

刻印機によるマーキングを利用した画像解析によるひずみ計測に関する研究

京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 准教授 ○北根安雄

京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 教授 杉浦邦征

京都大学工学部地球工学科 4 回生 清水厚佑

1. はじめに

構造物のひずみを計測し、状態把握を行うことは構造物の安全性を確保する上で重要になる。現在、そのようなひずみ計測の手段としては、ひずみゲージを用いた計測が一般的である。ひずみゲージによるひずみの計測は、精度高く計測が行える一方で、複数の点の計測には、それぞれの測定箇所にはひずみゲージを設置しなければならず、それに伴いゲージから計測器へ複雑な配線作業が必要になるなどの作業面での問題がある。また、計測に際して、ひずみゲージは対象物に直接貼り付ける必要があるが、対象物の物理的、環境的な制限によりひずみゲージを直接貼り付けることができないところではひずみの計測が行えないという問題もある。さらに、ひずみゲージの素材の耐久性により長期間にわたるひずみ計測においても課題がある。

それらの問題を解消するために、現在ひずみゲージに代わる様々な計測法が提案されているが、そのなかの一つである画像関連法（DIC）を用いた計測法は、計測に際して、対象物をカメラで撮影し、画像を解析するだけで簡易にひずみの計測が行える手法である。この手法を実構造物のひずみ計測に用いることが出来れば、構造物を維持管理する上で有効なひずみ計測手法となりうるが、そのためには、DIC を用いたひずみの計測法による計測精度が重要になる。

DIC を用いたひずみ計測に関する既往研究では、DIC によるひずみ計測精度や計測範囲に関して、様々な条件、方法に着目し、数多くの研究が行われている。出水ら[1]は、撮影角度やシャッター速度、撮影距離などの撮影条件や加算平均処理、サブセット範囲などの解析条件の違いが DIC のひずみ計測精度に及ぼす影響を評価した。畝田ら[2]は、基本測定条件として測定対象物の有する表面模様ランダム性及びサブセットサイズ等の DIC における解析パラメータ等の条件とひずみの計測精度の関係について実験的検討を行った。有川ら[3]は、デジタル DIC を測定範囲の異なるスペックル干渉法を組み合わせることで、広範囲の大きさのひずみをまとめて計測する方法を提案した。以上の既往研究ではひずみ計測精度向上のために、計測、解析条件の違いに対し、精度を評価する研究が多くなされてきたが、本研究では、計測対象物に施したマーキングの違いによるひずみ計測精度の違いを評価し、DIC によるひずみ計測をする上で有効なマーキングを検討した。

これらの研究背景を踏まえ、本研究では、マーキングを施した計測対象物に DIC を用いたひずみ計測を行い、それぞれの計測精度を検証し、効果的なひずみの計測方法を明らかにすることを目的とする。また、マーキングには、実構造物のひずみ計測にも利用可能な刻印機を用いた刻印でのマーキングや、DIC による追跡が行いやすいと考えられるエーミングターゲットとしてシールによるマーキングなどを試し、計測精度がどの程度なのかを明らかにする。

2. 実験

2.1. 試験体

実験としては、図-1 に示す SS400 鋼材の試験体に対して、静的引張試験および圧縮試験を実施した。試

験体には、ひずみゲージを貼布し、ひずみを計測した。また同時に試験体表面にマーキングを施し、マーキングの画像をデジタルカメラで撮影することで、DICによりマーキング箇所でのひずみを同定した。

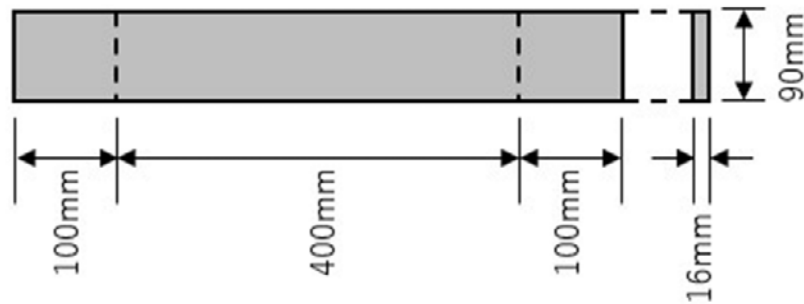


図-1 試験体の寸法

2.2. マーキング

マーキングの種類としては、図-2 に示したように、4分円を10mmの正方形の四隅に刻印したもの、4分円のシールを10mmの正方形の四隅に張り付けたもの、同心円を10mmの四隅に刻印したもの、同心円のシールを10mmの正方形の四隅に張り付けたもの、QRコードを10mm四方に刻印したもの、スプレーによりランダムパターンを10mm四方に塗布したもの計6つのマーキングを試した。それぞれ試験体の中央付近の位置にマーキングを行った。



図-2 マーキングの種類

2.3. 実験方法

DICにより求めたひずみの精度を確かめる方法として、ひずみゲージによる計測を同時に行い、その値との比較により精度を確かめる。ひずみゲージは、ゲージ長5mmのものを使用し、マーキングのすぐ下の位置に設置した。

使用した試験機は、MTS材料試験機(最大荷重500kN)である。引張試験については、0kNから、試験体の降伏に対し約1.7の安全率を取った220kNまでの弾性範囲内で20kNずつ载荷し、各荷重においてマーキングをカメラで撮影し、ひずみゲージによる計測を行った。圧縮試験についても同様に実施した。試験

の様子を以下の図-3 に示す。



図-3 実験の様子

2.4. DIC によるひずみの同定方法

DIC 解析は商業用ソフト、DIPP-Motion V を使用して行った。DIC の解析には、テンプレート範囲とその探査範囲を指定する必要がある。テンプレートは、変形前後の画像に対して、追跡の対象とする範囲である。このテンプレート範囲にマークやパターンの特徴が入るように設定する。探査範囲は、テンプレートを画像内で探索する範囲である。引張試験および圧縮試験の解析に用いた各マーキングでのテンプレート、探査範囲を表-1 に、各マーキングの追跡点を図-4 に示す。

精度の比較のためにテンプレートは基本的に揃えて解析を行ったが、ランダムパターンについては、10mm×10mm のパターンの内部を追跡したため、そのサイズに適切なテンプレート範囲、探査範囲を設定した。

軸ひずみの算出には、前章で述べたように、DIC により追跡した载荷方向の 2 点の 2 点間の線分の長さを求めてひずみを求める方法と、DIC により追跡した点から三角形要素をつくりひずみを求める方法でひずみの値を算出した。2 点間の線分の長さを求めてひずみを求めた方法と、三角形要素をつくりひずみを求めた方法による結果の例を示す。図-5 と図-6 はそれぞれ、引張試験、圧縮試験において、刻印の四分円

表-1 画像解析の解析単位

	テンプレート範囲	探査範囲
四分円(刻印)	500pixels×500pixels	1000pixels×1000pixels
同心円(刻印)	500pixels×500pixels	1000pixels×1400pixels
四分円(シール)	500pixels×500pixels	1000pixels×1000pixels
同心円(シール)	500pixels×500pixel	1000pixels×1000pixels
QR コード	500pixels×500pixels	1000pixels×1000pixels
ランダムパターン	200pixels×200pixels	400pixels×400pixels

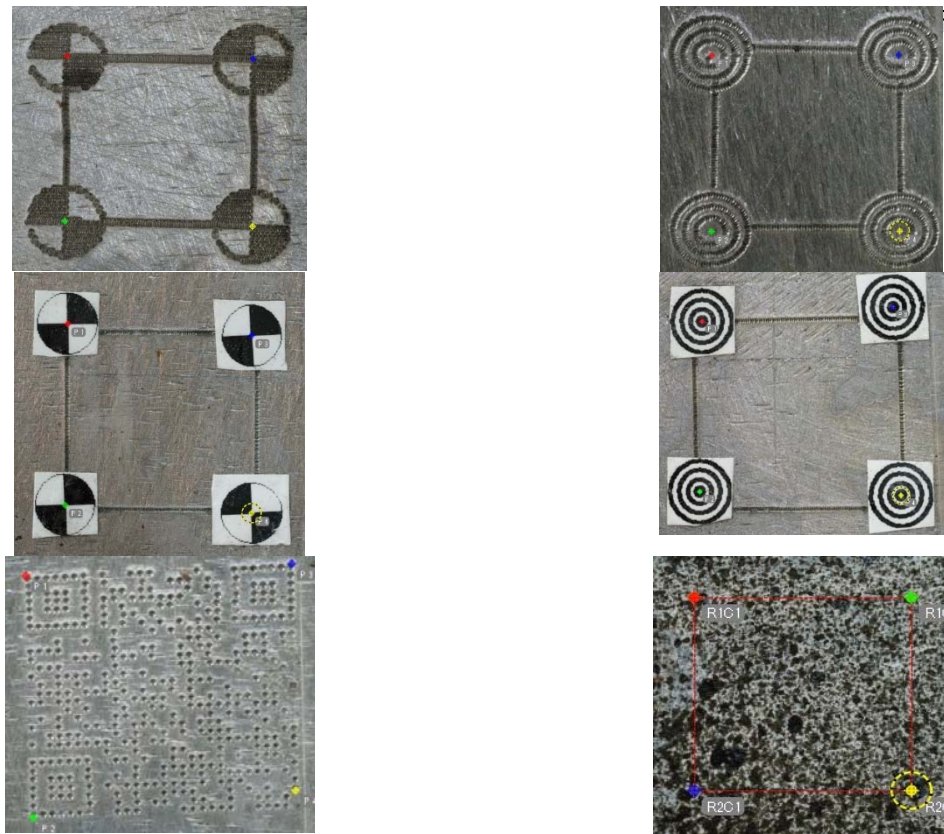


図-4 各マーキングの追跡点

のマーキングでひずみを計測した際の応力-ひずみ関係のグラフを示している。グラフ内では、2点間の線分の長さからひずみを算出した場合の結果を「2点間距離」、三角形要素からひずみを算出した場合の結果を「三角形要素」と表記した。

図-5 と図-6 に示された、2点間距離からひずみを算出した場合と三角形要素からひずみを算出した場合の応力-ひずみ関係のグラフを比較すると、得られた値のばらつきやその傾向に差はほとんど無かった。また、誤差の平均の結果を比較しても、得られた値にほとんど差がなく計測精度においてもほとんど差が無いことがわかる。この結果を踏まえ、以下に示す結果には、三角形要素からひずみを算出した場合の結果のみを示す。

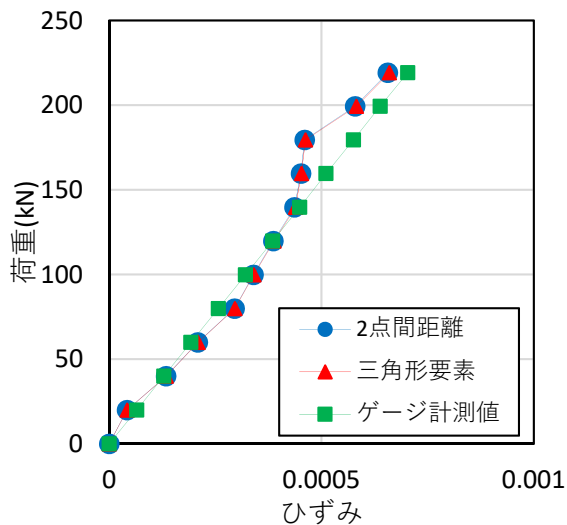


図-5 引張試験の結果

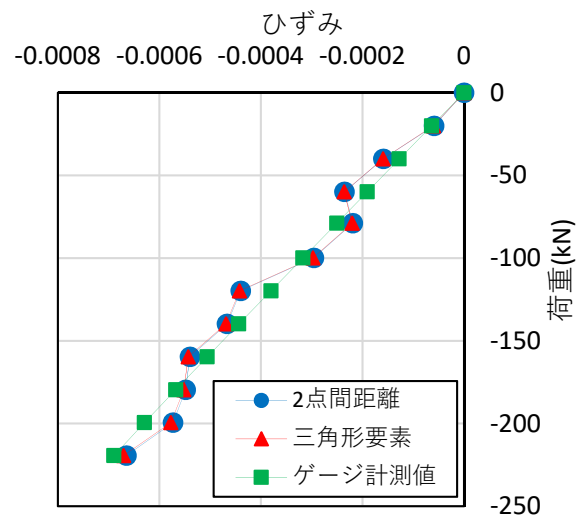


図-6 圧縮試験の結果

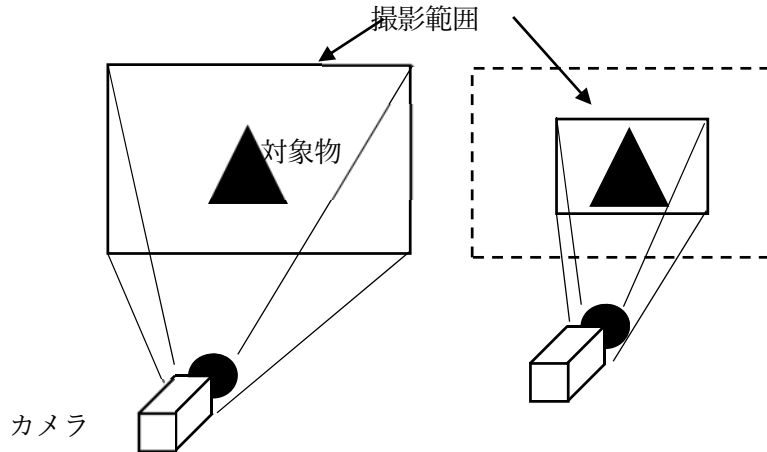


図-7 カメラと被写体の距離と撮影範囲

DIC を用いてひずみを算出するためには、画像内でのスケール(ピクセル単位)を実際のスケール(実際の長さの単位)に変換するために、それらの関係を求める必要がある。具体的には、寸法が分かっている物体を撮影し、その物体の画像内でのピクセル数と実際の寸法との関係から、画像内のピクセル数が実際のスケールではどのくらいの長さになるのかを求める。

変形前後でカメラと対象物の平面の位置関係が変化する場合、変形前後の画像で画像内でのピクセル数と実際の長さの関係が変化してしまう。例えば、図-7 のようにカメラと対象物との距離が遠くなる場合は画像内の対象物を構成するピクセル数が小さくなり、カメラと対象物との距離が近くなる場合は画像内の対象物を構成するピクセル数が大きくなる。このような場合は、ひずみを求める際に、画像内でのピクセル数と実際の長さの関係を変形前後の画像ごとに設定を行う（以下スケールの補正と呼ぶ）必要がある。

本研究では、実験において上記の例と同様に変形前後の画像ごとにスケールの変化があったためスケールの補正を行った。スケールの補正のための長さの基準として、長さ 10mm のルーラーと中心間距離が分かっている 2 個のマークをマーキングと一緒に撮影し、それらの画像内でのピクセル数と実際の長さとの関係より画像内でのスケールと実際のスケールとの関係を求めた。画像内のピクセル数は、ルーラーについては両端の点、マークについては 2 個のマークの中心点をそれぞれ画像相関法により追跡し、それにより得られた各点のピクセル座標値の追跡データを用いて、ルーラーの両端の 2 点間のピクセル数、およびマークの中心の 2 点間のピクセル数を求めた。マーキングと一緒に撮影したルーラーとマークの様子を以下の図-8 に示す。ルーラーとマークは、図-9 のようにマーキングのすぐ横の位置に、試験体の変形の影響が出ないように角だけにテープを付け、試験体に貼り付けた。

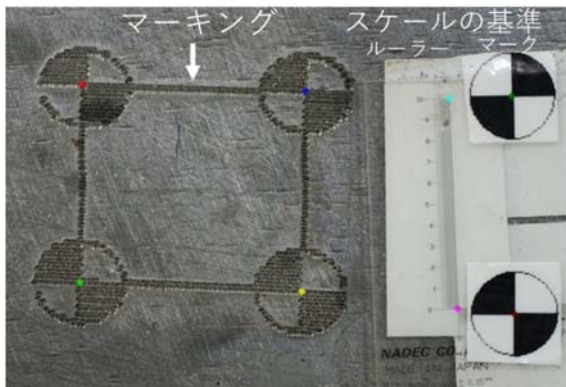


図-8 ルーラーとマーク

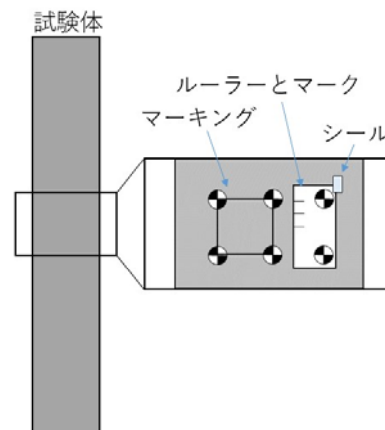


図-9 ルーラーとマークの貼付位置

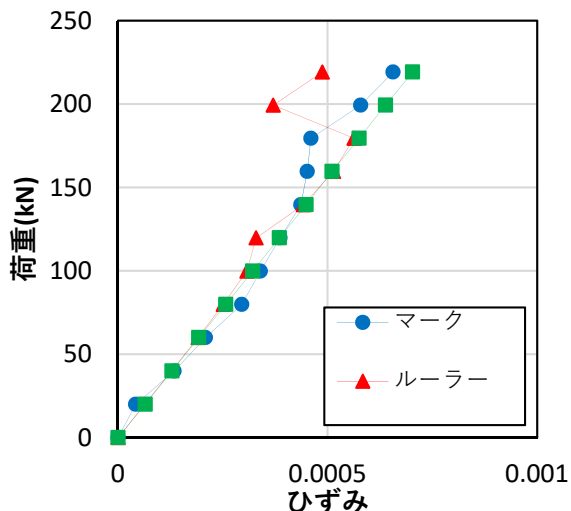


図-10 引張試験の結果

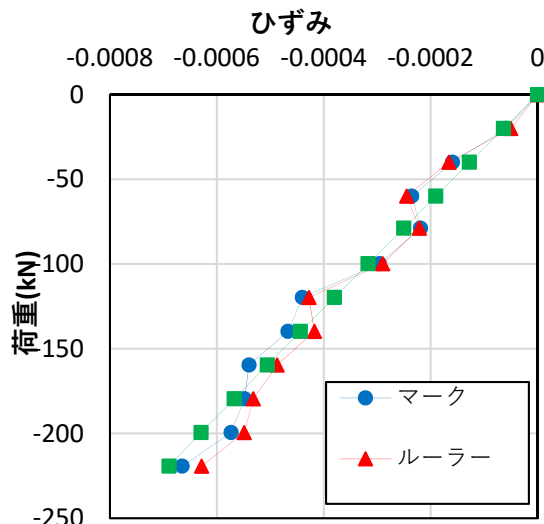


図-11 圧縮試験の結果

マークにより補正した場合とルーラーにより補正した場合での結果の例を、図-10 と図-11 に示す。図-10 と図-11 は、それぞれ、引張試験、圧縮試験において、刻印の四分円のマーキングでひずみを計測した際に、ルーラーによりスケールを補正した場合とマークにより補正した場合の荷重-ひずみ関係のグラフを示している。これらの結果からは、マークにより補正した場合に比べ、ルーラーにより補正した場合の方が全体的にゲージ計測値から大きく外れた箇所が多く確認され、平均の誤差でも、ルーラーにより補正した場合の方の平均の誤差が大きくなるという結果であった。この理由としては、マークとルーラーの追跡点の追跡の行いやすさの違いが考えられる。ルーラーは、線が細かく、画像内に映る線もあまり明瞭ではないため、変形前後の撮影間の時間差における、撮影環境（実験室の明るさ等）や撮影条件（カメラのフォーカス等）の微妙な違いにより、画像ごとにルーラーの線の明瞭度、濃さや太さなども微妙に変化し、正確な追跡が行いづらかったと考えられる。一方で、ルーラーの点の追跡が DIC で正確に行えたと考えられるケースにおいては、精度としても、マークで補正した場合とほぼ変わらない計測精度が得られており、正しく追跡が行えればマークと同程度の精度が期待できる。以上を踏まえると、DIC による追跡を行いやすさ、精度という観点で見れば、スケールの補正のためには、マークのように追跡が行いやすいものを用いる方が良いものと考えられる。この結果を踏まえ、以下の結果では、マークにより補正した場合の結果を示す。

2.5. 実験結果と考察

図-12 と図-13 は、それぞれ引張試験と圧縮試験での各マーキングでひずみを計測した際の荷重-ひずみ関係のグラフである。グラフ内では DIC によるひずみ計測値を「DIC 計測値」、ひずみゲージによるひずみ計測値を「ゲージ計測値」と表記した。また表-2 には、引張試験、圧縮試験においての各マーキングの DIC によるひずみ計測値の平均の誤差を示した。誤差は、DIC により求めたひずみ計測値とゲージ計測値の差の絶対値と、ゲージ計測値との比をパーセンテージで示したものである。

引張試験と圧縮試験の結果は、どちらか一方の試験でひずみの計測精度が大きく変わるということはなく、軸ひずみの計測においては、引張と圧縮による違いが計測精度に影響することはあまりないと考えられる。

次に、各種マーキングを比較する。得られた結果を比較すると、四分円と同心円は、引張試験、圧縮試験の両試験において、全体的に誤差が 10%以下ほどで抑えられたとことが多く、引張試験で値のばらつきが大きく、平均の誤差が 15%ほどになったランダムパターンや、全体的を通して誤差が 15%~20%ほどになった QR コードの結果と比べると良い計測精度を示した。これは、四分円や同心円のマーキングがランダムパターンや QR コードに比べると、明暗や幾何的に特徴のあるマーキングなので、画像相関法による追

跡点の同定も行ないやすく、計測精度も良かったことが考えられ、特徴のあるマークによるマーキングが画像相関法による計測に上手く機能したものと考えられる。

ランダムパターンは、圧縮試験においては平均の誤差が 9%ほどで、全体的に誤差が 10%以下に抑えられていたところが多く、四分円や同心円と同じくらいの計測精度を確認できた一方で、引張試験においては、四分円や同心円のマーキングに比べ値のばらつきや誤差が大きくなったところが多く、四分円、同心

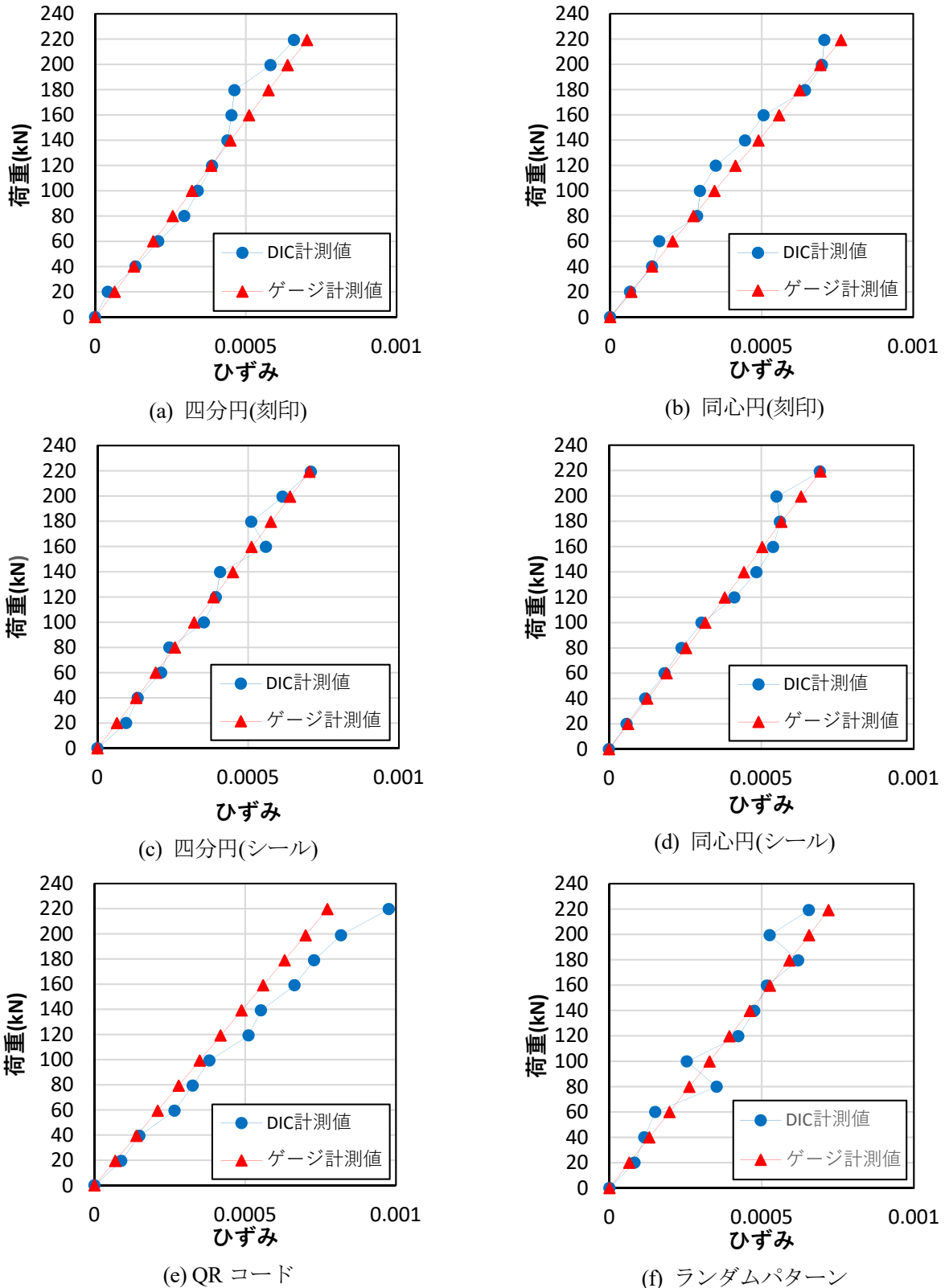


図-12 引張試験の荷重-ひずみ関係

円のマーキングと比べ、やや計測精度を欠いた結果となった。ランダムパターンは、四分円や同心円のようにマークの中の特徴的な点を追跡するのではなく、任意の点のランダム性を手掛かりにして画像相関法による追跡を行っており、解析の際に選んだ任意の追跡点のまわりのランダム性によっても計測精度が異なると考えられ、引張試験と圧縮試験の解析の際に選んだ任意の点まわりのランダム性の違いが、引張試験と圧縮試験での計測精度の差の原因ではないかと考えられる。今回は、ランダムパターンをひずみ分布

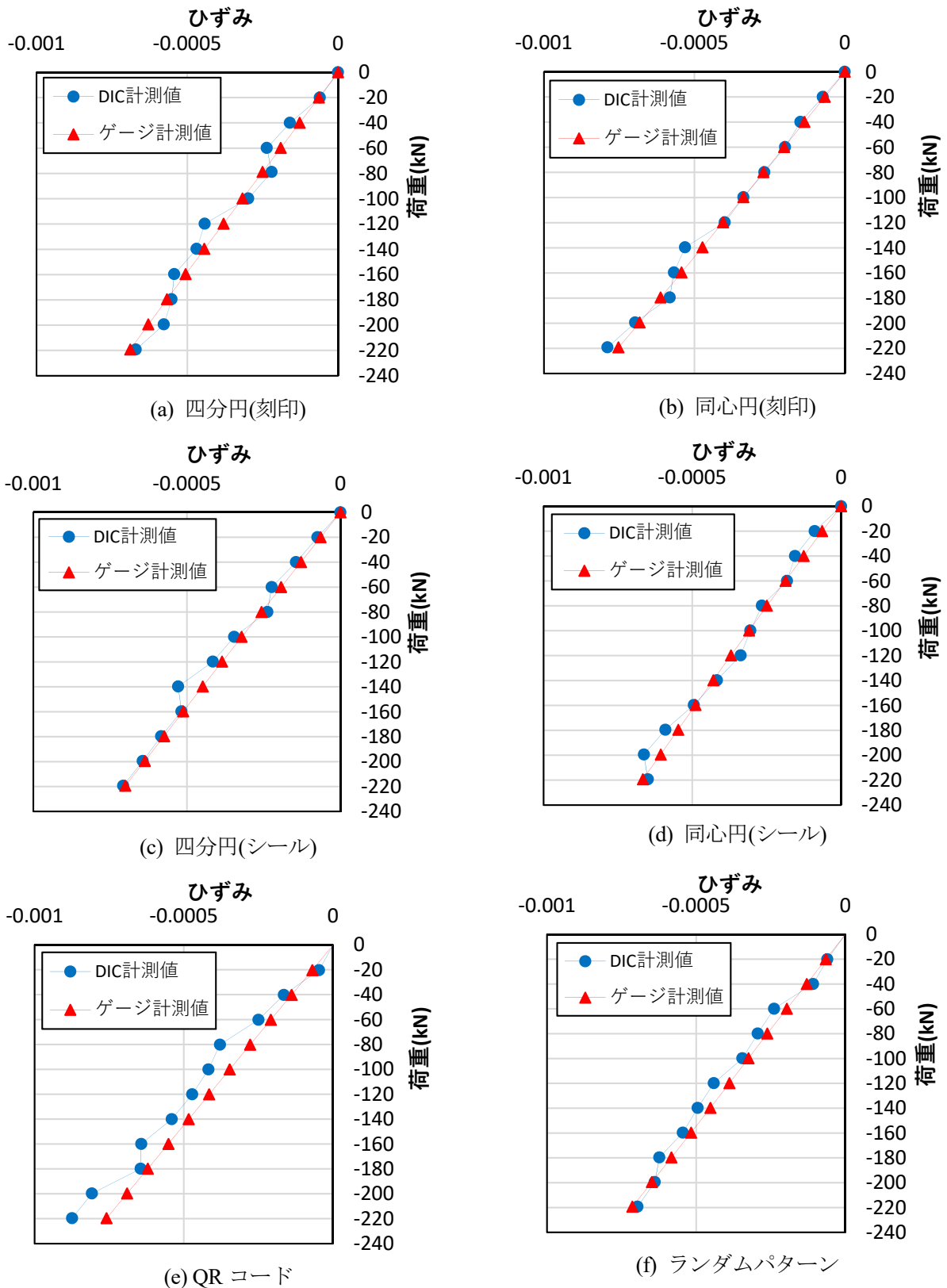


図-13 圧縮試験の荷重-ひずみ関係

表-2 各マーキングのゲージ計測値に対する誤差の平均(%)

	引張試験	圧縮試験
四分円(刻印)	10.73	10.54
同心円(刻印)	8.17	4.80
四分円(シール)	11.42	8.07
同心円(シール)	4.61	9.59
QR コード	18.37	17.79
ランダムパターン	15.09	9.45

ではなくひずみの計測のために用いたため、10mm×10mm の小さな範囲にランダムパターンを作成したが、作成したパターンも細かく小さなものになってしまったため、ひずみ計測を行う上で適切なパターンのサイズであったか、ランダム性が十分であったかは改めて検討する必要があると考えられる。

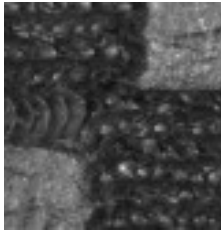
QR コードは、引張試験と圧縮試験において、全体を通して 15%から 20%ほどの誤差があり、四分円、同心円やランダムパターンと比べても精度を欠いた結果となった。この理由としては、QR コードのマーキングの追跡の精度が他のマーキングと比べるとあまり高くなかったことが考えられる。QR コードは、打刻した点を特徴点として追跡を行ったが、画像を細かく確認すると、打刻点の明暗や線の明瞭度が画像ごとに微妙に変化しており、画像ごとに正確な追尾点を特定することが難しかったのではないかと考えられる。打刻点の明暗や、線の明瞭度が画像ごとに変化した理由としては、打刻点がマーキングとしてはあまり目立つものではなかったため、撮影時の実験室の明るさの変化や載荷ごとのフォーカスの微妙な違いなどが映り方に影響したのではないかと考えられる。この結果からは、刻印の打刻点を単独で追尾してひずみを求めるよりは、細かい打刻点の集まりから線や明暗部を作った四分円や同心円のような特徴のあるマークを追跡してひずみを求める方が得られる結果の精度は良いと言える。

最後に、刻印によるマーキングとシールによるマーキングの結果の違いについて述べる。表-2 の刻印(四分円、同心円)とシール(四分円、同心円)の平均の誤差を比較すると、マーキングごとに平均の誤差に違いはあるが、刻印とシールでどちらか一方が安定して誤差が小さく抑えられたというような結果は確認できず、どちらか一方の計測精度が良いと言えるほどの差は無かった。図-12 と図-13 の全体の結果を見ても、両者ともに、画像相関法による計測値がゲージ計測値に対して大きく外れたということは無いものの、値にばらつきがあるところが何箇所か確認され、この結果についてもあまり大きな差は無かった。また、圧縮試験の刻印の同心円の結果や、引張試験のシールの同心円の結果のように、平均の誤差が 5%ほどで、誤差や値のばらつきが特に小さく抑えられていたところも確認されたが、これらの結果も、引張試験、圧縮試験の両方で、同様の結果が得られたという訳では無かったので、マーキングによる効果というよりは、試験ごとの撮影環境や条件等の違いによるものではないかと考えられる。

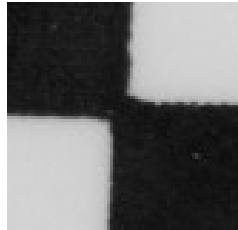
ただし、細かな違いとしては、刻印の場合は、図-12(a)の引張試験の刻印の四分円の荷重 160kN~200kN の範囲でのひずみや、図-12(b)の刻印の同心円の 100kN~160kN の範囲でのひずみのように、画像相関法による計測値がゲージ計測値から若干外れる箇所が多かった一方で、シールの場合は、値のばらつきがあるところは確認されるものの、全体的には値のばらつきが少なかった。この結果から、シールと刻印のマークの追跡の精度に大きな差は無いものの、刻印に比べるとシールの方がより安定して精度の高く追跡が行っていたのではないかと考えられる。シールは刻印よりもマークの線や白黒の明暗を細かく明瞭に表現出来るため、図-14 に示すように同じテンプレート範囲に収まる模様についても明瞭度高く、より多くの情報を収めることができ、それがマークの探索、追跡に大きく役立ったと考えられる。

刻印についても、シールと比べると誤差にばらつきが大きかったものの、全体を通して、誤差が 10%以下に抑えられたところがほとんどで、誤差が 1%~6%ほどに抑えられたところも多く確認でき、ほとんど

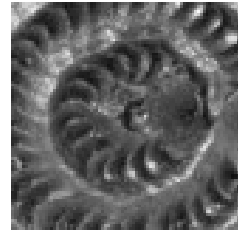
のところでは、シールと同程度に精度高く計測が行えたものと考えられる。また、 $60\mu\sim 100\mu$ ほどの小さなひずみに対して誤差が1~4%ほどに抑えられたところもあり、刻印についてもシールと同等に小さなひずみの変化を追うことができることが確認できた。



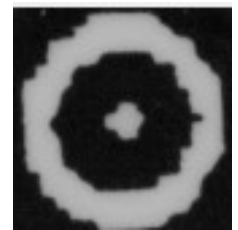
(a) 四分円(刻印)



(b) 四分円(シール)



(c) 同心円(刻印)



(d) 同心円(シール)

図-14 テンプレート範囲のマーキングの様様

3. 結論

本論文での結論は以下の通りである。

- (1) 刻印およびシールを用いたマークのマーキングについては、軸ひずみの計測において精度良く計測できることが確認できた。長期の計測を行う実構造物に利用する上では、刻印の方が有効なマーキング方法であると考えられる。
- (2) ひずみの計測を精度行うためには、基準寸法の補正を画像ごとに行う必要がある。

今後は、実構造物で計測を行い、その精度を確認すること、また、カメラの位置を移動させた場合でも、精度よく計測ができるかどうかについて確認を行う必要がある。

参考文献

- [1] 出水享, 板井達志, 藤野義裕, 山下務, 松田浩; 撮影・解析条件がデジタル画像相関法のひずみ計測精度に及ぼす影響, 長崎大学研究成果リポジトリ, 2011.
- [2] 畝田道雄, 奥畑峻, 石川憲一; デジタル画像相関法を用いた全視野変形・ひずみ計測の精度評価研究, 日本機械学会論文集(C編), 76巻763号, No.09-0809, pp.587-594, 2010-3.
- [3] 有川秀一, 富永泰隆, 米山聡; スペックル・画像相関ハイブリッド法による広レンジひずみ計測, 実験力学, Vol112, No.3, pp.235-242, 2012.