デジタル画像相関法を用いた全視野変形・ひずみ測定の精度評価研究*

畠田 道雄^{*1}, 奥畑 峻^{*2}, 石川 憲一^{*3}Study on Accuracy Evaluation of Deformation and Strain Distribution
Measurement using Digital Image Correlation MethodMichio UNEDA^{*4}, Syun OKUHATA and Ken-ichi ISHIKAWA^{*4} Department of Mechanical Engineering, Kanazawa Institute of Technology,
7-1 Ohgigaoka, Nonoichi, Ishikawa-gun, Ishikawa, 921-8501 Japan

Sub-pixel digital image correlation (Sub-DIC) method is effective for health monitoring of structures, because the Sub-DIC method can measure full-field deformation and strain distribution. However, the effect of analysis parameters of Sub-DIC method on measurement accuracy is not clarified. In this paper, we discussed the relation between the analysis parameters and the measurement accuracy of the Sub-DIC method. We demonstrated the analysis parameters such as a sub-set size, scan-step interval, and averaged point size on the standard deviation of measured deformation and strain error distributions. Moreover, we found measurement accuracy is correlation related to the half width of spatial FFT spectrum of measured object and strain distribution. Finally, it is basically confirmed the measurement accuracy of Sub-DIC method depends on the central limit theorem.

Key Words: Image Processing, Measurement, Accuracy, Deformation and Strain Distribution
Measurement, Sub-Pixel Digital Images Correlation (Sub-DIC) Method

1. 緒 言

昭和30年代から40年代の高度経済成長期において、社会的インフラの急速な需要の高まりから橋梁やダムなどの大型構造物が多く建造された。一方、高度経済成長期から40年以上が経過した近年、それらの構造物の老朽化が進み、その維持管理やリスク評価がより重要視されるようになっており、構造物の安全性や信頼性を評価する新しい手法である構造ヘルスマモニタリングが提唱されている⁽¹⁾。構造ヘルスマモニタリングは、構造物における安全性及び信頼性評価の高効率化やコスト削減を目的とした手法であり、その測定対象は変形、応力、振動、腐食量など多岐にわたる。その中でも構造物に生じる変形やひずみは、破壊に対する安全指標であるため、特に継続的にモニタリングすべき対象の一つとされており⁽¹⁾、変形・ひずみ測定に求められる要求は高くなりつつある。

ところで、現在のところ一般的に使用される変形・ひずみ測定法の代表例として、接触式測定法であるひずみゲージ法が挙げられる。ゲージ法は、安価な測定器で高精度のひずみ測定が可能であることから、構造物に加わ

る荷重・応力状態測定などに幅広く利用されている。しかしながら、ゲージ貼り付けの人的コストが高いことや、測定範囲が狭小であり、広範囲のひずみ分布測定には適さないことなどが問題点とされている⁽²⁾。それに対して、広範囲の変形・ひずみ分布測定が可能である非接触式測定法が開発され、その代表例にモアレ法やレーザホログラフィ干渉法などがある。しかし、これらの測定法も、それぞれ微小ひずみの測定に向かないこと⁽³⁾や、高変位量の測定が困難であること⁽⁴⁾などから、その用途は未だ限定的である。

このような状況を背景に、昨今のデジタルカメラの高性能化により、新たな非接触式変形・ひずみ測定法として、サブピクセル処理を可能とするデジタル画像相関法(以下、Sub-DIC法)に関する研究が盛んに行われている⁽⁵⁾⁻⁽¹⁵⁾。Sub-DIC法は、デジタルカメラによって撮影した画像全体の全視野変形・ひずみ分布測定が可能である。そのため、構造物などの応力・荷重測定のみならず、電子基板のひずみ測定⁽⁵⁾やCFRP積層板のひずみ測定⁽⁶⁾、歯周組織の変形解析⁽⁷⁾など、電子機器や医療の分野への適用も検討され、その用途や重要性は今後さらに増大していくと考えられる。

ここで、Sub-DIC法における測定精度に視点を向けると、インテリジェントハイブリッド法⁽⁸⁾や輝度値へのラグランジュ補間⁽⁹⁾、ロゼット解析の適用⁽¹⁰⁾など、様々な手法を併用して測定精度の向上を目的とする検討が行

* 原稿受付 2009年9月10日。

^{*1} 正員, 金沢工業大学工学部(〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1)。^{*2} 学生員, 金沢工業大学大学院工学研究科。^{*3} 正員, 永年会員, 金沢工業大学。

E-mail: uneda@neptune.kanazawa-it.ac.jp

われている。さらに、サブピクセル処理にはピクセルロッキング現象と称される特有の誤差原因があることが明らかにされている⁽¹¹⁾。一方、測定対象物が有する表面模様のランダム性やSub-DIC法における解析パラメータ、測定対象物に生じているひずみ状態を基本測定条件と捉えると、基本測定条件が測定精度に及ぼす影響についての評価研究は少なく、測定精度との関係性は十分に解明されていないと言えよう。

本研究はこのような観点に立脚し、Sub-DIC法による変形・ひずみ測定の基本測定条件が測定精度に及ぼす影響について統計的に解明することを通じて、Sub-DIC法の測定精度に関する指針提示を目的としている。すなわち本論文においては、測定対象物の表面模様のランダム性を、空間FFT解析を用いて定量評価するとともに、それが測定精度に及ぼす影響を明らかにする。また、変形・ひずみ測定における解析パラメータの影響を検討し、さらには測定対象物にひずみが生じている場合の測定精度への影響について実験的に検討した結果を述べる。

2. デジタル画像相関法を用いた変形・ひずみ分布測定法の概要と測定精度の評価方法

2.1 変形・ひずみ分布測定法の概要 現在までにSub-DIC法に関して様々な観点から研究が行われているが、Sub-DIC法による変形・ひずみ分布の算出方法は、それぞれの研究で少しずつ異なった方法が用いられている⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾。変形・ひずみ分布の測定精度は算出方法の影響も受けることから、本節では本研究において著者らが用いた変形・ひずみ測定法について述べる。すなわち、本論文における測定精度評価は本節の方法による結果であり、他研究者によって提示されるSub-DIC法のすべてに適用できるものではないことを注意されたい。

本研究におけるSub-DIC法では、測定対象物の基準となる表面状態を基準画像としてデジタルカメラによって撮影後、測定したい状態での測定対象物を比較画像として撮影する。これらの画像を比較することによって、測定対象物の表面に生じる変形・ひずみ分布測定を行う。

図1はSub-DIC法による変位測定の概要を示している。なお図1は、撮影した画像の一部を画素が確認できるレベルまで拡大したものである。本研究で取り扱う測定法では、図1(a)のように基準画像内の測定点 $A(i,j)$ を中心に、一辺が $S[\text{pixel}]$ となるサブセット領域と呼ばれる正方形の微小領域を設定する。このとき、比較画像内にも当該座標 (i,j) を中心に同一形状、サイズのサブセット領域があると考える。このように、著者らが用いた方法ではサブセットの変形を考慮していない。なお、サブセット領域の変形も考慮に入れた解析法⁽⁸⁾⁽¹³⁾が他研究者によつ

(a) Original image (b) Comparison image

Fig.1 Summary of deformation measurement by Sub-DIC

Fig.2 Calculation method of strain using deformation value measured

て既に提案・検討されていることを付記する。また、ここでは $S[\text{pixel}]$ をサブセットサイズと定義する。一例として、基準画像撮影後に測定対象物が変形し、測定点 A が X 軸方向に5pixel、 Y 軸方向に-2pixel変位した場合を考えると、基準画像中のサブセット領域は比較画像中で図1(b)に示す位置となる。この変位量を残差自乗和相関⁽¹⁴⁾により求めることによって、測定点 A の変位を測定できる。しかし実際には、測定対象物の変位量は1pixel単位とならないことが多く、変位の測定分解能が1pixelである方法では十分な精度が得られない。そこで相関の極値近傍に、式(1)で与えられる関数を用いた応答曲面近似によるサブピクセル処理を施し、サブピクセルレベルでの変位測定を行った⁽¹⁴⁾。

$$g(x, y) = a_1 x^2 + a_2 y^2 + a_3 xy + a_4 x + a_5 y + a_6 \quad (1)$$

式(1)の係数 a_h ($h: 1 \sim 6$)は、ピクセルレベルでの相関曲面の極値座標を (m_{x0}, m_{y0}) としたとき、(X 軸: $m_{x0}-1, m_{x0}, m_{x0}+1$) $\times$ (Y 軸: $m_{y0}-1, m_{y0}, m_{y0}+1$) = 合計9点の相関値を用いて最小二乗法により求めた。なお、このような方法で相関値に対してサブピクセル処理を施す場合、得られる変位が整数値に偏る現象、すなわち、ピクセルロッキング現象が発生する傾向にあることが知られている⁽¹¹⁾。本論文ではピクセルロッキング現象があることを認識した上で、著者らが用いたSub-DIC法に関する解析条件と標準偏差の関係を検討した。

このようなサブピクセルレベルの変位測定を、 $\Delta m_p[\text{pixel}]$ の間隔で格子状に隣り合うすべての測定点で繰り返すことによって、画像全体の変形分布を求めた。

なお、測定点の間隔である Δm_p [pixel]をスキャンステップ間隔と定義し、その大きさはX軸方向及びY軸方向で同一とした。

変形分布の測定後、隣接する変位値とスキャンステップ間隔 Δm_p により、ひずみの算出を行う。本研究では図2に示すように1つのひずみ測定点 $N_0(x, y)$ に対して、それを含む4つの測定点 $N_k (k: 0 \sim 3)$ の変位値を用いて算出した。すなわち、点 N_k で測定される変位値を (u_k, v_k) とすると、点 $N_k (k: 0 \sim 3)$ の中心点におけるX軸ひずみ ε_x 、Y軸ひずみ ε_y は式(2)のようにして求めることができる。

$$\varepsilon_x = \frac{(u_1 + u_2) - (u_0 + u_3)}{2\Delta m_p} \quad (2)$$

$$\varepsilon_y = \frac{(v_2 + v_3) - (v_0 + v_1)}{2\Delta m_p}$$

ところで、ひずみ測定の誤差を低減するには、ロゼット解析の適用⁽¹⁰⁾などが検討されているが、本論文では簡易な方法である平均化処理を用いて誤差の低減を図った。平均化処理とは、測定点周辺のひずみ値を平均し、その値を当該測定点のひずみ値として置き換える処理である。このとき平均化範囲は測定点を中心とした正方形($P_s \times P_s$)であり、ここでは一辺に含まれる測定点数 P_s を平均化処理サイズと定義する。また、平均化処理範囲における一辺の長さを A_s [pixel]と表すと、 A_s はスキャンステップ間隔 Δm_p と平均化処理サイズ P_s に対して式(3)のような関係が成り立つ。なお、 A_s を平均化エリアサイズと定義する。

$$A_s = \Delta m_p \cdot (P_s - 1) \quad (3)$$

本研究では Sub-DIC 法で必要となるサブセットサイズ S [pixel]、スキャンステップ間隔 Δm_p [pixel]、平均化処理サイズ P_s 、平均化エリアサイズ A_s [pixel]の4つを解析パラメータと定義する。なお、サブセットサイズ、スキャンステップ間隔、及び平均化処理サイズはそれぞれ大きくなるほど解析結果の空間分解能は低下する。

2・2 実験方法及び測定精度評価方法

本研究では、試験片(アルミニウム A2017-T4, 厚さ2mm)を測定対象物とし、その全表面に黒色のスプレー塗料を塗布した後、白色のスプレー塗料をまだらに塗布することによってランダムな表面模様を付与した。これにより作成した3種類の表面模様を撮影した画像の一部を図3に示す。なお、撮影した画像のpixelサイズは 2381×1901 pixel, 1pixelの大きさは約 $12\mu\text{m}$ である。また、撮影時のレンズ焦点から測定対象物の表面までの距離(以下、撮影距離)は180mmであり、これらの画像の

Fig.3 Surfaces of test-piece

Fig.4 Contour diagrams of spatial FFT results

pixel サイズや撮影距離は、第3章における実験でも基本的に同様とした。この結果、図3に示す表面模様の撮影画像には、白い斑点によるランダム模様が確認できる。ここで、斑点のランダム性は画像の空間周波数成分を知るための解析法である空間FFT解析によって評価することが可能であると考えられる。すなわち、画像内における模様の間隔が大きい場合(ランダム性が弱い場合)、その画像の空間周波数は小さいことを意味する。その結果、空間FFT解析で得られるスペクトルは中心波数($=0\text{pixel}^{-1}$)に集中し、当該スペクトル波数の半値幅は小さくなると考えられる。

図4は撮影した画像全体(2381×1901pixel)に対して空間FFT解析を行った際に得られたスペクトルを等高線図で表記した結果である。なお、それぞれの最大値を基準(=0dB)として正規化し、-40dBから0dBまでの間を5dB間隔で表記した。これらの結果より、ランダム性が弱いパターンほどスペクトルの等高線は中心に集中していることがわかる。また、空間FFT解析によって求めたパターンの半値幅は、パターンA, B, Cにおいてそれぞれ 0.138pixel^{-1} , 0.070pixel^{-1} , 0.049pixel^{-1} であった。そこで、この半値幅をそれぞれのパターンにおけるランダム性の定量評価値として、以後の検討を行った。

変形・ひずみ測定結果の測定精度を評価するため、これらの測定対象物に外力や変形を一切加えることなく、基準画像と比較画像を撮影した。なお、撮影間の時間差において発生する幾分の輝度変化などに起因する外乱の影響を削除するため、比較画像は10枚連続して撮影し、表1の解析パラメータを基本として解析を行った。図5は比較画像の1枚目における変形測定結果の(a)分布図、並びに(b)誤差分布、図6は同様にひずみ測定結果である。誤差分布中に示す実線は、測定結果の平均値と標準偏差から求めた確率密度関数である。図5(a)及び図6(a)より、理想的に測定される変形・ひずみは0であるにも拘わらず、誤差が生じていることがわかる。また図5(b)及び図6(b)の結果より、誤差分布はどちらの場合でも正規分布にしたがっていると言える。なお、図5(b)に示した変形誤差分布は $0.08\text{pixel} \approx 1\mu\text{m}$ を中心としているが、これはカメラシャッターの機械的動作などによりカメラがわずかに移動したためであると考えられる。また、ひずみ分布に関しては0を中心とした正規分布となっている。ここで誤差分布を示すデータ群が正規分布にしたがう場合、そのバラツキの大きさは標準偏差によって評価できる⁽¹⁶⁾。そこで本研究では、10枚の比較画像から得られる変形・ひずみ分布の標準偏差の平均値を用いることで、測定精度を評価した。

3. 基本測定条件が測定精度に及ぼす影響

3・1 表面模様のランダム性の影響 Sub-DIC法では、変形測定において相関値に式(1)で与えられる応答曲面近似を行うことによって、サブピクセルレベルでの相関の極値を求めている。このときサブセット領域内に含まれるパターンのランダム性が弱い場合や、サブセットサイズが小さい場合、応答曲面の作成精度が低下し、変形分布に誤差が生じると考えられる。そこで、図3に示した3種類の表面模様を用いて、空間FFT解析による半値幅と測定精度の関係について検討した。また、撮影距離を大きくした場合、画像上での表面模様は相対的に細

Table 1 Main analysis conditions on Sub-DIC

Sub-set size	S	31pixel
Scan step interval	Δmp	10pixel
Averaged point size	P_s	1

(a) Contour diagram (b) Error distribution results

Fig.5 Deformation distribution measuring results using Sub-DIC

(a) Contour diagram (b) Error distribution results

Fig.6 Strain distribution measuring results using Sub-DIC

(a) Deformation results (b) Strain results

Fig.7 Relation between half width of pattern and standard deviation of error distribution

かく撮影される。そこでパターンAの撮影距離を現在の180mmから、200, 220, 240mmと変化させて画像を撮影し、空間FFT解析を行った結果、半値幅はそれぞれ 0.155pixel^{-1} , 0.172pixel^{-1} , 0.183pixel^{-1} であった。この結果、撮影距離を拡大することによって画像内のランダム性が強くなることを確認できたため、これらの撮影画像についても同様に測定精度を評価した。

図7に半値幅と(a)変形分布、(b)ひずみ分布の標準偏差の関係を示す。これらの結果より、半値幅が大きくなるにつれて変形・ひずみ分布の標準偏差は減少していることがわかる。これは、表面模様のランダム性が強くなることによって、サブセット領域内のランダム性も強くなり、応答曲面の作成精度が向上したためであると考えら

れる。また、図7の結果から半値幅と標準偏差には一定の関係が認められることから、空間FFT解析の半値幅による精度評価方法は有効であると考えられる。なお、以後の実験及び解析では、パターンAの測定対象物を使用した。

3・2 サブセットサイズSの影響

サブセットサイズと測定精度の関係について検討を行うため、表1に示す解析パラメータからサブセットサイズのみを変化させて解析した。図8は(a) $S=31$ pixel, (b) $S=51$ pixelでの変形分布である。この結果より、サブセットサイズを大きくすることで測定誤差は低減されていることがわかる。図9はサブセットサイズSと(a)変形分布, (b)ひずみ分布の標準偏差の関係である。この結果より、どちらの場合でもサブセットサイズSが大きくなるほど標準偏差は減少しており、その関係は反比例に近い関係であることがわかる。すなわち、サブセットサイズが大きくなった場合、サブセット領域内に含まれる画素数が多くなるにしたがって応答曲面の作成精度が向上し、標準偏差の減少につながったと考えられる。

3・3 スキャンステップ間隔 Δm_p の影響

スキャンステップ間隔 Δm_p は隣り合う測定点の間隔であり、ひずみ算出式である式(2)では隣り合う変位値の差をスキャンステップ間隔 Δm_p によって除することによってひずみを求めている。そのため、スキャンステップ間隔 Δm_p は変形分布の測定精度には影響せず、またひずみ分布の測定精度に対しては、式(2)から理論的には反比例関係になると推測される。そこで、表1に示す解析パラメータからスキャンステップ間隔 Δm_p のみを変化させて解析を行うことを通して、スキャンステップ間隔 Δm_p が測定精度に及ぼす影響を検討した。

図10はスキャンステップ間隔 Δm_p と(a)変形分布, (b)ひずみ分布の標準偏差の関係である。なお、図10(b)に示す近似曲線はスキャンステップ間隔 Δm_p とひずみ分布の標準偏差の関係が、式(2)から推測されるように反比例関係であると仮定して最小二乗法により求めたものである。図10(a)の結果より、変形分布の測定精度はスキャンステップ間隔 Δm_p に依存しないと言える。また、図10(b)より、スキャンステップ間隔 Δm_p はひずみ分布の標準偏差に影響を及ぼし、その関係は近似曲線に近い。したがって、式(2)から推測されるとおりスキャンステップ間隔 Δm_p と変形分布の標準偏差は関係せず、また、ひずみ分布の標準偏差とは反比例関係にあると考えられる。

3・4 平均化処理サイズ P_s の影響

本論文におけるひずみ分布測定法では、誤差低減を目的として、ひずみ値の平均化処理を施している。図11は平均化処理サイズ P_s を(a)1(平均化処理なし), (b)11とし

Fig.8 Strain contour diagram when sub-set size S was changed

Fig.9 Relation between sub-set size S and standard deviation of error distribution

Fig.10 Relation between scan-step interval Δm_p and standard deviation of error distribution

Fig.11 Strain contour diagram when averaged point size P_s was changed

たときのひずみ分布である。この結果より、平均化処理を施すことでひずみ誤差が低減されることは明らかである。

ここで測定値の誤差分布が正規分布にしたがう場合、標準偏差は平均化処理を行えば、中心極限定理によって減少することが知られている⁽¹⁶⁾。そこで、中心極限定理による関係を実験的に検証するため、

表1に示す解析パラメータから平均化処理サイズ P_s のみを変化させて解析した。図12は平均化処理サイズ P_s とひずみ分布の標準偏差の関係である。この結果より、標準偏差は中心極限定理による理論曲線とほぼ一致していることがわかる。したがって、ひずみ分布の誤差は、平均化処理を施すことによって低減できると言える。

3・5 平均化エリアサイズ A_s の影響 本節では、画像上の平均化範囲の pixel サイズである平均化エリアサイズ A_s [pixel] が測定精度に及ぼす影響を検討する。ここでは、平均化処理サイズ P_s とスキャンステップ間隔 Δm_p を反比例関係にすることによって平均化エリアサイズ A_s を一定とし、ひずみ分布の測定精度に及ぼす平均化エリアサイズ A_s の影響を検討した。図13は平均化エリアサイズ A_s を(a)100pixel、並びに(b)200pixel として一定としたときの、平均化処理サイズ P_s 並びにスキャンステップ間隔 Δm_p とひずみ分布の標準偏差の関係である。図13の(a)と(b)を比較すると、平均化エリアサイズ A_s が大きい場合の方が標準偏差は小さいことがわかる。一方、平均化エリアサイズ A_s が一定の場合では、平均化処理サイズ P_s やスキャンステップ間隔 Δm_p に関係なく標準偏差はほぼ一定であることがわかる。これは、3・3節及び3・4節の結果よりひずみ分布の標準偏差は、スキャンステップ間隔 Δm_p 及び平均化処理サイズ P_s とそれぞれ共に反比例関係にあることに依存するものと考えられる。したがって、平均化処理によってひずみ分布測定時の誤差の低減は可能であるが、その効果は平均化処理を施す範囲の pixel サイズに依存し、平均化処理を行う範囲に含まれる測定点数には依存しないと考えられる。

3・6 測定対象物に生じたひずみの大きさの影響

3・6・1 面外変位を利用したひずみの発生方法

測定対象物にひずみが生じている場合、変形前後で表面模様はわずかに変形する。そこで、測定対象物のひずみ状態が Sub-DIC 法の測定精度に及ぼす影響を調べるため、基準画像と比較画像の間に様なひずみを発生させ、ひずみの大きさとひずみ分布の標準偏差の関係について検討した。なお、既述のとおり、サブセット領域の変形を考慮した解析法も提案されているが⁽⁸⁾⁽¹³⁾、本論文では2・1節で示したとおりサブセットの変形を考慮しない方法を用いている。

ところで、測定対象物に荷重を負荷することによって測定範囲内に様なひずみを発生させることは困難である。一方、面外変位に視点を向けると、基準画像撮影後に図14のように面外変位 ΔL が発生した場合、比較画像が基準画像に対して拡大・縮小されることによって、比較画像にひずみが生じる⁽¹⁵⁾。このひずみ ε_e の大きさに

Fig.12 Relation between averaged point size P_s and standard deviation of strain error distribution

(a) $A_s=100$ pixel

(b) $A_s=200$ pixel

Fig.13 Relation between averaged point size P_s and standard deviation of strain error distribution when averaged area size A_s was changed

Fig.14 Definition of out-of-plane deformation of measuring object

については、面外変位 ΔL 及び撮影距離 L を用いて、式(4)で表されることが明らかになっている⁽¹⁵⁾。なお ΔL の符号は接近時为正、後退時が負である。

$$\varepsilon_e = \frac{\Delta L}{L} \quad (4)$$

そこで本実験では、基準画像撮影後にカメラを基準画像撮影位置から 0.2mm ずつ ± 1.0 mm まで移動させ、比較画像に最大で $\pm 5556\mu$ のひずみ ε_e を発生させることによ

って撮影と解析を行った。解析パラメータは表1のとおりとした。

3・6・2 ひずみの大きさと測定精度の関係 図15はひずみ ϵ_e の大きさとひずみ分布の標準偏差の関係である。この結果より、ひずみ ϵ_e が大きいほどひずみ分布の標準偏差は増加していることがわかる。ここで、図16は(a)基準画像に対して(b)比較画像に圧縮方向の面ひずみが生じた場合の模式図である。図16(a)の黒枠で示すサブセット領域内のパターンは、ひずみを受けることで図16(b)の点線枠のように変形するため、サブセット領域内のパターンは基準画像と比較画像では異なる。このパターンの変化は誤差の発生要因となり、誤差の大きさは図16のような面ひずみの場合、X軸方向及びY軸方向に生じるそれぞれのひずみ ϵ_x 、 ϵ_y の積に比例すると考えられる。本実験で与えたひずみでは、 ϵ_x と ϵ_y の大きさが同じ(ϵ_e)であるため、 ϵ_e の二乗に比例して測定誤差は増加すると考えられる。そこで、ひずみ ϵ_e とひずみ分布の標準偏差 σ_s の関係が式(5)であると仮定して、最小二乗法により求めた近似曲線を図15に示す。

$$\sigma_s = a\epsilon_e^2 + \sigma_1 \quad (5)$$

なお、 σ_1 は表1の解析条件のもとでひずみ測定を行った場合の標準偏差であり、図12に示した σ_1 と同一である。図15より、標準偏差のプロットと近似曲線が近い値を示していることがわかる。したがって、測定対象物に面ひずみが生じている場合、X軸方向及びY軸方向に生じるひずみの積に比例して、ひずみ分布の標準偏差が大きくなることが明らかになった。

4. 結 言

本研究では著者らが用いたデジタル画像相関法の基本測定条件として測定対象物が有する表面模様、及びSub-DIC法における解析パラメータと測定精度の関係について検討した。さらに、比較画像におけるひずみ発生状態の測定精度への影響について、面外変位を利用したひずみを用いて検討を行い、その結果について考察した。以下に、本論文によって明らかになったことを要約する。

- 1) Sub-DIC法による測定精度は、測定対象物の表面模様のランダム性を示す空間FFT解析の半値幅や、サブセットサイズの増大に伴って向上する。
- 2) ひずみ分布に平均化処理を施した場合、標準偏差は中心極限定理にしたがって小さくなるが、その割合は平均化処理を施す範囲のpixelサイズのみに依存する。
- 3) 比較画像にひずみが発生した場合、X軸方向とY軸方向に生じるひずみの積に比例してひずみ分布の標準偏差が大きくなることが明らかになった。

Fig.15 Relation between equivalent strain ϵ_e and standard deviation of error distribution

Fig.16 Transformation pattern area on strain

謝 辞

本研究の一部は科学技術振興機構による平成20年度シーズ発掘試験(A:発掘型)の研究補助金によって行われた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) The Japan Society of Mechanical Engineers Concrete Committee, *Health Monitoring on Concrete Structure* (in Japanese), (2007), pp."I-1"-I-6, "I-476", The Japan Society of Civil Engineers.
- (2) The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, *Strain Measurement II* (in Japanese), (2007), p.21, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection.
- (3) Japanese Society for Experimental Mechanics, *Experimental Mechanics Handbook* (in Japanese), (2008), pp.168-171, Asakura Publishing.
- (4) Yamazaki, H., Ishikawa, M., Ando, S., Imai, H., Esashi, M., Ote, A., Sugimoto, E., *Measure Engineering Handbook*, (2001), pp.730-731, Asakura Publishing.
- (5) Shishido, N., Ikeda, T., Miyazaki, N., *Strain Measurement in Electronic Packages Using Digital Image Correlation*, *JSME annual meeting*, Vol.6, (2006), pp.219-220.

- (6) Wang, Z. Y., Li, H. Q., Tong, J. W., Shen, F., Aymerich, M., Priolo, P., Dual Magnification Digital Image Correlation Based Strain Measurement in CFRP Laminates with Open Hole, *Journal of Composites Science and Technology*, Vol.68, No.9 (2008), pp.1975-1980.
- (7) Morita, Y., Uchino, M., Arakawa, K., Todo, M., Deformation Analysis of Periodontal Tissues by Digital Image Correlation Method, *JSME annual meeting*, Vol.1, (2006), pp.835-836.
- (8) Matsubara, A., Machida, K., Ogihara, S., Stress Analysis of CFRP Composites by Digital Image Correlation and Intelligent Hybrid Method, *Symposium on Evaluation and Diagnosis*, Vol.4, (2005), pp.37-40.
- (9) Nishikawa, I., Abe, S., Improvement of Digital Image Correlation Method and Application to Strain Measurement of Notch, *JSME Kansai district meeting*, Vol.80, (2005), pp."7-1"-"7-2".
- (10) Uchino, M., Okamoto, T., HIDA, K., Ito, Y., Matsuda, H., Investigation of Strain Analysis Method Around a Hole in a Plate using Multi-Rosette Analysis by Digital Image Correlation Method, *Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics*, Vol.9, No.2 (2009), pp.96-102.
- (11) Shimizu, M., Okutomi, M., Significance and Attributes of Sub-Pixel Estimation on Area-Based Matching, *The IEICE Transaction on Communications*, Vol.J85-D-II, No.12 (2002), pp.1791-1800.
- (12) Uchino, M., Discussion of Strain Analysis using Digital Image Correlation Method (in Japanese), *JSEM combination workshop*, No.6-1 (2006), pp.36-39.
- (13) Machida, K., Morita, K., Nonlinear Stress Analysis by Digital Image Correlation Method and Two-dimensional Nonlinear Hybrid Method, *Journal of JSEM*, Vol.6, No.1 (2006), pp.36-42.
- (14) Uneda, M., Shibahara, M., Matsuishi, M., Ishikawa, K., Iwata, S., Kitamura, K., Studies on Non-Contact Deformation and Stress Measurement Technique of Structures using Sub-pixel Image Processing, *Journal of Japan Society for Precision Engineering*, Vol.72, No.3 (2006), pp.360-365.
- (15) Uneda, M., Matsuishi, M., Iwata, S., Ishikawa, K., Studies on Strain Distribution Measurement using Digital Image Correlation Method - Effect of Out-of-plane Deformation on Strain Measurement Accuracy and its Compensation -, *Journal of Japan Society for Precision Engineering*, Vol.73, No.6 (2007), pp.659-664.
- (16) Oshikawa, M., Sakaguchi, K., *Base of Statistical Science* (in Japanese), (1989), pp.56,67, Baihuukan Publishing.