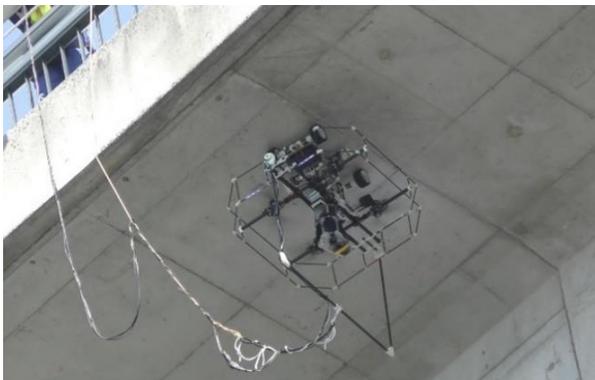


# 江島大橋プロジェクト実証試験報告書



平成 31 年 3 月

橋梁点検への新技術の適用性評価委員会



## 橋梁点検への新技術の適用性評価委員会

### 委員会の構成

顧問	藤野陽三	横浜国立大学先端科学高等研究院
委員長	黒田保	鳥取大学大学院工学研究科
副委員長	吉野公	鳥取大学大学院工学研究科
委員	六郷恵哲	岐阜大学大学院工学研究
	竹田宣典	広島工業大学工学部
	半井健一郎	広島大学大学院工学研究科
	岩波光保	東京工業大学環境・社会理工学院
	新田恭士	土木研究所
	信田佳延	科学技術振興機構
	松村英樹	松村技術士事務所
	澤邦洋	鳥取県建設技術センター
	長本敏澄	鳥取県測量設計業協会
	和田晶夫	島根県測量設計業協会
	奥村智洋	鳥取県コンクリート診断士会
	松浦寛司	島根県コンクリート診断士会
オブザーバー	宮武晃司	内閣府参事官
	若原敏裕	内閣府戦略的イノベーション創造プログラム
	池田朋広	中国地方整備局 港湾空港部
	藤原浩幸	中国地方整備局 道路部
	竹田幸詞	中国地方整備局 企画部
	早本慎也	中国地方整備局 境港湾・空港整備事務所
	河田英明	鳥取県 県土整備部 道路企画課
	前田達美	鳥取県 県土整備部 技術企画課
	大賀隆宏	島根県 土木部 道路維持課
	永田英明	境港管理組合
	金氏真	科学技術振興機構
	生井達朗	新エネルギー・産業技術総合開発機構
事務局	中村公一	鳥取大学大学院工学研究科
	藤井優	鳥取県 県土整備部 技術企画課
	日紫喜剛啓	リテックエンジニアリング
	西村正三	計測リサーチコンサルタント

## 江島大橋での点検方法検討委員会

### 委員会の構成

委員長	黒田保	鳥取大学大学院工学研究科
副委員長	吉野公	鳥取大学大学院工学研究科
委員	西土井一宏	鳥取県 県土整備部 道路企画課
	藤井優	鳥取県 県土整備部 技術企画課
	大野利博	島根県 土木部 道路維持課
	藤原強	境港管理組合
	澤邦洋	鳥取県建設技術センター
	反田敏博	鳥取県建設技術センター
	井上和大	鳥取県建設技術センター
	金氏真	科学技術振興機構
	松村英樹	松村技術士事務所
	橋本健男	シンワ技研コンサルタント
	金村誠	アキバ
	長本敏澄	鳥取県測量設計業協会
	和田晶夫	島根県測量設計業協会 (ワールド測量設計)
	奥村智洋	アサヒコンサルタント
	川本篤志	荒谷建設コンサルタント
	田中孝志	西谷技術コンサルタント
	松岡晃宏	サンイン技術コンサルタント
	山根清香	ヨナゴ技研コンサルタント
	橋本健男	シンワ技研コンサルタント
	溝本浩二	アトラス
	奥田真二	共立エンジニア
	細田高弘	日発技研
	藤井俊逸	藤井基礎設計事務所
オブザーバー	前田達美	鳥取県 県土整備部 技術企画課
事務局	中村公一	鳥取大学大学院工学研究科
	倉本政寛	鳥取県 県土整備部 技術企画課
	日紫喜剛啓	リテックエンジニアリング
	岡本裕昭	リテックエンジニアリング
	山田宏	リテックエンジニアリング
	栗原陵	リテックエンジニアリング
	西村正三	計測リサーチコンサルタント
	木本啓介	計測リサーチコンサルタント
	大町正和	計測リサーチコンサルタント

# 目 次

1. 実証試験概要 .....	1
1.1 江島大橋プロジェクトの目的 .....	1
1.2 江島大橋の概要と定期点検における問題点 .....	2
1.2.1 江島大橋の概要 .....	2
1-1-2 江島大橋の定期点検における問題点 .....	4
1-1-3 橋梁点検ロボット技術の現状と課題 .....	7
2. 実証試験計画 .....	8
2-1 実証試験範囲 .....	8
2-2 ロボット技術の選定と適用範囲 .....	9
2-3 ロボット技術の制約条件の確認 .....	15
2-4 安全性能の確認 .....	23
2-5 実証試験における安全管理 .....	24
2-6 関係機関との協議及び許認可手続き .....	25
2-7 実証試験スケジュール .....	26
2-8 江島大橋プロジェクトの位置付けと実証試験実施体制 .....	27
3. ロボット技術の精度確認試験 .....	28
3-1 画像撮影ロボットの精度確認試験 .....	28
3-1-1 目的 .....	28
3-1-2 概要 .....	28
(1) 精度確認試験実施場所 .....	28
(2) 評価方法 .....	29
(3) 事前準備 .....	29
(4) 精度確認試験ヤードの損傷の種類 .....	29
(5) ターゲット設置状況と対象範囲 .....	33
(6) 精度確認試験の実施状況 .....	34
3-1-3 精度確認試験の結果 .....	35
(1) 計測可能な最小ひびわれ幅および計測精度の確認 .....	35
(2) 模擬ひびわれシートによるひびわれ視認性の確認 .....	41
(3) 損傷の大きさの計測精度確認 .....	43
(4) 損傷の位置の精度確認 .....	44
(5) 色の識別性能の確認 .....	48
(6) オリジナル画像と展開画像の画像品質の比較 .....	50
(7) 暗所での撮影画像の評価（橋梁点検ロボットカメラ 【三井住友建設】） .....	56
(8) 総評 .....	58
3-2 打音ロボットの精度確認試験 .....	61
3-2-1 目的 .....	61
3-2-2 概要 .....	61
(1) 供試体の概要 .....	61

(2) 評価方法.....	62
(3) 点検ロボットによる試験方法.....	62
3-2-3 打音精度確認試験の結果.....	63
4. 実証試験結果.....	64
4-1 概要.....	64
4-1-1 各チームの実施工程と点検範囲.....	64
4-1-2 天候の影響による稼働率.....	66
4-2 ロボット活用に伴う問題点と解決策.....	67
4-2-1 浮かび上がった問題点.....	67
4-2-2 問題の解決策.....	68
(1) 展開画像の作成.....	68
(2) 展開画像から損傷程度を直接評価する手法の提案.....	69
(3) ブロック分割による損傷程度評価手法.....	70
4-3 実証試験結果.....	72
4-3-1 橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】.....	72
4-3-2 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』【ジビル調査設計】.....	77
4-3-3 二輪型マルチコプタ【富士通】.....	81
4-3-4 打音機能付飛行ロボット【新日本非破壊検査】.....	85
4-4 展開画像.....	89
4-4-1 橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】.....	89
4-4-2 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』【ジビル調査設計】.....	90
4-4-3 二輪型マルチコプタ【富士通】.....	91
4-5 損傷程度の評価について.....	92
5. 実証試験結果の評価.....	97
5-1 ロボット技術の諸元等一覧.....	97
5-2 地元コンサルタントによるロボット技術の評価.....	99
5-3 損傷程度評価に関する考察.....	103
5-3-1 損傷程度の評価結果について.....	103
5-3-2 損傷抽出時の留意点.....	103
5-3-3 ひびわれ抽出結果の違いとその原因.....	105
5-3-4 総評.....	106
6. 実用化に向けた基礎資料作成.....	107
6-1 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.....	107
6-2 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.....	108
6-2-1 積算基礎資料作成の手順.....	108
6-2-2 ロボット技術の点検範囲と点検面積算定.....	109
6-2-3 点検日数の算定.....	110
6-2-4 歩掛基礎資料の作成.....	114

## 参考資料

参考資料 1 実証試験における安全管理

参考資料 2 ロボット技術精度・性能確認試験根拠資料

参考資料 3 ロボット技術シート

参考資料 4 ロボット技術を活用した定期点検業務概算費用

参考資料 5 ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務仕様書（案）

平成 31 年 3 月発出 鳥取県

公開：公益財団法人 鳥取県建設技術センター

<http://www.tctcplaza.or.jp/front/pages/view/114>

参考資料 6 ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務積算基準

平成 31 年 3 月発出 鳥取県

公開：公益財団法人 鳥取県建設技術センター

<http://www.tctcplaza.or.jp/front/pages/view/114>

## 1. 実証試験概要

### 1.1 江島大橋プロジェクトの目的

平成26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」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、それらの中には国土交通省の新技術情報提供システム（NETIS）に申請・登録されるなど実用化レベルに達しているものもある。

これらの新技術を社会実装するにあたって、土木インフラの大半を管理している地方自治体への普及展開が重要であるとの認識から、平成28年度に地域の大学を中心とする地域実装支援チームを全国に12チーム組織した。地域実装支援チームの一つである鳥取大学チームは、人口減少の進行に伴って技術者不足が懸念される地方自治体において、ロボット技術を土木インフラの維持管理・更新・マネジメントにどのように活用することができるかを主たるテーマとして活動するなかで、「ベタ踏み坂」として全国的に知名度が高い江島大橋の定期点検に最新のロボット技術を適用できるかどうかを実証する「江島大橋プロジェクト」を企画した。

江島大橋プロジェクトの目的として以下の三つを設定した。

- ・地方自治体において新技術（ロボット技術）を活用した効率的な橋梁点検を実現する
- ・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
- ・さらなる新技術（ロボット技術）の開発を促進する

江島大橋における実証試験で新技術（ロボット技術）の適用性を評価するとともに、「ロボット技術を活用した橋梁点検指針」を策定して橋梁点検に新技術（ロボット技術）を適用するための道筋をつけることを目指した。



図 1-1 江島大橋全景

## 1.2 江島大橋の概要と定期点検における問題点

### 1.2.1 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。次ページの図1-2に江島大橋一般図を示す。

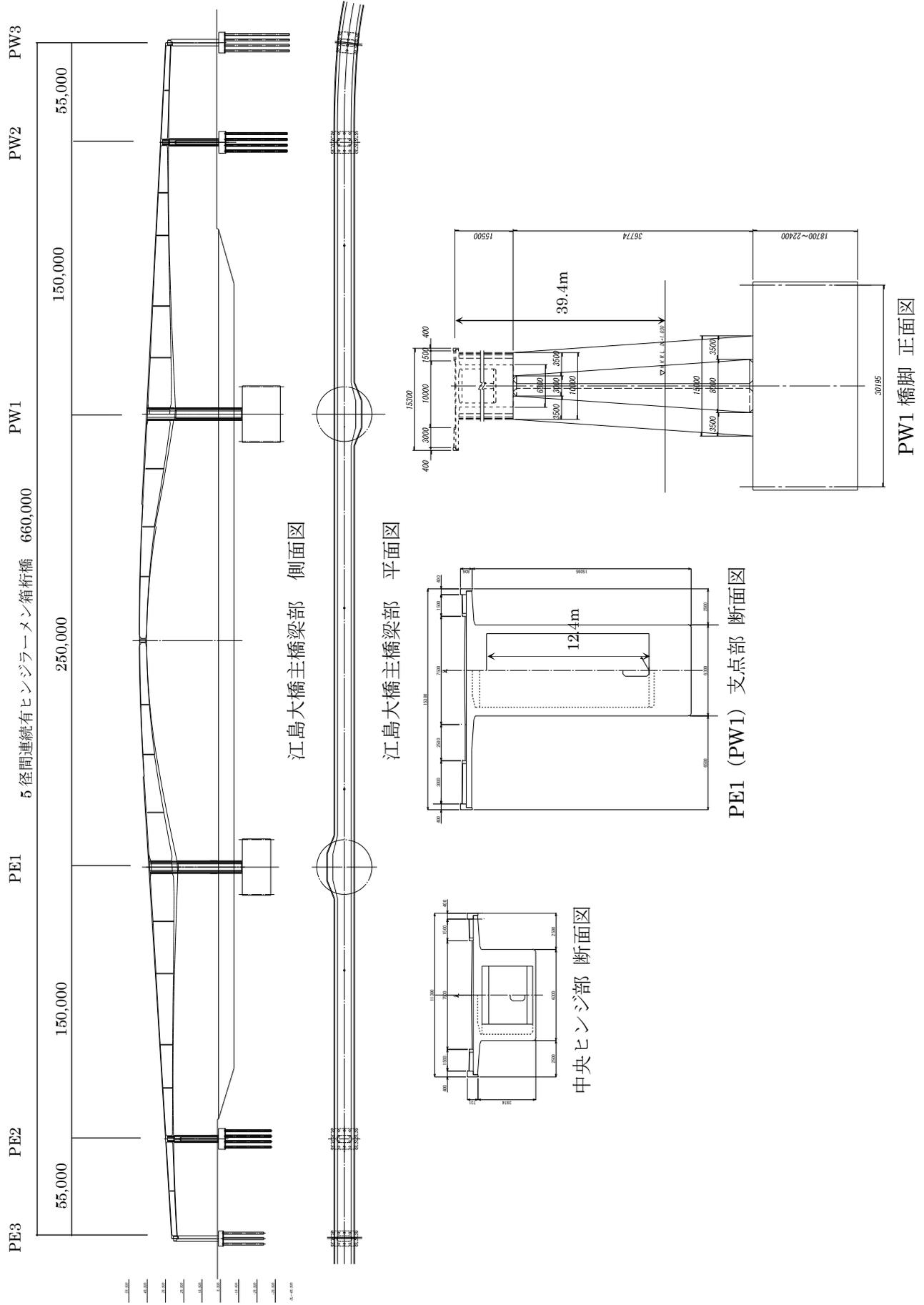


図 1-2 江島大橋一般図

### 1-1-2 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。

- 1) 橋梁点検車による方法（上部工）
- 2) ロープアクセスによる方法（上部工）
- 3) 移動式吊足場による方法（上部工）
- 4) 足場による方法（上部工・箱桁内）
- 5) 足場による方法（橋脚）

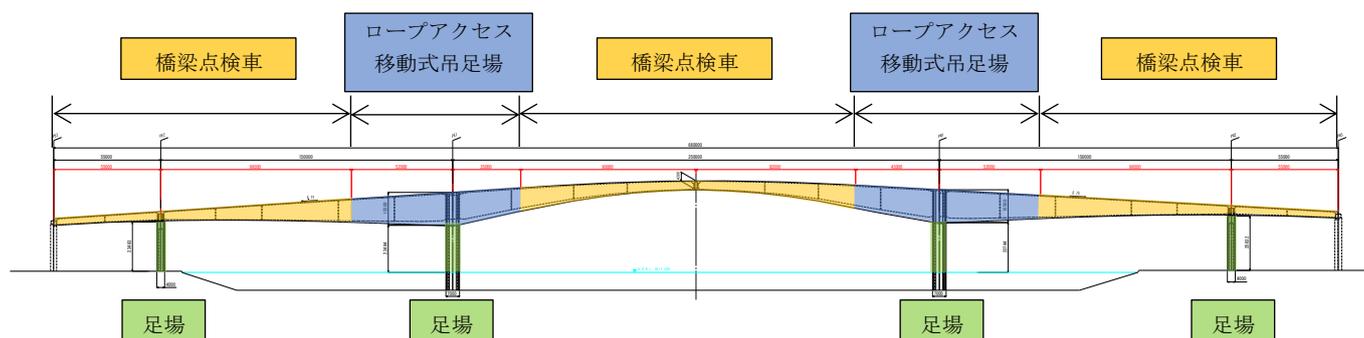


図 1-3 人による近接目視点検を実施する場合の近接方法

- 1) 橋梁点検車による方法（上部工）
  - ・橋梁点検車（BT400）は縦断勾配4.0%までは走行しながら点検できるが、4.0%を超えるとアウトリガを使用しなければならない。
  - ・橋梁点検車（BT400）は桁高約12mまでは点検できるが、桁高12mを超える部分は点検できない。
  - ・大型橋梁点検車（バーリン社製AB1400X）は計算上は桁高12m以上の部分の点検は可能だが、勾配4度以上は使えないため江島大橋主橋梁部には適用できない。
  - ・橋梁点検車使用時は片側通行規制が必要になる。  
ブーム可動域の検討結果を図1-4に示す。
- 2) ロープアクセスによる方法（上部工）
  - ・橋梁点検車が使えない桁高12m以上の上部工の点検にロープアクセスを用いる。
  - ・桁下面の調査のためにアンカー等の補助工法が必要となる。
  - ・安全上の配慮が必要である。
  - ・点検に多大な時間と費用を要する。  
ロープアクセスによる点検状況の事例を図1-5に示す。
- 3) 移動式吊足場による方法（上部工）
  - ・補修工事に使用される移動式吊足場を設置して上部工の点検を行う。
  - ・レール設置のためにアンカー等の補助工法が必要となる。
  - ・多額の足場費用を要する。  
移動式吊足場の設置事例を図1-6に示す。

4) 足場による方法（上部工・箱桁内）

- ・最大高さが12.4mで箱桁内部の断面が大きく多くの足場資材が必要になるが、資材の搬入に多大な時間を要する。
- ・箱桁下面の勾配が大きく変化するため移動式吊足場が使えない。

5) 足場による方法（橋脚）

- ・橋脚が海中にあるため足場の設置に多大な日数と費用を要する。  
江島大橋を対象とした場合の足場設置計画図を図1-7に示す。

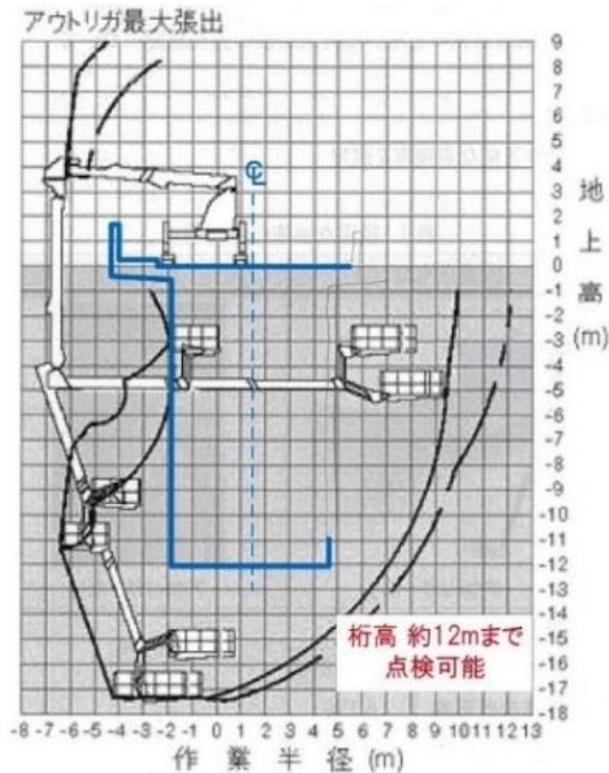


図 1-4 ブーム可動域 (BT400)



図 1-5 ロープアクセスによる点検状況

出典：株式会社 きいすどん

<http://www.rope-access.co.jp/menu-g37-lm-id441.htm#top>



図 1-6 移動式足場設置事例

出典：株式会社 中村組 [http://www.nakamura-gumi.co.jp/recruit/job/pj\\_story/pj\\_story02/](http://www.nakamura-gumi.co.jp/recruit/job/pj_story/pj_story02/)

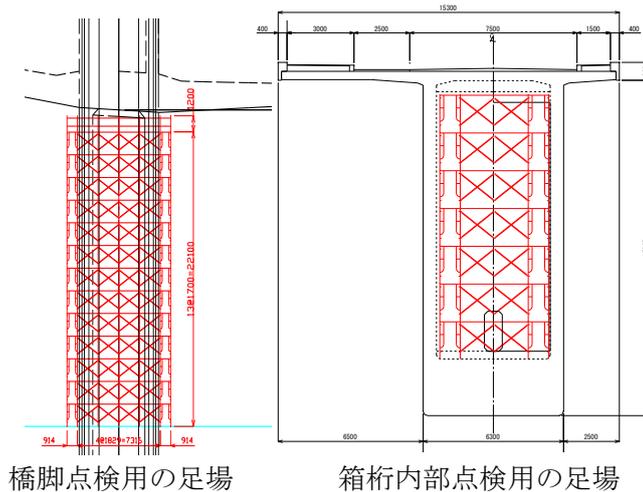


図 1-7 足場設置計画

上記の点検方法のうち、橋梁点検車はもっとも一般的な方法であるが交通規制に伴って大渋滞を引き起こす恐れがある。江島大橋は軽自動車のテレビ広告で「ベタ踏み坂」として有名になったように急勾配なので両端の盛土区間を含めて1.7km全区間を交通規制しなければならない。1.7kmの交通規制区間を通過するのに約3分かかるため、青信号時間を3分とすると、最後の車が交通規制区間を通過するまで3分、反対車線の青信号時間が3分、反対車線からの最後の車が交通規制区間を通過するのに3分、合計9分の間が赤信号となり1サイクルが12分となる。青信号時間を2分に短縮した場合は赤信号時間が8分となり1サイクルが10分となる。1サイクル10分の場合の渋滞予測シミュレーションによれば交通規制を始めて30分で84台の車が滞留するとのことであるが、8分から9分の赤信号時間は許容限界を超えており現実的ではない。迂回路は約19kmで所要時間は38分であり、江島大橋を通行した場合の2.5kmの通過時間5分に対しておよそ8倍の時間がかかる。

江島大橋の片側通行規制に伴う交通渋滞は許容限界を超えていると思われることから、人による近接目視点検を実施しようとする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 1-8 迂回路の検討

### 1-1-3 橋梁点検ロボット技術の現状と課題

SIP インフラプロジェクト等で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。これらのロボット技術を、江島大橋のような人による近接目視が困難な大型橋梁に適用できるようになれば、橋梁管理者にとっては橋梁点検費用を縮減でき、橋梁点検ロボット技術の開発者にとってはロボット技術活用の一つの道筋が明確になって、技術開発が促進されるきっかけになると思われる。ちなみに江島大橋に類似した大型橋梁は全国で2000橋ほどあり、そのうち半数近くは地方自治体の管理下にあると思われることから、これらの大型橋梁にロボット技術を適用できるようになればその経済効果は大きい。

SIP インフラ等で開発が進んでいるロボット技術のうち実用化レベルに近づいた技術については全国各地でロボット技術の潜在的ユーザである地方自治体や橋梁点検技術者達の協力によって実証試験が行われている。これらの実証試験の多くは、ユーザに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、見学者にとってアクセスのいい場所で、ロボット技術にとって性能を発揮できるいわば好条件下で行われることが多い。画像撮影ロボットを例にとると、ロボットが取得した画像が人による近接目視とどのくらいの差があるかを見学者に確認して貰うために、人による近接目視がしやすい場所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という視点から見た場合、さらに多くのことを確認する必要がある。

第一に、ロボット技術の活用にあたって制約条件を確認する必要がある。例えば、飛行型ロボットの場合は飛行制限区域が設定されており制限区域外であっても飛行許可申請が必要である。遠隔操縦の場合はロボット操縦者と点検対象部位の距離が離れるに従って操縦が困難になることから両者間の距離限界を把握する必要があり、操縦方法によっては付帯設備の設置等の場所を確保しなければならない。

第二に、ロボット技術を活用した場合の点検期間、点検費用を確認する必要がある。技術開発段階のロボットを実橋梁で試験的に使おうとしてもそのハードルは高く、その機会が与えられたとしてもその期間は短期間に限られることが多い。従って限定的な実証試験の結果だけから点検期間や点検費用を算定するのは難しく、費用の算定ができなければ橋梁管理者は業務として発注できない。

第三に、ロボット技術を活用しようとする場合に、ユーザの立場からどのような体制を整える必要があるかを確認する必要がある。多くの実証試験はロボット開発チームのメンバーによって行われるが、ロボット開発チームが通常の橋梁点検業務を受注することは少ないと思われる。したがって、橋梁点検ロボットを実務で活用するには、橋梁点検業務を実施する点検技術者（橋梁点検コンサルタント）がロボット技術を熟知し適正に運用するノウハウを習得するとともに、橋梁管理者は活用しようとするロボット技術について点検技術者と同等以上の知識を習得するだけでなくロボットを活用した点検業務発注に必要な諸手続き（特記仕様書や積算基準等）など、ユーザ側がロボット技術を活用するための体制を整備する必要がある。

最後に、安全性の確認が必要である。ロボットはソフトウェアを含むすべての構成部品が正常に機能している限りは安全が確保されるように設計されているが、部品の故障や誤作動が発生した場合で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。ロボットの逸走によって第三者に危害を及ぼすようなことがあるとロボット技術の活用の道が閉ざされることになりかねない。

## 2. 実証試験計画

### 2-1 実証試験範囲

江島大橋主橋梁部全体を複数のロボット技術の組み合わせによって点検できることを実証する、ならびに従来方法では難度が高い部位の点検をロボット技術の活用によって効率化する、という二つの視点から、図 2-1 に示すとおり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視点から、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

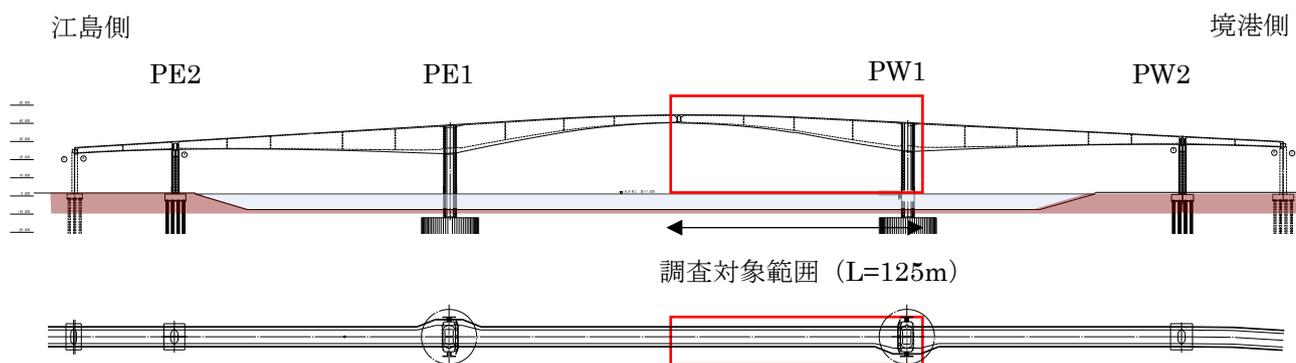


図 2-1 実証試験対象範囲

## 2-2 ロボット技術の選定と適用範囲

SIP「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」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実証試験への参加を打診した。

### 【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につれて大きくなり（最大高さ12.4m）、下面の勾配も変化が著しい。そのため箱桁内部に点検足場を設置しようとする足場設置の工期・費用が膨大になる。

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、暗い場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。

### 【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と比較的小さいこと、ならびにロボットの懸垂ロッドの長さの制約から点検可能な桁高に限界があること、などの制約条件があることが分かった。ロボット開発メーカーと協議した結果、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を歩道に乗り入れることが可能であり、ロッド部分の改良によって桁高10.0mまでの計測が可能であるとの回答を得た。

UAVを用いた飛行型ロボットについては、橋脚付近に台船を設置してUAV操縦者の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困難であること、中央支間の下部は主航路であるためUAV操縦者が支間中央付近に近づくのは制限があること、UAVの位置制御のためにトータルステーションを反対側の橋脚付近または岸壁に設置しなければならないこと、などの制約条件があることが分かった。

上記二つのロボットの制約条件とその解決策を比較検討し、確実性の高い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』」を採用することとした。

### 【部位3】上部工外面のうち橋脚に近い部分（桁高が大きい）

車両型橋梁点検支援ロボットは、上部工の桁高が10mを超える部分については箱桁下面の点検はできないが、箱桁側面の点検は可能である。

UAVを使った飛行型ロボットは、橋脚付近に台船を設置してUAVの離発着場とUAV操縦者の足場を確保することにより、橋脚に近く桁高の大きな部分の点検は可能である。

上記の二つのロボットを比較検討し、桁高10.0m以上の上部工外面は飛行ロボット「二輪型マルチコプタ」を採用することとした。なお、鉛直面である箱桁側面に対しては「大型二輪型マルチコプタ」を、水平面である箱桁下面に対しては「大型二輪型マルチコプタ」もしくは「中型二輪型マルチコプタ」をレーザーレンジファインダによって箱桁下面との距離を制御して用いた。

### 【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は、防護柵の内側に設置されたガラス板の高さが1.4~1.9mと高さがあるが、路面にパレットを設置してその上にロボットを載せることで計測できることが分かった。

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であるが、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、安定して計測できる「橋梁点検支援ロボット『見る・診る』」を採用することとした。

【部位5】橋脚

橋脚（PE1及び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を第一候補として考えた。

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飛行型ロボットの位置制御機能が重要になる。位置制御の方法としては、熟練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、レーザーレンジファインダなどの機器を用いて位置制御する方法などがあるが、江島大橋の場合は高さ約39mの高橋脚であることから、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、逸走防止ケーブルを備えた「二輪型マルチコプタ」を採用することとした。

【打音検査ロボット】

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」を採用した。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。

表 2-1 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	橋梁点検支援ロボット『見る・診る』	二輪型マルチコプタ	打音機能付飛行ロボット
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

【開発者】

三井住友建設

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 2-2 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）

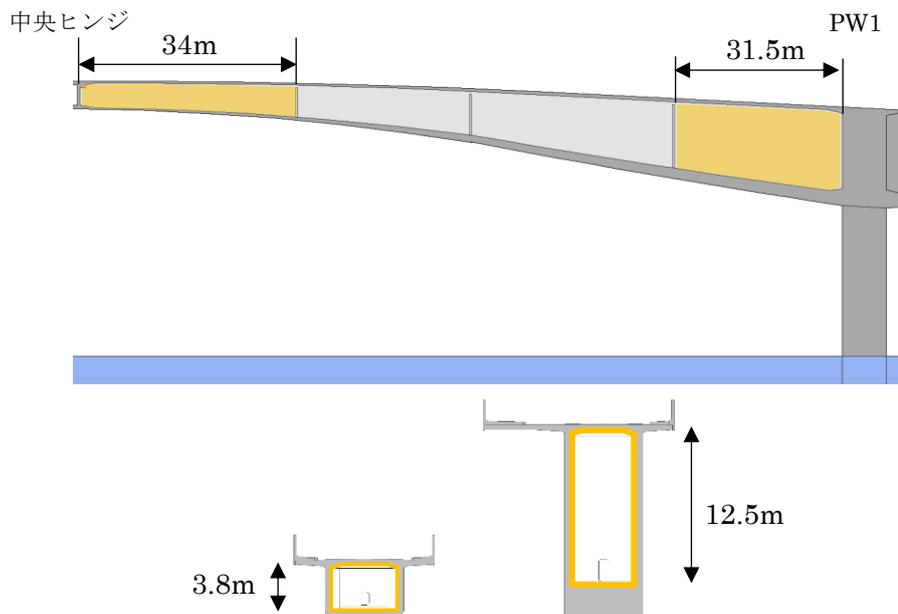


図 2-3 実証試験範囲

[II] 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』 NETIS : KK-110063-VR

【開発者】

ジビル調査設計

【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 2-4 橋上の台車設置状況



図 2-5 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

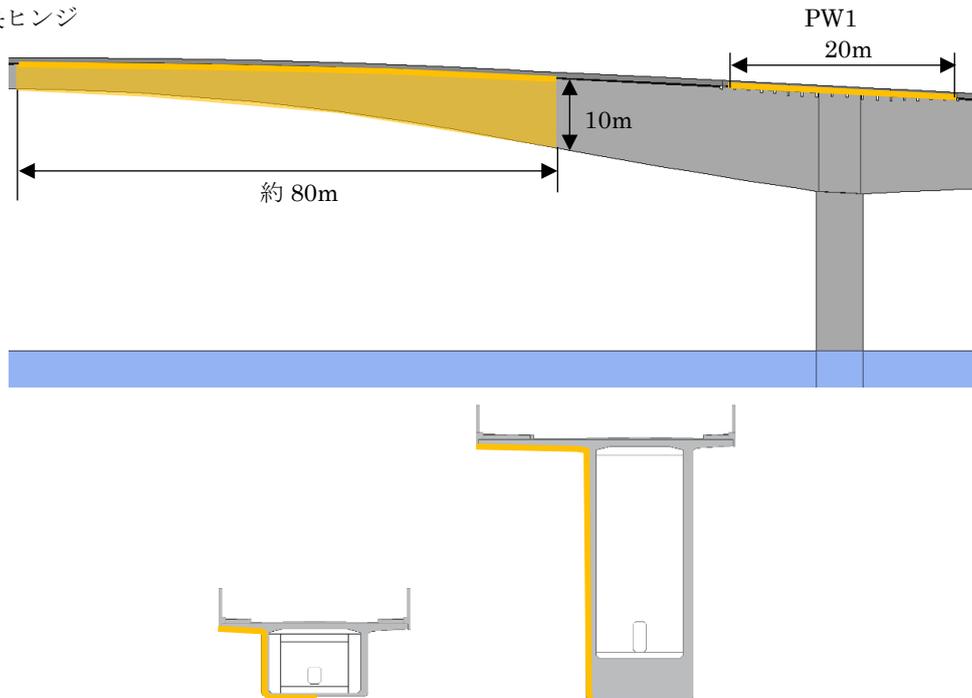


図 2-6 実証試験範囲

### [Ⅲ] 二輪型マルチコプタ

#### 【開発者】

富士通

#### 【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 2-7 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>)

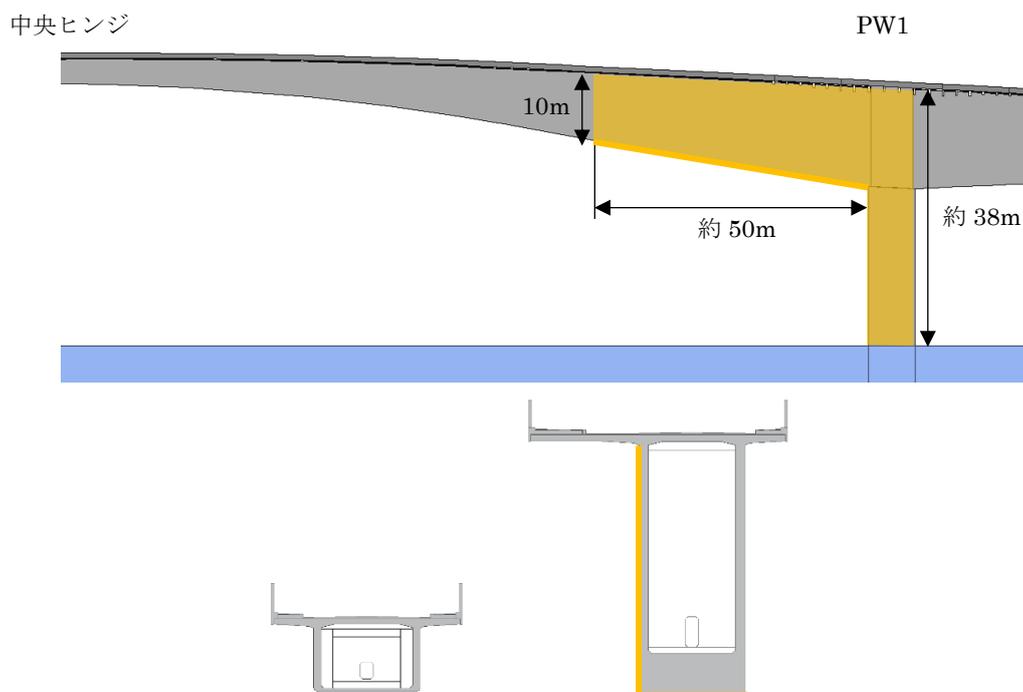


図 2-8 実証試験範囲

[IV] 打音機能付飛行ロボット NETIS : QS-180005-VR

【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 2-9 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

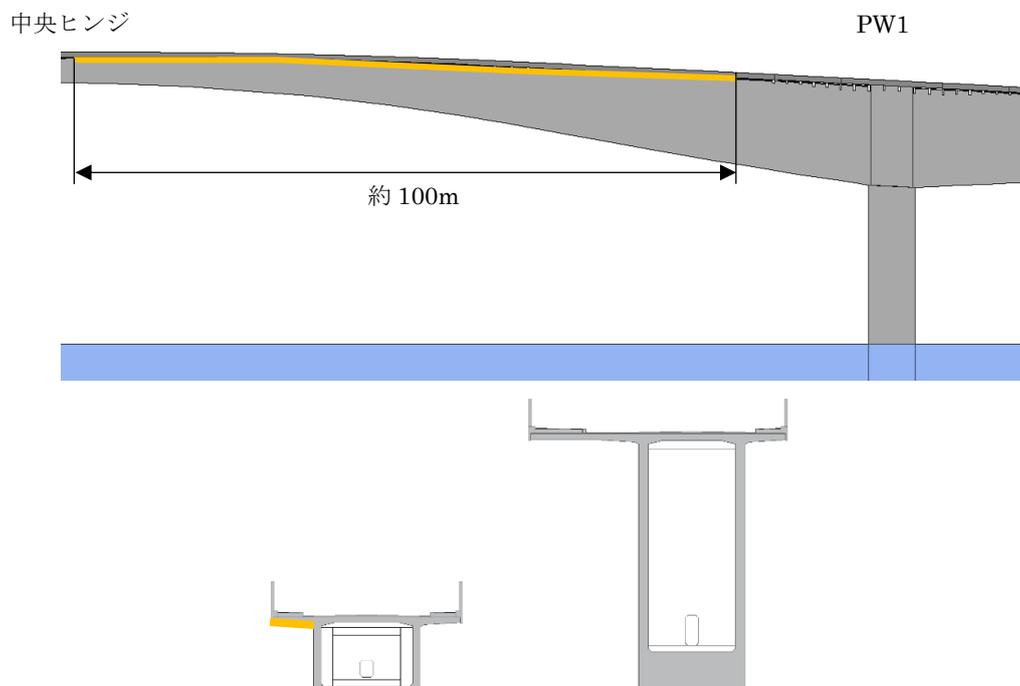


図 2-10 実証試験範囲

### 2-3 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にあたって制約条件をクリアできるかどうかを確認する必要がある。

#### [I] 橋梁点検ロボットカメラ

橋梁点検ロボットカメラの制約条件ならびに対策としては、「点検資機材の箱桁内への搬入」と「箱桁内部の急こう配底面への対応」の二つが考えられる。

##### 1) 点検資機材の箱桁内への搬入

「点検資材の箱桁内への搬入」に関しては、PW3の箱桁底面に設置された人孔から、必要な資機材の搬入が可能であるかを確認する必要がある。

橋梁点検ロボットカメラの資機材は図 2-11 に示すようなポールユニット（1,900×230×230）とカメラユニット（280×550×280）に分けて収納し、持ち運びが可能となっている。ポールユニットの重量は約 13 kg、カメラユニットの重量は約 5 kgである。

人孔のアクセスするタラップには、落下防止用の安全ガードが設置されており、ポールユニット等を背負って昇降することは困難だが、コンパクトで軽量の機材のため図 2-12 に示すように検査路からロープ等により吊り上げることができる。



図 2-11 資機材収納時の運搬状況

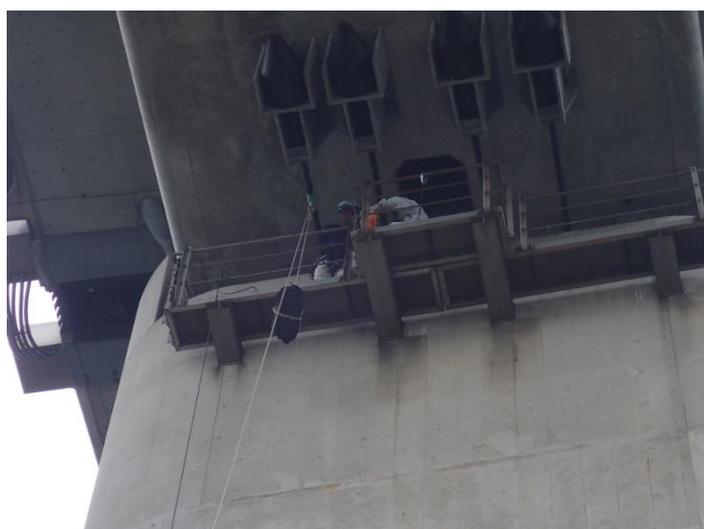


図 2-12 資機材搬入状況

##### 2) 箱桁底面の勾配への対応

箱桁は中央ヒンジ部から橋脚に向かうにつれて桁高が変化しており、それに伴った橋脚付近の底面の勾配は最大 14%（約 8 度）となっている。橋梁点検ロボットカメラは、三脚の長さ調整により最大 18%（約 10 度）までの勾配に対応できることから問題はない。

上記の通り、橋梁点検ロボットカメラを箱桁内部の点検に適用するにあたっての制約条件は全てクリアできることを確認した。

## [II] 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』

橋梁点検支援ロボット『見る・診る』は、ロッド長の制約から「点検可能な桁高」に、車両幅と歩道幅との関係から「走行可能な歩道幅」にそれぞれ制約があることが分かった。

### 1) 点検可能な桁高に関する制約

江島大橋プロジェクトの計画段階における調査では、ロッド長は9.0mで点検可能な桁高は6.8mであったが、ロッド長の延長により桁高10mまでの点検が可能になり、装置の改良後、8月初旬には江島大橋での実証試験ができることが確認された。

### 2) 走行可能な歩道幅に関する制約

橋梁点検支援ロボット『見る・診る』の車両幅は950mmであり、江島大橋の歩道幅を図面で確認すると1,050mmであることから、片側の歩道を占有することによってロボットを走行させることは可能であると思われるが、ロボットの組立場所と歩道への乗り入れ箇所の確認のため現地を踏査した。

ロボットの組立場所の第一候補として非常駐車帯でのロボット機材の積み降ろし及びロボット組み立てを検討した。図2-13に示すように非常駐車帯においてロボット機材の搬入・荷卸しならびに組み立てが可能である。ただし、ロボットの歩道乗り入れに際しては一時的に防護柵を撤去する必要があることが分かった。

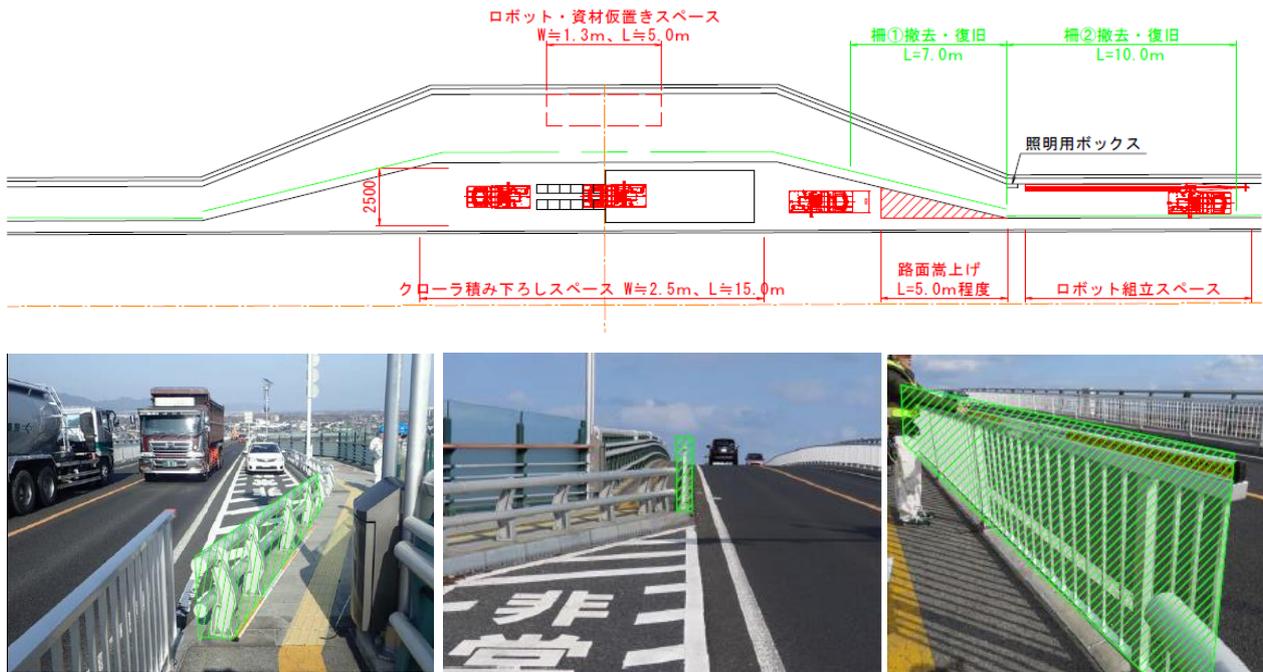


図 2-13 防護柵撤去部分の検討

### 3) 非常駐車帯の高欄乗り越え

非常駐車帯張出床版下面を点検するためには高欄の内側に設置されているガラス板を乗り越えなければならない。橋梁点検支援ロボット『見る・診る』の技術カタログによれば最大高欄乗り越え高さは1.7mであるが、非常駐車帯部分の高欄ガラス板の高さは歩道面から1.4~1.9mである。そのため、歩道上に角材とパレット1枚を設置して約30cmかさ上げし、その上にロボットを設置して点検することとした。

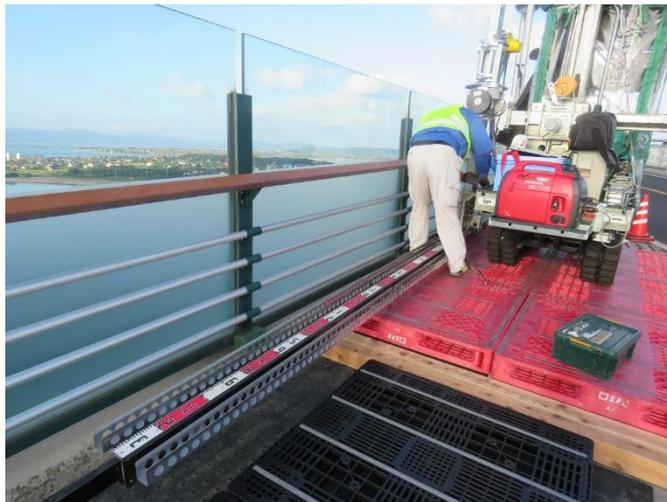


図 2-14 角材とパレットによるかさ上げ状況

橋梁点検支援ロボット『見る・診る』を江島大橋の上部工（箱桁高さ 10m 以下）ならびに非常駐車帯張出床版下面の点検に適用するにあたっては、いくつかの制約条件はあるものの上記の対応によってクリアできることを確認した。

### [Ⅲ] 二輪型マルチコプタ

江島大橋主橋梁部の点検に飛行型ロボットを適用する際の制約条件としては、「風の影響」と「UAV 操縦者の足場」が考えられる。

#### 1) 風の影響

飛行型ロボット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」が挙げられる。UAV は強い風を受けると位置と姿勢を制御することが難しくなる。また、橋軸方向に対する風向きも影響を及ぼすことが分かっており、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。そのため飛行型ロボット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きを調査したうえで点検時期を選定する必要がある。

表 2-2 および図 2-15 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 2-2 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%

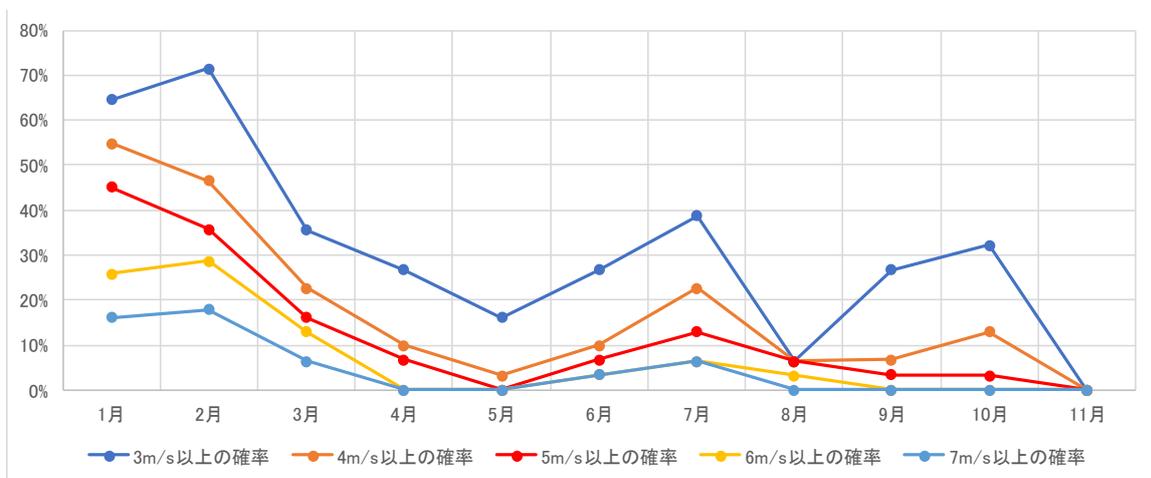


図 2-15 風速ごとの出現状況 (2015 年)

図 2-16 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 2-17 はこの地域の「通年の日最多風向 (境港管理組合提供)」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。

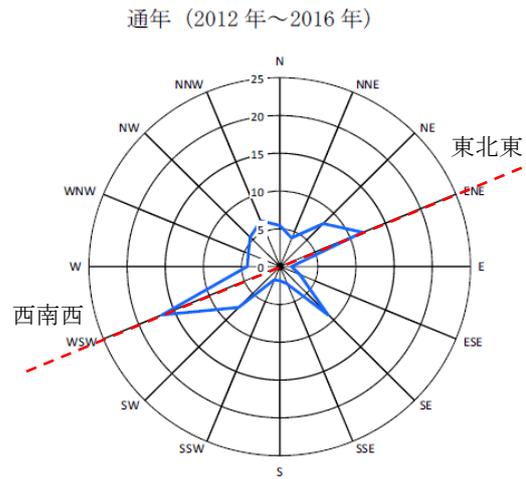


図 2-16 江島大橋、米子空港の滑走路の方向 図 2-17 通年の日最多風向 (境港管理組合提供)

図 2-18 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。

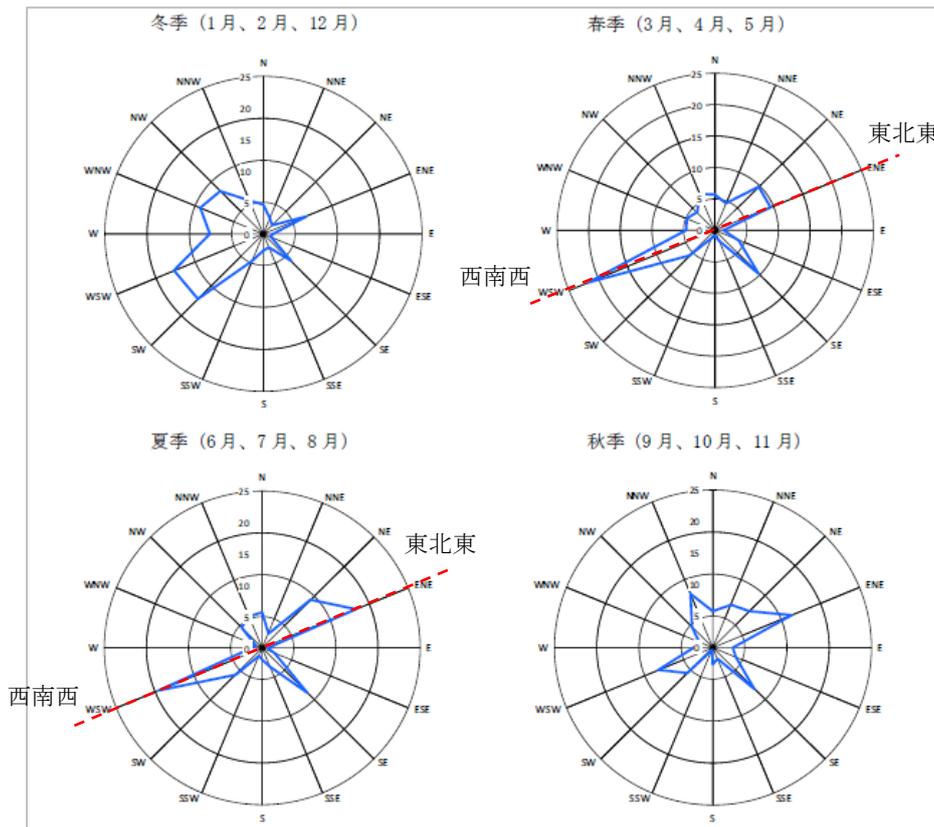


図 2-18 各季節の日最多風向 (境港管理組合提供)

風向きと風速の両方を考慮した場合、4 月から 8 月が飛行型ロボットを適用するのに適した時期といえる。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。

## 2) UAV 操縦者の足場確保

UAV 操縦者の足場を橋梁下部に確保しなければならないことから、橋脚周辺の海上に足場を設置する必要がある。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非常に難しいことから移動式の浮き足場を検討した。

浮き足場としては「フロート足場（組立式浮き栈橋）」と「台船」を候補として検討した。

### <フロート足場>

フロート足場は、フロート（プラスチック製の箱）を接続して浮き足場を構築するもので、岸壁に近い場所でフロートを海上に降ろして接続して現地まで曳航する形式の組立式浮き栈橋である。必要な大きさの栈橋を比較的自由に構築することができるが、サイズが大きくなるといくつか分割して曳航し現地で接続しなければならない。また、軽量であることから波の影響を受けて揺れるため、主航路を大型船が航行した場合に揺れが収まるまで作業を一時的に中断しなければならない可能性がある。

また、フロート足場を設置した後に護岸から人や資機材を運搬する運搬船が別途必要となる。

図 2-19 にフロート足場を PW1 橋脚の足元に設置した場合の計画図を示す。

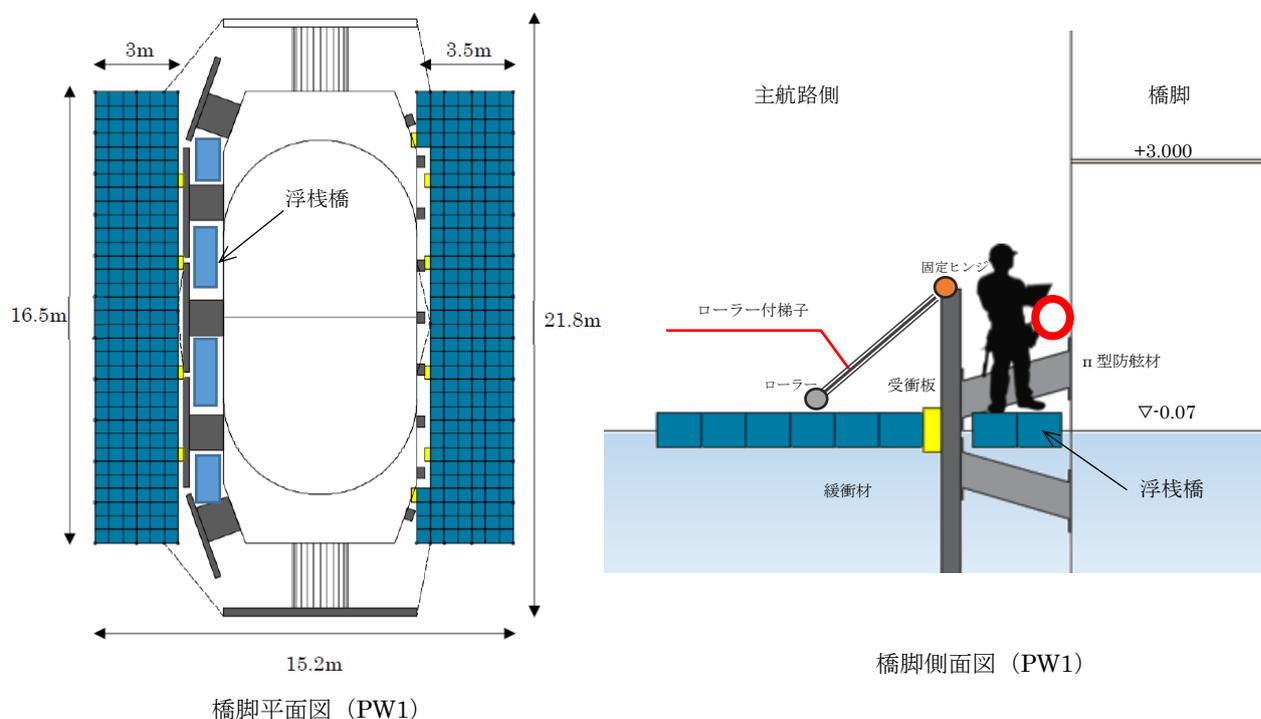
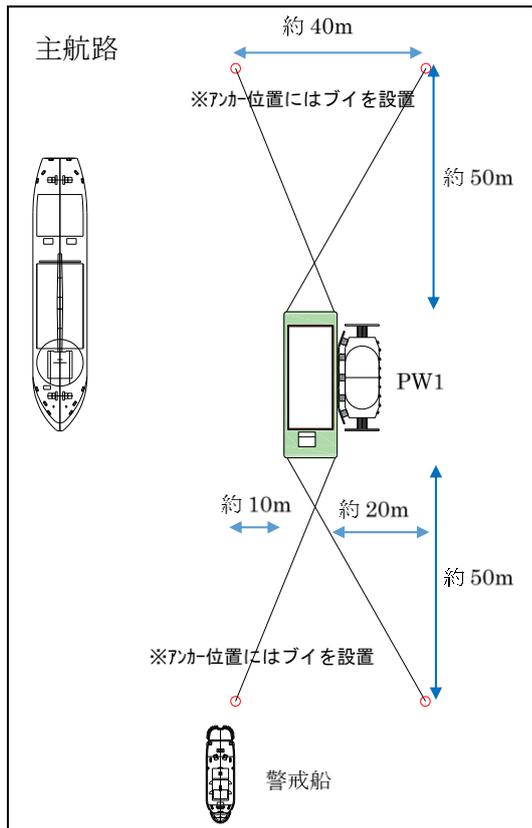


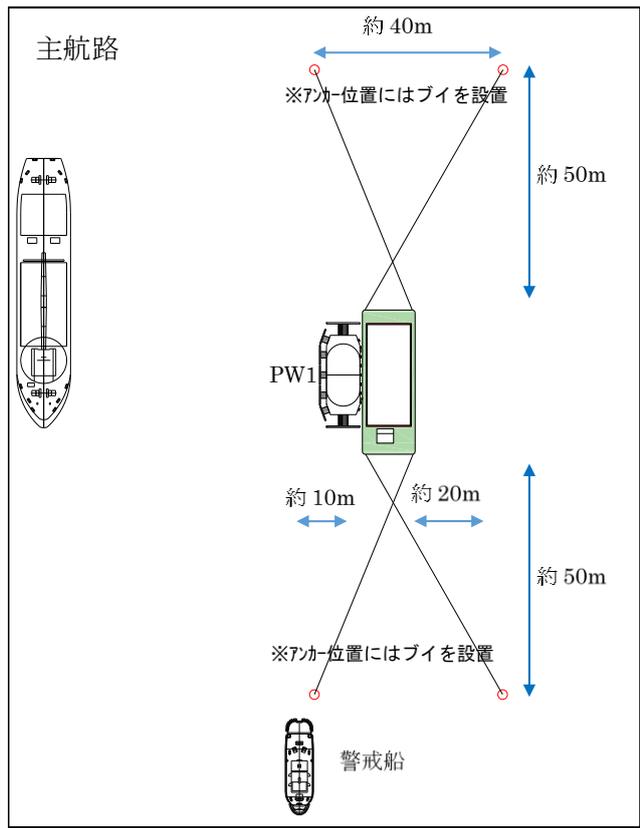
図 2-19 フロート足場の設置設計図

### <台船>

土砂運搬等に用いられる台船を UAV 操縦者の足場として活用する。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る。また、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できる。図 2-20 および図 2-21 に台船を PW1 橋脚の足元に設置した場合の計画図を示す。



主航路側に設置した場合



PW2側に設置した場合

図 2-20 台船の設置計画図

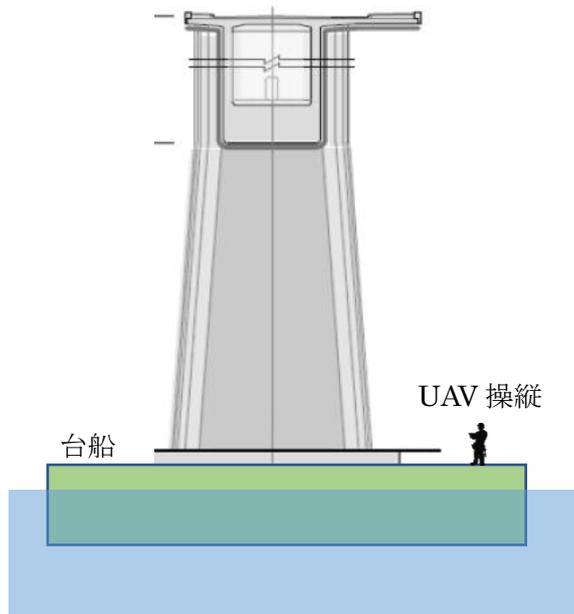


図 2-21 台船上での作業イメージ

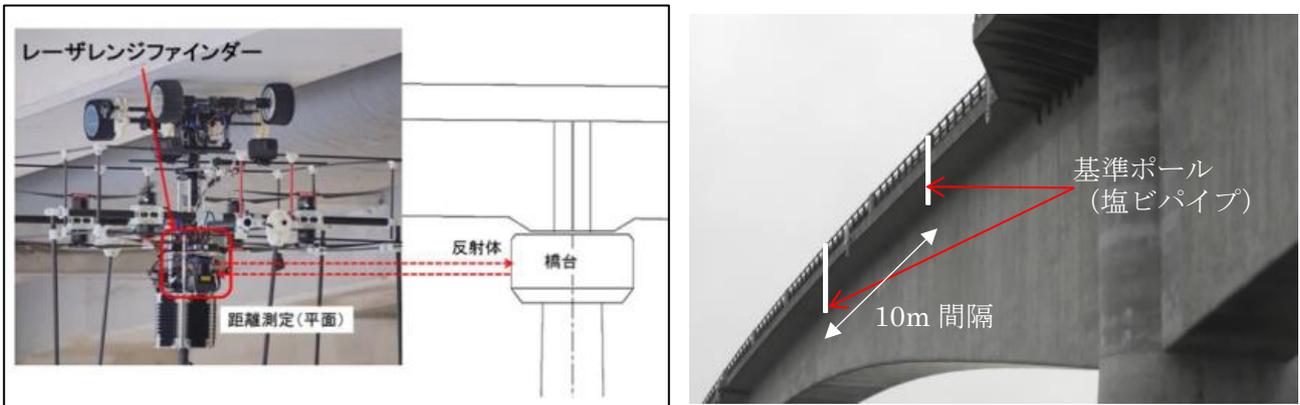
フロート足場と台船を候補として検討した結果、「緊急時にすぐ移動できること」と「安定性に優れていること」の二つの理由で台船を採用することとした。

#### [IV] 打音機能付飛行ロボット

打音検査ロボットの適用にあたっては、制約条件として「1) 風の影響」と「2) UAV 操縦者の足場確保」のほかに、「3) ロボット位置制御方法」を確認する必要がある。前者の二つについては「二輪型マルチコプタ」と同様のため省略する。

##### 3) ロボット位置制御方法

打音検査ロボットは 12cm×12cm の大きさの浮き・空洞を検出するため、うき・空洞の位置情報を取得しなければならない。そのためロボットの位置制御においては高い精度が求められる。点検ロボットは、その位置を計測するためにロボットに搭載した LRF（レーザレンジファインダ）により、橋の構造部位などの目印となる目標点までの距離を測定し、現在位置や走行軌跡を記録する。しかし、江島大橋では目印となる部位は箱桁側面のみとなるため、張出床版の先端部から 10m 間隔に基準ポール（φ200mm の塩ビパイプ）を吊下げ、それをターゲットとした。図 2-22 に測定方法と設置イメージを示す。



測定方法

目印となる基準ポールの設置イメージ

図 2-22 位置測定イメージ

## 2-4 安全性能の確認

実証試験でロボット技術を用いる上で、安全対策の観点からロボットが何らかの原因によって制御を失った場合においても第三者に被害を及ぼさないように緊急対応する機能が求められる。特に想定される事故として下記が挙げられる。

- ・ 部品の落下
- ・ ロボットの転倒
- ・ ロボットの落下
- ・ ロボットの逸走

これらの想定される事故に対する各ロボット技術の安全性能を以下に記載する。

### [I] 橋梁点検ロボットカメラ

#### 【部品の落下】

カメラとライト、パンチルト雲台が一体となった構造となっており、部品の落下する可能性はない。

#### 【ロボットの転倒】

高所型は、ポールユニットの三脚を大きく広げ、状況に応じて重し等により固定する。基本的には 2m × 2m 程度の平坦なスペースに設置して作業することが望ましいが、設置位置の傾斜が 10 度までであれば対応が可能である。

#### 【ロボットの落下】

懸垂型は、落下防止ベルトで高欄と架台ユニットとを結び固定する。

#### 【ロボットの逸走】

対象外

### [II] 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』

#### 【部品の落下】

主構造部材はワイヤにより落下防止対策が施されている。また、橋上でのロボット準備時は、工具を使用せず組立が可能のため、工具や細かなネジ等の落下の可能性はない。

#### 【ロボットの転倒】

ベースマシンのキャタピラに車止めを設置し、ロボット全体の水平を維持する。

#### 【ロボットの落下】

部品の落下と同様である。

水平アームはカウンターウェイトによりバランスを取っている。

#### 【ロボットの逸走】

ベースマシンのキャタピラに車止めを設置し、ベースマシンの逸走を防止する。

### [III] 二輪型マルチコプタ

#### 【部品の落下】

プロペラやカメラなどはフライト毎に事前確認を実施する。

#### 【ロボットの転倒】

橋上の給電装置は発電機や電源ドラムが搭載できる一体構造となっており、重量物を下部に配置し安定させている。

#### 【ロボットの落下】

有線給電ケーブルと有線給電ケーブル巻取装置により落下を防止する。巻取装置は、押しボタンにより装置が起動する。

#### 【ロボットの逸走】

有線給電ケーブルにより飛行範囲を制限するとともに、UAV が橋面より上部へ逸走した場合やロボットが操縦不能となった場合は、非常停止ボタンにより電源を遮断する。

### [IV] 打音機能付飛行ロボット

#### 【部品の落下】

基準ポールは、ロープから抜け落ちない構造とし、ロープを高欄に強固に固定する。

#### 【ロボットの転倒】

対象外

#### 【ロボットの落下】

安全ロープおよび有線給電ケーブルにより、落下を防止する。

#### 【ロボットの逸走】

安全ロープおよび有線給電ケーブルにより飛行範囲を制限するとともに、UAV が橋面より上部へ逸走した場合やロボットが操縦不能となった場合は、非常停止ボタンにより電源を遮断する。

## 2-5 実証試験における安全管理

本実証試験では、「安全第一、かつ効率よく実施」するため「実証試験における安全管理」(参考資料 1) を策定した。

特に橋上・海上作業では風向・風速が最も影響を与える可能性があることから、江島大橋での調査を実施する際には「乱流による急激な風速変動」等の影響も考慮して安全に飛行できる風速を設定する必要がある。SIP インフラで想定している UAV の風速安定性に関わる運用最大風速は 10m/s (平均風速) であり、各開発チームの技術は、開発目標をクリアしている。そこで、境港管理組合提供の過去気象データを基に各ロボット技術の耐風安定性や稼働率を考慮し、平均風速の中断・中止基準値 (UAV : 5m/s、ロボットカメラ : 7m/s) を設定した。

また、大雨や暴風、強風、洪水の各種警報・注意報発令時の対応や地震発生時の対応、そして船舶往来時の対応等を細かく定め、安全な試験実施に努めた。

その他、「実証試験における安全管理」では作業者の役割明確化、連絡体制の周知・徹底、熱中症対策等についても定めている。

## 2-6 関係機関との協議及び許認可手続き

実証試験実施にあたり、表 2-3 に示す関係機関との事前協議および許認可手続きを行った。

表 2-3 関係機関

関係機関名	項目	内容	備考
境港管理組合	港湾施設占有	橋梁利用 桁下土地占有	
		台船係留 交通船係留	年間使用許可済のため申請不要
境海上保安部	事前協議	調査計画 台船設置 足場仮設	
	海上作業許可	警戒船 台船設置 足場仮設	
出雲河川事務所中海出張所	河川占有 工作物設置	台船設置	着工届 1 部 検査申請書 2 部
境港警察署	道路占有	点検作業、橋梁 点検車における 歩道通行規制	境港警察署には松江警察署の許可証の写しを提出
松江警察署		点検作業、橋梁 点検車における 歩道通行規制	夜間の歩道通行止めも申請
国土交通省大阪航空局	航空法許可	UAV 飛行	UAV 飛行実施者が申請
美保航空事務所	航空法許可	UAV 飛行	水平距離 4km 以上のため申請不要
J F 鳥取	事前協議	航路干渉	事前調整のみ
中海漁協		同上	事前調整のみ
八束中海漁協		同上	事前調整のみ
外江漁協		同上	事前調整のみ
米子市漁協		同上	事前調整のみ
渡釣り船協会		同上	事前調整のみ 会員周知用にハガキ 80 枚送付
中海漁協		航路干渉 警戒船手配	警戒船は八束中海漁協と契約で調整済み
空港港湾課港湾担当		航路干渉	事前調整のみ
島根県港湾空港課管理グループ	事前協議	同上	事前調整のみ
境港市水産課		同上	事前調整のみ
境港側の関係自治会長	近隣住民周知	交通規制	周知用チラシの回覧

## 2-7 実証試験スケジュール

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。

表 2-4 に各開発チームの作業項目を細分化し、計画した工程表を示す。外作業となる新日本非破壊検査、富士通、ジビル調査設計については、悪天候による順延等を考慮し、それぞれ予備日を設けた。

表 2-4 現地点検工程表

■ 当初計画    ■ 予備日

開発チーム (共通仮設)	作業場所	作業内容	2018年7月																		
			1 日	2 月	3 火	4 水	5 木	6 金	7 土	8 日	9 月	10 火	11 水	12 木	13 金	14 土	15 日	16 月	17 火	18 水	19 木
三井住友建設	全体工程																				
	現場事務所前 (PE2-PE3)	機材使用方法レクチャー																			
	精度検証ヤード (PE9-PE10) 桁内	精度確認試験																			
		ロープによる資機材の吊上げ・搬入																			
		桁内への運搬・設置																			
		下床板清掃・送風機設置等																			
歩道上 (PW2)	撮影																				
	片付																				
	橋面上への運搬・設置																				
新日本非破壊調査	全体工程																				
	現場事務所前 (PE2-PE3)	機材の準備																			
富士通	歩道上PW1～中央ヒンジ	点検作業・張出床板の打音検査																			
	全体工程																				
	精度検証ヤード (PE9-PE10)	精度確認試験																			
	PW1	事前テスト撮影																			
	PW1橋脚 (東平面・南曲面・東側)	撮影																			
	PW1橋脚 (西平面・南曲面・西側)	撮影																			
	PW1橋脚 (北曲面・東側・西側)	撮影																			
	箱桁 (側面)	撮影																			
	箱桁 (下面)	撮影																			
	(台船)	主航路側																			
(交通規制)	航路外																				
	南側																				
	北側																				

開発チーム (共通仮設)	作業場所	作業内容	2018年8月																		
			6 月	7 火	8 水	9 木	10 金	11 土	12 日	13 月	14 火	15 水	16 木	17 金	18 土	19 日	20 月	21 火	22 水	23 木	24 金
ジビル調査設計	全体工程																				
	非常駐車帯部	柵撤去、機材の搬入																			
	中央ヒンジ部～PW1張出床版・箱桁側面	撮影																			
	中央ヒンジ部～PW1箱桁側面	撮影																			
	中央ヒンジ部～PW1箱桁下面	撮影																			
	非常駐車帯部 張出床版	撮影																			
	非常駐車帯部	柵撤去、機材の搬出																			
	精度検証ヤード (PE9-PE10)	精度確認試験																			
	(台船)	主航路側																			
(交通規制)	航路外																				
	南側																				
	北側																				

## 2-8 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 2-23 に示す。

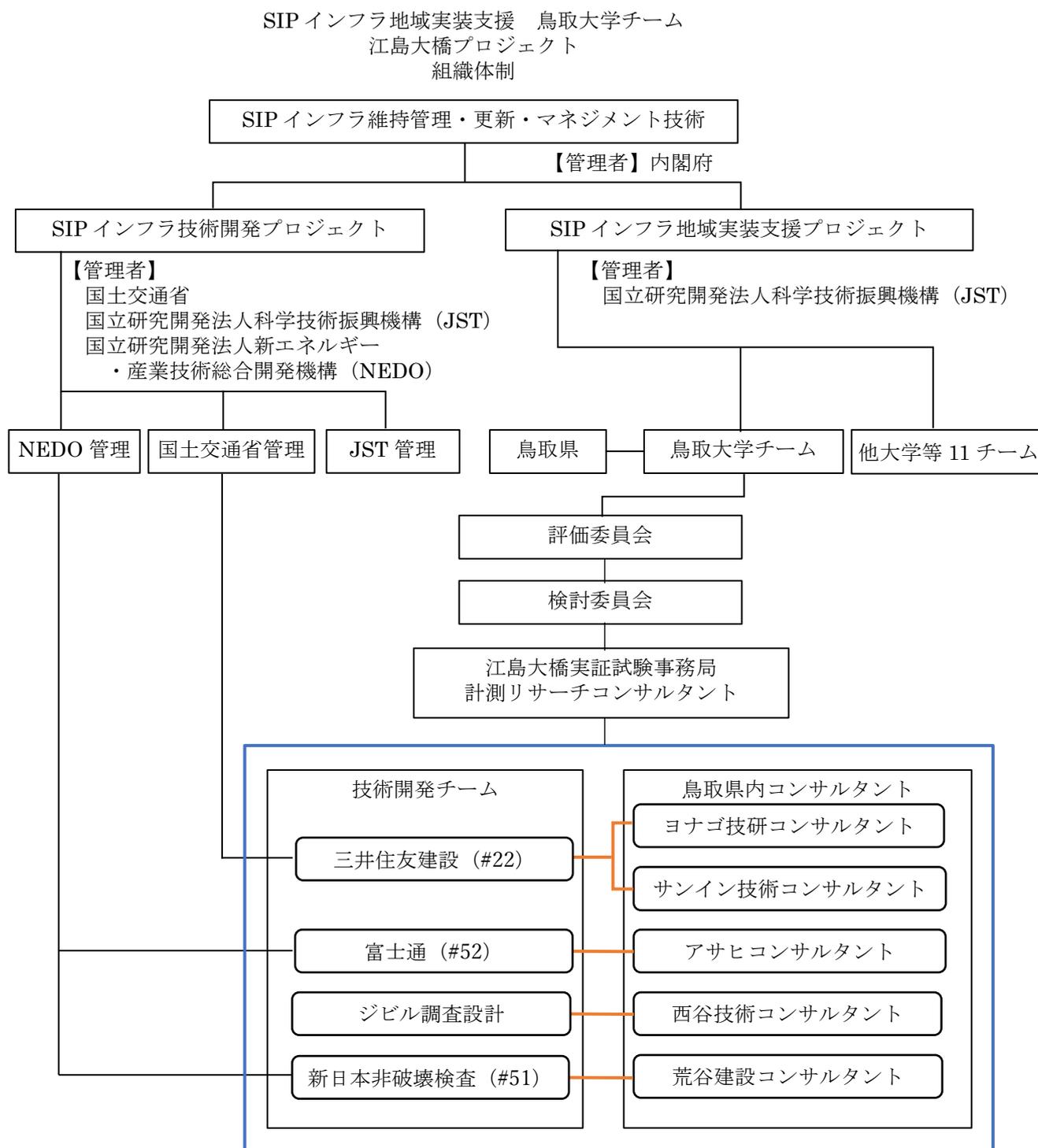


図 2-23 江島大橋プロジェクトの位置付けと実証試験実施体制図

### 3. ロボット技術の精度確認試験

#### 3-1 画像撮影ロボットの精度確認試験

##### 3-1-1 目的

画像撮影ロボットの精度確認試験は、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島根県松江市側取付高架橋部のうち、高所作業車で箱桁下面に近接できる区間（PE10 と PE11 の間）を精度確認試験の実施場所として選定した。

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 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ことが分かった。そこで、他のコンクリート構造物を対象として、上記の計測性能を確認するために必要な損傷の画像を高解像度撮影し、シートに印刷して精度確認試験の実施場所に貼り付けて損傷の代用とした。

##### 3-1-2 概要

###### (1) 精度確認試験実施場所

島根県松江市側の PE10～PE9 の区間（橋脚および桁下面）

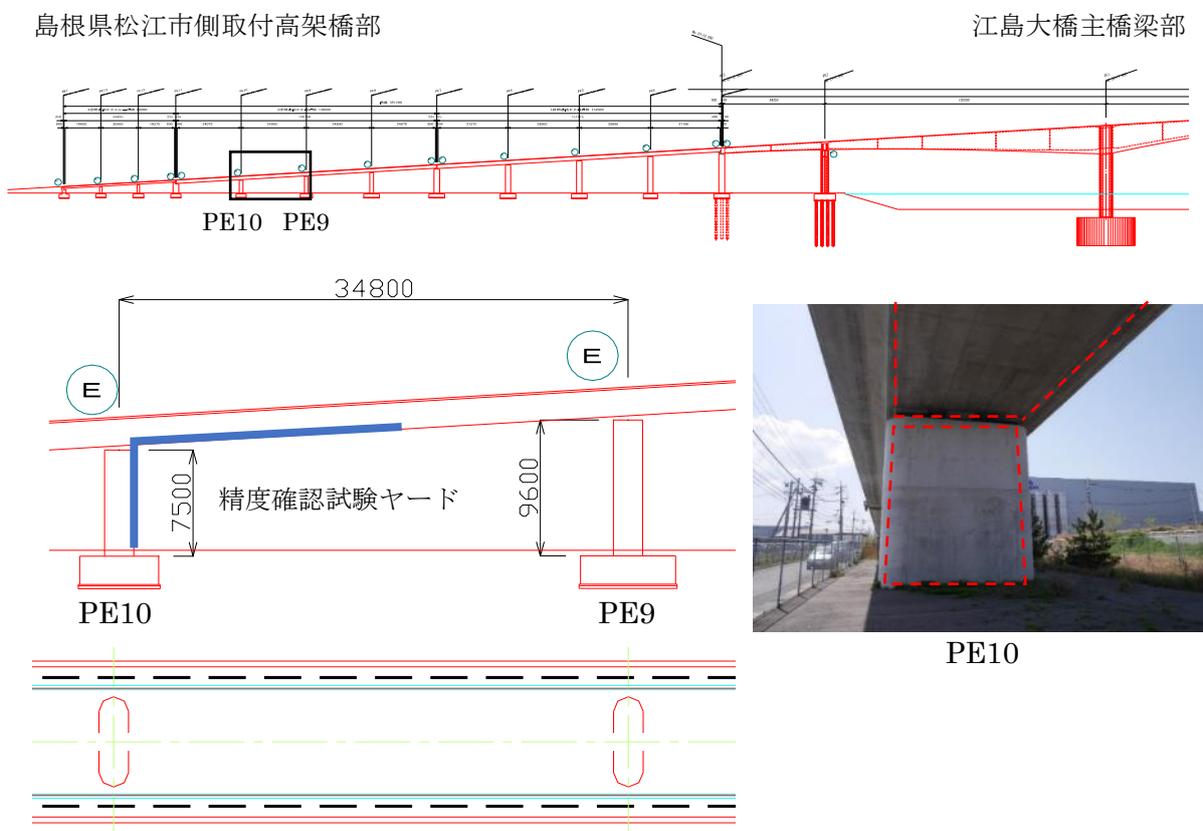


図 3-1 精度確認試験ヤード

## (2)評価方法

各開発チームに精度確認試験ヤード（鉛直面および桁下水平面）の中から確認試験実施部位を選択してもらい、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。取得した画像データを用いて事務局から指定された損傷部を計測してその結果を提出して貰い、ロボットによる計測結果を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。

## (3)事前準備

### 【真値の取得】

事前準備として、入念な近接目視点検および高解像度のオルソ画像作成により、損傷部のひびわれの長さ・幅・位置等を計測し、その計測結果を「真値」とした。近接目視点検でひびわれの探査およびひびわれ幅の計測を行い、オルソ画像よりひびわれの位置・長さを計測した。



高所作業車により点検

ひびわれ幅の計測

橋脚の撮影

図 3-2 ひびわれ幅の確認他 事前作業状況

入念な近接目視点検を実施した結果、ひびわれのほとんどは 0.1mm のひびわれ幅で目立った損傷は見受けられなかった。精度確認を行う上ではサンプルとなる損傷が少ないことから、幅 0.2mm から 2.0mm のひびわれの検出精度を評価するために、別のコンクリート構造物で撮影した鮮明なひびわれ画像を 20cm 角のシートに印刷してコンクリート表面に貼付し、模擬ひびわれとした。シート上のひびわれ幅をクラックスケールで計測しその値を「真値」とした。

なお、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。

## (4)精度確認試験ヤードの損傷の種類

精度確認試験ヤードで検出した「コンクリート表面のひびわれ」の他に、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計測対象とした。

### 【コンクリート表面のひびわれ】

図 3-3 に PE9 の橋脚鉛直面上の「コンクリート表面のひびわれ」の一例を示す。事前準備の段階でひびわれ幅の計測箇所を矢印を記入したうえで、クラックスケールでひびわれ幅を計測して「真値」とし、開発チームの計測結果を「真値」と比較してひびわれ幅の計測精度を評価した。



図 3-3 コンクリート表面のひびわれ

### 【ひびわれ画像シート】

精度確認試験ヤードのコンクリート表面には見られない幅 0.2mm 以上のひびわれの検出およびひびわれ幅計測精度を確認するために、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 箇所に「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。

開発チームに対しては、10 枚のひびわれシート上の全 90 か所のひびわれ幅計測結果と、チームごとに指定した 2 点間距離の計測結果の提出を求めた。なお、「コンクリート表面のひびわれ」と「ひびわれ画像シート上のひびわれ」の計測結果は、損傷図（CAD 図）に記載して提出して貰った。



図 3-4 ひびわれ画像シート

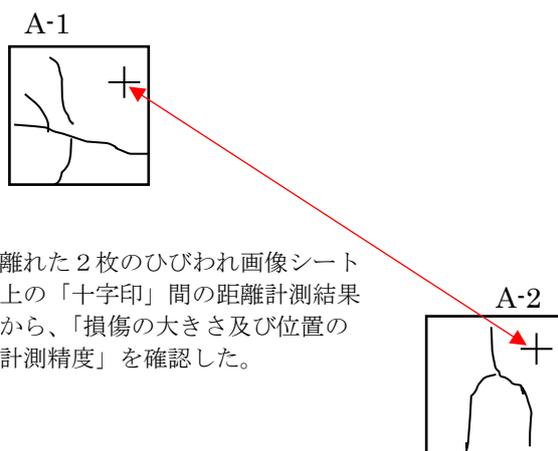


図 3-5 2 点間距離の算出イメージ

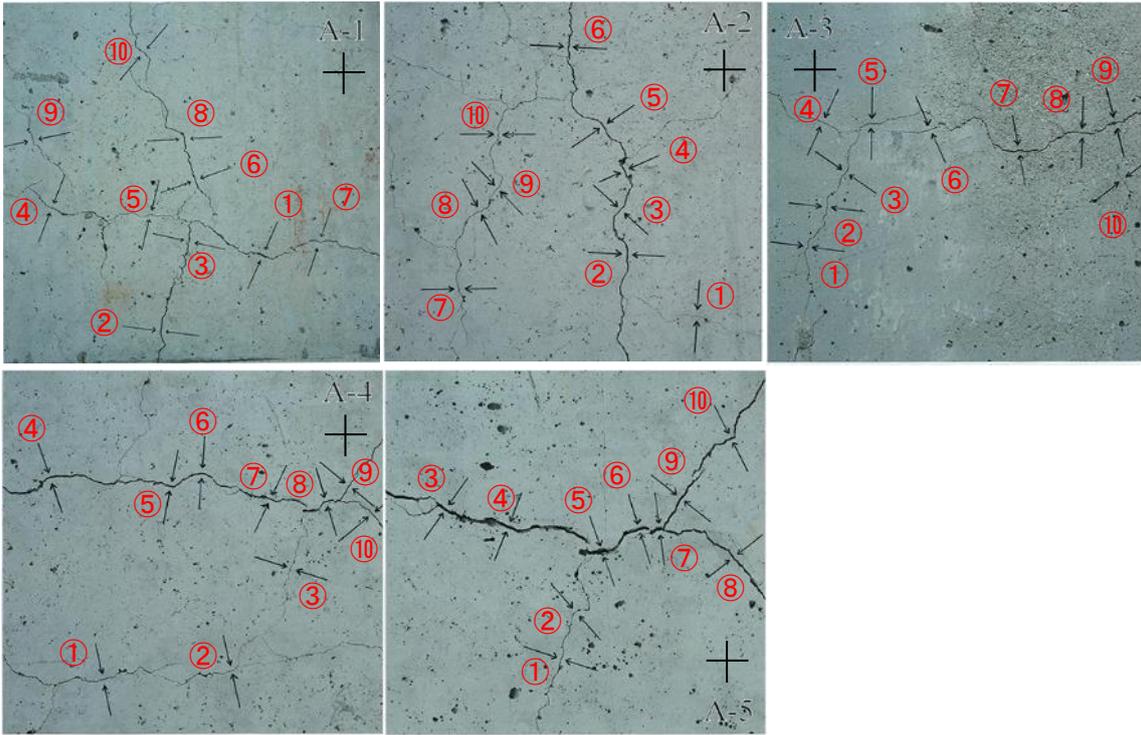


図 3-6 グループ A : 比較的汚れの少ないコンクリートのひびわれ

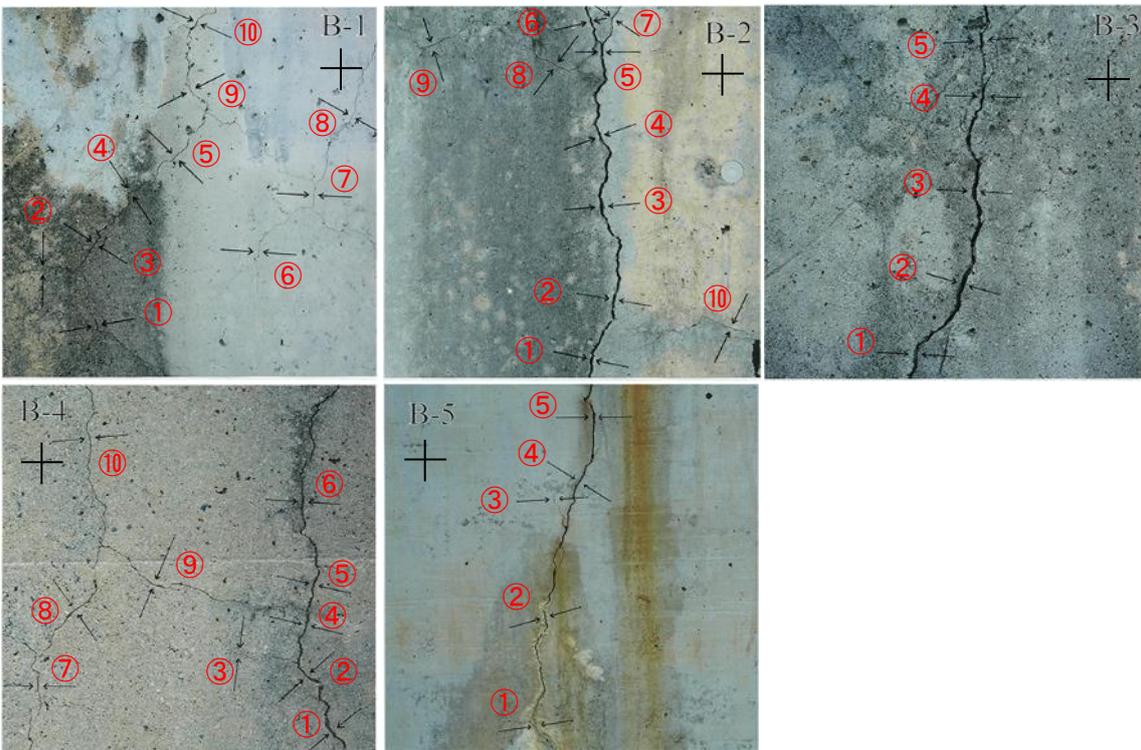


図 3-7 グループ B : 錆汁等表面の汚れが目立つコンクリートのひびわれ

### 【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ー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。

各開発チームには、模擬ひびわれシートを撮影したオリジナル画像を提供して貰い、事務局で各ひびわれが PC 上で視認可能かを評価した。

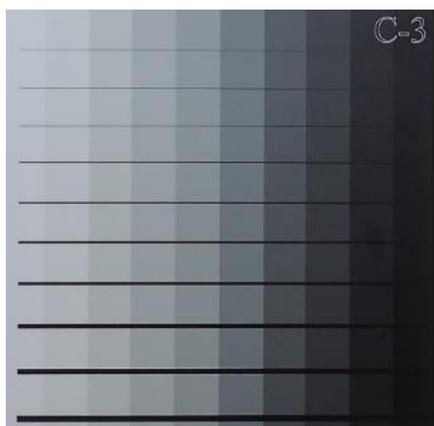


図 3-8 模擬ひびわれシート (C-3)

### 【測量ターゲット】

撮影画像から尺度を持った展開画像を作成するには、撮影対象部位の位置・寸法情報が必要となる。そのため精度確認試験ヤードに測量ターゲット (5 cm 角) を複数枚貼付して、ターゲットの位置情報 (座標) を実測して開発チームに配布した。開発チームは、ターゲットの座標情報を活用してひびわれの位置・長さ等を抽出するとともに展開画像を作成した。

(5)ターゲット設置状況と対象範囲

精度確認試験の対象部位として、PE9 東面の上下2か所（3m 範囲と 4m 範囲）、PE9-PE10 の桁下面（10m 範囲）の計3か所を準備し、開発チームにはそれらのうち1か所を精度確認試験の対象部位として選択して貰った。それぞれの精度確認対象部位にひびわれ画像シート10枚、模擬ひびわれシート1枚、対象部位の四隅に測量ターゲットを4枚設置した。図3-9 および図3-10 にそれらの設置状況を示す。

【I】橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】と【III】二輪型マルチコプタ【富士通】が精度確認対象部位①、【II】橋梁点検支援ロボット『見る・診る』【ジビル調査設計】が対象部位②を選択して精度確認試験を実施した。

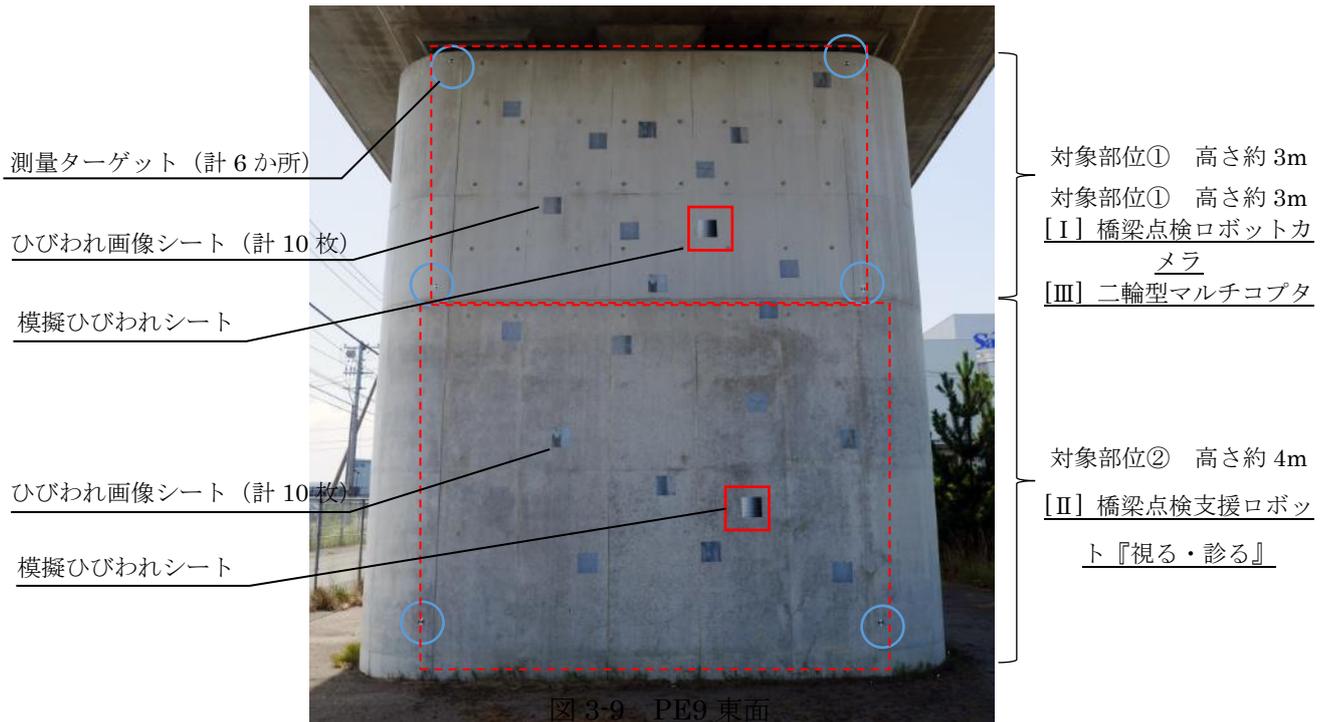


図 3-9 PE9 東面

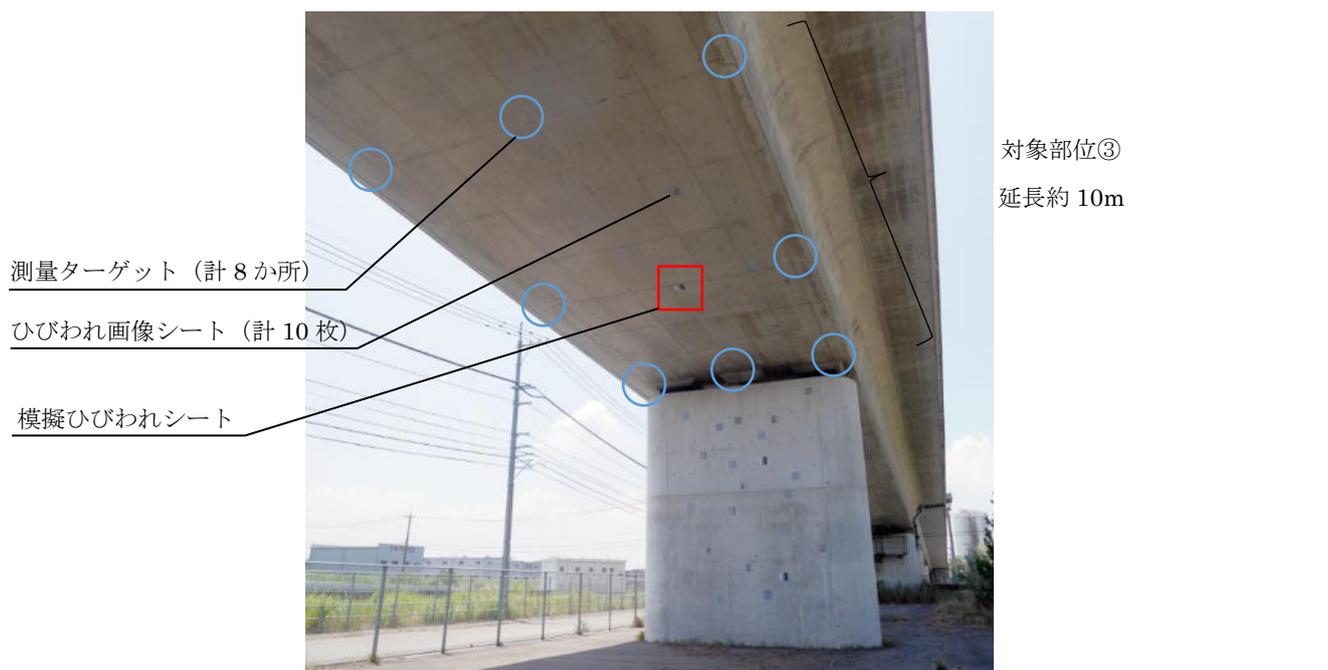


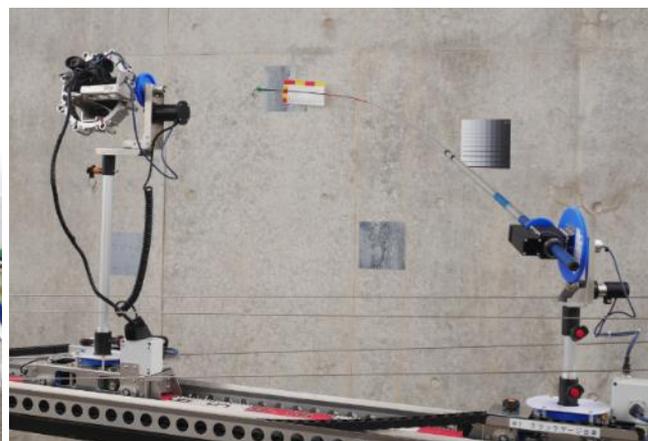
図 3-10 PE9-PE10 桁下面

### (6)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【三井住友建設】 撮影状況



【Ⅱ】橋梁点検支援ロボット『見る・診る』【ジビル調査設計】 撮影状況



【Ⅲ】二輪型マルチコプタ【富士通】 撮影状況

図 3-11 各開発チームの精度確認試験の実施状況

### 3-1-3 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。

表 3-1 に、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示す。

表 3-1 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					

#### [I] 橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】

全 90 か所のうち、85 か所の計測結果を得た。計測できなかった 5 か所は、ひびわれ幅が 1.5mm 以上で、ひびわれ幅算出に使用するデジタルクラックスケールが 1.5mm を上限に想定されていたため計測不可であった。今後のシステム改変により対応は可能である。表 3-2 にひびわれ幅計測結果、表 3-3 に真値との差分を示す。表 3-3 は、幅の差分に応じて色付けした表である。図 3-12 は表 3-3 をベースにグラフ化したものであり、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 3-2 ひびわれ画像シートのひびわれ幅計測結果 (mm)【橋梁点検ロボットカメラ】

No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
A-1	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.30	0.30	0.30	0.10	0.20
A-2	0.10	0.40	0.40	0.40	0.30	0.30	0.10	0.20	0.20	0.20
A-3	0.10	0.10	0.20	0.20	0.30	0.30	0.40	0.40	0.60	0.10
A-4	0.20	0.10	0.05	0.40	0.30	0.30	0.30	0.40	0.20	0.20
A-5	0.20	0.20	0.80	0.90	1.50	0.90	1.00	0.60	0.80	0.70
B-1	0.30	0.10	0.30	0.30	0.20	0.05	0.10	0.10	0.10	0.20
B-2		1.00		1.20	1.10	0.60	0.30	0.20	0.20	0.10
B-3				1.10	1.10					
B-4	0.80	0.50	0.10	0.60	0.60	0.90	0.10	0.30	0.20	0.20
B-5	0.10	0.30	0.05	0.30	0.40					

表 3-3 真値との差分 (mm) 【橋梁点検ロボットカメラ】

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-2	0.00	-0.25	-0.05	-0.30	-0.35	-0.35	-0.15	0.00	0.00	-0.05
A-3	-0.15	-0.15	-0.10	0.00	0.00	0.05	-0.15	-0.10	0.10	-0.05
A-4	-0.10	-0.15	-0.10	-0.35	-0.40	-0.40	-0.30	-0.15	-0.20	-0.15
A-5	-0.10	-0.05	-0.30	-0.40	-0.20	-0.20	-0.60	-0.25	-0.20	-0.20
B-1	0.00	-0.05	-0.05	0.00	-0.05	-0.10	-0.05	-0.05	-0.10	-0.15
B-2		-0.50		0.20	0.00	-0.25	-0.10	-0.10	0.00	-0.05
B-3				-0.30	-0.30					
B-4	-0.30	-0.15	-0.05	-0.30	-0.35	-0.20	-0.20	0.00	-0.10	-0.05
B-5	-0.10	-0.10	-0.10	-0.30	-0.40					

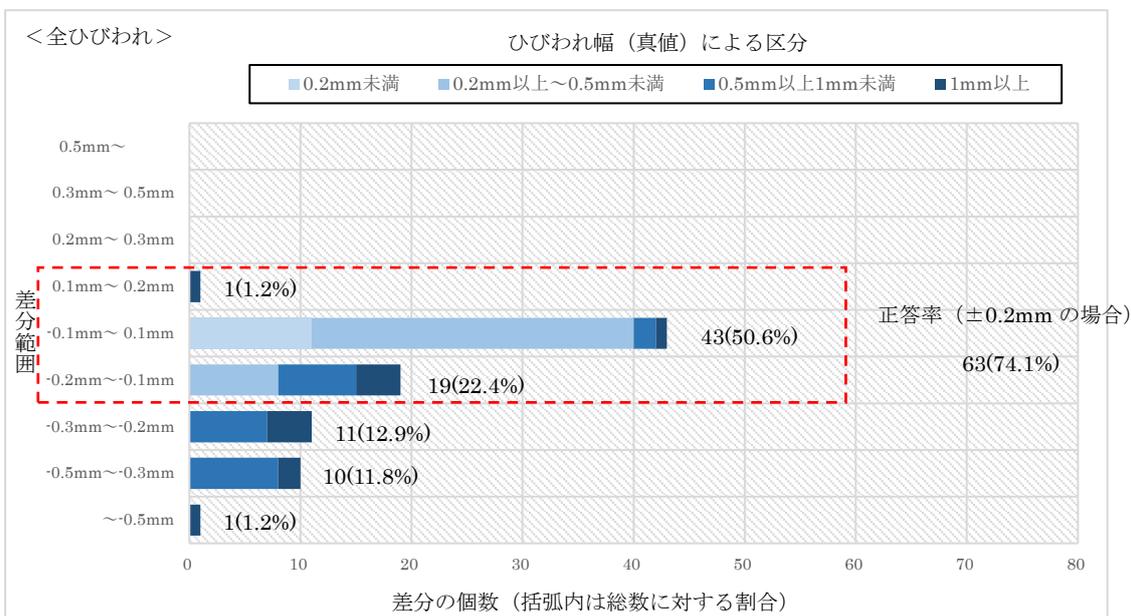
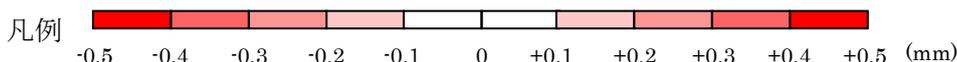


図 3-12 真値との差分分布図<全ひびわれ> 【橋梁点検ロボットカメラ】

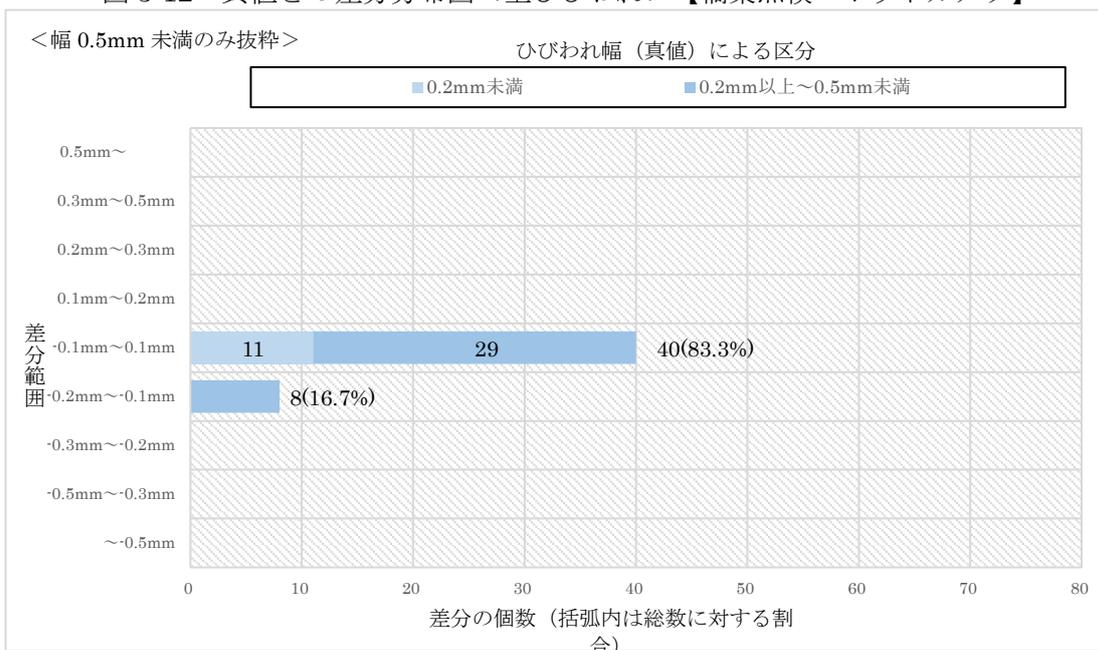


図 3-13 真値との差分分布図<幅 0.5mm 未満のみ抜粋> 【橋梁点検ロボットカメラ】

【考察】

全体 85 か所のうち約半数の 43 か所 (50.6%) が  $\pm 0.1\text{mm}$  の差分範囲に収まっており、 $\pm 0.2\text{mm}$  までを許容範囲と仮定した場合、74.1%がこの範囲に収まっていることが図 3-12 より分かる。内訳として、幅 0.5mm~1.0mm の大きなひびわれについては、 $-0.3\text{mm}\sim-0.5\text{mm}$  程度のやや大きめの差分が表れていることに対し、幅 0.5mm 未満のひびわれは全て  $\pm 0.2\text{mm}$  以内の差分に収まっている。図 3-13 は、幅 0.5mm 未満のひびわれのみを抜粋してグラフ化した図である。

また、全体的に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図 3-12 より見受けられる。当ロボットシステムでは、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思われる。

[II] 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』【ジビル調査設計】

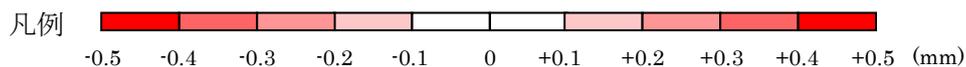
欠測や検出漏れはなく全 90 か所の計測結果が得られた。表 3-4 にひびわれ幅の計測結果、表 3-5 に真値との差分を示す。図 3-14、図 3-15 には、ひびわれ幅 (真値) の区分ごとの差分個数の集計結果を示す。

表 3-4 ひびわれ画像シートのひびわれ幅計測結果 (mm) 【橋梁点検支援ロボット『見る・診る』】

No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
A-1	1.00	0.50	0.40	0.30	0.10	0.50	0.30	0.50	0.10	0.20
A-2	0.05	0.60	0.40	0.60	0.60	0.60	0.10	0.10	0.10	0.15
A-3	0.10	0.10	0.15	0.15	0.30	0.25	0.50	0.50	0.55	0.05
A-4	0.30	0.15	0.10	0.70	0.65	0.65	0.55	0.60	0.40	0.30
A-5	0.30	0.25	1.00	1.40	2.00	1.20	1.80	0.90	1.00	1.00
B-1	0.30	0.10	0.40	0.25	0.10	0.05	0.10	0.10	0.15	0.30
B-2	1.50	1.50	1.40	1.00	1.10	1.00	0.25	0.20	0.10	0.10
B-3	1.60	2.10	2.00	1.30	1.30					
B-4	1.00	0.50	0.05	1.00	1.00	1.10	0.15	0.20	0.30	0.30
B-5	0.05	0.30	0.10	0.50	1.00					

表 3-5 真値との差分 (mm) 【橋梁点検支援ロボット『見る・診る』】

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



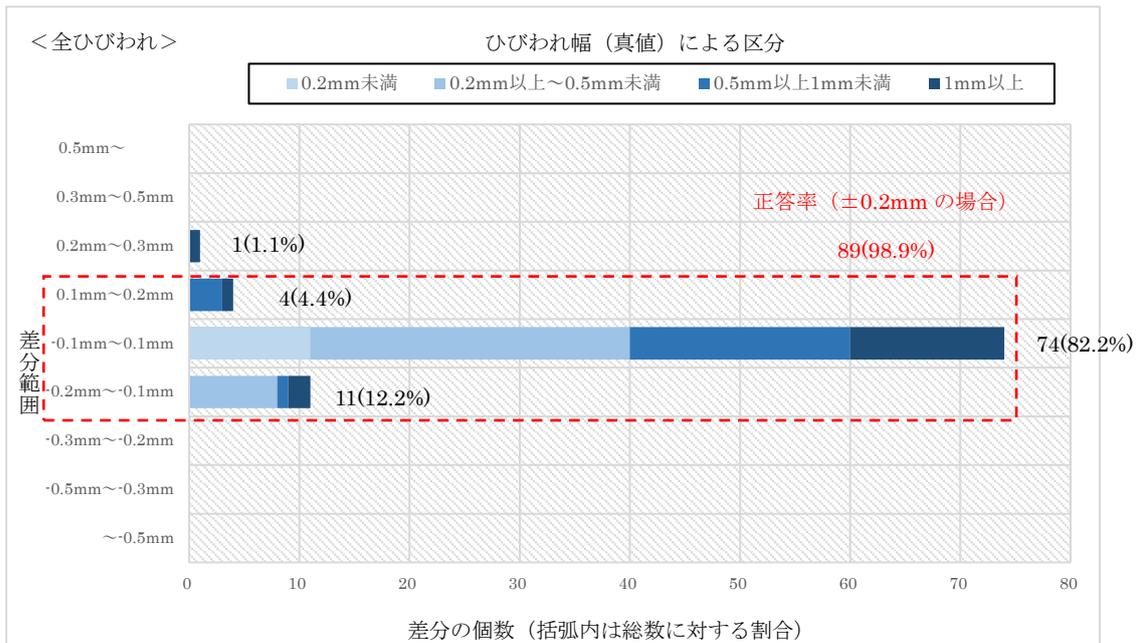


図 3-14 真値との差分分布図<全ひびわれ>【橋梁点検支援ロボット『見る・診る』】

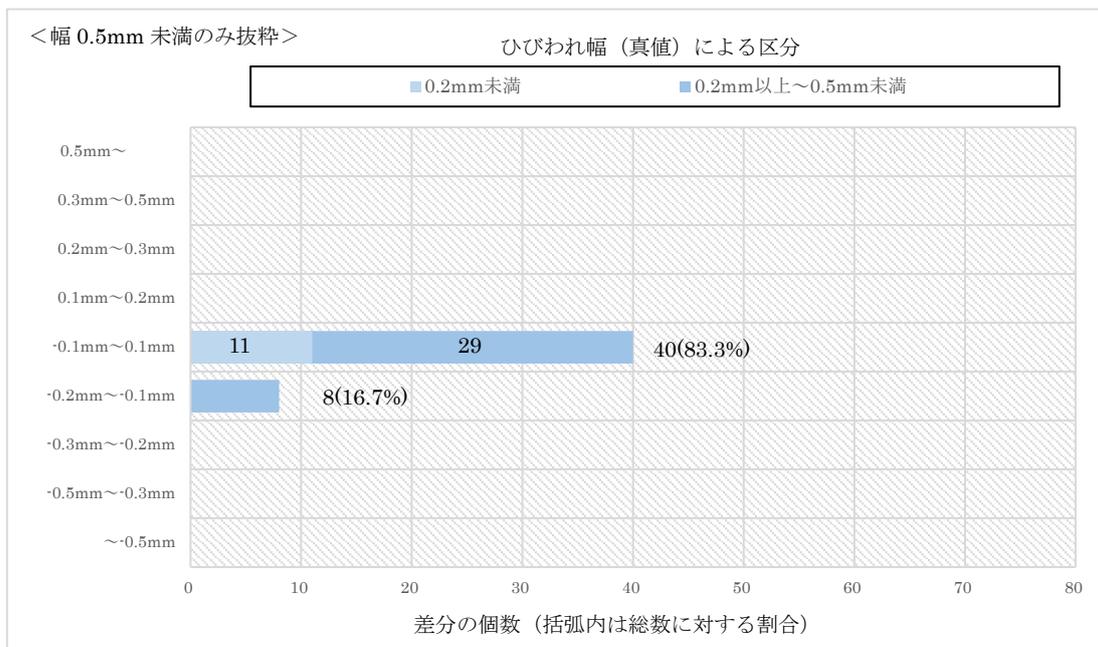


図 3-15 真値との差分分布図<幅 0.5mm 未満のみ抜粋>【橋梁点検支援ロボット『見る・診る』】  
【考察】

全体 90 か所のうち 74 か所 (82.2%) が  $\pm 0.1\text{mm}$  の差分範囲に収まっており、 $\pm 0.2\text{mm}$  までを許容範囲と仮定した場合、98.9%がこの範囲に収まっていることが図 3-14 より分かる。1.0mm 幅未満のひびわれに対しては、一部 0.3mm の差分はあるが、ほぼ全て真値と同等のひびわれ幅を計測できている。

計測しようとする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思われる。仮に画質が若干劣化してもひびわれ・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。

[Ⅲ] 二輪型マルチコプタ【富士通】

欠測や検出漏れはなく全 90 か所の計測結果が得られた。表 3-6 にひびわれ幅の計測結果、表 3-7 に真値との差分を示す。図 3-16、図 3-17 にひびわれ幅（真値）の区分ごとの差分個数の集計結果を示す。

表 3-6 ひびわれ画像シートのひびわれ幅計測結果 (mm)【二輪型マルチコプタ】

No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
A-1	0.90	0.60	0.40	0.30	0.30	0.60	0.40	0.50	0.30	0.30
A-2	0.20	0.60	0.50	0.70	0.70	0.60	0.30	0.20	0.30	0.30
A-3	0.30	0.40	0.30	0.30	0.30	0.30	0.60	0.40	1.40	0.20
A-4	0.30	0.30	0.20	0.80	0.80	0.80	0.60	0.70	0.40	0.40
A-5	0.30	0.30	1.30	1.70	1.80	1.50	1.80	0.80	1.00	1.00
B-1	0.30	0.20	0.30	0.20	0.30	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30
B-2	1.40	1.30	2.50	1.20	1.20	0.80	0.50	0.30	0.30	0.20
B-3	2.10	2.50	2.40	1.40	1.30					
B-4	1.30	0.80	0.20	1.00	1.10	1.30	0.40	0.40	0.40	0.30
B-5	0.20	0.40	0.20	0.80	1.50					

表 3-7 真値との差分 (mm)【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					

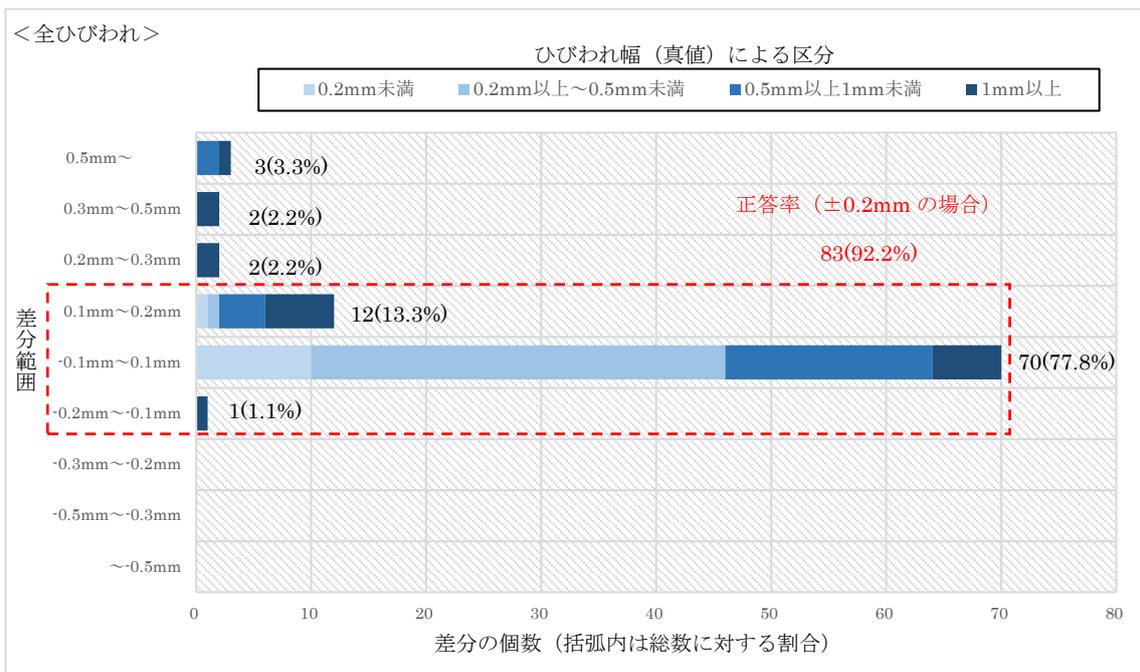
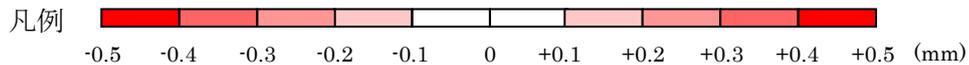


図 3-16 真値との差分分布図<全ひびわれ>【二輪型マルチコプタ】

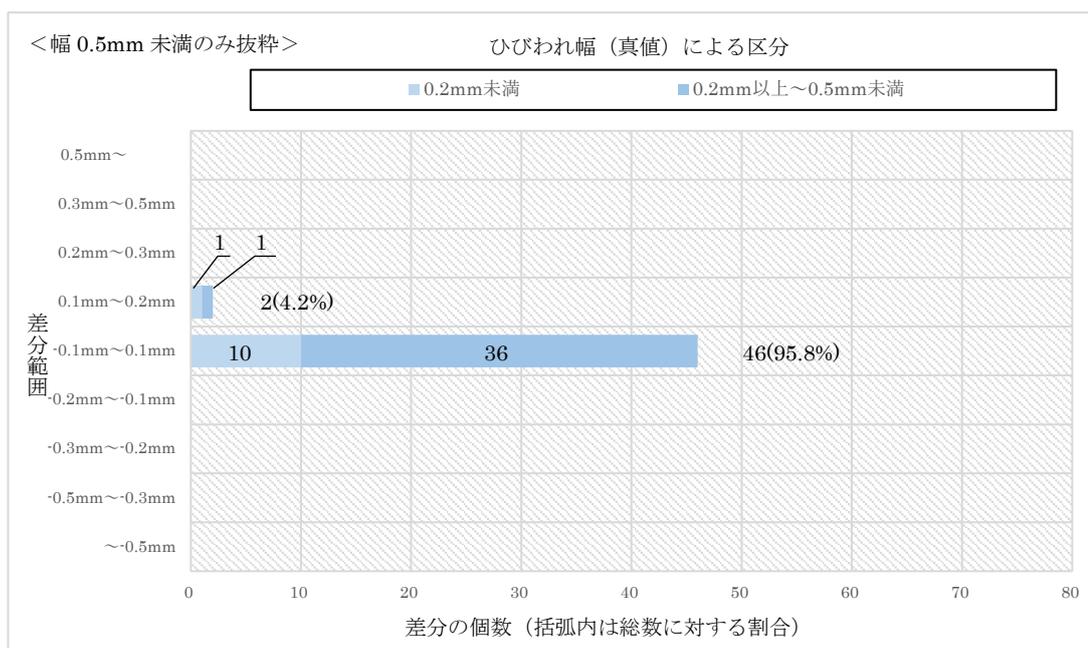


図 3-17 真値との差分分布図＜幅 0.5mm 未満のみ抜粋＞【二輪型マルチコプタ】

【考察】

全体 90 か所のうち 70 か所（77.8%）が±0.1mm の差分範囲に収まっており、±0.2mm までを許容範囲と仮定した場合、92.2%がこの範囲に収まっていることが図 3-16 より分かる。幅 1.0mm 未満のひびわれに対しては、一部 0.5mm 以上の大きな差分は見受けられるものの幅 0.5m 未満に限ると図 3-17 に示すように 95.8%が±0.1mm 以内に収まっており、非常に精度の高い結果となっている。

また、全体的に真値に対し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と思われる。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と思われる。

## (2) 模擬ひびわれシートによるひびわれ視認性の確認

各チームともまず人の目でひびわれを画像から抽出し、クラックスケールを宛がってひびわれ幅を算出している。そのため、PC上でひびわれを視認（目視で認識）することが第一段階の作業であり、損傷を画像上で視認できなければ見落とすことになってしまう。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。下記画像は、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。

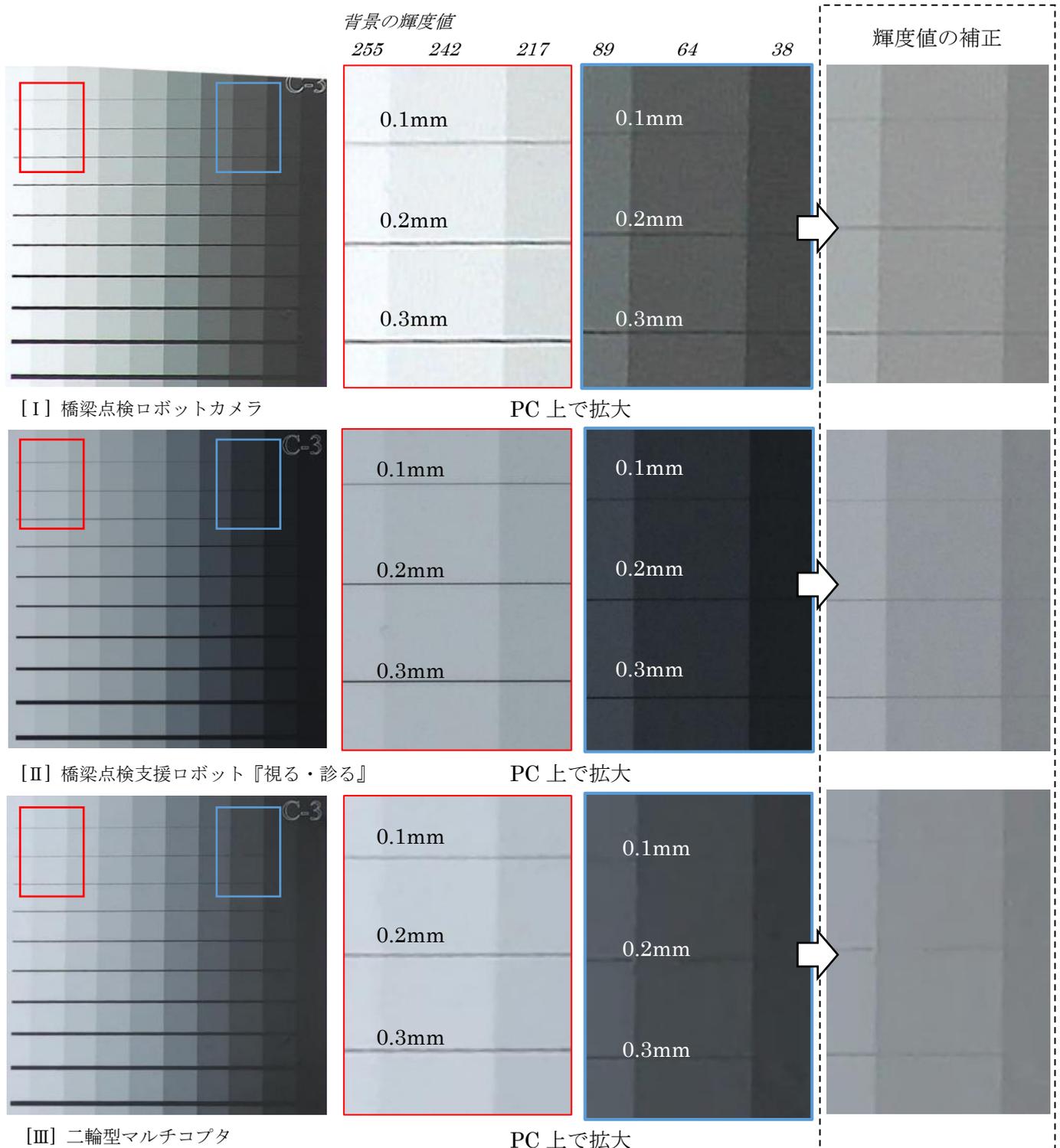


図 3-18 C-3 シートの視認性確認

## 【考察】

各チームとも撮影画像の解像度に差があり、鮮明さにも差はあるものの、精度確認試験ヤードで撮影した画像から 0.1mm 幅のひびわれ線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、視認性にやや差が表れた。各チームとも背景が黒に近いほどひびわれ線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（感度、ダイナミックレンジ等）、センササイズなどの影響も大きい。

下記に各ロボット技術に関する考察を記す。

### 【I】 橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】

画像を拡大するとノイズは表れるものの、輝度値 64 程度であっても 0.1mm 幅のひびわれ線を視認可能である。高感度撮影が可能なカメラによる画像のため、背景の輝度が低い場合でも目標解像度に応じたひびわれの視認は可能と思われる。

### 【II】 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』【ジビル調査設計】

画像を拡大すると、あまりノイズの発生は見受けられず輝度値 64 でも 0.1mm 幅のひびわれ線を視認可能であり、輝度補正した画像を確認すると非常に鮮明な画像が取得できていると言える。ひびわれ線・背景色の境界等が鮮明であり、使用カメラのダイナミックレンジが広くセンサ性能が高いと思われる。

### 【III】 二輪型マルチコプタ【富士通】

画像を拡大すると、背景の輝度が高い部分では、0.1mm 幅のひびわれ線を視認可能であったが、輝度値 89 程度で視認が難しくなり、輝度値 64 では視認不可となった。0.2mm 幅でも輝度値 64 で線が途切れる箇所があり、輝度補正を実施してもやや視認が困難な結果となった。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思われる。

### (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、2つの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確認した。各チームの計測結果を以下に示す。

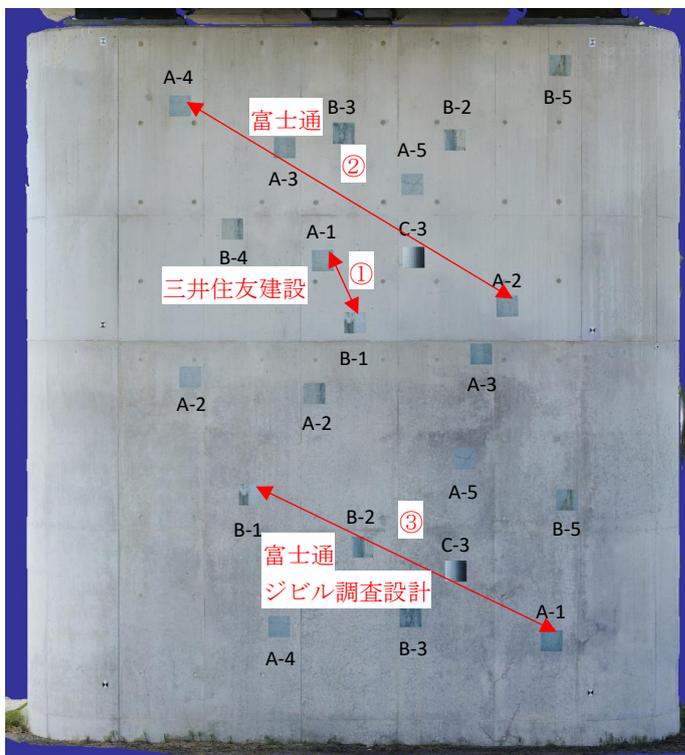


図 3-19 2点間距離の計測

#### [I] 橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】

橋脚上部の対象部位において、A-1 と B-1 の2点間距離を計測

計測箇所	計測値	真値	差分
①A-1～B-1 (橋脚上部)	650mm	660mm	-10mm (-1.5%)

#### [II] 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』【ジビル調査設計】

橋脚下部の対象部位において、A-1 と B-1 の2点間距離を計測

計測箇所	計測値	真値	差分
③A-1～B-1 (橋脚下部)	3,130mm	3,126mm	4mm (0.1%)

#### [III] 二輪型マルチコプタ【富士通】

橋脚上部が当初の対象部位であったが、橋梁上部と橋梁下部の両方を撮影し全シートにある十字印の計 20 か所の座標を計測。その結果より任意の2点間距離を計測した。

計測箇所	計測値	真値	差分
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%)

#### (4) 損傷の位置の精度確認

損傷の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事務局が事前に準備した「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。

図 3-20 は、従来点検手法によって作成した精度確認試験ヤードの橋脚部の損傷図である。橋梁点検技術者が高所作業車を使ってひびわれ幅・長さの測定、チョーキング、スケッチ、写真撮影を行い、必要と判断された損傷について損傷図を作成したものである。

図 3-21 は、事務局が高所作業車を使って入念な近接目視点検（チョーキングは実施せず）を実施し、同時に撮影したオルソ画像を下図として 0.1mm 以上のひびわれを対象に念入りに作成した損傷図である。この損傷図の位置精度は高いと考えられるため損傷図の真値として損傷の位置の精度確認に使用した。

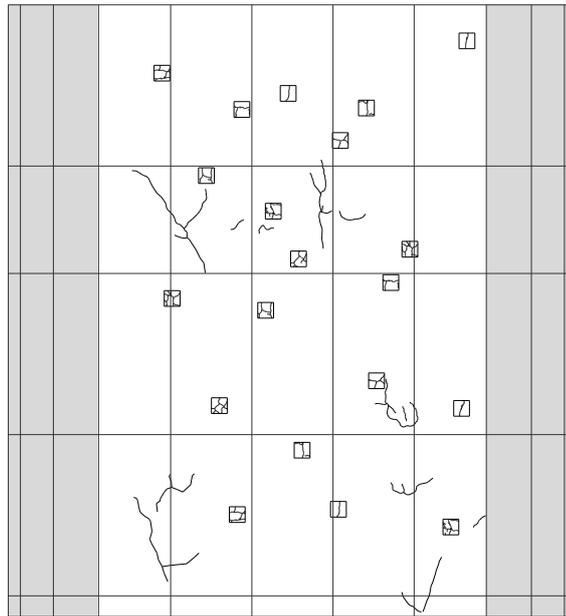
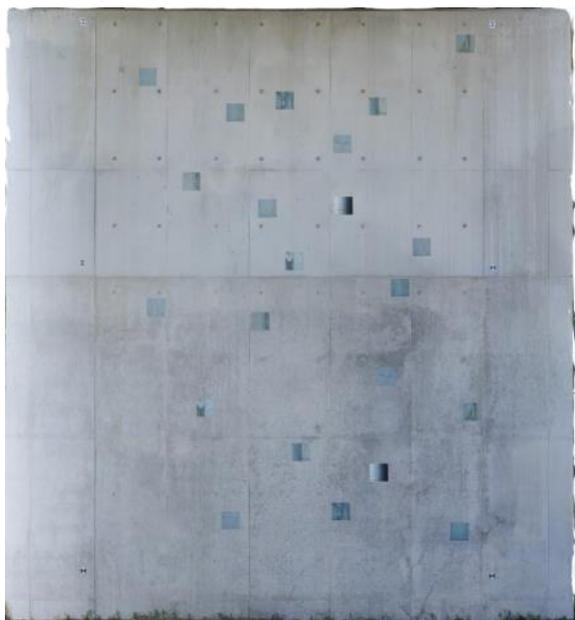
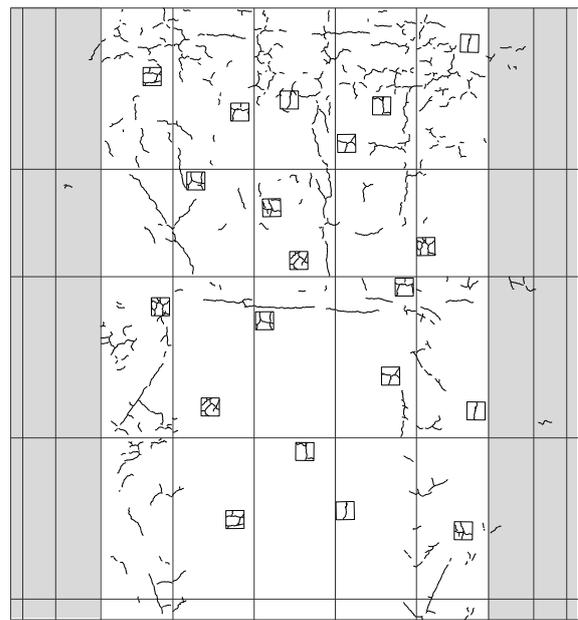


図 3-20 従来点検手法による損傷図



損傷図（真値）作成の下図として用いたオルソ画像



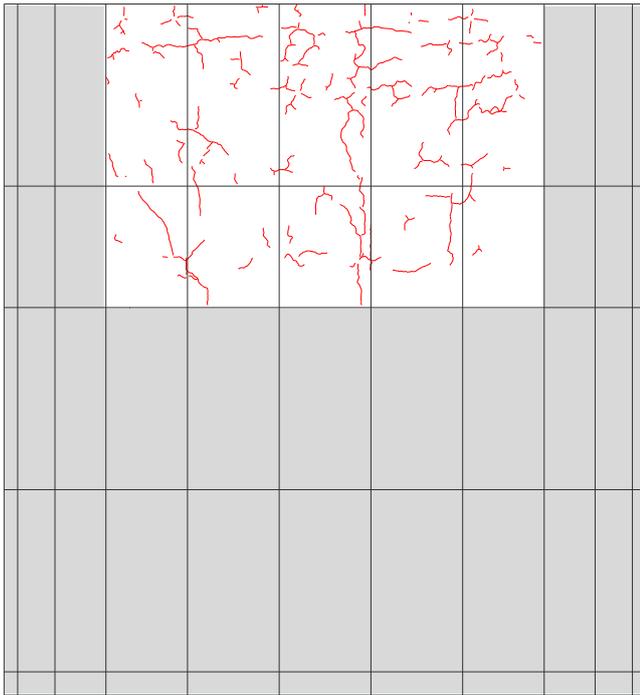
損傷図（真値）

図 3-21 入念な近接目視点検による真値損傷図

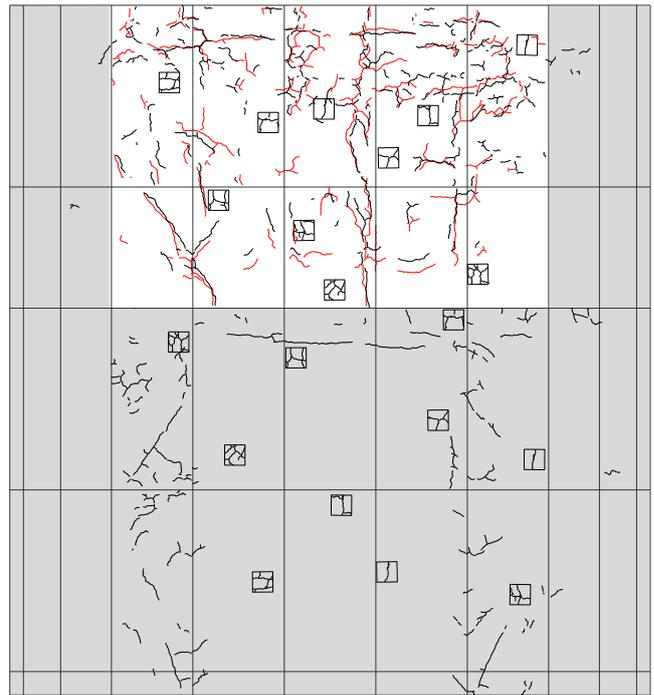
### [I] 橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】

橋脚上部を対象部位として選定し、橋梁点検ロボットカメラで撮影した画像から損傷図を作成した。ポールの先端に設置したカメラが首を振りながら格子状に撮影した 456 枚の画像から画像接合によって展開画像を作成し、展開画像を確認しながらスケッチにより損傷図を作成した。損傷図（真値）と比べるとひびわれの位置に差が生じているものの、ひびわれの位置は型枠目地を基準に把握できており、構造上重要なひびわれの位置を大きく誤認識する可能性は低いと思われる。

ロボット技術によって作成した損傷図（赤）



損傷図（真値）（黒）との重ね合わせ



ロボットによる撮影画像を接合した展開画像を確認しながらスケッチによって作成した損傷図

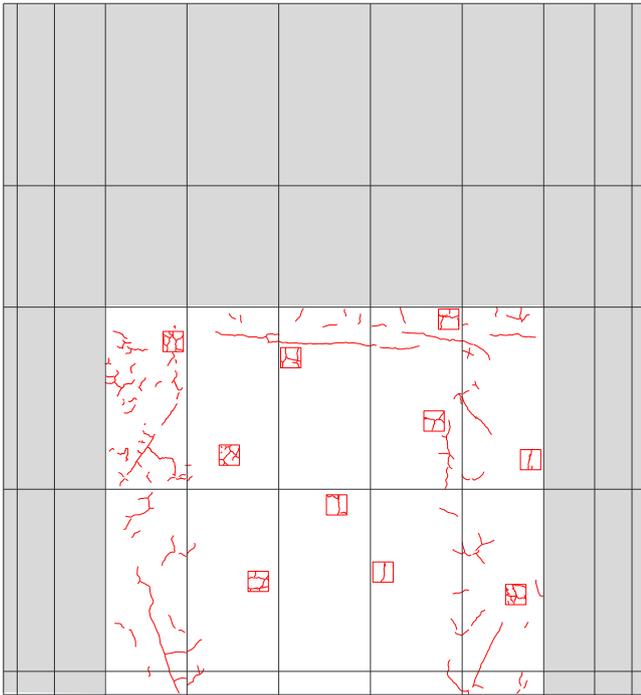
図 3-22 橋梁点検ロボットカメラ

[II] 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』【ジビル調査設計】

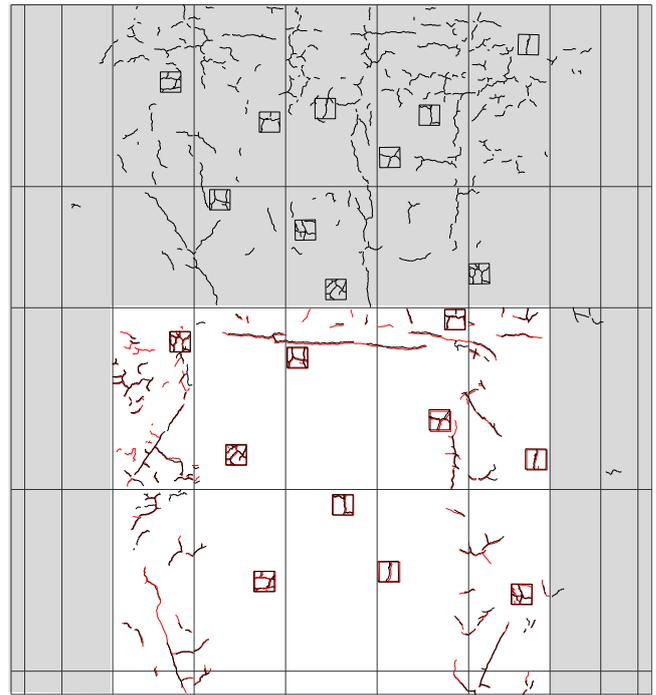
橋脚下部を対象部位として選定し、橋梁点検支援ロボット『見る・診る』で撮影した画像から損傷図を作成した。一定距離で正対撮影された画像を、型枠目地を基準にあおり補正およびスケール調整を行ったうえでつなぎ合わせて展開画像を作成した。型枠目地の形状・寸法を基準に補正されており、作成された展開画像は図面と重ね合わせることができるほど精度が高く、画像上をトレースすることで正確な損傷図を作成することができる。

損傷図（真値）と比較した結果、ごく微小なひびわれの記載漏れはあるものの、損傷の位置精度は高いと評価できる。

ロボット技術によって作成した損傷図（赤）



損傷図（真値）（黒）との重ね合わせ



あおり補正画像の合成により作成した展開画像をトレースして損傷図作成

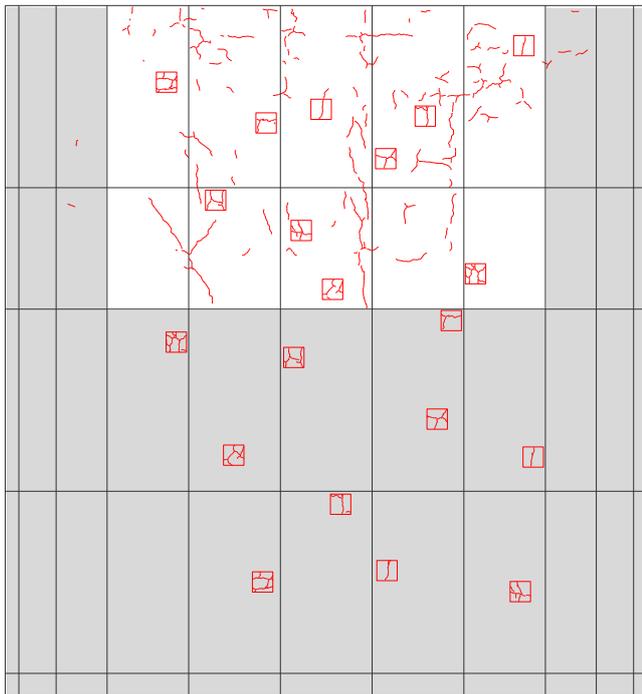
図 3-23 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』

### [Ⅲ] 二輪型マルチコプタ【富士通】

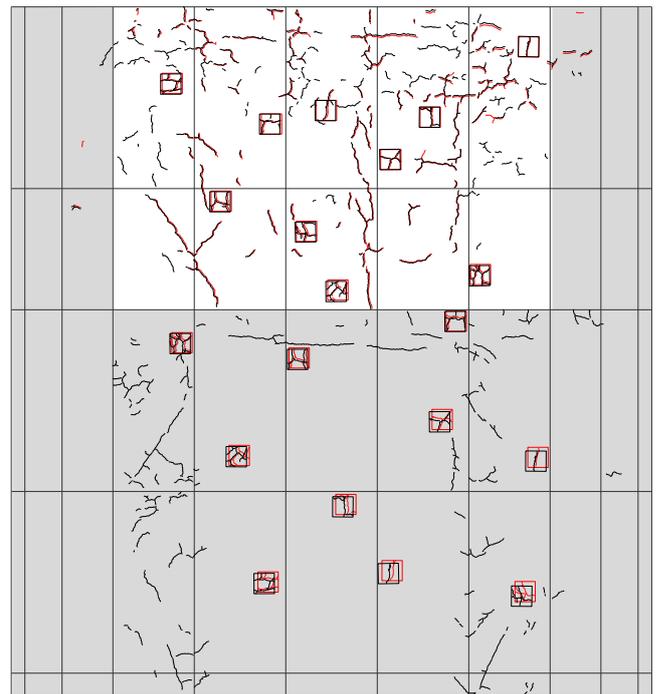
橋脚上部を対象部位として選定し、二輪型マルチコプタで撮影した画像から損傷図を作成した。二輪を壁面に押し付けて移動することによってカメラと被写体の間隔を一定（40 cm）に保持しながら近接画像撮影し、撮影画像から SfM 解析により橋脚の 3D モデルを構築し、そこから展開画像（オルソ画像）を作成した。この展開画像はオルソ画像のため図面と重ね合わせることができるほど精度が高く、画像上をトレースすることで正確な損傷図を作成することができる。

細かなひびわれの記載漏れがあるものの、主要なひびわれは損傷図（真値）とほぼ一致しており、損傷の位置精度は高いと評価できる。

ロボット技術によって作成した損傷図（赤）



損傷図（真値）（黒）との重ね合わせ

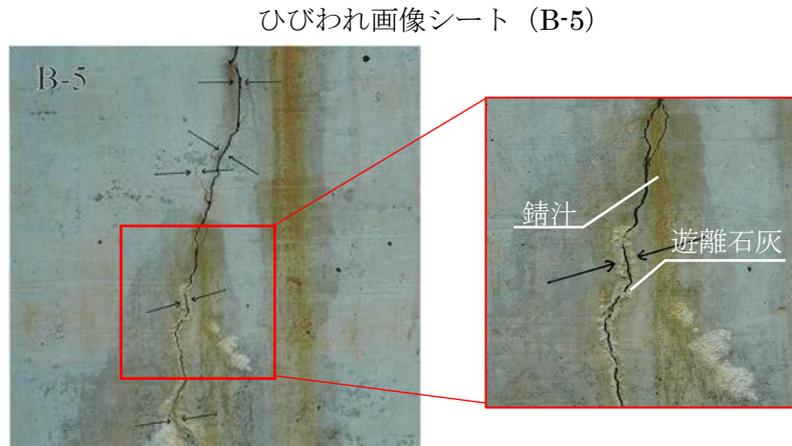


SfM により作成した展開画像（オルソ画像）をトレースして損傷図作成

図 3-24 二輪型マルチコプタ

### (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。

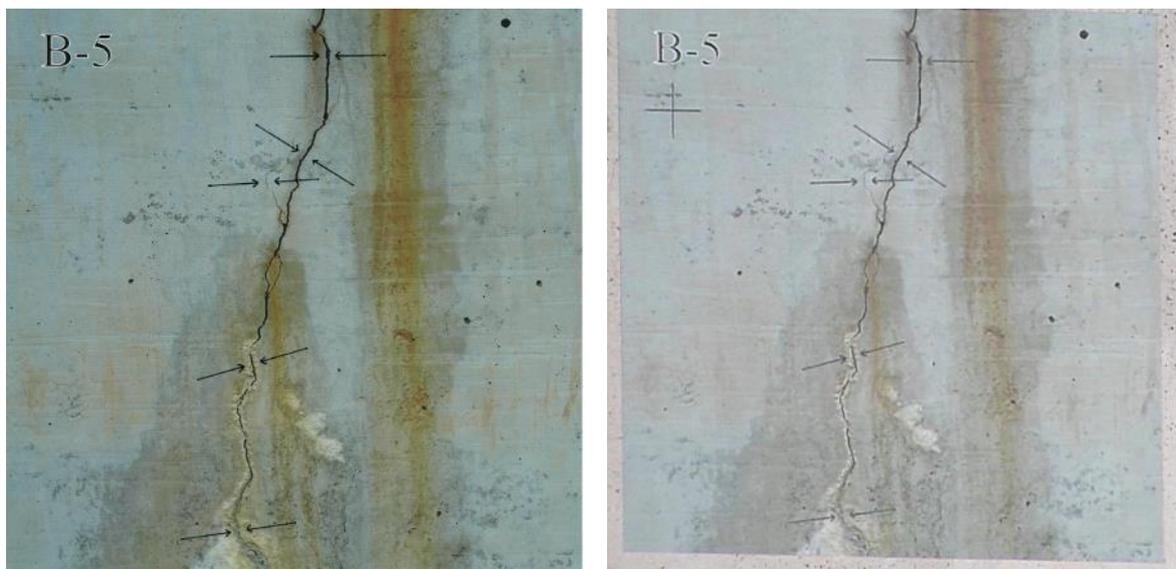


B-5 の遊離石灰と錆汁を確認の対象とする

図 3-25 色の識別性能の確認に用いたひびわれ画像シート

### [I] 橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】

撮影された画像は実際のひびわれ画像シートに比べ全体的に彩度が低下し視認性も低下しているものの、遊離石灰と錆汁は視認できる。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。



貼付したひびわれ画像シート (スキャン)

ひびわれ画像シート (撮影画像)

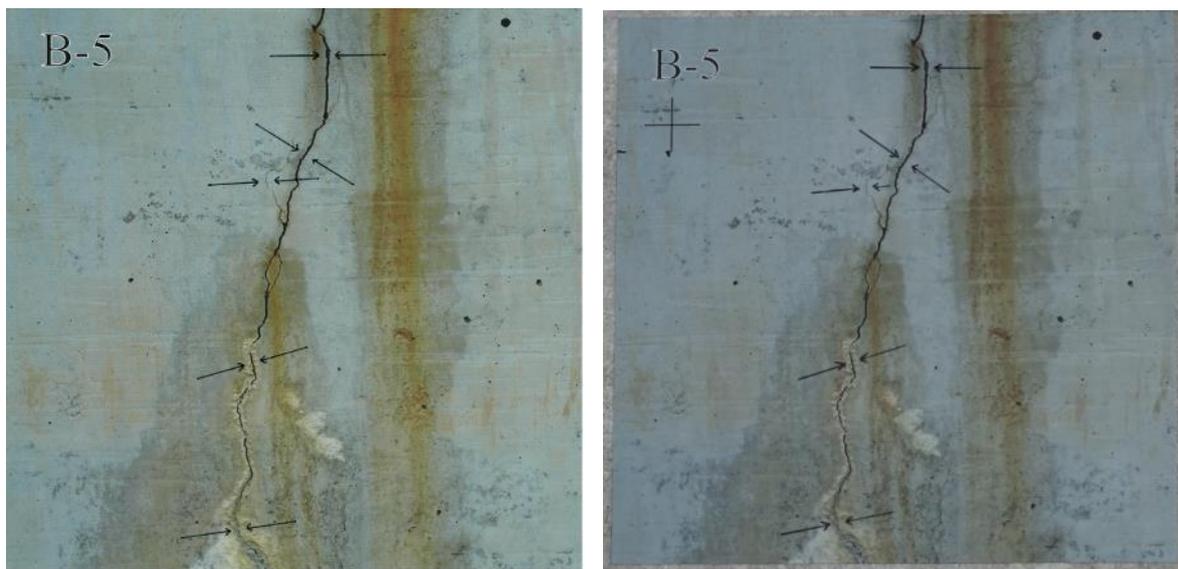
※画像補正未実施

図 3-26 ひびわれ画像シート (B-5) の比較

【橋梁点検ロボットカメラ】

[II] 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』【ジビル調査設計】

実際のひび割れ画像シートと比較し、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。



貼付したひびわれ画像シート（スキャン）

ひびわれ画像シート（撮影画像）

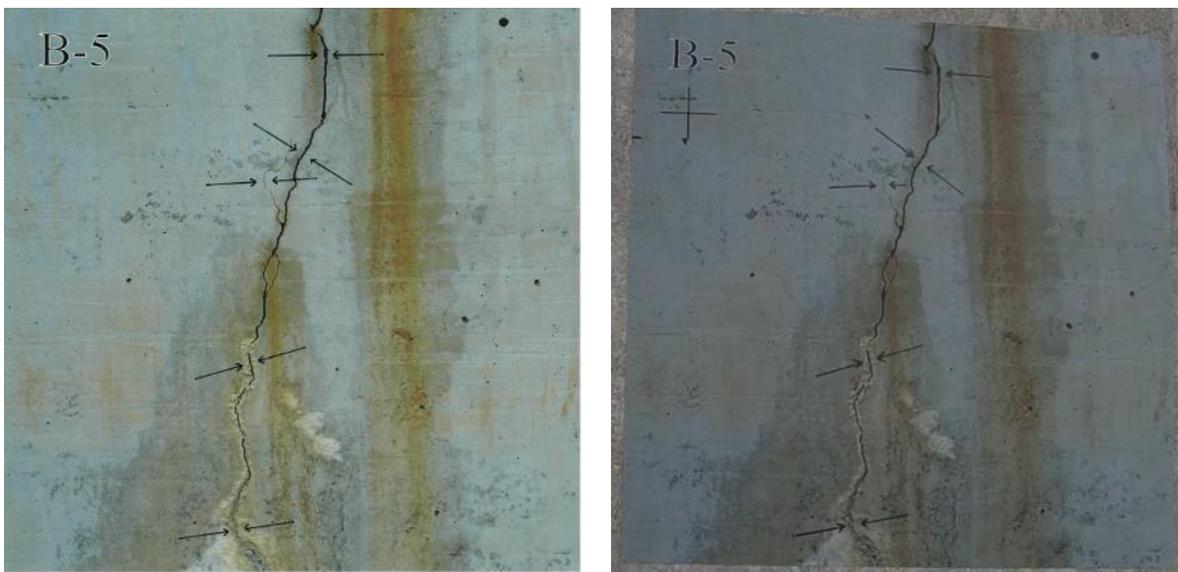
※画像補正未実施

図 3-27 ひびわれ画像シート（B-5）の比較

【橋梁点検支援ロボット『見る・診る』】

[III] 二輪型マルチコプタ【富士通】

実際のひび割れ画像シートと比較し、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。



貼付したひびわれ画像シート（スキャン）

ひびわれ画像シート（撮影画像）

※画像補正未実施

図 3-28 ひびわれ画像シート（B-5）の比較

【二輪型マルチコプタ】

### (6)オリジナル画像と展開画像の画像品質の比較

実証試験に参加したロボット技術開発チームはいずれも、オリジナル画像を JPEG 形式で保存し、展開画像等への加工処理後も JPEG 形式で保存している。JPEG 形式は、容量が小さく高画質な状態で保存できる汎用性の高いフォーマットであるが、非可逆圧縮方式のため、画像処理を繰り返すことで画質が劣化する恐れがある。ロボット技術を活用した橋梁点検では、展開画像を用いて損傷の抽出や損傷程度の判定を行うことが多いが、展開画像に加工処理した段階でも十分な画像品質が保持されているかを確認するために、オリジナル画像と展開画像の画像品質を比較評価した。

本実証試験では、0.1mm 幅のひびわれが視認可能な画像品質を要求しているため、図 3-29 に示すひびわれ画像シート (A-2) と模擬ひびわれシート (C-3) 上の 0.1mm 幅ひびわれの視認性を両画像において評価した。また、図 3-30 に示すひびわれ画像シート (B-5) では遊離石灰および錆汁が発生しており、これらの視認性についても評価した。なお、展開画像の作成手法については各ロボット技術が採用する方法のままとした。

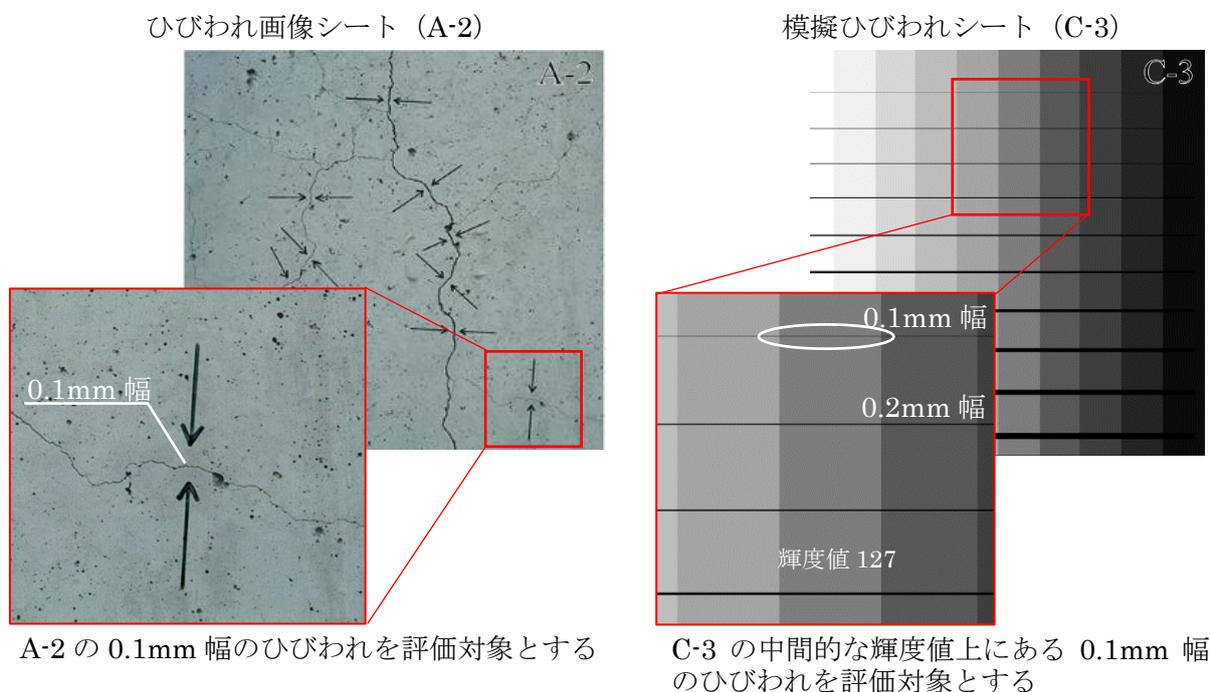


図 3-29 視認性評価の対象とするひびわれ

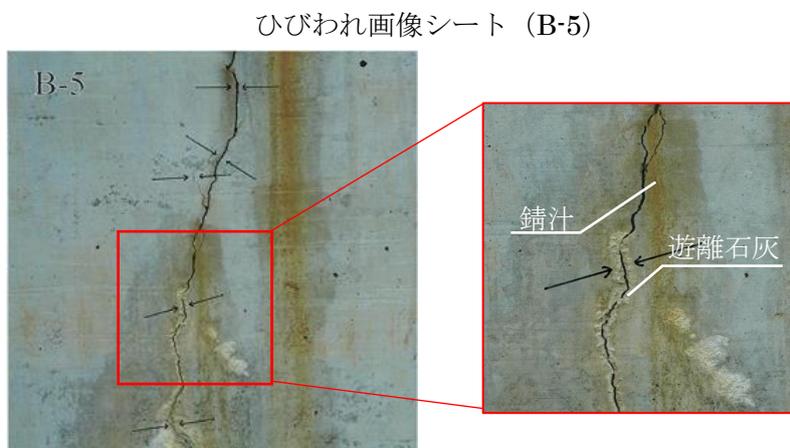


図 3-30 視認性評価の対象とする遊離石灰と錆汁

[I] 橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】

【ひびわれ画像シート (A-2)】

オリジナル画像とそれらを接合した展開画像を拡大して比較すると、微小ではあるが展開画像でノイズの増加が見受けられるものの両画像とも 0.1mm 幅のひびわれは十分視認可能である。

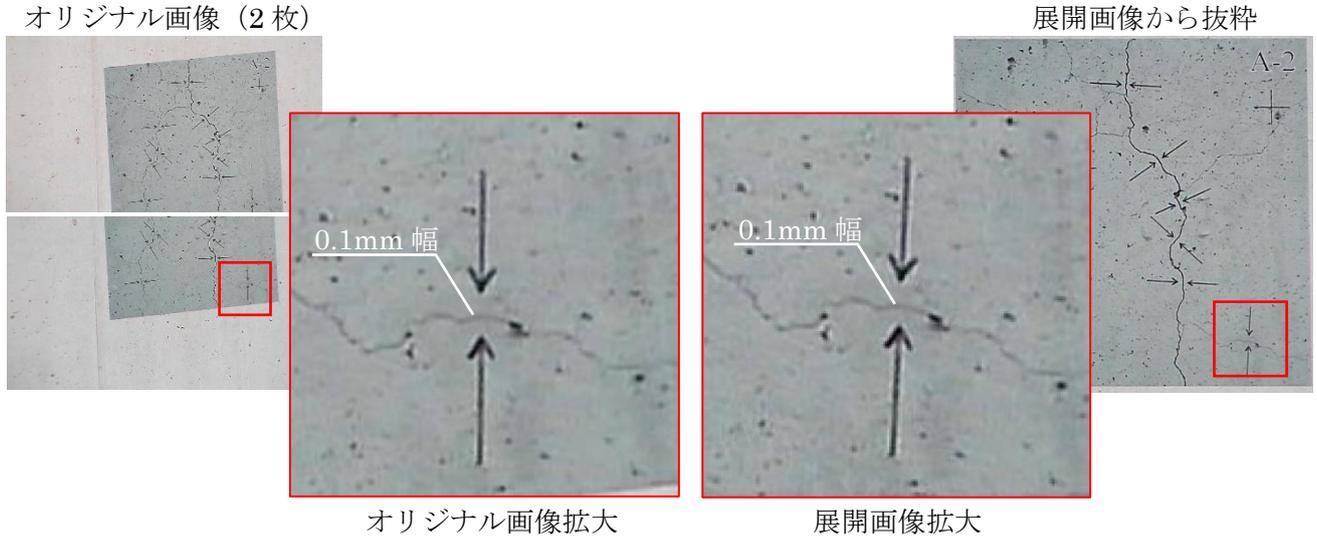


図 3-31 ひびわれ画像シート (A-2) の比較【橋梁点検ロボットカメラ】

【模擬ひびわれシート (C-3)】

オリジナル画像とそれらを接合した展開画像を拡大して比較すると、上記同様微小ではあるが展開画像でノイズの増加が見受けられるものの両画像とも中間的な輝度値上にある 0.1mm 幅のひびわれは十分視認可能である。

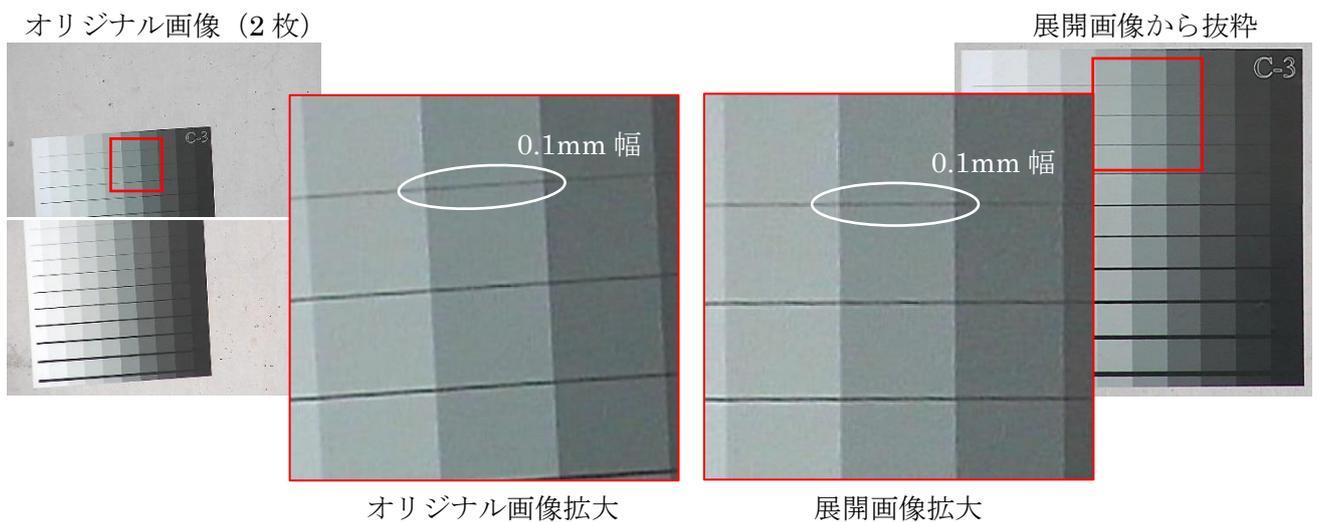


図 3-32 模擬ひびわれシート (C-3) の比較【橋梁点検ロボットカメラ】

### 【ひびわれ画像シート (B-5)】

オリジナル画像の段階で彩度が低下しており、展開画像では微小なノイズ増加に伴い更に彩度が低下しているが、両画像とも遊離石灰および錆汁は視認可能である。

オリジナル画像 (1枚)

展開画像から抜粋

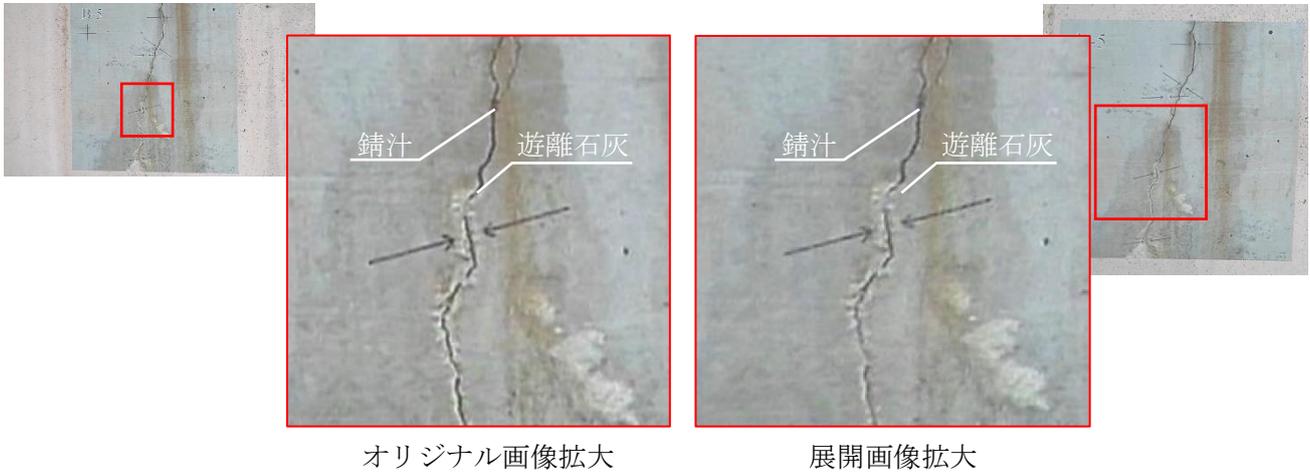


図 3-33 ひびわれ画像シート (B-5) の比較【橋梁点検ロボットカメラ】

### 【考察】

上記の比較により、本精度確認試験と同等の撮影を実施した場合、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と言える。遊離石灰・錆汁の視認については、本精度確認試験では両画像とも可能であったが、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』【ジビル調査設計】

### 【ひびわれ画像シート (A-2)】

オリジナル画像とそれらを接合した展開画像を拡大して比較すると、オリジナル画像では 0.1mm 幅のひびわれは十分視認でき、展開画像ではやや不鮮明ではあるが視認は可能である。展開画像で不鮮明となっている要因は画像劣化ではなく、展開画像作成時の解像度調整によるものと考えられる。

オリジナル画像 (1枚)

展開画像から抜粋

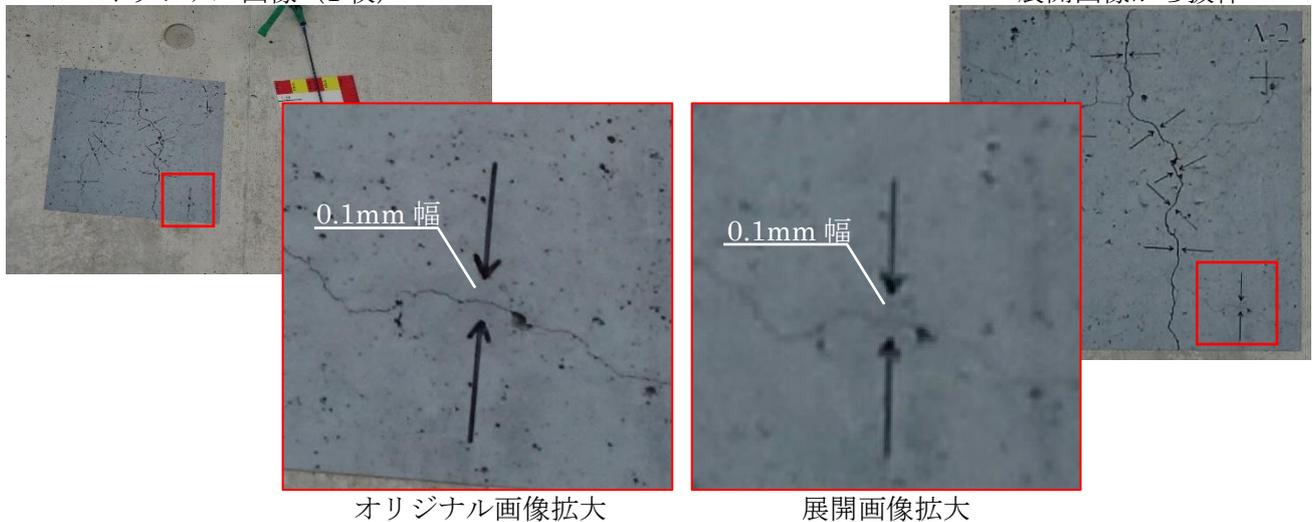


図 3-34 ひびわれ画像シート (A-2) の比較【橋梁点検支援ロボット『見る・診る』】

【模擬ひびわれシート (C-3)】

オリジナル画像とそれらを接合した展開画像を拡大して比較すると、上記同様にオリジナル画像では中間的な輝度値上にある 0.1mm 幅のひびわれは十分視認でき、展開画像ではやや不鮮明ではあるが視認は可能である。解像度調整のため、展開画像がやや不鮮明となっている。

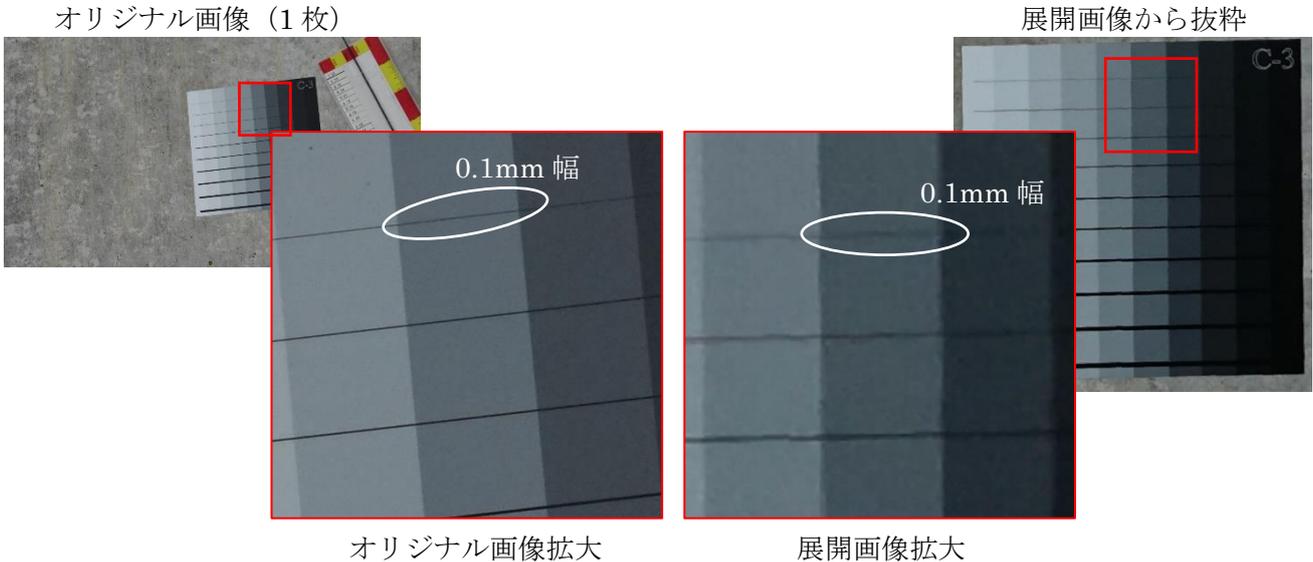


図 3-35 模擬ひびわれシート (C-3) の比較【橋梁点検支援ロボット『見る・診る』】

【ひびわれ画像シート (B-5)】

オリジナル画像とそれらを接合した展開画像を拡大して比較すると、解像度調整のためやや不鮮明となっているものの遊離石灰や錆汁の視認は十分可能である。

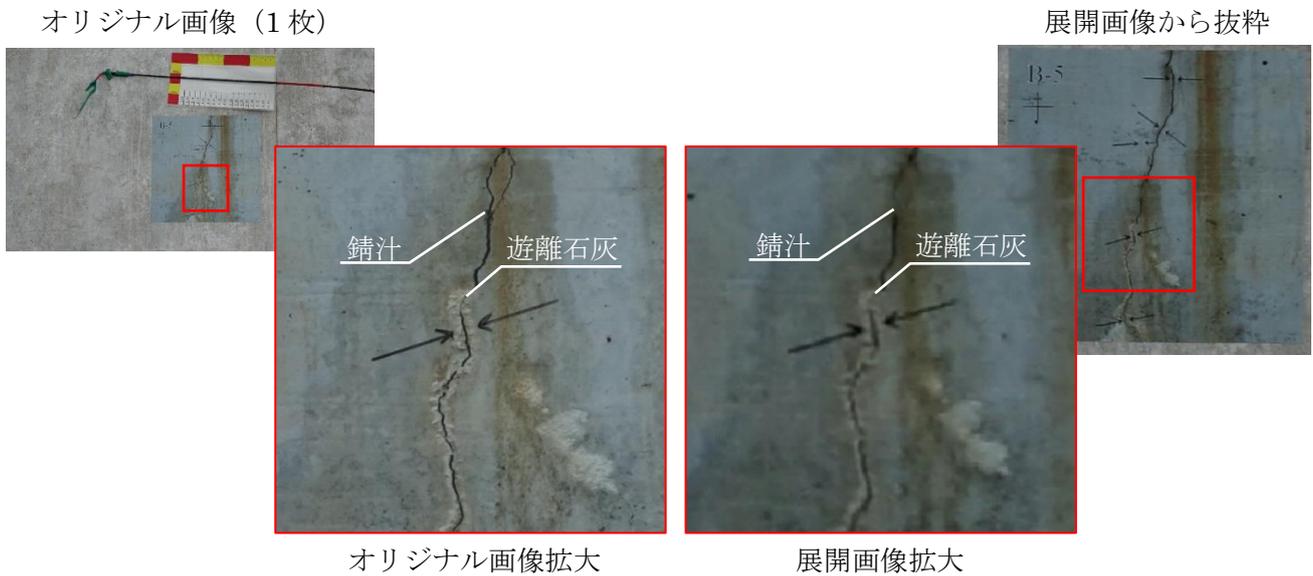


図 3-36 ひびわれ画像シート (B-5) の比較【橋梁点検支援ロボット『見る・診る』】

【考察】

上記の比較により、本精度確認試験と同等の撮影を実施した場合、展開画像にやや不鮮明さはあるもののオリジナル画像と展開画像とも 0.1mm 幅のひびわれおよび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、細い幅のひびわれの見落としを防止するために、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【富士通】

【ひびわれ画像シート (A-2)】

オリジナル画像とそれらを接合した展開画像を拡大して比較すると、展開画像で画像処理により色調の変化はあるものの両画像とも 0.1mm 幅のひびわれは十分視認可能である。

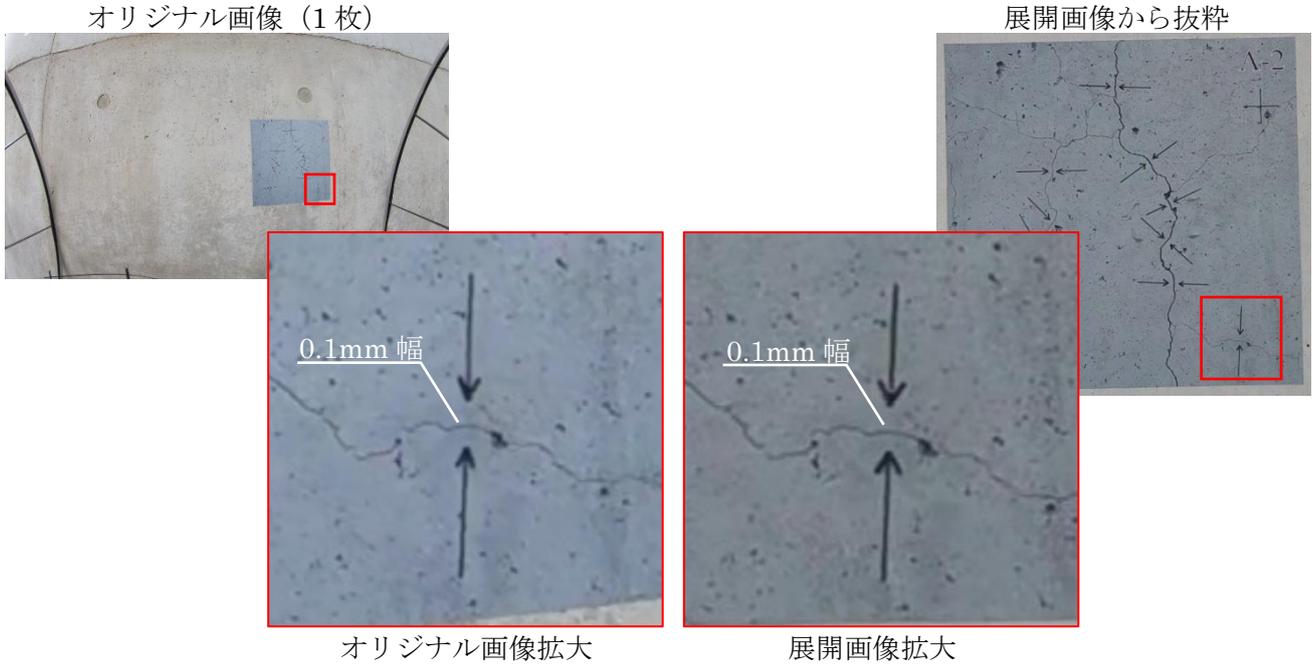


図 3-37 ひびわれ画像シート (A-2) の比較【二輪型マルチコプタ】

【模擬ひびわれシート (C-3)】

オリジナル画像とそれらを接合した展開画像を拡大して比較すると、オリジナル画像の段階でやや色が平滑化されているように見受けられるものの画像劣化などはなく、両画像とも中間的な輝度値上にある 0.1mm 幅のひびわれは十分視認可能である。

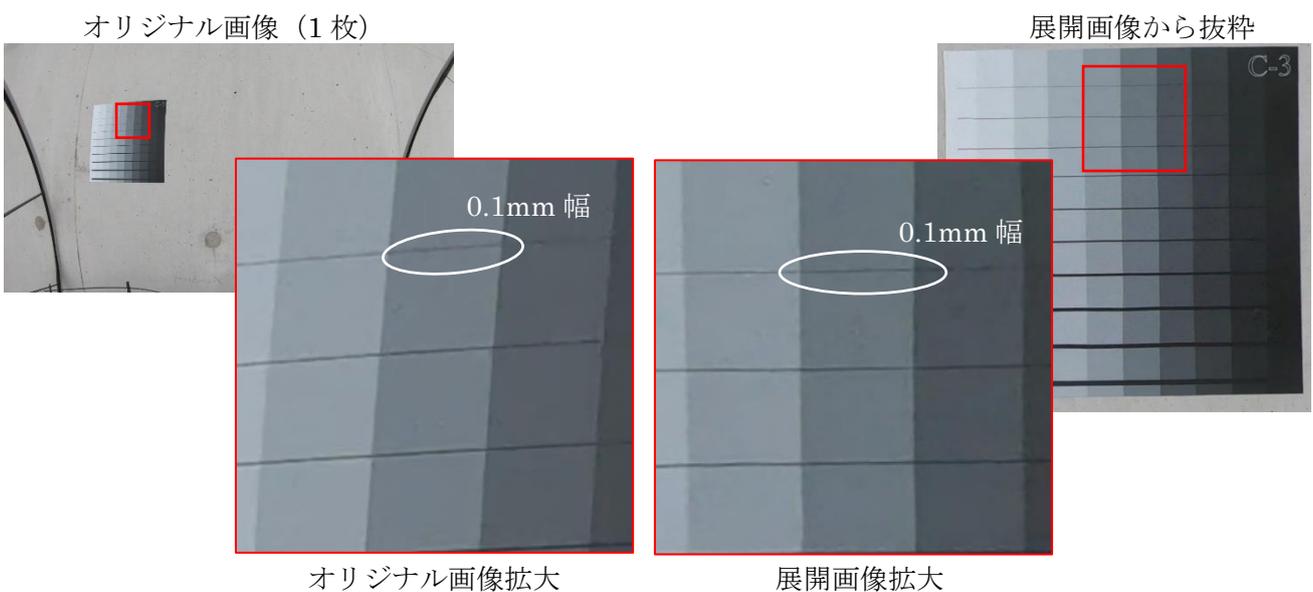


図 3-38 模擬ひびわれシート (C-3) の比較【二輪型マルチコプタ】

### 【ひびわれ画像シート (B-5)】

オリジナル画像とそれらを接合した展開画像を拡大して比較すると、両画像ともやや暗めであるものの遊離石灰や錆汁の視認は十分可能である。

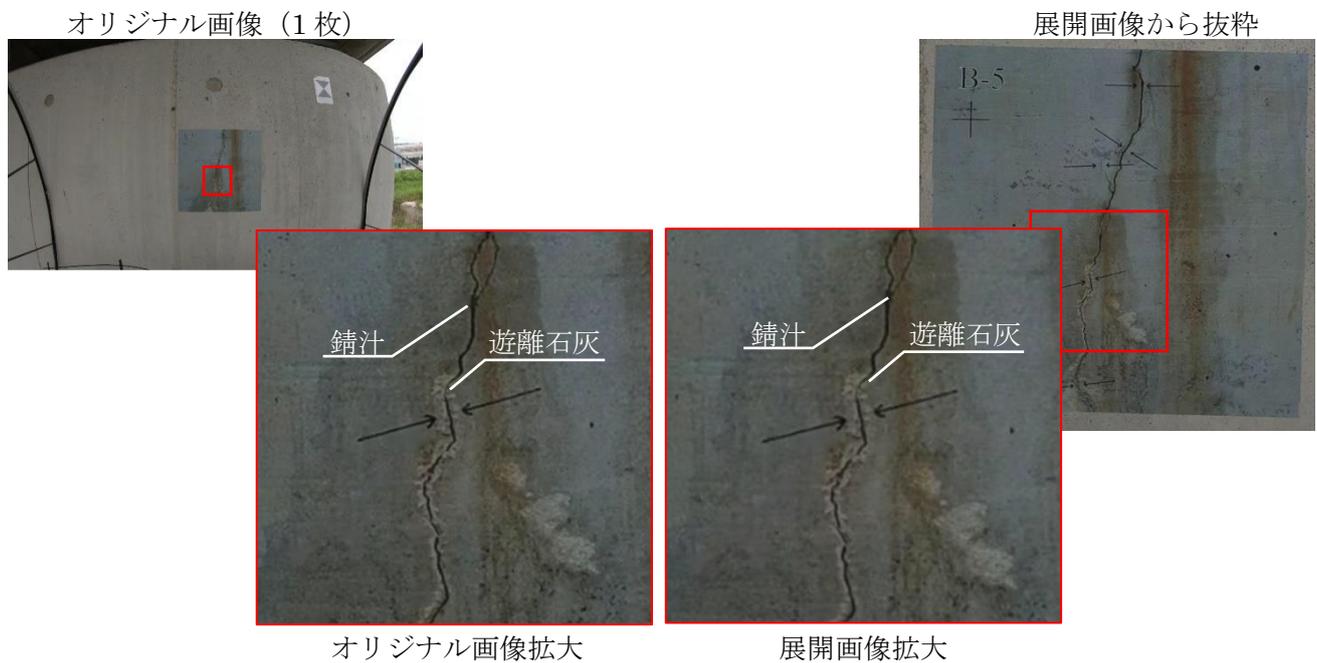


図 3-39 ひびわれ画像シート (B-5) の比較【二輪型マルチコプタ】

### 【考察】

上記の比較により、本精度確認試験と同等の撮影を実施した場合、オリジナル画像の段階でやや色が平滑化されているように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。

(7)暗所での撮影画像の評価(橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】)

橋梁点検ロボットが本試験で対象とした箱桁内は照明がなく暗所だが、当ロボットには、感度の高いカメラと補助光照射用ライトが搭載されており、光量が少ない環境下でも撮影が可能である。箱桁内部では、撮影距離 4m に対し対象面で約 200 lx の明るさを確保した状態で撮影を実施した。しかし、精度確認試験を日射により十分な光量<sup>\*</sup>が確保できる桁外部で実施していることから、暗所での撮影時でも同等の精度を確保できるかどうかを確認した。室内空間で 100 lx、41 lx、25 lx、10 lx の 4 種類の光量下でひびわれ画像シート (B-1) を撮影し、ひびわれの視認性・色の再現性・ノイズの発生状況を確認した。撮影時には、カメラ内蔵のライトを点灯させ、ライトの点灯数で光量を調整した。

※屋外の曇天時：約 30000 lx の明るさ、住宅内居間：約 100 lx 前後

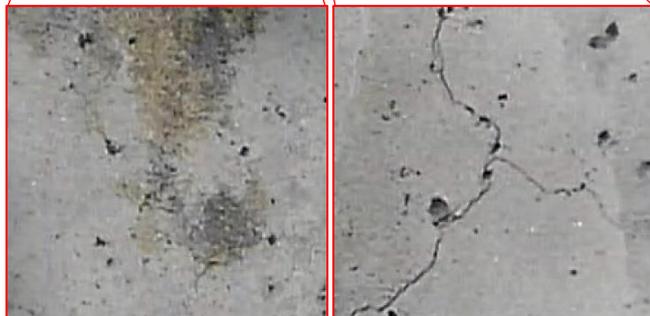


ひびわれ画像シート B-1

100 lx での撮影画像



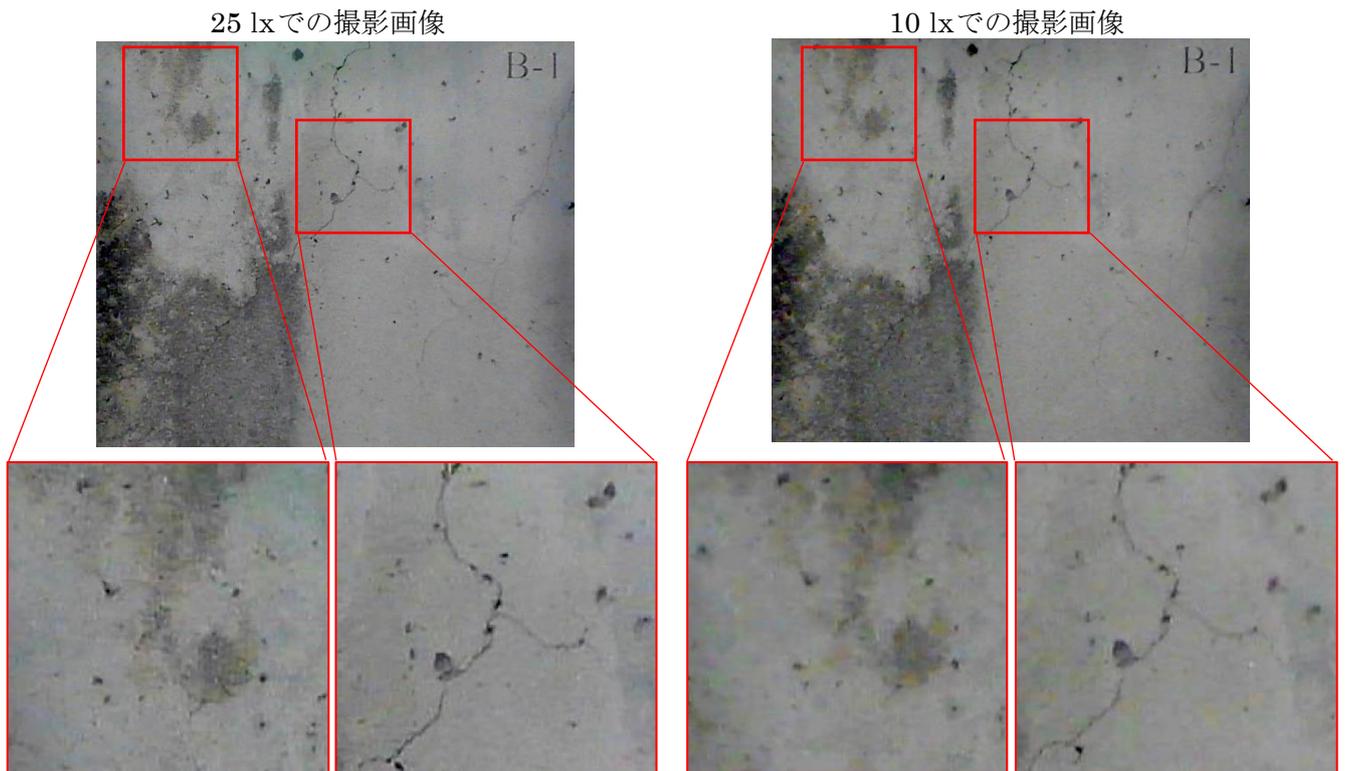
41 lx での撮影画像



ひびわれは十分に視認できる。色はオリジナルデータに比べるとやや再現性が低い、ノイズの発生は見受けられない。



全体的に鮮明さは欠けるが、ひびわれの視認や色の識別は可能である。拡大するとノイズの発生が見受けられる。



ひびわれの有無は判別できるが、幅の判定や細かい部分の視認、色による判別はやや困難である。ノイズの発生が見受けられる。

ひびわれの有無は判別できるが、全体的に鮮明さに欠ける。光量の低下により、色の再現性も低下している。ノイズの発生が見受けられる。

図 3-40 B-1 シートによる暗所撮影画像の評価【橋梁点検ロボットカメラ】

10 lx程度の光量でもひびわれの有無は視認可能であると言える。しかし、色の再現性は光量が落ちるにつれ低下しており最低でも 40 lx程度の光量は必要であると言える。ただし、40 lx程度でも若干のノイズが発生しており、鮮明な画像取得を目標とする場合は、100 lx以上の光量が必要となる。つまり、本試験で実施したように搭載されたライトを用いて 200 lxの光量を確保して撮影を実施すれば、十分な品質を保持した画像を取得できると言える。ただし、撮影時のブレ等による画像品質の低下を防ぐためには、極力高い光量を確保した状態での撮影が望ましい。

## (8)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【三井住友建設】

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、74.1%が±0.2mm 以内の誤差に収まっている。

#### 【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』【ジビル調査設計】

0.42mm/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、98.9%が±0.2mm 以内の誤差に収まっている。

#### 【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【富士通】

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、92.2%が±0.2mm 以内の誤差に収まっている。

#### 【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】

画像処理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。

なお、本試験において作成した展開画像とオリジナル画像から抜粋したひびわれ画像シートの拡大画像を開発チームごとにまとめ、参考資料 2 に示す。

### 【ひびわれの自動抽出技術（参考データ）】

精度確認試験を実施した3つのロボット技術は、展開画像から手作業により損傷図を作成しているが、損傷図を作成する自動処理技術に関する研究開発が多々行われており、その中にはサービスとして実用化されているものもある。ロボット技術を活用した橋梁点検では多くの画像データを取得し保存することから、膨大な画像データから有害な損傷を自動抽出し損傷図を自動作成する技術開発の促進が期待される。

図3-41に、自動処理サービスにより作成した損傷図を示す。事務局でPE10の真値取得用に撮影した144枚の画像から自動処理サービスに適した12枚の画像を精選し、それらをクラウドに上げ、約1時間で展開画像および下記の損傷図が生成された。損傷図（真値）とはほぼ重なりあい、精度の高い損傷図が得られている。

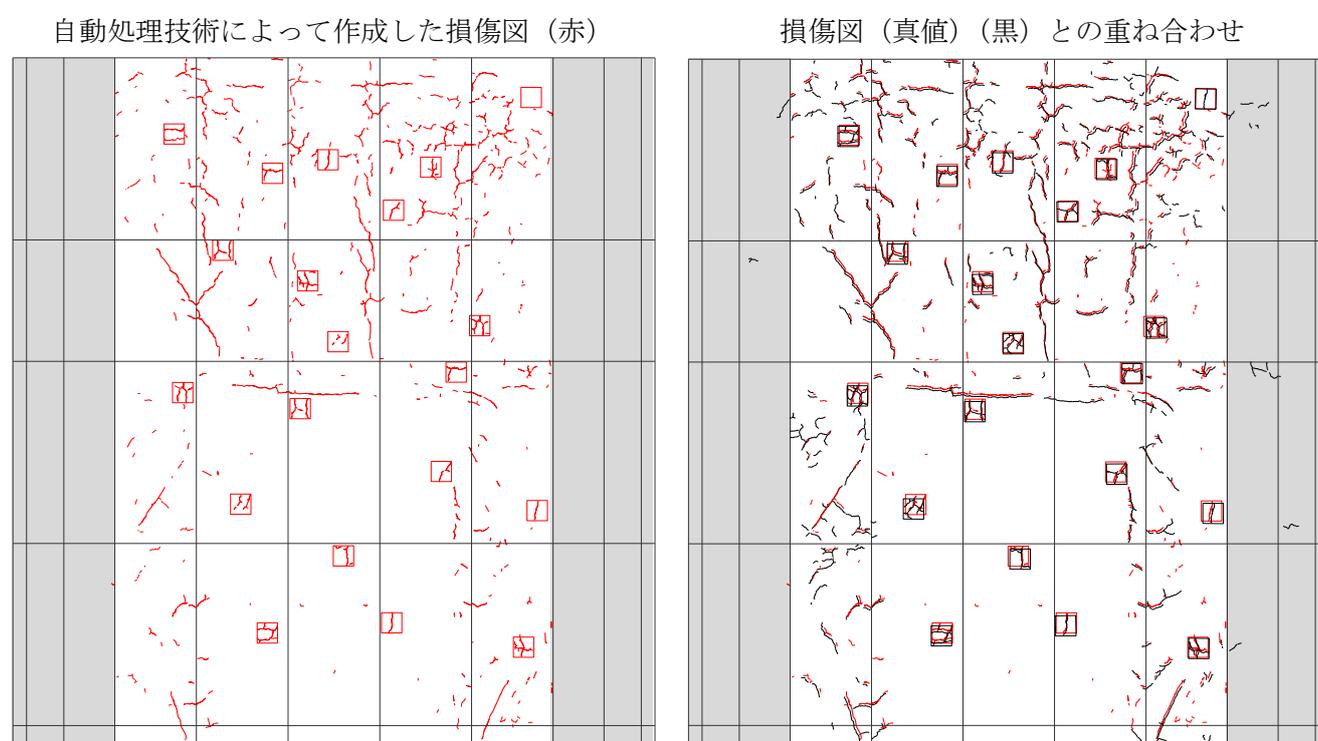


図 3-41 自動処理技術による損傷図

#### 使用した自動処理サービス

社会インフラ画像診断サービス「ひびみっけ」 *FUJIFILM*

マニュアルに従い撮影した画像をクラウドに上げ、展開画像の作成、AIによるチョーキング検出およびひびわれ検出を実施するサービス

### 3-2 打音ロボットの精度確認試験

#### 3-2-1 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計測性能の確認ができない。そこで、打音試験の実績が豊富な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【新日本非破壊検査】の打音機能の精度確認試験を実施した<sup>1)</sup>。

#### 3-2-2 概要

##### (1) 供試体の概要

1000×300×200mm のコンクリート供試体の内部には 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箇所配置されている。また、コンクリート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パターンで性能確認試験を実施した。

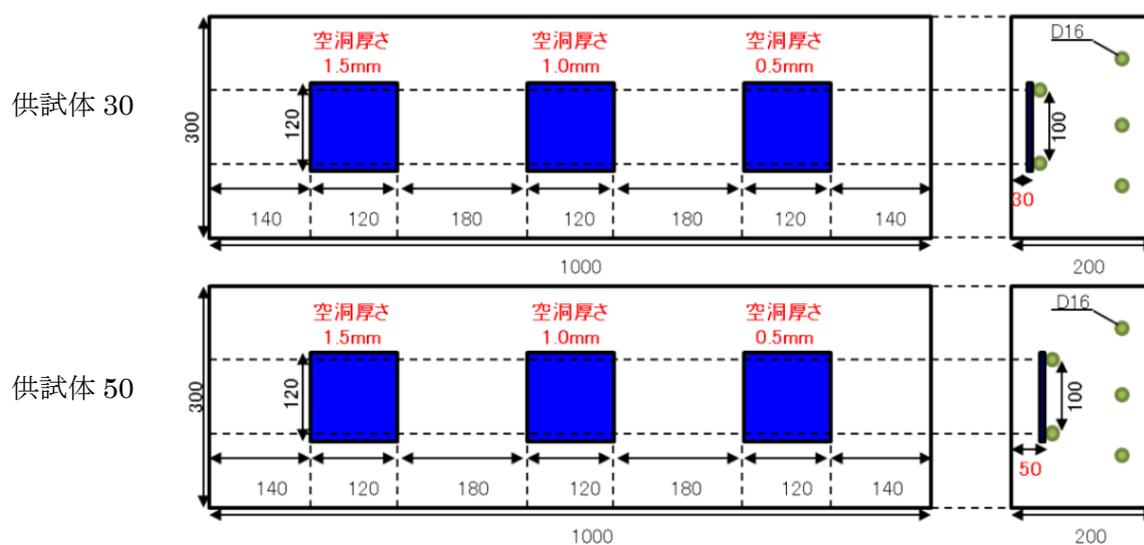


図 3-42 供試体の形状・寸法



図 3-43 供試体の外観

## (2) 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。

## (3) 点検ロボットによる試験方法

精度確認試験は実際の点検時と同様に打音機能付飛行ロボットを飛行させて実施することが望ましいが、試験体の形状などの問題から実施できない。そこで、図 3-44 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。

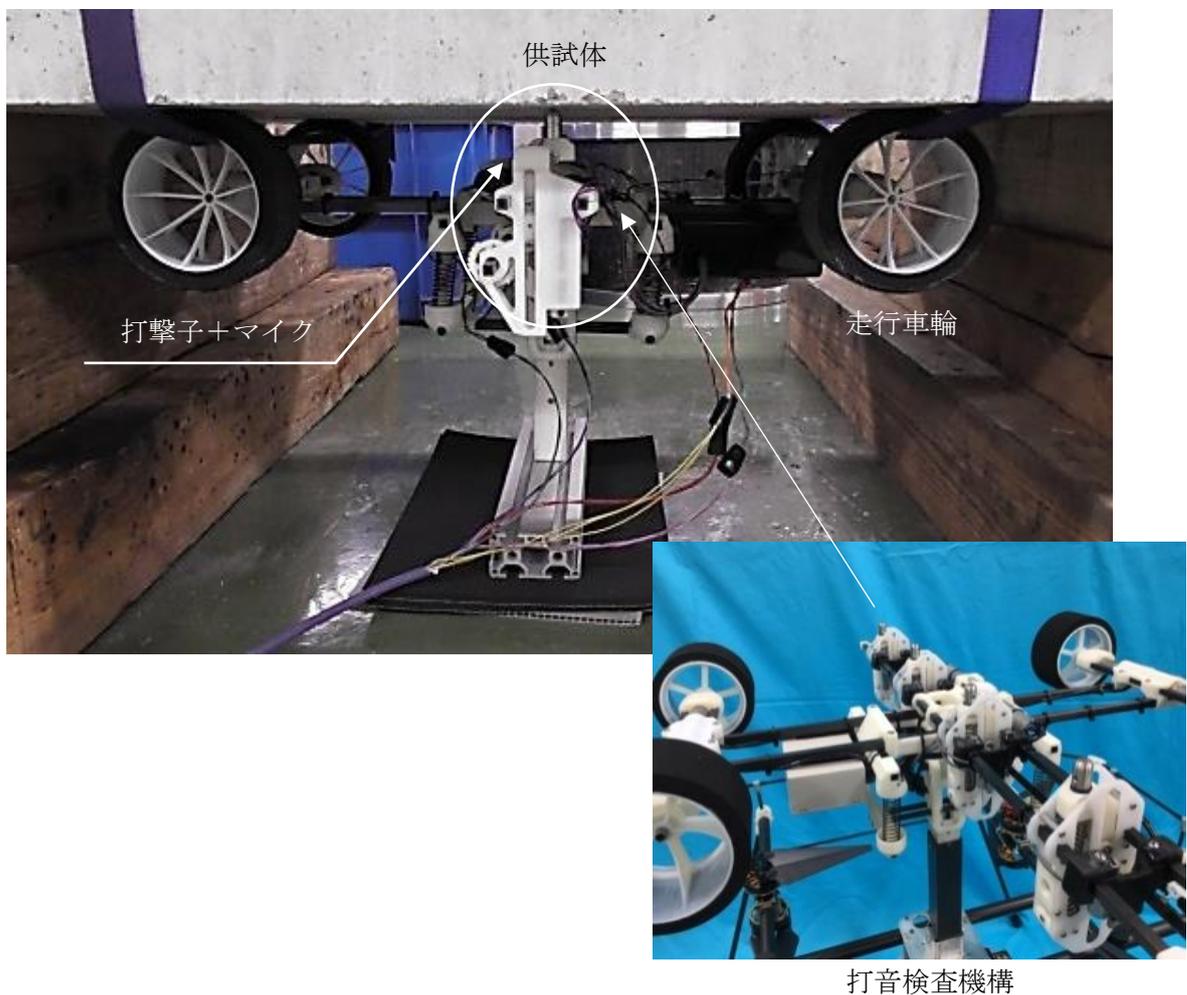


図 3-44 試験状況

### 3-2-3 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 3-45 および図 3-46 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。図 3-45 および図 3-46 においての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。

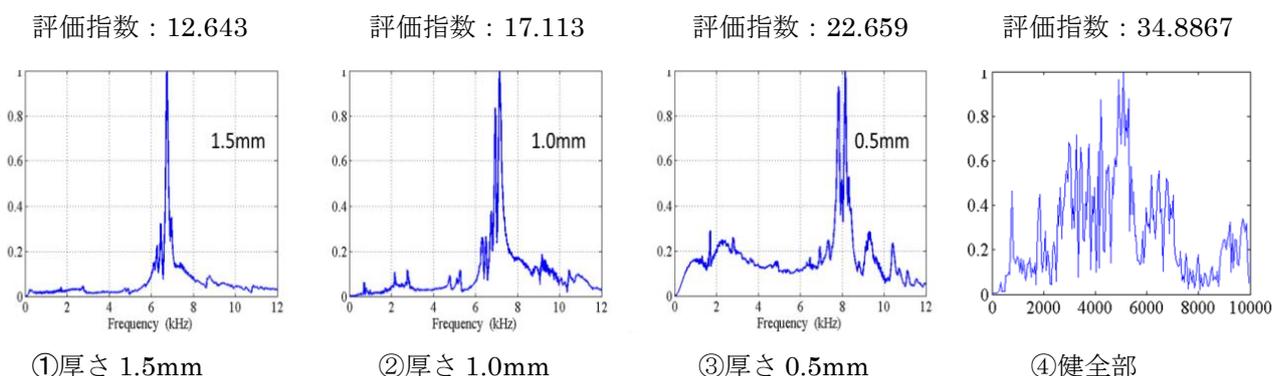


図 3-45 供試体 30 の打音スペクトル

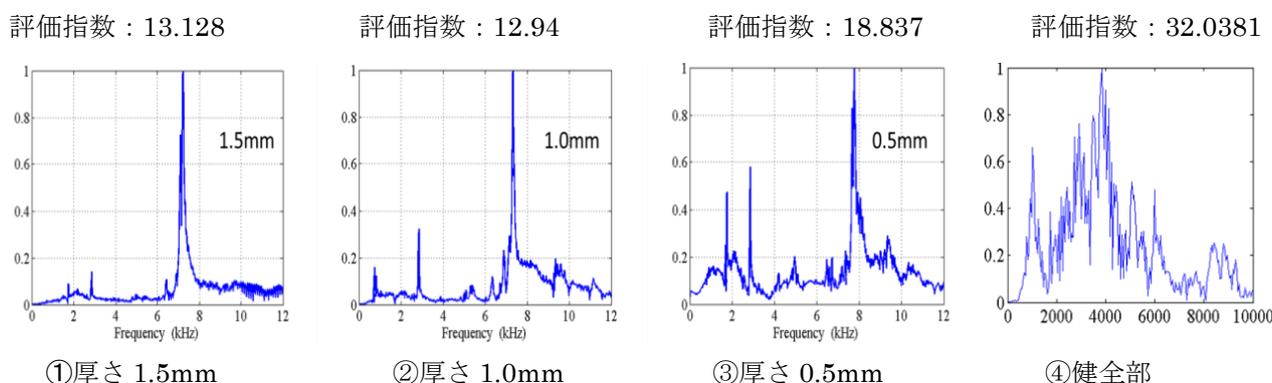


図 3-46 供試体 50 の打音スペクトル

#### 【考察】

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。空洞の深さが 30mm よりも浅い場合や 50mm よりも深い場合など様々なパターンのデータを蓄積することによって、将来的には空洞までの距離や空洞の厚さの推定ができる可能性がある。

#### 参考文献

- 1) 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

## 4. 実証試験結果

### 4-1 概要

#### 4-1-1 各チームの実施工程と点検範囲

当初計画では6月下旬から実証試験を開始する予定であったが、梅雨明け時期、台風の襲来予想および境港における過去の天候観測データの分析結果等から、7月上旬から実証試験を開始することとした。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【三井住友建設】、[IV] 打音機能付飛行ロボット【新日本非破壊検査】、[III] 二輪型マルチコプタ【富士通】、[II] 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』【ジビル調査設計】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。

表4-1に実施工程表を示す。表内の「○」は計画工程日、「△」は予備日を、そして数字は人員数の実績値である。

表4-1 実施工程表

	会社名	2018年7月																								
		1日	2月	3火	4水	5木	6金	7土	8日	9月	10火	11水	12木	13金	14土	15日	16月	17火	18水	19木	20金	21土	22日	23月	24火	
開発チーム	三井住友建設	計画工程			○	○	○	○																		
		実績			4	3	3	3																		
	新日本非破壊検査	計画工程									○	○	△	△	△											
		実績									6	5	6	6												
	富士通	計画工程											○	○	○	○	○	○	○	○	△					
		実績											9	10	10	10	12	10	10	8						
	ジビル調査設計	計画工程																								
		実績																								
地元 コンサルタント	アサヒコンサルタント													2	2	2	2	1	1	1						
	荒谷建設コンサルタント									3	3	3	3													
	西谷技術コンサルタント																									
	サンイン技術コンサルタント			3	2	1	2																			
	ヨナゴ技研コンサルタント			6	5	6	5	4																		
警備会社	アトラス警備									4	4	4	4	4	4		4	4	4	4						
手摺撤去	天松産業																									
台船	ウオタニ		4							4	4	4	4	4	4		4	4	4	4						
警戒船										2	2	2	2	2	2		2	2	2	2						
合計		0	4	13	10	10	10	4	0	19	18	19	28	22	22	12	24	21	21	19	0	0	0	0	0	
管理	計測リサーチコンサルタント		3	3	3	3	3	3		2	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2						

	会社名	2018年8月																									
		1水	2木	3金	4土	5日	6月	7火	8水	9木	10金	11土	12日	13月	14火	15水	16木	17金	18土	19日	20月	21火	22水	23木	24金		
開発チーム	三井住友建設	計画工程																									
		実績						2																			
	新日本非破壊検査	計画工程																									
		実績																									
	富士通	計画工程																									
		実績																									
	ジビル調査設計	計画工程						○	○	○	○	○															
		実績						9	7	7	8												△	△	△	△	△
地元 コンサルタント	アサヒコンサルタント																										
	荒谷建設コンサルタント																										
	西谷技術コンサルタント						2	3	2	2																	
	サンイン技術コンサルタント						3																				
	ヨナゴ技研コンサルタント						2																				
警備会社	アトラス警備						4	4	4																		
手摺撤去	天松産業						4	3	3																		
台船	ウオタニ																										
警戒船																											
合計		0	0	0	0	0	26	17	16	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
管理	計測リサーチコンサルタント						3	3	3	2																	

図 4-1 に、4つのロボット技術の計測範囲を示す。

江島大橋主橋梁部の中央ヒンジ部から PW1（境港側）までの箱桁内部、箱桁側面および下面、張出床版下面、橋脚を対象とし、各ロボット技術の適性を考慮して計測範囲を設定した。

**[I] 橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】**

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』【ジビル調査設計】**

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【富士通】**

計測範囲：PW1 橋脚側面（総面積の 60%）、桁高 10m 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【新本非破壊検査】**

計測範囲：張出床版下面の打音検査（250 m<sup>2</sup>）

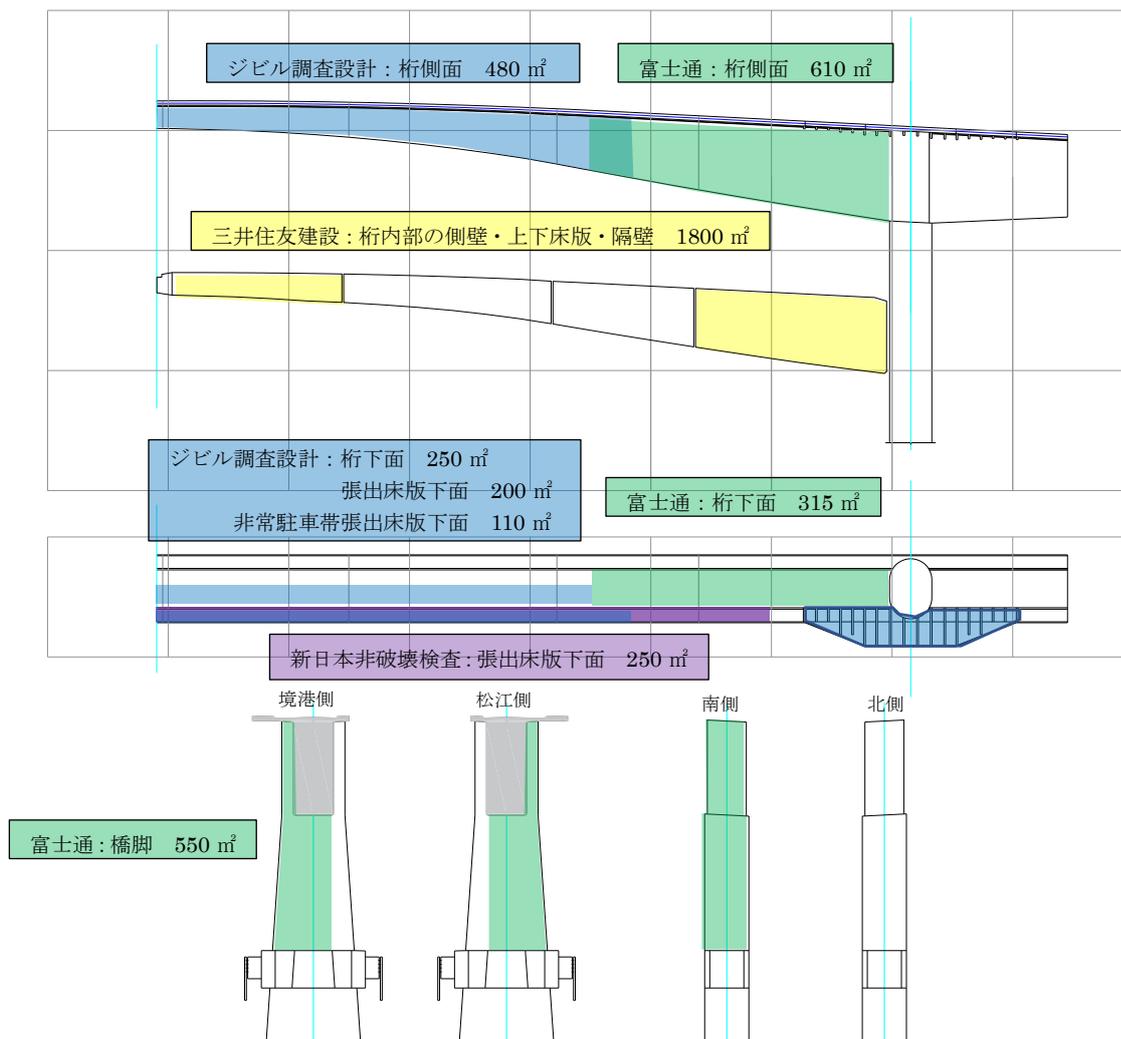


図 4-1 各ロボット技術の計測範囲（実績）

#### 4-1-2 天候の影響による稼働率

図 4-2 に 6 月～8 月の日平均風速、日最大風速、日降水量の実績を示す。使用した気象データは、境特別地域気象観測所で観測されたもので、気象庁 HP より取得した。調査期間中は 7 月 4 日に風速が強く、桁内への計測資機材の搬入作業が危険と判断し終日作業中止としたが、それ以外では風や降雨による作業中止はなかった。

図 4-3 に実証試験期間中（7 月 2 日～8 月 9 日）の時間帯別平均風速データと降水量データを示す。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、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。

実証試験期間中は真夏で好天に恵まれたこともあって気温は午前 10 時ごろから 30℃以上を記録した。橋上は日陰もなく熱中症のリスクが非常に高い状況であったが、作業時間を午前中にシフトした効果もあり熱中症被害は発生しなかった。

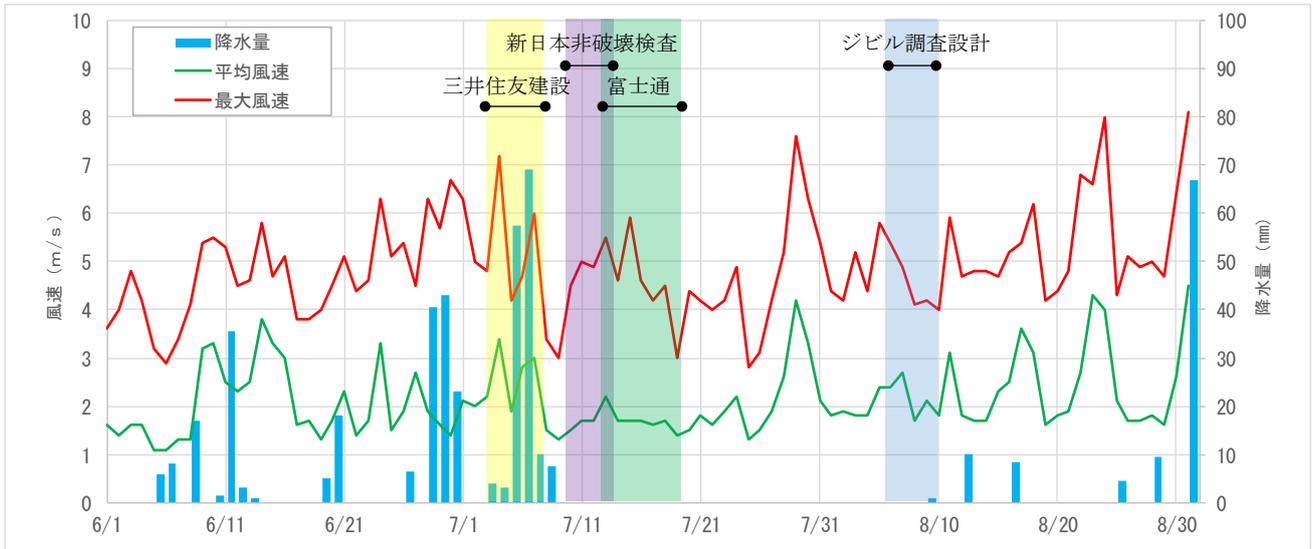


図 4-2 実証試験期間中の風速と降雨量 境特別地域気象観測所のデータ

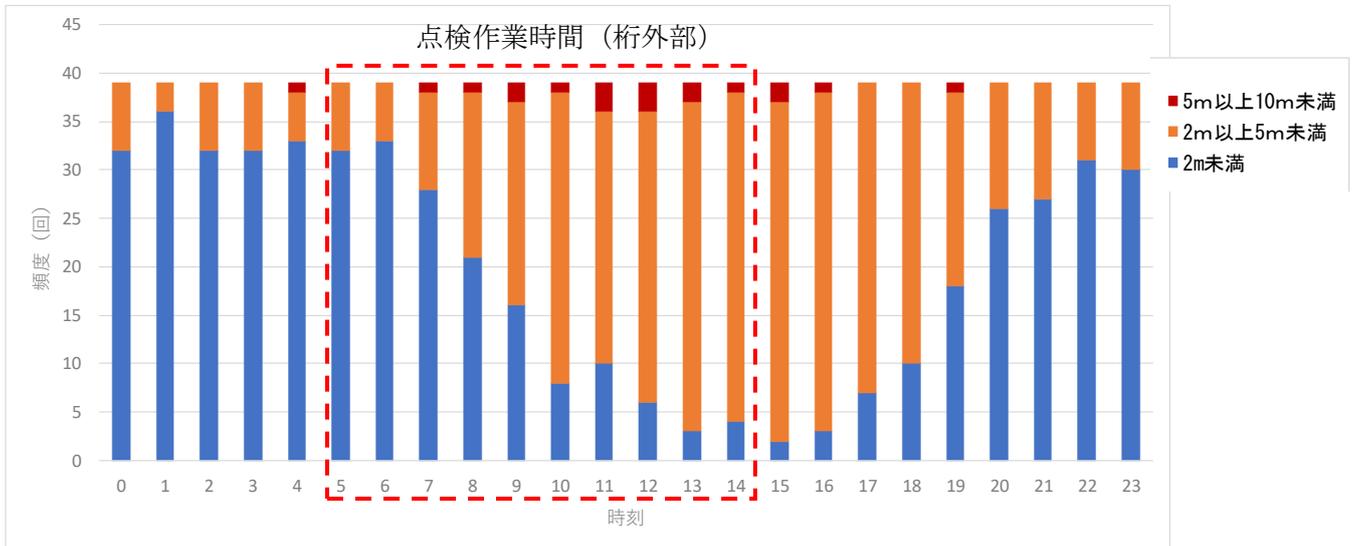


図 4-3 時間帯別平均風速の出現頻度 ※境特別地域気象観測所のデータ

## 4-2 ロボット活用に伴う問題点と解決策

### 4-2-1 浮かび上がった問題点

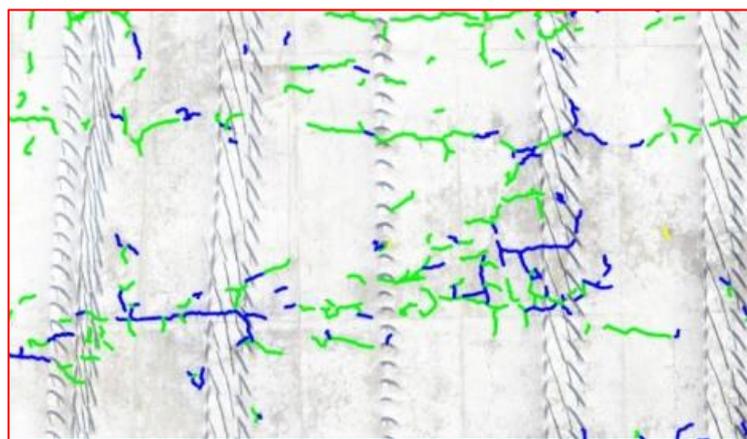
ロボット技術が撮影した近接画像から損傷図を作成する段階で、想定していなかった問題点が浮かび上がってきた。それは、ロボット技術で取得したすべての近接画像データから損傷図を作成しようとすると多大な時間と労力を要する、ということである

図 4-4 に、二輪型マルチコプタが取得した近接画像から富士通が作成した PW1 橋脚東面の展開画像とそれをもとに点検技術者が作成した損傷図を示す。浮かび上がった問題点というのは、PW1 橋脚東面の展開画像から損傷図を作成するのに点検技術者が約 40 時間も要した、ということである。

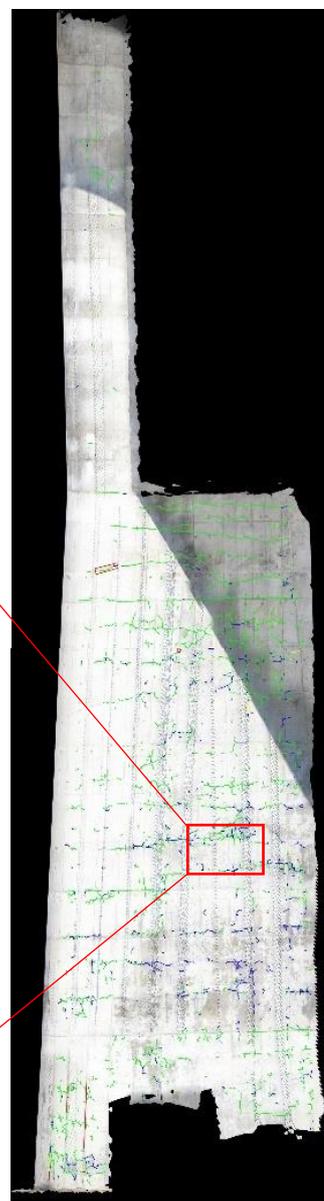
人による近接目視点検では「人（点検員）が有害な損傷を探し出し、その後有害な損傷を記録する（スケッチ図作成、写真撮影）」が、ロボット技術を活用した点検では「ロボットには有害な損傷かどうかを判断できないためすべての部位の近接画像を撮影し、その近接画像から有害な損傷を探し出す」という手順にならざるを得ない。

ロボットが撮影した近接画像から有害な損傷を自動検出する技術（AI を含む）は現在開発が進んでおり一部実用化されているものもあるが（本報告書 60 ページ参照）、点検技術者の照査がまだ必要で完全自動化には至っていない。また、画像上でひびわれを検出した後にそのひびわれ幅を自動判定する技術も開発されているが、一定幅以上のひびわれだけを検出する技術は完成していない。

そのため、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の活用は大きく制限されてしまう。



一部拡大図



PW1 東面

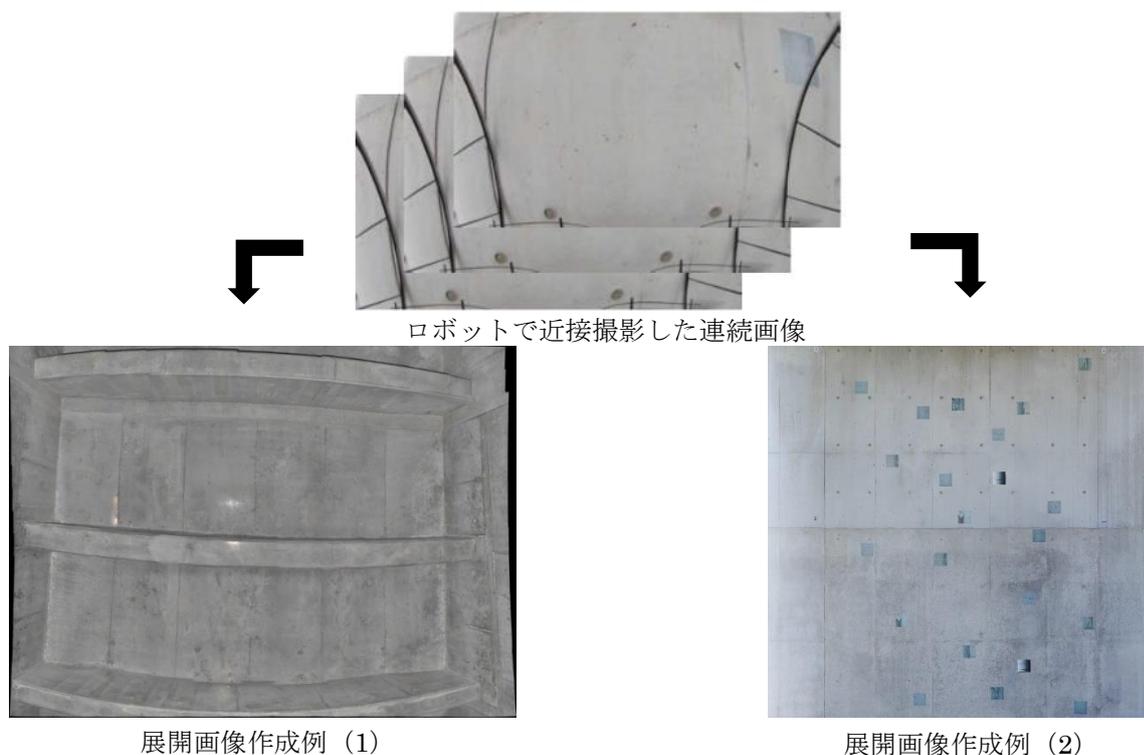
図 4-4 損傷図の作成事例

## 4-2-2 問題の解決策

### (1) 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て損傷程度を評価する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ってしまいます。画像から有害な損傷を探し出すには、ひびわれ幅を迅速に判断できるようにするとともに、損傷が点検対象構造物のどの位置にあるかが即座に分かるような仕組みが必要であり、数多くの画像を効率よく確認するには、一枚ずつ取り出して見るのではなく画像をつなぎ合わせた展開画像で確認するのが望ましい。

展開画像は、図 4-5 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。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画像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ことが可能となる。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。

#### 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 4-5 2種類の展開画像

人による近接目視点検では、点検員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損傷図をスケッチし画像を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を作成するところまでが、点検員が現地で点検対象部位に近接することに相当する。前章の精度確認試験を通じてロボットで撮影した画像から有害な損傷を視認できることが確認できたことから、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が可能となる。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。

**(2) 展開画像から損傷程度を直接評価する手法の提案**

画像から迅速にひびわれ幅を確認する手法として考えられるのが、高精度の画面に画像を等倍で映し出す手法である。画像上のひびわれ幅を判定するために画像の倍率に調整されたデジタルクラックスケールを使う手法が提案されているが、画像を等倍で映し出すことによってデジタルクラックスケール以外に通常のクラックスケールを使うこともできる。

ひびわれが有害であるかどうかを判断するには、ひびわれの発生位置と方向を確認する必要がある。大型画面上に縮小した展開図を同時に表示し、縮小展開図の中で等倍に映し出した拡大画像の位置を表示することによって、対象構造物におけるひびわれの発生位置と方向を同時に確認することができる。

上記のアイデアに基づいた点検手法（「バーチャル近接目視点検」と呼ぶ）が有効であるかどうかを確認するために、高精度の大型タッチパネル（75インチ・4K解像度）上に展開画像を等倍で映し出し、タッチパネルに表示された画像が展開画像の中でどの位置にあるかを縮小展開図の中で同時に確認できるように準備し、点検技術者がバーチャル近接目視点検を体験したところ、バーチャル目視点検の操作に慣れれば、5m×5m程度の展開画像を10分程度で点検し損傷程度を評価できることが分かった。また、必要に応じて展開画像をトレースすることによって損傷図を作成することができる。

大型タッチパネルモニタ  
(75V型 4K)

全体図とモニタ  
拡大表示位置



点検技術者によるバーチャル近接目視点検の体験状況

委員会時の藤野顧問体験状況

図 4-6 大型タッチパネルモニタによるバーチャル近接目視点検

### (3)ブロック分割による損傷程度評価手法

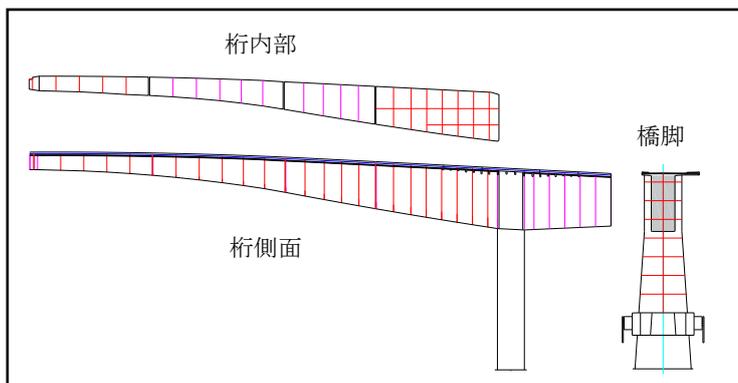
点検対象部位を撮影した近接画像をつなぎ合わせて展開画像を作成し、展開画像を大型画面に映し出してバーチャル目視点検を行うことによって、効率よく点検対象部位の損傷程度評価をすることができると分かった。しかし、点検対象部位の面積が大きな場合は、点検対象部位の近接画像を一つの展開画像にすると展開画像の面積も画像データ容量も大きくなりすぎて作業性が低下し、かえって効率が悪くなってしまふ。

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によって効率よく点検することができる。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、あるいはブロックの損傷程度がいくつかのレベルに分かれる場合、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によって損傷図作成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説明する。

#### step1：点検対象部位をブロック分割する

型枠目地等を基準に4～5m間隔でブロック分割する。



ブロック分割図

#### 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

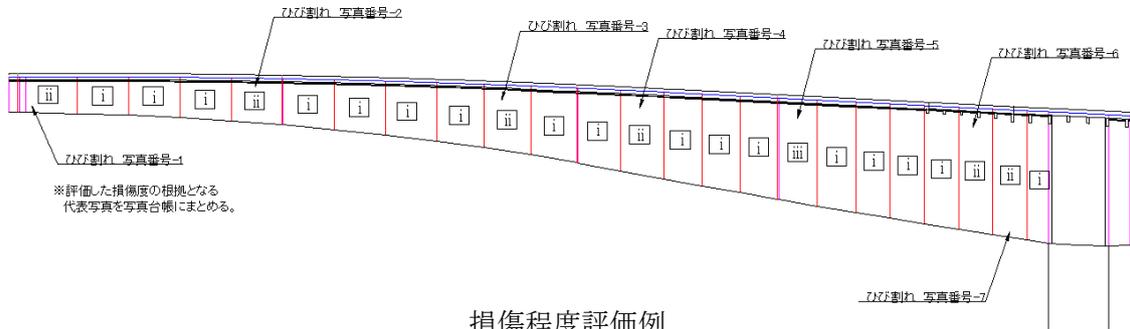


デジタルクラックスケール

図 4-7 ブロック単位の損傷程度評価（1）

### step2-2 : ブロック単位で損傷程度評価

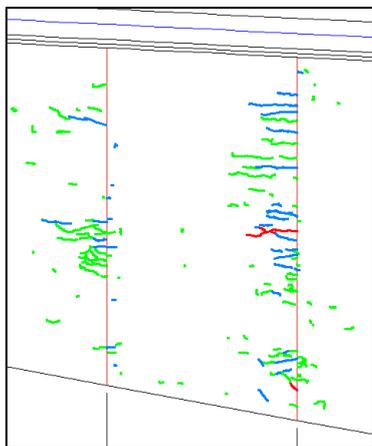
最大ひびわれ幅と最小ひびわれ間隔より、ブロック単位で損傷程度を評価し図面上に記載する。  
 (「鳥取県道路橋りょう定期点検マニュアル」に準じる)



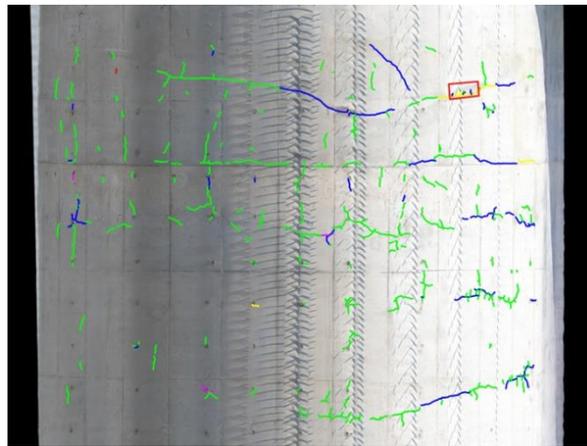
損傷程度評価例

### 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 4-7 ブロック単位の損傷程度評価 (2)

### 4-3 実証試験結果

#### 4-3-1 橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】

計画工程：4日間

実施工程：6日間（うち1日は強風のため中止）

作業時間：8:30～18:00

実施範囲：所定の範囲を計測完了（1800㎡）

表 4-2 に作業実績を示す。桁内の作業のため当初天候の影響はほぼないと考えていたが、計測実施期間全般的に悪天候となり、機材の搬出入にやや時間を要した。うち1日は、豪雨・強風（5～10m/s）のため機材の搬出入作業が出来ず作業中止となり、工程が延長されるとともに精度確認試験および支承撮影が8月に延期された。図 4-8 に人員の配置、表 4-3 に作業人員、図 4-9 に作業状況を示す。

表 4-2 作業実績

○：計画工程日 △：予備日 数字：人員数

	会社名	2018年7月							2018年8月					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	4	5	6	7
		日	月	火	水	木	金	土	日	月	土	日	月	火
開発チーム	三井住友建設	計画工程			○	○	○	○						
		実績			4	3	3	3					2	
コンサルタント	サンイン技術コンサルタント			3	2	1	2					3		
	ヨナゴ技研コンサルタント			6	5	6	5	4				2		
合計		0	0	13	10	10	10	4	0	0	0	0	7	0

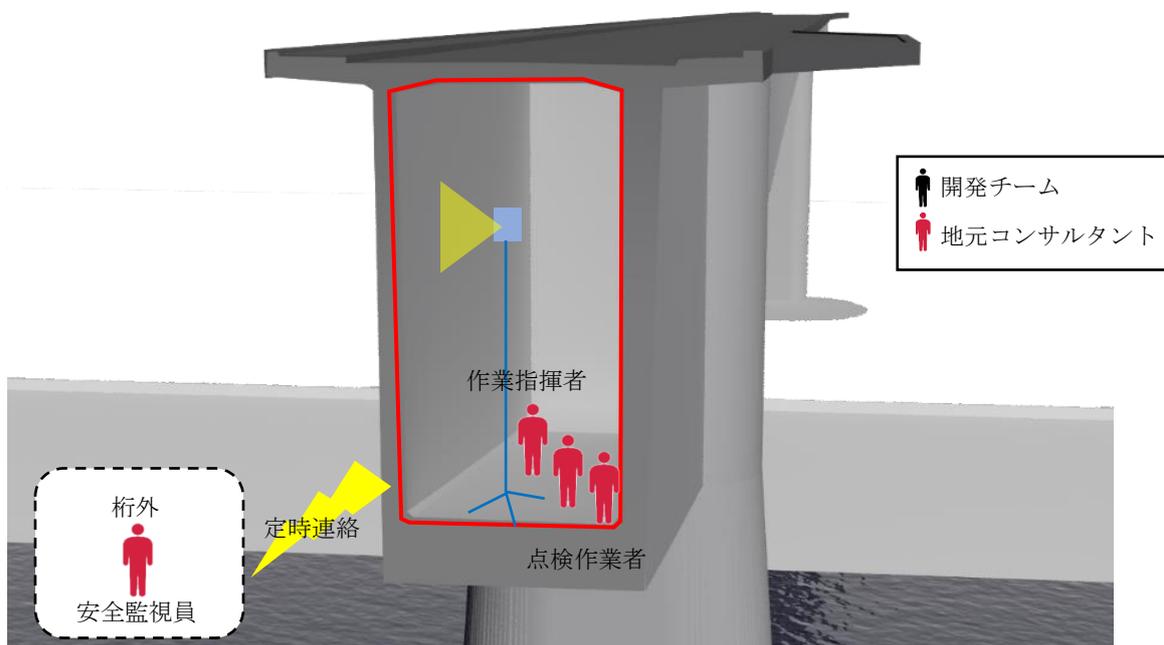


図 4-8 人員配置

表 4-3 作業人員

担当	役割	人員数 (延べ)	特記事項
作業指揮者	作業全体の管理	1	
安全監視員	桁外にて定時連絡	1	
点検作業員	カメラ操作、機材盛替	2	作業指揮者含む3名1組で実施



1.撮影指導



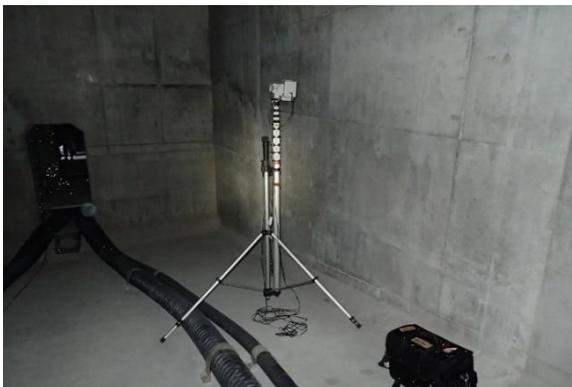
2.タラップの昇降



3.機材搬出入



4.桁内換気



5.撮影機材



6.カメラの設置・準備



7.撮影範囲の指定



8.撮影

図 4-9 作業状況（橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】）

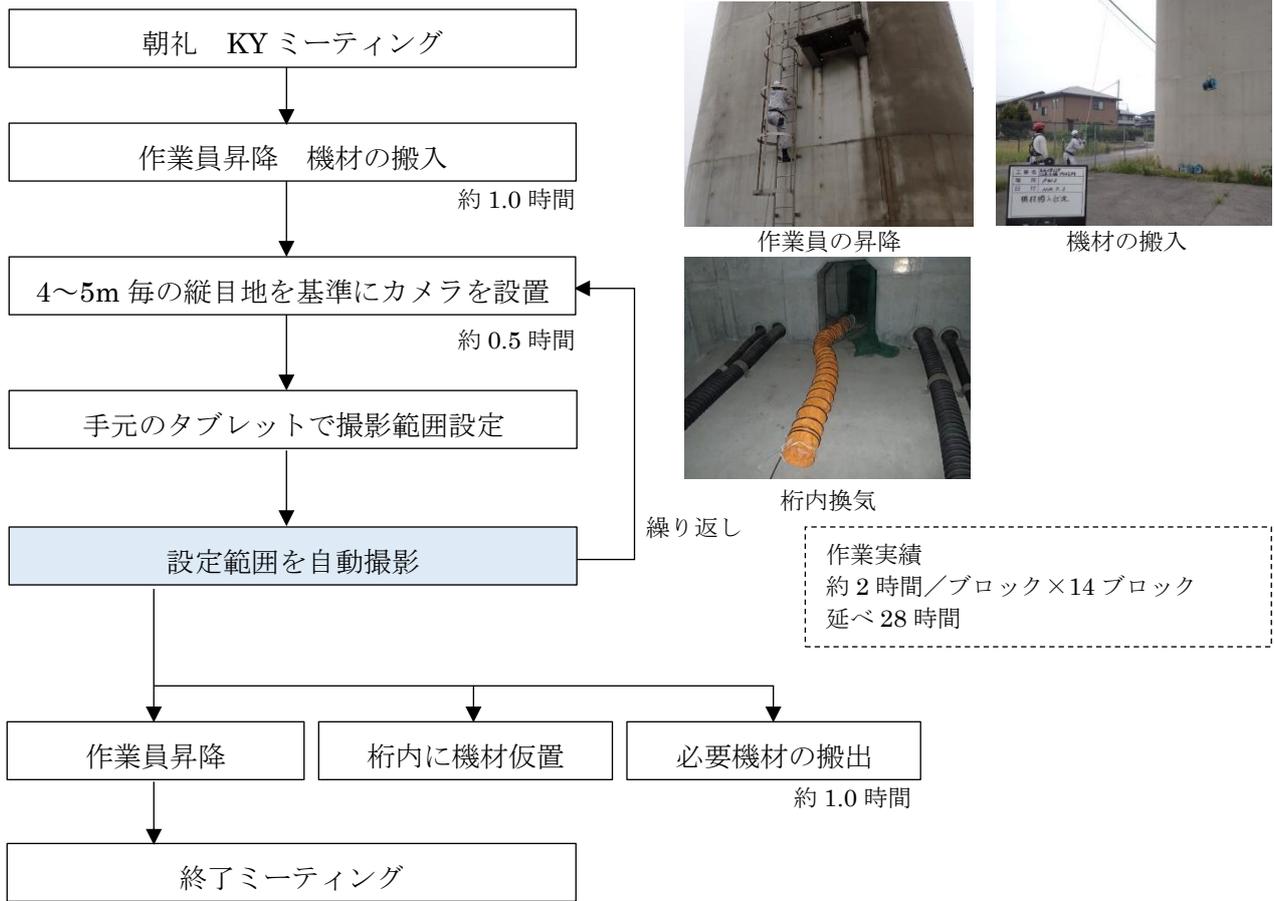


図 4-10 桁内部の計測作業の流れ（橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】）

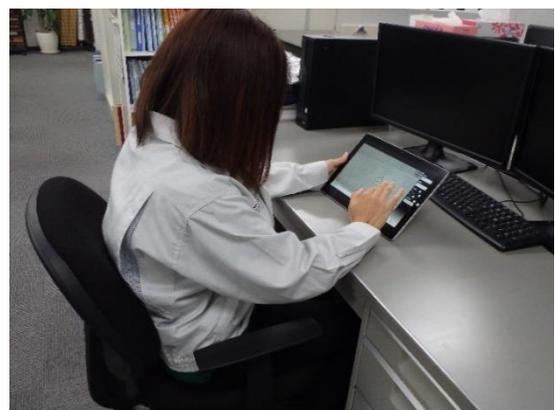
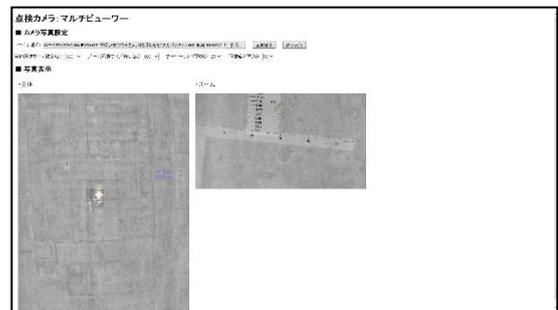
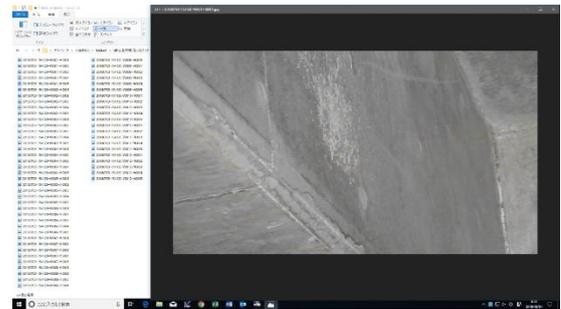
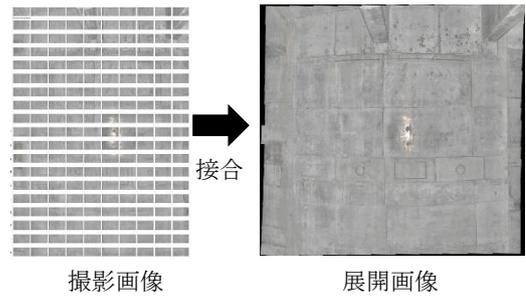
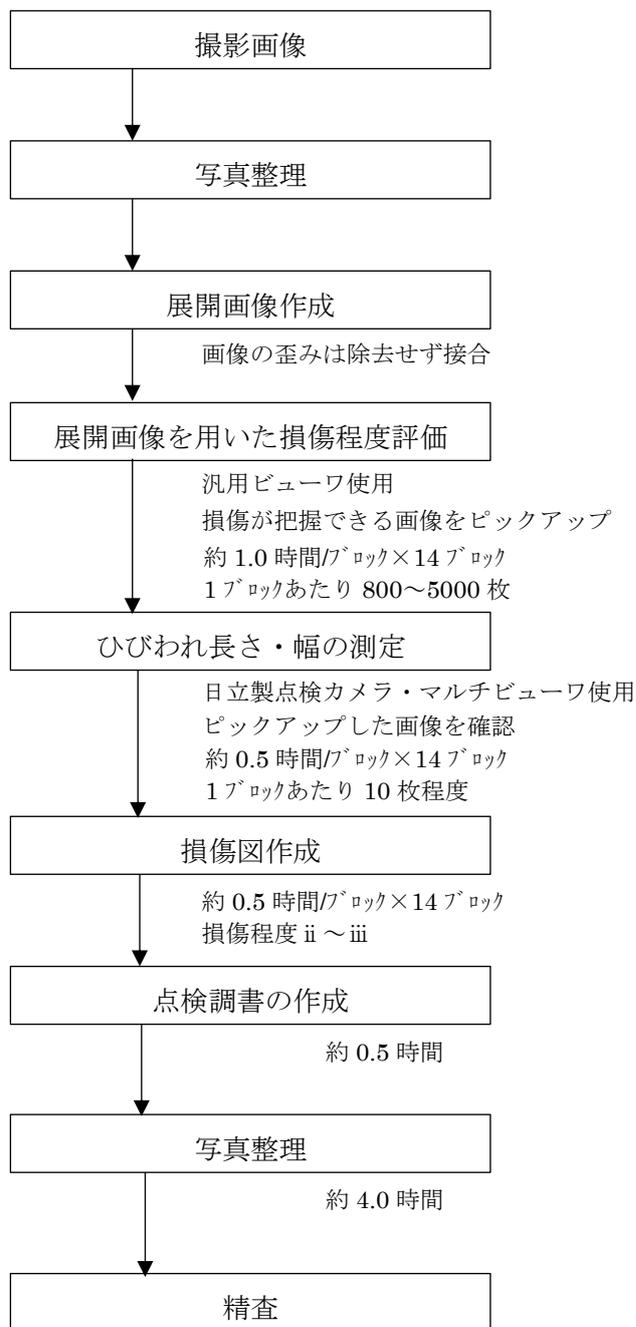


図 4-11 撮影データ処理および評価作業の流れ（橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】）

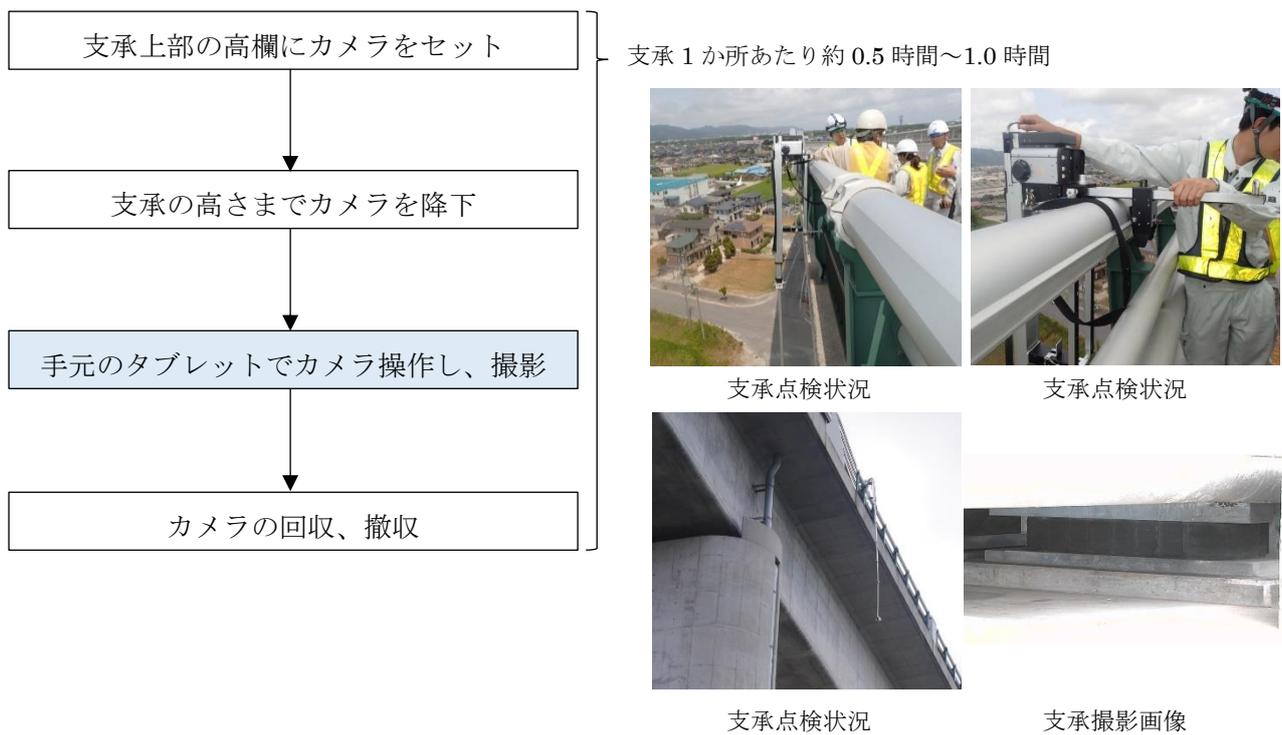


図 4-12 支承点検作業の流れ（橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】）

#### 4-3-2 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』【ジビル調査設計】

計画工程：5日間

実施工程：4日間

作業時間：5:30～15:00

実施範囲：所定の範囲を計測完了（1040㎡）

表 4-4 に作業実績を示す。全作業が順調に進行し、予定を短縮して完了した。一時、強風（5m/s 強）となる時間帯があり、アームの挙動が若干振れるときもあったが、問題なく撮影を実施した。

図 3-13 に人員の配置、表 3-5 に作業人員、図 4-14 に作業状況を示す。

表 4-4 作業実績

○：計画工程日 △：予備日 数字：人員数

	会社名	2018年8月							
		4	5	6	7	8	9	10	11
		土	日	月	火	水	木	金	土
開発チーム	ジビル調査設計	計画工程		○	○	○	○	○	
		実績			9	7	7	8	
コンサルタント	西谷技術コンサルタント			2	3	2	2		
警備会社	アトラス警備			4	4	4			
手摺撤去	天松産業			4	3	3			
合計		0	0	19	17	16	10	0	0

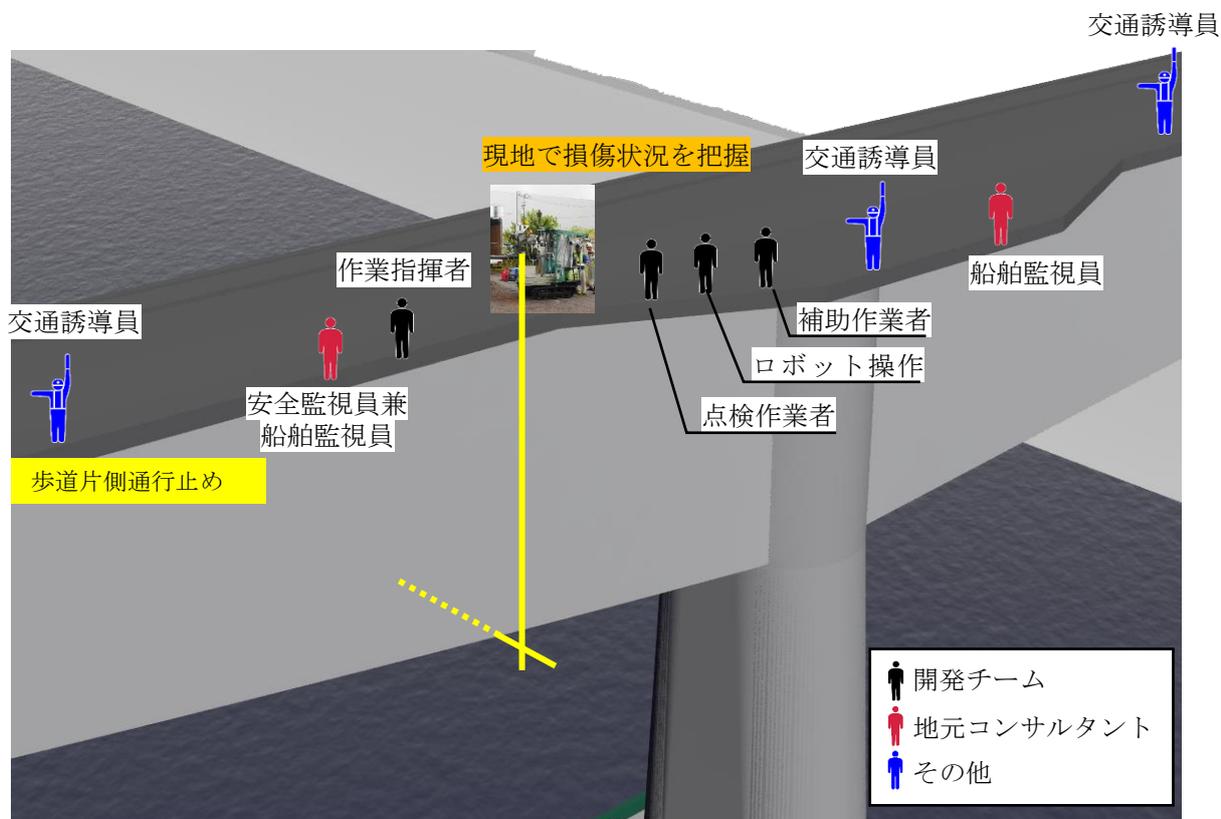


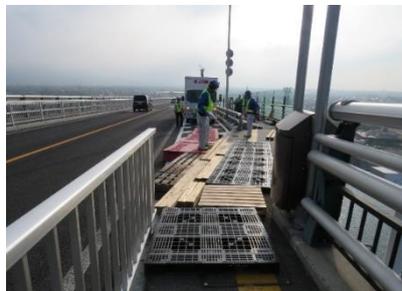
図 4-13 人員配置（橋梁点検支援ロボット『見る・診る』【ジビル調査設計】）

表 4-5 作業人員

担当	役割	人員数 (延べ)	特記事項
作業指揮者	作業全体の管理	1	
安全監視員		1	船舶監視員を兼務
ロボット操作者	ロボットの操縦	1	
点検作業	リアルタイムに損傷評価	1	
補助作業	点検技術者の補助	1	
船舶監視員	往来船舶の監視・周知	2	1名は安全監視員が兼務
交通誘導員	歩道片側の通行止め	4	渡側 1名 江島側 1名 橋上 1名 交代要員 1名



1.手摺の撤去



2.ロボットの搬入路



3.ロボットの搬入



4.ロボット搬入完了



5.ロボット組立



6.桁下面の撮影



7.張出下面の撮影

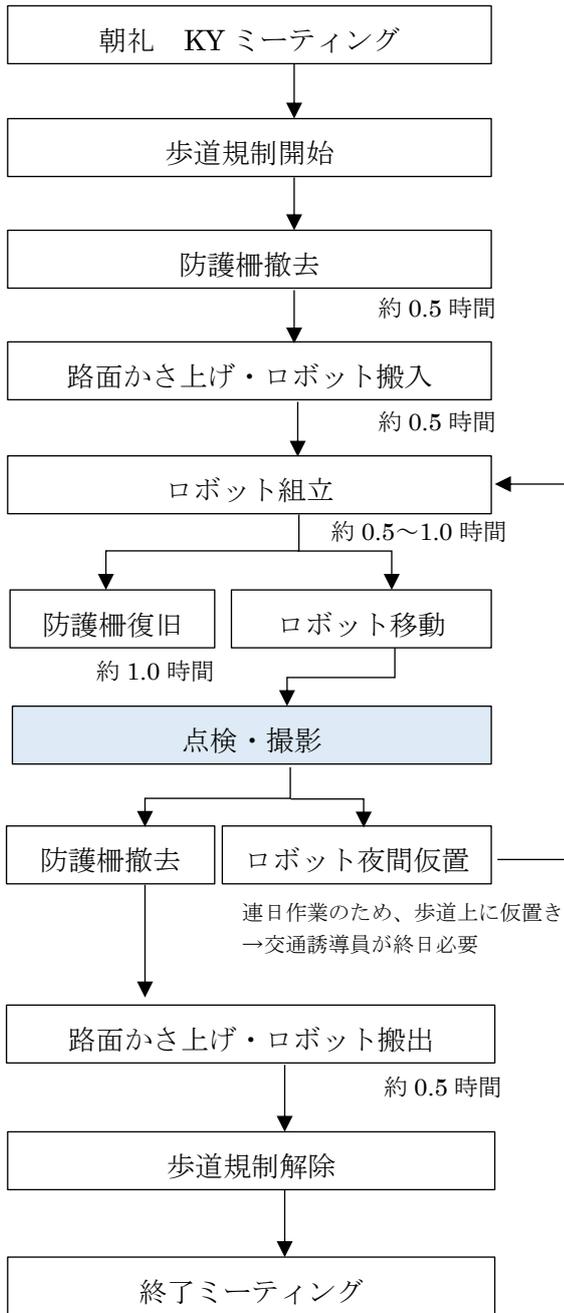


8.桁側面の撮影



9.点検状況

図 4-14 作業状況（橋梁点検支援ロボット『見る・診る』【ジビル調査設計】）



路面かさ上げ



ロボット搬入



ロボット組立



点検・撮影

毎日  
繰り返し



点検・撮影 (ロボット上のモニタ)

作業実績  
桁下面、張出部 約 6 時間  
桁側面 約 5 時間、非常駐車帯下部 約 3.5 時間



ロボットの仮置状況



防護柵復旧状況

図 4-15 点検作業の流れ (橋梁点検支援ロボット『見る・診る』【ジビル調査設計】)

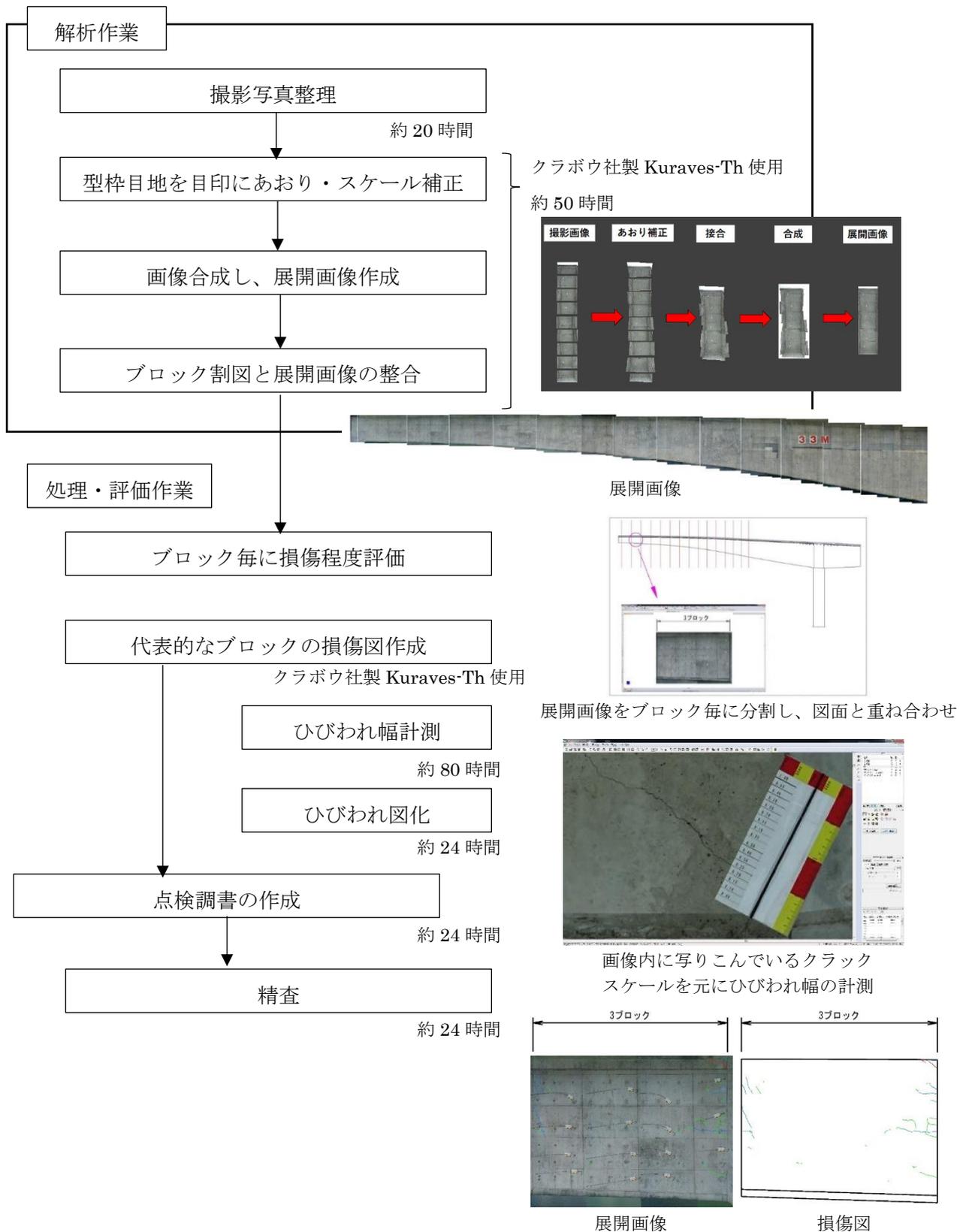


図 4-16 撮影データおよび評価作業の流れ  
 (橋梁点検支援ロボット『視る・診る』【ジビル調査設計】)

### 4-3-3 二輪型マルチコプタ【富士通】

計画工程：7日間+予備1日間

実施工程：8日間（見学会対応含む）

作業時間：5:00～13:00

実施範囲：桁側面・桁下面の撮影は完了したが、橋脚が6割程度の撮影で終了（1475㎡）

表4-6に作業実績を示す。橋脚撮影中にUAV運用上のトラブルが発生した。UAVや周辺機材の破損に伴い、他作業の進捗にも影響が出たため、面積としては、予定の8割程度で終了となった。また、桁下撮影時には距離センサが機能しない状態だったため、高品質の画像取得ができていない部分がある。午後から風が強くなる日もあったが、早朝より作業を行ったため天候面での影響はなかった。

図4-17に人員の配置、表4-7に作業人員、図4-18に作業状況を示す。

表4-6 作業実績

○：計画工程日 △：予備日 数字：人員数

	会社名	2018年7月											
		10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
		火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	
開発チーム	富士通	計画工程			○	○	○	○	○	○	○	△	
		実績			9	10	10	10	12	10	10	8	
コンサルタント	アサヒコンサルタント				2	2	2	2	1	1	1		
警備会社	アトラス警備				4	4	4	4	4	4	4		
台船	ウオタニ				4	4	4	4	4	4	4		
警戒船					2	2	2	2	2	2	2		
合計		0	0	9	22	22	12	24	21	21	19	0	

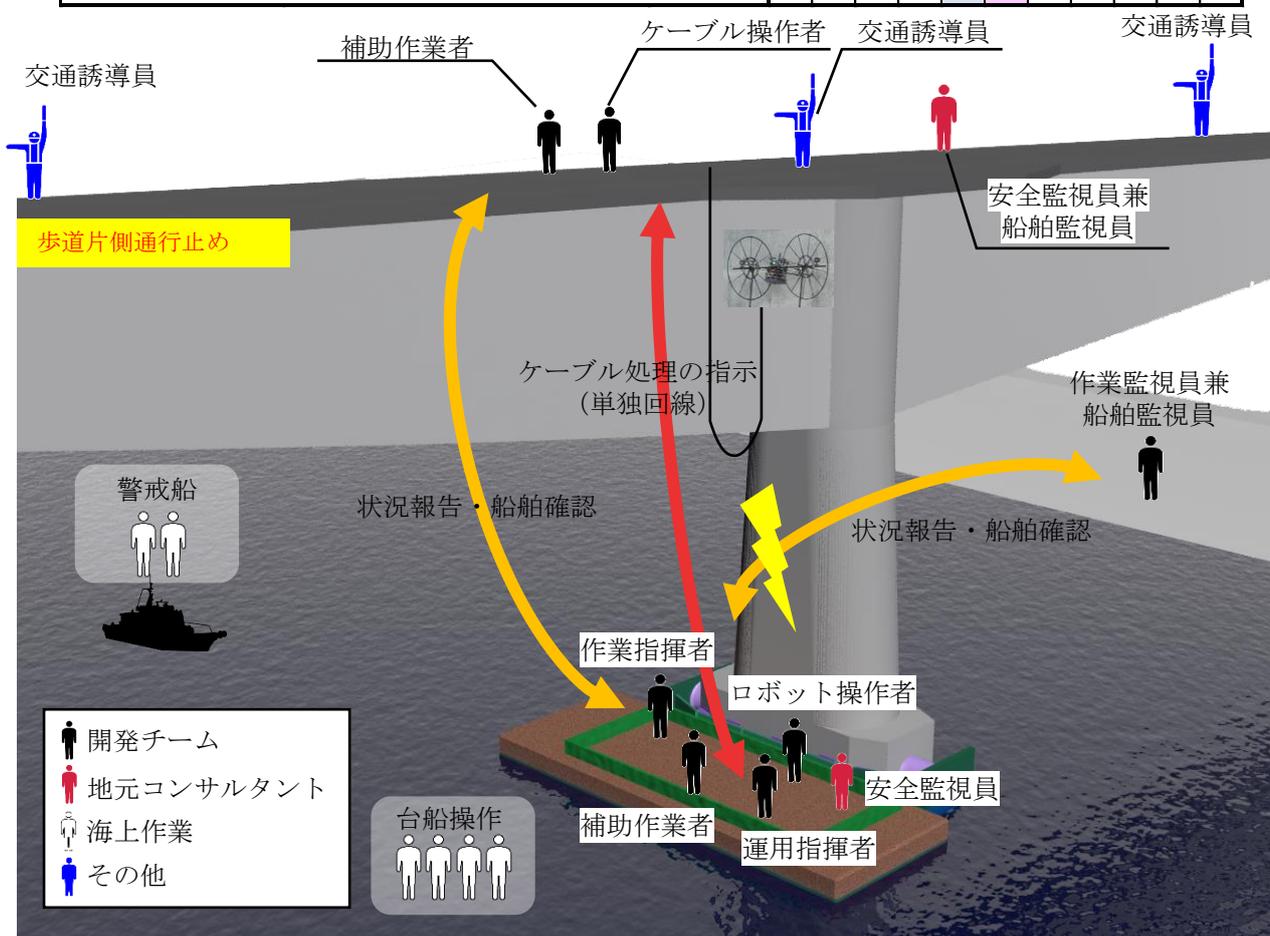


図4-17 人員配置（二輪型マルチコプタ【富士通】）

表 4-7 作業人員

担当	役割	人員数 (延べ)	特記事項
作業指揮者	作業全体の管理	1	台船上 1 名
安全監視員		2	橋上 1 名 台船上 1 名 橋上は船舶監視員を兼務
ケーブル操作者	有線給電用ケーブル操作	1	橋上
補助作業員（橋上）	ケーブル操作補助 作業指揮者との連絡	1	橋上
ロボット操作者	ロボットの操縦	1	台船上
運用指揮者	ドローン運用指揮 ケーブル処理指示	1	台船上
補助作業員（台船上）	カメラ操作 進行記録	1	台船上
作業監視員	往来船舶の監視・周知 作業監視	1	陸上 1 名 船舶監視員を兼務
交通誘導員	歩道片側の通行止め	4	渡側 1 名 江島側 1 名 橋上 1 名 交代要員 1 名
船舶監視員	往来船舶の監視・周知	2	安全監視員と作業監視員が兼務
海上作業員	台船の航行等	4	4 名 1 パーティ
海上作業員	警戒船による監視	2	



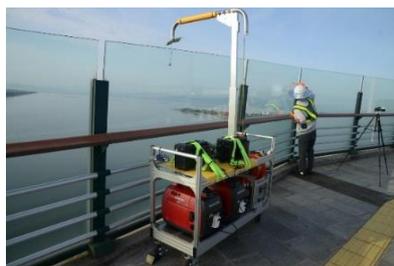
1. 台船への機材搬入



2. 台船上でのロボットの準備



3. 風向風速計による監視



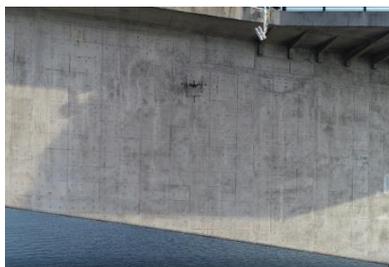
4. 橋上の資機材



5. 給電用ケーブルの降下



6. 橋脚点検状況



7. 桁側面点検状況



8. 点検状況（橋上～台船）

図 4-18 作業状況（二輪型マルチコプタ【富士通】）

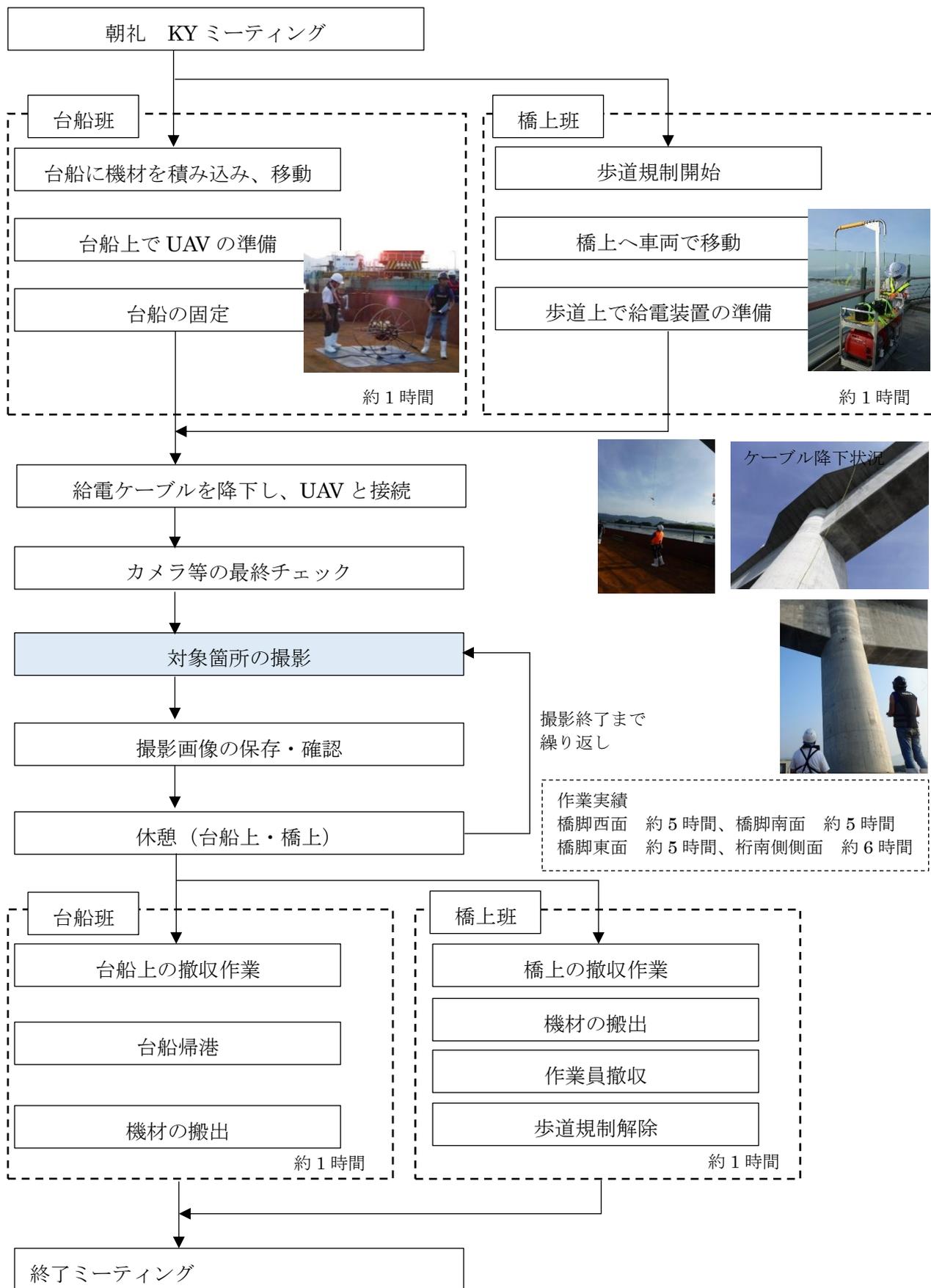


図 4-19 点検作業の流れ（二輪型マルチコプタ【富士通】）

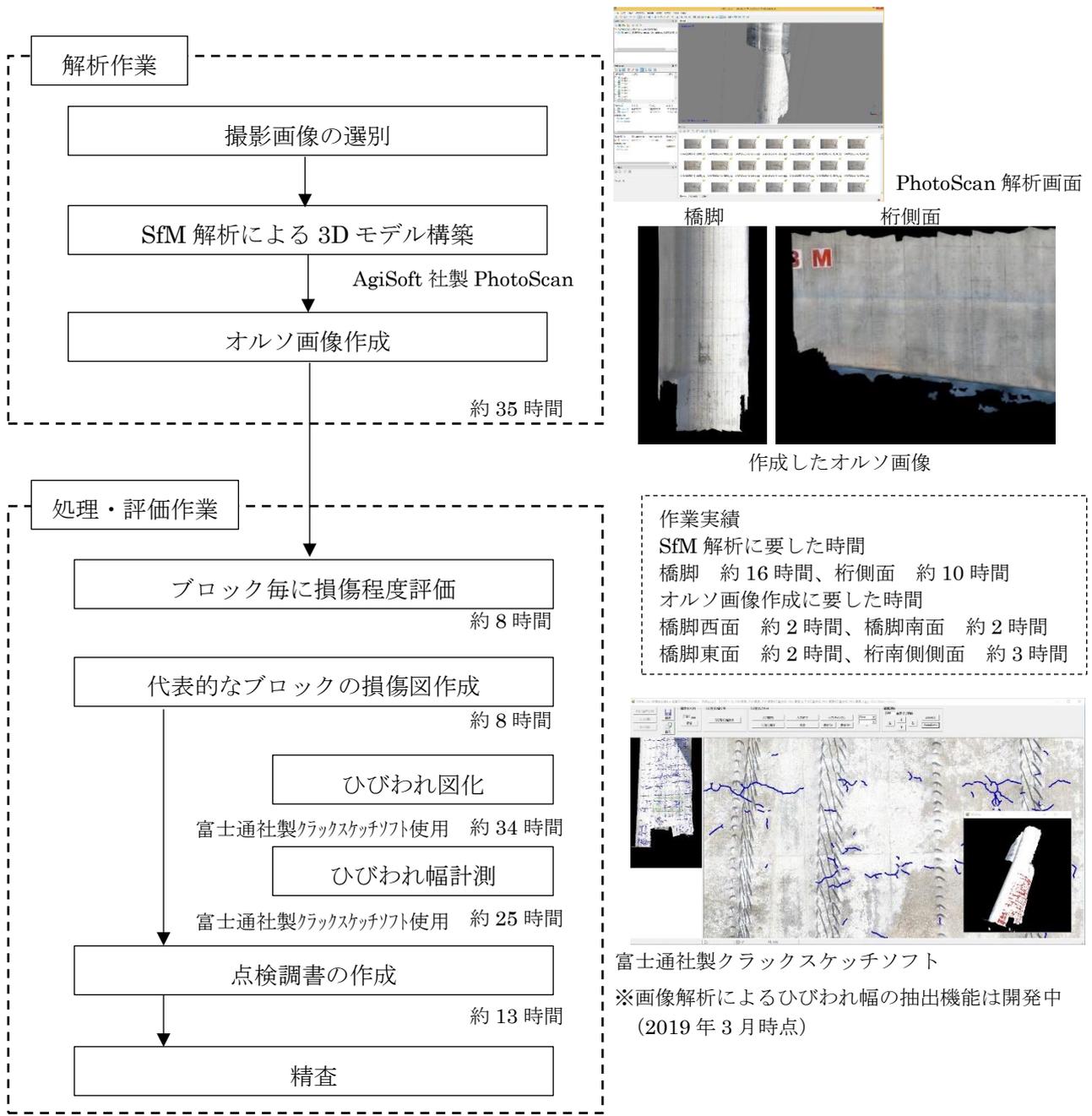


図 4-20 撮影データ処理および評価作業の流れ (二輪型マルチコプタ【富士通】)

4-3-4 打音機能付飛行ロボット【新日本非破壊検査】

計画工程：2日間+予備3日間

実施工程：4日間

作業時間：5:30～17:00

実施範囲：所定の範囲を計測完了（250㎡）

表 4-8 に作業実績を示す。機械トラブルや誤操作による緊急停止があり、機材調整のため待機時間が1/3程度発生した。強風による待機時間も数時間程度発生した。3日目は順調に進行し、その日だけで予定範囲のうち6割の進捗を達成した。

図 4-21 に人員の配置、表 4-9 に作業人員、図 4-22 に作業状況を示す。

表 4-8 作業実績

○：計画工程日 △：予備日 数字：人員数

	会社名	2018年7月									
		7	8	9	10	11	12	13	14	15	
		土	日	月	火	水	木	金	土	日	
開発チーム	新日本非破壊検査	計画工程			○	○	△	△	△		
		実績			6	5	6	6			
コンサルタント	荒谷建設コンサルタント			3	3	3	3				
警備会社	アトラス警備			4	4	4	4				
台船	ウオタニ			4	4	4	4				
警戒船				2	2	2	2				
合計		0	0	19	18	19	19	0	0	0	

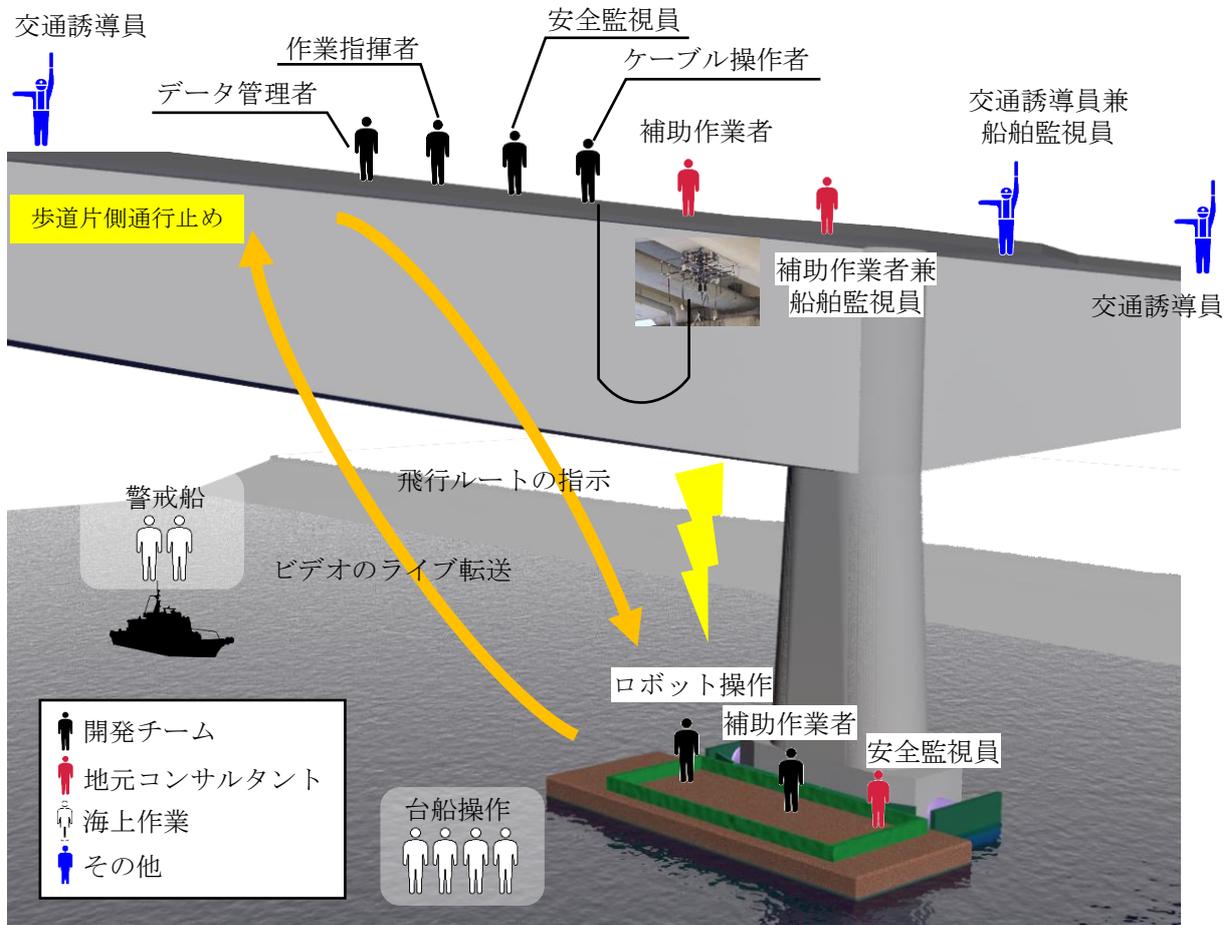


図 4-21 人員配置（打音機能付飛行ロボット【新日本非破壊検査】）

表 4-9 作業人員

担当	役割	人員数 (延べ)	特記事項
作業指揮者	作業全体の管理	1	橋上 1 名
安全監視員	桁外にて定時連絡	2	橋上 1 名 台船上 1 名
データ管理者	データ取込・保存、自動走行開始・終了	2	ケーブル操作者の補助兼務
ロボット操作者	ロボットの操縦	1	
ケーブル操作者	有線給電用ケーブル操作	1	
補助作業者（橋上）	ロボットの橋外への持ち出し	2	1 名は船舶監視員を兼務
補助作業者（台船上）	点検中ロボットの撮影	1	操作者の交代要員兼務
交通誘導員	歩道片側の通行止め	4	渡側 1 名 江島側 1 名 橋上 1 名 交代要員 1 名 橋上は船舶監視員を兼務
船舶監視員	往来船舶の監視・周知	2	橋上交通誘導員と補助作業者が兼務
海上作業者	台船の航行等	4	4 名 1 パーティ
海上作業者	警戒船による監視	2	



1.自己位置推定用視準ポールの設置



2.風向風速計による監視



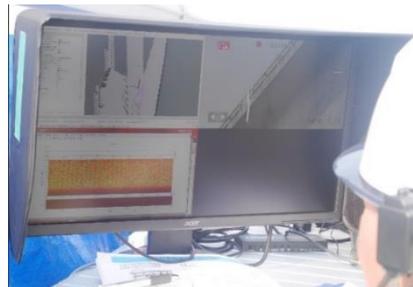
3.ロボットの吊下



4.橋上での作業状況



5.橋上での作業状況



6.橋上の PC 画面



7.張出下面の計測状況



8.ロボット操作者の目線



9.台船上での作業状況

図 4-22 作業状況 (打音機能付飛行ロボット【新日本非破壊検査】)

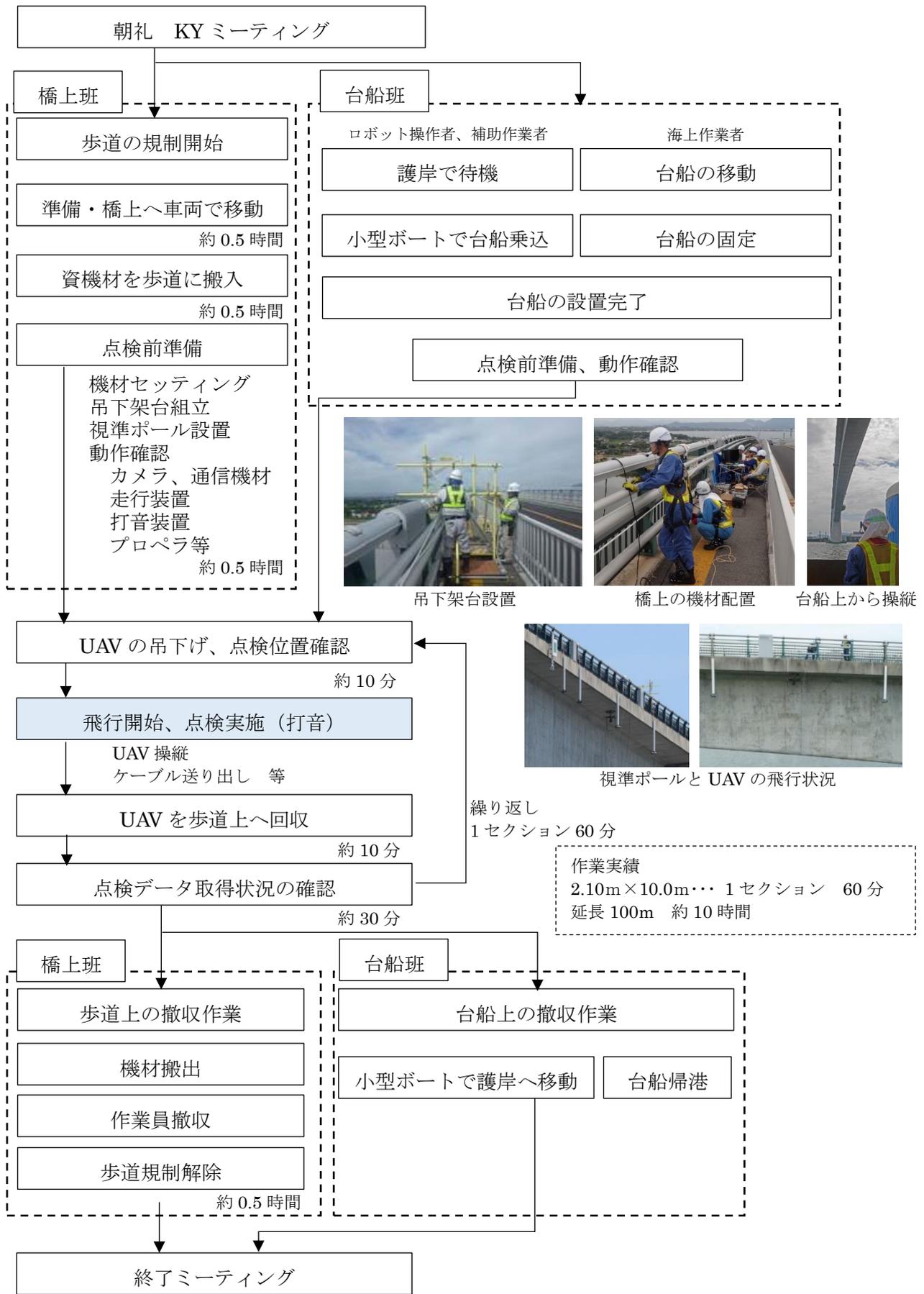


図 4-23 点検作業の流れ (打音機能付飛行ロボット【新日本非破壊検査】)

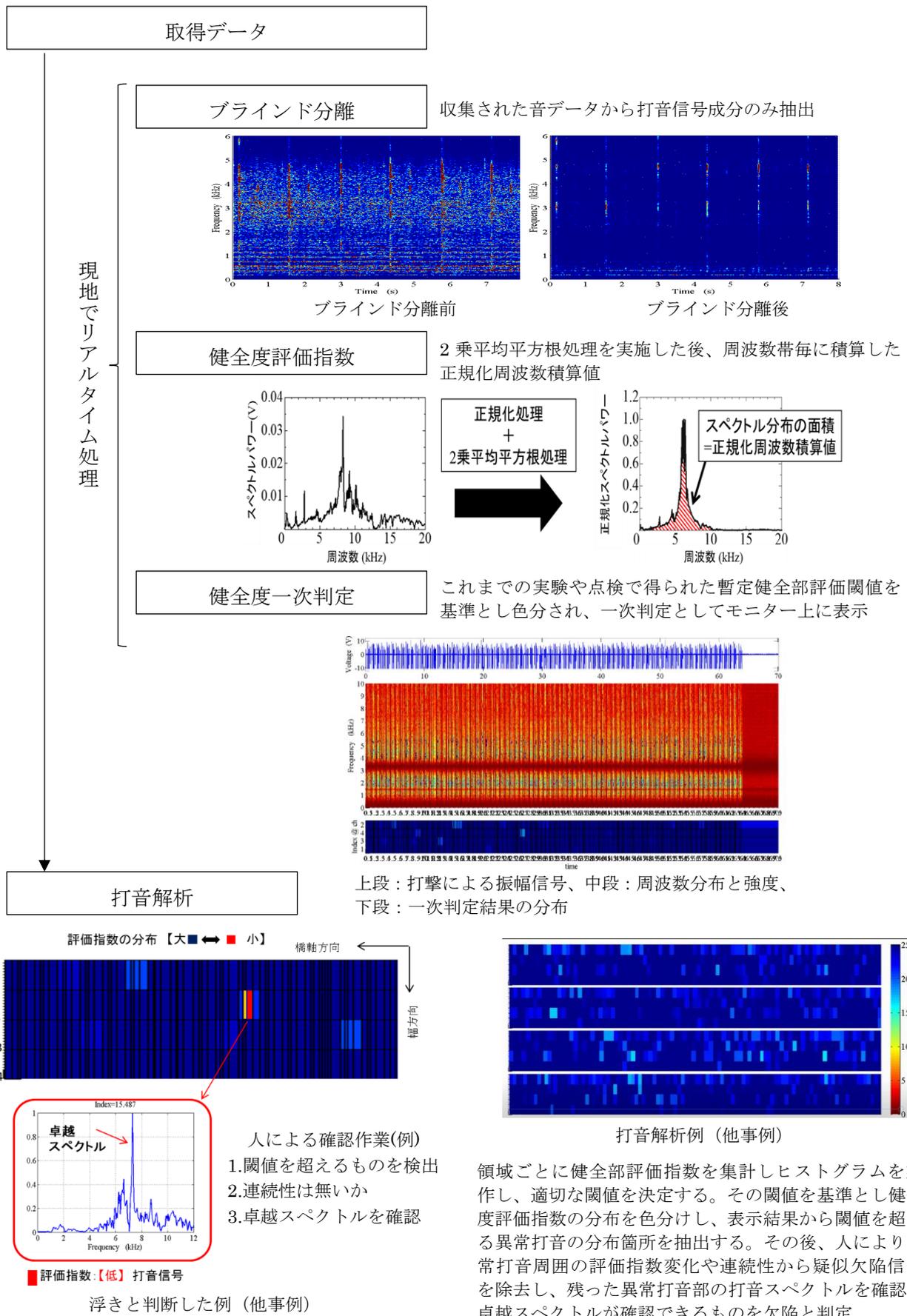


図 4-24 計測データ処理および評価作業の流れ (打音機能付飛行ロボット【新日本非破壊検査】)

#### 4-4 展開画像

##### 4-4-1 橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】

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。撮影範囲のうち各部位の展開画像を抜粋して以下に示す。

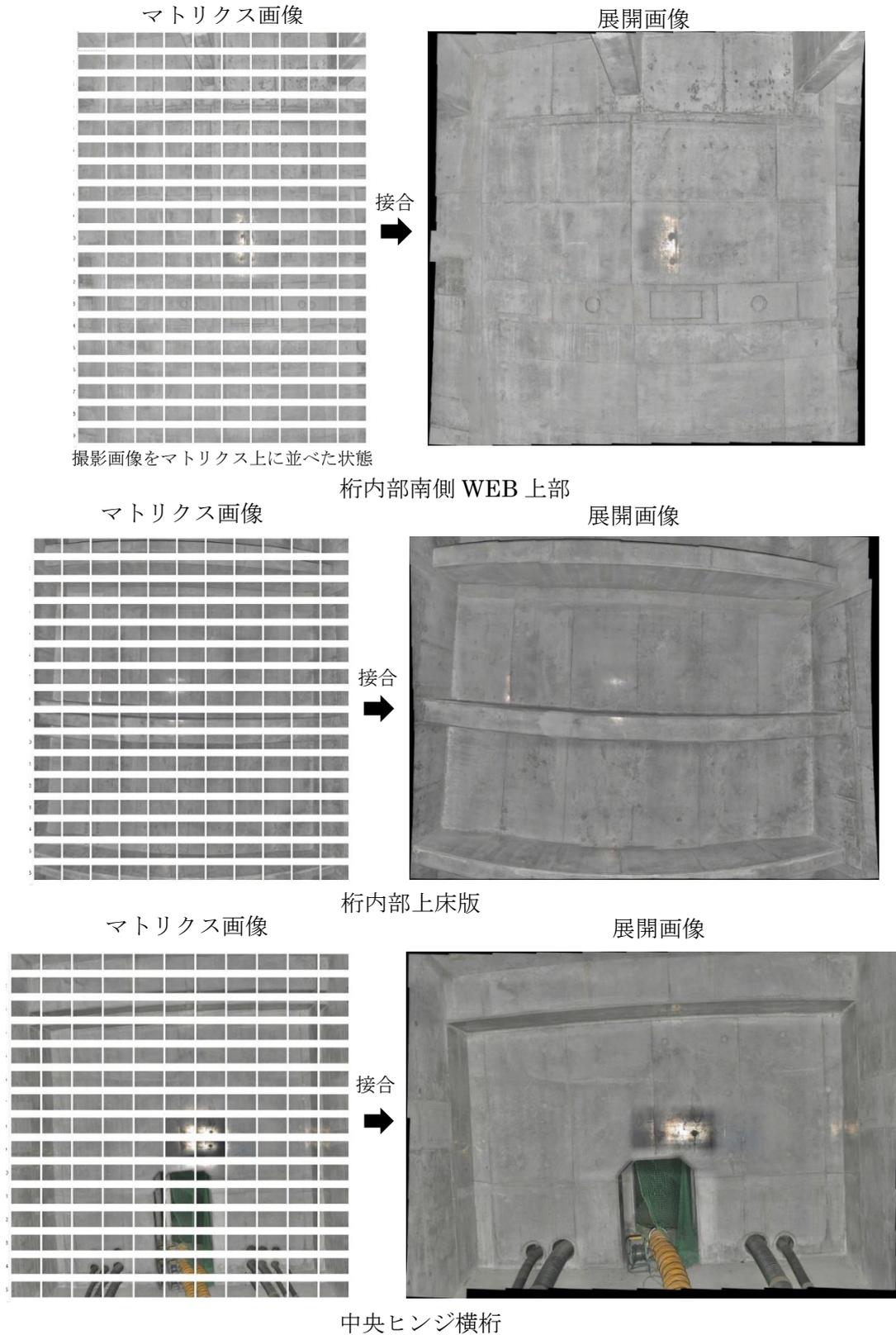


図 4-25 展開画像作成例（橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】）

#### 4-4-2 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』【ジビル調査設計】

桁下面の一部に欠測が生じているが、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。

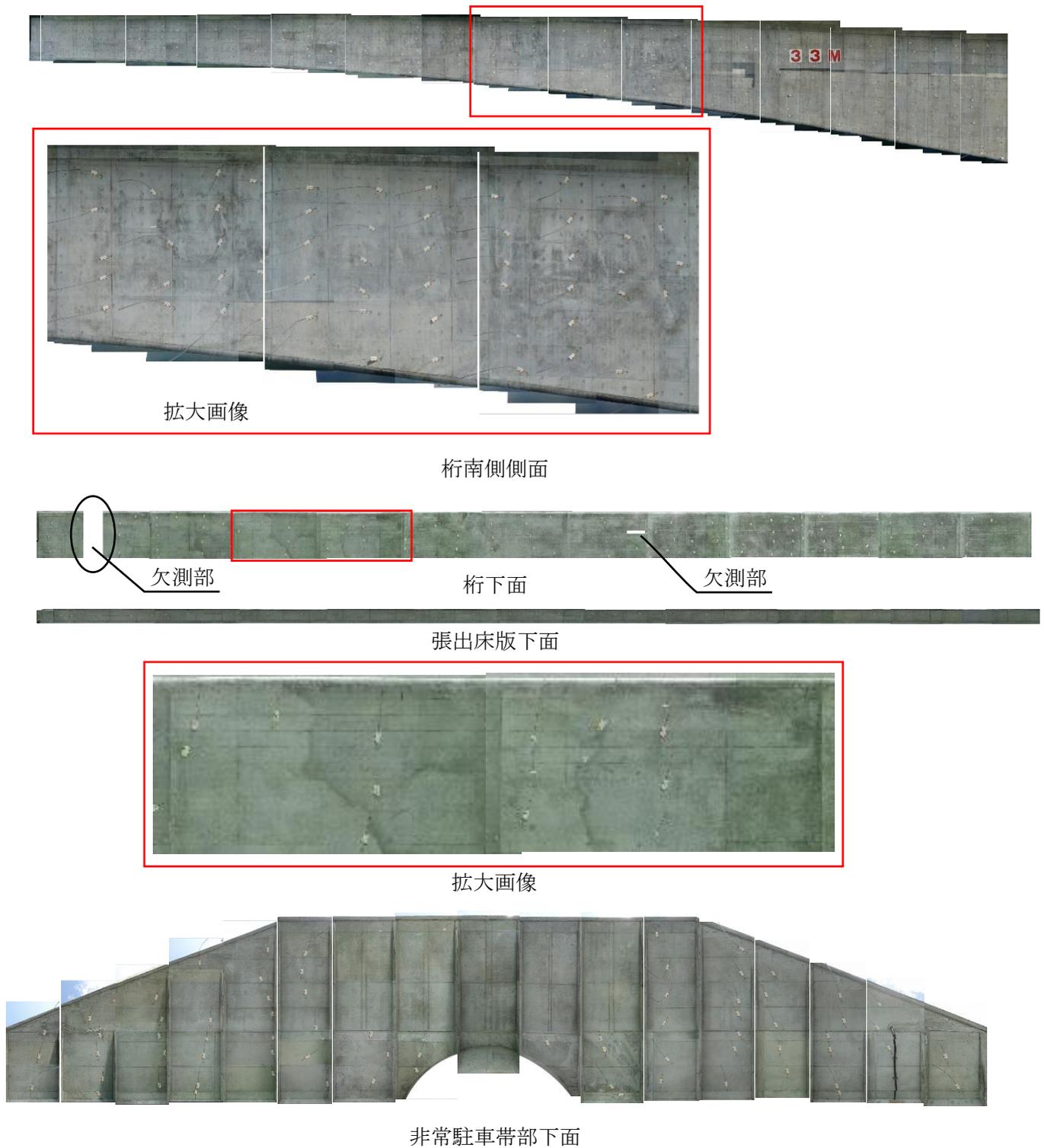


図 4-26 作成した展開画像（橋梁点検支援ロボット『見る・診る』【ジビル調査設計】）

#### 4-4-3 二輪型マルチコプタ【富士通】

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。桁下面は、台船上から目視による非接触撮影のため、位置管理が困難となり大きく欠測が生じている。また、距離センサのトラブルにより一定距離を保持した飛行が実施できず焦点距離があっていない画像が取得されている部分もあり、非接触時の位置・距離管理が必須である。橋脚最上部は、桁側面の上部と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。

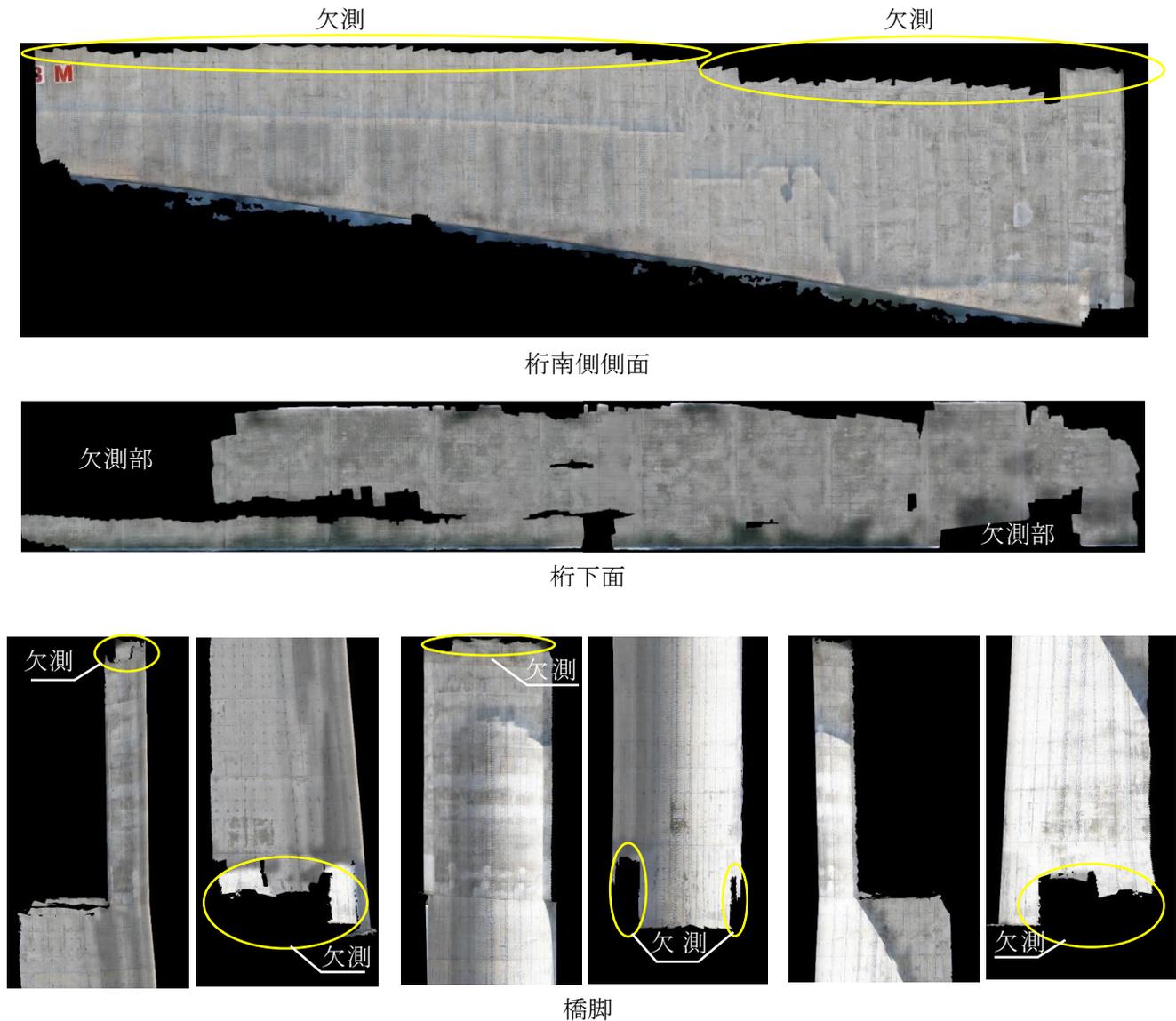


図 4-27 作成した展開画像 (二輪型マルチコプタ【富士通】)

#### 4-5 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」に準じて実施した。表 4-10 および表 4-11 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 4-10 ひびわれの損傷程度評価基準

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
ii	小	粗	小	密
			中	粗
iii	小	密	大	粗
				中
iv	中	密	大	密
				大
v	大	密	/	

※鳥取県道路橋りょう定期点検マニュアル

表 3-11 浮きの損傷程度評価基準

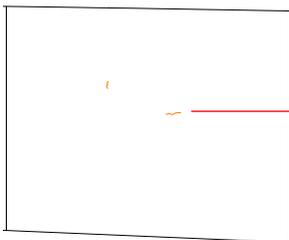
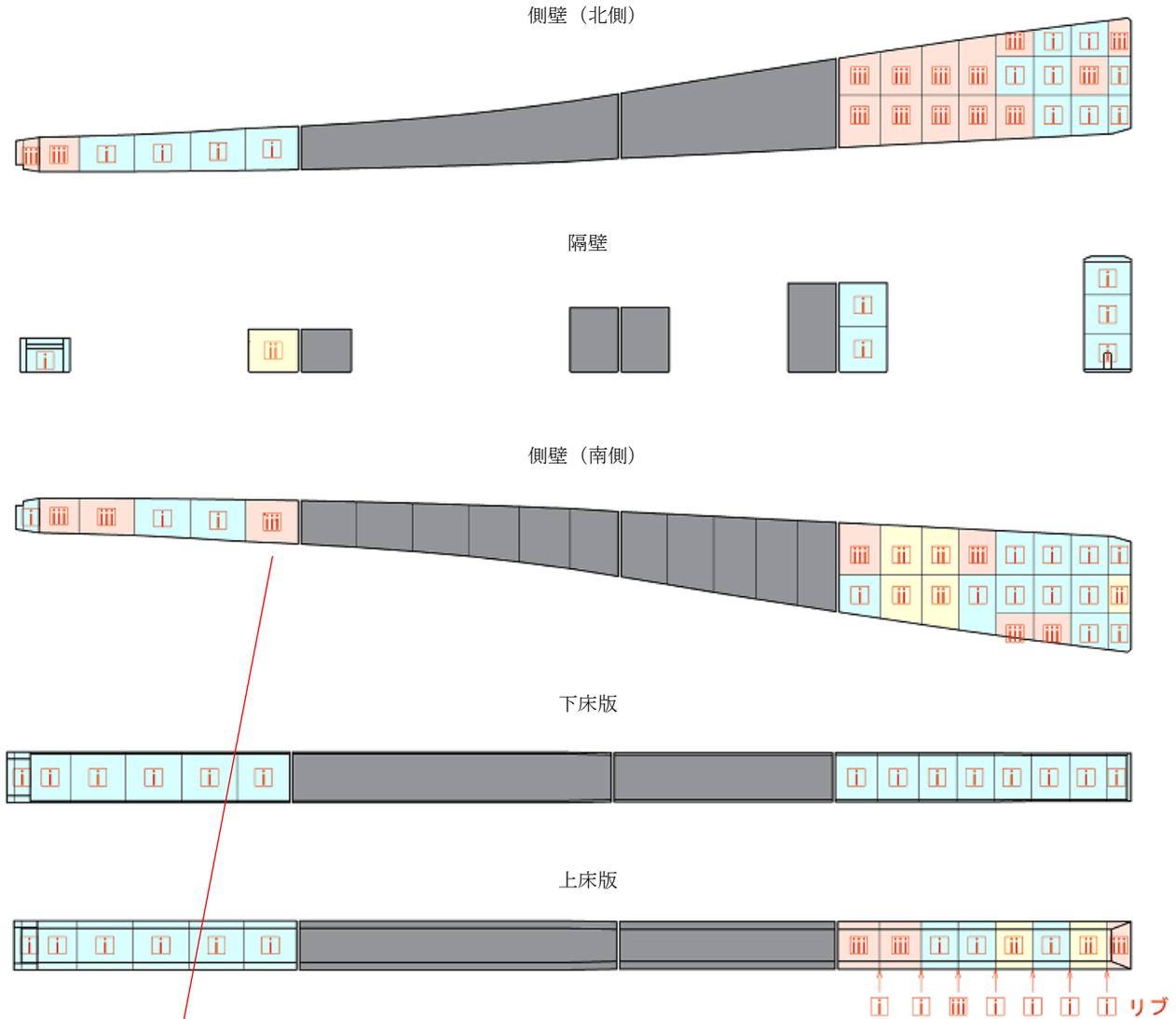
区 分	一 般 的 状 況
i	損傷なし
ii	—
iii	うきがある。

※鳥取県道路橋りょう定期点検マニュアル

【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【三井住友建設】

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。



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	

損傷程度の凡例  
(三井住友建設)

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

損傷部の拡大写真

図 4-28 桁内調査結果（橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】）

【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『視る・診る』【ジビル調査設計】

[III] 二輪型マルチコプタ【富士通】

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）。

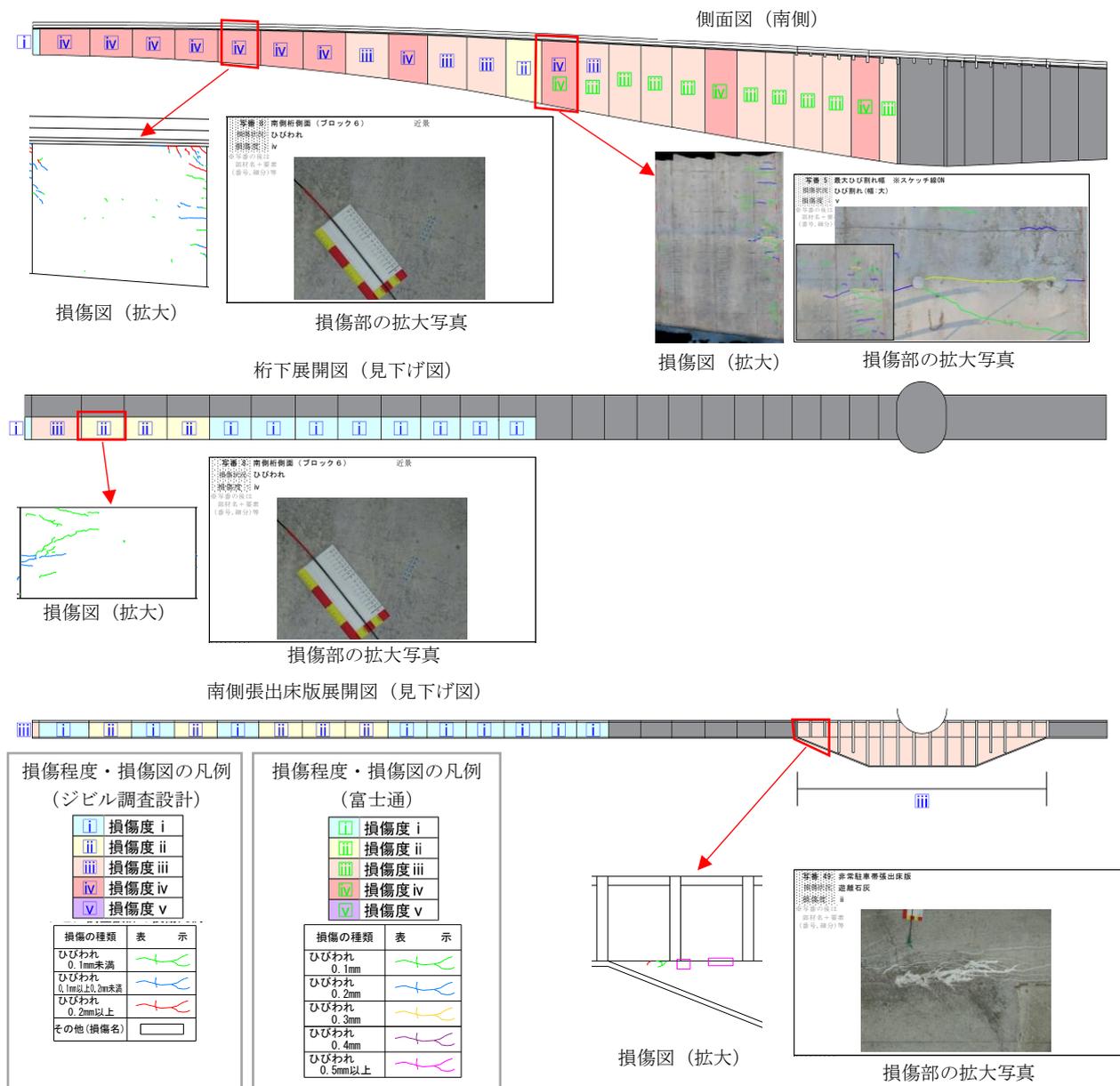


図 4-29 桁外面調査結果

(二輪型マルチコプタ【富士通】・橋梁点検支援ロボット『視る・診る』【ジビル調査設計】)

【橋脚 (PW1)】

[Ⅲ] 二輪型マルチコプタ【富士通】

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)。

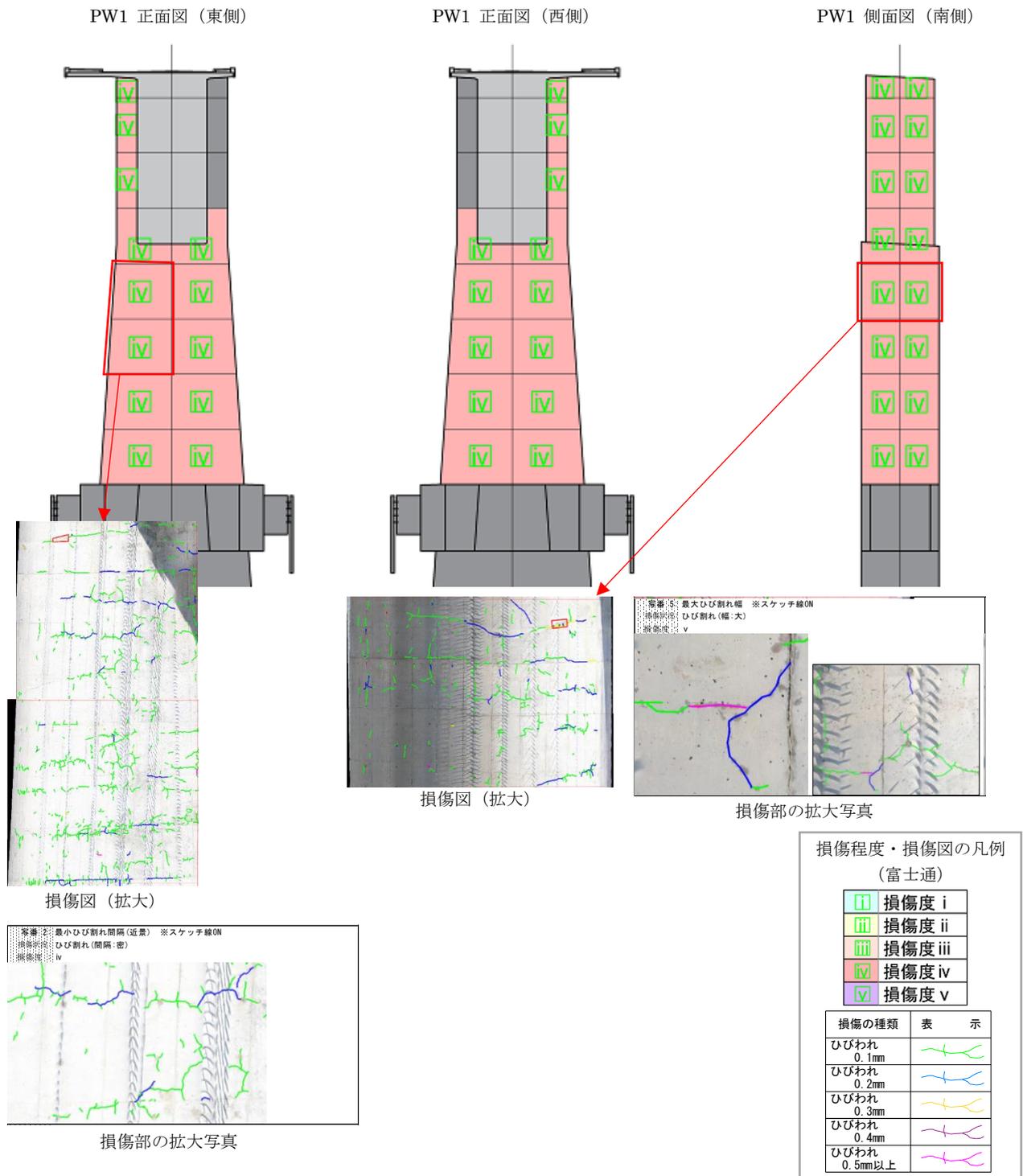


図 4-30 橋脚 (PW1) 調査結果 (二輪型マルチコプタ【富士通】)

【桁外部（張出床版下面）】

[IV] 打音機能付飛行ロボット【新日本非破壊検査】

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）

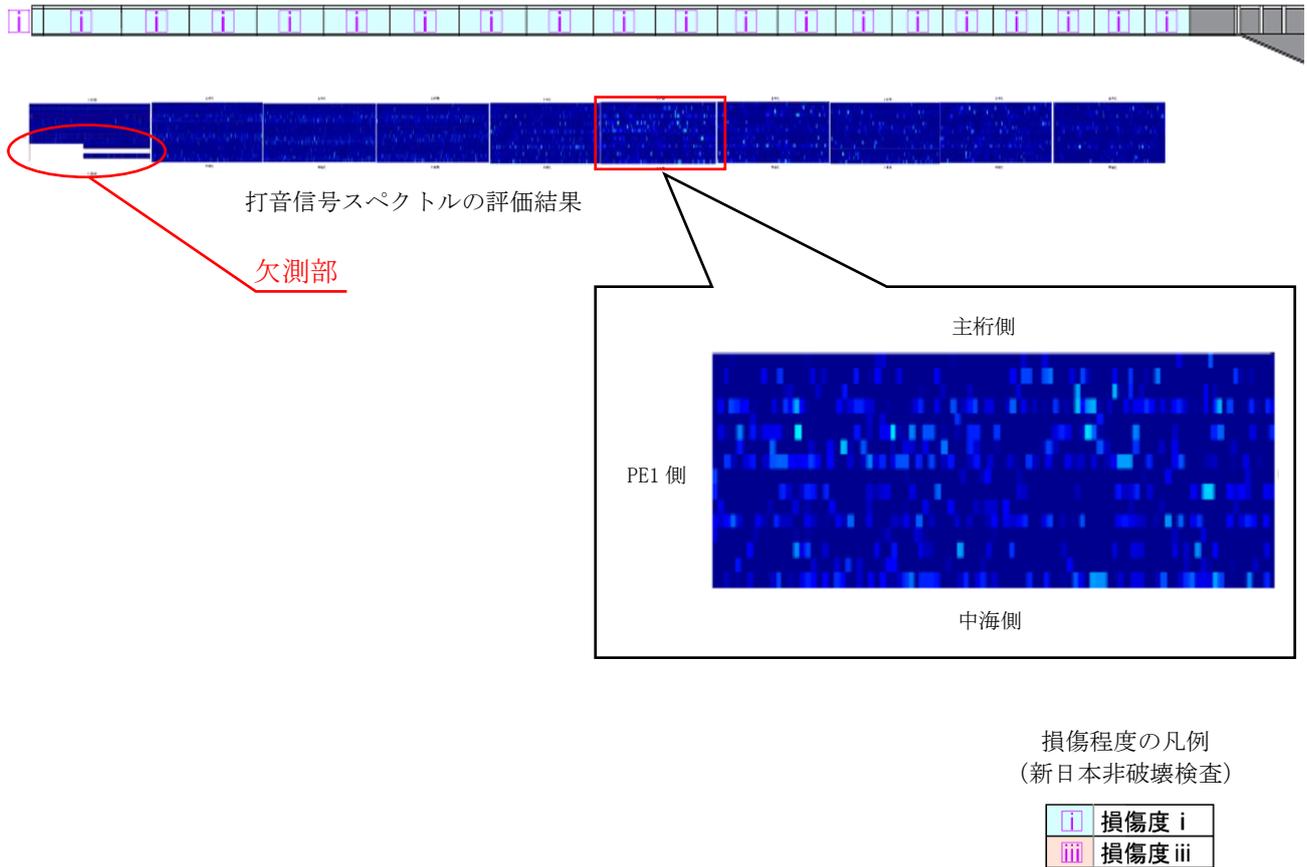


図 4-31 打音信号スペクトルの評価結果（打音機能付飛行ロボット【新日本非破壊検査】）

(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、化学的侵食など）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考えられるが、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。

## 5. 実証試験結果の評価

### 5-1 ロボット技術の諸元等一覧

本実証試験に適用したロボット技術の諸元等を技術ごとに整理し下表にまとめた。なお、下記情報は本実証試験実施時点（2018年8月）のものであり技術改良に伴って更新が必要になる。

表 5-1 各ロボット技術諸元一覧

技術名称	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』
開発者	三井住友建設	ジビル調査設計
江島大橋の作業エリア	海上（台船）	—
	橋上	○（支承撮影時）
	桁内	○
ロボット等資機材の搬入方法	海上	非常駐車帯にトラックで運搬し、防護柵撤去後スロープを設置して歩道内に搬入
	橋上	
	桁内	
交通規制	不要	片側歩道の通行止めロボット仮置のため夜間通行止め
配置作業員	作業指揮者、安全監視員、点検作業員	作業指揮者、安全監視員、ロボット操作者、点検技術者、補助作業員、交通誘導員、船舶監視員、海上作業員（台船航行、警戒船）
資格要件等	不要（荷揚げにクレーン等を用いる場合は「玉掛け技能講習」が必要となる。）	車両系建設機械（整地・運搬・積込・掘削）特別教育 または不整地運搬車技能講習・特別教育 橋上作業（歩道）：道路使用許可
天候による安全基準（江島大橋にて）	桁内作業は天候の影響なし タラップ昇降時の雨天・強風は注意	雨天中止 平均風速 7m/s 以上中断・中止
ロボットの電源	バッテリー駆動 桁内換気のため、地上に配置した発電機より送風機に給電	ディーゼルエンジン ロボットに搭載した発電機で機材への給電
ロボット操作難易度（江島大橋での実績） 使用する測定装置	短時間の操作指導で使用可能（地元コンサルタント実施） カメラ（静止画 1280×720）	短期間の操作指導で使用可能（開発者が実施） ビデオカメラ（動画 1920×1080）
現地で実施する作業	画像データ取得	画像データ取得 その場で損傷評価可能
計測位置の管理方法	型枠目地を目印に撮影位置決定 補助作業員が計測位置をチェック	地覆のマーキングと併せ、型枠跡を目印に位置を確認 補助作業員が計測位置をチェック
計測データの位置特定	撮影画像内の特徴的な箇所から位置把握	画像解析後に展開画像を図面に整合させ位置特定
計測データの現地確認	手元のタブレット端末で画像確認 全体の画像解析はデータを持ち帰った後に実施	リアルタイムに収録結果を橋上のモニターで確認し、損傷をリアルタイムに把握可能
損傷程度把握に要するデータ	オリジナル画像	現地での目視確認結果 オリジナル画像を接合した展開画像
解析・評価に使用するソフトウェア	点検カメラ・マルチビューワ（日立製）：ひびわれ長さ、幅測定	Kuraves-Th（クラボウ製）：画像接合、損傷図化
ひびわれ幅・長さの判読方法	デジタルクラックスケール	クラックスケール（現地撮影時に対象物に宛がう） デジタルクラックスケール
その他技術の特徴	高感度カメラのため低光量での撮影が可能	アームにクラックスケールの他、回転式打診装置を装着し打音検査による浮きの検出も可能

表 5-2 各ロボット技術諸元一覧

技術名称 開発者	二輪型マルチコプタ 富士通	打音機能付飛行ロボット 新日本非破壊検査
江島大橋の 作業エリア	海上（台船） 橋上 桁内	○ ○ -
ロボット等 資機材の搬 入方法	海上 橋上 桁内	台船に小型船で運搬可能 非常駐車帯に車両を止め、搬入
交通規制	片側歩道の通行止め	片側歩道の通行止め
配置作業員	作業指揮者、安全監視員、ロボット操 作者、ケーブル操作者、運用指揮者、作業 監視員、補助作業員、交通誘導員、船舶 監視員、海上作業員（台船航行、警戒 船）	作業指揮者、安全監視員、データ管理 者、ロボット操作者、ケーブル操作者、 補助作業員、交通誘導員、船舶監視員、 海上作業員（台船航行、警戒船）
資格要件等	UAV の飛行：国土交通省（大阪航空 局）への許可申請 海上作業：境海上保安部への許可申請、 関連漁協への連絡 橋上作業（歩道）：道路使用許可	UAV の飛行：国土交通省（大阪航空 局）への許可申請 海上作業：境海上保安部への許可申請、 関連漁協への連絡 橋上作業（歩道）：道路使用許可
天候による安全基準 （江島大橋にて）	雨天中止 平均風速 5m/s 以上中断・中 止	雨天中止 平均風速 5m/s 以上中断・中 止
ロボットの電源	橋上に配置した発電機よりロボットに有 線給電	橋上に配置した発電機よりロボットに有 線給電
ロボット操作難易度 （江島大橋での実績）	特殊スキルを要す （開発者が実施）	特殊スキルを要す （開発者が実施）
使用する測定装置	カメラ GoPro（4K 動画 3840×2160）	打音、集音装置
現地で実施する作業	画像データ取得	打音データの収録
計測位置の管理方法	型枠目地を目印に撮影位置を目視確認 補助作業員が計測位置をチェック 桁下の撮影位置管理が課題	型枠目地を目印に計測位置を目視確認 10m 毎に配置した視準ポールを LRF で 把握し、位置確認
計測データの位置特定	画像解析後にオルソ画像を図面に整合さ せ位置特定	LRF により位置を特定
計測データの現地確認	数フライト毎に画像を保存し、その場で PC で画像確認のみ実施 全体の画像解析はデータを持ち帰った後 に実施	リアルタイムに収録結果を橋上のモニタ で確認 ラフな状態であれば損傷（浮き）をリア ルタイムに把握可能
損傷程度把握に要するデータ	オリジナル画像から画像解析により作成 したオルソ画像	打音解析結果
解析・評価に 使用するソフトウェア	Photoscan（AgiSoft 製）：SfM 解析 クラックスケッチソフト（富士通製）： 損傷図化	自社製解析プログラム
ひびわれ幅・長さの判読方法	デジタルクラックスケール 画像解析による抽出（開発中）	-
その他技術の特徴	3D モデルを用いた維持管理システムへ の展開可能 （富士通開発システム）	カメラを搭載し、打音検査結果とリンク することも可能（開発中）

## 5-2 地元コンサルタントによるロボット技術の評価

地方自治体が管理する橋梁点検業務は主として地元企業が担っていることから、本プロジェクトではロボット技術開発チームと地元コンサルタントの協力体制のもと実証試験を実施した。地元コンサルタントの点検技術者にユーザの立場からロボット技術の計測性能および作業性について評価して貰った結果を表 5-3、表 5-4、表 5-5 及び表 5-6 にまとめた。

表 5-3 橋梁点検ロボットカメラ 評価表

技術名称		橋梁点検ロボットカメラ
開発者		三井住友建設
評価者		サンイン技術コンサルタント ヨナゴ技研コンサルタント
計測準備	機材の搬入・搬出	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンパクトかつ比較的軽量で人力による搬入出が可能だが、三脚等はもう少し軽量化が必要</li> <li>桁内での移動時はすべて手持ち移動のため、もう少し軽量かつ小型であると持ち運びやすい。</li> </ul>
	ロボット準備	<ul style="list-style-type: none"> <li>設置作業は比較的簡易だが、上方を撮影する場合は数人で支えながら作業をする必要がある。ボールの自動昇降機能があるとよい。</li> <li>機材全体的に一体性があり、撮影中の移動時も効率的な形状、性能であれば作業効率も向上すると思われる。</li> </ul>
	その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>荷揚げにクレーン等を用いる場合は「玉掛け技能講習」が必要となる</li> </ul>
本計測	ロボット操作の難易度	<ul style="list-style-type: none"> <li>カメラの据え付け方法は単純なので、一度の研修で対応可能</li> <li>操作は比較的簡易で、理解しやすい</li> <li>カメラの撮影方向を変更する際の自動移動が遅いため、撮影位置の微調整に時間を要する</li> <li>エラーの理由がわからないため、エラーコードなどの表示があるとよい</li> </ul>
	人員の配置人数・役割分担	<ul style="list-style-type: none"> <li>搬入出時に人員が必要 据え付けに 2 人、カメラ位置調整および撮影は 1 人で可能</li> </ul>
	計測位置の管理方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>現地作業上は撮影範囲の管理は容易だが、損傷図の作成を踏まえると計測位置の管理方法が不十分であった</li> <li>カメラ位置と対象物の距離などから計測位置情報を管理できるとよい</li> </ul>
	ロボットのオペレーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>タブレットの操作で誰でも可能</li> <li>タブレット操作後のカメラの動作が遅れるため慣れるまで時間を要す</li> <li>撮影時間が長い</li> </ul>
	計測データの確認方法 (計測漏れ、データの不備がないか現地での確認)	<ul style="list-style-type: none"> <li>一部データに不足やピンぼけなどの不備があった</li> <li>タブレット上でのフォルダおよびファイル管理となる</li> <li>フォルダの中にたくさんの JPEG ファイルが格納されるだけなので、不備や撮影ミス等は気がつきにくい</li> <li>撮影後のデータ移行・管理方法も検討が必要</li> <li>カメラ性能を上げ 1 枚の撮影範囲がもっと広範囲に設定できれば良いと思う</li> <li>現地での撮影時に自動で連続写真から面を作成できれば、現地での確認ができ計測漏れを防止できる。</li> </ul>
	リスク管理について	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業員、機材昇降時は、落下防止対策が必須</li> <li>据え付け時のカメラ転倒の可能性あり</li> </ul>
	その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造物等の状況（形状等）により、撮影範囲等の設定に技術的な指導や経験値が要求される</li> <li>カメラの電池残量をタブレット上で確認できると良い</li> <li>各種エラーの対応方法が必要</li> </ul>
内業	損傷程度判定までのプロセス	<ul style="list-style-type: none"> <li>PC でのひびわれ確認方法が Windows 標準搭載の Viewer によるもので、確認漏れを起こしやすい</li> <li>ひびわれ確認時に、全体の撮影範囲と現在の確認位置との関係がわかるような Viewer ソフトが必要</li> <li>0.2mm 幅を観測するためには画質がやや低い</li> <li>写真の閲覧作業に時間を要する。</li> <li>表面傷、ひびわれの区別がつきにくい</li> </ul>
	データ容量	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 ブロック（目地間）あたり 20~30MB。さほど容量は大きくないので、作業性に問題はない</li> <li>全体で 2.5GB 程度</li> </ul>
	PC の要求性能	一般的なタブレットでストレスなく作業可能
	総評	<ul style="list-style-type: none"> <li>橋桁内の悪条件下でも使用可能で、機能・作業性など優れている。</li> <li>固定式であり実業務として対象となる案件は現状そう多くはないと感じられるが、高所作業車が入れない狭小な搬入路等の場合、利用可位置がある。</li> <li>ただし、現地作業は比較的容易であるが、内業の操作性があまり良くないのでソフトの改善が望まれる。（作業している画像と全体位置の把握等をリンクさせるとさらに作業効率の向上が期待できる。）</li> <li>改善点としては、①機材の重量が重い点。②タブレットとカメラの連動性（速さ）、③取得データ（JPEG）の管理や確認がしにくい点が挙げられる。機材の電源も複数箇所あるため、一括管理できると良い。位置管理方法や撮影後の処理方法などが改善できれば、実作業での使用は可能である。</li> </ul>

表 5-4 橋梁点検支援ロボット『見る・診る』 評価表

技術名称		橋梁点検支援ロボット『見る・診る』
開発者		ジビル調査設計
評価者		西谷技術コンサルタント
計測準備	機材の搬入・搬出	<ul style="list-style-type: none"> <li>・（片押しでの全橋連続調査ではなく）江島大橋のような長大橋などで特定の部位の調査のために用いる場合は、準備効率が良いとはいえない</li> <li>・片側歩道の通行止めが必要</li> <li>・調査期間はロボット仮置きのため夜間も片側歩道の通行止め</li> </ul>
	ロボット準備	<ul style="list-style-type: none"> <li>・狭隘空間のため各種ユニット組立ての作業性が悪い</li> <li>・組立てに工具が不要のため工具の落下の可能性なし</li> <li>・組立てのミスが生じにくい工夫がされている</li> </ul>
	その他	車両系建設機械（整地・運搬・積込・掘削）特別教育 または、不整地運搬車技能講習・特別教育
本計測	ロボット操作の難易度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・クラックスケールを当てる作業に慣れが必要である</li> <li>・一連の作業は比較的容易であり、少し経験を積めば誰でも操作可能</li> <li>・クラックゲージを内蔵した撮影機材（カメラ）を搭載することにより作業効率を上げることも検討する。 ※市販の（安価な）カメラを用いるという趣旨から乖離</li> </ul>
	人員の配置人数・役割分担	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ロボットの操縦と補助作業員が必要</li> <li>・リアルタイムに画像を見ながら点検も可能なため、点検技術者と補助作業員が兼務できる</li> </ul>
	計測位置の管理方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地覆のマーキングと併せ、型枠目地を目印に位置を確認</li> <li>・点検補助員が完了箇所をチェック（タブレット PC）しながら点検を実施</li> <li>・鉛直ロッドとカメラユニットの操作を基に計測位置を座標管理できると内業の効率化が図れる</li> </ul>
	ロボットのオペレーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現地でひびわれを確認しながらの作業となり、広範囲にわたる連続調査では多少スピード感に欠ける</li> <li>・現場作業において損傷程度判定に役立つ（打音等含め）計測のバリエーションが売りだが、調査の目的によっては高性能、多機能カメラの搭載により現場作業の効率化と内業作業へのシフトも検討する必要あり</li> </ul>
	計測データの確認方法 （計測漏れ、データの不備がないか現地での確認）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・オペレータがリアルタイムで保存データを確認することが可能で、加えて補助員が完了箇所のチェックを行う体制により計測漏れの可能性は低いと思われる</li> <li>・現地確認という意味においては、本ロボットシステムの特性から（克服すべき）課題は特に見当たらない</li> </ul>
	リスク管理について	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ドローンと異なり、暴走の心配はない。ただし、機材の接触等による破損・落下には、注意が必要。（接触防止用カメラも設置され配慮はされている）</li> </ul>
	その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・点検範囲はロボット構造により制約を受ける</li> <li>① 箱桁のウェブ高と鉛直ロッド長との関係</li> <li>② 下床版の横断方向幅と水平アーム長との関係</li> </ul>
内業	損傷程度判定までのプロセス	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現場作業中にひびわれを確認でき、その部分の近接写真が取れるため、ひびわれ幅の評価をし易い</li> <li>・現場で画面を確認できるため、ひびわれ幅に限らず実際に近接目視する感覚で、損傷程度判定ができる</li> <li>・画面上でクラックゲージの移動は可能であり、現場でのオペレータの作業を再現できる</li> <li>・調査面に対し一定の離間を保って撮影するため写真の歪みは小さい</li> <li>・現場作業において損傷程度判定に役立つ（打音等含め）計測のバリエーションが売りだが、調査の目的によっては高性能、多機能カメラの搭載により現場作業の効率化と内業作業へのシフトも検討する必要あり</li> </ul>
	データ容量	—
	PCの要求性能	一般的な PC で作業可能である。
	総評	<ul style="list-style-type: none"> <li>・江島大橋では、歩道への乗入れに問題があったが、一般的な道路橋（歩道幅員、橋梁規模、防護柵の有無等）であれば乗入れに大きな支障はないと思われる。</li> <li>・歩道幅員が 2.0m 程度以上あれば、歩行者も含め「通行止め」の必要はない。また、歩道がない幅員 4～5 m 程度の橋梁についても「片側通行規制」により作業が可能である。</li> <li>・箱桁橋（江島大橋）、中空床版橋など外周が一樣で大規模な橋梁に対し T 桁橋、鉸桁橋、トラス橋、並列橋等外周が比較的複雑な中小規模の橋梁で特に優位性が認められる。</li> <li>・装着ユニットを自由に選択できるところにシステムの優位性があり、他に打音調査や高圧洗浄の装置等も装着可能である。</li> <li>・現状では市販のカメラを搭載しているが、今後は高性能、多機能なカメラを搭載することにより、現場作業や内業の省力化も可能である。（関連技術の進歩に対応できる）</li> <li>・オペレータが専門的な技術を有している場合、損傷の計測のみならず、現場作業時に損傷程度の判定や損傷原因等について考察することができる。</li> </ul>

表 5-5 二輪型マルチコプタ 評価表

技術名称		二輪型マルチコプタ
開発者		富士通
評価者		アサヒコンサルタント
計測準備	機材の搬入・搬出	<ul style="list-style-type: none"> <li>歩道に設置する電源車は、コンパクトな設計となっている</li> <li>片側歩道の通行止めが必要</li> </ul>
	ロボット準備	<ul style="list-style-type: none"> <li>台船・橋上の2チームに分かれての準備</li> </ul>
	その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>UAVの飛行：国土交通省（大阪航空局）への許可申請</li> <li>海上作業：境海上保安部への許可申請、関連漁協への連絡</li> <li>橋上作業（歩道）：道路使用許可</li> </ul>
本計測	ロボット操作の難易度	<ul style="list-style-type: none"> <li>難易度がかなり高い</li> <li>地元企業では対応が困難</li> <li>電気に関する知識の習得が必要</li> <li>台船上の作業員と橋上の作業員間での、より良い意思疎通方法を確立する必要がある</li> </ul>
	人員の配置人数・役割分担	<ul style="list-style-type: none"> <li>最低3人で可能ということだが、現実的には厳しい</li> </ul>
	計測位置の管理方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>型枠目地を基準に目視確認</li> </ul>
	ロボットのオペレーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>難易度がかなり高い</li> <li>地元企業では対応が困難</li> <li>操縦者の育成が不可欠</li> </ul>
	計測データの確認方法 (計測漏れ、データの不備がないか現地での確認)	<ul style="list-style-type: none"> <li>写真の撮影枚数が膨大なため、現地では部分的な確認となる</li> </ul>
	リスク管理について	<ul style="list-style-type: none"> <li>ドローンがケーブルでつながれているため、安全度は高い</li> <li>ドローンの信頼性の向上が必要</li> </ul>
	その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>GoProの絞り調整できない。</li> <li>柔軟にマニュアル調整できるカメラの選定。</li> </ul>
内業	損傷程度判定までのプロセス	<ul style="list-style-type: none"> <li>一般的なPCでの処理作業である</li> <li>AI等による自動化が望まれる</li> </ul>
	データ容量	<ul style="list-style-type: none"> <li>橋脚撮影枚数 10240枚 容量 21.8GB</li> <li>桁 撮影枚数 8883枚 容量 21.4GB</li> <li>全ての点検データを記録・保管するには大容量の記憶媒体が必要になる。</li> </ul>
	PCの要求性能	Windows10 64bit(メモリ 16GB)
	総評	<p>現在の一般的なドローン活用の状況を前提とした場合、優位性の高いシステムだと感じる。しかし、ドローン本体の信頼性が低く、操作に高度なテクニックが要求されることから、地元コンサルとしては手を出しづらい。将来的には、ドローンの活用は必須のため、ドローンの信頼性が向上し、自動運転が可能になれば運用したいと感じる。</p> <p>しかし、内業処理ソフトが不十分で、内業処理のノウハウの蓄積もないため、現在の人力に頼る作業からロボットの活用に移行するには、関係者の意識改革が必要だと感じる。</p> <p>(ロボット技術は、現在の人力に頼る作業の延長線上にあるものではなく別物という前提で様々な条件をつめなければいけないのではないかと)</p>

表 5-6 打音機能付飛行ロボット 評価表

技術名称		打音機能付飛行ロボット
開発者		新日本非破壊検査
評価者		荒谷建設コンサルタント
計測準備	機材の搬入・搬出	<ul style="list-style-type: none"> <li>【上部】 ・資機材の仮置き場等の調査ヤードを確保が必要</li> <li>・片側歩道の通行止めが必要</li> <li>【下部】 ・操縦者のための調査用足場等、調査ヤードを確保が必要</li> </ul>
	ロボット準備	<ul style="list-style-type: none"> <li>・吊り下げ架台を計画し、高欄から乗り出して作業するときの安全性を確保</li> <li>・調査箇所への歩道幅員が狭く、架台が資材の移動の邪魔になる場面が発生</li> </ul>
	その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・UAVの飛行：国土交通省（大阪航空局）への許可申請</li> <li>・海上作業：境海上保安部への許可申請、関連漁協への連絡</li> <li>橋上作業（歩道）：道路使用許可</li> </ul>
本計測	ロボット操作の難易度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ロボット操作には<b>相当な熟練度</b>が求められる</li> <li>・地元コンサルで調査を実施する場合には、<b>ロボット操作者養成のためプログラム（ロボット構造および操作に関わる講習～実地訓練等）を完了した技術者を育成する必要がある</b></li> <li>・<b>現段階では地元コンサルで実地調査は難しい</b></li> </ul>
	人員の配置人数・役割分担	<ul style="list-style-type: none"> <li>【上部】4名 指揮者：1名、ケーブル操作者：1名、データ管理者：2名</li> <li>【下部】2名 操作者：1名、補助作業員：1名</li> <li>※安全監視員および交通誘導員は除く。</li> <li>・現段階の調査内容では妥当な人員であるが、今後、作業の簡素化・効率化を図り、上部作業2名および下部作業2名の合計4名程度で調査が実施できるようになれば良いと考える</li> <li>ジベル調査設計で使用されている上部調査機材を参考に、<b>上部作業機材を検討することにより、ケーブル操作およびデータ管理を一元化</b>できるのではないかと考える</li> </ul>
	計測位置の管理方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・調査箇所に基準ポールを設置し、<b>基準ポールをLRF（レーザーファインダー）により視準し、相対計測位置を管理</b></li> <li>・現在の位置管理は、走行した場所を管理するもので、調査フィールド全体の情報（打音情報）を得ることができていない</li> </ul>
	ロボットのオペレーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>・<b>高度な技術を必要</b>とする</li> <li>・オペレーション技術を習得するための<b>技術者養成</b>をどのように実施していくかが課題</li> <li>・<b>技術の習得のため調査フィールドとなる橋梁を選定し、技術者養成並びに計測機材の性能向上</b>を図っていくことのできる施策を考えていく必要がある</li> </ul>
	計測データの確認方法 (計測漏れ、データの不備がないか現地での確認)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・<b>リアルタイムにデータ管理者が記録データを確認し、データ取得状況を確認</b></li> <li>・記録データを確認することはできるが、浮き箇所の確認はデータ分析をしないと整理することはできない</li> <li>・正確な評価はできないが、<b>汎用的な閾値をもとに調査後、浮きが発生している可能性が高い範囲を確認できるようにすると再計測等の対応が可能となり、作業の効率化を図ることができる</b></li> </ul>
	リスク管理について	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電源 OFF により、緊急停止するようになっている</li> <li>・緊急停止により、ロボットは停止することはできるが、<b>飛行停止により、ロボットが落下し、その衝撃により付属物等が落下する可能性</b>がある</li> </ul>
	その他	
内業	損傷程度判定までのプロセス	打音データ処理は <b>ブラインド分離によりプロペラ音と打音を分離し、打音のみを抽出し、健全部と浮き・剥離・ひびわれ等の発生箇所を識別、評価</b> を行う。
	データ容量	打音データ 320MB/15分 LRF データ 4.5GB/15分 カメラ画像 4.0GB/15分 ※1セクション（10m×2m）を15分で点検した想定した場合 ・全ての点検データを記録・保管するには大容量の記憶媒体が必要になる。
	PCの要求性能	CPU Core i7-6700HQ (2.6GHz/4cores) メモリ 32GB グラフィック NVIDIA GeForce GTX 970M データ収録・解析ソフト MATLAB 2013a(MathWorks 社) ・ややスペックの高いPCが必要となり、汎用のPCでは対応できない場合がある。
	総評	現時点、解決すべき課題はあるが、先に挙げた <b>解決策が施されれば運用すべき技術</b> である。ただし、要素実験では点検の現場に適用することができないので、 <b>技術の習得のため調査フィールドとなる橋梁を選定・固定し、技術者養成並びに計測機材の性能向上</b> （位置情報を基にした自動計測および制御等）を図っていくことが必要であると考え。

### 5-3 損傷程度評価に関する考察

#### 5-3-1 損傷程度の評価結果について

精度確認試験（3章参照）の結果から各ロボット技術とも十分な計測精度を有していることが分かった。実証試験の計測対象範囲においては人による近接目視点検は実施していないが、精度確認試験と同一仕様・同一条件で計測していることから、精度確認試験と同等の計測精度は確保できたと思われる。

「4-5 損傷程度の評価について」において報告したように、ロボット技術を活用して取得した情報をもとに、鳥取県橋りょう点検マニュアルに沿って損傷の抽出、損傷程度の評価を実施し、点検調書を作成することができた。また、ブロック分割による評価手法を採用したことで損傷程度の評価を効率的に実施することができた。

#### 5-3-2 損傷抽出時の留意点

各チームから提出された損傷程度の評価結果の妥当性を確認する目的で損傷程度の評価結果を計測データと照らし合わせた。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が見つかったので報告する。

##### ・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 5-1）の展開画像（図 5-2）を再確認した。図 5-3 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。

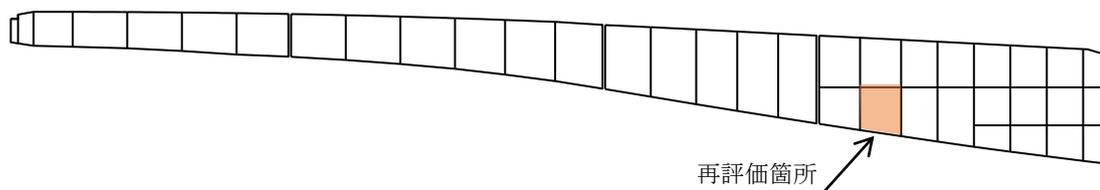


図 5-1 箱桁内部 側面（南側）

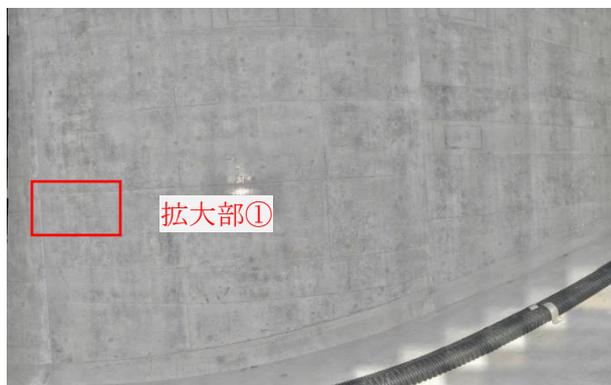


図 5-2 ブロック単位の展開画像

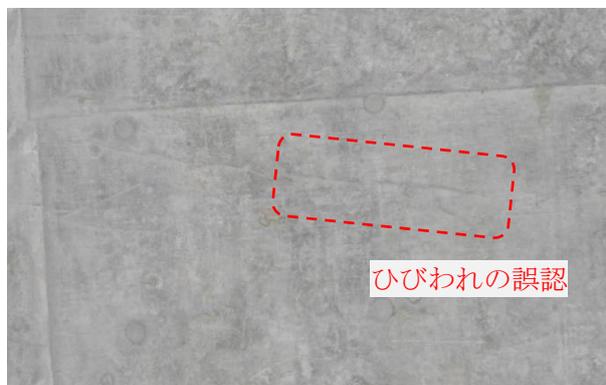


図 5-3 展開画像 拡大部①

・留意点2「ひび割れ幅の違い」「ひび割れの未抽出」

橋梁点検支援ロボット『見る・診る』【ジビル調査設計】と二輪型マルチコプタ【富士通】の二つのロボット技術で橋梁上部工の同一ブロック（図 5-4）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。ちなみに二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 5-5 および図 5-6 にそれぞれの展開画像を示す。二つ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。二つ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 5-7 および図 5-8 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 5-9 および図 5-10 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。

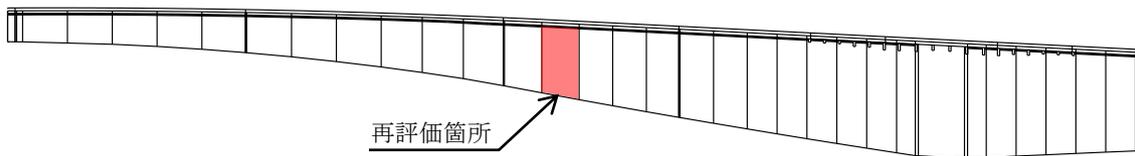


図 5-4 箱桁側面図（南側）



図 5-5 展開画像  
【ジビル調査設計】



図 5-6 展開画像【富士通】

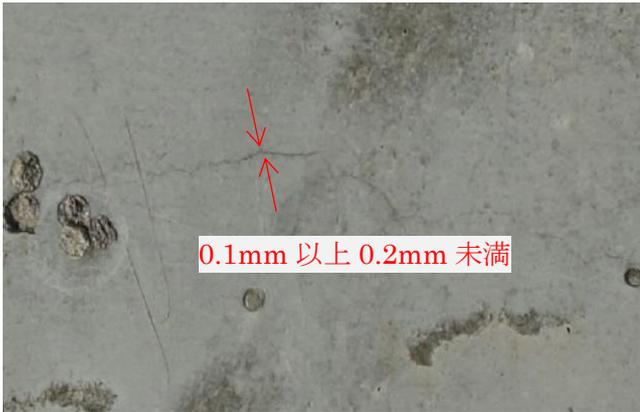


図 5-7 展開画像 拡大部①【ジビル調査設計】



図 5-8 展開画像 拡大部①【富士通】

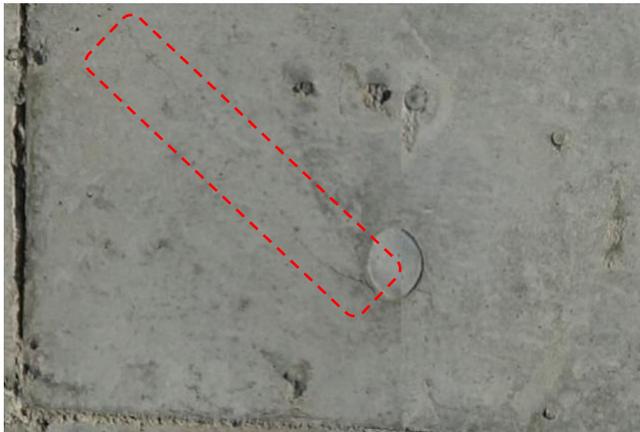


図 5-9 展開画像 拡大部②【ジビル調査設計】

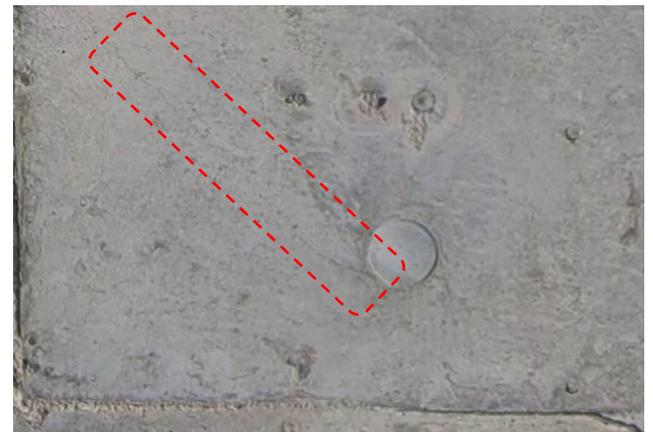


図 5-10 展開画像 拡大部②【富士通】

### 5-3-3 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 5-7 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

#### 5-3-4 総評

本実証試験で採用した4つのロボット技術は、精度確認試験によって一定レベル以上の計測精度を有することが確認されており、4つのロボット技術によって得られた計測データに基づく損傷程度の評価結果は妥当なものであった。

計測データに基づくひびわれ抽出の内容を詳細に調べたところ、「ひびわれの誤認」、「ひびわれ幅計測結果の違い」あるいは「ひびわれの未抽出」などが生じる可能性があることが分かった。それらの一部はロボット技術の活用が進み計測データから損傷程度を評価することに慣れることによって解決されるものであり、全体として損傷程度の評価結果に大きな違いを生じるようなものではなかった。

ロボット技術を活用するうえで重要なことは、計測時と同じ仕様及び計測条件で精度確認試験を実施して当該ロボット技術が橋梁点検に必要とされる性能を有することを事前に確認するとともに、ロボット技術を活用した橋梁点検の実施段階では、ロボット技術の性能を十分に発揮できる条件下で計測し、計測データを都度チェックしてデータの品質と計測漏れがないことを確認することである。

今後の課題としては、計測データから損傷を抽出する技術の開発・改良、ロボット技術を活用するための点検技術者の教育などが挙げられる。

## 6. 実用化に向けた基礎資料作成

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、付帯設備や安全対策を含めた積算資料などの基礎資料が必要になる。

江島大橋の実証試験結果をベースに、4つのロボット技術の技術資料として「ロボット技術シート(※)」と、江島大橋主橋梁部全体を4つのロボット技術を活用して点検した場合のコストシミュレーションに基づく積算のための基礎資料を作成した。

### 6-1 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

橋梁管理者あるいは点検技術者が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、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が必要になる。

本実証試験では江島大橋を試験フィールドとして点検への適用性を検証するとともに、4つのロボット技術に対し、精度・性能確認試験を実施し十分な精度・性能を有していることが実証された。実証試験をベースに「ロボット技術シート」を作成した(参考資料3参照)。

(※) 本プロジェクトの実証試験の結果を踏まえて作成した「ロボット技術シート」は、国土交通省が定めた「点検支援技術の性能カタログ」に相当するものであるが、記載項目が若干異なることと本実証試験において技術が実証されたことから別名称「ロボット技術シート」とした。

## 6-2 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

江島大橋プロジェクト実証試験では、ロボット技術開発チームメンバーと地元コンサルタントの点検技術者がロボット技術毎に「実証試験チーム」を組織し、それぞれの役割分担を定めて、実際の橋梁点検業務と同じ体制で実証試験を実施した。

実証試験の実施に際しては、本プロジェクトの事務局メンバーが立ち会って点検作業のサイクルタイムを記録した。実証試験に先立って、ロボット技術開発チームが装置の事前点検・調整あるいは事前テストを実施し、また地元コンサルタントの点検技術者に対してロボット技術の説明を実施したが、積算基礎資料の策定にあたってはこれらの時間は除外した。

### 6-2-1 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。

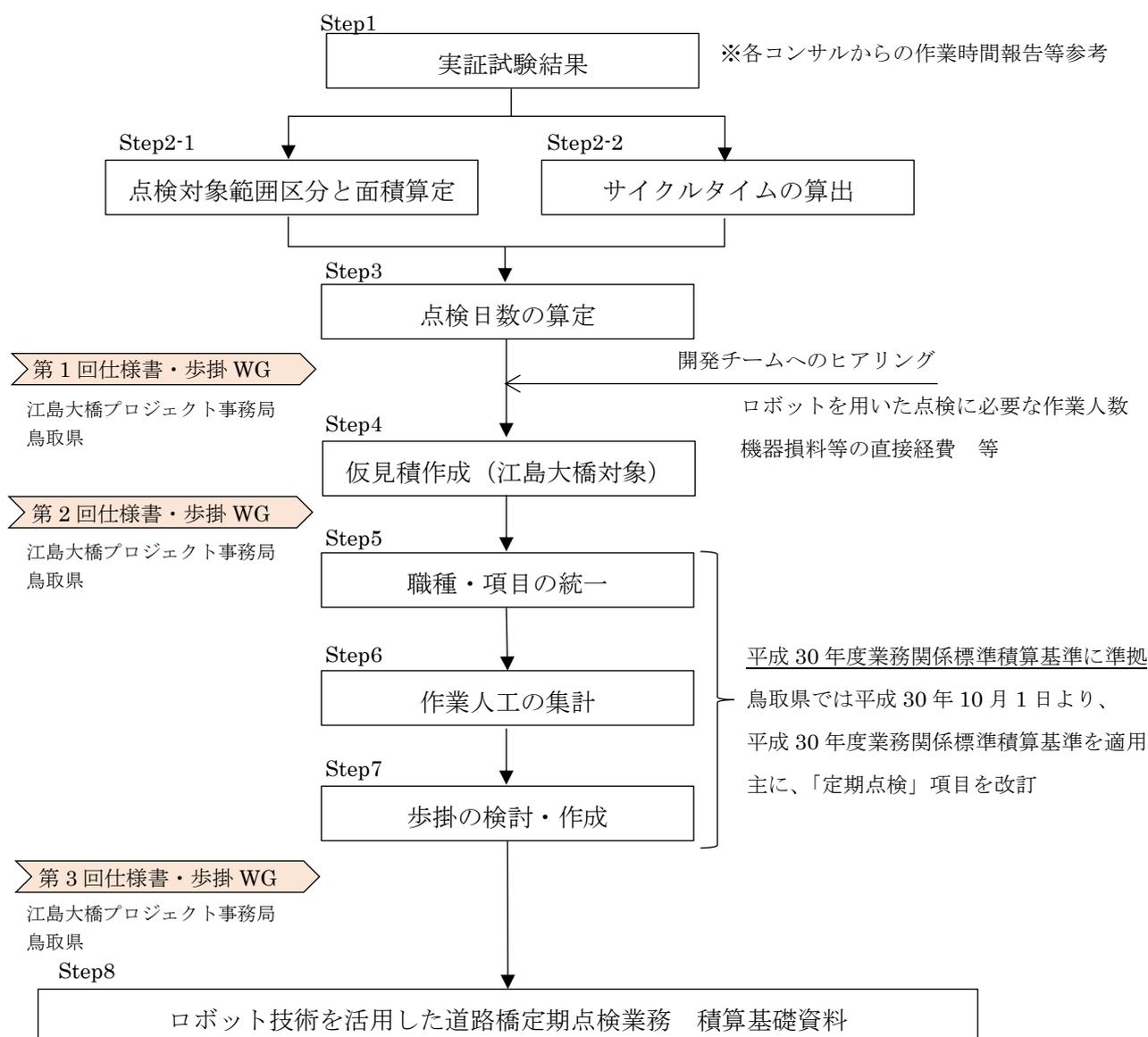


図 6-1 積算基礎資料作成の流れ

### 6-2-2 ロボット技術の点検範囲と点検面積算定

江島大橋プロジェクト実証試験では、実証試験期間や予算の制約から江島大橋主橋梁部全体の点検は実施しなかったが、積算基礎資料の作成にあたっては実証試験に参加した4つのロボット技術で江島大橋主橋梁部全体の点検を実施する前提で4つのロボット技術の点検範囲を決め、それぞれの点検面積を算定した。4つのロボット技術の点検範囲と点検面積を図6-2および表6-1に示す。

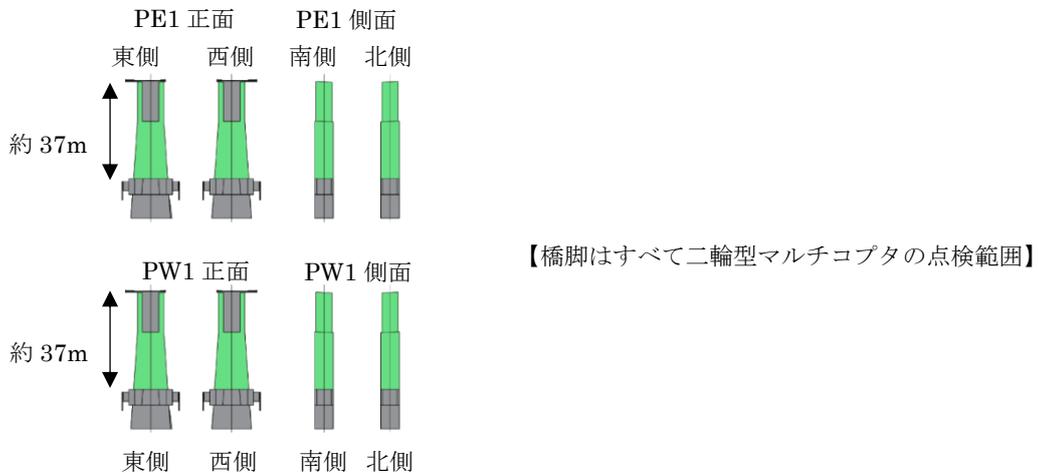
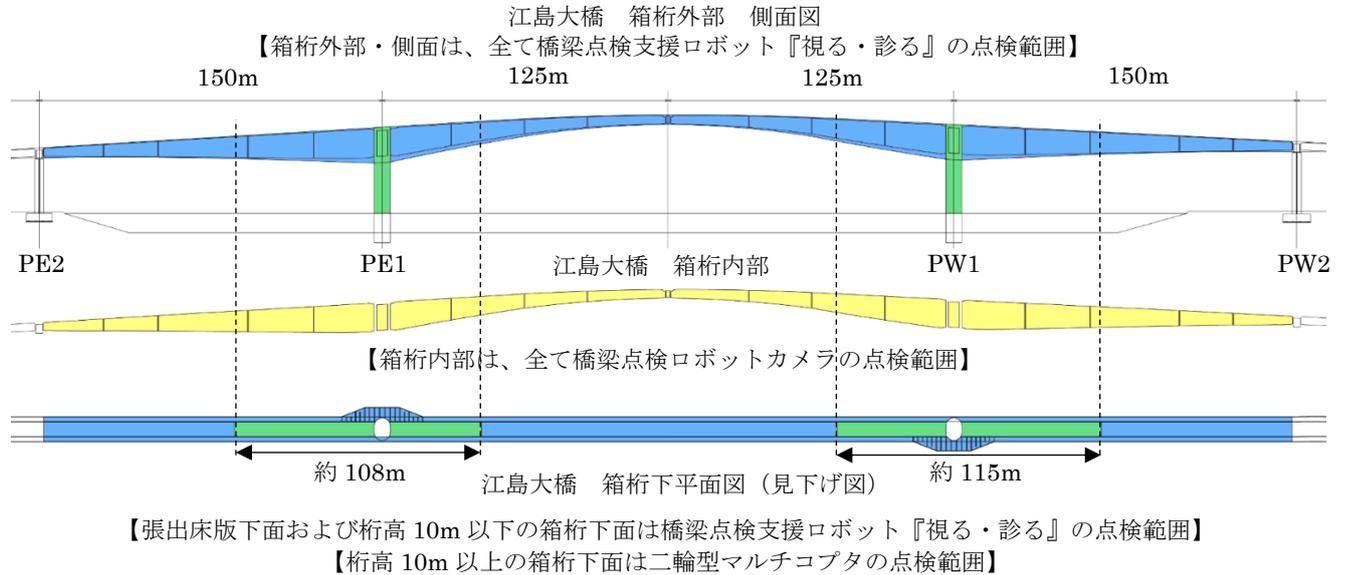


図 6-2 点検範囲

表 6-1 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>	
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>	
張出床版下面（非常駐車帯含む）		3,012 m <sup>2</sup>	
箱桁外部・下面	二輪型マルチコプタ（富士通）	2,054 m <sup>2</sup>	
橋脚		1,323 m <sup>2</sup>	
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）	1,800 m <sup>2</sup>	

### 6-2-3 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 6-2～6-5）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 6-6 にまとめた。

#### [I] 橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】

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 6-2 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』【ジビル調査設計】**

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・残置できることになったため、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 6-3 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 6-4 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 橋上:給電装置設置、動作確認	30	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 6-5 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	50
																吊り下げ		10	
																有線給電ON		10	
																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	10	
																	吊り上げ		
																データ確認		10	
																休憩	オペ2人の場合は休憩時間短縮可	10	
																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 6-6 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 (m2/日)	パーティ数	作業人員数 (1パーティ)
		時間 (分)	点検面積 (m2)				
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
		三井住友建設	調査面積	16,000								
	調査日数	27	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	m2
	調査日数	0	14	3	2	2	1	1	0	0	23	日
富士通	調査面積			636	687				450	450	1,800	m2
	調査日数	0	0	1	1	0	0	0	1	1	6	日
新日本非破壊検査	調査面積				1,400	1,400					2,800	m2
	調査日数	0	0	0	8	8	0	0	0	0	16	日

### 6-2-4 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平成30年度業務関係標準積算基準（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6-3に業務委託料の構成改定案を示す。

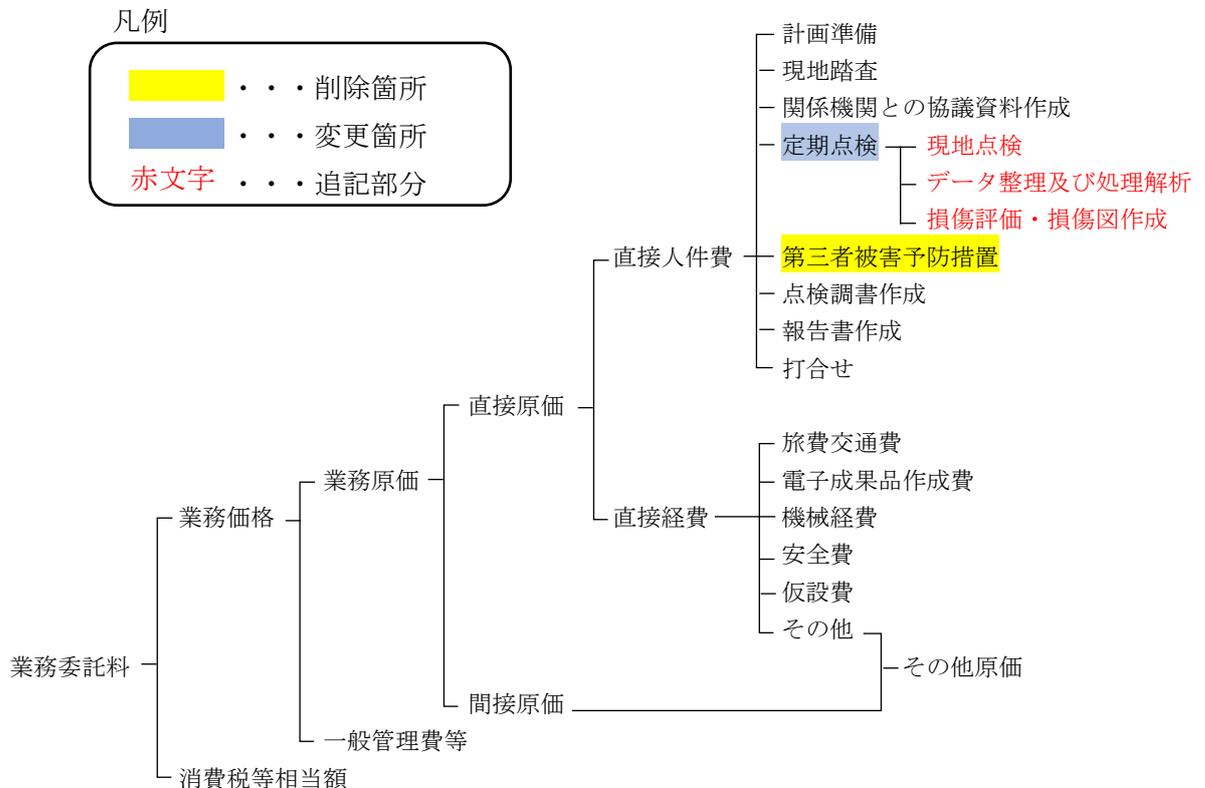


図 6-3 業務委託料の構成 改定案

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 ロボット技術ごとの歩掛案

**【I】 橋梁点検ロボットカメラ【三井住友建設】**

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』【ジビル調査設計】**

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

**【Ⅲ】 二輪型マルチコプタ【富士通】**

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【新日本非破壊検査】**

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「6-2-2 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「ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務積算基準」を用いて試算したところ、積算額約 7,800 万円となった。（参考資料 4）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。

## 参考資料

参考資料 1 実証試験における安全管理

参考資料 2 ロボット技術精度・性能確認試験根拠資料

参考資料 3 ロボット技術シート

参考資料 4 ロボット技術を活用した定期点検業務概算費用

参考資料 5 ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務仕様書（案）

平成 31 年 3 月発出 鳥取県

公開：公益財団法人 鳥取県建設技術センター

<http://www.tctcplaza.or.jp/front/pages/view/114>

参考資料 6 ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務積算基準

平成 31 年 3 月発出 鳥取県

公開：公益財団法人 鳥取県建設技術センター

<http://www.tctcplaza.or.jp/front/pages/view/114>

## 実証試験における安全管理

### 1. 安全衛生対策の基本事項

本プロジェクトの現場作業実施にあたって労働安全衛生関係法令を遵守し、労働者の安全に万全を期すものとする。作業の安全衛生事項として以下の基本事項を遵守・留意する。

#### 1.1 基本事項

##### 【共通】

- ① 当日の作業前には作業内容、作業手順、役割分担、指揮系統の周知、KY ミーティングを行い安全作業に努める。  
また、作業者の健康状態を把握し、無理な作業は行わせない。
- ② 使用機器は持ち込み前および作業前に動作確認を行い、不備が見つかったものは使用しない。
- ③ 作業状況に応じた保護具を着用する。(保護帽、安全ベスト、安全帯等)
- ④ 朝礼時に作業当日の天気予報を確認し、全作業者が把握しておく。
- ⑤ 作業中は、事務局に定時連絡を行い、進捗等を報告する。連絡を行う者は、朝礼時に決定しておく。

##### 【高所作業】

- ⑥ 高所作業車使用時は地盤の状態を確認し、アウトリガは最大張り出しとする。
- ⑦ 高所作業車による調査は橋梁下のみとし、橋梁上へははみ出さないこととする。
- ⑧ 高所作業時は安全帯を確実に使用する。

##### 【歩道作業】

- ⑨ 歩道上での作業時は人・機材の車道へのはみ出しがないよう安全監視員若しくは交通誘導員が監視する。
- ⑩ 橋梁上から身を乗り出す場合は、安全帯を使用する。

##### 【海上作業】

- ⑪ 海上作業時は台船の揺動によって転倒転落等しないよう足元を確認するとともに、台船際へ極力近づかないようにする。
- ⑫ 海上作業時は船舶と構造物との挟まれに十分注意する。
- ⑬ 橋脚足場上での作業時は作業前に足場の点検を実施すること。
- ⑭ 橋脚に設置した親綱に安全帯を掛けて作業を行うこと。

##### 【その他】

- ⑮ UAV の飛行は、橋面以下とし、橋面より上には飛行させない。
- ⑯ 精度確認試験用のシートは飛散しないよう複数箇所にて接着し、精度確認試験終了後には速やかに撤去を行う。また、台風等により強風が予測される場合には一時撤去を行う。
- ⑰ 作業関係車両は交通ルールを遵守し、地元車両優先の意識を持って交通災害の防止に努める。

- ⑱ 作業終了時には作業箇所周辺の点検・見回りを行い、忘れ物等ないよう確認する。
- ⑲ 火災防止のため、喫煙は所定の場所（現場事務所、車内等）とするものとし、作業中は喫煙禁止とする。
- ⑳ 作業時は定期的に休憩を取る。特に台船上での作業者は、陸上での休憩を取るよう心掛ける。
- ㉑ 熱中症対策として作業場所に水分・塩分を準備し、適宜補給を行う。

## 1.2 作業開始前までの中止基準

### 1.2.1 UAV 飛行による点検作業

- (1)作業当日に境港市または松江市に下記に示す警報が発令された場合は、作業を**中止**とする。
  - ・警報（大雨、洪水、暴風、暴風雪、大雪、波浪、高潮）
  - ・特別警報（大雨、暴風、暴風雪、大雪、波浪、高潮）
- (2)注意報（大雨、洪水、強風、風雪、大雪、波浪、高潮、雷、濃霧）が発令している場合は当日の現地の天候を確認し、事務局と作業指揮者で協議の上、作業指揮者が作業の可否（待機を含む）を決定する。
- (3)天気予報を確認し、一日を通して悪天候（**降雨予報、10分間の平均風速が5m/s以上**）の場合は事務局と協議の上、作業指揮者が作業の可否（待機を含む）を決定する。なお、天候についてはインターネット等により情報を収集する。

### 1.2.2 橋面上からのロボットカメラによる点検作業

- (1)作業当日に境港市または松江市に下記に示す警報が発令された場合は、作業を**中止**とする。
  - ・警報（大雨、洪水、暴風、暴風雪、大雪、波浪、高潮）
  - ・特別警報（大雨、暴風、暴風雪、大雪、波浪、高潮）
- (2)注意報（大雨、洪水、強風、風雪、大雪、波浪、高潮、雷、濃霧）が発令している場合は当日の現地の天候を確認し、事務局と作業指揮者で協議の上、作業指揮者が作業の可否（待機を含む）を決定する。
- (3)天気予報を確認し、一日を通して悪天候（**降雨予報、10分間の平均風速が5m/s以上**）の場合は事務局と協議の上、作業指揮者が作業の可否（待機を含む）を決定する。なお、天候についてはインターネット等により情報を収集する。

### 1.2.3 桁内におけるロボットカメラによる点検作業

- (1)天気予報を確認し、作業当日の風速（10分間の平均風速）が**10m/s以上**のときは高所作業、吊荷作業を**中止**する。風速は江島大橋の気象観測データを参考とする。

### 1.2.4 海上作業

- (1)作業当日の波高が**1.0m以上**のときは海上作業を**中止**する。波高の確認および海上作業中止の決定は海上作業担当（株）ウオタニ）の現場代理人が行う。

## 1.3 作業中の中断・中止基準

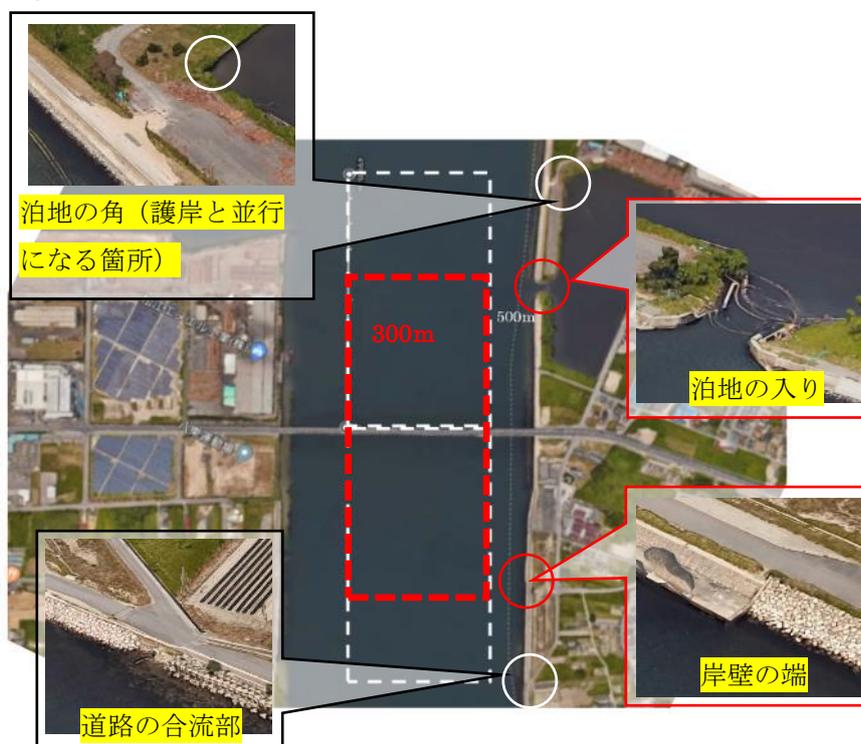
### 1.3.1 UAV 飛行による点検作業

- (1)作業中に境港市または松江市に警報（大雨、洪水、暴風、暴風雪、大雪、波浪、高潮）特別警報（大雨、暴風、暴風雪、大雪、波浪、高潮）が発令された場合は、直ちに作業を**中止**し、機材を撤収してから安全な場所に避難する。避難場所は朝礼時に事務局から作業関係者全員に周知する。
- (2)風速（瞬間風速）が**5m/s**を超えた場合は、作業指揮者が飛行を**中断（レベルⅠ～レベルⅣ）**させる。風速の計測については安全監視員が作業場所の歩道にて計測を行う。作業の再開は風速（瞬間風速）が**5m/s**以下であることを確認してから作業指揮者が決定する。また、風速（瞬間風速）が**5m/s**以下であっても、作業指揮者または UAV 操縦者が飛行するのが危険と判断した場合は飛行を**中断（レベルⅠ～レベルⅢ）**し、作業指揮者、UAV 操縦者の両名が安全と判断するまで待機する。
- (3)飛行中に風向が変わり、機体にケーブルが巻き込まれる危険があると作業指揮者もしくは UAV 操縦者が判断した場合は、直ちに飛行を**中断（レベルⅠ～レベルⅢ）**する。作業の再開は作業指揮者、UAV 操縦者の両名が安全と判断した段階で再開する。
- (4)作業中に降雨が確認された場合は飛行を**中断（レベルⅠ～レベルⅣ）**する。
- (5)作業中に雷鳴が確認された場合は、直ちに作業を**中断（レベルⅣ）**する。
- (6)濃霧により江島大橋からの視界が 1000m以下となった場合、作業を**中断（レベルⅢ～レベルⅣ）**する。視界の確認は作業開始前、UAV 飛行前に行うことを基本とし、飛行中は安全監視員が兼任で視界の状況を確認する。距離の基準は、下図の目標物を参考にする。



- (7)上記(2)～(6)の条件により**中断**した場合の中断レベルは状況に応じて作業指揮者が判断する。また、中断後は気象情報をインターネット等で確認し、天候が回復したのちに作業指揮者が安全と判断した段階で再開する。天候の回復が見込まれない場合は、事務局と協議の上、作業指揮者が作業**中止**の決定をする。
- (8)震度 3 以下の地震が観測された場合、作業を**中断（レベルⅢ～レベルⅣ）**し、作業指揮者は津波の情報を確認し、津波警報が発令された場合は作業を**中止**し、安全な場所に避難する。津波が発生しないことが確認できた場合、作業指揮者の判断で作業を再開する。  
震度 4 以上の地震が観測された場合は、直ちに作業を**中止**し、安全な場所に避難する。避難場所は朝礼時に事務局から作業関係者全員に周知する。  
また、作業場所にて緊急地震速報を受信した場合は、人命を最優先とし、周囲の状況に応じて身を守る行動をとる。
- (9)船舶が江島大橋の**500m以内**に侵入した場合に作業**中断準備**、**300m以内**に侵入した場合に作業**中断**

(レベルⅠ～レベルⅡ)とし、**300m**エリアから外れた段階で作業を再開する。なお、船舶の監視人は朝礼時に選任し、無線などにより船舶の状況を作業指揮者に逐次連絡する。距離の基準は、下図の目標物を参考にする。



江島大橋からの離隔距離と目標物

(10)その他、不測の事態が生じた場合は事務局と作業指揮者とで協議を行い、作業の中断・中止を事務局が決定する。

- |            |                               |
|------------|-------------------------------|
| ※中断 (レベルⅠ) | UAV 機体の移動や作業を行わず、その場に留まって待機   |
| ※中断 (レベルⅡ) | UAV 機体の電源を切り、ケーブルでぶら下がった状態で待機 |
| ※中断 (レベルⅢ) | UAV 機体の電源を切り、機体を台船上に降ろして待機    |
| ※中断 (レベルⅣ) | UAV 機体を歩道上に引きあげて待機            |

### 1.3.2 橋面上からのロボットカメラによる点検作業

- (1)作業中に境港市または松江市に警報 (大雨、洪水、暴風、暴風雪、大雪、波浪、高潮)、特別警報 (大雨、暴風、暴風雪、大雪、波浪、高潮) が発令された場合は、直ちに作業を**中止**し、機材を片付けてから安全な場所に避難する。避難場所は朝礼時に事務局から作業関係者全員に周知する。
- (2)風速 (瞬間風速) が**7m/s**を超えかつ断続的に吹き続けた場合 (**約 5 分間**)、作業指揮者が速やかに作業を**中断 (レベルⅡ)**する。風速の計測については安全監視員が作業場所の歩道にて計測を行い、作業場所での風速 (瞬間風速) **7m/s 以下**であることやその継続時間を確認する。作業の再開は風速 (瞬間風速) が**7m/s 以下**で安定していることを確認してから作業指揮者が再開を決定する。
- (3)作業中に雷鳴が確認された場合は、直ちに作業を**中断 (レベルⅡ)**する。
- (4)濃霧などにより江島大橋からの視界が**1000m以下**となった場合、作業を**中断 (レベルⅡ)**する。視界の確認は作業開始前に行うことを基本とし、作業中は安全監視員が兼任で視界の状況を確認する。距離の基準は、下図の目標物を参考にする。



(5) **震度 3 以下**の地震が観測された場合、作業を**中断（レベルⅡ）**し、作業指揮者は津波の情報を確認し、津波警報が発令された場合は作業を**中止**し、安全な場所に避難する。津波が発生しないことが確認できた場合、作業指揮者の判断で作業を再開する。

**震度 4 以上**の地震が観測された場合は、直ちに作業を**中止**し、安全な場所に避難する。避難場所は朝礼時に事務局から作業関係者全員に周知する。

また、作業場所にて緊急地震速報を受信した場合は、人命を最優先とし、周囲の状況に応じて身を守る行動をとる。

(6) 点検範囲の上下流 **50m**の範囲に船舶が接近した場合、水平アームを停止させ作業を**中断（レベルⅠ）**する。なお、船舶の監視人は朝礼時に選任し、無線などにより船舶の状況を作業指揮者に逐次連絡する。

(7) 上記(2)～(6)の条件により**中断**した場合、中断後は気象情報をインターネット等で確認し、天候が回復したのちに作業指揮者が安全と判断した段階で再開する。天候の回復が見込まれない場合は、事務局と協議の上、作業指揮者が作業**中止**の決定をする。

(8) その他、不測の事態が生じた場合は事務局と作業指揮者とで協議を行い、作業の中断・中止を事務局が決定する。

※中断（レベルⅠ）	ロボットの移動や作業を行わず、その場に留まって待機
※中断（レベルⅡ）	ロボットのアームを歩道上に引き上げて待機

### 1.3.3 桁内におけるロボットカメラによる点検作業

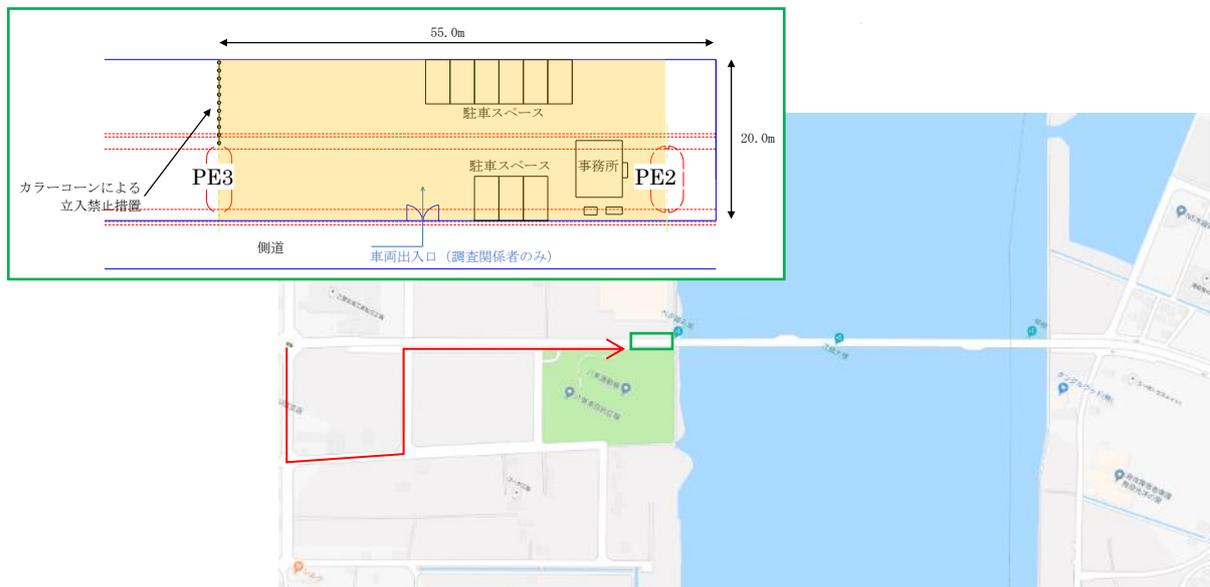
(1) 風速（10 分間の平均風速）が **10m/s 以上**となった場合は高所作業、吊荷作業を**中断**する。作業の再開は風速（10 分間の平均風速）が **10m/s 未満**になったことを確認し、作業指揮者が安全と判断した段階で決定する。風速は江島大橋の気象観測データを参考とする。

### 1.3.4 海上作業

(1) 波高が 1.0m 以上となった場合は海上作業を**中止**する。海上作業中止の決定は海上作業担当（(株)ウオタニ）の現場代理人が行う。

## 2. 現場事務所について

下図に示す位置（PE2-PE3 径間の高架橋下）に現場事務所を仮設する。車両の駐車や休憩、データの確認、機器の充電等に利用が可能である。



現場事務所位置図



現場事務所設置状況

### 3. 朝礼について

作業期間中は作業前に現場事務所にて毎朝朝礼を実施する。朝礼では当日作業に関わる全員で作業内容、作業手順、役割分担、指揮系統の周知、KY ミーティング等を行う。また、当日の天気予報を確認し、全作業者が把握しておく。ただし、台船等に乗船する場合は、出航予定の港や岸壁に直接集合して朝礼を実施することも可能とする。

下記配置予定の作業者の役割と担当者を明確にしておく。

- ・作業指揮者：作業全体の指揮、作業中止・中断・再開の決定 等
- ・安全監視員：船舶の監視、道路上ではみ出し等の監視、風速の確認（風速計携帯） 等
- ・交通誘導員：歩行者の誘導、道路上ではみ出し等の監視 等
- ・作業員：各チームの作業計画による
- ・作業補助員：各チームの作業計画による

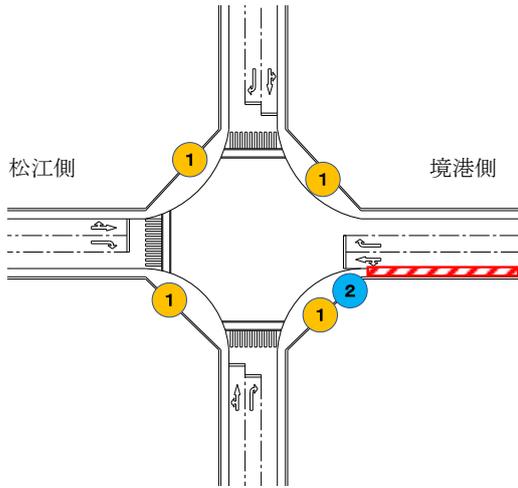
### 4. 歩道の交通規制について

歩道での作業中は北側または南側の歩道を通行止めとする。松江側、境港側の橋詰に看板および交通誘導員を設置し、江島大橋利用者を反対側の歩道に誘導する。また、南側歩道通行止めの際は、境港側に橋の途中から歩道に入ることができる箇所があるため、その箇所についてはバリケードを設置して通行禁止措置をとる。

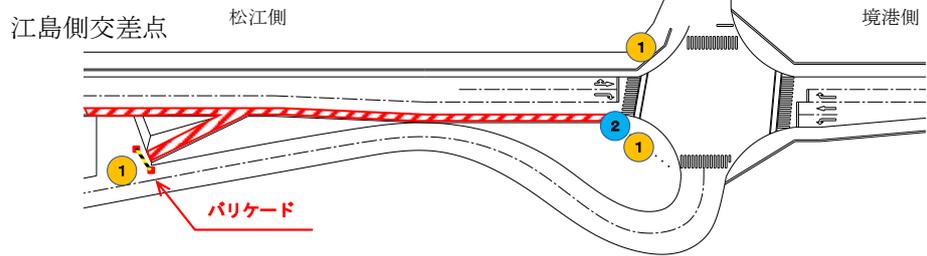
非常駐車帯は資機材の搬入・搬出時のみの停車とし、停車中は誘導員を配置し、通行車両に注意喚起を行う。



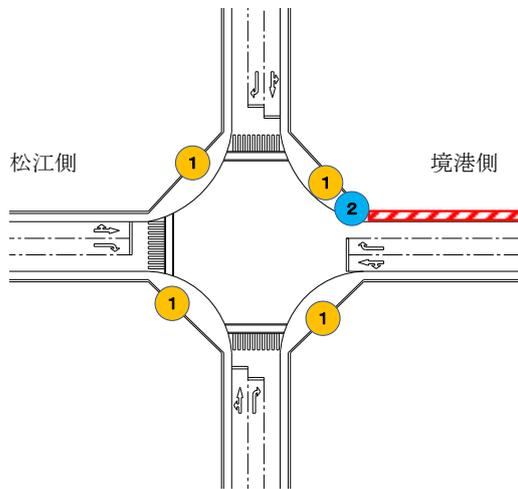
南側歩道通行止めの場合



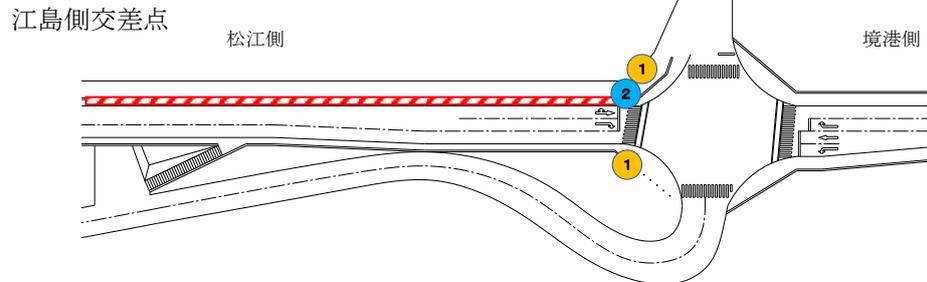
1	2
案内看板	交通誘導員
<p>橋梁調査中</p> <p>南側歩道通行止め</p> <p>北側の歩道を通行してください</p>	



北側歩道通行止めの場合



1	2
案内看板	交通誘導員
<p>橋梁調査中</p> <p>北側歩道通行止め</p> <p>南側の歩道を通行してください</p>	



渡町側交差点

## 5. 作業時間について

各種事前申請にて作業可能時間は下記に示す通りである。

作業可能時間	歩道上で作業：	5：00～19：00
	桁内作業：	5：00～19：00
	海上作業：	6：00以降 出航
		↓ 移動
		約1時間後 江島大橋に到着し、作業可能

台船上での作業者は、下図に示すように交通船で現場事務所裏の護岸（PE2 付近）から乗降が可能である。作業開始時、休憩時、作業完了時に適宜使用してもよい。



## 6. 装備品について

安全作業のため、作業内容によって以下の装備を着用し作業を行うこととする。

【共通】ヘルメット、作業着、作業靴（動きやすいもの）

【歩道作業】安全チョッキ、安全帯（身を乗出す場合）

【海上作業】ライフジャケット、安全帯（足場作業時）

【桁内作業】ヘッドライト、安全帯、手袋、マスク（適宜）

## 7. 熱中症対策について

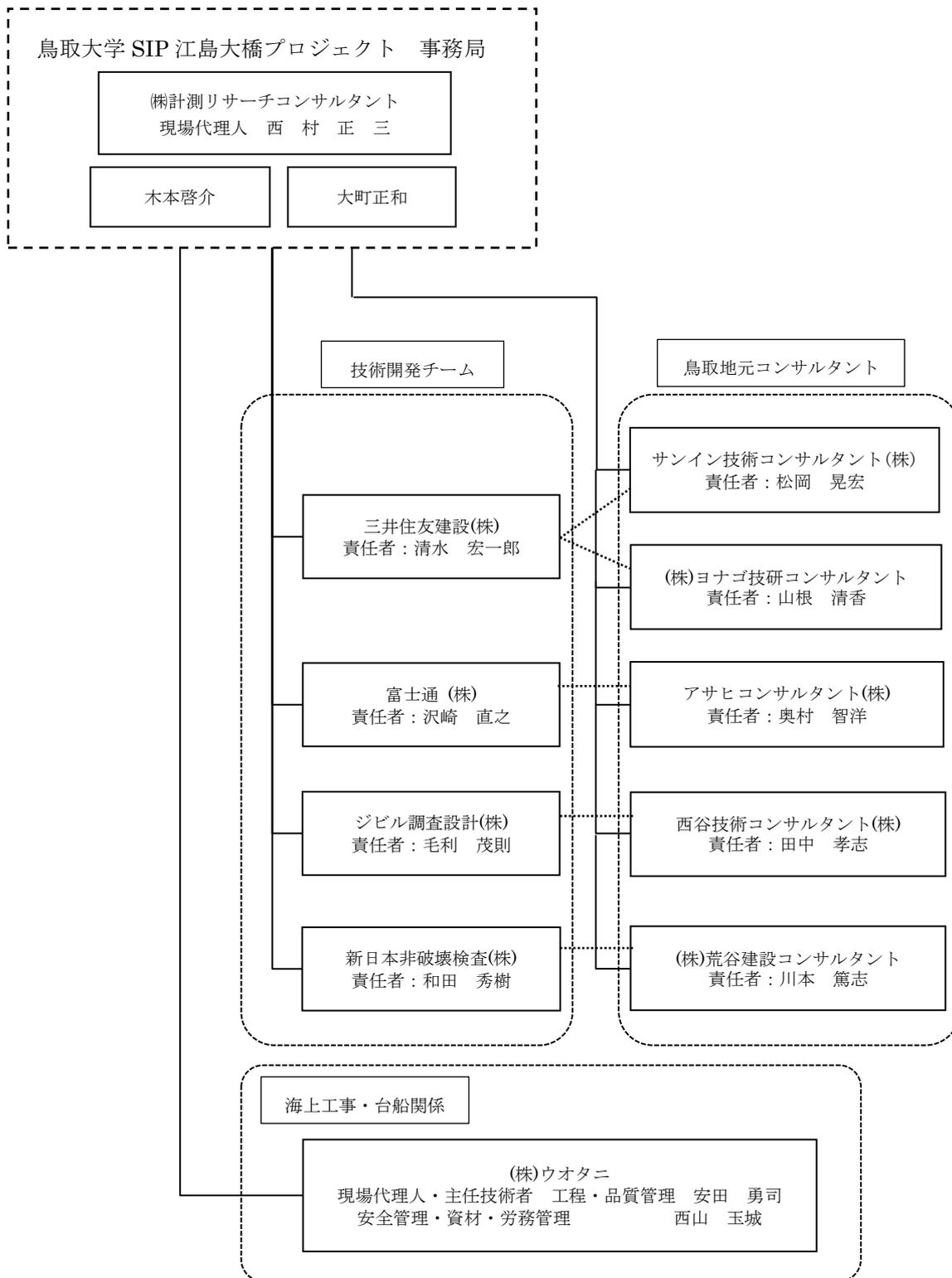
夏季作業のため熱中症対策として以下のものを準備する。特に台船上での作業は酷暑となる可能性があるため、作業には万全の体制で臨むこと。

事務所準備品（予定）

- ・ 冷蔵庫、熱中飴、スポーツドリンク、飲料、保冷剤、簡易救急セット

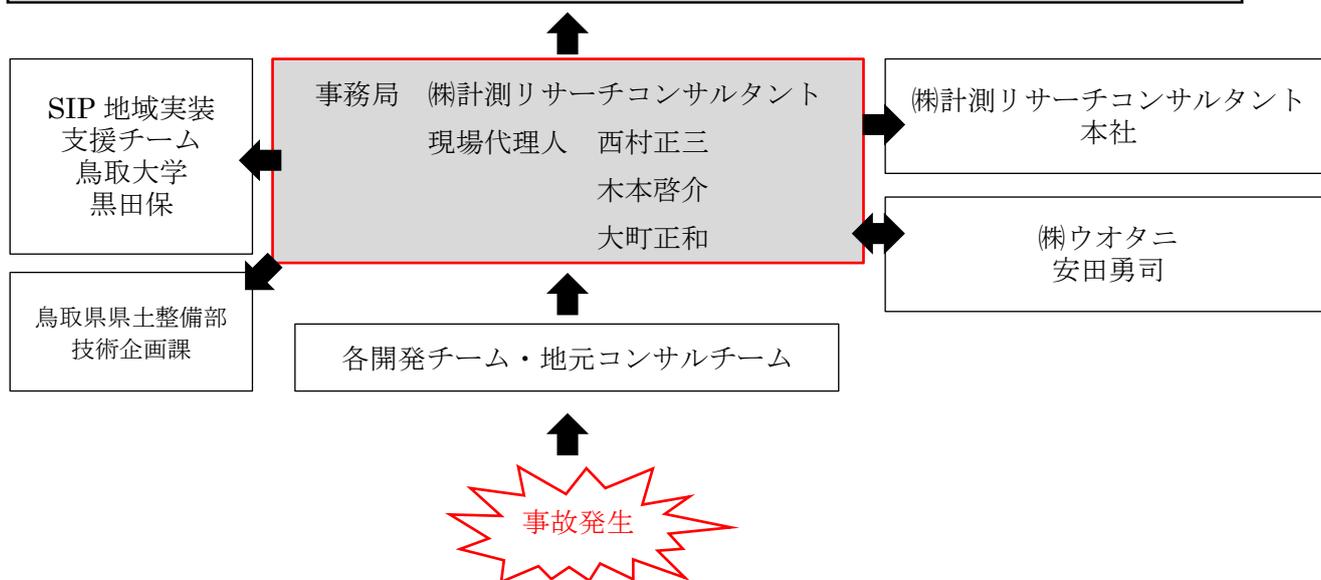
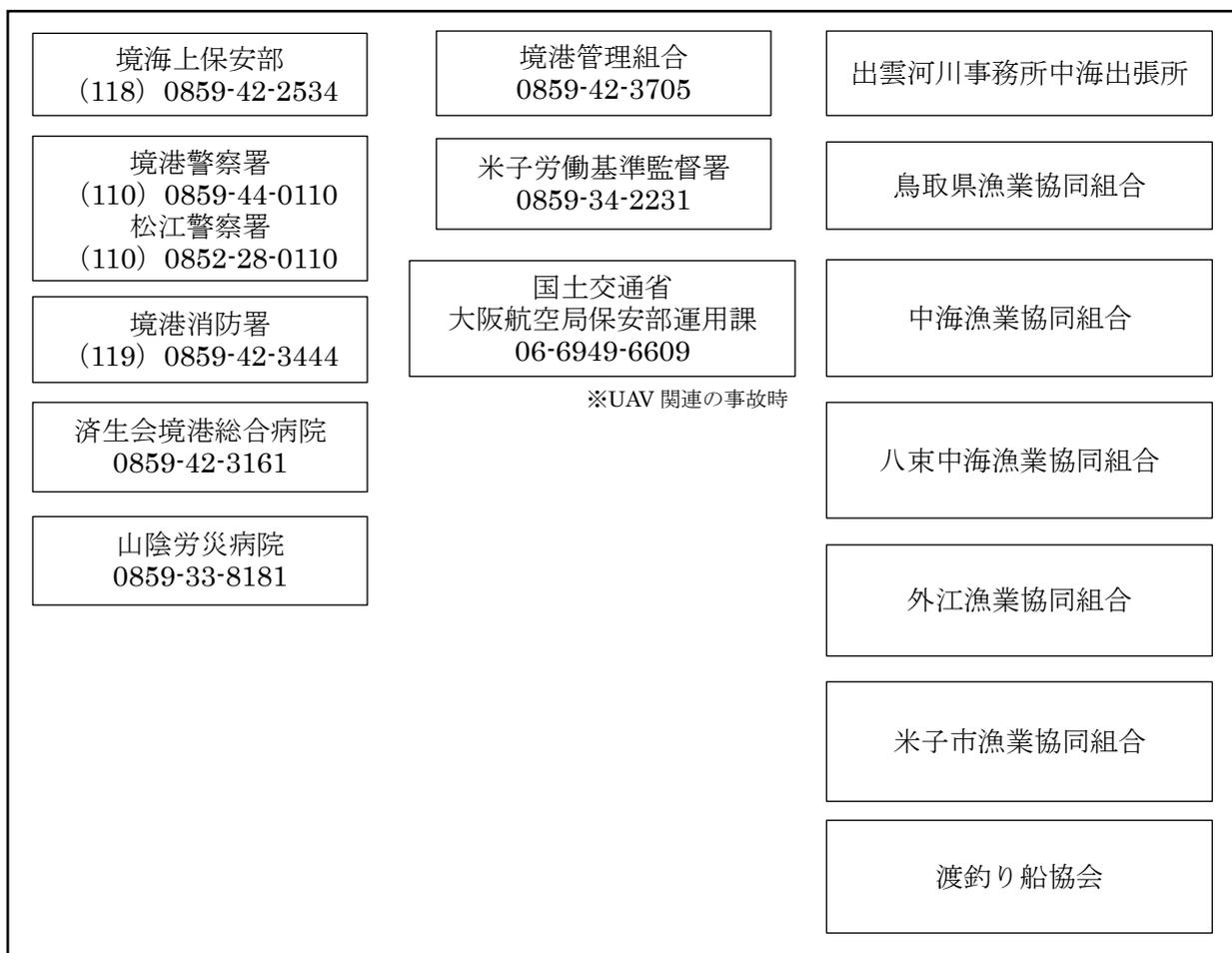
## 8. 現場体制図

実証試験を実施する上での組織体制図を以下に示す。



## 9. 緊急時の連絡体制

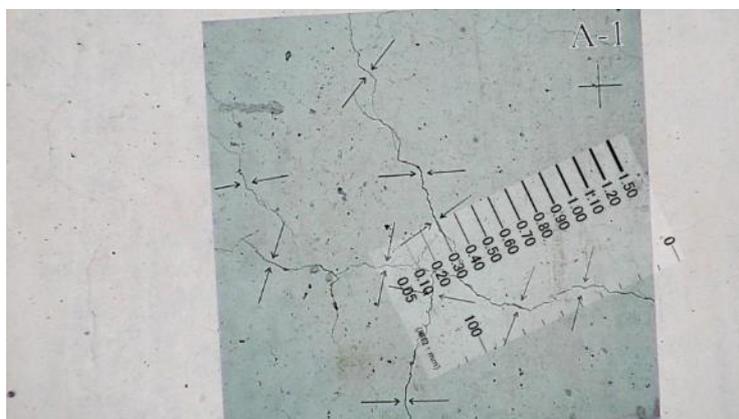
万が一事故等（怪我や設備等の破損）が発生した場合は下図に示す連絡体制に基づき、関係各所に報告する。各開発チーム・地元コンサルトチームは事故発生時に速やかに事務局へ報告すること。



橋梁点検ロボットカメラ  
三井住友建設・日立産業制御ソリューションズ



展開画像 16884pixel×10351pixel 32.4MB (jpg)



A-1 ひびわれ幅算出画像 1280pix×720pixel 264KB (jpg)

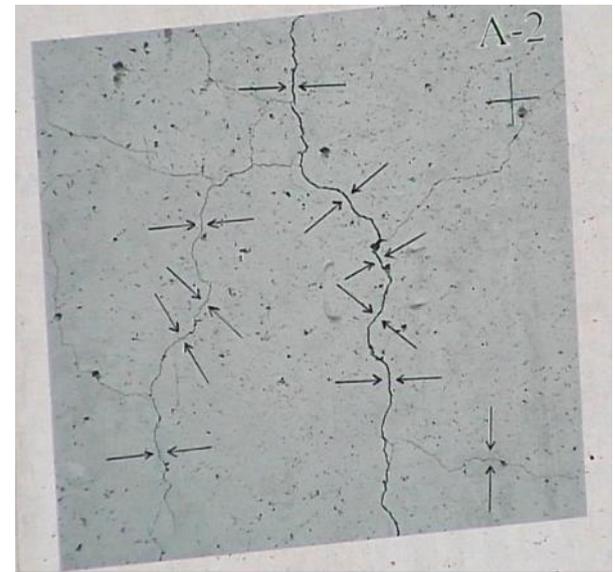
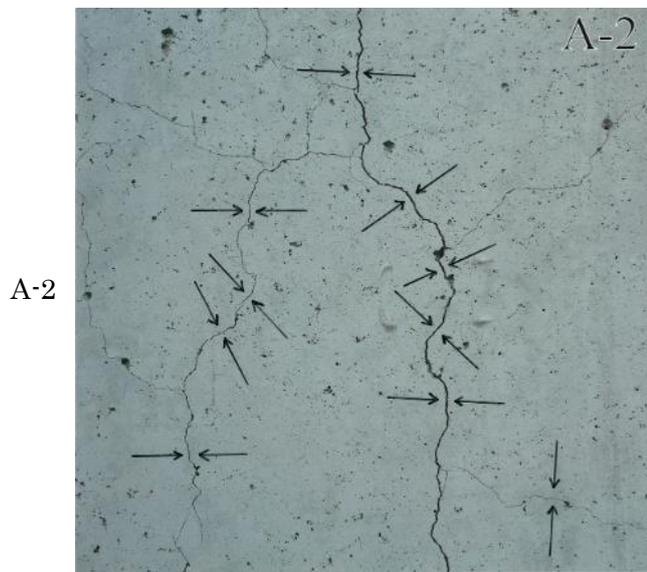


B-1 ひびわれ幅算出画像 1280pix×720pixel 270KB (jpg)

ひびわれ画像シートのスキャンデータと撮影画像の比較

ひびわれ画像シート (スキャン)

ひびわれ画像シート (撮影画像)



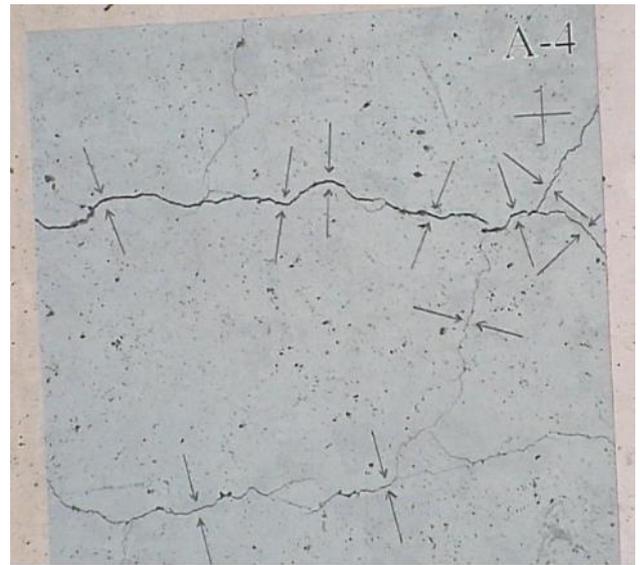
※オリジナルデータをそのまま貼付  
画像補正等は一切行っていない

ひびわれ画像シートのスキャンデータと撮影画像の比較

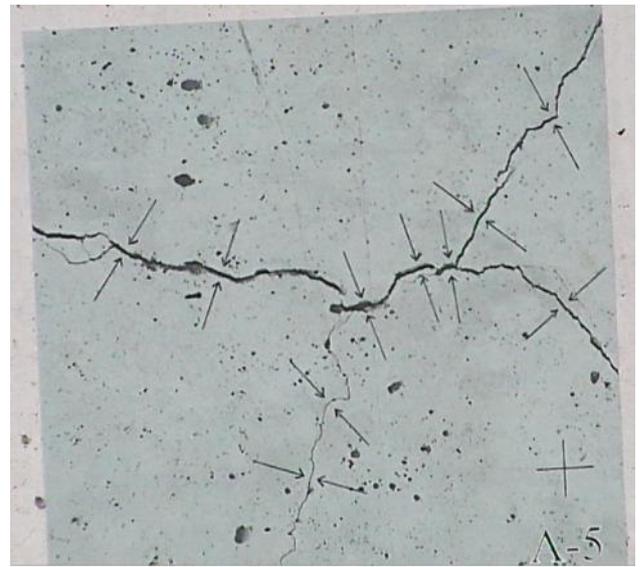
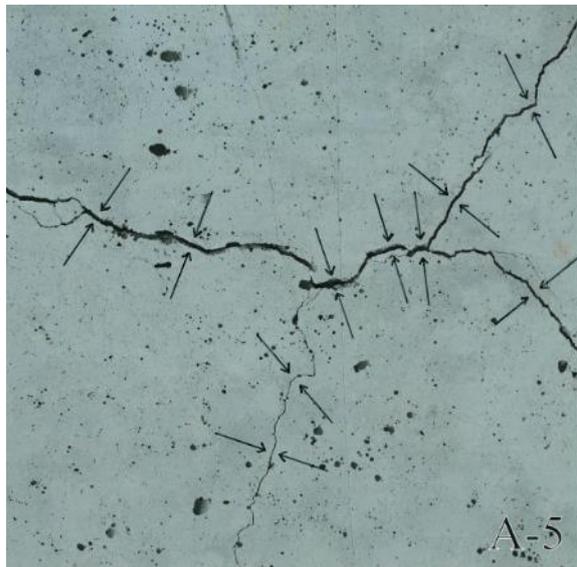
ひびわれ画像シート (スキャン)

ひびわれ画像シート (撮影画像)

A-4



A-5

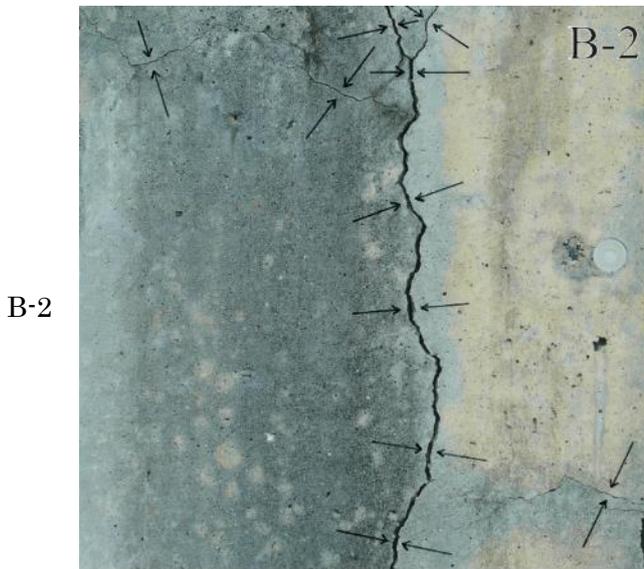
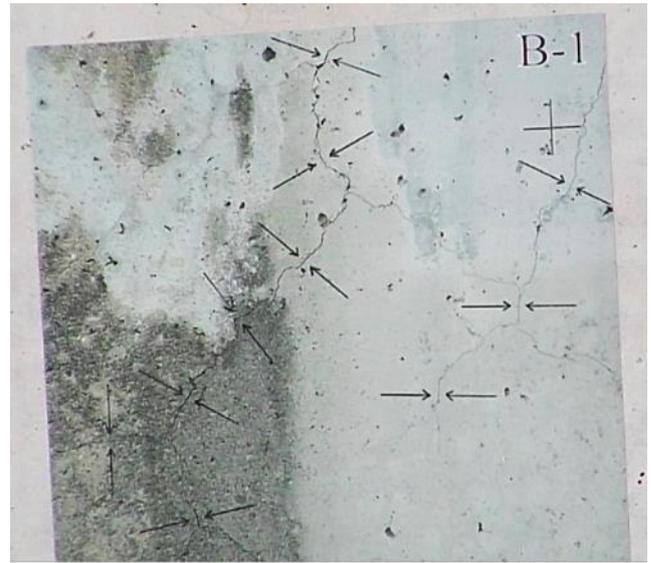
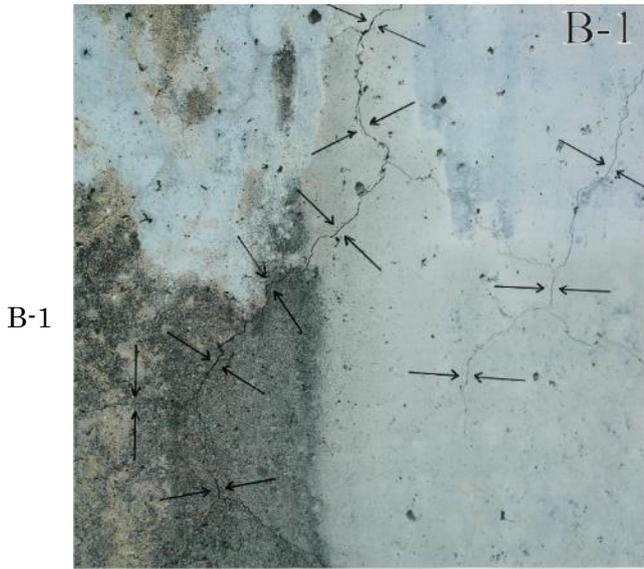


※オリジナルデータをそのまま貼付  
画像補正等は一切行っていない

ひびわれ画像シートのスキャンデータと撮影画像の比較

ひびわれ画像シート (スキャン)

ひびわれ画像シート (撮影画像)



※オリジナルデータをそのまま貼付  
画像補正等は一切行っていない

ひびわれ画像シートのスキャンデータと撮影画像の比較

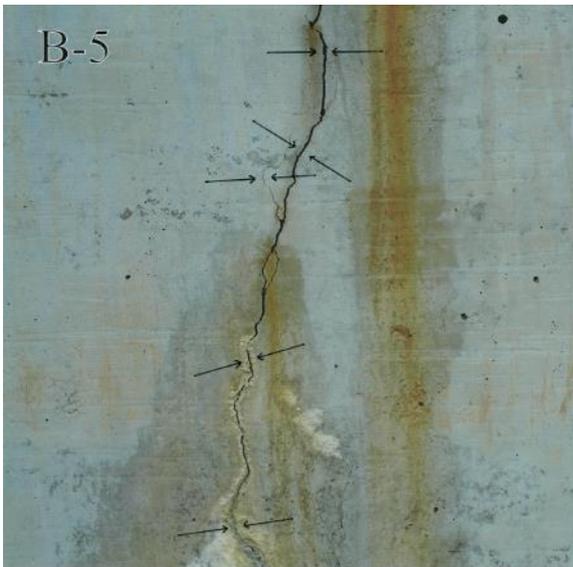
ひびわれ画像シート (スキャン)

ひびわれ画像シート (撮影画像)

B-4



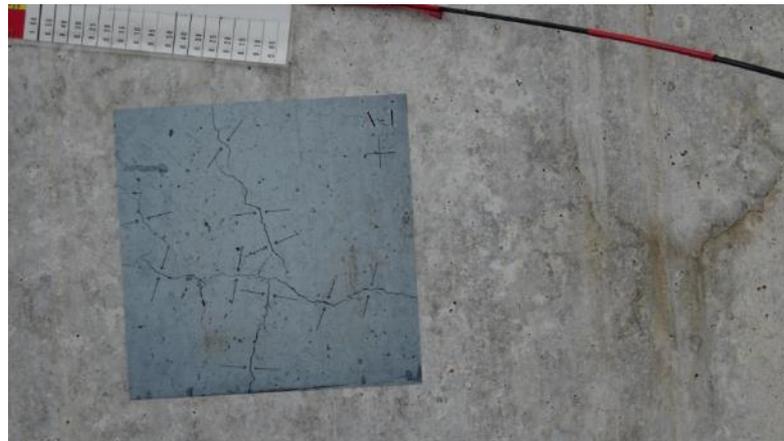
B-5



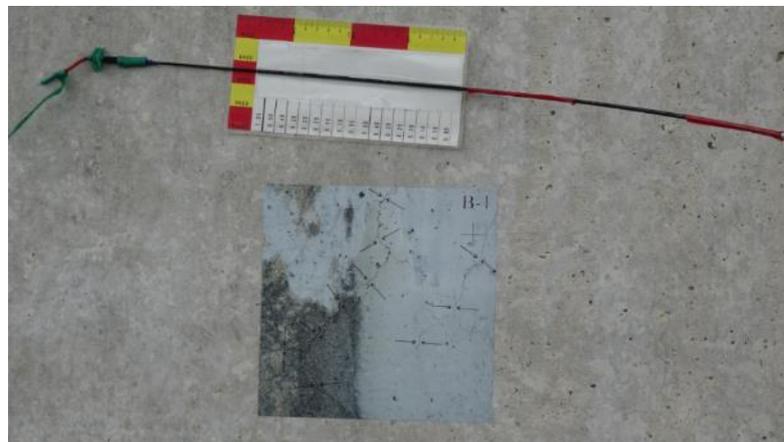
※オリジナルデータをそのまま貼付  
画像補正等は一切行っていない



展開画像 17914pixel×15772pixel 41.0MB (jpg)



A-1 ひびわれ幅算出画像 5968pix×3352pixel 4.82MB (jpg)

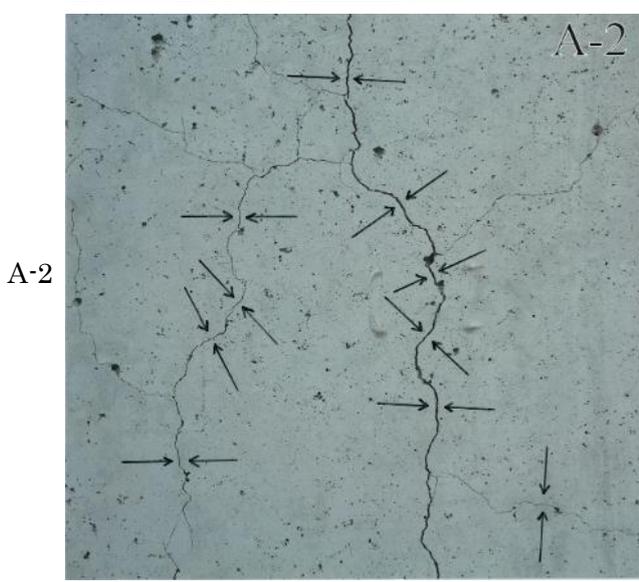
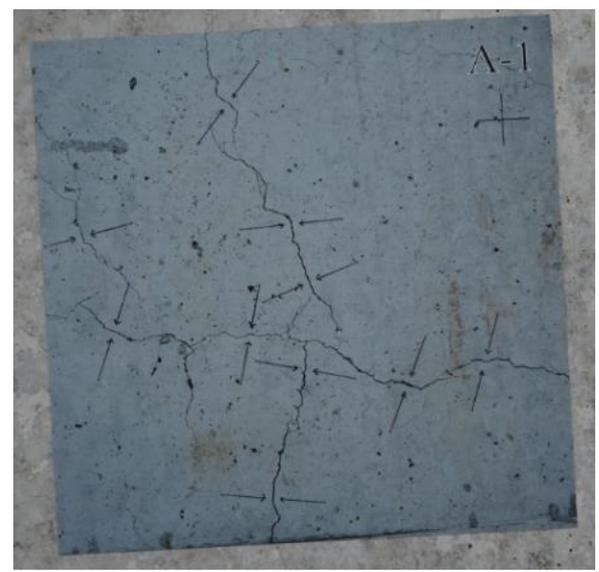


B-1 ひびわれ幅算出画像 5968pix×3352pixel 4.62MB (jpg)

ひびわれ画像シートのスキャンデータと撮影画像の比較

ひびわれ画像シート (スキャン)

ひびわれ画像シート (撮影画像)

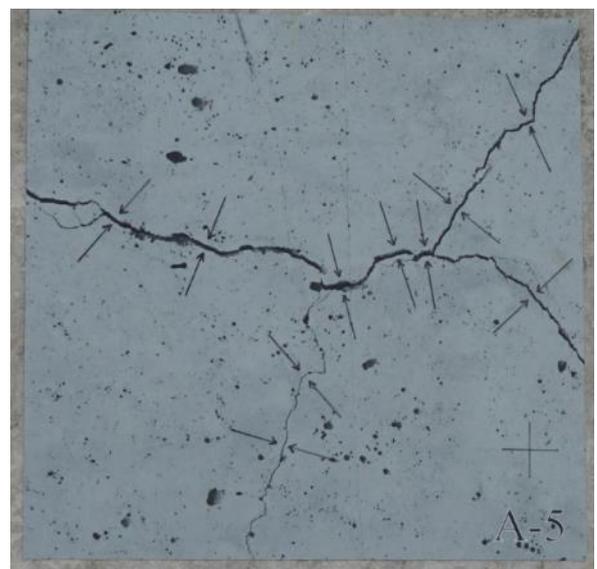
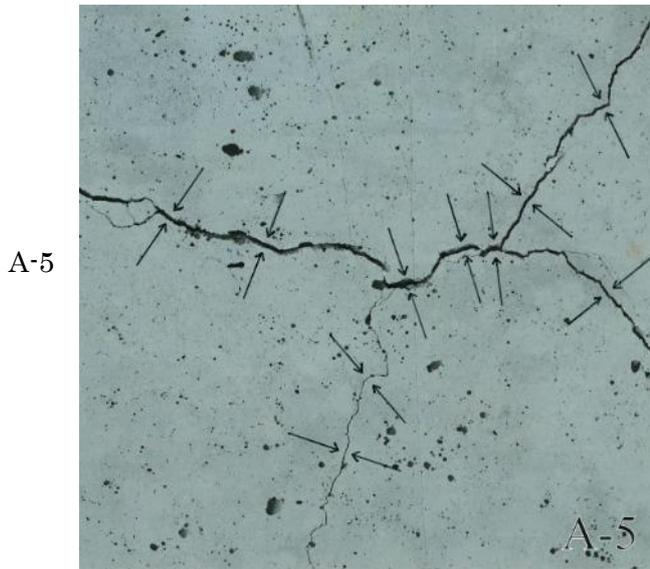
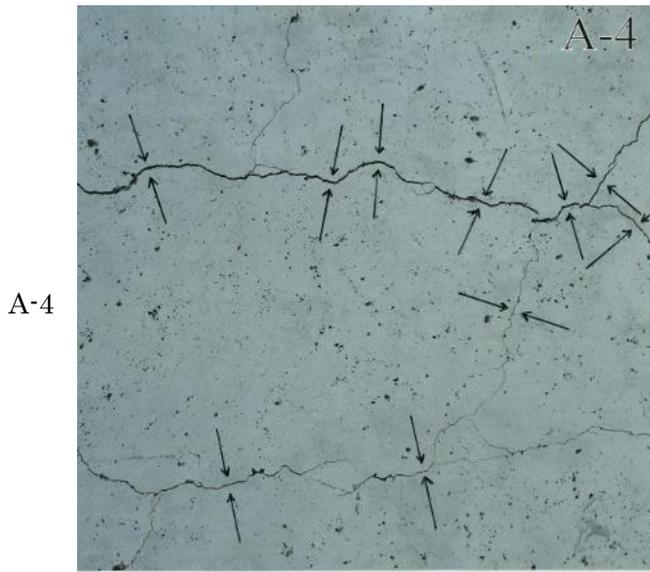


※オリジナルデータをそのまま貼付  
画像補正等は一切行っていない

ひびわれ画像シートのスキャンデータと撮影画像の比較

ひびわれ画像シート (スキャン)

ひびわれ画像シート (撮影画像)

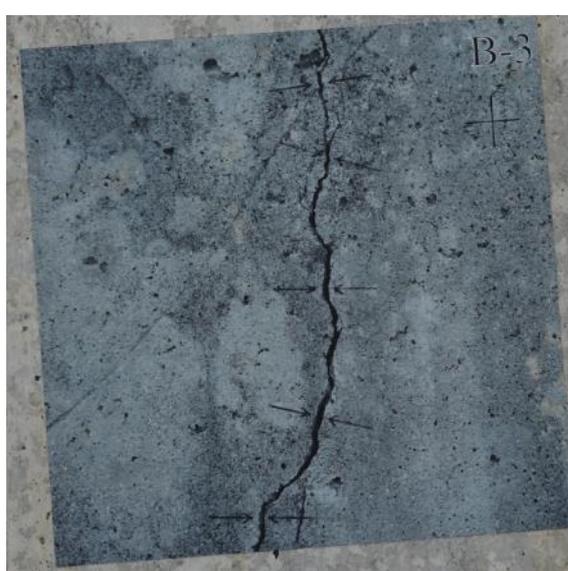
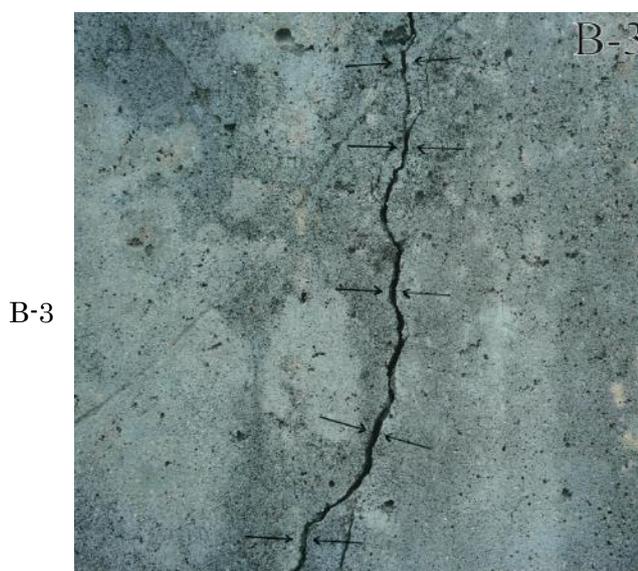
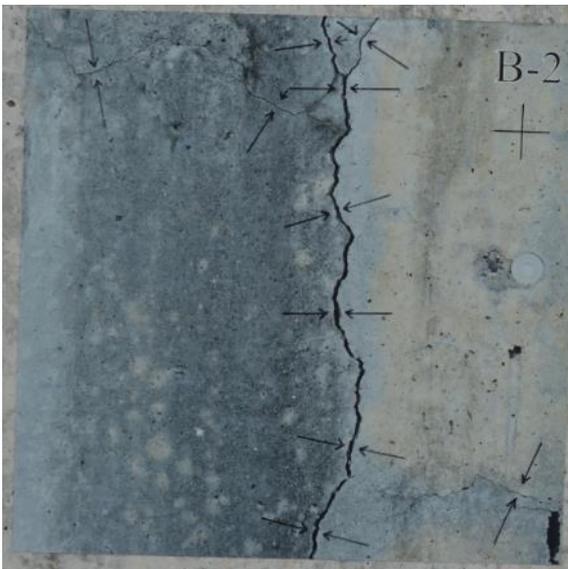
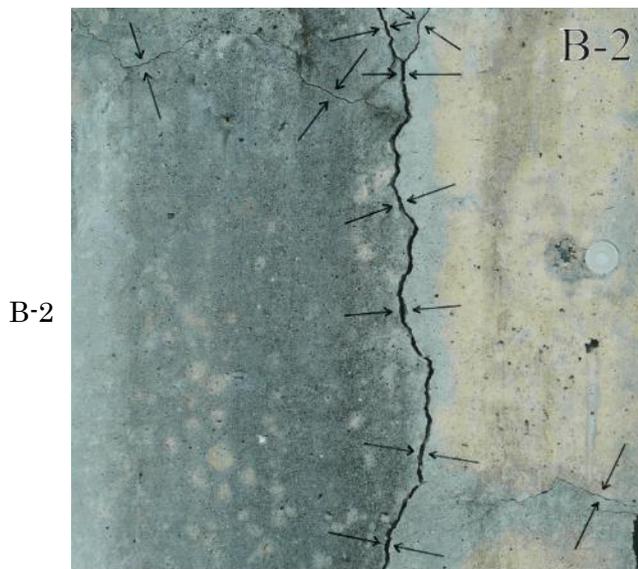
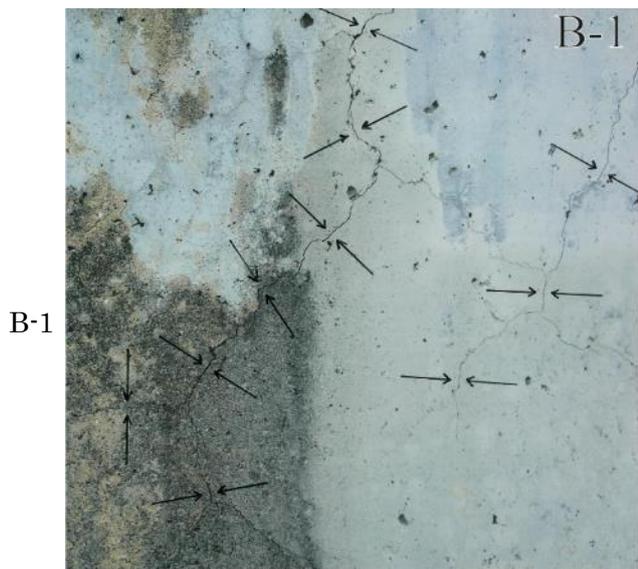


※オリジナルデータをそのまま貼付  
画像補正等は一切行っていない

ひびわれ画像シートのスキャンデータと撮影画像の比較

ひびわれ画像シート (スキャン)

ひびわれ画像シート (撮影画像)

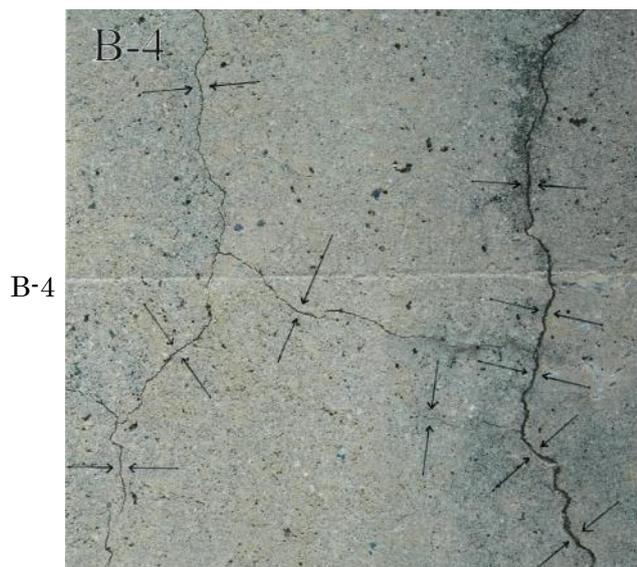


※オリジナルデータをそのまま貼付  
画像補正等は一切行っていない

ひびわれ画像シートのスキャンデータとを撮影画像の比較

ひびわれ画像シート (スキャン)

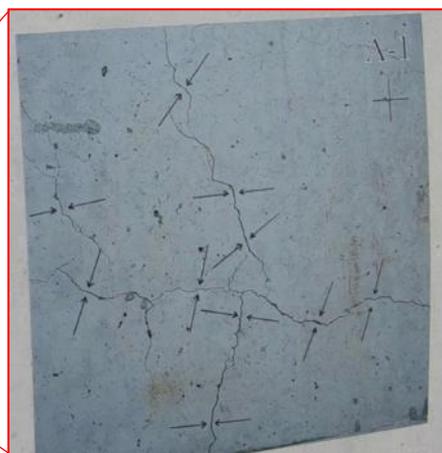
ひびわれ画像シート (撮影画像)



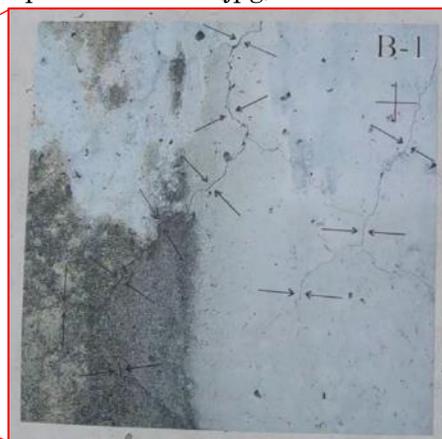
※オリジナルデータをそのまま貼付  
画像補正等は一切行っていない



展開画像（オルソ画像） 26227pixel×25368pixel 81.4MB (jpg)



A-1 ひびわれ幅算出画像 3840pix×2160pixel 2.11MB (jpg)

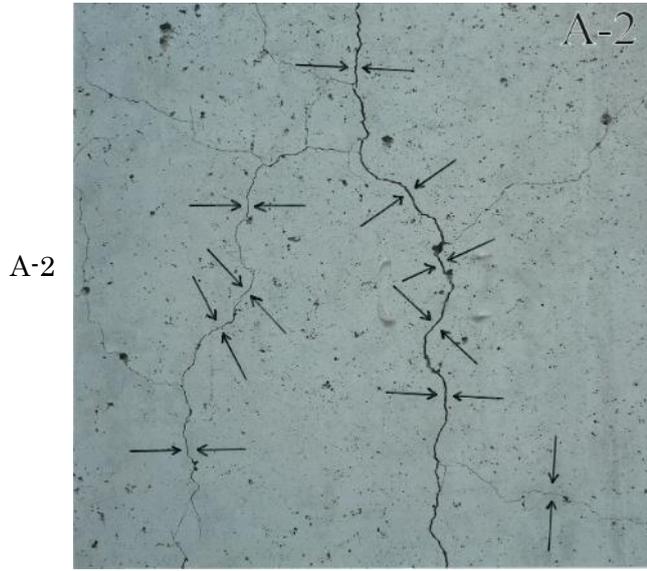
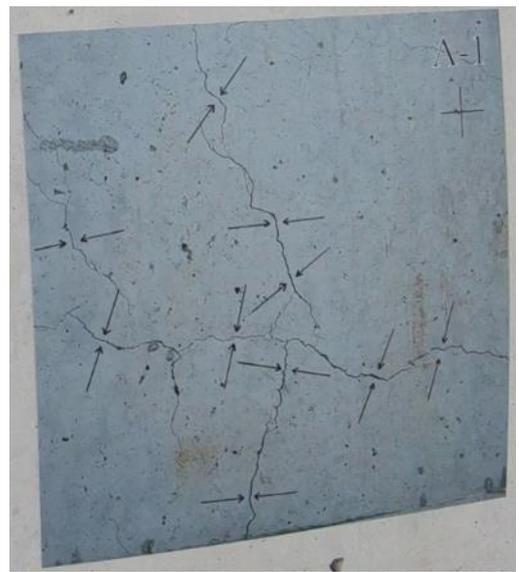


B-1 ひびわれ幅算出画像 3840pix×2160pixel 1.67MB (jpg)

ひびわれ画像シートのスキャンデータと撮影画像の比較

ひびわれ画像シート (スキャン)

ひびわれ画像シート (撮影画像)

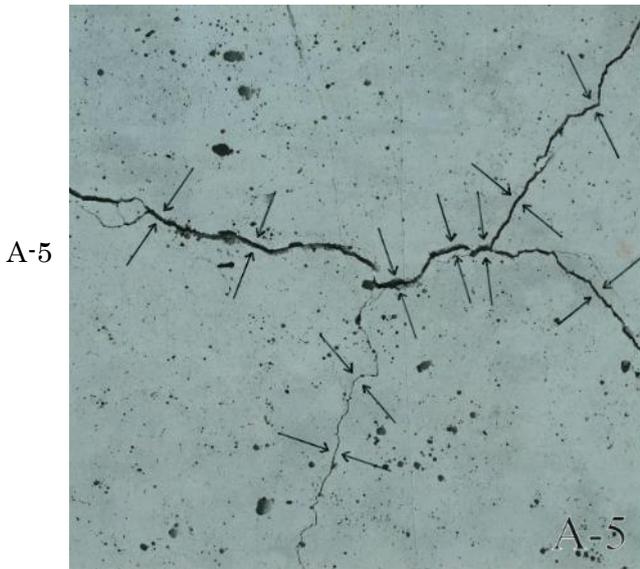
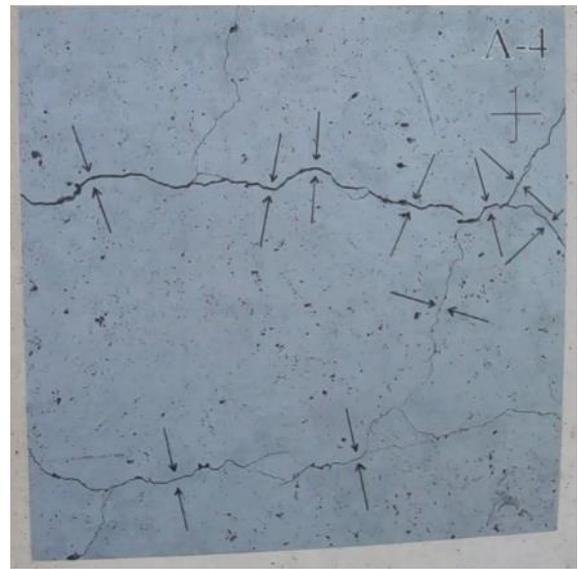
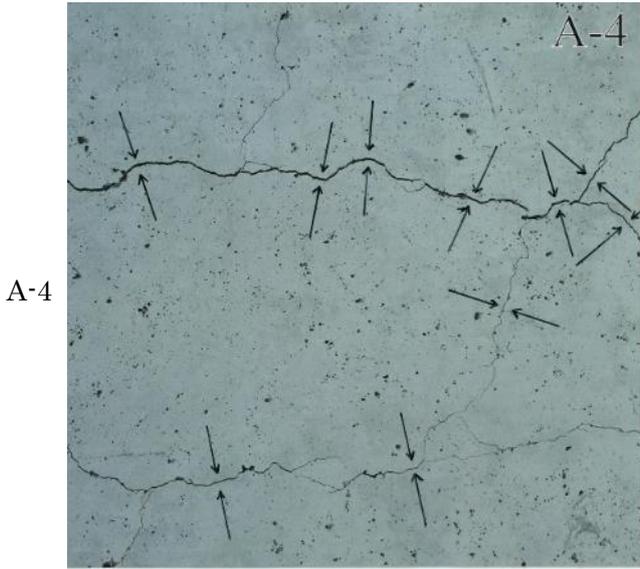


※オリジナルデータをそのまま貼付  
画像補正等は一切行っていない

ひびわれ画像シートのスキャンデータと撮影画像の比較

ひびわれ画像シート (スキャン)

ひびわれ画像シート (撮影画像)

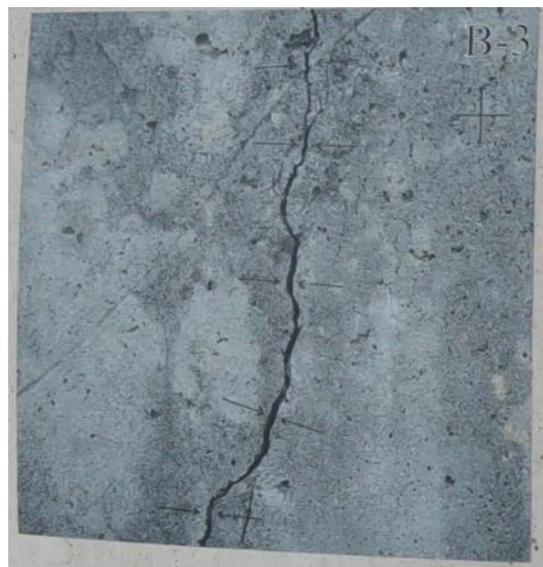
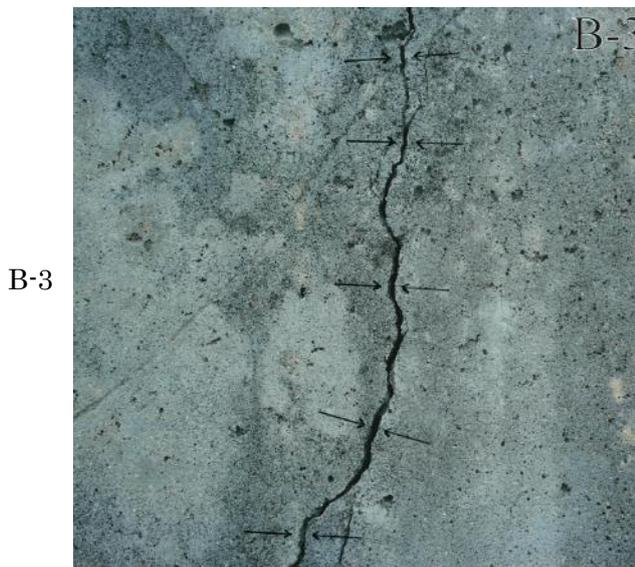
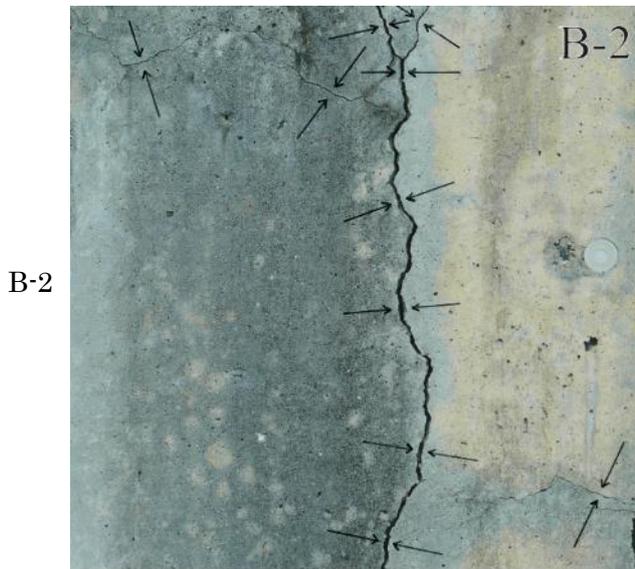
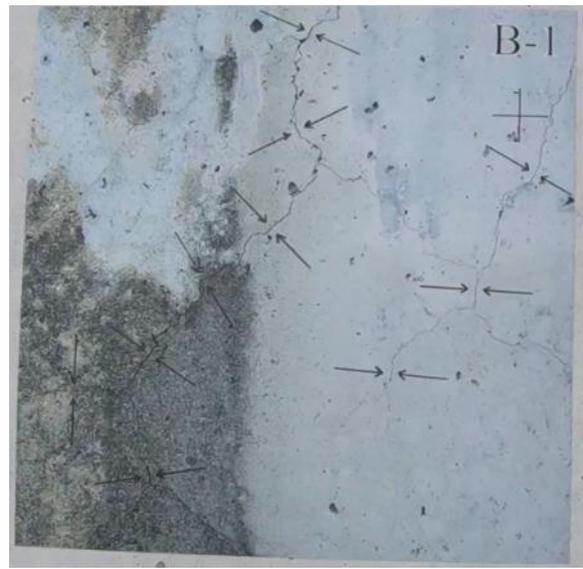
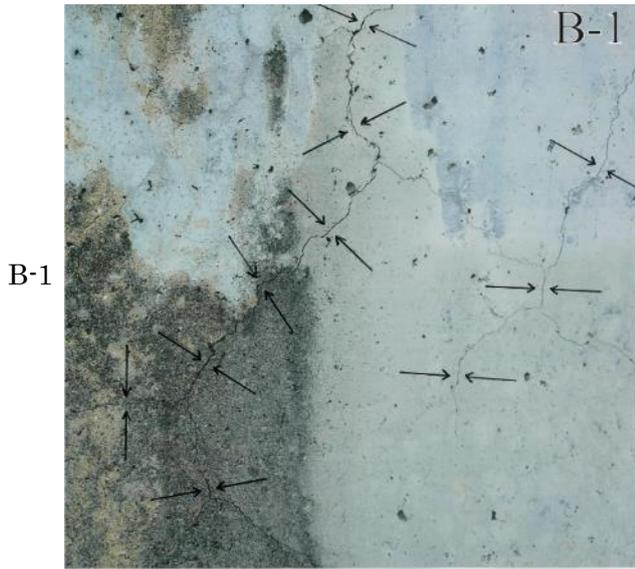


※オリジナルデータをそのまま貼付  
画像補正等は一切行っていない

ひびわれ画像シートのスキャンデータと撮影画像の比較

ひびわれ画像シート (スキャン)

ひびわれ画像シート (撮影画像)

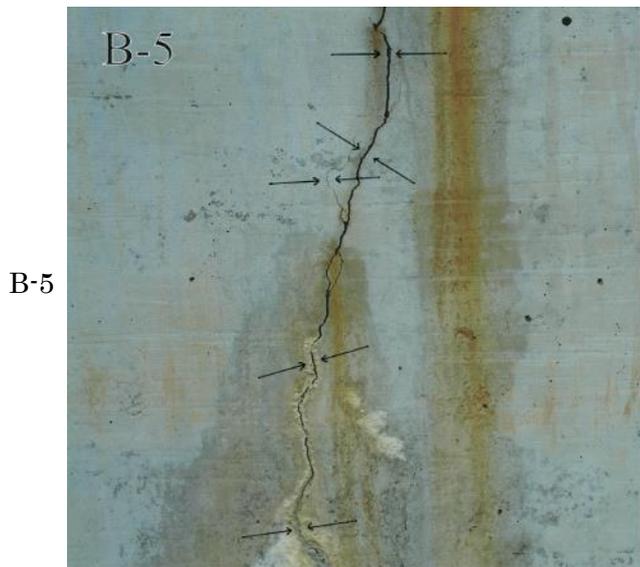
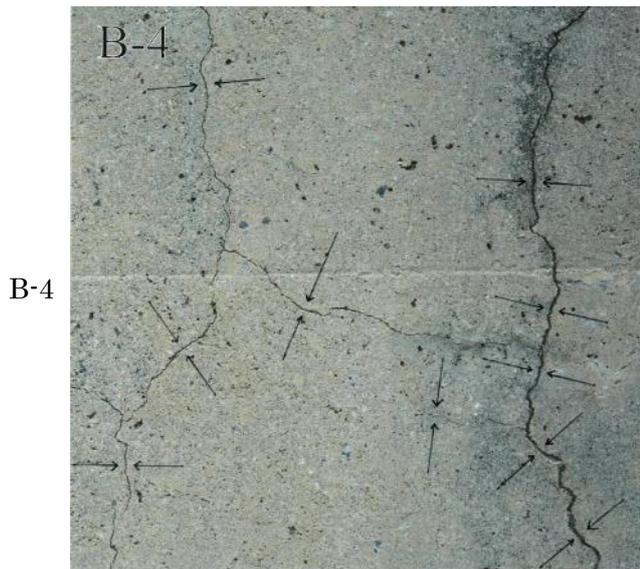


※オリジナルデータをそのまま貼付  
画像補正等は一切行っていない

ひびわれ画像シートのスキャンデータと撮影画像の比較

ひびわれ画像シート (スキャン)

ひびわれ画像シート (撮影画像)



※オリジナルデータをそのまま貼付  
画像補正等は一切行っていない

<真値作成に使用した展開画像>



展開画像（オルソ画像） 13273pixel×14223pixel 80.7MB（jpg）

打音機能付飛行ロボット  
新日本非破壊検査

ブラインド分離法

ブラインド分離とは複数の未知の信号系列を未知の線形混合系で混合した複数の測定値系列から、それぞれの信号を分離するものであり、複数の音源データからそれぞれの音源を分離するようなときに使われる。

図1は単独の打音信号とプロペラ音を混合させ、ブラインド分離処理により打音信号成分を抽出した結果である。抽出した打音信号成分が混合前と同じであることが確認できる。

図2は実際の点検時のブラインド分離処理による結果である。

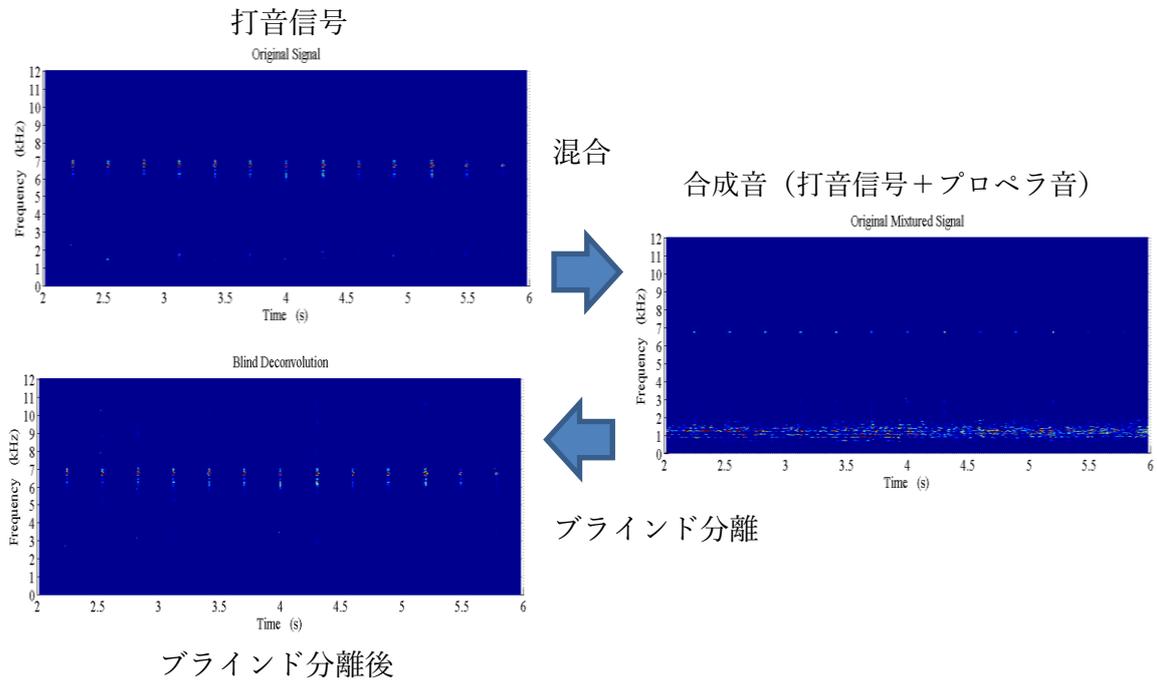


図1 ブラインド分離検証実験結果

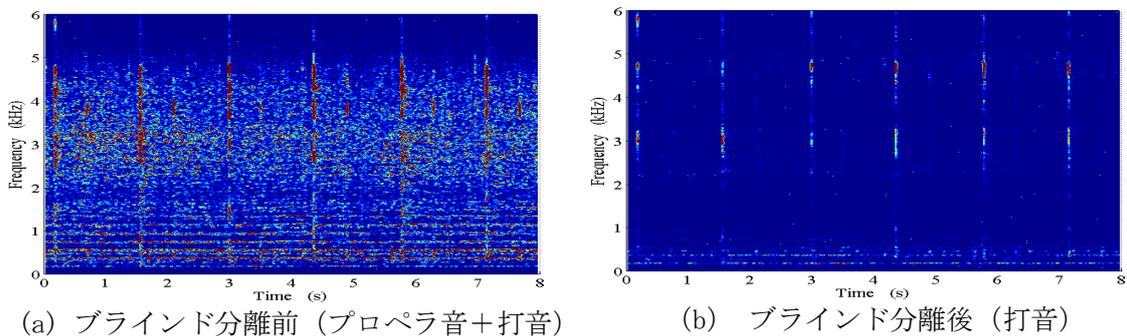


図2 実際のブラインド分離結果

### 健全度評価指数

健全度評価指数とは、スペクトル分布の最大値を1として正規化し、よりスペクトル分布の特性を際立たせるために二乗平均平方根処理を各周波数帯のスペクトルパワーに対して行い、さらに周波数帯ごとに積算した正規化周波数積算値（図3）である。図4に鋼球落下試験によって得られたスペクトル分布を示す。健全部ではブロードな分布であるのに対し、欠陥部ではある周波数帯にスペクトルが卓越するような分布となる。なお、健全部と欠陥部の境界付近に近づくにつれて、欠陥部の特徴的な分布が健全部の分布に漸近するような傾向が確認されている。

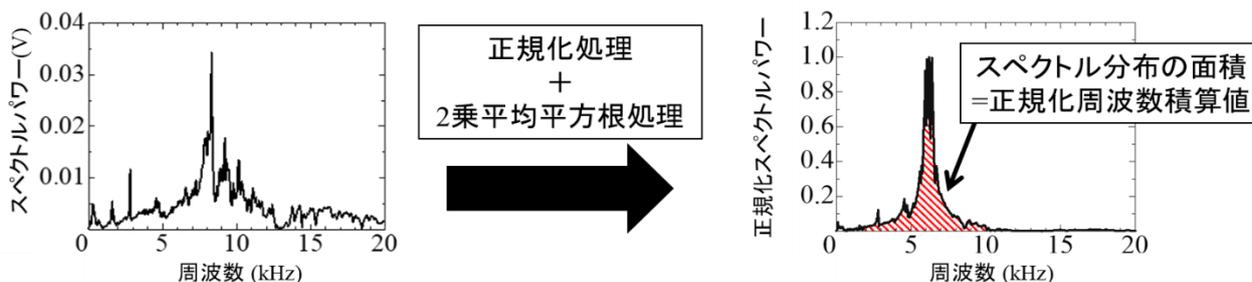


図3 正規化周波数積算値の算出方法

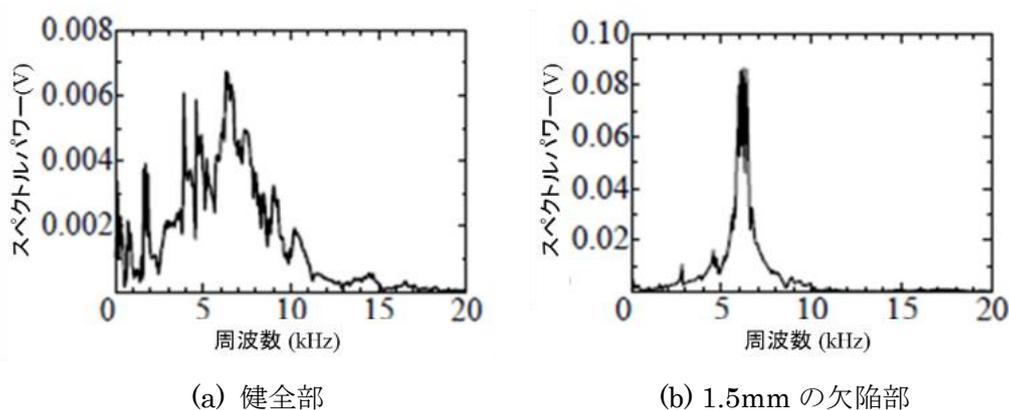


図4 鋼球落下試験によるスペクトル分布の例

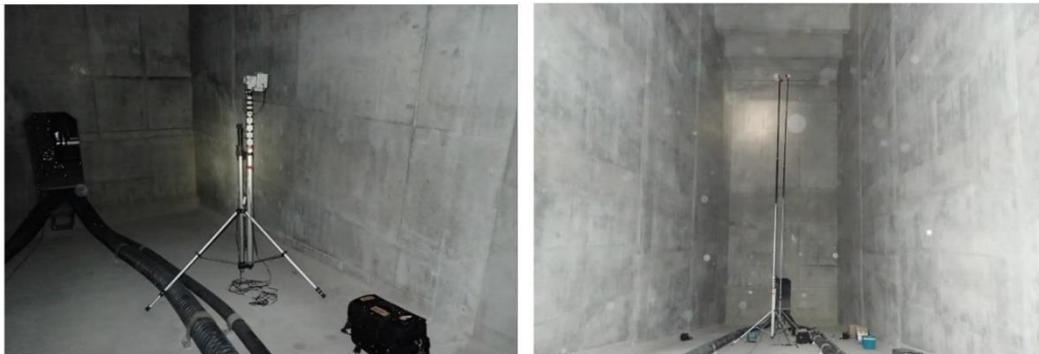
### 参考資料 3

ロボット技術シート（鳥取大学SIPインフラ江島大橋プロジェクト実証試験実施時点）

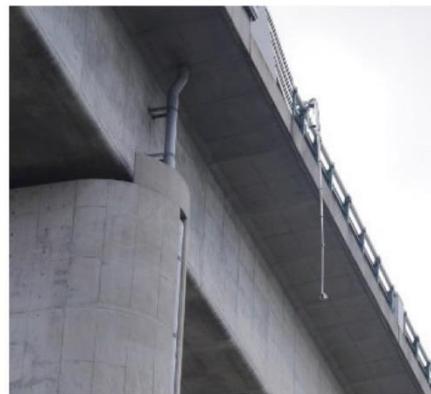
ロボット名称		橋梁点検ロボットカメラ		
開発者		三井住友建設株式会社 株式会社日立産業制御ソリューションズ		
分類①（用途・目的）		画像撮影ロボット		
分類②（近接機構）		ポール型ロボット		
分類③（制御方法）		遠隔操作型ロボット		
項目		性能等		
基本諸元	寸法	カメラユニット：190×160×130[mm] 高所ポールユニット：1730×200×160[mm]（収納時） ※設置時の三脚の占有平面範囲：1500×1500[mm]程度 懸垂架台ユニット：1350×280×210[mm]（収納時）		
	通信	有線/無線		
	給電方法	点検専用カメラに装着するバッテリー：約3時間 （ただし、ライト点灯を併用した場合は、短くなる）		
運動性能	近接機能	【ポール型】 撮影距離に応じ、三脚を有したポールユニットを設置		
	位置制御機能	【遠隔操作型】 手元の操作端末で撮影範囲を指定し、自動で分割連続撮影		
計測性能	データ取得機能	センサ	カメラ（静止画・動画）	
		センサスペック	センサーサイズ：縦2.94mm×横5.22mm ピクセル数：縦736pixel×横1296pixel 焦点距離：4.4mm～132mm	
		点検速度	【カメラ】 連続自動撮影機能を使用した場合、8秒/枚 移動方向ラップ率：10～50%可変設定 動画：15fps	
		損傷検出精度 （精度・性能確認試験結果）	ひびわれ幅：0.1mm≦w<0.3mm ⇒ 正答率85.7%（±0.1mm精度） 0.3mm≦w<0.6mm ⇒ 正答率100%（±0.2mm精度） 0.6mm≦w<2.2mm ⇒ 正答率63.3%（±0.3mm精度） ひびわれ長さ：誤差1.5% ひびわれ位置：水平方向20mm 鉛直方向100mm	
		画像解像度 位置特定	0.1mm幅視認時0.3mm/pixel 型枠目地を目印に計測位置を目視確認 補助作業員が計測位置をチェック	
	計測漏れ防止機能	手元のタブレット端末で画像確認		
	データ記録・保存機能	静止画（JPEG）、動画（MPEG4） パン・チルト角度測位結果を静止画画像のExifデータに保存		
	データ処理機能	損傷度把握に要するデータ	オリジナル画像、展開画像	
		解析・評価に使用するソフトウェア	点検カメラ・マルチビューワ（日立製）：ひびわれ長さ、幅測定	
		ひびわれ幅・長さの判読方法	デジタルクラックスケールで人力作業により算出	
制約条件	天候等環境条件	天候	筐体は、防滴使用であるが長時間の雨天時使用は不可	
		外気温	-10°C～40°C	
		適用可能風速	懸垂型：平均風速10m/s以下	
	点検時現場条件	日照条件	完全な暗所(0lux)でも、装備照明を使用(約30lux)することで、日向・日陰環境と同様のひびわれ計測が可能	
		道路条件	制約なし	
		交通規制	不要（但し、懸垂型使用時は、半径1.5m程度の作業エリアを確保のこと）	
その他条件	ロボット搬入条件	【桁内】機材を吊り上げ、マンホールから搬入 【橋上】歩道を手持ちで移動		
	その他条件			
安全性能	転倒防止	高所型：三脚を大きく広げ、状況に応じて重し等により固定		
	落下防止	懸垂型：鉛直アームにワイヤ等を取付け、道路橋高欄部に固定		
	耐久性	パン・チルト方向のカメラ首振り試験：10000回実施		
資格要件	不要（荷揚げにクレーン等を用いる場合は「玉掛け技能講習」が必要）			

ロボット名称	橋梁点検ロボットカメラ
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
分類①（用途・目的）	画像撮影ロボット
分類②（近接機構）	ポール型ロボット
分類③（制御方法）	遠隔操作型ロボット

図面 外観写真等



高所型 点検状況



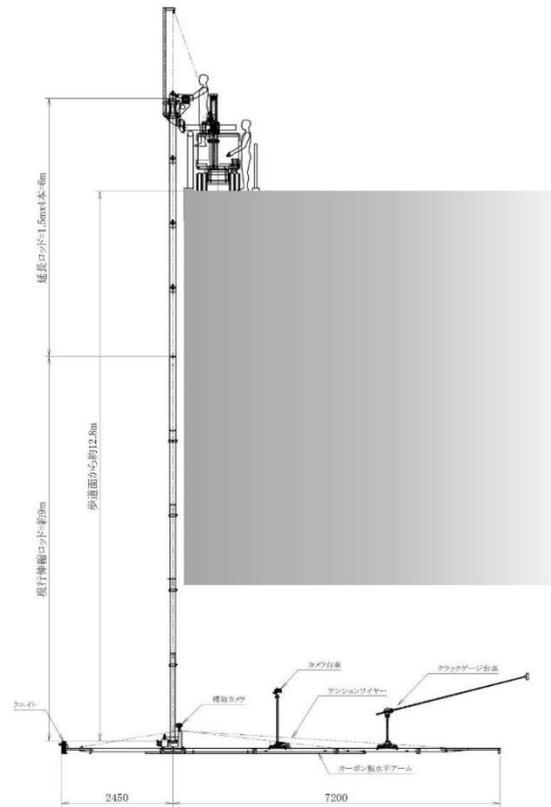
懸垂型 点検状況

ロボット技術シート（鳥取大学SIPインフラ江島大橋プロジェクト実証試験実施時点）

ロボット名称		橋梁点検支援ロボット『見る・診る』		
開発者		ジビル調査設計株式会社		
分類①（用途・目的）		画像撮影ロボット		
分類②（近接機構）		車両型ロボット		
分類③（制御方法）		遠隔操作型ロボット		
項目				
基本諸元		性能等		
基本諸元	寸法	ベースマシン：950×3080×2270mm（幅×長×高） 水平アーム長 7000mm（最大長） 鉛直ロッド長 15000mm（最大長）		
	通信	有線		
	給電方法	ロボット駆動はエンジン及び有線供給で1日（8時間）の連続稼働が可能 カメラはバッテリーで稼働で8時間連続使用可能		
運動性能	近接機能	【車両型】 橋面上の操作ベースマシンより桁下にアームを挿入し、アーム上を稼働するカメラ等を遠隔操作し近接		
	位置制御機能	【遠隔操作型】 橋上でカメラ画像をリアルタイム確認し、遠隔操作によりカメラを移動し撮影		
計測性能	データ取得機能	センサ	カメラ（静止画・動画）	
		センサスペック	センサーサイズ：縦8.8mm×横13.2mm ピクセル数：縦3352pixel×横5986pixel 焦点距離：9mm～111.6mm	
		点検速度	【カメラ】 静止画：停止状態で撮影 動画：30fps	
		損傷検出精度 （精度・性能確認試験結果）	ひびわれ幅：0.1mm≦w<0.3mm ⇒ 正答率82.1%（±0.1mm精度） 0.3mm≦w<0.6mm ⇒ 正答率100%（±0.2mm精度） 0.6mm≦w<2.2mm ⇒ 正答率97.1%（±0.3mm精度） ひびわれ長さ：誤差0.1% ひびわれ位置：20mm以内	
		画像解像度 位置特定	0.1mm幅視認時0.42mm/pixel 地覆のマーキングと併せ、型枠跡を目印に位置を確認 補助作業員が計測位置をチェック	
	計測漏れ防止機能	リアルタイムに収録結果を橋上のモニターで確認		
	データ記録・保存機能	静止画（RAW）、動画（MPEG4） カメラ本体のmicroSDに保存		
	データ処理機能	損傷把握に要するデータ	現地での目視確認結果 オリジナル画像を接合した展開画像	
		解析・評価に使用するソフトウェア	Kuraves-Th（クラボウ製）：画像接合、損傷図化	
		ひびわれ幅・長さの判読方法	クラックスケール（現地撮影時に対象物に宛がう）、デジタルクラックスケールで人力作業により算出	
制約条件	天候等環境条件	天候	晴れ・曇り・小雨は対応可能 降雪時は不可	
		外気温	5℃～35℃	
		適用可能風速	平均風速7m/s以下	
		日照条件	昼間作業を基本とする	
	点検時現場条件	道路条件	総幅員は14.0m未満 ロボットの移動には歩道付き（2.0m以上）が望ましい	
		交通規制	片側歩道の通行止め 調査期間はロボット仮置のため夜間も通行止め	
		ロボット搬入条件	【橋上】非常駐車帯にトラックで運搬し、防護柵撤去後スロープを設置して歩道内に搬入	
		その他条件		
安全性能	落下防止	水平アーム（カメラ部等取付）にワイヤ等を取付け、落下防止		
	逸走防止	ベースマシンのキャタピラに車止め設置 （水平維持と転倒防止も兼ねる）		
	耐久性	水平アームの強度試験実施		
資格要件	車両系建設機械（整地・運搬・積込・掘削）特別教育 又は、不整地運搬車技能講習・特別教育 橋上作業（歩道）：道路使用許可			

ロボット名称	橋梁点検支援ロボット『見る・診る』
開発者	ジビル調査設計株式会社
分類①（用途・目的）	画像撮影ロボット
分類②（近接機構）	車両型ロボット
分類③（制御方法）	遠隔操作型ロボット

図面 外観写真等



点検状況

ロボット技術シート（鳥取大学SIPインフラ江島大橋プロジェクト実証試験実施時点）

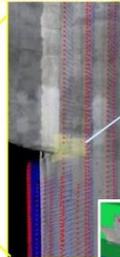
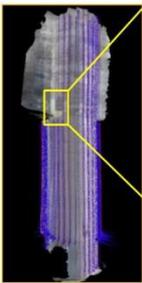
ロボット名称		二輪型マルチコプタ		
開発者		富士通株式会社		
分類①（用途・目的）		画像撮影ロボット		
分類②（近接機構）		飛行型ロボット		
分類③（制御方法）		遠隔操作型ロボット		
項目		性能等		
基本諸元	寸法	大型：車輪径100cm、幅120cm 中型：車輪径50cm、幅50cm		
	通信	ロボット操縦：無線		
	給電方法	橋上に配置した発電機よりロボットに有線給電		
運動性能	近接機能	【飛行型】 飛行ロボットにより近接		
	位置制御機能	【遠隔操作型】 車輪を構造物面に押し付けてロボットと構造物面の距離を一定に保ち撮影		
計測性能	データ取得機能	センサ	アクションカメラ（静止画・動画）	
		センサスペック	センサーサイズ：縦5.9mm×横4.4mm ピクセル数：縦3840Pixel×横2160Pixel 焦点距離：15mm～48mm（35mm換算）	
		点検速度	【ロボット】 大型機：0.3m/s以下で移動 中型機：0.1m/s以下で移動 【カメラ】 静止画：停止状態で撮影 動画：60fps	
		損傷検出精度 （精度・性能確認試験結果）	ひびわれ幅：0.1mm≦w<0.3mm ⇒ 正答率71.4%（±0.1mm精度） 0.3mm≦w<0.6mm ⇒ 正答率96.3%（±0.2mm精度） 0.6mm≦w<2.2mm ⇒ 正答率82.9%（±0.3mm精度） ひびわれ長さ：誤差0.3% ひびわれ位置：20mm以内	
		画像解像度	0.1mm幅視認時0.3mm/pixel	
	位置特定	型枠目地を目印に撮影位置を目視確認 補助作業員が計測位置をチェック		
	計測漏れ防止機能	数フライト毎に画像を保存し、その場でPCで画像確認		
	データ記録・保存機能	静止画（JPEG）、動画（MPEG4） カメラ本体のmicroSDに保存		
	データ処理機能	損傷度把握に要するデータ	オリジナル画像から画像解析により作成したオルソ画像	
		解析・評価に使用するソフトウェア	近接画像抽出ソフト（富士通製）：撮影画像からSfM解析用画像を選択、抽出 SfM解析ソフト（AgiSoft製Photoscan等）：近接画像の3D合成、オルソ画像作成 クラックスケッチソフト（富士通製）：損傷検出、計測、損傷図作成（2D/3D） 点検データ管理ソフト（富士通製）：近接画像と損傷を3Dモデルに登録しDB化、3D調書作成	
ひびわれ幅・長さの判読方法		ひびわれ幅：デジタルクラックスケールで人力作業により算出 画像解析による抽出（開発中） 長さ：3Dモデルとの対応から算出		
制約条件	天候等環境条件	天候	雨天・濃霧時は不可	
		外気温	0℃～40℃	
		適用可能風速	平均風速5m/s以下	
		日照条件	昼間作業を基本とする	
	点検時現場条件	道路条件	歩道上に給電装置の設置場所が必要 UAVのオペレータ立ち位置の確保が必要（江島大橋では台船使用）	
		交通規制	片側歩道の通行止め	
		ロボット搬入条件	【橋上】非常駐車帯により車両を止め、給電装置搬入 【海上】台船でロボット運搬	
		その他条件	・海上作業において船舶の進入などを監視する作業員を配備 ・船舶進入時は飛行を中断	
安全性	逃走防止	有線給電ケーブルによる飛行範囲制限		
	落下防止	①有線給電ケーブルによる落下防止 ②有線給電ケーブル巻取装置による落下防止（押しボタンによる装置起動）		
	緊急時	UAVの操縦不能時：非常停止押しボタンによる電源遮断 無線通信途絶判断機能：途絶判断（LED表示）時、非常停止押しボタンによる電源遮断		
	耐久性	車輪部耐荷重：30kg（軸荷重試験を実施）		
資格要件	UAVの飛行：国土交通省（大阪航空局）への許可申請 海上作業：境海上保安部への許可申請、関連漁協への連絡 橋上作業（歩道）：道路使用許可			

ロボット名称	二輪型マルチコプタ
開発者	富士通株式会社
分類①（用途・目的）	画像撮影ロボット
分類②（近接機構）	飛行型ロボット
分類③（制御方法）	遠隔操作型ロボット
図面 外観写真等	

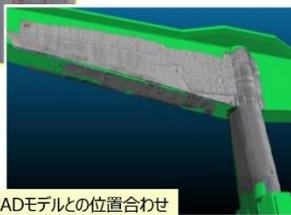


点検状況

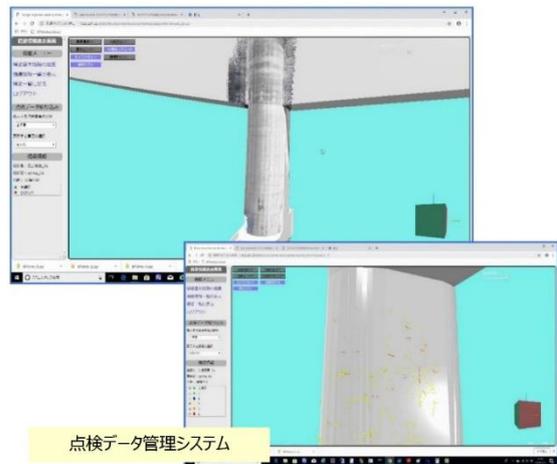
SFM合成結果:3D形状, カメラ位置



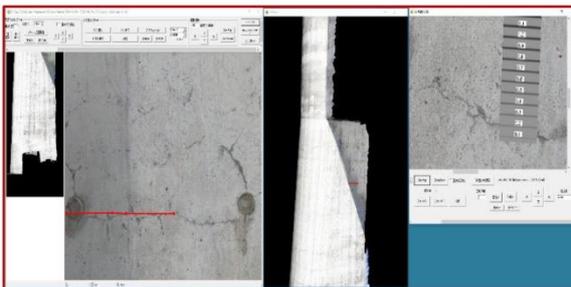
近接画像(3840x2160)



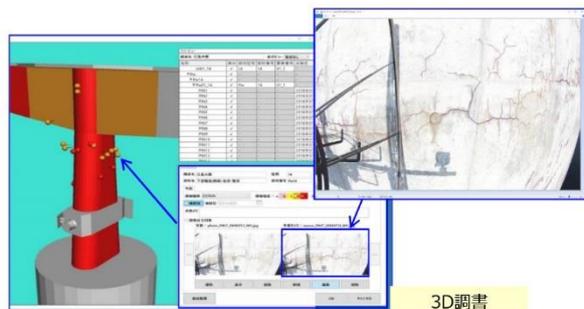
CADモデルとの位置合わせ



点検データ管理システム



損傷検出・計測・スケッチ作成



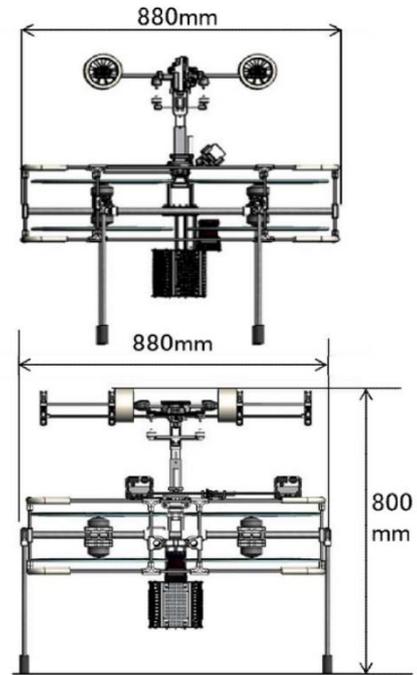
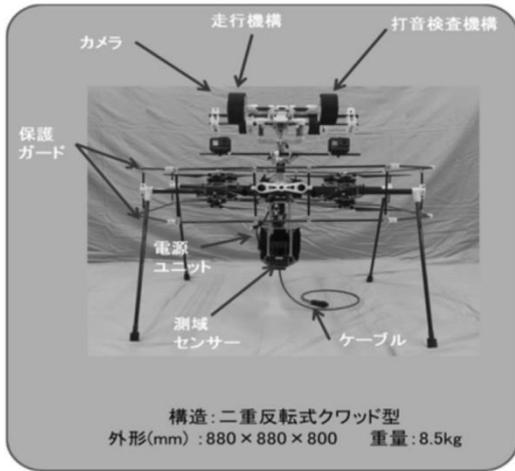
3D調査

データ解析状況

ロボット技術シート（鳥取大学SIPインフラ江島大橋プロジェクト実証試験実施時点）

ロボット名称		打音機能付飛行ロボット		
開発者		新日本非破壊検査株式会社		
分類①（用途・目的）		打音・触診ロボット		
分類②（近接機構）		飛行型ロボット		
分類③（制御方法）		遠隔操作型ロボット		
項目		性能等		
基本諸元	寸法	縦：880mm 横：880mm 高さ：800mm		
	通信	ロボット操縦：無線		
	給電方法	橋上に配置した発電機よりロボットに有線給電		
運動性能	近接機能	【飛行型】 飛行ロボットにより近接		
	位置制御機能	【遠隔操作型】 揚力で壁面に押しつけロボットと構造物面の距離を一定に保ち点検 レーザレンジファインダーにより自己位置推定		
計測性能	データ取得機能	センサ	打撃装置、集音装置、レーザレンジファインダー	
		センサスペック	球面上打撃子（鋼製）がバネの力で飛び出し、コンクリート面に衝突 打撃子質量：12g 打撃子数量：4個 打音検査間隔：軸方向120mm、幅方向：40mm	
		点検速度	【ロボット】 8cm/sで移動 【打撃子】 打撃間隔：2Hz	
		損傷検出精度 （精度・性能確認試験結果）	検出可能な空洞深さ：30mm～50mm 検出可能な空洞厚さ：0.5mm～1.5mm 面積：120mm×120mm以上	
		打音点検密度 位置特定	200点/m <sup>2</sup> 型枠目地を目印に計測位置を目視確認 10m毎に配置した視準ポールをレーザレンジファインダーで把握し、位置確認	
	計測漏れ防止機能	リアルタイムに収録結果を橋上のモニターで確認		
	データ記録・保存機能	打音信号		
	データ処理機能	損傷度把握に要するデータ	打音解析結果	
		解析・評価に使用するソフトウェア	自社製解析プログラム	
		浮きの有無判読方法	ブラインド分離法によりノイズ除去し、スペクトル分布面積比較（正規化周波数積算値）により算出	
制約条件	天候等環境条件	天候	雨天・濃霧時は不可	
		外気温	-5°C～40°C	
		適用可能風速	平均風速5m/s以下	
		日照条件	昼間作業を基本とする	
	点検時現場条件	道路条件	歩道上に給電装置、モニター等の設置場所が必要 UAVのオペレータ立ち位置の確保が必要（江島大橋では台船使用）	
		交通規制	片側歩道の通行止め	
		ロボット搬入条件	【橋上】非常駐車帯により車両を停め、ロボット一式搬入 【海上】台船に小型船で運搬	
その他条件	・海上作業において船舶の進入などを監視する作業員を配備 ・船舶進入時は飛行を中断			
安全性能	逸走防止	安全ロープ（および有線給電・通信ケーブル）による飛行範囲制限		
	落下防止	安全ロープ（および有線給電・通信ケーブル）による落下防止		
	緊急時	UAVの操縦不能時：非常停止押しボタンによる電源遮断 無線通信途絶判断機能：①飛行位置保持（橋下より操作時）②直下に着地（橋上より操作時）		
	耐久性	打音装置：30分間×10セットの連続稼働試験実施		
資格要件	UAVの飛行：国土交通省（大阪航空局）への許可申請 海上作業：境海上保安部への許可申請、関連漁協への連絡 橋上作業（歩道）：道路使用許可			

ロボット名称	打音機能付飛行ロボット
開発者	新日本非破壊検査株式会社
分類①（用途・目的）	打音・触診ロボット
分類②（近接機構）	飛行型ロボット
分類③（制御方法）	遠隔操作型ロボット
図面 外観写真等	



点検状況

参考資料 4

ロボット技術を活用した定期点検業務概算費用（江島大橋渡海部を点検対象とする）

概要			
点検手法	ロボット技術による点検		
特記	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務積算基準を用いて積算（一括発注の場合）</li> <li>・江島大橋のロボット技術を活用した橋梁点検の実証試験に適用したロボット技術のうち、3つの「画像撮影ロボット」を対象として積算</li> <li>・路面の点検は除外し、ロボット技術による点検の結果、近接点検や第三者被害予防措置の必要性が生じた場合は別途対応措置を検討することとする。</li> </ul>		
適用範囲と点検面積			
<p>江島大橋 箱桁外部 側面図</p> <p>【箱桁外部・側面は、全て橋梁点検支援ロボット『視る・診る』の点検範囲】</p> <p>江島大橋 箱桁内部</p> <p>【箱桁内部は、全て橋梁点検ロボットカメラの点検範囲】</p> <p>江島大橋 箱桁下平面図（見下げ図）</p> <p>【張出床版下面および桁高 10m 以下の箱桁下面是橋梁点検支援ロボット『視る・診る』の点検範囲】</p> <p>【桁高 10m 以上の箱桁下面是二輪型マルチコプタの点検範囲】</p> <p>PE1 正面 東側 西側 約 37m</p> <p>PE1 側面 南側 北側</p> <p>PW1 正面 東側 西側 約 37m</p> <p>PW1 側面 南側 北側</p> <p>【橋脚はすべて二輪型マルチコプタの点検範囲】</p>			
点検面積表			
撮影対象箇所	ロボット技術	面積	凡例
桁内	橋梁点検ロボットカメラ 三井住友建設	16,000 m <sup>2</sup>	
桁側面	橋梁点検支援ロボット『視る・診る』 ジビル調査設計	9,658 m <sup>2</sup>	
張出下面（非常駐車帯含む）		3,012 m <sup>2</sup>	
桁下面	二輪型マルチコプタ 富士通	2,054 m <sup>2</sup>	
橋脚		1,323 m <sup>2</sup>	
		1,800 m <sup>2</sup>	

業務委託料						
点検イメージ						
積算項目	項目	ロボット技術ごとの費用 (万円)			積算費用 (万円)	
		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		
	点検面積	16000m2	14724m2	3123m2		
直接 人件費	(1) 計画準備	1) 橋梁台帳等出力	9		9	
		2) 業務計画書作成	46	46	46	138
		3) 部材番号図の作成及び修正	5		5	
	(2) 現地踏査	36			36	
	(3) 関係機関との 協議資料作成	47			47	
	(4) 定期点検	1) 現地点検	710	313	120	1,143
		2) データ整理及び処理解析	17	78	60	155
		3) 損傷評価・損傷図作成	107	102	150	359
	(5) 点検調査書作成	201			431	
	(6) 報告書作成	35			35	
(7) 打合せ	1) 業務着手時	48			48	
	2) 中間打合せ 5回					
	3) 成果品納入時					
①直接人件費計					2,406	
②その他原価					1,296	
直接 経費	※旅費交通費は本積 算では対象外とし た。	機器損料				
		橋梁点検ロボットカメラ (3台)	405		405	
		橋梁点検支援ロボット『見る・診る』	145		145	
		二輪型マルチコプタ (機体・給電)	90		90	
		機器燃料費				
		橋梁点検支援ロボット『見る・診る』	5		5	
		二輪型マルチコプタ	1		1	
		移動運搬費				
		橋梁点検支援ロボット『見る・診る』	11		11	
		二輪型マルチコプタ	20		20	
		安全費				
		交通誘導員 (昼間) 3人/日	105		105	
		交通誘導員 (夜間含) 3人/日	100		100	
		データ解析費				
		(4) の 2) の人件費×20%	31		31	
防護柵撤去・復旧 (ジビル調査設計)	117		117			
フライヤー外注費 (富士通)	180		180			
台船・警戒船	210		210			
③直接経費計					1,420	
直接原価 ①+②+③					5,122	
一般管理費					2,758	
業務委託料 合計					7,879	

以降の資料は、江島大橋プロジェクト実証試験にて作成した実用化に向けた基礎資料を参考に鳥取県が作成した「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）」および「ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務積算基準」であり、平成31年3月に鳥取県より発出されている。

参考資料5 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）

平成31年3月発出 鳥取県

公開：公益財団法人 鳥取県建設技術センター

<http://www.tctcplaza.or.jp/front/pages/view/114>

参考資料6 ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務積算基準

平成31年3月発出 鳥取県

公開：公益財団法人 鳥取県建設技術センター

<http://www.tctcplaza.or.jp/front/pages/view/114>

## ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務委託 〔公募型プロポーザル方式〕 特記仕様書（案）

### 第1（目的・主旨）

本業務は、ロボット技術が有する、客観的データの正確な記録、科学的データに基づく健全性の診断等の優れた特徴を活用し、安全かつ効率的な橋梁点検を行うことを目的とする。

### 第2（適用範囲）

本業務の履行に当たっては、鳥取県が定める「設計業務共通仕様書（最終改定：平成28年10月10日）」、「鳥取県道路橋りょう定期点検マニュアル（最終改定：平成27年3月31日）」および、内閣府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・マネジメント技術において、鳥取大学SIPインフラ江島大橋プロジェクト実証試験結果に基づき、鳥取大学SIP地域実装支援鳥取大学チームの橋梁点検への新技術の適用性評価委員会が作成した「ロボット技術を活用した橋梁点検指針（案）（平成31年3月）」によるほか、この特記仕様書によること。

### 第3（ロボットの適用範囲と経費算定）

業務委託の内容については、別途に提示する「業務委託説明書」によることとし、ロボットの適用と経費の算定については、別紙の「ロボット技術を活用した橋梁点検業務におけるロボット機能諸元表」（以下、「機能諸元表」という。）および、「ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務積算基準（平成31年3月29日）」に基づいて行っている。なお、現場条件等に基づいて、ロボット技術の組合せにより、さらに合理的かつ効率的な点検計画を提案することができるものとする。

### 第4（ロボット技術の要求性能の検証）

点検に用いるロボット技術の要求性能の確認について、江島大橋のロボット技術を活用した橋梁点検の実証実験において、要求性能を検証できた機能諸元表に掲げるロボットについては、精度及び性能確認試験を省略することができるものとする。機能諸元表に掲げるロボット以外で、「点検支援技術 性能カタログ（案）」（平成31年2月時点 国土交通省）等から引用するロボットについては、業務期間において、「ロボット技術を活用した橋梁点検指針（案）」に基づく精度及び性能確認試験を点検作業前に実施し、用途・目的、近接機構、制御方法の分類別に要求性能を有することを確認・検証した後に用いることができるものとする。

### 第5（技術開発に係る調査への協力）

江島大橋のロボット技術を活用した橋梁点検の実証試験に適用したロボット技術以外の新技術を導入する場合は、さらなる技術開発による点検業務の効率性向上を図るため、必要とする機能等のロボット技術レベルに応じた積算基準の改定に向けて、並行して行う歩掛調査に協力すること。

編	章	節	条	見出し	項	特記及び追加仕様事項
1	1		1106	管理技術者	3	設計業務共通仕様書に定める技術者
1	1		1107	照査技術者および照査の実施	1	本業務は、照査技術者を定め照査を実施する。なお、照査にあたっては「詳細設計照査要領」及び調査職員の指示によること。
1	1		1110	打合せ等	2	本業務における打合せ協議は、下記の主要な区切において行うこととし、7回を予定しているが、業務計画に基づいて受発注者による協議により決定する。 ・着手時・中間5回・納品時
1	1		1112	資料の貸与及び返却	1	本業務において必要となる資料については、初回打合せ時において、双方確認し貸与することとする。
1	1		1113	官公庁への手続き等		橋梁点検に伴う道路使用許可等については、調査職員と協議のうえ、申請手続き等を行うこと。なお、その他関係機関との協議が必要となる場合には、調査職員に速やかに報告すること。

1	1		1114	地元関係者との交渉等	2	業務期間内に事業説明会等を行うこととしており、その結果を設計に反映させる必要があるため、調査職員に協議すること。
1	1		1116	成果物の提出	1 4	成果物は、下記のとおりとする。 ・報告書 1部 (A4版) ・報告書原稿1式 電子媒体については、損傷凶データ等、データ容量に応じた適切な手法により提出することとし、受発注者協議のうえ決定することとする。
追加				業務カルテ登録方法		受託者は、財団法人日本建設情報総合センターへ、フロッピーディスクの郵送又はインターネットを通じてオンラインで登録することが出来る。
追加				疑義等		業務を遂行するうえで疑義を生じた場合は、調査職員と協議し、速やかに処理すること。
追加				担当技術者 (橋梁点検員)		業務に該当するものに関して、以下のいずれかの資格を有すること。 コンクリート (業務：点検・診断) ①技術士 (鋼構造及びコンクリート) ②RCCM (鋼構造及びコンクリート) ③「公共工事に関する調査及び設計等の品質確保に関する技術者資格登録規定 (平成26年国土交通省告示第1107号)」に基づく「技術者資格登録簿」に登録された資格のうち以下の全ての該当する資格とする。 1 施設分野：橋梁 (コンクリート橋) に該当するもの 2 業務：点検及び診断に該当するもの
追加				資格要件		ロボット技術の活用にあたって、機能諸元表に示す要件をはじめ、ロボット制御等に関して必要となる資格要件 (国土交通省による証明・実績のほか、ロボット制御訓練の社内訓練の実績等) 及び許認可手続きを行うこと。
追加				安全対策		ロボット技術の活用にあたって、機能諸元表に示す要件をはじめ、安全性能を確保するための組織体制や仮設機材等を整備すること。
追加				ロボットの点検整備		ロボット開発者はロボットを安全に稼働させるための基準を策定するとともに、使用回数に応じたロボットの点検整備記録を作成し、事前に発注者への報告を行うこと。
追加				近接点検の必要性が生じた場合の措置		ロボット技術による点検の結果、近接点検の必要性が生じた場合には、発注者への報告協議により、別途対応措置を検討することとする。
追加				第三者被害予防措置		第三者被害予防措置に必要性が生じた場合には、発注者への報告協議により、別途対応措置を検討することとする。
追加				点検範囲		本仕様は橋面の点検は対象外としている。橋面の点検を行う場合にあっては、通行規制や仮設備等の条件整理のうえ、別途経費を計上することとする。
追加				新技術活用における調査への協力		今後の橋梁点検へのロボット技術活用を普及拡大するため、別途発注者が指示する、点検に使用したロボットの稼働時間、操作人員等への調査に協力すること。



ロボット技術を活用した道路橋定期点検業務積算基準

1. 適用範囲

本積算基準は、「橋梁定期点検要領（案）（平成 26 年 3 月）国土交通省道路局国道・防災課」（以下、「定期点検要領」という。）および「ロボット技術を活用した橋梁点検指針（案）（平成 31 年 3 月）鳥取大学 SIP インフラ地域実装支援チーム」に基づき実施するロボット技術を用いた道路橋定期点検業務に適用する。

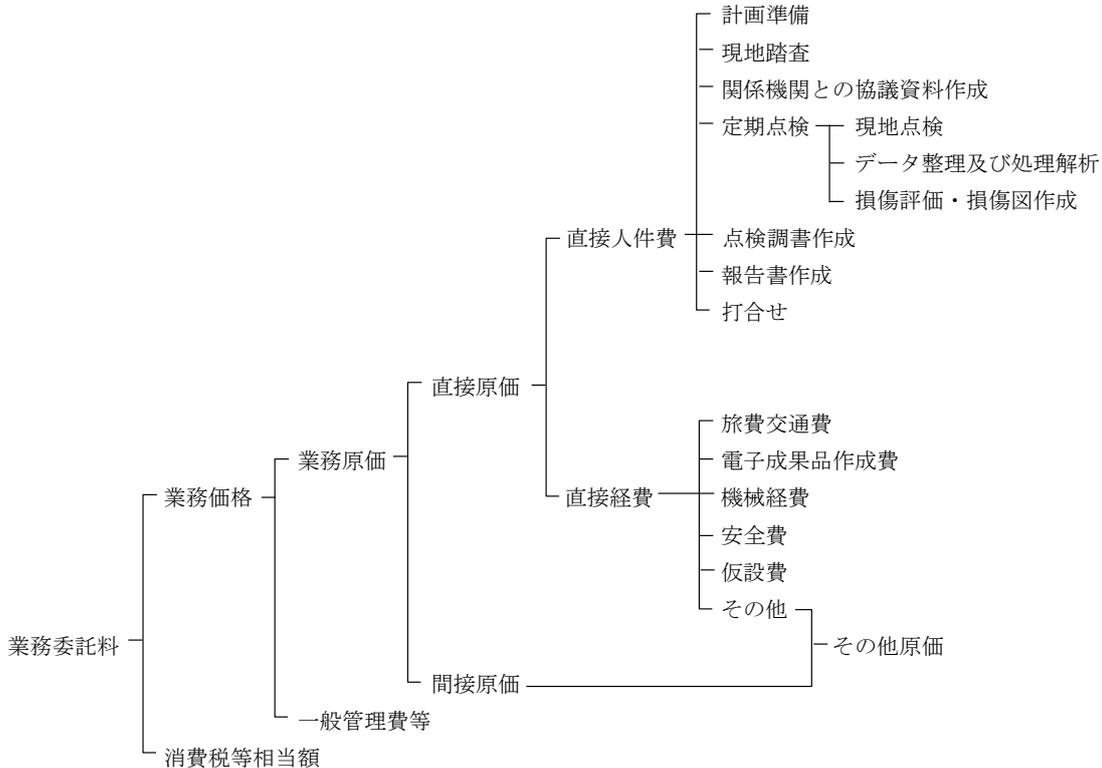
なお、本積算基準は、「設計業務等標準積算基準書（平成 30 年度版）一般財団法人経済調査会」を参考に作成されたものであり、上記資料に改正が生じた場合は、本積算基準の運用については別途考慮する。

2. 適用条件

- ・本積算基準は、2018 年度に実施した鳥取大学 SIP インフラ江島大橋プロジェクト実証試験結果に基づき策定したものである。
  - ・江島大橋のロボット技術を活用した橋梁点検の実証実験において、要求性能を検証できた機能諸元表に掲げるロボット以外で、「点検支援技術 性能カタログ（案）（平成 31 年 2 月時点 国土交通省）」等から引用するロボットについては、業務期間において、「ロボット技術を活用した橋梁点検指針（平成 31 年 3 月）」に基づく精度及び性能確認試験を点検作業前に実施し、用途・目的、近接機構、制御方法の分類別に要求性能を有することを確認・検証した後に用いることができるものとする。
  - ・江島大橋のロボット技術を活用した橋梁点検の実証試験に適用したロボット技術以外の新技术を導入する場合は、さらなる技術開発による点検業務の効率性向上を図るため、必要とする機能等のロボット技術レベルに応じて、歩掛調査を並行して実施し、積算基準の改定を行うこととする。
- 考慮するものとする。
- ・ロボット技術による点検の結果、点検者による近接点検の必要性が生じた場合は、別途積算するものとする。
  - ・第三者被害予防措置の必要性が生じた場合は、別途積算するものとする。

3. 業務委託料

(1) 業務委託料の構成



(2) 業務委託料構成費目の内容

イ. 直接原価

(イ) 直接人件費

直接人件費は、業務に従事する者の人件費とする。

(ロ) 直接経費（積上計上分）

直接経費は、業務処理に必要な経費とする。

直接経費（積上計上分）は、次に示すものとする。

a 旅費交通費

b 電子成果品作成費

c 機械経費

d 安全費

安全費は、安全管理を目的とし、橋梁点検に当たり常に適切な保安施設、交通誘導員を配置し、現場の安全確保に努める費用とする。

(a) 保安施設

「道路工事保安施設設置基準（案）」によるものとし、橋梁点検区間、交通量、交通状況、その他現地の状況等を勘案した保安施設の費用とする。

(b) 交通誘導員

点検調査等の交通障害を防ぎ、現場の安全確保に努めるものとし、交通誘導員の費用とする。

e 仮設費

ロボット技術を用いる上で足場が必要な場合は、別途、費用を計上するものとする。また、枠組足場等を設置する場合も適切に計上する。

(ハ) 直接経費（積上計上するものを除く）

直接経費（積上計上分）以外の直接経費とする。

ロ. 間接原価

間接原価は「土木設計業務等積算基準」による。

※その他原価は直接経費（積上計上するものを除く）及び間接原価からなる。

ハ. 一般管理費等

一般管理費等は「土木設計業務等積算基準」による。

4. 業務委託料の積算

機械経費は「土木設計業務等積算基準」等を参考に必要に応じて計上すること。

## 5. 業務内容

### (1) 計画準備

橋梁台帳等出力，業務計画書作成，部材番号図の作成及び修正等を行う。

- 1) 橋梁台帳等出力点検に先立って，橋梁台帳，過年度の点検調書，橋梁管理カルテ，補修履歴等の出力を行う。なお，必要に応じて計上することとする。また，印刷した資料を貸与する場合は計上しないこと。
- 2) 業務計画書作成業務計画書及び，詳細な橋梁毎の点検計画となる実施計画書の作成及び関連資料等の収集を行う。
- 3) 部材番号図の作成及び修正

「定期点検要領」に従い部材番号図等を作成する。また，橋梁拡幅など構造変更による径間分割等を行う場合は，部材番号図の修正を行う。

### (2) 現地踏査

橋梁定期点検に先立って現地踏査を行い，橋梁の変状（劣化・損傷等）程度を把握する他，橋梁の立地環境，交通状況，交通規制の要否，近接手段等について現場の概況の調査記録（写真撮影含む）を行う。

### (3) 関係機関との協議資料作成

橋梁定期点検において必要な関係機関との協議用資料，説明用資料の作成及び必要な資料等の収集を行う。

### (4) 定期点検

「定期点検要領」に基づき，ロボット技術を用いて，橋梁点検を行う。また，必要に応じて橋梁台帳の記載事項を補完するために現地計測を行う。ただし，路面の点検は，本積算基準では対象外のため別途計上すること。

#### 1) 現地点検

人による近接が困難な橋梁または部位に対し，ロボット技術を活用して有害な損傷を探し出すことに適した近接画像を撮影する。

#### 2) データ整理及び処理解析

ロボット技術によって取得した計測データから損傷の程度を短時間でかつ客観的に判定できるよう整理及び処理解析を行う。一般的には，部材毎もしくは部材が大規模である場合は適切な単位（ブロック※）に分割して，その全体が把握できる展開画像を作成することが望ましい。

#### 3) 損傷評価・損傷図作成

加工・整理された画像等からブロック毎の損傷状況（損傷の種類，程度，範囲等）を把握し，損傷度の評価を行うとともに，必要に応じて特定のブロックの損傷図を作成する。

※型枠目地や撮影効率などを基準に4～5m 間隔で分割した範囲を「ブロック」と定義

### (5) 点検調書作成

点検結果をもとに，「定期点検要領」付録-3 定期点検結果の記入要領（点検調書（その1）～（その9））に基づき点検調書を作成する。この際の損傷度評価は，「定期点検要領」付録-1 損傷評価基準による。

### (6) 報告書作成

点検業務の成果として，作成した資料や点検調書等のとりまとめを行う。なお，点検調書等は定期点検・カルテ入力システムに入力することによりデータ作成を行うものとする。

### (7) 打合せ

打合せは，業務着手時，各作業の中で主要な区切りの時点及び成果品納入時に行う。

#### (a) 業務着手時

業務計画書等をもとに，調査方法，内容等の打合せを行うとともに，橋梁点検に必要な資料等の貸与を行う。

#### (b) 中間打合せ

現地踏査時終了時あるいは現地での点検終了時等の区切りにおいて，必要回数を計上する。

#### (c) 成果品納入時

成果品のとりまとめが完了した時点で打合せを行うものとする。

6. 歩掛

(1) 計画準備

1) 橋梁台帳等出力

(1 業務当たり)

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
橋梁台帳等出力	100 橋未満						1.5	1.5
	100 橋以上						3.0	2.0

- (注) 1. 台帳出力は必要に応じて計上すること。(貸与する場合は計上しない。  
2. 実橋梁数にて計上する。

2) 業務計画書作成

(1 業務当たり)

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
業務計画書作成	100 橋未満			1.5	1.5		6.0	5.0
	100 橋以上			1.5	2.0		7.5	7.0

- (注) 1. 業務計画書作成には資料収集, 実施計画書作成を含む。  
2. 実橋梁数にて計上する。

3) 部材番号図の作成及び修正

(1 日当たり)

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
部材番号図の作成	コンクリート橋						0.5	1.5
	鋼橋						1.5	1.5
部材番号図の修正	コンクリート橋						0.5	1.0
	鋼橋						0.5	1.5

- (注) 1. 作成・修正日数 D は橋梁毎に算出すること。  
2. 作成・修正面積及び日数は少数第 1 位 (少数第 2 位を四捨五入) とする。  
3. 部材番号図の修正は, 構造変更等がある場合に計上する。

部材番号図の作成日数は, 以下の算定式により算出する。

$$D=A1/y$$

A1: 部材番号図作成面積

A1=橋長×全幅員 (地覆外縁間距離)

y: 日当たり作成面積 コンクリート橋  $y=9.44 \times A1^{0.75}$

鋼橋

$$y=7.55 \times A1^{0.85}$$

部材番号図の修正日数は, 以下の算定式により算出する。

$$D=A2/y$$

A2: 部材番号図修正面積

A2=対象径間長×全幅員 (地覆外縁間距離)

y: 日当たり作成面積 コンクリート橋  $y=22.51 \times A2^{0.64}$

鋼橋

$$y=7.86 \times A2^{0.85}$$

## (2) 現地踏査

(10 橋まで)

区分	職種	直接人件費				
		主任 技師	技師 (A)	技師 (B)	技師 (C)	技術員
現地踏査 (定期点検)	外業	1.5		1.5	2.0	
	内業			2.0	1.5	1.5
	計	1.5		3.5	3.5	1.5
現地踏査 (第三者被害予防措置)	外業	1.5		1.5	1.0	
	内業			1.0	1.5	1.5
	計	1.5		2.5	2.5	1.5

(注) 1. 外業には橋梁間の移動時間も含む。

## (3) 関係機関との協議資料作成

(10 機関まで)

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
関係機関との協議資料作成	外業					3.0	3.0	
	内業					4.0	2.5	1.5
	計					7.0	5.5	1.5

(注) 1. 外業は関係機関協議及び不足する資料収集を行うもので、内業は収集した資料等により協議資料及び説明資料に整えるものである。

2. 外業には移動時間も含む。なお、移動に必要な経費は、別途計上すること。

3. 機関数は、協議資料作成を行う機関にて計上する。10 機関以上となる場合は、別途計上すること。

(4) 定期点検

1) 現地点検

本積算基準は、2018年度に実施した鳥取大学SIPインフラ江島大橋プロジェクト実証試験結果に基づき策定したものであり、実証試験に適用したロボット技術以外の新技術を活用する場合には、必要とする機能等のロボット技術レベルに応じて、歩掛調査を並行して実施し、積算基準を改定するものとする。

【ロボット番号：Ⅰ】

分類①（用途・目的）：画像撮影ロボット

分類②（近接機構）：ポール型ロボット

分類③（制御方法）：遠隔操作型ロボット

(1000m<sup>2</sup> 当たり)

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
現地点検						6.8	1.7	5.1

(注) 1. 検査対象面積は小数第1位（小数第2位を四捨五入）とする。

【ロボット番号：Ⅱ】

分類①（用途・目的）：画像撮影ロボット

分類②（近接機構）：車両型ロボット

分類③（制御方法）：遠隔操作型ロボット

(1000m<sup>2</sup> 当たり)

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
現地点検						3.2	1.6	1.6

(注) 1. 検査対象面積は小数第1位（小数第2位を四捨五入）とする。

【ロボット番号：Ⅲ】

分類①（用途・目的）：画像撮影ロボット

分類②（近接機構）：飛行型ロボット

分類③（制御方法）：遠隔操作型ロボット

(1000m<sup>2</sup> 当たり)

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
現地点検						5.8	2	3.9

(注) 1. 検査対象面積は小数第1位（小数第2位を四捨五入）とする。

【ロボット番号：Ⅳ】

分類①（用途・目的）：打音・触診ロボット

分類②（近接機構）：飛行型ロボット

分類③（制御方法）：遠隔操作型ロボット

(100m<sup>2</sup> 当たり)

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
現地点検						1.8	1.2	1.2

(注) 1. 打音検査対象面積は小数第1位（小数第2位を四捨五入）とする。

2) データ整理及び処理解析

本積算基準は、2018 年度に実施した鳥取大学 SIP インフラ江島大橋プロジェクト実証試験結果に基づき策定したものであり、実証試験に適用したロボット技術以外の新技術を活用する場合には、必要とする機能等のロボット技術レベルに応じて、歩掛調査を並行して実施し、積算基準を改定するものとする。

【ロボット番号：Ⅰ】

- 分類①（用途・目的）：画像撮影ロボット  
 分類②（近接機構）：ポール型ロボット  
 分類③（制御方法）：遠隔操作型ロボット (1000m2 当たり)

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)
現地点検							0.4

- (注) 1. 検査対象面積は小数第 1 位（小数第 2 位を四捨五入）とする。  
 2. PC 等の自動処理による解析費が必要となる場合は、直接経費として別途計上する。  
 [データ解析費]=[ 2)の積算額]×r r は 20%を上限とする。

【ロボット番号：Ⅱ】

- 分類①（用途・目的）：画像撮影ロボット  
 分類②（近接機構）：車両型ロボット  
 分類③（制御方法）：遠隔操作型ロボット (1000m2 当たり)

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)
現地点検					0.3	1.1	0.3

- (注) 1. 検査対象面積は小数第 1 位（小数第 2 位を四捨五入）とする。  
 2. PC 等の自動処理による解析費が必要となる場合は、直接経費として別途計上する。  
 [データ解析費]=[ 2)の積算額]×r r は 20%を上限とする。

【ロボット番号：Ⅲ】

- 分類①（用途・目的）：画像撮影ロボット  
 分類②（近接機構）：飛行型ロボット  
 分類③（制御方法）：遠隔操作型ロボット (1000m2 当たり)

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)
現地点検						4.5	2.0

- (注) 1. 検査対象面積は小数第 1 位（小数第 2 位を四捨五入）とする。  
 2. PC 等の自動処理による解析費が必要となる場合は、直接経費として別途計上する。  
 [データ解析費]=[ 2)の積算額]×r r は 20%を上限とする。

【ロボット番号：Ⅳ】

- 分類①（用途・目的）：打音・触診ロボット  
 分類②（近接機構）：飛行型ロボット  
 分類③（制御方法）：遠隔操作型ロボット (100m2 当たり)

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)
現地点検						0.3	0.8

- (注) 1. 打音検査対象面積は小数第 1 位（小数第 2 位を四捨五入）とする。  
 2. PC 等の自動処理による解析費が必要となる場合は、直接経費として別途計上する。  
 [データ解析費]=[ 2)の積算額]×r r は 20%を上限とする。

3) 損傷評価・損傷図作成

本積算基準は、2018 年度に実施した鳥取大学 SIP インフラ江島大橋プロジェクト実証試験結果に基づき策定したものであり、実証試験に適用したロボット技術以外の新技術を活用する場合には、必要とする機能等のロボット技術レベルに応じて、歩掛調査を並行して実施し、積算基準を改定するものとする。

【ロボット番号：Ⅰ】

- 分類①（用途・目的）：画像撮影ロボット  
 分類②（近接機構）：ボール型ロボット  
 分類③（制御方法）：遠隔操作型ロボット (1000m2 当たり)

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
現地点検						1.2	0.7	

(注) 1. 検査対象面積は小数第 1 位（小数第 2 位を四捨五入）とする。

【ロボット番号：Ⅱ】

- 分類①（用途・目的）：画像撮影ロボット  
 分類②（近接機構）：車両型ロボット  
 分類③（制御方法）：遠隔操作型ロボット (1000m2 当たり)

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
現地点検						0.2	0.3	2.0

(注) 1. 検査対象面積は小数第 1 位（小数第 2 位を四捨五入）とする。

【ロボット番号：Ⅲ】

- 分類①（用途・目的）：画像撮影ロボット  
 分類②（近接機構）：飛行型ロボット  
 分類③（制御方法）：遠隔操作型ロボット (1000m2 当たり)

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
現地点検						2.0	13.2	

(注) 1. 検査対象面積は小数第 1 位（小数第 2 位を四捨五入）とする。

【ロボット番号：Ⅳ】

- 分類①（用途・目的）：打音・触診ロボット  
 分類②（近接機構）：飛行型ロボット  
 分類③（制御方法）：遠隔操作型ロボット (100m2 当たり)

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
現地点検					0.3			

(注) 1. 打音検査対象面積は小数第 1 位（小数第 2 位を四捨五入）とする。

## (5) 点検調書作成

(1日当たり)

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
定期点検の点検調書作成						0.5	1.0	1.0

- (注) 1. 上記歩掛は、健全性の診断を含まない点検調書(1)～(9)の作成を行う歩掛である。健全性の診断を行い、点検調書(10)、(11)の作成を行う場合については、別途計上する。
2. 点検橋梁が複数ある場合は、橋梁ごとの調書作成日数を定めるものとする。
3. 定期点検面積が300㎡を超える場合の下限値は1.6日とする。
4. 定期点検面積及び調書作成日数は少数第1位(少数第2位を四捨五入)とする。

定期点検の点検調書作成日数D(日/橋)は、以下の算定式により算出する。

$$D = a \times A1 + b$$

A1: 定期点検面積(㎡/橋)

A1 = 橋長 × 全幅員(地覆外縁間距離)

表 4.4 定期点検の定期点検調書作成の変数値

		a	b	備考
定期点検の点検調書作成	定期点検面積 $A1 \leq 300\text{m}^2$	0.0037	0.47	
	定期点検面積 $A1 > 300\text{m}^2$	0.0016	0.89	D=1.6 日以上

## (6) 報告書作成

(1日当たり)

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
報告書作成				0.5	0.5	1.0	1.0	1.5

- (注) 1. 作成日数は少数第1位(少数第2位を四捨五入)とする。

報告書作成日数Dは、以下の算定式により算出する。

$$D = 0.0001 \times N^2 + 0.057 \times N + 2.1$$

N: 実橋梁数(橋)

## (7) 打合せ

(1業務当たり)

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
打合せ	業務着手時			0.5	0.5	0.5		
	中間打合せ(1回当たり)			0.5	0.5	0.5		
	成果物納入時			0.5	0.5	0.5		

- 備考 1. 打合せには、打合せ議事録の作成時間及び移動時間(片道所要時間1時間程度以内)を含むものとする。
2. 打合せには、電話、電子メールによる確認等に要した作業時間を含むものとする。
3. 中間打合せの回数は、5回を標準とし、必要に応じて打合せ回数を増減する。打合せ回数を増減する場合は、1回当たり、中間打合せ1回の人員を増減する。

## 編集後記

SIP「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」江島大橋プロジェクトは、人による近接目視点検が困難であるという課題を抱えた江島大橋を対象として、SIP インフラ他で開発された新技術の橋梁点検への適用性の検証を行い、「人による近接目視点検が困難な橋梁に新技術が活用できることを実証すること」を目標に掲げたプロジェクトです。

立地条件や環境条件において非常に難易度が高い江島大橋で 100%の安全性を維持したうえで新技術（ロボット技術）を適用し、その運動性能、計測性能、安全性能を検証することはチャレンジングな内容でしたが、この橋梁でロボット技術の適用性を実証できたことは非常に価値が高いものであると言えます。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との協働により実証試験を実施できたことは、「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、およびロボット技術やその技術を用いた橋梁点検手法の習得」、「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り、今後の社会実装に向けた大きな一歩であったと思います。

国土交通省は、2019年2月に「道路橋定期点検要領」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』と道路橋定期点検における新技術（ロボット技術等）活用の位置づけが明記されました。

本プロジェクトでは、それに先駆け実証試験で得られた成果を基に点検業務発注時に橋梁管理者に必要な仕様書や積算の基礎資料を作成しました。これらの資料を基に鳥取県は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」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）」を発出しました。鳥取県では今後ロボット技術の活用事例を増やし、新たな課題抽出や適用性の検証を行いつつ、活用の幅を広げ本格的な社会実装に向かっていくことが期待されます。

最後に、本プロジェクトはSIP「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の事業の一環として実施したものであり、本プロジェクトの実施にあたり国立研究開発法人科学技術振興機構に多大なるご支援をいただきました。ここに心より感謝申し上げます。また、本プロジェクトを実施するにあたりフィールドを提供して頂いた境港管理組合、鳥取県、島根県ならびに実証試験に参加頂いた地元建設コンサルタントの皆様やロボット技術開発者の皆様、そして実証試験の実施や成果の取り纏めにあたり有益なご意見をいただいた「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」の構成員の皆様に対して、多大なるご協力を頂いたことに心より感謝申し上げます。

本プロジェクトの成果をもとに鳥取県が先駆けとなり、ロボット技術を活用した橋梁点検が社会に普及し、橋梁点検の効率化が図られていくことを願っております。

2019年3月

鳥取大学大学院工学研究科 黒田 保

## 江島大橋プロジェクト実証試験報告書

平成 31 年 3 月 28 日 発行

編集者 橋梁点検への新技術の適用性評価委員会

発行者 SIP インフラ地域実装支援鳥取大学チーム

〒680-8552 鳥取市湖山町南 4 丁目 101 番地

鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

TEL : 0857-31-5523

E-mail : tkuroda@tottori-u.ac.jp

・本報告書の内容を他の出版物へ転載する場合には、必ず発行者の了解を得てください。

本取り組みは、内閣府総合科学技術・イノベーション会議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」の中で、JSTが管理法人として担当した活動の一環です。

