高サイクル疲労試験時のアコースティック・エミッション*

羽 田 野 甫**

Acoustic Emission during High-Cycle Fatigue Testing

by

Hajime HATANO

(Research Laboratory of Precision Machinery and Electronics, Tokyo Institute of Technology, Yokohama)

Acoustic emission (or stress wave emission) is measured during high-cycle fatigue testing of pure aluminium specimens. Experimental results obtained are as follows:

(1) Burst-type acoustic emission begins to radiate intermittently in the early stage of fatigue testing before the macroscopic crack growth is observed.

(2) Smoothed specimen radiates acoustic emission of several mV peak. Notched specimen radiates much larger acoustic emission of scores of mV peak under the same cyclic load.

(3) Most of the acoustic emission signals are detected around the instance that the cyclic load attains a maximum.

(4) It is clear that the acoustic emission measurement using a peak voltmeter is useful for the study of fatigue, particularly that of microscopic fatigue crack growth.

(Received Dec. 5, 1974)

1 緒 言

固体材料の変形やき裂の伝ばに伴って弾性波が放出される現象を構造物の非破壊検査や安全性確保に応用する試みが近年活発に行なわれている。この現象は^{1)~8)}“アコースティック・エミッション (Acoustic Emission, 以下 AE と略す)”あるいはその周波数が可聴域に限定されない点を考慮して“Stress Wave Emission”などと呼ばれている。古くは裸耳による観察が試みられたこともあったが、現在は安定した測定が可能である電気的な検出器や増幅器を用いた研究が行なわれている。AE の基本的な特性に関してはいまだに不明の点が多いものの、この電気的な方法によってきわめて高感度の弾性波の検出が実現されるので、材料の変形時や破壊時の AE の調査によって、その微視的な機構を解明する上での有益な知見が得られる可能性がある。^{9)~11)}

工学的な応用の面からも重要な意義をもっていると考えられる金属の疲労の進行に伴って発生する AE に関しては、すでに何篇かの報告が発表されている。¹²⁾¹³⁾T. M. Morton らは 2024 アルミニウム合金、D. O. Harris らは 7075 アルミニウム合金と 4140 鋼、¹⁴⁾¹⁵⁾C. E. Hartbower らは D6ac 鋼、6Al-4V チタン合金と

7075 アルミニウム合金をそれぞれ用いた実験を行ない、疲労き裂の伝ば速度や応力拡大係数と AE の関係を整理している。しかしこれらの実験はいずれも切欠き試験片によるものであり、その疲労寿命は 10^5 に達していない。また AE の測定量として、物理的な意味付けや再現性の点で必ずしも満足できない“計数値”や“計数率”（後述）を採用しているという問題点も残っている。

このような現状に鑑み、筆者らは個々の AE の大きさの相対的な比較がある程度可能であると考えられる、検出信号のピーク電圧を測定する方法を採用して、純アルミニウムの高サイクル疲労試験に適用した。平滑試験片と切欠き試験片についてはほぼ同一実験条件下での AE の測定を行ない、その差異も調査した。本報では、この AE の測定法についての検討と、その若干の実験結果に触れる。

2 実験方法

2.1 AE の測定

Fig. 1 に本実験で採用した AE の測定方法の構成図を示す。薄板の疲労試験片の表面に接着した AE 検出器の出力信号は、低雑音増幅器、バンドパスフィルタを経てピーク電圧計に導かれる。ピーク電圧計の出力信号はペンレコーダで連続的に記録する。また、検出信号波形の観察を行なうため、オシロスコープも併用

* 原稿受理 昭和49年12月5日

** 正会員 東京工業大学精密工学研究所 横浜市緑区長津田

Fig. 1. Instrumentation setup for acoustic emission measurement.

する。

2.2 AE 検出器

本実験で使用した疲労試験片のような薄い金属板では、AE の弾性エネルギーの主要な成分は“板波 (Lamb 波)” の非対称モードで伝ばすることが知られている。検出器の軸方向から伝ばしてくる弾性波に対しては、その断面積を大きくすることが感度向上のために有効な手段の一つである。しかし、試験片内を検出器の横方向から伝ばしてくる板波の場合には、検出器の断面積を音波の波長に比して一定以上に大きくすると、その断面内で音波の山と谷とが互いに打ち消し合う効果によって、かえって感度が低下することがある。

今回の実験では、先に実用的な検出器として開発した、Fig.2 のような厚さ 10 mm、直径 7.5 mm の断面が比較的小さい円筒状の圧電セラミック振動子を金属製のケースに収めて耐久性を高めたものを使用した。この検出器の特徴として、横方向から伝ばしてくる板波に対しても、軸方向からの縦波に対してもほぼ同一の約 140 kHz の共振周波数を有する点が挙げられる。検出器の出力回路にそう入したコイル Lc は、振動子の拘束容量を打ち消して検出器の帯域幅を拡大すると同時に、低周波に対する検出器の感度を低下させ、疲労試験機で発生する強大な機械的振動によって増幅器の初段が飽和するのを防止している。検出器を試験片に取り付けるための接着剤には熱可塑性の樹脂“ホットメルト”を使用してその反復使用を可能とした。Fig. 3 に検出器の取り付け状況を示す。

Fig. 2. Acoustic emission transducer of 140 kHz resonance.

Fig. 3. Acoustic emission detection during high-cycle fatigue testing.

2.3 検出周波数

AE は少なくとも MHz 台に達する広い周波数スペクトルをもっていると考えられている。しかし、広帯域の周波数特性をもった高感度の超音波検出器が得難いことや、AE を発生する試験片自体が形成する振動系の音響的な伝送特性の補正が困難であることなどが障害となって、一般の音響測定で採用されているようなスペクトル解析やエネルギー解析、波高値解析といった定量的な手法を、そのまま AE の測定に適用することはできない。

金属材料の塑性変形では、その巨視的に均一な変形に伴って、見掛け上連続型の AE が観測されることが多い。これは、検出系の時間分解能に比して AE の個々の素過程の時間間隔が充分短いことによっていものと考えられる。この種の連続型の AE については、一応の定量的な測定法も考案されている¹⁷⁾¹⁸⁾。しかし疲労試験の場合には、断続的なき裂の伝ばに対応してパースト型の AE が不規則に発生する例が多く、定量的な測定を一層困難にしている。

この実験では、広い周波数領域での定量的な測定は当面の目的からはずし、検出周波数を検出器の共振周波数近傍に限定することによって検出系の感度の向上を図ることを主眼とした。使用した増幅器は約 1 MHz まで平坦な周波数特性を有しているが、バンドパスフィルタを測定系にそう入して、検出器の共振周波数である 140 kHz 付近の周波数成分だけを選択している。バンドパスフィルタの通過域は 20-200 kHz (-3dB) であるが、検出器を機械的に完全には制動していないので、測定の実効的な周波数帯域はこれよりもかなり狭帯域になっていると考えられる。また、フィルタによって低域の周波数成分を除去した結果、疲労試験機

の振動の影響をほぼ完全に逃れることも可能になった。

2・4 検出信号の処理

AE の検出周波数が 140 kHz と高周波であるため、増幅、濾波した検出信号波形をペンレコーダなどの記録計に直接記録することは難しい。また、AE の周波数スペクトルに比して検出の周波数帯が著しく狭帯域であるので、この検出信号波形から AE の原波形に関する多くの情報を得ることもできない。検出信号に適当な処理を施して特定の情報を抽出、記録するための方法として、次のようなものが挙げられる。

(a) 計数法

従来の多くの研究で採用されてきた方法である。Fig.4 のように、あらかじめ設定したしきい値 V_i 以上の大きさをもった検出信号の波数の総量や単位時間当たりの数をカウンタで直接計数する。1 個のバースト型の AE 信号波形が同図のような減衰振動で近似されるとき“計数値” N は、 $V_0 \geq V_i$ として、

Fig. 4. Counts of burst-type acoustic emission signal.

$$N = \frac{\omega}{2\pi\beta} \ln \frac{V_0}{V_i} \tag{1}$$

で与えられるので、 N から検出信号の振幅 V_0 を算定することも一応可能となる。しかし実際には、試験片内での音波の反射や分散の影響によって、検出信号波形は単純な減衰振動とは異なった複雑な形状になることが多い。しかも荷重の繰返し速度の大きな高サイクル疲労試験の場合には、カウンタのリセット間隔（通常 0.1~10sec. 位）内に多数のバーストが発生するため、1 個のバーストに対応した計数値を求めることができなくなるおそれが強い。このように計数値から AE の物理量を推定することが難しいばかりでなく、カウンタのしきい値 V_i によって、計数値の絶対値やその変化のパターンも大幅に変動することが知られている。現在の段階では、計数法がこのような AE の基礎的な研究にとって、必ずしも妥当な方法であるとは言えないように考えられる。

(b) ピーク電圧法

ピーク電圧計を用いて検出信号のピーク電圧を記録する方法である。バースト型の AE の検出信号のピーク電圧が V_p であるときのそのエネルギー E は、波形が Fig.4 のような減衰振動と異なった複雑なものであっても、

$$E = \alpha V_p^2 \tag{2}$$

となる。検出器や試験片の形状や大きさが同一であれば、検出信号波形は常に大体相似であると考えられるので(2)式の α は定数と見なす。したがってこのピーク電圧の測定によって、個々の AE のエネルギーの大きさの相対的な比較が可能になる。

本実験では、約 0.5 sec. ごとに検出信号のピーク電圧を検出して保持するピーク電圧計（富士精密電機製、PPV-8 型改造品）を採用した。この電圧計は死時間を伴わない測定が可能である。また、この電圧計の出力に追従した記録を得るため、ペンの移動速度が 0.4 sec./full scale であるペンレコーダを使用している。後述するように、疲労試験の荷重の繰返し速度は 25 Hz であるので、平均疲労繰返し数 12.5 サイクルの間に発生した AE の最大のもののピーク電圧が連続的に記録されることになる。

ピーク電圧や計数値の他に、検出信号の平均電圧や実効電圧を測定する方法も一般に採用されることがある⁹⁾。ただし、疲労試験の場合に発生するバースト型の AE は大振幅であっても継続時間は短いのでその平均値や実効値は必ずしも小さくなく、良好な記録を得るのは容易でない。

2・5 試験片と疲労試験

供試材の市販純アルミニウム（1050）の化学成分を Table I に示す。Fig.5 に示す形状、寸法に機械加工後、400℃、1 hr. の焼なましを行なった。表面は #1000 のエメリー紙で研磨した後にバフ仕上げを施した。AE に対する切欠きの効果を調べるため、ほぼ同

Table I. Chemical composition of specimen.
(Commercial purity aluminium (1050))
(wt.%)

Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Zr
<0.02	0.04	0.24	<0.02	<0.003	<0.001	<0.02	<0.02	<0.002

Fig. 5. Pure-aluminium fatigue-test specimens.

Fig. 6. Acoustic emission of smoothed specimen.

一の大きさの平滑試験片と切欠き試験片を製作して、同一荷重での試験を行なった。切欠き底の曲率半径は約 0.05 mm であるので、その応力集中係数は約12.5となる。

疲労試験は、島津製油圧制御方式のサーボバルサを用いて、繰返し速度 25 Hz の片振り引張荷重正弦波形で、応力振幅一定の条件で行なった。引張荷重の最大値は 400 kg、平均値は 200 kg であった。平滑試験片の平行部の応力に換算すると最大約 7.7 kg/mm²になる。両振り圧縮引張荷重試験は、チャック部のゆるみに起因する機械的な雑音が測定の障害になるおそれがあるので、今回は行っていない。

3 実験結果と考察

3・1 平滑試験片の AE

平滑試験片について片振り高サイクル疲労試験を行ない AE の測定を行なった。Fig. 6 は AE の検出信号のピーク電圧を検出器出力端電圧に換算して表示したものである。

この試験片は、荷重の繰返し数が約 35×10^4 で破断した。巨視的なき裂が発生した時点と正確にとらえることはできなかったが、目視によって検出できる程度の大きさのき裂は、少なくとも試験の後半の繰返し数 20×10^4 まで認められなかった。これに対し AE は、繰返し数 10^4 前後の疲労試験の初期段階から、数 mV のピーク電圧が間歇的に記録されている。なお、同種の試料10本について同一条件下での実験を行なったが、いずれも同様の結果が得られた。

3・2 切欠き試験片の AE

切欠き試験片について AE の測定を行なった結果の例を Fig. 7 に示す。モータドライブカメラによってき裂の伝ばの様子を連続的に撮影、測定した結果もあわせて示した。

平滑試験片と同一荷重の実験であったが、切欠きを付加した効果によって疲労寿命は約 6.3×10^4 に低下している。試験片表面の写真撮影による測定では、荷

Fig. 7. Acoustic emission of notched specimen.

重繰返し数 4×10^4 前後の時刻から巨視的な疲労き裂の急速な伸長が認められる。AE はこれよりも以前の、荷重繰返し数 0.2×10^4 の段階から数 10 mV もの大信号が記録されている。この電圧は平滑試験片のものに比して10倍以上の大きさになる。個々の AE バーストの検出信号エネルギーに換算すると、2式から100倍以上の比になる。測定に使用した装置が同一であり、また平滑試験片と切欠き試験片の大きさもほぼ等しいので、この差は有意であると考えられる。なお、同種の切欠き試験片5本について同一の実験を行なったところ、良好な再現性が得られた。

3・3 AE の検出信号

Fig. 8 は、高サイクル疲労試験時の AE の検出信号波形をバンドパスフィルタの出力端で観察し、繰返し荷重との対応関係を示したものである。平滑試験片の場合には、疲労試験機の油圧系で発生する高周波成分の強大なキャビテーション雑音に起因すると考えられる連続的な背景雑音が比較的強大である。しかしそのピーク電圧は高々 0.5 mV 程度であるので、Fig. 6 に記録されている約 1 mV 以上のピーク電圧の信号は AE に対応した有意なものと思えしえよう。ただし、微小な AE がこの背景雑音に埋もれている可能性もあることは充分留意すべきものと考えられる。切欠き試験片の場合には、AE 信号が強大であるのでこの背景雑音の影響は僅少になっている。

今回の疲労試験では、圧縮荷重を付加しなかった。しかし疲労き裂の先端の領域では残留応力によって圧

*1 荷重信号によって制御されるゲートを測定系にそ入することによってこの問題はほとんど解決される。

Fig. 8. Acoustic emission signal correlated with cyclic load.

縮応力も生じている可能性がある¹⁹⁾。そのためすでに存在するき裂の破面同志が打ち合って機械的な雑音を生じるおそれがある。記録された AE 信号の多くは、Fig. 8 のように、繰返し荷重が最大値に達する前後の時刻に検出されているので、この種の雑音は微小であったと考えられる。

3.4 疲労破壊と AE

先に筆者らが、純アルミニウムの単純引張試験時に、今回使用したものと同種の振動子によって得た AE 検出信号のピーク電圧は、高々数 $10 \mu\text{V}$ のオーダーであった²⁰⁾。試験片の大きさや形状などが異なるので厳密な比較は不能であるが、単にピーク電圧で比較した場合、塑性変形よりも格段に大きな信号が、巨視的なき裂が認められるよりも以前の疲労試験の初期段階から記録されたことになる。

従来の切欠き試験片を用いた実験では、疲労の最終段階で AE 信号の計数値が急増している^{12)~16)}。今回の切欠き試験片による実験でも、荷重繰返し数が約 5.6×10^4 に達した疲労試験の最終段階で、大きなピーク電圧がほぼ連続的に記録されている。またこの実験では、巨視的なき裂が認められるよりも以前の段階でも大きなピーク電圧が記録されている。ここで採用したピーク電圧による方法が、発生頻度にかかわらず一定の感度を有することがその一つの原因であると考えられる。増幅器の利得を設定可能な最小値の 28dB に減少したが、検出信号が強大であるため、出力電圧が増幅器の直線性保証値の 1V を越えた部分も生じた。Fig. 7 の結果はその範囲内での記録を示してある。今後は適当な減衰器をそう入するなどの措置を講じ、スケールオ

ーバしないデータによって疲労の各段階での AE 発生 の差異を明確にしていきたい。

一方平滑試験片では、疲労の最終段階における AE の顕著な増大が認められていない。おそらく、平滑試験片と切欠き試験片における疲労進行の様相の差異によるものと考えられるが詳細は不明である。たとえば、切欠き試験片では切欠き底部に集中して疲労き裂が発生して破断にいたるのに対し、平滑試験片では試験片の平行部の何箇所かに疲労き裂が発生し、その一部のものが試験片の破断に結びつくことが一つの原因であると考えられる。事実、疲労試験後の平滑試験片の表面を肉眼によって観察したところ、破断にいたった疲労き裂の他に、数個の微小なき裂が認められた。

4 結 言

検出器や検出信号の処理方法などについて新たな検討を加えた AE の測定方法を開発した。純アルミニウムの平滑試験片と切欠き試験片の片振り引張荷重高サイクル疲労試験に適用して得られた主な実験結果は次のとおりである。

(1) 平滑試験片、切欠き試験片いずれの場合でも、巨視的な疲労き裂が認められるよりも以前の、疲労試験の初期段階から、強大な AE ピーク電圧が間歇的に記録された。

(2) 同一繰返し荷重の試験で、平滑試験片では数 mV、切欠き試験片では数 10 mV のピーク電圧の AE が記録された。個々の AE のエネルギーの大きさと比較すると 100 倍以上の比になる。

(3) 切欠き試験片では従来の報告と同様に、疲労の最終段階で強大な AE の連続的な発生が認められたものの、平滑試験片ではこの段階における AE の顕著な増大が認められなかった。

(4) 検出された AE 信号の大部分は、繰返し荷重が最大値に達する前後の時刻に発生した。

(5) 本実験で採用したピーク電圧法による AE の測定によって、疲労破壊、特に巨視的なき裂が発生する以前の微視的なき裂の成長に関する知見を得るための有効な手段が提供されうるものと思われる。

日頃ご指導いただき、本稿をまとめる機会を与えていただいた森栄司教授、筆者が東京大学大学院在学中にご指導いただいた丹羽登教授、堀内良教授、岸輝雄助教授、ならびに実験に関してご助力いただいた佐下橋市太郎氏、森本三郎氏、三浦康弘氏、吉田安德氏、M. H. スルタン氏、田中博氏に深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) "Acoustic Emission" (1972) Amer. Soc. Test. Mat., STP 505, Philadelphia
- 2) "Proc. 2nd AE Symp." (1974) JIPA, Tokyo

- 3) 小野恒司, 鉄と鋼, **59**, 132 (1973).
- 4) 今中拓一, 佐野謙一, 清水真人, 金属学会報, **12**, 871 (1973).
- 5) 羽田野甫, “Stress-Wave Emission の研究”, 東京大学学位論文 (1973. 12).
- 6) 羽田野甫, 応用物理, **44**, 564 (1975).
- 7) 羽田野甫, 堀内 良, 丹羽 登, Inst. Space Aeronaut. Sci., Univ. Tokyo Rep., **38**, 31 (1973).
- 8) 羽田野甫, 鉄と鋼, **61**, 101 (1975).
- 9) 羽田野甫, 非破壊検査, **20**, 597 (1971).
- 10) 羽田野甫, 非破壊検査, **21**, 219 (1972).
- 11) 羽田野甫, 丹羽 登, Proc. 7th Int. Conf. N.D.T., Warszawa, E-12 (1973).
- 12) Morton, T. M., R. M. Harrington, and J. G. Bjeletich, Eng. Fract. Mech., **5**, 691 (1973).
- 13) Smith, S., and T. M. Morton, Exp. Mech., **13**, 193 (1973).
- 14) Harris, D. O., and H. L. Dunegan, Exp. Mech., **14**, 71 (1974).
- 15) Dunegan, H. L., D. O. Harris, and A. S. Tetelman, Mater. Eval., **221** (1970).
- 16) Hartbower, C. E., C. F. Morais, W. G. Reuter, and P. P. Crimmins, Eng. Fract. Mech., **5**, 765 (1973).
- 17) 羽田野甫, 音響学会誌, **31**, 3 (1975).
- 18) 羽田野甫, J. Acoust. Soc. Amer., **57**, 639 (1975).
- 19) Shih, T. T., and R. P. Wei, Eng. Fract. Mech., **6**, 19 (1974).
- 20) 羽田野甫他, 金属学会誌, **31**, 675 (1975).

書 評

Principles of Electrochemical Machining

(J. A. McGeough 著, Chapman and Hall, London, 1974年刊, B 5 判, 255頁, 英国価額£6.00)

食塩電解やアルミニウム精練のような製造工業として発展してきた電気化学操作が, 最近, 新しい領域への適用を模索している. 電荷移動と物質移動とが厳密に量論関係にあり, また反応の駆動力としての電極電位を外部から容易に制御でき, さらに陽陰両極反応はそれぞれ著しく強い酸化および還元反応であるなど, 多くの特徴を活して, 例えば, プロセスのモニタリングや排水処理対策などに実用的に利用されてすでに多くの実績を挙げている.

このように電気化学反応操作の特徴を単的に利用した一つの成果が電解加工 Electrochemical Machining (ECM) と云える. ECM は決して新しい技術ではなく, また一つには電解研磨の延長として眺めることができるけれども, ECM が本格的に研究され, 開発されたのは近々10年程度である. それは新しい金属材料の開発によって利用技術の多用化が求められた結果と考えられる.

ECM は電気化学反応操作であるため

- (1) 作業が Faraday の法則によって量論的であり, その速度を広範囲に亘って容易に制御できる.
- (2) 目的の金属や合金の機械的性質, 例えば, 硬度などに作業性が影響されない.
- (3) 機械加工では困難な複雑な形状も, 相手陰極の設計などによって可能である.

などの特徴を有する. さらに従来試みられた ECM では例えば食塩水や塩素酸ソーダ水溶液などのように毒性や危険性の少ない電解液が用いられていることは作業環境や排液排水の対策上好都合である.

ECM は金属加工であるから機械工学関係の技術者や技能者が実際にたずさわっている. しかし電気化学反応操作の応用であるため, 最少必要限の電気化学の知識を修得しなければならない. 本書ではこのような専門外の人に電気化学の概要を平易に解説しようと試みられている. ところが ECM は, 従来の電気化学ないし電気化学工業の操作範囲とはかなり異なった条件にあるため, いわゆる電解槽工学の思想が非常に重要である. 単的に云えば, 加工精度を上げるために系の電場の状態 (電流分布) を可能な限り正確に把握するとともに, いかに均一電流分布状態を確保するかが工学的にも実際技術の面でも大切である.

ECM は非常に高電流密度領域で操作する. したがって陽極生成物質および Joule 熱を速やかに系外に除くために陽陰両極間の狭い間隙を高速で電解液を流すが, この場合の流体力学的考察と物質収支の算定が ECM の一つの決め手となる.

本書ではまず ECM の特徴や原理を概説した後, 流体力学の基礎, 電気化学の基礎, ECM における金属と電解液, 流体力学と反応動力学, 陽極表面の平滑化, 陽極および陰極の構造設計, に関して解説している. そして最後に幾つかの ECM の応用例を示しているので参考となるであろう. (名古屋工業大学 日根文男)