

画像解析を用いた有限歪の計測に関する基礎研究

(引張と剪断の比例変形下の局部変形の測定)

Fundamental Study on Finite Strain Measurements using Image Analysis

(Measurement of Local Deformation under Proportional Deformation of Tension and Shear)

○福士 洸介¹, 二見 将弘², 青木 頌太², 加藤 保之³Kouske FUKUSHI¹, Masahiro FUTAMI¹, Shota AOKI², Yasuyuki KATO³

Abstract: The measurement method for finite strain based on the image analysis is suggested in this paper by using the Natural Strain theory. The effectiveness of this method has been verified by comparing the strain measurement of image analysis with the conventional measurement based on the displacement meter. In our previous study, the effectiveness of this method has been confirmed within the range of the uniform field. However, the local deformation has not been examined in detail yet. So, in this paper, the large proportional deformations of tension and shear, which the local deformation occurs, are examined based on this image analysis.

1. 緒言

自然歪理論に基づく、本画像解析の妥当性を実験的に検証していくことが、本研究の目的である。これまで、主として局部変形がまだ生じない一様場の変形に限定して研究が行われ、局部変形が生じた後の更に大きな変形については検討が行われていなかった。そこで前報の研究では、単軸状態の変形(即ち、単軸引張と単純剪断)を研究対象として、局部変形が発生する更に大きな変形に対して、本画像処理と従来の変位計の測定値の比較を行ってきた。その結果、単軸引張の場合では、試験片の上部と中央部の画像に差異が生じ、局部変形が発生して以降は中央部画像の測定結果が現実の歪の挙動を最も的確に表していることが確認できた。一方で、単純剪断の場合には、ストレッチ量が $\lambda=2.6$ まで加えているにもかかわらず上部と中央部の画像の測定結果にあまり差異が生じないことが明らかとなった。

本論文ではそれらの単軸引張と単純剪断が同時に加わる比例変形に対して本画像解析の測定値と従来の変位計の測定値の比較をすると共に、局部変形以降の上部画像と中央部画像の結果を比較し考察していくことにする。

2. 3本の線素の伸び歪と変形勾配の関係

実験について説明をする前に、ここでは試験片の表面に描いた3本の線素の伸び歪の値から変形の主値とその主軸の方位を算出する方法について述べる。

図1は、基底面(水平軸)からそれぞれ $\beta_{oa}, \beta_{ob}, \beta_{oc}$ の方位に存在する3本の線素 l_{oa}, l_{ob}, l_{oc} を表わしている。

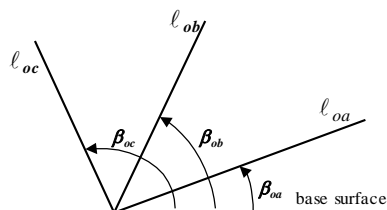


Fig.1 Line elements in a space

自然歪理論ではこれらの線素の伸び歪と変形勾配 D の各成分 D_{11}, D_{12}, D_{22} の間に次式の関係が成立する。

$$D_{11} = \exp(\varepsilon_a) \quad (1)$$

$$D_{12} = \exp(2\varepsilon_b - \varepsilon_a) - \frac{1}{2}(\exp(\varepsilon_a) + \exp(2\varepsilon_c - \varepsilon_a)) \quad (2)$$

$$D_{22} = \sqrt{\exp(2\varepsilon_c) - \left\{ \exp(2\varepsilon_b - \varepsilon_a) - \frac{1}{2}(\exp(\varepsilon_a) + \exp(2\varepsilon_c - \varepsilon_a)) \right\}^2} \quad (3)$$

これより、変形の主値 λ_1 、主歪 ε_1 と主軸(歪主軸)の方位 θ_m は、

$$\lambda_1 = \frac{\sqrt{D_{11}^2 + D_{12}^2 + D_{22}^2 + 2D_{11}D_{22}} + \sqrt{D_{11}^2 + D_{12}^2 + D_{22}^2 - 2D_{11}D_{22}}}{2} \quad (4)$$

$$\varepsilon_1 = \ln \lambda_1 \quad (5)$$

$$\theta_m = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{D_{11}^2 + D_{12}^2 - D_{22}^2}{2D_{12}D_{22}} \right\} \quad (6)$$

とそれぞれ表される。

3. 実験方法

引張と捩りを同時に作用させることのできる多軸負荷試験機を用いて単軸引張と単純剪断の複合変形の実験を行った。実験では、大きな変形を与えるために、延性材料の中でも特に純度の高いタフピッチ銅(純度 99.99%)の焼き鈍し円筒試験片(外径 22[mm], 内径 16[mm], 標点間距離 30[mm])を採用し、図2に示すように試験片の表面には、画像測定のために予め等間隔(1.92[mm])の格子状の罫書き線を描き、その円筒試験片を多軸負荷試験機に装着した後に引張荷重とトルクを加えながら画像の測定を行う。ここでの画像の測定は、最初に局部変形が起り始める試験片の中央と、中央から上方に 11.52[mm]離れた位置の微小要素に対して行う。なお、試験片に与える最大のストレッチ量は $\lambda=1.82$ である。

画像の測定に使用したカメラは、Canon 製の高画素カ

メラ(最大画素 2110 万画素)であり、上部と中央部の微小要素の表面形状の刻々の変化を測定するために 2 台のカメラを用いる。なお、カメラの位置は、試験片の半径方向の変化に追従させると共に上下に移動させて測定を行う。これらの測定した画像から微小要素(図 2(b)参照)の 4 点の座標位置 OABC を測定し、前述の 3 本の線素(水平方向の線素 OA, 対角線に位置する線素 OB, 鉛直方向の線素 OC)のそれぞれの伸び歪を幾何学的に奥行きを修正しながら自然歪理論に基づき求める。

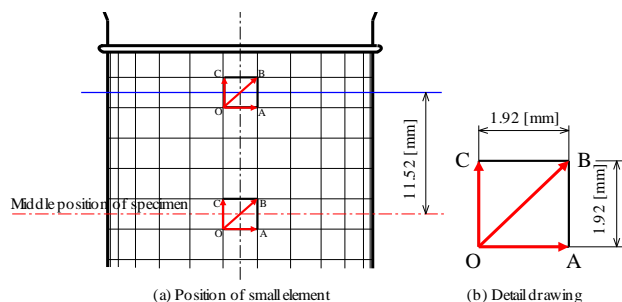


Fig.2 Specimen and position of small elements

4. 実験結果と考察

実験で測定した変形途中の画像の一例を図 3 に示す。ここで、(i) は試験片の標点間の中央から 11.52[mm]離れた上部の微小要素、(ii) は中央部の微小要素に対し、同一の引張荷重及びトルクが作用するときの画像を比較したもの(但し、a は 16.3[kN], 93.1[N・m], b は 25.7[kN], 102[N・m], c は 25.2[kN], 76.8[N・m])である。これらの画像を比較すると、b までは、(i)と(ii)の画像に大きな差異が認められず、試験片には一様な変形が生じている。一方で、c の画像から明らかなように、(ii-c)の画像は(i-c)の画像に比べて変形が進行していることがわかる。従って、b から c に至るまでの過程で、試験片の中央部付近で局部変形が生じ始めていると考えられる。

次に図 4 と図 5 は、画像解析から求めた偏差主応力 S_t と偏差主歪 e_t の関係を従来の変位計を用いた測定結果と比較したものである。ここで、◆が変位計による測定結果であり、図 4 の□が上部画像、図 5 の○が中央部画像より求めたそれぞれの測定結果である。なお、これらの図の応力は微小要素の表面形状の変化ならびに外径の変化を基に刻々の断面積を求めて得られる真応力であり、図中の a,b,c は、前述の画像が測定された箇所に対応している。比較的初期の測定段階では、両測定結果は良く一致するが、図中の b 点では既に変位計による測定結果 b' と画像処理に基づく測定結果 b に差異が生じ始め、c 点においては、画像解析に基づく上部(i)の測定値が最も小さく、中央部(ii)が最も大きくなり、従来の変位計を用いた測定値がそれらの間に存在する。これは、局部変形が発生して以降は、上部画像の変形があまり伸展しないのに対して、中央部は大きく進展しており、そこでの局所的な歪を測定しているため、平均的な歪を測定している変位計との差異が生じたと考えられる。

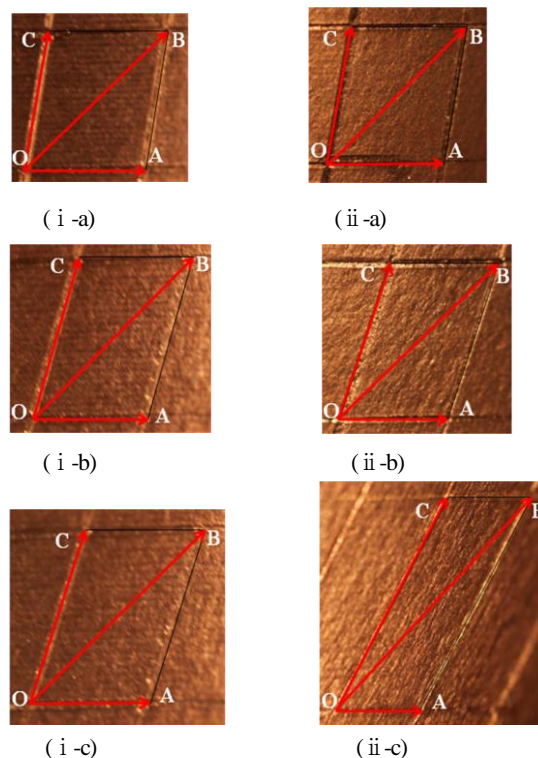


Fig. 3 Comparison of photograph in each small element

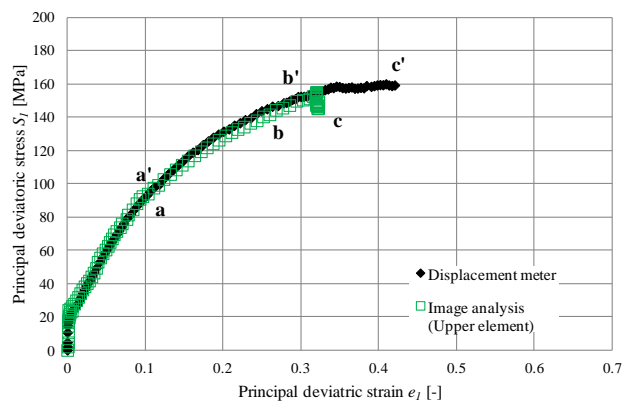


Fig.4 Principal deviatoric stress and deviatoric strain diagram (in case of (i))

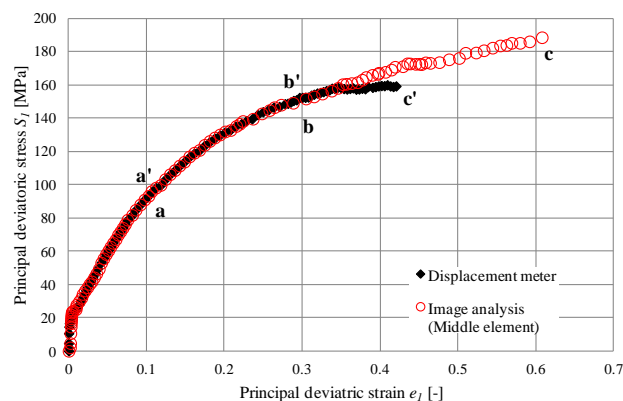


Fig.5 Principal deviatoric stress and deviatoric strain diagram (in case of (ii))

4. 結言

本実験の結果から、単軸引張と単純剪断の比例変形下では、上部と中央部の画像の測定結果に差異が生じ、 $\lambda=1.3$ 以降に局部変形が発達することが明らかとなった。