎にイベント数をレートまたはトータルの形で集計し、CRTに表示する。

なお、主増幅器のスレッシュホールド電圧(1V)に合わせて、それ以下の信号を除去するため、振幅検出器専用のスレッシュホールド設定が可能である。

## (f) データ処理装置と方法

本試験で使用したA E計測装置に内蔵された計算機は、インターデータ社製7/16型ミニコンピュータで、内部メモリの容量は65Kバイトで、この他に外部記憶装置としてカルコンプ社製T-80型ディスク装置および142型フロッピーディスク装置がある。入出力装置として、TI社製733ASR型テレタイプ(カセット付)と、テクトロニクス社製613型CRT表示装置および4631型ハードコピー装置がある。

本装置のA E処理能力は最大32チャンネルのA E信号を毎秒100イベントまで処理し、記憶できる。A E位置標定する場合の時間差分解能は $0.1\mu\text{s}$ で、音速を $3,000\text{m/s}$ とすると位置の分解能は $0.3\text{mm}$ となる。また、A E波形記録用として、バイオメーション社製1010型トランジェントレコーダ(10ビット×4Kワード)があり、毎秒2回まで波形を記憶できる。

## (6) A E試験の結果

### 1) 単調引張試験

室温における単調引張試験の結果を図3.2.1-3に示す。またこのときのA E計数率を図3.2.1-13に示す。さらにこのとき発生したA Eの振幅分布を図3.2.1-4に示す。この場合の歪速度は $4\times 10^{-4}$ である。

300°Cにおける単調引張試験の結果を図3.2.1-5～図3.2.1-6に示す。

500°Cおよび600°Cにおける同様の試験結果を図3.2.1-9～図3.2.1-12に示す。

また図3.2.1-7は300°Cにおいて歪速度を10倍にした場合の特性で、RMS電圧が幾分増大している。このときの振幅分布を図3.2.1-8に示す。

### 2) カイザー効果試験

室温における繰返し荷重によるカイザー効果試験の結果を図3.2.1-17に示す。

また、300°C、500°C、600°Cにおける同様の試験結果を図3.2.1-19、-21、-23に示す。特に図3.2.1-21のように荷重増加のない場合には、試験機のノイズの他にRMS電圧はまったく発生しない。

次に室温、300°C、500°C、600°Cにおける振幅分布特性をそれぞれ図3.2.1-18、-20、-22、-24に示す。これらの振幅分布特性より、試験温度が高くなるにつれて小振幅のA Eが多くなる傾向がみられる。

### 3) 荷重保持試験

室温および300°C、500°C、600°Cにおいて荷重を途中で保持した場合の測定結果を図3.2.1-25、-27、-29、-31に示す。これらの図より、荷重保持期間中のA E発生はほとんど無いことが判った。

また、A E振幅分布特性は図3.2.1-26、-28、-30、-32に示すように、温度によってあまり変化がみられない。

F A E A E 計測データシート

高温単軸引張りのA E特性		データ番号				責任者名	中島玉雄
		記入年月日	1978年4月 日			所属会社名	石川島播磨重工
試験材料	SUS 304	試験雰囲気	AIR			試験場所	技術研究所内
試験装置	INSTRON	材料熱処理				試験片形状	F A E丸棒試験片
試験目的	(1) 単調引張試験						
単調引張試験において試験温度および歪速度を変化させた場合のA E特性を測定する。							
試験片番号	SUS	SUS 5	SUS 6	SUS 9	SUS 11		
単軸試験	試験温度	R. T.	300°C	300°C	500°C	600°C	
	ひずみ速度	$4 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-2}$	$4 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$	
単軸試験 疲労試験	ひずみ保持時間	引張側					
		圧縮側					
	周波数						
	抑制方法				印荷波形		
A E 計測		A E 計測装置	DUNEGAN/ENDEVCO-1032D (Fig. 3. 2. 1-1)				
試験片番号	SUS	SUS 5	SUS 6	SUS 9	SUS 11		
予備型	変換子名と番号	FAE1579	FAE1579	FAE1579	FAE1579	FAE1579	
	校正曲線	F. 3.2.1-2	F. 3.2.1-2	F. 3.2.1-2	F. 3.2.1-2	F. 3.2.1-2	
	取付箇所(導波棒)	4φ×300	4φ×300	4φ×300	4φ×300	4φ×300	
	接着法(カップラント)	アロンアルファ	アロンアルファ	アロンアルファ	アロンアルファ	アロンアルファ	
増幅器	前置増巾器	40DB	40DB	40DB	40DB	40DB	
	主増幅器	30DB	40DB	20DB	40DB	36DB	
フィルター・周波数帯域	FLAT	FLAT	FLAT	FLAT	FLAT		
トリガーレベル	316μV	100μV	1 mV	100μV	158μV		
R. M. S. 電圧	F. 3.2.1-3	F. 3.2.1-5	F. 3.2.1-7	F. 3.2.1-9	F. 3.2.1-11		
リングダウンor事象数	F. 3.2.1-13	F. 3.2.1-14		F. 3.2.1-15	F. 3.2.1-16		
振幅分布	F. 3.2.1-4	F. 3.2.1-6	F. 3.2.1-8	F. 3.2.1-10	F. 3.2.1-12		
エネルギー分布							
波形観察							
その他( )							
	前置増巾器	主増巾器		フィルター		位置標定手法	
型式	1801	1302	型式		分解能		
メーカー	D/E	D/E	メーカー名		範囲		
ダイナミックレンジ	74DB		周波数帯域				
備考							

F A E A E 計測データシート

高温単軸引張りのAE特性		デタクト番号			責任者名	中島玉雄	
		記入年月日	1978年4月 日		所属会社名	石川島播磨重工	
試験材料	SUS 304	試験雰囲気	AIR		試験場所	技術研究所	
試験装置	INSTRON	材料熱処理	-		試験片形状	FAE丸棒試験片	
試験目的	(2) カイザー効果試験						
最初に約5%の歪量まで引張り、ここで荷重をゼロに戻し、一定の休止時間をおいて再び荷重を与える。							
試験片番号	SUS 1	SUS 13	SUS 10	SUS 12			
条件 試験	試験温度	R. T.	300°C	500°C	600°C		
	ひずみ速度	$4 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$		
条件 試験 疲労	ひずみ保持時間	引張側					
	ひずみ保持時間	圧縮側					
	周波数						
	抑制方法			印荷波形			
A E 計測		A E 計測装置		DUNEGAN/ENDEVCO-1032D			
試験片番号	SUS 1	SUS 13	SUS 10	SUS 12			
子 線 変	変換子名と番号	FAE1579	FAE1579	FAE1579	FAE1579		
	校正曲線	3.2.1-2	3.2.1-2	3.2.1-2	3.2.1-2		
	取付箇所(導波棒)	4φ×300	4φ×300	4φ×300	4φ×300		
	接着法(カップラント)	アロンアルファ	アロンアルファ	アロンアルファ	アロンアルファ		
増 幅	前置増幅器	40DB	40DB	40DB	40DB		
	主増幅器	26DB	36DB	40DB	40DB		
フィルター・周波数帯域	FLAT	FLAT	FLAT	FLAT			
トリガーレベル	500μV	158μV	100μV	100μV			
R. M. S. 電圧	3.2.1-17	3.2.1-19	3.2.1-21	3.2.1-23			
リングダウンor事象数							
振幅分布	3.2.1-18	3.2.1-20	3.2.1-22	3.2.1-24			
エネルギー分布							
波形観察							
その他( )							
	前置増幅器	主増幅器		フィルター		位置標定手法	
型式	1801	1302	型式		分解能		
メーカー	D/E	D/E	メーカー名		範囲		
ダイナミックレンジ	74DB		周波数帯域				
備考							



F A E A E 計測データシート

高温単軸引張りの A E 特性		デタート番号			責任者名	中島玉雄	
		記入年月日	1978年4月 日		所属会社名	石川島播磨重工	
試験材料	SUS 304	試験雰囲気	A I R		試験場所	技術研究所	
試験装置	INSTRON	材料熱処理	-		試験片形状	F A E 丸棒試験片	
試験目的	(3) 荷重保持試験						
最初に約 5% の重量の引張荷重を与え、ここで一定時間荷重を保持して再び荷重を増加させる。							
試験片番号	SUS 2	SUS 8	SUS 14	SUS 15			
試験条件	試験温度	R. T.	300°C	500°C	600°C		
	ひずみ速度	$4 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$		
試験条件	ひずみ保持	引張側					
		圧縮側					
	周波数						
	抑制方法				印荷波形		
A E 計測			A E 計測装置	DUNEGAN/ENDEVCO-1032D			
試験片番号	SUS 2	SUS 8	SUS 14	SUS 15			
試験条件	変換子名と番号	FAE1579	FAE1579	FAE1579	FAE1579		
	校正曲線	3.2.1-2	3.2.1-2	3.2.1-2	3.2.1-2		
	取付箇所(導波棒)	4φ×300	4φ×300	4φ×300	4φ×300		
	接合法(カップラント)	アロンアルファ	アロンアルファ	アロンアルファ	アロンアルファ		
増幅器	前置増幅器	40DB	40DB	40DB	40DB		
	主増幅器	26DB	30DB	28DB	28DB		
フィルター・周波数帯域	FLAT	FLAT	FLAT	FLAT			
トリガーレベル	500μV	316μV	398μV	398μV			
R. M. S. 電圧	3.2.1-25	3.2.1-27	3.2.1-29	3.2.1-31			
リングダウンor 事象数							
振幅分布	3.2.1-26	3.2.1-28	3.2.1-30	3.2.1-32			
エネルギー分布							
波形観察							
その他( )							
	前置増幅器	主増幅器		フィルター		位置標定手法	
型式	1801	1302	型式		分解能		
メーカー	D/E	D/E	メーカー名		範囲		
ダイナミックレンジ	74DB		周波数帯域				
備考							

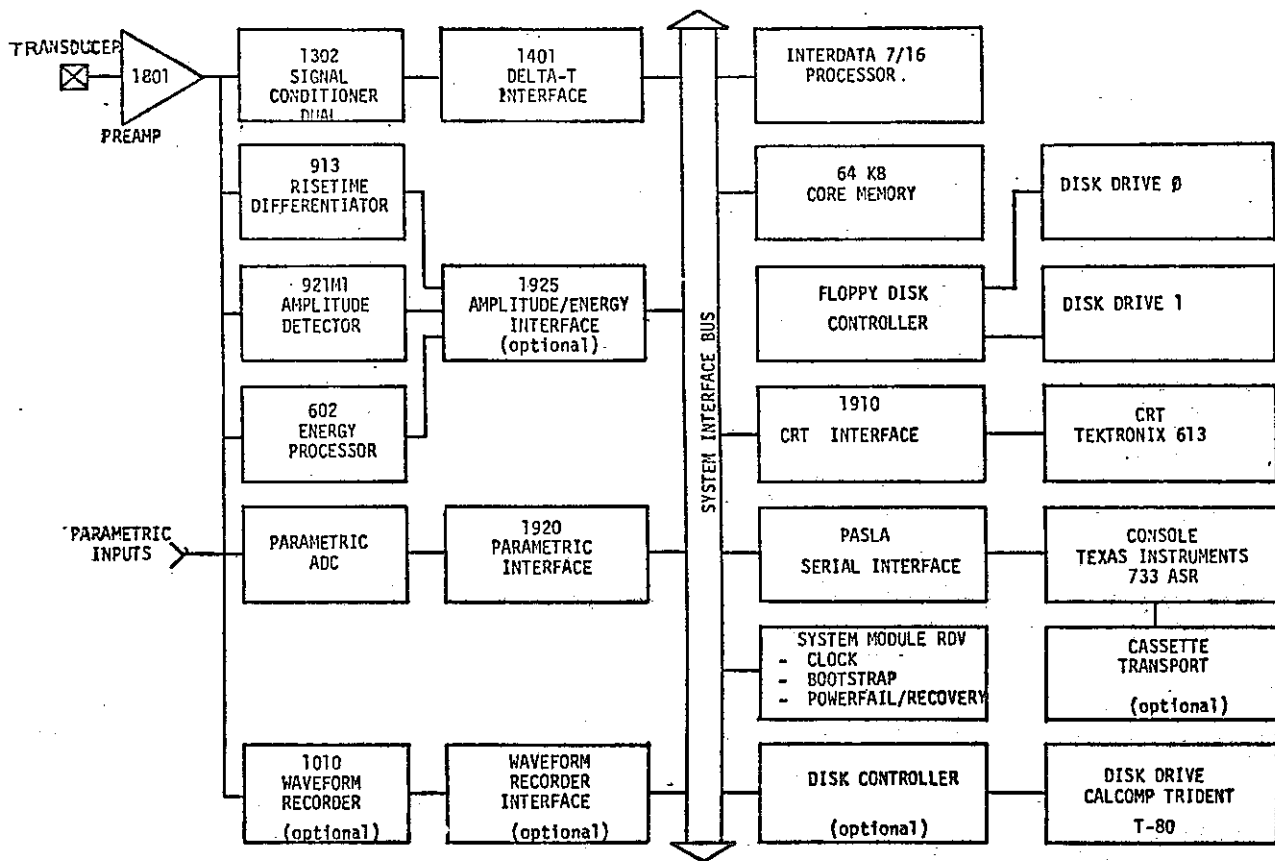


Fig.3.2.1-1 Block diagram of AE system.

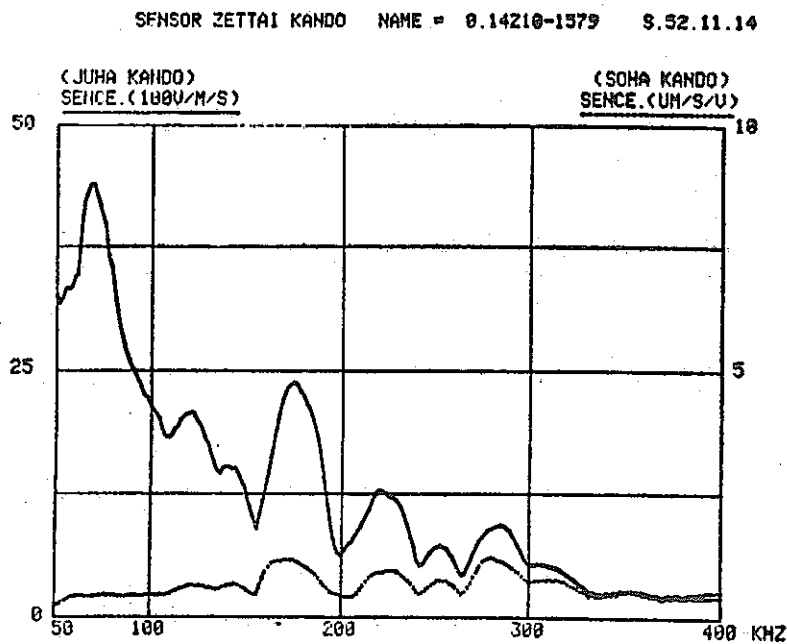


Fig.3.2.1-2. Calibration curve of AE transducer.

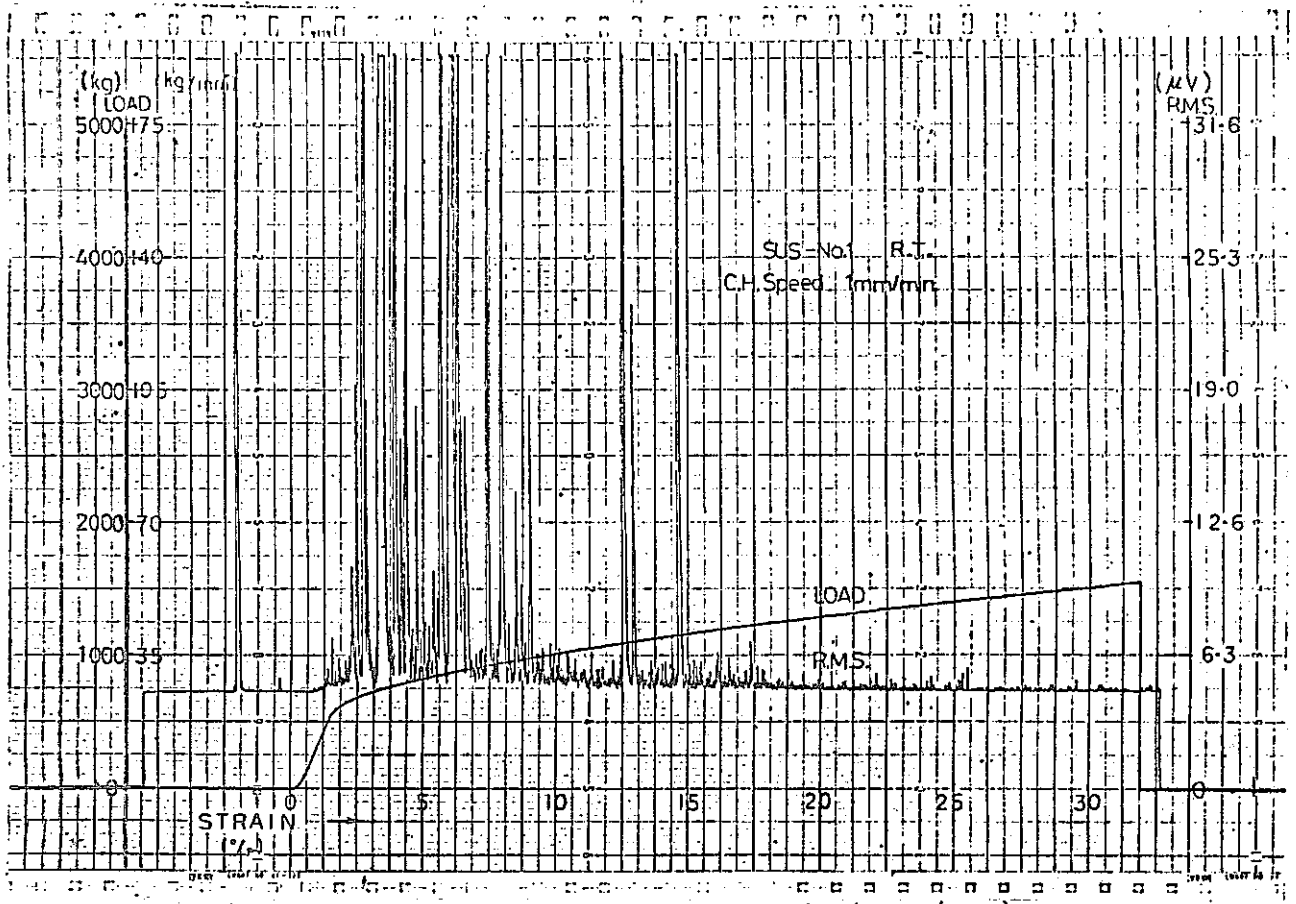


Fig.3.2.1-3. Load and RMS characteristics. (SUS)

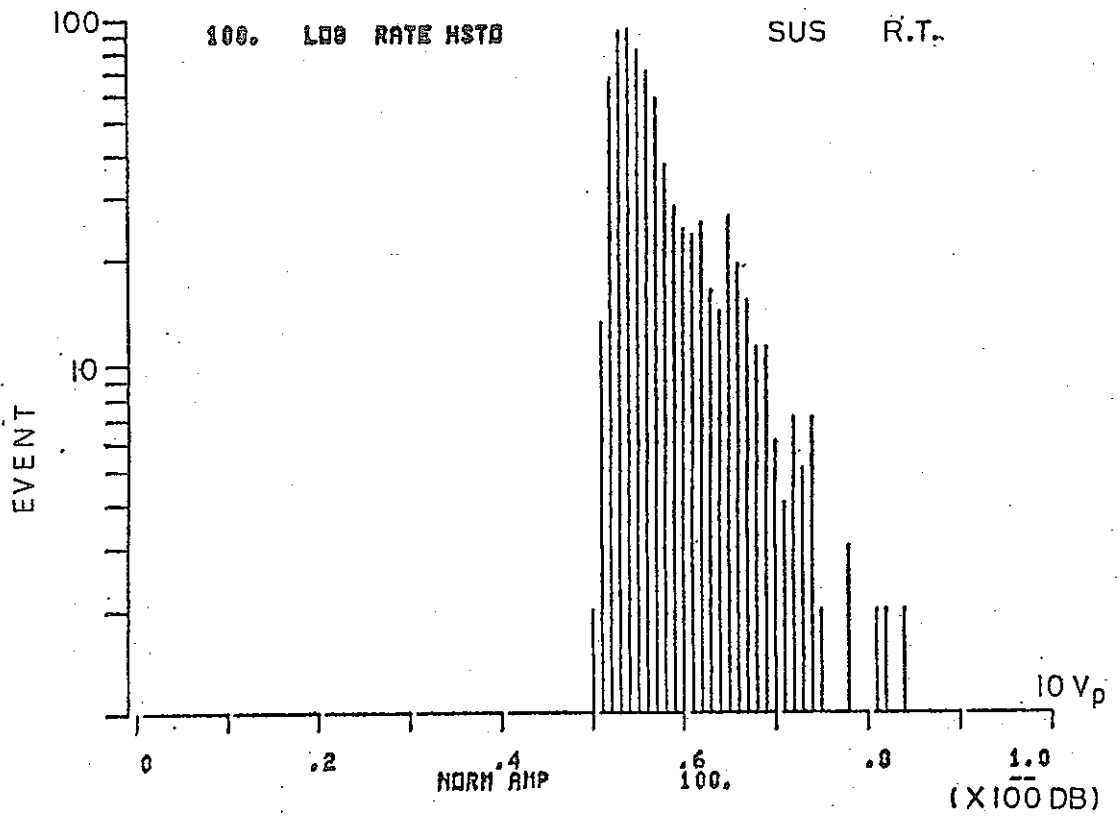


Fig.3.2.1-4. AE Amplitude distribution. (SUS)

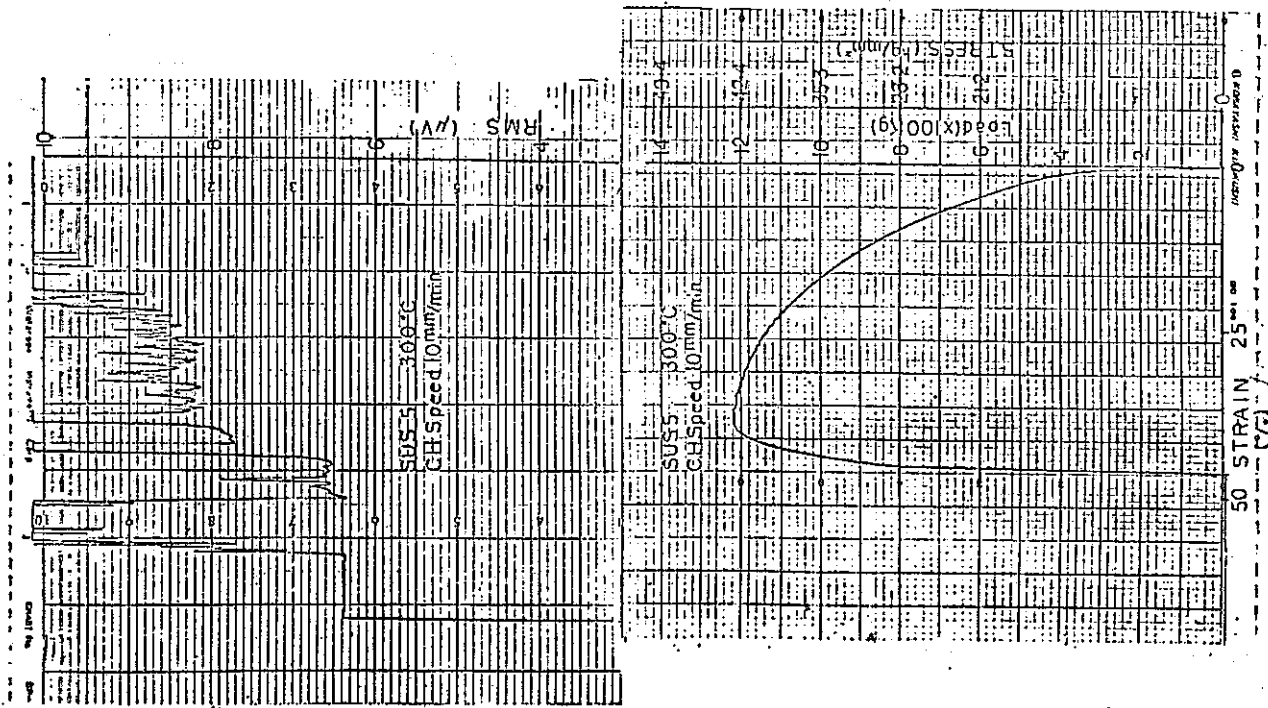


Fig.3.2.1-5. Load & RMS characteristic. (SUS5)

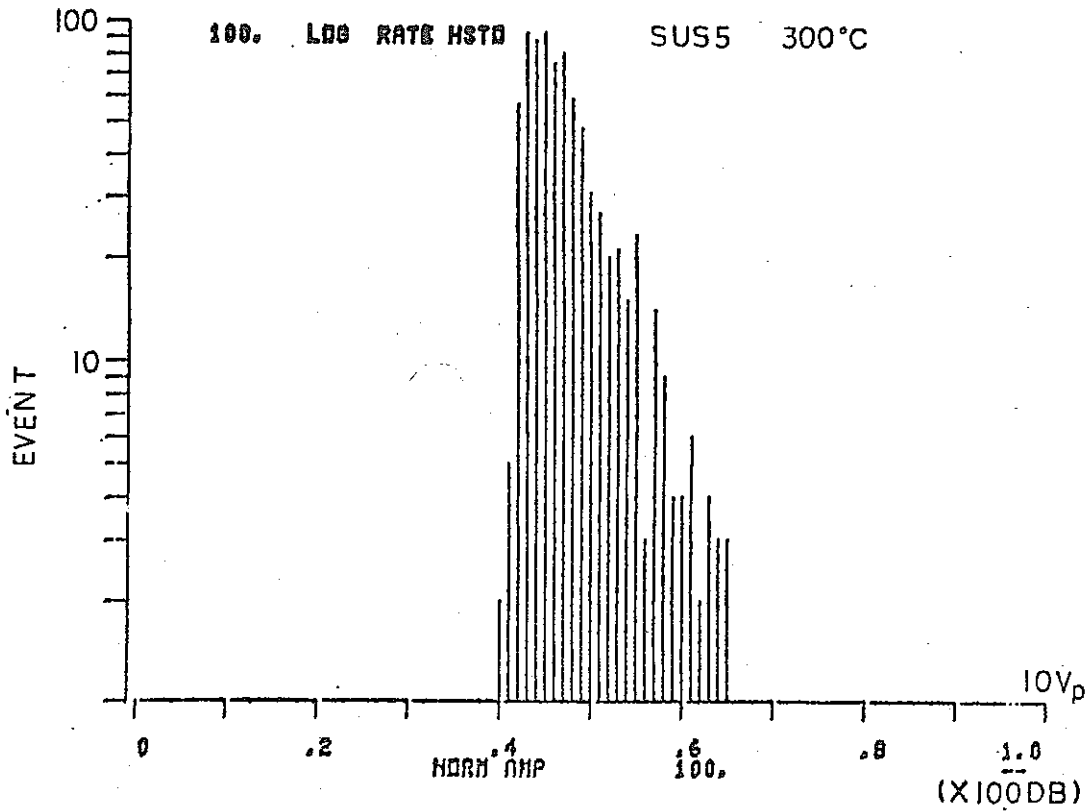


Fig.3.2.1-6. AE Amplitude distribution. (SUS5)

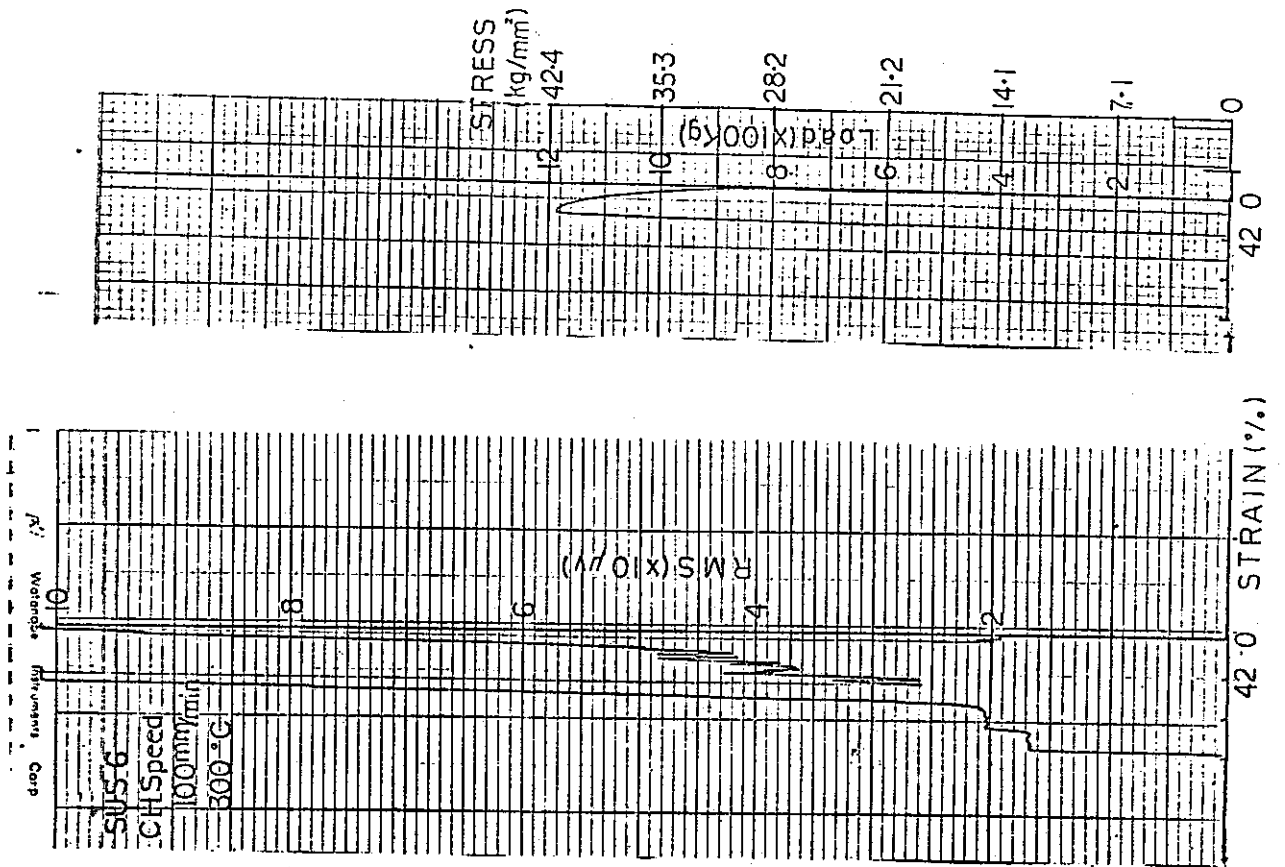


Fig.3.2.1-7. Load & RMS characteristic. (SUS6)

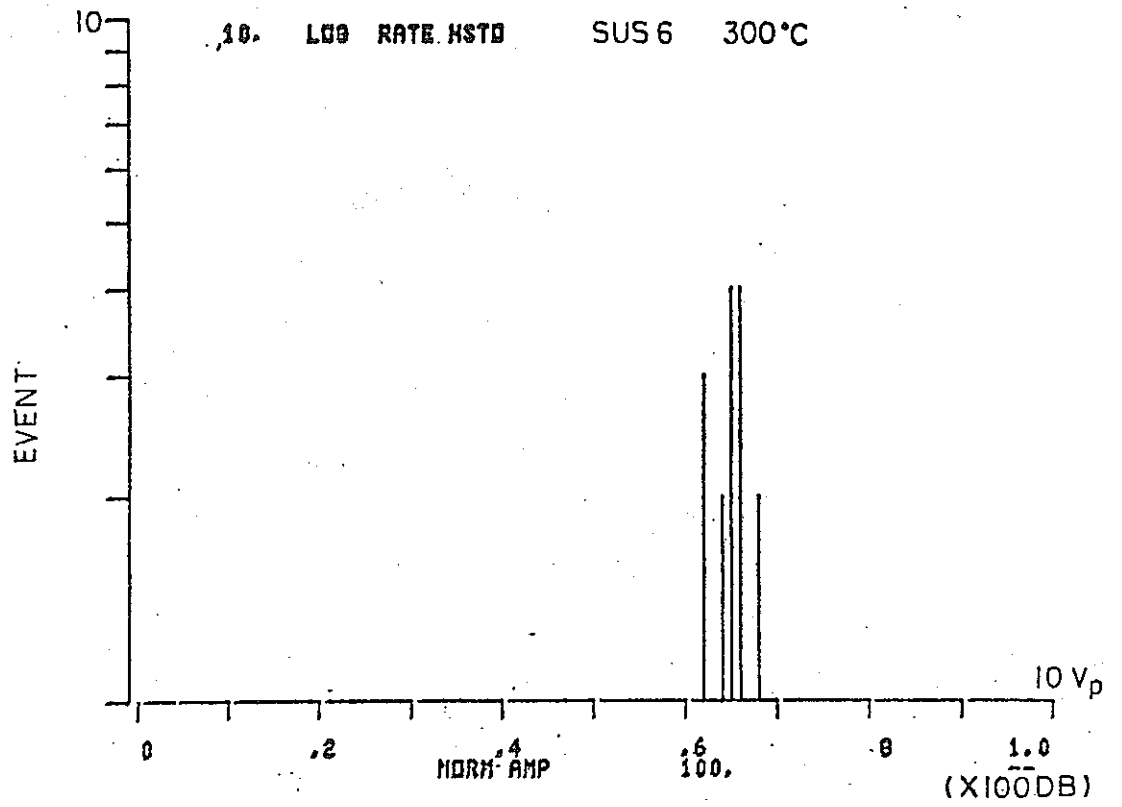


Fig.3.2.1-8. AE Amplitude distribution. (SUS6)

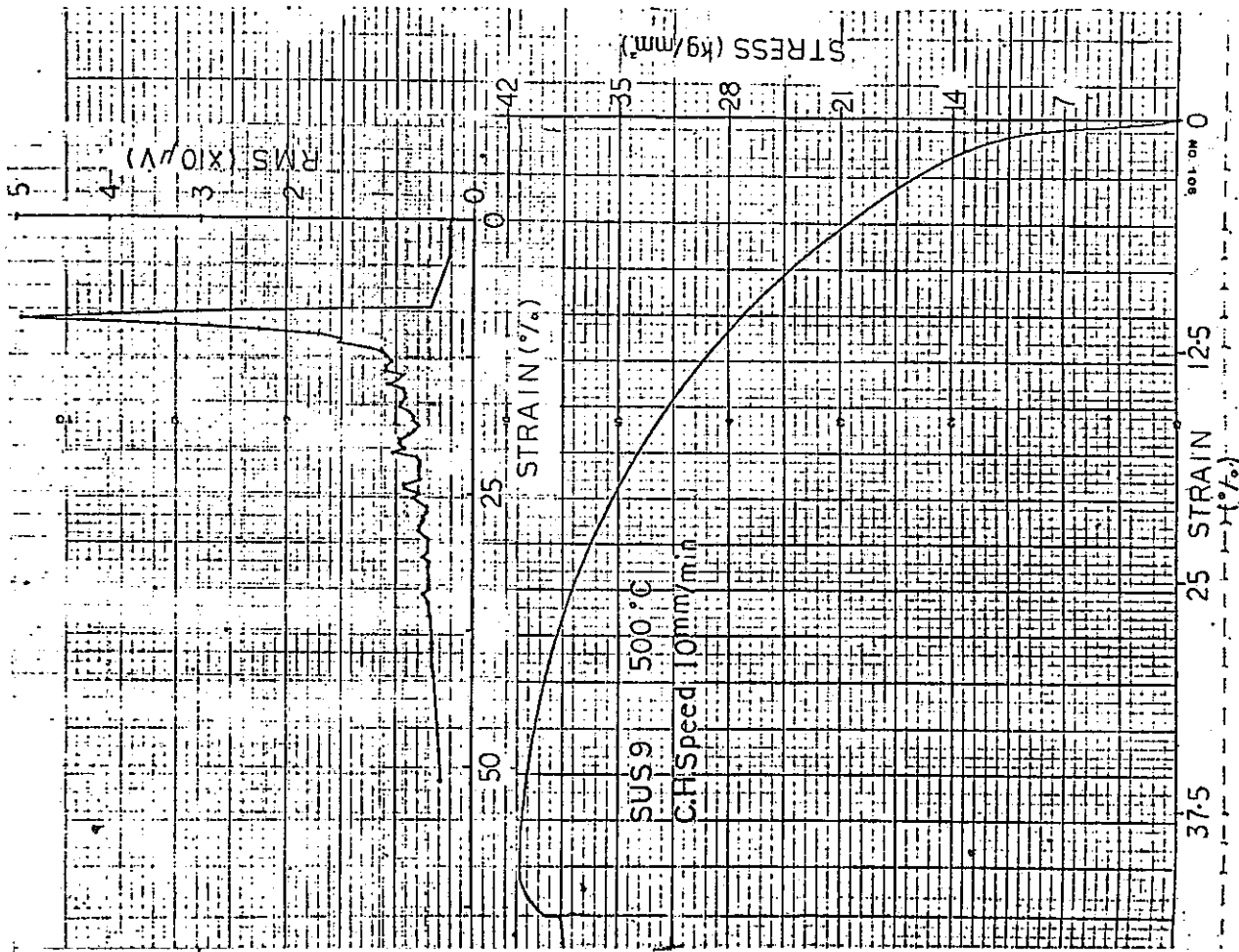


Fig. 3.2.1-9. Load & RMS characteristic. (SUS9)

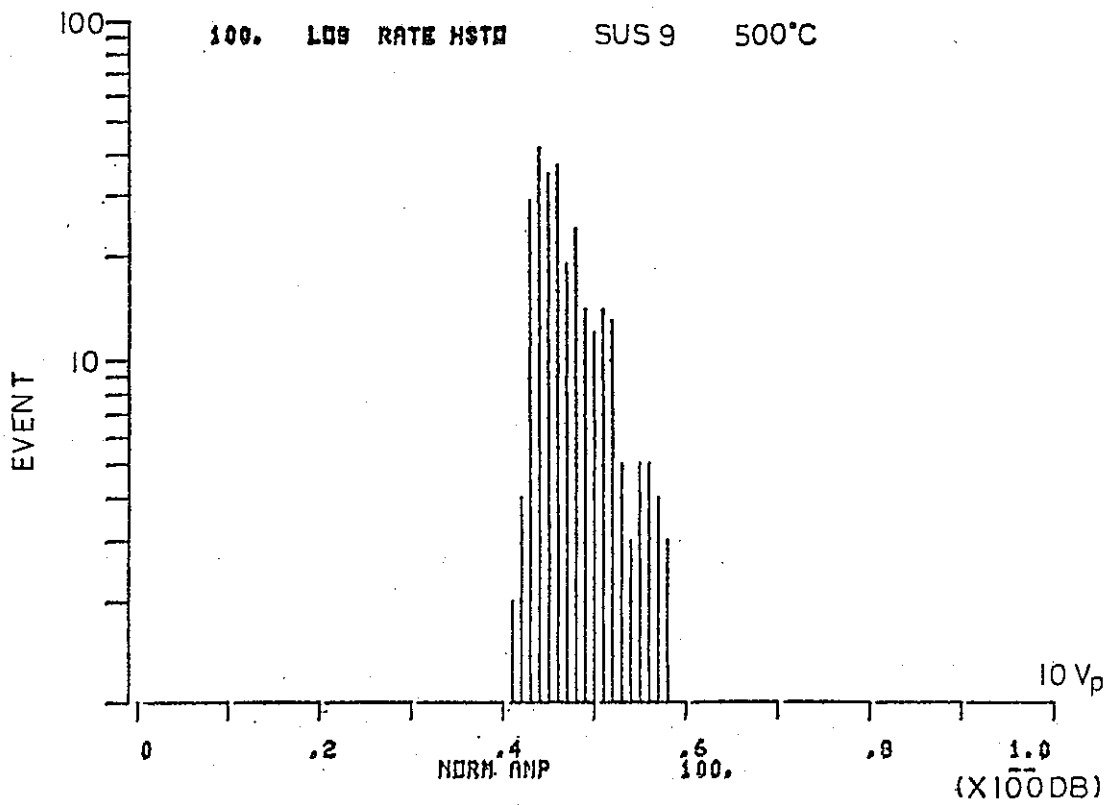


Fig. 3.2.1-10. AE Amplitude distribution. (SUS9)

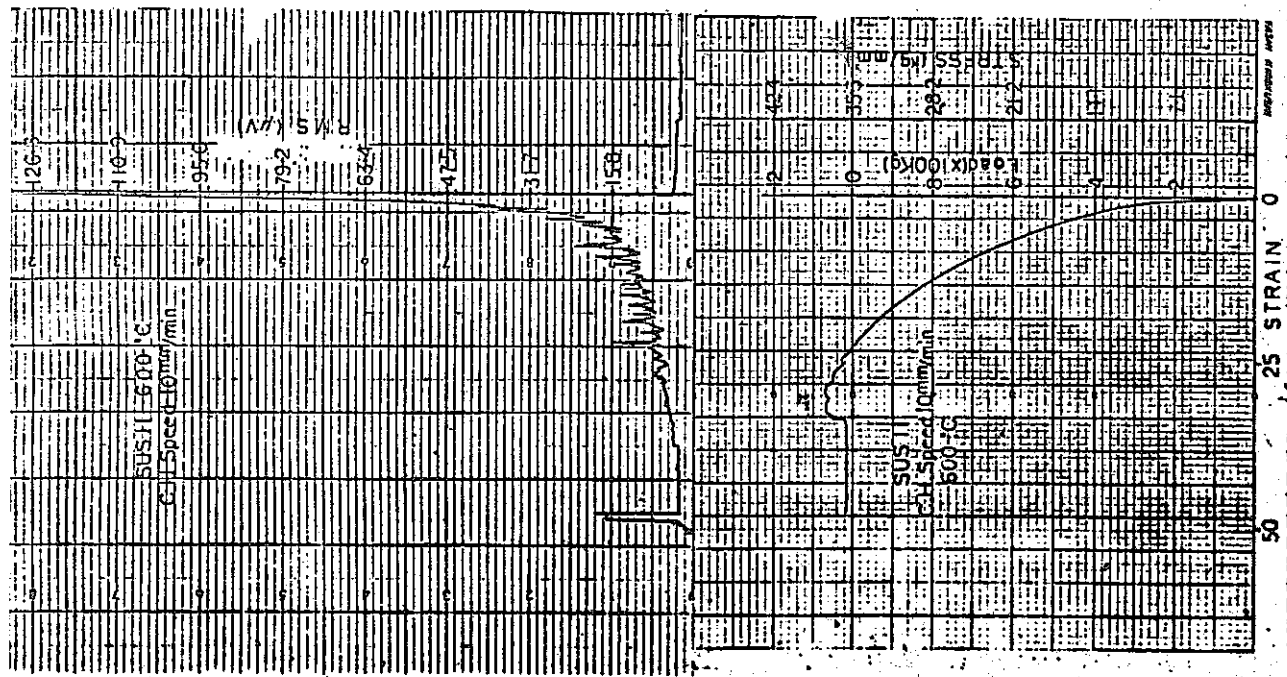


Fig.3.2.1-11. Load & RMS characteristic. (SUS11)

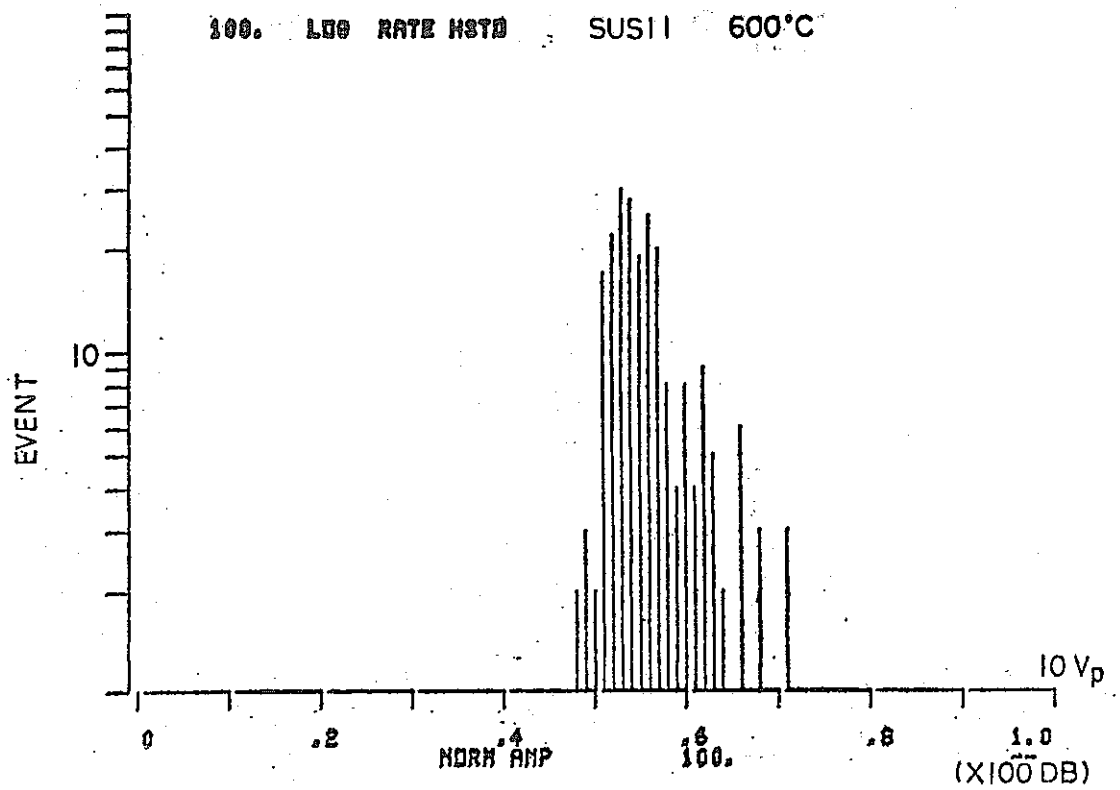


Fig.3.2.1-12. AE Amplitude distribution. (SUS11)

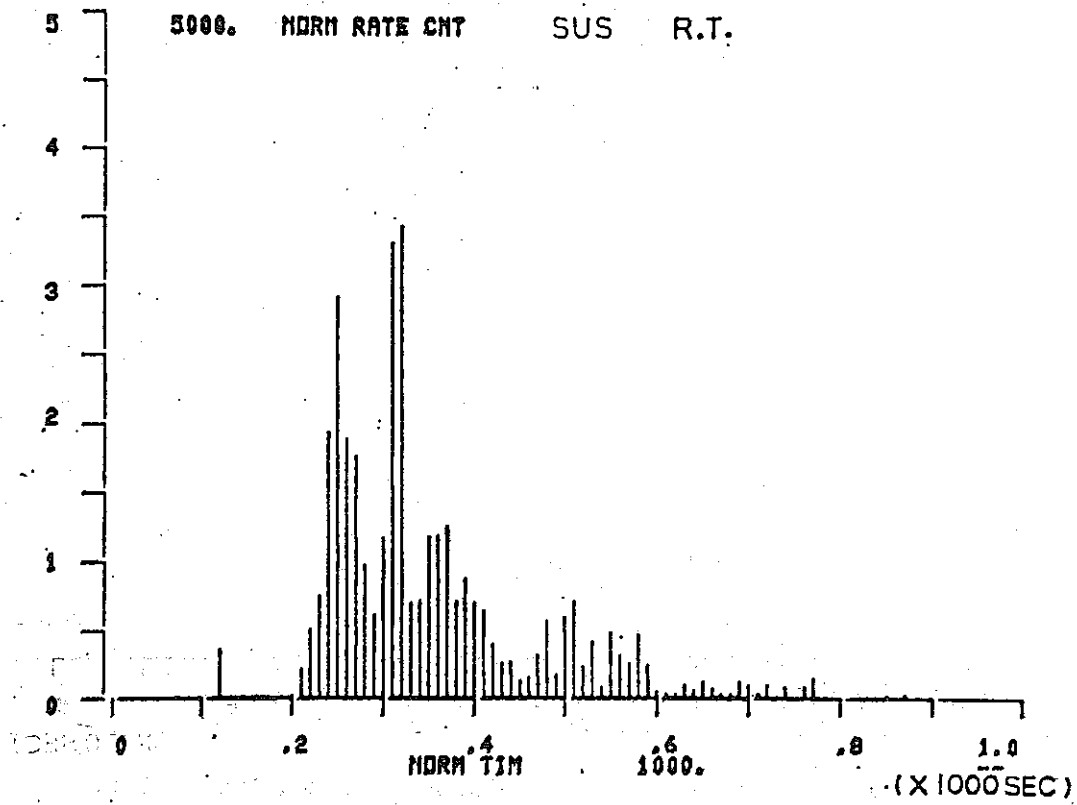


Fig.3.2.1-13. AE Count Rate.(SUS9) Sampl. Time = 10sec

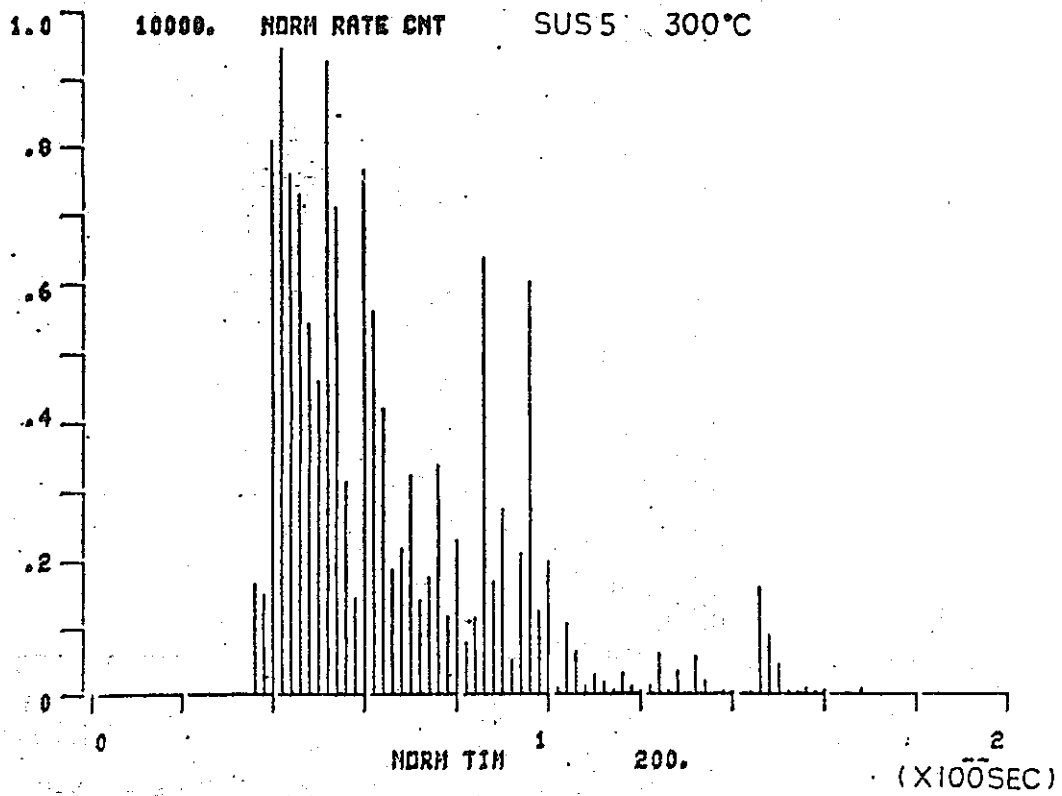


Fig.3.2.1-14. AE Count Rate. (SUS5) Sampl. Time = 2sec



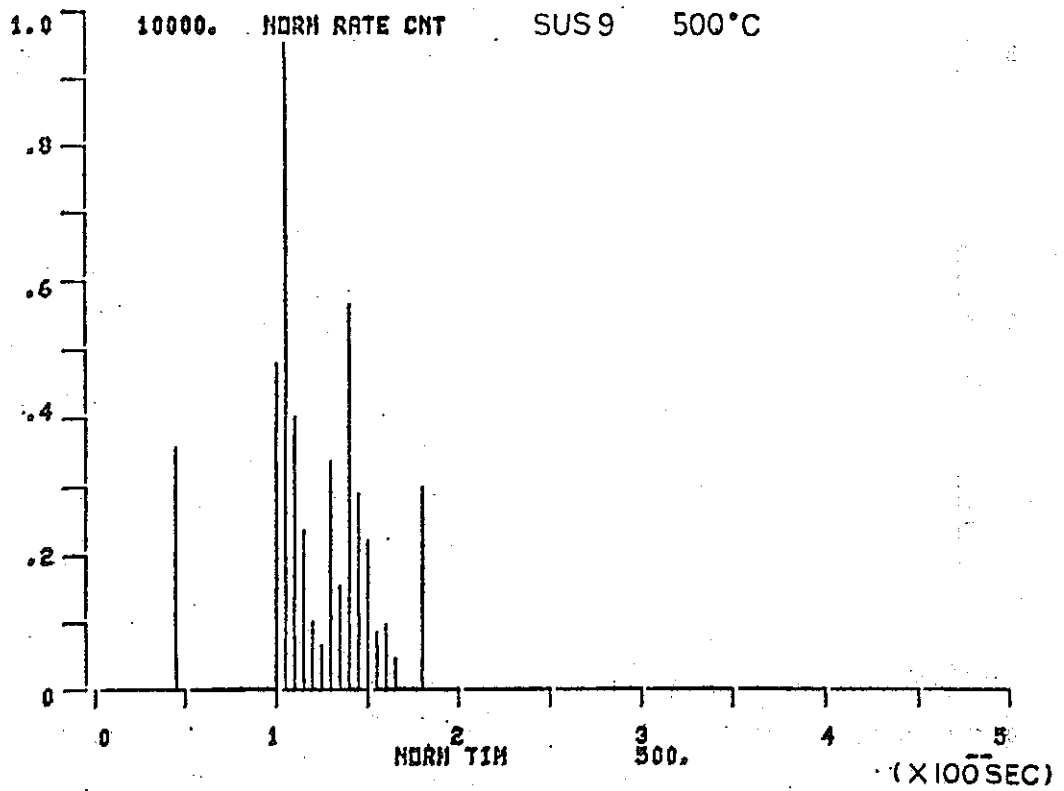


Fig.3.2.1-15. AE Count Rate. (SUS9) Sampl. Time = 5sec

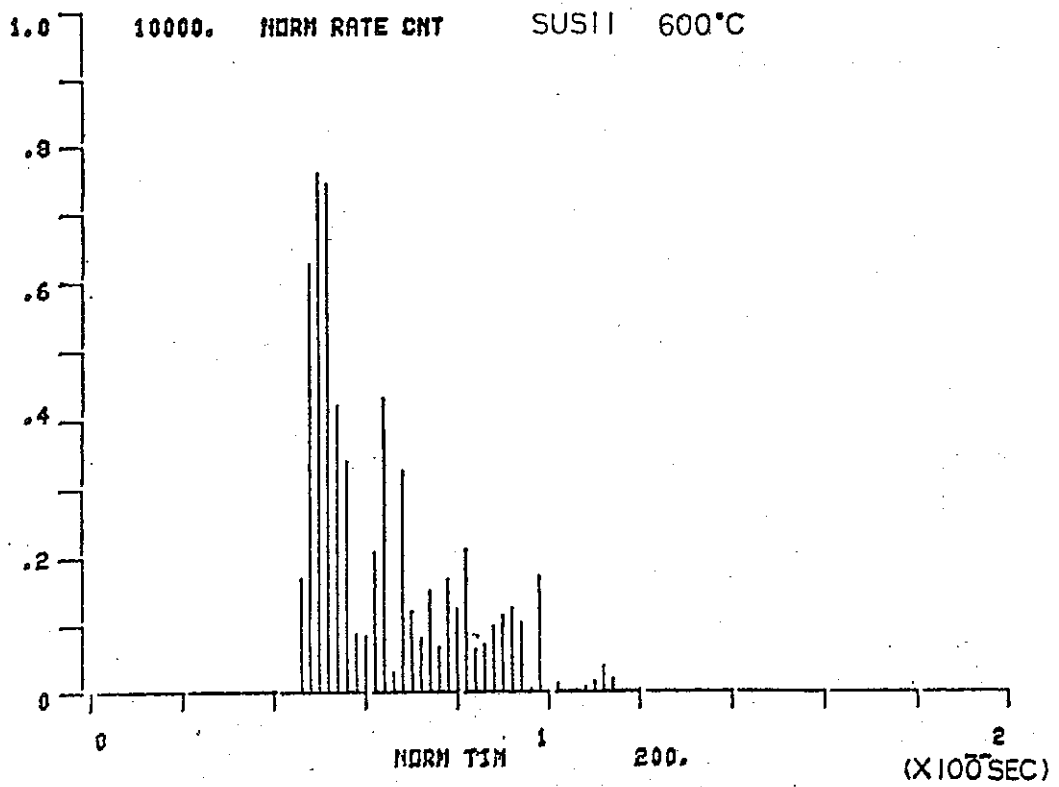


Fig.3.2.1-16. AE Count Rate. (SUS11) Sampl. Time = 2sec

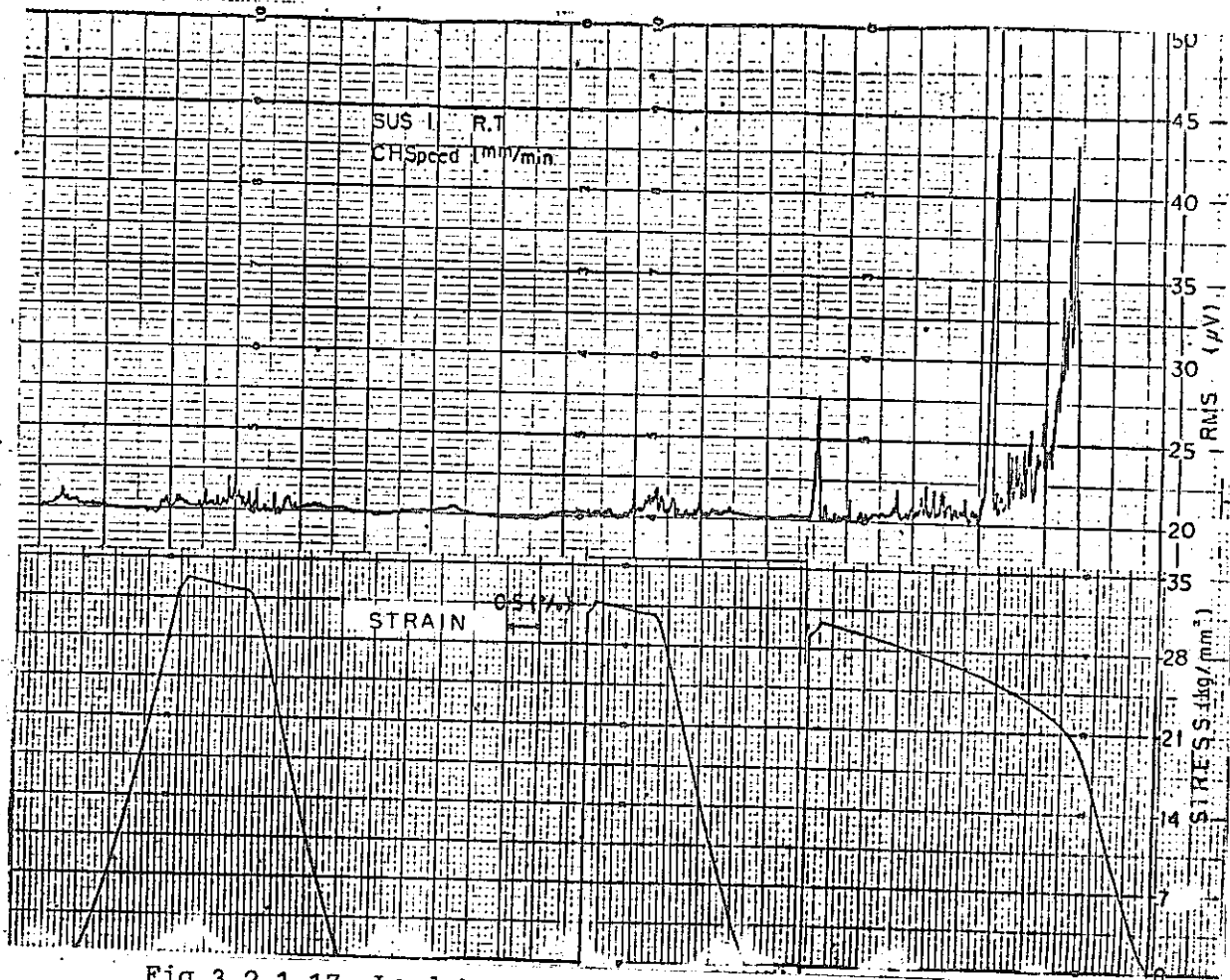


Fig.3.2.1-17. Load & RMS characteristic. (SUS1)

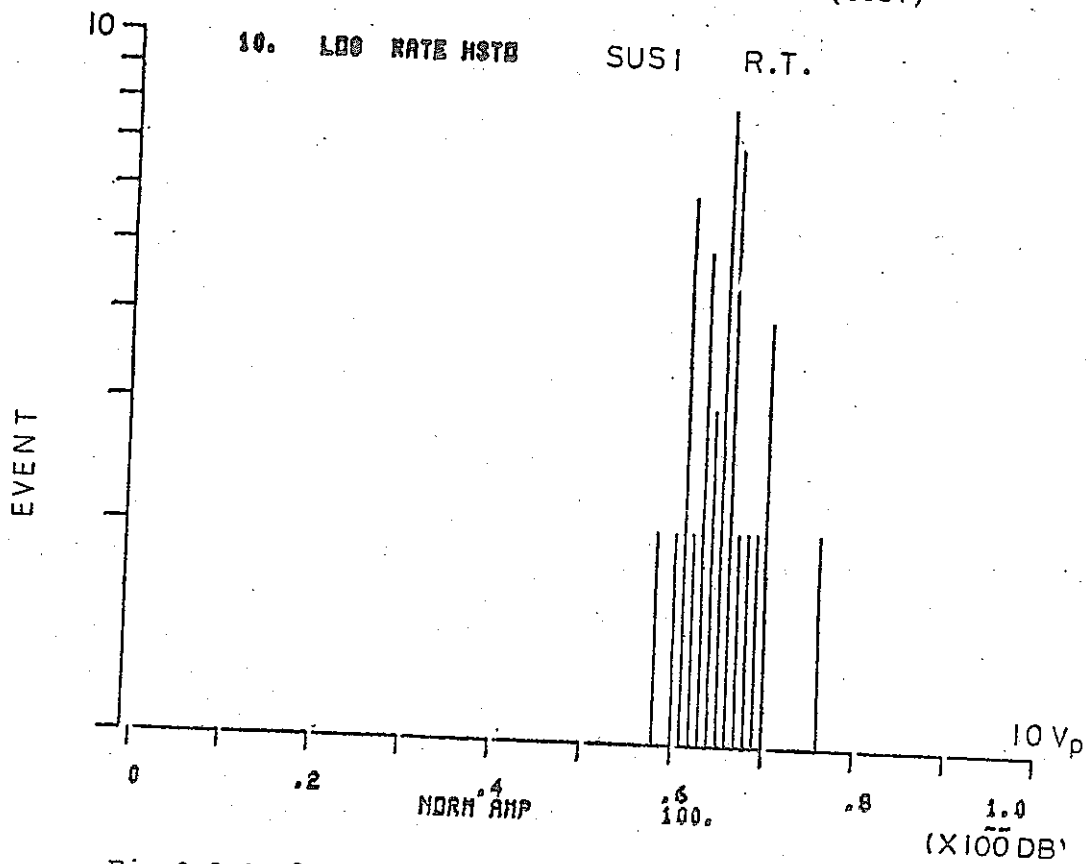


Fig.3.2.1-18. AE Amplitude distribution. (SUS1)

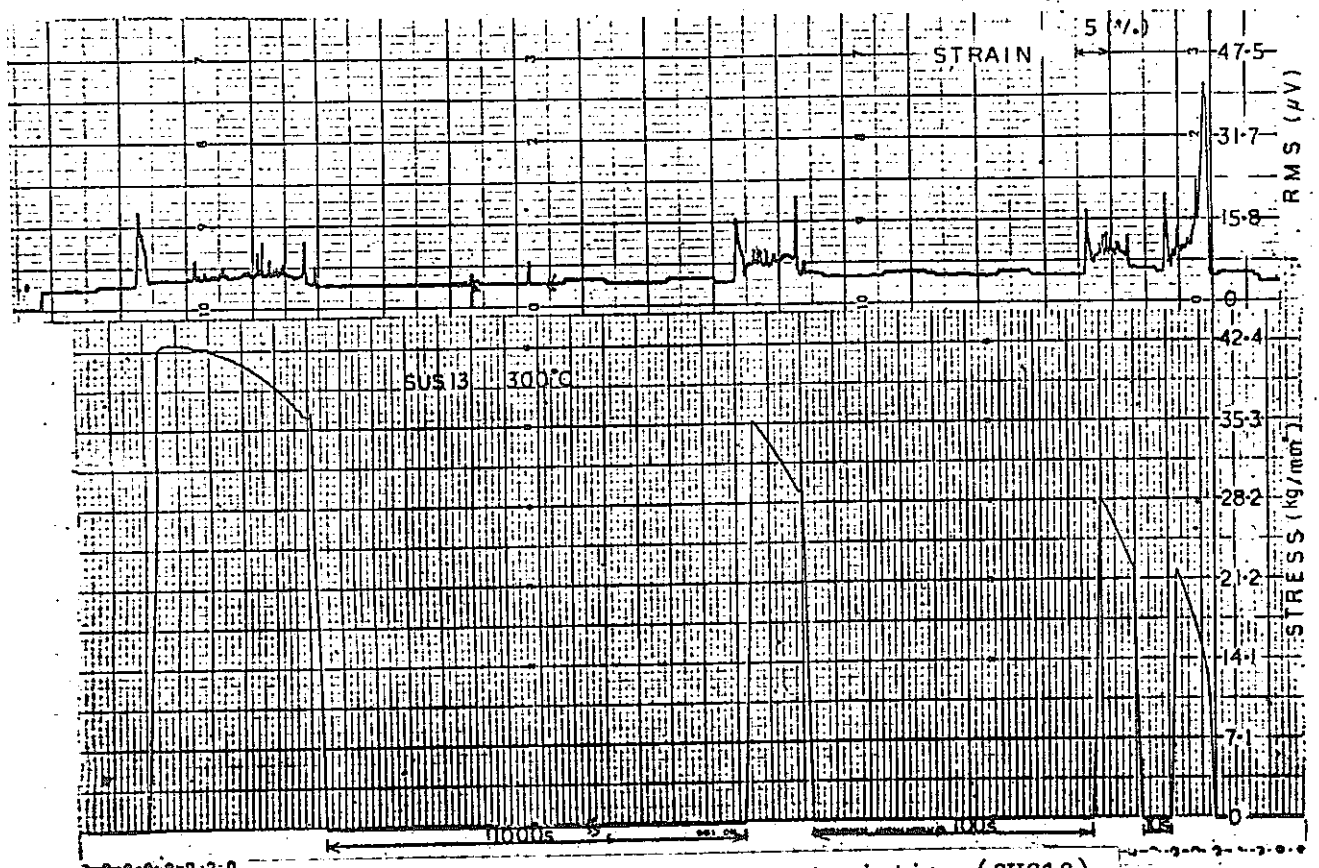


Fig.3.2.1-19. Load & RMS characteristic. (SUS13)

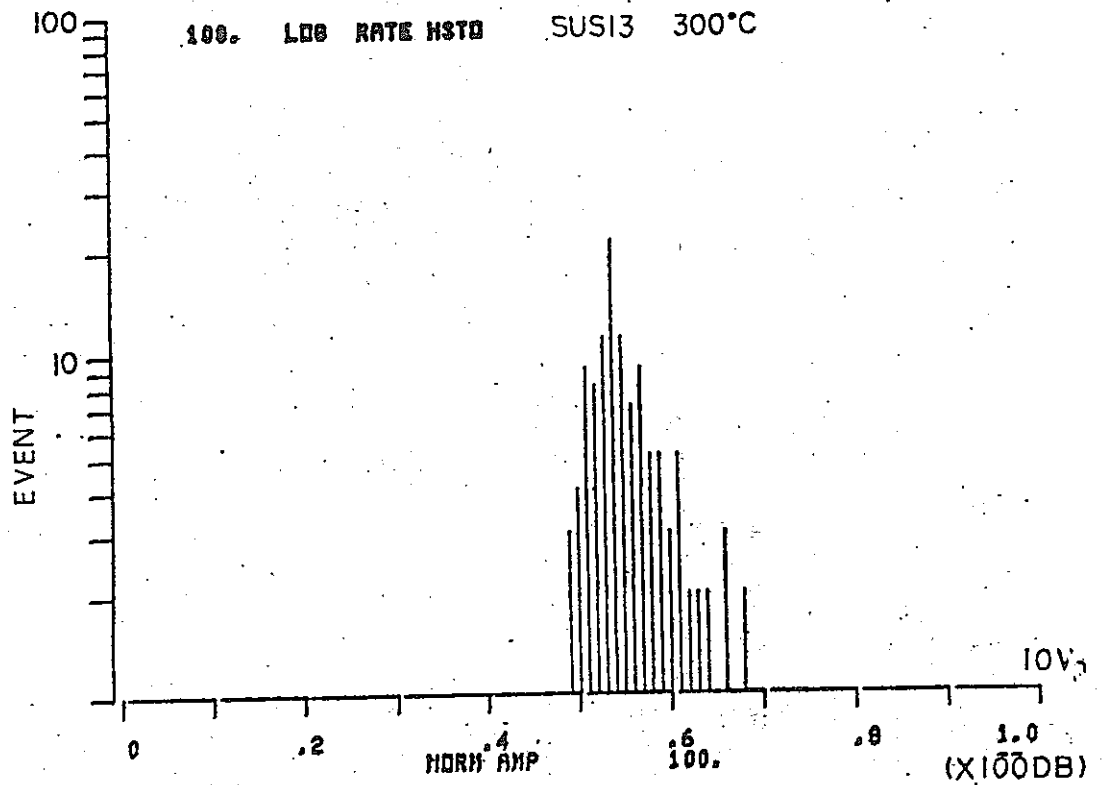


Fig.3.2.1-20. AE Amplitude distribution. (SUS13)

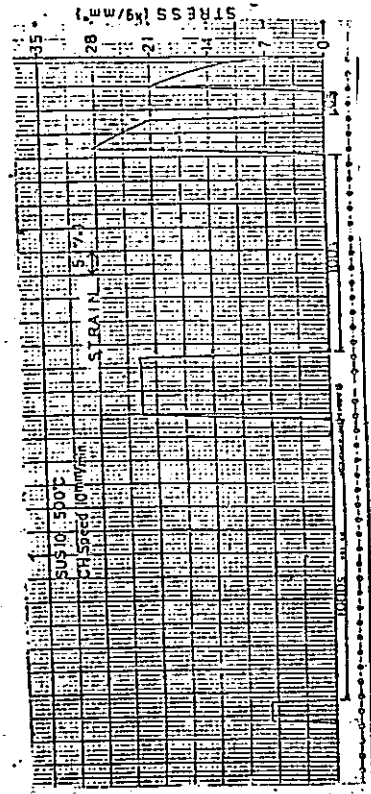
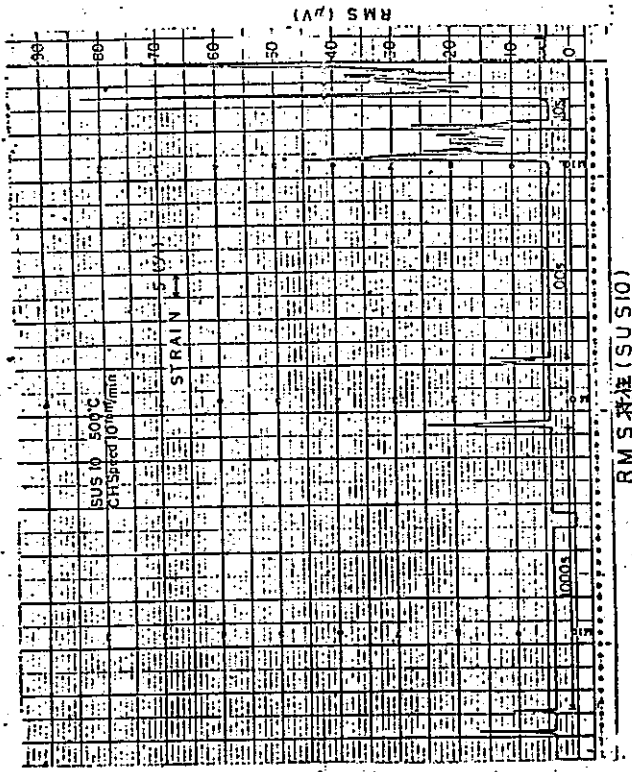


Fig. 3.2.1-21. Load & RMS characteristic. (SUS10)

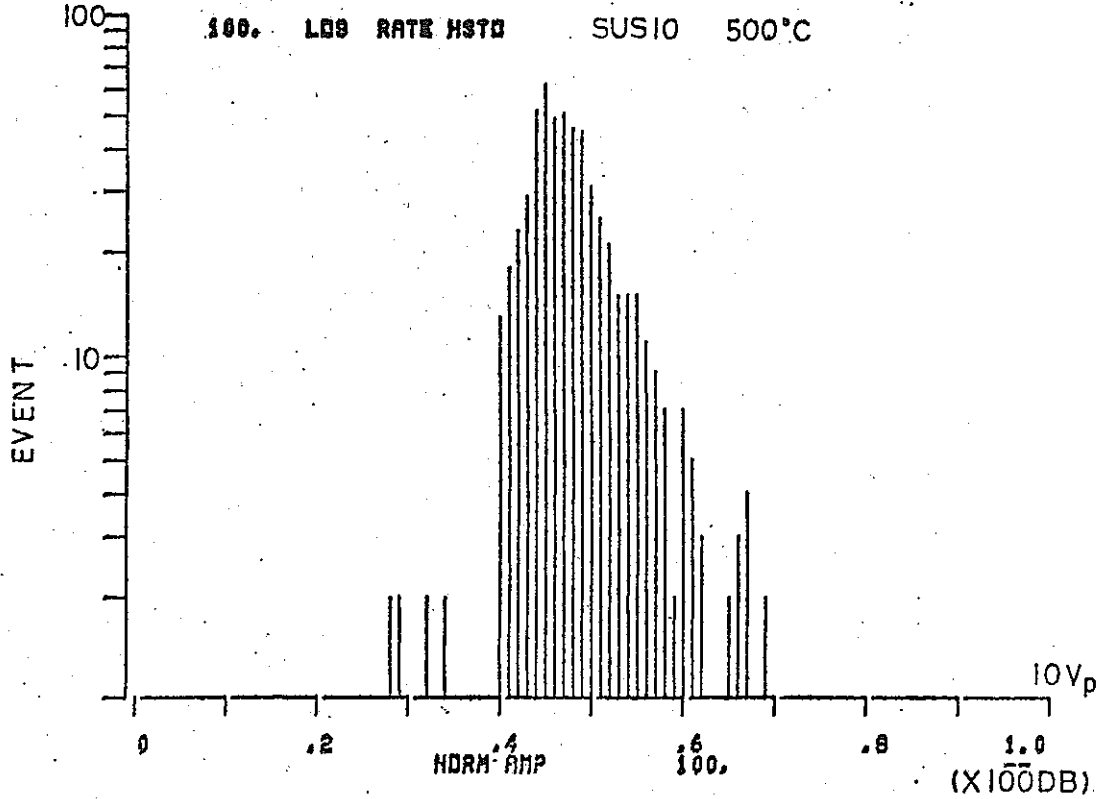
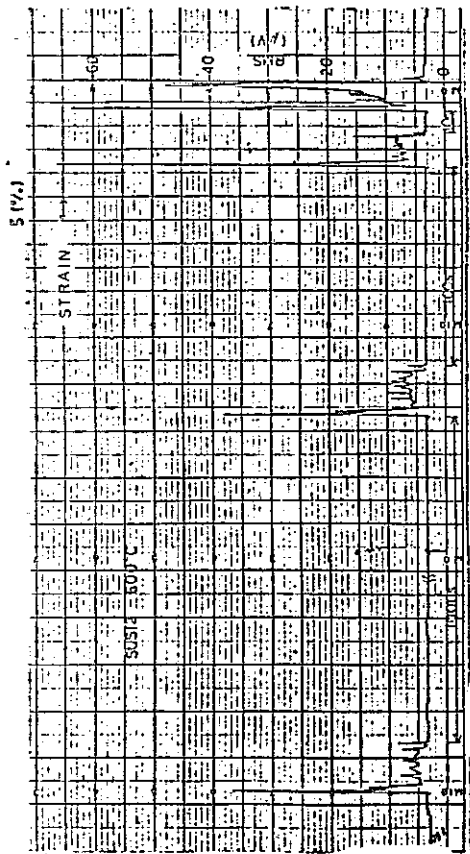


Fig. 3.2.1-22. AE Amplitude distribution. (SUS10)



RMS (V) (SWS12)

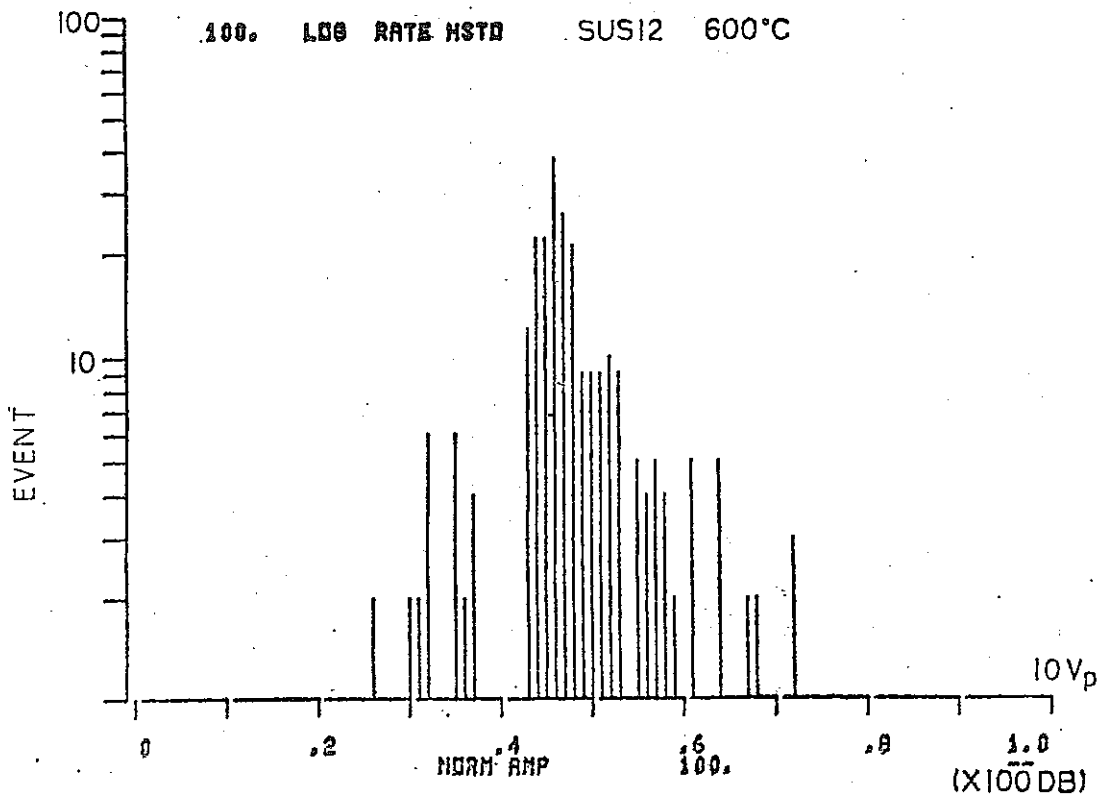
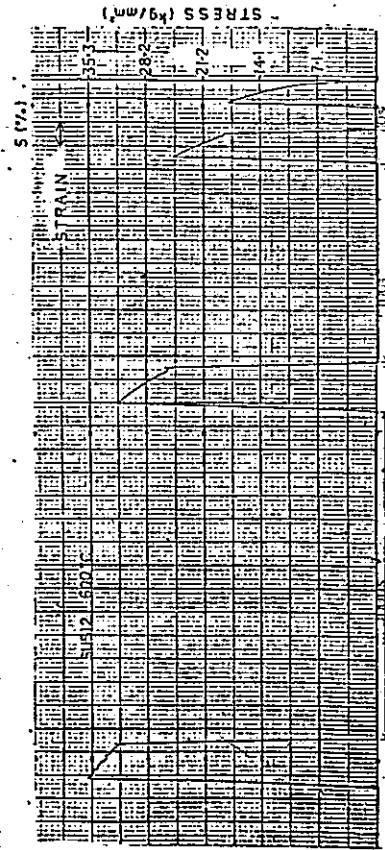


Fig.3.2.1-24. AE Amplitude distribution. (SUS12)

Fig.3.2.1-23. Load & RMS characteristic. (SUS12)

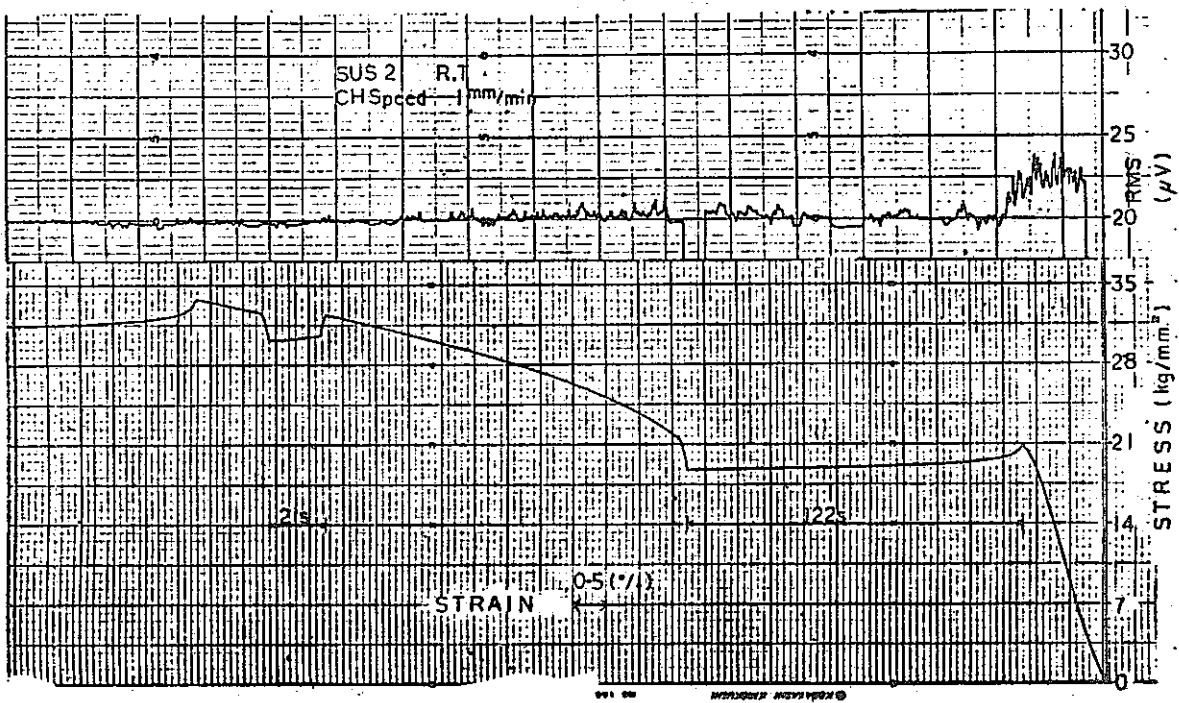


Fig.3.2.1-25. Load & RMS characteristic. (SUS2)

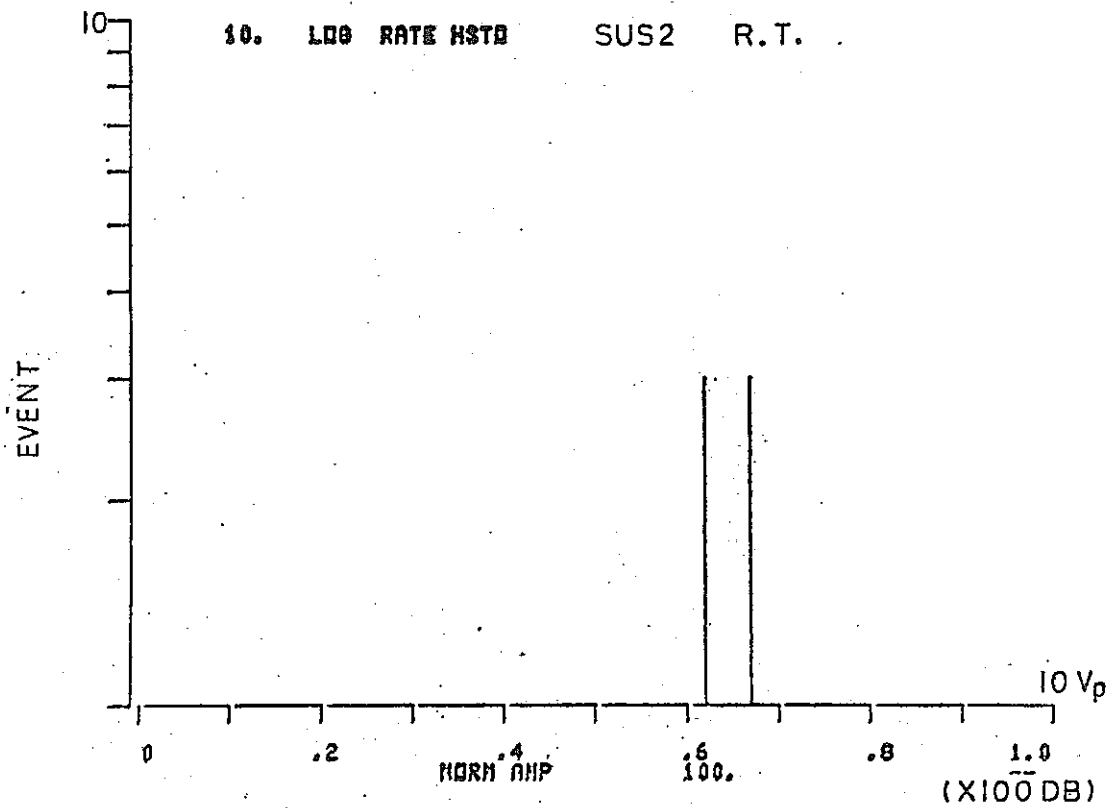
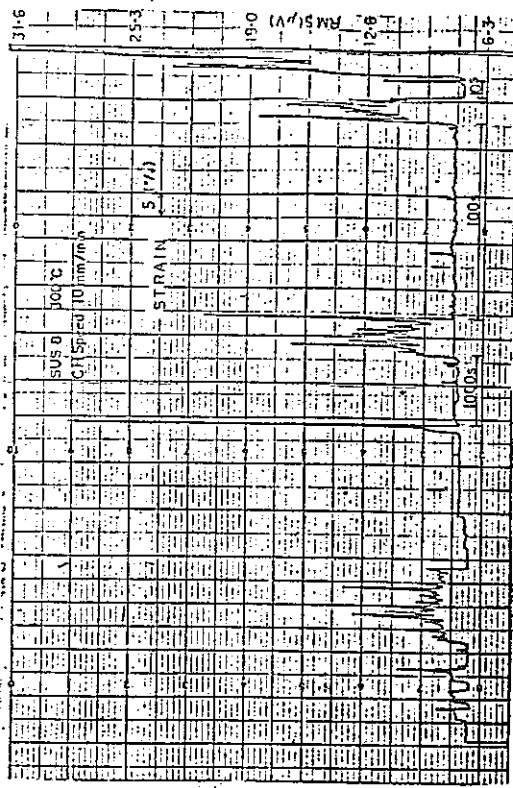


Fig.3.2.1-26. AE Amplitude distribution. (SUS2)



RMS 电压 (SUS8)

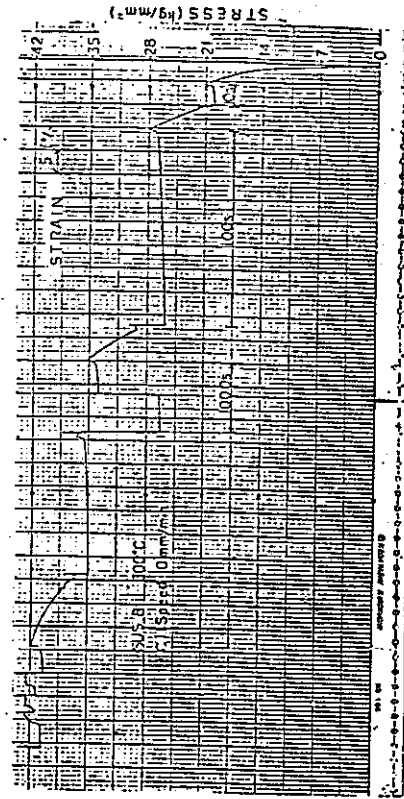


Fig.3.2.1-27. Load & RMS characteristic. (SUS8)

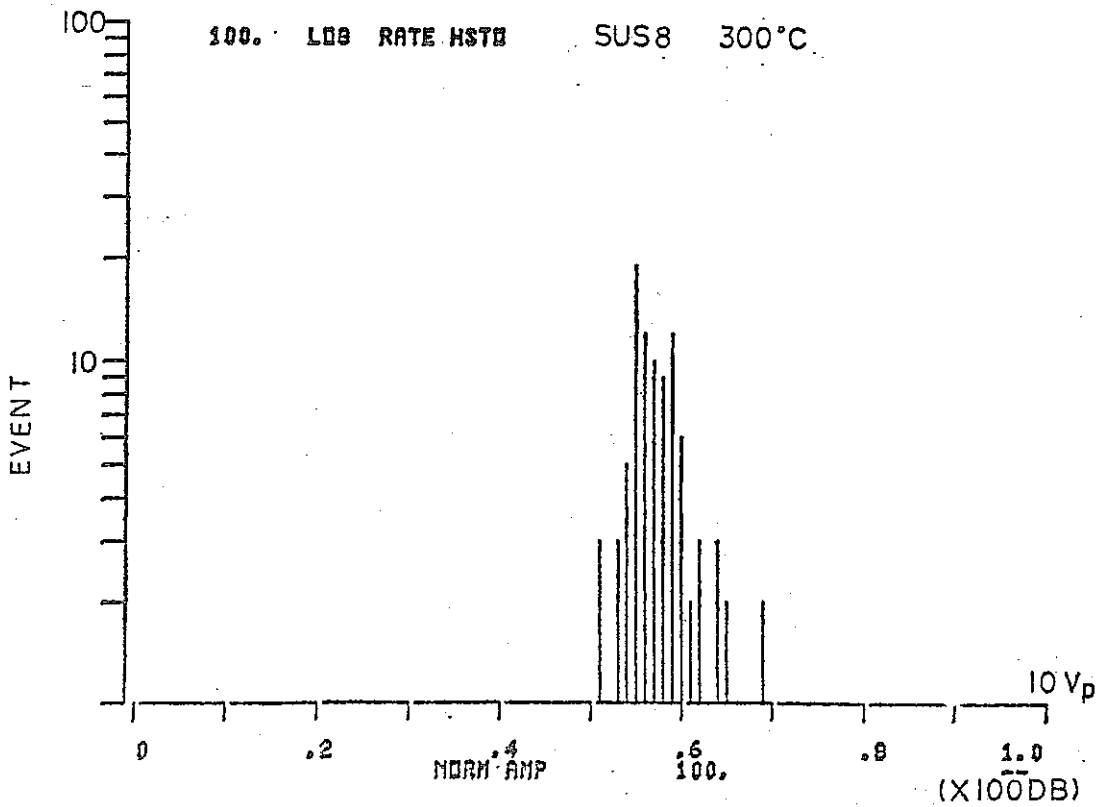


Fig.3.2.1-28. AE Amplitude distribution. (SUS8)

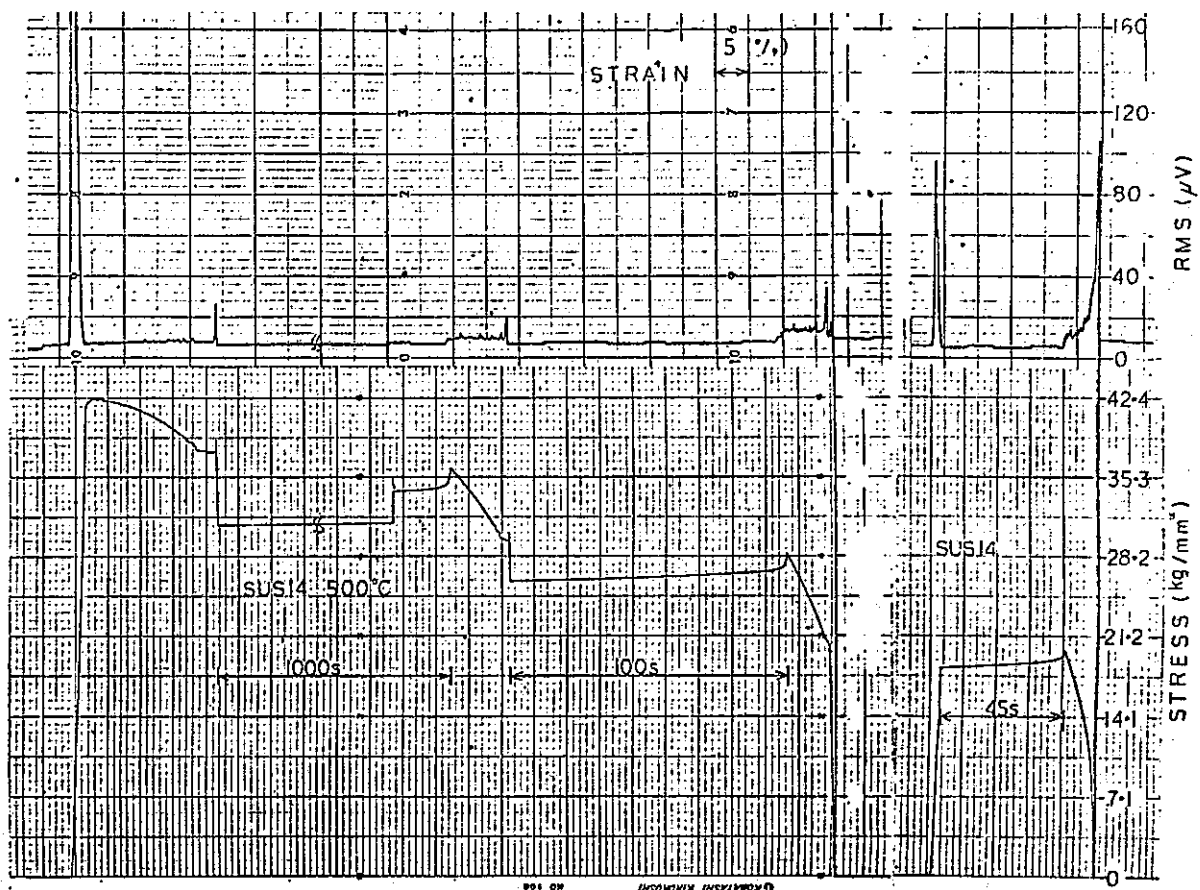


Fig.3.2.1-29. Load & RMS characteristic. (SUS14)

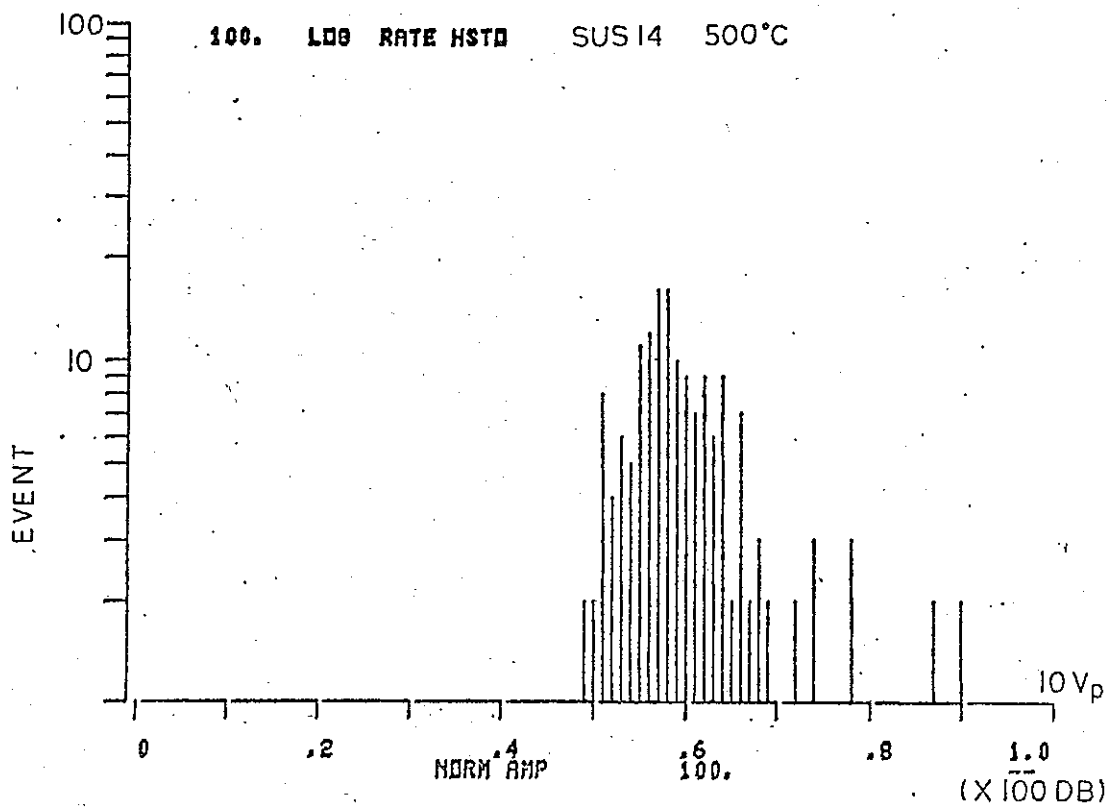


Fig.3.2.1-30. AE Amplitude distribution. (SUS14)



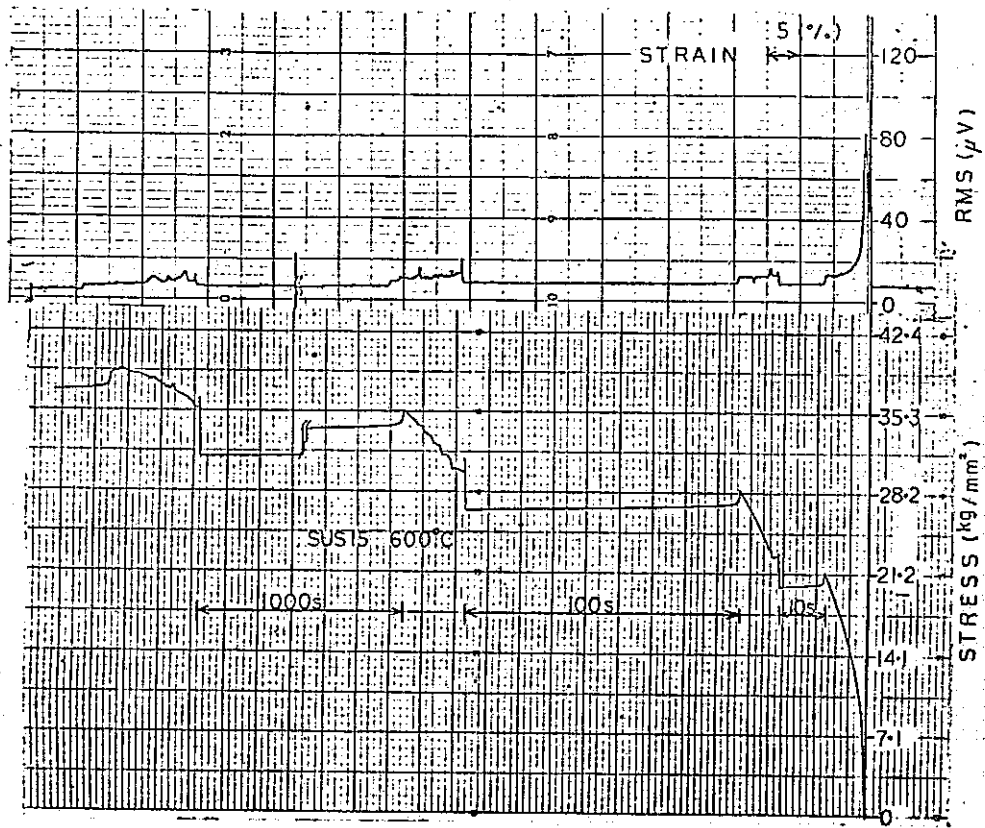


Fig.3.2.1-31. Load & RMS characteristic. (SUS15)

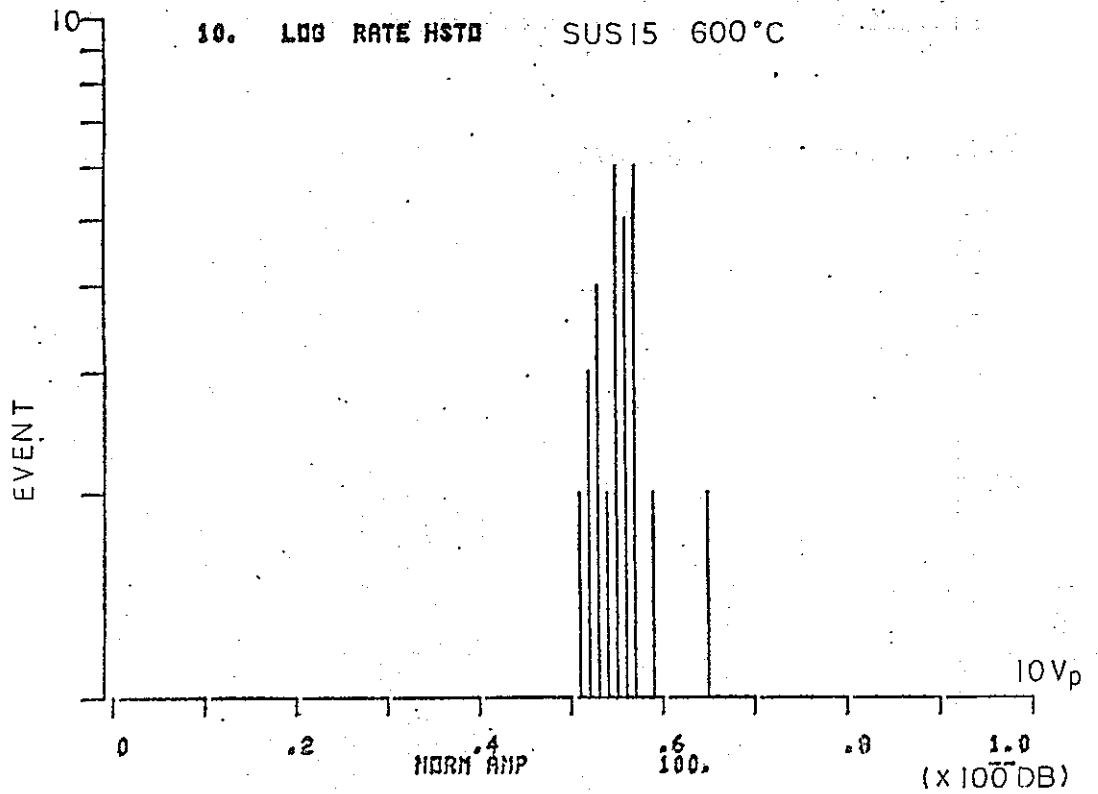


Fig.3.2.1-32. AE Amplitude distribution. (SUS15)

### 3.2.2 SUS304 鋭敏化ならびに溶体化処理と温度の影響

#### (1) 試験目的

SUS304 鋭敏化並びに溶体化処理材の高温時のA E特性を調べる。

#### (2) 供試材

1. 試験片形状 (3.1.2、図3.1.2-1に同じ)
2. 熱処理条件 表3.2.2-1

#### (3) 材料試験条件

力学的条件	丸棒単純引張
環境条件	恒温恒湿室内 (空气中)
クロスヘッド速度	0.5 mm/min
歪速度	$2.08 \times 10^{-4}$ strain/sec
雰囲気温度	270°C

引張試験結果を表3.2.2-2に示す。

尚、溶体化処理材の高温引張は雑音が多すぎてA E計測が不能であった。

#### (4) A E計測方法

(a) A E計測機器 (3.1.2、図3.1.2-2に同じ)

(b) 変換子及び導波棒取り付け法

導波棒形状 (3.1.2、図3.1.2-3に同じ)

取り付け状況 (3.1.2、図3.1.2-4に同じ)

導波棒と試験片との取付部はエポキシ樹脂系接着剤 (高温用) を介してネジ込み式とし、センサーと導波棒とはシアノアクリレート系接着剤を用いた。

(c) 位置標定

手法 一次元の時間差測定による数値計算

分解能 2.3 mm

表示法 3.1.2項参照

(d) A Eエネルギー解析項目

1. 位置標定

しきい値  $61 \mu V_{P-P}$

音速 4600 m/sec

2. 事象数

サンプリング間隔 A Eイベント 20 sec

stress 2 sec

3. 波高分析

減衰定数  $0.85 \times 10^{-2}$  1/mm

4. 波形観察および周波数分析

使用装置 biomation製8100型トランジェントレコーダー

5. 実効値電圧

使用装置 NF製M172TA 交流電圧計

(e) データ処理装置

CPU YHP製2112型

(5) 結果の評価

引張試験機付属の加熱炉の能力上の制約により高温引張は270℃で行なった。270℃における鋭敏化処理材の引張は非常に特異であった。降伏・引張強さおよび伸びが室温引張試験結果の約半分になり非常に脆化するとともに、A Eの発生が加工硬化域から破断近くまで増え続けるという特長のある現象を呈した。

またA Eの発生状況については鋭敏化処理条件のちがいにより、傾向は同じであるがA E入力換算平均電圧に約倍のちがいがあった。即ち600℃、24 hour 鋭敏化処理材のA E入力換算電圧は700℃、1 hour 鋭敏化処理材のA E入力換算電圧の約倍であった。

270℃引張におけるこれらの現象が鋭敏化処理材に特有なものであるか否かは、溶体化処理材の引張試験時のA E計測に失敗した（原因不明のノイズにより）ため確認できなかった。

F A E A E 計測データシート

平滑材の A E 特性		データ番号		責任者名	丸山 温
		記入年月日	1978 年 5 月 29 日	所属会社名	日本鋼管
試験材料	SUS304	試験雰囲気	空気中	試験場所	三重県工業技術センター
試験装置	島津オートグラフ	材料熱処理	Table 3.2.3-1	試験片形状	丸棒引張試験片
試験目的	鋭敏化並びに溶体化処理材の高温時の A E 特性を調べる。				
試験片番号	#5	#6			
試験条件	試験温度	270°C	270°C		
	ひずみ速度	$2.08 \times 10^{-4}$	$2.08 \times 10^{-4}$		
	熱処理	600°C×24hr	700°C×1hr.		
試験条件	ひずみ保持時間	引張側			
		圧縮側			
	周波数				
	抑制方法			印荷波形	
A E 計測		A E 計測装置	NKK AE Monitoring System		
試験片番号	#5	#6			
変換	変換子名と番号	1586	1586		
		1587	1587		
	校正曲線	3.1.2-3~4	3.1.2-3~4		
	取付箇所(導波棒)	4φホーン付	4φホーン付		
接合法(カップラント)	アロンアルファ	アロンアルファ			
増幅	前置増幅器	40dB	40dB		
	主増幅器	46dB	46dB		
フィルター・周波数帯域	100KHz H.P.	100KHz H.P.			
トリガーレベル	$61 \mu V_{P-P}$	$61 \mu V_{P-P}$			
R. M. S. 電圧	3.2.2-3	3.2.2-6			
リングダウンor事象数	3.2.2-1	3.2.2-4			
振幅分布	3.2.2-2	3.2.2-5			
エネルギー分布	-	-			
波形観察	-	3.2.2-7,8 (←含周波数分析)			
その他( )					
	前置増幅器	主増幅器		フィルター	位置標定手法
型式	1801		型式		分解能 2.3mm
メーカー	D/E	小野測器	メーカー名	小野測器	範囲
ダイナミックレンジ	74dB		周波数帯域	100KHz H.P.	
備考	ノイズレベル 最大 $40 \mu V_{P-P}$				

Table 3.2.2-1 Condition of Heat Treatment

heat treatment	sensitization		solution treatment	
	600° c, 24hour	700° c, 1hour	1100° c, 0.5hour	1250° c, 0.5hour
test NO.	#5	#6	-	-

Table 3.2.2-2 Results of the Tensile Test

test NO. (heat treatment)	dimension of tensile specimen		tensile test		
	diameter (mm)	gage length (mm)	yield point (kg/mm <sup>2</sup> )	tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	elongation (%)
#5 (600° c, 24hour)	6.00	40	11.7	44.9	47.5
#6 (700° c, 1hour)	6.00	40	10.6	44.2	47.5

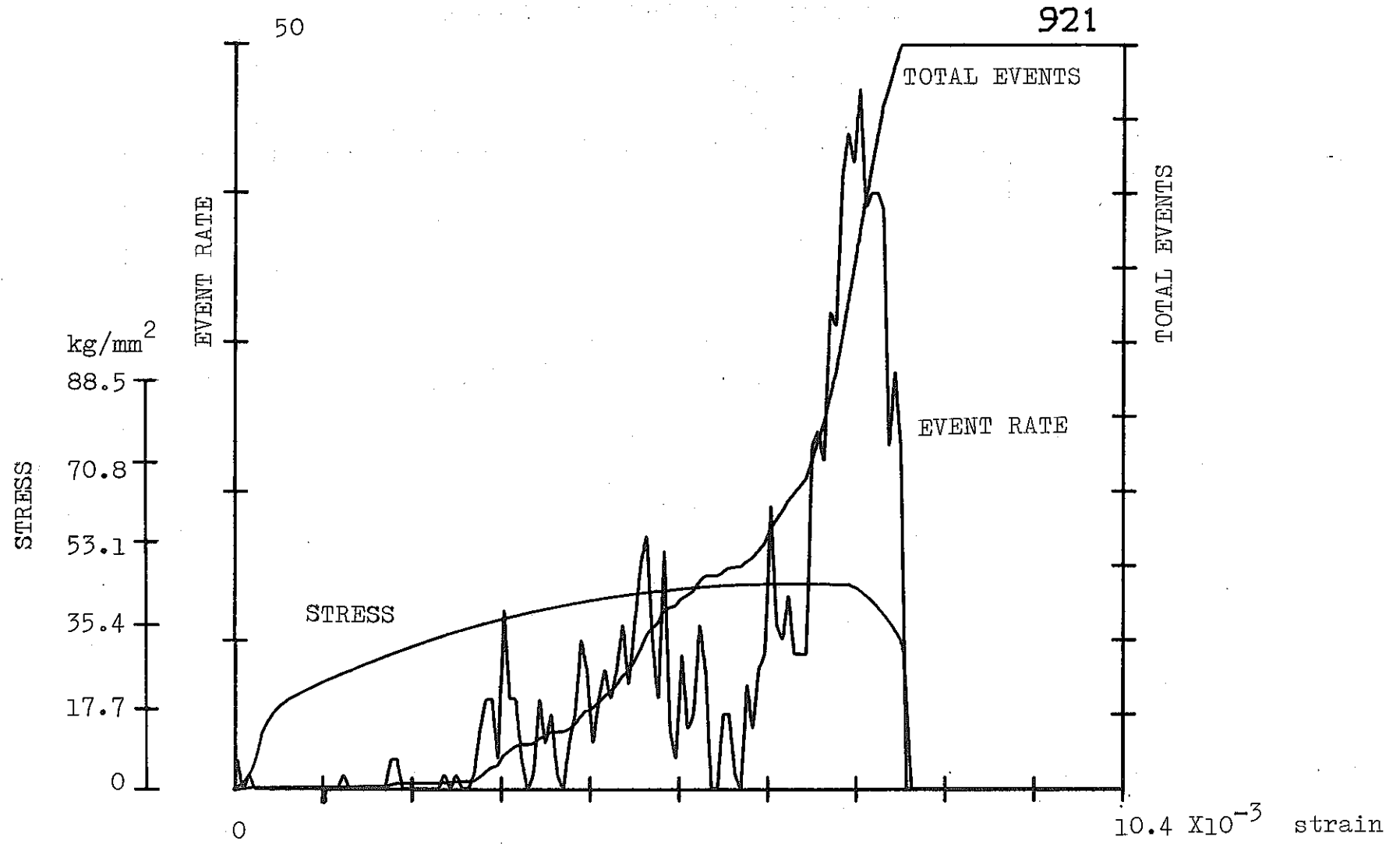


Fig.3.2.2-1 AE Event Rate Curve (#5:600°c,24hour)

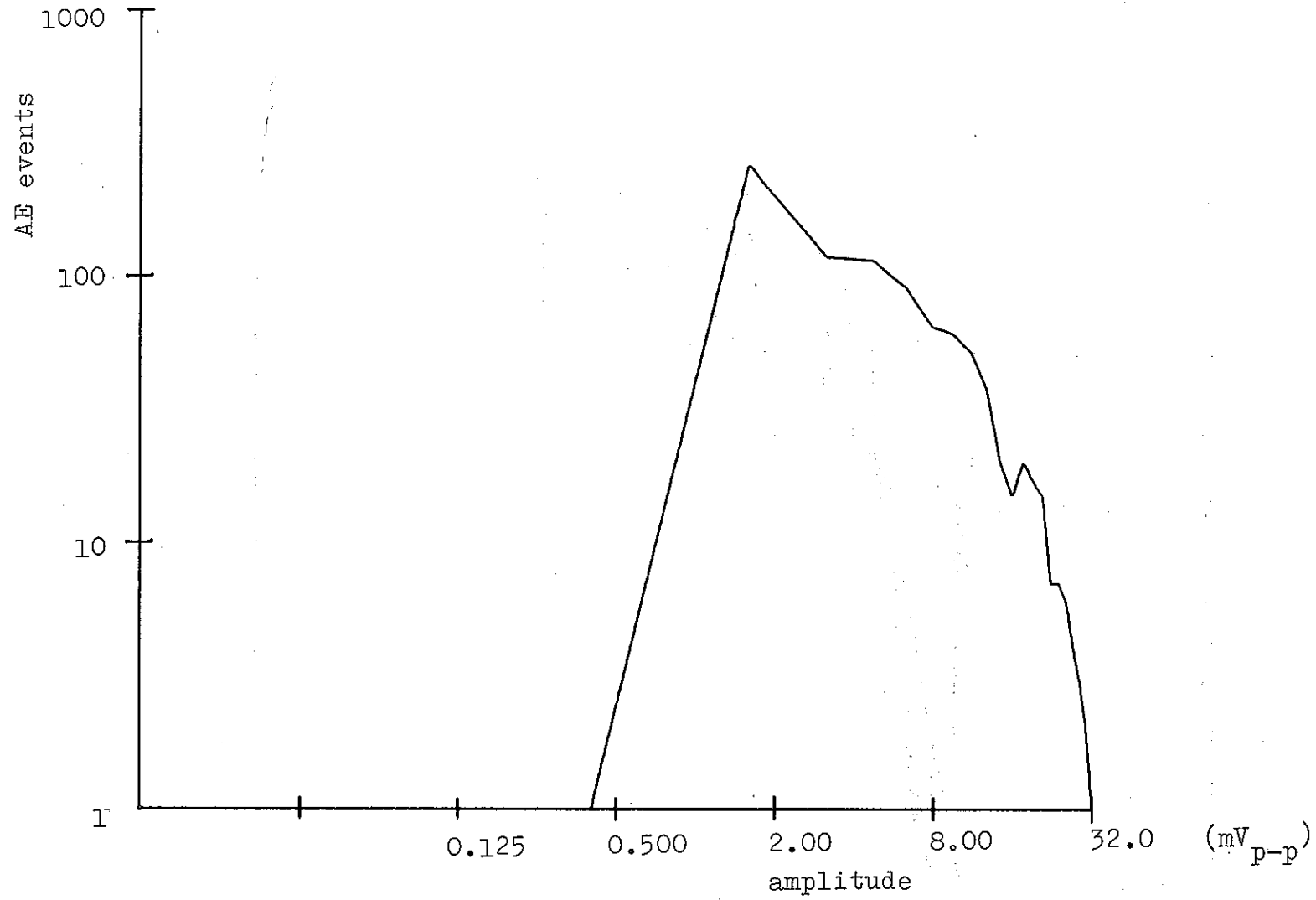
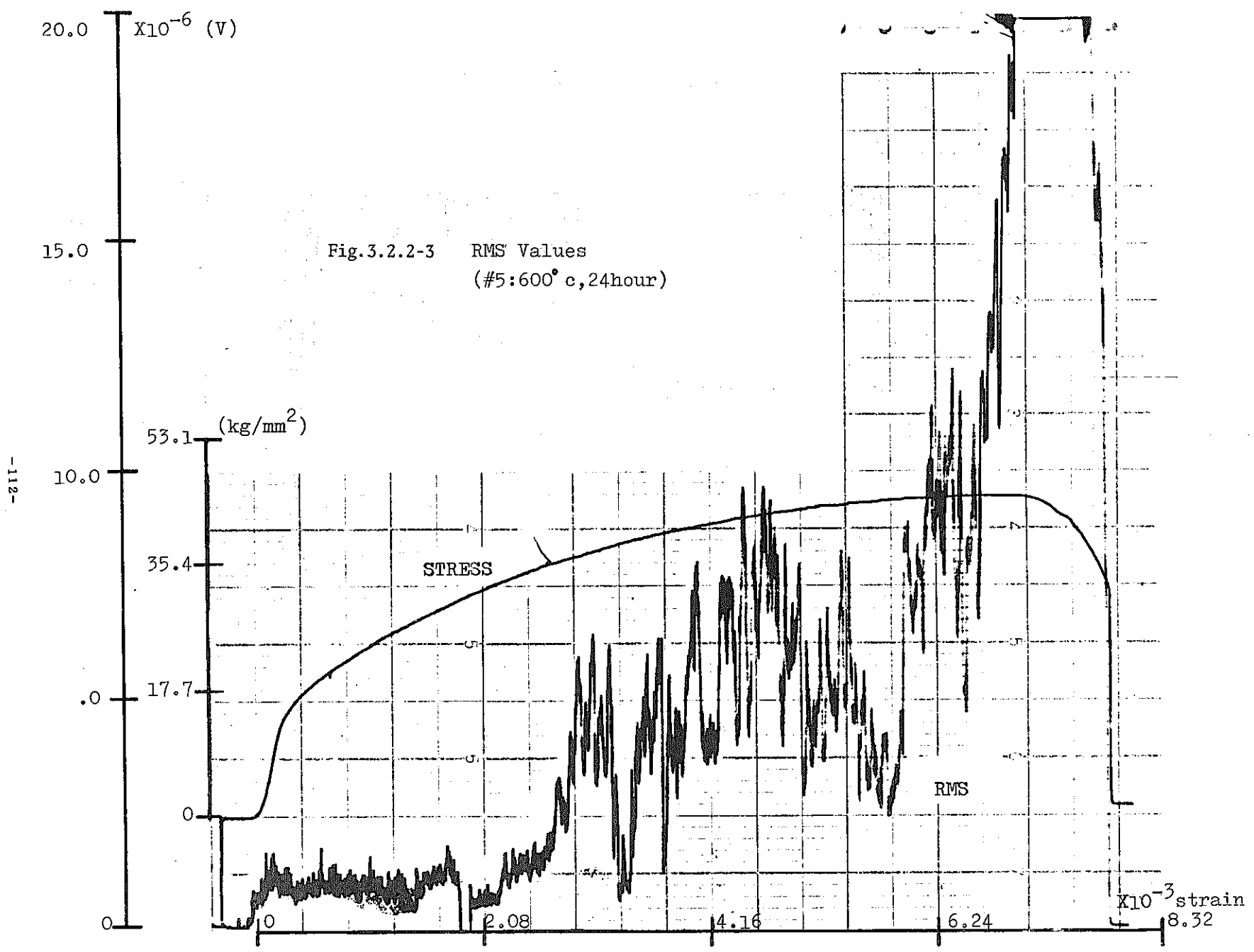


Fig.3.2.2-2 Amplitude Distribution  
(#5:600° c,24hour)





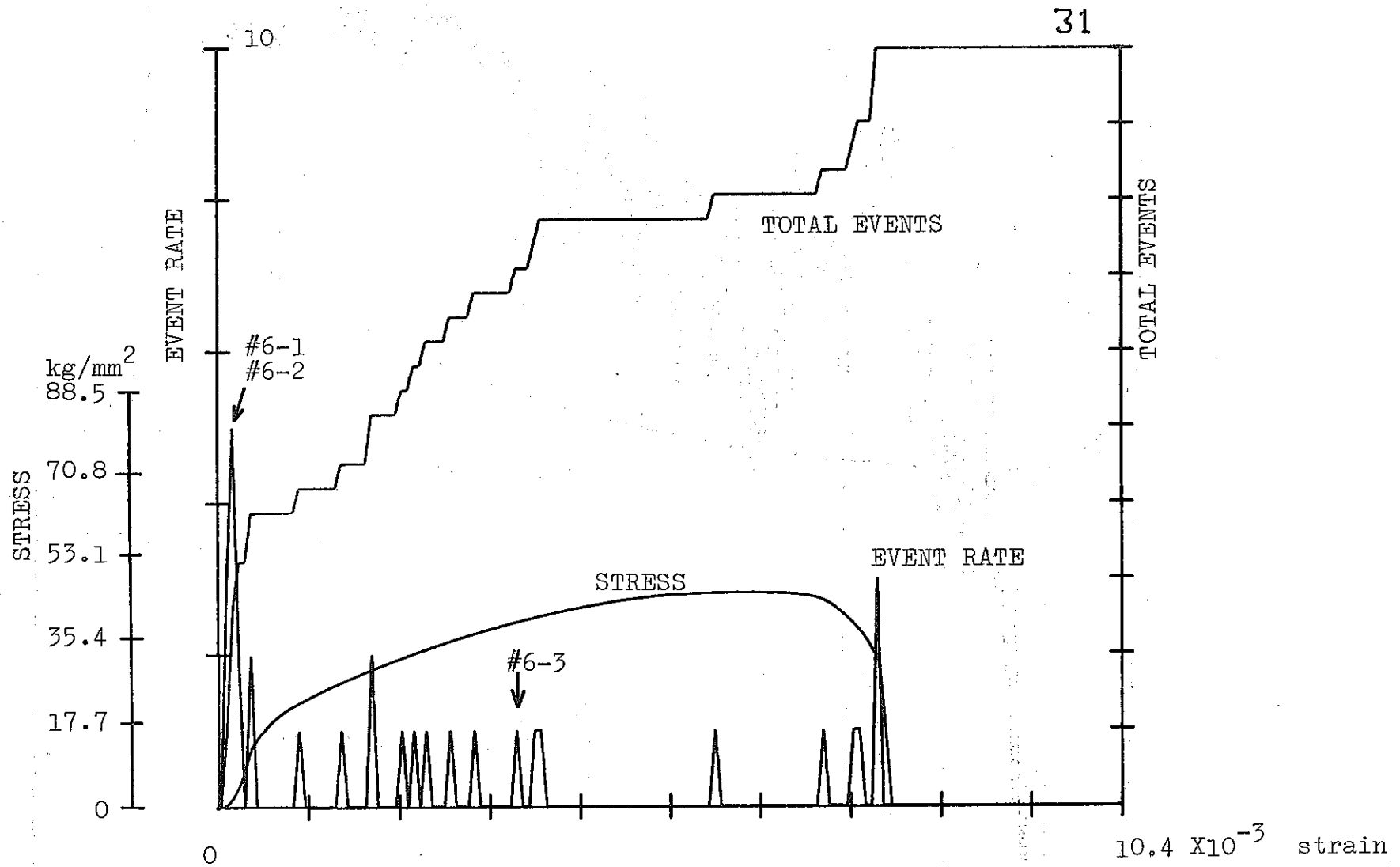


Fig.3.2.2-4 AE Event Rate Curve (#6:700°c,1hour)

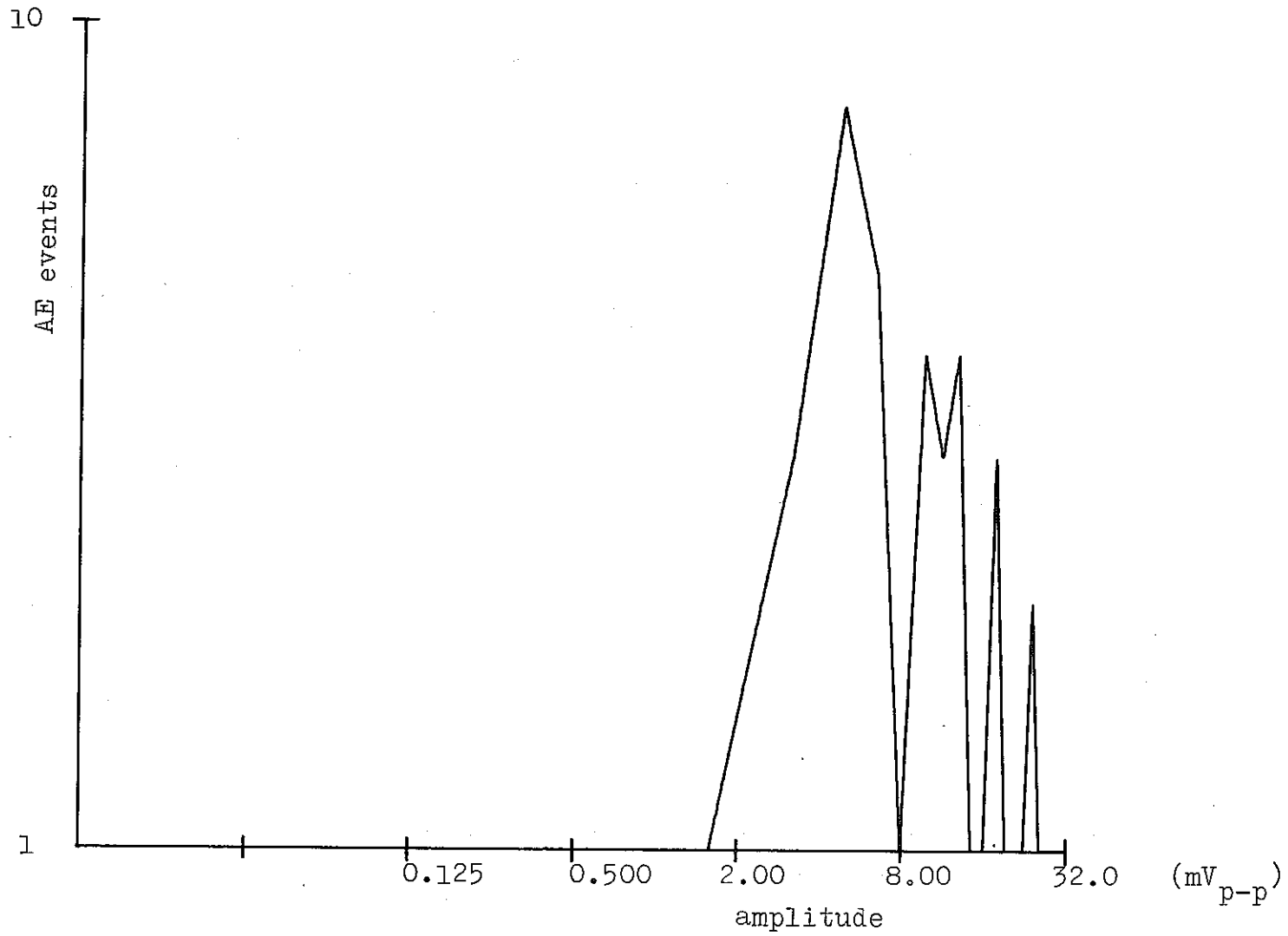


Fig.3.2.2-5 Amplitude Distribution  
(#6:700° c, 1hour)

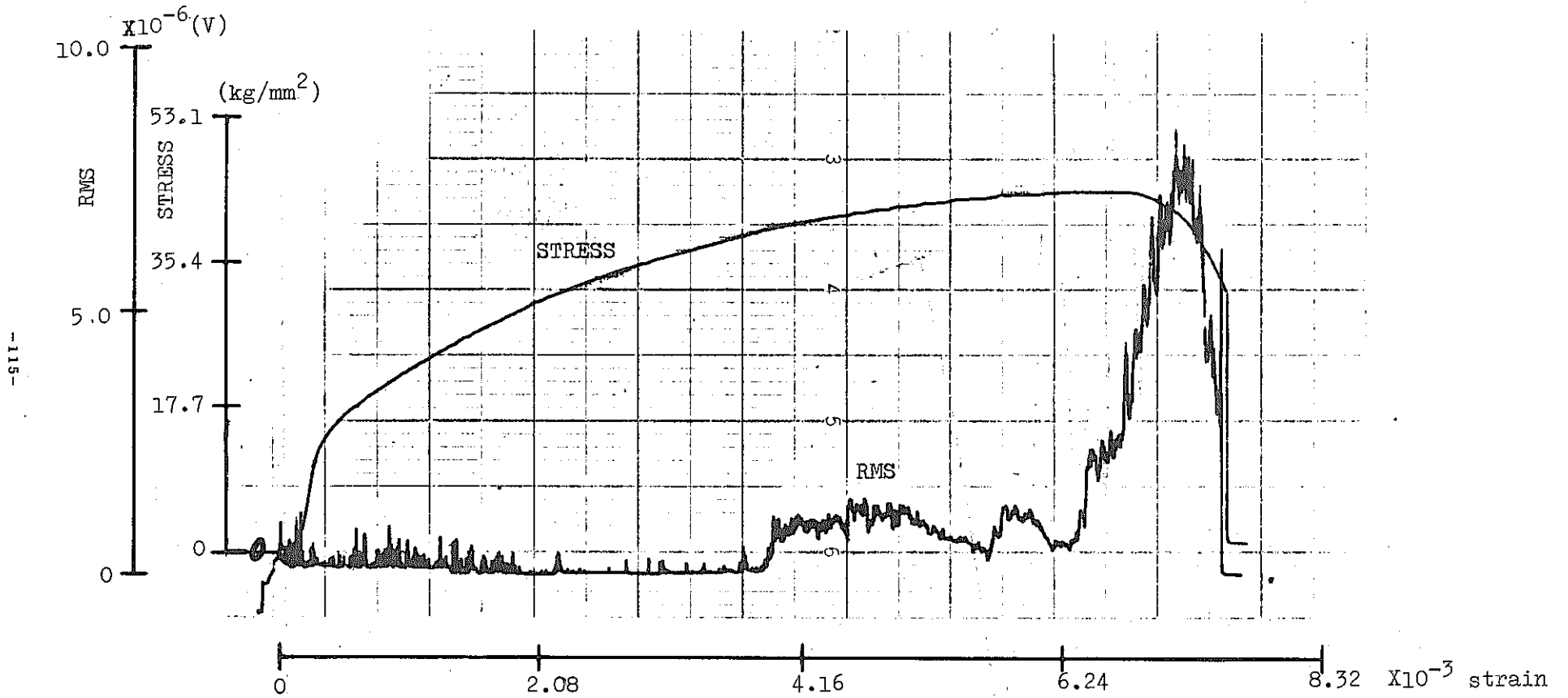


Fig.3.2.2-6 RMS Values (#6:700° c, 1hour)

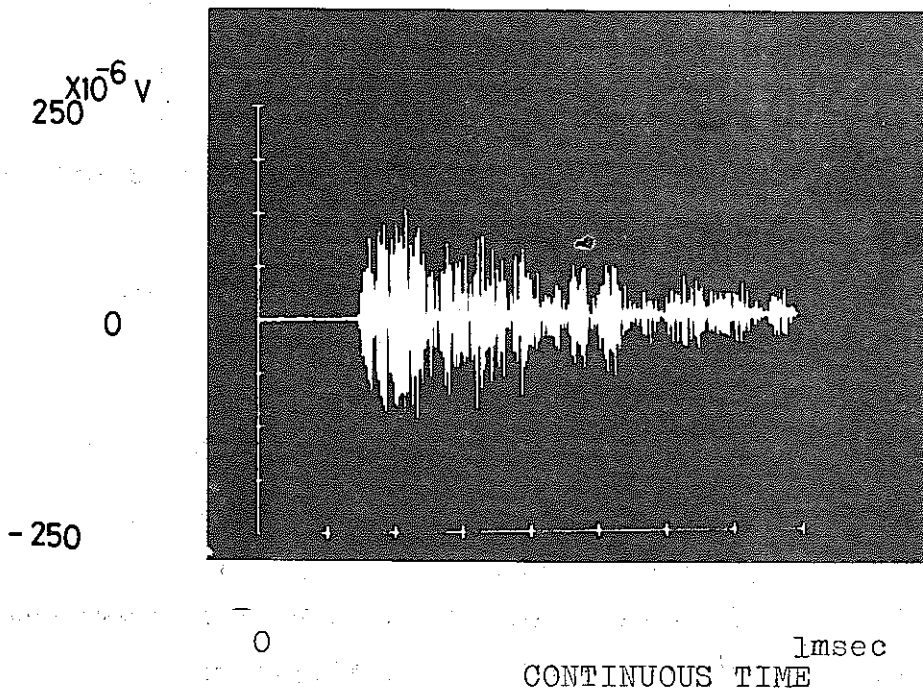


Fig.3.2.2-7 AE Waveform (#6-1:700° c, 1hour)

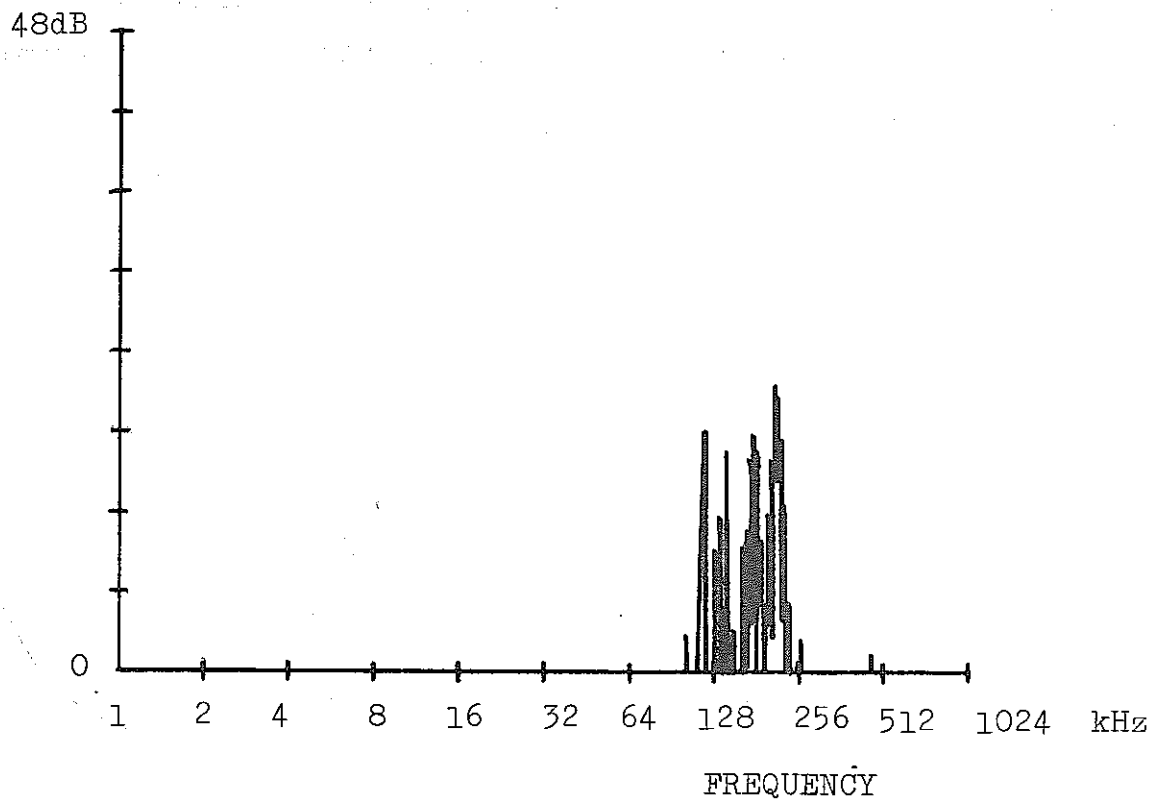


Fig.3.2.2-8 Frequency Spectrum  
(#6-1:700° c, 1hour)

### 3.2.3 2¼Cr-1Mo鋼 温度と回復の影響

#### (1) 目的

2¼Cr-1Mo鋼の引張変形に対するAE特性の試験温度依存性と時効・回復の影響を調べる。

#### (2) 供試材

試供材 2¼Cr-1Mo鋼

#### (3) 実験方法

試験片端部にステンレス鋼(φ4mm)の導波棒を銀ロウ付けした。センサーと導波棒はアロンアルファにて接着した。

試験温度はR.T.(約25℃)と400℃の2点、引張試験は次のように行った。

1. 歪(伸び)で10%まで引張り除荷した。

Fig. 3.2.3-1とFig. 3.2.3-2に結果を示す。

2. 30分後再負荷を行なった後(5%歪まで)除荷して、荷重が0になってからすぐに再び5%歪まで負荷して除荷した。

Fig. 3.2.3-2とFig. 3.2.3-4に結果を示す。

AE特性はRMS電圧(入力換算値を示してある)リングダウン方式によるTotal count(threshold levelは14μV)で示し、同時に荷重-時間曲線も示した。

#### (4) 考察

Fig. 3.2.3-1及びFig. 3.2.3-3に示すように、試験温度依存性は認められなかった。

時効回復による影響はほとんど認められない(Fig. 3.2.3-2及び4)。400℃の場合には若干の回復が認められる。

F A E A E 計測データシート

2 1/4 Cr-1Mo 鋼の試験温度の影響		デクメント番号		責任者名	福沢 康・羽田野甫	
		記入年月日	1978年6月5日	所属会社名	東工大	
試験材料	2 1/4 Cr-1Mo 鋼	試験雰囲気	空気中	試験場所	東工大・大岡山キャンパス	
試験装置	新興 TOM 2000 X	材料熱処理	支給材	試験片形状	丸棒平滑	
試験目的		2 1/4 Cr-1Mo 鋼の A E の試験温度依存性と時効による回復の影響を調べる。				
試験片番号		2-1		2-2		
試験条件	試験温度	R. T.		400°C		
	ひずみ速度	$1.67 \times 10^{-3} / S$		$1.67 \times 10^{-3} / S$		
	クロスヘッド速度	3 mm/min		3 mm/min		
試験条件	試験片の位置	引張側				
		圧縮側				
	周波数					
	抑制方法			印荷波形		
A E 計測		A E 計測装置				
試験片番号		2-1		2-2		
試験条件	変換子名と番号	0.14Z.10 1659		0.14Z.10 1659		
	校正曲線					
	取付箇所(導波棒)	試片端部	φ4ステン導波棒	"		
	接合法(カップラント)	銀ロウ付		銀ロウ付		
増幅器	前置増巾器	40dB		40dB		
	主増幅器	-		-		
フィルター・周波数帯域	100-200KHz		100-200KHz			
トリガーレベル	14μV		14μV			
R. M. S. 電圧	Fig.3.2.3-1,2		Fig.3.2.3-3,4			
リングダウン	"		"			
振幅分布						
エネルギー分布						
波形観察						
その他( )						
	前置増巾器	主増巾器		フィルター		位置標定手法
型式	400E		型式		分解能	
メーカー	H. P.		メーカー名	自作	範囲	
ダイナミックレンジ			周波数帯域	100-200KHz		
備考						

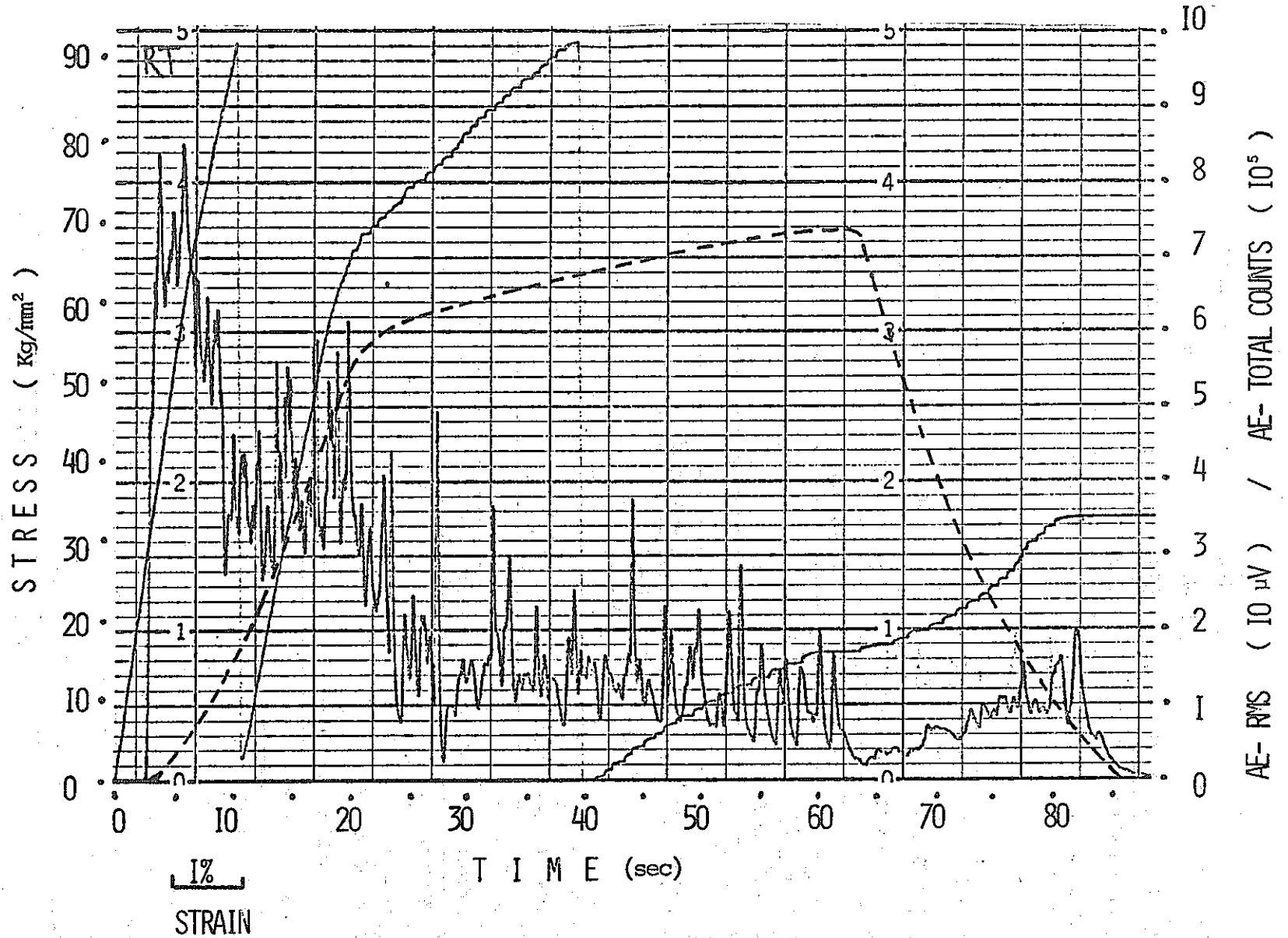


Fig.3.2.3-1 2.1/4Cr - 1Mo Steel tested at room temperature.

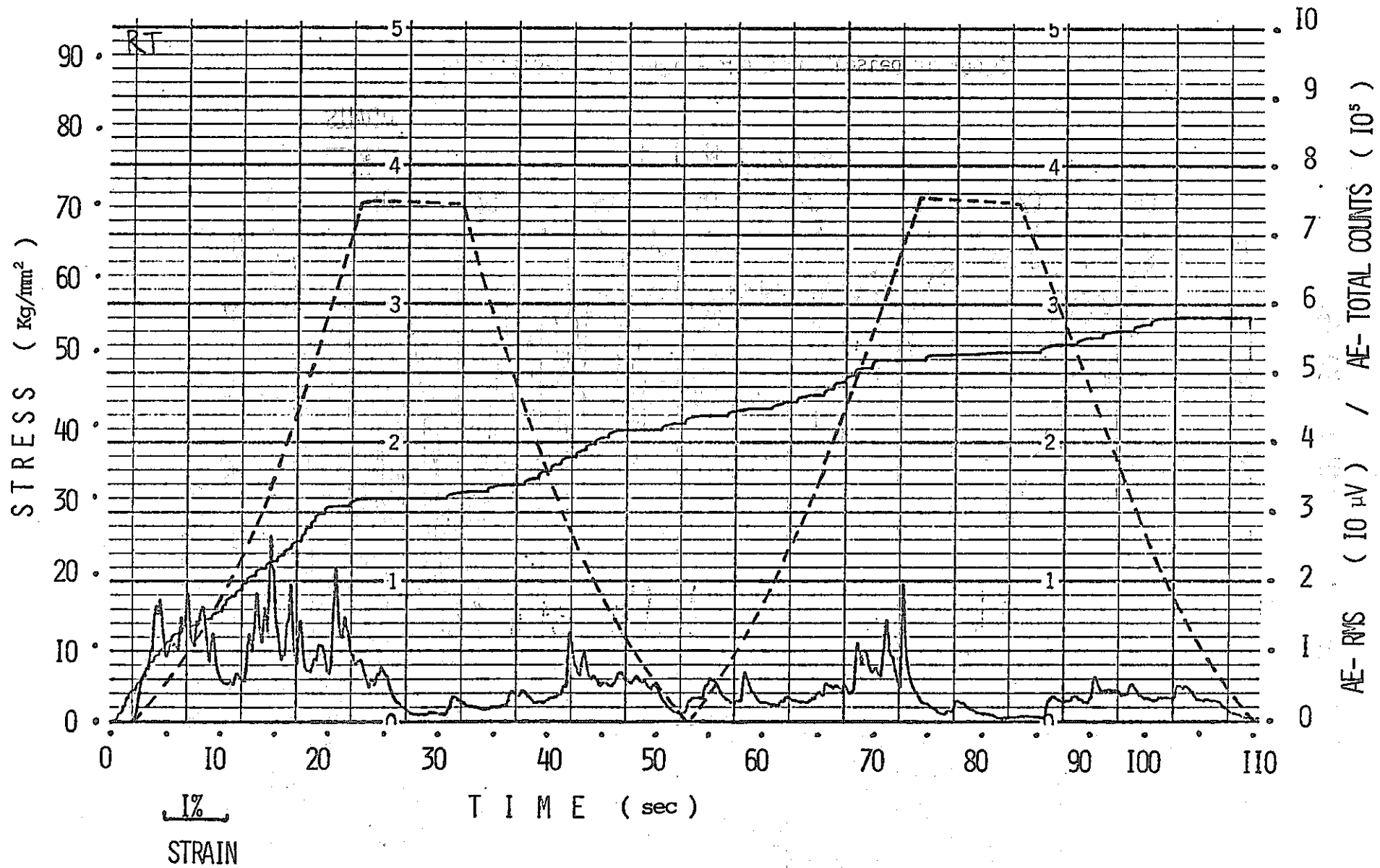


Fig.3.2.3-2 2·1/4Cr - 1Mo Steel tested at room temperature. ( 30 minutes after 1st loading )



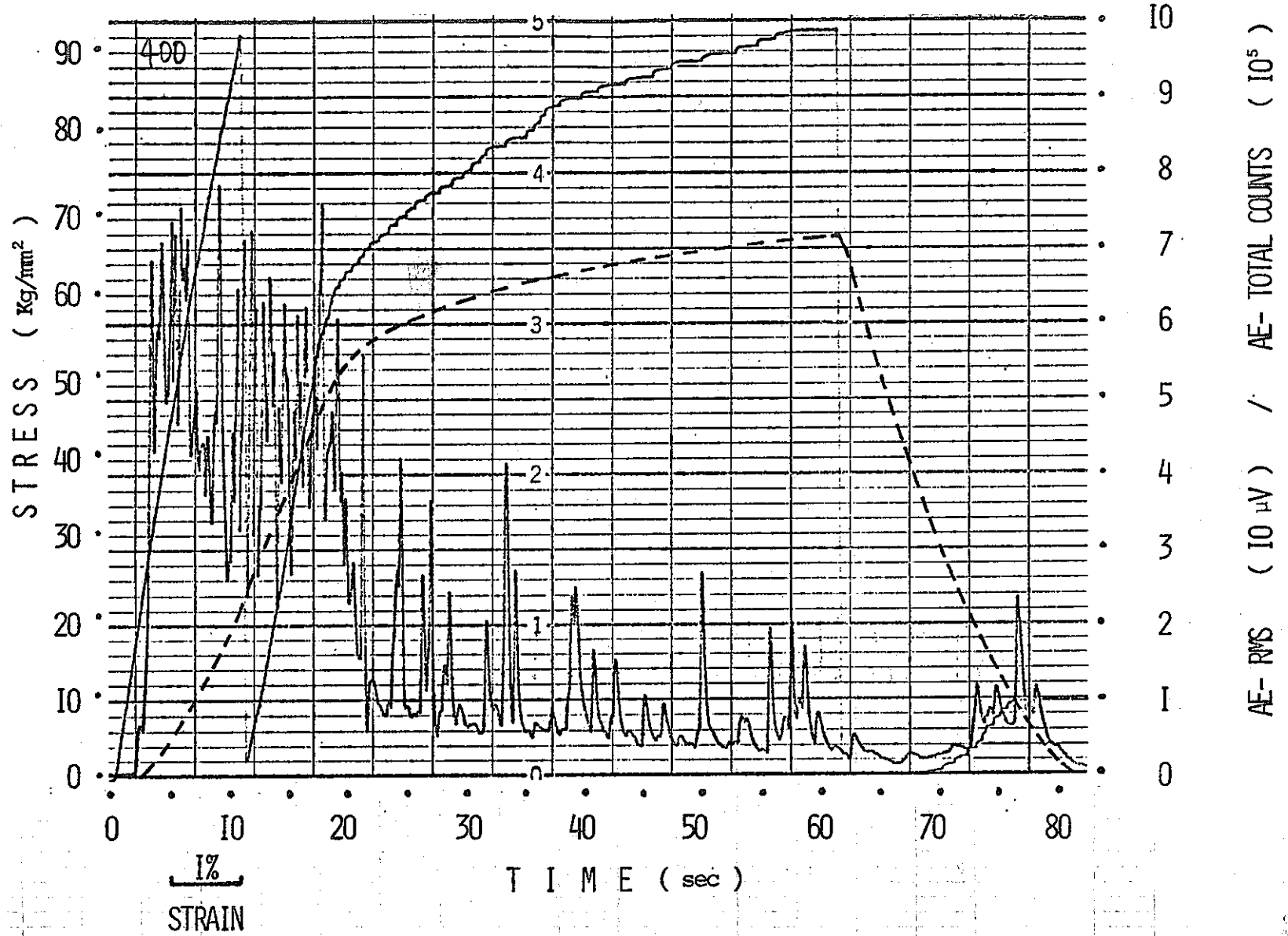


Fig.3.2.3-3 2.1/4Cr - 1Mo Steel tested at 400°C.

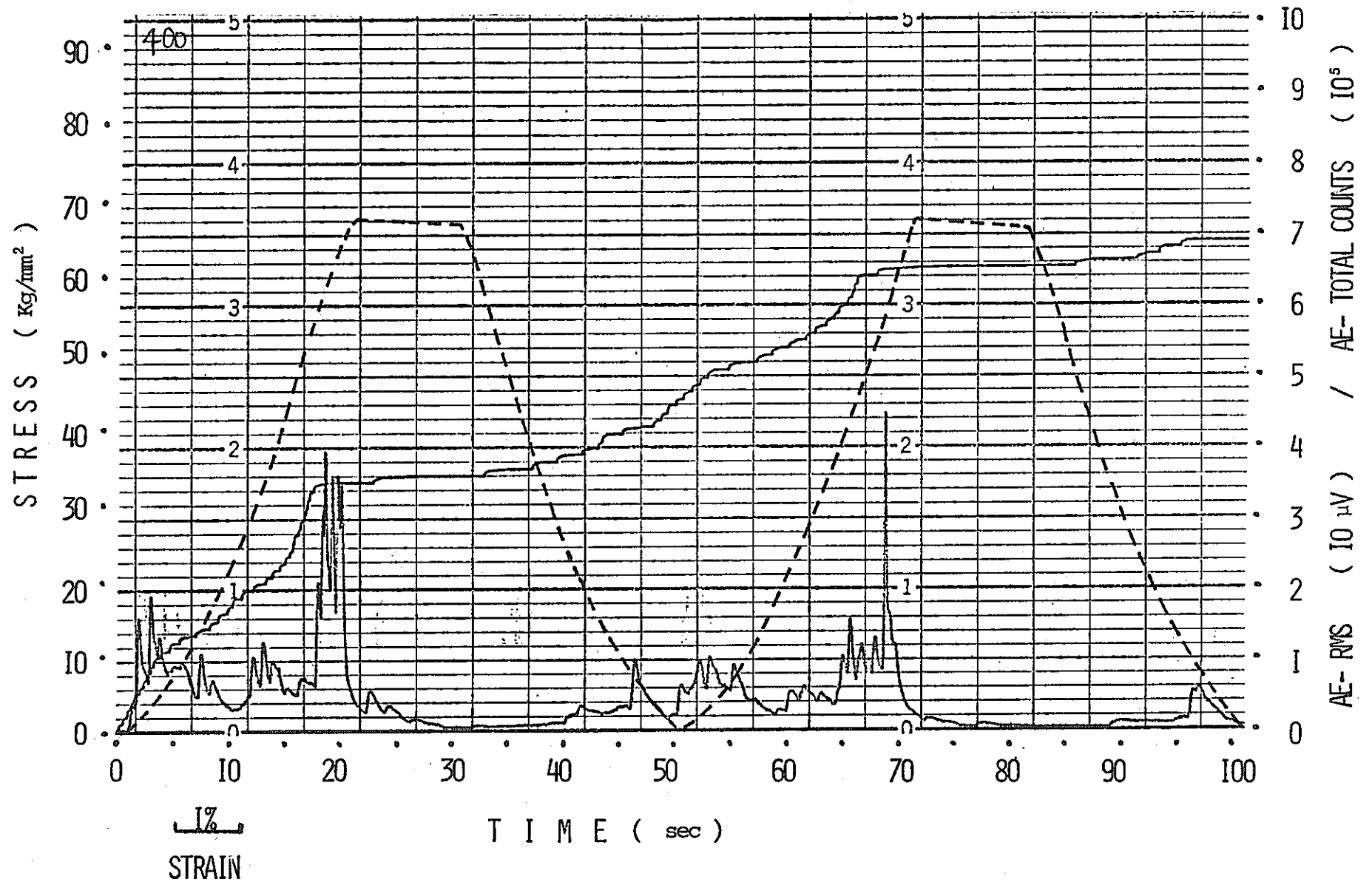


Fig.3.2.3-4 2.1/4Cr - 1Mo Steel tested at 400°C. ( 30 minutes after 1st loading )

### 3.3 常温、高温における繰り返し変形過程のA E特性

#### 目 的

平滑試験片の引張り-圧縮繰り返し変形過程のA Eにおよぼす温度の影響を調べる。

#### 供試材と試験方法

供試材はSUS304、SUS316であり、試験片の形状と寸法をFig. 3.3-1に示す。

A Eの計測には、Fig. 3.3-2に示す形状、寸法のSUS304製導波棒を用いた。導波棒の試験片への取り付けは、導波棒のテーパ部を試験片端面に挿入し、テーパ部によって密着させる方法をとった。

使用したA E変換子の感度特性曲線をFig. 3.3-3に示す。

繰り返し変形試験は、25℃、300℃、600℃の各温度下で、応力比を-1とした引張り-圧縮繰り返し試験を行ない、試験開始直後の20サイクルについて、A Eを採取した。応力振幅としては、塑性変形が生じるよう、室温における降伏応力の1.5倍とし、ひずみ速度は約 $3 \times 10^{-3} \text{ S}^{-1}$ として試験を行った。

#### 3.3.1 SUS304のA E特性

##### (1) 試験条件

データシートに記す。

##### (2) 試験結果とその評価

###### (i) 応力-ひずみ曲線

試験温度25℃における繰り返し変形時の応力-ひずみ曲線をFig. 3.3-4に示す。変形は数サイクルで定常状態となり、そのひずみ振幅は約0.6%であった。

###### (ii) 繰り返し変形に伴うA E (25℃)

試験開始直後の繰り返し変形に伴うA Eの累積事象数と、リングダウン計数率の時間に対する変化を応力とともに示したのがFig. 3.3-5である。

A Eは、最初の1サイクルにおいて、引張り側降伏を生じるあたりより発生しはじめ、さらに、応力反転に伴う再降伏に伴って発生することが認められる。しかし、3サイクル以降では、ほとんどA Eの発生はなく、20サイクル中のA E累積事象数は65であった。

A E計測時の背景雑音は $7 \mu \text{ V}_{\text{P-P}}$ であり、A E計測しきい値は $10 \mu \text{ V}$ に設定した。観察されたA E波形はすべて突発型であり、その最大振幅は約 $30 \mu \text{ V}$ 程度であった。

この結果より、実機においては、背景雑音がかなり高いレベルを有することが予想されるため、常温においては、SUS304材の塑性変形に伴うA Eの検出は、難しいものと考えられる。

###### (iii) 繰り返し変形に伴うA E (300℃)

試験結果をFig. 3.3-6に示す。SUS304材の300℃における降伏応力よりかなり高い応力振幅で試験を行った結果であるが、繰り返し変形過程におけるA Eの発生状況は、先の

25℃における結果とほぼ同様である。一概に25℃の結果と比較することは出来ないが、A Eは、25℃よりも活動度が増しており、また、やや高振幅の突発型A Eが観察された。

(Ⅳ) 繰り返し変形に伴うA E (600℃)

試験時の背景雑音レベルは25℃におけると同程度であったが、試験片取り付け治具の高温での使用に対する配慮に欠点があったためか、そのチャック部から発生した雑音のため、A E計測は不可能であった。

### 3.3.2 SUS316のA E特性

(1) 試験条件

データシートに記す。

(2) 試験結果とその評価

(i) 応力-ひずみ曲線

試験温度25℃における繰り返し変形時の応力-ひずみ曲線をFig. 3.3-7に示す。変形は約10サイクルで同図(b)のように定常状態となり、そのひずみ振幅は約0.6%であった。

(ii) 繰り返し変形に伴うA E (25℃)

試験結果をFig. 3.3-8に示す。A Eの発生と荷重サイクルとの関係は、SUS304材の試験結果と同様で、最初の降伏ならびに応力反転に伴う再降伏に伴ってA Eの発生が多く見られるが、サイクル数の増加とともにA Eの発生は減少し、10~20サイクル間ではA Eの発生は無かった。

(iii) 繰り返し変形に伴うA E (高温)

試験片取り付け治具の高温における障害のため、A E計測は不可能であった。

供試材であるSUS304、SUS316ステンレス鋼の塑性変形に伴うA Eの波高値は、使用するA E変換子の感度にもよるが、プリアンプの雑音レベルよりやや高いレベルの値である。したがって、このような微小振幅のA Eを計測するには、A Eの発生位置標定を行うとしても、試験機、治具等の機械雑音や、電気雑音を最小限にとどめる配慮が必要である。

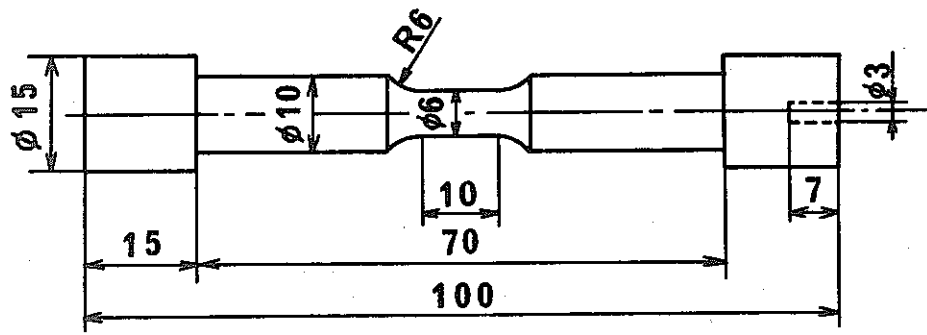


Fig.3.3-1 Specimen.

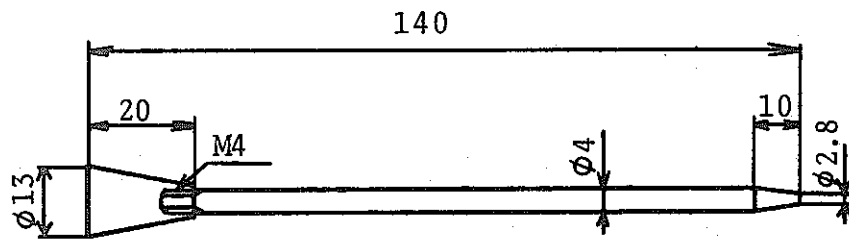


Fig.3.3-2 Wave guide.

SENSOR ZETTAI KANDO NAME = NHM-2-.1425-1651 S.53.3.16-3

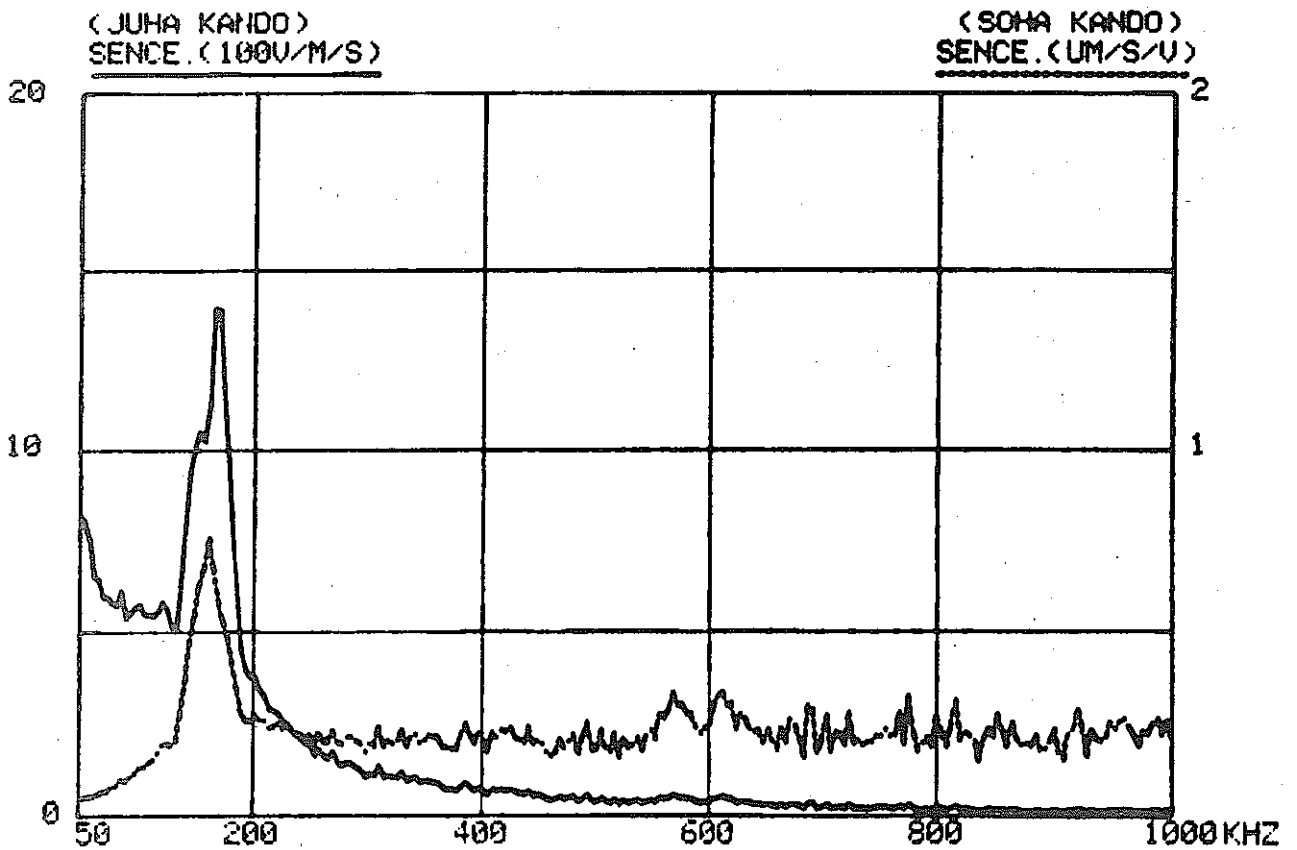


Fig.3.3-3 Characteristic of AE transducer.

F A E A E 計測データシート

繰り返し変形過程のA E特性		デタント番号		責任者名	岸 輝雄・森 康彦	
		記入年月日	1978年5月25日	所属会社名	東大宇宙研・日大生産工	
試験材料	SUS304	試験雰囲気	大気中	試験場所	東京大学宇宙航空研究所	
試験装置	島津オートグラフIS-10T	材料熱処理	支給材	試験片形状	Fig. 3.3-1	
試験目的	平滑材の引張り-圧縮繰り返し変形過程のA Eにおよぼす温度の影響を調べる。					
試験片番号	048-1	048-2	048-3			
牛糸線試験	試験温度	25℃	300℃	600℃		
	クロスヘッド速度	2mm/min	←	←		
	荷重振幅	800Kg	←	←		
牛糸線試験為数	引張側	0	←	←		
		0	←	←		
	周波数					
	抑制方法	荷重制御		印荷波形	～三角波	
A E 計測			A E 計測装置			
試験片番号	048-1	048-2	048-3			
変換子	変換子名と番号	14Z5 No. 1651	←	←		
	校正曲線	Fig. 3.3-3	←	←		
	取付箇所(導波棒)	Fig. 3.3-2	←	←		
	接合法(カップラント)	シリコングリス	←	←		
増幅器	前置増幅器	40dB	←	←		
	主増幅器	40dB	←	←		
フィルター・周波数帯域	0.1~0.2MHz	←	←			
トリガーレベル	10μV	12μV	12μV			
R. M. S. 電圧						
リングダウン&事象数	Fig. 3.3-5	Fig. 3.3-6	測定不能			
振幅分布						
エネルギー分布						
波形観察						
その他( )						
	前置増幅器	主増幅器		フィルター		位置安定手法
型式	AE-912	AE-922	型式	AE-922	分解能	
メーカー	NF	NF	メーカー名	NF	範囲	
ダイナミックレンジ	60dB	60dB	周波数帯域	0.1~1.0MHz		
備考						

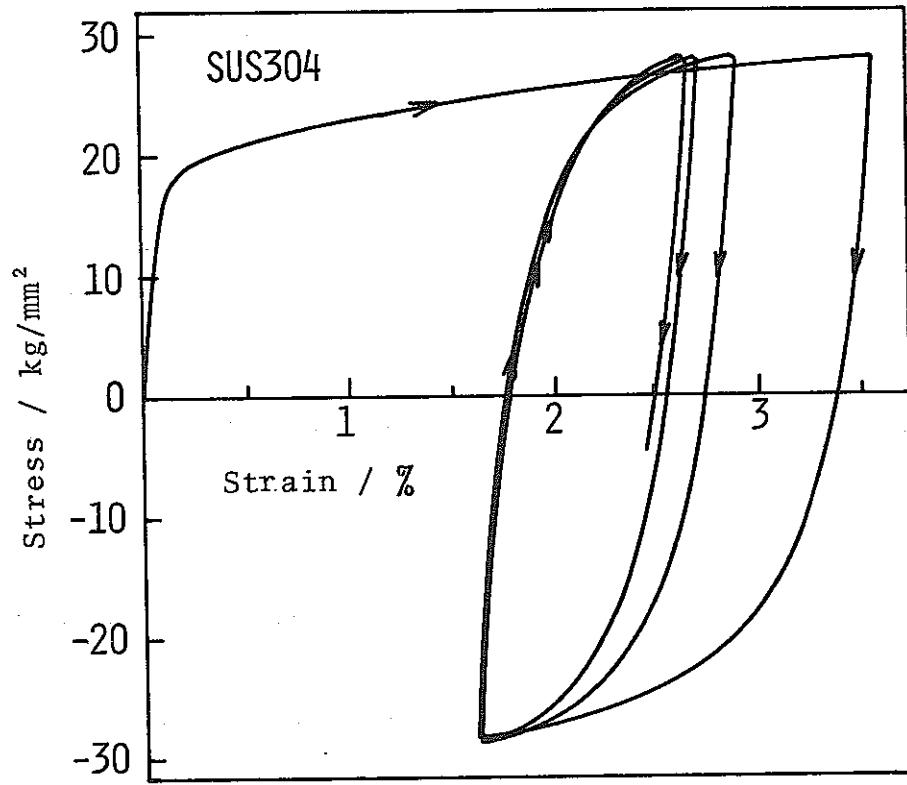


Fig.3.3-4 Stress-Strain curve.

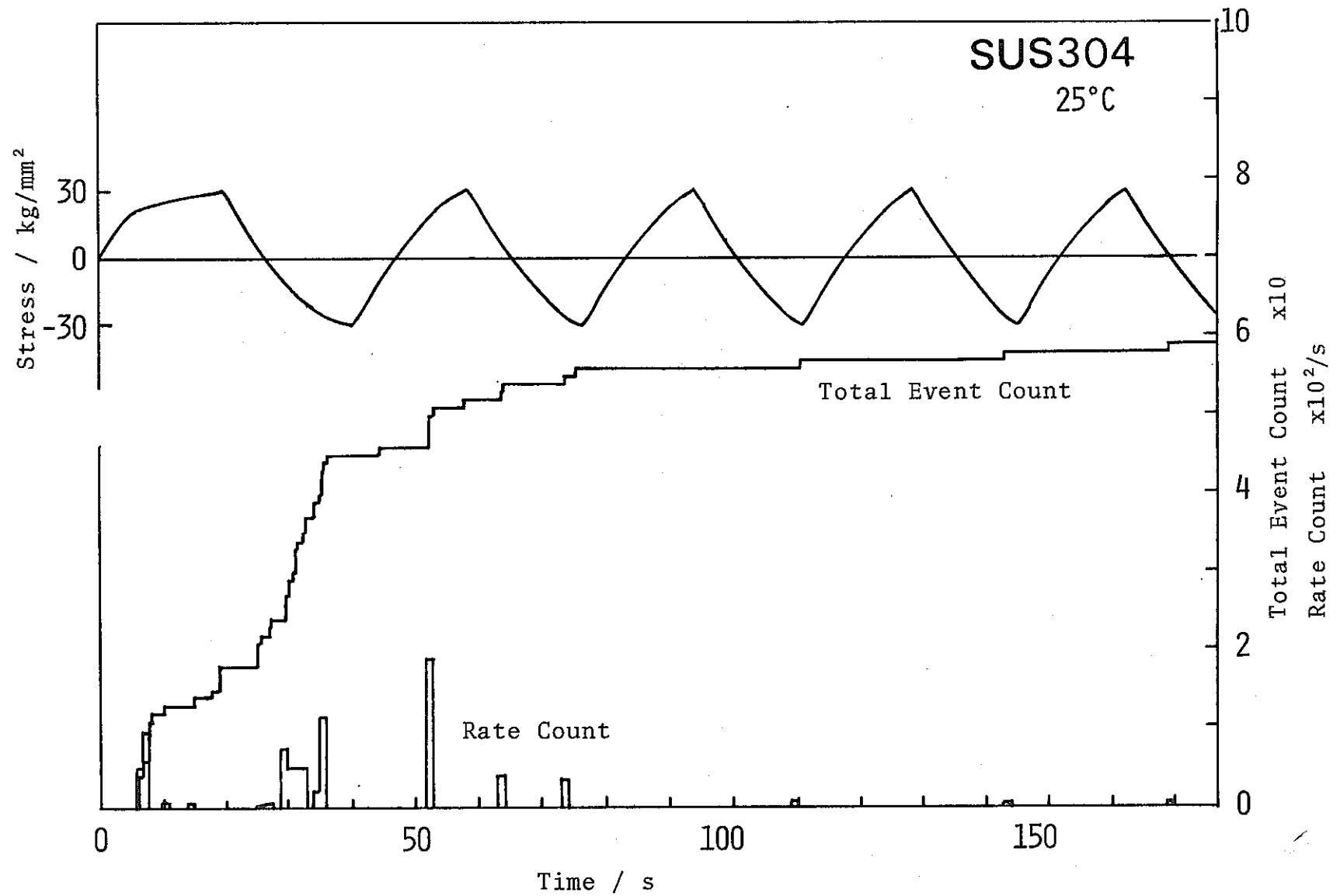


Fig.3.3-5 Acoustic emission behaviour during cyclic deformation.



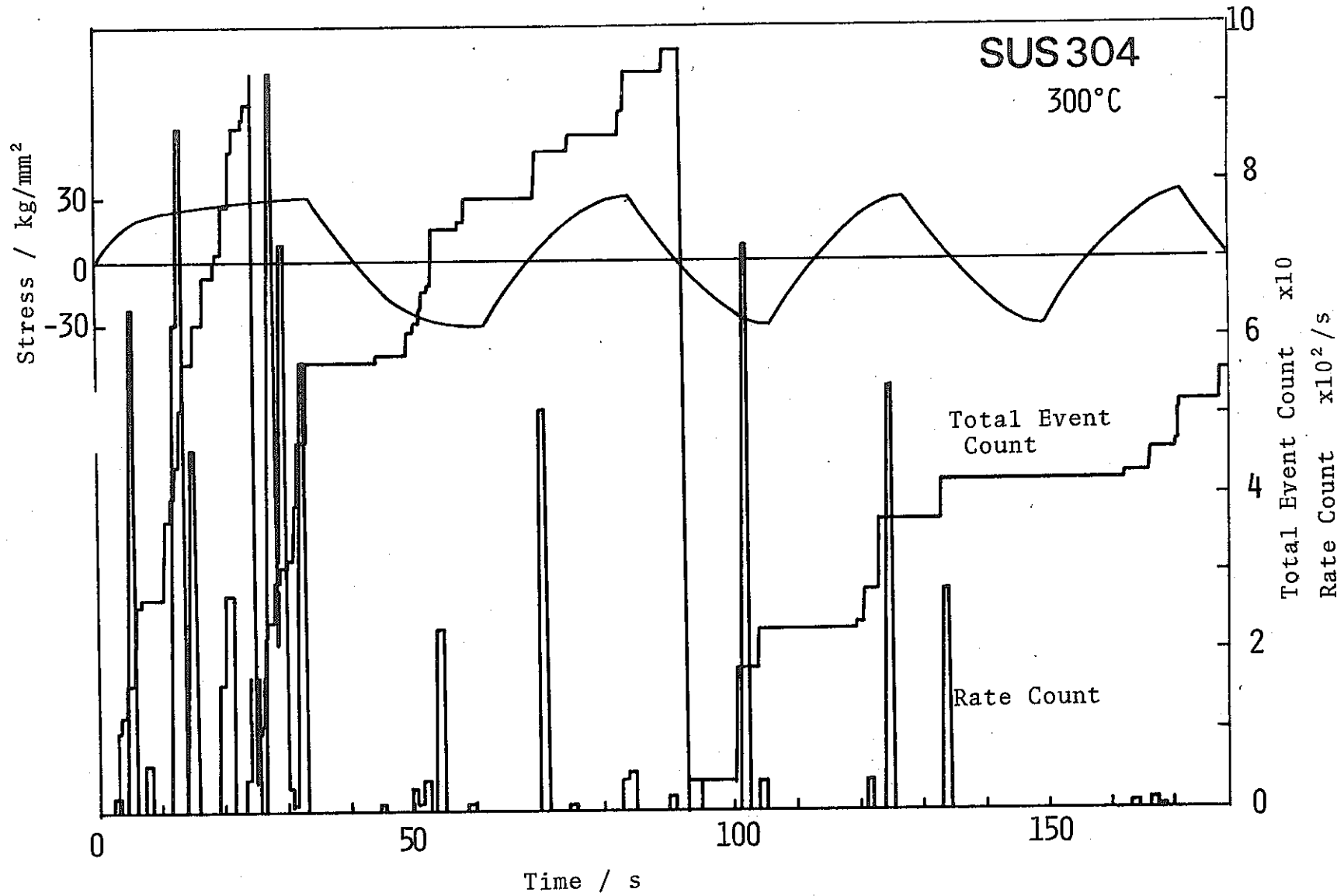


Fig.3.3-6 Acoustic emission behaviour during cyclic deformation.

F A E A E 計測データシート

繰り直し変形過程のA E特性		デグメント番号		責任者名	岸 輝雄・森 康彦	
		記入年月日	1978年5月25日	所属会社名	東大宇宙研・日大生産工	
試験材料	SUS316	試験雰囲気	大気中	試験場所	東京大学宇宙航空研究所	
試験装置	島津オートグラフIS-10T	材料熱処理	支給材	試験片形状	Fig. 3.3-1	
試験目的	平滑材の引張り-圧縮繰り直し変形過程のA Eにおよぼす温度の影響を調べる。					
試験片番号	166-1	166-2	166-3			
試験条件	試験温度	25°C	300°C	600°C		
	クロスヘッド速度	2mm/min	←	←		
	荷重振幅	850Kg	←	←		
試験条件	引張側	0	←	←		
	圧縮側	0	←	←		
	周波数					
	抑制方法	荷重制御		印荷波形	三角波	
A E 計 測			A E 計測装置			
試験片番号	166-1	166-2	166-3			
変換子	変換子名と番号	14Z5 No. 1651	←	←		
	校正曲線	Fig. 3.3-3	←	←		
	取付箇所(導波棒)	Fig. 3.3-2	←	←		
	接合法(カップラント)	シリコングリス	←	←		
増幅器	前置増幅器	40dB	←	←		
	主増幅器	40dB	←	←		
フィルター・周波数帯域	0.1~0.2MHz	←	←			
トリガレベル	10μV	12μV	12μV			
R. M. S. 電圧						
リングダウン & 事象数	Fig. 3.3-8	測定不能	測定不能			
振幅分布						
エネルギー分布						
波形観察						
その他( )						
	前置増幅器	主増幅器		フィルター		位置標定手法
型 式	AE-912	AE-922	型 式	AE-922	分解能	
メーカ	NF	NF	メーカー名	NF	範囲	
ダイナミックレンジ	60dB	60dB	周波数帯域	0.1~10MHz		
備 考						

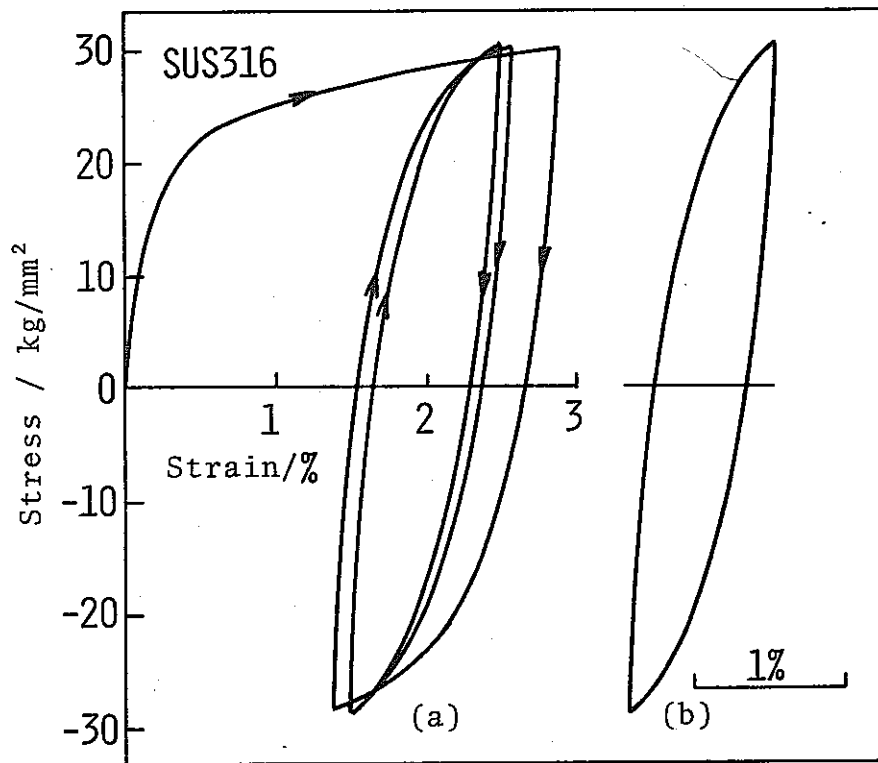


Fig.3.3-7 Stress-Strain curve.

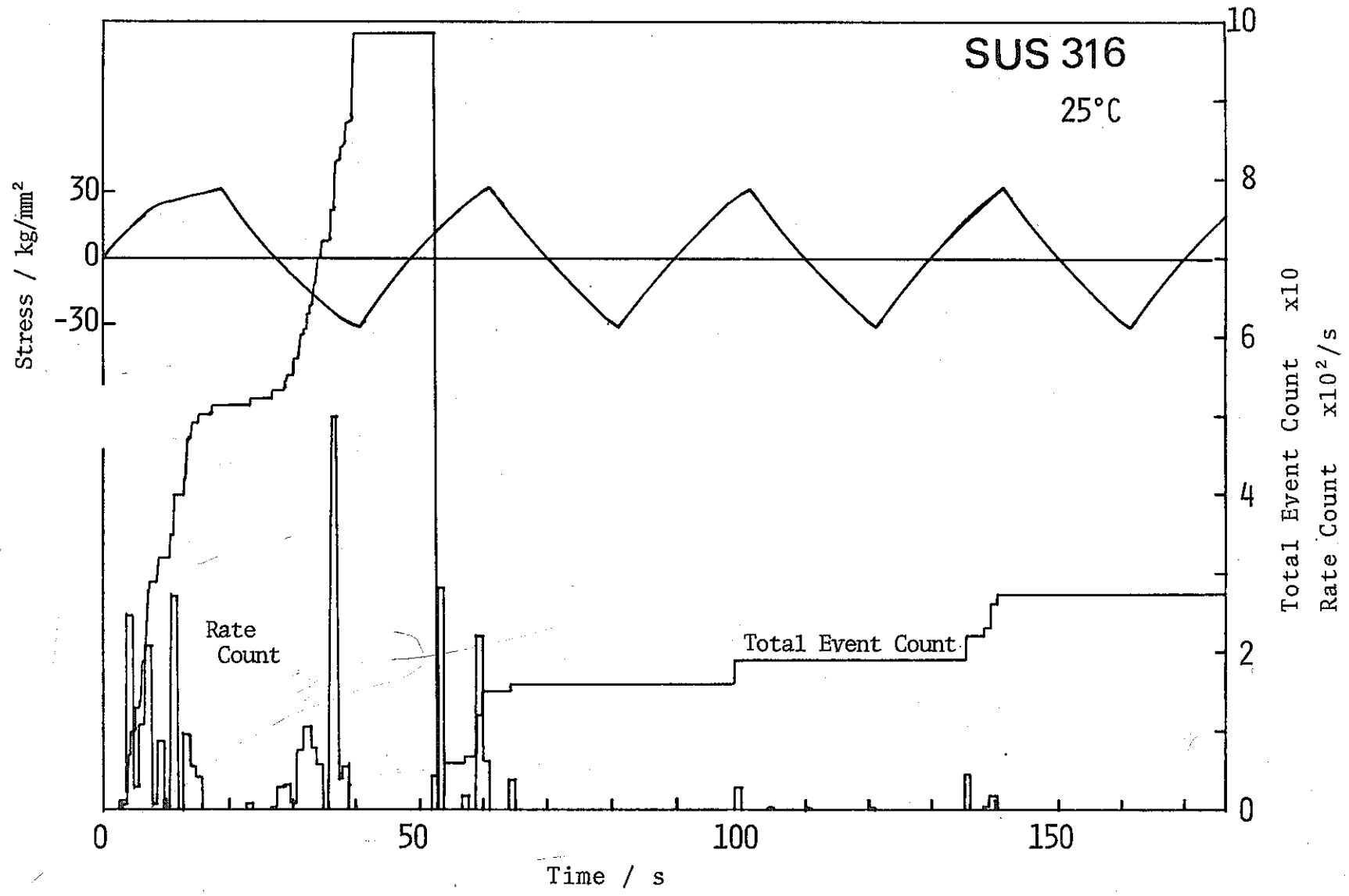


Fig.3.3-8 Acoustic emission behaviour during cyclic deformation.

## 4章 切欠き材の疲労き裂進展に伴う A E

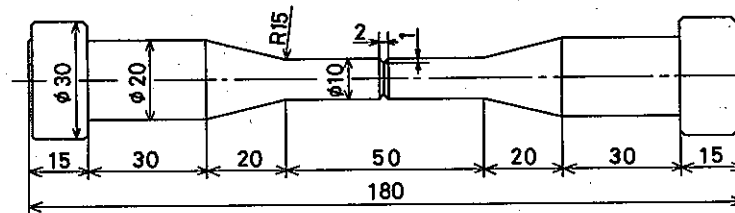
供試材 SUS304, SUS316 の化学成分を Table 4-1 に示す。

疲労試験用に本委員会で定めた F A E 標準疲労試験片の形状と寸法を Fig. 4-1 に示す。

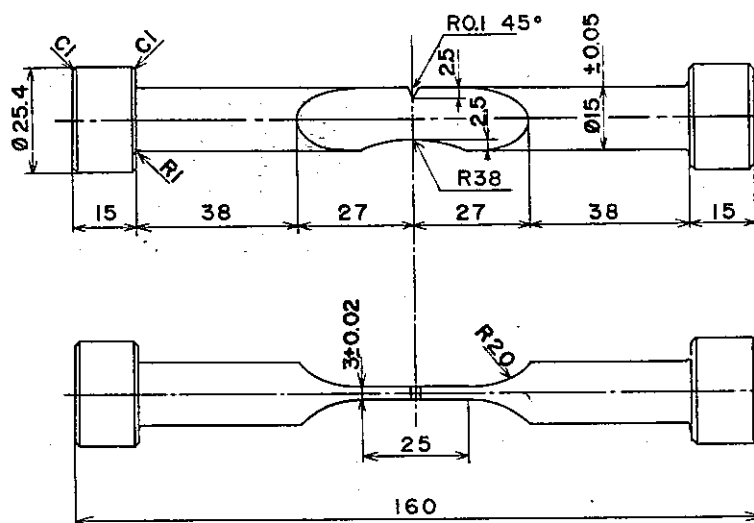
Table 4-1. Chemical composition of the steels used (wt.%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Specimen
SUS304	.06	.41	1.72	.029	.019	8.86	18.31		CN
SUS304	.08	.50	1.89	.025	.013	8.75	19.00		SEN
SUS316	.08	.29	1.35	.022	.021	11.11	16.13	2.34	SEN

Heat treatment 1050°C WQ.



(a) Circular notched specimen.



(b) Single edge notched specimen.

Fig.4-1 FAE standard cyclic fatigue specimens.

## 4.1 SUS304 片側切欠き材の A E 特性

### 4.1.1 目 的

温度をパラメータとした、SUS304 のき裂進展に伴う A E 特性を調べること。

### 4.1.2 試 験 方 法

本試験は、室温、300℃、600℃ の3つの温度下で、疲労き裂発生前から破断までくり返し荷重を加え、き裂進展に伴う A E を計測した。

### 4.1.3 実 験 結 果

#### (1) 有効な A E 信号の分離

本試験は、試験片の両端に 210 mm と 190 mm の導波棒を溶接し、その反対側にそれぞれホーンを取り付けて2つの変換子より A E を計測する方法を用いている。それ故、2つの変換子に到達する信号の時間差より、電気および機械的雑音は取り除くことができる。Fig. 4.1-1 に試験片番号 3005 (600℃) の試験中に測定された到達時間差が示されている。試験片の長さと同導波棒の長さを考慮して、到達時間差 2~30 μsec の A E 信号のみを有効な A E 信号として解析に用いた。

#### (2) くり返しに伴う変化

Fig. 4.1-2~7 に各温度における破断前のくり返しに伴う A E 事象数の変化が示されている。

どの温度条件下でも、くり返しに伴い、換言すれば、き裂長さが長くなるに従って、1サイクル当りの A E 事象数は増加する傾向にある。

温度に関しては、温度上昇に伴い1サイクル当りの A E 事象数は、増加するが、例外的に 300℃ 付近では低下する傾向にある。また、図より理解される様に、破断直前で急激に A E 事象数は増加する。

#### (3) A E 発生位相

Fig. 4.1-8~10 に試験片番号 3003 (300℃) の代表的なき裂進展に伴う A E 発生位相の変化が示されている。

図より理解されるように、き裂長さが長くなるに従って、ある一定の荷重位相で A E が集中的に発生していることが観察された。

また、き裂進展に従って A E 発生荷重位相が圧縮側に移行する傾向がある。

#### (4) 波高分布

Fig. 4.1-11~13 に各温度における破断前の波高分布が示されている。

本試験は、大体 200 サイクルを単位として、それぞれの解析を行ってきたが、この波高分布では A E 事象数が十分でない場合が多く、統計的処理が困難であったので、破断直前の事象数の波高分布が示されている。

#### 4.1.4 結果の評価

- (1) 有効な A E 信号は、到達時間差  $2 \sim 30 \mu \text{sec}$  と決められた。
- (2) き裂進展に伴い A E 事象数は増加し、破断直前では急激な増加を示す。
- (3) き裂長さが長くなると、徐々にある荷重位相で集中的に A E 発生がみられた。さらに、その荷重位相レベルは圧縮側に移行する傾向にある。
- (4) 収録された A E 事象数が少ないため、波高分析による A E 波の傾向を知るにはデータ不足であった。

F A E A E 計測データシート

切欠材の疲労き裂進展に伴うAE		データシート番号		責任者名	岸 輝雄・森 康彦		
		年月日	1978年1月17~28日	所属会社名	東大宇宙研・日大生産工		
試験材料	SUS304	試験雰囲気	空気中	試験場所	動燃・大洗工学センター		
試験装置	鷺宮製引一圧疲労試験機	材料熱処理	支給のまま	試験片形状	平板片側切欠付		
試験目的	温度をパラメータとしたき裂進展に伴うAE特性を調べる。						
試験片番号	3003		3004		3005		
試験条件	試験温度	300℃		R.T.		600℃	
	ひずみ速度						
	荷重振幅	547kg		600kg		470kg	
疲労試験条件	ひび保持時間	引張側	0.1s	0.1s		0.1s	
		圧縮側	0.1s	0.1s		0.1s	
	周波数	1/10.2		1/10.2		1/10.2	
	制抑方法	荷重制御		印荷波形	台形波・完全両振り		
A E 計 測		A E 計測装置	A E 総合計測解析システム A E S O P (岩通製)				
試験片番号	3003		3004		3005		
変換子	変換子名と番号	D/E D9203		D/E D9203		D/E D9203	
	校正曲線						
	取付個所(導波棒)	φ4. ホーン付	$\frac{\pm 210}{\text{下 } 190} \text{mm}$	φ4. ホーン付	$\frac{\pm 210}{\text{下 } 190} \text{mm}$	φ4. ホーン付	$\frac{\pm 210}{\text{下 } 190} \text{mm}$
	接着法(カップラント)	ACV9(D/E)		ACV9(D/E)		ACV9(D/E)	
増巾率	前置増巾器	40dB		40dB		40dB	
	主増幅器	20dB		20dB		20dB	
フィルター・周波数帯域	100~500KHz		100~500KHz		100~500KHz		
トリガーレベル	100μV		100μV		100μV		
R.M.S. 電圧							
事 象 数	4.1-4~5	4.1-8-10	4.1-2~3		4.1-6~7		
振 幅 分 布	4.1-12		4.1-11		4.1-13		
エネルギー分布							
波形観察							
その他(到達時間差)					4.1-1		
	前置増巾器	主増巾器		フィルター		位置標定手法	
型 式	801 P	SM-7261A	型 式	SM-7262A	分解能	2~3 cm	
メ - カ -	D/E	岩 通	メーカー名	岩 通	範 囲		
ダイナミックレンジ	60dB	60dB	周波数帯域				
備 考							



#3003 切欠付試験 at 300°C ±546.5 kg

	クラックサイズ	サイクル数	イベント数#	備 考
1	initial	0 ~ 200	14	
3	0.66 ~	10,119 ~ 10,318	70	
4	1.25 ~	15,000 ~ 15,200	73	
5	1.35 ~	16,272 ~ 16,472	200	
6	1.74 ~	18,105 ~ 18,305	271	
E	5.93 ~	22,029 ~ 22,044	181	to vupture

#  $2 \leq \Delta t_{12} \leq 30$  を満足するもの

#3004 切欠付試験 at RT ±600 kg

	クラックサイズ	サイクル数	イベント数#	備 考
1	initial	0 ~ 200	0	
3	0.10 ~ 0.19	10,029 ~ 10,229	0	
4	0.50 ~ 0.56	30,025 ~ 30,225	0	
5	0.97 ~ 1.02	50,000 ~ 50,200	8	
6	1.25 ~ 1.33	60,000 ~ 60,200	117	
7	2.47 ~ 2.63	78,866 ~ 79,066	889	サイクルカウンタにノイズ入り
10	2.68	79,100 ~ 79,500	791	$T_3 = 0.5 \text{ sec}$
11	~ 2.94	79,500 ~ 79,700	358	
12		79,713 ~ 79,734		
13	2.94 ~	79,734 ~ 81,259	3,925	to vupture

#3005 切欠付試験 at 600°C

	クラックサイズ	サイクル数	イベント数#	備 考
1	initial	0 ~ 200		
5	0.69 ~	5,000 ~ 5,200		
10	1.92 ~ 2.37	10,000 ~ 10,200		
12	2.37	10,240 ~ 10,250		圧縮保持 100秒
13	2.37	10,250 ~ 10,260		引張保持 100秒
14	2.37 ~	10,260 ~ 10,609		to vupture

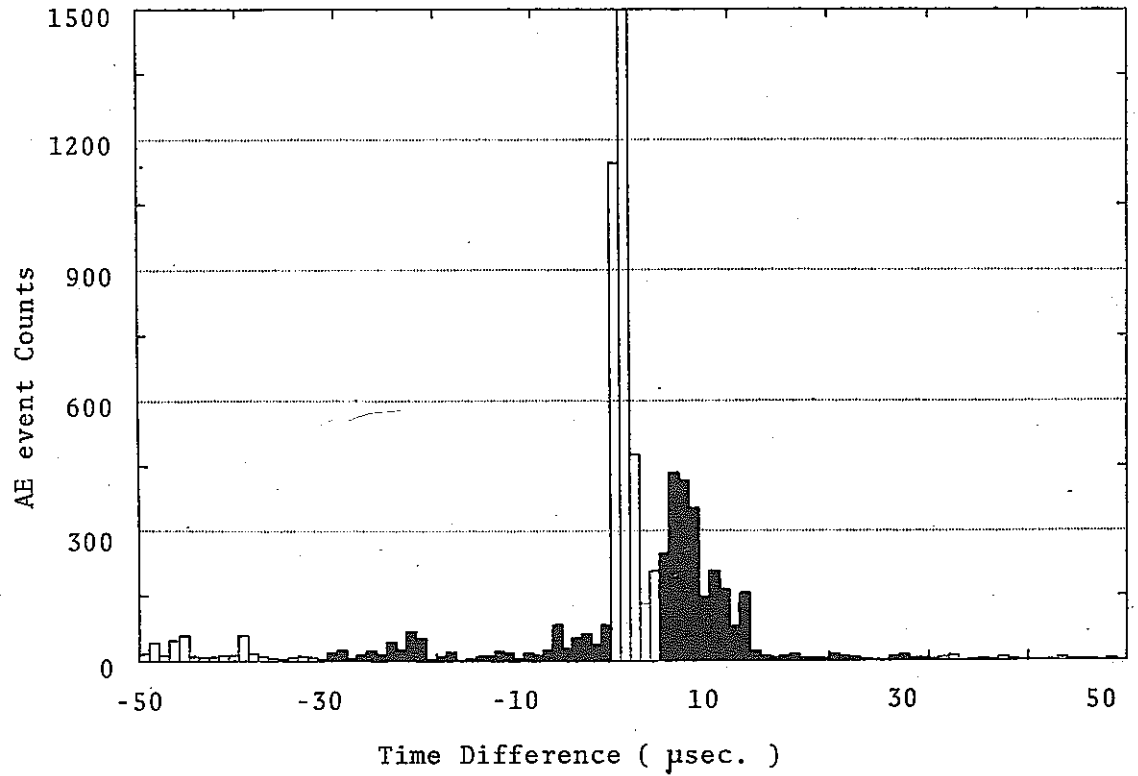


Fig.4.1-1. The arrival time difference of AE signals.

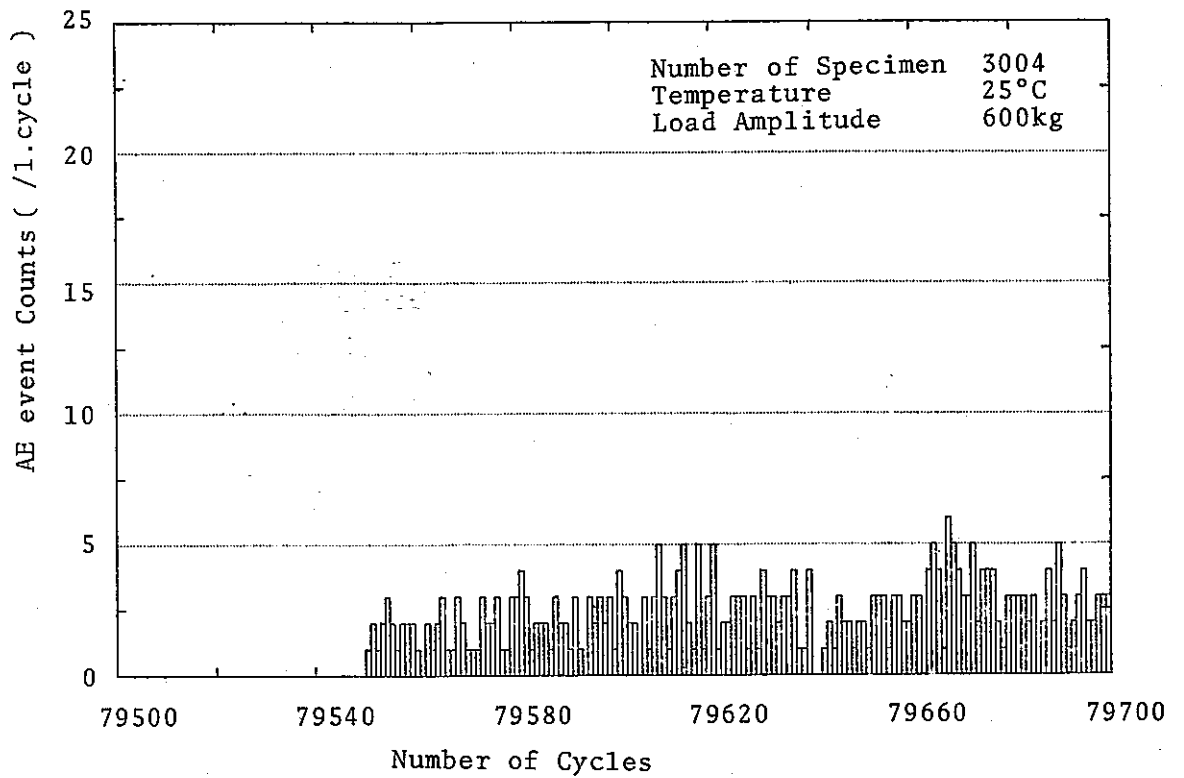


Fig.4.1-2. The variation of AE event counts with number of cycles

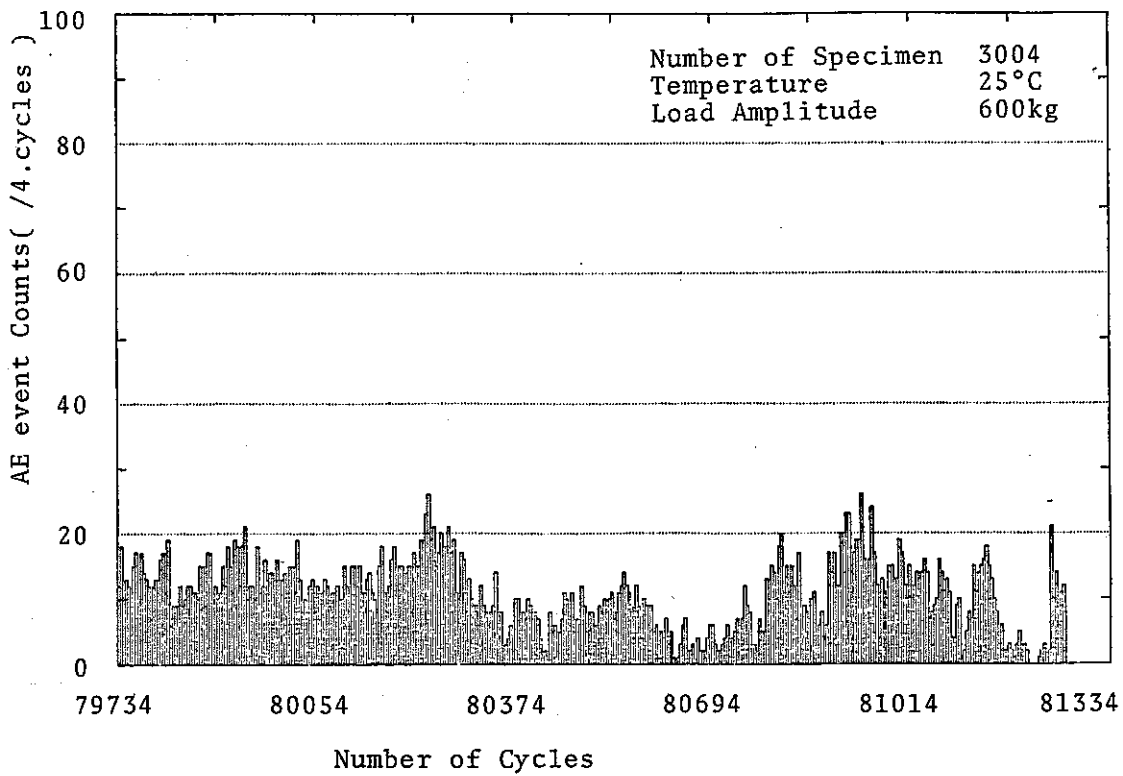


Fig.4.1-3. The variation of AE event counts with number of cycles

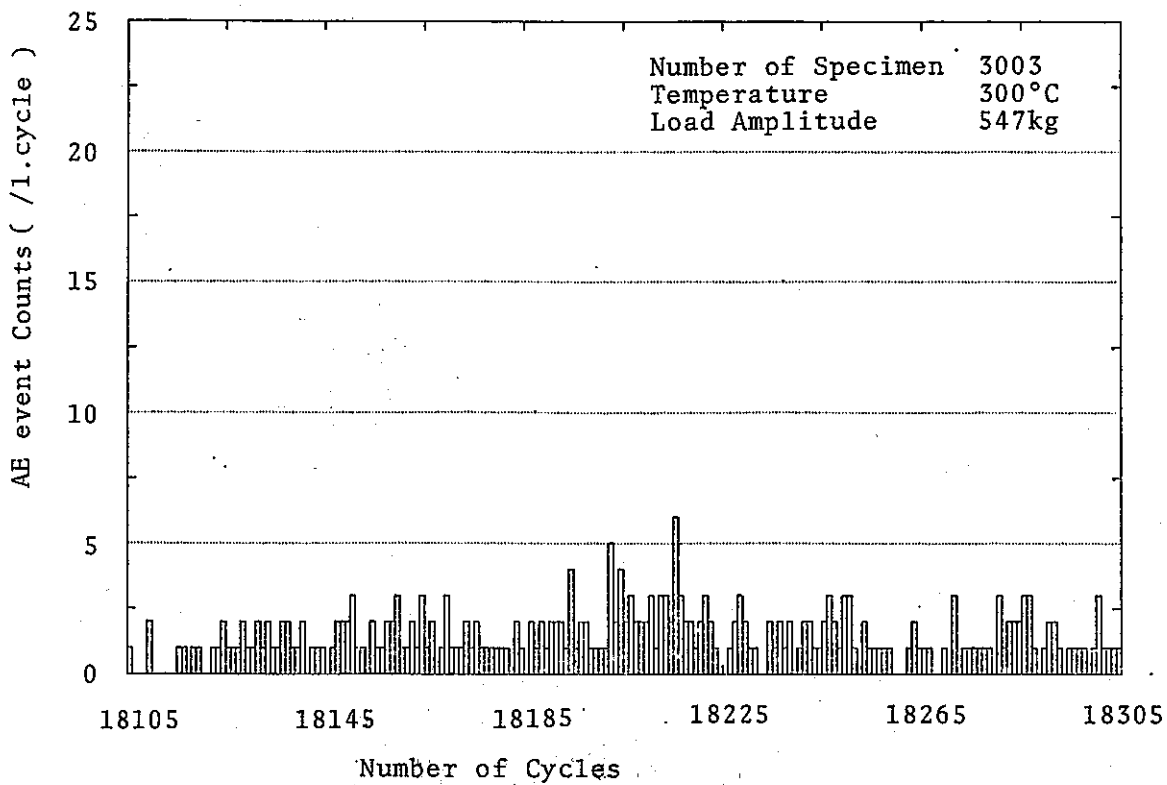


Fig.4.1-4. The variation of AE event counts with number of cycles.

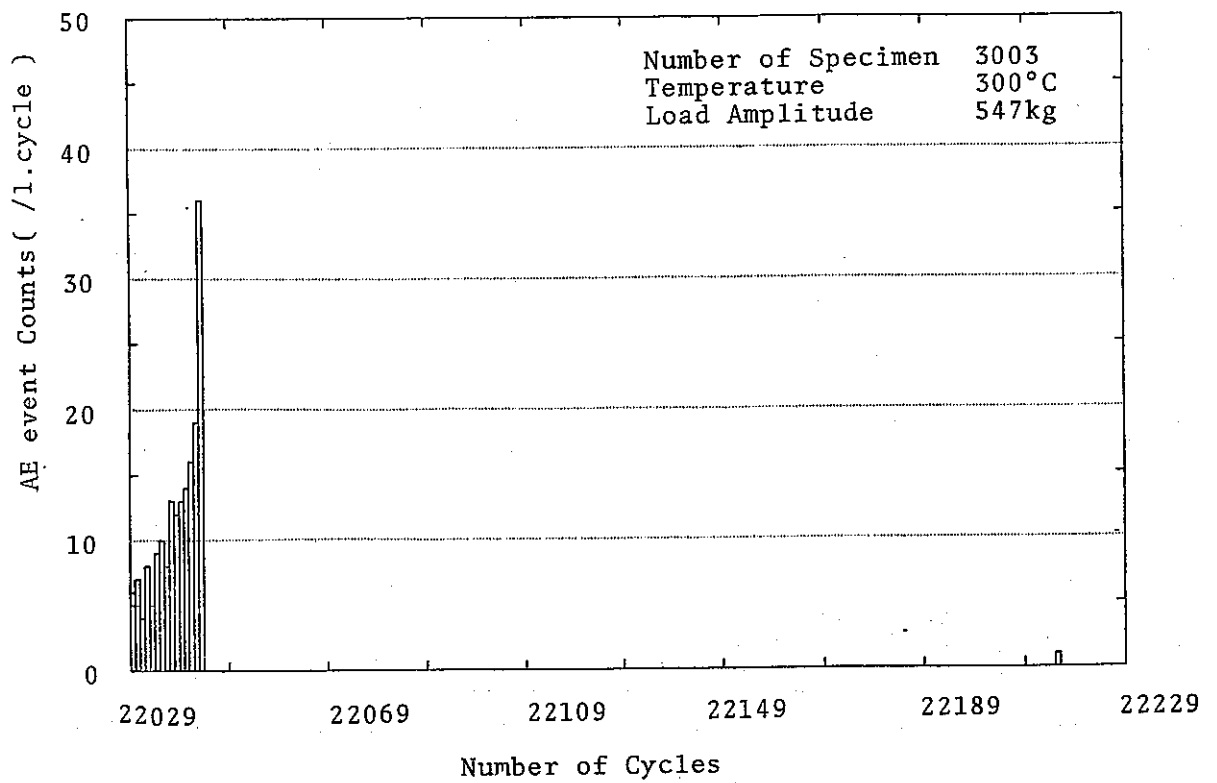


Fig.4.1-5. The variation of AE event counts with number of cycles.

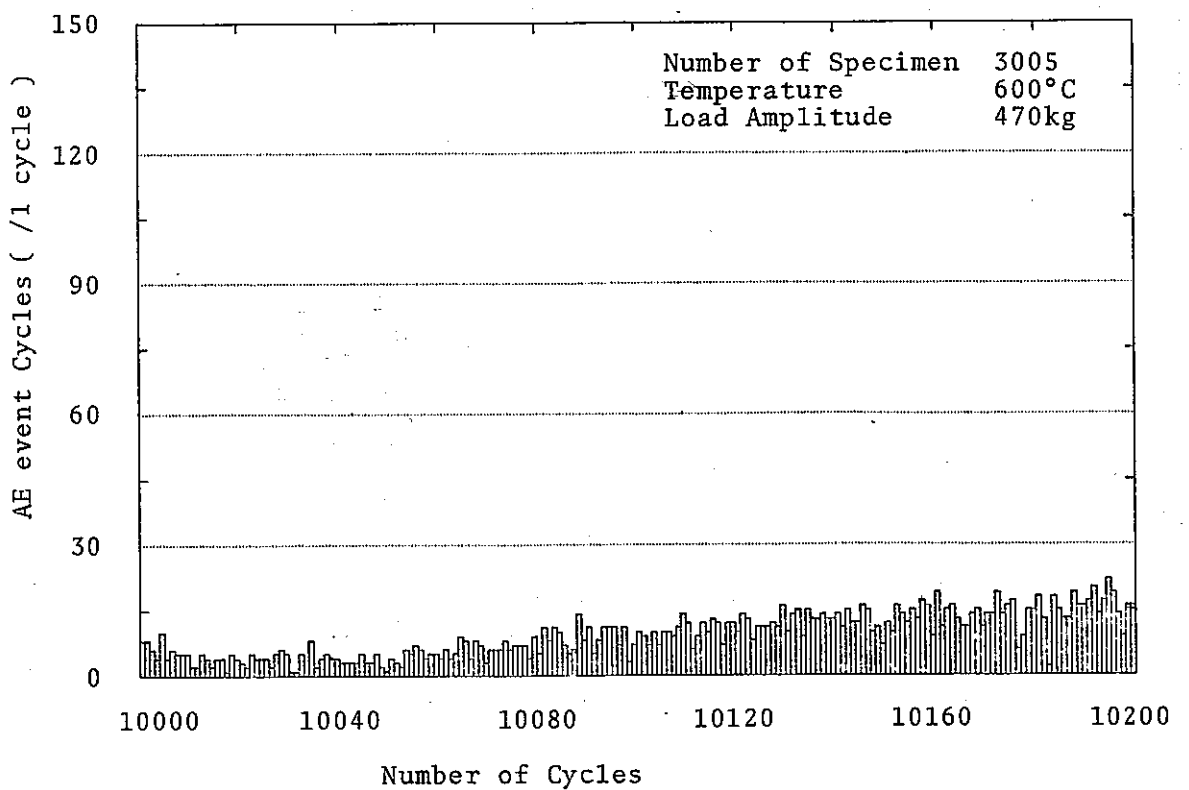


Fig.4.1-6. The variation of AE event counts with number of cycles.

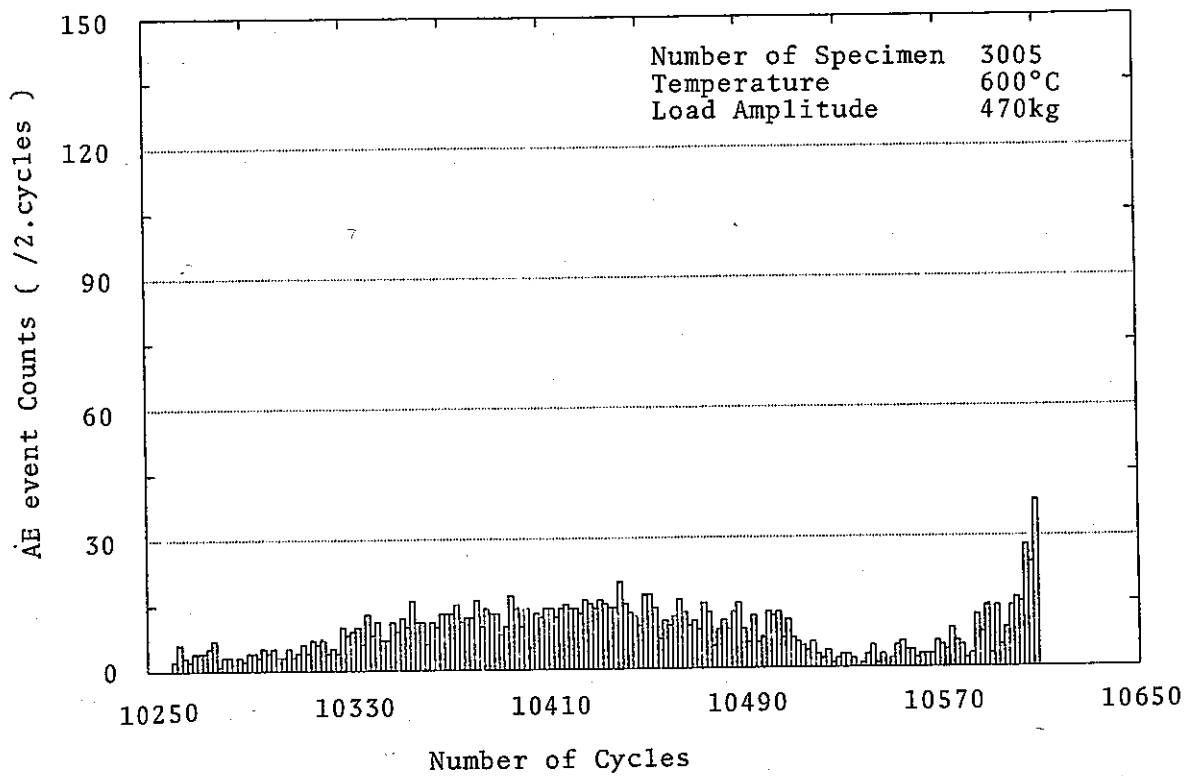


Fig.4.1-7. The variation of AE event counts with number of cycles.

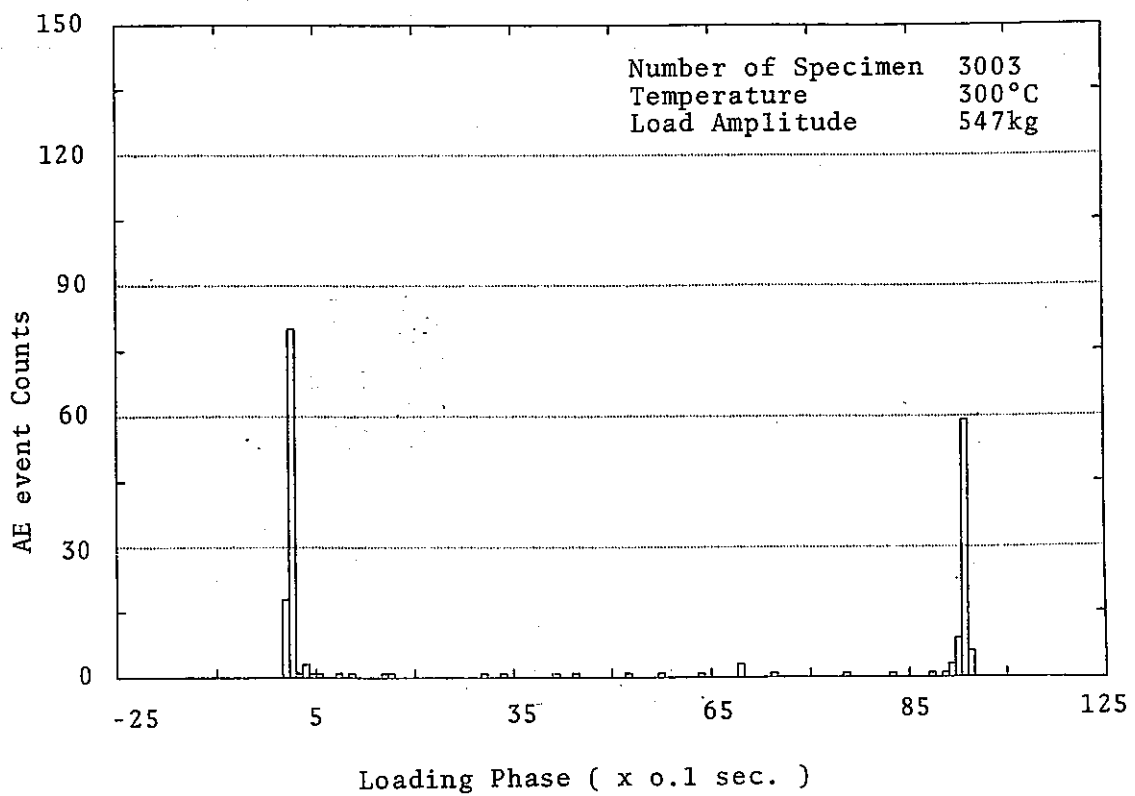


Fig.4.1-8. The relation between AE generation and loading phase.

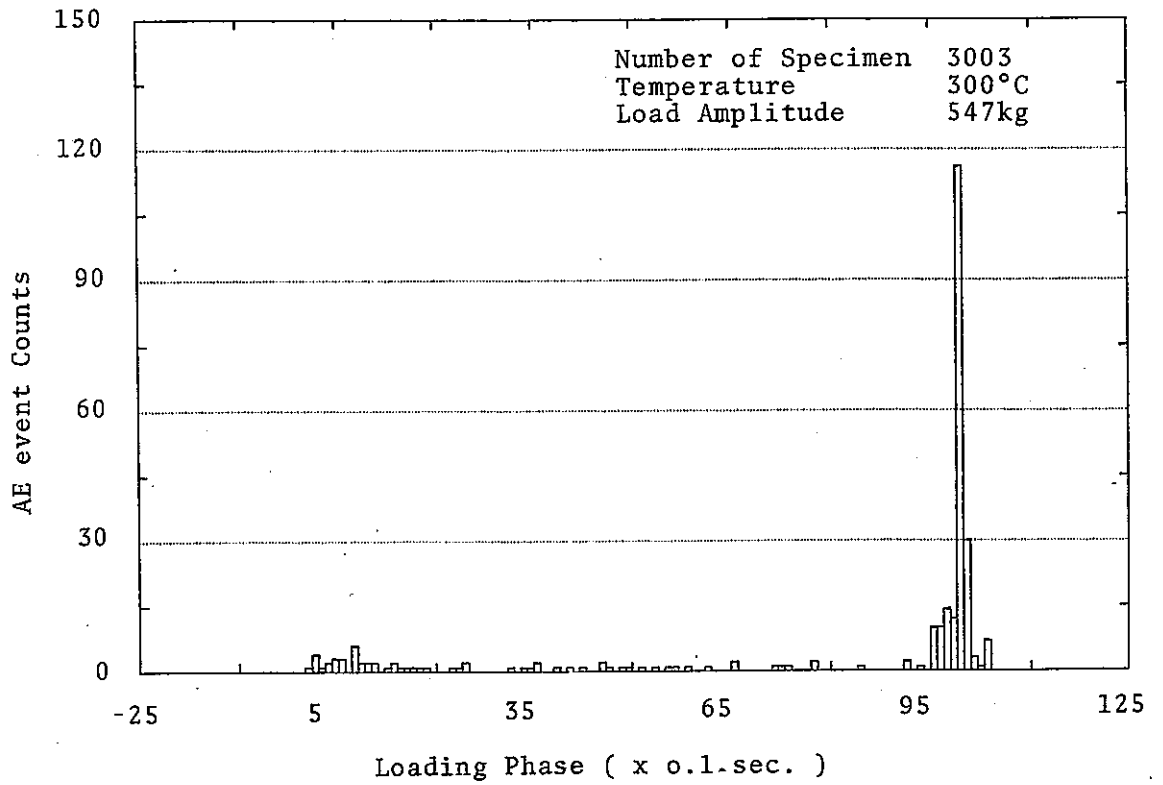


Fig.4.1-9. The relation between AE generation and loading phase.

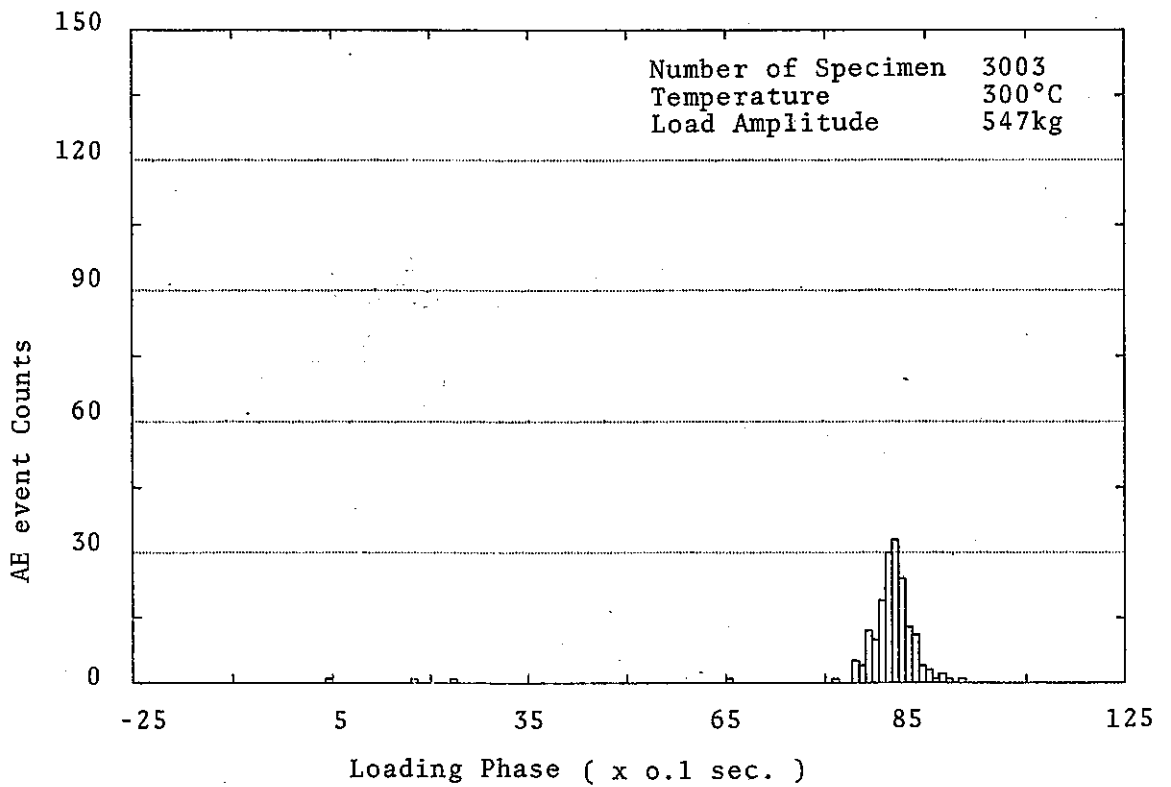


Fig.4.1-10. The relation between AE generation and loading phase.

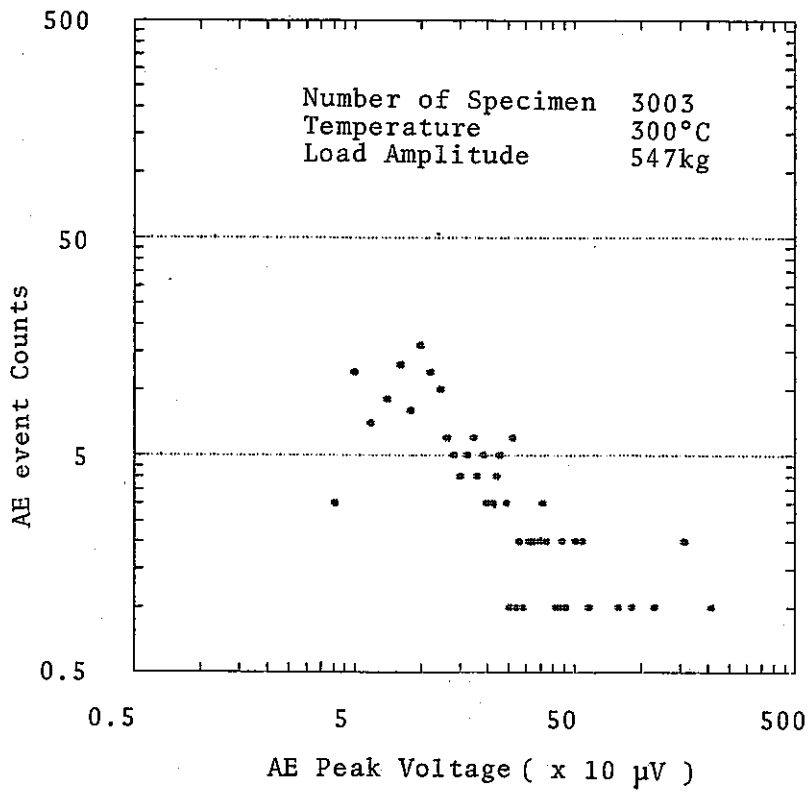


Fig.4.1-11. AE pulse height distribution.

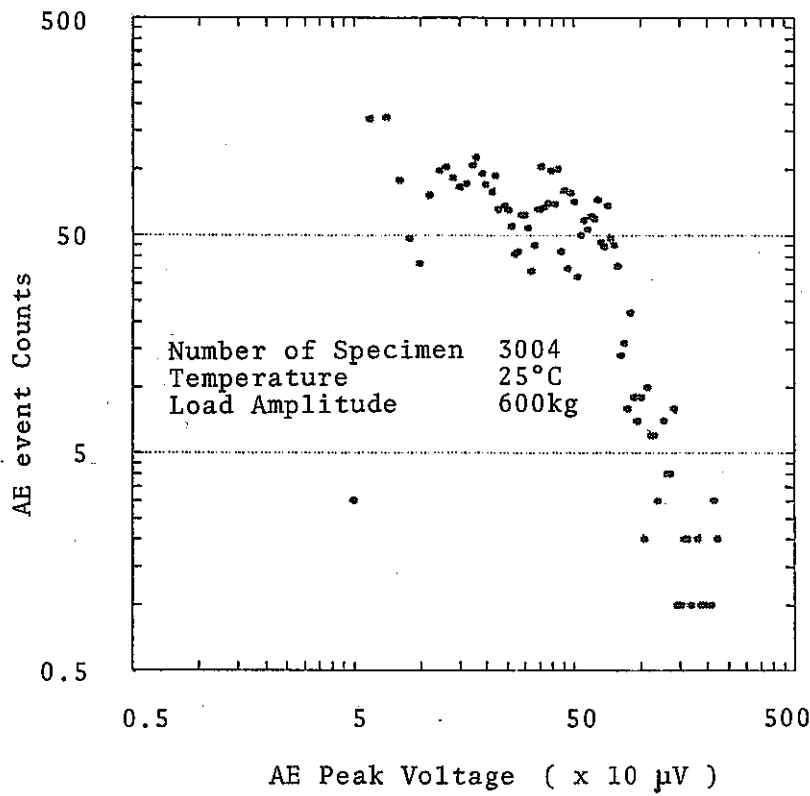


Fig.4.1-12. AE pulse height distribution.

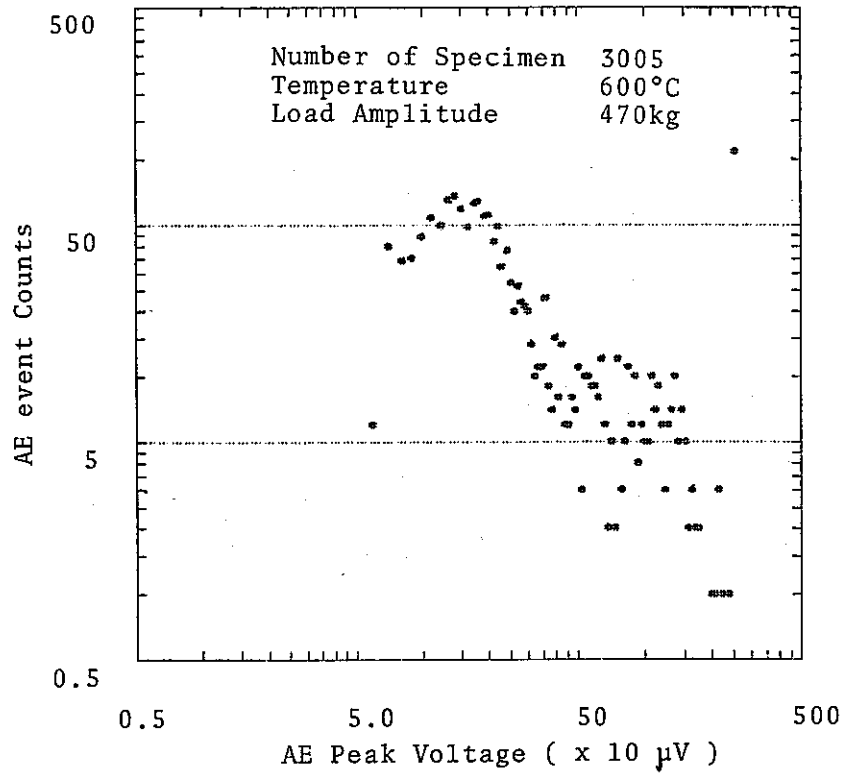


Fig.4.1-13. AE pulse height distribution.

72



## 4.2 SUS304 環状切欠き材の A E 特性

### 4.2.1 目的

温度，応力振幅，応力負荷速度および応力保持時間をパラメータとした，繰り返し変形に伴う A E 特性を調べる。

### 4.2.2 試験方法

試験片切欠き底に事前に室温において疲労き裂を導入した試験片の引張り - 圧縮による疲労試験を，室温から 600°C の温度範囲について行い，A E を計測した。

試験条件を定めるにあたって以下の点を考慮した。

- 1) 試験温度は，実機で予想される温度条件が十分含まれるよう，室温より 600°C までの範囲とする。
- 2) 代表的応力レベルとしては，切欠き底で室温にて降伏応力となるように設定し，台形波，完全両振りとした。
- 3) 温度比較は，応力レベルをヤング率補正し，グロスなひずみレベルが各温度間で同一となるようにして行った。
- 4) 代表的荷重立上り時間は，切欠き部におけるグロスなひずみ速度がほぼ  $4 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$  となるようにした。
- 5) 上下荷重保持時間は同一とし，特に高温域における保持時間の効果を調べた。
- 6) Kaiser 効果による影響を最低限に留めるため，応力振幅をパラメータとした加振は，600°C において行った。
- 7) A E 信号採取は，各条件で加振サイクルの 20 サイクルについて行った。

### 4.2.3 A E 試験の結果

#### 1. 位置標定 - 有効な A E 信号の決定

結果の一例を Fig. 4.2-3 に示す。この結果より，到達時間差 30  $\mu\text{sec}$  以内の信号を，試験片切欠き部近傍からの有効な A E 信号と判別する。

#### 2. 温度の影響

##### (i) A E 発生率の温度依存性

結果を Fig. 4.2-4，Fig. 4.2-5 に示す。

##### (ii) 波高分布の温度依存性

結果を Fig. 4.2-6 に示す。

##### (iii) A E の発生と荷重サイクル中の位相との関係

結果を Fig. 4.2-7，Fig. 4.2-8 に示す。

#### 3. 保持時間の影響

結果を Fig. 4.2-9 に示す。

#### 4. ひずみ速度の影響

結果を Fig. 4.2-10 に示す。

#### 5. 応力振幅の影響

結果を Fig. 4.2-11 に示す。

#### 4.2.4 結果の評価

##### 1. 有効な A E 信号の弁別

時間差測定および機械、電気雑音監視用のダミー変換子を用いることにより、外来雑音と A E 信号の弁別は可能である。

##### 2. 温度依存性

負荷当初の A E 発生率は温度上昇に伴い、単調に著しく増加し、A E 発生率は繰り返しとともに安定する。安定後の A E 発生率は温度上昇とともに増加するが、必ずしも単調とはいえない。

A E の波高は、温度上昇とともにやや増加する。

##### 3. A E の発生と荷重位相との関係

比較的低温域では特定の荷重位相に A E の発生が集中することは認められなかった。660 °C においては、最大圧縮荷重からの応力反転位相で特に著しい A E の活性が見られた。

##### 4. 応力保持時間の影響

600 °C においては、保持時間が増すと、A E 発生率は高く得られ、また、発生位相のピークは最大圧縮応力側に移行する。

##### 5. ひずみ速度の影響

600 °C においては、ひずみ速度が小さいほど、1 サイクル当りの A E 発生率は増す。

##### 6. 応力振幅の影響

600 °C においては、応力振幅が増加するにつれ、A E 発生率は著しく増大する。

##### 7. 以上の結果より、高温における A E の発生要因としては、き裂面の圧着からの解放、あるいは、き裂底部の回復に伴う再降伏によるものと推定される。しかし、A E 発生要因を断定するには、より多くのデータの集積が必要である。

S U S 3 0 4		データシート 番号					責任者名	岸 輝雄・森 康彦	
環状切欠き材の A E 特性		年 月 日	1977 年 7 月 4 ~ 17 日				所属会社名	東大宇宙研・日大生産工	
試験材料		試験雰囲気	大 気 中				試験場所	動燃・大洗工学センター	
試験装置	減音, 引張-圧縮疲労試験機	材料熱処理	支 給 材				試験片形状	環状切欠き付試験片	
試験目的	温度, 応力振幅, 応力負荷速度および応力保持時間をパラメータとした繰り返し変形に伴う A E 特性を調べる。								
試験片番号	77-04-1	77-04-2	77-04-3	77-04-4	77-07-5	77-07-6	77-07-7		
試験条件	試験温度	R. T.	200 °C	400 °C	600 °C	600 °C	←		←
	ひずみ速度	$4 \times 10^{-4} S^{-1}$	←	←	←	$4 \times 10^{-4} S^{-1}$	$4 \times 10^{-5}$ ~ $4 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-4} S^{-1}$	
	荷重振幅	1000 kg	947 kg	867 kg	767 kg	767 kg	←		387~ 1153kg
疲労試験条件	ひ保持 ず時間	引張側	10 s	←	←	←	1, 10, 100	10	10
		圧縮側	10 s	←	←	←	1, 10, 100	10	10
	周波数	1/30	←	←	←				1/30
抑制方法	荷重制御			印荷波形	台形波・完全両振り				
A E 計 測		A E 計 測装置	A E 総合計測解析システム A E S O P (岩通製)						
試験片番号	77-04-1	77-04-2	77-04-3	77-04-4	77-07-5	77-07-6	77-07-7		
変換子	変換子名と番号	D/E SP201							
	校正曲線								
	取付個所(導波棒)	$\phi 10 \times \frac{210}{230}$ 全て 77-04-1 に同じ							
	接着法(カップラント)	D/E ACV9							
増巾率	前置増巾器	40dB							
	主増幅器	40dB							
	フィルター・周波数帯域	0.1-0.5MHz							
	トリガーレベル	30μV							
	R. M. S. 電圧								
事 象 数	Fig. 4.2-4.5 7.8	同 左	同 左	同 左	Fig. 4.2-9	Fig. 4.2-10	Fig. 4.2-11		
振 幅 分 布	Fig. 4.2-6.8	"	"	"		"	"		
エ ネ ル ギ ー 分 布									
波 形 観 察									
その他(到達時間差)	Fig. 4.2-3								
	前置増巾器	主増巾器		フィルター		位置標定手法			
型 式	D/E 801 P	SM 7261	型 式	SM 7262 A	分解能	2~3 cm			
メ ー カ ー	D/E	岩 通	メーカ名	岩 通	範 囲				
ダイナミックレンジ	60dB	60dB	周波数帯域						
備 考									

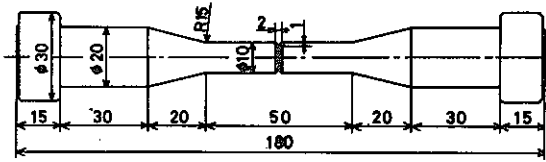


Fig. 4.2-1 Fatigue test specimen. Dimensions in millimeters.

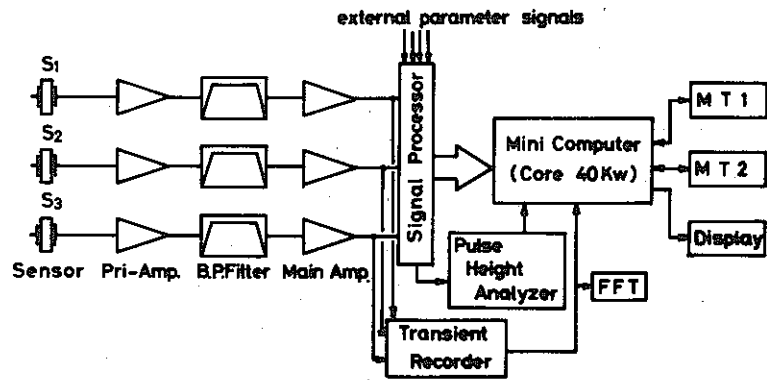


Fig. 4.2-2 Schematic arrangement of the acoustic emission analysis system used in this work.

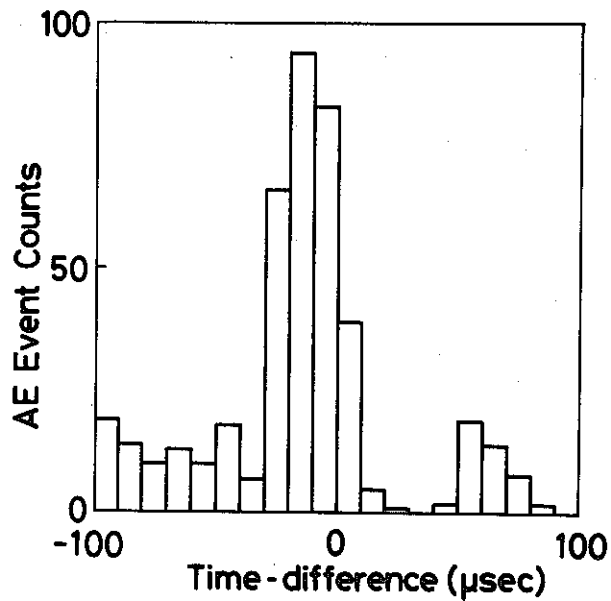


Fig. 4.2-3 The arrival time difference of AE signals.

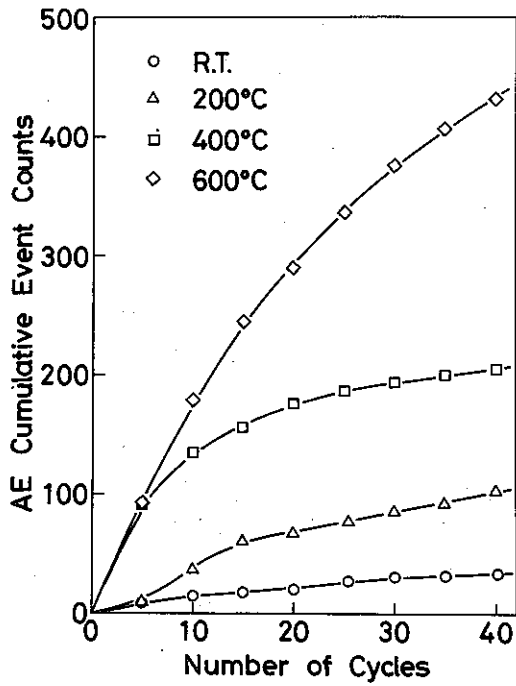


Fig. 4.2-4 Acoustic emission activity as a function of the number of fatigue cycles at various temperatures. Stress amplitude  $\sigma^*$ , nominal strain rate  $4 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ .

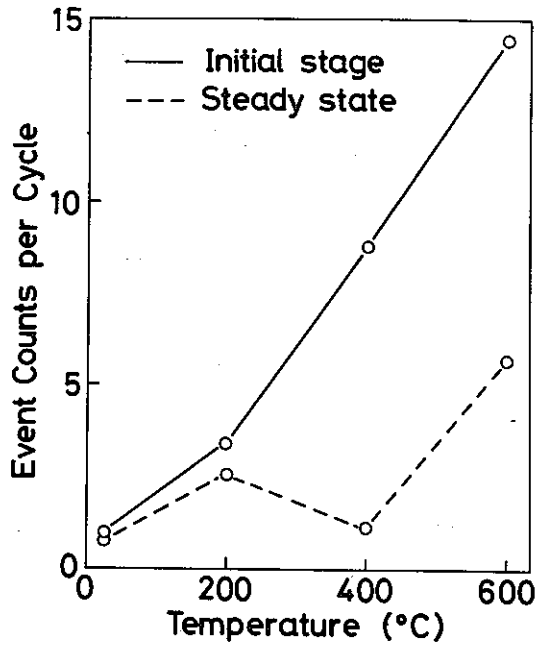


Fig. 4.2-5 Acoustic emission activity as a function of the temperature.

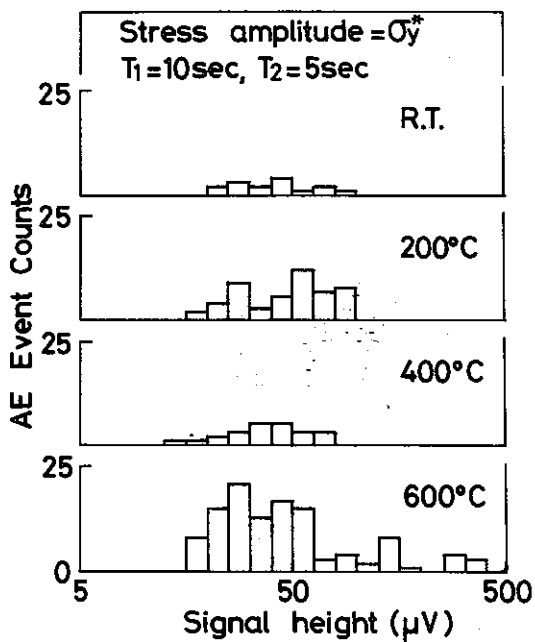


Fig. 4.2-6 Amplitude distributions of acoustic emission events at various temperature. The emission signals were detected above  $30 \mu\text{V}$  peak at the preamplifier input.

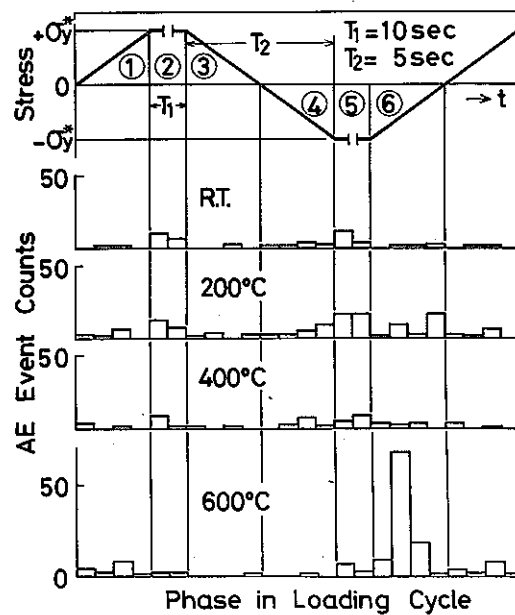


Fig. 4.2-7 Relation between emission event counts and phase in loading cycle at different temperatures.

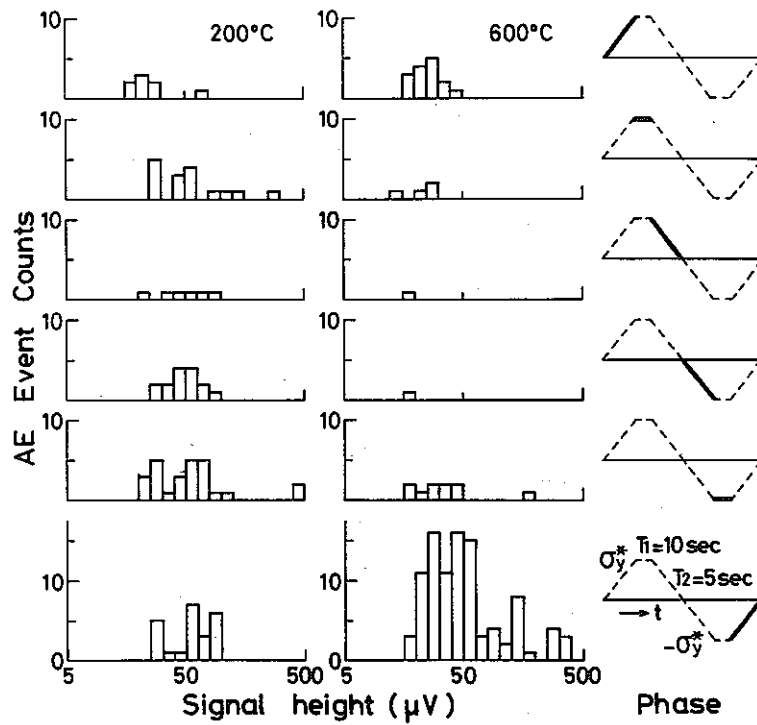


Fig. 4.2-8 Amplitude distributions of emission events at different phase in loading cycle. Stress amplitude  $\sigma_y^*$ , nominal strain rate  $4 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ , hold periods 10 sec.

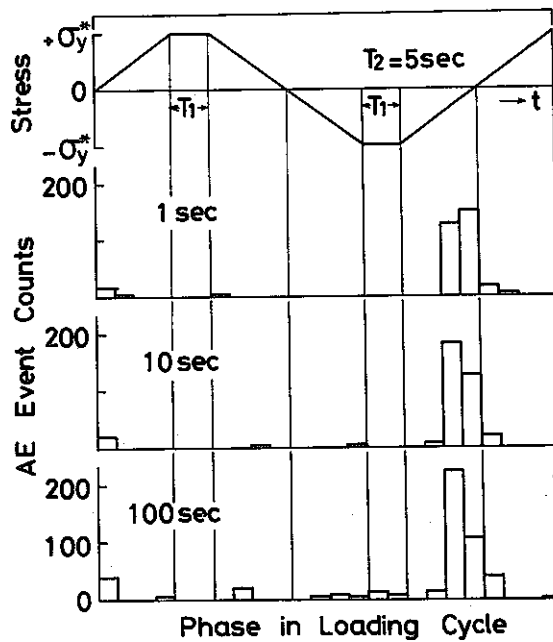
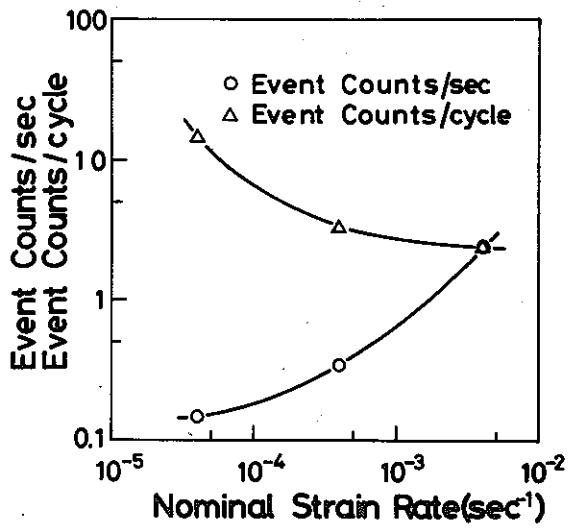
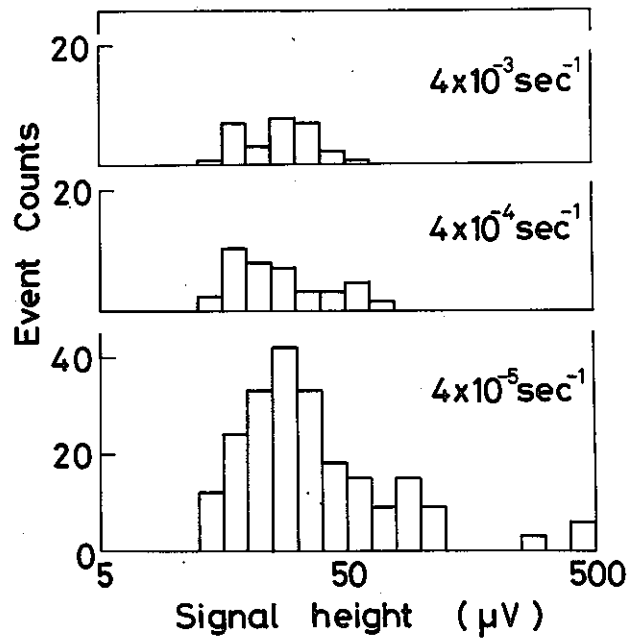


Fig. 4.2-9 Effect of hold periods on the relation between emission event counts and phase in loading cycle at 600°C.

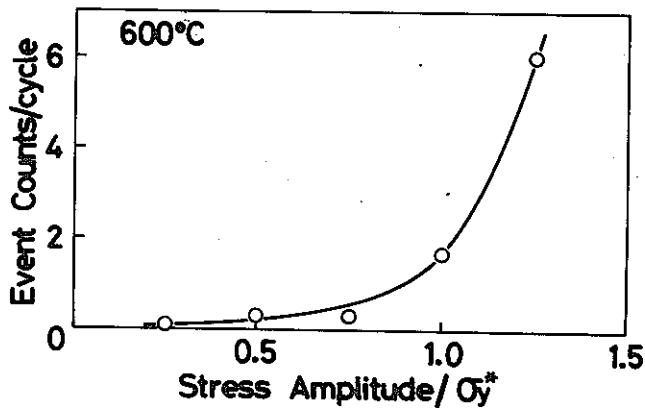


(a)

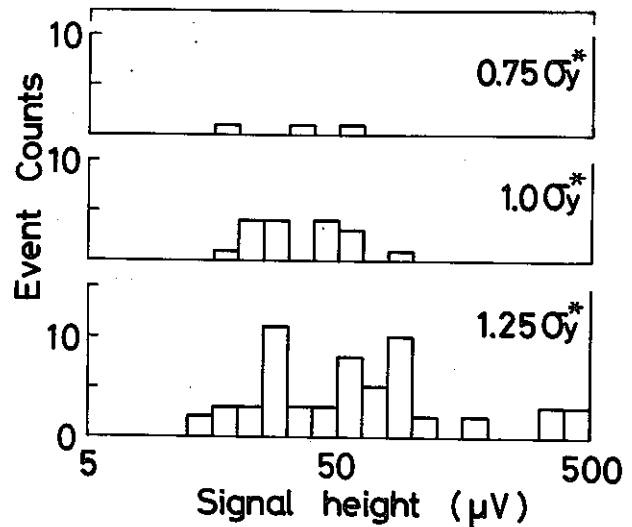


(b)

Fig. 4.2-10 Effect of nominal strain rate on acoustic emission activity at 600°C : (a) Relation between event count rate and strain rate and (b) amplitude distributions of events. Stress amplitude  $\sigma_y^*$ , hold periods 10 sec.



(a)



(b)

Fig. 4.2-11 Effect of stress amplitude on acoustic emission activity at 600°C : (a) Relation between event counts per cycle and stress amplitude and (b) amplitude distributions of events.

#### 4.3 SUS316 片側切欠材のA E特性

##### 4.3.1 目的

SUS316について、予き裂を入れた試験片を用い引張一圧縮による低サイクル疲労試験を行い、温度、応力振幅などの試験条件下での亀裂進展評価のためのA E特性の検討を行う。

##### 4.3.2 試験方法

###### 1 供試材と試験片形状

供試材：SUS316 (FAE小委からの支給材)

試験片の形状と寸法：図4.3-1

###### 2 材料試験装置と計測法

材料試験機：

(1) 予き裂導入には アームスラー高サイクル(160 Hz 使用)試験機

(2) 低サイクル試験には 島津油圧式低サイクル試験機

荷重測定：ロードセル(5 ton)

温度制御装置：PIV 制御(自製の炉を作製して使用)

###### 3 材料試験条件

加振条件

(1) 予き裂導入には 荷重振幅0~900 kgとし、160 Hz

(2) 低サイクル試験では、台形波、完全両振り

立上り5秒、保持時間10秒とした。

###### 4 A E計測方法

###### (1) A E計測機器

基研A Eコンピュータ制御解析装置

ブロック図(制御)を図4.2-2に示す。

###### (2) 使用変換子

FAE小委支給のもの014Z-10の1569及び1570

但し前置増巾器及び変換子間のノイズレスケーブルが細いためノイズの混入があり、これをふせぐためアース線を附加して使用。

###### (3) 変換子および導波棒の取り付け法

導波棒： A 10 φ × 372 材質 SUS304

B 10 φ × 400 "

変換子-導波棒：カプラント AC-V9 (D/E社製)を介して圧着

導波棒-試験片：10 φの導波棒の先端に4 φのつぎてを出して試験片に4 φの穴をあけてねじ止め、カプラントとしてスミセラムを使用

###### (4) 増幅系

前置増巾器：S15-DS(昭電製)設定利得 40 dB



主増巾器：20H-AE（昭電製）設定利得 40dB（低サイクル）

(5) フィルター 20H-AE（昭電製）設定帯域 100～300KHz

(6) 有意信号検出方法

設定チャンネル数：2

電氣的雑音排除のための到達時間差：2 $\mu$ secに設定

有意信号検出のための到達時間差：2 $\mu$ sec～17 $\mu$ secに設定

スレーブセンサーによる信号排除：100 $\mu$ sec（再トリガー方式）

トリガレベル：予き裂の測定及び室温900kgによる低サイクル試験では15 $\mu$ V，その他  
100 $\mu$ Vに設定

(7) AEエネルギー解析項目とその方法及び表示

(i) RMS電圧：アナログテバイセズ社製素子440-Jを使用

(ii) リングダウン計数：Rate & Total

リングダウン計数は主増巾器出力側でしきい値 1, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, の8レベルで検出している。本研究報告においてはRateに関しては、しきい値1Vについて示しており、Totalについては上記8レベルをまとめて表示してある。Totalの8本の曲線は発生量の多い方からしきい値1V, 1.5V～と順次上がって最も発生量の少ない曲線がしきい値4.5Vに対応する。サンプリング間隔は1秒に設定。

(iii) 事象数：Rate & Total表示法はリングダウン計数と同様

(iv) 振幅分布：本報告では事象数に関する振幅を表示し、リングダウン計数に関するものは省略してある。また、10本の曲線は試験時間（サイクル数）を等間隔に10等分し、等分された時間（N/10）までの総発生事象数と振幅電圧の関係を示したものである。すなわち、最も発生数の少ない曲線からN番目の曲線は試験時間N/10までの総事象数と振幅電圧の関係を示している。

(v) エネルギー分布：本報告では事象数に関するエネルギーの発生率及び総発生量を示している。エネルギーは振幅電圧の2乗とその電圧に対応する発生数との積である。

(8) データ処理装置と方法

検出された計数データ及び波形はフロントコンピューター（富士通 U-400）のメモリに転送記録され、データ処理及び表示はすべて中型コンピューター（富士通 F-230-38）によるソフト処理で行い、X-Yプロッターに表示される。（図4.3-2参照）

#### 4.3.3 AE試験の結果

各試験条件下でのAE特性の検出結果が表紙テーブルに一括してまとめて示している。

##### 1. RMS電圧

(1) 検出結果の代表的な例を図4.3-4及び10に示してある。

(2) 低サイクルき裂進展時のRMS電圧変化の一般的（荷重、温度によらない）特徴は圧縮保

保持時の方が引張保持時に比べて常に高いことである。また荷重零のとき最低電圧を示しほぼ零となる。

(3) 保持時のRMS電圧変化(定常的変化)のほか電圧ピークのするどい変化がみられる位相は一般に次の時期である。

- (i) 圧縮応力が最大になるとき。図4.3-4参照,特に荷重振幅が高いときに顕著でこの電圧ピークは破断面積(試験サイクル数の増加)の増加とともに大きくなる。
- (ii) 最大圧縮応力からの応力反転時。図4.3-10参照,700kg以下の荷重振幅で顕著で特に温度が高い600℃でこのピーク値が大きい。
- (iii) 引張応力が最大になるとき。この時期にピークが生ずるときは,のちに述べる発生AEエネルギーが高く,振幅分布の勾配が-1に近い。図4.3-4にみられるように室温においても高荷重でき裂進展時に顕著で図4.3-10の600℃での結果でもこのピークの発生がみられる。
- (iv) 応力保持時にも電圧ピークの発生がみられることがあるがごくまれである。

## 2. リングダウン計数及び事象数

(1) 予き裂の発生にともなうリングダウン発生数を図4.3-3に示した。低サイクル疲労時の発生数の変化を図4.3-5,7,8,11,12,114,16および18に示した。

(2) き裂進展にともなう周波数によるAE発生数の特徴

- (i) 高サイクルによるき裂の発生の場合には断続的な顕著な発生率変化がみられる。図4.3-3参照。
- (ii) 低サイクルの場合は発生ステップの変化が比較的一様である。

(3) リングダウン計数と事象数の比較

図7.8および図11,12.にみられるようにリングダウン計数が事象数の10倍程度である。

(4) 1サイクルあたりの発生事象数の比較

最低しきい値(100μV)をこえる事象数について比較すると,

- (i) 600kgの荷重振幅の場合300℃で30,600℃で110(図4.3-8および図4.3-12)
- (ii) 700kgの荷重振幅では室温13,300℃,16,600℃,400である。(図4.3-14,16,18)
- (iii) 温度の上昇とともに発生数が増加し,特に300℃と600℃で比較すると,600℃の方が3~4倍程度活性度が高い。700kgの荷重振幅的は破断寸前(3サイクルで破断,600℃)で600℃の発生イベント数が特に高い。

## 3. 振幅分布

(1) 振幅分布の結果を図4.3-6(b)(室温,荷重振幅900kg),図4.3-9(b)(300℃,荷重振幅600kg),図4.3-13(b)(600℃,荷重振幅600kg),図4.3-15(b)(室

温, 荷重振幅 700 kg) 図 4.3 - 17 (b) (300 °C, 荷重振幅 700 kg) 及び図 4.3 - 19 (b) (600 °C, 荷重振幅 700 kg) に示している。

## (2) き裂進展と振幅分布の特徴

- (i) 試験期間に発生した全発生数(事象)と発生電圧を両対数表示すると、き裂進展時においては各温度、荷重によらず勾配がほぼ -1 となる。
- (ii) き裂の顕著な進展がない場合には図 4.3 - 15 (b) にみられるように勾配が高くなる。この傾向は、たとえば図 4.3 - 17 (b) の最初の 2 サイクルの振幅分布の勾配にみられるように一般的な傾向である。また、付録に示される Cu の引張変形での傾向とも一致する。

## 4. 発生エネルギー

- (1) 発生エネルギーの発生率及び総和を各試験条件について図 4.3 - 6 (a), 9 (a), 13 (a), 15 (a), 17 (a) および 19 (a) に示している。
- (2) 1 サイクルあたりの発生エネルギー ( $V^2$ ) の各試験条件での比較
  - (i) 600 kg の荷重振幅の場合、300 °C で 200, 600 °C で 1100 (図 4.3 - および図 4.3 - 13)
  - (ii) 700 kg の荷重振幅の場合、室温で 23, 300 °C で 170, 600 °C で 1600 程度である。(図 4.3 - 15 (a), 17 (a) および 19 (a))
  - (iii) 900 kg の荷重振幅で室温の場合(図 4.3 - 6 (a)) は 10 程度とみられる。
  - (iv) 温度の上昇(600 kg の荷重振幅の場合、600 °C の方が 300 °C に比較して 5 倍程度発生エネルギーが高い) および亀裂の長さが長くなるほど発生エネルギーは高く、とくに 600 °C, 700 kg 荷重振幅での破断前では発生エネルギーは著しく高い。
  - (v) 700 kg の荷重振幅での室温と 300 °C の 1 サイクルあたりの発生事象数はさきに示した(2. (4) (iii)) ように大きな違いはないが発生エネルギーからみると約 1 桁の違いを示す。

### 4.3.4 結果の評価

#### 1. 有意 AE 信号の検出

- (1) 疲労き裂の進展にともなう検出領域は狭い範囲に限定されるので時間差測定が容易であり、さらにスレーブセンサーを併用することによって有意 AE 信号の検出が充分可能である。時間差およびマスタースレーブ方式によって機械的、電気的ノイズの排除が充分可能である。
- (2) き裂進展にともなう AE 振幅は 100  $\mu V$  以上のトリガーレベルで検出可能と考えられ、振幅分布の検出結果からみて飽和する AE 信号も発生し、割れの検出においてさらにトリガーレベルを上げる必要も考えられる。実用モニタレベルから考えても充分可能な検出レベルと思われる。
- (3) 高温における AE 信号の検出が導波棒使用によって充分可能で、むしろ感度低下をともなう高温用センサーより有利と考えられる。

## 2. 温度による影響

600℃などの高温に一たん試片を上げると圧縮応力側（特に応力反転時）にA Eの活性が生ずる。これは600℃に上げたのち室温でA Eの計測を行っても同様の結果を示す。また、RMS特性（図4.3-4）の項で示したように予き裂導入後、900kgの荷重振幅で室温において低サイクル疲労によってき裂進展が生じてもこのような現象はみられない。したがって、この圧縮応力反転時のA Eの活性はき裂底部の回復に伴う再降伏と考えるのが妥当であろう。

## 3. 荷重位相との関係

温度（600℃）による回復にともなって圧縮応力反転時にRMSのピークがみられA Eの活性をともなう現象があるが、同時にき裂進展時には最大荷重時にRMSピークがみられるのが一般的である。このピークは高温（600℃）にあげた試片にみられる圧縮応力反転時のピークと比較すると小さいがバースト型の振幅の大きいA Eの発生をともなう。

## 4. き裂把握のためのA E特性

低サイクル高温における割れの検出においては振幅分布の勾配と発生エネルギーからの評価が重要でこれによって少なくとも定性的にき裂の進展を把握することが可能と考えられる。

F A E A E 計測データシート

SUS316 片側切欠材のAE特性		データシート 番 号			責任者名	門 田 安 弘		
		記入年月日	1978年5月25日		所属会社名	新日鉄(株)基礎研究所		
試験材料 SUS316		試験雰囲気	空 気 中		試験場所	基礎研究所		
試験装置 アームスラ高サイクル 島津油圧式低サイクル疲労試験機		材料熱処理			試験片形状	片側切欠付試験片		
試験目的		SUS316について、予き裂を入れた試験片を用い引張-圧縮による低サイクル疲労試験を行い温度 応力振幅などの試験条件下でのき裂進展評価のためのAE特性の検討を行う。						
試験片番号		3161	3161	3162	3162	3162	3162	3162
試験条件	試験温度	R.T	R.T	300℃	600℃	R.T	300℃	600℃
	ひずみ速度							
	荷重振幅	0~900 kg	±900 kg	±600kg	±600 kg	±700 kg	±700 kg	±700 kg
疲労試験条件	保持時間 ひずみ時間	引張側	10 sec	10 sec	10 sec	10 sec	10 sec	10 sec
		圧縮側	10 sec	10 sec	10 sec	10 sec	10 sec	10 sec
	周波数	160 (Hz)	1/40	1/40	1/40	1/40	1/40	1/40
	抑制方法	荷重制御		印荷波形	台形波			
A E 計 測		A E 計 測装置	基研AEコンピューター制御解析システム					
試験片番号		3161	3161	3162	3162	3162	3162	3162
変換子	変換子名と番号	014z-10 1569,1570	同 左	同 左	同 左	同 左	同 左	同 左
	校正曲線							
	取付個所(導波棒)	試験片直接	φ10 導波棒	同 左	同 左	同 左	同 左	同 左
	接着法(カップラント)	ACV9(D/E)	同 左	圧着	同 左	ACV9(D/E)	圧着	同 左
増巾率	前置増巾器	40dB	同 左	スミセラム 同 左	同 左	同 左	スミセラム 同 左	同 左
	主増幅器	58dB	同 左	40dB	同 左	同 左	同 左	同 左
フィルター・周波数帯域		100~300KHz	同 左	同 左	同 左	同 左	同 左	同 左
トリガーレベル		15μV	同 左	100μV	同 左	同 左	同 左	同 左
R. M. S. 電圧			Fig 4.3-4		Fig 4.3-10			
リングダウン or 事象数		Fig 4.3-3	Fig 4.3-5	Fig 4.3-7 8	Fig 4.3-11 12	Fig 4.3-14	Fig 4.3-16	Fig 4.3-18
振幅分布			Fig 4.3-6(b)	Fig 4.3-9 (b)	Fig 4.3-13(b)	Fig 4.3-15(b)	Fig 4.3-17(b)	Fig 4.3-19(b)
エネルギー分布			Fig 4.3-6(a)	Fig 4.3-9 (a)	Fig 4.3-13(a)	Fig 4.3-15(a)	Fig 4.3-17(a)	Fig 4.3-19(a)
波形観察								
その他( )								
		前置増巾器	主増巾器		フィルター		位置標定手法	
型 式		S15-DS	20H-AE	型 式	主増巾器中	分解能		
メーカ		照電	照電	メーカー名	にこみ	範囲		
ダイナミックレンジ		40dB	60dB	周波数帯域	100-300 KHz			
備考								

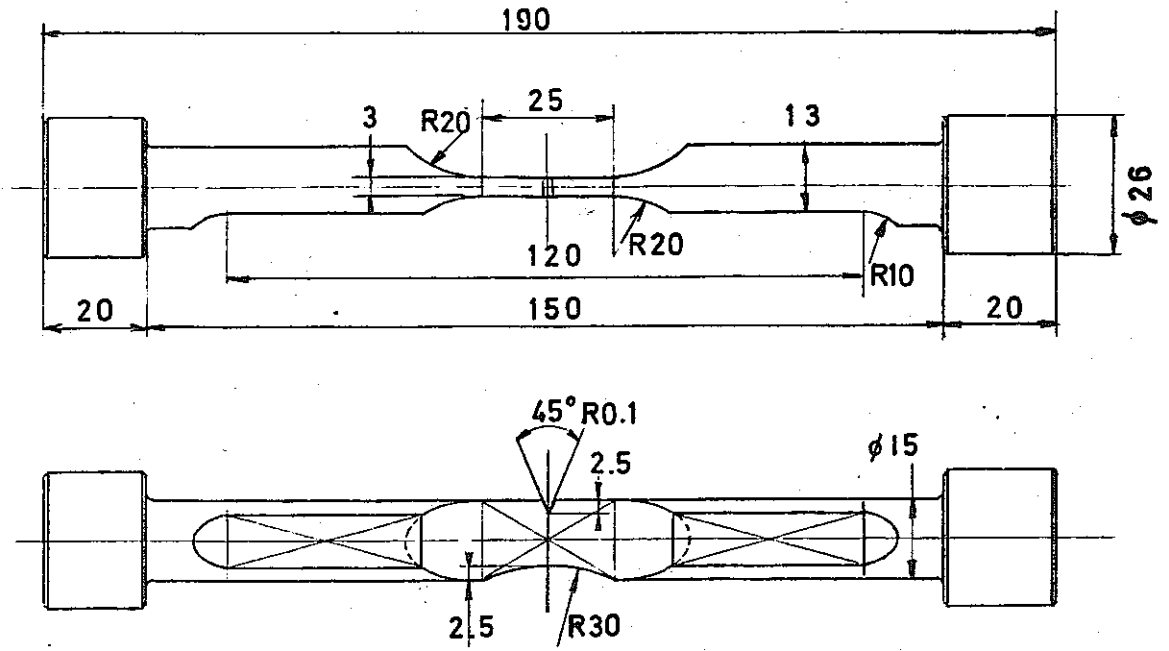


Fig. 4.3-1 Dimension of fatigue test specimen

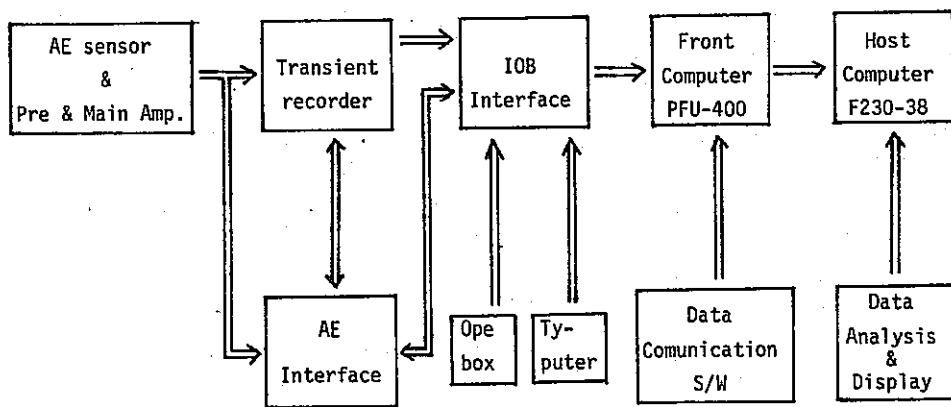


Fig. 4.3-2 Computer controlled AE monitoring system

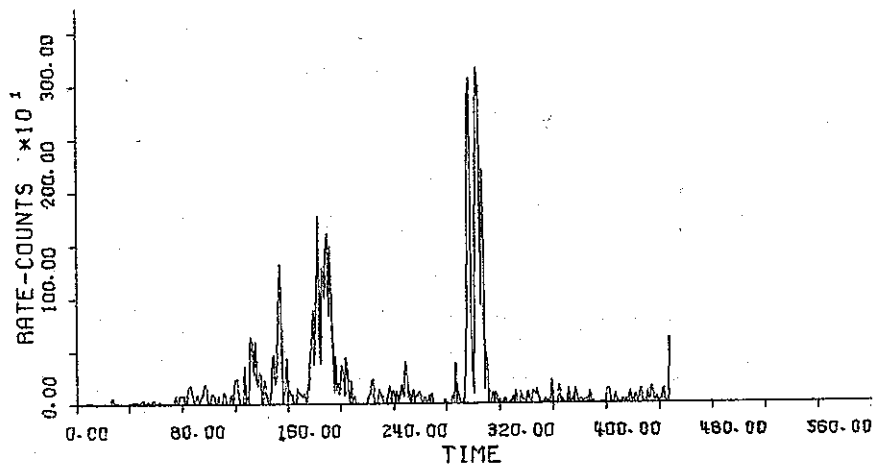


Fig. 4.3-3(a) AE ringdown rate counts v.s time (sec) during pre-crack initiation. (Gain: 98 dB, Threshold level: 1 V)

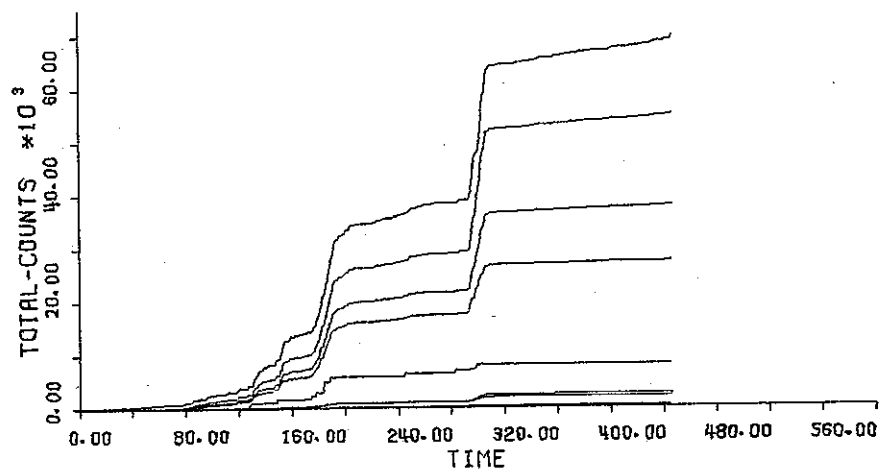


Fig. 4.3-3(b) AE ringdown total counts for 8 threshold levels during pre-crack initiation

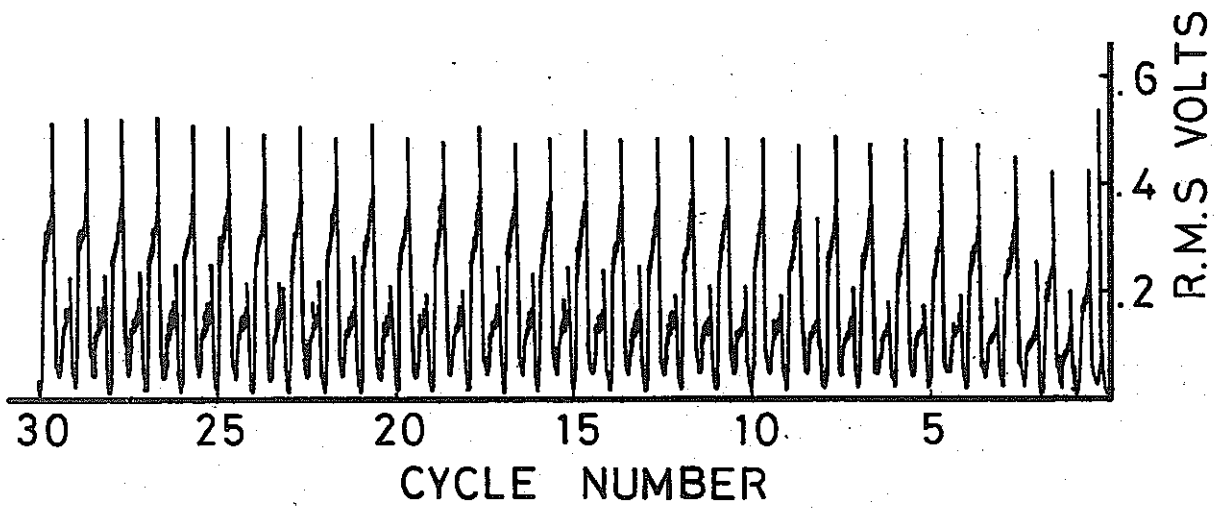


Fig. 4.3-4 Change in RMS volt v.s time during low cycle fatigue test. (Temp: room, Load: 900 Kg)



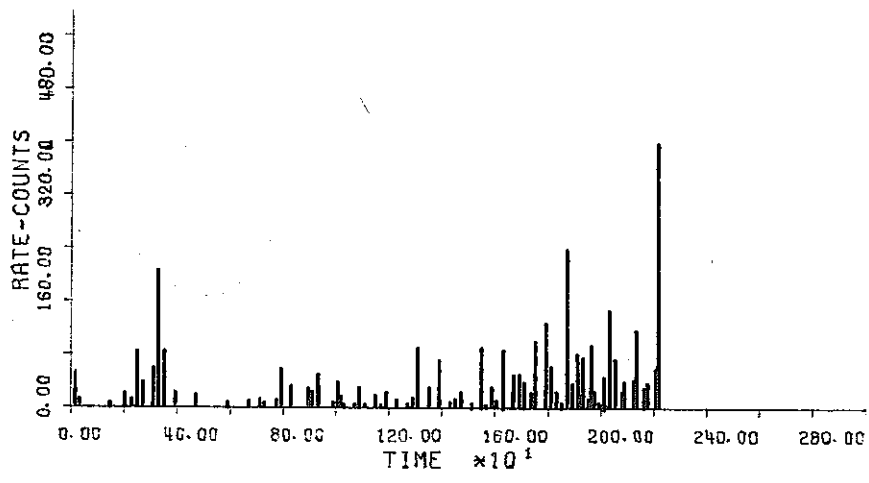


Fig. 4.3-5(a) AE ringdown rate counts v.s time (sec) during low cycle fatigue test. (Temp: room, Load: 900 Kg)

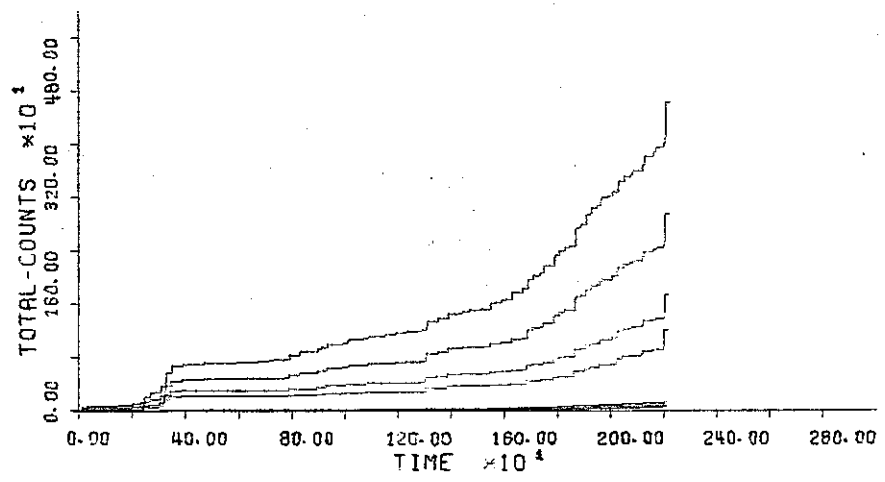


Fig. 4.3-5(b) AE ringdown total counts for 8 threshold levels during low cycle fatigue test. (Temp: room, Load: 900 Kg)

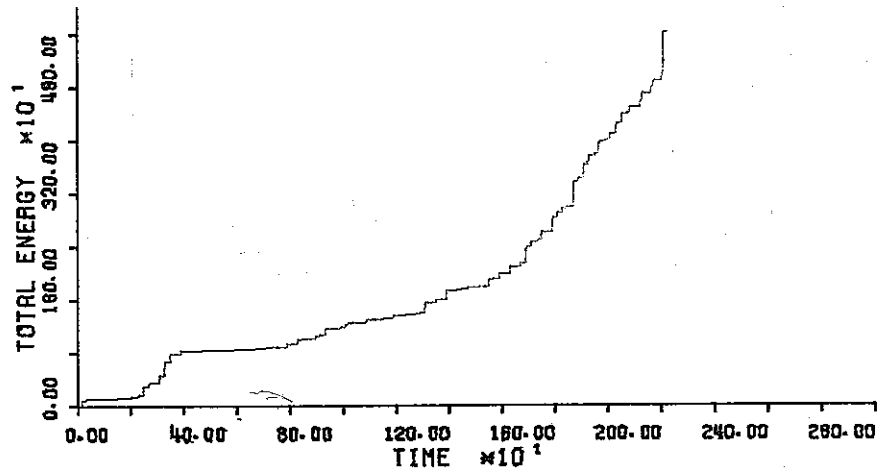
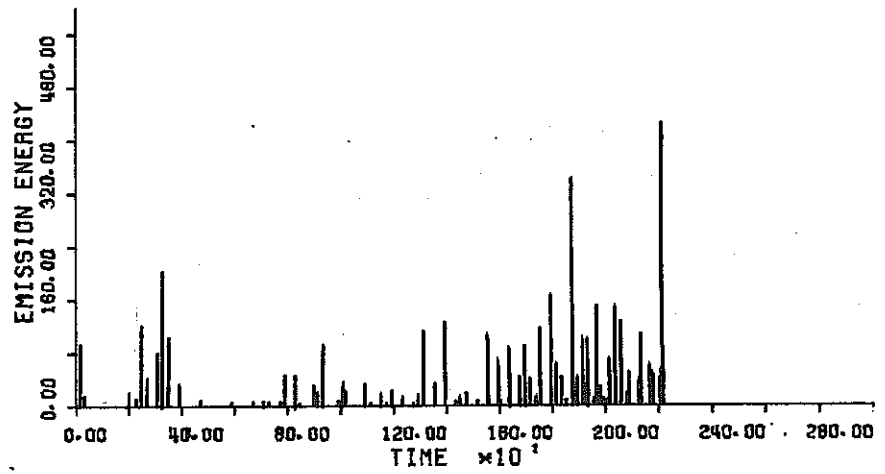


Fig. 4.3-6(a) Emission energy (rate & total) during low cycle fatigue test. (Temp: room, Load: 900 Kg)

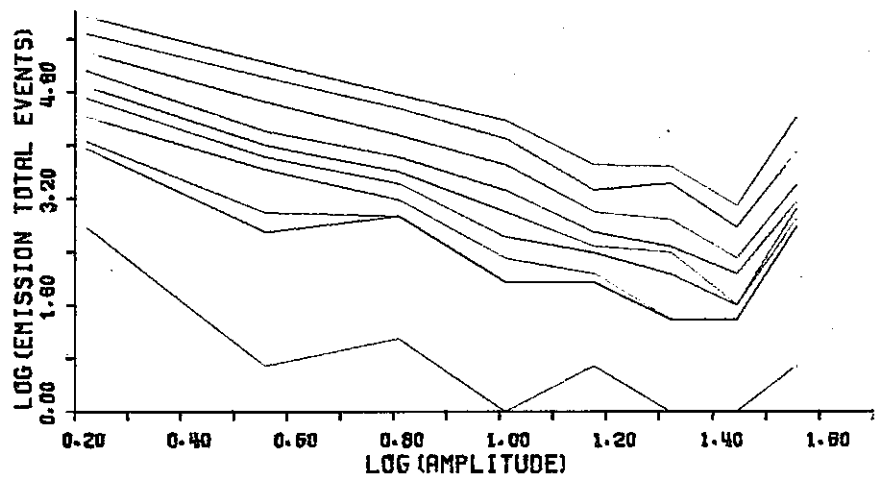


Fig. 4.3-6(b) Amplitude distribution v.s emission total events during low cycle fatigue test. (Temp: room, Load: 900 Kg)

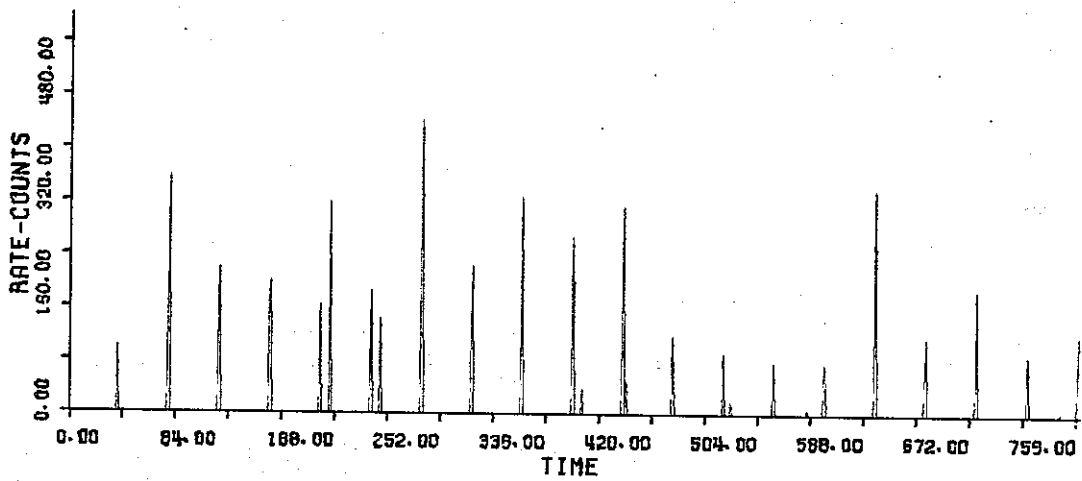


Fig. 4.3-7(a) AE ringdown rate counts v.s time (sec) during low cycle fatigue test. (Temp: 300 °C, Load: 600 Kg)

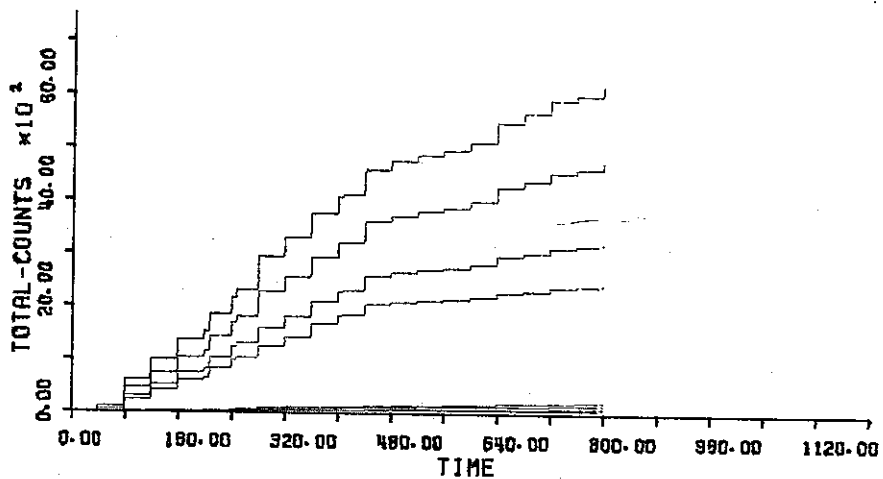


Fig. 4.3-7(b) AE ringdown total counts for 8 threshold levels, during low cycle fatigue test. (Temp: 300 °C, Load: 600 Kg)

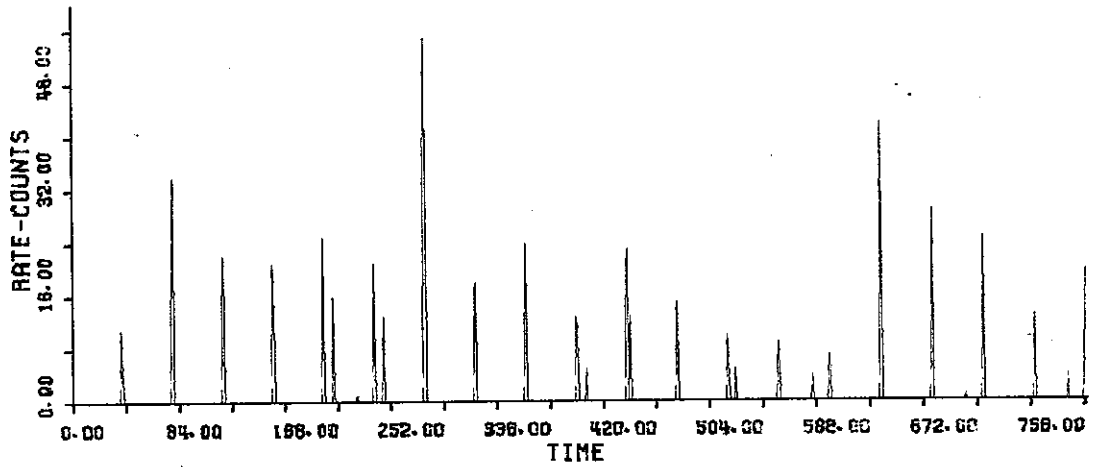


Fig. 4.13-8(a) AE event rate counts v.s time (sec) during low cycle fatigue test. (Temp: 300 °C, Load: 600 Kg)

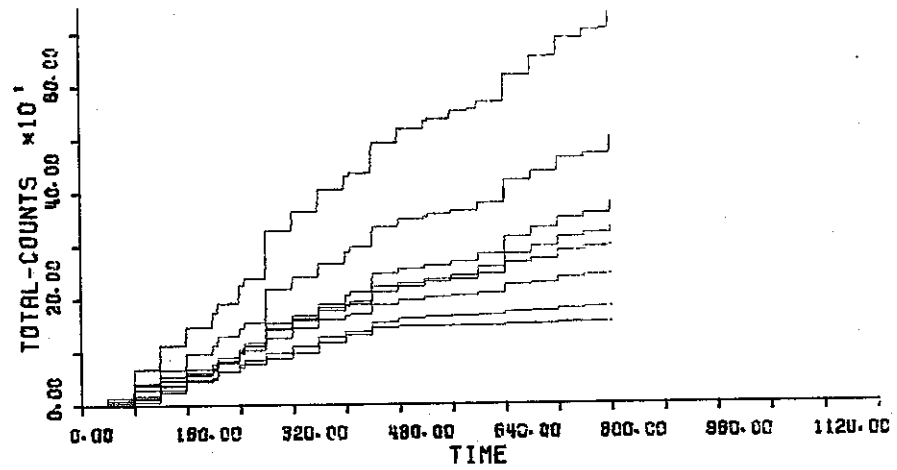


Fig. 4.3-8(b) AE event total counts for 8 threshold levels during low cycle fatigue test. (Temp: 300 °C, Load: 600 Kg)

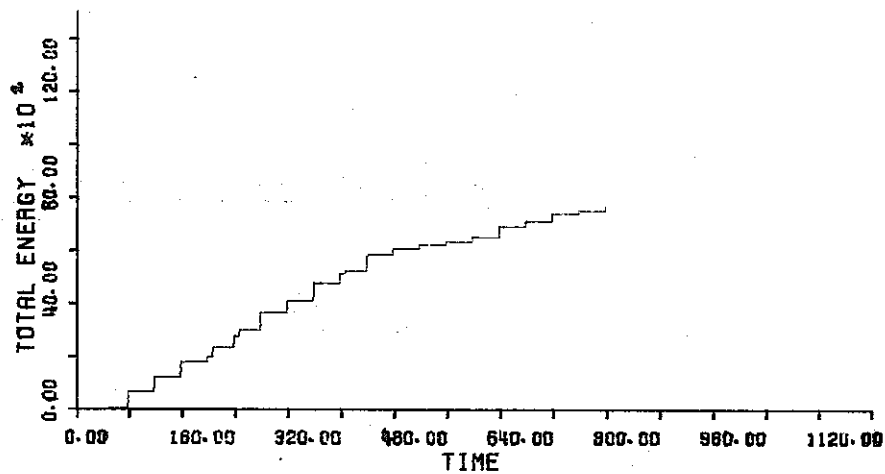
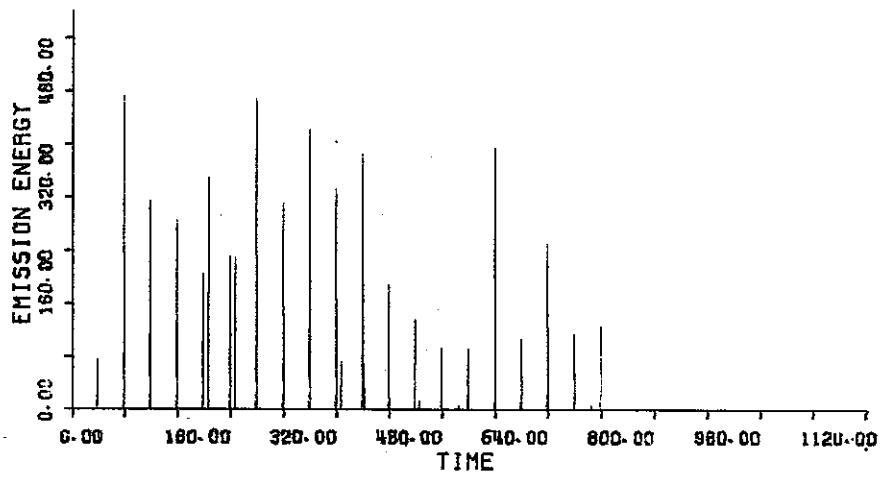


Fig. 4.3-9(a) Emission energy (rate & total) during low cycle fatigue test. (Temp: 300 °C, Load: 600 Kg)

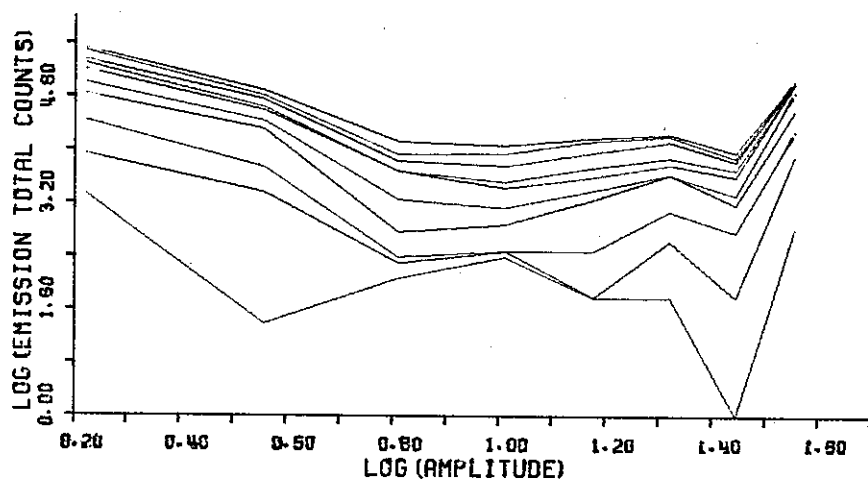


Fig. 4.3-9(b) Amplitude distribution v.s emission total events during low cycle fatigue test. (Temp: 300 °C, Load: 600 Kg)

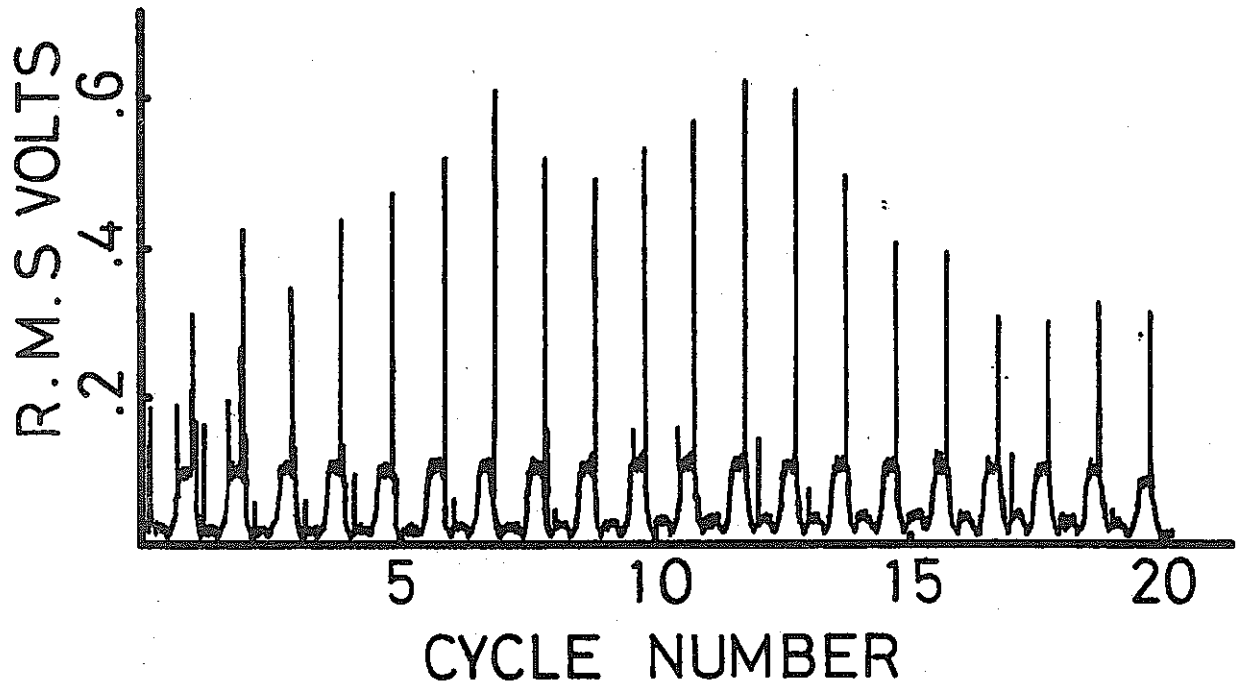


Fig. 4.3-10 Change in RMS volt v.s time during low cycle fatigue test. (Temp: 600 °C, Load: 600 Kg)

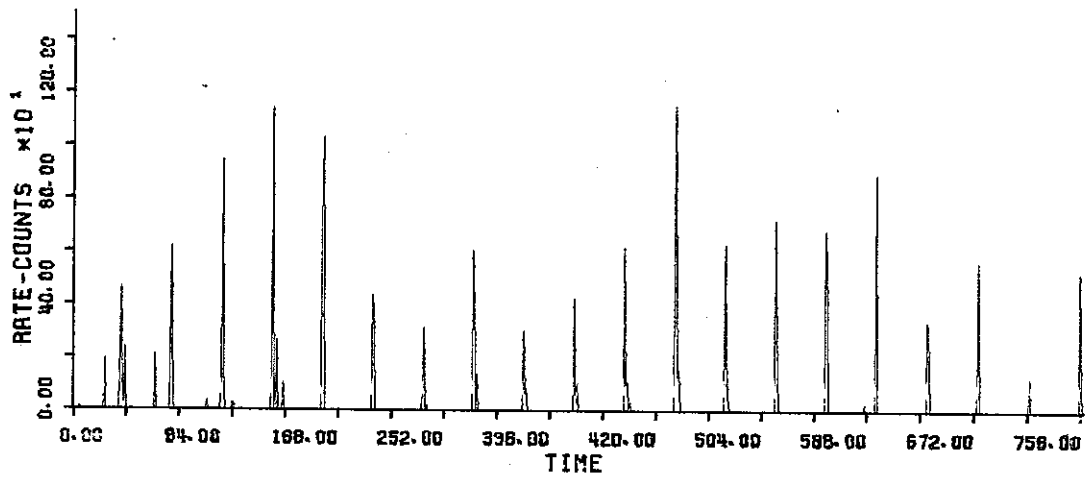


Fig. 4.3-11(a) AE ringdown rate counts v.s time (sec) during low cycle fatigue test. (Temp: 600 °C, Load: 600 Kg)

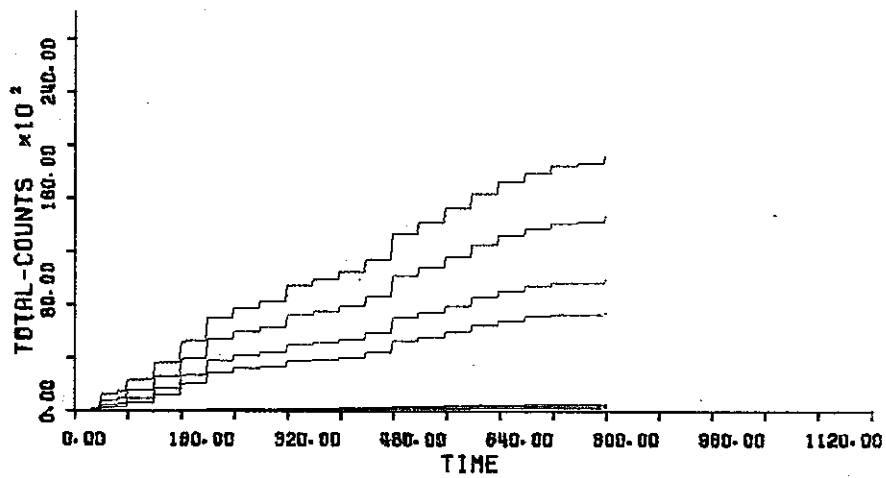


Fig. 4.3-11(b) AE ringdown total counts for 8 threshold levels during low cycle fatigue test. (Temp: 600 °C, Load: 600 Kg)

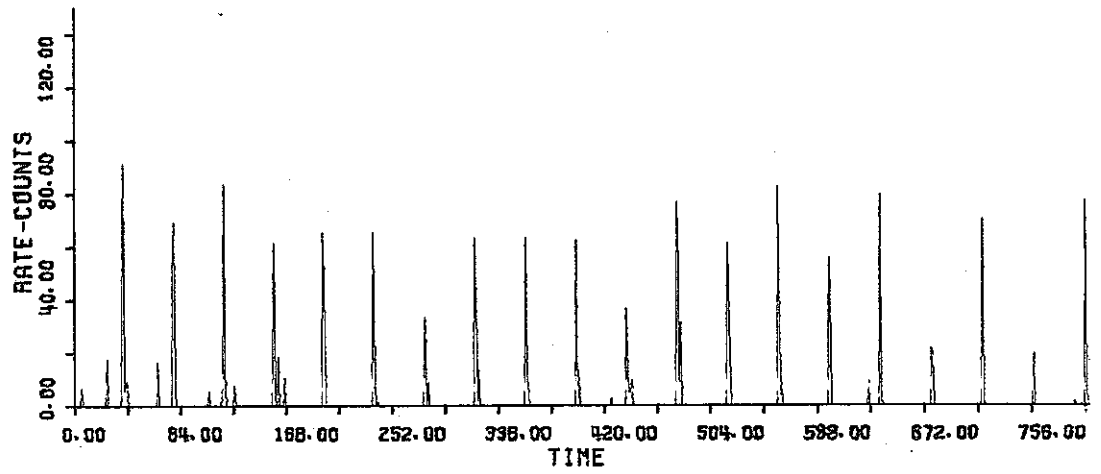


Fig. 4.3-12(a) AE event rate counts v.s time (sec) during low cycle fatigue test. (Temp: 600 °C, Load: 600 Kg)

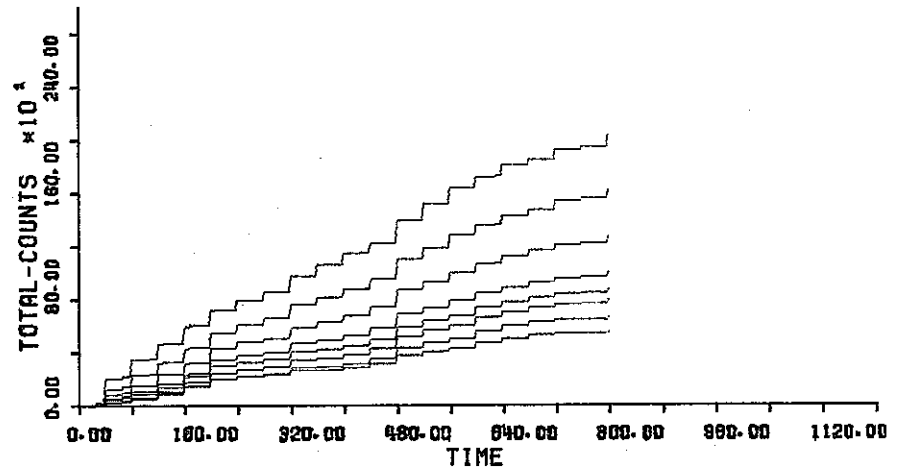


Fig. 4.3-12(b) AE event total counts for 8 threshold levels during low cycle fatigue test. (Temp: 600 °C, Load: 600 Kg)



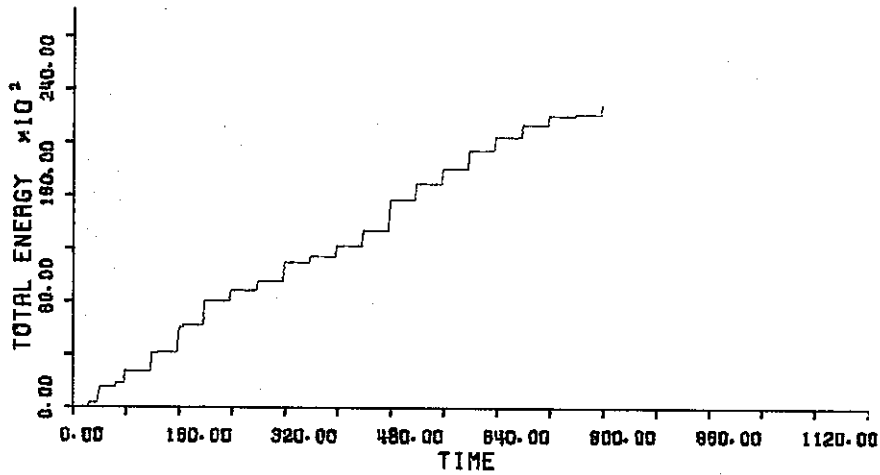
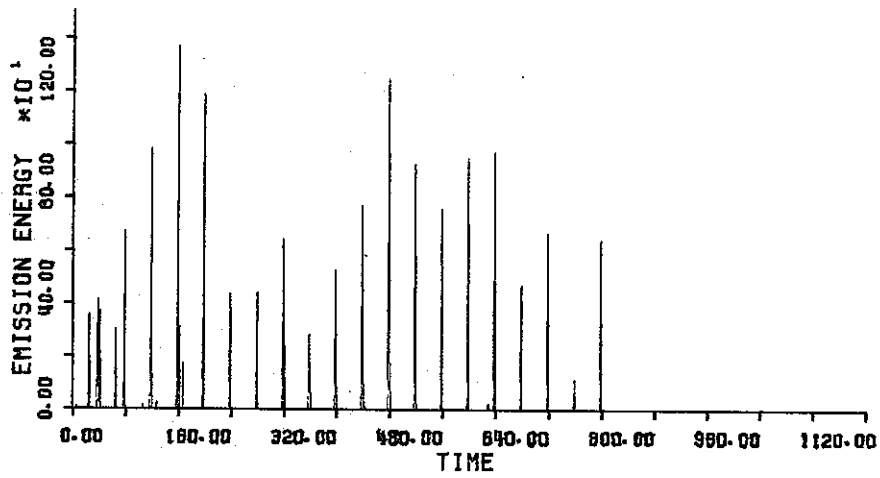


Fig. 4.3-13(a) Emission energy (rate & total) during low cycle fatigue test. (Temp: 600 °C, Load: 600 Kg)

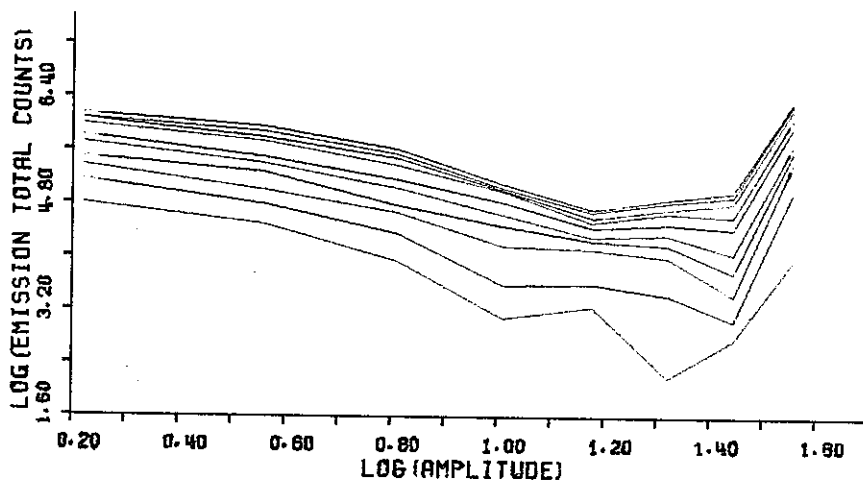


Fig. 4.3-13(b) Amplitude distribution v.s emission total events during low cycle fatigue test. (Temp: 600 °C, Load: 600 Kg)

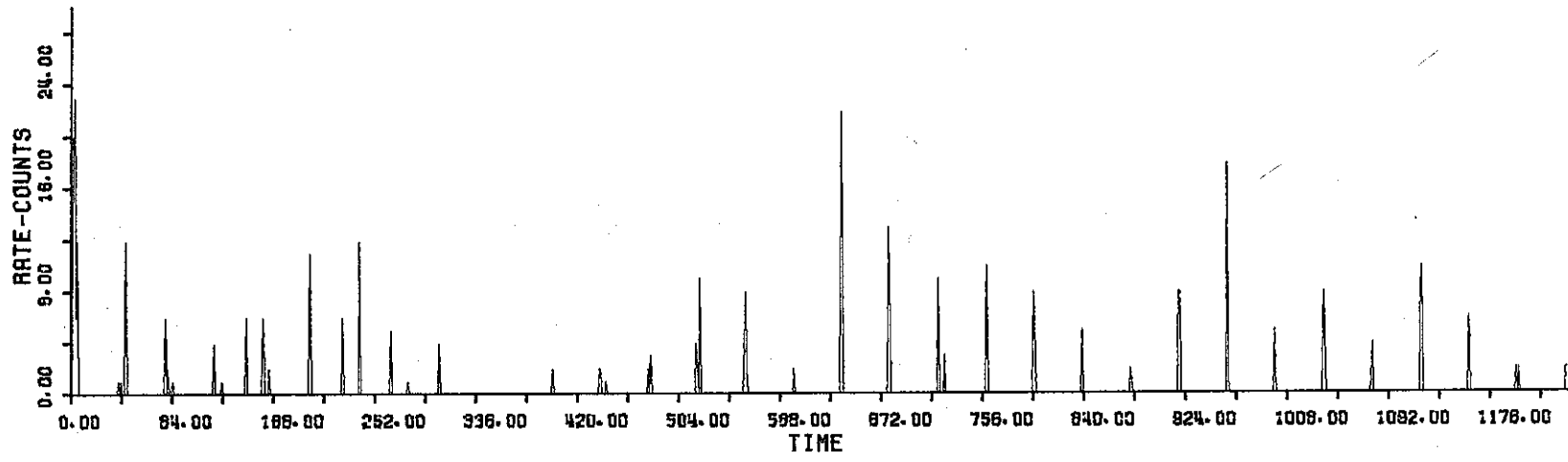


Fig. 4.3-14(a) AE event rate counts v.s time (sec) during low cycle fatigue test. (Temp: room, Load: 700 Kg)

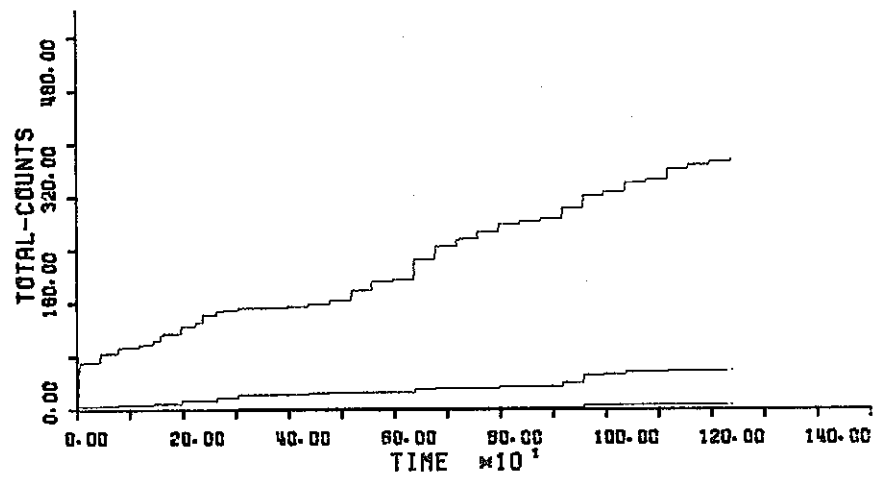


Fig. 4.3-14(b) AE event total counts for 8 threshold levels during low cycle fatigue test. (Temp: room, Load: 700 Kg)

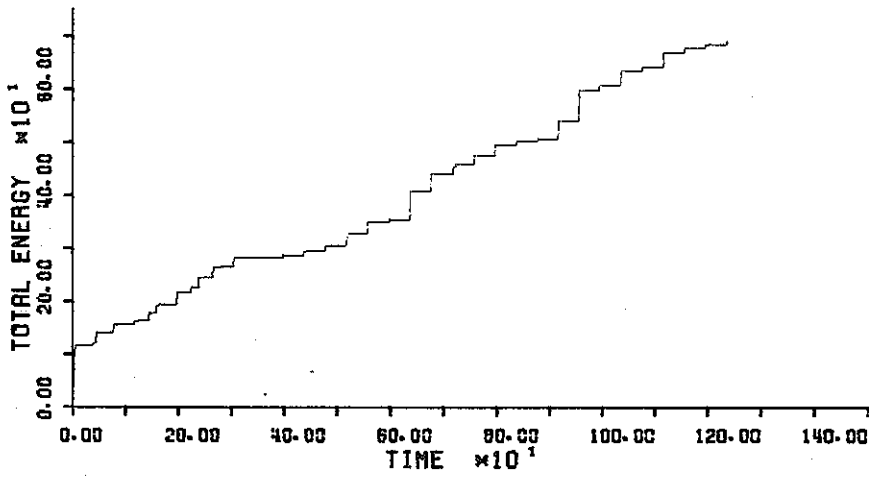
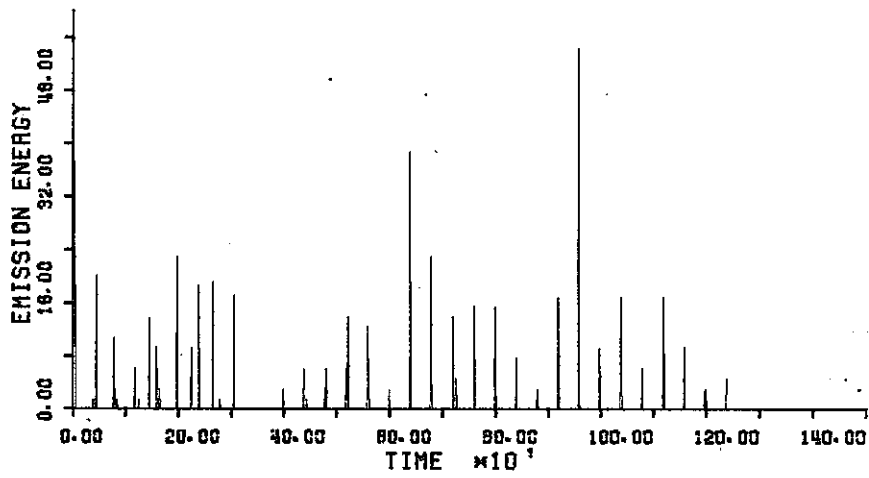


Fig. 4.3-15(a) Emission energy (rate & total) during low cycle fatigue test. (Temp: room, Load: 700 Kg)

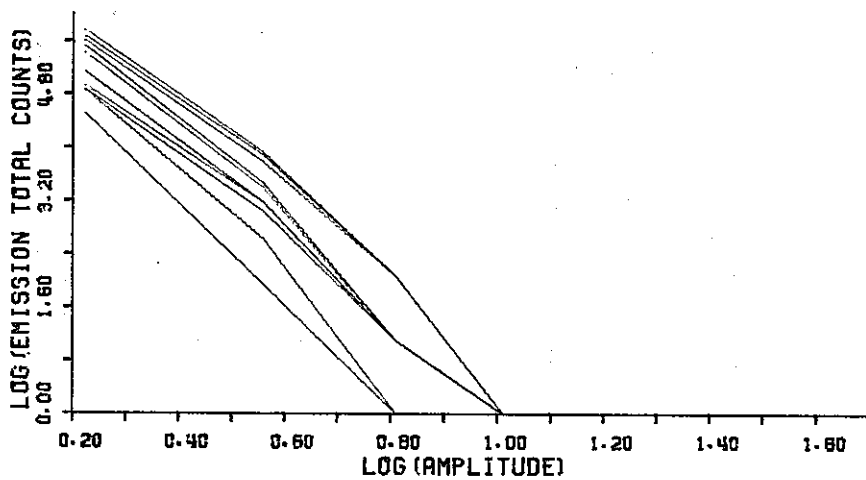


Fig. 4.3-15(b) Amplitude distribution v.s emission total events during low cycle fatigue test. (Temp: room, Load: 700 Kg)

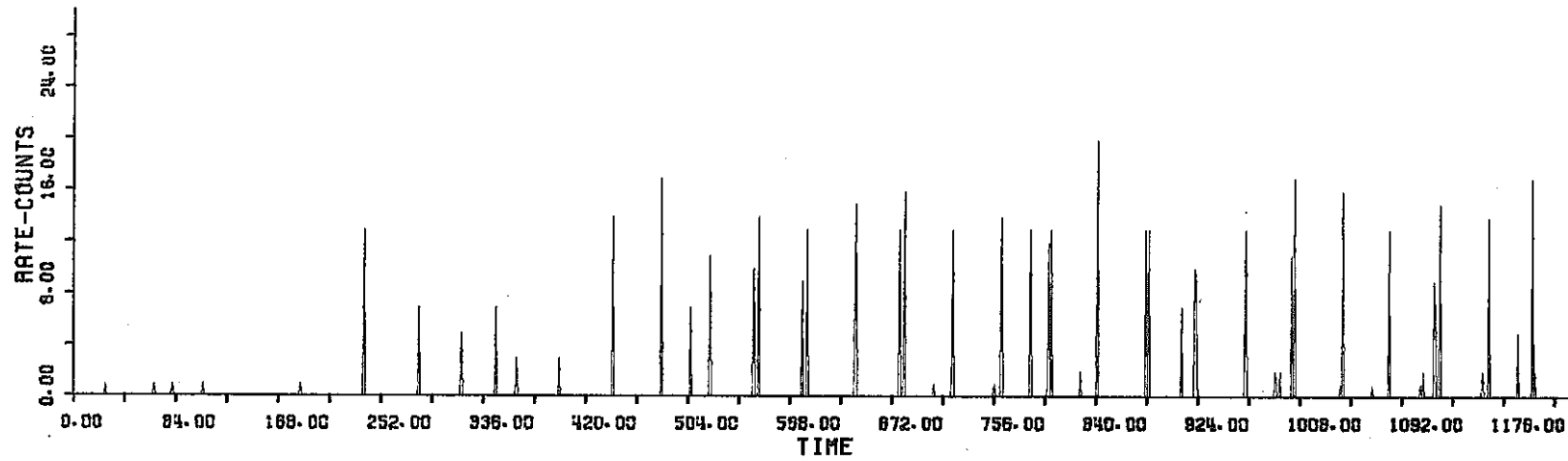


Fig. 4.3-16(b) AE event total counts for 8 threshold levels during low cycle fatigue test. (Temp: 300 °C, Load: 700 Kg)

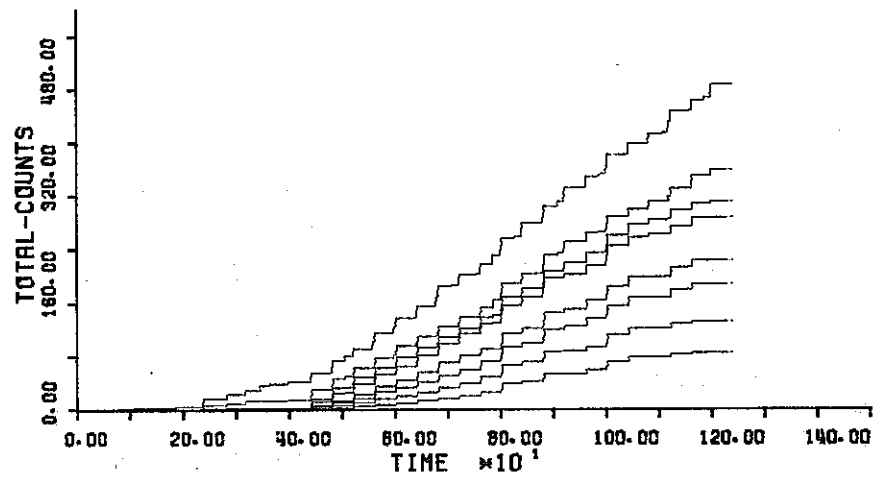


Fig. 4.3-16(a) AE event rate counts v.s time (sec) during low cycle fatigue test. (Temp: 300 °C, Load: 700 Kg)

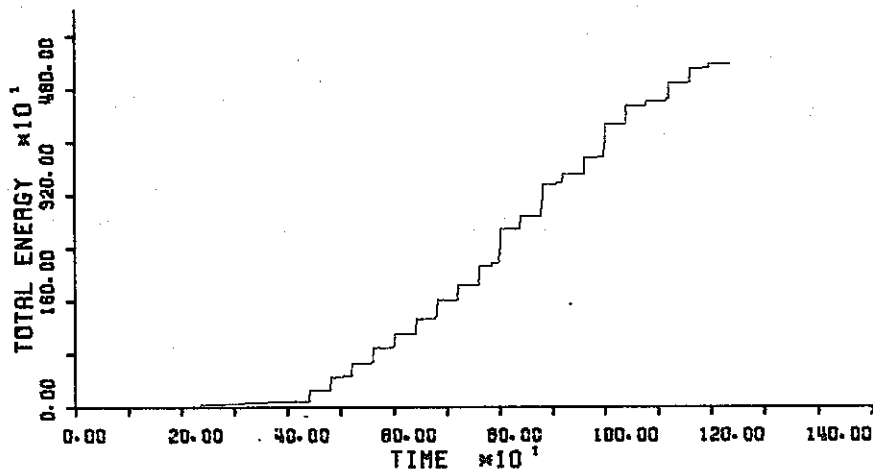
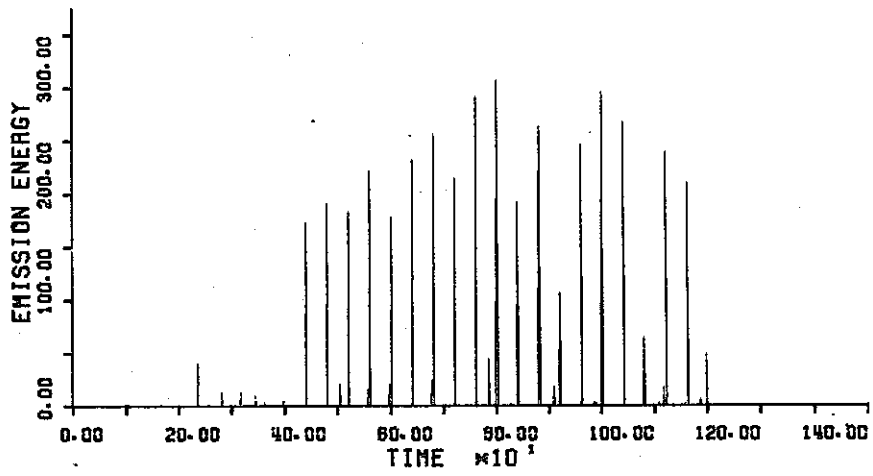


Fig. 4.3-17(a) Emission energy (rate & total) during low cycle fatigue test. (Temp: 300 °C, Load: 700 Kg)

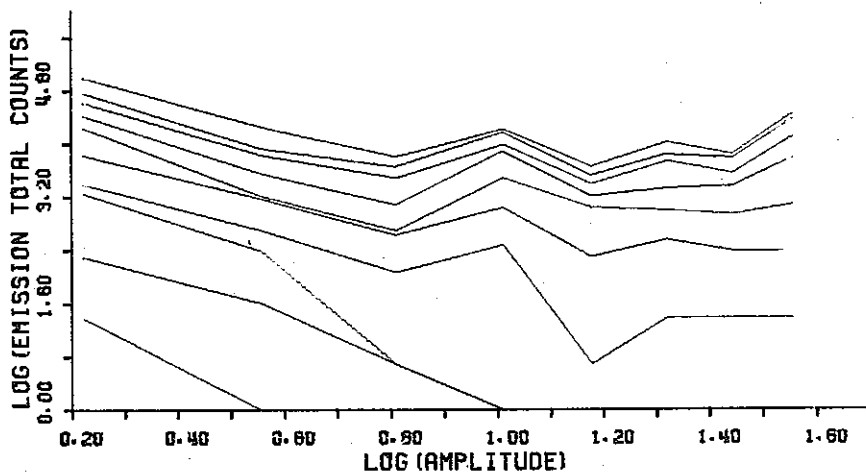


Fig. 4.3-17(b) Amplitude distribution v.s emission total events during low cycle fatigue test. (Temp: 300 °C, Load: 700 Kg)

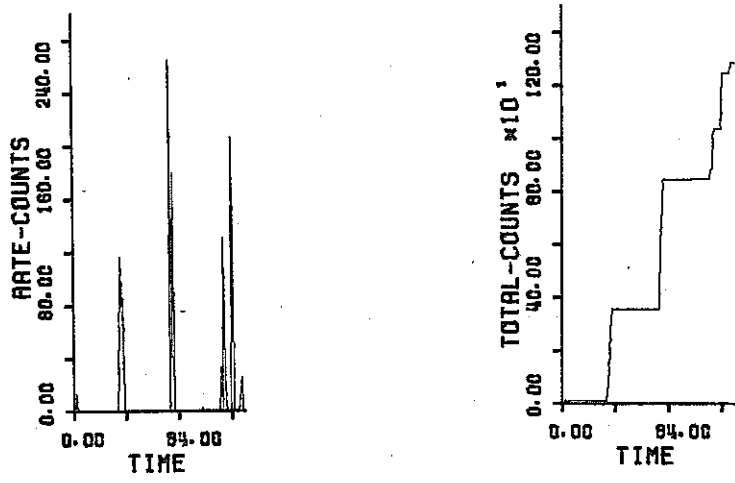


Fig. 4.3-18(a) AE event rate counts v.s time (sec) during low cycle fatigue test. (Temp: 600 °C, Load: 700 Kg)

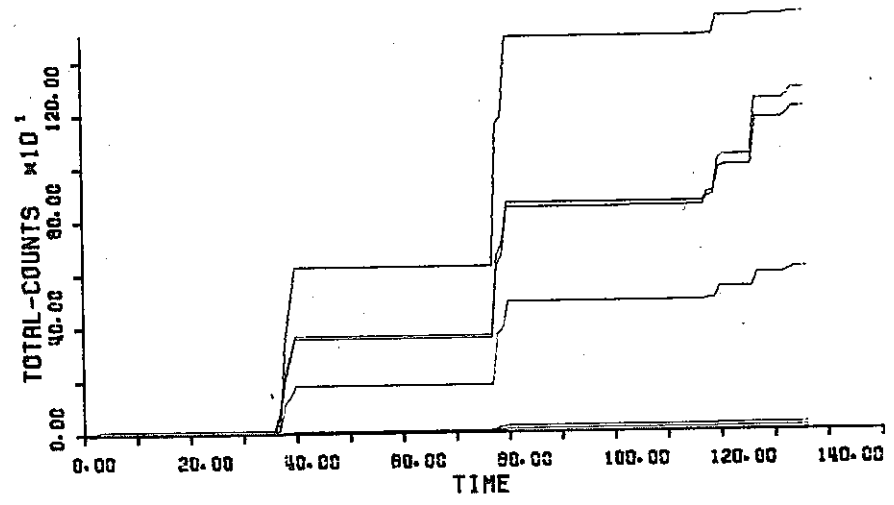


Fig. 4.3-18(b) AE event total counts for 8 threshold levels during low cycle fatigue test. (Temp: 600 °C, Load: 700 Kg)

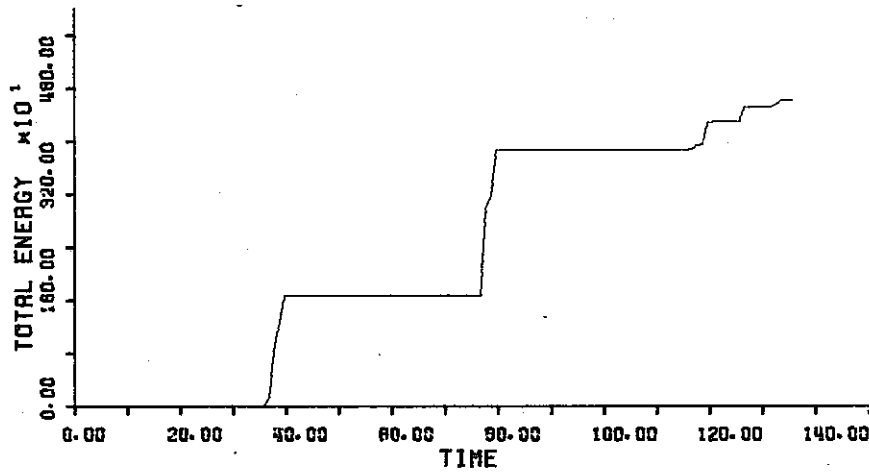
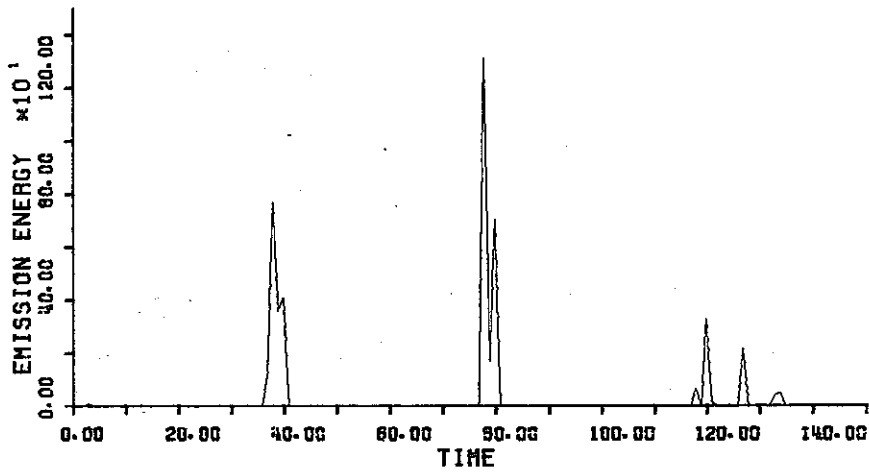


Fig. 4.3-19(a) Emission energy (rate & total) during low cycle fatigue test. (Temp: 600 °C, Load: 700 Kg)

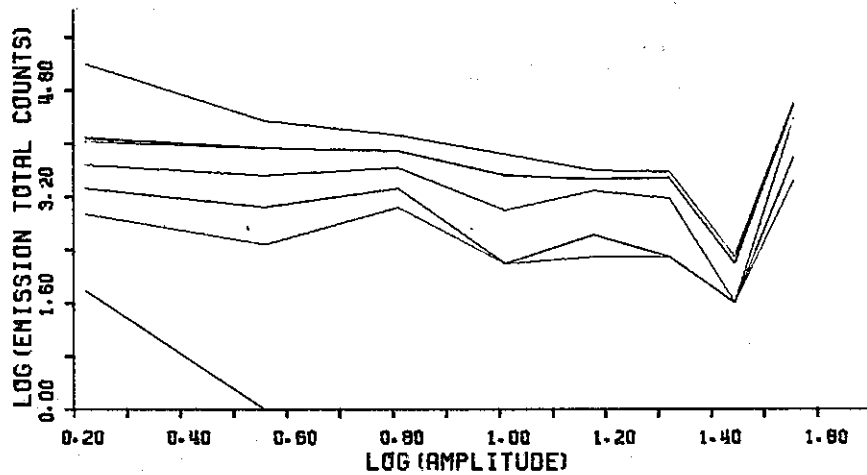


Fig. 4.3-19(b) Amplitude distribution v.s emission total events during low cycle fatigue test. (Temp: 600 °C, Load: 700 Kg)

## 5 章 試験結果の総括と評価

### 5.1 平滑材の A E 特性

#### 5.1.1 試験実施機関

(株)日立製作所日立研究所、日本鋼管(株)技術研究所、(株)神戸製鋼所中央研究所、三菱重工業(株)高砂研究所、石川島播磨重工業(株)技術研究所、東京大学工学部、東京大学宇宙航空研究所、東京工業大学総合理工・精密工学研究所、日本大学生産工学部

#### 5.1.2 実験結果のまとめ

##### 5.1.2-1 単軸引張りの A E 特性

###### (1) SUS304

###### (a) A E の発生状況

発生する A E は小振幅の突発型 A E であり、その発生は、応力-ひずみ曲線上において、降伏点近傍で多く見られるが、以後の加工硬化の過程においては断続的で発生数もごくわずかである。

###### (b) ひずみ速度の影響

ひずみ速度を  $4 \times 10^{-4} \text{ S}^{-1} \sim 4 \times 10^{-2} \text{ S}^{-1}$  の範囲で試験した結果、ひずみ速度を増すと、A E 実効値電圧が大きくなる傾向が得られた。

###### (c) 回復の影響

10%予変形後、除荷し、300°C、600°C で各30分の熱処理をした後、再負荷した結果は、熱処理温度600°Cの方が、処女材に近い挙動を示した。

Kaiser 効果については、明確な結果が得られなかった。

###### (d) 鋭敏化処理の影響

600°C × 24h、700°C × 1h の2種の鋭敏化処理材について試験した結果、A E の活動度にやや差はあるが、A E 発生の模様、振幅分布の形態に顕著な差は認められなかった。なお、処女材(溶体化処理材)と比較すると、その A E 発生パターンに変化は認められないが、振幅分布の形態に若干の差が生じているようにも見える (Fig. 3.2.1-10、Fig. 3.2.1-26)。しかし、この差が有意であるか否かは、断定できない。

###### (e) 溶体化処理の影響

2通りの溶体化処理1100°C × 0.5h、1250°C × 0.5hを行った材料について試験した結果、1100°C溶体化処理材の A E 特性は、先の1050°C溶体化処理材の結果(a)と同様な傾向が得られた。しかし、1250°C溶体化処理材の A E 特性はこれらと異なる結果が得られた。すなわち、応力-ひずみ曲線において、加工硬化特性はいずれもほぼ同様な傾向を示しているが、その加工硬化の過程において A E 発生頻度が、1250°C溶体化処理材は他にくらべて高く、A E 累積事象数がひずみとともにほぼ直線的に増加する (Fig. 3.1.2-9、Fig. 3.1.2-15)。



(f) 温度の影響

室温より600℃の温度範囲で試験した結果、AE実効値電圧は試験温度が高いほど大きい値となる。

また、先の鋭敏化処理材について270℃で試験した結果は、室温にくらべて、加工硬化時のAEの活性が増している。しかし、600℃×24h 鋭敏化処理材のAE発生パターンは、他のいずれの試験条件にも見られない様相を呈した (Fig. 3.2.2-1)。

(g) 荷重保持時間の影響

室温より600℃の温度範囲において、所定ひずみ予変形後、除荷、あるいは、その荷重状態で10、100、1000秒間保持し、再負荷した場合のAEを計測した。その結果は、先(f)と同様にAEの温度依存性が認められたが、保持時間の影響は認められず、Kaiser効果が成立した。

(2) SUS316

(a) AEの発生状況

小振幅 (トリガーレベル30μV) の突発型AEであり、AEの活性は降伏点近傍でのみ高く得られ、また、リングダウン計数総数は塑性仕事に比例する。応力-ひずみ曲線上でのAE発生パターンは、SUS304の結果(1)-(a)と同様である (Fig. 3.1.4-4)。

(b) ひずみ速度の影響

ひずみ速度を $10^{-4} S^{-1} \sim 10^{-2} S^{-1}$  のオーダーで試験した結果、AEの発生パターンは変わらないが、ひずみ速度が増すと、リングダウン計数総数、振幅が若干増す。AE事象の積分形振幅分布は、振幅値とその累積事象数の両対数表示において、ほぼ直線関係を示し、その勾配はひずみ速度に依存しない (Fig. 3.1.4-6、Fig. 3.1.4-7)。

(3) 2¼Cr-1Mo鋼

(a) AEの発生状況

降伏点の直前において連続型のAEが観察され、以後、加工硬化の過程においては、最大荷重点近傍で、突発型AEが断続的に発生する。(Fig. 3.1.3-7、Fig. 3.1.3.2-2)

(b) ひずみ速度の影響

ひずみ速度 $10^{-4} S^{-1} \sim 10^{-2} S^{-1}$ の範囲で、ひずみ速度を増すと、連続型、突発型AEとも、その振幅が増す傾向があるが、AE発生数に変化は見られない。(Fig. 3.1.3-16、Fig. 3.1.3.2-6~8)

(c) 回復の影響

所定の予変形後、除荷し、300℃、600℃ (630℃) で各30分熱処理を行ない、再負荷した結果、AE実効値電圧は処女材におけるレベルより低い値となるが、リングダウン計数、事象数は、回復とともに処女材に近い値、ならびに、変化の様相を呈するようになる。なお、600℃、30分の熱処理により、材料の回復はほぼ得られている。(Fig. 3.1.3-12~15、Fig. 3.1.3.2-4、5、9、10)

(d) 温度の影響

試験温度 400℃で得られた A E 特性と、室温における特性との間に有意な差は認められない。(Fig. 3.2.3-1, 3)

(e) Kaiser 効果について

荷重を除荷する後半(低荷重)において A E の発生があり、さらに再負荷時の初期および元の荷重レベルに到達する以前に A E の発生があり、Kaiser 効果の現象は見られない。

5.1.2-2 繰り返し変形過程の A E 特性

SUS304、SUS316 について応力振幅を 0.1%耐力(室温)の 1.5 倍とした引張り-圧縮繰り返し試験を、室温~600℃の温度範囲で試験した。

両材とも A E の発生状況は類似しており、最初の 1 サイクルにおいて、引張り側降伏、応力反転に伴う再降伏に伴って A E の活性があるが、以後、繰り返し数とともに減少し、A E の発生が止む。観察された A E は小振幅(トリガーレベル 10 μV)の突発型である。(Fig. 3.3-5, 6, 8)

温度の影響としては、高温になるほどやや A E の活性は増すが、繰り返し変形に対する A E の発生状況に変化はなかった。なお、600℃における試験は、試験機治具からの雑音のため、A E 計測は行なえなかった。

5.2 切欠き材の疲労き裂進展に伴う A E 特性

5.2.1 試験実施担当機関

東大宇宙航空研究所、日大生産工学部、新日本製鉄㈱基礎研究所

5.2.2 実験結果のまとめ

本試験研究に供せられた試験片は、SUS304、SUS316 の二鋼種であり、両者に共通した試験結果をまとめると次のようになる。

(1) 有効な A E 信号の検出

(a) 時間差およびマスタースレーブ方式の併用によって機械的、電氣的な外来ノイズの弁別または排除が可能である。疲労き裂の進展にともなう検出領域は特に単純な形状の小型試験片による実験においては狭い範囲に限定されるので時間差測定が容易であり、さらにスレーブセンサー(ダミ変換子)を併用することによって有効な A E 信号の検出が充分可能である。

(b) き裂進展にともなう A E 信号は 100 μV 以上のトリガーレベルで検出可能である。

(c) 高温における A E 信号の検出が導波棒使用によって充分可能である。

(2) 温度による影響

(a) 温度の上昇とともに破断に要する疲労サイクル数が低下する。

(b) 温度の上昇とともに A E の活性(発生率、波高などの増加)がみられる。特に 600℃にお

いて顕著である。(各研究機関とも共通)

(c) 高温になると(特に600℃で顕著)最大圧縮荷重からの応力反転位相側に新たな著しいA Eの活性が見られる(各研究機関とも共通)。低温域(室温)ではこのような活性は見られない。(図4.3-4)

(d) 600℃では応力保持時間の増加、ひずみ速度の低下によってA E発生率が増加する。(図4.2-10、11)

### (3) 応力条件による影響

(a) 応力振幅が増加するとA Eの活性が増大する。

(b) き裂長さが長くなると特に破断直前では急激にA Eの活性が高くなり、A E発生率、発生エネルギーが増大する。

### (4) 振幅分布および発生エネルギー

(a) き裂進展にともなう振幅分布の勾配は両対数表示で-1に近い。この結果は300℃、600℃に関しては、各研究機関とも同様な結果であるが、室温に関しては図4.1-13、図4.3-6(b)、図4.3-15(b)の結果が示すように必ずしも一致していない。き裂進展断面積の定量化による検討が必要と考えられる。

(b) 一定トリガレベルでのA E発生率に顕著な差がない場合でも発生エネルギー比較を行うと差が顕著になる場合がある。(図4.3-15(a)、図4.3-17(a)参照) き裂進展時にはA E発生率が増加すれば発生エネルギーも一般に増加する。

## 5.3 試験結果の評価

三鋼種について、材料試験に伴うA Eを測定し、その結果をまとめてきたが、未だ計測法、計測因子の確立されていない部分のあるA E技法において、見るべき有意な結果、及び将来への指針が得られている。

塑性変形に伴うA E、き裂進展に伴うA Eと分類して試験を進めたが、当然後者には、変形に伴うA Eが含まれ得るものである。又、き裂に伴うA Eは、破面のたたき合い(摩擦)等、き裂開閉に伴う機械的な原因によるA Eも数多く含まれている場合が多い。しかしながらこのき裂開閉に伴う挙動も、き裂近傍の残留応力に支配された結果生じたものであり、材料特性の一つと考えられる。

結論的には、塑性変形に伴うA Eは信号レベルが小さく、その検出が困難な場合が多く、有意な信号処理をほどこし難いと云える。一方、き裂進展に伴うA Eはそのレベルも高く、充分有意信号として今後検討するに値するものと結論できる。

以下、いくつかの項目に分けて評価、検討を行なってみる。

### 5.3.1 A E信号の有効性(雑音除去計測技術)

変形のA Eに関しては、時間差を用いてノイズを弁別した研究機関と、1チャンネル計測による研究機関があり、若干、データの相互比較に問題を残している。変形に伴うA E波が連続型であ

る場合には、基本的に時間差、及びマスタースレーブ方式も適用し難い場合があり、この点は、変形のA E測定には宿命的なことと云える。しかしながら、治具にかかわるノイズ除去等を十分に考慮した結果、どの材料においても降伏近傍にかなりのA E信号が得られ、且つ、材料、及び試験条件の有意差を取り出すにいたっていることは、A E測定定量化の一步として評価できる。

今後は、突発成分の多い、SUS304、SUS316は必ず、時間差法等用い、ノイズを除去し、その事象数に注目すること、Cr-Mo鋼では、連続型A Eが多いことより、事象数、リングダウン計数、RMS電圧を併用することが推奨される。又、導波棒使用による信号レベルの低下はかなり大きいものがあった。

単軸引張り変形に関しては、本試験研究で、概略は把握できており、信号レベルの低いことから、この領域の試験の大きな展開は必要ないと結論できる。しかしながら、繰り返し変形に伴うA Eは、雑音除去も含めて未だ測定の初段階にあり、除荷、及び逆方向負荷過程での塑性挙動に伴うA Eの材料形状依存性を考慮に入れ、また導波棒による減衰を極力おさえるため、大型試験片使用による計測が必要である。

一方、き裂進展に伴うA E計測は、変形のA Eに比較し、信号が大きい上に、信号位置が限定されていることもあり、よい計測がなされている。

各研究機関ともノイズの弁別、排除が行なわれ、相互にデータの検討が可能な段階にまで、A E検出手法、及び装置の確立が行なわれたのは本年の最も重要な成果の1つと考えられる。得られた結果に関しては、き裂進展に伴うA E検出トリガレベルは実用モニターレベルから考えても充分可能な検出レベルと考えられる。又、導波棒使用によるA E検出は、導波棒相互の長さを容易に変えることができ、時間差による外来ノイズの除去が容易で、現在では感度低下を伴う高温用センサ(LiNbO<sub>3</sub>)よりも、導波棒使用による常温センサー(PZT)による検出の方が有利であるという結論が得られている。

### 5.3.2 A E発生状況

変形に伴うA Eに関しては一般的には、降伏に伴いその活動度が大きいのが特徴である。しかしながら、溶体化処理、鋭敏化処理等によりその金属組織を変化させると、A E発生状況に大きな差異がみられ、加工硬化領域においてもA E信号が観察されている。又、破断にいたる寸前にも、かなり大きな信号が観察され、き裂進展によるA Eと考えられる。このような結果が得られたのは評価に値するが、これらの因子の影響についてはまだ試験結果が少なく、特に溶接熱影響部とのからみにおいて、今後の試験が必要である。Kaiser効果、及び低温回復の影響が調べられたが、これら材料では必ずしもKaiser効果は成立せず、特にCr-Mo鋼では、除荷時にかなりのA Eが計測されている。これは、次の繰り返し変形に伴うA E測定と併せ検討すべき項目である。

繰り返し変形下のA E挙動が、SUS304、SUS316に関しては明らかにされた。再降伏に伴いA Eピークが観察され、これは疲労き裂に伴うA Eを理解する上に重要な指針を与えるものと思われる。しかしながら、繰り返し数と共にそのエネルギーは低下している。

又、全ての變形において、ひずみ速度の増加と共にA E信号は増大しているが、定量的な関係式を得るにはいたっていない。

### 5.3.3 温度の影響

變形に伴うA Eは、SUS304、SUS316では變形温度の上昇と共にその活性を増しており、一方Cr-Mo鋼では、温度の影響は顕著に見られなかった。

これは、SUSでは高温においてSerrationが生ずる變形機構に対応して、固溶原子と転位の動的効果に帰せられるものであろう。これに対応して疲労き裂進展におけるA E活動度も、温度と共に上昇している。この原因は、単に變形のA Eの延長として捉えられるのみでなく、高温になると室温などの低温領域での疲労き裂の進展と異なり、高温クリープ現象が加わり、高温領域における疲労破壊が促進されると考えられる。これに伴って、A Eの活性の増大、及び新たな荷重点相でのA E信号の増大などの現象が生ずるものと考えられる。

又、き裂開閉のA Eに関しては、今後酸化膜の形成と破壊の面からも検討が必要である。

### 5.3.4 応力位相とA E信号の関係

疲労き裂進展に伴うA Eの意味を明確にするには、応力位相のどの領域で、どのようなA E信号が生じているかを把握しなくてはならない。本試験研究で得られたSUS304の結果は、この点を明確にしたものであり、き裂開閉、特にき裂が開くに伴い大きな信号が観察されている。又、この領域の信号は、応力反転に伴う再降伏（バウシinger効果）によるA E信号とも考えられ、今後、平滑材の応力反転に伴うA E信号を定量的に把握して、その発生機構を明らかにしなければならない。

その他に、数十～数百サイクル毎に、き裂進展によると思われる突発型A Eが最大荷重点近傍で観察されている。これは、1サイクル毎のき裂進展によると云うよりはむしろ、巨視的なき裂進展挙動の変化（例えば、ストライエーションの集合体としてのパッチの形成に対応）に起因するものと考えられる。

この他、最大荷重保持時間中にもA E信号が生じており、クリープ効果によるき裂進展と思われる。

以上、応力位相-A E信号の関係より、A E発生の原因をかなり明確にしえたと思われるが、き裂開閉に伴うA Eも、き裂近傍の残留応力に支配された材料因子と考えられ、応力条件との関係において、このような信号処理が有益であることが示された。

このき裂開閉に関しては、モードの異なるき裂進展に伴うA E挙動が、実機との関係において、今後とも研究の必要があろう。

### 5.3.5 き裂進展量とA E

応力条件により、き裂進展速度が変化し、それに伴い発生するA E信号そのものは、当然変化する

ることになる。5.3.4に述べた位相の影響は、A Eの起源を知る上に重要であるが、現実の実機へのA E適用にあたっては、破壊力学諸因子、き裂断面積等に対するA Eの定量的評価が必要になる。本試験研究では、そのような結果を得るにいたっていないが、電気抵抗、その他の手法で、き裂進展量を確認しつつA E特性との比較の検討が必要になる。

又、低サイクル高温疲労におけるき裂の進展把握においては、振幅分布の勾配と発生エネルギーによる評価が重要であると考えられる。これによって少なくとも、定性的にき裂の進展を把握することが可能と考えられる。しかし、A E特性のうちどのようなA Eパラメータを把握すれば、き裂の進展を評価しうるかについては、本試験の段階では定性的な結果であって、この結果は今後の検討方向を示唆するものと考えられる。

### 5.3.6 A E信号処理とその表示

現在の所、A E試験結果の整理法は、確立されたものが提案されていない。これは、有意信号処理法が各々のA E発生状況により異なり、有効因子の抽出が、材料、構造条件に依存するということを考えると、いたし方のないことではある。

本試験研究では、このような現状において、一応、データフォーマットの作製を行ないえたことは、我が国では勿論、他に類をみないものであり、今後のA E研究を単純化して進めるにあたり、評価されうるものであろう。すなわち変換子の絶対感度、その取り付け法、計測系の最低具備条件、機械的、電氣的雑音除去の手法、事象数とそのピーク電圧の分布、等に注目した測定法が進められる基礎をなすものである。このデータフォーマットの標準化を通して、装置、及び検出手法を含めた高度なA E検出技術の確立と、データ処理システムの確立、定量化が期待される。

## 6 章 結 言

本年度の試験研究には、変換子の標準較正法にはじまり、各研究機関ともA E検出方法、及び装置の作製、検討に多くの時間を取られ、系統的な試験条件での、定量的な実験結果を得るにはいたっていない。この事は、又、A E技法 そのものが確立された技法としてはいまだ難しい面があり、有効なA E信号処理因子についても、確固たるものが提案されていない現状からみて、当然といえる。それ故に、結論に関しても、定性的にまとめざるをえないし、且つ、その評価も、推論的な考察にとどまっている部分が多い。しかしながら、このような研究現状の中であって、

(1) F A E 標準変換子校正法の確立

(2) 検出技術の標準化

(3) データ処理システムの確立

(4) A Eデータフォーマットの作製

等、A E検出、データ処理にかかわる基礎的問題点を解決し、構造材料としてのSUS304、SUS316、Cr-Mo鋼を用いて、

(5) 高温における単軸引張り変形に伴うA E挙動を実験的に把握し、

(6) 繰返し変形に伴うA E

について、一部有益な結論が得られている。

又、き裂進展に関しては、

(7) 応力位相とA E発生の関係

を知ることにより、疲労き裂進展に伴うA E発生機構に関する考察を進めると共に、

(8) 低サイクル高温疲労に関するA E特性の把握

(9) 割れの実用モニターのための指針

など、多くの示唆に富む結果が得られている。これらの結果は、近い将来、構造材料のA E特性を定量化する貴重な基礎資料となりうる。

幸い、次年度においても、本試験研究の継続が予定されており、(1)~(4)項の計測技術、処理技術の標準化を進めつつ、(6)~(8)項のA E特性の定量化をはかり、よって実機へのA E技法適用の確立をめざすことが期待される。

最後に、本年度の試験研究を総括することにより、A E材料特性の定量化を進めると共に、A Eを実機適用するにあたっては、新たに以下の課題についての検討が早急に望まれることを付記したい。

(1) モードの異なるき裂進展に伴い生ずるA E信号の解析

(2) 高温における環境（雰囲気）のA E特性への影響