

画像処理による非接触変形・応力計測法の開発

大阪府立大学院 工学研究科 柴原 正和, ○山口 晃司
正岡 孝治, 坪郷 尚

Development of Non-contact Measurement for Deformation and Stress by Image Processing

by Masakazu SHIBAHARA, Koji YAMAGUCHI, Koji MASAOKA and Takashi TSUBOGO

1. 緒言

近年におけるデジタルカメラの高性能化, 特に画素数の増加に伴う画素分解能の向上によって, 構造物の変形・応力計測に画像相関法等の画像処理技術を応用する研究¹⁻⁶⁾が盛んに行われている. この手法では一般的に, 構造物の変形前における状態を基準画像として撮影し, また, 計測・点検を実施したい変形後における状態を計測対象画像として撮影する. そして, 取得した 2 枚の画像の輝度相関値を計算することにより, カメラで撮影された全領域における変位場および応力場を計算する. この手法は, 簡便であり, なおかつ原理的には, 画素数分だけ計測点を有しており, その情報量の多さゆえ有望視されている手法である. しかし一方で, 応力精度の点で問題となるケースも報告^{1,7)}されている. そこで本研究では, 画像相関法を用いた画像処理による高精度な光学式非接触変形・応力計測法を独自に開発し, 三点曲げ試験や円孔を有する帯板の引張り試験, および溶接変形問題に適用することにより, 本手法の持つ計測精度について検証を行った.

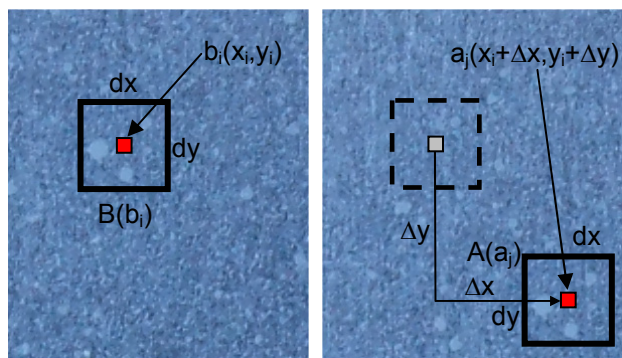
2. デジタル画像相関法を用いた変形・応力計測法の基本原理

ここでは, 本研究において開発された, 非接触変形・応力計測法の理論について説明する. 本手法では, まず, 変形前と変形後のデジタル画像を撮影し, 取得した画像を基に, 画像相関法を用いて, 微小画像の移動量すなわち変位量をピクセル単位で算出する. さらに, 計測された変位の精度をピクセル単位以下に向上させるため, ピクセル位置における輝度相関値の分布を曲面近似し, 得られた相関曲面の最小値をサブピクセル変位解^{3,4)}とする. ここで得られた変位分布から FEM の理論に基づき応力分布を算出する.

2. 画像相関法

ここでは, 画像照合で用いられる手法を基に, 画像相関法を用いて変位解を求める方法について説明する. 変形前の画像である基準画像と, 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類似性の高い領域を 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 $b_i(x_i, y_i)$ を中心とする $dx \times dy$ の微小領域を設定する. これを



(a) Original image (b) Deformed image

Fig.1 Basic procedure of digital image correlation.

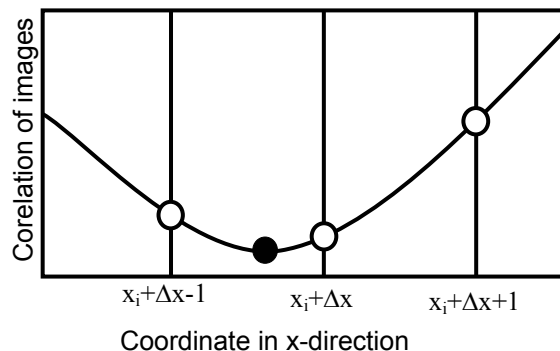


Fig.2 Basic procedure of curve approximation for subpixel measurement.

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 $R_{ij}(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)$ を求める。輝度相関値としては、次式で表される残差ノルムを用いた。

$$R_{ij}(b_i, a_j) = \frac{|A(a_j) - B(b_i)|}{\sqrt{A(a_j)^2 + B(b_i)^2}} \quad (1)$$

- (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 $R_{ij}(b_i, a_j)$ が最小値となる時の座標 $(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)$ 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。また、ここで示した方法を残差自乗和相関という。

2. 2 曲面近似を用いたサブピクセル変形計測法

前節で紹介した方法を用いて計測できる変位はピクセル単位であるが、実構造物の変形計測においては、より高い精度が要求される。当然のことながら、応力・ひずみは変位の微分量なので、これらを求めるためにも高精度な変位分布が必要である。そこで本節では、画像相関法により得られた変位解の精度をピクセル単位以下、すなわちサブピクセルにする方法について説明する。

前節により得られた輝度相関値 $R_{ij}(b_i, a_j)$ が最小、すなわち相関性の最も高いピクセル単位の照合位置 $(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)$ を基準として、 x, y 方向の ± 1 画素ずつをそれぞれ加えた計 3×3 点における輝度相関値を用いて、次式により示される最小自乗曲面 $g(x, y)$ を作成する。

$$g(x, y) = ax^2 + bx + cy^2 + dy + exy + f \quad (2)$$

ただし $a \sim f$ は最小自乗法により得られる係数である。この曲面 $g(x, y)$ が最小となる時の座標 (x_k, y_k) が、サブピクセル単位での照合位置であり、また、基準画像中における画素位置 $b_i(x_i, y_i)$ との差がサブピクセル計測変位 $(\Delta x_k, \Delta y_k)$ である。以上の方法を基準画像の全画素について繰り返し適用することにより、画像内全体のサブピクセル計測変位分布 $\{u\}$ が得られる。さらに、変位分布に対し、 $21 \text{ pixel} \times 21 \text{ pixel}$ の平均化フィルタ (AF) を用いることで、変位分布の平滑化を行った。

2. 3 応力・ひずみ解析法

上記により得られた計測変位分布 $\{u\}$ から FEM の理論に基づき、ひずみ $\{\epsilon\}$ および応力 $\{\sigma\}$ を求める方法について説明する。

まず、基準画像における画素の中心位置に節点を配置し、各節点により囲まれる正方領域のすべてを有限要素と定義する。すなわち基本的には、画素数の分だけ節点を定義することになる。ここで、前節で得られたサブピクセル変位量をそれぞれの節点に対し節点変位として与え、これらの変位と次式により与えられる変位-ひずみ関係式により各要素におけるひずみ分布が得られる。

$$\text{変位-ひずみ関係式 : } \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

また、応力を求める際には、次式により与えられる応力-ひずみ関係を用いた。

$$\text{応力-ひずみ関係式 : } \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ただし、 $[B]$ は微小変形理論に基づく変位-ひずみ関係式であり、また、 $[D]$ は線形平面応力状態における応力-ひずみマトリックスである。

以上の方法により、全要素、すなわち画像全体における応力、ひずみ分布が算出される。

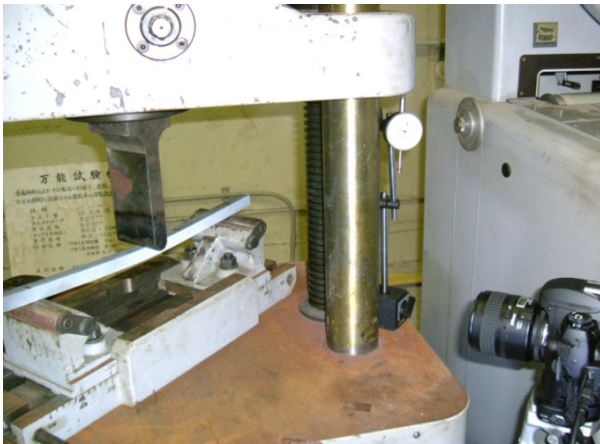


Fig.3 Experimental set-up configuration.

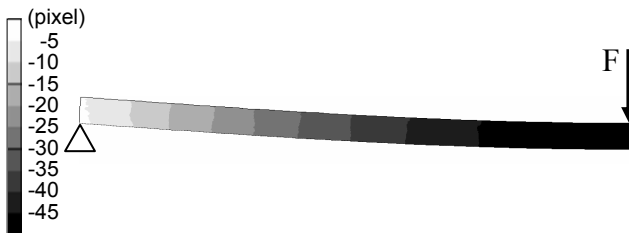


Fig.5 Distribution of displacement in y-direction (F=167kgf).

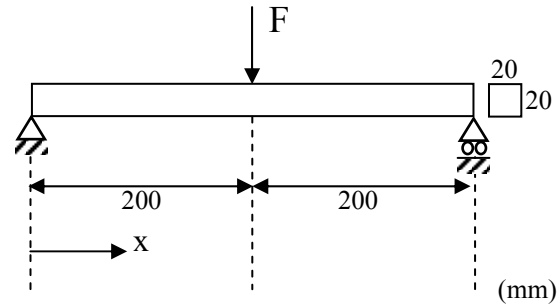


Fig.4 Shape and size of three-point bending test specimen.

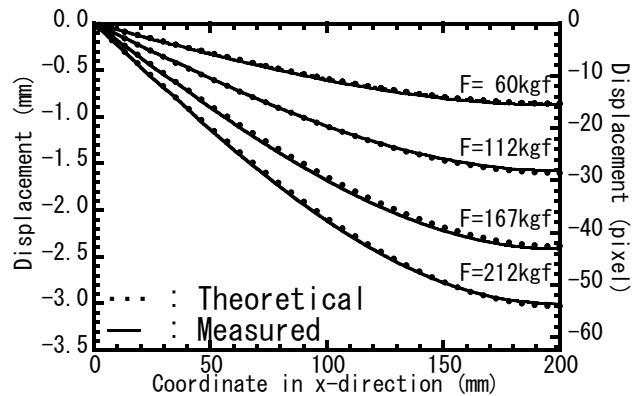


Fig.6 Comparison between theoretical and measured displacement distribution on three-point bending test.

3. 三点曲げ試験への適用

3. 1 実験装置および試験片の形状・寸法

ここでは、2章で示した変形計測法を三点曲げ試験に適用することによりその精度検証を行った。Fig.3にその実験風景を示し、またFig.4には三点曲げ試験で用いた試験片の形状・寸法を示す。試験材料はアルミニウム合金 A6063S を用いた。なお、試験装置は島津社製 UNIVERSAL TESTING MACHINE (TYPE:RH-30) を用いた。

3. 2 変形計測と結果

本章で実施した3点曲げ試験においては、荷重 F 、座標 x および変位分布 $v(x)$ の関係は、梁理論により次式のように与えられる。

$$y(x) = \frac{FL^2x}{16EI} - \frac{Fx^3}{12EI} \quad (0\text{mm} \leq x \leq 200\text{mm}) \quad (5)$$

ただし、 L は支点間の梁の長さ、 E はヤング率、 I は断面二次モーメントである。なお、本節で議論される計測結果および上式(5)を用いた理論計算においては、別途、一軸引張り試験により求めたヤング率、 7000 kgf/mm^2 を用い、ポアソン比は 0.3 とした。

本研究で開発された変形計測法を用いた結果を Fig.5 に示す。同図は、荷重 $F=167 \text{ kgf}$ 負荷時における、試験片左端の支持点から荷重点までの y 方向変位分布を示している。この結果から、試験片左端から中央部にかけて、変形量が増加していることが確認でき、また、変位分布も板厚方向に一様であることが確認できる。

次に、負荷荷重値を $F=60 \text{ kgf}$ 、 112 kgf および 212 kgf とした場合の中性軸上における測定変位分布を、 $F=167 \text{ kgf}$ の場合と併せて Fig.6 の実線で示す。また、荷重値を式(5)に代入し得られた理論変位分布を図中の点線で示す。同図より、計測変位分布は局所的な振動も少なく、また、計

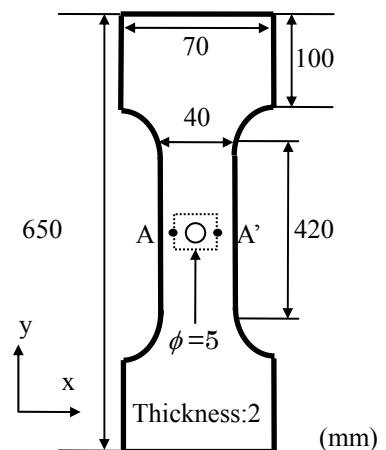


Fig.7 Shape and size of tensile test specimen.

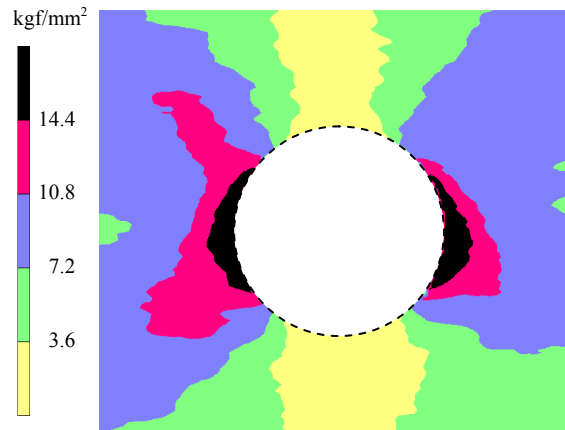
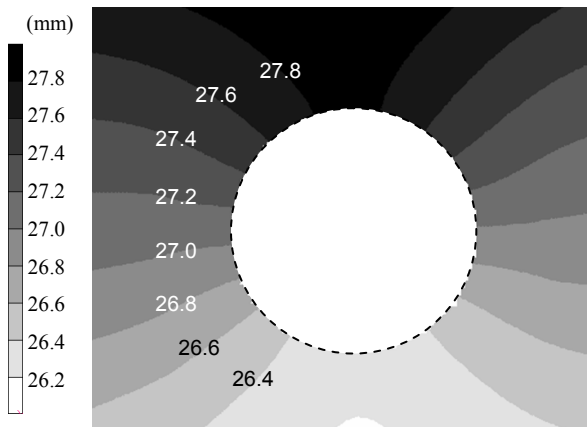


Fig.8 Measured displacement distribution v ($F=600$ kgf). Fig.9 Measured stress distribution (σ_y) ($F=600$ kgf).

測変位分布と理論変位分布がほぼ一致していることが確認できる。さらに、両者の差は最大でも $20 \mu\text{m}$ 程度であることが確認できる。この結果は、本計測法を用いることで、非常に高精度な計測が可能であることを示唆するものである。

4. 円孔を有する帯板の引張り試験とその解析

4. 1 試験片の形状・寸法および材料定数

本章では、提案手法の応力問題への適用性について検討するため、円孔を有する帯板の一軸引張り試験を実施し、それにより得られた応力分布について精度検証を行った。Fig.7 にその試験片形状と寸法を示す。なお、図中の点線で囲まれた部分を計測対象領域とした。また、材料は前章と同様、アルミニウム合金 A6063S を用い、ヤング率は 7000 kgf/mm^2 、ポアソン比は 0.3 とした。

4. 2 変形計測と応力解析

Fig.8 に、荷重 $F=600 \text{ kgf}$ を負荷した際の y 方向変位分布を示す。同図から、変位分布はほぼ左右対称であり、なおかつ上部ほど大きい値を示していることが分かる。また円孔側部では、変位の変化が大きくなっていることが確認できる。

Fig.9 には y 方向応力分布(σ_y)を示す。同図から、円孔の上部、下部ともに応力が小さくなっており、円孔側部においては応力集中が生じていることがわかる。さらに Fig.10 には、変形・応力計測で得られた Fig.5 の A-A' 部における y 方向応力分布(σ_y)を実線で示し、また、理論解析により求められる応力分布²⁾を点線で示す。同図から、計測応力分布と理論応力分布の差は小さく、 $2\sim 3 \text{ kgf/mm}^2$ 程度であることが確認できる。このことは、本手法を用いることで、円孔部周辺の様な比較的变化の大きい応力状態についても高い精度で解析可能なことを意味するものである。

5. 残差力に基づく修正変位法を用いた変形・応力計測の高精度化

前節で示した応力解析における精度を向上させるために、本研究では残差力に基づく修正変位法を提案する。この手法の概要を次に示す。

実験により得られた計測変位は一般に計測誤差を含んでいる。よってその計測変位から直接応力・ひずみ場を評価しようとする、これらは変位の空間方向に対する微分値であるため、計測変位場に比べて精度が悪くなる。そこで、次に示す残差力に基づく修正変位法を用いることで、計測変位の高精度化を行い、それが応力精度に及ぼす影響について評価を試みた。

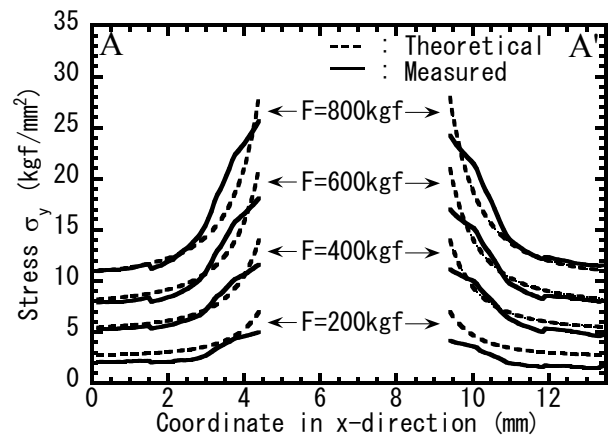


Fig.10 Comparison between theoretical and measured stress distribution (σ_y) along A-A' on tensile test.

5. 1 残差力に基づく修正変位法の基本原理

前章までに述べた画像処理による変形計測法から得られた変位場が正しいなら，その変位場は，物体内部での釣り合い方程式

$$[K] \{u^{ex}\} = \{f\} \quad (6)$$

を満足するはずである．ここで $[K]$ は剛性マトリクス， $\{u^{ex}\}$ は変形計測法により得られた節点変位ベクトル， $\{f\}$ は節点力ベクトルである．しかし，実験計測場の節点変位ベクトル $\{u^{ex}\}$ は，一般に誤差があるため，式(5)で示される釣り合い方程式を満足しない．すなわち，次式が成立する．

$$\{f\} - [K] \{u^{ex}\} \neq 0 \quad (7)$$

ここで，不釣り合い力，すなわち，残差力ベクトルを $\{R\}$ とおくと次式が成り立つ．

$$\{R\} = \{f\} - [K] \{u^{ex}\} \quad (8)$$

この残差力ベクトル $\{R\}$ から次式により修正変位ベクトル $\{u^{mod}\}$ が算出される．

$$\{u^{mod}\} = [K]^{-1} \{R\} \quad (9)$$

ただし，このとき，画像の周辺境界部における変位は正しいと仮定し，画像周辺境界部では

$$\{u^{mod}\} = 0 \quad \text{on edge of image} \quad (10)$$

とする．このようにして得られた修正変位ベクトル $\{u^{mod}\}$ を変形計測法により得られた変位ベクトル $\{u^{ex}\}$ と足しあわせることで，合成変位ベクトル $\{u\}$ が得られる．

$$\{u\} = \{u^{ex}\} + \{u^{mod}\} \quad (11)$$

この合成変位ベクトル $\{u\}$ は，画像の周辺境界部における変位境界条件を満足し，内部の釣り合い方程式も満足する理想的な変位場 kgf/mm^2 を表す．

5. 2 適用結果

Fig.11 には，荷重 $F=800 \text{ kgf}$ 負荷時における，通常の応力解析法により得られた応力場と残差力に基づく修正変位法により得られた応力場についての比較結果を示す．(a)は通常の方法により求めた応力分布(σ_y)を示し，(b)は残差力に基づく修正変位法を適用した場合である．ただし，これらは，平均化フィルターを使用していない場合の結果を示している．これらより，残差力に基づく修正変位法を用いた場合には，局所的な応力振幅は存在するものの，円孔両端の応力集中を捉えることができていると言え

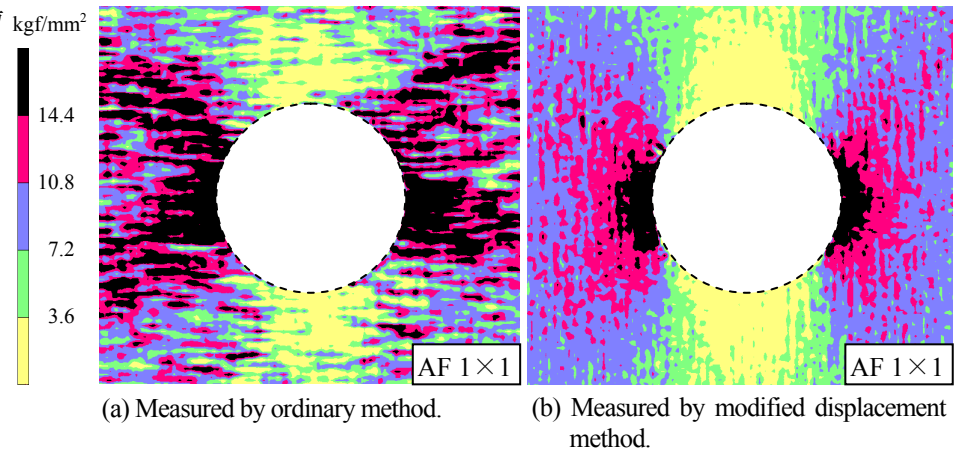


Fig.11 Measured stress distribution σ_y (AF1×1) (F=800kgf).

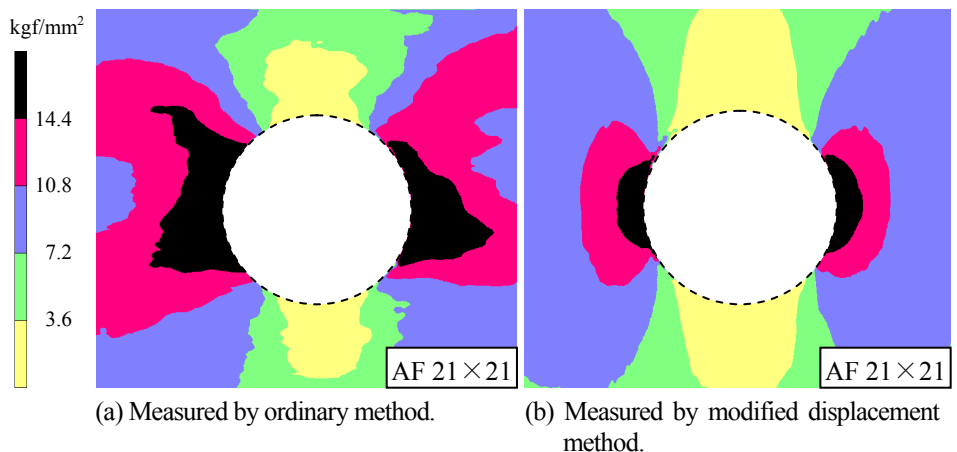


Fig.12 Measured stress distribution σ_y (AF21×21) (F=800kgf).

る。

次に、Fig.12 には、 21×21 の平均化フィルターを使用した場合における応力分布 σ_y の比較を示す。これらの結果より、通常手法に対し、平均化フィルターのみを適用した(a)の場合には、局所的な応力振動を抑えることができていたことが分かる。ただし、全体的な応力分布はバラツキの大きなものになっている。これに対し、残差力に基づく修正変位法を適用した場合には、局所的な応力振動および全体的なバラツキの両方が抑えられていることが確認でき、Fig.13 に示される FEM による解析解と良好に一致することが分かる。

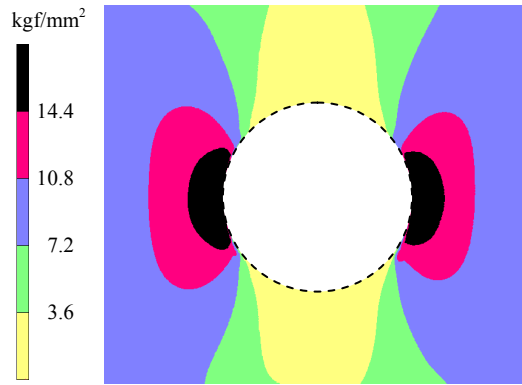


Fig.13 Stress distribution analyzed by FEM (F=800kgf).

次に、変位分布についても同様に Fig.14 に示す。ただし、これらの結果は、 21×21 の平均化フィルターを適用したものである。これらの結果より、変位分布に関しては、残差力に基づく修正変位法の適用の有無にかかわらず、同様の滑らかな分布になっていることが確認できる。このように、変位分布にはバラツキが小さいにも関わらず、応力分布に大きくバラツキが出る理由としては、式(3)および(4)から分かる通り、ひずみおよび応力は、変位の微分量であるため、ノイズの影響を受け易いからであると考えられる。

さらに、Fig.15 (a)および(b)には、荷重値がそれぞれ F=400 kgf および F=600 kgf の場合における提案手法を用いた変形計測結果を示している。

これらの図および Fig.12 (b)より、いずれの場合においても、円孔両端における応力集中を確認することができる。また、荷重値の増加とともに、応力集中部の応力が大きくなっていることが分かる。これらの結果を FEM による解析解と共に比較したのが Fig.16 である。横軸は x 方向の座標を示し、縦軸は A-A'部における y 方向応力分布を示している。

この結果より、提案手法による変形計測結果と FEM による解は非常に良く一致しており、残差力に基づく修正変位法を用いることで、解析解との差は 1 kgf/mm^2 以下になるという結果が得られた。

以上の結果より、提案手法を用いることで、変位分布のみならず、応力分布までも非常に高い精度で計測することが可能であることが分かった。

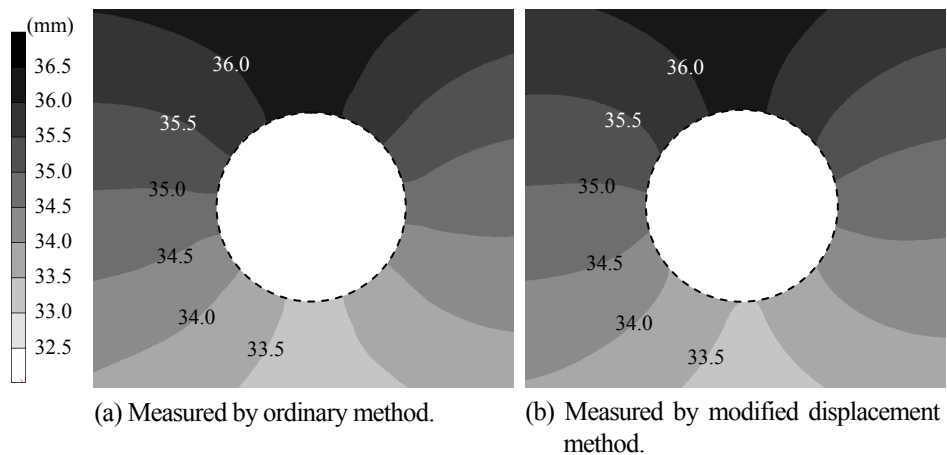


Fig.14 Displacement distribution obtained by proposed method using average filter 21×21 and modified displacement (F=800kgf).

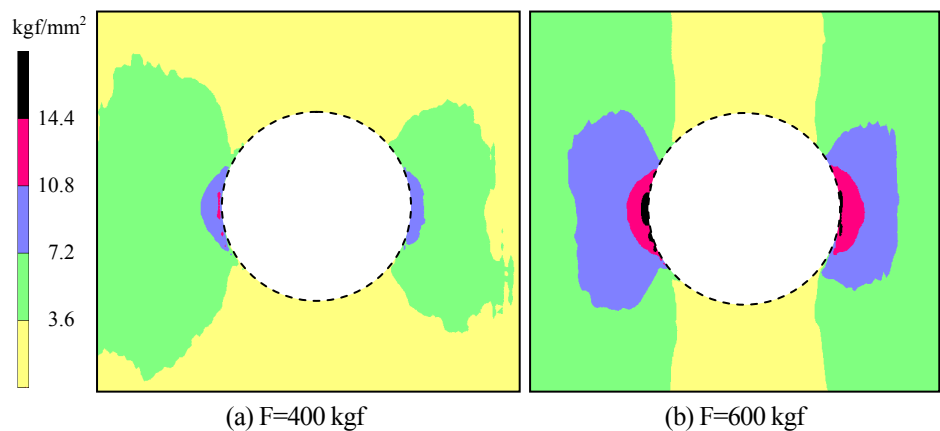


Fig.15 Stress distribution obtained by proposed method using average filter 21×21 and modified displacement.

6. 基礎溶接継手の溶接変形問題への適用

6. 1 実験および諸条件

次に、提案手法の溶接問題への適用例として、基礎的な溶接継手であるビードオンプレート時における横収縮を対象に、提案手法の適用を行った。試験片の形状および寸法を Fig.17 に示す。試験片材料は SM490 材とした。なお、実験の際には始端部および終端部にタブ板を設け、また、今回の計測では面内変形のみを計測対象とするために、単位溶接長さあたりの入熱量を、板厚に対して比較的大きい $Q=714 \text{ J/mm}$ 、 $Q=918 \text{ J/mm}$ および $Q=1122 \text{ J/mm}$ とした。なお、溶接速度は 100 mm/min とした。また、変形計測においては、溶接前後の試験片の画像を取得し、 21×21 の平均化フィルターを用いて変形計測を実施し、ヤング率を 21000 kgf/mm^2 、ポアソン比を 0.3 とした。

6. 2 変形計測

Fig.18 に、入熱量が $Q=918 \text{ J/mm}$ および $Q=1122 \text{ J/mm}$ の場合における変形計測結果を示す。同図は、溶接後における y 方向の変位分布、すなわちその端部は横収縮分布を示している。この結果から、入熱量が $Q=918 \text{ J/mm}$ および $Q=1122 \text{ J/mm}$ の場合の両者において、終端部ほど、収縮量が大きくなっていることが確認できる。また、溶接部近傍における画像情報が失われた領域を除けば、連続な分布が、試験片全体に渡り、得られていることが確認できる。

次に、本章における実験に対応した FEM 熱弾塑性解析を実施し、実験結果との比較を試みた。Fig.19 に実験結果を示し、Fig.20 に FEM 解析結果を示す。両者は、 y 方向端部における横収縮分布を示している。

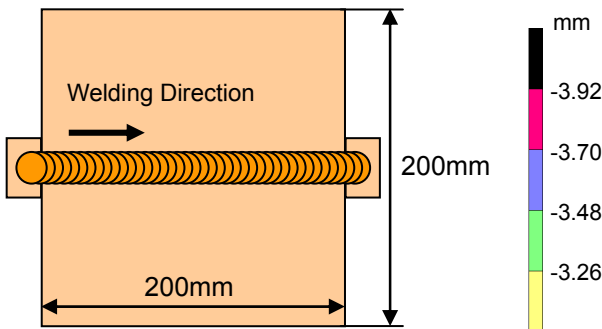
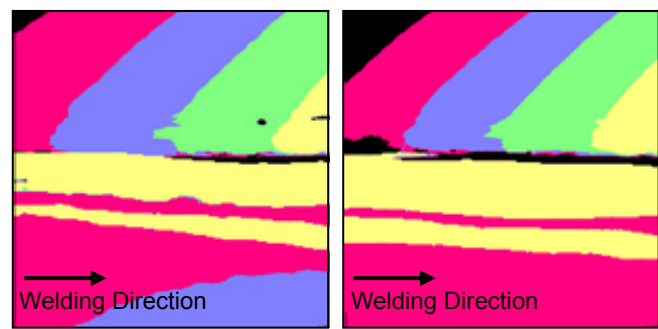


Fig.17 Shape and size of welding test piece and welding direction.



(a) $Q=918 \text{ J/mm}$ (b) $Q=1122 \text{ J/mm}$
Fig.18 Distribution of displacement in y direction.

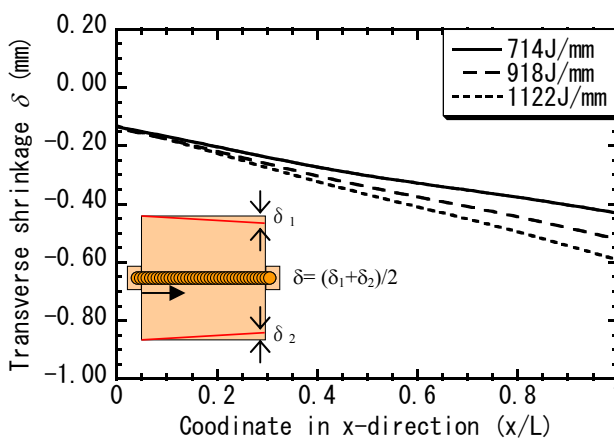


Fig.19 Distribution of transverse shrinkage measured by proposed method.

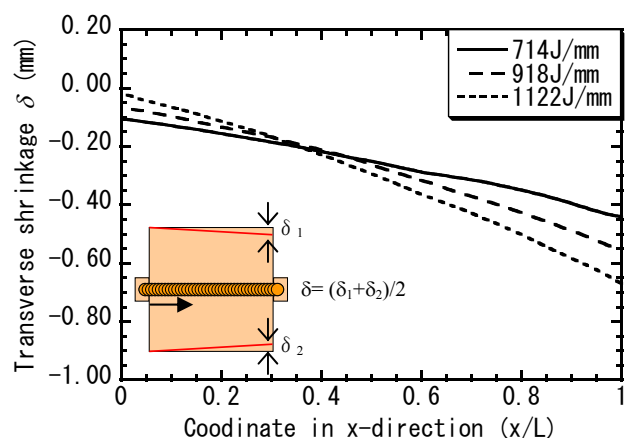


Fig.20 Distribution of transverse shrinkage analyzed by Thermal-elastic-plastic FEM.

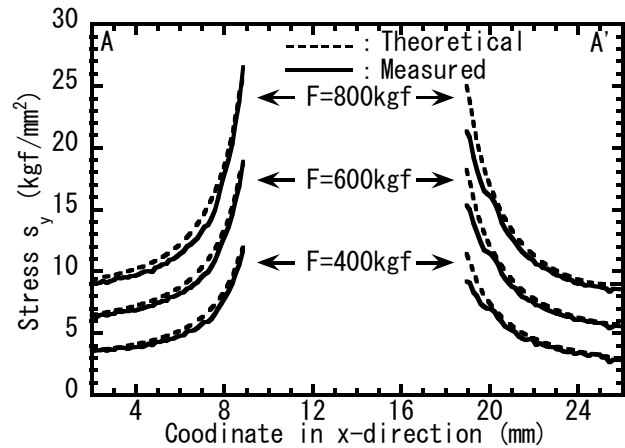


Fig.16 Comparison between theoretical and measured stress distribution (σ_y) by correction method along A-A' of tensile test.

これらを比較すると、終端部に向かい、収縮量が大きくなる点、および終端部における横収縮量がほぼ一致する点において、両者は良好に一致していると言える。

以上の結果は、提案手法を用いることで、実構造物における面内変形および応力分布を非接触でなおかつ高精度に計測可能なことを示唆するものであり、今後の適用範囲の拡大が期待できる。

7. 結 言

本研究では、著者らが独自に開発した、画像処理による光学式非接触変形・応力計測法を三点曲げ試験、円孔を有する帯板の引張り試験および、基礎継手の溶接変形問題に適用し、変形および応力の計測精度について検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 画像相関法、サブピクセル変形計測法、および残差力に基づく修正変位法により構成される非接触変形・応力計測法を用いることで、高精度な変形・応力計測が可能であることを確認した。
- 2) 本手法を三点曲げ試験の変形計測に適用した結果、解析解との差は最大で 20 μm 程度であった。
- 3) 残差力に基づく修正変位法を新たに開発し、提案手法に用いることで、応力計測の精度が飛躍的に向上することを確認した。なお、円孔を有する帯板の引張り試験においては、応力計測精度が 1kgf/mm^2 程度であった。
- 4) 本手法を用いることで溶接時における面内変形が高精度に計測できることを示した。

謝 辞

本研究の一部は、独立行政法人科学技術振興機構「平成 18 年度シーズ発掘試験」の補助を受けたことを付記し、関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Michio Uneda, Masakazu Shibahara, Masakatu Matsuishi, Setuo Iwata, Koji Kitamura and Kenichi Ishikawa : Studies on Non-Contact Deformation and Measurement Technique of Structures using Sub-pixel Image Processing, Journal of the Japan Society of Precision Engineering 3-72, (2006)
- 2) 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) 79-86
- 3) Mizuki Hagiwara, Masayuki Kawamata : Performance Evaluation of Subpixel Displacement Detection for Images Using Phase-Only Correlation, 第 16 回デジタル信号処理シンポジウム講演論文集, 3-6, (2001), 517-522
- 4) Koji Okamoto : PIV Image Evaluation Algorithms, Journal of the Visualization Society of Japan 24-95, (2004), 31-35
- 5) Kenji Machida and Takayoshi Hirano : Stress Analysis around the Crack-Tip of Homogeneous Material by Speckle Photography and Image-Processing, Transactions of the Japan Society of Material Engineers 66-641 (2001), 137-143
- 6) Kenji Machida, Hiroyuki Okamura, Takayosi Hirano and Kenji Usui : Stress Analysis of Mixed-Mode Crack of Homogeneous and Dissimilar Materials by Speckle Photography, Transactions of the Japan Society of Material Engineers, 67-655, (2001), 86-91
- 7) Koji Murata, Minoru Masuda and Miyuki Ichimaru : Analysis of Radial Compression Behavior of Wood Using Digital Image Correlation Method, Mokuzai Gakkaishi, 5-45, (1999), 375-381