

第 3 章

変位, ひずみ計測精度の検証

3.1 概要

カメラ装置とスキャナ装置の性能を検証するため, 鋼部材およびコンクリート部材などを用いた変位, ひずみ計測精度の検討を行った. 変位, ひずみは, 無載荷時に計測した画像を初期画像として, 各荷重段階に計測した変形画像を用いて DICM により算出した.

3.2 カメラ装置

カメラ装置を用いて変位, ひずみ計測精度の検証を行った. 変位計測は, 計測距離が計測精度に及ぼす影響について検討した. また, 高速度カメラを用いた動的変位計測精度を検証し, 計測した時刻歴応答変位をフーリエ変換することにより固有振動数の特定が可能であるか検討した.

ひずみ計測は, 鋼部材およびコンクリート部材を用いた一軸圧縮試験を実施し, 弾性域におけるひずみ計測精度を検討した. そして, アルミニウムの一軸引張試験により塑性域におけるひずみ計測精度を検討した. また, 計測条件であるカメラの角度, シャッター速度, 画像解像度と解析条件であるサブセットの大きさや加算平均処理法を適用した場合のひずみ計測精度を検討した. さらに, ひずみ計測精度を向上させるため DICM を用いたマルチロゼット解析法を開発し, その計測精度を検討した.

3.2.1 静的変位計測精度の検証

(1) 試験概要

計測システムの概要を写真 3.2.1 および表 3.2.1 に示す. 計測システムは, 1 台の CCD カメラ, 望遠レンズ, テレコンバータおよび三脚で構成される. CCD カメラにテレコンバータを介して望遠レンズを取り付けた. この状態ではブレるため, CCD カメラとレンズを一体にできる治具を用いてそれぞれを固定し, 治具と三脚を固定させた. 精度検証には QR コードを取り付けた Z ステージを使用した(写真 3.2.2). QR コードの大きさは縦, 横ともに 54.5 mm である. 計測では, レンズの最大焦点距離である 400mm に調整して計測を行った. この際の計測システム全体の焦点距離は 35mm 判換算で 3200mm 相当となる. 計測距離は, 10m, 20m および 30m とした. それぞれの距離で計測された画像解像度は, 10m で 0.042mm/pixel, 20m で 0.086mm/pixel, 30m で 0.13mm/pixel となる. 計測は, Z ステージの変位量を 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 および 5.0mm の 15 段階と調整し, 各段階でそれぞれ 3 枚ずつ, 計 45 枚の画像を計測した. 計測した画像を DICM により画素の変化量を算出した. 画素(pixel)から長さ (mm) への換算は, QR コードを利用した. 計測は室内で行い, 明るさを一定にするため LED ライトを 2 台使用した. 本条件下のシャッター速度は 30ms である. 計測画像を写真 3.2.3 に示す.

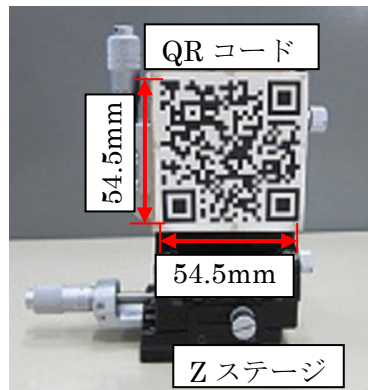
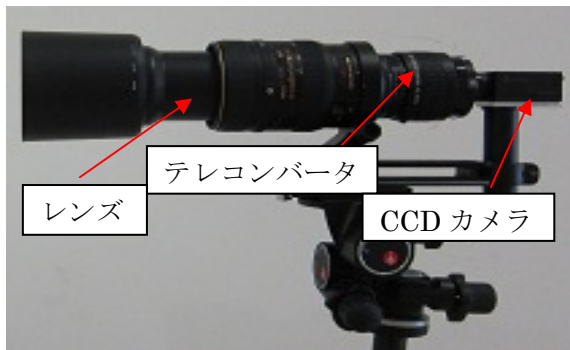


表 3.2.1 計測システム仕様

CCDカメラ	2章参照
レンズ	型番 : Ai AF VR Zoom-Nikkor 80-400mm f/4.5-5.6D ED 焦点距離 : 80-400mm 絞り : 最大 f/4.5, 最小 f/32
テレコンバータ	型番 : KENKO デジタルテレプラス PRO300 2X DGX 倍率 : 2 倍 露出倍率 : 4 倍(2 絞り分)



(a) 10m



(b) 20m



(c) 30m

写真 3.2.3 計測画像

(2) 試験結果

10m, 20mおよび30mの変位計測結果を図3.2.1~図3.2.3に, 標準偏差, 平均誤差および最大誤差を表3.2.2に示す. 図には, 回帰直線も合わせて示す.

計測距離10mの計測結果は, 図3.2.1より回帰直線の傾きが1に近くまた, 切片の値も0に近い値を示した. そして, 相関係数(R^2)は0.9999を得た. また, 表より標準偏差は0.01mm, 平均誤差は0.01mm, 最大誤差は0.04mmを得たことから高精度な計測ができた.

計測距離20mの計測結果は, 図3.2.1より回帰直線の傾きが1に近くまた, 切片の値も0に近い値を示

した．そして，相関係数(R^2)は0.9999を得た．また，表より標準偏差は0.01mm，平均誤差は0.01mmおよび最大誤差は0.04mmを得たことから高精度な計測ができた．

計測距離30mの計測結果は，計測距離10m，20mと比較すると若干ばらつきが確認され，計測精度も低下した．これは計測距離が遠くなるとターゲットのランダムパターンを構成するpixel数が低下するため，QRコードのランダムパターンの認識が困難になるためと考えられる．しかし，標準偏差は0.03mm，平均誤差は0.02mm，最大誤差は0.11mmであり，近似曲線の傾きが非常に1に近く切片も0に近いことから，計測精度は高いと考えられる．計測精度を向上させるためには，高解像度なカメラを用いることや，大きなランダムパターンを持つターゲットを用いることで解決できると考えられる．

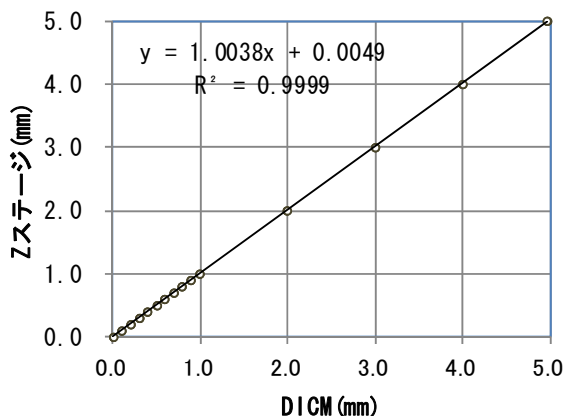


図 3.2.1 計測結果 (10m)

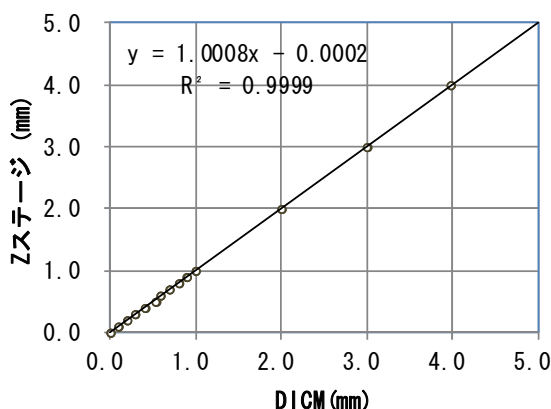


図 3.2.2 計測結果 (20m)

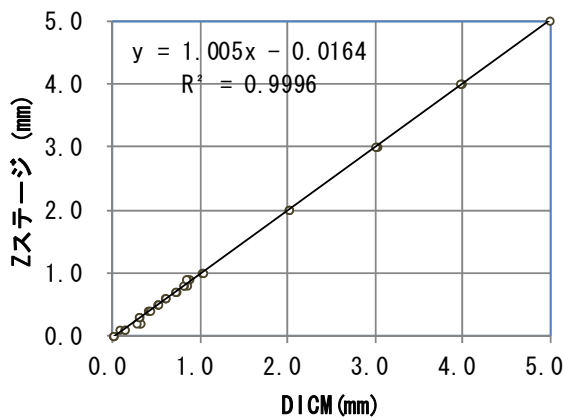


図 3.2.3 計測結果 (30m)

表 3.2.2 計測結果一覧

計測距離	10m	20m	30m
標準偏差 (mm)	0.01	0.01	0.03
平均誤差 (mm)	0.01	0.01	0.02
最大誤差 (mm)	0.04	0.04	0.11

3.2.2 動的変位計測精度の検証

(1) 試験概要

高速度カメラを用いて，動的変位計測精度の検証を行った．さらに，計測した時刻歴応答変位から振動数の算出を試みた．試験では，寸法 (250mm×10mm×1mm) のアルミニウム合金 5052 (静弾性係数 70 kN/mm²，降伏強度 248 N/mm²，伸び 6%) を使用し，試験体の下端 50mm を完全固定させ，

片持ち状態にして上端（自由端）を厚さ方向に強制振動させた。振動パターンとしては、加振器により 20Hz（振幅約 0.6mm）で定常振動させるパターン 1 と約 5.0mm の初期変位を与え、減衰振動させるパターン 2 とした。加振器には FOSTEX 社の FW108N（インピーダンス 8Ω, 最低共振周波数 55Hz, 入力 50W(MUS)) を使用した。試験体の表面に白色のスプレーで下地を塗布し、後に黒色のスプレーでランダムパターンを設けた。そして、スプレーを乾燥させた後に計測を行った。計測システムを写真 3.2.4 に、仕様を表 3.2.3 にそれぞれ示す。計測では自由端のランダムパターンを設けた表面を 2 台の高速度カメラにより計測した。計測した画像から DICM により変位を算出した。また、DICM の比較のために試験体の裏面をレーザ変位計で計測を行った。レーザ変位計はキーエンス社の LK-G85 を使用した。

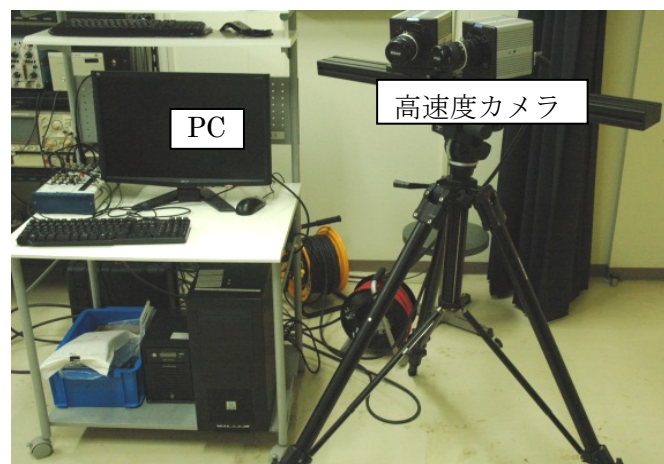


写真 3.2.4 計測システム

表 3.2.3 計測システム仕様

高速度カメラ	Photron 社製 FASTCAM-1024PCI 撮像素子：CMOS イメージセンサ レンズマウント形式：C マウント, F マウント (マウントブロック交換式) 解像度：1024×1024 画素 最高計測速度：1000Hz (モノクロ) シャッター方式：電子シャッター 記録方式：IC メモリ方式 AD 変換：モノクロ 10 ビット メモリ容量：3GB トリガ入力信号：TTL, 接点 (ランダムリセットトリガモード) 外部同期入力信号：5V _{pp} (正極性/負極性選択可能)
レンズ	Nikon 社製 nikkor 50mm f/1.2 焦点距離：50mm 絞り：最大 f/1.2, 最小 f/16 最短計測距離：0.5m
パソコン	CPU Quad CPUQ9550 @2.83GHz メモリ容量 2.99GB HD 1TB

高速度カメラとレーザ変位計を同期させるために, 図 3.2.4 に示すシステムとした. 高速度カメラは専用のケーブルと PCI ボードを用いてパソコンに接続した. また, レーザ変位計は NATIONAL INSTRUMENTS 社の NI USB-6221 と BNC ケーブルで接続し, NI USB-6221 とパソコンを USB ケーブルで接続した.

計測条件としては, 高速度カメラのシャッタースピードを 1/1000 秒, サンプル周波数を 500Hz とし 12 秒間で 6000 枚計測した. レーザ変位計は, 高速度カメラと同様にサンプル周波数 500Hz で計測を行った. また, 計測時に白熱灯を使用した.

計測時の位置関係として, アルミ試験体と 2 つのカメラの中心点までの距離を 660mm, 2 つのカメラ間距離を 165mm とした. この条件下で計測された画像解像度は約 0.173mm/pixel となる. 試験体概要を図 3.2.5, アルミ試験体を写真 3.2.5, 計測状況を写真 3.2.6 にそれぞれ示す.

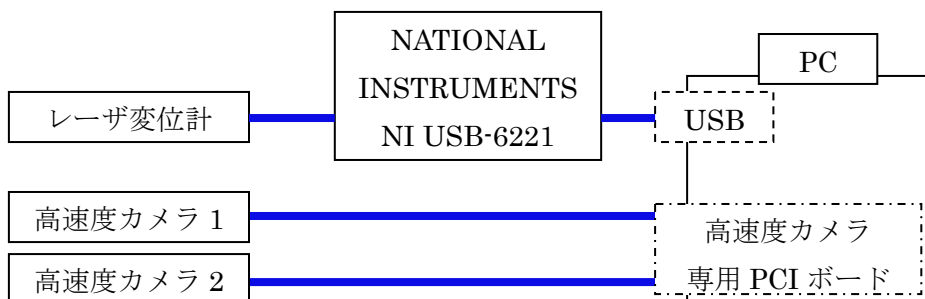


図 3.2.4 システム概要図

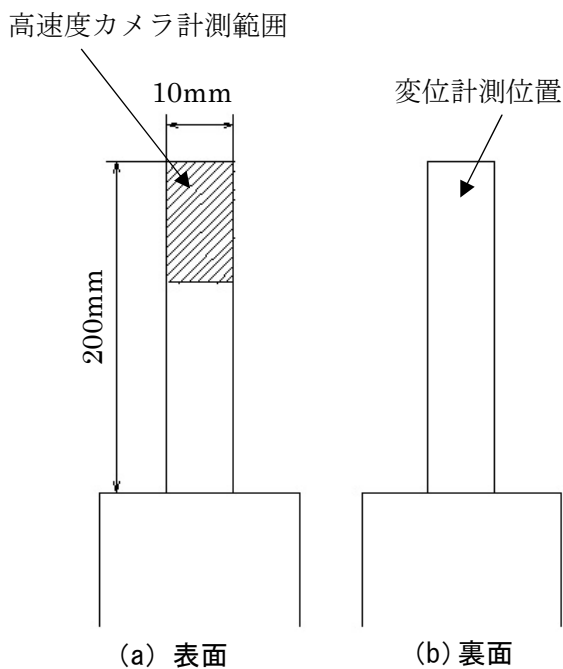


図 3.2.5 試験体



写真 3.2.5 アルミ試験体

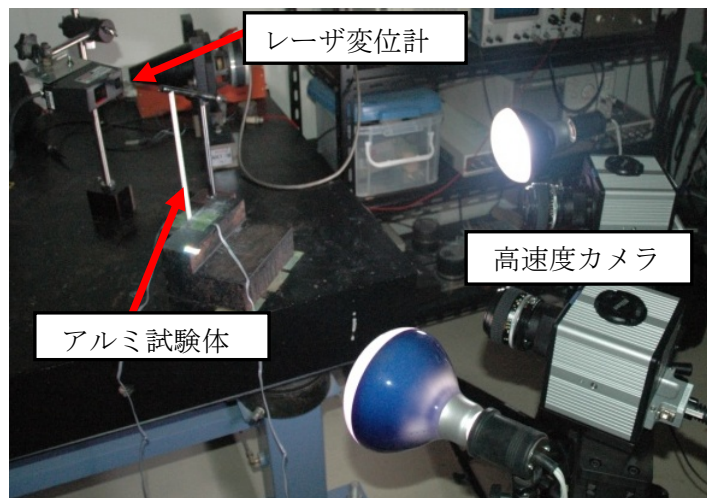


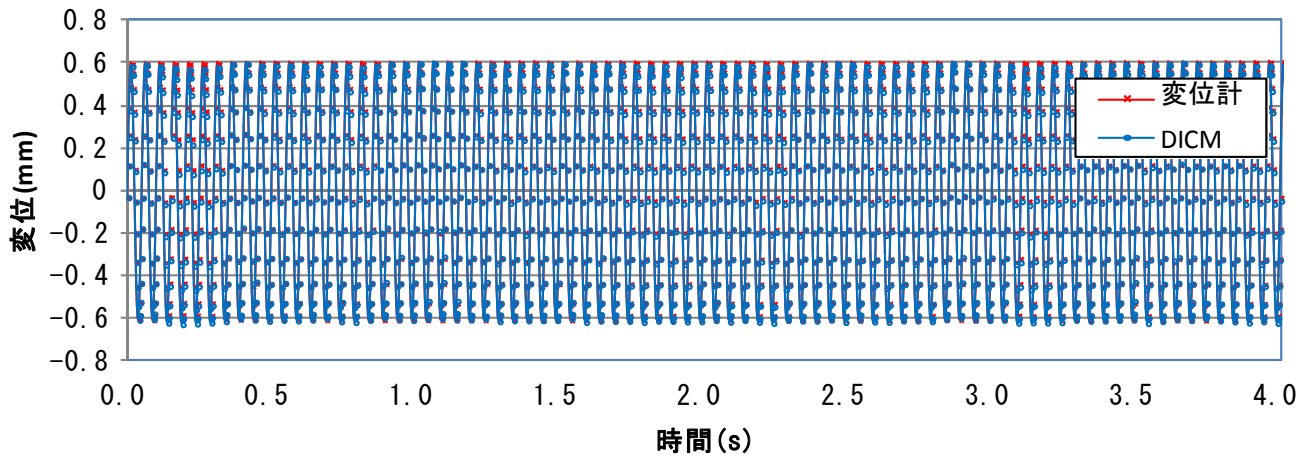
写真 3.2.6 計測状況

(2) 試験結果

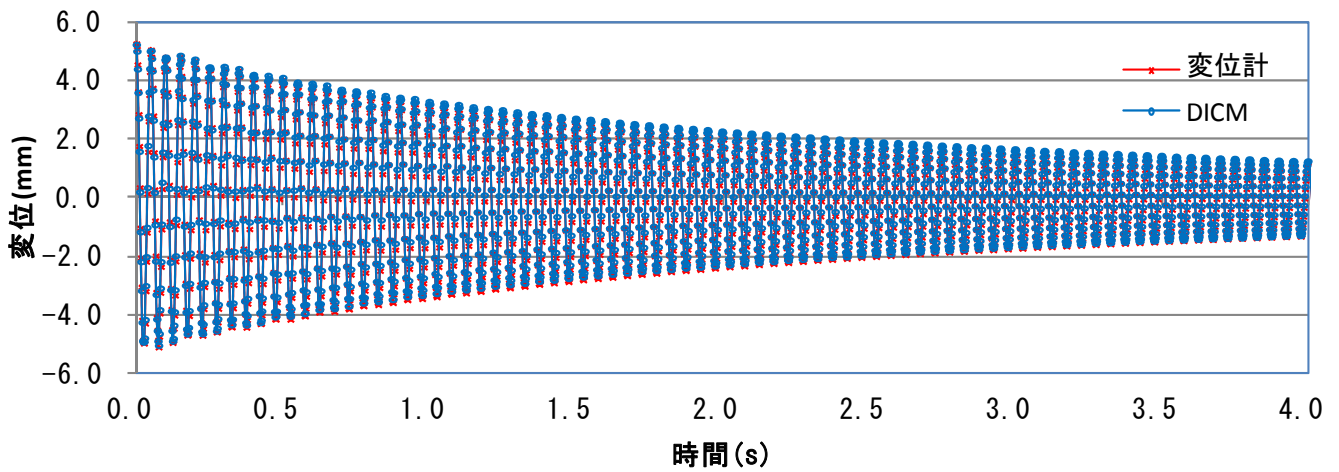
パターン 1 の計測開始から 4.0 秒間，計測開始 11.9 秒後から 12.0 秒までの時刻歴応答変位を図 3.2.6(a)，図 3.2.7(a)にそれぞれ示す。図 3.2.6(a)，図 3.2.7(a)より，DICM とレーザー変位計の応答変位は，振幅が約 0.6mm の正弦波形となり，ほぼ同じ挙動を表している。パターン 2 の計測開始からの 4.0 秒間，計測開始 11.9 秒後から 12.0 秒までの時刻歴応答変位を図 3.2.6(b)，図 3.2.7(b)にそれぞれ示す。図 3.2.6(b)，図 3.2.7(b)より，DICM とレーザー変位計の応答変位は，最大振幅が 5.3mm で 12 秒後に振幅が 0.2mm となる波形となり，減衰しながらほぼ同じ挙動を表している。

DICM とレーザー変位計の関係を図 3.2.8 に示す。図 3.2.8 よりパターン 1，2 とも相関係数(R^2)は 1 に近い値を示した。また，回帰曲線の傾きもほぼ 1 を示している。各パターンの平均誤差，標準偏差および変動係数を表 3.2.4 に示す。平均誤差とは，DICM とレーザー変位計の計測値の差分の平均を意味する。パターン 1，2 の平均誤差は 0.007 mm，0.030 mm，標準偏差は 0.005 mm，0.048 mm および変動係数は 0.71，1.60 となりパターン 2 のばらつきが大きい結果となった。これは，試験における振幅がパターン 1 に比べパターン 2 が大きいため，計測誤差が大きくなったことを意味する。以上から，DICM は高精度に動的変位計測が可能だと確認できた。

パターン 1，2 の DICM とレーザー変位計の時刻歴応答変位からフーリエ変換によって求めたフーリエスペクトルを図 3.2.9，卓越周波数を表 3.2.5 にそれぞれ示す。なお，フーリエ変換は，計測開始 6.0 秒後から 2.046 秒間(1024 点)のデータについて行った。図 3.2.9 よりすべてのパターンで 20Hz 付近に大きな卓越が確認でき，表 3.2.5 より DICM とレーザー変位計の卓越周波数は，同じであることも確認できた。以上から，DICM により計測した時刻歴応答変位から固有振動数の特定が可能であると確認できた。

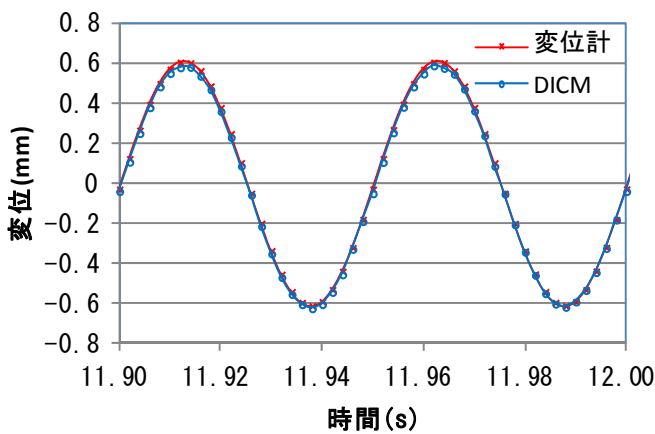


(a) パターン 1

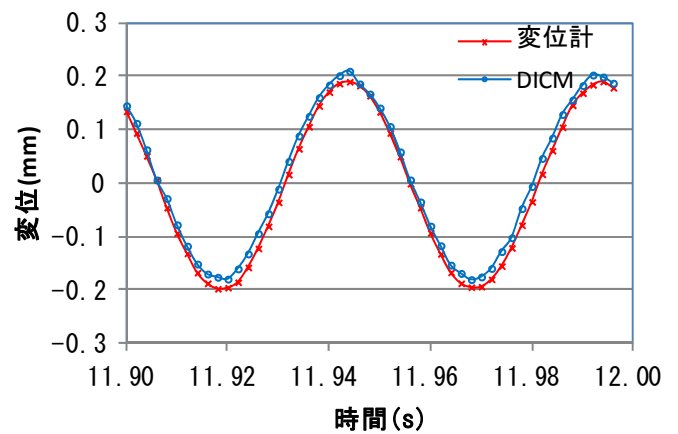


(b) パターン 2

図 3.2.6 変位計測結果(0 秒—4.0 秒)



(a) パターン 1



(b) パターン 2

図 3.2.7 変位計測結果(11.90—12.00 秒)間

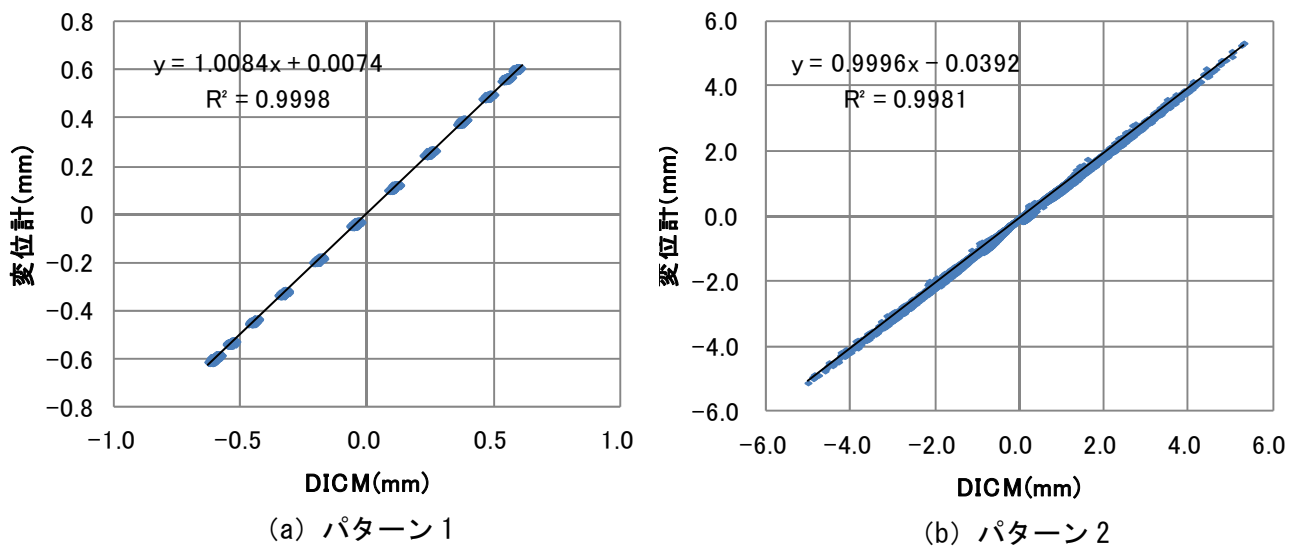


図 3.2.8 DICM と変位計の関係

表 3.2.4 変位計測結果一覧

	パターン1	パターン2
標準偏差(mm)	0.005	0.048
平均誤差(mm)	0.007	0.030
最大誤差(mm)	0.033	0.249
変動係数	0.71	1.60

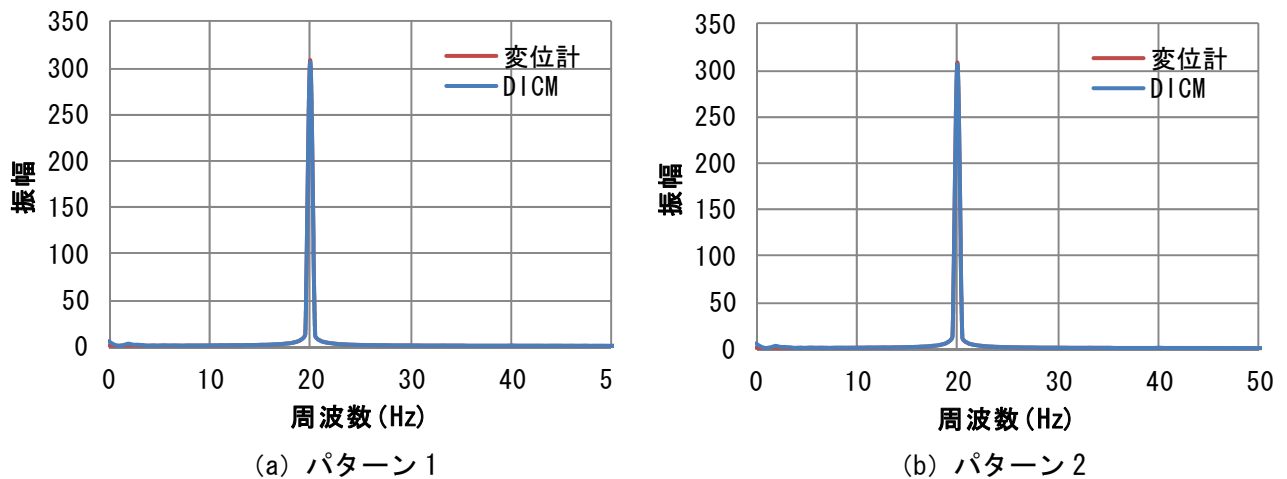


図 3.2.9 フーリエスペクトル

表 3.2.5 振動数の比較 (Hz)

	DICM	レーザ変位計
パターン1	20.01	20.01
パターン2	20.01	20.01

3.2.3 鋼部材を用いたひずみ計測精度の検証

(1) 試験概要

鋼部材は、比較的均一な材料であることからコンクリート部材と異なりひずみゲージを貼付する際にゲージ長の制約などはない。このことから、局所的なひずみを計測したい場合には、自由にゲージ長の異なるひずみゲージを使用することができる。一方、DICM では、解析パラメータを設定することで、自由に取得したい任意長さ（以下解析ゲージ長と呼ぶ）のひずみを算出することができる。ここでは、解析ゲージ長を変化させた場合の計測精度の検証を行った。

本試験では、長さ 400mm×断面 100×100×6×8 (mm) の H 鋼(降伏強度 329N/mm²,引張強度 445N/mm², 伸び 31%) を用いて一軸圧縮試験を行い、ひずみゲージと DICM によりひずみ計測を実施した。本試験では試験体中央部表面にゲージ長 5mm, 30 mm および 60mm のひずみゲージを貼付し、貼付面を DICM により計測した。DICM の計測面には、白色のスプレーで下地を塗布し、後に黒色のスプレーでランダムパターンを設けた。そして、スプレーを乾燥させた後に一軸圧縮試験を実施した。試験体概要を図 3.2.10 に試験体のランダムパターンを写真 3.2.7 にそれぞれ示す。

計測条件として、試験体から 2 台の CCD カメラの中心位置までの距離を 340mm, カメラ間の距離を 160mm とした。また、計測時には、白熱灯を 2 つ使用した。なお、本条件下で計測した画像は、約 0.075mm/ pixel で構成される。このことから、ゲージ長手方向において 5mm ゲージは約 67pixel, 30mm ゲージは約 400pixel および 60mm ゲージは約 800pixel で構成される。

載荷速度は 2kN/s とし、ひずみゲージと DICM を 1 秒間隔で計測し、ひずみゲージ値約 1200 μ で計測を終了した。計測状況を写真 3.2.8 に示す。

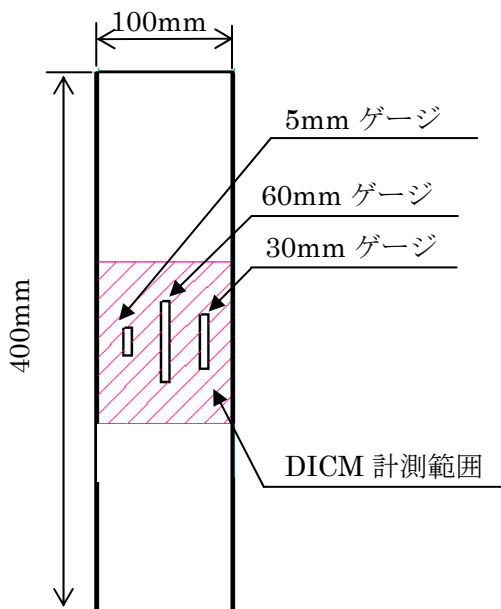


図 3.2.10 試験体

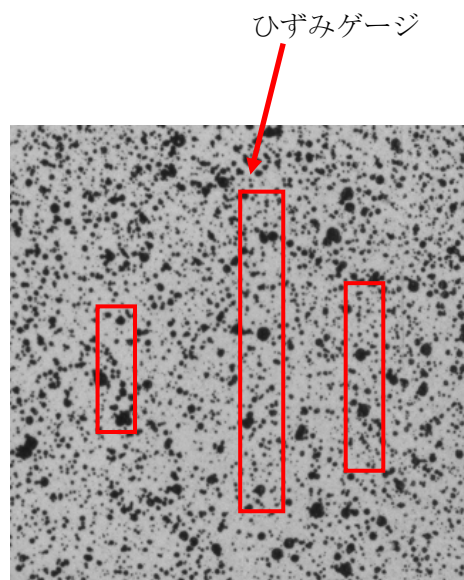


写真 3.2.7 ランダムパターン

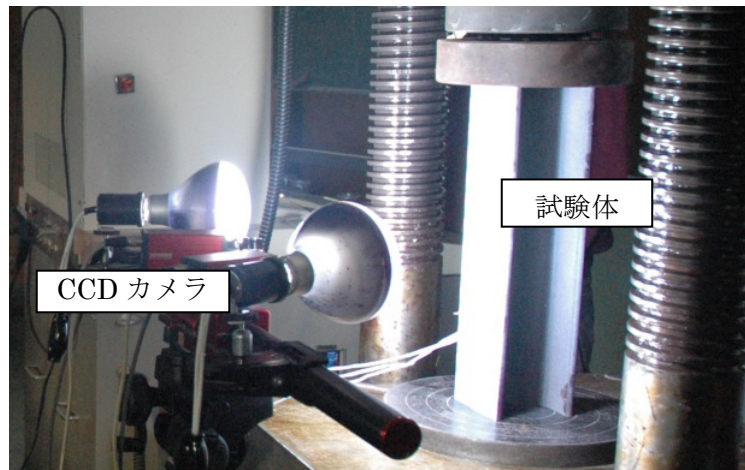


写真 3.2.8 計測状況

(2) 試験結果

DICM とひずみゲージの計測値を図 3.2.11～図 3.2.13 に示す。また, DICM とひずみゲージの計測値の標準偏差, 平均誤差および最大誤差を表 3.2.6 に示す。図より, 解析ゲージ長を長くすると, ばらつきが低下しているのが確認された。そして, 回帰直線の傾きや相関係数(R^2)も 1 に近づくことが確認できた。それは, 表中の標準偏差, 平均誤差および最大誤差からも確認できる。

表より解析ゲージ長を 5mm から 30mm にすることにより, 標準偏差, 平均誤差および最大誤差が大きく改善されたが, 解析ゲージ長を 30mm から 60mm にした場合は, 大きな改善は確認されなかった。

以上から高解像度の CCD カメラを用いることやズームレンズを用いて計測すればひずみ精度の向上が期待できる。

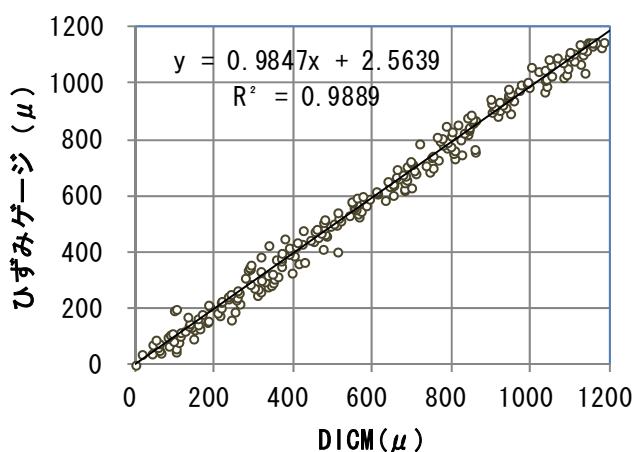


図 3.2.11 計測結果 (5mm)

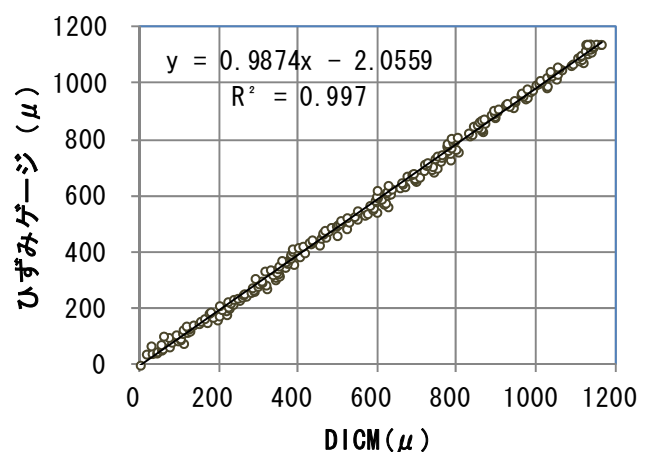


図 3.2.12 計測結果 (30mm)

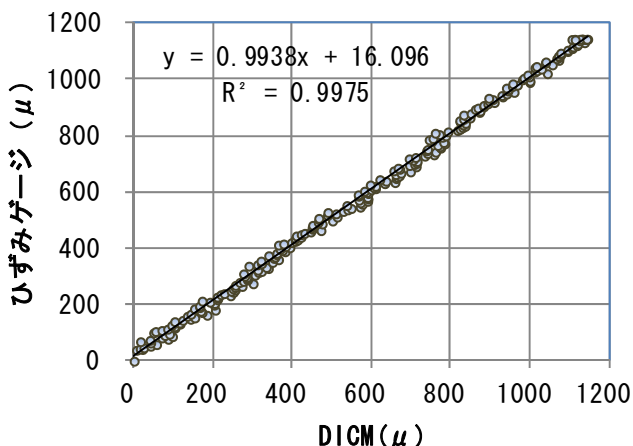


図 3.2.13 計測結果 (60mm)

表 3.2.6 ひずみ値の比較

ゲージ長	5mm	30mm	60mm
解析ゲージ長 (pixel)	67	400	800
標準偏差 (μ)	23	13	12
平均誤差 (μ)	27	16	17
最大誤差 (μ)	109	63	53

3.2.4 コンクリート部材を用いたひずみ計測精度の検証

(1) 試験概要

コンクリートは、セメント、水、細骨材、粗骨材などで構成された不均一材料である。このことから、コンクリートのひずみ計測においては、最大粗骨材寸法の3倍以上の長さのひずみゲージを使用することが推奨されている。ここでは、コンクリート部材に DICM を適用した場合のひずみ計測精度の検証を行った。試験では、試験体寸法 100×100×400(mm)の無筋コンクリート試験体を3体用い、一軸圧縮試験を行い、ひずみゲージと DICM によりひずみ計測を実施した。

試験では、試験体中央部表面にゲージ長 60mm のひずみゲージを貼付し、ゲージを貼付した面を DICM により計測した。DICM の計測面には、白色のスプレーで下地を塗布し、後に黒色のスプレーでランダムパターンを設けた。そして、スプレーを乾燥させた後に一軸圧縮試験を実施した。試験体概要を図 3.2.14 に、試験体ランダムパターンを写真 3.2.9 にそれぞれ示す。

計測条件として、試験体から2つの CCD カメラの中心位置までの距離を 620mm、カメラ間の距離を 155mm とした。また、計測時には、白熱灯を2つ使用した。なお、本条件下で計測した画像解像度は、約 0.146mm/pixel で構成される。このことから、ゲージ長手方向において 60mm ゲージは、約 410pixel で構成される。

載荷速度は 2kN/s とし、ひずみゲージと DICM を 1 秒間隔で計測し、ひずみゲージ値が約 1000 μ に達した時点で計測を終了した。計測状況を写真 3.2.10 に示す。

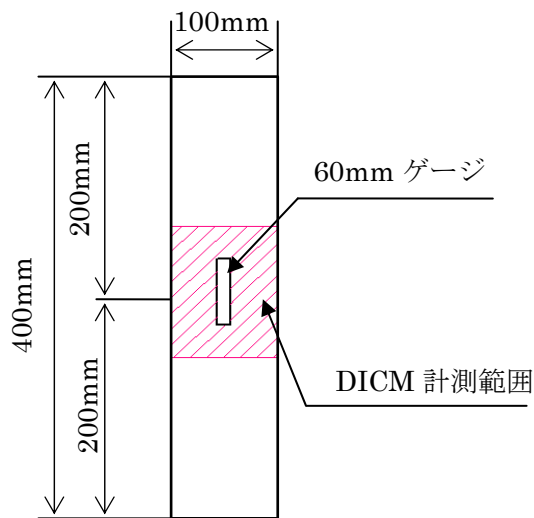


図 3.2.14 試験体

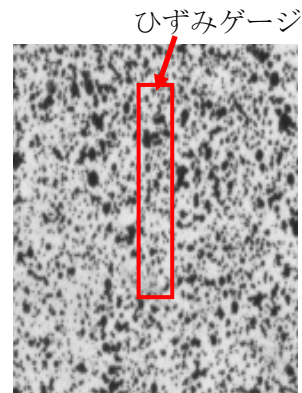


写真 3.2.9 ランダムパターン

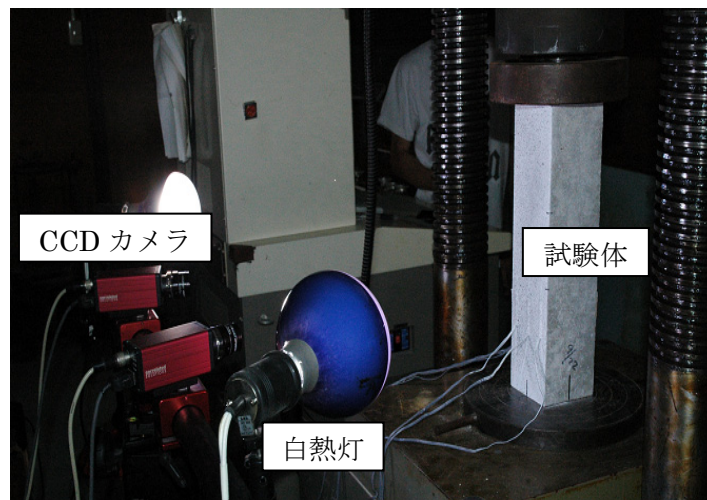


写真 3.2.10 計測状況

(2) 計測結果

DICM とひずみゲージの計測値を図 3.2.15～図 3.2.17 に示す。また、DICM とひずみゲージの計測値の標準偏差, 平均誤差および最大誤差を表 3.2.7 に示す。図より回帰直線の傾きは 0.969～0.983, 相関係数(R^2)は 0.996～0.997 と 3 試験体においてほぼ同じ値を示した。また, 表中の標準偏差, 平均誤差および最大誤差においても同じ値を示した。つまり, 3 試験体において同精度で計測ができていることが確認できた。

本試験の 60mm ゲージは約 410pixel で構成されている。これは, 表 3.2.6 における鋼部材の 30mm ゲージを構成する pixel 数(400pixel)とほぼ同じ値である。それぞれを比較するとコンクリート部材と鋼部材の回帰直線の傾き, 相関係数(R^2), 標準偏差, 平均誤差および最大誤差は同じ値を示していることが確認できた。よって, 弾性域内においては, コンクリート部材と鋼部材は同等の精度で計測できることが確認された。

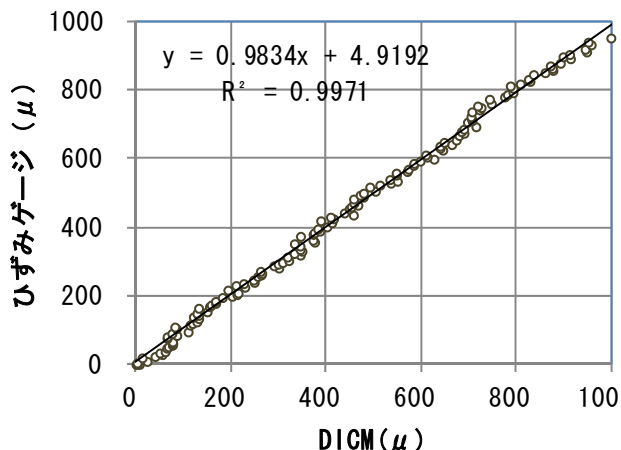


図 3.2.15 計測結果 (No.1)

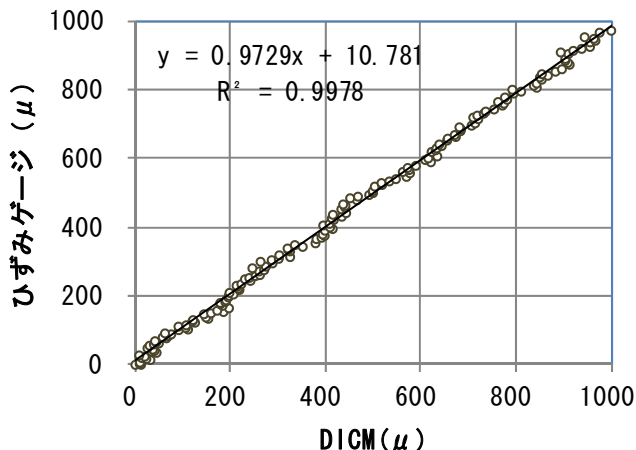


図 3.2.16 計測結果 (No.2)

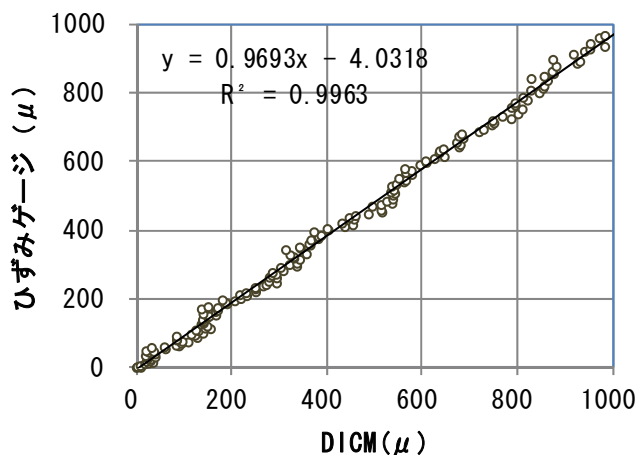


図 3.2.17 計測結果 (No.3)

表 3.2.7 結果一覧

	No.1	No.2	No.3
解析ゲージ長(pixel)	410		
標準偏差 (μ)	11	10	16
平均誤差 (μ)	13	13	21
最大誤差 (μ)	59	41	76

3.2.4 アルミニウムを用いた塑性域のひずみ計測精度の検証

(1) 試験概要

DICM の塑性域におけるひずみ計測精度を確認するため、アルミニウム合金 5052 (静弾性係数 70kN/mm², 降伏強度 248N/mm², 伸び 6%) を用いて、一軸引張試験を行い、ひずみゲージと DICM によりひずみ計測を実施した。

試験では、試験体中央部にゲージ長 5mm のひずみゲージを貼付し、貼付した裏面を DICM により計測した。DICM の計測面には、白色のスプレーで下地を塗布し、後に黒色のスプレーでランダムパターンを設けた。そして、スプレーを乾燥させた後に一軸引張試験を実施した。試験中は、1 秒間隔でひずみゲージと DICM を計測した。試験はひずみゲージ値が約 15000μ に達した時点で計測を終了した。試験体概要図を図 3.2.18 に示す。なお、画像解像度は約 0.08mm/pixel で構成されることから 5mm ゲージは 62.5pixel で構成される。

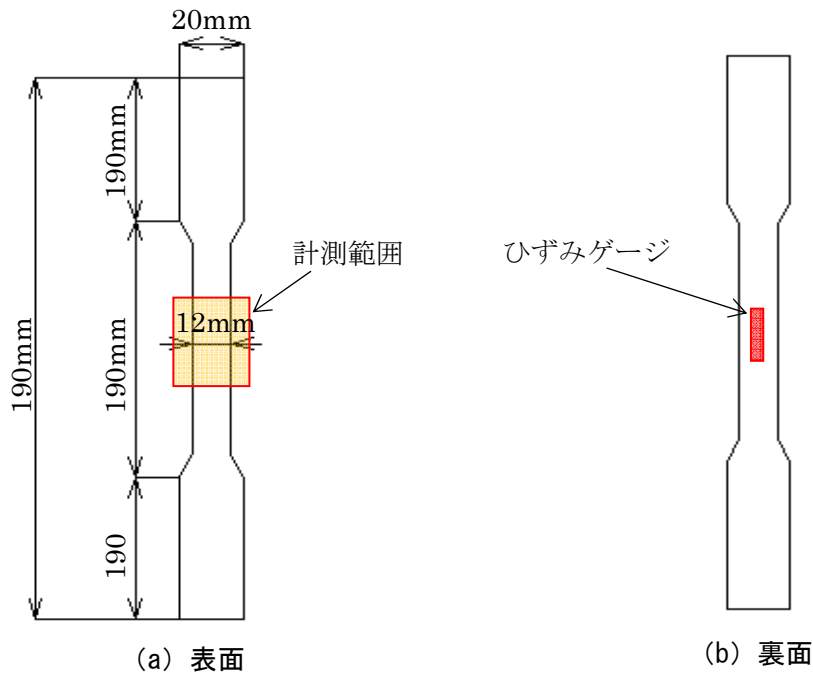


図 3.2.18 試験体概要図

(2) 試験結果

DICM とひずみゲージの計測値を図 3.2.19 に示す. 図 3.2.19(a) より弾性域から塑性域にかけて, ひずみゲージと DICM の計測値は一致していることが確認できる. 図 3.2.19(b) より, 回帰直線の傾きや相関係数(R^2)は 1 に近いことが確認できた. また, 標準偏差 62μ , 平均誤差 36μ および最大誤差 302μ となり高精度に計測できていることが確認できた. 以上から DICM は, 15000μ 以下のひずみに対しても高精度に計測できることが確認できた.

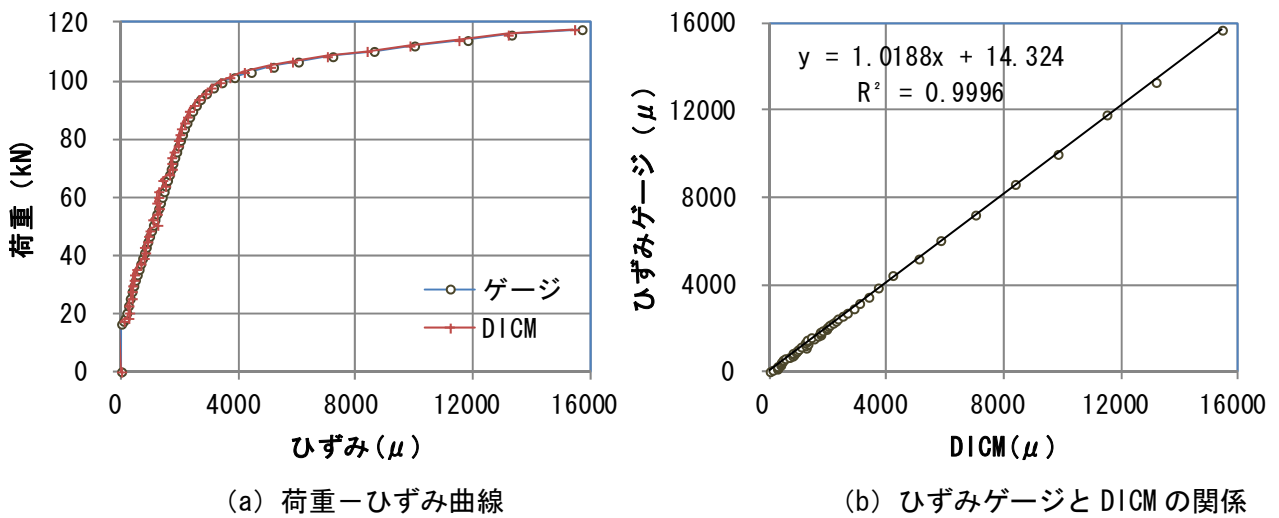


図 3.2.19 計測結果

3.3 計測条件がひずみ計測精度に与える影響

カメラ装置を用いた際の計測条件であるカメラ角度, シャッター速度, 画像解像度を变化させた場合のひずみの計測精度の影響について検討した.

3.3.1 試験概要

試験は, 長さ 400×断面 100×100×6×8 (mm) の H 鋼 (SS400) を用いて一軸圧縮試験を行い, ひずみゲージと DICM によりひずみ計測を実施した. ひずみゲージは図 3.3.1 に示すように, ゲージ長 5mm のひずみゲージを試験体表面に等間隔に 9 枚貼付し, ひずみゲージ貼付面の約 130mm×110mm の範囲を DICM により計測した. DICM の計測面には, 白色のスプレーで下地を塗布し, 後に黒色のスプレーでランダムパターン (写真 3.3.1) を設けた. そして, スプレーを乾燥させた後にした試験を実施した. 計測状況を写真 3.3.2 に示す. 計測は, 2 台の CCD カメラを用いて計測を行った. 計測時には, 白色発光ダイオード (白色 LED) ライトを 2 つ使用し, 試験体表面の明るさを一定に保つようにした.

計測条件の検討項目は, カメラ角度, シャッター速度, 画像解像度とした. 計測概要を表 3.3.1 に示す. 表中の角度, 距離 1, 距離 2 は図 3.3.2 の位置関係と対応している. 計測では, 無載荷時および図 3.3.1 の No.5 のひずみゲージ値がおよそ 25, 50, 75, 100, 250 および 500 μ 時に荷重を一定にして, 各段階においてひずみゲージと DICM でそれぞれ 50 回計測 (50 枚計測) を行った. 画像解析は, 無載荷時の一枚目の画像を初期画像として, 無載荷時の残りの画像 49 枚と各荷重段階の画像 50 枚に対して画像解析を行った. つまり, 349 枚 (49 枚 (無載荷時) + 50 枚×6 (25, 50, 75, 100, 250 および 500 μ 時)) の画像に対して画像解析を行うことになる.

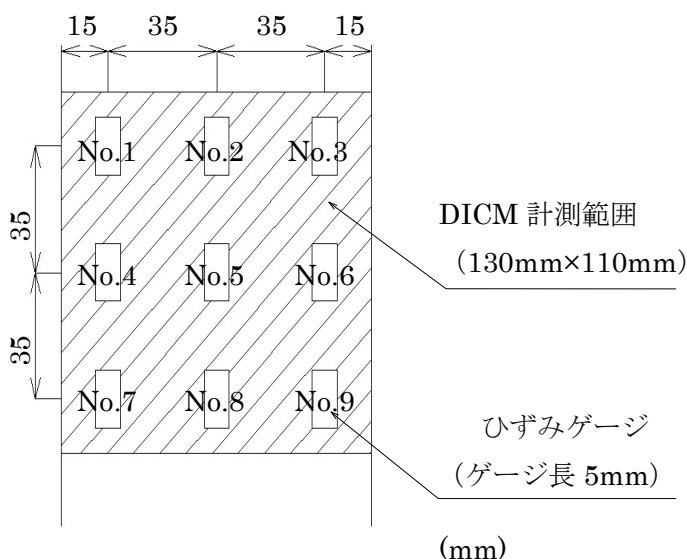


図 3.3.1 試験体

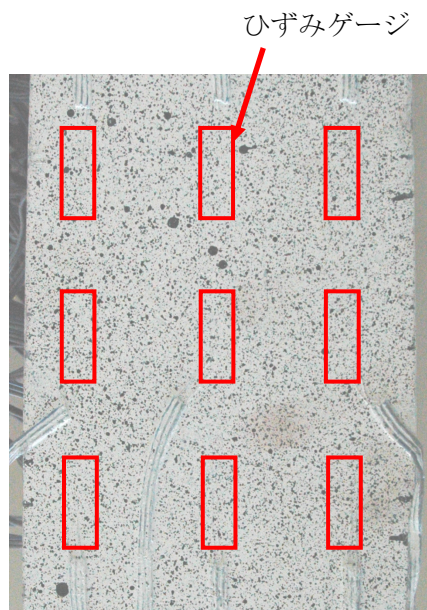


写真 3.3.1 試験体

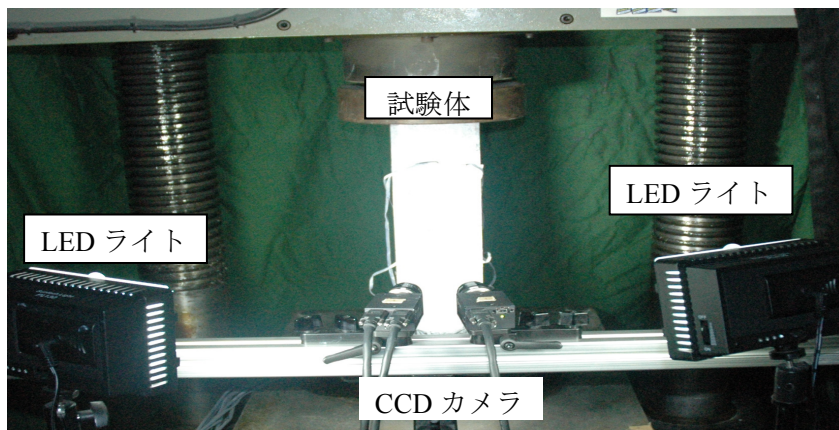


写真 3.3.2 計測状況

表 3.3.1 計測概要

ケース	項目	角度 (度)	距離 1 (mm)	距離 2 (mm)	シャッター 速度(ms)	画像解像度 (mm/pixel)
1-1	角度	60	316	327	25	0.056
1-2		75		169		0.056
1-3		83		80		0.055
2-1	シャッター 速度	75	316	169	5	0.056
2-2					25	0.056
2-3					50	0.056
3-1	画像解像度	75	316	169	25	0.056
3-2			632			0.117
3-3			1264			0.238
3-4			1896			0.365
3-5			2528			0.486

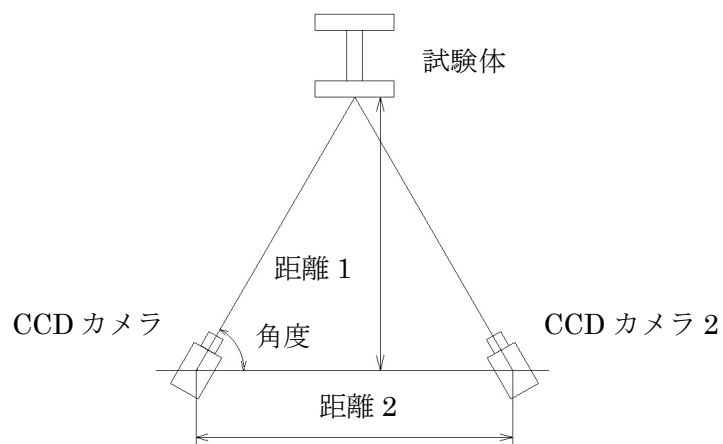


図 3.3.2 位置関係

3.3.2 試験結果

(1) 計測角度の影響

計測角度毎のゲージ番号 No.1～No.9 の標準偏差，誤差および最大誤差の平均を表 3.3.2 に示す。表より，計測角度 60° ～83° の範囲内において計測結果に大きな変化は確認されなかった。

表 3.3.2 計測角度

ケース	1-1	1-2	1-3
角度 (°)	60	75	83
標準偏差 (μ)	58	60	61
誤差 (μ)	14	15	15
最大誤差 (μ)	233	230	240

(2) シャッター速度の影響

シャッター速度毎のゲージ番号 No.1～No.9 の標準偏差，誤差および最大誤差の平均を表 3.3.3 に示す。表よりシャッター速度を低下させることにより標準偏差，誤差および最大誤差の減少が確認され，計測精度が向上した。原因としては，シャッター速度を遅くしたことにより，画像の輝度値のばらつきが低下したためと考えられる。

表 3.3.3 シャッター速度

ケース	2-1	2-2	2-3
速度 (ms)	5	25	50
標準偏差 (μ)	67	60	48
平均誤差 (μ)	20	15	6
最大誤差 (μ)	256	230	173

(3) 画像解像度の影響

画像解像度毎のゲージ番号 No.1～No.9 の標準偏差，誤差および最大誤差の平均を表 3.3.4 に示す。表より，画像解像度を低下させると標準偏差は 316μ から 2528μ，平均誤差 15μ から 266μ，最大誤差は 230μ から 951μ と増加した。このことから，画像解像度を向上させること，拡大して計測することにより，ひずみ計測精度の向上が期待できる。

表 3.3.4 画像解像度

ケース	基本	3-1	3-2	3-3	3-4
画像解像度 (mm/pixel)	0.056	0.117	0.238	0.365	0.486
計測距離 (mm)	316	632	1264	1896	2528
標準偏差 (μ)	60	68	107	151	200
平均誤差 (μ)	15	120	149	227	266
最大誤差 (μ)	230	288	557	769	951

3.4 解析条件がひずみ計測精度に与える影響

連続的に計測した静止画像は一見すべて同じ画像に見えるが、画素レベルで分析すると、輝度値にはばらつきが確認される。これは、CMOS や CCD などのイメージセンサにおいて映像を光から電気信号に変換する際に発生・混在するノイズが主原因と考える。このノイズは、ひずみを算出する際に誤差として顕在化する。ここでは、解析条件を変化させた場合のひずみ計測精度を検討するとともに、画像ノイズの低減を行い、ひずみ計測精度の向上を試みた。

3.4.1 試験概要

試験は、長さ 400×断面 100×100×6×8 (mm) の H 鋼 (SS400) を用いて一軸圧縮試験を行い、ひずみゲージと DICM によりひずみ計測を実施した。前節と同様ひずみゲージは図 3.3.1 に示すように、ゲージ長 5mm のひずみゲージを試験体表面に等間隔に 9 枚貼付し、ひずみゲージ貼付面の約 130mm×110mm の範囲を DICM により計測した。DICM の計測面には、白色のスプレーで下地を塗布し、次に下地の上から黒色のスプレーでランダムパターンを塗布した。そして、スプレーが乾燥した後に試験を実施した。計測状況は、写真 3.3.2 に示したものと同様である。計測時には、白色発光ダイオード (白色 LED) ライトを 2 つ使用し、試験体表面の明るさを一定に保つようにした。

解析概要を表 3.4.1 に示す。計測システムは、2 台の CCD カメラを用いて計測を行った。試験体とカメラ間の位置関係は、表 3.4.1 の基本ケースと同様とした。計測では、無載荷時および図 3.3.1 の No.5 のひずみゲージ値がおおよそ 25, 50, 75, 100, 250 および 500 μ 時に荷重を一定にして、各段階においてひずみゲージと DICM でそれぞれ 50 回計測 (50 枚計測) を行った。

解析条件の検討項目は、ケース 1 のサブセットの大きさとケース 2 の加算平均処理法とした。ケース 1 は、無載荷時の一枚目の画像を初期画像として、無載荷時の残りの画像 49 枚と各荷重段階の画像 50 枚に対して画像解析を行った。つまり、349 枚 (49 枚 (無載荷時) + 50 枚×6 (25, 50, 75, 100, 250 および 500 μ 時)) の画像に対して画像解析を行うことになる。

ケース 2 は、各荷重段階で計測した画像をそれぞれ 3 枚、10 枚および 50 枚ずつ加算平均処理法により結合させ、結合画像を用いて画像解析を行った。つまり、無載荷時の結合画像を初期画像として、6 荷重段階 (25, 50, 75, 100, 250 および 500 μ 時) の結合画像に対して画像解析を行うことになる。

表 3.4.1 解析概要

ケース	項目	サブセット (pixel)	画像解像度 (mm/pixel)	加算平均処理 (枚)
1-1	サブセット	30	0.056	—
1-2		50		
1-3		100		
2-1	加算平均処理	30		1
2-2				3
2-3				10
2-4				50

3.4.2 試験結果

(1) サブセットの大きさの影響

サブセット毎のゲージ番号 No.1~No.9 の標準偏差, 誤差および最大誤差の平均を表 3.4.2 に示す. 表よりサブセットを大きくすることにより標準偏差の減少が確認された. しかし, 平均誤差, 最大誤差に変化が確認されなかった. ケース 1-1(サブセット 30)とケース 1-3(サブセット 100)の No.1 のひずみゲージと DICM の計測値を図 3.4.3 と図 3.4.4 にそれぞれ示す. また, 回帰直線もあわせて示す. 図より各荷重段階においてひずみにばらつきが確認される. このばらつきが画像ノイズの影響であり, 計測精度を向上させるためにはこのノイズを低減・削除する必要がある. 図よりサブセットを大きくするとばらつきの範囲が狭くなること, 回帰直線の傾きや相関係数(R²)も 1 に近づくことが確認できた.

表 3.4.2 サブセット

ケース	1-1	1-2	1-3
サブセット (pixel)	30	50	100
標準偏差 (μ)	44	31	23
平均誤差 (μ)	97	72	86
最大誤差 (μ)	208	199	198

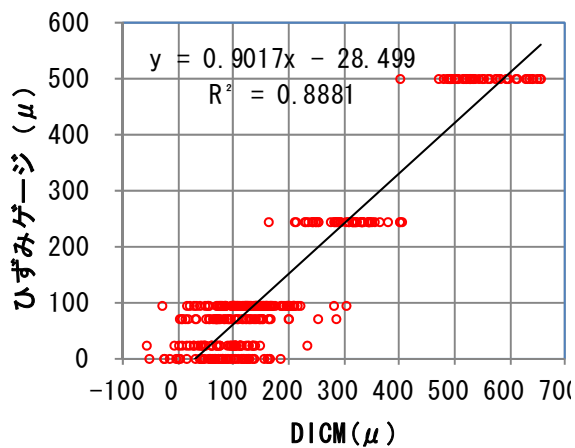


図 3.4.3 ケース 1-1(サブセット 30 No. 1)

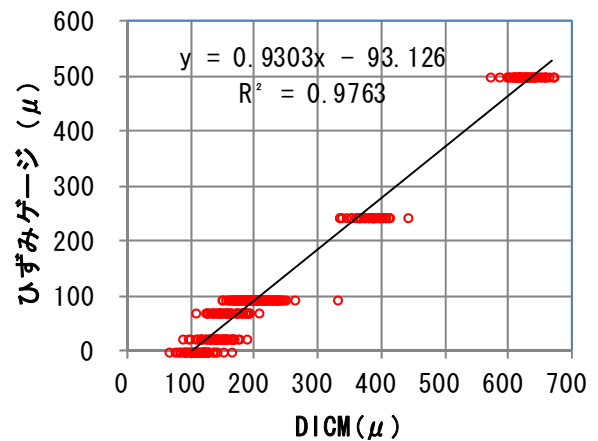


図 3.4.4 ケース 1-3(サブセット 100 No. 1)

(3) 加算平均処理の影響

加算平均処理毎のゲージ番号 No.1~No.9 の標準偏差, 誤差および最大誤差の平均を表 3.4.3 に示す. 表より加算枚数を増加させると, 標準偏差, 平均誤差, 最大誤差の低下が確認され計測精度が向上した.

ケース 2-4(加算枚数 50 枚)の No.1 のひずみゲージと DICM の計測値を図 3.4.5 に示す. また, 回帰直線も合わせて示す. 図より回帰直線の傾きや相関係数(R^2)も 1 に近く, 高精度に計測していることが確認できる.

表 3.4.3 加算平均処理

ケース	2-1	2-2	2-3	2-4
加算枚数 (枚)	1	3	10	50
標準偏差 (μ)	47	26	19	12
平均誤差 (μ)	74	36	25	16
最大誤差 (μ)	86	42	29	19

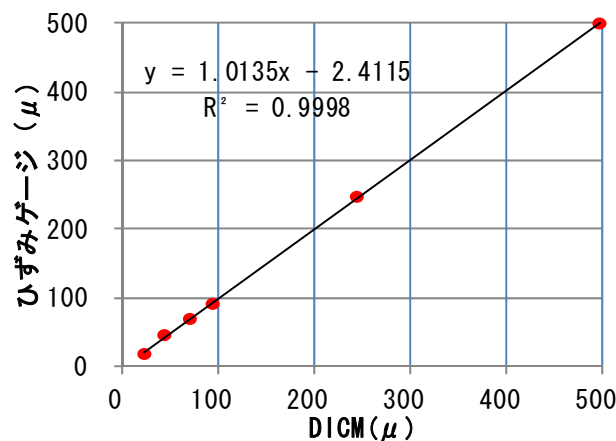


図 3.4.5 ケース 2-4(加算枚数 50 No. 1)

3.5 マルチロゼット解析法

DICM は，任意に解析ゲージ長を設定することができるが，3.2.3 項で述べたように解析ゲージ長が短い場合，ひずみ値がばらつく傾向を示す．そのため円孔の応力集中部のような微小領域の計測では解析誤差が大きくなり有効な方法ではない．しかしながら，円孔の中心点から点対称となる2点間の距離変化率を利用する手法では，2点間距離を大きくすることができ，誤差が小さくなる．さらに，誤差をできるだけ小さくするために2点間の距離変化率を利用してロゼット解析を複数回行うことで，その誤差を平均化することができる．以下にマルチロゼット解析の手順を示す．

- ① 図 3.5.1 に示すように円孔の中心点を中心とし，同心円状に解析点を配置する．例えば，図 3.5.1 の場合は 64 点（64 分割）配置している．
- ② 点対称になる 2 点の解析点の移動量を DCIM で求め，2 点間の距離変化率を計算する．
- ③ ① で求めた距離変化率の内， 0° ， 45° ， 90° の角度に位置する計算結果（図 3.5.1 に示す 1 と 33，9 と 41，17 と 49 の組み合わせ）を用いてロゼット解析を行い，この組み合わせの時の最大，最小の距離変化率と方向を求める．（シングルロゼット解析）
- ④ その後，組み合わせを変えてロゼット解析を行う．図 3.5.1 の場合は，組み合わせの総数は 32 通りあり，その平均値を求め，この同心円における距離変化率の最大，最小値および方向とする．（マルチロゼット解析）

なお，同心円の径を変えることで円孔近傍から外側に向かっての分布評価が可能となる．

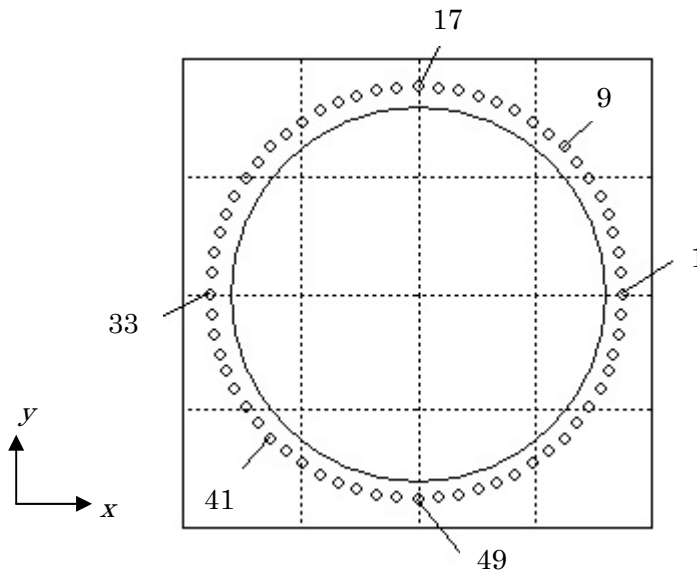


図 3.5.1 解析点

3.5.1 試験概要

マルチロゼット解析の計測精度を確認するため、有孔板の引張試験を行った。試験体概要を図 3.5.2 に示す。試験体の寸法は 150mm×400mm、板厚 2.3mm の SS400 材である。試験体の上下端には、引張試験機に取り付けるため、円孔をそれぞれ 5 つ設けている。試験体は、中央付近に均一な引張ひずみを生じさせるため平行部の幅を上下端の半分の 75mm とし、試験体中央部に直径 15mm の円孔を設けた。この試験体を引張試験機に固定して、一軸引張試験を行った。荷重は荷重制御とし、荷重が 2.00kN となるように荷重し、その荷重に達すると荷重を一定に保ち、計測を行った。DICM 計測のため、試験体の表面に、白色のスプレーで下地を塗布し、下地の上から黒色のスプレーでランダムパターンを塗布して階調値に変化を与えた(写真 3.5.1)。計測は、2 台の CCD カメラを用いた。計測の位置関係として、2 台のカメラの中心から試験体までの距離を約 575mm とし、シャッター速度は 25ms とした。この条件下では、画像解析度は約 0.032mm/pixel であるため、例えばゲージ長 5mm のひずみゲージは、約 156pixel で構成されることになる。また、試験体表面の明るさを一定に保つため、LED ライトを 2 台使用した。計測状況を写真 3.5.2 に示す。

計測は、無荷重時および各荷重において CCD カメラで 1 枚ずつ計測を行った。ひずみの算出は、無荷重時の画像を初期画像とし、荷重後の変形画像を DICM によるシングルロゼット解析、マルチロゼット解析を行い、最大主ひずみ、最小主ひずみ、主ひずみ方向の角度を算出した。なお、画像解析のサブセットは 30pixel とした。解析では、円孔中心より 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 20 および 30mm の位置に解析点を 64 点ずつ設け、ひずみの算出を行った。

シングルロゼット解析、マルチロゼット解析の計測値の比較・検討するために、FEM 解析を行った。解析には、汎用有限要素解析ソフト MSC.Marc2010 を使用した。解析に先立ち、試験体の静弾性係数とポアソン比を把握するために、JIS Z 2201 13 号試験体による引張試験を行った。試験体形状は、長さ 190mm×幅 20mm、板厚 2.3mm、平行部の長さ 50mm×幅 12.5mm である。中央にひずみゲージを貼付し、一軸引張試験を行い、静弾性係数とポアソン比を求めた。ここで得られた静弾性係数 200GPa、ポアソン比 0.3 を FEM 解析に用いた。

解析モデルの全体図および円孔付近拡大図をそれぞれ図 3.5.3(a), (b) に示す。解析モデルは、図 3.5.2 に示す試験体の平行部である 180mm×75mm のみをモデル化した。なお、要素数は 3420 である。解析モデルに使用した要素は、四節点平面応力要素を用い、要素メッシュは、円孔中心とする放射状に分割した。なお、計測点と同位置に要素節点を配置させている。荷重は荷重制御とし、試験と同じ荷重値である 2.00kN とした。ひずみの算出は、荷重前後の節点の変位を同心円状に算出した。つまり、FEM によるマルチロゼット解析を行うことにより、最大主ひずみ、最小主ひずみおよび主ひずみ方向の角度を求めた。なお、解析モデルの妥当性は、事前に試験体にひずみゲージを貼付し、荷重試験を行った結果と比較を行うことにより、検証を行っている。メッシュ分割についても同様に、事前解析により、結果に影響がない分割数を選定している。

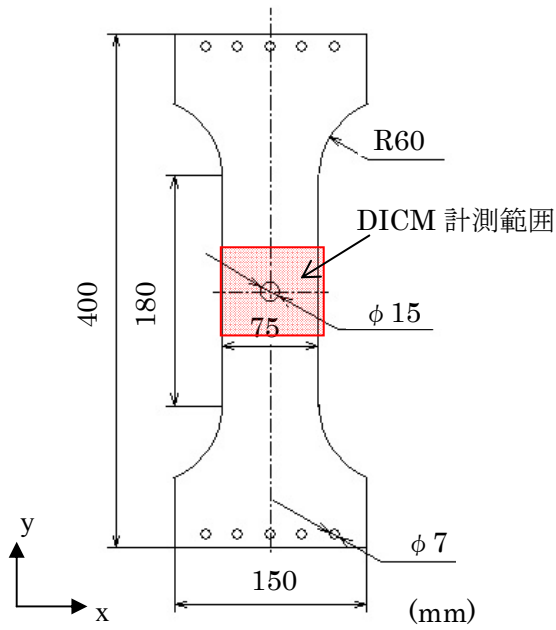


図 3.5.2 試験体

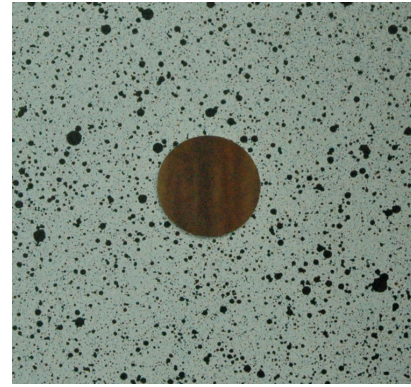


写真 3.5.1 ランダムパターン

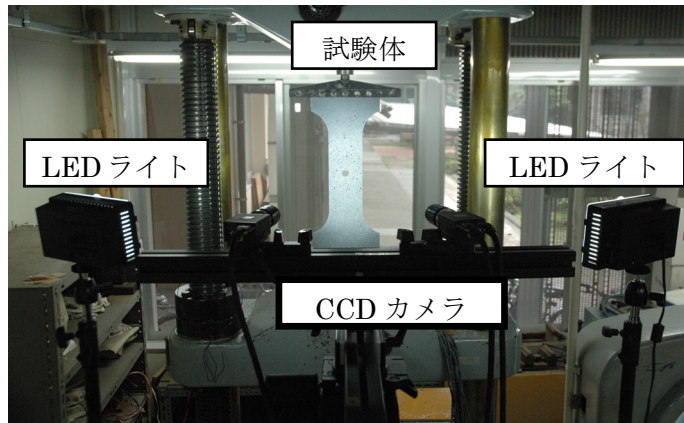
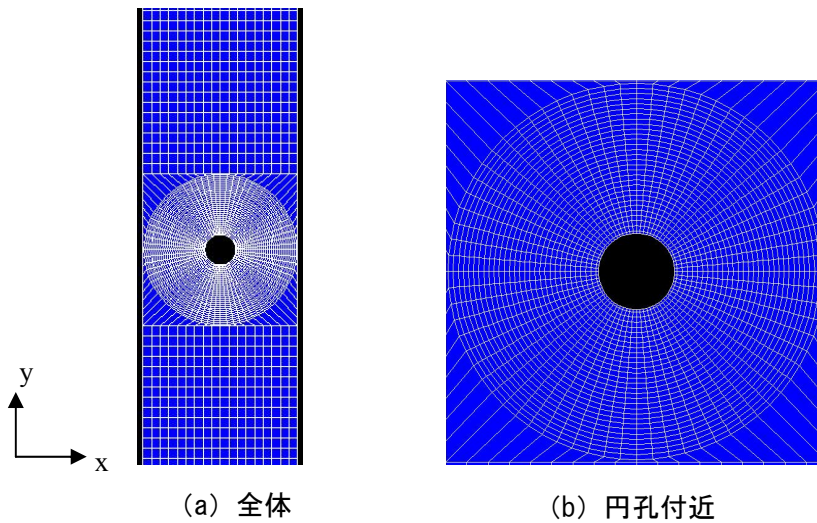


写真 3.5.2 計測状況



(a) 全体

(b) 円孔付近

図 3.5.3 解析モデル

3.5.2 試験結果

FEM と DICM (シングルロゼット, マルチロゼット) の円近傍からの最大主ひずみ, 最小主ひずみの推移を図 3.5.4, 図 3.5.5 にそれぞれ示す. また, 標準偏差, 誤差および最大誤差を表 3.5.1 に示す. 図 3.5.4, 図 3.5.5 より円孔近傍のひずみ値が大きく円孔から離れるにつれてその値が小さくなっていった. シングルロゼットは, マルチロゼットと比較して乱れる結果となった. 表より, マルチロゼット解析を行うことで標準偏差, 誤差および最大誤差が低下することが確認された. 特に最大誤差の低下が大きいことが確認された.

FEM と DICM (シングルロゼット, マルチロゼット) の円近傍からの最大主ひずみ方向の角度の推移を図 3.5.6 に示す. 図 3.5.6 より, 円孔近傍から約 30mm の範囲ではほぼ一定の値が確認された. また, FEM と比較してシングルロゼットは, 約 0.27° , マルチロゼットは約 0.03 の誤差が確認された. 以上から, DICM によるマルチロゼット解析は, 高精度な計測が可能であることが確認できた.

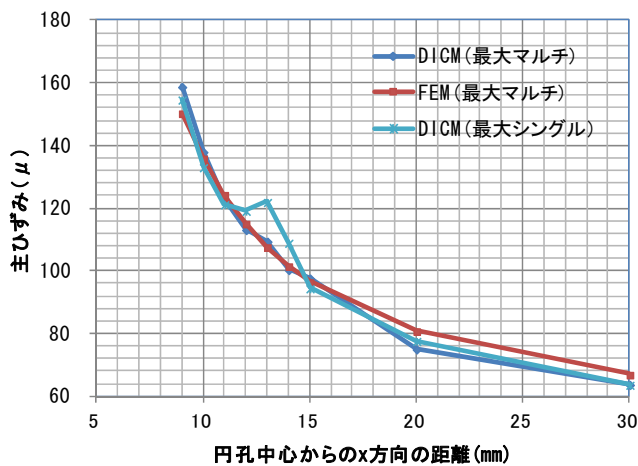


図 3.5.4 最大主ひずみの比較

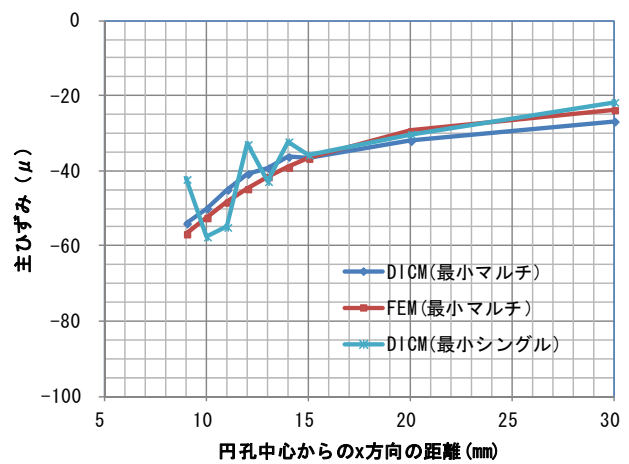


図 3.5.5 最小主ひずみの比較

表 3.5.1 結果一覧

項目	最大主ひずみ		最小主ひずみ	
	シングル	マルチ	シングル	マルチ
標準偏差 (μ)	3.9	2.5	5.0	1.0
誤差 (μ)	4.9	3.0	5.6	2.7
誤差 (%)	4.7	2.9	12.3	6.9
最大誤差 (μ)	14.4	8.5	14.6	4.0

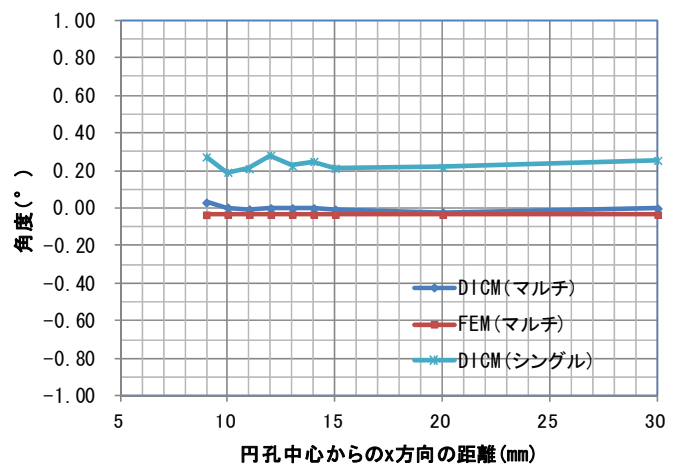


図 3.5.6 最大主ひずみ方向角度の比較

3.6 スキャナ装置 A

鋼部材およびコンクリート部材を用いてスキャナ装置 A のひずみ計測精度の検証を行った。ひずみは、無載荷時に計測した画像を初期画像として、各荷重段階に計測した変形画像を DICM により算出した。

3.6.1 鋼部材を用いたひずみ計測精度の検証

(1) 試験概要

スキャナ装置 A のひずみ計測精度を確認するために、材質が均等である鋼材（H 鋼：H150×150×500mm）を用い、ひずみを発生させ、各ひずみにおける計測精度を結果の直線性や誤差・標準偏差から評価した。鋼材表面には、ゲージ長が異なる 3 種類のひずみゲージを貼付し、その上からエアブラシを用いて解析用のランダムパターンを設けた。

スキャナ装置 A により計測したひずみ値の精度検証においては、試験体表面に貼付したひずみゲージにより計測したひずみ値と比較した。試験に使用したひずみゲージは、ゲージ長 10mm, 30mm および 60mm タイプである。ひずみゲージの貼付位置を図 3.6.1 に示す。試験では、圧縮試験機により鉛直方向に一軸載荷し、ひずみゲージ値によりひずみを 0μ , 200μ , 400μ , 600μ , 800μ および 1000μ と変化させた。各ひずみにおいてスキャニングを行い、全てのスキャニング終了後、除荷し、同じ計測を 5 回繰り返した。試験では、スキャナ装置を試験体に対し縦方向（主走査方向が荷重に対して水平方向）に設置した。スキャナ装置 A の解像度は 1200dpi であるため、10mm, 30mm および 60mm ゲージはそれぞれ 476, 1429 および 2857pixel で構成されることになる。

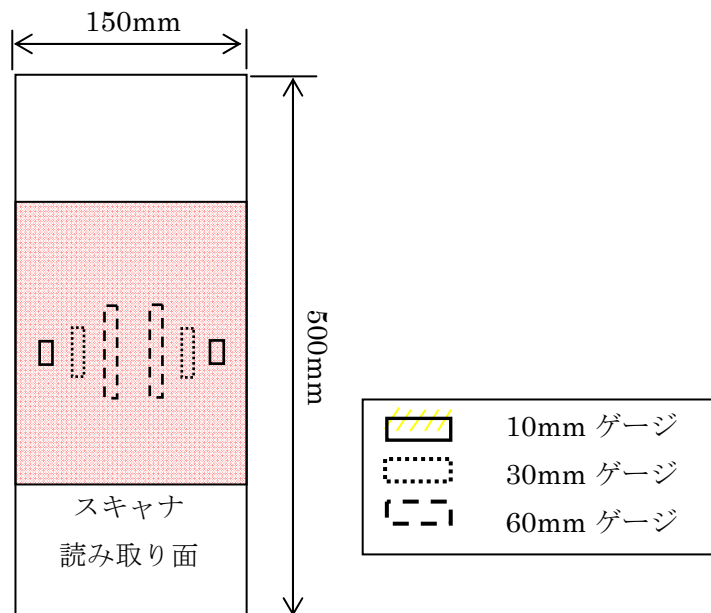


図 3.6.1 試験体

(2) 試験結果

10mm, 30mm および 60mm ゲージを使用し、ゲージ上を直接計測する試験を行った結果を、左右のゲージ別に表 3.6.1~表 3.6.3 に示す。また、それぞれの回帰直線と 5 回の計測値の平均値をプロットした図を図 3.6.2~図 3.6.4 に示す。

試験結果より、60mm ゲージの計測結果が最も精度が良く、ひずみゲージとスキャナによる計測値の平均値と比較すると、その誤差は最大でも 5 μ であった。各ひずみレベルにおける誤差の平均は 2 μ であった。なお、同一ひずみレベルにおけるスキャナによる 5 回の計測値の標準偏差は 23 μ 以下と高い再現性を示した。10mm および 30mm ゲージ上での計測結果は、ひずみゲージとの誤差の平均が、それぞれ 13 μ および 4 μ となり、60mm ゲージ上と比較すると計測精度は若干低下したが、精度よく計測できた。

表 3.6.1 計測結果 (10mm) 単位 : μ

10mm ゲージ		右					左					平均	標準偏差	誤差	%
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5				
0 μ	ゲージ	2	0	0	1	1	0	-1	1	1	0	1			
	スキャナ	-1	-8	-9	-1	-4	1	-5	-6	-2	-3	-4	3	5	-
200 μ	ゲージ	203	200	203	205	194	195	200	197	197	201	200			
	スキャナ	264	208	254	217	217	233	177	172	156	164	206	36	7	3.5
400 μ	ゲージ	392	383	393	395	378	400	417	409	407	417	399			
	スキャナ	401	363	372	435	354	378	501	508	327	510	415	66	16	4.0
600 μ	ゲージ	589	578	587	594	573	604	622	611	610	624	599			
	スキャナ	623	620	659	545	526	715	541	552	674	750	621	75	21	3.5
800 μ	ゲージ	794	782	790	792	775	804	824	810	807	824	800			
	スキャナ	880	720	729	851	843	695	837	743	850	772	792	64	8	1.0
1000 μ	ゲージ	998	983	994	998	978	1002	1019	1007	1004	1022	1001			
	スキャナ	990	1028	1052	921	892	1141	920	991	906	976	982	73	19	1.9
平均												53	13	2.8	

表 3.6.2 計測結果 (30mm) 単位 : μ

30mm ゲージ		右					左					平均	標準偏差	誤差	%
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5				
0 μ	ゲージ	0	-1	2	3	2	0	-1	1	0	0	1			
	スキャナ	-3	-6	1	-1	-4	1	-6	-4	1	-5	-3	3	4	-
200 μ	ゲージ	206	204	208	206	204	194	199	196	198	197	201			
	スキャナ	228	180	241	190	211	216	167	200	157	176	197	26	5	2.5
400 μ	ゲージ	398	396	400	399	394	399	409	405	404	407	401			
	スキャナ	392	393	369	413	373	383	425	440	357	450	400	30	2	0.5
600 μ	ゲージ	600	592	597	598	592	600	612	607	606	613	602			
	スキャナ	598	580	595	589	557	615	618	568	617	627	596	22	5	0.8
800 μ	ゲージ	801	793	795	795	788	800	815	803	802	811	800			
	スキャナ	781	788	797	786	767	820	808	783	814	843	799	21	2	0.3
1000 μ	ゲージ	1001	987	991	993	984	1000	1011	1002	1001	1010	998			
	スキャナ	1033	951	956	1020	1017	996	1001	1047	963	970	995	32	3	0.3
平均												22	4	0.8	

表 3.6.3 計測結果 (60mm) 単位: μ

60mm ゲージ		右					左					平均	標準偏差	誤差	%	
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5					
0 μ	ゲージ	-1	-2	1	0	1	0	0	0	0	1	0				
	スキャナ	-1	-1	-2	-4	-3	-2	-1	-2	1	-4	-2	1	2	-	
200 μ	ゲージ	204	203	203	205	199	198	200	198	200	199	201				
	スキャナ	233	170	226	183	203	218	169	216	172	195	199	23	2	1.0	
400 μ	ゲージ	400	400	403	403	396	400	405	403	402	403	402				
	スキャナ	401	388	395	403	390	402	391	395	407	391	396	6	5	1.2	
600 μ	ゲージ	604	598	601	603	596	603	605	602	602	605	602				
	スキャナ	572	620	610	603	608	573	617	612	589	613	602	17	0	0.0	
800 μ	ゲージ	806	802	800	803	795	800	806	799	800	804	802				
	スキャナ	799	824	808	785	783	824	813	820	781	788	803	17	1	0.1	
1000 μ	ゲージ	1010	1002	1005	1005	998	1003	1003	999	998	1003	1003				
	スキャナ	1003	996	1002	1011	1003	994	976	997	1005	1010	1000	10	3	0.3	
平均												12	2	0.5		

表 3.6.4 結果一覧

	10mm ゲージ	30mm ゲージ	60mm ゲージ
標準偏差	53	22	12
平均誤差 (μ)	13	4	2
平均誤差 (%)	2.8	0.8	0.5
最大誤差 (μ)	21	5	5

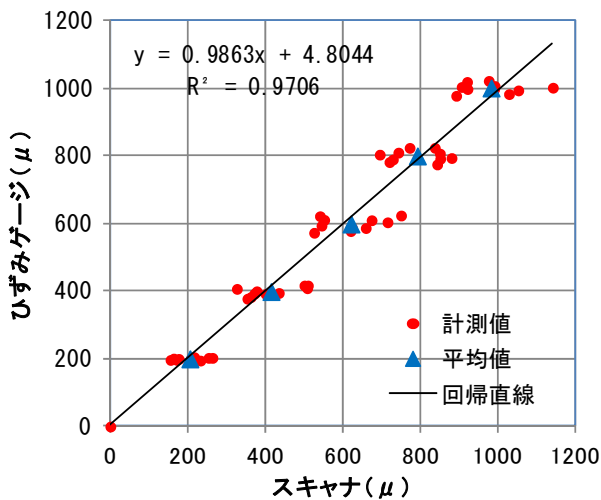


図 3.6.2 計測結果 (10mm)

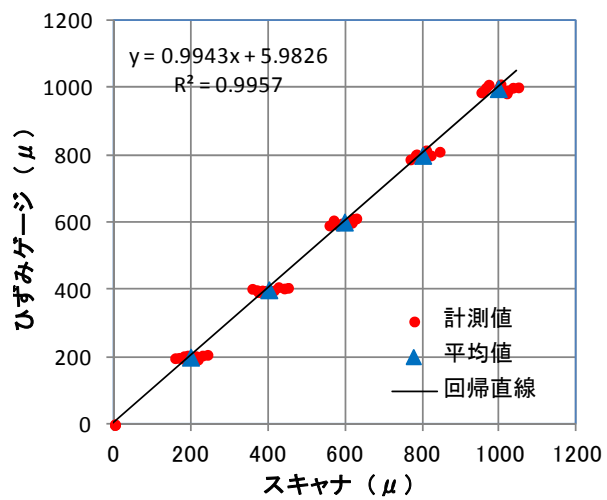


図 3.6.3 計測結果 (30mm)

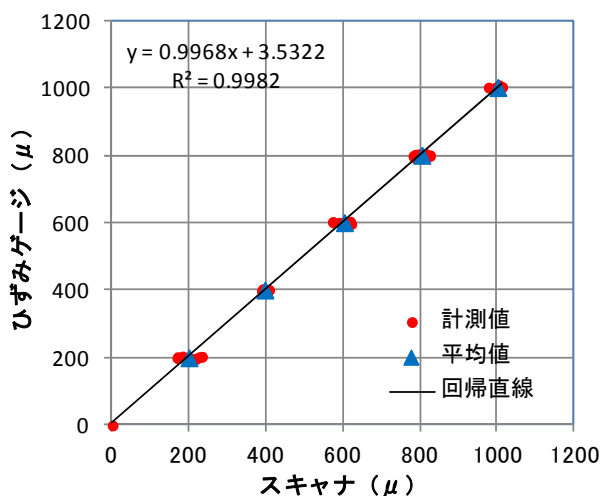


図 3.6.4 計測結果 (60mm)

3.6.2 コンクリート部材を用いたひずみ計測精度の検証

(1) 試験概要

試験ではコンクリート材料におけるひずみ計測精度を検証するために、無筋コンクリート角柱（断面 370×240mm, 長さ 460mm）を用い、ひずみを発生させ、各ひずみにおける計測精度を結果の誤差・標準偏差から評価した。ここでは、回転盤により主走査方向を主ひずみ方向とポアソン方向に回転させてひずみ計測を行った。コンクリート表面には、ひずみゲージを貼付し、その上から白と黒のスプレーで解析用のランダムパターンを設けた。試験体の端面（上下面）の研磨仕上げの精度や圧縮試験機ヘッドの微妙な偏心により、左右のひずみゲージにひずみ差を生じるため、端面に石膏を塗りその上から金属板を接着することで試験体にかかる荷重が全体でほぼ同等となるよう調整した。

スキャナ装置により計測したひずみ値の精度検証においては、試験体表面に貼付したひずみゲージにより計測したひずみ値と比較した。試験に使用したひずみゲージは、ゲージ長 30mm タイプである。ひずみゲージは、スキャナ装置を縦向きおよび横置きに設置したときのスキャンングによって取得できる画像の重なる位置の中心部に 2 箇所、その四つ角にそれぞれ 2 箇所ずつ取り付けた。ひずみゲージの配置図、スキャナによる読み取り範囲を図 3.6.5 に示す。

試験では、圧縮試験機により鉛直方向に一軸荷重し、試験体中央鉛直方向のひずみゲージ値によりひずみを 0μ, 100μ, 200μ, 300μ, 400μ および 500μ と変化させた。各ひずみにおいてスキャンングを行い、全てのスキャンング終了後、除荷し、同じ計測を 5 回繰り返した。

写真 3.6.1 にパターン 1 とパターン 2 の計測状況を示す。パターン 1 では、スキャナ装置を試験体に対し縦方向（主走査方向が荷重に対して水平方向）に取り付け、段階的に荷重し取得した画像（No.1～5）の解析を行う。パターン 2 では、各荷重段階で主ひずみ方向の計測終了後、ラインセンサを横方向（主走査方向が荷重に対して直角方向）に回転させて、段階的に荷重し取得した画像（No.6～10）の解析を行うポアソン方向の計測を行った。スキャナ装置 A の解像度は 1200dpi であるため、10mm, 30mm および 60mm ゲージはそれぞれ 476, 1429 および 2857pixel で構成されることになる。

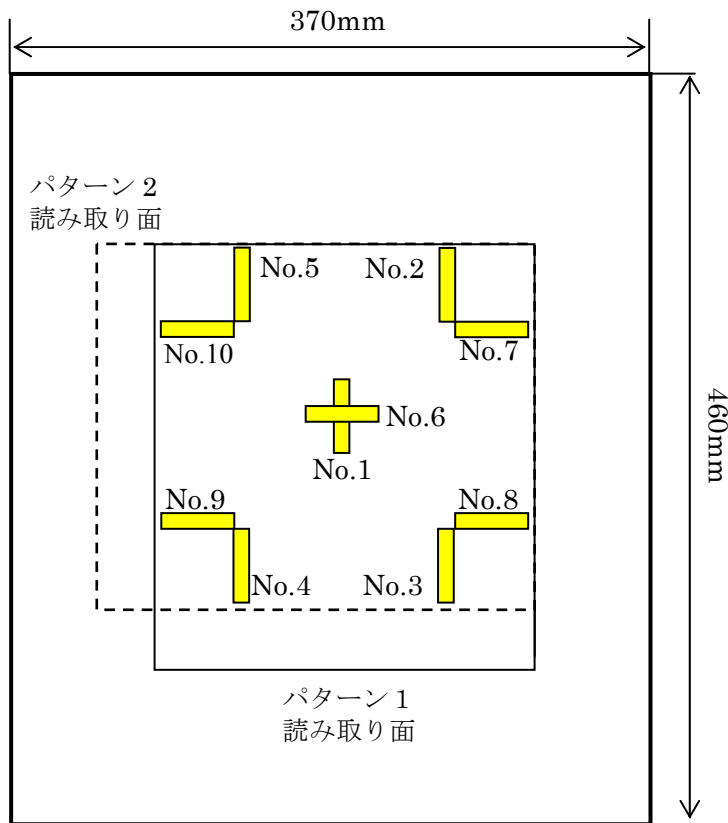


図 3.6.5 試験体

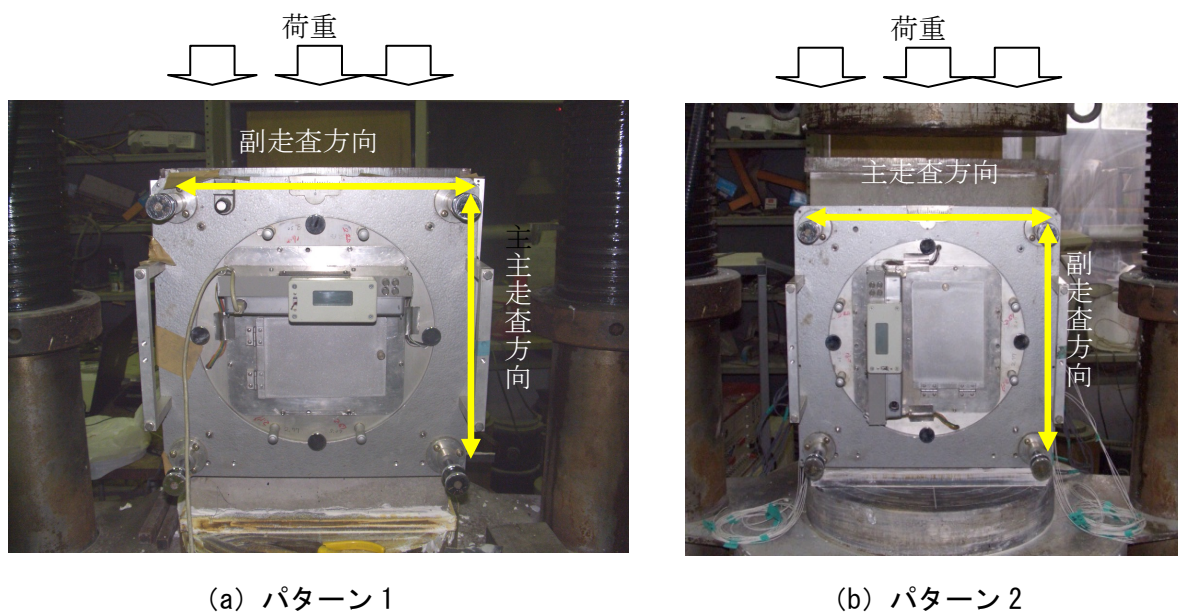


写真 3.6.1 計測状況

(2) 試験結果

No.1~No.10 ひずみゲージとスキャナ装置により得られた5回のひずみ計測値の平均値, 標準偏差および誤差を表3.6.5~3.6.14に示す. 表3.6.15にスキャナ装置とひずみゲージNo.1~No.10における全荷重ステップの標準偏差と誤差の平均値を示す.

主ひずみ方向の計測では, スキャナ装置とひずみゲージの計測値を比較すると, 標準偏差の平均は 7μ ~ 16μ , 誤差の平均は 11μ ~ 20μ となった. ポアソン方向の計測では, スキャナ装置とひずみゲージ値を比較すると, 標準偏差の平均は 9μ ~ 29μ , 誤差の平均は 3μ ~ 12μ となった.

主ひずみ方向とポアソン方向において計測値とひずみゲージ値を比較すると, 多少ひずみゲージに対する標準偏差や誤差のばらつきが確認できるがほぼ同等の計測精度が得られている. なお, ポアソン方向では, 主ひずみ方向と比較すると小さな値を計測したことになる. つまり, スキャナ装置は, 低ひずみ領域においても高精度にひずみ計測が可能なが分かる.

コンクリート部材の結果は, 計測面全域において高精度にひずみ計測が可能ながこと, それは, ラインセンサスキャナを回転して計測してもほぼ同様の計測精度であることが確認できた.

表 3.6.5 No.1 計測結果 (5回平均) 単位: μ

荷重ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	102	92	5	10	9.6
200	201	194	9	8	3.7
300	302	327	16	25	8.1
400	401	417	14	16	4.0
500	501	496	23	6	1.2
平均			13	13	5.3

表 3.6.6 No.2 計測結果 (5回平均) 単位: μ

荷重ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	114	120	8	6	5.5
200	232	240	7	8	3.4
300	349	349	10	0	0.0
400	460	486	9	25	5.5
500	574	606	10	32	5.6
平均			9	14	4.0

表 3.6.7 No.3 計測結果 (5回平均) 単位: μ

载荷ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	162	186	8	23	14.3
200	322	321	14	0	0.1
300	464	475	18	11	2.3
400	597	616	19	19	3.1
500	725	756	19	31	4.2
平均			16	17	4.8

表 3.6.8 No.4 計測結果 (5回平均) 単位: μ

载荷ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	73	78	7	6	7.7
200	155	179	7	25	15.9
300	241	260	8	19	7.7
400	328	356	8	29	8.7
500	417	441	7	24	5.7
平均			7	20	9.2

表 3.6.9 No.5 計測結果 (5回平均) 単位: μ

载荷ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	77	77	5	0	0.3
200	160	144	5	16	10.0
300	252	262	7	10	4.0
400	342	322	13	21	6.0
500	437	444	8	8	1.7
平均			8	11	4.4

表 3.6.10 No.6 計測結果 (5回平均) 単位: μ

载荷ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	20	20	6	0	0.5
200	46	42	6	4	9.3
300	70	74	13	4	5.9
400	94	89	17	5	5.7
500	118	111	8	7	5.8
平均			10	4	5.5

表 3.6.11 No.7 計測結果 (5回平均) 単位: μ

载荷ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	19	22	14	3	13.7
200	43	44	11	1	3.3
300	70	73	23	3	4.1
400	97	102	18	5	4.8
500	128	129	27	1	0.9
平均			19	3	5.4

表 3.6.12 No.8 計測結果 (5回平均) 単位: μ

载荷ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	39	48	16	9	22.8
200	84	71	18	13	15.2
300	123	107	25	16	13.3
400	159	172	32	13	8.0
500	195	186	31	10	4.9
平均			24	12	12.8

表 3.6.13 No.9 計測結果 (5回平均) 単位: μ

载荷ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	16	19	7	3	16.9
200	37	33	10	4	10.0
300	56	59	7	3	5.2
400	75	66	8	9	12.5
500	92	107	11	15	15.9
平均			9	7	12.1

表 3.6.14 No.10 計測結果 (5回平均) 単位: μ

载荷ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	11	18	24	7	59.1
200	27	35	22	8	30.7
300	40	49	34	9	22.3
400	55	56	29	1	1.8
500	68	75	37	7	10.6
平均			29	6	24.9

表 3.6.15 計測結果一覧 (No.1~No.10) 単位: μ

主ひずみ方向	標準偏差	誤差	誤差(%)	ポアソン方向	標準偏差	誤差	誤差(%)
No.1	13	13	5.3	No.6	10	4	5.5
No.2	9	14	4.0	No.7	19	3	5.4
No.3	16	17	4.8	No.8	24	12	12.8
No.4	7	20	9.2	No.9	9	7	12.1
No.5	8	11	4.4	No.10	29	6	24.9
平均	11	15	5.5	平均	18	6	12.1

3.7 スキャナ装置 B

コンクリート部材を用いてスキャナ装置 B のひずみ計測精度の検証を行った。ひずみは、無載荷時に計測した画像を初期画像として、各荷重段階に計測した変形画像を DICM により算出した。

3.7.1 コンクリート部材を用いたひずみ計測精度の検証

(1) 試験概要

本試験ではコンクリート材料におけるひずみ計測精度を検証するために、無筋コンクリート角柱（断面 370×240mm, 長さ 460mm）を用い、ひずみを発生させ、各ひずみにおける計測精度を結果の誤差・標準偏差から評価した。ここでは、スキャナ装置の主走査方向を主ひずみ方向に取り付けて主ひずみ方向とポアソン方向のひずみ計測を行った。

コンクリート表面には、ひずみゲージを貼付し、その上から白と黒のスプレーで解析用のランダムパターンを設けた。試験体の端面（上下面）の研磨仕上げの精度や圧縮試験機ヘッドの微妙な偏心により、左右のひずみゲージにひずみ差を生じるため、端面に石膏を塗りその上から金属板を接着することで試験体にかかる荷重が全体でほぼ同等となるよう調整した。

スキャナ装置により計測したひずみ値の精度検証においては、試験体表面に貼付したひずみゲージにより計測したひずみ値と比較した。試験に使用したひずみゲージは、ゲージ長 30mm タイプである。ひずみゲージは、スキャナ装置を縦向きおよび横置きに設置したときのスキャニングによって取得できる画像の重なる位置の中心部に 2 箇所、その四つ角にそれぞれ 2 箇所ずつ取り付けた。ひずみゲージの配置図、スキャナによる読み取り範囲を図 3.7.1 に示す。

試験では、圧縮試験機により鉛直方向に一軸載荷し、試験体中央鉛直方向のひずみゲージ値によりひずみを 0 μ , 100 μ , 200 μ , 300 μ , 400 μ および 500 μ と変化させた。各ひずみにおいてスキャニングを行い、全てのスキャニング終了後、除荷し、同じ計測を 5 回繰り返した。

写真 3.7.1 に計測状況を示す。試験では、スキャナ装置を試験体に対し縦方向（主走査方向が荷重に対して水平方向）に取り付け、段階的に載荷し取得した画像から主走査で主ひずみ方向に設置したひずみ (No.1~No.5) の解析を、副走査でポアソン方向のひずみ (No.6~No.10) の解析を行った。今回、スキャナ装置の解像度を 1200dpi としたため、各ゲージ長の標点間画素数は、1429pixel となる。

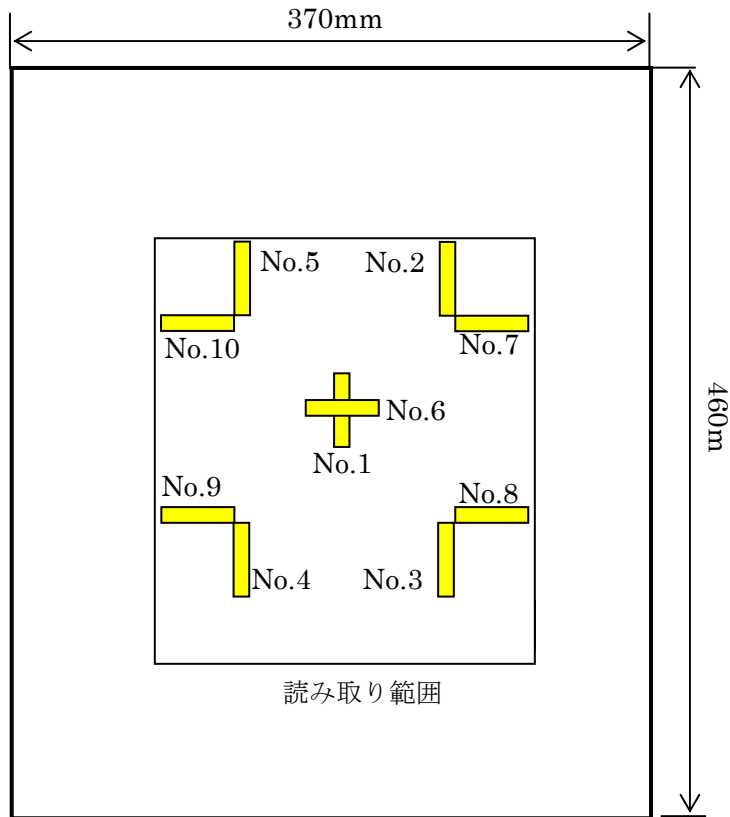


図 3.7.1 試験体

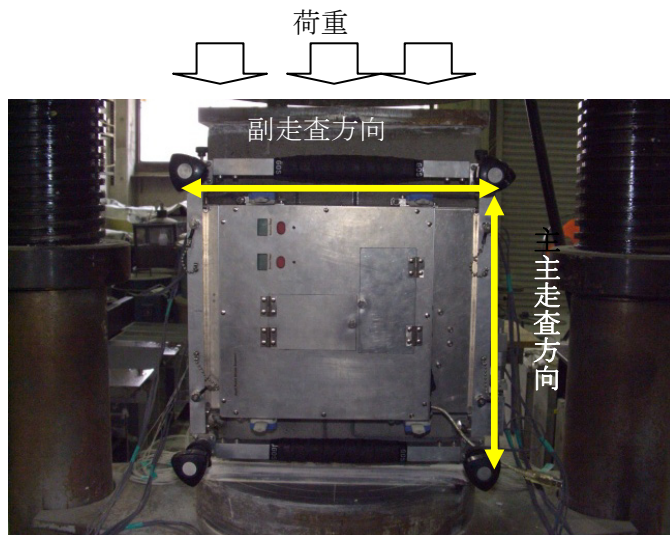


写真 3.7.1 計測状況

(2) 試験結果

・主走査方向

スキャナ装置を試験体に対し横向き（主走査方向が荷重に対し水平）に設置し、スキヤニングによって取得した画像において、鉛直方向の設置した5つのひずみゲージ（No.1～No.5）上を解析しひずみゲージ値と計測値を比較した。No.1～No.5 ひずみゲージとスキャナ装置により得られた5回のひずみ計測値の平均値、標準偏差および誤差を表3.7.1～表3.7.5に示す。また、計測結果一覧を表3.7.6に示す。

スキャナ装置とひずみゲージ値を比較すると、多少の計測値のひずみゲージに対する誤差や5回繰り返した試験の計測値のばらつきが確認できるが、これは圧縮試験装置の操作が難しく約5分のスキヤニング中に荷重を一定に保てなかったため取得した画像に影響が出たためであると考えられる。しかし、スキャナ装置とひずみゲージ値を比較すると、標準偏差の平均は6 μ ～29 μ 、誤差の平均は4 μ ～10 μ であり、高精度に計測できた。

表 3.7.1 No.1 計測結果 (5 回平均) 単位： μ

载荷ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	102	107	8	5	4.6
200	201	195	15	6	3.0
300	301	308	16	7	2.3
400	401	405	20	4	0.9
500	501	507	19	6	1.2
平均			15	6	2.4

表 3.7.2 No.2 計測結果 (5 回平均) 単位： μ

载荷ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	100	109	3	9	9.3
200	219	223	21	4	1.7
300	338	336	22	2	0.6
400	444	455	26	11	2.4
500	552	565	27	13	2.4
平均			20	8	3.3

表 3.7.3 No.3 計測結果 (5回平均) 単位: μ

载荷ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	59	47	2	12	20.8
200	123	123	4	0	0.2
300	206	224	3	18	8.7
400	285	275	5	10	3.5
500	371	360	14	11	2.9
平均			6	10	7.2

表 3.7.4 No.4 計測結果 (5回平均) 単位: μ

载荷ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	82	73	9	9	11.0
200	178	186	15	8	4.6
300	294	297	24	3	0.9
400	406	400	23	6	1.5
500	525	530	40	5	0.9
平均			22	6	3.8

表 3.7.5 NO.5 計測結果 (5回平均) 単位: μ

载荷ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	42	32	13	10	23.6
200	104	100	24	4	3.5
300	192	191	37	2	0.8
400	287	290	37	3	0.9
500	392	395	35	3	0.8
平均			29	4	5.9

表 3.7.6 計測結果一覧 (No.1~No.5) 単位: μ

主ひずみ方向	標準偏差	誤差	誤差(%)
No.1	15	6	2.4
No.2	20	8	3.3
No.3	6	10	7.2
No.4	22	6	3.8
No.5	29	4	5.9
平均	18.5	6.8	4.5

・副走査方向

スキャナ装置を試験体に対し横向き（主走査方向が荷重に対し水平）にし、スキャニングによって取得した画像において、水平方向の設置した5つのひずみゲージ（No.6～No.10）上を解析し、ひずみゲージ値と計測値を比較した。No.6～No.10 ひずみゲージとスキャナ装置により得られた5回のひずみ計測値の平均、標準偏差および誤差を表3.7.7～表3.7.11に示す。また、計測結果一覧を表3.7.12に示す。

スキャナ装置とひずみゲージの計測値を比較すると、多少の計測値のひずみゲージに対する誤差や5回繰り返した試験の計測値のばらつきが確認できるが、これは圧縮試験装置の操作が難しく約5分のスキャニング中に荷重を一定に保てなかったため取得した画像に影響が出たためであると考えられる。スキャナ装置とひずみゲージの計測値を比較すると、標準偏差の平均は $3\mu\sim 12\mu$ 、誤差の平均は $4\mu\sim 10\mu$ であり、高精度に計測できた。計測方向は試験体のポアソン方向であり、主ひずみ方向と比較すると小さな値を計測したことになる。つまり、スキャナ装置は、低ひずみ領域においても高精度にひずみ計測が可能なことが分かる。よって、スキャナ装置Bは、コンクリート部材において主走査、副走査は、高精度にひずみが高精度に計測できることが確認できた。

表 3.7.7 No. 6 計測結果 (5 回平均) 単位 : μ

載荷ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	1	3	3	2	160.0
200	11	12	3	1	10.0
300	31	27	3	4	14.2
400	49	53	2	4	8.8
500	71	70	5	2	2.1
平均			3	3	39.0

表 3.7.8 No. 7 計測結果 (5 回平均) 単位 : μ

載荷ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	1	3	3	2	230.0
200	14	11	5	4	25.0
300	29	26	6	3	10.0
400	44	41	6	3	6.4
500	65	87	5	22	34.3
平均			5	7	61.1

表 3.7.9 No.8 計測結果 (5回平均) 単位: μ

载荷ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	11	21	3	10	89.1
200	20	18	3	2	9.5
300	38	45	7	7	19.5
400	54	50	11	4	6.9
500	74	74	9	0	0.5
平均			7	5	25.1

表 3.7.10 No.9 計測結果 (5回平均) 単位: μ

载荷ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	9	3	12	7	72.2
200	21	17	13	4	17.1
300	43	35	11	8	18.8
400	58	41	13	17	28.8
500	80	67	13	13	15.9
平均			12	10	30.6

表 3.7.11 No.10 計測結果 (5回平均) 単位: μ

载荷ステップ	ゲージ	スキャナ	標準偏差	誤差	誤差(%)
100	7	11	5	4	55.7
200	16	10	7	6	36.9
300	32	28	11	4	12.2
400	47	46	14	1	2.1
500	67	61	20	6	9.1
平均			11	4	23.2

表 3.7.12 計測結果一覧 (No.6~No.10) 単位: μ

ポアソン方向	標準偏差	誤差	誤差(%)
No.6	3	3	39.0
No.7	5	7	61.1
No.8	7	5	25.1
No.9	12	10	30.6
No.10	11	4	23.2
平均	8	6	43.8

3.8 まとめ

カメラ装置およびスキャナ装置を用いた変位, ひずみ計測精度の検証を行った結果, 以下の所見を得た.

・カメラ装置について

- (1) 静的変位計測では, 望遠レンズを取りつけたCCDカメラを用いることで, 遠距離(10~30m)の計測において微小変位を高精度に計測できた.
- (2) 動変位計測では, アルミ試験体の定常振動状態および減衰振動状態において, 高速度カメラを用いた動変位の計測精度は高いことが確認できた. さらに, DICMにより計測した時刻歴応答変位をフーリエ変換することにより固有振動数を算出することができた.
- (3) 鋼部材を用いたひずみ計測では, 解析ゲージ長を構成するpixel数が増加するとDICMのひずみ計測精度が向上した. よって, 高解像度のCCDカメラを用いることや拡大して計測することにより, 高精度な計測ができることが期待できる.
- (4) コンクリート部材を用いたひずみ計測では品質の違いによるDICMのひずみ計測精度に大きな差は確認されなかった.
- (5) アルミニウム試験体を用いた塑性域のひずみ計測では約15000 μ の範囲内において高精度にひずみが計測できることが確認できた.
- (6) 計測条件を変化させた計測では, 計測角度60° ~83° の範囲内においては, ひずみ計測精度に変化がないこと, シャッター速度を低下させることによりひずみ計測精度が向上すること, 画像解像度を増加させると計測精度が向上することが確認された.
- (7) 解析条件を変化させた計測では, サブセットを大きくすること, 加算平均処理法を適用することによりひずみ計測精度が向上することが確認された.
- (8) DICMを用いたマルチゾット解析法を用いることにより, 微小ひずみ領域の最大主ひずみ, 最小主ひずみおよび主ひずみ方向の角度を算出することができた. また, 円孔近傍やその周辺のひずみを高精度に計測することができた.

・スキャナ装置 A について

- (1) 鋼部材を用いたひずみ計測では, 60mm ゲージの計測結果が最も精度が良く, ゲージ値とスキャナによる計測値の平均値と比較すると, その誤差は最大でも5 μ であった. 各ひずみレベルにおける誤差の平均をとると2 μ であった. なお, 同一ひずみレベルにおけるスキャナによる5回の計測値の標準偏差は23 μ 以下と高い再現性を示した.
- (2) コンクリート部材を用いた計測では, 主ひずみ方向の計測では, スキャナ装置とひずみゲージの計測値を比較すると, 標準偏差の平均は7 μ ~16 μ , 誤差の平均は11 μ ~20 μ となった. ポアソン方向の計測では, スキャナ装置とひずみゲージ値を比較すると, 標準偏差の平均は9 μ ~29 μ , 誤差の平均は3 μ ~12 μ となった. 鋼材の30mmゲージの結果に比べて若干ひずみ計測精度が低下したが, 計測

面全域において高精度にひずみ計測が可能なこと, それは, ラインセンサスキャナを回転して計測してもほぼ同様の計測精度であることが確認できた.

・スキャナ装置 B について

コンクリート部材を用いた計測では, 主走査方向と副走査方向においてスキャナ装置とひずみゲージ値を比較すると, 多少の計測値のひずみゲージに対する誤差や 5 回繰り返した試験の計測値のばらつきが確認できるが, これは圧縮試験装置の操作が難しく約 5 分のスキャニング中に荷重を一定に保てなかったことが原因となり, 取得した画像に影響が出たためであると考えられる.

主走査方向において, スキャナ装置とひずみゲージ値を比較すると標準偏差の平均は $6\mu\sim 29\mu$, 誤差の平均は $4\mu\sim 10\mu$ であり, 高精度に計測できた. 副走査方向において, スキャナ装置とひずみゲージ値を比較すると, 標準偏差の平均は $3\mu\sim 12\mu$, 誤差の平均は $4\mu\sim 10\mu$ であり, 高精度に計測できた. 計測方向は試験体のポアソン方向であり, 主ひずみ方向と比較すると小さな値を計測したことになる. つまり, スキャナ装置は, 低ひずみ領域においても高精度にひずみ計測が可能なが分かる. よって, スキャナ装置 B は, コンクリート部材において主走査, 副走査にとおいて高精度にひずみが計測できることが確認できた.

