

画像解析技術の応用とロボット技術の活用による  
橋梁点検の効率化・高度化に関する研究

2019年7月

長崎大学大学院工学研究科

木本 啓介



# 目 次

第1章 序 論 .....	1
1.1 研究の背景 .....	1
1.2 研究の目的 .....	2
1.3 論文の構成 .....	2
第2章 レーザや画像を用いた計測技術 .....	7
2.1 3次元計測技術の現状 .....	7
2.2 3D計測技術の分類 .....	8
2.3 3D計測技術の特長 .....	10
2.3.1 航空LiDAR, UAV-LiDAR .....	10
2.3.2 地上型3Dレーザスキャナ .....	12
2.3.3 ハンディスキャナ .....	14
2.3.4 写真測量 .....	16
2.3.5 Structure from Motion (SfM) .....	18
2.3.6 その他の3D計測技術 .....	22
2.4 UAV-LiDARの適用性検証 .....	26
2.4.1 概要 .....	26
2.4.2 上空からの計測手法比較 .....	26
2.4.3 UAV-LiDARシステムの概要 .....	27
2.4.4 河畔林における検証 .....	29
2.4.5 自然災害後の峡谷におけるデータ取得と検証 .....	34
2.4.6 まとめ .....	36
第3章 ひびわれの視認と検出における検証 .....	39
3.1 検証の概要 .....	39
3.1.1 検証の背景と目的 .....	39
3.1.2 デジタルカメラの仕組み .....	41
3.1.3 「ひびわれ描画支援システム」 .....	42
3.2 カメラ・解像度の違いによる視認可能な最小ひびわれ幅の検証 .....	44
3.2.1 検証方法 .....	44
3.2.2 検証結果 .....	48
3.2.3 考察 .....	53
3.2.4 視認性評価のまとめ .....	55
3.3 ひびわれ位置・幅判読図化システムの精度確認 .....	56
3.3.1 精度確認方法 .....	56
3.3.2 精度確認結果 .....	57
3.3.3 まとめ .....	59
第4章 大型橋梁の点検における UAV-SfM の実証試験 .....	63
4.1 概要 .....	63

4.1.1	背景と目的.....	63
4.1.2	鷹島肥前大橋の概要 .....	64
4.1.3	使用機材 .....	66
4.2	既往研究との違い, 改善点 .....	67
4.3	撮影計画.....	69
4.4	データ処理・解析 .....	71
4.4.1	データ取得状況 .....	71
4.4.2	撮影結果 .....	71
4.4.3	SfM 解析.....	73
4.4.4	損傷図作成.....	75
4.5	考察.....	76
4.6	抽出された課題 .....	77
4.7	まとめ .....	78
第5章	中小橋梁の点検における SfM の活用方法の比較・検証 .....	81
5.1	概要.....	81
5.1.1	背景と目的.....	81
5.1.2	検証の対象とした中小橋梁.....	81
5.1.3	検証項目 .....	82
5.1.4	使用機材 .....	82
5.2	データ取得と SfM 解析.....	84
5.2.1	データ取得.....	84
5.2.2	撮影結果と SfM 解析結果.....	86
5.3	SfM の各出力結果を用いた比較検証 .....	88
5.3.1	カメラの性能による差.....	88
5.3.2	形状の再現性検証 .....	89
5.3.3	SfM 解析のための撮影位置の検討 .....	91
5.3.4	損傷図の作成および定期点検結果との比較.....	96
5.4	検証結果の他橋梁での適用検証.....	97
5.4.1	対象橋梁 .....	97
5.4.2	使用機材 .....	97
5.4.3	撮影方法 .....	97
5.4.4	データ解析・処理.....	98
5.4.5	他橋梁での適用検証のまとめ .....	99
5.5	まとめ .....	100
第6章	SIP 江島大橋プロジェクトにおける橋梁点検への 新技術の実用化に向けた実証試験 .....	103
6.1	はじめに.....	103
6.2	実証試験の概要 .....	103
6.2.1	目的 .....	103

6.2.2	江島大橋の概要と定期点検における問題点.....	104
6.3	実証試験計画.....	106
6.3.1	実証試験範囲.....	106
6.3.2	ロボット技術の選定と適用範囲.....	106
6.3.3	ロボット技術の制約条件の確認.....	113
6.3.4	実証試験工程.....	115
6.3.5	江島大橋プロジェクトの位置付けと実証試験実施体制.....	116
6.4	ロボット技術の精度確認試験.....	117
6.4.1	画像撮影ロボットの精度確認試験.....	117
6.4.2	打音ロボット技術の精度確認試験.....	131
6.5	実証試験結果.....	133
6.5.1	概要.....	133
6.5.2	画像を用いた点検の課題と解決策.....	134
6.5.3	作業状況.....	140
6.5.4	展開画像.....	141
6.5.5	損傷程度の評価について.....	142
6.6	損傷程度評価に関する考察.....	147
6.6.1	損傷程度の評価結果について.....	147
6.6.2	損傷抽出時の留意点.....	147
6.6.3	ひびわれ抽出結果の違いとその原因.....	149
6.6.4	総評.....	150
6.7	実用化に向けた基礎資料作成.....	151
6.7.1	江島大橋で実証したロボット技術の「ロボット技術シート」作成.....	151
6.7.2	ロボット技術を活用した橋梁点検業務の積算基礎資料作成.....	154
6.8	まとめ.....	162
第7章	ま と め.....	165
7.1	各章のまとめ.....	165
7.2	本研究のまとめ.....	167
7.3	今後の展望.....	167

謝辞



# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

地上型 3D レーザスキャナ (TLS : Terrestrial Laser Scanner) やモバイルスキャナの小型化・高性能化や「空の産業革命」と呼ばれる UAV (Unmanned Aerial Vehicle : 無人飛行体) の一般化などハードウェアの革新と 3D データ解析技術や SfM (Structure from Motion) のような画像解析技術, PC 性能の向上などソフトウェアの革新の相乗効果により, 3次元計測技術が近年目覚ましい進化を遂げている。

UAV の登場は, 多くの計測が地上目線であったのに対し, 空中からの計測が容易に可能となり, 計測の幅を大きく広げた。従来より航空機やヘリコプター, ラジヘリといった計測技術により広範囲の空間情報取得は実施されているが, コスト面や難易度が高く容易に扱えるものではなかった。しかし, UAV は比較的安価なうえ, その安定性から短期間の訓練でオペレーションができ, 低空から短時間で極小範囲の高密度情報の取得が可能なることから急速に普及し, 各分野で広く活用されている。また, SfM の普及も近年の 3次元計測の状況を大きく変化させた。SfM は, 従来の写真測量では困難であったような多量の画像を一括でオートマチックに解析可能なことと解析に熟練の技術を要せずにリアリティのあるテクスチャがマッピングされた 3次元データが得られることが特徴である。上記両技術により, これまでは困難であった多視点から UAV を用いて多量の画像を撮影し, SfM により局所のおよび構造物単位の高密度な 3次元情報が得られることから, 土木建築・文化財・観光分野で活用されている。特に西村や渡邊, 筆者らは, これらの技術を軍艦島などの産業遺産・土木遺産の 3次元記録保存や観光コンテンツとしての利用<sup>1)2)</sup>やインフラ構造物の維持管理<sup>4)</sup>に適用している。その他, 最近では UAV にレーザスキャナを搭載した UAV-LiDAR (Light Detection and Ranging) も実用化され, その特徴から SfM では困難な樹木下の形状取得に優れ, 土砂災害現場での迅速な対策検討などに利用されている。

建設分野においては, 国土交通省が, 3次元モデルを中心に関係者間で情報共有することで一連の建設生産システム(設計・施工・維持管理など)の効率化・高度化を図る BIM (Building Information Modeling) /CIM (Construction Information Modeling/Management) の導入<sup>5)</sup>や「ICT の全面的な活用」等の施策により建設生産システム全体の生産性向上を図り, もっと魅力ある建設現場を目指す取組である i-Construction (アイ・コンストラクション)<sup>6)</sup>を推進しており, 3次元計測技術の重要性は増している。

一方, 現在わが国には橋長 2m 以上の橋梁が約 73 万橋あり, このうち地方公共団体が管理する橋梁は約 66 万橋と全体の 9 割以上を占めている<sup>7)</sup>。平成 26 年に国土交通省より「道路橋定期点検要領」<sup>8)</sup>が示され, 近接目視点検によりすべての橋梁を 5 年に 1 回の頻度で定期点検を実施することが義務化された。しかし, それらの多くを市町村が管理しており, 少子高齢化, 人口減少に伴う自治体の財政難, 技術職員の不足のため, 十分な点検が実施できていない現状がある。更に, 建設後 50 年を超えた橋梁 (2m 以上) の割合は, 2016 年では 20%であるが, 10 年後には 44%に急増することが見込まれており<sup>7)</sup>, より効率的な橋梁点検手法の開発が急務となっている。また, 従来手法による近接目視点検では, 構造物に近接するために, 橋梁点検車・高所作業車等の使用や, 足場の仮設, ロープアクセスによる特殊作業, それに伴う交通規制などが必要となり, 点検コスト・労力の縮減が課題となっている。橋梁のみならずインフラ構造物全般の点検も同様の課題を抱えている。

## 1.2 研究の目的

本研究では、筆者がこれまで文化財の記録保存や土木建築構造物の維持管理を目的に活用してきた各種3次元計測技術の特長や用途をまとめ、特に SfM を橋梁点検に応用することで点検の省力化・効率化が期待できることから、実橋梁における実証試験を行い、課題抽出および適用性検証を行いその有効性を明らかにすることが第一の目的である。

また、2014年度からスタートした内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）インフラ維持管理・更新・マネジメント技術（以下「SIP インフラ」）<sup>9)</sup>では、道路橋をはじめとする土木インフラの維持管理・更新・マネジメントに役立つ新技術が開発されており、実用化レベルに達しているものもある。そこで、地域実装支援チームのひとつである鳥取大学チームの江島大橋プロジェクトに研究の一環として参画し、研究成果を実証試験に反映させ、各種試験を通して各橋梁点検新技術が橋梁点検の実務に活用できることを実証するとともに、社会実装に向けた環境・体制の整備、そして実証試験を通して本研究成果を実証することが第二の目的である。

## 1.3 論文の構成

本論文は7章で構成されており、各章の概要を以下に示し、関係と流れを図1.3.1に示す。

### 【第1章 序論】

研究の背景として下記に示す3つの実状を挙げた。

#### ①3次元計測技術の急速な進化

近年新たな計測ツールとなった UAV や SfM を用いることで容易に高密度な情報を高精細に取得することが可能となった

#### ②BIM/CIM, i-Construction など3Dデータを用いた生産システムの効率化

建設分野では一連の建設生産システム（設計・施工・維持管理など）の効率化・高度化を図るため、BIM/CIM や i-Construction が導入され、3次元計測技術の重要度が増している。

#### ③橋梁の定期点検に関する課題

5年に1度の橋梁定期点検が義務化されたものの少子高齢化や財政難、技術者不足などにより十分な点検の実施が困難な現状と今後老朽化していく橋梁を適切にマネジメントし長寿命化を図っていくために、効率的で低コスト・低労力な橋梁点検手法の開発が急務となっている。

以上の観点から3次元計測技術特に SfM の橋梁点検における有効性を実橋梁を対象とした実証試験により明らかにし、SIP インフラ江島大橋プロジェクトにおいて、それらの研究成果を活かし、新技術の橋梁点検への適用性実証および社会実装に向けた環境・体制を整備することを目的とした。

### 【第2章 レーザや画像を用いた計測技術】

3次元計測技術は、レーザなどの光を用いた計測とカメラを用いた画像による計測に大別される。出力されるデータも点情報や面情報に区別され、技術によって計測精度も異なることから使用者は各種技術の長所短所を熟知し、計測対象の規模や種類、要求精度、出力結果の用途に応じて適切な計測手法を選定する必要がある。

そこで、第2章では筆者らが地形や土木・建築構造物、文化財の計測に適用してきた3次元計測技術のうち、空中からレーザにより計測する航空 LiDAR や UAV-LiDAR、地上からレーザにより計測する地



上型 3D レーザスキャナ, 詳細な形状を取得するハンディスキャナ, 画像により 3 次元形状と色情報を取得するデジタル写真測量および Structure from Motion (SfM) について, それらの特長や課題を整理し, まとめた. 加えて, 最近実用化され災害現場などで活用されている UAV-LiDAR について既存技術 (地上型 3D レーザスキャナや UAV-SfM) と比較し, その適用性を検証した.

### 【第3章 ひびわれの視認と検出】

足場等を仮設せずに橋梁点検を行うには, カメラで撮影した画像を用いることが一般的である. 「コンクリート診断技術' 19 [基礎編]<sup>10)</sup>」では, 「デジタル分解能は 2mm であるが, コンピュータモニタ上では 0.2mm のひびわれを認識することができる」との記載がある. つまり視認すべきひびわれ幅の 10 倍の解像度で画像を撮影すれば, その画像から視認が可能ということだが, 筆者のこれまでの点検経験上, 10 倍の解像度では視認性が低く, コンクリート表面の汚れなどの状況によっては, 見落としとになってしまう可能性が高い. また, 近年では高性能なものから一般的なものまで様々なカメラ機種が販売されており, これらの違いによる認識の差も存在すると推測される.

そこで, 第 3 章ではカメラ機種・撮影解像度の違いによる視認可能なひびわれ幅を算出するため, 検証を実施し, 明らかとなった結果を示した. ひびわれのサンプルとして模擬ひびわれシートと数種類のひびわれを生じさせたコンクリートパネルを用意し, デジタル一眼レフカメラ・ミラーレスカメラなど数種類のカメラで撮影距離を変えることで撮影解像度を変化させ, 撮影を行った. 撮影された画像を PC で確認し, 性能の異なるカメラの撮影解像度と視認可能な最小ひびわれ幅の関係性を検証した.

### 【第4章 大型橋梁の点検における UAV-SfM の実証試験】

近年の PC の性能や画像解析技術の向上により一般化してきた SfM を橋梁点検へと応用することで, 点検の省力化, 効率化が可能であると考えられる. SfM とは, 一般的なデジタルカメラで多視点から撮影した画像のみで対象構造物の 3D モデルを構築する技術で, 室内作業により PC 上で点検作業が実施できる可能性がある. 地上型 3D レーザスキャナなども遠隔地からの 3 次元計測は可能だが, 取得データは点群であり, 形状取得に特化しており損傷抽出・評価は難しい. 一方 SfM の場合, 形状も再現でき, リアルな色情報も取得できるため, 高精度に損傷を抽出・評価できる点が橋梁点検においては, 非常に有効な手段となることが期待される. 画像撮影には, UAV を用いることで通常では撮影できない視点, 例えば斜張橋の主塔上部の正対撮影などができ, SfM・点検の両観点から理想的な撮影が可能となる. また, 複数人が同じ条件下で画像を用いて点検することができるため, 点検技術者の技量に捉われない客観的・定量的な判断ができるうえ, デジタルデータを蓄積することで経年的な比較も容易となる.

そこで, 第 4 章には佐賀県唐津市肥前町星賀と長崎県松浦市鷹島町神崎免を結ぶ鷹島肥前大橋 (斜張橋) のコンクリート主塔を対象に UAV-SfM による点検の実証試験を行い, その適用性検証や課題抽出を行った結果を示した. 人による近接目視点検が困難な箇所に対しての UAV-SfM の有効性は実証できたが, UAV の安全性, 撮影位置の管理方法, など課題も抽出された.

### 【第5章 中小橋梁の点検における SfM の活用方法の比較・検証】

第 4 章において, 長大橋 (斜張橋) のコンクリート主塔を対象に UAV-SfM の有効性は実証できたものの, 「道路メンテナンス年報 (2016, p.28)」によると全国の橋梁約 73 万橋のうち 74%が橋長 2m 以上 15m 未満の中小橋梁であり<sup>7)</sup>, 安全面や費用面からも必ずしも全橋梁に UAV の適用が可能ではない

え、UAVの操縦には非常に高度な技量を要し、誰もが容易に行える手段ではない。そこで、第5章では九州にある橋長9.6mのRC中実床版橋と橋長33.4mのPC2径間単純ポストテンションT桁橋を対象として、3D計測技術に関して特別な技術や知識がない点検技術者でも容易に橋梁点検に資するデータ取得ができるよう、UAVを使用せず手撮りによる効率的な撮影方法の検証やSfM解析により算出された3Dモデルの再現性(色や形状)、使用機材の差などを検証し、中小橋梁の点検へのSfMの活用方法を検証した結果を示した。また、これらの結果を踏まえ、長崎県大村市にある橋長7m、幅員20mのRCT桁橋(7主桁)にRC床版橋が拡幅された構造の橋梁に適用し、検証を行った。

#### 【第6章 SIP 江島大橋プロジェクトにおける橋梁点検への新技術の実用化に向けた実証試験】

SIPインフラでは、2014年度よりインフラの維持管理に必要な新技術が研究開発されており、これらの活用により、中長期的な維持管理・更新等に係るトータルコストの縮減や維持管理業務の効率性の向上に寄与することが期待されている。そしてこれら新技術の社会実装のため、地域の大学等を拠点とした12の地域実装支援チームが組織されている。筆者は、鳥取大学チームとして江島大橋プロジェクトに参加し、第3章で検証した撮影解像度と視認可能なひびわれ幅の関係性や第4章で検証したUAV-SfMの大型橋梁への点検適用時の課題などの研究成果を活かし、新技術の橋梁点検への適用性の実証と社会実装に向けた基礎資料作成のため、実証試験や精度確認試験の計画立案と実施、現地点検の管理、成果の取り纏めを行った。本章には、江島大橋プロジェクトの成果に加え、当プロジェクトを通じて実証した本研究の成果についても示す。

鳥取県境港市渡町と島根県松江市八束町江島を結ぶ全長1446.2mの江島大橋は、中海をまたぐ主橋梁部(660m)は中央径間250mの5径間連続PC有ヒンジラーメン箱桁橋で、その構造的制約条件や立地条件から近接目視点検は困難であり、共用を開始して以来14年間遠望目視点検となっている現状がある。一方、SIPインフラで開発され実用化レベルに近づいた新技術は、橋梁点検の実務に活用するために、新技術適用時の制約条件や実状に則した点検期間や点検費用、そして点検業務発注時の仕様書、積算基準などを含めた橋梁点検の体制など多くのことを確認する必要がある。そこでこれらのニーズのマッチングにより、江島大橋主橋梁部(渡海部)において実務に近い体制でまとまった数量の橋梁点検を新技術により実施することで、新技術が橋梁点検の実務に活用できることを実証するとともに、新技術開発者においては実用化に向け更なる課題の抽出により開発を促し、橋梁管理者ならびに橋梁点検技術者においては新技術を橋梁点検に活用するための体制整備を行い、点検業務として発注するために必要な基礎資料の整備することを目的として江島大橋プロジェクトが発足した。

#### 【第7章 まとめ】

本研究の検証結果や抽出された課題などをとりまとめ、今後の展望を記し、本論文のまとめとした。

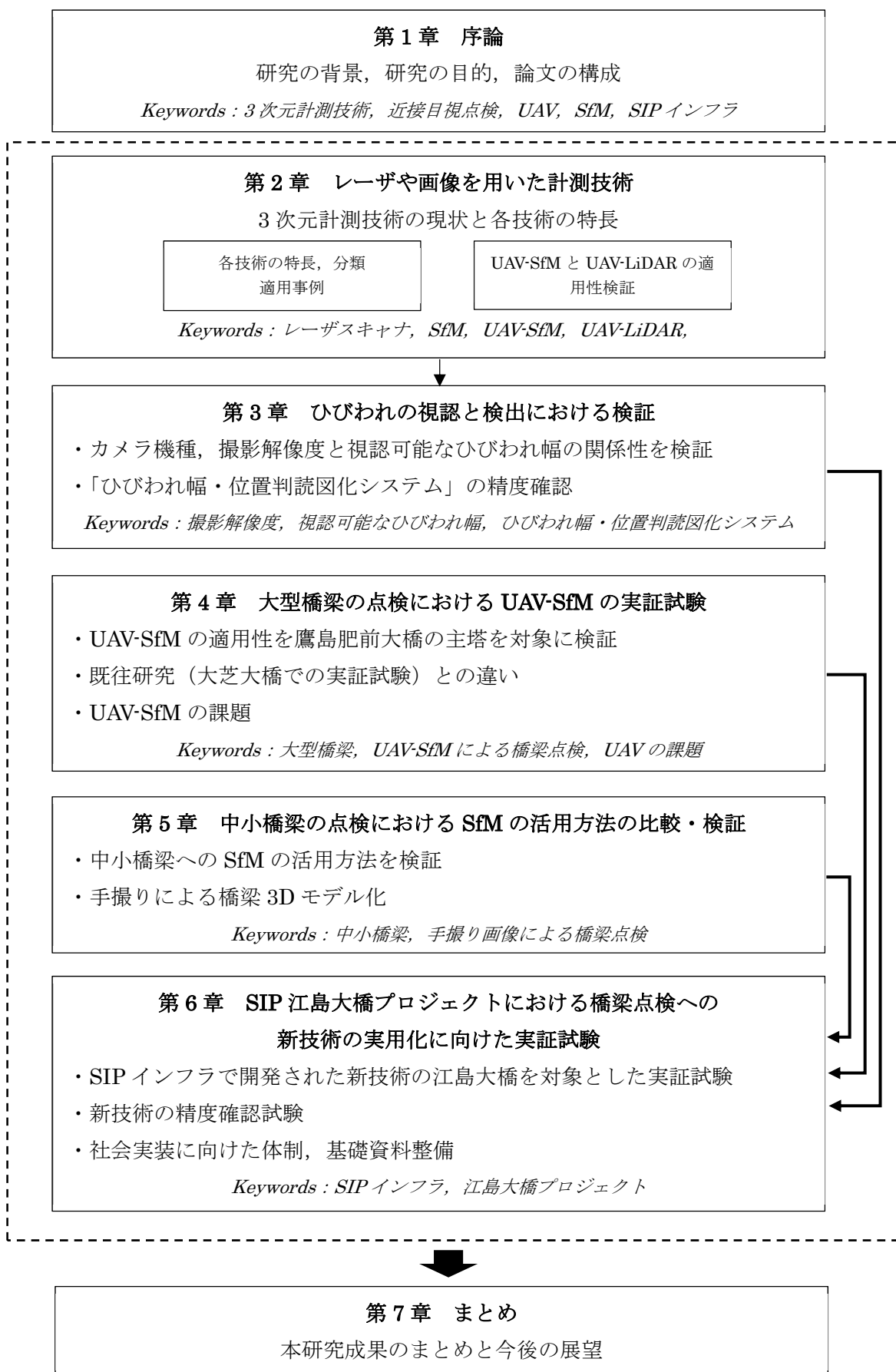


図 1.3.1 各章の流れと関係

## 参考文献

- 1) 西村正三：産業遺産への3次元計測技術の応用，近畿産業考古学会誌(11)，pp.15-20，2017.5
- 2) 西村正三，木本啓介，味岡収，安井伸顕，松田浩：光学的計測手法を用いた軍艦島護岸の計測とモニタリング，実験力学，Vol.12，No.3，pp.193-200，2012.9
- 3) 渡邊弘行：光学的計測手法の土木遺産保存での利活用，土木学会第71回年次学術講演会概要集，IV-036，2016
- 4) 西村正三，木本啓介，松岡のどか，大谷仁志，緒方宇大，松田浩：橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価，応用測量論文集，Vol.24，pp.52-61（2013）
- 5) 国土交通省：BIM/CIM 関連，[http://www.mlit.go.jp/tec/tec\\_tk\\_000037.html](http://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000037.html)
- 6) 国土交通省：i-Construction，<http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>
- 7) 国土交通省：道路メンテナンス年報，  
[http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/28\\_3maint.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/28_3maint.pdf)，pp.26-27，2016.9
- 8) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，  
[http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4\\_1.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4_1.pdf)，2014.6[改訂，2019.2]
- 9) 科学技術振興機構（JST）：インフラ維持管理・更新・マネジメント技術，  
<https://www.jst.go.jp/sip/k07.html>
- 10) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術 '19 [基礎編]，p.109，2019

## 第2章 レーザや画像を用いた計測技術

### 2.1 3次元計測技術の現状

3次元計測技術は、光の性質を利用し、対象物の情報を定量的に把握する技術であり、高精度、非接触、短時間で高密度の情報取得が可能といった利点を有している。これらで取得した3次元データは21世紀以後建設分野全体及び文化財の調査記録など各分野において大きく貢献をしてきた。

取得技術は図2.1.1に示すようレーザを用いる方法と画像を用いる方法に大別できる。レーザを用いる方法の代表的な技術は、航空機などに2Dレーザスキャナを搭載した航空LiDAR (Light Detection and Ranging) や地上型3Dレーザスキャナ (TLS : Terrestrial Laser Scanner) であり、安定的に広範囲の3次元情報を高速で取得できることが特長である。他に三角法方式によるハンディスキャナなども普及しており、地上型レーザスキャナと比較して、超近距離 (数十 cm 程度) で高精細な3次元情報を取得可能な技術である。しかし、これらの計測に使用するデバイスは高価であり適用可能な範囲が機種仕様によって異なり、多様な状況に備えるにはいくつもの機種を揃えることが望ましいがコスト的には難しいのが現状である。一方、画像を用いる方法で代表的な技術は写真測量である。2枚の写真 (ステレオ写真) を基に撮影対象物の位置・大きさ・形状などを判定・測量する技術であり、写真測量には大きく分けて、地上用のカメラで水平に対象物を撮影する「地上写真測量」と航空機などを用いて空中から地表を撮影する「空中写真測量」の2種類がある。その一方で、近年はコンピュータビジョンと呼ばれる分野において画像を用いた3次元形状の復元技術が注目され、普及している。これは異なる位置から撮られた複数枚の画像のオーバーラップ部を解析し3次元モデルを復元するもので、SfM (Structure from Motion) と呼ばれる技術である。従来の写真測量では困難であったような多量の画像を一括でオートマチックに解析可能なことと解析に熟練の技術を要せずに3次元データが得られることが特長として挙げられる。また、写真測量と同じように元の画像をテクスチャとして使用することでリアリティのある3Dモデルが得られる。

レーザを用いる方法

画像を用いる方法



図 2.1.1 3次元計測技術の分類

## 2.2 3D 計測技術の分類

図 2.1.1 に示すような現在利用されている 3D 計測技術は、それぞれ特性が異なり、計測対象（地形や土木構造物、建築物、彫刻など）や規模、環境、要求精度、計測データの用途に応じて、最適な計測手法を適用する必要がある。特に計測距離（レンジ）と計測精度は大きく異なる。また移動しながらの動的計測、固定した状態での静的計測であるかも計測計画を立案する上では、大きな要素であるため、それぞれの特長を表 2.2.1<sup>1)</sup>に分類した。図 2.2.1 は表 2.2.1 をグラフに示したものである。X 軸が計測距離で Y 軸が計測精度である。計測距離が長くなるにつれ、計測精度は低くなるが、地上型 3D レーザスキャナは高精度で数百 m のレンジをカバーできている。また計測距離が短いほど静的計測が主となり、計測距離が長い場合は、計測対象範囲も必然的に広範囲となることから移動しながら計測する動的計測が主となっている。目的・用途に応じて、これらの技術単体で計測するのではなく、融合させることで最適な解を出すことが可能となる。

表 2.2.1 3次元計測分類<sup>1)</sup>

「河村幸二：3次元計測の最近技術と市場動向」から引用し、筆者が加工

3D 計測技術	計測距離	計測精度	計測時の動き	主な対象物
航空 LiDAR	数百 m～数 km	1m 以内（絶対精度）	動的	地形
UAV-LiDAR	数十 m～150m	数 cm（絶対精度）	動的	地形、大型の土木構造物
UAV-SfM (写真測量含む)	数十 m～150m	数 cm～数十 cm (精度管理手法による)	動的	地形、土木構造物、建築物、文化財
MMS	数 m～500m	10cm 以内（絶対精度）	動的	道路構造物
地上型 3D レーザスキャナ	数 m～数百 m	数 mm	静的	地形、土木構造物、建築物、文化財、室内空間
手撮り画像による SfM (写真測量含む)	数十 cm～数十 m	数 cm (精度管理手法による)	静的	土木構造物、建築物、文化財
モバイルスキャナ	数 m～100m	数 cm	動的	地形、土木構造物、建築物、室内空間
ハンディスキャナ	数十 cm～数 m	サブミリ	静的	文化財、工業製品
水中 3D 計測	数 m～数十 m	数 cm～十数 cm	静的	水中構造物、洗堀調査

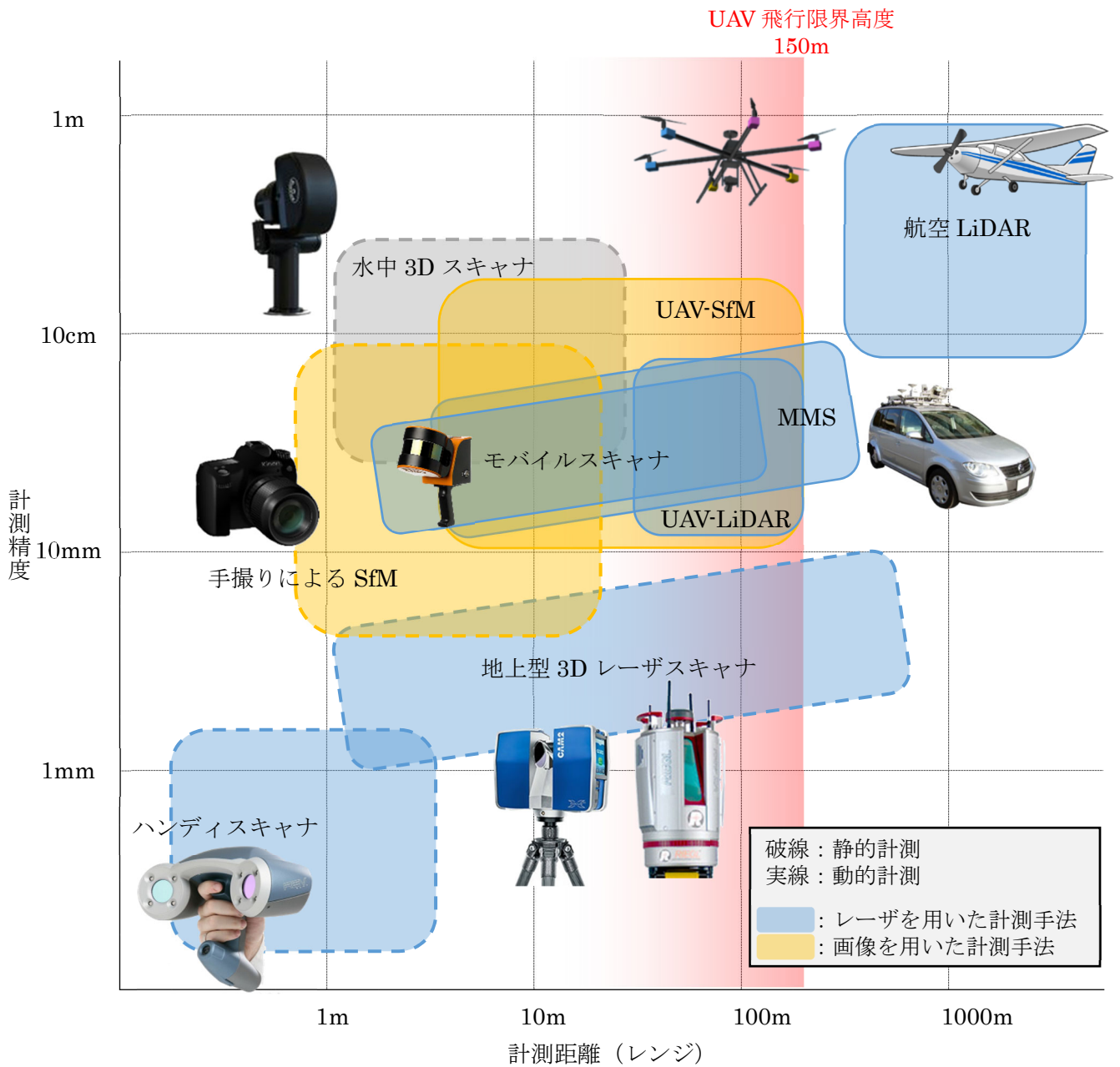


図 2.2.1 計測距離など計測技術の特長による分類

### 2.3 3D 計測技術の特長

以降に代表的な 3D 計測技術の特長をまとめる。

#### 2.3.1 航空 LiDAR, UAV-LiDAR

航空 LiDAR は、航空機から地上に向けてレーザを照射し、地表面等で反射した地点の 3D データを取得する測量技術である。航空 LiDAR システムは GNSS/IMU 装置、レーザスキャナの 3 つのセンサで構成される。GNSS/IMU は航空機位置、加速度、角速度を航空 LiDAR 計測時にリアルタイムで記録している<sup>2)</sup>。データ取得後、地上 GPS 基地局で観測した GPS データと航空機上で観測した GPS データの位相差から算出した航空機位置座標と IMU で計測した航空機の角度・角速度を統合し、位置精度±30cm、高さ精度±15cm で航空機の移動軌跡・姿勢を求め、それらとレーザスキャナのデータを統合し、高精度な地形データを再現する。航空 LiDAR の計測イメージを図 2.3.1 に示す。特長としては、対地高度が 2km まで可能なため短時間で広範囲の計測が可能で、植生が繁茂した環境下では樹木の樹冠部だけでなく樹木下部（地表面）の形状も波形記録方式により取得できる。波形記録方式とは、ひとつのレーザ発射パルスから得られる反射光の強弱を波形として記録する方式で、植生が著しく繁茂する箇所の地盤面からの微弱な反射も記録でき、DSM (Digital Surface Model: 数値表層モデル)・DEM (Digital Elevation Model: 数値標高モデル) どちらの形状も再現可能である。図 2.3.2 に模式図を示す。しかし、計測位置が比較的高いため地表部分での点密度が低いことや対象面積が小さい場合、費用が高額となる等の課題もある。

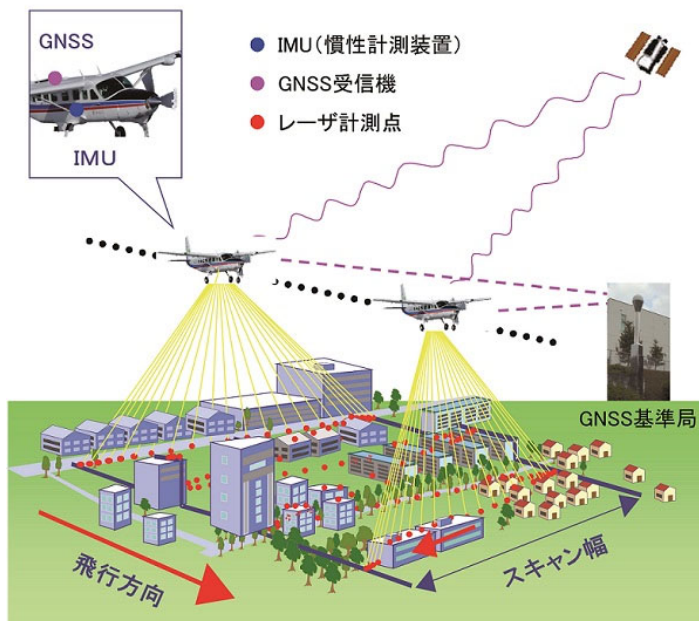


図 2.3.1 航空 LiDAR の計測イメージ

出典：国土地理院ウェブサイト、  
[http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser\\_senmon.html](http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_senmon.html)

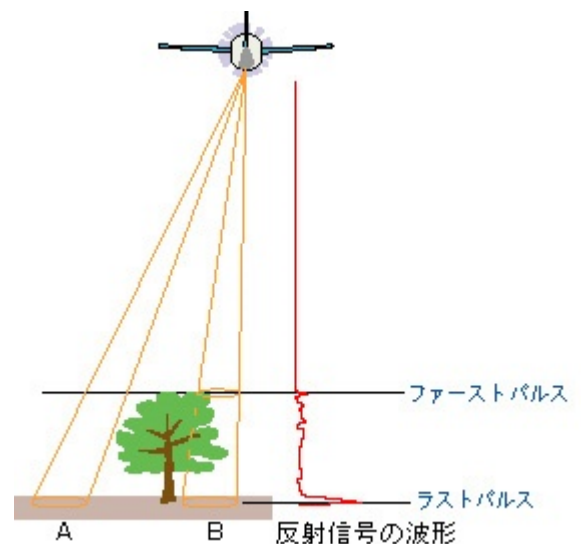


図 2.3.2 波形記録方式

出典：国土地理院ウェブサイト、  
[http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser\\_senmon.html](http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_senmon.html)



一方、近年航空機用のレーザ機器は軽量化が進み、UAVに搭載可能なモデルが市販されてきており、UAVにレーザスキャナを搭載した計測技術をUAV-LiDARと称する。UAV-LiDARは使用するセンサ・機器の構成は、航空LiDARと基本的には同等である。対地高度が150m以下と低空で飛行可能なため、航空LiDARより1度のフライトで観測できる範囲が狭いが、高密度な点群を取得できる。加えて上下前後左右への飛行および空中静止が可能となるため、観測対象物が複雑な形状をしていてもその表面に沿って飛行することで航空LiDARでは不可能であった垂直面やオーバーハング部の形状取得が可能となった。

表2.3.1に両計測技術の比較を示す。両技術ともレーザスキャナを用いており、計測可能な高度に差はあるものの上空から樹木の葉の間をすり抜け地表面を計測できるため地上の標高や地形の形状を計測する用途として主に使用されている。取得されたデータは、点群として出力され、ソフトウェアのフィルタリング機能によりグラウンドデータ（地表面以外の地物データを除去した点群データ）へのクラス分け、グリッドデータ（グラウンドデータの内挿補間によって作成される格子状の標高データ）の生成等を行い最終的にコンター図の作成等の3Dデータ処理へと繋がっていく。航空LiDARにより取得した地形情報の事例を図2.3.3に示す。UAV-LiDARの適用性については、「2.4 UAV-LiDARの適用性検証」に示す。

表 2.3.1 航空 LiDAR と UAV-LiDAR の比較

	航空機 (LiDAR)	UAV (LiDAR)
計測面積 (日あたり)	1～50 km <sup>2</sup>	0.5 km <sup>2</sup>
対地高度	150m～2km	10～150m
飛行速度	0～200km/h	40km/h 以下
航続時間	2～3 時間	20～30 分
点密度	10～30 点/m <sup>2</sup>	100～300 点/m <sup>2</sup>
特長	樹木下の形状が計測可能 広範囲で計測可能	樹木下の形状が計測可能 極小範囲を高密度計測可能
課題	小地域が対象の場合フライト費用が高い 計測基地が現場近くに必要	飛行できる場所が限られる 飛行時間が短い 広範囲計測では高額となる

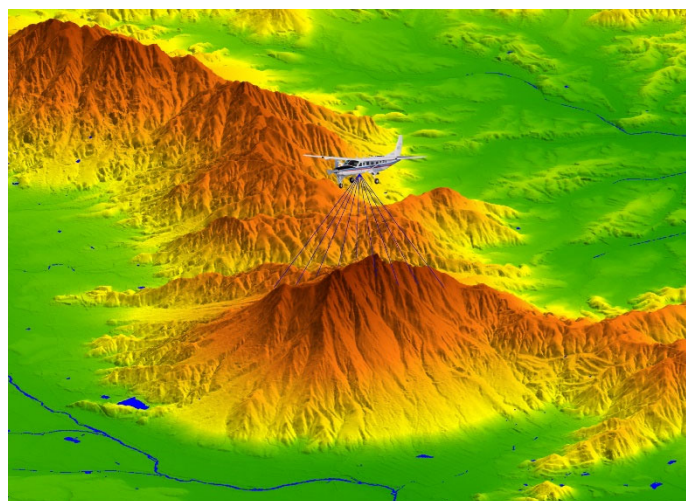


図 2.3.3 航空 LiDAR の計測データ事例

出典：国土地理院ウェブサイト，[http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser\\_index.html](http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_index.html)

### 2.3.2 地上型 3D レーザスキャナ

#### (1) 概要

地上型 3D レーザスキャナは、三脚などで任意位置に機器を据え付け、レーザを計測対象に照射すると同時に、機器本体を回転させることにより周囲に存在する対象物までの方向と距離を面的に観測し、3次元点群として出力するものである。非接触・遠隔計測で安定的に広範囲の3次元情報を取得できるため、河川・砂防・斜面等の地形測量や災害調査、建築物や土木構造物の形状取得、文化財の3D記録保存などで活用されており、比較的大型の構造物に対し適用されることが多い。

国土交通省国土地理院は「地上レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル<sup>3)</sup>」で、「地上レーザスキャナを用いた地形測量」と「地上レーザスキャナを用いた三次元点群データ作成」のふたつの公共測量に準拠できる方法を規定している。地形測量は数値地形図データ作成のための測量で、三次元点群データ作成は地形を表現するための高密度な標高を作成するための測量である。

#### (2) 計測の方式

レーザに用いられている光の波長は 500nm から 1,500nm 程度で、計測の方式はレーザの照射と受光の際の光の位相差を用いる方式（位相差方式：Phase Shift）とレーザの照射から受光までの時間を観測する方式（TOF 方式：Time Of Flight）があり、計測距離や計測精度が異なる。

位相差方式は、複数に変調させたレーザ光を照射し、対象物に当たって戻ってきた拡散反射成分の位相差により対象物との距離を求める方法である。垂直方向に回転するミラーと水平方向に回転する本体の角度情報をエンコーダより得て、測定ポイントの座標を記録する。一般的に計測距離は 1m～120m 程度で計測精度は、2～5mm 程度であり、大量の点群データを短時間で高精度に取得できることが特長である。

TOF 方式は、レーザを発射してから測定対象物に反射し帰ってくるまでの時間を計測して距離を算出する方法である。レーザ光の往復した時間と照射方向により、距離と角度を割り出して測定ポイントの座標を記録する。一般的に計測距離は 1m～数百 m で計測精度は 2～10mm 程度であり、長距離の計測が可能であることが特長である。

表 2.3.2 レーザスキャナの計測方式

計測の方式	位相差方式 (Phase Shift)	TOF 方式 (Time Of Flight)
概念		
一般的な計測距離	短距離用 (1～150m)	中長距離用 (1～数百 m)
一般的な計測精度	2～5mm 程度	2～10mm
計測速度	10 万～100 万点/秒	2 千～10 万点/秒

## (3) 3D レーザ点群の処理

3D レーザスキャナはレーザを計測対象に高密度で照射し、点群情報（座標値と反射強度： $x,y,z,i$ ）を取得する機器である。高密度で計測された点群は、現状を忠実に再現し構造物の補修・補強検討の際に有効とされる。現在一般的に使用されている地上型 3D レーザスキャナの一例を表 2.3.3 に示す。これらの中から、用途に応じ各スキャナの特長を把握したうえで適切な機器選択をし、適切な点密度・計測場所・計測回数を計画する必要がある。通常数箇所から計測した点群の合成・面化处理を経て立面図等の各主題図の作成や時系列データの差分から変形図などの作成が行われる。このとき点群密度を上げればそれなりに成果品質の向上は期待できるが、データ容量は急増し、その処理時間も増大するため品質を確保した容量低減化策などが課題となっている。また近年では、BIM/CIM の導入により、3次元 CAD に取り込むために既設構造物の点群データからモデル化するニーズは大きい。レーザスキャナが登場し始めた頃は、このモデル化はソフトウェアを駆使し一つずつモデリングしていたため、多大な労力を要していたが、近年では形状自動認識によるモデル化技術が進化していることとレーザスキャナの高精度化、CAD 系ソフトウェアの機能強化により、点群情報から自動で配管などの既設部材をモデリングし、干渉チェックや新規部材の挿入、機器の配置検討など BIM/CIM への展開が可能なソフトウェアもリリースされている。

表 2.3.3 地上型レーザスキャナの仕様（値は各社カタログより引用）

機種名	Riegl VZ-400i	TOPCON GLS2000	FARO FocusX330	Leica BLK360
レンジ	長距離型	中距離型	中距離型	短距離型
レーザクラス	クラス 1	クラス 3R/1M	クラス 1	クラス 1
計測方式	TOF 方式	TOF 方式	位相差方式	TOF 方式
測定距離	1.5m~800m	~500m	0.6~330m	0.6m~60m
計測範囲	V100° (+60° / -40° ) ×H360°	V270° ×H360°	V300° ×H360°	V300° ×H360°
計測精度	5mm@100m	3.5mm (σ) /1~ 150m	±2mm@25m	4mm@10m/7mm@20 m
スキャンスピード	122,000 点/秒 (高速)	120,000 点/秒 (詳細)	最大 976,000 点/秒	最大 360,000 点/秒
レーザ波長	1550nm	1064nm	1550nm	830nm
機器イメージ				
寸法	180×308mm (直径×高さ)	293×228×412mm (幅×奥行×高さ)	240×100×200mm (幅×奥行×高さ)	100×165mm (直径×高さ)
重量	9.6kg	10kg	5.2kg	1kg

### 2.3.3 ハンディスキャナ

前項で記述した地上型レーザスキャナ他、レーザを用いた計測手法には三角法方式のものもある。これは、ラインレーザを計測対象物に照射し、反射光をカメラで撮影し、画像処理することで形状を復元する手法である。処理が高速に行われるため、レーザが照射された領域の形状がほぼリアルタイムで復元される。図 2.3.4 に creafom 社製 HandySCAN3D の計測イメージ<sup>4)</sup>を示す。ノート PC と軽量なスキャナで構成されており、操作も容易であることから工場の製品検査や土木分野においては鋼材の腐食、筆者らは特に文化財分野において、彫刻や遺物など高精度・高密度の情報が要求される対象物の計測に活用されている。

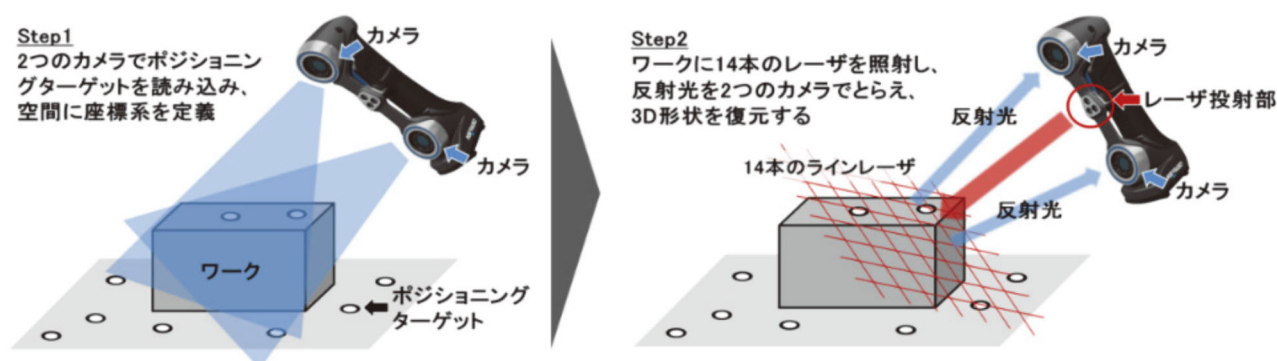


図 2.3.4 HandySCAN3D の計測イメージ<sup>5)</sup>

以下にハンディスキャナを用いてギリシャ・アテネのアクロポリスにあるアウグストゥス神殿において、崩壊し散在した部材を計測し、各部材の図化および復元検討を行った事例<sup>6)</sup>を示す。当検討は、都城工業高等専門学校（研究責任者：林田義伸教授）と熊本大学（研究責任者：伊藤重剛教授）が共同調査を行ったもので、筆者は creafom 社製の REVscan による計測で復元検討を支援した。

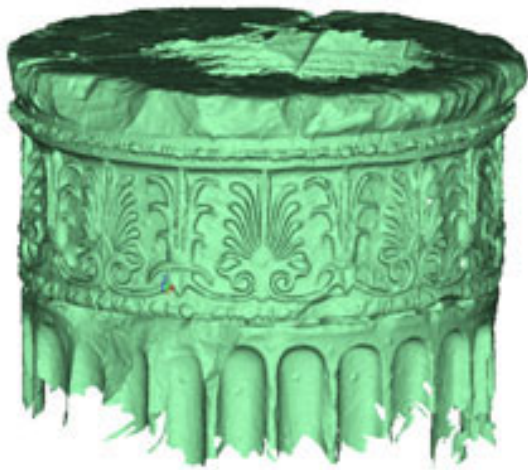
本調査は、図 2.3.5 に示すよう崩壊し散在した部材はパルテノン神殿の前に集められているものの全部材は残存していないため、残存部材をより建設当時の姿の復元検討を行うものである。そのために通常であれば、すべての部材をミリオーダーで手実測するが、対象となる神殿は円形神殿のため、基壇や上部構造は曲率を持った石材で構成されており、レリーフの形状、奥行きを持った曲面など、手実測では図化が困難である。そこで、まず図化対象の石材を REVscan により高精度に計測した。図 2.3.6 が実測を行っている様子で、対象石材にポジショニングターゲットを設置し、ノート PC にリアルタイムに表示されるデータ取得状況を確認しながら、全形状を詳細にスキャンした。そのデータから正面・側面投影図を配置した下図を作成した（図 2.3.7）。そしてその下図をベースに手実測を行うことで、通常の手実測では図化に 1 週間以上要するものも 3~4 日で図化が完了でき石材の形状を正確に再現することが可能となった。また、取得したデータを用いて、近似円作成による設計曲率・中心の推定（図 2.3.8）、3D モデルを用いた復元シミュレーション（図 2.3.9）など多くの検討を実施した。



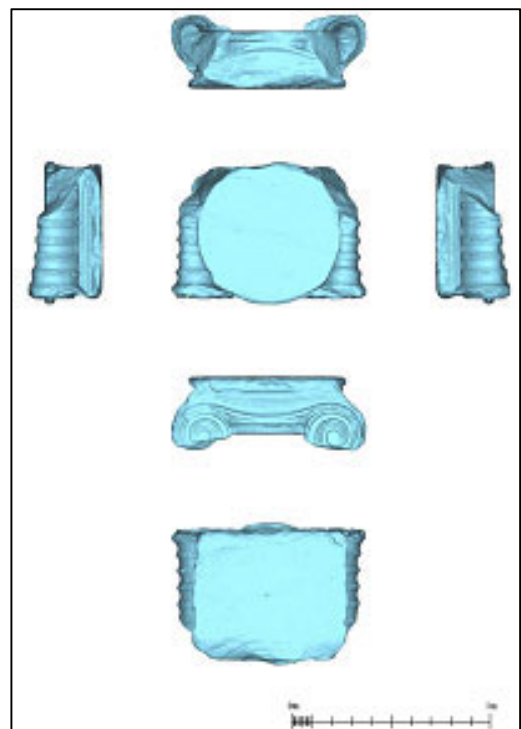
図 2.3.5 現地計測ヤード  
(アテネ パルテノン神殿前)



図 2.3.6 REVscan による計測状況



ネッキング計測データ



モデルを配置して下図の作成

図 2.3.7 計測データと作成した下図例

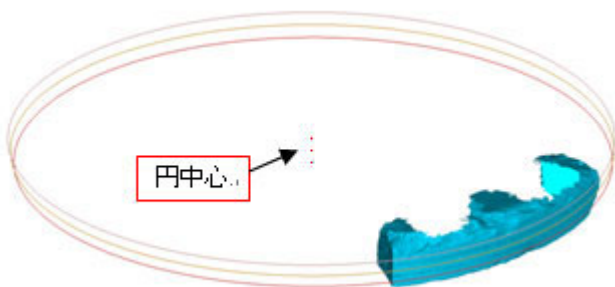


図 2.3.8 各断面における推定円周と円中心

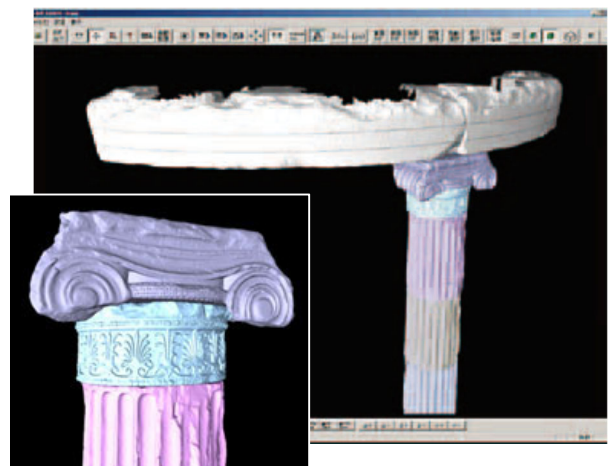


図 2.3.9 復元シミュレーション

### 2.3.4 写真測量<sup>6)</sup>

写真測量とは、最低2枚の写真（ステレオ写真）を基に撮影対象物の位置・大きさ・形状などを判定・測量する技術であり、写真測量には大きく分けて、地上用のカメラで水平に対象物を撮影する「地上写真測量」と航空機などを用いて空中から地表を撮影する「空中写真測量」の2種類がある。特に空中写真測量は地図作成に古くから活用されてきた技術である。

入力する情報は、主には撮影された画像データであり使用するデバイスは民生用デジタルカメラのみのため、地上型3Dレーザスキャナ等に比べ比較的安価に3次元情報を取得可能である。出力されるデータのTIN: Triangulated Irregular Network（不整三角網）には撮影画像がマッピングされており、3次元情報に加え、色情報も付加された3Dモデルとなるためひびわれや錆汁などの構造物の劣化状況を3次元的に把握することにも活用可能である。筆者らは、軍艦島の護岸調査<sup>7)</sup>や皇居山里門石垣<sup>8)</sup>の修復など多岐にわたり活用してきた。

以下に写真測量の原理などを纏める。

#### (1) 基本原理と処理の流れ

写真測量の原理は、図2.3.10に示すように、デジタルカメラで撮影した左右2枚の画像（ステレオ画像）を用いて3次元計測を行う。左右の異なる位置O1、O2から対象を撮影し、画像上の対応点P1、P2を計測して、三角測量の原理により、対象の3次元座標Pが求められる。この例は、カメラの傾きのない平行撮影という理想的な場合を想定したものであり、実際には基準点を何点か一緒に写し込んで、撮影した時のカメラの位置や傾きを求める標定作業を行う。このように2次元の画像データから3次元の情報を得ることを、ステレオマッチングという。

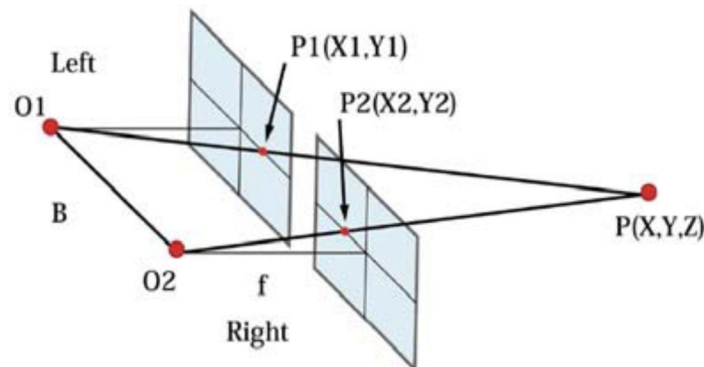


図 2.3.10 写真測量の基本原則

#### (2) 精度

写真測量においては、通常撮影距離の1/1,000程度が精度といわれてきたが、ソフトウェア上でターゲットの中心（重心）を半自動で算定することで、個人差なく高精度で標定できるため、撮影距離に対して、凡そ1/3,000、すなわち距離30mで10mm程度の精度で計測が可能となる。

#### (3) 標定

標定とは、計測対象を撮影した時のカメラの位置と傾きを求める作業であり、通常、座標の分かっている基準点を3点以上写しこんで、基準点と画像との対応点を計測して算出する。基準点がなくとも画像の特徴部分に対応付けることにより画像座標のみで仮のカメラの位置と傾きを計算し、後で既知点の座標値や2点間の長さを入力すれば3次元座標に変換できる。これらの標定にレーザスキャナ等を用いて計測した3D点群を使用することもできる。

(4) 3次元計測・図化

対象物の輪郭などの形状を3次元でトレースする機能であり、計測した点と点をポリラインで連続的に結線する。

(5) データ処理

ステレオマッチングで計測されるDSM (Digital Surface Model: 数値表層モデル) データは、対象物の表面形状をリアルな高密度データ (点群) として得ることができる。これらの点群データから3次元のTIN (Triangulated Irregular Network-不整三角網モデル) モデルなどの面的なデータに変換する。TINモデルが形成できると、正射画像 (オルソ画像) への変換、等高線、断面図として簡単に処理できる。図2.3.11に写真測量を用いた軍艦島護岸の調査事例を示す。

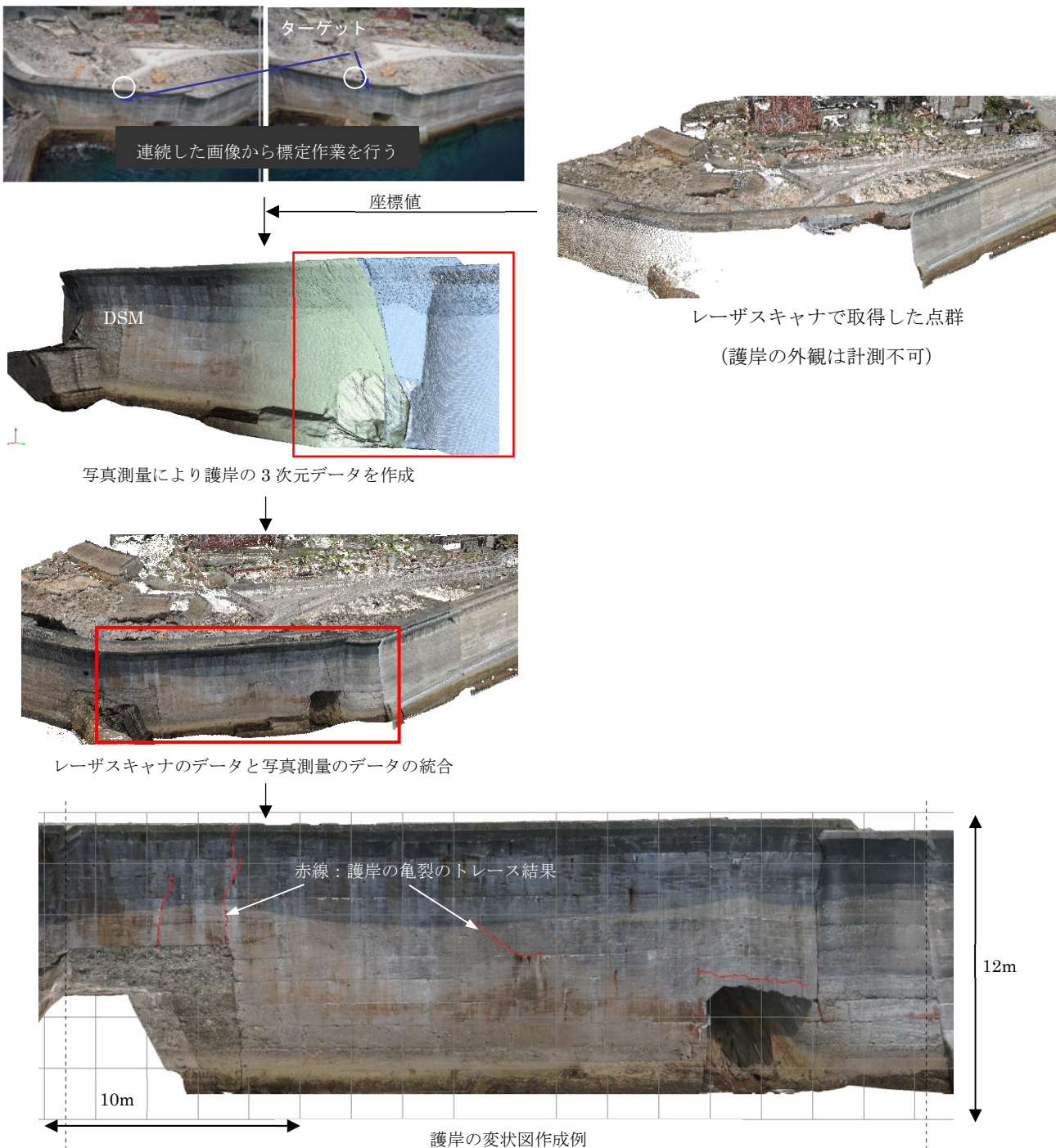


図 2.3.11 軍艦島護岸の写真測量を用いた調査事例

## 2.3.5 Structure from Motion(SfM)

## (1) 概要と原理

SfM とは、多視点から撮影した画像を元に、撮影対象物の 3D モデルを構築する技術である。従来の写真測量と異なり、80%ラップを目標とし、被写体の表面上にある特徴点を異なる方向から撮影した画像の組み合わせから順々に、ステレオ法によりその点とカメラの位置、すなわち 3 次元座標  $(X,Y,Z)$  を自動特定していく (図 2.3.12)。こうして得られる点群を基にそれらを節点とする三角形面要素である TIN (Triangulated Irregular Network) を作成し、3D モデルを構築する。ここで、特徴点とは、画像上のある点で、周囲と比較して輝度すなわち色や明るさが異なる点のことである。2 枚の画像上の領域  $(i, j)$  内にある特徴点  $p$  と  $q$  について、それぞれの領域内での周囲との輝度  $T$  の差の総和  $J$ 、すなわち周囲との色や明るさの違いの程度を算出し、その値がある判定値に収まる場合に同一点であると判断する (図 2.3.13) 9)。生成した TIN には、撮影画像がテクスチャとしてマッピングしており、被写体を忠実に再現した 3D モデルが構築される。また、対象範囲内に座標値の明らかな標定点 (ターゲット) を 3 点以上設置し、画像に写し込むことで、生成する TIN にスケールを与えることが可能である。

図 2.3.14 に撮影画像(一部抜粋)から SfM 解析により作成した橋梁下面の 3D モデルの構築例を示す。100 枚程度の撮影画像より SfM 解析を行うことで、橋梁下面、特に T 桁の形状などが現地のリアルなマッピングが付いた状態で 3D モデルが構築されている様子が分かる。これらのデータはソフトウェア付属のビューワを用いて自由な視点で閲覧することが可能であり、汎用的な CG 形式 (OBJ, FBX など) に変換後、3DCAD ソフトへ移行し、BIM/CIM のベースモデル等で活用することも可能である。

写真測量と同様にレーザスキャナに比べて価格が大幅に低く、手軽に利用できる点に加え、従来の写真測量では不可能であった膨大な数量の画像を自動処理により解析することと UAV により空中から容易に画像撮影ができるという利点が合致し、土木建築分野、文化財分野における計測のニーズが大きく変化した。一方、従来の写真測量のような精度管理を行えないことが多いため、精度を要求される計測における使用については、注意が必要である。

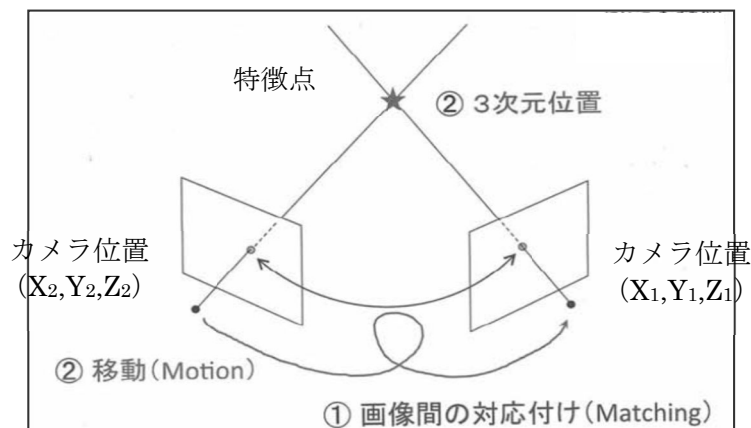
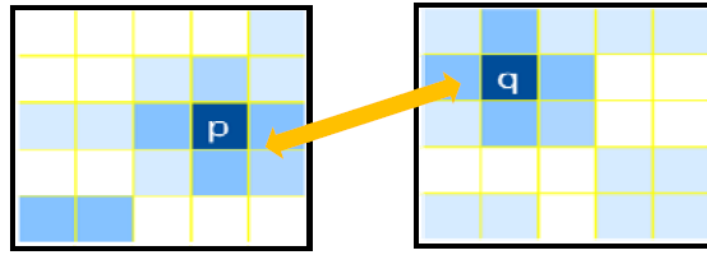


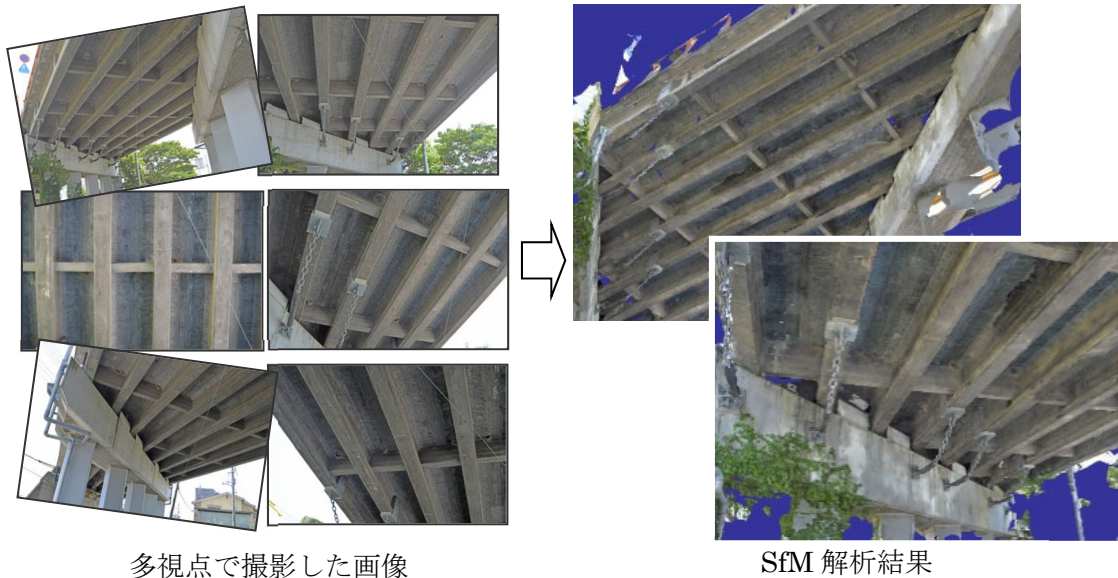
図 2.3.12 特徴点・カメラ位置の算出方法





$$J(p, q) = \sum_{i,j} |T_p(i, j) - T_q(i, j)|^2$$

図 2.3.13 特徴点の判定



多視点で撮影した画像

SfM 解析結果

図 2.3.14 SfM による 3D モデル構築例

## (2) 軍艦島の記録調査への UAV-SfM の活用 (2014 年実施)

### ①概要

長崎市高島町地内に所在する端島炭坑跡(軍艦島)について、世界遺産登録後を見据えた保存管理や整備活用に資する資料として活用するため、3D レーザ計測・画像計測(SfM)、水中 3D 計測などを元に 3D モデルの作成等を行った。なお、調査対象が貴重な近代化遺産であることに留意し、現場での調査業務中は損傷事故等ないように十分に注意して実施した。その後、2015 年に国際記念物遺跡会議(ICOMOS)により、軍艦島を構成遺産に含む「明治日本の産業革命遺産 製鉄・製鋼、造船、石炭産業」が世界文化遺産に登録された。

### ②使用機材と撮影状況

軍艦島全体の 3D モデル化には、空中のあらゆる視点から撮影する必要があったため UAV を用いて撮影した。撮影に使用した UAV とカメラの仕様を表 2.3.4 および表 2.3.5 に示す。UAV は一眼レフカメラが搭載可能な HEXApro4 であり、1 度に 10 分程度飛行が可能である。搭載したカメラは Canon EOS kiss X7 でインターバル撮影により 1 秒に 1 度シャッターを切った。

表 2.3.4 使用した UAV の仕様


名称	HEXApro4
機器イメージ	
機体重量	3.0kg
搭載重量	3.5kg
対風安定性	10m/s
飛行時間	～10分
プロポ周波数	2.4GHz

表 2.3.5 使用したカメラの仕様

名称	Canon EOS kiss X7
機器イメージ	
撮像素子	約 22.3×14.9mm
画素数	18MP 5184*3456
焦点距離	20mm
質量	約 407g



図 2.3.15 UAV の飛行状況

## ③撮影結果

撮影した内容を表 2.3.6 に示す。島全体を SfM により 3D 化し、構造物の劣化状況を把握するため目標解像度を 10mm～20mm/pix と設定し、高度約 50m の地点より島全体を隣接画像が 70%程度ラップするよう格子状に UAV を飛行させ連続的に撮影した。主要建物は、より詳細な状況保存のため目標解像度を 5mm/pix とした。UAV の撮影計画を図 2.3.16 に示す。

表 2.3.6 UAV による撮影内容

撮影対象	特記事項	撮影枚数
a. 護岸回り	護岸+島内部が一枚の画角に収まるよう撮影	約 1000 枚
b. 島全体	SfM による画像撮影 a とラップし、島全体の 3D 化	約 2000 枚
c. 65 号棟～ 小学校壁面	損傷把握+SfM による 3D 化 正対撮影と 3D 化のための撮影	約 3000 枚
d. 日給社宅	損傷把握+ SfM による 3D 化 正対撮影と 3D 化のための撮影	約 6000 枚
e. 30 号棟壁面	損傷把握+ SfM による 3D 化 正対撮影と 3D 化のための撮影	約 2000 枚

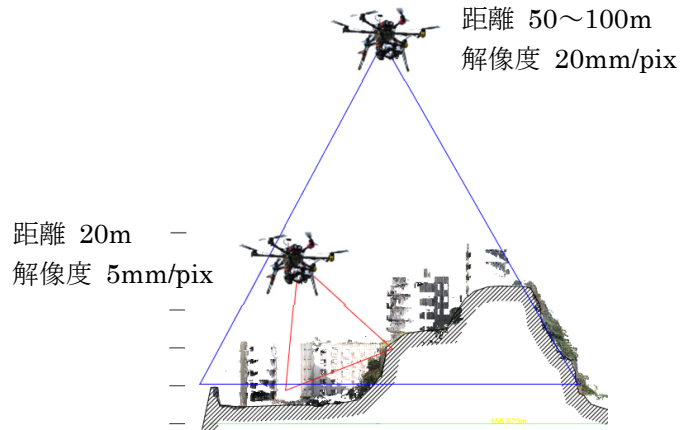
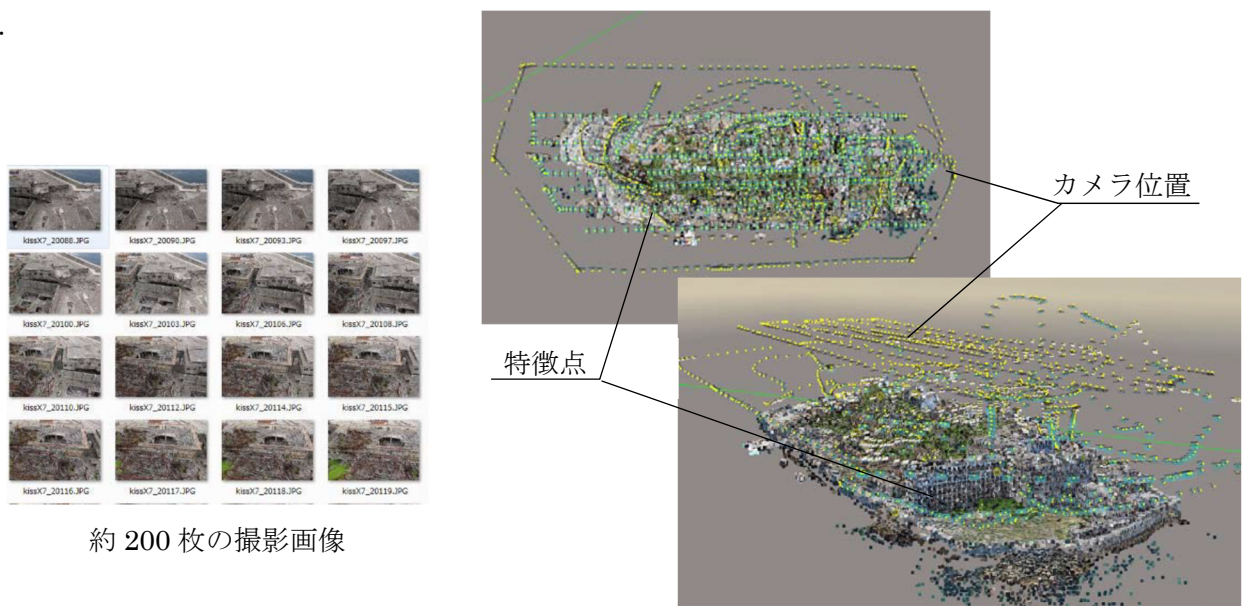


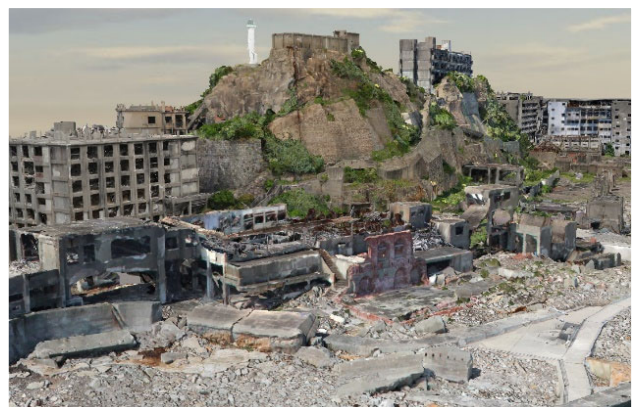
図 2.3.16 目標解像度と UAV フライトプラン

④SfM 解析結果

UAV で島全体を格子状に平面撮影した画像と護岸を外側から撮影した画像、主要建物の周囲を撮影した画像から SfM により特徴点の抽出およびカメラ位置の復元を行い、マッピング付きの 3D モデルを生成した。(図 2.3.17) 本調査では撮影画像 14,000 枚のうち精選した約 2,000 枚の画像を SfM 解析に使用した。



SfM 解析による特徴点の抽出とカメラ位置復元



作成した 3D モデル

図 2.3.17 SfM 解析の流れ

## ④モニタリングへの活用

UAV は GPS を用いた自動飛行も可能なため、定期的な同じルートを飛行させ、SfM により生成したモデルを用いて劣化状況の把握、経年変化の有無などを PC 上で安全に確認することが可能となる。図 2.3.18 に 2012 年と 2014 年の 2 時期に撮影した画像から生成したモデルの比較により抽出できた変状箇所の一例を示す。会社事務所 2F 床スラブが抜け落ちている様子が、2 時期のデータを比較することで容易に分かる。画像のみでも判読できるが、3D モデルにすることで壁の倒れや孕み、護岸の変形なども確認が可能となる。



図 2.3.18 会社事務所 2F の床スラブの抜け落ち

## ⑤まとめ

世界遺産登録へ向けて、現状をより詳細に記録することで軍艦島の「今」を把握しておく必要があり、このような 3 次元計測手法を用いた調査を経年的に実施できれば安全に損傷の進展を追うことができる。データの 2 次利用として AR (拡張現実) や MR (複合現実) により、観光ツールとしての価値も充分あり、貴重な資料と成りうる<sup>10)</sup>。

また、この軍艦島での調査事例でインフラ構造物の点検・モニタリングへの SfM の活用が期待できることが分かった。現地の状況をリアルに再現した 3D モデルに撮影画像がマッピングされることで、3 次元的な位置を把握しつつ、コンクリート表面のひびわれや錆汁、遊離石灰など色情報から判読される損傷を捉えることができると考えられる。この調査事例が基礎資料となり、本研究に繋がっている。

## 2.3.6 その他の 3D 計測技術

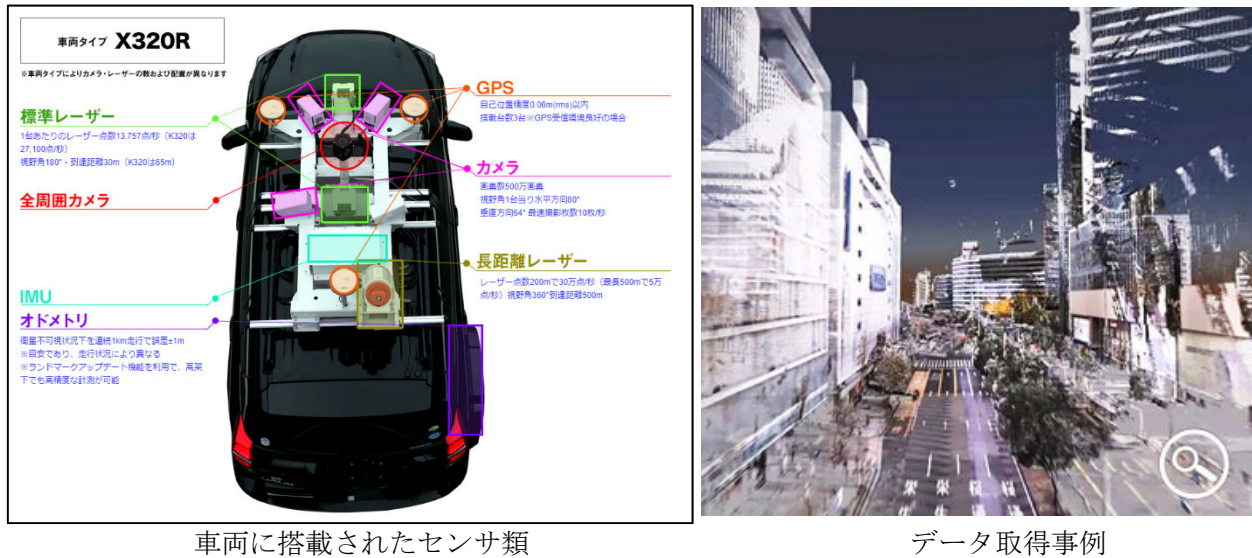
上記以外にも MMS (Mobile Mapping System: モービルマッピングシステム) や SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) を用いたモバイルスキャナ、水中で音波により水平方向の 3D 計測を行う水中 3D スキャナなど多くの 3D 計測技術 (製品) がリリースされている、

以下にその概要を示す。

【MMS (Mobile Mapping System : モービルマッピングシステム)】

車両などの移動体に搭載したレーザスキャナとデジタルカメラによって、移動しながら道路および周辺の3次元座標データと連続映像を取得する技術である。

GPS, IMU, オドメーターにより車両位置・姿勢を高精度に取得し、その上で同期したレーザスキャナ, カメラを搭載し、走行しながら道路面と道路周辺の3次元情報を高精度で効率的に取得出来るシステムである。道路台帳や地形図の作成, 3次元道路データの整備に活用されている。



車両に搭載されたセンサ類

データ取得事例

図 2.3.19 MMS について

出典：アイサンテクノロジー株式会社ウェブサイト <http://www.whatmms.com/whatmms>

【モバイルスキャナ】

軽量小型の2DレーザスキャナとIMUで構成されたハンドヘルド型のレーザスキャナであり、非GNSS環境下においてSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) により、計測データを統合させ空間情報を構築する技術である。SLAMとは、ロボットビジョンとして研究開発されたもので、2DレーザスキャナやIMUなどの情報から自己位置の自動抽出と同時に環境の3次元マッピングも行うものである。軽量小型のため室内空間や狭小空間で人が手持ちで移動しながら計測することで、3次元データを取得することができる。UAVや移動体に搭載して計測することもでき、今後更なる技術革新が期待される技術でもある。

図2.3.21にStencilを用いて河川にかかる橋梁周辺を計測したデータを示す。作業員が約10分の間モバイルスキャナを持った状態で移動しながら計測した事例であり、これだけの計測で橋梁周辺の状況を忠実に捉えていることが分かる。また断面表示することで、一部オクルージョンはあるものの橋梁下面の構造が判読できる情報は得られており、図面作成等には活用可能である。ただし、精度が±3cm程度のため、地上型3Dレーザスキャナほどの精度は保有していない。しかし、短時間で容易に広範囲のデータを取得できることから、要求精度によっては活用できる可能性は高い。



KAARTA 社 Stencil2

出典：株式会社アルゴウェブサイト

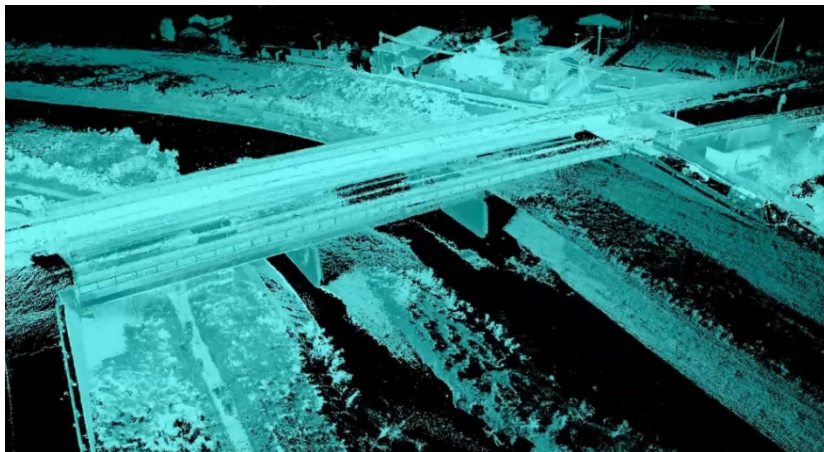
<https://www.argocorp.com/system/3D/KAARTA/Stencil.html>



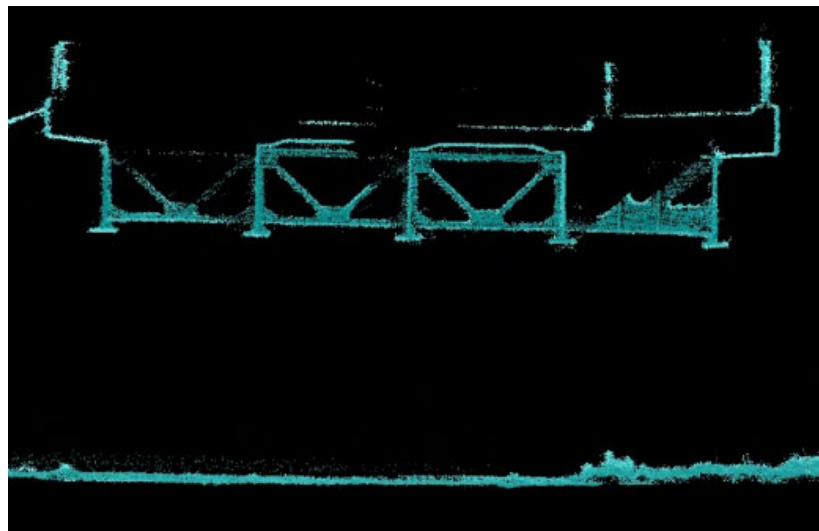
geoslam 社 ZEB HORIZON

出典：ZEB HORIZON カタログ

図 2.3.20 モバイルスキャナの一例



Stencil で橋梁を計測したデータの俯瞰画像



橋梁の断面データ

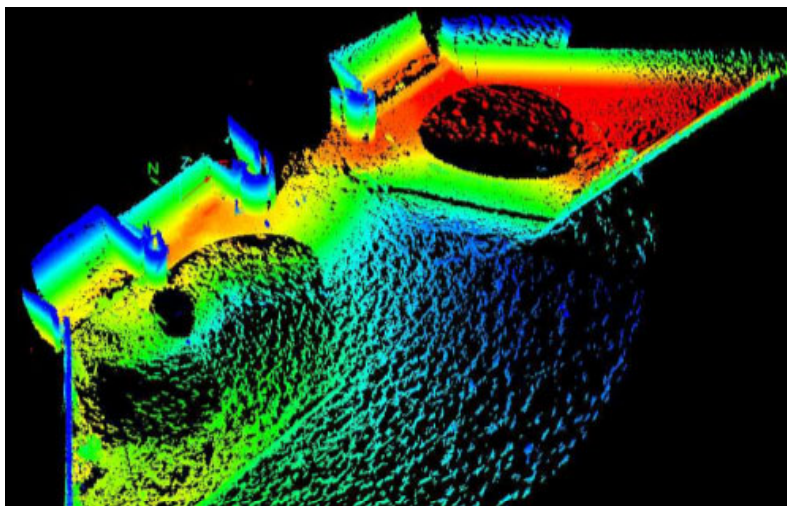
図 2.3.21 Stencil で橋梁を計測した例

【水中 3D スキャナ】

水中音波（ソナー）技術を基に開発された水中 3D スキャナは、サイドスキャナーとは異なり、水中で対象物に正対して計測できることから水中構造物の損傷検査，河床の洗掘測量などで活用されている。BlueView 社の BV5000-1350 は， $45 \times 360^\circ$  の範囲を約 6 分でスキャンでき，濁水や視界ゼロでも計測が可能である。しかし，音波を使用していることとビーム幅が  $1^\circ$  あることから精度はやや低いが，これまでデータの取得が困難であった水中の状況を取得できるツールである。



図 2.3.22 BV5000-1350 機器イメージ



水中の垂直壁の 3D データ取得が可能

図 2.3.23 BV5000-1350 を用いた 1 級河川の取水水門の計測事例

## 2.4 UAV-LiDARの適用性検証

### 2.4.1 概要

「2.3.1 航空 LiDAR, UAV-LiDAR」に記述した通り、近年航空機用のレーザ機器は軽量化が進み、UAVに搭載可能なモデルが販売されてきている。現在、広範囲の地形計測には固定翼機やヘリコプターによる航空 LiDAR が用いられている。地形図作成には、従来から航空写真測量が用いられてきたが、近年では急速に普及してきた UAV を用いた SfM 解析による計測も展開されている。しかし、SfM 解析による樹木の繁茂した環境下での地表面取得では、手前の樹木が阻害要因となり樹木下の形状を正確に捕捉できないこと<sup>1)</sup>や写真測量のような精度管理を行えないことが多く、精度を要求される計測時には、注意が必要などの課題がある。一方、航空 LiDAR では樹木の繁茂した環境下でも枝葉の間を通過することで、樹木下の地形データ取得が可能だが、対地高度 500m 以上からの計測では、地上での点密度が低く、対象物の詳細形状把握は難しいことや費用が高いなどの課題がある。

そこで、UAV-LiDAR を用いて、河畔林及び人工林の樹木下の地表面形状の取得状況・地上レーザスキャナのデータと相対的な比較を行い、その実用性を検証した。

### 2.4.2 上空からの計測手法比較

表 2.4.1 は、地形形状を上空より取得可能な主要技術である①航空 LiDAR、②UAV-SfM 解析、③UAV-LiDAR の 3 手法の特徴や課題を比較したものである。

航空 LiDAR は、航空機から地上に向けてレーザを照射し、地表面等で反射した地点の 3D データを取得する測量技術である。航空 LiDAR システムは、GNSS/IMU 装置、レーザスキャナの 3 つのセンサで構成される。GNSS/IMU は航空機位置、加速度、角速度を航空 LiDAR 計測時にリアルタイムで記録している<sup>2)</sup>。データ取得後、地上 GPS 基地局で観測した GPS データと航空機上で観測した GPS データの位相差から算出した航空機位置座標と IMU で計測した航空機の角度・角速度を統合し、位置精度±30cm、高さ精度±15cm で航空機の移動軌跡・姿勢を求め、それらとレーザスキャナのデータを統合し、高精度な地形データを再現する。

特徴としては対地高度が 2km まで可能なため、短時間で広範囲の計測が可能で、植生が繁茂した環境下では樹木の樹冠部だけでなく、樹木下部（地表面）の形状も波形記録方式により取得できる。波形記録方式とは、ひとつのレーザ発射パルスから得られる反射光の強弱を波形として記録する方式で、植生が著しく繁茂する箇所の地盤面からの微弱な反射も記録でき、DSM (Digital Surface Model : 数値表層モデル)・DEM (Digital Elevation Model : 数値標高モデル) どちらの形状も再現可能である。しかし、計測位置が比較的高高度なため地表部分での点密度が低いことや対象面積が小さい場合、費用が高額となる等の課題もある。

一方、UAV による計測では対地高度が 150m 以下であり、低空から短時間で極小範囲の高密度情報の取得が可能である。UAV にカメラを搭載した SfM 解析による手法では、現地状況をリアルに再現した 3D データを構築できるが、植生が繁茂した状況では元データが画像のため、手前の下草・樹木が阻害要因となり、地形形状までは正確に取得できず、再現されたデータは DSM となる。

UAV-LiDAR でも使用するセンサ・機器の構成は、航空 LiDAR と基本的には同等であるが、近年レーザスキャナが小型化・軽量化されたことにより UAV への搭載が可能となった。UAV-LiDAR では航空 LiDAR より 1 度のフライトで観測できる範囲が狭いが、低空で飛行可能なため高密度な点群を取得でき



表 2.4.1 地形形状取得技術の比較表

	航空機 (LiDAR)	UAV (SfM)	UAV (LiDAR)
計測面積 (日あたり)	1~50 km <sup>2</sup>	0.5 km <sup>2</sup>	0.5 km <sup>2</sup>
対地高度	300m~2km	10~150m	10~150m
飛行速度	0~200km/h	40km/h 以下	40km/h 以下
航続時間	2~3 時間	20~30 分	20~30 分
点密度	10~30 点/m <sup>2</sup>	—	100~300 点/m <sup>2</sup>
特長	樹木下の形状が計測可能 広範囲で計測可能	低空から高精細に撮影 SfM で高精細な画像を取得 3D モデル化可能	樹木下の形状が計測可能 極小範囲を高密度計測可能
課題	小地域が対象の場合フライト費用が高い 計測基地が現場近くに必要	樹木下の形状が計測不可 飛行できる場所が限られる 飛行時間が短い	飛行できる場所が限られる 飛行時間が短い 広範囲計測では高額となる

る。加えて、上下前後左右への飛行および空中静止が可能となるため観測対象物が複雑な形状をしていても、その表面に沿って飛行することで航空 LiDAR では不可能であった垂直面やオーバーハング部の形状取得が可能となった。

### 2.4.3 UAV-LiDAR システムの概要

#### (1) LiDAR システム

本検証で使用した UAV 及び LiDAR システムを下記に示す。UAV は 6 枚のプロペラを有す DJI 社製の MATRICE600 であり、ペイロードが 6kg そして最大積載時の飛行時間が 16 分であることから選定した。プロペラを広げた状態での寸法は、1668mm×1518mm×759mm である。また、LiDAR システムとしては小型で軽量化された Velodyne 社の 2D レーザスキャナ (VLP-16) と IMU/GNSS ユニットで構成された YellowScan を上記 UAV に搭載した。VLP-16 は 16 方向にレーザを照射するため、枝葉・下草の間をレーザが通過しやすく、地表面形状を取得することに有利である。また、同時にカメラも搭載することで取得した点群に色情報を付加することも可能である。UAV を高度 60m、速度 5m/s で飛行させ、レーザスキャナを 10 回転/s の設定とした場合、地上部分でのレーザ点間隔は、進行方向約 31mm、横方向約 201mm となり、点密度はおおよそ 150 点/m<sup>2</sup>となる。

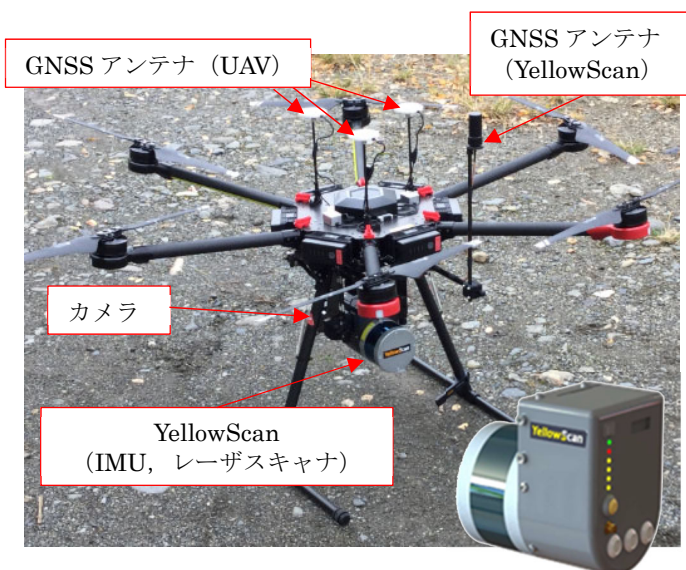


図 2.4.1 使用した UAV (MATRICE600)

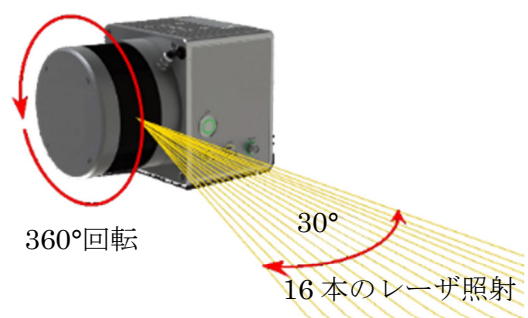


図 2.4.2 VLP-16 のレーザ照射方法

(2) 仕組み

以下に UAV-LiDAR のデータ取得の仕組みを示す。UAV-LiDAR システムでは、UAV (センサ類) の位置情報を正確に取得するため、近傍に GPS の基地局もしくは仮想基準点を設置する必要がある。それら基地局もしくは仮想基準点の位置情報と GNSS/IMU により UAV 飛行中に取得した UAV の自己位置・姿勢情報、それと基準局から提供される仮想基準点の観測データもしくは GPS 基地局の補正情報の3つの情報から GPS 基線解析及びコース間調整により UAV の正確な位置情報を復元し、精度が約±5cm のレーザデータを構築する。その後、任意範囲に属する点群の中から Z 値の最下点のみを抽出する最下点検出により、グラウンドデータ (地表面以外の地物データを除去した点群データ) へのクラス分け、グリッドデータ (グラウンドデータの内挿補間によって作成される格子状の標高データ) の生成等を行い、最終的にコンター図の作成等の 3D データ処理へと繋がっていく。

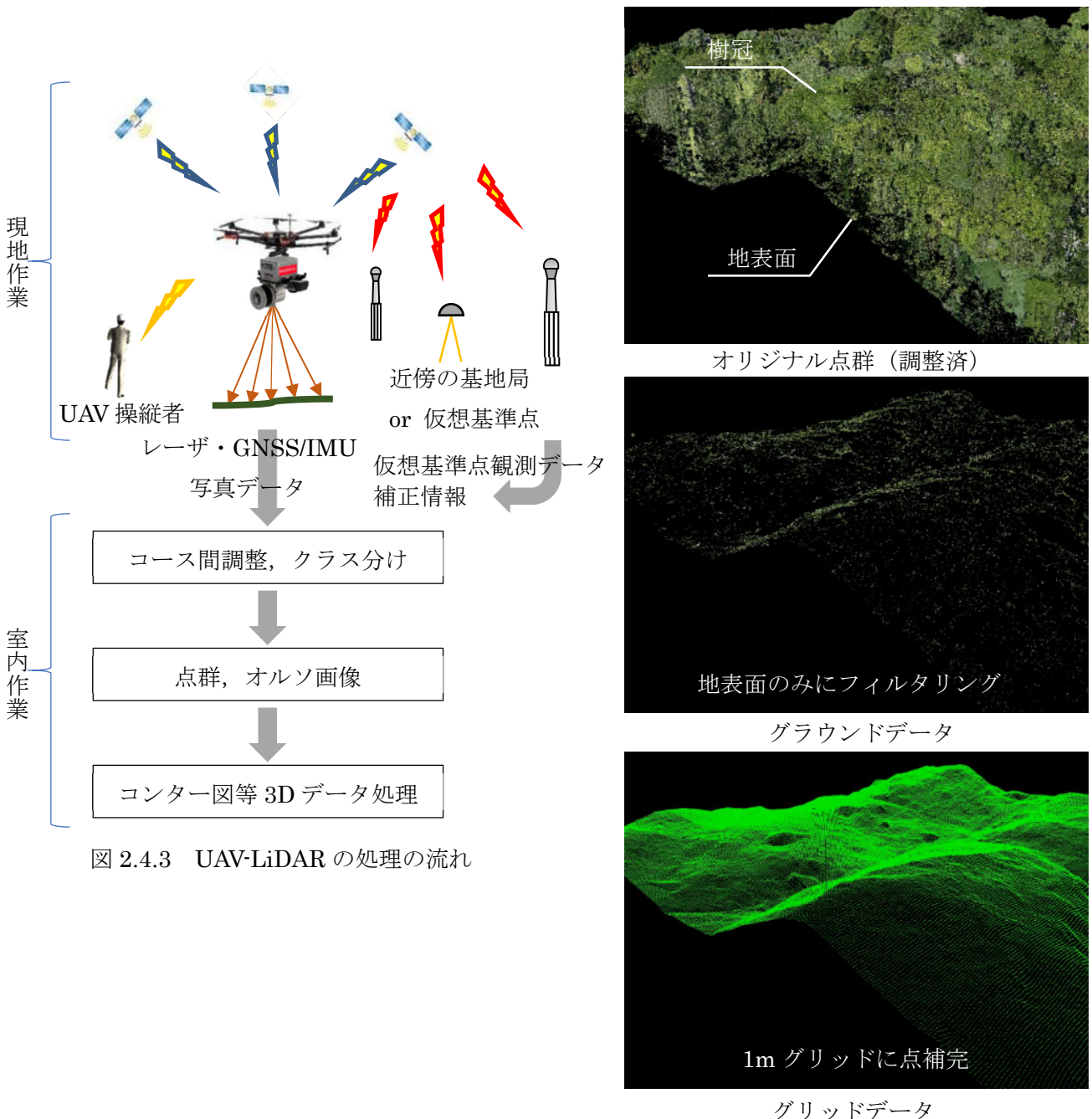


図 2.4.3 UAV-LiDAR の処理の流れ

図 2.4.4 データ処理のイメージ

#### 2.4.4 河畔林における検証

本項では、これまで記してきた YellowScan を搭載した UAV (MATRICE600) を長野県梓川の河畔林にて飛行させ、取得したデータの比較検証を行った結果を示す。対象とした河畔林は単層林であり、実施時期は10月であったため落葉前の樹木が繁茂した状態であった。

##### (1) 対象敷地

対象敷地は図 2.4.5 に示す河畔林であり、SfM による地表面形状の取得は困難な箇所と判断し選定した。当敷地の近傍には铁塔と送電線があり、UAV-LiDAR により送電線形状取得の可否についても検証した。また、当敷地は航空法が UAV の飛行禁止区域として定めている DID 地区 (人口密集地区) には該当しないが、熟練のオペレータの下、安全に十分配慮し UAV を飛行させた。



赤枠の約 100m 四方が対象

上空が開けたエリアと樹木が繁茂したエリアが混在

対象範囲に沿って堤防道路があり、この堤防の断面形状の再現性も検証した。

図 2.4.5 対象とした河川敷の状況

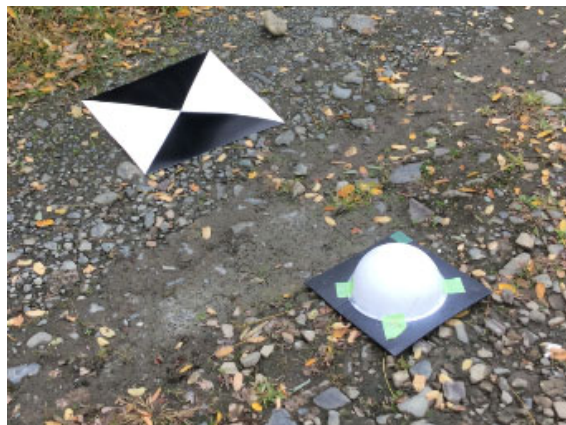
##### (2) 検証内容

同一の対象敷地にて、UAV-LiDAR と地上型 3D レーザスキャナによる計測を実施し、地上型 3D レーザスキャナによる計測結果を実証値として樹木下のデータを相対的に比較検証した。実証値の計測に使用した地上型 3D レーザスキャナには表 2.4.2 に示す FARO 社製の Focus3D を採用した。当機器は小型・軽量で、機動性に優れているため対象範囲を網羅し、樹木下のデータも取得できるよう複数位置から計測した。設置高は、地上から約 1.5m である。地上型 3D レーザスキャナの計測結果もデータ取得・合成処理の段階で誤差は含むものと考えられるが、高密度に地表面データを取得する手法の中では最も一般的であり、精度が期待できる<sup>12)</sup>ため本検証では使用した。これらの地上型 3D レーザスキャナのデータは図 2.4.6 に示すような、現地に設置したターゲット (別途 TS による測量で公共座標値を取得) を元に合成することで UAV-LiDAR のデータと同位置となるよう整合を図った。このとき設置したターゲットは 2 種類あり、一方は地上型レーザスキャナ用の標識、もう一方は対空標識に半球上の模型を接合した UAV-LiDAR 用のものである。通常、地上型レーザスキャナの場合は点群の反射強度を利用してターゲットの中心位置を抽出するが、UAV-LiDAR の場合は点群形状からでもターゲットの中心が推測可能なように半球の中心と標識の中心が合致する 3 次元的なターゲットを用いた。

また、レーザ光は距離と共に広がる特性を持ち、計測距離が長くなるほどビーム幅であるスポット径は大きくなり、照射面積に依存して誤差が生じる。地上高 1.5m 程度では遠方になるほど地表面での入射角は浅くなり、スポット径が大きくなる。そこで本検証では、地上型 3D レーザスキャナ設置位置より 30m 以上のデータは削除した状態で合成処理を行った。

表 2.4.2 使用した地上型 3D レーザスキャナ

機械名	FARO Focus3D
機器イメージ	
測距方式	位相差方式 (Phase Shift)
測定距離	0.6~120m (反射率 90%)
測定範囲	V : 300° / H : 360°
レーザクラス	3R
距離精度	±2mm (@25m)
主な用途	建築/文化財/プラント他
重量	5.0kg



設置した 2 種類のターゲット



UAV-LiDAR の飛行準備状況



地上型レーザスキャンの状況

図 2.4.6 設置したターゲットと検証用データ取得の状況

(3) データの取得

① UAV-LiDAR

YellowScan は最大レンジが 100m あり、十分なサイドラップを確保するよう高度 50m および 75m、飛行測線の間隔を 20m、進行速度は 3m/s に設定し、敷地上空を横断・縦断方向に格子状に飛行させた。図 2.4.7 は UAV の飛行軌跡と各補正が完了した UAV-LiDAR による点群を示したものである。10 分間のフライトで約 3500 万点の点群を取得し、飛行範囲よりやや広範囲のデータを取得できており、最も軌跡が錯綜した A 点では約 3000 点/m<sup>2</sup>の点密度があった。A 点を含む横断面 (図 2.4.8) を確認すると、河川堤防等、上空に障害要因がない部分に加え、樹冠・樹木の下部も高密度な点群を取得している。ただ、地表面を拡大するとデータにばらつきがある。これは地表面付近の下草の繁茂が影響していると考えられる。これらは最下点検出やグラウンドデータへのフィルタリングにより、改善される。図 2.4.9 にオリジナルデータ、グラウンドデータ、グリッドデータの抽出結果を示す。オリジナルデータでは一部送電線の形状も取得していることが確認できる。

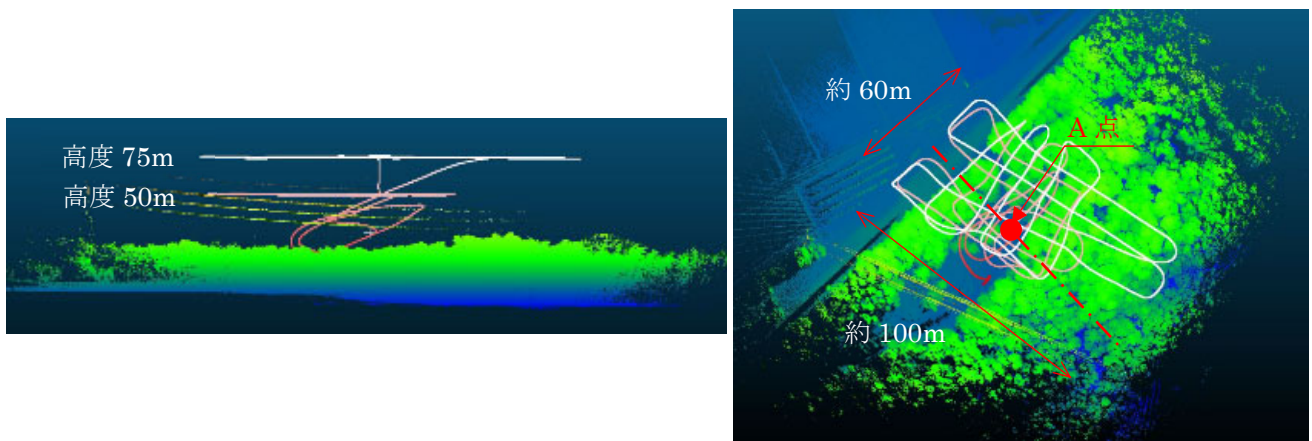


図 2.4.7 飛行軌跡と取得点群

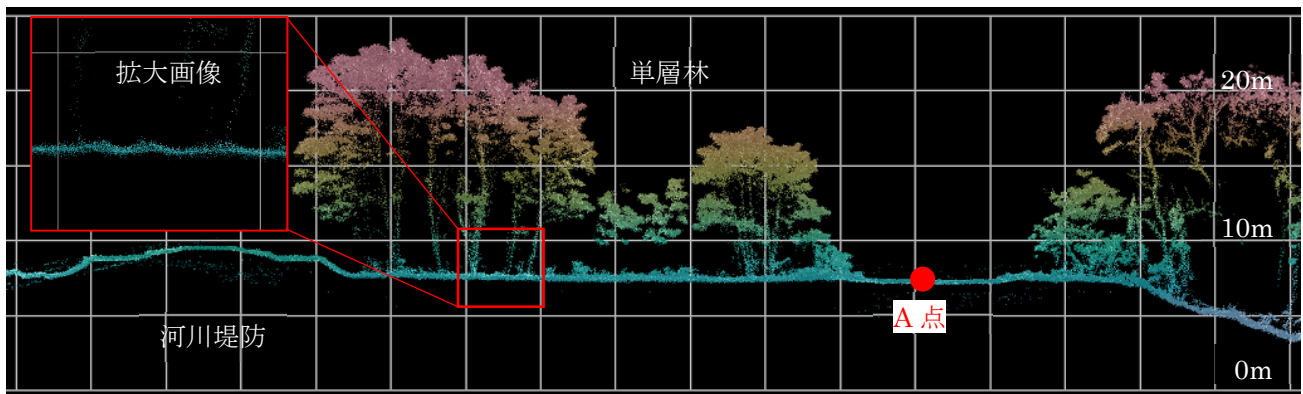


図 2.4.8 A 点を含む横断位置の断面表現



図 2.4.9 取得データのフィルタリング処理

## ②地上型レーザスキャナ

Focus3Dにより対象範囲内で南北方向に連続的に10箇所より計測を行い、約4000万点の点群を取得し、ターゲットを元に合成処理を行った。図2.4.10に合成結果を示す。UAV-LiDARのデータと比較し、地表面付近や樹木の幹等を主に捉えている。

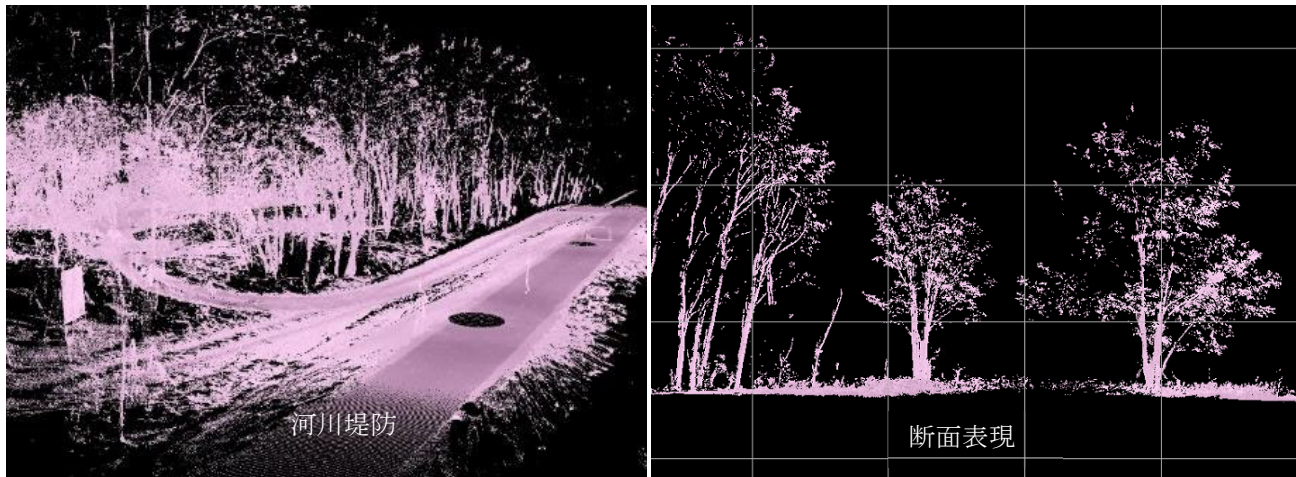


図 2.4.10 地上型レーザスキャナによる取得データ

## ③画像による SfM 解析

UAV-LiDARによるレーザ計測と同時に、搭載したカメラでインターバル撮影も実施しており、試行的にそれらの画像から SfM 解析により 3D モデルを構築した。図 2.4.11 に示すよう樹冠や上空に障害物のない部分は 3D モデルが構築されているが、樹木下は欠測が生じている。

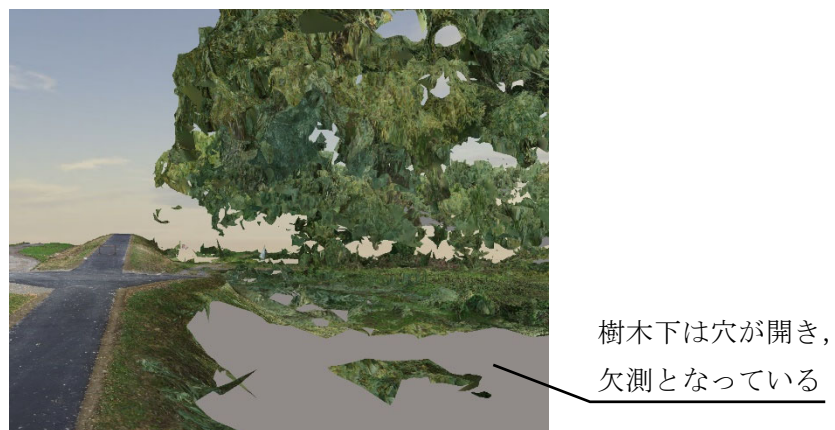


図 2.4.11 SfM 解析結果

## (4) 比較検証

まず、UAV-LiDARのデータと同様に、地上型 3D レーザスキャナのデータもノイズ等を除去した後、1m グリッドの最下点検出によりグラウンドデータを抽出した。両データの点群から TIN モデルを生成し、地上型 3D レーザスキャナの TIN をベースオブジェクトとして UAV-LiDAR の TIN の鉛直誤差を色により表現した差分マップと B-B' 測線における断面図を作成し比較した。

図 2.4.12 に差分マップを示す。地上型 3D レーザスキャナの計測地点付近では水色～黄色、つまり±5cm 程度の誤差内でデータが取得できているが、スキャナ計測位置から離れるにつれ部分的に±10cm 以上の鉛直誤差が生じている。この範囲は単層林ではあるが、下草の繁茂が顕著で、地上高約 1.5m に設置

したスキャナから照射されたレーザ光は、スキャナ周辺では地表面に垂直に近い角度で入射するため、地表面まで高確率で到達するが、スキャナから距離が離れるにつれ入射角が浅くなり、下草の中部～頂部の座標値を取得したことに起因するものと考えられる。よってレーザスキャナから離れた位置では、青つまり UAV-LiDAR のデータが地上型 3D レーザスキャナのデータより下部にある傾向が現れている。しかし、部分的に赤つまり UAV-LiDAR のデータが 10cm 程度上部にある部分も見受けられる。これらの箇所では上部の樹木間を通過した UAV-LiDAR のレーザ光はあるものの地表面まで到達せず、下草の上部を計測しているため最下点検出でも地表面を抽出できず、地上型 3D レーザスキャナのデータより上部に計測点が残存したものと推測する。

図 2.4.13 は鉛直方向を 5 倍表示した B-B' 断面図を示している。堤防の形状や地表面の凹凸から判断すると、断面方向ではデータのずれは数 cm 程度に収まっており、鉛直方向については差分マップでも示した通り、レーザスキャナ設置位置付近では高精度に地表面を捉えた結果となっているが、レーザスキャナから離れた位置では UAV-LiDAR のデータが地上型 3D レーザスキャナのデータより下方にある傾向がある。

これらのことから高精度な DEM の取得には、樹木の繁茂状況だけでなく下草の状況も重要な要因のひとつであると考えられる。入射角の観点では地上型 3D レーザスキャナより UAV-LiDAR 等上空からの計測が有効であると言えるが、下草の繁茂状況によっては全ての範囲において UAV-LiDAR を用いても地表面の取得が可能とは言い難い。

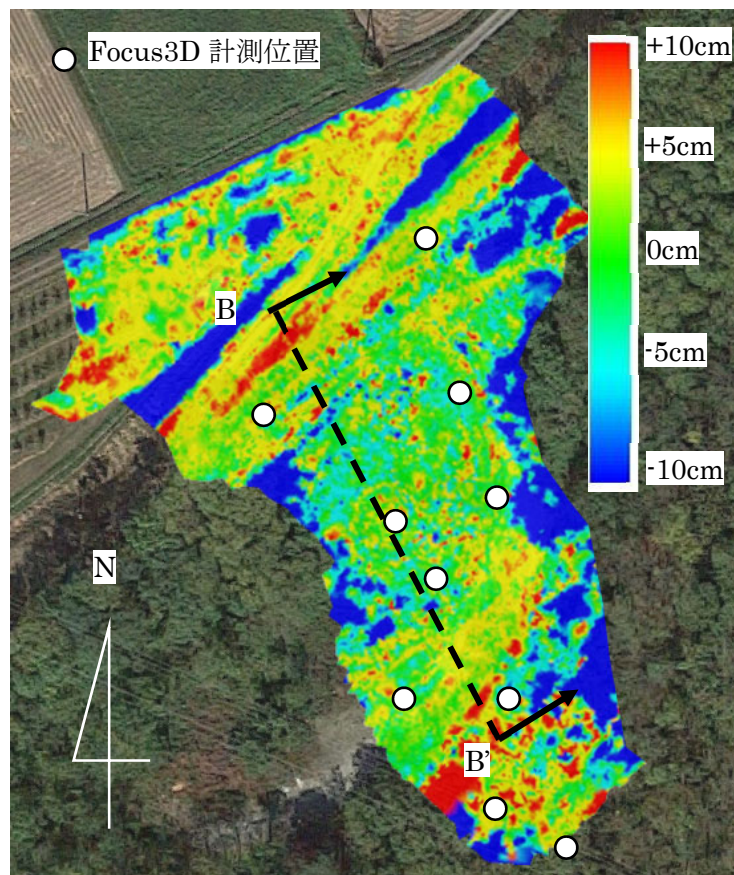


図 2.4.12 差分マップ

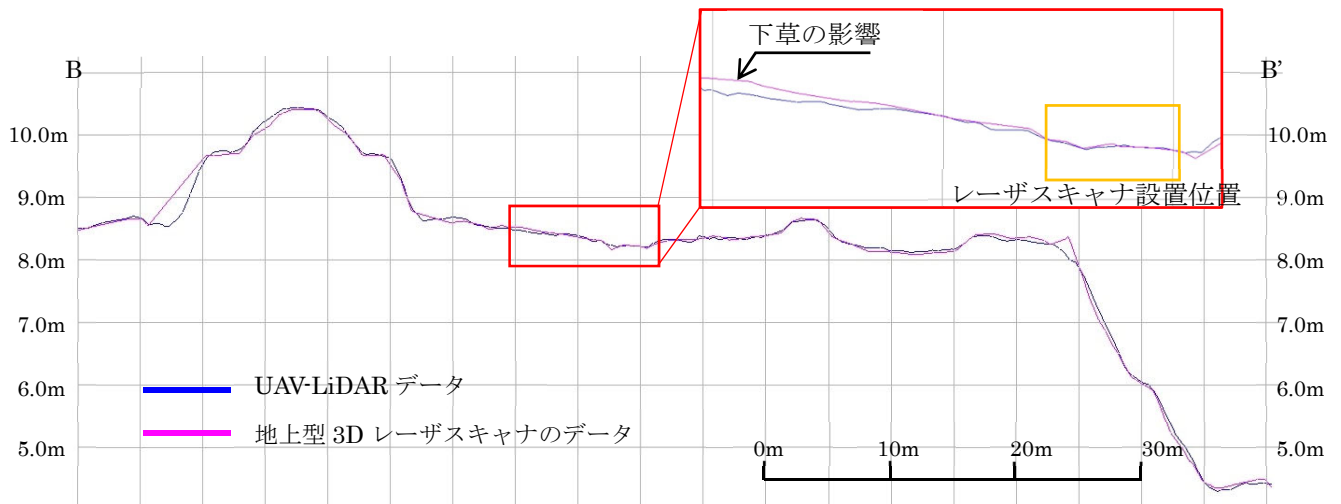


図 2.4.13 UAV-LiDAR と地上型レーザスキャナ各データの B-B'断面による比較

(5) 考察

本検証で、地上型 3D レーザスキャナのデータを実証値として UAV-LiDAR による樹木下のデータ取得状況を比較したところ、平面方向・鉛直方向で平均して±5~10cm 程度の誤差に収まっていることが確認できた。しかし、地上型 3D レーザスキャナでは、下草の影響により正確な地表面のデータを捉えきれていない可能性があるため信頼度にやや欠けると言える。

2.4.5 自然災害後の峡谷におけるデータ取得と検証

(1) 概要

自然災害により落石・地すべり等が発生し、その応急対策のため現状地形の早急な把握が求められた。当該箇所は数十メートルの高さの垂直に近い断崖が続く峡谷で、オーバーハング箇所が随所に見られる。上部では単層林の人工林があり、全範囲の詳細な地形情報を取得するには UAV-LiDAR が最適と考え、点群の取得～グラウンドデータ抽出、そしてコンター図・縦横断面図の作成を行った。

使用した UAV-LiDAR は、YellowScan を搭載した DJI 社製 Matrice600 である。通常、地形測量であれば上空から平面的に UAV を飛行させてデータを取得するが、当該箇所はオーバーハング箇所が多々あるため、図 2.4.14 に示すように、垂直面及びオーバーハング箇所の形状を効率的に取得できるよう高度を変化させ、峡谷の上空と峡谷内を飛行させた。これは航空機では不可能な飛行ルートであり、UAV の利点を活かした飛行ルートの設定である。

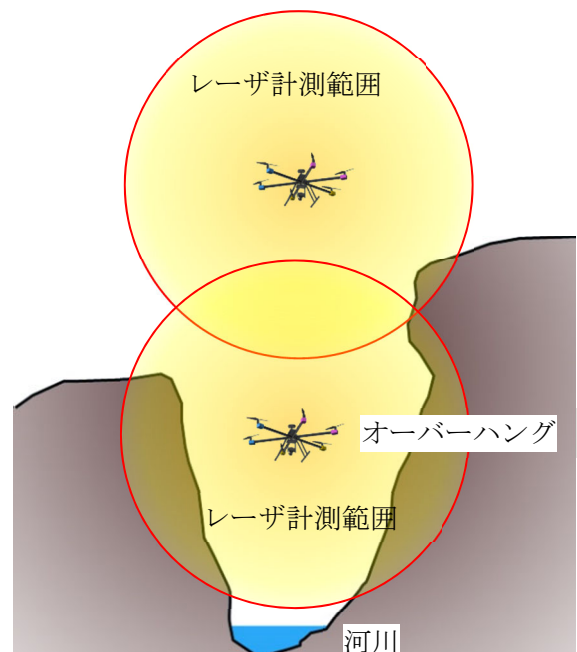


図 2.4.14 UAV 飛行ルートの断面イメージ



(2) データ取得

異なる高度で飛行させた UAV で取得したオリジナル点群と、Terrasolid 社製の TerraScan による自動フィルタリング及び手動フィルタリングにより抽出したグラウンドデータを図 2.4.15 に示す。峡谷上部の人工林(単層林)は、TerraScan による自動フィルタリングにより地表面の抽出が可能であったが、垂直に近い急崖やオーバーハングした範囲は自動フィルタリングや Maptек 社製の点群処理ソフト (I-Site Studio) の最下点検出では、任意の平面範囲における鉛直方向の点群が輻湊しており、コンター表現する上で必要となる点まで削除されるため、不要点を人の目で選別し手動除去する必要があった。手動除去した急崖やオーバーハング部では、約 200~300 点/m<sup>2</sup>と高密度な点群を抽出できていた。これらのデータより対象範囲の地表面のコンター図を作成した。



図 2.4.15 取得データの処理の流れ

(3) 比較検証

「2.4.4 河畔林における検証」と同様に当該範囲でも一部地上型 3D レーザスキャナにより 3D データを取得したため、そのデータを実証値としてコンター図・断面図における比較検証を行った。計測に使用した地上型 3D レーザスキャナは TOPCON 社製の GLS-2000 で、そのデータから作成したコンターと UAV-LiDAR データから作成したコンターを重畳表示したものを図 2.4.16 に示す。地上型 3D レーザスキャナのデータが UAV-LiDAR のコンター線より前方に張り出している箇所が多く見受けられ、全体的には±10cm 程度に収まっているものの、大きな箇所では 1m 程度の誤差が生じている。これは地上型レーザが対岸の約 200m 遠方からしか計測できず、UAV-LiDAR の点密度より低いため、抽出したコンター線が直線的な表現となっていることが原因と考えられる。つまりこの対象範囲の環境下では、UAV-LiDAR の方がより高密度に詳細な形状を捉えていると言える。

表 2.4.3 使用した地上型 3D レーザスキャナ

機械名	TOPCON GLS-2000
機器イメージ	
測距方式	TOF 方式
測定距離	~350m (反射強度 90%)
測定範囲	V : 270° / H : 360°
レーザクラス	3R
距離精度	3mm( $\sigma$ )/1~110m (高速モード)
主な用途	土木・大型構造物
重量	10kg

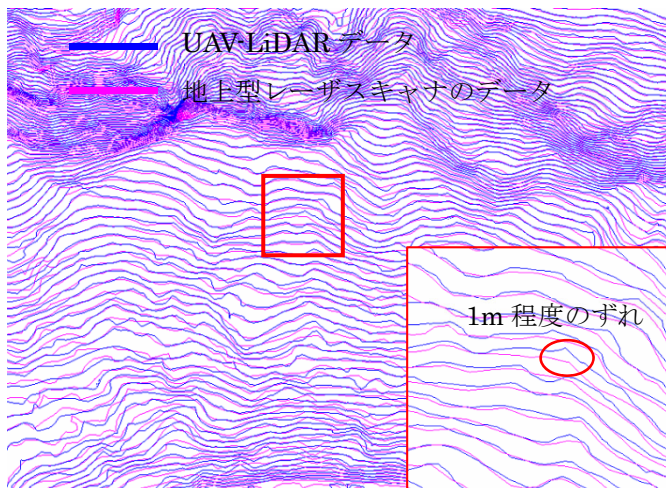


図 2.4.16 1m ピッチで抽出したコンター図

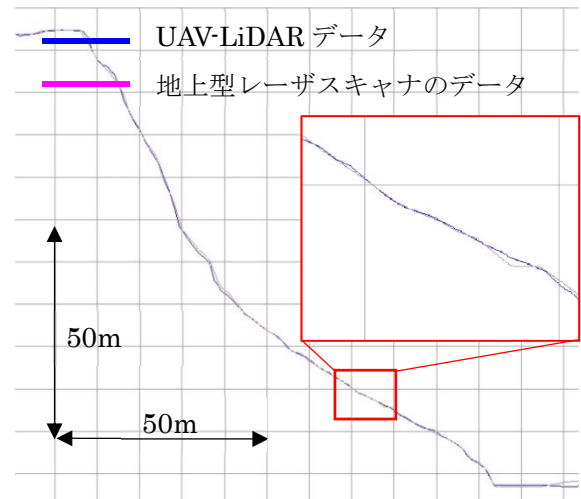


図 2.4.17 高さ約 100m の斜面の断面

図 2.4.17 は、斜面の任意箇所両データの断面を抽出したものである。1 グリッドが 10m のため約 100m の高さの斜面であり、10cm 程度のばらつきはあるが両断面ともほぼ重なり、同等の結果を示していると言える。

#### (4) 考察

当該範囲においては、限られた位置のみから地上型 3D レーザスキャナによる計測を実施したため、点密度に差が生じてしまったが、UAV-LiDAR により地形コンター図を表現する上では、十分な情報が得られた。特に航空 LiDAR では困難な垂直面やオーバーハングした部分も高密度な点群を取得できた。しかし、オーバーハング部の自動処理によるグラウンドデータ抽出は、鉛直方向に点群が重なり合うため、単純な最下点検出ではその中でも上部にある必要なデータまで削除されてしまうため、現状では手作業が必要となる。また、オーバーハング部を平面図化した場合、コンター線が交差してしまうため、隠線処理等も必要となる。UAV-LiDAR は、このようなオーバーハング部の計測には非常に有効なことから、今後同様の課題が頻出してくると思われるため、処理ソフトウェア開発も不可欠と考える。

### 2.4.6 まとめ

UAV-LiDAR により取得したデータは、飛行計画にも起因するが、航空 LiDAR より高密度に樹木下のデータを取得可能である。その上、地上型 3D レーザスキャナとも同レベルのデータを取得でき、グラウンドデータの計測のみであれば、地上型 3D レーザスキャナよりも効果的な計測手法である。ただし、樹木・下草の繁茂状況によっては、地表面までレーザ光が到達しない可能性もあるため、要求精度によっては事前踏査も必要と考える。また、航空 LiDAR では困難な垂直面やオーバーハング部も UAV-LiDAR の場合、360 度の計測が可能のため、低高度で飛行させることで十分にデータが取得できる。しかし、既存ソフトウェアでは既述の通りオーバーハング部の自動抽出は困難で、手動処理に頼らざるを得ないため、今後は処理ソフトウェアの開発も必要となる。

また、現状ではペイロードの都合上、大型の UAV にレーザスキャナ・IMU を搭載しているため、飛行時間の制約により飛行可能範囲が狭いうえ、UAV の操縦に高スキルが要求されるため、経済性・運用性の点で課題は多々存在する。しかし昨今の UAV 関連の急速な技術革新により、レーザスキャナの小型化・高精度化等が予想されるため、市販の小型 UAV にも搭載可能なモデルが普及し、長時間飛行でより広範囲のデータ取得が可能となることが予想される。最近では、処理解析のリアルタイム化により、上空

で計測を行いながら、その結果を手元の PC で即時に取得でき、取得データの良否の即時確認およびクラウド経由でのデータ送信による業務の迅速化を図るとともに顧客に対してタイムリーに情報を提供する仕組みを保有した UAV-LiDAR もリリースされており、この数年で劇的に様相は変わってきている<sup>13)</sup>。

## 参考文献

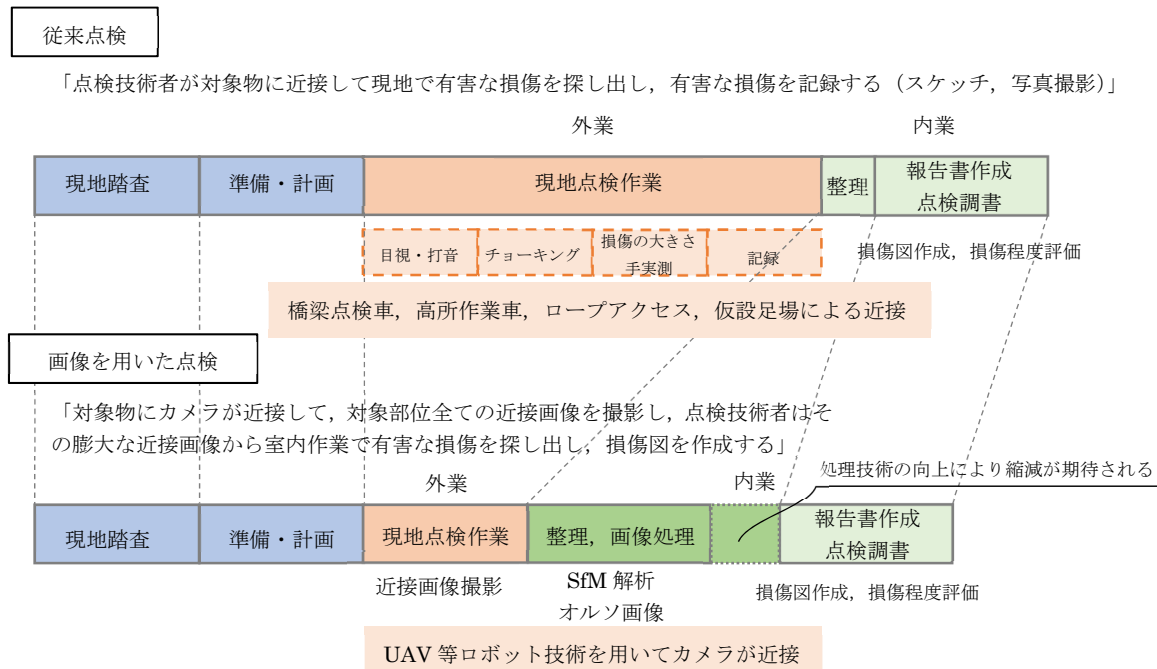
- 1) 河村幸二：3次元計測の最近技術と市場動向，精密工学会誌 79(5)，pp.388-391，2013
- 2) 横尾泰広：航空レーザ測量の概説と最新動向，フォレストコンサル 137号，林業土木部門技術士会，2014.9
- 3) 国土交通省国土地理院：地上レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル（案），2018.3
- 4) 篠田達也，永田優次：3D計測技術の動向とその応用，Komatsu technical report 61(168)，13-17，2015
- 5) 山崎荘太郎，林田義伸，太田明子：アテネのアクロポリスにあるローマとアウグストゥス神殿に関する研究 その2 3Dレーザスキャナを用いた石材実測手法，日本建築学会九州支部研究報告第51号，2012.3
- 6) 西村正三：インフラ構造物の変状調査とモニタリングのための遠隔測定法の開発と評価に関する研究，長崎大学大学院工学研究科学位論文，p.22，2012
- 7) 西村正三，木本啓介，味岡収・安井伸頭・松田浩：光学的計測手法を用いた軍艦島護岸の計測とモニタリング，実験力学，Vol.12，No.3，pp.193-200，2012.9
- 8) 西村正三，木本啓介，巽耕一，根岸明廣，山内裕之，宮塚義人：『石垣修復支援システム』を用いた石垣の大規模修復工事（その2），土木学会第64回年次学術講演会概要集，IV-084，2009
- 9) 小沼恵太郎，西村正三：多視点画像3Dモデル構築システムの橋梁調査への適用性について，土木学会第69回年次学術講演会講演概要集，VI-511，Vol.69，2014.9.
- 10) 西村正三：産業遺産への3次元計測技術の応用，近畿産業考古学会誌(11)，pp.15-20，2017.5
- 11) 寸田亘，菊本健太，春田健作，木本啓介，坂口博紀：無人航空機（ドローン）の道路施設管理への展開（京都府：八雲橋・大津南郷宇治線），土木学会第71回年次学術講演会概要集，VI-738，2016.9
- 12) 小花和宏之，早川裕弐，齋藤仁，ゴメスクリストファー：UAV-SfM手法と地上レーザ測量により得られたDSMの比較，写真測量とリモートセンシング，VOL.53，NO.2，日本写真測量学会，2014
- 13) 西村正三：UAVレーザのIOT化によるリアルタイム空間情報取得システム，Journal of Survey VOL.67，日本測量協会，2017.8

## 第3章 ひびわれの視認と検出における検証

### 3.1 検証の概要

#### 3.1.1 検証の背景と目的

コンクリート構造物においては、目視点検によりひびわれ等の発生状況・進展を把握することやその補修などは、長寿命化にとって極めて重要である。道路橋については、平成26年6月には「道路橋定期点検要領」<sup>1)</sup>が示され、その中で人（点検作業員）が構造物に近接し、点検することが求められている。従来の計測手法としては、人がコンクリート表面を確認し、ひびわれが確認された箇所ではクラックスケールによる幅の計測、コンベックスによる長さの計測、チョーキングしてスケッチによる記録、そして損傷図の作成と点検作業に時間と労力がかかる。人がアクセスできない場合は、高所作業車や足場仮設、ロープアクセスなどで近接し同様の作業を行うため、安全の確保やさらに費用が嵩むこと等の様々な課題を抱えている。遠望から点検する手法としてクラックスケールを内蔵した光波測量機<sup>2)</sup>を用いるものもあり、ダム堤体のひびわれ調査<sup>3)</sup>などに活用されているが、広範囲の計測においては多大な労力を要す。そのような中、目視調査に置き換わる方法として、デジタルカメラで遠隔・非接触で撮影した画像を用いてコンクリート表面の劣化状況を判断する方法が研究・開発<sup>4)5)</sup>され、建築物や橋梁・トンネルといったインフラ構造物の点検<sup>6)7)8)</sup>に活用されている。コンクリート表面を撮影した画像から損傷を視認（人が目で認識すること）・検出（画像解析により自動もしくは半自動で損傷を認識すること）し、損傷程度を評価することは、従来の点検手法と比較し、現場作業の省力化、安定した室内作業による点検漏れの防止や安全性の向上、複数人が同じ画像を確認することで判定結果の客観性向上など多くの利点を有して



【メリット】

足場仮設等が不要、現地作業の大幅な省力化、展開画像をトレースして損傷図作成、橋梁3Dモデルや展開画像の作成、損傷程度評価結果の客観性向上、点検漏れ等の防止

【デメリット】

画像処理等内業の増大、画像点検では触診ができない

図 3.1.1 従来点検と画像を用いた点検の比較

いる(図3.1.1)。しかし、画像を用いた点検では画像処理に要する時間が増大する他、ひびわれや遊離石灰、剥落など色情報で判読できる損傷の把握は可能だが、浮きなどの触診(打音検査)で判断すべき損傷は把握することはできないなどの課題も存在する。画像を用いた点検を1次スクリーニングとして触診する範囲を限定し、その後点検技術者が近接する面積を低減することで橋梁点検全体の効率化を図ることも考えられる。人が容易にアクセスできる橋梁に対しては、画像を用いた場合の方が高コストとなってしまうことも考えられ、必ずしも画像を用いた点検が効率的な手法であるとは限らない。橋梁の環境条件や予算によって適切な点検手法を取捨選択する必要がある。ただし、画像を用いた点検では、各部位の展開画像や橋梁の3Dモデルなどにより、経年的な損傷進展の比較など今後の維持管理の効率化、高度化に向けた付加的な基礎データを蓄積できる重要なメリットを有している。

画像を用いた点検では、撮影画像から非常に微細な色情報であるひびわれを判読する必要があり、「コンクリート診断技術'19 [基礎編]<sup>9)</sup>」では、デジタル分解能以下の1pixelに満たない幅を持つひびわれを画像から特定が可能であるとされ、村井らの検証<sup>10)11)12)</sup>により、172万画素(1312×1312)で撮影範囲の1短辺長が約2.5m以下、つまり画像解像度が約2mm/pixelの画像であれば、コンクリート表面の汚れが少ない状態という制約はあるものの0.2mm幅のひびわれを特定できるという結果が出ている。つまり視認すべきひびわれ幅の10倍の解像度で画像を撮影すれば、その画像から視認が可能ということだが、筆者のこれまでの点検経験上、10倍の解像度では視認性が低く、コンクリート表面の汚れなどの状況によっては、見落としとになってしまう可能性が高い。また、近年では高性能なものから一般的なものまで様々なカメラ機種が販売されており、これらの違いによる視認性の差も存在すると推測される。

そこで、ひびわれのサンプルとして「模擬ひびわれシート」と数種類のひびわれを生じさせた「コンクリートパネル」を用意し、センササイズの異なるデジタル一眼レフカメラ2台・ミラーレスカメラ2台の計4台のカメラを用いて、撮影距離を変えることで撮影解像度を変化させて撮影した各画像からカメラ機種・撮影解像度と視認可能な最小ひびわれ幅の関係性を明らかにする検証を行った。解像度と視認可能なひびわれ幅の関係性が明らかになることで、画像を用いた点検の適切な計画立案などが可能となる。

また、西村らが開発したデジタルカメラで撮影した画像の分解能以下のひびわれ幅を検出する「ひびわれ描画支援システム<sup>13)</sup>」の精度確認も行った。それらの結果を本章に示す。

### 3.1.2 デジタルカメラの仕組み

デジタルカメラはレンズから入った光を素子の集合体である CCD (Charge Coupled Device) や CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) のイメージセンサ (撮像素子) で受光し、電気信号に変換後、画像処理エンジンにより画像データへと変換され、カメラのディスプレイでの表示や SD カードなどの記録媒体に記録される。記録方式は、圧縮により容量を抑える JPEG が広く利用されているが、不可逆圧縮のため画質が劣化してしまう。画質を維持するためには容量は大きくなるが、RAW などでも記録することも可能である。図 3.1.2 にデジタル一眼レフカメラの仕組み<sup>13)</sup>を示す。

デジタルカメラの性能は、センササイズや素子の数 (画素数, ピクセル数) に大きく依存する。一般的には、センササイズが大きいほどより多くの光情報を取り込むことができ、画質が向上する。画素数が多いほど高画素となり、分解能は向上する。その他、ダイナミックレンジも重要な要素である。ダイナミックレンジとは、一度の撮影でカメラが識別できる明るさの範囲のことを示し、ダイナミックレンジを超えた範囲は「白飛び」や「黒つぶれ」となり色情報が失われる。使用しているセンサの性能に依存する部分はあるが、一般的にセンササイズが大きいほどダイナミックレンジが広がり、表現可能な階調の幅が広がる。図 3.1.3 はダイナミックレンジのイメージを示したものである。現在、販売されているデジタルカメラは、画素数やセンササイズ、撮影機構の違いにより①デジタル一眼レフカメラ、②ミラーレスカメラ、③コンパクトデジタルカメラ、④アクションカメラ、⑤スマートフォン等に大きく分類ができる。図 3.1.4 はセンササイズの違いにより主なカメラを分類したものである。

撮影画像から定量的に損傷程度を評価するためには、損傷を視認もしくは検出が可能な品質を持った均質な画像を取得する必要がある。そのためにはデジタルカメラおよび画像に関する上述のような基本的な概念を理解することが重要である。本研究では、画像からコンクリート表面の損傷の視認もしくは検出を目的としており、その中でも特にひびわれは 1mm 以下の極微細な色情報のため、センササイズが大きく画質の面で有利なデジタル一眼レフカメラとミラーレスカメラを主に用いて検証等を行った。

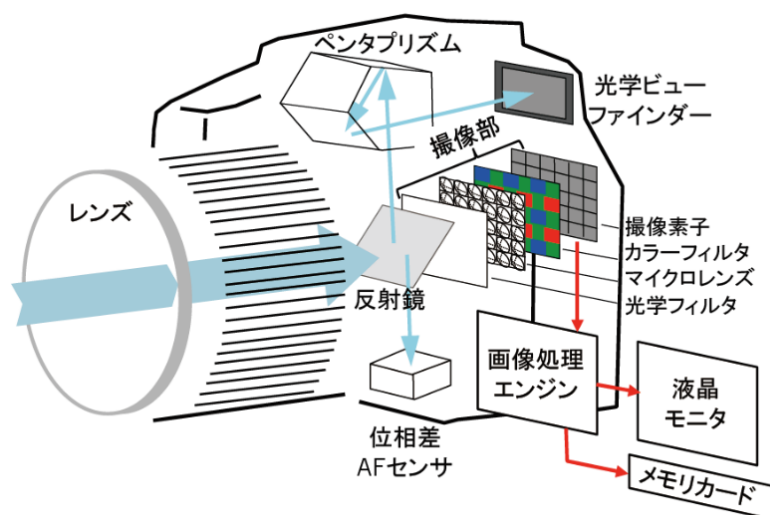


図 3.1.2 デジタル一眼レフカメラのしくみ<sup>13)</sup>

出典：「デジカメ画像処理のしくみ—進化を続けるデジカメ技術を解き明かす—」(蚊野, 2011.11)

<http://www.cc.kyoto-su.ac.jp/~kano/pdf/study/CSE20101110.pdf>

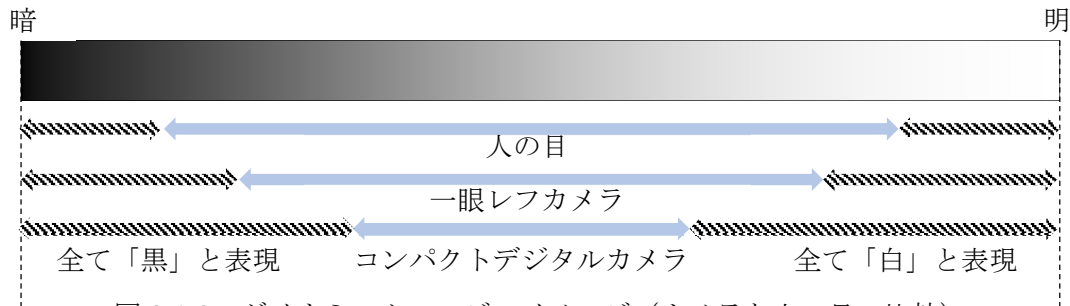


図 3.1.3 ダイナミックレンジのイメージ (カメラと人の目の比較)

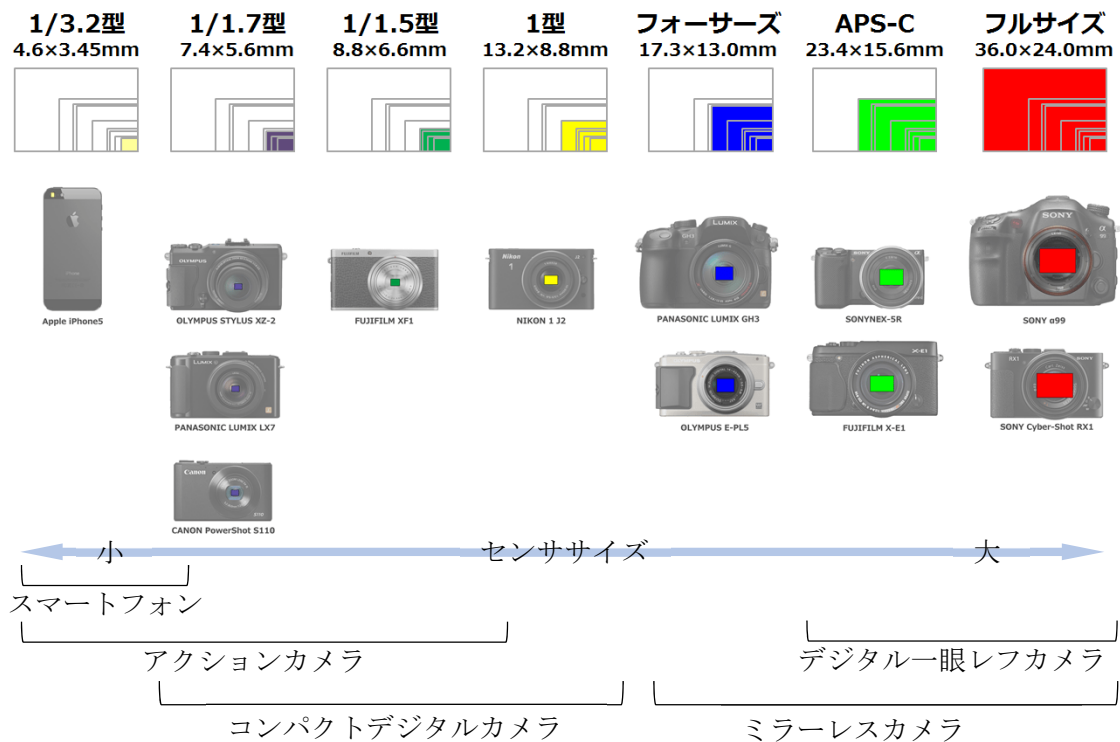


図 3.1.4 センササイズとカメラの種類

出典：「カメラ初心者の選び・購入・上達のポイント！」(筆者が一部加筆)

<http://c-camera.com/camera/page236.html>

### 3.1.3 「ひびわれ描画支援システム」<sup>14)</sup>

「ひびわれ描画支援システム」は、2012年に西村，原らが開発したシステムであり，筆者も開発に携わった．このシステムはクラックインデックス [CI] :「特徴値×分布幅」という指標により，半自動で画像上のひびわれを検出できるものであり，損傷図作成の大幅な省力化が可能である．以下に，「橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価<sup>8)</sup>」(西村他，2013.1) から引用した「ひびわれ描画支援システム」の概要を示す．筆者が一部加工した．

#### (1) クラックインデックス [CI] の概要

RC造のひびわれ幅伸展を評価するには0.2mm以上のひびわれの捕捉が必要とされる<sup>15)</sup>．図3.1.5の①は，デジタルカメラ(1,200万画素，以下12MP)に望遠レンズ(f=200mm)を装着し，距離20mから図3.1.6に示す模擬ひびわれシートを1mm/pixelで撮影し，それをグレイ階調で表したものを示す．また図3.1.5の②はピーク位置を合致させ拡大表示したものである．ひびわれ幅が大きいとグレイ階調の



ピークである特徴値が大きくなる。一方③は下地が灰色の場合、特徴値は小さくなるが分布幅は②と同様に-4~4pixelの範囲内に納まり差異が少ないことを示す。これらの事項を元に、図3.1.7に示すように、「ひびわれ幅の特徴量」としてクラックインデックス（以下〔CI〕）： $\sum \text{GRAY}(i)$ という指標を考案した。〔CI〕は、分解能以下のひびわれがセンサに取り込まれた際の各グレイ階調  $\text{GRAY}(i)$ の総和（ $i$ は-4~4まで）であり、ひびわれ幅が大きいと〔CI〕値も大きくなる。また〔CI〕からひびわれ幅を定量的に算定・図化が可能な「ひびわれ幅判読図化システム」を構築した。

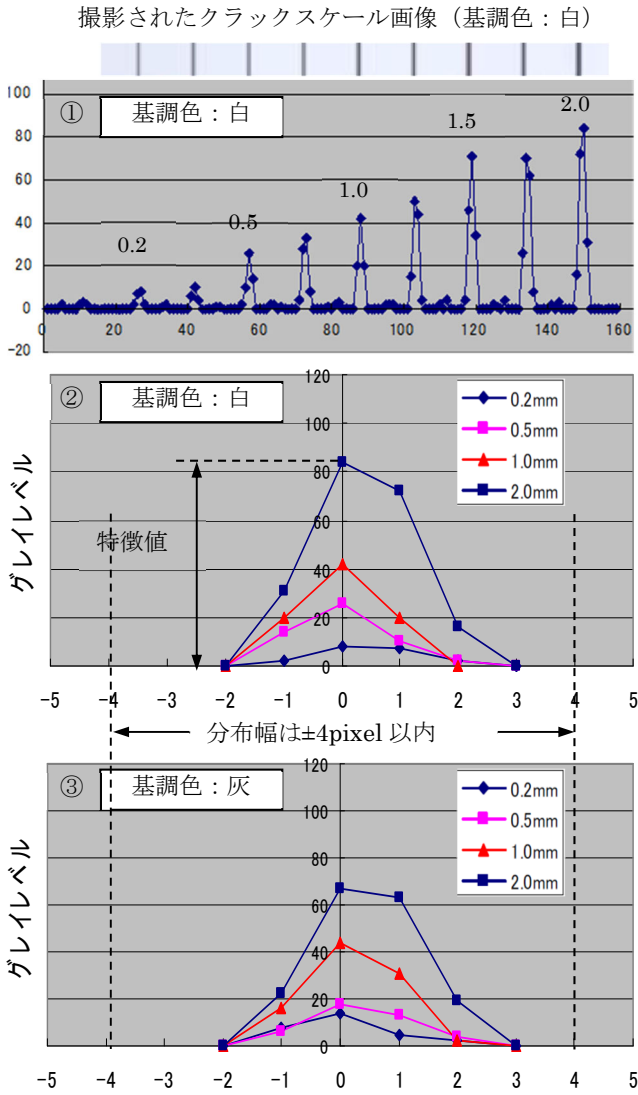


図 3.1.5 クラック近傍の濃淡分布

(2) グレイレベルと〔CI〕の詳細

コンクリート造表面の濃淡は千差万別であり、ひびわれ近傍に基準となるシートを貼り、この基準画像から〔CI〕とひびわれ幅の関係性を把握しキャリブレーションすることが最良である。しかし部位が高所にあり、シート設置の制約や適切な解像度で撮影できない場合もある。そこで普遍的に〔CI〕を適用することが可能か否かを検証するために、シート下地のグレイレベルや撮影解像度を変えてその影響を把握した。用いたシートは図3.1.6に示すように、グレイレベル8段階、幅11段階である。撮影距離

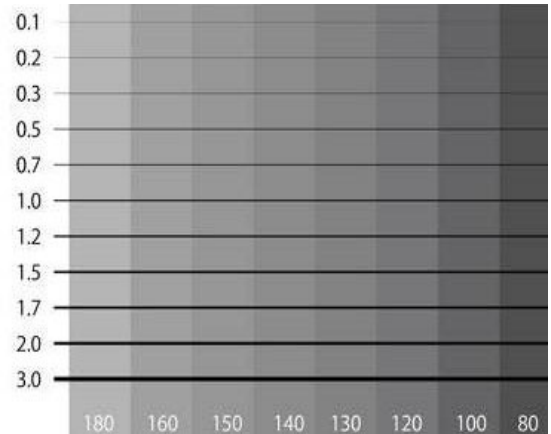


図 3.1.6 模擬ひびわれシート

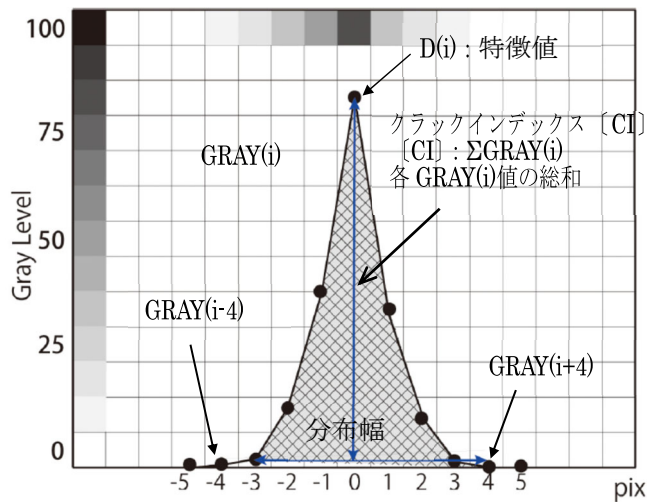


図 3.1.7 特徴量算出の模式イメージ

50m, 望遠レンズ (200~500mm) を用い対象面での解像度は, 0.5, 1.0, 2.0mm/pixel の3段階とした. シート画像の各グレイレベル, 各解像度における [CI] をそれぞれ算出し, ひびわれ幅との関係を求めたところ, グレイレベルや解像度が異なっても [CI] とひびわれには明確な相関が維持されていることから, 撮影状況が異なっても [CI] によるひびわれ幅算定は可能である. ただし, 汚れや日陰等でグレイレベルが変化する場合, 注意が必要である. その検証結果の一部を図 3.1.8 に示す.

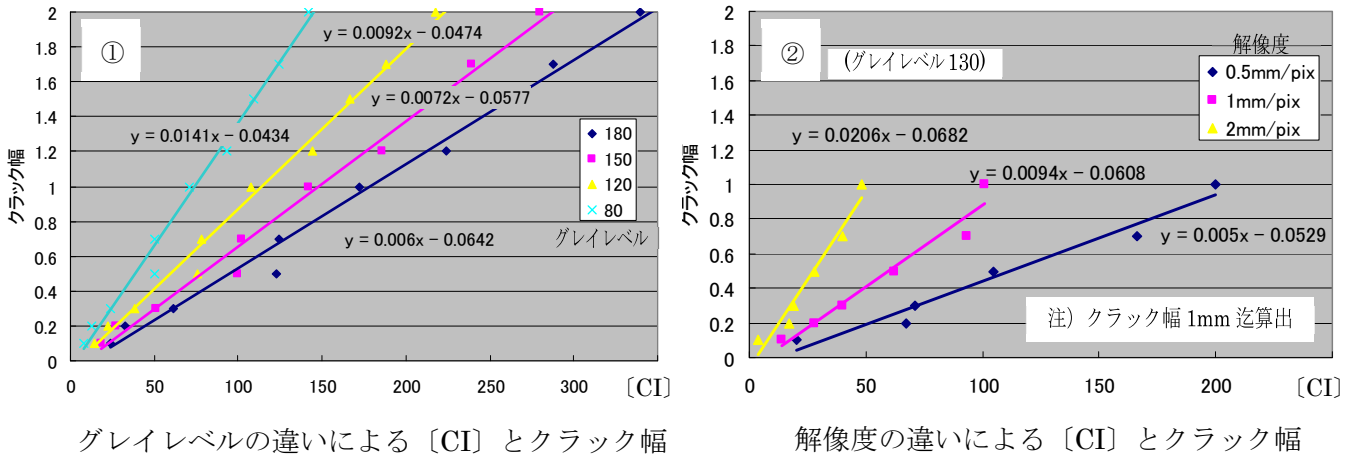


図 3.1.8 [CI] とクラック幅の関係

当該システムは, 本論文では「ひびわれ位置・幅判読図化システム」と記載する.

### 3.2 カメラ・解像度の違いによる視認可能な最小ひびわれ幅の検証

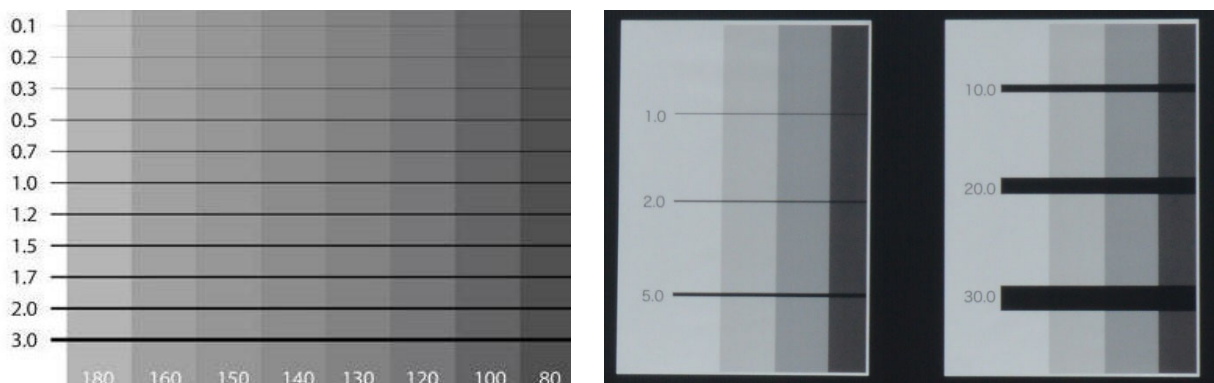
#### 3.2.1 検証方法

##### (1) 撮影対象

以下3種類のターゲットを撮影対象とした.

##### 【模擬ひびわれシート】

コンクリート表面の色によってひびわれの視認精度が異なる可能性があるため, 白から段階的にグレイ値を変えた背景色の上に 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.2, 1.5, 1.7, 2.0, 3.0mm 幅の計 11 本ひびわれを模した線が配置された A3 横サイズのシートと遠方からの視認性確認のため 1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 20.0, 30.0mm 幅のひびわれについては, 別の A3 縦サイズのシートを準備した.



0.1mm~3.0mm の模擬ひびわれ

1.0mm~30.0mm の模擬ひびわれ

図 3.2.1 模擬ひびわれシート

## 【模擬ひびわれシート (十字)】

コンクリート表面のひびわれは、一定方向のみに生じることはないため、水平垂直の2方向に0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.2, 1.5, 1.7, 2.0, 3.0mm幅の模擬ひびわれを配置したA3サイズのシートを準備した。遠方から撮影し、低解像度となった場合にA3横サイズの模擬ひびわれシートでは、隣接する模擬ひびわれがピクセルに影響する可能性があるため、A3サイズ1枚に1つのひびわれを十字に配置した。このとき背景色は、中間的なグレイ値とした。

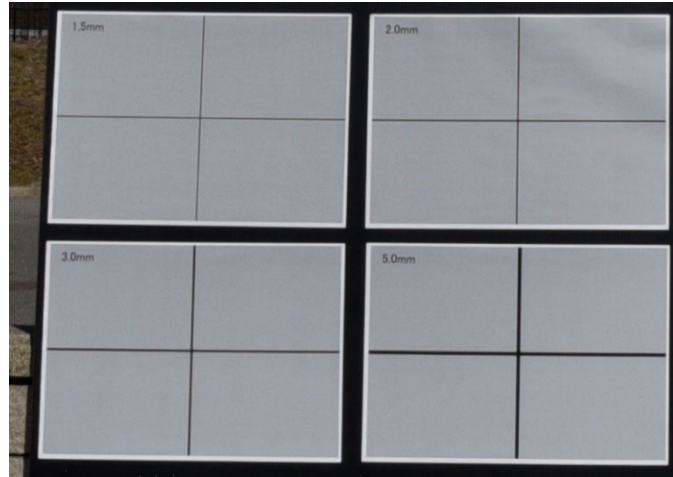


図 3.2.2 模擬ひびわれシート (十字)

## 【コンクリートパネル】

実際のコンクリート表面に生じたひびわれでも検証を行うために、意図的にひびわれを生じさせた30cm角のコンクリートパネルを準備した。ひびわれ幅の評価対象箇所には、真値幅を明示し、鉛筆で薄く矢印を記載した。評価対象ひびわれ幅は、0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0, 1.4, 1.5, 3.0mmの計11箇所である。



図 3.2.3 コンクリートパネル

## (2) 使用機材

検証に使用したカメラは、「3.1.2 カメラの仕組み」に記述したカメラのうちセンササイズを考慮し、一眼レフカメラ (フルサイズ)、一眼レフカメラ (APS-C)、ミラーレスカメラ (フルサイズ)、ミラーレスカメラ (フォーサーズ) の4種類である。表 3.2.1 に各カメラの仕様を示す。撮影時に使用したレンズ焦点距離も併せて記す。

表 3.2.1 検証に用いたカメラの仕様 (各社ウェブサイトより引用)

	一眼レフカメラ	一眼レフカメラ
名称	Nikon D750	Nikon D7100
イメージ		
センサ	CMOS センサ	CMOS センサ
センササイズ	35.9×24.0mm (フルサイズ)	23.5×15.6mm (APS-C)
画素数	6016×4016 2432 万画素	6000×4000 2410 万画素
大きさ (W×H×D)	約 140.5×113×78mm	約 135.5×106.5×76mm
重さ	約 750g (本体のみ)	約 675g (本体のみ)
レンズ焦点距離 (35mm 換算)	24mm (24mm)	24mm (約 35mm)

	ミラーレスカメラ	ミラーレスカメラ
名称	SONY α 7R	Panasonic DMC-GM1K
イメージ		
センサ	CMOS センサ	CMOS センサ
センササイズ	35.9×24.0mm (フルサイズ)	17.3×13.0mm (フォーサーズ)
画素数	7360×4912 3640 万画素	4592×3448 1600 万画素
大きさ (W×H×D)	約 126.9×94.4×54.8mm	約 140.5×113×78mm
重さ	約 407g (本体のみ)	約 204g
レンズ焦点距離 (35mm 換算)	35mm (35mm)	12mm (約 24mm)

## (3) 撮影方法

撮影対象とする模擬ひびわれシート、模擬ひびわれシート（十字）、コンクリートパネルをボードに貼り付け配置し、そこから撮影距離を変えることで撮影解像度を変化させて撮影した。撮影距離とそのときの各カメラの撮影解像度を表 3.2.2 に示す。またブレ防止のため撮影時は全てカメラ三脚を使用し、シャッターはレリーズを用いて切ることとした。その他、撮影モードはシャッター速度 1/500s のシャッター優先モードとし、常にボードにオートフォーカスでピントを調整しフォーカスロックを用いて撮影した。図 3.2.4 に撮影時の状況を示す。

表 3.2.2 撮影距離と各カメラの撮影解像度

撮影距離 (m)	撮影解像度 (mm/pixel)			
	Nikon D750	Nikon D7100	SONY α7R	Panasonic GM1
1.5	0.37	0.24	0.21	0.47
3	0.75	0.49	0.42	0.94
5	1.24	0.82	0.70	1.57
7	1.74	1.14	0.98	2.20
10	2.49	1.63	1.39	3.14
15	3.73	2.45	2.09	4.71
20	4.97	3.26	2.79	6.28
25	6.22	4.08	3.48	7.85
30	7.46	4.90	4.18	9.42
40	9.95	6.53	5.57	12.56
50	12.43	8.16	6.97	15.70
70	17.40	11.42	9.76	21.98
100	24.86	16.32	13.94	31.40
120	29.84	19.58	16.72	37.67



図 3.2.4 撮影状況

## (4) 評価方法

撮影画像からコンクリート表面のひびわれを見つけ出し、デジタルクラックスケールにより幅や長さを計測するためには、まず撮影画像からひびわれを「視認（人の目で認識する）」することが第一段階の作業であり、視認できなければ見落としとなってしまふ。将来的に「視認」のプロセスを省略し画像解析やAI等により「自動検出」することが可能となることが予期されるが、本研究においては「視認」のプロセスは必要と考えている。

評価方法は、各距離で撮影した画像をPCモニタ上で拡大し、模擬ひびわれおよびコンクリートパネルのひびわれが視認できれば「○」、周囲の状況なども加味すれば、視認は可能な場合は「△」、視認不可の場合は「×」とし、整理した。図3.2.5に評価例を示す。

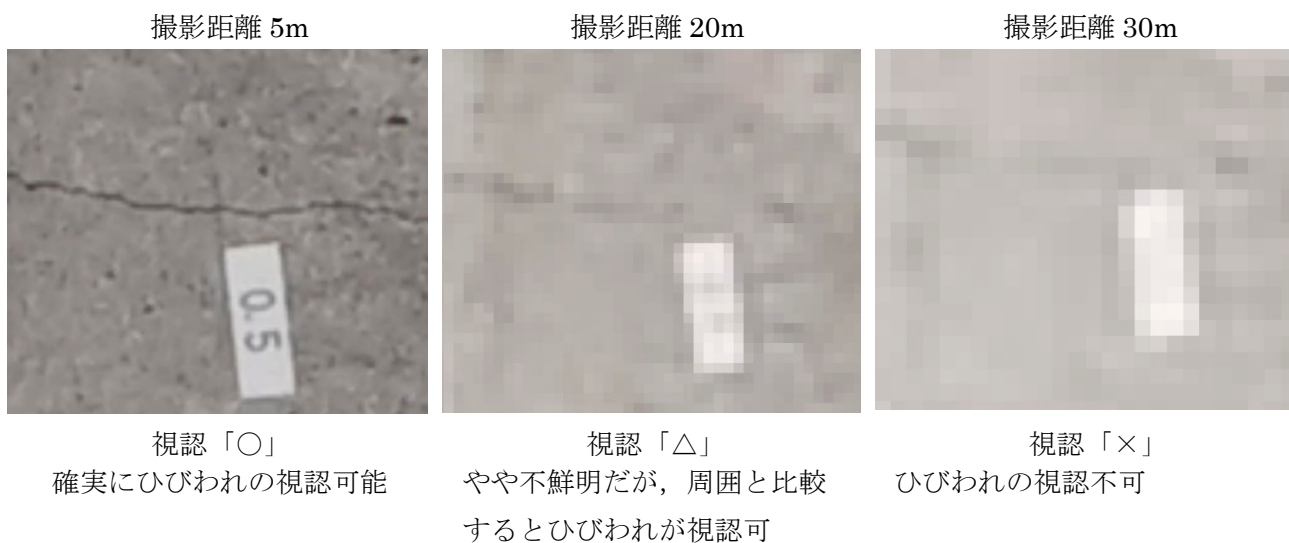


図 3.2.5 視認性の評価例

## 3.2.2 検証結果

## (1) 撮影結果

4種類のカメラで撮影した結果のうち、Nikon D750で撮影したオリジナル画像と模擬ひびわれシートの拡大画像を図3.2.6 ①, ②に示す。撮影距離40m以降は、ボード全体の拡大画像も示す。距離が離れるにつれ画角内の撮影対象ボードは小さくなり、解像度は低下していくため模擬ひびわれシートの画質は劣化し、模擬ひびわれの視認性は低下している。

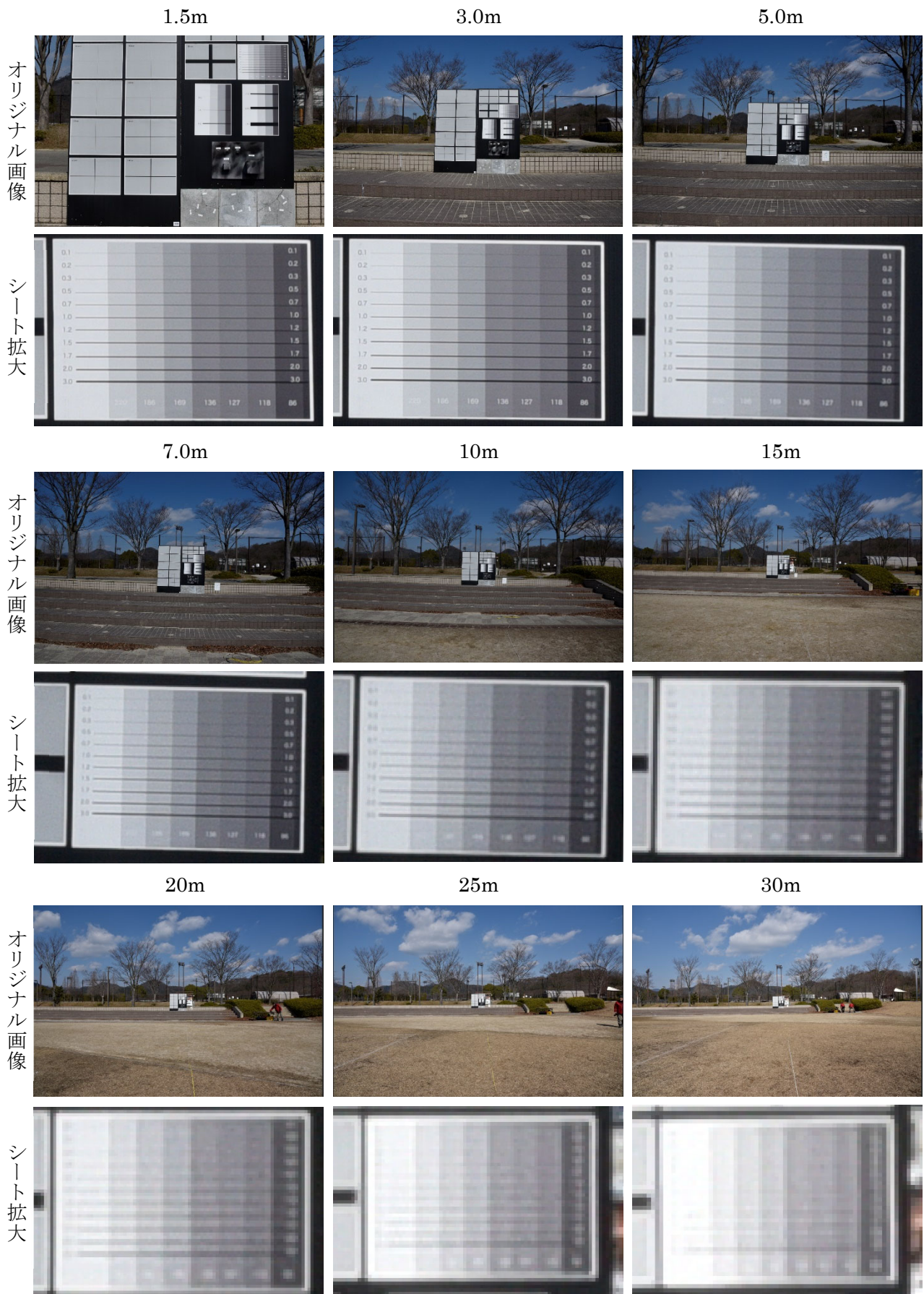


図 3.2.6 ① Nikon D750 の撮影結果

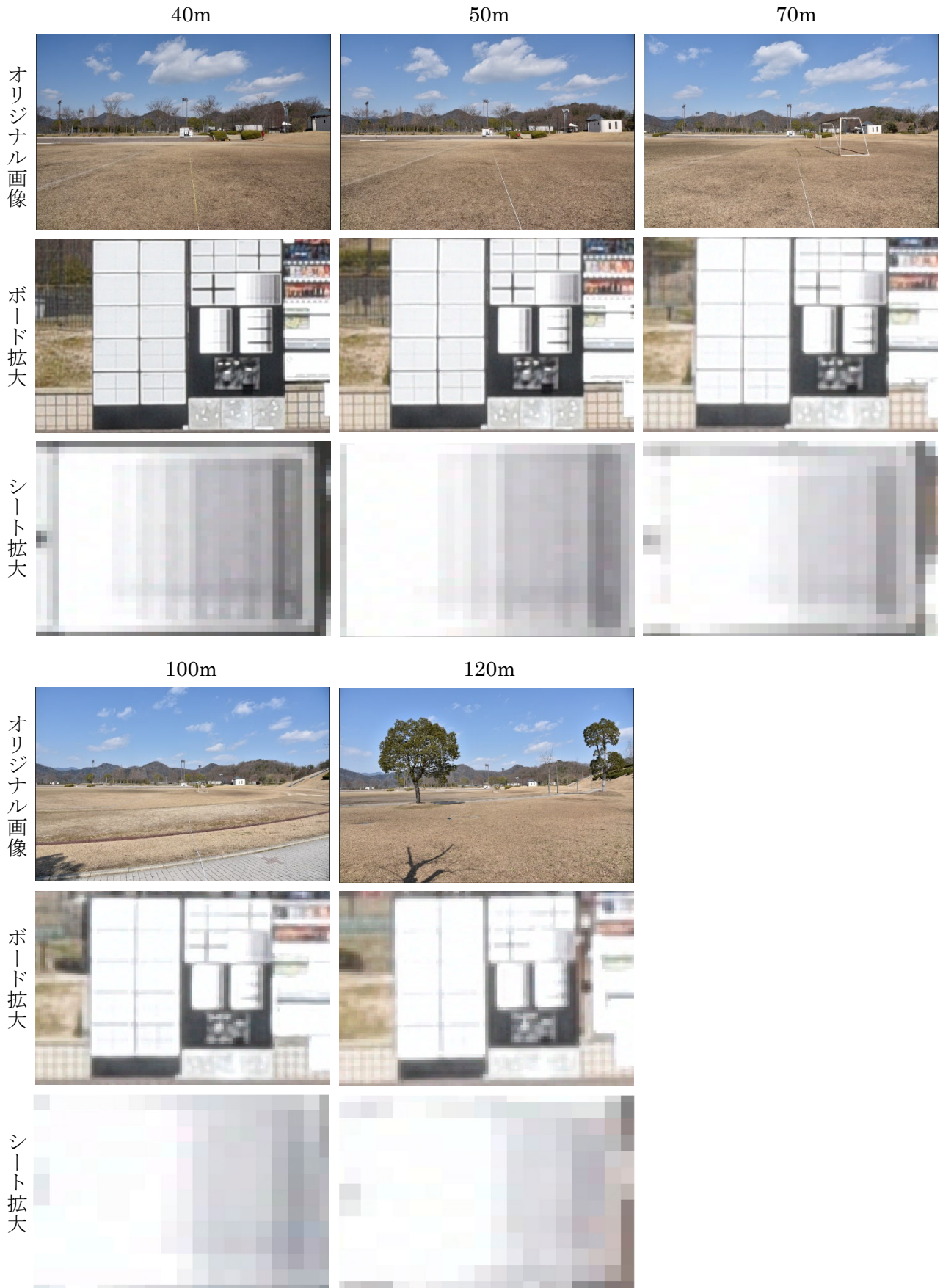


図 3.2.6 ② Nikon D750 の撮影結果



(2) 視認性の評価結果

コンクリートパネルおよび模擬ひびわれシートを4種のカメラで撮影した全ての画像をPCモニターで拡大し、評価対象ひびわれの視認性を確認し、計測距離ごとに「○」「△」「×」で評価した。表3.2.3は、コンクリートパネルを撮影した画像の評価結果を一覧としてまとめたものである。どのカメラも距離が離れる、つまり解像度が低下するにつれ視認可能な最小ひびわれ幅は太くなる傾向が見受けられる。また、どのカメラにおいても解像度の1/10幅のひびわれを視認することは困難であり、概ね解像度の1/3~1/4のひびわれ幅を視認することが可能と言える。なお、「△」は視認不可として評価した。

表 3.2.3 視認性の評価結果 (コンクリートパネル)

Nikon D750

撮影距離 (m)	解像度 (mm/pixel)	評価対象ひびわれ幅(mm)											視認可能な 最小ひびわれ幅 (mm)	最小ひびわれ幅 /解像度	
		0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.4	1.5	3.0			
1.5	0.37	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.27
3	0.75	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.27
5	1.24	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.16
7	1.74	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.4	0.23
10	2.49	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	0.6	0.24
15	3.73	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	0.7	0.19
20	4.97	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	0.8	0.16
25	6.22	×	×	×	×	×	×	△	△	△	○	○	○	1.5	0.24
30	7.46	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	1.5	0.20
40	9.95	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	3	0.30
50	12.43	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△	-	-
70	17.40	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
100	24.86	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
120	29.84	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-

Nikon D7100

撮影距離 (m)	解像度 (mm/pixel)	評価対象ひびわれ幅(mm)											視認可能な 最小ひびわれ幅 (mm)	最小ひびわれ幅 /解像度	
		0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.4	1.5	3.0			
1.5	0.24	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.42
3	0.49	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.41
5	0.82	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.24
7	1.14	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.4	0.35
10	1.63	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.5	0.31
15	2.45	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	0.6	0.24
20	3.26	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	0.8	0.25
25	4.08	×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	1	0.25
30	4.90	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	1.5	0.31
40	6.53	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	3	0.46
50	8.16	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△	-	-
70	11.42	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
100	16.32	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
120	19.58	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-

SONY α7R

撮影距離 (m)	解像度 (mm/pixel)	評価対象ひびわれ幅(mm)											視認可能な 最小ひびわれ幅 (mm)	最小ひびわれ幅 /解像度	
		0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.4	1.5	3.0			
1.5	0.21	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.48
3	0.42	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.24
5	0.70	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.14
7	0.98	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.20
10	1.39	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.4	0.29
15	2.09	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.5	0.24
20	2.79	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	0.6	0.22
25	3.48	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	0.7	0.20
30	4.18	×	×	×	×	△	△	○	○	○	○	○	○	0.8	0.19
40	5.57	×	×	×	×	×	×	△	△	△	○	○	○	1.4	0.25
50	6.97	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	1.5	0.22
70	9.76	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	3	0.31
100	13.94	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
120	16.72	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-

Panasonic DMC-GM1K

撮影距離 (m)	解像度 (mm/pixel)	評価対象ひびわれ幅(mm)											視認可能な 最小ひびわれ幅 (mm)	最小ひびわれ幅 /解像度	
		0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.4	1.5	3.0			
1.5	0.47	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.21
3	0.94	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.21
5	1.57	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.5	0.32
7	2.20	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	0.6	0.27
10	3.14	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○	○	○	0.8	0.25
15	4.71	×	×	×	×	×	×	△	△	△	○	○	○	1.4	0.30
20	6.28	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	1.5	0.24
25	7.85	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	3	0.38
30	9.42	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△	-	-
40	12.56	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
50	15.70	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
70	21.98	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
100	31.40	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-
120	37.67	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-

表 3.2.4 は、模擬ひびわれシートを撮影した画像の評価結果をまとめたものである。このとき背景が中間的なグレイ値にある模擬ひびわれを用いて評価した。コンクリートパネルと同様に解像度が低下するにつれ視認可能な最小ひびわれ幅は太くなる傾向が見受けられる。また、模擬ひびわれシートの場合、画像上で模擬ひびわれの輝度値の分布が直線的で単調であり背景色との差が明確なため、コンクリートパネルと比較すると視認性が高く、一部解像度の 1/10 幅ひびわれも視認できた箇所も存在するが、解像度の 1/10 幅のひびわれを視認することが可能と言える結果ではないと考える。概ね解像度の 1/3~1/5 のひびわれ幅を視認することが可能と言える。なお、コンクリートパネルと同様に「△」は視認不可として評価した。

表 3.2.4 視認性の評価結果（模擬ひびわれシート）

Nikon D750

撮影距離 (m)	解像度 (mm/pixel)	評価対象ひびわれ幅 (mm)													視認可能な最小ひびわれ幅 (mm)	最小ひびわれ幅 / 解像度
		0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0	10.0	20.0	30.0		
1.5	0.37	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.27
3	0.75	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.13
5	1.24	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.08
7	1.74	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.11
10	2.49	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.3	0.12
15	3.73	x	x	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.5	0.13
20	4.97	x	x	x	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.7	0.14
25	6.22	x	x	x	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.7	0.11
30	7.46	x	x	x	x	△	○	○	○	○	○	○	○	○	1	0.13
40	9.95	x	x	x	x	x	△	○	○	○	○	○	○	○	1.5	0.15
50	12.43	x	x	x	x	x	x	△	○	○	○	○	○	○	2	0.16
70	17.40	x	x	x	x	x	x	x	△	△	○	○	○	○	5	0.29
100	24.86	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	○	○	○	10	0.40
120	29.84	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	○	○	20	0.67

Nikon D7100

撮影距離 (m)	解像度 (mm/pixel)	評価対象ひびわれ幅 (mm)													視認可能な最小ひびわれ幅 (mm)	最小ひびわれ幅 / 解像度
		0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0	10.0	20.0	30.0		
1.5	0.24	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.42
3	0.49	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.20
5	0.82	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.12
7	1.14	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.09
10	1.63	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.12
15	2.45	x	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.3	0.12
20	3.26	x	x	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.5	0.15
25	4.08	x	x	x	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.7	0.17
30	4.90	x	x	x	x	△	○	○	○	○	○	○	○	○	1	0.20
40	6.53	x	x	x	x	x	△	○	○	○	○	○	○	○	1.5	0.23
50	8.16	x	x	x	x	x	x	△	△	○	○	○	○	○	2	0.25
70	11.42	x	x	x	x	x	x	x	△	△	○	○	○	○	3	0.26
100	16.32	x	x	x	x	x	x	x	x	x	△	○	○	○	10	0.61
120	19.58	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	○	○	10	0.51

SONY α 7R

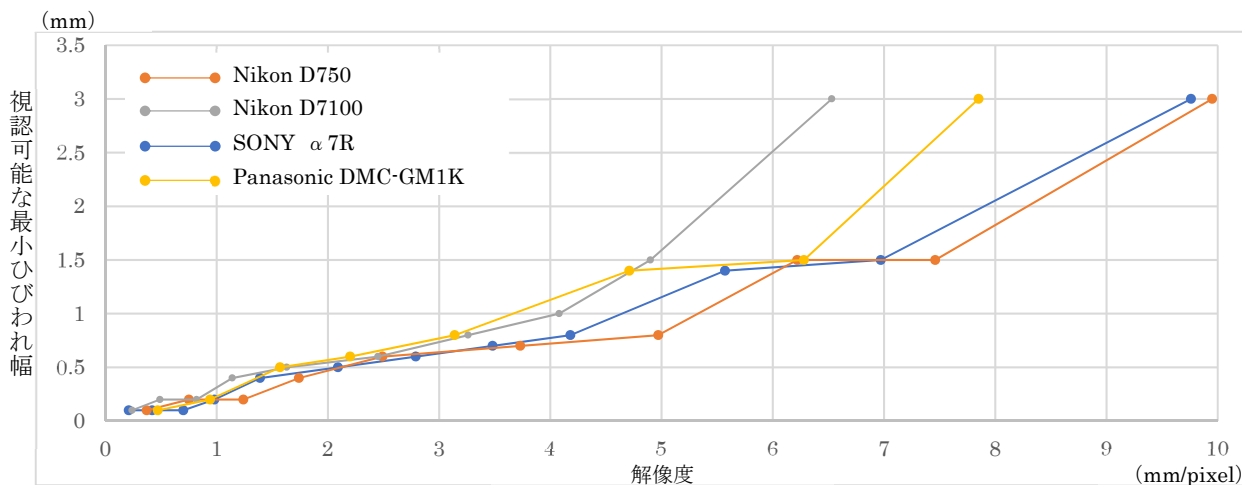
撮影距離 (m)	解像度 (mm/pixel)	評価対象ひびわれ幅 (mm)													視認可能な最小ひびわれ幅 (mm)	最小ひびわれ幅 / 解像度
		0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0	10.0	20.0	30.0		
1.5	0.21	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.48
3	0.42	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.24
5	0.70	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.14
7	0.98	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.10
10	1.39	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.07
15	2.09	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.10
20	2.79	x	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.3	0.11
25	3.48	x	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.3	0.09
30	4.18	x	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.5	0.12
40	5.57	x	x	x	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.7	0.13
50	6.97	x	x	x	x	△	○	○	○	○	○	○	○	○	1	0.14
70	9.76	x	x	x	x	x	△	△	○	○	○	○	○	○	2	0.20
100	13.94	x	x	x	x	x	x	x	△	○	○	○	○	○	3	0.22
120	16.72	x	x	x	x	x	x	x	x	x	△	○	○	○	5	0.30

Panasonic DMC-GM1K

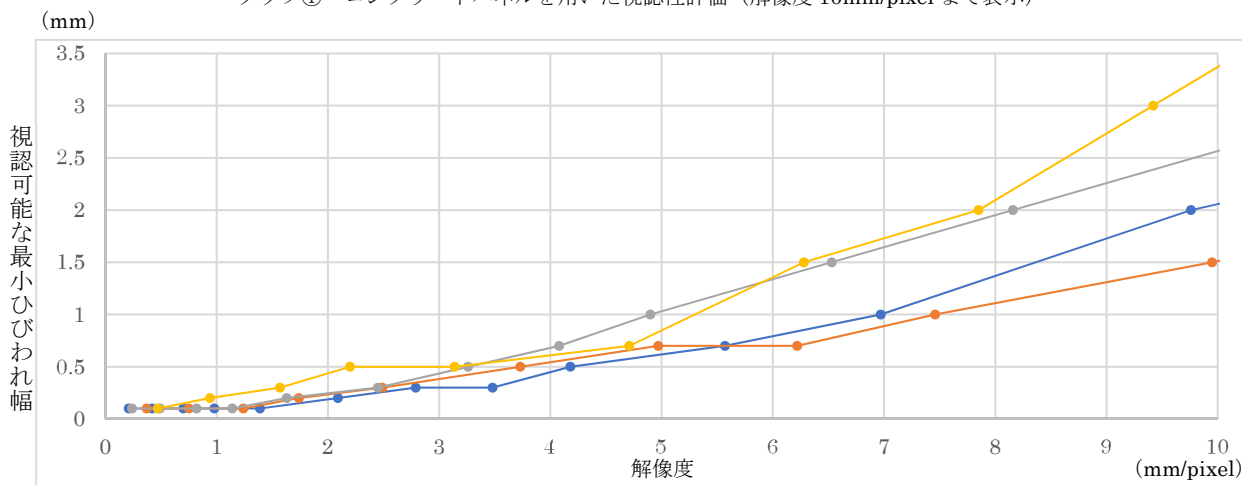
撮影距離 (m)	解像度 (mm/pixel)	評価対象ひびわれ幅 (mm)													視認可能な最小ひびわれ幅 (mm)	最小ひびわれ幅 / 解像度
		0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0	10.0	20.0	30.0		
1.5	0.47	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.1	0.21
3	0.94	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.2	0.21
5	1.57	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.3	0.19
7	2.20	x	x	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.5	0.23
10	3.14	x	x	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.5	0.16
15	4.71	x	x	x	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.7	0.15
20	6.28	x	x	x	x	x	△	○	○	○	○	○	○	○	1.5	0.24
25	7.85	x	x	x	x	x	x	△	○	○	○	○	○	○	2	0.25
30	9.42	x	x	x	x	x	x	x	△	○	○	○	○	○	3	0.32
40	12.56	x	x	x	x	x	x	x	x	x	○	○	○	○	5	0.40
50	15.70	x	x	x	x	x	x	x	x	x	△	○	○	○	10	0.64
70	21.98	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	○	○	○	10	0.45
100	31.40	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	△	○	○	20	0.64
120	37.67	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	△	○	30	0.80

### 3.2.3 考察

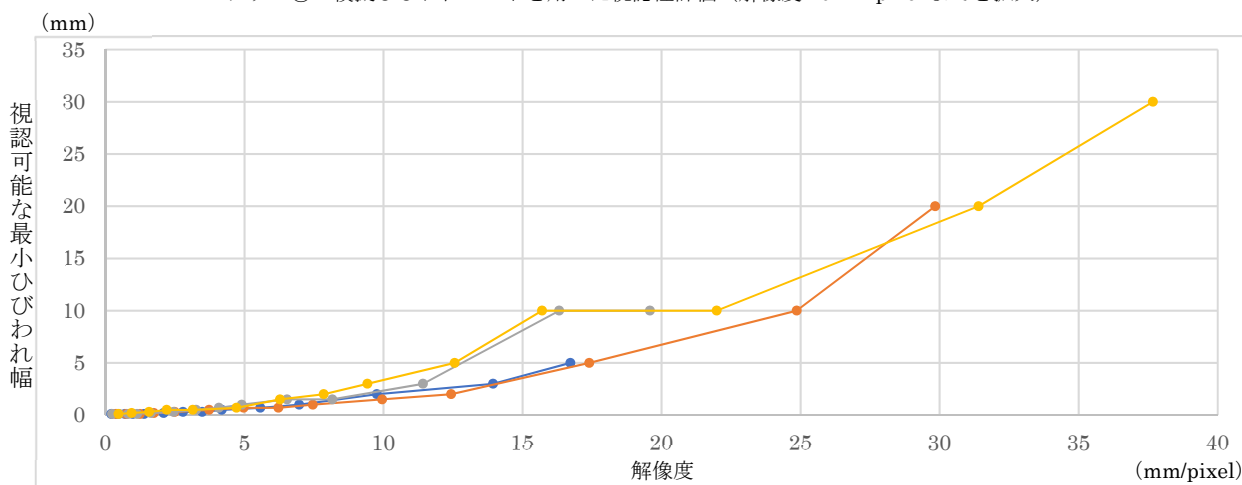
図 3.2.7 は前項の表 3.2.3 および表 3.2.4 の結果より、解像度と視認可能な最小ひびわれ幅の関係性をグラフで表したものである。これらのグラフより、撮影解像度と視認可能な最小ひびわれ幅には、相関が



グラフ① コンクリートパネルを用いた視認性評価 (解像度 10mm/pixel まで表示)

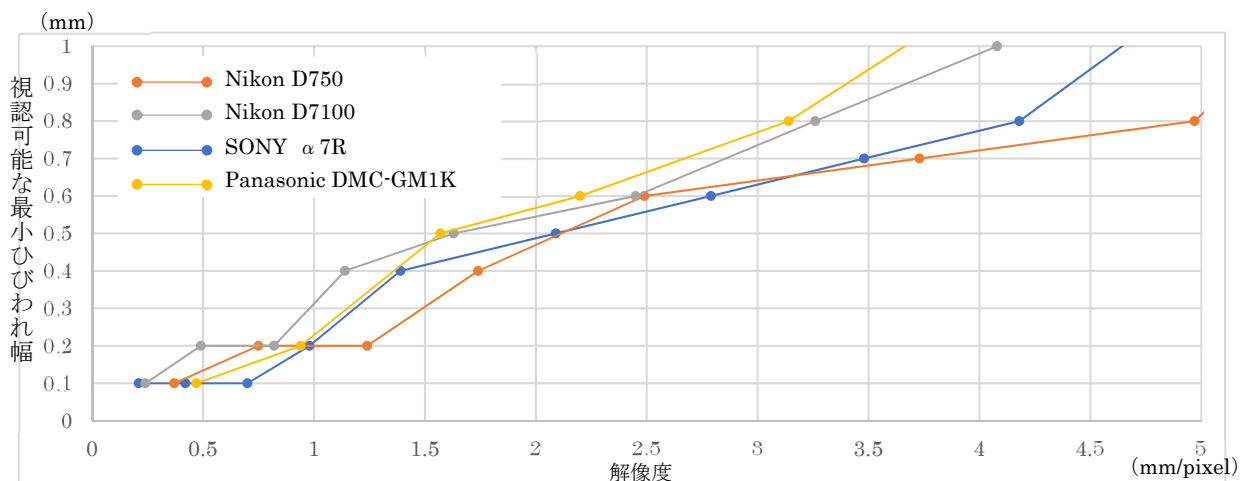


グラフ② 模擬ひびわれシートを用いた視認性評価 (解像度 10mm/pixel までを拡大)



グラフ③ 模擬ひびわれシートを用いた視認性評価 (解像度 40mm/pixel まで表示)

図 3.2.7 解像度と視認可能な最小ひびわれ幅の関係性を示したグラフ



グラフ④ コンクリートパネルを用いた視認性評価 (解像度 5mm/pixel まで表示)

図 3.2.8 解像度と視認可能な最小ひびわれ幅の関係性を示したグラフ

表 3.2.5 各カメラの 1 素子のサイズ

カメラ名	Nikon D750	Nikon D7100	SONY α7R	Panasonic DMC-GM1K
センササイズ	35.9×24.0mm	23.5×15.6mm	35.9×24.0mm	17.3×13mm
画素数	6016×4016	6000×4000	7360×4912	4592×3448
1 素子のサイズ (計算上)	5.97 μ m	3.92 μ m	4.88 μ m	3.77 μ m

あること、4 種のカメラの特性から視認可能な最小ひびわれ幅に違いがあることが分かる。グラフが下にあるほど、同じ解像度でもより細かいひびわれを視認できることを示しており、解像度 1~3mm/pixel ではあまり差は見受けられないが (図 3.2.8)、低解像度になるほどカメラ毎のバラつきが大きくなる傾向が見受けられる。その中でも Nikon D750 と SONY α7R はグラフが下方にあり、視認性においては優位であると言える。概ね Nikon D750>SONY α7R>Nikon D7100, Panasonic DMC-GM1K の順で撮影画像の画質が良いものと考えられる。また、同じ解像度であっても、コンクリートパネルより模擬ひびわれシートの方が視認性が高い結果となっており、模擬ひびわれシートのように背景色が均一で直線的な線のためコントラストが明確に表れたことが原因ではないかと推測する。

当初、搭載されたセンササイズが大きいかほどより視認性が高くなると予想していたが、Nikon D7100 と Panasonic DMC-GM1K はセンササイズが大きく異なるもののほぼ同等の視認性評価の結果が得られている。このことからセンササイズの大きさも重要な要素であるが、センサを構成している素子 (ピクセル) の大きさが最も重要な要素ではないかと推測される。各カメラの素子サイズは計算上、表 3.2.5 に示す通りとなり、Nikon D7100 と Panasonic DMC-GM1K はほぼ同じ大きさの素子であり、1 素子あたりの受光面積が他 2 機種に比べ小さいことが、視認性がやや低くなった要因と考えられる。

### 3.2.4 視認性評価のまとめ

撮影解像度と視認可能な最小ひびわれ幅には、カメラごとに差異はあるものの明確に相関があることと解像度の 1/10 幅のひびわれを画像から視認することは困難であることが分かった。また、解像度 1～3mm/pixel においては、使用するカメラによる視認性の差異は多少生じているものの、ほぼ同じ傾向を示しているが、解像度 4mm/pixel より低解像度になるにつれ差異が顕著に現れており、1 素子（ピクセル）のサイズが小さなカメラの視認性がより低下している。「コンクリート診断技術 ‘19 [基礎編]9)」に記載されている検証結果は、使用したカメラの 1 素子あたりのサイズが約 11.85 μm と今回使用した 4 機種より大きく、高画質であったことが解像度の 1/10 幅のひびわれを視認できた要因と推測する。

表 3.2.3 および表 3.2.4 の結果より、最小ひびわれ幅 2mm、解像度 5mm/pixel までの結果をプロットし、近似式を表示したグラフを図 3.2.9 に示す。オレンジがコンクリートパネル、青が模擬ひびわれシートを用いて評価したものであり、それぞれ解像度 1～3mm/pixel においては、カメラ機種による差異は少ないことからまとめてプロットした。緑の曲線は「デジタル画像によるコンクリート床版劣化判定システムの開発 16)」(佐々木ら, p.1776, 2003) に示された「図-2 認識可能なひびわれ幅と撮影画角の関係グラフ」を筆者が X 軸を解像度に変換したグラフである。(点線は推定である。)

オレンジと青の直線は、プロットした値の 1 次近似式であり、ひびわれ幅 1mm 以下については、緑の曲線よりそれらの近似式が上部にある。PC・RC 構造物の点検で抽出が要求されているひびわれは、0.1mm もしくは 0.2mm 幅以上であり、これらを視認するためには「デジタル画像によるコンクリート床版劣化判定システムの開発 16)」で示された緑線より上部、つまり高解像度の画像撮影が必要である。

図 3.2.9 に示す 2 つの 1 次近似式を逆算すると、1mm～1.5mm 幅程度のひびわれを視認するためには、コンクリートパネルを用いた検証結果からは、抽出すべきひびわれ幅の約 4 倍の解像度、模擬ひびわれシートを用いた検証結果からは、抽出すべきひびわれ幅の約 5 倍の解像度で画像を撮影する必要がある。ただし、本検証で使用したコンクリートパネルは表面の汚れが少なく、模擬ひびわれシートも背景色が均一でひびわれの視認性が高いため、実際にはより確実性を高めるため抽出すべきひびわれ幅の約 3～5 倍の解像度での画像撮影が必要であると言える。使用するカメラはセンササイズが大きく、1 素子あたりのサイズも大きなものが推奨される。対象となるコンクリート表面の状況や撮影環境に応じて適切な撮影解像度を設定し、撮影計画を立案することが重要である。

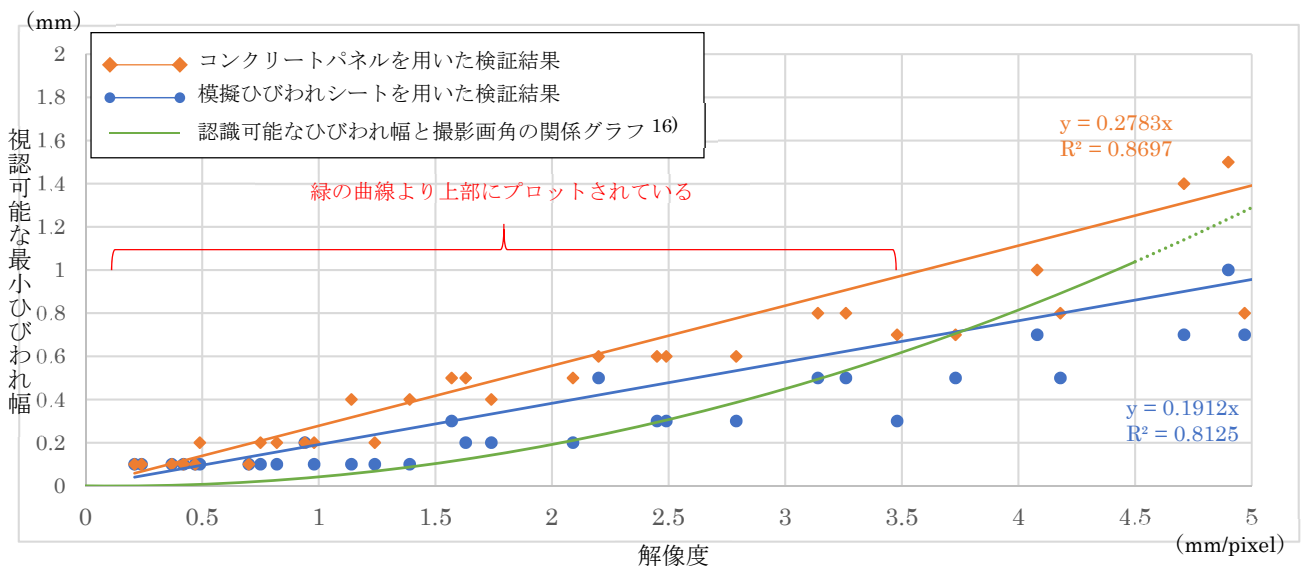


図 3.2.9 最小ひびわれ幅 3mm、解像度 10mm/pix までの結果をプロット図

### 3.3 ひびわれ位置・幅判読図化システムの精度確認

「ひびわれ位置・幅判読図化システム<sup>14)</sup>」は、2012年に西村，原らが開発したシステムであり，クラックインデックス〔CI〕：「特徴値×分布幅」という指標により，半自動で画像上のひびわれを検出でき，損傷図作成の大幅な省力化が可能である．全自動では誤検出や未検出などの照査に時間がかかってしまう．そこで，まずオルソ画像からひびわれ等の損傷を視認し，点検技術者が大まかなトレースを行う．その後のひびわれ幅の算出，詳細図化は自動処理となり，点検技術者の「目」が介入する点で効率的なシステムと言える．

本節では，前節で算出したひびわれと解像度の関係性に則り撮影した画像から「ひびわれ位置・幅判読図化システム」を用いて正確なひびわれ幅が検出可能か，その精度確認を行う．

#### 3.3.1 精度確認方法

第6章の精度確認試験で使用したRC造橋脚を用いて精度確認を行った．RC造橋脚には，【模擬ひびわれシート】と評価用の【ひびわれ画像シート】が貼付されている．ひびわれ画像シートには，予めひびわれ幅を検出すべき箇所を矢印で示しており，模擬ひびわれシートから求めたクラックインデックス〔CI〕より相関式を算出し，「ひびわれ位置・幅判読図化システム」で評価対象のひびわれ幅を検出する．なお，ひびわれ画像シート上のひびわれ幅はクラックスケールで計測しその値を「真値」とした．対象としたシートは図3.3.1に示す2枚で0.1mm幅以上のひびわれ20箇所が評価対象である．使用したカメラは表3.3.1に示すSONY α7R IIで，0.1mm幅以上のひびわれが対象のため前節の検証結果を踏まえ解像度0.5mm/pixelで正対撮影し，橋脚のオルソ画像を作成した．

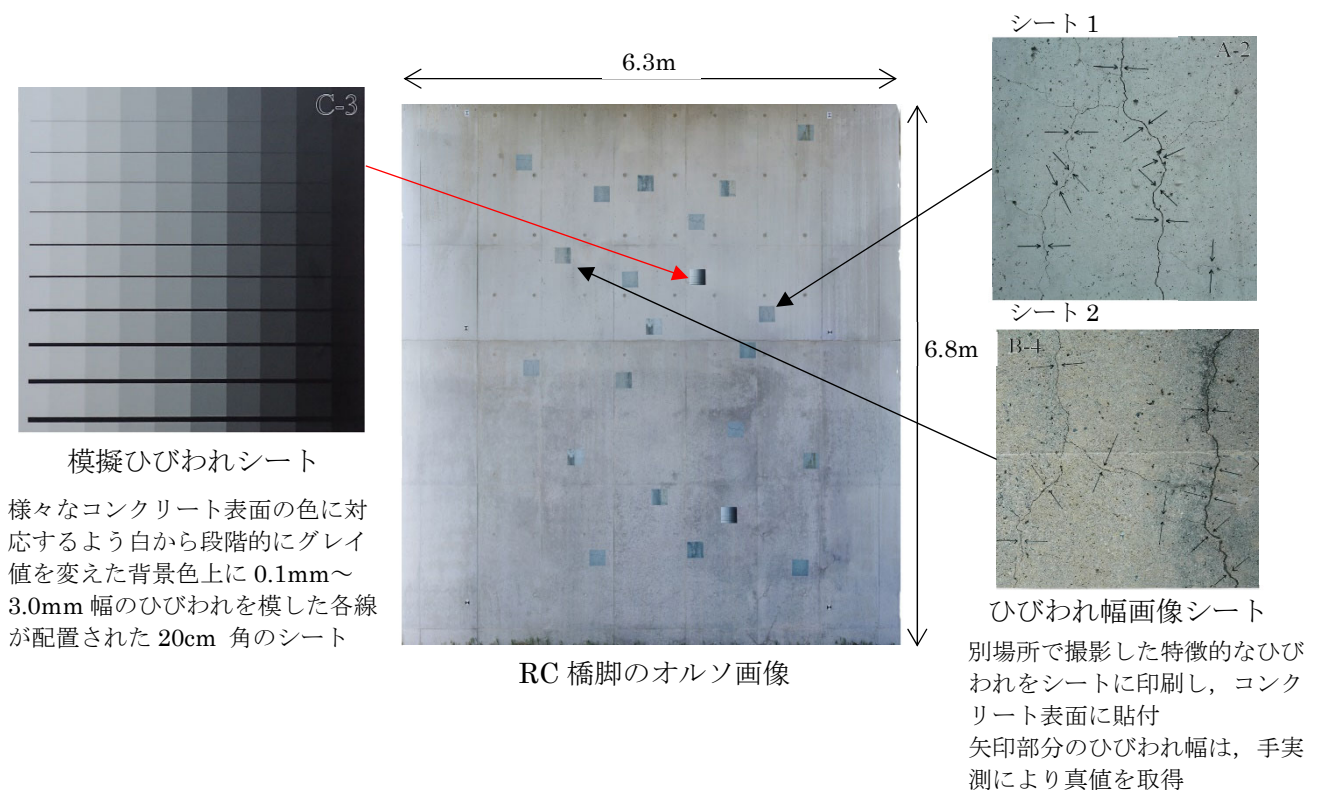


図 3.3.1 対象となる橋脚の状況

表 3.3.1 使用したカメラ

	ミラーレスカメラ
名称	SONY α 7R
イメージ	
センサ	CMOS センサ
センササイズ	35.9×24.0mm (フルサイズ)
画素数	7952×5304 4240 万画素
大きさ (W×H×D)	約 126.9×95.7×60.3mm
重さ	約 582g (本体のみ)
レンズ焦点距離 (35mm 換算)	35mm (35mm)

3.3.2 精度確認結果

(1) キャリブレーション

まず、作成したオルソ画像内の模擬ひびわれシート上の背景色が中間的な部分から参考となる [CI] を算出した。図 3.3.2 が「ひびわれ位置・幅判読図化システム」で [CI] を算出している状況であり、こ

この位置の [CI] を算出

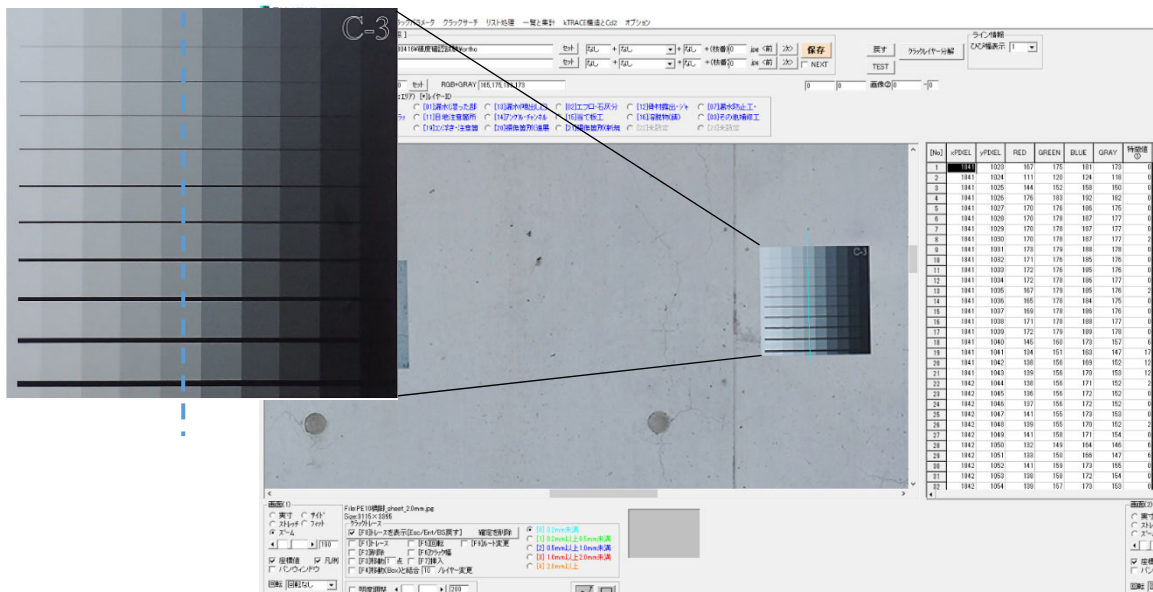


図 3.3.2 [CI] 算出方法

表 3.3.2 キャリブレーション用の [CI]

模擬ひびわれシート 上のひびわれ幅	[CI]
0.1	22
0.2	31
0.3	34
0.5	58
0.8	112
1	125
1.5	189
2	261
2.5	305
3	384

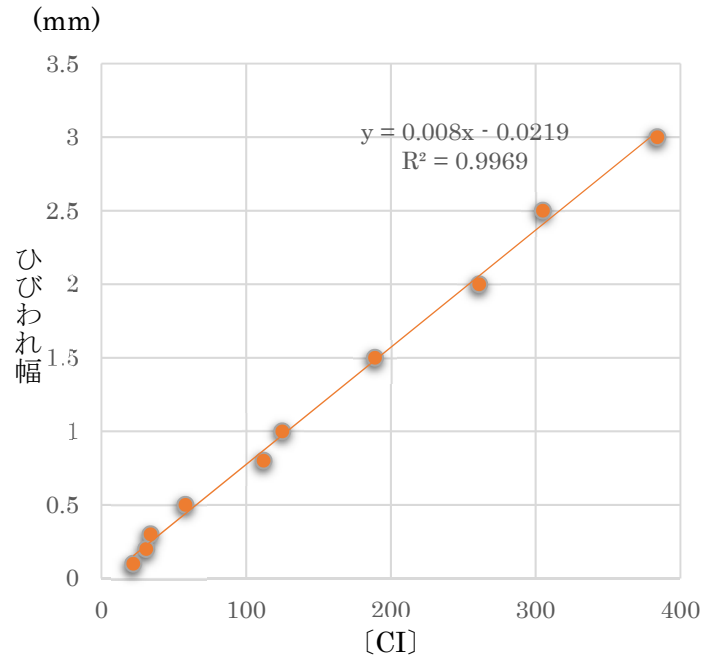


図 3.3.3 [CI] とひびわれ幅の相関

の値とひびわれ幅の関係性をグラフ化したものが図 3.3.3 である。[CI] とひびわれ幅には明確に相関があり、この相関式を「ひびわれ位置・幅判読図化システム」に反映させる。

(2) ひびわれ幅の検出と差分比較

前項で作成した相関式を反映した「ひびわれ位置・幅判読図化システム」により、ひびわれ画像シート 1 および 2 の計 20 箇所ひびわれ幅を検出した。表 3.3.3 および表 3.3.4 に真値との比較結果を示す。

表 3.3.3 シート 1 の比較結果

No.	検出結果		真値	差分
	[CI]	検出幅		
①	21	0.1	0.1	±0.0
②	102	0.8	0.7	+0.1
③	45	0.3	0.5	-0.2
④	82	0.6	0.7	-0.1
⑤	66	0.5	0.7	-0.2
⑥	88	0.7	0.7	±0.0
⑦	40	0.3	0.3	±0.0
⑧	31	0.2	0.2	±0.0
⑨	32	0.2	0.2	±0.0
⑩	54	0.4	0.3	+0.1

シート 1

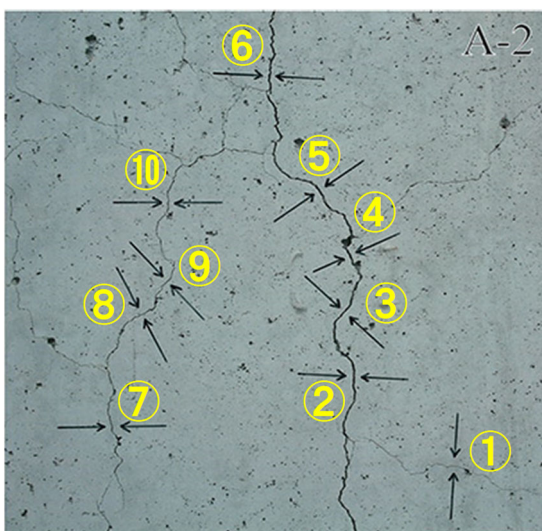


図 3.3.4 シート 1 の評価ひびわれ箇所



シート2

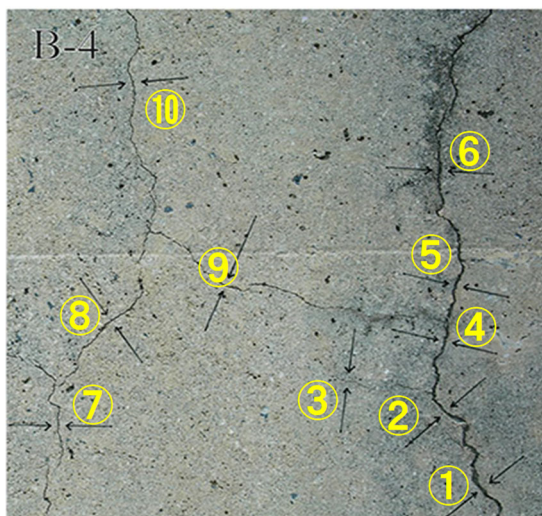


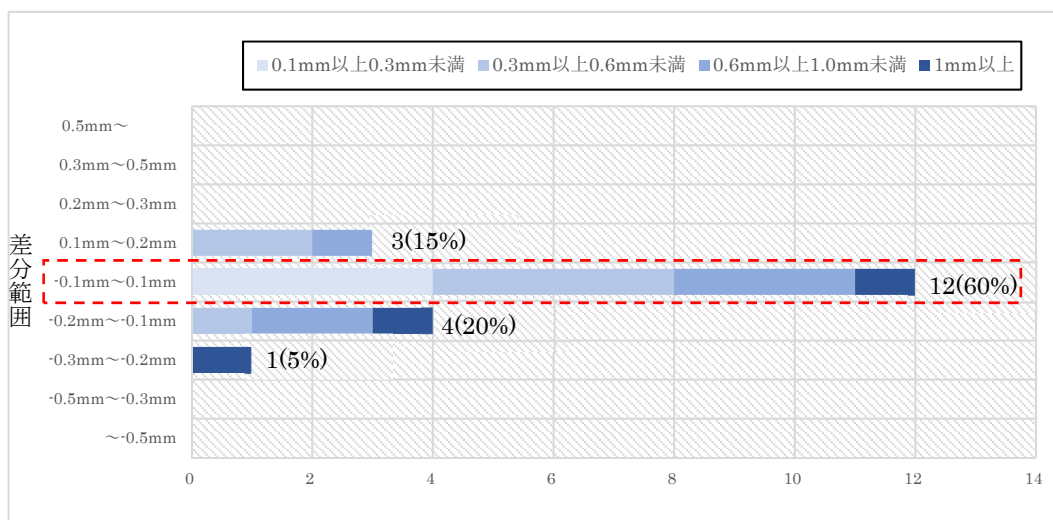
図 3.3.5 シート2の評価ひびわれ箇所

表 3.3.4 シート2の比較結果

No.	検出結果		真値	差分
	[CI]	検出幅		
①	156	1.2	1.1	+0.1
②	61	0.5	0.7	-0.2
③	28	0.2	0.2	±0.0
④	136	1.1	0.9	+0.2
⑤	104	0.8	1.0	-0.2
⑥	104	0.8	1.1	-0.3
⑦	64	0.5	0.3	+0.2
⑧	49	0.4	0.3	+0.1
⑨	63	0.5	0.3	+0.2
⑩	41	0.3	0.3	±0.0

3.3.3 まとめ

表 3.3.3 および表 3.3.4 の結果を図 3.3.6 に示すグラフに纏めた。この結果より「ひびわれ位置・幅判読図化システム」を用いて検出したひびわれ幅は、誤差の平均値が-0.01mm、標準偏差が 0.14mm であり、60%の割合で±0.1mm の誤差範囲に収まっている。表 3.3.5 は図 3.3.6 を表に示したものであり、ひびわれ真値幅を 0.1mm 以上 0.3mm 未満、0.3mm 以上 0.6mm 未満、0.6mm 以上 1.0mm 未満、1.0mm 以上の4つに区分し、それぞれに許容誤差範囲を±0.1mm から段階的に設定し、各区分における正答率を示している。全て 100%と高精度な結果が得られていることが分かる。適切な解像度で撮影された画像と同条件下で算出した相関式を用いれば、「ひびわれ位置・幅判読図化システム」により高精度にひびわれ幅を検出できることから、大きな効率化・省力化に貢献できるものであると言える。



平均値 : -0.01mm 標準偏差 : 0.14mm

図 3.3.6 真値との差分分布図

表 3.3.5 真値との差分の累積

$0.1\text{mm} \leq w < 0.3\text{mm}$  : 許容誤差 $\pm 0.1\text{mm}$

$0.3\text{mm} \leq w < 0.6\text{mm}$  : 許容誤差 $\pm 0.2\text{mm}$

$0.6\text{mm} \leq w < 1.0\text{mm}$  : 許容誤差 $\pm 0.3\text{mm}$

$1.0\text{mm} \leq w$  : 許容誤差 $\pm 0.3\text{mm}$

真値幅 誤差範囲	0.1mm 以上 0.3mm 未満	0.3mm 以上 0.6mm 未満	0.6mm 以上 1.0mm 未満	1mm 以上
~-0.5mm	0	0	0	0
-0.5mm~-0.3mm	0	0	0	0
-0.3mm~-0.2mm	0	0	0	1
-0.2mm~-0.1mm	0	1	2	1
-0.1mm~0.1mm	4	4	3	1
0.1mm~0.2mm	0	2	1	0
0.2mm~0.3mm	0	0	0	0
0.3mm~0.5mm	0	0	0	0
0.5mm~	0	0	0	0
正答率	100.0	100.0	100.0	100.0

## 参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，  
[http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4\\_1.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4_1.pdf), 2014.6[改訂, 2019.2]
- 2) 前田穰, 中庭和秀, 石澤徹, 小山幸則, 朝倉俊弘：クラックスケール内蔵光波測量器を用いたひび割れ点検システムの開発と現場適用, 土木情報利用技術論文集 16 巻, pp.167-174, 2007
- 3) 交久瀬磨衣子, 中庭和秀, 建山和由：クラックスケール内蔵光波測量機を用いたダム堤体のひびわれ調査について, 土木学会第 65 回年次学術講演会, VI-153, 2010.9
- 4) 金子英, 岡宗一, 松宮直規：デジタルカメラ画像を用いたコンクリート構造物のひび割れ検査技術, NTT 技術ジャーナル, pp.21-24, 2011.12
- 5) S.Nishimura, K.Kimoto, S.Kusuhara, S.Kawabata, A.Abe, T.Okazawa : Development of a hybrid camera system for bridge inspection, IABMAS, 2012
- 6) 西村正三, 木本啓介, 味岡収, 安井伸頭, 松田浩：光学的計測手法を用いた軍艦島護岸の計測とモニタリング, 実験力学, Vol.12, No.3, pp.193-200, 2012.9
- 7) 西村正三, 藏重裕俊, 原健司, 石井俊治, 加藤淳, 大前雅史, 山崎博：走行型連続画像計測システムの開発と構造物壁面調査への活用, JAST, VOL.21, pp.40-47, 2010
- 8) 西村正三, 木本啓介, 松岡のどか, 大谷仁志, 緒方宇大, 松田浩：橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価, 応用測量論文集, Vol.24, pp.52-61, 2013
- 9) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術 '19 [基礎編], pp.109-112, 2019
- 10) 柳沢栄一, 村井亮介, 勝野寿男, 越川一成, 梶本勝也：高感度画像強調カメラを用いたコンクリート床版ひび割れの遠隔点検に関する研究, 土木学会年次学術講演概要集, Vol.53, pp.514-515, 1998
- 11) 岡俊蔵, 村井亮介, 勝野寿男, 越川一成, 佐伯輝夫, 藤井堅：CCD カメラを用いたコンクリート床版ひび割れ検出に関する実橋試験, 土木学会年次学術講演概要集, Vol.54, pp.452-453, 1999
- 12) 小出博, 福田貴, 勝野寿男, 山本利生, 村井亮介：デジタルスチル画像によるコンクリート床版ひび割れ認識の研究, 土木学会年次学術講演概要集, Vol.54, pp.454-455, 1999
- 13) 蚊野浩：デジカメ画像処理のしくみ—進化を続けるデジカメ技術を解き明かす—,  
<http://www.cc.kyoto-su.ac.jp/~kano/pdf/study/CSE20101110.pdf>, pp.13-19, 2011.11
- 14) 西村正三, 原健司, 木本啓介, 松田浩：3D レーザ・デジタル画像を用いた軍艦島計測と損傷図作成, 写真測量とリモートセンシング, Vol.51, No.1, pp.46-53, 2012
- 15) 国土交通省道路局国道・技術課：橋梁定期点検要領 付録-2 損傷程度の評価要領,  
[https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3\\_1\\_6.pdf](https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3_1_6.pdf), p.19, 2019.3
- 16) 佐々木聡, 渡邊一悟, 小出博, 山本利生：デジタル画像によるコンクリート床版劣化判定システムの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2003



## 第4章 大型橋梁の点検における UAV-SfM の実証試験

### 4.1 概要

#### 4.1.1 背景と目的

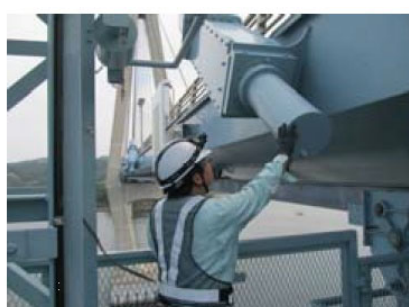
従来手法による近接目視点検では、人が容易にアクセスできない構造物に近接するために橋梁点検車・高所作業車等の使用や、足場の仮設、ロープアクセスによる特殊作業（図 4.1.1）などが必要となり、点検コスト・労力の縮減、安全性の確保などが課題となっている。

長崎県が実施する橋梁点検には、通常の 5 年に 1 度の近接目視による定期点検に加え、橋梁規模や構造特性が大きく異なる橋梁および地域に与える影響が大きい橋梁（重点維持管理橋梁）では、1 年毎の点検（以降、1 年点検と呼ぶ。）も実施されている。1 年点検では、地上から確認可能な定点観測ポイントの劣化進行状況を確認している。そこで、1 年点検時に UAV-SfM を活用することで、通常ではロープアクセスや仮設足場を用いた近接目視点検でしか確認できない箇所や近接もできない箇所の損傷状況を安全・迅速かつ低費用に確認できると考えられる。加えて、画像から損傷評価を行うため調査技術者の技量に捉われない定量的な判断ができ、デジタルデータを蓄積することで、経年的な比較も容易となる。近接目視点検に代わる新たな点検手法として確立できれば定期点検への適用も充分期待できる。

本章では、佐賀県唐津市肥前町星賀と長崎県松浦市鷹島町神崎免を結ぶ鷹島肥前大橋のコンクリート主塔（4P）を対象に UAV-SfM の適用性検証や既存の点検結果との比較、課題の抽出などを目的として実証試験を行った。なお、同様の研究を「橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価<sup>1)</sup>」（応用測量論文集，2013）において、広島県東広島市安芸津と大芝島を結ぶ大芝大橋（斜張橋）の主塔を対象に実施しており、当研究で明らかになった課題の改善も本実証試験の目的の一つとした。



高所作業車による点検



検査車による点検



船上による点検

#### 鷹島肥前大橋詳細点検の状況

長崎県重点維持管理橋梁詳細点検（5年点検）業務委託（鷹島肥前大橋）<sup>2)</sup>より引用



吊足場による点検



ロープアクセスによる点検

#### その他の点検方法例

図 4.1.1 各種点検方法の作業状況例

### 4.1.2 鷹島肥前大橋の概要

鷹島肥前大橋は、佐賀県唐津市肥前町星賀と長崎県松浦市鷹島町神崎免を結ぶ全長 1,251m、幅員 11.5m、主塔高 100m の橋梁で、そのうち延長 840m が 5 径間連続複合斜張橋である。以下に橋梁データ<sup>2)</sup>を記載する。本実証試験では、当橋梁の高さ 100m、RC 構造の 4P 主塔を対象とした。

橋梁名	: 鷹島肥前大橋
路線名	: 一般県道鷹島肥前線
橋長	: 1251.00m
全幅員	: 11.50m
主塔高	: 100m
航路高	: 27m
上部工形式	: 5 径間連続鋼 2 主桁, 5 径間連続斜張橋, 4 径間連続鋼 2 主桁
下部工形式	: 橋台 (2 基), 橋脚 (13 基)
仮設年次	: 2009 年 (平成 21 年)

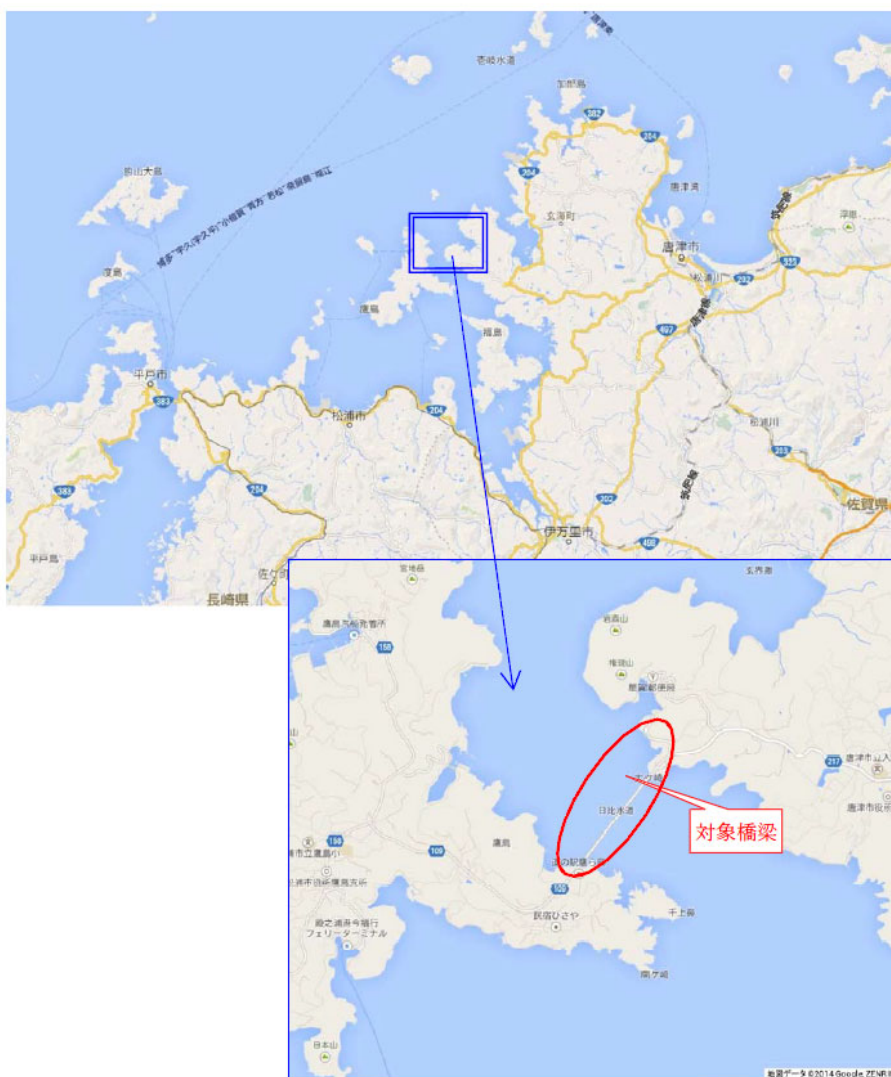


図 4.1.2 鷹島肥前大橋の位置図



図 4.1.3 鷹島肥前大橋の全体

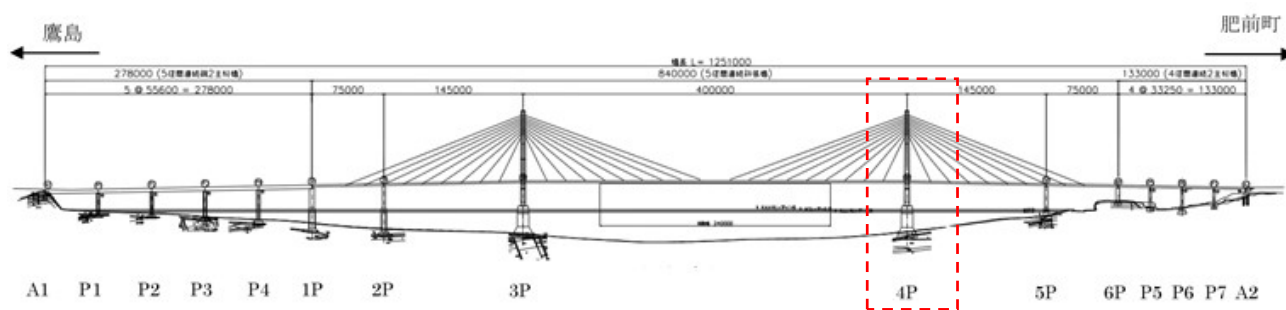


図 4.1.4 鷹島肥前大橋の一般図

### 4.1.3 使用機材

本検証で用いた UAV 及びデジタルカメラの仕様を表 4.1.1 及び表 4.1.2 に示す。使用した UAV は、ペイロードが 2.5kg まで可能な DJI 製の Spreading Wings S900 である。橋梁の立地上、風が強いことが想定されたため、やや重量のあるカメラが搭載可能で耐風安定性のある当機種を選定した。カメラは、「3.2 カメラ・解像度の違いによる視認可能な最小ひびわれ幅の検証」でも使用したフルサイズのセンサを搭載し、3600 万画素と高画素の撮影が可能な SONY 製のミラーレスカメラ  $\alpha$  7R を選定した。図 4.1.4 に  $\alpha$  7R を搭載した Spreading Wings S900 の状況写真を示す。

表 4.1.1 使用した UAV

UAV	
名称	DJI Spreading Wings S900
イメージ	
ペイロード	2.5kg
耐風安定性	8m/s
飛行時間	~15min
飛行距離	2km
GPS	1 周波

表 4.1.2 使用したカメラ

ミラーレスカメラ	
名称	SONY $\alpha$ 7R
イメージ	
センサ	CMOS センサ
センササイズ	35.9×24.0mm (フルサイズ)
画素数	7952×5304 4240 万画素
大きさ (W×H×D)	約 126.9×95.7×60.3mm
重さ	約 582g (本体のみ)
レンズ焦点距離 (35mm 換算)	35mm (35mm)

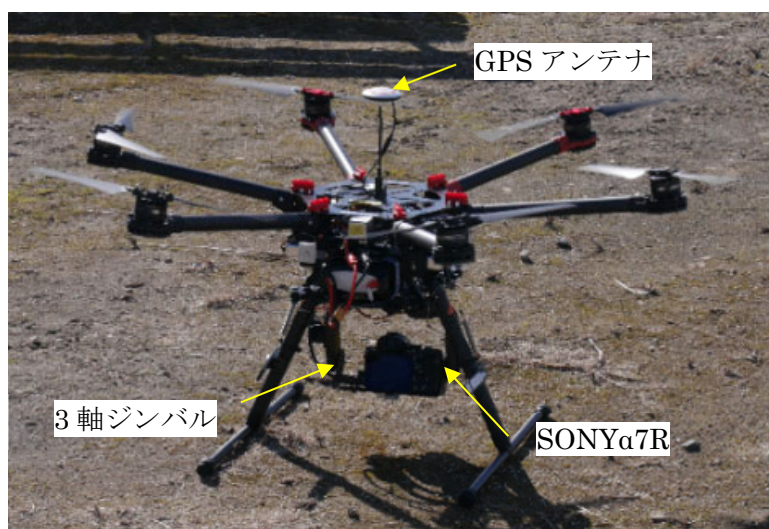


図 4.1.5 カメラを搭載した UAV の状況



## 4.2 既往研究との違い, 改善点

2013年に西村, 筆者らは同様の研究を「橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価<sup>1)</sup>」(応用測量論文集, 2013)において, 広島県東広島市安芸津と大芝島を結ぶ大芝大橋(斜張橋)の主塔を対象に実施した。大芝大橋・鷹島肥前大橋ともコンクリートの主塔であり, 大芝大橋は主塔高が75mである。

大芝大橋では長崎大学所有の UAV (MK-8) に SONY 製のカメラ NEX5D を搭載し飛行させた。表 4.2.1 および表 4.2.2 にそれぞれの仕様を示す。飛行ルートは Google-Map を利用した Waypoint 設定により自動飛行としたが, 搭載している GPS が 1 周波の低精度(誤差 5m 程度)であり, 風の影響や安全性の確保を考慮し, 撮影距離は 20m とし 2.0mm/pixel の解像度を目標としたため, 焦点距離がやや望遠よりの 55mm のレンズを用いた。しかし, 当時の対象エリアの Google-Map は低解像度で細かなルート設定が困難で, 想定飛行ルートを飛行させるのに苦慮した。更に使用したレンズの焦点距離が 55mm であり, 少しでも想定ルートや角度が外れると主塔が撮影画角から外れてしまうため, 1 フライトごとに撮影画像を現場の PC で確認し, Waypoint の微調整を行いつつ, 主塔 1 面の撮影に複数回のフライトを要した。撮影計画などを図 4.2.2 に示す。

また, 大芝大橋の場合, 撮影した画像から主塔の損傷評価を行うために, TOPCON 社製 Image master を使用したデジタル写真測量にて TIN を生成し, オルソ画像を作成した。写真測量では座標が明らかな基準点が必要なため, 遠方より地上型 3D レーザスキャナ (TOPCON GLS-1500) のデータから地物標定により座標値を取得したが, 画角内で主塔が占める面積が小さいため標定点として利用できる点が少なく標定作業に苦慮し, 生成したモデルが湾曲するなどの問題が生じ, 写真測量によるオルソ画像作成に大幅な時間を要した。

表 4.2.1 UAV の仕様

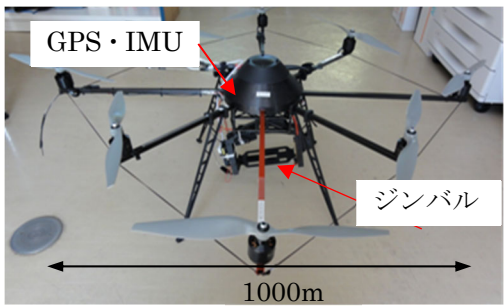
	名称	MK-8
	ペイロード	2.5kg
	耐風安定性	10m/s
	飛行時間	~15min
	飛行距離	1~1.5km
	GPS	1 周波

表 4.2.2 カメラの仕様

名称	SONY NEX5D
イメージ	
センサ	CMOS センサ
センササイズ	23.4×15.6mm (APS-C)
画素数	4592×3056 1420 万画素
重さ	約 229g (本体のみ)
焦点距離 (35mm 換算)	55mm (83mm)

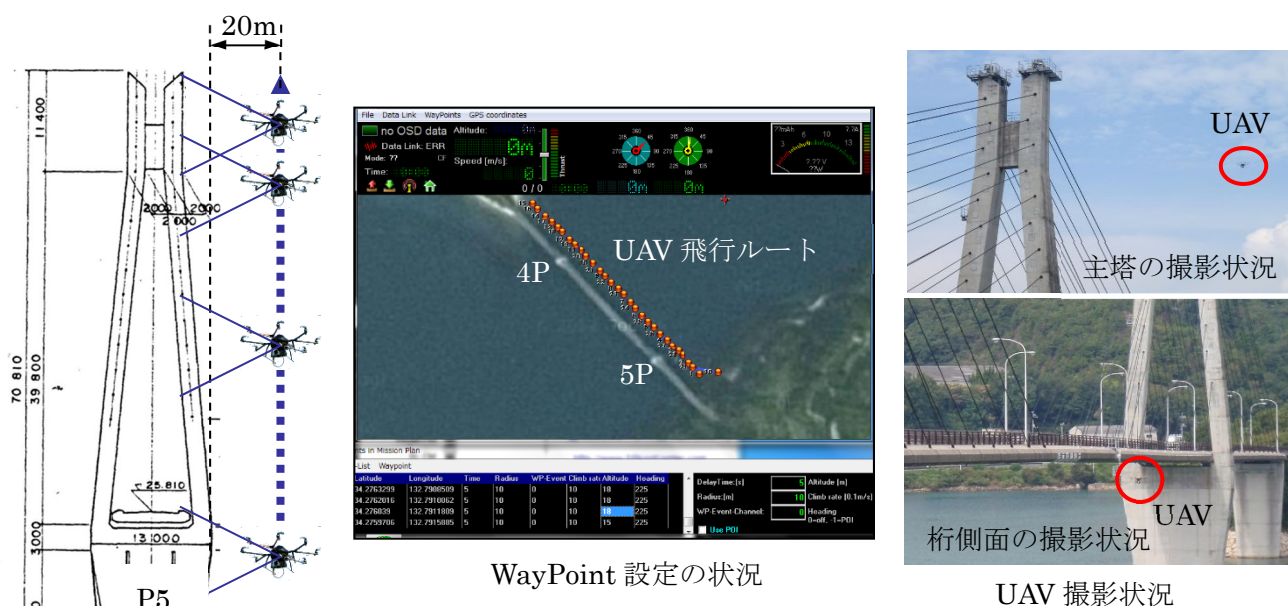


図 4.2.2 撮影計画と撮影状況

以上が大芝大橋で実施した「橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価<sup>1)</sup>」の概要であり、抽出された課題に対しそれぞれ改善策を検討し本実証試験を実施した。表 4.2.3 に改善点をまとめた。

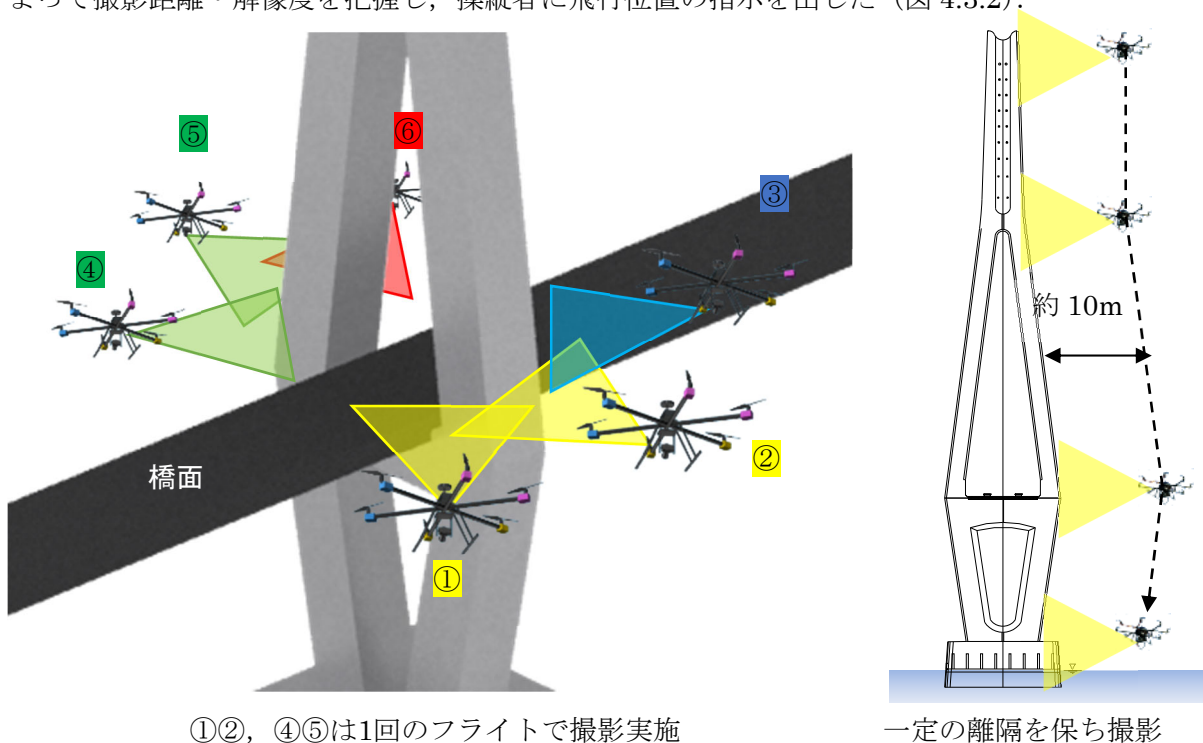
表 4.2.3 本実証試験の改善点

大芝大橋での実証試験 【課題】	鷹島肥前大橋での実証試験 【改善点】
Waypoint による自動飛行を実施したが、Google-Map が低解像度で正確な点を指定できない	マニュアル飛行で画像転送によりオペレータ及び画像確認者がリアルタイムに画像を確認し、フライト位置を微調整
焦点距離 55mm レンズのため飛行位置の微小なズレでも撮影対象が画角から外れるため複数回のフライトを実施 撮影距離 20m で解像度 2.0mm/pixel	3600 万画素と高画素の SONY α 7R を使用し、撮影距離 10m で約 1.4mm/pixel の解像度で撮影。広角のため視死角が広く、対象を画角内に収めやすい
写真測量解析時に標定作業に労力を要す	多視点から撮影した画像より SfM 解析により、自動標定で写真解析を実施。
3D レーザスキャナのデータから地物標定	標定には、既存図面から取得した座標値を入力。(3D レーザスキャナのデータも併用)
オルソ画像の出力が目的	写真測量では困難な奥行きのある対象物に対し、高解像度の画像がマッピングされた 3D モデルの生成が可能。

### 4.3 撮影計画

4P 主塔のうち橋軸方向と海側の面、計 6 面を撮影対象とした。道路側（内側）は UAV を道路直上に飛行させるため、危険と判断し除外した。また、画像から損傷を把握するためには正対撮影が要求されるが、橋軸方向にはケーブルがあり正対撮影が困難なため 45 度方向から斜め撮影により画像撮影を行った。また主塔は RC 構造であるため、点検では 0.2mm 幅以上のひびわれの把握が必要<sup>3)</sup>であり、「3.2 カメラ・解像度の違いによる視認可能な最小ひびわれ幅の検証」の検証結果より把握すべきひびわれ幅の 3~5 倍の解像度での撮影が必要だが、試験的な内容でありリスクを考慮して撮影距離 10m、目標解像度 1.5mm/pixel と設定して撮影計画を作成した。

主塔外側を図 4.3.1 に示すように正対, 45 度方向の計 6 測線で主塔の形状に合わせて一定の距離(10m)を維持しながらフライトさせた。UAV の離発着は図 4.3.1 に示すように肥前町側の駐車場および北側道路で行うものとし、UAV 操縦者と画像確認者の 2 名体制で飛行させた。画像確認者は、タブレットに伝送されてくる撮影画像をリアルタイムに確認しながら、撮影画角に対する対象物の写り込みの大きさによって撮影距離・解像度を把握し、操縦者に飛行位置の指示を出した (図 4.3.2)。



UAVの離発着位置等

図 4.3.1 撮影計画図

SfM 解析により撮影画像から 3D モデルを作成するため、オーバーラップは全て 80%ラップとし、撮影はインターバル撮影により 1 回/秒で実施した。また、生成した TIN にスケールを与えるため、3D レーザ計測を実施し、任意点の座標値を標定点として利用した。使用した 3D レーザスキャナは TOPCON 製の GLS-2000 である。既存図面から取得した寸法値も活用する。図 4.3.3 に内業を含めた作業の手順を示す。



図4.3.2 撮影時の体制



図4.3.3 作業の手順

表4.3.1 3Dレーザスキャナの仕様

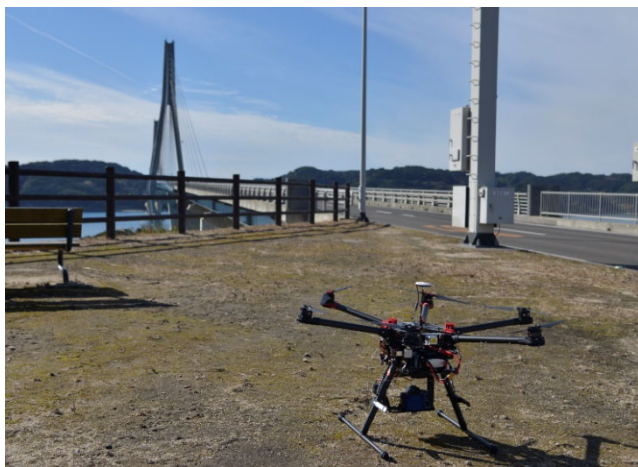
機種名	TOPCON GLS2000
レンジ	中距離型
レーザクラス	クラス 3R/1M
計測方式	TOF 方式
測定距離	~500m
計測範囲	V270° × H360°
計測精度	3.5mm (σ) / 1~150m
スキャンスピード	120,000 点/秒 (詳細)
レーザ波長	1064nm
機器イメージ	

#### 4.4 データ処理・解析

##### 4.4.1 データ取得状況

図 4.4.1 に現地の作業状況を示す。

撮影当日は、晴天のち曇天で風速は 0~3m/s であり、好条件下で作業が完了した。



UAVの離発着場所



主塔撮影状況（橋面付近）



主塔撮影状況（頂部付近）



3Dレーザ計測状況

図4.4.1 現地の作業状況

##### 4.4.2 撮影結果

主塔の海側面 6 測線の撮影に合計 4 フライトを実施し、1 フライト約 12 分で完了した。1 回/秒のインターバル撮影のため、1 フライトで約 600 枚の画像を取得した。全体で撮影対象外の範囲も含むが約 2500 枚（約 45GB）もの画像を取得した。UAV を使用することで、通常ではロープアクセス等では確認できない主塔頭頂部などの画像も容易に取得でき、画像を拡大するとコンクリート表面の状況も鮮明に認識することができる。図 4.4.2 に撮影画像例を示す。

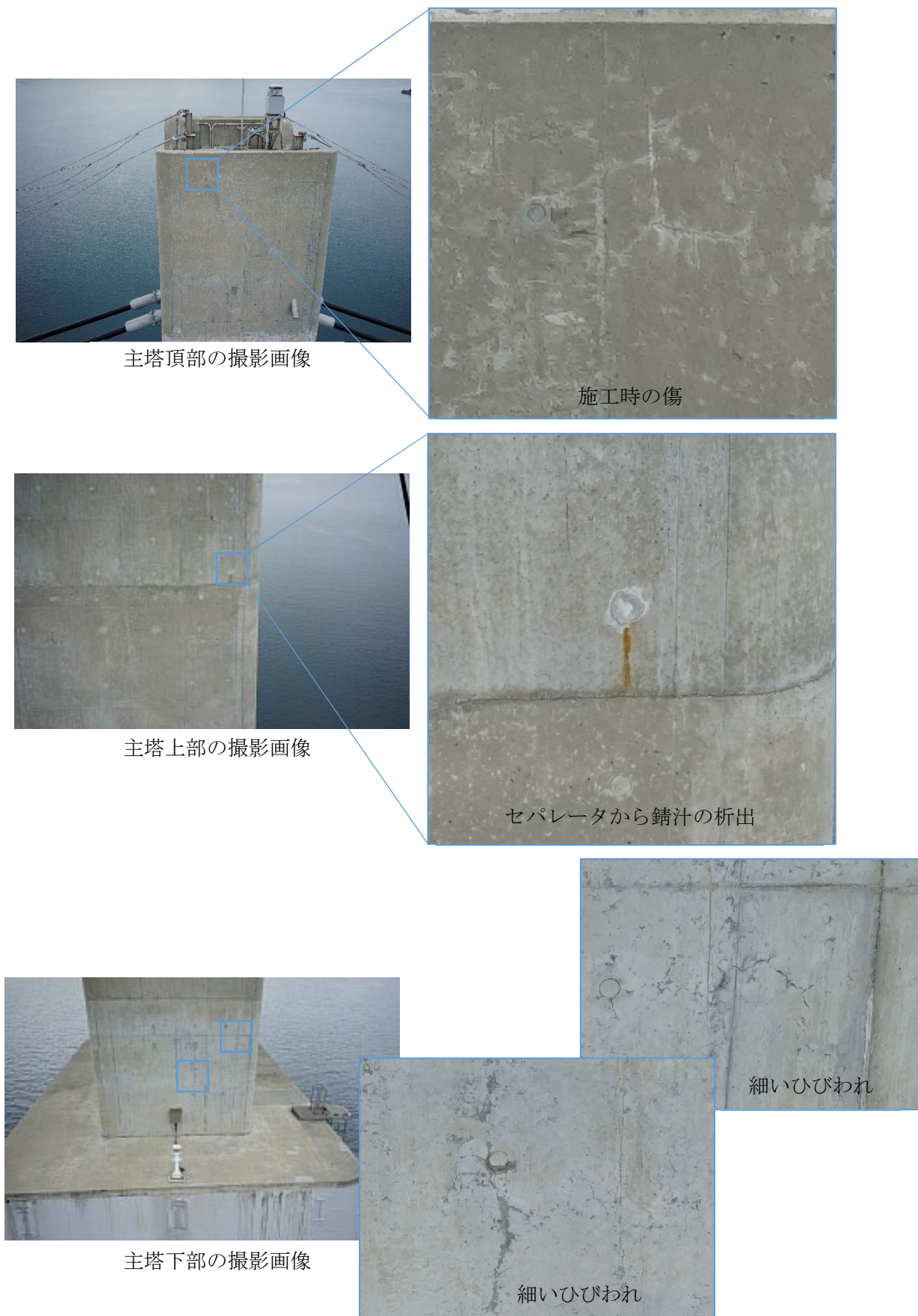


図4.4.2 撮影画像と把握可能な損傷部の拡大例

#### 4.4.3 SfM 解析

従来の写真測量では、UAV で取得した膨大な枚数の標定作業を手動で行う必要があり、画像全てのマッチングを行うのに多大な時間を要し苦慮していたが、SfM 解析では、特徴点を用いた自動標定のため、大幅な省力化が可能である。また、写真測量では奥行きのある形状の場合、形状を忠実に再現することが困難であったが、SfM では多方向から撮影した画像でも容易に解析ができ、奥行きのある面のモデル生成も可能である。本検証にて SfM 解析に使用したソフトは Bentley Systems 社製の Context Capture である。

まず撮影した画像より、ブレやピントのズレが生じている画像や不要な画像を除去し、解析に使用する画像を選定する。次に、選定した画像を自動標定により画像解析し、特徴点・カメラ位置を算出する。このとき、3D レーザスキャナで計測した点群や図面上から算出した寸法値を入力し、データに尺度を与える。この時点で特徴点の点群で構成された大まかな形状を PC 上で確認し、実物と異なる形状、例えば平らな面の湾曲や二重に構成されているなどの事象が生じている場合は手動標定や使用画像の変更等の対応を行い、数度解析を繰り返す。その後、算出した特徴点を元に TIN を構築し、撮影画像をテクスチャとしてマッピングすることで 3D モデルが生成される。このモデルは、PC 上で自由に拡大縮小・移動回転が可能のため、任意の視点からモデルを閲覧可能である。生成したモデルは一般的な CG ソフトで扱える汎用形式 (DXF, OBJ, FBX 等) に変換も可能である。本検証では OBJ 形式に変換後、Autodesk 社 3dsmax へとデータを移行し、任意面のレンダリングによりオルソ画像を作成した。このとき、オルソ画像は 1.5mm/pixel の解像度で出力した。SfM 解析により 3D モデルを生成するのに約 4 日間、オルソ画像の出力に約 1 日間、これらの全プロセスに計 5 日間要した。図 4.4.3 に主塔の北側を例として解析の手順と結果を示す。

解析により復元されたカメラ位置を確認すると、十分なラップは保持しており正確に復元できているが、撮影位置が直線的でない。これは UAV が蛇行しながら上昇もしくは下降していることを示している。リアルタイムに画像確認者は伝送された画像を確認し、オペレータに随時位置情報を伝え、位置の修正は行っているものの、オペレータは 300m 先の非常に小さな UAV を目視して操縦しているため、微細な調整が困難であり、蛇行したものと推測される。

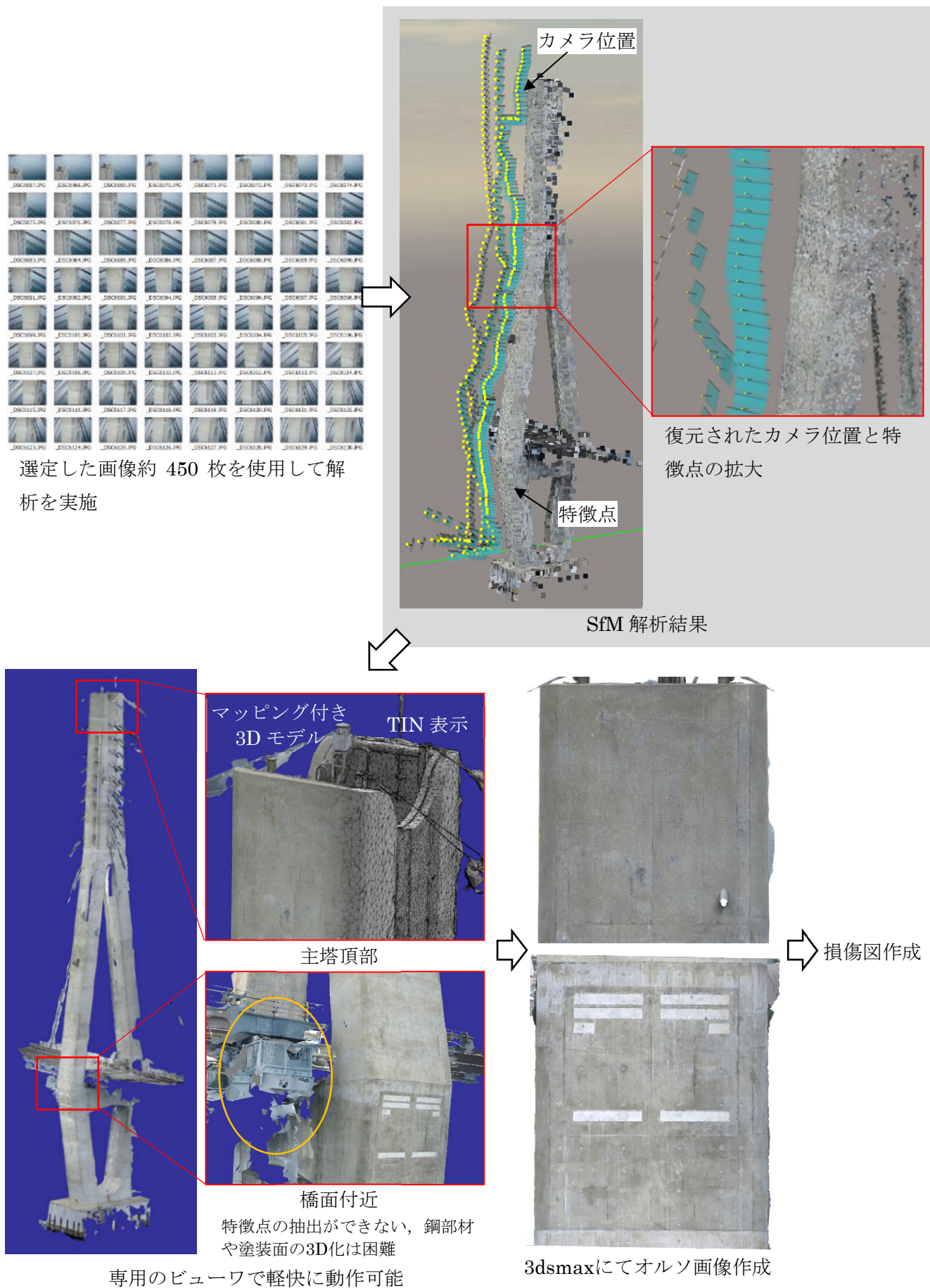


図4.4.3 SfM解析～オルソ画像作成手順



#### 4.4.4 損傷図作成

SfM により作成したマッピング付きの 3D モデルより 1.5mm/pixel 解像度のオルソ画像を生成し、国土交通省が示す橋梁定期点検要領で示すひびわれ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、抜け落ち、補修・補強材の損傷 4等のコンクリートにおける損傷を対象に画像から判読可能なものについて損傷図化を行った。画像からひびわれの自動検出や幅判定を行う研究は種々行われており、例えばウェーブレット変換や機構フィルタを用いたもの<sup>5~9)</sup>、最近では AI による自動検出サービス<sup>10)</sup>も実装されているが、まだ開発レベルのものが多く、本検証では、「3.3 ひびわれ位置・幅判読図化システムの精度確認」でも使用した [CI] による「ひびわれ位置・幅判読図化システム<sup>11)</sup>」を使用した。

損傷判読は、図 4.4.4 に示すようマルチ画面で作業を行い、左画面では「ひびわれ位置・幅判読図化システム」を用いてオルソ画像を下図として損傷を視認し、画像上に記載していく。その際、右画面には 3D モデルを表示し、対象構造物を様々な視点より見ることで、2次元では分からない段差や孕みなどの変状も確認できるうえ、損傷の位置や発生部位などを 3次元的に把握しながら評価できるため客観的かつ適正な評価が行えるメリットがある。また、これらの作業が室内の落ち着いた状況で可能な点でも非常に有効な手法である。記載した損傷は、CAD データへの変換し、管理図面などへの転記も可能である。作成した損傷図の一例を図 4.4.5 に示す。



図4.4.3 「ひびわれ位置・幅判読図化システム」による損傷図作成状況

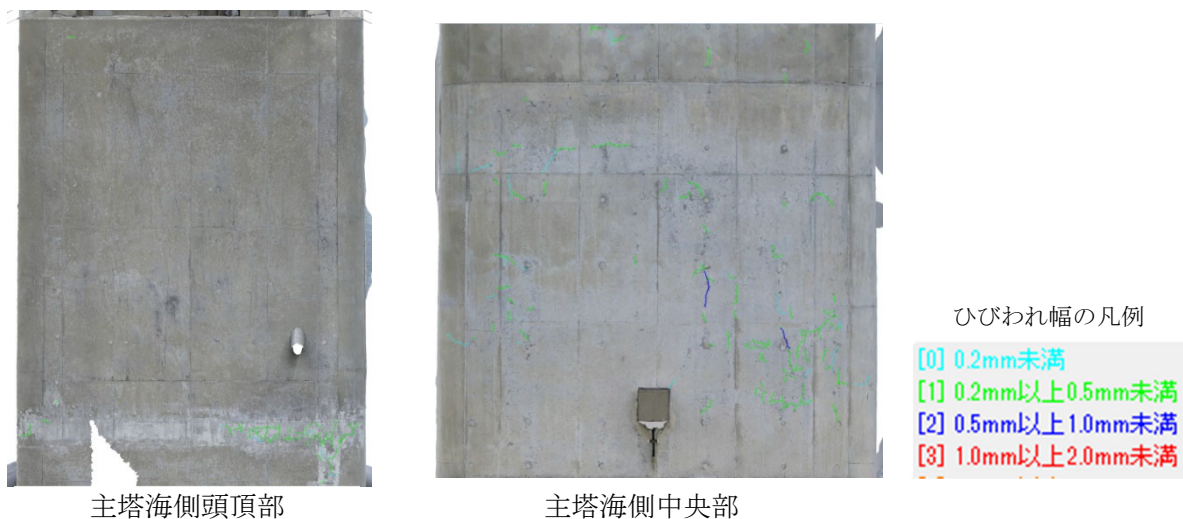


図4.4.4 損傷図作成例

### 4.5 考察

前節で記述したプロセスを経て作成したオルソ画像や 3D モデルなどの「画像」を用いて損傷を確認した結果、今回対象とした主塔には有害と思われる損傷はなかったが、その中でも既存の点検結果<sup>2)</sup>と可能な範囲で比較を実施した。

図 4.5.1 に既存の点検結果と本検証で作成した画像を用いた点検結果を比較した図を示す。この範囲は主塔下部基礎の直上のため、梯子等で点検技術者が近接して目視点検を実施している箇所である。両損傷図とも細かなひびわれまで記載できており、ほぼ同等の結果が得られていると言えるが、やや位置関係に差異が見受けられる。実点検において、この程度の位置の差異は健全度に影響を与えるものではないが、スケッチにより記録される目視点検と比較して、画像を用いた点検の方がオルソ画像をもとに損傷図を作成するため、位置の再現性は高いと考える。ひびわれ幅について、既存の目視点検結果では全て 0.1mm 幅と記載されているが、画像を用いた点検では全体的に 0.2mm 幅程度、一部 0.5mm 以上と判断したひびわれもある。〔CI〕を用いたひびわれの抽出の場合、コンクリート表面の色・汚れにより結果がばらつくことがあるため、本検証でも汚れなどが影響している可能性も考えられる。0.5mm 幅と判定した箇所の画像を拡大すると、ひびわれの周囲が他のコンクリート表面と比較して、灰色が濃くなっていることが〔CI〕を増加させ、その結果ひびわれ幅が太く算出されたものと考えられる。(図 4.5.2)

通常の見視点検では、点検技術者の技量・解釈に委ねられる部分が多く、損傷位置の記録など定量的な判断が難しいが、画像を用いた点検では画像を元に損傷判読を行うため、定量的かつ客観的な判断が可能。また定期的な同様のデータを取得することで、経年的な比較や劣化の進展なども容易に確認が可能である。このように 3D モデル・画像等の付加価値のあるデータを蓄積するため、今後の維持管理の上では、充分メリットのある調査手法であるといえる。

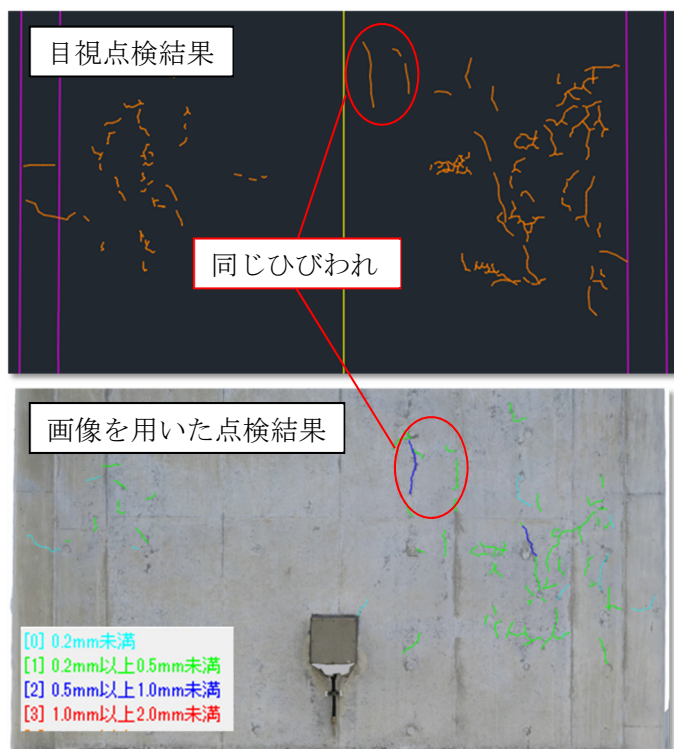


図4.5.1 点検結果の比較



図4.5.2 0.5mm幅と検出された箇所

#### 4.6 抽出された課題

画像を用いた点検は、これまで述べた結果より有効な手段であると言えるが、以下の課題も存在する。

##### ・ UAV の安全性

UAV は人がアクセスできない箇所に容易にアクセスできる画期的なツールではあるが、橋梁点検で活用するためには、第三者に危害を与える可能性を排除する必要がある。本検証で対象としたような橋梁は、絶えず風が吹く環境である場合が多く、特に風に対する安定性が必要である。また、UAV の暴走や逸走への対策も必要である。暴走時、緊急時のフェイルセーフや電源遮断、逸走防止のための有線給電タイプの UAV やジオフェンスの活用などが考えられる。

安全対策の構築にあたっては、個々の不測の事への対策だけでなく、すべての不測の事態のあらゆる組み合わせへの対策が必要である。さらには、一つの対策では十分ではなく二重三重の対策が必要となる。

##### ・ 画像撮影位置の管理，制御

本検証では、「橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価<sup>1)</sup>」での課題の改善として、画像転送によりオペレータ及び画像確認者がリアルタイムに画像を確認し、フライト位置を微調整しながらマニュアル操作により UAV を飛行させたが、オペレータに非常に高度な技術が要求されるとともにオペレータへの依存度が高く、常に最適な画像を取得できる保証はない。安全にかつ一定の品質の画像を確実に取得するためには、UAV の位置制御が不可欠である。特に橋梁点検に活用する場合は、絶対位置よりも相対位置、すなわち点検対象物を認識し自動で一定距離を保ちつつ撮影できる位置制御技術が必要であると考えられる。近年普及している距離センサが搭載された DJI 製の phantom4 や Inspire2 のような UAV や SLAM、レーザスキャナによる自律飛行型 UAV<sup>12) 13)</sup>など、今後の技術革新が期待される。

##### ・ 解析作業，評価作業などの内業の増加

UAV-SfM を用いた場合、現地作業は大幅な省力化・ローコスト化が可能だが、解析作業には多大な時間を要する。特に損傷図作成や損傷程度の評価については、現状人の手に頼らざるを得ない状況である。

##### ・ 近接，接触が必要な損傷

「浮き」など近接、接触して点検が必要となる項目については、画像からでは評価できない。画像を用いた点検結果から打音点検が必要な箇所を選定し、限定的な範囲を点検するなどスクリーニングとして活用することは可能であると考えられるが、現行の橋梁定期点検要領では全ての範囲において打音点検が必要なため、人による近接目視点検の代替案としては難しい。

#### 4.7 まとめ

UAV を用い撮影した画像から SfM 解析により 3D 化し、損傷図を作成することは点検手法として充分活用でき、足場仮設やロープアクセスによる点検を行う場合と比較し、大幅な省力化・ローコスト化できる手法であると考えが、ひびわれ幅の検出精度、近接・接触点検が必要な項目への対応など課題は多々ある。しかし、画像を用いた手法を 1 次スクリーニングとして実施することは、有効な手段であると考ええる。1 次スクリーニングにより、詳細点検が必要な箇所を選定することで、適切な時間・予算・人員を配分することができ、効果的・効率的な点検が可能となる。

UAV を用いた点検は、多方面（河川調査・ダム調査等）での活用も期待でき、災害時の概略の対策設計などにも十分活用が可能である。ただし、UAV は画期的なツールであり、これまでの「計測」の裾野を大きく広げているが、いかなる場合においても UAV の安全性の確保は必須であり、第三者被害を確実に防ぐことが重要である。また、安全性・コストの点から全ての場合において UAV が効果的であるわけではなく、要求成果や対象物の環境などに応じて適切な計画を立案し、手撮影による SfM 解析なども有効に利用していくべきである。

## 参考文献

- 1) 西村正三, 木本啓介, 松岡のどか, 大谷仁志, 緒方宇大, 松田浩: 橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価, 応用測量論文集, Vol.24, pp.52-61, 2013
- 2) 長崎県土木部 道路維持課: 長崎県重点維持管理橋梁詳細点検 (5年点検) 業務委託 (鷹島肥前大橋) 報告書, 2015.3.
- 3) 国土交通省道路局国道・技術課: 橋梁定期点検要領 付録-2 損傷程度の評価要領, [https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3\\_1\\_6.pdf](https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3_1_6.pdf), p.19, 2019.3
- 4) 国土交通省道路局国道・技術課: 橋梁定期点検要領, [https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3\\_1\\_6.pdf](https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3_1_6.pdf), pp.10-13, 2019.3
- 5) 堀内宏信, 後藤和夫: デジタル画像を利用したひびわれの計測精度について, 平成16年度土木学会東北支部技術研究発表会, pp.782-783, 2005
- 6) 金子英, 岡宗一, 松宮直規: デジタルカメラ画像を用いたコンクリート構造物のひび割れ検査技術, NTT 技術ジャーナル, pp.21-24, 2011
- 7) 中野昭, 齋藤淳: コンクリート表面のひび割れ評価方法ハザマ研究年報, pp.1-6, 2009
- 8) 武田均, 堀口賢一, 小山哲, 丸屋剛: ウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析手法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1895-1900, 2006
- 9) 西川貴文, 吉田純司, 杉山俊幸, 斉藤成彦, 藤野陽三: 木構造状フィルタを用いたコンクリートのクラック抽出のためのロバストな画像処理システム, 土木学会論文集, Vol.63, No.4, pp.599-616, 2007
- 10) FUJIFILM: 社会インフラ画像診断サービス「ひびみつけ」, <https://fujifilm.jp/business/material/infraservice/>
- 11) 西村正三, 原健司, 木本啓介, 松田浩: 3D レーザ・デジタル画像を用いた軍艦島計測と損傷図作成, 写真測量とリモートセンシング, Vol.51, No.1, pp.46-53, 2012
- 12) 野波健蔵: ドローン (飛行ロボット) の最新動向と展望, <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tiiki/kokusentoc/kinmirai/dai1/shiryou4.pdf>, 2015
- 13) 河内山聡: UAV の自律飛行技術の最新動向について, [http://www.actec.or.jp/study/document/180808\\_02.pdf](http://www.actec.or.jp/study/document/180808_02.pdf), 2018



## 第5章 中小橋梁の点検における SfM の活用方法の比較・検証

### 5.1 概要

#### 5.1.1 背景と目的

レーザや画像等を用いた光学的計測手法のインフラ維持管理への活用方法が研究<sup>3)</sup>されている中、第4章に記述したように長大橋（斜張橋）のコンクリート主塔を対象に UAV-SfM を活用することで、ロープアクセスや足場仮設を必要とせず、安全に短時間で目視点検と同等の損傷を把握できることを実証した。しかし、「道路メンテナンス年報<sup>2)</sup>」（2016, p.28）によると全国の橋梁約73万橋のうち74%が橋長2m以上15m未満の中小橋梁であり、安全面や費用面からも必ずしも全橋梁に UAV の適用が可能ではなく、UAV の操縦には非常に高度な技量を要し、誰もが容易に行える手段ではない。さらには、2015年12月に航空法の一部が改正され、飛行範囲の環境によっては事前に許認可が必要となった<sup>3)4)</sup>。

そこで、九州にある橋長9.6mのRC中実床版橋と橋長33.4mのPC2径間単純ポストテンションT桁橋を対象として、3D計測技術に関する特別な技術や知識がない点検技術者でも容易に橋梁点検に資するデータ取得ができるよう、UAVを使用せず手撮りによる効率的な撮影方法の検証やSfM解析により算出された3Dモデルの再現性（色や形状）、使用機材の差異などを明らかにし、中小橋梁の点検へのSfMの活用方法を比較・検証する。SfM解析を用いて作成した展開画像を元に損傷図を作成し、目視点検による定期点検結果との比較も実施する。なお、SfM解析の特性上、本検証ではコンクリート橋のみを対象とした。また、これらの結果を踏まえ、長崎県大村市にある橋長7m、幅員20mのRCT桁橋（7主桁）にRC床版橋が拡幅された構造の橋梁に適用した結果も併せて示す。

#### 5.1.2 検証の対象とした中小橋梁

図5.1.1に示す2つの橋梁を対象として、SfM解析を行うための手撮り撮影及び比較検証用に地上型3Dレーザスキャナによる形状の計測を実施した。2つの橋梁ともコンクリート構造であり、A橋は市道にかかる橋長9.6m、幅員4.2mのRC中実床版橋で、B橋は県道にかかる橋長33.4m、幅員5.2mのPC2径間単純ポストテンションT桁橋である。B橋は橋長がやや長い、1径間は約15mであり、T桁の形状の再現性を検証するために選定した。また両橋とも桁下へのアクセスが容易であることも選定理由の1つである。



A 橋 （スパン長 9.6m）

B 橋 （スパン長 33.4m, 2 径間）

図 5.1.1 対象とした橋梁

### 5.1.3 検証項目

#### (1) カメラ性能の差の比較 (対象橋梁：A)

機構やセンササイズの異なる4機種のカメラを用いて同じ対象を撮影し画質やSfMの解析精度などを検証した。その際、SfM解析に使用したソフトウェアは、構造物の再現性が高い Bentley Systems 社の Context Capture である。

#### (2) 形状の再現性検証 (対象橋梁：B)

画像撮影と同時に地上型3Dレーザスキャナにより橋梁の形状を取得し、取得した3Dレーザデータを実証値として、橋梁の任意断面において位置精度や形状の再現精度を確認した。3DレーザデータとSfM解析データは、どちらも現地に設置した同じターゲットをもとに処理したため、同じ座標系上にあり、重ね合わせることが可能である。

に存在する。

#### (3) SfM解析のための撮影位置の検討 (対象橋梁：A)

撮影した画像データを測線ごとに分類し、それらの画像の組み合わせによりSfM解析の可否を検証し、効率的な撮影パターンを抽出した。

#### (4) 損傷図の作成および定期点検結果との比較 (対象橋梁：A)

SfMにより作成した3Dモデルからオルソ画像を作成して、[CI]による「ひびわれ位置・幅判読図化システム<sup>5)</sup>」により損傷図を作成し、既存の定期点検結果と比較を行った。

### 5.1.4 使用機材

A橋の撮影では現在市販されているデジタルカメラのうちセンササイズや撮影機構の異なる4種類を使用した。本検証では3D計測技術に関する特別な技術や知識がない点検技術者でも容易に橋梁点検に資するデータ取得ができる手法の検討を目的としているため、高性能な一眼レフカメラ (Nikon D750) やミラーレスカメラ (Panasonic DMC-GM1K) の他、コンパクトデジタルカメラ (Olympus TG-810) とビデオカメラ (Panasonic HC-WX970M) を選定した。SfM解析においては、隣接画像とのオーバーラップを80%程度保つことが重要であり、カメラではそのラップ率の確保を考慮して撮影を実施するが、ビデオカメラは30fpsもしくは60fpsでの連続撮影が可能のため、ラップ率の確保が比較的容易であると考え、選定した。表5.1.1に各機種の子な仕様を記す。また、B橋の計測では表5.1.1内の一眼レフカメラ NikonD750のみを撮影には用いた。3Dモデルの形状比較用に用いた地上型3Dレーザスキャナは、表5.1.2に示す FARO 製の Focus3D X330 である。



表 5.1.1 検証に用いたカメラの仕様 (各社ウェブサイトより引用)

	一眼レフカメラ	ミラーレスカメラ
名称	Nikon D750	Panasonic DMC-GM1K
イメージ		
センサ	CMOS センサ	CMOS センサ
センササイズ	35.9×24.0mm (フルサイズ)	17.3×13.0mm (フォーサーズ)
画素数	6016×4016 2432 万画素	4592×3448 1600 万画素
大きさ (W×H×D)	約 140.5×113×78mm	約 140.5×113×78mm
重さ	約 750g (本体のみ)	約 204g
レンズ焦点距離 (35mm 換算)	24mm (24mm)	12mm (約 24mm)

	コンパクトデジタルカメラ	ビデオカメラ
名称	Olympus TG-810	Panasonic HC-WX970M
イメージ		
センサ	CCD センサ	MOS センサ
センササイズ	6.2×4.7mm (1/2.3 型)	6.2×4.7mm (1/2.3 型)
画素数	4288×3216 1400 万画素	3824×2160 (4K) 829 万画素
大きさ (W×H×D)	約 100.2×64.5×26mm	約 140.5×113×78mm
重さ	約 221g (本体のみ)	約 362g
レンズ焦点距離 (35mm 換算)	5mm (約 28mm)	5.3mm (約 30.8mm)

表 5.1.2 地上型 3D レーザスキャナの仕様 (カタログより引用)

機種名	FARO FocusX330
レンジ	中距離型
レーザクラス	クラス 1
計測方式	位相差方式
測定距離	0.6~330m
計測範囲	V300° × H360°
計測精度	±2mm@25m
スキャンスピード	最大 976,000 点/秒
レーザ波長	1550nm
機器イメージ	
寸法	240×100×200mm (幅×奥行×高さ)
重量	5.2kg

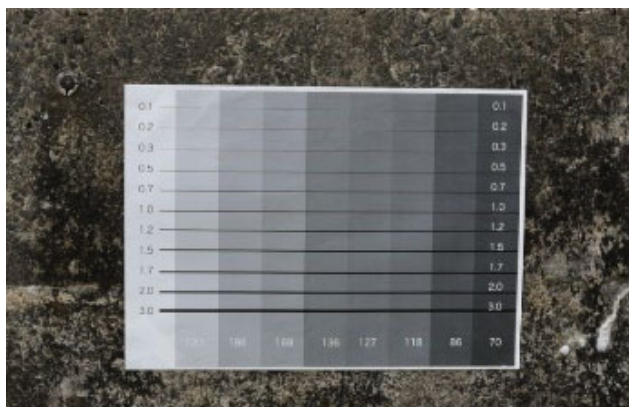
## 5.2 データ取得と SfM 解析

### 5.2.1 データ取得

A と B の両橋共, 解析時に座標系を揃えるため事前に対象範囲内に 10cm 角のターゲットを対象範囲を囲むように数点配置し, それらの中心座標を測量により取得し, コントロールポイントとして SfM 解析に使用した. また, A 橋においては白から灰色の濃淡の背景色上に 0.1~3.0mm 幅の線を描いた A3 サイズの模擬ひびわれシートを桁側面に貼付した状態で撮影し, 視認可能なひびわれ幅の検証および [CI] のキャリブレーションに使用した. 図 5.2.1 に設置したターゲット及び模擬ひびわれシートを示す.



設置した 10cm 角のターゲット (地覆)



設置した模擬ひびわれシート (桁側面)

図 5.2.1 設置したターゲットと模擬ひびわれシート

A 橋では、4 台のカメラを用いてそれぞれ手持ち撮影と桁の側面などはポールを用いた撮影により、あらゆる方向から画像を取得した。その際、カメラ性能が異なるため解像度を統一することは難しいが、対象より 5m 以内の離隔を保った状態で撮影が可能な解像度、約 1.5mm/pixel 以上を目標解像度とした。また、桁下面は一眼レフカメラとミラーレスカメラのみ撮影を実施し検証を行った。コンパクトデジタルカメラ、ビデオカメラは橋面と桁側面のみの撮影とした。

B 橋では、A 橋よりも規模が大きいため、目標解像度を 1.5~2.0mm/pixel と設定し、一眼レフカメラのみを使用して A 橋と同様に手持ちとポール撮影を併用し、あらゆる方向から撮影した。

両橋梁とも画像撮影は全て 1 人で可能な範囲で実施し、UAV 等は一切使用していない。地上型 3D レーザスキャナによる計測も同時に実施し、橋梁全体の 3D データも取得した。撮影状況および 3D レーザ計測状況を図 5.2.2 に示す。



使用した 4 台のカメラ



桁側面の撮影（手撮り）



橋面の撮影（手撮り）



斜め上からの撮影（ポール撮影）



3D レーザ計測状況

図 5.2.2 データの取得状況

### 5.2.2 撮影結果と SfM 解析結果

A 橋では、4 種のカメラを用いて全体で約 1000 枚の画像を取得するのに約 1.5 時間を要した。そのうち一眼レフは、撮影時のカメラの反応（ピント調整など）が速く、短時間で連続的に撮影が可能のため、500 枚もの画像を 30 分程度で取得した。B 橋は T 桁橋のため、桁下面から T 桁の側面など撮影が困難な箇所の対応に大部分の時間を要し、全体で約 1 時間を要した。

これらの画像を Context Capture を用いて SfM 解析を実施し、対象橋梁の 3D モデルを作成した。A 橋における SfM 解析の流れを図 5.2.3 に示し、表 5.2.1 に両橋における各カメラの撮影枚数、撮影時間、SfM 解析に要した枚数、時間などを纏めた。

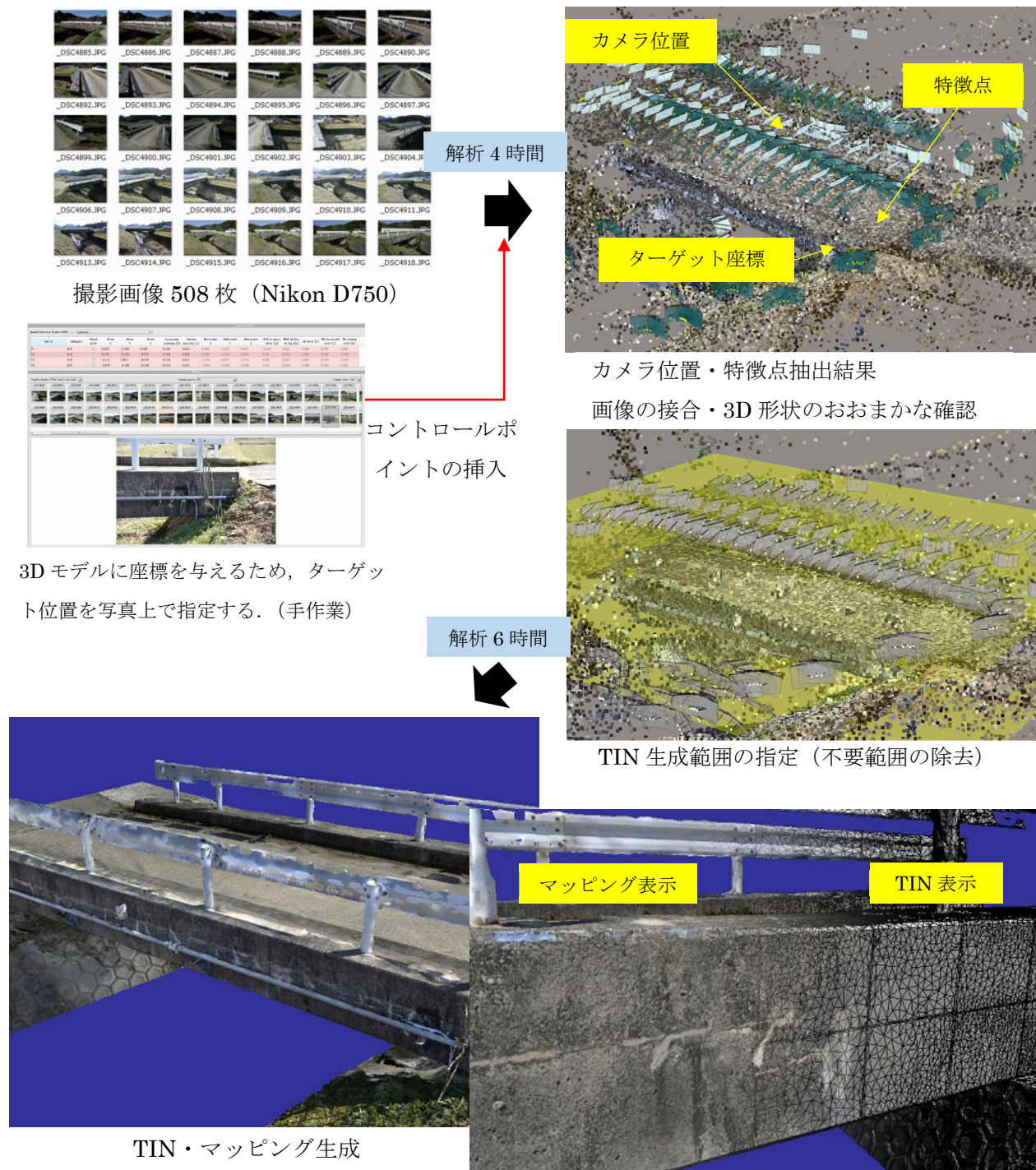

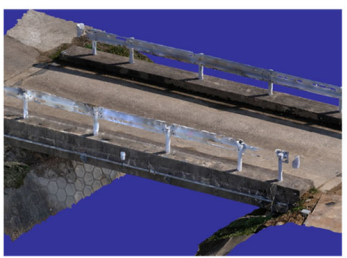
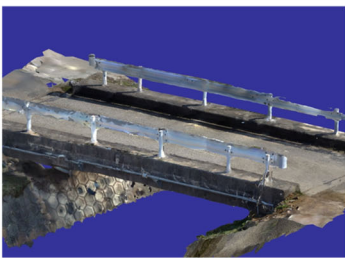
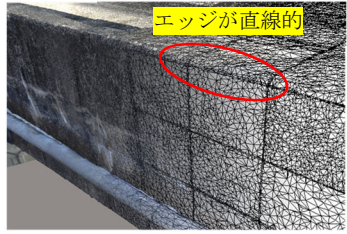
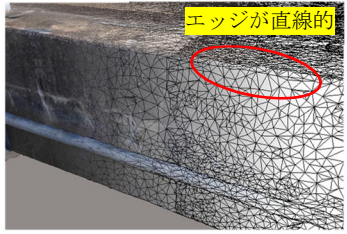
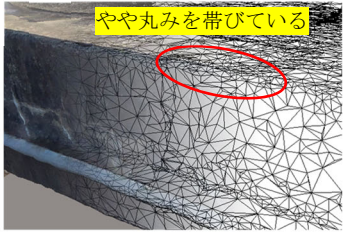


図 5.2.3 SfM 解析の流れ (A 橋参照)

表 5.2.1 各カメラで取得した情報の比較

対象橋梁	A橋		
使用したカメラ	Nikon D750	Panasonic DMC-GM1K	Olympus TG-810
撮影枚数	508	383	99
撮影に要した時間	30分	20分	10分(桁下面以外)
SfM解析に使用した画像枚数	508	383	99
解析に要した時間	約10時間	約6時間	約3時間
作成した3Dモデル			
3Dモデルの詳細			
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 現地を忠実に再現したモデルを生成。</li> <li>・ 写真の容量・枚数が多いため、多大な時間を要した。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 現地を忠実に再現したモデルを生成。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 形状は再現できているが、低画質のため細部で再現性が悪い。</li> </ul>



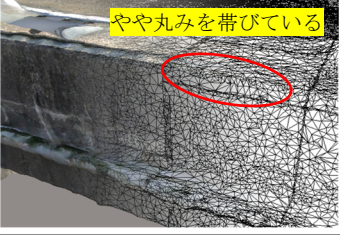
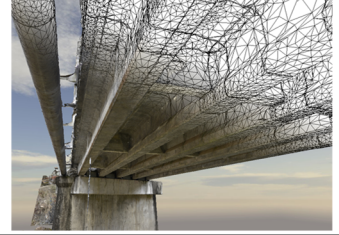
対象橋梁	A橋	B橋
使用したカメラ	Panasonic WX970M	Nikon D750
撮影枚数	300 (動画から0.5s毎の画像に切出)	711
撮影に要した時間	2.5分(桁下面以外)	60分
SfM解析に使用した画像枚数	300	644
解析に要した時間	約6時間	約30時間
作成した3Dモデル		
3Dモデルの詳細		
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 形状は再現できているが、低画質のため細部で再現性が悪い。</li> <li>・ 画質は劣るが、十分にラップした画像の抽出が可能のため、簡易モデルを作成するには問題なし。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 現地を忠実に再現したモデルを生成。</li> <li>・ 写真の容量・枚数が多いため、解析に時間を要した。</li> </ul>

表 5.2.1 に示す撮影結果より、全ケースにおいて SfM 解析による 3D 化は可能であった。A 橋において一眼レフカメラとミラーレスカメラの画像を用いた場合、対象橋梁を忠実に再現した高精度なモデルが生成された。各部位とも構造物のエッジが直線的であり、細部の再現性が高い。ただ、一眼レフカメラについては、撮影枚数が多く 1 枚当たりの容量が大きいため、解析作業に 10 時間かかり、他と比較するとやや時間を要した。一方で、コンパクトデジタルカメラとビデオカメラについても同様に 3D モデルは生成できたものの、地覆のエッジが丸みを帯び、直線的ではない。既設配管と桁が一体となったモデルが生成されている部分もあり、細部での再現性が低いと言える。おそらくこれらは、一眼レフカメラなどよりセンササイズが小さく、画質が低いことに起因していると推測される。しかしビデオカメラの場合、現地撮影時にオーバーラップ不足による解析不可となる可能性を懸念する必要があまりなく、短時間で簡易的にモデルを生成する上では、非常に有効なツールだと言える。

B 橋では、周囲の画像とのラップ不足のため一部の画像が解析上不適となり除外された。やや対象の規模が大きく撮影枚数が多くなる場合は、撮影に注意が必要である。しかしながら、解析に 30 時間と時間は要したものの、桁下面からの撮影画像のみにもかかわらず再現性の高い（特に T 桁部分）3D モデルが生成され、損傷などを十分把握できるモデルとなっている。

### 5.3 SfM の各出力結果を用いた比較検証

#### 5.3.1 カメラの性能による差

前節の結果より、どのカメラの画像でも SfM 解析により橋梁の 3D モデルが作成できることは確認できた。本節では、SfM 解析によって生成された 3D モデルにテクスチャとしてマッピングされている画像の比較を行う。撮影時はほぼ同一の解像度であった画像が、テクスチャとなった場合の画質を模擬ひびわれシートなどを用いて検証する。

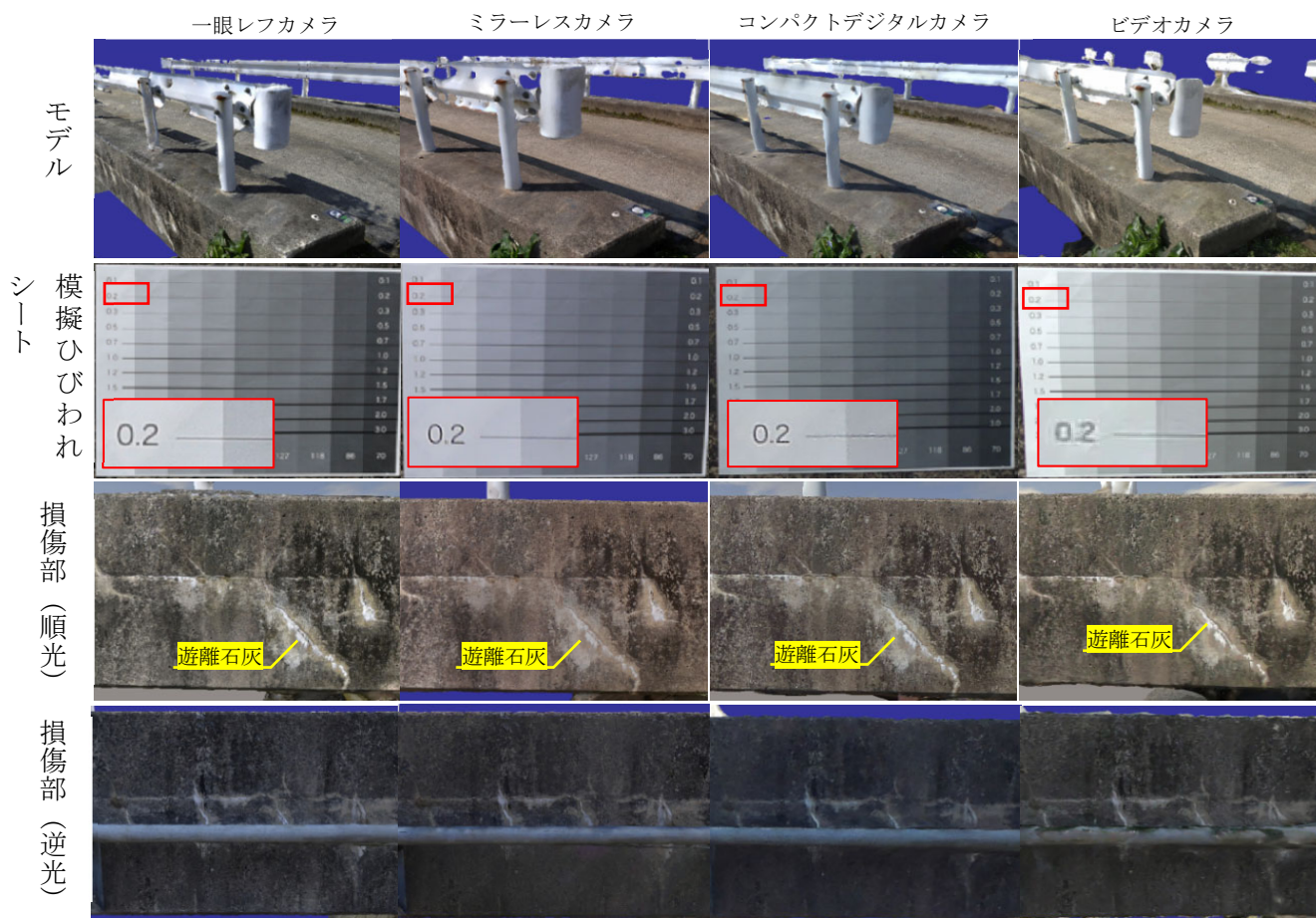
作成した 3D モデルのマッピング画像をビューワ上で拡大し、比較した表を表 5.3.1 に示す。模擬ひびわれシートの 0.2mm 幅の線は、全て視認可能ではあるが、ビデオカメラのみやや鮮明さに欠ける結果となっている。また、順光で撮影できた桁側面において遊離石灰の視認性を比較すると、どの画像も確実に視認が可能であり、大差は見受けられなかった。逆光となる反対側の桁側面でも遊離石灰はどの画像でも視認は可能だが、順光と比較するとコンパクトデジタルカメラ、ビデオカメラはやや不鮮明で色の再現性が悪く、一眼レフカメラの画像と比較すると特にコンクリート表面の汚れなどの色が平滑化され、やや判別しにくい。

カメラのセンササイズやセンサの性能差により、同等の条件下で撮影した結果でも、画質や色の再現性は大きく異なる。色味は、主にホワイトバランスにより調整できるが、今回は全て自動による撮影を行ったため、ミラーレスカメラの画像が他に比べやや赤みを帯びている。手動で撮影対象物の色を忠実に再現するようホワイトバランスを適宜調整することも可能だが、撮影条件が変化するたびにに対応する必要がある上、知識や経験も必要となる。また、一般に輝度が高い部分（日向）と輝度が低い部分（日陰）が混在する場合、同時に両者の鮮明な画像を取得することは難しいが、そのような場合でも一眼レフカメラの色の再現性は高い。これはダイナミックレンジの差によるもので、コントラストの差が強い状況下での撮影時は、一眼レフカメラを用いることが最適である。

画質・色の再現性では、光を如何に効率よく取り込むかが重要である。つまり、受光面積（センササイズ）が大きく、一度に取り入れることができる光量が多いほど、鮮明な描画が可能となる。本検証で比較

した4種類のカメラのうち、一眼レフカメラとミラーレスカメラの画質・色の再現性が他2つより優れていることから、センササイズに着目した場合、17.3mm×13.0mm以上のセンサを有した一眼レフカメラとミラーレスカメラが SfM 解析による3D化とその結果を用いた画像による点検作業に適していると言える。

表 5.3.1 カメラの違いによるマッピング画像の比較



### 5.3.2 形状の再現性検証

B橋において、Context Capture で作成した3Dモデルと地上型3Dレーザスキャナで計測した橋梁の形状データを重ね合わせ、3Dモデルの形状の再現性を検証した。本検証では3Dレーザ計測の結果を実証値として、橋梁の任意断面を抽出し形状の再現精度を確認した。実証値の計測に使用した地上型3Dレーザスキャナは、FARO社製のFocus3D X330である。当機器は、小型かつ軽量で機動性に優れており、対象範囲を網羅するよう複数位置から計測した。A橋と同様に現地に設置したターゲットを基準に処理解析を行っており、SfM解析による3Dモデル、3Dレーザデータどちらも同じ座標系上に存在する。3Dモデルと3Dレーザデータを重ね合わせ、橋梁中央付近の断面を抽出し、比較した結果を図5.3.1および図5.3.2に示す。

全体形状は、SfM解析による3Dモデルと3Dレーザデータとは重なり合っており、ほぼ同等の形状を再現できていると言える。断面データで比較すると、3Dレーザデータに対し、場所によりややばらつきや位置ズレはあるものの、10~20mm程度の精度で断面形状を再現している。特にT桁断面に着目する

と、直線的な形状で断面を忠実に再現しており、桁下からの撮影が可能な範囲で撮影した画像のみでもエッジを持った形状を再現できている。

現状では管理図面がない橋梁も多く、測量や 3D レーザ計測だけでなく、10mm 程度の精度であれば SfM 解析により平面図、立面図、断面図の作成は可能であると言える。

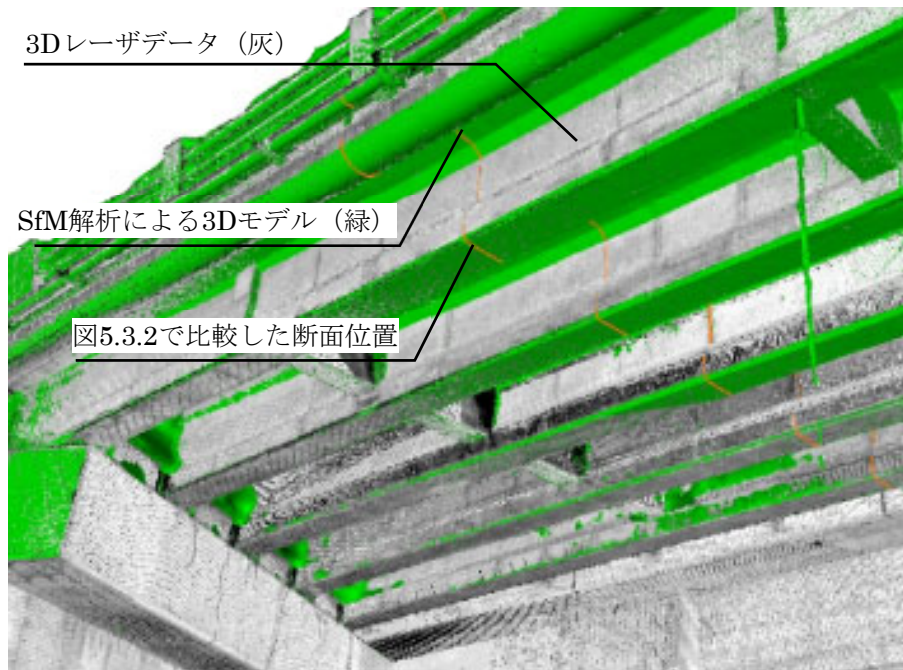


図 5.3.1 3D レーザデータと SfM 解析による 3D モデルの重ね合わせ

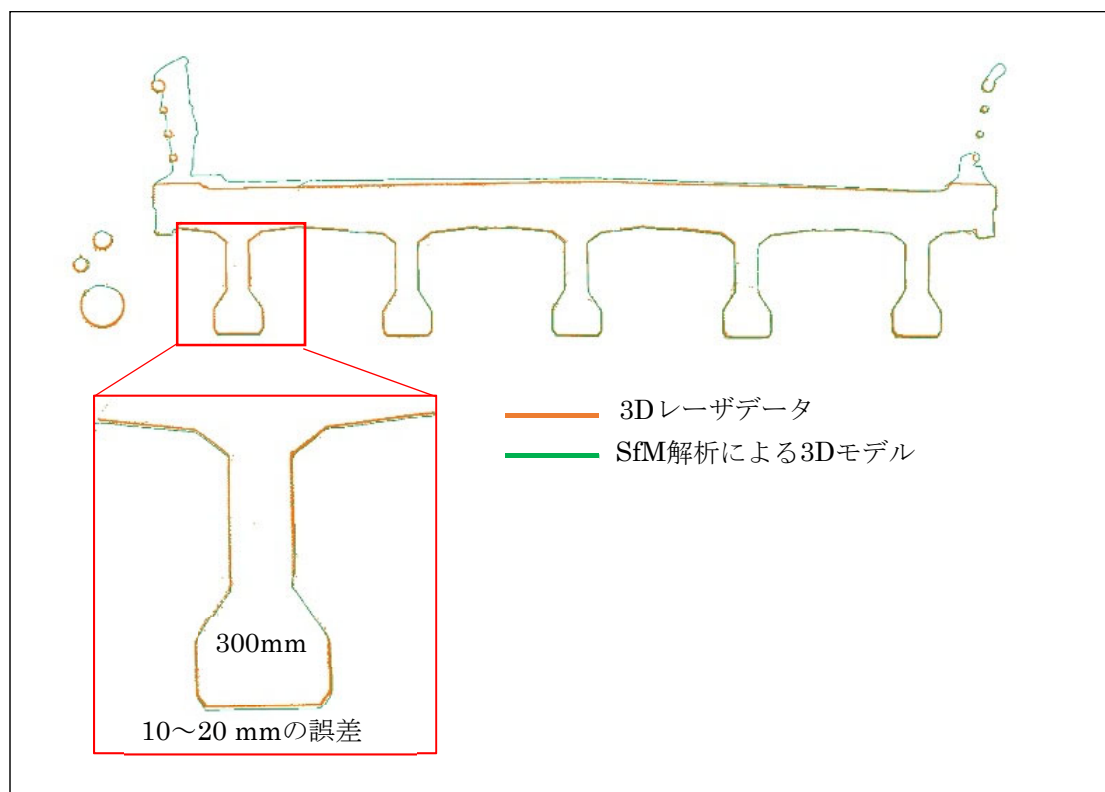


図 5.3.2 任意断面における形状の再現性検証



### 5.3.3 SfM 解析のための撮影位置の検討

橋梁点検等に活用可能な品質の 3D モデルを効率的に作成するためには、任意位置からラップのみを考慮して撮影するのではなく、SfM 解析に適した画像を取得する必要がある。そこで本項では、A 橋を対象に撮影した結果を図 5.3.3 に示す 13 の撮影グループに分類し、これらの撮影グループの組合せによる SfM 解析の可否を明らかにすることで、効率的な 3D モデル化に必要な撮影最適位置の検討を行った。図 5.3.3 は橋梁断面における撮影グループを示しており、この撮影位置を保ちつつ奥に 80% ラップするよう連続的に撮影を行っている。

各撮影グループを段階的に組み合わせ、Context Capture によりケースごとに解析を行い、その解析の可否に応じて順次、次の撮影グループを追加し橋梁全体のモデル化が可能となる組み合わせを明らかにした。このとき、橋梁は左右対称と仮定し、橋梁半分の解析により検証を実施した。

以下に、ケースごとに断面的な撮影位置イメージと SfM 解析結果を示す。断面イメージの赤いカメラ位置は解析不可となったグループを示し、緑のカメラ位置は前ケースより追加して解析可となったグループを示す。



図 5.3.3 撮影位置の分類

(1) ケース 1：グループ①～⑬を全て使用

分類した全ての画像であれば、SfM 解析が可能であることを確認するため、全画像で SfM 解析を実施した。全ての画像が接合され、上面・側面・下面のモデル化が完了した。

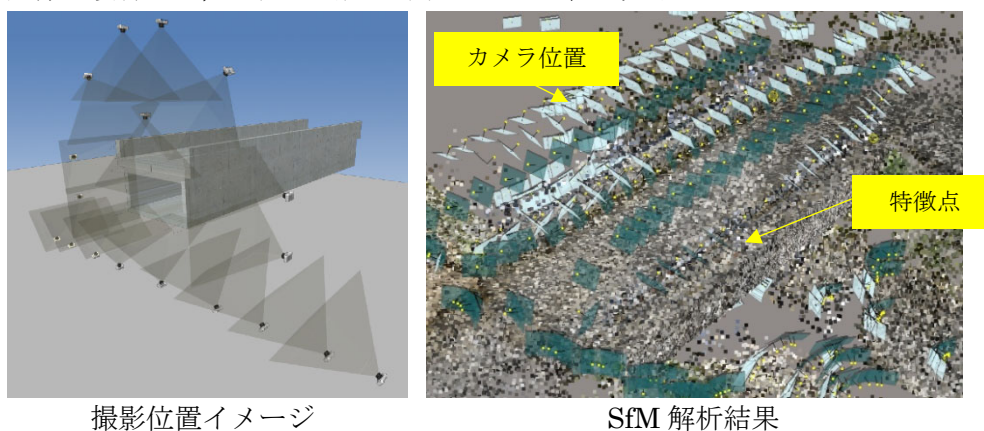


図 5.3.4 ケース 1 の解析結果

(2) ケース 2：グループ①～④を使用

下面を撮影した 4 つのグループで SfM 解析を実施した。使用した全ての画像で SfM 解析が可能で、撮影対象である橋梁側面，下面のモデル化が可能であった。

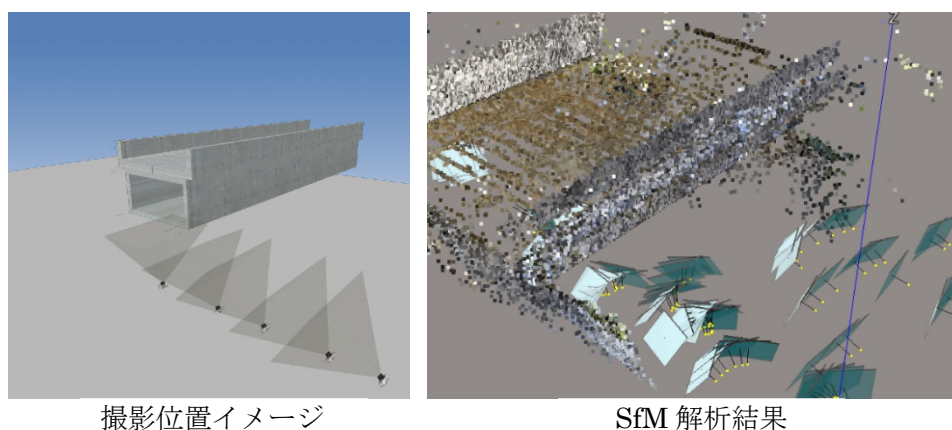


図 5.3.5 ケース 2 の解析結果

(3) ケース 3：グループ②，③，④を使用

下面を撮影した 3 つのグループ（ケース 2 よりも少ないグループ数）で SfM 解析を実施し、使用した全ての画像で SfM 解析が可能であった。撮影対象である橋梁側面，下面のモデル化が可能であった。

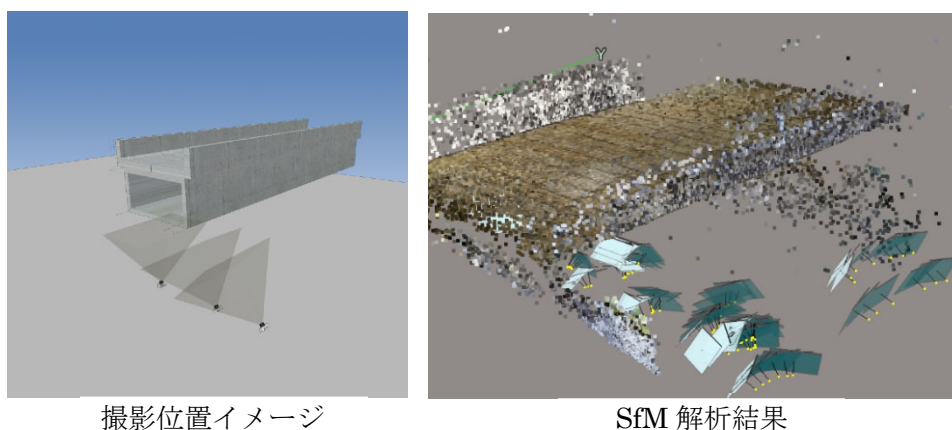


図 5.3.6 ケース 3 の解析結果

(4) ケース 4：グループ②，③，④，⑩を使用

ケース 3 に上面撮影画像グループ⑩を追加して SfM 解析を実施したが，グループ⑩は側面とラップ不足のため解析不可となった。

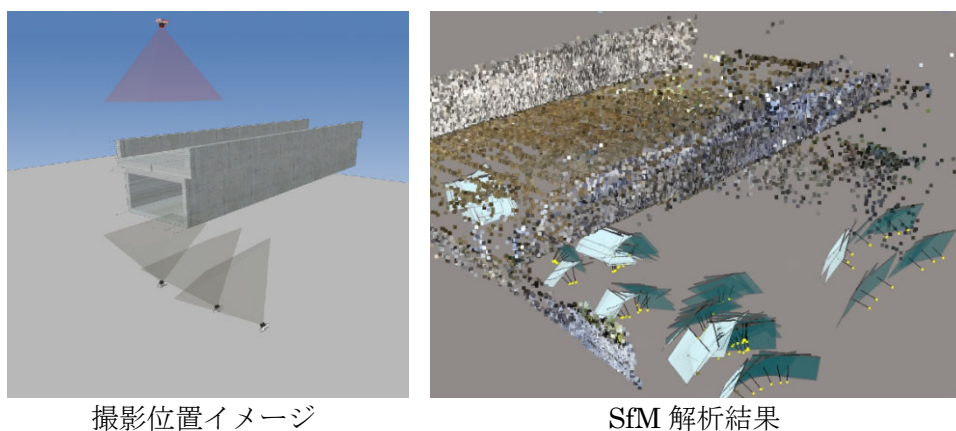


図 5.3.7 ケース 4 の解析結果

(5) ケース 5：グループ②，③，④，⑧，⑩を使用

ケース 4 の上面撮影画像グループを接合するため，側面の撮影グループを付加して SfM 解析を実施した。グループ②，③，④，⑧は接合したが，⑩は側面とのラップ不足のため，解析不可となった。

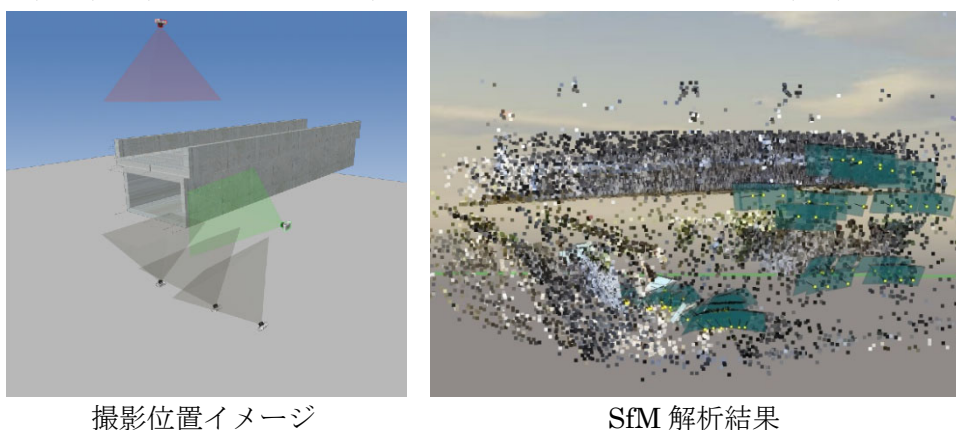


図 5.3.8 ケース 5 の解析結果

(6) ケース 6：グループ②，④，⑧を使用

下面，斜め下，側面の画像で SfM 解析を実施した。最低限の撮影画像での解析を行ったが，それぞれのラップが少なく，解析不可となった。

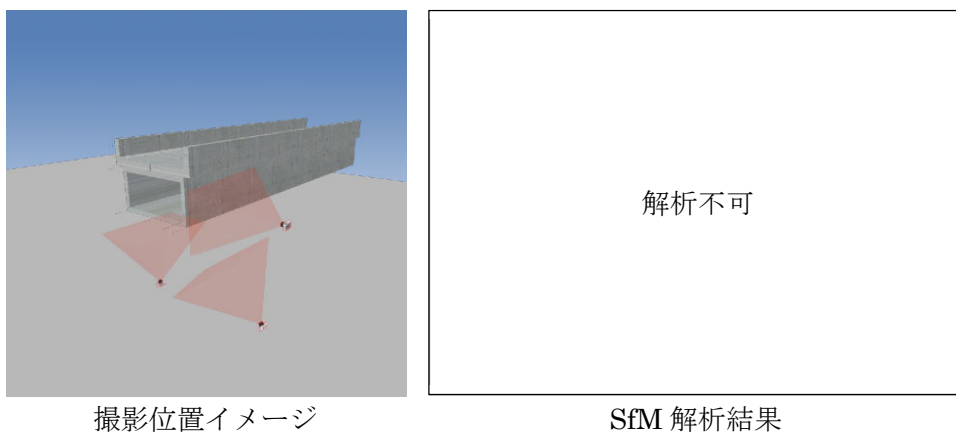
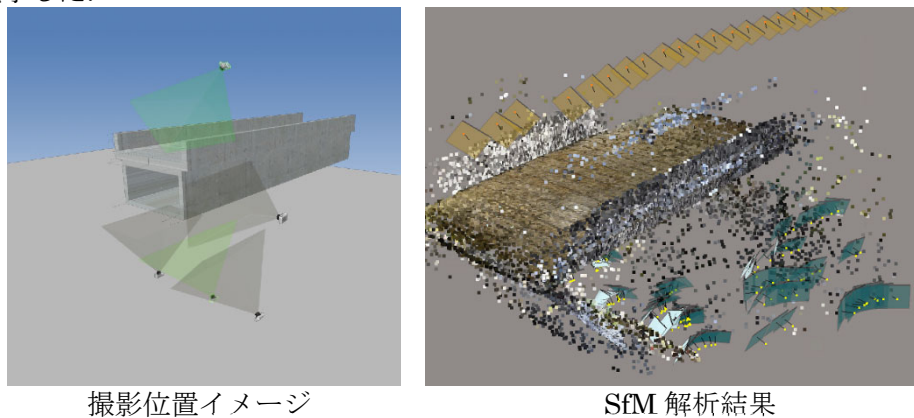


図 5.3.9 ケース 6 の解析結果

(7) ケース7：グループ②，③，④，⑧，⑨を使用

ケース6の間を補完するグループ③と斜め上から撮影したグループ⑨を付加し，SfM 解析を実施した．ケース6ではラップ不足で解析不可だったが，グループ③によりラップが確保でき，上面，側面，下面のモデル化が完了した．



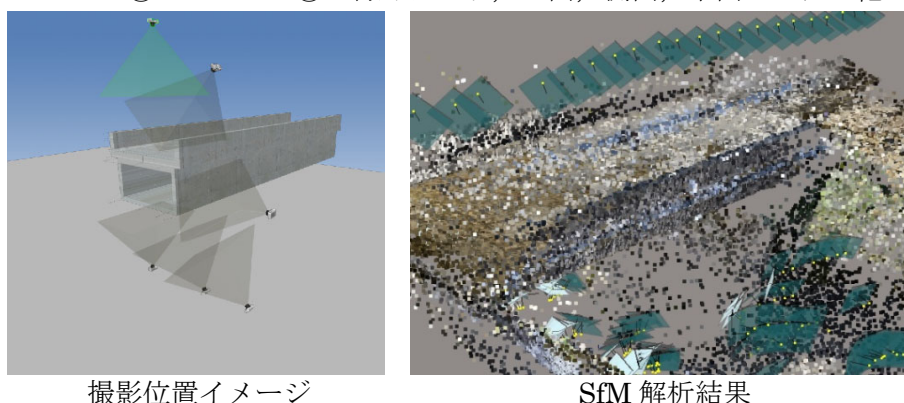
撮影位置イメージ

SfM 解析結果

図 5.3.10 ケース7の解析結果

(8) ケース8：グループ②，③，④，⑧，⑨，⑩を使用

ケース7にグループ⑩の上面撮影画像を付加し，SfM 解析を実施した．ケース5では，ラップ不足で解析不可だったグループ⑩がグループ⑨の付加により，上面，側面，下面のモデル化が可能となった．



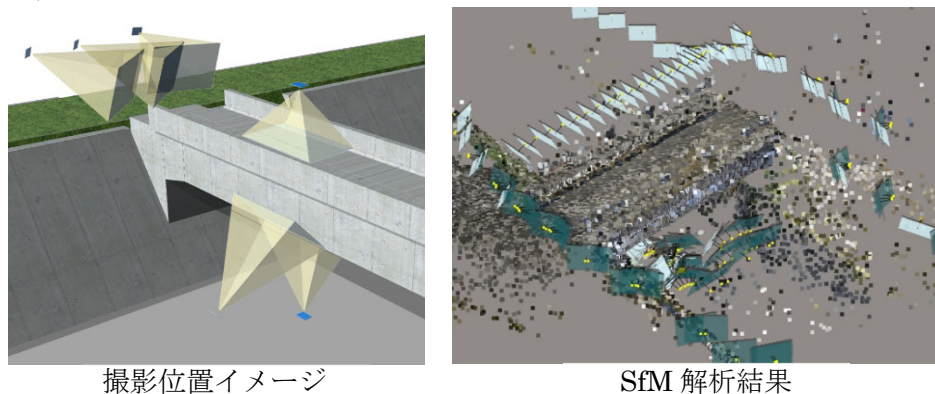
撮影位置イメージ

SfM 解析結果

図 5.3.11 ケース8の解析結果

(9) ケース9：グループ①，②，③，④，⑩を使用

ポールを使用せずに撮影可能な範囲の画像のみで SfM 解析を実施した．このとき，側面と上面及び下面とラップした画像を確保するため，両岸から橋梁を中心に撮影した画像を付加した．両岸から撮影が可能であれば，上面や斜め上の画像はなくても SfM 解析は可能だが，低解像度の画像を使用するため，品質と再現性は低くなる．



撮影位置イメージ

SfM 解析結果

図 5.3.12 ケース9の解析結果

SfM 解析により 3D モデルを作成するためには、撮影画像同士のラップが最も重要となる。(1)～(9)の解析結果より、図 5.3.13 および図 5.3.14 に示す橋梁を中心とした放射状 8 方向の撮影が最低限必要となる。更に可能な範囲で 8 方向の間を補間する撮影も加える事で、より確実に 3D モデル化が可能である。しかし、現地撮影で常にポールを使用できるわけではないため、図 5.3.14 に示すように、下面と上面を接合させるための両岸からの橋梁を中心とした画像を用いることで、手撮影のみでも 3D モデルを構築することは可能である。ただし、ポールを使用した場合に比べ、解析の難易度は高く、特に側面などは正対して撮影した画像を取得しないため、斜めからの撮影画像がマッピングとなってしまう、品質は低下すると考えられる。また桁下面へのアクセスが困難な場合は、橋面よりポールを用いて見上げ撮影を行うことで対応は可能であると考えられる。

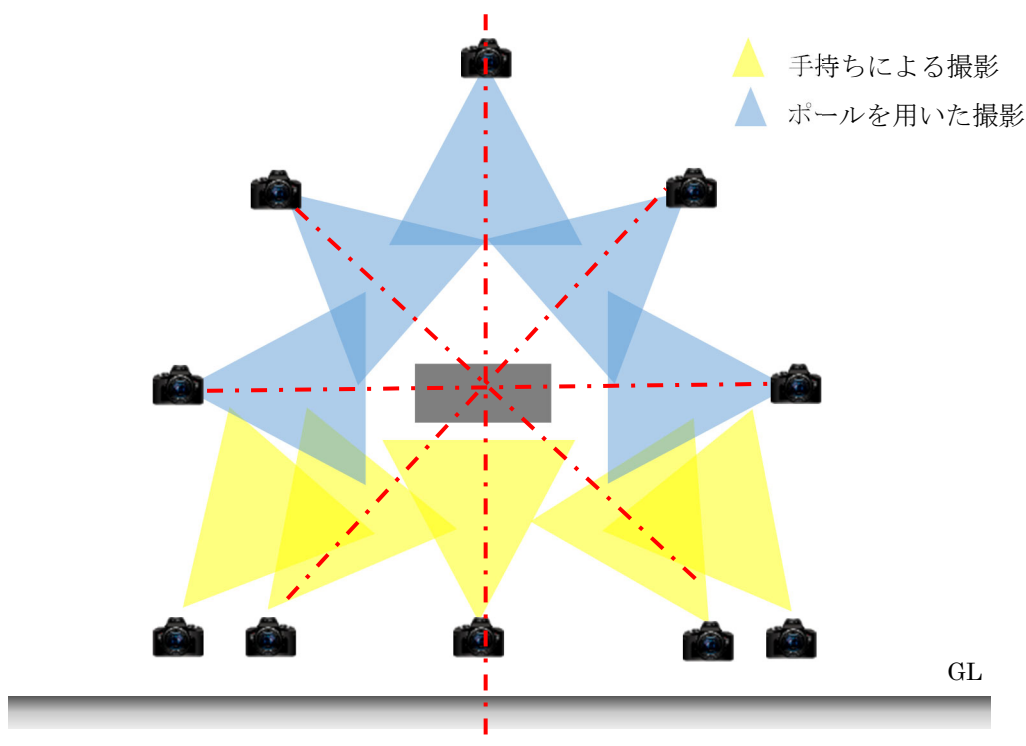


図 5.3.13 3D 化に必要な撮影位置 (断面イメージ)

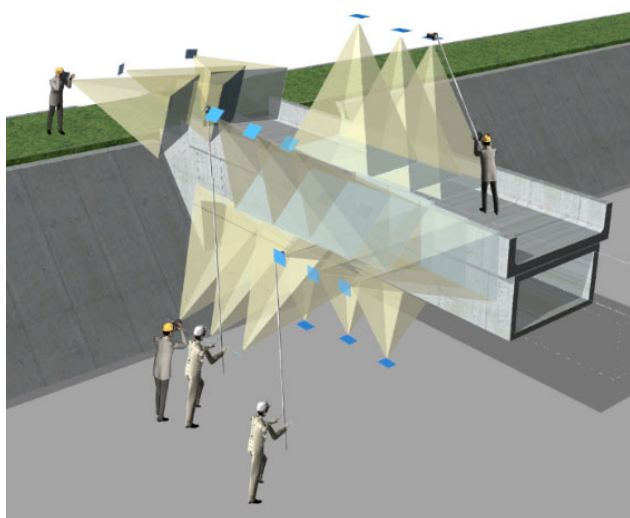


図 5.3.14 撮影位置の俯瞰イメージ

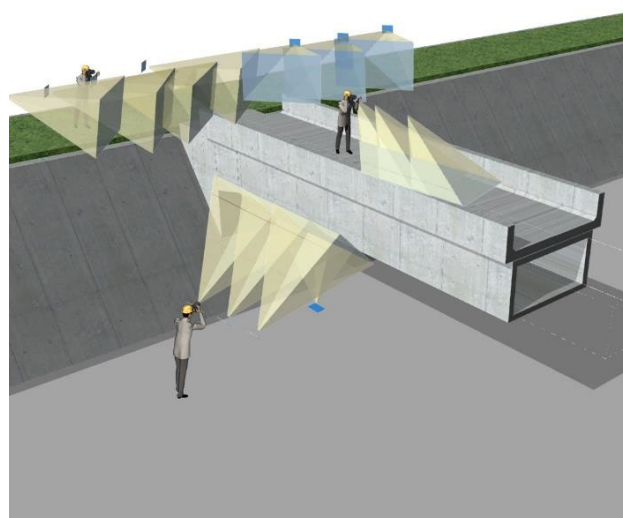


図 5.3.15 撮影位置の俯瞰イメージ  
(手撮影のみ)

### 5.3.4 損傷図の作成および定期点検結果との比較

SfM 解析で作成した 3D モデルには、撮影画像と同質の画像がマッピングされており、そこから 1.5mm/pixel の解像度でオルソ画像を生成し、損傷図を作成することが可能である。対象とする損傷は、国土交通省が橋梁定期点検要領で示すひびわれ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、抜け落ち、補修・補強材の損傷<sup>9)</sup>等で、ひびわれの位置と幅の自動判定には、[CI] を用いた「ひびわれ幅判読図化システム」を使用した。

図 5.3.16 に本検証で作成した損傷図と桁下面の定期点検結果を示す。SfM 解析に 10 時間、オルソ画像作成と損傷図作成に約 1 時間要した。なお [CI] のキャリブレーションは、現地桁側面に添付した模擬ひびわれシートを利用し実施した。定期点検の結果と比較すると、やや直線的に記録されていたひびわれも画像を元にするすることで、より詳細な形状を把握できる。また、定期点検結果からは、主桁全体的にひびわれが発生しているように見受けられるが、地覆下部の桁端部と桁中央にひびわれが集中している様子が容易に判断でき、位置精度が高い損傷図と言える。

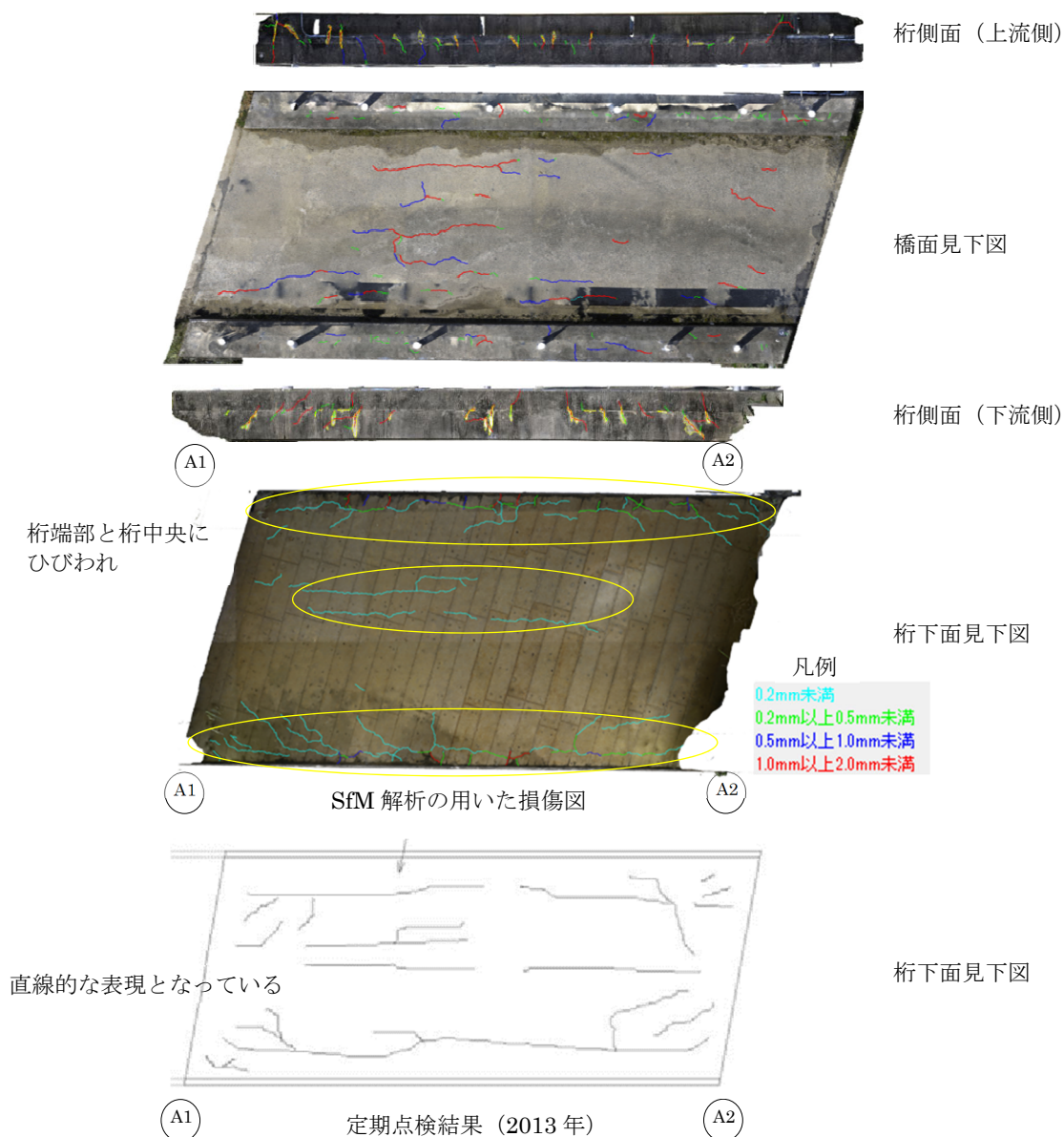


図 5.3.16 SfM 解析を用いた損傷図と定期点検結果の比較

#### 5.4 検証結果の他橋梁での適用検証

前節までに得られた結果を踏まえ、長崎県大村市にある橋梁を対象に SfM 解析による 3D 化を行い、その適用性を確認した。

##### 5.4.1 対象橋梁

撮影対象は、長崎県大村市にある高縄手橋（橋長約 7m、幅員約 20m）で、RCT 桁橋（7 主桁）に RC 床版橋が拡幅された構造である。本橋梁は、河川改修に伴う拡幅のため撤去が予定されている。



RCT 桁橋（7 主桁）



RC 床版橋（拡幅）

図 5.4.1 高縄手橋の状況

##### 5.4.2 使用機材

本検証で使用したカメラは、近距離で広範囲を高解像度で撮影する必要があるため、フルサイズのセンサを搭載した一眼レフカメラ Nikon D750 を選定した。撮影画像から 0.2mm 幅のひびわれを抽出可能な 1.0mm/pixel を目標解像度として撮影した。

##### 5.4.3 撮影方法

まず、作成した 3D モデルに座標値を与えるために、撮影前に本橋梁に 10cm 角のターゲットを 8 点設置し、それらの中心座標を測量により取得した。

撮影方法は、図 5.4.2 に示すよう前節までの検証結果を参考にし、8 方向からの撮影となるよう橋面及び側面、桁下から撮影した。本橋梁は幅が約 20m あるため、橋面及び下面においては、左右側面の形状が関連するよう複数測線を設定した。基本的には、1 人で撮影を行い、橋面では全てポールの先にカメラをセットし撮影を実施した。

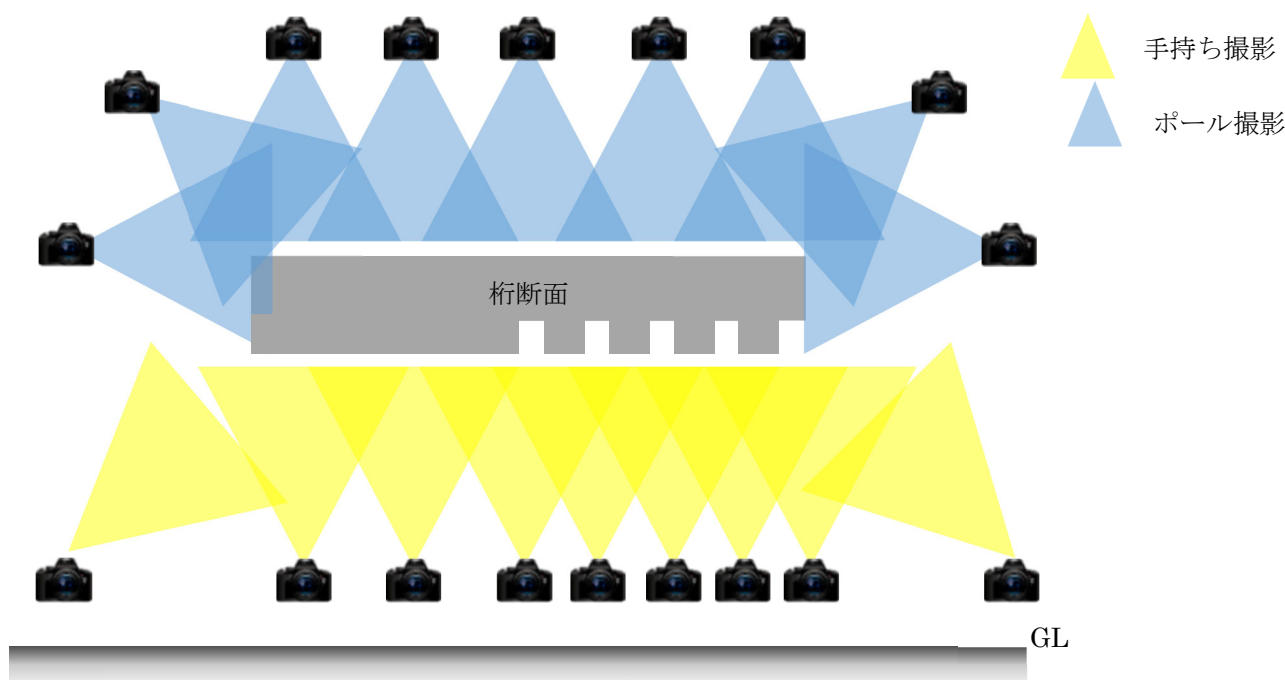


図 5.4.2 撮影計画

#### 5.4.4 データ解析・処理

撮影した画像は全 1430 枚で、容量は約 22.9GB であった。橋面では、508 枚の撮影に約 40 分要し、桁下では 922 枚の撮影に約 60 分要した。これらの画像を Context Capture を用いて SfM 解析を実施し、本橋梁の 3D モデルを作成した。

解析はステップ毎に行われ、図 5.4.3 に示す②、③の解析は最適な値が算出されるまで繰り返し実施し、完了後に④に移行する。本件では、②、③の解析に約 6 時間要し、④～⑥の解析に 18 時間要した。経験上、複雑な構造物ほど解析に多大な時間を要すが、本橋梁では比較的短時間で処理が完了したと言える。図 5.4.4 に SfM 解析の結果を示す。当 3D モデルは、T 桁も忠実に再現しているうえ、高解像度の画像がテクスチャとして貼付されており、複雑な形状を理解しながら損傷を把握することが可能である。また、図 5.4.5 に示すオルソ画像（展開画像）の作成も可能であり、損傷の位置把握及び経年比較にも有効なデータとなる。

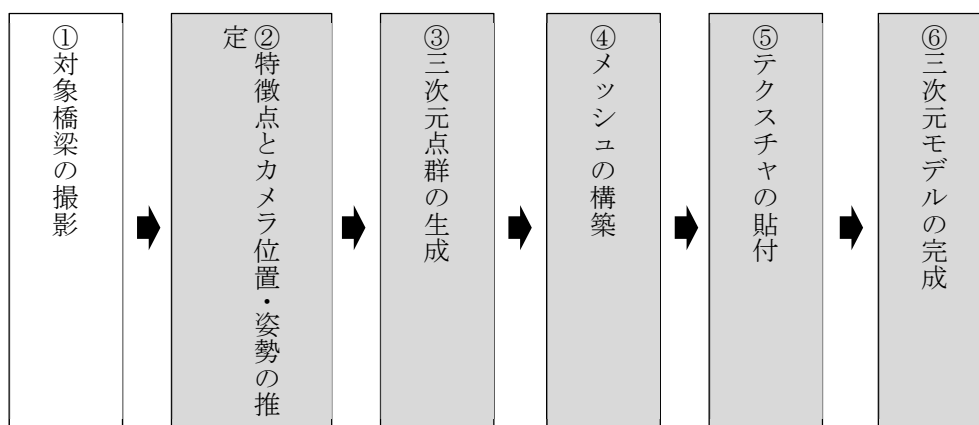
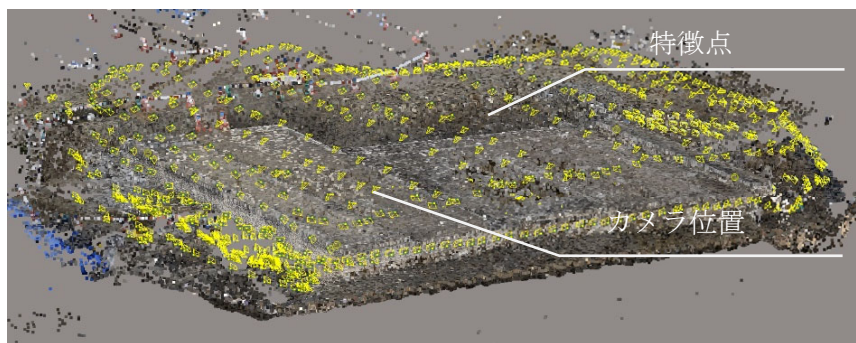


図 5.4.3 SfM 解析の流れ





特徴点の抽出とカメラ位置の復元



図 5.4.4 SfM 解析による 3D モデル



図 5.4.5 SfM 解析結果より作成した桁下面のオルソ画像

#### 5.4.5 他橋梁での適用検証のまとめ

前節で検討に使用した橋梁は、幅員が狭く桁下に空間があったが、本橋梁は橋長に対し幅員が大きいため、両側面の関連性を持たせることに苦慮すると思われたが、十分なラップ率を確保し、計画的に撮影することで、再現性の高い 3D モデルを作成できた。つまり、幅員が広い橋梁でも橋面及び桁下面を複数測線で撮影することで、手撮影のみで橋梁の 3D モデルを作成することが可能である。当 3D モデルには、0.2mm 幅以上のひびわれを判読できる高解像度のテクスチャが貼付されており、3次元形状を把握しながらの損傷調査が容易となる、

## 5.5 まとめ

近年では、空間情報を取得する光学的計測技術は日々進歩し、市販レベルの機材やソフトでも十分なデータを取得できる。しかし、それら機材やソフトの使用方法には、スキルを要するものが多く、現場レベルでは点検を行う作業員の技量により使用可能な技術も限定されてしまう。特に UAV は 2015 年 12 月に航空法が改正され国土交通省への事前申請も必要となり、安全上の観点からも誰もが容易に行える手段とは言い難い。しかし、中小橋梁においては UAV を使用せずに手撮影による画像のみで、SfM 解析を実施することは十分可能と言える。その中で使用するカメラや解析データの精度、撮影方法など本検証で実証できた事項を以下に纏める。

使用カメラは、画像から SfM 解析により 3D 化し、コンクリートのひびわれのような細かな損傷を把握するためには、ミラーレスカメラで用いられているセンササイズ程度以上の大きさを有したカメラが適している。現場での作業性を考慮するとボディが比較的小さなミラーレスカメラが推奨される。また、適切な解像度で撮影できれば、構造物の形状の再現性も高く、橋梁の図化などにも応用は可能である。

撮影方法については、橋梁を中心とした放射状 8 方向の撮影が最低限必要となる。可能な範囲で 8 方向の間を補間する撮影も加える事で、より確実に 3D モデル化が可能である。橋梁下にアクセスできない場合などは、両岸から撮影を実施しても 3D 化は可能であるが、品質は低下する。また、幅員が広い場合は桁下面および橋面にて複数測線撮影し、左右の関連性を持たせることで応用が可能である。ただし、いずれの場合においても撮影者は SfM 解析の基本情報であるラップ率等の知識は習得しておく必要がある。

参考文献

- 1) 科学技術振興機構 (JST) : インフラ維持管理・更新・マネジメント技術,  
<https://www.jst.go.jp/sip/k07.html>
- 2) 国土交通省 : 道路メンテナンス年報,  
[http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/28\\_3maint.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/28_3maint.pdf), pp.26-27, 2016.9
- 3) 国土交通省 : 無人航空機 (ドローン・ラジコン機等) の飛行ルール,  
[https://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_tk10\\_000003.html](https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html)
- 4) 国土交通省 航空局 : 無人航空機 (ドローン, ラジコン機等) の安全な飛行のためのガイドライン, <https://www.mlit.go.jp/common/001287979.pdf>, 2019
- 5) 西村正三, 原健司, 木本啓介, 松田浩 : 3D レーザ・デジタル画像を用いた軍艦島計測と損傷図作成, 写真測量とリモートセンシング, Vol.51, No.1, pp.46-53, 2012
- 6) 国土交通省道路局国道・技術課 : 橋梁定期点検要領,  
[https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3\\_1\\_6.pdf](https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3_1_6.pdf), pp.10-13, 2019.3



## 第6章 SIP 江島大橋プロジェクトにおける橋梁点検への 新技術の実用化に向けた実証試験

### 6.1 はじめに

2014年度からスタートした内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」<sup>1)</sup>(以降 SIP インフラと記す。)では、インフラの維持管理に必要な新技術が研究開発されており、これらの活用により、中長期的な維持管理・更新等に係るトータルコストの縮減や維持管理業務の効率性の向上に寄与することが期待されている。そしてこれら新技術の社会実装のため、地域の大学等を拠点とした12の地域実装支援チームが組織されている。

地域実装支援チームのひとつである鳥取大学チーム(研究責任者:黒田保教授)は、有識者、高度専門技術者、境港管理組合、鳥取県、島根県、国土交通省中国地方整備局、ならびに山陰両県の橋梁点検技術者からなる「橋梁点検への新技術の適用性評価委員会」および「江島大橋での点検方法検討委員会」を組織し、江島大橋を対象モデルとしてロボット技術を活用した橋梁点検の実証試験(江島大橋プロジェクト)を実施した<sup>2)</sup>。筆者は江島大橋プロジェクトに研究の一環として参画し、第3章で検証した撮影画像と解像度の関係性や第4章で検証した UAV-SfM の大型橋梁への点検適用時の課題などの研究成果を活かし、新技術の橋梁点検への適用性の実証と社会実装へ向けた基礎資料作成のため、実証試験や精度確認試験の計画立案と実施、現地点検の管理、成果の取り纏めを行った。

第6章では、江島大橋プロジェクトの成果を示すとともに、当プロジェクトを通じて実証した本研究の成果についても併せて示す。

### 6.2 実証試験の概要

#### 6.2.1 目的

江島大橋主橋梁部(渡海部)において実務に近い体制でまとまった数量の橋梁点検を実施することによって、ロボット技術が橋梁点検の実務に活用できることを実証するとともに、ロボット技術開発者においては実用化のための課題抽出、橋梁管理者ならびに橋梁技術者においてはロボット技術を橋梁点検に活用するための体制整備と点検業務として発注するために必要な特記仕様書や積算資料等を作成する上での基礎資料を整備することが江島大橋プロジェクトの目的である。

また、撮影解像度と視認可能なひびわれ幅の関係性など第5章までに得られた成果や課題、知見をプロジェクトに反映させるとともに、新たな課題抽出と解決そしてプロジェクトを通して橋梁点検への画像の適用性検証等、本研究の実証も第6章の目的とする。



図 6.2.1 江島大橋全景

### 6.2.2 江島大橋の概要と定期点検における問題点

#### (1) 江島大橋の概要

江島大橋は鳥取県境港市渡町と島根県松江市八束町江島の間にかかる大型橋梁で、平成16年に供用を開始した。この橋梁は中国地方整備局境港湾・空港整備事務所が港湾構造物として建設し、その後、境港管理組合（鳥取県と島根県が設立する一部事務組合）に管理が移管された。

江島大橋の全長は 1446.2m で主橋梁部（660m）、島根県側取付高架橋部（351.2m）及び鳥取県側取付高架橋部（435.0m）で構成されており、中海をまたぐ主橋梁部は中央径間 250m の 5 径間連続 PC 有ヒンジラーメン箱桁橋で、この形式の PC ラーメン橋としては中央径間の長さが東洋一である。また、江島大橋の特徴として、箱桁の高さが最大 15m と高いこと、橋梁の勾配が最大 6.1% と大きいこと、海面からの高さが最大 44.7m と高いことがあげられる。江島大橋の 1 日当たりの交通量は約 15,000 台で、江島大橋は鳥取県と島根県を結ぶ主要な交通路となっている。図 6.2.2 に江島大橋一般図を示す。

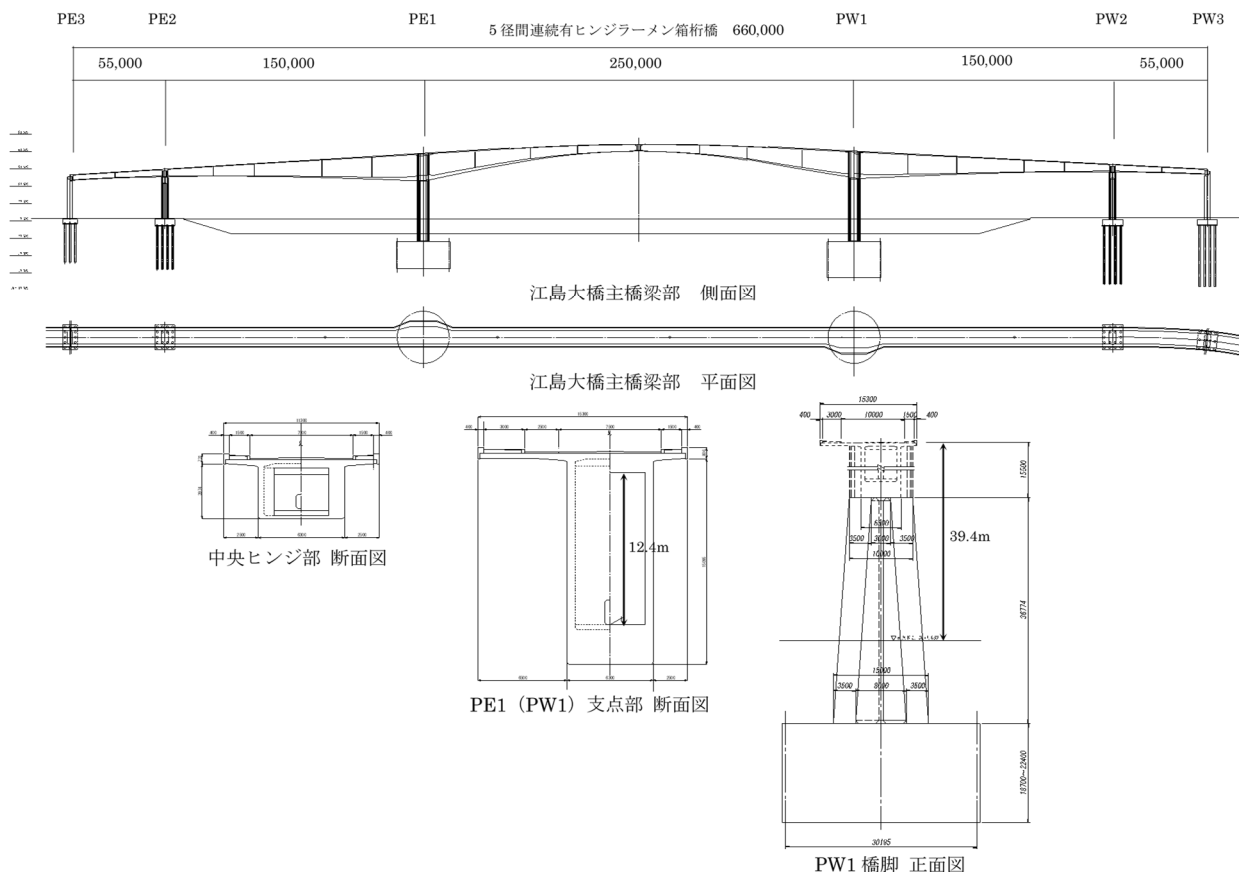


図 6.2.2 江島大橋一般図

## (2) 江島大橋の定期点検における問題点

江島大橋主橋梁部を道路法に定められた人による近接目視で定期点検をしようとする、大半が渡海部であり、兩岸の陸上部も上部工の位置が地上から 25m と高いことから上部工外面については、橋梁点検車による方法、ロープアクセスによる方法、移動式吊足場による方法が考えられ、上部工箱桁内部については足場による方法、橋脚については足場による方法が考えられる。しかし、箱桁の高さ（最大 15m）や橋梁の勾配（最大 6.1%）、海面からの高さ（最大 44.7m）といった構造的制約条件と約 15,000 台/日の交通量があり仮に片側通行規制した場合に発生が予測される重大な渋滞による社会的損失から橋梁点検車を用いた人による近接目視点検が困難であり、多額の費用が必要となるロープアクセス、移動式吊足場や橋脚周りの足場などの方法に頼らざるを得ない。このような事情から、江島大橋は供用を開始してから約 14 年経過しているがこれまでの定期点検ではアクセスしにくいところは遠望目視のみによる点検しか実施されていない。

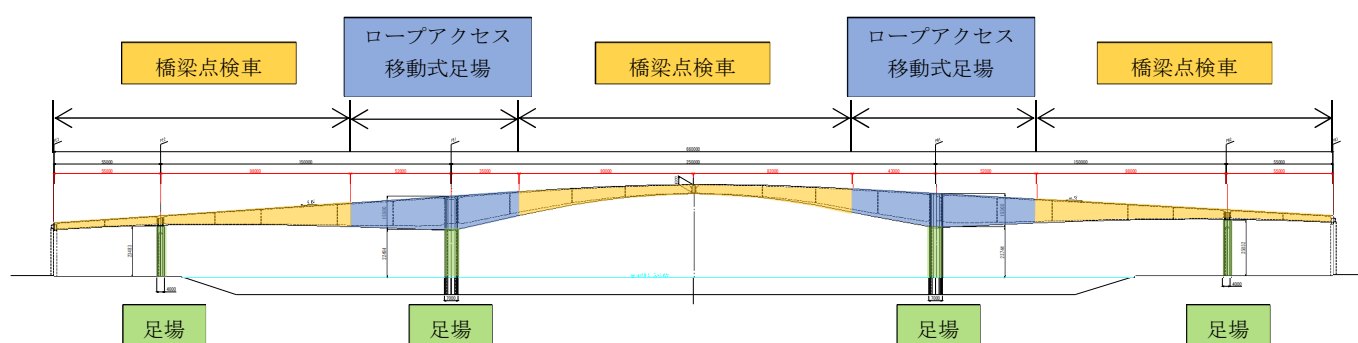


図 6.2.3 人による近接目視点検を実施する場合の近接方法

## (3) 橋梁点検ロボット技術の現状と課題

SIP インフラ等では、人による近接目視点検が困難な橋梁部位に近接して点検に必要な情報を取得する橋梁点検用ロボットの開発が進んでいる。その中で実用化レベルに近づいた技術については全国各地で橋梁管理者である地方自治体や橋梁点検技術者の協力によって実証試験が行われているが、その多くは、点検ロボットを近くで見て貰うことを主目的にしていることから、好条件下で行われることが多い。多くのロボット技術の開発が実用化レベルに近づいていることを踏まえ、ロボット技術を橋梁点検の実務に活用するためには、ロボット技術適用時の制約条件や実状に則した点検期間や点検費用、そして点検業務発注時の仕様書、積算基準などを含めた橋梁点検の体制など多くのことを確認する必要がある。さらには、安全性の確認が必要であり、いかなる状況においても第三者に対して危害を及ぼさないことを確認する必要がある。

### 6.3 実証試験計画

#### 6.3.1 実証試験範囲

江島大橋主橋梁部（渡海部）を複数のロボット技術の組み合わせによる点検の実証，ならびに従来方法では難度が高い部位の点検へのロボット技術の活用による効率化という2つの視点から，図2-1に示す江島大橋渡海部の中央ヒンジから境港側の橋脚PW1までを実証試験の対象範囲と設定した。

ロボット技術の特長を生かして調査対象範囲全体をカバーするため調査対象となる部位を以下の5つに分類した。

【部位1】上部工内面（箱桁内部）

【部位2】上部工外面のうち中央ヒンジに近い部分（桁高は小さいが海面からの距離が44.7mと高く橋脚からの距離も離れている）

【部位3】上部工外面のうち橋脚に近い部分（桁高が大きい）

【部位4】非常駐車帯張出床版下面

【部位5】橋脚

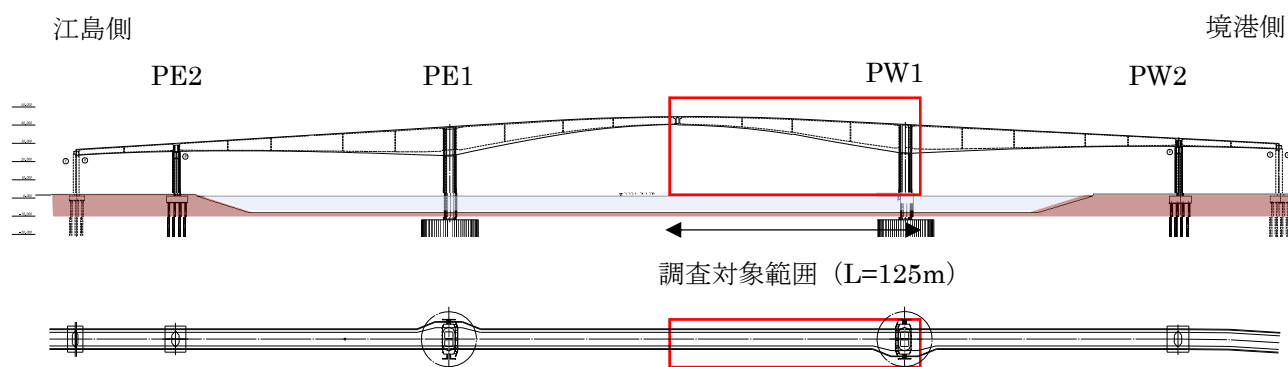


図 6.3.1 実証試験対象範囲

#### 6.3.2 ロボット技術の選定と適用範囲

SIP インフラ等で開発されすでに実用化段階に到達している橋梁点検ロボット技術の中から，上記の5つの部位に対する適用性を評価したうえで候補技術を選定した。このとき，ロボット技術には第4章で抽出された課題を踏まえ，オペレータの技量に依存せず安全に対象に近接すること，安定的に均質なデータが取得できること（例えば画像撮影ロボットであれば一定の離隔を常に保ち，同じ解像度の画像を撮影する等），第三者被害を与えない措置が可能であること，そしてそれらを満たしたうえで損傷評価に資する品質のデータが取得できることが要求される。

各部位に対し選定したロボット技術を以下に示す。

【部位1】上部工内面（箱桁内部）

箱桁内部は，PC箱桁端部（PE3・PW3）の人孔から点検資機材を搬入することはできるが，内空断面の高さは橋脚に近づくと大きくなり（最大高さ12.4m）下面の勾配も変化が著しい。

そこでポールの先端にカメラを設置した「ポール型橋梁点検ロボットカメラ」を選定した。ポールの最大高さは11.5mで足場の設置は不要となり，暗所でもロボットカメラに設置したLED照明で画像撮影できるため別途照明設備を箱桁内に搬入する必要もない。三脚によりポールを設置し，一定範囲を自動的にグリッド撮影するため，安全に均質なデータ取得が可能である。



### 【部位2】上部工外面（桁高10m以下）

上部工外面のうち中央ヒンジに近い桁高の小さい部位については、歩道上を走行する車両型橋梁点検支援ロボットと UAV を用いた飛行型ロボットが候補として考えられる。

車両型橋梁点検支援ロボットの場合、江島大橋の歩道の幅が1.05mと比較的狭いこと、ロボットの懸垂ロッドの長さから点検可能範囲に限界があることなどの制約条件がある。ロボット開発メーカーとの協議の結果、非常駐車帯部分の防護柵を一時的に撤去することでロボットの歩道への乗入れは可能であり、ロッド延長の改良により桁高10.0mまでの計測への対応は可能であることが分かった。

UAVを用いた飛行型ロボットについては操縦者の足場の確保が必要であり、橋脚付近に足場を確保した場合、中央ヒンジまでの距離が100m以上となり目視操作での位置制御はリスクが高く、中央支間の下部は主航路のため足場の確保が困難である。UAVについては、操縦者の足場確保、位置制御などの制約条件がある。

上記2つのロボットの制約条件とその解決策を比較検討し、現実性が高く安定的にデータ取得が可能な車両型橋梁点検ロボット「橋梁点検支援ロボット『見る・診る』」を選定した。ロッドを桁側面に平行に配置が可能であり、一定の離隔を保ち画像を撮影できる。

### 【部位3】上部工外面のうち橋脚に近い部分（桁高10m以上）

UAVを使った飛行型ロボットであれば、橋脚付近に足場を設置してUAVの離発着地点とUAV操縦者の足場を確保することで橋脚に近く桁高が10m以上となる部分の点検は可能となる。

飛行型ロボットで近接画像撮影をする場合、被写体とカメラとの距離を一定に保つために位置制御機能が必要になる。位置制御の方法としては、熟練したUAV操縦者のスキルによる方法、車輪などを壁面に押し付けて距離を保つ方法、レーザやカメラなどのセンサを用いて位置制御する方法などがあるが、第4章の結果より、熟練したUAV操縦者のスキルによる方法は、安定的に膨大な面積の撮影は困難でありリスクも高いことから除外される。そこで、多くの飛行型ロボットのうち、車輪によって確実に被写体との距離を制御でき、レーザレンジファインダによる位置制御機能も有している「二輪型マルチコプタ」を選定した。「二輪型マルチコプタ」は、有線給電のため逸走・暴走時の飛行範囲を制限することができ、安全面においても有効である。

### 【部位4】非常駐車帯張出床版下面

車両型橋梁点検支援ロボットと UAV を用いた飛行型ロボットが候補として考えられる。

防護柵の内側に設置されたガラス板の高さが1.4~1.9mありアームの張り出しが困難だが、路面にパレットを設置してかさ上げし、ロボットを載せることで対応が可能である。

UAVを使った飛行型ロボットでも非常駐車帯張出床版下面の点検を行うことは可能だが、張出床版の下面に2.0m間隔で縦リブがあり構造が複雑であることから、安全に安定した計測が期待できる「橋梁点検支援ロボット『見る・診る』」を選定した。

### 【部位5】橋脚

橋脚(PW1)は海中に設置された高橋脚で、海面からの高さが約39mあることから飛行型ロボットが第一候補となる。【部位3】の選定理由と同等の理由で、「二輪型マルチコプタ」を選定した。

### 【打音検査ロボット】

橋梁点検では、打音検査による「浮き」等の把握が必要であり、打音検査ロボットとして開発されているものの中から、完成度が高く実用化レベルに近い「打音機能付飛行ロボット」を選定した。なお、江島

大橋実証試験の実施時期においては、水平面に対する上向き打音検査装置は完成していたが、鉛直面に対する横向きの打音検査装置は開発途中であったことから上部工の張出床版を実証試験対象範囲とした。

選定した4つのロボット技術を用途・目的、近接機構、制御方法で分類した表を表6.3.1に示し、次ページよりロボット技術ごとに、その特徴などを示す。

表 6.3.1 ロボット技術の選定と実証試験対象部位

	[I]	[II]	[III]	[IV]
ロボット 技術名称	橋梁点検ロボットカメラ <sup>3)</sup>	橋梁点検支援ロボット 『見る・診る』	二輪型マルチコプタ <sup>4)</sup>	打音機能付飛行ロボット <sup>5)</sup>
分類① (用途・目的)	画像撮影ロボット	画像撮影ロボット	画像撮影ロボット	打音・触診ロボット
分類② (近接機構)	ポール型ロボット	車両型ロボット	飛行型ロボット	飛行型ロボット
分類③ (制御方法)	遠隔操作型ロボット	遠隔操作型ロボット	遠隔操作型ロボット	遠隔操作型ロボット
開発チーム	三井住友建設 日立産業制御ソリューションズ	ジビル調査設計	富士通	新日本非破壊検査
実証試験 対象部位	上部工内面 (箱桁内部)	上部工外面 (桁高 10m以下) 非常駐車帯張出床版下 面	上部工外面 (桁高 10m以上) 橋脚	上部工張出床版下面 (打音検査)

[I] 橋梁点検ロボットカメラ NETIS : KT-160016-A<sup>6)</sup>

【開発者】

三井住友建設株式会社

株式会社日立産業制御ソリューションズ

【技術概要】

高所型または懸垂型ロボットカメラにより橋梁（コンクリート橋）の近接画像を自動撮影し、画像からひびわれなどの変状を識別し損傷図を作成する技術である。カメラおよびポールユニットのロボット一式は、軽量で可搬性があり設置も容易である。ロボットカメラの向き、倍率（光学30倍ズーム）設定等は、手元の端末（タブレットPC）で遠隔操作が可能であり、内蔵されたソフトウェアで撮影画像上にデジタルクラックスケールやL型スケールを表示し、ひびわれ幅などの損傷が判別できる。

【機材イメージ】

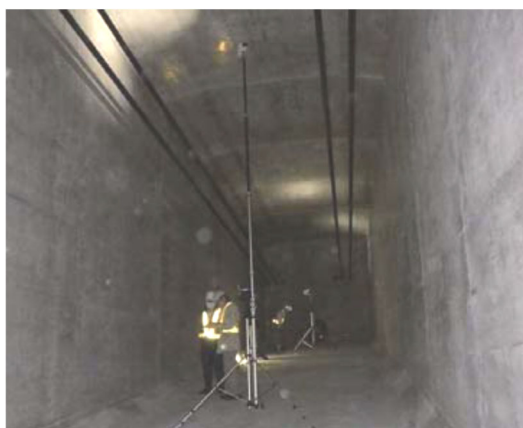


図 6.3.2 機材設置状況

【実証試験範囲】

- ①中央ヒンジ～PW1 径間のうちの柱頭部～中間横桁間および中央ヒンジ～中間横桁間の桁内のコンクリート面（上床版下面、ウェブ内面、下床版上面、上床版リブ、横桁）約 1800 m<sup>2</sup>
- ②PW2 橋脚の支承（2基）

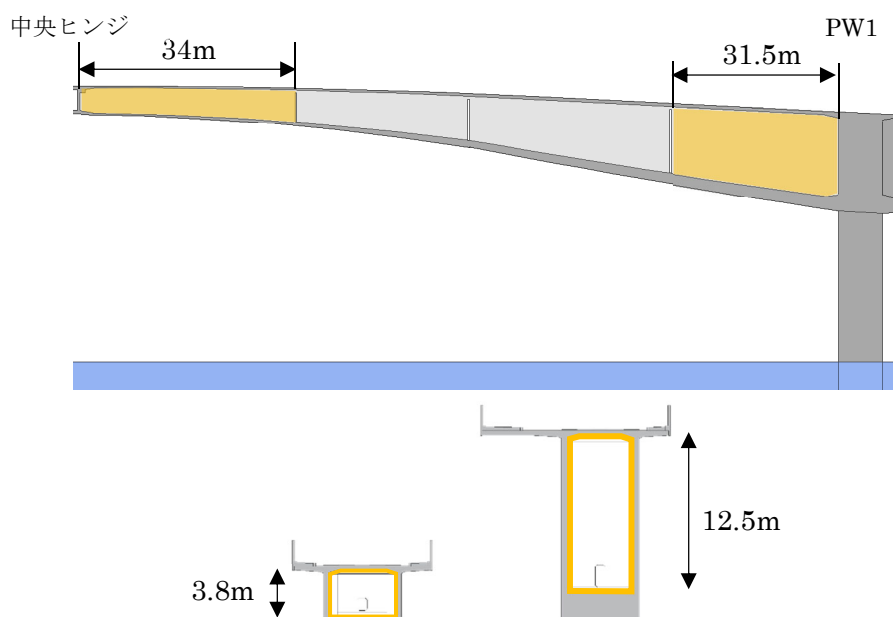


図 6.3.3 実証試験範囲

〔Ⅱ〕 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』 NETIS : KK-110063-VR<sup>7)</sup>

【開発者】

ジビル調査設計株式会社

【技術概要】

橋面歩道上の操作台車から鉛直ロッドを介して水平アームユニットをつりさげ、アームユニットに搭載したカメラを遠隔操作して近接画像を撮影する技術である。

【機材イメージ】



図 6.3.4 橋上の台車設置状況

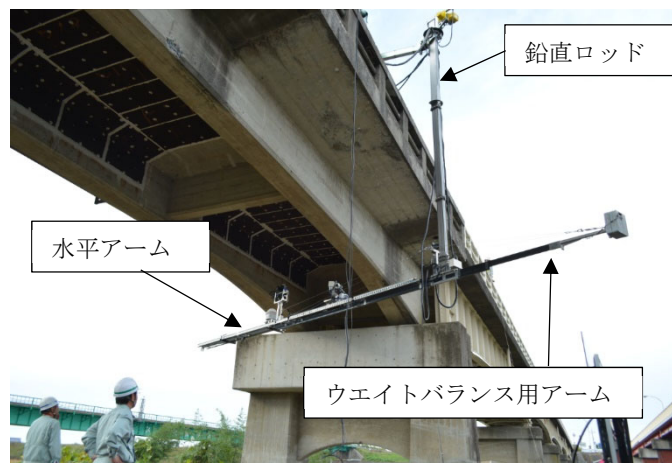


図 6.3.5 撮影状況

【実証試験範囲】

① 上部工一般部

張出床版下面 (200 m<sup>2</sup>) 箱桁側面 (480 m<sup>2</sup>) 箱桁下面 (250 m<sup>2</sup>)

② 非常駐車帯部

張出床版下面 (110 m<sup>2</sup>)

中央ヒンジ

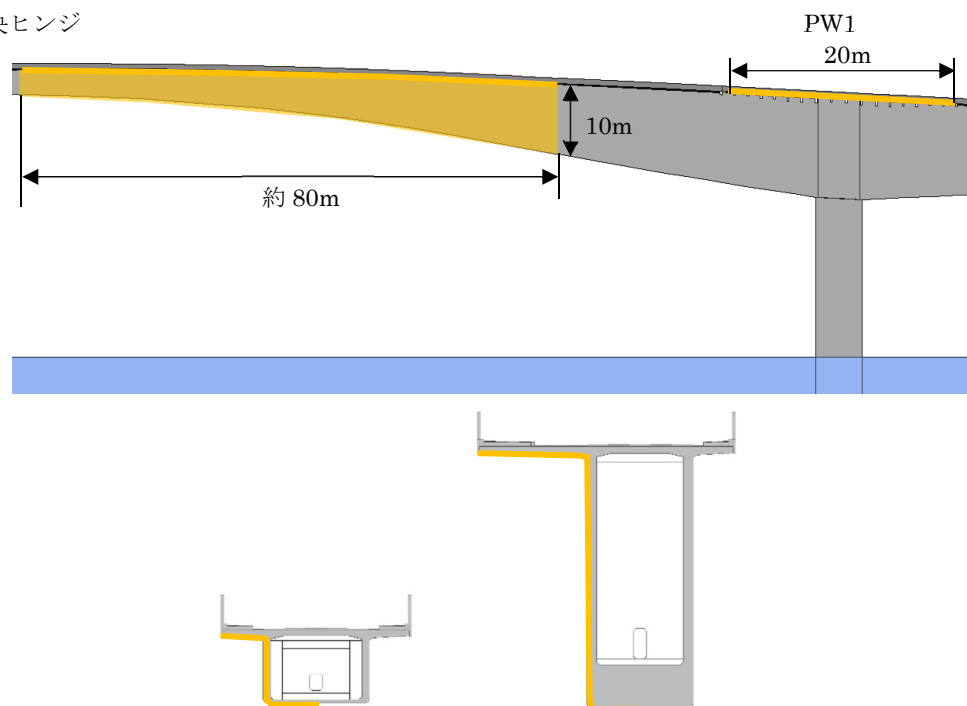


図 6.3.6 実証試験範囲

### [Ⅲ] 二輪型マルチコプタ

#### 【開発者】

富士通株式会社

#### 【技術概要】

人がアクセスしにくい箇所へ車輪付きのマルチコプタが遠隔操作により接近・接触し、搭載されたカメラで連続的に近接画像を撮影する技術である。

#### 【機材イメージ】



図 6.3.7 撮影状況

#### 【実証試験範囲】

①PW1 橋脚 (900 m<sup>2</sup>)

②上部工一般部

箱桁側面 (610 m<sup>2</sup>) 箱桁下面 (315 m<sup>2</sup>)

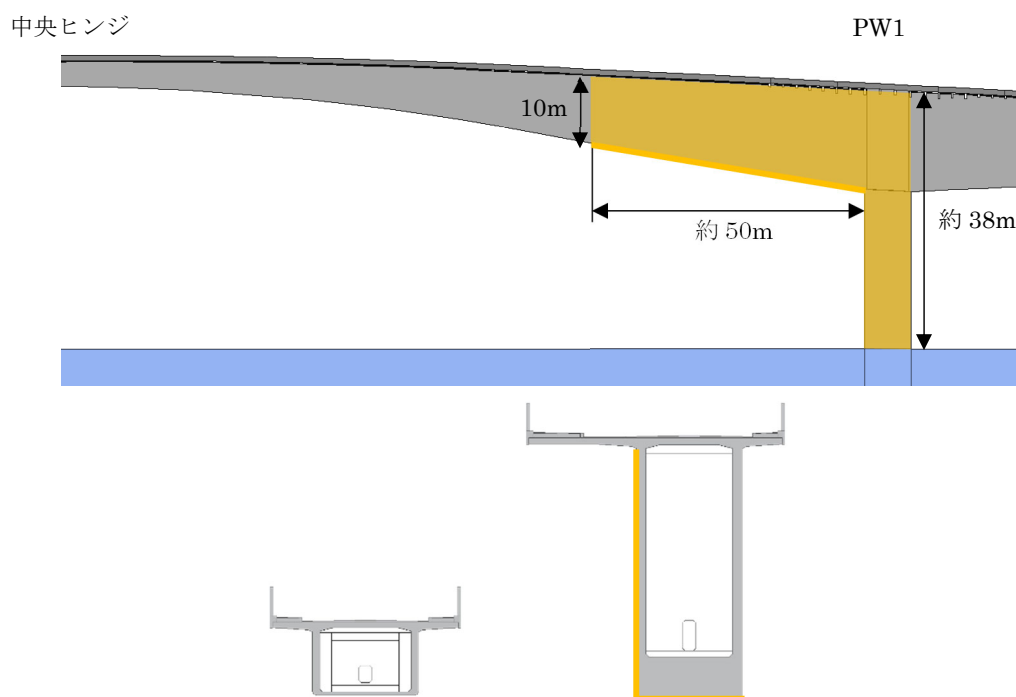


図 6.3.8 実証試験範囲

[IV] 打音機能付飛行ロボット NETIS : QS-180005-VR<sup>®</sup>

【開発者】

新日本非破壊検査

【技術概要】

有線式のマルチコプタ上部に車輪駆動機構と点検機構を搭載。マルチコプタの飛行機能で橋梁の床版など人が容易に近づけない部位に接近し、車輪を押し当てて走行しながら、打音検査を実施する有線式の飛行型点検ロボットである。

【機材イメージ】



図 6.3.9 打音点検状況

【実証試験範囲】

中央ヒンジ～PW1 間の南側張出床版下面 (250 m<sup>2</sup>) ※非常駐車帯は除く

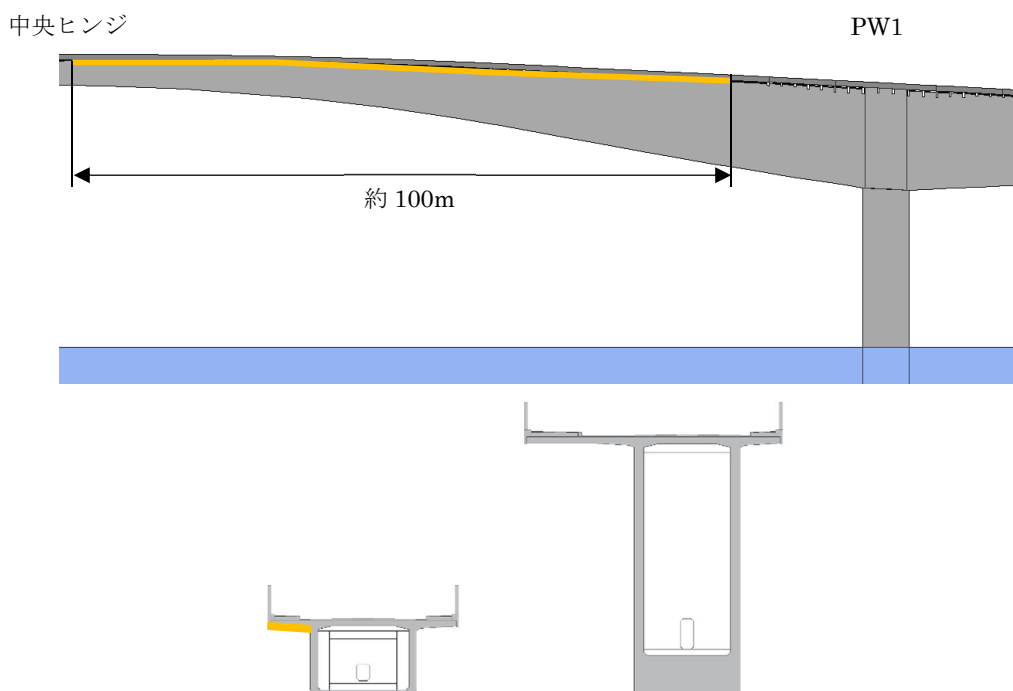


図 6.3.10 実証試験範囲

### 6.3.3 ロボット技術の制約条件の確認

橋梁点検にロボット技術を活用するためには、その使用に際して環境条件や気候・天候の制約を受ける場合があり、計画段階で確認が必要である。

- 【環境条件】
- ・ロボットの搬入・設置に関する制約
  - ・ロボットの近接に関する制約
  - ・騒音
  - ・電波障害
  - ・飛行制限
  - ・桁下空間の障害物の有無

- 【気候・天候】
- ・雨天
  - ・風向，風速

特に UAV の使用時は、環境条件や天候の制約を受けやすく、十分な検討が必要である。第4章の実証試験では撮影対象近辺での UAV 操縦者の確保が困難で、約 300m も離れた位置から視認性が悪い状態で UAV を操縦しており、データの品質・安全面の両面においてリスクの高いものであった。そこで、本実証試験では、UAV 飛行範囲の近傍に安定した操縦者の足場を確保することとした。

操縦者の足場として船舶を検討したが、揺動した状態で常に機体を目視することは困難であり、波高・航跡波の影響が大きいため採用はできない。次に海上への足場仮設を検討したが、江島大橋が交差する中海は国際船舶の航路となっており、点検のために仮設足場を長期間設置する許可を得るのは困難なため採用はできない。そこで、安定性があり移動が可能な台船を操縦者の足場として利用することとした。台船は船舶なので係留基地で人と計測機器類を載せたあと現地に曳航することができ、計測場所に応じて比較的自由に係留場所を移動させることが可能である。

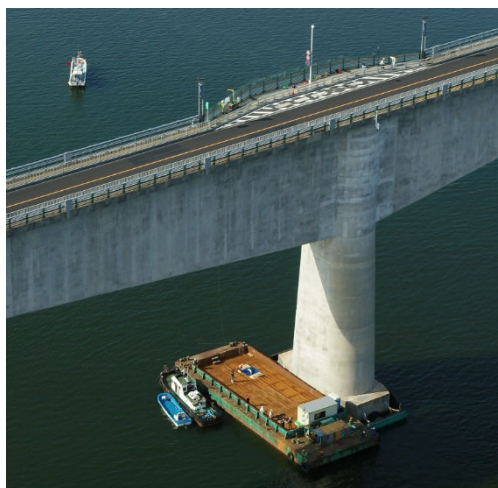


図 6.3.11 台船の設置状況

UAV を橋梁点検に適用する場合の制約条件の一つに「風の影響」も挙げられる。UAV は強い風を受けると位置と姿勢の制御が難しくなる。また、橋軸に直角方向の風が卓越している場合は UAV の安定した飛行が難しくなる。そのため UAV の適用にあたっては年間を通じた風の強さならびに風向を調査したうえで点検時期を選定する必要がある。本実証試験では、境港管理組合から提供して頂いた境港気象データ<sup>9)</sup>をもとに下記に示す検討を行った。

表 6.3.2 および図 6.3.12 は 2015 年の風速データから風速 3m/s 以上の風の出現率を月ごとに示したものである。4 月～10 月では 6m/s 以上の風速の出現率は最大で 6% である。

表 6.3.2 風速ごとの出現割合 (2015 年)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
3m/s以上の確率	65%	71%	35%	27%	16%	27%	39%	6%	27%	32%
4m/s以上の確率	55%	46%	23%	10%	3%	10%	23%	6%	7%	13%
5m/s以上の確率	45%	36%	16%	7%	0%	7%	13%	6%	3%	3%
6m/s以上の確率	26%	29%	13%	0%	0%	3%	6%	3%	0%	0%
7m/s以上の確率	16%	18%	6%	0%	0%	3%	6%	0%	0%	0%

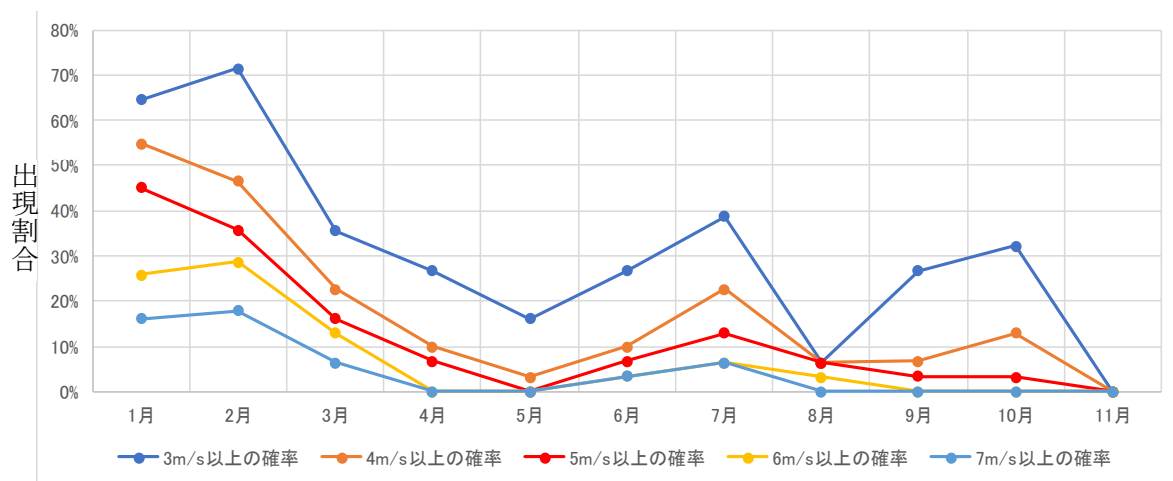
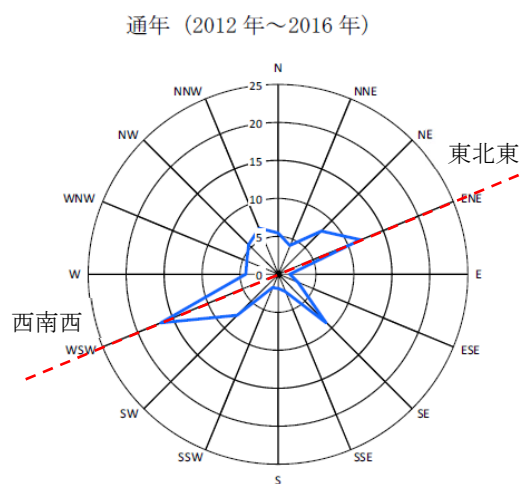


図 6.3.12 風速ごとの出現状況 (2015 年)

図 6.3.13 は江島大橋付近の地図を示したものであり、江島大橋の橋軸方向は西南西－東北東の方角にある。図 6.3.14 はこの地域の「通年の日最多風向」を示したものであり、年間を通して西南西の風と東北東の風が卓越（ただし冬季の低気圧や夏期の台風は対象外）しており、米子空港の滑走路も年間を通じた風向きを考慮して設計されたものと推測される。



図 6.3.13 江島大橋，米子空港の滑走路の方向



西南西と東北東が卓越（橋軸方向）  
図 6.3.14 通年の日最多風向



図 6.3.15 は各季節の日最多風向を示したものであり、春季（3月、4月、5月）ならびに夏季（6月、7月、8月）は橋軸方向の風が頻出していることが分かる。

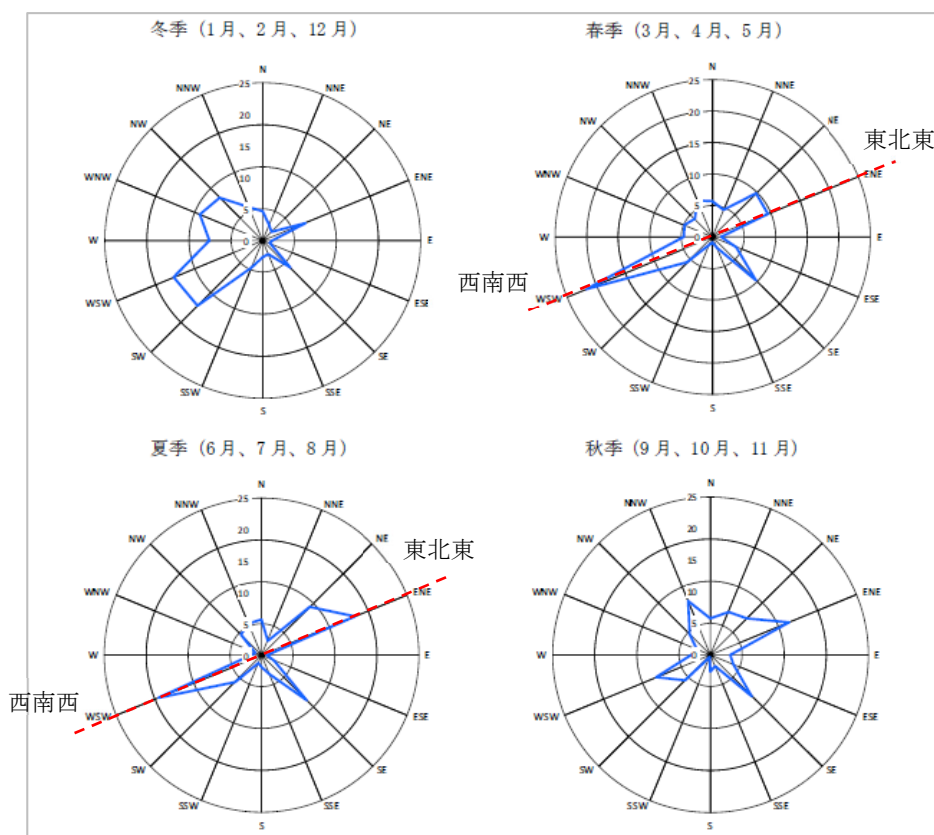


図 6.3.15 各季節の日最多風向

風向きと風速の両方を考慮した場合、4月から8月が UAV を使用するのに適した時期ということが出来る。この期間においては風速 6m/秒の出現率が 10%未満なので、風速という制約条件から言えば 90%以上の高い稼働率が期待できる。さらに、一日の中でも早朝から午前中は風速が小さいことが分かっており、作業時間を通常よりも早い時間に設定することによってより高い稼働率が期待できる。

#### 6.3.4 実証試験工程

風向や風速の出現状況に加え梅雨明け時期等を考慮し、7月初旬から8月にかけて現地点検を行うよう工程調整を行った。なお、夏季の場合、気温が上昇する午後は上昇気流の発生により大気が不安定となり、雷雨などの発生も予測されることから、実証試験は大気が安定している早朝から午前中、あるいは午後の早い時間帯までの間に実施することとした。

### 6.3.5 江島大橋プロジェクトの位置付けと実証試験実施体制

本実証試験は、ロボット技術が橋梁点検に適用できるレベルに達しているかを確認するとともに、橋梁点検に適用するために何が足りないかについてロボット技術の開発者とロボット技術のユーザが共通認識を持つことを目的の一つとしていることから、鳥取県測量設計業協会から推薦して頂いた鳥取県内の建設コンサルタント5社と開発チームとがペアとなり実証試験を実施した。これにより地元コンサルタントにおいて新技術（ロボット技術）を活用して点検技術者の育成を図ることとした。

実証試験の実施体制を図 6.3.16 に示す。

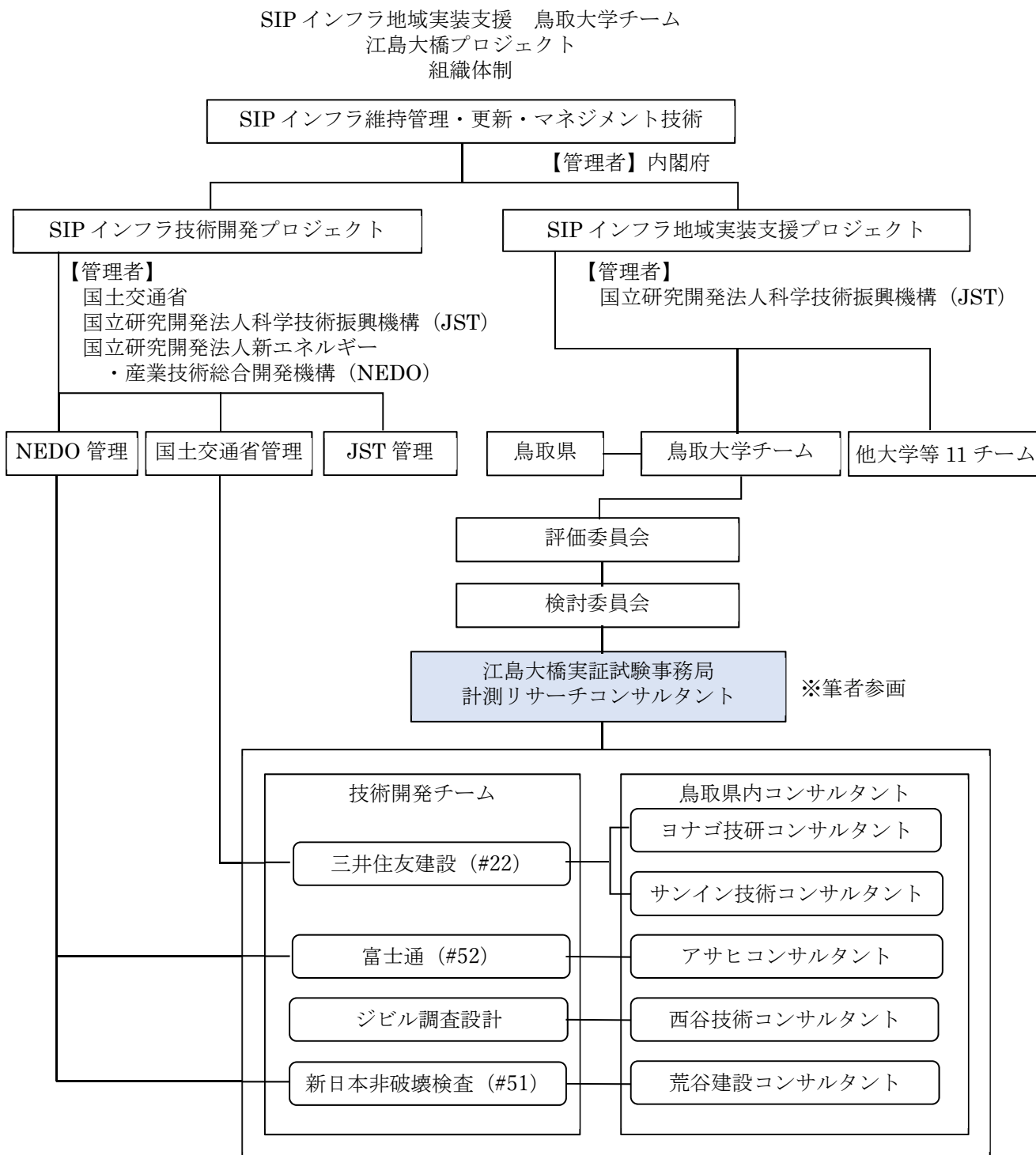


図 6.3.16 江島大橋プロジェクトの位置づけと実証試験実施体制図

## 6.4 ロボット技術の精度確認試験

### 6.4.1 画像撮影ロボットの精度確認試験

#### (1) 精度確認試験の概要

##### 1) 目的

画像撮影ロボットの以下の計測性能の確認を目的として、江島大橋の点検業務と同じ条件で画像撮影ロボットの精度確認試験を実施した。

- ① 計測可能なひびわれ幅および計測精度
- ② 損傷の大きさおよび位置の計測精度
- ③ 色の識別性能

ロボットで取得した画像データの精度を確認するには、画像撮影の対象部位を人による近接目視で確認する必要があるが、実証試験の対象となる江島大橋主橋梁部は人による近接目視点検ができない。そこで、人による近接目視が可能な松江市側取付高架橋部のうち図 6.4.1 に示す高所作業車で箱桁下面に近接できる区間（PE10 と PE11 の間）の PE10 橋脚を精度確認試験の実施場所として選定した。

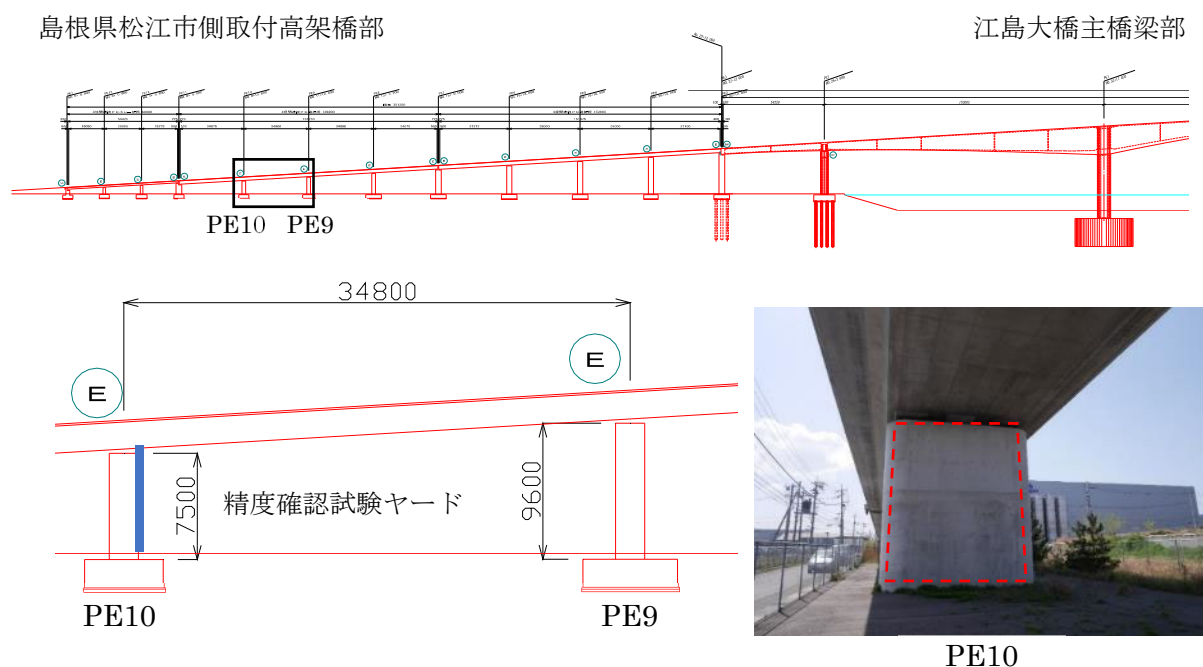


図 6.4.1 精度確認試験ヤード

なお、第 3 章で実施した検証のノウハウを踏まえ、この精度確認試験の成果を導くことでロボット技術の精度確認に加え、撮影解像度と視認可能なひびわれ幅の関係性などの研究成果の実証にも繋がると考える。

##### 2) 評価方法

精度確認試験の実施場所を事前調査したところ 0.1mm 幅のひびわれは見受けられるものの 0.2mm 幅以上のひびわれがなく、錆汁や遊離石灰などの損傷も見られないため、計測性能を確認するために必要な損傷画像を他のコンクリート構造物を対象に高解像度撮影し、20cm 角のシートに印刷して精度確認試験ヤードに貼付し損傷の代用とした。第 3 章の検証では、模擬ひびわれシートの模擬ひびわれを主に使用して検証したが、直線的な線は画像上で視認性が向上し、同じ解像度であってもより細かいひびわれまで視認できることが分かっているため、実際のコンクリート構造物に生じたひびわれを撮影した画像を

評価対象とした。

各開発チームは精度確認試験ヤードにて、実証試験と同様の仕様および手順で計測作業を実施した。各開発チームは、事務局が指定した損傷部の計測結果を提出し、事務局が事前準備で計測した「真値」と比較して精度を確認した。なお、対象とするひびわれ幅は0.1mm以上と事前に通知した。

### 3) 評価対象

2種類計10枚の「ひびわれ画像シート」、「模擬ひびわれシート」、「標定用ターゲット」を精度確認試験ヤードに貼り付けて評価対象とした。

#### 【ひびわれ画像シート】

0.1mmから2.0mm前後のひびわれを有する「ひびわれ画像シート」を10枚準備した。比較的表面の汚れが少なくひびわれが判読しやすいグループA（5枚のシート）と表面に錆汁や汚れが目立ち、ややひびわれが判読しづらいグループB（5枚のシート）の2つのグループに分けた。

各シートには10か所または5か所（全90カ所）のひびわれ幅計測位置を矢印で示した。また、各シート内の1か所に「十字印」を記入しておき、離れた2枚のひびわれ画像シートの「十字印」間の距離を計測することによって「ひびわれ長さの計測精度」を確認した。

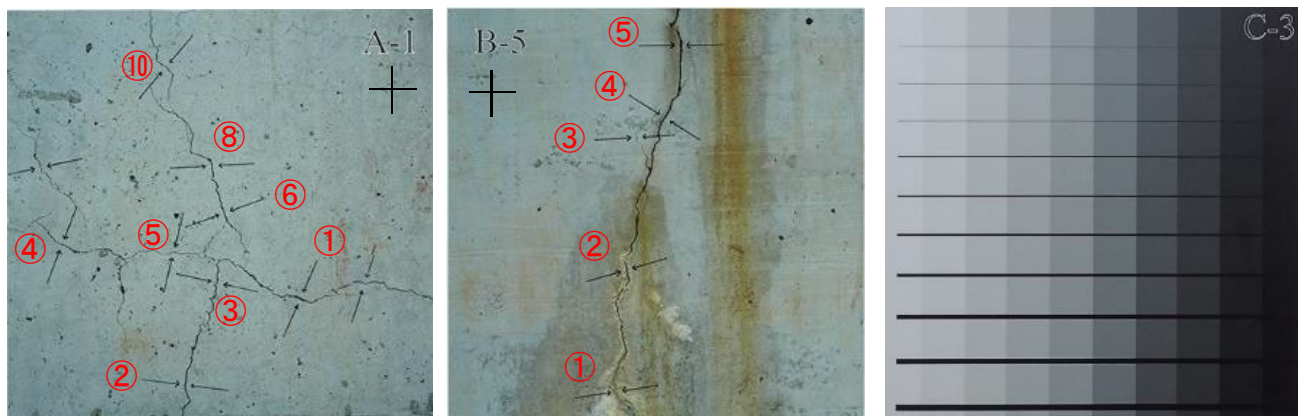
#### 【模擬ひびわれシート】

コンクリート表面の色によってひびわれの視認精度が異なる可能性があるため、白から段階的にグレイ値を変えた背景色の上に0.1mm～3.0mm幅のひびわれを模した線が配置された20cm角の「模擬ひびわれシート」を貼り付け、撮影画像からどの背景色でひびわれ幅を視認できるかを確認した。

なお、上記両シートの素材は雨水や湿気等で変形しないようシールタイプの塩化ビニールシートとし、画像撮影時の反射防止としてマットラミネート加工を施した。

#### 【標定用ターゲット】

撮影画像から尺度を持った展開画像を作成する場合は、撮影対象部位の位置・寸法情報が必要となる。そのために精度確認試験ヤードに標定用ターゲット（5cm角）を複数枚貼付して、ターゲットの位置情報（座標）をトータルステーションにより測量して開発チームに配布した。



ひびわれ画像シート A-1

ひびわれ画像シート B-5

模擬ひびわれシート C-1

図 6.4.2 添付したシート（ひびわれ画像シートは一例）

#### 4) 真値の取得

事前準備として、入念な近接目視点検および SfM 解析により作成したオルソ画像による点検の両手法から損傷部のひびわれの幅・長さ・位置等を計測し、その計測結果を「真値」とした。

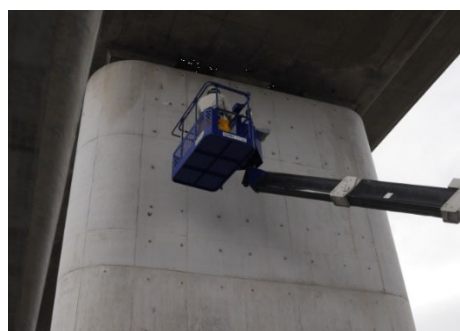
撮影に使用したカメラは、表 6.4.1 に示すフルサイズセンサを搭載した高画素数の SONY 製  $\alpha$  7R II であり、第 3 章の「視認すべきひびわれ幅の 3~5 倍の解像度で撮影する」を踏まえ、0.1mm 幅のひびわれを視認するため目標解像度は 0.5mm/pixel 解像度とした。撮影には高所作業車を用い、対象となる橋脚に全て正対して一定の離隔を維持し 80%ラップとなるよう手持ち撮影により画像を取得した。オルソ画像は、第 4 章および第 5 章で示した流れと同様の手順で行い、損傷図の作成にも同様に「ひびわれ位置・幅判読図化システム」を用い、その結果を損傷図（ひびわれ位置）の真値とした。

なお、ひびわれ画像シート上の 90 箇所の評価対象となるひびわれ幅は、クラックスケールを用いて直接画像上を計測し、その値を真値とした。

各シートに記した十字印は、トータルステーションを用いた測量により座標値を取得し、それらの座標値から算出した 2 点間距離を真値とした。

表 6.4.1 使用したカメラ

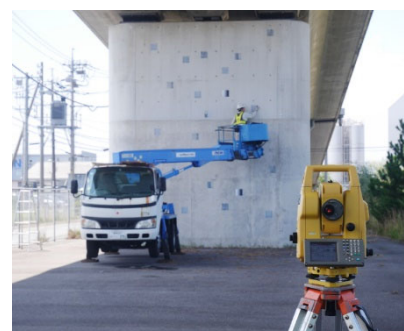
	ミラーレスカメラ
名称	SONY $\alpha$ 7R II
イメージ	
センサ	CMOS センサ
センササイズ	35.9×24.0mm (フルサイズ)
画素数	7952×5304 4240 万画素
大きさ (W×H×D)	約 126.9×95.7×60.3mm
重さ	約 582g (本体のみ)
レンズ焦点距離 (35mm 換算)	35mm (35mm)



高所作業車により点検



橋脚の撮影



十字印の測量

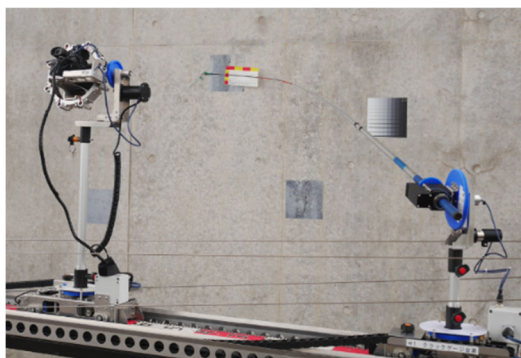
図 6.4.3 真値の計測作業状況

5) 精度確認試験の実施状況

以下に各開発チームによる精度確認試験の実施状況を示す。



[Ⅰ] 橋梁点検ロボットカメラ 撮影状況



[Ⅱ] 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』 撮影状況



[Ⅲ] 二輪型マルチコプタ 撮影状況

図 6.4.4 各開発チームの精度確認試験の実施状況

(2) 精度確認試験の結果

1) 計測可能な最小ひびわれ幅および計測精度の確認

計測可能な最小ひびわれ幅の確認とひびわれ幅計測精度の確認を目的として、ロボットによって「ひびわれ画像シート」のひびわれ幅を計測した結果を真値と比較した。

ひびわれ画像シート 10 枚に記した計 90 か所 (10 枚のうち 2 枚は 5 か所) のひびわれ幅を事務局が実測したひびわれ幅の真値を表 6.4.2 に、各開発チームが計測したひびわれ幅と真値との差分を表 6.4.3 に示す。表 6.4.3 は、幅の差分に応じて色付けした。またそれらの差分値をベースにグラフ化したものを図 6.4.5 に示す。ひびわれ幅 (真値) を基準に 0.2mm 未満, 0.2mm 以上 0.5mm 未満, 0.5mm 以上 1.0mm 未満, 1mm 以上の 4 つに区分し、各差分の個数を積み上げている。

表 6.4.2 ひびわれ画像シートのひびわれ幅の真値 (mm)

No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
A-1	0.85	0.55	0.35	0.30	0.15	0.50	0.30	0.50	0.20	0.20
A-2	0.10	0.65	0.45	0.70	0.65	0.65	0.25	0.20	0.20	0.25
A-3	0.25	0.25	0.30	0.20	0.30	0.25	0.55	0.50	0.50	0.15
A-4	0.30	0.25	0.15	0.75	0.70	0.70	0.60	0.55	0.40	0.35
A-5	0.30	0.25	1.10	1.30	1.70	1.10	1.60	0.85	1.00	0.90
B-1	0.30	0.15	0.35	0.30	0.25	0.15	0.15	0.15	0.20	0.35
B-2	1.50	1.50	1.50	1.00	1.10	0.85	0.40	0.30	0.20	0.15
B-3	1.80	2.20	2.20	1.40	1.40					
B-4	1.10	0.65	0.15	0.90	0.95	1.10	0.30	0.30	0.30	0.25
B-5	0.20	0.40	0.15	0.60	0.80					

表 6.4.3 真値との差分 (mm)

【橋梁点検ロボットカメラ】

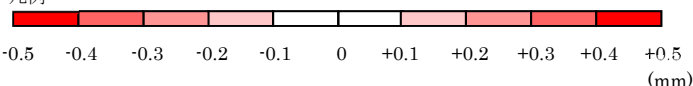
【橋梁点検支援ロボット『視る・診る』】

No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
A-1	-0.35	-0.15	-0.05	-0.10	-0.05	-0.20	0.00	-0.20	-0.10	0.00	A-1	0.15	-0.05	0.05	0.00	-0.05	0.00	0.00	0.00	-0.10	0.00
A-2	0.00	-0.25	-0.05	-0.30	-0.35	-0.35	-0.15	0.00	0.00	-0.05	A-2	-0.05	-0.05	-0.05	-0.10	-0.05	-0.05	-0.15	-0.10	-0.10	-0.10
A-3	-0.15	-0.15	-0.10	0.00	0.00	0.05	-0.15	-0.10	0.10	-0.05	A-3	-0.15	-0.15	-0.15	-0.05	0.00	0.00	-0.05	0.00	0.05	-0.10
A-4	-0.10	-0.15	-0.10	-0.35	-0.40	-0.40	-0.30	-0.15	-0.20	-0.15	A-4	0.00	-0.10	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	0.05	0.00	-0.05
A-5	-0.10	-0.05	-0.30	-0.40	-0.20	-0.20	-0.60	-0.25	-0.20	-0.20	A-5	0.00	0.00	-0.10	0.10	0.30	0.10	0.20	0.05	0.00	0.10
B-1	0.00	-0.05	-0.05	0.00	-0.05	-0.10	-0.05	-0.05	-0.10	-0.15	B-1	0.00	-0.05	0.05	-0.05	-0.15	-0.10	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
B-2		-0.50		0.20	0.00	-0.25	-0.10	-0.10	0.00	-0.05	B-2	0.00	0.00	-0.10	0.00	0.00	0.15	-0.15	-0.10	-0.10	-0.05
B-3				-0.30	-0.30						B-3	-0.20	-0.10	-0.20	-0.10	-0.10					
B-4	-0.30	-0.15	-0.05	-0.30	-0.35	-0.20	-0.20	0.00	-0.10	-0.05	B-4	-0.10	-0.15	-0.10	0.10	0.05	0.00	-0.15	-0.10	0.00	0.05
B-5	-0.10	-0.10	-0.10	-0.30	-0.40						B-5	-0.15	-0.10	-0.05	-0.10	0.20					

【二輪型マルチコプタ】

No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
A-1	0.05	0.05	0.05	0.00	0.15	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10
A-2	0.10	-0.05	0.05	0.00	0.05	-0.05	0.05	0.00	0.10	0.05
A-3	0.05	0.15	0.00	0.10	0.00	0.05	0.05	-0.10	0.90	0.05
A-4	0.00	0.05	0.05	0.05	0.10	0.10	0.00	0.15	0.00	0.05
A-5	0.00	0.05	0.20	0.40	0.10	0.40	0.20	-0.05	0.00	0.10
B-1	0.00	0.05	-0.05	-0.10	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	-0.05
B-2	-0.10	-0.20	1.00	0.20	0.10	-0.05	0.10	0.00	0.10	0.05
B-3	0.30	0.30	0.20	0.00	-0.10					
B-4	0.20	0.15	0.05	0.10	0.15	0.20	0.10	0.10	0.10	0.05
B-5	0.00	0.00	0.05	0.20	0.70					

凡例



橋梁点検ロボットカメラが 50.6%，橋梁点検支援ロボット『見る・診る』が 82.2%，二輪型マルチコプタが 77.8%の割合で±0.1mm の誤差範囲に収まっている。橋梁点検ロボットカメラが約 50%と他 2 つのロボットと比較し精度が低い結果となったが、現地撮影時の作業性や操作性の簡易さを考慮すると十分高品位な結果が得られていると考える。橋梁点検支援ロボット『見る・診る』と二輪型マルチコプタは 80%近い結果であり、高精度にひびわれ幅が計測できていると言える。表 6.4.4 は図 6.4.5 を表に示したものであり、ひびわれ真値幅を 0.1mm 以上 0.3mm 未満、0.3mm 以上 0.6mm 未満、0.6mm 以上 1.0mm 未満、1.0mm 以上の 4 つに区分し、それぞれに許容誤差範囲を±0.1mm から段階的に設定し、各区分における正答率を示している。橋梁点検ロボットカメラでは、図 6.4.5 では±0.1mm の誤差範囲に 50.6% が収まっていると示したが、表 6.4.4 では 0.1mm 以上 0.3mm 未満及び 0.3mm 以上 0.6mm 未満では約 85%，100%と細かいひびわれでは高精度に計測ができていることが分かる。一部、0.6mm 以上 1.0mm 未満において約 53%となったもののそれ以外のロボットや区分においては、全て 80%以上と高精度な結果が得られていることが分かる。また、図 6.4.5 より誤差の差分分布にそれぞれのロボット技術に応じた傾向が見受けられた。これらの要因は撮影方法やカメラの性能、ひびわれ幅算出方法によるものと考えられる。

橋梁点検ロボットカメラは、真値に対しひびわれ幅がやや小さく計測されている傾向があり、カメラ設置位置 1 か所から放射状に連続撮影するため、撮影範囲端部では斜め撮影となり、ひびわれ幅が若干小さく計測されてしまうものと推測される。

橋梁点検支援ロボット『見る・診る』は、計測対象のひびわれにクラックスケールを当てて撮影し、同一画像に写し込んだクラックスケールを用いてひびわれ幅の算出を行うため、高い精度でひびわれ幅の計測ができていると推測する。仮に画質が若干劣化しても画像上のひびわれとクラックスケールが同質で劣化するため、ひびわれ幅の判読に差が生じにくいものと考えられる。

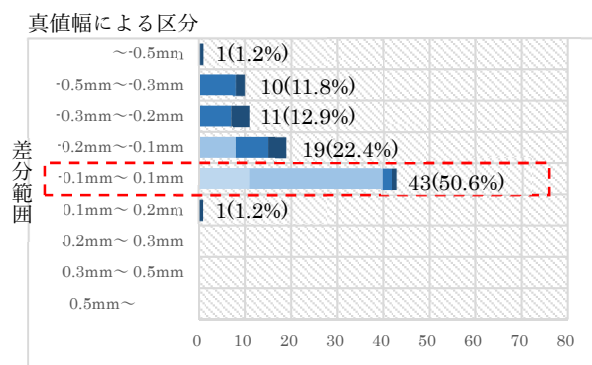
二輪型マルチコプタは、僅かではあるが、やや太めに計測される傾向が見受けられる。これはデジタルクラックスケールを用いたひびわれ幅計測方法に起因しているのではないかと推測される。ひびわれ抽出に使用している画像は、ひびわれ幅の計測には十分な解像度を有しているが、画像の一般的フォーマットである JPEG によって処理されている。そのため圧縮処理によりピクセルレベルで色がやや平滑化され、微小ではあるがひびわれが滲みにより太く見えており、その画像上に別途作成した鮮明なデジタルクラックスケールを当ててひびわれ幅を計測することから、計測結果がやや大きめになっているのではないかと考える。

また、各技術の撮影解像度は、橋梁点検ロボットカメラが 0.3mm/pixel、橋梁点検支援ロボット『見る・診る』が 0.4mm/pixel、二輪型マルチコプタが 0.3mm/pixel となっており、視認すべき最小ひびわれ幅 0.1mm の 3 倍もしくは 4 倍の解像度である。つまり、これは本研究の第 3 章で算出した「視認すべきひびわれ幅の 3～5 倍の解像度で撮影する」という条件に当てはまっており、その関係性を高精度に実証できた一例であると言える。

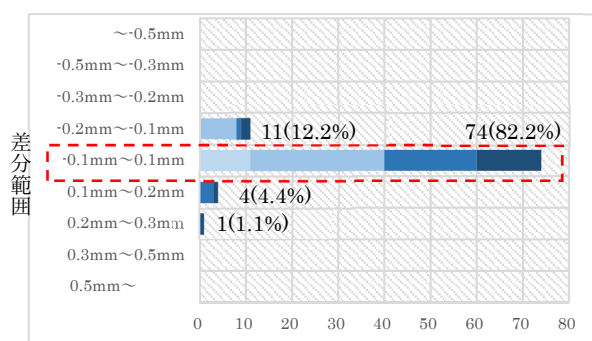


表 6.4.4 真値との差分の累積

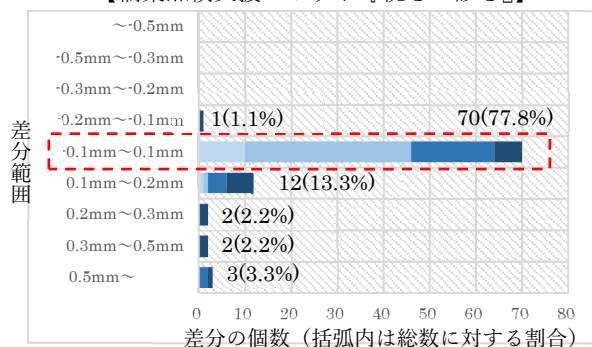
0.1mm ≤ w < 0.3mm : 許容誤差 ± 0.1mm  
 0.3mm ≤ w < 0.6mm : 許容誤差 ± 0.2mm  
 0.6mm ≤ w < 1.0mm : 許容誤差 ± 0.3mm  
 1.0mm ≤ w : 許容誤差 ± 0.3mm



【橋梁点検ロボットカメラ】



【橋梁点検支援ロボット『見る・診る』】



【二輪型マルチコプタ】

図 6.4.5 真値との差分分布図

2) 模擬ひびわれシートによるひびわれ視認性の確認

各チームが撮影した画像上で模擬ひびわれシート (C-3) の視認性を確認した。図 6.4.6 は撮影画像 (オリジナル画像) から模擬ひびわれシート部のみを抽出し正規化したもので、明度補正・解像度の調整等は一切実施していない。

各チームとも撮影画像の鮮明さにも差はあるものの、撮影した画像から 0.1mm 幅の模擬ひびわれは十分視認可能と言える。ただし、ひびわれ背景の輝度値によっては、一部視認性に差が表れた。各チームと

【橋梁点検ロボットカメラ】

真値幅 誤差範囲	真値幅			
	0.1mm 以上 0.3mm 未満	0.3mm 以上 0.6mm 未満	0.6mm 以上 1.0mm 未満	1mm 以上
~-0.5mm	0	0	0	1
-0.5mm~-0.3mm	0	0	8	2
-0.3mm~-0.2mm	0	0	7	4
-0.2mm~-0.1mm	4	9	2	4
-0.1mm~0.1mm	24	18	0	1
0.1mm~0.2mm	0	0	0	1
0.2mm~0.3mm	0	0	0	0
0.3mm~0.5mm	0	0	0	0
0.5mm~	0	0	0	0
正答率	85.7	100.0	52.9	76.9

【橋梁点検支援ロボット『見る・診る』】

真値幅 誤差範囲	真値幅			
	0.1mm 以上 0.3mm 未満	0.3mm 以上 0.6mm 未満	0.6mm 以上 1.0mm 未満	1mm 以上
~-0.5mm	0	0	0	0
-0.5mm~-0.3mm	0	0	0	0
-0.3mm~-0.2mm	0	0	0	0
-0.2mm~-0.1mm	5	3	1	2
-0.1mm~0.1mm	23	25	13	14
0.1mm~0.2mm	0	0	3	1
0.2mm~0.3mm	0	0	0	1
0.3mm~0.5mm	0	0	0	0
0.5mm~	0	0	0	0
正答率	82.1	100.0	100.0	100.0

【二輪型マルチコプタ】

真値幅 誤差範囲	真値幅			
	0.1mm 以上 0.3mm 未満	0.3mm 以上 0.6mm 未満	0.6mm 以上 1.0mm 未満	1mm 以上
~-0.5mm	0	0	0	0
-0.5mm~-0.3mm	0	0	0	0
-0.3mm~-0.2mm	0	0	0	0
-0.2mm~-0.1mm	0	0	0	1
-0.1mm~0.1mm	26	25	13	6
0.1mm~0.2mm	2	1	3	6
0.2mm~0.3mm	0	0	0	2
0.3mm~0.5mm	0	0	0	2
0.5mm~	0	1	1	1
正答率	92.9	96.3	94.1	83.3

も背景が黒に近いほど模擬ひびわれの視認性は悪くなり、0.1mm 幅の認識は困難となっている。これは、撮影解像度だけでなく、カメラのセンサ性能（特にダイナミックレンジ）やセンササイズなどの影響が大きい。背景色の輝度値が 64 の箇所と比較すると、橋梁点検ロボットカメラと橋梁点検支援ロボット『見る・診る』ではうっすらと 0.1mm 幅の線は視認できるが、二輪型マルチコプタ（アクションカメラ使用）では線が途切れており、視認ができない。画像を拡大しても極端なノイズは発生していないが、やや色が平滑化された印象を受けることから使用カメラのダイナミックレンジが狭いこと、もしくは JPEG 圧縮に起因しているのではないかと考えられる。

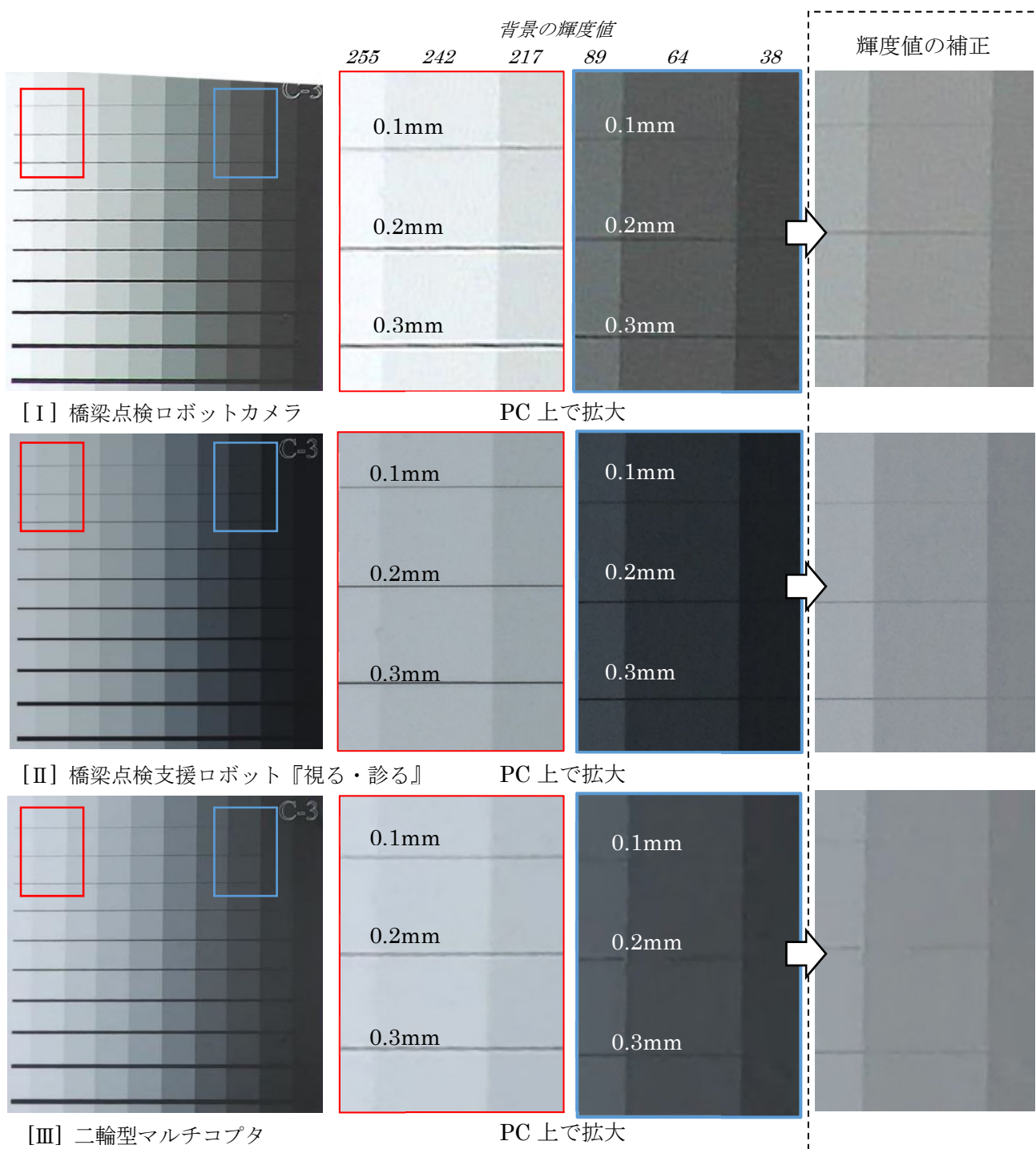


図 6.4.6 C-3 シートの視認性確認

3) 損傷の大きさの計測精度確認

損傷の大きさの計測精度を確認する目的で、ひびわれ画像シートに記入した「十字印」の2点間距離の計測精度を真値と比較し確認した。各チームの計測結果を表 6.4.5 に示す。

0.1～1.5%の誤差で計測できており、高い精度を有していると言える。特に、図面に重ねることができる精度を有した展開画像を作成する橋梁点検支援ロボット『見る・診る』と二輪型マルチコプタは、直接的に画像から寸法値を算出可能なため、非常に精度が高いと言える。

表 6.4.5 2点間距離の精度確認

ロボット技術名	計測箇所	計測値	真値	差分
橋梁点検ロボットカメラ	①A-1～B-1 (橋脚上部)	650mm	660mm	-10mm (-1.5%)
橋梁点検支援ロボット『見る・診る』	③A-1～B-1 (橋脚下部)	3,130mm	3,126mm	4mm (0.1%)
二輪型マルチコプタ	②A-2～A-4 (橋脚上部)	2,525mm	2,517mm	8mm (0.3%)
	③A-1～B-1 (橋脚下部)	3,121mm	3,126mm	-5mm (-0.2%)

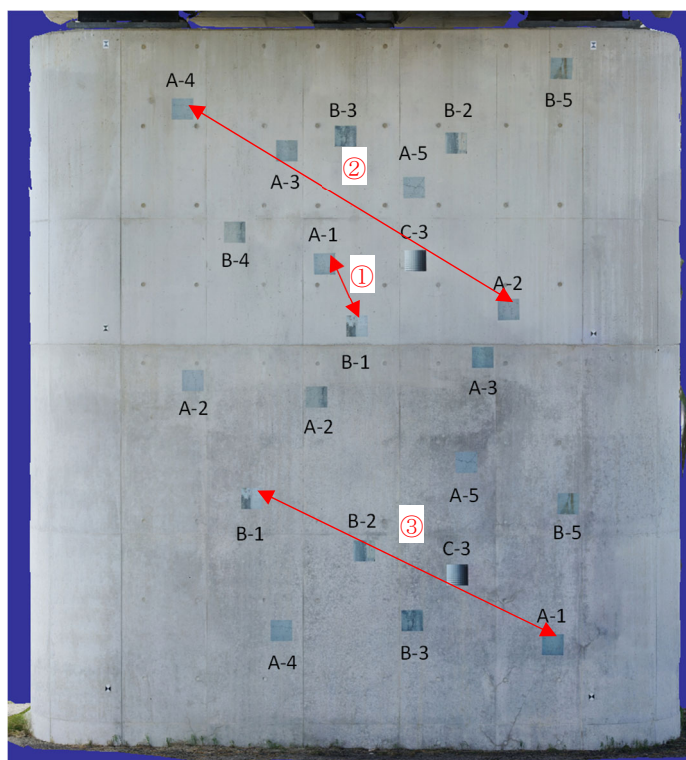


図 6.4.7 2点間距離の計測位置

#### 4) 損傷の位置の精度確認

損傷位置の計測精度を確認する目的で、ロボットによる撮影画像から作成した損傷図を「損傷図の真値」と重ね合わせて比較することによって、ロボットによるひびわれ計測の精度を確認した。各開発チームが作成した損傷図と損傷図（真値）を重ね合わせた結果を図 6.4.8 に示す。

橋梁点検ロボットカメラはカメラ位置を中心とし放射状に撮影した画像から損傷をスケッチ（トレースではない）するため、ひびわれの位置にやや差が生じている。橋梁点検支援ロボット『見る・診る』と二輪型マルチコプタは、正対撮影した画像を接合し図面と重ね合わせてトレースしているため位置については高精度な損傷図が作成されている。特に、二輪型マルチコプタについては、本研究の第4章および第5章で示した損傷図の作成手順と同等であり、SfM解析による3Dモデルよりオルソ画像を作成し、損傷図を作成している。3Dモデルへの座標値の入力方法に依存する部分もあるが、「損傷の大きさ・位置」については、非常に高精度な結果が得られる手法と言える。

赤線：各チームが記載した損傷図  
黒線：真値損傷図

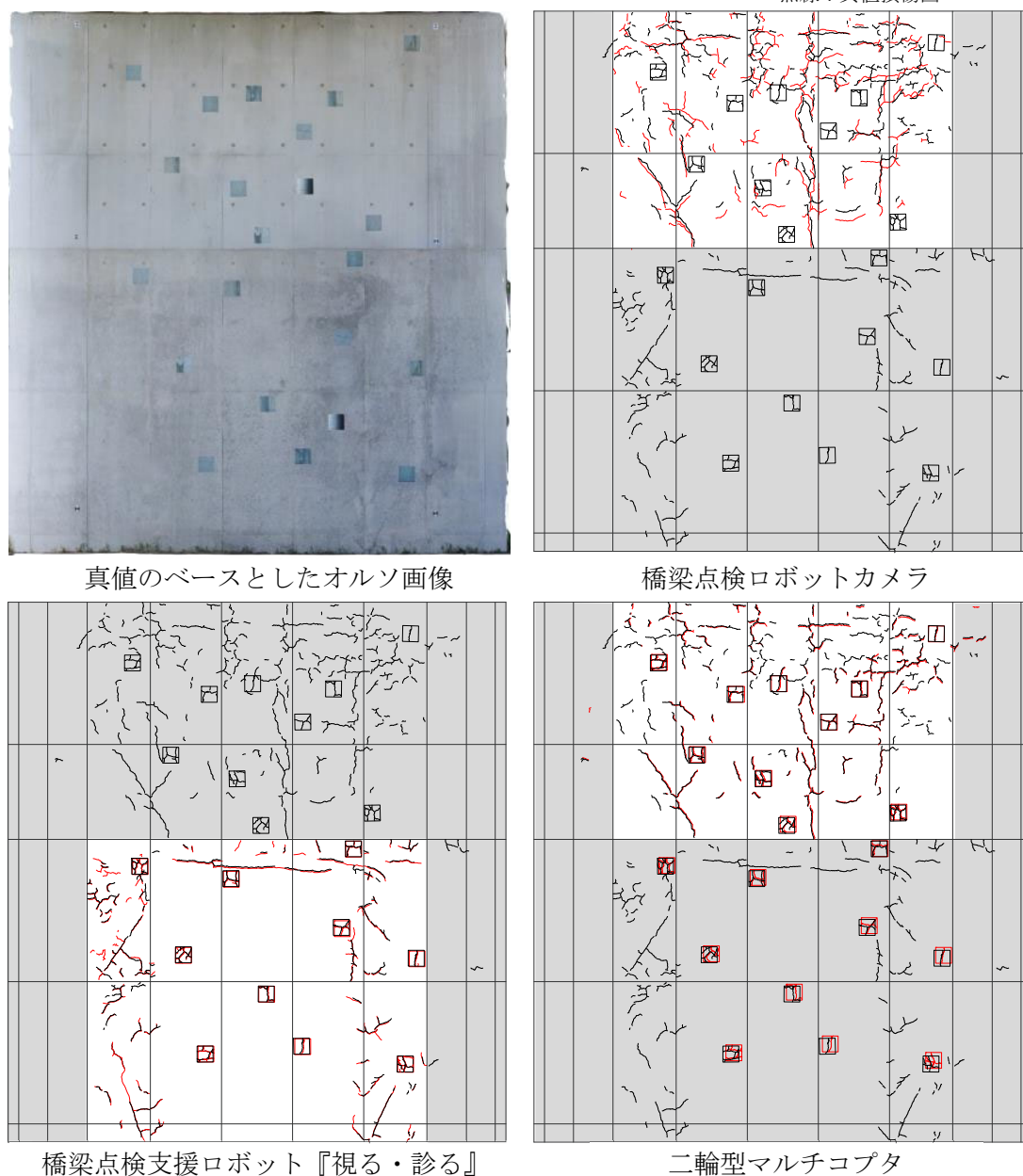


図 6.4.8 損傷図の比較

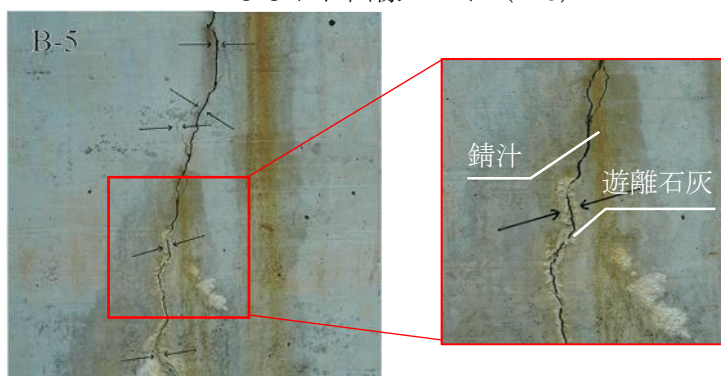
### 5) 色の識別性能の確認

撮影画像から色情報により抽出すべき損傷は、遊離石灰および鉄筋腐食に伴う錆汁の発生であり、これらの視認（目視で認識）が撮影画像から可能かグループ B のひびわれ画像シートのうち B-5 を用いて確認した。

橋梁点検ロボットカメラの画像は彩度が低下しており、やや視認性が劣るが遊離石灰と錆汁は視認可能なレベルである。しかし、コントラストや色差が小さい場合は視認性が更に低下し、損傷の見落としにつながる可能性があるため、十分な光量下での撮影や適切なカメラ設定等注意が必要である。

橋梁点検支援ロボット『見る・診る』と二輪型マルチコプタはやや暗めの画像であるが、十分遊離石灰と錆汁は視認可能である。

ひびわれ画像シート (B-5)



B-5 の遊離石灰と錆汁を確認の対象とする

図 6.4.9 色の識別性能の確認に用いたひびわれ画像シート



橋梁点検ロボットカメラ

橋梁点検支援ロボット『見る・診る』

二輪型マルチコプタ

図 6.4.10 B-5 を撮影した画像

### 6) 総評

精度確認試験から得られた結果を以下にまとめる。

#### [I] 橋梁点検ロボットカメラ

0.3mm/pixel 解像度の展開画像を作成し、そこから下記結果を得た。

#### 【ひびわれ幅正答率】

0.1mm～2.2mm のひびわれ幅に対し、50.6%が±0.1mm 以内の誤差に収まっている。段階的に許容誤差を設定した場合、下記に示す正答率である。

0.1mm ≤ w < 0.3mm : 85.7% (許容誤差±0.1mm)

$0.3\text{mm} \leq w < 0.6\text{mm}$  : 100% (許容誤差 $\pm 0.2\text{mm}$ )

$0.6\text{mm} \leq w < 1.0\text{mm}$  : 52.9% (許容誤差 $\pm 0.3\text{mm}$ )

$1.0\text{mm} \leq w$  : 76.9% (許容誤差 $\pm 0.3\text{mm}$ )

【ひびわれ長さ】

2点間距離の誤差は、-1.5%であった。

【ひびわれ位置】

10~20cmの誤差は生じているものの、それ以上に大きく位置を誤認識する可能性は低い。

【色の識別】

彩度が低下し、やや視認性が低下しているが、遊離石灰と錆汁は視認可能である。撮影時の設定や条件に注意する必要がある。

【その他】

高感度撮影が可能なカメラを用いており、ノイズの発生が見受けられる部分があるもののオリジナル画像と展開画像とも0.1mm幅のひびわれを視認するには十分な品質を確保できている。ただし、遊離石灰や錆汁などの色情報で識別する損傷については、コントラストや色差が小さい場合は視認性が低下し、損傷の見落としにつながる可能性がある。

【II】 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』

0.4mm/pixel 解像度の展開画像を作成し、そこから下記結果を得た。

【ひびわれ幅正答率】

0.1mm~2.2mmのひびわれ幅に対し、82.2%が $\pm 0.1\text{mm}$ 以内の誤差に収まっている。段階的に許容誤差を設定した場合、下記に示す正答率である。

$0.1\text{mm} \leq w < 0.3\text{mm}$  : 82.1% (許容誤差 $\pm 0.1\text{mm}$ )

$0.3\text{mm} \leq w < 0.6\text{mm}$  : 100% (許容誤差 $\pm 0.2\text{mm}$ )

$0.6\text{mm} \leq w < 1.0\text{mm}$  : 100% (許容誤差 $\pm 0.3\text{mm}$ )

$1.0\text{mm} \leq w$  : 100% (許容誤差 $\pm 0.3\text{mm}$ )

【ひびわれ長さ】

2点間距離の誤差は、0.1%であった。

【ひびわれ位置】

あおり補正およびスケール調整を行った展開画像を用い損傷図を作成しているため、位置精度は20mm前後であり、非常に高い。

【色の識別】

やや暗めではあるものの遊離石灰と錆汁は十分視認可能である。

【その他】

使用カメラのダイナミックレンジが広く、あまりノイズの発生も見受けられない。解像度調整のため展開画像がやや不鮮明になっていたもののオリジナル画像と展開画像とも0.1mm幅のひびわれや遊離石灰や錆汁などの損傷を視認するには十分な品質を確保できていると言える。ただし、細い幅のひびわれ見落としの可能性を低下させるために、展開画像の解像度を上げ、視認性を向上させることが望ましい。

### [Ⅲ] 二輪型マルチコプタ

0.3mm/pixel 解像度の展開画像を作成し、そこから下記結果を得た。

#### 【ひびわれ幅正答率】

0.1mm～2.2mm のひびわれ幅に対し、77.8%が±0.1mm 以内の誤差に収まっている。段階的に許容誤差を設定した場合、下記に示す正答率である。

0.1mm ≤ w < 0.3mm : 92.9% (許容誤差 ± 0.1mm)

0.3mm ≤ w < 0.6mm : 96.3% (許容誤差 ± 0.2mm)

0.6mm ≤ w < 1.0mm : 94.1% (許容誤差 ± 0.3mm)

1.0mm ≤ w : 83.3% (許容誤差 ± 0.3mm)

#### 【ひびわれ長さ】

2か所で2点間距離検証を実施し、それぞれの誤差は、0.3, -0.2%であった。

#### 【ひびわれ位置】

SfM 解析により歪みを除去した展開画像（オルソ画像）を用い損傷図を作成しているため、位置精度は20mm前後であり、非常に高い。

#### 【色の識別】

やや暗めではあるものの遊離石灰と錆汁は十分視認可能である。

#### 【その他】

使用しているカメラのダイナミックレンジが狭く、オリジナル画像の段階でやや色が平滑化され、背景の輝度が低い場合にやや視認が困難な結果も見受けられるもののオリジナル画像と展開画像とも0.1mm幅のひびわれや遊離石灰や錆汁などの損傷を視認するには十分な品質を確保できている。

今後の技術進歩により、ダイナミックレンジが広いコンパクトなカメラの販売も期待されるため、そのようなカメラを搭載することで、より高精度に損傷を視認できると思われる。

#### 7) まとめ

江島大橋プロジェクトで適用した3つの画像撮影ロボットは、橋梁点検に適用できる計測精度を有していると言える。

本研究の観点からすると、解像度においては0.1mm幅のひびわれを対象として、各チームとも0.3～0.4mm/pixelと近い解像度で撮影を行っている。図6.4.11は第3章に示した図3.2.9のグラフを拡大(X:0.5mm/pixel以下, Y:0.3mm以下)したもので、本研究で算出した視認すべきひびわれ幅の3～5倍という結果と合致する。各チームとも社内試験などで検討した結果より目標解像度を設定し、本精度確認試験において、その精度を立証できたことから、本研究で示した3～5倍という値も実証できたと考える。

ひびわれの位置や長さなども二輪型マルチコプタの試験結果より、SfM解析から作成したオルソ画像を用いる手法は非常に高精度で有効であると言える。また色情報で視認すべき損傷（遊離石灰や錆汁など）も十分視認可能である。ただし、撮影対象から一定の離隔を保ち、均質な画像を撮影することが重要であり、UAV等により撮影を行う場合は、距離を一定に保つ機能（位置制御機能）が必要である。また使用するカメラについては、第3章や第5章においてセンササイズが大きいカメラの使用が望ましいとの結果を導いており、本精度確認試験で各チームが用いたカメラは、センササイズが小さくダイナミックレンジが狭いため色の再現性がやや劣っていた。順光など十分光量が確保できる条件下では、あまり

差異は生じないがあらゆる条件を想定した場合、やはりダイナミックレンジが広い、つまりセンササイズが大きめのカメラを使用することが推奨される。

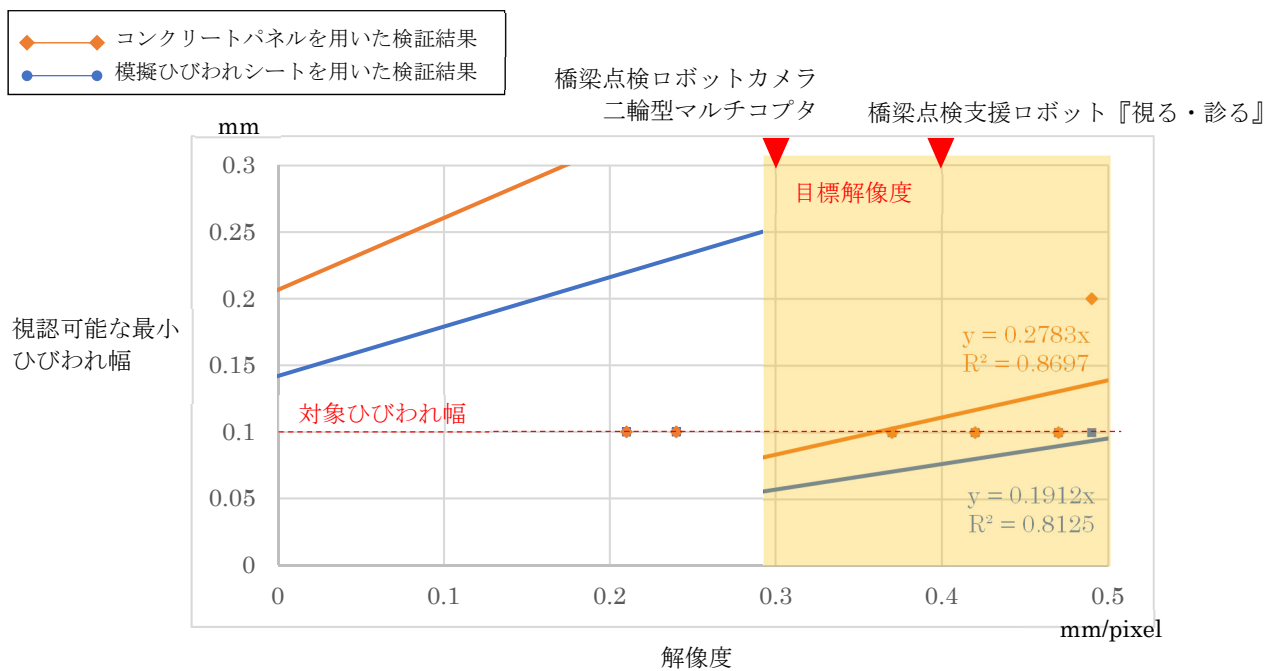


図 6.4.11 解像度と視認可能な最小ひびわれ幅の関係性



### 6.4.2 打音ロボット技術の精度確認試験

#### (1) 目的

画像による精度確認試験と同様に、打音についても現地で精度確認ができない。そこで、名古屋大学で作製された供試体を使用して[IV] 打音機能付飛行ロボットの打音機能の精度確認試験を実施した<sup>10)</sup>。

#### (2) 供試体の概要

1000×300×200mm のコンクリート供試体の内部に 120×120mm の浮きを模した厚さの異なる空洞 (0.5mm, 1.0mm, 1.5mm) が 3 箇所配置されており、表面から空洞までの深さが 30mm と 50mm の 2 種類あり、空洞までの距離と空洞厚さを変えた計 6 パターンで精度確認試験を実施した。(図 6.4.12)

#### (3) 評価方法

空洞までの深さや空洞の厚みを変えた供試体に対して打音検査を実施し、空洞の検出の可否を確認することで打音機能付飛行ロボットの精度確認試験とした。

供試体 30 (深さ 30mm)

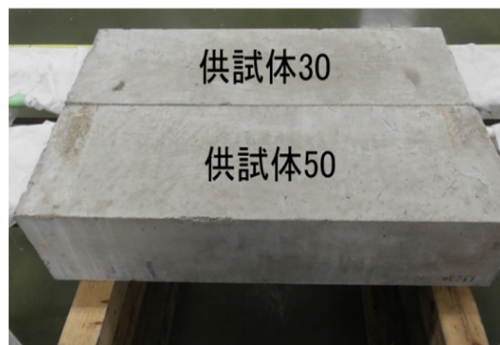
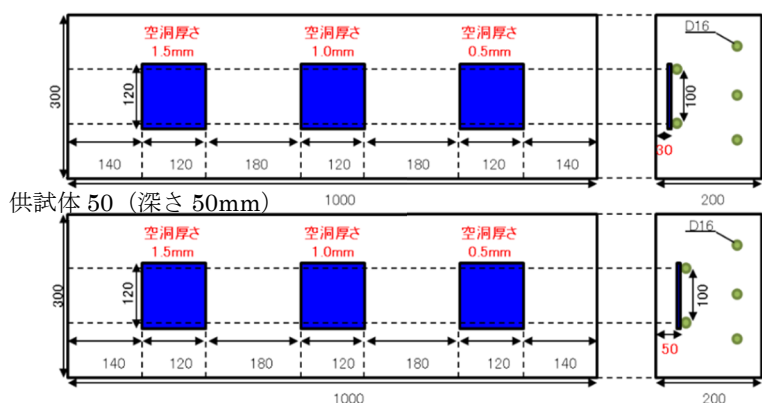


図 6.4.12 試験に使用した供試体

#### (4) 点検ロボットによる試験方法

図 6.4.13 に示すように点検ロボットの打音検査機構部を走行機構部に取り付け、打撃力が大きく変動しないよう 4 つの車輪を供試体に押し当てた状態で実施した。この要領で試験を実施した場合、プロペラ音などのノイズが含まれていないが、これまでの試験からブラインド分離法により打音信号が問題なく抽出できることを前提として精度確認試験を実施した。

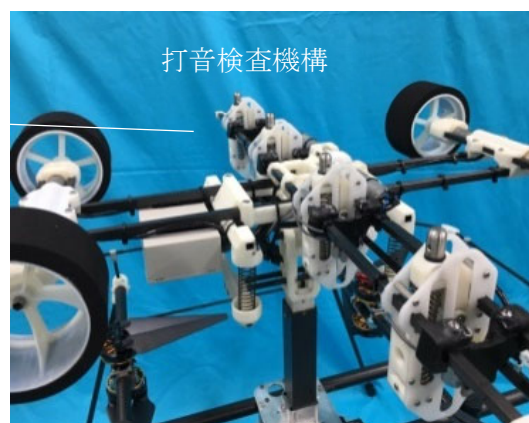
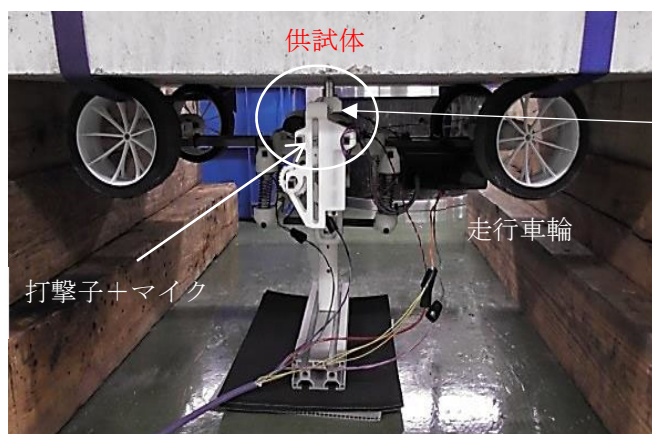


図 6.4.13 試験状況

(5) 打音精度確認試験の結果

供試体 30 および供試体 50 の空洞部と空洞のない健全部に対して実施した打音打撃機構による打音スペクトルと健全度評価指数の結果を図 6.4.14 および図 6.4.15 に示す。図中グラフの縦軸は打音振幅の最大値を 1 として正規化した打音強度であり、横軸は周波数である。空洞部のスペクトルには 6~8kHz の周波数帯域に狭い帯域幅で強度が強い部分があり、健全部との打音スペクトルの現れ方に明らかな違いがみられる。評価指数については、健全部は空洞部に比べかなり大きな数値を示している。また、空洞厚さが大きくなるほど評価指数は小さくなる傾向がみられた。最も薄い 0.5mm 空洞と健全部の評価指数を比較した場合 1.5 倍以上の違いが見られた。打音スペクトルの現れ方や評価指数の数値から深さ 30~50mm の範囲については空洞厚さが 0.5mm と薄い場合でも空洞の検出は可能であると考えられる。

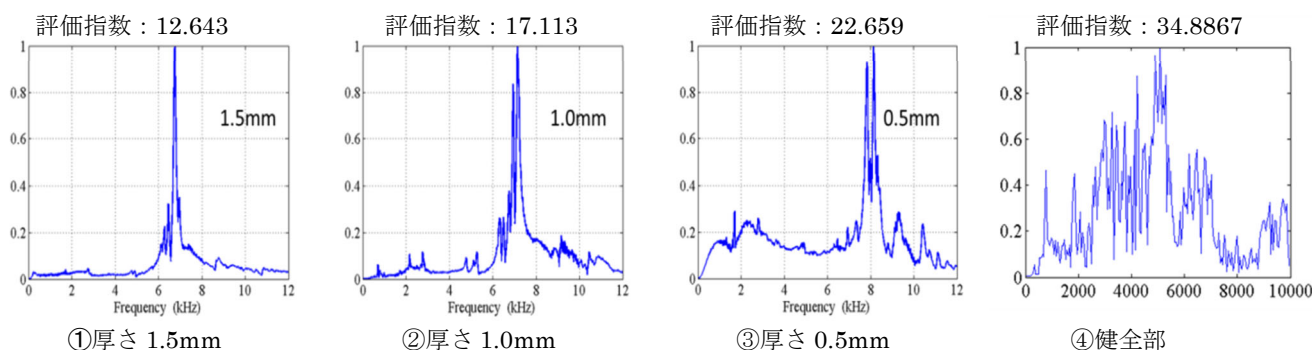


図 6.4.14 供試体 30 の打音スペクトル

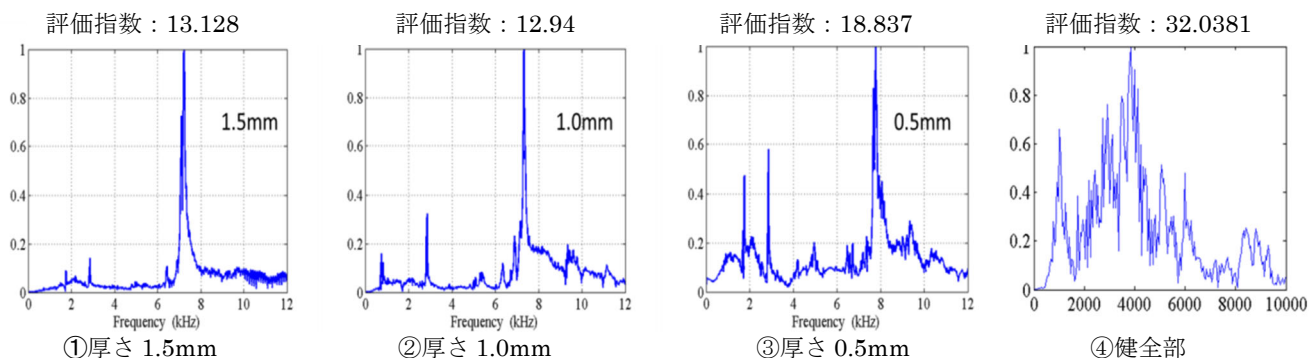


図 6.4.15 供試体 50 の打音スペクトル

## 6.5 実証試験結果

### 6.5.1 概要

#### (1) 各チームの点検範囲の実績

7月上旬から開始した実証試験では、一時的に強風や雨天により点検作業の中断や順延もあったが、[I] 橋梁点検ロボットカメラ、[IV] 打音機能付飛行ロボット、[III] 二輪型マルチコプタ、[II] 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』の順で実証試験を実施し、全4チームとも計画工程内で予定していた点検作業をほぼ完了した。図 6.5.1 に4つのロボット技術の計測範囲（実績）を示す。

#### [I] 橋梁点検ロボットカメラ

計測範囲：箱桁内部の中央ヒンジ部分と橋脚付近部分（1800 m<sup>2</sup>）

#### [II] 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』

計測範囲：箱桁側面および下面（中央ヒンジから桁高 10mまで）、張出床版および非常駐車帯張出床版下面（1040 m<sup>2</sup>）

#### [III] 二輪型マルチコプタ

計測範囲：PW1 橋脚側面（総面積の 60%）、桁高 10 以上の箱桁側面および箱桁下面（1475 m<sup>2</sup>）

#### [IV] 打音機能付飛行ロボット

計測範囲：張出床版下面の打音検査（250 m<sup>2</sup>）

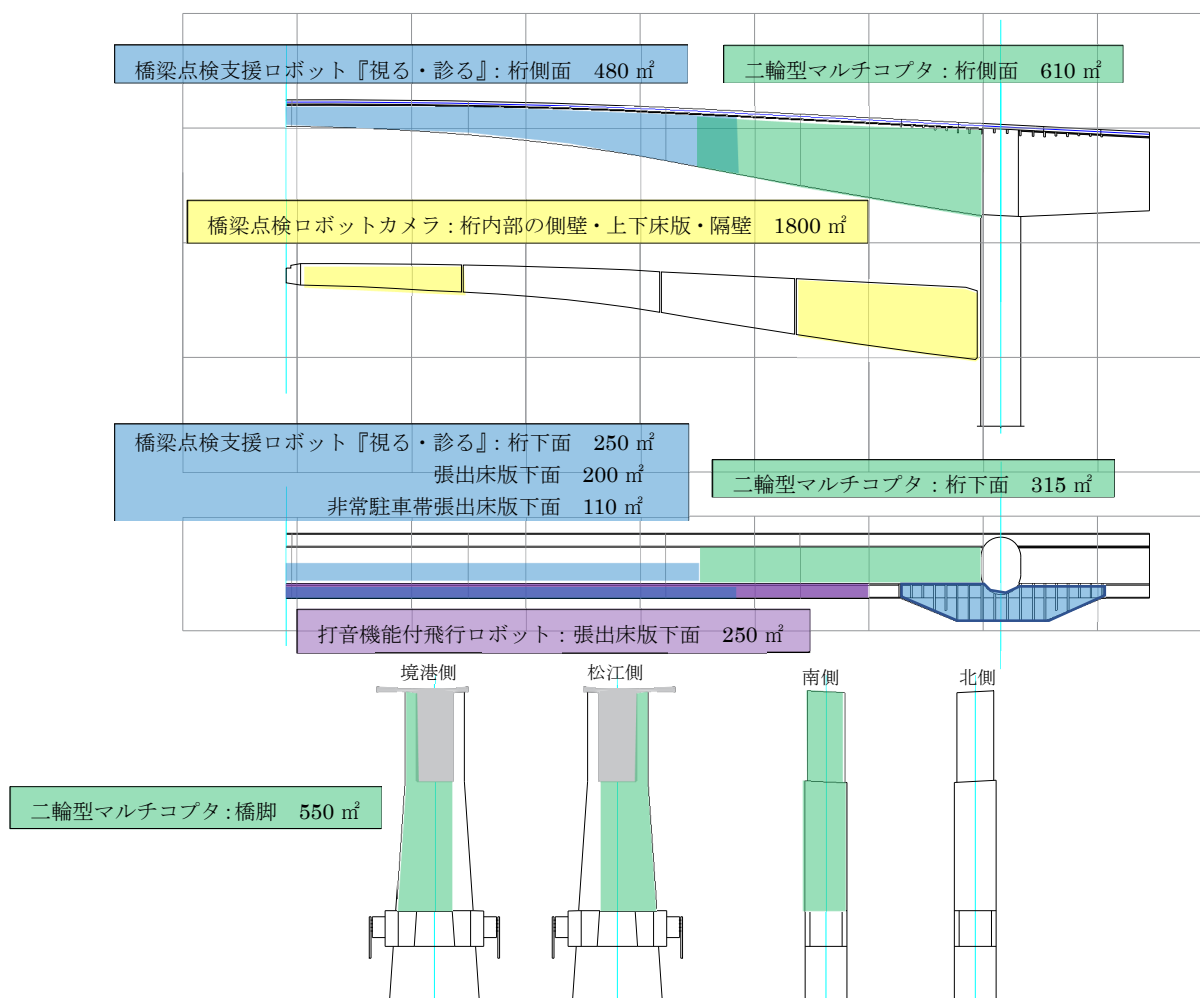


図 6.5.1 各ロボット技術の計測範囲（実績）

## (2) 天候の影響による稼働率

実証試験期間中（7月2日～8月9日）、風は夜から早朝にかけて穏やかで、昼前後から強くなる傾向が見られたので、風の影響を受ける飛行ロボットによる計測は早朝5時から昼過ぎまでを標準作業時間帯とした。強風を原因とする作業の中断は7月10日と7月11日（新日本非破壊検査）に1～2時間程度発生しただけであった。計画段階で風や雨の過去のデータを調査して準備したことと実証試験期間中に好天に恵まれたことが重なって、ロボット技術による計測作業の稼働率は9割以上を確保することができた。

### 6.5.2 画像を用いた点検の課題と解決策

#### (1) 課題

本実証試験において各ロボット技術で取得したすべての近接画像データから損傷図を作成しようとすると多大な時間と労力を要することが課題として浮かび上がった。図6.5.2は、二輪型マルチコプタで撮影された画像から作成したPW1東面の展開画像を元に、ペアリングした鳥取県内の建設コンサルタントの点検技術者が損傷図を作成した例であり、この橋脚東面の展開画像の全範囲の損傷図作成に約40時間も要した。近接画像からひびわれ図等の損傷図を作成する作業は、現状では人の手に頼らざるを得ず、多大な時間と費用がかかるためロボット技術（画像）の活用に対し、消極的になり社会実装が進まない恐れがある。

現行の近接目視点検では「点検技術者が現地で有害な損傷を探し出し、その後有害な損傷を記録する（スケッチ図作成、写真撮影）」という手順だが、画像を活用した場合「ロボットが全ての部位の近接画像を撮影し、点検技術者はその膨大な近接画像から室内作業で有害な損傷を探し出し、損傷図を作成する」という手順となり、従来手法でこれまでは点検していた点検技術者にとっては、内業の作業量が増大し多大な時間を要すと感じられたのではないかと推測する。

今後画像を用いた点検が普及するためには、「ひびわれ位置・幅判読図化システム」のような損傷図化支援ツールや画像から損傷を自動検出する技術の実用化が必要であり、既にサービスとして利用されている技術<sup>11)</sup>の活用なども1つの解決策である。

筆者は、これまでの実務や本研究の第4章や第5章で示したような画像を用いたコンクリート構造物の点検では、効率化・省力化のため写真測量やSfM解析を用いて展開画像（オルソ画像）を作成し、「ひびわれ位置・幅判読図化システム」というツールを用いて損傷図を作成しており、画像解析と損傷図作成には時間を要すが、外業（現地での点検作業）は大幅に省力化でき、外業・内業含めた作業全体でも省力化が図れるため、この点にあまり問題意識を持っていなかった。しかし、本実証試験で点検技術者から挙げられたこの課題の解決は重要であり、画像を用いた点検の効率化にも繋がることから、解決策を協議し次ページ以降に示す手法を提案した。

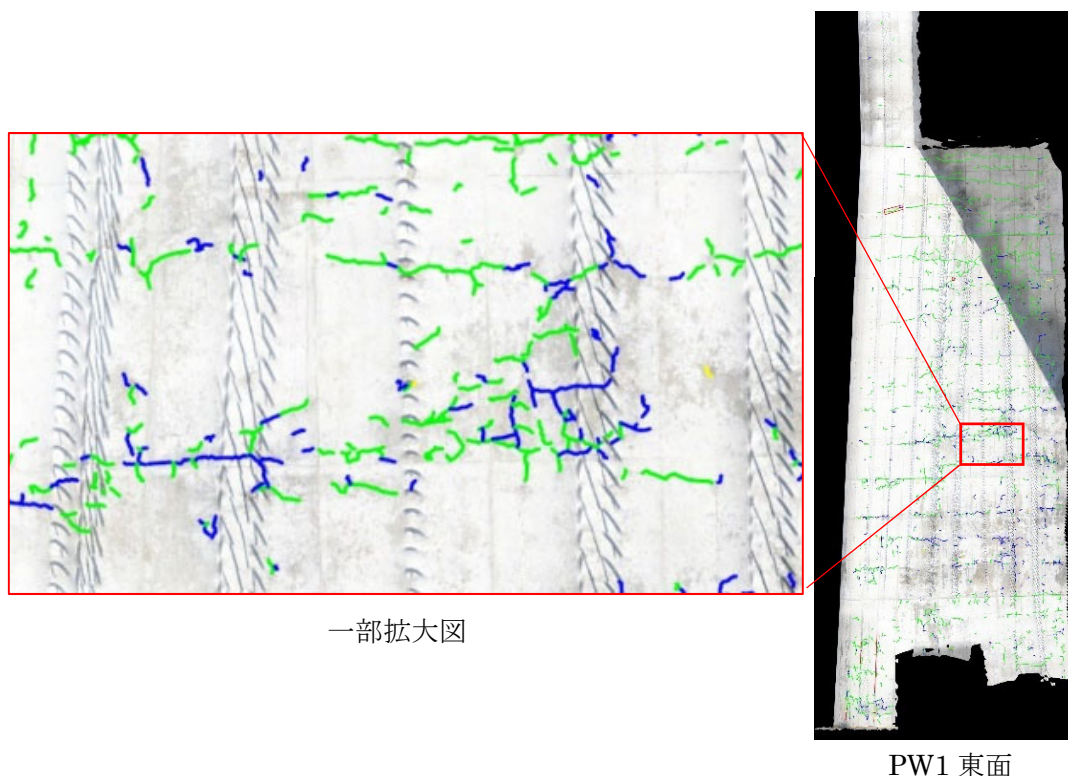


図 6.5.2 損傷図の作成事例

## (2) 課題への解決策提案

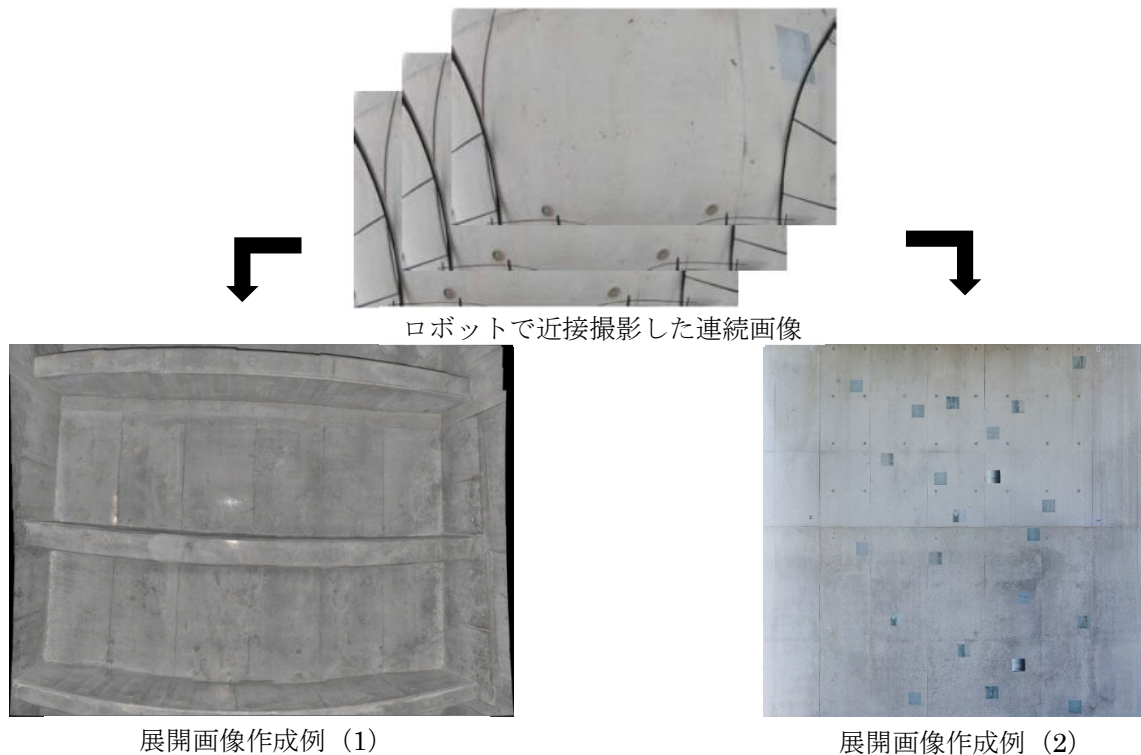
### ◆展開画像の作成

江島大橋のような大規模橋梁でロボット技術により取得した近接画像を用い点検を行う場合、膨大な数量の画像を取得するため、個々の画像を確認し損傷評価を行うには多大な労力が必要となるうえ、位置の把握が困難となり、非効率な点検手法となる。そこで本実証試験では、本研究の第4章や第5章でも活用したように膨大な撮影画像を接合した展開画像を用いて損傷程度の評価を行うこととした。解析に時間がかかることや画質の劣化が懸念されるが、展開画像を面的に確認することで位置を把握しつつ損傷程度の評価が可能のため、省力化・効率化が図れる可能性がある。元々処理フローに展開画像作成が組み込まれているチームもあったが、撮影範囲全部位に対し、展開画像の作成を要求した。

展開画像は、図 6.5.3 に示すよう大きく 2 種類に分けられる。一つは撮影対象範囲のほぼ中心にカメラを設置し、撮影範囲を放射状に連続撮影し、それらの画像を接合したものである。撮影範囲の端部ほど斜めに撮影することとなり歪みが発生した状態で接合するため湾曲した展開画像となる。例えばギガピクセル画像撮影システムがあり、「橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価<sup>12)</sup>」(西村ら, 2013)では自動撮影雲台を用いて撮影した画像から展開画像を作成し、射影変換により疑似オルソ画像を作成する手法を提案しており、このような技術により図面と重ね合わせることも可能となる。(図 6.5.4)

もう一方は、一定のラップ率を保持した状態で連続的に正対撮影した画像から写真測量や SfM 解析のような画像解析処理により合成したものである。歪みが除去されたオルソ画像となるため、尺度を与えることで図面と重ね合わせる事が可能となる。この手法は筆者が第4章および第5章で適用したものであり、位置精度は非常に高い損傷図の作成が可能となる。

ただし、どちらの展開画像でも 0.1mm 幅のひびわれを視認可能な品質を維持する必要がある。



**特徴**

- ・カメラ位置を中心に放射状に連続撮影。
- ・一連の画像の中で端部ほど歪みが発生する。
- ・マトリクス上に接合するが、歪みは残る。
- ・損傷の図化は、画像上の特徴的な点を参考にスケッチ。
- ・従来の近接目視と同等の損傷図作成は可能。(ひびわれは直線的な描画になる)
- ・面的に画像を確認できる。
- ・投影面の座標が分かれば、射影変換で疑似オルソ化が可能

**特徴**

- ・画像処理により展開画像を作成し、歪みの除去が可能。
- ・正対撮影が必須となる。
- ・画像解析に時間を要す
- ・撮影画像によっては、合成できない可能性もある。
- ・面的に画像を確認でき、正確に位置を把握しながら損傷評価が可能。
- ・画像上をトレースするため、損傷図作成が省力化できる。

図 6.5.3 2種類の展開画像

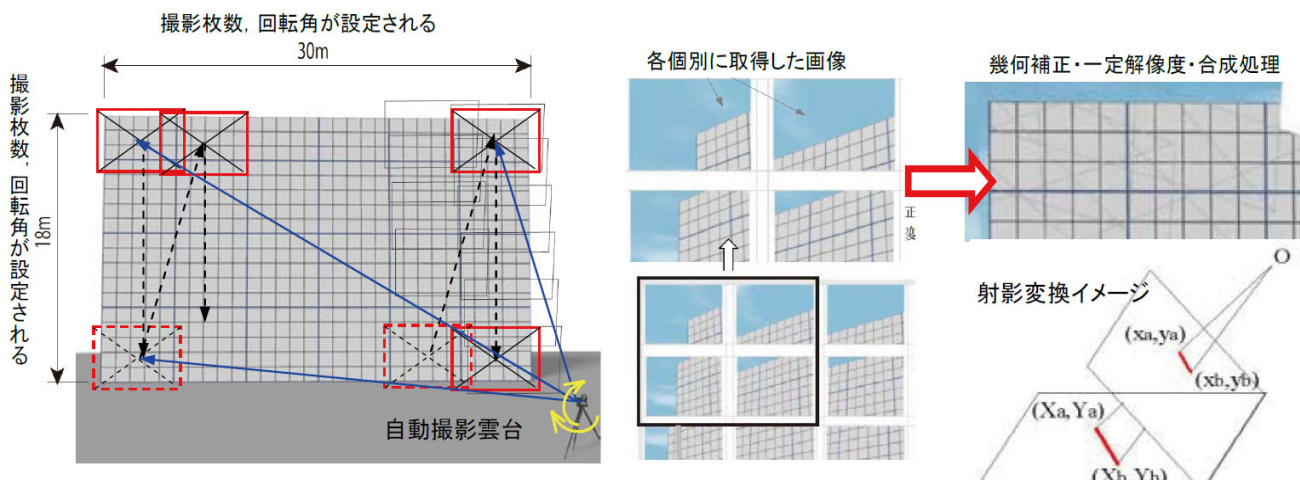


図 6.5.4 自動撮影雲台を用いた壁面撮影のイメージ<sup>12)</sup>

人による近接目視点検では、点検技術者が有害な損傷の有無を現地で判断し、有害な損傷についてスケッチと写真撮影し記録を残すこととなっている。この作業手順を、ロボット技術を活用した橋梁点検に当てはめてみると、ロボット技術を活用して近接画像を撮影しその展開画像の作成までが点検技術者が現地で点検対象部位に近接することに相当する。「6.4 ロボット技術の精度確認試験」でロボットで撮影した画像から損傷を視認するための精度は十分有していることから、位置を把握しつつ面的な点検が可能でありオルソ画像であれば必要に応じてその画像上を直接トレースすることで損傷図の作成ができ、点検作業の大幅な効率化可能となる。また、点検時の展開画像データを蓄積することで過去と現在の損傷の変化を容易に比較できるようになる等、橋梁定期点検の高度化を図ることができる。

その他、作成した高解像度の展開画像を大型モニタに等倍で映し出し、スクロールしながら損傷を視認することで、あたかも点検技術者が橋梁に近接して目視点検しているのと同じ感覚で評価を行う近接目視点検も可能となる。現地の状況を室内で再現でき、管理者・点検者が同じ視点で評価可能となる。図 6.5.5 は、精度確認試験で作成した橋脚のオルソ画像を大型モニタに等倍で表示し、ひびわれをトレースしている状況である。ひびわれのトレースは、タッチパネル用に改良した「ひびわれ位置・幅判読図化システム」を用いている。将来的には、橋梁を 3D モデル化し、VR 技術を用いたバーチャル点検も実装される可能性がある。図 6.5.6 は、コンクリート構造物を SfM 解析により 3D 化したデータを用いて、ヘッドマウントディスプレイにより VR 表示している様子である。

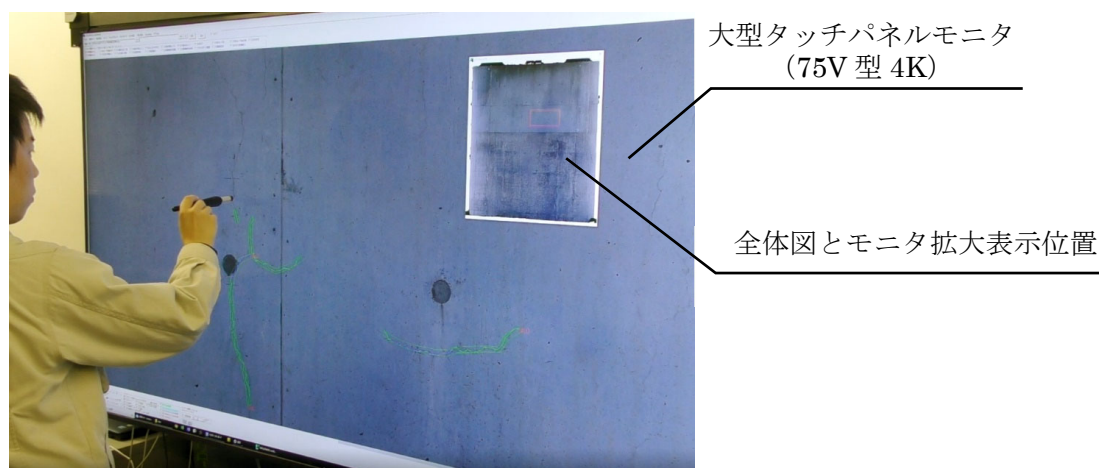


図 6.5.5 大型タッチパネルを用いた点検状況

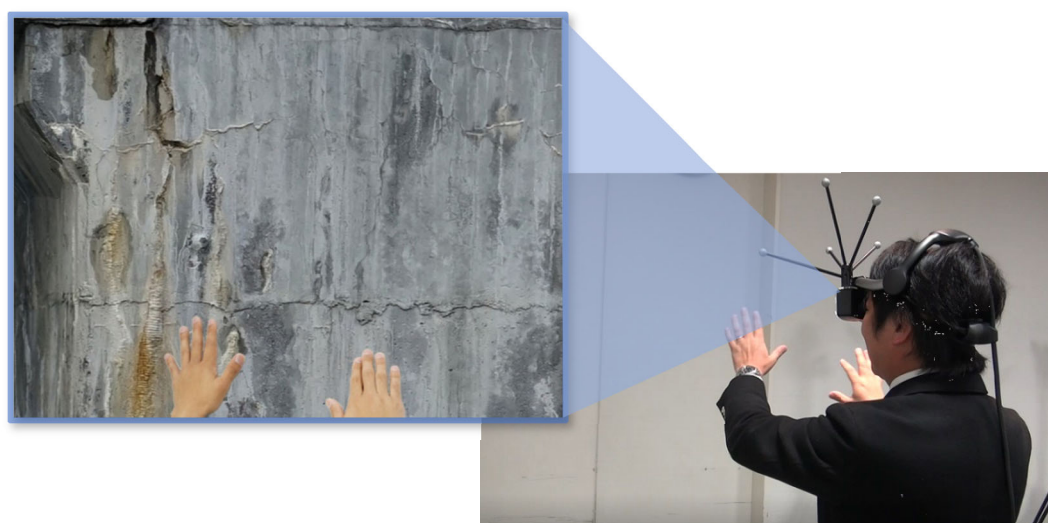


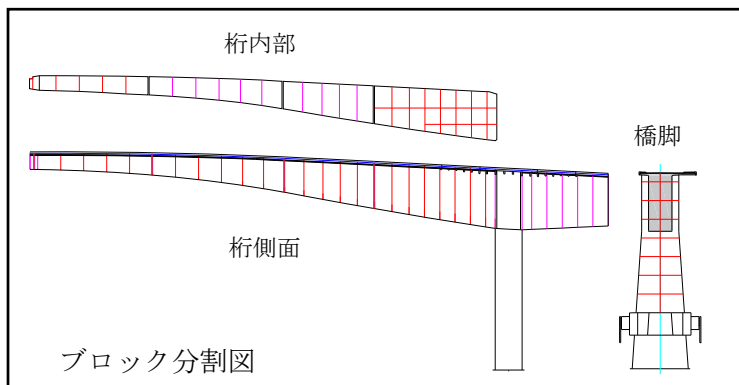
図 6.5.6 VR によるバーチャル点検のイメージ

◆ブロック分割による損傷程度評価手法

点検対象部位の面積が大きな場合は、一つの展開画像にすると展開画像の面積も画像データ容量も膨大になり作業性が低下し、かえって効率が悪くなる。江島大橋のような大型橋梁の場合には、点検対象部位をいくつかのブロックに細分化し、ブロック単位で展開画像を作成して損傷程度を評価することで効率化が可能である。損傷図の作成については、重大な損傷が発生しているブロックのみ損傷図を作成するもしくは、同じ損傷程度レベルの中から代表的なブロックの損傷図を作成するなど、損傷図作成にかかる作業を効率化することができる。以下に、大型橋梁の点検対象部位をブロック分割して損傷程度を評価する手法を示す。本実証試験では、この手法で損傷程度を評価することを要求した。

step1：点検対象部位をブロック分割

型枠目地等を基準に4～5m 間隔でブロック分割する。



step2：ブロック単位の損傷程度評価

step2-1：ブロック単位で有害な損傷を抽出

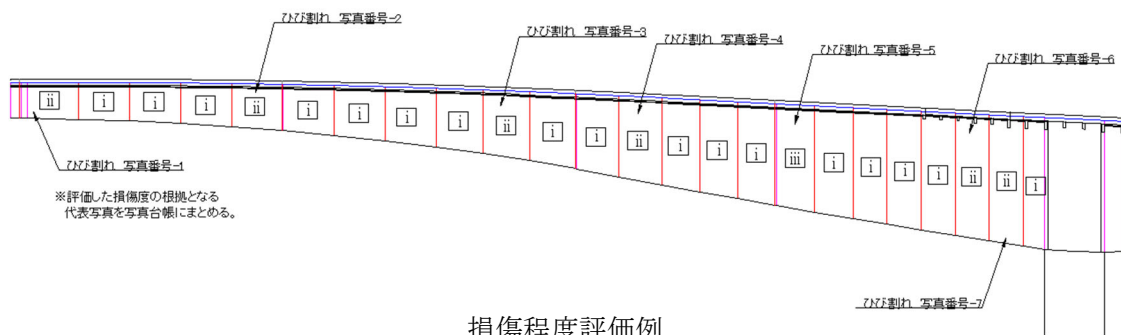
ブロック単位で展開画像を作成し、展開画像からひびわれ等の損傷を抽出  
最大ひびわれ幅と最小ひびわれ間隔を計測



デジタルクラックスケール

step2-2：ブロック単位で損傷程度評価

最大ひびわれ幅と最小ひびわれ間隔より、ブロック単位で損傷程度を評価し図面上に記載する。



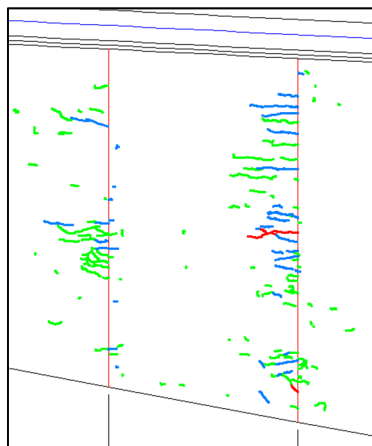
損傷程度評価例

図 6.5.7 ブロック単位の損傷程度評価（1）

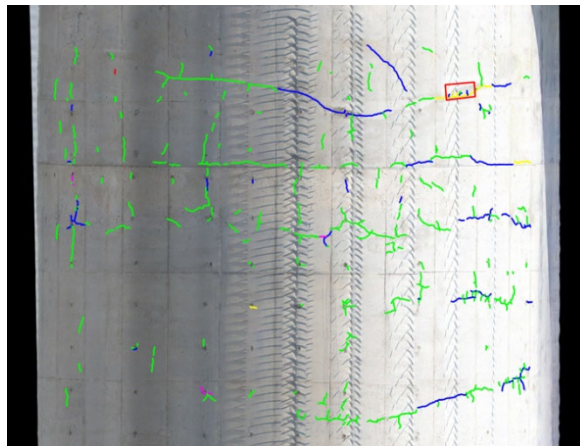


step3 : 代表的なブロックの損傷図を作成

各部位（桁側面、下面、張出下面等）で代表的なブロックの損傷図を作成



損傷図作成例（桁側面）



損傷図作成例（橋脚）

step4 : 点検調書の作成

点検調書の写真台帳に損傷程度（ii）以上と評価した根拠となる画像を貼付する。使用する画像は、展開画像若しくは撮影オリジナル画像をキャプチャしたもので良い。

また、ブロック単位の最大損傷程度を要素の損傷程度として点検調書に記載する。



点検調書記載例

図 6.5.8 ブロック単位の損傷程度評価（2）

### 6.5.3 作業状況

以下に各チームの作業状況の一例を示す。なお、各チームの作業のサイクルタイム算出のため、各作業項目に要した時間を記録した。



機材の搬出入



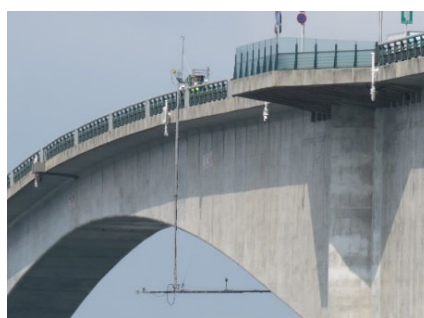
カメラの設置・準備  
橋梁点検ロボットカメラ



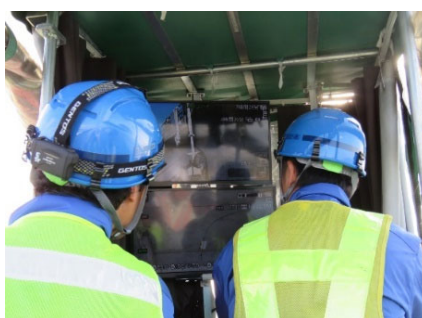
桁内撮影状況



ロボットの歩道への搬入



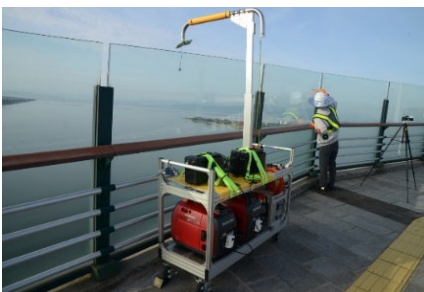
桁下面撮影状況  
橋梁点検支援ロボット『見る・診る』



橋上での点検状況



台船上でのロボットの準備



橋上の資機材（給電装置）  
二輪型マルチコプタ



橋脚撮影状況



橋上でのデータ確認状況



張出下面の点検状況  
打音機能付飛行ロボット



ロボット操作者の目線

図 6.5.9 各ロボットの作業状況

### 6.5.4 展開画像

以下に各チームが作成した展開画像の一例を示す。

#### (1) 橋梁点検ロボットカメラ

マトリクス状に撮影された画像を接合したものが展開画像となる。カメラ位置を中心に放射状に撮影するため、接合後はゆがみが生じた状態となる。撮影範囲のうち展開画像の一例を以下に示す。

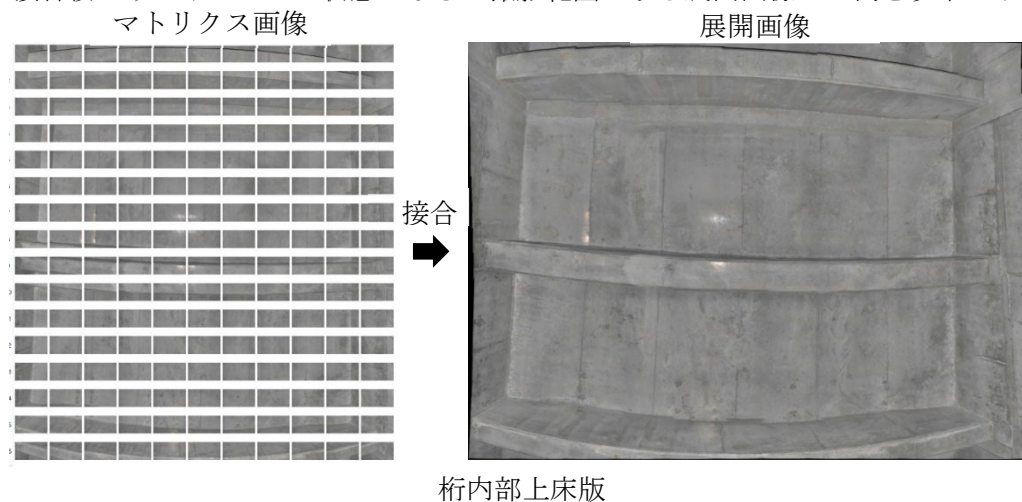


図 6.5.10 橋梁点検ロボットカメラで撮影した画像から作成した展開画像

#### (2) 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』

撮影範囲の展開画像は概ね作成できている。撮影毎にクラックスケールを写し込むため、全範囲にクラックスケールが配置された展開画像となっている。

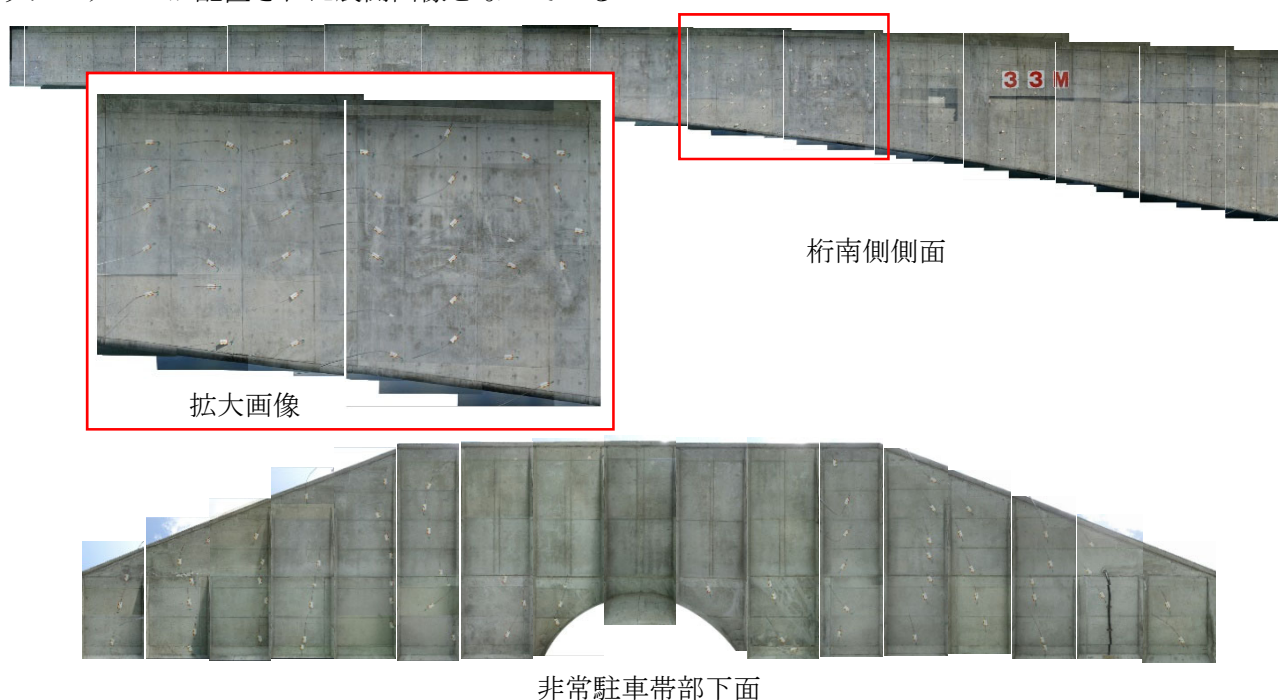


図 6.5.11 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』で撮影した画像から作成した展開画像

#### (3) 二輪型マルチコプタ

大部分の展開画像は作成できているが、それぞれの部位に抜け(欠測)が生じている。桁側面の上部は、張出床版近くになると UAV の挙動が安定せず撮影できていない部分である。橋脚最上部も同様の理由で

撮影ができず、最下部も撮影できていない。構造物の端部や形状が大きく変化する箇所は UAV の接近が難しく欠測となる箇所が発生してしまう。欠測部が生じる場合は、他のロボット技術等で補完する必要がある。

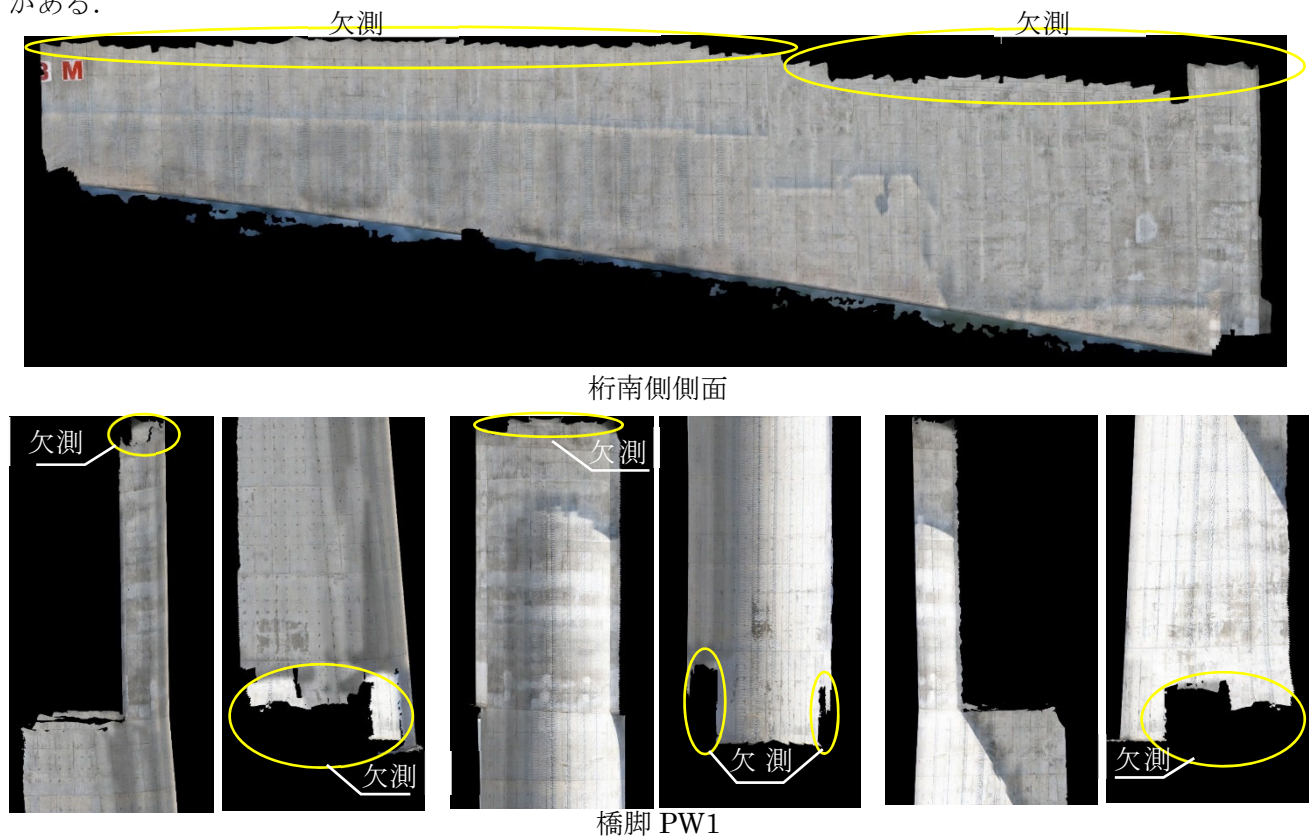


図 6.5.12 二輪型マルチコプタで撮影した画像から作成した展開画像

### 6.5.5 損傷程度の評価について

各開発チームが作成した展開画像から損傷程度の評価を実施し、各部材の損傷程度の最も高いブロックについては損傷図の作成も実施した。損傷程度の評価は「鳥取県道路橋りょう定期点検マニュアル<sup>13)</sup>」に準じて実施した。表 6.5.1 および表 6.5.2 にひびわれと浮きに対する損傷程度の評価基準を示す。

表 6.5.1 ひびわれの損傷程度評価基準<sup>13)</sup>

#### a) 最大ひびわれ幅 (mm)

区分	上部工		下部工	
	RC	PC	RC	無筋
大	$0.3 \leq W$	$0.2 \leq W$	$0.3 \leq W$	$0.5 \leq W$
中	$0.2 \leq W < 0.3$	$0.1 \leq W < 0.2$	$0.2 \leq W < 0.3$	$0.3 \leq W < 0.5$
小	$W < 0.2$	$W < 0.1$	$W < 0.2$	$W < 0.3$

注：PC 橋の横締め部後打ちコンクリート等、当該構造自体は RC 構造であっても、部材全体としては PC 構造である部材は、PC 構造物として扱う。

#### b) 最小ひびわれ間隔 (発生密度)

区分	一般的状況
密	ひびわれ間隔が小さい (最小ひびわれ間隔が概ね 0.5m 未満)
粗	ひびわれ間隔が大きい (最小ひびわれ間隔が概ね 0.5m 以上)

区分	構造物への影響大※		構造物への影響小	
	最大ひびわれ幅	最小ひびわれ間隔 (発生密度)	最大ひびわれ幅	最小ひびわれ間隔 (発生密度)
i	損傷なし		損傷なし	
			小	粗
			小	密
ii	小	粗	中	粗
			中	密
iii	小	密	大	粗
	中	粗		
iv	中	密	大	密
	大	粗		
v	大	密	/	/
	幅 0.3mm 以上の曲げひびわれ または せん断ひびわれ			

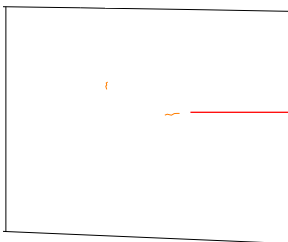
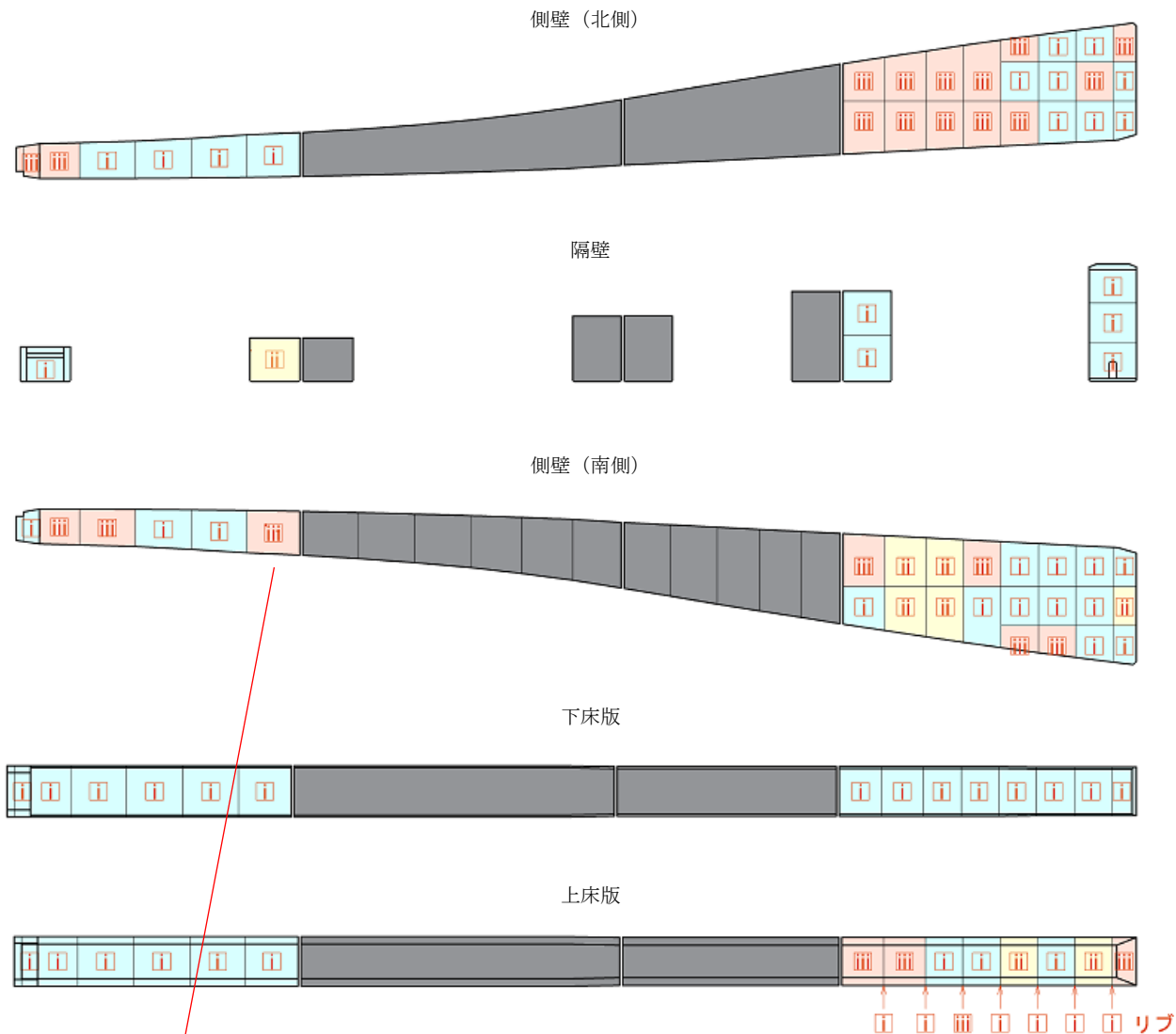
表 6.5.2 浮きの損傷程度評価基準<sup>13)</sup>

区分	一般的状況
i	損傷なし
ii	—
iii	うきがある。

【桁内部（側壁・上床版・下床版・隔壁）】

[I] 橋梁点検ロボットカメラ

桁内部については幅 0.2~0.5mm 程度のひびわれが点在しており、局部的に幅 1.5mm 程度のものも認められた。ひびわれ長さは 0.5m 以下の比較的短いものが主であった。損傷程度としては i ~ iii である。



損傷図（拡大）

写真番号	24	径間番号	PW1-中央ヒンジ	撮影年月日	2018年7月5日
部材名	南側WEB	要素番号	19	メモ	
損傷の種類	ひび割れ	損傷程度	iii	W=0.2mm L=0.3m	

損傷部の拡大写真

損傷程度の凡例

	損傷度 i
	損傷度 ii
	損傷度 iii
	損傷度 iv
	損傷度 v

図 6.5.13 桁内調査結果（橋梁点検ロボットカメラ）

【桁外部（桁側面・桁下面・張出床版下面）】

【II】橋梁点検支援ロボット『見る・診る』

【III】二輪型マルチコプタ

桁側面は打ち継ぎ目付近を中心にひびわれが発生していた。ひびわれ幅は最大で0.2mm程度であり、ひびわれ密度も密であった。損傷程度としてはiii～ivが主であった。

桁下面是0.2mm未満のひびわれが発生しており、損傷程度としてはi～iiであるが、一部で浮きと思われる箇所があったため、損傷程度をiiiとした。

張出床版下面についてはひびわれの発生は少ないが非常駐車帯部で遊離石灰の析出が確認された。損傷程度としてはi～iiが主であった。

桁側面の損傷程度の評価はiii～ivが主であるが、ひびわれ発生の原因は先打ちコンクリートの拘束による乾燥収縮ひびわれであり何らかの劣化機構を原因とするひびわれではないため、この点を考慮して部材の健全性を評価する必要がある（注1）。

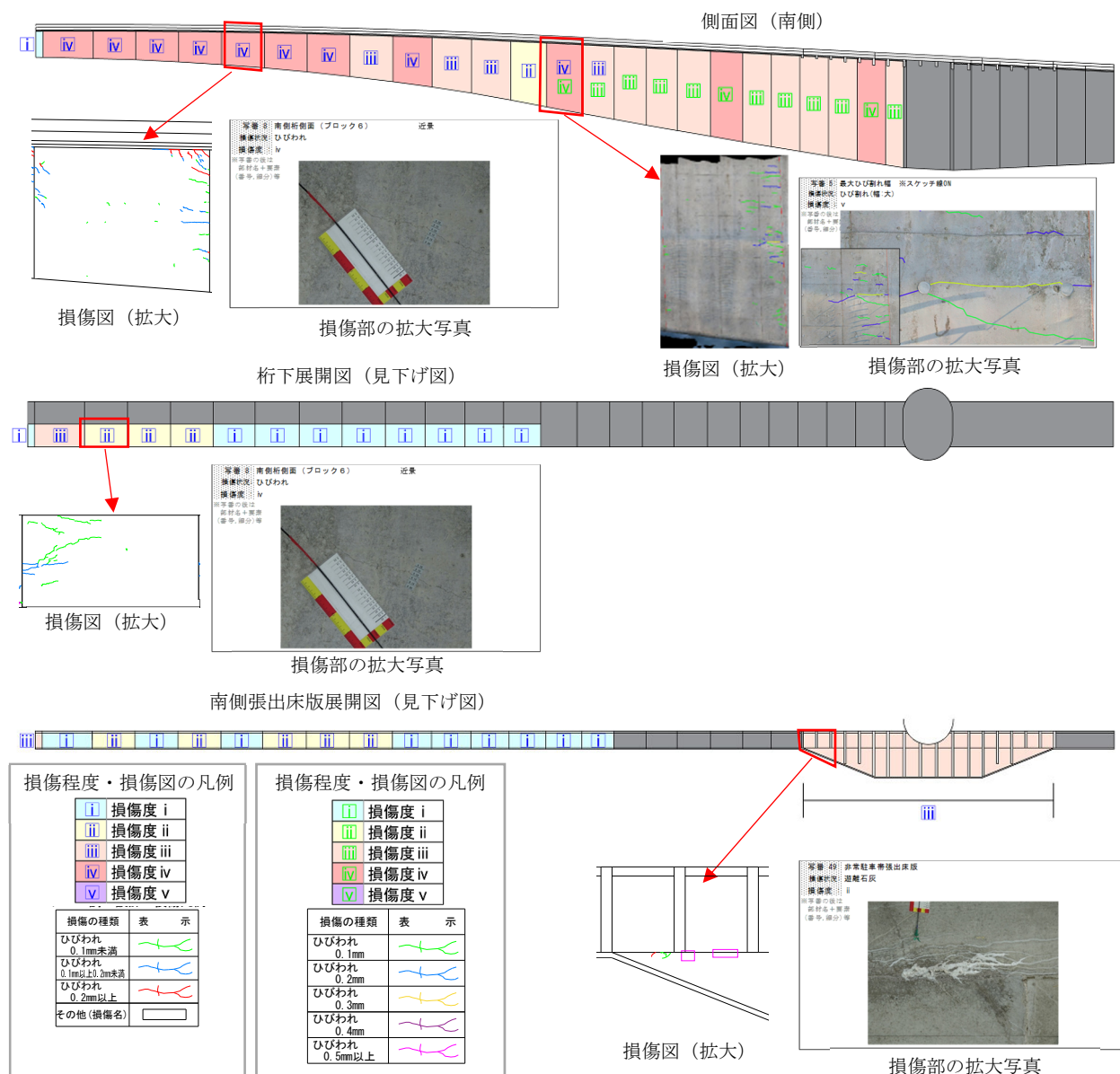


図 6.5.14 桁外面調査結果

（二輪型マルチコプタ・橋梁点検支援ロボット『見る・診る』）

【橋脚 (PW1)】

[Ⅲ] 二輪型マルチコプタ

橋脚は全面にわたって微細なひびわれが発生していた。ひびわれ幅は0.1~0.2mm程度が主であるが、一部で幅0.5mm程度のひびわれも確認された。損傷程度の評価結果はivであった。

評価基準に基づいて機械的に損傷程度を評価するとivとなるが、ひびわれ発生の原因は、コンクリート打設時の沈下ひびわれ(主にセパレータ下に発生)や乾燥収縮ひびわれなどであり、何らかの劣化機構を原因とするひびわれではないため、この点を考慮して部材の健全性を評価する必要がある(注1)。

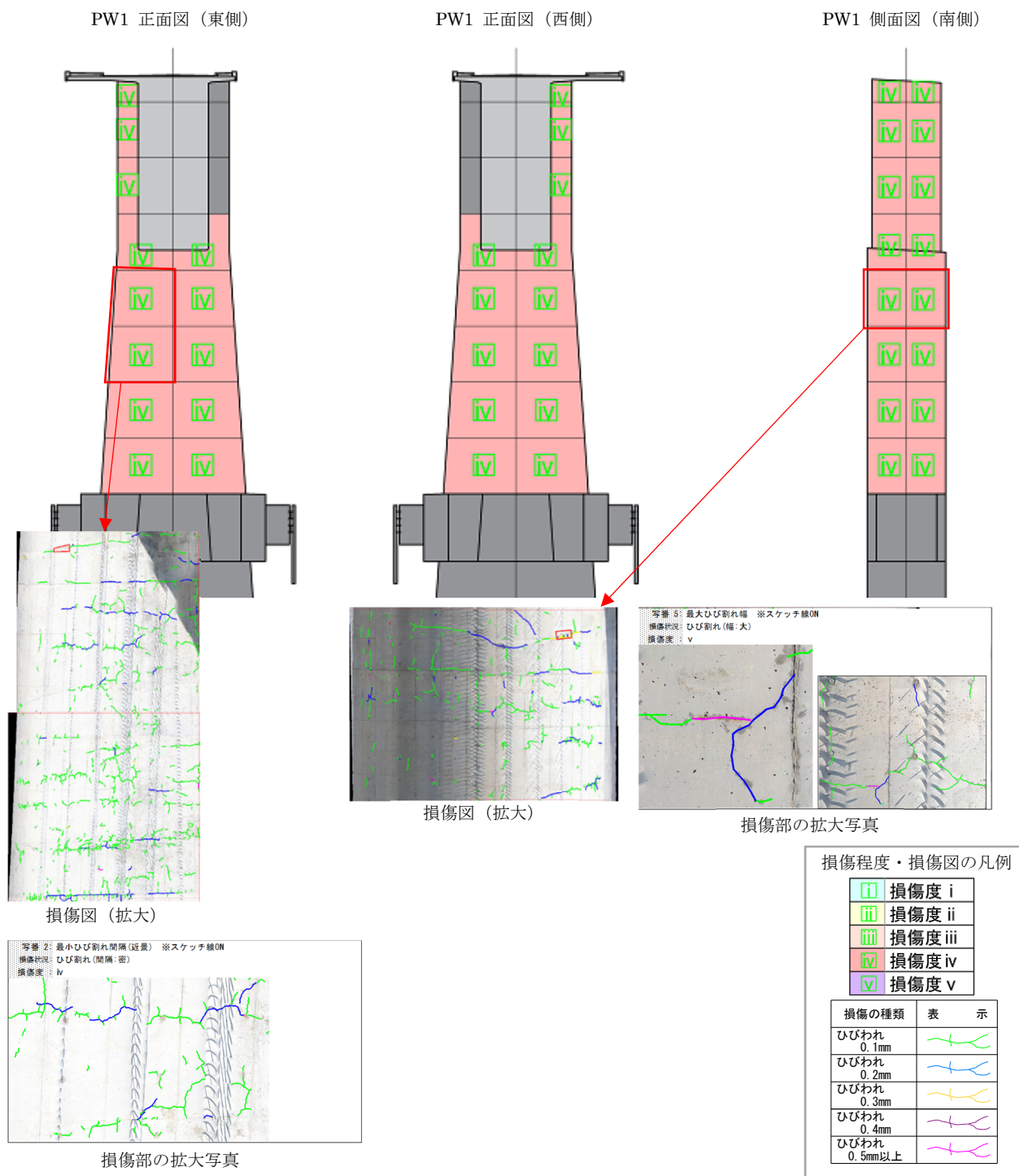


図 6.5.15 橋脚 (PW1) 調査結果 (二輪型マルチコプタ)

【桁外部（張出床版下面）】

[IV] 打音機能付飛行ロボット

以下に打音信号スペクトルから評価した結果を示す。異常部は黄色～赤色で表示されるが、今回の調査範囲においては浮きと思われる箇所は確認されなかった。そのため、損傷程度は i とした。

南側張出床版下面展開図（見下げ図）

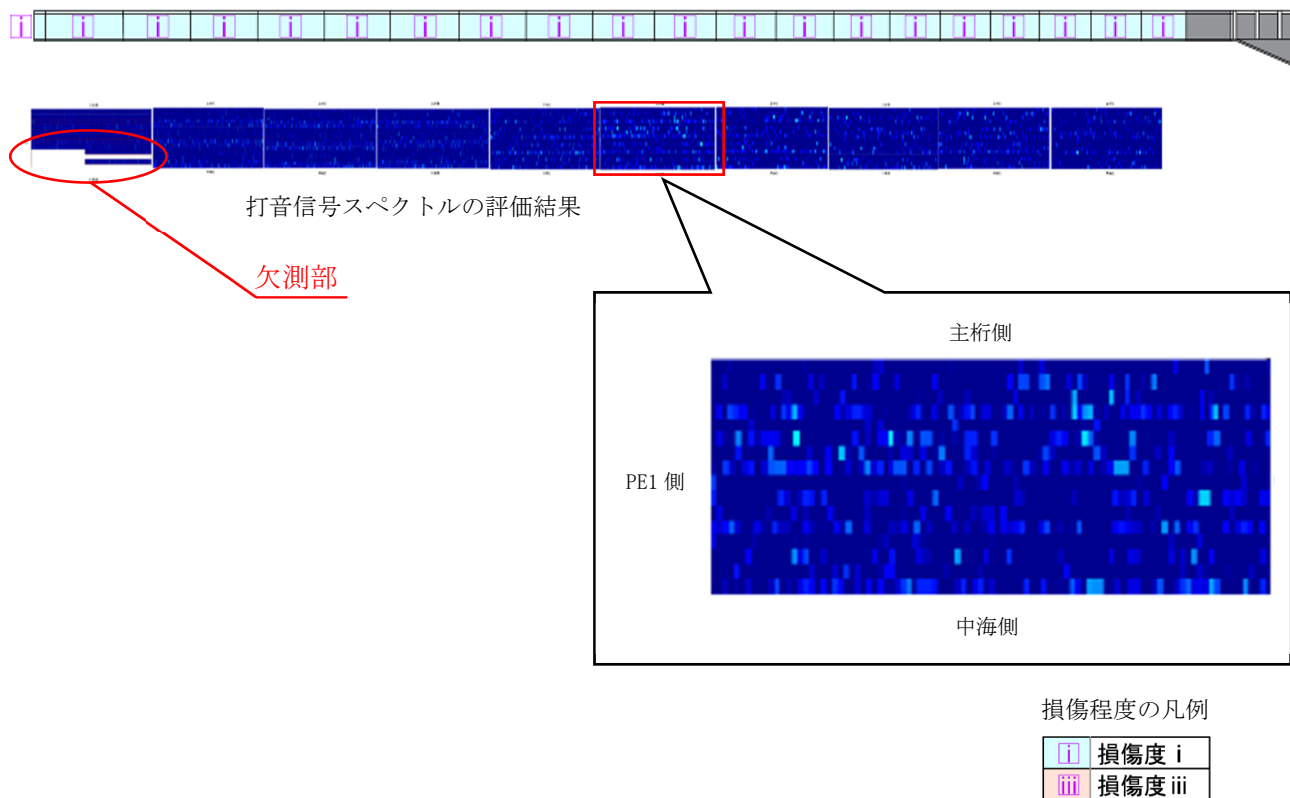


図 6.5.14 打音信号スペクトルの評価結果（打音機能付飛行ロボット）

（注 1）

画像撮影ロボットによって撮影した画像をもとに、鳥取県道路橋りょう定期点検マニュアルに示された損傷程度の評価基準に従って損傷程度を評価すると、箱桁内部においては一部「損傷程度 iii」、箱桁外部の桁側面においては「損傷程度 iii あるいは iv」、橋脚においては「損傷程度 iv」という結果が得られた。このような評価結果になった原因は、箱桁の側面に見られる先打ちコンクリートの拘束による乾燥収縮ひびわれ、橋脚に見られる乾燥収縮ひびわれあるいはセパレータ周辺に発生したコンクリート打設時のコンクリートの沈下によるひびわれなどであった。これらのひびわれは、劣化機構（塩害、ASR、凍害、中性化、コンクリート床板の疲労、科学的侵食など）を原因とするものではないことから、人による近接目視点検であれば有害な損傷（変状）として認識されない可能性が非常に大きい。部材の健全性を評価する段階では損傷として記録されたひびわれの原因を考慮することになるので、今回の点検対象部位の健全性評価が「3」以上になることはないと思うが、ロボットを活用した点検では有害なひびわれと無害なひびわれが区別されずに損傷程度が評価されることになるので注意を要する。



## 6.6 損傷程度評価に関する考察

### 6.6.1 損傷程度の評価結果について

各ロボット技術とも損傷程度の評価を行ううえで、十分な精度を保有していることが実証されており、実証試験範囲においては真値との比較検討はできないものの、精度確認試験と同等の質を保持した情報を取得できている。

「6.5.5 損傷程度の評価について」に示すように、取得した情報をもとに従来の近接目視による点検と同様の損傷抽出、損傷程度評価、点検調書作成も実施できた。また、ブロック分割による損傷程度評価を採用したことで損傷程度の評価を効率的に実施できた。

### 6.6.2 損傷抽出時の留意点

損傷程度の評価結果のほとんどは妥当でありチームによる偏りは見られなかったが、撮影画像から損傷の抽出を行う上で留意すべき点について以下に示す。

#### ・留意点1「ひびわれの誤認」

箱桁内においてひびわれが抽出され「損傷程度 ii」と評価されたブロック（図 6.6.1）の展開画像（図 6.6.2）を再確認した。図 6.6.3 に抽出されたひびわれの拡大画像を示す。赤枠内に黒い「すじ」が見られ、これをひびわれと判断したと思われるが、展開画像を再確認したところこの「すじ」は直線的で施工の際に付いたものと思われる。これを損傷と判断しそのひびわれ幅が 0.1mm 以上であったことから「損傷程度 ii」と判断したと思われるが、これを損傷と判断しなかった場合は「損傷程度 i」となり評価結果に違いが生じる。

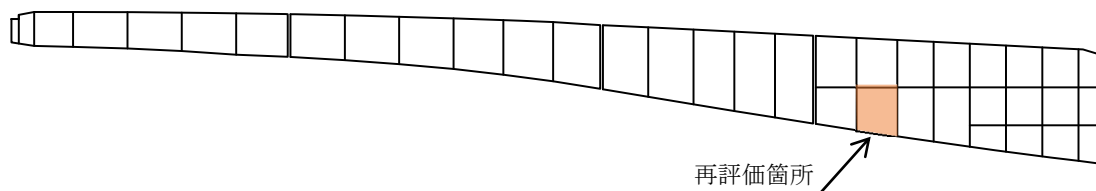


図 6.6.1 箱桁内部 側面（南側）



図 6.6.2 ブロック単位の展開画像

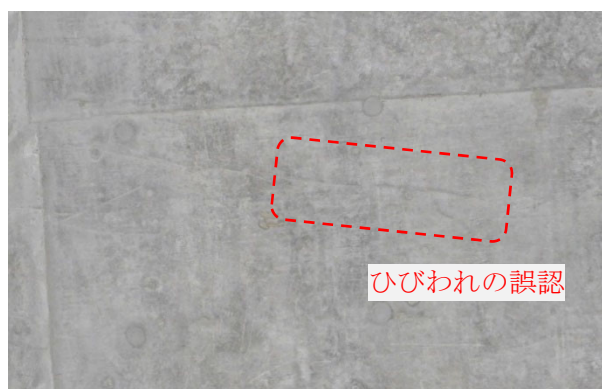


図 6.6.3 展開画像 拡大部①

・留意点2「ひびわれ幅の違い」「ひびわれの未抽出」

橋梁点検支援ロボット『見る・診る』と二輪型マルチコプタの2つのロボット技術で橋梁上部工の同一ブロック（図6.6.4）を点検していることから、評価内容にどのような差があるかを再確認した。ちなみに2つのロボット技術による損傷程度の評価はともに「iv」であった。

図6.6.5および図6.6.6にそれぞれの展開画像を示す。両者の展開画像はともにひびわれを視認する上で十分な画質を有している。それぞれの展開画像から同一個所のひびわれの画像を抜粋した。

図6.6.7および図6.6.8に拡大部①の画像を示す。橋梁点検支援ロボットでは「0.1mm以上0.2mm未満のひびわれ」と判断しているが、二輪型マルチコプタでは「0.3mmのひびわれ」と判断している。このひびわれが評価対象ブロックの最大ひびわれ幅だった場合、橋梁点検支援ロボットでは「最大ひびわれ幅：中、最小ひびわれ間隔：密」の「損傷程度ii」、二輪型マルチコプタでは「最大ひびわれ幅：大、最小ひびわれ間隔：密」の「損傷程度iv」と評価され評価結果に違いが生じることになる。

図6.6.9および図6.6.10に拡大部②の画像を示す。赤枠内を橋梁点検支援ロボットではひびわれとして抽出しているが、二輪型マルチコプタではひびわれとして抽出していない。このひびわれが評価対象ブロックのひびわれの中で最大ひびわれ幅であった場合、評価結果に違いが生じることになる。

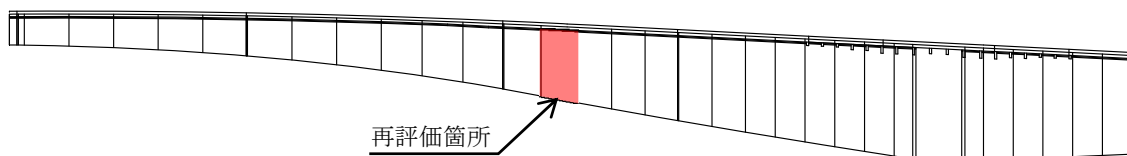


図 6.6.4 箱桁側面図（南側）



図 6.6.5 展開画像  
(橋梁点検支援ロボット)



図 6.6.6 展開画像  
(二輪型マルチコプタ)



図 6.6.7 展開画像 拡大部①  
(橋梁点検支援ロボット『見る・診る』)



図 6.6.8 展開画像 拡大部①  
(二輪型マルチコプタ)

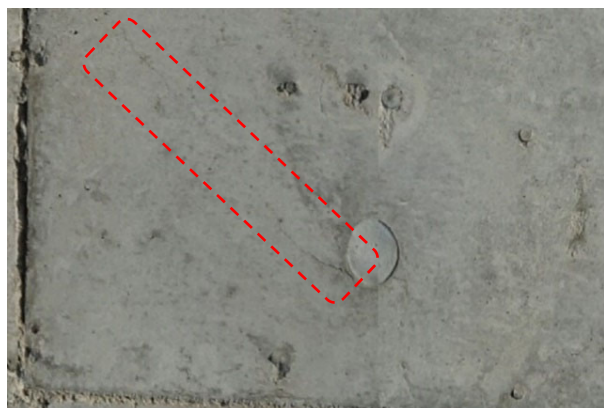


図 6.6.9 展開画像 拡大部②  
(橋梁点検支援ロボット『見る・診る』)



図 6.6.10 展開画像 拡大部②  
(二輪型マルチコプタ)

### 6.6.3 ひびわれ抽出結果の違いとその原因

ひびわれ抽出結果に関しては、「ひびわれの誤認」、「ひびわれ幅の計測誤差」、「ひびわれの抽出・未抽出」などの違いが見られた。このような違いが発生した原因を表 5-7 に示した。

ひびわれ抽出結果の違いが発生する原因は大きく 3 つに分類できる。1 つ目はカメラ性能・解像度に起因するもの、2 つ目はひびわれ幅算出システムに起因するもの、3 つ目は点検技術者に起因するものである。

カメラ性能・解像度に起因する画像の鮮明さ(画質)はひびわれなどの損傷を抽出するためには一定以上の品質が必要となる。これが満たされない場合、ひびわれの誤認やひびわれの未抽出などの問題が発生しやすい。

一方、点検技術者の熟練度などの点検技術者に起因する問題は、通常の近接目視による点検と同様に生じる問題である。例えば一方の技術者はあるひびわれを重要ではないと考えひびわれを抽出しなかったのに対し、もう一方の技術者は確認されたひびわれはすべて抽出するという事象が生じる可能性がある。

また、開発技術によってひびわれ幅を算出するシステムが異なると、システムに起因する問題と点検技術者に起因する問題の両者が関わってくる。ひびわれ幅を自動で判定する技術であればシステムに起因する問題であるが、PC 画面上でデジタルクラックスケールを宛がうような手動の方法であれば、点検技術者に起因する部分も含まれてくる。

表 6.6.1 ひびわれ抽出結果の違いとその原因

ひびわれ抽出結果の違い	原因	原因の区分
ひびわれの誤認	画像の鮮明さ（画質）	カメラ性能・解像度に起因
	技術者のひびわれに関する知識不足	点検技術者に起因
	画像からひびわれを判断する技術者の熟練度	点検技術者に起因
ひびわれ幅の違い	画像の鮮明さ（画質）	カメラ性能・解像度に起因
	ひびわれ幅を算出するシステムの違い （自動、手動など）	自動：ひびわれ幅算出システムに起因 手動：点検技術者に起因するものも含まれる
	画像からひびわれを判断する技術者の熟練度	点検技術者に起因
ひびわれの未抽出	画像の鮮明さ（画質）	カメラ性能・解像度に起因
	画像からひびわれを判断する技術者の熟練度	点検技術者に起因
	ひびわれを抽出する技術者の丁寧さ	点検技術者に起因

#### 6.6.4 総評

上記に示した事象はあるものの江島大橋渡海部の点検範囲においては一部に確認されたのみであり、全体としては妥当な結果が得られた。精度確認試験で一定以上の精度が担保された技術を用いれば上記の事象が生じた場合においても損傷程度の評価結果が大きく異なることはないと考えられる。つまり、ロボット技術を活用するうえで基本的な画像の品質が担保されていれば従来の近接目視点検と同等の点検は可能と言える。さらに、ロボット技術により部材全体の画像を撮影していれば、複数の技術者による精査が可能であるということや経年変化を捉えやすく客観的で定量的な評価が可能というメリットがある。しかし、画像の品質や点検技術者の技量によっては、ひびわれの誤認や未抽出、幅の計測結果の違いが生じる可能性があるため、対象となる損傷を抽出するのに適切な解像度で均質な画像を取得することは重要である。また、今後の課題として画像から損傷を把握するための技術者の教育やルールの整備が挙げられる。画像から損傷を把握する教育を実施することで技術者の技量の向上を図ることができ、統一した規格で教育することで技術者の技量による損傷評価の差異も小さくなることが期待できる。さらに、画像による点検の具体的なルール（撮影解像度、使用するカメラ、抽出すべき損傷等）を整備することにより統一した考え方で、より客観的なデータの取得や評価を行うことができると考えられる。







### 6.7.2 ロボット技術を活用した橋梁点検業務の積算基礎資料作成

#### (1) 積算基礎資料作成の手順

以下に、「ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務の積算基礎資料」の作成手順を示す。

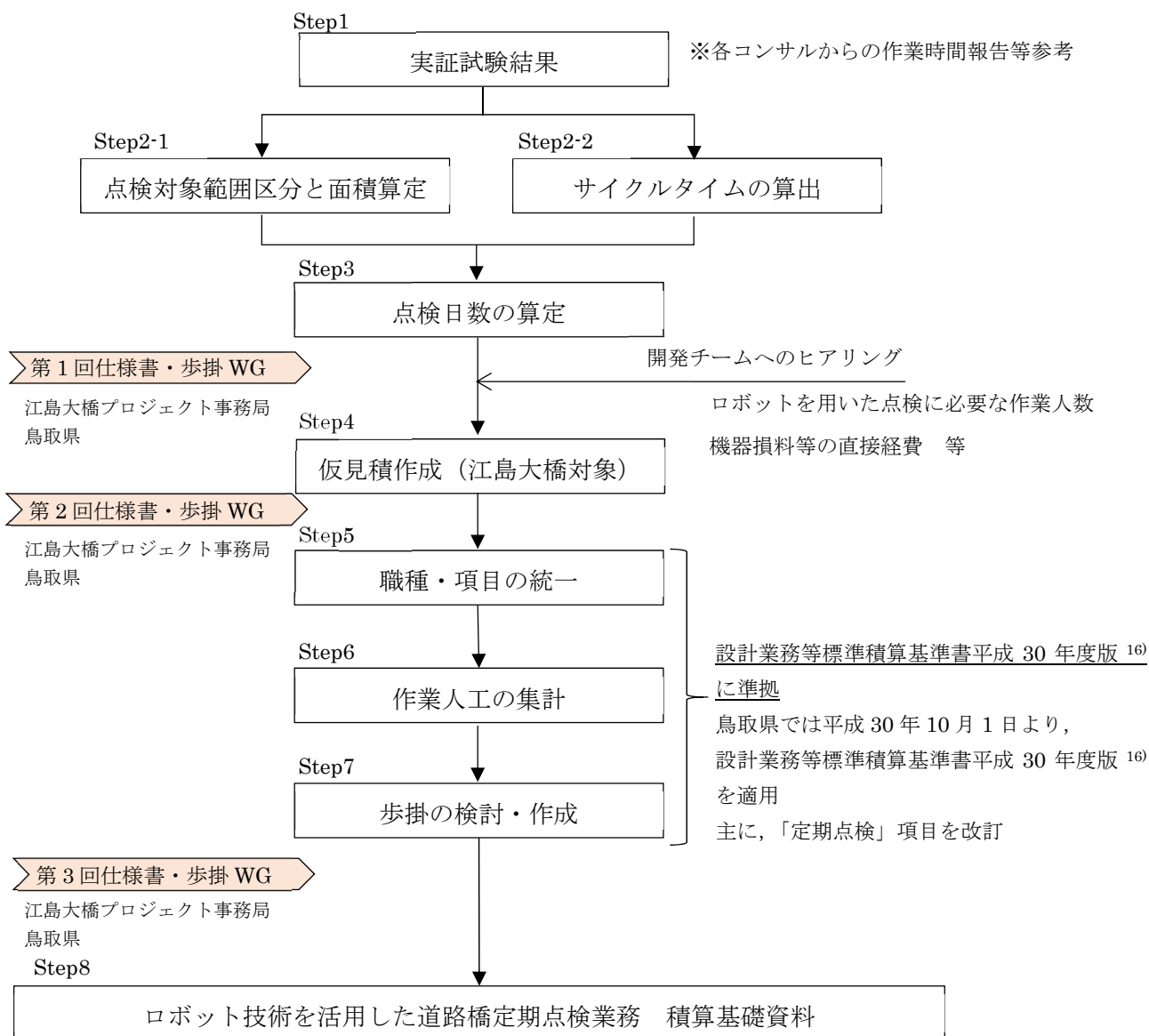


図 6.7.5 積算基礎資料作成の流れ



(2) ロボット技術の点検範囲と点検面積算定

本実証試験結果より今回実施した4つのロボット技術を組み合わせることで、各部位の点検に活用できることが実証された。江島大橋渡海部を対象とした場合の各ロボット技術の点検範囲区分図と対象面積を図6.7.6および表6.7.1に示す。なお、点検範囲の区分は各ロボット技術の特徴を活かしつつ全範囲を効率的に点検できるよう設定した。

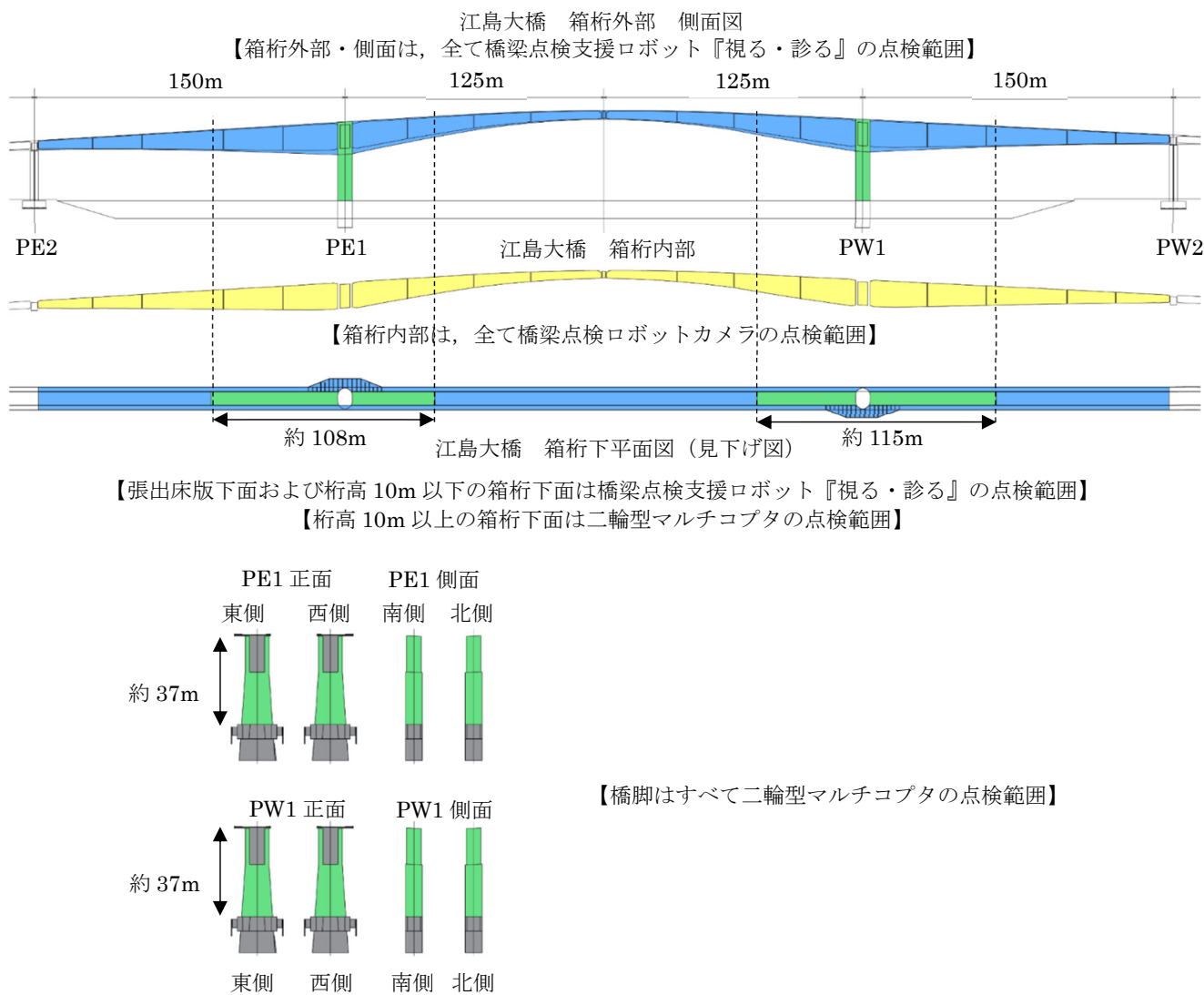


図 6.7.6 点検範囲

表 6.7.1 点検範囲と点検面積

点検範囲	ロボット技術 (開発チーム)	点検面積	凡例
箱桁内部	橋梁点検ロボットカメラ (三井住友建設)	16,000 m <sup>2</sup>	<span style="background-color: yellow; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>
箱桁外部・側面	橋梁点検支援ロボット『見る・診る』 (ジビル調査設計)	9,658 m <sup>2</sup>	<span style="background-color: lightblue; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>
張出床版下面 (非常駐車帯含む)		3,012 m <sup>2</sup>	<span style="background-color: lightblue; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>
箱桁外部・下面		2,054 m <sup>2</sup>	<span style="background-color: lightblue; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>
橋脚	二輪型マルチコプタ (富士通)	1,323 m <sup>2</sup>	<span style="background-color: lightgreen; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>
張出床版下面 (打音検査)	打音機能付飛行ロボット (新日本非破壊検査)	2,800 m <sup>2</sup>	<span style="background-color: lightgreen; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>

(3) 点検日数の算定

実証試験結果より各作業のサイクルタイムを算出(表 6.7.2~6.7.5)し、そこから点検範囲の点検に必要な時間・日数をロボット技術ごとに算定し、表 6.7.6 にまとめた。

[I] 橋梁点検ロボットカメラ

点検初回時と撤収時に全機材の搬入にやや時間を要すが、基本的には主要な機材は、箱桁内に仮置きが可能であり、日々の作業時の準備では作業員の移動が主である。

撮影対象箇所へのカメラ移動・設置と撮影を 1 サイクルとした場合、実証試験結果よりカメラ移動・設置作業に 10 分、撮影作業に 25 分かかっていることから、サイクルタイムを 35 分とした。

表 6.7.2 橋梁点検ロボットカメラのサイクルタイム

実証試験結果から想定されるサイクルタイム (初回時)

0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	項目	備考	時間 (分)	サイクルタイム (分)
																作業員昇降	PW3より進入	30	30
																機材搬入	PW3より荷上げ	90	
																桁内移動	その日の撮影位置による	10~30	10~30
																カメラ設置	移動 撮影設定	10	35
																撮影	1ブロック当たり	25	
																機材仮置き	桁内に機材残置	30	30
																桁内移動	その日の撮影位置による	10~30	10~30
																作業員昇降		30	30

実証試験結果から想定されるサイクルタイム (通常時)

0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	項目	備考	時間 (分)	サイクルタイム (分)
																作業員昇降	PW3より進入	30	30
																桁内移動	その日の撮影位置による	10~30	10~30
																カメラ設置	移動 撮影設定	10	35
																撮影	1ブロック当たり	25	
																機材仮置き	桁内に機材残置	30	30
																桁内移動	その日の撮影位置による	10~30	10~30
																作業員昇降		30	30

実証試験結果から想定されるサイクルタイム (撤収時)

0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	項目	備考	時間 (分)	サイクルタイム (分)
																作業員昇降	PW3より進入	60	60
																桁内移動	その日の撮影位置による	10~30	10~30
																カメラ設置	移動 撮影設定	10	35
																撮影	1ブロック当たり	25	
																桁内移動	その日の撮影位置による	10~30	10~30
																機材搬出		90	120
																作業員昇降		30	

[II] 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』

点検開始時と最終日の機材撤収時に、非常駐車帯の防護柵撤去・復旧作業とロボットの歩道乗り入れ作業が必要となるが、点検期間中は夜間にロボットを歩道上に仮置きすることで、点検期間中は一部部品の解体および組立の時間を除きほぼ全日を点検作業に集中することができる。

当ロボット技術は、繰り返し作業ではなく面的に連続点検作業を行うことから、サイクルタイムは 360 分と設定した。

表 6.7.3 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』のサイクルタイム

実証試験結果から想定されるサイクルタイム（初回時）

0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	項目	備考	時間（分）	サイクルタイム（分）
																防護柵撤去		30	30
																ロボット搬入	路面かさ上げ 車両で搬入	60	60
																ロボット組立	組立位置へ移動 ロボット組立	60	60
																防護柵復旧		30	30
																点検・撮影		240	240
																ロボット一部解体	橋上への仮置き 養生	60	60
																資機材撤収	必要機材のみ撤収	10	10

実証試験結果から想定されるサイクルタイム（通常時）

0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	項目	備考	時間（分）	サイクルタイム（分）
																ロボット一部組立	橋上に仮置きしていた状態から再開	30	30
																点検・撮影		360	360
																ロボット一部解体	橋上への仮置き 養生	60	60
																資機材撤収	必要機材のみ撤収	10	10

実証試験結果から想定されるサイクルタイム（撤収時）

0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	項目	備考	時間（分）	サイクルタイム（分）
																ロボット一部組立	橋上に仮置きしていた状態から再開	30	30
																点検・撮影		180	180
																ロボット解体		60	60
																防護柵撤去		30	30
																ロボット搬出	路面かさ上げ 車両で搬出	60	60
																防護柵復旧		90	90
																資機材撤収		10	10

【Ⅲ】 二輪型マルチコプタ【富士通】

点検実施日毎に、台船へのロボット機材搬入・台船移動・ロボット動作確認などの準備作業に 1.5 時間、点検作業後の機材撤収と台船移動のために 1.5 時間を要する。橋上での準備作業は台船移動時間中に完了する。

点検作業の 1 サイクルに必要な時間は実証試験結果より、「ロボットの吊り下げ・有線給電による電源 ON・ロボット起動」に約 5 分、「撮影対象位置までの飛行・撮影（点検）・着陸点への移動」に約 13 分、「UAV 停止・ロボットの電源 OFF」に約 5 分、「画像確認とオペレータの休息」に約 10 分、合計約 33 分であった。日数計算では 1 サイクル 35 分として計算した。

表 6.7.4 二輪型マルチコプタのサイクルタイム

実証試験結果から想定されるサイクルタイム

0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	項目	備考	時間（分）	サイクルタイム（分）
																セッティング	台船への機材搬入・台船セット、橋上へ給電装置搬入	30	30
																準備作業	台船上:ロボット動作確認	30	30
															橋上:給電装置設置、動作確認		30		
															橋上から給電ケーブルの降下		30		
																吊り下げ		5	33
															有線給電ON				
															ロボット起動				
															撮影	開始位置への飛行	1.5		
																【橋脚】1往復（1ライン） 高さ約37m 5分	10		
																【側面】1往復（1ライン） 平均高さ約10m 2分			
																【下面】1往復（1ライン） 延長50m 3分			
																停止位置への飛行	1.5		
															UAV停止		5		
															有線給電OFF				
															画像確認		10		
															休憩				
																撤収作業	橋上撤収・台船帰港	90	90

**【IV】 打音機能付飛行ロボット【新日本非破壊検査】**

点検実施日毎に、台船へのロボット機材搬入・台船移動・ロボット動作確認などの準備作業に 1.5 時間、点検作業後の機材撤収と台船移動のために 1.0 時間を要する。橋上での準備作業は台船移動時間中に同時進行で実施する。

点検作業の 1 サイクルに必要な時間は実証試験結果より、「ロボットの吊り下げ・有線給電の電源 ON・ロボット起動」に約 10 分、「点検対象位置までの移動・LRF 計測及び現在位置確認・点検作業（10m・4 測線）」に約 20 分、「電源 OFF・吊り上げ」のロボット回収に約 10 分、「データ確認・オペレータ休息」に約 10 分、合計約 50 分であった。日数計算では 1 サイクル 50 分として計算した。

表 6.7.5 新日本非破壊検査 サイクルタイム

実証試験結果から想定されるサイクルタイム

0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	項目	備考	時間(分)	サイクルタイム(分)
																セッティング	資機材橋上へ搬入・台船セット	30	30
																準備作業	機材設置	30	60
															吊り下げ架台の設置				
															基準ボールの設置				
																ロボット動作確認	橋上・台船上	30	
																吊り下げ		10	50
																有線給電ON			
																点検	調査箇所への移動	20	
															LRF計測 現在位置確認				
															点検実施 データ監視 2.10m×10.0m (4測線)				
																ロボット回収	電源OFF 吊り上げ	10	
																データ確認		10	
																休憩	オペ2人の場合は休憩時間短縮可		
																橋上撤収・台船帰港		60	60

1 日の実働時間 8h のうち準備と撤去を考慮し、点検実施時間を 6h として上記結果から 1 日あたりのサイクル数および点検面積、点検に要する日数をロボット技術ごとに算出した。1 サイクルあたりの点検可能面積については、江島大橋での実績値と各開発チームへのヒアリング結果をもとに算出した。

表 6.7.6 点検に必要な日数の算定結果

	調査対象箇所	1サイクル		6h点検 サイクル数	点検面積 (m <sup>2</sup> /日)	パーティ数	作業人員数 (1パーティ)
		時間(分)	点検面積(m <sup>2</sup> )				
三井住友建設	桁内	35	20	10	200	3	2
ジビル調査設計	桁側面・桁下面(一部) 張出、非常駐車帯下面	360	700	1	700	1	4
富士通	橋脚	35	130	10	1,300	1	6
	桁下面(一部)	35	180		1,800	1	
新日本非破壊検査	張出下面	50	25	7	175	1	7

		桁内		桁側面		桁下面		張出下面(南)		張出下面(北)		非常駐車帯 下面(南)		非常駐車帯 下面(北)		橋脚 (PE1)		橋脚 (PW1)		合計	単位
		調査面積	調査日数	調査面積	調査日数	調査面積	調査日数	調査面積	調査日数	調査面積	調査日数	調査面積	調査日数	調査面積	調査日数	調査面積	調査日数	調査面積	調査日数		
三井住友建設	調査面積	16,000																		16,000	m <sup>2</sup>
	調査日数	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	日
ジビル調査設計	調査面積		9,658	2,054	1,400	1,400	106	106												14,724	m <sup>2</sup>
	調査日数	0	14	3	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	日
富士通	調査面積			636	687									450	450	450	450			1,800	m <sup>2</sup>
	調査日数	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1			6	日
新日本非破壊検査	調査面積					1,400	1,400													2,800	m <sup>2</sup>
	調査日数	0	0	0	0	8	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	日

(4) 歩掛基礎資料の作成

サイクルタイムから算出した点検日数、実証試験結果をベースにした内業にかかる時間の算出ならびに開発チームへのヒアリング結果（ロボット技術を実施するための1パーティの人数、機材損料等直接経費等）をもとに江島大橋主橋梁部を点検対象とした場合の仮見積もりをロボット技術ごとに作成した。

作成した仮見積もりと「設計業務等標準積算基準書平成30年度版<sup>16)</sup>（以下、標準積算基準）」を参考に積算を行った。

積算を行ううえで、ロボット技術を活用する場合、従来の近接目視点検と比較すると、現地点検結果から損傷評価するまでの作業の流れ（例えば画像処理等）が大きく変わる。この部分は標準積算基準では「定期点検」と「点検調書作成」に含まれる部分であるが、ロボット技術を活用する場合に必要な画像処理等に対する費用は見込まれていない。そこで標準積算基準の「定期点検」の項目を「現地点検」「データ整理および処理解析」「損傷評価・損傷図作成」の3項目に細分化することでロボット技術を活用した場合に必要な項目を追加した。3項目に細分化したうえで各ロボット技術の仮見積もりをこの項目に沿うように項目の統一を行った。併せて各ロボット技術の技術者の職種についても統一を行った。

それ以外の項目については、基本的には標準積算基準を用いるものとした。なお、「第三者被害予防措置」については、本実証試験で実証したロボット技術では現状対応できないことから、削除する。

図6.7.7に業務委託料の構成改定案を示す。

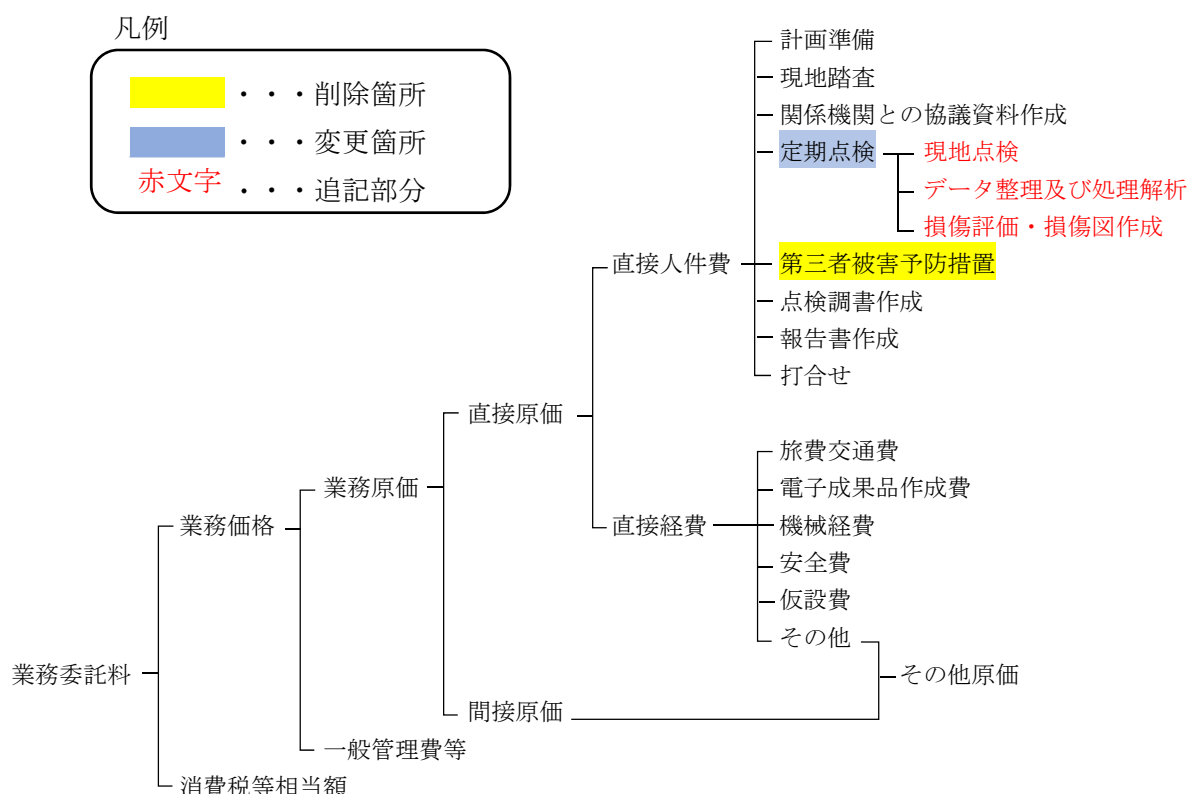


図 6.7.7 業務委託料の構成 改定案

実証試験結果から細分化した「現地点検」「データ整理および処理解析」「損傷評価・損傷図作成」の3項目について作業人工を集計し、単位面積当たりの点検にかかる人件費を算出し、歩掛とした。このとき単位面積は、画像による点検ロボット技術は1000㎡とし、打音点検ロボットは100㎡とした。ただし、本実証試験で適用した4技術以外については、単位面積は別途考慮するものとする。表6.7.7および表6.7.8に作成した歩掛案を示す。

表 6.7.7 ロボット技術ごとの歩掛案 (1)

[I] 橋梁点検ロボットカメラ

条件	点検対象面積	16,000 ㎡
	現地点検日数	27 日
	単位面積	1000 ㎡

人工数の集計

区分	職種	直接人件費						
		主任 技術者	技師長	主任 技師	技師 (A)	技師 (B)	技師 (C)	技術員
単価		65,500	61,700	52,700	46,300	37,900	30,800	26,200
1) 現地点検				0	0	108	27	81
2) データ整理及び処理解析				0	0	0	0	5
3) 損傷評価・損傷図作成				0	0	18	10	0

単位面積あたりの人工数 (少数第2位切上げ)

(1000m2あたり)

1) 現地点検			0.0	0.0	6.8	1.7	5.1
2) データ整理及び処理解析			0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
3) 損傷評価・損傷図作成			0.0	0.0	1.2	0.7	0.0

[II] 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』

条件	点検対象面積	14,724 ㎡
	現地点検日数	23 日
	単位面積	1000 ㎡

人工数の集計

区分	職種	直接人件費						
		主任 技術者	技師長	主任 技師	技師 (A)	技師 (B)	技師 (C)	技術員
単価		65,500	61,700	52,700	46,300	37,900	30,800	26,200
1) 現地点検				0	0	46	23	23
2) データ整理及び処理解析				0	0	4	16	4
3) 損傷評価・損傷図作成				0	0	2	4	28

単位面積あたりの人工数 (少数第2位切上げ)

(1000m2あたり)

1) 現地点検			0.0	0.0	3.2	1.6	1.6
2) データ整理及び処理解析			0.0	0.0	0.3	1.1	0.3
3) 損傷評価・損傷図作成			0.0	0.0	0.2	0.3	2.0

表 6.7.8 ロボット技術ごとの歩掛案 (2)

**[Ⅲ] 二輪型マルチコプタ**

条件	点検対象面積	3,123 m <sup>2</sup>
	現地点検日数	6 日
	単位面積	1000 m <sup>2</sup>

人工数の集計

区分 \ 職種	直接人件費						
	主任 技術者	技師長	主任 技師	技師 (A)	技師 (B)	技師 (C)	技術員
単価	65,500	61,700	52,700	46,300	37,900	30,800	26,200
1) 現地点検			0	0	18	6	12
2) データ整理及び処理解析			0	0	0	14	6
3) 損傷評価・損傷図作成			0	0	6	41	0

単位面積あたりの人工数 (少数第2位切上げ)

(1000m<sup>2</sup>あたり)

1) 現地点検			0.0	0.0	5.8	2.0	3.9
2) データ整理及び処理解析			0.0	0.0	0.0	4.5	2.0
3) 損傷評価・損傷図作成			0.0	0.0	2.0	13.2	0.0

**[Ⅳ] 打音機能付飛行ロボット**

条件	点検対象面積	2,800 m <sup>2</sup>
	現地点検日数	16 日
	単位面積	100 m <sup>2</sup>

人工数の集計

区分 \ 職種	直接人件費						
	主任 技術者	技師長	主任 技師	技師 (A)	技師 (B)	技師 (C)	技術員
単価	65,500	61,700	52,700	46,300	37,900	30,800	26,200
1) 現地点検			0	0	48	32	32
2) データ整理及び処理解析			0	0	0	7	20
3) 損傷評価・損傷図作成			0	8	0	0	0

単位面積あたりの人工数 (少数第2位切上げ)

(100m<sup>2</sup>あたり)

1) 現地点検			0.0	0.0	1.8	1.2	1.2
2) データ整理及び処理解析			0.0	0.0	0.0	0.3	0.8
3) 損傷評価・損傷図作成			0.0	0.3	0.0	0.0	0.0

江島大橋主橋梁部を対象とし、本実証試験に参加した4つのロボット技術を活用して「6.7.2 (2) ロボット技術の点検範囲と点検面積算定」で示した範囲を点検した場合の積算額を上記歩掛が反映された鳥取県発出の「ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務積算基準<sup>17)</sup>」を用いて試算したところ、積算額約7,800万円(打音検査は除く)となった。ちなみに同レベルの点検を総足場若しくはロープアクセスにより実施した場合の費用を専門業者にヒアリングしたところ、概算でそれぞれ約3億円、約2億円との結果を得た。

## 6.8 まとめ

本プロジェクトで適用した4つのロボット技術は、精度確認試験と実証試験結果から橋梁点検に適用可能な計測精度を有しており、江島大橋のような大規模な橋梁の点検に対して安全かつ安定的に均質なデータをロボットが近接して取得し、それらのデータを基に損傷程度の評価が十分可能であることが実証できた。特に精度確認試験においては、本研究で実施した各検証での成果や課題を活かし試験方法や評価方法を立案したことにより、各ロボット技術が持つ最大限のスペックを証明できたと考える。また、ロボット技術開発者と鳥取県内の建設コンサルタント技術者が協働により実証試験を実施したことは「地元建設コンサルタント技術者のロボット技術を用いた橋梁点検の体感」、「地元建設コンサルタント技術者からロボット技術開発者への将来的なユーザとしての意見のフィードバックによるさらなる技術開発の促進」と両者にとって有益なものであった。

しかし、画像を用いた点検では触診（打音検査）および第三者被害予防措置ができないという課題がある。本プロジェクトでも使用した打音検査が可能なロボット技術も開発されており、技術の組み合わせにより点検することも可能だが、江島大橋のような膨大な面積の点検への適用が現状困難であり、現行の橋梁定期点検要領を満たすためには、現状では点検技術者が近接して触診する必要がある。また、画像を用いた点検では、展開画像をもとに室内作業にて損傷評価を行うため、根拠資料の蓄積や複数人の照査による客観性向上など多々メリットはあるものの、さらなる効率性、客観性の向上のためには、点検技術者の教育や損傷抽出時の規格統一（ルール統一）などが必要である。

立地条件や環境条件において難易度の高い江島大橋にてロボット技術の適用性を実証できたことは、今後の維持管理への新技術（画像やロボット技術）の活用を大きく加速させる結果であると考えられる。さらには実証試験で得られた成果から作成した基礎資料をもとに鳥取県はロボット技術を活用した橋梁点検業務の特記仕様書と積算基準を2019年3月に公開しており、これは社会実装に向けた大きな一歩であり、本研究が机上の成果ではなく、実務への適用性を持ったものであると言える。



参考文献

- 1) 科学技術振興機構 (JST) : インフラ維持管理・更新・マネジメント技術,  
<https://www.jst.go.jp/sip/k07.html>
- 2) 公益社団法人土木学会 技術推進機構 SIP インフラ連携委員会 新技術の地域実装促進小委員会 : SIP インフラ新技術地域実装活動報告書～地域のインフラ維持管理の今後に向けて～,  
pp.104-107, 2019.1
- 3) SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術 : SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術 インフラ技術総覧, pp.76-77, 2019.1
- 4) SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術 : SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術 インフラ技術総覧, pp.126-127, 2019.1
- 5) SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術 : SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術 インフラ技術総覧, pp.124-125, 2019.1
- 6) NETIS 登録番号 KT-160016-A : NETIS,  
[http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG\\_NO=KT-160016](http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=KT-160016)
- 7) NETIS 登録番号 KK-110063-VR : NETIS,  
[http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG\\_NO=KK-110063](http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=KK-110063)
- 8) NETIS 登録番号 QS-180005-VR : NETIS,  
[http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG\\_NO=QS-180005](http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=QS-180005)
- 9) 境港管理組合 : 周辺の自然環境, 2017
- 10) 三浦泰人, 新田益大, 和田秀樹, 中村光 : 打音機構を搭載した飛行ロボットによる内部欠陥検出手法の開発と実橋梁への適用, 構造工学論文集, Vol.65A, 2019
- 11) FUJIFILM : 社会インフラ画像診断サービス「ひびみっけ」,  
<https://fujifilm.jp/business/material/infraservice/>
- 12) 西村正三, 木本啓介, 松岡のどか, 大谷仁志, 緒方宇大, 松田浩 : 橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価, 応用測量論文集, Vol.24, 2013.1
- 13) 鳥取県県土整備部道路企画課 : 鳥取県道路橋りょう定期点検マニュアル, pp.52-53, p.84, 2015.3
- 14) 国土交通省 : 新技術利用のガイドライン(案),  
[http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo5\\_1.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo5_1.pdf), 2019.2
- 15) 国土交通省 : 点検支援技術 性能カタログ (案),  
[http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo5\\_2.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo5_2.pdf), 2019.2 時点
- 16) 一般財団法人経済調査会 : 設計業務等標準積算基準書平成 30 年度版, pp.4-1-12-4-4-21, 2018
- 17) 鳥取県 : ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務積算基準,  
<http://www.tctcplaza.or.jp/front/pages/view/114> (鳥取県建設技術センターHP), 2019.3



## 第7章 まとめ

### 7.1 各章のまとめ

以下に各章の成果を纏めた。第1章は本研究の背景や目的を記しているため省略する。

#### 【第2章 レーザや画像を用いた計測技術】

3次元計測技術は、光の性質を利用し、対象物の情報を定量的に把握する技術であり、高精度、非接触、短時間で高密度の情報取得が可能といった利点を有している。これらで取得した3次元データは建設分野全体及び文化財の調査記録など各分野において大きく貢献をしてきた。それぞれの技術は、計測距離・計測精度・出力結果などが異なり、要求成果や用途によって適切な手法を選定する必要がある。

近年では UAV の登場により空中から局所的に高密度なデータの取得が可能となり、計測分野の幅は大きく広がった。特に UAV で取得した画像を用い SfM 解析により生成した 3D モデルは、撮影画像がそのままマッピングされ、計測対象物の形状も高精度に再現しており、訴求力のあるデータとして利用価値が高い。その優位性から筆者らは UAV-SfM を用いた軍艦島の現状記録を成功させた。この事例を通して、UAV-SfM のインフラ構造物点検への応用が期待できると判明したことが本研究の基礎となっている。

また、UAV にレーザスキャナを搭載した UAV-LiDAR も新たなツールとして普及してきたことから、その適用性や UAV-SfM および地上型 3D レーザスキャナとの差異などを検証し、特に地形計測やオーバーハングした地形などの計測に有効であることを実証した。

#### 【第3章 ひびわれの視認と検出】

コンクリート構造物において、画像を用いて損傷程度を評価することは、従来の点検手法と比較し、現場作業の省力化、安定した室内作業による点検漏れの防止や安全性の向上、複数人が同じ画像を確認することで判定結果の客観性向上など多くの利点を有している。

そこで、撮影解像度と視認可能なひびわれ幅の関係性を明確にするため、模擬ひびわれなどを用いた検証を実施し、把握（視認）すべきひびわれ幅の約 3~5 倍の解像度で画像を撮影する必要があるとの結果を得た。使用するカメラはセンササイズが大きく、1 素子あたりの面積も大きなものが推奨される。ただし、対象となるコンクリートの表面の状況（汚れ等）に応じた適切な計画が必要である。

また、画像からひびわれの幅と位置を検出するシステムである〔CI〕を用いた「ひびわれ位置・幅判読図化システム」の精度検証も実施し、適切なキャリブレーションの実施により十分な精度を有していることが実証できた。このシステムを用いることで大幅な省力化・効率化が可能となる。

#### 【第4章 大型橋梁の点検における UAV-SfM の実証試験】

鷹島肥前大橋の主塔を対象に UAV-SfM を用いた点検の実証試験を行い、人による近接目視点検が困難な箇所に対する UAV-SfM の有効性は実証できたが、下記に示す課題が明確になった。

##### ・ UAV の安全性

UAV は人がアクセスできない箇所容易にアクセスできる画期的なツールではあるが、その使用に際して環境条件や気候・天候の制約を受けやすいため、第三者に危害を与える可能性を排除する必要がある。また、UAV の暴走や逸走に対する対策も必要である。暴走時、緊急時のフェイルセーフや電源遮断、逸走防止のための有線給電タイプの UAV やジオフェンスの活用などが考えられる。

- ・画像撮影位置の管理，制御

本検証では，オペレータの直接目視によるマニュアル操作と画像確認者のリアルタイム画像確認によりフライト位置の管理を行ったが，オペレータに非常に高度な技術が要求されるとともにオペレータへの依存度が高く，常に最適な画像を取得できる保証は全くない．安全にかつ一定の品質の画像を確実に取得するためには，UAVの位置制御が不可欠であり，特に橋梁点検に活用する場合は，絶対位置よりも相対位置，すなわち点検対象物を認識し自動で一定距離を保ちつつ撮影できる位置制御技術が必要であると考えられる．

- ・解析作業，評価作業などの内業の増加

UAV-SfMを用いた場合，現地作業は大幅な省力化・ローコスト化が可能だが，解析作業には多大な時間を要する．特に損傷図作成や損傷程度の評価については，現状人の手に頼らざるを得ない状況である．

### 【第5章 中小橋梁の点検におけるSfMの活用方法の比較・検証】

全国の橋梁約73万橋のうち74%が橋長2m以上15m未満の中小橋梁であることと第4章で抽出されたUAVの安全性などの課題より，必ずしも全橋梁にUAVの適用が可能ではないため，中小橋梁を対象として，SfMに適した画像の手撮りによる効率的な撮影方法や使用カメラの差異，解析したデータの精度などを検証した．

使用するカメラは，センササイズが大きく現場での操作性・機動性を考慮し，ボディが比較的小さなミラーレスカメラであれば色情報，3D化した構造物の形状の再現性も高く，橋梁の図化などにも応用は可能である．撮影方法については，橋梁を中心とした放射状8方向の撮影が最低限必要となる．可能な範囲で8方向の間を補完する撮影も加える事で，より確実に3Dモデル化が可能である．また，幅員が広い場合は桁下面および橋面にて複数測線撮影し，左右の関連性を持たせることで応用が可能である．ただし，いずれの場合においても撮影者はSfM解析の基本情報の知識は習得しておく必要がある．

### 【第6章 SIP江島大橋プロジェクトにおける橋梁点検への新技術の実用化に向けた実証試験】

SIPインフラでは，2014年度よりインフラの維持管理に必要な新技術が研究開発されており，これら新技術の社会実装のために組織された地域実装支援チームの一つである鳥取大学チームでは，江島大橋を対象に4つのロボット技術を点検に適用し，その適用性の実証や社会実装へ向けた環境・体制整備を目的とした江島大橋プロジェクトを実施した．

本プロジェクトで適用した4つのロボット技術は，第4章で抽出した課題へ対応する性能・機能（安全性能や位置制御機能）を有しており，江島大橋のような大規模な橋梁の点検に対して安全かつ安定的に均質なデータをロボットが近接することで取得し，それらのデータを基に損傷程度の評価が十分可能であることが実証できた．しかし，点検面積が膨大な場合，画像を用いた点検ではデータ解析や評価作業に多大な時間を要することがデメリットとなり得ることも明らかとなり，本研究の第4章や第5章で使用した展開画像の活用やブロック分割による効率化などの改善提案により，解決を図った．

また，江島大橋高架橋部に設けたヤードにて実施した精度確認試験により，各ロボット技術（画像撮影ロボット）はひびわれ幅・損傷の大きさおよび位置・色の識別の計測精度を十分有していることが実証された．この精度確認試験では0.1mm幅以上のひびわれの抽出を要求し，それに対し各ロボット技術では

0.3~0.4mm/pixel の撮影解像度で画像を取得し、高精度な結果が得られた。つまり、この結果より第3章で筆者が算出した解像度とひびわれ幅の関係性も実証できたと考える。

ロボット技術を活用した橋梁点検業務を計画するにあたっては、ロボット技術の機能、計測性能、制約条件および安全性等を把握するための技術資料と積算資料が必要になる。本実証試験に適用した4つのロボット技術は、橋梁点検への適用性とともな十分な計測精度を保有していることが実証できたことから、その結果をもとに技術資料として、国土交通省が示す「点検支援技術 性能カタログ(案)<sup>1)</sup>」と同等の「ロボット技術シート」を作成した。また積算資料として、4つのロボット技術により江島大橋を点検した場合のコストシミュレーションより、橋梁点検の歩掛の基礎資料を作成した。これらの資料をもとに鳥取県は、「ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務積算基準<sup>2)</sup>」および「ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務委託特記仕様書(案)<sup>3)</sup>」を2019年3月に発出し、今後の橋梁点検にロボット技術を活用していくことを示した。

## 7.2 本研究のまとめ

本研究において、コンクリート構造物、特に橋梁に対して画像を用いた点検は効率的で有効な手段の1つであることが実証された。画像を用いた点検は対象となる損傷を抽出するのに資するデータを、点検対象範囲全体を網羅するように取得することが大前提として不可欠であり、そのうえで「画像の取得方法」と「画像からの損傷程度の評価方法」の2つに分解して考える必要がある。

画像の取得には、まず対象となる損傷を抽出するのに適切な解像度を設定し、一定の離隔を保った状態で均質に撮影を行うことが重要である。抽出の対象をひびわれと設定した場合、センササイズの大きなカメラを用い、抽出すべきひびわれ最小幅の3~5倍の解像度で撮影することが望ましい。

橋梁の規模や環境条件、立地条件から手撮り、UAV、その他 SIP インフラなどで開発された新技術などの中から適切な近接手法を選定しなければならない。このとき、一定の離隔を保つための機能と安全性が特に重要であり、適切な離隔を維持した状態で橋梁を中心として放射状8方向から撮影することで、SfM 解析により損傷把握も可能な橋梁の3Dモデルを構築することが可能となる。

損傷程度の評価方法は、撮影された画像から SfM 解析などの画像解析手法により展開画像(オルソ画像)を作成し、位置を把握しながら(図面と重ね合わせて)損傷図の作成および損傷程度の評価を行うことが重要である。損傷図化には「ひびわれ位置・幅判読図化システム」のような自動・半自動のツールを活用することで大幅な省力化が図れ、なおかつ客観性のある定量的な損傷評価に期待ができる。

加えて、今後画像を用いた点検を普及させるには、点検技術者の教育や損傷抽出時の規格統一(ルールの統一)なども必要であり、効率性・客観性の向上に繋がるものと考えられる。

## 7.3 今後の展望

国土交通省は、2019年2月に「道路橋定期点検要領<sup>4)</sup>」を改定し、運用の留意事項に対応した付録の一般的な注意点の中で、『自らの近接目視によるときと同等の健全性の診断を行うことができると定期点検を行う者が判断した場合には、その他の方法についても近接目視を基本とする範囲と考えてよい』ことを示した。SIP インフラ江島大橋プロジェクトでは、それに先駆けロボット技術の橋梁点検への実用性の実証とともに積算関係の基礎資料を作成し、これらの資料をもとに鳥取県は2019年3月に「ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務積算基準<sup>2)</sup>」と「ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務委託特

記仕様書（案）<sup>3)</sup>」を発出した。鳥取県では今後ロボット技術の適用事例を増やし、新たな課題抽出や適用性の検証を行いつつ、本格的な社会実装に向かっていくことが期待される。

今後はインフラ構造物の長寿命化のための維持管理やモニタリングへのニーズがさらに高まり、ロボット技術の高性能化や画像解析技術の高度化などの技術革新により橋梁点検の効率化や高度化が図られていくであろうが、その中で「画像」が基礎的なデータであり、そこから「損傷を抽出する」ことは不変であり、画像の価値や重要性は益々高まっていくと考えられる。本研究が僅かでもそこに寄与できることを願うとともに、今後も本研究を基礎として、社会に貢献できる技術者であり続けることが使命であると考えている。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：点検支援技術 性能カタログ（案），  
[http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo5\\_2.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo5_2.pdf), 2019.2 時点
- 2) 鳥取県：ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務積算基準，  
<http://www.tctcplaza.or.jp/front/pages/view/114>（鳥取県建設技術センターHP），2019.3
- 3) 鳥取県：ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務委託特記仕様書（案），  
<http://www.tctcplaza.or.jp/front/pages/view/114>（鳥取県建設技術センターHP），2019.3
- 4) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，  
[http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4\\_1.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4_1.pdf), 2014.6[改訂, 2019.2]

## 謝辞

本論文は筆者が長崎大学大学院工学研究科生産システム工学専攻博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものです。

本研究を遂行し、学位論文をまとめるに当たり長崎大学大学院工学研究科 松田浩教授には、貴重な機会を与えていただき、継続的にご指導を頂きました。社会人学生として研究と仕事の両立に苦心し、思うように研究が進まない状況もありましたが、寛大なご配慮を賜りました。ここに深謝の意を表します。

学位論文審査において、貴重なご指導とご助言を頂いた長崎大学大学院工学研究科 原田哲夫教授、長崎大学大学院工学研究科 蔣宇静教授、長崎大学大学院工学研究科 山口浩平准教授、長崎大学大学院工学研究科 佐々木謙二准教授に心より感謝申し上げます。

長崎大学大学院工学研究科 出水享技術職員には、貴重な情報を頂き多くのご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

江島大橋プロジェクトにおいては、SIP「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」のプログラムディレクターである藤野陽三氏、サブプログラムディレクターの若原敏裕氏、国立研究開発法人科学技術振興機構幹事の金氏眞氏、鳥取大学大学院工学研究科 黒田保教授には、多大なるご支援とご指導を頂くとともに本論文への執筆を快く許可して頂いたことに感謝申し上げます。また鳥取県県土整備部技術企画課 藤井優氏、鳥取県県土整備部技術企画課 倉本政寛氏や実証試験に協力頂いたロボット技術開発者の皆様、地元建設コンサルタントの皆様にも感謝申し上げます。

株式会社計測リサーチコンサルタントの岡本卓慈代表取締役会長、花倉宏司代表取締役社長、クリエイティブ事業部 西村正三部長には多大なるご支援を頂きました。事業推進部 梅本秀二部長、大町正和課長、クリエイティブ事業部 藏重裕俊副部長を始めとする同部職員にはご支援とともに多くのご助言を頂きました。心より感謝致します。

本研究は、多くの素晴らしい人々と機会に恵まれたことで作り上げることができたものです。研究を進めるにあたり、ご支援、ご協力を頂きながらここにお名前を記すことが出来なかった多くの方々を含め、改めて皆様に心より感謝申し上げます。

最後に、私の職を理解し日々気遣い、支え続けてくれる家族に深く感謝します。特に妻 奈緒美、息子 大嗣に心から感謝の意を表し、謝辞と致します。

2019年7月 木本 啓介