

B05 デジタル画像相関法を用いた大変形、大回転時における変形・ひずみ計測法の開発

大平 紘 敬 (指導教員 正岡・柴原)

Development of Strain Measurement Using Digital Image Correlation in Large Deformation and Large Rotation

by Hironori Ohira

Abstract

There is a growing demand for developing non-contact and accurate deformation and strain measurement technique of structures. Then, studies on digital image correlation technique, which can obtain the deformation of a surface by comparison of digital images of the unformed and deformed configurations, are presented in this paper. Since this technique does not need a complicated optical system, the measurement can be performed easily. However, it is difficult to measure large deformation and strain using this method. So, we develop incremental type measurement method and the method which can consider the effect of tensile and compressive strain and rotation. Using this method, the large deformation and large rotation can be analyzed. This paper presents the detail of these measurement method and the result of tensile test of these measurement method.

1. 結 言

ゴム材料は他の材料と比較して、超低弾性率、可逆的大変形、粘弾性などの顕著な物性を有するため、近年各工業分野で広く応用されている。具体的には海洋分野では浮標ブイを係留するラバージョイナーに、自動車分野ではタイヤに用いられている。しかし、ゴム材料は各工業分野で広く応用されているにもかかわらず、ゴム弾性の発生メカニズムでさえ解明されていないのが現状である¹⁾。その要因として、三次元ネットワークを持ち、複雑な分子運動を行い、金属、繊維、充填材などが混合されていることなどが挙げられる。そのため、ゴム材料の変形・破壊挙動を詳細に把握することは非常に重要であると考えられる。しかし、現在ひずみゲージによる計測方法では35%を越える大ひずみの計測を行うことができず、ゴムなどの柔軟な材質の変形・破壊挙動を把握することができないため、ゴム材料に模様をつけ、目視で変形・破壊挙動を調べているのが現状である。

そこで、本研究では他の計測手法に比べ、安価、簡便であり、非接触で高精度な変形・応力計測が可能であると報告されているデジタル画像相関法²⁾を用いて、大変形、大回転時における変形・ひずみ計測法を開発した。具体的には、画像照合をする際、直ひずみを考慮し、拡大・縮小補正を加えることで、照合精度を高めた画像照合法と、複数の画像を用いることで、各画像間に生ずる変位分布を算出し、それらを足し合わせることで大変形、大回転した試験片の変位を算出する増分加算型画像計測法である。これらの画像照合法を用いることで、機械的にゴムの変形挙動を確認することが可能となった。

2. 理 論

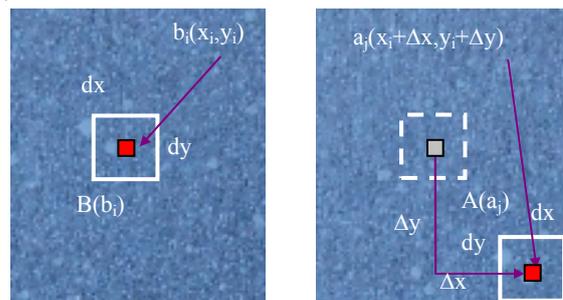
2.1 画像相関法を用いた画像照合法

変形前の画像である基準画像領域と、変形後の画像である計測対象画像を基に、Fig.1 (a)に示すような微小領域

と最も良い相関を得る画像領域を Fig.1 (b)で示される変形後画像より検出する。その方法を以下に示す。

- (1) 基準画像中におけるある画素位置 $b_i(x_i, y_i)$ を中とする $dx \times dy$ の微小領域を設定する。これを基準画像領域 $B(b_i)$ と定義する。
- (2) 計測対象画像においても、同様にして、画素位置 $a_j(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)$ を中心にした $dx \times dy$ の微小領域である比較画像領域 $A(a_j)$ を設定し、基準画像領域 $B(b_i)$ と比較画像領域 $A(a_j)$ の輝度相関値 $R_{ij}(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)$ を、画像相関法を用いて求める。
- (3) 比較画像領域 $A(a_j)$ を1画素ずつずらしながら全画像領域内の輝度相関値 $R_{ij}(b_i, a_j)$ を求める。輝度相関値 $R_{ij}(b_i, a_j)$ が最小あるいは最大となる時の座標 $(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)$ が相関性の最も高い座標、すなわち画像照合位置であり、 Δx および Δy が $b_i(x_i, y_i)$ における変位解である。本研究で用いた残差自乗和相関³⁾では輝度相関値 R_{ij} が最小の時に相関性が最も高くなる。

変形前および最終変形時の画像において、上記に示した理論を適用し、計測変位を算出する手法を従来手法とする。



(a) Original Image

(b) Deformed Image

Fig.1 Basic procedure of digital image correlation.

2.2 直ひずみを考慮した画像照合法

一般的によく用いられる画像照合法では、Fig.2 に示す (a)変形前画像照合領域の点(X,Y)と(b)変形後画像照合領域の点(Xo,Yo)を照合する際、点(X1,Y1)と点(Xe1,Ye1)、点(X2,Y2)と点(Xe2,Ye2)という照合領域の対応した点の相関を全てとることで点(X,Y)と点(Xo,Yo)の相関をとる。

本手法は、点(X1,Y1)と点(Xe1',Ye1')、点(X2,Y2)と点(Xe2',Ye2')という(a)の照合領域と(b)の黒線で示す各点を点(Xo,Yo)を中心に x 方向に m 倍、y 方向に n 倍させた照合領域とで相関をとることで直ひずみを考慮した画像照合をすることが可能になった。拡大・縮小させた照合領域の各点の座標は(1)式より算出する。ただし、一般的に拡大・縮小した点には輝度値が存在しないので、その場合には、近傍 4 点の輝度値から線形補間により算出した値を使用する。

$$\begin{aligned} X_{e_1}' &= (X_{e_1} - X_o) \times m + X_o \\ Y_{e_1}' &= (Y_{e_1} - Y_o) \times n + Y_o \end{aligned} \quad (1)$$

2.3 増分加算型画像計測法

従来の画像照合法では変形前後の 2 枚の画像を用いて照合するため、大きな変形が起こった場合に画像自体が大きく変化し補正をしない状態では照合ができない可能性がある。しかし、画像相関法と本章で説明する増分加算型画像計測法を使用することによって、大きな変形や回転などが起こった場合でも補正をすることなく解析が可能になる。

増分加算型画像計測法とは変形前後の画像に加え変形途中の画像も撮影し、連続する 2 枚の画像で画像照合をして得られた各画像間の変位をピクセル単位で追跡していき、サブピクセル単位で計測⁴⁾した変位を全て足し合わせるにより最初の画像と最後の画像における変位量を得る手法である。これにより、大変形、大回転をしても微小な変形、回転として比較することが可能となり、一般的によく用いられている画像相関法を適用することで変形を計測することができる。例えば、Fig.3 のように Image 1、2、3、4 の 4 枚で増分加算型画像計測法を用いて変位計測を行う場合は Image 1 と 2 で照合、2 と 3 で照合、3 と 4 で照合を行い、3 つの変位量を足し合わせることで Image 1 と 4 での変位量を得ることができる。

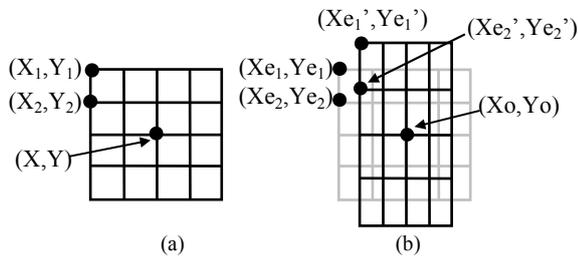


Fig.2 Expansion and Reduction matching area

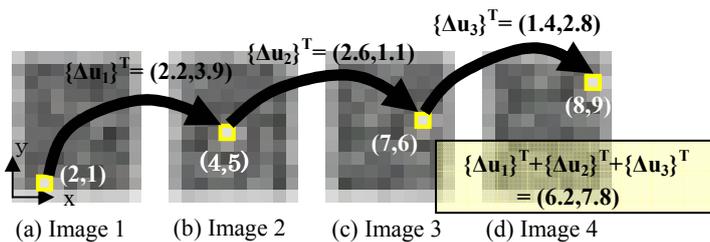


Fig.3 Incremental type measurement method

本研究では直ひずみを考慮した画像照合法と増分加算型画像計測法の 2 手法を開発したが、両手法とも異なる長所を有する。直ひずみを考慮した画像照合法では変形前後 2 枚の画像だけで解析が可能であるとともに、照合時の拡大・縮小率でおおよそそのひずみを算出することが可能になる。一方、増分加算型画像計測法では 2.1 節で示した、画像相関法を用いた画像照合法で照合できる画像を撮影し続けることができれば、大変形時でも変位計測が可能であり、かつ高速で解析を行うことができる。

3. 大変形時における帯板の引張り試験

3.1 実験装置および試験片の形状・寸法

本章では提案手法の大変形時における変位・ひずみ計測への適用性について検討するため、試験装置として島津製作所製島津オートグラフ AG-IS MS(卓上)形を使用し、帯板の一軸引張り試験を実施した。Fig.4 にその試験片形状と寸法を示す。また、大変形時の挙動を確認するため材料はゴム材料 MBA079-B を使用した。

3.2 変位・ひずみ計測

増分加算型画像計測法では計 6 枚 の画像を使用し解析を行った。Fig.5(a)に case1(F=0)の画像を、(b)に case6(F=219.6N)の画像を示す。Fig.6 に Fig.5(a)に示される解析領域における y 方向変位分布、Fig.7 に y 方向ひずみ分布、Fig.8 と Fig.9 には Fig.8 中に示す B-B' 上の y 方向変位分布と y 方向ひずみ分布を示す。

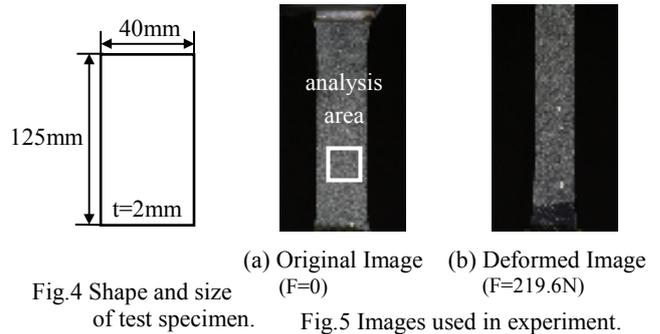


Fig.4 Shape and size of test specimen.

Fig.5 Images used in experiment.

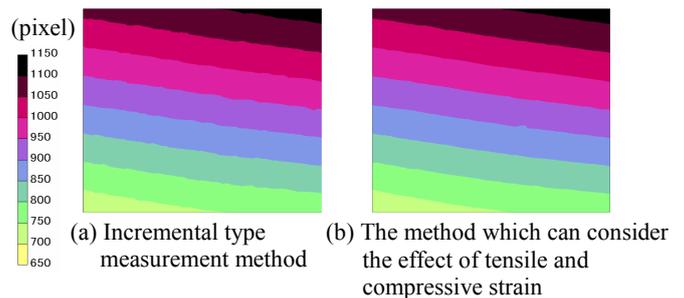


Fig.6 Distribution of displacement in y direction

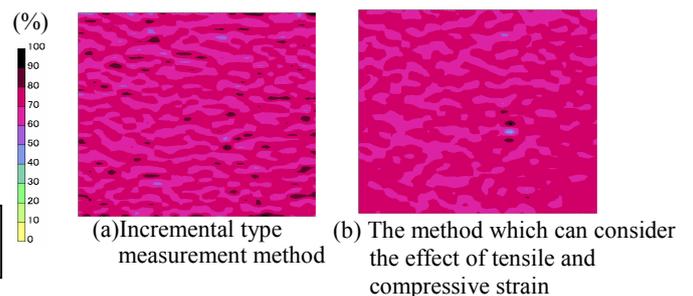


Fig.7 Distribution of strain in y direction

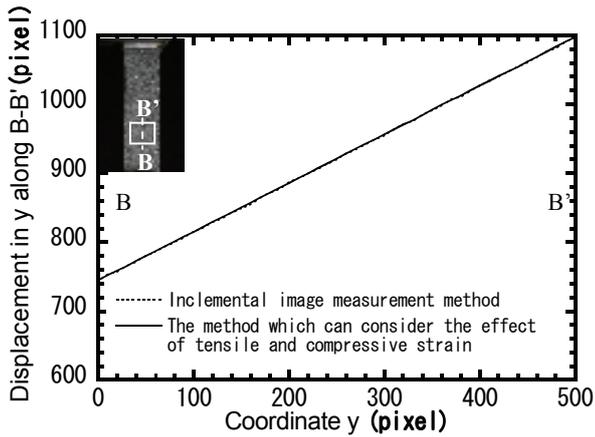


Fig.8 Distribution of displacement in y direction along B-B'

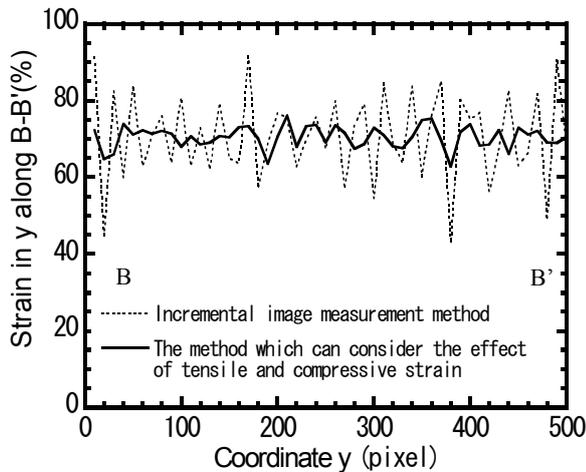


Fig.9 Distribution of strain in y direction along B-B'

従来手法では不可能であった変位・ひずみ計測が、直ひずみを考慮した照合方法および、増分加算型画像計測法を適用することにより可能であることが確認できた。また、Fig.6 および Fig.8 より 2 手法の結果を比較すると、y 方向変位分布においてほぼ一致していることが確認できる。Fig.7 と Fig.9 から直ひずみを考慮した照合方法から得られたひずみは振動が小さいことが確認できる

次に、同様の実験をカメラ・試験片間の距離を長くして行い、さらに大きな伸びを撮影した。変位計測には 16 枚の画像を使用し計 15 ケースの解析を行った。この解析では、直ひずみを考慮した照合方法では計測ができなかったため、増分加算型画像計測法を用いて計測した結果を示す。

Fig.10 に解析に使用した 1、2、9、16 枚目の画像を示す。図中の白線で囲まれた領域が解析対象領域である。Fig.11 に case1、8、15 における y 方向変位分布を、Fig.12 に y 方向ひずみ分布を、Fig.13 に図中に示す A-A' 上のひずみ分布を示す。

同図より増分加算型画像計測法を用いることで 1800 ピクセル(約 234mm)を越えるような大きな変位でも画像照合可能であることが確認できる。また、変位勾配が増加していく傾向が見られ、それにもとないひずみ量も増加している挙動が確認できる。直ひずみを考慮した照合方法では 70%程度のひずみまで計測できたが、増分加算型画像計測法は 200%以上のひずみも計測可能であることが確認できた。

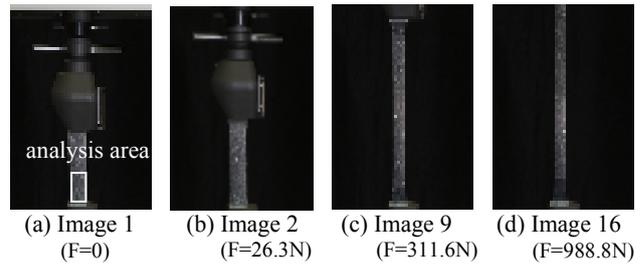


Fig.10 Images used in experiment

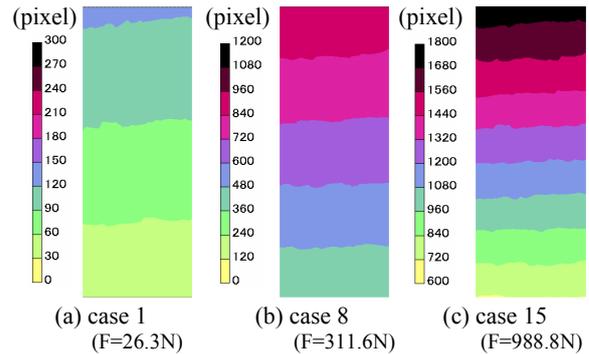


Fig.11 Distribution of displacement in y direction

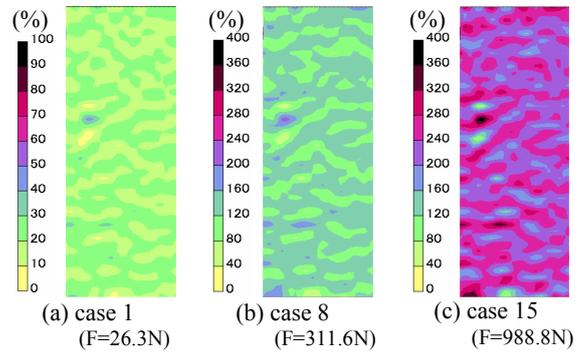


Fig.12 Distribution of strain in y direction

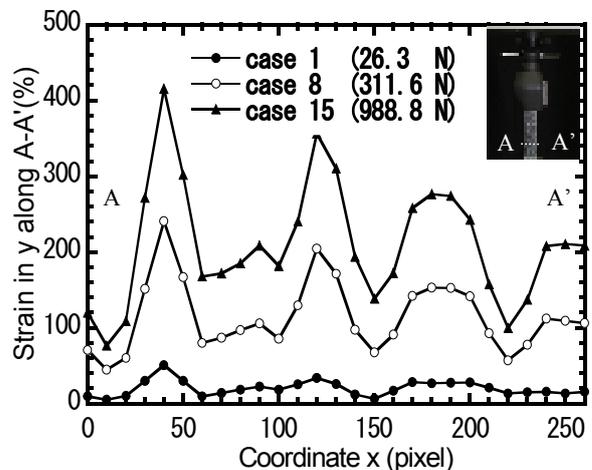


Fig.13 Distribution of strain in y direction along A-A'

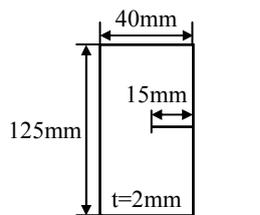


Fig.14 Shape and size of test specimen



Fig.15 Original Image (F=0)

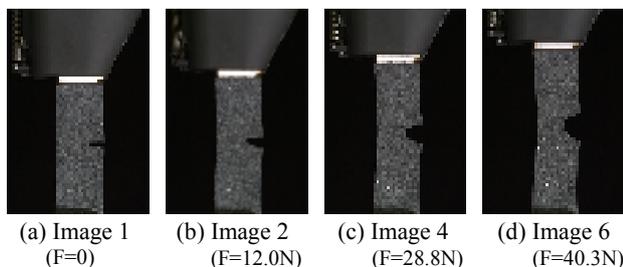


Fig.16 Image used in experiment

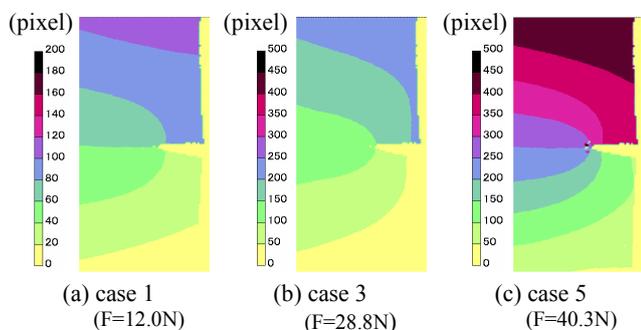


Fig.17 Distribution of displacement in y direction

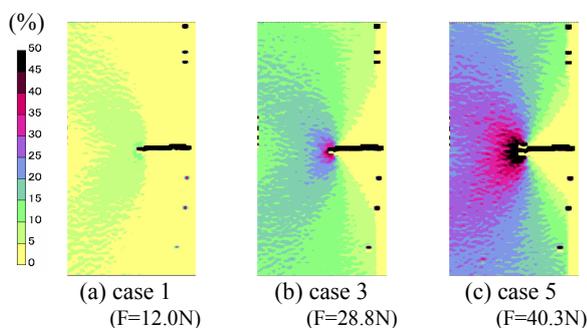


Fig.18 Distribution of strain in y direction

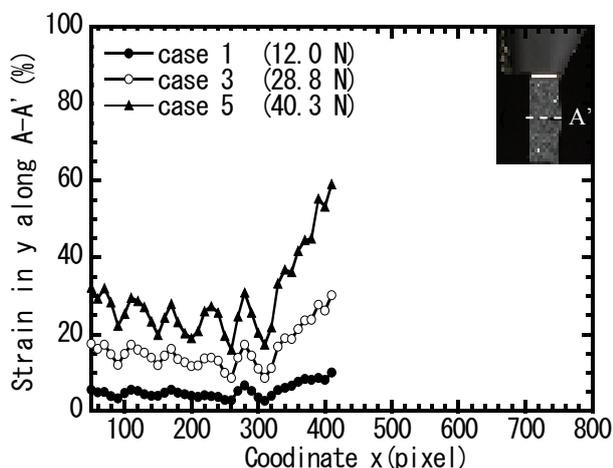


Fig.19 Distribution of strain in y direction along A-A'

4. 端部き裂を有する帯板の引張り試験

4.1 試験片の形状・寸法

本章では提案手法の大回転時における変位・ひずみ計測への適用性について検討するため、端部亀裂を有する帯板の一軸引張り試験を実施した。Fig.14 にその試験片形状と寸法を示す。また、材料は 3 章と同様のゴム材料 MBA079-B を使用した。

4.2 変位・ひずみ計測

変位計測には 6 枚の画像を使用し、計 5 ケースの解析を行った。Fig.15 中の白線で囲まれた領域が解析対象領域である。解析に使用した 1、2、4、6 枚目の画像を Fig.16 に示す。Fig.17 に case1(F=12.0N)、case3(F=28.8N)、case5(F=40.3N)における y 方向変位分布を、Fig.17 に y 方向ひずみ分布を、Fig.18 に図中に示す A-A'上の y 方向ひずみ分布を示す。

Fig.17 より、変位勾配が増加していることが確認できる。また、同図よりき裂先端部において、他の場所より大きな回転が起きていることが確認できる。Fig.18 より、荷重荷荷が大きくなるに従い、全体的なひずみが大きくなっていることが確認できる。また、き裂先端部において、ひずみの集中が見られることが確認できる。増分加算型画像計測法を用いることで、大回転時における変位・ひずみ計測が可能であると確認できた。

5. 結 言

本研究では、開発した直ひずみを考慮した照合方法と増分加算型画像計測法を用いて、大変形・大回転時における変形・ひずみ計測を行った。これにより以下の知見が得られた。

- 1) ゴムの帯板の引張り試験において直ひずみを考慮した照合方法を適用することで、変形前後 2 枚の画像で大変形時の変位・ひずみ計測が可能となることが確認できた。
- 2) 端部き裂を有する帯板の引張り試験において増分加算型画像計測法を適用することで、大変形・大回転時における変位・ひずみ計測が可能となることが確認できた。
- 3) 画像相関法を用いることで、ゴムの変形挙動を確認することができた。

参考文献

- 1) 岡本伸吾、小村勇樹：非直線軌道上を非等速で動く幾何学的非線形薄肉構造物の動的有限要素解析、日本計算工学会論文集、2002 年号(2002)
- 2) 柴原正和、山口晃司、正岡孝治、坪郷尚：画像処理による非接触変形・応力計測法の開発、溶接構造シンポジウム'06 講演論文集(2006)、pp.216-217.
- 3) 畝田道雄、柴原正和、松石正克、石川憲一、岩田節雄、北村幸嗣：サブピクセル画像処理を用いた構造物の非接触変形・応力計測法に関する研究、精密工学会論文集 (2006)、pp.360-365.
- 4) Mizuki Hagiwara and Masayuki Kawamata : Detection of Subpixel Displacement for Image Using Phase-Only Correlation、電子情報通信学会技術研究報告(2001)、pp.79-86.