

[研究論文]

モードI型疲労き裂進展機構に関する一考察

田 中 武 之

要 旨

これまで伊原らによって構築された疲労き裂に関する損傷累積理論を基礎として、疲労き裂の発生および開口のメカニズムに関する統一的な説明を試みる。ここでは、転位密度と転位の弾性エネルギーの積をエネルギー開放率に結びつけた損傷累積モデルを用いて、へき開き裂の発生・開口に由来するモードI型の疲労き裂進展メカニズムについて考察する。つぎに、エネルギー開放率がへき開き裂発生のエネルギーと等しいという条件の下で、有効応力拡大係数変動幅の閾値 $\Delta K_{\text{eff th}}$ を算出する。また、塑性域内のすべり線上の転位の個数から塑性域の大きさを算出する。その結果、このモデルから算出したき裂進展速度 da/dn と有効応力拡大係数変動幅 ΔK_{eff} の関係は実験データと一致した。

はじめに

従来、モードI型疲労き裂進展の挙動は巨視的観点から説明されてきた。しかし、本来、き裂進展は微視的破壊から巨視的破壊に至る連続的なプロセスであるから、き裂進展のメカニズムはそのような全破壊プロセスを含めて説明されることが望まれる。すなわち、微視的領域における転位理論と巨視的領域における破壊力学を包含し、同時に微視的領域と巨視的領域を結びつける理論が必要である。そこでは、結晶格子の転位のエネルギーが蓄積し、巨視的き裂進展のエネルギーとして消費されると考えるべきである。

さて、疲労き裂のモデルとしては、破壊現象を損傷の累積によって説明し、き裂長さ（確率変数）の平均値とエネルギーとの関係からき裂進展則を導く立場と、経験的なき裂進展則を基盤としてその不規則性の原因を確率過程で表現し、き裂長さの分布関数を理論的に導く立場がある。本報告は前者の立場をとるものである。

損傷累積モデルの背景について簡単に述べる。疲労き裂進展についてOhは最弱リンクモデルを提案した。Ohのモデルはき裂先端から前方に並んだ微小要素に、繰り返し応力による損傷が累積すると考える1次元モデルである。ある要素の損傷累積が許容値を超えると、その要素は破壊し、き裂がその要素まで進むとした。要素の強度を確率変数とし、適当な分布関数を

受付日 2005. 4.14

受理日 2005. 5.30

所 属 福井県立大学情報センター

仮定して、き裂進展則を導出した。しかし、この分布関数の形は適当に仮定されたもので、物理的な観点から導き出されたものではなかった。そこで、伊原ら²は転位の増殖によって損傷が累積するというモデルによって各要素の強度の分布関数を導いた。さらに先の1次元モデルを2次元モデルに拡張した。その結果、き裂進展速度が応力拡大係数のべきに比例すること(パリ則)、また間欠的に進むき裂が1回に進む距離およびき裂が1回進むのに要する繰り返し数が求められた。しかし、モデルの中に現れたパラメータの物理的意味が必ずしも明らかでなく、また当時、き裂進展過程の破面観察などからき裂進展機構を模式的に表したものはあったが、き裂先端付近のすべり変形の詳細を示すものはなかったため、その後目立った進展はなかった。

ところが、最近になってこの2点に進展が見られた。一つは確率論的損傷累積モデルの物理的意味が明らかにされたことである³。すなわち、疲労損傷は転位の形で累積されること、き裂発生時のエネルギーが転位密度を含む形で表されること、および、き裂発生までの過程はミクロ現象であり、すべり帯でのき裂の発生が微視的領域と巨視的領域の接点であることを提唱した。第2点として実験的な進歩があった。たとえば、菅田ら⁴は、モードIで進展する疲労き裂先端近傍の材料表面を原子間力顕微鏡(AFM)によって観察し、すべり変形とき裂進展の関係を明らかにした。

これらをふまえて、本報告では損傷累積モデルを近年の知見によって修正し、き裂の発生・進展のエネルギーに着目して疲労き裂進展の説明を試みる。その際に立脚する事項は次の3つである。

- (1) 微視的な疲労損傷と巨視的破壊を結ぶプロセスは疲労き裂進展の確率論的損傷累積モデルを用いて表される。
- (2) 損傷累積モデル中のエネルギーの次元をもつパラメータは転位理論と破壊力学に基づく物理量によって表される。
- (3) き裂進展に関して損傷累積モデルで従来用いられた仮定²を、き裂の進展挙動とJonoら⁵が原子間力顕微鏡(AFM)で観察したき裂先端近傍のすべり線の変形挙動との間の関係から推測される微視的き裂進展メカニズムで置き換える。

上記の仮定に基づいて、き裂進展のモデルを考察する。特に(3)の点が過去の損傷累積モデルと異なる点である。最後に、モデルから得られた結果と実験データ⁶(3%Si-Fe)との比較を行う。

疲労き裂進展モデル

はじめに、き裂進展についての確率論的損傷累積モデル²の基本的考え方と、そこから得られた結果の概要について簡単にのべる。繰り返し応力のもとでは、き裂先端の塑性域内には多

モードI型疲労き裂進展機構に関する一考察

くのすべり帯の交差により、図1のような損傷の著しい領域D(破壊進行域)が現れる。この領域を図1のように大きさ d_0 の小さい要素に分割し、き裂先端を原点として、き裂の主な進展方向をx軸、それに垂直にz軸を決める。x軸方向に id_0 、z軸方向に jd_0 の距離にある要素を (i, j) とする。 $(i=1, 2, \dots, i_0, j=\pm 1, \pm 2, \dots, \pm j_0)$

周期的に応力が負荷される状況では、各要素に損傷がランダムに累積する。荷重 n サイクル目において、 (i, j) 要素に累積した損傷がある一定の値 U を超えたとき、その要素は崩壊し、その要素の場所までき裂が進むものとする。つまり、荷重 n サイクル目にき裂はx軸方向に id_0 の長さまで進展すると仮定する。また、各要素にランダムに損傷が発生し、損傷発生率が一定と仮定すると、累積損傷量(確率変数)は平均 $\sigma(i, j)$ の指数分布にしたがう。

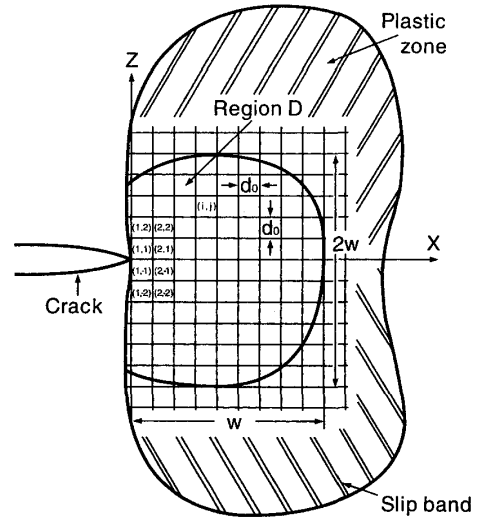


図1 塑性域の模式図

ところで、損傷はき裂に近いほど蓄積されやすく、領域Dの外部ではほとんど蓄積されないと考えられる。 (i, j) 要素に1サイクル当たりに累積する損傷の平均値 $\sigma(i, j)$ として、次のような形を仮定する。

$$\sigma(i, j) = c_0 \exp\left(-\frac{d_0}{w}i - \frac{d_0}{w}|j|\right) \quad (1)$$

ここで、 w は領域Dのx軸方向の長さ、 $2w$ はz方向の幅であり、 c_0 は1サイクル当たりの損傷程度を表す定数である。

上記のモデルから計算すると、 U/c_0 の値に関する3つの結果が得られる²⁾。

- (1) き裂進展速度 $\frac{1}{d_0} \frac{da}{dn}$ と w/d_0 の関係 (図2) (a はき裂長さ)
- (2) き裂成長1ステップ当たりの平均進展距離 $\langle X \rangle$ と w/d_0 の関係 (図3)
- (3) き裂成長1ステップ当たりに費やされる荷重サイクル数の平均値 $\langle N \rangle$ と w/c_0 の関係 (図4)

図2からどの U/c_0 の値に対しても、き裂進展速度 da/dn は w のべき乗にほぼ比例している

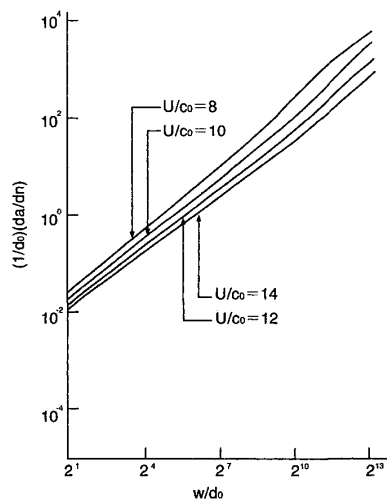


図2 $(1/d_0)(da/dn)$ 対 w/d_0

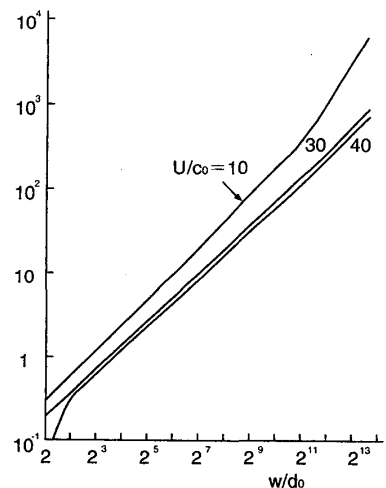


図3 $(1/d_0)\langle X \rangle$ 対 w/d_0

ことがわかる。また、図4から、き裂が1回進むのに要する平均繰り返し数 $\langle N \rangle$ が w の増加とともに1回になり、ストライエーションが現れることが示される。

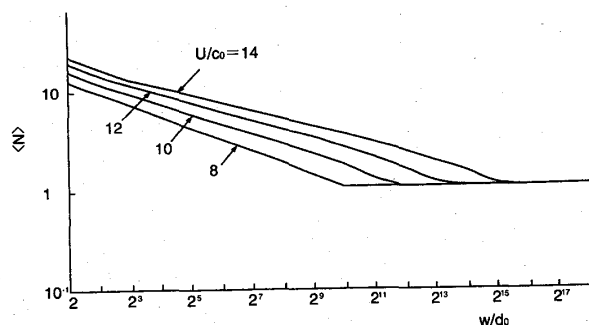


図4 $\langle N \rangle$ 対 w/d_0

損傷累積モデルのパラメータと物理量との関係

疲労き裂発生に関する確率論的損傷累積モデルの研究結果から、次のような事柄が得られている^{3,7}。

- (1) 疲労による損傷は転位の形で累積する。
- (2) き裂発生のエネルギーは転位の密度との関係で説明できる。

ここで用いる損傷累積モデルにおけるパラメータと物理量の関連を以下に示す³。

まず、材料中の微小要素の長さ d_0 の値として、転位幅に相当する値 $d_0 = 1.3 \times 10^{-9} \text{m}$ を採用する。また、き裂発生モデルにしたがって

$$c_0 = 2S_Y \cdot 2\varepsilon_P$$

$$U = Gb^2 \rho_U \frac{l_c}{l_0} \exp\left(-\frac{Gb}{l_0 S}\right) \Bigg|_{\substack{S=S_Y \\ l_0=l_c}}$$

$$= Gb^2 e^{-1} \rho_U$$

とおく。ここで、 S_Y は降伏応力、 ε_P は降伏点到達時の塑性歪み、 U はき裂発生時に領域 D 内に累積する増殖源としての転位双極子の単位体積当たりのエネルギー、 G は剛性率、 b はバーガスベクトル、 ρ_U はき裂発生時の転位双極子密度、 l_0 は転位セグメントの長さ L (確率変数)の平均値である。 l_c は増殖源としての転位セグメントの最小値で、

$$l_c = \delta Gb / S \quad (4)$$

と表される。 S は応力振幅、 δ はオーダー1の定数である。

き裂進展機構

Jonoら⁵はモードI型で進展する疲労き裂先端付近の材料表面をAFMを用いて観察し、き裂先端近傍でのすべり変形と疲労き裂進展挙動との関係を調べた²。その結果、次の2点を明らかにした。

- (1) 疲労き裂縁から多数のすべり線が発生しているが、すべり線はき裂先端より後方のみで発生し、き裂先端で交差する二つのすべり系が荷重1サイクル中に作動することにより、き

モードI型疲労き裂進展機構に関する一考察

裂は進展する。

- (2) 繰り返し荷重の過程では、直前の除荷過程で閉口したき裂の先端よりすべりが作動し、負荷すると閉口している部分が再び開口をはじめる。そして、前回の最大負荷時のき裂先端まで開口した後、さらに前方にすべりが生じることにより、新しくき裂が開口し進展する。

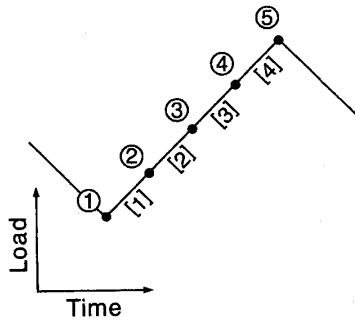


図5 負荷過程の分割

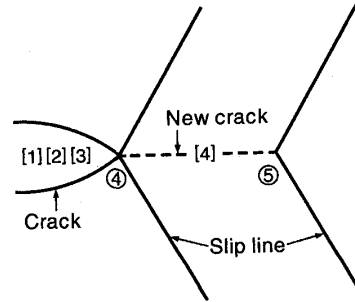


図6 き裂進展過程の模式図

上記の観察結果にもとづき、図5のように負荷過程（負荷開始点①、最大負荷点⑤）を②、③、④点で等分した4つの過程 [1]、[2]、[3]、[4] に分割して考えることにする。[1] から [3] までの負荷過程では、直前の負荷でき裂になった部分が、負荷をうけて徐々に開口する。点④では、二つのすべり系がき裂先端で交差し、き裂が完全に開く。過程 [4] ではすべり線は動かないが、点⑤で新たなすべり系が交差し、同時に点④と点⑤の間の部分が開いて新たなき裂になる。このような過程に対応するき裂先端近傍の様子を図6に示す。以下、この図6に沿ってき裂進展メカニズムを考える。

図6のように負荷過程を4つの小過程に分割したときの点④では、領域Dに作用する負荷エネルギー $2w^2c_0$ 、および、[1]、[2]、[3] の過程で開口したき裂の存在のために、領域D内の損傷が空孔型転位双極子の集まりとして $2w^2U$ のエネルギー量に達する。(図7(a))

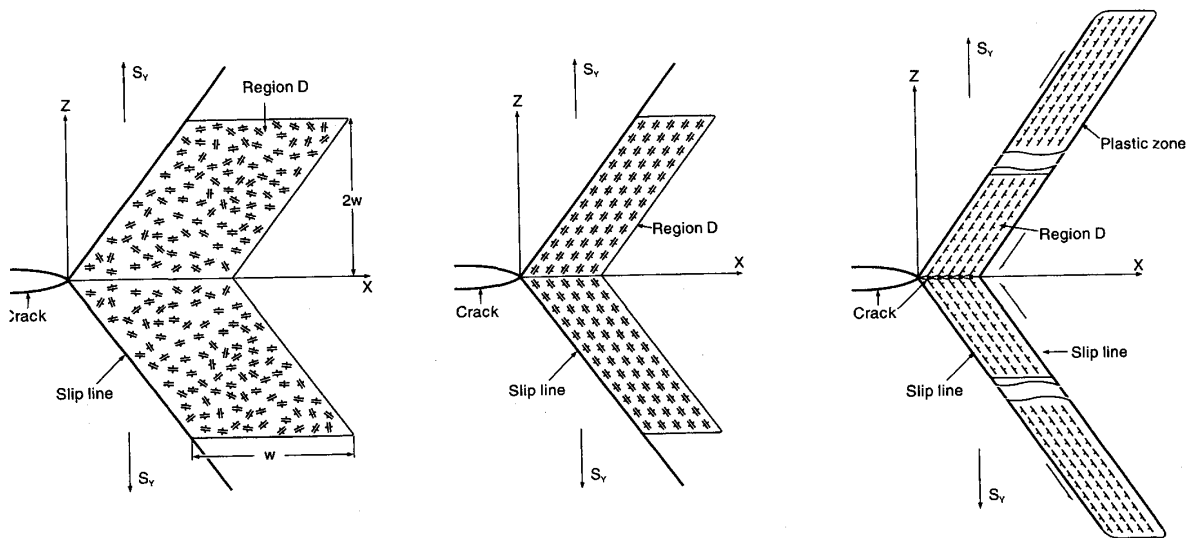


図7(a) 時点④での転位の状況 図7(b) 小過程[4]での転位の状況 図7(c) 時点⑤での転位の状況

き裂成長1ステップに進展する平均距離を $\langle X \rangle$ とし、エネルギー開放率を g とすると、 $\langle X \rangle$ と g の積は距離 $\langle X \rangle$ の分だけき裂が成長するのに要するエネルギーである。これは点④において D 内に累積したエネルギーに等しいと考えられる。すなわち、

$$g \cdot \langle X \rangle = 2w^2U \quad (5)$$

が成立するはずであり、 ρ_U の値を決める一つの条件になる。過程[4]では、図7(b)に示すように領域 D 内にあるすべり線(間隔 d_0)に沿って転位双極子が並ぶ。固執すべり帯内の転位双極子の振る舞いから考えても、すべり帯内ではこのような状態が現れると考えられる⁸⁾。また、このような転位の配向は元屋敷らが行ったコンピュータシミュレーション結果¹⁰⁾とも一致する。前述のモデルでは、き裂成長が1ステップ進展するのに要する平均距離は $\langle X \rangle$ であるから、④の時点で領域 D 内にある転位双極子(エネルギー $2w^2\rho_U$)がすべてき裂先端から $\langle X \rangle$ の距離内で交わる上下のすべり線上に並ぶと考えられる。すべり線の数 n は x 軸の上下それぞれ $\langle X \rangle/d_0$ であるから、一つのすべり線に並ぶ転位双極子の数は $w^2\rho_U / \frac{\langle X \rangle}{d_0}$ となる。すなわち、一つのすべり線に沿う転位の数 m は

$$m = \frac{1}{2} \frac{w^2\rho_U}{\langle X \rangle/d_0} \quad (6)$$

となる。最大負荷点⑤では、図7(c)中の矢印の方向に転位のすべりが起る¹¹⁾。その結果、次の2つのことが起る。

- (1) き裂成長と逆方向に移動する各すべり線上の転位は交差点で大きなバーガースベクトルをもったコトレルの不動転位を形成する。また、後で示すように、き裂前方に $d_0 (= 1.3 \times 10^{-9} \text{m})$ のへき開き裂が多数生じる。
- (2) それと同時に、き裂進行方向に移動する転位は、

$$\frac{S_Y/2}{G} \times w_p = m d_0 \quad (7)$$

の関係を保ちつつ、長さ w_p のすべり帯上を D の外部へとすべり、発生したき裂を開口させる。式(7)はせん断変位(左辺)が累積した m 個の転位によって生じた塑性変位(右辺)にほぼ等しいことを意味する。 d_0 は変位幅 $1.3 \times 10^{-9} \text{m}$ である。また、 w_p の大きさは破壊進行域の大きさ w の約100倍に等しく、き裂先端の塑性域の大きさと同程度と考えられる。さて、

$$w_p = \frac{2}{3\pi} \left(\frac{\Delta K_{\text{eff}}}{2S_Y} \right)^2, \quad (8)$$

とおくと、 da/dn と w との関係から式(6), (7), (8)を用いてき裂進展速度 da/dn と有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} の関係が導かれ、よく知られたパリ則の形となる²⁾。いま、ヤング率を E とすると、き裂先端開口変位範囲 $\Delta\phi$ は

モードI型疲労き裂進展機構に関する一考察

$$\Delta\phi_t = \frac{0.73\Delta K_{\text{eff}}^2}{E\sigma_Y}, \quad (9)$$

と表される¹²ので、エネルギー開放率 g は

$$g = S_Y \Delta\phi_t = \frac{0.73\Delta K_{\text{eff}}^2}{E}, \quad (10)$$

と表される。

次に、へき開き裂発生について考える。上述のように (図7c)、き裂進行方向と逆方向にすべり線上を移動する転位は、すべり線が交差する点で不動転位を形成し、そこにへき開き裂が発生することがコットレルによって解析されている¹³。この場合、発生するき裂の長さ a は

$$a = \frac{2G}{\pi(1-\nu)S_Y^2} \left\{ \left(2\gamma_s - \frac{m_0 b S_Y}{2} \right) \pm \sqrt{2\gamma_s(2\gamma_s - m_0 b S_Y)} \right\} \quad (11)$$

となる。ここで、 γ_s は表面エネルギー、 m_0 は合体する転位の数であり、 ν はポワソン比で $\nu=0.3$ である。この式から $a=d_0 (=1.3 \times 10^{-9} \text{m})$ のき裂を生じるための m_0 を求めて次式に代入し、長さ d_0 のき裂発生のエネルギー W を求める¹³。

$$W = \frac{Gm_0^2 b^2}{4\pi(1-\nu)} \ln\left(\frac{4R}{d_0}\right) + 2\gamma_s d_0 - \frac{\pi(1-\nu)S_Y^2 d_0^2}{8G} - \frac{S_Y m_0 b d_0}{2} \quad (12)$$

ここで、 R は転位場の有効半径である。

さらに、 $\frac{W}{d_0} <X>$ は長さ $<X>$ のき裂を発生させるエネルギーであり、 $g<X>$ は長さ $<X>$ のき裂を進展させる (すなわち、き裂を発生させ、同時に開口させる) エネルギーであるが、

$$\frac{W}{d_0} <X> = g \cdot <X> \quad (13)$$

が成立する場合には、式 (10) を用いて、

$$\frac{W}{d_0} = \frac{0.73\Delta K_{\text{eff}}^2}{E} \quad (14)$$

とかける。この式から得られる ΔK_{eff} は外部から加えられたエネルギーがすべてき裂発生のために消費され、き裂が開口しない (したがって、き裂が進展しない) ΔK_{eff} の限界値を意味するので、その値が有効応力拡大係数幅の閾値 $\Delta K_{\text{eff th}}$ に相当するはずである。一方、実験¹⁴によって得られた $\Delta K_{\text{eff th}}$ は

$$\Delta K_{\text{eff th}} = 1.64 \times 10^{-5} E \quad (15)$$

と表される。次節では、式 (14) で与えられる ΔK_{eff} の値が式 (15) のものと等しいかどうかを数値的に検討する。

計算結果と実験結果の比較

ここでは、上記に述べたモデルによる具体的な計算例を示す。比較に使うデータは、3% Si-Feにおける下限界近傍の疲労き裂進展試験⁶のデータである。この材料の化学組成と機械的特性をそれぞれ表1、2に示す。

表1 材料の化学組成 (Wt %)

C	Si	Mn	P	S	Al
0.007	3.02	0.15	0.013	0.004	0.46

表2 材料の機械的特性

降伏強度 SY (MPa)	引張強度 SB (MPa)	絞り ϕ (%)
431	576	40.5

はじめに、式(2)で $\varepsilon_p = 0.5\%$ とおくと、 $c_0 = 8.62 \times 10^6$ (J/m³)となる。次に、 $\rho_U = 4.51 \times 10^{16}$ m⁻²、 $G = 8.3 \times 10^4$ MPa、 $b = 2.5 \times 10^{-10}$ m とすると、式(3)より $U = 8.7 \times 10^7$ (J/m³)、よって、 $U/c_0 = 10$ を得る。

いま、例として $da/dn = 1 \times 10^{-10}$ m/cycle の場合をとりあげてパラメータの評価を行ってみる。 $d_0 = 1.3 \times 10^{-9}$ m として、図2から $w = 2.24 \times 10^{-7}$ m が得られ、この w の値に対応して、図3と4から、それぞれ $\langle X \rangle = 2.94 \times 10^{-8}$ m および $\langle N \rangle = 3.5$ が得られる。

図7(a)から、領域Dの上半分の部分に含まれる転位双極子の数は

$$w^2 \rho_U = (2.24 \times 10^{-7})^2 \times 4.51 \times 10^{16} = 2263$$

となる。き裂 $\langle X \rangle$ を発生させるすべり帯内の転位双極子の列の数は

$$\frac{\langle X \rangle}{d_0} = 22.6$$

となる。したがって、図7(b)における一つの列の転位双極子の数は、 $2263/22.6=100$ であり、一列に並ぶ転位の数は $m = 50$ となる。この値を式(7)に代入すると、 $w_p = 2.5 \times 10^{-5}$ m となり、また、式(8)から $\Delta K_{\text{eff}} = 9.36$ を得る。この値と $E = 2.16 \times 10^5$ MPa を用いると式(9)より、 $g = 69.7$ (J/m²) となる。上記の g 、 $\langle X \rangle$ 、 w および U の値を用いると、

$$g \cdot \langle X \rangle = 8.70 \times 10^{-6} \text{ (J/m)}$$

$$2w^2 U = 8.73 \times 10^{-6} \text{ (J/m)}$$

を得る。両者の値を比較すると、式(5)の関係がおおむね成り立っていることがわかる。

モード I 型疲労き裂進展機構に関する一考察

さらに、 $\gamma_s = 2 \text{ J/m}^2$ の場合、長さ $a = 1.3 \times 10^{-9} \text{ m}$ のへき開き裂を発生する転位の数は式 (11) より、 $m_0 = 3$ である。 $R = 7.75 \times 10^{-6} \text{ m}$ とすると、式 (12) から、長さ $d_0 = 1.3 \times 10^{-9} \text{ m}$ のへき開き裂を発生するエネルギーは $W = 5.51 \times 10^{-8} \text{ J/m}$ である。よって、単位長さ当たりのき裂発生エネルギーは

$$\frac{W}{d_0} = 42.4 \text{ J/m}^2 = 42.4 \times 10^{-6} \text{ MPa} \cdot \text{m}$$

となる。この値をモデルに基づく式 (14) に代入すると $\Delta K_{\text{eff th}} = 3.54 \text{ MPa m}^{1/2}$ となるが、一方、実験に基づく式 (15) に $E = 2.16 \times 10^5 \text{ MPa}$ を代入して得た $\Delta K_{\text{eff th}}$ も $3.54 \text{ MPa m}^{1/2}$ となり、両者は一致する。

また、 ΔK_{eff} と E の関係であるが、 W を式 (12) の第 1 項で近似し、剛性率とヤング率の関係 $G = E/(1+\nu)$ を用いて、式 (14) に適用すると

$$\Delta K_{\text{eff}} = 1.62 \times 10^{-5} E$$

の関係が導かれ、実験結果の式 (15) とほぼ一致する。

上記の数値例のほかに 5 つのケースを表 3 に示す。また、図 8 に示すとおり、き裂進展速度 da/dn と応力拡大係数 (ΔK_{eff}) の関係は、つぎの実験式

$$\frac{da}{dn} = 1.3 \times 10^{-11} (\Delta K_{\text{eff}})^{3.0} \quad (16)$$

とほぼ一致している。また、 da/dn に対する $g \cdot \langle X \rangle = 2w^2 U$ および $\frac{W}{d_0} \langle X \rangle$ の値を図 9 に示す。

表 3 da/dn に対する各パラメータの計算値

$da/dn \text{ (m/c)}$	5.77×10^{-10}	1×10^{-9}	1×10^{-8}	2×10^{-7}	9.24×10^{-7}
$w \text{ (m)}$	3.2×10^{-8}	5.07×10^{-8}	2.24×10^{-7}	1.9×10^{-6}	5.32×10^{-6}
$\langle X \rangle \text{ (m)}$	4.19×10^{-9}	6.34×10^{-9}	2.94×10^{-8}	2.57×10^{-7}	9.0×10^{-7}
$\langle N \rangle$	6.4	5.4	3.5	1.2	1
M	7.2	11.8	50	412	922
$w_p \text{ (m)}$	3.6×10^{-6}	5.92×10^{-6}	2.5×10^{-5}	2.07×10^{-4}	4.63×10^{-4}
ΔK_{eff}	3.54	4.54	9.36	26.83	40.2
$2w^2 U \text{ (J/m)}$	1.78×10^{-7}	4.47×10^{-7}	8.73×10^{-6}	6.28×10^{-4}	4.93×10^{-3}
$g \cdot \langle X \rangle \text{ (J/m)}$	1.78×10^{-7}	4.42×10^{-7}	8.70×10^{-6}	6.25×10^{-4}	4.92×10^{-3}
$\frac{W}{d_0} \langle X \rangle \text{ (J/m)}$	1.78×10^{-7}	2.69×10^{-7}	1.25×10^{-6}	1.09×10^{-5}	3.82×10^{-5}

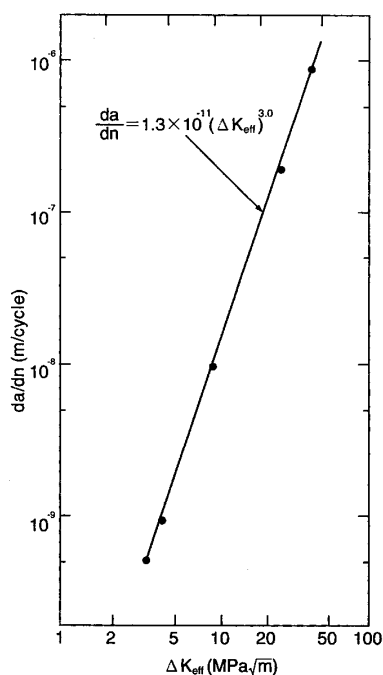
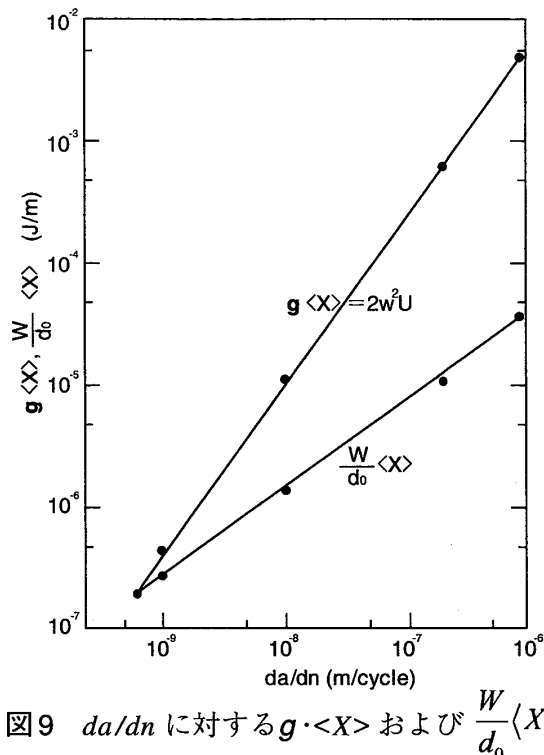
図8 da/dn 対 ΔK_{eff} 図9 da/dn に対する $g \cdot \langle X \rangle$ および $\frac{W}{d_0} \langle X \rangle$

表3においてサイクル数 $\langle N \rangle = 1$ の場合の $\langle X \rangle = 9.0 \times 10^{-7}$ m はストライエーションの間隔に相当するものであり、実験結果とほぼ一致する。また、実験でストライエーションが観察されるとき進展速度は、表3のき裂進展速度 $da/dn = 9.24 \times 10^{-7}$ m/cycle の近辺の速度である。このようなことから、ここで用いた確率モデルはストライエーション観察結果をよく再現したといえるだろう。

結論

ここで用いた疲労き裂進展における損傷累積モデルの要点は次の3点にまとめられる。(1) 損傷量の物理的意味は転位双極子集団のエネルギー（すなわち弾性エネルギーと転位密度の積）である。(2) 転位は不規則に累積し増加するため、一種の確率過程であって、確率的損傷累積モデルが疲労き裂進展過程に適用されうる。(3) き裂成長の原因となる転位双極子エネルギーは巨視的なエネルギー開放率に等しい。

モード I 型疲労き裂進展のメカニズムを要約するとつぎのようになる。荷重負荷時に、エネルギー開放率 g によってき裂が長さ $\langle X \rangle$ だけ進む場合、エネルギー $g \cdot \langle X \rangle$ がき裂先端近傍の領域 D 内の空孔型転位双極子の形で累積する。そして、き裂先端から距離 $\langle X \rangle$ 以内のところまで交差するすべり帯上に転位双極子が並ぶ。このとき、すべり面に沿ってき裂進行と逆方向に移動する転位がき裂の開口に寄与し、正方向に移動する転位がへき開き裂発生に寄与する。つまり、へき開き裂の発生と開口がほぼ同時に起こることにより、き裂が進展する。

このモデルに基づき計算した数値と実験データを比較したところ、次のような結果を得た。

モード I 型疲労き裂進展機構に関する一考察

- (1) このモデルから導出した da/dn と ΔK_{eff} の関係が実験データに一致することが確認された。
- (2) $g \cdot \langle X \rangle$ がへき開き裂発生エネルギーに等しいという条件のもとで計算した ΔK_{eff} の値が $\Delta K_{\text{eff th}}$ であると考え、実験データに一致することが確認された。
- (3) き裂先端の塑性域内に含まれるすべり線上に並ぶ転位の数によって、塑性域の大きさが評価された。
- (4) このモデルを用いてストライエーション観察結果が再現された。

謝辞

材料科学および損傷累積理論について、終始有益な助言をくださった京都大学名誉教授伊原千秋博士（理学・工学）に心から謝意を表します。

参考書：

- 1 Oh, K. P. (1978) *J. Eng. Mat. Tech. Trans ASME* **100**, 170-174.
- 2 C. Ihara and A. Igarashi (1981) A damage accumulation model for fatigue crack propagation. *J Engng Mater Tech Trans. ASME* **103**, 293-297.
- 3 C. Ihara and T. Tanaka (2000) A stochastic damage accumulation model for crack initiation in high-cycle fatigue. *Fatigue Fract Engng Mater Struct* **23**, 375-380.
- 4 菅田淳・植松美彦・谷本憲史・上南恵資・橋本亜希桐・城野政弘 (2000) 機会学会論文集A編, **66** (646), 83-90.
- 5 M. Jono, A. Sugeta and Y. Uematsu (2001) Atomic force microscopy and the mechanism of fatigue crack growth. *Fatigue Fract Engng Mater Struct* **24**, 831-842.
- 6 K. Tanaka, M. Hojo and Y. Nakai (1982) Plastic deformation around a fatigue crack near threshold in 3% Si-Fe. *Mater. Sci. Engng.* **55**, 85-96.
- 7 C. Ihara and T. Tanaka (2002) A stochastic damage accumulation model for crack initiation in low cycle fatigue, 福井県立大学論集, **21**, 81-91.
- 8 J. G. Antonopoulos, L. M. Brown and A. T. Winter (1976) Vacancy dipoles in fatigued copper. *Phil. Mag.* **34**, 549-563.
- 9 L. M. Brown (1977) Dislocation substructures and the initiation of cracks by fatigue. *Metal Science* **11**, 315-320.
- 10 元屋敷靖子, 菅田淳, 植松美彦, 城野政弘 (2003) 離散転位動力学法による疲労き裂先端近傍の転位運動および応力場の検討, *材料*, **52**, 1217-1224.
- 11 R. Honda (1961) Cleavage fracture in single crystals of silicon iron, *J. Phis. Soc. Japan* **16**, 1309-1321.
- 12 B. Budiansky and J. W. Hutchinson (1978) Analysis of crack closure in fatigue crack growth. *J. Appl. Mech. Trans. ASME* **45**, 267-276.
- 13 A. H. Cottrell (1958) Theory of brittle fracture in steel and similar metals. *Trans. Met. Soc. AIME* **212**, 192-203.
- 14 J. Wasen and E. Heier (1998) Fatigue crack growth thresholds—the influence of Young's modulus and fracture surface roughness. *Int. J. Fatigue* **20**, 737-742.