トポグラフィ手法による高温疲労破面の三次元解析†

大 塚 尚 武* 小 林 隆 夫**
渡 士 克 己*** 菊 池 政 之***

Topographic Analysis of Fracture Surface after Fatigue Test
at Elevated Temperature

by

Naotake OHTSUKA*, Takao KOBAYASHI**, Katsumi WATASHI***
and Masayuki KIKUCHI***

The fracture surface topography analysis (FRASTA) technique was applied to investigate the fatigue cracking of SUS304 stainless steel specimen at elevated temperatures. The specimen with single edge notch was subjected to 2603 cycles of fatigue at a constant strain range at 600°C. After the test, the topographic features of the conjugate fracture surfaces were compared using the FRASTA technique and fracture mechanics analysis was conducted. The analysis showed that a macroscopic fatigue crack was initiated at around 1000 cycles and then propagated at nearly a constant rate. These features and the expected crack growth rate coincided well with the experimental observation. This indicates that the FRASTA technique is applicable to the estimation of fatigue cracking at elevated temperatures.

Key words : Fracture surface, Topography, Fatigue, Crack, Fracture mechanics, Elevated temperature, Computer analysis, SUS304 stainless steel

1 緒 言

フラクトグラフィは破壊の事故原因の推定や破壊機構の解明をするための有力な手段であるが、簡便のために破面の平面的な観察にとどまる場合が多い。しかし、破面を三次元観察すると、得られる情報が増し、新たな知見が得られることが多い¹⁾。また、コンピュータを利用して破面をシステムティックに三次元解析するトポグラフィ手法を用いると、破壊過程をシミュレートすることもできる^{2),3)}。そこで、高温機器の設計や保守上重要なクリープ疲労き裂進展問題への本トポグラフィ手法の適用性を検討するため、高温疲労試験で得られた SUS304 鋼の破面に適用し、実測した疲労き裂の進展挙動と比較した。

2 解 析 対 象

解析の対象とした材料は、Table I の化学成分と Table II の機械的性質をもつ SUS304 ステンレス鋼である。試験片形状は Fig. 1 に示す片側切欠き付きの曲げ試験片であり、切欠き底の試験部分の寸法は厚さ 12 mm、幅 8 mm である。本試験片は、Fig. 2 のように高周波誘導加熱により 600°C 一定に保持し、曲げ

レバーを介して定ひずみ高温曲げ疲労試験を行なった。Fig. 2 に示す切欠き底をはさんだ標点間距離 15 mm の位置に SUS316 製の薄板を折り曲げたツメをスポット溶接し、これに押し当てるように取り付けられた伸び計の出力と切欠き底に貼り付けたひずみゲージ出力との関係を予め室温で求めておき、切欠き底の繰返しひずみ範囲が 1.2% 一定となるように伸び計出力を制御した。ひずみ波形は保持時間 0 の三角波、ひずみ速度は 1×10^{-4} mm/mm/s で行なった。試験中のき裂長さの測定は写真撮影により行なった。その結果によると、繰返しサイクル 10 回目で切欠き底から微

Table I. Chemical composition of material (wt. %).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.06	0.50	1.68	0.024	0.005	8.61	18.1

Table II. Mechanical properties of material.

Temp. (°C)	Y. S. (MPa)	T. S. (MPa)	R. A. (%)	El. (%)	H _b
RT	259	571	76.5	63.8	146

† 原稿受理 平成元年11月4日 Received Nov. 4, 1989

* 正 会 員 龍谷大学理工学部 大津市瀬田大江町横谷, Faculty of Science and Technology, Ryukoku University, Yokotani, Oe-cho, Seto, Ohtsu

** SRI インタナショナル Poulter Laboratory, Stanford Research Institute, Ravenswood Ave., Menlo Park, CA94025, U. S. A.

*** 動力炉核燃料開発事業団大洗工学センター 茨城県東茨城郡大洗町成田町, Oarai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp., Naritamachi, Oarai-cho, Higashiibaraki-gun, Ibaraki

Fig. 1. Geometry of notched specimen.

Fig. 2. Apparatus for bending specimens.

小さき裂が、また 1100 回で巨視き裂が発生した。その後、2603 回で試験を中止した。

3 解析方法

試験中止後、試験片を液体窒素温度に冷却して過大荷重を加え、強制分離した。そして上下破面 A および B について、それぞれ試験片破面から約 7 mm 離れた位置で Fig. 1 の基準側面 C に直角になるように放電加工にて精密切断し、破面観察試料を作成した。破面試料上で、Fig. 3 の長方形の枠で示す上下試料 A および B の対応する同一位置について、それぞれ走査電子顕微鏡を用いたステレオ写真を撮影した。ステレオ写真の撮影は、破面試料の背面を基準にしてその面に垂直な方向から $\pm 4.0^\circ$ 回転させた 2 方向から 20 倍の最低倍率で行なった。さらに、各破面試料のステレオ写真をもとに航空写真解析図化機を用いて破面の等高線データを作成し、磁気テープに出力した。この

Fig. 3. Area for topographic examination of Surface A.

磁気テープに記憶された等高線データをコンピュータに読み込み、コンピュータ内で上下破面試料 A および B の等高線データを反転、拡大、縮小、回転、移動などの座標変換を施して重ね合わせ、上下破面間に空間が生じないように相対位置を調整した。さらに、上側破面の等高線データの破面垂直方向への移動量 δ を逐次制御することによって破壊進行時の上下破面間の空間の変化をシミュレートした。このときの破壊進行状況を、一定の破面垂直移動量 δ ごとに透視図および横断面図に出力した。ただし、透視図は破面垂直方向から破面試料を透視したときに上下破面間の空間を白地で示したものであり、横断面図はマクロ的なき裂進展方向に平行な断面における上下破面の重なりぐあいを示したものである。

4 解析結果

A および B 側破面試料の破面全体写真を Fig. 4 に、Fig. 3 の観察位置における A 側試料破面の走査電子顕

(a) Surface A.

(b) Surface B.

Fig. 4. A pair of photographs from top fracture surface of SUS304 steel. Crack propagation direction is from bottom to top.

(a) Initial stage of crack propagation. (b) Final stage of crack propagation.

Fig. 5. SEM photographs of fracture surface of Surface A. Crack propagation direction is from bottom to top. ($\times 730 \times 0.71$)

(a) Surface A.

(b) Surface B.

Fig. 6. A pair of topographic maps corresponding to the marked area in Fig. 3. Crack propagation direction is from bottom to top.

微鏡写真を Fig. 5 に示す。A および B 側破面試料の等高線図を Fig. 6 に示す。図中の破線で示した等高線は間曲線で、実線間の中間の高さを示す。間曲線を含む等高線の本数は A および B 側破面試料上でそれぞれ 26 および 28 本、等高線の高さ間隔およびデータ間隔は両破面試料共それぞれ $29 \mu\text{m}$ および $25 \mu\text{m}$ とし

Fig. 7. Series of fractured-area projection plots. Crack propagation direction is from bottom to top.

Fig. 8. Cross-sectional view of crack face opening profiles at the center of abscissa in Fig. 7. Crack propagation direction is from the right to the left.

た。これらの等高線データをもとに、コンピュータを用いて破壊過程を三次元解析した結果得られた破面の透視図の例を Fig. 7 に、また、Fig. 7 の透視図の横軸の中央の位置における横断面図の例を Fig. 8 に示す。両図中の δ の値は破面垂直移動量を示す。Fig. 7 の透視図の分解能は 200×200 であり、図中の黒地は上下破面が開いていない部分を、白地は上下破面間に空間が生じている部分を示す。Fig. 8 の横断面図中の水平方向のスリット状の部分は上下破面間の開口部分を示し、縦軸の単位は μm である。また、図中の二重に塗りつぶした部分は上下破面が重なっている部分を示し、横軸上の任意の位置における縦軸方向のその幅は、各位置で図の状態から破断にいたるまでの変形量に相当する。

5 考 察

5・1 き裂のマクロ的な進展挙動

Fig. 5 によると、試料破面には疲労によるストライ

エーションが明瞭にみられる。Fig. 7 の破面試料の透視図および Fig. 8 の横断面図の例によると、高温疲労試験によりき裂はマクロ的には Fig. 4, Fig. 6 および Fig. 7 の右下部、すなわち切欠き底の試験片側面から発生した後、左側、すなわち切欠き底の試験片板厚中心部へ進展している。その後、き裂先端形状は板厚中心部での加速により切欠き底とほぼ平行になり、さらに板厚中心部の方が逆に早くなるという現象がみられる。最終段階に近い透視図(d)上でき裂先端形状が若干下に凸状になっている。これは上下破面の相対回転角がき裂進展途中から増大しているが、コンピュータ上の制約から現状では大きな回転角を入力できないことによる。しかし Fig. 7 は、Fig. 3 の破面の右下枠内部分に対応しているので、試験片側面部付近 (Fig. 7 の右側) を除けば Fig. 3 および Fig. 4 の最終的なき裂前縁形状に近く、巨視的なき裂進展挙動と矛盾しない結果が得られたと考えられる。

5・2 き裂先端開口変位と平均き裂深さとの関係

Fig. 7 の透視図で、き裂が開口している白地部分の面積 A と透視図の面積 A_0 との比をデジタルカメラで読み取り、次式により平均き裂深さ a を求める。

$$a = l_0 + lA/A_0 \quad (1)$$

ただし、 l_0 はき裂発生位置に対応する切欠き底表面と透視図表示範囲の最下線との距離 (0.11 mm)、 l は透視図表示範囲のき裂進展方向長さ (3.94 mm) である。得られた平均き裂深さ a と破面垂直移動量 δ との関係を図 9 に示す。

Fig. 7 および Fig. 8 のコンピュータ解析結果は、き裂進展時の破面間の垂直方向の変形のみを考慮して回転変形による影響を無視している。そこで、高温疲労試験の最終サイクル時に実測したき裂端面開口変位

Fig. 9. Relationship of elevation δ and crack tip opening displacement CTOD with mean crack length. a .

EOD の値 ($=0.138$ mm) と、その時のき裂深さに対応する破面解析結果で得られた破面垂直移動量 δ^* ($=0.708$ mm) を用いて、次式により破面垂直移動量の補正值 δ' を求める。

$$\delta' = \frac{\delta}{\delta^*} (EOD) \quad (2)$$

また、Fig. 2 の負荷方法からわかるように、解析対象の試験片は純曲げに近い繰返し変形を受けているので、さらに曲げ変形によるき裂先端開口変位 CTOD を次式により求める。^{4),5)}

$$\begin{aligned} CTOD &= \frac{r(W-a)\delta'}{a+r(W-a)} \\ &= \frac{(3.124-0.4a)\delta'}{3.124+0.6a} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 W は試験片の板幅 ($=7.81$ mm) であり、 r は回転係数でここでは一定値 0.4 をとると仮定する。^{4),5)} 以上の解析で得られたき裂先端開口変位 CTOD と平均き裂深さ a との関係を図 9 に示す。

5・3 き裂進展挙動の推定

一般にき裂進展速度、 da/dN 、と応力拡大係数または J 積分の変動範囲、 ΔK または ΔJ 、との間には次の関係が認められる。

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

$$da/dN = D(\Delta J)^n \quad (5)$$

ただし、 C 、 D および m 、 n は試験条件、材質などに依存する定数である。ダグデイルモデルによると弾塑性状態ではき裂先端開口変位 CTOD と K_I または J との間に次の関係が成立する。⁵⁾

$$CTOD = \frac{(1-\nu^2)K_I^2}{\lambda E \sigma_{fs}} \quad (6)$$

$$CTOD = \frac{J}{\lambda \sigma_{fs}} \quad (7)$$

ここで、 ν 、 E および σ_{fs} は材料のポアソン比、縦弾性係数および流動応力 (降伏応力と引張強さの平均値) で、 λ は係数である。式 (6) の K_I を式 (4) の ΔK に、式 (7) の J を式 (5) の ΔJ にそれぞれ代入して積分すると次式が得られる。

$$N = \frac{1}{C} \left(\frac{1-\nu^2}{\lambda E \sigma_{fs}} \right)^{m/2} \int (\Delta CTOD)^{-m/2} da \quad (8)$$

$$N = \frac{1}{D(\lambda \sigma_{fs})^n} \int (\Delta CTOD)^{-n} da \quad (9)$$

ここで式 (8) または式 (9) 中の各定数を次のように仮定する。

$$\lambda = 1/0.6, \quad \nu = 0.3 \quad (\text{大変形 FEM 解析の場合})^{5)}$$

$$\lambda = 1, \quad \nu = 0 \quad (\text{ダグデイルモデルの場合})^{5)}$$

$$E = 15200 \text{ kgf/mm}^2 (=149 \text{ GPa}, 600^\circ\text{C での値})$$

$$\sigma_{fs} = (13.06 + 35.0)/2 = 24.0 \text{ kgf/mm}^2$$

$$(=235 \text{ MPa}, 600^\circ\text{C での値})$$

Fig. 10. Crack propagation data of SUS304 steel at 600°C in Ref. 6).

Fig. 11. Crack propagation data of SUS304 steel at 550 and 650°C in Ref. 7).

$C=5.85 \times 10^{-8}$, $m=2.21$ (工学単位系)

(Fig. 10 の SUS304 鋼の 600°C での高温疲労試験結果による)⁶⁾

$D=1.20 \times 10^{-3}$, $n=1.44$ (工学単位系)

(Fig. 11 の SUS304 鋼の 550°C および 650°C での高温疲労試験結果の平均線による)⁷⁾

Fig. 9 のき裂先端開口変位 $CTOD$ と平均き裂深さ a との関係式 (8) および式 (9) の $\Delta CTOD$ に代入し、大変形 FEM 解析の場合 ($\lambda=1/0.6$, $\nu=0.3$) およびダグデイルモデルの場合 ($\lambda=1$, $\nu=0$) について積分範囲 a_0 から a まで数値積分すると、初期き裂深さが a_0 のときの繰返し数 N とき裂深さ a との関係が得られる。ここで最終繰返し数を 2603 回とすると、高温疲労試験中のき裂深さの進展曲線が Fig. 12 のように求まる。

5・4 解析によるき裂進展挙動と実測結果との比較

Fig. 12. Relationship between crack length, a , and number of fatigue cycles, N , obtained by the present analysis.

Fig. 12 のき裂進展解析結果によると、高温疲労試験時の巨視的き裂の発生繰返し回数は、破壊パラメータとして応力拡大係数 K_I を用いた場合 (中空印) より J 積分を用いた場合 (中実印) の方が、また大変形 FEM 解析による係数 $\lambda=1/0.6$, $\nu=0.3$ を用いた場合 (丸印) よりダグデイルモデルによる係数 $\lambda=1$, $\nu=0$ を用いた場合 (四角印) の場合の方がそれぞれ少なくなっている。いずれの場合も、き裂進展速度はき裂発生直後の初期段階を除いた全期間でほぼ一定となっている。このことは、Fig. 5 の走査電子顕微鏡写真で観察される疲労によるストライエーション間隔がき裂先端位置によらずほぼ一定の値 $1.6 \sim 2.7 \mu\text{m}$ 程度であることと一致している。このストライエーション間隔の測定値は、Fig. 12 の大変形 FEM 解析で J 積分を用いた場合 (●印) の繰返し 1 回当たりのき裂進展量約 $2.8 \mu\text{m}$ 、およびダグデイルモデルで J 積分を用いた場合 (■印) のき裂進展量約 $1.3 \mu\text{m}$ の中間にあり、前者に近い。この前者 (●印) のき裂進展挙動は、高温疲労試験中に読み取り顕微鏡を用いて実測した Fig. 13 のき裂進展曲線ともかなりよく一致しており、しかも、Fig. 13 で巨視的き裂発生繰返し回数が約 1100 回となっている観察結果ともほぼ一致している。

Fig. 13. Fatigue crack extension curve measured during fatigue test at 600°C.⁷⁾

以上の結果は、本解析に用いたトポグラフィ手法が、高温疲労試験中のき裂進展挙動をかなり精度よくシミュレートし得ることを示している。

6 結 論

破壊後の破面情報をもとにコンピュータを用いた三次元解析を行い、破壊過程をシミュレートするトポグラフィ手法を、SUS304 ステンレス鋼の高温曲げ疲労破面に適用した。解析の結果、き裂は疲労試験の初期を除いてほぼ一定の速度で進展したと推定され、試験中のき裂進展曲線は実測の結果とよく一致した。この結果から、本手法が高温疲労によるき裂進展挙動のシミュレートにも十分使用できることがわかった。特に、き裂進展解析では、破壊パラメータにJ積分を用い、J積分とき裂先端開口変位CTODとの関係に大変形FEM解析により得られた式およびダグデイルモデルにより得られた式の中間のモデルを用いれば最も実測結果に近い結果が得られることがわかった。

解析に際しては、千代田化工建設(株)のご協力を得た。記して関係各位に謝意を表する。

(平成元年9月28日 第5回破壊力学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 大塚尚武, 日本機械学会論文集, A-54, 498, 333 (1988).
- 2) T. Kobayashi, G. R. Irwin and X. J. Zhang, ASTM STP 827, 234 (1984).
- 3) T. Kobayashi and D. A. Schockey, Metal. Trans. A. 18A, 1941 (1987).
- 4) BS PD6493, British Standard Inst. (1980).
- 5) 日本機械学会基準, 弾塑性破壊靱性, J_{IC} 試験方法, JSME S-001, 46; 64 (1981).
- 6) JWES-AE-8402, J925, 84-01, 2 (1984).
- 7) 動力炉核燃料開発事業団の資料 (1987).

書 評

“破壊と材料”

日本材料科学会(編)

(1989年, (株)裳華房発行, A 5判, 207ページ, 3300円)

本書は、日本材料科学会が編集を行っている先端材料シリーズの中の1冊として出版されたものである。各種工業用材料の破壊および破壊力学に関して、以下の構成で述べられている(カッコ内は執筆者)。

1. 材料の破壊と破壊力学(小林英男)
2. 金属材料の破壊(武藤陸治)
3. セラミック材料の焼結, 強度, 破壊(田中紘一)
4. 高分子材料の破壊(宮入裕夫)
5. 複合材料の破壊(宮入裕夫)

第1章では材料の破壊に関する一般論と、破壊力学の基礎および、損傷許容設計について述べられている。第2章では、鉄鋼, アルミニウム合金, チタン合金, 高融点金属, および焼結合金の破壊の種類と機構およびこれらと破壊じん性値との関係が述べられている。第3章では、セラミック材料の機械的性質, 弾性的性質, 化学結合, および焼結方法について述べられている。第4章では、工業材料として広く用いられる代表的な高分子材料を中心に、その力学的挙動, ぜい性破壊と延性破壊, 衝撃壊, 疲労, および環境強度, クリープ特性に関して述べられている。第5章では、繊維を強化材とするプラスチック系複合材料を対象に、繊維強化の機構と、複合材料の破壊および強度について述べられている。

本書の読者としては、大学上級学生および大学院修士課程の学生が対象とされている。しかしながら、力学の基礎的な事項の説明がいくつかの章に分散, あるいは重複していることや, 各章内の構成が材料によって必ずしも統一されていないことなどのため, 全くの初心者には戸惑うかもしれない。すでに, ある程度の基礎知識をもった技術者や研究者が, これまでに自分が扱ってきた材料に関する知識を整理するとともに, それ以外の材料に関する新たな知識を得るための参考書としては, 読みごたえのある本である。

(大阪大学工学部 中井 善一)