アルミニウム合金の三段変動荷重下での疲労き裂進展挙動[†]

加藤 泰世* 中山 英明** 田中 道七***

Fatigue Crack Growth Behavior of Aluminum Alloy under Three-Step Varying Loads

by

Yasuo KATO^{*}, Hideaki NAKAYAMA^{**} and Tsuneshichi TANAKA^{***}

Fatigue crack growth behavior of aluminum alloy under three-step varying load conditions was investigated. The load patterns used in this study consist of high low two-step load (K_H/K_L) and additionally inserted middle level (K_M). The crack growth behavior was observed fractographically, and the results were correlated with two typical phenomena observed under two-step loads; one is the retardation phenomenon due to load change, and another is the steady crack growth behavior where linear cumulative law of crack growth rate based on ΔK_{eff} can be applied. It was revealed that the crack growth law derived under two-step load could be applied to the estimation of crack growth rate at K_M . But, the crack growth rate at K_L depends on the K -values at K_H and K_M , although the trend of the crack growth behavior at K_L under three-step load is qualitatively similar to the result observed at K_L under two-step load. Accordingly the analytical crack growth law derived in authors previous papers under two-step load conditions was extended to make it applicable to the results obtained in the present paper. The estimated results based on the modified method well agree with the experimental results.

Key words: Fatigue crack growth, Aluminum alloy, Variable load, Three-step varying loads, Crack growth model, Crack growth law

1 緒言

変動荷重下での疲労き裂進展挙動を検討するにあたり、これまで二つの現象がよく取り上げられてきた。一つは、単一過大荷重あるいは高低二段変動荷重下で生ずる遅延現象であり、もう一つは二段多重繰返し荷重下で観察される定常なき裂進展挙動である。¹⁾

ところで、後者の二段多重繰返し荷重は前者の範疇である過大荷重を周期的に繰返し与えることによって構成される荷重パターンであるが、この両荷重下でみられる現象は全く異なった手法によって検討が行われてきた。^{1), 2)}そこで、筆者らは変動荷重下でのき裂進展挙動を体系的に明らかにするためには、これらの現象の関連性と整合性について検討する必要があると考え、既報にて定常な二段多重繰返し荷重下でのき裂進展挙動と過大荷重により引き起こされる遅延現象の両者について詳細に調べた。^{2)~4)}また、そこで示した遅延期間中のき裂進展挙動に関する実験式やき裂進展モデルは、この両者に対して適用が可能であることを示した。^{2)~4)}

一方、多段変動荷重下についても、これまでしばしば検討が行われてきた。たとえば、遅延現象のモデルとしてよく知られている Wheeler のモデル⁵⁾は、塑性域寸法に着目したものであるが、多段変動荷重下でのき裂進展速度の推定法としても適用可能である。また菊川、城野らが定常な二段変動荷重下でのき裂進展挙動に対して提

案した有効応力拡大係数範囲に基づくき裂進展速度の線形累積則も、^{6)~8)}多段変動荷重下への拡張が試みられている。⁹⁾この二つの手法は、ともに特定の条件下においては妥当な推定結果を与えているが、互いに異なる立場から導かれているため相互の関連が明らかでない。

本研究は、二段変動荷重に中間レベル荷重を加えた三段変動荷重下でのき裂進展試験を行い、そこで観察された現象を既報^{2)~4)}での二段変動荷重下の場合と対応をさせながら詳細に調べたものである。さらに、筆者らが二段変動荷重下で導いたき裂進展速度の解析的表示^{2)~4)}を多段変動荷重下へ拡張することも試みた。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

使用した材料は、既報^{2)~4)}と同じ板厚 10mm に圧延されたアルミニウム合金 A2017-T3 材 ($\sigma_{0.2} = 340\text{MPa}$, $\sigma_B = 443\text{MPa}$) であり、材料は供給状態のまま既報^{2), 3)}と同様のサイドグループ付 CT 型試験片 (荷重点から背面までの距離 48mm, グループ底厚さ 8mm) に機械加工した。

試験には、荷重容量 10kN の電気油圧サーボ型疲労試験機を用い、荷重繰返し速度が 2 ~ 20Hz の範囲で実験を行った。き裂長さの観察は光学顕微鏡にて行い、応力拡大係数の算出は Srawly の式¹⁰⁾を用いた。また、背面ゲージからひずみを検出することにより除荷弾性コンプ

[†] 原稿受理 平成 12 年 2 月 25 日 Received Feb. 25, 2000

* 正会員 中日本自動車短期大学 〒505-0077 岐阜県加茂郡祝町深萱, Nakanihon Automotive College, Kamo-gun, Gifu, 505-0077

** 正会員 大阪産業大学法人为本部 〒574-8530 大東市中垣内, Executive Office, Osaka Sangyo Univ., Nakagaito, Daito, 574-8530

*** 正会員 立命館大学理工学部 〒525-8577 草津市野路東, Faculty of Sci. and Eng., Ritsumeikan Univ., Noji-higashi, Kusatsu, 525-8577

Fig. 1. Load patterns.

ライアンス法によってき裂開口比の測定も行った。

Fig. 1 (a), (b) に、本研究で三段変動荷重による実験に用いた荷重パターンを示す。これらは全て最初の K_H 一定条件から K_M と K_L によって構成される二段多重繰返し荷重に移行する荷重パターンであり、荷重パターン A は K_M と K_L を周期的に交互に負荷するのに対し、荷重パターン B は、 K_L の繰返し数を数段回 (N_{L1} , N_{L2} , ..., N_{LN}) に変化させ、それを 1 ブロックとしたものである。

3 解析の基礎となる二段変動荷重下でのき裂進展挙動

本研究における Fig. 1 の荷重パターンのもとでのき裂進展挙動の解析は、既報^{3), 4)}の二段変動荷重下でのき裂進展挙動の解析手法に基礎を置いているので、まず後者についてその概要を示しておく。

まず、高低二段変動荷重下において荷重変動直後の微小なき裂長さの変化を測定するにあたり、試験片の表面観察では十分な精度が得られないので、既報^{2), 3)}では大荷重 K_H と小荷重 K_L をそれぞれ少数回ずつ交互に負荷した後、破面観察を行うことによって K_L での微小なき裂進展量の測定を行い、表面観察による巨視的な測定結果と併用したことに注意しておく。

こうして得られた遅延過程でのき裂長ささと繰返し数の関係を、Fig. 2 (a) 中に太線で模式的に示している。遅延過程は、荷重変動後、き裂の成長に伴ってき裂進展速度が低下する減速過程と、その後き裂進展速度が定 ΔK 条件下と等しくなるまで上昇する加速過程からなり、図中に破線で示すように二段変動荷重を構成する K_H と K_L の与え方によっては加速過程が現れない場合もある。

Fig. 2 (a) 中に示す r_0 は荷重変動直後のき裂進展速度であり、 r_t , a_t , n_t はそれぞれ減速過程から加速過程へ移行する遷移点でのき裂進展速度、き裂進展量、繰返し数である。 r_c は定 ΔK 条件下でのき裂進展速度、 a_r は遅延過程終了時のき裂進展量である。また、 c_1 は加速過程が現れない場合のき裂進展量の飽和値であり、 N_R は遅延過程に要する繰返し数が実験データから簡便に求められるように既報²⁾で定義した遅延繰返し数である。

遅延過程中のき裂進展速度とき裂進展量の関係を厳密に関数化するためには、遷移点の値を明らかにする必要があるが、減速と加速の両過程を Fig. 2(b) 中の太線あ

Fig. 2. Schematic crack growth behavior under two-step load.

るいは下記の式 (1), (2) に示すような直線で表わし、両者を重ね合わせることによって精度的に十分な関数化が可能である。⁴⁾

$$\text{減速過程: } \frac{da}{dn} = r_0 - \alpha_1 a, \alpha_1 = r_0/c_1, a < c_1 \quad (1)$$

$$\text{加速過程: } \frac{da}{dn} = \alpha_2(a - a_0), a \geq a_0 \quad (2)$$

その際、Fig. 2 (b) 中の a_0 を定める必要があるが、既報⁴⁾ではこの値を 0 としている。また、式 (1), (2) 中のパラメーターは K 値の条件に依存する。 r_0 は一定荷重振幅下での $da/dn - \Delta K_{eff}$ 関係と良い相関性があり、 r_0 と c_1 は K_L での有効応力拡大係数範囲のみに依存するが、³⁾ α_2 は K_H と K_L での最大応力拡大係数の比もパラメーターとして含んでいる。³⁾ これ以上の詳細については既報³⁾を参照されたい。

4 三段変動荷重下での疲労き裂進展試験結果

Fig. 1(a), (b) に示した荷重パターン A, B による実験を行ったところ、 K_H から K_L と K_M からなる荷重ブロックへ変動させた後に、一時的なき裂進展速度の低下が観察された。以下本節では、こうした三段変動荷重試験結果について示す。なお、荷重変動に伴う開口応力拡大係数の変化は、既報²⁾で示した二段変動荷重下の場合と同様にほとんど観察されなかったため、き裂閉口に関する実験結果は省略する。

まず、三段変動荷重の K_H , K_M , K_L として採用した応力拡大係数の値とそれぞれの K 値における片振一定振幅荷重下でのき裂進展速度を Table I に示す。また Table II は、表中に示す K_H , K_L からなる二段荷重下で得られた遅延繰返し数 N_R (Fig. 2(a)) である。Table II で $K_H/K_L = 24/12$ とした場合は、荷重変動後 10^6 回の繰返し荷重を負荷しても巨視的なき裂の成長はみられなかった。しかし、 $K_H/K_L = 24/12$ とした場合は荷重変動直後に $20\mu\text{m}$ 程度の微小なき裂の進展のみられることが、筆者らの既報²⁾にて確認されている。

Fig. 3(a), (b) は、荷重パターン A による疲労破面の例で、 K_H から K_M/K_L の荷重ブロックへ変動させ、その後き裂が数 $100\mu\text{m}$ 進展する様子を示している。なお、荷重ブロックでの繰返し数 N_M/N_L はそれぞれ図(a), (b) 中に示すように与えている。両図から明らかなように、 K_H , K_M , K_L によって進展した部分を明確に区分することができる。すなわち、 K_H では一定荷重振幅下と同様にストライエーションが観察され、 K_L では既報³⁾で示した二段

Table I. Crack growth rates under constant ΔK conditions.

	K -value ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	da/dN (mm/cycle)
K_H	24	9.59×10^{-4}
K_M	18	4.62×10^{-4}
K_L	12	1.20×10^{-4}

Table II. Retardation cycles.

K_H ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	K_L ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	N_R
24	18	1500
24	12	$>10^6$
18	12	10^4

変動荷重下での小荷重下と同様の様相のしみが形成されており、また K_M では細いストライエーションが形成されている。以下、破面観察より得られる微視的進展量について、 K_H から荷重ブロックへ変動後のき裂進展量を Δa_B とし、各荷重ブロック中の K_M または K_L で形成されたしき幅をそれぞれ Δa_M , Δa_L として表すことにする。

ここで、Fig. 3 (a) は $N_M/N_L = 50/29950$ の場合であり、 N_L は K_M/K_L を二段とする場合の N_R より約 20000 回多くなっている。そこで、 K_H を負荷せずに K_M/K_L のみの二段多重繰返し荷重として負荷した場合を考えると、各荷重ブロック中で K_L を負荷している間に遅延過程は終了し、 K_L を負荷する間のき裂進展量は 1mm を大きく越えるはずである。しかしながら、図(a)にみるように、あらかじめ K_H を負荷することによって荷重ブロックへの変動後、 K_L でのき裂進展量は著しく小さくなり、 Δa_B が $30\mu\text{m}$ 程度のところの Δa_L は約 $3\mu\text{m}$ にすぎない。一方、この値は $N_M/N_L = 50/4950$ とした図(b)で Δa_B が $40\mu\text{m}$ 程度のところの Δa_L とほとんど変わらない。これは Δa_B が $30 \sim 40\mu\text{m}$ のところでは Fig. 3(a), (b) のどちらの場合も、 N_L が 4950 回に達するまでに Δa_L が飽和したことを意味している。また両条件下とも、 Δa_B が約 $40\mu\text{m}$ までは、 Δa_M と Δa_L がともに低下し、その後増加する傾向が観察される。なお、こうした傾向が現れる理由については、次節にてき裂進展モデルと合わせて検討する。

Fig. 3(a), (b) に示した破面写真より、まず、 K_H 一定条件から K_M/K_L の荷重ブロックへ変動後、 Δa_B の変化に伴う各荷重ブロックでの K_M と K_L における平均き裂進展速度の変化を調べた。Fig. 4 は、Fig. 3(a), (b) に示した破面写真から得られる Δa_M と Δa_L をそれぞれ N_M , N_L で除して求める各荷重ブロックの K_M および K_L での平均き裂進展速度 $(da/dN)_M$, $(da/dN)_L$ を Δa_B の変化に対して示したものである。これらの図中の記号の塗り分けは

Fig. 3. Examples of fractographs.

N_M/N_L の区別を意味している。また、図中に示した実線は、 K_H/K_M , K_H/K_L を二段とした場合のき裂進展速度とき裂進展量の関係を式 (1), (2) に基づいて描いたものである。同図より K_H から荷重ブロックへ変動後のき裂進展量 Δa_B の増加に伴う K_M でのき裂進展速度 $(da/dN)_M$ の変化は、 K_H/K_M を二段とした場合とほぼ一致している。また、 $K_H/K_L = 24/12$ とした二段変動荷重下の場合、 K_L でのき裂進展挙動に加速過程が現れないが、Fig. 4 に示す $(da/dN)_L$ は Δa_B が $10\mu\text{m}$ より大きくなると、 K_M の影響を受けて徐々に上昇する。また、 $(da/dN)_L$ の変化に N_L 依存性が現れているが、これは Fig. 3 に関して上で指摘した Δa_L の飽和のためと考えられる。そこで、各荷重ブロック中の K_L でのき裂進展量 Δa_L が、 Δa_B の増加に伴いどのように変化するかを調べた。

Fig. 5 は、 Δa_L を Δa_B に対してプロットしたものであり、記号の区別は荷重パターンと N_L の違いを示している。 $m = 1, 2, 3$ と示した細線については後に説明する。また、ここでは、 K_L での繰返し数を数段階に変化させた荷重パターン B で得られた結果も併記しているが、図中に N_L として示す繰返し数を少数回の方から順に Fig. 1 (b) に示す $N_{L1} \dots N_{L4}$ にあてはめている。Fig. 5 より、どちらの荷重パターンで得られた結果も大きな傾向の違いはないが、ここで示す Δa_L - Δa_B 曲線に基づき、以下 K_L での挙動について検討する。

Fig. 6 (a) 中の実線は、Fig. 5 中の各 N_L に対する実験点の傾向を示す曲線を再度描いたものであり、これより得られる Δa_B が $0.02, 0.05, 0.07$ および 0.2mm のときの Δa_L と N_L の関係を Fig. 6 (b) に○印で示す。この図は K_H 一定から K_M/K_L の荷重ブロックへ変動後、複数回の荷重ブロックを負荷した後の進展量 Δa_B が Fig. 6 (b) の各図中に示したそれぞれの値に達したところから、 K_L 一定の条件を負荷した場合のき裂長さとし繰返し数の関係を意味している。各図中に細線で示す c_1 は実験結果より定

Fig. 4. Mean crack growth rates at K_M and K_L . Fig. 5. Variations of Δa_L with the increase in Δa_B . (a) Δa_L - Δa_B curves. (b) Δa_L - nL curves. (c) $(da/dN)_B$ - a_L curves.Fig. 6. Variations of crack growth amount and crack growth rate at K_L .

めとき裂進展量の飽和値である。また Fig. 6 (c) は、Fig. 6 (b) に示した結果を K_L でのき裂進展量の増加に対するき裂進展速度の変化として表したものである。ただし、Fig. 6 (c) の各図中に $m=1, 2, 3$ と示した細線については後で説明する。これらの図から三段変動荷重下での K_L でのき裂進展挙動は、Fig. 2(a), (b) に示したような二段変動荷重下と定性的に同様であるが、 c_1, c_2 などの係数を定量的に解析するためには K 値の条件の他に Fig. 3 で定義した Δa_B も因子として取り入れる必要がある。一方、Fig. 4 に示したように、 K_M でのき裂進展挙動は、き裂進展速度とき裂進展量の関係に着目すれば、二段変動荷重下での解析^{3), 4)} がそのまま適用できる。また、以後の検討において K_L での挙動は K 値の条件と直前の K_M で進展したところまでの Δa_B によって定まるものと仮定する。すなわち、直前の K_M 以前の荷重ブロックは K_L のみであっても、あるいは K_L の直前までの荷重ブロック全てが K_M であっても、 Δa_B と K 値の条件が等しければその後に引き続く K_L での挙動は変わりがないものとする。

ここで、 K_L での繰返し数 N_L を著しく大きくした場合の現象を調べるために行った実験結果について示す。Fig. 7 は、荷重パターン A において K_M/K_L の荷重ブロックによってき裂をいくらか進展させた後、 K_L 一定に変化させる荷重パターンと、この荷重パターンで得られるき裂長さと繰返し数の関係の模式図である。模式図に示す $(N_R)_B$ は、 K_M/K_L の荷重ブロックで Δa_B だけき裂を進展させ、そこから K_L 一定に変化させた後の遅延繰返し数である。また、Fig. 8 は実験で得られた $(N_R)_B$ の Δa_B 依存性を示したものである。図中の記号の塗り分けは K_M/K_L の荷重ブロックでの繰返し数 N_M/N_L と負荷したブロック数 n_B によって区別しており、 $\diamond$ と $\blacklozenge$ は K_M/K_L

Fig. 7. Definition of $(N_R)_B$. Fig. 8. Relationship of $(N_R)_B$ versus Δa_B .

の荷重ブロックの代わりに K_M 一定を負荷した場合である。Fig. 4 に示したように荷重ブロックによる進展量 Δa_B が 0.04mm あたりが K_L での進展速度の低下が最も著しいところであり、Fig. 8 より Δa_B を 0.04mm 程度となるように与えた場合の $(N_R)_B$ は $10^6 \sim 10^7$ のオーダーとなるが、 Δa_B を大きくするにつれて $(N_R)_B$ は $K_H/K_L = 18/12$ とした場合の 10^4 回に近づく傾向にある。このように $(N_R)_B$ は荷重ブロックでのき裂進展量 Δa_B に大きく依存することがわかる。図中の細線については後の第 6 章で述べる。

5 二段と三段変動荷重下でのき裂進展挙動の対応関係およびき裂進展モデルについて

Fig. 9 (a), (b), (c) は、前節に示した三段変動荷重下でのき裂進展挙動を二段変動荷重下のそれと対応させて示した模式図である。同図 (a) は、 K_L が K_M に等しい場合で K_H/K_L を二段とする高低二段変動荷重の場合であり、同図 (b) は K_M が K_H に等しい場合で K_H/K_M を二段とする二段多重繰返し荷重の場合である。なお、各図において上の図は荷重の変化を示し、下の図はき裂進展速度をき裂長さに対して示したものであり、次の図 (c) も同様である。上の図 (a), (b) は三段変動荷重の二つの極限状態としての二段変動荷重の場合を示しているが、図 (c) は前節で示した三段変動荷重下の挙動を模式的に示したものである。ここで、 K_M でのき裂進展挙動は既述のように K_H/K_M を二段とする場合の挙動に従うが、 K_M は K_L と交互に負荷されるので K_M を負荷したところを太線で示している。また、 K_L では先の Fig. 6 (b) に示したように、各荷重ブロックでの進展に伴って変動直後の進展速度や進展量の飽和値が変化するので、そうした傾向を太線で示してある。

図 (c) において K_L が K_M に近づくにつれて K_M から K_L へ荷重変動による干渉効果が小さくなるので同図 (a) のようになり、また、図 (c) にて K_M が K_H に近くなると K_M での進展速度がき裂長さに関係なく K_H での値と等しくなり、それに伴って K_L での挙動も変化し同図 (b) のようになる。このように K_M , K_L の系統的な変化に応じて

Fig. 9. Crack growth behavior under typical three-step load and extreme cases.

三段変動荷重下での結果を矛盾なく二段での結果と結びつけることができる。

また、筆者らは、Fig. 2(a), (b) に示したような二段変動荷重下の遅延現象を説明するため、既報⁴⁾において Fig. 10 に示すようにき裂先端の繰返し塑性域の内部に高ひずみ領域を考え、き裂進展モデルについての検討を行った。ところで、高ひずみ領域の存在については他でもしばしば指摘されているが、¹²⁾ 筆者らの考案したモデルが他のモデルと異なる点は、高ひずみ領域は荷重の繰返しによって形成されるという点であり、き裂進展の機構を下に示す 2 つの作用の重ね合わせとして考えていることである。

Fig. 10. Illustration of crack growth model.

- 〔Ⅰ〕 高ひずみ領域内のき裂先端部分の破壊
- 〔Ⅱ〕 高ひずみ領域の形成のための被害の蓄積

二段変動荷重下での遅延過程では、あらかじめ K_H によって、き裂先端付近においては〔Ⅱ〕の作用が十分に進んでおり、変動直後においても〔Ⅰ〕の作用は起こりうるが、き裂先端から少し離れた前方塑性域ではあらかじめ負荷された K_H によって残留応力が生じるため、〔Ⅱ〕の作用が一定振幅荷重下の場合に対して遅くなり、き裂進展量の飽和とその後のき裂進展速度の上昇が起ると考えられる。ところが、本研究で示したような三段変動荷重下においては、 K_H から荷重ブロックへ変動後、 K_M によって徐々に高ひずみ領域が形成されていくが、その寸法の変化が各荷重ブロックでの K_L でのき裂進展挙動に影響を及ぼし Fig. 3 の破面写真のような結果になったと考えられる。

6 三段変動荷重下でのき裂進展速度の解析およびき裂進展速度の推定

先に述べたように荷重パターン A, B における中間レベルの K_M におけるき裂進展挙動は K_H/K_M からなる二段変動荷重として取り扱うことができ、式 (1), (2) を用いてき裂進展速度の推定が可能である。しかし、小荷重レベル K_L での挙動については二段の場合と異なり検討を要する。

前節で Fig. 9 の各図に示したような挙動を反映させる実験式を導くため、まず式 (1), (2) を K_L 一定条件下でのき裂進展速度 $(r_c)_L$ で除すことにより無次元化して次のように表す。

減速過程:

$$f_{HL}(a) = \frac{da/dn}{(r_c)_L} = \frac{(r_0)_{HL}}{(r_c)_L} \left(1 - \frac{a}{(c_1)_{HL}}\right), a \leq (c_1)_{HL} \quad (3)$$

加速過程:

$$f_{HL}(a) = \frac{da/dn}{(r_c)_L} = \frac{(\alpha_2)_{HL}}{(r_c)_L} (a - (a_0)_{HL}), a \geq (a_0)_{HL} \quad (4)$$

ここで $(r_0)_{HL}$, $(c_1)_{HL}$, $(\alpha_2)_{HL}$, $(a_0)_{HL}$ における添え字 HL は K_H から K_L へ変動させた場合の値であることを意味している。また式 (3), (4) は、式 (1), (2) と同様に 2 式を重ね合わせて用いることを念頭においている。式 (3), (4) で定義した関数 $f_{HL}(a)$ は K_H から K_L へ荷重変動後き裂長さが a だけ進展したときのき裂進展速度の定 ΔK 条件下の値に対する低下率を意味しており、 $f_{HL}(a) = 1$ のときはき裂進展速度は定 ΔK 条件下と等しい。このように定義した関数 $f_{HL}(a)$ を用いて三段変動荷重下での K_L でのき裂進展挙動を、Fig. 3 で定義したき裂長さのパラメーターを用いて

$$\frac{da}{dn} = (r_c)_L f_{HM}(a_B + a_L) f_{ML}(a_L) \quad (5)$$

のように表す。この式は、 K_H から K_M/K_L の荷重ブロックへ変動後、 K_H から K_M へ変動させた場合のき裂進展速度の低下率 $f_{HM}(a_B + a_L)$ と各荷重ブロックにて K_M から K_L へ変動させた場合のき裂進展速度の低下率 $f_{ML}(a_L)$ の積を K_L 一定条件下での進展速度 $(r_c)_L$ に乗じたものである。なお、式中に記した a_L , a_B などのき裂進展量を表す

文字は変数として扱うため、 Δ は記さないことにする。Fig. 11 中の太線は、荷重ブロックによって Δa_B き裂が進展した後、 K_L によって Δa_L 進展したところの進展速度 $(da/dn)_L$ を式 (3), (4) で定義した $f_{HL}(a)$ を用いて模式的に示している。式 (5) において、 K_M が K_H に近づくにつれて $f_{HM}(a_B)$ が 1 に近づくので、Fig. 9 (b) のような二段多重繰返し荷重を表すことになり、また K_L が K_M へに近づくにつれて $f_{ML}(a_L)$ が 1 に近づくので、Fig. 9 (a) のような高低二段変動荷重を表すことになる。

さて、式 (5) で $a_L = 0$ とおくと、 da/dn は荷重ブロックにて a_B だけき裂が進展したところで K_M から K_L へ変動させた直後の進展速度 $(r_0)_{BML}$ を与えることになる。すなわち

$$(r_0)_{BML}(a_B) = (r_c)_L f_{HM}(a_B) \frac{(r_0)_{ML}}{(r_c)_L} = (r_0)_{ML} f_{HM}(a_B) \quad (6)$$

が成り立つ。また、Fig. 6(b) に示したように、 a_B の増加に伴って K_L でのき裂進展量の飽和値は変化するのでこれを $(c_1)_{BML}$ で表し、

$$(c_1)_{BML}(a_B) = (c_1)_{ML} f_{HM}(a_B) \quad (7)$$

のように関数化した。以下、式 (5) を用いる際に $(c_1)_{ML}$ の代わりに式 (7) で得られる $(c_1)_{BML}$ を用いることとし、また式 (3), (4) の f_{HL} を K_H/K_M の場合に適用して式 (5), (7) に用いる際に $(a_0)_{HM}$ を 0.04mm とした。既報^{3), 4)}で示した二段変動荷重下で加速過程が現れる場合は a_0 を 0 として解析を行ってきたが、先に述べたように $K_H/K_L = 24/12$ とした二段の場合は加速過程が現れない。従って、この条件に $K_M = 18$ を加えた $K_H/K_M/K_L = 24/18/12$ の場合は、 Δa_B が小さいところでは K_L による進展に対して K_H の影響が大きいものと思われ、実験結果が的確に反映できるように $(a_0)_{HM}$ の値を定めた。しかし、 $(a_0)_{HM}$ による補正を行っても (7) に基づく $(c_1)_{BML}$ は実際の K_L でのき裂進展量の飽和値と有意な差異が認められるので、式 (1), (2) を以下に示す式 (8), (9) のようにパラメーター m を用いて補正した。

Fig. 11. Schematic crack growth curve at K_L based on $E_q(5)$.

$$\text{減速過程: } \frac{da}{dn} = r_0 \left(1 - \frac{a}{c_1}\right)^m, a \leq c_1 \quad (8)$$

加速過程:

$$\frac{da}{dn} = r_c \{1 - (1 - \alpha'_2 a')^m\}, a' = a - a_0, a \geq a_0 \quad (9)$$

以下、式 (5), (7) を用いる際には、式 (8), (9) の da/dn を $(r_0)_L$ で除したものを式 (3), (4) の定義に基づく f_{HM} , f_{ML} の代わりに用いている。また、 m の値が 1, 2, 3 の場合について解析を行っている。

ここで、式 (7) に基づく $(c_1)_{BML}$ の計算結果を示す前に、式 (1), (2) と式 (8), (9) の関連について述べる。式 (9) の両辺を a で微分すると

$$\frac{d\left(\frac{da}{dn}\right)}{da} = r_c m \alpha'_2 (1 - \alpha'_2 a)^{m-1} \quad (10)$$

となるので、

$$\alpha'_2 = \frac{\alpha_2}{r_c m} \quad (11)$$

とおくと $\alpha'_2 a \ll 1$ の場合は式 (9) は式 (2) とほぼ等しい計算結果を与える。また式 (11) のような置き換えをすれば $m = 1$ の場合は式 (8), (9) は式 (1), (2) と同じである。式 (8), (9) はパラメーター m を含むことによって減速過程ではき裂進展量の飽和の速さを変えることができる。また加速過程では遷移点付近での挙動は m の値を変えることによる大きな変化はないが、遷移点から比較的離れたところのき裂進展挙動は m の値に幾分影響を受け、また m は N_R にも変化を与える。

さて、式 (7) に基づく a_B の増加に伴う $(c_1)_{BML}$ の変化が、式 (8), (9) で $m = 1, 2, 3$ とした場合について Fig. 5 中に示してある。 $m = 1$ の場合は式 (1), (2) を用いた場合に相当するが、 a_B が 0.07mm より小さいところでは $(c_1)_{BML}$ は実験点よりも大きめの値となる。しかし、 $m = 2, 3$ とすると、 $(c_1)_{BML}$ の計算結果は、 N_L が $10^3 \sim 10^4$ 回のときの a_L の実験結果に近い値をとる。なお、 N_L が $10^3 \sim 10^4$ 回のところで a_L が飽和値に達することは、Fig. 6(b) にてどの a_B に対する a_L の結果からも明らかである。また、式 (8), (9) で $m = 1, 2, 3$ とした場合の f_{HM} および f_{ML} を式 (5) に用いて得られる K_L でのき裂長さの増加に伴うき裂進展速度の変化が、Fig. 6(c) の各図中に細線で描いてある。

また、 K_L での加速過程での進展挙動を反映する係数 $(\alpha_2)_{ML}$ についても荷重ブロックでのき裂進展量 a_B の関数と考えらるが、ここでは単純に a_B に無関係に K_M/K_L を二段とする場合の値をそのまま式 (5) に用いて $m = 1, 2, 3$ とした場合の $(N_R)_B$ と a_B の関係を計算で求め、先の Fig. 8 に示した結果と比較してみた。すると、 a_B が $(a_0)_{HM}$ として与えた 0.04mm より小さいところにおいて実験結果は解析結果よりも大きく高めに離れているが、 a_B が 0.04mm を越えると両者はオーダー的に近い値をとる。二段変動荷重下での場合に加速過程のき裂進展挙動に大きく影響する係数 α_2 は、予加工や時効など種々の因子の影響を受けやすく⁴⁾、ここでの $(\alpha_2)_{ML}$ についても a_B による補正は容易ではない。そこで、 $(\alpha_2)_{ML}$ は a_B が $(a_0)_{HM}$ より大きいところは K_M と K_L を二段とする場合の

値をそのまま用いることとした。また、 a_B が $(a_0)_{HM}$ より小さいところでは実験を行った N_L の範囲において加速過程が現れないと考えられるので $(\alpha_2)_{ML} = 0$ とした。

最後に、荷重パターン A による実験に対し K_M/K_L の 1 ブロックでの平均進展速度 $(da/dn)_B$ の推定を行った。具体的には K_H から荷重ブロックへ変動後、 K_M/K_L の荷重ブロックを n_B ブロック負荷し、そこから K_M とその後に引き続く K_L による 1 ブロックの総進展量を N_M と N_L の和で除して得られる値として $(da/dn)_B$ を算出した。Fig. 12 は、 $(da/dn)_B$ を n_B に対して示したものである。これらのどの図をみても Fig. 4 に示したような K_M/K_L の荷重ブロックの繰返しによるき裂進展速度の低下と上昇が推定結果に現れている。 $N_M/N_L = 50/250, 50/950$ の場合は式 (5) にて m を 1 から 3 へ変化させたことによる推定結果にそれほど差異はなく実験結果もほぼ一致している。しかし、 $N_M/N_L = 50/4950$ の場合は m の与え方によって推定結果に幾分ばらつきがみられ n_B が大きくなると推定結果は実験結果より加速側へ離れていく。これは先に述べたように $(\alpha_2)_{ML}$ についての検討がなお不十分なためであるが、前節に示した現象を満足させ、かつ Fig. 9 に示した二段変動荷重下の挙動と整合性を保つように $(\alpha_2)_{ML}$ の関数化を行うことは、容易ではないと思われる。しかし、Fig. 12 に示したように K_L でのき裂進展量が飽和に至らない $N_M/N_L = 50/250, 50/950$ の場合は、本節で示した方法によって十分妥当なき裂進展速度の推定結果が得られる。

また、パラメーター m を取り入れた式 (1), (2) から式 (8), (9) への変形は、 $(c_1)_{BML}$ の補正には有効であったが、進展速度の推定結果にはそれほど際だった変化が現れていない。こうしたことから、Fig. 2(b) のようなき裂進展速度とき裂長さの関係に着目してき裂進展挙動を解析するにあたり、直線で結んだ 3 点すなわち①荷重変動直後、②減速過程から加速過程への遷移点および③加速過程の終了する点の定め方は重要であるが、これらの 3 点を結ぶにあたって非線形関数を導入するなどの高精度化を図っても直線近似による推定結果と大きな差異はないといえる。

さて、緒言で述べたように多段変動荷重下でのき裂進展速度の推定についての報告は、これまでもいくつか示されている。菊川、城野らの線形累積則^{6)~9)}が適用できるのは、開口応力拡大係数が荷重ブロックを通じて一定として扱うことができ、さらに各レベルでの進展速度が ΔK_{eff} による一義的な対応づけが可能な場合であるので、線形則の適用によって Fig. 12 に示した K_M/K_L の荷重ブロックによる進展に伴う $(da/dn)_B$ の変化をうまく反映させることはできない。また、Wheeler のモデル⁵⁾では、第 4 章に示したような減速と加速の両過程の現れる現象をうまく扱うことはできない。

7 結 言

本研究で得られた結果は以下に示す通りである。

1) 三段変動荷重下での疲労き裂進展試験を行ったところ K_M でのき裂進展挙動は K_H/K_M を二段とする場合の

解析をそのまま適用することができる。一方、 K_L での挙動は、 K_M/K_L の荷重ブロックによる進展に伴ってき裂進展量の飽和値などが変化する。

2) 三段変動荷重下で得られたき裂進展速度とき裂進展量の関係について、二段変動荷重下でのき裂進展挙動として典型的な高低二段変動荷重下での遅延現象や ΔK_{eff} に基づきき裂進展速度の線形累積則の適用できる定常な二段多重繰返し荷重下でのき裂進展挙動との対応関係を、本文中のFig. 9の各図に示すように明らかにした。

3) 既報⁴⁾で示した二段変動荷重下の場合と同様に、き裂先端に高ひずみ領域を考えるき裂進展モデルを用いて三段変動荷重下でのき裂進展挙動について検討した。すなわち、 K_L にて観察された K_M/K_L の荷重ブロックによる進展量 Δa_B の増加に伴うき裂進展量の飽和値などの変化は、 K_M によって形成される高ひずみ領域の変化に起因するものと考えられる。

4) 既報^{3), 4)}で導いた二段変動荷重下でのき裂進展挙動の解析結果を、本研究での実験結果に基づき三段変動荷重下に適用できるように拡張した。また、実験結果に対し1ブロックでの平均き裂進展速度の推定を行ったところ、特定の条件下を除きほぼ妥当な結果が得られた。

参考文献

- 1) 菊川 真, 日本機械学会論文集, A-48, 1369 (1982).
- 2) 田中道七, 加藤泰世, 中山英明, 材料, 39, 945 (1990).
- 3) 田中道七, 加藤泰世, 中山英明, 材料, 43, 41 (1994).
- 4) 田中道七, 加藤泰世, 中山英明, 材料, 43, 48 (1994).
- 5) O. E. Wheeler, Trans. ASME, Ser. D, 94, 181 (1972).
- 6) 菊川 真, 城野政弘, 近藤良之, 材料, 27, 1096 (1978).
- 7) 菊川 真, 城野政弘, 近藤良之, 材料, 28, 946 (1979).
- 8) 菊川 真, 城野政弘, 近藤良之, 日本機械学会論文集, A-47, 468 (1981).
- 9) 菊川 真, 城野政弘, 近藤良之, 三上省二, 日本機械学会論文集, A-48, 1496 (1982).
- 10) J. E. Srawly, Int., Jour., Frac., 12, 475 (1976).
- 11) 菊川 真, 城野政弘, 田中健一, 高谷 勝, 材料, 25, 899 (1981).
- 12) G. T. Hahn and R. G. Hoagland, A. R. Rosenfield, Met. Trans., 3, 1189 (1972).

Fig. 12. Estimated crack growth rates.