

デジタル画像相関法による動的変位計測に関する基礎的研究

論文

Fundamental Study on Dynamic Displacement Measurement by Digital Image Correlation Method

出水 享* ○板井 達志** 松田 浩*** 森田 千尋**** 伊藤 幸広*****
Akira DEMIZU Satoshi ITAI Hiroshi MATSUDA Chihiro MORITA Yukihiro ITO

ABSTRACT Recently, the study and the development of a new measurement method that uses optical sensing of the sampling moire method, the digital holography method, the digital image correlation method, and the infrared method, etc. are done. In this study, the dynamic displacement measurement of the aluminum specimens by the digital image correlation method with a high-speed camera was executed, and the measurement accuracy was confirmed. And, the vibration frequency was calculated from the measurement displacement.

Key words : 高速度カメラ, デジタル画像相関法, 動的変位計測

high-speed camera, digital image correlation method, dynamic displacement measurement

1. はじめに

近年, 既設建造物の効率的な維持管理を行うために, 変位やひずみに着目した計測手法や計測技術に関する研究が多々行われている。

こうした中, サンプリングモアレ法, デジタルホログラフィ法, デジタル画像相関法 (以下DICMと呼ぶ), 赤外線法などの非接触かつ全視野で計測可能な光学的計測技術による新しい計測法に関する研究が鋭意進められている¹⁾。

こうした中, 筆者らは DICM を土木構造物に適用するために, コンクリート部材や鋼部材の破壊・劣化過程における変位やひずみ計測に関する研究を行ってきた^{2)~4)}。藤垣ら¹⁾は, デジタルホログラフィ法を用いて微小な変位分布計測を用いた可搬型計測システムの開発を行っている。また, 李ら⁵⁾は, サンプリングモアレ法を用いて 10m 長のクレーンの変位を測定し, サブミリメートルの変位の検出に成功している。しかし, これらの計

測法はすべて静的計測にとどまっている。

一方, 岡重ら⁶⁾は家庭用デジタルビデオカメラを利用した動的変位計測を行っているが, ビデオカメラの計測周波数は 60Hz と低いため瞬間的な挙動を捉えるに至っていない。

近年, 高速度カメラの高解像度化・高速度化が進み, 人の目や一般的なビデオカメラでは見ることができない一瞬の動きや短時間の高速現象を連続して撮影することが可能となってきた。また, パソコンの HD の大容量化, CPU の処理能力向上, マルチコアプロセッサ CPU などといった並列計算処理により, 高解像度の画像や膨大な画像データを短時間に保存・処理することが可能となってきた。

以上から本研究では, 高速度カメラを用いて, DICM によるアルミ試験片の動的変位計測を実施し, 計測精度の確認を行った。そして, 計測した動的変位から振動数の算出を試みた。

| | | | |
|------------|----------------|-------------------------|------------------------|
| * 修 (工) | 長崎大学大学院生産科学研究科 | 博士後期課程 | 準会員 (学生) |
| | | (〒852-8521 長崎市文教町 1-14) | |
| ** | 長崎大学大学院生産科学研究科 | 博士前期課程 | (同上) 準会員 (学生) |
| *** 工博 | 長崎大学大学院工学研究科 | 教授 | (同上) 第 2 種正会員 |
| **** 博(工) | 長崎大学大学院工学研究科 | 准教授 | (同上) 第 2 種正会員 |
| ***** 博(工) | 佐賀大学大学院 工学系研究科 | 准教授 | (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄 1) |

本論文の一部は土木学会年次学術講演会 2011 に発表

2. 計測システム
2.1 DICMについて

DICM は、測定対象物表面の模様ランダム性を基にして、変形前後の測定対象物表面を CCD カメラや CMOS 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解析手法である。また、2 台のカメラによりステレオ撮影することで3次元変形計測が可能となることや、温度変化に伴う測定空間の揺らぎに比較的強いこともその特徴の一つと言える。

DICM の適用事例としては、機械・材料分野では集積回路の熱膨張や窒化ケイ素のき裂開口機構の解明をはじめ、多岐にわたる研究に活用されている。医療分野においても、X線CTによる生体組織内部の非侵襲力学場計測の応用として用いられている。

DICM で解析する際に重要になるのが、任意の点の移動量の算出である。その解析原理は、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、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(図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(図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。また、ひずみ解析は、以上の手法により得られた変位計測結果を利用してひずみ分布を求める。これは、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2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、斜めと3軸のひずみゲージと同じ解析を行い、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。また、高速度カメラを利用することで動的な変位・ひずみ分布計測も可能となる。

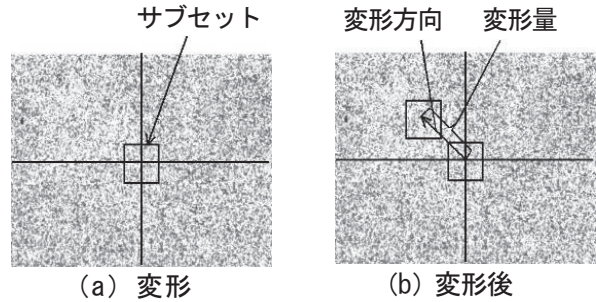


図1 変形前と変形後のデジタル画像

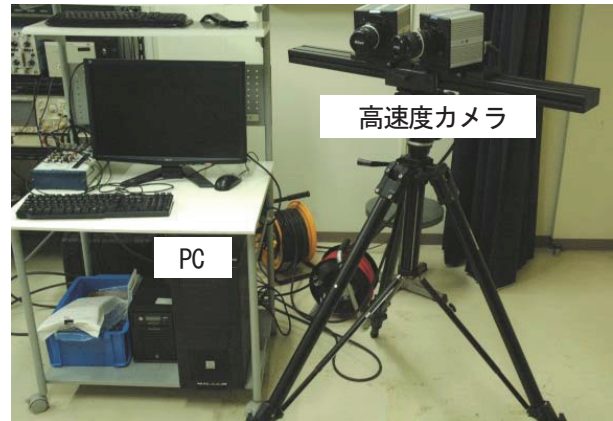


写真1 本計測装置

表1 計測器仕様

| | |
|--------|--|
| 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 最高撮影速度: 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: 5Vp-p (正極性/負極性選択可能) |
| レンズ | Nikon 社製 nikkor 50mm f/1.2 |
| パソコン | CPU Quad CPUQ9550 @2.83GHz メモリ容量 2.99GB HD 1TB |
| 計測感度 | ピクセル間距離の 1/10~1/100 変位: 100mm の視野で 20μm ひずみ: 0.01% |
| 計測レンジ | 数百%の変形まで可 |
| 出力形式 | 三次元形状, 変位, ひずみ |

2. 2 キャリブレーションについて

本計測装置と計測システムの仕様を写真1と表1にそれぞれ示す。一般に、デジタルカメラのレンズは曲面となっているため、撮影された画像は歪を持っている。また、2台のカメラでステレオ撮影する場合は、カメラ画像の位置合わせを行う必要がある。ここでは、計測前において2台の高速度カメラで写真2に示すキャリブレーションプレート（位置や角度を変えながら複数枚(20枚から30枚程度)撮影することで、画像の歪み補正やカメラの位置合わせを行う。

本研究では、DICM解析プログラム Correlated Solutions Vic-3D 2009⁷⁾を用いて変位計測を行った。

3. 試験概要

試験では、寸法（長さ×幅×250mm×10mm×1mm）のアルミ試験片を使用し、その試験片の下端50mmを完全固定させて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。試験片の表面に白色のスプレーで下地を塗布し、乾燥したのちに黒色スプレーでランダムパターンを設けた。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撮影し、撮影した画像からDICMにより変位を算出した。また、DICMの比較のために

試験片の裏面をレーザー変位計で計測を行った。レーザー変位計はキーエンス社のLK-G85を使用した。

高速度カメラとレーザー変位計を同期させるために、図2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、レーザー変位計は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速度を1/1000秒、サンプリング周波数を500Hzとし12秒間で6000枚撮影した。レーザー変位計は、高速度カメラと同様にサンプリング周波数500Hzで計測を行った。また、撮影時に白熱灯を使用した。

計測時の位置関係として、アルミ試験片と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。この条件下では、撮影された画像の解像度は、約0.173mm/pixelで構成される。アルミ試験片の物性値を表2、試験体概要を図3、計測風景を写真3、アルミ試験片を写真4にそれぞれ示す。

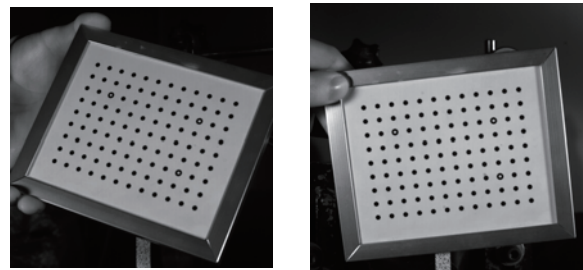


写真2 キャリブレーション画像



図2 計測システム概要図

4. 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4(a), 5(a)にそれぞれ示す。図より、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4(b), 5(b)にそれぞれ示す。図より、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となる減衰波形となり、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相関関係を図6に示す。また、近似曲線も合わせて示す。図6よりパターン1, 2とも相関係数Rは0.999となり1に非常に近い値を示した。また、近似曲線の傾きもほぼ1を示している。

各パターンの平均誤差、標準偏差、変動係数を表3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, 変動係数は0.71, 1.60となりパターン2のバラつきが大きい結果となった。これは、実験における振幅幅がパターン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。計測画像の解像度を上げることで変位計測の精度の向上や動的ひずみ計測が期待できる。

パターン1, 2のDICMとレーザー変位計の時刻歴変位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7, 卓越周波数を表4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7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4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変位応答変位から固有振動数の特定が可能だと確認できた。今回、試験体の任意の点における時刻歴応答変位を計測したが、試験体全域を計測することで固有モードの算出が期待できる。

表2 アルミ試験片物性値

| 規格 | 静弾性係数 | 引張強度 | 伸び |
|---------|-----------------------|-----------------------|----|
| 合金 5052 | 70 kN/mm ² | 248 N/mm ² | 6% |

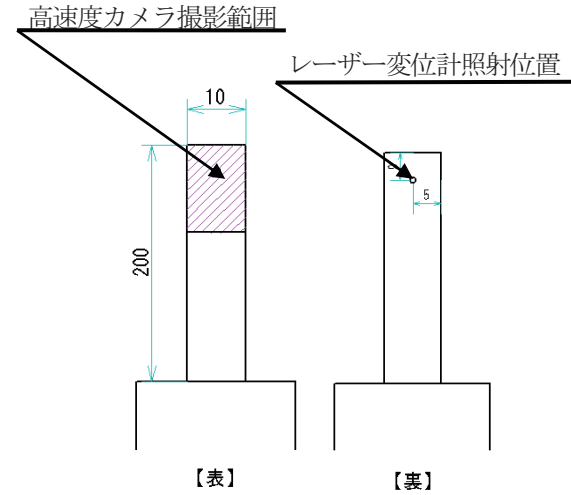


図3 試験体概要

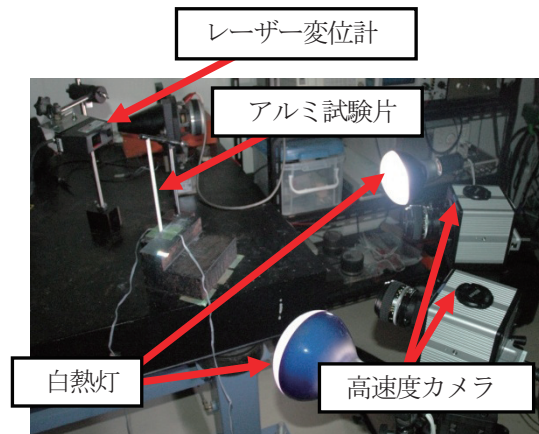


写真3 計測風景

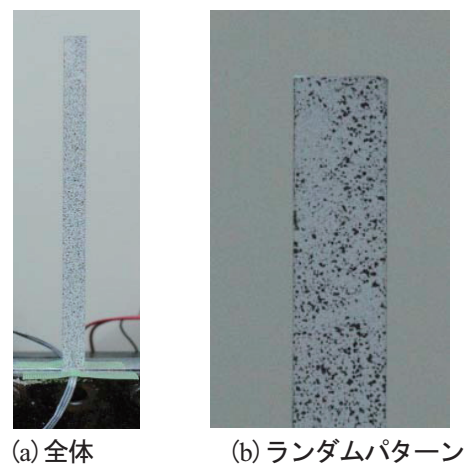
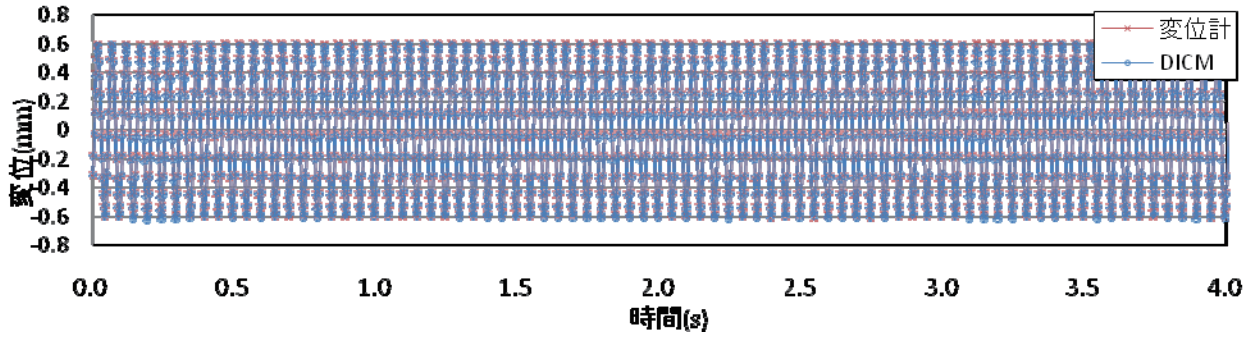
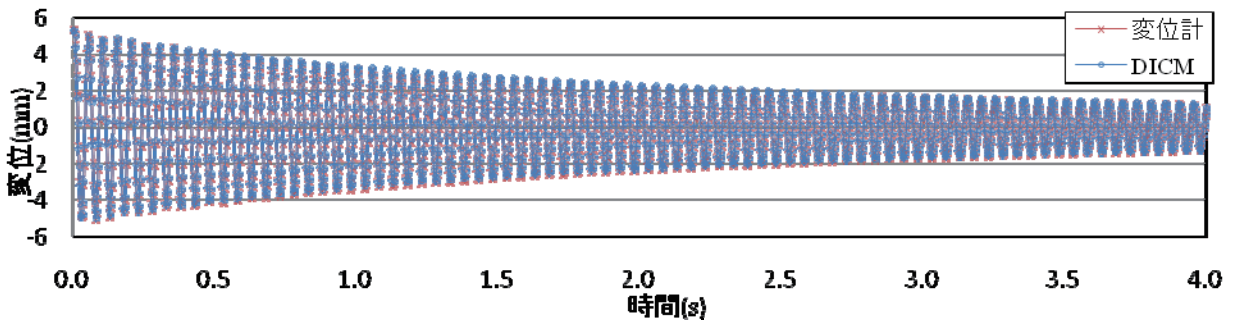


写真4 アルミ試験片

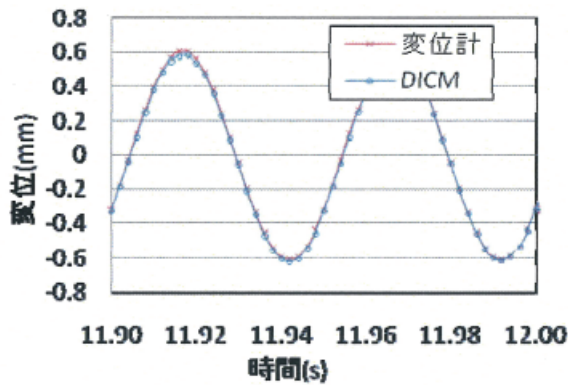


(a) パターン 1

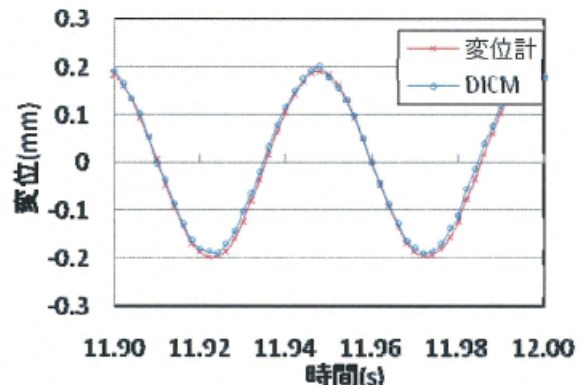


(b) パターン 2

図 4 変位計測結果(0 秒-4.0 秒間)

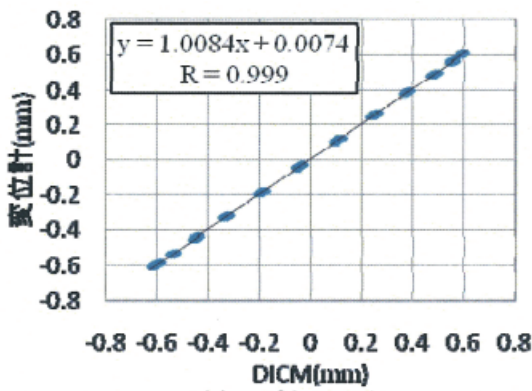


(a) パターン 1

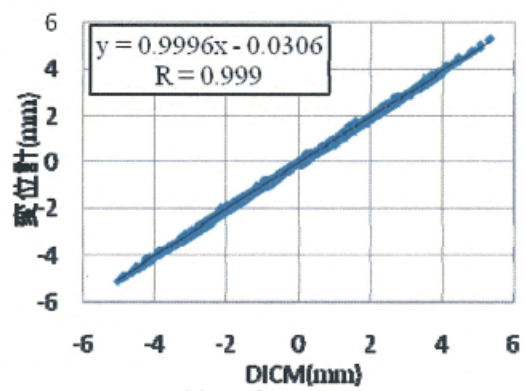


(b) パターン 2

図 5 変位計測結果(11.90-12.00 秒間)



(a) パターン 1



(b) パターン 2

図 6 相関関係

5. まとめ

今回、高速度カメラを用いた DICM によるアルミ試験片の動的変位計測を実施し、得られた結果を以下に示す。

- ・アルミ試験片の定常振動状態及び減衰振動状態において DICM による動的変位計測精度は非常に良く、その有効性が確認できた。
- ・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の特定が可能である。

今後は、画像解像度が変位計測精度に与える影響、動的ひずみ計測や固有モードの算出を行っていく予定である。

謝辞

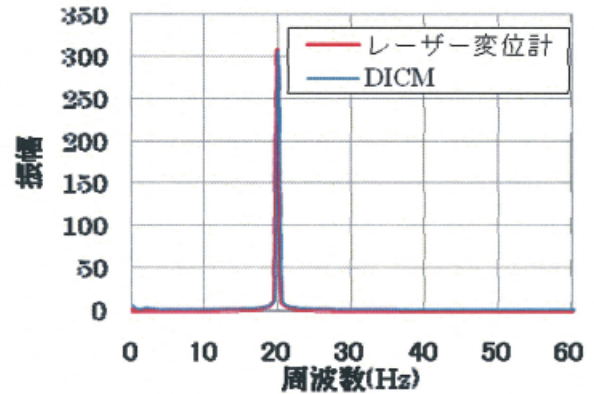
研究を遂行するにあたって、長崎大学工学部教育研究支援部生産技術室の辻下栄技術職員、久田英樹技術職員には、大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

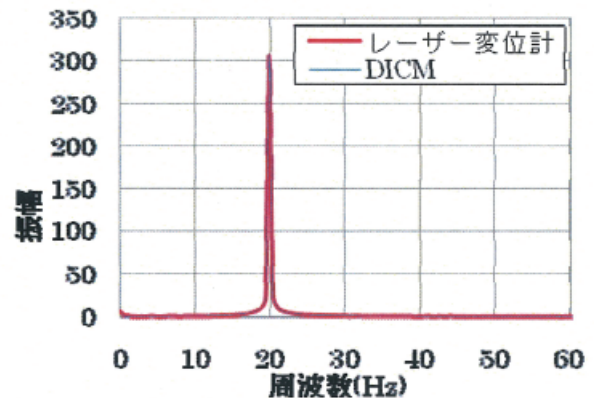
- 1) 社団法人日本非破壊検査協会：非破壊検査～検査と材料評価, Vol.59 No.7 Jul., 2010
- 2) 出水亨, 松田浩, 中島朋史, 浜岡広：非接触全視野計測によるコンクリートの材料試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.473-478, 2006
- 3) C.Morita, C.Zhao, A.Demizu, K.Makino, H.Matsuda, K.Ichimiya : 3D profile measurement and buckling simulation on thin-walled cylindrical shells under compression by utilizing 3D-digital Image Correlation Method , IABMAS 5 2550-2556 (2010)
- 4) 出水亨, 松田浩, 伊藤幸広, 森田千尋, 藤野義裕：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
- 5) 李志遠：先端画像処理技術による大型構造物の全視野変位分布計測, 応力・変位場計測法および解析法の基礎と応用に関する研究集会, 2010
- 6) 岡重嘉泰, 海老原学, 川谷充朗, 金哲佑, 三谷欣也：家庭用デジタルビデオカメラを用い

表3 結果一覧

| | パターン1 | パターン2 |
|----------|--------|-------|
| 平均誤差(mm) | -0.007 | 0.030 |
| 標準偏差(mm) | 0.005 | 0.048 |
| 変動係数 | 0.71 | 1.60 |



(a) パターン1



(b) パターン2

図7 フーリエスペクトル

表4 振動数の比較(Hz)

| | DICM | レーザー変位計 |
|-------|-------|---------|
| パターン1 | 20.01 | 20.01 |
| パターン2 | 20.01 | 20.01 |

た変位計測による橋梁の応答振動数特性, 土木学会第65回年次学術講演会(平成22年9月), I-456, p911-912, 2010年9月

- 7) Correlated Solutions : Vic-3D 2009 Reference Manual.