

名古屋大学工学部
大学院大塚 昭夫 東郷 敬一郎
神原 幸二

1. 緒言

モードI疲労き裂進展過程及び機構などについては多くの詳細な検討がなされているがモードII進展に関しては、進展過程の観察及びそれに基づく進展機構のモデル化などに関する検討はあまりなされていないように思われる。また、モードI進展は一般に材料組織などに敏感でないのに対し、モードII進展は、 $(\Delta K_I = \Delta K_{II})$ でモードI進展以上の進展速度でモードII進展をする材料もある反面、全くモードII進展を起さない材料もあること¹⁾や、熱処理のみで ΔK_{II} -threshold が10倍程度以上も変化する²⁾などもあることなどからも明らかなように極めて組織敏感である。このようなモードI進展とモードII進展における材質依存性の差も、両者における疲労き裂進展機構の差に起因するものと考えられ、このような面からモードII進展過程の解明は興味あることと思われる。そこで本研究ではモードII進展における荷重1サイクル中における疲労き裂先端近傍の変形挙動をレプリカ法により詳細に調べ、モードII進展の過程及び機構について検討を行った。

2. 供試材及び試験法

実験は表1に示す7N01-T4 アルミニウム合金及びその溶接部（ミグ溶接：溶接電流260-260A、溶接電圧：26-27V）について行った。溶接部の硬さ分布を図1に示す。実験は図2に示す試験片を用いた。

表1. 供試材及び溶接心線の化学成分及び機械的性質

	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Zr	Al	Yield Stress (MPa)	U.T.S (MPa)	Elongation (%)
7N01-T4	0.13	0.09	0.19	0.34	1.35	4.33	0.12	0.06	0.14	Re	294	345	20.0
Wire, A5556WY	0.01	0.07	0.17	0.63	5.00	0.02	0.09	0.09	-	Re	133	283	14.7

4点せん断試験法³⁾で行なった。スリット位置は母材部の他、図1に示すようなHAZ及び溶接金属部について行った。実験は応力比 $R=0.05$ 、応力繰返し速度 $3 \sim 10$ Hz、空气中で行なった。

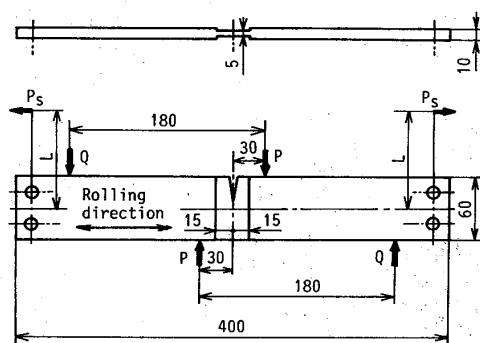


図2. 4点せん断試験片

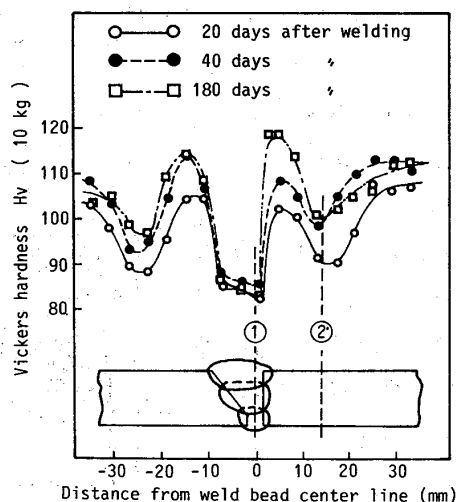


図1. 溶接部のビッカース硬度。①及び②はそれぞれ溶接金属試験片及びHAZ試験片のスリット位置を示す。

3. 実験結果及び考察

(1) 溶接部各部の $da/dN-\Delta K_{II}$ 及び $da/dN-\Delta K_{Ieff}$

図3に7N01-T4母材、HAZ、及び溶接金属部のモードII進展に対する $da/dN-\Delta K_{II}$ 関係²⁾及び比較のため通

常のCT試験片による $da/dN - \Delta K_{Ieff}$ ($\Delta K_{Ieff} = K_{Imax} - K_{Iop}$) 関係を示す。この結果によると、このアルミニウム合金の場合、母材及び溶接金属部はモードII進展に対し $8 - 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 程度の比較的高い ΔK_{IIw} (mode II growth) を示すのに対しHAZ部は $1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 程度の極めて低い ΔK_{IIw} (mode II growth) を示している。しかし、これらの材料のモードI進展挙動には全く差が見られず、材料依存性がモードI進展とモードII進展とは全く異なることがわかる。

(2) モードII進展機構

図4は、試験前に、試験片表面をバフ仕上げ後エコーペーパーでき裂進展方向と直角方向に二重に細線をつけて疲労試験を行ない、荷重の1サイクル中の荷重最小-最大-最小の各時点で荷重を停止し、き裂先端近傍のレプリカをとり走査電顕で観察した結果である。(a)~(c)、(d)~(f) にそれぞれ母材部及びHAZ部の結果の例を示す。図5はこれらの結果を模式的に示したものである。

図5(b)に示すように最大荷重時にはき裂下面に二重に新しい面ABが形成され、最小荷重時には、周辺部の弾性除荷により逆方向の二重に起り、き裂上面に新しい面A'B'が形成される。AB $\approx$ A'B' と考えられ、このようなき裂先端

のせん断変位を $\Delta(CTSD)$ と表すことにする。本実験の場合

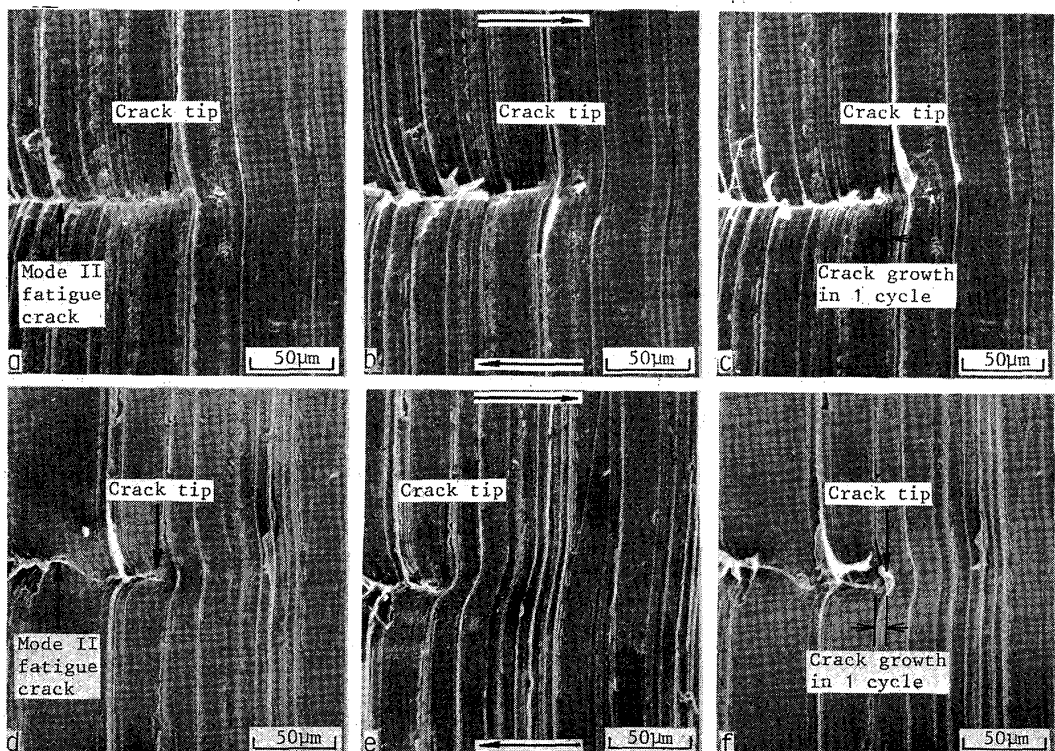


図4. 1荷重サイクル中におけるき裂先端部の弾性変形挙動、レプリカの走査電顕写真、平行に並んだ二重の細線は荷重負荷前にエコーペーパーでつけたもの。(a),(b),(c)は母材部、(d),(e),(f)はHAZ。図(b)及び(e)中の矢印はせん断応力の作用方向を示す。
(a)最小荷重時: $K_{II} = 1.45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, (b)最大荷重時: $K_{II} = 28.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, (c)最小荷重時: $K_{II} = 1.45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$
(d) " : $K_{II} = 1.12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, (e) " : $K_{II} = 22.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, (f) " : $K_{II} = 1.12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

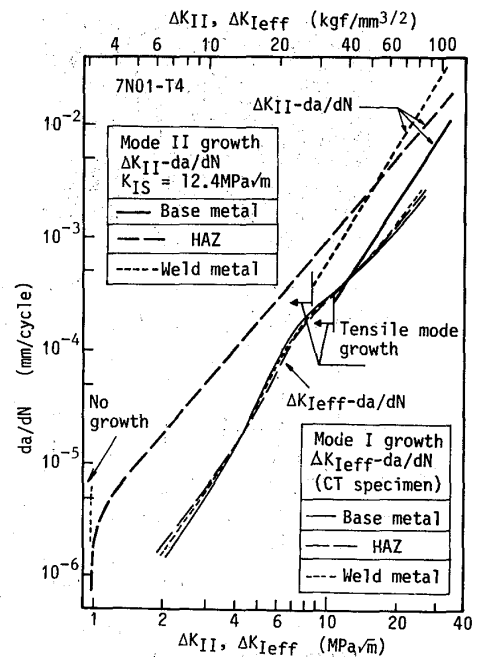


図3 溶接部各部のモードII進展に対する $da/dN - \Delta K_{II}$ 関係と、CT試験片による通常のモードI進展に対する $da/dN - \Delta K_{Ieff}$ 関係との比較

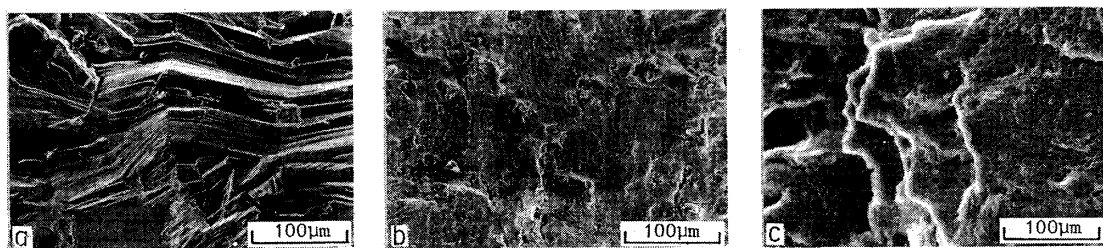


図7 アルミニウム合金のモードII進展破面の例 (a) 2017-T4 押し出し材の低 ΔK_{II} 域 ($\Delta K_{II} = 1.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) における破面, (b) (a) と同一材料における高 ΔK_{II} 域 ($\Delta K_{II} = 20.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) における破面 (c) 7075-T6 圧延板, $\Delta K_{II} = 7.1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

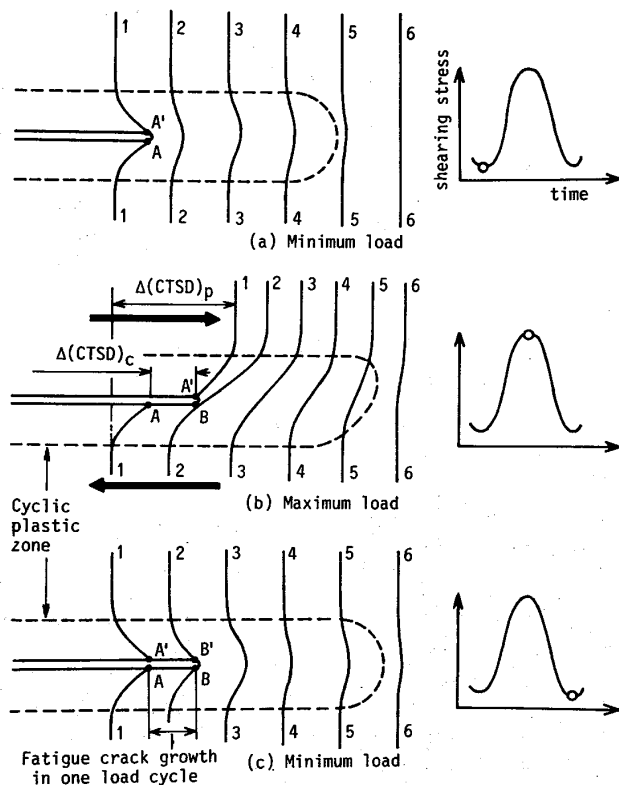


図6 モードII疲労き裂進展の模式図 (a) 最小荷重時 (b) 最大荷重時 (c) 最小荷重時

$\Delta(\text{CTSD})_p$ の値と、下記の式(1)により計算したBCS理論⁴⁾によるせん断変位量を示してある。

$$\phi(a) = \frac{8(1-\nu^2)\tau_{ys}^c a}{\pi E} \log\left\{\sec\left(\frac{\pi \Delta\tau}{2 \tau_{ys}^c}\right)\right\} \approx \frac{(1-\nu^2) \Delta K_{II}^2}{E \tau_{ys}^c}, \quad \frac{\Delta\tau}{\tau_{ys}^c} \ll 1. \quad (1)$$

ここに $\Delta\tau$ = せん断応力範囲、 $\Delta K_{II} = \Delta\tau\sqrt{\pi a}$ 、 τ_{ys}^c = 繰返しせん断降伏応力、 ν = ポアソン比、 a と $\Delta(\text{CTSD})_p$ とはよく一致しており、 da/dN はこれらよりやや低い値となっている。図7はモードII進展における破面形態の典型的な例⁵⁾を示す。図(a)及び(c)は、図6に模式的に示したようなように、平行な複数の面で同時に起きていることを示している。

4. 参考文献 1) 大塚 森: 材料強度と破壊国内シンポジウム論文集(昭57-3)43. 2) 大塚ほか2名: 機械学会講演論文集 No.830-10 (昭58-10)249. 3) 大塚ほか3名: 第16回疲労シンポジウム別冊(昭57-11), 26. 4) B. A. Bilby ほか2名: Proc. Roy. Soc., A, 272, 304. 5) 大塚 森: 材料, 32 (1983), 282.

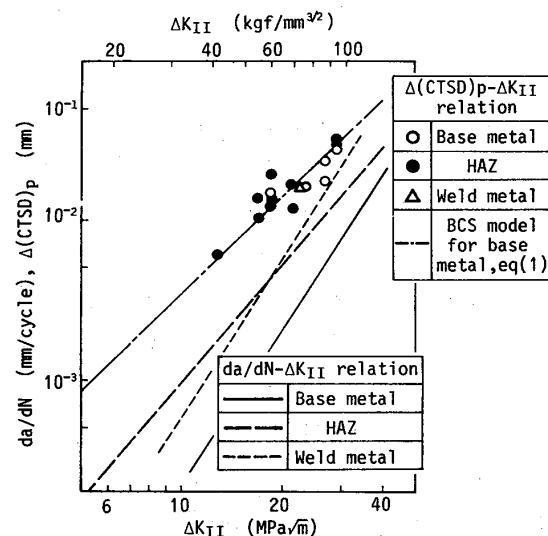


図8 レプリカ上で測定した繰返し塑性域境界におけるせん断変位 $\Delta(\text{CTSD})_p$ とBCS理論により(1)式から計算で求めたせん断変位。

$AB \approx A'B' = \Delta(\text{CTSD})_c \approx da/dN$ と考えてよいようである。また、図6中に $\Delta(\text{CTSD})_p$ で示すような、繰返し塑性域境界線上におけるせん断変位のき裂先端位置における値をレプリカ上で測定した。図8にはこの