

# 第 1 章

## 序 論

## 1.1 研究の背景

### 1.1.1 インフラ構造物の現状

アメリカはニューディール政策によって、1930年代に多くのインフラを整備した。道路橋で見ると、1931年から1935年の5年間に2万2千橋、1935年から1940年に3万橋もの橋梁が建設された。1920年代が1万橋であり、1910年代が数千橋だったのに比べ著しい増加であった。その後、第二次世界大戦時代の落ち込みを経て、1960年代にはインターステートハイウェイ整備の全盛に至り、ピークの1961年から1965年の5年間には5万5千橋の橋梁が整備されるなど、大量のインフラが供給されてアメリカの経済成長を支えてきたとともに、長距離・大量の人々や物資の移動が安全に効率的に行えるようになり、地域における生活の安全や安心の向上に大きく寄与した。しかし、1920年から1930年代に建設された橋が50～60年後の1980年代に老朽化および落橋が相次ぎ、「荒廃するアメリカ(America in Ruins)」と言われるようになった<sup>1)</sup>。その後、維持管理費を増強し補修補強を行ったにもかかわらず、現在でもまだ3割もの欠陥橋梁があると言われている。

アメリカでの最初の事故が、1967年のウェストバージニア州とオハイオ州を連絡するシルバー橋の落橋である<sup>2)</sup>。クリスマスの買い物で混雑していたシルバー橋が突然落橋、46名が死亡した。1928年に建設されたこの橋は、センタースパン20mの吊橋で吊部材が疲労を起こして、切断に至った。1983年には、コネチカット州のインターステートハイウェイの一部であるマイアナス橋が崩壊した<sup>3)</sup>。崩壊は、午前1時に起きたため、3名の死亡と3名の重傷ですんだが、本橋は日交通量9万台も走行する片側三車線の幹線道路であったため、日中に崩壊していれば大惨事になるところであった。これも建設後わずか25年しか経過していないが、十分な維持管理が行われていなかったことによる鋼橋の疲労き裂が原因であったとされている。その後も2005年のペンシルバニア州I-70コンクリート跨道橋<sup>4)</sup>、2006年のカナダのモンリオールでデラコンコルド跨道橋<sup>5)</sup>、2007年のミネアポリスの鋼製トラス橋<sup>6)</sup>と立て続けに落橋事故が発生している。ミネアポリスの鋼製トラス橋は、欠陥が発見されたため、継続的なモニタリングが行われていたにもかかわらず、補修補強工事の最中に落橋した。

わが国は、戦後急速に公共インフラを整備してきたが、塩害や錆による橋梁の劣化、道路橋床版の疲労、劣化トンネルのコンクリート片はく落、鋼製橋脚隅角部の疲労き裂などにみられるように、これまでに建設されてきた道路ストックの劣化・老朽化が急速に進行している。アメリカの例を考慮すると、日本では2010年代以降に多くの老朽化橋梁が出現することが予想される。その上、わが国の道路ストックは、地震・台風・島国など、地勢的にも地理的にも厳しい自然・環境条件下に存在し、利用者の安全・安心を確保するため欧米以上の適切な管理が必要である。特に条件の厳しい道路では損傷が顕著であるため早期対策が不可欠となる。

国土交通省では、「荒廃するアメリカ」のようにならないようにするため、社会資本整備審議会道路分科会「基本政策部会」を設置した。そこでは、道路施設の急速な高齢化を踏まえ、今後の道路管理はどうあるべきか、「荒廃する日本」としないための道路管理について審議されていた(2007年3月8日)<sup>7)</sup>。しかし、その3ヶ月後の2007年6月20日に三重県の本曾川橋のトラス斜材(H形鋼)の破断が発見された。床版と斜材の間にできた隙間に雨水が浸透して腐食し、車の繰り返し荷重が作用して破断したと

推定されている<sup>8)</sup>。さらに、同年8月27日に秋田県の本荘大橋のトラス斜材において、腐食による断面欠損部のはつり調査中、大型クレーンの通過時に欠損部分が破断した<sup>9)</sup>。これらの事故からも「荒廃するアメリカ」の状況が日本においても現実視されるようになった。このような状況を受けて、2007年10月に“道路橋の保全に向けた有識者会議”が開催され、2008年5月には「道路橋の予防保全に向けた提言」が出されている<sup>10)</sup>。

国内において、平成23年4月の段階で通行止めを行っている橋長2m以上の橋梁は216箇所、通行規制を行っている橋梁は、1658箇所存在しており、その数は平成20年度と比較して1.5～2倍と増加している<sup>11)</sup>。老朽化による崩落や破損、使用規制に関する具体的な事例も、46件報告されている<sup>12)</sup>。

しかも危険なことに、全国に68万存在する橋梁のうち、日常的に点検・管理されているものは極少数で、平成23年4月の段階において、22%の自治体は定期検査すら行っていない<sup>13)</sup>。これは橋梁だけの問題ではない。学校、図書館、病院、公民館といった公共施設や、上下水道、ごみ処理場などのインフラ施設も同様の状況にある。すでに公共施設の5割以上は建設後30年を経過している<sup>14)</sup>。



写真 1.1.1 ペンシルバニアの落橋事故<sup>4)</sup>



写真 1.1.2 ミネアポリスの落橋事故<sup>6)</sup>



写真 1.1.3 木曾川橋梁のトラス斜材の破断<sup>8)</sup>

### 1.1.2 建設分野における計測技術の問題点

インフラ構造物の老朽化が問題となり、維持管理やリスク評価がより重要視される中、構造物の安全性や信頼性を評価する手法である構造ヘルスマニタリング(Structural Health Monitoring: SHM)<sup>15)~18)</sup>が注目されている。SHMは、構造物における安全性および信頼性評価の効率化やコスト削減を目的とした手法であり、その測定対象は変位、ひずみ、応力、振動、腐食量など多岐にわたる。その中でも構造物に生じる変位やひずみは破壊に対する安全指標であるため、特に継続的にモニタリングすべき対象の一つとされており、変位、ひずみ計測に求められる要求は非常に高い。しかし、建設分野における変位やひずみ計測による各種管理の有用性は一般的に認識されているものの作業性・コスト、設置環境の影響、計測精度などの問題から効率的・効果的な計測が実現できていない。

作業性・コストの問題として、計測箇所が海洋上や高所位置など容易に近づくことができない場合は、センサ設置のために仮設足場や高所作業車が必要となる。それに伴って交通規制が必要な場合もあり、作業が大掛かりになることやコストも増加する。また、インフラ構造物は一般的に部材寸法が大きく各部の応力状態が複雑なため、多点・多方向計測が必要となる。そのため、計測器までの配線作業が煩雑となる。また、配線が施工などの妨げになる場合や誤って配線を切断し計測が中断されることも多々ある。

設置環境の影響として、センサが機械的な変化量を電気信号として検出するため、水分、温度など周辺環境の影響を受け、それが大きな計測誤差となる。特に高温材料では、センサの耐火性の問題から計測不可能な場合が多い。構造物の動的な沈下量を計測する場合、リング式変位計やダイヤルゲージ式変位計、あるいはレーザ変位計などが用いられることが多い。しかし、これらの使用には、構造物に近接した定点が必要であり、周辺地盤も構造物とともに沈下する場合にはこれらを用いることができない。また、レーザレベルやトータルステーションなど、離れた場所からの沈下量を計測できる機器もあるが、一般にサンプリング周波数が遅く動的沈下量の計測には向かない。

センサの精度の問題として、センサから得られる情報は、1点1方向の平均値のみである。さらに、ひずみゲージ内やその近傍にひび割れが発生すると周辺部とのひずみ挙動に大きな差異が生ずることやゲージが切れて計測不能となる場合もある。また、センサ自体の耐久性の問題から長期に渡る計測には不向きである。

### 1.1.3 光学的全視野計測法

最近、従来の変位、ひずみ計測法に代わる手法として、光学的全視野計測法<sup>19)~24)</sup>の研究開発が行われている。光学的全視野計測技術は、「光の性質を利用して計測範囲全域の情報を二次元、三次元的に把握する計測手法」と定義できる。光の波長分類と産業上の応用例を図1.1.1に示す。人間の目に見える可視光はおよそ400nmから800nmの狭い範囲の領域である。光学的全視野計測技術では、可視光はもちろん電波のような長い波長のものから、赤外線、紫外線、X線、さらに短い波長であるガンマ線といった人間の目では捉えられない様々な波長の電磁波を使用して計測が行われる。光学的全視野計測は、計測対象物にセンサを取り付けて計測する方法と比べると、以下の特徴がある。

① 遠隔・非接触な計測が可能であり、センサ設置手段(例えば仮設足場など)が不要となる。設置型

センサに必要なケーブルの配線が不要となる。

- ② 多点の情報を短時間で取得可能なため、計測範囲の多点の情報が取得でき一点当たりの計測コストが安価になる。
- ③ 高密度の計測結果を可視化情報として表現可能となり、計測対象物の挙動を分布で把握しやすく、評価が行い易い。

安全で安価に高密度の可視化情報にして、状態を視認しやすく出来ることから、光学的全視野計測が、設置型のセンサ技術や非破壊検査技術と同等以上に計測できる独特の技術分野と言えるのはこの辺りにある。このことから、光学的全視野計測法は、建設分野の既存の変位、ひずみ計測の種々の問題を解決できる可能性がある。

光学的全視野計測法の代表的な手法として、サーモグラフィ法<sup>25)~28)</sup>、ホログラフィ法<sup>29)~37)</sup>、モアレ法<sup>38)~42)</sup>、スペckルパターン干渉法<sup>43)~46)</sup>、デジタル画像相関法<sup>47)~54)</sup>（以下 DICM と呼ぶ）がある。

サーモグラフィ法は、計測対象物から放射されている赤外線をセンサにより検出し、その強度分布を温度分布として検出する手法である。赤外線サーモグラフィ法は、簡易に対象物の温度を計測できることや装置の使い方も簡単であるため、現在、さまざまな分野で利用されている。しかし、変位やひずみの計測は困難である。

ホログラフィ法は、光の干渉、回折により生じる縞から、主に面外変位を計測する手法である。変形前のホログラムを記録し、その再生画像と変形後を二重露光することから同時に再生される物体間の干渉によって面外変位が求められる。また、正弦振動している物体から等振幅線を得る方法で、変形前あるいは静止状態をホログラムに記録し、この再生像と振動状態での物体光波面を直接干渉させることにより、実時間的に変化の状態を計測することができる。特徴として、振動の影響をうけることから防振装置が必要となる。また、計測装置が特殊で高価である。

モアレ法は、計測対象物に細い格子線を描き、変形前後の格子線から得られるモアレ縞から変位を計測する手法である。高・低湿環境あるいは大変形状態でも計測可能であり、計測では、格子を計測対象物表面に描く必要があることから、計測対象物が限定されるため汎用性がない。

スペckルパターン干渉法は、レーザ光が粗面などによって散乱・反射することで生じるスペckルパターンを利用した計測法である。計測精度はレーザの波長を基準としており、位相解析を行うことで数 nm という非常に高精度な計測法である。しかし、計測領域は理論的には数 m<sup>2</sup>程度から顕微鏡領域までと小さいことや、空気のゆらぎに弱いため屋外で利用が困難であることや、一度に計測できる計測幅が小さいことから大変形計測に向かない特徴をもつ。さらに、計測装置が高価である。

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。計測装置は、デジタルカメラのみ（画像の保存にパソコンが必要な場合もある）と簡易かつ軽量化であり、操作も非常に簡単である。

以上から、計測システムが簡易かつ安価で変位やひずみ計測が可能な DICM が建設分野において最も利用できる可能性が高いと考える。



ステム領域をモデル化した試験片を用いた押し込み試験を行い、DICMによりステム/骨セメント/皮質骨界面周辺の微視的な変位挙動を計測している。南谷ら<sup>63)</sup>は、顕微鏡で観測される微小循環系の細かな流動現象を超高速度ビデオ録画システムで映像として捉え、DICMによって血流やリンパ流の速度を計測するとともに、血管やリンパ管の収縮活動を計測する方法について紹介している。森田ら<sup>64)</sup>は、歯科インプラントおよびその周辺骨の変位、ひずみ、応力分布の把握にDICMを適用している。

電気電子分野では、宍戸ら<sup>65)</sup>は、光学顕微鏡とDICMを組み合わせることで微細な領域のひずみ分布を計測する手法を開発し、積層版の断面部やシリコンチップ内蔵基盤内部の熱ひずみ分布計測を行っている。鈴木ら<sup>66)</sup>は、DICMを用いて電子部品の熱変形挙動の計測を行っている。さらに、DICMを顕微鏡画像に適用することで、従来は計測困難とされているはんだ断面の熱変形の評価を行っている。

農学分野では、福島ら<sup>67)</sup>は、DICMを用いて栄養生長期の小麦の植被率の推定法を開発し、植被率による生育診断の可能性について検討している。豊岡ら<sup>68) 69)</sup>は、シロイヌナズナ(植物)を対象として、その花茎の運動を市販のビデオカメラによる観察とDICMによる定量化を行っている。村田ら<sup>70) 71)</sup>は、木材の4点曲げ試験の破壊時において、DICMにより二次元ひずみ分布解析を試みている。そして、二次元計測では、木材の面外変形により計測精度が低下することから、2台のカメラを用いたステレオ計測により面外方向の変形量の補正を試みている。さらに、DICMを用いて針葉樹木口面を観察し、年輪構造が横圧縮時の変形挙動に与える影響を観察している。

材料分野では、松原ら<sup>72)</sup>は、異方性材料の線形弾性論をインテリジェントハイブリッド法に組み込むことにより、DICMと二次元インテリジェントハイブリッド法を組み合わせたCFRP複合材料の線形弾性領域における変位解析、応力、ひずみ解析を行っている。中山ら<sup>73)</sup>は、紙に光を透過させることで得られる透過光画像の地合パターンにDICMを適用したシステムを構築している。さらに、このシステムを用いて湿潤シートの乾燥過程における変形状態の把握に利用している。Choiら<sup>74)</sup>は、光学顕微鏡とDICMを用いて、コピー用のカーボントナーを付着させた木片や板紙のひずみ計測を行っている。村澤ら<sup>75)</sup>は、熱的負荷(加熱・冷却)中の形状記憶合金複合材料に生じる変形、内部応力、温度分布をDICM、光弾性法、赤外放射温度測定法(サーモグラフィ)により計測している。松田ら<sup>76)</sup>は、変形能の大きい膜材に対してDICMを適用し、リンクルの発生箇所および発生時を特定している。大貫ら<sup>77)</sup>は、DICMによりウレタンゴムの振動下の面内方向の動的変位を計測し、有限要素法と比較し計測精度の検討を行っている。また、計測した動的変位から固有振動数の算出を行っている。

以上から、DICMは、さまざまな分野に利用されていることから、その原理の理解、計測装置の操作、計測結果の評価の容易さを伺える。DICMは、市販のデジタルカメラを用いた計測が主だが、研究者の中には、顕微鏡と組み合わせた微細領域の計測、高速度カメラを用いた動的計測、X線CT装置を組み合わせた内部の計測を行っており、DICMの応用範囲の広さが伺える。また、DICMはデジタルカメラの画素数に計測精度が依存するため、計測精度を向上させるためのアルゴリズムの開発も行われている。

### 1.2.2 建設分野における変位、ひずみ計測について

建設分野における変位、ひずみ計測は、設置型である変位計やひずみゲージによる計測が主である。これらの計測は、点計測であり多点多方向の計測をするためには、多くのセンサが必要となる。最近で

は、光ファイバセンサの開発により線的ひずみ計測が可能となっている。光ファイバを用いた研究として、岩城ら<sup>78)</sup>は、光ファイバセンサを用いた構造ヘルスマニタリングシステムを提案し、兵庫県南部地震以降急速に広まった制震・免震などの機構を有する損傷制御型建築構造物に対して実装・運用を行い、その性能を検証している。小林ら<sup>79)</sup>は、FBG センサを用いて、橋梁上を車両が通過した際の変形挙動の履歴から、逆解析によって荷重を算出する Weigh-In-Motion システムの構築し、実橋への適用性を検証している。倉嶋ら<sup>80)</sup>は、光ファイバひずみ・損失統合型 OTDR を用いた構造物の変状計測手法について検討を行っており、モデル実験として、コンクリート単純梁の曲げ試験を行い、コンクリート構造物の弾性変形限界約  $100\mu\text{m}$  のひずみを光ファイバにより測定可能であることを実験的に確認し、検討手法が構造物のひずみ分布を測定する手段として有効であることを明らかにしている。光ファイバは、耐久性があり長期間ひずみ計測が可能なことや動的に計測できる特徴がある。しかし、計測に際してセンサを構造物に直接設置する必要があることやセンサから測定器までの信号線が必要となるため、設置に関しては、従来のひずみゲージや変位計と同じである。また、センサや測定器が非常に高額であることから、利用が限定的であり普及していない。

広範囲の変位計測法としては、GPS を利用した計測が開発されている。櫻井ら<sup>81)</sup>は、長大斜面や大規模露天掘りピットなどのような、広範囲な領域における地盤の変位測定に GPS 測量を適用して、GPS 測量による変位測定の精度をシミュレーション実験ならびに実際の長大切取斜面の変位測定に GPS を適用してその実用性を明らかにしている。GPS 計測は非常に広範囲の変位を計測できる特徴があるが、人工衛星の位置やセンサの設置場所によっては、計測精度が低下することや計測不能になる場合がある。

### 1.2.3 建設分野について

建設分野において DICM を適用した研究として、佐川ら<sup>82)</sup>は、DICM を一軸圧縮試験時におけるモルタル供試体の表面のひずみ計測を試みている。そして、ひずみゲージとの比較によりほぼ同等の結果を得ていることやひずみ分布の可視化に成功している。しかし、計測は室内で行われること、1台のカメラを用いた二次元計測であるため試験体が面外方向に変形した場合、計測精度が大きく乱れること、モルタル試験体を用いており、コンクリートに比べて材質が均一であること、計測範囲が  $100\times 100\text{mm}$  範囲と狭いこと、などからコンクリート材料へ適用できたとはいえない。Choi ら<sup>83)</sup>は、DICM により、一軸圧縮試験時におけるコンクリートに発生するマイクロクラックの伝播を詳細に計測し、コンクリートの破壊が骨材の間隔により影響を受けることを確認している。また、圧縮荷重下でコンクリートに発生したひび割れは、画像解析の計測精度に大きな影響を及ぼさないと報告している。野間ら<sup>84)85)</sup>は、各種配合により高強度コンクリートの圧縮強度が変化する現象を説明するため、DICM によりコンクリート表面のひずみ計測を行い、連結、進展したひび割れの可視化あるいは微細ひび割れの発生、累積を含めた損傷状況の把握を試みている。しかし、計測は室内で行われること、1台のカメラを用いた二次元計測であるため試験体が面外方向に変形した場合、計測精度が大きく乱れること、計測範囲が狭いこと、さらに、計測結果はひずみ分布による定性的な評価のみであり、計測精度について言及していないことなどから、計測精度に疑問が残りコンクリート部材に十分適用できたとはいえない。

東、渡部、二羽ら<sup>86)~89)</sup>は、載荷中の試験体の変形を画像解析により計測し、画像解析の計測結果を



有限要素法に適用することでコンクリート供試体の変形やひずみ分布をリアルタイムに計測可能なシステムの開発ならびにその広域化を行っている。開発したシステムを、鉄筋コンクリート梁などの载荷試験に適用した結果、コンクリート表面に発生したひずみの分布からひび割れの特徴や破壊性状の経時的变化の把握が可能なることを確認している。開発したシステムは、複数のカメラを用いて、広範囲な計測が可能だが、カメラ一台に対してパソコンが一台必要なり広域な計測するためには、計測システムが複雑になる。また、計測に際して、計測対象物に等間隔に評点を貼り付ける必要があり、手間がかかる。その評点間に複数のひび割れが生じた場合は、1つのひずみ分布として評価されることから実際のひび割れの評価とは異なる。さらに、試験中に評点が欠損すると計測できないこと、などの問題がある。さらに、有限要素法によりひずみを算出することから、DICM と異なる。

米山ら<sup>90)</sup>は、DICM を用いて鋼橋のたわみ計測を行うため、簡単なはりを用いた実験を行っている。結果として、あおりレンズを用いた計測の有効性を確認するとともに、ランダムパターンを塗布することなくたわみ計測が可能なることを示している。さらに、橋長 10m~30m の橋梁のたわみ分布が計測可能であるがばらつきが大きいことを示している。

### 1.3 研究の目的

既往の研究からも、DICM はさまざまな分野に利用されており、その原理の理解、計測装置の操作、計測結果の評価の容易さを伺える。しかし、建設分野においては、国内外を見てもごく一部の研究者により行われているのが実状である。そこで、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への適用性について検討を行った。

既往の建設分野における DICM の研究として、室内において計測されていること、計測システムは一台のカメラを用いた二次元計測であること、さらに計測範囲が狭いことなどのから、十分な計測が実現できていない。本研究では、2台のカメラを用いて三次元計測を行うこと、既存の研究より広範な計測を行うこと、屋外において計測可能とすること、高精度な計測を行うこと、およびコンクリート構造物の維持管理へ応用することに着目して研究を行った。

DICM は、デジタル画像を取得するため、画像計測装置が必要となる。本研究で使用した画像計測装置は、カメラタイプ全視野計測装置（以下カメラ装置と呼ぶ）とスキャナタイプ全視野計測装置（以下スキャナ装置と呼ぶ）の2つを用いた。スキャナ装置は屋外で計測を可能とするため、本研究で開発した装置である。それぞれの詳細は2章で述べるが、カメラ装置は、CCD カメラ、レンズ、パソコンと簡易なシステムあり、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。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計測が可能であり、凹凸や曲率形状のある計測物の変位、ひずみの計測が可能である。一方、スキャナ装置は、計測物に密着・固定させて二次元の変位・ひずみを計測する装置であり、計測中の照度の変化、振動・移動の影響を受けず計測できる。

それぞれの装置に特徴があり計測環境によっては適用制限があることが想定される。そこで、本研究は、装置の特徴を考慮して鋼部材およびコンクリート部材の計測を行った。

## 1.4 論文の構成

本論文は、7章で構成されており、各章の関係と流れをフローチャートにすると図1.4.1となる。

第1章「序論」では、研究の背景と目的、既往の研究および本論文の構成について述べたものである。

第2章「デジタル画像相関法」では、本論文で利用した光学的全視野計測法の一つである DICM の原理、特徴について述べたものである。DICM は、デジタル画像を用いて画像解析を行う。そこで、画像を計測するためのシステムが必要となる。ここでは、計測システムとして、カメラ装置とスキャナ装置の特徴について述べたものである。なお、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。

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について述べたものである。カメラ装置は、鋼部材およびコンクリート部材を用いた変位、ひずみ計測精度の検討および各種計測条件、画像解析条件が計測精度に及ぼす影響について検討を行った。また、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を行った。さらに高速度カメラを用いた動的変位計測精度の検討を行った。スキャナ装置では、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の検討を行った。

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、DICMを鋼部材へ適用するための基礎的研究として、従来の計測法であるひずみゲージ、変位計で計測困難な鋼部材の溶接時（高温時）およびその冷却過程における変形、ひずみ分布計測について述べたものである。試験では、試験体が高温状態になるため、非接触計測が可能なカメラ装置を用いた。また、赤外線サーモグラフィにより温度分布を計測し、変形、ひずみと温度の関係について検討を行うとともに、三次元熱弾塑性FE解析を行い温度、変形、ひずみ計測精度の検証を行った。

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、DICMをコンクリート部材への適用するための基礎的研究として、従来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におけるコンクリート表面の変形、ひずみ、ひび割れ計測について述べたものである。計測は、カメラ装置とスキャナ装置を用いた。カメラ装置は屋内、スキャナ装置は屋外ならびに実現場において計測を行い、コンクリートのひび割れ発生、進展挙動の予測・評価への有効性について検討した。スキャナ装置については屋外ならびに実現場への適用性について検討を行った。

第6章「PC 構造物の現有作用応力計測」では、DICMをコンクリート構造物の維持管理へ適用するための応用研究として、PC 構造物の現有作用応力計測について述べたものである。ここでは、従来のひずみゲージを用いたコンクリートの応力解放法に比べ計測精度を向上させるため、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）を開発し、その計測精度の検討を行った。さらに、計測法の実構造物への適用性について検討を行った。

第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、本論文の結論とした。

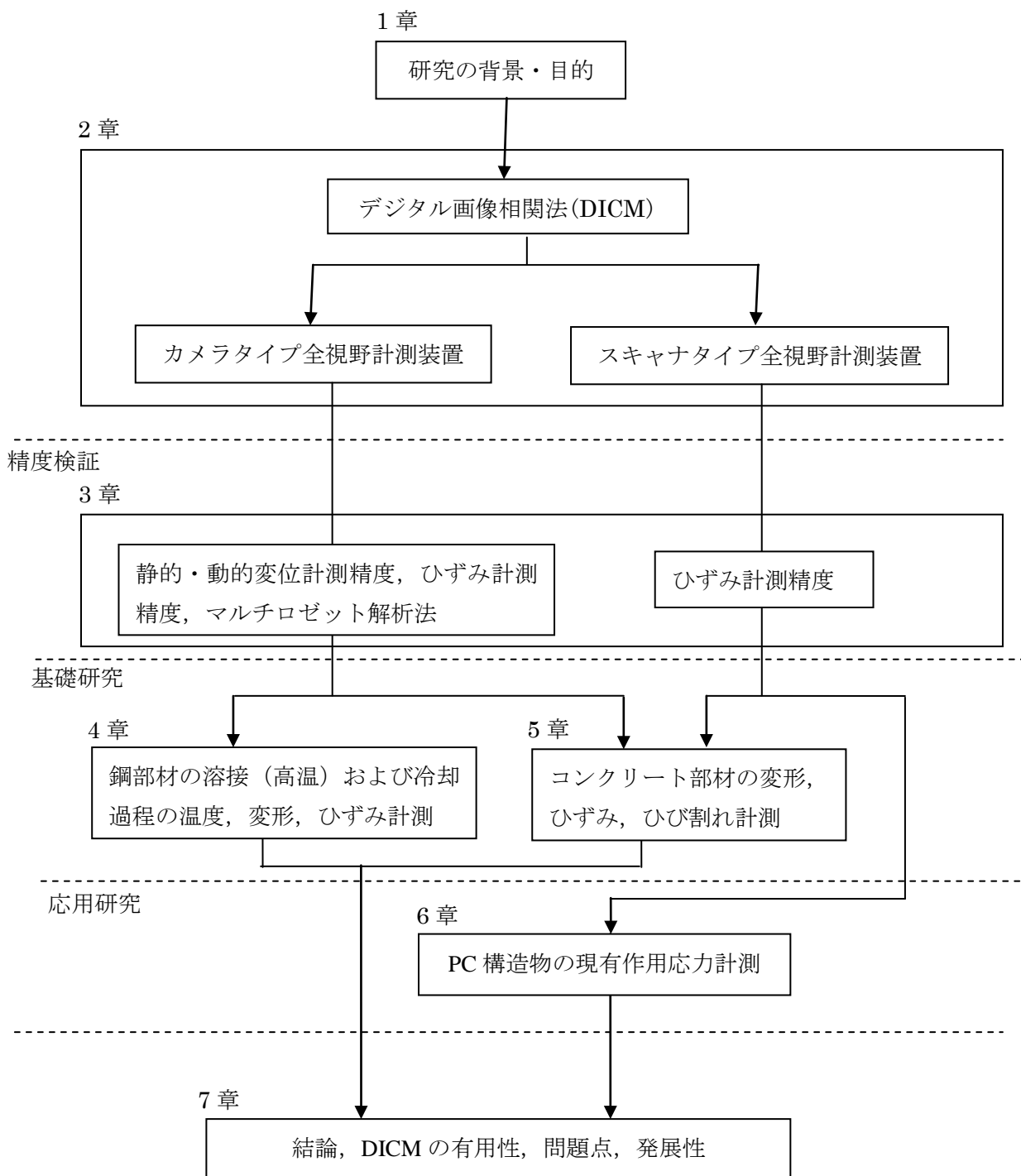


図 1.4.1 各章の関係と流れ

【参考文献】

- 1) チョート, P., ウォルター, S. (社会資本研究会訳) : 荒廃するアメリカ, 開発問題研究所, 1982.
- 2) J.W. Fisher, 阿部英彦, 三木千寿 : 鋼橋の疲労と破壊—ケーススタディー, 建設図書
- 3) Highway Accident Report, NTSB, July 19, 1984.  
(URL <http://www.nts.gov/publicn/1984/HAR8403.htm>)
- 4) Federal Highway Administration HP  
(URL <http://www.fhwa.dot.gov/>)
- 5) 六郷恵哲, 羽田野英明, BANTHIA Nemkumar: カナダのデラコンコルド跨道橋の崩落事故に学ぶ, コンクリート工学, Vol.46, No.12, pp.35-41, 2008.
- 6) 米国ミネアポリス橋梁崩壊事故に関する技術調査団「米国ミネアポリス橋梁崩壊事故に関する技術調査報告」, 2007.
- 7) 国土交通省道路局「荒廃する日本」としないための道路管理～道路施設の急速な高齢化を踏まえ, 今後の道路管理はどうあるべきか～, 2007.
- 8) 山田健太郎 : 国道 23 号木曾川大橋の斜材の破断, 橋梁と基礎, Vol41, No.9, pp.54-55, 2007.
- 9) 日経コンストラクション(431), pp.14-15, 2007.
- 10) 国土交通省「道路橋の予防保全に向けた有識者会議」  
(URL : <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/maintenance/index.html>)
- 11) 国土交通省「地方自治体管理橋梁の通行規制状況について」  
(URL : <http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobohozen.html>)
- 12) 国土交通省「道路橋の重大損傷—最近の事例」  
(URL : <http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobohozen.html>)
- 13) 国土交通省「橋梁点検実施および長寿命化修繕計画策定の進捗率について」  
(URL : <http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobohozen.html>)
- 14) 国土交通省 : 国土交通白書 2010
- 15) Boller, C., F-K., Chang, and Y., Fujino: Encyclopedia of Structural Health Monitoring, vols.1-5, pp.1-2709, Wiley, 2009.
- 16) 日本非破壊検査協会:特集 構造ヘルスマモニタリング, 非破壊検査, Vol.52, No.4, pp.173-193, 2003.
- 17) 呉智深, 許斌, 原田隆郎 : 都市インフラに関する構造ヘルスマモニタリングの現状と展望, 応用力学論文集, Vol. 6, pp.1043-1054, 2003.
- 18) 中村充 : 建築構造物のヘルスマモニタリング, 計測と制御, Vol.41, No.11, pp.819-824, 2002.
- 19) 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 特集 応力とひずみの計測検査と材料評価, Vol.59, No.7, 2010.
- 20) 社団法人日本非破壊検査協会 : 非破壊検査 特集 光学的全視野応力・ひずみ計測技術の最近の動向, Vol.52, No.3, pp.115-136, 2003.
- 21) 日本実験力学会 : 実験力学 特集 光学的全視野計測法の現状とその標準化, Vol.2, No.1, pp.2-54, 2002.

- 22) 米山聡, 森本吉春: 光学的全視野応力・ひずみ計測法の国際標準化について, 実験力学, Vol.2, No.1, pp.32-38, 2002.
- 23) 森本吉春, 米山聡: 全視野計測法標準化分科会: 光学的全視野計測法の研究開発とその標準化, 実験力学, Vol.1, No.1, p.17, 2001.
- 24) 米山聡, 森本吉春: 光学的全視野応力・ひずみ計測法の国際標準化について, 実験力学, Vol.2, No.1, pp.32-38, 2002.
- 25) 日本写真測量学会: 熱赤外線リモートセンシングの技術と実際, p.36
- 26) 日本リモートセンシング研究会: リモートセンシング・ノートー原理と応用一, p.26
- 27) 矢尾板達也, Pierre BREMOND: 赤外線応力計測のリアルタイム計測法, 非破壊検査, Vol.59, No.7, pp.324-327, 2010.
- 28) 和泉遊以, 阪上隆英, 久保司郎, 森直也: 赤外線サーモグラフィによる鋼橋梁疲労き裂の遠隔検出・評価手法の開発, 日本機械学会 M&M 材料力学カンファレンス, pp.749-751, 2009.
- 29) 藤垣元治: デジタルホログラフィによるひずみ分布計測, 非破壊検査, Vol.59, No.7, pp.300-305, 2010.
- 30) 山口一郎: 光学的全視野応力・ひずみ計測技術の最近の動向デジタルホログラフィによる形状・変形計測, 非破壊検査, Vol.52, No.3, pp.127-131, 2003.
- 31) Yamaguchi, I. and T., Zhang: Phase-shifting Digital Holography, Opt. Lett., Vol.22, No.16, pp.1268-1270, 1997.
- 32) 山口一郎: 位相シフトデジタルホログラフィによる形状と変形の計測, 実験力学, Vol.1, No.4, pp.191-196, 2001.
- 33) Yamaguchi, I., J., Kato, and S., Ohta: Surface Shape Measurement by Phase-shifting Digital Holography, Opt. Rev., Vol.8, No.2, pp.85-89, 2001.
- 34) Yamaguchi, I., J., Kato, and H., Matsuzaki: Measurement of Surface Shape and Deformation by Phase-shifting Image Digital Holography, Opt. Eng., Vol.42, No.5, pp.1267-1271, 2003.
- 35) 坂上賢一, 大瀧博貴, 隆雅久: 位相シフトイメージプレーンデジタルホログラフィによる変位・変位勾配の計測, 実験力学, Vol.6, No.2, pp.71-76, 2006.
- 36) Schnars, U. and Jüptner., W.: Principales of direct holography for interferometry, FRINGE93, Proc.2nd international Workshop on Automatic Processing of Finge Patterns, Axademie, Berlin, pp.115-120, 1993.
- 37) 高橋功, 森本吉春, 野村孝徳, 米山聡, 藤垣元治: 位相シフトデジタルホログラフィを用いた面外変位計測, 実験力学, Vol.3, No.2, pp.42-46, 2003.
- 38) 森本吉春: モアレ法を用いた三次元形状・変形計測 サンプリグモアレ法による高速・高精度な形状・ひずみ分布計測, 画像ラボ, Vol.22, No.3, pp.7-14, 2011.
- 39) 李志遠, 沼山達朗, 坂真澄, 南原健一, 小林大輔: 三次元ハイブリッドサンプリグモアレ法による構造物の応力集中評価, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.77, No.777, pp.741-744, 2011.
- 40) 藤垣元治, 塩川貴之, 梶谷明大, 森本吉春: サンプリグモアレ法による膜構造物の動的形状計測,

- 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, p.69, 2009.
- 41) 李志遠, 南原健一, 小林大輔: サンプルングモアレ法による大型構造物の全視野変位分布計測, 非破壊検査, Vol.59, No.7, pp.328-333, 2010.
  - 42) 李志遠, 森本吉春, 藤垣元治: サンプルングモアレ法による構造物の非接触変位分布計測検査技術, Vol.14, No.5, pp.1-6, 2009.
  - 43) 豊岡了: 電子スペックルパターン干渉法(ESPI)の原理と応用, 日本実験力学学会研究発表講演会講演論文集, pp.297-300, 2002.
  - 44) 豊岡了: ダイナミック電子スペックルパターン干渉法(DSPI)による動的全視野計測, 実験力学, Vol.2, No.1, pp.20-25, 2002.
  - 45) 豊岡了: スペックル干渉法による粗面の変形測定, 非破壊検査, Vol.44, No.7, pp.515-521, 1995.
  - 46) 早川峰之: ESPIによるひずみ計測 Dr.Ettemeyer 社製 Micro Star による計測 (小特集: ひずみみをレーザーで計る, 光アライアンス, Vol.11, No.9, pp.41-44, 2000.
  - 47) Sutton, M.A., J.-J., Orteu, and J.-J., Screeier: Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, Springer, 2009.
  - 48) Hild, F., and F., Roux: Digital Image Correlation: from Displacement measurement to Identification of Elastic Properties-a Review, Strain, Vol.42, No.2, pp.69-80, 2006.
  - 49) Pan, B., K., Qian, H., Xie, and A., Asundi: Two-dimensional Digital Image Correlation for In-plane Displacement and Strain Measurement: a Review, Measurement Science and Technology, Vol.20, No.6, Art.No.062001, 2009.
  - 50) Morita, Y., M., Uchino, M., Todo, Y., Matsushita, K., Akarawa, and K., Koyano: Visualizing Displacement and Deformation Behavior of the Periodontium Under Dental Occlusion Using a Digital Image Correlation Method, Journal of biomechanical science and engineering, Vol.2, No.3, pp.105-114, 2007.
  - 51) 西川出: デジタル画像相関法による全視野微小変位分布計測, 非破壊検査, Vol.54, No.3, pp.132-138, 2005.
  - 52) 米山聡: デジタル画像相関法を用いた変位・ひずみ分布測定, 非破壊検査, Vol.59, No.7, pp.306-310, 2010.
  - 53) 梅崎栄作: デジタル画像相関法, 実験力学, Vol.3, No.2, pp.115-118, 2003.
  - 54) 米山聡, 森本吉春: デジタル画像相関法による変位測定とその標準化について, 材料力学部門春のシンポジウム講演論文集, pp.98-103, 2003.
  - 55) 岡直樹, 松崎亮介, 轟章: デジタル画像相関法を用いたタイヤの面内ひずみ・面外変位同時計測, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.74, No.746, pp.53-59, 2008.
  - 56) 藤松信義, 三栖功: 軟質ゲルコーティングを用いた表面摩擦力の画像計測システムの構築, 可視化情報学会誌, Vol. 27, pp.265-268, 2007.
  - 57) 植村知正, 井口学, 臼井尚, 坂根守: 二値画像相関法による水槽中の三次元流れの計測, 可視化情報学会誌, Vol. 13, pp.67-70, 1993.

- 58) Yoneyama, S., and M., Takashi : Automatic Determination of Stress Intensity Factor Utilizing Digital Image Correlation, J. Jpn. Soc. Exp. Mech., pp.202-206, 2001.
- 59) 畝田道雄, 岩田節雄, 松石正克, 芦田吏史, 岡田潤, 石川憲一: 計測画像を用いたひずみ分布計測法に関する研究-高ひずみ条件下における計測精度および疲労き裂発生位置の推定に関する実験検証, 精密工学会誌, Vol.75, No.3, pp.437-442, 2009.
- 60) 葛上昌司, 桑水流理, 吉川暢宏: 並列三次元一括画像相関法による軟組織内部の変位場同定, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.73, No.732, pp. 844-851, 2007.
- 61) 桑水流理, 中本与一, 吉川暢宏: X線 CTによる生体内非侵襲力学場評価, 日本機械学会第15回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, pp.423-424, 2003.
- 62) 森田康之: デジタル画像相関法による骨セメント型人工股関節を模擬したステム/骨セメント/皮質骨界面周辺の微視的変形挙動計測, 実験力学, Vol.11, No.2, pp.107-111, 2011.
- 63) 南谷晴之, 臓器微小循環系の血流・リンパ流の可視化と動態解析, 生物物理, Vol.36, No.1, pp.35-39, 1996.
- 64) 森田康之, 銭立和, 東藤貢, 松下恭之, 内野正和, 新川和夫, 古谷野潔: デジタル画像相関法による歯科インプラントを植立した擬似骨の変形計測(実験力学における計測, 解析法の新展開(2)), 年次大会講演論文集, pp.143-144, 2009.
- 65) 穴戸信之, 池田徹, 宮崎則幸, 中村健太郎, 宮崎政志: デジタル画像相関法を用いた電子実装部の熱ひずみ分布計測, 材料, Vol.57, No.1, pp.83-89, 2008.
- 66) 鈴木康平, 荒木俊二, 池田健一, 三宅修吾: デジタル画像相関法による電子デバイスとはんだ接合部の熱変形評価(特集 2 マイクロ接続技術の進化), エレクトロニクス実装学会誌, Vol.12, No.7, pp.616-622, 2009.
- 67) 福嶋陽: デジタル画像を利用した栄養生長期の小麦における植被率の簡易推定法, 日本作物学会, Vol.70, pp.236-237, 2001.
- 68) 豊岡了: ビデオカメラおよびデジタル画像相関法によるシロイヌナズナの回旋運動の計測, 非破壊検査, Vol.54, No.6, pp. 298-301, 2005.
- 69) 豊岡了, 門野博史, 三輪誠, ラルハヤケ P.アヌラ: 植物の成長の光学的非接触計測とその環境センシングへの応用, 実験力学, Vol. 8, No. 4, pp23-24, 2008.
- 70) 村田功二, 増田稔, 宇京斉一郎: デジタル画像相関法による木材のひずみ分布解析, 可視化情報学会論文集, Vol.25, No.7, pp.57-63, 2005.
- 71) 村田功二, 増田稔: 画像相関法による針葉樹の横圧縮ひずみ分布解析(<特集>木質材料), 材料, Vol.52, No.4, pp.347-352, 2003.
- 72) 松原晃義, 町田賢司, 荻原慎二: デジタル画像相関法とインテリジェントハイブリッド法によるCFRP 複合材料の応力解析(セッション 2 画像計測・評価), 評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, Vol.4, pp.37-40, 2005.
- 73) 中山智仁, 江前敏晴, 尾鍋史彦: 透過光画像に画像相関法を応用した紙の物性解析技術, 紙パ技協誌, Vol. 56, No. 11, pp.90-96, 2002.

- 74) Choi, D., J. L., Thorpe, and R. B., Hanna: Image-analysis to measure strain in wood and paper, *Wood Science and Technology*, Vol.25, No.4, pp. 251-262, 1991.
- 75) 村澤剛, 米山聡, 東郷敬一郎, 隆雅久: 形状記憶合金複合材料に生じる変形と内部応力分布, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol.71, No.705, pp.780-788, 2005.
- 76) 松田浩, 森下喬, 安東祐樹, 古屋瞬, 山下務, 内野正和, 伊藤幸広, 崎山毅: デジタル画像相関法を用いた矩形張力膜のリンクル計測, *応用力学論文集*, Vol.9, pp.581-590, 2006.
- 77) 大貫博崇, 町田賢司: デジタル画像相関法による構造物の振動解析, *実験力学*, Vol.10, No.1, pp.57-62, 2010.
- 78) 岩城英朗, 柴慶治, 武田展雄: FBG 型光ファイバセンサを用いた構造ヘルスマモニタリングシステム, *応用力学論文集*, Vol. 6, pp.1113-1120, 2003.
- 79) 小林裕介, 三木千壽, 佐々木栄一: FBG 光ファイバセンサによる Weigh-In-Motion システムの構築, *応用力学論文集*, Vol.6, pp.1009-1014, 2003.
- 80) 倉嶋利雄, 薄知規, 田中郁昭, 佐藤昌志: 光ファイバ歪みセンサを用いた構造物歪み分布評価法, *地震工学研究発表会講演論文集*, Vol.24, pp.397-400, 1997.
- 81) 櫻井春輔, 清水則一, 皿海章雄, 古谷茂也: GPS による切り取り斜面の変位測定, *土木学会論文集*, No.47, III-24, pp.137-142, 1993.
- 82) 佐川康貴, 尾上幸造, 内野正和, 松下博通: 一軸圧縮力を受けるモルタル供試体のひずみ計測へのデジタル画像相関法の適用性に関する検討, *実験力学*, Vol. 7, No. 2, 2007.
- 83) Choi, S., and S. P., Shah: Propagation of microcracks in concrete studied with subregion scanning computer vision, *ACI Materials Journal*, Vol.96, No.2, pp.255-261, 1999.
- 84) 野間康隆, 渡辺健, 二羽淳一郎: 画像解析による高強度コンクリートの圧縮破壊性状の可視化ならびに評価, *土木学会論文集 E*, Vol. 66, No. 1, pp.68-79, 2010.
- 85) 野間康隆, 渡辺健, 二羽淳一郎: 画像解析を用いた高強度コンクリートの圧縮破壊進展評価, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.31, No.1, pp.523-528, 2009.
- 86) 東広憲, 渡辺健, 三木朋広: 画像解析を用いた鉄筋コンクリートはりの破壊性状の予測, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.30, No.3, pp.793-798, 2008.
- 87) 東広憲, 渡辺健, 二羽淳一郎: 破断した軸方向鉄筋を有する RC はりの破壊に対する画像解析, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.31, No.2, pp.727-732, 2009.
- 88) 渡辺健, 東広憲, 三木朋広, 二羽淳一郎: コンクリート構造実験を対象としたリアルタイム画像解析システムの開発, *土木学会論文集 E*, Vol.66, No.1, pp.94-106, 2010.
- 89) 東広憲, 渡辺健, 三木朋広, 二羽淳一郎: 画像解析を用いた RC はりの破壊性状の予測, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.30, No.3, pp.793-798, 2008.
- 90) 米山聡, 北側彰一, 岩田節雄, 谷和彦, 北村幸嗣, 菊田久雄: デジタル画像相関法を用いた橋梁の非接触たわみ分布測定, 非破壊検査, *Vol.55, No.3, pp.119-125, 2006.*