

# デジタル画像相関法を用いた橋梁のたわみ計測方法の開発

高橋洋一<sup>1</sup>, 松田浩<sup>2</sup>, 伊藤幸広<sup>3</sup>, 出水享<sup>4</sup>, 内野正和<sup>5</sup>, 森田千尋<sup>6</sup>, 牧野高平<sup>7</sup>

著者 1(株)計測リサーチコンサルタント, 著者 2&6 長崎大学大学院工学研究科, 著者 3 佐賀大学大学院工学系研究科, 著者 4&7 長崎大学工学部インフラ長寿命化センター, 著者 5 福岡県工業技術センター

本研究は、高速度カメラを用いた DICM による橋梁の動的なたわみ計測方法を開発することを目的に基礎的な検討を行ったものである。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結果、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。

## 1. はじめに

国土交通省は、地方自治体が管理する橋梁の長寿命化および予防保全型維持管理への移行を図るため、平成 19 年度に「長寿命化修繕計画策定事業補助制度」を新たに創設した。この補助制度に基づき、都道府県および政令指定市の 9 割以上が長寿命化修繕計画を既に策定し（平成 22 年 4 月時点）、その他市区町村においても現在活発に長寿命化修繕計画策定作業が進められている。

地方自治体が策定する長寿命化修繕計画には、橋梁の補修・補強に関わる施工計画のみならず定期的な点検・調査計画も盛り込まれている。補助制度が始まる前の調査では、橋梁の定期点検を行っていた市区町村は全体の僅か 1 割程度であったことから、今後点検・調査業務が大幅に拡大することが予想される。全国で定期点検の対象となる橋梁数は、補助制度の時限措置の期限である平成 25 年度末を待たなければ明らかにならないが、(独)土木研究所構造物メンテナンス研究センターの推計によると、橋長 15m 以上の橋梁だけでも我が国には約 15 万橋あるとされている。橋長 15m 以上の 15 万橋を外観目視、ひび割れスケッチ等の簡易な調査を行うだけでも、その調査費は概算で 250 億円以上となる。

以上のような背景より、今後発生する膨大な点検・調査を合理的に進めて行くために、検査装置・方法には、検査費用が安価、検査時間が短い、特別な技術を要さず操作が簡易という要件を具

備する必要がある。

橋梁の各部材の劣化状況を調べるために破壊・非破壊検査が実施されているが、桁のたわみ測定は、橋梁の耐荷性能を総合的に判断する手法として有効である。現状のたわみ測定方法としては、トラックなどにより静的、動的に載荷し、変位計や光ファイバーセンサにより変位量を測定する方法、衝撃加振装置を用いて振動特性を評価する方法などがある。しかし、いずれも計測コストが高く、専門の技術を要することから普及していない。たわみ計測を一般的なものとするために、簡易で安価な検査方法を開発する必要性が高い。

一方、構造物の効率的な維持管理を行うために、デジタルカメラ等により撮影した画像を用いて変位やひずみを計測する技術に関する研究が盛んに行われている。その中でも、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 と称す）などの非接触かつ全視野で計測可能な新しい画像処理技術に関する研究が鋭意進められている<sup>1)</sup>。

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<sup>2)~4)</sup>。藤垣ら<sup>1)</sup>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<sup>5)</sup>は、サンプリングモアレ法を用いて長さ 10m 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。また、岡重ら<sup>9)</sup>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、更なる高速化が進み、人の目や一般の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た。

以上のような背景より、本研究は、高速度カメラを用いた DICM による橋梁の動的なたわみ計測方法を開発することを目的に基礎的な検討を行ったものである。実験としては、まず CCD カメラを用いた DICM による静的な変位量の計測精度について検証を行い、次いで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、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。

## 2. DICMの概要

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 カメラなどのデジタルカメラで撮影したデジタル画像元に画像解析を行うことにより、計測範囲の任意の点の変位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 台のデジタル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、温度変化に伴う計測空間の揺らぎに比較的強いことも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、任意の点の変位量の算出である。その解析原理は、デジタル画像が一般的に 256 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査する。このサブセット中心の点の移動より変位方向、変位量を算出するものである。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。

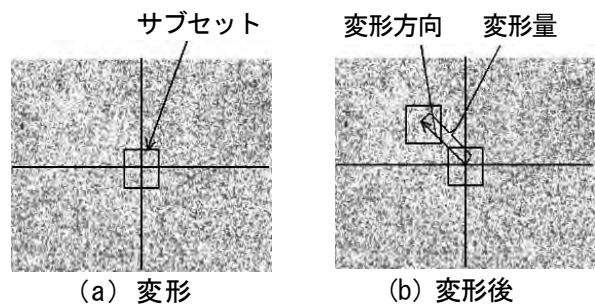


図1 変形前と変形後のデジタル画像

## 3. CCDカメラを用いたDICMによる静的変位量の計測精度の検証

### 3.1 実験概要

本実験では、デジタルカメラを用いDICMによって橋梁のたわみ計測を行う際に最も重要な要件である変位量の計測精度について実験的に検証を行うものである。本研究の目的として、橋梁のたわみ計測を定期点検レベルで実施できるような一般的なものとするため、簡易で安価な計測システムを開発することも目的の一つとしている。なお、開発する計測システムは、デジタルカメラで橋梁の桁側面の変形前後の画像を撮影し、画像解析によりたわみを求める方法を想定している。従って、ここでは足

場等を必要とせず遠距離から計測できるよう、望遠レンズを装着したデジタルカメラによって変位計測を行う方法について検討を行った。

### 3.2 実験方法

本実験で用いた計測システムの概要を表1および写真1に示す。計測システムは、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。テレコンバータは、望遠レンズの焦点距離を2倍にするためのものである。レンズおよびテレコンバータを装着したCCDカメラは長尺となり不安定で画像がぶれる原因となるため、CCDカメラとレンズおよびテレコンバータを一体にできるジグを用いて固定し、さらにジグは三脚を固定させた。

計測精度の検証実験に用いた撮影ターゲットには、QRコードを取り付けたZステージを使用した(写真2)。QRコードの大きさは縦、横ともに54.5mmである。撮影画像中のターゲット部分を多くの画素数で構成させることで計測精度が向上するため<sup>8)</sup>、レンズの最大焦点距離である400mmに設定して撮影を行った。この際の計測システム全体の焦点距離は、35mm判換算で3200mmとなる。

撮影距離は、10m、20mおよび30mと3種類に変化させた。それぞれの距離で撮影されたピクセルサイズは、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と15段階に変化させ、各段階でそれぞれ3枚ずつ、計45枚の画像を撮影した。変位量0mmの画像を初期画像として、各段階で撮影した画像を用いてデジタル画像相関法により移動画素量を求め、ピクセルサイズよりターゲットの変位量を算出した。

移動画素量から変位量への換算は、予め測定しておいたQRコード中のマーク間距離を利用した。なお、撮影距離20mおよび30m時では、QRコードが小さく撮影されるため、換算誤差が予想される。そのため、金尺を撮影し、金尺による換算も合わせて行った。計測は全て室内で行い、明るさを一定にするためLEDライトを2台使用し、ターゲットに照射した。本条件下のシャッター速度は1/30sec、F値は11である。なお、絞りの調整はレンズ側で行っている。

撮影画像の一例を写真3(a)、(b)および(c)に示す。また、金尺による換算画像(撮影距離20m)を写真3(d)に示す。

表1 計測機器仕様

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：3.45×3.45μm 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	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)

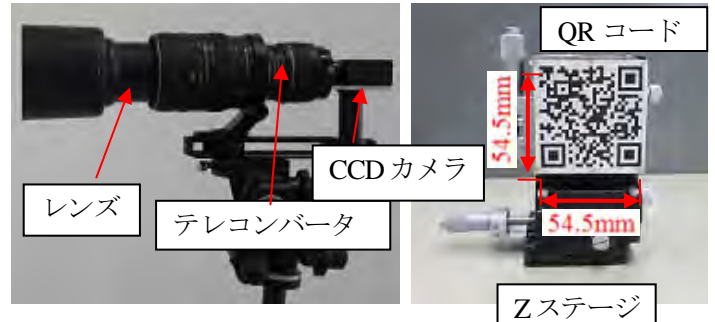
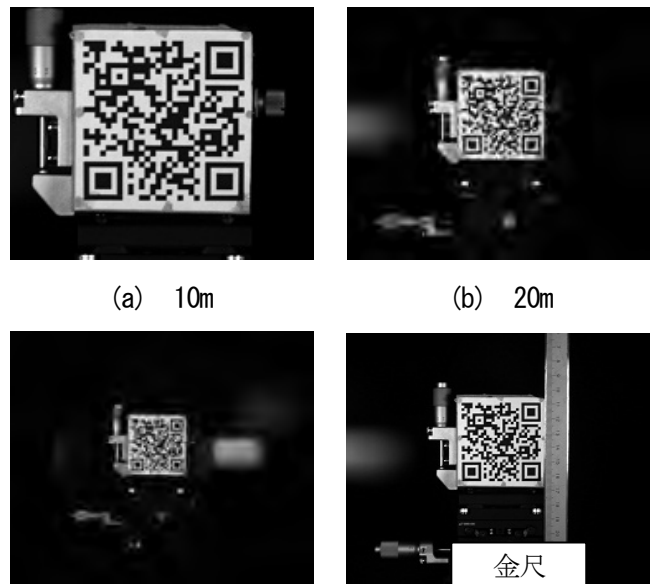


写真1 計測システム

写真2 ターゲット



(a) 10m

(b) 20m

(c) 30m

(d) 20m 金尺入り画像

写真3 ターゲット撮影画像の一例

### 3.3 実験結果

撮影距離10m, 20mおよび30mの変位計測結果 (QRコード換算)を図1 (a), (b), (c)に、誤差の平均、標準偏差、相関係数を表2にそれぞれ示す。撮影距離10mの場合、誤差の平均は0.01mm, 標準偏差は0.01mm, 相関係数は0.999と相関性は高くなった。また、グラフの傾きが非常に1に近いことから、計測精度は高いと考えられる。また、ばらつきが小さいため高精度で計測できていることが分かる。

撮影距離 20m の場合、誤差の平均は 0.008mm, 標準偏差は 0.008mm, 相関係数は 0.999 と相関性は高くなった。また、グラフの傾きが非常に 1 に近くばらつきも小さいことから、計測精度は高いと言える。なおこれらは、金尺で換算した結果と同じ値を示した。

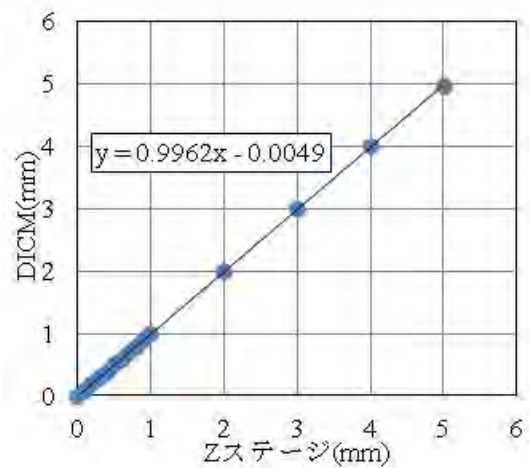
撮影距離30mの場合、誤差の平均は0.019mm, 標準偏差は0.024mm, 相関係数は0.999と相関性は高くなった。10mおよび20mと比較すると誤差平均および標準偏差は大きくなったが、高い精度で計測できている、実用上問題の無い精度であるといえる。また、金尺で換算した場合、わずかに誤差平均が向上したが、標準偏差、相関係数は、同じ値であった。

撮影距離30mの計測結果では、10mおよび20mの計測結果に比べるとばらつきが大きくなった。この原因としては、距離が遠くなるほどターゲットのランダムパターンを構成するpixel数が少なくなるためであると考えられる。計測精度を向上させるためには、より高解像度なデジタルカメラを用いること、更に焦点距離の大きな望遠レンズを用いること、より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などが考えられる。

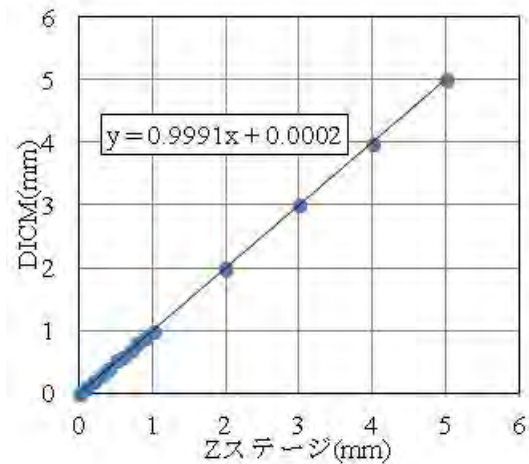
### 3.4 まとめ

本実験で得られた知見を以下に示す。

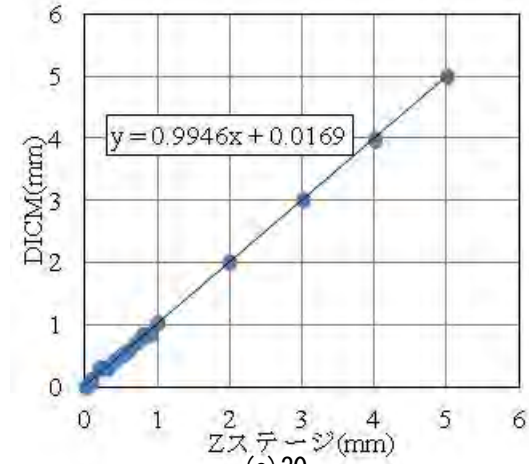
- (1)望遠レンズを取りつけた CCD カメラと DICM による解析を用いることで、遠距離の計測において微小変位を精度よく捉えることができた。
- (2)金尺を用いた比較により、小さく撮影されたターゲットを用いて移動画素量を変位量に換算しても計測精度の大幅な低下は確認されなかった。
- (3)室内実験ではあるが、本計測システムを用いた計測精度は、撮影距離30mという長距離であっても誤差平均は0.02mm程度であり、実橋のたわみ計測に適用した場合、十分な精度を有していると言える。



(a) 10m



(b) 20m



(c) 30m

図1 変位計測結果

表2 計測結果一覧

撮影距離(m)	換算対象	誤差平均 (mm)	標準偏差 (mm)	相関係数
10	QR コード	0.010	0.010	0.999
20	QR コード	0.008	0.008	0.999
	金尺	0.008	0.008	0.999
30	QR コード	0.019	0.024	0.999
	金尺	0.018	0.024	0.999

## 4. 高速度カメラを用いたDICMによる動的変位量の計測精度の検証

### 4.1 実験概要

橋梁のたわみ計測において、従来法のように桁にセンサを設置することなく、足場類も不要で、さらにたわみを発生させるための载荷方法も、走行する車両の荷重を利用することができれば、大幅な計測コストの低減を図ることができ、簡易で安価なたわみ計測方法として定期点検レベルで実施できる可能性がある。この方法を確立するためには、まず遠方からの動的な変位計測が可能であることが前提となる。しかし、このような検討は現状ではほとんど行われていないため、本研究では、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基礎的な検討を行った。なお、本実験では撮影距離を6m程度とし、動的変位計測精度の確認を行った。また、計測した動的変位から振動数の算出を試みた。

### 4.2 実験方法

高速度カメラを用いた計測システムとその仕様を写真4および表3に示す。一般に、デジタルカメラのレンズには収差があり、撮影された画像は歪を含んでいる。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5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。本実験で用いたDICM解析プログラムは、Correlated Solutions Vic-3D 2009<sup>9)</sup>である。

動的変位計測実験に用いた試験片は、寸法（長さ×幅×250mm×10mm×1mm）のアルミ試験片である。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により変位量を算出した。



写真4 高速度カメラを用いた計測システム

表3 計測機器仕様

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

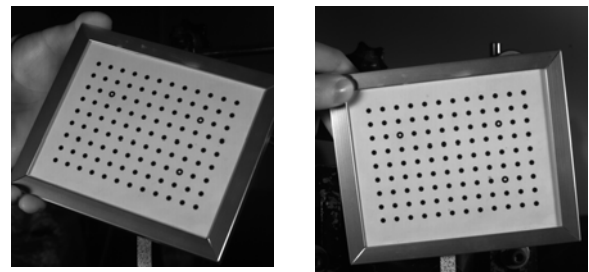


写真5 キャリブレーション画像

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

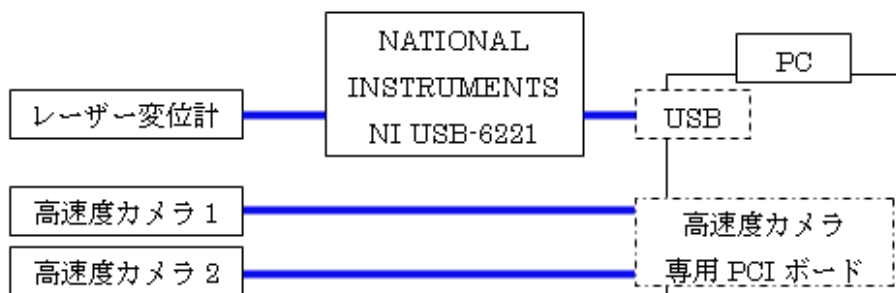


図2 計測システム概要図

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スピードを1/1000sec、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、撮影された画像のピクセルサイズは、約0.173mm/pixelである。

アルミ試験片の物性値を表4、試験体概要を図3、計測風景を写真6、アルミ試験片を写真7にそれぞれ示す。

表4 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 <sup>2</sup>	248 N/mm <sup>2</sup>	6%

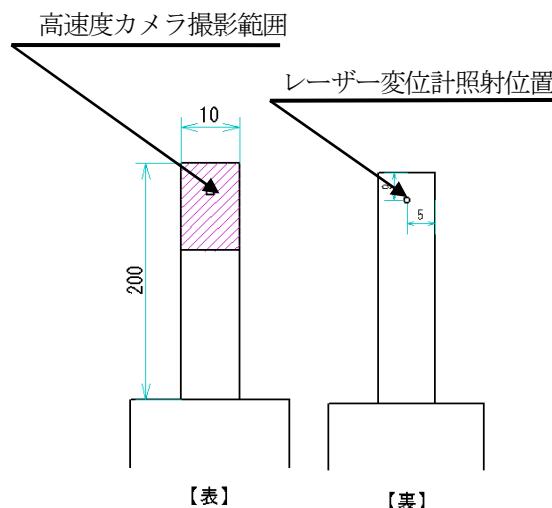


図3 試験体概要

### 4.3 実験結果

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

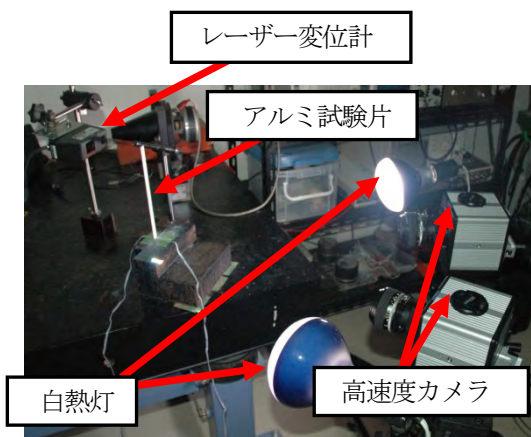
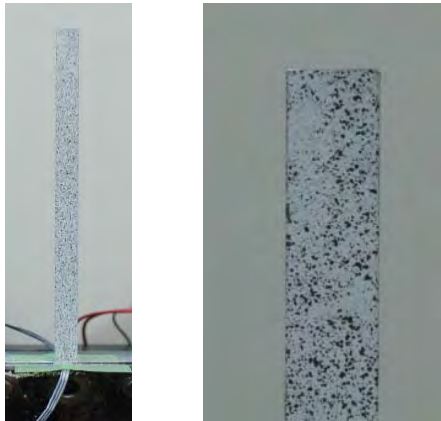


写真6 計測風景



(a)全体 (b)ランダムパターン

写真7 アルミ試験片

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。

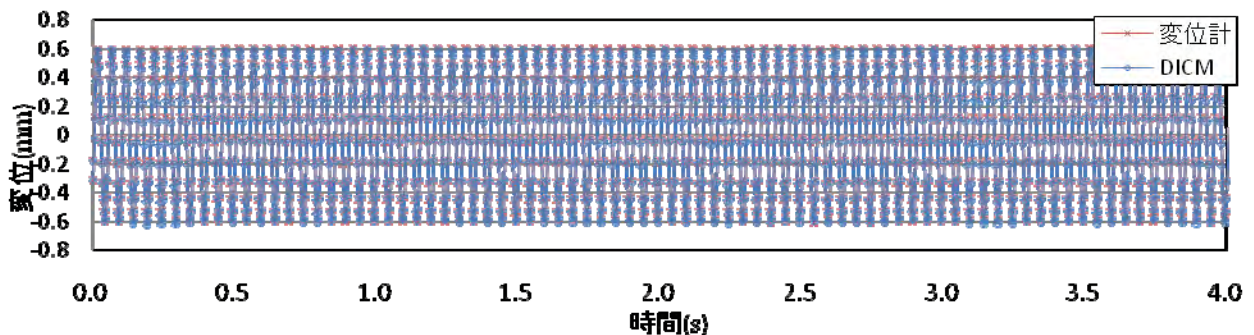
各パターンの平均誤差、標準偏差、変動係数を表5に示す。平均誤差とは、DICMとレーザー変位計の計測値の差分の平均を意味する。パターン1,2の平均誤差は-0.007 mm, 0.030 mm, 標準偏差は0.005 mm, 0.048 mm, 変動係数は0.71, 1.60となり

パターン2のばら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。

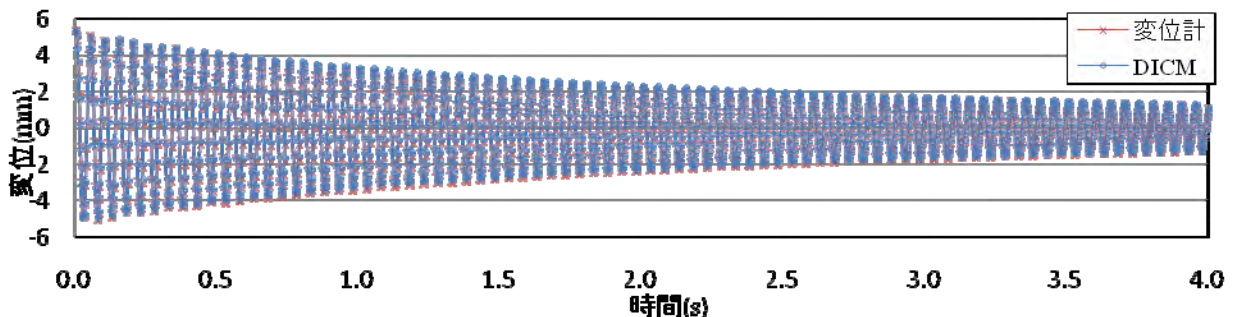
以上から、DICMは高精度に動的変位計測が可能であると確認できた。計測画像の解像度を上げることで変位計測の精度の向上や動的ひずみ計測が期待できる。

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6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)のデータで行った。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6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であると確認できた。今回、試験片の任意の点における時刻歴変位を計測したが、試験片全域を計測することで固有モードの算出が期待できる。

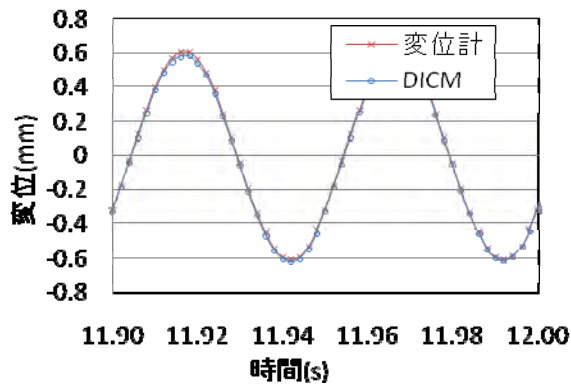


(a)パターン1

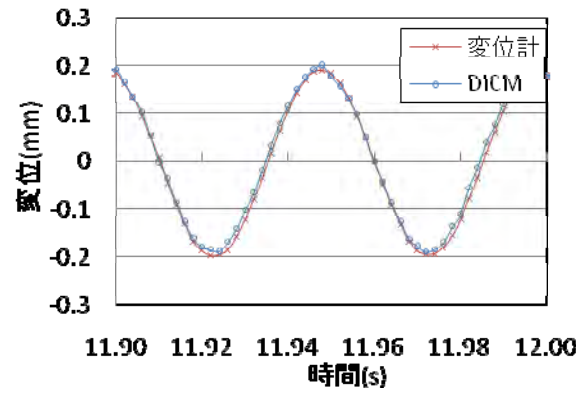


(b)パターン2

図4 変位計測結果(0秒-4.0秒間)

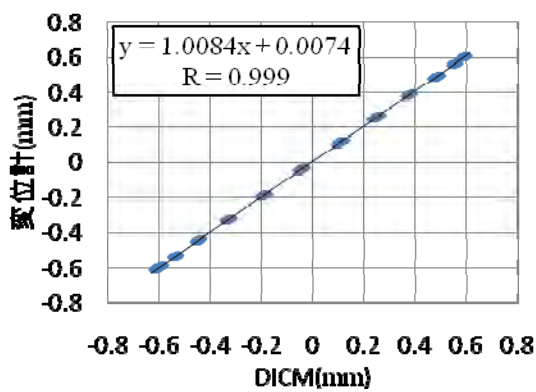


(a) パターン1

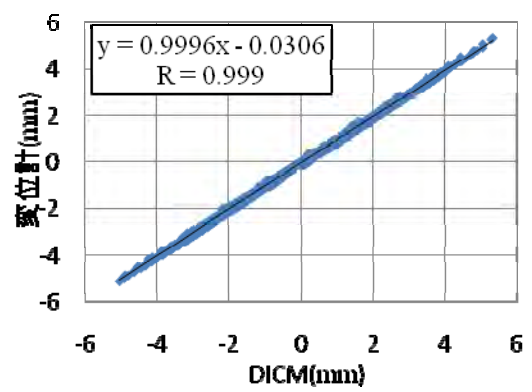


(b) パターン2

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

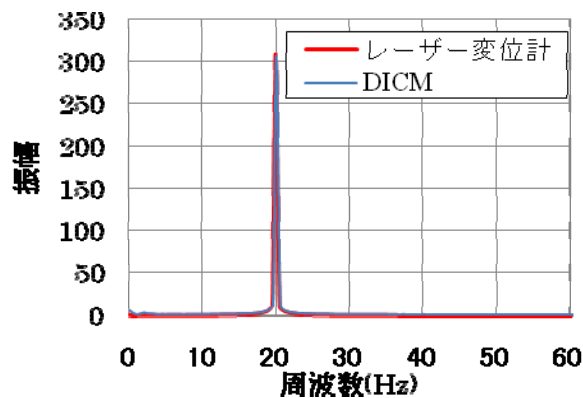
図6 相関関係

表5 結果一覧

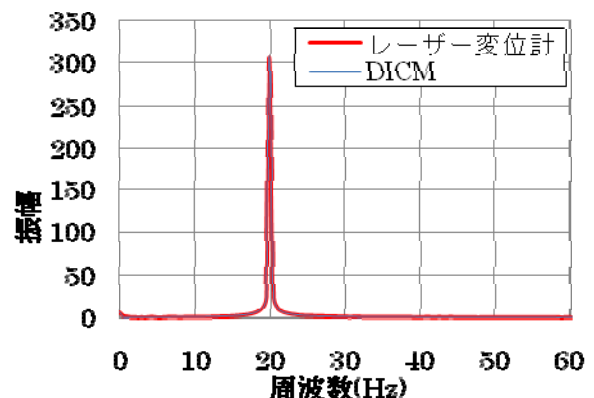
	パターン1	パターン2
平均誤差(mm)	-0.007	0.030
標準偏差(mm)	0.005	0.048
変動係数	0.71	1.60

表6 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



(a) パターン1



(b) パターン2

図7 フーリエスペクトル



#### 4.4 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、得られた知見を以下に示す。

- (1)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。
- (2)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。

- 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)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, 長崎大学工学部研究報告, 41(77), pp.45-52; 2011
- 8) Correlated Solutions : Vic-3D 2009 Reference Manual.

#### 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。

#### <発表論文>

出水享, 板井達志, 松田浩, 森田千尋, 伊藤幸広: 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, 鋼構造年次論文報告集, 第 19 巻 pp.671-676, 2011.11

#### <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, 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) 出水享, 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