時効硬化 Al 合金 6061-T6 の確率疲労特性*

後 藤 真 宏^{*1}, 三 浦 篤 義^{*1}
西 谷 弘 信^{*2}, 皮 籠 石 紀 雄^{*3}

Probabilistic Fatigue Characteristics of Age-Hardened Al Alloy 6061-T6

Masahiro GOTO, Atsuyoshi MIURA,
Hironobu NISITANI and Norio KAWAGOISHI

In order to clarify the physical basis of scatter in the fatigue life of age-hardened Al alloy 6061-T6, rotating bending fatigue tests of smooth specimens were carried out at several stress levels. Fifteen or seventeen specimens were fatigued at each stress level and the initiation and propagation behaviors of major cracks were examined for all specimens. The statistical treatment of each set of lifetime data was performed by assuming the Weibull distribution. The lifetimes studied here were the fatigue life, the initiation life of 30 μm crack and the crack propagation lives from 30 μm up to 100 μm , from 100 μm up to 1 mm and from 1 mm to fracture, respectively. The scatter characteristics of these lifetimes were investigated based on the CV vs σ_a relation (CV : coefficient of variation, σ_a : stress amplitude).

Key Words: Fatigue, Statistical Treatment, Age-Hardened Al Alloy, Crack Initiation, Crack Propagation, Smooth Specimen, Weibull Distribution

1. 結 言

疲労寿命のばらつきを定量化することは機械・構造物を設計・保守・管理する上で重要である。また、平滑材では、疲労寿命の大部分が比較的寸法の小さいき裂の伝ば寿命で占められるので、微小き裂の伝ば挙動のばらつき特性と関係した疲労寿命の確率特性の検討が必要である。

一方、部材の軽量化の目的から種々の機械要素に時効硬化 Al 合金が使用されている。著者らはこれまで時効硬化 Al 合金 6061-T6 の疲労挙動を明らかにしてきた^{(1)~(5)}。それによれば、Al 合金 6061-T6 の疲労挙動は焼なました Al 合金や炭素鋼とは大きく異なり、き裂は点発生的であること、発生したき裂はき裂が小さい間はすべり帯に沿って急速に成長し、ある程度長くなれば粒界ごとに方向を変えジグザグに伝ばし組織依存性が強いこと、また時効硬化 Al 合金特有の疲労挙動はそれが繰返し軟化材であることと密接に関係することなどが示されている。このようにき裂発生およ

び伝ばに対する組織依存性の強い材料では、疲労寿命が組織の影響を受け大きくばらつくものと思われる。したがって、Al 合金の疲労寿命のばらつき特性を検討する意味は大きい。

これまで微視的き裂の挙動に注目して疲労寿命のばらつき特性を検討した研究は、炭素鋼^{(6)~(9)}ではいくつかあるが時効硬化 Al 合金ではほとんどないようである。

本研究では以上のことを考慮して、時効硬化 Al 合金 6061-T6 の回転曲げ疲労試験を行った。そして、レプリカ法による試験片表面の連続観察結果に基づいて時効硬化 Al 合金の疲労寿命のばらつき特性を検討した。また、ばらつきの定量的検討を行うため、ワイブル分布による各種寿命データの整理を行った。

2. 実 験 方 法

使用した材料は、時効硬化処理を施した耐食アルミ合金 6061-T6 丸棒(直径約 20 mm)である。化学成分を表 1 に、機械的性質を表 2 にそれぞれ示す。試験片形状を図 1 に示す。試験片は切欠半径 20 mm の浅い環状切欠きを有するが、その切欠係数は 1 に近く実質的には平滑材とみなせるので、以後これを平滑材と呼ぶ。試験片製作後、電解研磨により表面を直径で 50

* 原稿受付 平成 5 年 10 月 4 日。

^{*1} 正員、大分大学工学部 (☎870-11 大分市旦野原 700)。^{*2} 正員、九州大学工学部 (☎812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。^{*3} 正員、鹿児島大学工学部 (☎890 鹿児島市郡元 1-21-40)。

μm 程度取り除いてから実験に供した。

使用した試験機は小野式回転曲げ疲労試験機(容量 14.8 N・m, 3 000 rpm)である。

疲労被害の観察およびき裂長さの測定は、所定の繰返し数ごとに採取したレプリカに真空中で金を蒸着したものについて、金属顕微鏡($\times 400$)により行った。き裂長さ l は試験片の円周方向に沿って測った長さで定義する。また、応力 σ_a は最小断面部の公称曲げ応力振幅を意味する。

3. 実験結果および考察

本研究では、時効硬化 Al 合金 6061-T6 の疲労寿命のばらつき特性を微小き裂の挙動との関係から検討する。その際、比較的寿命の短い領域($\sim 10^5$ 回)から長い領域($\sim 5 \times 10^6$)までの疲労寿命のばらつき特性を検討するため、三つの応力($\sigma_a = 130, 150, 170 \text{ MPa}$)についてそれぞれ 15 本から 17 本の試験片を破断させ、そ

表 1 化学成分

Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.27	0.70	0.44	0.02	0.90	0.08	0.05	0.02

表 2 機械的性質

MPa			%
$\sigma_{0.2}$	σ_s	σ_T	ψ
250	309	479	48.0

図 1 試験片形状

れぞれの試験片について表面に発生した主き裂(破断に導いた最大寸法のき裂)の発生・伝ば挙動を追跡した。以下に、疲労寿命のばらつき特性の定性的側面と定量的(統計的)側面をそれぞれ示す。

3・1 6061-T6 材の疲労挙動 ここでは、試験片表面の連続観察結果を示し、6061-T6 材の疲労被害の物理的背景と疲労寿命のばらつきを検討する。

図 2 に S-N 曲線を示す。いずれの応力レベルにおいても疲労寿命はばらつくが、ばらつきの程度は応力が小さいほど大きい傾向にある。図の曲線(実線)は各応力下の平均寿命を通るように引いている。なお、点線のみで示した他の曲線($\bar{N}_{0.03}$, $\bar{N}_{0.1}$, $\bar{N}_1$)は、後に示すき裂伝ば曲線から測定した、き裂がそれぞれ 0.03, 0.1, 1 mm に達する繰返し数の平均値である。疲労寿命に対する、それぞれの長さのき裂発生寿命の割合は応力レベルによって異なり、したがって 6061-T6 材では疲労寿命 N_f を基準としたマイナー則が成り立たない⁽¹⁰⁾ ことがわかる。ここで 10^7 回の繰返しに対する時間強度を σ_w ($\sigma_w = 118 \text{ MPa}$) とすれば、ばらつきを調べた応力は、それぞれ σ_w の約 10%, 27% および 44% 増しの応力に相当する。

図 3 に $\sigma_a = 150 \text{ MPa}$ を繰返したときの主き裂発生場所付近の表面状態の変化を示す。すでに報告されているように、繰返しのかなり早い時期にき裂が認められ、かつき裂発生は点発生的といえる。これは、き裂の起点となる滑りの発生に関与する領域がかなり小さいことを意味する。き裂発生後、き裂は粒界で伝ば方向を変えながらかなりの寸法に達するまで、結晶粒内の最大せん断応力が作用する面に近い面に沿ってせん断形で成長する場合が多い(1 mm を越えるき裂でもせん断形で伝ばすることがある)。また、巨視的に主応力に直角方向へ伝ばする引張形も認められ、この結果破面はかなりジグザグになる。

図 2 S-N 曲線および 0.03, 0.1, 1 mm のき裂発生寿命

図 3 主き裂発生活場所近傍の表面状態の変化

(a) $\sigma_a = 130 \text{ MPa}$ の場合 (○印で $\sigma_a = 150 \text{ MPa}$ の最長寿命の伝ば曲線を示す) (b) $\sigma_a = 150 \text{ MPa}$ および 170 MPa の場合

図 4 主き裂のき裂伝ば曲線

図4に主き裂の伝ば曲線を示す。いずれの応力レベルでも、伝ば曲線には大きなばらつきが認められる。 $\sigma_a=130$ MPaと150 MPaおよび $\sigma_a=150$ MPaと170 MPaとで、それぞれの前者の最短寿命と後者の最長寿命の伝ば曲線を比べれば、その挙動はそれほど違わない。また、 $\sigma_a=130$ MPaの伝ば曲線の場合、き裂が1 mmに達するまでに減速・一時的な停留の影響が大きい場合とそれほど大きくない場合が認められる。 $\sigma_a=150$ MPaにおいても同様の傾向は認められるが、応力の増加とともに減速・停留がき裂伝ば曲線のばらつきに及ぼす影響はかなり小さくなる。極端に大きな減速・停留が発生した $\sigma_a=130$ MPaの数例を除けば、き裂伝ば曲線($\ln l-N$ 関係)の形状は一般に上に凸になり(凸になる度合は応力が大きいほど大きい)、炭素鋼の傾向($\ln l-N$ 関係は直線または下に凸の曲線で近似できる)とは異なる。このように伝ば曲線が上に凸になるのは、き裂発生後き裂が小さい間はせん断形で急速に伝ばし、ある程度長くなると組織の影響を受け伝ば経路がジグザグになる(このときの伝ば速度の増加は小さい)ためである。発生後粒内をせん断形で伝ばしたき裂が粒界で最初に伝ば方向を変えるときき裂長さは、ばらつきはあるが多くの場合0.2 mm以下である。これは本材料の結晶粒径(~ 0.1 mm)とほぼ対応する。

図5にき裂伝ば曲線を相対繰返し数 N/N_f で整理したものを示す。応力が大きければ($\sigma_a > 150$ MPa)、伝ば曲線(図4)に大きなばらつきが認められる場合でも $\ln l-N/N_f$ 関係のばらつきはかなり小さい。一方、 $\sigma_a=130$ MPaの場合はき裂が粒界近傍で減速・停留する傾

向が大きいため、 $\ln l-N/N_f$ 関係で整理してもそのばらつきはかなり大きい。

3・2 疲労寿命のばらつきの統計的検討

3・1節では疲労寿命のばらつきと疲労挙動の関係を定性的に検討した。ここではワイブル分布を仮定して、疲労寿命のばらつきの統計的検討を行う。疲労強度の分布特性を調べるのに正規分布、対数正規分布およびワイブル分布がよく使われる^{(5)~(9)(11)~(22)}。このうち寿命分布には対数正規分布とワイブル分布の適合性がよいことが示されている。ここでは次式⁽²³⁾で示すワイブル分布関数 $F(x)$ を用いて、ばらつき特性の統計的検討を行う。

$$F(x)=1-\exp\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^m\right] \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 m 、 η および γ はそれぞれ形状母数、尺度母数および位置母数であり、各母数は相関係数法⁽²⁴⁾により求めた。

図6にき裂発生寿命、伝ば寿命および疲労寿命をワイブル確率紙にプロットしたものを示す。本材料ではき裂は点発生的であるが、測定精度を考慮してき裂発生寿命としては0.03 mmのき裂発生寿命 $N_{0.03}$ を示す。したがって、き裂伝ば寿命は0.03 mmから破断するまでの繰返し数 $N_{0.03-f}$ となる。 $\sigma_a=170$ MPaの $N_{0.03-f}$ が2母数ワイブル分布($\gamma=0$)で整理される以外は、いずれの寿命も3母数ワイブル分布で整理できる。

図7に、図6に分布を示した各寿命の変動係数 CV ($=s/\mu$, s :標準偏差, μ :平均寿命)と応力の関係を示す。それぞれの寿命の CV の値はいずれも応力の減

図5 主き裂の $\ln l-N/N_f$ 関係

少とともに増加する。すなわち、ばらつきが大きくなる。また、 $N_{0.03}$ のCVが他に比べてすべての応力下で大きく、時効硬化Al合金ではき裂発生寿命のばらつきがき裂伝ば寿命のばらつきに比べてかなり大きいことがわかる。炭素鋼でもき裂発生寿命のばらつきは大きい、CVの値はこれほど大きくない(疲労限度近傍でもCVは0.5~0.7程度)^{(6)~(9)}。

図8に、き裂伝ば寿命を0.1mmと1mmを境として分けた場合($N_{0.03-0.1}$, $N_{0.1-1}$, N_{1-f})のワイブルプロ

(a) $\sigma_a = 130$ MPa の場合

(b) $\sigma_a = 150$ MPa の場合

(c) $\sigma_a = 170$ MPa の場合

図6 各寿命のワイブルプロット

ットを示す。ここで、0.1mmはせん断形で伝ばするき裂が最初に伝ば方向を変えるときのき裂長さおよび本材料の結晶粒径を考慮して、また1mmは引張形の伝ばが支配的になる長い寸法のき裂伝ば寿命のばらつきを検討するために決めた。 $\sigma_a = 130$ MPaの場合の N_{1-f} は2母数ワイブル分布で整理されるが、それ以外の伝ば寿命はいずれの場合も3母数ワイブル分布で整理される。 $\sigma_a = 130$ MPaの $N_{0.1-1}$ の分布は累積確率50%付近を境として傾きの異なる2本の直線で近似できる。き裂伝ば曲線(図4)で示したように、 $\sigma_a = 130$ MPaの $l = 0.1 \sim 1$ mmの範囲ではき裂が粒界近傍で著しく減速・停留する場合とその影響があまり認められない場合があり、このことが傾きの異なる2本の直線で $N_{0.1-1}$ の分布を近似できることと関係している。

図9は、図8に示したき裂伝ば寿命のCV- σ_a 関係である。CV- σ_a 関係は対象とするき裂長さによりその傾向がかなり違う。き裂が短い所の伝ば寿命は、一般にき裂が長い所のそれに比べてばらつきが大きいことがわかる。

表3に、以上で示した寿命のワイブル母数 m , η , γ と各種統計量 μ , CV, R (R :相関係数)を示す。

図10に、 $N/N_f = 0.6$ における主き裂のき裂長さ分布を示す。 $\sigma_a = 130, 150$ MPaの場合は2母数ワイブル分布により、 $\sigma_a = 170$ MPaでは3母数ワイブル分布で整理される。他の繰返し数比の分布を調べたところ、応力レベルに影響されず $N/N_f = 0.2, 0.4$ では2母数ワイブル分布により、 $N/N_f = 0.8$ では3母数ワイブル分布により整理される。

図11に、各繰返し数比における主き裂の長さ分布に対する変動係数CVと応力の関係を示す。 $N/N_f = 0.2$ の場合はいずれの応力においてもき裂長さは小さく(き裂が発生していない場合もある)、長さ分布のばらつきは大きい。また、応力依存性はあまり認められない。他の N/N_f では繰返し数比の増加とともにCV

図7 $N_{0.03}$, $N_{0.03-f}$ および N_f の CV- σ_a 関係

(a) $\sigma_a = 130$ MPa の場合

(b) $\sigma_a = 150$ MPa の場合

(c) $\sigma_a = 170$ MPa の場合

図 8 各き裂伝ば寿命のワイブル確率紙による整理

図 9 $N_{0.03 \rightarrow 0.1}$, $N_{0.1 \rightarrow 1}$ および $N_{1 \rightarrow f}$ の CV - σ_a 関係

値は減少する。また、 $\sigma_a = 130$ MPa の場合は、 CV の値は N/N_f にあまり影響されず、寿命の後期においても主き裂の長さ分布はかなりばらつく。この傾向は $\ln l - N/N_f$ 関係 [図 5 (a)] にも現れている。

部材の疲労寿命を評価するとき、き裂伝ば則の定数のばらつき特性から疲労寿命のばらつきを推定することが行われている。著者らは、炭素鋼やいくつかの Al 合金について微小き裂伝ば則に基づく疲労寿命のばらつき特性の検討を行っている⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。一方、6061-T6 材では他の材料のように実用上有効なき裂伝ば則が得ら

図 10 $N/N_f=0.6$ におけるき裂長のき裂長さ分布

表 3 ワイブル母数と各種統計量の値

σ_a MPa	N	m	η	γ ($\times 10^5$)	μ	CV	R
130	$N_{0.03}$	0.78	1.372	0.183	1.768	1.13	0.984
	$N_{0.03 \rightarrow f}$	1.06	0.910	0.907	1.798	0.47	0.979
	N_f	1.31	2.714	0.908	3.411	0.56	0.982
	$N_{0.03 \rightarrow 0.1}$	1.06	2.660	0.225	2.827	0.88	0.986
	$N_{0.1 \rightarrow 1}$	0.89	5.138	3.564	8.999	0.67	0.974
	$N_{1 \rightarrow f}$	3.71	6.968	0.000	6.290	0.30	0.986
150	$N_{0.03}$	0.84	1.824	0.479	2.479	1.00	0.967
	$N_{0.03 \rightarrow f}$	1.73	3.171	2.518	5.343	0.32	0.978
	N_f	1.21	4.098	3.808	7.654	0.42	0.990
	$N_{0.03 \rightarrow 0.1}$	0.78	0.511	0.081	0.673	1.24	0.991
	$N_{0.1 \rightarrow 1}$	1.25	1.267	0.671	1.851	0.52	0.991
	$N_{1 \rightarrow f}$	1.12	1.470	1.771	3.182	0.41	0.995
170	$N_{0.03}$	2.17	0.515	0.023	0.479	0.46	0.951
	$N_{0.03 \rightarrow f}$	3.70	2.464	0.000	2.223	0.31	0.983
	N_f	1.97	1.652	1.281	2.746	0.29	0.988
	$N_{0.03 \rightarrow 0.1}$	1.10	0.214	0.011	0.217	0.89	0.984
	$N_{0.1 \rightarrow 1}$	1.73	0.571	0.201	0.710	0.43	0.956
	$N_{1 \rightarrow f}$	2.16	1.266	0.213	1.334	0.41	0.990

μ : mean value, CV: coefficient of variation,
R: correlation coefficient

れておらず、伝ば則に基づく疲労寿命のばらつきの評価は困難である。しかし、 $10^6, 10^7$ 回などの時間強度に対する応力を基準とした相対応力を用いれば、強度レベルの異なる Al 合金の $S-N$ 曲線がほぼ一致する⁽⁴⁾ ので、他の 60 系 Al 合金のばらつきが本実験結果からある程度は推定できると思われる (例えば、 $S-N$ 曲線や $CV-\sigma_a$ 関係の応力として、時間強度を基準とした相対応力を用いたものを使う)。

4. 結 論

時効硬化 Al 合金 6061-T6 の確率疲労特性を検討するため、平滑材の回転曲げ疲労試験を行った。レプリカ法による表面の連続観察を行い、疲労寿命のばらつき特性をき裂の発生・伝ば挙動に注目して検討した。

図 11 各繰返し数比におけるき裂長さ分布の $CV-\sigma_a$ 関係

得られたおもな結論を以下に示す。

- (1) 疲労寿命のばらつきは大きく、応力が小さいほどばらつきは大きい。
- (2) き裂発生は点発生的であり、発生後せん断形で結晶内を伝ばし、粒界で伝ば方向を換える。かなり長いき裂 (例えば 1 mm を越えるき裂) では引張形の伝ばが支配的になるが、この場合でもせん断形で伝ばする場合がある。
- (3) いずれの応力においてもき裂伝ば挙動のばらつきは大きい。が、 $\sigma_a = 130$ MPa ($=1.1\sigma_w$, $\sigma_w: 10^7$ 回に対する時間強度) ではき裂長さ $l=0.1 \sim 1$ mm の範囲において、き裂が粒界近傍で著しく減速・停留する場合とそれがあまり認められない場合がある。 σ_w 付近の減速・停留の特に大きい場合を除けばき裂伝ば曲線 ($\ln l-N$ 関係) は上に凸になり、応力が大きいほど凸になる割合は大きい。
- (4) 疲労寿命 N_f , 0.03 mm のき裂発生寿命 $N_{0.03}$, それぞれ 0.03 mm および 0.1 mm から 0.1 mm および 1 mm までのき裂伝ば寿命 $N_{0.03 \rightarrow 0.1}$, $N_{0.1 \rightarrow 1}$ および 1 mm から破断までの伝ば寿命 $N_{1 \rightarrow f}$ は、2 母数または 3 母数ワイブル分布で整理できる。

(5) 各寿命の変動係数 CV と応力の関係を調べた結果, 0.03 mm のき裂発生寿命の CV は炭素鋼に比べて大きく, したがってき裂発生の際のばらつきは炭素鋼に比べて大きいと言える。また, き裂伝播寿命では $N_{0.03-0.1}$ のばらつきが最も大きくかつこの場合は CV に応力依存性がほとんど認められない。 $N_{0.1-1}$ の CV は応力の増加とともに減少する傾向に, また N_{1-f} の CV は応力の増加とともに増加する傾向にある。

終わりに, 実験に協力していただいた本学卒業研究生・小坂哲也君 [現: (株)九州三田技術コンサルタンツ] および相馬太君 [現: (株)大和冷機工業] に感謝する。

文 献

- (1) 西谷・高尾, 機論, 40-340(1974), 3254.
- (2) 西谷・遠藤, 機論, 50-454, A(1984), 1303.
- (3) 西谷・皮籠石, 機論, 50-455, A(1984), 1334.
- (4) 西谷・ほか2名, 機論, 51-464, A(1985), 1017.
- (5) 後藤・ほか4名, 機論, 59-559, A(1993), 701.
- (6) Goto, M., *Fat. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 15-10(1992), 953.
- (7) 後藤・ほか2名, 材料, 41-469(1992), 1499.
- (8) 後藤・ほか2名, 材料, 42-473(1993), 163.
- (9) Goto, M., *Fat. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 16(1993), 795.
- (10) 西谷・ほか2名, 材料, 33-369(1984), 673.
- (11) 田中・藤井, 材料, 25-276(1976), 909.
- (12) 酒井・ほか2名, 材料, 36-408(1987), 915.
- (13) 佐々木・ほか2名, 機論, 55-509, A(1989), 22.
- (14) 後藤・ほか2名, 機論, 57-537, A(1991), 1050.
- (15) 戸梶・ほか3名, 材料, 30-328(1981), 15.
- (16) 田中・ほか2名, 材料, 30-332(1981), 483.
- (17) 越智・ほか2名, 材料, 31-345(1982), 559.
- (18) Shu, C. M., ほか2名, *Int. J. Fat. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 8-2(1995), 193.
- (19) 北川・ほか2名, 機論, 51-461, A(1985), 179.
- (20) 後藤・ほか2名, 機論, 55-515, A(1989), 1493.
- (21) Goto, M., *Fat. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 14-8(1991), 833.
- (22) Goto, M., *Eng. Fract. Mech.*, 42-6(1992), 893.
- (23) Weibull, W. J., *J. Appl. Mech.*, 18-3(1951), 293.
- (24) 酒井・田中, 材料, 29-316(1980), 17.
- (25) 皮籠石・ほか4名, 機論, 59-557, A(1993), 57.
- (26) 皮籠石・ほか4名, 機論, 59-565, A(1993), 2107.