

材料の有効利用を目的とした疲労破壊のAE測定の基礎的研究

A Basic Study on Measurements of Fatigue Crack by Acoustic Emission for the Efficient Use of Materials

鳥飼安生*・北川英夫*・尾上守夫**

李孝雄*・大平壽昭*・山田博章**

Yasuo TORIKAI, Hideo KITAGAWA, Morio ONOE

Hyo Ung LI, Toshiaki OHIRA, and Hiroaki YAMADA

1.はじめに

疲労き裂が成長する過程でのAEの計測については、最近実物または部材を対象とした計測^{[1]~[6]}に強い関心が向けられているが基礎的な研究^{[7]~[17]}は意外に少ないよう見える。AEによる疲労き裂の追跡、監視およびそれに基づく疲労破壊予測などを行うためには現段階ではまず(基礎的実験による)多くの基礎的なデータの蓄積が急務の一つであり、その上でAEと疲労き裂挙動の関係について的一般法則を定式化することが材料および構造物の安全性の確保とその有効利用にとって必要であると考えられる。本研究は上記の趣旨に沿って進められたものであり、応用上最も一般性のある条件での基礎的データを求める目的としている。

2.実験方法

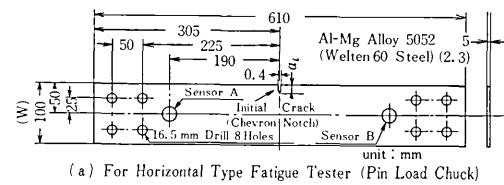
2-1 材料 比較的高延性、高韌性でしかもしばしばき裂が問題となり、AEの活性度が低い汎用の鋼である60 kg級の溶接構造用圧延鋼 Welten 60(板厚2.3 mm)と、これと比較のため、塑性変形に対してAEの活性度の高い低強度のAl-Mg系アルミニウム合金、JIS A 5052 P-H24(板厚5 mm)を試料として使用した。これらの化学成分と引張試験結果をTable 1とTable 2に示す。上記のAl-Mg合金材料の試験片のあるものは電熱炉中350°C、3 hr.熱処理した後空冷を施したが、これは塑性変形中に高い活性度を与える条件として選んだ。

2-2 試験片形状と荷重方法 低応力高サイクル域での実験を容易にするため、Fig. 1に示すような比較的大きい片側予き裂を入れた1軸引張平板試験片を採用した。予き裂には間隙幅0.4 mmのchevronノッチを用いた。試験片に繰返し引張荷重を与えるための油圧サーボ式疲労試験機としては、10 tonの水平型と20 tonの垂直型のものを用い、荷重条件、試験片寸法、センサー取付位置の影響について検討を行った。水平型試験機にはFig.

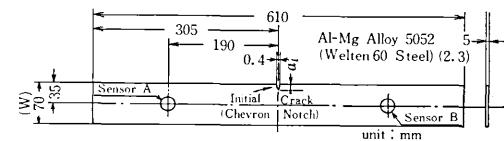
1(a)の試験片を、垂直型試験機にはFig. 1(b)の試験片を用いた。

疲労試験は周波数10ないし15 Hz、応力比0.10~0.16の範囲の正弦波の繰返し荷重一定で行った。高サイクル疲労試験におけるき裂からのAE測定は試験片チャック部を含む動的な荷重系の各所から発生する多様な雑音を低減するために試験片チャック部にグリスを塗布した。

2-3 AEの測定系 AEの測定に使用した装置の構成図をFig. 2に示す。この測定系の基本的部分はDUNEGRAN/ENDEVCO社3000 Seriesの要素で構成され



(a) For Horizontal Type Fatigue Tester (Pin Load Chuck)



(b) For Vertical Type Fatigue Tester (Oil Pressure Chuck)

Fig. 1 Notched Plate Fatigue Specimens for AE Measurements, Illustrating Positions of a Preformed Initial Crack and AE Sensors

Table 2 Mechanical Properties of Materials Tested

Material	Yield Strength $\sigma_{0.2}$, kg/mm ²	Tensile Strength σ_B , kg/mm ²	Elongation δ , (%)
Welten 60 Steel	50.0	62.0	26.0
5052 Al-Mg Alloy	22.5	28.0	15.0

Table 1 Chemical Composition of the Materials Tested (%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Fe	Mg	Zn	Al
Welten 60 Steel	0.11	0.38	1.39	0.017	0.008	2.00	—	RE	—	—	—
5052 Al-Mg Alloy	—	0.07	0.03	—	—	0.22	0.03	0.21	2.77	TR	RE

* 東京大学生産技術研究所 第1部

** " " 第3部

ている。9202型センサーは500kHzにピークがあり300kHz~1MHzの周波数特性をもつていて低周波の機械的雑音を感じにくい特性を備えているものといわれる。AE信号は40dBのプリアンプを経て、302-A型Signal Conditionerにより50dB(1例のみ40dB)で増幅された後、1Vに設定した比較器に入り1Vを越えたAE信号の発生回数をAE発生数として計測され次段に出力される。920型Distribution Analyzerは外来の機械的雑音からAE信号を分離する空間フィルタ機能をもつていて一次元の位置標定を行うことができる。これと921型Amplitude Detectorを併用してAEの振幅分布を求めた。またデジタルメモリを用いてAE波形を紙テープに取込み必要に応じて再生観察するとともにオフラインで信号処理し、周波数分布を求めた。

3. 実験結果

3-1 疲労き裂の成長とAE 実験に用いたWelten 60鋼、Al-Mg合金試料の予き裂長 a_i 、初期応力拡大係数範囲 ΔK_i 、荷重値などの実験条件および破断に至るまでの荷重繰返し数 n_f とその間に発生したAE事象の累積数 $[N]_{n=n_f}$ の結果をTable 3、Table 4に示す。各試料とともに予き裂が疲労によって伸び始めるまでは顕著なAEは発生しない。き裂が伸び始めても毎荷重ごとにAEが発生するのではなく、発生とその後のある荷重繰返し数のAE休止期(荷重繰返し数)とを繰返すような場合が多く、最終破断時に接近すると大振幅のAEを発生する。Fig 3(a), (b)に代表的なWelten 60鋼、Al-Mg合金の疲労サイクル数に対するAE事象の累積数とき裂長さとの関係を示す。Al-Mg合金の方がWelten 60鋼よ

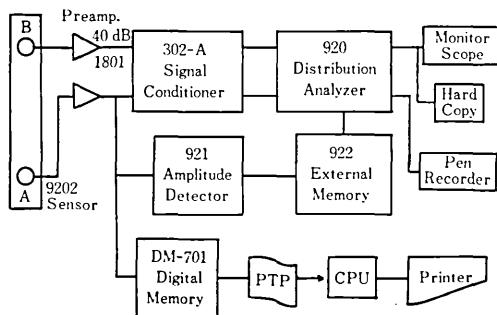


Fig. 2 Block Diagram of the Present Measuring System for Counting, Locating, and Analyzing of AE

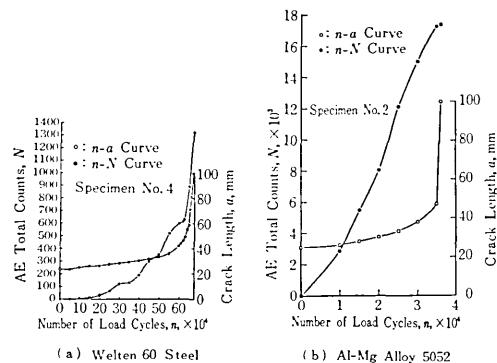


Fig. 3 Fatigue Crack Growth Curve ($n-a$ diagram) and AE Accumulation Curve ($n-N$ Diagram)

Table 3 Test Conditions for Welten 60 Steel

Specimen No.	Specimen Type	Initial Crack Length a_i , mm	Initial Stress Intensity Factor ΔK_i , kg/mm ^{3/2}	Stress Range $\Delta \sigma$, kg/mm ²	Maximum Load P_{max} , kg	Minimum Load P_{min} , kg	Load Cycles to Fracture n_f , cycles	AE Total Count (N) $n=n_f$, counts	Total Gain dB ($V_{th}=1$ V)	Filter kHz
No. 3	Pin Load	31.18	130.60	7.82	2000	200	32540	1574	A, B ch 90	H.P.F.f _c =100
No. 4	Pin Load	24.56	56.56	4.37	1200	200	657610	1389	A, B ch 90	H.P.F.f _c =100
No. 5	Pin Load	22.20	93.88	7.94	2000	200	81180	1328	A, B ch 90	H.P.F.f _c =100
No. 6	Pin Load	24.67	101.47	7.78	2000	200	61090	654	A, B ch 90	H.P.F.f _c =100
No. 9	Oil Pressure	5.39	54.52	11.32	2000	200	186940	1031	A, B ch 90	—
No. 10	Oil Pressure	5.12	54.70	10.68	1900	200	262160	1998	A, B ch 90	—
No. 11	Pin Load	10.52	55.09	8.17	2000	200	456640	1937	A, B ch 90	—
No. 13	Pin Load	9.55	51.53	7.91	2000	200	579620	10479	A, B ch 90	—

Load Frequency : 10 Hz (Except Specimen No. 3 : 15 Hz)

Table 4 Test Conditions for Al-Mg Alloy 5052

Specimen No.	Specimen Type	Initial Crack Length a_i , mm	Initial Stress Intensity Factor ΔK_i , kg/mm ^{3/2}	Stress Range $\Delta \sigma$, kg/mm ²	Maximum Load P_{max} , kg	Minimum Load P_{min} , kg	Load Cycles to Fracture n_f , cycles	AE Total Count (N) $n=n_f$, counts	Total Gain dB ($V_{th}=1$ V)	Filter kHz
No. 1*	Pin Load	11.21	25.74	3.58	2000	200	64740	56070	A, B ch 90	H.P.F.f _c =100
No. 2	Pin Load	25.13	47.40	3.57	2000	200	36090	17466	A, B ch 90	H.P.F.f _c =100
No. 3	Pin Load	10.08	28.20	3.60	2000	200	179840	28686	A, B ch 90	H.P.F.f _c =100
No. 4*	Pin Load	10.95	28.40	3.56	2000	200	237050	1153	A, B ch 80	H.P.F.f _c =100
No. 6	Oil Pressure	6.28	29.50	5.86	2000	200	120000	22296	A, B ch 90	—
No. 7	Oil Pressure	6.86	29.80	4.85	1900	200	169060	33298	A, B ch 90	—
No. 8	Pin Load	9.86	17.14	2.38	1500	200	680250	267785	A, B ch 90	—

Load Frequency : 10 Hz (Except Specimen No. 1 : 15 Hz) * Heat treatment : 350°C, 3 hr... Air Cooling

研究速報

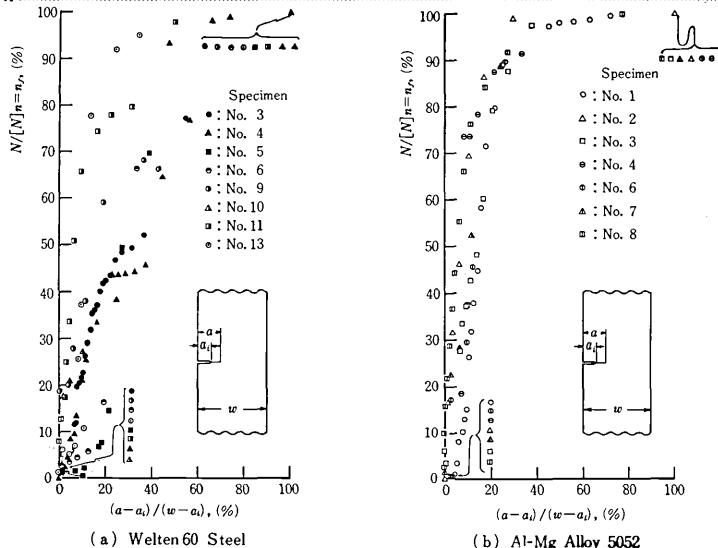


Fig. 4 Non-dimentional Total AE Counts with Respect to Non-dimentional Crack Length

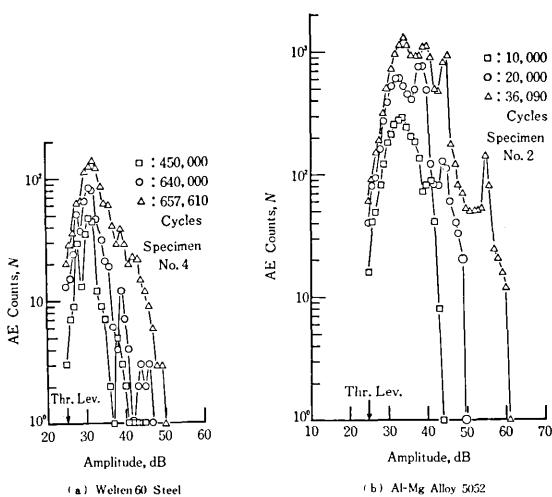


Fig. 5 Distribution of AE Amplitude Summed before Specified Load Cycles

りもAEの活性度が大きかった。

Fig. 4(a), (b)に横軸を無次元き裂長 $(a-a_i)/(w-a_i)$ 、縦軸を $N/[N]_{n=n_f}$ でプロットした結果を示す。Al-Mg合金では Fig. 4(b)に見られるように各種の異なる実験条件のデータは驚くほどよく一致した特性を示した。AE事象の累積数 N はき裂成長可能距離 ($w-a_i$) の約40%までにはほとんど飽和している。この40%以上の段階ではき裂成長速度はきわめて早く、き裂端がわずかな荷重繰返し数で残りの60%を通過するためこの間の N の増加は一見著しくないよう見える。Welten 60

鋼の Fig. 4(a) は Al-Mg 合金に比較して飽和傾向がそれほど著しくなく、曲線の上昇も Al-Mg 合金ほどには急でなく実験条件によって異なった特性を示した。

3-2 AE の発生と荷重位相との関係 疲労き裂にともなう AE の発生機構を明らかにする上で繰返し荷重のどの位相で AE が発生するかを知ることは重要である。Photo. 1 は Al-Mg 合金で AE が発生している荷重サイクルを選んでオシロスコープを単掃引にして撮影した突発型 AE 信号と荷重波形との位相関係を示したものである。

き裂成長のほとんど大部分の期間では、荷重波形の谷底部から荷重上昇が始まる位相または荷重増加速度が最大に達する位相で数多く発生しており、破断時に接近すると荷重最大付近の位相で発生するのが支配的になる。AE の発生時期が最大荷重のときと必ずしも一致しないことは他の報告^{2), 4), 11), 18)}でも指摘されている。

Welten 60 鋼についても荷重波形にたいする突発型 AE の位相関係の変化は Al-Mg 合金の場合とほぼ同じ経過をたどる。

3-3 AE の振幅分布 Welten 60 鋼と Al-Mg 合金における荷重サイクルをパラメータとし、AE 振幅の大きさにたいする AE 事象の累積発生数との関係を求めた。この AE 振幅分布曲線を Fig. 5(a), (b) に示す。横軸は 921 型 Amplitude Detector の入力端における AE 振幅を dB 表示したものであり、0 dB の基準値は 100 μ V で最大振幅 100 dB は 10 V の振幅をもつ AE の入力に相当する。この場合のしきい値 (Threshold Level) は 25 dB に設定した。これらの図から得られる情報のうち、従来の研究結果¹⁹⁾と同様に AE 振幅の最大値は最終破断に近づくに従い高くなる。振幅の大きい AE の発生頻度

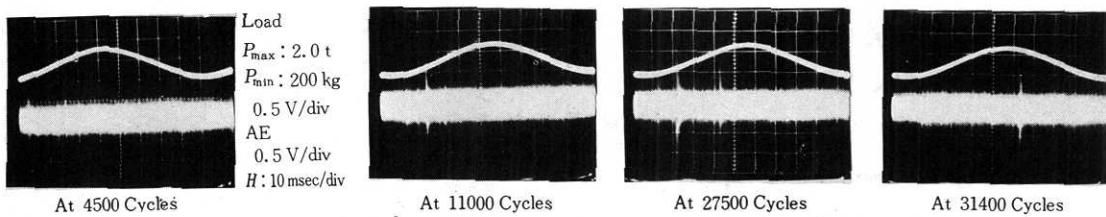


Photo 1 Dual Beam Oscilloscope Traces Showing Relationships between a Load Wave and AE Signals During Fatigue Crack Growth in Al-Mg Alloy, No. 2

は低く、低い振幅の発生頻度は高くなる傾向が認められる。(ただし、しきい値 25 dB 付近では計測上からも頻度が急低下する。)

しかし、振幅分布は、従来の研究結果に見られるように全特性を単純な負の勾配をもった単純な直線で近似することは難しく、いずれの場合も複数個のピークをもった振幅特性とからなり、複雑な様相を呈している。各ピークは疲労き裂の成長とともに AE の発生機構の多様性を示唆しているものと考えられ、疲労破面の観察や材料の内部構造との関連において解明する必要があるかと考えている。

4. む す び

比較的延性、静的強度、韌性の高い接合構造用圧延鋼 Welten 60 と、これと比較のため選んだ低強度 Al-Mg 合金 5052 P-H 24 について低応力高サイクル疲労試験を行い、疲労き裂の成長とともに AE 特性、荷重位相と AE の関係、AE の振幅分布について計測と解析を行い次のような興味ある結果を得た。

1) Al-Mg 合金は Welten 60 鋼に較べて AE の活性度は高い。き裂の長さと AE の累積総数を Fig. 3 のごとく規格化すると Al-Mg 合金では実験条件が異なっても 1 本の曲線状分散帯に実験値が乗る。急速に立上りその後は飽和傾向を示すが、立上り部分に疲労寿命の大半が含まれるので疲労寿命予測等には支障がない。Welten 60 鋼の実験値は 1 本の分散帯に乗らない。

2) 疲労き裂の成長の初期から疲労き裂成長の大部分の期間では、荷重位相の谷底部から上昇を初める時期または荷重増加速度が最大になるところで AE が多数発生するが、最終破断に接近すると荷重最大の位相での発生が支配的になる。

3) 本実験の結果では AE の振幅分布は負の勾配をもった単純な直線では近似できず複数個のピークをもった特性を示した。

以上得られた結果は低応力高サイクル疲労におけるき裂成長に特有のものか AE の計測条件の差によるものかさらに検討する必要がある。

本研究では破壊力学的な解析や AE の波形解析も行ったが、その内容についての報告は別の機会に譲ることに

した。

本研究を行うに当たり卒業論文に従事した東海大学山腰綱吉君の御協力を得たことを記し感謝の意を表します。

(1979年1月11日受理)

参 考 文 献

- 1) 仲佐; 火力原子力発電, vol. 28, No. 2 (1977-2) P. 153
- 2) 尾上, 山口, 市川, 鳴田; 電気学会論文集, vol. 95, No. 6 (1975-6) P. 139
- 3) K. Narita, M. Kawahara, K. Ishihara, T. Fuji; Proc. 3rd ICPVT, Tokyo, Part 1 (1977-4) P. 439
- 4) 動燃・電力中研共同研究報告, PNC N 941 77-77, CRIEPI 276005 (1977-4)
- 5) T. Nagata, K. Kobayashi, A. Imazu, R. Miura; 3rd AE Symp., Tokyo (1976-9) P. 11
- 6) 仲佐, 永田; 圧力技術, vol. 13, No. 2 (1975-2) P. 72
- 7) C. E. Hartbower, C. F. Morais, W. G. Reuter, P. P. Crimmins; Engng. Frac. Mech., Vol. 5 (1973) P. 765
- 8) T. M. Morton, R. M. Harrington, J. G. Bjelitch; Engng. Frac. Mech., Vol. 5 (1973) P. 691
- 9) S. Smith, T. M. Morton; Exp. Mech., (1973-5) P. 193
- 10) D. O. Harris, H. L. Dunegan; Exp. Mech., (1974-2) P. 71
- 11) 羽田野; 材料, Vol. 24, No. 265 (1975-10) P. 974
- 12) W. W. Geberich, C. E. Hartbower; Intern. J. Frac., Vol. 3 (1967) p. 185
- 13) J. R. Mitchell, P. M. Egle; Paper Summaries, Spring Conf. ASNT, (1977-3)
- 14) A. Kanno, M. Sakaki, M. Shimada, K. Katsumata; 3rd AE Symp., Tokyo (1976-9) p. 360
- 15) J. R. Wardin, H. L. Dunegan; 3rd AE Symp., Tokyo (1976-9) p. 183
- 16) J. Eisenblätter; 2nd AE Symp., Tokyo (1974-9) p. 7-1
- 17) K. Iida, M. Onoe, K. Takahashi, H. Yamada, C. Lee; 2nd AE Symp., Tokyo (1974-9) p. 6-15
- 18) T. Nagata, Y. Mori, Y. Sakakibara, T. Kishi; 4th AE Symp., Tokyo (1978-9) p. 3-45
- 19) H. Nakasa, S. Ueda, T. Nagata; 2nd AE Symp., Tokyo (1974-9) p. 9-21