レーザとカラーカメラを用いた 2 次元変形測定法

Two-dimensional deformation measurement with using laser and color camera

○学 有川 龍郎 (金沢大・院)

正 安達 正明 (金沢大)

Tatsuro ARIKAWA, Kanazawa University
Kakumamachi Kanazawa, Ishikawa 920-1192Masaaki ADACHI, Kanazawa University
Kakumamachi Kanazawa, Ishikawa 920-1192

Key Words: Deformation measurement, Two-dimensional, Laser, Color camera

1. 緒言

現在, 金属の変形機構には解明されていない部分が多い。そこで常に変形し続け, 変形を止められない面を対象に任意の時間長での変形量を定量測定する方法についての研究を行った。変形を測定することによって, 歪み速度一定での塑性変形量と破壊メカニズムの解明に役立つと思われる。これによって金属の強度や変形加工性などの機械的性質を高めることができると考えられる。

現在一般的な変形の測定にはひずみゲージが用いられている。接触式の測定であるため, 試料に対する前処理が必要で測定時の準備に時間を要し, 1 点測定であるなどの欠点がある。

そこで測定にレーザを用いることでこれらの問題を解決できる他, 様々な利点がある。例えば高感度であること, 微小物体の測定が可能といったものである。

具体的にはレーザ光のスペックル干渉を用いることでミクロンオーダーの静的変形量について 2 次元的な分布を調べることができる。動変形に関しても干渉像をカメラで連続的に取り込み, その光強度変化から時間情報を求める方法がある。

この測定方法では 1 方向の変位ごとにレーザとカメラが 1 台ずつ必要である。よってこれを 2 台組み合わせることで 2 次元の変形を測定することができるが, 装置が大きく複雑になってしまう。そこで本研究では 1 台のカメラで 2 次元の変形を測定するために, 赤緑 2 色のレーザとカラーカメラを用いる方法を検討した。

2. 測定原理

2-1. スペックルパターン干渉法(ESPI)

レーザ光を粗面に照射すると, 粗面の各点で乱反射した光波が像面でランダムな位相関係で重ね合わせられることによって, スペックルパターンと呼ばれる独特の干渉模様が生じる。このスペックルパターンを参照光と重ね合わせると, やはりスペックルパターンが現れるが, 物体が変形して個々のスペックルの干渉条件が変化するとパターンの明暗が変化する。変形前後のスペックルパターンを CCD カメラで電子的に記録し両者の差の絶対値をとると, 変形による位相差が 2π 変化するごとに差画像の明暗が 1 周期変化する。このようにして全視野にわたる変形の分布を光波の 2π 位相変化を単位とする等高線として描かせることができる。得られる縞パターンはホログラフィー干渉法によるものと等価で, 光波長をものさしにした高精度全視野計測ができる。これはホログラフィーと違って CCD カメラとコンピュータさえあればすべてデジタル処理で結果が得られることから

電子スペックルパターン干渉法(ESPI)とよばれる。ESPI には様々な特長があり微小変形や振動解析の新しい計測法として期待が寄せられてきた。例えば, 高感度全視野計測, 非接触計測法であり試料に対する前処理が不要, 光学系の選択により面外変形や面内変形に加えてこれらの空間微分を測定できることなどが挙げられる。

近年, 低価格で高性能なコンピュータが身近なものとなり, 大量の画像データをメモリーに蓄え, またデータ間の演算を高速に行うことなどが比較的容易になった。そのため物体の変形に伴って刻々と変化する干渉スペックルパターンを長時間にわたって連続的にコンピュータに取り込み, 差画像の計算を時系列的に行うことによって時間微分の相関縞を得る方法が提案されている。この方法で金属材料の引張試験の全過程を観察し, 塑性変形過程で知られている局在する変形場の詳細な動的挙動の計測をすることができる。

2-2. 2 色のレーザによる 2 次元変形測定

照射されたレーザ光はビームスプリッターで 2 分され, 反射鏡とレンズによって試料に照射される。試料が変形すると, この 2 つの光路長の差が変化する。これらが互いに干渉して反射点の光強度となる。

2 色のレーザを x, y それぞれの方向に用いることで 2 方向それぞれの干渉像を得ることができる。これを CCD カメラを通して画像として連続してコンピュータに取り込み, グラフィカル言語 (LabVIEW) で作成したプログラムを用いて解析することで 2 方向の物体の変形を測定することができる。

Fig1. Optical setup(one dimension)

3. 実験装置

本研究では図2に示す自作した小型の引張試験機を用いて金属板を引っ張り、光学系を用いてその変形を測定する。これは通常の引張試験機は大型であるため光学系に組み込むことが困難であるためである。この装置は厚さ 12 mm のジュラルミン板を組み合わせ、ねじ棒を支えている。モータからの軸とねじ棒を支える部分にはラジアル軸受けとスラスト軸受けを用いて2方向の荷重を受けられるようにした。超低速モータからの出力をウォームギアを用いて減速し、ねじ棒を回転させる。これによって数 $\mu\text{m/s}$ で試料を引っ張ることができる。

光学系は He-Ne レーザ(波長 638 nm)・DPSS レーザ(波長 473 nm), CCD カメラ, レンズ, ビームスプリッター, 反射鏡を用いている。

試料は幅 5 mm, 厚さ 0.5 mm, 幅 5 mm 部の有効長さ 70 mm のアルミ板を用いる。表面には艶消しホワイトの塗装をすることでレーザ光の反射を均等にし、取り込みやすくしている。これを試験機の上部にはさんで固定し引張試験を行う。

Fig.2 experimental setup

4. データ処理

変形に伴うカメラの各画素での光強度変化の最大値 $I_{\max}(r)$, 最小値 $I_{\min}(r)$ さらに光強度 $I(r,t)$ を図3に示す。この時、式(1)を用いて干渉位相 $\psi(r,t)$ に関する絶対値が分かる。そこで測定初期 t_0 での位相が分かっている時、 $\pm|\psi|$ を t での位相の候補として取り上げ、測定点の局所域内の画素で2つの候補から計算した位相変化を図4の複素平面でプロットする。変形による位相変化は域内ではほぼ同じになることを利用し、図の白丸は位相が不揃いなので間違った候補から計算された点、黒丸は正しい候補から計算された点と考え $\Delta\psi$ を位相の正しい変化量とみなす。この位相変化を測定初期の位相に加えると t での位相が分かる。よって次の処理をするための初期位相も分かる。一定画像枚数(60 枚)の周期で $I_{\max}$ と $I_{\min}$ を更新しながら図4の抽出と加算を繰り返すと大変形への対応ができそうに思われる。しかし変形が大きくなるとスペックルの位相分布が変化し、加算値と新しい位相には少しずつ違いが累積していく。このため上記の繰り返しには限界があり、途中で抽出できなくなる。そこで図4の $\Delta\psi$ を用いて加算によらない 60 枚目の位相 $\phi(r,t)$ を式(2), (3), (4)を用いて計算した。式(2), (3)で θ は変形による位相変

化量, $Bn(\theta)$ は変形に相関をもたない光強度変化成分である。この $\phi(r,t)$ はスペックルの位相分布に変化が発生していても正しい。これをその時点以降の図4の $\Delta\psi$ 抽出のための初期位相として使用し、 $\Delta\psi$ の抽出と ϕ の計算を60 枚毎に繰り返した。その結果、大変形によって大きなモジュレーションの変化やスペックル位相分布に変化があっても正しく変形位相測定を行うことができた。

Fig.3 Light intensity change on a pixel of CCD camera

Fig.4 Complex plane plot

$$|\psi(r,t)| = \cos^{-1} \left[\frac{I(r,t) - \{I_{\max}(r) + I_{\min}(r)\}/2}{\{I_{\max}(r) + I_{\min}(r)\}/2} \right] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} I_c(r,t) &= \int_{t_k}^t I(r, t_k - t_m) \cos\{\Delta\psi(r, t_k - t_m)\} \frac{d\Delta\psi(r, t_k - t_m)}{dt_m} dt_m \\ &= \int_{-2\pi}^0 I(r, \theta) \cos\theta d\theta = \int_{-2\pi}^0 \{A \cos(\theta + \phi) + Bn(\theta)\} \cos\theta d\theta \quad (2) \\ &\approx A\pi \cos\phi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_s(r,t) &= \int_{t_k}^t I(r, t_k - t_m) \sin\{\Delta\psi(r, t_k - t_m)\} \frac{d\Delta\psi(r, t_k - t_m)}{dt_m} dt_m \\ &= \int_{-2\pi}^0 I(r, \theta) \sin\theta d\theta = \int_{-2\pi}^0 \{A \cos(\theta + \phi) + Bn(\theta)\} \sin\theta d\theta \quad (3) \\ &\approx A\pi \sin\phi \end{aligned}$$

$$\phi(r,t) = \arg(I_c(r,t) - iI_s(r,t)) \quad (4)$$

5. 結言

本研究で製作した装置を用いることで、金属板の2次元の変形を測定することが可能であると考えられる。