

多軸応力下での疲労き裂成長速度におよぼす 応力成分相互作用効果†

横 堀 寿 光* 磯 貝 毅**
横 堀 武 夫*** 小 泉 幸 久****

Effect of Stress Components on Fatigue Crack Growth Rate under Multiaxial Stress Condition

by

Toshimitsu A. YOKOBORI*, Takeshi ISOGAI**, Takeo YOKOBORI***
and Yukihsa KOIZUMI****

Multiaxial fatigue tests were carried out to investigate the effect of stress components ($\Delta\sigma$, $\Delta\tau$, σ_{st} , τ_{st}) on fatigue crack growth.

The test method was the combined tension and torsion one in phase loading by using thin-walled hollow cylindrical specimens with pre-cracks. The experiments were carried out under the condition of equal equivalent stress amplitude, $\Delta\sigma_{eq} = \sqrt{\Delta\sigma^2 + 3\Delta\tau^2}$

Under the condition of mixed modes, the fatigue crack growth rate increases remarkably with increasing stress ratio. This characteristics is due to the effect of static tensile stress σ_{st} on $\Delta\tau$.

In this paper, the effect of static tensile stress was incorporated in the constitutive equation of fatigue crack growth rate under the mixed mode fatigue condition of $\Delta\sigma$ and $\Delta\tau$. Then, the following constitutive equation of fatigue crack growth rate including the effects of $\Delta\sigma$, $\Delta\tau$, σ_{st} and τ_{st} was obtained.

$$db/dN = A(\Delta K_{Ib})^m$$

$$A = (A_{R=0})^{1/r^*}$$

$$r^* = \begin{cases} 1 + (\sigma_{st}/\Delta\tau)^{1/2}/7 & \text{(Region IIa)} \\ 1 & \text{(Region IIb)} \end{cases}$$

$$A_{R=0} = \begin{cases} 2.16 \times 10^{-5} \times 0.230^m & \text{(Region IIa)} \\ 3.64 \times 10^{-5} \times 0.147^m & \text{(Region IIb)} \end{cases}$$

$$m = \begin{cases} f(\sigma_2/\sigma_1) & \text{(Region IIa)} \\ g(\sigma_2/\sigma_1) & \text{(Region IIb)} \end{cases}$$

Key words : Multiaxial fatigue crack growth rate, Effect of stress ratio, Effect of static tensile stress, Effect of static torsional stress, Effect of stress component

1 緒 言

常温における混合モード、多軸応力下での疲労き裂成長挙動に関する研究は数多くなされている。^{1)~10)} また最近、高温多軸応力下での疲労挙動に関する研究も進められている。^{11)~13)} 多軸応力下での疲労挙動の実験方法として、薄肉中空円筒試験片に引張り・ねじり組合せ荷重を負荷する方法が提案されている。この方法は常温・高温を通じて、荷重条件としては引張りからせん断、

また初期き裂が存在する時は初期き裂に対して Mode I から Mode II にわたる統一的な実験を行える特徴を有している。著者らはこの方法を用いて常温での混合モード疲労挙動に関する研究を進めてきた。^{7)~10)}

ところで疲労き裂成長の理論¹⁴⁾は、基本となる引張負荷に対して明らかにされている。これは初めに実験により物理的諸現象が明らかにされたのち、それを基にした物理モデルの構築と理論解析により導かれたもの

† 原稿受理 平成元年10月5日 Received Oct. 5, 1989

* 正 会 員 東北大学工学部 仙台市青葉区荒巻字青葉, Department of Mechanical Engineering II, Tohoku University, Aramaki, Aoba, Sendai

** 正 会 員 帝京大学理工学部 宇都宮市長岡町, School of Science and Engineering, Teikyo University, Nagaoka-cho, Utsunomiya

*** 名誉会員 帝京大学理工学部 宇都宮市長岡町, School of Science and Engineering, Teikyo University, Nagaoka-cho, Utsunomiya

**** (株)日立製作所 横浜市戸塚区, Hitachi Ltd., Totsuka-ku, Yokohama

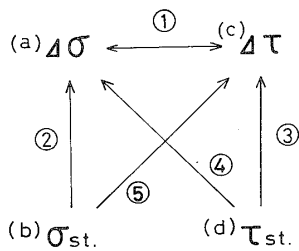


Fig. 1. The effects of stress components on the fatigue crack growth rate under multiaxial stress condition.

である。したがって、混合モード・多軸応力負荷の場合も疲労の理論を導出するには種々の破壊力学クライテリアをそのまま当てはめるのではなく、まず最初に多軸効果がどのようにき裂伝ばに寄与するのを実験的に明らかにする必要がある。著者等はこのような考え方から、既に実験的にも理論的にも裏づけが与えられている引張応力下での疲労き裂成長速度式を基にして、これに多軸応力効果がどのように寄与してくるかという観点で実験結果の検討を行ってきた。そして、多軸効果を考慮にいたした疲労き裂成長速度、寿命の実験的構成則を求めた。^{7)~10)}

ところで、引張り・せん断組合せ応力による多軸応力条件下での疲労挙動は負荷応力レベルにも複雑に影響される。その影響因子を模式的に表したものを Fig. 1 に示す。多軸疲労負荷では、この図に示されるように単軸引張疲労負荷と異なり、①引張応力振幅 $\Delta\sigma$ とせん断応力振幅 $\Delta\tau$ の組合せ応力効果、②応力比の効果としての静的引張応力 σ_{st} と引張応力振幅 $\Delta\sigma$ 、③同じく静的せん断応力 τ_{st} とせん断応力振幅 $\Delta\tau$ 、④静的せん断応力 τ_{st} が $\Delta\sigma$ に及ぼす効果、⑤静的引張応力 σ_{st} が $\Delta\tau$ に及ぼす効果、が考えられる。そこで著者らは、初めに応力組合せ効果 ($\Delta\sigma$, $\Delta\tau$) のみを明らかにするため、相当応力振幅 $\Delta\sigma_{eq}$ を一定にした引張り・せん断組合せ疲労試験 (応力比 $R=0$) を行ってきた。^{9),10)}

そこで本研究では、さらに Fig. 1 に示す形で多軸応力下での疲労き裂成長挙動に及ぼす種々の応力効果に

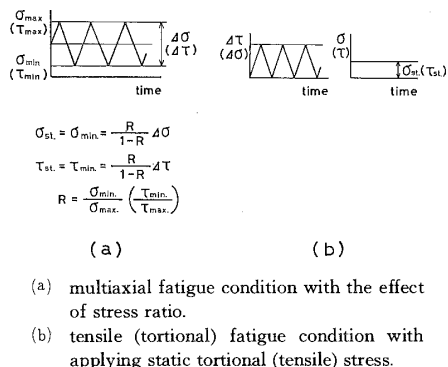


Fig. 2. The definition of σ_{st} .

ついて検討を行った。ここで σ_{st} , τ_{st} の定義を Fig. 2 に示す。すなわち、Fig. 2(a)は応力比効果を有する多軸疲労負荷条件の場合の σ_{st} , τ_{st} の定義を示したものである。Fig. 2(b)はせん断 (引張) 疲労に、静的引張り (せん断) の異種応力を負荷したときの σ_{st} , τ_{st} の定義を示したものである。本論文ではこの (a), (b) 2種類の実験を行った。

2 供試材および実験方法

供試材は、アルミニウム合金 5083P-O 材であり、その化学成分および機械的性質をそれぞれ Table I, Table II に示す。試験片は圧延方向と試験片軸方向が一致するようにして、Fig. 3 に示すような薄肉中空円筒試験片に加工した。そしてスリットを付し、エメリー紙 06 まで研磨したのちバフ仕上げを行った。そして最後に本実験で用いたのと同様の試験機にて、引張応力振幅 $\Delta\sigma=121.6$ MPa の条件にて全長約 2 mm の疲労予き裂を導入した。また、せん断疲労負荷条件 ($\Delta K_{II0}/\Delta K_{I0}=\infty$) に関してはスリット材に直接、せん断疲労荷重を負荷して行った。

試験機は任意の比の引張り・せん断組合せ荷重状態が得られるように試作した組合せ引張り・ねじり疲労試験機を用いた。この試験機では最大引張応力 σ_{max} と最大せん断応力 τ_{max} を種々の比に設定し、この比を一定に保ちつつ、同位相にて引張り・ねじり組合せ疲労試験を行うことができる。また静的せん断応力 τ_{st} 負荷のもとでの引張疲労試験および静的引張応力 σ_{st} 負荷のもとでのせん断疲労試験を行うことができる。

本論文では、(1)平均応力を有する引張り・せん断混合モード疲労試験 (Fig. 2(a)), および(2)静的せん断応力負荷のもとでの引張疲労試験 [τ_{st} , $\Delta\sigma$] および静的引張応力負荷のもとでのせん断疲労試験 [σ_{st} , $\Delta\tau$] (Fig. 2(b)) を行った。(1), (2)の実験とも室温大

Table I. Chemical composition (wt %).

Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti
0.02	0.15	0.21	0.78	4.73	0.01	0.13	0.01

Table II. Mechanical properties.

Proof stress (MPa)	Shearing proof stress (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)
152.0	89.2	321.7	22.5

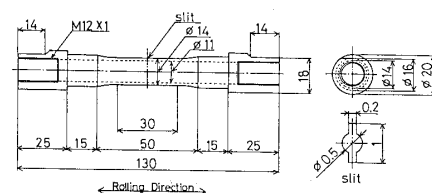


Fig. 3. Specimen geometry (dimension in mm).

Table III. The condition of multiaxial fatigue test (1).

No.	1	2	3	4	5	6
R	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
a (mm)	0.987	1.090	0.871	1.161	1.278	0.617
σ_{\min} (MPa)	13.51	13.51	10.68	10.68	5.560	0
σ_{\max} (MPa)	135.1	135.1	106.8	106.8	55.57	0
$\Delta\sigma$ (MPa)	121.6	121.6	96.11	96.11	50.01	0
τ_{\min} (MPa)	0	0	4.795	4.795	7.119	7.806
τ_{\max} (MPa)	0	0	47.93	47.93	71.17	78.02
$\Delta\tau$ (MPa)	0	0	43.15	43.15	64.05	70.21
$\Delta\tau/\Delta\sigma$	0	0	0.45	0.45	1.28	∞
σ_2/σ_1	0	0	-0.15	-0.15	-0.47	-1.0
ϕ	0°	0°	20.96°	20.96°	34.34°	45.00°
$K_{I0\min}$	0.772	0.813	0.571	0.664	0.364	0
$K_{I0\max}$	7.716	8.131	5.713	6.643	3.639	0
$K_{II0\min}$	0	0	0.257	0.299	0.467	0.344
$K_{II0\max}$	0	0	2.569	2.990	4.671	3.435
ΔK_{I0}	6.944	7.319	5.140	5.980	3.274	0
ΔK_{II0}	0	0	2.312	2.691	4.207	3.091
$\Delta K_{II0}/\Delta K_{I0}$	0	0	0.45	0.45	1.28	∞

(slit)

 ΔK_{I0} : Initial mode I stress intensity range component (MPam^{1/2}). ΔK_{II0} : Initial mode II stress intensity range component (MPam^{1/2}).

空中, 繰返し負荷速度 4c.p.m. の条件にて行った。

(1) の実験では応力比 $R=0.1$ とした。(2) の実験においては τ_{st} , σ_{st} の値は, それぞれ(1)の実験におけるせん断疲労条件, および引張疲労条件における τ_{\min} , σ_{\min} の値を用いた。

本実験では引張応力振幅 $\Delta\sigma$ とせん断応力振幅 $\Delta\tau$ の間に次のような相当応力振幅 $\Delta\sigma_{eq}$ 一定の条件が成立するようにして実験を行った。

$$\Delta\sigma_{eq} = (\Delta\sigma^2 + 3\Delta\tau^2)^{1/2} = 121.6 \text{ MPa} \quad (1)$$

(1) および(2)の実験条件をそれぞれ Table III および Table IV に示す。ここで ΔK_{I0} , ΔK_{II0} は水平方向初期き裂長さ $2a$ に対する中空円筒の解より求めた初期応力拡大係数振幅である。また, せん断疲労負荷条件 ($\Delta K_{II0}/\Delta K_{I0} = \infty$) では, 前に述べたように予き裂を導入しないスリット材を用いた実験を行った。これらの実験結果を, 同一の試験片を用いて既に行われている応力比 $R=0$ の結果と比較検討した。またせん断疲労負荷条件 ($\Delta K_{II0}/\Delta K_{I0} = \infty$) においては試験片直径 $\phi=24 \text{ mm}$ の別の試験片にて行った結果⁹⁾も, 合わせて考察した。き裂長さの測定は前報^{9),10)}と同様に連続写真を撮影し, これらの写真より測定する方法で行った。

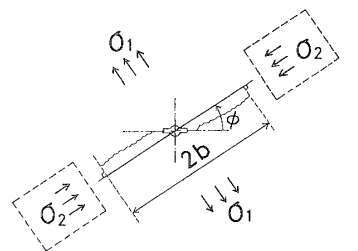
引張り・せん断組合せによる本実験方法では, 初期き裂に対しては Mode I から Mode II にわたる混合モ

Table IV. The condition of multiaxial fatigue test (2).

Sp. No.	7	8
Stress condition	$\tau_{st}, \Delta\sigma$	$\sigma_{st}, \Delta\tau$
R	0	0
a (mm)	1.254	1.626
$\Delta\sigma$ (MPa)	121.6	0
$\Delta\tau$ (MPa)	0	70.21
σ_{st} (MPa)	0	13.51
τ_{st} (MPa)	7.806	0
$\Delta\tau/\Delta\sigma$	0	∞
$\Delta\sigma_2/\Delta\sigma_1$	0	-1.0
ϕ	0°	45.00°
ΔK_{I0} (MPam ^{1/2})	9.061	0
ΔK_{II0} (MPam ^{1/2})	0	4.545
K_{I0st} (MPam ^{1/2})	0	0.877
K_{II0st} (MPam ^{1/2})	0.580	0
$\Delta K_{II0}/\Delta K_{I0}$	0	∞

 ΔK_{I0} : Initial mode I stress intensity range component. ΔK_{II0} : Initial mode II stress intensity range component. K_{I0st} : Initial stress intensity factor of static mode I component. K_{II0st} : Initial stress intensity factor of static mode II component.

ード疲労荷重が負荷されている。しかし著者らの実験によると, Fig. 4 に示すように疲労き裂は発生後すぐに最大引張主応力に垂直な方向に遷移して進展し, 引張圧縮二軸応力下でのき裂進展挙動となる。⁷⁾⁻¹⁰⁾ところで引張応力に垂直に疲労き裂が進展するときは, 初期き裂の傾斜角の影響は小さく, 引張応力に垂直な方向に投影したき裂長さで評価しても良い近似を与えることが示されている。¹⁾ また引張疲労条件に対しては疲労き裂成長速度式は式(2)の形で表される¹⁴⁾ことが実験的にも理論的にも裏づけられている。本論文ではこのような観点から, 最大引張主応力 σ_1 とそれに垂直な方向

 σ_1 : maximum principal stress σ_2 : minimum principal stress ϕ : angle between the direction normal to the maximum principal

tensile stress and the direction normal to the specimen axis

 b : half length of the crack projected on the line perpendicular

to the direction of maximum principal tensile stress

Fig. 4. Model of crack length b , projected perpendicular to the maximum principal tensile direction.

へ投影したき裂長さ $2b$ を用いて式 (2) の形で疲労き裂成長速度を評価する。そして式 (2) の定数 A , m に及ぼす圧縮応力効果として多軸効果について検討を行う。

$$\frac{db}{dN} = A(\Delta K_{Ib})^m \quad (2)$$

ここで, $\Delta K_{Ib} = \sqrt{\pi b} \Delta \sigma_1$
 $\Delta \sigma_1 = \sigma_{1max} - \sigma_{1min}$.

である。

本論文では多軸応力効果の尺度として, 初期応力拡大係数振幅比 $\Delta K_{I10}/\Delta K_{I0}$, 最大最小主応力比 σ_2/σ_1 , 負荷せん断応力振幅と負荷引張応力振幅の比 $\Delta\tau/\Delta\sigma$ を併記したが, これらは Table III に示したように一対一に対応するものである。

3 実験結果および考察

3.1 多軸応力下での疲労き裂成長速度に及ぼす応力比の効果 (Fig. 2(a) の実験)

単軸引張疲労条件における σ_{st} の効果は, 疲労き裂成長速度がわずかに増加する傾向もみられたが, その程度は小さかった。またせん断疲労条件における τ_{st} の効果はほとんど見られなかった。

つぎに, $\Delta K_{I10}/\Delta K_{I0} = 0.45$ ($\sigma_2/\sigma_1 = -0.15$, $\Delta\tau/\Delta\sigma = 0.45$) および, $\Delta K_{I10}/\Delta K_{I0} = 1.28$ ($\sigma_2/\sigma_1 = -0.47$, $\Delta\tau/\Delta\sigma = 1.28$) の混合モード条件での疲労き裂成長速度に及ぼす応力比の効果を調べた結果をそれぞれ Fig. 5 および Fig. 6 に示す。これらの結果より, 混合モード条件では応力比の増加にともないき裂成長速度は著しく加速されることがわかる。特に, 著者等が混合モード疲労き裂成長の特性として示した¹⁰⁾ IIa 領域と IIb 領域の中では, IIa 領域での加速が顕著であった。

式 (2) で表した疲労き裂成長速度式の定数 m , A の多軸応力効果を, それぞれ Fig. 7, Fig. 8 に示す。 m

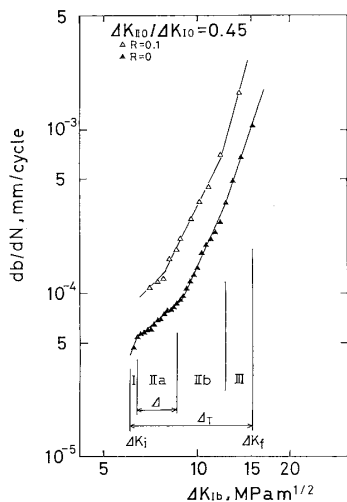


Fig. 5. Fatigue crack growth rate, db/dN vs. stress intensity range, ΔK_{Ib} under $\Delta K_{I10}/\Delta K_{I0} = 0.45$.

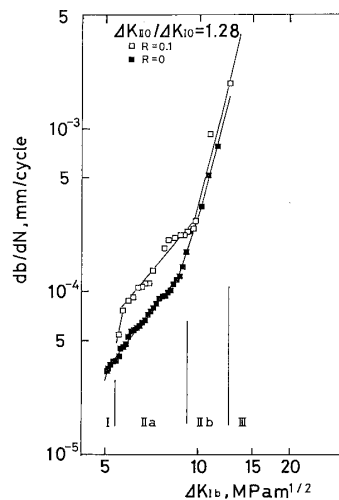


Fig. 6. Fatigue crack growth rate, db/dN vs. stress intensity range, ΔK_{Ib} under $\Delta K_{I10}/\Delta K_{I0} = 1.28$.

の多軸応力効果は応力比 $R=0$ については前報で示しているが, $R=0.1$ の結果を含めてもこの特性に変化はみられなかった (Fig. 7). すなわち m の多軸応力

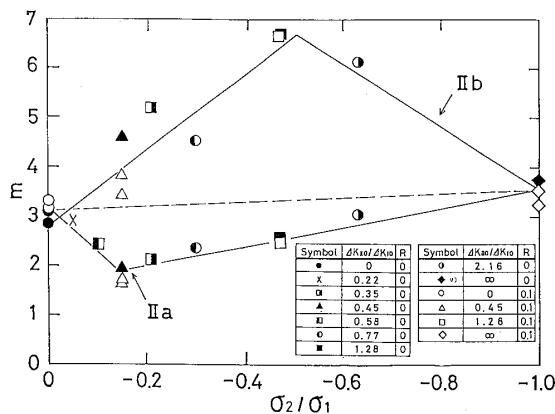


Fig. 7. The relation between m and (σ_2/σ_1) for IIa and IIb region.

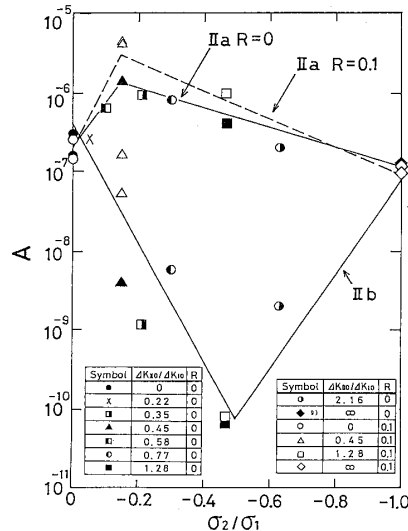


Fig. 8. The relation between A and (σ_2/σ_1) for IIa and IIb region.

効果特性は応力比に依存しないことがわかる。一方, Fig. 8 に示した A の多軸応力効果特性は m と逆の特性を示し, IIa 領域に対して $\sigma_2/\sigma_1 = -0.15$ ($\Delta\tau/\Delta\sigma = 0.45$, $\Delta K_{II0}/\Delta K_{I0} = 0.45$) の時最大値をとり, IIb 領域に対して $\sigma_2/\sigma_1 = -0.47$ ($\Delta\tau/\Delta\sigma = 1.28$, $\Delta K_{II0}/\Delta K_{I0} = 1.28$) の時最小値をとる。また IIb 領域の A には応力比の効果は存在しないが, IIa 領域の A には混合モード条件下で明確な応力比の効果が見られる。すなわち Fig. 5, Fig. 6 に示した混合モード条件での応力比の効果は IIa 領域での式 (2) の定数 A の特性に表れることがわかる。

すべての条件における A と m の関係を Fig. 9, Fig. 10 に示す。本結果より疲労き裂成長速度の応力比の効果は顕著に表れた IIa 領域の $\sigma_2/\sigma_1 = -0.15 \sim -0.47$ ($\Delta\tau/\Delta\sigma = 0.45 \sim 1.28$, $\Delta K_{II0}/\Delta K_{I0} = 0.45 \sim 1.28$) の領域を除き, A は応力比および多軸応力効果にかかわらず m の増加とともに直線的に減少する特

性を示すことが分かる。¹⁴⁾

ところで, このような応力比の効果が生じた原因を明らかにするためには, 応力成分の効果を逐一調べる必要がある。そこで著者らは, 初めに応力比 $R=0$, 相当応力振幅 $\Delta\sigma_{eq}$ 一定のもとで $\Delta\sigma$ と $\Delta\tau$ の組合せによる多軸応力効果について論じた。^{9),10)} さらに本研究で行ったように, $\Delta\sigma$ と $\Delta\tau$ の組合せ条件下での応力比の効果を考えて, Fig. 1 に示されるように $\Delta\sigma$, $\Delta\tau$ の他に, σ_{st} , τ_{st} の合わせて 4 つの異種応力成分効果が影響因子として加わる。本節で示した応力比の効果が, これらのどの成分とどの成分の相互作用効果によるものかを次節で検討する。

3・2 多軸疲労き裂成長速度に及ぼす異種応力成分効果

3・1 節で述べたように, Fig. 1 に示した $\Delta\sigma$ と σ_{st} , $\Delta\tau$ と τ_{st} の効果は, 応力比効果として顕著な影響はみられなかった。

つぎに Fig. 2(b) に示す $\Delta\sigma$ に及ぼす τ_{st} の効果と, $\Delta\tau$ に及ぼす σ_{st} の効果について検討を行う。

Fig. 1 ④ で示した静的せん断応力 τ_{st} を負荷したときの引張疲労試験における結果を Fig. 11 に示す。本結果より静的せん断応力 τ_{st} は引張疲労き裂成長速度にほとんど影響を及ぼさないことが分かる。つぎに Fig. 1 ⑤ に示した静的引張応力 σ_{st} を負荷した場合のせん断疲労試験の結果を Fig. 12 に示す。本結果より σ_{st} の負荷によりせん断疲労き裂成長速度が, $\Delta K_{II0} \leq 7 \text{ MPam}^{1/2}$ においてかなり加速されていることがわかる。本結果では, せん断疲労試験の結果は応力比 $R=0.1$ の条件を用いている。しかし $R=0$ の条件に σ_{st} を負荷すると, $R=0.1$ の結果よりも加速されることから, σ_{st} は有意に加速の効果を有することが分かる。またこの特性は, Fig. 6 の多軸応力条件下

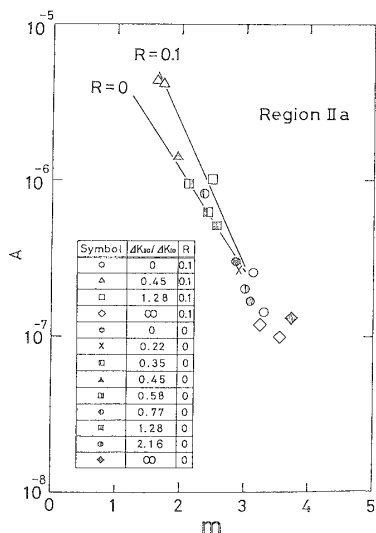


Fig. 9. The relation between A and m for IIa region.

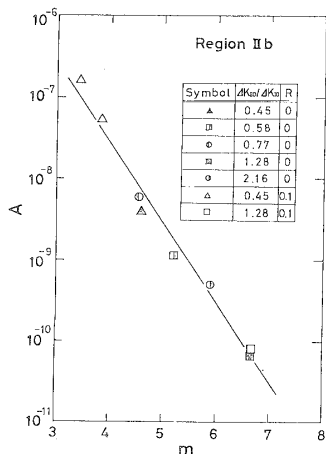


Fig. 10. The relation between A and m for IIb region.

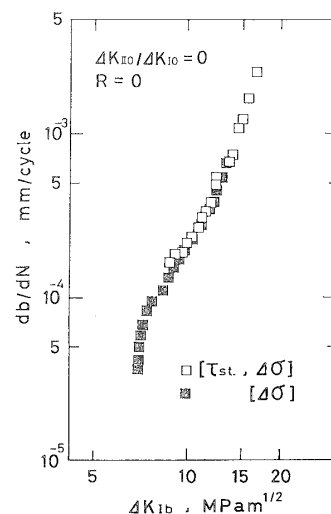


Fig. 11. The effect of τ_{st} on fatigue crack growth rate, db/dN vs. stress intensity factor, ΔK_{Ib} under tensile fatigue condition.

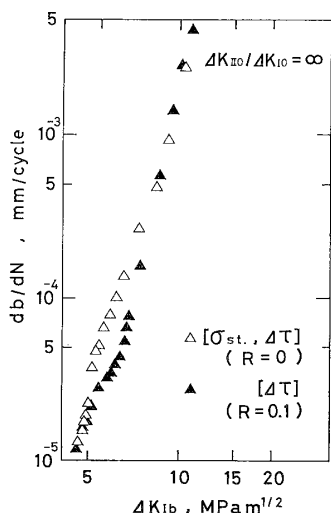


Fig. 12. The effect of σ_{st} on fatigue crack growth rate, db/dN vs. stress intensity factor, ΔK_{Ib} under shearing fatigue condition.

での疲労き裂成長速度の応力比効果と類似した特性を示している。

以上の結果より、3・1節で示した引張り・せん断組合せによる多軸応力疲労の応力比効果は、せん断応力振幅 $\Delta\tau$ に及ぼす σ_{st} の効果に起因していると考えられる。

3・3 異種応力成分効果を考慮にいたれた疲労き裂成長速度の構成則

3・2節の結果より、多軸応力条件下での疲労き裂成長速度の応力比効果はせん断応力振幅 $\Delta\tau$ に及ぼす σ_{st} の効果であると考えられる。そこで本節では、この結果を3・1節の応力比効果の実験結果に適用し、検討を行う。

せん断応力振幅 $\Delta\tau$ に対する静的引張応力 σ_{st} の効果を表すパラメータ r としては式(3)のように考えられよう。

$$r = f(\sigma_{st}/\Delta\tau) \quad (3)$$

ここで f としては σ_{st} の効果がないときは、 r は影響を与えず、 σ_{st} が増加するにつれてその効果が増大する関数形を考える。その代表的な関数として $\sigma_{st}=0$ の時 $r=1$ 、 σ_{st} の増加と共に $\sigma_{st}/\Delta\tau$ が線形に単調増加する式(4)を考える。

$$r = \frac{\Delta\tau + \alpha\sigma_{st}}{\Delta\tau} = 1 + \alpha \frac{\sigma_{st}}{\Delta\tau} \quad (4)$$

この式は $\sigma_{st}/\Delta\tau < 1$ として式(3)を Taylor 展開した時の1次の項までと同じ形となっている。ここで α は定数である。このパラメータを用い、応力比の効果を生じた IIa 領域の A 値、 $A_{R=0.1, IIa}$ を $R=0$ における A 値、 $A_{R=0, IIa}$ を用いて式(5)で表す。

$$A_{R=0.1, IIa} = (A_{R=0, IIa})^{1/r} \quad (5)$$

$\alpha=1/3$ とした時の IIa 領域の A 値と m との関係は Fig. 13 に示す。本結果より r を用いることにより応

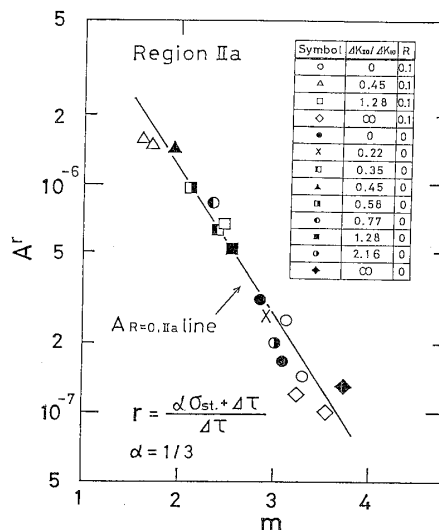


Fig. 13. The relation between A^r and m for IIa region.

力比効果を含めた多軸応力効果を統一的に評価することができる。さらに式(3)の考え方で $\sigma_{st}/\Delta\tau$ の効果を実験結果と比較検討すると、より精度良い式として式(6)が得られる。式(6)を用いて実験結果を評価した結果を Fig. 14 に示す。

$$r^* = 1 + \frac{1}{7} \left(\frac{\sigma_{st}}{\Delta\tau} \right)^{1/2} \quad (6)$$

本結果より、多軸疲労における応力比効果とは $\Delta\tau$ に対する σ_{st} の効果であり、それは IIa 領域の A 値に影響を与える。したがって式(6)を用いることにより、多軸応力条件下での疲労き裂成長速度は式(7)で与えられることがわかる。

$$\frac{db}{dN} = A(\Delta K_{Ib})^m \quad (7)$$

$$A = (A_{R=0})^{1/r^*}$$

$$r^* = \begin{cases} 1 + \frac{1}{7} \left(\frac{\sigma_{st}}{\Delta\tau} \right)^{1/2} & \text{IIa 領域} \\ 1 & \text{IIb 領域} \end{cases}$$

ここで m の多軸応力効果は Fig. 7 および式(8)で与えられる。また A については、IIa 領域では Fig. 9 の応力比 $R=0$ の A と m の関係より、IIb 領域では Fig. 10 の A と m との関係より求めることができる。

IIa 領域

$$m = 3.05 + 6.79(\sigma_2/\sigma_1) \quad (0 \leq |\sigma_2/\sigma_1| \leq 0.15)$$

$$m = 1.66 - 2.10(\sigma_2/\sigma_1) \quad (0.15 \leq |\sigma_2/\sigma_1| \leq 1.0)$$

(8a)

IIb 領域

$$m = 3.11 - 7.31(\sigma_2/\sigma_1) \quad (0 \leq |\sigma_2/\sigma_1| \leq 0.47)$$

$$m = 9.34 + 5.58(\sigma_2/\sigma_1) \quad (0.47 \leq |\sigma_2/\sigma_1| \leq 1.0)$$

(8b)

$R=0$ における A 値と m 値の関係を式(9)に示す。

$$\text{IIa 領域} \quad A_{R=0} = 2.16 \times 10^{-5} \times 0.230^m \quad (9a)$$

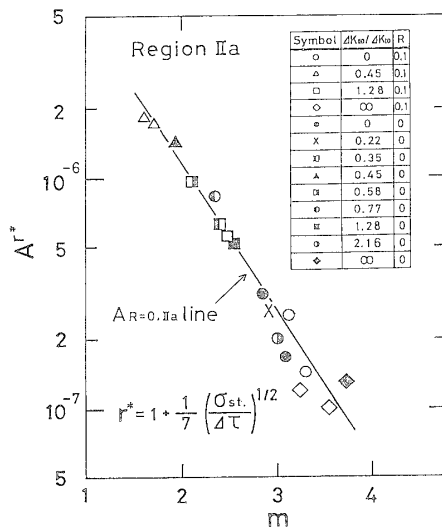


Fig. 14. The relation between $A r^*$ and m for IIa region.

$$\text{IIb 領域} \quad A_{R=0} = 3.64 \times 10^{-5} \times 0.147^m \quad (9b)$$

式(7)~式(9)が応力比の効果を含む多軸応力条件下での疲労き裂成長速度式である。

4 結 論

(1) 等相当応力振幅条件下での引張り・せん断組合せによる多軸応力条件下では、引張およびせん断疲労条件に比較し、応力比の増加とともに疲労き裂成長速度が著しく加速される。特に、著者らが混合モード疲労き裂成長の特性として示したIIa領域とIIb領域の中では、低き裂成長速度領域であるIIa領域での加速が顕著であった。この応力比の効果は、IIa領域における疲労き裂成長速度式、式(2)のA値の特性に影響を与える。

(2) 結論(1)の引張り・せん断組合せによる多軸応力疲労の応力比効果はせん断応力振幅 $\Delta\tau$ に及ぼす σ_{st} の効果によるものであった。

(3) $\Delta\tau$ に及ぼす σ_{st} の効果を考慮すると、多軸応力下での疲労き裂成長速度式は応力比の効果をも含め次式で表される。

$$\frac{db}{dN} = A(\Delta K_{IIb})^m$$

$$A = (A_{R=0})^{1/r^*}$$

$$r^* = \begin{cases} 1 + \frac{1}{7} \left(\frac{\sigma_{st}}{\Delta\tau} \right)^{1/2} & \text{IIa 領域} \\ 1 & \text{IIb 領域} \end{cases}$$

ここで m の多軸応力効果は次式で与えられる。

IIa 領域

$$m = 3.05 + 6.79(\sigma_2/\sigma_1) \quad (0 \leq |\sigma_2/\sigma_1| \leq 0.15)$$

$$m = 1.66 - 2.10(\sigma_2/\sigma_1) \quad (0.15 \leq |\sigma_2/\sigma_1| \leq 1.0)$$

IIb 領域

$$m = 3.11 - 7.31(\sigma_2/\sigma_1) \quad (0 \leq |\sigma_2/\sigma_1| \leq 0.47)$$

$$m = 9.34 + 5.58(\sigma_2/\sigma_1) \quad (0.47 \leq |\sigma_2/\sigma_1| \leq 1.0)$$

また $A_{R=0}$ については、 m 値を用い次式より求められる。

$$\text{IIa 領域} \quad A_{R=0} = 2.16 \times 10^{-5} \times 0.230^m$$

$$\text{IIb 領域} \quad A_{R=0} = 3.64 \times 10^{-5} \times 0.147^m$$

本研究の供試材をご提供いただいたスカイアルミニウム株式会社に謝意を表す。また本実験遂行にご助力いただいた当時4年次学生 保坂 清氏((株)東芝)、斉藤 修氏((株)荏原製作所)に謝意を表す。

(平成元年9月26日 第5回破壊力学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) S. Iida and A. S. Kobayashi, Trans, ASME Ser., D91, 764 (1969).
- 2) K. Tanaka, Engng. Fract. Mech., 6, 493 (1974).
- 3) 北川英夫, 結城良治, 東郷敬一郎, 日本機械学会論文集, A-47, 1283 (1981).
- 4) 結城良治, 秋田清司, 岸 成人, 材料, 37, 1084 (1988).
- 5) A. Otsuka, K. Mori and K. Tohgo, Current Research on Fatigue Cracks, M. R. Series 1, Soc. Mater. Sci., Japan, May, p. 127 (1985).
- 6) 大塚昭夫, 東郷敬一郎, 松山秀信, 材料, 36, 570 (1987).
- 7) 横堀寿光, 横堀武夫, 亀井浅道, 日本機械学会論文集, 43, 4345 (1977).
- 8) 横堀寿光, 高木清寿, 横堀武夫, 阿部 明, 日本機械学会論文集, 48, 1000 (1982).
- 9) A. T. Yokobori Jr., T. Yokobori, K. Sato and K. Syoji, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 8, 4, 315 (1985).
- 10) 横堀寿光, 横堀武夫, 石井顯治, 佐藤 清, 庄司一夫, 材料, 35, 930 (1986).
- 11) 星出敏彦, 河端亨介, 山川倫央, 井上達雄, 材料, 38, 280 (1987).
- 12) 浜田直巳, 坂根政男, 大南正瑛, 日本機械学会論文集, A-50, 1838 (1984).
- 13) 大南正瑛, 坂根政男, 浜田直巳, 材料, 35, 230 (1986).
- 14) T. Yokobori, ASTM STP 675, 683 (1979).
- 15) H. V. Lakshminarayana and M. V. V. Nurthy, Int. J. of Fract., 12, 547 (1976).