正の応力比を有する小荷重からなる二段変動荷重下での アルミニウム合金の疲労き裂進展挙動[†]

田 中 道 七* 加 藤 泰 世** 中 山 英 明***

Fatigue Crack Growth Behavior of Aluminum Alloy under Two-Step Varying Load Conditions with the Lower Stress of Positive Stress Ratio

by

Tsuneshichi TANAKA*, Yasuo KATOH** and Hideaki NAKAYAMA***

In our previous paper, an analytical crack growth law to predict crack growth rate during the retardation period was established through the detailed evaluation of fatigue crack growth behavior under two-step varying load conditions with the stress ratio $R (= \sigma_{\min} / \sigma_{\max}) = 0$. The main purpose of this study is to develop the above crack growth law to make applicable to various types of two-step varying load conditions. For this purpose, the effects of the tensile mean stress and the stress ratio of the lower stress level on the crack growth behavior during the retardation period induced by load change were investigated by carrying out fatigue crack growth tests on aluminum alloy (A2017-T3) compact tension specimens under four types of two-step varying load conditions with the lower stress level of positive stress ratio. Detailed observations for the crack length grown by the application of lower stress cycles were made by an optical microscope and/or on SEM micro-fractographs. The results indicated that crack growth behavior in the deceleration stage during the retardation process was governed only by the lower stress intensity range, ΔK_L , and that the crack growth ratio in the acceleration stage was presented as a function of the maximum values of the higher and the lower stress intensity ranges together with the value of ΔK_L . A new crack growth law to estimate the fatigue crack growth rate during the whole retardation process including the deceleration and acceleration stages was derived by using the empirically determined parameters.

Key words : Fatigue crack, Aluminum alloy, Two-step varying load, Tensile mean stress, Crack closure, Retardation

1 緒 言

筆者らは、先に応力比 $R (= \sigma_{\min} / \sigma_{\max}) = 0$ とした各種二段変動荷重による疲労き裂進展試験を行い、試験片表面のき裂観察および破面観察を併用して荷重変動後の遅延過程におけるき裂進展挙動を詳細に調べ、遅延過程でのき裂成長と繰返し数の関係について解析的表示を導いた¹⁾。

本研究では、二段変動荷重を構成する低応力側の応力範囲を完全引張側とした種々の荷重パターンによる疲労き裂進展試験を行い、二段変動荷重下でのき裂進展挙動に及ぼす引張平均応力および応力比の影響を実験的に調べた。このような荷重条件を採用したのは、繰返し荷重を負荷する際の応力拡大係数の振幅と最大値を独立した因子として扱うことによって、 $R=0$ の条件下では見出し得ない傾向を知ることが現象の総括

的な把握につながると考えたためである。実験の結果、荷重変動後のき裂進展挙動に及ぼす力学的パラメータの影響を明らかにするとともに、前報¹⁾で導いた遅延過程でのき裂進展挙動の解析的表示を修正し、前報および本報に示す実験結果に対して総括的なき裂進展挙動の推定を試みた。以下、得られた結果について報告する。

2 供試材料、試験片および実験方法

供試材料は前報と同じアルミニウム合金 A2017-T3 材 ($\sigma_{0.2} = 320 \text{ MPa}$, $\sigma_B = 443 \text{ MPa}$) であり、試験片は前報と同様厚さ 10 mm の板材から加工したサイドグループ付 CT 型 (荷重点から背面までの距離 48 mm, グループ底厚さ 8 mm) である。

疲労試験には容量 10 kN の横型電気油圧サーボ式疲労試験機を用い、2 ~ 40 Hz の荷重繰返し速度範囲

[†] 原稿受理 平成 4 年 6 月 17 日 Received June 17, 1992

* 正 会 員 立命館大学理工学部機械工学科 〒603 京都市北区等持院北町, Dept. of Mech. Eng., Ritsumeikan Univ., Kita-ku, Kyoto, 603

** 正 会 員 中日本自動車短期大学 〒505 岐阜県加茂郡坂祝町深萱, Nakanihon Automotive College, Kamo-gun, Gifu, 505

*** 正 会 員 大阪産業大学短期大学部 〒574 大東市中垣内, Junior College of Automobile Indust., Osaka Sangyo Univ., Nakagaito, Daito, 574

Fig. 1. Load patterns.

で実験を行った。き裂長さの測定には光学顕微鏡を用い、き裂進展速度は接線法によって求め、応力拡大係数の算出は Srawley の式によった。また、背面ゲージによりひずみを検出し、除荷弾性コンプライアンス法によってき裂開口比の測定も行った。

本研究では遅延過程でのき裂進展挙動に及ぼす平均応力や応力比の影響を詳細に調べることが目的であるため、実験は高応力拡大係数 K_H および低応力拡大係数 K_L よりなる二段変動荷重において、 K_L に対する応力比が $R > 0$ となる完全引張条件下で行ったが、比較のため前報¹⁾で示した $R = 0$ の条件下で得られたデータも一部引用した。

Fig. 1 に実験に用いた荷重パターンを示す。ここで、 K_H と K_L はそれぞれ高応力範囲と低応力範囲における応力拡大係数のパターンを示す記号であり、 K_H はすべての荷重パターンに対して Fig. 1 のように 0 から $(K_H)_{\max}$ の完全片振りとし、 K_L については $(K_L)_{\max}$ 、 $(K_L)_{\min}$ および ΔK_L を種々に変えて実験を行った。なお、 K_H はこのようにすべて完全片振りなので、簡単のため K_H で $(K_H)_{\max}$ を表すことがある。また、 K_H での繰返し数 N_H は荷重パターン A (図(a)) では K_H でのき裂進展量が約 3 mm 以上となるように与え、他の荷重パターンでは K_H にて 20~500 μm の範囲でき裂が成長するように N_H を選んだ。

図(b)の荷重パターン B において、 K_L での繰返し数は図のように N_{L1} , N_{L2} , ... と変化させたが、これは K_H から K_L への変動後の K_L でのき裂進展挙動と繰返し数の関係を調べるために適当に設定したもので、前報¹⁾で示したように、図のような二段多重の場合、 K_L でのき裂進展に影響するのは直前の K_H であることから、以下では番号 1, 2, ... の区別を設けず、 N_L で記述することにする。また、図(c), (d)に示す荷重パターン C, D における N_L は最大約 5000 回としたが、これは 3・2 節で述べるように K_L 条件下で加

速過程が現れない場合に明確にき裂成長の飽和が認められる繰返し数である。荷重パターン C では $(K_L)_{\max}$ を $(K_H)_{\max}$ と等しくし、き裂長さの増加に伴い ΔK_L が漸減するように $(P_L)_{\min}$ を一定とした。一方、荷重パターン D では $(K_L)_{\min}$ を一定とし、き裂長さの増加に伴い $(K_L)_{\max}$ および ΔK_L が漸増するように $(P_L)_{\max}$ を一定とした。なお、荷重パターン C, D においては、 K_L での K 値の条件は、その間のき裂成長により徐々に変化する。しかし、1 ブロック内での K_L によるき裂進展量は大部分が 30 μm 以下であり、これに伴う ΔK_L の値の変化は最大 5 % 以内であるので、1 ブロック

中での K_L の値の変化は無視した。なお、実験に採用した K_H と K_L の具体的な数値は実験結果の章で述べる。

以上すべての荷重パターンにおいて、 K 値を一定とする場合は具体的には表面観察によるき裂長さか 0.1 mm 増加することに荷重を調整した。この一回の荷重調整による K 値の変化は 2.5 % 以内である。

3 実験結果および考察

3・1 一定荷重振幅下での疲労き裂進展挙動

応力比を $R = 0.25, 0.5$ および 0.75 とした一定荷重振幅下で得られたき裂進展速度曲線を Fig. 2 に示す。図中の細線は前報¹⁾で示した $R = 0$ の条件下での $da/dN - \Delta K_{\text{eff}}$ 曲線である。上記の 3 種の応力比 R に対する実験点はこの曲線とほぼ一致しており、また、すべての条件下においてコンプライアンス法ではき裂開口が認められなかったことから ΔK は ΔK_{eff} に等しく、ここでの一定荷重振幅下ではき裂進展速度は ΔK_{eff} に支配されると考えてよい。図中の太線は実験

Fig. 2. Crack growth rate curve under constant load conditions.

点を滑らかに結んだものであるが既報と同様に da/dN と ΔK の間には折れ曲がりが見られ、低進展速度側から Π_A , Π_{AB} , Π_B の各領域に区分される⁴⁾。なお、 Π_B 領域はほぼ直線とみなすことができ、図中の破線は Π_B 領域の太線を下方へ延長したもので 4 章で使用する。

3・2 二段変動荷重下におけるき裂進展挙動

Fig. 3 は前報で示したき裂進展の遅延過程中的き裂成長の模式図で、原点を二段多重繰返し荷重における K_H から K_L への荷重変動直後にとり、それからのき裂長さ a を繰返し数 n に対して図示したものである。図のように、遅延過程はき裂成長速度が r_0 から減速する減速過程と、その後速度が増加して定 ΔK 条件下の値 r_c まで上昇する加速過程からなり、減速と加速の両過程の遷移点でのき裂長さ、繰返し数、進展速度をそれぞれ a_t , n_t , r_t とする。ただし、 K 値の条件によっては減速過程でき裂長さが一定値 c_1 に飽和し、加速過程が現れない場合がある。また、図中の N_R は遅延期間の長さを表すために定義した遅延繰返し数である。前報においては Fig. 3 の関係を $R=0$ の条件下においてのみ明らかにしたが、このような関係をさらに広範囲の K 値の条件下で可能な限り定量的に明らかにするのが本論文の一つの主題である。

ところで、荷重変動後の遅延過程中的微小なき裂進展挙動を定量化するには破面観察によらなければならないことは前報と同様であり、Fig. 4 に荷重パターン B により形成される破面の数例を示している。写真のように低荷重レベルの K_L によって形成された破面

Fig. 3. Schematic crack growth curves after load change from K_H to K_L .

が明確であることから、それぞれの K 値の条件ごとに低レベルでの繰返し数 N_L 間の微視的進展量 a_L を破面写真から求めることができる。なお、 K 値の条件と N_L の値は図中に併記している。

Fig. 4 (a), (b) は荷重変動後に K_L でのき裂進展がほぼ飽和したところであり、ここでの a_L はほぼ Fig. 3 のき裂飽和長さ c_1 に達しており、両図より、 K_H , $(K_L)_{\max}$ が異なっても ΔK_L が等しければ、飽和き裂長さはほぼ等しいことが観察される。また、図 (c), (d) は、 $K_H=24 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ で $(K_L)_{\max}/\Delta K_L=20/6$ の場合であり、図 (c) の $N_L=500$ では $a_L \approx 5 \mu\text{m}$ であるが、 $N_L=10^4$ では図 (d) のように $a_L \approx 0.1 \text{ mm}$ に増加している。さらに、 K_H と ΔK_L を図 (c), (d) と等しくし、 $(K_L)_{\max}$ を $14 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ とした場合が、図 (e), (f), (g) で、図 (f), (g) から N_L を 5×10^4 から 2×10^5 に変えても $a_L \approx 9 \mu\text{m}$ のままではほぼ一定である。しかし、図 (c), (e) を比べると、 a_L が十分飽和に至っていない $N_L=500$ の段階では $a_L \approx 3 \mu\text{m}$ で、この値は $(K_L)_{\max}$ に依存していないことがわかる。このように飽和き裂長さ

Fig. 4. Examples of micro-fractographs under load pattern B.

Fig. 5. Examples of compliance curves during retardation period under load pattern A.

c_1 は K_H に依存せず ΔK_L の増加関数として評価しうることは城野, 菅田らによっても示されている⁵⁾。

ところで, 先の Fig. 2 において応力比 $R \geq 0.25$ の一定荷重振幅下では $\Delta K = \Delta K_{\text{eff}}$ であり, き裂は閉口しないことを述べたが, 本節で述べる変動荷重下において K_L 条件下でき裂が閉口するかどうかは重要な点の一つである。Fig. 5 は荷重パターン A, $K_H = 24$ MPa, $(K_L)_{\text{max}}/\Delta K_L = 14/6$ の場合のコンプライアンス曲線の一例であるが, 進展速度の著しい低下と上昇のみられる遅延過程でさえ, き裂閉口は認められない。このことは本節で示す他の条件下においても同様であり, 本研究での $R \geq 0.25$ における実験結果において, $(\Delta K_L)_{\text{eff}}$ は常に設定した ΔK_L に等しい。

Fig. 6, 7 は Fig. 4 に数例を示した破面写真に基づく遅延過程でのき裂進展量 a_L と繰返し数 N_L の関係を示したもので, Fig. 6 は $\Delta K_L = 4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ とし, $K_H = 14$ (図(a)) および $24 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (図(b)) の場合について $(K_L)_{\text{max}}$ を種々に変えた場合であり, Fig. 7 は $\Delta K_L = 6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ とし, $K_H = 18$ (図(a)) および $24 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (図(b)) とした場合についての同様の結果

Fig. 6. Crack growth at lower stress intensity K_L (in the case of $\Delta K_L = 4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

Observation	Load pattern	$(K_L)_{\text{max}}$ (MPa $\sqrt{\text{m}}$)
		24 22 20 18 16 14 12
Surface crack	A	□
	B	△
Fractography	C	○
	D	●

Fig. 7. Crack growth at lower stress intensity K_L (in the case of $\Delta K_L = 6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

である。なお, $K_H = 24 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の場合については Fig. 1 に示す荷重パターン A, C, D の結果も合わせて示している。ただし, 荷重パターン A によるデータのみは試験片表面において, K_H から K_L への荷重変動後の繰返し数 N_L におけるき裂長さ a_L をとっている。

さて, 著者らは既に各ブロック中の K_H での進展速度は定 ΔK 条件下と等しいことを確認しており^{1), 3)}, 本研究においても, 先に述べたように二段多重繰返し荷重下で K_L でのき裂進展挙動は高低二段変動荷重における荷重変動後のそれと同じであると仮定して扱うことにする。なお, Fig. 6, 7 に示した K_L での微視的進展量には幾分ばらつきがみられるが, これは a_L 自体が数 μm 以下と小さく, ある程度の測定誤差がさけられないためである。しかし, き裂進展の全体的な傾向は, Fig. 3 の傾向を良く反映しており, 前報¹⁾と同様, 一般に減速と加速の両過程からなることは明らかである。なお, 両図において, K_H と $(K_L)_{\text{max}}$ が近い場合には遅延過程が明瞭でない場合があるが, 後の解析に示すようにこれは K 値の条件によって遅延過程が極端に短くなったものと解せられる。

まず, Fig. 6 についてみると, 減速過程でのき裂進展量の増加は, $(K_H)_{\text{max}}$, $(K_L)_{\text{max}}$ にほぼ無関係で, ΔK_L のみの関数として扱うことができ, 特に, $\Delta K_L = 4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の場合のき裂進展量の飽和値は同図(a), (b)中に c_1 で示すように, 2種類の K_H に対し約 3.5 μm とみなすことができる。先に述べたように破面観察によるデータは多少の誤差を伴うために, a_L の飽

和が比較的遅い場合や加速過程への移行の早い場合もあるが、Fig. 6 中に示したデータの中で $K_H=24$ で $(K_L)_{\max}=12$ あるいは $K_H=14$ で $(K_L)_{\max}=8$ といった加速過程が現れない場合、もしくは減速過程から加速過程への移行が比較的遅い場合には、 N_L が 10^4 回を越えると実験点は図中に示した c_1 のところにほぼ位置しており、 a_L は図の c_1 の値でほぼ飽和状態であると判断される。一方、 $(K_L)_{\max}$ が大きいほど減速過程から加速過程に移行する時期が早くなり、その後の進展速度の上昇も大きく、この傾向は K_H にも依存する。特に、 $(K_L)_{\max}=K_H$ の場合はこの傾向が極限になった場合で、減速と加速の両過程が現れず、したがって遅延現象は観察されない。こうしたことから、加速過程でのき裂進展量の変化を関数化するには ΔK_L のみでなく、 $(K_H)_{\max}$ 、 $(K_L)_{\max}$ の両者を考慮する必要がある。なお、 K 値の条件によっては、上述のように進展速度が低下した後に加速過程は現れず、き裂長さは一定値に飽和し、き裂は停留する。

Fig. 7 は $\Delta K_L=6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の場合であるが、Fig. 6 の場合と同様に加速過程への移行が比較的遅い場合に注目すれば、減速過程でのき裂進展量の飽和値 c_1 は、同図 (a)、(b) に示すように $(K_H)_{\max}$ 、 $(K_L)_{\max}$ に無関係に約 $9 \mu\text{m}$ とみなすことができる。この場合の c_1 の値は先の $\Delta K_L=4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の場合とはもちろん異なっているが、他の傾向については Fig. 6 の $\Delta K_L=4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の場合と同様である。また、Fig. 6, 7 に示した細線は、次章で示す解析結果に基づく遅延過程での a_L - n_L 関係である。

4 遅延過程でのき裂進展挙動の解析および K_L でのき裂進展速度の推定

Fig. 6, 7 に示した遅延期間中のき裂長さ a と繰返し数 n の関係を解析するにあたり、下に示す前報¹⁾で導入した2つの関数形をここでも用いることにする。

$$\text{減速過程； } a(n)=c_1(1-e^{-a_1n}) \quad n \leq n_t \quad (1)$$

$$\text{加速過程； } a(n)=c_2(e^{\alpha_2(n-n_t)}-1)+a_t \quad n > n_t \quad (2)$$

式中の係数 c_1 、 c_2 、 α_1 、 α_2 は、一般に K_H と K_L における K 値の条件に依存する関数であり、以下これらの係数の関数化を行う。

まず、 c_1 は加速過程が現れない場合に減速過程で進展量が飽和する値であり、すでに述べたように、この値は第一近似として ΔK_L にのみ依存すると仮定し、ここでは Fig. 8 (a) のように、荷重パターン C で得られるき裂進展量の飽和値 c_1 と ΔK_L の関係を両対数紙上に整理した。ただし、 $R=0$ の結果は前報からの引用であるが、開口点が K_H 一定条件と等しいと仮定し、 $(\Delta K_L)_{\text{eff}}$ を $(K_L)_{\max}$ と $(K_H)_{\text{op}}$ の差として算出し、これを ΔK_L として用いた。なお、前報では c_1 を $(K_L)_{\max}$ に対して整理したが、 $R=0$ では $\Delta K_L=(K_L)_{\max}$ なので本報の結果と矛盾しないが、本報では $R=0$ の場合に対して $(\Delta K_L)_{\text{eff}}$ を用いた点が異なっている。Fig. 8 (a) より c_1 は K_H や $(\Delta K_L)_{\min}$ の種々の値に対して ΔK_L のみの関数として扱うことができ、次式で与えられる。

$$c_1=C_1(\Delta K_L)^{m_1}, \quad C_1=1.01 \times 10^{-4}, m_1=2.51 \quad (3)$$

つぎに、 a_1 については、式 (1) の両辺を n で微分すると

$$\frac{da}{dn}=c_1 a_1 e^{-a_1 n}, \quad n \leq n_t \quad (4)$$

(a) Relationship of a_L vs. ΔK_L after the saturation of crack growth.
 (b) Relationship of τ_t / τ_c vs. $(K_L)_{\max} / (K_H)_{\max}$.
 (c) Relationship of da/dN_L vs. a_L .
 (d) Relationship of α_2 vs. $\Delta K_L / ((K_H)_{\max} - (K_L)_{\min})$.

Fig. 8. Determination of constants c_1 , τ_t and α_2 .

となることから, $c_1 a_1$ は荷重変動直後の $n \rightarrow 0$ の極限における進展速度 r_0 に等しくなる. 前報では $(K_L)_{\max}$ が $(K_H)_{\max}$ に等しい場合にのみ着目して a_1 を求めたが, 上述のように, 減速過程でのき裂進展挙動は K_H に依存することなく ΔK_L のみの関数と考えられ, 次式で与えた.

$$r_0 = C_0 (\Delta K_L)^{m_0}, \quad C_0 = 1.59 \times 10^{-7}, \quad m_0 = 2.92 \quad (5)$$

式(5)は, r_0 と ΔK_L の関係として Fig. 2 に示した一定荷重振幅下での Π_B 領域の $da/dN - \Delta K$ 関係を当てはめたものであるが, この根拠については後に示す Fig. 9 のところで説明する. すると, a_1 は式(5)で与えられる r_0 と式(3)の c_1 より求めることができる.

一方, 加速過程については式(2)の両辺を n で微分すると

$$\frac{da}{dn} = C_2 a_2 e^{\alpha_2(n-n_t)}, \quad n > n_t \quad (6)$$

となることから, $c_2 a_2$ は遷移点 $n = n_t$ での進展速度 r_t に等しい. $R=0$ の条件下では $(K_L)_{\max}$ が $(K_H)_{\max}$ に等しければ r_t は K_H 一定条件下での進展速度 r_H に等しくなるので前報では, r_t を r_H で無次元化した, 本報の場合は $R > 0$ で $(K_L)_{\min}$ が変化することを考慮し, $(K_H)_{\max}$ と $(K_L)_{\max}$ が等しい場合に r_t が r_c に等しくなることから, Fig. 8(b) のように r_t/r_c を $(K_L)_{\max}/(K_H)_{\max}$ に対してプロットした. この関係を図のように両軸の1を通る直線で回帰すると次式が得られる.

$$r_t = r_c [(K_L)_{\max}/(K_H)_{\max}]^{m_t}, \quad m_t = 7.17 \quad (7)$$

そこで, c_2 , α_2 のいずれかがわかれば他方を求めることができる.

さて, $r_0 = c_1 a_1$, $r_t = c_2 a_2$ に注意し, 既述のように荷重パターン C, D においても N_L 間で K 値は一定であることを仮定すると, 式(1), (2) はそれぞれ次の微分方程式を満たしている.

$$\text{減速過程: } \frac{da}{dn} + a_1 a = r_0, \quad n \leq n_t \quad (8)$$

$$\text{加速過程: } \frac{da}{dn} - \alpha_2 (a - a_1) = r_t, \quad n > n_t \quad (9)$$

両式より減速, 加速の両過程ともにき裂進展量とき裂進展速度の間に直線関係が成り立ち, α_2 は加速過程における da/dN と a の間の直線関係の傾きを意味している. Fig. 8(c) は実験データより α_2 を求めるために描いた荷重パターン B による実験で得られた加速過程でのき裂進展速度と進展量の関係であり, 前報の結果(同図 A)と本報の結果(同図 B)を示している. ここで da/dN_L の値は Fig. 4 に示したような破面観察より得られる $a_L - N_L$ 関係から求めたものであり, 図のように, a_L の小さい範囲を除くとどの条件下で得られた結果も両対数グラフ上で 45° の傾きをなす直線として近似することができる. 一方, 式

(9) は, $a_L \gg a_t$, $da/dn_L \gg r_t$ において, 両対数紙上で傾き 45° の直線に漸近することから Fig. 8(c) を使って α_2 を求めることができる. 実際, a_t は, 図 A の $\square$, $\circ$, $\blacksquare$ の場合に約 $30 \mu\text{m} \sim 50 \mu\text{m}$ 程度であり, その他については $30 \mu\text{m}$ 以内であるので, 上のことは充分成立すると考えて良い. こうして求めた α_2 を両対数グラフ上で $\Delta K_L / ((K_H)_{\max} - (K_L)_{\min})$ に対して示したのが Fig. 8(d) である. ただし, $R=0$ の条件下で得られた前報の結果については Fig. 8 で示した係数 c_1 の場合と同様な理由によって $(K_L)_{\min} = (K_H)_{\text{op}}$ として $\Delta K_L (= (\Delta K_L)_{\text{eff}})$ を算出している. $R=0$ の結果のみを扱った前報では $K_L/K_H (= (K_L)_{\max}/(K_H)_{\max})$ によって α_2 の関数化を行ったが, Fig. 8(d) の横軸にとった $\Delta K_L / ((K_H)_{\max} - (K_L)_{\min})$ は, $R=0$ で得られたデータに対して上記の方法に従えば, $((K_L)_{\max} - (K_H)_{\text{op}}) / ((K_H)_{\max} - (K_H)_{\text{op}})$ を算出するので, き裂開口を考えなければ前報と同じ形となる. 図にみるように良好な直線関係が得られるので, これより α_2 を次式で与えることにした.

$$\left. \begin{aligned} \alpha_2 &= C_2 [\Delta K_L / ((K_H)_{\max} - (K_L)_{\min})]^{m_2} \\ C_2 &= 1.47 \times 10^{-2}, \quad m_2 = 6.58 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

こうして得られた α_2 と r_t より c_2 が求まる. 最後に, 式(2)の a_t , n_t については, 式(7)より r_t を算出すれば式(8), (1)より順次求めることができる. したがって, 式(1), (2)によって荷重変動後の n 回の間の進展量 a を求めることができる.

Fig. 6, 7 の細線は, 以上の解析結果をもとに, 式

Fig. 9. Estimated crack growth rate for K_L cycles.

(1), (2)に基づいて描いた遅延期間中の a_L - n_L 関係である。Fig. 6, 7 で説明したように微視的データについては幾分ばらつきがみられるものの図中の細線は、第一近似として実験結果の傾向を良く表していることがわかる。つぎに、式 (1), (2) を用いて荷重変動後の $n=N_L$ におけるき裂進展量を求め、それを N_L で除してその間の K_L での平均き裂進展速度を求めた。Fig. 9(a), (b) 中の各種細線は図中に示した K_H と K_L の条件下でこうして求めた荷重パターン D による K_L での平均き裂進展速度の解析結果である。ただし、解析条件として N_H は取り入れていないが、以下に説明する実験点と解析結果の比較がしやすいように Fig. 9 中の細線の区別は N_H/N_L によって表してある。図中の実験点は実験結果に基づく K_L での N_L 間の平均き裂進展速度の推定値で、白抜き印は K_H でのき裂進展速度が定 ΔK 条件下のそれと等しいと仮定し、線形累積則によって求めた K_L での進展速度の推定値 da/dN_L であり、黒塗り印は破面観察によって得られる K_L での微視的き裂進展量 a_L を N_L で除して求める da/dN_L である。なお、図中には Fig. 2 に示した定 ΔK 条件下での結果に基づく太線と破線が記入してある。

線形累積則により推定を行った場合には、 K_H による進展量 a_H が K_L による進展量 a_L に比べて極端に大きい場合には実験誤差が大きく拡大されるため、条件によっては白抜き印と黒塗り印の間にいくらか差異が見られるが、Fig. 9 の両条件下で全体的に両者はほぼ一致しており、また、実験点と解析結果の間には良い対応がみられる。

ところで、アルミニウム合金の場合には、二段多重繰返し荷重の 1 ブロックでの K_L での平均き裂進展速度の推定値が II_A , II_{AB} 領域内にあるときは、一定振幅荷重下で得られた II_B 領域の da/dN - ΔK_{eff} 関係を下方へ延長した線上に位置する場合があることが報告されている⁶⁾。本研究の場合、Fig. 9 の両図から N_L の変化に伴う実験点で変化すると、 N_L が約 5000 回の実験結果は太線で示した一定振幅荷重下での進展速度よりかなり低い値をとっているが、 N_L が少数回になるにつれて実験点の値は高くなり、 N_L が 300 回以下の実験結果は低 ΔK_L 側で定 ΔK 条件下の進展速度より高い値をとっている。そして、こうした N_L の変化に伴う実験点の変化より $N_L \rightarrow 0$ の極限として与えられる荷重変動直後の進展速度 r_0 は、荷重一定条件下の II_B 領域の関係を下方へ延長した図中の破線の上にはほぼ位置すると考えてよい。式 (5) の関係はこの仮定に基づいて導いたものである。

このように r_0 は定 ΔK 条件下での da/dN - ΔK_{eff} 関係と良い相関性があり、式 (4) より、減速過程の初期におけるき裂進展速度は近似的に r_0 に等しいと考

えても差し支えない。したがって、1 ブロック中の K_L でのき裂進展量が飽和値に至らないような二段多重繰返し荷重下では、菊川、城野らの提案した ΔK_{eff} に基づく線形累積則によるき裂進展速度の推定が可能である。

5 結 言

本研究では低応力側での荷重波形が完全引張となる各種二段変動荷重下にて疲労き裂進展試験を行った。得られた結果の概要は以下の通りである。

(1) 破面観察と表面観察を併用して遅延過程を詳細に調べたところ、前報でみられたような減速過程と加速過程が観察された。

(2) 遅延期間中の減速過程でのき裂進展挙動は、平均応力に依存することなく ΔK_L のみをパラメータとする関数として扱うことができる。それに対し、加速過程でのき裂進展挙動を関数化する場合には ΔK_L のほかに $(K_H)_{\text{max}}$, $(K_L)_{\text{max}}$ などを変数として導入する必要がある。

(3) (2) で記述した内容を考慮し、二段変動荷重を構成する K 値の条件と一定荷重振幅下での疲労き裂進展特性を用いることによって、前報と同様に K_L が完全引張となる条件下に適用できる遅延過程でのき裂長さ繰返し数に関する解析的表示を導いた。また、それを用いて二段多重繰返し荷重下での K_L での平均き裂進展速度の推定を行ったところ実験結果と良い対応が得られた。

(4) 荷重変動直後の進展速度は一定荷重振幅下での da/dN - ΔK_{eff} 関係と相関性があり、 a_L が飽和値に至らないような二段多重繰返し荷重下では、 K_L での平均き裂進展速度は、一定荷重振幅下での da/dN - ΔK_{eff} 関係によって推定が可能である。

本研究に使用した材料は住友金属工業(株)より提供頂いたものであり、記して謝意を表する。

(平成 2 年 5 月 25 日 日本材料学会第 39 期学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 田中道七, 加藤泰世, 中山英明, 材料, **39**, 945 (1989).
- 2) J. E. Srawly, Intern. Jour. Fract., **12**, 475 (1976).
- 3) 田中道七, 加藤泰世, 中山英明, 材料, **36**, 1368 (1987).
- 4) 城野政弘, 宋 智浩, 三上省二, 大垣雅由, 材料, **33**, 468 (1984).
- 5) 城野政弘, 菅田 淳, 岩橋 拓, 材料, **38**, 1194 (1989).
- 6) 城野政弘, 宋 智浩, 菅田 淳, 材料, **34**, 1193 (1985).
- 7) 菊川 真, 城野政弘, 近藤良之, 材料, **27**, 1096 (1978); **28**, 946 (1979); 日本機械学会論文集, A-47, 468 (1981).