レーザ干渉法による中高温下疲労き裂開閉口の計測と
き裂進展下限界*小倉 敬二^{*1}, 西川 出^{*1}, 木村 康樹^{*2}Crack Closure Measurement at Elevated Temperatures
Using Laser Interferometric Gage and Fatigue Threshold

Keiji OGURA, Izuru NISHIKAWA, and Yasuki KIMURA

A laser interferometric strain/displacement gage (ISDG) was developed and used to investigate the fatigue crack growth at elevated temperatures. The technique was modified so as to enable continuous measurement of crack closure during the fatigue crack growth tests. Only the numbers of interference fringes were used instead of the movement of those fringes as an input information in the present system developed in this study in order to calculate the crack opening displacement. The fatigue crack growth tests were performed in SUS304 stainless steel compact tension specimens at several temperatures up to 500°C. Crack closure monitoring was successful for all the tests in this study. A discussion was included on the influence of compressive stressing on the fatigue crack growth rate and closure.

Key Words: Fatigue at Elevated Temperature, Crack Closure, Crack Propagation, Stress Intensity Factor, Interferometric Strain / Displacement Gage, Threshold

1. 緒 言

中高温環境下における疲労き裂進展挙動の把握ならびにその支配因子の解明は、原子力プラントや各種高温機器の分野などでますます要求されている。中高温下き裂進展に関する研究はこれまでにいくつかなされている^{(1)~(8)}。著者らも数種の材料における中高温環境下疲労き裂進展挙動について一連の研究を行ってきた^{(9)~(11)}。それによると、高温下におけるき裂進展挙動は常温下におけるそれ以上にき裂開閉口の影響を強く受けており、き裂進展挙動に対する支配因子の解明にあたってはき裂開閉口挙動の解明、すなわち正確なき裂閉口計測が必要不可欠と考えられる。さらに高温下においては Elber⁽¹²⁾の指摘した残留ストレッチによるき裂閉口現象のほか、酸化物による閉口などが同時に生じ⁽²⁾⁽³⁾、そのメカニズムは常温下におけるものに比べると極めて複雑なものとなっている。

このように高温下におけるき裂閉口計測の重要性が認識されているものの、実際の計測にあたっては常温

下における計測に比べて困難な点が多く、正確な実測データは極めて少ないのが現状である。これまでに行われた高温下き裂閉口計測には電位差法⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾や超音波法⁽¹⁵⁾、除荷弾性コンプライアンス法⁽¹⁶⁾などが適用されている。しかし電位差法では負荷中に母材自身の電気抵抗が変化するなど計測上の問題点が多く、その計測精度には限界があるようである。除荷弾性コンプライアンス法においても高温ひずみゲージなどを用いた閉口変位計測が試みられているが、耐熱性や電氣的雑音などの理由から飛躍的な計測精度の向上が望めないのが現状である。このような計測手法の最大の問題点の一つにセンサを計測対象物に接触させ、センサ自身を高温環境にさらさなければならなかったことが挙げられる。そこで本研究では高温環境下において非接触かつ高精度な計測手法として二つのビッカース圧痕によるレーザ干渉を利用した微小変位計測技術 (ISDG: Interferometric Strain/Displacement Gage)⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾に着目し、これを援用したき裂閉口計測のための簡便システムを試作することとした。試作したき裂閉口計測システムのき裂閉口計測精度を検討するとともに、これまで計測が極めて困難であった 500°C の中高温下における進展下限近傍疲労き裂の開閉口挙動計測に応用することを試みた。

* 平成元年11月9日 材料力学講演会において講演、原稿受付 平成元年6月5日。

^{*1} 正員、大阪大学基礎工学部 (〒560 豊中市待兼山町1-1)。

^{*2} 三菱電機(株)生産技術研究所 (〒661 尼崎市塚口本町8-1)。

2. レーザ干渉法による 微小変位測定原理

基本的な測定原理については Sharpe⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾が詳細に述べているので、ここではその概要についてのみ簡単に述べることにする。まず図1に示すようにき裂をまたぐ位置に距離 d だけ離して二つのマイクロビッカース圧痕をつけ、レーザ光を試験片に対して垂直に照射する。このとき圧痕面から反射したレーザ光によって上下左右の4方向に干渉じまが発生する。このうち二つのビッカース圧痕の上下方向の間隔に直接対応している上下方向の干渉じまに注目することにする。この干渉じまの明部を支配する条件は次式で与えられる。

$$d \cdot \sin \alpha = m \cdot \lambda \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで α は入射光と反射光のなす角、 λ はレーザ光の波長、 m はしま次数であり、整数である。

ここでき裂開口量は二つの圧痕の間隔 d の変化に対応しているから、なんらかの方法で式(1)中の d の変化を検出すれば良いことになる。この計測手法には2通りの手法が考えられる。一つは式(1)中の α を固定し、 m の変化を調べる α 固定計測法である。これは干渉じまの計測位置を固定し、その位置を横切っていくしま次数の変化を調べることになる。もう一つの手法は m を固定し、 α の変化を調べる m 固定計測法である。すなわち着目したある1本の干渉じまがどの程度移動したかを調べるものである。

計測精度を考えると α 固定計測法では得られる情報が離散的であり、 m 固定計測法はほぼ連続的であることから、後者のほうが優れているように思われる。しかし m 固定計測法は着目した一つの干渉じまの移

動を追跡する必要があるため、一次元センサを用いた計測システムを構築しなければならず、ハード的にもソフト的にも極めて複雑かつ高価なものとなる。これに対して α 固定計測法は計測位置を横切る干渉じま、すなわち干渉光の強弱を単一の光学センサで検出することにより計測が可能となり、極めて簡便なシステムとなる。

田中ら⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾あるいは大路ら⁽²¹⁾は開口変位の極めて小さい微小き裂の開閉口を測定対象としており、き裂の最大開口時においても着目したしまがセンサ受光部から消失しない程度のき裂開口を取扱っているため m 固定計測法を採用している。しかし本研究では比較的長いき裂を計測対象としており、き裂開口変位すなわち圧痕間隔 d の変化も大きい。したがって干渉じまの移動量が大きく、き裂開口時には着目したしまが容易に消失してしまう。このように本研究で対象としているような長いき裂の開閉口計測には m 固定計測法による計測は極めて困難となる。そこで本研究では α 固定計測法を採用することとした。

3. き裂閉口計測システム ならびに計測精度の検討

以下に本き裂閉口計測システムの詳細について述べる。本システムはレーザ発光部から照射されたレーザ光を試験片に取付けた二つの圧痕で反射、干渉させた後、スリットを介してフォトディテクタで検出するものである。すなわちディテクタが入射光に対して角度 $\pm \alpha$ で固定されており、き裂開口に伴いこの位置を干渉じまが次々と通過する。このときのしまの通過数がしま次数 m の変化量 δm に対応するから、この δm を測定することによって圧痕間の変位 δd を計測することができる。ここではディテクタとしてフォトダイ

図1 干渉じま発生の様式図

図2 計測システムブロック図

図3 計測システム回路図

オード(シャープ製プレーナ形シリコンブルーセル BS 142)を用いた。図2に本計測システムのブロック図ならびに図3には干渉光受光部の回路図を示す。この計測システムに用いたフォトダイオードはフォトマルチメータなどと比較して極めて安価であり、操作が簡単である上に、応答時間が高速である。このような高速・高感度半導体センサを用いることにより疲労き裂開閉口挙動のリアルタイム・オンライン計測が可能となる。本研究ではセンサからの信号をコンピュータに取り込む際に用いたA/D変換器の変換速度がチャンネル切替え時間を含んで45 $\mu\text{s}/\text{ch}$ であるため、真の意味でのリアルタイム計測を実現することはできないが、30 Hzの試験運転周波数を約3 Hzにまで低下させることにより、オンライン計測を可能としている。

実際にセンサで測定したしまの数とその時の荷重の値とを対応させてプロットしたものが図4である。このデータは後述する SUS 316 鋼 CT 試験片を用いて常温下 $R=0.1$ のもとで行った $\Delta K=7.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、き裂長さ 7.9 mm の時の実験データであり、このときの圧痕はき裂先端後方 4.6 mm に位置していた。図4(a)からわかるように上下2箇所のセンサで測定したしま次数の変化は剛体移動の影響を受け様子が異なる。この2本の曲線を平均することによりき裂開口のみによるしま次数変化と負荷荷重の関係を得ることができる。このデータ点をスプライン補間後、除荷弾性成分を引算し、拡大したものが図4(c)である。図中の折れ曲がり点がき裂開口荷重に対応している。

このようなセンサ上を通過するしまの本数から変位を計算する本システムの計測精度をまず調べることにする。すなわちこれまでき裂の開閉口を調べる手法と

図5 CT試験片

図6 除荷弾性コンプライアンス法およびレーザ干渉法による常温・下限界近傍き裂開閉口挙動の計測結果

図4 (a) しま次数と荷重 (b) 平均処理後 (c) 演算処理後の関係

図4

図7 両手法による計測結果の比較

して多用され、計測精度も高いと考えられている背面ひずみゲージによる除荷弾性コンプライアンス法と本レーザ干渉法の両手法によるき裂閉口の測定結果を比較することにより、その測定精度を調べた。この比較は図5に示すような形状の SUS 316 鋼 CT 試験片(板厚 5 mm)を用いた常温下疲労き裂進展試験において、種々の負荷レベルすなわち種々のき裂閉口変位に対して行った。図6はこれら両計測手法により得られたき裂閉口比率 $P_{op}/P_{max}(=K_{op}/K_{max})$ をそのときの応力拡大係数により整理したものである。比較試験は疲労き裂が安定成長する $\Delta K=20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 付近からき裂進展が停止する常温下限界 ΔK_{th} (約 $4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)にまでわたって実施した。図6よりわかるように幅広い応力拡大係数レベルすなわちき裂閉口変位にわたって両者の計測値が良く対応しているようである。このことをより明瞭に示したものが図7である。図7は横軸にレーザ干渉法、縦軸に除荷弾性コンプライアンス法によって測定したき裂閉口比率 K_{op}/K_{max} を再整理したものであるが、データは原点を通る割合1の直線上に乗り、極めて良く一致していることがわかる。

以上の結果から本研究で対象としたようなある程度き裂が長い場合には、 α 固定計測法によるレーザ計測手法はき裂閉口の測定に対し実用上、十分な測定精度を有していることがわかる。

4. 中高温下疲労き裂進展試験への応用

4・1 実験方法 試作したレーザ干渉法援用き裂開閉口計測システムを用いて中高温下におけるき裂開閉口計測することを試みた。疲労試験に用いた材料は板厚 5 mm の SUS 304 ステンレス鋼(Ni: 8.54%, Cr: 18.26%, C: 0.05%)である。試験片は前章で用いたと同形状の CT 試験片である。これらの試験片は

試験前に 1050°C 、30 分保持の溶体化処理を施してある。

疲労試験には電気油圧式疲労試験機(容量 1 t)を用い、応力比 $R=0.1$ 、周波数 $f=30 \text{ Hz}$ で行った。高温環境は図8に示すようなシース電熱線で構成された自作炉を用いることにより実現した。炉にはレーザ照射用窓が一つと、入射光に対して上下およそ 45° の向きに干渉光通過用窓が二つの合計三つのオプティカルフラットな耐熱ガラス窓を設けてある。試験温度は 400°C 、 500°C の2種類とし、大気中で行った。下限界近傍を調べる試験においては荷重漸減法により行った。

高温下におけるき裂開閉口測定に際しては試験片に予き裂導入後、試験温度で6時間高温環境にさらし、その表面を十分酸化させた後に予き裂先端後方 $1.0\sim 1.4 \text{ mm}$ の位置に、予き裂をまたぐように2個のビッカース圧痕をつけた。すなわち酸化物で被覆されたビッカース圧痕面を得ることで、高温環境下試験中に圧痕面の酸化がさらに進行し、レーザ光の反射率が低下することを防いだ。なお圧痕間隔は $100\sim 150 \mu\text{m}$ である。本研究で行った最高温度、最高時間の実験は 500°C 下、100 時間であったが、この試験の終了時においても圧痕面は計測に耐えうる程度の鏡面に維持されていた。

4・2 高温下き裂閉口計測結果 SUS 304 鋼 CT 試験片を用いて 400°C ならびに 500°C の中高温下において疲労き裂進展試験を行い、本研究で開発したき裂閉口計測システムを用いてき裂開閉口挙動を計測した。その結果、得られたき裂閉口比率 K_{op}/K_{max} を応力拡大係数幅 ΔK に対して整理した結果が図9である。図中には参考のため、前報⁹⁾の応力比-1の両振り条件

図8 自作電気炉

図9 中高温下におけるき裂開閉口挙動

下、試験温度 300°C ならびに 500°C における結果も併せて示した。図より応力比、試験温度によらずき裂開閉口挙動は図 6 の常温下におけるき裂開閉口挙動と類似の変化傾向を示しているが、開口レベルの絶対値は試験温度ならびに応力比により大きく異なっている。まず下限界近傍では常温下におけると同様、高温環境下においても ΔK が小さくなるにつれて K_{op}/K_{max} 値は上昇する。 $\Delta K=7\sim 9\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の領域において 400°C ならびに 500°C の両試験温度下の結果を比較すると 500°C のほうがき裂が良く閉じている。このことは高温ほど酸化物誘起き裂閉口が助長されていることを示唆している。これに対して後述するようにき裂進展速度が Paris 則に従うような中間速度領域に対応する ΔK レベル (8 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以上) においては、両試験温度下におけるき裂閉口レベルは ΔK レベルや試験温度にはあまり依存せず、約 0.4 のほぼ一定値となっている。一方、これら応力比 0.1 の結果を応力比 -1 の結果と比較すると下限界領域、中間速度領域を問わずその開閉口レベルは大きく異なっている。このことについては次節で詳述する。

4.3 高温下き裂開閉口に及ぼす圧縮応力の影響
前節でも述べたように応力比 0.1 の片振り引張条件下におけるき裂閉口レベルは試験温度にあまり依存しないが、応力比が -1 といった圧縮負荷を伴うような負荷条件下においては試験温度の上昇とともに中間速度領域におけるき裂閉口レベルは大きく低下する。このようなき裂閉口レベルの応力比による相違や両振り負荷下における試験温度依存性を引き起こす要因としては高温下における圧縮負荷の影響が考えられる。そこでこのことを確認するために 500°C 下で特別な実験を

行った。まずはじめに、応力比 0.1, 12 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の一定 ΔK レベルで疲労き裂をある程度進展させた後、 $K=12\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 時の最大引張荷重と等しい圧縮荷重を負荷する。これは便宜的には両振り条件下における最小荷重負荷と等価な負荷状態としたことに対応するものと考えられる。このような圧縮荷重を負荷したままの状態で約 3 時間保持した。その後、荷重保持前の負荷状態、すなわち $R=0.1$, $\Delta K=12\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の条件下でき裂開閉口を計測し、き裂開閉口レベルが圧縮荷重負荷直前の状態に回復するまで、再びき裂を進展させた。ここではこのような荷重の圧縮保持操作を 3 回行った。得られた結果を図 10 に示す。図よりわかるように圧縮荷重保持直後にはき裂閉口レベルは極めて低くなり、き裂長さがあまり長くない場合には本実験の応力比 0.1 の条件下においてほぼ全開口状態となっていた。しかしこのような低いき裂閉口レベルはその後のき裂進展とともに上昇し、最終的には圧縮負荷直前のレベルにまで回復するようである。このことから高温下における圧縮負荷は残留ストレッチを消失させる効果があり、き裂閉口レベルを低下させるものと考えられる。このような圧縮負荷による残留ストレッチ消失効果のメカニズムやその詳細の解明については今後の研究によるところが大きいが、同様の効果が常温においても少なからず観察されることから⁽²²⁾、高い試験温度がさらにこの効果を助長したものとも考えられる。

4.4 高温下におけるき裂進展挙動 最後に本実験で観察された中高温下疲労き裂の進展挙動について調べる。図 11 にはき裂進展速度 da/dN を応力拡大係数幅 ΔK 、さらにはき裂開閉口を考慮した ΔK_{eff} に対してまとめて示した。同図には図 9 の場合と同様、前

図 10 高温下き裂開閉口に対する圧縮負荷の影響

図 11 中高温下におけるき裂進展挙動

報⁽⁹⁾の300°C, 500°C($R = -1$, 33 Hz)における結果も併せて示した。

まず本研究で得られた400°C下と、500°C下の結果を比較すると中間速度領域では同一 ΔK に対するき裂進展速度は試験温度の上昇とともに加速するが、下限界値は大きくなる。その結果、各温度におけるき裂進展速度曲線は互いに交差することになる。このようなき裂進展挙動の温度依存性は両振り応力下においても同様である。次に同一試験温度条件下において応力比の効果について調べてみる。片振り条件下における実験と両振り負荷条件下における実験に用いた試験片形状・寸法や負荷様式が異なるため、厳密に両負荷条件下における結果を比較することはできないが、全体的な変化傾向を比較すると、 ΔK による整理では $R = 0.1$ の結果が両振りの結果の低速側に位置するのに対し、 ΔK_{eff} による整理では逆に高速側に位置する結果となっている。このように ΔK_{eff} を用いてもき裂進展速度の応力比依存性が消失しないことから考えて、高温下における材料固有のき裂進展抵抗の応力比依存も考えられる。

5. 結 言

本研究において得られた結果をまとめると以下のようになる。

(1) レーザ光の干渉による非接触き裂閉口に対する簡便計測システムを試作した。常温下において本システムによるき裂閉口計測結果と除荷弾性コンプライアンス法による計測結果との比較を行い、本システムの計測精度がこれまでの除荷弾性コンプライアンス法による計測と同程度の測定精度を有していることが確認された。

(2) 本システムを用いて最高500°Cの中高温下大気中におけるき裂開閉口挙動のオンライン連続計測が可能となった。

(3) 高温下SUS 304鋼におけるき裂開閉口挙動を調べた結果、き裂開口レベルは $R < 0$ の範囲で応力

比の影響を強く受けることが明らかとなった。これに起因して、き裂進展挙動にも応力比依存性が認められる結果となった。

(4) このような高温下 $R < 0$ におけるき裂閉口レベルの低下は圧縮負荷時に生ずる残留ストレッチの消失効果に起因するものと考えられる。

本研究は昭和63年度文部省科学研究費補助金奨励研究A(63750090)の援助を得た。また研究遂行にあたり三好良夫助教授(阪大基工)の有益な討論ならびに向島克敏君(現シチズン)の協力をいただいた。記して謝意を表する。

文 献

- (1) James, L. A. and Schwenk, E. B. Jr., *Metall. Trans.*, **2** (1971), 491.
- (2) Stewart, A. T., *Eng. Fract. Mech.*, **13**(1980), 463.
- (3) Suresh, S., ほか2名, *Metall. Trans.*, **A. 12**(1981), 1435.
- (4) Liaw, P. K. and Saxena, A., *Metall. Trans.*, **A. 14** (1983), 1631.
- (5) 小林・ほか3名, 機論, **50**-455, A(1984), 309; 機論, **51**-463, A(1985), 799.
- (6) 長谷川・ほか3名, 機論, **48**-426, A(1982), 132.
- (7) Yuen, J. L., ほか2名, *Fatigue Fract. Eng. Mater.*, **8**-1(1985), 65.
- (8) 竹内・ほか2名, 機論, **52**-481, A(1986), 2155.
- (9) 小倉・ほか2名, 機論, **52**-473, A(1986), 89.
- (10) 西川・ほか2名, 機論, **53**-490, A(1987), 993.
- (11) 小倉・ほか2名, 材料, **38**-435 (1989), 1395.
- (12) Elber, W., *Eng. Fract. Mech.*, **2**(1970), 37; *ASTM STP*, 486(1971), 230.
- (13) Irving, P. E., ほか2名, *Int. J. Fract.*, **9**-1(1973), 105.
- (14) Shih, T. T., and Wei, R. P., *Eng. Fract. Mech.*, **6**(1974), 19.
- (15) Buck, O., ほか2名, *Eng. Fract. Mech.*, **5**(1973), 23.
- (16) 菊川・ほか3名, 材料, **25**-276(1976), 899.
- (17) Sharpe, W. N., Jr., *Int. J. Nondestructive Testing*, **3** (1971), 59.
- (18) Sharpe, W. N., Jr., *Eng. Fract. Mech.*, **3**(1988), 275.
- (19) 田中・ほか2名, 日本材料学会第37期学術講演会前刷, (1988-5), 52.
- (20) 杵渕・ほか2名, 機論, **56**-522 (1990), 251.
- (21) 大路・ほか2名, 日本材料学会第38期学術講演会前刷, (1989-5), 198.
- (22) 荻山・ほか2名, 文献(21)の7ページ.