

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	デジタル画像相関法によるNi基超合金のき裂先端ひずみ場の測定
Title(English)	Strain field measurement around the crack tip in Ni-base superalloy using Digital Image Correlation
著者(和文)	大塚勇貴, 阪口 基己, 黒川 悠, 井上裕嗣
Authors(English)	Yuki Otsuka, Motoki Sakaguchi, Yu Kurokawa, Hirotsugu Inoue
出典(和文)	日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 866, pp. 18-00246
Citation(English)	Transactions of the JSME (in Japanese), Vol. 84, No. 866, pp. 18-00246
発行日 / Pub. date	2018, 9

デジタル画像相関法による Ni 基超合金のき裂先端ひずみ場の測定

大塚 勇貴^{*1}, 阪口 基己^{*2}, 黒川 悠^{*2}, 井上 裕嗣^{*3}

Strain field measurement around the crack tip in Ni-base superalloy using Digital Image Correlation

Yuki OTSUKA ^{*1}, Motoki SAKAGUCHI ^{*2}, Yu KUROKAWA ^{*2} and Hirotsugu INOUE ^{*3}

^{*1,*2,*3}Department of Mechanical Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

Received: XXXX; Revised: XXXX; Accepted: XXXX

Abstract

Digital Image Correlation (DIC) method was applied to measure the strain fields around the crack tip in a Ni-base single crystal superalloy. DIC systems were assembled to appropriately measure the strain fields at room temperature, 700 °C and 900 °C. Influences of crystallographic orientation and temperature on the crack tip strain fields were investigated. A series of measurement at room temperature revealed that cracks propagated in shearing mode and the strain fields around the crack tip were strongly affected by anisotropic plastic deformation along the octahedral slip system. Based on the shear strain components along the slip systems, effect of the crystal orientation on the strain field was visualized, and the visualized strain field provided a reasonable explanation on the crack propagation path and propagation rate. At 700 °C, on the contrary, cracks propagated in opening mode and symmetric shear strain fields were measured around the crack tip. Temperature dependent strain fields and resultant cracking modes were explained by the slip system activity which was also influenced by temperature. The present DIC systems could measure the strain field even at 900 °C, and it was found that the strain around the crack tip was higher at 900 °C than that at 700 °C.

Keywords : Digital image correlation, Strain field, Ni-base superalloy, Fatigue crack, Shearing mode, Opening mode, High temperature, Octahedral slip system

1. 結 言

き裂先端の力学場は疲労き裂の進展挙動を特徴づけるため、き裂先端の開口変位を実測する実験的な手法や、弾塑性破壊力学に基づいた解析的な手法により評価されてきた(國尾他, 1984)。それらの多くの研究は、負荷方向の応力・ひずみ成分が支配的となる開口型 (Mode I 型) のき裂を対象にしており、実測したき裂開閉挙動を基にした有効応力拡大係数やエネルギー解放率によりき裂進展駆動力を定量的に表現できることが知られている (Suresh, 2008)。ただし、発生初期の疲労き裂に代表される、結晶粒内のすべり面に沿ったせん断型 (第 I 段階型) 疲労き裂の場合、き裂先端で局在化するすべり変形や結晶粒界での不連続性の影響が大きくなり Mode I 型の破壊力学パラメータでは評価が難しい (岡崎他, 1994, 東郷, 2004)。

せん断型の疲労き裂進展が顕在化する材料のひとつとして、ガスタービンなどの高温高压部材として用いられる Ni 基超合金が挙げられる。Ni 基超合金の疲労き裂進展についてはこれまでも多くの研究が行われ、高温・低応力拡大係数の条件下では開口型の進展形態となり、それに対して低温・高応力拡大係数の条件下ではせん断型の進展挙動となることが知られている (Telesman and Ghoson, 1989, 1996, Suzuki et al., 2018)。著者らはこれまで、Ni 基超合金の単結晶材と多結晶材を対象とした室温での疲労き裂進展試験を行い、単結晶材でのせん断型疲労き裂進展は試験片の負荷方向とき裂進展方向の結晶方位に強く依存すること (阪口他, 2017)、多結晶材の結晶粒内

No.18-00246 [DOI: 10.1299/transjsme.18-00246]

^{*1} 学生員, 東京工業大学 工学院 機械系 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

^{*2} 正員, 東京工業大学 工学院 機械系

^{*3} 正員, フェロー, 東京工業大学 工学院 機械系

E-mail of corresponding author: sakaguchi@mep.titech.ac.jp

でのき裂進展はき裂長さと粒径の影響を受け、き裂長さに比して粒径が大きい場合にはせん断型で進展する傾向が強く、そのときの進展速度には単結晶材と同様の結晶方位依存性が見られること（檜垣他，2018）を明らかにした。また、単結晶材を対象にした結晶塑性有限要素解析を行い、せん断型き裂進展に与える結晶方位の影響は Mode I 型の応力拡大係数範囲では説明が難しく、弾塑性異方性を考慮したき裂先端近傍のすべり系活動量を個別に評価する必要があることを示した（Sakaguchi et al., 2017）。ただし、この現象を正確に理解し、き裂進展を特徴づける破壊力学パラメータを決定するには、応力ひずみ場を解析的に求めるだけでなく、せん断型き裂先端近傍の変形場を実測し、結晶粒の方位に依存した弾塑性異方性がすべり変形の分布や局在化に与える影響を把握する必要がある。また、耐熱材料としての Ni 基超合金の用途を考えると、ガスタービン動翼が曝される室温から 900 °C 程度までの温度域での変形場を実測し、温度環境がき裂先端変形場に与える影響を可視化するとともに、その変形場とき裂進展挙動との関連について考察できることが望ましい。この目的には、変形場を全視野かつ非接触で測定できるデジタル画像相関法（Digital Image Correlation, DIC）が相応しい（Peters and Ranson, 1982）。

DIC は、測定対象表面のランダムパターンの変化に基づいて面内方向の変位場とひずみ場を算出する手法であり、大型の実構造物（Yoneyama et al., 2007）や液体内に存在する物体（Ke et al., 2008）に適用できるなど汎用性が高い。室温でき裂先端の変形場を測定した例として、Peralta ら（2007）は多結晶純 Ni の開口型き裂先端を撮影した SEM 画像から数 μm の変位を測定し、すべり線に局在化するひずみとき裂進展経路を対応付けた。Carroll ら（2013）は、多結晶 Ni 基超合金のき裂進展にともなう塑性ひずみの蓄積過程を検討するため、DIC で測定したひずみ場と EBSD で測定した結晶方位マップを対応付けて考察した。高温でのひずみ場を測定した例としては、Lyons ら（1996）が恒温槽内で Ni 基超合金の引張試験を行い、650 °C での応力・ひずみ関係を DIC により測定した研究がある。また、Grant ら（2009）は、DIC に用いる光の波長を選択することで 1100 °C の高温環境にも適用できる測定手法を提案し、Ni 基超合金の縦弾性係数と線膨張係数を測定している。しかし、これらの手法をせん断型疲労き裂に適用し、すべり変形場とき裂進展挙動を関連付けた例はなく、それらの温度依存性を考慮した測定も行われていない。

本研究では、室温から 900 °C までの温度環境でひずみ場の実測が可能な DIC 測定系を構築し、Ni 基超合金のき裂先端ひずみ場に与える結晶方位と温度条件の影響を評価した。具体的には、まず、単結晶 Ni 基超合金から切り出した結晶方位が異なる 2 種類の CT 試験片に対し、室温で繰返し負荷を加えてせん断型の疲労き裂を導入し、き裂先端近傍のひずみ場を DIC を用いて測定した。次に、700 °C で繰返し負荷を加えることで開口型の疲労き裂を導入し、き裂先端のひずみ場を 700 °C と 900 °C で測定してひずみ場に与える温度環境の影響を検討しながら、測定されたひずみ場とすべり面の活動やき裂進展経路との関連について考察した。

2. 実験方法

2・1 CT 試験片の作製と疲労き裂進展試験

供試材は単結晶 Ni 基超合金の CMSX-4 に準じた単結晶材である。この単結晶材には CMSX-4 に 3 wt.% 含まれる Re が含まれないが、そのほかの化学組成は同等である（表 1 参照）。この鋳造板材から、図 1 に示す寸法の CT 試験片を切り出した。結晶方位の影響を検討するため、試験片を切り出す方向を変え、負荷方向とき裂進展方向がともに $\langle 100 \rangle$ 方位に配向した試験片と、ともに $\langle 110 \rangle$ 方位に配向した試験片の 2 種類を作製した。本論文では、著者らの文献（阪口他，2017）での表記に倣い、それぞれを $\langle 100 \rangle \langle 100 \rangle$ 試験片ならびに $\langle 110 \rangle \langle 110 \rangle$ 試験片と表記する。

作製した試験片に、室温と 700 °C で繰返し負荷を加えて疲労き裂を進展させた。試験には電気油圧式疲労試験機を用いた。試験は荷重制御で行い、負荷波形は正弦波、加振周波数は 10 Hz、荷重比は 0.4 とした。試験中はき裂長さに合わせて荷重を漸減させ、き裂先端の Mode I 応力拡大係数範囲 ΔK_I が 15 MPam^{0.5} で一定となるようにした。この条件での最大応力拡大係数は $K_{I,\text{max}} = 25 \text{ MPam}^{0.5}$ である。 ΔK_I の算出には ASTM E647-11（2011）にて規定されている以下の式を用いた。

$$\Delta K_I = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4), \quad \alpha = a/W \quad (1)$$

Table 1 Chemical composition of the single crystal Ni-base superalloy employed in this study, in wt.%.

Co	Cr	W	Al	Ti	Ta	Hf	Mo	Ni
9.65	6.49	6.37	5.69	1.0	6.57	0.09	0.6	Bal.

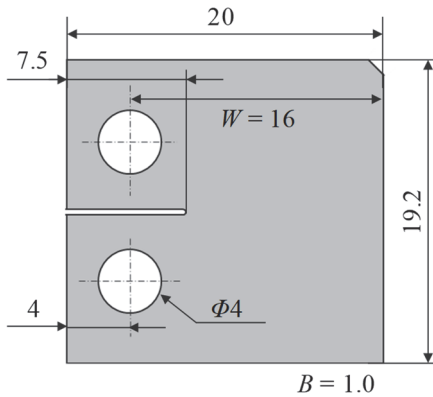


Fig.1 Geometry of CT specimen in mm.

Table 2 Summary of the specimens used in this study. Specimen labels, temperature conditions during crack growth tests, and schematic illustrations of crack path are summarized.

Specimen	Temperature condition	Crack path
<100><100>RT	RT	DIC measurement at RT
<100><100>HT	700 °C	DIC measurement at 700 °C and 900 °C
<110><110>RT	RT	DIC measurement at RT

ここで、 ΔP は荷重振幅、 B は試験片の厚さ、 W は荷重線から試験片端部までの距離、 a は投影き裂長さである。本研究では、試験片の結晶方位とき裂導入時の温度を変化させた 3 種の CT 試験片を準備した。3 種の試験片の結晶方位、き裂導入時の温度ならびに DIC によるひずみ場測定時の温度条件を表 2 にまとめて示す。<100><100>RT 試験片と<110><110>RT 試験片を比較することで結晶方位の影響を、<100><100>RT 試験片と<100><100>HT 試験片を比較することで温度に依存したき裂進展形態の相違がひずみ場に与える影響を考察した。また、<100><100>HT 試験片では 900 °C でもひずみ場を測定し、700 °C と 900 °C でのき裂先端ひずみ場の相違を考察した。

2・2 デジタル画像相関法によるひずみ場測定

表 2 に示した 3 枚の CT 試験片を対象にして、室温、700 °C ならびに 900 °C の 3 種の温度条件でき裂先端のひずみ場を DIC により測定した。ひずみ場の測定誤差が小さくなるよう、各温度条件において光学系と測定条件を適切に調整した。

2・2・1 室温での測定方法

ランダムパターンには直径約 5 μm の顔料からなる塗料 (Mr.カラー C1, C2, GSI クレオス) を用い、ノズル径 0.18 mm のエアブラシで試験片表面に塗布した。図 2 にランダムパターンとその拡大写真の一例を示す。試験片表面に粒径 50 μm 未満の白色粒子が不規則に付着していることがわかる。

光学系にはモノクロ CMOS カメラ (MQ042-MG-CM, XIMEA) と単焦点レンズ (AF MICRO NIKKOR 200mm, ニコン) を用い、光源には白色光を発するハロゲンランプを用いた。レンズ倍率は 1 倍、1 pixel の大きさは約 5 μm であり、撮影領域は約 11×11 mm^2 である。

DIC プログラムには、Blaber ら (2015) によって公開されている Ncorr v1.2.1 を用いた。変位算出は 5 pixels おきに行い、変位決定に用いるサブセット半径は 25 pixels とした。<100><100>RT 試験片と<110><110>RT 試験片を対象にして、き裂先端の Mode I 応力拡大係数が $K_{I1}=25 \text{ MPam}^{0.5}$ となるように負荷した状態でランダムパターンを撮影し、無負荷時の画像と比較することでき裂先端のひずみ場を算出した。

2・2・2 高温での測定方法

700 °C と 900 °C での試験系の外観を図 3 に示す。塗料には耐熱塗料 (VHT paints SP101, SP102, VHT Products Company) を用い、室温と同様にエアブラシによってランダムパターンを塗布した。高温では、試験片から放射される赤外線が強くなり輝度値が飽和するため、ランダムパターンを明瞭に撮影できなくなる問題が生じ

る。この赤外線とカメラ感度による輝度値の関係は Pan ら (2011) によって定量的に検討されている。彼ら検

討結果に基づき、700 °C での測定時には赤外線帯域を透過しない赤外線カットフィルター (DR655, ケンコー・トキナー) をレンズに取り付けた。また、高温環境では、試験片とカメラ間の空気の陽炎現象により撮影画像がゆがみ、変位の測定誤差が大きくなることも問題となる (Novak and Zok, 2011)。そのため、図3に示すように試験系の上側と左側の2方向からそれぞれファンとエアナイフで空気を吹き付け、試験片周囲の温度分布を均一に保った。また、Leplay ら (2015) により、露光時間を30秒程度に長くすることで陽炎現象に起因する測定誤差が減少できることが報告されている。これに基づき、本研究では計30秒露光させた複数枚の画像 (露光時間60 ms の画像500枚) の輝度値の平均を用いた。

900 °C では、赤外線カットフィルターの透過波長帯域においても試験片から放射される光の強度が大きくなるため、700 °C と同様の測定方法ではランダムパターンを撮影できない。1000 °C 以上の高温域での測定には赤外線帯域の波長を用いた UV-DIC が提案されている (Berke and Lambros, 2014) が、本研究では光学系を簡便にするため、Grant ら (2009) によって提案された青色光を透過するバンドパスフィルターを用いる方法を採用した。中心波長470 nm、半値幅45 nm のバンドパスフィルター (BN470, Midwest Optical Systems) をレンズに取り付け、光源には青色LEDを用い、黒体放射輝度の小さい青色光帯域を対象としてランダムパターンを撮影した。図4に赤外線カットフィルターとバンドパスフィルターの透過率を示す。ここには、CMOS カメラの量子効率、ならびに、プランクの法則から求めた700 °C と900 °C での黒体放射輝度も示している。図4に示すように、赤外線カットフィルターの透過帯域が約700 nm 以下であるのに対し、バンドパスフィルターの透過帯域は425~515 nm である。900 °C での黒体放射のエネルギー密度は700 °C と比較して約100倍大きくなるが、バンドパスフィルタ

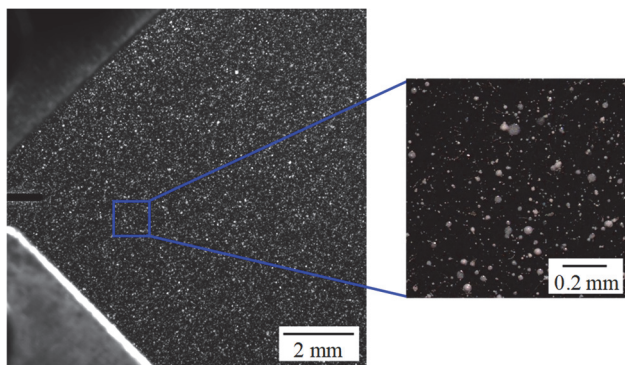


Fig.2 Random pattern employed in this study at room temperature. A white pattern is sprayed on black background. The diameter of the white patterns is less than 50 μm .

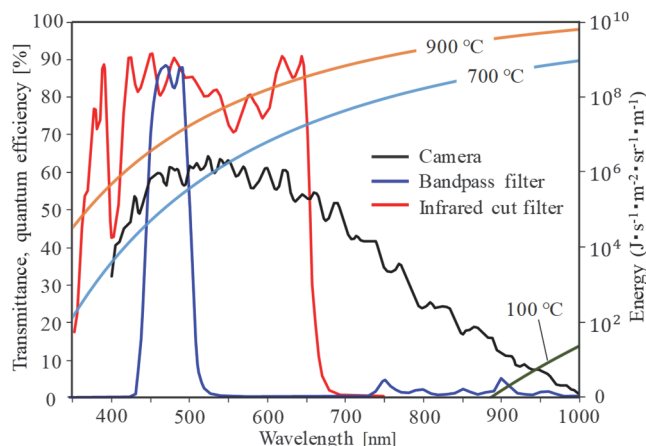


Fig.4 Transmittance and quantum efficiency of the optical systems compared with the black body radiation as a function of wavelength.

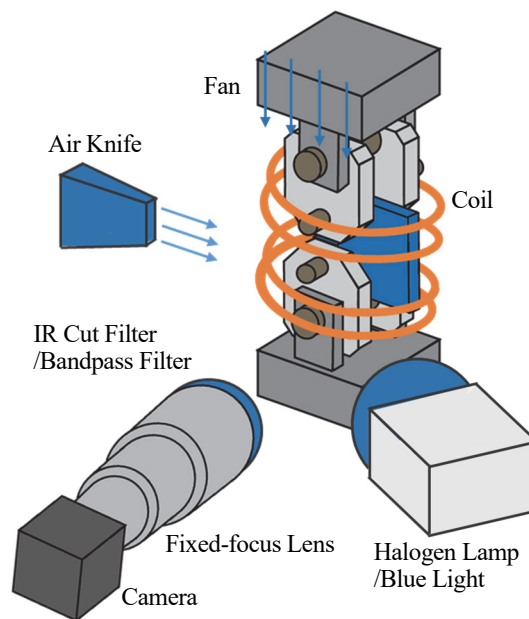


Fig.3 Schematic illustration of the test facility and associated instrumentations at 700 °C and 900 °C. The air knife and fan are used to reduce heat haze. The filters on the camera prevent saturation of gray-levels due to infrared.

Table 3 Exposure time and optical systems used for the DIC measurement at three temperature conditions.

	RT	700 °C	900 °C
Exposure time	100 ms	60 ms × 500 times	60 ms × 500 times
Light source	Halogen lamp	Halogen lamp	Blue LED
Filter	-	IR cut filter	Bandpass Filter

一の透過帯域ではそのエネルギー密度が急激に小さくなり、また、その透過帯域では CMOS カメラの量子効率も大きくなるため、900 °C でのランダムパターン撮影が可能になる。表 3 に各温度条件で用いた光学系をまとめた。

2・2・3 ひずみ算出条件の最適化

DIC では、測定前後のランダムパターンから求まる変位分布を局所領域で平面近似し、その平面の勾配を求めることによってひずみを算出する。そのため、算出されるひずみは平面近似を行う局所領域のサイズ（平滑化ゲージ半径）に依存する。本研究では、Ni 基超合金のき裂先端ひずみ場を測定する前に、等方性の SUS304 製の CT 試験片を対象とした予備測定を行い、弾塑性 FEM 解析の結果と比較して平滑化ゲージ半径の最適値を求めた。なお、変位決定に用いるサブセットサイズは、試験片全域でランダムパターンの大きさに差が無いことから 25 pixels として統一した。

予備測定には 2・2・1 項の DIC 測定系を用い、SUS304 製 CT 試験片のき裂先端に対して室温で測定を行った。CT 試験片の寸法は図 1 に示したものと同様であり、室温で繰返し負荷を加えてノッチ先端から長さ 2.6 mm のき裂を導入した。なお、このときのき裂は負荷軸に垂直な Mode I 型のき裂であった。この CT 試験片を有限要素モデルで再現し、汎用ソフト ABAQUS Standard 2017 を用いた弾塑性解析を行った。図 5 に本解析で使用した FEM モデルを示す。き裂最先端の要素サイズは約 4 μm である。縦弾性係数は 193 GPa、降伏応力は加工硬化を除去した SUS304 について櫻庭（2009）が測定した 0.2 %耐力である 318 MPa とした。

図 6 に DIC 測定と FEM 解析によって得られた負荷方向の垂直ひずみ ϵ_{yy} をき裂先端からの距離の関数として示す。ここでは平滑化ゲージ半径を 6, 12, 24 pixels として算出したひずみを FEM 解析結果と比較して示している。き裂先端の K_I はいずれも $K_I=25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。図 6 から、平滑化ゲージ半径を 12 pixels とした場合に DIC 測定値と FEM 解析値がよく一致していることが分かる。平滑化ゲージ半径を 6 pixels とした場合、DIC 測定値は 0.1 % 程度の範囲で大きく変動し、FEM 解析値との差が大きくなっている。一方、平滑化ゲージ半径を 24 pixels とした場合には DIC 測定値の変動は小さくなっているが、き裂先端近傍での測定値は FEM 解析値よりも小さくなっている。これは、平滑化ゲージ半径を小さくすると、ひずみを算出するときに用いる変位データが少なくなるため DIC 測定値のばらつきが大きくなり、一方、平滑化ゲージ半径を大きくすると、ひずみ算出時の変位データ数が多くなるためき裂先端近傍のひずみ勾配の大きい領域での測定値が小さくなるためである。平滑化ゲージ半径を 12 pixels とした時の DIC 測定値と FEM 解析値をコンター図として比較した結果を図 7 に示す。図 7 より、き裂先端から 1 mm 程度までの領域のひずみ場はよく一致していることがわかる。き裂先端から 1.2~1.5 mm 程度の領域では DIC 測定値と FEM 解析値との差がやや大きくなっているが、その差は最大でも 0.05 % 程度（カラスケール 1 目盛分）と小さく、平滑化ゲージ半径を 12 pixels とすることで巨視的なき裂進展挙動とひずみ場との関連を考察できると考えられる。最近では、き裂先端近傍のひずみ場を正確に測定するため、変位決定時にき

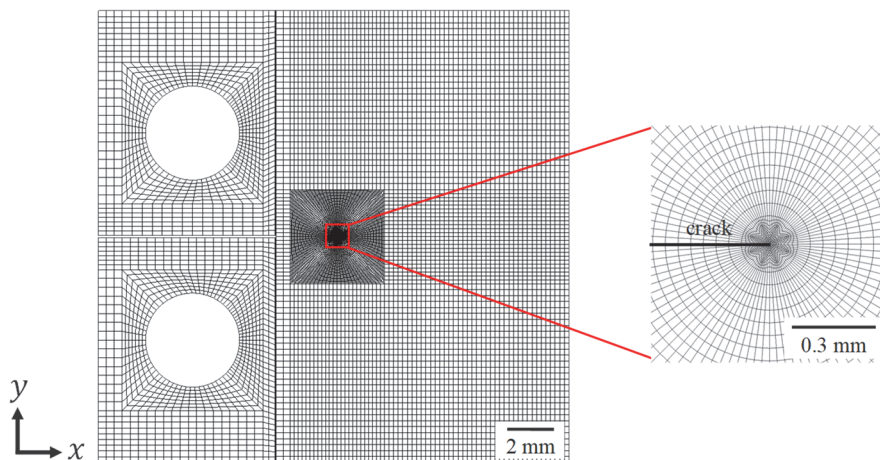


Fig.5 FE model of the CT specimen including the opening mode crack. An elastic-plastic analysis was conducted to optimize the condition of DIC measurement.

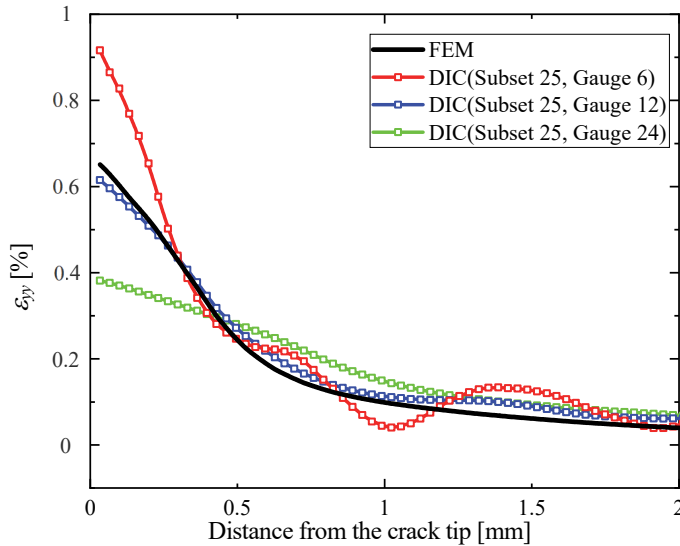


Fig.6 Distribution of ε_{yy} as a function of distance from the crack tip. Measured values by DIC with different smoothing gauges are compared with calculated value in the 3D-FEM.

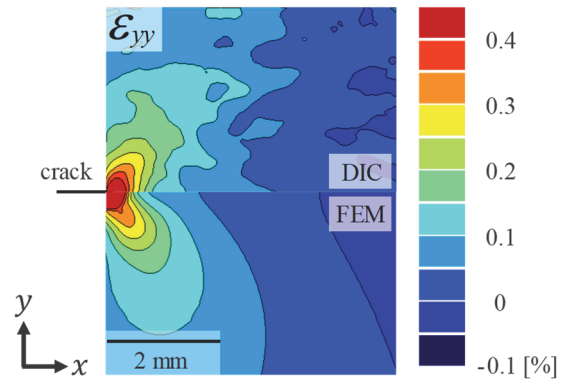


Fig.7 Comparison of ε_{yy} distribution measured by DIC with calculated value in FEM. The strain field measured by DIC is very similar to FEM.

裂先端近傍の応力・ひずみ特異場を考慮したひずみ算出アルゴリズムも提案されている（徐他，2017）が，本研究では上の検討に基づき，測定された変位分布を平滑化ゲージ半径 12 pixels で平面近似することで得られるひずみを DIC 測定値とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 せん断型の疲労き裂先端のひずみ場

室温でき裂を導入した<100><100>RT 試験片と<110><110>RT 試験片で観察されたき裂進展経路を図 8 と図 9 にそれぞれ示す。座標系は負荷方向を y 軸，それと垂直なき裂進展方向を x 軸とし，各試験片で観察された主き裂を青線で示している。図 8 と図 9 ではともに，図(b)は図(a)の 20000 サイクル後であり，図(c)はそれぞれのき裂進展経路の SEM 画像である。これらの SEM 画像から，どちらの試験片でもき裂は<100>方位に配列した γ 相をせん断しながら進展していることがわかる。図 10 には，各試験片のすべり系の配向方向と試験片表面から見たすべり系の配置を示している。これらのすべり面でき裂が進展する場合，試験片表面から見えるき裂経路は，<100><100>RT 試験片では x 軸から $\pm 45^\circ$ ，<110><110>RT 試験片では 0° または $\pm 90^\circ$ 傾いた方向に配向する。図 8(c) と図 9(c)より，どちらの試験片でもき裂はすべり面に沿った方向に進展しており，この結果は著者らのこれまでの実験結果（阪口他，2017）と一致している。なお，図 8(a)から(b)ならびに図 9(a)から(b)の 20000 サイクルの間の平均き裂進展速度は，<100><100>RT 試験片では約 2.6×10^{-8} m/cycle，<110><110>RT 試験片では約 1.4×10^{-8} m/cycle であった。ここで，き裂進展速度はき裂面の傾きを考慮した実き裂長さをサイクル数で除して算出した。

DIC 測定は，<100><100>RT 試験片に対しては図 8(a)の時点，<110><110>RT 試験片に対しては図 9(a)の時点で行った。それぞれの試験片で測定された開口方向 (y 方向) の垂直ひずみ成分 ε_{yy} の分布を図 11 に示す。コンター図はき裂先端近傍の 3.5×3.5 mm² の領域に対応し，観察されたき裂経路を実線で記入している。また，2つのコンター図のカラースケールは同一である。どちらの試験片でも， ε_{yy} は測定領域内の全域でおおよそ上下対称に分布していることがわかる。図 11(a)と(b)を比較すると，例えば， $\varepsilon_{yy} = 0.3 \sim 0.36\%$ に相当するオレンジ色の領域は2つの試験片で形状が異なっているが，このわずかな形状の相違を基にそれぞれのき裂進展挙動を特徴付けることはできない。また，ひずみの絶対値も2つの試験片で大きな差は無く，この垂直ひずみ場 ε_{yy} からき裂先端のすべり変形やき裂進展挙動を評価することは難しい。

せん断型き裂を対象としたこれまでの研究（Telesman and Ghosn, 1989, 阪口他, 2017）によると，せん断型き裂の進展挙動はき裂開口変位や Mode I 型の応力拡大係数では評価が困難で，き裂先端に広がるすべり面上のせん

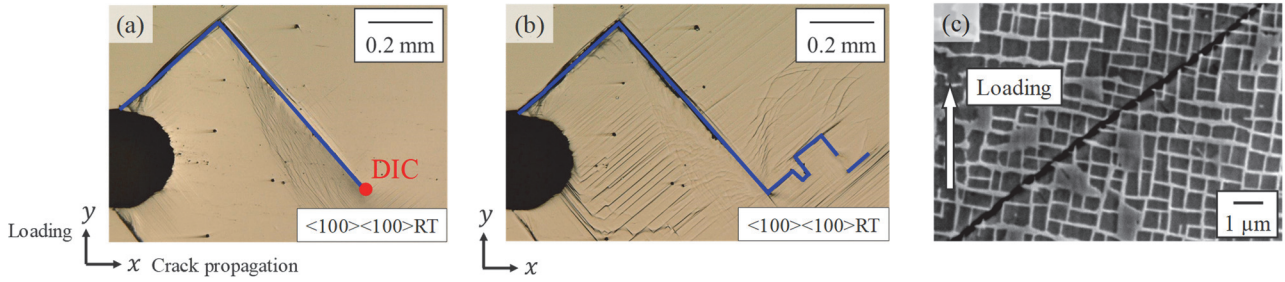


Fig.8 Crack paths in $\langle 100 \rangle \langle 100 \rangle$ RT specimen. (a) Crack path when the strain field was measured, (b) crack path after 20000 cycles from (a), and (c) SEM image of the crack path.

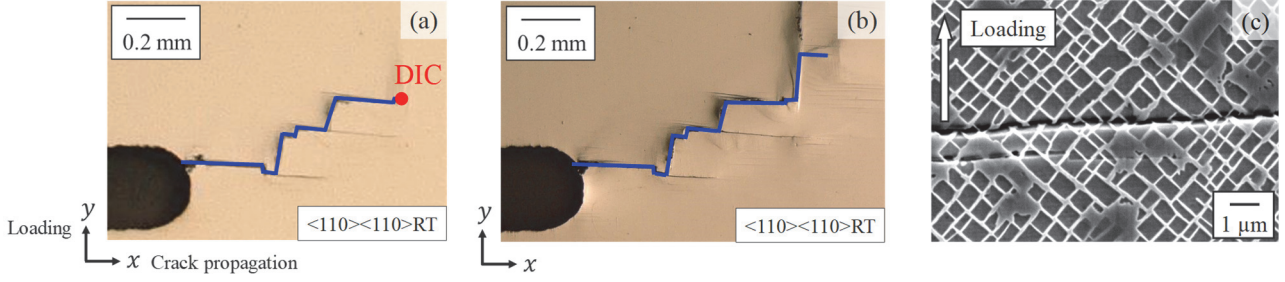


Fig.9 Crack paths in $\langle 110 \rangle \langle 110 \rangle$ RT specimen. (a) Crack path when the strain field was measured, (b) crack path after 20000 cycles from (a), and (c) SEM image of the crack path.

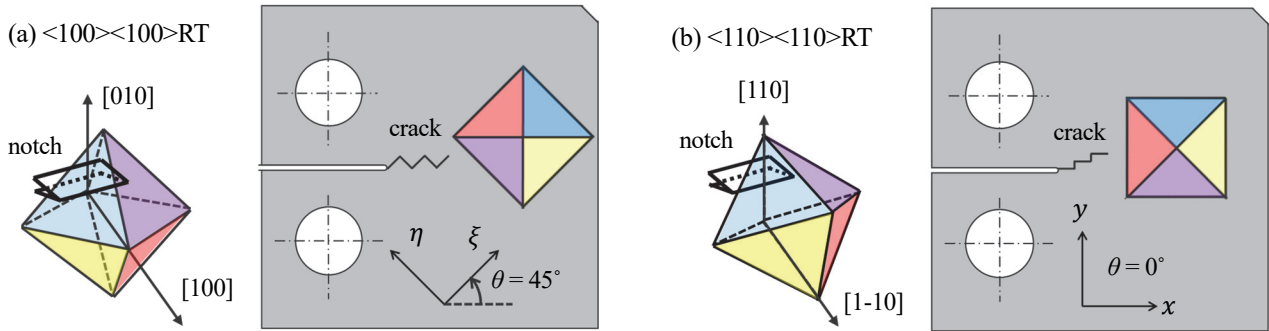


Fig.10 Schematic illustrations of octahedral slip system in two types CT specimens. (a) $\langle 100 \rangle \langle 100 \rangle$ RT specimen and (b) $\langle 110 \rangle \langle 110 \rangle$ RT specimen.

断応力やすべり系活動量を考慮する必要がある。そこで、すべり系の配向方向に沿った方向のひずみ成分として、 $\langle 100 \rangle \langle 100 \rangle$ 試験片ではき裂進展方向から反時計回りに $\theta = 45^\circ$ 回転した ξ - η 座標系 (図 10(a)参照) でのせん断ひずみ $\gamma_{\xi\eta}$ を、 $\langle 110 \rangle \langle 110 \rangle$ 試験片では x - y 座標系 (図 10(b)参照) でのせん断ひずみ γ_{xy} を算出した。これらのせん断ひずみは、DIC で測定できる試験片表面のひずみ成分のなかで八面体すべり系の活動を最も忠実に反映した成分であり、すべり変形の局在化とその後の進展挙動を評価できると考えられる。せん断ひずみ $\gamma_{\xi\eta}$ は、Ncorr によって得た Green-Lagrange ひずみ ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{xy} を基に、次式に示す座標変換式で θ だけ回転した Green-Lagrange ひずみ $\gamma'_{\xi\eta}$ を真ひずみ $\gamma_{\xi\eta}$ に変換することで求められる。

$$\gamma'_{\xi\eta} = 2(\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx}) \cos \theta \sin \theta + 2\varepsilon_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (2)$$

$$\gamma_{\xi\eta} = \ln(1 + \gamma'_{\xi\eta}) \quad (3)$$

図 8(a)と図 9(a)の時点で測定されたせん断ひずみ $\gamma_{\xi\eta}$, γ_{xy} の分布を図 12 に示す。図 12 には、実験で観察されたせん断型き裂を実線で示し、それぞれの試験片における八面体すべり系の配置とせん断ひずみの正方向を矢印で示している。どちらの試験片でも、き裂先端から十分離れた弾性域ではせん断ひずみがほぼ上下対称に分布していることが分かる。一方、き裂先端近傍に注目すると、まず、 $\langle 100 \rangle \langle 100 \rangle$ 試験片ではき裂先端から右上の方向に大きなせん断ひずみが生じていることが分かる (図 12(a)参照)。このことから、 $\langle 100 \rangle \langle 100 \rangle$ 試験片で

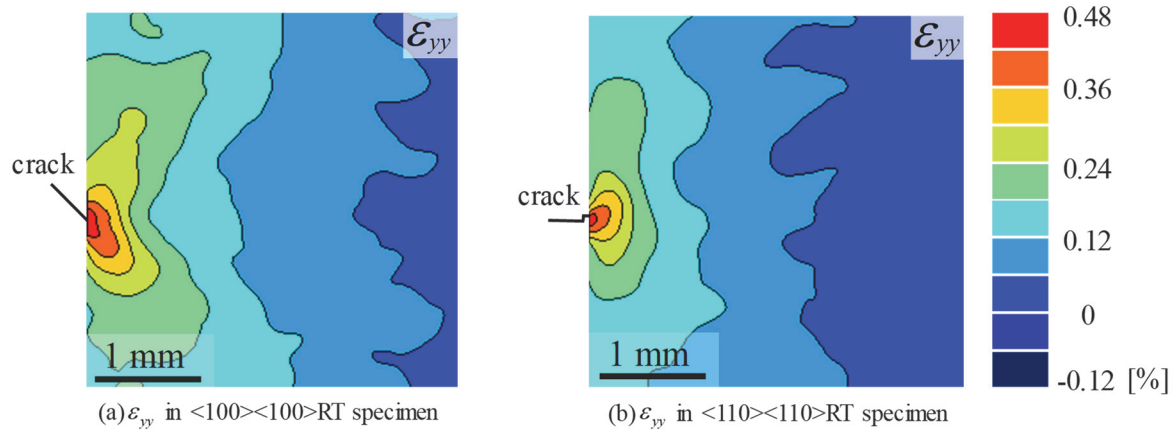


Fig.11 Distributions of normal strain, ϵ_{yy} , at room temperature measured by DIC for two types CT specimen. (a) $\langle 100 \rangle \langle 100 \rangle$ RT, (b) $\langle 110 \rangle \langle 110 \rangle$ RT. The difference in the measured strain fields is not observed clearly.

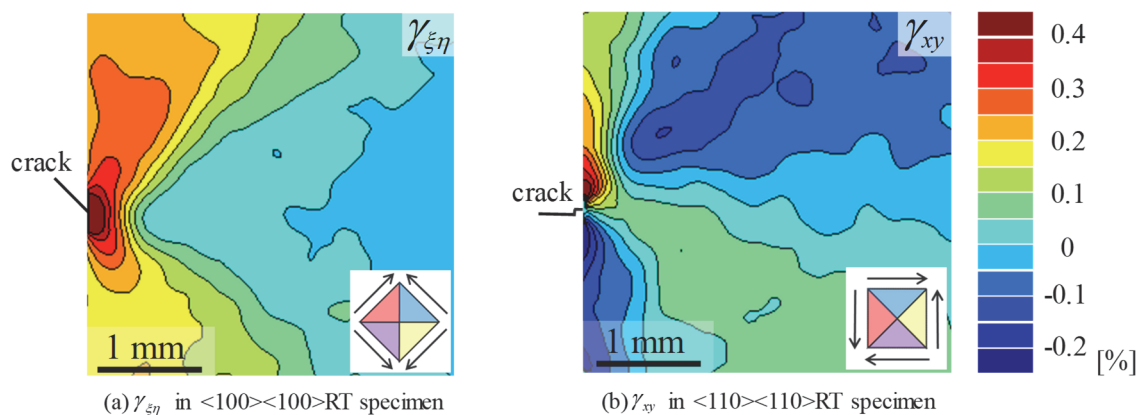


Fig.12 Distributions of shear strain components along slip systems at room temperature. (a) $\gamma_{\xi\eta}$ in $\langle 100 \rangle \langle 100 \rangle$ RT, (b) γ_{xy} in $\langle 110 \rangle \langle 110 \rangle$ RT. The distributions of shear strain components are clearly different.

は、八面体すべり系のうち赤色もしくは黄色のすべり面が活動していたと考えられる。DIC 測定を行った図 8(a)の状態からさらに 20000 サイクル負荷を加えた際のき裂経路 (図 8(b)参照) を見ると、き裂は図 8(a)の地点で屈曲してから右上方向に進展しており、図 12(a)でせん断ひずみが発達していた方向と一致する。次に、 $\langle 110 \rangle \langle 110 \rangle$ RT 試験片のき裂先端近傍では、き裂先端の直上方向に大きなせん断ひずみが発達していることがわかる (図 12(b)参照)。実際に $\langle 110 \rangle \langle 110 \rangle$ RT 試験片では、DIC 測定を行った図 9(a)の地点でき裂は上方向に屈曲しており、せん断ひずみが発達した方向にき裂が進展した。また、図 12(a)と(b)を比較すると、 $\langle 100 \rangle \langle 100 \rangle$ RT 試験片の方がき裂先端でせん断ひずみが発達した領域が大きい。これは、き裂先端の Mode I 応力拡大係数が同一であっても、 $\langle 100 \rangle \langle 100 \rangle$ RT 試験片の方がき裂先端のすべり変形が生じやすいことを意味しており、実際、2つの試験片のき裂進展速度を比較すると $\langle 100 \rangle \langle 100 \rangle$ RT 試験片の方が 2 倍程度大きな値となっていた。すなわち、すべり系の配向方向を考慮したせん断ひずみ場を DIC 測定することで、せん断型疲労き裂進展を支配するすべり変形の局在化とその程度を評価できると考えられる。

3・2 開口型疲労き裂先端のせん断ひずみ場

図 13 に開口型のき裂経路の観察結果を示す。室温でき裂を進展させた場合 (図 8(c)参照) とは異なり、700 °C では負荷軸に垂直な開口型で進展していることが分かる。この開口型き裂先端のせん断ひずみ $\gamma_{\xi\eta}$ と開口方向ひずみ ϵ_{yy} を 700 °C で測定した結果を図 14 と図 15 に示す。図 12(a)に示したせん断型き裂先端では上下非対称なせん断ひずみ場が発達していたのに対し、開口型き裂の先端近傍では上下対称なせん断ひずみ場が形成されていることが分かる (図 14 参照)。このひずみ場の違いは、せん断型き裂と開口型き裂のき裂進展メカニズムの違いに起因したものと考えられる。すなわち、せん断型き裂の場合は、き裂先端に広がる八面体すべり系のうち活動量

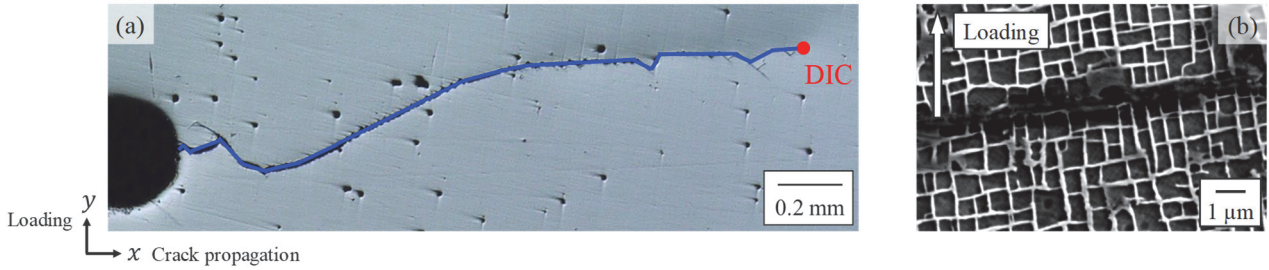


Fig.13 (a) Crack path in <100><100>HT specimen. (b) SEM image for opening mode crack path near the crack tip. Crack propagates perpendicular to the loading axis without shearing of γ' precipitates at 700 °C.

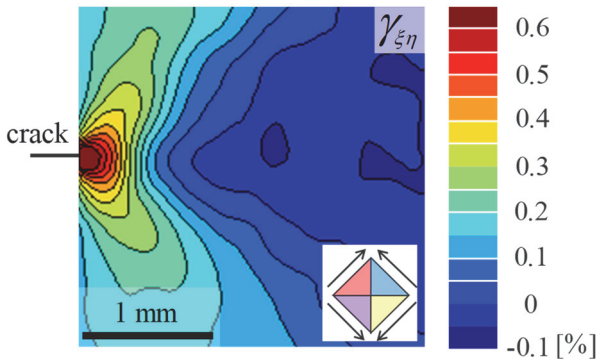


Fig.14 Shear strain field, $\gamma_{\xi\eta}$, along slip system at 700 °C in <100><100>HT. Unlike room temperature, isotropic shear strain develops around the crack tip.

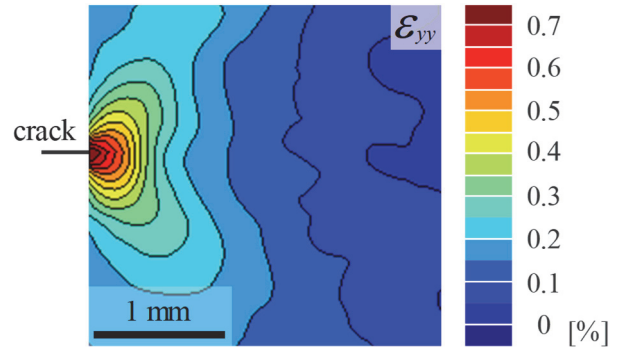


Fig.15 Normal strain field, ϵ_{yy} , at 700 °C in <100><100>HT. Higher strain concentration is localized around the crack tip compared with room temperature as in Fig.11(a).

が最大となるすべり面に変形が局在化して特定の方向にせん断ひずみが発達するのに対し、高温での開口型き裂の進展過程では複数のすべり面が同程度に活動したと考えられる。後者のき裂進展過程は“Double slip mechanism” (Suresh, 2008) として広く知られている機構であり、実際、Bettge ら (1999) は 650 °C で変形させた Ni 基超合金 SC16 の TEM 観察により、2 つのすべり面 ($(1\bar{1}1)$ 面, $(11\bar{1})$ 面) での転位の運動が同時に活発となることや、 $\{111\}$ すべり面だけでなく $\{100\}$ 面でも転位の運動が生じることを明らかにしている。また、Leverant ら (1975) は、Ni 基超合金 Mar-M200 を 843 °C で疲労試験を行ったときの転位構造を観察することで、高温では上昇運動によって転位が均一に分散し、その結果として開口型のき裂進展が生じることを明らかにしている。700 °C でき裂を進展させた<100><100>HT 試験片でも、これらと同様の転位の運動が生じた結果、ひずみ場が特定のすべり方向のみに発達せず上下対称な形状になったと考えられる。また、図 15 に示した開口方向の垂直ひずみ ϵ_{yy} を図 11(a) に示した室温でのそれと比較すると、高温では大きなひずみが発達していることがわかる。これは、温度上昇に伴い開口方向の縦弾性係数が低下したことに起因すると考えられる。

続いて、<100><100>HT 試験片の開口型き裂先端のひずみ場を 900 °C で測定した。900 °C で測定したき裂先端の開口方向垂直ひずみ ϵ_{yy} の分布を図 16 に示す。図 15 に示した 700 °C での ϵ_{yy} と比較すると、900 °C ではき裂先端近傍のひずみの絶対値が大きく、また、より広い範囲でひずみが発達していることがわかる。これは縦弾性係数の温度依存性に起因していると考えられる。実際、き裂先端からき裂進展方向に 1 mm の距離にある弾性領域での ϵ_{yy} は 700 °C で 0.17 %, 900 °C では 0.19 % であり (図 15, 図 16 参照), 900 °C では 1.1 倍ほどひずみが多い。Siebörger ら (2001) の単結晶材 CMSX-4 に対する測定結果に基づくと、<100>方位の縦弾性係数は 700 °C で約 100 GPa, 900 °C で約 90 GPa であり、この比率はそれぞれの温度で DIC 測定された開口方向垂直ひずみの比率とおおよそ一致する。すなわち、本研究で構築した DIC 測定系とひずみ算出方法により、900 °C 高温環境においてもき裂先端のひずみ場をある程度適切に測定できたと考えられる。

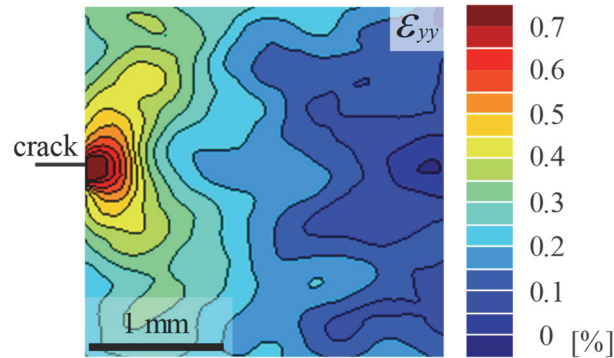


Fig.16 Normal strain field, ε_{yy} , at 900 °C in $\langle 100 \rangle \langle 100 \rangle$ HT. Larger strain is measured compared with 700 °C.

4. 結 言

本研究では、デジタル画像相関法 (DIC) を用い Ni 基超合金のき裂先端近傍のひずみ場を室温、700 °C、900 °C の 3 種の温度条件で測定した。それぞれの温度条件にあわせて DIC 測定条件と光学系を適切に調整し、Ni 基超合金単結晶材に導入したせん断型き裂と開口型き裂先端のひずみ場に与える結晶方位と温度の影響を検討した。また、測定されたひずみ場とき裂進展挙動との関連について考察した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・ 室温では、き裂はすべり面に沿ったせん断型で進展した。すべり系の配向方向を考慮したせん断ひずみ場を DIC を用いて測定すると、せん断型き裂先端のひずみ場に与える結晶方位の影響を可視化できた。また、せん断型き裂の進展方向や進展速度はせん断ひずみ場の影響を強く受けることが明らかとなった。
- ・ 高温では、き裂は荷重軸に垂直な開口型で進展した。き裂先端では、上下対称に発達したせん断ひずみが測定された。室温と高温でのき裂進展メカニズムの違いは、温度に依存したすべり面の活動の相違に起因し、DIC で測定されたき裂先端ひずみ場の温度依存性はそのすべり面の活動を反映した結果であると考えられる。

謝 辞

DIC の測定技術や解析プログラムについて、青山学院大学の米山聡教授にご指導をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

文 献

- ASTM International, Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates, E647-11 (2011), p.13.
- Berke, B. R. and Lambros, J., Ultraviolet digital image correlation (UV-DIC) for high temperature applications, Review of Scientific Instruments, Vol.85 (2014), 045121.
- Bettge, D. and Österle, W., “Cube slip” in near-[111] oriented specimens of a single-crystal nickel-base superalloy, Scripta Materialia, Vol.40, No.4 (1999), pp.389–395.
- Blaber, J., Adair, B. and Antoniou, A., Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software, Experimental Mechanics, Vol.55 (2015), pp.1105–1122.
- Carrol, J. D., Abuzaid, W., Lambros, J. and Sehitoglu, H., High resolution digital image correlation measurements of strain accumulation in fatigue crack growth, International Journal of Fatigue, Vol.57 (2013), pp.140–150.
- Grant, B. M. B., Stone, H. J., Withers, P. J. and Preuss, M., High-temperature strain field measurement using digital image correlation, The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol.44 (2009), pp.263–271.
- 檜垣真奈, 阪口基己, 松浪賢史, 金子秀明, 唐戸孝典, 鈴木健太, 井上裕嗣, 多結晶 Ni 基超合金の室温疲労き裂進展に及ぼす結晶粒の方位と粒界の影響, 日本機械学会論文集, Vol.84, No.859 (2018), DOI: 10.1299/transjsme.17-00578.
- 徐冬輝, 北田貢久, 西川出, デジタル画像相関法を用いた混合モードき裂の力学量評価法の検討, 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス 講演論文集 (2017), pp.74–76.
- Ke, X., Sutton, M. A., Lessner, S. M. and Yost, M., Robust stereo vision and calibration methodology for accurate three-

- dimensional digital image correlation measurements on submerged objects, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 43 (2008), pp.689–704.
- 國尾武, 中沢一, 林郁彦, 岡村弘之編, 破壊力学実験法, 朝倉書店 (1984), pp.30–72.
- Leplay, P., Lafforgue, O. and Hild, F., Analysis of asymmetrical creep of a ceramic at 1350 °C by digital image correlation, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.98 (2015), pp.2240–2247.
- Leverant, G. R. and Gell, M., The influence of temperature and cyclic frequency on the fatigue fracture of cube oriented nickel-base superalloy single crystals, *Metallurgical Transactions*, Vol. 6A (1975), pp.367–371.
- Lyons, J. S., Liu, J. and Sutton, M. A., High-temperature deformation measurements using digital-image correlation, *Experimental Mechanics*, Vol. 36 (1996), pp.64–70.
- Novak, D. M. and Zok, W. F., High-temperature materials testing with full-field strain measurement: Experimental design and practice, *Review of Scientific Instruments*, Vol.82 (2011), 115101.
- 岡崎正和, 大島繁, 能美伸一郎, き裂開閉口測定に基づく Ni 基超合金の高温における微小き裂進展の調査, *材料*, Vol.43, No.490 (1994), pp.860–866.
- Pan, B., Wu, D., Wang, Z. and Xia, Y., High-temperature digital image correlation method for full-field deformation measurement at 1200 °C, *Measurement Science and Technology*, Vol.22 (2011), 015701.
- Peralta, P., Choi, S.-H. and Gee, J., Experimental quantification of the plastic blunting process for stage II fatigue crack growth in one-phase metallic materials, *International Journal of Plasticity*, Vol.23 (2007), pp.1763–1795.
- Peters, W. H. and Ranson, W. F., Digital imaging techniques in experimental stress analysis, *Optical Engineering*, Vol.21, No.2 (1982), pp.427–431.
- 阪口基己, 神山大知, 横口太郎, 駒村僚汰, 井上裕嗣, 単結晶 Ni 基超合金の第 I 段階型疲労き裂進展に及ぼす結晶方位の影響, *材料*, Vol.66, No.10 (2017), pp.731–737.
- Sakaguchi, M., Higaki, M., Komamura, K., Inoue, H. and Okazaki, M., Crystal plasticity assessment to stage I fatigue crack propagation in a single crystal nickel-base superalloy, *Proceedings of Low Cycle Fatigue 8th* (2017), pp. 249–255.
- 櫻庭健一郎, ステンレス鋼における最適疲労設計基準の確立, 東京都立産業技術研究センター研究報告, No. 4 (2009), pp.66–67.
- Sieböcker, D., Knake, H. and Glatzel, U., Temperature dependence of the elastic moduli of the nickel-base superalloy CMSX-4 and its isolated phase, *Materials Science and Engineering*, A298 (2001), pp.26–33.
- Suzuki, S., Sakaguchi, M. and Inoue, H., Temperature dependent fatigue crack propagation in a single crystal Ni-based superalloy affected by primary and secondary orientations, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 724 (2018), pp.559–565.
- Suresh, S., *Fatigue of Materials*, Cambridge University Press (2008), pp.277–313, pp.330–332.
- Telesman, J. and Ghosn, L. J., Fatigue crack growth behavior of PWA 1484 single crystal superalloy at elevated temperatures, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 118 (1996), pp.399–405.
- Telesman, J. and Ghosn, L. J., The unusual near-threshold FCG behavior of a single crystal superalloy and the resolved shear stress as the crack driving force, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.34 (1989), pp.1183–1196.
- 東郷敬一郎, 材料強度解析学, 内田老鶴圃 (2004), pp.186–189.
- Yoneyama, S., Kitagawa, A., Iwata, S., Tani, K. and Kikuta, H., Bridge deflection measurement using digital image correlation, *Experimental Techniques*, Vol.34 (2007), pp.34–40.

References

- ASTM International, standard test method for measurement of fatigue crack growth rates, E647-11 (2011), p.13.
- Berke, B. R. and Lambros, J., Ultraviolet digital image correlation (UV-DIC) for high temperature applications, *Review of Scientific Instruments*, Vol.85 (2014), 045121.
- Bettge, D. and Österle, W., “Cube slip” in near-[111] oriented specimens of a single-crystal nickel-base superalloy, *Scripta Materialia*, Vol.40, No.4 (1999), pp.389–395.
- Blaber, J., Adair, B. and Antoniou, A., Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software, *Experimental Mechanics*, Vol.55 (2015), pp.1105–1122.
- Carrol, J. D., Abuzaid, W., Lambros, J. and Sehitoglu, H., High resolution digital image correlation measurements of strain accumulation in fatigue crack growth, *International Journal of Fatigue*, Vol.57 (2013), pp.140–150.
- Grant, B. M. B., Stone, H. J., Withers, P. J. and Preuss, M., High-temperature strain field measurement using digital image

- correlation, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol.44 (2009), pp.263–271.
- Higaki, M., Sakaguchi, M., Matsunami, M., Kaneko, H., Karato, T., Suzuki, K. and Inoue, H., Influence of crystal orientations and grain boundary on crack propagation behavior at room temperature in a polycrystalline Ni-base superalloy, *Transactions of the JSME (in Japanese)*, Vol.84, No.859 (2018), DOI: 10.1299/transjsme.17-00578.
- Jo, T., Kitada, M. and Nishikawa, I., Evaluation of fracture mechanics parameters for mixed mode crack using digital image correlation method, *Proceedings of M&M conference* (2017), pp.74–76 (in Japanese).
- Ke, X., Sutton, M. A., Lessner, S. M. and Yost, M., Robust stereo vision and calibration methodology for accurate three-dimensional Digital Image Correlation measurements on submerged objects, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 43 (2008), pp.689–704.
- Kunio, T., Nakazawa, H., Hayashi, I. and Okamura, H., *Experimental methods for fracture mechanics*, Asakura Publishing (1984), pp.30–72 (in Japanese).
- Leplay, P., Lafforgue, O. and Hild, F., Analysis of asymmetrical creep of a ceramic at 1350 °C by digital image correlation, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.98 (2015), pp.2240–2247.
- Leverant, G. R. and Gell, M., The influence of temperature and cyclic frequency on the fatigue fracture of cube oriented nickel-base superalloy single crystals, *Metallurgical Transactions*, Vol. 6A (1975), pp.367–371.
- Lyons, J. S., Liu, J. and Sutton, M. A., High-temperature deformation measurements using digital-image correlation, *Experimental Mechanics*, Vol. 36 (1996), pp.64–70.
- Novak, D. M. and Zok, W. F., High-temperature materials testing with full-field strain measurement: Experimental design and practice, *Review of Scientific Instruments*, Vol.82 (2011), 115101.
- Okazaki, M., Ohsima, S. and Nohmi, S., Investigation on small fatigue crack growth based on crack opening-closing measurement in Ni-base superalloys at high temperature, *Journal of the society of materials science, Japan*, Vol.43, No.490 (1994), pp.860–866 (in Japanese).
- Pan, B., Wu, D., Wang, Z. and Xia, Y., High-temperature digital image correlation method for full-field deformation measurement at 1200 °C, *Measurement Science and Technology*, Vol.22 (2011), 015701.
- Peralta, P., Choi, S.-H. and Gee, J., Experimental quantification of the plastic blunting process for stage II fatigue crack growth in one-phase metallic materials, *International Journal of Plasticity*, Vol.23 (2007), pp.1763–1795.
- Peters, W. H. and Ranson, W. F., Digital imaging techniques in experimental stress analysis, *Optical Engineering*, Vol.21, No.2 (1982), pp.427–431.
- Sakaguchi, M., Kouyama, D., Yokoguchi, T., Komamura, R. and Inoue, H., Effect of crystallographic orientations on stage I fatigue crack propagation in a Ni-base single crystal superalloy, *Journal of the society of materials science, Japan*, Vol.66, No.10 (2017), pp.731–737 (in Japanese).
- Sakaguchi, M., Higaki, M., Komamura, K., Inoue, H. and Okazaki, M., Crystal plasticity assessment to stage I fatigue crack propagation in a single crystal nickel-base superalloy, *Proceedings of Low Cycle Fatigue 8th* (2017), pp. 249–255.
- Sakuraba, K., Defining the design rule of the fatigue strength of stainless steel, *Bulletin of Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute*, No. 4 (2009), pp.66–67.
- Sieböcker, D., Knake, H. and Glatzel, U., Temperature dependence of the elastic moduli of the nickel-base superalloy CMSX-4 and its isolated phase, *Materials Science and Engineering*, A298 (2001), pp.26–33.
- Suzuki, S., Sakaguchi, M. and Inoue, H., Temperature dependent fatigue crack propagation in a single crystal Ni-based superalloy affected by primary and secondary orientations, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 724 (2018), pp.559–565.
- Suresh, S., *Fatigue of Materials*, Cambridge University Press (2008), pp.277–313, pp.330–332.
- Telesman, J. and Ghosn, L. J., Fatigue crack growth behavior of PWA 1484 single crystal superalloy at elevated temperatures, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 118 (1996), pp.399–405.
- Telesman, J. and Ghosn, L. J., The unusual near-threshold FCG behavior of a single crystal superalloy and the resolved shear stress as the crack driving force, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.34 (1989), pp.1183–1196.
- Tohgo, K., *Analysis of material strength*, Uchida Rokakuho Publishing (2004), pp.186–189 (in Japanese).
- Yoneyama, S., Kitagawa, A., Iwata, S., Tani, K. and Kikuta, H., Bridge deflection measurement using digital image correlation, *Experimental Techniques*, Vol.34 (2007), pp.34–40.