

JAERI-M

9037

BWR近似高温水中における疲労き裂成長
に伴うAE波の検出

1980年9月

燃料工学部材料工学研究室

東北大学工学部一般工学教室

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合せは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

B W R 近似高温水中における疲労き裂成長に伴う A E 波の検出

日本原子力研究所燃料工学部材料工学研究室
東北大学工学部一般工学教室

(1 9 8 0 年 7 月 3 1 日受理)

BWR 一次系を近似した高温高圧水中で原子炉圧力容器用の S A 5 3 3 B 鋼に繰返し荷重を与えたとき、腐食疲労効果によってき裂成長が促進されるとともに、それに伴って放出される AE (アコースティック・エミッション) も腐食疲労特有のものが検出されることを見出した。

この AE を明確に把えるために、試験片と荷重ピンの間の摩擦によるノイズなどの障害をのぞき、適切なフィルターを用いた。検出された信号をスペクトル解析した結果、高温水環境下の各荷重サイクル毎のき裂成長に直接対応した信号が検出可能となった。

得られた AE 信号のエネルギーの一サイクル当りの累積 ($d \Sigma E_{AE} / \text{mm} / d N$) とき裂成長速度 ($da / d N$) の測定結果の間の相関を調べてみると、

$$da / d N = C (d \Sigma E_{AE} / \text{mm} / d N)^n$$

C, n は定数で示される関係が成立しており、AE エネルギーからき裂成長速度を精度良く推定できることが示された。

この種の AE の検出法を稼動中の原子炉プラントの連続モニタリングに用いる可能性についても述べた。

Detecting Acoustic Emission During Cyclic Crack Growth
in Simulated BWR Environment

Division of Nuclear Fuel Research,
Tokai Research Establishment, JAERI
Dept. of Engineering Science, Faculty of
Engineering, Tohoku University

(Received July 31, 1980)

An attempt is made to detect and analyze acoustic emissions from cyclic crack growth in SA 533 grade B steel in the simulated BWR water environment.

Significant levels of signals caused by the environment-enhanced crack growth were obtained through appropriate noise reduction techniques. By reducing the frictional noises between the loading pins and the specimen, as well as characterizing the spectrum of signals emitted from various sources, discrete signal identification was made possible.

The following empirical relationship was obtained between the energy of emission and the crack growth rate:

$$da/dN = C(d \sum E_{AE}^n / mm/dN)^n$$

where C and n are material constant and exponent respectively.

The possibility of utilizing this type of acoustic emission technique was also discussed in relation to future continuous monitoring of operating nuclear plants.

Key Words: Acoustic Emission, Spectrum Analysis, Crack Growth Monitoring, SA 533 Grade B Steel, Corrosion Fatigue, Simulated BWR Environment

The work was performed under co-operation between Tohoku University and JAERI in 1978 and 1979.

目 次

1. まえがき	1
2 AE モニタリング技術の現状	2
3 実験方法	3
4 実験結果および討論	5
4. 1 き裂成長速度	5
4. 2 擬AE信号とその除去	6
4. 3 高温高圧水中における繰返しき裂成長による真のAE信号	7
5. 結論	8
謝辞	9
参考文献	10
附録 1. 疲労き裂成長速度データ	26
附録 2. 室温引張試験結果	31
附録 3. AE計測データ	32

CONTENTS

1. PREFACE	1
2. TECHNICAL BACKGROUND FOR ACOUSTIC EMISSION MONITORING	2
3. EXPERIMENTAL.....	3
4. RESULTS AND DISCUSSION	5
4.1 CRACK GROWTH RATE	5
4.2 FALSE SIGNAL AND THEIR SEPARATION	6
4.3 TRUE ACOUSTIC EMISSION SIGNALS DUE TO CYCLIC CRACK GROWTH IN WATER..	7
5. CONCLUSION	8
ACKNOWLEDGEMENTS	9
REFERENCES	10
APPENDIX 1 RESULTS OF FATIGUE CRACK GROWTH RATE MEASUREMENT	26
APPENDIX 2 RESULTS OF ROOM TEMPERATURE TENSILE TEST.....	31
APPENDIX 3 RESULTS OF ACOUSTIC EMISSION DETECTION	32

1. まえがき

BWRを近似した高温高圧水中における原子炉圧力容器鋼の腐食疲労き裂成長挙動を明らかにするため、昭和50年度より原研・燃料工学部材料工学研究室と東北大学工学部一般工学教室との間で研究チームを編成し、協力研究を開始した。

昭和50年度および51年度には圧力容器鋼の溶接部に焦点を絞った実験を行い、溶接部のミクロ組織は高温水中特有のき裂成長挙動を示すことをたしかめるとともに、き裂成長速度は材料のミクロ組織に依存することを明らかにした。^{(1), (2)}

この実験を通して、高温水中における変動荷重により進行するき裂の定量的な追跡方法を確立することや、き裂成長のメカニズムを解明することの必要性が痛感された。

一方、東北大学において、一般工学科と情報工学科の協力のもとに、材料試験に適した機能をもつAE計測装置の開発がなされた。そしてこれを応用した材料の破壊のき裂成長過程とAE特性の関係に関する基礎的な研究が行なわれた。⁽³⁾

このような背景をもとに、このAE装置を応用して高温水中のき裂成長の定量的な追跡方法の確立と割れのメカニズムの解明を目的とした新しい協力研究計画ができた。

昭和53年度当初より、このAE計測システムを高温高圧水系へ適用する試みを開始し、技術的な準備に入った。同年10月から翌年10月までの間に各種の実験を行った。

第一期では高温水系からのAE信号を検出することを試み、各種の信号を計測することが可能となった。さらに第二期ではAE信号源を確認することや、各種の雑音信号の除去方法の確立をはかった。これらの結果を解析し、高温水中におけるき裂成長に対応したAEの検出技術を確立することが出来、さらにこの種のAE計測が高温水中におけるき裂成長を非破壊的にかつ連続的にモニター出来る可能性を有していることがわかった。⁽⁴⁾

なお、昭和53、54年度の研究は東北大学との協力により次に示す研究チームにより進められた。

(1) 総 括

近藤達男（原研燃料工学部材料工学研究室長）

鈴木正彦（東北大学工学部一般工学教室教授、現トヨタ自動車教育部）

高橋秀明（東北大学工学部一般工学教室、助教授）

(2) 試験の計画と結果の解析

中島 甫（原研燃料工学部材料工学研究室）

庄子哲雄（東北大学工学部一般工学教室助手）

(3) 試験の実施

※材料の引張破壊や疲労き裂の成長に伴って起る固体内の弾性エネルギーの解放はしばしば音波の発生を伴うことが知られている。この音波の放出をアコースティックエミッション（略してAE）と呼び、その周波数帯域は通常20KHzから1MHz程度と言われている。

中島 甫（原研燃料工学部材料工学研究室）

新藤雅美（ ” ）

鈴木富男（ ” ）

木内 清（ ” ）

菊地正彦（ ” ）

辻 宏和（ ” ）

庄子哲雄（東北大学・工学部・一般工学教室助手）

新妻弘明（東北大学・工学部・情報工学教室助手、現電気工学科助手）

玉川欣治（東北大学・工学部・一般工学教室助手）

菊池正明（東北大学・工学部・一般工学教室・大学院生、現東京芝浦電気）

千葉昌幸（東北大学・工学部・一般工学教室・大学院生、現日産自動車）

湯田周二（東北大学・工学部・一般工学教室・大学院生）

2. AE モニタリング技術の現状

AEは材料の内部で起る微視的な破壊を動的に把握する有力な手段の一つである。最近になって、材料の塑性変形、疲労あるいは破壊過程とAE特性の関係を求めるための試みがなされてきた。^{(5)~(9)}

安全性がとくに重要視される原子炉プラント等では、圧力壁となる構造物に潜在的にある材料の欠陥の成長あるいは稼動中に炉内環境の損傷効果で新たに作り出される欠陥の成長の有無を監視できることが望ましい。仮りにき裂成長のデータが十分に蓄積されて予測が可能な場合でも、より高い安全性の確保の上では実際にプラントが出力運転中の連続監視がより優れていることは言うまでもない。

AEモニタリングはそうした目的を達する上で最も有力な手段と考えられている。従来AEモニタリングは、疲労におけるき裂成長のような安定なき裂成長、すなわち各荷重サイクル下で起る破壊が微小な場合には適用が難しいとされ、不安定破壊時の急速破断への応用が主と考えられてきた。⁽¹⁰⁾ このように単位時間に放出されるAEエネルギーの大きさによって、AEモニタリングの可能性が左右される傾向にある。

まず著者らは、従来行なわれてきた材料の破壊挙動とAE特性に関する実験のほとんどすべてが大気中あるいは非腐食性媒体の中でのものであることに注目した。また高温高圧水中での低合金鋼の疲労き裂成長速度は荷重繰返し速度が10 cpm以下の低い場合とくに顕著に加速されることが見い出されており^{(11)~(13)}、とくに極端な試験条件下の場合には、高温高圧水中における低合金鋼の腐食疲労き裂成長速度は大気中のそれと比較して約10倍程度に加速されることも経験されている。⁽¹⁴⁾ 高温水の水化学環境と荷重負荷モードの両者が実際の原子炉の運転条件に近くなると実験室の試験で作り得る試験条件と比べてき裂成長速度がさらに大きくなる可能性もある。

一般に高温水中における腐食疲労損傷により形成される破面は大気中における疲労損傷によ

中島 甫（原研燃料工学部材料工学研究室）

新藤雅美（ ” ” ）

鈴木富男（ ” ” ）

木内 清（ ” ” ）

菊地正彦（ ” ” ）

辻 宏和（ ” ” ）

庄子哲雄（東北大学・工学部・一般工学教室助手）

新妻弘明（東北大学・工学部・情報工学教室助手、現電気工学科助手）

玉川欣治（東北大学・工学部・一般工学教室助手）

菊池正明（東北大学・工学部・一般工学教室・大学院生、現東京芝浦電気）

千葉昌幸（東北大学・工学部・一般工学教室・大学院生、現日産自動車）

湯田周二（東北大学・工学部・一般工学教室・大学院生）

2. AE モニタリング技術の現状

AEは材料の内部で起る微視的な破壊を動的に把える有力な手段の一つである。最近になって、材料の塑性変形、疲労あるいは破壊過程とAE特性の関係を求めるための多くの試みがなされてきた。^{(5)~(9)}

安全性がとくに重要視される原子炉プラント等では、圧力壁となる構造物に潜在的にある材料の欠陥の成長あるいは稼動中に炉内環境の損傷効果で新たに作り出される欠陥の成長の有無を監視できることが望ましい。仮りにき裂成長のデータが十分に蓄積されて予測が可能な場合でも、より高い安全性の確保の上では実際にプラントが出力運転中の連続監視がより優れていることは言うまでもない。

AEモニタリングはそうした目的を達する上で最も有力な手段と考えられている。従来AEモニタリングは、疲労におけるき裂成長のような安定なき裂成長、すなわち各荷重サイクル下で起る破壊が微小な場合には適用が難しいとされ、不安定破壊時の急速破断への応用が主と考えられてきた。⁽¹⁰⁾ このように単位時間に放出されるAEエネルギーの大きさによって、AEモニタリングの可能性が左右される傾向にある。

まず著者らは、従来行なわれてきた材料の破壊挙動とAE特性に関する実験のほとんどすべてが大気中あるいは非腐食性媒体の中でのものであることに注目した。また高温高圧水中での低合金鋼の疲労き裂成長速度は荷重繰返し速度が10 cpm以下の低い場合とくに顕著に加速されることが見い出されており^{(11)~(13)}、とくに極端な試験条件下の場合には、高温高圧水中における低合金鋼の腐食疲労き裂成長速度は大気中のそれと比較して約10倍程度に加速されることも経験されている。⁽¹⁴⁾ 高温水の水化学環境と荷重負荷モードの両者が実際の原子炉の運転条件に近くなると実験室の試験で作り得る試験条件と比べてき裂成長速度がさらに大きくなる可能性もある。

一般に高温水中における腐食疲労損傷により形成される破面は大気中における疲労損傷によ

るものと比較して脆性的な傾向を持つと言われており、破壊モードが脆性的な傾向を持つにしたがって、破壊に伴って放出されるAEのエネルギーは大きくなると考えられる。

いずれにせよ、そのような加速条件のもとでは、き裂成長に伴って放出されるAEも当然大きくなることが予想され、その結果AEの検出が可能になるかもしれないと考えた。しかしながら、高温高圧純水中でのき裂成長に伴うAEを検出することに焦点を絞った研究は少ない。⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾

本研究の目的はBWR一次系を近似した高温高圧純水中でSA533B鋼が変動応力を受けることにより生ずるき裂成長に伴って放出されるAEを検出するための方法を確立することである。

このために克服しなければならない技術的な障壁は

- (1) 水化学環境ならびに力学的条件がよく定義された系内で腐食疲労試験を行うこと。
- (2) AEの発生源の確認とバックグラウンドノイズを除去すること。

であると考えられる。前者は高温高圧水中での腐食疲労試験に特有の問題であり、後者はAEに関する実験に共通した問題と言える。

3. 実験方法

腐食疲労試験は容量±10トンの電磁油圧式の疲労試験機と高温高圧純水ループを組み合せた装置により実施した。純水ループの配管および機器はすべてSUS304ステンレス鋼製とし、水質についてはとくに運転中のBWRの一次系である高温高圧純水環境を近似した条件に保つことに留意した。水質は溶存酸素および電導度を試験オートクレーブの出口で測定した。⁽¹¹⁾
試験装置の構成および詳細な仕様は他の報告に記した。

素材は板厚16.5mmのSA533B鋼である。

著者らが既に報告したように、高温高圧水環境によるき裂の成長速度の加速の程度は素材のミクロ組織に大きく依存することが知られているので⁽¹¹⁾、き裂成長速度とAE特性の相互関係を多面的に調らべるためミクロ組織の異なる2種類の試験片を用意することにした。上述の目的を達成することをねらいとして、素材の化学組成を変えることなく極端に異なったミクロ組織を有する試験片を作るため、素材の一部に熱処理を施した。すなわち、一つは実際の原子炉圧力容器鋼として用いられているいわゆる母材に相当する焼戻しベーナイト組織であり、他方は油焼入れにより得られたマルテンサイト組織である。

供試材の化学組成、熱処理履歴および機械的性質をTable 1に示す。

本研究に用いた試験片の形状をFig. 1に示す。特殊な形状をもったこの試験片はContoured Double Cantilever Beam(CDCB)型と呼ばれ、一定の荷重振巾のもとではき裂長さの如何に拘わらず応力拡大係数範囲(Stress Intensity Factor Range、以後△Kと呼ぶ)が一定となる特色を有している。これに対して、通常広く用いられているASTM(American Society for Testing and Materials)で規定されているCompact-Tension(CT)型の試験片の場合は、一定の荷重振巾のもとでも、き裂が成長するにつれてだんだん△Kが大きくなる傾向を示す。このように一定の△Kの条件下で疲労試験が行なえる

るものと比較して脆性的な傾向を持つと言われており、破壊モードが脆性的な傾向を持つにしたがって、破壊に伴って放出されるAEのエネルギーは大きくなると考えられる。

いずれにせよ、そのような加速条件のもとでは、き裂成長に伴って放出されるAEも当然大きくなることが予想され、その結果AEの検出が可能になるかもしれないと考えた。しかしながら、高温高圧純水中でのき裂成長に伴うAEを検出することに焦点を絞った研究は少ない。⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾

本研究の目的はBWR一次系を近似した高温高圧純水中でSA533B鋼が変動応力を受けることにより生ずるき裂成長に伴って放出されるAEを検出するための方法を確立することである。

このために克服しなければならない技術的な障壁は

- (1) 水化学環境ならびに力学的条件がよく定義された系内で腐食疲労試験を行うこと。
- (2) AEの発生源の確認とバックグラウンドノイズを除去すること。

であると考えられる。前者は高温高圧水中での腐食疲労試験に特有の問題であり、後者はAEに関する実験に共通した問題と言える。

3. 実験方法

腐食疲労試験は容量±10トンの電磁油圧式の疲労試験機と高温高圧純水ループを組み合せた装置により実施した。純水ループの配管および機器はすべてSUS304ステンレス鋼製とし、水質についてはとくに運転中のBWRの一次系である高温高圧純水環境を近似した条件に保つことに留意した。水質は溶存酸素および電導度を試験オートクレーブの出口で測定した。試験装置の構成および詳細な仕様は他の報告に記した。⁽¹¹⁾

素材は板厚16.5mmのSA533B鋼である。

著者らが既に報告したように、高温高圧水環境によるき裂の成長速度の加速の程度は素材のミクロ組織に大きく依存することが知られているので⁽¹¹⁾、き裂成長速度とAE特性の相互関係を多面的に調べるためにミクロ組織の異なる2種類の試験片を用意することにした。上述の目的を達成することをねらいとして、素材の化学組成を変えることなく極端に異なったミクロ組織を有する試験片を作るため、素材の一部に熱処理を施した。すなわち、一つは実際の原子炉圧力容器鋼として用いられているいわゆる母材に相当する焼戻しベーナイト組織であり、他方は油焼入れにより得られたマルテンサイト組織である。

供試材の化学組成、熱処理履歴および機械的性質をTable 1に示す。

本研究に用いた試験片の形状をFig. 1に示す。特殊な形状をもったこの試験片はContoured Double Cantilever Beam(CDCB)型と呼ばれ、一定の荷重振巾のもとではき裂長さの如何に拘わらず応力拡大係数範囲(Stress Intensity Factor Range, 以後△Kと呼ぶ)が一定となる特色を有している。これに対して、通常広く用いられているASTM(American Society for Testing and Materials)で規定されているCompact-Tension(CT)型の試験片の場合は、一定の荷重振巾のもとでも、き裂が成長するにつれてだんだん△Kが大きくなる傾向を示す。このように一定の△Kの条件下で疲労試験が行なえる

C D C B型試験片の利点はC T型試験片と比較して、き裂成長速度を精度良く求めることが出来るばかりでなく、 ΔK が一定のもとでのA Eの計測を繰返し行なえることにあるといえる。

この試験片の応力拡大係数（Stress Intensity Factor以後Kと呼ぶ）は①式によって

$$(4), (17)$$

 計算される。

ここで

K : 応力拡大係数 (MPa \sqrt{m})

P : 試験片に作用する荷重 (MN)

B : 試験片の最大厚み (m)

B_n : 試験片の最小厚み (m)

$$m = 3.13 \times 10^2 \text{ (1/m)}$$

実験条件をまとめて Table 2 に示す。

試験片に予備き裂を約 5 mm 導入し、大気中でのき裂成長速度を測定後、高温高圧純水中での疲労試験を実施した。予備き裂の導入は ΔK が $2.5 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ 以下で実施した。高温水中での疲労き裂の成長は板厚の影響を受けず、マクロ的にはき裂先端は直線と見ることが出来た。また一つの ΔK 当り 1.5 mm から 2.0 mm 程度のき裂成長が認められるように荷重繰返し数を選択した。

き裂長さは下記の2つの方法で決定した。すなわち、

- (1) 試験片の肩部に取り付けられたLVDT(Linear Variable Displacement Transducer)を用いたコンプライアンスの測定
 - (2) ビーチマークによる破面観察

である。

ΔK が $4.6.5\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ より低い条件のもとでは、上に述べた二つの異なったき裂長さの測定法によるき裂長さは $\pm 0.04\text{ mm}$ の範囲内で一致した。一方、 ΔK が $4.6.5\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以上の試験ではコンプライアンス法により求めたき裂長さはピーチマーク法により求めた実際のき裂長さよりやや短かめに測定されることがわかった。したがって、 ΔK が大きな試験条件下ではコンプライアンス法はき裂長さの絶対的な測定には用いず、き裂長さと荷重繰返し数の間に直線関係が成立していることの確認、すなわち同一荷重条件下ではき裂成長速度が一定であることを定性的にモニターすることにのみ用いた。

最終的なき裂成長速度の定量は、同一荷重条件のもとで得られたき裂長さの増加分をその間に行なわれた荷重繰返し総数で割った値 ($\Delta a / \Delta N$) として求めた。

このような方法でのき裂成長速度の測定は、荷重繰返し数とき裂長さとの間に直線関係が成立するという CDCB 型試験片の特色を利用したものであって、等価の現象を何度も何度も繰返しあさせた後に、それらの平均値を取ることを基礎としている。合計 4 個の試験片を用い

※試験片の剛性の逆数に相当する量

て行った大気中における ΔK とき裂成長速度に関する予備的な再現性試験の結果では 0.992 という相関係数が得られ、これは通常の CT 試験片を用いた場合と比較してデータのバラツキが少ないことを示していると言える。⁽¹⁸⁾

Fig. 2 に本研究で用いたAE計測システムの構成図を示す。AEの検出周波数は2 KHzから1 MHzの範囲である。Fig. 3 は高温高圧水中での疲労試験によるき裂成長に伴って放出されるAEを検出する目的で本実験で採用した圧電気素子の取り付け方を示したものである。現在のところ高温高圧水中で直接試験片に取り付けることが可能な圧電気素子がないので、試験片の後方表面に直接溶接付けされた直径4 mm, 長さ750 mmのステンレス製の導波管を介してオートクレーブの外部に共振周波数特性が1 MHzの圧電気素子を取り付けた。

き裂成長に伴って放出されるAE信号が導波管を通つてくる間に減衰することを考慮して、各試験ごとに導波管の取付状態が同じになるよう注意深く再現した。そのような配慮をした結果、一連の試験によって得られたAE信号をそのまま比較することが可能となった。

最初、荷重繰返し時のき裂成長に伴って放出された信号は導波管を通してオートクレーブの外側にある圧電気素子まで伝達され、電気信号に転換された。これらの電気信号は図2-aに示すように2KHzから1MHzの周波数帯域を有する信号処理装置に入力された。入力信号の強度に応じて十段階に弁別されたヒストグラムが2秒間隔ごとに作製された。それと同時に入力信号は100Hzから1MHzまでの周波数帯域を持ったVTR型の磁気テープに記録された。試験後、記録された信号は可変のバンドパスフィルターを通してエネルギー検出器に入力された。一方、図2-bに示すごとく信号の波形と周波数特性はオシロスコープと周波数解析器により調べた。

4. 実験結果および討論

4.1 き裂成長速度

Fig. 4 は大気中における一定荷重振巾下でのき裂成長挙動を示したものである。これよりき裂長さと荷重繰返し数の間に直線関係が成立しており、試験片の形状から期待される通り、き裂長さの如何に拘わらず一定のき裂成長速度を示している。

Fig. 5 は大気中およびBWR近似高温水中におけるき裂成長速度とき裂先端に作用する△Kの関係を示したものである。近藤らは焼戻しベーナイト組織を有するいわゆる母材のき裂成長速度が⁽⁹⁾高温水環境により加速されることを見い出した。そして、同程度の高温水環境によるき裂成長速度の加速が本研究でも観察された。

実験した範囲では大気中および高温水中試験とも△Kとき裂成長速度の間に成立することが広く知られている

の関係式を満足することが確かめられた。

ここで、 da/dN はき裂成長速度、 C_1 は材料定数、 n_1 は指数である。本実験により求め

て行った大気中における ΔK とき裂成長速度に関する予備的な再現性試験の結果では 0.992 という相関係数が得られ、これは通常の CT 試験片を用いた場合と比較してデータのバラツキが少ないことを示していると言える。⁽¹⁸⁾

Fig. 2 に本研究で用いたAE計測システムの構成図を示す。AEの検出周波数は2 KHzから1 MHzの範囲である。Fig. 3 は高温高圧水中での疲労試験によるき裂成長に伴って放出されるAEを検出する目的で本実験で採用した圧電気素子の取り付け方を示したものである。現在のところ高温高圧水中で直接試験片に取り付けることが可能な圧電気素子がないので、試験片の後方表面に直接溶接付けされた直径4 mm、長さ750 mmのステンレス製の導波管を介してオートクレーブの外部に共振周波数特性が1 MHzの圧電気素子を取り付けた。

き裂成長に伴って放出されるAE信号が導波管を通つてくる間に減衰することを考慮して、各試験ごとに導波管の取付状態が同じになるよう注意深く再現した。そのような配慮をした結果、一連の試験によって得られたAE信号をそのまま比較することが可能となった。

最初、荷重繰返し時のき裂成長に伴って放出された信号は導波管を通してオートクレープの外側にある圧電気素子まで伝達され、電気信号に転換された。これらの電気信号は図2-aに示すように2KHzから1MHzの周波数帯域を有する信号処理装置に入力された。入力信号の強度に応じて十段階に弁別されたヒストグラムが2秒間隔ごとに作製された。それと同時に入力信号は100Hzから1MHzまでの周波数帯域を持ったVTR型の磁気テープに記録された。試験後、記録された信号は可変のバンドパスフィルターを通してエネルギー検出器に入力された。一方、図2-bに示すごとく信号の波形と周波数特性はオシロスコープと周波数解析器により調べた。

4. 実験結果および討論

4.1 き裂成長速度

Fig. 4 は大気中における一定荷重振巾下でのき裂成長挙動を示したものである。これよりき裂長さと荷重繰返し数の間に直線関係が成立しており、試験片の形状から期待される通り、き裂長さの如何に拘わらず一定のき裂成長速度を示している。

Fig. 5 は大気中およびBWR近似高温水中におけるき裂成長速度とき裂先端に作用する△Kの関係を示したものである。近藤らは焼戻しベナイト組織を有するいわゆる母材のき裂成長速度が高温水環境により加速されることを見い出した。⁽⁹⁾そして、同程度の高温水環境によるき裂成長速度の加速が本研究でも観察された。

実験した範囲では大気中および高温水中試験とも ΔK とき裂成長速度の間に成立することが広く知られている

の関係式を満足することが確かめられた。

ここで、 d_a / d_N はき裂成長速度、 C_1 は材料定数、 n_1 は指数である。本実験により求め

られた大気中および高温水中における C_1 と n_1 の値をTable 3 に示す。

両者ともいわゆる焼戻しペーナイト組織を有するヒートAとヒートBの高温水中におけるき裂成長速度を比較してみると、 ΔK が $3.5.5 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ 以下ではヒートAの方がヒートBよりもき裂成長速度が大きいと言える。このき裂成長速度のヒート間の差は、波形、応力比、あるいは試験片の切り出し方向といったような二次的な試験条件の相違に起因しているものかもしれない。

一方、上で述べたような二次的な試験条件の相違にも拘わらず、 ΔK が $3.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以上では 2 つのヒート間のき裂成長速度の見掛けの差は少ないと見える。

油焼入により完全なマルテンサイト組織とした場合（B-2）と焼戻しベーナイト組織の場合（B-1）を比較してみると、マルテンサイト組織のものの方がベーナイト組織のもの場合より高温水環境によるき裂成長の加速は少なく、 ΔK が $6.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以上の場合には高温水環境によるき裂成長の加速は認められない。

4.2 擬 A/E 信号とその除去

高温高圧水中における腐食疲労試験においては、 ΔK が $30 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ においても、それ以上の ΔK の範囲と同様に多数の、そして振巾の大きなAE信号が 20 dB の利得でも得られた。さらに、荷重増加の状態ではかなりレベルの大きな可聴音が観察された。Fig. 6 にこの場合のAE波形とその周波数分布特性を示す。この図から、このような波のほとんどは 500 KHz 以下の周波数を有していることがわかる。このような信号を一サイクル当たりに放出される信号の単位板厚当りのエネルギーの累積量 ($\text{d} \Sigma E_{\text{AE}} / \text{mm} / \text{d}N$) として、き裂成長速度 ($\text{da} / \text{d}N$) と両対数上にプロットしたのが Fig. 7 である。この両者は、見かけ上よい対応関係を示し、仮に表現したとすれば

$$\frac{da}{dN} = C_2 \left(\frac{d\Sigma E_{AE}}{dm/dN} \right)^{n/2} \dots \quad (3)$$

と表わされる。ここで C_2 , n_2 はそれぞれ材料定数と指数である。しかしながらこの結果は、AE 信号の発生源およびその発生機構に対する検討を通してその妥当性が示されなければならぬ。

あらかじめ、き裂先端にドリル穴を設け、負荷の繰返しがあってもき裂の成長が生じないようにした試験片を用いた2～3の予備試験などの結果より、これまで述べてきたAE信号の源は試験片のピン穴と負荷ピンの間の摩擦によるものであることが明らかとなった。すなわち、CDCB型やCT型の試験片は負荷にともなう開口とともに荷重点に回転成分が生じ、そのため摩擦音が発し、それがAE信号として捉えられていた事が判明した。高温高圧水中における試験時にのみAE信号が認められたのは、ピン穴、ピン部におけるマグネタイト酸化膜が摩擦現象に大きな影響を有していたためと考えられる。

この摩擦音が高温高圧水中における試験時にのみ観察され、さらに図7に示した如く一サイクル当たりのAE信号の累積量とき裂成長速度の間に見掛け上の関数関係が成立したことなどは、

$$\text{※ 応力比 (R) } = P_{\min} / P_{\max} = K_{\min} / K_{\max}$$

上述のAE信号が高温水中でのき裂成長にあたかも対応していたかのような錯覚を生じさせる多くのトリックになっていたと言える。その理由は一定荷重振巾のもとではき裂長さによらずき裂先端における ΔK が一定となるようなCDCB型の試験片を採用したためと考えられる。すなわち、そのような条件下では荷重振巾、 ΔK 、き裂成長速度そしておそらく摩擦により消費されるエネルギー等の多くの物理量の間に単純な関数関係が成立していたためであろう。

そこで、次の試みとして、この摩擦音を減ずる目的でテフロンで被覆したピンを用いて、前述のドリル穴をき裂先端に有する試験片を高温高圧水中で試験した。このような条件で試験を行った結果、高温高圧水中において広い荷重振巾の範囲においてAE信号はほとんど観察されなくなり、Fig. 8 に示すように検出利得を70 dBまであげる事が可能となり、そのような場合では信号は主としてバックグラウンドノイズだけである。バックグラウンドノイズが有する周波数はほとんど 500 kHz 以下であり、このことは、他の研究者らによって報告されている流体雑音に対応していると思われる。このような対処によってAE信号の検出利得を70 dBまで高めることが可能となり、この利得は大気中における試験時に用いられた利得と同程度である。また、これらの結果より図7に示した結果は全く本質的なものではないことが明らかとなつた。

4.3 高温高圧水中における繰返しき裂成長による真のAE信号

前節の結果にもとづき、その後の高温高圧水中での腐食疲労試験においてはすべてテフロンで被覆したピンを用いた。そのような試験ではバックグラウンドノイズと明瞭に区別できるレベルの高温水中でのき裂成長に伴って発生するAEを検出することができた。

Fig. 9 に高温高圧水中におけるき裂の成長に伴って放出された突発型AEの波形とその周波数分布特性を示す。このようなAE波は、荷重の増加時に観察されるが、そのほとんどは荷重が最大荷重の0.8から1の間に検出された。

Fig. 10 に示す結果は、ベーナイト組織を有する(A-1)受入材について単位サイクル、単位板厚当りのAE放出エネルギーの累積($d \Sigma E_{AE} / mm^2 / d N$)とき裂成長速度($da / d N$)を ΔK の関数として整理したものである。両者とも ΔK に対して同様な傾向を示している。一方 Fig. 11 は、同様な関係をマルテンサイト組織を有する材料について示したものである。Fig. 10, 11 におけるAE放出エネルギーの累積はともに 20 kHz から 1 MHz の間の周波数のエネルギーを採用してある。その理由は 2 kHz ~ 20 kHz の間には、試験機の振動や導波管の共振等によるノイズ信号を含んでいるためである。

Fig. 11 に示したマルテンサイト組織の材料においては、AEの放出エネルギーの累積と ΔK の関係は非線形な対応関係を有するき裂成長速度と ΔK の関係を追従して非線形な対応関係にある。この両者の ΔK に対する対応関係が一致していることは、ここで測定されたAEは少くとも定性的にはき裂成長速度を反映したものである事を示しており、極めて重要である。Fig. 11 において ΔK が $4.65 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ の場合にAEの活動度が著しく大きな値を示しており、き裂成長速度との対応が一見認められないが、この高い活動度の原因是破面観察を通して明らかとなつた。すなわち、この領域における破面上には、大きなラメラーティング

(lamellar tearing)が認められ、荷重の繰返しごとに破面の擦過を生じ、高いAE放出特性を示したものと推察された。

Fig. 12 には、全体の結果をまとめて、AE の放出エネルギーの累積とき裂成長速度の対応関係を示す。図に示された関係は、

$$\frac{da}{dN} = C_3 \left(\frac{\sum E_{AE}}{m} \right)^{n_3} \dots \dots \dots \quad (4)$$

と表わされる。ここで C_3 と n_3 はそれぞれ 1.48×10^{-3} および 0.21 である。但し dA / dN が mm / cycle , EAE が $V^2 \text{ sec}$ である。Fig. 12 に示してある結果は、一サイクル当たりのき裂成長量が概略 $\sim 10^{-3} \text{ mm}$ 程度であるとき、一サイクル当たり放出される AE エネルギーの累積量は約 10^2 のバラツキがあることを示している。このことは、図の直線の勾配が極めて水平に近いこと、すなわち n_3 が小さいことに起因するものであるが、それがゆえに AE エネルギーの累積量がき裂成長速度に極めて敏感である事を示唆している。

実際問題として、このバラツキは本研究で行った範囲内の条件においてはき裂成長速度を推定する上で全く支障がない。すなわち、き裂成長速度の最大のバラツキは約3程度であり、実験上の再現性の範囲内に納まるものと考えられ、高温高圧水中でのき裂成長速度を非破壊的に推定する上では全く問題がないと言える。 n_3 が小さな値であるということは、AE法による高温高圧水中のき裂成長のモニターが有望なものであることを意味している。

今後、ここで用いたようなAE法を原子炉構造物、機器等へ実際に応用するにあたっては、AE波の減衰あるいは位置決めのための技巧的な三角測量法等に関する多くの研究に取り組まなければならぬが、ここで示した結果は、AE法の今後の発展のための基礎を与えるものと思われる。

終りに、本報で述べたAE法は半定量的ではあるが、BWRを近似した高温高圧水環境下における繰返しき裂成長の検知およびその速度の推定に極めて有力な手法であることが明らかとなつた。

5. 結論

高温高压水中における SA 533 B 鋼の腐食疲労き裂成長試験に AE 法を応用し、以下に示す結論が得られた。

- (1) 繰返し荷重によるき裂成長をモニターするためのAE法は環境が高温高圧水である場合には有力な手法である。
 - (2) AE信号の検出は、高温水中でのみ特有に発生するノイズを除去した場合にのみ可能となる。
 - (3) 本研究で得られた一サイクル当りのAEエネルギーの累積とき裂成長速度の間に成立する良い対応関係は、AE法をプラントのモニタリングに応用する場合に極めて有力な基礎を与える。ただし、他の工学的な問題点、例えばAE波の減衰や位置決め手法などが今後並行して研究および開発されなければならない。

(lamellar tearing)が認められ、荷重の繰返しごとに破面の擦過を生じ、高いAE放出特性を示したものと推察された。

Fig. 12 には、全体の結果をまとめて、AE の放出エネルギーの累積とき裂成長速度の対応関係を示す。図に示された関係は、

と表わされる。ここで C_3 と n_3 はそれぞれ 1.48×10^{-3} および 0.21 である。但し dA/dN が mm/cycle , EAE が $V^2 \text{ sec}$ である。Fig. 12 に示してある結果は、一サイクル当たりのき裂成長量が概略 $\sim 10^{-3} \text{ mm}$ 程度であるとき、一サイクル当たり放出される AE エネルギーの累積量は約 10^2 のバラツキがあることを示している。このことは、図の直線の勾配が極めて水平に近いこと、すなわち n_3 が小さいことに起因するものであるが、それがゆえに AE エネルギーの累積量がき裂成長速度に極めて敏感である事を示唆している。

実際問題として、このバラツキは本研究で行った範囲内の条件においてはき裂成長速度を推定する上で全く支障がない。すなわち、き裂成長速度の最大のバラツキは約3程度であり、実験上の再現性の範囲内に納まるものと考えられ、高温高压水中でのき裂成長速度を非破壊的に推定する上では全く問題がないと言える。 n_3 が小さな値であるということは、AE法による高温高压水中のき裂成長のモニターが有望なものであることを意味している。

今後、ここで用いたようなAE法を原子炉構造物、機器等へ実際に応用するにあたっては、AE波の減衰あるいは位置決めのための技巧的な三角測量法等に関する多くの研究に取り組まなければならないが、ここで示した結果は、AE法の今後の発展のための基礎を与えるものと思われる。

終りに、本報で述べたA E法は半定量的ではあるが、BWRを近似した高温高圧水環境下における繰返しき裂成長の検知およびその速度の推定に極めて有力な手法であることが明らかとなつた。

論 結

5. 結

高温高压水中における SA 533 B 鋼の腐食疲労き裂成長試験に AE 法を応用し、以下に示す結論が得られた。

- (1) 繰返し荷重によるき裂成長をモニターするためのAE法は環境が高温高圧水である場合には有力な手法である。
 - (2) AE信号の検出は、高温水中でのみ特有に発生するノイズを除去した場合にのみ可能となる。
 - (3) 本研究で得られた一サイクル当たりのAEエネルギーの累積とき裂成長速度の間に成立する良い対応関係は、AE法をプラントのモニタリングに応用する場合に極めて有力な基礎を与える。ただし、他の工学的な問題点、例えばAE波の減衰や位置決め手法などが今後並行して研究および開発されなければならない。

謝 辞

本研究で用いたK一定型試験片の応用に際し菊山紀彦副主任研究員の協力を得た。

また実験素材としては一部をバブコック日立株式会社より提供を受けたものを用いたほか、国際協力腐食疲労き裂成長速度委員会（ International Cyclic Crack Growth Rate Committee）の共通試験材料を用いている。

ここに記して謝意にかえる。

REFERENCES

1. M. Suzuki, H. Takahashi, T. Shoji, T. Kondo and H. Nakajima, "The Environment Enhanced Crack Growth Effects in Structural Steels for Water Cooled Nuclear Reactors", Proc. of The Influence of Environment on Fatigue, I Mech. E., 1977, p.161-169.
2. 中島・近藤・庄子・高橋・鈴木, "高温高圧水中の低合金鋼の疲労き裂成長". 鉄と鋼, vol. 65, No 8, 1979, P. 103S-106S.
3. H. Takahashi, M.A. Khan, K. Shimomura and M. Suzuki, "Acoustic Emission Characteristics and Pop-in Cracking in AISI 4340 High Strength Steel", Proc. 4th Acoustic Emission Symposium, Tokyo, 1978, HPI, Japan, p.24-45.
4. H. Nakajima, T. Shoji, M. Kikuchi, H. Niituma and M. Shindo, "Detecting Acoustic Emission During Cyclic Crack Growth in Simulated BWR Environment" to be published in ASTM STP.
5. G. Aioldi, "Acoustic Emission and Deformation Processes in Nuclear Vessel Steels", Mat. Sci. Eng., vol. 38, No. 1, 1979, p.99-110.
6. A.C.E. Sinclair, C.L. Formby and D.C. Connors, "Some Examples of Laboratory Application and Assessment of Acoustic Emission in the United Kingdom", "ACOUSTIC EMISSION" edited by R.W. Nichols, [Applied Science Publishers, London], 1976, p.51-64.
7. L.J. Graham and G.A. Alers, "Spectrum Analysis of Acoustic Emission in A533B Steel", Mat. Eval., vol. 32, No. 1, 1974, p.31-37.
8. T.C. Lindley, I.G. Palmer and C.E. Richards, "Acoustic Emission Monitoring of Fatigue Crack Growth", Mat. Sci. Eng., vol. 32, No. 1, 1978, p.1-15.
9. G. Clark and J.F. Knott, "Acoustic Emission and Ductile Crack Growth in Pressure Vessel Steels", Metal Sci., vol. 11, No.11, 1977, p.531-536.
10. K.E. Stahlkopf and G.J. Daut, "Acoustic Emission: A Critical Assessment", Nuclear Safety, vol. 17, No. 1, 1976, p.33-42.
11. T. Kondo, T. Kikuyama, H. Nakajima, M. Shindo and R. Nagasaki, "Fatigue of A302 grade B Steel in High Temperature Simulated Nuclear Reactor Environment", Proc. 1st Int. Conf. on CORROSION FATIGUE, NACE and AIME, 1972, p.539-556.
12. T.R. Mager, J.D. Landes, D.M. Moon and V.J. McLaughlin, "The Effect of Low Frequencies on the Fatigue Crack Growth Characteristics of A533 Grade B Class 1 Plate in an Environment of High-Temperature Primary Grade Nuclear Reactor Water, WCAP-8256, December, 1973.

13. T.L. Gerber, J.D. Heald and E. Kess, "Fatigue Crack Growth in SA508-cl 2 Steel in a High Temperature, High Purity Water Environment", ASME PV Conference in Miami, June, 1974.
14. W.H. Bamford, "The Effect of Pressurized Water Reactor Environment on Fatigue Crack Propagation of Pressure Vessel Steels", Proc. of The Influence of Environment on Fatigue", I Mech. E., 1977, p.51-56.
15. R. Gopal, "Acoustic Monitoring System to Assure Integrity of Nuclear Plants", Monitoring Structural Integrity by Acoustic Emission, ASTM STP 571, 1975, p.200-220.
16. J.B. Vetrano and W.D. Jolly, "In-Service Acoustic Emission Monitoring of Reactor Pressure Vessels", Mat. Eval., vol. 30, No.1, 1972, p.9-12.
17. S. Mostovoy, B.P. Crosley and E.J. Ripling, "Use of Crack-Line Specimens Measuring Plane-Strain Fracture Toughness", J. Material, vol. 2, No. 3, 1967, p.661-681.
18. 中島, 辻, 近藤, "疲労き裂成長速度のバラツキと試験片形状について", 日本鉄鋼協会秋季大会講演概要集, 1980, (掲載予定).

Table 1 Chemical composition, heat treatment and room temperature mechanical properties of specimen materials

Specimen No.	Chemical Composition (w/o)										Sb	As	Sn
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Sb	As	Sn
A-1	0.19	0.25	1.28	0.009	0.013	0.61	0.04	0.55	0.13	0.004	—	—	—
B-1	0.17	0.02	1.48	0.011	0.006	0.58	0.16	0.52	0.13	0.003	0.0041	0.015	0.008
B-2	0.17	0.02	1.48	0.011	0.006	0.58	0.16	0.52	0.13	0.003	0.0041	0.015	0.008

Specimen No.	Heat Treatment	Tension Test			
		Yield Strength MN/m ²	Ultimate Tensile Strength MN/m ²	Total Elongation %	Reduction of Area %
A-1	899°C×8hrW.Q + 671°C A.C. → 566°C×2hr + 621°C×50hr	452	597	27.2	65.8
B-1	890°C×3.5hrA.C. + 660°C×3.5hrF.C. + 600°C×40.5hrF.C.	480	610	27.0	69.2
B-2	1000°C×30minO.Q.	1003	1128	19.3	73.0

Table 2 Summary of specimen preparation and test condition for high temperature water environment.

Specimen No.	Specimen			Fatigue Test			Demineralized Pure Water			
	Thickness mm	Orientation Bn	ASTM E399	Ratio P_{min}/P_{max}	Wave Form	Frequency Hz	Temperature °C	Pressure MPa	Dissolved Oxygen ppm	Conductivity micro•mho•cm ⁻¹
A-1	25	21	T-L	0.2	Sine					
B-1	30	24	L-S	0.1	Triangular	1/60	288	8.2	< 0.2	> 1
B-2	30	24	L-S	0.1	Triangular					

Table 3 The values of C_1 and n_1 determined experimentally in equation (2).

Specimen No.	In Air		In Water	
	C_1	n_1	C_1	n_1
A-1	1.41×10^{-9}	3.31	2.48×10^{-8}	2.90
B-1	1.16×10^{-10}	3.84	1.11×10^{-10}	4.23
B-2	2.22×10^{-9}	3.19	—	—

da/dN : mm/cycle

ΔK : MPa \sqrt{m}

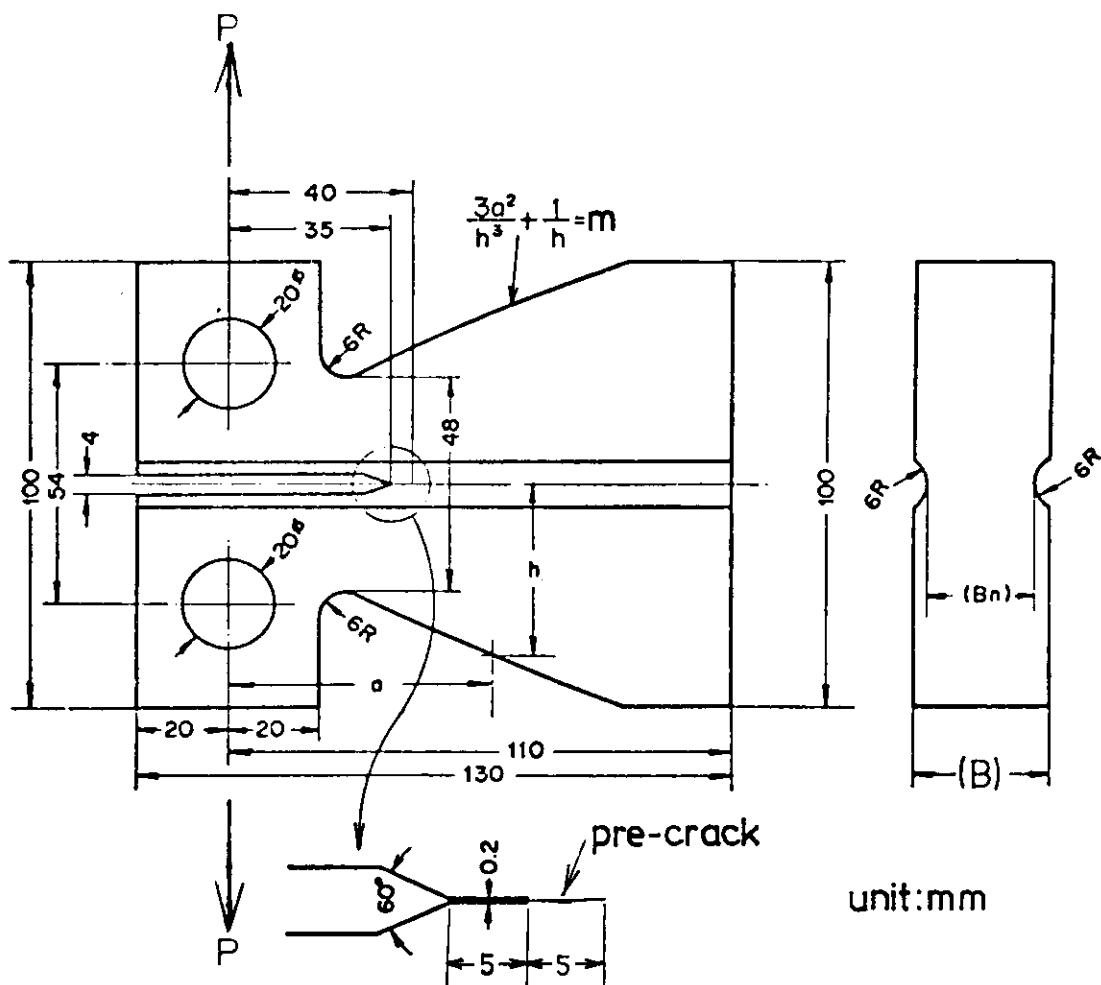


Fig. 1 Geometry of tapered double-cantilever beam type specimen.

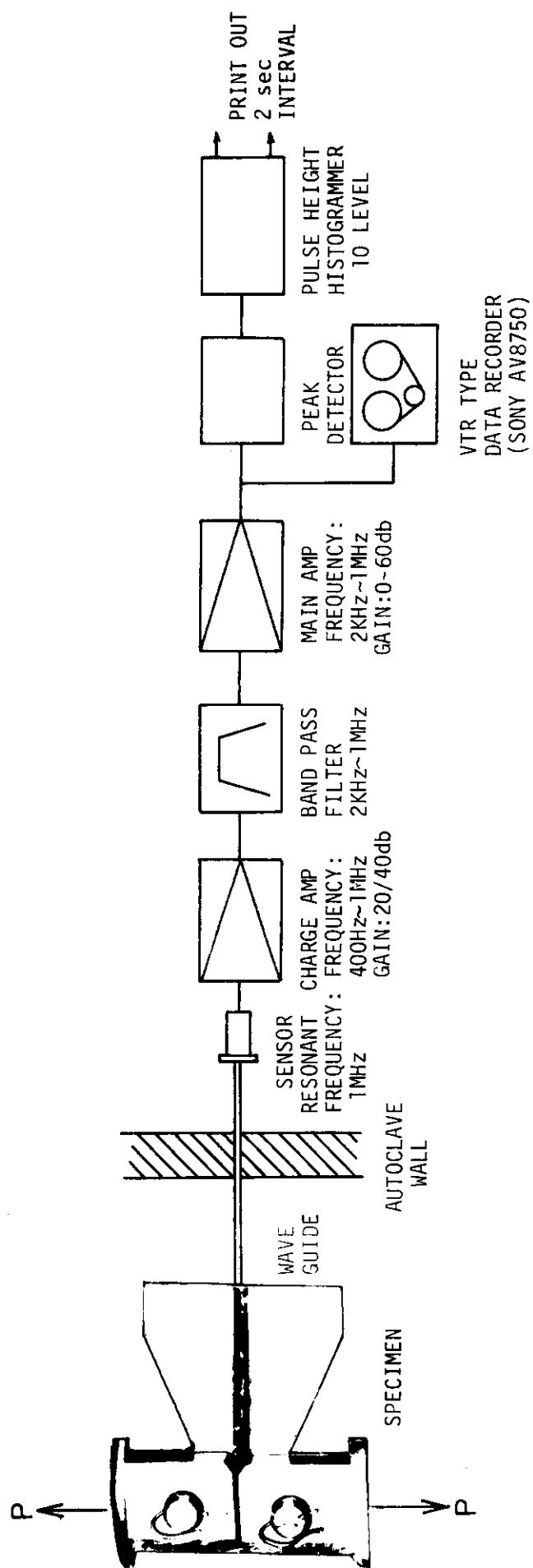


Fig. 2(a) Block diagram of wide band AE measurement system.

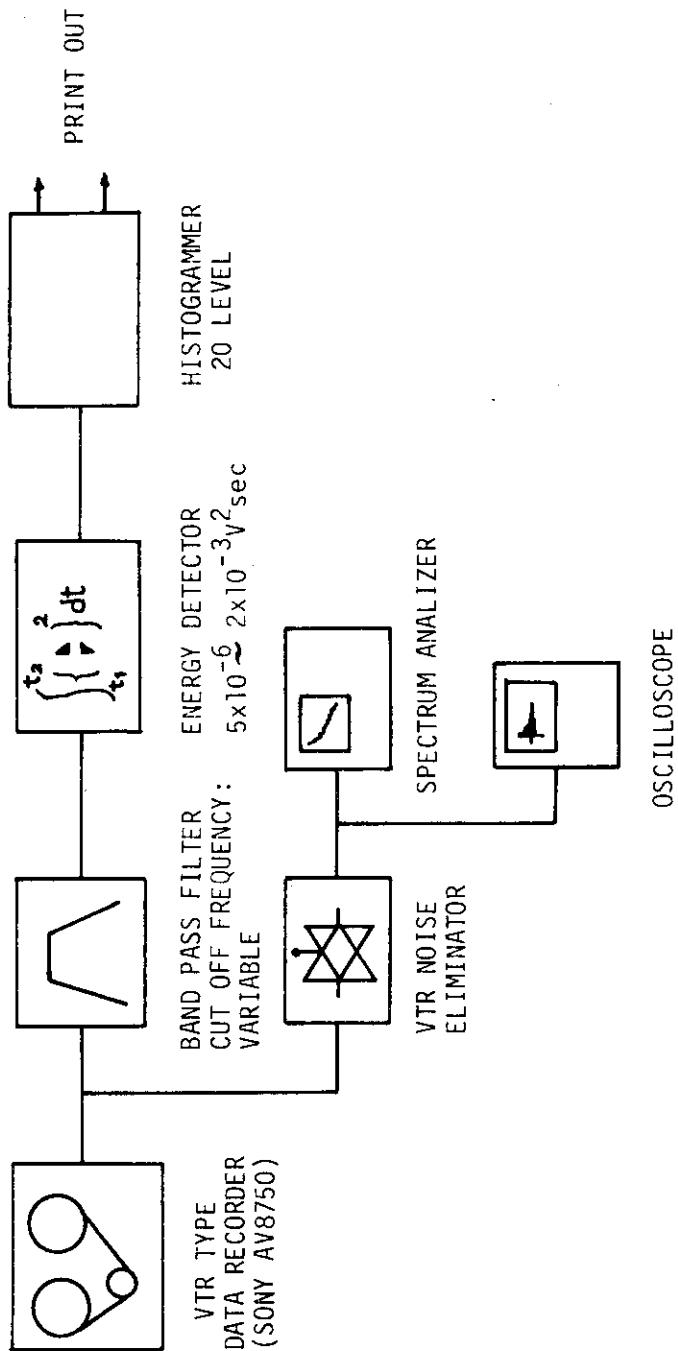
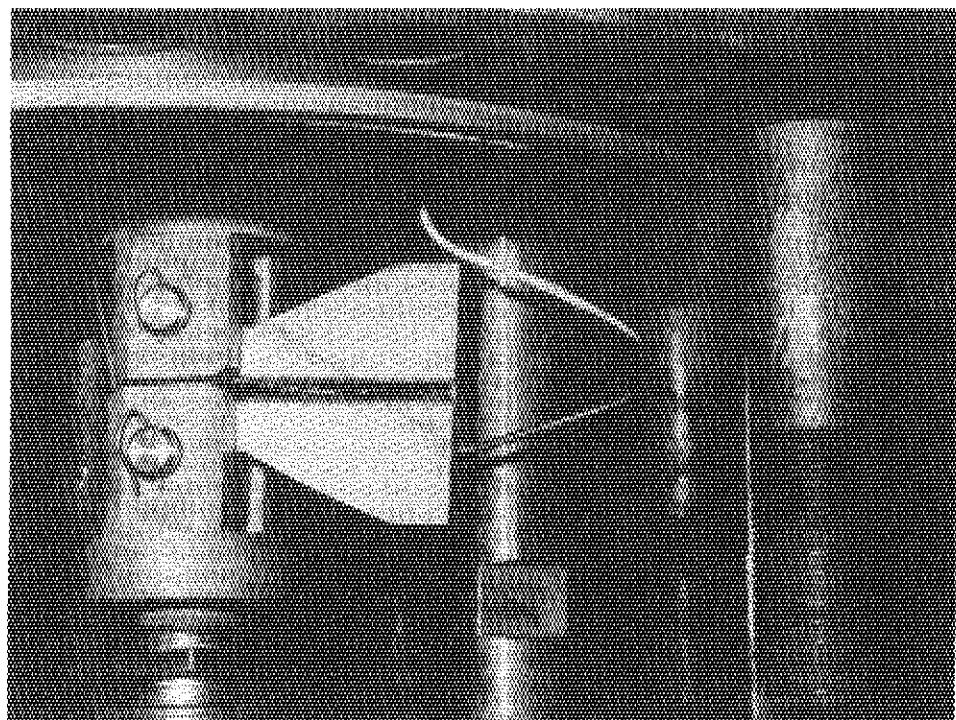
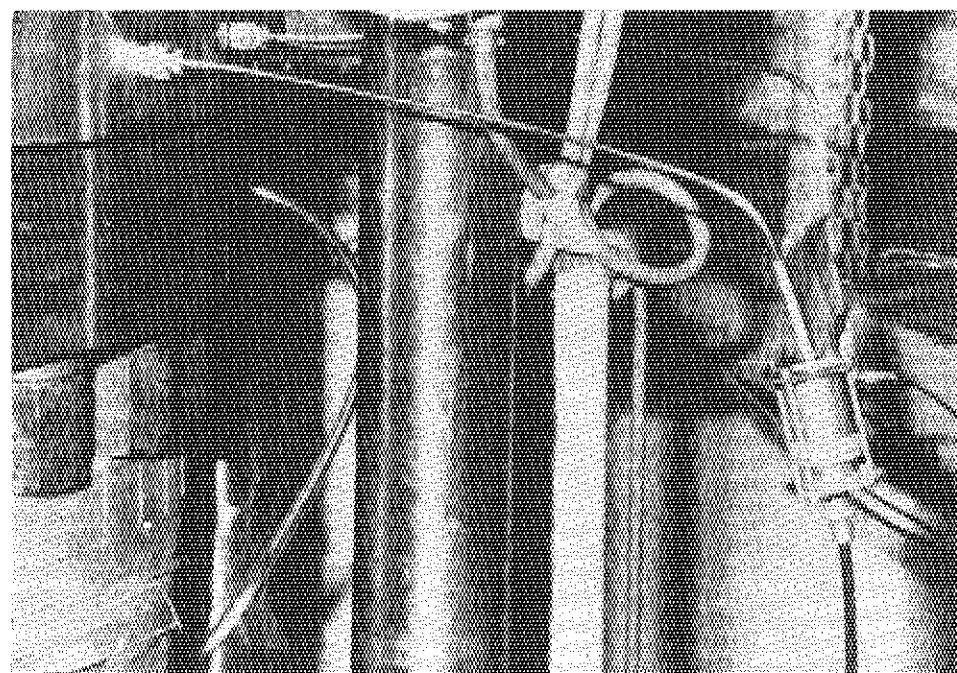


Fig. 2 (b) Block diagram of data processing.



(a)



(b)

Fig. 3

Experimental set up for signal detection

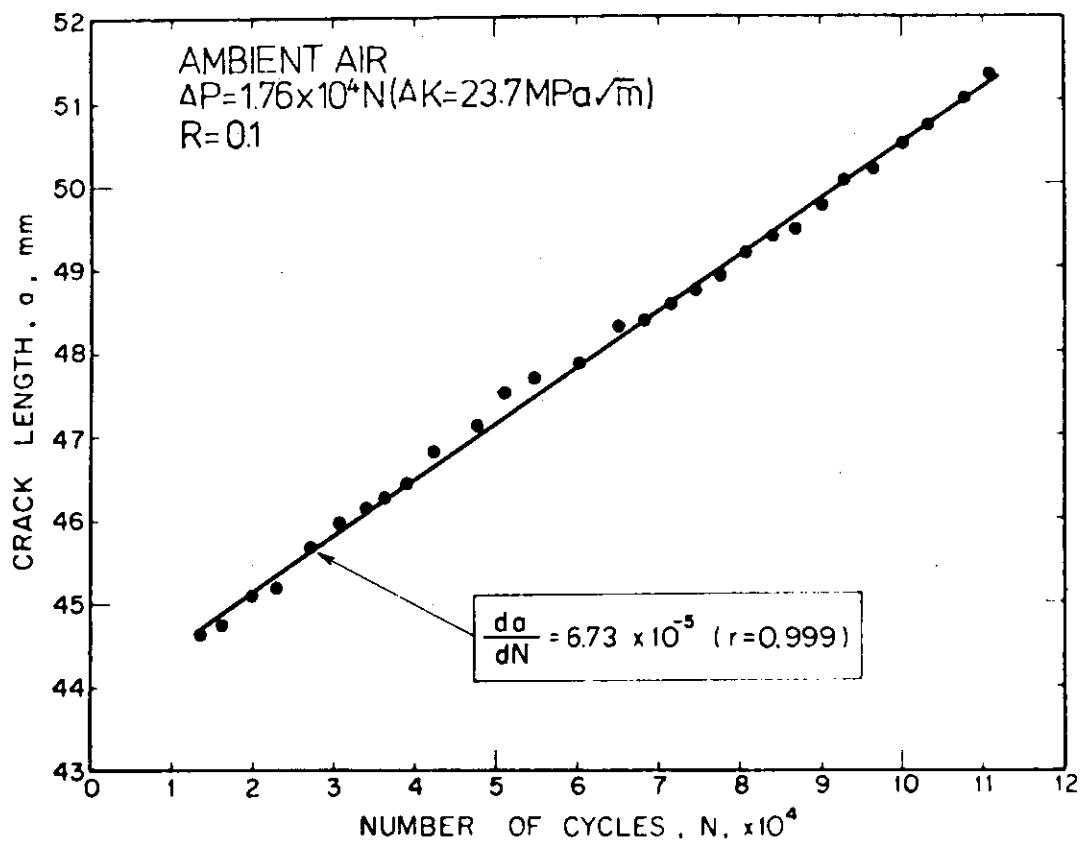


Fig. 4 Typical crack growth curve obtained in ambient air for CDCB specimen.

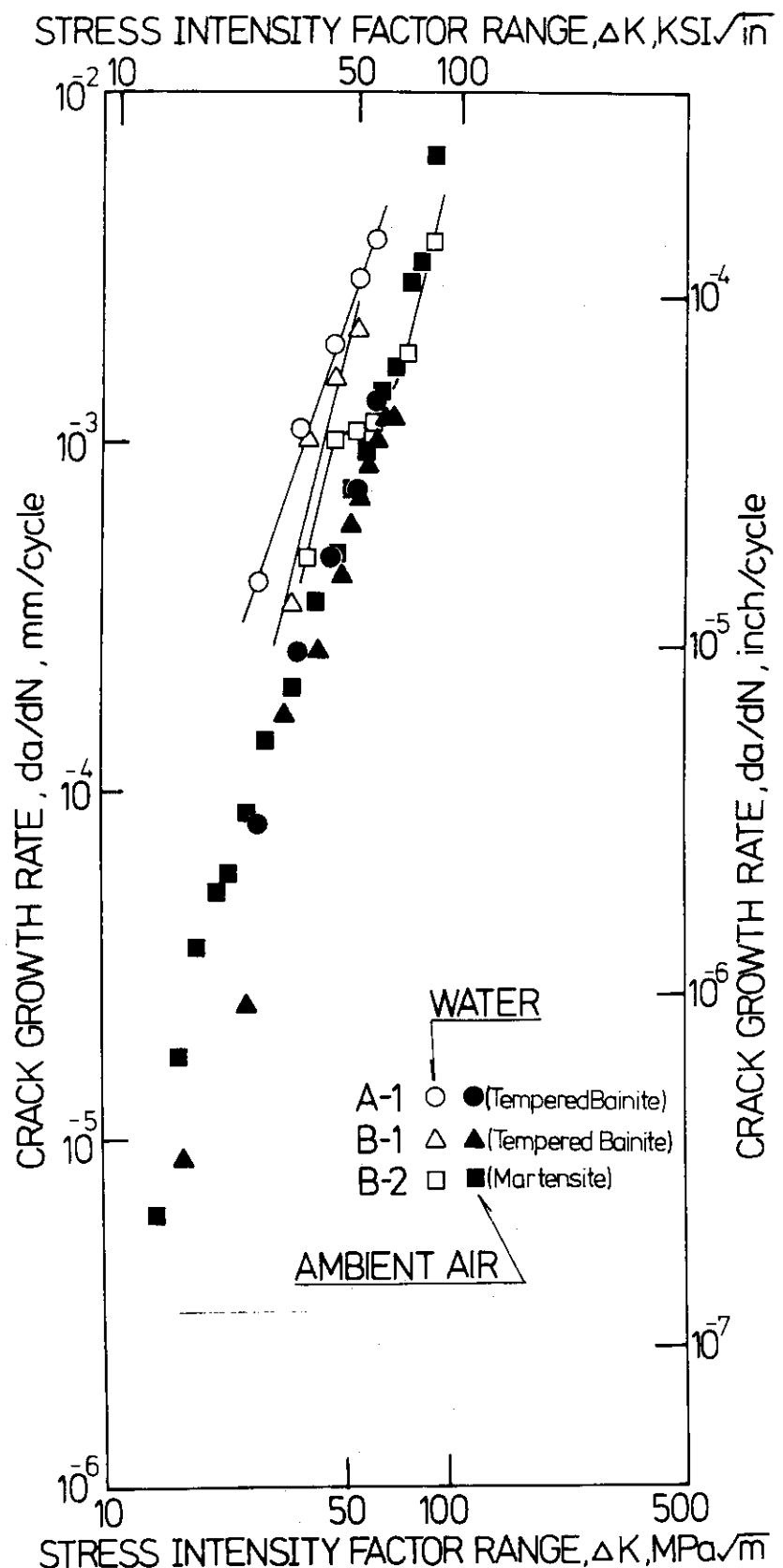


Fig. 5

Results of fatigue crack growth rate both in ambient air and simulated BWR environments.

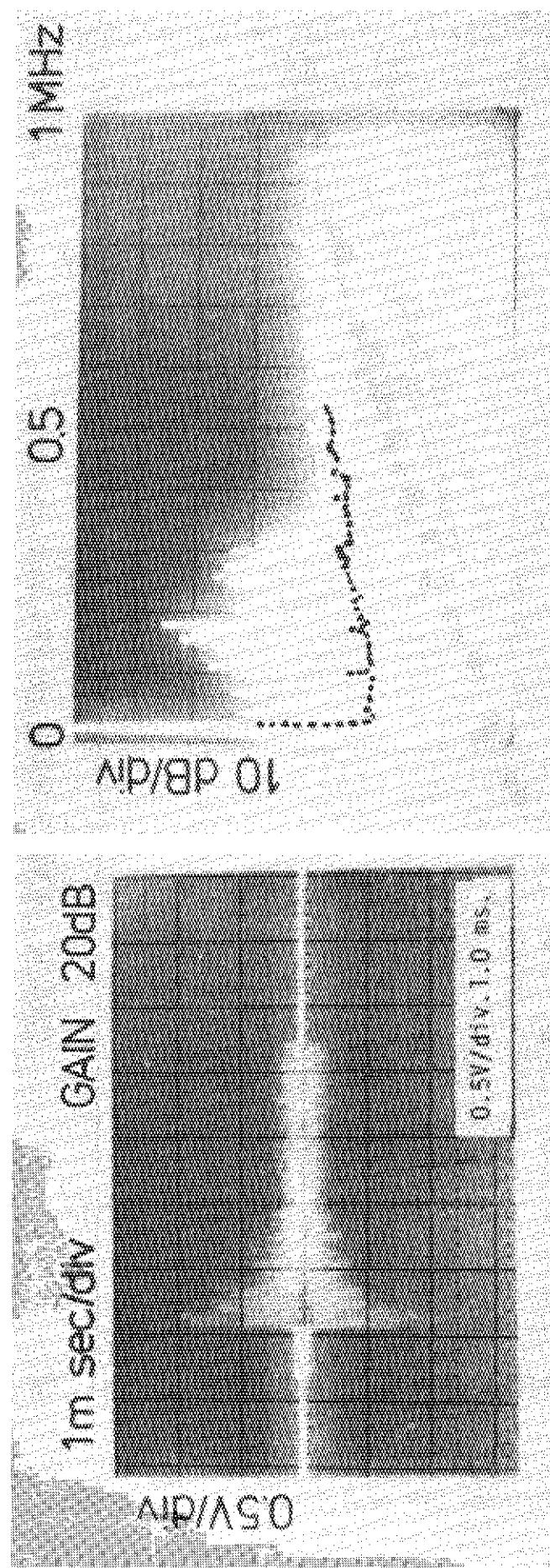


Fig. 6
Typical wave form and its frequency spectrum of false signal originated from friction between loading pins and specimen. (The dotted curve is the noise level.)

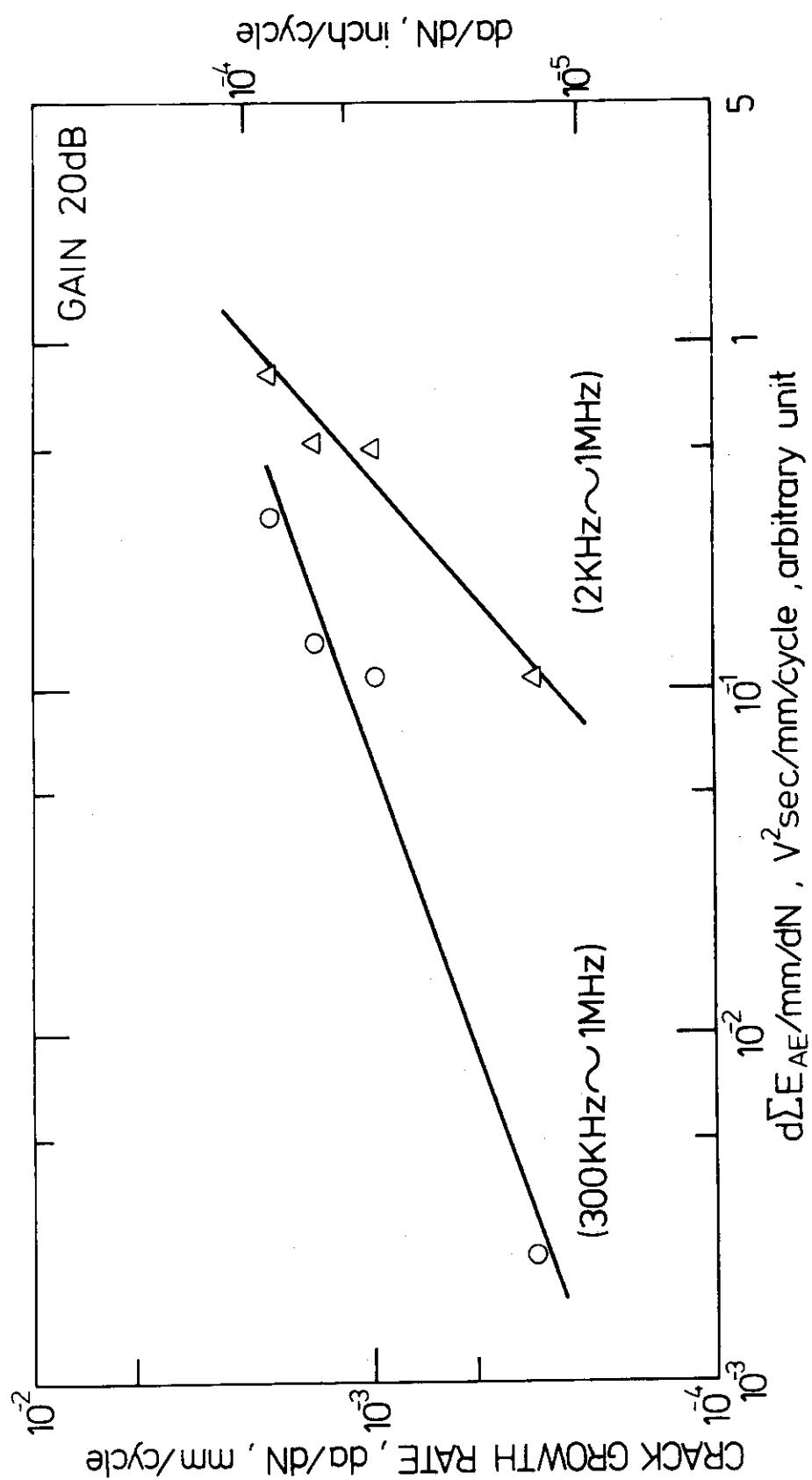


Fig. 7 Apparent relationship between crack growth rate vs energy of false signal.

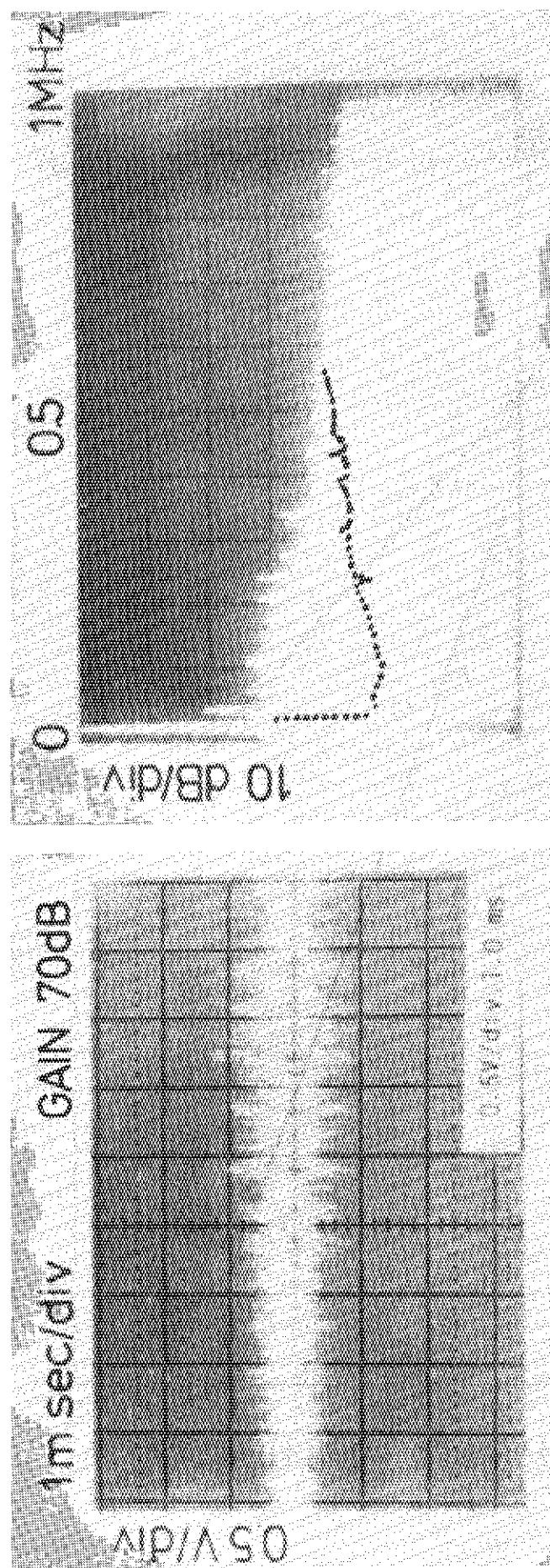


Fig. 8 Typical wave form and its frequency spectrum of signal obtained through appropriate noise reduction techniques. (The dotted curve is the noise level.)

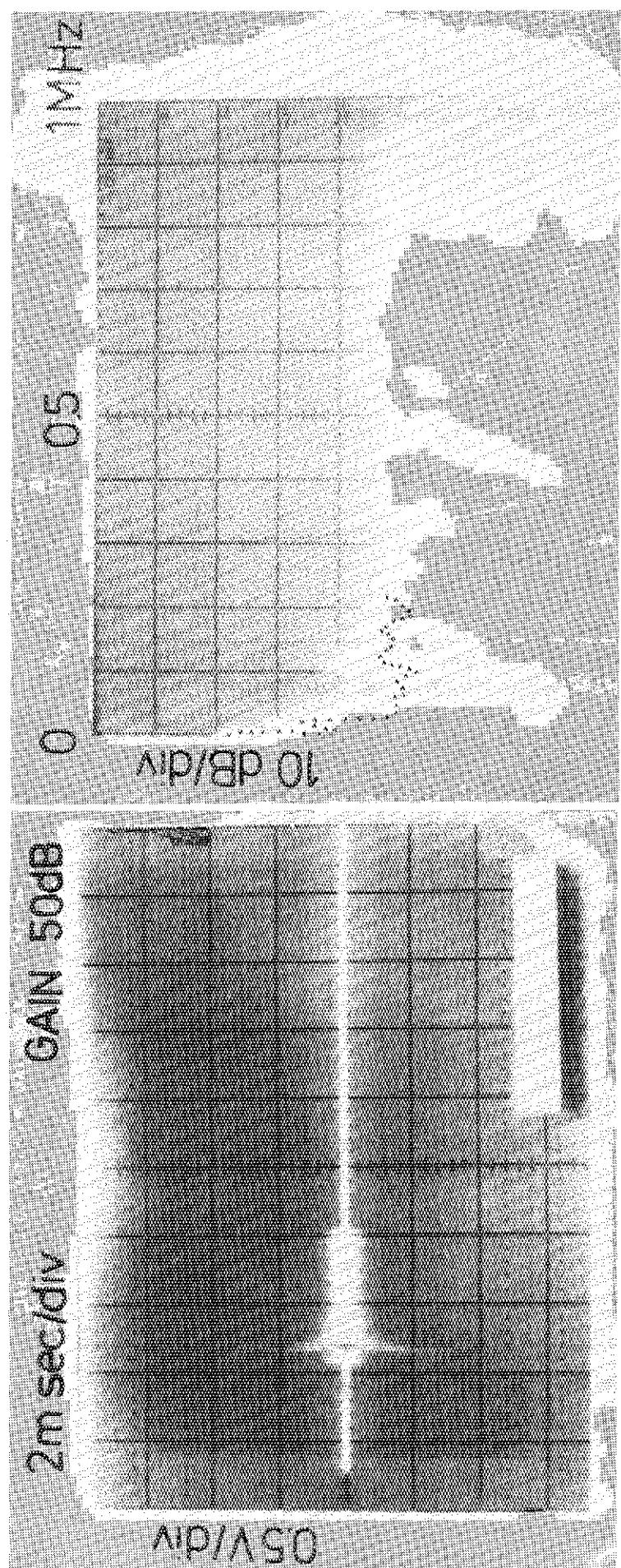
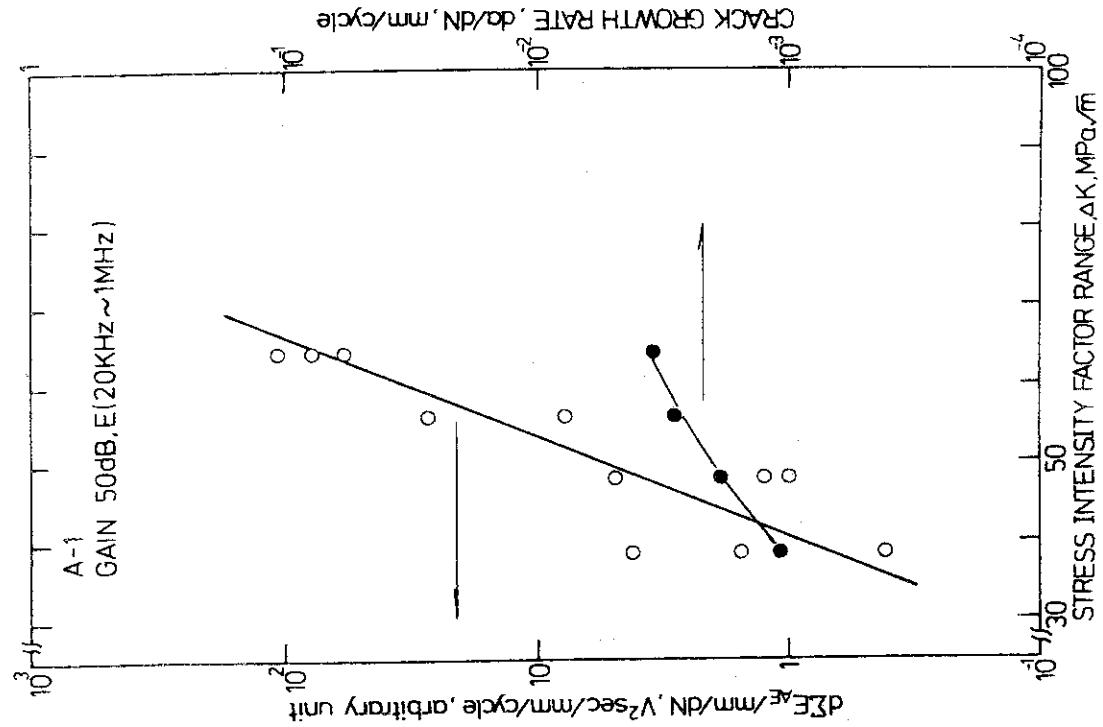
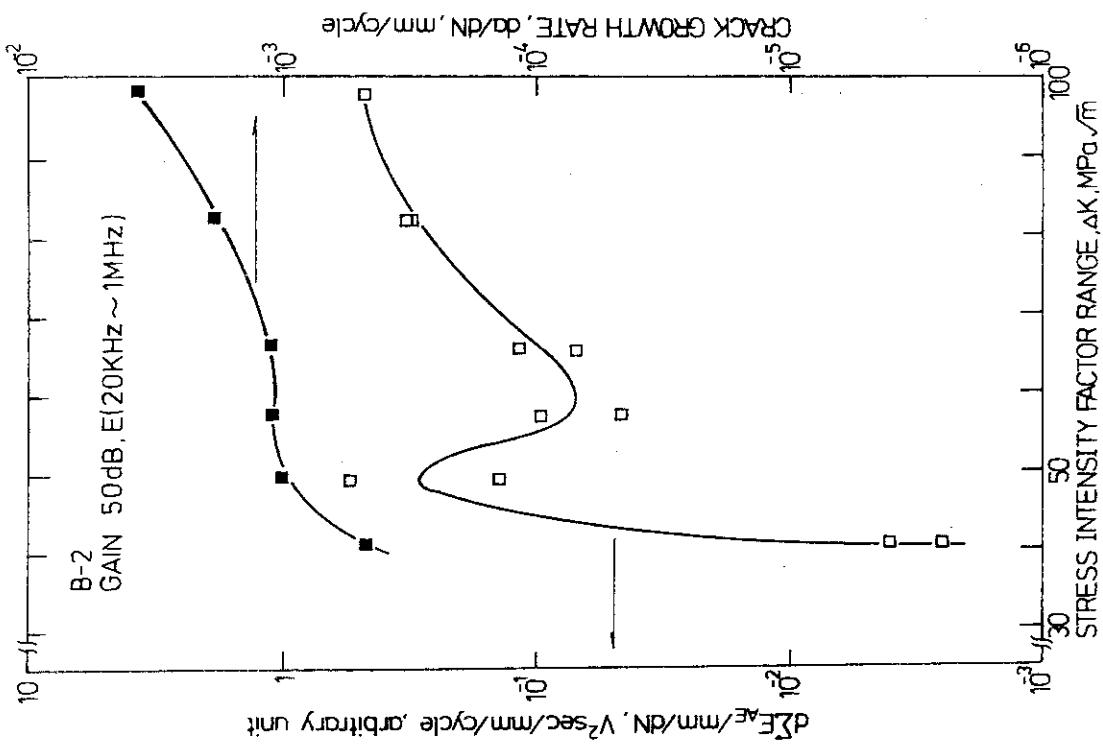


Fig. 9 Burst type wave form and its frequency spectrum of signal with particular reference to the environment-enhanced crack growth in high temperature water. (The dotted curve is the noise level.)



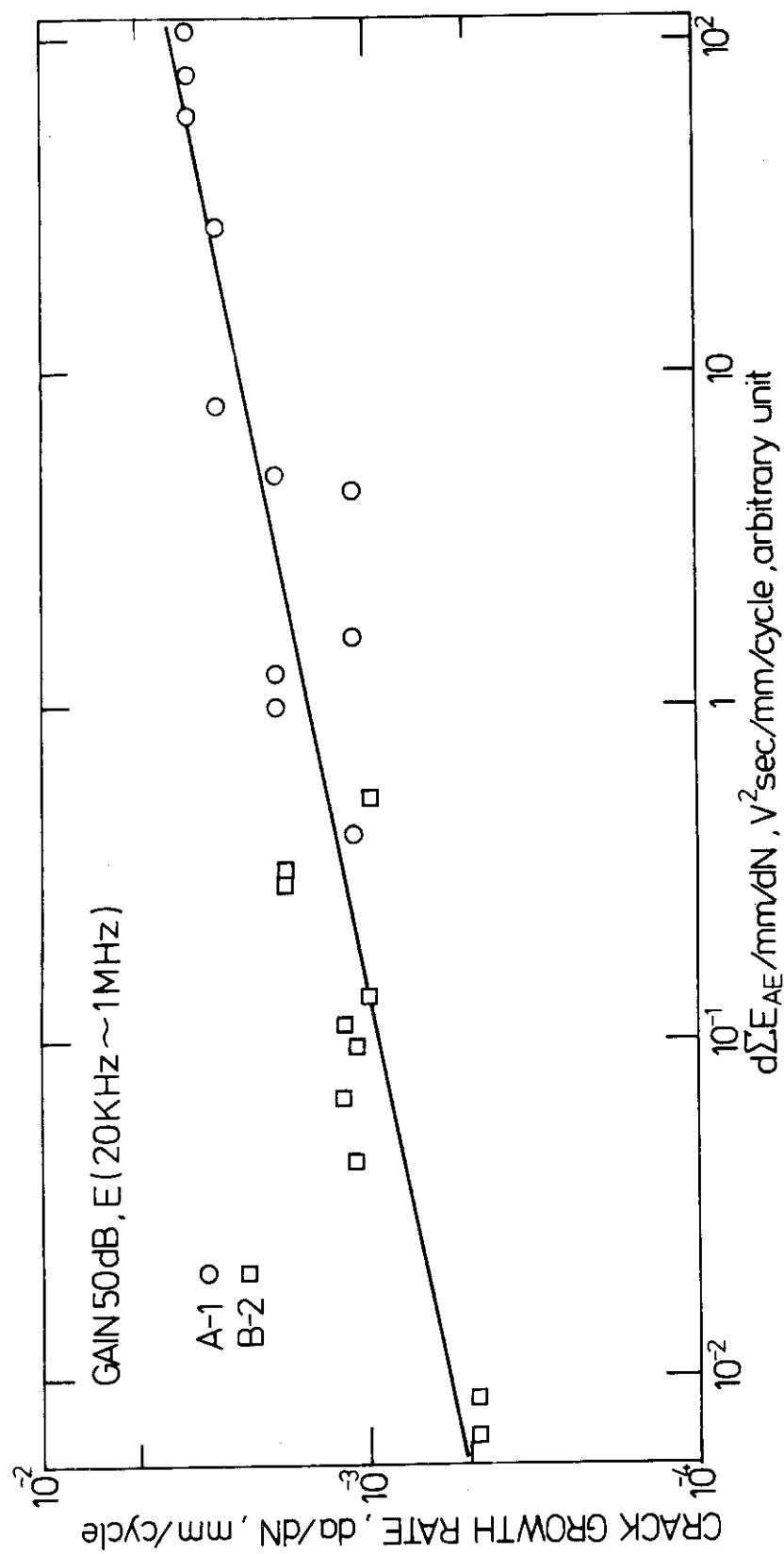


Fig. 12 Relationship between crack growth rate vs wave energy with particular reference to the environment-enhanced crack growth in high temperature water.

附錄 1 疲効き裂成長速度予一々

① NRC-CDCB-1

大気中, R = 0.2, 正弦波

 $\Delta K, \text{kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$

	$\Delta a / \Delta N, \text{mm} / \text{cycle}$
9 0	8.04×10^{-5}
1 2 0	2.50×10^{-4}
1 5 0	4.64×10^{-4}
1 7 5	7.21×10^{-4}
2 0 0	1.29×10^{-3}

② NRC-CDCB-1

288°C水中, 0.1 ppmO₂, R = 0.2, 三角波, 1 cpm $\Delta K, \text{kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$

	$\Delta a / \Delta N, \text{mm} / \text{cycle}$
9 0	4.00×10^{-4}
1 2 0	1.07×10^{-3}
1 5 0	1.89×10^{-3}
1 7 5	2.90×10^{-3}
2 0 0	3.77×10^{-3}

③ B材(東北大材), 母材

大気中, R = 0.1, 正弦波

 $\Delta K, \text{kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$

	$\Delta a / \text{dN}, \text{mm} / \text{cycle}$
9 0	5.0
1 2 0	7.5
1 5 0	1.00
1 7 5	1.25
2 0 0	1.46
1 5 3	5.70×10^{-4}
1 6 5	6.90×10^{-4}
1 7 0	8.80×10^{-4}
1 8 0	1.00×10^{-3}
1 9 0	1.17×10^{-3}
2 0 5	1.17×10^{-3}

(4) B 2 0 - C D C B , Q 材

大気中, R = 0.1, 正弦波

 $\Delta K, \text{kg} \cdot \text{mm}^{-3} \sqrt{2}$

	$\Delta a / \Delta N, \text{mm} / \text{cycle}$
4 5.9	7.01 × 10 ⁻⁶
5 3.6	1.75 × 10 ⁻⁵
6 1.0	3.59 × 10 ⁻⁵
6 8.9	5.14 × 10 ⁻⁵
7 6.5	5.80 × 10 ⁻⁵
8 8.0	8.65 × 10 ⁻⁵
9 9.5	1.41 × 10 ⁻⁴
1 1.5	2.06 × 10 ⁻⁴
1 3.4	3.52 × 10 ⁻⁴
1 5.3	4.90 × 10 ⁻⁴
1 7.2	7.40 × 10 ⁻⁴
1 9 1.2	9.42 × 10 ⁻⁴
2 1 0	1.42 × 10 ⁻³
2 3 0	1.65 × 10 ⁻³
2 4 9	2.92 × 10 ⁻³
2 7 2	3.20 × 10 ⁻³
3 0 6	6.75 × 10 ⁻³

(5) B 9 - C D C B , 母材

288°C水中, 0.1 ppmO₂, R = 0.1, 三角波, 1 cpm $\Delta K, \text{kg} \cdot \text{mm}^{-3} \sqrt{2}$

	$\Delta a / \Delta N, \text{mm} / \text{cycle}$
4 5.9	1.15
5 3.6	1.28
6 1.0	1.53
6 8.9	1.79
7 6.5	2.04
8 8.0	2.04
9 9.5	2.06
1 1.5	3.52
1 3.4	4.90
1 5.3	7.40
1 7.2	9.42
1 9 1.2	1.42
2 1 0	1.65
2 3 0	2.92
2 4 9	3.20
2 7 2	6.75

(6) B 1 7 - C D C B , Q 材

288°C水中, 0.1 ppmO₂, R = 0.5, 三角波, 1 cpm $\Delta K, \text{kg} \cdot \text{mm}^{-3} \sqrt{2}$

	$\Delta a / \Delta N, \text{mm} / \text{cycle}$
7 5	7 5
7 5	6.66 × 10 ⁻⁴
1 9 1.2	9.42 × 10 ⁻⁴
2 1 0	1.42 × 10 ⁻³
2 3 0	1.65 × 10 ⁻³
2 4 9	2.92 × 10 ⁻³
2 7 2	3.20 × 10 ⁻³
3 0 6	6.75 × 10 ⁻³

(7) B 11 - C D C B , 母材

大気中 , R = 0.1 , 正弦波

ΔK , kg · mm⁻²/cycle

3 0 6	1.3 0 × 1 0 ⁻⁶
3 6 3	2.0 6 × 1 0 ⁻⁶
4 1.6	4.3 0 × 1 0 ⁻⁶
5 1.3	1.3 4 × 1 0 ⁻⁵
6 3.8	2.1 0 × 1 0 ⁻⁵
7 6.5	3.6 5 × 1 0 ⁻⁵
8 9.0	6.4 9 × 1 0 ⁻⁵
1 0 2	1.1 1 × 1 0 ⁻⁴
1 1 5	1.5 8 × 1 0 ⁻⁴
1 2 8	2.2 2 × 1 0 ⁻⁴
1 5 3	4.2 0 × 1 0 ⁻⁴
1 7 9	6.2 0 × 1 0 ⁻⁴

(8) B 6 - C D C B , Q T 材

大気中 , R = 0.1 , 正弦波

ΔK , kg · mm⁻²/cycle

3 0 6	3.8 3	3.6 1 × 1 0 ⁻⁶
3 6 3	4 5 9	1.0 5 × 1 0 ⁻⁵
4 1.6	5 3.6	1.3 5 × 1 0 ⁻⁵
5 1.3	6 1.2	2.1 3 × 1 0 ⁻⁵
6 3.8	6 8.9	3.4 4 × 1 0 ⁻⁵
7 6.5	7 6.5	7.4 4 × 1 0 ⁻⁵
8 9.0	8 4.2	8.8 3 × 1 0 ⁻⁵
1 0 2	9 5.6	1.1 2 × 1 0 ⁻⁴
1 1 5	1 0 7	1.6 2 × 1 0 ⁻⁴
1 2 8	1 1 5	2.0 5 × 1 0 ⁻⁴
1 5 3	1 3 4	3.5 3 × 1 0 ⁻⁴
1 7 9	1 5 3	4.7 4 × 1 0 ⁻⁴
	1 7 2	6.3 7 × 1 0 ⁻⁴
	1 9 1	8.7 3 × 1 0 ⁻⁴
	2 1 0	1.3 1 × 1 0 ⁻³
	2 3 0	1.3 1 × 1 0 ⁻³
	2 4 9	2.2 8 × 1 0 ⁻³
	2 7 2	2.0 0 × 1 0 ⁻³
	3 0 6	3.2 8 × 1 0 ⁻³

⑨ B 1 8 - C D C B , Q 材	⑩ B 4 - C D C B , Q T 材
2 8 8 °C 水中 , 0.1 ppm O ₂ , R = 0.1 , 三角波 , 1 cpm	2 8 8 °C 水中 , 0.1 ppm O ₂ , R = 0.1 , 三角波 , 1 cpm
ΔK , kg · mm ⁻³ /2	Δa / ΔN , mm ⁻³ /cycle
1 2 8	4.6 5 × 1 0 ⁻⁴
1 5 3	1.0 1 × 1 0 ⁻³
1 7 9	1.0 6 × 1 0 ⁻³
2 0 4	1.1 1 × 1 0 ⁻³
2 5 5	1.8 2 × 1 0 ⁻³
3 0 6	3.7 0 × 1 0 ⁻³
ΔK , kg · mm ⁻³ /2	Δa / ΔN , mm ⁻³ /cycle
1 2 8	7.0 7 × 1 0 ⁻⁴
1 5 3	9.2 1 × 1 0 ⁻⁴
1 7 9	1.3 4 × 1 0 ⁻³
2 0 4	1.8 2 × 1 0 ⁻³

附録 2 A 5 3 3 B (東北大, B 材) 鋼の室温引張性質におよぼす各種熱処理の関係

5 mm Φ 丸棒 (G · L . 15 mm)

	σ_y (kg / mm^2)	σ_B (kg / mm^2)	ϵ (%)
母材	4 9.0	6 2.0	2 7.0
Q 材	1 0 2.4	1 1 5.1	1 9.3
QT 材	5 0.9	6 4.2	3 0.0

附録 3 AE 計測データ（抜粋）

T. P. No C D C B - B 1 8

$\text{NK} = 1.53$ Gain 50 dB, 1eBm

10 分割

ベベルヒストリーグ

$V_{\text{bias}}[\text{V}]$ 0.2 0.4 0.75 1.25 1.75 V

Y-axis: レベル(V)

X-axis: Pmin →, Pmax →

Pmin (W)	Pmax (W) for V=0.1	Pmax (W) for V=0.2	Pmax (W) for V=0.4	Pmax (W) for V=0.75	Pmax (W) for V=1.25	Pmax (W) for V=1.75
0.1	0.1	0.2	0.4	0.75	1.25	1.75
0.3	0.3	0.5	0.8	1.2	1.8	2.4
0.5	0.5	0.7	1.0	1.5	2.2	3.0
0.75	0.75	1.0	1.4	2.0	2.8	3.8
1.25	1.25	1.75	2.2	3.0	4.2	5.5
1.75	1.75	2.2	2.8	3.8	5.2	6.8

Pmin → 時分秒

0:0:00 start

N=215

N=216

N=217

N=218

N=219

N=220

N = 2 2 1

N = 2 2 2

N=223

N=227

N=226

N = 225

N = 224

② T. P. № CDCCB-B18
 $\Delta K = 15.3$ Gain 50 dB 1
 レベル 1.0 分割 (N = 215)

Pmin → 時 分 秒

Pmax →

-34-

ラグストスヒルベルベ

0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6
1.7
1.8
1.9
2.0
2.1
2.2
2.3
2.4
2.5
2.6
2.7
2.8
2.9
3.0
3.1
3.2
3.3
3.4
3.5
3.6
3.7
3.8
3.9
4.0
4.1
4.2
4.3
4.4
4.5
4.6
4.7
4.8
4.9
5.0
5.1
5.2
5.3
5.4
5.5
5.6
5.7
5.8
5.9
6.0
6.1
6.2
6.3
6.4
6.5
6.6
6.7
6.8
6.9
7.0
7.1
7.2
7.3
7.4
7.5
7.6
7.7
7.8
7.9
8.0
8.1
8.2
8.3
8.4
8.5
8.6
8.7
8.8
8.9
9.0
9.1
9.2
9.3
9.4
9.5
9.6
9.7
9.8
9.9
10.0

Pmax →

$$N = 4 \ 0 \ 1$$

7

N=4 0 3

N-104

N = 400

Pmax →