レーザスペckルゲージ SSDG による ひずみ・き裂開口変位計測†

西川 出* 小倉 敬二*
山上 正文** 桑山 健太郎***

New Development of Laser Speckle Strain/Displacement Gage for the Measurement of Fracture Mechanics Parameters

by

Izuru NISHIKAWA*, Keiji OGURA*, Masafumi YAMAGAMI**
and Kentaro KUWAYAMA***

This paper describes a new strain/displacement measuring SSDG system by using laser speckles. An emphasis was put on the development of a real time non-contact system which could be applicable to the measurements of a local strain and a crack opening displacement (COD) around crack tips both at room and elevated temperatures.

A conventional double sensor SSDG system, in which two image sensors are required to eliminate the rigid motion of samples, was first discussed. A single sensor SSDG system was newly proposed which was applicable to the COD measurements. A real time processing of speckle movements was realized by an originally developed software. The applicability of the single sensor system was successfully tested in the COD measurements of cracks in ceramics and in the closure measurements of small cracks in steels under cyclic thermal stressing at elevated temperatures.

Furthermore an application of this system to a crack tip deformation measurement under mixed loading of Mode I and II was included.

Key words: Laser speckle, Displacement gage, Image processing, COD, Crack closure, Ceramics, Thermal stripping, Interface crack

1 緒 言

破壊力学実験を行う上で短標点距離が要求される局所領域のひずみやき裂の開口変位などの相対変位の高精度計測は不可欠である。従来よりこのような計測にはひずみゲージが用いられてきたが、小型化には限界があり、また計測環境が高温あるいは腐食環境である場合など、計測対象に直接貼付できないケースも多く、高精度で非接触の計測方法の確立が望まれてきた。

これまでに光学的な非接触変位計測手法としては、被計測サンプルに2つのビッカース圧痕を打ち、これにレーザを照射して得られる干渉じまの計測からビッカース圧痕間の変位を求める ISDG (Interferometric Strain/Displacement Gage)^{1),(2)} 法が有力な手法の一つとして提案されている。この手法は我が国でも小倉ら³⁾、田中ら^{4),(5)}、大路・中井ら⁶⁾により発展させられ、主として疲労き裂開口計測に成功をおさめてきた。小倉らは特に高温下のき裂開口計測に応用し、多くの結果を

得てきた。^{7)~9)}

このような ISDG 法は、その計測原理やシステム構成の簡易さから、極めて有効な変位計測手法と考えられるが、対象材料によってはセラミックスなどビッカース圧痕の付与加工が困難である場合や、ある長さ以上の標点間距離を必要とするなど、使用する上でいくつかの制約がある。また高温や腐食環境のようにビッカース圧痕面の金属光沢を維持することが困難な計測対象や曲面などに対しては適用が不可能であった。

一方、被計測サンプル表面が粗面である場合に有効なレーザひずみ計測手法としてレーザスペckルひずみ計測手法が提案されている^{10),(11)}。レーザスペckルは人工的な圧痕の代わりに自然の表面凹凸によるレーザ干渉の結果生じるスペckルの移動を計測対象とするために、この方法が破壊力学計測に適用できれば上述の ISDG 法に代わる計測手法に成り得るものと考えられる。

† 原稿受理 平成6年1月7日 Received Jan. 7, 1994

* 正会員 大阪大学基礎工学部機械工学科 〒560 豊中市待兼山町, Dept. of Mech. Eng., Osaka Univ., Machikaneyama-cho, Toyonaka, 560

** グンゼ(株) 〒524 守山市森川原町, Gunze Ltd., Morikawara-cho, Moriyama, 524

*** (株)堀場製作所 〒601 京都市南区吉祥院宮の東町, Horiba Ltd., Minami-ku, Kyoto, 601

そこで本論文ではレーザスペックルに着目した SSDG (Speckle Strain/Displacement Gage)^{12)~15)} 法の破壊力学計測への適用を目指し、システムの開発を行うこととした。またこのシステムの有効性をセラミックスにおけるき裂開閉計測、サーマルストライピング条件下におけるき裂開閉計測、さらには異種接合界面き裂の混合モード変形計測に応用することにより検討した。

2 計測原理

粗面にレーザを照射した時、粗面上の各粗点からの散乱光が互いに干渉しあうことにより、Fig. 1 のようなスペックルが発生する。このスペックルパターンはレーザ照射領域内の表面変形に伴い変化する。レーザスペックルは複数の干渉現象が重なり合ったものであり、基本的には Bragg の式 $d \sin \theta = n \lambda$ (θ : 入射光と観察方向のなす角, λ : 波長, n : 任意整数, d : 2つの発光源の間隔, 標点間距離) が成立する。したがって、ある1つのスペックル輝点(斑点)に着目すると、計測面の変形あるいはひずみによる標点間距離 d の変化 Δd は、回折角 θ の変化から求められる。

$$\epsilon = \Delta d / d = -\Delta \theta / \tan \theta \quad (1)$$

ここで Fig. 2 に示すように座標系を決め、 z 軸上からレーザを照射し、これと yz 面内で角度 θ_1 をなす方向に距離 L_1 だけ離れた位置を観測位置とする。また3つの軸方向への剛体移動の量を η_x, η_y, η_z 、各軸まわりの回転移動を右ネジの方向を正にして、それぞれ ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z とする。

まず計測方向として荷重軸方向 (y 軸方向) を考える。 z 軸から角度 θ_1 の位置で観察される y 軸方向へのスペックルの移動量 A_y は剛体回転 ϕ_x の方向を正にすると、 θ_1 の関数として次式で与えられる。

$$\begin{aligned} A_y(\theta_1) &= \eta_y \cos \theta_1 - \eta_z \sin \theta_1 + L_1 \phi_x - L_1 \tan \theta_1 \epsilon_y \\ &= \eta_y \cos \theta_1 + L_1 \phi_x - L_1 \tan \theta_1 \epsilon_y \end{aligned} \quad (\because \text{通常 } \eta_z \ll 1) \quad (2)$$

Fig. 1. Typical speckle pattern.

Fig. 2. Coodinate system.

ここで ϵ_y は計測対象領域の y 方向ひずみである。ひずみ計測では $\pm \theta_1$ の位置でステレオ的に計測し、その結果を減算することにより、剛体移動の影響を取り除くことができる。このような計測手法は照射レーザビーム1本に対して、2方向から2台のセンサーを用いて計測することから、以後2センサー法と呼ぶことにする。この手法は、山口ら^{10), 11)}によっても実用化されている変位計測手法である。

$$\epsilon_y = -[A_y(\theta_1) - A_y(-\theta_1)] / 2L_1 \tan \theta_1 \quad (3)$$

一方、き裂を跨ぐようにレーザを照射すると、照射領域はき裂の上下面の2領域に分割される。この2領域を標点とするスペックルの移動にはき裂開口の影響が重畳するので、スペックル移動は次式ようになる。

$$\begin{aligned} A_{yc}(\theta_1) &= \eta_y \cos \theta_1 + L_1 \phi_x - L_1 \tan \theta_1 \epsilon_y \\ &\quad - L_1 \tan \theta_1 \Delta d_1 / d \end{aligned} \quad (4)$$

A_y と A_{yc} におけるひずみ量は厳密には異なる場合もあるが、その相異量はき裂開口変位に比べて極めて小さく無視できる。したがって式(4)と式(2)の差をとることにより、次式を得る。

$$\Delta d_1 = -[A_{yc}(\theta_1) - A_y(\theta_1)] d / L_1 \tan \theta_1 \quad (5)$$

z 軸から θ_1 の角度をなす位置に撮像装置を配置し、試験片を変形させたときに撮像素子上を移動するスペックルを1次的に計測した結果の模式図を Fig. 3 に示す。実際にき裂を跨ぐようにレーザを照射した場合、スペックル移動の量として大小2つの値が得られる。それらのうち移動量の小さい方が剛体移動のみの影響を受けた変化分 $A_y(\theta_1)$ であり、大きい方がこの剛体移動の影響に加え、き裂開口の影響が重畳した変化 $A_{yc}(\theta_1)$ に対応する。このように θ_1 の位置における情報のみから2種類のスペックル移動 $A_y(\theta_1)$, $A_{yc}(\theta_1)$ が分離でき、モードI変位 Δd_1 を求めることができる。このような照射レーザビーム1本、計測センサー1台で計測する手法を先の2センサー法と区別し、1センサー法と呼ぶことにする。

つぎにモードII変形の計測方法について考える。モ

Fig. 3. Speckle intensity distribution.

ードⅡ型（せん断型）のき裂開口変位の計測の原理は、基本的にはモードⅠ計測のそれと全く同様である。き裂を挟む二つのレーザ照射領域の重心を標点と考えると、このき裂がモードⅡ変形を受けた場合、その二点は z 軸回りに回転を起こすので、これに伴うスペックルパターン z 軸回りの回転量を計測すれば良いことになる。回転移動のみを計測する観察位置としては、モードⅠ変形によるスペックル移動の影響が最も少ない場所が最適となるが、それはFig. 2で示している xz 平面内である。この平面内で入射レーザに対して $-\theta_1$ の角度をなす位置を観察位置とし、この位置においてき裂開口の影響を含んだ移動量 A_{yc} と剛体回転による移動量 A_y の2成分を分離・計測し、これらの差からモードⅡ変形 Δd_{II} を求めることができる。

$$\Delta d_{II} = -[A_{yc}(\theta_1) - A_y(\theta_1)]d/L_{II} \sin \theta_1 \quad (6)$$

なおモードⅠ計測の場合と同様、この場合も1台のセンサーでき裂開口の影響を含んだ移動量 A_{yc} と剛体回転による移動量 A_y の2成分の計測ができるので、混合モード下におけるき裂開口変位計測は、それぞれの変形モードにつき1台の、合計2台のセンサーで計測可能となる。

3 計測システムならびに実験方法

ここでは照射レーザとして、サーマルストライピング下の実験にはArレーザ（㈱日本レーザー、最大出力波長 $\lambda=488$ nm, 最大出力43 mW）を、またこれ以外の実験にはHe-Neレーザ（㈱日本科学エンジニアリング、出力波長 $\lambda=632.8$ nm, 最大出力15 mW）を用いた。レーザのビーム径は共に約1 mmである。明りょうなスペックルパターンを得るために、常温の試験では試験片表面に白色の塗料をつけ、完全乱反射面とした。発生したスペックル画像を2次元CCDカメラ（ソニー（株）製、XC-711）を用いて採取した。カメラはレーザの入射光に対し $\theta=45$ deg, 試験片表面より $L=300$ mm~400 mmの位置に、ス

Fig. 4. Laser speckle strain/displacement gage (SSDG) system.

ペックルの移動方向に合わせて設置した。スペックル画像は512画素×512画素×8 bit×3画面の画像ボード（サイバーテック（株）製、CT-9801C）によりパーソナルコンピュータ（EPSON PC-486HX, CPU: 80486 DX2/66 MHz, RAM: 7.5 MB, OS: MSDOS ver 3.30）に取込んだ。代表的なシステム構成例をFig. 4に示す。スペックル画像データは連続的に取込み、処理に必要な 128×128 画素の画像データをEMSメモリに最大197枚まで蓄積できる。一枚の画像サンプルには約0.19秒を要した。山口らはスペックル移動量を高速評価するハードウェア化のために符号のみの演算を行う簡略化した相互相関計算を採用している。本システムでは、得られた変形前のスペックル画像と変形後の画像に対して次式で与えられる2次元画像の輝度残差を最小にする、いわゆる残差最小化法を採用することにより、計算に近似を行うことなく、ソフトウェアでもオンライン計測可能な程度に高速化させた。

$$D(u, v) = 1 - \sum [I_i(x, y) - I_i(x+u, y+v)] / (n \cdot I_{\max}) \quad (7)$$

ここで、 I_i は各画素の輝度、 n は比較画素数、 $I_{\max}$ は画像内の最大輝度である。2枚の画像に対してスペックル移動量評価に要する時間は約0.18秒であった。画像処理を行うこれらのソフトウェアは、すべてC言語で記述した。

開発したスペックルゲージSSDGを用いて、まず単軸引張り荷重下にあるステンレス鋼 SUS304 平滑試験片（平行部長さ30 mm, 幅10 mm, 厚さ3 mm）について一様ひずみの計測精度検定を行った。スペックルの計測と同時に計測面に添付した箔ひずみゲージも用いてひずみ量を計測し、スペックルを用いて求めたひずみの値と比較した。得られたひずみの値をFig. 5にまとめて示した。スペックルゲージならびに箔ひ

Fig. 5. Relationship between foil gage strain and speckle gage strain.

ずみゲージによる結果は良く対応しており、き裂開口変位などの破壊力学計測に十分使用可能であることがわかる。

なお理論的な分解能は式(3)中の分子 $|A_y(q) - A_y(-q)|$ の最小計測可能寸法が撮像素子の一画素の寸法に等しいとすることにより求められる。本実験では画素寸法 $10\mu\text{m}$ 、計測距離 $L=300\text{mm}$ 、計測角は 45° であるので、 $33\mu\text{strain}$ となる。

4 セラミックスの COD 計測

まず実際のき裂開口変位計測として、セラミックスに発生したき裂の開口変位を計測することにした。セラミックスに発生するき裂の開口変位は、その絶対値が極めて小さく、また ISDG 法などを適用しようとする、計測表面の鏡面維持の困難さや、圧痕付与によるき裂発生などの問題のため、常温下でも計測が難しい対象物の一つである。

ここではアルミナセラミックスの3点曲げ試験片(長さ 55mm 、高さ 10mm 、幅 5mm)を用い、き裂発生起点とするために引張り荷重側となる試験片表面にピッカース圧痕を打ち、BC法により、長さ 5.8mm の予き裂を発生させた。このき裂材に同じく BC 法の治具を用いて最大 15.7kN の片振り繰返し荷重を

Fig. 6. Crack opening behavior in Alumina ceramics.

加え、そのときのき裂開口の様子をスペckルゲージで計測した。得られたき裂開口変位を Fig. 6 に黒丸印で示す。図より負荷荷重が増えるに従い、ほぼ直線的にスペckル移動量が増加していることがわかる。さらに詳細に観察すると、この直線の勾配は 10kN を越えるあたりから緩やかになっているようである。このことを明確にするために、最大負荷付近の除荷弾性線を求め、計測結果からこれを引き去った後、横方向に拡大した結果を Fig. 6 に合わせて示す。引き算処理により引張り荷重 10kN でき裂が開口し始めていることが明らかである。常温下においてセラミックスに発生したき裂の開口レベルは極めて高く、有効応力幅比率は約 0.36 であった。

5 サーマルストライピング条件下の COD 計測

つぎに苛酷条件下にある計測対象として、通電加熱による赤熱状態と圧力水による冷却を繰返すサーマルストライピングシミュレーション実験下にある表面長さ 0.22mm のき裂を取上げた。用いた試験片は SUS 304L 鋼平板試験片(試験部幅 30mm 、板厚 10mm 、冷却領域直径 20mm)である。実験は 0.25 秒冷却、 0.7 秒加熱の熱サイクルとした。実験中の試験片内部

Fig. 7. Temperature variation under thermal striping experiment.

Fig. 8. Setup for thermal striping experiments.

Fig. 9. Defused deflection area for laser speckle measurement.

Fig. 10. Samples of sequential image data obtained under thermal stripping condition.

の温度変化の様子を Fig. 7 に示す。本実験では図にも示したように試験表面に $450 \sim 600^\circ\text{C}$ の熱サイクルを多数回加えるため、計測面の高温酸化が顕著となる。さらに水冷却を行うため計測対象面の劣化が著しく、従来型のレーザ計測は困難となる。本計測では Fig. 8 に示すように 1 台の CCD カメラを角度 $\theta = 45^\circ$, 距離 $L = 400 \text{ mm}$ にセットした。スペックル計測のためには、計測対象面が乱反射面すなわち粗面である必要がある。そこで Fig. 9 に示すようにスリット部に微小な研磨傷を導入することにより、乱反射面の確保と計測領域の限定を行った。

本実験の熱サイクルは 1.05 Hz と比較的高速いため、以下のような画像データ採取の高速化を計った。まず得られた 512×485 画素の原画像からスペックル移動方向（走査線方向）が 256 画素、その直交方向が 16 画素の部分のみを記憶し、次の画像を 16 画素分シフトさせ、ボード上のメモリーがすべて埋まるまで、移

Fig. 11. Relationship between stress intensity factor and speckle displacement.

Fig. 12. Effective stress intensity factor range, ΔK_{eff} , and crack growth rate, da/dN , plotted against crack length.

動方向に細長い画像データとして連続的に採取した。得られた計測時間ごとの連続画像データを Fig. 10 に示す。時間が進むに連れて白色を呈しているスペックル模様が移動していく様子が認められる。なおこの時のデータサンプルには高速処理が必要であるため、この部分についてはマシン語で記述した。計測より得られたスペックル移動を K 値に対してプロットしたものを Fig. 11 に示す。図よりき裂閉口にとまなうレーザスペックル移動量の変化が明りょうに読み取れる。

このようにして評価したき裂閉口レベルから有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} を求め、き裂深さに対して Fig. 12 にまとめた。また同図には併せて計測したき裂深さから求めたき裂進展速度も ■ 印でプロットしてある。両者の変化傾向は良く対応しており、本研究で取扱った範囲のサーマルストライピング条件下ではき裂閉口により、ある程度き裂進展挙動を論じ得ることがわかる。

以上のように本研究で開発したレーザスペックルゲージは水冷を行う高温環境下での計測、小寸法き裂の計測、計測領域の限定および高速計測などの苛酷な計

測条件下でも十分適用可能であることがわかる。

6 混合モード変形計測

つぎに混合モード変位計測として異種接合界面に発生したき裂の開口変位計測を行った。試験片は結城¹⁷⁾が用いたと同様の Al/Epoxy 接合円形試験片であり、直径 100 mm の半円形の 2017Al 合金を 2 枚向かい合わせ、それらをエポキシ樹脂を用いて張合わせることで作成した。エポキシ樹脂層の厚さは 2 mm である。試験片中央部の界面には厚さ 25 μm のテロンフィルムをはさみ、これにより長さ 10 mm の初期欠陥を得た。界面に対して任意の方向から -100 kgf ～ -300 kgf の繰返し圧縮負荷を加えることにより、荷重変化中のき裂開口変位変化を計測した (Fig. 13)。負荷角度 ϕ は 5, 10, 20, 30, 45, 60 度の 6 種類を選んだ。計測位置 (レーザ照射位置) は初期欠陥の中心とこれを挟む $\pm 2\text{ mm}$, $\pm 4\text{ mm}$ の 5 箇所とした。最小圧縮荷重から最大圧縮荷重負荷の間に Al/Epoxy 接合界面き裂に生じたモード I 変位ならびにモード II 変位分布を各負荷角度についてまとめた結果をそれぞれ Fig. 14(a), Fig. 15(a) に示す。横軸には界面き裂中央部からの距離を、縦軸には各計測領域における変位量をとった。モード II 変位の符号は界面の上部が左に変位する方向を正とした。また比較のため本実験と同じ形状・材料の試験片に対して解析された界面き裂の両先端における応力拡大係数をもとに評価したき裂面のモード I・モード II 変位から推定した変位分布をそれぞれ Fig. 14(b), Fig. 15(b) に示した。図中、き裂中央部付近の開口変位量は両き裂先端近傍における変位量からの推定値であるので、その絶対値自身には正確さを欠くが、変位分布の傾向は正しいものと考えられる。まず Fig. 14 に示したモード I についてみると負荷角度 ϕ が増えるに従い開口量は減少している。場所による開口変位の違いについてみると、左端近傍で最大、右端で最小となっており、この最小値は負、すなわち完全閉口状態となっていることが分かる。つぎ

Fig. 13. Interface crack under mixed mode loading.

(a) Experimental.

(b) BEM.

Fig. 14. Mode I crack opening displacement.

(a) Experimental.

(b) BEM.

Fig. 15. Mode II crack opening displacement.

に Fig. 15 のモードⅡ変位についてみると, 負荷角度 ϕ が5度から増えるに従いいったん増加するが, 20度を越えると減少に転ずる結果となった。これらの開口変位の様子はすべて解析結果の傾向とも一致している。

Al/Epoxy 接合界面では左端がモードⅠ支配型, 右端がモードⅡ支配型のき裂開口変位分布を呈しており, 異種接合界面特有の非対称の開口変位分布が生じていることが明らかとなった。また本計測システムは混合モード変形に対しても精度良く計測可能であることが明らかとなった。

7 結 論

非接触, 曲面計測, 計測面非加工(弱加工), 小計測標点, 高速計測, 高分解能などの特徴を有するレーザスペckルゲージを開発し, システムの有効性について検討した。本論文で得られた結論をまとめると以下のとおりである。

(1) パーソナルコンピュータと CCD カメラ, 画像ボードからなるスタンドアロンタイプの SSDG システムを開発した。画像処理に EMS メモリを活用することにより, オンラインでかつ高速処理を可能にした。

(2) 従来より提案されている2センサー法をき裂開口変位計測に応用する手法を提案するとともに, 新たに1台のセンサーで計測可能な1センサー法をも開発した。

(3) 変形量が極めて微小で, かつその計測表面を鏡面にすることが困難なアルミナセラミックスのき裂開口変位計測に応用した結果, 除荷弾性線の減算などの処理を施せば, セラミックスの COD に対しても十分な精度で非接触計測が可能であることを明らかにした。

(4) サーマルストライピング条件のように加熱冷却を繰返すような苛酷環境下における微小き裂に対しても, スペckル計測が有効であることを示した。得られたき裂開閉口挙動はき裂進展挙動と対応していた。

(5) 1センサー法を発展させ, 混合モード COD に対しても計測できる手法を提案した。これを Al/Epoxy の異種接合界面に発生したき裂の混合モード

変形状態の計測に応用し, 異種接合界面特有の非対称き裂開口変位を明らかにした。

(平成5年9月21日 日本材料学会第7回破壊力学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) W. N. Sharpe, Jr., Int. J. of Nondestructive Testing, **3**, 59 (1971).
- 2) W. N. Sharpe, Jr. and J. J. Lee, ASTM STP 905, 253 (1984).
- 3) 小倉敬二, 西川 出, 木村康樹, 日本機械学会論文集, **56**, 523, A, 526 (1990).
- 4) 杵渕雅男, 秋庭義明, 田中啓介, 日本機械学会論文集, **56**, 522, 251 (1990).
- 5) 田中啓介, 秋庭義明, 中尾真也, 杵渕雅男, 日本機械学会論文集, **56**, 524, A, 715 (1990).
- 6) 大路清嗣, 中井善一, 藤本一男, 日本材料学会第38期学術講演会前刷, 198 (1989).
- 7) K. Ogura, I. Nishikawa and Y. Miyoshi, Residual Stresses **III**, **1**, 531 (1992).
- 8) K. Ogura and I. Nishikawa, Fatigue '90 **3**, 1413 (1990).
- 9) 小倉敬二, 西川 出, 日本機械学会講演論文集, No. 920-72, 619 (1992).
- 10) 山口一郎, 非破壊検査, **35**, 7, 453 (1986).
- 11) 山口一郎, 竹森民樹, 小林幸一, 非破壊検査, **39**, 8, 682 (1990).
- 12) 西川 出, 小倉敬二, 日本機械学会講演論文集, No. 920-78, 459 (1992).
- 13) 西川 出, 小倉敬二, 日本材料学会第42期学術講演会前刷, 285 (1993).
- 14) 小倉敬二, 西川 出, 山上正文, 日本機械学会講演論文集, No. 934-1, 82 (1993).
- 15) 西川 出, 小倉敬二, 精密工学会第5回外観検査の自動化ワークショップ, 65 (1993).
- 16) 武藤睦治, 田中紘一, 宮原信幸, 日本機械学会論文集, **55**, 518, A, 2144 (1989).
- 17) 結城良治, 許 金泉, 劉 金橋, 大平寿昭, 小野智佳, 日本機械学会講演論文集, No. 910-17, 192 (1991).