

低サイクル疲労下におけるハイブリッド構造物中の
複数疲労き裂伝ばの相互作用に関する研究*塩 沢 和 章*¹, 姫 野 徹 治*²
大 島 誠 司*³, 宮 尾 嘉 寿*¹A Study on the Interaction of Multiple Ended Fatigue Crack
Propagation in Hybrid Structures under High Cyclic StressesKazuaki SHIOZAWA, Tetsuji HIMENO,
Seiji OHSHIMA, and Kajyu MIYAO

The interaction of crack propagation on multiple ended fatigue cracks in hybrid structures is examined with the coupled compact tension specimens of 0.45%C carbon steel and A2017-T4 aluminum alloy under high cyclic stresses. The crack propagation behavior of coupled specimens fatigued under the stress ratio of 0.05 and 0.7 is compared with that of single cracked specimen. The deviation of crack propagation rate from the stable relation between the rate and ΔK of a single specimen is found to take place with the difference of crack closure and the onset of the ratcheting extension of specimens. The crack growth acceleration is affected by another specimen coupled because of the incomplete reversal of plastic deformation in ratcheting deformation. Based on the theoretical prediction of an interaction curve for crack growth of a coupled specimen, it is concluded that multiple ended fatigue cracks under high cyclic stresses propagate with a mechanism such that the increment of total strain energy release per cycle in a hybrid body including some cracks is distributed to each crack with the ratio of strain constraint factor.

Key Words: Fatigue, Crack Growth, Hybrid Structure, Ratcheting Deformation, Energy Release Rate, Interaction Curve, Carbon Steel, Aluminum Alloy

1. 緒 言

複数のき裂端を有する構造物の疲労き裂進展の相互作用を明らかにするための一連の基礎的研究として、これまでに2枚のコンパクトテンション(CT)試験片を組合せたモデル実験を行い、同種材料⁽¹⁾および異種材料⁽²⁾⁽³⁾の高サイクル下における組合せ疲労き裂伝ば挙動について検討してきた。さらに、前報⁽⁴⁾ではラチェット変形を生ずる高応力下での炭素鋼(JIS S 45 C)同種材の組合せ低サイクル疲労実験を行い、き裂伝ば挙動に検討を加えてきた。これまでのいずれの実験条件下においても、組合せ各試験片のき裂伝ばは単一試験片のそれに比較して加速または減速を生ずることが実験的に明らかとなった。この原因として組合せ各試験片のき裂壁面に起因するき裂開閉挙動の相違、変形が引張方向に蓄積していくラチェット変形の差異並びに破壊モードの遷移時期の違いなどが考えられた。これらの因子は組合せ各試験片のき裂長さの違いによる拘束の程度や試験片材料の違いによって影響を受

け、き裂伝ば挙動は複雑に変化する。

本研究では、前報に引続きラチェット変形を生ずる高応力下の低サイクル疲労中のき裂伝ばの相互作用を明らかにするために、炭素鋼(JIS S 45 C)とアルミニウム合金(A 2017-T 4)の異種材組合せによる低サイクル疲労実験を行い、降伏応力および弾性係数の違いによる相互作用の機構について検討した。また、前報までに提案した組合せ疲労のき裂伝ば経路の推定法の妥当性を調べ、き裂伝ば機構をエネルギー解放率を基礎に考察した。

2. 試験片および実験方法

2・1 供試材および試験片 本研究に用いた試験片材料は機械構造用炭素鋼 JIS S 45 C およびアルミニウム合金 A 2017-T 4 であり、前者は 1 138 K, 30 min 保持後空冷の焼ならしの熱処理を行った後、また後者は 655 K, 60 min 保持後空冷, 733 K, 30 min 保持後水冷, その後自然時効の T 4 熱処理を行った後、図 1 に示す形状のコンパクトテンション試験片に機械加工した。なお、切欠先端は放電加工により成形し、試験片側面にはサイドグループを付した。供試材の化学成分を表 1 に、熱処理後の機械的性質を表 2 にそれぞれ示す。

* 昭和 63 年 10 月 19 日 第 66 期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 3 月 29 日。

¹ 正員、富山大学工学部 (〒930 富山市五福 3190)。

² 准員、富山県立富山工業高等学校 (〒930 富山市五福 2238)。

³ 学生員、富山大学大学院。

あらかじめ試験片には疲労予き裂を導入し、組合せ実験のため初期き裂長さの異なる試験片対を用意した。試験片作成法の詳細は前報⁽⁴⁾と同様であり、ここでは省略する。

2.2 実験方法 き裂伝ば試験は動的最大荷重 49 kN の電気・油圧制御式疲労試験機を用い、室温・大気中で応力比 $R=0.05$ のとき繰返し速度 $f=1$ Hz, 応力比 $R=0.7$ のとき $f=5$ Hz の正弦波, 荷重制御繰返し引張荷重下で行った。

き裂長さの測定は移動読取り顕微鏡(読取り精度 1/100 mm)によった。また、試験片の荷重-荷重点変位はクリップゲージを用いて、疲労試験中に繰返し速度を 0.2 Hz に落して 2 ペン式 X-Y レコーダによって記録した。

き裂長さ a_1 および a_2 の 2 枚のコンパクトテンション試験片をピンで結合して総荷重 P_0 を負荷すると、各試験片には荷重配分 P_1, P_2 を生じ次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} P_0 + \frac{V_{pl,2} - V_{pl,1}}{\lambda_1 + \lambda_2} \\ P_2 &= \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} P_0 - \frac{V_{pl,2} - V_{pl,1}}{\lambda_1 + \lambda_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\lambda_i (i=1, 2)$ および $V_{pl,i}$ は各試験片のコンプライアンス、塑性変位であり、詳細は前報⁽⁴⁾で述べたので省略する。各試験片のき裂端における応力拡大係数は上式で求めた荷重を用いて求めることができる。疲労の場合には総負荷荷重 P_0 の変動分を ΔP_0 として、各試験片の荷重変動分 ΔP_i を求めて応力拡大係数 ΔK_i を求めることができる⁽⁴⁾。なお、低サイクル疲労き裂伝ばの支配力学量として J 積分範囲 ΔJ が有効であるとされてきているが、ラチェット変形を生ずるような荷重制御試験の全面降伏状態ではその適用限界のあること⁽⁵⁾⁽⁶⁾が指摘されており、このような状態におけるき裂伝ばの支配力学的パラメータは明らかにされていない。本研究では前報⁽⁴⁾と同様主として応力拡大係数による整理を行い、ラチェット変形を生ずる条件下のき裂伝ばの支配力学量については、き裂伝ばの相互作用との関連で考察した。

3. 実験結果および考察

3.1 き裂伝ば挙動 本実験を通じて得られたき裂伝ば速度 da/dN と応力拡大係数幅 ΔK の関係を図 2 にまとめて示す。(a) および (b) 図はそれぞれ $R=0.05, R=0.7$ の結果である。図中の実線はアルミニウム合金および炭素鋼⁽⁴⁾のそれぞれの単一試験片から得た結果を実験点を省略して示したもの(LSY と略記)である。また、これまでに報告した高サイクル疲労下の $da/dN-\Delta K$ 関係⁽¹⁾⁻⁽³⁾ の中間領域を延長して図中の破線(SSY と略記)で示した。これらの図より明らかにように、本実験条件の高荷重下の実験において単一試験片のき裂伝ば速度は SSY のそれを逸脱して、き裂伝ばの加速を生じている。これは弾塑性条件下におけるラチェット変形の影響、破壊モードの変化の影響によるものである⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

ラチェット変形を生ずる場合、繰返し塑性域の大きさは減少し、単調モードのき裂伝ば様式に移行する。この場合のき裂伝ば速度の最大値は次式で与えられる⁽⁴⁾。

$$\frac{da}{dN} = C \cdot 2^{m/2} \left(\frac{\Delta K}{\sqrt{E\sigma_{ys}}} \right)^m = C' \cdot 2^{m/2} (\Delta K)^m \dots (2)$$

一方、完全な繰返し塑性域を生ずる場合のき裂伝ば速度は次式となる。

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \left(\frac{\Delta K}{\sqrt{E\sigma_{ys}}} \right)^m = C' \cdot (\Delta K)^m \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 E, σ_{ys} はそれぞれヤング係数および降伏応力

表 1 供試材の化学組成

JIS S45C (wt%)							
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.43	0.24	0.77	0.027	0.009	0.10	0.20	0.15

A2017-T4 (wt%)								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.54	0.32	4.16	0.72	0.57	0.03	0.16	0.04	BAL

表 2 供試材の機械的性質

	Yield strength	Tensile strength	Elongation	Young's modulus
S45C	510 MPa	784 MPa	22.1 %	210 GPa
A2017-T4	350 MPa	531 MPa	23.0 %	70.6 GPa

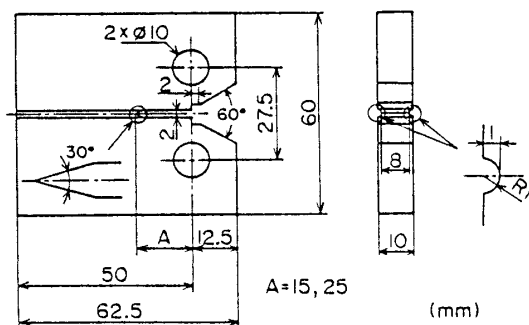


図 1 試験片の形状および寸法

であり、 C, C', m は定数である。式(3)の関係は小規模降伏条件下のき裂伝ば速度式(SSY)に対応するものとして、これをもとに式(2)の関係を求めて図2に一点鎖線で示した。単一き裂材のき裂伝ば速度は ΔK の小さい時式(3)の関係を満たし、 ΔK の増加に伴って式(2)の関係、すなわち単調モードのき裂伝ばに近付くことがわかる。なお、 ΔK の大きな領域でラチェット変形による加速以上の急激なき裂伝ばを示すが、これは負荷荷重の大きなことより破壊モードの遷移によるものである。

異なる初期き裂長さ a_0 をもつ炭素鋼およびアルミニウム合金の2枚のCT試験片の組合せ試験より得た $da/dN-\Delta K$ 関係を図2の実験点で示した。なお、 ΔK は2章で述べた方法により、ラチェット変形 V_{pl} を用いて各試験片の荷重配分を考慮して求めた。実験は a_0 の組合せを変えることによって、実験開始時の変位拘束係数 x_0 を種々に変えたものである。なお、変位拘束係数 x は組合せ試験片のコンプライアンスを λ_1 および λ_2 として、次式で定義されるものである⁽⁷⁾。

$$x = \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2) \dots\dots\dots (4)$$

これはき裂長さ a_1 をもつ炭素鋼材(コンプライアンス λ_1)のき裂長さ a_2 をもつアルミニウム合金材(同 λ_2)による拘束の程度を表すもので、0~1の値をとる。また、両試験片のき裂長さが等しい場合の x の値は0.236であり、 $x=0.5$ は相互に及ぼす拘束の程度が同一であることを意味する。

実験結果より、組合せ各試験片のき裂伝ば速度は単

一材のそれ(LSY)と比較して加速または減速を生じており、これらの傾向は前報の同種材の組合せ実験結果⁽⁴⁾と同様である。 $R=0.05$ および0.7のいずれの場合においても、 x_0 が0.5以下ではコンプライアンスが炭素鋼材に比較して大きなアルミニウム合金材のき裂伝ばの加速が顕著であり、その程度は変位拘束度係数に依存することがわかる。なお、 $x_0=0.674(R=0.05)$ および $x_0=0.651(R=0.7)$ ではアルミニウム合金材の減速、炭素鋼材の加速が見受けられる。

アルミニウム合金材のき裂伝ばの加速はラチェット変形にその原因を求めることができる。式(2)から求めたき裂伝ば速度との比較より、単調モードのき裂伝ば様式に移行する時期が単一き裂材よりも早くなる。これは相手き裂材の影響を受けてラチェット変形が大きく現れることによると考えられ、次節で検討する。

3.2 ラチェット変形とき裂開口挙動 実験中測定した荷重-荷重点変位曲線より、き裂開口を無視して荷重零の点に外挿した荷重点変位の塑性成分で定義したラチェット変形 V_{pl} と最大応力拡大係数 K_{max} の関係を図3に示す。図中の実線はアルミニウム合金および炭素鋼⁽⁴⁾のそれぞれ単一き裂材から得た $V_{pl}-K_{max}$ 関係である。図より明らかなように、組合せ各試験片の V_{pl} は単一材のそれと異なり、コンプライアンスの大きいアルミニウム合金材の V_{pl} は単一材のそれよりも大きく、逆に炭素鋼材のそれは小さいことがわかる。これらの現象は同種材の組合せ実験と同様の傾向を示し、コンプライアンスの差の大きいき裂材の

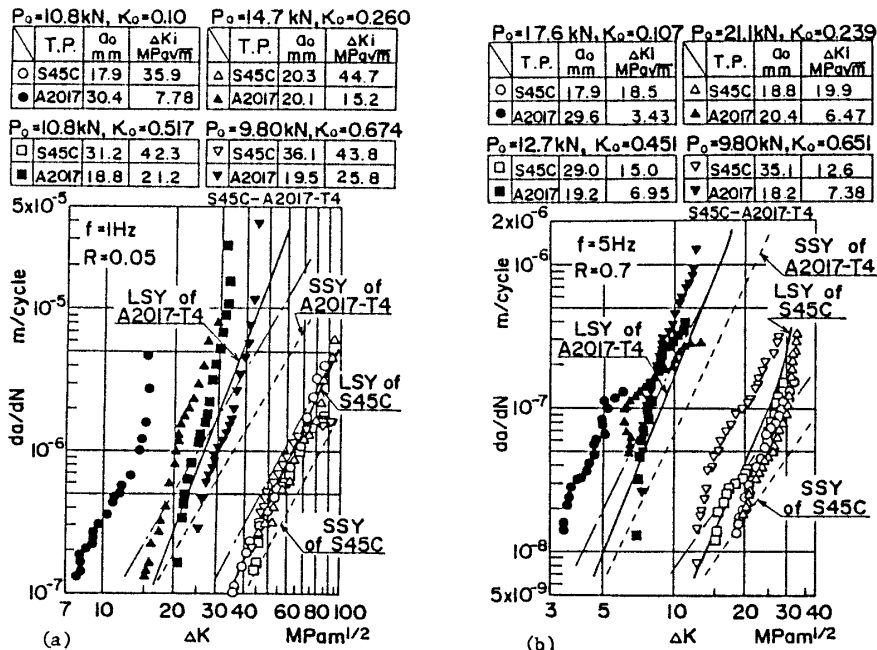


図2 異種材組合せCT試験片の $da/dN-\Delta K$ 線図

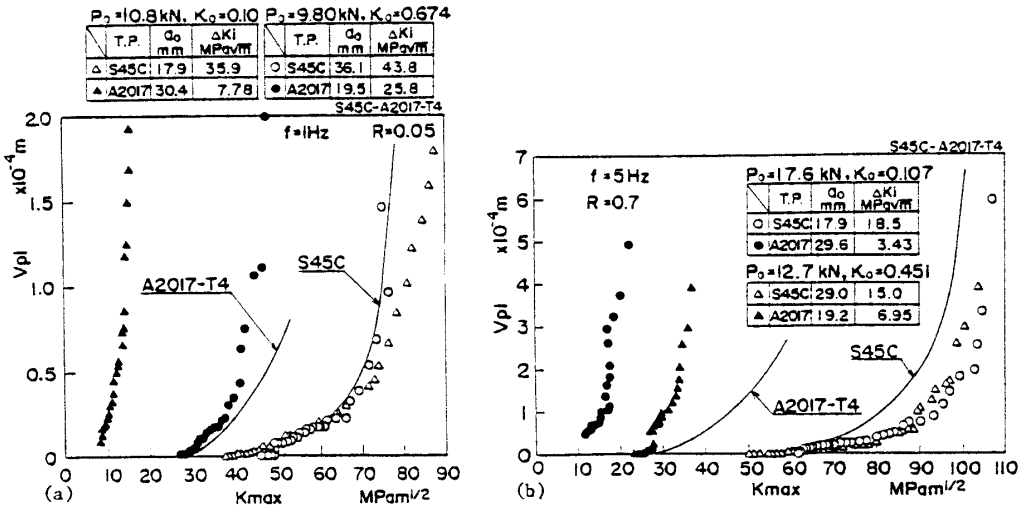


図3 異種材組合せ試験のラチェット変形 V_{pl} - K_{max} 線図

組合せに対して V_{pl} の差異も大きく現れる。

前節で述べたき裂伝ばの加速または減速の原因として、相手き裂材によるき裂開閉口挙動の変化および上述したラチェット変形挙動の差異が考えられる。ラチェット変形は試験片の塑性変形が完全な繰返し状態にないときに発生し、繰返しに伴って一方に蓄積する。単一き裂材のラチェット変形 V_{pl} はき裂開口比 U がほぼ1に達するあたりから急激に増加することが観察されており⁽⁴⁾⁽⁵⁾、ラチェット変形とき裂開閉口とは無関係ではない。

図4は組合せ各試験片のき裂開口比 U と ΔK の関係を示したものである。図中の実線および破線はアルミニウム合金および炭素鋼の各単一き裂材の U - ΔK 関係を示したものである。組合せ各試験片の U の変化挙動は単一き裂材のそれと異なり、コンプライアンスの大きなアルミニウム合金材の U 値は大きく、低 ΔK 域から開口しており、1に近い値をとる。これは変位拘束係数 x の値に依存する。また、これら U 値の変化挙動とラチェット変形の大小関係は対応していることがわかる。

3.3 き裂伝ば加速の機構 図2に示した da/dN - ΔK 線図において最大の加速を生じた時の da/dN とその ΔK に対応する単一き裂材のそれ $(da/dN)_{single}$ との比と実験開始時における変位拘束係数 x_0 との関係を図5に示す。図中には前報⁽⁴⁾で述べた炭素鋼 S45C 同種材の実験結果を破線 ($R=0.05$) および一点鎖線 ($R=0.7$) で併記した。図よりき裂伝ばの加速は x 依存性を示すことがわかる。

前報の実験におけるき裂伝ば加速の応力比 R 依存性はき裂伝ば挙動に及ぼすき裂開閉口挙動の差異によるものであることを明らかにした。これは $R=0.05$ の

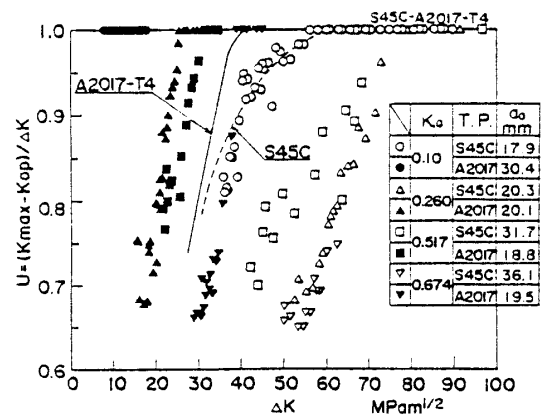


図4 異種材組合せCT試験片のき裂開口比 U と ΔK の関係

実験においては有効応力拡大係数 ΔK_{eff} による整理によって、 $R=0.7$ の結果に一致することから類推されたものである。本研究における異種材の組合せ実験においては、図5より明らかなように応力比 R によるき裂伝ば速度の加速の差異が小さい。したがって、この場合き裂伝ばの加速の原因は主としてラチェット変形の影響によるものと考えられる。

変位拘束係数 x は式(4)の定義からも明らかなように、材料の降伏応力、き裂の伝ば機構などの影響を含んでいない。これまでに述べてきたき裂伝ばの加速を説明するためには、き裂伝ばの機構を反映した力学量が必要である。

一般に、単調モードのき裂伝ばにおけるき裂先端部の開口変位は降伏応力 σ_{ys} の逆数に比例する。一方、繰返し変形によるき裂伝ば様式の場合には開口変位は $2\sigma_{ys}$ の逆数に比例する。3.1節で述べたように組合せ各試験片のき裂伝ば様式は異なり、本実験の x_0 が0.5

以下においてはアルミニウム合金材のき裂が単調モード、炭素鋼材のき裂が繰返し変形モードである。したがって、前者のき裂開口変位はアルミニウム合金の降伏応力 $\sigma_{ys,A}$ の逆数に、また後者は炭素鋼のそれ $\sigma_{ys,S}$ の2倍の逆数に比例する。これらの伝ば挙動の影響を変位拘束度係数に考慮して、修正変位拘束度係数を次式のように定義する。

$$x_m = (\sigma_{ys,A} / 2\sigma_{ys,S})x \quad \dots\dots\dots (5)$$

図6は式(5)を用いて図5を再整理した結果を示したものである。なお、図中には炭素鋼同種材の組合せ実験結果⁽⁴⁾も同様にして再整理した結果も示した。図から明らかなように、いずれの実験結果も修正変位拘束度係数によって1本のなだらかな曲線で整理できることがわかる。したがって、き裂進展の相互作用を考える場合には各き裂の伝ば様式を考慮する必要のあることが理解できる。

3.4 き裂伝ばの相互作用曲線 弾塑性条件下における組合せ疲労き裂の伝ば経路はラチェット変位を考慮したひずみエネルギー解放率をもとに推定できることを前報⁽⁴⁾で示した。この方法は、相互作用下のき裂伝ばは系のエネルギー解放率が変位拘束度係数の比に各き裂に配分される機構に従うと考えるものである。すなわち、疲労の1サイクル当たり解放される系のエネルギー Δg_N は各き裂のエネルギー解放率 Δg_{N1} と Δg_{N2} の和で与えられ次式となる。

$$\Delta g_N = \Delta g_{N1} + \Delta g_{N2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、

$$\Delta g_N = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1}{2} \Delta P_i^2 \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_i} + \Delta P_i \frac{\partial V_{pl,i}}{\partial a_i} \right) \frac{1}{B_i} \frac{da_i}{dN} \quad \dots\dots\dots (7)$$

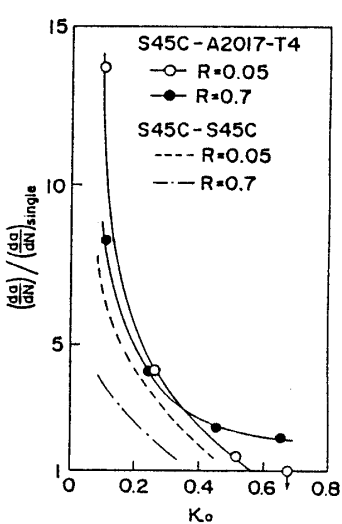


図5 き裂伝ば速度比と変位拘束度係数との関係

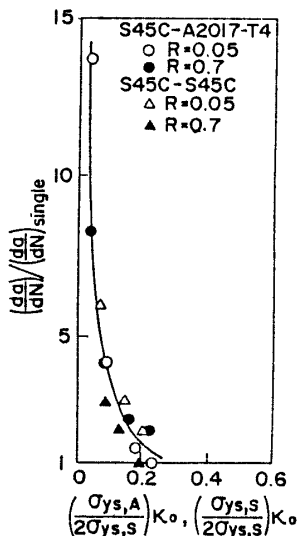


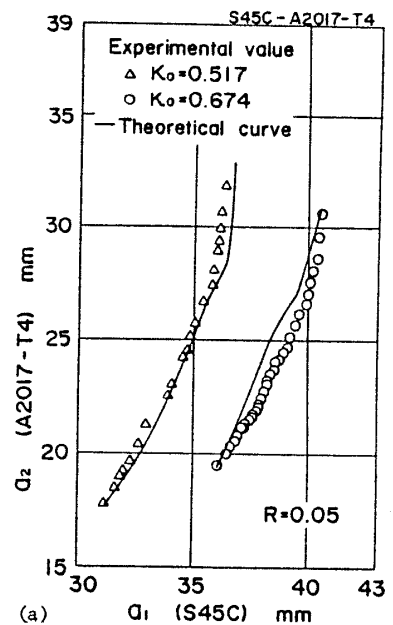
図6 き裂伝ば速度比の修正変位拘束度係数による整理

$$\Delta g_{N1} = (1-x)\Delta g_N, \Delta g_{N2} = x\Delta g_N \quad \dots\dots\dots (8)$$

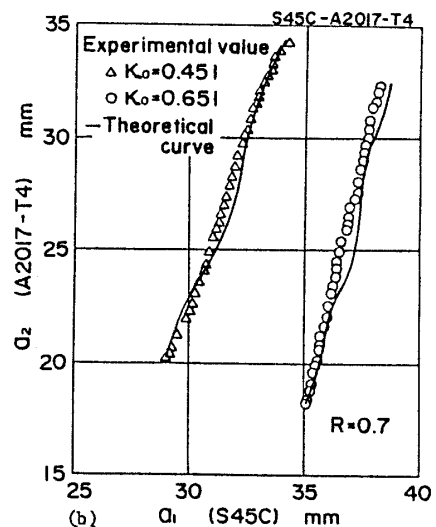
推定の手法はこれまでに報告してきたと同様であるので詳細は省略する。なお、推定に使用するき裂伝ば速度式は単一き裂材から得た結果を用いた。

計算結果を実験結果と併せて図7に示す。図より、本推定方法によって前報の同種材組合せ実験結果と同様、異種材の組合せによるき裂伝ばの相互作用曲線を精度よく推定できることがわかる。また、異種材の低サイクル疲労下における複数き裂の伝ばは複数のき裂が疲労の1サイクル当たり解放する総エネルギーを変位拘束度係数の比に各き裂に配分する機構にしたがうものであることが明らかとなった。

図8は式(8)より求めた Δg_{N1} および Δg_{N2} を用い

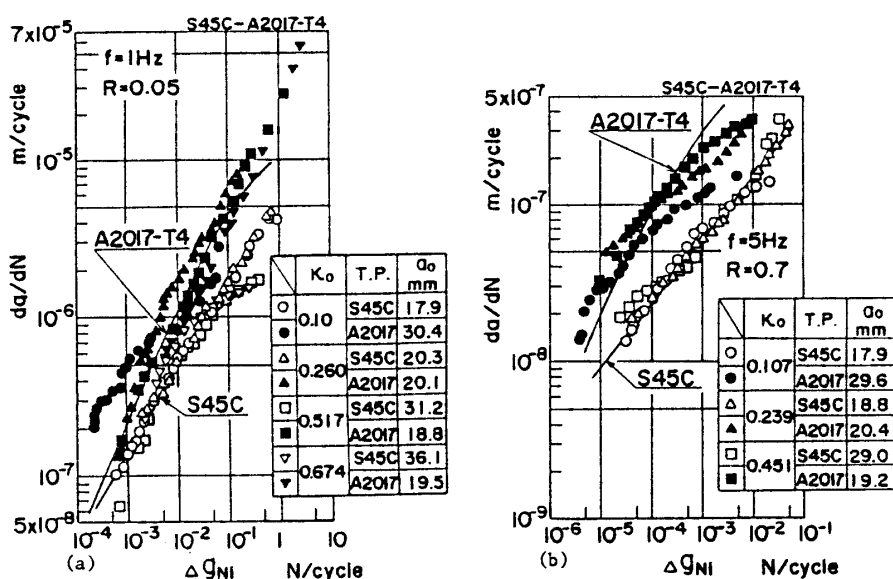


(a)



(b)

図7 き裂伝ば経路の実験結果と推定結果

図 8 異種材組合せ CT 試験片の $da/dN-\Delta q_N$ 線図

てき裂伝ば速度 da/dN を再整理した結果を示したものである。図中の実線はそれぞれの材料の単一き裂材の結果である。組合せ各試験片の da/dN は単一材のそれとよい対応を示すことがわかり、ラチェット変形を伴う弾塑性条件下の疲労き裂伝ばの相互作用に対する支配力学量として 1 サイクル当たりのひずみエネルギー解放率を用いることは有効であると考えられる。

4. 結 言

複数のき裂端を有するハイブリッド構造物の低サイクル疲労き裂伝ばの相互作用を明らかにするための基礎的研究として、炭素鋼 S45C 焼ならし材とアルミニウム合金 A2017-T4 の異種材を用いて異なるき裂長さをもつ 2 枚の CT 試験片の組合せ疲労実験を行った。得られた主な結果は以下のとおりである。

(1) 低サイクル高応力下の疲労において、異種材組合せ疲労試験片のき裂伝ば速度は単一材のそれに比較して加速または減速を生ずる。

(2) このき裂伝ばの加速または減速は変位拘束度係数に依存し、き裂間の相互作用によるき裂の開閉口挙動の差異およびラチェット変形によるものである。

(3) ラチェット変形量は相手き裂材の影響を受けて変化し、単一き裂材のそれとは異なる。ラチェット

変形の変化挙動はき裂伝ば機構の繰返し変形から単調モードへの遷移を表わしており、その遷移時期はき裂間の相互作用によって変わる。

(4) き裂伝ばの相互作用を検討するためには、相手き裂も含めてき裂伝ば機構の変化を考慮する必要があることが指摘された。

(5) 複数き裂の低サイクル疲労き裂伝ばは系の総ひずみエネルギー解放率の増分が個々のき裂に変位拘束度係数の比に配分される機構に従うものであり、き裂伝ば速度はこのひずみエネルギー解放率を用いて整理できる。

終わりに、本実験を行うに際してご協力を得た富山大学文部技官・友坂敏信氏、また、卒業研究の一環としてご助力を得た、当時富山大学学生・北村和人君〔現在北陸ハーネス(株)〕に謝意を表する。

文 献

- (1) 塩沢, 機論, 51-464, A(昭60), 1168.
- (2) 塩沢・ほか2名, 機論, 52-473, A(昭61), 73.
- (3) 塩沢・ほか2名, 機論, 52-478, A(昭61), 1469.
- (4) 塩沢・ほか2名, 機論, 53-494, A(昭62), 1879.
- (5) 星出・ほか2名, 材料, 31-345(昭56), 566.
- (6) Tanaka, K., Hoshide, T. and Nakata, M., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 803(1983), 708.
- (7) 岡村・ほか2名, 機論, 41-348(昭50), 2247.