

オーステナイトステンレス鋼の繰返し変形 にともなう Acoustic Emission 挙動

森 康彦*・永田 敬**・岸 輝雄・堀内 良

Acoustic Emission Behaviour during Cyclic Deformation of Austenitic Stainless Steel

By

Yasuhiko MORI, Takashi NAGATA,
Teruo KISHI and Ryo HORIUCHI

Abstract: In order to study the application of the acoustic emission techniques to the method of materials evaluation, acoustic emission peak height, amplitude distribution and event counts were investigated in austenitic stainless steel during the constant stress amplitude cyclic deformation. The large burst type of acoustic emission was observed during the stress reversal from the compression cycle and generally the acoustic emission activity, in terms of the acoustic emission events per stress cycle, increased markedly with increasing testing temperature. The results suggest that the source of observed acoustic emission was due to both the reyielding of the crack tip, and also to the unsticking of partially rewelded area of the crack during the stress reversal.

1. 緒 言

非破壊検査における Acoustic Emission (以下 AE と略す) 法は、従来の検査法と異なり、欠陥からのエネルギー解放により放出された超音波を検出することにより、欠陥の位置を知ることはもとより、有害度を評価する可能性を有する新しい検査法である。この AE 法は、宇宙航空、原子力などの分野において、それらの構造要素の健全性監視法として、その実用化が待たれている。

近年、疲労における AE 法の有効性は、種々の金属材料について、AE による疲労き裂

* 日本大学生産工学部

** 動力炉核燃料開発事業団大洗工学センター

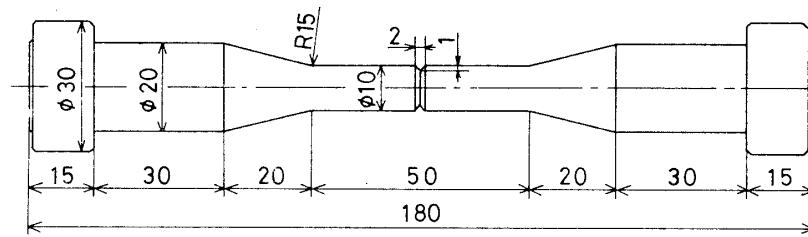
の発生や、き裂進展の検出、ならびにその応用に関する多くの研究によって確認されてきた [1-8]. しかしながら、AE法によるき裂進展機構の解明、または、監視法としての応用の確立を考えると、未だ十分とは言い難く、個々の構造材料のAE特性ならびにその特性に基づく材料評価に関する多くの研究の積み重ねが必要であると考えられる。

本研究は、AEを材料評価法として適用するための基礎データを得るために、材料のAE特性について研究を行ったものである。すなわち、例えば高速増殖炉構造材料として広汎に使用されることが予想されるオーステナイトステンレス鋼について、事前に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行ない、温度、応力振幅、応力負荷速度および応力保持時間の各試験条件のAE挙動におよぼす影響を調べるとともに、AEの発生する荷重サイクル中の位相を解析することにより、繰り返し変形にともなうAEの発生要因を検討することを目的とした。

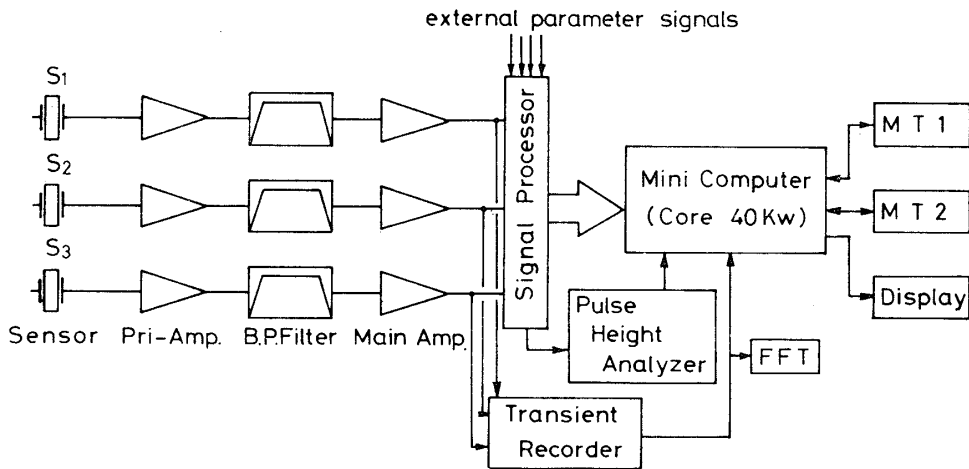
2. 実験方法

2.1 試験片と試験機

供試材は SUS 304 であり、試験片は環状切欠き付丸棒試験片で、その形状と寸法を第1図に示す。



第1図 試験片の形状と寸法



第2図 AE計測・解析システムのブロック図

第1表 集録データファイルの内容

FILE - A		FILE - B	
1	Event counts	1	Record number of AE signals
2	Error event counts	2	Event counts
3	Error code	3	1st arrival channel
4	Cycle counts	4	2nd "
5	Time	5	3rd "
6	Phase	6	User's parameter 1
7	1st arrival channel	7	" 2
8	2nd "	8	" 3
9	3rd "	9	" 4
10	Time - difference ; 1-2	10	" 5
11	" ; 1-3	11	" 6
12	Peak voltage	12	AE signals ; Ch1, Ch2 1 kW
13	Oscillation counts	13	" ; Ch3, Ch4 1 kW
14	External parameter 1	FILE - A ; 4 kW/Rec. ; 128 events / Rec. FILE - B ; 2 kW/Rec.	
15	" 2		
16	" 3		
17	" 4		
18	Record number of AE signals		
19	User's parameter 1		
20	" 2		
21	" 3		
22	" 4		
23	" 5		

疲労試験機としては、電気ヒータ方式の炉を有する電気油圧式引張り圧縮疲労試験機を用い、特に高温における AE 計測用に設計された中空の治具を介して、試験片は取り付けられた。

2.2 AE 計測・信号処理系

使用された AE 計測解析システムのブロック図を第2図に示す。本システムはいわゆる“one event- multi parameter”方式の計測システムで、突発型の AE 信号一事象ごとに、種々の計測項目についてデジタル化し、集録、解析するシステムである。データは、比較的単純なパラメータ化したデータ (File-A と呼ぶ) と、原波形データ (File-B と呼ぶ) の2つに区分され、それぞれ別個の磁気テープに集録される。2つのファイルの内容を示したのが第1表である。File-A として記録されるデータは、第1表に示すように、従来より AE 法で考慮されるほぼ全ての計測項目および AE が発生する時点における時刻、荷重サイクル数、位相時間ならびに荷重、変位、温度等の外部条件等である。

AE の検出は、その発生位置を標定し、AE 信号と外部雑音を分離するために、2個の AE 変換子 S_1 , S_2 をそれぞれ試験片の両端に溶接された導波棒に圧着して行った。導波

第2表 試験条件

試験温度 (°C)	応力振幅	荷重保時 時間 T_1 (S)	荷重立上り 時間 T_2 (S)	降伏応力 σ_Y^* (MPa)
R.T.	σ_Y^*	10	5	195
200	σ_Y^*	10	5	184
400	σ_Y^*	10	5	169
600	$0.25 \sim 1.25 \sigma_Y^*$	$0.1 \sim 100$	$0.5 \sim 50$	149

棒としては、試験片と同一材料である SUS 304 を用い、直径 10 mm の丸棒とし、その長さをそれぞれ 210 mm, 230 mm として環状切欠きからそれぞれ S_1 , S_2 に到る距離を変え、電気ノイズの分離をはかった。さらに、試験機の油圧ジャッキに近いフレーム上に第3の変換子 S_3 を配置し、機械的雑音を監視するとともに、仮に S_3 も励起させる信号は、機械的雑音あるいは電気ノイズとして除去する方法も、あわせて採用した。AE 変換子はいずれも D/E 社製広帯域変換子 S9201 を使用した。

AE 計測解析システムは、実時間処理機能も有するが、本実験においては、主として試験終了後オフラインにて第1表に示した個々の情報相互間の関係を調べ、AE の材料特性の検討を行った。

2.3 試験条件と試験方法

引張り・圧縮による疲労試験の試験条件を第2表に示す。試験温度は室温より 600°C までの範囲をとり、各温度における応力振幅は、有効断面で降伏応力となるように、室温における降伏応力をヤング率の温度依存性で補正した値 σ_Y^* に設定し、台形波完全両振りで加振した。このとき、環状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、台形波の立上り、立下り時間 T_2 を設定した。また、600°C において応力振幅、応力負荷速度および応力保持時間を変化させて試験を行い、それらの効果を調べた。

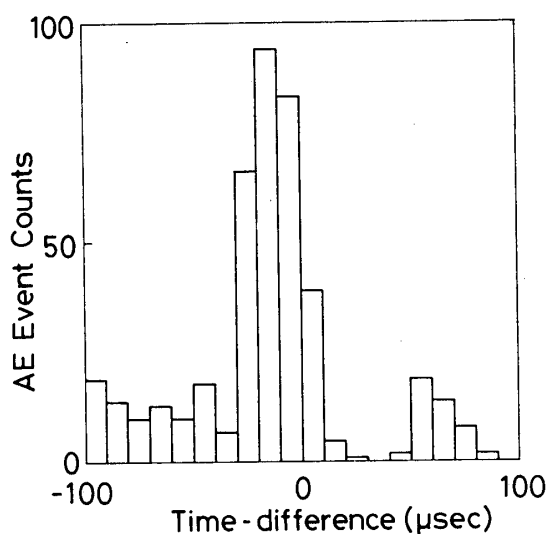
試験は、室温において疲労き裂を導入した試験片について、試験温度を室温から順次 600°C に昇温させ、その間各設定温度について各条件の試験を行い AE を計測した。AE データは、各試験条件で加振サイクルの 20 サイクルについて採取し、すべて変換子出力電圧で処理を行った。なお、試験結果の再現性を確認するために、複数の試験片について試験を実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 有効な AE 信号の弁別

本試験においては、AE 計測系の総合利得を 80 dB とし、トリガレベルはメインアンプ出力で 300 mV に設定した。このレベルは、プリアンプ入力換算で $30 \mu\text{V}$ であり、またプリアンプ電気ノイズに対し +12 dB である。また、周波数フィルタは 100 kHz-500 kHz の領域を用いた。

計測に際しては、可能な限り試験機の油圧を低く抑える、あるいは、昇温後試験片取り付けボルトの増し締めを行う等により、外部機械雑音の低減をはかったが、それでもなお、あ

第3図 変換子 S_1 , S_2 のAE 到着時間差ヒストグラム

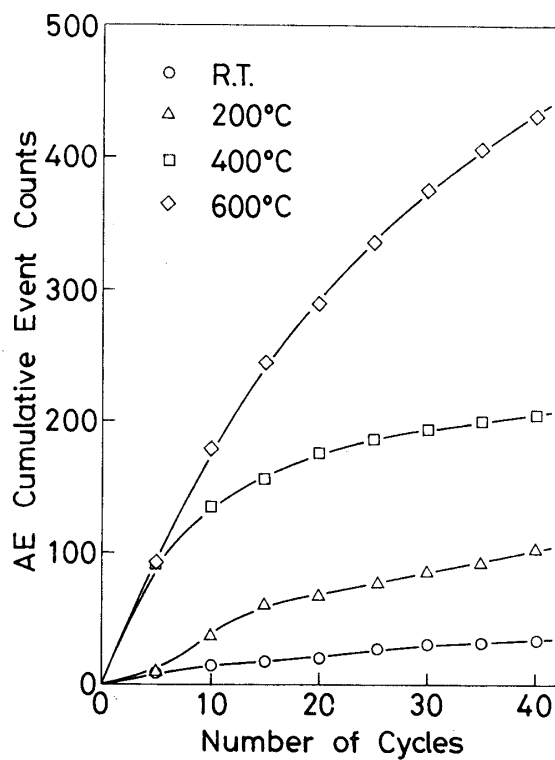
る程度の雑音のまわり込みは避け得なかった。

検出された信号の変換子 S_1 , S_2 に対する到着時間差のヒストグラムの一例を第3図に示す。このようにイベントの分布は、時間差0付近およびある程度左右に離れた位置と、三つのピークを有する分布となる結果が得られた。時間差が0付近のピークがやや負側に寄っているのは、導波棒の長さを異ならせているためであり、このピークのイベントが環状切欠き付近より発せられた信号と判定される。他方、その左右のピークは、それぞれ試験片つかみ部を經由して侵入した信号と判定される。そこで、本試験では、試験片の形状や音波の伝播様式等を勘案し、 S_1 - S_2 の信号到着時間差が $30\mu\text{sec}$ 以内のイベントを有効な AE 信号として以後の解析を行った。なお、電気ノイズの除去は三つの変換子の励起状態を判定して行った。

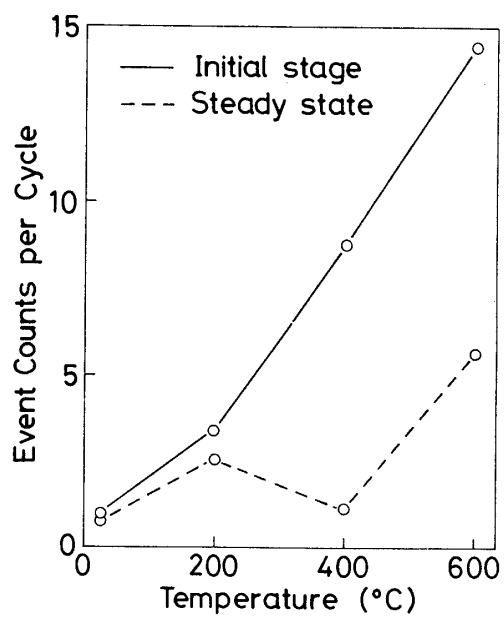
3.2 温度の影響

繰り返し変形下の AE の温度依存性を調べるために、各温度条件における加振サイクル数と累積事象数の関係を示したのが第4図である。概して、高温になるほど負荷当初において累積数が急増し、やがてその変化は一定勾配に近づき、1サイクル当りの事象数がほぼ一定となる。これは後にも考察するように、高温下では AE 発生要因の回復現象が生ずるためか、あるいは、単調引張りに対する降伏応力はヤング率より温度依存性が大きいいためか、負荷当初は一定荷重制御下でより大きなひずみ範囲となり、昇温後の繰り返し荷重負荷に対し、当初は比較的 AE 発生率が高く、やがて安定化に向かうと考えられる。傾向的には温度上昇とともに AE の活性度は著しく増大する。

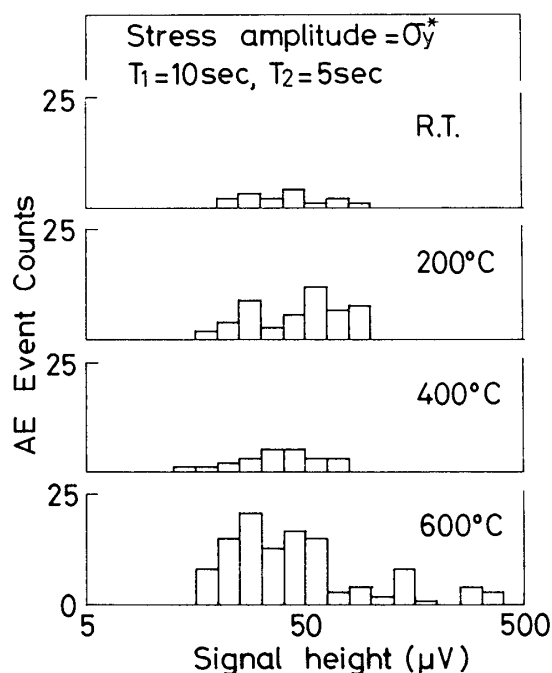
負荷当初は上述のように他の要素が含まれるため、むしろある程度安定後の状態で AE の温度依存性を検討したほうが好ましいであろう。第5図は1サイクル当りの事象数と温度の関係を示したものである。実線は第4図にも示した負荷当初の20サイクルのほぼ安定したと考えられる最終5サイクルにおける結果を示したもので、事象数は温度の上昇とともに増



第4図 AE 累積事象数と荷重サイクル数の関係



第5図 AE 発生率と温度の関係



第6図 各温度における波高分布

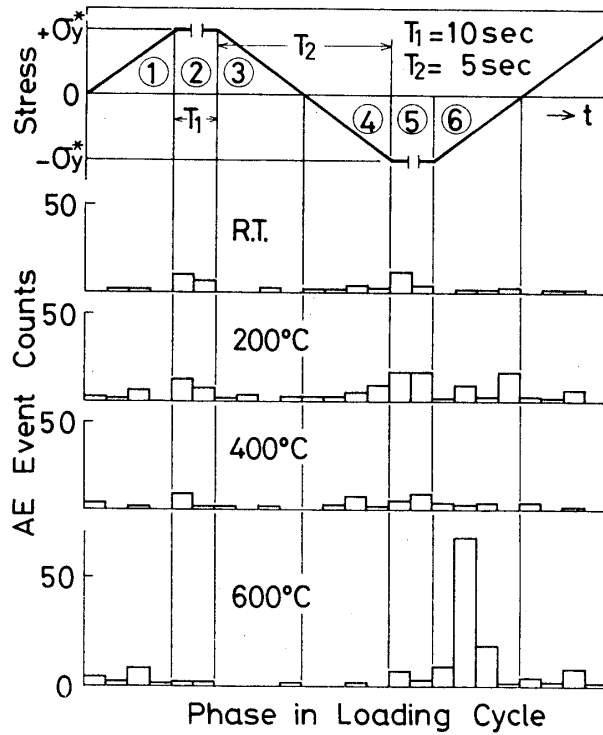
加している。また、破線は41～60サイクルにおける結果を示したものであるが、このようにより安定した状態で事象数が400°Cで低下する現象が観察された。この結果については、未だデータ量としても僅少であり、断定的な判断は下し難く、今後の検討が必要である。

さらに、上記の41～60サイクルにおけるAEの波高分布を各温度ごとに示したのが、第6図である。事象数が少なく、分布関係を求めることはできないが、ほぼ同様な分布形態を有していると考えることができる。600°Cでは、事象数も多く、またかなり高振幅の信号が現われていることが認められる。

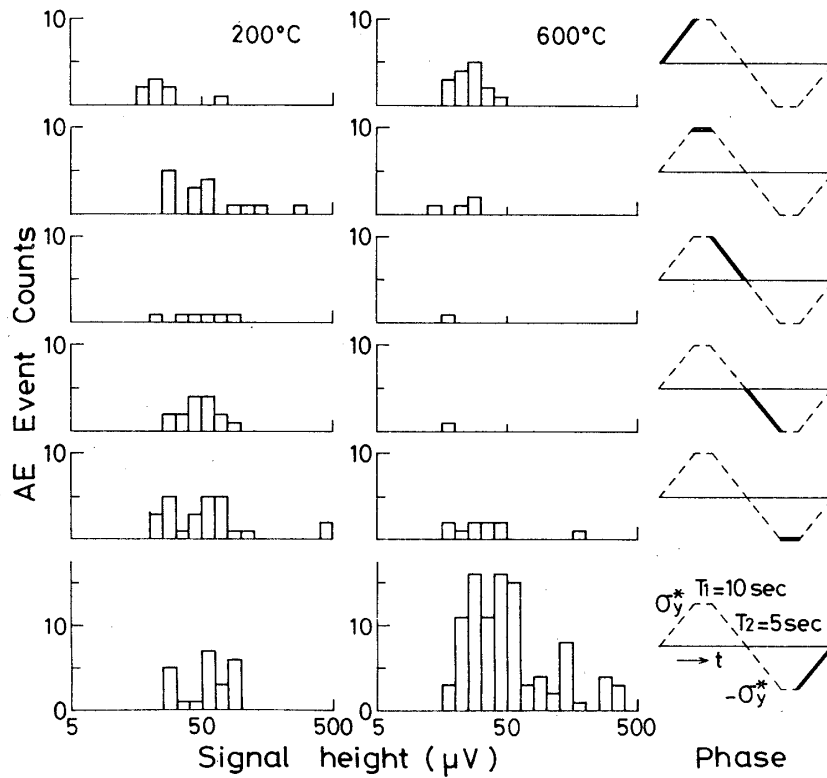
3.3 AEの発生と荷重サイクル中の位相との関係

AEの発生と荷重サイクル中の位相との相関は、AEの発生機構を検討する上で、大きな手がかりとなる。第7図は、荷重サイクル中の位相に対して、AEの発生する頻度を解析した結果で、同図上部に示すように、荷重サイクルを大きく6分割し、それら各位相中で発生したAE事象数を各温度について示したものである。事象数は各温度とも、加振後41～60サイクル中の累積数をとってある。さらに、第7図の結果について各位相ごとのAEの波高分布を求め、試験温度200°Cと600°Cについての結果を示したのが第8図である。これらの結果から、AEはほとんどの位相で発生しているが、当然のことながら、AE発生率は荷重が変化する過程では高く、荷重が保持されている間では相対的に低い。温度による変化は、最大圧縮荷重から荷重0に到る過程に現われ、特に200°C、600°Cについて顕著で、その過程において特にAE発生率が高く、また、600°Cにおいて大振幅のAEの発生が認められる。

繰り返し変形における試験片のき裂周辺の挙動は、荷重サイクルを第7図のように分割し



第7図 荷重位相に対する発生AE事象数の温度による変化



第8図 各位相について解析した波高分布

た各位相に対し、以下のように説明できる。

①き裂開口が増大し、き裂が生長する。②高温下ではクリープが生ずる。特にき裂底では著しい。③き裂が閉口する。④き裂は閉口のまま最大圧縮荷重に向かう。⑤高温下ではクリープが生ずる。ただし、全断面で荷重を負担するため②ほどではない。⑥き裂が開口し、き裂底より再降伏が開始する。

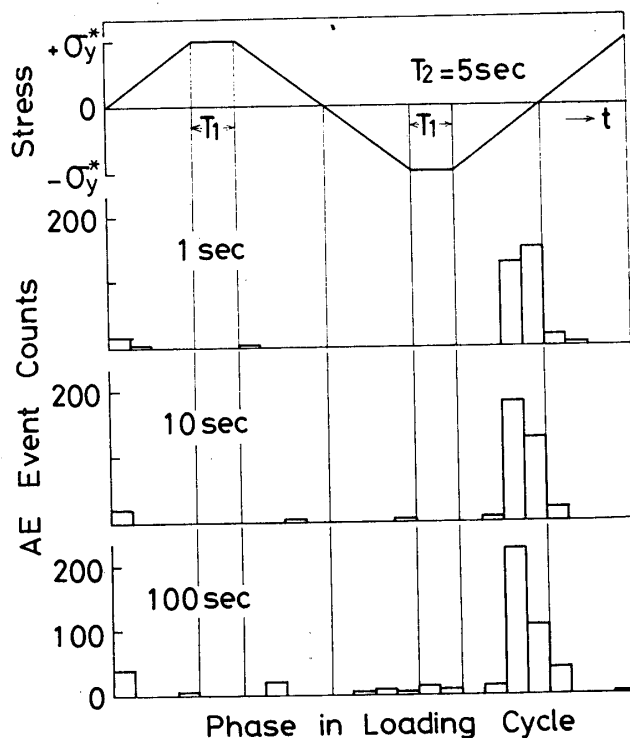
一方、従来、繰り返し変形における AE 発生要因としては、以下の事由が考えられてきた。

1) き裂進展(自由界面の形成)に伴うエネルギー開放。2) き裂閉口にともなう摩擦。3) 酸化物の閉口に伴う破壊。4) き裂面の圧着からの解放。5) 塑性変形(降伏曲面の推移)。

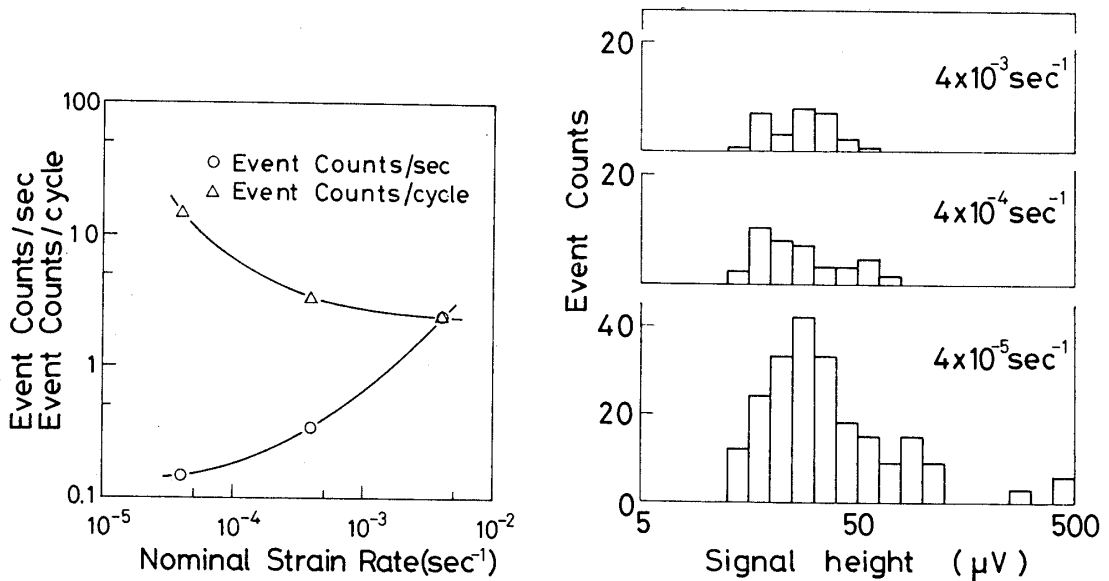
ここで、特に高温における AE の発生要因を第7図中の 600°C の結果から考察すると、最も AE が頻発するのは位相⑥であり、その要因として考えられるのは上記1)～5)の内4)と5)である。さらに、SUS 304 材の単調引張り下の AE 特性をあわせて考慮すると、位相⑥の一部にのみピークが見られるのは、き裂底部の再降伏に対応していると考えられ、結果として以下の AE 発生要因が導かれる。

1) 高温における AE 発生要因は主としてき裂底の引張り側再降伏に伴う。2) 高温において引張り側再降伏で AE が現われるのは、回復現象が見られるためである。3) 回復現象は単に温度、時間に対する増加型であるばかりでなく、負荷応力(ひずみ)振幅にも影響される。

以上、塑性変形に関する AE 発生の可能性を中心に検討したが、き裂面の圧着からの解



第9図 AE 発生荷重位相におよぼす保持時間 T_1 の影響



(a) 発生率とひずみ速度の関係

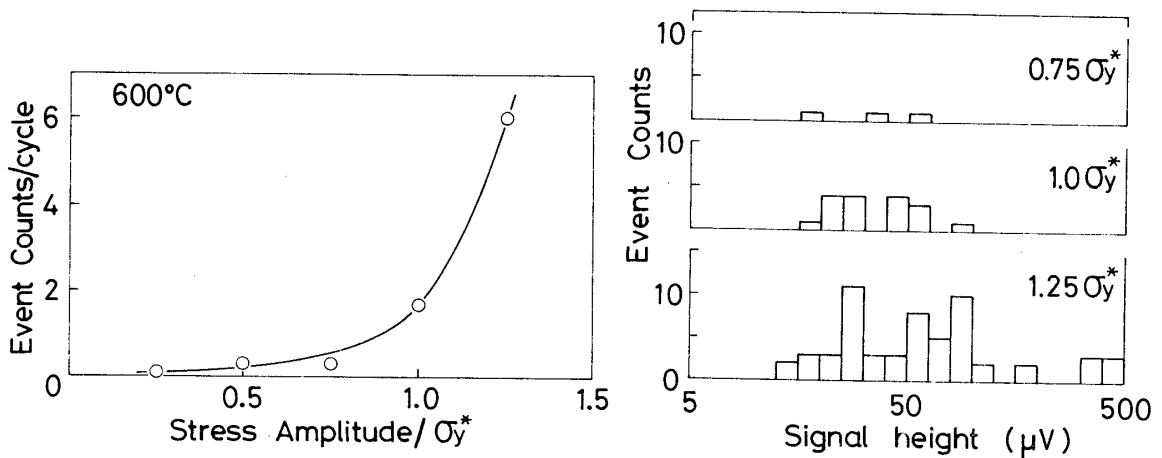
(b) 波高分布

第 10 図 AE 発生率におよぼすひずみ速度の影響(600°C)

放に伴う AE も当然含まれていると考えられる。但し、これらは僅少なデータに基づく結果であり、今後多数のデータ集積による詳細な検討が必要なのは言うまでもない。また、一般に、き裂面に剪断力が一部働くような構造物試験では、き裂閉口に伴い AE が頻発することも知られており、本試験のような単純な形状の試験片での結果と、構造物の場合とを対応づけるには、別途考察が必要である。

3.4 応力保持時間の影響

高温における応力保持時間の影響を調べるために、600°C で保持時間を 1 ~ 100sec の間



(a) 事象数と応力振幅の関係

(b) 波高分布

第 11 図 AE 活性度におよぼす応力振幅の影響

で変化させた時の、荷重サイクル中の位相と AE 事象数の関係を第9図に示す。この結果より、保持時間が増すほど AE 発生率は高くなり、保持時間の影響は特に圧縮から引張りに移行する過程で大きく、その間に発生する事象数のピークは、保持時間が長くなるにしたがい、その過程の初期、すなわち最大圧縮荷重に向けて移行する。という興味深い現象が把握され、近年問題とされているクリープ疲労現象を把握する有力な手段として、AE 法が適用可能性を有することが示された。

3.5 応力負荷速度（ひずみ速度）の影響

試験温度 600°C、応力振幅 σ_f^* 、応力保持時間 10 秒一定のもとで、応力負荷速度を変化させたときの、毎秒当りと 1 サイクル当りの事象数を、見かけ上のgrossなひずみ速度に対して示したのが第 10 図である。同図 (a) に AE 発生率を、(b) に波高分布をそれぞれ示してある。従来、AE 計測においては、一般にひずみ速度が増すほど AE の活性度は増すといわれ、同図 (a) の時間当りの事象数の傾向はこれに相当する。しかし、ここでのひずみ速度の効果を考察するには、サイクル当りの AE 活性度で見るのがよく、試験結果によると、ひずみ速度が小さいほど AE 活性度は高く、また、やや高振幅の AE が発生する傾向が示された。

3.6 応力振幅の影響

試験温度 600°C において、応力振幅の影響を調べるために、応力保持時間 10 秒一定にて、応力振幅を σ_f^* の 25%~125% まで変化させ、AE を計測した。このとき、応力負荷速度は見かけのひずみ速度が各応力振幅で同一となるようにした。第 11 図 (a) に AE 発生率を、また、同図 (b) にその波高分布を、それぞれの応力振幅に対して示す。この結果から、応力振幅の増加とともに、AE 発生率は指数関数的に増大し、また、大振幅の AE の発生が認められた。なお、この結果は、応力履歴を考慮すると、繰り返し変形におけるカイザー効果を示していると理解される。

4. 結 論

オーステナイトステンレス鋼の SUS 304 について、環状切欠き付丸棒試験片を用いて、引張り・圧縮による疲労試験を行った結果、材料の AE 特性として以下の結論を得た。

1. 有効な AE 信号の弁別

時間差およびダミー変換子を用いることにより、AE 信号と雑音の弁別が可能となった。

2. 温度の影響

負荷当初の AE 発生率は温度上昇に伴い単調に著しく増加する。AE 発生率は繰り返しとともに安定し、安定後の AE 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。

3. AE の発生と荷重位相との関連

比較的低温域では、特定の荷重位相に AE 発生が集中することは認められなかった。600°C では、最大圧縮荷重から引張りに向かう位相で特に著しい AE の活性が見られた。この AE の発生要因としては、き裂底部の回復効果を伴う再降伏の結果と推定されたが、き裂面の圧着からの解放に伴う AE も含まれているものと考えられる。

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、AE 発生率は高くなり、また、発生位相のピークは最大圧縮応力側に移動する。

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 AE 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、AE 発生率は著しく増大する。

終りに、本研究を進めるにあたって、助言と協力をいただいた動力炉核燃料開発事業団大洗工学センター FBR 安全性試験室室長堀 雅夫氏ならびに今津 彰氏に深甚なる謝意を表す。また実験の遂行に助力を惜しまれなかった東京大学大学院生榊原安英君、三島 豊君、日本大学大学院生小幡義彦君に厚くお礼申し上げる。

1978年3月29日 材料部

参 考 文 献

- [1] H. L. Dunegan, D. O. Harris and A. S. Tetelman: Mat. Eval., Oct. (1970), 221.
- [2] T. M. Morton, R. M. Harrington and J. G. Bjeletich: Engn. Fract. Mech., 5 (1973), 691.
- [3] T. Shiraiwa, Y. Sakamoto, K. Hirakawa, H. Yamaguchi and T. Sakai: 2nd. AE Symp., Tokyo, 1974.
- [4] D. O. Harris and H. L. Dunegan: Exp. Mech., Feb. (1974), 71.
- [5] A. C. E. Sinclair, D. C. Connors and C. L. Formby: Mater. Sci. Eng., 28 (1977), 263.
- [6] T. C. Lindley, I. G. Palmer and C. E. Richards: Mater. Sci. Eng., 32 (1978), 1.
- [7] L. H. Gordon: NASA TMX-3523 (1978).
- [8] 榊原安英: 東京大学学位論文, (1978).