



Title	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
Author(s)	出水, 享; 板井, 達志; 藤野, 義裕; 山下, 務; 松田, 浩
Citation	長崎大学大学院工学研究科研究報告, 41(77), pp.45-52; 2011
Issue Date	2011-07
URL	http://hdl.handle.net/10069/25347
Right	

This document is downloaded at: 2020-10-20T05:17:14Z

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

出水享*・板井達志**・藤野義裕**・山下務***・松田浩****

Effects of Photographing and Analysis Condition on Strain Measurement Accuracy by Digital Image Correlation Method

by

Akira DEMIZU*, Satoshi ITAI**, Yoshihiro FUJINO**, Tutomu YAMASHITA***

and Hiroshi MATSUDA****

The influence given to the strain measurement accuracy of DICM when various parameters of the analysis condition etc. when the measurement condition and strain of the angle and the shutter speed etc. of CCD camera were calculated were changed was examined, and two or more digital images were tried, and in the study, the addition average processing was done, the image noise was decreased, and the improvement of the warp measurement precision was tried.

Key words : strain measurement , digital image correlation method , ccd camera , strain gauge

1. はじめに

近年、高度経済成長期時代に建設された構造物の老朽化が進む中、それらの維持管理やリスク評価を目的としたひずみ計測が行われている。代表的なひずみ計測として、ひずみゲージ法が挙げられる。ひずみゲージ法は適切な位置、方向、状態でひずみゲージを貼付することで信頼性の高い評価を得ることができるが、得られるひずみ値は、貼付したひずみゲージのゲージ長の1点1方向のみの平均ひずみしか得られず、多点を計測するには多点のひずみゲージを貼付する必要や測定器までの複雑な配線作業を伴うため作業面やコスト面で問題がある。

また、破壊挙動が複雑で、進展方向が変化するひび割れの場合、ひび割れ発生を正確に予測し、進展を追跡することは極めて困難であり、ひび割れ発生やひび割れ幅の増大にともない、ひずみゲージ自体が切れてしまうことで計測不能となることも多い。

橋梁などの土木構造物のひずみ計測は、構造物に近接してひずみゲージを設置する必要があり、仮設足場や高所作業車が必要となることが多々ある。構造物の交差物件が道路の場合は、交通規制(通行止、車線規制)が必要となることから、作業が大掛かりとなる。また、鉄道の場合は、き電停止や線路閉鎖を行う必要があり、そのための書類作成・手続き、協議などの手間が必要となる。

こうした中、ひずみゲージ法に代わる計測法として、サンプリングモアレ法やデジタル画像相関法(以下 DICM)などの光学的全視野ひずみ計測法の研究が盛んに行われている¹⁾。その中でも DICM は、変形前後の計測対象物をデジタルカメラで撮影したデジタル画像を用い、解析することで広範囲の変位分布やひずみ分布を簡易に計測できる手法である。

DICM は、デジタルカメラの高解像度化、パソコンの CPU やハードディスクの高速化・大容量化にとも

平成23年 6月23日受理

* 生産科学研究科博士後期課程 (Graduate School of Science and Technology)

** 生産科学研究科博士前期課程 (Graduate School of Science and Technology)

*** 教育支援部 (Educational support)

**** 大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering)

ない、高解像度の画像や膨大な画像データを短時間に処理することが可能なことも魅力の一つと言える。

筆者らは数年前からDICMをコンクリートおよび鋼などの建設材料に適用してきた^{2)~5)}。その中で、DICMの計測誤差が撮影条件や画像解析条件により変化することが確認されている。計測誤差の要因としては、イメージセンサにより画像を電気信号への変換時や撮影時のカメラの振動などにより混在するノイズが原因だと考えられる。

本研究では、カメラの角度やシャッター速度などの撮影条件やひずみを算出する際の撮影条件や画像解析条件などの各種パラメータの変化が、DICMのひずみ計測精度に与える影響を検討するとともに、画像処理を行い、ひずみ計測精度の向上を試みた。

2. デジタル画像相関法 (DICM)

DICMの技術は、1980年代初頭にSouth Carolina大学の研究者によって紹介された⁶⁾。DICMは、計測対象物表面の模様ランダム性を基にして、変形前後の計測対象物表面をCCDカメラなどで撮影したデジタル画像を画像処理することにより、計測範囲全体にわたって変形の大きさと方向を求めることができる手法である。DICMの特長として、測定空間の揺らぎには比較的強い⁷⁾ことが挙げられる。また、2台のカメラを使用することで三次元変形やひずみも計測可能である。

DICMを行う際に重要になるのが、任意の点の移動量の算出である。DICMの解析原理は、デジタル画像が一般的に256濃度階調で表現される画像から構成された濃淡のある画像であることを利用したものである。まず、計測対象物表面の模様ランダム性を基にして計測対象物の変形前後をデジタルカメラ等で撮影し、得られたデジタル画像の輝度値分布から試料表面の変形量と方向を同時に求める方法である。

まず、変形前の画像において、任意の点(1画素)を中心とした $N \times N$ 画素の任意領域(サブセット)を指定する(Fig.1(a))。計測対象物に変位を与えると、変形後の画像でのサブセットの位置は変化する(Fig.1(b))。変形後のサブセットを対象に、変形前のサブセットの輝度分布と高い相関性を示すサブセットを数値解析で探索する。このサブセット中心の点の移動より変形方向、変形量を算出する。この処理を全ての小領域で繰り返す事によって、全視野の変形データが得ることができる。

ひずみ分布は、以上の方法により得た変形量を利用して算出する。これは、Fig.2(a)に示すように、あらかじめ求めたい点を中心として、ある画素数だけ離れた点の変位を基に、変形後の二点間の長さの

変化を求め、計測点のひずみとする解析手法である。この解析手法の特長として、水平、垂直、斜め、最大主ひずみ、最小主ひずみの値と方向を求めることが可能であること、任意に解析点の距離を変えること、すなわちゲージ長の自由な選択が可能となることなどが挙げられる(Fig.2(b)~(c))。

研究では、2台のカメラを使用し、画像を撮影した。そして、撮影した画像をDICM解析プログラムCorrelated Solutions VIC3D 2009^{8,9)}を用いてひずみ分布を算出した。計測システムの写真(Photo.1)に概要図をFig.3に仕様をTable.1にそれぞれ示す。

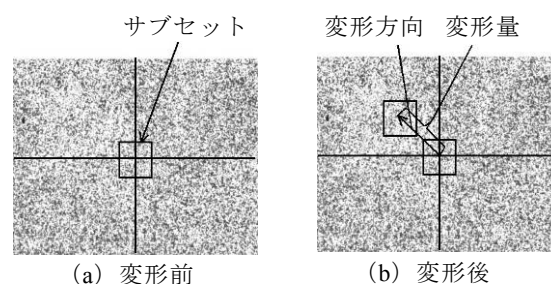


Fig.1 変形前と変形後のデジタル画像

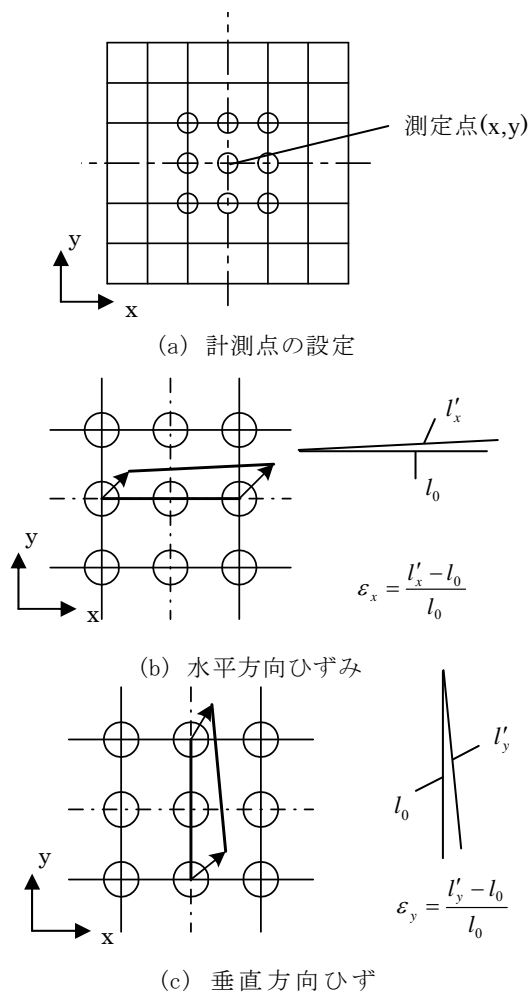


Fig.2 ひずみ解析

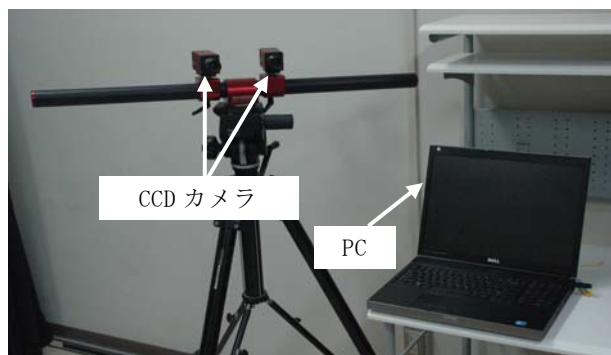


Photo. 1 計測システム

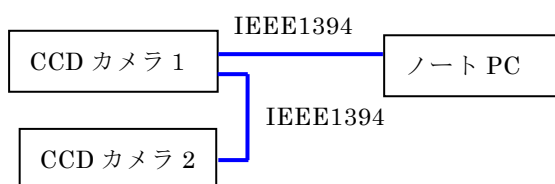


Fig. 3 システム概要図

Table 1 仕様

CCD カメラ	型番：Point Grey Research 社 GRASS-50S5M/C 撮像素子：Sony ICX625 CCD 解像度：2448×2048pixel (500 万画素) 画素サイズ：3.45 ×3.45 μ m デジタル画像：モノクロ 8 ビット シャッター形式：電子シャッター シャッター速度：0.02ms ~10s 最大フレームレート：15fps
レンズ	レンズ 1：Schneider Kreuznach 社 Xenoplan 1.4/ 17mm レンズ 2：Schneider Kreuznach 社 Xenoplan 2.8/ 50mm
ノート PC	CPU：intel(R) Core(TM)i7 CPU Q 820 @1.73GHz (8CPUs) HD：300GB メモリ容量：3.5GB RAM
LED ライト	Suntech 社 PL130 光源：高輝度白色 LED130 個 照度：3520 lx (50cm・full) 絞値：f11+2/10 (ISO400・1/30 秒・50cm・ Full) 色温度：約 5500 K 照射角度：44 度 *フィルターなしの条件
計測 レンジ	数百分の変形まで計測可
出力 形式	三次元形状，変位，ひずみ

3. 実験概要

計測状況を Photo. 2 に示す。試験では、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 Fig. 4 に示すように試験体表面にゲージ長 5mm のひずみゲージを等間隔に 9 枚貼付し、ひずみゲージ貼付面の約 130 mm×110 mm 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 (Photo. 3) を塗布した。そして、スプレーが乾燥した後には試験を実施した。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。

撮影解像度 (mm/pixel) は、ひずみ計測精度に寄与するため、すべての撮影条件下で、撮影解像度がほぼ同じになるように、撮影距離やレンズを調整・選択した。今回、撮影解像度は、約 0.051~0.055mm/pixel としたため、5mm ゲージは長手方向において、約 91~98pixel で構成されることになる。計測では、無載荷時およびひずみゲージ値がおおよそ 25, 50, 75, 100, 250, 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 枚撮影) を行った。

ここでは、table 2 に示す基本ケースを基準として撮影条件や画像解析条件の各種パラメーターの変化がひずみ計測精度に与える影響を検討するとともに、各荷重段階において複数枚撮影した画像に加算平均処理 (コンボジット処理) を行い、画像ノイズを軽減させ、画像解析を行い、ひずみ計測精度の向上を試みた。

Table 2 の 1-1~4-3 に関しては、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 (25,50,75,100,250,500 μ 時)) の画像に対して画像解析を行うことになる。各荷重段階で 50 枚撮影した理由としては、各荷重段階で計測誤差を確認するためである。

Table 2 の 5-1~5-4 に関しては、各荷重段階の 1 枚目から加算枚数分の画像を結合させて、結合した画像に対して画像解析を行った。つまり、6 枚 (25,50,75,100,250,500 μ 時) の画像に対して画像解析を行うことになる。

table 2 に示す角度、距離 1,2 は、Fig. 4 に示す位

置関係と対応している。

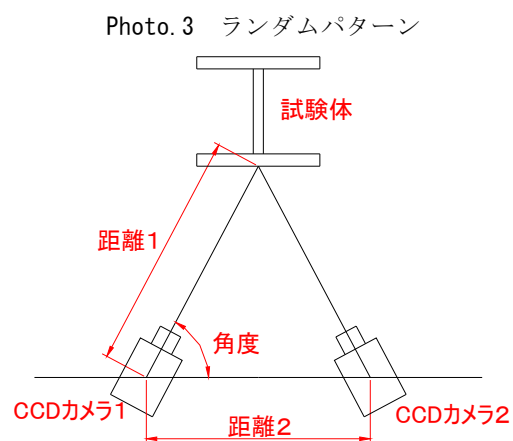
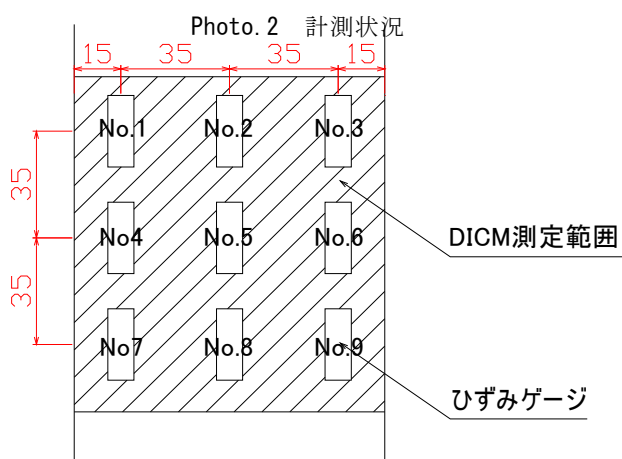
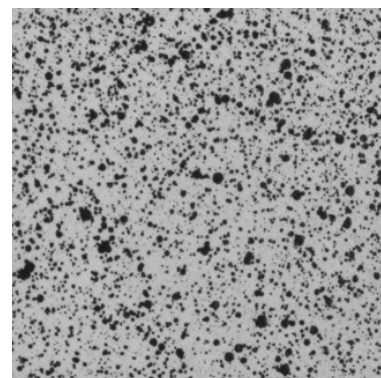
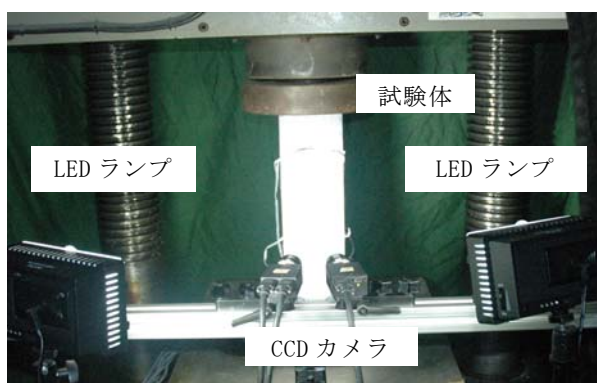


Fig. 4 ひずみゲージ貼付位置

Fig. 5 位置関係

Table 2 計測概要

ケース	項目	角度 (°)	距離 1 (mm)	距離 2 (mm)	レンズ	シャッター速度(ms)	サブセット (pixel)	加算平均処理 (枚)
基本	—	75	316	169	1	25	30	—
1-1	角度	60	316	327	1	25	30	—
1-2		75		169				
1-3		83		80				
2-1	シャッター	75	316	169	1	5	30	—
2-2						25		
2-3						50		
3-1	撮影距離	75	316	169	1	25	30	—
3-2			833	445	2			
4-1	サブセット	75	316	169	1	25	30	—
4-2							50	
4-3							100	
5-1	加算平均	75	316	169	1	25	30	1
5-2								3
5-3								10
5-4								50

3. 試験結果

計測結果の評価項目としては、相関係数、標準偏差、誤差平均、最大誤差とした。誤差とは、ひずみゲージと DICM の差分値を意味し、最大誤差は、誤差の最大値の絶対値を意味する。

4.1 基本ケース

基本ケースのゲージ番号 No.5 の各荷重段階におけるひずみ計測結果を Fig. 6、誤差の推移を Fig. 7、標準偏差、最大誤差を Fig. 8 にそれぞれ示す。Fig. 6 から近似曲線の傾きが 0.8 となり、DICM がひずみゲージと比較して大きいひずみ値を示した。これは、その他の箇所でも同様な傾向を示した。各荷重段階において誤差が確認されるが、この誤差は、

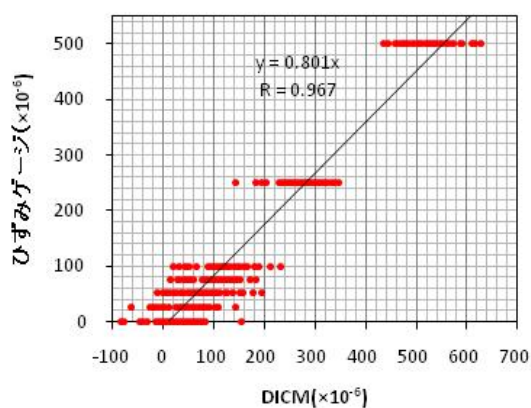


Fig. 6 ひずみ測定結果 (No.5)

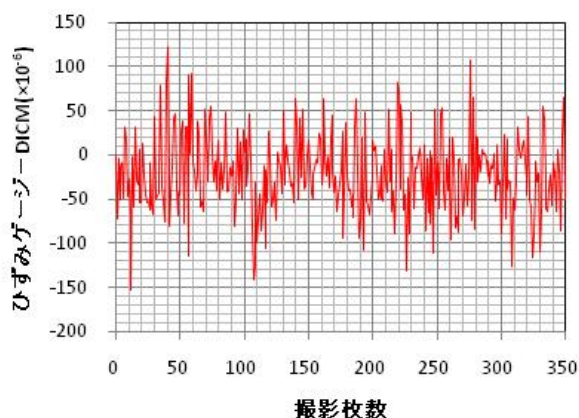


Fig. 7 誤差の推移 (No.5)

画像ノイズの影響だと考えられる。Fig. 7 からその誤差が -20μ を中心として変化しながら推移しているのが確認できる。Fig. 8 より標準偏差と最大誤差に関しては、ほぼ一定の値を示した。

ゲージ番号 No.1~No.9 における各荷重段階の相関係数、標準偏差、誤差、最大誤差の平均値一覧表とそのグラフを Table 3 と Fig. 9 にそれぞれ示す。Fig. 9 から標準偏差は、一定の値を示している。また、相関係数、誤差、最大誤差に関しては、若干のばらつきが確認されたが、ほぼ一定の値を示した。このことから計測範囲全域において、一定の精度でひずみが計測できていることが分かる。

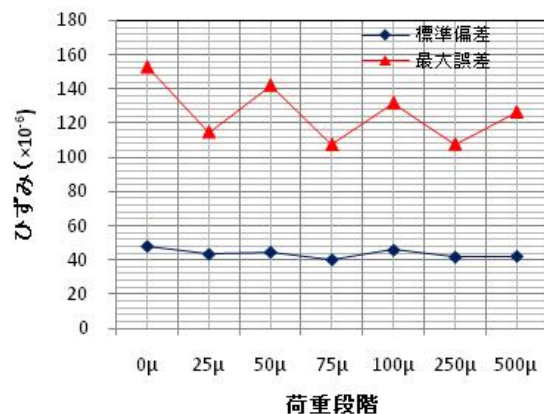


Fig. 8 標準偏差・最大誤差 (No.5)

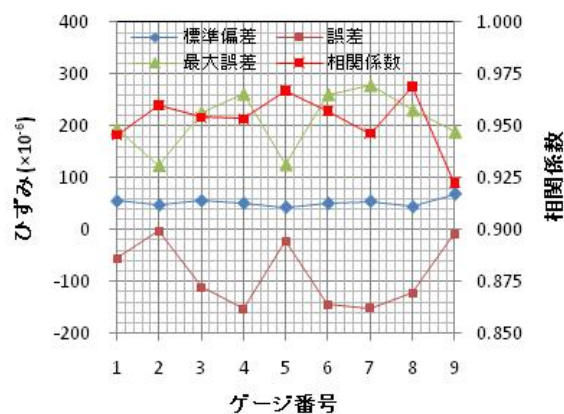


Fig. 9 計測結果 (基本ケース)

Table 3 計測結果一覧 (基本ケース)

	ゲージ番号									平均
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	
相関係数	0.946	0.960	0.954	0.953	0.967	0.957	0.946	0.969	0.923	0.953
標準偏差 (μ)	55	48	56	51	44	51	55	45	68	52
誤差 (μ)	-55	-3	-112	-153	-22	-144	-151	-122	-8	-86
最大誤差 (μ)	194	124	226	261	126	261	278	231	189	210

4.2 撮影条件の影響

撮影角度毎のゲージ番号 No.1~No.9 の相関係数, 標準偏差, 誤差, 最大誤差の平均を Table 4 に示す. Table 4 より撮影角度 60°~83°の範囲内においては, 計測精度に変化がないことが確認できる.

Table 4 撮影角度

ケース	1-1	1-2 (基本)	1-3
角度 (°)	60°	75°	83°
相関係数	0.945	0.953	0.943
標準偏差 (μ)	58	52	61
誤差 (μ)	14	-86	-15
最大誤差 (μ)	180	210	187

シャッター速度毎のゲージ番号 No.1~No.9 の相関係数, 標準偏差, 誤差, 最大誤差の平均を Table 5 に示す. Table 5 よりシャッター速度を低下させることにより相関係数の増加, 標準偏差の減少が確認され, 計測精度が向上した. 原因としては, 画像ノイズが平均化されたことが考えられる.

Table 5 シャッター速度

ケース	2-1	2-2 (基本)	2-3
速度 (ms)	50	25	5
相関係数	0.961	0.953	0.925
標準偏差 (μ)	48	52	67
誤差 (μ)	-6	-86	10
最大誤差 (μ)	139	210	202

撮影距離毎のゲージ番号 No.1~No.9 の相関係数, 標準偏差, 誤差, 最大誤差の平均を Table 6 に示す. Table 6 より撮影距離 316mm~883mm の範囲内においては, 計測精度に変化がないことが確認できた.

Table 6 撮影距離

ケース	3-1 (基本)	3-2
撮影距離 (mm)	316	883
レンズの焦点距離	17mm	55mm
相関係数	0.953	0.947
標準偏差 (μ)	52	55
誤差 (μ)	-86	22
最大誤差 (μ)	210	160

4.3 解析条件の影響

サブセット毎のゲージ番号 No.1~No.9 の相関係数, 標準偏差, 誤差, 最大誤差の平均を Table 7 に示す. Table 7 よりサブセットを大きくすることにより相関係数の増加, 標準偏差, 最大誤差の減少が確認され, 計測精度が向上した. しかし, 誤差に関しては, 変化が確認されなかった.

Table 7 サブセット

ケース	4-1(基本)	4-2	4-3
サブセット(pixel)	30	50	100
相関係数	0.953	0.980	0.991
標準偏差 (μ)	52	34	23
誤差 (μ)	-86	-62	-86
最大誤差 (μ)	210	150	144

4.4 加算平均処理枚数の影響

加算枚数毎のゲージ番号 No.1~No.9 の相関係数, 標準偏差, 誤差, 最大誤差の平均を Table 8 に示す. Table 8 より加算枚数を増加させると, 相関係数の増加, 標準偏差・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, 加算平均処理により画像ノイズが平均化されたことが考えられる.

Table 8 加算平均枚数

ケース	5-1	5-2	5-3	5-4
加算枚数 (枚)	1	3	10	50
相関係数	0.969	0.990	0.993	0.996
標準偏差 (μ)	51	30	22	16
最大誤差 (μ)	86	45	30	19

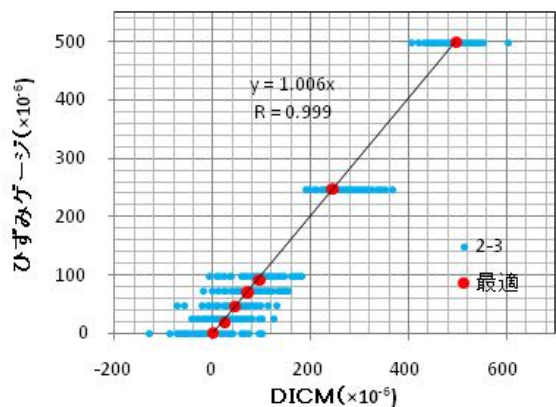
4.5 最適条件

シャッター速度を低下させて撮影し, サブセット・加算平均枚数を増やして解析した場合に計測精度が向上することが分かった. 例として, ケース 2-3 と 2-3 のサブセット 100, 加算平均枚数 50 で解析した場合の結果一覧を Table 9, ゲージ番号 No.1~No.9 のひずみ計測結果を Fig. 10 に示す. Table 9 より相関係数がほぼ 1 になり, 標準偏差・最大誤差は, 10μ 以下になった. また, Fig. 10 より近似曲線の傾きがほぼ 1 になった.

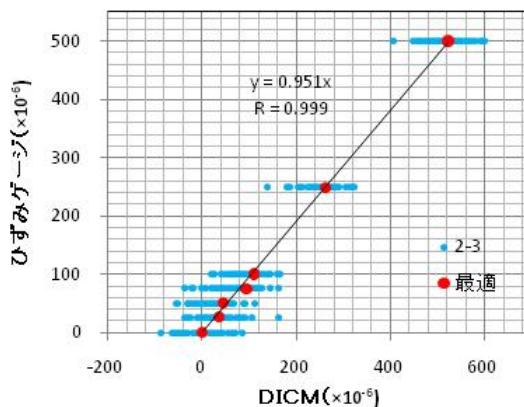
Table 9 最適条件

ケース	2-3	最適
相関係数	0.961	0.999
標準偏差 (μ)	48	7

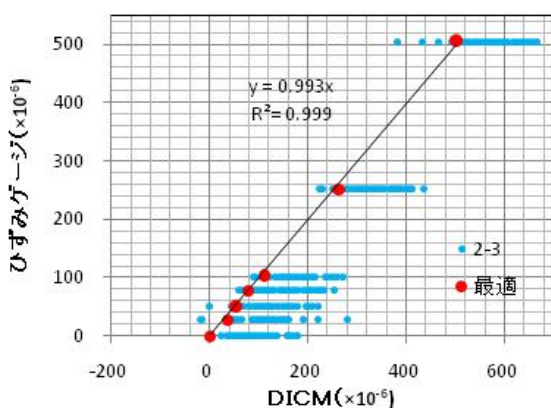
最大誤差 (μ)	139	9
----------	-----	---



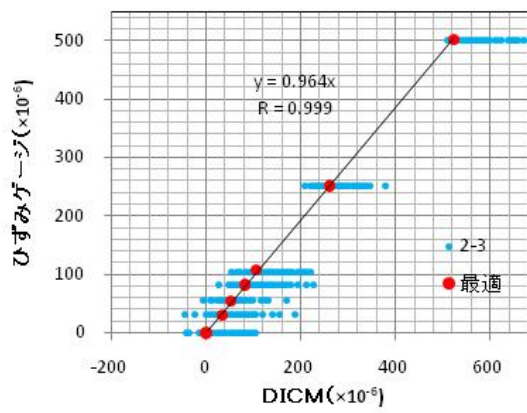
(a)No.1



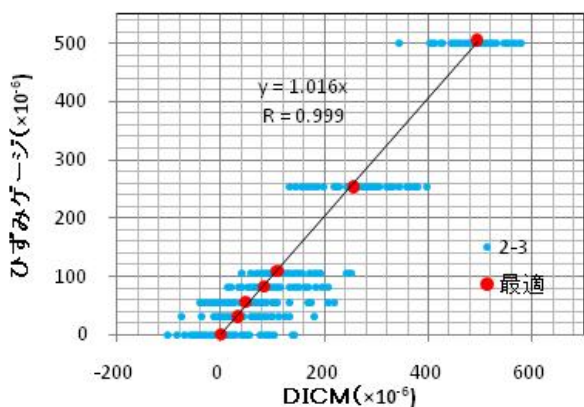
(e)No.5



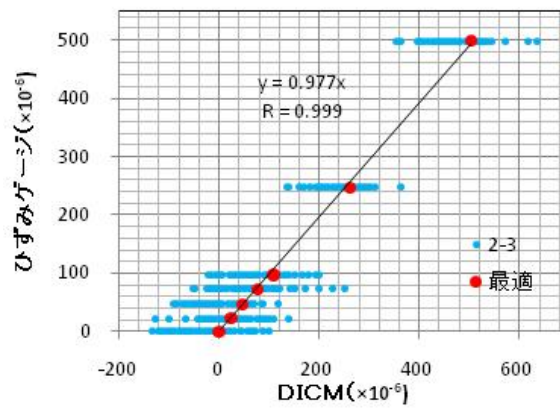
(b)No.2



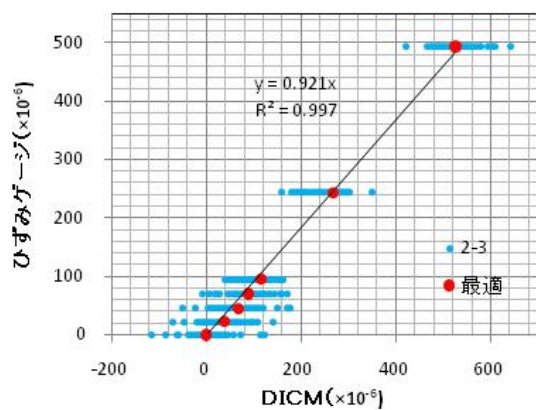
(f)No.6



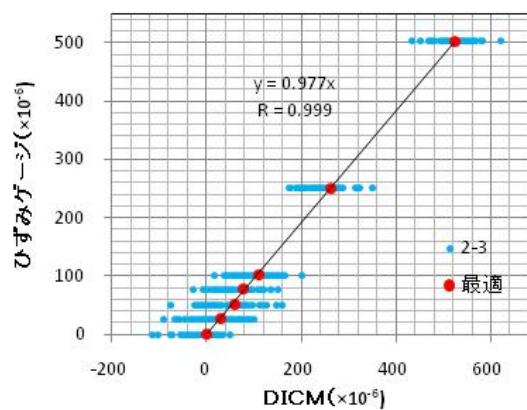
(c)No.3



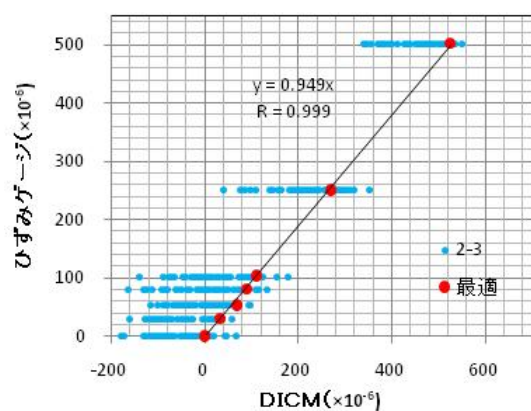
(g)No.7



(d)No.4



(h)No.8



(i)No.9

Fig. 10 ひずみ測定結果

5. 考察

本研究から以下のことが得た。

- ・計測範囲全域において、一定の精度でひずみが計測できていることが確認された。
- ・撮影角度 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が確認された。
- ・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した。
- ・撮影距離 316mm ～ 883mm の範囲内においては、ひずみ計測精度に変化がないことが確認できた。
- ・サブセットを大きくすることにより、ひずみ計測精度が向上した。
- ・加算枚数を増やすことにより、ひずみ計測精度が向上した。

参考文献

- 1) 社団法人日本非破壊検査協会：非破壊検査～検査と材料評価, Vol.59 No.7 Jul. ,2010
- 2) 出水享, 松田浩, 伊藤幸広, 森田千尋：光学的手法による鋼部材の加熱・冷却過程におけるひずみ分布計測, 構造工学論文集 Vol.57A, pp.86-93, 2011.4
- 3) デジタル画像相関法による建設材料のひずみ計測に関する基礎的研究, 出水享, 板井達志, 御舟研二, 松田浩, 長崎大学工学部研究報告, 41(76), pp.66-72; 2011
- 4) 出水享, 松田浩, 中島朋史, 浜岡広: 非接触全視野計測によるコンクリートの材料試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.473-478 (2006)
- 5) 3D profile measurement and buckling simulation on thin-walled cylindrical shells under compression by utilizing 3D-digital Image Correlation Method C.Morita, C.Zhao, A.Demizu, K.Makino, H.Matsuda, K.Ichimiya, IABMAS 5 2550-2556 (2010)
- 6) 株式会社レーザー計測：安全の評価のための非接触計測技術について, pp.1-8
- 7) 内野正和：デジタル画像相関法によるひずみ解析法の検討, 日本実験力学会講演論文集合同ワークショップ2006, No.6-1, pp.36-39, 2006
- 8) Correlated Solutions : Vic-3D 2009 Reference Manual.
- 9) 株式会社レーザー計測：レーザー計測技術報「画像相関法によるひずみ測定の精度について」, Vol.1, 2010.2