

# 第 7 章

## 結 論

## 7.1 各章の結論

本研究で得られた所見を以下に示す.

第1章「序論」では, 研究の背景として, インフラ構造物の現状, 建設分野における計測技術の問題点について述べるとともに, 光学的全視野計測法の特徴について述べた. そして, 光学的全視野計測法の一つである DICM を用いた既往の研究例と本研究の目的ならびに構成について述べた.

第2章「デジタル画像相関法」では, DICM の原理, 特徴を述べた. そして, デジタル画像の取得に必要な計測システムであるカメラ装置とスキャナ装置の特徴について述べた. スキャナ装置は, 屋外で計測することを目的に本研究で開発した装置である. 表 7.1.1 にカメラ装置とスキャナ装置の比較表を示す.

表 7.1.1 カメラ装置とスキャナ装置の比較

	カメラ装置	スキャナ装置	
		装置 A	装置 B
システム	CCD カメラ, レンズ, ノート PC, 接続ケーブル, 三脚など	スキャナ装置, ノート PC, USB ケーブル	
出力	三次元形状, 変位, ひずみ	二次元変位, ひずみ	
操作性	通常のデジタルカメラとほぼ同様に操作に技術は必要ない	技術が必要	
画素数 解像度	500 万画素	解像度 1200dpi (210mm×210 mm を計測すると約 9800 万画素)	
計測範囲	自由に設定可能	200mm×200mm	210mm×210mm
計測距離		約 3mm	約 4mm
計測時間		3 分 30 秒	5 分
振動・外乱 光の影響	有 ⇒計測誤差につながる	無	
質量	約 5kg 以内 (三脚除く)	本体約 6.0kg	本体約 8.0kg
特徴	三次元計測が可能	回転盤により主走査方向を 360° 回転できる	副走査の精度を向上させたため, 回転盤ない
計測表面	計測面に輝度値の変化がなければ, スプレーでランダムパターンを塗布する必要がある		
備考	ステレオ計測により, 凹凸形状や曲面形状の対象物を計測できる	計測対象物が凹凸形状や曲面形状の場合, 計測表面を研磨して平滑にする必要がある	

第3章「変位・ひずみ計測精度の検証」では、カメラ装置とスキャナ装置の計測精度の検証を行った。カメラ装置は、鋼部材およびコンクリート部材を用いて変位、ひずみ計測精度の検証を行った。また、各種計測条件・画像解析条件が計測精度に及ぼす影響について検討するとともに、ひずみ計測精度を向上させるために開発したDICMを用いたマルチロゼット解析法とその計測精度について検討した。さらに、ハイスピードカメラを用いた動的変位計測精度について検討した。スキャナ装置は、鋼部材およびコンクリート部材を用いたひずみ計測精度について検討した。結果として、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) 動的変位計測では、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的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 $\mu$ 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を用いたマルチロゼ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 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ ~16 $\mu$ 、誤差の平均は11 $\mu$ ~20 $\mu$ 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 $\mu$ ~29 $\mu$ 、誤差の平均は3 $\mu$ ~12 $\mu$ 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、副走査にとおいてひずみが高精度に計測できることが確認できた。

第 4 章「鋼部材の溶接および冷却過程における温度、変形、ひずみ計測」では、ひずみゲージ、変位計、熱電対で計測不可能な鋼部材の溶接時（高温時）およびその冷却過程における温度、変形、ひずみ分布計測について検討した。計測では、カメラ装置と赤外線サーモグラフィ装置を用いた。また、計測結果の妥当性を検討するため三次元熱弾塑性 FE 解析を行った。結果として、以下の所見を得た。

- (1) 溶接中および冷却過程における DICM によるひずみ分布の推移とサーモによる温度分布の推移を可視化することができた。
- (2) 溶接中の溶接棒直下ではアーク熱による温度膨張に伴う引張ひずみが確認された。
- (3) 厚さの異なる試験片を用いることで、温度、ひずみ、面外方向の変形の違いを確認することができた。
- (4) 試験片の厚さが大きくなるにつれ、面外方向の変形は小さく、また、温度およびひずみの最大値は小さくなることが確認できた。
- (5) DICM により計測した面外方向の変位は変位計と一致した。
- (6) サーモより計測した温度分布・温度履歴に一致するような入熱温度、表面熱伝達率を逆解析により算出することができた。
- (7) 逆解析で算出した入熱温度、表面熱伝達率を使用した際の解析結果は、DICM の変形・ひずみ分布および履歴と定性的・定量的におおむね一致した。

第 5 章「コンクリート部材の変形、ひずみ、ひび割れ計測」では、カメラ装置とスキャナ装置を用いてコンクリート部材の破壊時の変形およびひび割れ発生・進展挙動の予測・評価に対する有効性を検討するために、撤去桁ならびに実橋梁を用いて変位、ひずみ、ひび割れ計測を行った。結果として、以下の所見を得た。

・カメラ装置

- (1) 変位計やひずみゲージによる接触式計測と同様に、DICMは高精度に変位およびひずみ計測が可能なのが確認された。
- (2) ひずみの集中を可視化することができ、また、2台のCCDカメラを用いたステレオ計測により三次元形状やそのひずみ分布を可視化することができた。
- (3) DICMはひび割れの発生前にひずみの集中が確認され、また、DICMで計測したひずみの集中箇所と目視によるひび割れ発生箇所が一致した。

・スキャナ装置

- (1) ひずみ集中を可視化することができた。
- (2) スキャナ装置から取得した画像でひび割れを計測することができた。
- (3) DICMはひび割れの発生前にひずみの集中が確認され、また、DICMで計測したひずみの集中箇所とスキャナで計測したひび割れ発生箇所が一致した。
- (4) 実構造物を用いた載荷試験では、スキャナ装置はひずみゲージの値より小さい値を示し、荷重の増加とともにひずみ値の差が大きくなる傾向を示した。しかし、ひずみ値の平均誤差は $15\mu$ であり、スキャナ装置は、ひずみゲージと同精度の計測結果が確認された。

6章「PC 構造物の現有作用応力計測」では、DICM の維持管理へ適用するための応用研究として、スキャナ装置を用いた PC 構造物の現有作用応力計測法(スリット応力解放法)の開発を行った。また、その計測法の計測精度の検証を行うとともに、実構造物へ適用した。結果として、以下の所見を得た。

- (1) スリット応力解放法の計測精度を確認するために、プレテンションPC桁を用いて現有作用応力計測の実証実験を行った結果、設計値との差は $0.9\text{N/mm}^2$ であり、精度良く計測することができた。
- (2) 実際に供用されているポストテンションPCT桁橋においてスリット応力解放法を適用した結果、G2桁の現有作用応力は、 $7.96\text{N/mm}^2$ と推定された。
- (3) ASRが生じたポストテンションPC合成I桁橋の現有作用応力計測においては、有効プレストレス量の計測値/設計値は、G4主桁：95.4%、G5主桁：104.4%となり、有効プレストレス量の大きな減少は確認されなかった。よって、耐荷力を十分保有していることが確認された。そして、橋軸方向および橋軸直角方向において、対称点間距離変化率分布において計測値が乱れる結果となった。これは、ASRの膨張力により応力が乱れていることが考えられる。また、橋軸直角方向には、圧縮応力が作用している結果を得た。これは、ASRの膨張力による影響であると考えられる。また、G5主桁は、G4主桁に比べて大きい値を示している。これは、G5主桁がASRによる変状が顕著であることから、その影響を多く受けていることが考えられる。

7章「結論」では、各章の研究成果を総括するとともに、DICMの有用性、発展性、現段階における技術的な問題を挙げ、本研究の結論とした。

## 7.2 本論文の結論

本研究は、光学的全視野計測法の一つである DICM を建設分野に適用するため、鋼部材およびコンクリート部材の適用性について検討を行った。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デジタルカメラなどで計測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位、ひずみを計測できる手法である。研究では、画像取得装置として、カメラ装置とスキャナ装置の2種類の計測装置を用い、それぞれ特徴を生かした計測を行った。

カメラ装置は、CCD カメラ、レンズ、パソコンで構成され、ユーザーが任意に計測範囲、距離などの計測条件を自由に設定できることや2台のカメラを用いてステレオ計測を行うことで三次元形状やその変位、ひずみ分布の計測が可能である。研究は室内で行い、2台のカメラを用いたステレオ計測とした。結果として、既存の計測法である変位計やひずみゲージで計測困難な鋼部材の高温時やコンクリート部材の破壊時の計測に適用し、高精度な変位・ひずみ計測やその可視化ができた。さらに、高速度カメラを用いた動的変位計測やカメラの画像解像度の不足などによる計測精度の低下を補う解析法の開発を行うことができた。

スキャナ装置は、屋外で計測することを目的に研究で開発した装置であり、測定表面に固定・密着させて二次元変位、ひずみの計測が可能である。スキャナ装置は、カメラ装置と比較してレンズ収差、照度の変化、三脚や架台自体が振動・移動、画素数の不足などによる計測精度の低下の心配がない。スキャナ装置は室内および屋外・実構造物において高精度なひずみ計測が可能なが確認された。さらに、既存の計測法であるひずみゲージで計測困難なコンクリート部材の破壊時の計測に適用し、高精度なひずみ計測やその可視化ができた。さらに、DICM をコンクリート構造物の維持管理に適用するための応用研究として、スキャナ装置を用いた応力解放法による PC 構造物の現有作用応力計測法（スリット応力解放法）の開発を行い、高精度に計測可能なことが確認できた。そして、開発した手法を実構造物へ適用することができた。

以上から、DICM は建設分野に十分利用できることが証明できた。スキャナ装置は、今後の建設分野の施工や維持管理において多いに活躍できる実用的な装置と考える。しかし、計測範囲が約 200mm×200mm と若干狭いこと、計測に約 3 分～5 分の時間が要すること、二次元変位・ひずみ計測であること、計測前に計測面を平滑処理する必要があること、装置を測定面に直接固定して計測する必要があるなどの課題がある。インフラ構造物は部材断面が大きく容易に近づくことができない構造物が多く存在し、スキャナ装置の適用は限られると考える。

今後、発生する膨大な老朽化したインフラ構造物を点検・調査を効率的・効果的に進めていくために、完全非接触な計測システムが必要となる。そのことを考えると、スキャナ装置に比べ精度が若干劣るものの、カメラ装置の研究の発展に期待したい。カメラ装置は、レンズの収差の影響、外乱の影響、振動の影響などの解決すべき点があるが、カメラの高性能化ならびに画像処理法の高度化・開発により解決できると考える。今後も DICM を用いた研究を推進していくとともに、実務に役立つ技術開発に力を注ぐ所存である。