十字形試験片を用いた高温二軸
低サイクル疲労の破壊モード*伊藤隆基^{*1}, 坂根政男^{*2}, 大南正瑛^{*2}Crack Mode in High-Temperature Biaxial Low Cycle Fatigue
Using a Cruciform Specimen

Takamoto ITOH, Masao SAKANE, and Masateru OHNAMI

This paper describes the crack mode in the high-temperature multiaxial low cycle fatigue using cruciform specimens. We also extensively examined the crack direction on the specimen surface as well as the crack plane inclination into the specimen for the specimen fatigued at the principal strain ratio of $-1 \leq \phi \leq 1$, where ϕ is the ratio of the minimum principal strain to the maximum principal strain on the specimen surface. The crack was mode I if it propagated in the direction normal to the specimen surface but was a mixed mode, I and III, if it propagated in the direction parallel to the specimen surface.

Key Words: High Temperature, Biaxial Low Cycle Fatigue, Cruciform Specimen, Crack Mode, FEM Analysis, Strain Energy Release

1. 緒 言

一般に高温で使用する高温部材は複雑な多軸応力状態にあるにもかかわらず、高温低サイクル疲労の研究のほとんどが単軸応力状態のもので行われており、多軸応力下での研究例は少ない。

高温二軸低サイクル疲労試験は、従来より中空薄肉円筒試験片に引張り・圧縮および繰返しねじりを組合せた負荷を与える方法が採用されてきた^{(1)~(4)}。しかし、この試験方法では試験片表面に平行な面上での最大主ひずみを ε_y 、最小主ひずみを ε_x とすると、主ひずみ比 $\phi(=\varepsilon_x/\varepsilon_y)$ の実験可能な範囲は $-1 \leq \phi \leq -\nu$ (ν : 非弾性域のポアソン比) に限られている。著者らはより広域な主ひずみ比の範囲 ($-1 \leq \phi \leq 1$) で実験可能な十字形試験片を用いた二軸電気油圧サーボ疲労試験機を開発し⁽⁵⁾、種々の主ひずみ比の下で高温低サイクル疲労寿命に及ぼす ϕ の影響を明らかにしてきた⁽⁵⁾。

本研究は、著者らのこれまでの多軸応力下の高温低サイクル疲労研究^{(6)~(14)}の一環として行われたもので

あり、高温多軸疲労破損のクライテリオンの開発とかわって、主ひずみ比が $-1 \leq \phi \leq 1$ の範囲の高温多軸低サイクル疲労破面の観察を詳細に行い、考察を加えた。とくに、 ϕ が $-1 \leq \phi < -0.5$ の主ひずみ比の範囲の試験においては、き裂のモードは試験片表面でのき裂の傾きから決定できるが、 $-0.5 \leq \phi \leq 1$ の試験においては、き裂面の板厚方向の傾きも考慮して決定しなければならない。本研究では、この点を 1Cr-1Mo-1/4 鋼および SUS 304 ステンレス鋼について考察するとともに、弾塑性有限要素法 (FEM) を用いてき裂進展に伴うポテンシャルエネルギー変化とき裂の破壊モードの関係も検討した。

2. 試験片形状および試験方法

本研究で用いた試験片は十字形試験片であり、その形状・寸法および座標系を図 1 に示す。座標系は試験片標点部表面上に X, Y 軸をとり、板厚方向を Z 軸とした。さらに、破面の傾きを示すため、破面と X-Z 面との角度を θ 、また破面上でのき裂進展方向と Z 軸方向との角度を α と定義した。また、本研究では主ひずみ比 ϕ を $\phi = \varepsilon_x/\varepsilon_y$ とした。ここに、 ε_x および ε_y は X 軸方向および Y 軸方向の垂直ひずみである。

供試材は蒸気タービンロータ材の 1Cr-1Mo-1/4 V

* 平成 2 年 3 月 24 日 関西支部第 65 期定時総会講演会において講演、原稿受付 平成元年 3 月 22 日。

*1 学生員、立命館大学大学院 (〒603 京都市北区等持院)。

*2 正員、立命館大学。

鋼およびオーステナイト系 SUS 304 ステンレス鋼である。なお、供試材の熱処理条件などは既報⁽⁵⁾と同じである。1Cr-1Mo-1/4 V 鋼の試験片は試験片標点部(直径 15 mm の円内)中央に直径 0.5 mm の円孔切欠を有し、SUS 304 ステンレス鋼は平滑試験片である。

試験条件は 1Cr-1Mo-1/4 V 鋼については 823 K、SUS 304 ステンレス鋼では 923 K、両鋼種とも大気中の下で、Y 軸方向のひずみ範囲 $\Delta\epsilon_y$ を一定とし、X 軸方向のひずみ範囲 $\Delta\epsilon_x$ を種々変化させたひずみ制御試験を行った。ひずみ波形は、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_y = 0.1\%/s$ の完全両振三角波で実施した。なお、試験機は既報⁽⁵⁾のものを用いた。

本試験では、破損繰返し数 N_f はき裂に垂直方向の荷重が最大荷重の 3/4 に低下したときの繰返し数として定義した。また、1Cr-1Mo-1/4 V 鋼ではき裂発生繰返し数 N_c を読取り顕微鏡によりき裂切欠円孔から 0.1 mm 進展したときの繰返し数とした。

き裂観察は、まず、疲労試験後の試験片標点部をエメリー紙で研磨し、さらにバフ研磨を行い酸化膜を取り除いた後、き裂を標点部表面から観察し、次いで、き裂破面の板厚方向の傾きを求めるため、走査電子顕微鏡(SEM)を用いて破面の試験片板厚方向(X-Z 面)からの傾きを観察し、さらに、破面上でのき裂伝ば方向もストライエーション方向の観察から確かめた。

3. 試験結果および考察

3.1 破損繰返し数の主ひずみ比依存性 図 2 (a), (b)⁽⁵⁾ に 1Cr-1Mo-1/4 V 鋼および SUS 304 ステンレス鋼の破損繰返し数 N_f 、き裂発生繰返し数 N_c と主ひずみ比 ϕ との関係を示す。1Cr-1Mo-1/4 V 鋼は Y 軸方向の全主ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_y = 0.78\%$ および 0.5%，SUS 304 ステンレス鋼では $\Delta\epsilon_y = 0.7\%$ の結

果である。 $\Delta\epsilon_y$ が一定の試験でも、 N_f は ϕ の増加に伴って減少することがわかる。この傾向は 1Cr-1Mo-1/4 V 鋼、SUS 304 ステンレス鋼両者について同様であり、鋼種にはあまり依存しないようである。また、1Cr-1Mo-1/4 V 鋼の N_c は $\phi=1$ の試験結果を除いて N_f の約 50% であるが、 $\phi=1$ の試験のみ N_c/N_f は約 90% と極めて大きな値となっている。このことについては、き裂伝ば方向とのかかわりで後述する。これらの疲労寿命を整理することができる多軸疲労パラメータについての考察は別報⁽⁵⁾にゆずる。

3.2 試験片表面でのき裂モード 図 3 は 1Cr-1Mo-1/4 V 鋼 ($\Delta\epsilon_y = 0.78\%$) および SUS 304 ステンレス鋼の各主ひずみ比における試験片表面からのき裂観察結果である。両鋼種とも、主ひずみ比が $-0.5 \leq \phi \leq 1$ の範囲で X 軸方向へき裂が伝ばしたのが観察された。しかし、 $\phi = -1$ のき裂方向は両鋼種とも $-0.5 \leq \phi \leq 1$ でのそれとは若干異なった様相を示していた。すなわち、1Cr-1Mo-1/4 V 鋼の $\phi = -1$ の試験では、図 3 に示すように円孔より 4 本のき裂が伝ばしており、これらのき裂はモード I 形のき裂であった。一方、

(a) 1Cr-1Mo-1/4 V 鋼

(b) SUS 304 ステンレス鋼

図 2⁽⁵⁾ 高温二軸低サイクル疲労寿命の主ひずみ比依存性

図 1 試験片形状・寸法および座標系 (mm)

SUS 304 ステンレス鋼の $\phi = -1$ の試験では図 4 の拡大図に示すように、ほぼ X 軸および Y 軸方向から $0 \sim 15^\circ$ 傾いた短いき裂がつながって、全体としてはモード II 形き裂となっていた。 $\phi = -1$ の試験において、微小なモード I 形のき裂が連結してモード II 方向に伝ばする傾向は、中空円筒試験片を用いた繰返しねじり試験におけるき裂観察結果⁽¹²⁾と一致している。

3.3 試験片板厚方向でのき裂モード 上記の考察は試験片表面でのき裂観察に基づくものであったが、主ひずみ比が $-0.5 \leq \phi \leq 1$ の範囲では、き裂の破壊モードは試験片表面のき裂伝ば方向のみで決定することはできず、板厚方向も考慮しなければならない。板厚方向のき裂破面の傾きを考察するために、図 5 に Brown ら⁽¹⁵⁾の表示法にならったき裂面を示す。図 5 中の太い実線は、各主ひずみ比における最大主ひずみ振幅を受ける面および最大せん断ひずみ振幅を受ける面を示しており、また、斜線を施した面にはき裂が観

察されたことを示している。ただし、主ひずみ比が -0.5 および 1 では、図 5 中の η および ξ が $-180 \leq \eta, \xi \leq 180^\circ$ のすべての面で最大せん断ひずみ面となる。なお、き裂伝ば挙動については後述する。

図 5 からわかるように、主ひずみ比が $-1 \leq \phi < -0.5$ の範囲では、主ひずみ面と最大せん断ひずみ面は試験片表面で方向が異なっているため、き裂モードは試験片表面上でのき裂方向のみから決定することができる。しかし、主ひずみ比が $-0.5 \leq \phi \leq 1$ の範囲では、主ひずみ面と最大せん断ひずみ面が試験片表面上で方向が一致しているため、き裂のモードは、試験片表面上のき裂の方向と X - Z 面からの破面の傾きの両方から決定しなければならない。とくに、主ひずみ比 ϕ が -0.5 および 1 の試験においては、 $\eta = 90^\circ$, $\xi = 0^\circ$ のとき両面の試験片表面上での方向が一致する。

図 6 (a)~(d) に 1Cr-1Mo-1/4 V 鋼の主ひずみ比が -1 から 1 までの破面の傾き θ を中央円孔縁か

図 3 各主ひずみ比での試験片表面からのき裂写真

図 4 SUS 304 ステンレス鋼, $\phi = -1$ の試験片表面からのき裂写真

図 5 各主ひずみ比における最大主ひずみ面および最大せん断ひずみ面 (斜線部には主にき裂が観察された面を示す)

らの距離について示す。ただし、主ひずみ比が0.5の試験はき裂の伝ば挙動が -0.5 の場合とほとんど同じであったので、ここでは、主ひずみ比が0.5の試験結果は省略した。

$\phi = -1$ の試験では図3に示したように、円孔より各軸方向に4本のき裂が観察されたが、図6(a)では円孔から発生したき裂はともに、板厚方向には試験片表面に垂直な $\theta = 0^\circ$ のき裂であったことを示している。その後、き裂はほとんど θ の増加/減少なく伝ばした。また、図6(b)の $\phi = -0.5$ の試験では、円孔切欠付近では $\theta = 0^\circ$ の面のき裂であったが、き裂の伝ばに伴って、 θ は増加/減少した。 θ は $\pm 45^\circ$ までには至らなかったが、逆に、さらにき裂が伝ばすると、 $\theta = 0^\circ$ のき裂も一部観察された。図6(c)の $\phi = 0$ の試験では、き裂発生点では $\phi = -0.5$ の場合と同様な挙動を示したが、最終的にはき裂は $\theta = \pm 45^\circ$ の面を伝ばした。図6(d)の $\phi = 1$ の試験では θ の増加/減少はほとんどなく $\theta = 0^\circ$ の面のき裂であった。

図7(a)~(d)にSUS 304 ステンレス鋼の主ひず

み比が -1 から 1 の破面の傾きを程度を示す。ただし、ここでも1Cr-1Mo-1/4V鋼の場合と同じく、主ひずみ比が -0.5 と 0.5 ではき裂伝ば挙動が同じであったので、主ひずみ比が0.5の結果は省略した。また、図7中の矢印はストライエーションの観察から、き裂発生点とみられる位置を示している。なお、横軸の単位長さは写真に示すとおりである。

図7(a)の $\phi = -1$ の試験では、ほとんどが $\theta = 0^\circ$ の面のき裂であったが、き裂発生点ではき裂は試験片表面から板厚方向($\alpha = 0^\circ$ の方向)に伝ばし、き裂伝ばに伴い α は増加/減少して、試験片表面に平行な方向($\alpha = \pm 90^\circ$)に遷移した。図7(a)および図3、4の試験片表面からのき裂観察結果より、 $\phi = -1$ の試験では、き裂発生点およびき裂が $\alpha = \pm 90^\circ$ の方向に伝ばするときはモードI形のき裂で、き裂発生点では含まれた部分[図7(a)の2個の矢印の間の部分]は、モードI形の短いき裂がモードII方向につながったき裂であった。図7(b)の $\phi = -0.5$ の試験では、き裂は試験片表面から発生し、まず、 $\theta = 0^\circ$ の面で板厚方向(α

図6 1Cr-1Mo-1/4V鋼の破面の傾きを示す写真

$=0^\circ$ の方向) に伝ばした。その後、き裂の伝ばに伴い α は増加/減少するが、 θ の変化はほとんどなかった。また、き裂発生点は複数観察された。図 7 (c) の $\phi=0$ の試験では、試験片表面の $\theta=0^\circ$ の面で発生したき裂は、まず、板厚方向 ($\alpha=0^\circ$ の方向) に伝ばし、その後 α の増加に伴って θ は減少し、き裂は $\theta=-45^\circ$ の面に遷移した。また、図 7 (d) の $\phi=1$ の試験では、き裂発生点は試験片表面の $\theta=0^\circ$ の全面で観察され、 $\alpha=0^\circ$ の方向に伝ばした。すなわち、試験片表面の大部分で発生したき裂が、 α はほとんど変化することなく試験片板厚方向 ($\alpha=0^\circ$ 方向) に伝ばした。

図 7 の観察結果から、SUS 304 ステンレス鋼の主ひずみ比が $-0.5 \leq \phi \leq 0.5$ の範囲では、き裂は $\alpha=0^\circ$ 、 $\theta=0^\circ$ の面で発生し、伝ばに伴い $\alpha=\pm 90^\circ$ 、 $\theta=\pm 45^\circ$ のき裂に遷移する傾向があった。ただし、 $\phi=-0.5$ の試験では、図 7 中の矢印で示すように、き裂発生点が複数観察され、隣接地点から発生・伝ばしたき裂が θ の $\pm 45^\circ$ への増加/減少する以前に合体したため、 θ の増加/減少は部分的にしか観察されなかった。

表 1 にき裂の発生から進展に伴うき裂の破壊モード

の遷移を要約したものを示す。表 1 中で ε_1 および ε_2 はそれぞれ最大および中間主ひずみ振幅を受ける面で、 $\gamma_{\max}$ は最大せん断ひずみ振幅を受ける面で疲労破面が観察されたことを示す。また、 $\varepsilon_{1,2}$ および $\varepsilon_{2,3}$ はそれぞれ最大と中間、中間と最小ひずみ振幅が等しい面にき裂が観察されたことを示している。表 1 中の一つの星印は部分的にき裂が観察されたことを示し、二つの星印は 1Cr-1Mo-1/4V 鋼で円孔切欠付近 (円孔から 0.1 mm 以内) で観察されたき裂面を示している。さらに、三つの星印は微小なモード I 形のき裂が連結して、モード II 方向に伝ばしたき裂を示している。また、前述した図 5 での斜線を施した部分は、き裂伝ばの最終段階でのき裂破面を示している。

上述したように、多軸応力下におけるき裂伝ば面は複雑であるので、一概に伝ば面について断定的に述べることはできないが、図 5 および表 1 の結果から、き裂伝ば面を大略まとめると以下ようになる。まず、主ひずみ比が $-0.5 \leq \phi \leq 0.5$ の範囲の試験では、き裂は最大主ひずみ面または中間主ひずみ面で発生し、最大せん断ひずみ面に遷移する傾向があるようである。

(a)

(b)

(c)

(d)

図 7 SUS 304 ステンレス鋼の破面の傾きを示す写真

$\phi = -1$ の試験では、著者らの先の報告⁽¹⁾⁽²⁾と考え合せると、き裂が主ひずみ面か最大せん断ひずみ面のどちらに伝ばするのには極めて不安定な状況にあり、試験条件によってどちらの面に伝ばするかが変化するようである。 $\phi = -1$ では孤立したき裂が進展する場合には主ひずみ面を伝ばし、き裂の合体が多く起こる場合は最大せん断ひずみ面を伝ばする傾向があるようである⁽¹²⁾⁽¹³⁾。 $\phi = 1$ の試験では中間ひずみ面を伝ばする。

3・4 $0 < \phi \leq 1$ の主ひずみ比の下でのき裂モード

図5で X , Y および Z 軸方向のひずみ振幅の大きさを示したが、図5からわかるように、 $0 < \phi \leq 1$ の試験においては最大ひずみ振幅を受ける面 (ϵ_1 面) は板厚方向に垂直な面 (X - Y 面) である。しかし、この面は自由境界と平行であることから応力は働いていない。 $0 < \phi \leq 1$ の主ひずみ比の範囲のき裂モードを考察することは、ひずみと応力がどのようにき裂のモードに関係しているかを考察するうえで興味深い問題である。

さて、表1および図5に示すように、 $0 < \phi \leq 1$ の主ひずみ比の範囲の試験ではき裂はいずれも中間主ひずみ面(一部のものは最大せん断ひずみ面)を伝ばしており、このことは、ひずみ振幅のみでは、き裂のモードは説明できず、応力やその他の因子を考慮する必要があることを示している。この実験結果は、多軸応力下での低サイクル疲労破壊クライテリオンを開発する際、主ひずみ比のみの関数では不十分で応力など⁽⁸⁾⁽¹⁶⁾を加味する必要を示唆しているものと考えられる。

図8に最も板厚方向のひずみ振幅が大きくなる $\phi = 1$ の破面写真を示すが、図8(b)からわかるように、 $\phi = 1$ の試験では、破面に試験片表面に平行 (X - Y 面に平行) なき裂がところどころに観察された。このことは、ひずみ振幅が十分大きい場合には、たとえ応力が負荷されなくても ($\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$)、部分的な破壊を生じることを示しているものと考えられる。

この場合のストライエーションは試験片表面に平行 (X 軸方向に平行) であり、き裂は Z 軸方向に進展したことを示している。 $\phi = 1$ 以外の場合では、ストライエーションの観察からき裂はいずれも X 軸方向に進

展していた。き裂が板厚方向に伝ばしたということは、き裂の伝ば距離は板厚(この場合1mm)であるので、伝ば期間が極めて短くなることを示唆している。図2(a)にすでに示したが、1Cr-1Mo-1/4V鋼の $\phi = 1$ の場合は、 N_c/N_f が90%と N_c が N_f と極めて近く、このことはき裂伝ば方向が板厚方向であるということから示唆されることとよく一致している。

3・5 多軸応力下でのき裂モード 図4に $-1 \leq \phi \leq 1$ の主ひずみ比の範囲の試験での垂直ひずみ振幅とせん断ひずみ振幅をまとめたものを示す。図9中の折れ線 ABC は最大せん断ひずみ面上でのせん断ひずみ $\gamma_{\max}$ を示し、GHI はその面上での垂直ひずみ ϵ_n の大きさを表している。また、直線 DEF は ϵ_y 面上での垂直ひずみ、折れ線 DEJK は最大主ひずみ ϵ_1 の大きさを表している。図9中の△印はき裂が $\alpha = 0^\circ$ 方向に伝ばしたときのき裂面を示しており、また、□印は $\alpha = 90^\circ$ のときのき裂面を表している。

図9からわかるように、 $-0.5 \leq \phi \leq 0.5$ の主ひずみ比の範囲において、 $\alpha = 0^\circ$ の場合は ϵ_y 面をき裂が伝ばし、モード I 形き裂であることがわかり、 $\alpha = 90^\circ$ の場合には、 $\gamma_{\max}$ 面上をき裂が伝ばし、このときモード I + III 形の混合モードとなる。ただし、 $\phi = 0$ の主ひずみ比の試験においては、 $\gamma_{\max}$ 面上での垂直ひずみが零となるのでこの場合はモード III 形のみとなる。

一方、 $\phi = -1$ の試験においては、 $\alpha = 0^\circ$ の場合も、 $\alpha = 90^\circ$ の場合も常にき裂は ϵ_y を伝ばし、モード I 形き裂である。しかし、図9中に▲印で表したように、モ

(a) 1Cr-1Mo-1/4V 鋼

(b) SUS 304 ステンレス鋼

図8 $\phi = 1$ の破面の写真

表1 各主ひずみ比におけるき裂成長面

ϕ	-1	-0.5	0	0.5	1
1Cr-1Mo-1/4V	$\epsilon_{1,2}$	$\epsilon_{1,2}^* \rightarrow \gamma_{\max}^*$	$\epsilon_{1,2}^* \rightarrow \gamma_{\max}$	$\epsilon_{2,3}^* \rightarrow \gamma_{\max}^*$	$\epsilon_{2,3}$
SUS304	$\epsilon_{1,2}$ $\gamma_{\max}^{***}$	ϵ_1 $\gamma_{\max}^*$	$\epsilon_{1,2} \rightarrow \gamma_{\max}$	ϵ_2 $\gamma_{\max}^*$	$\epsilon_{2,3}$

* Partly observed crack

** Crack near the notch (smaller than 0.1mm in length)

*** Model cracks linked up to form mode II cracks

図 9 各主ひずみ比におけるひずみ関係

ード I 形き裂が連結して生じるモード II 形き裂もこの場合には存在する(図 4 参照)。

$\phi=1$ の試験においては, $\alpha=0^\circ$ 方向に伝ばしたき裂のみしか存在せず, このときのき裂伝ば面は ε_γ 面であり, モード I 形き裂である。

Brown⁽¹⁵⁾らや Lohr⁽¹⁷⁾らはそれぞれ Γ 面や Γ^* 面がき裂面であるとし, 多軸疲労破損パラメータを提案している。図 9 との対応でいえば, Γ 面は折れ線 ABC で表され, Γ^* 面は直線 DBC で示される。図 9 の結果は, Γ 面はき裂がせん断ひずみ面を $\alpha=90^\circ$ の方向に伝ばするときのみ, $\phi=-1$ を除くその他の主ひずみ比の範囲で正しいことを示しており, また, $-1 \leq \phi < -0.5$ の主ひずみ比の範囲では Γ^* 面に伝ばしないことを示している。

3・6 き裂進展に伴うポテンシャルエネルギー

3・5 節で述べたように $-1 \leq \phi \leq 1$ の主ひずみ比の範囲ではき裂のモードは複雑であったが, この点を考察するために, 板厚方向に貫通したき裂を対象にして, 弾塑性有限要素法を用いて, ポテンシャルエネルギーの面より考察した。すなわち, $-1 \leq \phi \leq 1$ の主ひずみ比の範囲の試験において, ε_γ 面にき裂が存在する場合と, $\gamma_{\max}$ 面にき裂が存在する場合を想定し, 両者とも, き裂半長が 2 mm から引き続いて同一き裂面上で 0.1 mm さらに進展したときに解放されるポテンシャルエネルギーを算出した。

有限要素法解析に用いた要素分割図は既報⁽¹³⁾と同一であるので, 紙面の都合で図示は省略するが, 負荷条件を図 10 に示す。図 10(a) は ε_γ 面にき裂が存在する場合, 図 10(b) は $\gamma_{\max}$ 面にき裂が存在する場合であるが, $\phi=-1$ の $\gamma_{\max}$ のき裂は前述したようにモード II となるので, 図 10(c) に示すような解析を行った。図 10(a), (c) は二次元平面問題として解析し, 図

図 10 変位を与えた方向を示す模式図

図 11 ポテンシャルエネルギー変化と主ひずみ比の関係

10(b) は板厚 1 mm の三次元解析を実施した。図 10(a), (c) の要素数および節点数はそれぞれ 148, 464 であり, 図 10(b) のそれらは 74, 580 である。二次元解析には, 8 節点, 三次元解析には 20 節点アイソパラメトリック要素を用いた。なお, き裂先端にはアイソパラメトリック特異要素を用いた。構成関係は SUS 304 ステンレス鋼の 923 K を対象とし, 降伏応力 122 MPa, ヤング率 150 000 MPa, ポアソン比 0.3, 降

伏後の応力-ひずみ関係を七つの折れ線で近似したものを用いた。なお、解析は荷重点の強制変位が 0.0578 mm になるまで行い、各軸方向の荷重-変位線図のき裂進展前後の面積差を求め、それぞれをたし合せることによってポテンシャルエネルギーを算出した。

図 11 にポテンシャルエネルギー変化の解析結果を示す。白丸は主ひずみ面 ($-1 \leq \phi \leq 0$ は ε_1 面, $\phi = 0.5$, 1 はそれぞれ ε_2 面および $\varepsilon_{2,3}$ 面) にき裂がある場合の結果で、黒丸は最大せん断ひずみ面 ($\gamma_{\max}$ 面) にき裂が存在するときの結果である。全主ひずみ比範囲において、き裂の破壊モードの違いによるポテンシャルエネルギー変化の差はほとんどないことがわかる。この結果から、全主ひずみ比範囲 ($-1 \leq \phi \leq 1$) において、き裂は主ひずみ面および最大せん断ひずみ面にいずれも伝ばする可能性があると思われる。また、 ϕ が大きくなるほど、き裂進展に伴って解放されるエネルギーが大きくなり、このことは ϕ の大きいもののほどき裂伝ば速度が大きくなることを示唆している。しかし、上記の結果は板厚方向に貫通したき裂が生じ、き裂伝ば方向 α が $\pm 90^\circ$ の場合のものである。3.5 節の破面観察から試験片板厚方向に伝ばする場合と、試験片表面と平行な方向に伝ばする場合とでき裂の破壊モードは異なっており、ポテンシャルエネルギー変化を、き裂の伝ば方向 α も考慮して解析することが今後の課題といえる。

4. 結 言

1Cr-1Mo-1/4V 鋼および SUS 304 ステンレス鋼の十字形試験片を用いて主ひずみ比が $-1 \leq \phi \leq 1$ の範囲で、ひずみ制御の高温二軸低サイクル疲労試験を実施し、低サイクル疲労破面を板厚方向の傾きも含めて詳細に観察した結果、以下のような結論が得られた。

(1) 破面と試験片板厚方向の傾き θ 、破面上でき裂伝ば方向と板厚方向との角度を α とすると、全主ひずみ比 $-1 \leq \phi \leq 1$ の範囲で、各主ひずみ比の試験でのき裂モードはき裂伝ば方向 α のみ依存した。

(2) 主ひずみ比 ϕ が -1 の試験では、き裂が板厚方向に伝ばする場合 ($\alpha = 0^\circ$) およびき裂が試験片表面に平行に伝ばする場合 ($\alpha = 90^\circ$) のいずれも、き裂の破壊モードは最大主ひずみ面のき裂であった。このき裂はモード I 形き裂であった。

(3) 主ひずみ比が $-0.5 \leq \phi \leq 1$ の試験では、き裂が板厚方向に伝ばする場合 ($\alpha = 0^\circ$)、き裂の破壊モードは主ひずみ面 ($-0.5 \leq \phi \leq 0$ は最大主ひずみ面, $0.5 \leq \phi \leq 1$ は中間ひずみ面) のモード I 形き裂で、き裂が

試験片表面に平行に伝ばする場合 ($\alpha = 90^\circ$)、き裂の破壊モードは最大せん断ひずみ面を伝ばするモード I + III 形の混合モードき裂であった。ただし、 $\phi = 0$ においては、純モード III 形き裂であった。

(4) 主ひずみ比 $-0.5 \leq \phi \leq 0.5$ の範囲で、き裂は主ひずみ面から最大せん断ひずみ面のき裂に遷移する傾向があった。

(5) き裂進展に伴うポテンシャルエネルギー変化を、各主ひずみ比における主ひずみ面と最大せん断ひずみ面で、き裂が試験片表面と平行な方向に伝ばしたとき ($\alpha = \pm 90^\circ$) について解析した結果、き裂の破壊モードの違いによるポテンシャルエネルギー変化の差はほとんどなかった。このことは、き裂は主ひずみ面と最大せん断ひずみ面の両者に進展する可能性を示唆しているものと考えられる。また、主ひずみ比が増加するに従い、き裂進展に伴って解放されるエネルギーも大きくなることが判明した。

最後に、本研究を行う際協力していただいた当時立命館大学理工学部機械工学科 4 回生 北辻博明君、木崎智思君に謝意を表す。

文 献

- (1) Brown, M.W. and Miller, K.J., *ASTM Spec. Tech. Publ.* **770** (1982), 482.
- (2) Ohnami, M., Sakane, M. and Hamada, N., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, **853** (1985), 622.
- (3) *International conference, Biaxial/Multiaxial Fatigue*, (1985), Sheffield.
- (4) 大南・坂根・浜田・材料, **35-390** (1986), 230.
- (5) 坂根・大南・久野・伊津村, 材料, **37-414** (1988), 340.
- (6) Ohnami, M. and Hamada, N., *Proc. 25th Jpn. Congr. Mater. Res.*, (1982), 93.
- (7) Hamada, N., Sakane, M. and Ohnami, M., *Fatigue Eng. Mater. Struct.*, **7** (1983), 85.
- (8) Ohnami, M., Sakane, M. and Hamada, N., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, **853** (1985), 622.
- (9) Hamada, N., Sakane, M. and Ohnami, M., *Proc. 30th Jpn. Congr. Mater. Res.*, (1987), 69.
- (10) Hamada, N., Sakane, M. and Ohnami, M., *Bull. JSME*, **28** (1985), 1341.
- (11) Sakane, M., Ohnami, M., Nishino, S. and Hamada, N., *Proc. Int. Conf. Creep, JSME-IME ASME-ASTM*, (1986), 477.
- (12) Sakane, M., Ohnami, M. and Sawada, M., *Trans. ASME, J. Eng. Mater. Tech.*, **109** (1987), 236.
- (13) Sakane, M., Ohnami, M. and Hamada, N., *Trans. ASME, J. Eng. Mater. Tech.*, **110** (1988), 48.
- (14) Ohnami, M., Sakane, M. and Nishino, S., *Current Japanese Materials Research.*, **3** (1987), 165, Elsevier Applied Science.
- (15) Brown, M.W. and Miller, K.J., *Fatigue Eng. Mater. Struct.*, **1** (1979), 231.
- (16) Ohnami, M., *Proc. Int. Conf. Life Assess. Exten.*, Netherlands, Paper 3.3.4 (1988).
- (17) Lohr, R.D. and Ellison, E.G., *Fatigue Eng. Mater. Struct.*, **3** (1980), 1.