「知」の集積と活用の場による革新的技術創造促進事業

ＵＡＶ計測点検手法の手引き（案）

― 海岸保全施設及び農業水利施設 ―

令和３年　３月

国　際　航　業　株　式　会　社

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

目　　次

はじめに

1. 手引きの目的と適用　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　1

2. UAV計測の実証　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　3

3. 海岸保全施設　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４８

4. 開水路　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９０

5. ダ　ム　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２７

6. 頭首工　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１６５

7. 用排水機場　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２０５

はじめに

日本の喫緊な課題の一つとして、急速に進む人口減少と少子高齢化、巨大災害の切迫などとともに、インフラの老朽化が挙げられています。

本手引き（案）で対象とした食料生産に不可欠なインフラである土地改良施設等においても、基幹的な農業水利施設だけでもダム、頭首工、用排水機場が約７千カ所、農業用用排水路は約５万㎞が整備されています。しかし、これらの施設の多くは、戦後の食料増産の時代や高度経済成長期に整備されており、基幹的な農業水利施設の約２割はすでに耐用年数を超過するなど老朽化が進行しています。そのため、ストックマネジメントの現場では、突発事故の増加や施設機能の低下が懸念されると同時に、生産性向上、担い手確保が喫緊な課題として顕在化してきています。

また、施設機能を効率的に保全する取組みとしては、施設の長寿命化とライフサイクルの低減を図る施策が重要であると同時に、今後は限られた財源と人材の中で、最適なインフラ維持管理・更新を確実に実施していかなければならない現状です。

一方、社会では、インターネット、モバイルの普及から、IoT・AI の進化の時代となり、ICT の浸透があらゆるモノに深化し、３次元デジタルデータが付加価値創出の中核にとなり、「計画・設計・施工・維持管理」といったような業務プロセスにも変化をもたらしています。

このため、本手引き（案）では、ロボット技術やICT等の先端技術を活用した新たな点検手法の確立、すなわち，デジタルカメラを搭載した無人飛行機（UAV：Unmanned Aerial Vehicle)、3次元モデリングソフトウェア（SfM：Structure from Motion）を用いた空中写真撮影により、写真画像を用いたひび割れ判読や対象構造物の3次元データに基づく構造物の変状抽出を行い、施設維持管理への適用可能性を検討し、その手法（UAV計測）の精度、効率性等についての事例を取りまとめたものである。

本手引き（案）に記載している知見、事例が、インフラ維持管理の現場での作業安全、作業効率などを高めると同時に、今後の更なる調査・維持管理の高度化に寄与することが出来れば幸いです。

なお、本手引き（案）は、国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 生物系特定産業技術研究支援センターによる「『知』の集積と活用の場による研究開発モデル事業」の研究結果をもとに取りまとめたものです。

研究においては、共同研究者として参加いただいた応用技術（株)、(株)水域ネットワーク、富士フイルム（株）の研究担当者ならびに本研究に実験フィールドを提供していただいた農林水産省地方農政局（関東、北陸、近畿、中国四国、九州）および地元関係者の皆様の協力により実施することができました。ここに記して謝意を表します。

目　　次

1. 手引きの目的と適用　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　1
1.1 手引きの目的　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　1
1.2 手引きの適用　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　2

1. 手引きの目的と適用

本手引きは、「知」の集積と活用の場による研究開発モデル事業(平成 28 年度補正予算)において開発した、無人航空機（UAV: Unmanned Aerial Vehicle)、3 次元モデリング手法または多視点ステレオ写真測量（SfM：Structure from Motion）を活用した農業水利施設及び海岸堤防の点検効率化技術を、ストックマネジメントの事業現場において効果的また事故のないよう適切に利用してもらうために取りまとめたものである。手引きとしては、平成 26 年度官民連携新技術研究開発事業の一環として「農業水利施設及び海岸保全施設のストックマネジメントのための無人航空機（UAV）の活用の手引き(案) 平成 29 年 3 月*」が、UAV 計測を活用した点検調査の総論として取りまとめられている。このため、本手引きは、前手引きにおける実習編として、UAV 計測による施設毎の調査をケーススタディとして取りまとめ、現場技術者が具体的かつ効率的な施設点検方法として利用できるように取りまとめたものである。

1.1 手引きの目的

近年、UAV 撮影や SfM 技術による写真測量は、機体、ソフトの低価格化、さらには、デジタルカメラの高精度・小型化、GNSS 搭載による位置情報取得などにより、高解像度写真より生成される高密度かつ高精度な地形データ（DSM : Digital Surface Model）が手軽に取得できるようになった。

この結果、施設維持管理で実施される点検調査では、アクセス困難箇所への利用が可能になるだけでなく、既存のマニュアル、手引きに記載されているほとんどの施設変状項目が高解像度写真や 3 次元データなどにより定量可能となった。

また、今後は、UAV の性能向上による完全自律飛行、準天頂衛星システムの完成などにより、ますます施設維持管理での点検調査が高度化かつ効率化されていく。さらには、ICT の進歩に伴う計測、通信・制御、画像処理、AI（Artificial Intelligence）などの情報技術が、農業土木分野の現地調査、施工現場へと急速に普及していくと予測される。

このため、本手引きでは UAV 計測を用いた農業水利施設、海岸保全施設の点検調査への活用について、施設毎の撮影方法、3 次元データの解析方法などを具体的に説明し

注）＊国際航業株式会社　国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
公立大学法人 秋田県立大学

たものである。この手引きは、現場技術者が本手引きを広く活用し、点検・維持管理作業へ効率的かつ安全に従事することが可能となり、本研究で開発したUAV の3次元計測をはじめとする新たなICT技術が、将来のインフラ管理手法への発展・活用へのきっかけとなることを目的として作成したものである。

1.2 手引きの適用

本手引きは、農業水利施設および海岸保全施設である堤防・護岸を対象に、

① 中長期的に施設の機能を適切に保全する事業等を担う施設造成者

② 施設の利用と日常管理を行っている施設管理者

③ 地方公共団体などの施設の整備や利用に関係する機関

等の技術者が、「農業水利施設の機能保全の手引き」、「農業用ダム機能診断マニュアル」、「海岸保全施設維持管理マニュアル」に従い、ストックマネジメントの点検の全部もしくは一部をUAV にて実施する際に参考として利用するものである。なお、現時点では、UAV による計測のうち、写真測量技術を活用する際に限定するものとする。

目　　次

2. UAV 計測の実証 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3
2.1 実施地区および手順 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3
2.2 対象施設および調査数量 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5
2.3 計測方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6
2.3.1 計測機器 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6
(1) 計測型 UAV ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6
(2) 簡易型 UAV ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 11
2.3.2 SfM（Structure from Motion） ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 14
2.3.3 飛行撮影方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15
(1) 地上基準点（標定点・検証点） ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15
(2) UAV 撮影 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 17
2.3.4 RTK 測位システム ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 20
2.4 実証結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 22
2.4.1 確認できた変状項目 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 22
2.4.2 ３次元モデル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 23
(1) 点群データの位置精度 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 23
(2) 構造物の形状精度 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 27
2.4.3 変状抽出事例 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 28
(1) ひび割れ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 28
(2) ３次元計測事例 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 30
2.4.4 作業効率性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 39
2.4.5 RTK 測位システム ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 42
(1) 飛行軌道の安定性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 42
(2) 飛行軌道の精度 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 42

参　考　文　献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 47

2. UAV 計測の実証

実証では、対象施設を含めた計測範囲において、UAV 計測の精度検証に必要な地上基準点および撮影のための標定点を設置し、UAV 撮影ならびに SfM による 3 次元解析を行った。解析結果は、3 次元点群データ（物体の形状を 3 次元座標(x, y, z)）の位置精度を検証した上で、3 次元地形モデル、オルソフォトおよび単写真を用いて、構造物のひび割れや変形・歪み等の変状状況を従来点検と比較検討した。なお、UAV 計測の手順については、「農業水利施設及び海岸保全施設のストックマネジメントのための無人航空機(UAV)の活用の手引き(案) 平成 29 年 3 月」に従い実施した。

2.1 実施地区及び手順

実証調査は、図 2.1 に示す農林水産省の 5 地方農政局（関東、北陸、近畿、中国四国、九州）の 5 施設 16 箇所で、図 2.2 に示す手順で実施した。

施設の種別	地区名/施設名称	地区	実施時期
海岸保全施設	① A地区	中四国	H29
	② B地区	九州	H29,H30
開水路	③ C地区	中四国	H29
	④ D地区	北陸	H29
	⑤ E地区	九州	H30
	⑥ F地区	中四国	H31
ダム（ｺﾝｸﾘｰﾄﾀﾞﾑ）	⑦ G地区	中四国	H29
	⑧ H地区	関東	H29
	⑨ I地区	近畿	H30
頭首工・井堰	⑩ J頭首工	中四国	H29
	⑪ K頭首工	関東	H29
	⑫ L井堰	中四国	H29
	⑬ M頭首工	近畿	H30
用排水機場	⑭ N用排水機場	中四国	H29
	⑮ O用排水機場	関東	H29
	⑯ P揚水機場	近畿	H30

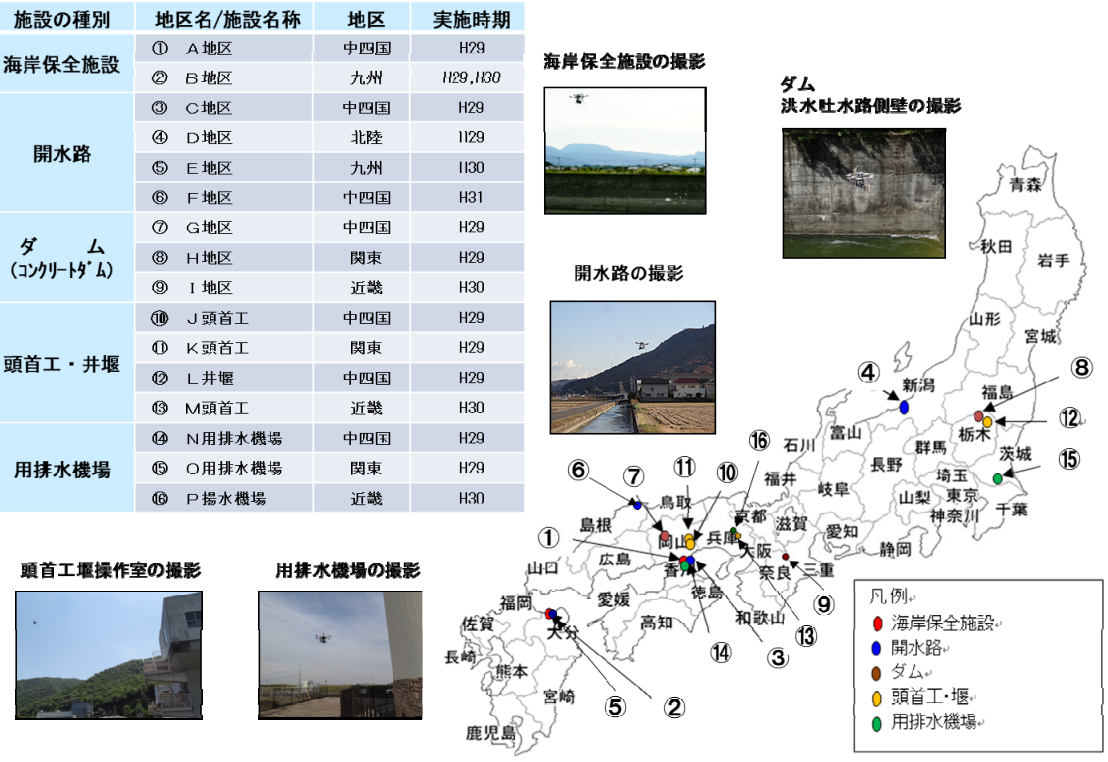


図 2.1　　実証調査を実施した地区及び施設名称

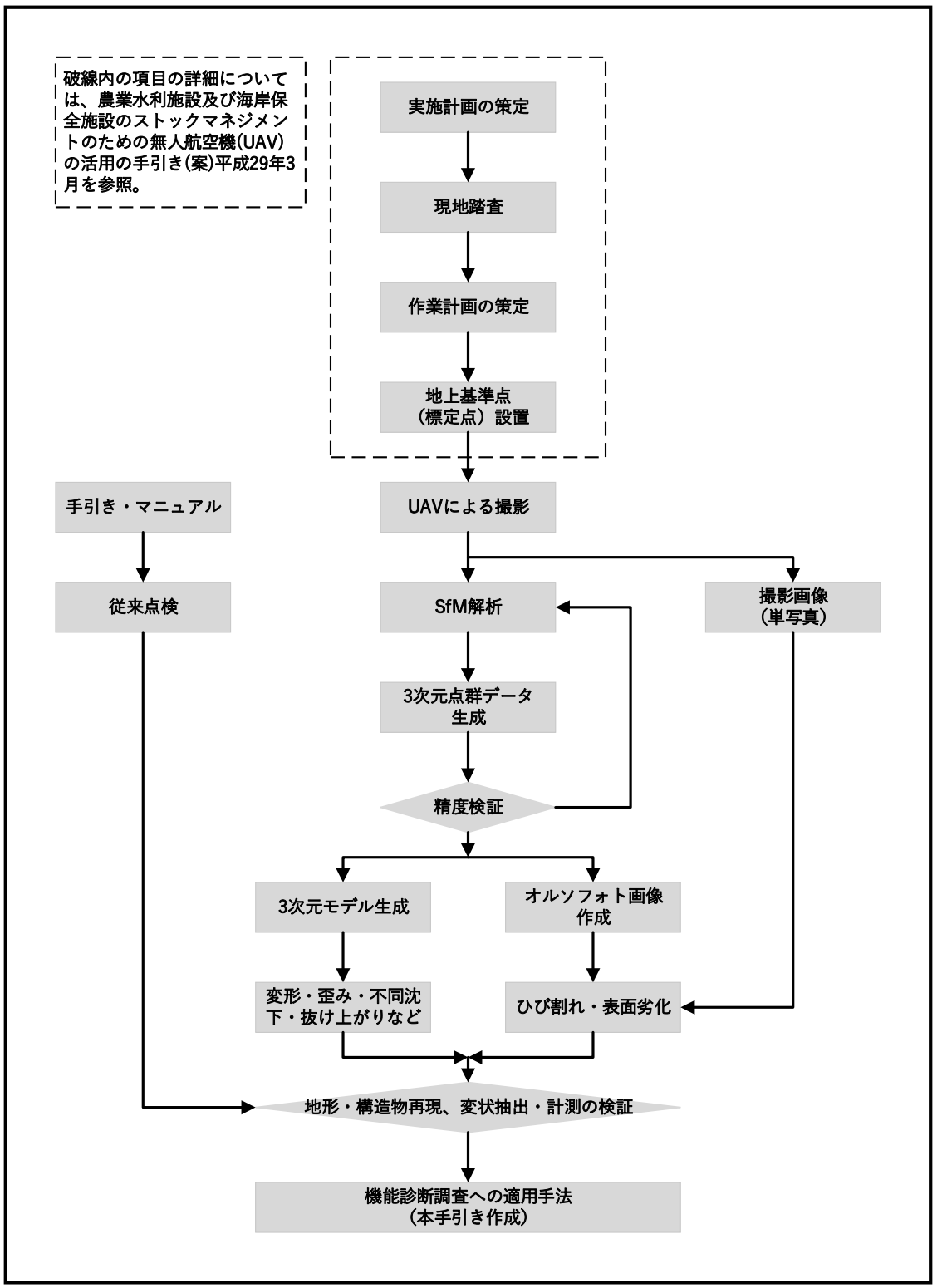


図 2.2　　UAV 計測の実証手順

2.2 対象施設および調査数量

対象施設は、海岸保全施設、農業水利施設４施設（開水路、ダム、頭首工、用排水機場）の５施設である。UAV 計測では、高精度な計測用と広く普及している簡易型の両機種について、地形・構造物再現、変状抽出・計測の検証を実施し、機能診断調査への適用性について取りまとめた。

表 2.1　　実証調査の対象施設及び飛行回数

単位：飛行回数

施　設	名　　称	地　区	調査年	使用UAV（焦点距離）		
				簡易型	計測型	
				（3.6mm）（8.8mm）	（50mm）	（135mm）
海岸保全施設	A地区	中四国	2017.6	2	2	2
	B地区	九州	2017.10	2	2	2
			2018.8	ー	2	1
開水路	C地区	中四国	2017.12	2	2	2
	D地区	北陸	2017.11	ー	1	1
	E地区	九州	2018.8	ー	2	2
	F地区	中四国	2019.4	ー	2	ー
ダム	G地区	中四国	2017.7	1	1	1
	H地区	関東	2017.7	ー	1	1
	I 地区	近畿	2018.7	1	1	1
頭首工・井堰	J頭首工	中四国	2017.7	1	1	1
	K頭首工	関東	2017.7	ー	1	1
	L井堰	中四国	2017.7	1	1	1
	M頭首工	近畿	2018.7	1	ー	ー
用排水機場	N用排水機場	中四国	2017.7	1	1	1
	O用排水機場	関東	2017.12	ー	1	1
	P揚水機場	近畿	2018.7	1	ー	ー

2.3 計測方法

2.3.1 計測機器

空中写真撮影に用いる UAV は、ひび割れ抽出や３次元計測など高解像度の画像を取得するため、装着レンズを交換可能な重量の重い一眼レフカメラ（SONY α7R II、α9）を搭載した大型の計測型（Spider6：ルーチェサーチ社）とした。一方、市場ではコンパクトデジカメ相当のカメラが搭載された小型の簡易型（Phantom3,4：DJI 社）が広く普及している。このため、本手引きでは、これら２機種とその撮影機材を活用し、施設点検への活用方法を検討してみた。

なお、UAV の選定では、「政府機関等における無人航空機の調達等に関する方針について」（令和２年９月 14 日、関係省庁申し合わせ）により、令和３年４月１日以降に政府機関等で行われる無人航空機の調達、詳細な 3D 地図の作成のための測量業務等の機密性の高い情報を取り扱う業務等の調達においては、事前に内閣官房と協議することが求められている。

(1) 計測型 UAV

1) 望遠撮影

① レンズ交換式デジタルカメラ

オートフォーカスで撮影が可能で、10bit 以上の RAW 形式で画像を記録できるカメラとした。具体的には、記録画素数が多く、画素サイズが 4.5μm×4.5μm と小さいことから、詳細画像（ひび割れ幅 0.2mm をターゲット）の取得に適していると判断した図 2.3 に示すソニー株式会社製 α7R II を選定した。

撮像素子：35mm フルサイズ（35.9mm × 24.0mm）CMOS センサ
最大記録画素数：7952 画素 × 5304 画素
画素サイズ：4.5μm × 4.5μm
重量（バッテリー，記録メディアを含む）：625g

図 2.3　　計測型カメラ（ソニー株式会社製 α7R II）

② レンズ

レンズは、図 2.4 に示すように、オートフォーカスで撮影可能であり、撮影距離（鉛直写真の場合は、UAV 飛行高度）が 10m前後で幅 0.2mm のひび割れの抽出が可能な画像解像度を確保できる焦点距離 135mm を選定した。

焦点距離：135㎜、画角：15° × 10° （18° ）
レンズ構成：11 群 14 枚
開放絞り（F 値）：2.8
フォーカス：オート，マニュアル
重量：614g

図 2.4 135mm レンズ（カールツァイス株式会社製 Batis 2.8/135）

2) 通常撮影

① レンズ交換式デジタルカメラ

オートフォーカスで撮影が可能で、10bit 以上の RAW 形式で画像を記録できるカメラとした。すなわち、三次元計測では、写真画像のオーバーラップ率を大きくとる必要があるため、短時間での連写機能が不可欠となる。したがって、カメラは、画像処理速度が速い積層型 CMOS センサを搭載する図 2.5 に示すソニー株式会社製 α 9 を選定した。

撮像素子：35㎜ フルサイズ（35.6㎜ × 23.8㎜）
積層型 CMOS センサ（画像処理速度の高速化）
最大記録画素数：6515 画素 × 4345 画素
画素サイズ：5.5μm × 5.5μm
重量（バッテリー，記録メディアを含む）：673g

図 2.5 計測型カメラ （ソニー株式会社製 α 9）

② レンズ

レンズは、図 2.6 に示すように、オートフォーカスで撮影可能であり、撮影距離（鉛直写真の場合は、UAV 飛行高度）が 50m前後で 10mm の地上解像度を確保できる焦点距離 50mm を選定した。

焦点距離：50㎜、画角：39° × 27° （47° ）
レンズ構成：4 群 6 枚
開放絞り （F 値）：2.0
フォーカス：マニュアル
重量：320g

図 2.6 50mm レンズ（カールツァイス株式会社製 Loxia 2/50）

3) ジンバル

通常、三次元計測では、飛行高度 50m 前後を一定高度、直線コースで垂直撮影する方法であり、UAV 機体は安定した飛行形態となる。このため、三次元計測では、多くの UAV に装着されている二軸ジンバルを使用した。

また、細かなひび割れ（0.2mm）画像の撮影では、飛行高度 10m前後の低空飛行で撮影範囲が小さくなるため、対象とするひび割れをピンポイントで撮影できるように、カメラの安定性を確保し、撮影時の機体動揺によるブレを極力低減させる必要がある。

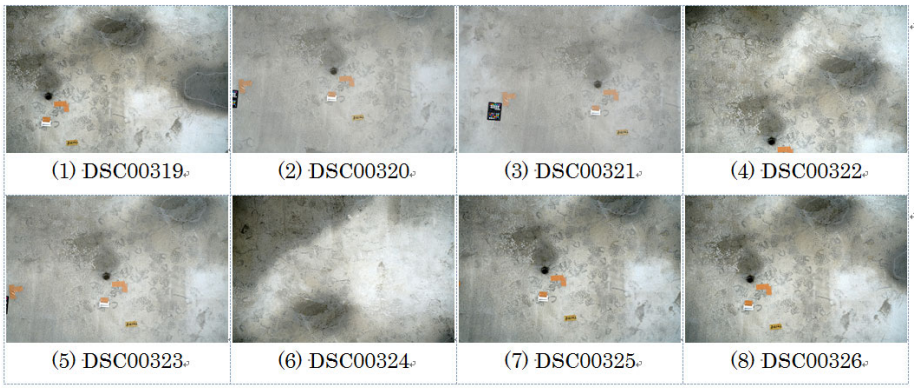
このため、ひび割れ（0.2mm）画像の撮影では、UAV の 3 方向の空中姿勢の安定に対応できる三軸ジンバル（図 2.7）を使用した。三軸ジンバルには、動きの支点となる軸が 3 つあり、パン（水平・左右）、ティルト（垂直・上下）、ロール（回転）の 3 方向に対応できることが特徴である。

二軸ジンバルと三軸ジンバルを用いた撮影画像の比較は、写真 2.1 に示すとおり、二軸ジンバルの撮影範囲が大きく変動している。一方、三軸ジンバルでは、撮影位置がほとんど変動せず、姿勢制御能力の高さがわかる。

パン軸制御　：± 360°
連続回転
ティルト軸制御：± 360°
連続回転
ロール軸制御：± 40°

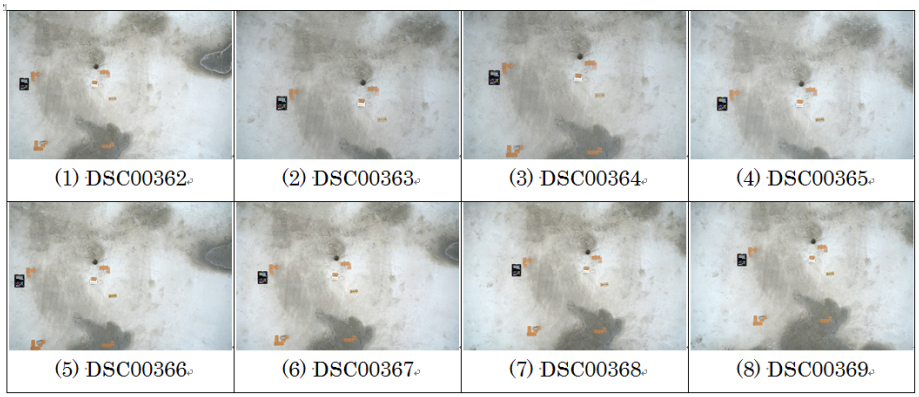
図 2.7　　三軸ジンバルと制御性能

【二軸ジンバルによる撮影(4 秒間隔)】



(1) DSC00319　(2) DSC00320　(3) DSC00321　(4) DSC00322
(5) DSC00323　(6) DSC00324　(7) DSC00325　(8) DSC00326

【三軸ジンバルによる撮影(4 秒間隔)】

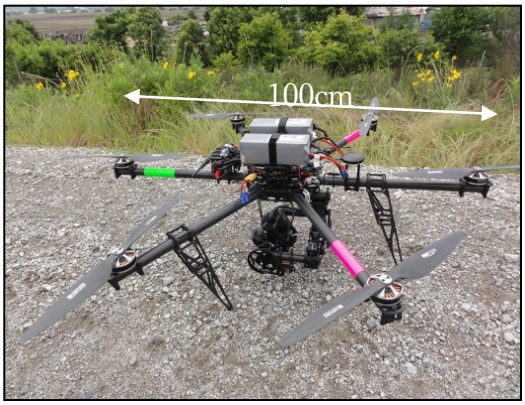


(1) DSC00362　(2) DSC00363　(3) DSC00364　(4) DSC00365
(5) DSC00366　(6) DSC00367　(7) DSC00368　(8) DSC00369

写真 2.1　　二軸ジンバル装着時と三軸ジンバル装着時の画像比較

4) UAV 本体

機種としては、ジンバルに装着したレンズ交換式デジタルカメラを搭載可能で、十分な飛行時間が確保でき、自律飛行システムに必要な基本機能・機材を有しているルーチェサーチ社の SPIDER 6 を計測型 UAV として選定した。



機体重量：3, 800g
外形寸法
：1, 000 mm × 1, 000 mm × 400mm
ローター：モータ駆動 × 6
耐風：15m/s 以下
飛行時間：10 分～25 分
電池：リチウムポリマー電池
最大搭載重量：6, 000g
最大到達高度：250m

図 2.8　　SPIDER 6（ルーチェサーチ株式会社製）

5）画像伝送装置等

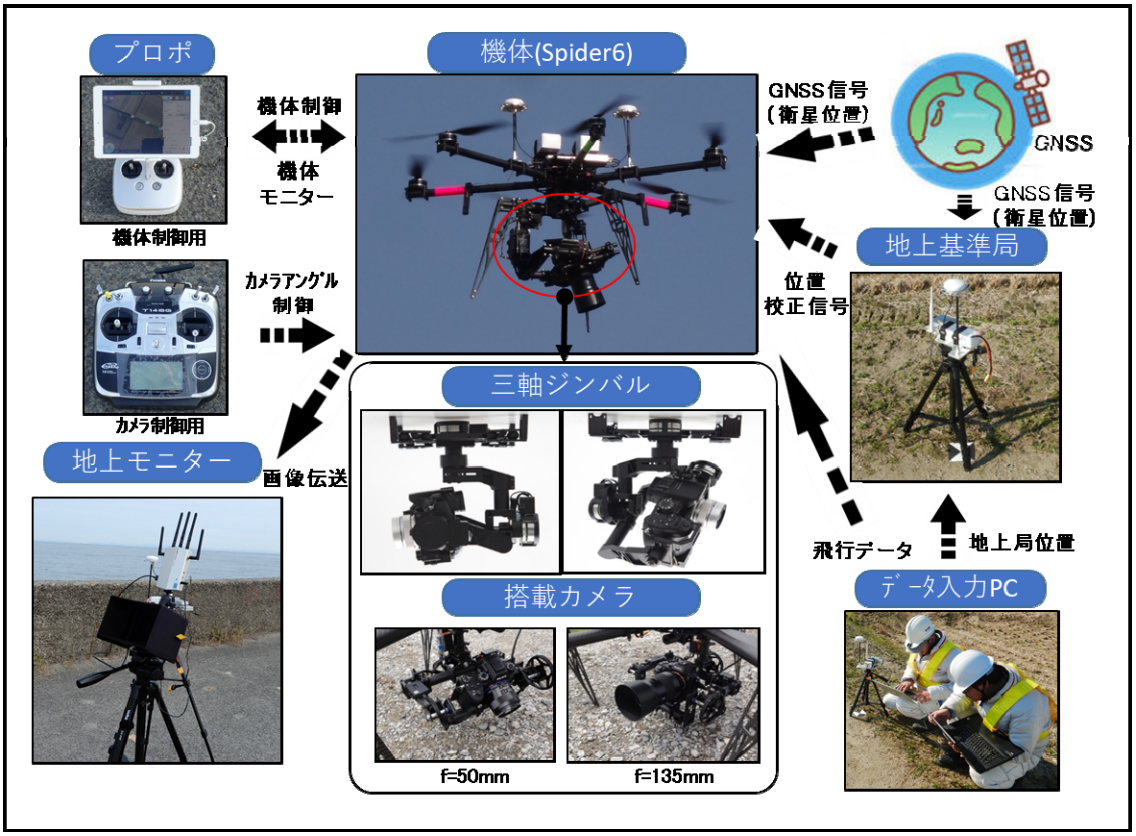


図 2.9　　画像伝送装置等

UAV 計測では、予めプログラミングした飛行コースに沿って GNSS を利用した自動航行、操縦者が機体を目視しながら操縦レバーにより操縦するマニュアル航行の 2 通りがある。

画像伝送装置は、どちらの航行においても、撮影範囲内の状況を確認できるため、対象物の撮影漏れ、機体との距離が離れた場合における安全確保等などに役に立つ。

特に、自動航行では、予め飛行コース設定をパーソナルコンピュータより転送しておくと、高精度な三次元モデル・オルソ作成に必要な撮影コース、撮影ラップ率などの飛行を簡便に実施することができる。このため、本手引きの調査では、図 2.9 に示すとおり、画像伝送機能等を用いて撮影作業を行った。

(2) 簡易型 UAV

1) UAV 本体

機種としては、現時点で広く普及し、比較的安価に購入でき、操作や持ち運びも容易な機種として、表 2.2 に示す DJI 社製 Phantom 3 ,4 を選定した。

計測型との違いは、搭載カメラの画像解像度と機体の大きさ（安定性）であり、搭載カメラの画像解像度は、図 2.10 に示すとおりである。

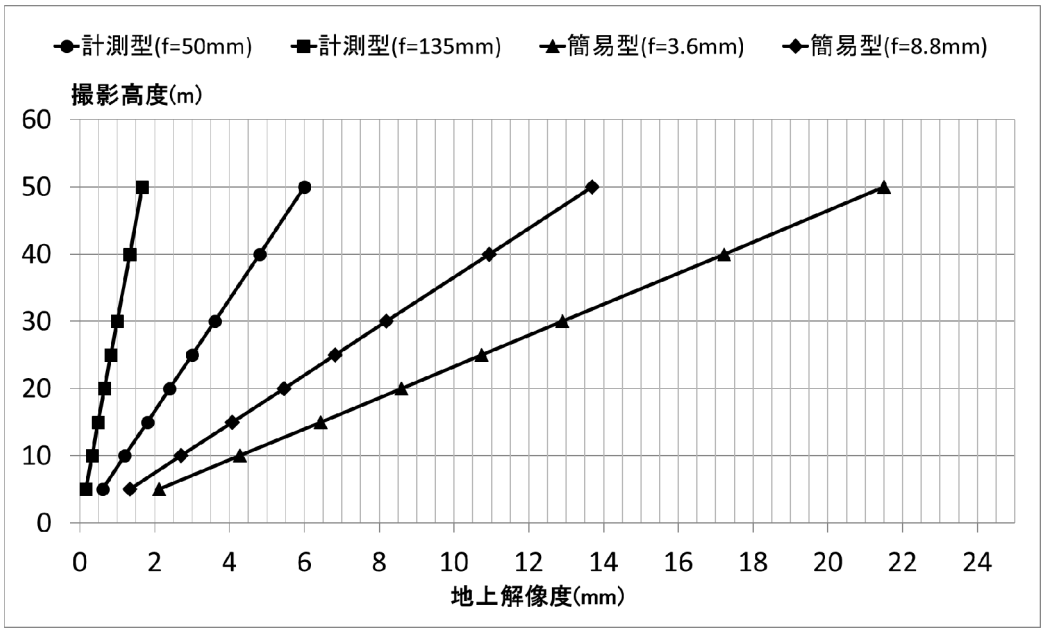


図 2.10　　撮影高度と地上解像度の関係

すなわち、離隔距離（被写体までの距離）が同じ場合は、Phantom3,4 の撮影画像の解像度が劣るため、SPIDER 6 に搭載したカメラと同等画像解像度を得るには、被写体に近接して撮影することになる。

ただし、Phantom 3 ,4 が搭載しているカメラは広角レンズであるため、SPIDER 6 に搭載したカメラに比べ 1 画郭あたりの撮影範囲が広い。なお、Phantom 3 ,4 は、機体が小型軽量であるため、風の影響を受けやすく、風速 5m/s 以上では、飛行が困難である。

表 2.2(1)　　Phantom 3 （DJI 社製）

	Phantom 3 -Pro	
	機体重量	1.28kg
	飛行時間	約23分
	バッテリー	リチウムポリマー電池（4480mAh）
	通信装置	2.4GHz帯（2000m通信可能）
	最大飛行速度	16m/s(ATTIモード、無風時)
	その他	3軸ジンバル装備 自立航行可能 自動帰還機能装備
	カメラ ・センササイズ　　1/2.3型 ・有効画素数　12.4Mピクセル ・解像度　4000×3000 ・画素サイズ　1.6μ×1.6μ ・レンズ　FOV　94°、20mmf/2.8　、f=3.6mm	

表 2.2(2)　　Phantom4（DJI 社製）

	Phantom 4 -Pro	
	機体重量	1.39kg
	飛行時間	約30分
	バッテリー	リチウムポリマー電池（5870mAh）
	通信装置	2.4GHz帯（4000m通信可能）
	最大飛行速度	16m/s(ATTIモード、無風時)
	その他	三軸ジンバル装備 自立航行可能 自動帰還機能装備
	カメラ ・センササイズ　　1型 CMOS ・有効画素数　20Mピクセル ・解像度　5477×3652(3:2アスペクト比) ・画素サイズ　2.4μ×2.4μ ・レンズ　FOV　84°、24mmf/2.8　、f=8.8mm	

2）画像伝送装置等

簡易型 UAV も、計測型 UAV 同様に、予めプログラミングした飛行コースに沿って GNSS を利用した自動航行、操縦者が機体を目視しながら操縦レバーにより操縦するマニュアル航行の 2 通りがある。

簡易型 UAV 用コントローラーは、図 2.11 に示すように、コントローラー電波発信機、撮影画像受信機及びディスプレイが一体となっているが、どちらの航行においても、撮影範囲内の状況を確認できるため、対象物の撮影漏れ、機体との距離が離れた場合における安全確保等などに役に立つ。

すなわち、計測時には、リアルタイムで送られてくる撮影画像を確認しながら、UAV 本体の飛行とカメラレンズの向きを制御した。

また、自動航行では、計測型 UAV 同様に、専用のソフトを利用することで、飛行コース設定をパーソナルコンピュータより転送可能であり、高精度な三次元モデル・オルソ作成に必要な撮影コース、撮影ラップ率などの飛行を簡便に実施可能とする。

図 2.11　　簡易型 UAV 用コントローラー

2.3.2 SfM（Structure from Motion）

代表的な SfM（写真測量用）は、表 2.3 に示すとおりであるが、本手引きでは、UAV 画像から自動生成される相似モデルを、現地基準点データより自動で絶対評定（絶対モデル）を生成するなどソフト機能が優れ、点群精度が安定している Pix4D mapper を 3 次元モデリングソフトウェアとして採用した。

表 2.3　　国内で使用されている主な SfM ソウトウェア（写真測量用）

製品名	PhotoScan Professional Edition	Smart3D Capture Master	Pix4D mapper Pro
開発社	Agisoft 社	Acute3D 社	Pix4D 社
開発国	ロシア	フランス	スイス
特　徴	✓ 最も低価格 ✓ カメラレンズのキャリブレーション補正を解析処理時に同時に行わない	✓ 高い画像の処理能力 ✓ キャリブレーションを行い、高精度の画像処理 ✓ 優れた TIN 表示等により、ビューア表示が繊細	✓ 撮影画像を用いた精細なキャリブレーション補正で極めて高精度 ✓ 国内及び欧米で多くの実績

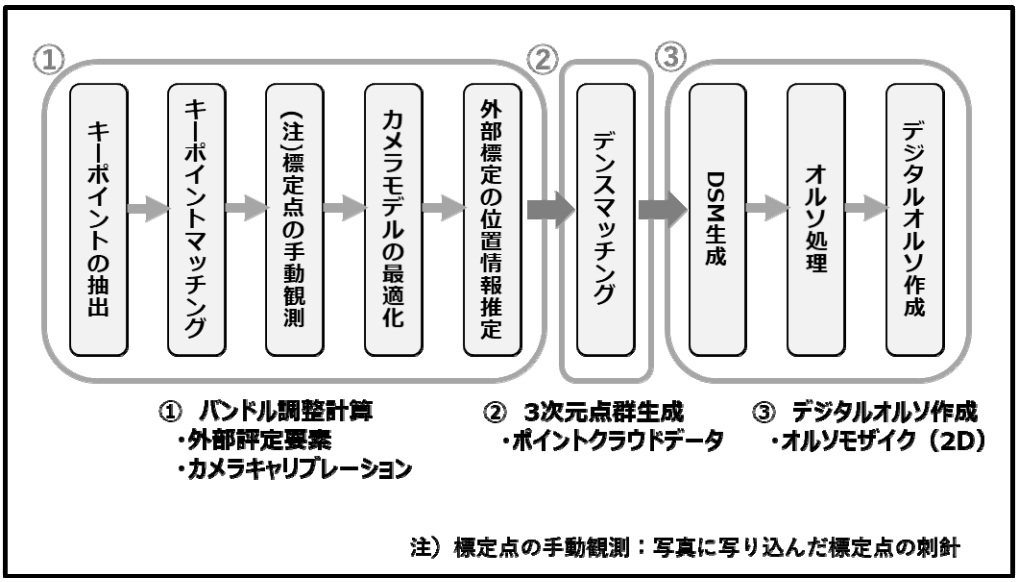


図 2.12　　Pix4D によるデータ処理手順

UAV により撮影した垂直写真及び斜め写真は、図 2.12 に示すように、標定点・検証点を用いた実測結果との比較より 3 次元点群データの精度を検証し、3 次元地形モデル、デジタルオルソ画像(正射投影画像)を作成した。

2.3.3 飛行撮影方法

(1) 地上基準点（標定点・検証点）

1) 設置方法

3 次元計測で必要となる標定点・検証点は、図 2.13 に示す標識を「空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案）」（国土交通省）及び「UAV を用いた公共測量マニュアル（案）」（国土交通省）を参考に、絶対位置誤差 5cm 以下になるように配点した（図 2.14 参照）。また、現場状況等により上記要領で配点できない場合は、設置可能な地点において精度検証のバランスを考慮して設置した。

なお、人の立ち入りが困難な施設では、写真で判読、特定が可能な物標をＴＳ測量により計測し、3 次元計測の標定点または検証点として利用した。

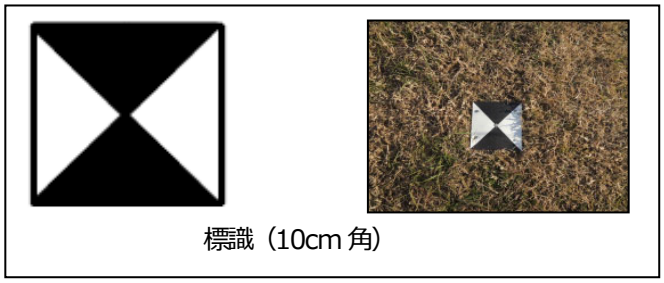


図 2.13　　標定点の標識（対空標識）

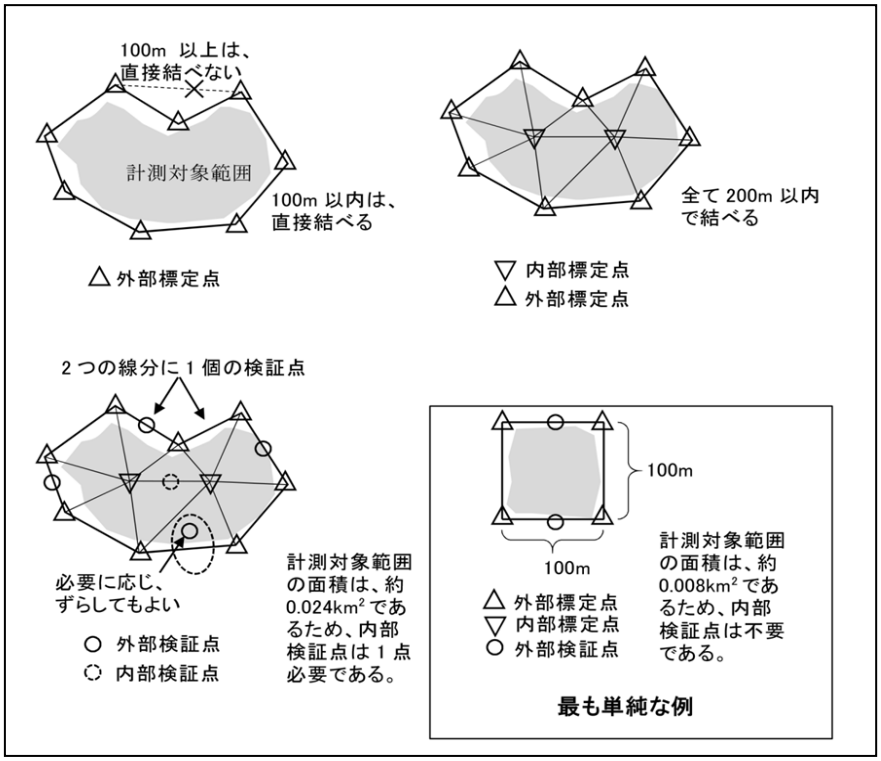


図 2.14　「UAV を用いた公共測量マニュアル（案）」における標定点・検証点の配置例

2）測量方法

標定点及び検証点の測量は、下記に示す要領で実施した（図 2.15 参照）。

ⅰ　選定・対空標識設置

・計測範囲の両端で視通が確保できる 2 点（VRS1、VRS2）を選定する。

・VRS 点を含む、始点～終点まで概ね 50 メートル間隔で対空標識を設置する。

ⅱ　VRS－GNSS 測量

・選定した 2 点（VRS1、VRS2）を VRS スタティック測位により計測し、基準点とする。

ⅲ　TS（トータルステーション）測量

・既知点（基準点）である VRS1、VRS2 にトータルステーションを据えて、それぞれを視準方向とし、対空標識を放射法で計測する。

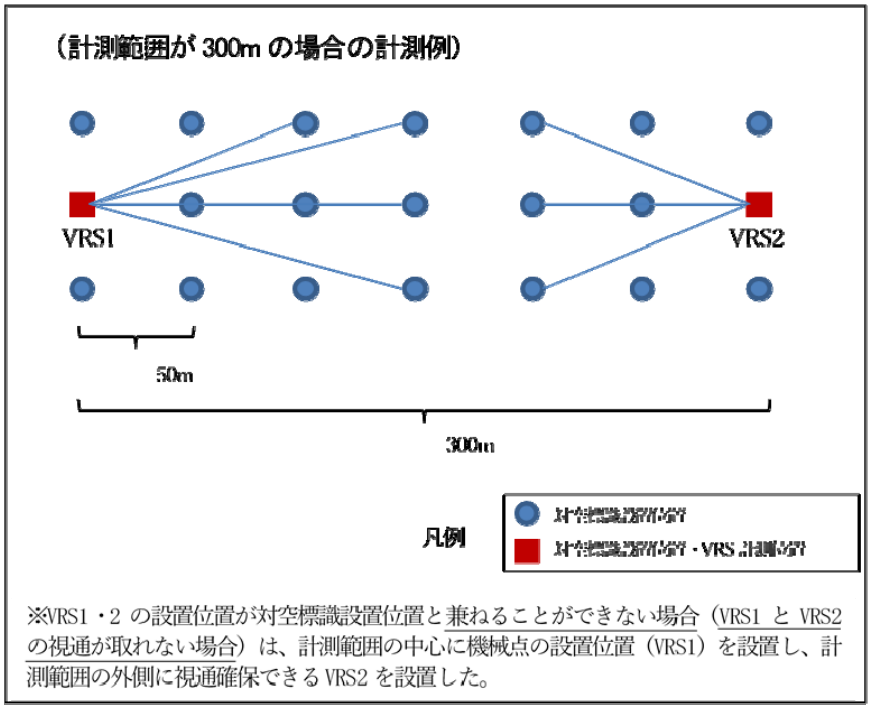


図 2.15　　標定点・検証点における測量概要

⑵ UAV 撮影

対象施設の撮影方法は、表 2.4、図 2.16 に示すとおりであり、対象施設の形状、対象とする変状及び撮影環境などより、撮影方向（垂直、斜め）、コース・スポット（水平・鉛直・定点）撮影、撮影高度（近接、低空、通常）を決定する。

表 2.4　　対象施設の UAV 撮影方法

対象施設	撮影方向		飛行方法			撮影高度		
	垂直	斜め	水平	鉛直	定点	近接	低空	通常
開水路	○	○	○	－	－	－	○	○
ダ　ム	○	○	○	－	○	○	－	○
頭首工・堰	○	○	○	－	○	○	－	○
用排水機場	○	○	○	○	○	○	－	○
海岸保全施設	○	○	○	－	－	－	○	○

本手引きでの撮影方法は、国土交通省が、2016 年 4 月より導入した「空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案）」および「UAV を用いた公共測量マニュアル（案）」を参考とした。この要領、マニュアルでは、鉛直撮影を基本とし、地形精度は絶対位置誤差 5cm 以下の 3 次元計測を目的としている。

本手引きの対象は、土工でなくインフラ施設であるため、撮影では水平面だけでなく鉛直面の計測も必要となる。このため、本手引きでは、計測に用いる画像を垂直画像に加え、斜め画像も利用し、3 次元地形モデルを構築・検証した。なお、撮影の実施にあたって考慮した撮影諸元は、次に示すとおりである。

①　撮影方向

計測対象面の傾きや UAV の飛行の制約などの撮影環境を考慮して垂直撮影、斜め撮影を行った。

②　飛行方法

水平（コース）撮影は、カメラ性能による撮影幅、解像度を考慮し、計測範囲内を同一高度で直線状に飛行させて撮影を行った。また、用排水機場では鉛直（コース）で直線上に飛行、ダム、頭首工・堰では定点（ホバリング）で撮影を実施した。

③　撮影高度

被写体までの距離（カメラと被写体の離隔距離）は、UAV の飛行性能、安全性、法

規制などに加え、地上画素サイズから決定した。本手引きでは、具体的に実証結果から、許容ひび割れ幅(幅 0.2mm 以上)のひび割れや微細変状を確認する場合、近接（定点：10m 未満)、低空飛行（コース：10m～20m 前後)、3 次元計測による変状を対象とする場合、通常（コース：30～60m）の飛行高度とした。

④　地上画素サイズ：5mm /画素以下

国土交通省の要領やマニュアルでは、絶対位置誤差 5cm 以下の計測に求められる地上画素サイズが 1cm /画素以下であることから、垂直撮影については、原則 5mm /画素以下とした。

⑤　オーバーラップ率：80%以上（図 2.17 参照）

垂直撮影は、国土交通省の要領やマニュアルを参考としてオーバーラップ率 80%以上とした。

⑥　サイドラップ率：60%以上（図 2.17 参照）

垂直撮影は、国土交通省の要領やマニュアルを参考としてサイドラップ率 60%以上とした。

⑦　撮影時間間隔

飛行速度、オーバーラップ率、画像ファイルの記録速度などから決定した。

⑧　撮影範囲（図 2.17 参照）

垂直撮影は、「UAV を用いた公共測量マニュアル（案)」を参考として、施設全体及びその外側に画像 1 枚分以上を確保した。

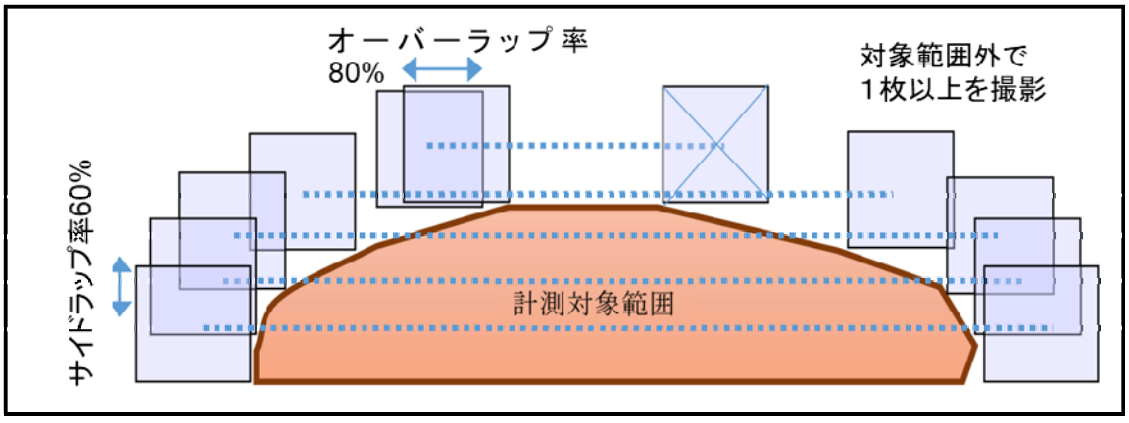


図 2.17　　「UAV を用いた公共測量マニュアル（案)」における画像撮影範囲の例

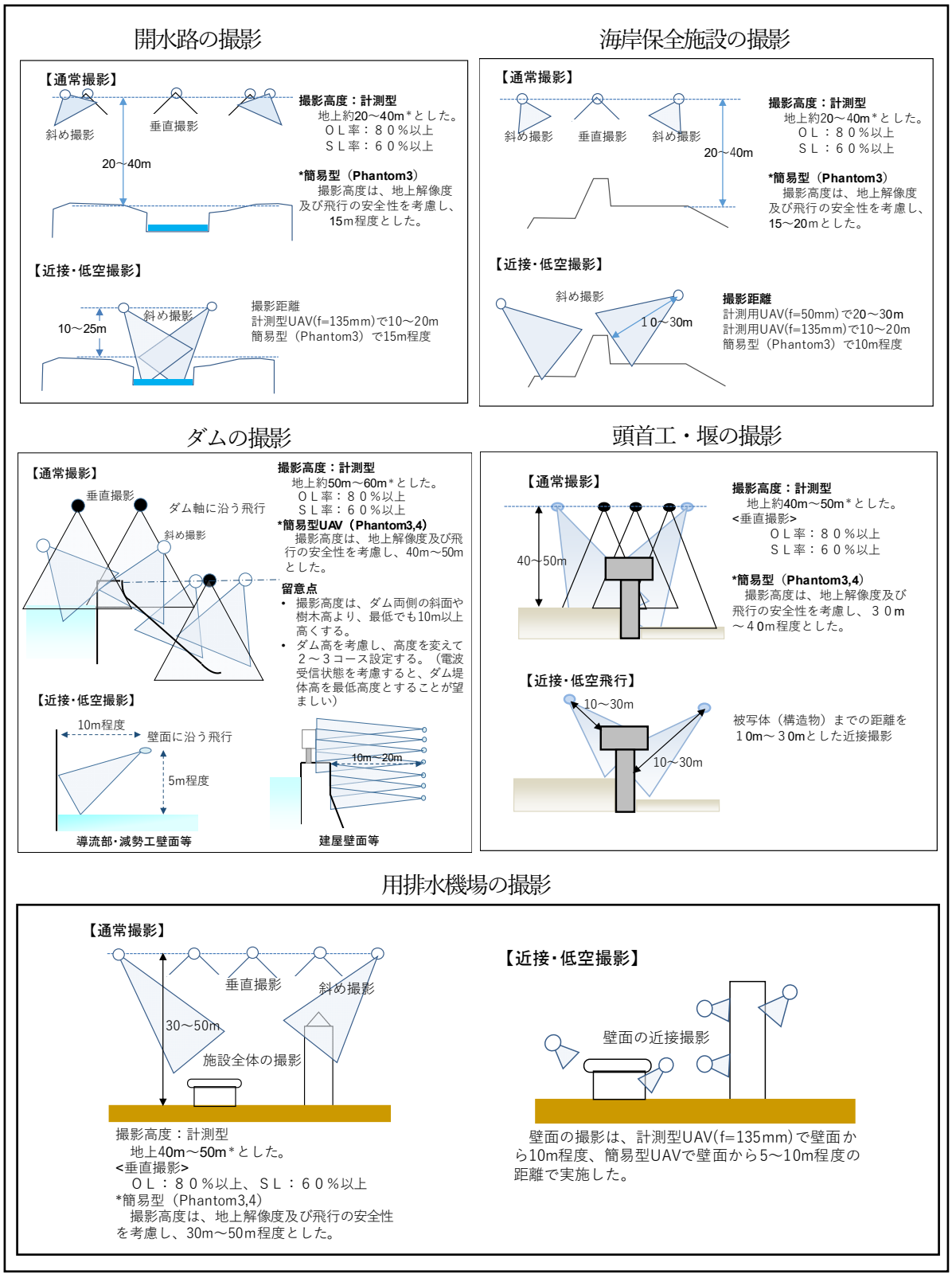


図 2.16　　対象施設の UAV 撮影方法概図

2.3.4　RTK 測位システム

通常、UAV に搭載されているフライトコントローラ（flight controller：飛行制御装置）は、内部に衛星測位（GNSS：Global Navigation Satellite System）装置、気圧高度計、電子コンパス等のセンサが組み込まれており、これらセンサの計測値により、自律航行の制御を可能としている。

本手引きで紹介する UAV 計測では、現在、多くの UAV で採用されている単独測位（point positioning）方式の GNSS 装置を用いた自律飛行を用いている。

この単独測位は、GNSS 衛星から送信された衛星の位置や時刻などの情報を 1 台のアンテナで受信し、衛星から電波が発信されてから受信機に到達するまでに要した時間を測り、それを距離に変換する。このため、原理的には、3 基の衛星から受信機までの距離より受信機の位置を求めることができるが、受信機の時計の精度が低いことから、通常は、4 基以上の衛星の電波から受信機の位置を求めている。

この単独測位の欠点は、衛星の位置誤差や衛星からの電波が対流圏や電離層を通過するときの電波遅延などから、数 m の測位誤差が生じることにある。また、気圧高度計による高度計測では、離陸時、制動時、あるいは長時間の飛行時における気流変動の影響により、計測される高度に 1m 以上の誤差を生じさせている。

さらに、電子コンパスによる機体の姿勢計測では、方位磁石と同じように地磁気を検知する機能であることから、金属の構造物や高圧電線により生じる磁気干渉の影響を受け、計画飛行コースを外れることが多く、また、機体進行方向に対して機体角度と一致しないことが多い。

本手引きで対象とする開水路、海岸保全施設では、ひび割れ等の変状を点検するコンクリート壁面が低くかつ直立しており、その施設形態が直線上で長い上に、場合によっては屈曲部が存在するという特性を有している。

さらに、将来的には、微細なひび割れ等の変状を抽出可能とする高精度なオルソ画像を構築することが望まれると予想される。

このため、撮影では、低空飛行による望遠撮影、施設屈曲部での自律飛行を実施することになり、撮影画像の重複が一定になるように、正確な飛行位置を制御する RTK-GNSS 装置の活用が考えられる。

したがって、本手引きでは、RTK-GNSS 測位による飛行制御方法を用いて、①飛行軌道の安定性、②飛行軌道の精度について、従来の GNSS 単独測位と比較検証した。

RTK-GNSS 装置を利用するシステムでは、図 2.18 に示すように、2 台の GNSS 受信器を用い、1 台の受信器は、絶対位置が既知である点に固定局（基準局）として設置す

る。このため、固定局は、衛星から受信した情報とあらかじめ把握している絶対位置との差分を測定し、その差分情報を、もう１台の受信器（移動局：UAV）に伝える。

このため、移動局では、自身がGNSS衛星から受信した情報を、固定局から得た差分情報を元に補正することにより、平面位置については単独測位方式のGNSSより、高度については気圧高度計より、格段に高い精度で測位を行うことができる。

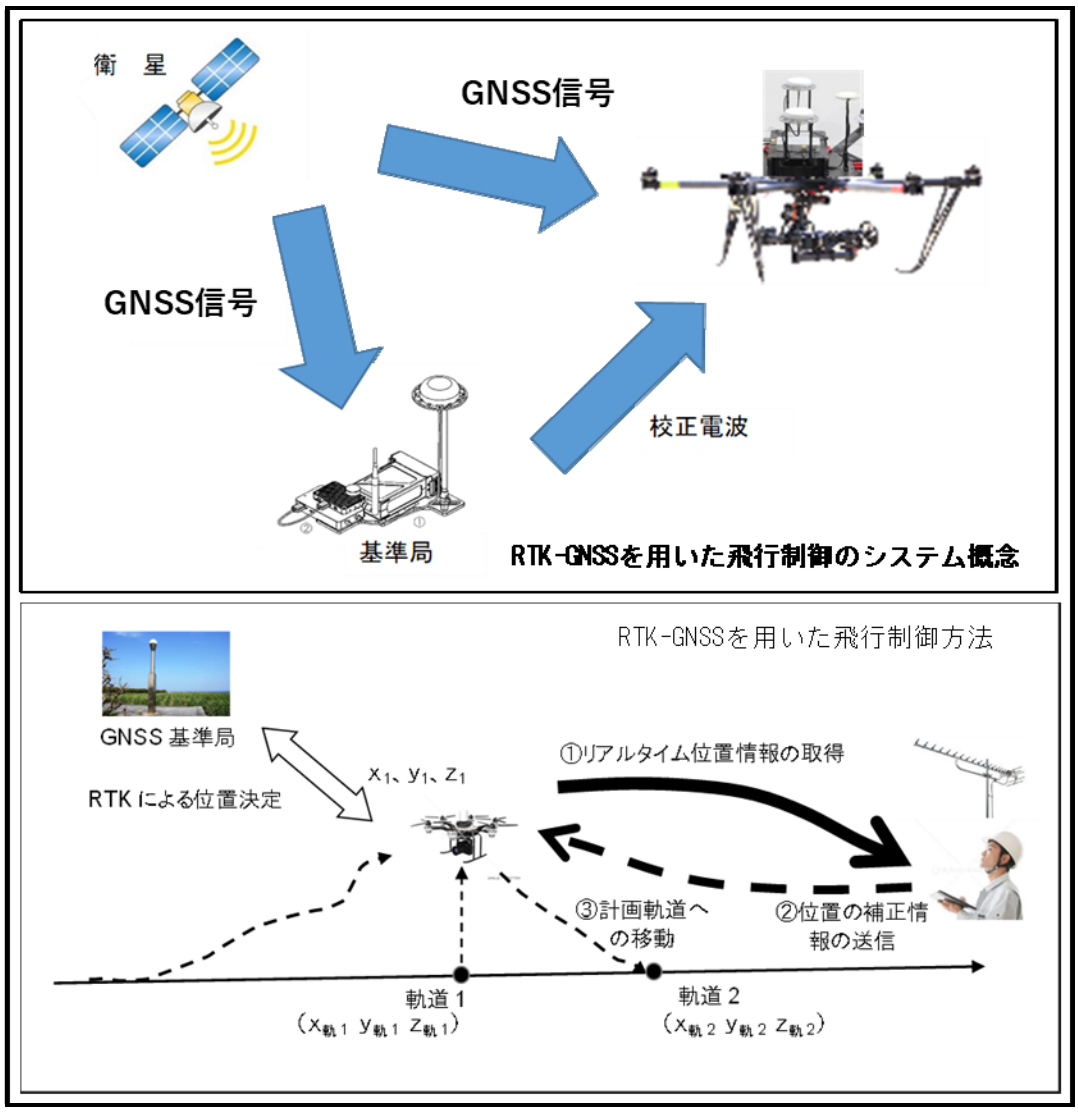


図 2.18　　RTK-GNSS 測位による飛行制御方法

2.4 実証結果

2.4.1 確認できた変状項目

「農業水利施設の機能保全の手引き」、「農業用ダム機能診断マニュアル」および「海岸保全施設維持管理マニュアル」にあげられている変状項目について、実証調査で確認できた変状は、表 2.5 に示すとおりである。

表 2.5　　実証調査で確認できた変状

凡例）●現地確認、○確認可能（確認事例より判定）、△調査確認（条件付き）、－対象外

変状箇所	変状内容/点検内容		開水路	海岸保全施設	頭首工	用排水機場	ダム
点検数量化指標＊	ひび割れ		0.2mm	1mm	0.2mm	0.2mm	0.2mm
	抜け上がり		20cm	なし	なし	なし	なし
構造物自体	ひび割れ＊	Phantom3（解像度5.5～19.9mm）	△ 1mm≧	△ 1mm≧	△ 2mm≧	△ 1mm≧	△ 10mm≧
		Phantom4（解像度7.7～9.1mm）					
		焦点距離50mm（解像度1.7～7.4mm）	△ 0.5mm≧	△ 0.5mm≧	△ 0.5mm≧	△ 0.5mm≧	△ 0.5mm≧
		焦点距離135mm（解像度0.3～0.5mm）	●	●	●	●	●
	材料劣化	変色	●	●	●	－	●
		浮き	○	●	○	－	○
		剥離・剥落	●	●	●	－	●
		析出物（ｴﾌﾛｴｯｾﾝｽ、ｹﾞﾙ等）	●	●	●	－	●
		錆汁	●	●	●	－	●
		摩耗・すりへり・風化	●	●	●	－	●
		鉄筋露出	●	●	●	－	●
	変形・歪み	法線・天端高・はらみ出し	●	●	○	－	●
	欠　損　・　損　傷		●	●	●	－	●
	表面保護材の劣化・変形	剥がれ、段差、ズレ、変形	●	●	●	－	●
	建屋の劣化	壁面のひび割れ	－	－	●	●	－
		柱、梁、筋交いの亀裂	－	－	○	○	－
		変形、損傷、腐食	－	－	●	●	－
		屋根のひび割れ、反り	－	－	●	●	－
	目地等	目地開き、段差、相対移動	●	●	○	－	●
		継ぎ目のずれ、変形	●	●	○	－	●
		止水板の破断	●	○	○	－	●
		漏水（痕跡）	○	○	○	－	●
		周縁コンクリートの欠損	●	●	●	－	●
構造物周辺	不同沈下		●	●	○	●	○
	抜け上がり＊		○	○	●	●	○
	地盤陥没、ひび割れ		●	●	○	○	○

注）＊ひび割れ、抜け上がりは、手引き等に記載される点検数量化指標に対する確認評価を示す。

2.4.2 3次元モデル

(1) 点群データの位置精度

UAV 計測により構築された 3 次元点群データの位置精度は、標定点・検証点における実測値との誤差を用いて、次式より評価した。なお、RMSE とは、RMS 誤差と訳される真値との誤差を評価する一指標である。

$$RMSE(Root\ Mean\ Square\ Error) = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(f_i - y_i)^2}$$

RMSE：RMS 誤差

n ： 標定点・検証点の数 ， i ： i 番目

f_i ： 3 次元モデルにおける標定点・検証点での数値（x,y,z）

y_i ： 検証点・検証点での実測値（x,y,z）

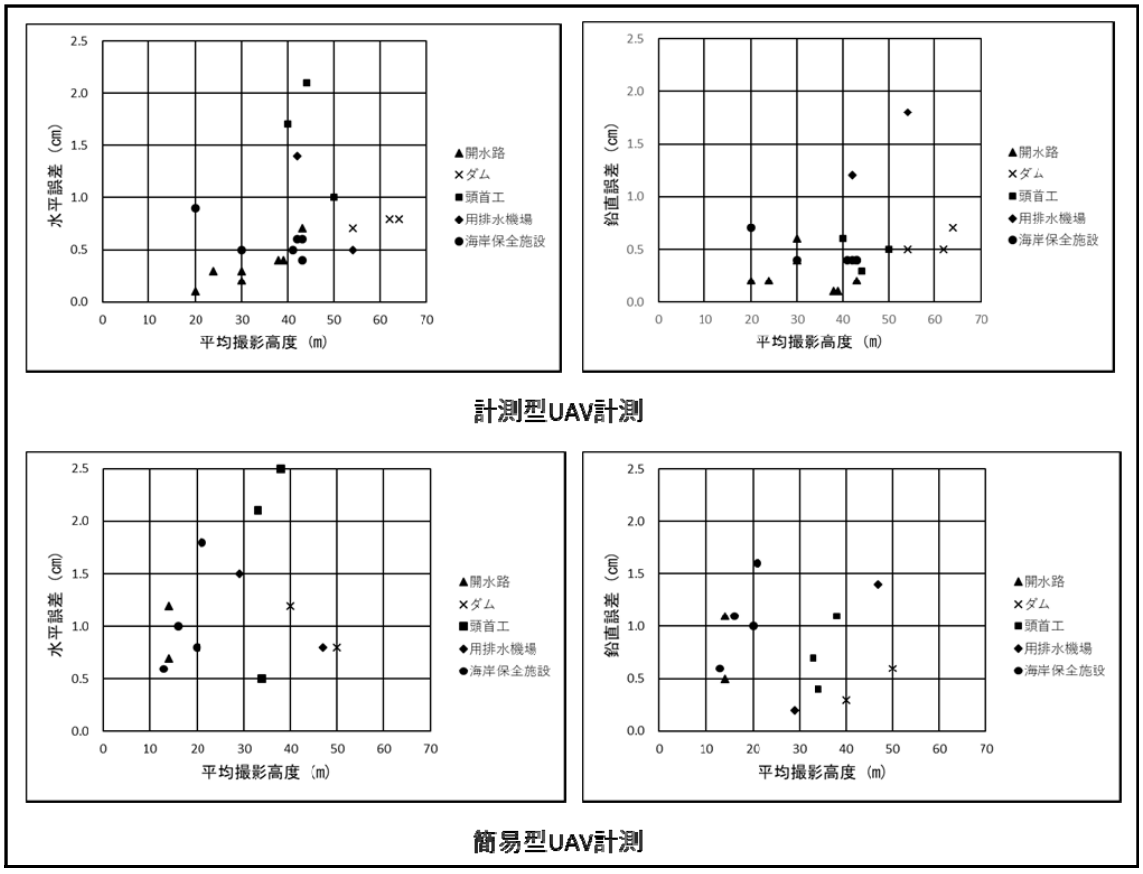


図 2.19 UAV 計測による 3 次元点群データの位置精度

水平・鉛直の位置精度は、図 2.19 に示すように、RMS 誤差で計測型が約 2cm 前後以下、簡易型が約 2.5cm 前後以下と高精度な結果となっていた。

特に、水面の影響を受けやすい頭首工、複雑な形状を示す用排水機場を除く 3 施設では、1cm 未満と非常に高精度な位置精度を示し、UAV 計測の維持管理調査への適用が十分に可能である。

次に、それぞれの UAV の位置精度を詳細にみてみると、以下のとおりである。

1）計測型 UAV（f=50mm）

撮影高度 20m～60m前後で撮影した画像から作成した三次元点群データの位置精度は表 2.6 に示すとおりである。

RMS 誤差で評価すると、水平および標高の位置精度は、それぞれ 0.4～2.1cm、0.1～1.8cm の範囲に収まり、変状の位置や規模を高精度に計測可能であると判断される。

表 2.6　　UAV 計測の諸元及び RMS 誤差（計測型 UAV）

番号	対象施設	名　称　等		調査年月	標定・検証点（箇所）	平均撮影高度（m）	平均地上解像度（cm）	RMSE(RMS誤差)	
								水平誤差（cm）	鉛直誤差（cm）
1	海岸保全施設	A 地区	G1	2017.6	23	42	0.50	0.6	0.4
2			G2		24	41	0.49	0.5	0.4
3		B 地区	K1	2017.10	13	43	0.52	0.4	0.4
4			K2		14	43	0.51	0.6	0.4
5			K1	2018.8	6	30	0.27	0.5	0.4
6					6	20	0.18	0.9	0.7
7	開水路	C 地区	S1	2017.12	9	38	0.46	0.4	0.1
8			S2		9	39	0.47	0.4	0.1
9		D 地区		2017.11	14	43	0.51	0.7	0.2
10		E 地区		2018.8	10	30	0.27	0.2	0.4
11					10	24	0.22	0.3	0.2
12		F 地区＊		2019.4	11	30	0.28	0.3	0.6
13					7	20	0.17	0.1	0.2
14	ダム	G 地区		2017.7	11	62	0.74	0.8	0.5
15		H 地区		2017.7	11	54	0.65	0.7	0.5
16		I 地区		2018.7	8	64	0.58	0.8	0.7
17	頭首工・井堰	J 頭首工		2017.7	10	44	0.53	2.1	0.3
18		K 頭首工		2017.7	11	40	0.48	1.7	0.6
19		L 井堰		2017.7	19	50	0.60	1.0	0.5
20	用排水機場	N 用排水機場		2017.7	7	54	0.65	0.5	1.8
21		O 用排水機場		2017.12	15	42	0.50	1.4	1.2

注）1．カメラ本体は、2017年がSony _α9、2018～2019年がSony_7R II である。

2．＊印はＲＴK測位、＊印無しは単独測位での観測値を示す。

特に、施設の形状・規模が大きい開水路、海岸保全施設およびダムでは、水平および標高の位置精度が 1cm 未満であり、既存のマニュアル、手引きに記載されているほとんどの施設変状項目が、高解像度写真や 3 次元データなどにより定量可能である。

また、誤差が大きかった頭首工や用排水機場は、他 3 施設に比較して、小さな建屋構造、水面上に配置される直線状施設など、特殊な施設形状や立地特性を有している。

しかし、水平および標高の最大誤差は、それぞれ 2.1cm（河原屋頭首工）、1.8cm（大曲用排水機場）と比較的高精度な結果が得られている。

このため、UAV 計測を活用した維持管理調査では、対象変状に対応したカメラ、レンズ、撮影高度、地上解像度、飛行方法など最適な撮影方法を、組み合せることが重要となる。

2）簡易型 UAV（f=3.6mm,8.8mm）

撮影高度 15m～50m前後で撮影した画像から作成した三次元点群データの位置精度は表 2.7 に示すとおりである。

RMS 誤差で評価すると、水平および標高の位置精度は、それぞれ 0.5～2.5cm、0.2～1.6cm の範囲に収まり、頭首工を除くと 2cm 未満となっている。

位置精度は、地上解像度が小さな計測型に比較して相対的に大きいが、数 cm 精度で変状位置や規模の計測が可能である。

表 2.7　　UAV 計測の諸元及び RMS 誤差（簡易型 UAV）

番号	対象施設	名　称　等		調査年月	標定・検証点（箇所）	平均撮影高度（m）	平均地上解像度（cm）	標定・検証点（箇所）	RMSE(RMS誤差)	
									水平誤差（cm）	鉛直誤差（cm）
1	海岸保全施設	A地区	G1	2017.6	23	21	0.91	23	1.8	1.6
2			G2		29	16	0.69	29	1.0	1.1
3		B地区	K1	2017.10	13	13	0.55	13	0.6	0.6
4			K2		14	20	0.86	14	0.8	1.0
5	開水路	C地区	S1	2017.12	9	14	0.60	9	1.2	1.1
6			S2		9	14	0.61	9	0.7	0.5
7	ダム	G地区		2017.7	9	40	1.71	9	1.2	0.3
8		I 地区		2018.7	8	50	1.34	8	0.8	0.6
9	頭首工・井堰	J 頭首工		2017.7	13	33	1.39	13	2.1	0.7
10		L 井堰		2017.7	19	38	1.62	19	2.5	1.1
11		M頭首工		2018.7	5	34	0.91	5	0.5	0.4
12	用排水機場	N用排水機場		2017.7	7	47	1.99	7	0.8	1.4
13		P 揚水機場		2018.7	5	29	0.77	5	1.5	0.2

注）カメラ本体は、2017年がPhantom3(f=3.6mm)、2018年がPhantom4(f=8.8mm)である。

このため、活用方法としては、人のアクセスが困難なダム、UAV が撮影飛行しにくい施設形状である用排水機場､水面上に直線に配置される頭首工などで適している。

また、開水路、海岸保全施設の事例に示されるように、撮影高度を低く（約 20m 以下)、解像度を小さく（10mm 以下）することにより、計測型とおおむね同程度の位置精度で計測することが可能となる。

したがって、UAV 計測を活用した維持管理調査では、計測型同様に、対象変状に対応したカメラ、レンズ、撮影高度、地上解像度、飛行方法など最適な撮影方法を組み合せること、計測型との併用、人のアクセスが困難となる特定箇所でのピンポイントなど用途に合わせた使用方法が重要となる。

(2) 構造物の形状精度

３次元点群データによる構造物の形状精度については、UAV 計測と同時に実施した現地測量から作成した開水路と海岸保全施設の横断図を用いて検証した。

その横断形状は、図 2.20、2.21 に示すように、両施設とも直立壁、湾曲した波返工とも良く一致しており、計測用 UAV（f=50mm）での垂直撮影画像、斜め撮影画像から構造物の形状が再現可能であると確認できた。

また、海岸保全施設の波返工は、オーバーハングしている形状のため、下部が撮影の死角となり再現が難しい。このような場合には、作業計画策定時に対象施設の形状特性、立地特性等を考慮した飛行撮影計画（斜め撮影の撮影高度、角度調整等）に充分留意する必要がある。

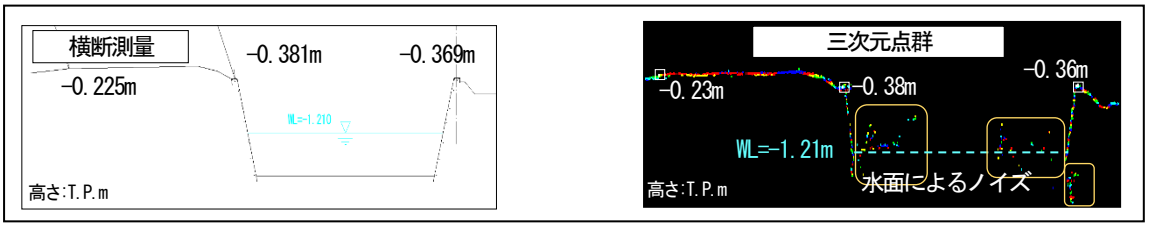


図 2.20　　開水路の横断形状比較

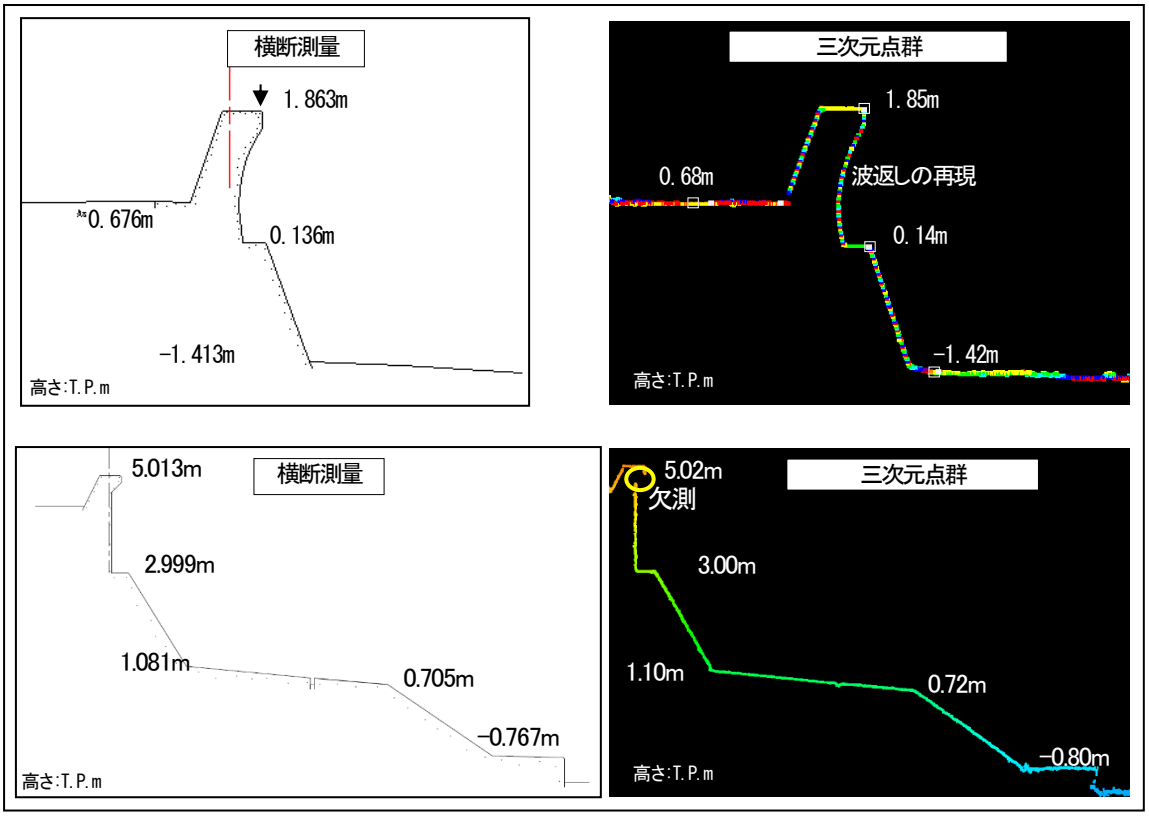


図 2.21　　海岸保全施設の横断形状比較

2.4.3 変状抽出事例

(1) ひび割れ

ひび割れの抽出結果は、表 2.8 に示すとおりであり、計測型(f=135mm)で幅 0.2mm 以上、計測型(f=50mm)で幅 0.5mm 以上、簡易型 UAV で幅 1mm 以上のひび割れ抽出が可能であることが確認できた。しかし、対象物の表面が析出物や錆汁等で著しく変色している場合、摩耗等により表面が粗粒状態になっている場合には、写真 2.2 に示すように、抽出が困難なケースも認められた。なお、0.2mm 以上のひび割れ抽出は、写真 2.3 に示すように、計測型 UAV (f=135mm)で、被写体との距離 10m程度の近接撮影により、可能であることが確認できた。

表 2.8　　ひび割れ幅の抽出検証

機　　種	被写体 からの距離	ひび割れ抽出精度
簡易型 UAV(f=3.6mm, 8.8mm)	10m～15m	幅 1mm 以上、表面の変色や影部では困難
計測型 UAV(f=50mm)	30m～60m	幅 0.5mm 以上、表面の変色や影部では困難
計測型 UAV(f=135mm)	10m 前後	幅 0.2mm 以上、全て判読可能

写真 2.2　　ひび割れの抽出例(簡易型、計測型：f=50mm)

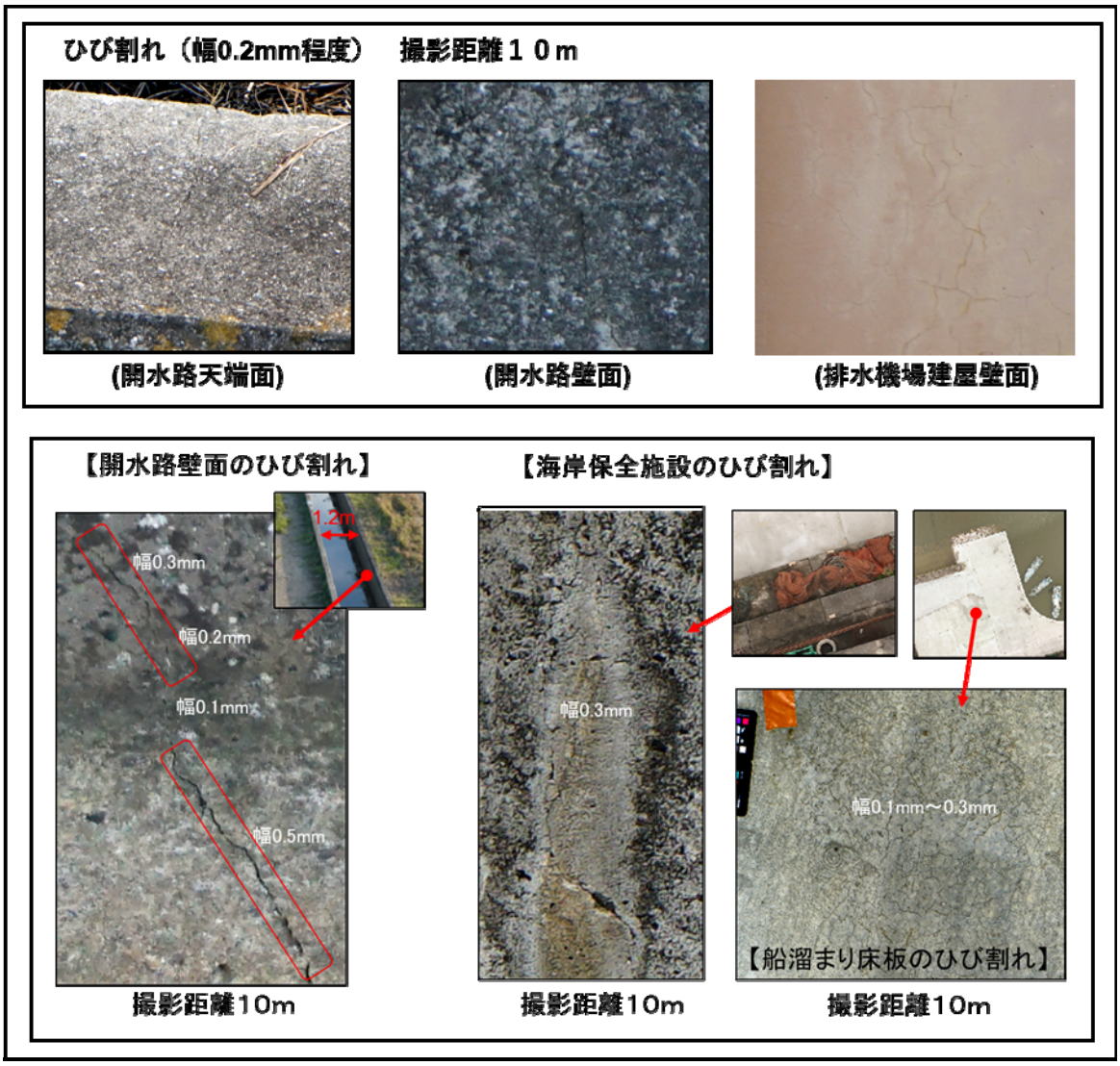


写真 2.3　　ひび割れの抽出例（計測型：f=135mm）

(2) 3 次元計測事例

UAV 計測では、目視項目として挙げられているほとんどの変状について確認できるだけでなく、撮影写真を SfM 解析することにより、高精度な 3 次元点群データが構築可能となった。例えば、目地の段差や天満高の起伏については、同時に実施した現地測量（縦断測量結果）と一致しており、1cm 単位で可能であることが確認できた。

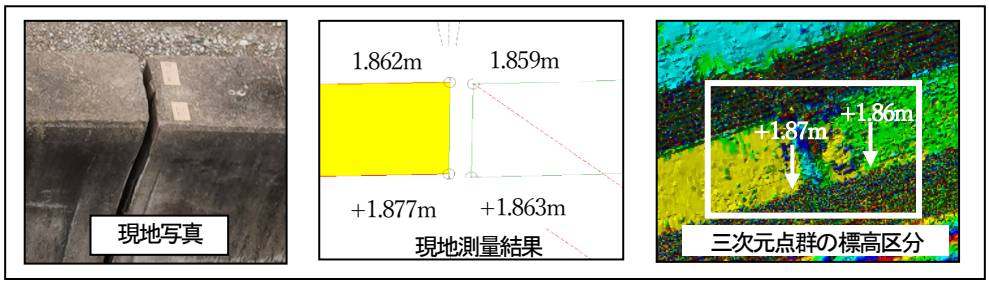


図 2.22　　開水路における目地の段差例

この結果、図 2.23 に示す計測活用例のように、ひび割れ幅、損傷の大きさ、表面の凹凸・段差など変状を数 mm～数 cm の精度での定量化が可能となった。

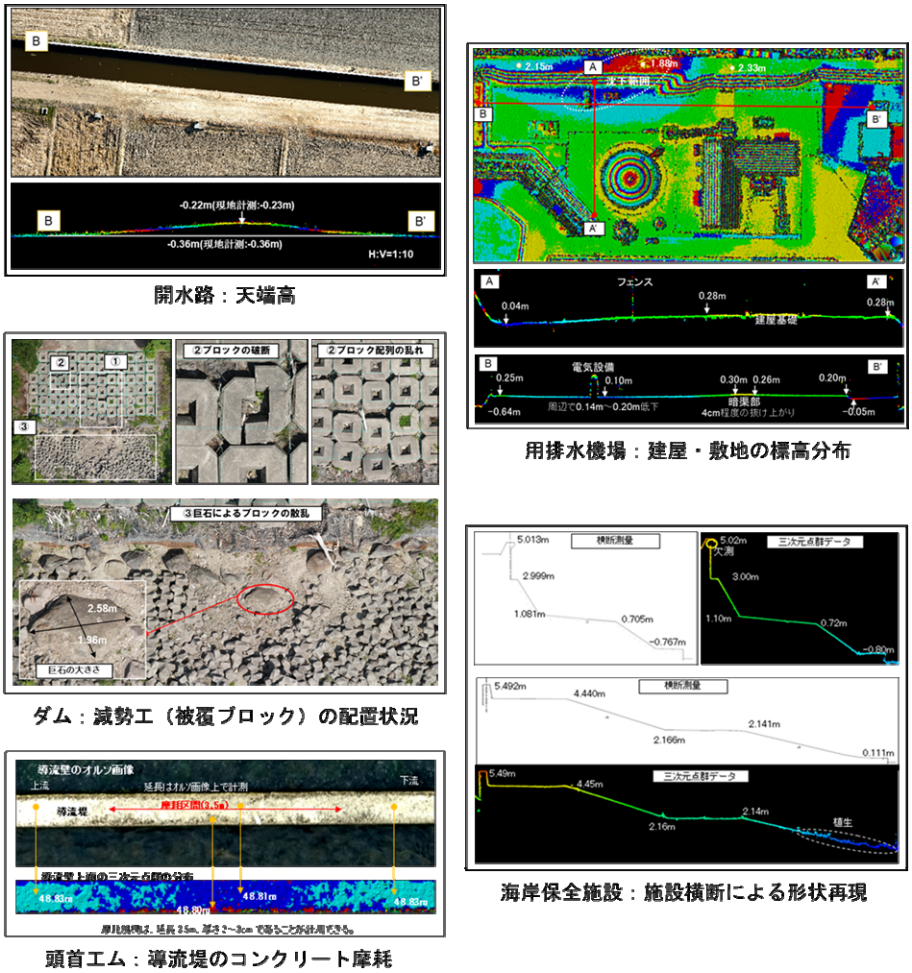


図 2.23　3 次元点群データによる地形・変状計測の検証事例

すなわち、高精度な 3 次元点群データは、図 2.24～2.28 に示す活用事例に示すように、構造物の変状（変形・歪み，欠損・損傷，不同沈下など）、地盤変形などを机上で定量可能とした。

すなわち、UAV による空中写真撮影と SfM を組合せた点検調査手法は、施設の維持管理における点検調査へ充分適用でき、点検作業の効率化、維持管理のモニタリング手法として有効である。

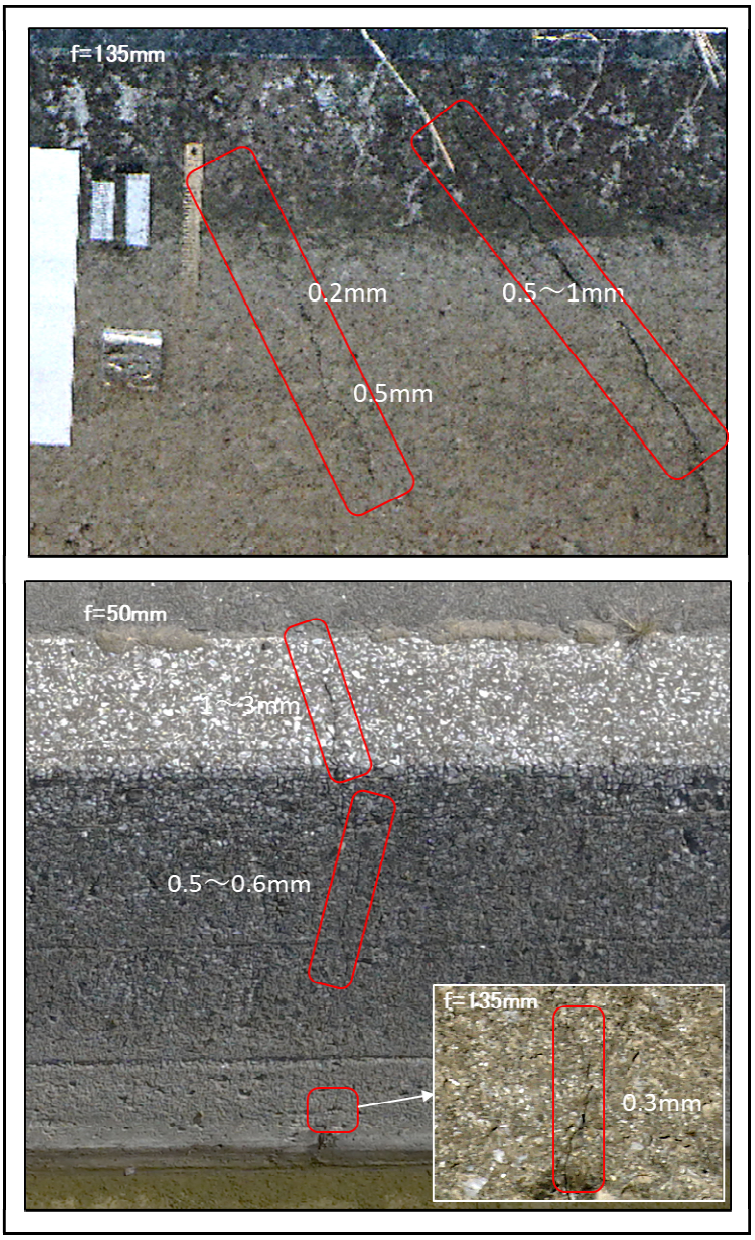


図 2.24(1)　　3 次元計測による活用事例（開水路）

図 2.24(2)　　3 次元計測による活用事例（開水路）

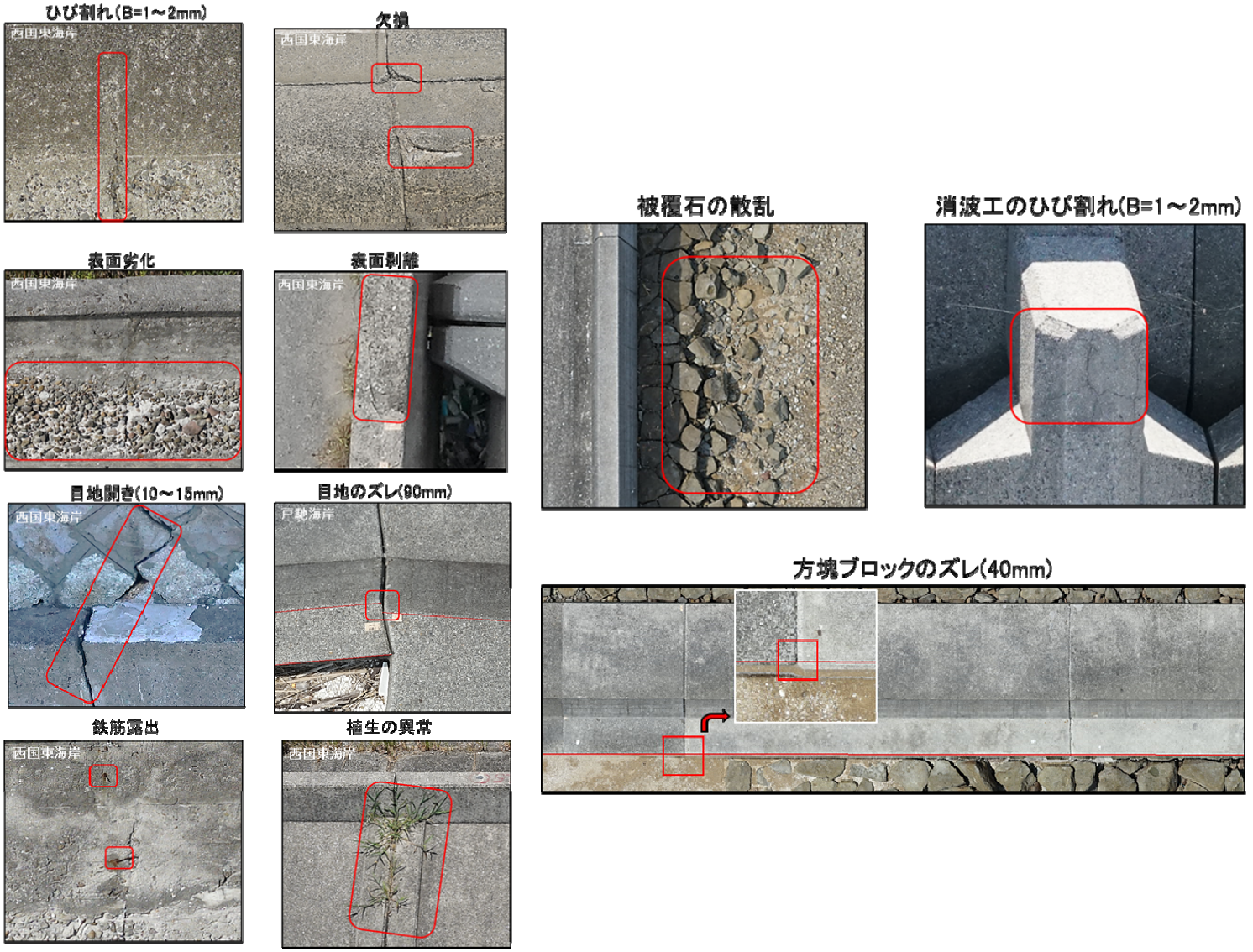


図 2.25（1）　　3 次元計測による活用事例（海岸保全施設）

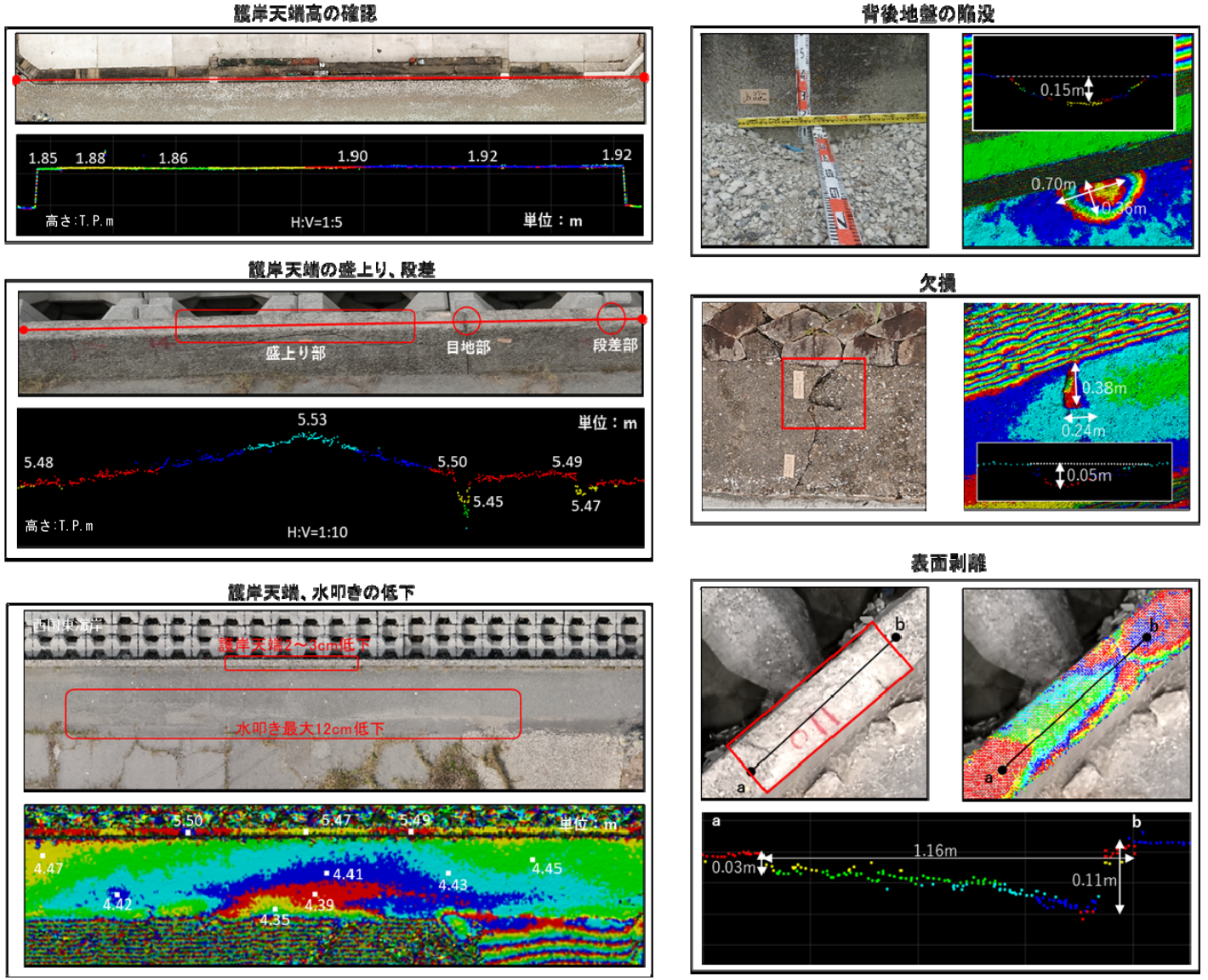


図 2.25（2）　　3 次元計測による活用事例（海岸保全施設）

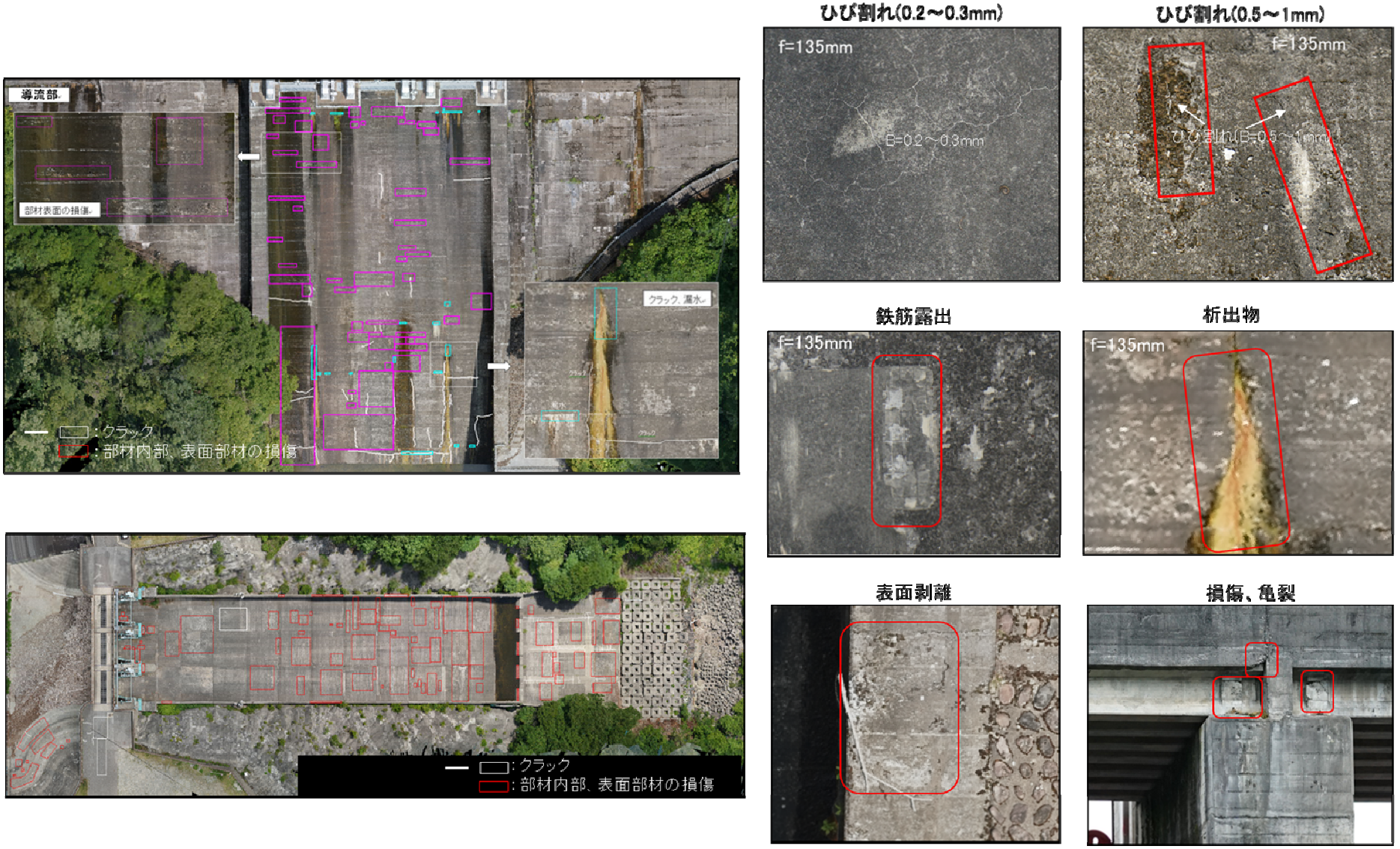
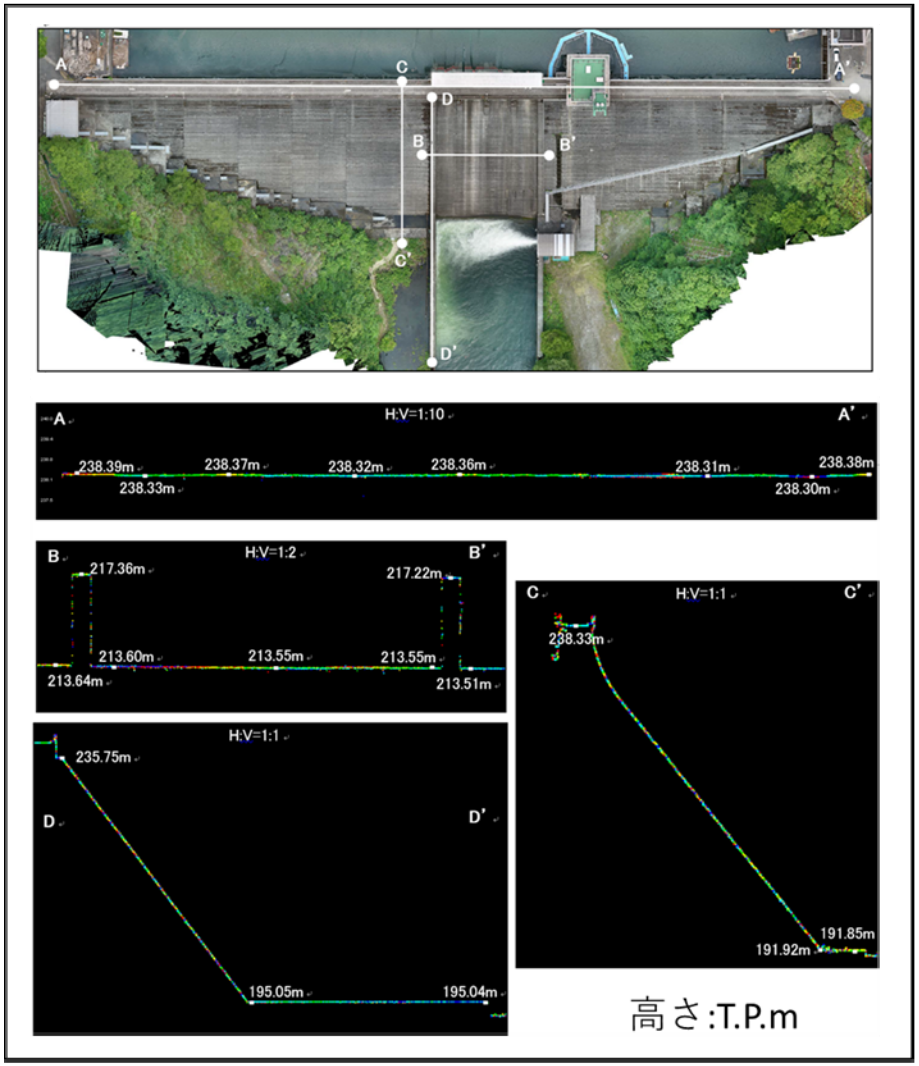


図 2.26（1）　　3 次元計測による活用事例（ダム）



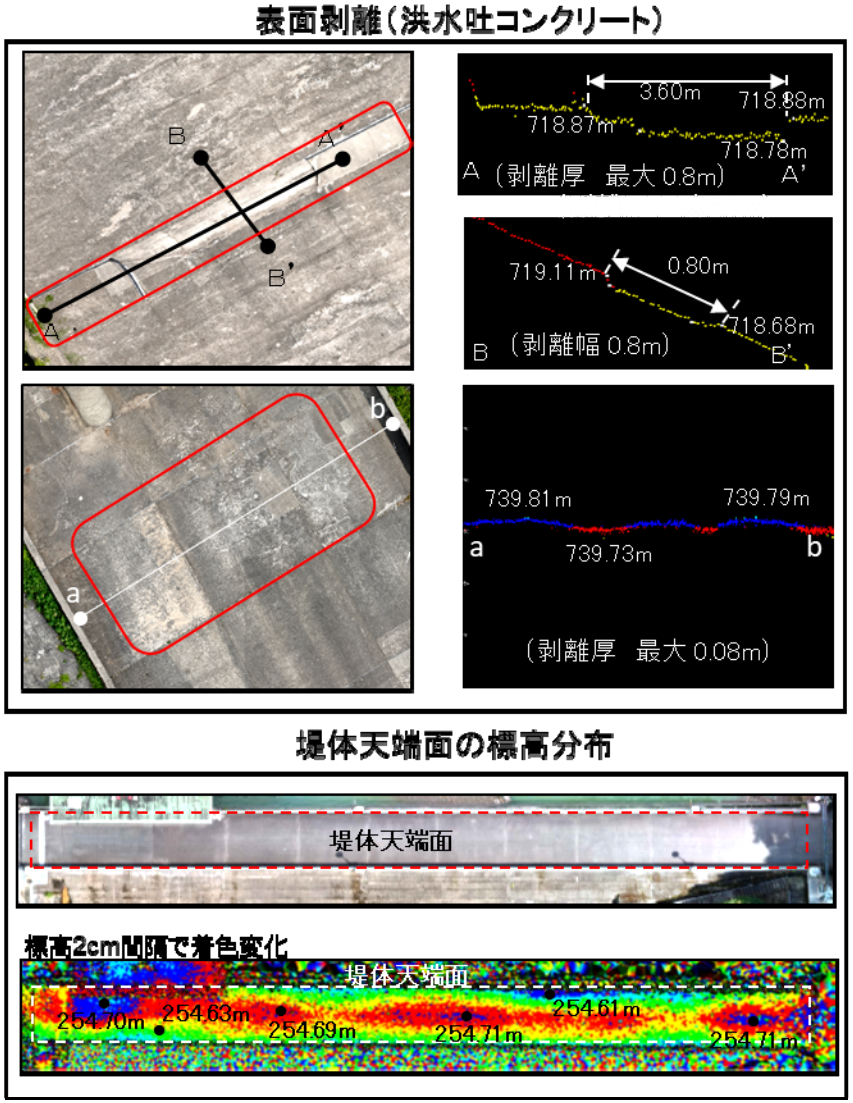


図 2.26（2）　　3 次元計測による活用事例（ダム）

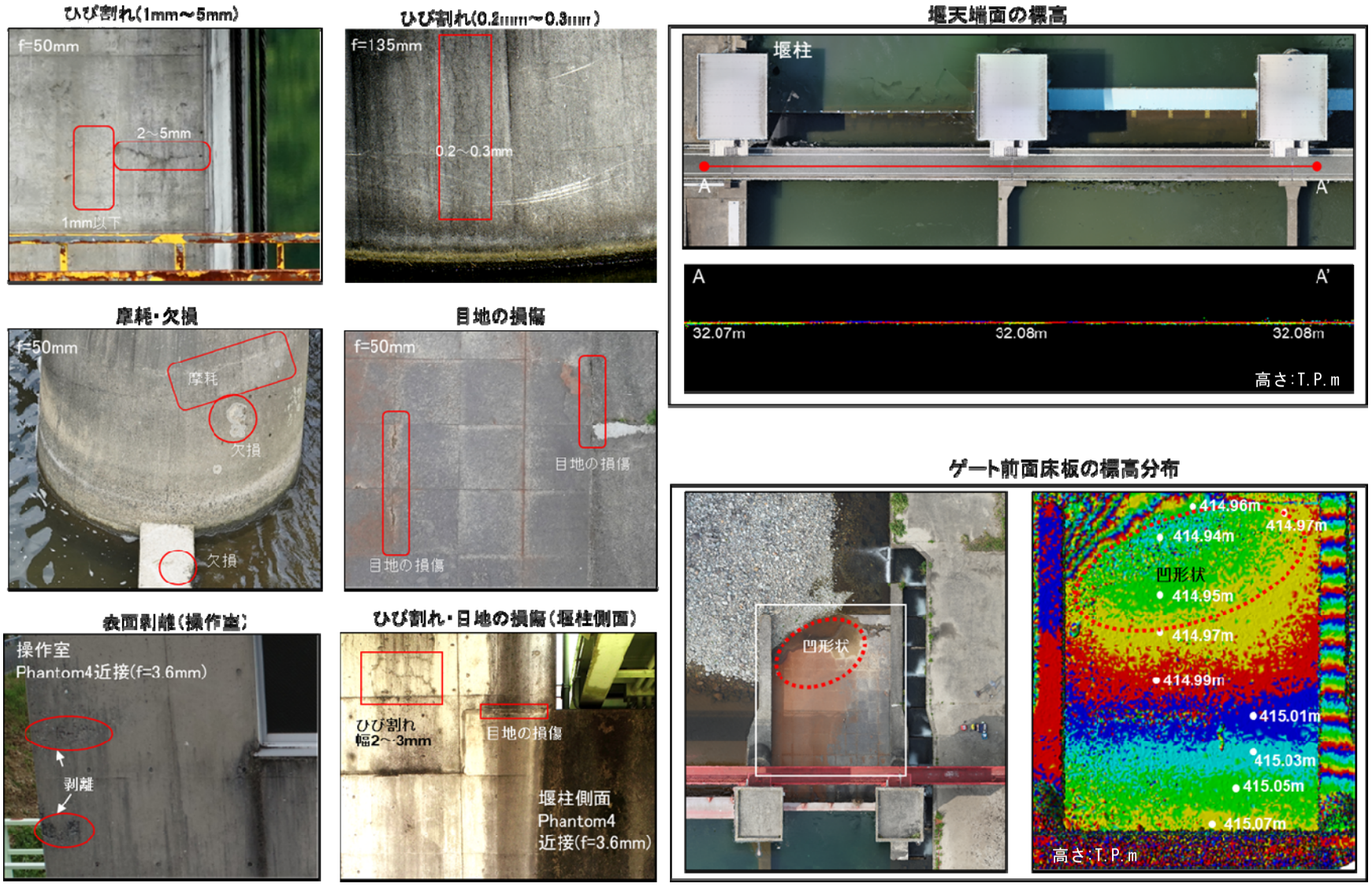


図 2.27　　3 次元計測による活用事例（頭首工・井堰）

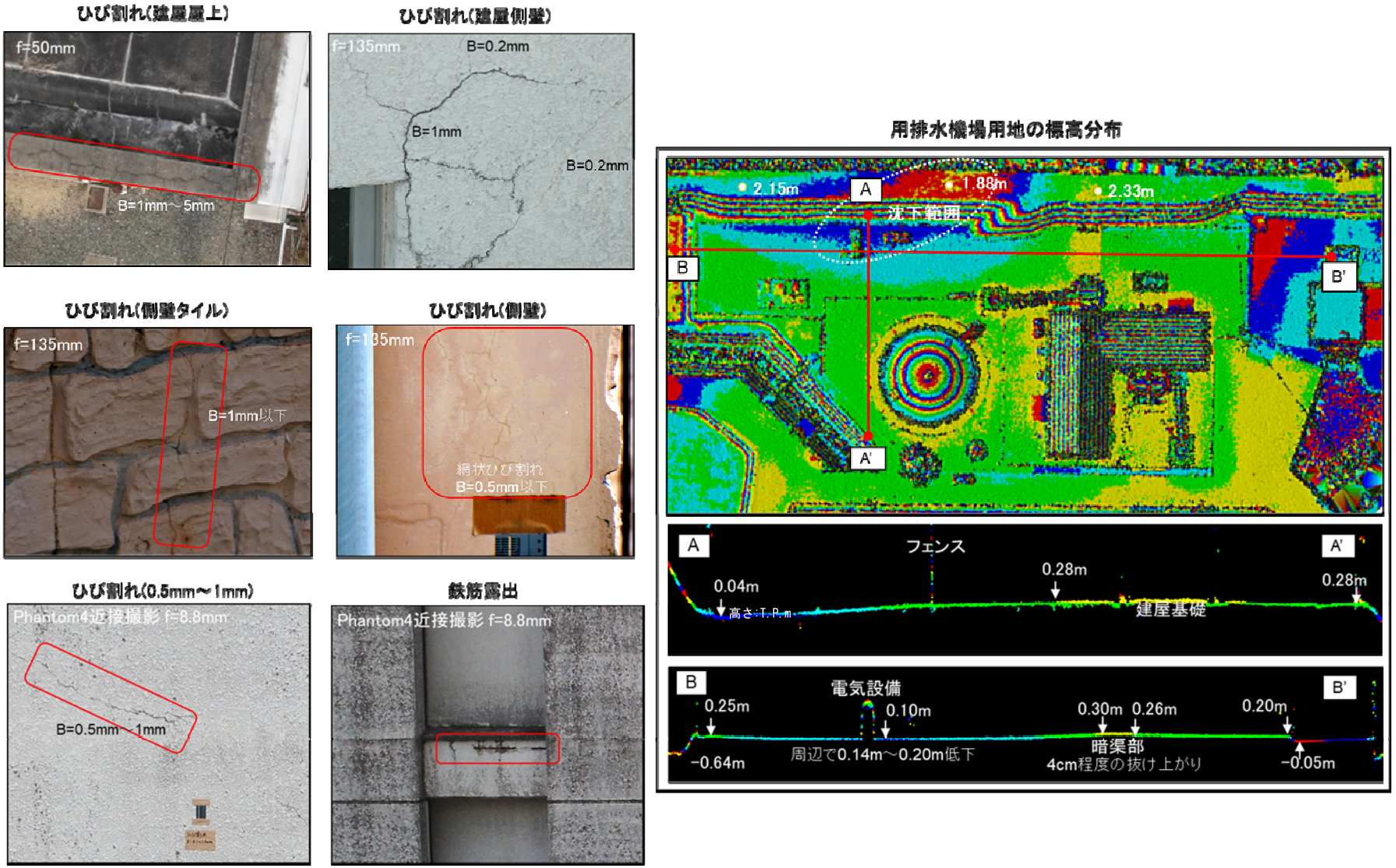


図 2.28　　3 次元計測による活用事例（用排水機場）

2.4.4 作業効率性

本手引きでは、開水路および海岸保全施設において、従来点検（目視・計測）手法とUAV を利用した点検手法により、作業効率性の効果について検証してみた。

２つの手法概要は、図 2.29 および表 2.9 に示すように、現地作業と室内作業に大別される。すなわち、従来手法では、現地作業で施設の変状を抽出、計測するが、UAV 計測では室内作業での写真判読により、施設変状を抽出、計測することとなる点が大きな相違点である。しかし、UAV 計測では、現地作業において新たに写真を標定、データを検証するための基準点の設置作業が必要となる。

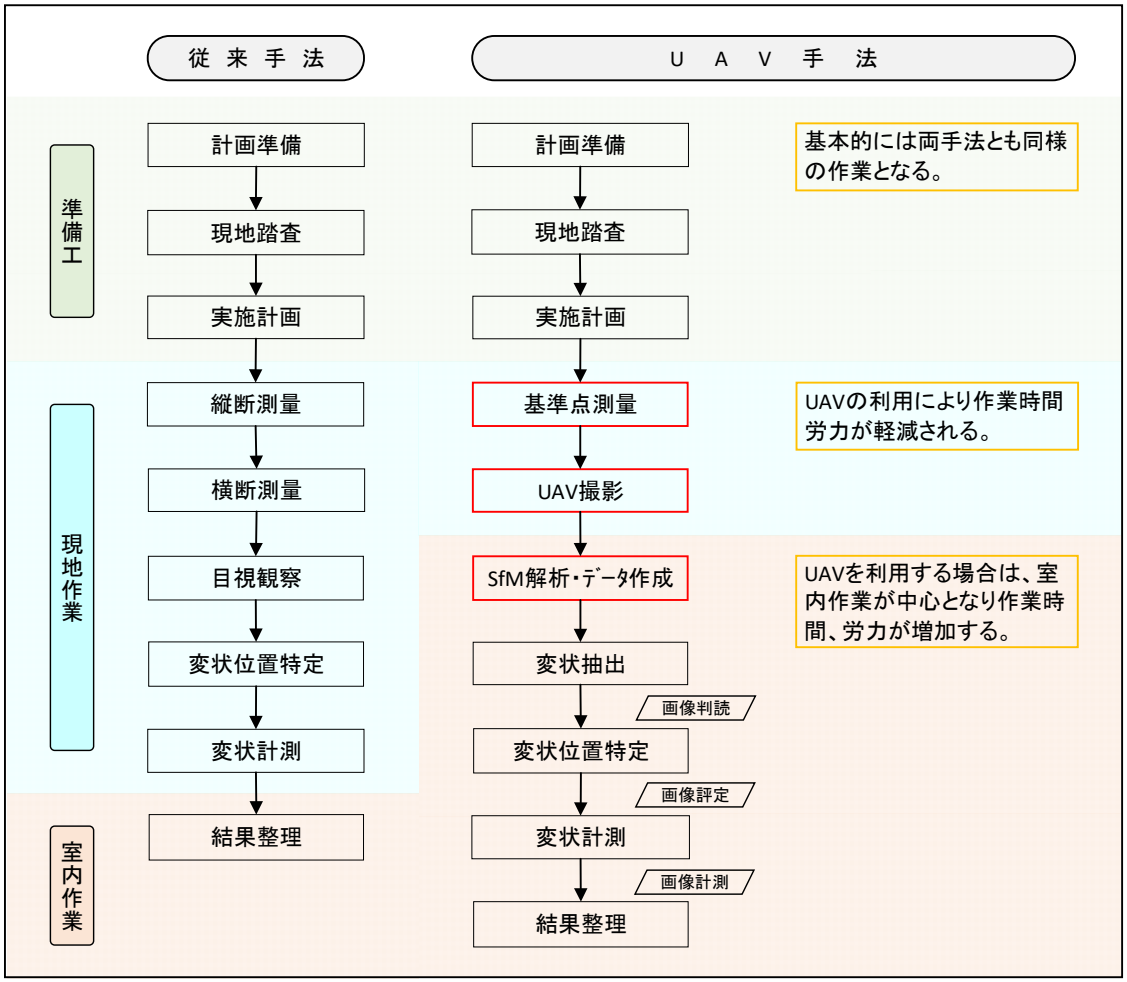


図 2.29　　従来手法、UAV 手法による機能診断調査フロー

開水路および海岸保全施設の施設点検において、２手法の人件日数を比較した結果は、表 2.10 に示すとおりである。

また、代表事例としては、変状箇所が比較的多く見られた施設を抽出した結果、海岸保全施設ではＢ地区（K2）、開水路ではＣ地区（S2）となった。なお、準備工は両手法ともほぼ同様の労力となるため、比較対象から除外した。

比較検証結果としては、表 2.10 に示したように、UAV 計測を活用することで、現地作業の労力が従来の２～３割に減少し、室内作業の労力が従来の３倍程度に増加している。UAV 計測では、従来手法に比較して、作業内容が現地作業から室内作業へと移行し、総作業量としては、約２割程度の削減効果となっている。

さらに、今後は、SfM より生成される３次元点群データ、デジタルオルソ、標高区分図などの構築から計測までを机上で効率的に実施できるビューア・システムやデータベースが開発されていくため、労働者不足下での点検効率化、品質向上に貢献するインフラメンテナンス技術として発展していくものと考えられる。

表 2.9　　従来手法及び UAV を利用した手法の調査内容

作業工種	従来手法(目視・計測)	UAV を利用した手法
計画準備	資料整理による対象施設、現場の把握	
現地踏査	調査場所の把握、現場留意事項等の把握	
実施計画	調査の実施計画、関係者調整（必要な申請含む）等 (従来手法：海岸保全施設で海上からも実施する場合は、海上保安部申請必要) (UAV：航空局、空港事務所等への申請必要、法規制外は不要)	
基準点測量	― (座標値を定めて調査をする場合は必要となる)	標定点、検証点の設置（VRS 測量） （施設端部等の物標を基準とする場合は、それらを基点とした測量が必要である。）
UAV 撮影	―	UAV による写真撮影
データ作成	―	画像解析、写真標定、データ検証 (三次元点群データ、デジタルオルソの作成)
縦断測量	主要な施設天端の現地計測	主要な施設天端の図上計測 （三次元点群データによる）
横断測量	主要な施設断面の現地計測	主要な施設断面の図上計測 （三次元点群データによる）
目視確認	目視による変状の抽出、写真撮影	写真判読による変状抽出 三次元点群データによる抽出
変状位置特定	物標からの相対位置の特定 （座標値を定める場合は、基準点からの測量が必要となる）	座標値等の図上特定 三次元点群データ、デジタルオルソによる特定
変状計測	ポール、スタッフ、スケール等による変状規模計測	三次元点群データ、デジタルオルソからの規模計測
結果の整理	現場野帳整理、様式作成	データ整理、様式作成

表 2.10　　従来手法、UAV 手法の作業効率比較推定

作業工種	開水路 (L=1km,幅 40m、両側)			海岸保全施設 (L=1km,幅 40m)		
	規模	従来手法 （人・日）	UAV 手法 （人・日）	規模	従来手法 （人・日）	UAV 手法 （人・日）
基準点測量	36 点	―	3.0	36 点	－	3.0
UAV 撮影（幅 40m）	1km	―	3.0	1km	－	3.0
データ作成	4ha	―	5.5	4ha	－	4.5
縦断測量	2km	5.3	―	1km	2.6	－
横断測量	10 断面	4.0	―	10 断面	4.0	－
目視・計測等 (変状抽出、位置、規模計測)	2km	10.7	6.5	1km	20.0	11.5
結果整理、様式作成	180 箇所	4.5	2.0	380 箇所	6.5	4.0
合　　計		24.5	20.0		33.1	26.0

注）1.UAV 手法は、計測用 UAV（ｆ＝50ｍｍ）を用いた撮影・点検である。
2.点検は、マニュアル（作業指針等）に規定される方法に従って実施している。
3.表中の灰色が現地作業、それ以外が室内作業を示す。

2.4.5 RTK 測位システム

正確な自律飛行に必要な RTK-GNSS 測位の実証では、①飛行軌道の安定性、②飛行軌道の精度について、従来の GNSS 単独測位と比較検証した。

(1) 飛行軌道の安定性

検証では、計測型 UAV の飛行軌道をＴＳ（トータルステーション：Total Station）を用いた自動追尾（0.4 秒間隔の UAV 飛行位置）で計測する方法で実施した。

検証結果は、図 2.30(1)、(2)に示すとおりであり、通常の GNSS 単独測位では、水平及び鉛直の機体位置における標準偏差が 2 回の実験でそれぞれ 1.4m 前後、0.8m 前後であった。これに対して、RTK-GNSS 測位は、水平及び鉛直の標準偏差がそれぞれ 0.2m 程度、0.1m 程度と従来の GNSS 単独測位に比較して、自律飛行時の動揺・ブレが半分以下と機体の空中姿勢の安定性が非常に向上された。

(2) 飛行軌道の精度

検証では、図 2.31 に示すように、UAV を対地高度 15m で「V04→V03→V02→V01→V04→V03→V02→V01」の順で自律飛行させ、その飛行軌道をＴＳによる自動追尾（0.4 秒間隔の UAV 飛行位置）で計測した。

検証結果は、表 2.11 に示すとおりであり、GNSS 単独測位では、計画ルートからのズレが最大で水平 3.51m、鉛直 3.21m であった。一方、RTK-GNSS 測位では、それぞれ 0.92m、1.09m と約 7 割前後の改善が認められた。

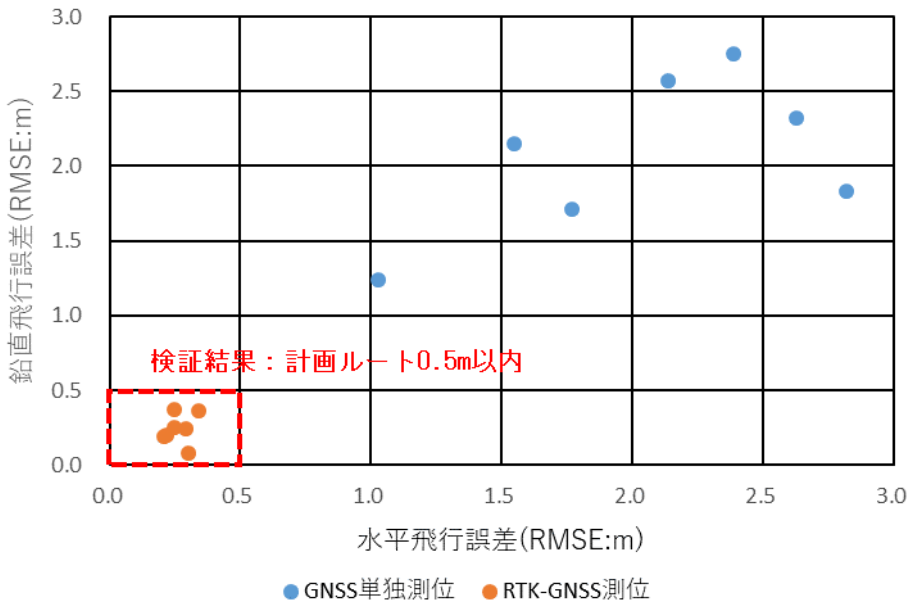
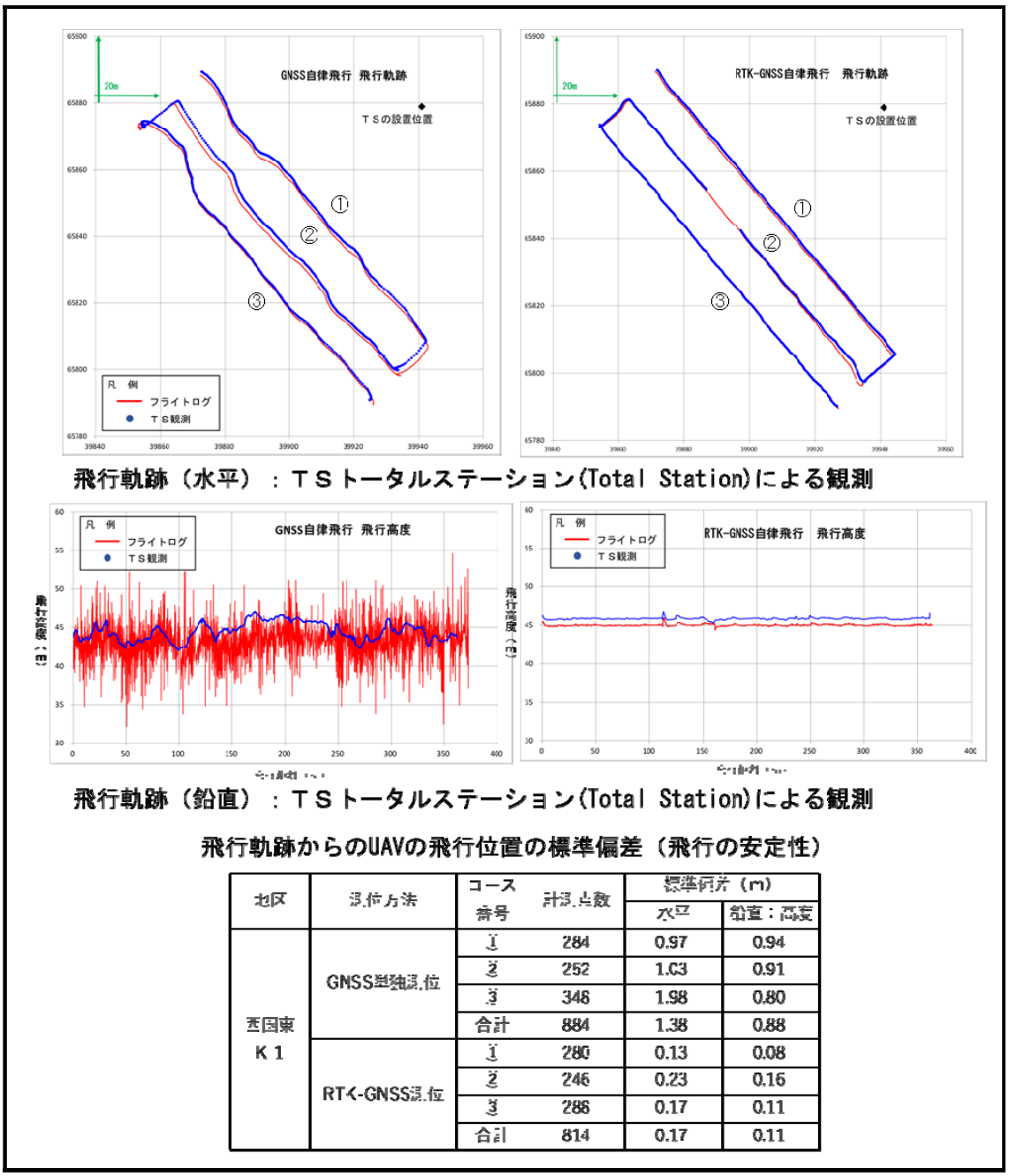


図 2.32　GNSS 単独測位と RTK-GNSS 測位における計画飛行ルート精度

飛行軌道の精度をRMSE（計画ルートからのズレ）で評価すると、RTK-GNSS測位では、図2.32に示すように、水平で0.21～0.34m、鉛直で0.08～0.37mと0.5m以下となっている。さらに、GNSS単独測位のRMSEと比較してみると、水平で1.03～2.82m、鉛直で1.24～2.75mとRTK-GNSS測位に比べ大きな変位を示しており、特に鉛直方向での改善が大きいことが検証された。

表2.11　測位法における自律飛行の精度

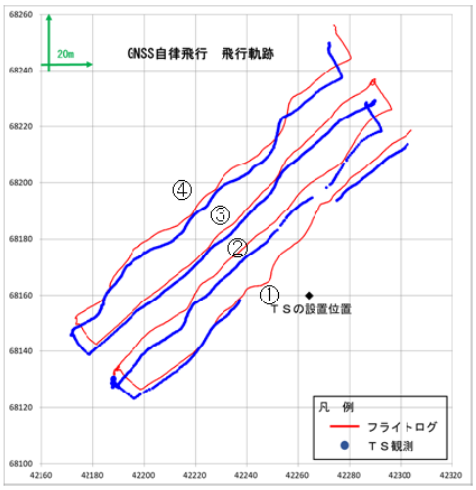
測位方法	飛行区間	計測点数	計画ルートからの変位	計画ルートからの変位量（m）			
				平　均	標準偏差	RMSE	最　大
GNSS単独測位	V04→V03	99	水平	-2.09	0.44	2.14	3.51
			鉛直	-2.54	0.41	2.57	2.89
	V03→V02	106	水平	-1.78	0.33	1.77	2.32
			鉛直	-1.67	0.39	1.71	2.57
	V02→V01	150	水平	2.80	0.33	2.82	3.30
			鉛直	-1.82	0.18	1.83	2.14
	V01→V04	79	水平	-0.97	0.36	1.03	1.52
			鉛直	-1.19	0.38	1.24	2.14
	V04→V03	98	水平	-2.37	0.31	2.39	3.08
			鉛直	-2.70	0.50	2.75	3.21
	V03→V02	107	水平	-1.47	0.47	1.55	3.00
			鉛直	-2.12	0.37	2.15	2.94
	V02→V01	151	水平	2.58	0.47	2.63	3.31
			鉛直	-2.31	0.23	2.32	2.60
RTK－GNSS測位	V04→V03	104	水平	-0.10	0.27	0.29	0.83
			鉛直	0.03	0.24	0.24	0.62
	V03→V02	114	水平	-0.14	0.31	0.34	0.85
			鉛直	0.22	0.29	0.36	1.09
	V02→V01	150	水平	0.02	0.21	0.21	0.54
			鉛直	0.09	0.17	0.19	0.44
	V01→V04	82	水平	-0.12	0.23	0.25	0.68
			鉛直	0.13	0.21	0.25	0.58
	V04→V03	98	水平	-0.05	0.30	0.30	0.92
			鉛直	-0.03	0.07	0.08	0.15
	V03→V02	106	水平	-0.01	0.25	0.25	0.75
			鉛直	0.34	0.15	0.37	0.62
	V02→V01	147	水平	0.09	0.20	0.22	0.51
			鉛直	0.02	0.20	0.20	0.54

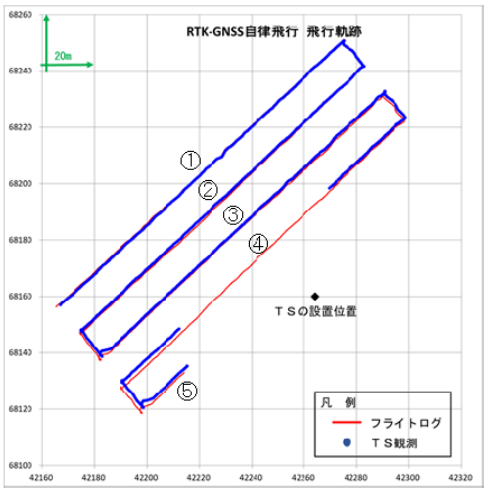


飛行軌跡からのUAVの飛行位置の標準偏差（飛行の安定性）

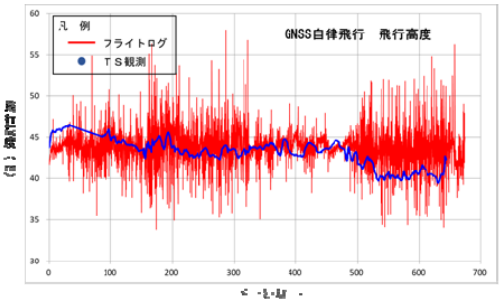
地区	測位方法	コース番号	計測点数	標準偏差（m）	
				水平	鉛直：高度
五国東K１	GNSS単独測位	1	284	0.97	0.94
		2	252	1.03	0.91
		3	348	1.98	0.80
		合計	884	1.38	0.88
	RTK-GNSS測位	1	280	0.13	0.08
		2	246	0.23	0.16
		3	288	0.17	0.11
		合計	814	0.17	0.11

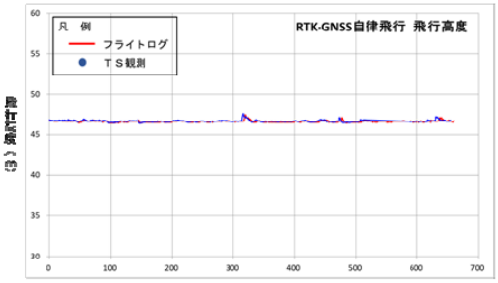
図2.30(1)　　測位方法による飛行軌道の安定性比較





飛行軌跡（水平）：ＴＳトータルステーション(Total Station)による観測



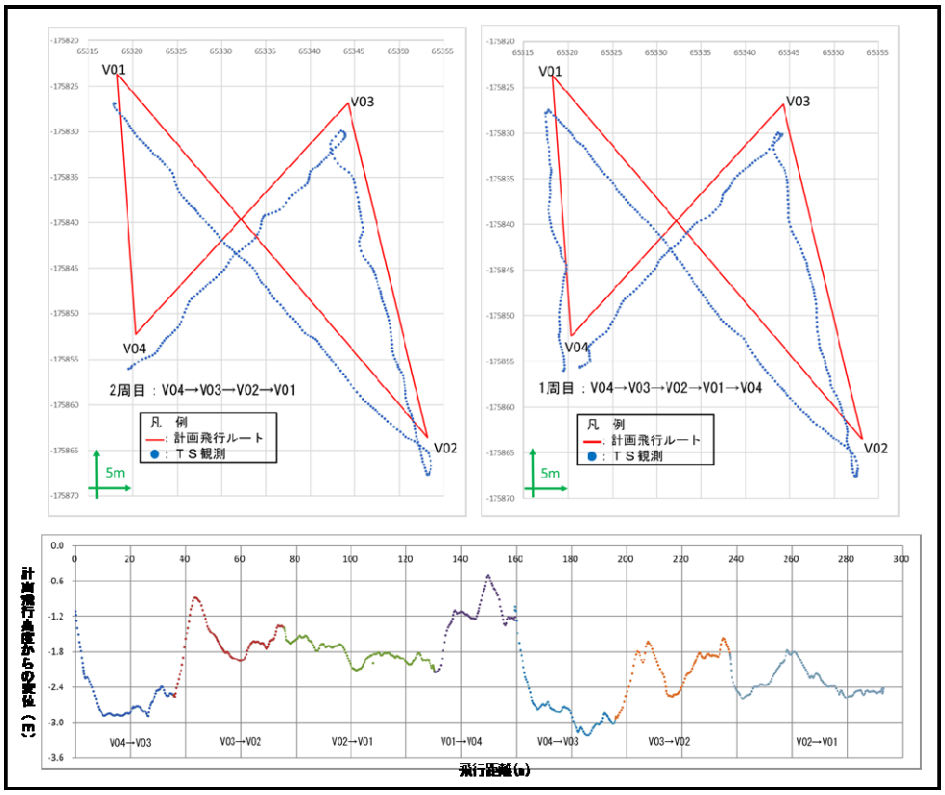


飛行軌跡（鉛直）：ＴＳトータルステーション(Total Station)による観測

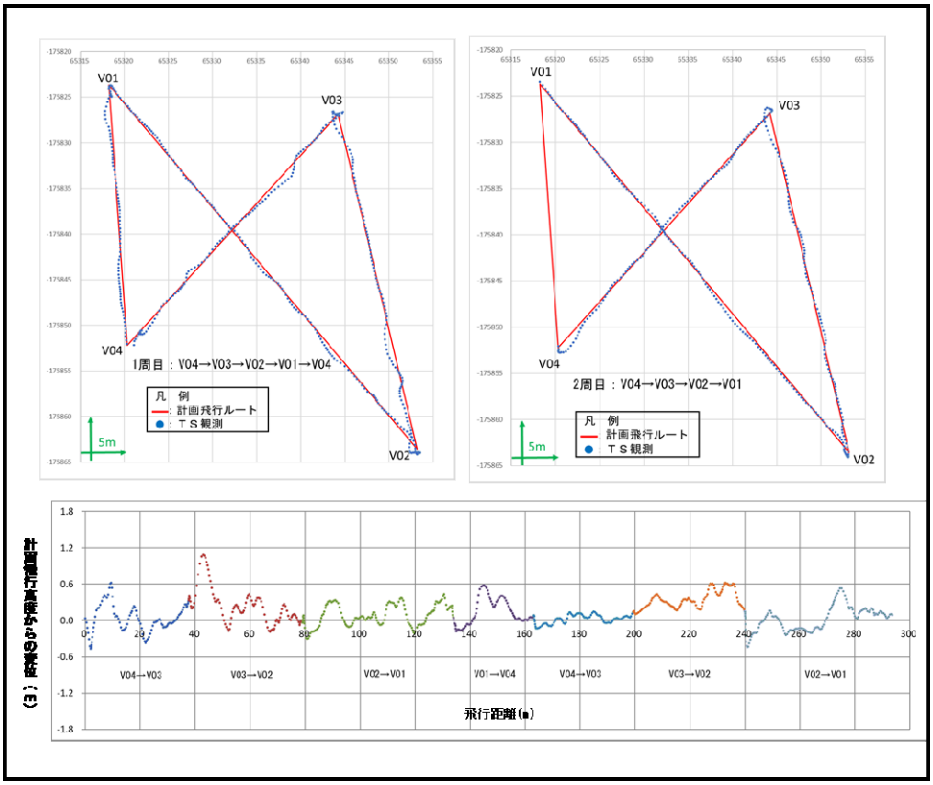
飛行軌跡からのUAVの飛行位置の標準偏差（飛行の安定性）

地区	測位方法	コース番号	計測点数	標準偏差（m）	
				水平	鉛直：高度
西区東K２	GNSS単独測位	①	195	1.57	0.78
		②	433	1.01	0.70
		③	424	1.50	0.52
		④	371	1.83	1.08
		合計	1423	1.44	0.76
	RTK-GNSS測位	①	361	0.16	0.10
		②	372	0.14	0.07
		③	370	0.22	0.17
		④	173	0.18	0.11
		⑤	65	0.42	0.18
		合計	1341	0.18	0.11

図2.30 (2)　　測位方法による飛行軌道の安定性比較



GNSS 単独測位・気圧高度計による自律飛行軌跡（計画飛行高度 15m）



RTK-GNSS 測位による自律飛行軌跡（計画飛行高度 15m）

図 2.31　　測位方法による自律飛行精度比較

参　考　文　献

1. 藤原洋一・川口渉・長野峻介・田中健二・一恩英二・渡辺一生：UAV と SfM(Structure from Motion)による高精度な 3 次元モデルの作成方法に関する検討、水土の知、Vol.86/No. 3、pp207-210、2018
2. 菅井秀翔・宮地邦英・中村孝之・南秀和・橘克巳：UAV を活用した写真測量の精度検証、国土地理院時報 2017 No.129 ww.gsi.go.jp/common/000192398.pdf
3. 近津博文・小高明彦・柳秀治・横山大：UAV 写真測量における三次元モデリングソフトウェアの性能評価、写真測量とリモートセンシング Vol.55、No. 2、2016
4. 北川悦司・津村拓実・山岸潤紀・吉永京平：UAV 空撮画像における SfM ソフトウェアの特徴比較、日本写真 測量学会 平成 30 年度年次学術講演会発表論文集 pp73-76
5. 中根勝見:JPGIS における Accuracy(正確度)、先端測量技術No.120、pp37-43、2010.8
6. 水上 幸治・白谷 栄作・桐 博英・関島 建志・金子 俊幸・大石 哲・豊福 恒平：UAV による海岸堤防の点検効率化のための変状自動抽出手法、土木学会論文集 B2（海岸工学）Vol.74、No.2、pp I_1435- 1440、2018
7. 藤田悠介・中村秀明・浜本義彦：画像処理によるコンクリート構造物の高精度なひびわれ自動抽出　土木学会論文集 F　Vol.66、No.3、pp459-470、2010.9
8. 藤田悠介・三谷芳弘・浜本義彦：画像処理によるコクリート表面のひび割れ抽出法 非破壊検査 Vol.56、No. 7、pp371-377、2007
9. 金子俊幸・井下恭次・神田康嗣・大竹臣哉：海岸保全施設の維持管理への UAV 計測の適用性について　水産工学 Vol .56、No. 2、pp121-131、2019
10. 白谷 栄作・金子俊幸・井下恭次・藤家亘・関島建志・桐博英：農業水利施設等の UAV 計測点検手法の評価、水土の知、Vol. 88/ No. 7、pp565-570、2020

目　　次

3. 海岸保全施設 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 48
3.1 UAV 計測における調査計画 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 51
3.1.1 調査概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 51
3.1.2 調査方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 53
⑴ 留意点 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 53
⑵ 撮影方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 54
⑶ 撮影写真の諸元 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 57
3.2 UAV 計測の活用について ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 57
3.2.1 機能診断調査概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 57
3.2.2 施設点検への適用性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 59
3.2.3 施設点検への活用手順 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 63
3.3 UAV 計測による変状解析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 65
3.3.1 撮影画像（単写真） ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 65
⑴ ひび割れ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 65
⑵ 剥離・損傷、目地開き等 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 69
3.3.2 ３次元点群データ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 73
⑴ オルソ画像 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 73
⑵ 地形・施設形状 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 76
⑶ 変状計測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 79
⑷ 今後のオルソ画像の活用 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 83
3.3.3 屈曲部での自律飛行 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 86
3.3.4 施設点検への適用結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 88

3. 海岸保全施設

【記載概要】

本項は、直立堤、消波ブロックを設置した海岸保全施設（コンクリート構造）を対象に、UAV 計測による画像、3 次元点群データの活用を検討した事例である。

撮影機種は、ひび割れ抽出や 3 次元計測など高解像度の画像を取得するため、装着レンズを交換可能な一眼レフカメラを搭載した大型の計測型 UAV と、広く普及しているコンパクトデジカメ相当のカメラを搭載した小型で安価な簡易型 UAV を用いた。

UAV 計測では、だれもが高精度な三次元モデル・オルソを作成できるように、予めプログラミングした飛行コースに沿って GNSS を利用した自律飛行で実施した。記載内容は、UAV 計測の調査計画、活用、変状解析の 3 項目から構成されており、画像、3 次元点群データによる変状解析の内容、精度についての事例を紹介している。

施設点検への適用については、「海岸保全施設維持管理マニュアル」に従い検討したが、鉄筋腐食、コンクリート劣化、吸出し・空洞化などの詳細計測以外の目視点検調査で有効活用できることが明らかになった。

大　項　目	中　　項　　目	記　　載　　内　　容
UAV計測による調査計画	調査概要	実証海岸保全施設の概要
	調査方法	留意点、撮影方法、撮影写真の諸元
UAV計測の活用について	機能診断調査概要	機能診断調査におけるUAV計測の対象範囲
	施設点検への適用性	適用性を検討する施設の変状項目
	施設点検への活用手順	施設点検での活用方法、変状項目の抽出手法・結果の概要
UAV計測による変状解析	撮影画像	ひび割れ、乖離・損傷、目地開き等の抽出事例、計測型・汎用型UAVの比較
	3次元点群データ	オルソ画像の解像度比較、地形・施設形状、目地の段差、天端の高さ・損傷、施設背後の陥没、オルソ画像の活用
	施設点検への適用結果	海岸保全施設点検におけるUAV計測の適用性結果

写真 3.1　　海岸保全施設における代表的な変状写真（A 地区）

写真 3.2　　海岸保全施設における代表的な変状写真（B地区）

3.1 UAV 計測における調査計画

3.1.1 調査概要

事例調査は、表 3.1 に示すA地区、B地区で実施し、対象とした海岸保全施設は写真 3.3 に示すとおりである。

調査では、表 3.1 に示した調査諸元で、単写真による変状目視、3 次元計測による変状の定量化について検討し、UAV 機種、カメラのレンズ（焦点距離)、撮影高度などによる計測成果を比較した。なお、B地区では、撮影高度別に生成されたオルソ画像の解像度、施設法線屈曲部の飛行方法についても検討した。

海岸保全施設では、堤体前面の海面が風波・流れなどにより動くため、3 次元点群モデルの構築時に大きく影響する。したがって、潮位変動が大きな地域での 3 次元計測では、原則として施設の下部工が露出し、影響を与える海面が施設法線より離れる干潮時前後に実施した。

表 3.1　　海岸保全施設調査概要

調査地区		調査年月	RTK-GNSS	使用UAV			調査延長（m）	構造形式
				計測型		簡易型		
				50mm	135mm	3.6mm		
A地区	G1	2017.6		○	○	○	280	直立堤（コンクリート）
	G2			○	○	○	220	傾斜堤（コンクリート）
B地区	K1	2017.10,12		○	○	○	110	傾斜堤（コンクリート）
	K2			○	○	○	150	直立堤＋消波ﾌﾞﾛｯｸ（コンクリート）
	K1	2018.8	○	○	○		110	直立堤（コンクリート）
	K3		○	○			100	直立堤＋消波ﾌﾞﾛｯｸ（コンクリート）
	K4		○	○			110	直立堤（コンクリート）

注）1. 使用UAVの最下段はレンズの焦点距離を示している。
2. B地区K3,K4は、自律飛行（屈曲部）を検討した箇所である。

写真 3.3(1)　　海岸保全施設の調査地区概観（A 地区）

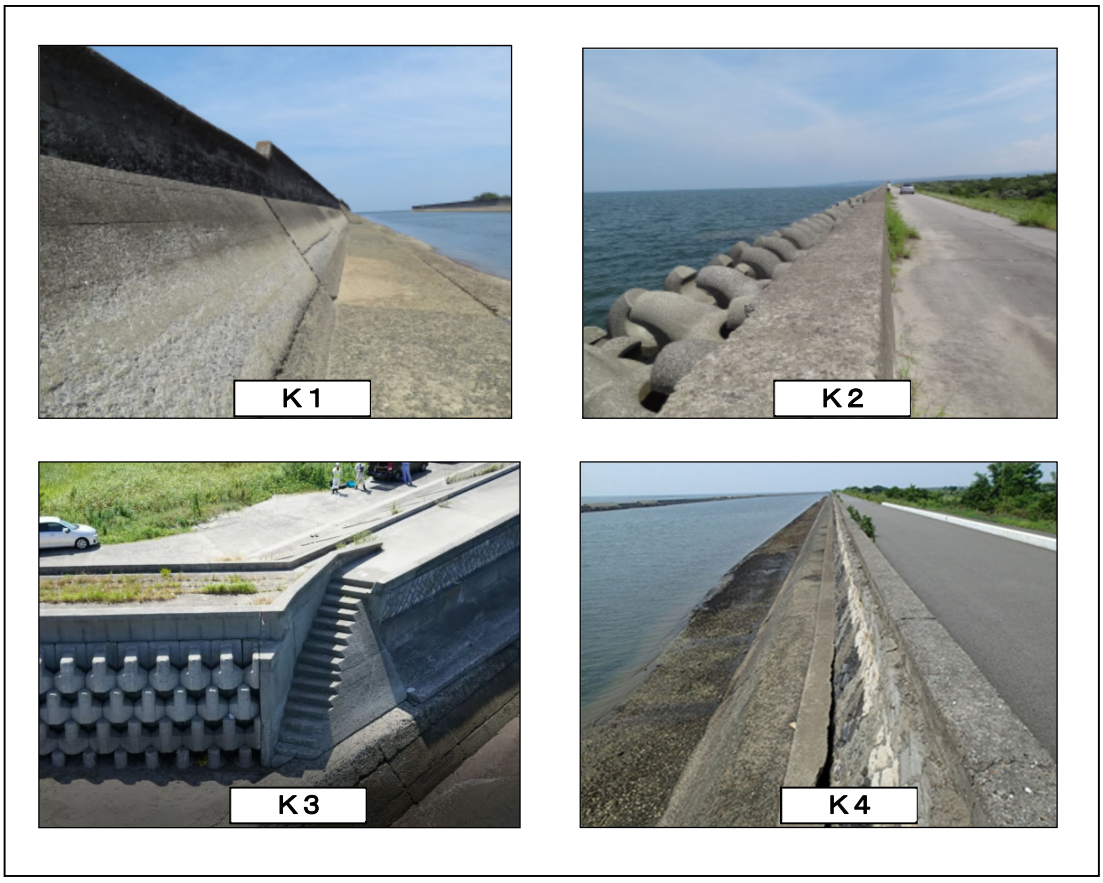


写真 3.3(2)　　海岸保全施設の調査地区概観（B 地区）

3.1.2 調査方法

(1) 留意点

対象とする海岸保全施設は、施設延長の割合が高いコンクリート構造物である堤防、護岸等とする。本施設は、津波・高潮等の災害から背後地を防護する施設であるため、海岸、港湾・漁港などの水際線に設置されており、以下のような事項に留意する必要がある。

① UAV 計測では、海岸構造物の施設・配置の形状、延長等より、効率的な撮影計画を立案すると同時に、SfM（Structure from Motion）で解析可能な撮影データ量に留意する。

② 画像、3 次元データの撮影では、対象とする変状が取得できる撮影方法、撮影高度、地上解像度などより、使用 UAV、レンズを決定する。

③ SfM 解析では、水面、樹木など風の影響を受ける地物が撮影されると、3 次元モデリング精度が低下する。このため、撮影時期の設定には、海水面が低下する大潮期干潮時、季節風・波浪など風浪が穏やかな時期、船舶などの停泊が少ない時間帯などが望ましい。

「海岸保全施設維持管理マニュアル（農林水産省農村振興局防災課、農林水産省水産庁防災漁村課、国土交通省水管理・国土保全局海岸室、国土交通省港湾局海岸・防災課、平成 26 年 3 月、平成 30 年 5 月)」（以下、「マニュアル」とする。）に記載されるように、施設の健全度評価の観点から、ひび割れ幅 1.0mm 以上の変状を観察する必要がある。

このため、撮影では、施設側面の変状観察を対象とした低空飛行、さらに、施設屈曲部での自律飛行が必用となる。したがって、点検時には、高精度な 3 次元点群データが取得できるように、正確な飛行位置を制御する RTK-GNSS 装置、カメラの画角を安定に制御する三軸ジンバルなどを活用して、撮影画像の重複が一定になるようにすることが望ましい。

(2) 撮影方法

海岸保全施設では、**図**3.1 に示すように、3 次元点群データの取得を目的とし、計測用 UAV と簡易型 UAV を用いて、施設法線に対して平行方向に、施設上空からの垂直撮影及び斜め撮影を実施した。また、垂直撮影、斜め撮影では、いずれの UAV でもオーバーラップ（OL）率 80%以上、サイドラップ（SL）率 60%以上とし、斜め撮影では、3 次元処理を行わない場合は、未撮影区域を発生させないラップ率で実施した（参考例①②参照）。検討では、画像による変状目視、3 次元計測による変状の定量化を目的に実施したが、A・B 地区では、UAV 機種の比較検討も実施した。また、B 地区では、RTK-GNSS を用いた屈曲部での自律飛行（参考例③参照）、壁面オルソ画像の作成検討を別途実施した。

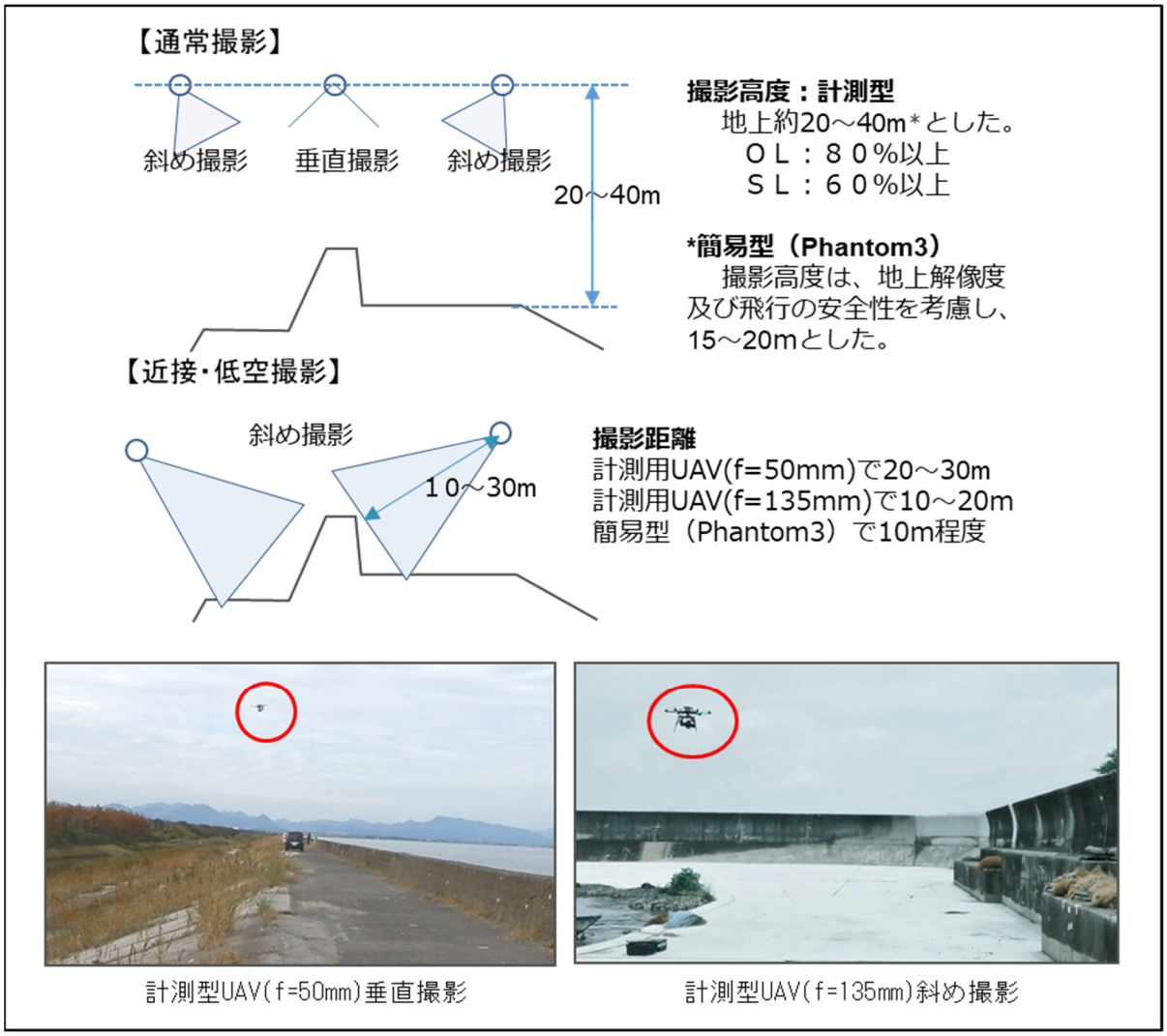
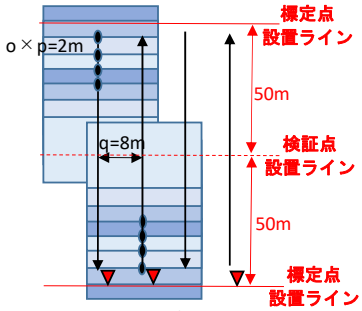


図 3.1　　海岸保全施設での UAV 計測方法

〈海岸保全施設の撮影方法参考例〉

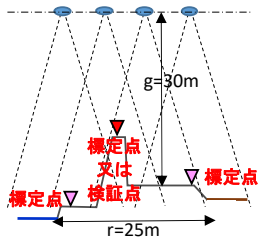
① 垂直撮影（撮影高度３０ｍの場合）

	諸元項目		諸元値	備考
a	レンズ焦点距離(mm)		50	レンズ仕様
b	カメラセンサーサイズ(mm)	進行方向	24	カメラ仕様
c		横方向	36	カメラ仕様
d	カメラ画素数(画素)	進行方向	4,000	カメラ仕様
e		横方向	6,000	カメラ仕様
f	ピクセルサイズ(μ)		6	b/d(=c/e)
g	撮影高度（m）		30	設定
h	地上解像度（mm）		3.6	(g×f)/a
i	１画角撮影範囲（m）	進行方向	14.4	h× d
j		横方向	21.6	h×e
k	オーバーラップ率（%）	進行方向	80	８０％＜設定
l	サイドラップ率（%）	横方向	60	６０％＜設定
m	最大画角間隔（m）	進行方向	2.8	(1-k×0.01)×i
n		横方向	8.6	(1-l×0.01)×j
o	UAV速度（m/s）		2	m＞で設定
p	撮影インターバル（s）		1	m＞(o×p)で設定
q	コース間隔（m）		8	n ＞で設定
r	対象施設幅（m）		25	設定
s	コース数（コース）		4	r/q+1



標定点は１ライン/100m以内

検証点は(1/2×標定点間距離)



標定点は3点/１ライン以上

検証点は護岸天端上

② 斜め撮影（撮影距離３０ｍの場合）

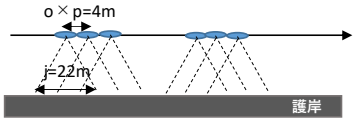
	諸元項目		諸元値	備考
a	レンズ焦点距離(mm)		50	レンズ仕様
b	カメラセンサーサイズ(mm)	横方向	24	カメラ仕様
c		進行方向	36	カメラ仕様
d	カメラ画素数(画素)	横方向	4,000	カメラ仕様
e		進行方向	6,000	カメラ仕様
f	ピクセルサイズ(μ)		6	b/d(=c/e)
g	撮影距離（m）		30	設定
h	地上解像度（mm）		3.6	(g×f)/a
i	１画角撮影範囲（m）	横方向	14.4	h× d
j		進行方向	21.6	h×e
k	オーバーラップ率（%）	横方向	60	設定
l	サイドラップ率（%）	進行方向	80	設定
m	最大画角間隔（m）	横方向	5.7	(1-k×0.01)×i
n		進行方向	4.3	(1-l×0.01)×j
o	UAV速度（m/s）		2	n ＞で設定
p	撮影インターバル（s）		2	n ＞(o×p)で設定
q	コース間隔（m）		任意	m＞で設定

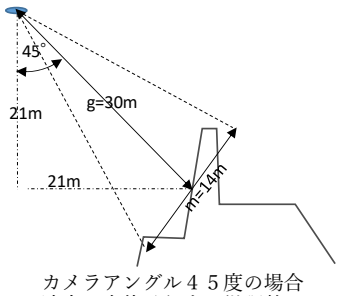
ｇ：撮影中心箇所とカメラ（UAV）の距離（撮影高度と撮影箇所の離れから計算）

ｋ、ｌ：3次元処理を行わない場合は未撮影区域が生じない程度で設定（余裕１０％程度）

ｑ：護岸壁面の高さ方向が１画角で撮影できない場合は、適宜、複数コースを設定

カメラを護岸方向に正対し、
UAVは護岸法線と平行に飛行（移動）





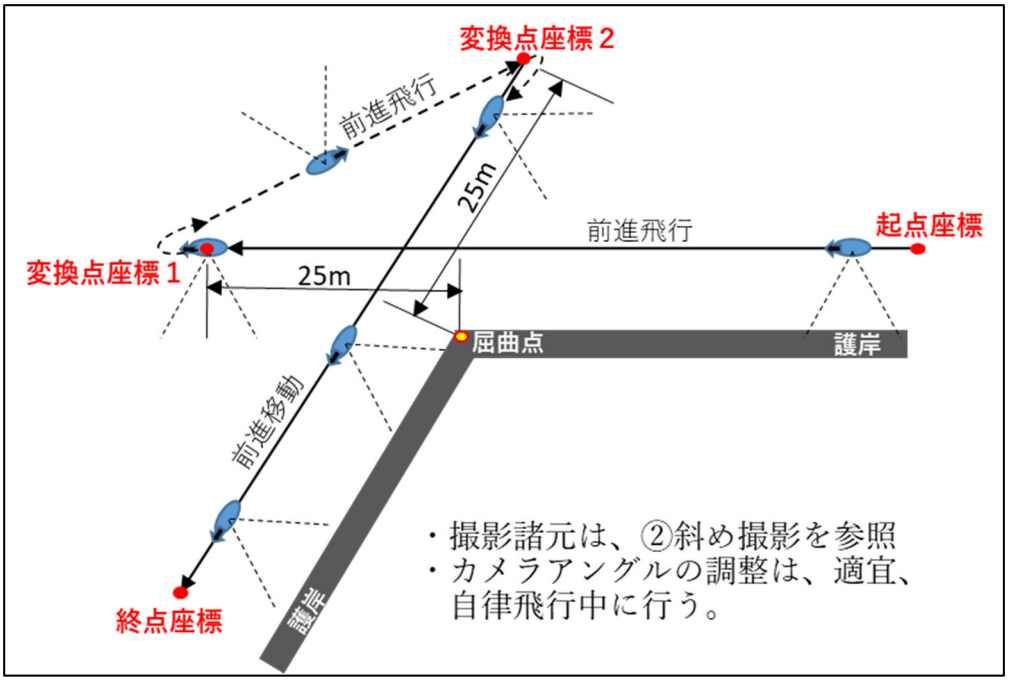
カメラアングル４５度の場合
適宜、自律飛行中に微調整

③ 屈曲部の撮影（自律飛行）

自律飛行は、操縦の簡素化を図るため、指定した地点（ウエイポイント）座標に沿って一方向で飛行を行う（飛行途中で前進、後退、横移動、一点回頭等の切り替えを行わない）。このことを踏まえ、屈曲部の斜め撮影方法を以下に示す。

基本的には護岸側面の斜め撮影となるため、例示の場合、前進飛行のみで「②斜め撮影」の諸元で撮影する。

また、一方向飛行のみで方向転換を行う必要があることから、UAV 速度 3m/ s 程度を想定した方向転換に要する距離を考慮し、屈曲点から概ね 25m程度延長した地点で方向転換点を指定する。



(3) 撮影写真の諸元

開水路での UAV 計測で撮影した空中写真の諸元は、表 3.2 に示すとおりであるが、3 次元解析では、3 次元モデリングの位置精度（RMS 誤差）を確認した上で実施した。

表 3.2　　海岸保全施設の 3 次元解析に使用した撮影写真の諸元

調査地区		調査年月	撮影方法	RTK-GNSS	使用UAV		平均撮影高度（m）	平均地上解像度（cm）	RMS誤差	
					計測型 50mm	簡易型 3.6mm			水平（cm）	鉛直（cm）
A 地区	G1	2017.6	鉛直・斜め		○		42	0.50	0.6	0.4
						○	21	0.91	1.8	1.6
	G2				○		41	0.49	0.5	0.4
						○	16	0.69	1.0	1.1
B 地区	K1	2017.10	鉛直・斜め		○		43	0.52	0.4	0.4
						○	13	0.55	0.6	0.6
	K2				○		43	0.51	0.6	0.4
						○	20	0.86	0.8	0.8
	K1	2018.8	鉛直・斜め	○	○		30	0.27	0.5	0.4
				○	○		20	0.18	0.9	0.7

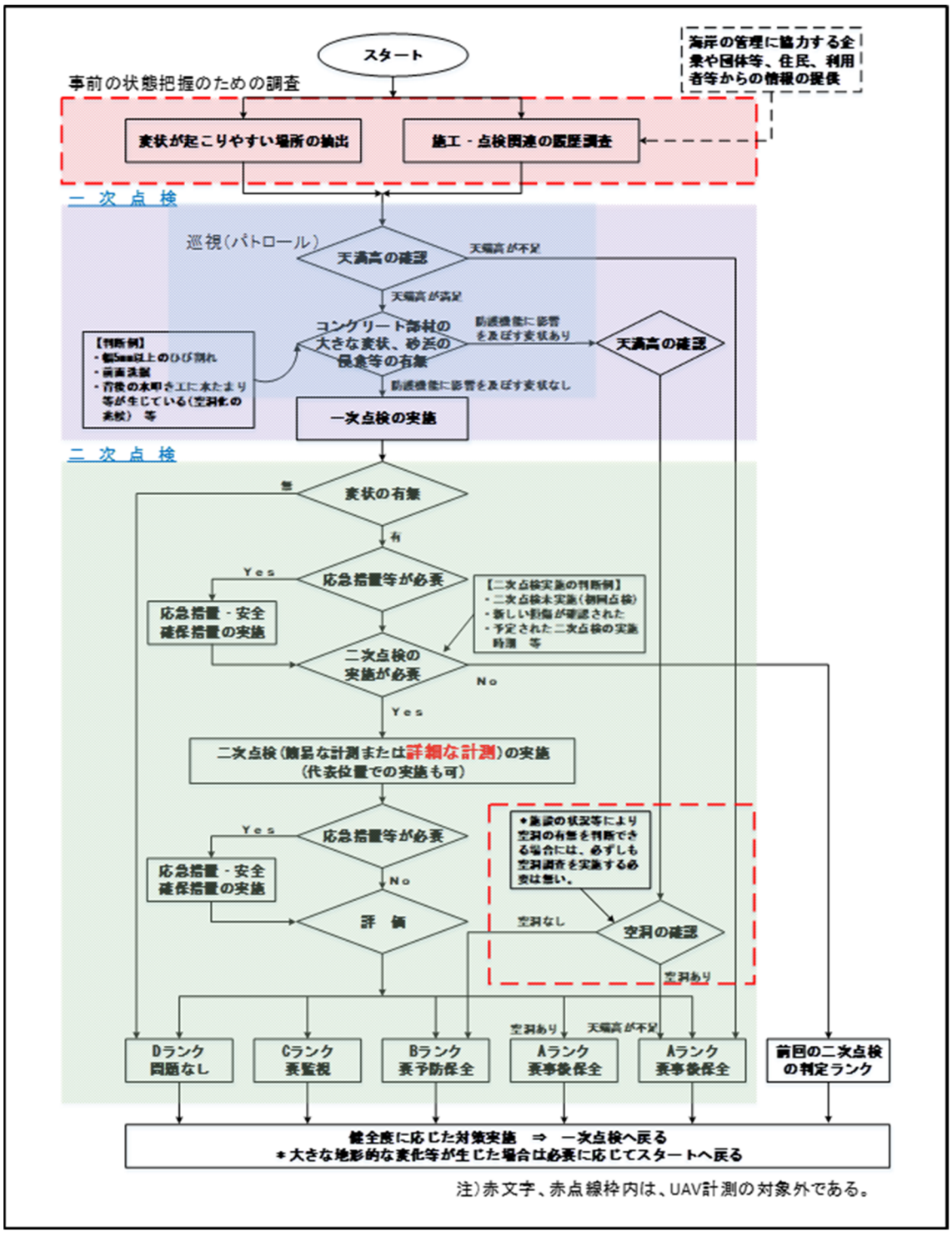
注）使用UAVの最下段はレンズの焦点距離を示している。

3.2 UAV 計測の活用について

3.2.1 機能診断調査概要

海岸保全施設の機能診断調査手順は、「マニュアル」により、図 3.2 に示すように“事前の状態把握のための調査”、“巡視による目視を含む一次点検”そして“簡易または詳細計測を含む二次点検”の 3 段階で実施することとなっている。

本手引きは、一次点検及び二次点検のうち、「鉄筋腐食、コンクリート劣化、吸出し・空洞化などの詳細計測を除く構造物の変状」の位置や規模等の把握を UAV 計測により実施し、その活用方法を検討したものである。



資料：海岸保全施設維持管理マニュアル（農林水産省農村振興局防災課他、平成 26 年 3 月）より編集

図 3.2　長寿命化計画での点検フロー(海岸保全施設)

3.2.2 施設点検への適用性

点検項目は、表 3.3 に示すとおりであり、本手引きでは、UAV 計測による撮影写真、画像解析（3 次元計測）を活用し、その適用性について確認した。

健全度評価は、表 3.4 に示すようにマニュアルで 4 段階に区分されており、定量化された変状項目は、「ひび割れ」のみである。その定量指標としては、表 3.5 に示す変状ランク a に示される 5mm 程度以上、d に示される 1mm 以下のみである。

本手引きでは、「ひび割れの長さ、幅」以外に、二次点検で「変状の定量化表現」が記載されている「防護高さの不足（天端高）」、「目地の相対的移動」などについて、その計測精度、抽出程度について検討した。

表 3.3　　海岸保全施設における点検調査内容（点検位置・項目、確認変状項目）

点検位置	点検項目	確認変状項目	
		一次点検	二次点検（簡易な計測）
天端高	天端の高さ	必要高さに対する不足	----------
波返工（胸壁については堤体工）	ひび割れ	ひび割れの有無	ひび割れの長さ、ひび割れ幅
	剥離・剥落・欠損	剥離・剥落・欠損の有無	剥離の範囲、剥落・欠損の深さと範囲
	鉄筋の腐食	錆汁、鉄筋露出の有無	錆汁の有無と範囲、鉄筋露出の長さ
	隣接スパンとの相対移動	隣接スパンとの高低差、ずれ、目地の開きの有無	隣接スパンとの高低差、ずれ・目地の開きの幅
	修繕箇所の状況	修繕箇所における変状の発生の有無	----------
天端被覆工（水叩き工を含む），表法被覆工，裏法被覆工	ひび割れ	ひび割れの有無	ひび割れの長さ、ひび割れ幅
	目地部、打継ぎ部の状況	目地材の有無、隙間・ずれの有無	目地材の有無、隙間・ずれの幅
	剥離・損傷	乖離・損傷の有無	乖離・損傷の深さと範囲
	沈下・陥没	沈下・陥没の有無	沈下・陥没の深さと範囲
	漏水	漏水の痕跡の有無	----------
	植生の異常（繁茂等）	植生の異常（繁茂等）の有無	----------
	修繕箇所の状況	修繕箇所における変状の発生の有無	----------
排水工	目地のずれ（目地の開き，相対移動量）	高低差・ずれ・開きの有無	隣接スパンとの高低差、ずれ・目地の開きの幅
	修繕箇所の状況	修繕箇所における変状の発生の有無	----------
消波工・根固工	移動・散乱	ブロックの移動・散乱の有無	ブロックの移動・散乱の範囲
	破損	ブロックのひび割れ・損傷の有無	ブロックのひび割れ・損傷の程度、範囲
	沈下	消波工の天端と波返工等の高低差の異常の有無	消波工の天端と波返工等の高低差
砂　　浜	侵食・堆積	砂浜の侵食、浜崖形成の有無、浜幅の減少	砂浜の侵食、浜崖形成の有無、浜幅

資料：海岸保全施設維持管理マニュアル（農林水産省農村振興局防災課他、平成 30 年 5 月）より編集

表 3.4　健全度評価における変状程度（海岸保全施設）

健全度		変状の程度
A ランク	要事後保全	施設に大きな変状が発生し、そのままでは天端高や安全性が確保されないなど、施設の防護機能に対して直接的に影響が出るほど、施設を構成する部位・部材の性能低下が生じており、改良等の実施に関し適切に検討を行う必要がある。
B ランク	要予防保全	沈下やひび割れが生じているなど、施設の防護機能に対する影響につながる程度の変状が発生し、施設を構成する部位・部材の性能低下が生じており、修繕等の実施に関し適切に検討を行う必要がある。
C ランク	要監視	施設の防護機能に影響を及ぼすほどの変状は生じていないが、変状が進展する可能性があるため、監視が必要である。
D ランク	問題なし	変状が発生しておらず、施設の防護機能は当面低下しない。

資料：海岸保全施設維持管理マニュアル（農林水産省農村振興局防災課他、平成 26 年 3 月）

表 3.5(1)　　海岸保全施設の施設状態評価表（UAV 計測対象）

点検位置	変状現象	変状、損傷等のランク	
		a	b
波返工 (胸壁については 堤体工)	防護高さの不足	防護高さを満足していない。	–
	ひび割れ	部材背面まで達するひび割れ・亀裂が生じている（幅5mm程度以上）。	複数方向に幅数mm程度のひび割れがあるが、背面までは達していない。
	剥離・損傷	広範囲に部材の深部まで剥離・損傷が生じている。	表面だけでなく部材の深部まで剥離・損傷が及んでいる。
	目地の開き、 相対移動量	転倒あるいは欠損がある。	移動に伴う目地の開きが大きい。目地部より水の浸透がある。
天端被覆工 （水叩き工を含む）	防護高さの不足	防護高さを満足していない。	–
	沈下・陥没	陥没がある。	沈下による凹部が目立つ。
	ひび割れ	部材背面まで達するひび割れ・亀裂が生じている（幅5mm程度以上）。	複数方向に幅数mm程度のひび割れがあるが、背面までは達していない。
	目地部、打継ぎ部 の状況	目地部、打継ぎ部のずれが大きく、堤体土砂の流出がみられる。	目地部、打継ぎ部より水の浸透がある。
	剥離・損傷	広範囲に破損、または流出している。	表面だけでなく部材の深部まで剥離・損傷が及んでいる。
表法被覆工	沈下・陥没	陥没がある。	沈下による凹部が目立つ。
	ひび割れ	部材背面まで達するひび割れ・亀裂が生じている（幅5mm程度以上）。	複数方向に幅数mm程度のひび割れがあるが、背面までは達していない。
	目地部、打継ぎ部 の状況	目地部、打継ぎ部のずれが大きく、堤体土砂の流出がみられる。	目地部、打継ぎ部より水の浸透がある。
	剥離・損傷	広範囲に破損、または流出している。	表面だけでなく部材の深部まで剥離・損傷が及んでいる。
裏法被覆工	沈下・陥没	陥没がある。	沈下による凹部が目立つ。
	ひび割れ	部材背面まで達するひび割れ・亀裂が生じている（幅5mm程度以上）。	複数方向に幅数mm程度のひび割れがあるが、背面までは達していない。
	目地部、打継ぎ部 の状況	目地部、打継ぎ部のずれが大きく、堤体土砂の流出がみられる。	目地部、打継ぎ部より水の浸透がある。
	剥離・損傷	広範囲に破損、または流出している。	表面だけでなく部材の深部まで剥離・損傷が及んでいる。
消波工	移動・散乱 及び沈下	消波工断面がブロック1層分以上減少している。	消波工断面が減少している(ブロック1層未満)。
	ブロック破損	破損ブロックが1/4以上ある。	破損ブロックは1/4未満である。
砂浜	侵食・堆積	侵食により基礎工が浮き上がり堤体土が既に流出している。 侵食により前面の砂浜が消失し、基礎工下端・止水矢板が露出している。 堤防・護岸等の防護機能が損なわれるほど、堤防・護岸等の前面の砂浜の侵食が進んでいると認められる場合。	堤防・護岸等の防護機能が将来的に損なわれると想定されるほど、堤防・護岸等の前面の砂浜の侵食が進んでいると認められる場合。
排水工	目地の開き、 相対移動量	転倒あるいは欠損がある。	移動に伴う目地の開きが大きい。天端工との目地部より水の浸透の恐れがある。

資料：海岸保全施設維持管理マニュアル（農林水産省農村振興局防災課他、平成 26 年 3 月）より編集

表 3.5(2)　　海岸保全施設の施設状態評価表（UAV 計測対象）

点検位置	変状現象	変状、損傷等のランク	
		c	d
波返工 (胸壁については 堤体工)	防護高さの不足	–	防護高さを満足している。
	ひび割れ	1方向に幅数mm程度のひび割れがあるが、背面までは達していない。	１mm以下のひび割れが生じているか、ひび割れが生じていない。
	剥離・損傷	広範囲であっても表面の剥離・損傷が生じている。	ごく小規模の剥離・損傷が生じているか、剥離・損傷が生じていない。
	目地の開き、 相対移動量	目地ずれがあるが、水の浸透はない。	目地部にわずかなずれ、段差、開きが見られるか、段差、開きが見られない。
天端被覆工 （水叩き工を含む）	防護高さの不足	–	防護高さを満足している。
	沈下・陥没	–	部分的な沈下が見られるか、沈下が見られない。
	ひび割れ	１方向に幅数mm程度のひび割れがあるが、背面までは達していない。	１mm以下のひび割れが生じているか、ひび割れが見られない。
	目地部、打継ぎ部 の状況	目地部、打継部にずれがあるが、水の浸透はない。	目地部、打継ぎ部にわずかなずれ、段差、開きが見られるか、段差、開きが見られない。
	剥離・損傷	広範囲であっても表面の剥離・損傷が生じている。	ごく小規模の剥離・損傷が生じているか、剥離・損傷が生じていない。
表法被覆工	沈下・陥没	–	部分的な沈下が見られるか、沈下が見られない。
	ひび割れ	1方向に幅数mm程度のひび割れがあるが、背面までは達していない。	１mm以下のひび割れが生じているか、ひび割れが見られない。
	目地部、打継ぎ部 の状況	目地部、打継ぎ部にずれがあるが、水の浸透はない。	目地部、打継ぎ部にわずかなずれ、段差、開きが見られるか、段差、開きが見られない。
	剥離・損傷	広範囲であっても表面の剥離・損傷が生じている。	ごく小規模の剥離・損傷が生じているか、剥離・損傷が生じていない。
裏法被覆工	沈下・陥没	–	部分的な沈下が見られるか、沈下が見られない。
	ひび割れ	１方向に幅数mm程度のひび割れがあるが、背面までは達していない。	１mm以下のひび割れが生じているか、ひび割れが見られない
	目地部、打継ぎ部 の状況	目地部、打継ぎ部にずれがあるが、水の浸透はない。	目地部、打継ぎ部にわずかなずれ、段差、開きが見られるか、段差、開きが見られない。
	剥離・損傷	広範囲であっても表面の剥離・損傷が生じている。	ごく小規模の剥離・損傷が生じているか、剥離・損傷が見られない。
消波工	移動・散乱 及び沈下	消波ブロックの一部が移動、散乱、沈下している。	わずかな変状がみられるか、変状なし。
	ブロック破損	少数の破損ブロックがある。	小さなひび割れが発生しているか、ひび割れが発生していない。
砂浜	侵食・堆積	汀線の後退もしくは浜崖の形成が認められる。	わずかな変状がみられるか、変状なし。
排水工	目地の開き、 相対移動量	目地ずれがあるが、水の浸透はない。	目地部にわずかなずれ、段差、開きが見られるか、段差、開きが見られない。

資料：海岸保全施設維持管理マニュアル（農林水産省農村振興局防災課他、平成 26 年 3 月）より編集

3.2.3 施設点検への活用手順

本手引きでは、UAV 計測を用いた空中写真撮影、SfM 解析を実施し、写真画像を用いたひび割れや亀裂の判読に加えて対象構造物の 3 次元データを取得し、これに基づく構造物の変状抽出を行って施設維持管理への適用可能性（表 3.6）について検討し、その手法の精度，効率性等について取りまとめた。

表 3.6　海岸保全施設の点検項目における UAV 計測の適用

凡例　●：現地確認済、○：活用可能（確認事例より判定）、×：活用不可

点検位置	点検項目	確認変状項目		単写真	3次元計測
		一次点検	二次点検（簡易な計測）		
対象可能なひび割れ幅：3次元計測は確認事例より判定。				0.2mm≧	(0.5mm)
天端高	天端の高さ	必要高さに対する不足	----------	×	●
波返工（胸壁については堤体工）	ひび割れ	ひび割れの有無	ひび割れの長さ、ひび割れ幅	●	●
	剥離・剥落・欠損	剥離・剥落・欠損の有無	剥離の範囲、剥落・欠損の深さと範囲	●	●
	鉄筋の腐食	錆汁、鉄筋露出の有無	錆汁の有無と範囲、鉄筋露出の長さ	○	○
	隣接スパンとの相対移動	隣接スパンとの高低差、ずれ、目地の開きの有無	隣接スパンとの高低差、ずれ・目地の開きの幅	●	●
	修繕箇所の状況	修繕箇所における変状の発生の有無	----------	○	○
天端被覆工（水叩き工を含む），表法被覆工，裏法被覆工	ひび割れ	ひび割れの有無	ひび割れの長さ、ひび割れ幅	●	●
	目地部、打継ぎ部の状況	目地材の有無、隙間・ずれの有無	目地材の有無、隙間・ずれの幅	●	●
	剥離・損傷	乖離・損傷の有無	乖離・損傷の深さと範囲	●	●
	沈下・陥没	沈下・陥没の有無	沈下・陥没の深さと範囲	●	●
	漏水	漏水の痕跡の有無	----------	○	○
	植生の異常（繁茂等）	植生の異常（繁茂等）の有無	----------	●	○
	修繕箇所の状況	修繕箇所における変状の発生の有無	----------	○	○
排水工	目地のずれ（目地の開き，相対移動量）	高低差・ずれ・開きの有無	隣接スパンとの高低差、ずれ・目地の開きの幅	○	○
	修繕箇所の状況	修繕箇所における変状の発生の有無	----------	○	○
消波工・根固工	移動・散乱	ブロックの移動・散乱の有無	ブロックの移動・散乱の範囲	○	○
	破損	ブロックのひび割れ・損傷の有無	ブロックのひび割れ・損傷の程度、範囲	○	○
	沈下	消波工の天端と波返工等の高低差の異常の有無	消波工の天端と波返工等の高低差	○	○
砂　　浜	侵食・堆積	砂浜の侵食、浜崖形成の有無、浜幅の減少	砂浜の侵食、浜崖形成の有無、浜幅	○	○

注）3次元計測とは、オルソ画像、3次元点群データを用いた定量計測を示す。

すなわち、海岸保全施設では、UAV 計測と SfM 解析を組み合わせ、撮影写真、オルソ画像、3 次元点群データを生成し、図 3.3 に示すような活用方法を検討した。

検討では、構築された 3 次元点群データの精度を基準点・標定点の測量結果より検証し、RMS 誤差が約 1cm 前後以下の高精度地形モデルであることを確認した。

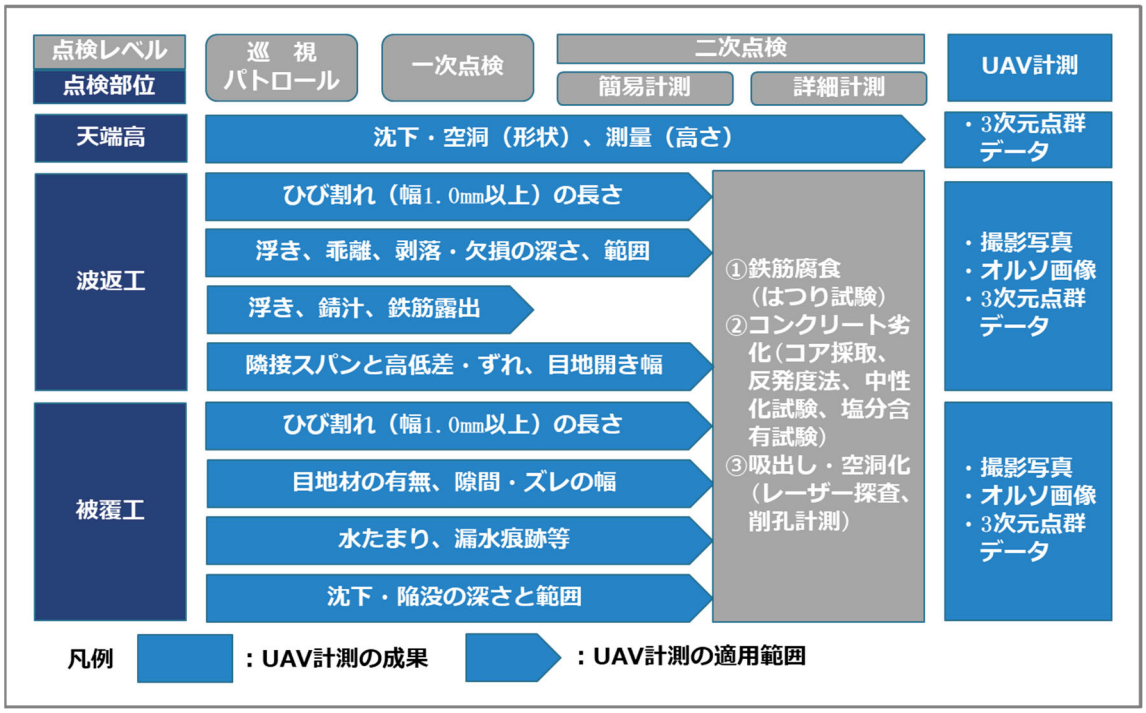


図 3.3　　海岸保全施設での UAV 計測の活用手順

次に、検討では、得られた単写真，オルソ画像および 3 次元地形モデルより、抽出可能な標高・横断図等を用いて、構造物の変状（ひび割れ、表面劣化、変形・歪み、欠損・損傷、不同沈下、抜け上がり、目地変化など）を抽出・計測を行い、その適用性、その手法の精度、効率性について取りまとめた。

海岸保全施設は、延長が比較的長いコンクリート構造物であるため、機能診断調査では、ひび割れの観察・記録・図化に多くの労力がかかる。ひび割れは、主として海岸保全施設の波返工、天端被覆工に発生するが、施設特性としては、海岸・河口部の水際線に設置されていることより、風浪など海象条件など撮影条件への影響を大きく受ける。

このため、本項では、UAV を施設の直線部かつ屈曲部に則して安定的に自律飛行させる手法（RTK-GNSS）及びこの手法における高精度オルソ画像生成、さらには、ひび割れを自動抽出させる結果について、その精度、適用性についても記載した。

3.3 UAV 計測による変状解析

3.3.1 撮影画像（単写真）

(1) ひび割れ

1) 計測型 UAV

海岸保全施設維持管理マニュアルでは、表 3.7 に示すとおり、最小で 1mm のひび割れを抽出する必要がある。ひび割れ幅の抽出には、撮影カメラとレンズ焦点距離、撮影距離の組合せによる地上解像度で決定される。

事例としては、写真 3.4 に示すとおりであり、幅 0.3mm のひび割れについては、f=135mm の望遠レンズ、撮影距離 10m でしっかりと抽出可能となっている。

表 3.7　　海岸保全施設の変状ランク判定

変状のランク	施　設　の　状　態	ひび割れ規模
a	部材背面まで達するひび割れ・亀裂が生じている。	幅 5mm 程度以上
b	複数方向にひび割れがあるが、背面までは達していない。	幅数 mm 程度
c	1 方向にひび割れがあるが、背面までは達していない。	幅数 mm 程度
d	ひび割れが生じているか、ひび割れが見られない。	1mm 以下

資料：海岸保全施設維持管理マニュアル（農林水産省農村振興局防災課他、平成 30 年 5 月）より編集

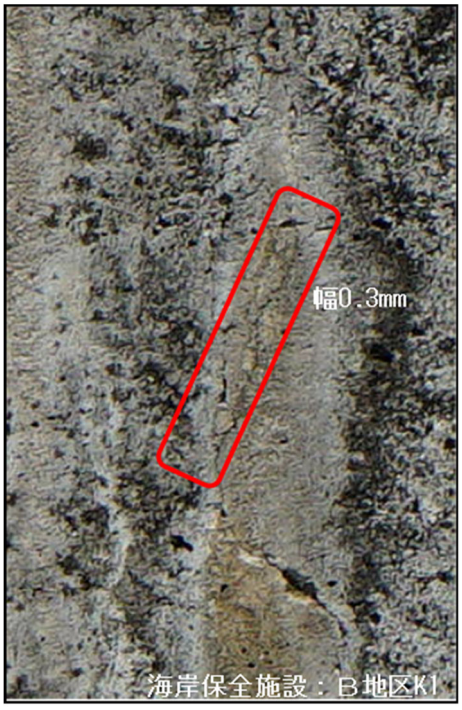


写真 3.4　　計測用 UAV（f =135mm、撮影距離 10m）の撮影画像

撮影カメラとレンズ焦点距離、撮影距離の組合せによる画像比較は、写真 3.5～3.6 に示すように、中央に通常計測の写真（f=50mm、撮影距離 40m）を置き、比較のために、汎用カメラを用いた現地での陸上撮影写真を左側に、精細度の高い画像（f=135mm、撮影距離 10m）の写真を右側に並べた。これら事例では、白の塗装がされているような好条件下（写真 3.5 a）で微細なひび割れ（現地確認：幅 0.3mm 前後以上）が抽出可能であると判断されるが、施設表面の汚れがひどい場合（写真 3.5b）には、抽出が難しくなるケースもある。

また、幅 1mm 以上のひび割れは、A・B地区とも確認されたが、抽出可能であると判断された。ただし、抽出が難しいケース（写真 3.6b）としては、撮影面が陰となる場合や、壁面表面が劣化に伴う粗粒状態となる場合などが考えられる。

しかし、望遠（f=135mm）、撮影距離 10m の場合には、現地検証結果から、微細なひび割れ（現地確認：幅 0.3mm 前後以上）が抽出可能であると判断された。

したがって、計測では、目標とするひび割れ幅が撮影可能な地上解像度より、UAV 機種、撮影高度、焦点距離など撮影方法を決定することが重要である。

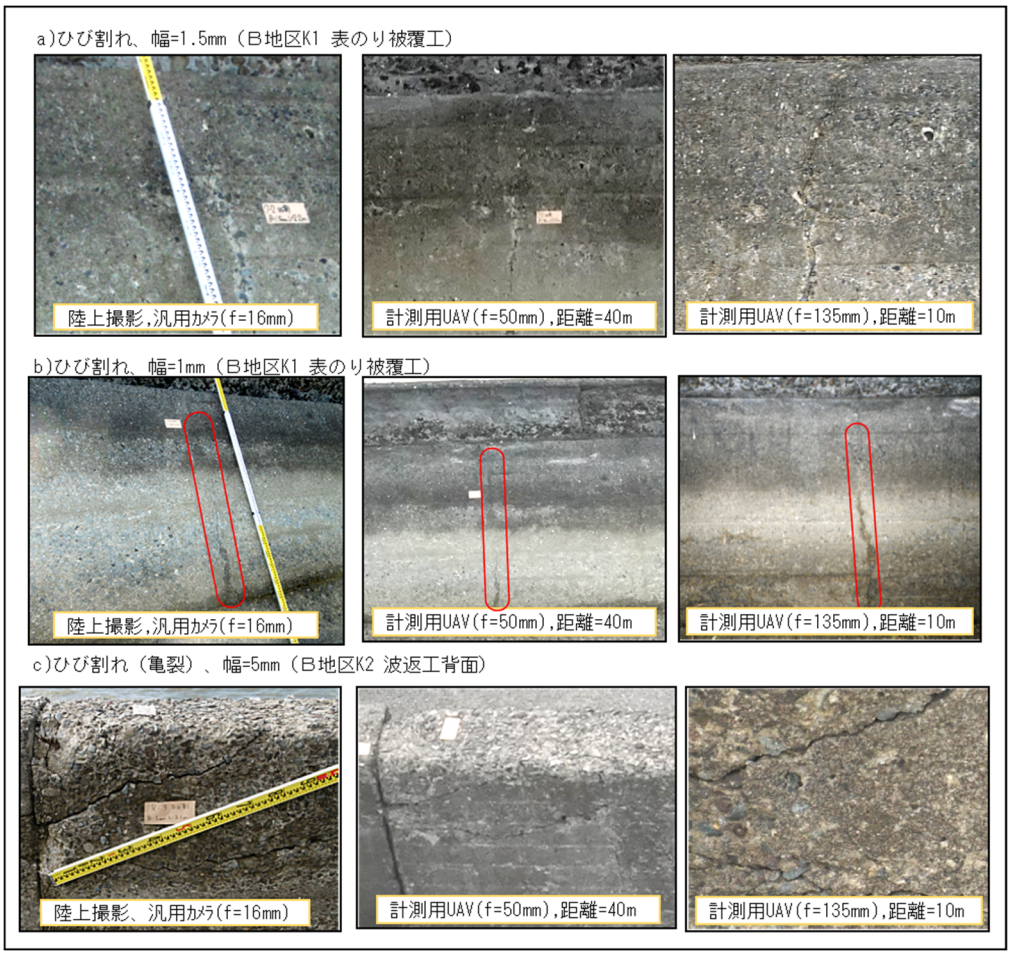


写真 3.6　ひび割れ画像の撮影距離・焦点距離別比較（海岸保全施設：B地区）

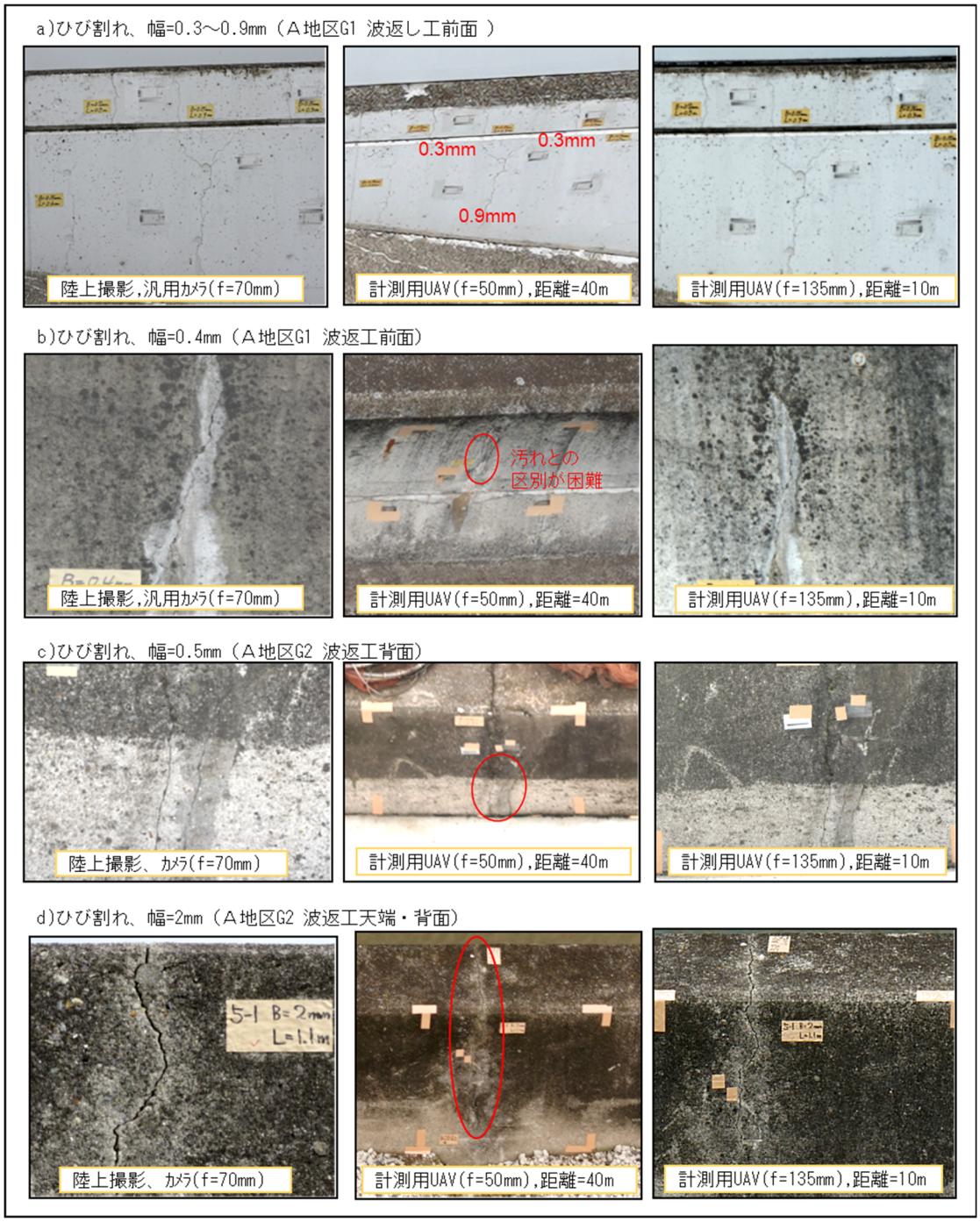


写真 3.5 ひび割れ画像の撮影距離・焦点距離別比較(海岸保全施設：A 地区)

2) UAV 機種による比較

簡易型 UAV(f=3.6mm)と計測型 UAV(f=50mm)を比較した画像は、写真 3.7 に示すとおりであり、両機とも幅 1mm 程度のひび割れの抽出は可能である。

しかし、簡易型 UAV では、幅 1mm 程度のひび割れを抽出可能であるが、被写体との距離を約 10m まで近接する必要がある。したがって、計測用 UAV と比較すると、施設全体のひび割れを撮影する場合には、撮影枚数の増加に伴う作業効率、低空飛行に伴う安全対策などに留意する必要がある。

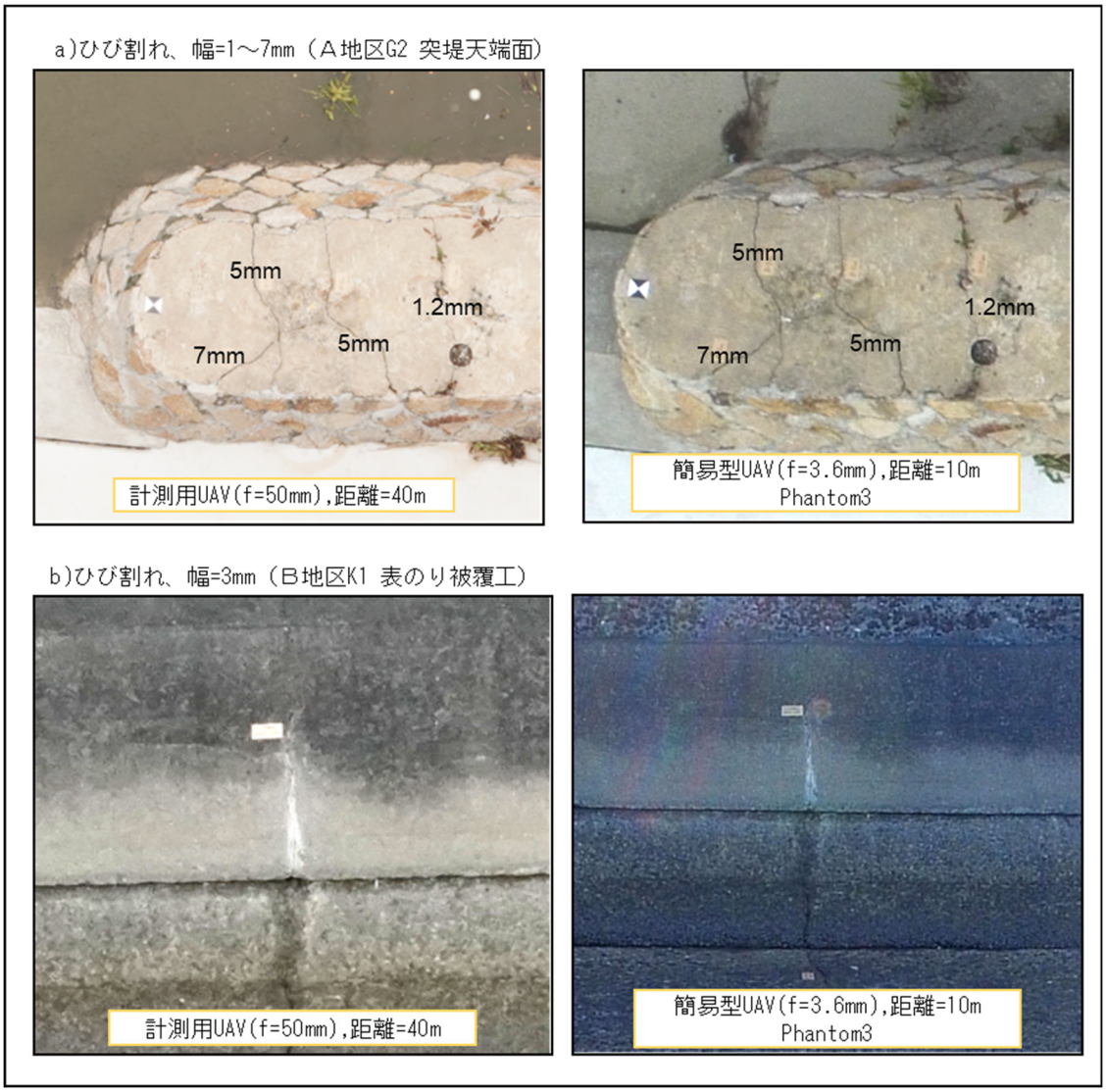


写真 3.7　　UAV 機種によるひび割れ画像の比較（海岸保全施設）

(2) 剥離・損傷、目地開き等

海岸保全施設の機能診断調査は、表 3.8 に示すとおりであり、剥離・損傷・目地開き等に関する評価基準には、個々の損傷等の定量的な基準はなく、変状程度が深部、広範囲、小規模または大きい、わずかなどというような定性評価を実施している。

表 3.8　　剥離・損傷、目地部の変状ランク（海岸保全施設）

変状のランク	施　設　の　状　態	
	剥 離 ・ 損 傷	目　　地　　部
a	広範囲に部材の深部まで剥離・損傷が生じている。	転倒、あるいは欠損がある。 堤体土砂の流出が見られる。
b	表面だけでなく部材の深部まで剥離・損傷が及んでいる。	移動に伴う目地の開きが大きい。目地部より水の浸透がある。
c	広範囲であっても表面の剥離・損傷が生じている。	目地ずれがあるが、水の浸透はない。
d	ごく小規模の剥離・損傷が生じているか、剥離・損傷が見られない。	目地部にわずかなずれ、段差、開きが見られるか、段差、開きが見られない。

資料：海岸保全施設維持管理マニュアル（農林水産省農村振興局防災課他、平成 30 年 5 月）より編集

通常計測による画像(f=50mm、撮影距離 40m)は、写真 3.8 に示すとおりであり、画像比較のために、汎用カメラを用いた現地での陸上撮影写真を左側に並べている。

この事例では、３次元データの利活用を主目的とした通常計測で、幅 15mm 程度の目地の開きや表面の損傷状態（表面劣化等)、数 cm 程度の損傷の抽出が可能となっている。また、望遠(f=135mm)の場合には、写真 3.9 に示すように、陸上での近接撮影と同等以上の鮮明な画像が得られるため、変状・段差・開きの有無、部材までの乖離・損傷、転倒、土砂流出など、剥離・損傷、目地部の施設状態を詳細に把握可能である。

すなわち、写真からの点検(定性評価)では、日常点検レベルで通常計測(f=50mm)を実施し、二次点検レベルが必要な箇所では、望遠計測(f=135mm)を実施するといった活用方法が有効である。

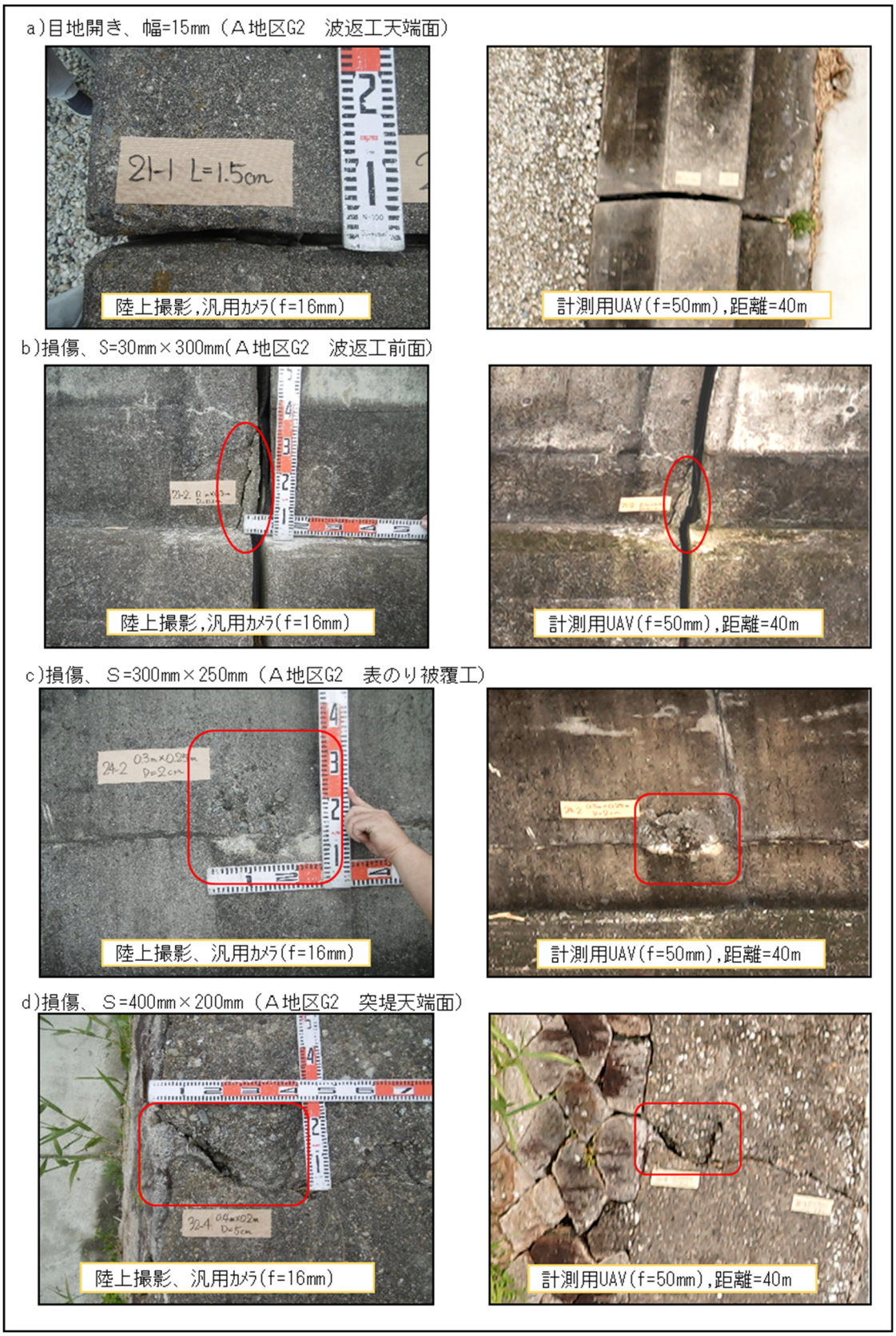


写真 3.8(1)　損傷/目地の開き画像の比較（海岸保全施設：A地区）

写真 3.8(2)　損傷/目地の開き画像の比較（海岸保全施設：B地区）

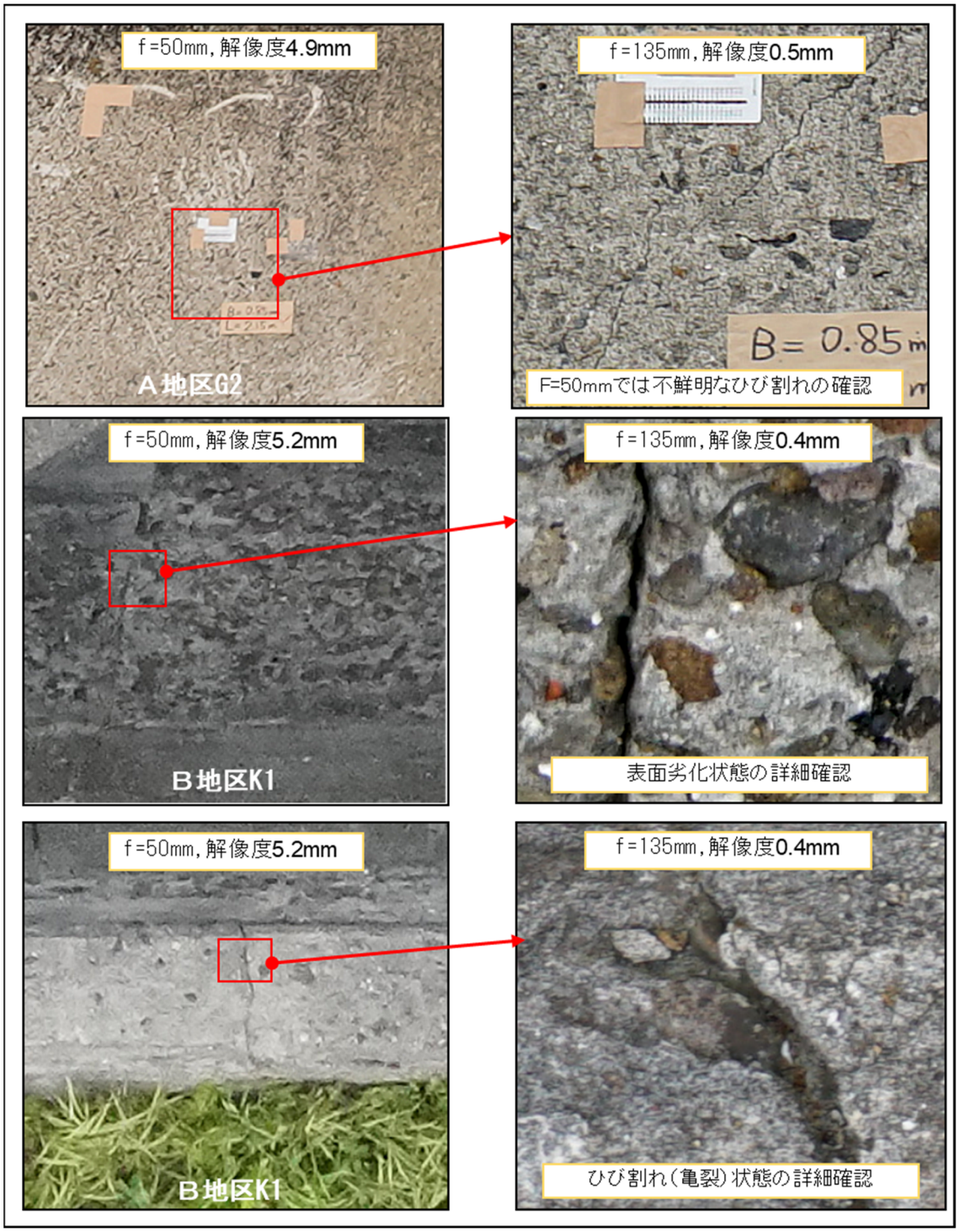


写真 3.9　　高解像度画像による変状確認事例（海岸保全施設）

3.3.2 3次元点群データ

(1) オルソ画像

オルソ画像は、UAV 計測で撮影した画像ならびに SfM（Structure from Motion）を用いた 3 次元解析より得られる 3 次元点群データ（物体の形状を 3 次元座標(x, y, z)）の位置精度を検証した上で作成される。

このため、作成されたオルソ画像は、写真上の像の位置ズレをなくし空中写真を地図と同じく、真上から見たような傾きのない、正しい大きさと位置に表示される画像に変換（以下、「正射変換」という）される。

したがって、その利点としては、画像上で位置、面積及び距離などを正確に計測可能であり、地図データなどと重ね合わせて利用することができる地理空間情報という点である。また、目視観察として利用するには、位置精度の他に、画面上の変状状況を確認するため、画像解像度が重要となる。

このため、変状の定量評価には、適切な地上解像度に設定した UAV 計測より生成される高精度なオルソ画像の活用が有効であり、計測では、点検用途に併せて、計測型 UAV(f=50mm)及び簡易型 UAV(f=3.6mm)を使い分けることが望ましい。

事例としては、写真 3.10、3.11 に示すように、両機種の解像度をほぼ同一にすると、両地区とも縮尺 1/100 程度で標識（10cm×10cm）、A地区では、1/200 程度で幅 7mm のひび割れ、B地区では、1/100～1/50 で剥離、損傷の状態が確認できる。

ただし、簡易型UAVで同程度の解像度を確保する場合、飛行時には、撮影高度が計測型UAVの平均 40m～45mに対し、平均 10m前後と低空となるため、風、樹木など地表面付近での影響や機器誤差に対応する技術が必要となることに留意する。

写真 3.10　デジタルオルソ画像の解像度比較（海岸保全施設：A 地区 G2）

（損傷、ひび割れ、標識 10cm×10cm）

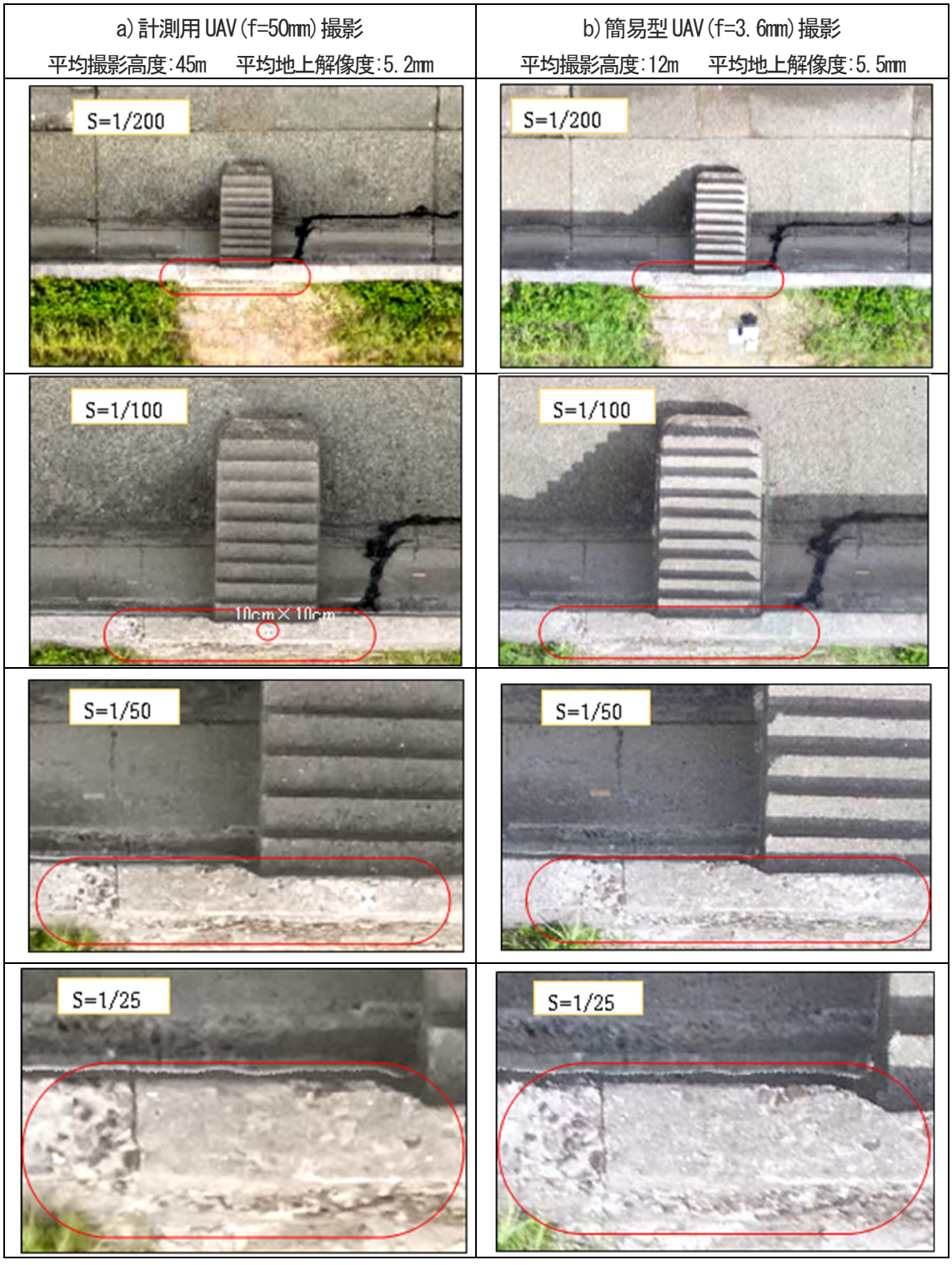


写真 3.11　　デジタルオルソ画像の解像度比較（海岸保全施設：B地区 K1）

（剥離、損傷、標識 10cm×10cm）

(2) 地形・施設形状

3 次元点群データの活用方法としては、位置精度が 1cm 未満であることより、地形・施設の形状計測に有効であり、A・B地区での事例をそれぞれ図 3.4・3.5 及び図 3.6 に示す。これら事例では、実測の横断測量と 3 次元点群データの画像解析より、それぞれ作成した海岸保全施設の断面図を比較してみた。

比較結果では、両地区の事例とも、上部パラペット端（写真の死角）での一部欠測、水面・背後付近（水面、植生等の揺らぎ）でのノイズデータが認められていた。

しかし、3 次元点群データは、全体的に横断形状を良好に再現しており、実測結果と比較して、海面付近の被覆工（B地区 K1：3cm）を除き、1cm～2cm 以下の誤差と施設形状を正確に表現していた。また、これら事例の UAV 計測は、地上解像度 1.8～5.2mm の撮影であったことより、海岸保全施設及び周辺の形状再現（誤差 1cm 未満）には、地上解像度 5mm 前後未満に設定した飛行方法が有効である。

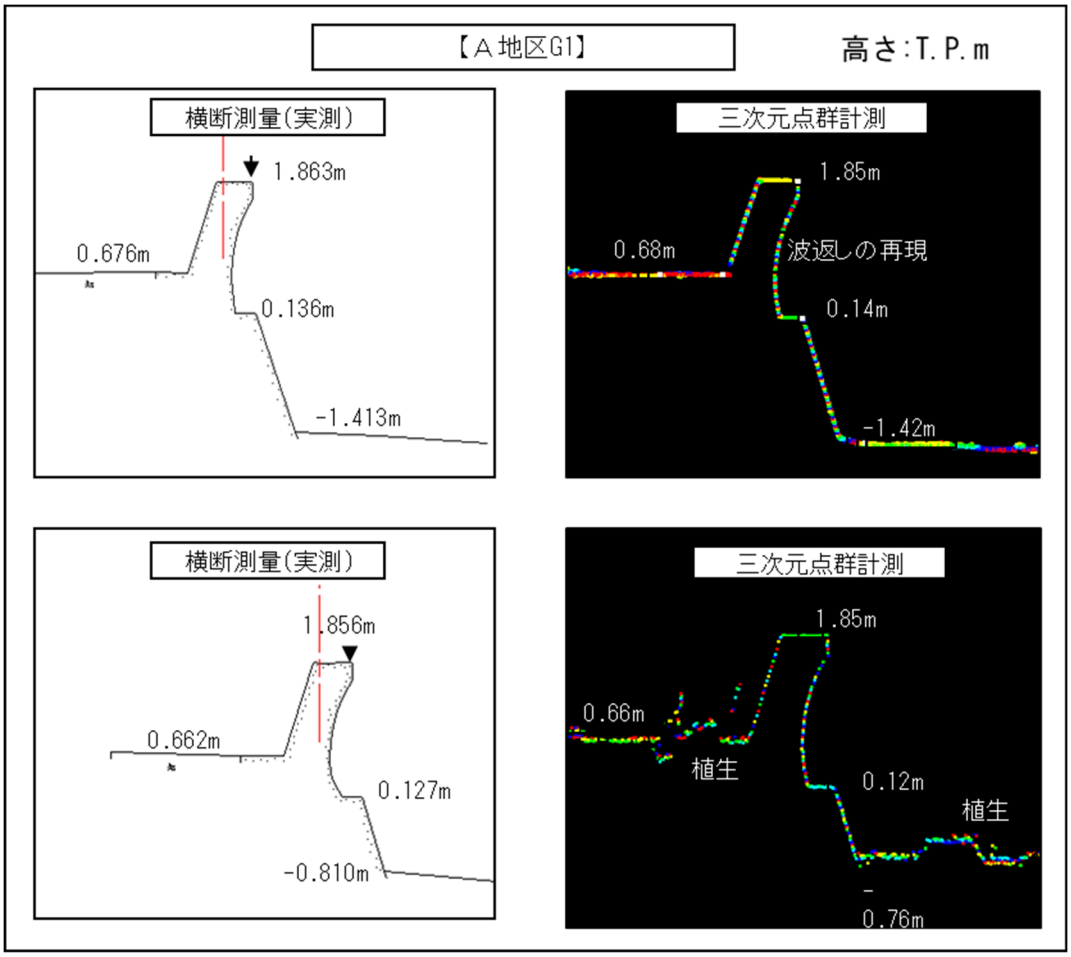


図 3.4　　海岸保全施設の形状再現（横断測量結果との比較：A地区 G1）

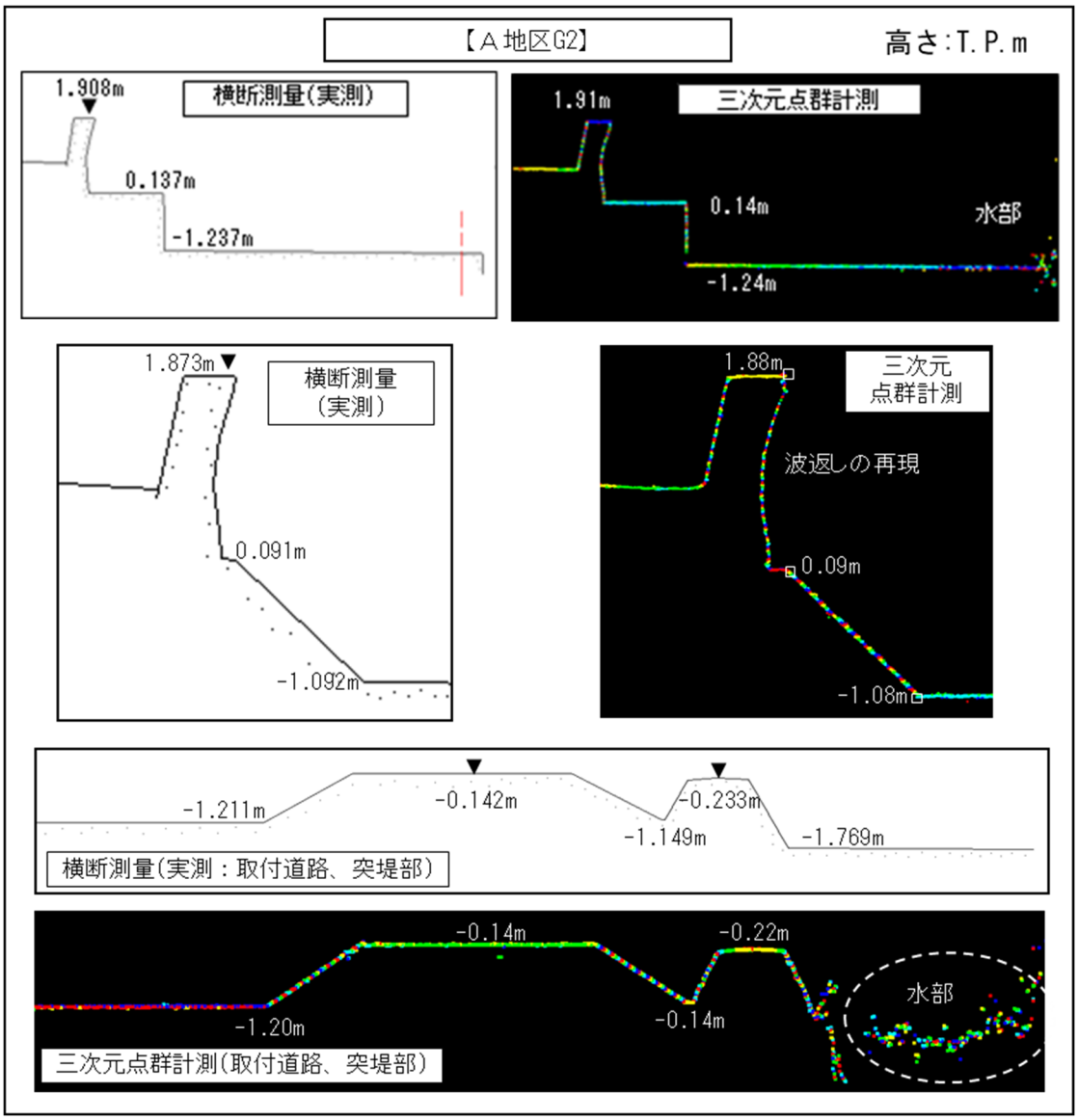


図 3.5　　海岸保全施設の形状再現（横断測量結果との比較：A 地区 G2）

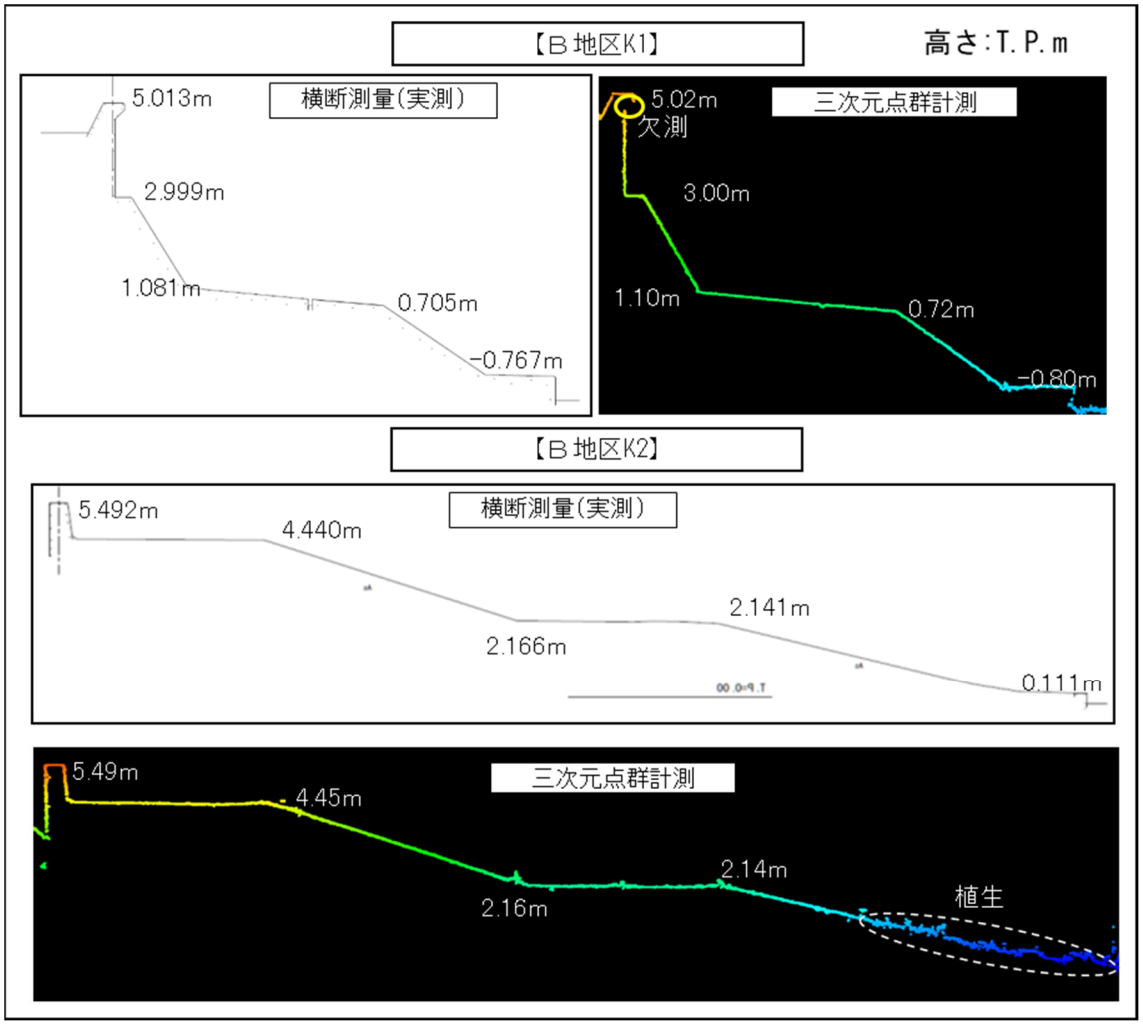


図 3.6　海岸保全施設の形状再現（横断測量結果との比較：B地区）

(3) 変状計測

本項では、A・B地区でのUAV計測で確認された変状について、3次元点群データ及びオルソ画像を活用した計測結果事例として紹介する。

1) 目地の段差

本事例は、目地の開きが確認された箇所において、「目地の両側の高さを計測・比較する」ことで段差の有無を確認したものである。

実測では、両端の高さ（Δh：1.877－1.863m＝1.4cm）から1.4cmの段差が認められ、3次元点群データによる計測では1cmと確認された。すなわち、3次元計測では、目地の開きや段差の変状抽出に有効活用できると判断できる。

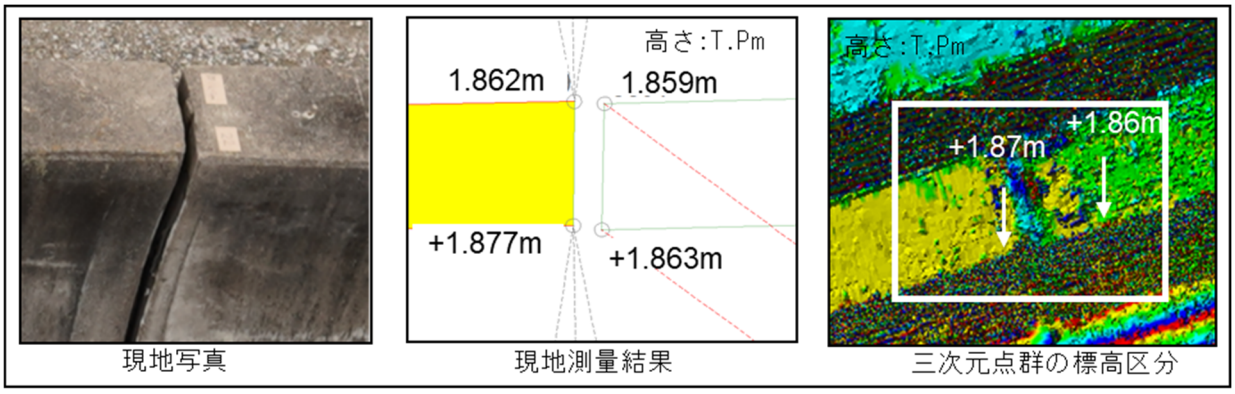


図3.7　目地の段差計測事例（海岸保全施設：A地区G2）

2) 天端の剥離・損傷

本事例は、護岸天端上における表面劣化を抽出し、「剥離による変状規模を計測」したものである。その計測結果では、「深さ約3～11cm×延長約1.2mの規模の剥離が生じている」と判断できる。

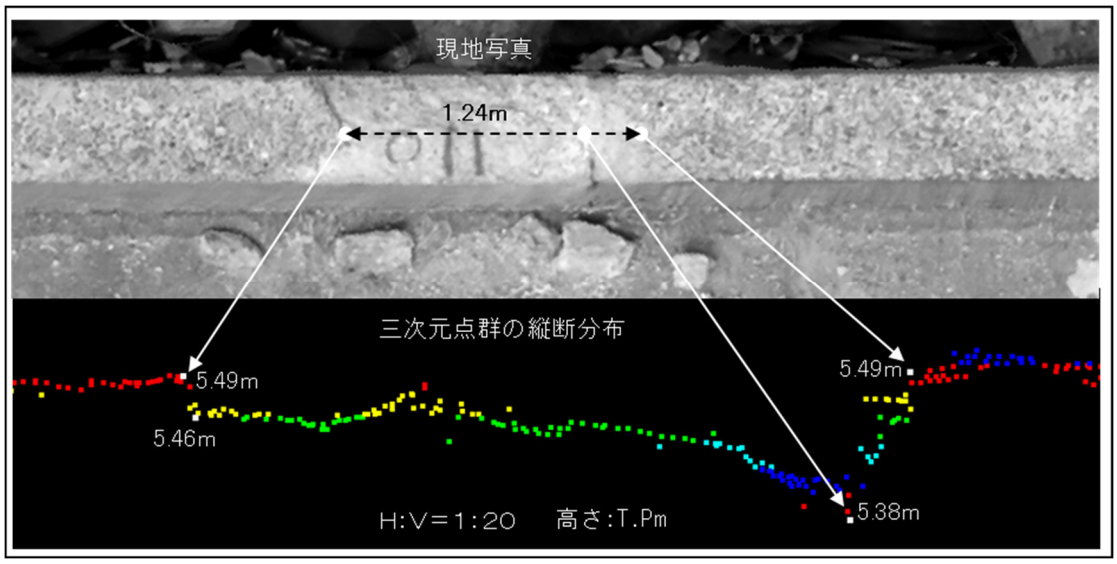


図3.8　天端の剥離・損傷の計測事例（海岸保全施設：B地区K2）

3）天端高等

本事例は、図 3.9 に示すように、3 次元点群データを用いて、任意区間の天端高の縦断図を作成したものであり、その結果（A 地区）は、G1、G2 の一部区間でそれぞれ最大 3cm、7cm ほどの標高差が確認された。

B 地区では、図 3.10 に示すように、K1 護岸の天端で 5cm、前面被覆工で 3cm、目地開き箇所で 19cm 及び 13cm の標高差が確認できた。

これら事例では、天端をはじめとする各箇所の標高差を数 cm 単位で把握することや、その変状区間（場所）の特定が可能であることを表している。

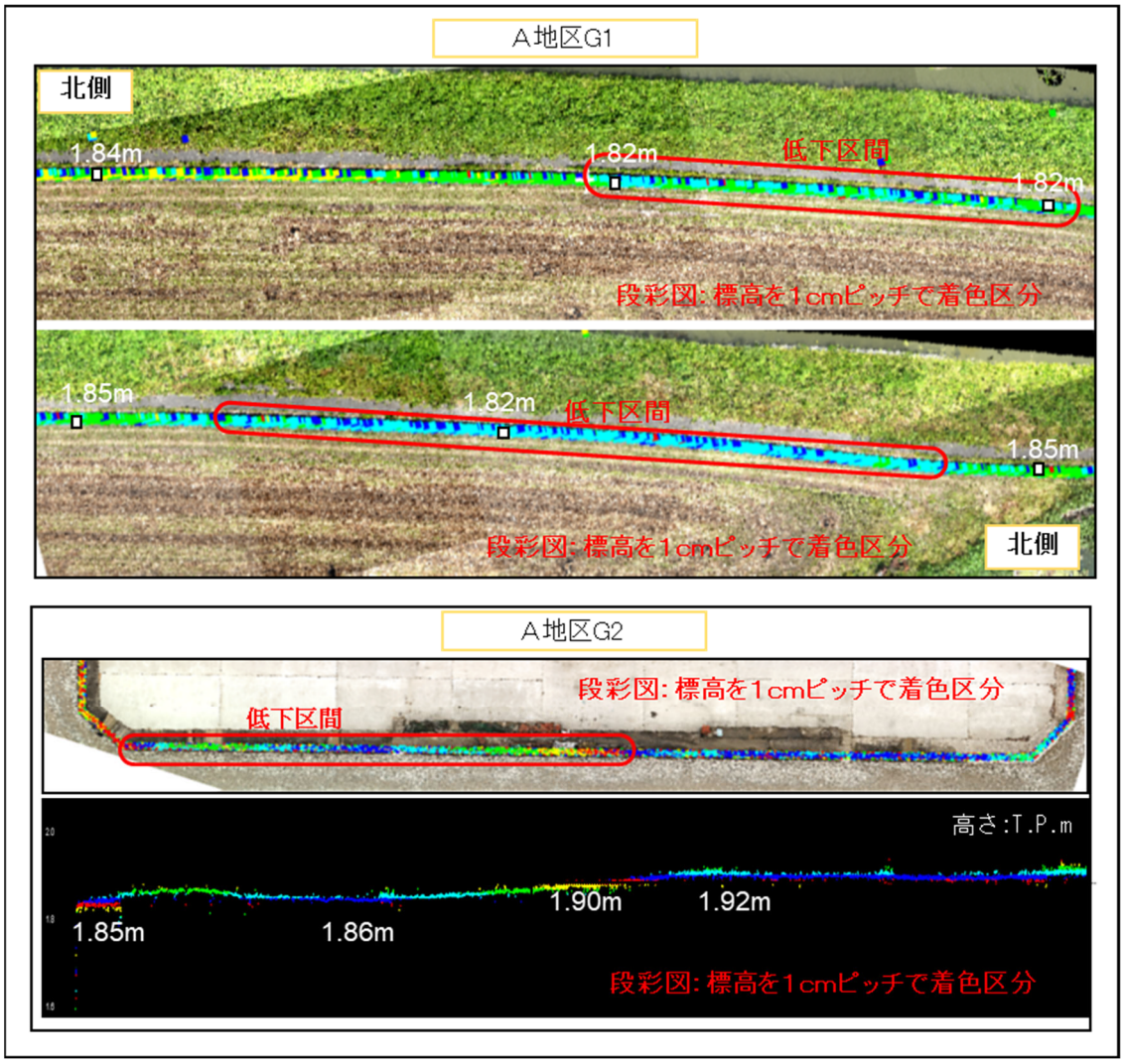


図 3.9　　天端高の縦断計測事例（海岸保全施設：A 地区 G1,G2）

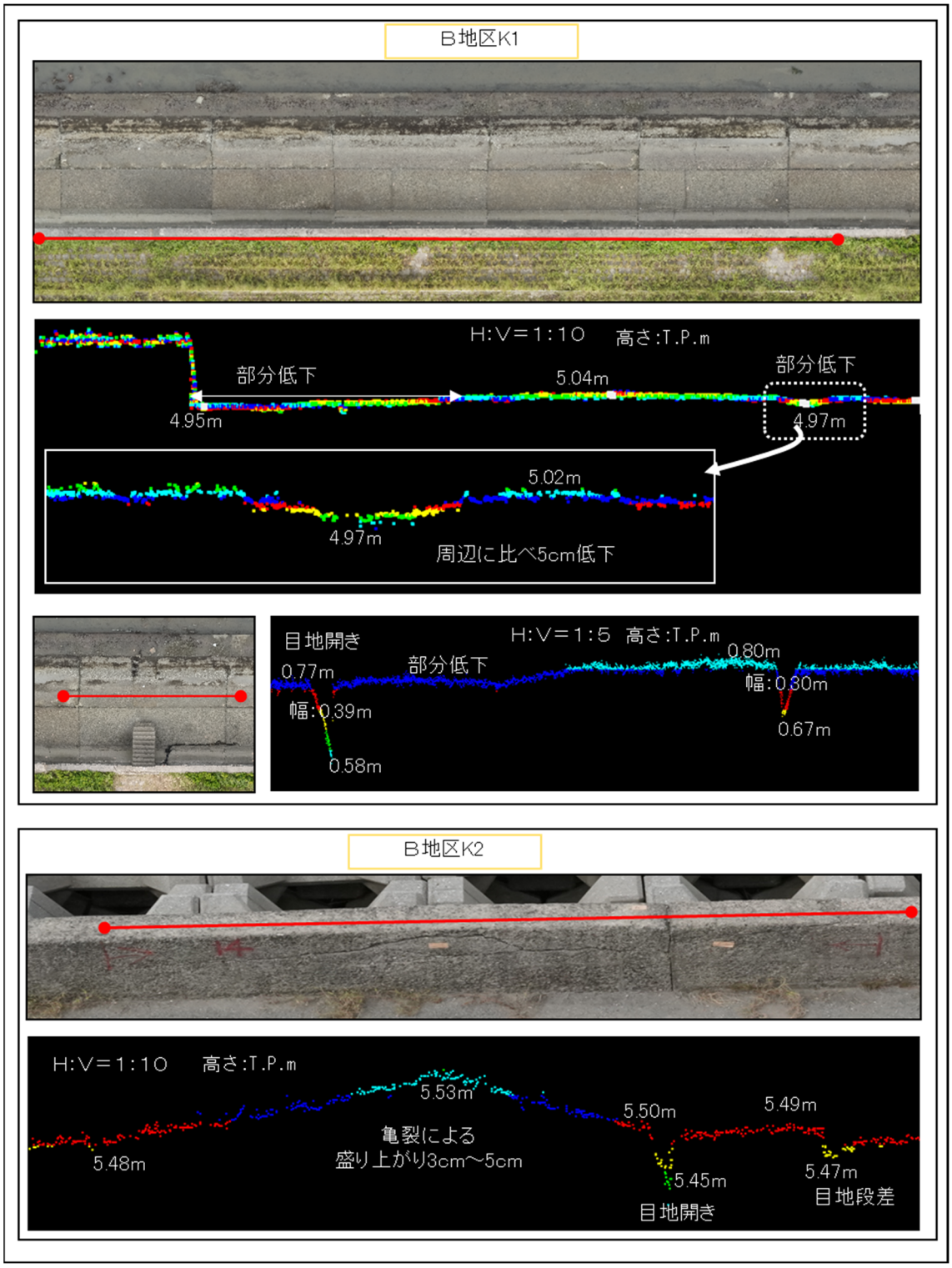


図 3.10　天端高の縦断計測等事例（海岸保全施設：B 地区 K1,K2）

4）損傷

本事例は、「突堤天端面の損傷」を計測したものであるが、損傷の大きさは、延長38cm、幅24cm、深さ5cm（-0.27－-0.32m）程度である判断された。

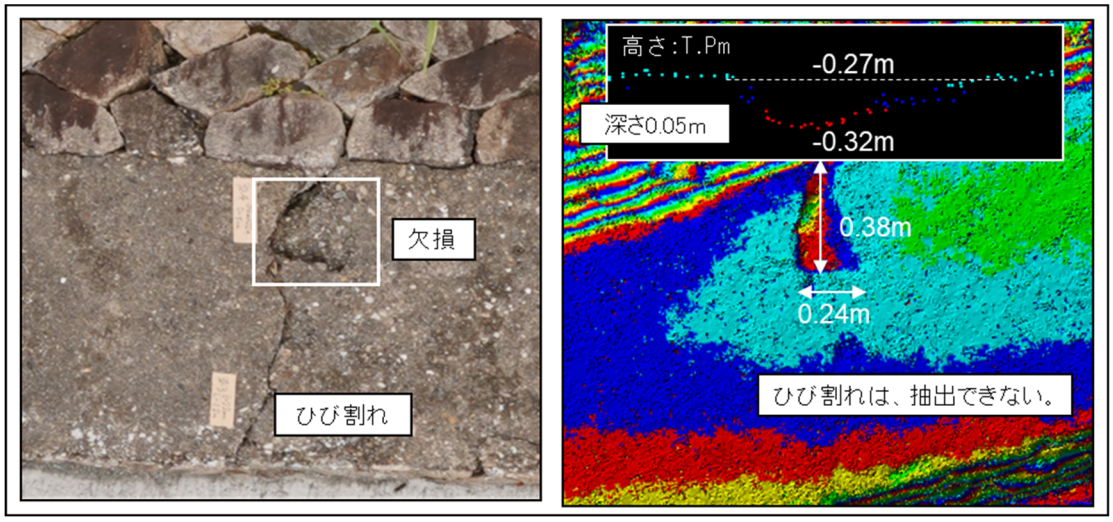


図3.11　　突堤（天端面）の損傷計測事例（海岸保全施設：A地区G2）

5)背後地盤の陥没

本事例は、「護岸背後に生じた陥没」であるが、その規模は、延長70cm、幅36cm、深さ15cm（0.91－0.76m）であると判断された。

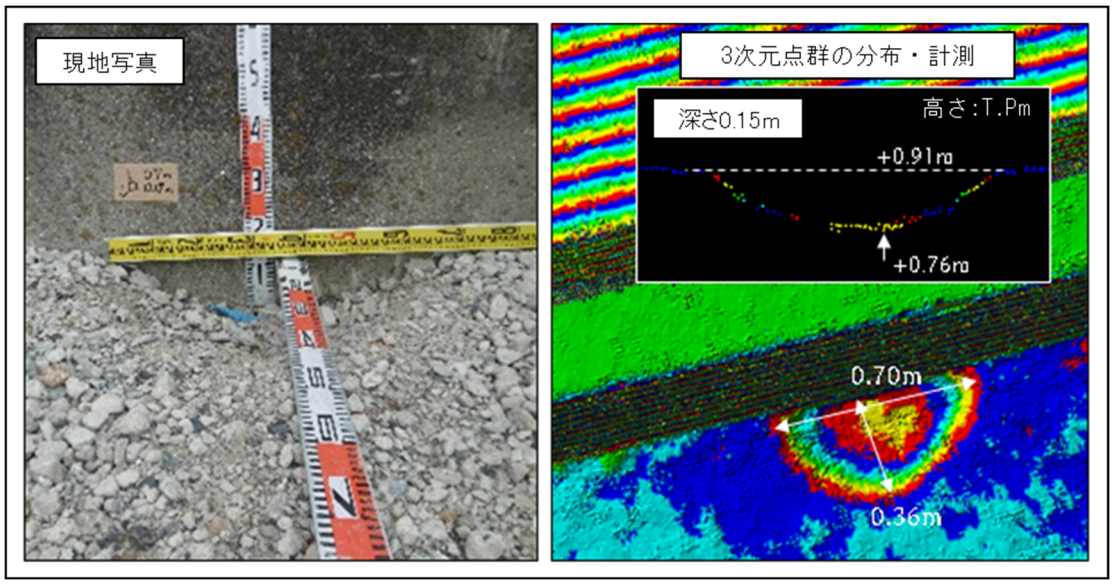


図3.12　　背後地盤の陥没計測事例（海岸保全施設：A地区G2）

（4）今後のオルソ画像の活用

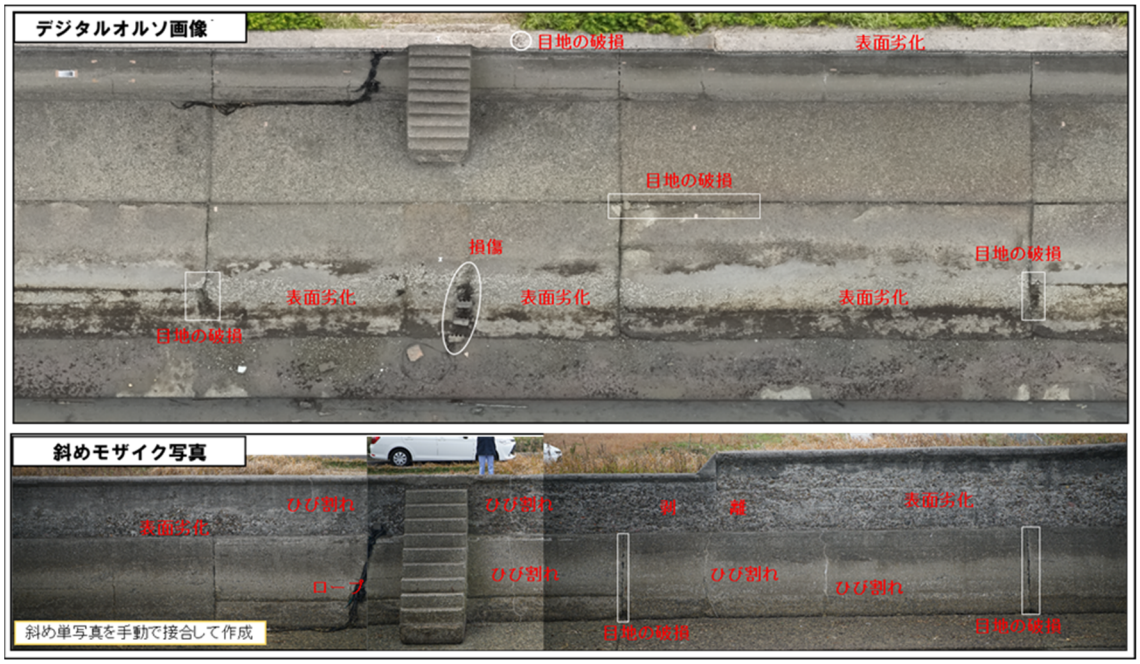
海岸保全施設の点検では、天端の他、波返工、表・裏法面等の施設側面でも変状を抽出するため、垂直撮影の他に、施設側面上方からの斜め撮影を同時に実施する。

撮影された斜め写真は、写真 3.12 に示すように、飛行位置の影響により、施設側面に対するアングルが一様でないため、画像の連続性、ひび割れ、損傷等のスケールの推定における均一性を欠くこととなる。

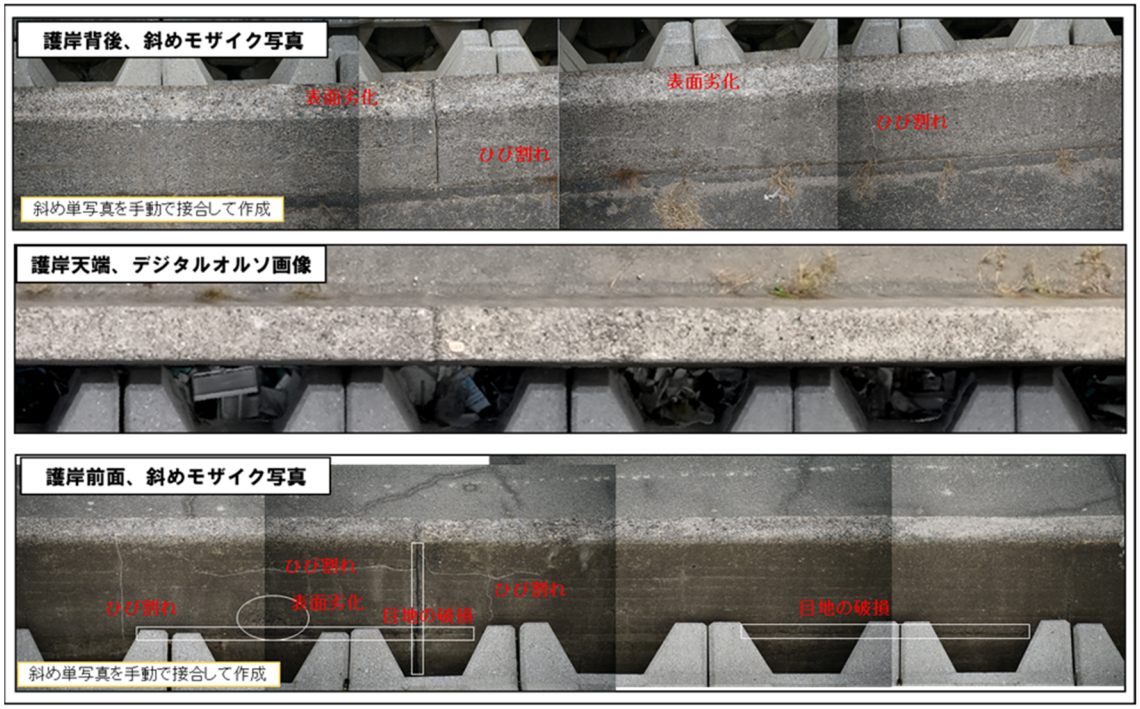
写真 3.12　　護岸側面の連続斜め撮影事例（海岸保全施設：B 地区 K1）

一方、オルソ画像は、写真上の像の位置ズレをなくし空中写真を地図と同じく、真上から見たような傾きのない、正しい大きさと位置に表示される画像に正射変換したもので、ひび割れ、損傷等の形状・大きさを計測することが可能である。

ここで、斜め単写真を接合したモザイク写真とオルソ画像を比較すると、図 3.13 に示すとおりである。すなわち、モザイク写真では、変状の目視観察に代わる定性評価へと活用することが可能である。また、写真の歪み、傾きなどを補正したオルソ画像では、変状の形状が明確に把握できるため、変状分布図の背景画像としての活用だけでなく、変状の定量計測までが可能となる点で優れている。



B 地区：K1



B 地区：K2

図 3.13　モザイク写真、オルソ画像の活用事例（海岸保全施設）

今回の UAV 計測では、3 次元点群データの水平及び鉛直の位置精度が 1cm 未満であることより、生成されたオルソ画像上で、地物（変状など）の位置、面積及び距離などを正確に計測することが可能となった。

留意点としては、図 3.14 に示すように、高密度なオルソ画像の生成が重要であり、そのためには、RTK-GNSS 測位を用いた低空飛行で垂直撮影、斜め撮影を実施することが望ましい。

今後、活用方法と一つとしては、ひび割れを含めた変状図面として利用できるだけでなく、高密度なオルソ画像は、AI など機械学習を活用した自動抽出を可能とする。

図 3.15 は、幅 1～4mm のひび割れが自動抽出された事例であり、将来的には、高密度なオルソ画像が、機能診断調査の効率化・省力化に大きく貢献するものと考えられる。

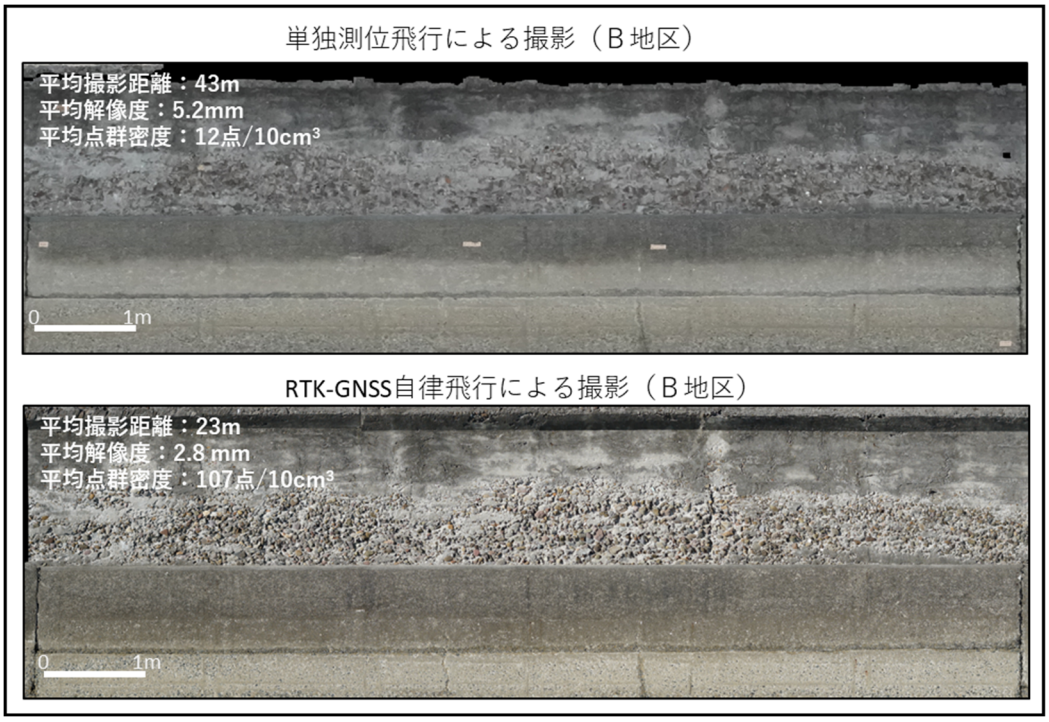


図 3.14　飛行方法の違いによるオルソ画像の点群密度（海岸保全施設：B 地区 K1）

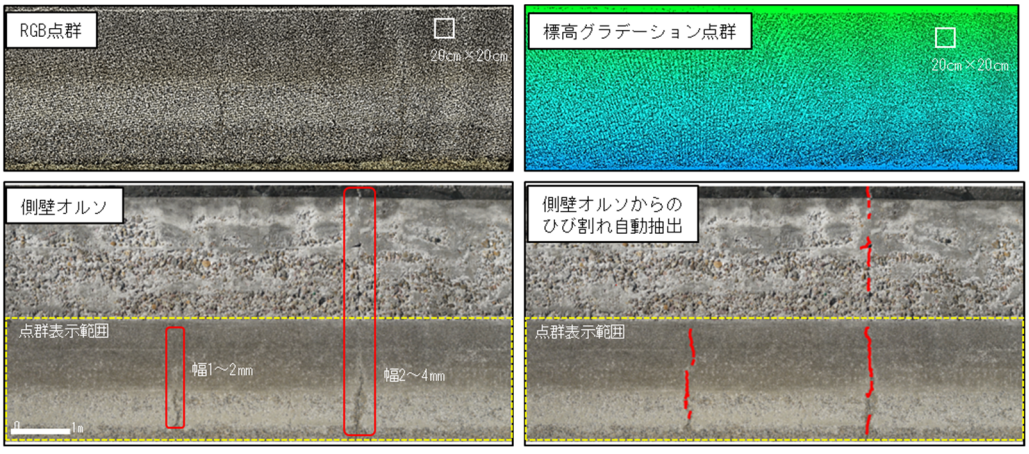


図 3.15　　今後のオルソ画像の活用方法（海岸保全施設：B 地区 K1）

3.3.3 屈曲部での自律飛行

RTK-GNSS 測位を用いた屈曲部での自律飛行は、RTK-GNSS 測位を用いた自律飛行は、焦点距離 f=50mm のレンズ、カメラ自体のブレを小さくする三軸ジンバルを搭載した UAV 計測として検証した。

海岸保全施設では、直線的な施設法線のほか、施設法線に屈曲部を有するため、高解像度の画像取得には、この構造に沿った低空飛行（飛行高度 15m）の斜め撮影が必用となる。

RTK-GNSS 測位による自律飛行結果は、図 3.16 に示すように屈曲した飛行コースでも安定した Waypoint 飛行と写真撮影、ならびに高品質なオルソ画像作成が可能であることを検証した。

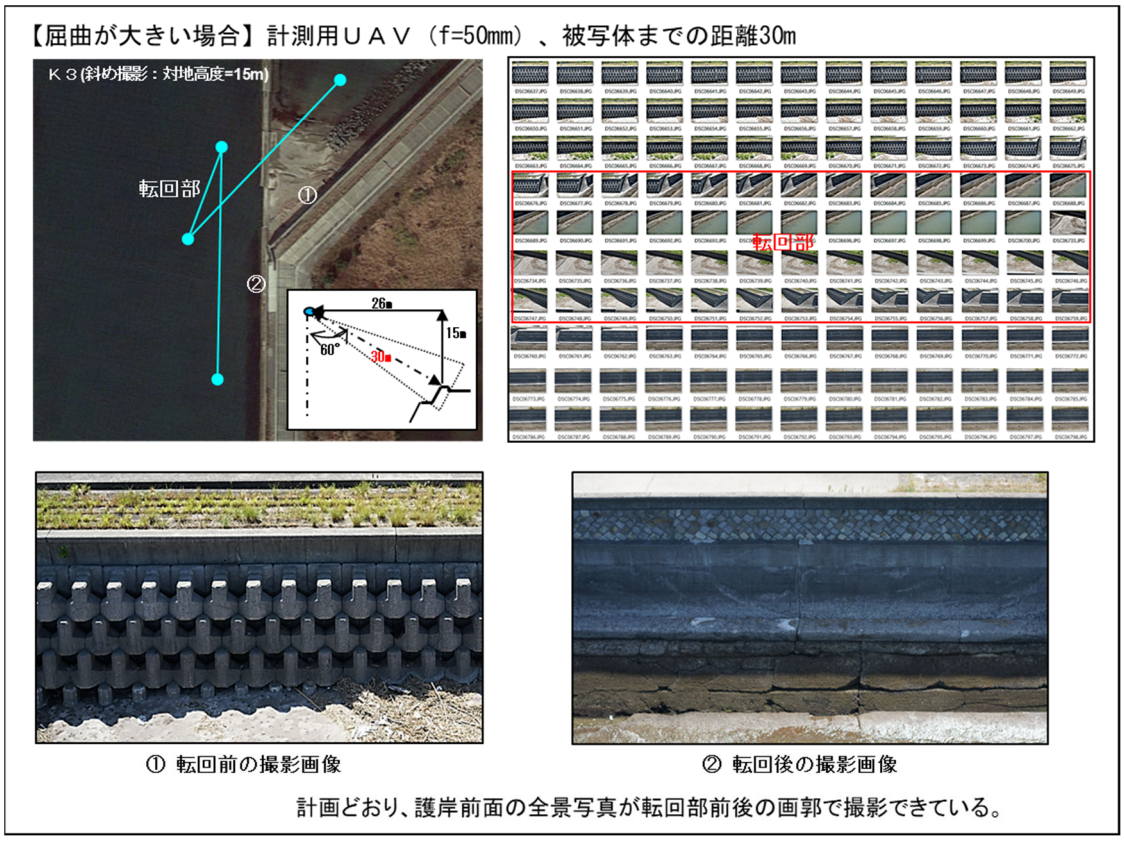


図 3.16(1)　　海岸保全施設屈曲部における軌道制御飛行（B地区 K3）

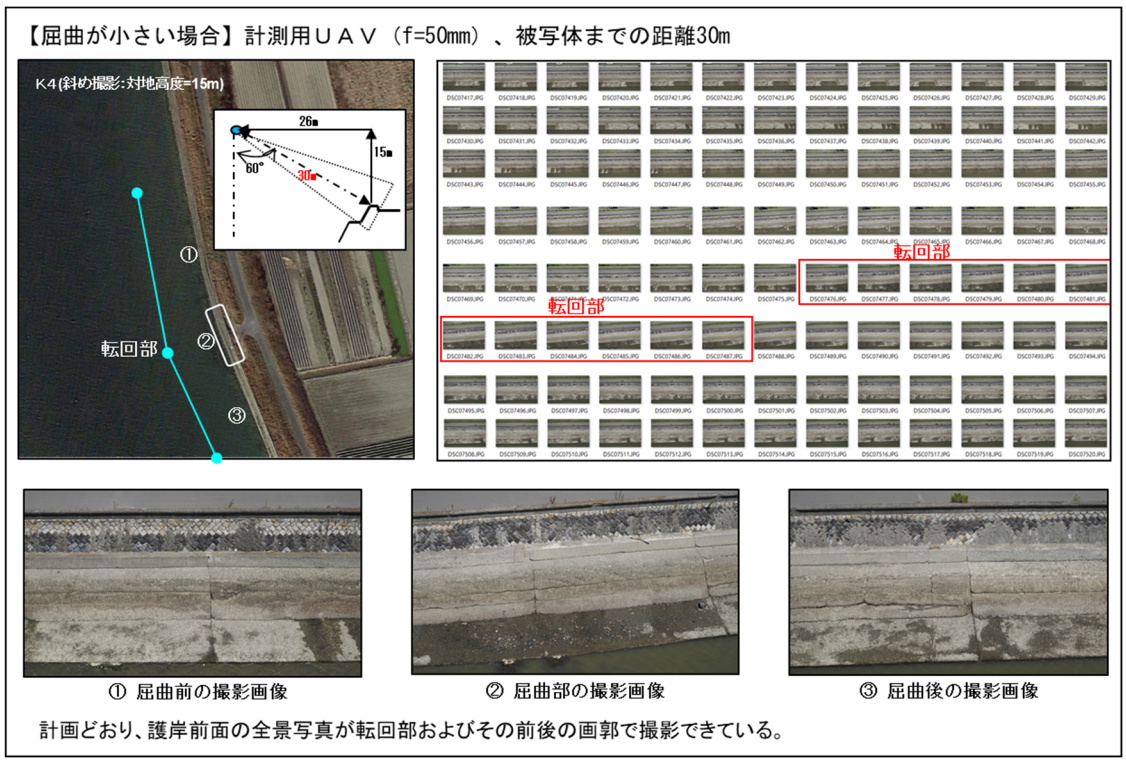


図 3.16(2)　　海岸保全施設屈曲部における軌道制御飛行（B地区 K4）

3.3.4 施設点検への適用結果

施設点検への適用結果は、表 3.9 に示すとおりであり、計測用 UAV（f=135mm）及び計測用 UAV(f=50mm)の併用活用では、「定期点検レベル」で海岸保全施設の点検に適用が一部条件を除き可能である。すなわち、計測用 UAV(f=50mm)では、幅 1mm 未満の細かなひび割れの抽出において、護岸等の汚れや色相の状態によって定期点検レベルの調査に支障を及ぶすケースも認められた。

また、簡易型 UAV では、ひび割れの抽出精度において計測用 UAV（f=50mm）には劣るものの、飛行高度 10m 程度までの近接撮影であれば、定期点検レベルへの適用が可能である。

なお、海岸保全施設の定量評価では、ひび割れ幅 1mm（変状ランク d）～5mm（変状ランク a）の指標のみであるが、剥離・損傷、沈下・陥没、目地開きなど他変状の評価指標でも定量化が可能であったため、維持管理では、UAV 計測を活用した点検が有効であった。

表 3.9　海岸保全施設点検での UAV 計測の適用性（定期点検レベル）

点検位置	変状現象	簡易型UAV	計測型UAV	
		f=3.6mm 撮影距離=10m～15m	f=50mm 撮影距離=40m～45m	f=135mm 撮影距離=10m～15m
		単画像、オルソ画像 3次元点群データ	単画像、オルソ画像 3次元点群データ	単画像
波返工 （胸壁については堤体工） 天端被覆工 表法被覆工 裏法被覆工	防護高さの不足	高さのRMS誤差が数cmであるため、数cm単位での高さ計測は可能である。	高さRMS誤差が5mm程度であり、1cm単位での高さ計測が可能である。	―
	ひび割れ	護岸の汚れ等が無い場合は、ひび割れ幅1mm以上の抽出が可能である。	護岸の汚れ等が無い場合は、ひび割れ幅0.5mm以上から抽出可能である。ひび割れ幅1mm以上は、護岸の状況に関係なく抽出可能である。	微少なひび割れ幅の抽出が可能である。現地検証では、最小0.3mmのひび割れ幅を抽出した。
	剥離・損傷	大きさ数cm程度の剥離・損傷の抽出が可能である。	大きさ数cm程度の剥離・損傷の抽出が可能である。	大きさ数cm程度の剥離・損傷の抽出、詳細な剥離面、損傷状態の確認が可能である。
	沈下・陥没	【陥没】大きさ数cm程度の陥没の抽出が可能であり、深さは数cm単位で計測できる。ただし、陥没底面が照度不足等で撮影できない場合は不可能である。 【沈下】周辺に対し数cmオーダーでの面的な比高差の把握が可能である。	【陥没】大きさ数cm程度の陥没の抽出が可能であり、深さは数cm単位で計測できる。ただし、陥没底面が照度不足等で撮影できない場合は不可能である。 【沈下】周辺に対し1cmオーダーでの面的な比高差の把握が可能である。	平面的な陥没状態の把握が可能であるが、深さ等の鉛直方向のについては、未確認である。
	目地の開き、相対移動量、打継部の状況	幅数cm程度の目地の開き、段差数cm以上の目地の段差の抽出が可能である。 相対移動量は、移動の有無確認は判読可能である。	幅15mm程度の目地の開きの抽出、段差1cm単位の計測が可能である。 相対移動量は、移動の有無確認は判読可能である。	数mm程度の目地の開きの抽出は可能である。段差、相対移動量については未確認である。
消波工	移動・散乱及び沈下	デジタルオルソ等の広範囲の写真により、面的に把握が可能である。 三次元点群の標高分布により面的な比高差の確認が可能である。	デジタルオルソ等の広範囲の写真により、面的に把握が可能である。 三次元点群の標高分布により面的な比高差の確認が可能である。	―
	ブロック破損	大きさ数cm以上の損傷の抽出が可能である。	大きさ数cm以上の損傷の抽出が可能である。	大きさ数mm以上の損傷の抽出が可能である。
排水工	目地の開き、相対移動量	幅数cm程度の目地の開き、段差数cm以上の目地の段差の抽出が可能である。 相対移動量は、移動の有無確認は判読可能である。	幅15mm程度の目地の開きの抽出、段差1cm単位の計測が可能である。 相対移動量は、移動の有無確認は判読可能である。	数mm程度の目地の開きの抽出は可能である。段差、相対移動量については未確認である。

目　　次

4. 開水路 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 90
4.1 UAV 計測における調査計画 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 92
4.1.1 調査概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 92
4.1.2 調査方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 92
⑴ 留意点 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 92
⑵ 撮影方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 95
⑶ 撮影写真の諸元 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 97
4.2 UAV 計測の活用について ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 97
4.2.1 機能診断調査概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 97
4.2.2 施設点検への適用性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 99
4.2.3 施設点検への活用手順 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 102
4.3 UAV 計測による変状解析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 105
4.3.1 撮影画像（単写真） ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 105
⑴ ひび割れ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 105
⑵ 剥離・損傷、目地開き等 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 109
⑶ 高解像度カメラ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 111
4.3.2 ３次元点群データ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 113
⑴ オルソ画像 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 113
⑵ 地形・施設形状 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 117
⑶ 変状計測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 120
⑷ 今後のオルソ画像の活用 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 123
4.3.3 施設点検への適用結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 125

4. 開水路

【記載概要】

本項は、幅 1.2～6.1m の開水路（コンクリート構造）を対象に、UAV 計測による画像、3 次元点群データの活用を検討した事例である。

撮影機種は、ひび割れ抽出や 3 次元計測など高解像度の画像を取得するため、装着レンズを交換可能な一眼レフカメラを搭載した大型の計測型 UAV と、広く普及しているコンパクトデジカメ相当のカメラを搭載した小型で安価な簡易型 UAV を用いた。

UAV 計測では、だれもが高精度な三次元モデル・オルソを作成できるように、予めプログラミングした飛行コースに沿って GNSS を利用した自律飛行で実施した。

記載内容は、UAV 計測の調査計画、活用、変状解析の 3 項目から構成されており、画像、3 次元点群データによる変状解析の内容、精度についての事例を紹介している。

施設点検への適用については、「農業水利施設の機能保全の手引き」に従い検討したが、圧縮強度、中性化などを計測する詳細調査以外の目視点検調査で有効活用できることが明らかになった。

大　項　目	中　　項　　目	記　　載　　内　　容
UAV計測による調査計画	調査概要	実証開水路の概要
	調査方法	留意点、撮影方法、撮影写真の諸元
UAV計測の活用について	機能診断調査概要	機能診断調査におけるUAV計測の対象範囲
	施設点検への適用性	適用性を検討する施設の変状項目
	施設点検への活用手順	施設点検での活用方法、変状項目の抽出手法・結果の概要
UAV計測による変状解析	撮影画像	ひび割れ、乖離・損傷、目地開き等の抽出事例、計測型・汎用型UAVの比較
	3次元点群データ	地形・施設形状、目地の段差、天端の剥離・高さ、施設の抜け上がり、背後地盤の陥没、施設の歪みの事例、オルソ画像の活用
	施設点検への適用結果	開水路点検におけるUAV計測の適用性結果

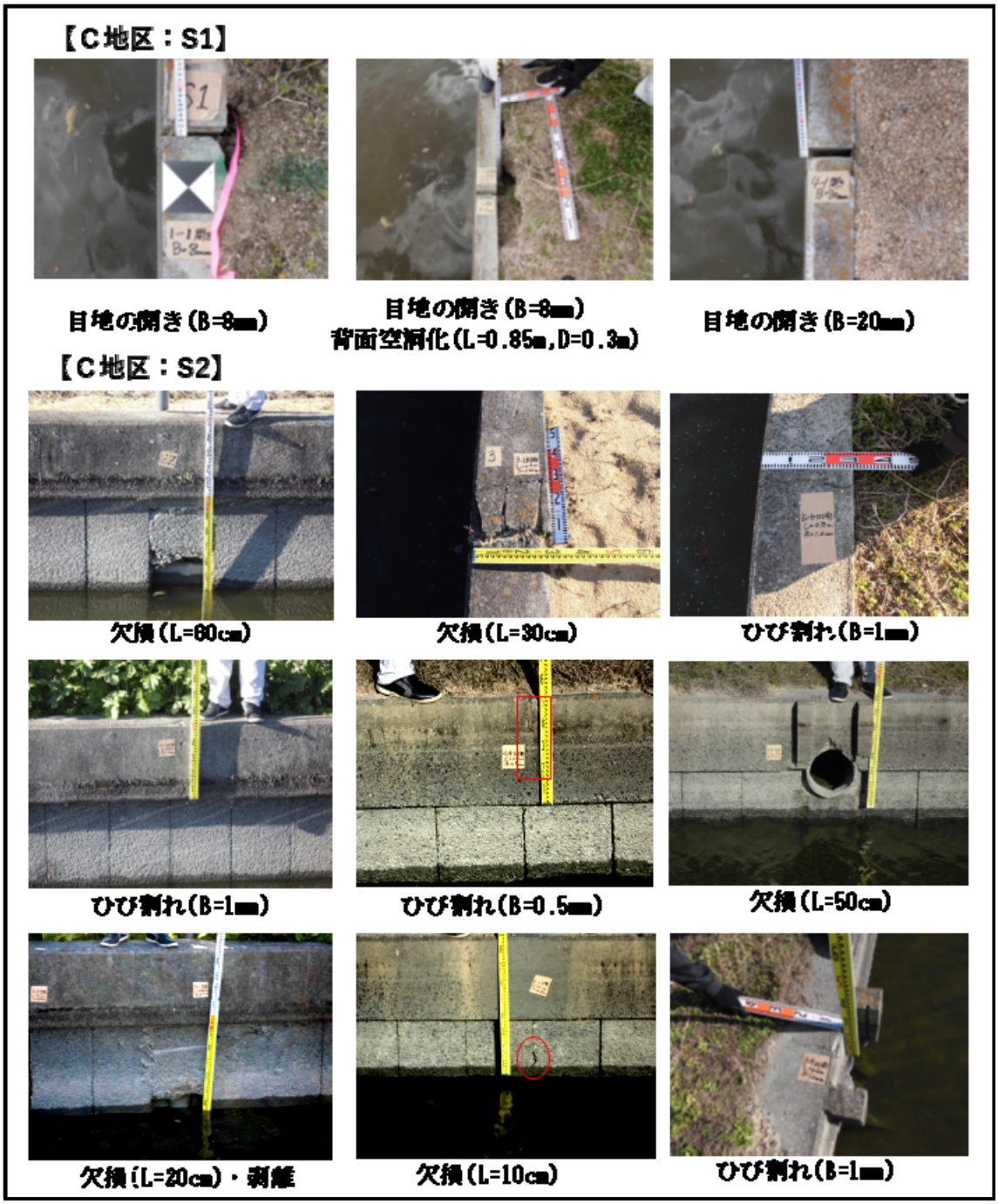


写真 4.1　　開水路における代表的な変状写真

4.1 UAV 計測における調査計画

4.1.1 調査概要

事例調査は、表 4.1 に示すC～F の 4 地区で実施したが、対象とした開水路は、写真 4.2 に示すとおりである。

調査では、表 4.1 に示した調査諸元で、単写真による変状目視、3 次元計測による変状の定量化について検討し、UAV 機種、カメラのレンズ（焦点距離)、撮影高度などによる計測成果を比較した。

表 4.1　　開水路調査概要

調査地区		調査年月	RTK-GNSS	使用UAV			調査延長（m）	水路幅（m）	構造形式
				計測型		簡易型			
				50mm	135mm	3.6mm			
C 地区	S1	2017.12		○		○	120	4.5	鉄筋コンクリート二次製品
	S2			○		○	120	5.7～6.1	矢板型
D 地区		2017.11,12		○	○		230	1.2	フリューム鉄筋コンクリート
E 地区		2018.8	○	○	○		100	1.4	フリューム鉄筋コンクリート
F 地区		2019.4	○	○			220	2.2	鉄筋コンクリート二次製品

注）使用UAVの最下段はレンズの焦点距離を示している。

4.1.2 調査方法

(1) 留意点

開水路は、農業用水及び農用地などからの排水を流送する施設であるため、掘削した地表面下に設置されている。さらに、対象とした開水路は、埋設施設であると同時に、水路幅、深度が比較的小型であるため、以下のような事項に留意する必要がある。

① 画像、3 次元データの撮影では、対象とする変状が取得できる撮影方法、撮影高度、地上解像度などより、使用 UAV、レンズを決定する。

② SfM（Structure from Motion）は、水面、樹木など風の影響を受ける地物が撮影されると、3 次元モデリング精度が低下する。このため、撮影時期の設定には、水が抜かれる時期（非灌漑期など)、下草の草刈り、水路の草刈り・泥上げなどが実施された直後が望ましい。

③ 開水路の壁面の撮影では、「農業水利施設の機能保全の手引き（食料・農業・農村政策審議会農業農村整備部会技術小委員会、平成 27 年 5 月)」(以下、「機能保全の手引き」とする。）に記載されるように、施設の健全度評価の観点から、

ひび割れ幅 0.2mm 以上の変状を観察する必要がある。したがって、撮影では、低空飛行による望遠撮影を実施することになるため、撮影画像の重複が一定になるように、正確な飛行位置を制御する RTK-GNSS 装置、カメラの画角を安定に制御する三軸ジンバルなどの活用が望ましい。

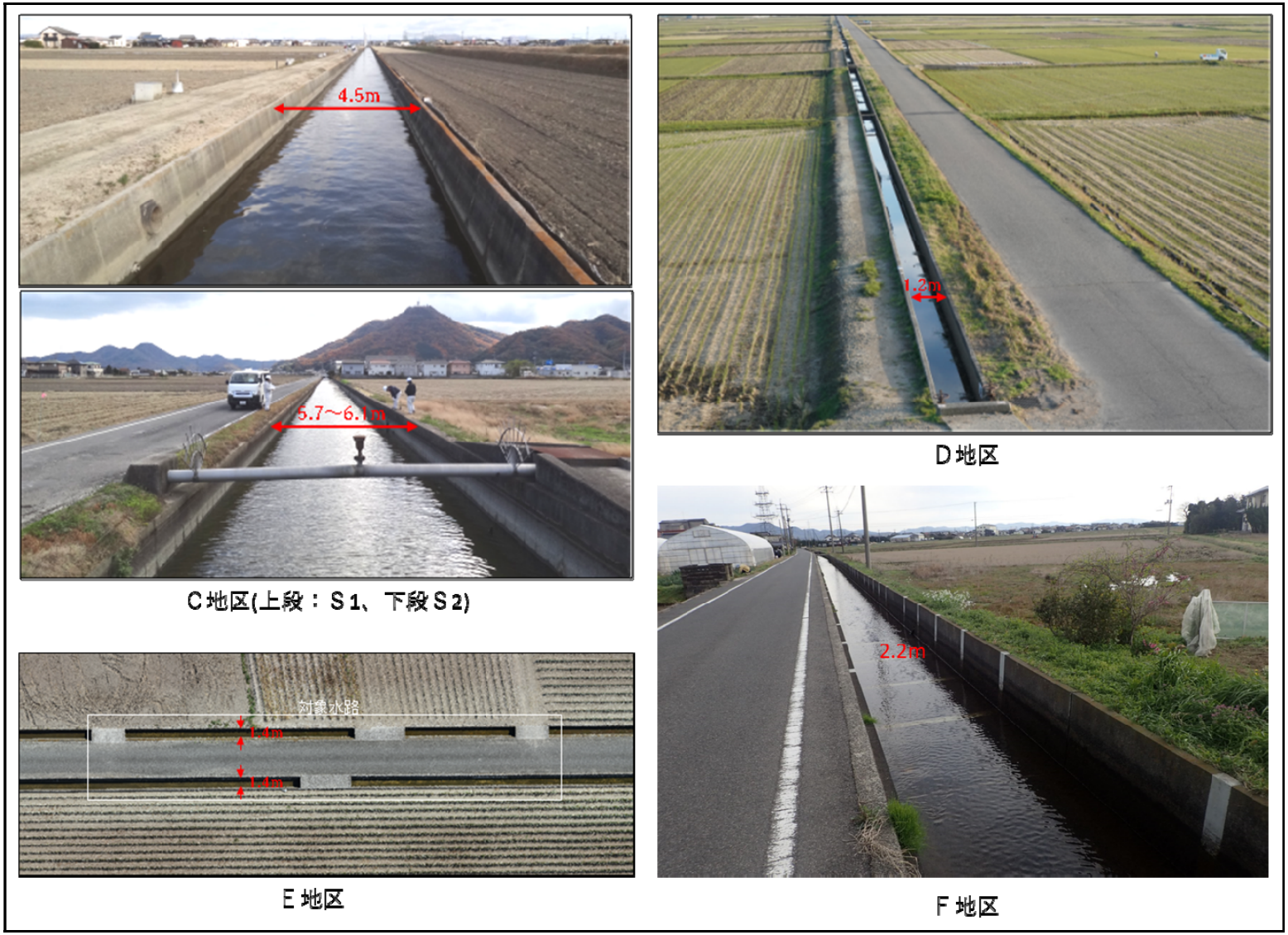


写真 4.2　　開水路の調査地区概観

(2) 撮影方法

開水路では、図 4.1 に示すように、3 次元点群データの取得を目的とし、計測用 UAV と簡易型 UAV を用いて、施設上空から水路に平行方向で垂直撮影及び斜め撮影を実施した。また、垂直撮影では、いずれの UAV でもオーバーラップ（OL）率 80%以上、サイドラップ（SL）率 60%以上とし、斜め撮影では、未撮影区域を発生させないラップ率で実施した（参考例①参照）。

検討では、画像による変状目視、3 次元計測による変状の定量化を目的に実施したが、C地区では、UAV 機種の比較検討、E・F 地区では、RTK-GNSS を用いた壁面オルソ画像の作成検討を別途実施した。

また、開水路壁面の撮影では、図 4.1 に示した近接・低空飛行のとおり、水路に平行な斜め撮影を連続に実施させ、撮影画像の目視内容、壁面オルソの精度などを検討した（参考例②参照）。

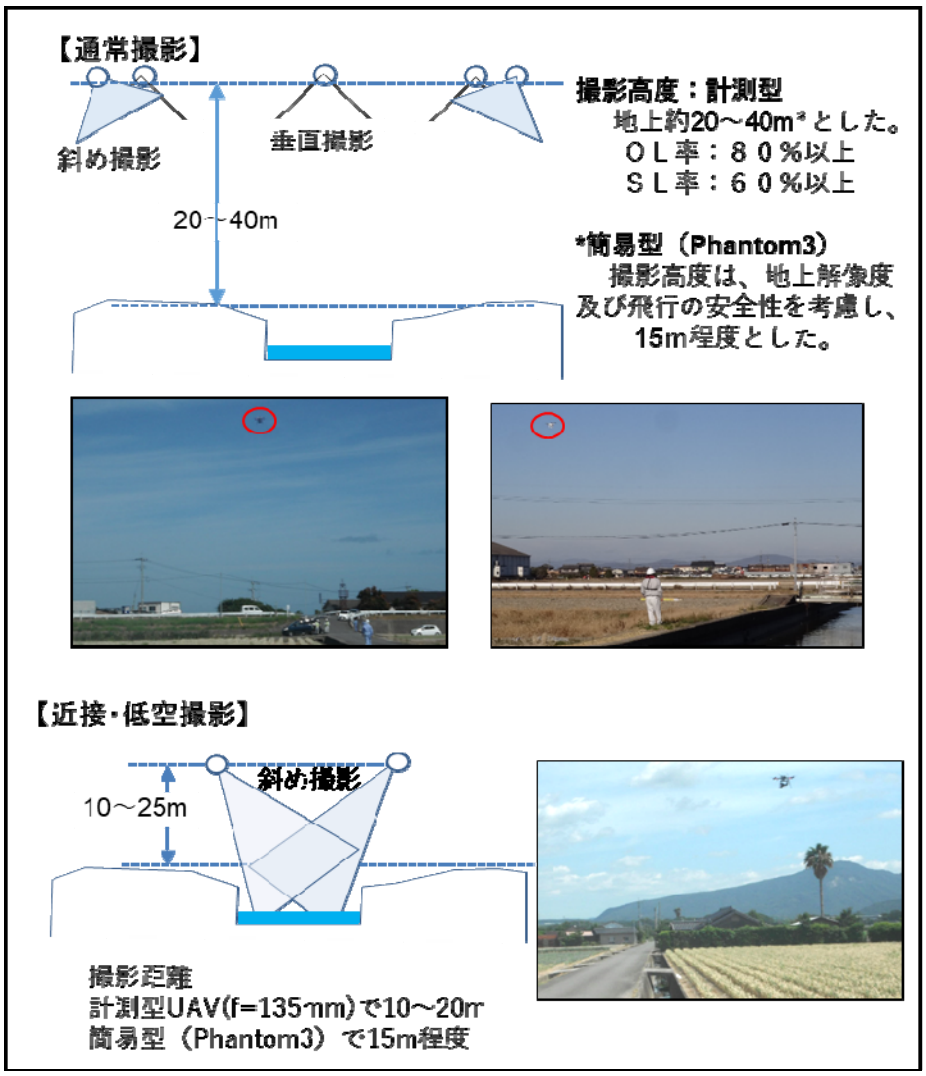
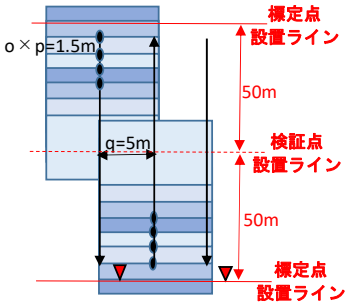


図 4.1　　開水路での UAV 計測方法

〈開水路の撮影方法参考例〉

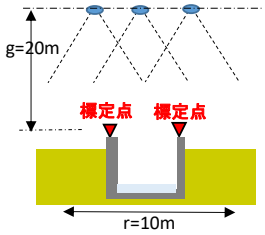
①　垂直撮影（撮影高度２０ｍの場合）

	諸元項目		諸元値	備考
a	レンズ焦点距離(mm)		50	レンズ仕様
b	カメラセンサーサイズ(mm)	進行方向	24	カメラ仕様
c		横方向	36	カメラ仕様
d	カメラ画素数(画素)	進行方向	4,000	カメラ仕様
e		横方向	6,000	カメラ仕様
f	ピクセルサイズ(μ)		6	b/d(=c/e)
g	撮影高度（m）		20	設定
h	地上解像度（mm）		2.4	(g×f)/a
i	１画角撮影範囲（m）	進行方向	9.6	h× d
j		横方向	14.4	h×e
k	オーバーラップ率（%）	進行方向	80	８０％＜設定
l	サイドラップ率（%）	横方向	60	６０％＜設定
m	最大画角間隔（m）	進行方向	1.9	(1-k×0.01)×i
n		横方向	5.7	(1-l×0.01)×j
o	UAV速度（m/s）		1.5	m＞で設定
p	撮影インターバル（s）		1	m＞(o×p)で設定
q	コース間隔（m）		5	n ＞で設定
r	対象範囲幅（m）		10	設定
s	コース数（コース）		3	r/q+1



標定点は１ライン/100m以内

検証点は(1/2×標定点間距離)



標定点、検証点は２点/１ライン以上

標定点、検証点は水路天端上に設置

② 斜め撮影（撮影距離２０ｍの場合）

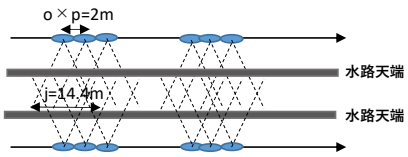
	諸元項目		諸元値	備考
a	レンズ焦点距離(mm)		50	レンズ仕様
b	カメラセンサーサイズ(mm)	横方向	24	カメラ仕様
c		進行方向	36	カメラ仕様
d	カメラ画素数(画素)	横方向	4,000	カメラ仕様
e		進行方向	6,000	カメラ仕様
f	ピクセルサイズ(μ)		6	b/d(=c/e)
g	撮影距離（m）		20	設定
h	地上解像度（mm）		2.4	(g×f)/a
i	１画角撮影範囲（m）	横方向	9.6	h× d
j		進行方向	14.4	h×e
k	オーバーラップ率（%）	横方向	60	設定
l	サイドラップ率（%）	進行方向	80	設定
m	最大画角間隔（m）	横方向	3.8	(1-k×0.01)×i
n		進行方向	2.8	(1-l×0.01)×j
o	UAV速度（m/s）		2	n ＞で設定
p	撮影インターバル（s）		1	n ＞(o×p)で設定
q	コース数		2	水路両側

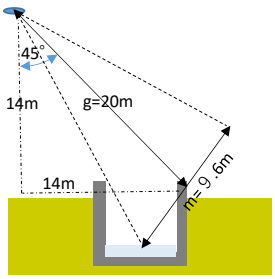
g：撮影中心箇所とカメラ（UAV）の距離（撮影高度と撮影箇所の離れから計算）

k、l：3次元処理を行わない場合は未撮影区域が生じない程度で設定（余裕１０％程度）

q：水路壁面の高さ方向が１画角で撮影できない場合は、適宜、複数コースを設定

カメラを水路壁面に正対し、
UAVは水路法線と平行に飛行（移動）





カメラアングル45度の場合
適宜、自律飛行中に微調整

(3) 撮影写真の諸元

開水路での UAV 計測で撮影した空中写真の諸元は、表 4.2 に示すとおりであるが、3 次元解析では、3 次元モデリングの位置精度（RMS 誤差）を確認した上で実施した。

表 4.2　開水路の 3 次元解析に使用した撮影写真の諸元

調査地区		調査年月	撮影方法	RTK-GNSS	使用UAV		平均撮影高度（m）	平均地上解像度（mm）	RMS誤差	
					計測型 50mm	簡易型 3.6mm			水平（mm）	鉛直（mm）
C 地区	S1	2017.12	鉛直・斜め		○		38	4.6	0.4	0.1
						○	14	6.0	1.2	1.1
	S2				○		39	4.7	0.4	0.1
						○	14	6.1	0.7	0.5
D 地区		2017.11,12	鉛直・斜め		○		43	5.1	0.7	0.2
E 地区		2018.8	鉛直・斜め	○	○		30	2.7	0.2	0.4
							24	2.2	0.3	0.2
F 地区*		2019.4	鉛直・斜め	○	○		30	2.8	0.3	0.6
							20	1.7	0.1	0.2

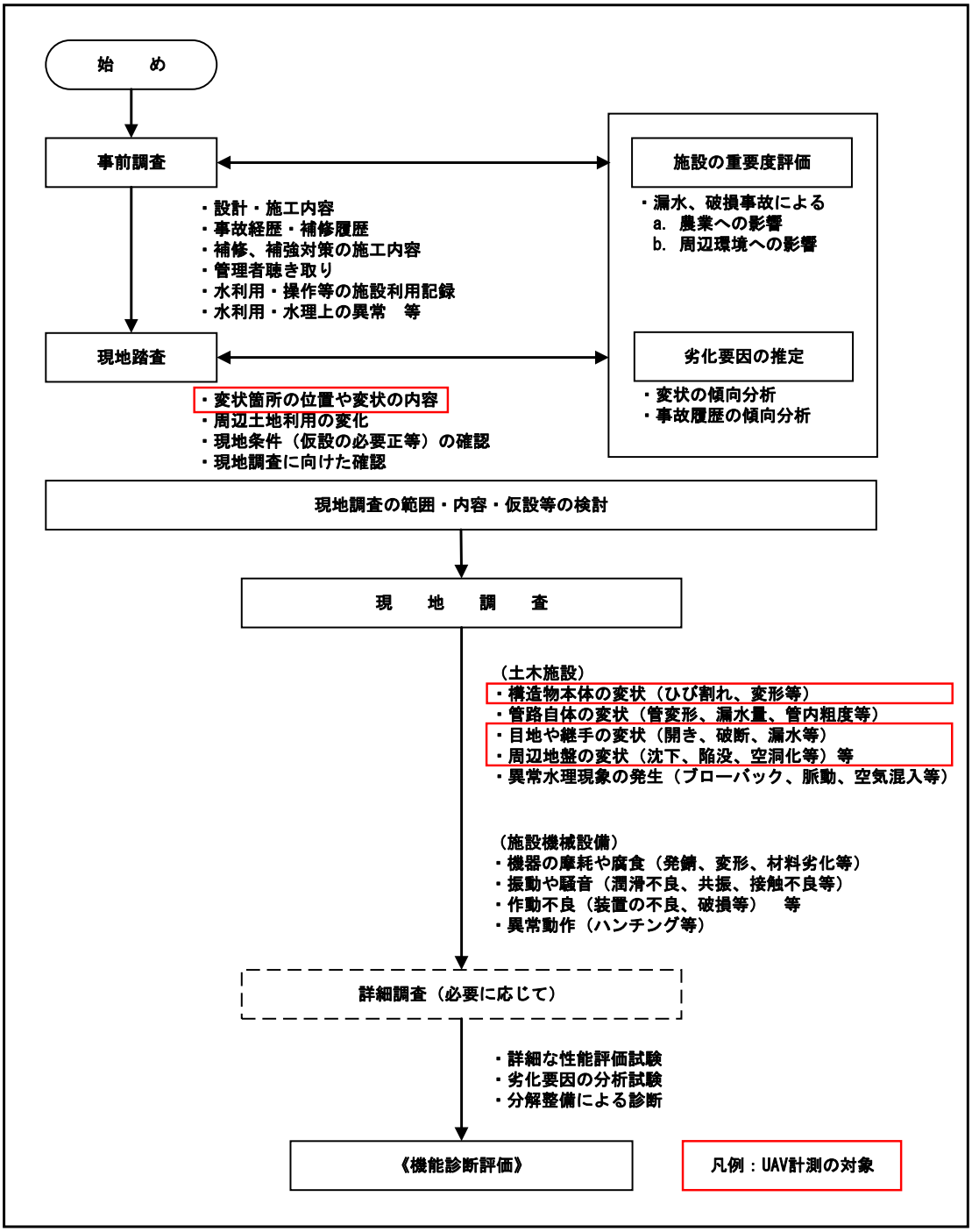
注）1. 使用UAVの最下段はレンズの焦点距離を示している。
2. *F 地区のRMS誤差は、RTK-GNSS測位時での数値を示す。

4.2 UAV 計測の活用について

4.2.1 機能診断調査概要

開水路の機能保全調査は、「機能保全の手引き」より、図 4.2 に示すとおり、事前調査、現地踏査、現地調査の 3 段階で実施すると示されている。

このうち、本技術開発における UAV 計測の活用は、現地踏査段階での変状の位置や変状の内容の把握、現地調査段階での土木施設の変状把握を目的としている。したがって、管路自体の変状及び異常水理現象の把握は対象外としている。



資料：農業水利施設の機能保全の手引き （食料・農業・農村政策審議会農業農村整備部会技術小委員会、平成 27 年 5 月）より編集

図 4.2　　機能診断調査の実施フロー（開水路）

4.2.2 施設点検への適用性

開水路の変状を把握する調査項目は、表 4.3 に示すとおりであり、UAV 計測では、目視・計測を対象とした調査手法について活用を検討した。

すなわち、本手引きでは、UAV 計測による撮影写真、画像解析（3 次元計測）を活用し、その適用性について確認した。

機能診断調査により判明した施設状態は、表 4.4 に示すとおり 5 段階で評価されており、評価の段階によって対応する対策の目安が示されている。

評価の基準となる個別の変状程度は、表 4.5 に示すとおりであり、定量化された評価指標は、「ひび割れ」の幅・密度（進行性：ASR や凍害)、「地盤変形」の抜け上がりの２項目である。具体的には、「ひび割れ」が進行性のひび割れを除くと、変状ランク S-5 に示されるひび割れ幅 0.2mm 未満、S-3 におけるひび割れ幅 1mm 以上となっている。

また、「地盤変形」の抜け上がりでは、20cm、50cm と cm 単位の判断基準が示されている。

本手引きでは、「ひび割れの長さ・幅、地盤変形の抜け上がり」以外に、「変形・歪み、欠損・損傷、不同沈下、目地変状」などについて、その計測精度、抽出程度について検討した。

表 4.4　　鉄筋コンクリート構造物の健全度指標（開水路）

評価ランク	施　設　の　状　態	対応する対策の目安
Ｓ－5	変状がほとんど認められない状態	対策不要
Ｓ－4	軽微な変状が認められる状態	要観察
Ｓ－3	変状が顕著に認められる状態 劣化の進行を遅らせる補修工事などが適用可能な状態	補修・補強
Ｓ－2	施設の構造的安定性に影響を及ぼす変状が認められる状態	補修・補強
Ｓ－1	施設の構造的安定性に重大な影響を及ぼす変状が複数認められる状態 近い将来に施設機能が失われる、または著しく低下するリスクが高い状態 補強では経済的な対応が困難で、施設の更新が必要な状態	更新

資料：農業水利施設の機能保全の手引き　（食料・農業・農村政策審議会農業農村整備部会技術小委員会、平成 27 年 5 月）より編集

表 4.3　　鉄筋コンクリート構造物に関する標準的な調査事項（開水路）

凡例：赤枠：UAV計測の対象外、青枠：UAV計測の一部対象

区　分	調　査　項　目	調　査　手　法	記　録　手　法
ひび割れ	ひび割れ最大幅	定量計測（クラックスケール）	定量記録、写真記録 図化
	ひび割れ延長	定量計測（スケール）	〃
	ひび割れタイプ	タイプ判別	〃
材料劣化	浮　き	目視による有無 打音調査	写真記録、図化
	剥離・剥落・スケーリング	目視による有無 簡易計測（デブスゲージ）	定量記録、写真記録 図化
	ポップアウト	目視による有無	写真記録、図化
	（析出物）エフロレッセンス	〃	〃
	（析出物）ゲルの滲出	〃	〃
	錆　汁	〃	〃
	変　色	〃	〃
	摩耗・風化	目視による有無 簡易計測（デブスゲージ）	定量記録、写真記録、図化
	漏水（痕跡）	目視による有無	写真記録、図化
	鉄筋露出	〃	〃
変形・歪み		目視による有無、簡易計測（下げ振り、ポール、傾斜計）	定量記録、写真記録、図化
圧縮強度		簡易計測（リバウンドハンマ法、機械インピーダンス法等）	定量記録、写真記録
中性化	中性化深さ/中性化残り	ドリル法	〃
	鉄筋被り	設計図書の確認	定量記録、写真記録
		定量計測（鉄筋探査）	図化
目地の劣化	目地の開き	目視による有無 簡易計測（スケール）	〃
	段差	〃	〃
	止水板の破断	目視による有無	写真記録、図化
	漏水痕跡	〃	〃
	鉄筋コンクリートの欠損等	目視による有無 簡易計測（スケール等）	定量記録、写真記録、図化
地盤変形	背面土の空洞化	目視による有無 打音調査	写真記録、図化
	不同沈下	目視による有無 簡易計測（スケール等）	定量記録、写真記録、図化

注）1. 有無を目視で調査する項目で、変状が「有」の場合は、定量的な調査を行う。
　　2. ひび割れの記録を行う場合、クラックスケールを当てて近接撮影を行う。

資料：農業水利施設の機能保全の手引き（食料・農業・農村政策審議会農業農村整備部会技術小委員会、平成 27 年 5 月）より編集

表 4.5　　鉄筋コンクリート開水路の施設状態評価表

評価項目（変状種別）					評価区分 S-5	S-4	S-3	S-2
内部要因	構造物自体の変状	ひび割れ	形状と幅（有筋）	目地間中央や部材解放部の垂直ひび割れ	最大ひび割れ幅 0.2mm未満	最大ひび割れ幅 [0.2mm以上～0.6mm未満] 0.2mm以上～1.0mm未満	最大ひび割れ幅 [0.6mm以上] 1.0mm以上	S-3に該当するものが全体的
				特徴的な形状を示さないひび割れ				
				格子状・亀甲状などのひび割れ				
				側壁を横切るような水平又は斜めのひび割れ				
				鉄筋に沿ったひび割れ	無		有	S-3に該当するものが全体的
			進行性（ASRや凍害などの場合）		有りの場合：ランクダウン			
			ひび割れ規模				①ひび割れ密度（幅0.2mm以上）50cm/m²以上 ②有 ③滲出し、漏水跡、滴水	S-3に該当するものが全体的又は流水、噴水
			ひび割れ付随物		無			
			ひび割れからの漏水					
			ひび割れ段差					有
		ひび割れ以外の劣化	浮き		無	部分的	全体的	
			剥離・剥落		無	部分的	全体的	
			析出物（エフロエッセンス・ゲルなど）		部分的(S-4以外)	全体的又は鉄筋に沿った部分的		
			錆汁		無	有		
			摩耗・すりへり(全体的の場合1ランクダウン)		細骨材露出	粗骨材露出	粗骨材剥落	
			鉄筋露出の程度		無		部分的	全体的
		UAV計測の対象外						
		圧縮強度	反発強度法（鉄筋）		21N/mm²以上	15N/mm²以上～21N/mm²未満	15N/mm²未満	
			反発強度法（無筋）					
		中性化	ドリル法		残り10mm以上		残り10mm未満	
外部要因		変形・歪み	変形・歪みの有無		無		局所的	全体的
		欠損・損傷	欠損・損傷の有無		無		局所的	全体的
		不同沈下	構造物の沈下、蛇行		無		局所的	全体的
	構造物周辺の変状	UAV計測の一部対象	背面土の空洞化		無	局所的	全体的	
		地盤変形	周辺地盤の陥没・ひび割れ		無	局所的	全体的	
			抜け上がり		無	20cm未満	20cm以上～50cm未満	50cm以上
その他要因	目地の変状		目地の開き		無	局所的	全体的	
			段差		無	局所的	全体的	
			止水板の破断		無		有	
			漏水の状況		無	漏水跡、滲出し、滴水	流水、噴水	
			周縁コンクリートの欠損等		無	局所的	全体的	

注）　1. 部分的と全体的の判断：部分的とは表面の50%未満、全体的とは表面の50%以上である。

2. 局所的と全体的の判断：局所的とは施設の一部のみで発生、全体的とは変状が構造物全体にある。

出典：農業水利施設の機能保全の手引き（食料・農業・農村政策審議会農業農村整備部会技術小委員会、平成27年5月）より編集

4.2.3 施設点検への活用手順

本手引きでは、UAV 計測を用いた空中写真撮影、SfM 解析を実施し、写真画像を用いたひび割れや亀裂の判読に加えて対象構造物の 3 次元データを取得し、これに基づく構造物の変状抽出を行って施設維持管理への適用可能性（表 4.6）について検討し、その手法の精度，効率性等について取りまとめた。

すなわち、開水路では、UAV 計測と SfM 解析を組み合わせ、撮影写真、オルソ画像、3 次元点群データを生成し、図 4.3 に示すような活用方法を検討した。

検討にあたっては、構築された 3 次元点群データの精度を基準点・標定点の測量結果より検証し、RMS 誤差が約 1cm 前後以下の高精度地形モデルであることを確認した。

次に、検討では、得られた単写真，オルソ画像および 3 次元地形モデルより、抽出可能な標高・横断図等を用いて、構造物の変状（ひび割れ、表面劣化、変形・歪み、欠損・損傷、不同沈下、抜け上がり、目地変化など）を抽出・計測を行い、その適用性、その手法の精度、効率性について取りまとめた。

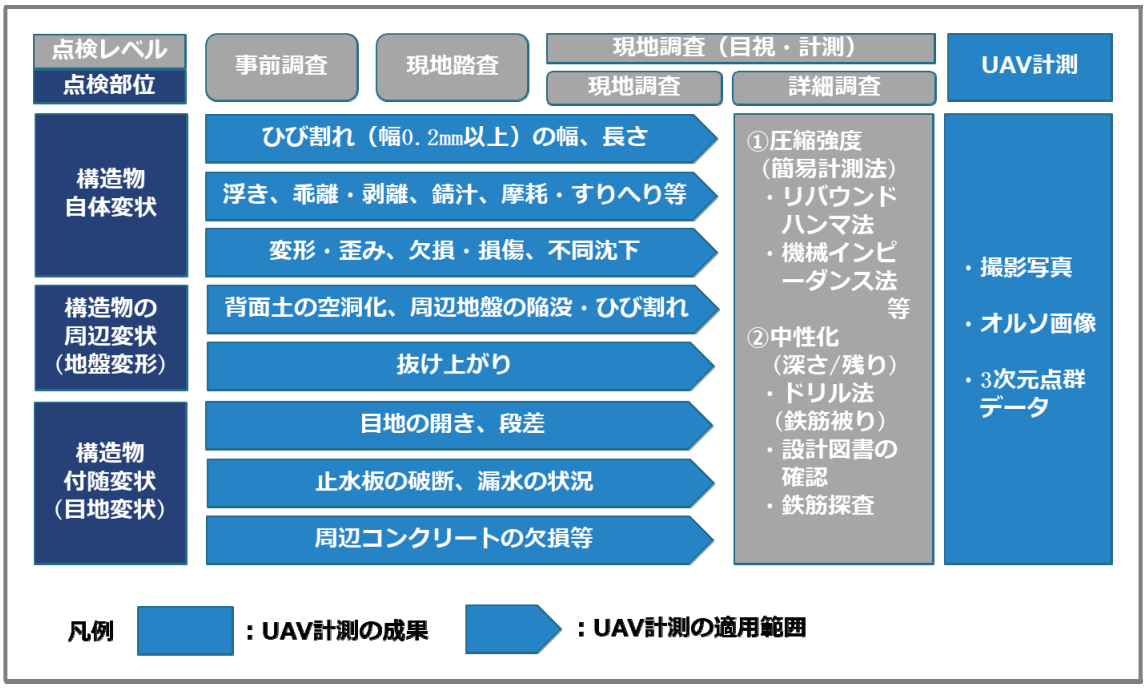


図 4.3　　開水路での UAV 計測の活用手順

また、機能診断調査では、ひび割れの観察・記録・図化に多くの労力がかかるが、ひび割れは、開水路の壁面・底面に発生する。特に、開水路は、直線的に長い埋設施設であると同時に、水路幅、深度が比較的小型な構造物であるため、施設壁面を一様に撮影

することが難しい。このため、本項では、UAV を直線的に飛行させる手法（RTK-GNSS）による高精度オルソ画像生成、さらには、ひび割れを自動抽出させた結果について、その精度、適用性についても記載した。

表 4.6　UAV 計測の活用により確認できる変状項目

凡例　●：現地確認済、○：活用可能（確認事例より判定）、×：活用不可

評価項目（変状種別）					単写真（画像）	3次元計測
内部要因	構造物自体の変状	ひび割れ	形状と幅（有筋）	目地間中央や部材解放部の垂直ひび割れ	●	●
				特徴的な形状を示さないひび割れ	●	●
				格子状・亀甲状などのひび割れ	○	○
				側壁を横切るような水平又は斜めのひび割れ	●	●
				鉄筋に沿ったひび割れ	○	○
				対象可能なひび割れ幅	0.2mm≧	0.5mm≧
			ひび割れ規模		●	●
			ひび割れ付随物		●	●
			ひび割れからの漏水		○	○
			ひび割れ段差		○	●
		ひび割れ以外の劣化	浮き		○	○
			剥離・剥落		●	●
			析出物（エフロエッセンス・ゲルなど）		●	●
			錆汁		○	○
			摩耗・すりへり(全体的の場合1ランクダウン)		●	●
			鉄筋露出の程度		○	○
		圧縮強度	反発強度法（鉄筋）		×	×
			反発強度法（無筋）		×	×
		中性化	ドリル法		×	×
外部要因		変形・歪み	変形・歪みの有無		×	●
		欠損・損傷	欠損・損傷の有無		●	●
		不同沈下	構造物の沈下、蛇行		×	●
	構造物周辺の変状	地盤変形	背面土の空洞化（内部空洞除く）		●	●
			周辺地盤の陥没・ひび割れ		●	●
			抜け上がり		×	●
その他要因	目地の変状		目地の開き		●	●
			段差		●	●
			止水板の破断		○	○
			漏水の状況		○	○
			周縁コンクリートの欠損等		●	●

注）　3次元計測とは、オルソ画像、3次元点群データを用いた定量計測を示す。

4.3 UAV 計測による変状解析

4.3.1 撮影画像（単写真）

(1) ひび割れ

1) 計測型 UAV

開水路の機能診断調査では、表 4.7 に示すように、最小のひび割れ幅である 0.2mm を抽出する必要がある。ひび割れ幅の抽出には、撮影カメラとレンズ焦点距離、撮影距離の組合せによる地上解像度で決定される。

事例としては、写真 4.3～4.4 に示すように、ひび割れ幅 0.2mm は 135mm の望遠レンズ、撮影距離 10m でしっかりと抽出可能となっている。

表 4.7　　鉄筋コンクリート構造物の健全度指標（開水路）

評価ランク	施設の状態	ひび割れ規模
S－5	変状がほとんど認められない状態	最大ひび割れ幅 0.2mm 未満
S－4	軽微な変状が認められる状態	最大ひび割れ幅 [0.2mm 以上～0.6mm 未満] 0.2mm～1.0mm 未満
S－3	変状が顕著に認められる状態 劣化の進行を遅らせる補修工事などが適用可能な状態	最大ひび割れ幅 [0.6mm 以上] 1.0mm 以上
S－2	施設の構造的安定性に影響を及ぼす変状が認められる状態	S-3 に該当するものが全体的
S－1	施設の構造的安定性に重大な影響を及ぼす変状が複数認められる状態 近い将来に施設機能が失われる、または著しく低下するリスクが高い状態 補強では経済的な対応が困難で、施設の更新が必要な状態	S-2 の状態がさらに進行した状態 （欠損、損壊等）

注）[ ] 内は、厳しい腐食状況の場合に適用する。
資料：農業水利施設の機能保全の手引き （食料・農業・農村政策審議会農業農村整備部会技術小委員会、平成 27 年 5 月）より編集

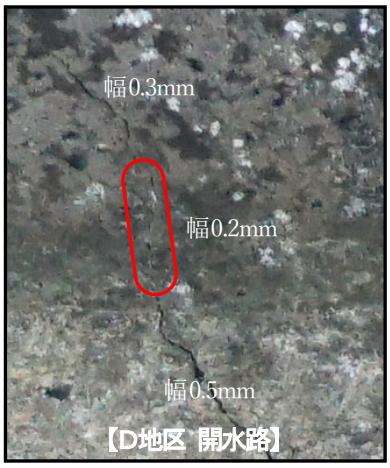


写真 4.3　　計測用 UAV（f=135mm、撮影距離 10m）の撮影画像

撮影カメラとレンズ焦点距離、撮影距離の組合せによる画像比較は、写真 4.4 に示したように、中央に通常計測の写真（f=50mm、撮影距離 40m）を置き、比較のために、汎用カメラを用いた現地での陸上撮影写真を左側に、精細度の高い画像（f=135mm、撮影距離 10m）の写真を右側に並べた。

この事例では、幅 0.5mm 前後以上のひび割れが抽出可能であると判断されるが、児島湾干拓地の事例（写真 4.4 b）のように、壁体の骨材が露出し粗粒状態となっている場合には、抽出が難しくなっている。

このような場合には、写真 4.5 に示すように撮影距離、レンズ焦点距離の組合せなどにより、地上解像度を高めることで抽出可能となる。すなわち、通常（f=50mm）の場合、撮影距離 30m では、摩耗した表面のひび割れを抽出することはできないが、撮影距離 20m では明確に抽出可能である。さらには、望遠（f=135mm）の場合、0.3mm のひび割れが抽出可能となり、計測では、目標とするひび割れ幅が撮影可能な地上解像度より、UAV 機種、撮影高度、焦点距離など撮影方法を決定することが必要である。

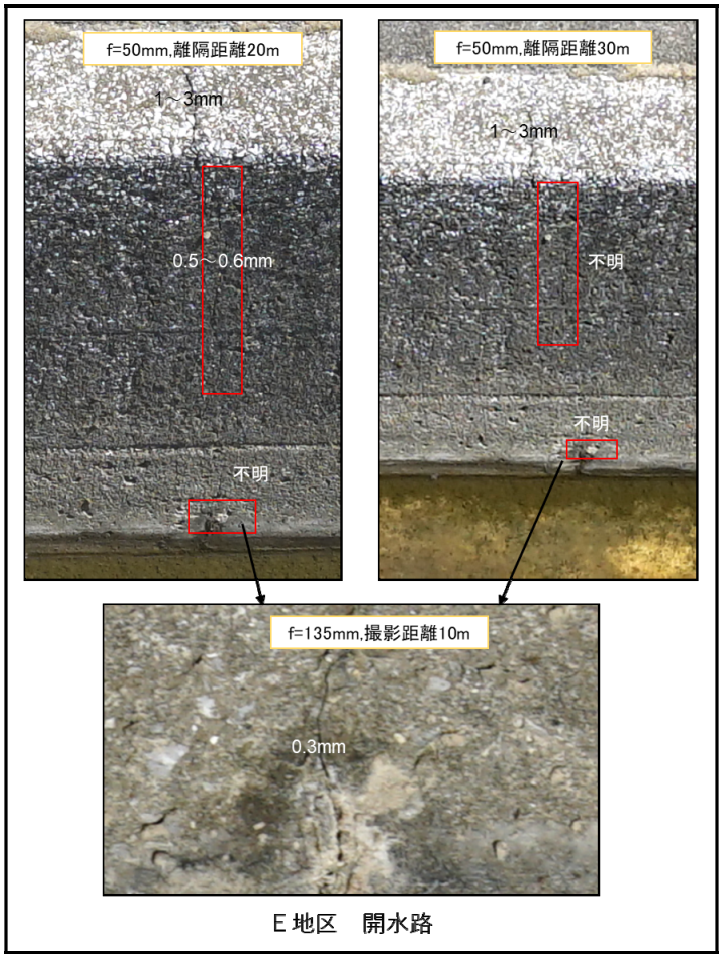


写真 4.5　　摩耗コンクリート壁面でのひび割れ画像事例（開水路）

写真 4.4　　ひび割れ画像の撮影距離・焦点距離別比較（開水路）

2）UAV 機種による比較

簡易型 UAV(f=3.6mm)と計測用 UAV(f=50mm)を比較した画像は、写真 4.6 に示すとおりであり、両機とも幅 1mm 程度のひび割れの抽出は可能である。

すなわち、簡易型 UAV は、幅 1mm 程度のひび割れを抽出可能であるが、被写体との距離を約 10m まで近接する必要がある。したがって、計測用 UAV と比較すると、施設全体のひび割れを撮影する場合には、撮影枚数の増加に伴う作業効率、低空飛行に伴う安全対策などに留意する必要がある。

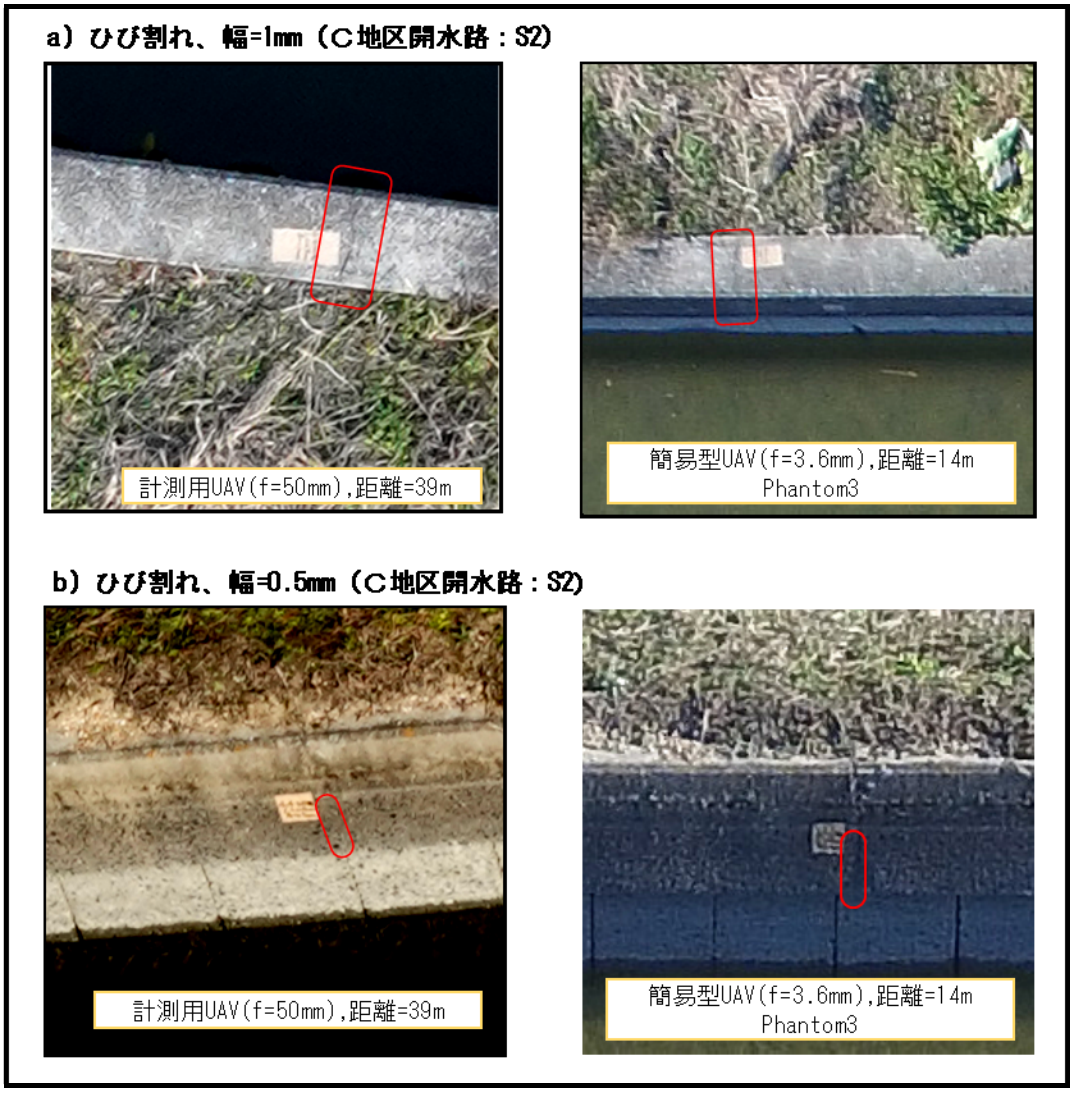


写真 4.6　　UAV 機種によるひび割れ画像の比較（開水路）

(2) 剥離・損傷、目地開き等

開水路の機能診断調査では、表 4.8 に示すとおりであり、剥離・損傷・目地開き等に関する評価基準には、個々の損傷等の定量的な基準はなく、変状程度が局所的、部分的または全体的というような定性評価を実施している。

表 4.8　剥離・剥落、欠損・損傷、目地の開き、止水板の評価区分（開水路）

評価ﾗﾝｸ	剥離・剥落	欠損・損傷	目地開き	止水板の破断
S－5	無	無	無	無
S－4	部分的 (表面の 50%未満)	－	局所的 (施設の一部)	－
S－3	全体的 (表面の 50%以上)	局所的 (施設の一部)	全体的 (構造物全体)	有
S－2	－	全体的 (構造物全体)	－	－

資料：農業水利施設の機能保全の手引き　（食料・農業・農村政策審議会農業農村整備部会技術小委員会、平成 27 年 5 月）より編集

撮影カメラとレンズ焦点距離、撮影距離の組合せによる画像比較は、写真 4.7 に示すように、中央に通常計測の写真（f=50mm、撮影距離 40m）を置き、比較のために、汎用カメラを用いた現地での陸上撮影写真を左側に、精細度の高い画像（f=135mm、撮影距離 10m）の写真を右側に並べている。この事例では、３次元データの利活用を主目的とした通常計測で、幅 8mm 前後の目地の開きや幅数 cm の損傷が抽出可能となっている。

また、望遠(f=135mm)の場合には、陸上での近接撮影と同等の鮮明な画像が得られ、損傷の程度や詳細な状態が把握可能となっている。具体的な活用としては、写真 4.8 に示す事例のように、通常計測(f=50mm、距離 43m)で撮影した画像で損傷箇所、概要状況を確認した後、必要に応じて望遠計測(f=135mm、距離 10m)により、詳細な損傷状況を確認するといった方法である。

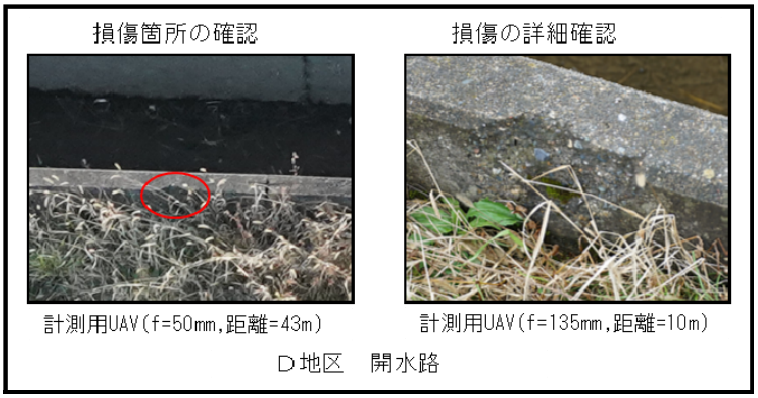


写真 4.8　通常・望遠撮影による損傷状況画像（開水路）

写真 4.7　　損傷/目地の開き画像の比較（開水路）

損傷・目地開き等の定性評価では、変状の有無の判別と変状箇所が局所的（部分的）であるか、全体に及んでいるかの判別区分となっている。このため、定性評価では、日常点検レベルで通常計測(f=50mm)を実施し、現地調査レベルが必要な箇所では望遠計測(f=135mm)を実施するといった活用方法が有効である。

(3) 高解像度カメラ

「農業水利施設の機能保全の手引き（開水路)」では、軽微な変状が認められる状態（S－4 レベル）として幅 0.2mm のひび割れを抽出する必要があり、このためには、焦点距離 f=135mm の望遠レンズを使用した場合でも、対象物に近接した撮影を行う必要がある。

また、焦点距離 f=135mm の望遠レンズでは、写真の画郭に収まる範囲が狭いため、カメラの小さなブレ、コースのズレによっても対象物の撮影が困難となる。

このため、撮影では、カメラ自体のブレを小さくできる三軸ジンバルを利用するとともに、飛行（撮影）コースを安定させるための自律飛行システム（RTK-GNSS 測位）を検証した。

E 地区において検証した事例では、写真 4.9 に示すとおり、水路壁面で大きなブレは無く安定した撮影画像となっていることが確認できた。また、写真 4.9 に示すひび割れ画像①、②からも判るように、画質についても鮮明なものとなっており、ひび割れが明瞭に判読できることを確認した。

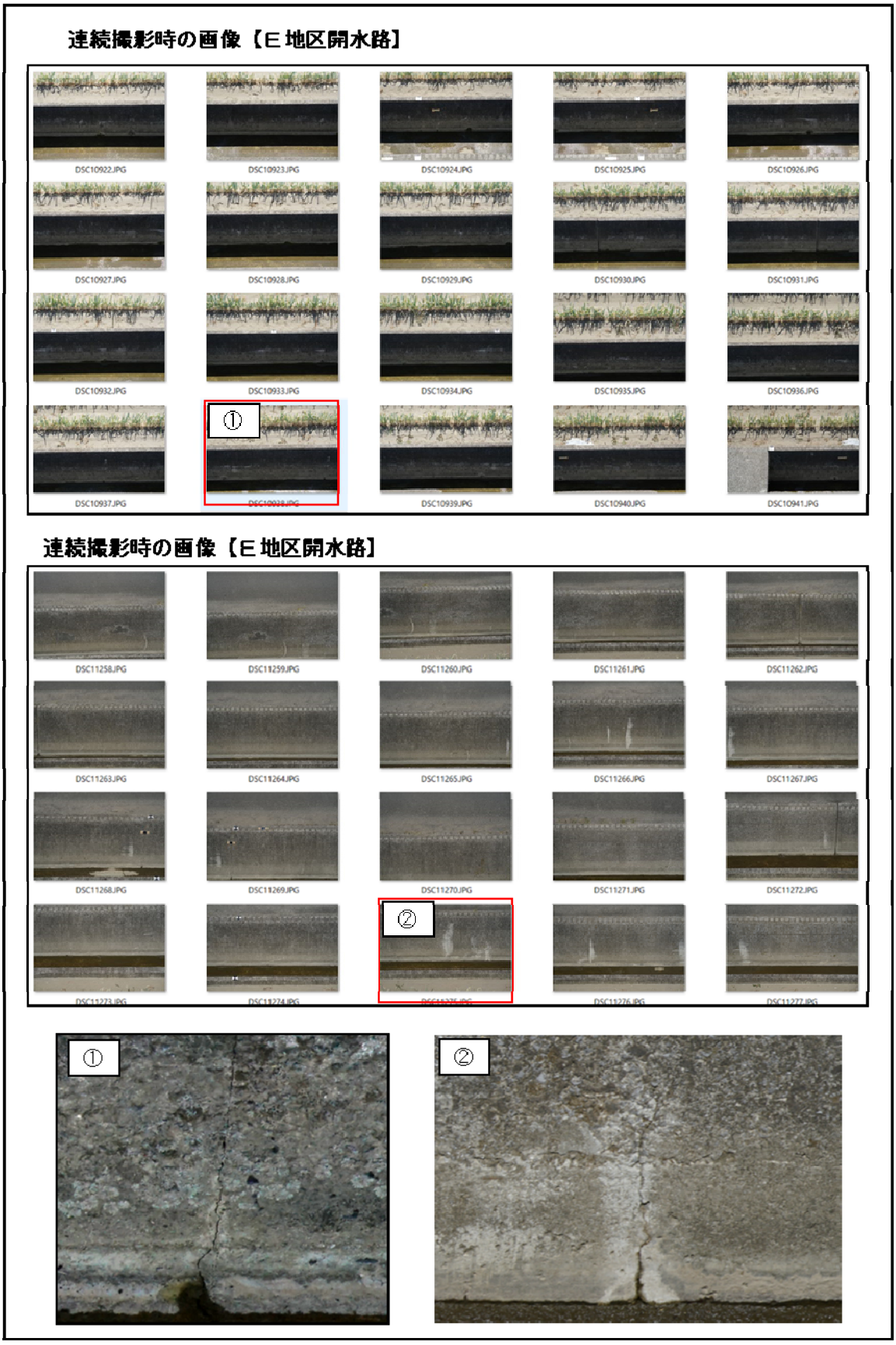


写真 4.9 開水路壁面の斜め撮影事例

4.3.2　3次元点群データ

(1) オルソ画像

オルソ画像は、UAV 計測で撮影した画像ならびに SfM（Structure from Motion）を用いた 3 次元解析より得られる 3 次元点群データ（物体の形状を 3 次元座標(x, y, z)）の位置精度を検証した上で作成されます。

このため、作成されたオルソ画像は、写真上の像の位置ズレをなくし空中写真を地図と同じく、真上から見たような傾きのない、正しい大きさと位置に表示される画像に変換（以下、「正射変換」という）されています。

したがって、その利点としては、画像上で位置、面積及び距離などを正確に計測可能であり、地図データなどと重ね合わせて利用することができる地理空間情報であるところです。また、目視観察として利用するには、位置精度の他に、画面上の変状状況を確認するため、画像解像度が重要となります。

このため、変状の定量評価には、適切な地上解像度に設定した UAV 計測より生成される高精度なオルソ画像の活用が有効であり、計測では、点検用途に併せて、計測型 UAV(f=50mm)及び簡易型 UAV(f=3.6mm)を使い分けることが望ましい。

事例は、C地区での開水路（S1，S2）において、計測型 UAV(f=50mm、高度 38～39m)で撮影した写真および簡易型 UAV（f=3.6mm、高度 13m～14m）で撮影した写真より作成したオルソ画像であり、その解像度比較は、写真 4.10、4.11 に示すとおりである。

両機種の画像解像度（鮮明度）を比較すると、ほぼ同等であり、幅 22mm の目地の損傷では縮尺 1/50、幅 30mm の欠損では、縮尺 1/100 で確認できる。すなわち、数 cm 規模の変状確認では、簡易型 UAV でも可能であるといえる。

ただし、簡易型 UAV で同程度の解像度を確保する場合、飛行時には、撮影高度が計測型 UAV の平均 40m～45m に対し、平均 10m 前後と低空となるため、風、樹木など地表面付近での影響や機器誤差に対応する技術が必要となることに留意する。

次の事例は、ひび割れ幅（2～3mm）を対象に、計測用 UAV(f=50mm)の撮影高度（24m、30m）を変化させたものである。このオルソ画像では、写真 4.12 に示すように、高度 24m から撮影した場合には縮尺 1/50 で、高度 30m から撮影した場合は縮尺 1/25 で、それぞれ幅 2mm～3mm のひび割れ抽出が可能であることが確認できた。

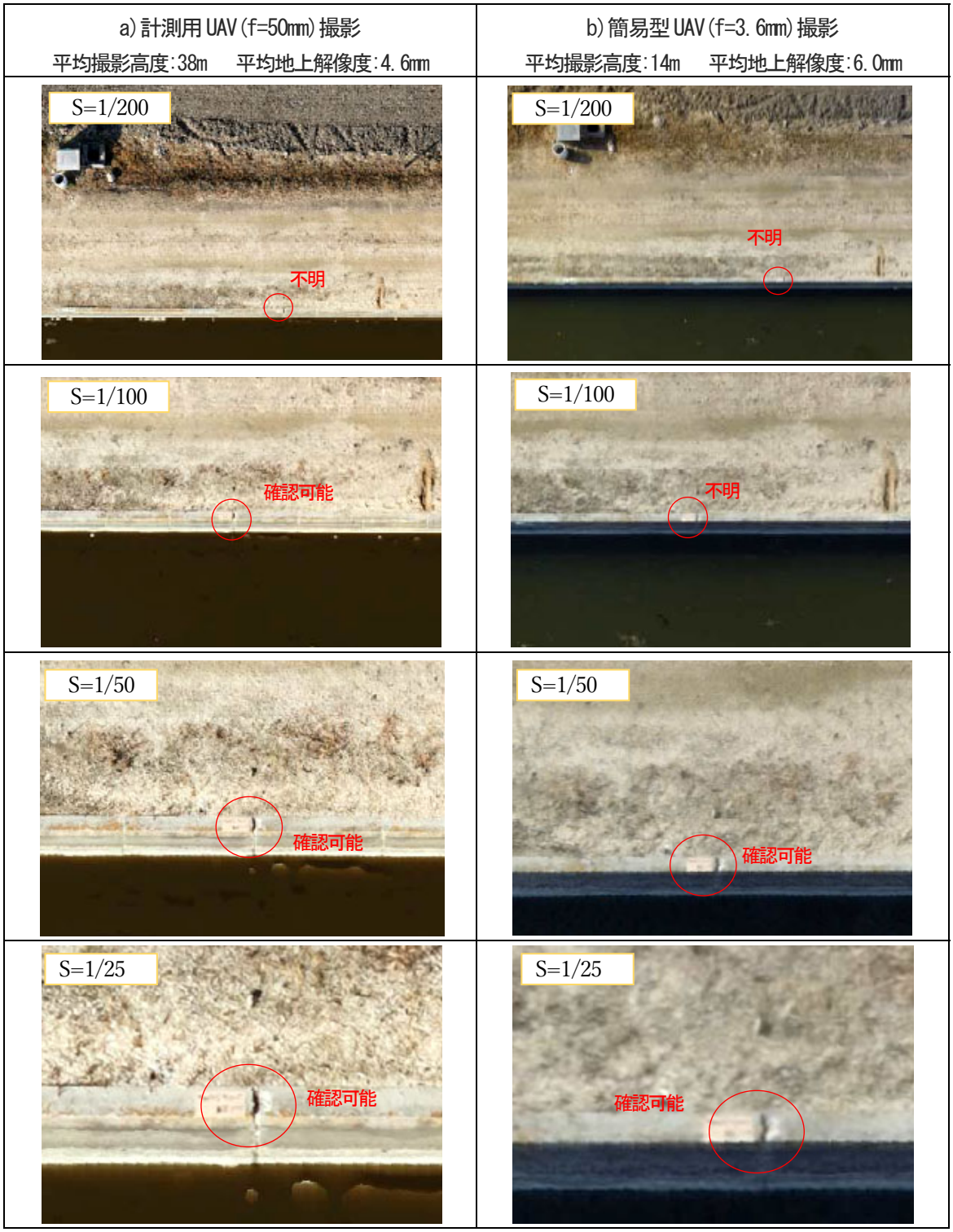


写真 4.10　　オルソ画像の解像度比較（開水路：C地区：S1）

（目地の損傷:B=22mm）

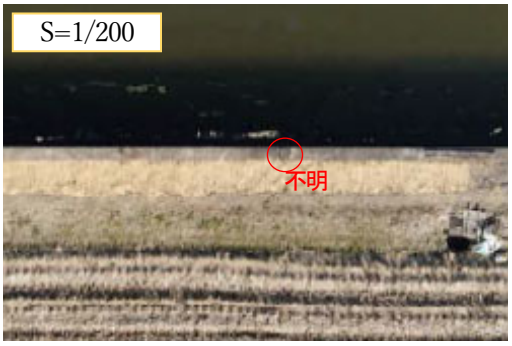
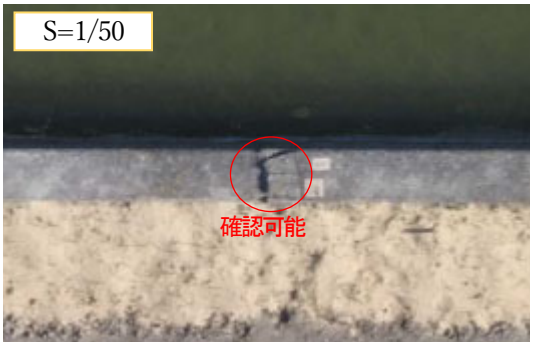
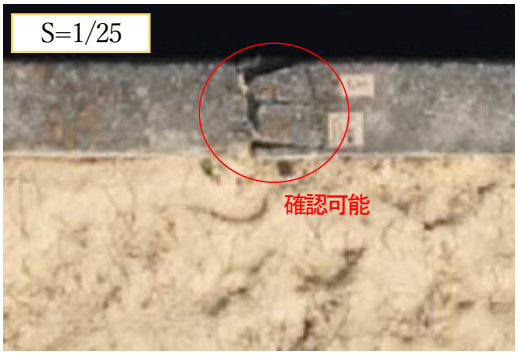
a) 計測用 UAV (f=50mm) 撮影 平均撮影高度:39m　平均地上解像度:4.7mm	b) 簡易型 UAV (f=3.6mm) 撮影 平均撮影高度:14m　平均地上解像度:6.1mm
	
	
	

写真 4.11　　オルソ画像の解像度比較（C地区：S2）

（欠損:B=30mm,S=0.25 ㎡）

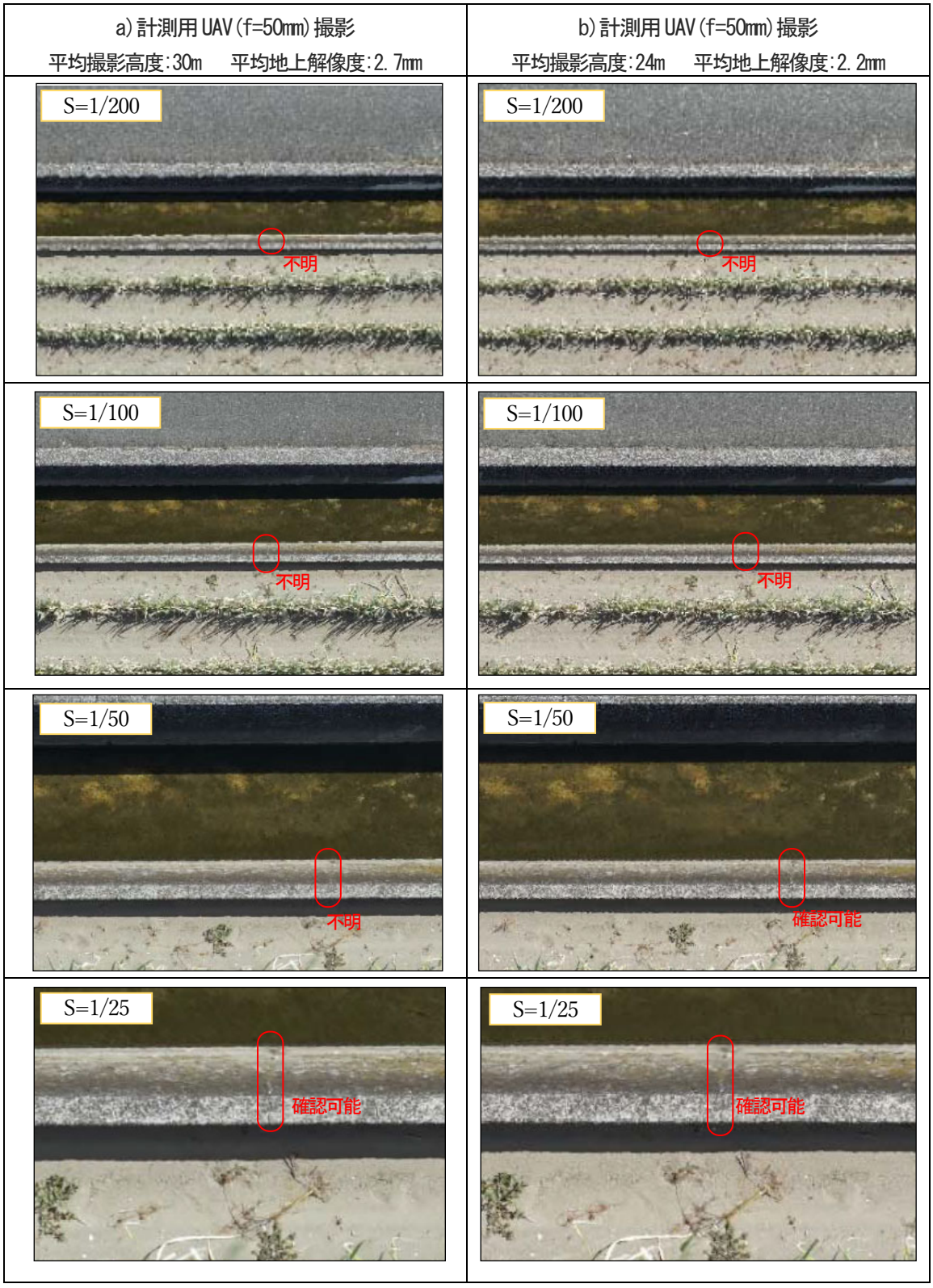


写真 4.12　　オルソ画像の解像度比較（E 地区）

（ひび割れ:B=2～3mm）

(2) 地形・施設形状

3 次元点群データの活用方法としては、位置精度が 1cm 未満であることより、地形・施設の形状計測に有効であり、C・E 地区での事例を図 4.4、4.5 に示してみる。

これら事例では、実測の横断測量と 3 次元点群データの画像解析より、それぞれ作成した開水路の断面図を比較してみた。

比較結果では、上部張出し部の下端（写真の死角）での一部欠測、水面付近（水面、植生等の揺らぎ）でのノイズデータが認められていた。しかし、3 次元点群データは、全体的に横断形状を良好に再現しており、実測結果に対して 1cm 以下の誤差と施設の形状把握には有効であった。なお、E 地区の事例では、水面での揺らぎが生じない程度の水（約 1mm 前後の水深）が水路底部に滞留していたが、実測との誤差は 1～2cm となっていた。

これら事例の UAV 計測（計測型）は、地上解像度 1.7～5.1mm の撮影であったことより、開水路及び周辺の形状再現（誤差 1cm 未満）には、地上解像度 5mm 程度に設定した飛行方法が有効であると判断された。

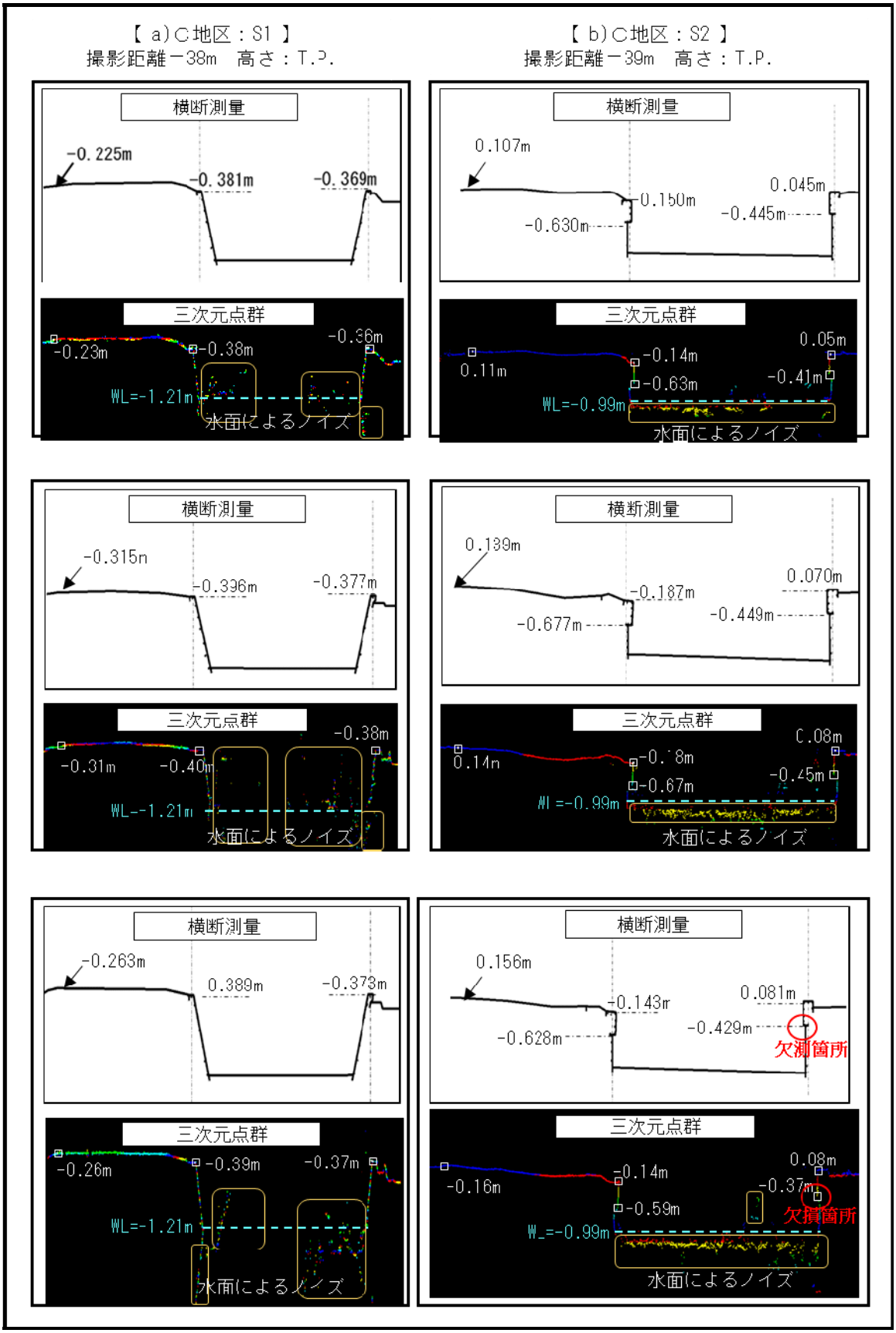


図 4.4　　開水路の形状再現（横断測量結果との比較：C地区）

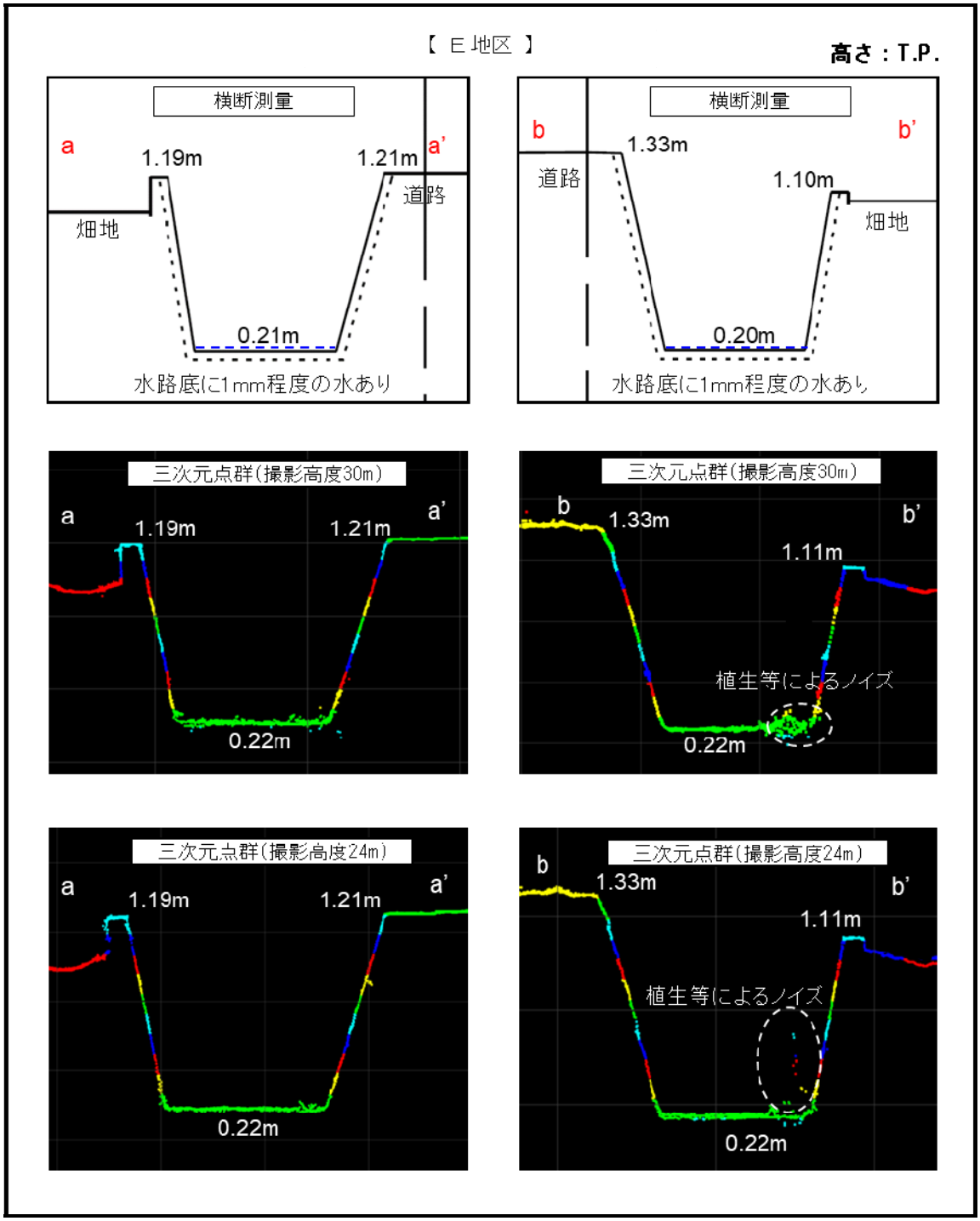


図 4.5　　開水路の形状再現（横断測量結果との比較：E 地区）

(3) 変状計測

本項では、C・D地区での UAV 計測で確認された変状について、3 次元点群データ及びオルソ画像を活用した計測結果事例として紹介する。

1) 目地の段差

本事例は、目地の開きが確認された箇所において、「目地の両側の高さを計測・比較する」ことで段差の有無を確認したものである。計測では、両端が同じ高さであるため、「目地の開きはあるものの、段差は形成されていない」と判断できる。

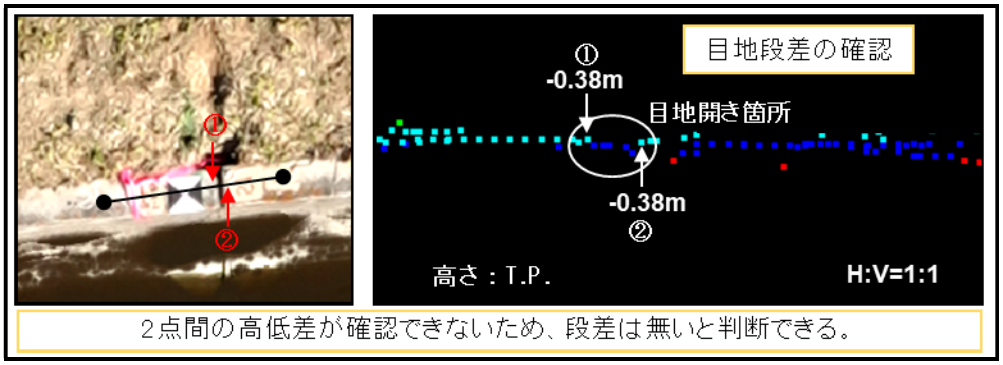


図 4.6　　目地の段差計測事例（開水路：C地区 S1）

2) 天端の剥離

本事例は、水路天端の表面劣化を抽出し、「剥離による変状規模を計測」したものである。その計測結果では、「深さ約 0.1m×延長約 2.1m の規模の剥離が生じている」と判断できる。

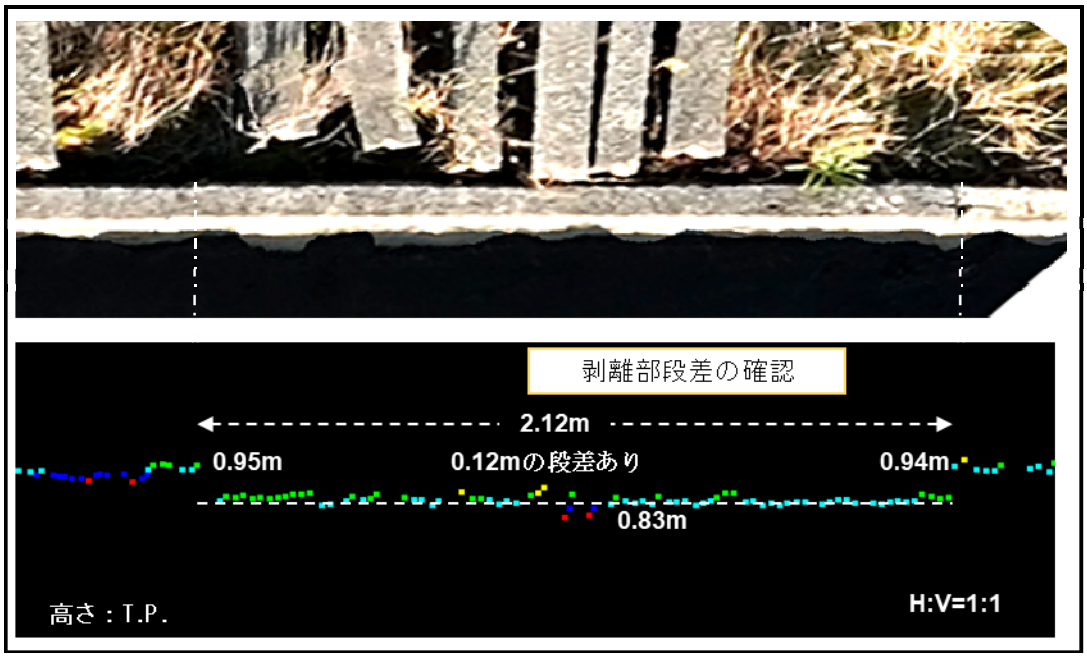


図 4.7　　天端剥離の規模計測事例（開水路：D地区）

3）橋梁都立部の抜け上がり

本事例は、開水路を横断する道路に架かる橋梁部における「抜け上がり（橋梁の道路面とこれに接続する道路面との段差）」を抽出し、その段差を計測したものである。

「機能保全の手引き」では、目視による抜け上がりの有無や、その規模を“20cm 未満”、“20cm～50cm 未満”、“50cm 以上”に区分することとなっているが、計測結果では、S-4 レベルの「6cm～7cm の段差」と判断された。

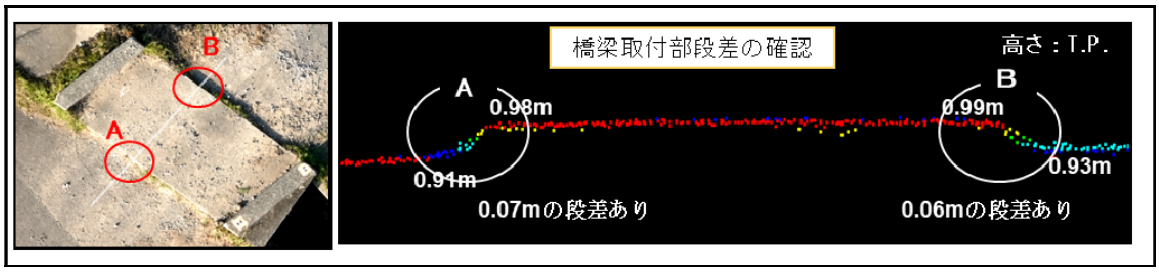


図 4.8　　抜け上がり段差の計測事例（開水路：D地区）

4）背後地盤の陥没

本事例は、「開水路背後に生じた陥没」であるが、その規模は、延長 82cm、深さ 5cm（0.45m－0.40m）であると判断された。

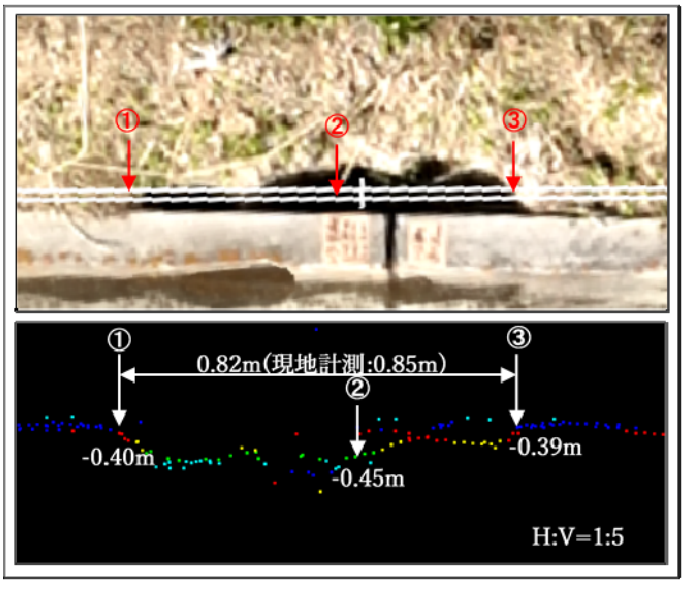


図 4.9　　背後地盤の陥没計測事例（開水路：C地区 S1）

5）天端高

本事例は、任意区間の天端高の縦断図を作成したものであり、その結果は、一部区間で最大 14cm(0.36m－0.22m)ほど高くなっていることが確認された。

この方法は、現地の縦断測量結果と比較すると、1cm 程度の誤差で一致しており、３次元点群データを用いた横縦断測量、地形図の作成などに活用できると判断された。

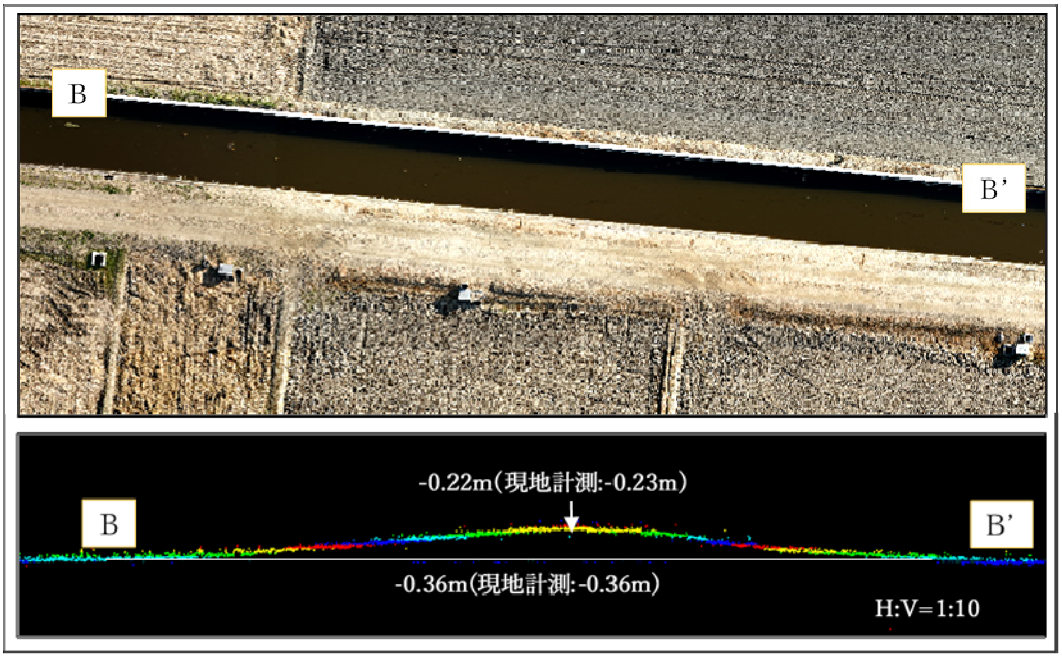


図 4.10　　天端高の縦断計測事例（開水路：C地区S1）

6）開水路の歪み

本事例は、オルソ画像上で「開水路の歪み」を解析したものであり、計測としては、任意の 2 点を結んだ直線と 2 点間の開水路の法線を比較する方法である。

この結果によると、中央部では、開水路側へ 14cm の歪みが確認され、オルソ画像を用いた変状抽出が有効であると判断された。

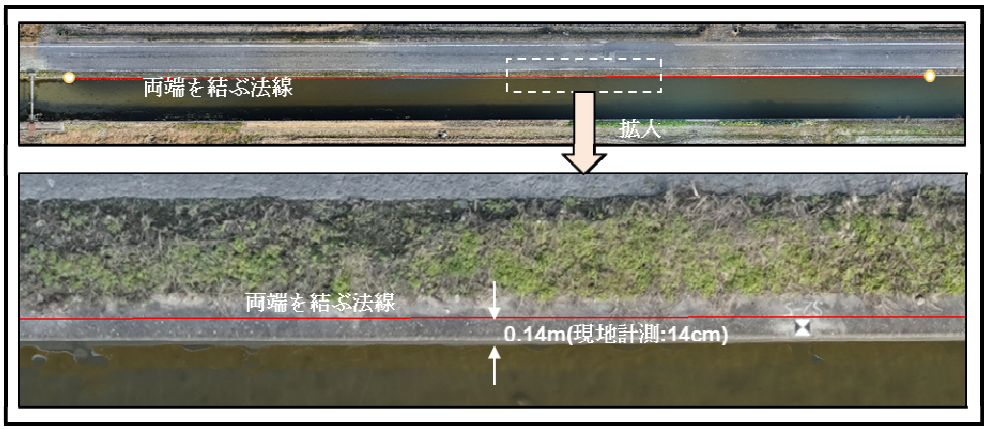


図 4.11　　開水路の歪みの計測事例（開水路：C地区S2）

(4) 今後のオルソ画像の活用

オルソ画像は、写真上の像の位置ズレをなくし空中写真を地図と同じく、真上から見たような傾きのない、正しい大きさと位置に表示される画像に正射変換したものである。

今回の UAV 計測では、3 次元点群データの水平及び鉛直の位置精度が 1cm 未満であることより、生成されたオルソ画像上で、地物（変状など）の位置、面積及び距離などを正確に計測することが可能となった。

図 4.12 は、開水路の壁面・底面のオルソ画像であるが、底面の変状状況が一目で把握でき、壁面ではひび割れを自動抽出した事例である。

すなわち、ある一定面積のオルソ画像は、ひび割れを含めた変状図面として利用できるだけでなく、今後は、AI など機械学習を活用した自動抽出を可能とし、機能診断調査の効率化・省力化に大きく貢献するものと考えられる。

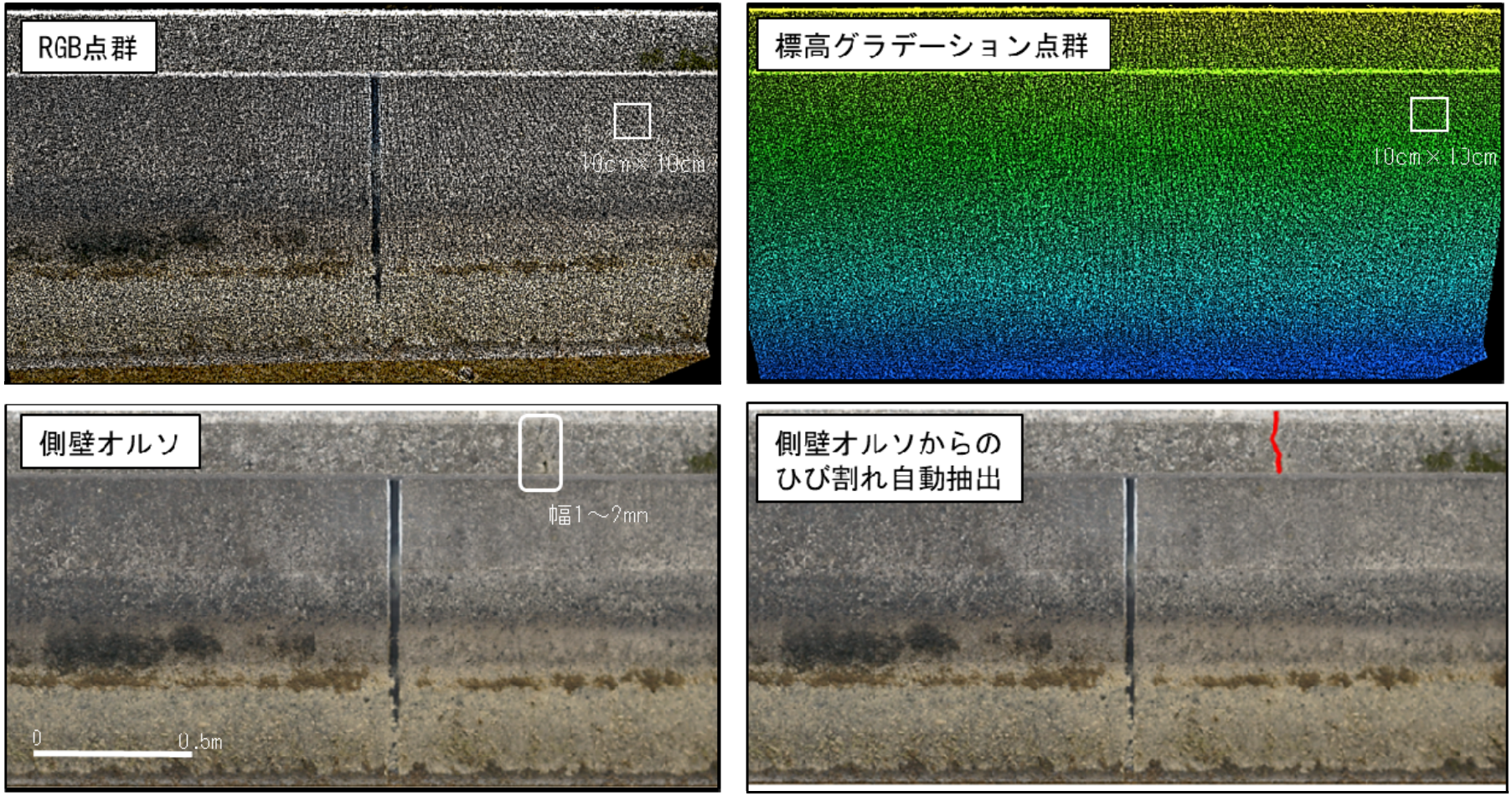


図 4.12　今後のオルソ画像の活用方法（開水路：F 地区）

4.3.3 施設点検への適用結果

施設点検への適用結果は、表 4.9 に示すとおりであり、抽出可能なひび割れ幅は、計測用 UAV(f=135mm)で 0.2mm 以上、 計測用 UAV(f=50mm)で 0.5mm 以上、簡易型 UAV(f=3.6mm)で 1.0mm 以上となっている。その他の変状については、画像、3 次元点群データの活用により抽出可能であることより、ひび割れを含めた点検では、「S-3 レベル以下」を対象とする計測用 UAV（f=50mm）と「S-4 レベル以上」を対象とする計測用 UAV(f=135mm)を併用することでほぼ全てに適用可能である。

また、簡易型 UAV(f=3.6mm)では、被写体までの距離（撮影距離）を 15m 以下とすることで、「S-3 レベル以下」を対象とした点検に適用可能である。

表 4.9　　開水路点検での UAV 計測の適用性（現地調査レベル）

評価項目(変状種別)					簡易型UAV	計測型UAV	
					f=3.6mm、撮影距離=10～15m	f=50mm,撮影距離=40m	f=135mm,撮影距離=10m
					単画像、オルソ画像 3次元点群データ	単画像、オルソ画像 3次元点群データ	単画像
内部要因	構造物自体の変状	ひび割れ	形状と幅（有筋）	目地間中央や部材解放部の垂直ひび割れ	**○有無の判定（抽出）** 計測用UAV(f=50mm)と同等の画質であることから、評価区分S-3（幅1mm以上）のひび割れの抽出が可能と思われるが、計測用UAVと同様、壁体が陰となっている場合、壁体が粗粒状態となっている場合は、抽出が難しいと思われる。 **○規模の計測** ひび割れ幅は、周辺物との比較による定性的な計測となり、ランク境界付近のひび割れ規模は、主観的な判断により評価ランクが異なってくる。	**○有無の判定（抽出）** 評価区分S-3（幅0.5mm以上）のひび割れの抽出が可能であるが、壁体が陰となっている場合、壁体が粗粒状態となっている場合は、抽出が難しい場合がある。 **○規模の計測** ひび割れ幅は、周辺物との比較による定性的な計測となり、ランク境界付近のひび割れ規模は、主観的な判断により評価ランクが異なってくる。	**○有無の判定（抽出）** 評価区分S-4（幅0.2mm以上）のひび割れの抽出が可能である。 **○規模の計測** ひび割れ幅は、周辺物との比較による定性的な計測となり、ランク境界付近のひび割れ規模は、主観的な判断により評価ランクが異なってくる。ただし、画像が鮮明（解像度が高い）ため、規模の判定精度は、計測用UAV(f=50mm)に比べて高くなる。
				特徴的な形状を示さないひび割れ			
				格子状・亀甲状などのひび割れ			
				側壁を横切るような水平又は斜めのひび割れ			
				鉄筋に沿ったひび割れ			
			進行性（ASRや凍害などの場合）				
				ひび割れ規模			
				ひび割れ付随物			
				ひび割れからの漏水			
				ひび割れ段差			
		ひび割れ以外の劣化		浮き	**○有無の判定（抽出）** 幅1mm以上のひび割れが抽出可能であることから、これらの変状の有無の判定は可能である。 **○規模の計測** 部分・全体的の判定は可能であり、平面的な規模はデジタルオルソからの計測で可能である。	**○有無の判定（抽出）** 幅0.5mm以上のひび割れが抽出可能であることから、これらの変状の有無の判定は可能である。 **○規模の計測** 部分・全体的の判定は可能であり、平面的な規模はデジタルオルソからの計測で可能である。	**○有無の判定（抽出）** 幅0.2mm以上のひび割れが抽出可能であることから、微細な変状の有無の判定が可能である。 **○規模の計測** 変状規模は、周辺物との比較による定性的な平面計測となる。 厚さ、深さ等の鉛直方向の規模計測は困難である。
				剥離・剥落			
				析出物（エフロエッセンス・ゲルなど）			
				錆汁			
				摩耗・すりへり(全体的の場合1ランクダウン)			
				鉄筋露出の程度			
			圧縮強度	反発強度法（鉄筋）	対象外	対象外	対象外
				反発強度法（無筋）			
			中性化	ドリル法			
外部要因		変形・歪み		変形・歪みの有無	**○有無の判定（抽出）/規模計測** デジタルオルソ、三次元点群データから計測することで抽出・計測が可能である。 変状範囲に対して変形・歪み量や沈下量が小さい場合は、画像からの抽出は困難で、三次元点群データが有効である。	**○有無の判定（抽出）/規模計測** デジタルオルソ、三次元点群データから計測することで抽出・計測が可能である。 変状範囲に対して変形・歪み量や沈下量が小さい場合は、画像からの抽出は困難で、三次元点群データが有効である。	**○有無の判定（抽出）/規模計測** 平面的な変状は、計測用UAV(f=50mm)より詳細な確認が可能である。 変状規模は、周辺物との比較による定性的な平面計測となる。 厚さ、深さ等の鉛直方向の規模計測は困難である。
		欠損・損傷		欠損・損傷の有無			
		不同沈下		構造物の沈下、蛇行			
	構造物周辺の変状	地盤変形		背面土の空洞化（地中の空洞化を除く）	**○有無の判定（抽出）/規模計測** デジタルオルソ、三次元点群データから計測することで抽出・計測が可能である。	**○有無の判定（抽出）/規模計測** デジタルオルソ、三次元点群データから計測することで抽出・計測が可能である。	**○有無の判定（抽出）/規模計測** 平面的な変状は、計測用UAV(f=50mm)より詳細な確認が可能である。 変状規模は、周辺物との比較による定性的な平面計測となる。 厚さ、深さ等の鉛直方向の規模計測は困難である。
				周辺地盤の陥没・ひび割れ			
				抜け上がり			
その他要因	目地の変状			目地の開き	**○有無の判定（抽出）/規模計測** 段差以外については、ひび割れ規模と同等の変状抽出が可能である。 段差は、三次元点群データにより確認が可能である。 **○規模計測（段差）** 高さ精度がRMS誤差で2cm程度であることから、2cm程度の精度で可能である。	**○有無の判定（抽出）/規模計測** 段差以外については、ひび割れ規模と同等の変状抽出が可能である。 段差は、三次元点群データにより確認が可能である。 **○規模計測（段差）** 高さ精度がRMS誤差で7mm以下であることから、1cm程度の精度で可能である。	**○有無の判定（抽出）** 平面的な変状は、計測用UAV(f=50mm)より詳細な確認が可能である。 **○規模計測（段差）** 変状規模は、周辺物との比較による定性的な平面計測となる。 厚さ、深さ等の鉛直方向の規模計測は困難である。
				段差			
				止水板の破断			
				漏水の状況			
				周縁コンクリートの欠損等			

目　　次

5. ダム ・・・

5. ダム

【基本的な考え方】

本項は、堤高 54.3～75.5ｍのコンクリート・フィルダムを対象に、UAV 計測による画像、3 次元点群データの活用を検討した事例である。

撮影機種は、ひび割れ抽出や 3 次元計測など高解像度の画像を取得するため、装着レンズを交換可能な一眼レフカメラを搭載した大型の計測型 UAV と、広く普及しているコンパクトデジカメ相当のカメラを搭載した小型で安価な簡易型 UAV を用いた。

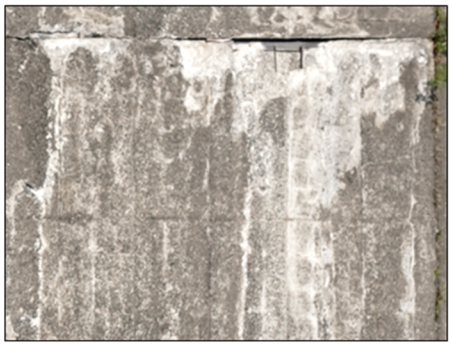
UAV 計測では、だれもが高精度な三次元モデル・オルソを作成できるように、予めプログラミングした飛行コースに沿って GNSS を利用した自律飛行で実施した。

記載内容は、UAV 計測の調査計画、活用、変状解析の 3 項目から構成されており、画像、3 次元点群データによる変状解析の内容、精度についての事例を紹介している。

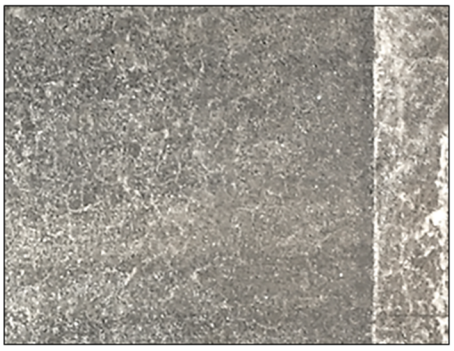
施設点検への適用については、「農業用ダム機能診断マニュアル」に従い検討したが、堤体・洪水吐等における点検（2 次調査レベル）で有効活用できることが明らかになった。

大　項　目	中　　項　　目	記　　載　　内　　容
UAV計測による調査計画	調査概要	実証ダムの概要
	調査方法	留意点、撮影方法、撮影写真の諸元
UAV計測の活用について	機能診断調査概要	機能診断調査におけるUAV計測の対象範囲
	施設点検への適用性	適用性を検討する施設の変状項目
	施設点検への活用手順	施設点検での活用方法、変状項目の抽出手法・結果の概要
UAV計測による変状解析	撮影画像	ひび割れ、析出物・漏水痕跡、鉄筋露出、コンクリート表面・部材の損傷等の抽出事例、計測型・汎用型UAVの比較
	3次元点群データ	施設形状・変形、護床ブロックの設置状況、損傷、剥離・摩耗・鉄筋露出の事例、オルソ画像の活用
	施設点検への適用結果	ダムにおけるUAV計測の適用性結果

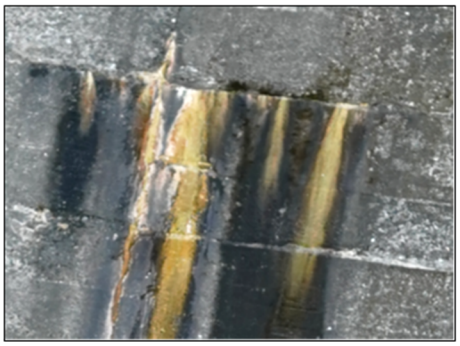
【堤体】



洪水吐表面の剥離



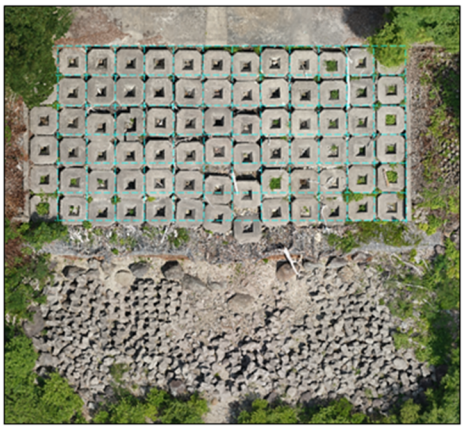
洪水吐表面のクラック



目地からの漏水痕

目地部の植生侵入

【付帯施設】



減勢工被覆ブロックの配列等

ゲート操作棟基部の損傷

写真 5.1　　ダムにおける代表的な変状写真

5.1 UAV 計測における調査計画

5.1.1 調査概要

事例調査は、表 5.1 に示す 3 地区（G～I 地区）で実施したが、対象としたダムの概観は、写真 5.2 に示すとおりである。

調査では、表 5.1 に示した調査諸元で、単写真による変状目視、3 次元計測による変状の定量化について検討し、UAV 機種、カメラのレンズ（焦点距離)、撮影高度などによる計測成果を比較した。

ダムは、農業水利施設の中で最も規模が大きく、複雑な形状で標高が高いため、人のアクセスしにくい施設である。このため、撮影方法としては、一定の垂直・斜め撮影だけでなく、目標とした変状箇所への正確な近接撮影が必要となる。

したがって、I 地区では、撮影位置への正確な移動、ブレの小さな近接撮影(望遠レンズ：135mm)を目的とした手動計測について検討した。また、ダム堤上部には、ゲート操作・観測等を行う建屋があるため、施設変状の点検を目的とした鉛直飛行による手動計測についても検討した。

ダムでは、湖・河川の水面（風波・流れ)、近接地域の樹木（風）などによる動き、施設規模の大きさに伴う陰影（太陽高度）など自然阻害要因が、3 次元点群モデルの構築時に大きく影響する。したがって、ダム地域の 3 次元計測では、原則として無風・弱風が頻発しやすい時期で、天候が曇りあるいは太陽高度が高い（太陽が南中）時間帯で実施することが望ましい。

表 5.1　　ダム調査概要

調査地区	調査年月	使用UAV				構造形式	調査箇所
		計測型		簡易型			
		50mm	135mm	3.6mm	8.8mm		
G	2017.7	○	○	○		重力式 コンクリート	堤体 洪水吐 （導流部、減勢工） ゲート操作棟
H		○	○			ｱｽﾌｧﾙﾄ ﾌｪｲｼﾝｸﾞﾌｨﾙ	
I	2018.7	○	○		○	重力式 コンクリート	

注）使用UAVの最下段はレンズの焦点距離を示している。

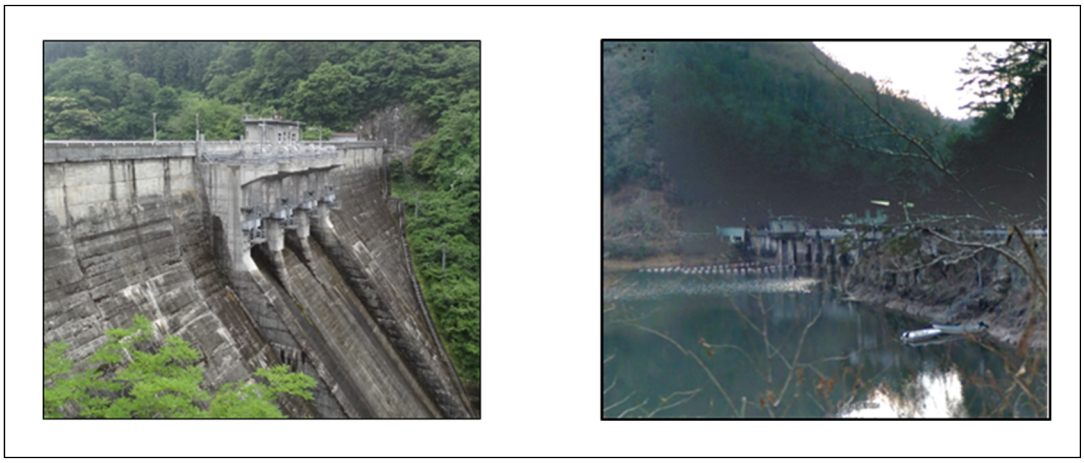


写真 5.2(1)　　ダムの調査地区概観（G地区：コンクリートダム）

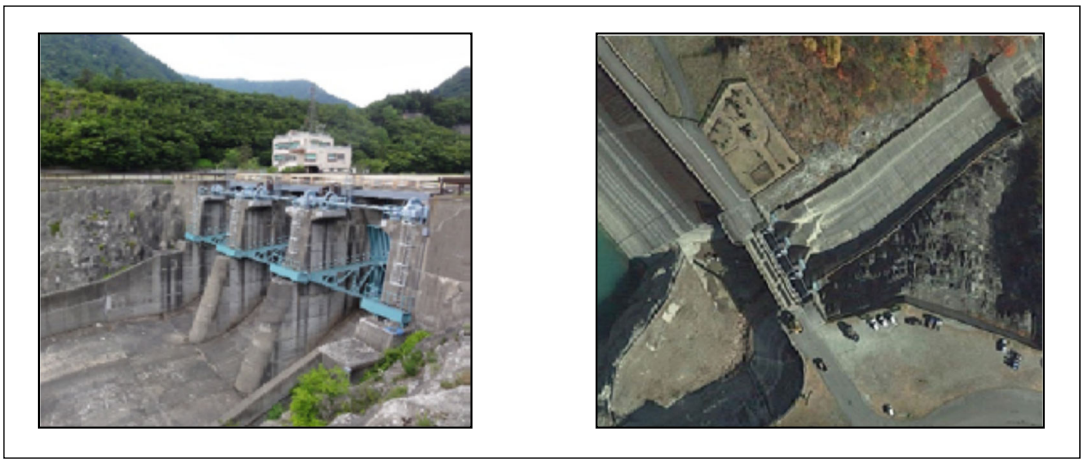


写真 5.2 (2)　　ダムの調査地区概観（H地区：フィルダム）

写真 5.2 (3)　　ダムの調査地区概観（ I 地区：コンクリートダム）

5.1.2 調査方法

(1) 留意点

対象とするダム施設は、農業用水の確保と安定的供給を目的とした重要な農業水利施設であり、機能としては、流水を貯留、調節、取水する大規模なコンクリート等の構造物である。

本施設は、山がなだらかで谷のふところが広い山間部に設置されることが多く、以下のような事項に留意する必要がある。

① UAV 計測では、ダム施設の形状、規模等より、効率的な撮影計画を立案すると同時に、SfM（Structure from Motion）で解析可能な撮影データ量に留意する。

② 画像、3 次元データの撮影では、対象とする変状が取得できる撮影方法、撮影高度、地上解像度などより、使用 UAV、レンズを決定する。

③ SfM 解析では、水面、樹木など風の影響を受ける地物が撮影されると、3 次元モデリング精度が低下する。このため、撮影時期の設定には、風が穏やかな時期、周囲の山や堤体の影の影響が少ない時間帯などが望ましい。

④ ダム施設や周囲の山は、UAV の姿勢制御等に必要な衛星電波を阻害する恐れがあるため、常に衛星電波の受信状態に留意し、受信状態が悪い場合は、マニュアル操縦により対応する必要がある。

「農業用ダム機能診断マニュアル　2次調査用（農林水産省農村振興局 平成 17 年 4 月)」(以下、「機能診断マニュアル」とする。）では、点検記録表の記載例にあるように、クラック、漏水、表面の損傷を目視観察での定性評価が主体となっている。

したがって、計測では、通常の垂直・斜め撮影の他に、目標とした変状箇所で正確に近接撮影するホバリング手法の活用が望ましい。なお、ダムの立地条件、形状などより高精度な撮影が必要になる場合には、撮影画像の重複が一定になるように、正確な飛行位置を制御する RTK-GNSS 装置、カメラの画角を安定に制御する三軸ジンバルなどの活用が望ましい。

(2) 撮影方法

ダムでは、図 5.1 に示すように、3 次元点群データの取得を目的とし、計測型 UAV と簡易型 UAV を用いて、ダム軸に対して平行方向に、施設上空からの垂直撮影及び斜め撮影を実施した。また、垂直撮影では、いずれの UAV でもオーバーラップ（OL）率 80%以上、サイドラップ（SL）率 60%以上とし、斜め撮影では、未撮影区域を発生させないラップ率で実施した。検討では、画像による変状目視、3 次元計測による変状の定量化を目的に実施したが、G・I 地区では、UAV 機種の比較検討を実施した。

また、I 地区では、図 5.2 に示すように、施設に近接した斜め撮影、ホバリング飛行による建屋等の鉛直壁面に正対する近接撮影を実施し、クラック、漏水痕跡、表面の損傷などへの活用について検討した。

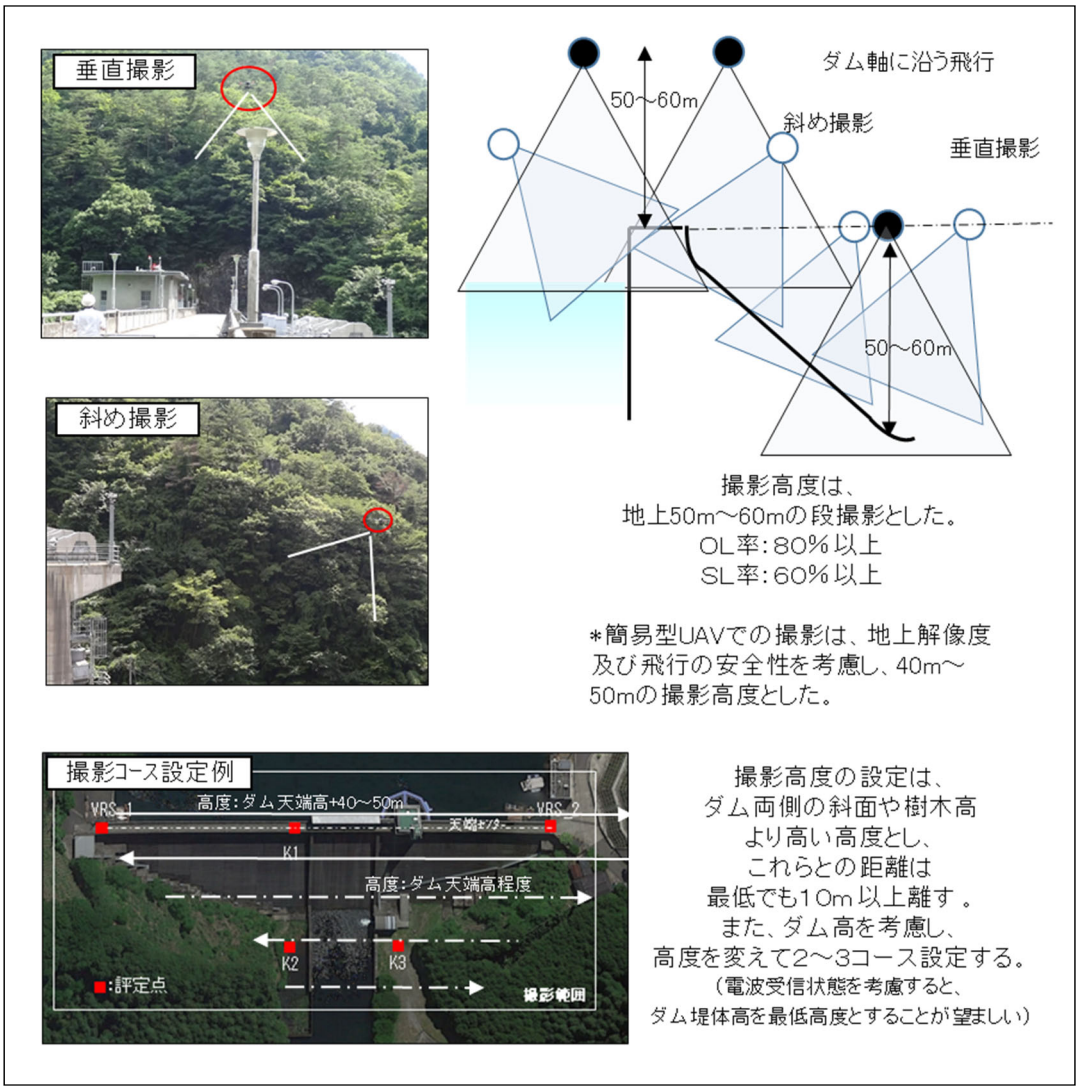


図 5.1　　ダムでの UAV 計測方法（全域撮影）

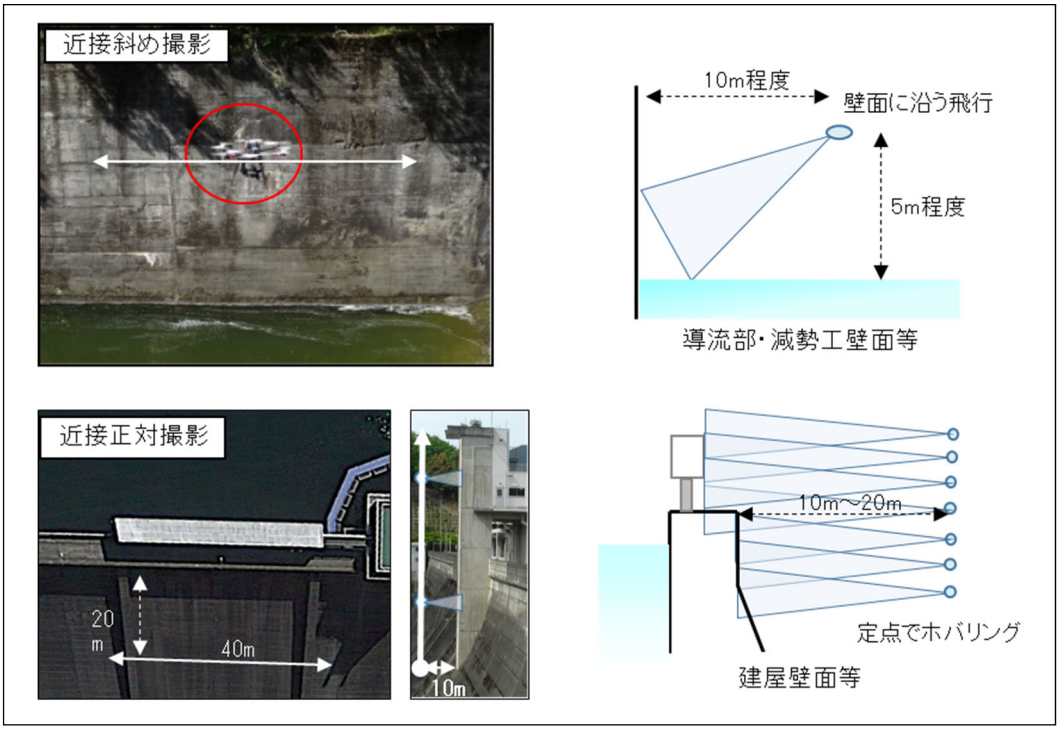


図 5.2　　ダムでの UAV 計測方法（近接撮影）

(3) 撮影写真の諸元

ダムでの UAV 計測で撮影した空中写真の諸元は、表 5.2 に示すとおりであるが、3 次元解析では、3 次元モデリングの位置精度（RMS 誤差）を確認した上で実施した。

表 5.2　　ダムの 3 次元解析に使用した撮影写真の諸元

調査地区	調査年月	撮影方法	使用UAV				平均撮影高度 (m)	平均地上解像度 (cm)	RMS誤差	
			計測型		簡易型				水平 (cm)	鉛直 (cm)
			50mm	135mm	3.6mm	8.8mm				
G	2017.7	鉛直・斜め	○	○			62	0.74	0.8	0.5
					○		40	1.71	1.2	0.3
H	2017.7		○	○			54	0.65	0.7	0.5
I	2018.7		○	○			64	0.58	0.8	0.7
						○	50	1.34	0.8	0.6
注）撮影高度、平均地上解像度、RMS誤差は、オルソ画像作成時における撮影数値である。										

5.2 UAV 計測の活用について

5.2.1 機能診断調査概要

ダムの機能診断調査手順は、「農業用ダム機能診断マニュアル（農林水産省農村振興局、平成 14 年 4 月、以後マニュアルとする)」より、図 5.3 に示すような点検（日常、定期、臨時)、調査（1 次、2 次、詳細）を 3 段階で実施することになっている。

それぞれの点検・調査の概要は、表 5.3 に示すとおりであるが、本手引きでは、マニュアルの対象となっている 2 次調査での UAV 計測の活用を検討したものである。

表 5.3　　長期供用ダムの機能診断における点検・調査の区分

＜点検の区分＞

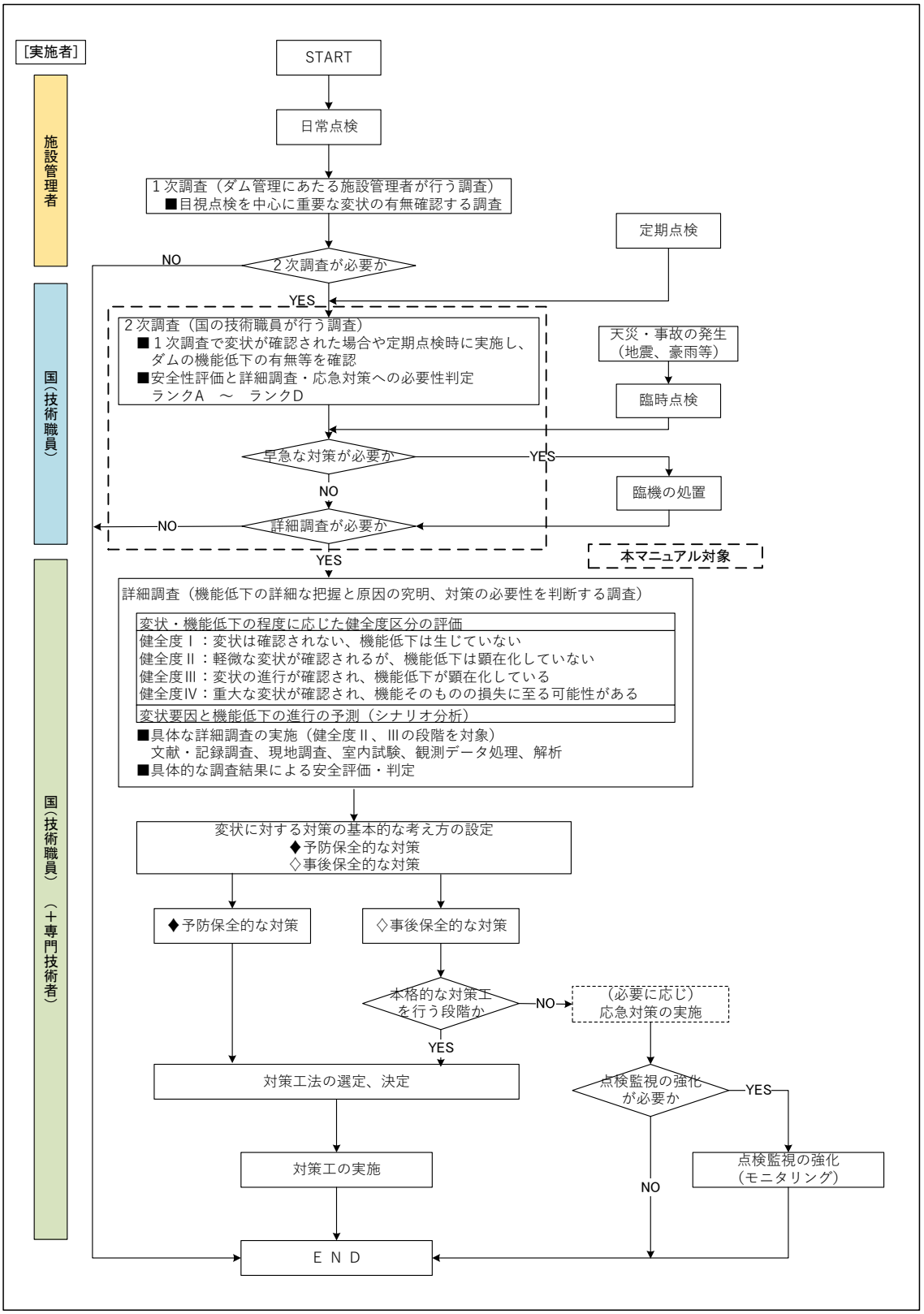
区　　分	内　　容
日常点検	ダム管理に当たる土地改良区等の施設管理者が日常的に行う点検作業
定期点検	直轄ダムにおいて、土地改良調査管理事務所の技術職員(国職員)が定期的（数年毎に 1 回のサイクル）に行う点検作業
臨時点検	地震等が発生した場合に、土地改良調査管理事務所の技術職員(国職員)又は専門技術者がダム全体の安全性確認のために行う臨時の点検作業

＜調査の区分＞

区　　分	内　　容
1次調査	ダム管理に当たる土地改良区等の施設管理者が日常点検において、目視観察を中心として特に重要な変状の有無を確認するための調査
2 次調査	土地改良調査管理事務所の職員(国職員)が以下の目的で実施する調査 1) 1 次調査の段階で、何らかの変状が確認された場合に、変状に関する定量的な状況やダム機能低下の有無を確認・把握するための調査 2) 定期点検において実施する調査 【このマニュアルの対象】
詳細調査	2 次調査の段階で、ダムの機能低下に関連する変状の発生が把握できた場合に、国職員が専門技術者等の協力を得て、機能低下の詳細な把握と原因の究明、対策の実施の必要性を判断するための調査

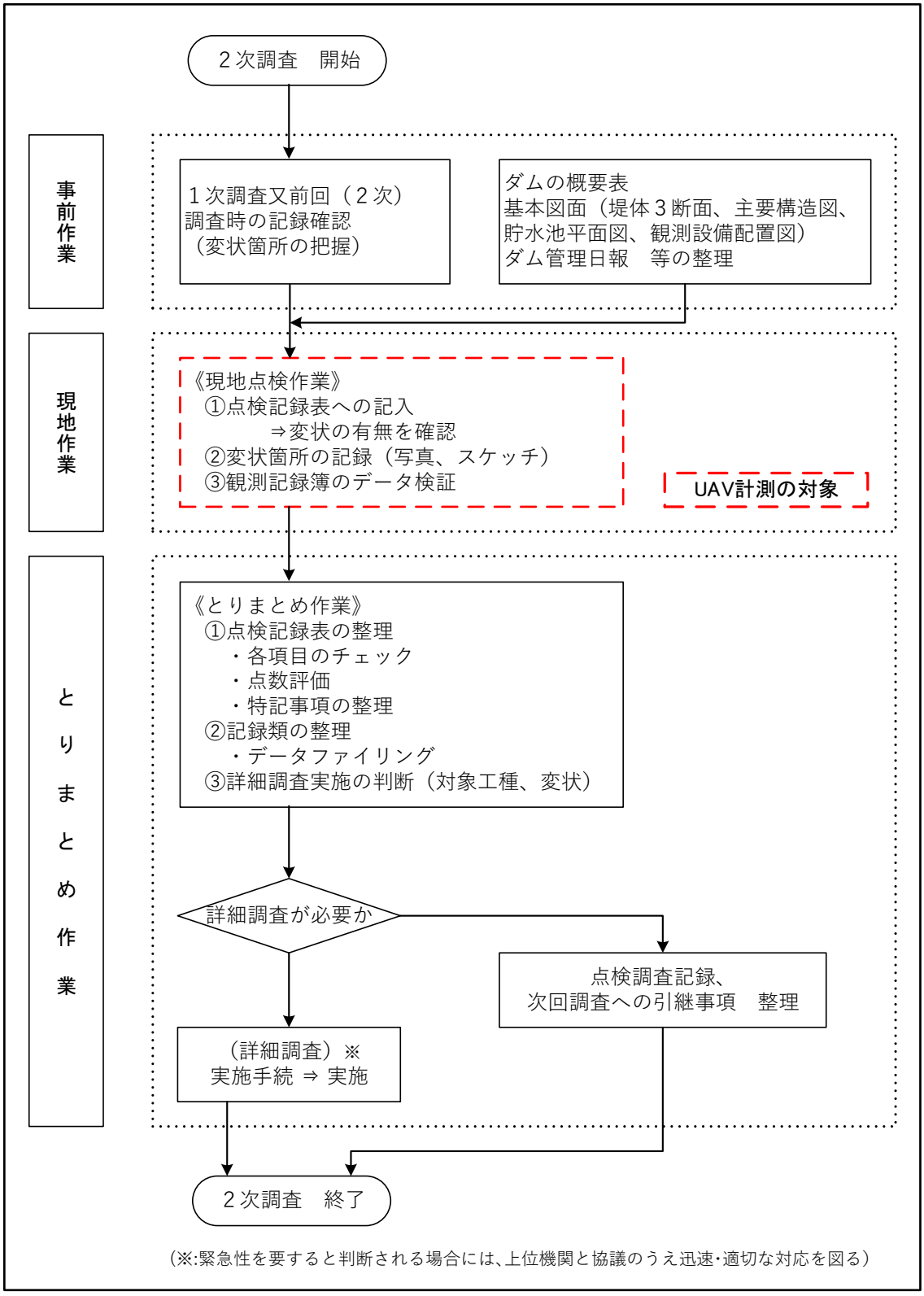
資料：農業用ダム機能診断マニュアル　2次調査用（農林水産省農村振興局 平成 17 年 4 月）より編集

具体的には、図 5.4 に示すとおり、事前作業、現地作業、とりまとめ作業の 3 段階で実施することが示されている。このうち、UAV の活用では、コンクリート構造物における現地作業段階での変状の有無確認を目的として検討した。



資料：農業用ダム機能診断マニュアル　2次調査用（農林水産省農村振興局 平成17年4月）より編集

図5.3　　長期供用ダムの機能診断フロー



資料：農業用ダム機能診断マニュアル　２次調査用（農林水産省農村振興局 平成 17 年４月）より編集

図 5.4　　長期供用ダムの機能診断（２次調査の作業の流れ）

5.2.2 施設点検への適用性

ダムの変状把握では、足場仮設等により人が立ち入ることを前提として、表 5.4 に示す確認項目、調査方法が記載されている。

このため、UAV 計測では、目視観察や写真、計測を対象とした調査手法について検討した。すなわち、本手引きでは、UAV 計測による撮影写真、画像解析（3 次元計測）を活用し、その適用性について確認した。

機能診断調査により判明した施設状態は、表 5.5 に示すとおり 4 段階で評価されており、評価段階における対応・対策の目安が示されている。なお、判定ランクは、表 5.4 に示したそれぞれの変状調査の合計点数を用いて実施する。

表 5.5　　ダム構造物の健全度指標（安全性評価・判定）

判定ランク	全体点数	判　定　ご　と　の　対　応
ランクＤ	０点	全体に変状はなく、安全である。通常の管理を継続することで問題ない。
ランクＣ	１～８点	全体的には劣化程度は小さく、当面は通常の管理を継続することで問題ない。ただし、個別項目で３点以上の箇所があった場合には、当該箇所を対象に詳細調査を行う。
ランクＢ	９～１４点	部分的に劣化がみられる状態である。変状の確認された箇所については、次回点検時に前回の記録（又は状況）との対比を行い、劣化の進行程度を確認する。ただし、個別項目で３点以上の箇所があった場合には詳細調査を行う。
ランクＡ	１５点以上	全体的に劣化が進行している状態であり、早急に詳細調査を実施する。なお、個別項目で５点以上の箇所があった場合には、対策の要否も含め優先的に詳細調査を実施する。

資料：農業用ダム機能診断マニュアル　２次調査用（農林水産省農村振興局 平成 17 年４月）

評価の基準となる個別の変状程度は、表 5.4 に示したとおりであるが、定量化された評価指標は、洪水吐コンクリートでの「クラック」に記載される幅 0.2mm 以上のみである。本手引きでは、コンクリート面におけるクラック、漏水、損傷、部材内部の損傷、部材表面の損傷について、その計測精度、抽出程度について検討した。

表 5.4　ダム構造物における現地調査での確認項目

注）＊該当する場合は○、該当しない場合はーで消す

●堤体コンクリート	左岸部＊	河床部＊	右岸部＊	＜計＞	自由記入欄（具体的状況等）
①クラック、漏水、表面の損傷					
1）水平打継目から漏水がみられる	1	1	1		
調査内容：・目視、写真 ・発生箇所（図面上に記載）					
2）堤体横継目から漏水がみられる	1	1	1		
調査内容：・目視、写真 ・発生箇所（平面上に記載）					
3）表面に連続したクラックがある	1	1	1		
調査内容：・目視、写真 ・発生箇所（平面上に記載）					
4）コンクリートの表面が剥離している	1	1	1		
調査内容：・目視、写真 ・発生箇所（平面上に記載）					
5）堤体上の越流部が摩耗し、粗骨材が露出している	ー	1	ー		
調査内容：・目視、写真 ・発生箇所（平面上に記載）					
				合計点数 点	

●洪水吐コンクリート	左岸側側壁	底版	右岸側側壁	＜計＞	自由記入欄（具体的状況等）
①クラック、漏水（地山からの湧水を含む）					
1）表面に線状のクラックが確認される（幅0.2mm以上）	1	1	1		
調査内容：・目視、写真 ・発生箇所（平面上に記載） ・計測（クラックの長さ、最大の開き幅、深さ）					
2）表面に亀甲状のクラックが確認される	2	1	2		
調査内容：・目視、写真 ・発生箇所（平面上に記載）					
3）エフロレッセンス、遊離石灰が確認される	1	1	1		
調査内容：・目視、写真 ・発生箇所（平面上に記載）					
4）クラック(または水平打継目)から漏水している箇所がある	2	2	2		
調査内容：・目視、写真 ・発生箇所（平面上に記載） ・計測（可能であれば、クラック深さ、幅、連続性を計測）					
5）クラック(または水平打継目)からの漏水が貯水位と連動して増減 している	3	3	3		
調査内容：・目視 ・計測（貯水位の異なる時期、降雨後の状態を確認）					
6）伸縮・収縮目地から漏水（湧水)が認められる	3	3	3		
調査内容：・目視、写真 ・発生箇所（平面上に記載）					
②部材内部の損傷					
1）部材から鉄筋が露出している箇所がある	3	3	3		
調査内容：・目視、写真 ・発生箇所（平面上に記載） ・計測（露出長さ、断面剥離の規模）					
2）部材表面に錆汁の発生が確認される	2	1	2		
調査内容：・目視、写真 ・発生箇所（平面上に記載）					
3）部材表面が膨張している	2	2	2		
調査内容：・目視、写真 ・発生箇所（平面上に記載）					
③部材表面の損傷					
1）部材の表面が摩耗し、骨材が露出している部分がある	1	2	1		
調査内容：・目視、写真 ・発生箇所（平面上に記載）					
2）部材の表面が剥離・剥落している	1	1	1		
調査内容：・目視、写真 ・発生箇所（平面上に記載）					
3）側壁部にたわみ（天端継目のズレ・手すりの変形）が生じている	3	ー	3		
調査内容：・目視、写真 ・発生箇所（平面上に記載） ・計測（ズレの大きさ）					
				合計点数 点	

合計点数より、次のようにランク区分をする。

ランク区分	全体点数 堤体コンクリート	全体点数 洪水吐コンクリート	判定	ランク判定
ランクD	0点	0点	安全であり、通常の管理で問題ない	
ランクC	1～5点	1～8点	劣化程度は小さく、当面は通常の管理で問題ない	
ランクB	6～9点	9～14点	部分的に劣化がみられ、日常点検での注意が必要	
ランクA	10点以上	15点以上	早急な詳細調査又は対策が必要	
（＊1）判定ランクに関わらず、変状の確認された項目・箇所の状況の記録は必ず残しておく。				
（＊2）ランクB、Cについては3点以上、ランクAについては5点以上の項目があった場合は、その項目について詳細調査を実施				

資料：農業用ダム機能診断マニュアル　2次調査用（農林水産省農村振興局 平成17年4月）より編集

5.2.3 施設点検への活用手順

本手引きでは、UAV 計測を用いた空中写真撮影、SfM 解析を実施し、写真画像を用いたひび割れや亀裂の判読に加えて対象構造物の 3 次元データを取得し、これに基づく構造物の変状抽出を行って施設維持管理への適用可能性（表 5.6）について検討し、その手法の精度，効率性等について取りまとめた。

表 5.6　ダム構造物の点検項目における UAV 計測の適用

凡例　●：現地確認済、○：活用可能（確認事例より判定）、×：活用不可

評価項目（変状種別）			単写真	3次元計測
堤体コンクリート	①クラック、漏水、表面の損傷			
	1）水平打縫目から漏水がみられる		●	●
	2）堤体横継目から漏水がみられる		●	●
	3）表面に連続したクラックがある		●	●
	4）コンクリートの表面が剥離している		●	●
	5）堤体上の越流部が摩耗し、粗骨材が露出している		●	●
洪水吐コンクリート	①クラック、漏水（地山からの湧水を含む）			
	1）表面に線状のクラックが確認される（確認事例より判定）	幅0.2mm以上	●	X
		幅0.5mm以上	●	●
	2）表面に亀甲状のクラックが確認される		●	●
	3）エフロレッセンス、遊離石灰が確認される		●	●
	4）クラック(または水平打継目)から漏水している箇所がある		●	●
	5）クラック(または水平打継目)からの漏水が貯水位と連動して増減 している		X	X
	6）伸縮・収縮目地から漏水（湧水)が認められる		○	○
	②部材内部の損傷			
	1）部材から鉄筋が露出している箇所がある		●	●
	2）部材表面に錆汁の発生が確認される		●	●
	3）部材表面が膨張している		X	○
	③部材表面の損傷			
	1）部材の表面が摩耗し、骨材が露出している部分がある		●	●
	2）部材の表面が剥離・剥落している		●	●
	3）側壁部にたわみ（天端継目のズレ・手すりの変形）が生じている		●	●

注）　3次元計測とは、オルソ画像、3次元点群データを用いた定量計測を示す。

資料：農業用ダム機能診断マニュアル　2次調査用（農林水産省農村振興局 平成 17 年 4 月）より編集

すなわち、ダムでは、UAV 計測と SfM 解析を組み合わせ、撮影写真、オルソ画像、3 次元点群データを生成し、図 5.5 に示すような活用方法を検討した。

検討では、構築された 3 次元点群データの精度を基準点・標定点の測量結果より検証し、RMS 誤差が約 1cm 前後以下の高精度地形モデルであることを確認した。

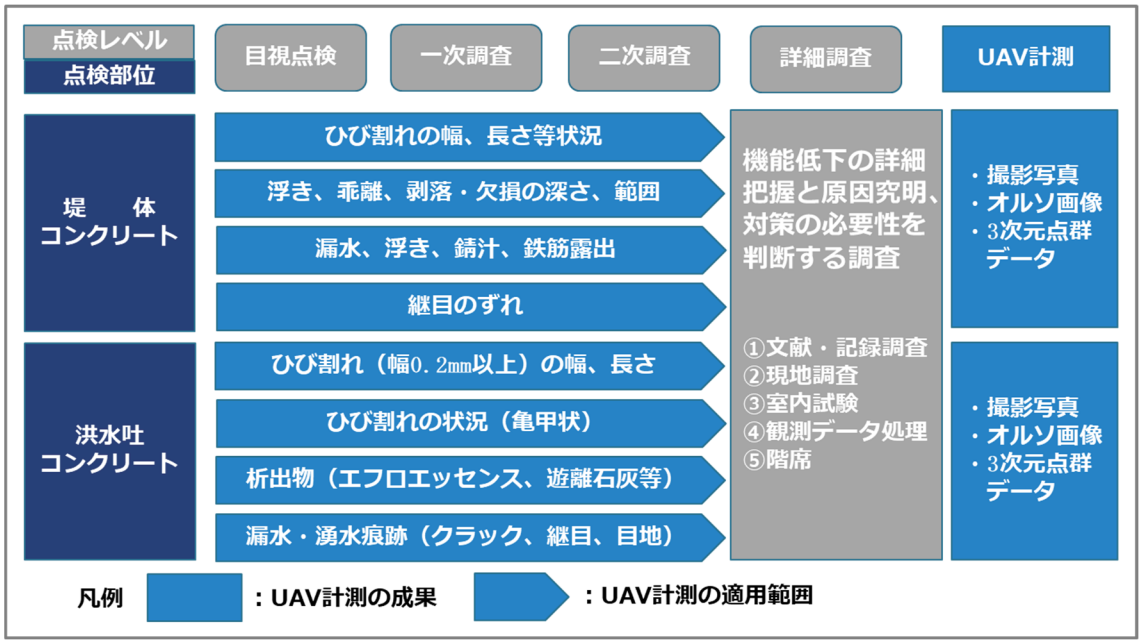


図 5.5　　ダム構造物での UAV 計測の活用手順

次に、検討では、得られた単写真，オルソ画像および 3 次元地形モデルより、抽出可能な標高・縦横断図等を用いて、構造物の変状（ひび割れ、表面劣化、変形・歪み、欠損・損傷、漏水、目地変化など）を抽出・計測を行い、その適用性、その手法の精度、効率性について取りまとめた。

ダムは、規模・標高差が大きいコンクリート構造物であるため、人のアクセスしにくい施設である。したがって、機能診断調査では、ひび割れ、表面劣化、漏水など変状観察・記録・図化に多くの労力がかかり、変状観察では、急勾配な堤体側面・洪水吐における正確な近接撮影が必要となる。

このため、Ｉ地区では、ピンポイント撮影位置への正確な移動、ブレの小さな近接撮影(望遠レンズ：135mm)を目的とした手動計測についても実施し、変状観察への適用性について記載した。

5.3 UAV 計測による変状解析

5.3.1 撮影画像（単写真）

(1) ひび割れ、析出物・漏水痕跡等

マニュアルでは、表 5.6 に示したように、最小で 0.2mm のひび割れを観察するように記載している。しかし、ダムのひび割れ発生箇所は、人のアクセスが困難であったため、以下の方法で推定した。

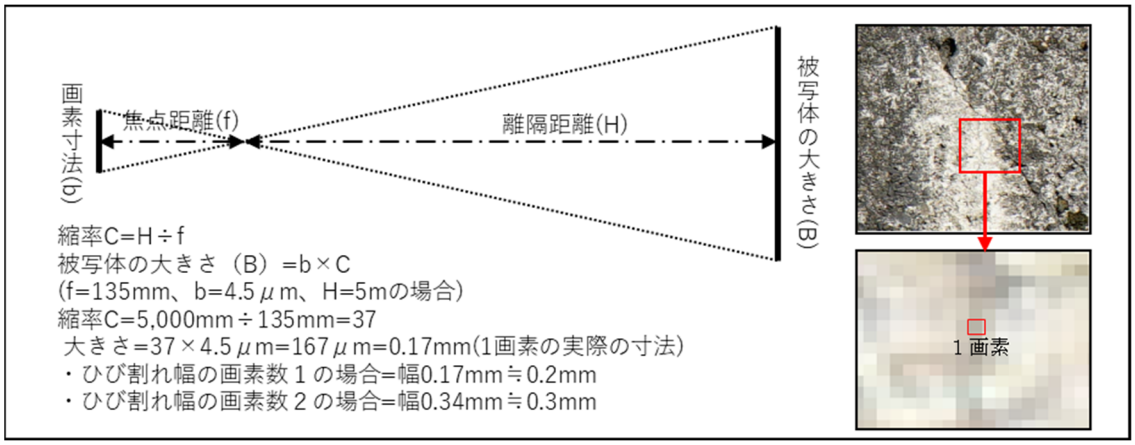


図 5.6　　ひび割れ幅の推定方法（f=135mm）

ひび割れ幅の抽出には、撮影カメラとレンズ焦点距離、撮影距離の組合せによる地上解像度で決定される。このため、事例では、写真 5.3 に示すように、計測型（f=50mm、f=135mm）、簡易型（f=3.6mm）の 3 ケースのレンズを用いて実施した。

この結果によると、幅 0.2mm～0.3mm 程度のひび割れでは、計測型（f=135mm）でのみ抽出可能であり、微細なひび割れを対象とした点検に適用可能であった（写真 5.3①参照）。一方、計測型(f=50mm)では、幅 0.5mm～1mm 程度のひび割れが抽出できたが、G地区の事例に示すとおり、壁体が漏水等で変色している場合には、抽出が難しい場合も認められた（写真 5.3②参照）。

また、簡易型（f=3.6mm）では、幅 12mm 程度のひび割れでも抽出が困難であり、微細なひび割れを対象とした点検への適用性は低い。

すなわち、2 次調査レベルの点検（クラック、漏水、表面の損傷等）では、計測用(f=135mm)を用いた離隔距離 10m 程度の近接撮影が効果的であった。

また、堤体コンクリートの点検では、洪水吐コンクリートと異なり、確認するひび割れ幅は定められておらず、ひび割れの有無の確認となっている。

このため、幅 0.5mm～1mm 程度のひび割れ抽出では、計測用（f=50mm）による離隔距離 50～60m 程度の撮影による点検が適用できる。

したがって、計測では、目標とするひび割れ幅が撮影可能な地上解像度より、UAV機種、撮影高度、焦点距離など撮影方法を決定することが重要である。

なお、析出物、漏水跡等の確認では、計測用（f=50mm)、簡易型（f=3.6mm）ともに、写真 5.4 に示すように有無の判読、分布が部分的、全体的の判別が可能であり、これら変状については、適用可能であった。

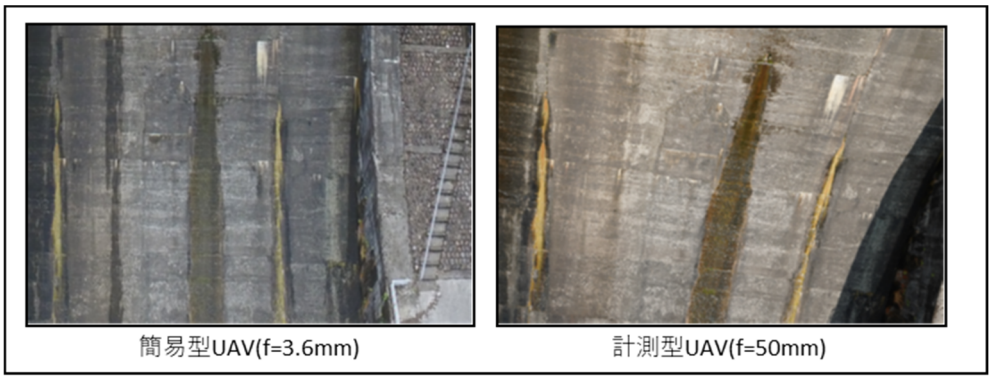
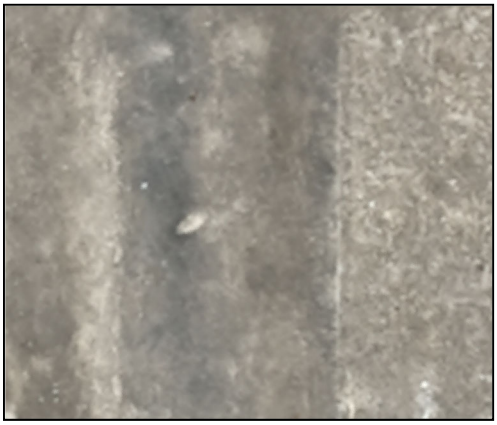


写真 5.4　　析出物・漏水跡等画像（G地区）

① 幅0.2～0.3mm程度の網の目状のひび割れ（H地区：洪水吐コンクリート）

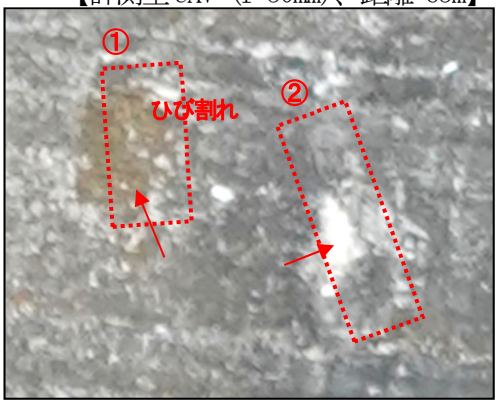
【計測型UAV（f=50mm）、距離=55m】



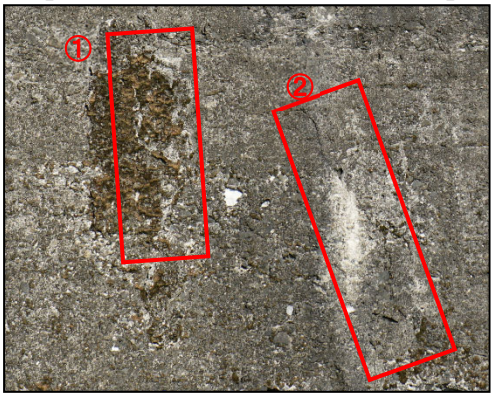
【計測型UAV（f=135mm）、距離=10m】

② 幅0.5～1mm程度の線状のひび割れ、析出物（G地区：洪水吐コンクリート）

【計測型UAV（f=50mm）、距離=65m】

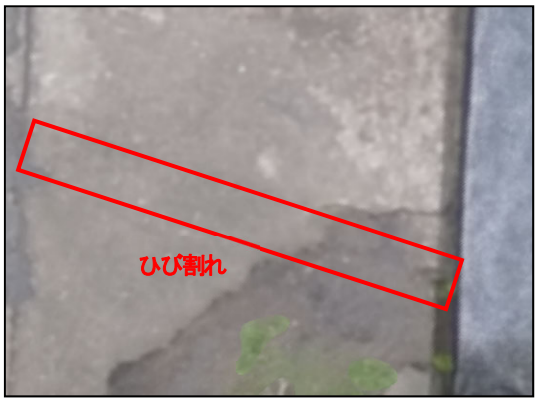


【計測型UAV（f=135mm）、距離=10m】



③ 幅6～12mm程度の線状のひび割れ（G地区：洪水吐減勢工コンクリート）

【簡易型UAV（f=3.6mm）、距離=30m】



【計測型UAV（f=50mm）、距離=65m】

写真5.3　　ひび割れ画像の撮影距離・焦点距離別比較（G・H地区）

(2) 鉄筋露出、コンクリート表面・部材の損傷等

ダムの機能診断調査では、表 5.4、5.5 に示したとおりであり、漏水、コンクリート表面・部材の損傷等に関する評価基準には、個々の定量的な基準はない。

安全性評価・判定では、各変状が「ある、確認される、認められる」というような判断（表 5.4）による合計点数（表 5.5）を用いて実施している。

ここで、変状状態を撮影した画像事例は、写真 5.5、5.6 に示すとおりであり、撮影カメラとレンズ焦点距離、撮影距離の組合せによる画像比較を実施した。

計測型(f=50mm)では、小規模な鉄筋露出が確認できないものの、一定規模の損傷、剥離、目地の劣化等は確認可能である。また、計測型(f=135mm)では、損傷及び剥離、鉄筋露出等の詳細な画像が得られ、変状の度合いや詳細状況が把握可能である。

しかし、計測型(f=135mm)では、1 枚の撮影写真（画郭）に収まる被写体の範囲が小さく（被写体までの距離 10m の場合で収まる範囲は 3m×2m 程度)、施設の全体撮影に利用した場合には、多大な労力と熟練度の高い操縦技術を要する。

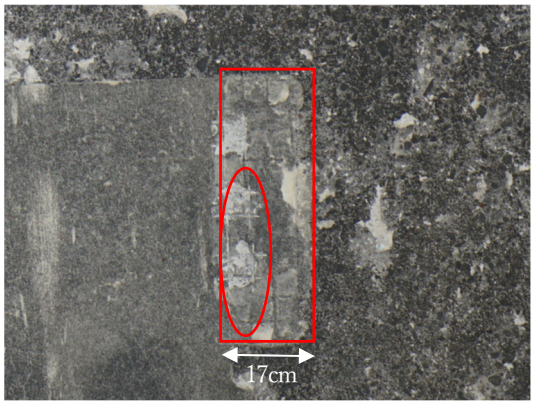
このため、活用としては、計測型(f=50mm)で損傷箇所など変状状況を撮影した後、必要に応じて計測型(f=135mm)を用いた詳細調査を実施するなどの方法が妥当であると考えられる。

すなわち、定性評価では、二次調査レベルで通常計測(f=50mm)を実施し、詳細調査レベルが必要な箇所では、望遠計測(f=135mm)を実施するといった活用方法が有効である。また、簡易型（f=3.6mm）では、一定程度の大きな変状抽出が可能であるため、災害発生時等における補修・補強が必要な緊急点検には適用可能と考えられる。

① 幅 17cm 程度の欠損/鉄筋（ﾜｲﾔｰﾒｯｼｭ）露出（H地区：洪水吐導流部コンクリート）

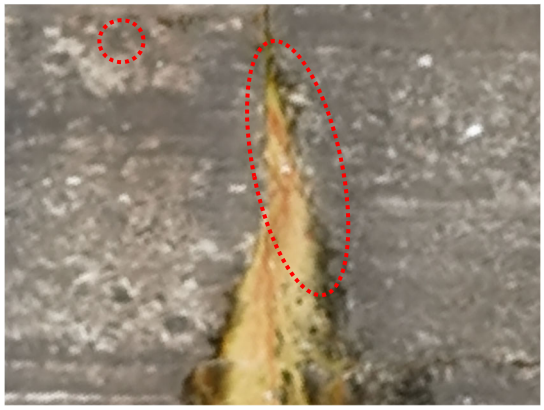
【計測型 UAV（f=50mm）、距離=55m】

【計測型 UAV（f=135mm）、距離=10m】



② 欠損、目地劣化、鉄筋露出（G地区：洪水吐導流部コンクリート）

【計測型 UAV（f=50mm）、距離=65m】



【計測型 UAV（f=135mm）、距離=10m】

③ 損傷/剥離（G地区：洪水吐導流壁コンクリート）

【簡易型 UAV（f=3.6mm）、距離=30m】

【計測型 UAV（f=50mm）、距離=10m】

写真 5.5 損傷/剥離/鉄筋露出等画像の撮影距離・焦点距離別比較(G・H地区)

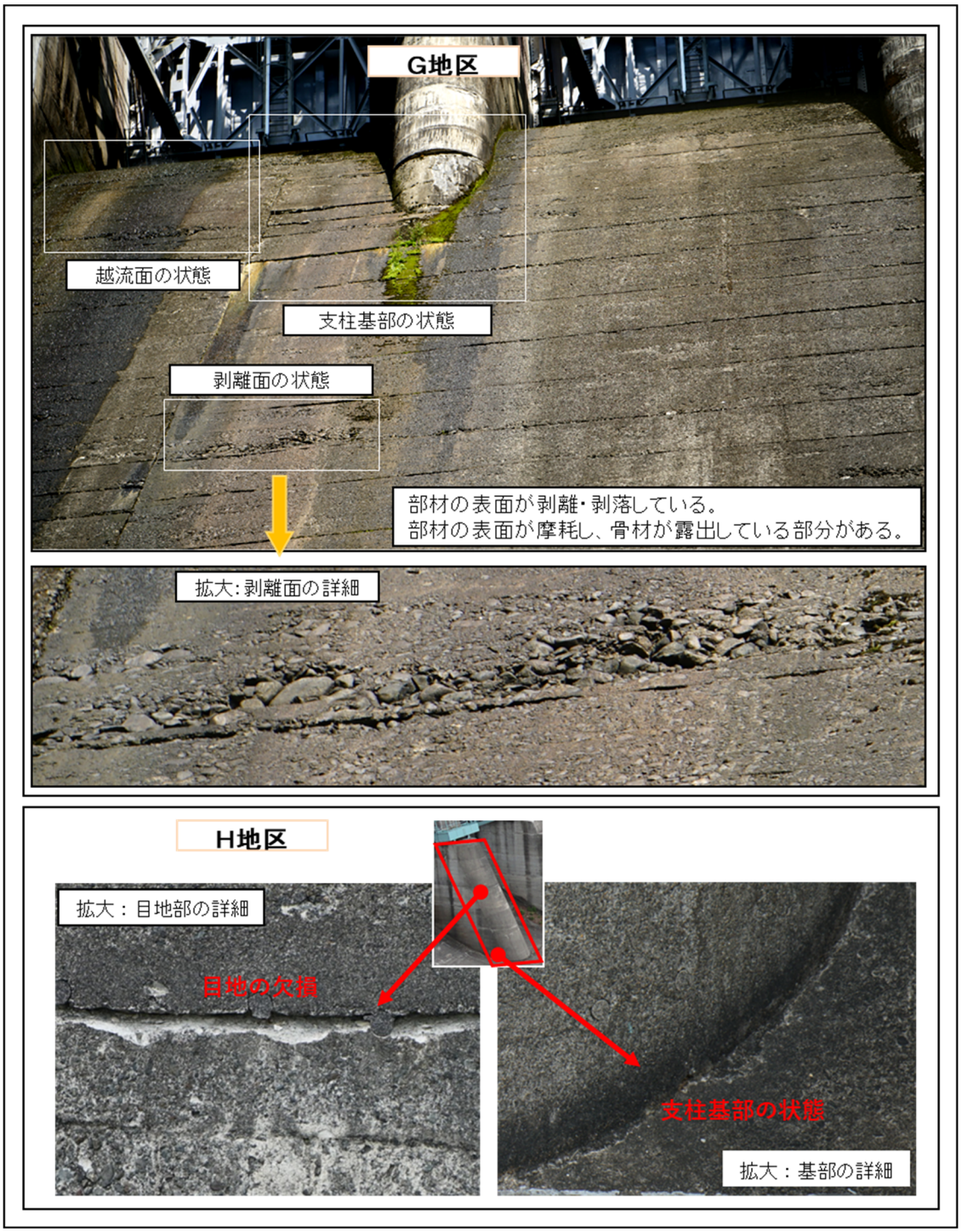


写真 5.6　部材損傷部の拡大画像（f=135mm）（G・H地区）

(3) 近接撮影

Ｉ地区では、減勢工直立壁、ダム堤頂部に築造されているゲート操作・観測等を行う建屋があるため、これらの周辺からの鉛直近接撮影（撮影距離 10m、20m）を焦点距離別に実施した（前出図 5.2 参照）。

撮影結果は、写真 5.7～5.9 に示すとおり近接撮影では、上空からの通常撮影で影となっていた建屋基部についても、変状が明瞭に確認できている。

変状の有無の確認では、簡易型（f=8.8mm）でも可能であるが、変状の詳細な状態把握には、計測型（f=50mm、135mm）の適用により、十分な点検が可能であった。

したがって、上空からの通常撮影（水平・垂直）で確認できない施設箇所の撮影、補完には、建屋等の施設を側面から鉛直に近接撮影する手法が有効である。

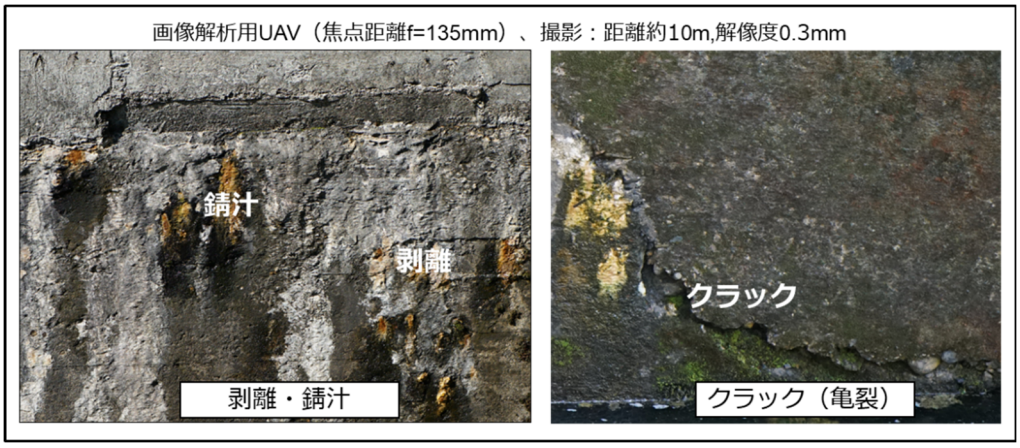


写真 5.7　　減勢工壁面の撮影画像（撮影距離約１0m）

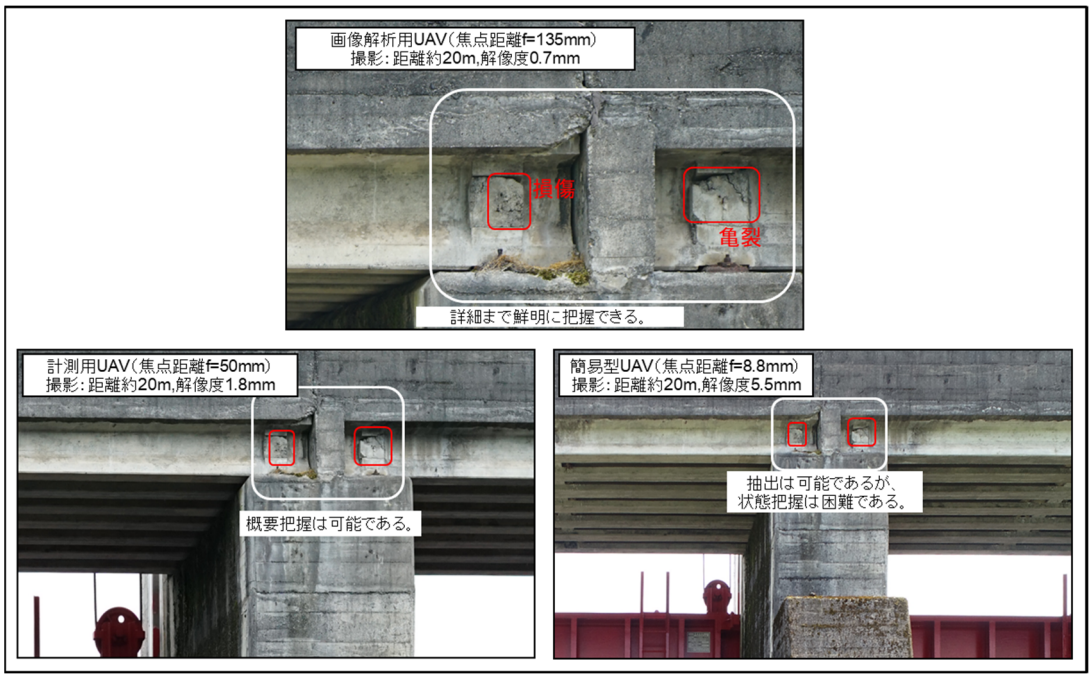


写真 5.8　　焦点距離別における建屋基部の撮影画像（撮影距離約 20m）

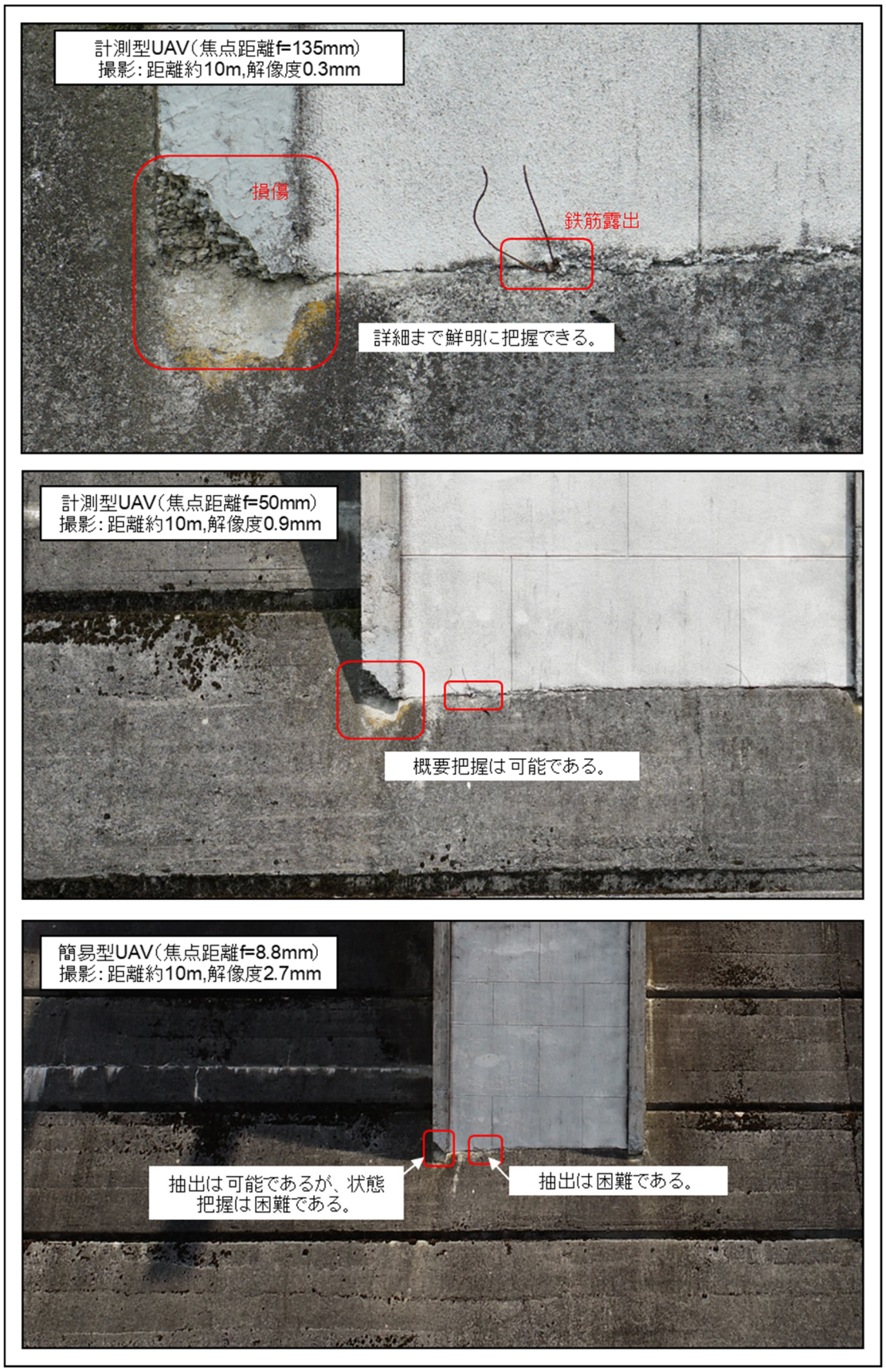


写真 5.9　　焦点距離別における建屋基部の撮影画像（撮影距離約 10m）

5.3.2　3 次元点群データ

(1) オルソ画像

オルソ画像は、UAV 計測で撮影した画像ならびに SfM（Structure from Motion）を用いた 3 次元解析より得られる 3 次元点群データ（物体の形状を 3 次元座標(x, y, z)）の位置精度を検証した上で作成される。

このため、作成されたオルソ画像は、写真上の像の位置ズレをなくし空中写真を地図と同じく、真上から見たような傾きのない、正しい大きさと位置に表示される画像に変換（以下、「正射変換」という）されている。

したがって、その利点としては、画像上で位置、面積及び距離などを正確に計測可能であり、地図データなどと重ね合わせて利用することができる地理空間情報という点である。また、目視観察として利用するには、位置精度の他に、画面上の変状状況を確認するため、画像解像度が重要となる。

このため、変状の定量評価には、適切な地上解像度に設定した UAV 計測より生成される高精度なオルソ画像の活用が有効であり、計測では、点検用途に併せて、計測型 UAV(f=50mm)及び簡易型 UAV(f=3.6mm、8.8mm)を使い分けることが望ましい。

ダムは、急峻な谷形状に設置され、地形による突風等の影響があるため、通常撮影では、安全面から低高度飛行が困難となる。したがって、ダムの撮影では、撮影高度を高くする必要性があり、結果的には解像度が低下する結果となる。

ここで、撮影高度 40m 以上における事例としては、写真 5.10～5.12 に示すとおりであり、計測型（f=50mm）では、どのケースにおいても縮尺 1/100 以上の画像で目地損傷の形状を判別・計測することが可能である。一方、簡易型(f=3.6mm、8.8mm)では、いずれの縮尺においても目地の開きなどの状態を判別する程度であり、計測することは困難である。

すなわち、点検時には、①3 次元計測（定量評価）を目的とする撮影では計測型（f=50mm)、②定性評価を対象とする画像取得のみを目的とした特定箇所のスポット撮影では、簡易型(f=3.6mm、8.8mm)を利用するというような用途にあわせた機種選定が重要となる。

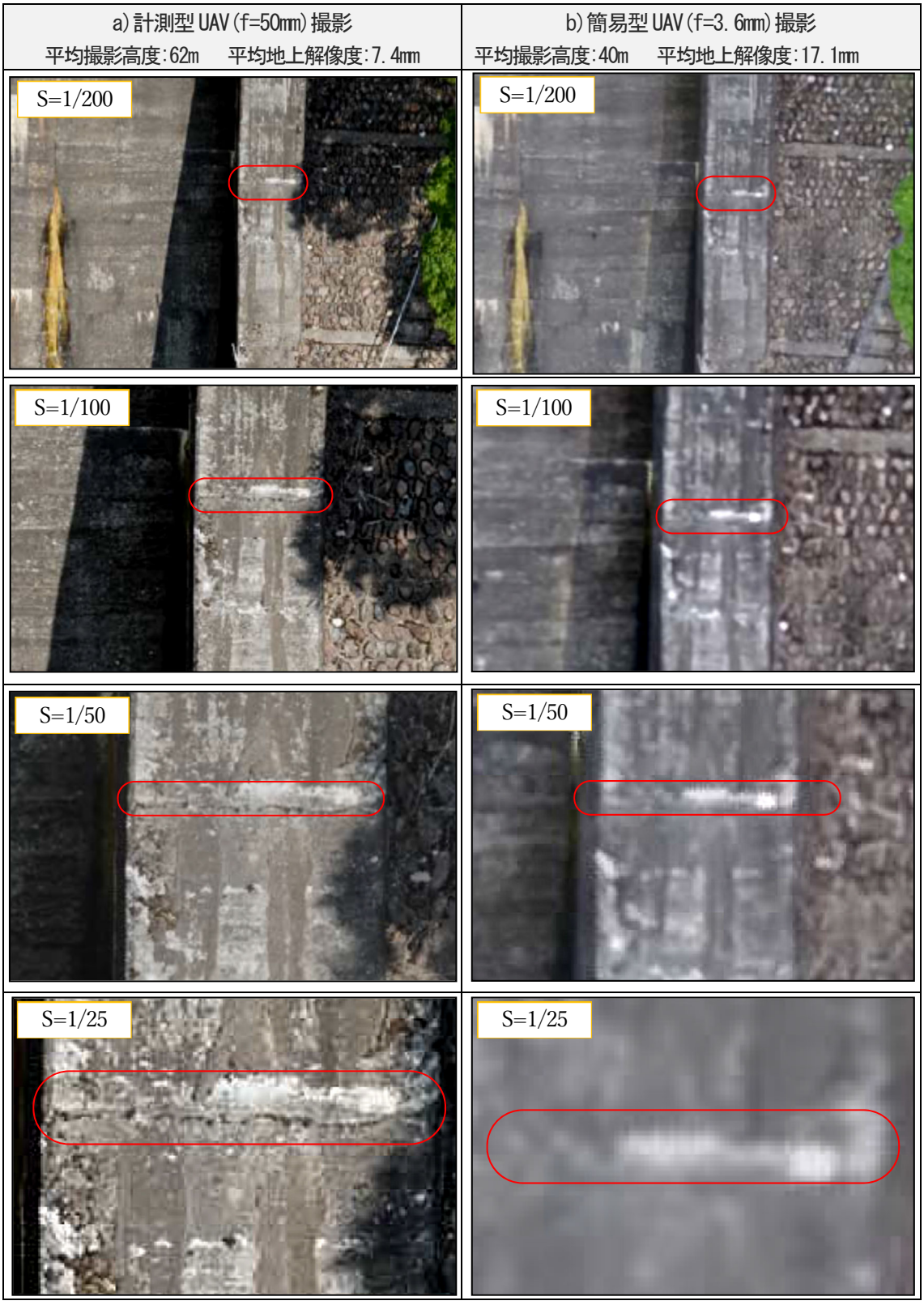


写真 5.10　デジタルオルソ画像の解像度比較（G地区:目地の損傷）

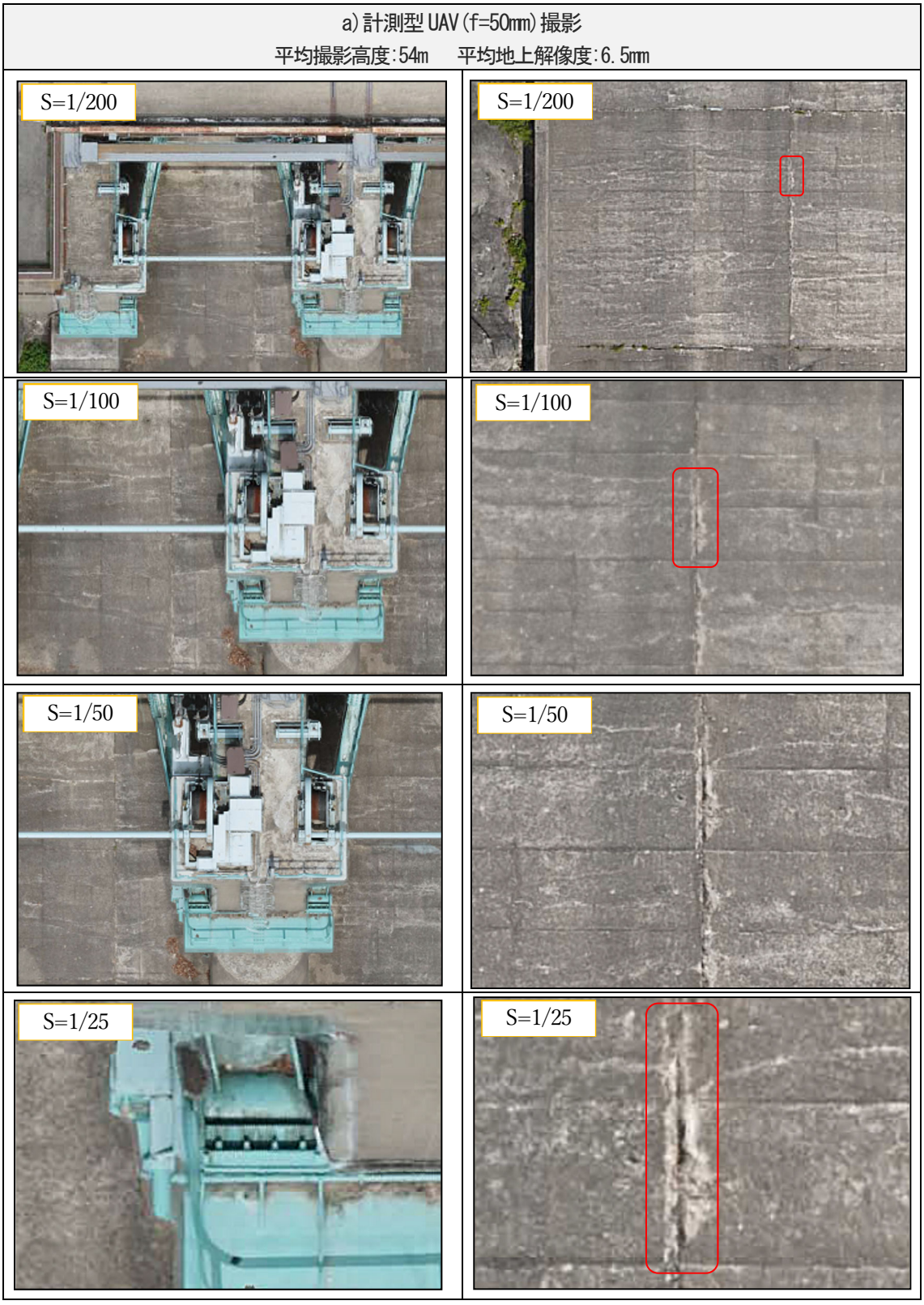


写真 5.11　デジタルオルソ画像の解像度比較（H地区:目地の損傷）

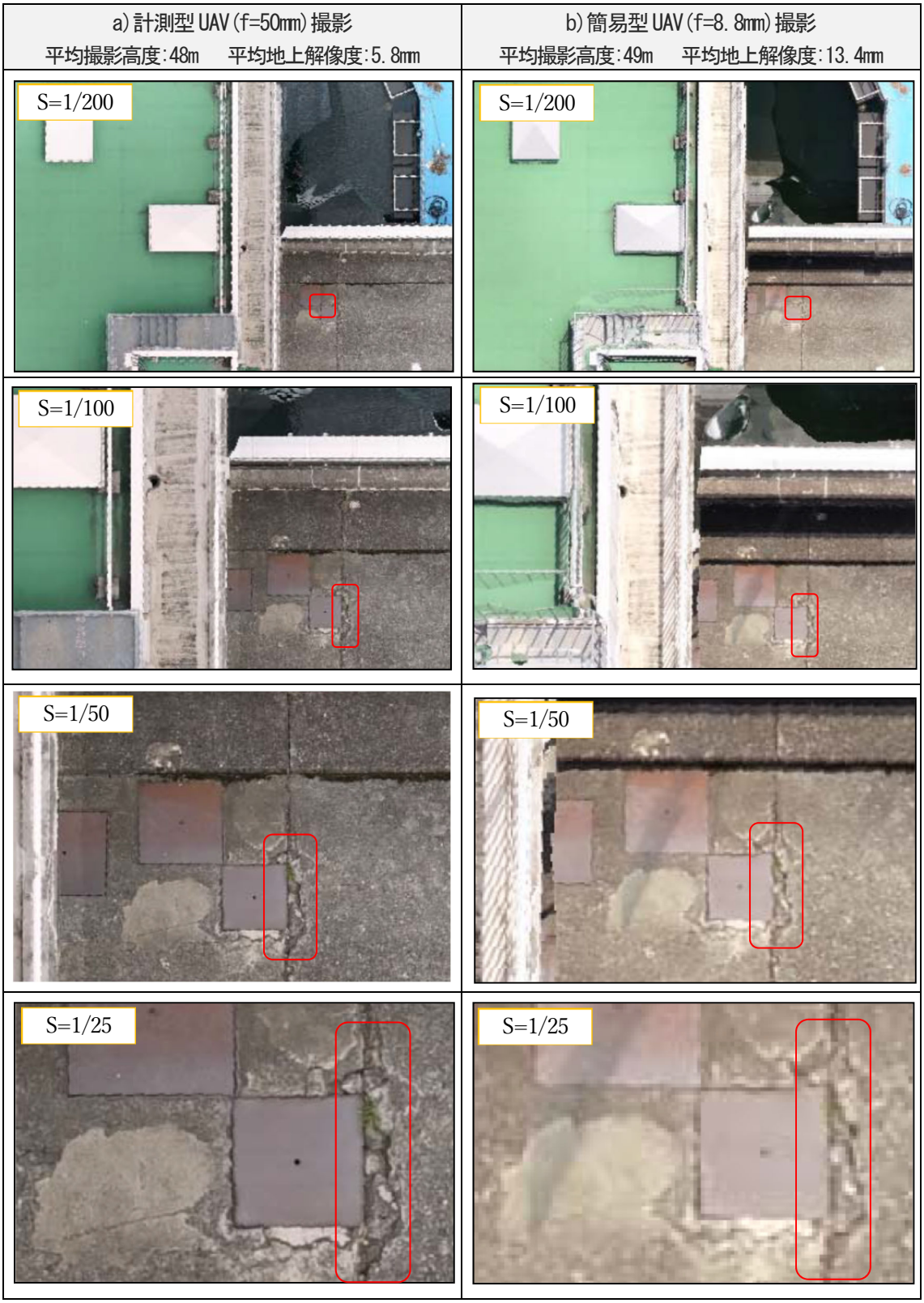


写真 5.12　デジタルオルソ画像の解像度比較（Ⅰ地区：目地の損傷）

(2) 施設形状

3 次元点群データの活用方法としては、位置精度が約 1cm 前後未満であることより、施設の形状計測に有効であり、事例では、実測測量と 3 次元点群データの画像解析より、それぞれ作成したダムの平面図を比較検証し、3 次元点群データより作成した横縦断図の活用について検討してみた。

1) 平面形状

画像事例は、写真 5.13～5.15 示すとおりであり、計測型 UAV(焦点距 f=50mm)で撮影し、標定点を使用して変換したオルソ画像である。

検証では、評定点間の実測測量とオルソ画像上で計測した距離を比較してみたが、両者の距離差は、最大 1cm 程度となっていた。

すなわち、構築したオルソ画像では、平面形状（相対的位置関係）における図上計測精度が高いことより、1cm オーダーでの堤体の法線・施設形状の変形など、詳細な平面形状（長さ）の計測が可能になると判断される。

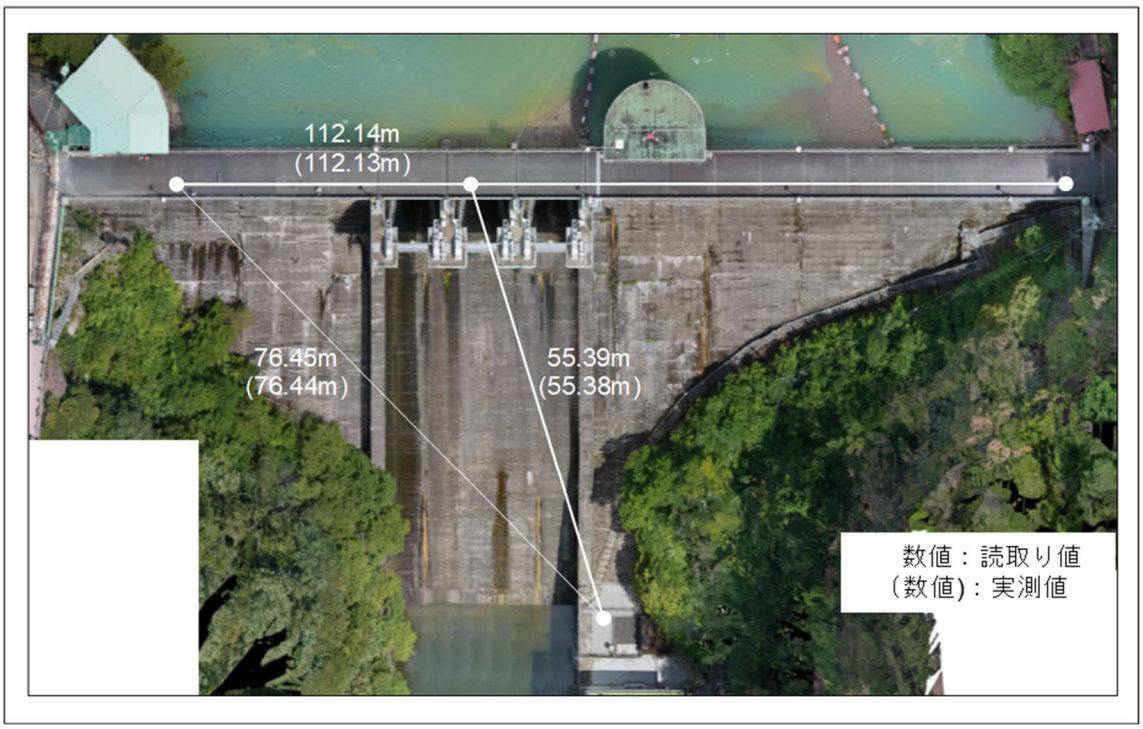


写真 5.13　オルソ画像における平面形状の精度（G地区）

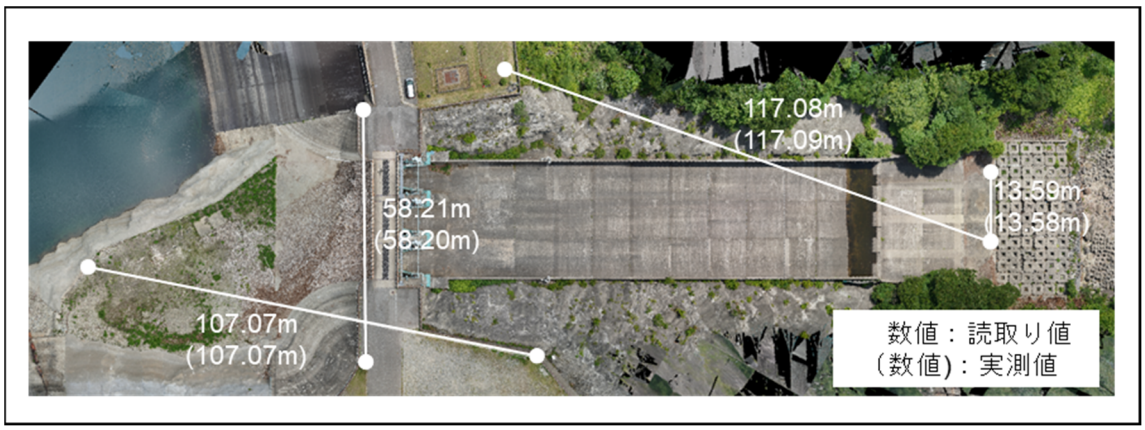


写真 5.14　オルソ画像における平面形状の精度（H地区）

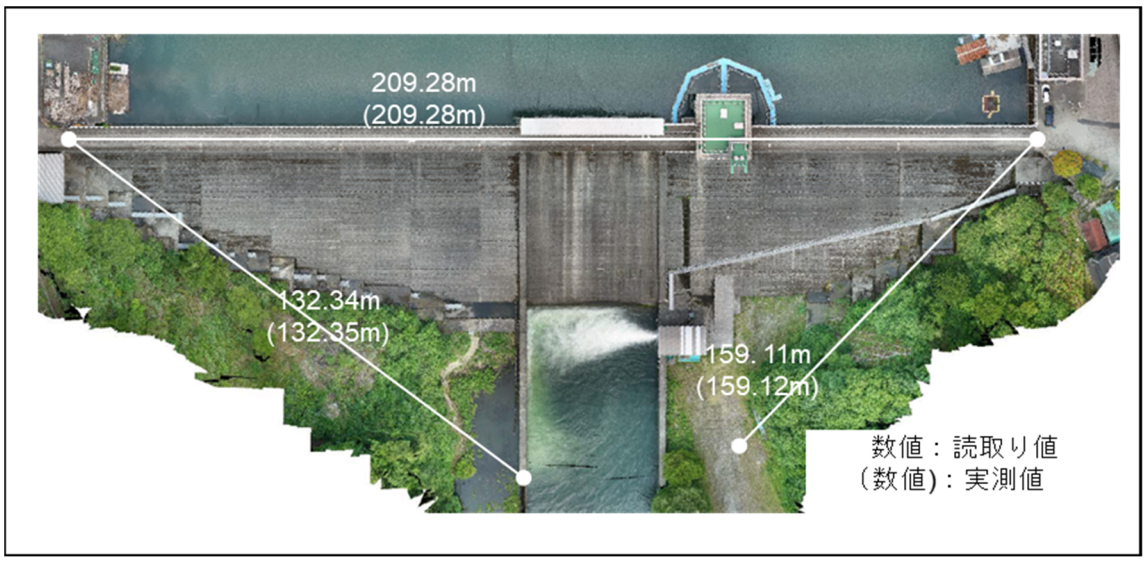


写真 5.15　オルソ画像における平面形状の精度（ I 地区）

2）縦横断形状

① G地区

３次元点群データにおける縦横断形状の再現結果は、図 5.7 に示すように、洪水吐の縦断形状（B-B’断面）は、天端高が 244.0m、下端が 191.8m の標高であると計測できる。この結果は、洪水吐側壁の縦断形状（C-C’断面）と比較しても、大きな変形がないことが確認できる。

次に、横断形状（A-A’）について確認すると、両側の側壁に大きな標高差はなく、平坦性が維持されていることが確認できる。その洪水吐の標高差は、放水路の中央底部(222.9m)と側壁上面（227.7m、227.9m）の計測より、約 5.0m と判断される。

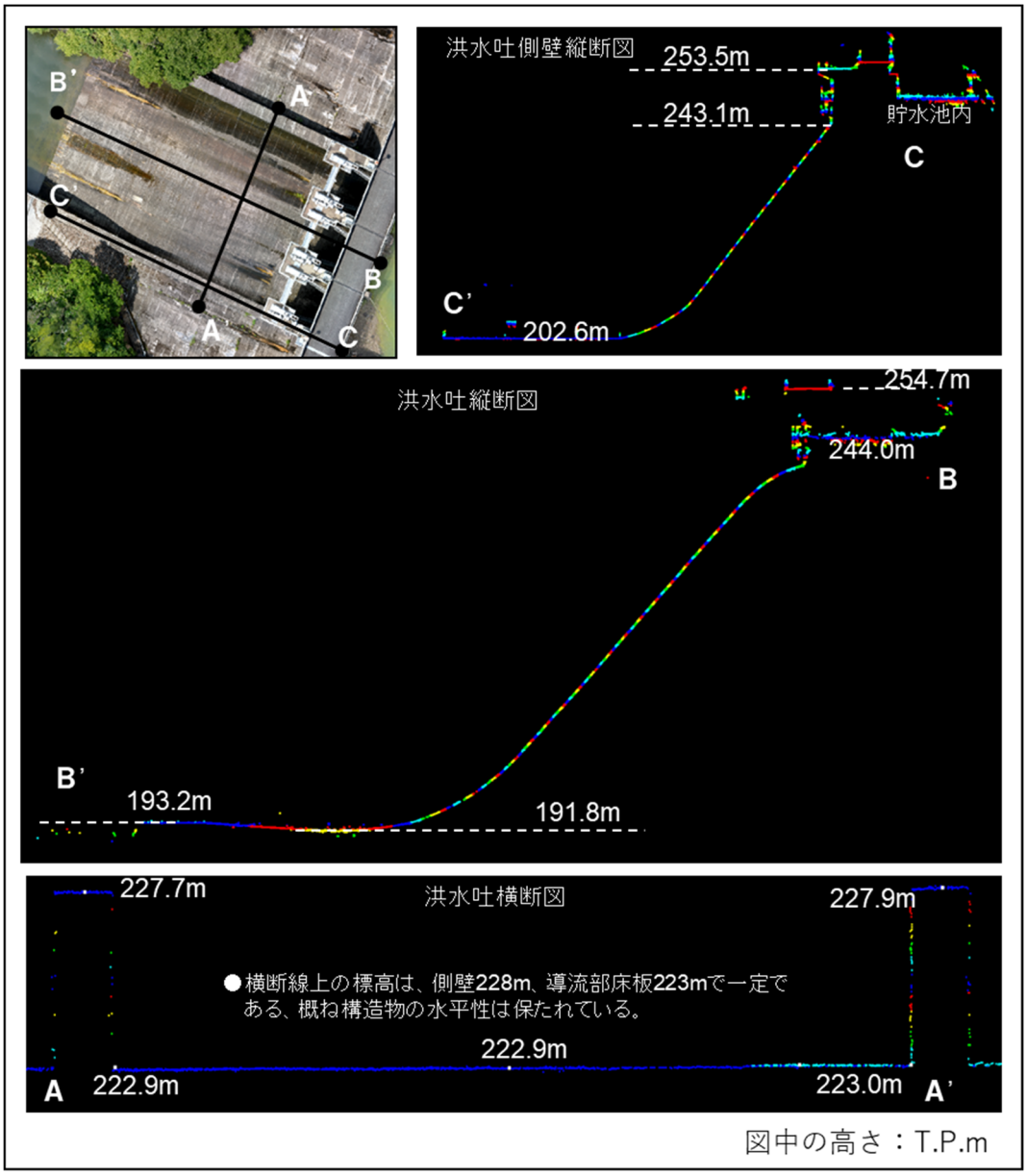


図 5.7　　３次元点群データによる縦横縦断（G地区）

縦横断図に活用した３次元点群データは、標高分布を面的に視覚化することにより、変状の有無を観察することができる。図 5.8 は、ダム堤頂部の天端、洪水吐減勢工での事例であるが、天端面（254.6m～254.7m）では中央部で高く両側で低くなる地形特性、減勢工（192.8m～193.0m）では、局所的に 20cm 程度の起伏（損傷）が存在することが確認できる。

このように、３次元計測では、点・線を計測する従来方法に比較して、変状の範囲、変位量を面的に把握が可能な点で有効な手法である。

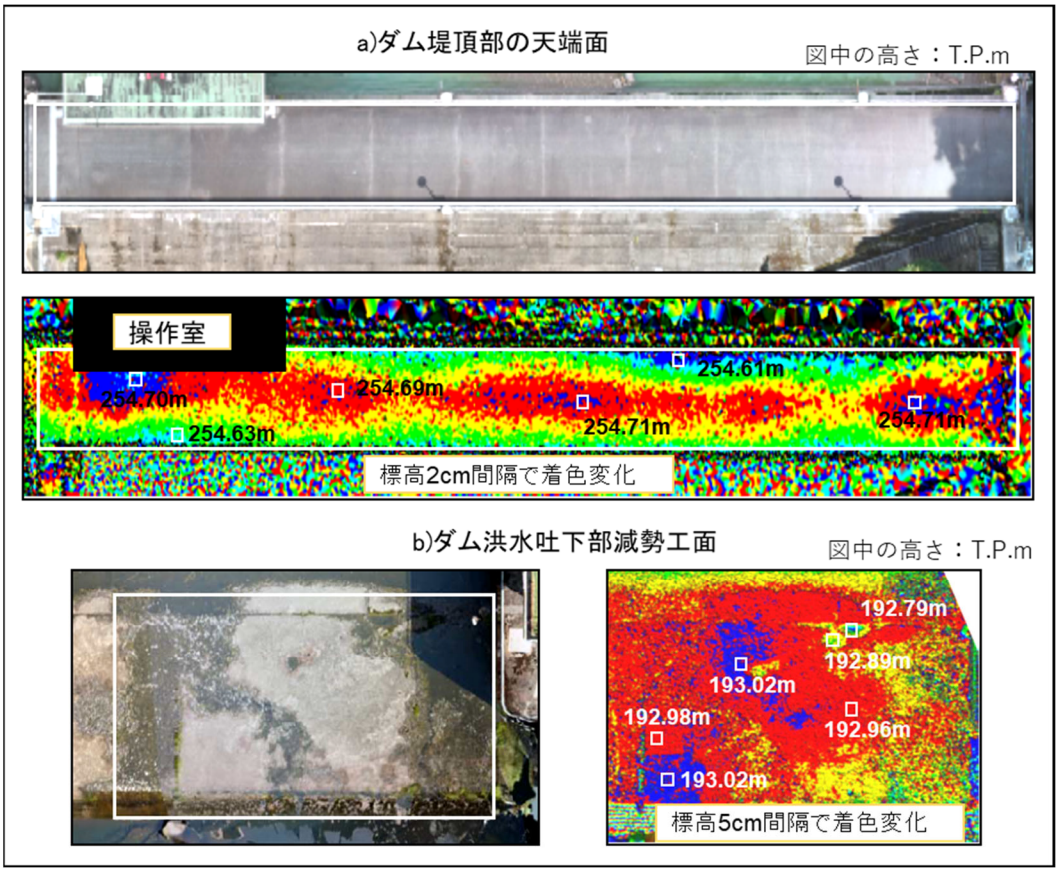


図 5.8　３次元点群データの活用による変状点検事例（ダム天端、洪水吐）

② H地区

３次元点群データにおける縦横断形状の再現結果は、図 5.9 に示すように、洪水吐の縦断形状（A-A’断面）は、天端高が 740.0m、下端が 674.6m の標高であると計測できる。また、横断形状（B-B’）は、洪水吐放水路（737.3m）と側壁上面（742.1m）と、平坦性が維持されていると確認できる。これら縦横断面の計測結果からは、大きな変形がないことが確認できる。

一方、減勢工の横断形状（C-C’）では、設置ブロックの形状が反映され、1m 前後の凹凸を計測可能となっている。

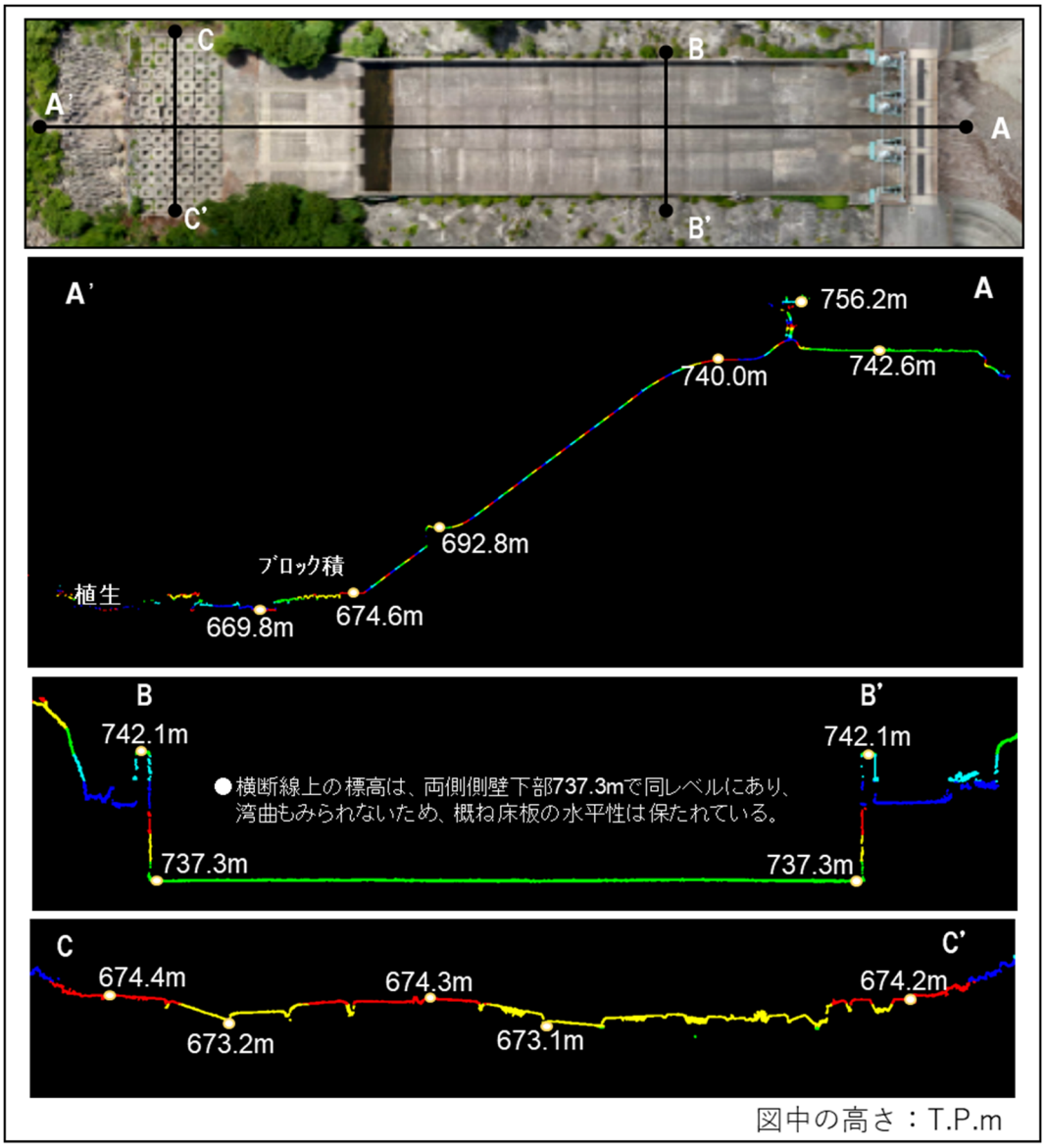


図 5.9　　３次元点群データによる縦横縦断（H地区）

③ Ⅰ地区

３次元点群データにおける縦横断形状の再現結果は、図 5.10 に示すとおりであり、ダム堤頂部の横断図（A-A’）では、天端高は 238.3m～238.4m と計測される。また、ダム形状は、堤体縦断図（C-C’）、洪水吐側壁縦断図（D-D’）の標高より、大きな変形がないと確認できる。なお、洪水吐の形状は、横断図（B-B’）の計測結果より、両側壁の上面（217.22m、217.36m）、放水路(213.55～213.60m)の標高がほとんど変わらないことより、平坦性が維持されていると確認できる。

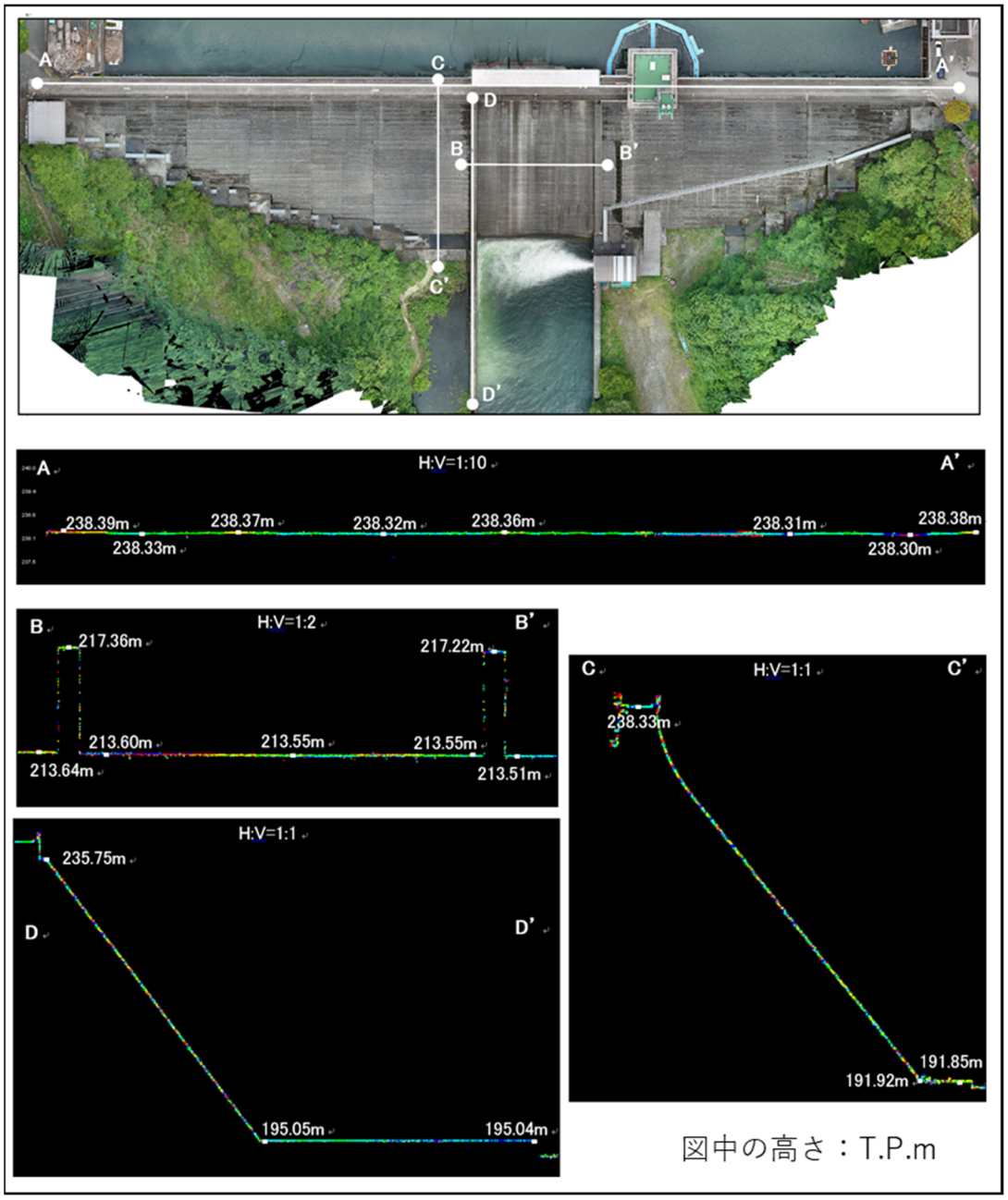


図 5.10　　３次元点群データによる縦横縦断（Ⅰ地区）

3）護床ブロックの設置状況

減勢工の護床ブロックの状況は、オルソ画像で確認すると、図 5.11 に示すとおりである。画像では、中央部①でブロック配列の乱れ、上流側②でブロックの一部破断、下流側③で巨石の流下に伴う全体的な散乱などの状況が確認できる。

このように、オルソ画像は、施設の設置状況を詳細に把握することが可能となり、効率的で有効な点検手法として活用できる。

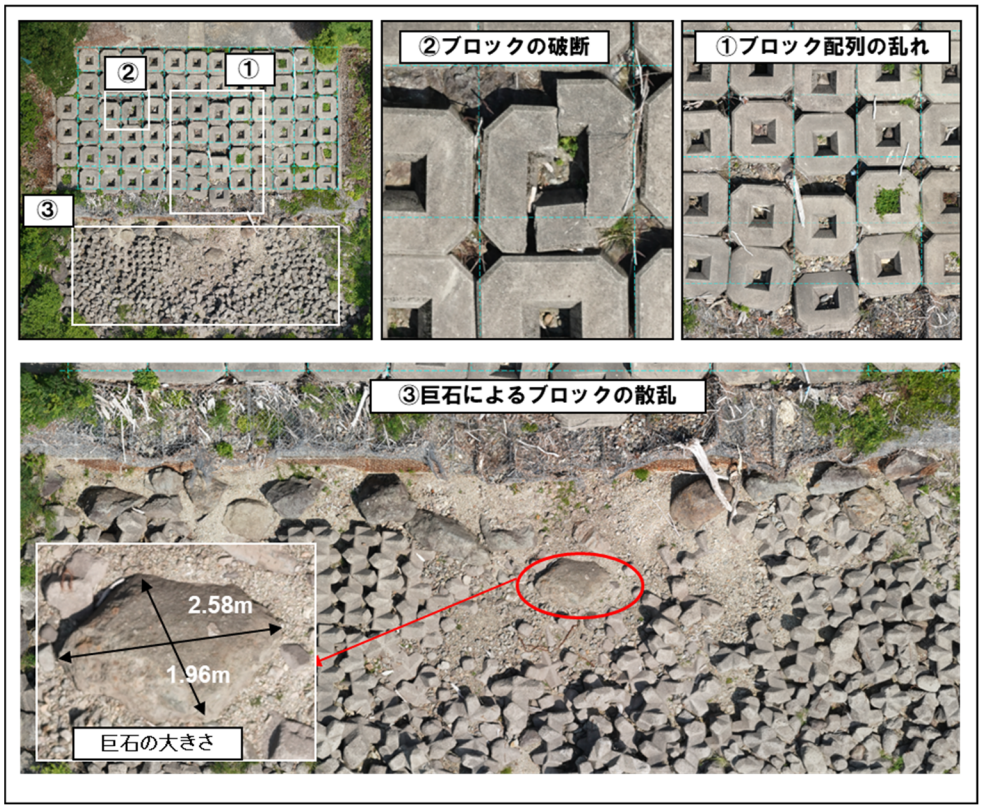


図 5.11　オルソ画像の活用による護床ブロックの確認事例

4）施設変形

本事例は、オルソ画像の活用により、構造物の変形を確認したものである。具体的には、図 5.12 に示したように、画面上において、直線形状の構造物の縁をトレースした線（黄色実線）と、縁の法線として見立てた線（黄色破線）を比較することにより、構造物の変形の有無を確認した。

この方法によると、洪水吐側壁は、上端から下端に対して直線形状であるとすると、中央部で外側へ約 20cm 程度の歪み（ズレ）が生じていると計測される。

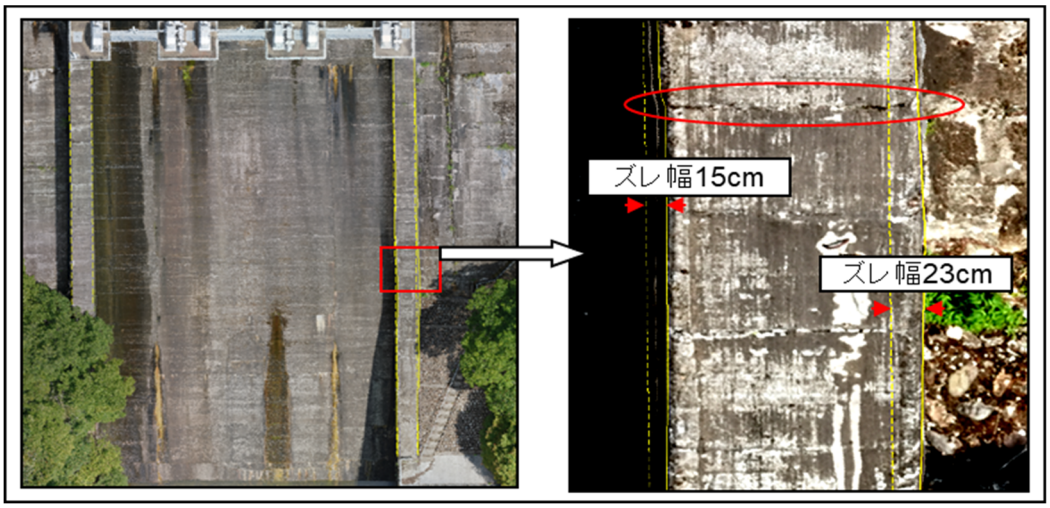


図 5.12 オルソ画像の活用による構造物法線の歪みの計測例(G地区：洪水吐)

(3) 変状計測

1) 損傷

本事例は、３次元点群データを標高 20cm 毎に区分した段彩図を活用したものであり、損傷箇所は、図 5.13 に示すように、段彩図上の標高区分（等高線）に凹凸状の乱れとして抽出される。

損傷抽出箇所は、指定した断面（A-A',B-B'）上の点群データの座標より、標高分布を作成することにより、損傷箇所の深さが計測できる。

すなわち、ケース①に示す損傷では、断面上の高低差より 20cm 程度の深さ、ケース②では、数 cm～10cm 程度の深さとして確認できる。

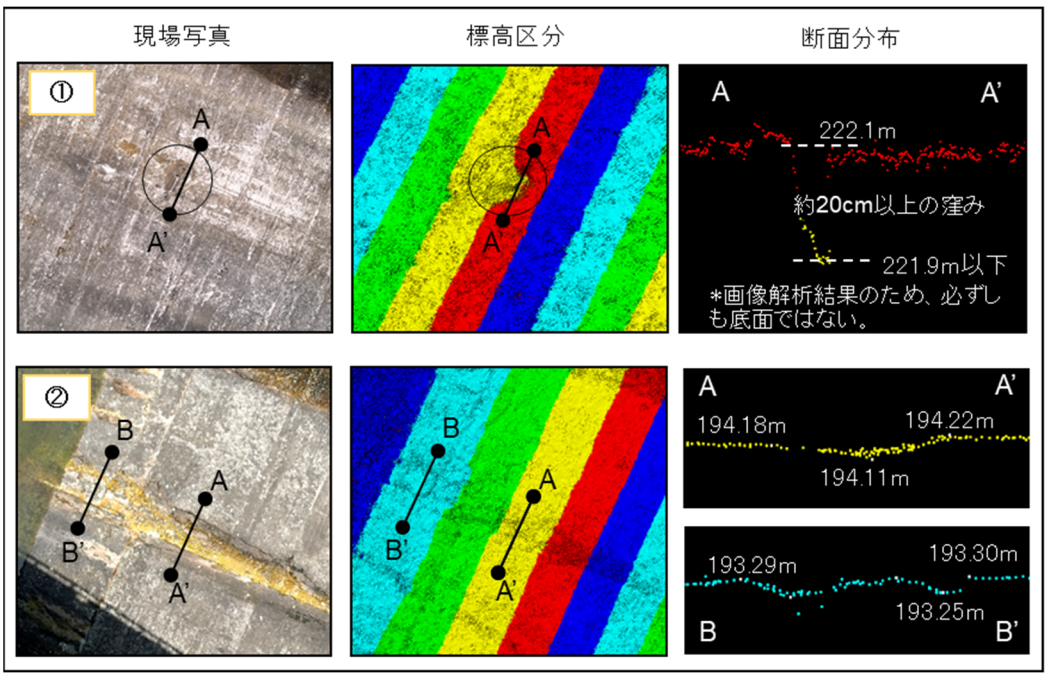


図 5.13　　損傷（深さ）の計測事例（G地区）

2）剥離・摩耗・鉄筋露出

本事例は、３次元点群データを用いた断面図を活用したものであり、剥離・摩耗箇所は、図 5.14 に示すように、断面分布図の点群データの座標（位置、標高）より算出する。すなわち、ケース①では、延長 3.6m、幅 0.8m、深さ 10cm 程度の剥離が生じており、ケース②では、床板全体にわたり、最大 8cm 程度の摩耗が生じていることが確認できる。

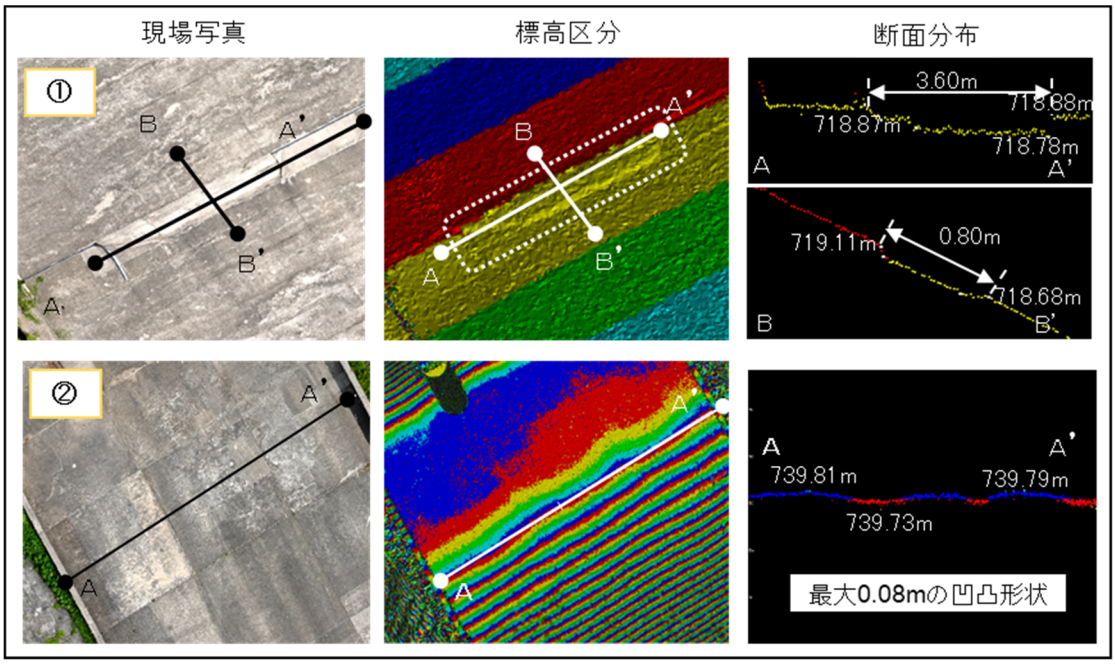


図 5.14　　剥離・摩耗の計測事例（H地区）

また、写真 5.16 に示す事例は、オルソ画像上における洪水吐コンクリートの剥離、鉄筋露出を計測したものである。この画像は、洪水吐コンクリート面が大きく傾斜している上に、洪水吐の施設が大きいため、正射変換したオルソ画像上の変状形状が、実際の形状に対して歪みが大きく生じる可能性もある。

したがって、オルソ画像の作成及び活用には、洪水吐の構造に適した撮影角度、投影面などに留意する必用があるが、人のアクセスができない箇所での変状の形状把握には非常に有効である。

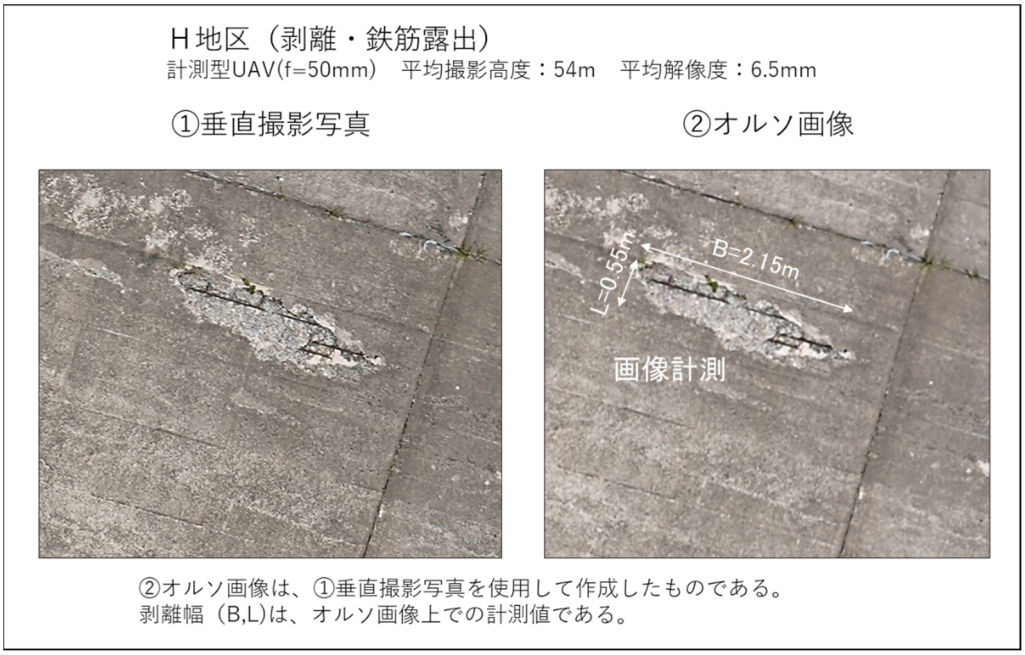


写真 5.16　　オルソ画像の活用による剥離形状の計測事例（洪水吐）

(4) 今後のオルソ画像の活用

オルソ画像を活用した変状点検としては、図 5.15 に示すとおりであり、オルソ画像の作成には、計測用（f=50mm）の画像を活用した。

この活用事例では、画像上で幅 0.5mm 程度以上と計測されたひび割れ（クラック）を抽出できたが、①漏水による壁体の変色、②壁体表面が剥離により粗粒子状になっている箇所では、抽出できていないケースも認められた。

すなわち、平面的に位置精度が保たれているオルソ画像では、一定以上の条件を満足するなら、ひび割れの規模、延長などを図上計測することが可能となる。

ただし、実際の変状は、斜面上に形成されているが、計測したオルソ画像は、水平面に投影したものであり、実際の変状規模とは誤差がある。特に、この誤差は斜面縦断方向の変状の長さ、斜面横断方向の変状の幅等に影響を与える。

このため、ダムの変状（堤体斜面、洪水吐斜面）をオルソ画像から計測する場合には、「施設斜面（UV 面）に垂直となるようなカメラ位置での斜め撮影」、「施設斜面（UV 面）に投影したオルソ画像作成」に留意することが望ましい（図 5.16）。

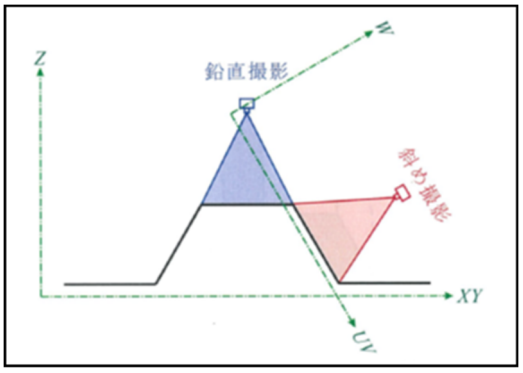


図 5.16　ダム斜面での撮影方法等

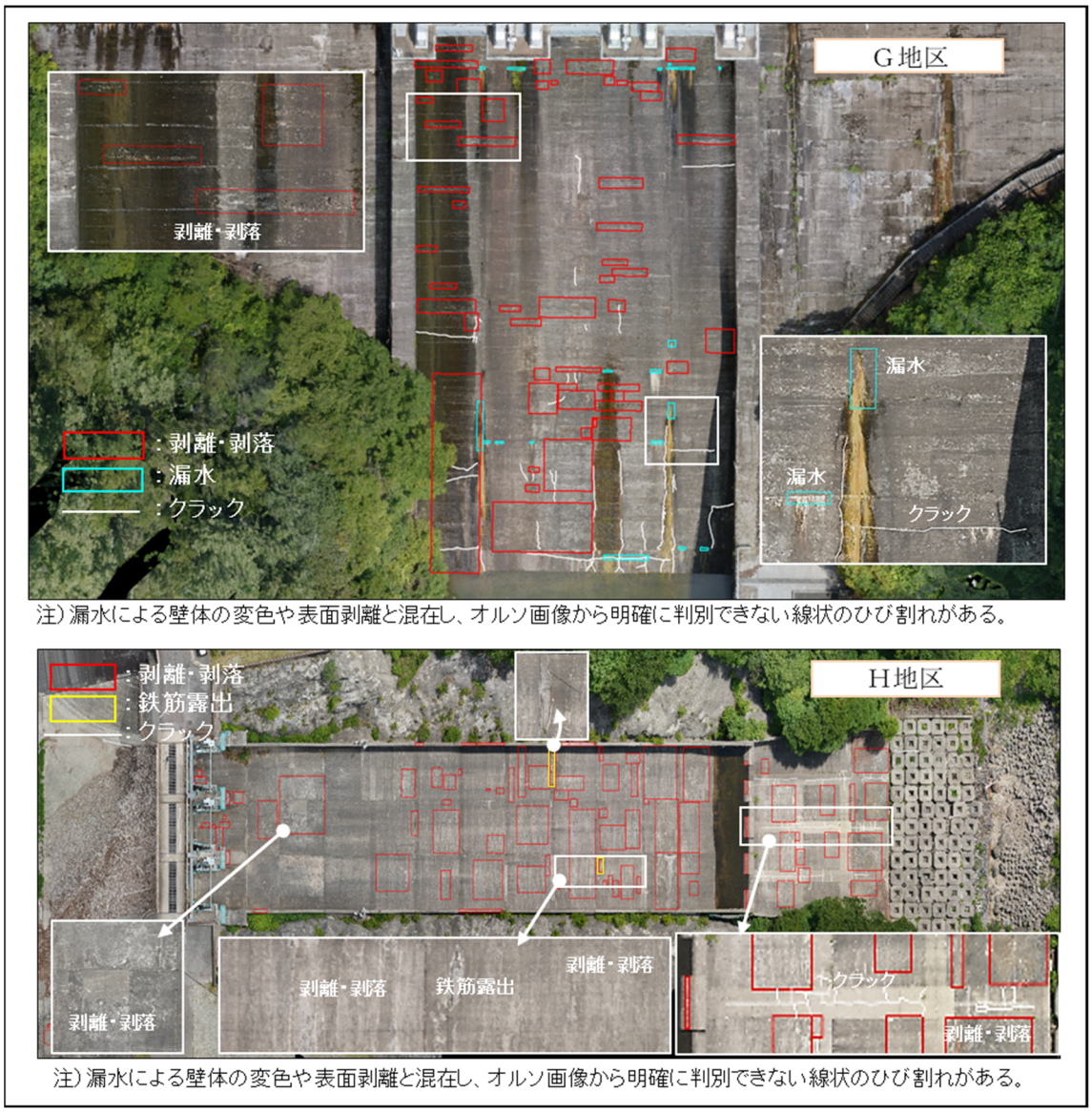


図 5.15　オルソ画像を活用した変状点検事例（G・H地区）

5.3.3 施設点検への適用結果

施設点検への適用結果は、表5.7に示すように、計測型(f=50mm)では、幅0.2mm～0.3mm程度の微細なひび割れ（クラック）の抽出は困難であるが、幅0.5mm以上のひび割れや、ひび割れ以外の変状（剥離、損傷等）の抽出・確認も可能であり、２次調査レベルでの点検に概ね適用することが可能である。

また、計測型（f=135mm）は、幅 0.2mm～0.3mm 程度の微細なひび割れについても抽出・確認可能で２次調査レベルでダム点検に適用が可能である。

ただし、0.2mm 程度の微細なひび割れ抽出を対象とする場合には、距離 10m 程度の近接撮影を実施する必要があり、撮影範囲の規模から撮影枚数が多くなると同時に、高度な操縦技術（マニュアル撮影）が必要となる。

なお、簡易型では、災害発生時等に緊急的な補修・補強が必要な比較的大規模な変状については抽出・確認が可能であり、これらを対象とした点検には適用が可能と考えられる。

表 5.7　　ダム点検での UAV 計測の適用性（現地作業レベル）

確認内容			簡易型ＵＡＶ (f=3.6mm, 距離=10m)	計測型ＵＡＶ (f=50mm, 距離=40m)	計測型ＵＡＶ (f=135mm, 距離=10m)
			単画像、オルソ画像 ３次元点群データ	単画像、オルソ画像 ３次元点群データ	単画像
堤体	クラック、漏水、表面の損傷	①水平打継目から漏水がみられる	**○有無の判定（抽出）** 幅10mm程度であれば、部分的、全体的の区分は可能であるが、壁体が陰となっている場合は、抽出が難しいと思われる。 クラックは、漏水跡や析出物による変色、表面が摩耗している等、他の変状と重複する場合は抽出が困難である。 **○規模の計測** 平面的な大きさはデジタルオルソからの計測で可能である。クラックは、幅の定量的な計測は、周辺物との比較等による定性的な計測となる。 段差や起伏量は、三次元データにより数cm単位で計測が可能である。	**○有無の判定（抽出）** 幅0.5mm以上であれば抽出が可能であるが、壁体が陰となっている場合は、抽出が難しいと思われる。 クラックは、漏水跡や析出物による変色、表面が摩耗している等、他の変状と重複する場合は抽出が困難である。 **○規模の計測** 平面的な大きさはデジタルオルソからの計測で可能である。クラックは、幅の定量的な計測は、周辺物との比較等による定性的な計測となる。 段差や起伏量は、三次元データにより1cm単位で計測が可能である。	**○有無の判定（抽出）** 幅0.2mm以上であれば抽出が可能である。 **○規模の計測** 平面的な大きさは、周辺物と比較することで定性的な計測が可能である。 高さ（深さ）方向の変状規模の計測は困難である。
		②堤体横継目から漏水がみられる			
		③表面に連続したクラックがある			
		④コンクリートの表面が剥離している			
		⑤堤体上の越流部が摩耗し、粗骨材が露出している			
	その他（マニュアル対象外）	天端高不足、断面形状の変形			
洪水吐	クラック、漏水（地山からの漏水）	①表面に線状のクラックが確認される（幅0.2mm以上）			
		②表面に亀甲状のクラックが確認される			
		③エフロエッセンス、遊離石灰が確認される			
		④クラック又は水平打継目から漏水している箇所がある			
		⑤クラック又は水平打継目からの漏水が貯水位と連動して増減している。（対象外）			
		⑥収縮目地から漏水（湧水）がみとめられる			
	部材内部の損傷	①部材から鉄筋が露出している			
		②部材表面に錆汁の発生が確認される			
		③部材表面が膨張している			
	部材表面の損傷	①部材の表面が摩耗し、骨材が露出している部分がある			
		②部材の表面が剥離・剥落している			
		③側壁部にたわみ（天端継目のズレ・手すりの変形）が生じている			
	その他（マニュアル対象外）	導流部、減勢工等の天端高不足、横断形状の変形			

目　　次

6. 頭首工 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 165
6.1 UAV 計測における調査計画 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 167
6.1.1 調査概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 167
6.1.2 調査方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 170
⑴ 留意点 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 170
⑵ 撮影方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 171
⑶ 撮影写真の諸元 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 172
6.2 UAV 計測の活用について ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 173
6.2.1 機能診断調査概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 173
6.2.2 施設点検への適用性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 174
6.2.3 施設点検への活用手順 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 178
6.3 UAV 計測による変状解析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 180
6.3.1 撮影画像（単写真） ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 180
⑴ ひび割れ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 180
⑵ 摩耗・欠損・損傷等 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 183
⑶ 近接撮影 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 185
6.3.2 ３次元点群データ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 189
⑴ オルソ画像 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 189
⑵ 施設形状 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 194
⑶ 変状計測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 197
6.3.3 施設点検への適用結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 203

6. 頭首工

【記載概要】

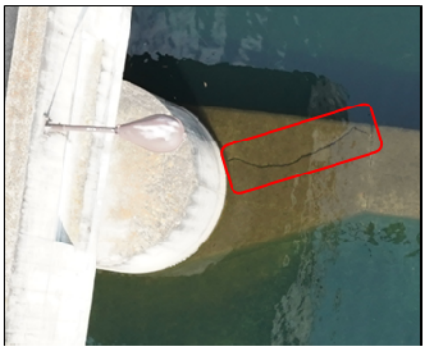
本項は、頭首工・井堰を対象に、UAV 計測による画像、3 次元点群データの活用を検討した事例である。

撮影機種は、ひび割れ抽出や 3 次元計測など高解像度の画像を取得するため、装着レンズを交換可能な一眼レフカメラを搭載した大型の計測型 UAV と、広く普及しているコンパクトデジカメ相当のカメラを搭載した小型で安価な簡易型 UAV を用いた。

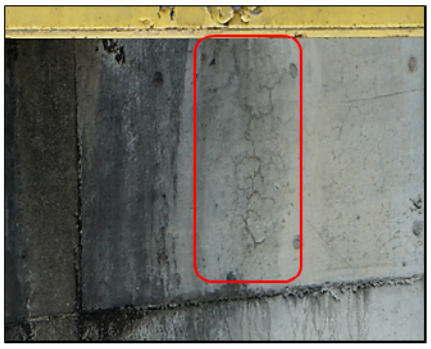
UAV 計測では、だれもが高精度な三次元モデル・オルソを作成できるように、予めプログラミングした飛行コースに沿って GNSS を利用した自律飛行、さらには、施設特性である複雑な形状を考慮した手動による近接撮影を実施した。記載内容は、UAV 計測の調査計画、活用、変状解析の 3 項目から構成されており、画像、3 次元点群データによる変状解析の内容、精度についての事例を紹介している。

施設点検への適用については、「農業水利施設の機能保全の手引き」に従い検討したが、圧縮強度、中性化、打音などを計測する直接的調査以外の目視点検調査で有効活用できることが明らかになった。

大　項　目	中　　項　　目	記　　載　　内　　容
UAV計測による調査計画	調査概要	実証頭首工・井堰の概要
	調査方法	留意点、撮影方法、撮影写真の諸元
UAV計測の活用について	機能診断調査概要	機能診断調査におけるUAV計測の対象範囲
	施設点検への適用性	適用性を検討する施設の変状項目
	施設点検への活用手順	施設点検での活用方法、変状項目の抽出手法・結果の概要、近接撮影
UAV計測による変状解析	撮影画像	ひび割れ、摩耗・剥離・欠損・段差・すりへり等の抽出事例、計測型・汎用型UAVの比較
	3次元点群データ	地形・施設形状、目地の段差、天端の剥離・高さ、施設の抜け上がり、背後地盤の陥没、施設の歪みの事例、オルソ画像の活用
	施設点検への適用結果	頭首工・井堰点検におけるUAV計測の適用性結果



導流堤のひび割れ



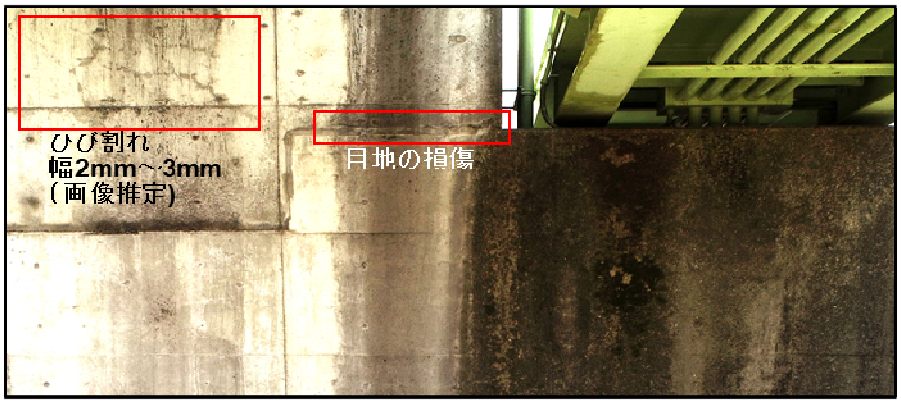
堰柱のひび割れ

堰柱の損傷

護床工目地の損傷

ゲート操作室のひび割れ

ゲート操作室の損傷



堰柱のひび割れ・目地の損傷（管理橋下部からの撮影）

写真 6.1　　頭首工・堰における代表的な変状写真

6.1 UAV 計測における調査計画

6.1.1 調査概要

事例調査は、表 6.1 に示す 4 施設で実施し、対象とした頭首工・井堰は写真 6.2 に示すとおりである。

調査では、表 6.1 に示した調査諸元で、単写真による変状目視、3 次元計測による変状の定量化について検討し、UAV 機種、カメラのレンズ（焦点距離)、撮影高度などによる計測成果を比較した。

表 6.1　　頭首工・井堰調査概要

施設名称	調査年月	使用UAV				構造／調査箇所
		計測型		簡易型		
		50mm	135mm	3.6mm	8.8mm	
J 頭首工	2017.7	○	○	○		鉄筋コンクリート構造 操作室、管理橋、堰柱 堰体、護床工、上流エプロン
K 頭首工		○	○			
L 井堰		○	○	○		
M頭首工	2018.7				○	

注）使用UAVの最下段はレンズの焦点距離を示している。

頭首工・井堰は、河川から農業用水を取水する目的で河道内に設置される施設総称であり、取入口、取水堰、附帯施設及び管理施設などと様々な構造形態から構成されている。このため、撮影方法としては、一定の垂直・斜め撮影だけでなく、目標とした構造物の変状箇所を対象とした低空・鉛直飛行による正確な近接撮影が必要となる。

このため、近接撮影では、形状形態が複雑であるため、撮影位置への正確な移動、ブレの小さな近接撮影(望遠レンズ：135mm)を目的とした手動計測について検討した。

また、管理施設、堰柱などでは、建屋・柱構造があるため、施設変状の点検（広角レンズ：f=3.6mm、8.8mm）を目的とした鉛直飛行による手動計測についても検討した。

頭首工・井堰では、河川の水面（風波・流れ)、近接地域の樹木（風）などによる動き、施設形状による伴う陰影（太陽高度）など自然阻害要因が、3 次元点群モデルの構築時に大きく影響する。このため、撮影時には、正確な 3 次元点群モデルが構築できる時期・時間帯を考慮する必用がある。

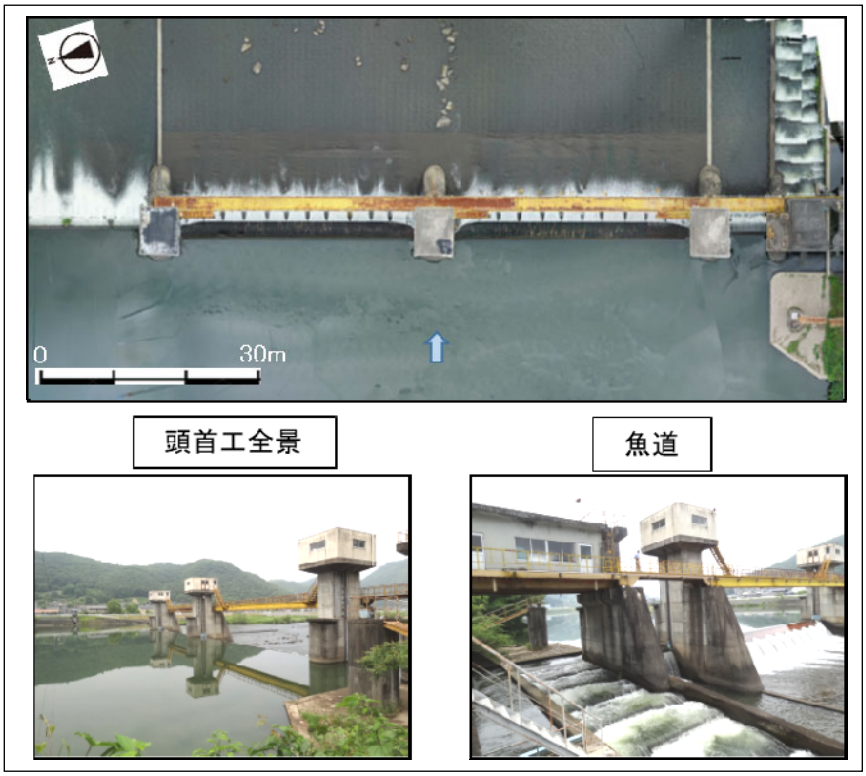


写真 6.2(1)　　頭首工・井堰の調査地区概観（J 頭首工）

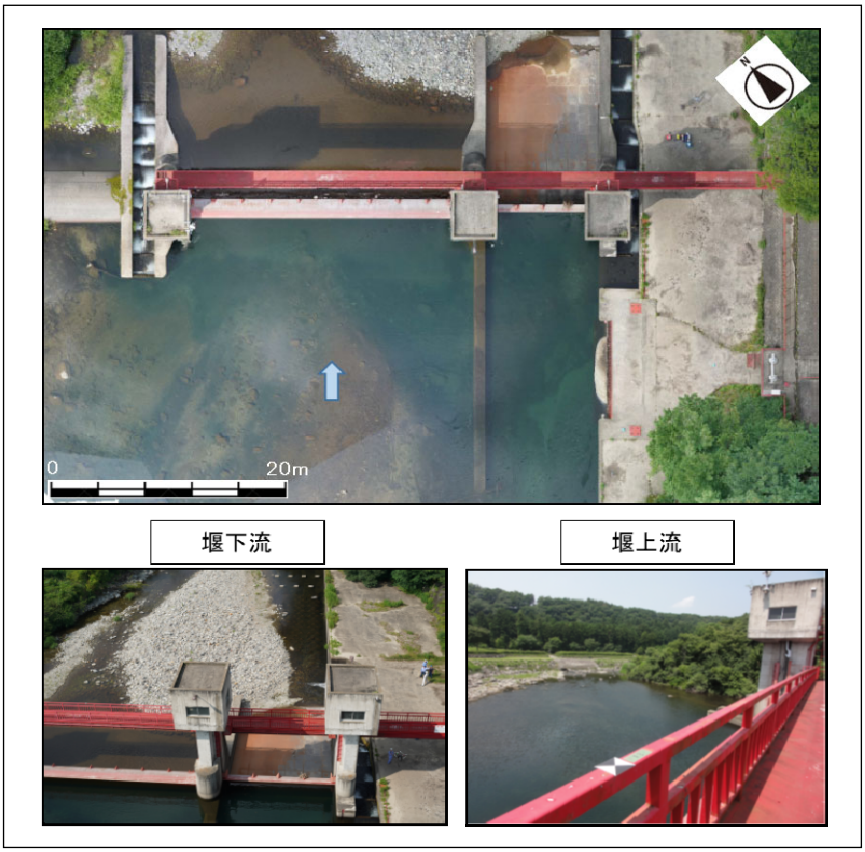
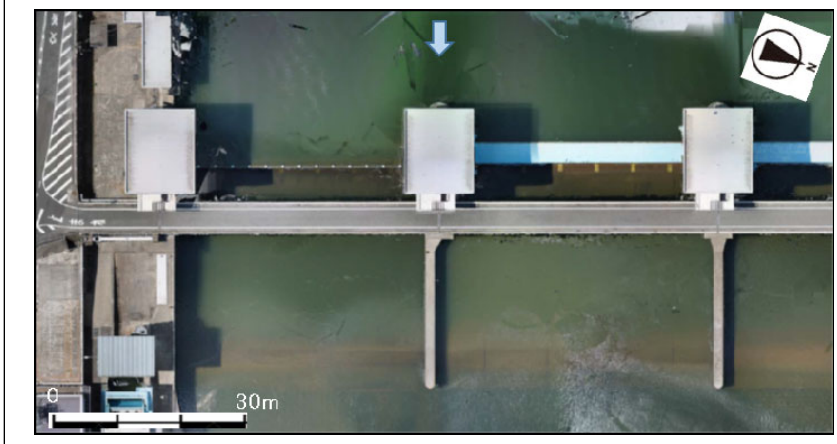


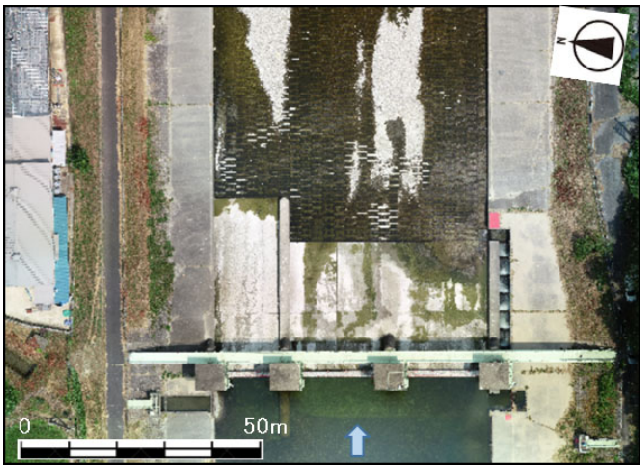
写真 6.2(2)　　頭首工・井堰の調査地区概観（K 頭首工）



堰全景

堰頭頂部

写真 6.2(3)　　頭首工・井堰の調査地区概観（L 井堰工）



堰下流

堰上流

写真 6.2(4)　　頭首工・井堰の調査地区概観（M頭首工）

6.1.2 調査方法

(1) 留意点

頭首工・井堰は、河川から農業用水を取水する目的で設置する施設の総称であり、取入口、取水堰、附帯施設及び管理施設から構成される。すなわち、頭首工・井堰は、「コンクリート施設」、「施設機械設備」など異なる機能を有する複数の施設・設備から構成される「複合施設」であるため、構造は、農業水利施設の中でも複雑な形態をしている。

さらに、施設が、河道内に設置されているため、UAV 計測では、以下のような事項に留意する必要がある。

① 画像、3 次元データの撮影では、対象施設の特性、さらに対象とする変状が抽出できる撮影方法、撮影高度、地上解像度などより、使用 UAV、レンズ、操作法（自動、手動）を決定する。

② SfM（Structure from Motion）は、水面、樹木など風の影響を受ける地物、太陽光の影響による水面反射、施設陰影が撮影されると、3 次元モデリング精度の低下や 3 次元点群の欠損等が発生する。このため、撮影時期は、無風・弱風が頻発しやすい季節で、天候が曇りあるいは陰影、水面反射が発生しにくい正午前後（太陽が南中）に設定することが望ましい。

③ 頭首工のコンクリート壁面における撮影では、「農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工」（農村振興局、平成 28 年 8 月）」（以下、「機能保全の手引き「頭首工」」とする。）に記載されるように、施設の健全度評価の観点から、ひび割れ幅 0.2mm 以上の変状を観察する必要がある。したがって、撮影では、低空飛行による近接の望遠撮影を実施することになるため、正確な飛行位置を制御する RTK-GNSS 装置、カメラの画角を安定に制御する三軸ジンバルなどの活用が望ましい。

(2) 撮影方法

頭首工では、図 6.1 に示すように、3 次元点群データの取得を目的に、計測型 UAV と簡易型 UAV を用いて、上空から施設の縦断方向（河川横断方向）に対して平行に垂直撮影及び斜め撮影を行った。

垂直撮影では、いずれの UAV でもオーバーラップ（OL）率 80%以上、サイドラップ（SL）率 60%以上とした。また、斜め撮影では、未撮影区域を発生させないラップ率で実施するとともに、撮影距離 10m～30m 程度からの近接スポット撮影を実施した。

なお、計測型ＵＡＶ（f=135mm）の撮影では、一定コース上の連続撮影は実施せず、損傷部などの特定箇所を対象としたスポット撮影を実施した。

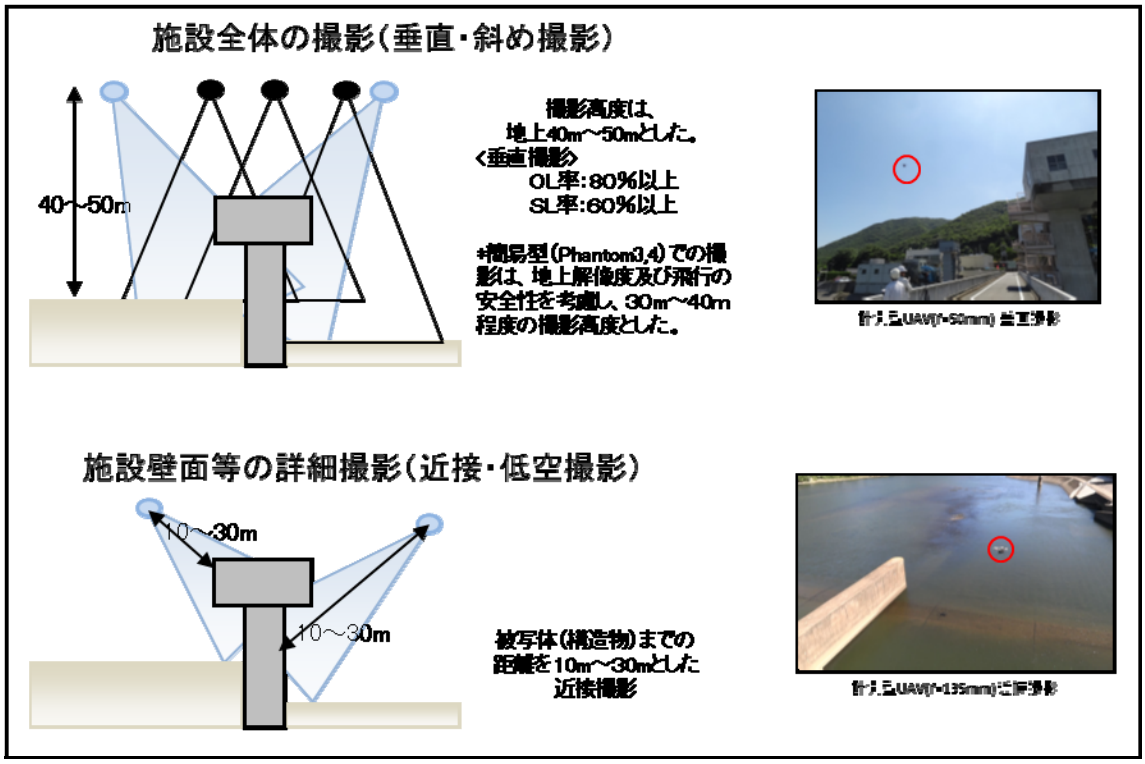


図 6.1　　頭首工・井堰での UAV 計測方法

(3) 撮影写真の諸元

頭首工・井堰での UAV 計測で撮影した空中写真の諸元は、表 6.2 に示すとおりであるが、3 次元解析では、3 次元モデリングの位置精度（RMS 誤差）を確認した上で実施した。

表 6.2　　頭首工・井堰の 3 次元解析に使用した撮影写真の諸元

施設名称	調査年月	撮影方法	使用UAV				平均撮影高度（m）	平均地上解像度（cm）	RMS誤差	
			計測型		簡易型				水平（cm）	鉛直（cm）
			50mm	135mm	3.6mm	8.8mm				
J 頭首工	2017.7	鉛直・斜め	○	○			44	0.53	2.1	0.3
					○		33	1.39	2.1	0.7
K 頭首工	2017.7		○	○			40	0.48	1.7	0.6
L 井堰	2017.7		○	○			50	0.60	1.0	0.5
					○		38	1.62	2.5	1.1
M頭首工	2018.7					○	34	0.91	0.5	0.4

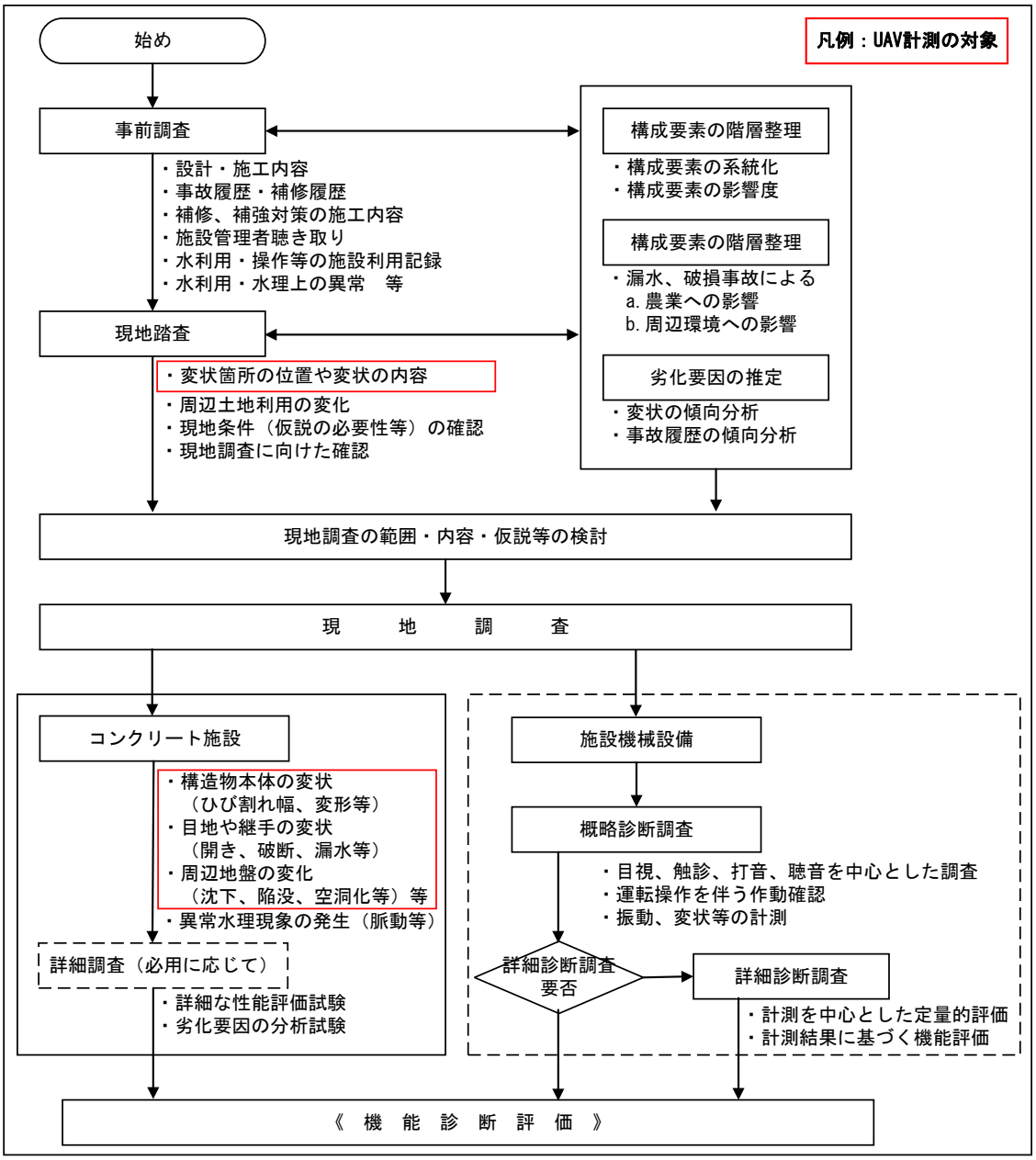
注）撮影高度、平均地上解像度、RMS誤差は、３次元点群作成時における計算数値である。

6.2 UAV 計測の活用について

6.2.1 機能診断調査概要

頭首工の機能保全調査は、「機能保全の手引き「頭首工」」より、図 6.2 に示すとおり、事前調査、現地踏査、現地調査の 3 段階で実施すると示されている。

このうち、UAV 計測の活用は、現地踏査段階での「変状の位置や変状の内容の把握」、現地調査段階でのコンクリート施設の「構造物本体・目地・継手の変状、周辺地盤の変化」目的とする。なお、頭首工の施設・機械設備の診断は対象外としている。



資料：農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工」　（農林水産省農村振興局、平成 28 年 8 月）より編集

図 6.2　　機能診断調査の実施フロー（頭首工）

6.2.2 施設点検への適用性

頭首工・井堰の変状を把握する調査項目は、表 6.3 に示すとおりであり、ＵＡＶ計測では、目視・計測を対象とした調査手法について活用を検討した。

すなわち、本手引きでは、UAV 計測による撮影写真、画像解析（3 次元計測）を活用し、その適用性について確認した。

機能診断調査により判明した施設状態は、表 6.4 に示すとおり 5 段階で評価されており、評価の段階によって対応する対策の目安が示されている。

評価の基準となる個別の変状程度は、表 6.5 に示すとおりであり、定量化された評価指標は、「ひび割れ」の幅・密度（進行性：ASR や凍害）のみである。具体的には、「鉄筋腐食先行型ひび割れ」を除くと、変状ランク S-5 に示されるひび割れ幅 0.2mm 未満、S-3 におけるひび割れ幅 1mm 以上となっている。

本手引きでは、「ひび割れの長さ・幅」以外に、「変形・歪み、欠損・損傷、不同沈下、目地変状」などについて、その計測精度、抽出程度について検討した。

表 6.3　コンクリート施設に関する標準的な調査事例（頭首工）

機能	性能	区分	調査項目		調査手法	記録手法
構造	力学的安全性	コンクリート	ひび割れ	ひび割れ最大幅	定量計測（クラックスケール）	定量記録、写真記録、図化
				ひび割れ延長	定量計測（スケール）	定量記録、写真記録
				ひび割れタイプ	タイプ判別	〃
				沈砂池や護岸等のひび割れからの漏水	目視による有無	写真記録、図化
				段差	定量計測（スケール）	定量記録、写真記録
			変形・歪み	変形・歪みの有無	目視による有無、簡易計測（下げ振り、ポール、傾斜計）	有無の記録、写真記録、定量記録
			UAV計測の対象外（赤字）			
			圧縮強度	圧縮強度（反発硬度）	簡易計測（リバウンドハンマ法、機械インピーダンス法等）	定量記録、写真記録
	耐久性	コンクリート	材料劣化	浮き	目視による有無、打音調査	写真記録、図化
				剥離・剥落・スケーリング	目視による有無、簡易計測（デプスゲージ等）	定量記録、写真記録、図化
				ポップアウト	目視による有無	写真記録、図化
				（析出物）エアロレッセンス	目視による有無	写真記録、図化
				（析出物）ゲルの滲出	〃	〃
				錆汁	〃	〃
				変色	〃	〃
				摩耗・風化	目視による有無、簡易計測（デプスゲージ等）	定量記録、写真記録、図化
				鉄筋露出	目視による有無	写真記録、図化
			中性化	中性化深さ/中性化残り	ドリル法	〃
				鉄筋被り	設計図書の確認、定量計測（鉄筋探査）	定量記録、写真記録、図化
		欠損・損傷		戸当たり周辺、巻き上げ機周辺の欠損・損傷	目視による有無	写真記録、図化
	安定性	不同沈下		構造物の沈下・傾倒	目視による有無、簡易計測（スケール等）	定量記録、写真記録、図化
		構造物周辺の変状	エプロン・護床工周辺河床	エプロン直上下流の局所洗掘、下流側護床工の消失・沈下、深掘れ	目視による有無、スタッフ挿入等による確認（必用に応じて測量）	〃
			エプロン・床版下部	床版・エプロンからの噴水	目視による有無、	定量記録、写真記録、図化
				床版・エプロン下の空洞	打音調査	〃
			護床工周辺地盤	背面土の空洞化	〃	写真記録、図化
				周辺地盤の沈下、陥没、ひび割れ	目視による有無	〃
			魚道下流	下流河床低下など	〃	有無の記録、写真記録
	上記性能を含む構造性能	目地の変状（護岸、エプロン、構造物境界）		目地の開き	目視による有無、簡易計測（スケール等）	定量記録、写真記録、図化
				止水板の破断	目視による有無	写真記録、図化
				目地の変状に伴う漏水状況	〃	〃
				段差	簡易計測（スケール）	定量記録、写真記録
				周縁コンクリートの欠損等	目視による有無、簡易計測（スケール等）	定量記録、写真記録、図化
		管理橋		橋桁や床版の損傷	〃	〃
				沓座・堰柱張出し部の損傷	〃	〃
		操作室（堰柱と一体的に設置された小規模なもの）		雨漏り・壁・柱の損傷・ひび割れ	〃	〃

資料：農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工」　（農林水産省農村振興局、平成 28 年 8 月）より編集

表 6.4　　鉄筋コンクリート施設の健全度指標（頭首工）

評価ランク	施設・設備の状態	現　　象　　例	対応する対策の目安＊
S －5	変状がほとんど認められない状態	① 新設時点とほぼ同等の状態 （劣化過程は、潜伏期）	対策不要
S －4	軽微な変状が認められる状態	① コンクリートに軽微なひび割れの発生や摩耗が生じている状態 （劣化過程は、進展期）	要観察
S －3	変状が顕著に認められる状態 劣化の進行を遅らせる補修工事などが適用可能な状態	①鉄筋に達するひび割れが生じているあるいは、鉄筋腐食によるコンクリートの剥離・剥落が生じている ②摩耗の進行により、骨材の脱落が生じている （劣化過程は、進展期から加速期に移行する段階）	補修・補強
S －2	施設・設備の構造的安定性に影響を及ぼす変状が認められる状態 補強を伴う工事により対策が可能な状態	①コンクリートや鉄筋の断面が一部で欠損している状態 ②地盤変形や背面土圧の増加によりコンクリート躯体に明らかな変形が生じている状態 （劣化過程は、加速期又は劣化期に移行する段階）	補修・補強
S －1	施設・設備の構造的安定性に重大な影響を及ぼす変状が複数認められる状態 近い将来に施設・設備の機能が失われる、又は著しく低下するリスクが高い状態 補強では経済的な対応が困難で、施設・設備の更新が必要な状態	①貫通ひび割れが拡大し、鉄筋の有効断面が大幅に縮小した状態 S-2に評価される変状が更に進行 した状態 ②補強で対応するよりも、更新した方が経済的に有利な状態 （劣化過程は、劣化期）	更　　新

注）＊同欄の記載内容は目安として示したものであり、健全度ランクに対応する対策の必要性の有無及びその内容は、水理性能に与える影響、重要度、リスク、劣化要因、劣化の進行状況などに応じて検討する。

資料：農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工」（農林水産省農村振興局、平成 28 年 8 月）より編集

表 6.5　頭首工（コンクリート施設）の施設状態評価表

評価項目（変状種別）					評価区分 S-5	評価区分 S-4	評価区分 S-3	評価区分 S-2
内部要因	構造物自体の変状	ひび割れ	形状と幅（有筋）	目地間中央や部材解放部の垂直ひび割れ	最大ひび割れ幅 0.2mm未満	最大ひび割れ幅 [0.2mm以上～0.6mm未満] 0.2mm以上～1.0mm未満	最大ひび割れ幅 [0.6mm以上] 1.0mm以上	S-3に該当するものが全体的
				特徴的な形状を示さないひび割れ				
				格子状・亀甲状などのひび割れ				
				側壁を横切るような水平又は斜めのひび割れ				
				鉄筋に沿ったひび割れ	無		有	S-3に該当するものが全体的
			最大ひび割れ幅（無筋）［部材を貫通する可能性がある場合］		最大ひび割れ幅 0.2mm未満	最大ひび割れ幅 0.2mm以上～5.0mm未満 [0.2mm以上～1.0mm未満]	最大ひび割れ幅 5.0mm以上 [1.0mm以上]	S-3に該当するものが全体的
			進行性（ＡＳＲや凍害などの場合）		有りの場合：ランクダウン			
			ひび割れ規模				①ひび割れ密度（幅0.2mm以上）50cm/㎡以上 ②有 ③滲出し、漏水	S-3に該当するものが全体的又は流水、噴水
			ひび割れ付随物		無			
			ひび割れからの漏水					
			ひび割れ段差					有
		ひび割れ以外の劣化	浮き		無	部分的	全体的	
			剥離・剥落		無	部分的	全体的	
			析出物（エフロエッセンス・ゲルなど）		部分的(S-4以外)	全体的又は鉄筋に沿った部分的		
			錆汁		無	有		
			摩耗・すりへり(全体的の場合１ランクダウン)		細骨材露出	粗骨材露出	粗骨材剥落	
			鉄筋露出の程度		無		部分的	全体的
		圧縮強度	反発強度法（鉄筋）		21N/mm²以上	UAV計測の対象外（赤字） 15N/mm²以上～21N/mm²未満	15N/mm²未満	
			反発強度法（無筋）					
		中性化	ドリル法		残り10mm以上		残り10mm未満	
外部要因	構造物自体の変状	変形・歪み	変形・歪みの有無		無		局所的	全体的
		欠損・損傷	欠損・損傷の有無 戸当たり周辺、巻き上げ機周辺の損傷		無		局所的	全体的
		不同沈下	構造物の沈下、傾倒		無		局所的	全体的
	構造物周辺の変状	エプロン・護床工周辺河床	エプロン直上下流の局所的洗掘、下流側護床工の消失・沈下、深掘れ		無	UAV計測の対象外（赤字）	局所的	全体的
		エプロン・床版下部	床版・エプロン下からの噴水、床版・エプロン下の空洞		無		局所的	全体的
		護床工周辺地盤	背面土の空洞化		無		局所的	全体的
			周辺地盤の沈下、陥没、ひび割れ		無		局所的	全体的
		魚道下流	下流河床低下など		無	局所的	全体的	
その他要因	目地の変状（護岸、エプロン、構造物境界）			目地の開き	無	局所的	全体的	
				止水板の破断	無		有	
					エプロンの場合は1ランクダウン			
			漏水の状況		無	漏水跡、滲出し、滴水	流水、噴水	
			段差		無	局所的	全体的	
			周縁コンクリートの欠損等		無	局所的	全体的	
	管理橋		橋桁や床版の損傷		無	局所的	全体的	
			沓座・堰柱張出し部の損傷		無	局所的	全体的	
	操作室（堰柱と一体的に設置された小規模なもの）		雨漏り・壁・柱の損傷・ひび割れ		無	局所的	全体的	

注）　1. 部分的と全体的の判断：部分的とは表面の50%未満、全体的とは表面の50%以上である。

2. 局所的と全体的の判断：局所的とは施設の一部のみで発生、全体的とは変状が構造物全体にある。

資料：農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工」　（農林水産省農村振興局、平成 28 年 8 月）より編集

6.2.3 施設点検への活用手順

本手引きでは、UAV 計測を用いた空中写真撮影、SfM 解析を実施し、写真画像を用いたひび割れや亀裂の判読に加えて対象構造物の 3 次元データを取得し、これに基づく構造物の変状抽出を行って施設維持管理への適用可能性（表 6.6）について検討し、その手法の精度，効率性等について取りまとめた。

すなわち、頭首工では、UAV 計測と SfM 解析を組み合わせ、撮影写真、オルソ画像、3 次元点群データを生成し、図 6.3 に示すような活用方法を検討した。

検討にあたっては、構築された 3 次元点群データの精度を基準点・標定点の測量結果より検証し、RMS 誤差が約 2cm 前後以下の高精度地形モデルであることを確認した。

次に、検討では、得られた単写真，オルソ画像および 3 次元地形モデルより、標高分布図・横断図等を用いて、構造物の変状（ひび割れ、材料劣化、欠損・損傷、目地の変状など）を抽出・計測し、その適用性、手法の精度、効率性について取りまとめた。

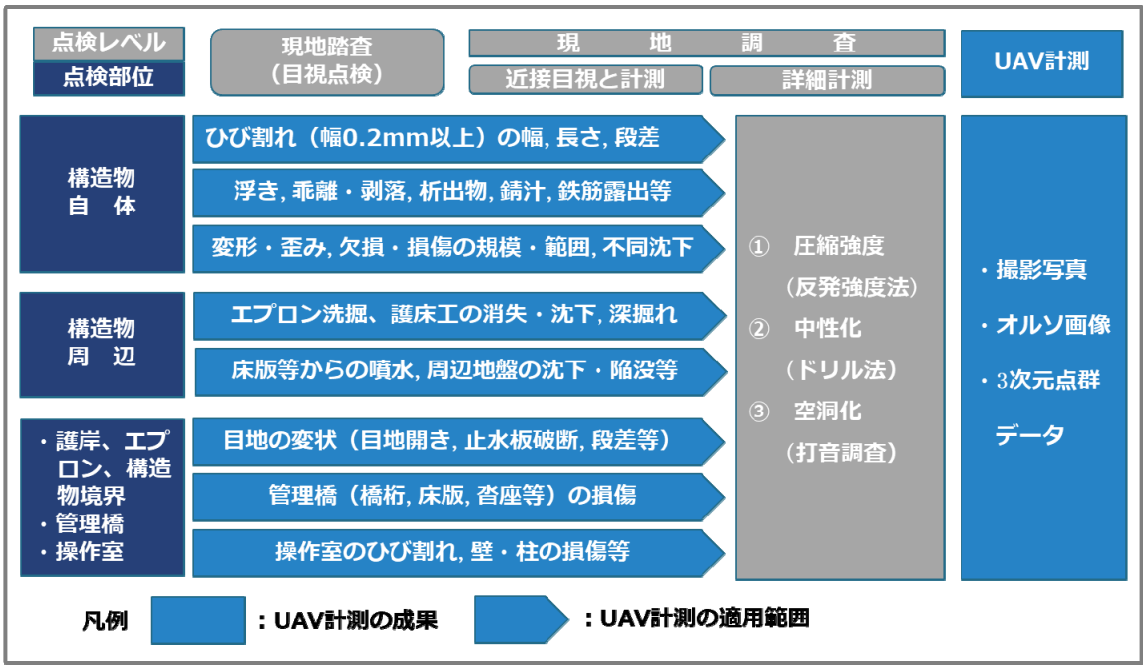


図 6.3　　頭首工での UAV 計測の活用手順

頭首工には、管理橋、操作室、堰柱、電柱、電線・ケーブルなどが設置されているため、ひび割れ・変状観察では、施設への接触など支障を及ぼさないように、近接撮影を実施する必用がある。具体的には、ひび割れ・変状観察を可能にする狭隘な空間での飛行が必用であるため、本項では、小型軽量な簡易型 UAV を用いた手動操作による適用性についても検討し記載した。

表 6.6　UAV 計測の活用により確認できる変状項目

凡例　●：現地確認済、○：活用可能（確認事例より判定）、×：活用不可

評価項目（変状種別）					単写真（画像）	3次元計測
対象可能なひび割れ幅：確認事例より判定					0.2mm≧	0.5mm≧
内部要因	構造物自体の変状	ひび割れ	形状と幅（有筋）	目地間中央や部材解放部の垂直ひび割れ	●	●
				特徴的な形状を示さないひび割れ	●	●
				格子状・亀甲状などのひび割れ	○	○
				側壁を横切るような水平又は斜めのひび割れ	●	●
				鉄筋に沿ったひび割れ	○	○
			最大ひび割れ幅（無筋）［部材を貫通する可能性がある場合］		○	○
			進行性（ＡＳＲや凍害などの場合）		○	○
			ひび割れ規模		●	●
			ひび割れ付随物		○	○
			ひび割れからの漏水		○	○
			ひび割れ段差		×	×
		ひび割れ以外の劣化	浮き		○	○
			剥離・剥落		●	●
			析出物（エフロエッセンス・ゲルなど）		●	●
			錆汁		○	○
			摩耗・すりへり(全体的の場合１ランクダウン)		●	●
			鉄筋露出の程度		○	○
		圧縮強度	反発強度法（鉄筋）			
			反発強度法（無筋）			
		中性化	ドリル法			
外部要因		変形・歪み	変形・歪みの有無		○	○
		欠損・損傷	欠損・損傷の有無 戸当たり周辺、巻き上げ機周辺の損傷		●	●
		不同沈下	構造物の沈下、傾倒		×	○
	構造物周辺の変状	エプロン・護床工周辺河床	エプロン直上下流の局所的洗掘、下流側護床工の消失・沈下、深掘れ		○	○
		エプロン・床版下部	床版・エプロン下からの噴水、		×	
			床版・エプロン下の空洞			
		護床工周辺地盤	背面土の空洞化			
			周辺地盤の沈下、陥没、ひび割れ		○	○
		魚道下流	下流河床低下など		○	○
その他要因	目地の変状（護岸、エプロン、構造物境界）			目地の開き	○	○
				止水板の破断	○	○
					エプロンの場合は1ランクダウン	
			漏水の状況		○	○
			段差		×	●
			周縁コンクリートの欠損等		●	●
	管理橋		橋桁や床版の損傷		●	●
			沓座・堰柱張出し部の損傷		●	●
	操作室（堰柱と一体的に設置された小規模なもの）		雨漏り・壁・柱の損傷・ひび割れ		●	●

注）＊3次元計測とは、オルソ画像、3次元点群データを用いた定量計測を示す。

6.3　UAV 計測による変状解析

6.3.1 撮影画像（単写真）

（1）ひび割れ

頭首工の機能診断調査では、表 6.7 に示すように、最小のひび割れ幅である 0.2mm を抽出する必要がある。ひび割れ幅の抽出には、撮影カメラとレンズ焦点距離、撮影距離の組合せによる地上解像度で決定される。

頭首工（堰）については、人が立ち入り計測することが困難であることから、検証では、次に示す方法でひび割れ幅を推定した。すなわち、空中写真画像におけるひび割れ（クラック）幅の実際の大きさは、図 6.4 に示すとおり、「カメラの 1 画素の寸法 b」及び「焦点距離 f と被写体までの離隔距離 H によって決まる縮率 C」により推定した。

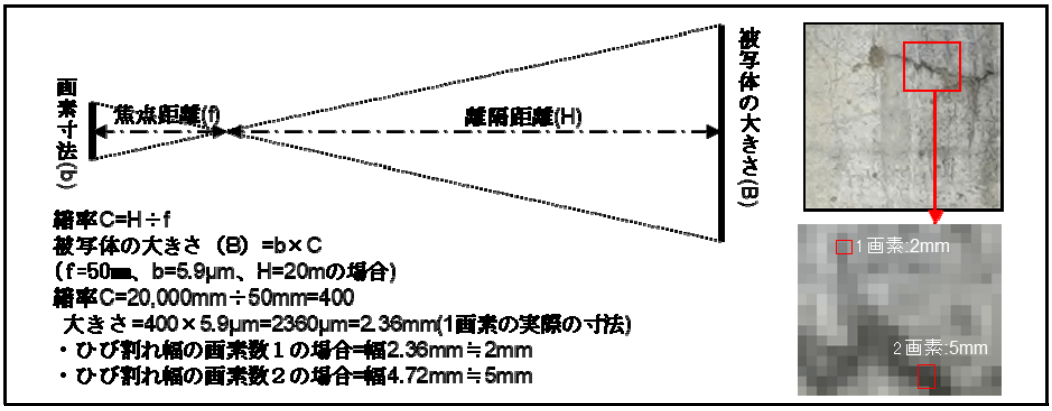


図 6.4　　ひび割れ幅の推定方法（頭首工）

表 6.7　鉄筋コンクリート施設におけるひび割れの施設状態評価指標（頭首工）

評価ランク	施設の状態	ひび割れ規模
S－5	変状がほとんど認められない状態	最大ひび割れ幅 0.2mm 未満
S－4	軽微な変状が認められる状態	最大ひび割れ幅 ［0.2mm 以上～0.6mm 未満］ 0.2mm～1.0mm 未満
S－3	変状が顕著に認められる状態 劣化の進行を遅らせる補修工事などが適用可能な状態	最大ひび割れ幅 ［0.6mm 以上］ 1.0mm 以上
S－2	施設の構造的安定性に影響を及ぼす変状が認められる状態 補強を伴う工事により対策が可能な状態	S-3 に該当するものが全体的
S－1	施設の構造的安定性に重大な影響を及ぼす変状が複数認められる状態 近い将来に施設機能が失われる、または著しく低下するリスクが高い状態 補強では経済的な対応が困難で、施設の更新が必要な状態	S-2 の状態がさらに進行した状態

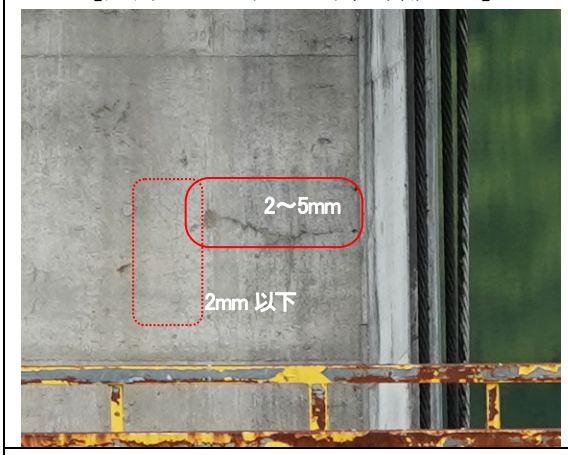
注）［　］内は、厳しい腐食状況の場合に適用する。
資料：資料：農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工」　（農林水産省農村振興局、平成 28 年 8 月）より編集

事例としては、写真 6.3 に示すように、ひび割れ幅 0.2mm は 135mm の望遠レンズ、撮影距離 10m でしっかりと抽出可能となっている。

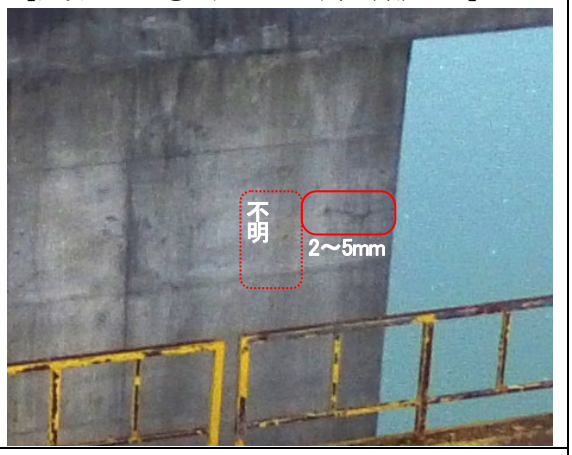
また、簡易型（f=3.6mm）、計測型（f=50mm）では、写真 6.4 に示すように、ひび割れ等による付随物（析出物、漏水跡）への適用が可能であり、変状有無の判読、分布が部分的か全体的かの判別に活用できる。

①幅 2～4㎜ 程度のひび割れ（Ｊ頭首工　堰柱）

【計測型 UAV （f=50㎜）、距離=20m】



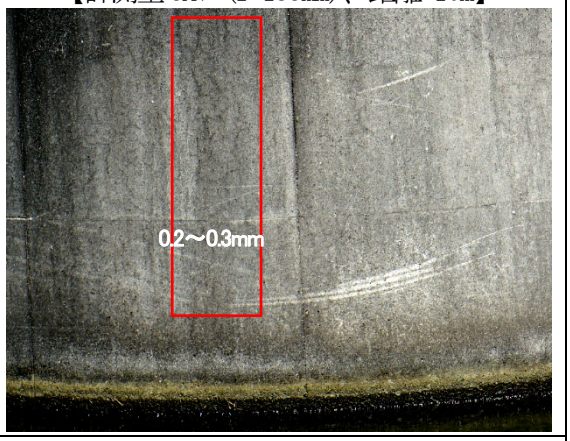
【簡易型 UAV①（f= 3.6㎜）、距離=25m】



②幅 0.2～0.3㎜ 程度の線状のひび割れ（Ｌ井堰　堰体）

【計測型 UAV （f=50㎜）、距離=50m】

【計測型 UAV （f=135㎜）、距離=10m】



③幅 0.5～1㎜ 程度の線状のひび割れ（K頭首工　堰体上部）

【計測型 UAV （f=50㎜）、距離=40m】

【計測型 UAV （f=135㎜）、距離=10m】

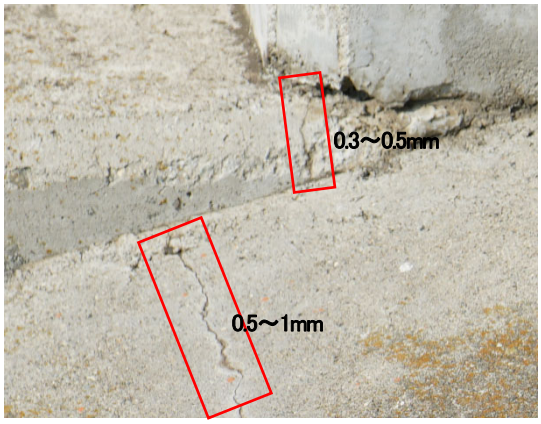


写真 6.3　　ひび割れ画像の撮影距離・焦点距離別比較（頭首工・井堰）

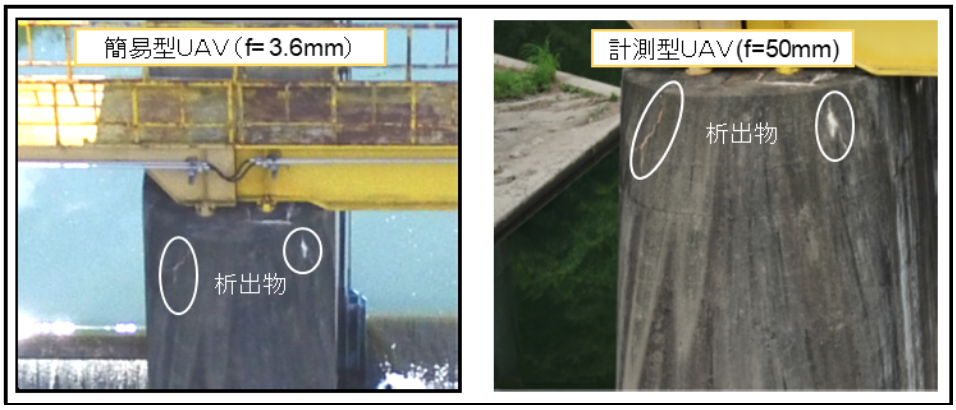


写真 6.4　　ひび割れ等による付随物（析出物）

(2) 摩耗・欠損・損傷等

頭首工のひび割れ以外の施設状態評価は、表 6.8 に示すように、「機能保全の手引き「頭首工」」に設定されており、UAV 計測での有効性について記載する。

簡易型(f=3.6mm)、計測型(f=50mm)で撮影した画像は、写真 6.5 に示すとおりであり、堰柱、堰体、導流壁、護床工における施設表面の摩耗・欠損・剥離、目地の損傷などの変状の有無、変状分布（部分的・全体的）などの状態について評価可能である。

すなわち、UAV 計測では、両機種とも現地踏査レベルの目視点検には適用可能であり、特に、計測型(f=50mm)では、被写体との距離 45m～50m 前後からの遠方撮影により活用できる。

表 6.8　鉄筋コンクリート施設におけるひび割れ以外の施設状態評価区分（頭首工）

ランク / 項　目	S－5	S－4	S－3	S－2
浮き、剥離・剥落	無	部分的 （表面の50%未満）	全体的 （表面の50%以上）	―
析出物	部分的 （表面の50%未満）	全体的 （表面の50%以上） 又は 鉄筋に沿った部分的 （表面の50%未満）	―	―
錆汁	無	有	―	―
摩耗・すりへり	細骨材露出	粗骨材露出	粗骨材剥落	―
鉄筋露出の程度	無	―	部分的 （表面の50%未満）	全体的 （表面の50%以上）
変形・歪み 欠損・損傷	無	―	局所的 （施設の一部）	全体的 （構造物全体）
止水板の破断	無	―	有	―
目地の開き、段差 周縁コンクリートの欠損等	無	局所的 （施設の一部）	全体的 （構造物全体）	

資料：資料：農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工」　（農林水産省農村振興局、平成 28 年 8 月）より編集

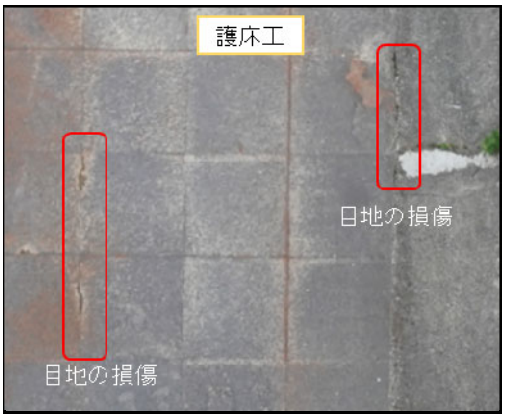
①摩耗/欠損（J頭首工　堰柱、導流壁）

【計測型UAV（f=50mm）、距離=20m】

【簡易型UAV（f=3.6mm）、距離=25m】

②目地の損傷/剥離（K頭首工　護床工、堰体）

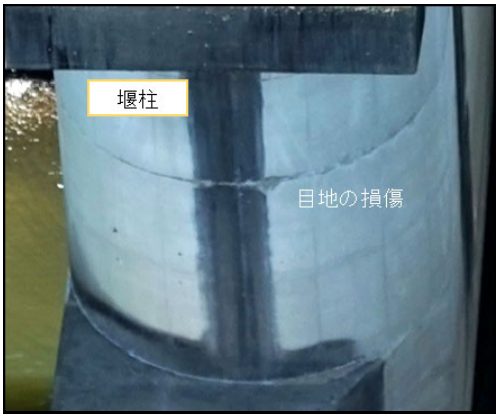
【計測型UAV（f=50mm）、距離=40m】



【計測型UAV（f=50mm）、距離=40m】

③目地の損傷（L井堰　堰柱）

【計測型UAV（f=50mm）、距離=50m】



【簡易型UAV（f=3.6mm）、距離=25m】

写真 6.5　　摩耗・欠損・損傷等の画像事例（頭首工・井堰）

(3) 近接撮影

頭首工は、構造上、複雑な形態をし、河道内に設置されているため、現地調査レベルでは、高度な飛行操作技術が求められる施設近傍での近接撮影が必要となる。

近接撮影の方法としては、①広角レンズ（f=8.8mm）を装着した軽量小型な簡易型UAV、②望遠レンズ（f=135mm）を装着した大型な計測型UAVで撮影する二通りがあり、以下にその撮影事例を記載する。

1) 簡易型UAV（f=8.8mm）

簡易型UAVは、軽量・小型であることから、計測型UAV等の大型機種に比較して飛行半径も小さく細かな動きが容易である。このため、利点としては、複雑な形状をした構造物等を対象にした近接撮影が比較的容易にできることにある。

ここでは、図6.5に示すM頭首工における①～⑤の各構造物に対して簡易型UAVの近接撮影（写真6.6～6.9）を行い、変状抽出の可否について検討した結果を以下に記載する。なお、近接撮影では、飛行の安全性を考慮して、被写体からカメラまでの距離を5m～10m程度（画像解像度1.3mm～2.7mm）とした。

その結果によると、ひび割れは、幅0.1～0.2mmで抽出困難、幅2～3mm抽出可能であった。ひび割れ以外では、導流堤の表面摩耗、操作室壁面の剥離、堰柱の目地損傷の状況について評価可能であり、ピンポイントの変状評価には、有効であった。

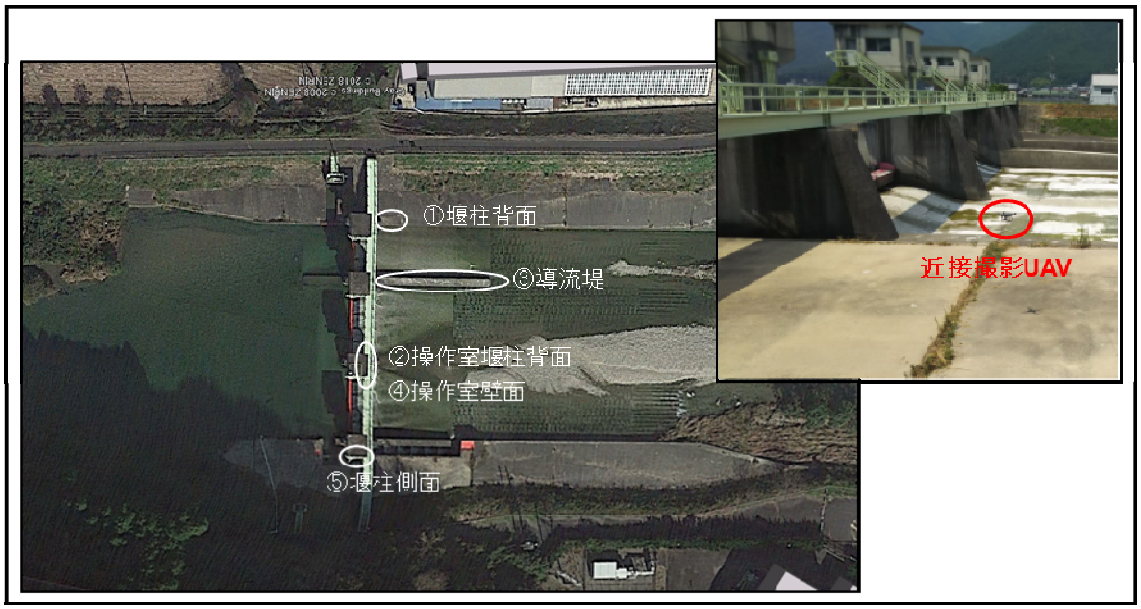


図6.5　簡易型UAV（f=8.8mm）による近接撮影箇所（M頭首工）

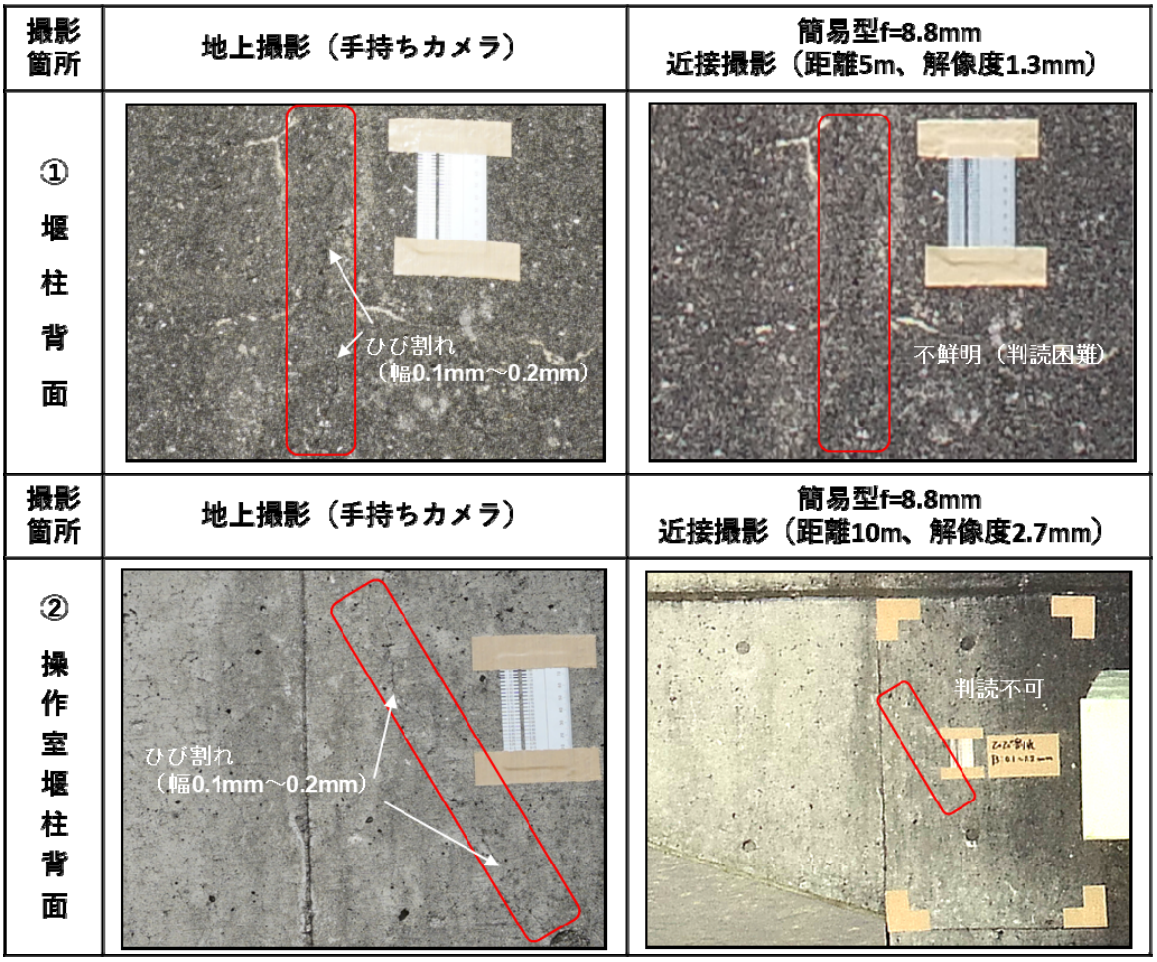


写真 6. 6　　M頭首工での近接撮影事例（堰柱、操作室堰柱）

写真 6.7　　M頭首工での近接撮影事例（導流堤）

写真 6. 8　　M頭首工での近接撮影事例（操作室壁面）

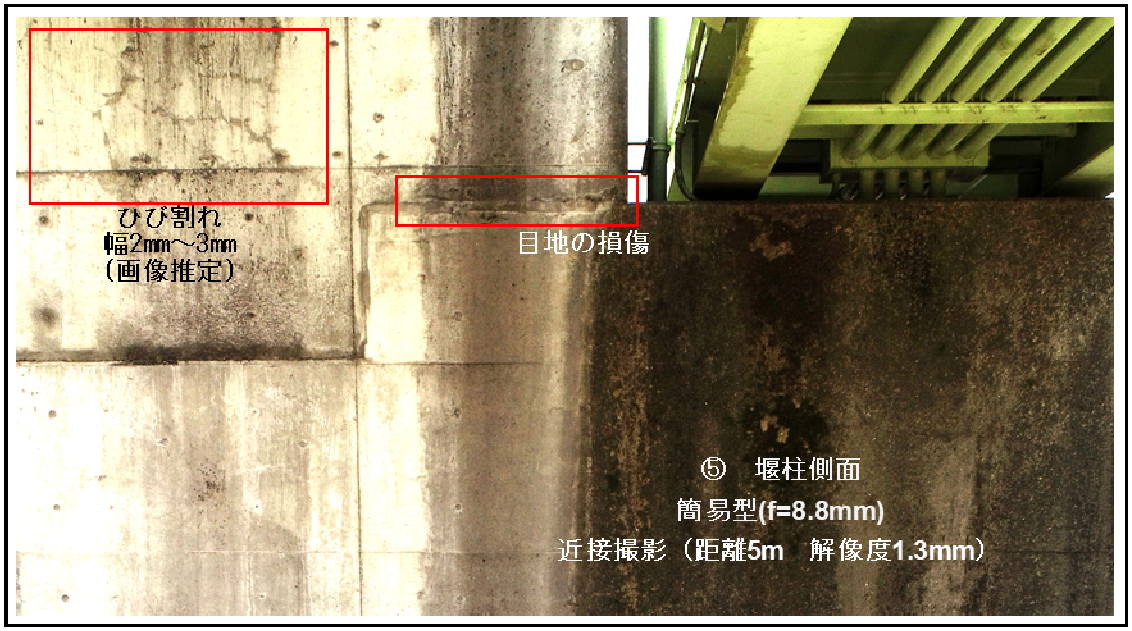


写真 6. 9　　M頭首工での近接撮影事例（堰柱側面）

2）計測型 UAV（f=135mm）

計測型(f=135mm)では、写真 6.10 に示すとおり、摩耗・すりへり、鉄筋露出の詳細な画像が得られ、変状程度、詳細な施設状態を把握する近接目視の代替手法として適用可能である。

しかし、計測型(f=135mm)での撮影写真（画郭）は、被写体の範囲が小さく（被写体までの距離 10m の場合で収まる範囲は 3m×2m 程度)、施設全体あるいは多くの撮影箇所で利用する場合には、多大な労力と UAV の高度な操縦技術を要する。

このため、望遠レンズによる近接撮影は、計測型(f=50mm)や簡易型(f=3.6mm、8.8mm)で撮影した画像より、変状箇所や施設概況を把握した後、詳細調査レベルが必要な箇所において活用する方法が望ましい。

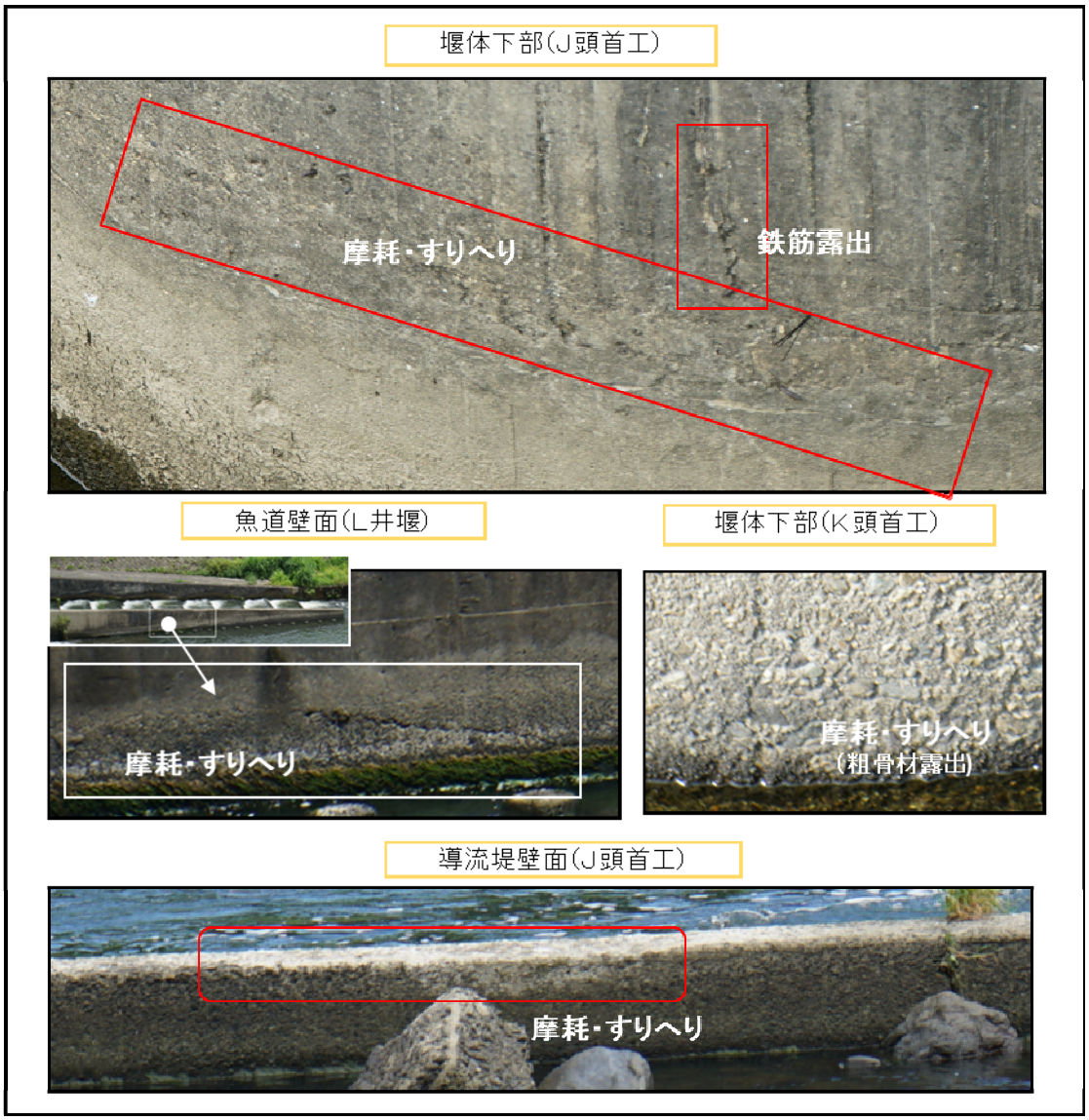


写真 6.10　計測型(f=135mm)による摩耗・すりへりの抽出例

6.3.2　3 次元点群データ

(1) オルソ画像

オルソ画像とは、写真上の像の位置ズレをなくし空中写真を地図と同じく、真上から見たような傾きのない、正しい大きさと位置に表示される画像に変換（以下、「正射変換」という）したものである。

オルソ画像は、UAV 計測で撮影した画像ならびに SfM（Structure from Motion）を用いた 3 次元解析より得られる 3 次元点群データ（物体の形状を 3 次元座標(x, y, z)）の位置精度を検証した上で作成される。

このため、作成されたオルソ画像は、写真上の像の位置ズレをなくし空中写真を地図と同じく、真上から見たような傾きのない、正しい大きさと位置に表示される画像に変換（以下、「正射変換」という）されている。

したがって、その利点としては、画像上で位置、面積及び距離などを正確に計測可能であり、地図データなどと重ね合わせて利用することができる地理空間情報という点である。また、目視観察として利用するには、位置精度の他に、画面上の変状状況を確認するため、画像解像度が重要となる。

頭首工は、写真 6.11 に示すようにゲート操作室や電源を供給する電柱、電線・ケーブル等が突出している場合があり、画像解像度の設定には、これらの障害物を考慮したレンズ（焦点距離）、撮影高度（飛行高度）の設定が重要となる。

本計測は、写真 6.12、写真 6.13 に示すように、障害物との接触などを考慮した撮影高度に設定したため、簡易型のオルソ画像の一部が低解像度となってしまった事例である。

写真 6.11　　頭首工付近の障害物及び高度設定

ここでは、計測型（f=50mm）、簡易型（f=3.6mm、8.8mm）のオルソ画像上における変状の確認状況（写真 6.12～6.15）について記載する。

計測型（f=50mm）では、表面損傷（Ｊ頭首工）、亀裂（Ｌ井堰）、目地損傷（K頭首工）などの変状状態が、撮影高度 40～50m からのオルソ画像より、判読・計測可能である。

一方、簡易型（f=3.6mm）では、縮尺 1/200～1/100 程度までのオルソ画像で損傷の有無が抽出可能であるが、解像度が低いため、1/50 以上の縮尺に拡大すると画像がぼやけて損傷の詳細な状態の判読は困難となる。

また、簡易型（f=8.8mm）では、地上解像度が約 9mm と、簡易型（f=3.6mm）の約 14～16mm に比べ小さいことより、縮尺 1/25 の拡大画像からは概ね 20cm 幅の損傷形状の把握が可能となっている。

今回の事例によると、オルソ画像の拡大による施設変状の抽出・計測では、解像度 10mm 前後以下になるような焦点距離のレンズ、撮影高度を設定する撮影が望ましいと判断される。

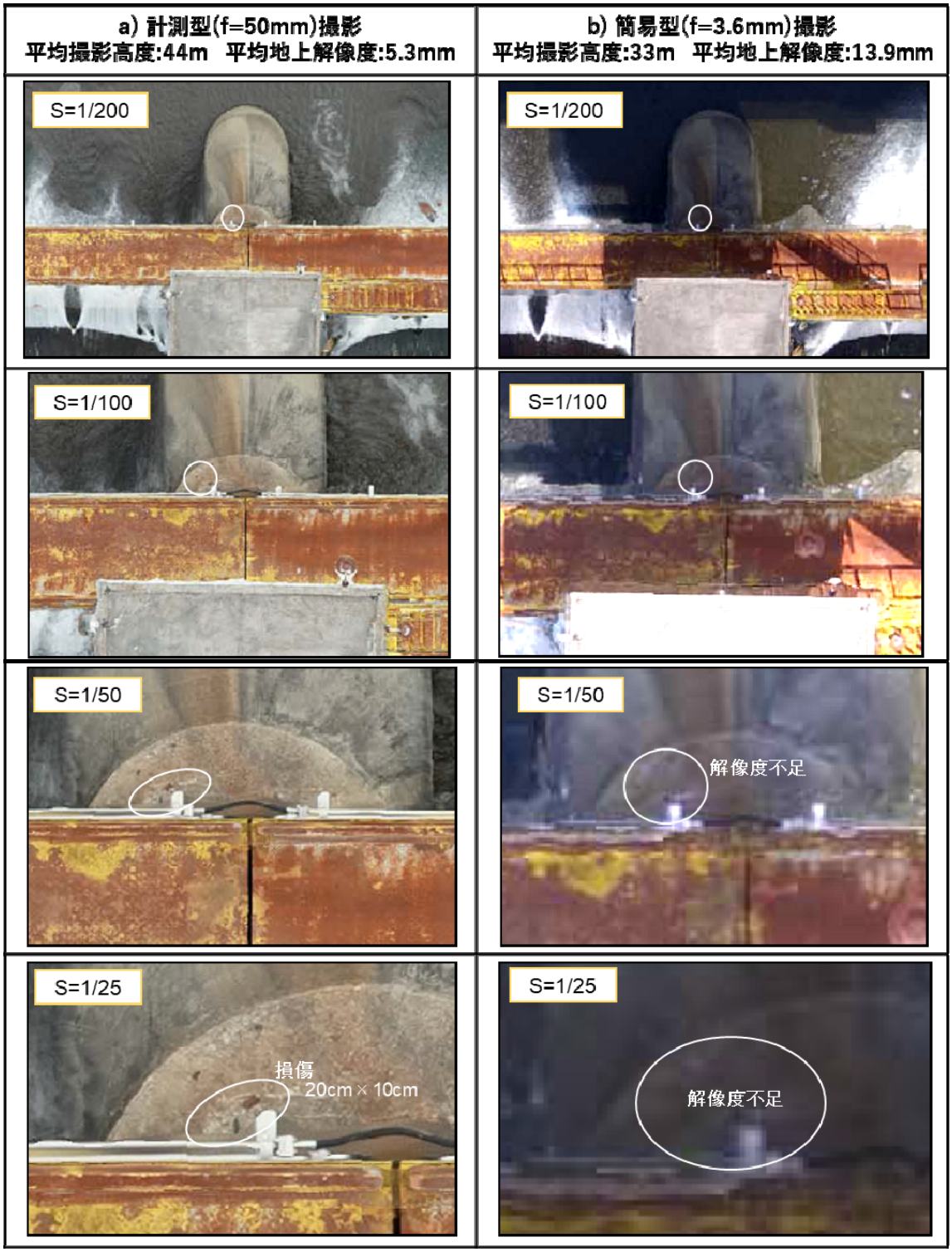


写真 6.12　　オルソ画像の解像度比較（J 頭首工）

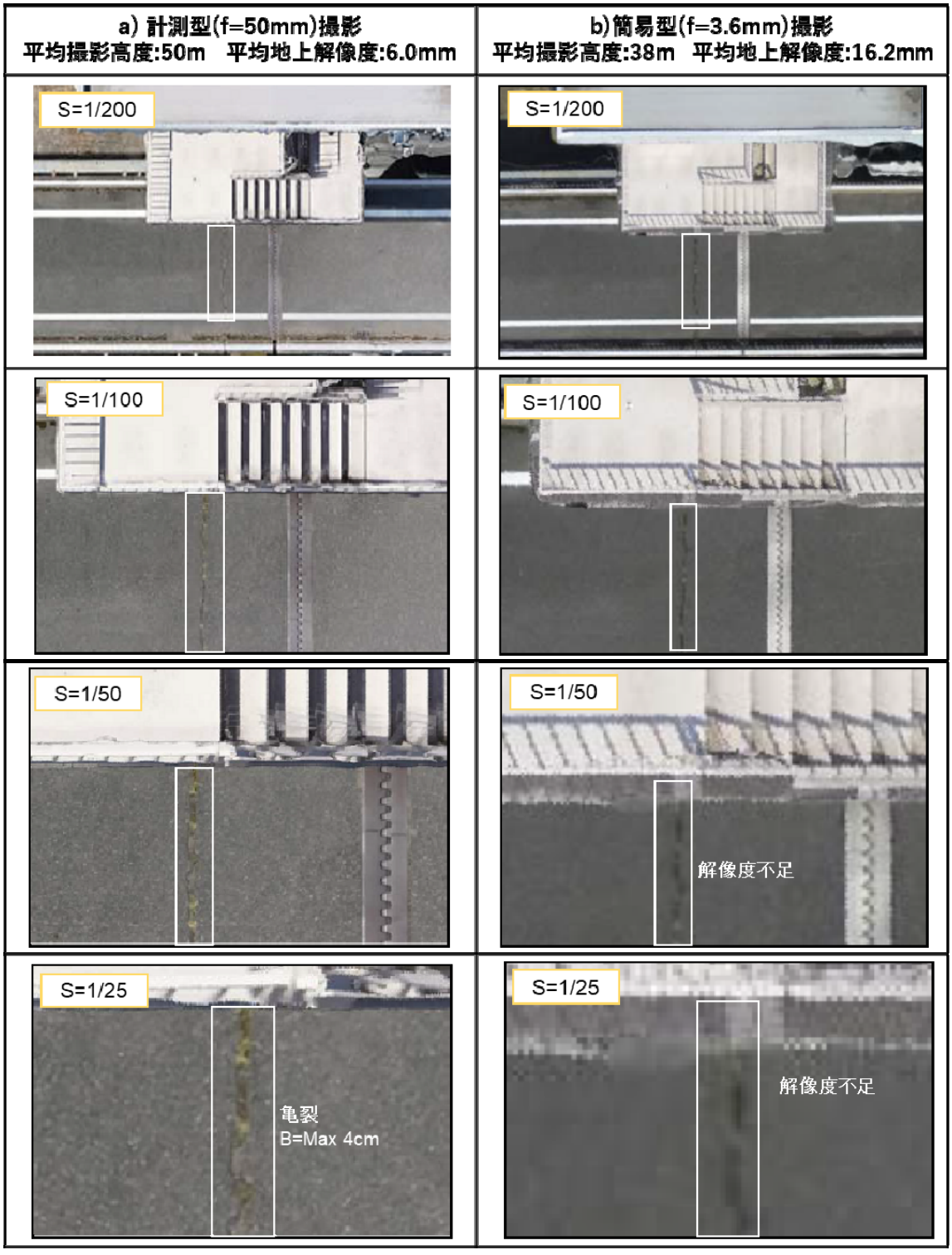


写真 6.13　　オルソ画像の解像度比較（L 井堰）

写真 6.14　　オルソ画像の解像度比較（K頭首工）

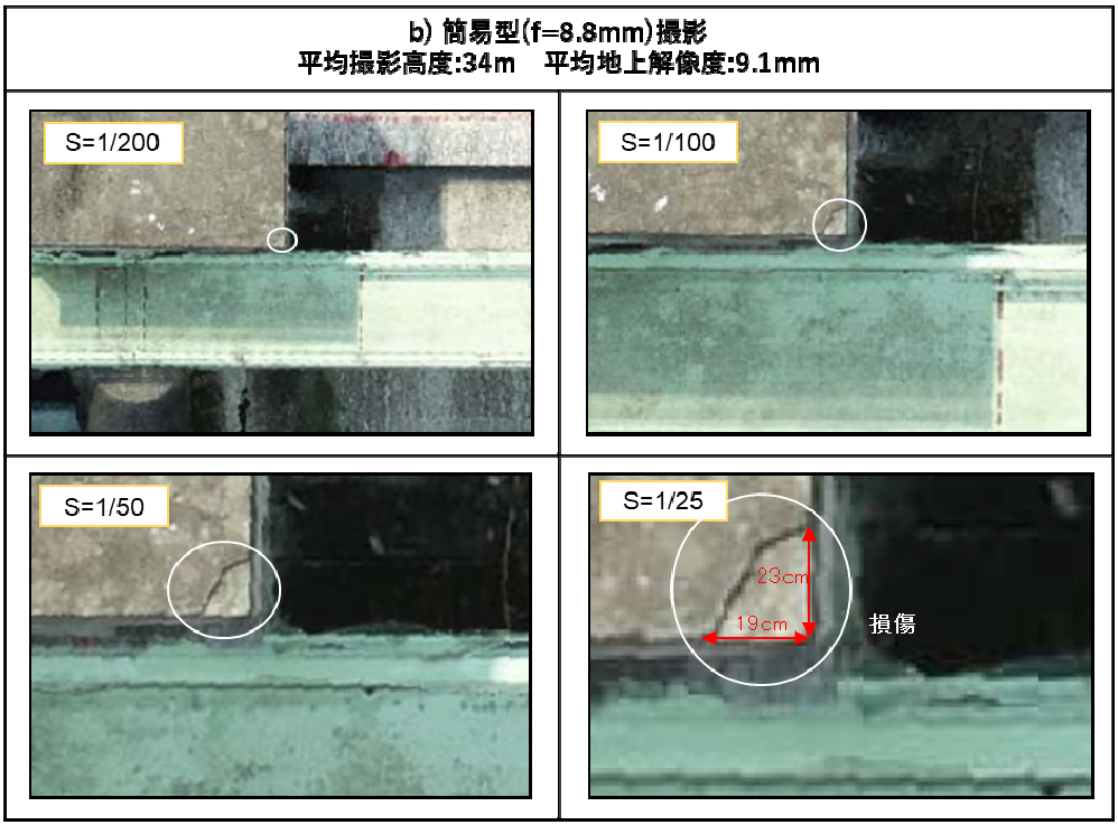


写真 6.15　　オルソ画像の解像度比較（M頭首工）

(2) 施設形状

施設形状への活用検討では、計測型（f=50mm)、簡易型（f=3.6mm,8.8mm）で撮影した写真及び標定点より、SfM ソフトウェアを用いて構築したオルソ画像（位置精度：2.5cm 以下）で検証した。

検証結果は、写真 6.16～6.19 に示すとおりであり、計測型（f=50mm）のオルソ画像（解像度：4.8～6.0mm）では、実測値との差が最大±1cm と計測精度が高かった。

また、解像度（13.9～16.2mm）の大きな簡易型（f=3.6mm）では、実測値との差が最大 7cm と大きいが、解像度 9.1mm の簡易型（f=8.8mm）では最大＋1cm と計測精度が高かった。

すなわち、本事例では、解像度が 10mm 未満になるように撮影した写真より構築したオルソ画像であれば、画像上での施設形状を 1cm オーダーで計測可能であることが検証された。

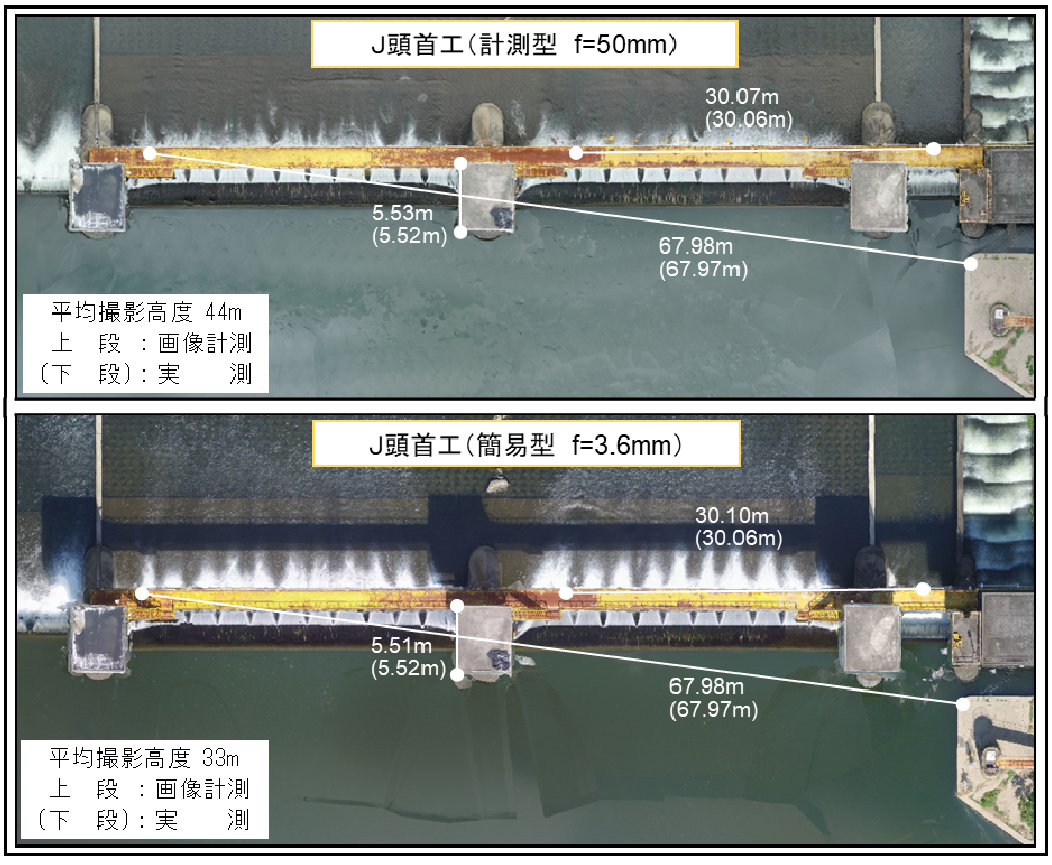


写真 6.16　　オルソ画像による施設平面形状の計測事例（J 頭首工）

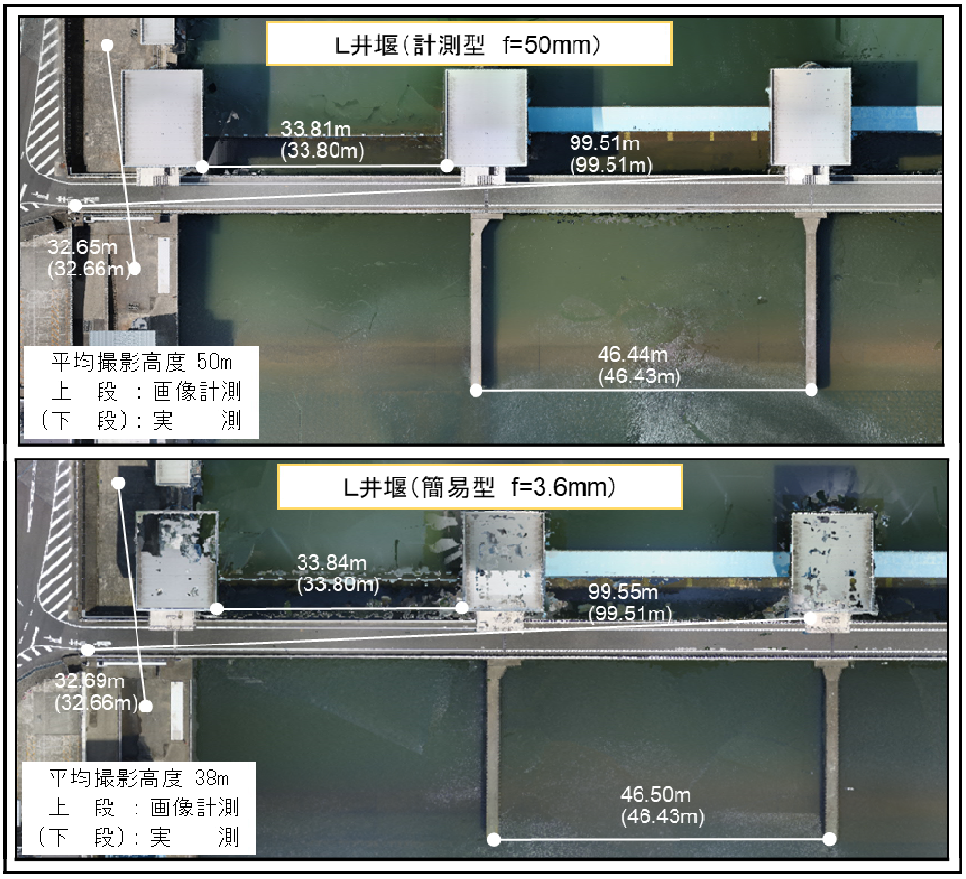


写真 6.17　　オルソ画像による施設平面形状の計測事例（L 井堰）

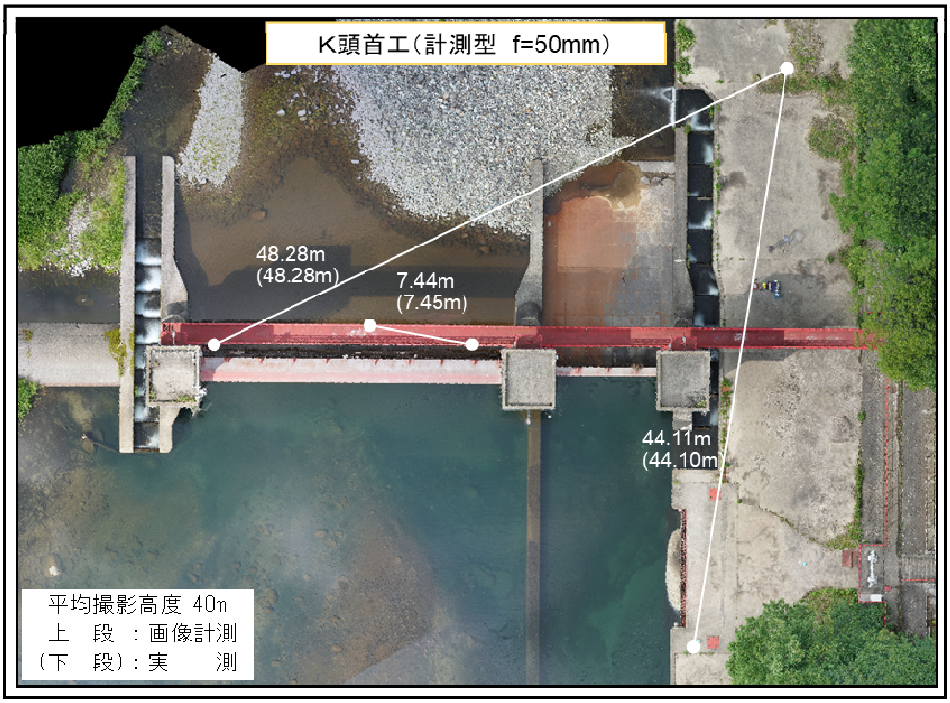


写真 6.18　　オルソ画像による施設平面形状の計測事例（K 頭首工）

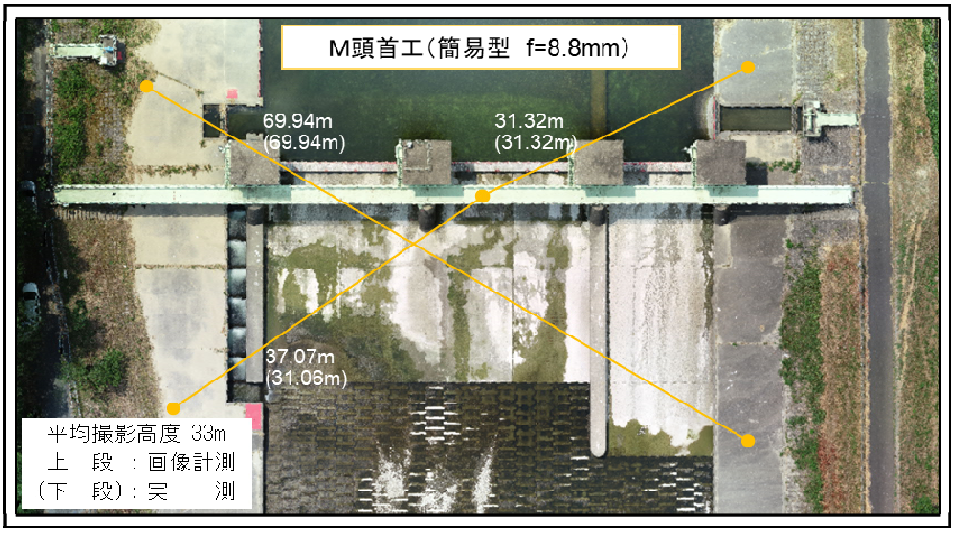


写真 6.19　　オルソ画像による施設平面形状の計測事例（M頭首工）

(3) 変状計測

本項では、J頭首工、K頭首工、L井堰、M頭首工でのUAV計測で確認された変状について、3次元点群データ及びオルソ画像を活用した計測結果事例として紹介する。

1) 摩耗・剥離

摩耗・剥離による変状範囲（平面形状）は、3次元点群による標高分布やオルソ画像上の計測、摩耗・剥離の厚み（鉛直形状）は、3次元点群の標高差より調査することができる。具体的は、図6.6に示すように、数cmの変状規模を計測可能であり、詳細レベルの調査手法として活用できる。

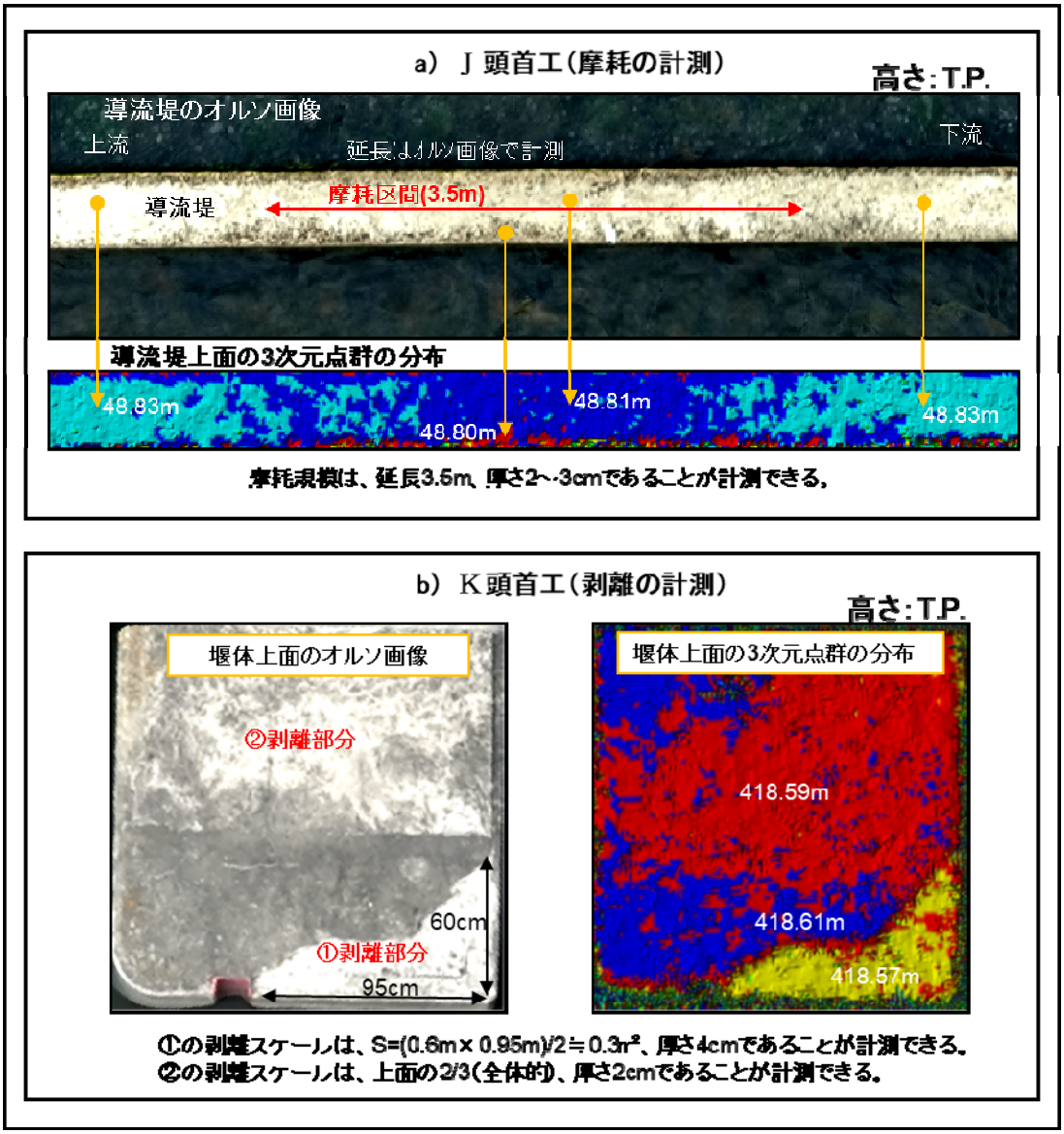


図6.6　　摩耗・剥離の3次元計測事例（J・K頭首工）

2）欠損・段差（抜け上り）

K頭首工では、護岸の欠損、固定堰の段差が認められたため、3 次元点群データ及びオルソ画像の活用より、計測した事例として紹介する。

具体的には、「摩耗・剥離」同様の方法で計測したが、護岸、固定堰では、図 6.7 の横断図に示すように、それぞれ「幅 2cm、深さ 6cm」の欠損及び「3cm の段差」として確認された。すなわち、UAV 計測と SfM を組み合わせた点検手法では、数 cm 程度の変状が計測可能であり、詳細レベルの調査に活用できることが実証された。

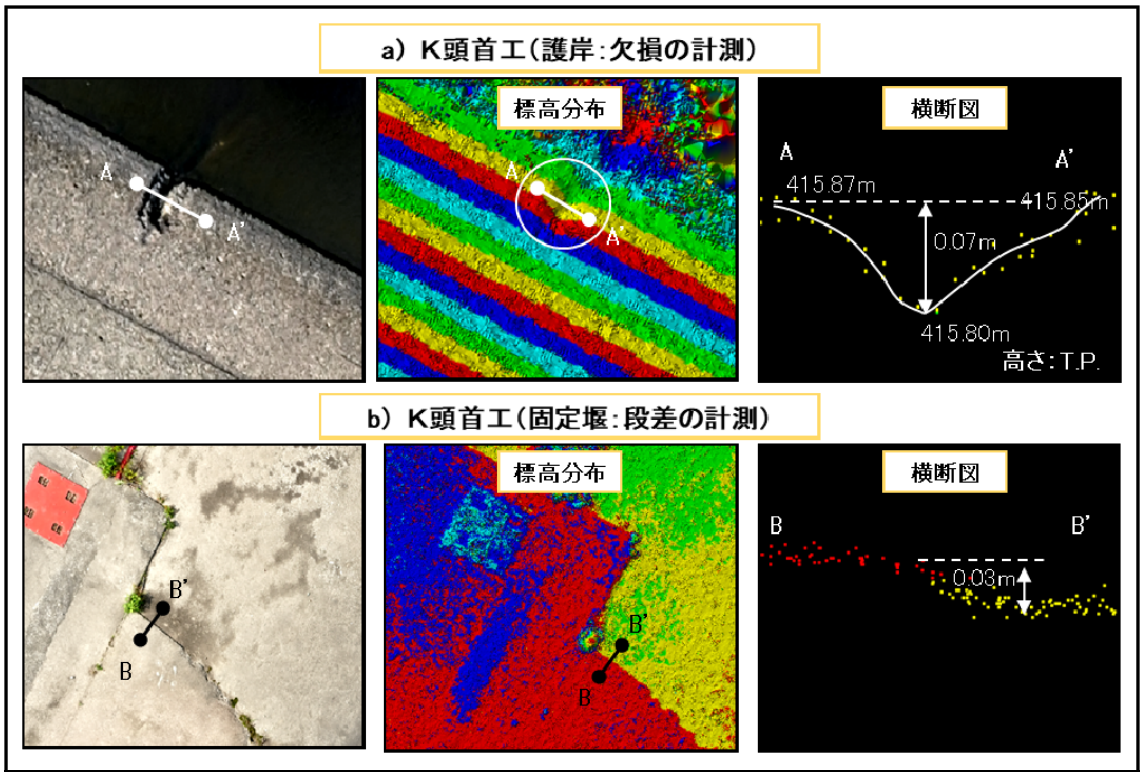


図 6.7　　欠損・段差の 3 次元計測事例（K頭首工）

3) 摩耗・すりへり等

3 次元点群データを活用した堰、護床工（下流部）の標高分布は、図 6.8 に示すとおりであり、施設表面の凹凸状況は、点群の標高データ、色区分から、変状範囲、変状量が容易に計測できる。この事例では、2cm 毎の段彩図として表現したが、部材表面の摩耗、すりへり等の変状抽出に活用できる。

すなわち、高密度な 3 次元点群データは、連続的な点描画として面的に利用できるため、変状の確認には、変換点を点と線で結ぶような従来の計測・点検方法に比較して、その形状を正確に確認・抽出できる利点がある。

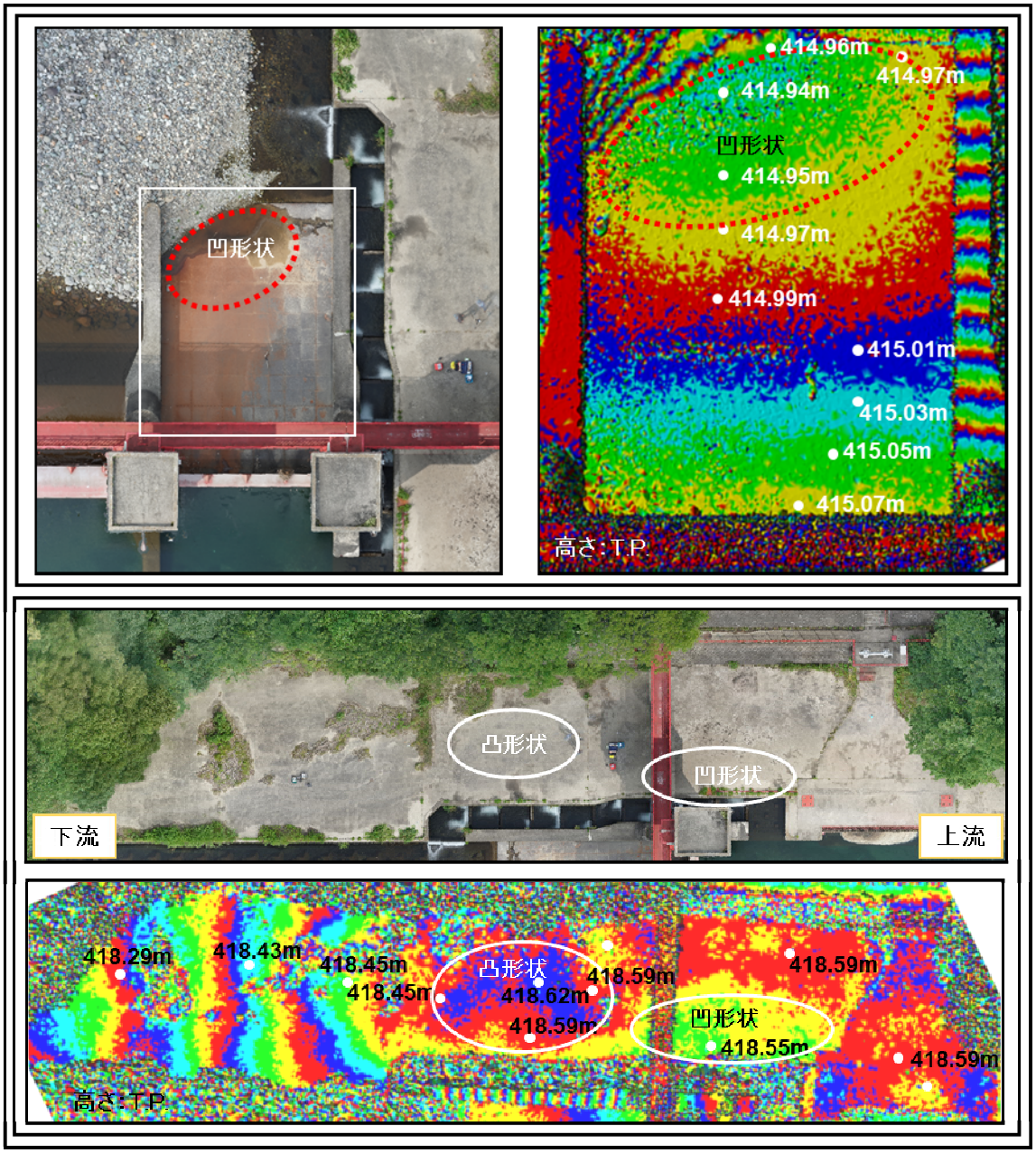


図 6.8　　3 次元点群データの段彩図による変状計測事例（K 頭首工）

4）施設標高等

事例は、計測型(f=50mm)の撮影画像から作成した 3 次元点群データを用いて、頭首工・井堰の各施設の断面形状を再現したものであり、その結果は以下のとおりである。

① J 頭首工

再現結果は、図 6.9 に示すとおりであり、管理橋床板の A-A'断面、堰柱の B-B'断面及び魚道側壁の C-C'断面には、構造的には大きな変化はなく、部分的な欠損、沈下等の変状もないことが確認できる。

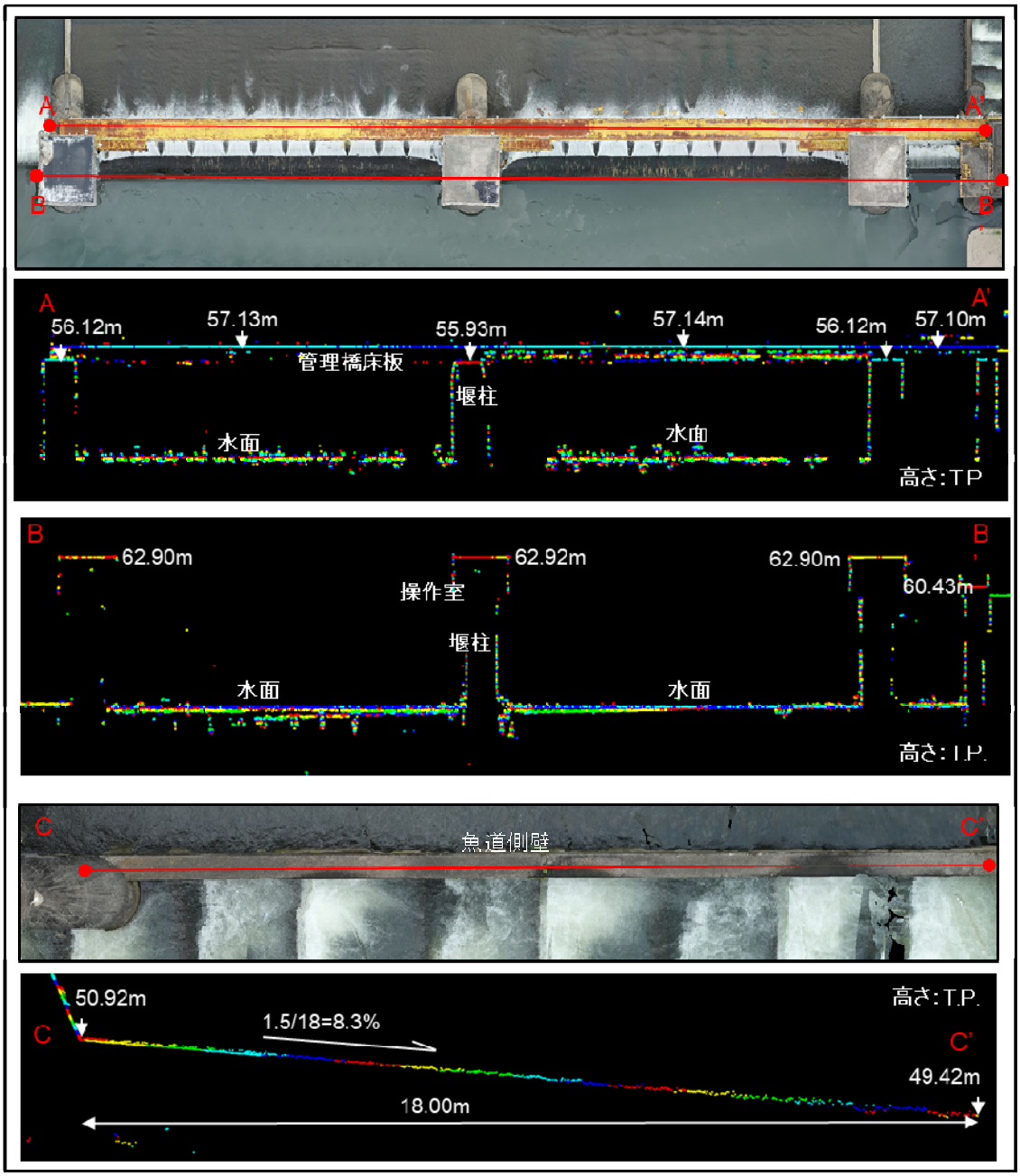


図 6.9　　3 次元点群による施設標高の計測事例（J 頭首工）

② K頭首工

再現結果は、図 6.10 に示すとおりであり、管理橋床板（A-A'断面）では、右岸天端高が 422.39m に対し左岸側で 422.51m と 12cm 程度の高低差が認められる。

一方、操作室・ゲート（B-B'断面）、護床工（C-C'断面）では、それぞれ 417.97～418.01m 及び 414.96～415.06m と、構造的には大きな変化はなく、部分的な欠損、沈下等の変状もないことが確認できる。

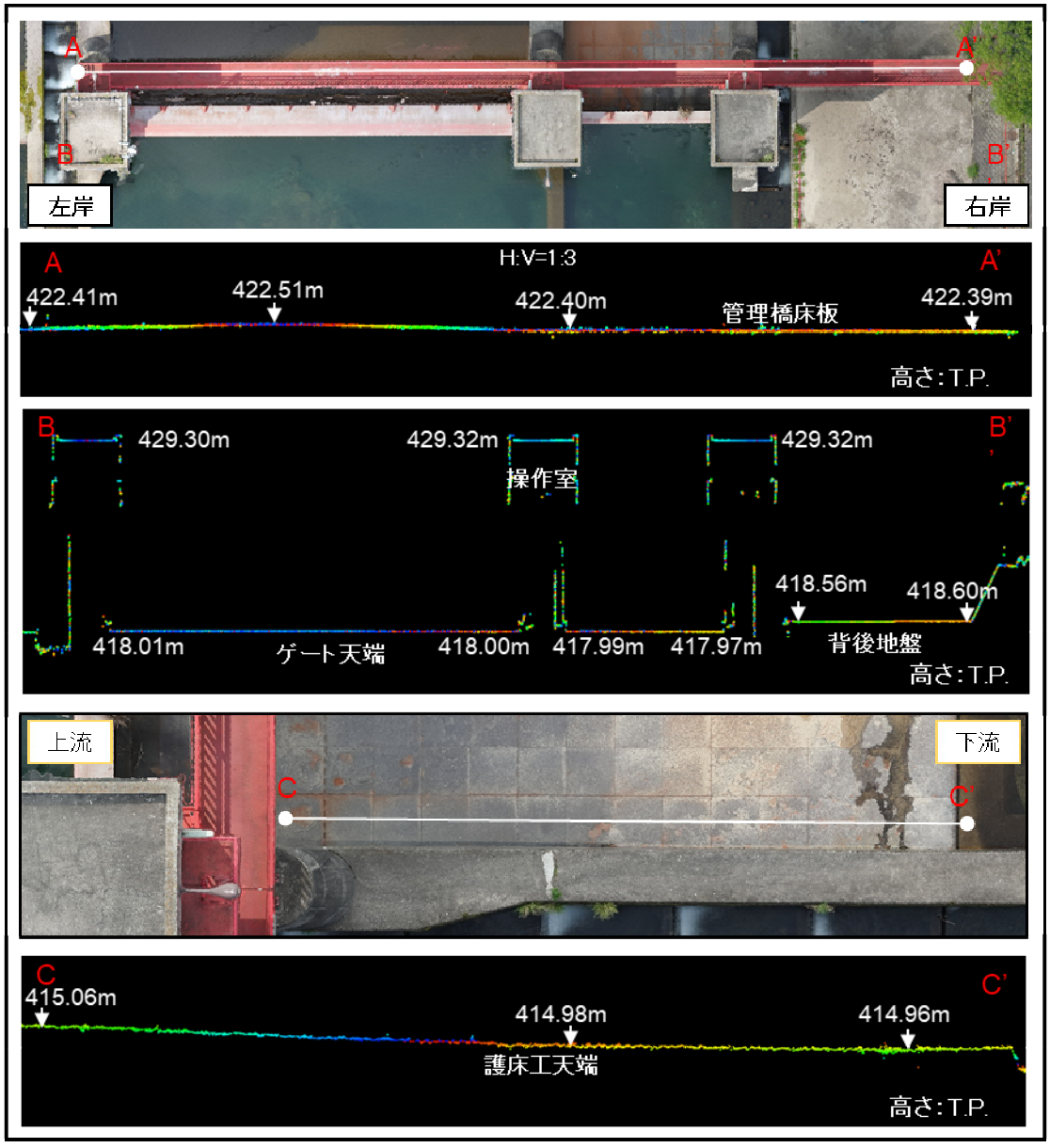


図 6.10　　3 次元点群による施設標高の計測事例（K頭首工）

③ L 井堰

橋梁道路面（A-A’断面）、左岸ゲート（B-B’断面）及び右岸ゲート（C-C’断面）では、図 6.11 に示すように、いずれの施設高も数 cm 以内と同一レベルにあり、道路、ゲートとも縦断方向での湾曲部分的な沈下なども確認できない。

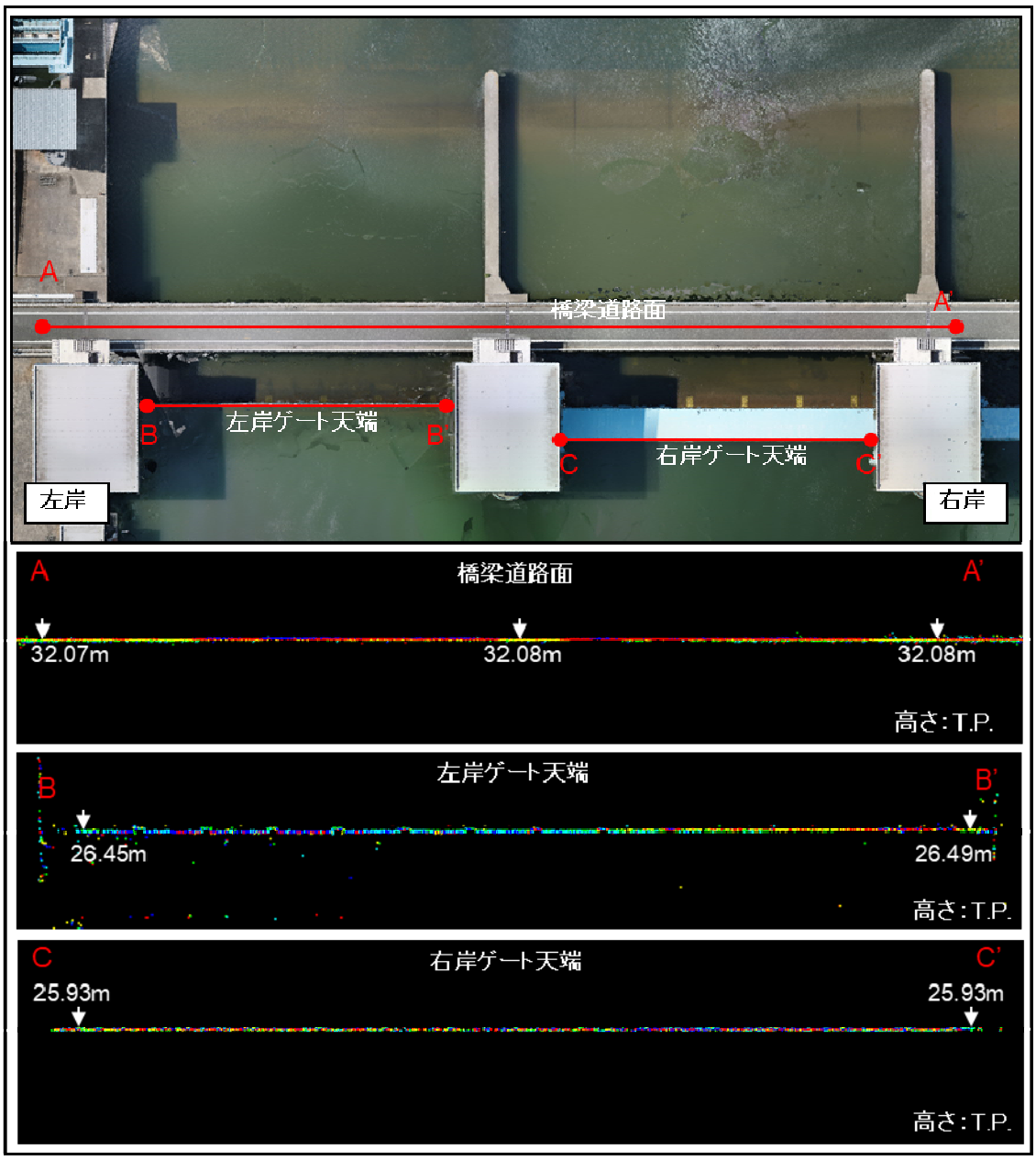


図 6.11　　3 次元点群による施設標高の計測事例（L 井堰）

6.3.3 施設点検への適用結果

頭首工点検への適用結果は、表 6.9 に示すとおりであり、計測型 UAV(f=50mm)では、幅 1mm 以上のひび割れおよびひび割れ以外の変状（剥離、摩耗、損傷等）の抽出が可能である。また、ひび割れ幅 0.2mm 以上の抽出には、計測型 UAV(f=135mm)で可能であり、UAV 計測は、これら 2 種のレンズ併用により、頭首工での「現地調査レベル」の点検に適用可能である。

一方、簡易型 UAV では、通常高度の運用で幅 2mm 以下でのひび割れ抽出が困難であることより、補修段階（S-3）より軽度な変状抽出への適用は難しい。しかし、距離 10m 以内の近接撮影では、幅 2mm 程度のひび割れも抽出が可能となるため、UAV 計測は撮影高度の組合せ等を実施することにより、補修・補強段階（S-3～S-1）を対象とした点検への適用が可能になる。

表 6.9　頭首工点検でのＵＡＶ計測の適用性（現地調査レベル）

評価項目(変状種別)					簡易型UAV	計測型UAV	
					(f=3.6mm,8.8mm,距離=30～35m)	(f=50mm,距離=40～50m)	(f=135mm,距離=10m)
					単画像、オルソ画像 3次元点群データ	単画像、オルソ画像 3次元点群データ	単画像
内部要因	構造物自体の変状	ひび割れ	形状と幅（有筋）	目地間中央や 部材解放部の垂直ひび割れ	○有無の判定（抽出） 幅2mm程度のひび割れでも抽出が困難であり、ひび割れを対象とした点検への適用性は低い。 （評価区分S-3の最小ひび割れを抽出できない）	○有無の判定（抽出） 評価区分S-3以下（幅1mm以上）のひび割れの抽出が可能であるが、壁体が陰となっている場合、壁体が粗粒状態となっている場合は、抽出が難しい場合がある。 ○規模の計測 ひび割れ幅の定量的な計測は、周辺物との比較により定性的な計測となり、ランク境界付近のひび割れ規模は、主観的な判断により評価ランクが異なってくる。	○有無の判定（抽出） 評価区分S-4以下（幅0.2mm以上）のひび割れの抽出が可能である。 ○規模の計測 ひび割れ幅の定量的な計測は、周辺物との比較により定性的な計測となり、ランク境界付近のひび割れ規模は、主観的な判断により評価ランクが異なってくる。ただし、画像が鮮明（解像度が高い）ため、規模の判定精度は、計測用UAV（f=50mm）に比べて高くなる。
				特徴的な形状を示さないひび割れ			
				格子状・亀甲状などのひび割れ			
				側壁を横切るような水平 又は斜めのひび割れ			
				鉄筋に沿ったひび割れ			
			進行性（ASRや凍害などの場合）				
				ひび割れ規模			
				ひび割れ付随物			
				ひび割れからの漏水			
				ひび割れ段差			
		ひび割れ以外の劣化	浮き		○有無の判定（抽出） 幅2mm以下のひび割れの抽出が困難であることから、小規模な変状の有無の判定はできない。 ○規模の計測 部分・全体的の判定は可能であり、平面的な規模はデジタルオルソからの計測が可能である。	○有無の判定（抽出） 幅1mm以上のひび割れの抽出が可能であることから、これらの変状の有無の判定は可能である。 ○規模の計測 部分・全体的の判定は可能であり、平面的な規模はデジタルオルソからの計測で可能である。	○有無の判定（抽出） 幅0.2mm以上のひび割れの抽出が可能であることから、微細な変状の有無の判定が可能である。 ○規模の計測 変状規模は、周辺物との比較による定性的な平面計測となる。 厚さ、深さ等の鉛直方向の規模計測は困難である。
			剥離・剥落				
			析出物（エフロエッセンス・ゲルなど）				
			錆汁				
			摩耗・すりへり （全体的の場合1ランクダウン）				
			鉄筋露出の程度				
外部要因		変形・歪み	変形・歪みの有無		○有無の判定（抽出）/規模計測 デジタルオルソ、三次元点群データから計測することで抽出・計測が可能である。ただし、変状範囲に対して変形・歪み量や沈下量が小さい場合は、画像からの抽出は困難で、三次元点群データが有効である。	○有無の判定（抽出）/規模計測 デジタルオルソ、三次元点群データから計測することで抽出・計測が可能である。ただし、変状範囲に対して変形・歪み量や沈下量が小さい場合は、画像からの抽出は困難で、三次元点群データが有効である。	○有無の判定（抽出）/規模計測 平面的な変状は、計測用UAV（f=50mm）より詳細な確認が可能である。 変状規模は、周辺物との比較による定性的な平面計測となる。 厚さ、深さ等の鉛直方向の規模計測は困難である。
		欠損・損傷	欠損・損傷の有無 戸当たり周辺、巻き上げ機周辺の損傷				
		不同沈下	構造物の沈下、傾倒				
	構造物周辺	地盤変形	下流側護床工の消失・沈下		○有無の判定（抽出）/規模計測 デジタルオルソ、三次元点群データから計測することで抽出・計測が可能である。	○有無の判定（抽出）/規模計測 デジタルオルソ、三次元点群データから計測することで抽出・計測が可能である。	○有無の判定（抽出）/規模計測 平面的な変状は、計測用UAV（f=50mm）より詳細な確認が可能である。 変状規模は、周辺物との比較による定性的な平面計測となる。 厚さ、深さ等の鉛直方向の規模計測は困難である。
			床板・エプロン下からの噴水				
			周辺地盤の沈下、陥没、ひび割れ				
その他要因	目地の変状（護岸、エプロン、構造物境界）		目地の開き		○有無の判定（抽出）/規模計測 段差以外については、ひび割れ規模と同等の変状抽出が可能である。 段差は、三次元点群データにより確認が有効である。 ○規模計測（段差） 高さ精度がRSMEで1cm程度であることから、2cm程度の精度で可能である。	○有無の判定（抽出）/規模計測 段差以外については、ひび割れ規模と同等の変状抽出が可能である。 段差は、三次元点群データにより確認が有効である。 ○規模計測（段差） 高さ精度がRSMEで7mm以下であることから、1cm程度の精度で可能である。	○有無の判定（抽出） 平面的な変状は、計測用UAV（f=50mm）より詳細な確認が可能である。 ○規模計測（段差） 変状規模は、周辺物との比較による定性的な平面計測となる。 厚さ、深さ等の鉛直方向の規模計測は困難である。
			段差				
			止水板の破断				
			漏水の状況				
			周縁コンクリートの欠損等				
	管理橋		横桁や床板の損傷 沓座・堰柱張出部の損傷		○有無の判定（抽出）/規模計測 幅2mm以下のひび割れが抽出が困難であることから、小規模な変状の有無の判定はできない。	○有無の判定（抽出）/規模計測 幅1mm以上のひび割れが抽出可能であることから、これらの変状の有無の判定は可能である。	○有無の判定（抽出）/規模計測 平面的な変状は、計測用UAV（f=50mm）より詳細な確認が可能である。 変状規模は、周辺物との比較による定性的な平面計測となる。 厚さ、深さ等の鉛直方向の規模計測は困難である。
	操作室		壁・柱の損傷・ひび割れ				

目　　次

7. 用排水機場 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 205
7.1 UAV 計測における調査計画 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 207
7.1.1 調査概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 207
7.1.2 調査方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 209
⑴ 留意点 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 209
⑵ 撮影方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 210
⑶ 撮影写真の諸元 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 211
7.2 UAV 計測の活用について ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 212
7.2.1 施設点検への適用性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 212
7.2.2 施設点検への活用手順 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 214
7.3 UAV 計測による変状解析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 216
7.3.1 撮影画像（単写真） ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 216
⑴ ひび割れ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 216
⑵ 近接撮影 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 219
7.3.2 ３次元点群データ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 222
⑴ オルソ画像 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 222
⑵ 施設形状 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 226
⑶ 変状計測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 229
7.3.3 施設点検への適用結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 233

7. 用排水機場

【記載概要】

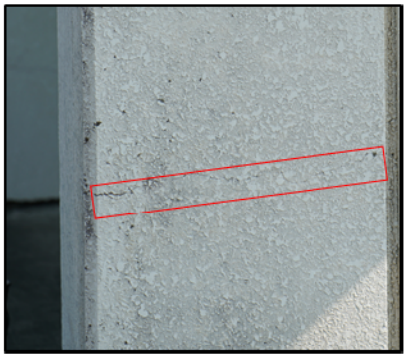
本項は、用排水機場を対象に、UAV 計測による画像、3 次元点群データの活用を検討した事例である。

撮影機種は、ひび割れ抽出や 3 次元計測など高解像度の画像を取得するため、装着レンズを交換可能な一眼レフカメラを搭載した大型の計測型 UAV と、広く普及しているコンパクトデジカメ相当のカメラを搭載した小型で安価な簡易型 UAV を用いた。

UAV 計測では、だれもが高精度な三次元モデル・オルソを作成できるように、予めプログラミングした飛行コースに沿って GNSS を利用した自律飛行、さらには、施設特性である複雑な形状を考慮した手動による近接撮影を実施した。記載内容は、UAV 計測の調査計画、活用、変状解析の 3 項目から構成されており、画像、3 次元点群データによる変状解析の内容、精度についての事例を紹介している。

施設点検への適用については、ポンプ設備を除く建屋、コンクリート施設を対象に検討したが、建屋の劣化、建屋周辺の地盤変形など目視点検調査で有効活用できることが明らかになった。

大　項　目	中　　項　　目	記　　載　　内　　容
UAV計測による調査計画	調査概要	実証用排水機場の概要
	調査方法	留意点、撮影方法、撮影写真の諸元
UAV計測の活用について	施設点検への適用性	点検対象施設及び準用図書の決定とUAV計測の対象範囲
		適用性を検討する施設の変状項目
	施設点検への活用手順	施設点検での活用方法、変状項目の抽出手法・結果の概要、近接撮影
UAV計測による変状解析	撮影画像	ひび割れ、鉄筋露出等の抽出事例、計測型・汎用型UAVの比較
	3次元点群データ	オルソ画像による地形・施設形状、構造物（給水塔、管理棟、フェンス、電気設備等）・地盤の高さ
	施設点検への適用結果	用排水機場におけるUAV計測の適用性結果

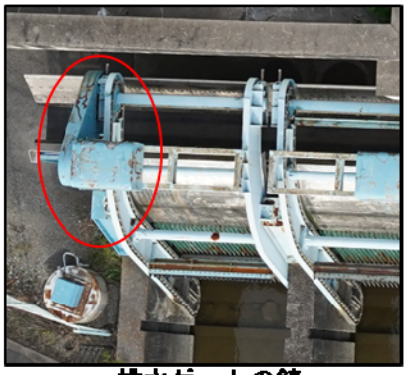


建屋のひび割れ

建屋のひび割れ修復跡

給水塔屋上のひび割れ

給水塔側壁のひび割れ



排水ゲートの錆

作業出入口屋上のひび割れ

建屋屋上の析出物（エフロエッセンス）

写真 7.1　　用排水機場における代表的な変状写真

7.1 UAV 計測における調査計画

7.1.1 調査概要

事例調査は、表 7.1 に示す 3 施設で実施し、対象とした用排水機場は写真 7.2 に示すとおりである。

調査では、表 7.1 に示した調査諸元で、単写真による変状目視、3 次元計測による変状の定量化について検討し、UAV 機種、カメラのレンズ（焦点距離)、撮影高度などによる計測成果を比較した。

表 7.1　　用排水機場調査概要

施設名称	調査年月	使用UAV				構造／調査箇所
		計測型		簡易型		
		50mm	135mm	3.6mm	8.8mm	
N用排水機場	2017.7	○	○	○		コンクリート・レンガ等 建屋（屋根、壁面等）
O用排水機場	2017.12	○	○			
P揚水機場	2018.7				○	
注）使用UAVの最下段はレンズの焦点距離を示している。						

用排水機場は、ポンプ設備などの「施設機械設備」を中心に、「コンクリート施設」や「建屋」などの異なる機能を有する複数の施設・設備から構成され、その構造形態も様々である。

また、「農業水利施設の機能保全の手引き「ポンプ場（ポンプ設備)」平成 25 年 4 月（平成 27 年 2 月正誤表対応版）農林水産省農村振興局整備部設計課」では、ポンプ設備を除くコンクリート施設、建屋などの機能診断の評価基準が規定されていない。

このため、用排水機場の機能診断では、コンクリート施設、建屋のひび割れ、変状等を対象に、開水路の評価基準表（前出表 4.5）を準用して検討する。

したがって、撮影方法としては、一定の垂直・斜め撮影だけでなく、目標とした構造物の変状箇所に対して、ホバリングによる正確な近接撮影が必要となる。

近接撮影では、建屋の屋上・壁面などのひび割れ、鉄筋露出等の変状抽出を目的に実施したが、その撮影方法としては、①望遠レンズ（f=135mm）を装着した大型な計測型 UAV、②広角レンズ（f=8.8mm）を装着した軽量小型な簡易型 UAV を用いた二とおりの手動計測を検討した。

建屋外観（表側）

建屋外観（裏側）

写真 7.2(1)　　用排水機場の調査地区概観（N用排水機場）

建屋外観（全景）

建屋外観（表側）

写真 7.2(2)　　用排水機場の調査地区概観（O 用排水機場）

建屋外観（全景）

建屋外観（側面）

写真 7.2(3)　　用排水機場の調査地区概観（P 揚水機場）

7.1.2 調査方法

(1) 留意点

用排水機場（ポンプ場）は、吸込水槽、吐出し水槽、沈砂池等の「コンクリート施設」とポンプ室、操作室、電気室等の「建築施設（建屋）」及びポンプ設備、電気設備、水管理制御設備等の「施設機械設備」など、異なる機能を分担する施設・設備から構成される複合施設である。

このため、施設敷地には、配水塔や避雷針、電源を供給する電柱、電線・ケーブル等が配備されており、UAV 計測では、以下のような事項に留意する必要がある。

① 画像、3 次元データの撮影では、対象施設の特性、さらに対象とする変状が取得できる撮影方法、撮影高度、地上解像度などより、使用 UAV、レンズ、操作法（自動、手動）を決定する。

② SfM（Structure from Motion）は、水面、樹木など風の影響を受ける地物、太陽光の影響による水面反射、施設陰影が撮影されると、3 次元モデリング精度の低下や 3 次元点群の欠損等が発生する。このため、撮影時期は、無風・弱風が頻発しやすい季節で、天候が曇りあるいは陰影等が発生しにくい正午前後（太陽が南中）に設定することが望ましい。

③ 建屋などコンクリート施設での撮影では、「農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」（農村振興局、平成 28 年 8 月）」を準用したため、施設の健全度評価の観点から、ひび割れ幅 0.2mm 以上の変状を観察する必要がある。したがって、撮影では、低空飛行による近接の望遠撮影を実施することになるため、正確な飛行位置を制御する RTK-GNSS 装置、カメラの画角を安定に制御する三軸ジンバルなどの活用が望ましい。

(2) 撮影方法

用排水機場では、図 7.1 に示すように、3 次元点群データの取得を目的に、計測型 UAV と簡易型 UAV を用いて、上空から施設の縦断方向に対して平行に垂直撮影及び斜め撮影を行った。

垂直撮影では、いずれの UAV でもオーバーラップ（OL）率 80%以上、サイドラップ（SL）率 60%以上とした。また、斜め撮影では、未撮影区域を発生させないラップ率で実施するとともに、撮影距離 10m 程度からの近接スポット撮影を実施した。

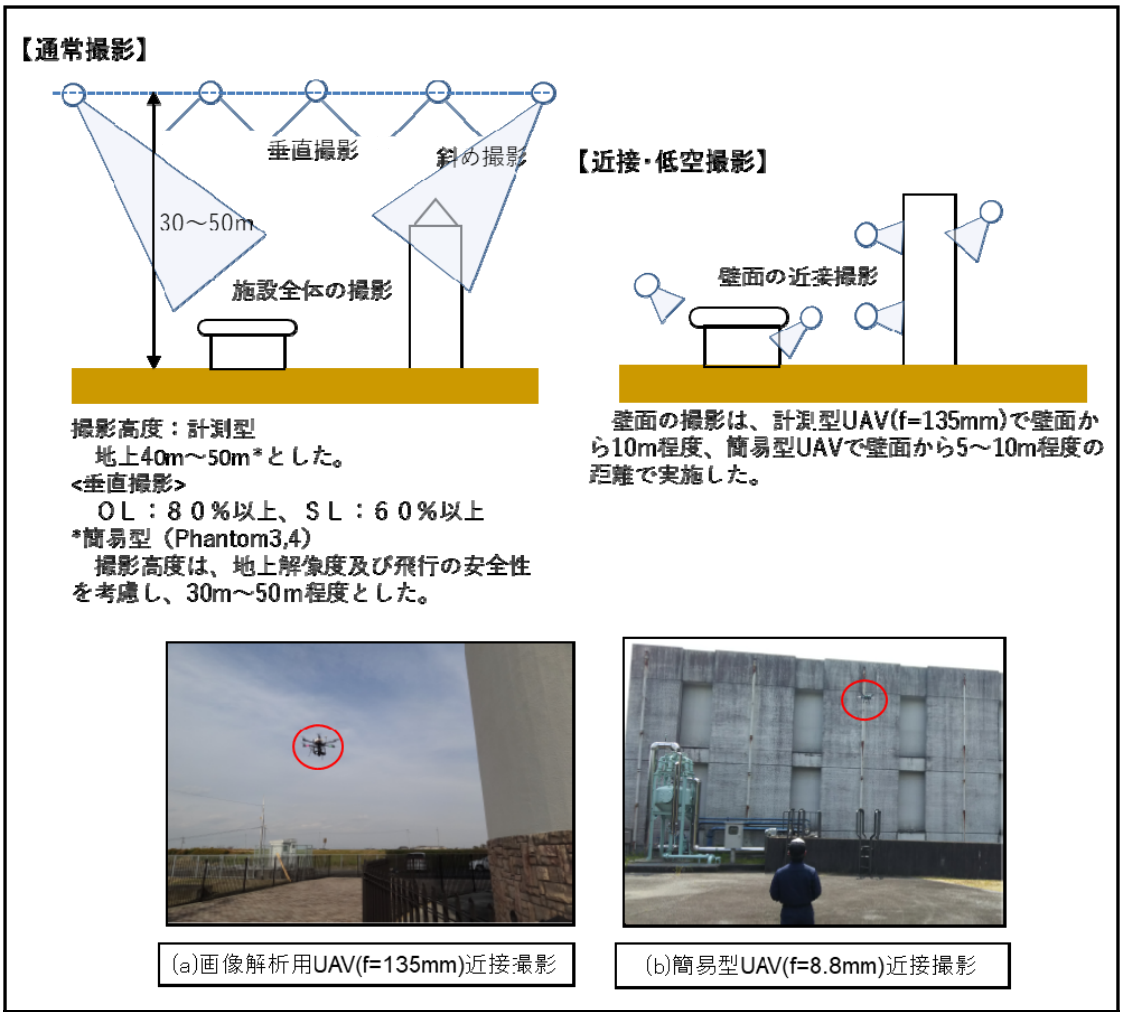


図 7.1　　用排水機場での UAV 計測方法

(3) 撮影写真の諸元

頭首工での UAV 計測で撮影した空中写真の諸元は、表 7.2 に示すとおりであるが、3 次元解析では、3 次元モデリングの位置精度（RMS 誤差）を確認した上で実施した。

表 7.2　用排水機場の 3 次元解析に使用した撮影写真の諸元

施設名称	調査年月	撮影方法	使用UAV				平均撮影高度（m）	平均地上解像度（cm）	RMS誤差	
			計測型		簡易型				水平（cm）	鉛直（cm）
			50mm	135mm	3.6mm	8.8mm				
N用排水機場	2017.7	鉛直・斜め	○	○			54	0.65	0.5	1.8
					○		47	1.99	0.8	1.4
O用排水機場	2017.7		○	○			42	0.50	1.4	1.2
P揚水機場	2018.7					○	29	0.77	1.5	0.2

注）撮影高度、平均地上解像度、RMS誤差は、３次元点群作成時における計算数値である。

7.2 UAV 計測の活用について

7.2.1 施設点検への適用性

用排水機場（ポンプ場）は、前述したように、「コンクリート施設」、「建築施設（建屋）」及び「施設機械設備」など、異なる機能を分担する施設・設備から構成される複合施設であり、手引きとしては、「ポンプ設備」のみを扱っている。

また、ポンプ設備を除く主要な施設の性能確認項目と準用すべき図書は、表 7.3 に示すとおりであり、UAV 計測の活用対象としては、建屋、コンクリート施設とする。

なお、建屋の準用図書である「建築物等の保全に関する基準の実施に係る要領」は、表 7.4 に示すとおりであり、外観目視による判定基準には、定量的な規模は示されていない。

表 7.3　　主要な施設・設備の性能確認項目及び準用図書

凡例：赤文字は UAV 計測対象項目

施設・設備名	性能確認項目	準用図書
導水路	・堆砂 ・漏水、ひび割れ ・不同沈下	農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」又は「パイプライン」
吸込水槽 吐出し水槽	・地盤の沈下 ・堆砂、水位※1 ・漏水、ひび割れ	農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」
建　　屋	・床面の沈下、傾斜 ・壁面のひび割れ ・柱、梁、筋交いの亀裂、変形、損傷、腐食 ・屋根のひび割れ、反り	農業水利施設の機能保全の手引き及び国家機関の建築物等の保全に関する基準の実施に係る要領※2
附帯設備 （水門設備、除塵設備）	・変形、摩耗、腐食 ・振動、異音 ・堆砂	農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工(ゲート設備)」
取水口沈砂池 吐出し樋門	・欠損、ひび割れ ・堆砂	農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工」
送水路	・振動・異音 ・亀裂、破損 ・不同沈下	農業水利施設の機能保全の手引き「パイプライン」
ポンプ設備のうち 監視設備、電気設備	・計器表示、作動状況 ・振動、異音 ・絶縁状態 ・予備品保有状況	農業用施設機械設備更新及び保全技術の手引き

注）※1：吸込水槽及び吐出し水槽の水位

※2：建築構造別の確認部位、判断基準を規定（「国家機関の建築物等の保全に関する基準の実施に係る要領」国土交通省大臣官房官庁営繕部長 最終改正 平成２２年3月３１日 国営管第 482 号 国営保第 30 号）

出典：農業水利施設の機能保全の手引き「ポンプ場（ ポンプ設備）、平成２５年４月　（平成２７年２月正誤表対応版）農林水産省農村振興局整備部設計課

表 7.4　　外観に係る建築物の確認項目と判定基準

確認項目		確認方法	支障がある状態の判定基準
敷地及び建物の各部	確認を要する状況		
建築物の敷地及び地盤面	地盤の不陸、傾斜等	目視	一目で分かるき裂、不陸、傾斜、陥没があること
	敷地内の排水		排水に不良があること
	植栽		植栽に一目で分かる枯れ、傾き、病害虫の発生があること
構造耐力上主要な部分	基礎・土台の外観、沈下	目視	沈下、き裂その他の損傷、変形又は腐食があること。
	壁の外観		・建築物の傾斜又は明らかな不同沈下による変形があること。 ・構造耐力を損なうおそれがあるき裂、損傷、変形又は腐食があること。 ・柱の脚部のコンクリートに鉄筋のさびが流れ出ている ・鉄骨の部材の接合部における緩みがあること。
	柱の外観		
	小屋組の外観		
	斜材の外観		
	床板の外観		
	屋根板の外観		
	はり、けたの外観		

資料）「国家機関の建築物等の保全に関する基準の実施に係る要領」国土交通省大臣官房官庁営繕部長 最終改正 平成２２年3月３１日 国営管第 482 号 国営保第 30 号を抜粋

用排水機場の変状を把握する調査項目としては、建屋、コンクリート施設の「ひび割れ、変形、損傷、腐食、不同沈下等の変状」とし、UAV 計測では、目視・計測を対象とした調査手法について活用を検討した。

すなわち、本手引きでは、UAV 計測による撮影写真、画像解析（3 次元計測）を活用し、その適用性について確認した。

なお、本手引きでは、開水路における健全度指標（前出表 4.4）、施設状態評価（前出表 4.5）を参考に、変状の計測精度、抽出程度について検討した。

7.2.2 施設点検への活用手順

本手引きでは、UAV 計測を用いた空中写真撮影、SfM 解析を実施し、写真画像を用いたひび割れ、亀裂、損傷、腐食等の判読に加えて、対象構造物の 3 次元データを取得し、これに基づく構造物の変状抽出を行って施設維持管理への適用可能性（表 7.5）について検討し、その手法の精度，効率性等について取りまとめた。

すなわち、用排水機場では、UAV 計測と SfM 解析を組み合わせ、撮影写真、オルソ画像、3 次元点群データを生成し、図 7.2 に示すような活用方法を検討した。

検討にあたっては、構築された 3 次元点群データの精度を基準点・標定点の測量結果より検証し、RMS 誤差が約 2cm 以下の高精度地形モデルであることを確認した。

次に、検討では、得られた単写真，オルソ画像および 3 次元地形モデルより、抽出可能な標高・横断図等を用いて、建屋、敷地の変状の抽出・計測を行い、その適用性、その手法の精度、効率性について取りまとめた。

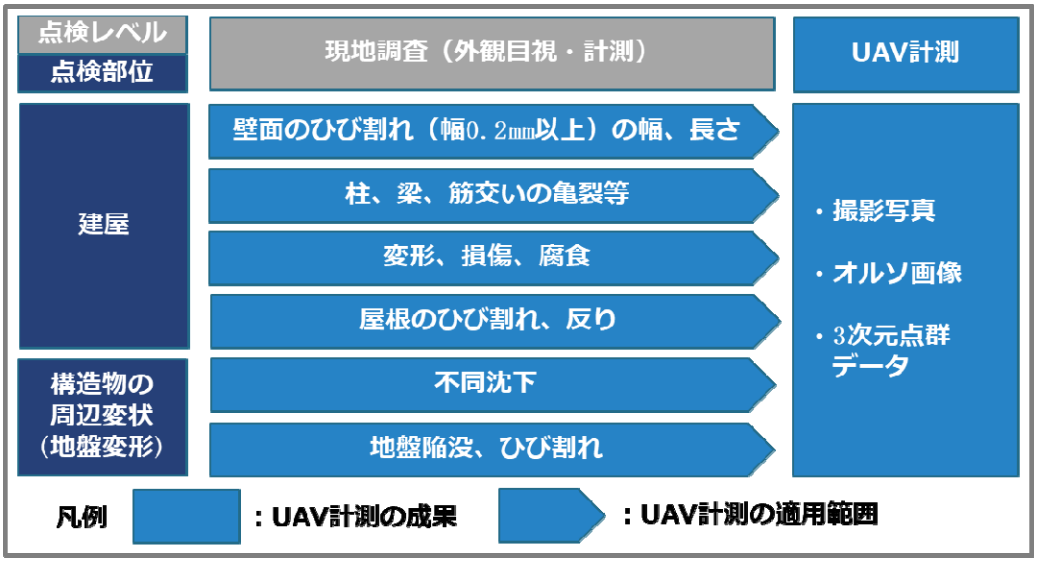


図 7.2　　用排水機場での UAV 計測の活用手順

用排水機場には、配水塔や避雷針、電源を供給する電柱、電線・ケーブルなどが設置されているため、ひび割れ・変状観察では、施設への接触など支障を及ぼさないように、近接撮影を実施する必用がある。具体的には、建屋壁面のひび割れ・変状観察などであり、望遠レンズ（f=135mm）による撮影だけでなく、小型軽量で機動性が高い簡易型 UAV を用いた手動操作での適用性について検討した。

表 7.5　UAV 計測の活用により確認できる変状項目

凡例　●：現地確認済、○：活用可能（確認事例より判定）、×：活用不可

評価項目（変状種別）			単写真（画像）	3次元計測＊
対象可能なひび割れ幅：確認事例より判定			0.2mm≧	0.5mm≧
構造物自体	建屋の劣化	壁面のひび割れ	●	●
		柱、梁、筋交いの亀裂等	○	○
		変形、損傷、腐食	●	○
		屋根のひび割れ、反り	●	○
構造物周辺の変状	地盤変形	背面土の空洞化（内部空洞除く）	○	○
		周辺地盤の陥没・ひび割れ	●	●
		抜け上がり	X	●

注）＊3次元計測とは、オルソ画像、3次元点群データを用いた定量計測を示す。

7.3　UAV 計測による変状解析

7.3.1 撮影画像（単写真）

(1) ひび割れ

用排水機場の機能診断調査は、表 7.6 に示すように開水路に準じるため、最小のひび割れ幅である 0.2mm を抽出する必要がある。ひび割れ幅の抽出には、撮影カメラとレンズ焦点距離、撮影距離の組合せによる地上解像度で決定される。

また、画像検証としては、地上から簡単に計測可能な箇所でのひび割れをクラックスケールにより計測した。さらに、建屋の高い場所の壁面、屋根など人が地上から簡単に計測することが困難である場所は、次に示す方法でひび割れ幅を推定した。

すなわち、写真画像のひび割れ幅の実際の大きさは、図 7.3 に示すとおり、「カメラの１画素の寸法ｂ」及び「焦点距離ｆと被写体までの離隔距離Ｈによって決まる縮率Ｃ」により推定した。

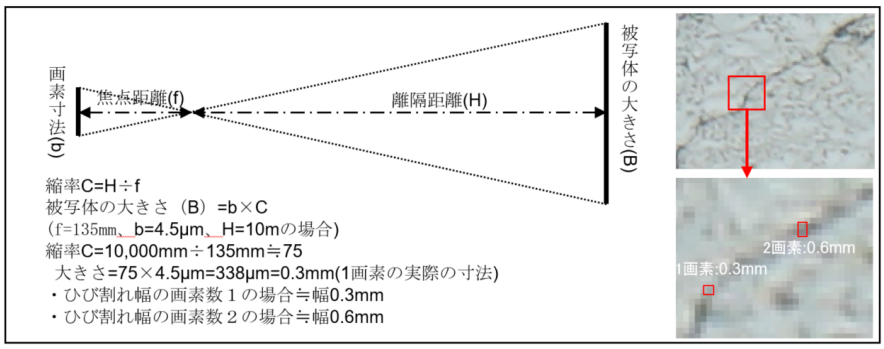


図 7.3　　ひび割れ幅の推定方法

表 7.6　　鉄筋コンクリート施設におけるひび割れの施設状態評価指標（開水路）

評価ランク	施設の状態	ひび割れ規模
Ｓ－5	変状がほとんど認められない状態	最大ひび割れ幅 0.2mm 未満
Ｓ－4	軽微な変状が認められる状態	最大ひび割れ幅 [0.2mm 以上～0.6mm 未満] 0.2mm～1.0mm 未満
Ｓ－3	変状が顕著に認められる状態 劣化の進行を遅らせる補修工事などが適用可能な状態	最大ひび割れ幅 [0.6mm 以上] 1.0mm 以上
Ｓ－2	施設の構造的安定性に影響を及ぼす変状が認められる状態 補強を伴う工事により対策が可能な状態	S-3 に該当するものが全体的
Ｓ－1	施設の構造的安定性に重大な影響を及ぼす変状が複数認められる状態 近い将来に施設機能が失われる、または著しく低下するリスクが高い状態 補強では経済的な対応が困難で、施設の更新が必要な状態	S-2 の状態がさらに進行した状態

注）[　] 内は、厳しい腐食状況の場合に適用する。
資料：資料：農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」　（農林水産省農村振興局、平成 28 年 8 月）より編集

幅 0.2mm のひび割れは、写真 7.3 に示すように、計測型（f=135mm）による近接撮影（距離 10m 程度）では、しっかり抽出可能となっている。また、計測型(f=50mm)での通常撮影（距離 55m）では、写真 7.4 に示すように、幅 1mm 未満のひび割れの抽出が困難であり、微細なひび割れを対象とした点検への適用性は低い。

さらに、簡易型(f=3.6mm)の通常撮影（距離 37m）では、幅 2～5mm 程度のひび割れの抽出可能である。しかし、ひび割れ画像が不鮮明であり、抽出漏れの恐れがあるため、ひび割れを対象とした点検への適用性は低い。

すなわち、開水路の手引きを準用にすると、計測型(f=135mm)の近接撮影(距離 10m)では、現地調査レベル（近接目視と計測）の点検に適用が可能であり、計測型（f=50mm）の通常撮影では、評価区分 S-3（幅 1mm 以上のひび割れ）より悪化した施設状態の把握には適用可能である。

写真 7.3　計測型（f=135mm）によるひび割れ画像の撮影事例

① 幅数 2～5㎜ 程度(推定値)の建屋屋上のひび割れ（N用排水機場　屋上）

【計測型 UAV （f=50㎜）、距離=55m】

【簡易型 UAV （f= 3.6㎜）、距離=37m】

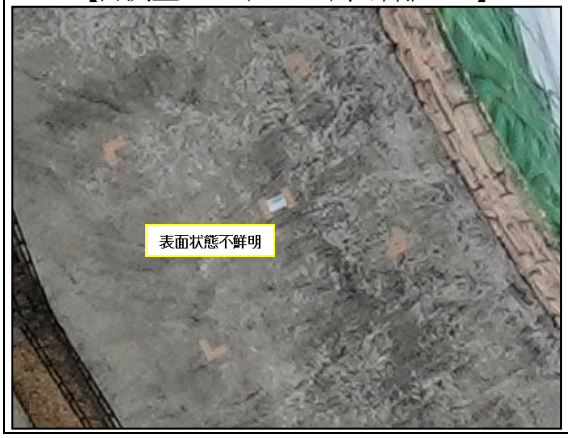
② 幅 1㎜ 未満(推定値)の線状のひび割れ（N用排水機場　屋上レンガ部）

【計測型 UAV （f=50㎜）、距離=55m】

【計測型 UAV （f=135㎜）、距離=10m】

③ 幅 5㎜ 未満(計測値)の網の目状のひび割れ（N用排水機場　建物基部）

【計測型 UAV （f=50㎜）、距離=55m】



【計測型 UAV （f=135㎜）、距離=10m】

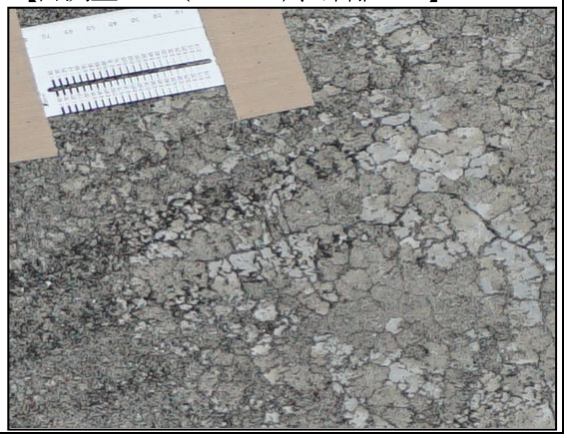


写真 7.4　　ひび割れ画像の撮影距離・焦点距離別比較事例（N用排水機場）

(2) 近接撮影

用排水機場は、配水塔や避雷針、電源を供給する電柱、電線・ケーブルなどが設置されているため、ひび割れ・変状観察では、施設への接触など支障を及ぼさない近接撮影の実施が有効である。本項では、広角レンズ（f=8.8mm）を装着した軽量小型な簡易型 UAV を用いて、飛行の安全性を考慮した撮影距離 5～10m（画像解像度 1.3mm～2.7mm）での活用を検討した。

撮影事例は、写真 7.5 に示すとおりであり、壁面との距離 5m まで接近して撮影した画像（解像度 1.3mm）では、幅 0.5mm 程度までのひび割れが抽出可能になることが確認された。また、壁面との距離 10m まで接近して撮影した画像（解像度 2.7mm）では、写真 7.6 に示すように、幅 2mm 程度のひび割れや比較的小さな損傷や鉄筋の露出が確認された。

以上のことから、簡易型 UAV においても、対象とする変状に対応した撮影距離、レンズの焦点距離を選定することにより、建屋の壁面・屋上等における幅 0.5mm 以上のひび割れや損傷等の点検に対して有効であると実証された。

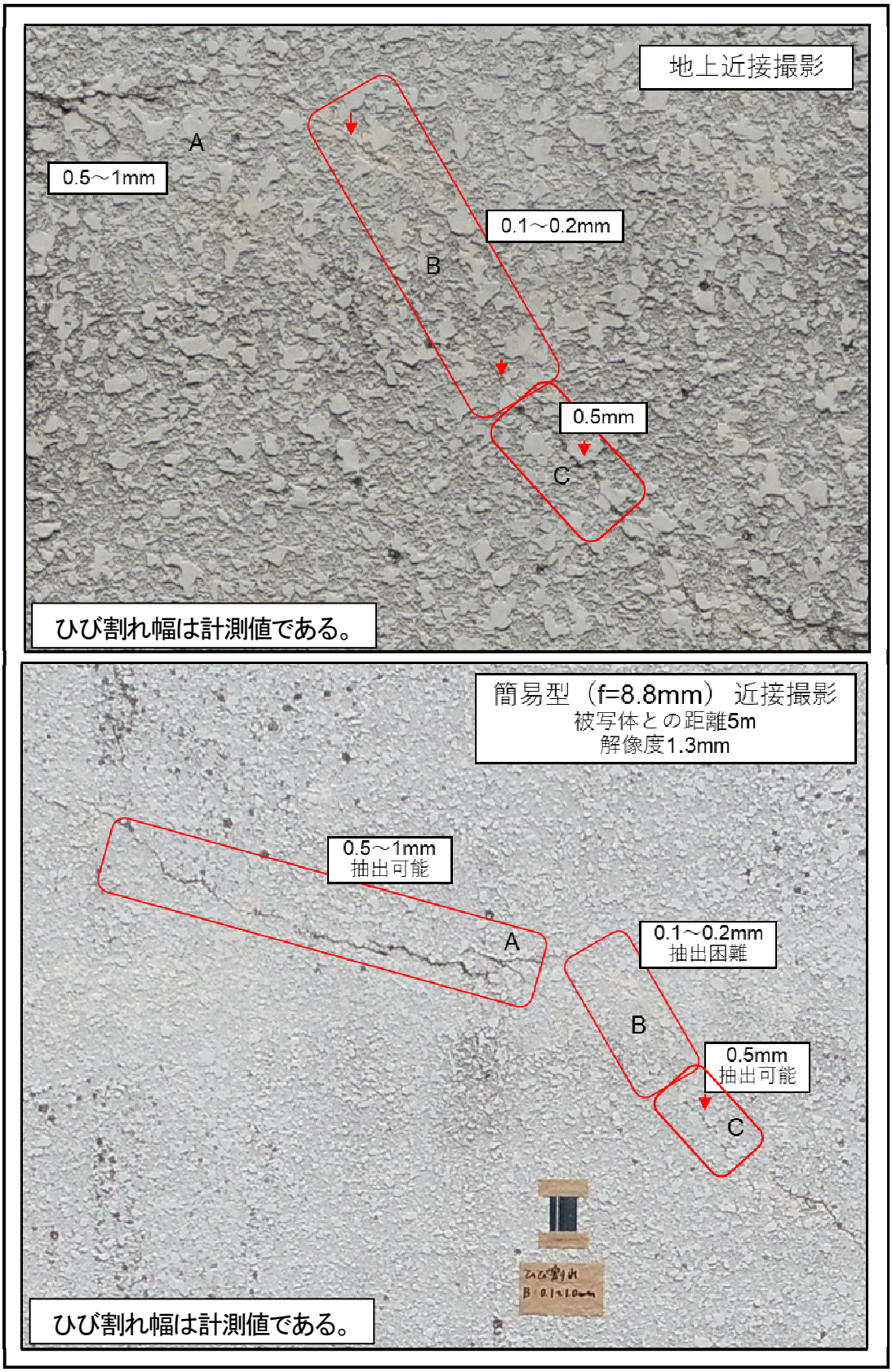


写真 7.5　簡易型（f=8.8mm）によるひび割れの近接撮影事例（P 揚水機場）

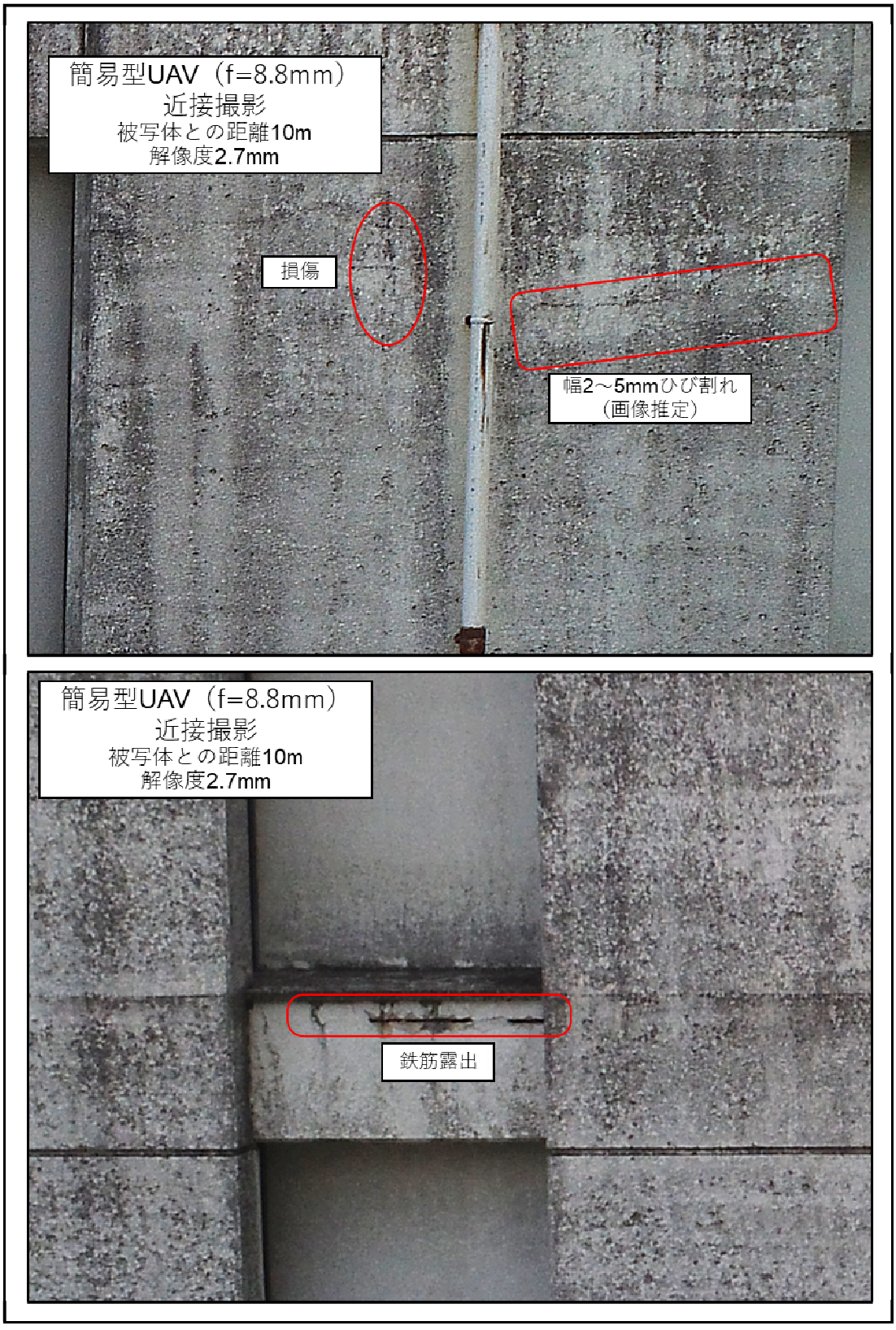


写真 7.6　簡易型（f=8.8mm）による鉄筋露出の近接撮影事例（P 揚水機場）

7.3.2　3 次元点群データ

(1) オルソ画像

オルソ画像とは、写真上の像の位置ズレをなくし空中写真を地図と同じく、真上から見たような傾きのない、正しい大きさと位置に表示される画像に変換（以下、「正射変換」という）したものである。

オルソ画像は、UAV 計測で撮影した画像ならびに SfM（Structure from Motion）を用いた 3 次元解析より得られる 3 次元点群データ（物体の形状を 3 次元座標(x, y, z)）の位置精度を検証した上で作成される。

このため、作成されたオルソ画像は、写真上の像の位置ズレをなくし空中写真を地図と同じく、真上から見たような傾きのない、正しい大きさと位置に表示される画像に変換（以下、「正射変換」という）されている。

したがって、その利点としては、画像上で位置、面積及び距離などを正確に計測可能であり、地図データなどと重ね合わせて利用することができる地理空間情報という点である。また、目視観察として利用するには、位置精度の他に、画面上の変状状況を確認するため、画像解像度が重要となる。

用排水機場は、配水塔や避雷針、電源を供給する電柱、電線・ケーブルなどが設置されているため、適切な画像解像度には、これらの障害物を考慮したレンズ（焦点距離）、撮影高度（飛行高度）の設定が重要となる。本事例は、障害物との接触などを考慮した撮影高度（写真 7.7）に設定した通常撮影を実施したものであり、写真 7.8～7.10 は、作成したオルソ画像を比較検討した結果である。

写真 7.7　　用排水機場の障害物及び高度設定

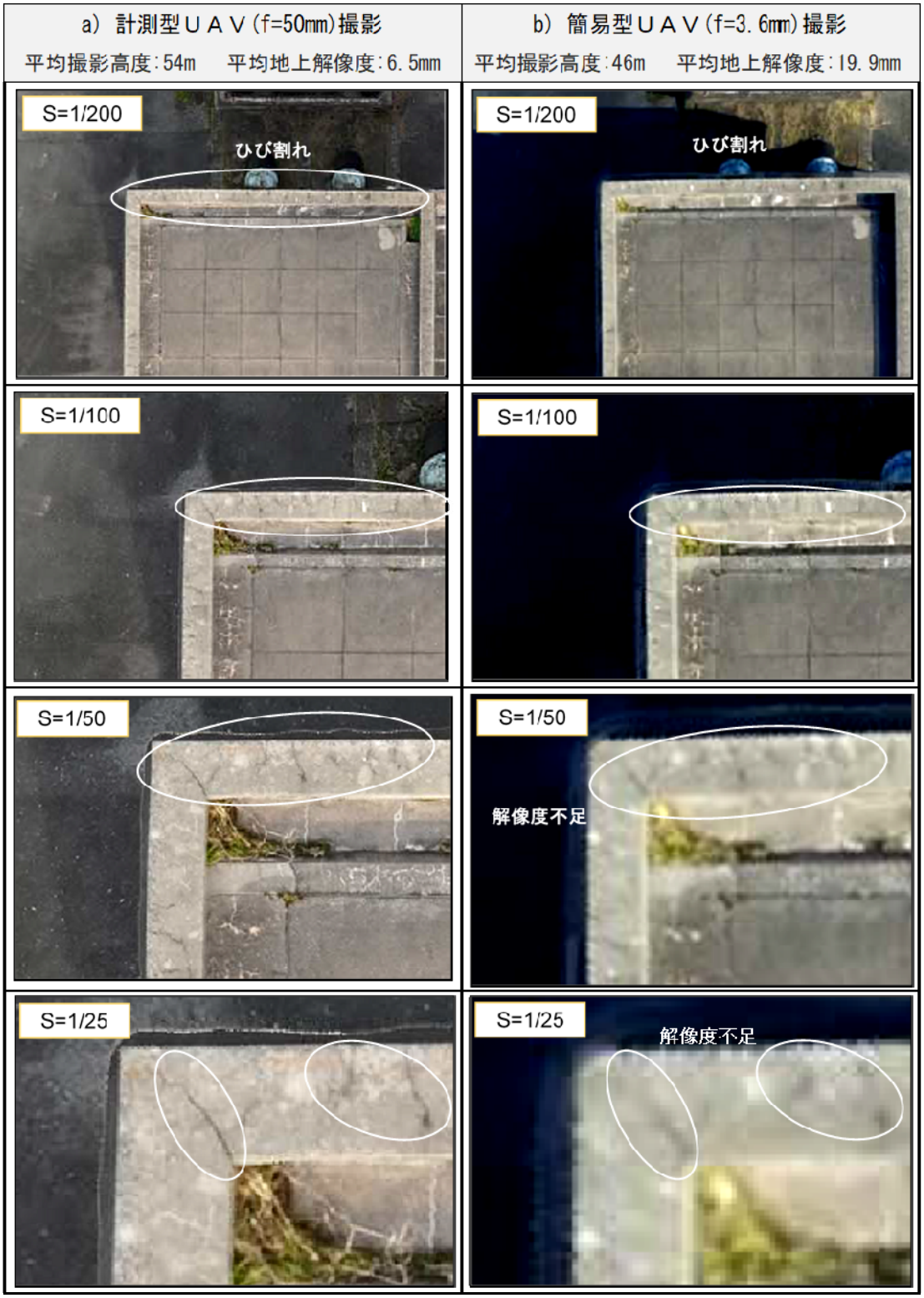


写真 7.8　　オルソ画像の解像度比較（N用排水機場）

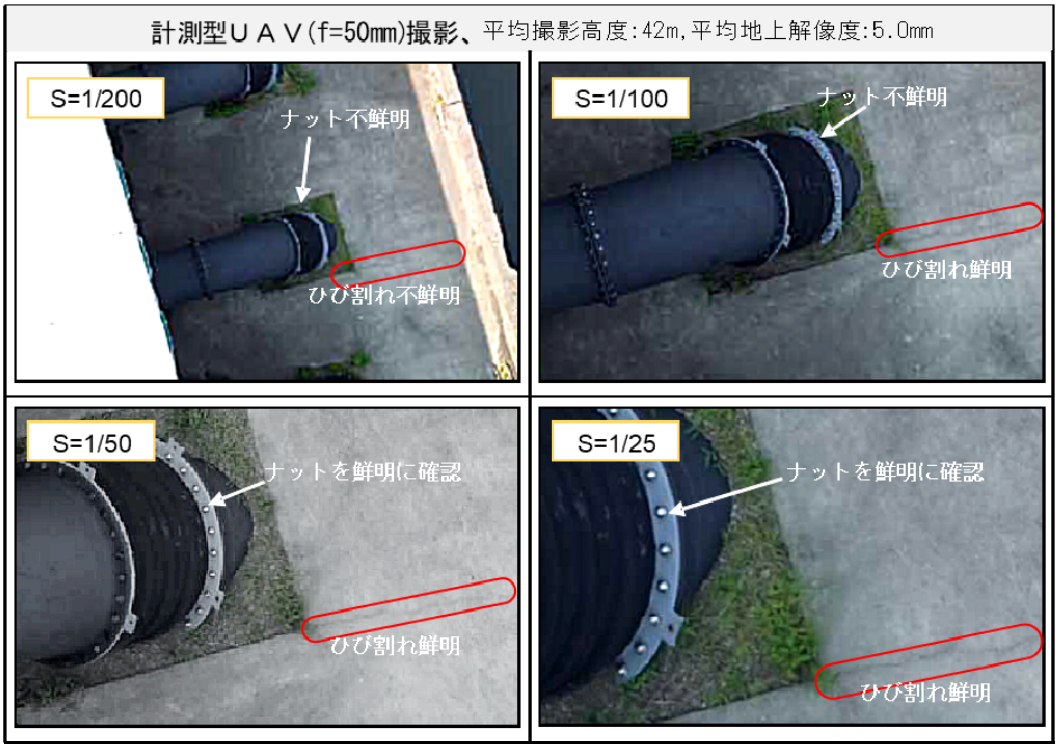


写真 7.9　　オルソ画像の解像度比較（O 用排水機場）

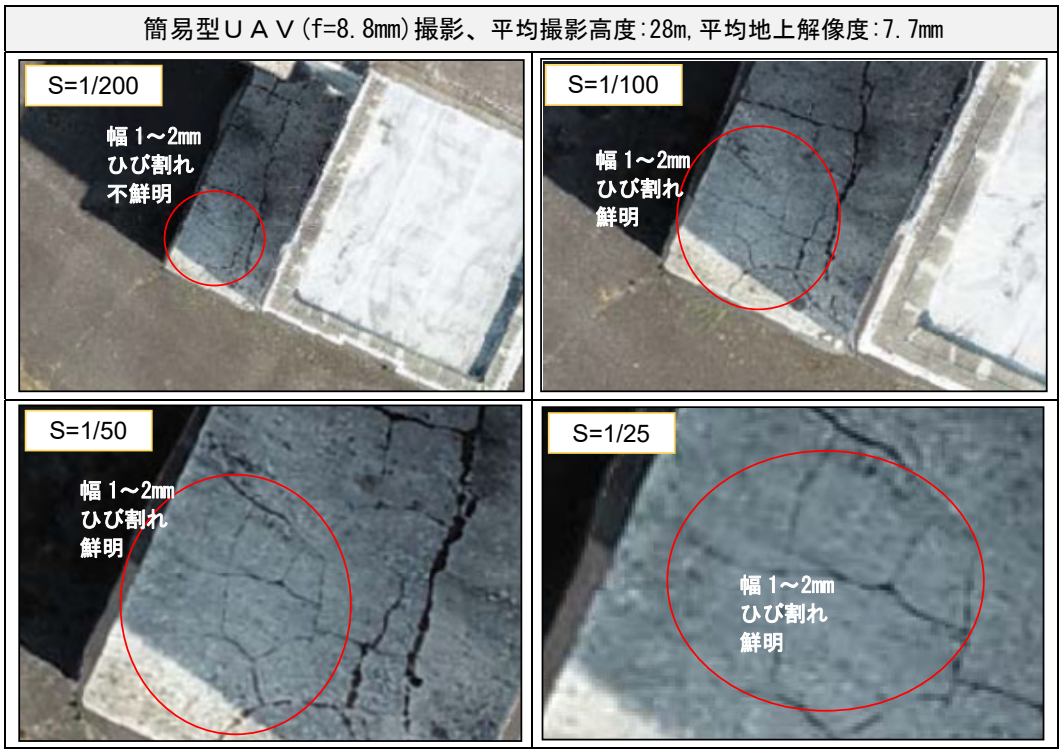


写真 7.10　　オルソ画像の解像度比較（P 排水機場）

計測型（f=50mm、撮影高度 54m）と簡易型（f=3.6mm、撮影高度 46m）の画像解像度を比較すると、写真 7.8 に示すように、計測型（地上解像度 6.5mm）では、縮尺 1/200 以上でもひび割れの損傷状態が判読可能である。同様に、計測型（地上解像度 5.0mm）の事例では、写真 7.9 に示すように、送水管のナット、コンクリート面のひび割れが、縮尺 1/25 までの画像拡大でも、はっきりと判読可能である。

また、簡易型（地上解像度 19.9mm）では、写真 7.8 に示したように、縮尺 1/200～1/100 程度で損傷の有無や規模が抽出可能であるが、1/50 以上の拡大縮尺では、解像度が低いため、画像がぼやけて損傷の詳細状態を判読することが困難となっている。

しかし、簡易型においても、写真 7.10 に示したように、撮影高度を 28m に下げ、地上解像度を 7.7mm にすると、幅 1～2mm のひび割れの判読が可能となる。

すなわち、簡易型の画像から損傷等の状態を抽出する場合には、対象とする変状に適切な高度、レンズ焦点を採用することで解像度を高めることが有効である。

今回の事例では、オルソ画像を拡大し施設変状の詳細を把握するなら、撮影には、解像度 10mm 前後以下になるような焦点距離のレンズ、撮影高度を設定することが望ましいと判断される。

また、用排水機場には、前述したように、上空への突出物等の飛行障害となる構造物が存在するため、一般的には、低高度飛行による高解像度のオルソ画像作成が困難となると考えられる。このため、用排水機場では、3 次元計測を主とした計測型と特定箇所の近接スポット撮影を主とした簡易型というような併用も含めて調査を実施することが望ましい。

(2) 施設形状

施設形状への活用検討では、計測型（f=50mm)、簡易型（f=3.6mm,8.8mm）で撮影した写真及び標定点より、SfM ソフトウェアを用いて構築したオルソ画像（位置精度：1.8cm 以下）で検証した。

検証結果は、写真 7.11～7.13 に示すとおりであり、計測型（f=50mm）のオルソ画像（解像度：5.0～6.5mm）では、実測値と同一であり計測精度が高かった。また、解像度（19.9mm）の大きな簡易型（f=3.6mm）では、実測値との差が最大 1cm と計測精度が高かったが、解像度 7.7mm の簡易型（f=8.8mm）では、点群データの水平位置精度が 1.5cm と最も悪いこともあり、実測値との差が最大＋3cm となっていた。

すなわち、本事例によると、画像上での施設形状を 1cm オーダーで計測するには、解像度とともに、SfM 解析による位置精度が向上するような計測手法が必用であることが明らかにされた。

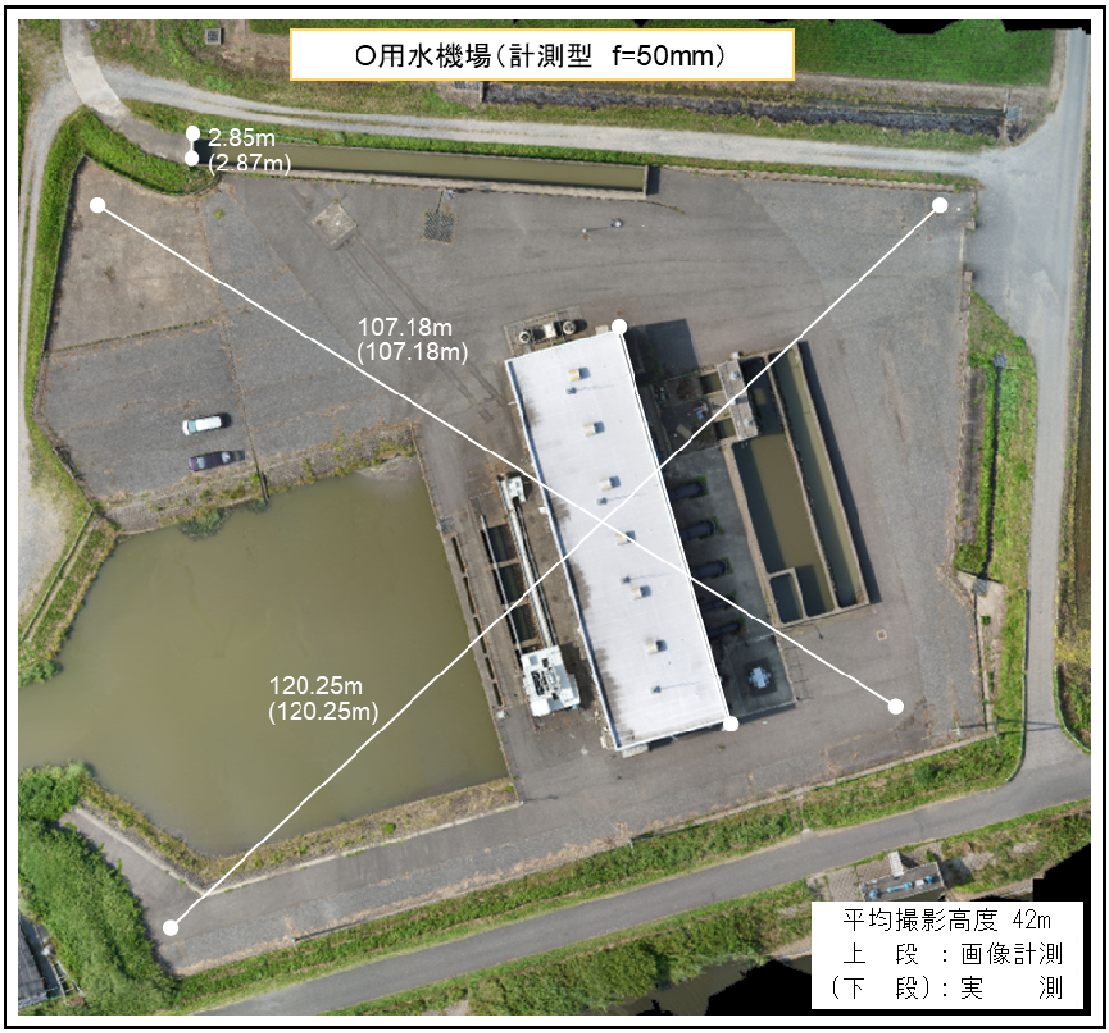


写真 7.11　　オルソ画像による施設平面形状の計測事例（O 用排水機場）

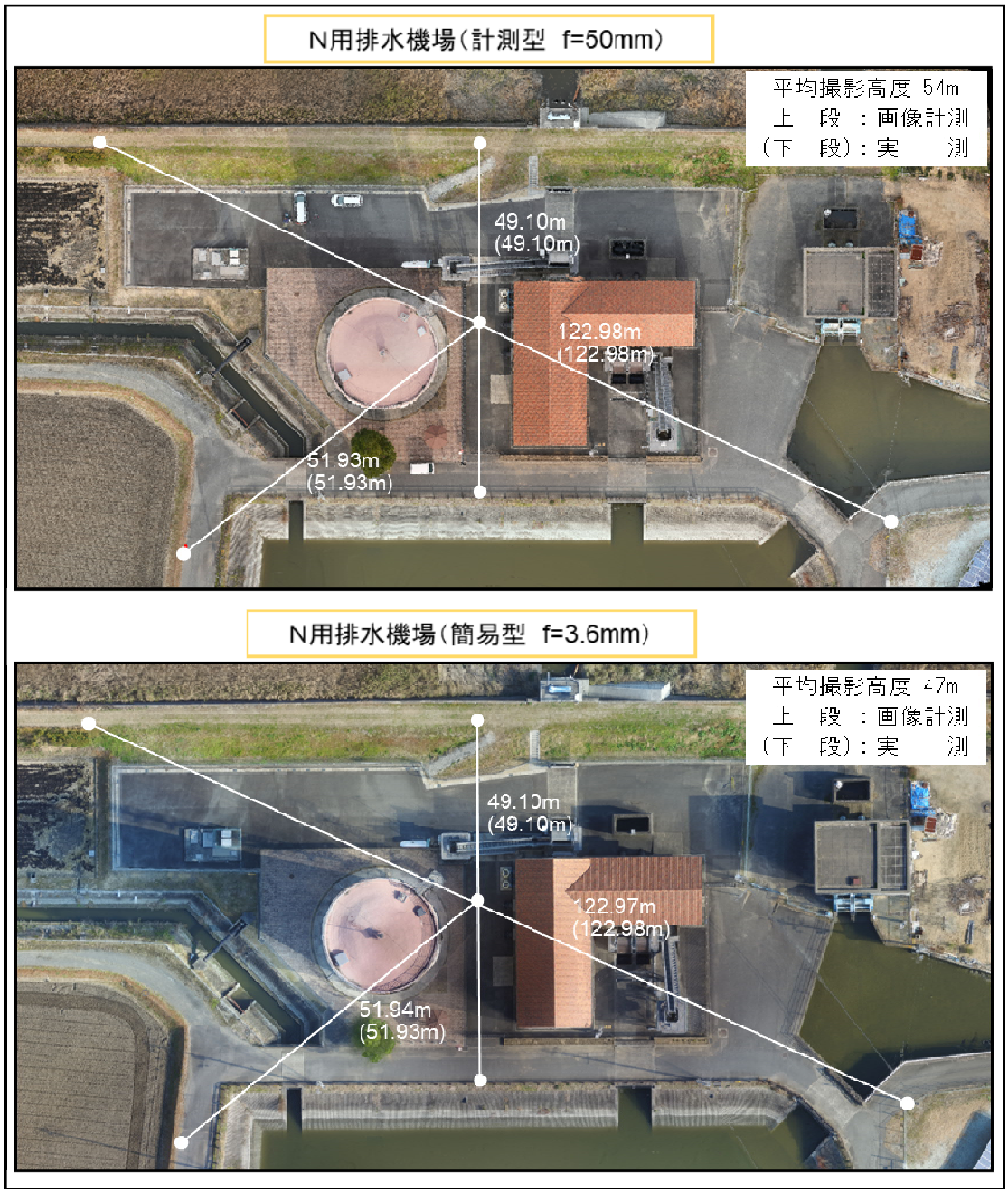


写真 7.12　　オルソ画像による施設平面形状の計測事例（N用排水機場）

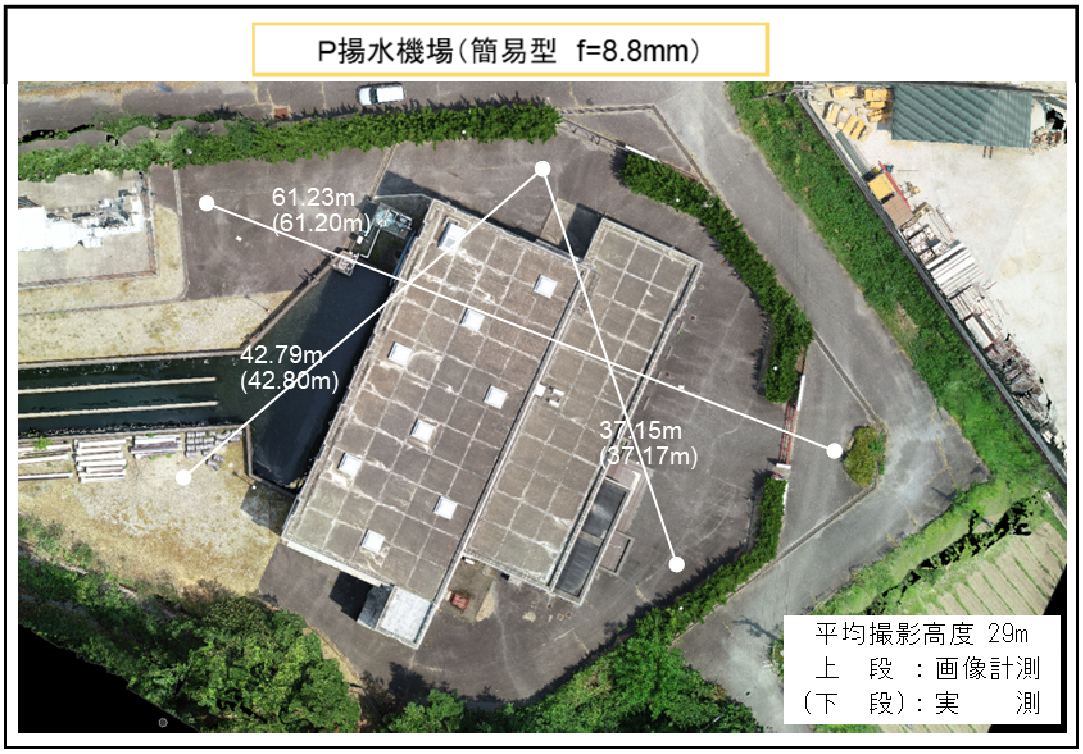


写真 7.13　　オルソ画像による施設平面形状の計測事例（P揚水機場）

(3) 変状計測

変状計測では、計測型(f=50mm)から生成した３次元点群データから建屋や敷地の面的な標高分布、横断分布（横断図）を解析し、図 7.4～図 7.6 に示した。

計測結果では、N用排水機場において電気設備周辺での 0.2m 程度の低下、暗渠部での 0.04m 程度の抜け上がりが確認された。また、O 用排水機場の管理棟では、屋根の傾斜勾配や換気塔を確認し、貯水池周辺では 0.2m 程度の地盤傾斜を計測した。

今回の事例では、UAV 計測から得られる３次元点群データを用いた計測により、屋根の起伏・傾斜、敷地における沈下等の凹凸の有無が、従来の点・線による計測に比べ、非常に簡単に抽出可能であることが明らかにされた。

すなわち、３次元点群データを用いた計測では、窪み、起伏などの変状を連続的かつ視覚的に表現可能であるため、その形状規模（広がり、深さ）を定量化できる点で優れている。

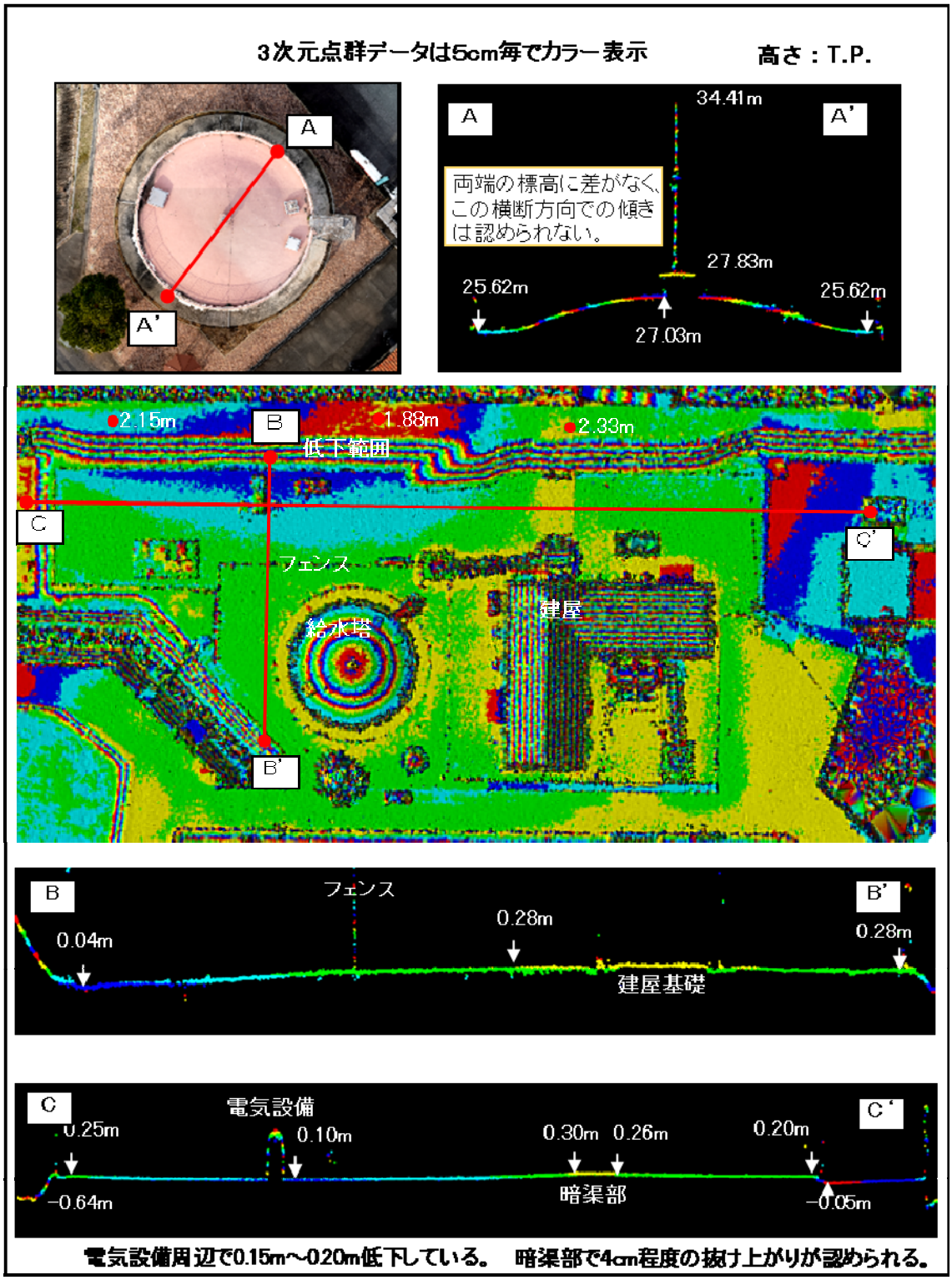


図 7.4　　構造物・地盤標高の 3 次元計測事例（N用排水機場）

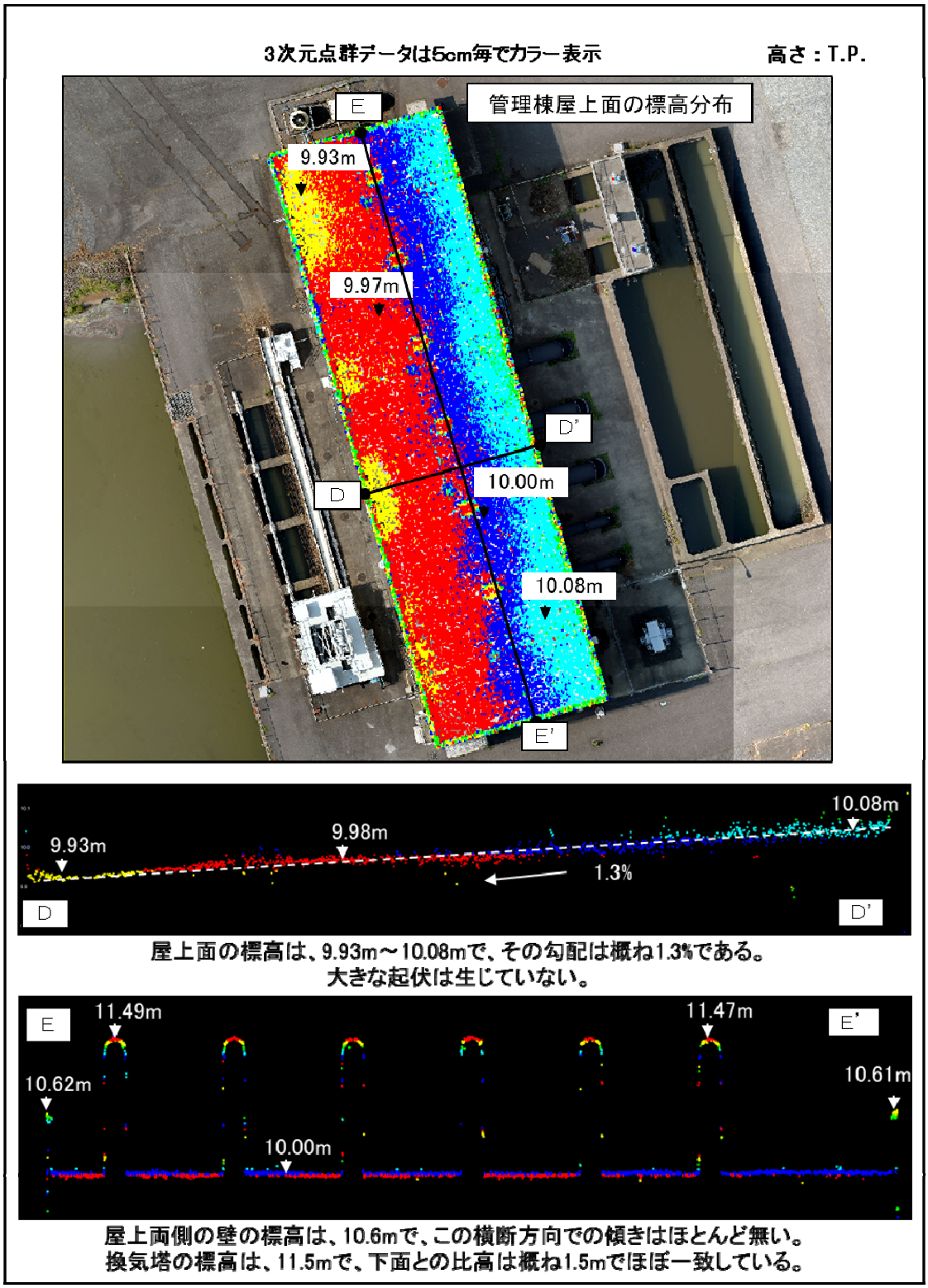


図 7.5　　構造物の標高計測事例（O 用排水機場）

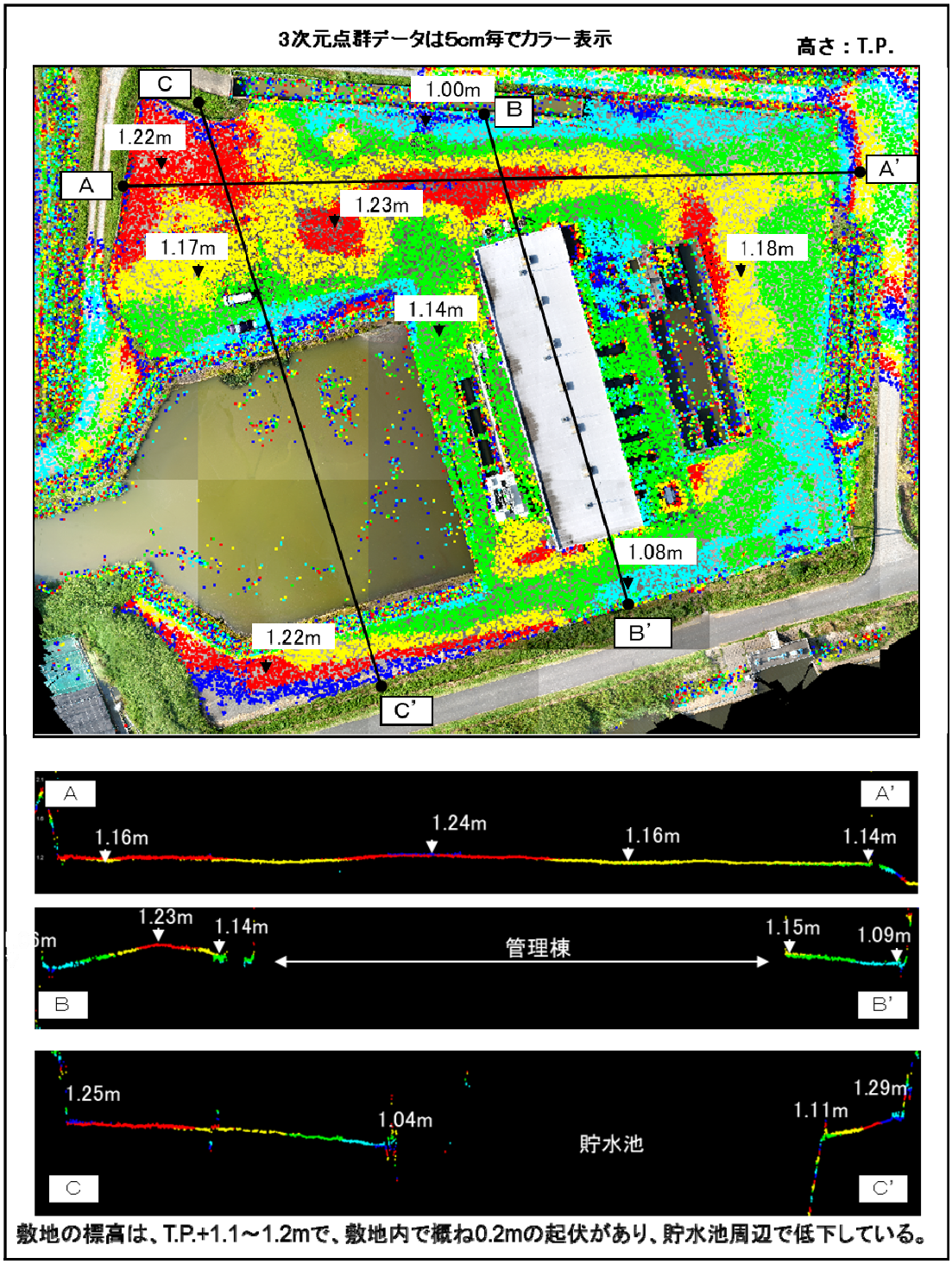


図 7.6　　敷地の標高計測事例（O 用排水機場）

7.3.3 施設点検への適用結果

用排水機場点検への適用結果は、表 7.7 に示すとおりであり、撮影高度 40m 程度の計測型(f=50mm)では、幅 2mm 以上のひび割れおよびひび割れ以外の変状（亀裂、損傷等）の抽出が可能である。また、ひび割れ幅 0.2mm 以上の抽出には、計測型(f=135 mm)で可能であり、UAV 計測は、これら 2 種のレンズ併用により、建屋壁面や屋上での「現地調査レベル」の点検に適用可能である。

一方、簡易型では、撮影距離（壁面、屋上との距離）30m 程度の運用で幅 1 mm 以下でのひび割れ抽出が困難であることより、補修段階（S-3）より軽度な変状抽出への適用は難しい。しかし、撮影距離 10m 以内の近接撮影では、幅 0.5mm 程度のひび割れも抽出が可能となるため、UAV 計測は撮影距離の組合せ等を実施することにより、補修・補強段階（S-3～S-1）を対象とした点検への適用が可能になる。

表 7.7　　用排水機場点検でのＵＡＶ計測の適用性（現地調査レベル）

<table>
<tr><th colspan="3" rowspan="3">評 価 項 目(変 状 種 別)</th><th>簡易型UAV</th><th colspan="2">計測型UAV</th></tr>
<tr><th>(f=3.6mm,8.8mm,距離=5～47m)</th><th>(f=50mm,距離=42～54m)</th><th>(f=135mm,距離=10m)</th></tr>
<tr><th>単画像、オルソ画像
3次元点群データ</th><th>単画像、オルソ画像
3次元点群データ</th><th>単画像</th></tr>
<tr><td rowspan="4">構造物自体</td><td rowspan="4">建屋の劣化</td><td>壁面のひび割れ</td><td rowspan="4">○有無の判定（抽出）
ひび割れは、距離30m程度では、評価区分S-3（幅1mm以上）の抽出可能である。距離5mの近接撮影では、幅0.5mm程度までのひび割れ抽出が可能である。その他の変状についても同程度の規模まで抽出が可能である。

○規模の計測
ひび割れ幅等の平面規模の計測は、周辺物との比較による定性的な計測となる。
その他の変状規模は、オルソ画像、3次元点群より計測可能である。なお、鉛直方向の規模、3次元点群データにより、5cm程度まで可能である。</td><td rowspan="4">○有無の判定（抽出）
ひび割れは、評価区分S-3（幅2mm以上で変状が顕著に認められる場合）の抽出が可能である。その他の変状についても同程度の規模まで抽出が可能である。

○規模の計測
ひび割れ幅等の平面規模の計測は、周辺物との比較による定性的な計測となる。
その他の変状規模は、オルソ画像、3次元点群より計測可能である。なお、鉛直方向の規模、3次元点群データにより、5cm程度まで可能である。</td><td rowspan="4">○有無の判定（抽出）
ひび割れは、評価区分S-4（幅0.2mm程度）の抽出が可能である。
その他の変状についても同程度の規模まで抽出が可能である。

○規模の計測
平面的な変状規模は、周辺物との比較による定性的な計測となり、ランク境界付近では主観的な判断により評価ランクが異なる。ただし、画像が鮮明（解像度が高い）なため、画像からの規模の判定精度は、計測用UAV（f=50mm)に比べて高くなる。
厚さ、深さ等の鉛直方向の規模計測は困難である。</td></tr>
<tr><td>柱、梁、筋交いの亀裂等</td></tr>
<tr><td>変形、損傷、腐食</td></tr>
<tr><td>屋根のひび割れ、反り</td></tr>
<tr><td rowspan="3">構造物周辺の変状</td><td rowspan="3">地盤変形</td><td>背面土の空洞化（内部空洞除く）</td></tr>
<tr><td>周辺地盤の陥没・ひび割れ</td></tr>
<tr><td>抜け上がり</td></tr>
</table>