

官民連携新技術研究開発事業

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

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

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
1.3 UAV の概要(回転翼のマルチコプターと限定).....	2
1.3.1 代表的な種類	2
1.3.2 機器構成	4
1.4 用語の定義	4
2. 実施方針	6
2.1 手順.....	6
2.2 目標の設定	7
2.2.1 参照手引き	7
2.2.2 目標設定	7
2.2.3 安全管理方針	8
3. 事前準備	9
3.1 事前調査	9
3.1.1 現地踏査	9
3.1.2 関連法規 概説と一覧表	12
3.2 使用機器	14
3.2.1 UAV	14
3.2.2 デジタルカメラ	15
3.2.3 写真測量ソフトウェア	16
3.3 作業計画	17
3.3.1 検討項目	17
3.3.2 地元説明及び調整	22
4. 画像撮影	23
4.1 基準点の整備	23
4.2 UAV 撮影計画	23
4.2.1 地上解像度	23
4.2.2 画像間ラップ率	24
4.2.3 飛行方法	24
4.2.4 撮影インターバル	25
4.2.5 画質調整	25
4.2.6 水利施設における撮影方法	27
4.3 UAV 操作時の確認事項	29
4.3.1 機体の点検	29
4.3.2 現地の状況	29
4.3.3 撮影計画と現地の整合性	30
4.3.4 人員配置および操縦者の技量	30
4.3.5 チェックシート	30
4.4 撮影後の画像点検	31
4.4.1 撮影画像の状況点検	31
4.4.2 撮影画像の品質点検	31
5. 画像処理	33

5.1 SfM 処理	33
5.1.2 入出力のデータフォーマット	34
5.2 主要成果品と活用方法	35
5.2.1 データ活用方法	35
5.2.2 画像データ	36
5.2.3 三次元点群データ	40
5.3 SfM 処理の留意事項	47
5.3.1 撮影範囲	47
5.3.2 キーポイントマッチング処理	47
5.3.3 画像の位置情報	48
6. 画像処理による施設変状への活用方法	49
6.1 コンクリートのひび割れ	49
6.1.1 ひび割れの判読	49
6.1.2 ひび割れの計測	50
6.2 不同沈下	51
6.2.1 不同沈下の計測方法	51
6.2.2 三次元モデルの標高精度	52
6.2.3 留意事項	52
6.3 その他変状	54
6.3.1 材料劣化	54
6.3.2 目地の劣化	54
6.3.3 周辺地盤	54
6.3.4 雑草・堆積	54
7. 調査事例	55
7.1 作業計画書の記載例	55
7.2 UAV 撮影による施設点検事例	60
7.2.1 海岸堤防	60
7.2.2 開水路の変状検出	71

1. 手引きの目的と適用

本手引は、平成 26 年度官民連携新技術研究開発事業において開発した、無人航空機（UAV: Unmanned Aerial Vehicle）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。UAV 及びその利用技術は急速に進歩しており、更に今後も技術開発が進められることは間違いない。このため、ストックマネジメントにおける UAV の活用にあたっては、本手引にこだわらず最新の技術情報を収集し対応することが重要である。

1.1 手引きの目的

現在、農業用水を供給する農業水利施設のうち、基幹的な農業用排水路の延長は約 5 万 km、ダム、頭首工、用排水機場等は約 7 千箇所、その資産価値は 18 兆円と推計されている。また、全国約 1.4 万 km の海岸保全施設のうち、約 1,600km を農地海岸として農村振興局が所管している。これらの農業水利施設や海岸保全施設の相当数は戦後集中的に整備されてきたことから、老朽化が進行し更新を必要とする時期を迎える施設が近年増加してきている。

増加する更新需要に対して、施設の長寿命化を図ることによって財政負担を平準化しつつ施設の有効活用を図ることが重要となり、そのための機能保全コストの一層の節減が求められている。農林水産省では、平成 19 年度から、予防保全の手法を取り入れた長寿命化等の取組として、農業水利施設整備事業等によってストックマネジメントを実施しているところである。

ストックマネジメントのサイクルは、施設管理者等による日常管理（継続的な施設監視を含む）、施設の状態を継続的に把握するために施設造成者等が定期的に行う機能診断、診断結果に基づく劣化予測、効率的な対策工法の比較検討、これらを取りまとめた機能保全計画の策定、施設監視並びに機能保全計画及び施設監視結果を踏まえた適時適切な対策工事の実施によって構成されている。このうち、日常管理や定期点検によって施設の劣化状態を把握することが、ストックマネジメントの起点となり、施設の全てが対象となる。

施設の点検の多くは、目視、打音検査、測量等で行われるが、農業水利施設や海岸保全施設の中には、人のアクセスが困難な場所や、測量では十分な情報が得られない場合がある。平成 27 年 3 月に農林水産技術会議において決定された農林水産研究基本計画では、農業水利施設の難アクセス区間の省力診断技術の開発を、今後 5 年間程度で技術開発と実用化を図るべき研究開発の重点目標の一つとして掲げている。

このようななか、UAV の移動体を使った新たな点検手法は、人のアクセスが困難な場所への点検を可能にするとともに、点検作業の飛躍的な効率化と低コスト化を図る有望なものとなる。UAV は、対象物に接近して画像を撮影し、単に目視による点検の代替手段となるだけでなく、上空から俯瞰した画像から三次元形状データを取得することができるため、構造物の沈下や傾きなどの施設全体

の変状把握にも利用できる。

本手引では、このような UAV の特長を活用した、開水路の不同沈下・海岸堤防の不同沈下と、アクセス困難な区間のひび割れ等の劣化の検出技術を中心に解説したものである。また、これらの技術は、難アクセス区間のある大規模なコンクリート構造物のひび割れや剥離・剥落、水準測量では捉えにくい農道や農地の不同沈下等に対しても適用できるものが多いため、UAV のストックマネジメントへの活用のきっかけとなることも本手引の目的である。

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社
- 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」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。

1.3 UAV の概要 (回転翼のマルチコプターと限定)

1.3.1 代表的な種類

回転翼の UAV の主な機器を表 1.1 に一覧とする。回転翼は、プロペラの数や大きさによって特徴がある。

プロペラの数が多くなれば安定した飛行やきめ細かな動きをすることが可能であるが、プロペラの駆動数が多いためバッテリーの消費が大きくなり飛行する時間は短くなる。

また、1つのプロペラが故障した場合でも直ぐに落下することを防ぐには、浮力を得る必要があり、そのためには機体の大きさが大きいほど浮力を得やすくなり、安定した飛行が可能となる。ただし、機体が大きくなるにつれて消費電力も増大することから、上述と同様に飛行時間は短くなる。

表1.1 主な UAV 機器

機 種	<p>α-UAV (アムューズ・ワンセルフ社)</p> 	<p>Phantom2 (DJI社)</p> 	<p>Phantom4 (DJI社)</p> 	<p>Zion QC730 (エンルート社)</p> 	<p>Zion PG700 (エンルート社)</p> 
最大航行距離	2,000m	1,000m	1,000m	30km	30km
最長飛行時間	23分	25分	28分	最大40分	最大30分
最大航行速度	6m/s	6m/s	20m/s	10m/s	10m/S
自動航行	○	×	○	○	○
最高到達高さ	250m	150m	600m	250m	250m
手動航行範囲	500m以内	100m以内	100m以内	250m以内	250m以内
測位システムの有無	○ GPS/IMU	○GPS	○GPS	○GPS/IMU	○GPS
機 種	<p>SPIDER (ルーチェサーチ社)</p> 	<p>TORNADO/H920 (YUNEEC社)</p> 	<p>Soleil-8(クリスタルテックUAV社)</p> 	<p>MS-06LA (ミニサーベイヤー)</p> 	<p>Falcon (情報科学テクノシステム社)</p> 
最大航行距離	2.5km	10.0km	15km	2.5km	2.5km
最長飛行時間	約15分	TYPHOON H(22分) TORNADO H920(30分)	Soleil-8(30分) Soleil-6(30分) Soleil-4(15分)	15分	10分～25分
最大航行速度	8m/s	TYPHOON H(10m/s) TORNADO H920(11m/s)	8m/s	8m/s	8m/s
自動航行	○	○	○	○	○
最高到達高さ	250m	122m(400ft)	150m	150m	250m以内
手動航行範囲	500m	250m	250m	250m	250m
測位システムの有無	○GPS/IMU	○	○	○	○

1.3.2 機器構成

UAV は図 1.1 に示す機器により構成されている。本体は、カメラや記録ボード、バッテリーなどを搭載しており、この機体の運航を制御するために操縦装置（プロポ）がある。操縦装置から無線で機体に運航を指示することができる。

また、UAV 機体で撮影した画像を地上局に配信するために、地上モニターセットがある。このセットは、画像を送信するアンテナ（アナログ、デジタル）と撮影画像を確認するためのモニターで構成されている。モニター画像は実際に撮影した画像と比較すると解像度は劣るものの、被写体の対象物を確実に捕らえているかは確認することができる。



UAV 機体



操縦装置（プロポ）



地上モニターセット

図1.1 UAV の機器構成の例

1.4 用語の定義

本手引きでは、次のとおり用語を定義する。

UAV :

(Unmanned Aerial Vehicle) の略称で、人を搭載せず、自律航法か遠隔操作航法で飛行する飛行体のことである。

SfM :

(Structure from Motion) の略称で、動画や静止画等カメラで視点撮影した複数枚の画像から、そのシーンの三次元形状とカメラ位置を同時に復元する要素技術である。

三次元モデル :

一般的には、地形を三次元的に表現した DEM や地表面を計測した DSM に分かれる。近年では、前記の SfM ソフトによって計算される三次元点群データのことを三次元モデルと表現する場合もある。

水準測量 :

水準測量とは、レベル (level : 水準儀ともいう) と標尺 (leveling staff : スタッフともいう) を用いて行う高さを計測するものをいう。レベルとは、望

遠鏡の視準線を水平にし、この水平視準線により、2点間に鉛直に立てられた標尺の目盛を正確に読み取る器械のことをいう。

GNSS :

GNSS (Global Navigation Satellite System / 全球測位衛星システム) とは、GPS、GLONASS、Galileo、準天頂衛星 (QZSS) 等の衛星測位システムの総称をいう。

GCP :

GCP (Ground Control Point) とは、人工衛星画像や航空写真などの正確な位置関係を調べるために測定する地上の点をいう。

CCD :

CCD (Charge-Coupled Device) とは、光をデジタルに変換するセンサー、撮影素子をいい、これに受光素子や微細なレンズなどを組み合わせた撮像素子である CCD イメージセンサーのことを CCD と略することが多い。

CMOS :

CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) とは、CCD と異なる方式の光をデジタルに変換するセンサー、撮影素子をいう。

地上解像度 :

地上解像度とは、デジタル画像を取得する際の、1画素あたりの地上での一辺の距離をいう。

オーバーラップ (OL) :

本手引きでいうオーバーラップ (OL) とは、ドローンで撮影した写真の進行方向の重なりをいう。

サイドラップ (SL) :

本手引きでいうサイドラップ (SL) とは、ドローンで撮影した写真の側方走行の重なりをいい、オーバーラップ (OL) に対して垂直方向のものをいう。

ストックマネジメント :

施設の管理段階から、機能診断を踏まえた対策の検討・実施とその後の評価、モニタリングまでをデータベースに蓄積された様々なデータを活用しつつ進めることにより、リスク管理を行いつつ施設の長寿命化とLCCの低減を図るための技術体系及び管理手法の総称。

2. 実施方針

2.1 手順

施設構造物の変状把握は、対象物と把握すべき変状及びその精度を明確にしたうえで、対象物及びその周辺環境を事前に調査し、所要精度等を考慮しつつ、UAV その他の適切な機器の選択、飛行のルート及び高度の計画策定、地上基準点の設定を行い、画像撮影（飛行）、三次元モデルの作成、三次元モデルの分析による変状検出の手順で行う。

まず、対象物の不同沈下、ひび割れの検出等の目的を明確にし、取得すべき画像の解像度や三次元モデルの精度を決定する必要がある。目的を達成するために必要な機器やソフトウェア、画像の取得位置等を検討するとともに、対象物周辺の状況や対象物の状態を調査し、UAV の飛行が可能な区域や時間帯、変状検出が可能な画像取得の可能性を考慮して、実施計画を策定する。

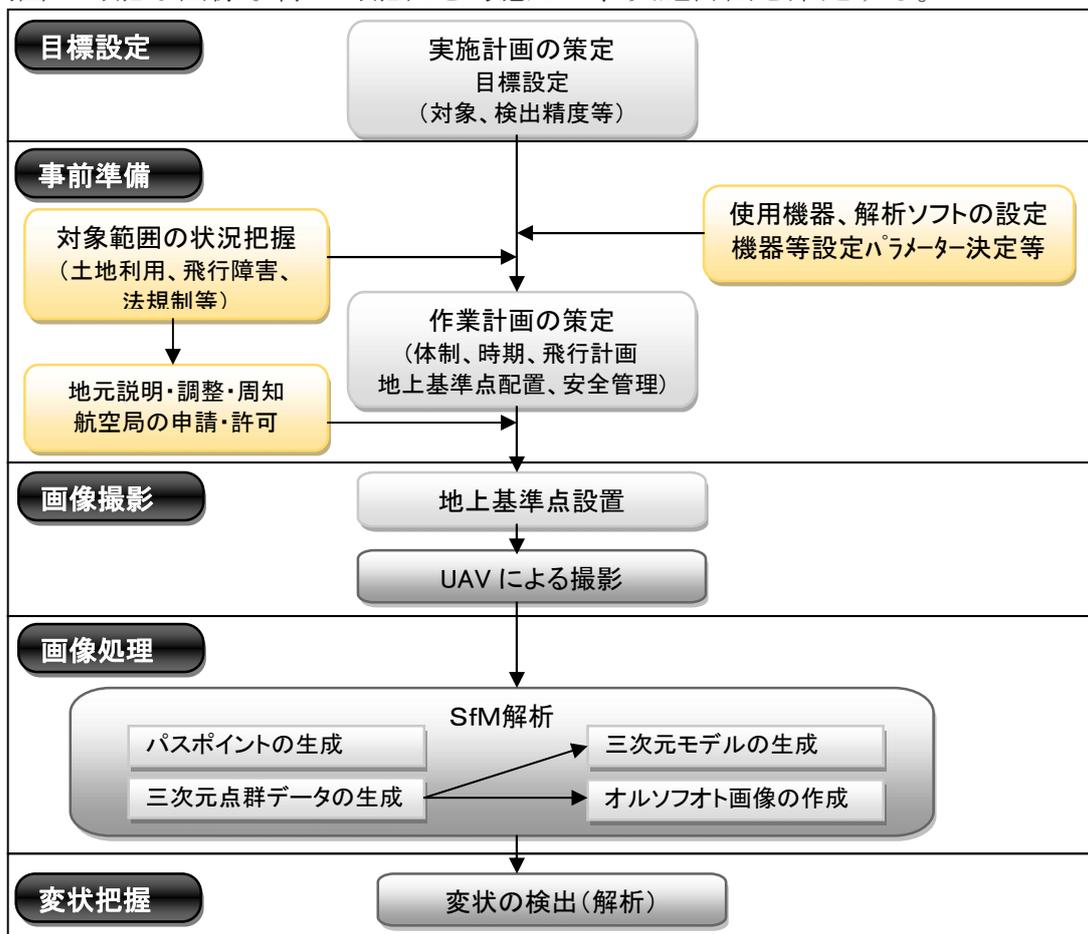


図2.1 UAVによる変状把握の手順

2.2 目標の設定

外的変状の1次的な点検が目的であり、コンクリートのひび割れの検出、構造物の沈下や傾きの程度の把握が対象になる。コンクリートのひび割れの検出精度は、農林水産省が発行するストックマネジメント関連の手引きに従う。また、構造物の沈下や傾きについては、それぞれの構造物の構造、機能、補修方法等を考慮し合理的な精度を設定する。

2.2.1 参照手引き

- 水利施設については、以下の手引きを参照する。
 - ・農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」（平成28年8月）
 - ・農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工」（平成28年8月）
 - ・農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工(ゲート設備)」(平成22年6月)
 - ・農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工(ゴム堰)」(平成25年4月)
 - ・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)
- 海岸保全施設については、以下の手引きを参照する。
 - ・海岸保全施設維持管理マニュアル～堤防・護岸・胸壁の点検・評価及び長寿命化計画の立案～（平成26年3月）
 - ・ライフサイクルマネジメントのための海岸保全施設維持管理マニュアル（案）～堤防・護岸・胸壁の点検・診断～（平成20年2月）

2.2.2 目標設定

1次点検及び2次点検の変状検出の目標は、表2.1に示すとおりとする。

表2.1 変状検出の目標

施設	調査項目	1次点検	2次点検 (現地調査)
開水路	欠損、崩壊 不同沈下	有無把握	局所的 or 全体把握
	ひび割れ	1mm 以上	幅 0.2mm 以上 延長を計測
	目地劣化	有無把握	幅等を計測
	周辺地盤	有無把握	局所的 or 全体把握
	雑草・堆砂	有無把握	-
海岸堤防	高さ		測量
	ひび割れ	5mm 程度以上	幅 1mm 以上 基礎工は 0.2mm 延長を計測
	目地	有無把握	幅等を計測
	沈下・陥没	有無把握	深さと範囲を計測
	雑草・堆砂	有無把握	範囲と高さ

* 参考目標は手引きに示す二次点検または詳細点検に準る。

2.2.3 安全管理方針

建物、人の往来、交通状況、空港周辺では、飛行制限区域の確認を行い、関係機関と十分に調整を図るとともに、仮に UAV の落下や予期せぬ妨害に遭遇した場合を想定した対応方策を十分に検討する。

現在、国等の安全性基準が未整備の段階であり、日本写真測量学会から、「測量調査に供する小型無人航空機を安全に運航するための手引き」が策定されている。

飛行を実施するにあたっては、この手引きを十分に理解した上で必要な対応をとる。また、UAV の利用者は、機体の特性を十分に理解し、自らの技量（操縦能力、状況判断能力、問題回避能力等）を適切に認識したうえで安全に運行させることが必要である（UAV の飛行の安全確保については、4.3 に詳述する）。

3. 事前準備

3.1 事前調査

UAVの飛行、画像撮影、画像処理に影響を与える障害物等の状況、周辺の道路、鉄道、高圧線、飛行場等の重要インフラの敷設と運用状況を調査する。特に、人、自動車の往来、建物等の調査は、万一のUAVの落下等を想定した視点で行う。また、UAVの飛行に係る関連法規への対応について措置する。

3.1.1 現地踏査

(1) 飛行周辺環境

UAVは、何らかの理由で墜落する恐れがあるため、対象地区の環境を把握し安全を確保できる対応策を講じる必要がある。下表に示す施設や環境である場合には、UAVが使えないことも考えられるので、第三者で管理したり、UAVを監視したりするために多くの監視員を配置し、飛行の可否を判断しなければいけない。

表3.1 UAV飛行範囲の注意すべき環境条件等

周辺環境等	想定される施設等	対応策
第三者の多い場所及び重要施設	住宅・市街地、観光地、交通施設、集客施設や行事事会場、空港関連施設、発電施設、鉄道、高速道路及び幹線道路、防衛施設等	○鉄道及びその周辺では、UAVの見張員を配置し、列車が走行していない時間帯に行う。 ○高速道路及びその周辺では、UAVの見張員、交通誘導員を配置し、車の走行を規制して行う。 ○集客施設及びその周辺で飛行する場合は、閉鎖あるいは閉鎖している時間帯に行う。
電磁場に影響を与える施設	鉄塔、架線、送電線、電波塔、Wi-Fi基地局、大規模工場、大規模鉄骨構造物、強力な磁力、電波を反射する施設	これらの施設上空、周辺では飛行を行わない。 (実施する場合は、プロポ使用周波数帯2.4GHzとの電波干渉を事前に検討する) (鉄骨構造物は地球磁場に異常を来たすことがある)
安全な飛行を妨げる生物の存在	集団で営巣している鳥類 子育てをしている鳥類 縄張り意識が強い鳥類 飛行により動揺する家畜	○事前に自然環境調査(環境庁)等資料より鳥類の分布を把握する。 ○飛行中に鳥類が近接してくる場合はマニュアル操縦により回避する。

(2) 衛星測位状況 観測時間帯

UAV は、機体の安定性を保持するため、ケアフリー（CF）機能やポジションホールド（PH）機能が装備されている。これらの機能は、GPS衛星電波を受信して機体の状態や操作を補助する機能であるが、衛星補足数が低下すると補助機能が効果を発揮せず機体の制御が困難となる。そのため、必ず現地調査では離発着周辺の樹木や起伏を考慮してGNSS補足数を確認する必要がある。GNSS補足数は、6個以上を原則とし、5個以下となる時間帯ではUAVの飛行を回避する。

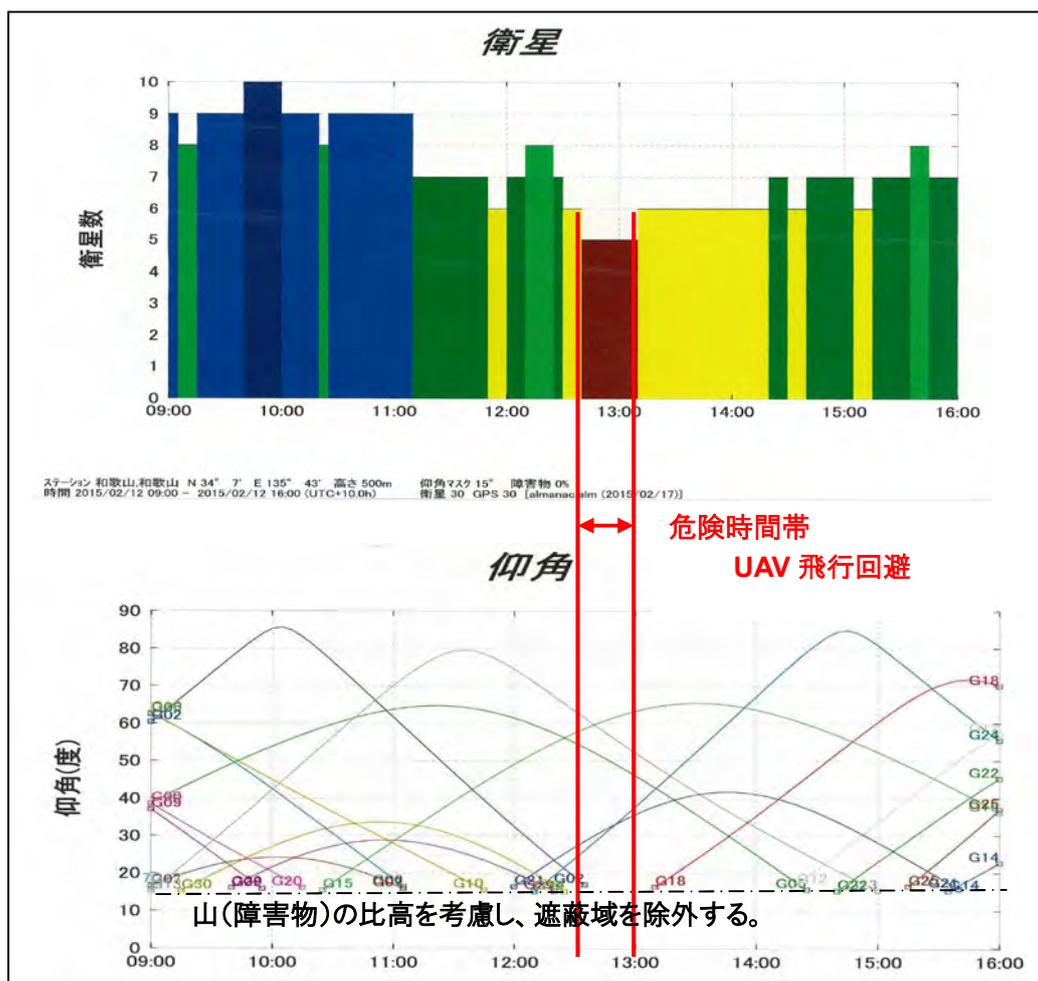


図3.1 GPS衛星の状況把握例

(3) 撮影障害要因 植生、水面、対象物性状（色、材質など）

対象物と UAV の間の樹木や対象物の近傍又は表面に植生が繁茂・被覆し、構造物の表面形状を捉えることができない場合がある。その場合は、出来るだけ除去しておく必要がある。

対象物の周辺に、噴煙や波などの動くものがあり、それらが含まれている画像は、SfMの完全な自動処理が難しく、良好な結果を得られない場合が多いことが知られている（飛田ら、2014）。対象物周辺の樹木についても同様

な効果があると考えられるため、事前に樹木の種類、樹高及び樹形並びに位置を把握しておくことが重要である。一方、水利構造物や海岸堤防の周辺には水面があり、波の影響は避けられない場合が多い。

(4) 墜落対策

① 飛行コース

やむをえず事故が起こると甚大な被害となるので、施設周辺を飛行させる場合は下図の回避構造物の距離を参考として飛行する。

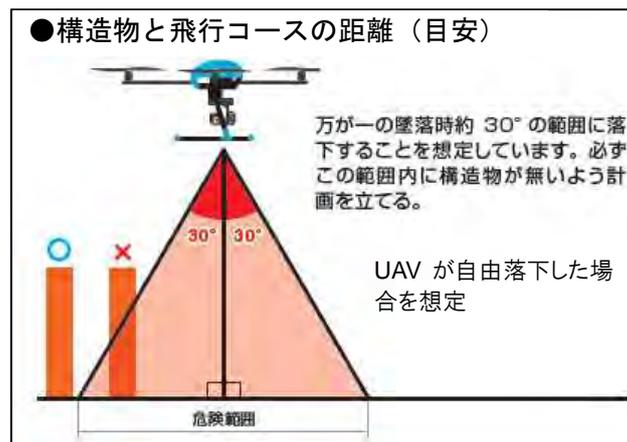


図3.2 地上の構造物と飛行コースの距離

② 緊急時の着陸場所

UAV は、磁場の影響や GNSS の捕捉不足等の原因で挙動が不安定な状態になるため、そのような状態になった場合には緊急に着陸させる必要がある。事態はいつ起こるかわからないので、離発着の場所の他に数箇所は選点しておく必要がある。着陸場所は、できるだけ水平な場所が望ましいが、やむをえない場合もあるので傾斜のある場所も候補地とする。

3.1.2 関連法規 概説と一覧表

法令の効力は強い順に、憲法、条約（シカゴ条約：憲法第98条第2項に規定）、法律（航空法など）、省令（航空法施行規則）、条例（地方自治体）の順で優先される。また、特別法は、一般法より優先される。以下には、無人航空機に関する主な国内法を列挙する。

(1) 航空法（施行規則）

航空法自体の改正と航空法施行規則の一部を改正した省令により、2015年12月10日施行として、この法律により、無人航空機の定義、飛行禁止空域、飛行方法を制定。これら禁止空域や飛行方法を行う場合は、事前に申請し許可・承認が必要となる。申請は、原則飛行予定の10開庁日前までに提出し、許可期間は原則3ヶ月とし、最長で1年を限度とする。本法律に関する詳細は、国土交通省航空局のホームページを参照してください。

(2) 小型無人航空機飛行禁止法（議員立法）

この議員立法は、首相官邸に小型無人機が飛来した事により、危機感から急遽成立した法律である。内容としては、飛行禁止対象と範囲を具体的に定めている。国の重要施設（国会議事堂、内閣総理大臣官邸、最高裁判所、皇居・東宮御所、対象政党事務所、対象危機管理行政機関（機関、庁舎を政令で規定）、外国公館等、原子力事業所など）と対象施設周辺地域として、対象施設の敷地又は区域の周囲300mを基準とする。

(3) 道路交通法

この法律は、小型無人航空機を離陸着陸する場所を、道路上にて行う場合と、小型無人航空機が道路上空を横切る又は飛行する場合に必要となる。

特に、第七十七条一と四を参考にすること。

過去の事例では、航空局に小型無人航空機の飛行申請を行った時に、道路上を跨ぐ飛行をすると申請した場合、交通規制をするように指導を受けた。この場合は、この道路交通法の道路占有許可申請を行うこととなる。

(4) 個人情報保護法

小型無人航空機の場合、デジタルカメラを搭載し映像や写真を撮影する機能を有するものが多く、撮影した映像や写真上に個人を特定するものがあることが想定される。具体的には、撮影の際に被撮影者の同意を得ることを前提とし、同意を得ることが困難な場合は、以下のような措置を講じる。

- ①人の顔や車のナンバープレート等はプライバシー侵害の可能性がある
のでボカスなどの配慮が必要。表札、住居の外観、洗濯物その他生活状
況を推測できるような私物もプライバシーとして法的な保護対象となる。
- ②特に、小型無人航空機による撮影等インターネット上に公開するサービ
スを提供する電気通信事業者は、削除依頼に対する体制を整備すること。

(5) 電波法

電波法で注意しなければならない点は、専門的な言い方をすれば、「無線局の開設」をする者は総務大臣の免許を受けなければならないと言うことが、第4条に記載されている。これは、小型無人航空機に搭載するカメラのファインダー映像を地上で受信して確認するときなどにあたる。この場合も正式には免許を受けなければならない。ただし、第4条の一と三に定める微弱無線局に関しては、その限りでない。また、特定省電力無線局の場合も発信機器に適合表示無線設備として技適マークが貼られたものを使用すること。

(6) 民法

民法においては、非常に重要な土地の所有権に関する法令を理解した上で小型無人航空機を飛行させなければならない。

- ①第207条:土地の所有権は、法令の制限内において土地の上下におよぶ。
- ②有人航空機は、航空法において公共性のためこの条項は適用されないとされている。しかし、小型無人航空機に関しては、公共性を謳うことは無理があり、上空を飛行させるのは現状、全ての地権者の承諾が必要となる。

(7) 外為法

小型無人航空機は、最先端技術（飛行制御装置、ジャイロやその他のセンサー等）が集積されたものであり、特定技術を特定国及び特定組織に販売する場合、経済産業相の許可が必要となる。要するに、海外に小型無人航空機を持ち出す場合や販売する場合は注意が必要となる。

(8) 産廃法

産廃物の抑制、処理責任に関する法律に小型無人航空機は関連する。小型無人航空機自体を廃棄する場合、バッテリー等の扱いも含め産廃の対象になるので、むやみに不法投棄をすれば罰則の対象となる。

3.2 使用機器

UAV によって施設構造物の変状を把握するためには、UAV 本体、飛行中に対象物のオーバーラップ画像を取得するため 1～数秒間隔で撮影できるデジタルカメラ、カメラの方向を変えるジグ及びこれらを地上から操作するシステム一式が必要である。また、撮影した画像から三次元形状データ（三次元モデル）を生成するためには、SfM (Structure from Motion) ソフトウェアを使用する。

3.2.1 UAV

UAV は、操縦者が搭乗せずに飛行するよう設計された航空機の総称であり、形状や動力によって搭載可能な重量や飛行速度、可搬性、値段、操作性等に違いがある。このため、利用者や目的に応じて、適切なものを選択することが肝要である。

測量分野で利用されている代表的な UAV 数種類について利用上の特性が、表 3.2 のように評価されている (Nex and Remondino, 2014)。凧や気球は、動力を有し自律飛行のできる UAV が登場するまでは、上空から地上の状態を画像で把握する手段として色々な分野で利用されてきた (例えば、三浦ら、2004)。固定翼の UAV は、比較的高速で飛行するため広い面積をカバーすることができ、海岸線の上空からのモニタリングの際に約 20 km を飛行させた実証例がある (熊田ら、2010)。これに対して、回転翼の UAV は、他に比べて自由な飛行が可能であり、近年はいろいろな分野で利用が進められている。回転翼の UAV は、ロータの数によって、単回転翼、同軸二重反転翼及び 3 基以上を装備したマルチコプタがある。既に農業分野で実用的に利用されている農薬散布用の無人ヘリコプターも UAV のひとつである。

表3.2 測量分野で導入している UAV の評価
(低い方から高い方までを 1～5 で評価)

	凧/気球	固定翼		回転翼	
		電動	エンジン	電動	エンジン
搭載荷重	3	3	4	2	4
耐風性	4	2	3	2	4
最低速度	4	2	2	4	4
自律飛行	—	3	5	2	4
可搬性	3	2	2	3	3
着陸距離	4	3	2	4	4

特に、農業水利施設や海岸堤防のストックマネジメントのなかで UAV を活用する際には、表 3.2 の評価項目以外に、操作性、落下した時の耐久性や発火等の危険性等も選択上の重要な要素となる。このため、土木構造物のストックマネジメントでは、測量等の様々な分野で急速に普及が進んでいる、電動で 4 枚又は 6 枚のロータを備え操作性の高い UAV を中心に、その活用を目指した技術開発が進められている。また、50kg の搭載可能な電動のマルチコ

ータの UAV が開発されており、重量のある様々な機材を搭載することも可能になりつつあり、益々適用範囲が広がることが予想される。

3.2.2 デジタルカメラ

UAV に搭載するデジタルカメラは、レンズ交換が可能な一眼レフカメラで、UAV の飛行高度（対象物までの距離）を考慮しつつ対象物の所要の解像度が得られるような画素数の撮像素子（CCD イメージセンサか CMOS イメージセンサ）を持ったものを使用する。

対象物の解像度と撮像素子の画素数とは次式の関係がある。ただし、色の認識に複数の画素を使う構造のものが多く、色による情報が重要なコンクリートのひび割れの検出のためには、より多くの画素数が必要になる。

$$\frac{P \times f}{C \times x} = 1$$

P = 対象物の解像度、 f = レンズの焦点距離、 C = 撮像素子の画素の大きさ、 x = 対象物までの距離。例えば、サイズ 17.3 mm×13.5 mm で画素数が 4,592×3,448 の撮像素子（4/3 型/LiveMOS センサー）のカメラを使用した時の上空から撮影した画像の解像度と撮影高さとの関係は、図 3.3 のようになる。ただし、総ての画素のうち一部（5%程度）は画像に使用されないものがあるが、図 3.3 はそれを考慮していない。

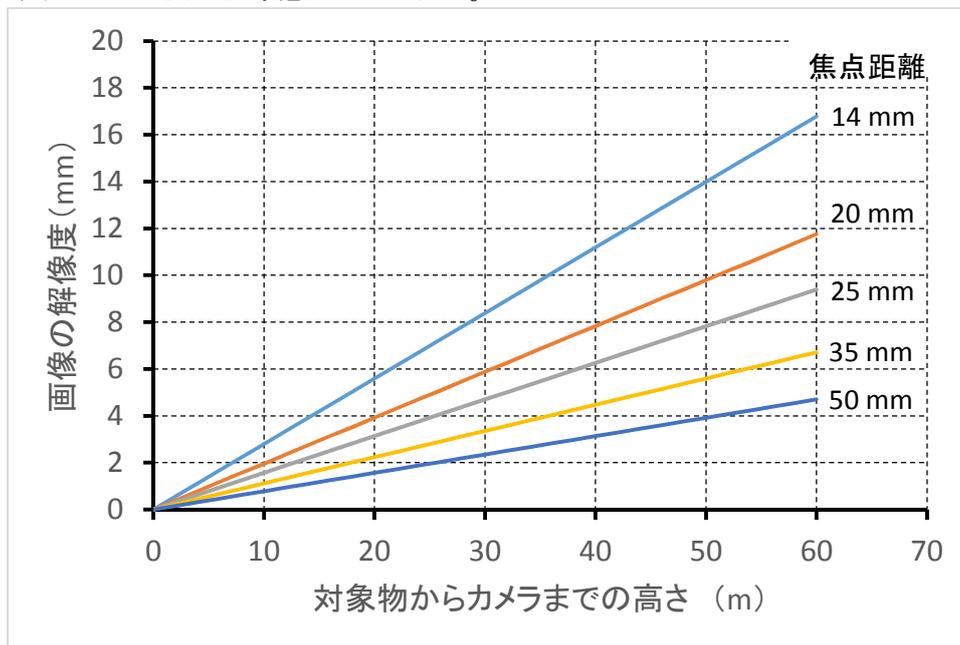


図3.3 4/3 型/LiveMOS センサー（サイズ 17.3 mm×13.5 mm で画素数が 4,592×3,448）の場合の対象物からカメラまでの距離に対する対象物の解像度

3.2.3 写真測量ソフトウェア

写真測量では、動画や静止画からカメラ撮影位置を推定し、三次元形状を復元する技術として SfM (Structure from motion) が使用され、市販のソフトウェアの他オープンソースからも入手できる。表 3.3 に、市販されている SfM ソフトウェアのうちの主な 3 種類の特徴を整理している。

表3.3 国内で使用されている主な写真測量用の SfM ソフトウェア

製品名	PhotoScan	Smart3DCapture	Pix4DMapper
開発社	Agisoft 社	Accute3D 社	Pix4D 社
開発国	ロシア	フランス	スイス
特徴	<ul style="list-style-type: none">・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。	<ul style="list-style-type: none">・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ワ表示が精細。	<ul style="list-style-type: none">・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。・国内及び欧米で実績が多い。

3.3 作業計画

作業計画は、現地調査を踏まえ UAV の飛行が可能な範囲や時間を定め、変状検出が可能な画像を取得するための全体の実施内容を立案するとともに、必要な作業体制を確保する。

3.3.1 検討項目

(1) 作業の目的

作業計画書の作成をイメージして追加

(2) 申請が必要な空域

空法で定める飛行ルールでは、下表の赤枠以外の空域で UAV の飛行を実施する場合には、航空局への申請・許可が必要となる。申請は、飛行の目的、日時、経路、高度、飛行禁止区域を飛行させる理由、操縦者の飛行経験・能力や機器機能および性能等に関する事項を記すものである(巻末資料参照)。

なお、許可・承認の申請手続きは、飛行開始予定日の10開庁日前までに申請書類を提出する必要がある。



図3.4 UAV 撮影における空域制限 (国土交通省 HP)

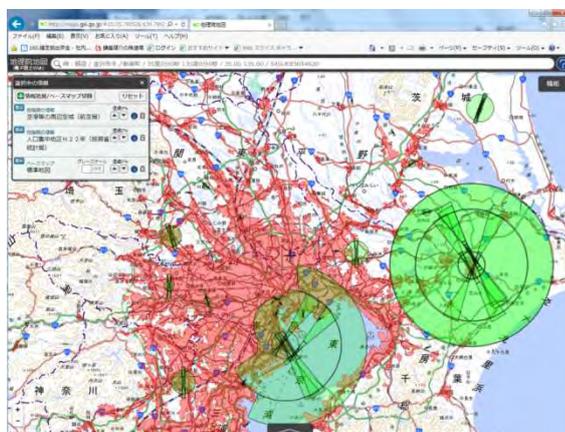


図3.5 地理院地図による人口集中地区・航空等の周辺空域 (国土地理院 HP)

(3) 1日当りの標準撮影等

① 撮影時間

○1 現場での撮影時間は、3時間以内、4フライトを目安と考える。

UAVの飛行では、予めプログラミングした飛行コースを機器本体に送信するためにPCを利用する。また、プロポのUAV監視モニターの補助としても利用している。一般的に、PCはバッテリーで稼動しているため、1現場の撮影時間はPCのバッテリー寿命(約3時間)の制約を受ける。また、撮影写真をこのモニター用PCで確認・処理を行う場合は、さらに制約時間が短縮される。

したがって、1現場での作業時間は3時間以内を標準とするが、PC用の専用充電器等を準備した場合はこの限りではない。

1現場を3時間以内に設定した場合、1回のフライトを10分、次のフライトまでの準備、安全確認等を30分とすると、

「 $180分 \div 40分/回 \div 4回$ フライト」となる。

このため、撮影範囲は最大4回のフライトで計画する。

例) 飛行速度 2m/s (7km/h) で飛行した場合、

「 $2m/s \times 600s/回 \times 4回 = 総飛行距離 4.8km$ 」

となるが、撮影地点までの移動距離、帰還距離、上昇・下降距離を踏まえて有効撮影範囲を設定する必要がある。

(4kmの有効延長を仮定すると、500m/コースで8コース)

飛行可能時間は上空の風が強いことやフライト中のトラブルを考慮し、バッテリー全容量の5割まで使用して着陸するよう計画する。飛行距離を延ばす場合はなるべくリスクを減らすために予備バッテリーを持参し、フライト回数を増やして対応するよう心がける。

② 撮影範囲

○撮影高度 20m で撮影する場合は、1 日約 0.07km² (概ね 0.1km²)

UAV の 1 現場あたりの撮影範囲は、撮影時間の制約から 3 時間以内で撮影できる範囲となる。3 時間以内で撮影できる範囲は、飛行高度に制約を受け飛行高度を高く設定すると撮影範囲は広くなり、飛行高度を低く設定すると撮影範囲は狭くなる。撮影高度と 1 画郭の撮影範囲の関係は、表 3.4 に示すとおりである。

表3.4 撮影高度と 1 画郭の撮影範囲

焦点距離 (mm)	撮影高度 (m)	1 ピクセルの長さ (μm)	長辺		短辺		地上解像度 (cm)
			ピクセル数 (ピクセル)	撮影範囲 (m)	ピクセル数 (ピクセル)	撮影範囲 (m)	
14	100	3.7	4,592	121	3,448	91	2.6
14	80	3.7	4,592	97	3,448	73	2.1
14	50	3.7	4,592	61	3,448	46	1.3
14	30	3.7	4,592	36	3,448	27	0.8
14	20	3.7	4,592	26	3,448	18	0.5
14	10	3.7	4,592	13	3,448	9	0.2

*例) 標準に設定した対地高度 20m で撮影した場合

- ・ 1 画郭の撮影範囲：(26m×18m)
- ・ 短辺のラップ (オーバーラップ)：80% (有効幅 18m×20%=3.6m)
- ・ コース延長：500m を仮定
- ・ 飛行速度：2m/s を仮定
- ・ 飛行コース数：8 コース
- ・ 撮影幅：8 コース×18m=144m
- ・ 撮影面積：144m×500m=72,000 m² (≒0.07k m²)

(4) 離発着場所

離発着場所は、UAV を始動するために水平な場所とする。ここでは、離陸前のモーター始動直前に加速度とジャイロキャリブレーションを行う。水平でない場所でこのキャリブレーションを行うと、傾いた機体の姿勢を水平時の姿勢に決定してしまうため離陸上昇が斜めになってしまうことと、高度ホールドを ON にしてホバリングすると、傾いた方向へ流れてしまう。(姿勢制御機能への障害：機種による)。

(5) 地上基準点 精度検証

地上基準点は、UAV で撮影した画像から作成する三次元モデルやオルソ画像、変状個所の正確な位置情報 (x、y、h) を把握したい場合に利用する。上空のUAVからよく見える場所に、図3.6に示すような明瞭な標識を設置し、その標識の中心位置は、GNSS 測量や TS 測量または水準測量により国家座標 (x、y、h) を与える。

地上基準点は、対象範囲の周囲と中間位置に適度に配置することにより、成果となる三次元モデルやオルソ画像の位置情報を正確かつ均一とすることができる。なお、中間位置の地上基準点は、概ね 50m 間隔に設置することが望ましい。

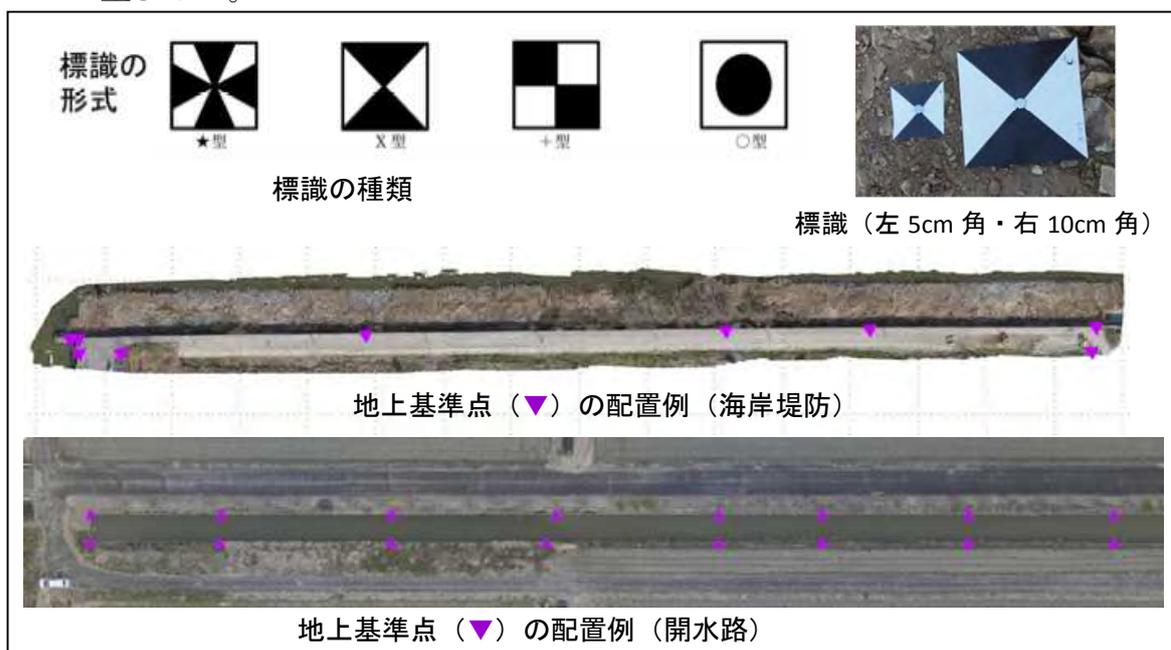


図3.6 標識の種類と配置

(6) 作業実施体制

UAVの安全作業を実施するにあたり、作業体制は、必要となる役割を明確にして一つの役割に専従することが必要である。また、UAVの安全飛行のためには、「周辺状況、気象の安全確認」、「機体の操縦」、「機器状態のモニター」を同時並行で行う必要があるため、下表の実施体制を標準とする。

表3.5 UAV飛行時の実施体制

作業者	役割
作業責任者(総括)	飛行可否の判断 常に飛行中の機体及び周辺環境、天候を監視する。 第三者に対して注意を払い、離着陸場所及び周囲への侵入を制止するための適切な対応をとる。
操縦者	常に機体、プロポモニターを監視しながら操縦を行う。機体監視者から常に状態の報告を受け、受けた内容を復唱する。
機体監視者	常に飛行中の機体をPC及び目視により監視する。 操縦者から常に実際の飛行状態の報告を受け、受けた内容を復唱する。
* アングル確認者	アングル指定の撮影を行う場合、モニターによりアングルの確認を行い、操縦者にカメラ方向を指示する。
* 見張員	やむをえず注意を要する施設周辺、見通しが悪い場所を飛行する場合は、UAVと障害物との距離、飛行状態を監視する見張員を配置する。

*：必要に応じて担当者を配置

(7) その他

特に海岸施設の汀線付近にてUAVで作業を実施する場合には、海上保安庁や漁業組合などの関係者と連絡を取り、作業内容を周知し実施する必要がある。

3.3.2 地元説明及び調整

UAV 測量は、測量を行うにあたり、対象施設の管理を担当する関係各所に説明するとともに、調査の実施に対する許可を取得する必要がある。主な調査関係者は、次のとおりである。

表3.6 関係機関の一覧

	対象施設の関係者
機関の名称	<ul style="list-style-type: none">・農林水産省・国土交通省 (道路や河川などで隣接する管理地に立ち入る場合)・都道府県・市町村・土地改良区・当該地区の区長または代表者

また、申請にあたり、以下の調査内容を示す作業計画書を作成し、関係各所の許可を得るものとする。

- ・目的
- ・調査実施主体
- ・調査内容（日程、使用機器、調査方法、調査範囲など）
- ・安全管理
- ・連絡体制
- ・参考資料（当該地区の飛行制限や DID 地区の有無等）など

4. 画像撮影

UAV の撮影計画は、調査目的を踏まえた上で撮影諸元（画像の解像度、撮影高度、画像間の重複：ラップ率、撮影インターバル等）を決定し、対象となる範囲を網羅する飛行ルートを立案する。

4.1 基準点の整備

UAV 機体保有の GNSS では軌道情報（撮影位置・撮影時の傾斜）が正確でない。正確な位置情報を得るためには地上に基準点を設置する必要がある、その基準点の位置情報から UAV の軌跡を推定することができる。

この基準点は、要求する位置精度によって配置する必要がある。図 4.1 に示す検証結果を参考とされたい。

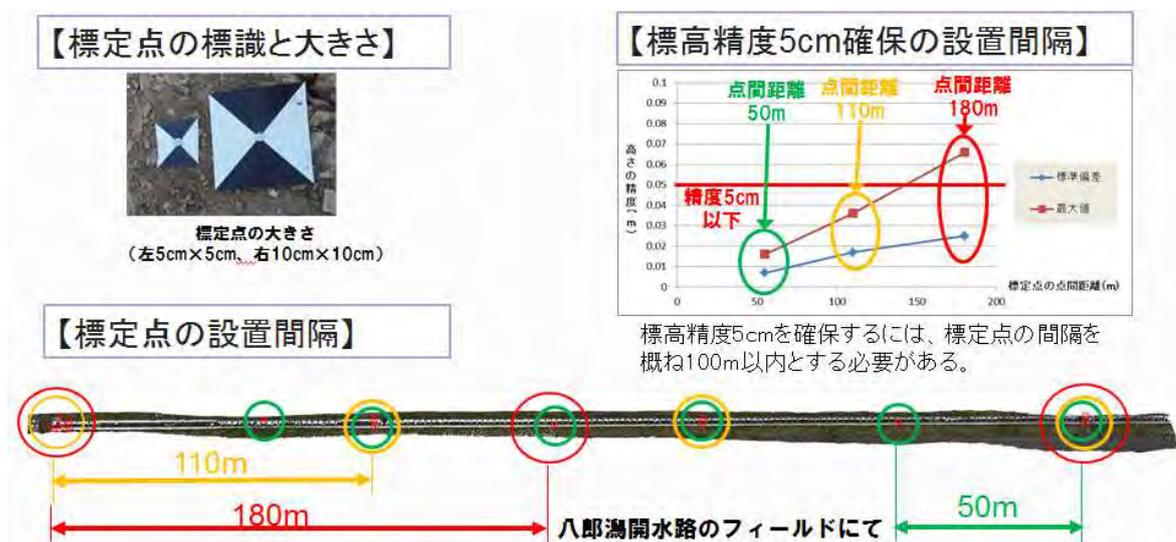


図4.1 基準点の配点例

4.2 UAV 撮影計画

4.2.1 地上解像度

地上解像度は、ひび割れ調査では1mm以下で、不陸調査では5mmを標準とする。

地上解像度は、UAV の対地高度に密接に関係しており対地高度が低いとより細かな写真画像となる。

本調査では、ひび割れや不陸の計測可能な高度を考慮し、対地高度2.5m程度で、地上解像度4mmを標準とする。ただし、ひび割れを検証する場合は、そのひび割れ幅に応じて、地上解像度を設定する必要がある。

4.2.2 画像間ラップ率

画像間のオーバーラップ率は、80%以上を確保することを標準とする。

空中写真測量は、地表の垂直写真を飛行コースに沿って重複させながら撮影した航空写真と地上の位置関係を詳細に求め、写真上での像の違いを立体的にかつ精密に測定することによって、正確な三次元計測・地形図作成を行う。そのため、撮影された垂直写真はある一定率で重複している必要がある。

画像の重複は、画像の進行方向に対するオーバーラップ（以下、OL:Over Lap）と、コース間に対するサイドラップ（以下、SL:Side Lap）がある。

UAV の画像から SfM 解析処理を用いる場合は、画像間の重複率が大きいほど出力される三次元モデルの精度が高くなるため、本調査では重複率を以下のように定めることを標準とする。

同一コース内の重複率（OL）：80%以上

隣接コースとの重複率（SL）：60%以上

因みに、「公共測量作業規定の準則」における重複率は下記のように設定されている。

（公共測量作業規定第125条）

同一コース内の重複率（OL）：60%以上

隣接コースとの重複率（SL）：30%以上

4.2.3 飛行方法

UAV 機器は、予めプログラミングした飛行コースに沿ってGPS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が可能である。それぞれの航行方法の特徴を把握し、航行方法を選択する必要がある。

なお、飛行方法に関係なく、山の斜面や構造物の上を越えず、これらに対峙する方向のフライトは避ける。人間の遠近感は50mも離れると距離感があいまになるため、UAVと障害物の距離判断が困難となる。このような場合、障害物付近に見張員を配置し、フライト中は無線や電話で速やかに飛行を止められるような確認体制を取る必要がある。

(1) 自動航行

自動航行は、予め飛行コース設定が可能で、三次元モデル作成やオルソ作成等で撮影ラップ率や測量精度が要求される場合は撮影漏れ等を防止できることが有効である。飛行コースの設定にあたっては、飛行範囲内の地形（山、谷、崖等）、障害物（構造物、架空線等）を回避する必要がある。

(2) マニュアル航行

マニュアル航行は、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方法である。事前に飛行コースの設定が困難な場合、撮影場所が事前に特定できない場合はマニュアル操作にて飛行を行う。

この場合、機体との距離が離れると遠近感がなくなるため、障害物と機体との距離が不明瞭となるので障害物との間には十分な距離を確保する必要がある。

4.2.4 撮影インターバル

UAV 搭載カメラは、動画撮影モードと静止画撮影モードがあり、利用目的によって設定を変えて利用する。動画はデータ容量が大きく、画像自体も加工が困難なため、ひび割れ抽出のような細かい判読や正確な標高値を算出するには不向きである。したがって、撮影モードは特別の要請がある場合を除き、「静止画」を標準とする。

静止画の撮影は、連射が可能なため撮影インターバルを設定して連射にて撮影する。連射の撮影インターバルは、撮影計画でのオーバーラップを確保する時間、撮影画像のSDカードへの書き込み保存の追従時間、AF（オートフォーカス）追従時間との関連があるため、2秒間隔を標準としている。（試験飛行結果から、撮影インターバル1秒では画像が不鮮明となる）

4.2.5 画質調整

UAV の搭載カメラには、カメラの基本設定項目（ピント、絞り、シャッタースピード、ISO）を自動調整するオートモード機能がある。オートモード機能は、被写体（地盤面）に追従して調整しているが、被写体が動く場合や起伏が大きい場合は調整できない場合がある。試験飛行を行った場合、オートモード機能での画像は手動でカメラ設定した場合に比べて画質が劣る。

このため撮影は、基本項目をマニュアル設定して撮影する。特にオルソ作成や地形解析データとすることを前提とする場合は、手動によるカメラ設定を行う。これは、位置情報と撮影画像を同期させる必要がある（GNSS ロガーとの同期）、撮影間隔が不定期となるオートモード機能を利用すると、撮影のタイミングと位置情報取得のタイミングの間にズレが生じ、撮影位置に誤差が生じるためである。



上図：撮影計画図（平面図：水路を挟んで2コースの撮影）
下図：撮影計画図（KML を利用して鳥瞰視：水路の上空を2段撮影）

図4.2 撮影計画図例

4.2.6 水利施設における撮影方法

- ・大規模な水利施設は、50m 程度の高度で鉛直撮影を実施する。
- ・5m 以下の小規模な水利施設は、GPS の位置精度や風などの影響から、低空（10～20m 程度）の鉛直撮影のみでターゲットをとらえることは困難である。
- ・低空（10～20m 程度）の鉛直撮影では、水路の壁面のような直壁を撮影することができない。
- ・上記の事から、5m 以下の小規模な水利施設は、斜め撮影を基本とする。
- ・ただし、低空の斜め撮影の場合、草の陰に隠れ基準点が見えないことが考えられるため、撮影高度を上げた鉛直撮影を併用することが望ましい。

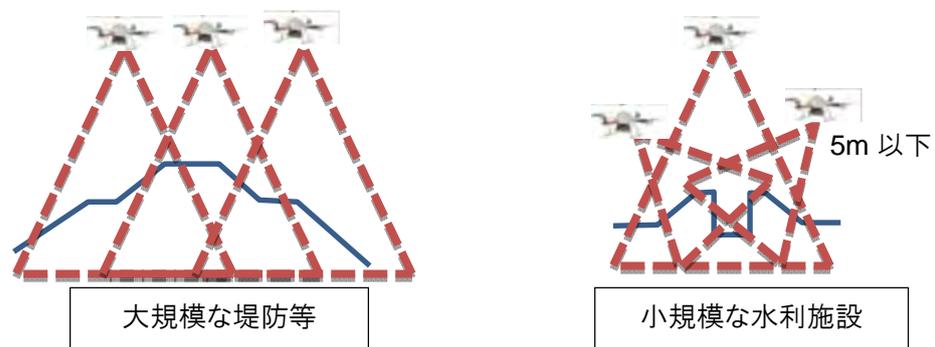


図4.3 農業水利施設における計測手法例

表4.1 水利施設における撮影計画の例

水利施設	撮影計画例	施設の状況写真
①海岸堤防	<p>堤防の全域監視 堤防の周辺監視 表裏面の監視</p> <p>約 20m</p> <p>10m 25m 50m</p>	
②開水路 I	<p>周辺田面の監視 水路全体監視 壁面詳細監視</p> <p>約 20m</p> <p>10m 20m 50m</p>	
③開水路 II	<p>50m 20m 10m</p>	

4.3 UAV 操作時の確認事項

UAV を安全に運用するためには、機体の点検、現地の状況（天気・風等）、撮影計画、人員配置と操縦者の技量を確認する必要がある。

4.3.1 機体の点検

UAV を安全に運用するためには機器の点検が重要となる。日頃からメンテナンスを実施するとともに、フライト当日に注意すべき点を下記に記載する。

① フライト前

- ・各機器は安全に取り付けられているか。
- ・全てのネジ類に緩みはないか。
- ・LED の点灯は正常か。
- ・モーターに異音はないか。
- ・プロペラに傷や摩耗はないか。
- ・バッテリーは満充電となっているか。
- ・積載重量は適正の範囲内か。
- ・プロポとの通信、撮影計画ソフトウェアとの連動は問題ないか。

② フライト中

- ・離陸、着陸共に安定しているか。
- ・ホバリングは安定しているか。
- ・GPS の感度は安定しているか。
- ・全ての動きは正常か。
- ・プロペラはきれいに回転しているか。
- ・バッテリーの残量に余裕はあるか。

③ フライト後

- ・機体に塵、ゴミは付着していないか。
- ・発熱している機器はないか。
- ・プロペラに亀裂や欠けなど損傷はないか。
- ・全てのネジに緩みはないか。

4.3.2 現地の状況

フライトを実施する前に事前に確認しておくべき事項を下記に記載する。

① 天候

現地フライト予定時間の気象情報を確認し、急激な天候の変化がないことを確認する。フライトに適している天候は「晴れ」もしくは「曇り」が好ましいが、光量が多すぎるとハレーションが起こり、少ないと撮影画像が暗くなるため注意が必要である。また、雷が聞こえたら、すみやかにフライトを中止すること。

② 風速

UAV の機体スペックには風速にどの程度耐えられるかが記載されているが、安全面を考慮すると地上風速 5m/s 以上の場合はフライトを中止する。上空では地上よりも風速が強い場合が多々有り、設定している飛行ルートと乖離してしまう可能性があるためである。

③ 離着陸場所

UAV 機体状況の確認、および安全に離陸・着陸が可能である場所を予め選定しておくこと。

4.3.3 撮影計画と現地の整合性

- ・事前に飛行ルートを作成しているか。
- ・作成した飛行ルートは撮影諸元通りか。
- ・作成した飛行ルート上に自動航行を妨げる障害物（樹木・電線等）はないか。

4.3.4 人員配置および操縦者の技量

- ・安全に配慮した人員配置をしているか。
- ・自動航行に問題が生じたときに、手動で安全に操作を行えるか。
- ・操縦者の技量を上回る撮影計画をしていないか。

4.3.5 チェックシート

UAV を安全に運航させるため、UAV を飛行させる前に必ず機体の安全管理を実施するとともに、現地状況を確認する必要がある。

4.4 撮影後の画像点検

画像の撮影は、撮影計画に則り 5.2 で定める UAV 操作にて実施する。撮影した画像は、速やかに品質を確認し、画像や撮影手法に不具合があった場合には再び撮影を実施し、後続作業に影響のない画像を取得する。

4.4.1 撮影画像の状況点検

画像の撮影は、自動運行の場合、予め設定する計画軌跡の情報を UAV 機体に入力して開始する。一方、手動運行の場合は、フライト航路の周辺に車両や人の影響がないかを念入りに確認し、突然の挙動変位が発生した場合に備える。

なお、要求内容や当日の天候に応じて、対象施設やターゲットの向きを考慮した撮影方法を検討する必要がある。例えば、水利施設の側面を計測したい場合は、施設の側面が影で暗くならないような時間帯に撮影を実施しなければいけない。



図4.4 撮影時間による対象施設の陰影

4.4.2 撮影画像の品質点検

撮影画像は、撮影が終了したら速やかに品質を点検しなければいけない。画像の品質は、画像そのものの品質と運行の影響による点検がある。以下に、点検項目を記載する。

- ・飛行計画と実際の走行ルートが乖離していて対象施設が映っていない。
(特に、撮影高度が低い(10m 程度)場合には撮影する範囲も狭くなるので、正確なフライトができているかを確認する必要がある。)
- ・インターバル撮影が機能せず、連続した撮影画像になっていない。
- ・画像にボケ、ブレがある。
- ・画像が暗いもしくは明るすぎる。



計画通りに水路側面を捉える画像

側面を捉えられない画像

a) 飛行計画との乖離した画像

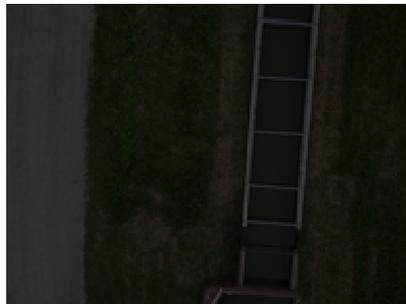


正常画像



ピンボケあり画像

b) 画像のボケの有無



暗い画像



明るい画像



正常画像



正常画像

c) 画像の明るさによる画質の相違

図4.5 撮影画像の画質例

5. 画像処理

画像処理は、UAV で連続的に重複して撮影した画像と地上基準点の情報から対象となる施設や地形の三次元モデルを作成する。

処理に用いるソフトは、隣接する写真間で共通する特異点から立体視し、1つ1つの画像の水平および高さ情報を計算する画像処理ソフト(SfM)とする。

5.1 SfM 処理

SfM では、カメラで撮影した複数の画像から、それらの撮影位置を推定し、同一地点に対するそれぞれの画像の視差から対象物全体の三次元モデルを生成する。三次元モデルは、多くの点群データ（三次元 point cloud）で構成され、その精度は、撮影に使用したカメラの画素数、焦点距離、対象物までの距離、オーバーラップ率等に依存するため、これらの条件を整えることによって所要の精度に近づけることとする。

SfM 処理した三次元モデルは、相対的な位置関係の情報であり、地理空間座標が定義はなされていないため、モデル上の特定の複数の地点に地上の座標（地上基準点、GCP: Ground control point）を対応づけることによって地理空間座標を定義する。この手順で、UAV で移動しながらオーバーラップして撮影した画像から、撮影範囲が三次元モデルとして再現され、その中の施設建造物の形状も三次元の座標データとして特定する。さらに、三次元モデルに撮影した画像から生成した色や模様を貼付け、より現実的なモデルへの加工や正射投影画像（オルソフォト）を作成する。

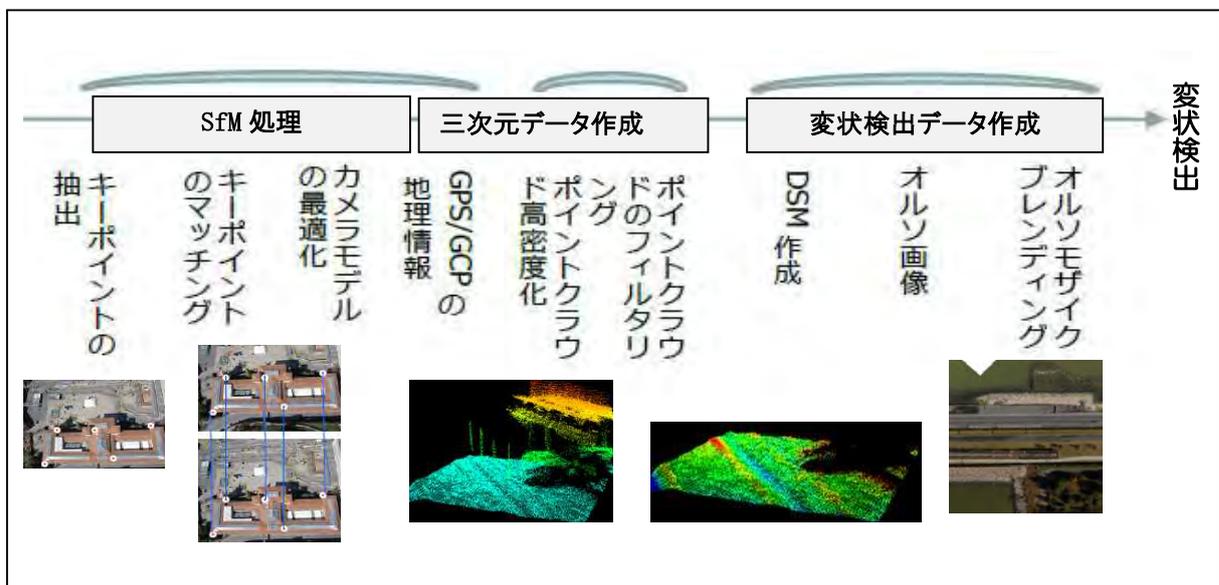


図5.1 画像処理手順

SfM ソフトウェアは、現在国内では3種類が普及している。それぞれの特徴は表 5-1 に示すとおりであり、調査における利用を制限するものではない。

表5.1 国内で使用されている主な写真測量用の SfM ソフトウェア

製品名	PhotoScan	Smart3DCapture	Pix4DMapper
開発社	Agisoft 社	Accute3D 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ワ表示が精細。	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。 国内及び欧米で実績が多い。

注)・市販のソフトウェアの他オープンソースからも入手可能である。

・SfM では、複数の UAV で撮影した画像や手持ちカメラの画像と組み合わせて三次元モデルを生成することもできる。

5.1.2 入出力のデータフォーマット

本ソフトウェアにて作成できる点群データは、三次元鳥瞰図（色つき点群データ）として利用することが出来る。現時点では、一般的にデータが流通している txt 形式もしくは las 形式を標準とする。

5.2 主要成果品と活用方法

UAV で撮影した結果は、変状の検出に活用することを前提としていることから、判読しやすい形式に加工する必要がある。

上空から撮影した鉛直写真および対象物と正対するような斜め写真をもとに、変状の検出を行う。

撮影した画像では、オルソ画像とすることで、概略の施設の形状、劣化状況と損傷規模が施設全体について面的に把握する。

また、SfM により作成した三次元モデルでは、写真では判断しづらい高さ（不陸や高低差など）の変状を施設全体について面的に把握する。

5.2.1 データ活用方法

UAV で撮影した画像をもとに作成するデータとその活用方法を表 5.2 に示す。

表5.2 UAV 調査で作成する成果と活用方法

基礎データ	加工データ	活用方法
画像	単写真 (画質調整画像)	オリジナルの写真画像を拡大表示し、詳細な状況を検出する。 日射状況により暗い写真画像などは、明るさやコントラストを変えることで検出できることがある。
	オルソフォト画像	施設全体の概略の損傷状況を把握する。また、連続する損傷が存在する場合、その位置特定、長さ(延長)、範囲等を計測する。
三次元点群データ	標高分布図 等高線図	三次元モデルの標高を一定の高さ毎に色分け表示することで、画像のコントラストの変化による高低差が検出しやすくなる。施設の面的な陥没、隆起や沈下を検出する。
	縦断面図	天端の標高を連続で把握したり、施設の不陸や目地の段差などを検出し、絶対的、相対的な高を計測する。
	横断面図	三次元モデルから任意の断面図を作成することで、不陸を検出し、絶対的、相対的な高を計測する。

5.2.2 画像データ

① 単写真

- UAV で撮影したオリジナル写真であり、地理空間情報は保有していない。
- 写真の歪等の修正は行っていないため、画像中心点から離れると長さ（距離）等が実際と異なり、隣接する写真画像をシームレスに接合することはできない（接合部の画像が一致しない）。
- 単写真は、対象物の詳細な表面情報から、局所的な変状箇所（ひび割れ、陥没、欠損等）、平面規模を定性的に検出する。

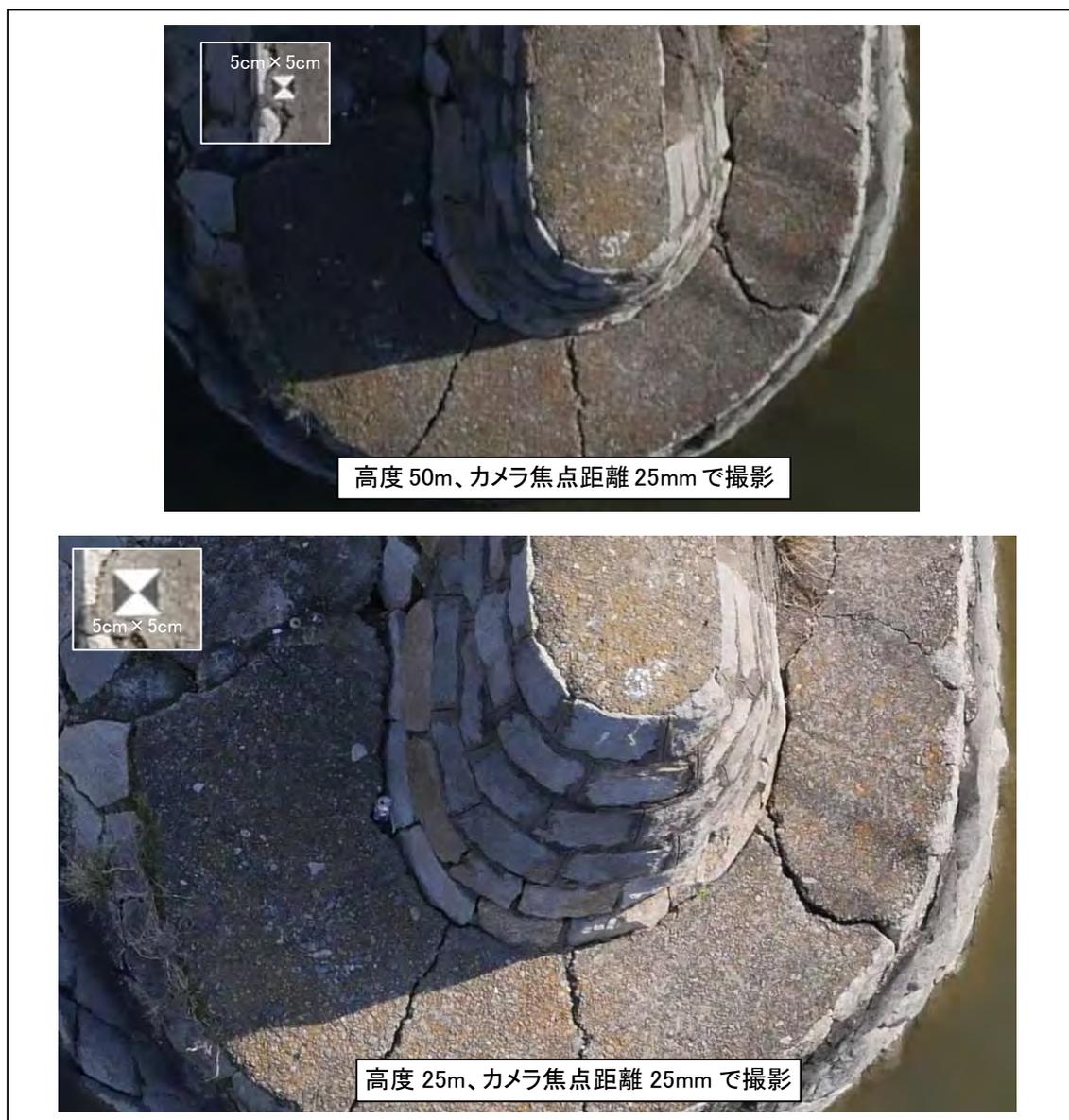


図5.2 撮影高度の違いによる単写真の視認性

【単写真画像による「ひび割れ」の検出精度例】

- 高度 10m 程度かつ、焦点距離 25mm のカメラで撮影した場合、擬似ひび割れ 1mm の検出が可能であった。
- 高度 3m 程度かつ、焦点距離 35mm のカメラで撮影した場合、実際のひび割れ 0.2mm の検出が可能であった。



図5.3 ひび割れの検出限界調査事例

② オルソフォト画像

- オルソフォト画像は、撮影した1枚1枚の画像と高さ情報を組み合わせて真上から見るように処理した地理空間情報を有した正射画像である。
(オルソ画像で重要となる高さデータは、前述した SfM で作成した三次元モデルの情報を利用することで正確な位置座標を保有するオルソ画像を作成できる)
- オルソフォト画像は、対象物の表面情報から、変状箇所（ひび割れ、陥没、欠損等）、平面規模（範囲、長さ等）を定量的に検出する。

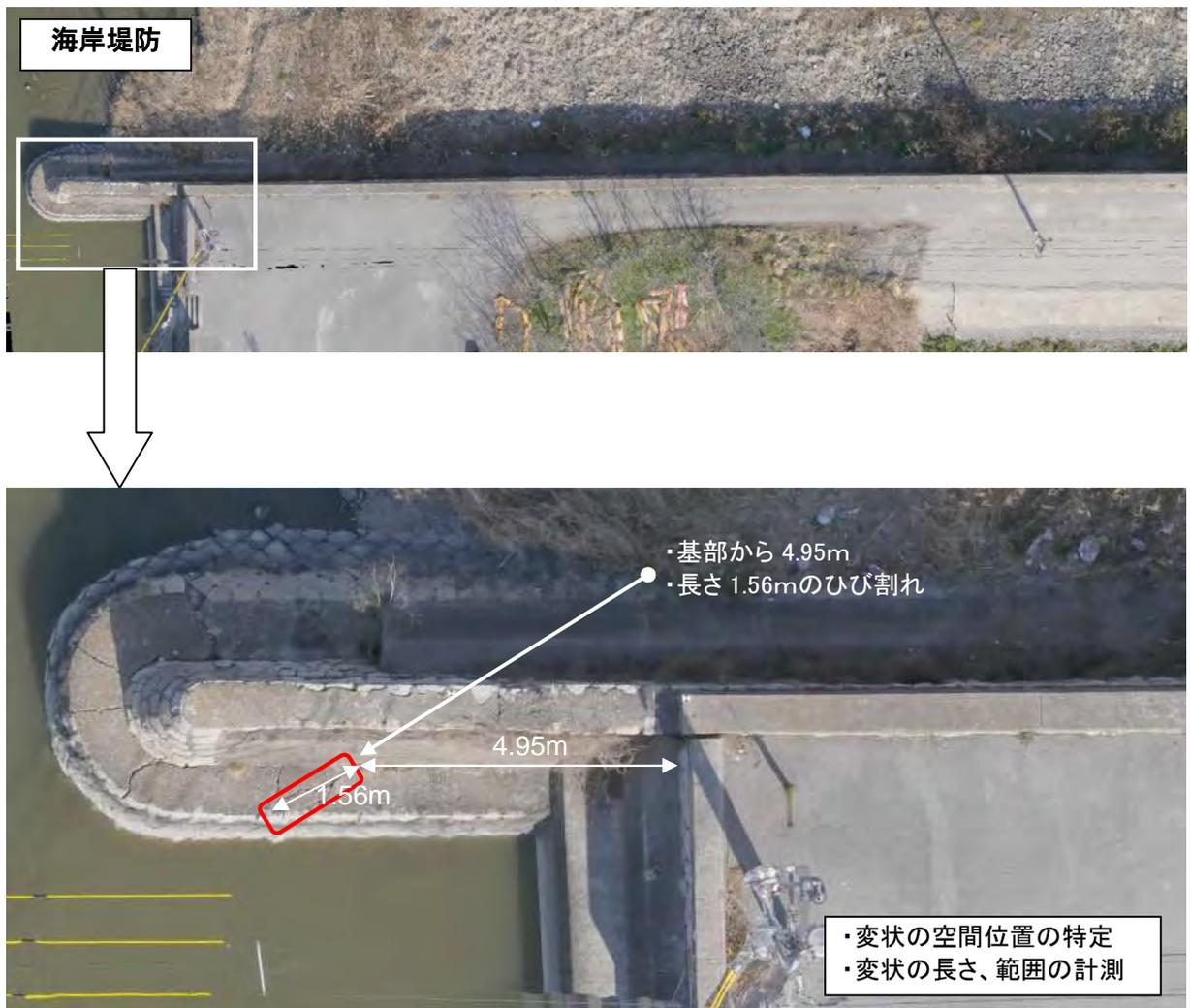


図5.4 オルソフォト画像(海岸堤防の例)



水路側面（水路壁）のオルソフォト（展開写真）

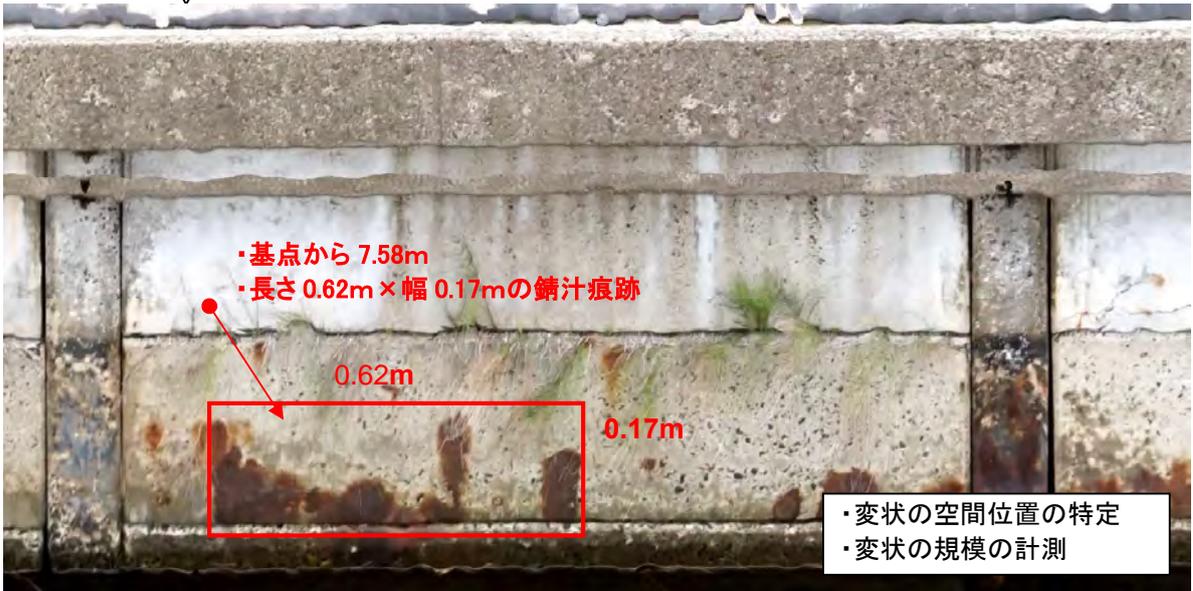


図5.5 オルソフォト画像（開水路の例）

5.2.3 三次元点群データ

- 三次元点群データは、SfM 処理により生成した空間地理情報を有するポイントデータであり、変状検出の基礎データとなる。
- 指定した対象物のポイントの平面位置、標高を取得し、基準（計画値）と対比することで指定ポイントの変状を定量的に検出する。
- 点群の生成密度は、数 cm に 1 点（撮影方法により異なる）と高密度であるため、鳥瞰画像とすることで、施設全体の概要を把握する。

(1) 概要

① データ概要

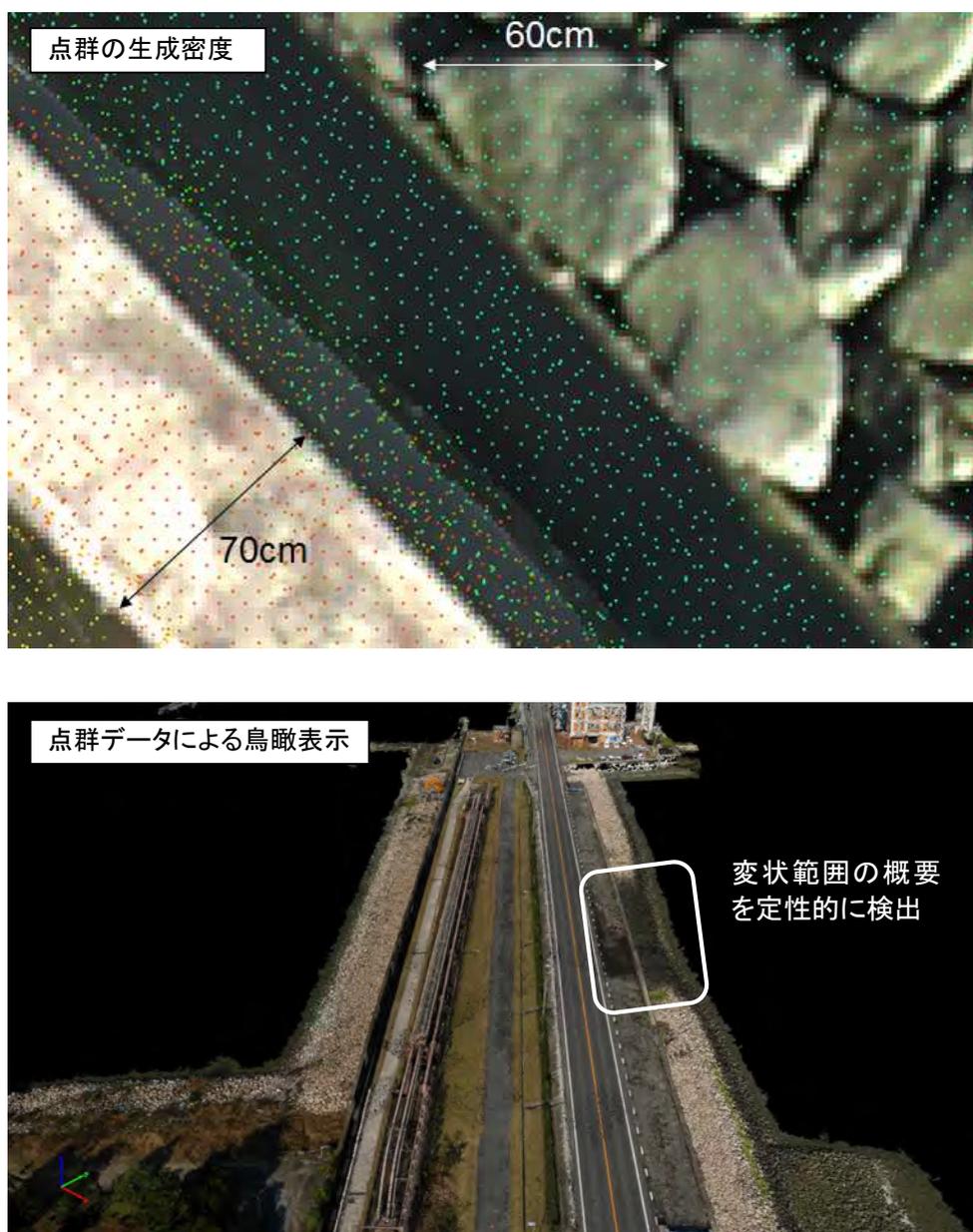


図5.6 三次元点群データの概要

② 三次元点群データの精度

三次元点群データは、cmレベルの高さ精度を取得することができる。
 撮影高度が10m・25m・50mにおける海岸堤防および開水路の高さを検証した結果、水準測量と比較して約5cm以内の高さ精度を得ることを確認している。

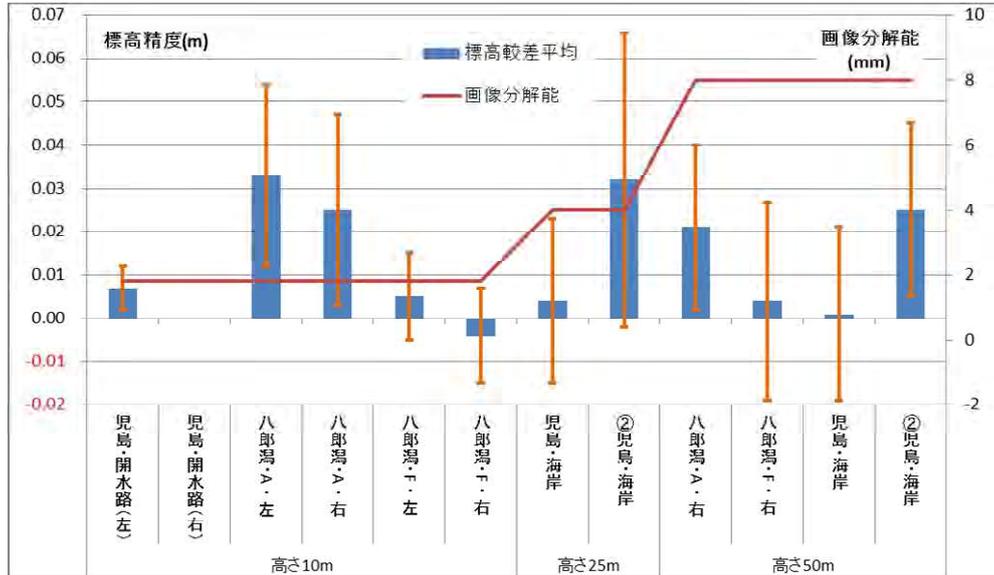
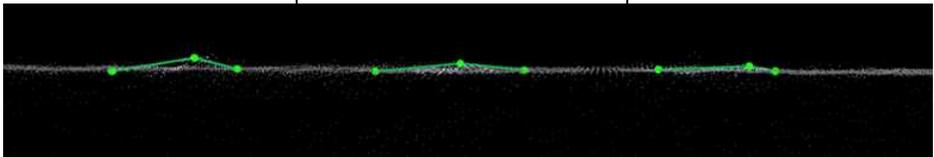


図5.7 撮影高度と対象施設別の高さの精度

③ 三次元点群データによる「起伏量」の判読精度

擬似的な段差を作成し、この模式を計測した結果、その精度は6mm以上で判読可能であることを確認している。

表5.3 擬似的な段差モードによる計測精度

	A (3枚)	B (2枚)	C (1枚)
場所	上空写真より 		
設置詳細	段差 20mm 	段差 13mm 	段差 6mm 
解析処理 (側面図)			
段差計測	26mm	13mm	6mm
較差	- 6mm	± 0mm	± 0mm

④ 留意事項

対象施設の上空及び近傍に灌木（樹木）が覆っている場合には、三次元点群データの欠測が発生する。このような場所では、UAV 測量にてデータ作成ができないことを予め理解して調査することが必要である。

また、必要に応じて他の測量手法（地上測量）を併用することを検討しなければいけない。



図5.8 灌木(樹木)群によるデータ欠測例

(2) 標高分布図及び等高線図

- 標高分布図は、三次元点群データを標高区分毎に着色して作成する。
(標高区分は、点検目的によって決定する。)
- 標高区分図、等高線図により施設の面的な起伏、沈下を検出する。



(標高区分図)

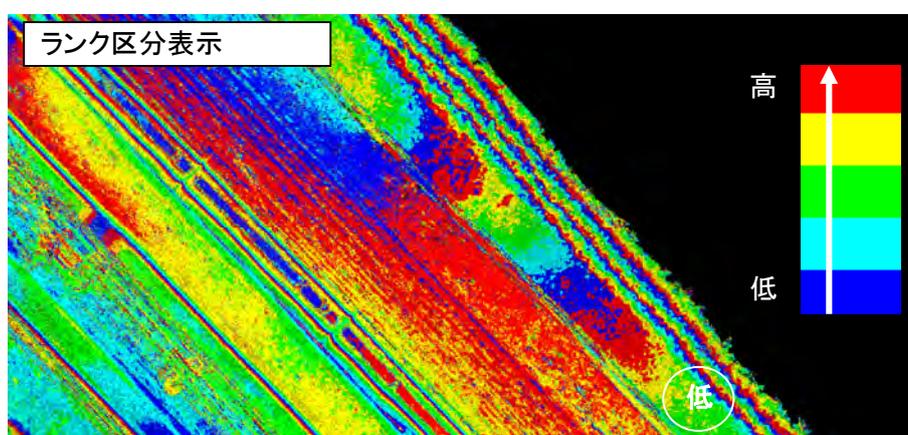
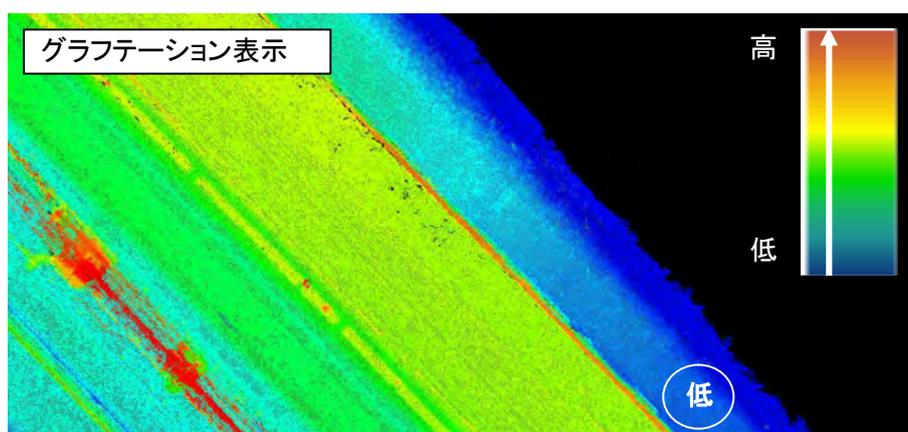
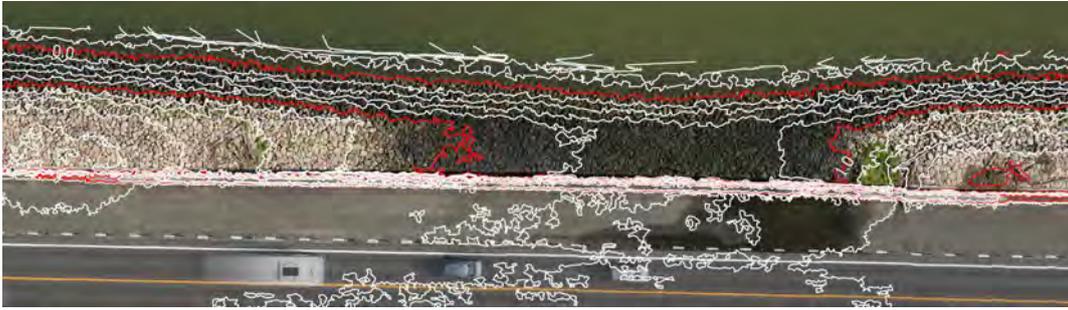


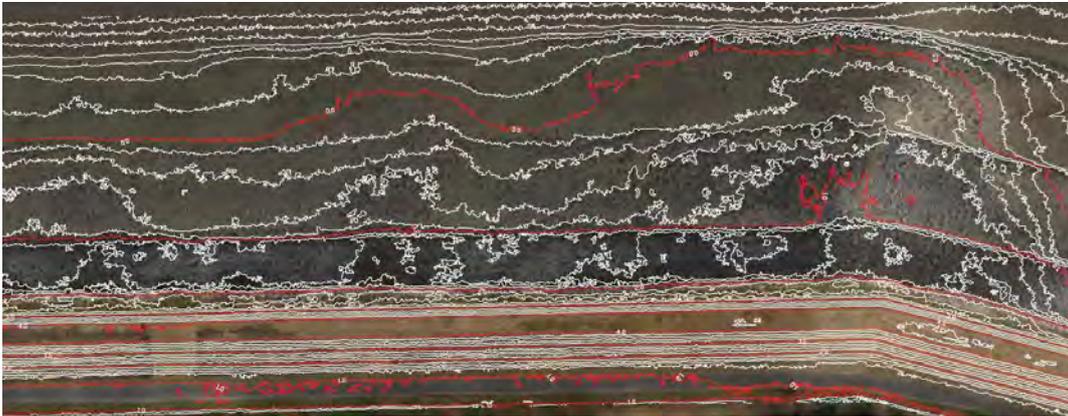
図5.9 標高区分図 (例)

(オルソフォト画像と等高線図の重ね合わせ)

○堤防前面の被覆石が沈下している事例



○堤防前面の被覆石に起伏(沈下、堆積等)が生じている事例



○堤防全体に渡って大きな変状が無い事例



図5.10 等高線図 (例)

(3) 縦断面図・横断面図

○縦断面図・横断面図作成は、変状の検出項目、精度及びコンピュータの処理能力（時間）を考慮して三次元点群データより抽出、加工して作成する。

(縦断面図・横断面図作成例)

① 全点の表示

指定した測線を中心として一定幅内に存在する三次元データを全て抽出して作成する方法

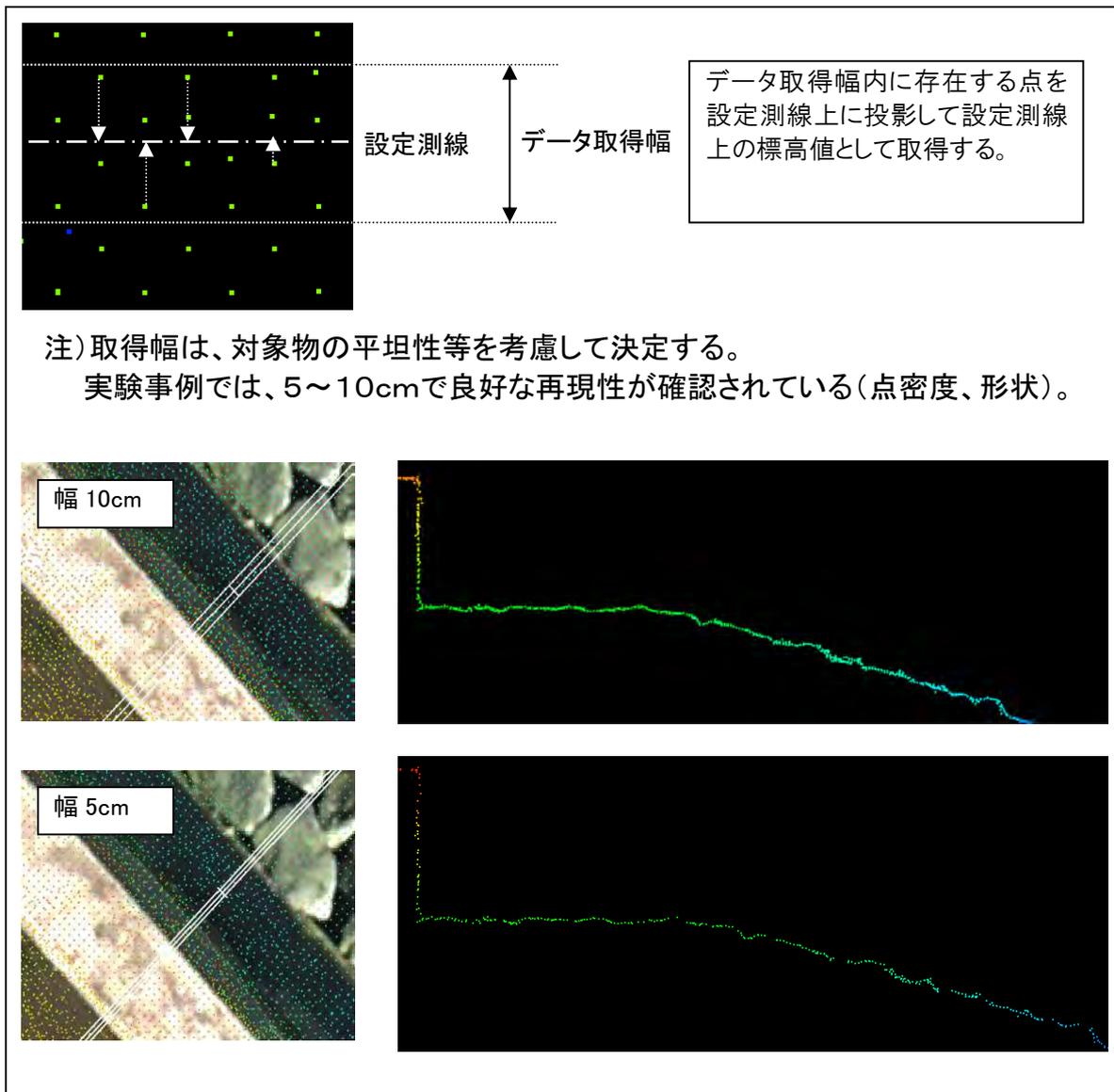
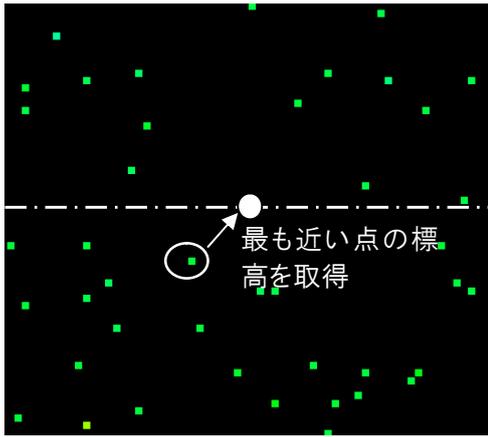
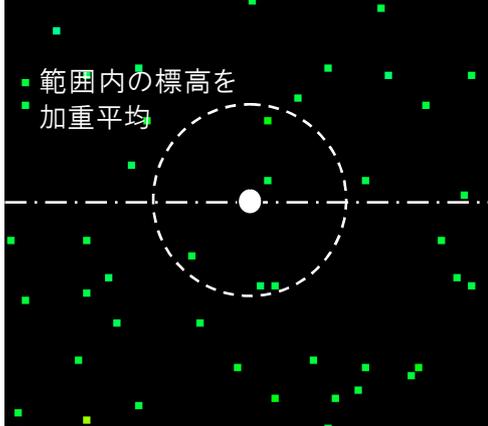
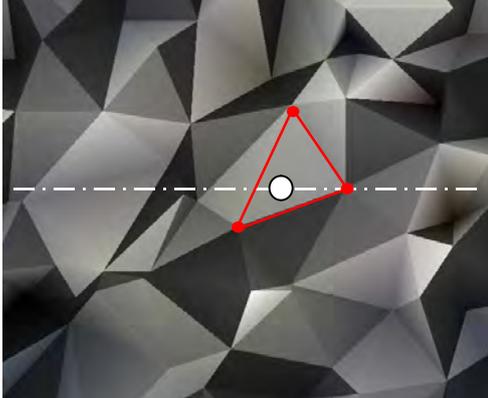


図5.11 データ取得幅を設定した全点表示 (例)

② 代表点の表示

測線上に一定間隔又は代表地点を設定し、三次元点群データより標高を決定して作成する方法

表5.4 代表地点による縦断面図、横断面データの取得方法

データ抽出方法	抽出イメージ
<p>①最近値法 指定個所に最も近い点の高さを採用</p> <p>注) 取得地点の設定にあたっては、地形変化点等に留意する必要がある。</p>	
<p>②平均値法 近傍の点の距離の逆数から逆距離加重にて決定</p> <p>注) 取得地点の設定にあたっては、地形変化点等に留意する必要がある。</p>	
<p>③TIN法 周辺の3点で面を形成し、指定位置を面上に落とし高さを決定</p> <p>注) 点群データ数が大量となるため、TINモデル作成においては、高性能(処理能力)なコンピュータが必要となる(一般事務用では困難)。</p>	

5.3 SfM 処理の留意事項

SfM 処理は、撮影した画像間の情報から三次元モデルを生成するため、撮影画像の状態が三次元モデルの品質を左右する。

5.3.1 撮影範囲

撮影画像は、計画コースと乖離がある場合は、画像に対象施設が映らず三次元モデルを作成できない。

撮影コースが乖離した場合は、対象施設を映す撮影を再度実施する。

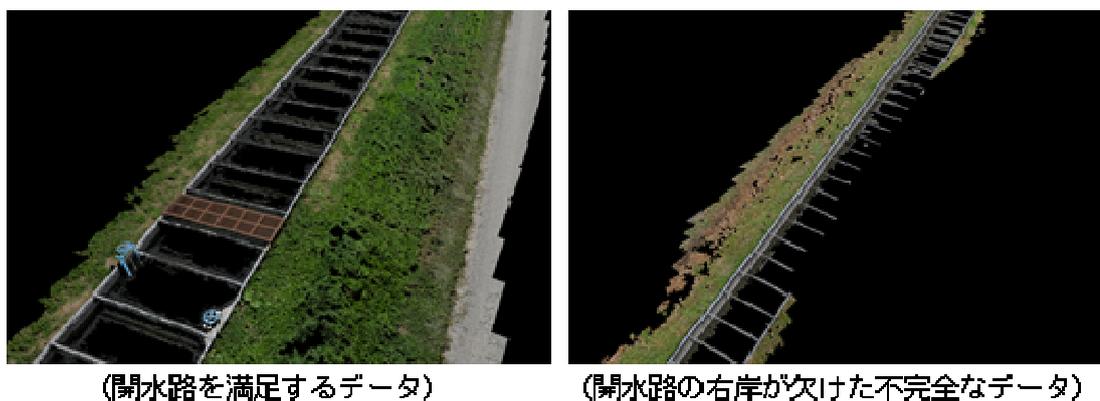


図5.12 撮影画像に依存する三次元モデルの例

5.3.2 キーポイントマッチング処理

二次元の画像と三次元点群ともに、色や形状に特徴がある点をキーポイント（特徴点）と呼ぶ。物体認識や対応点のマッチング、位置合わせ、検索などを行う際にこのキーポイントを利用する。

キーポイントを抽出する上で最も注意すべき事は、撮影対象の表面の状態である。対象の表面が草木に覆われているとか、水面、光沢のある材質である場合は、キーポイント抽出には向かないため解析処理が進まないことがある。画像内にキーポイントが多くある場合は、解析処理も短時間で済むとともに、位置情報の正確度も向上する（図 5.13）。

一方、キーポイントが少ない画像は、解析処理時間も長く、位置情報も不安定になりがちである。対象範囲にキーポイントが少ない地域では、適当な個所に例えば色つきのゴミ袋、木材、石、車両など、キーポイントに代替できそうな地物を設置しておくことでマッチング処理を向上させることもできる。



図5.13 キーポイントの選択例

5.3.3 画像の位置情報

SfM ソフトウェアは、画像データを重畳して特徴点の座標データを作成するが、画像のみでは歪みが生じてしまうことが多いため、画像データに Geo タグ情報を埋め込み、解析処理を行うことが望ましい。また、さらに精度を向上させるためには、計測した GCP を設置し画像標定する必要がある。

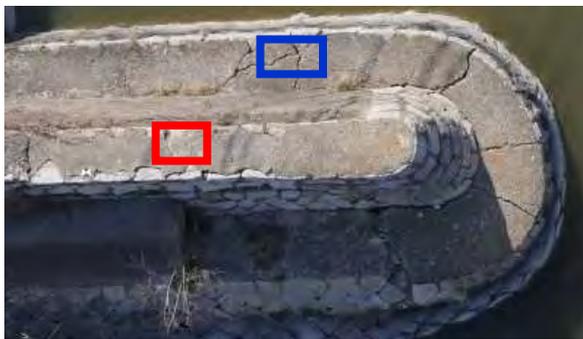
6. 画像処理による施設変状への活用方法

6.1 コンクリートのひび割れ

ひび割れは、画像劣化の少ない UAV で撮影した画像を直接確認することを基本とする。ひび割れの延長を計測する場合は、画像を平面投射して作成するオルソ画像を利用する。

6.1.1 ひび割れの判読

コンクリートの劣化・損傷は、ひび割れの状況を確認することを基本としている。ひび割れの判読は、上空から鉛直撮影した画像から判読するとともに、開水路の側壁や海岸堤防・護岸などの側壁は、斜めから撮影した画像から行う。



【撮影条件】

- ・ 飛行高度 25m
- ・ 焦点距離 26mm
- ・ 鉛直撮影

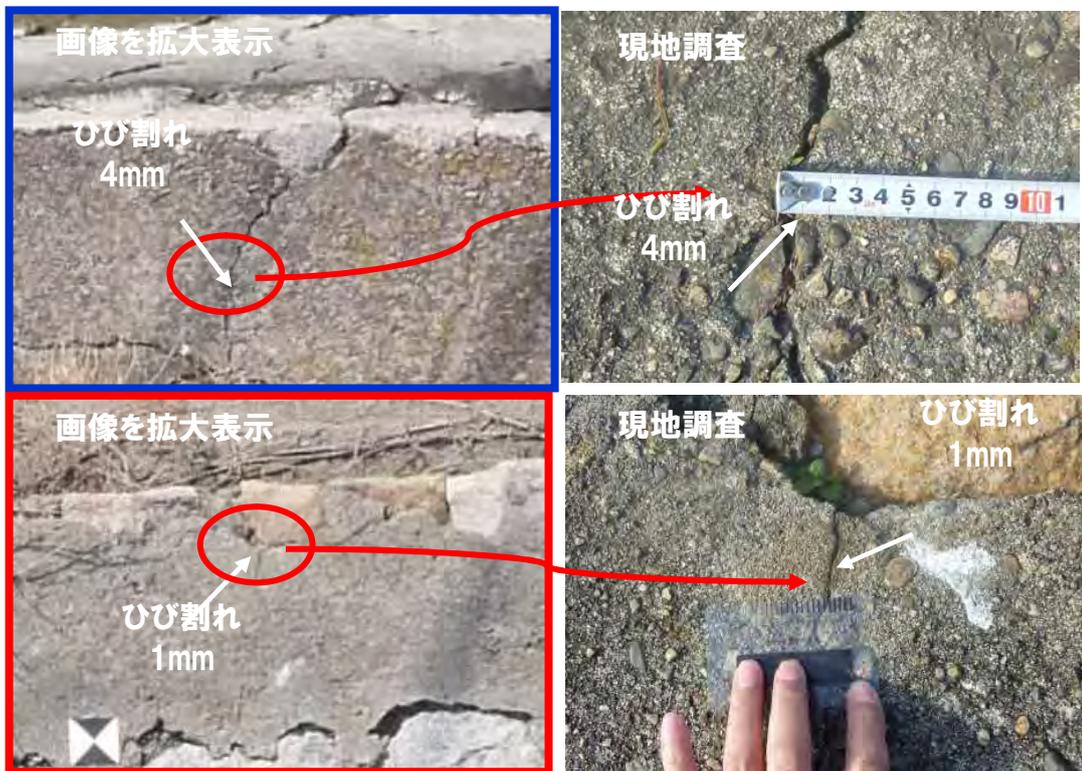


図 6.1 鉛直画像からの判読



【撮影条件】

- ・ 飛行高度 10m
- ・ 焦点距離 35mm
- ・ 斜め撮影

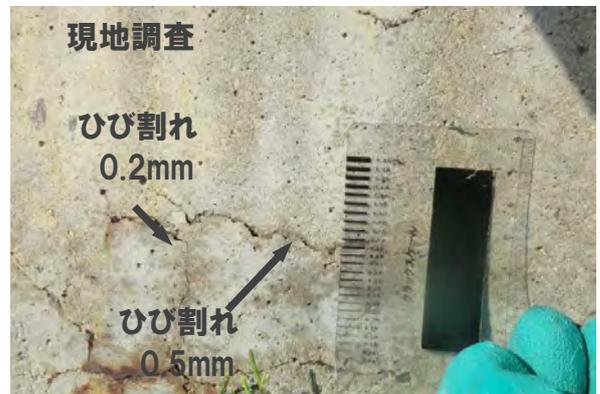


図 6.2 斜め画像からの判読

6.1.2 ひび割れの計測

コンクリートのひび割れの延長は、オルソ画像を作成して計測する。ただし、オルソ画像を作成する際に画像劣化が生じるため、ひび割れ幅や細かいひび割れの計測は、現時点では難しい。



図 6.3 側壁のオルソ画像

6.2 不同沈下

不同沈下は、UAV 画像から生成する三次元モデルから対象施設の高さを計測することができる。この計測により、水利施設における計画高の不足における有無を確認することができる。

6.2.1 不同沈下の計測方法

三次元モデルは、1つ1つの点群データについて高さの情報を保有しているので、水利施設および周辺の知りたい個所の高さを計測することができる。海岸堤防の堤防高を計測したい場合は、図 6.4 に示すように三次元モデル上で指定する堤防個所の高さを読み取る。読み取りには、以下に示す3手法で実施する。

- ① 最近値法：指定個所に最も近い点の高さを採用
- ② 平均値法：近傍の点の距離の逆数から逆距離加重にて決定
- ③ TIN 法：周辺の3点で面を形成し、指定位置を面上に落とし高さを決定

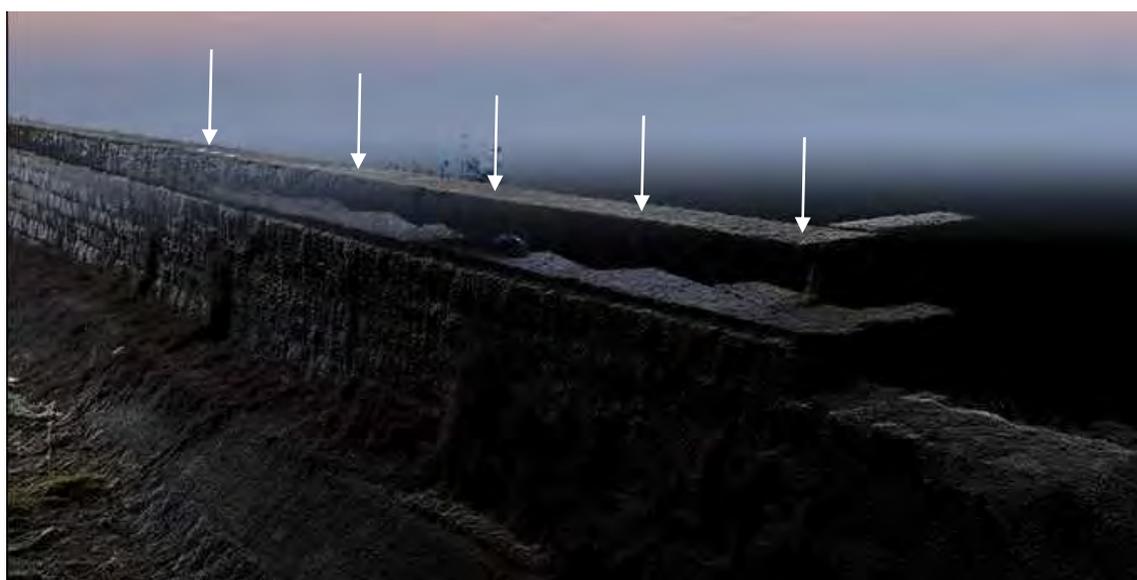


図 6.4 三次元モデルから高さの抽出するイメージ

6.2.2 三次元モデルの標高精度

UAVによる三次元モデルは、cmレベルの高さ精度を取得することができる。高さの精度は、撮影高度や障害となる地物の有無に左右されるが、概ねcmレベルでの精度となる。

図6.5には、撮影高度が10m・25m・50mにおける海岸堤防および開水路の高さを検証した事例を示す。撮影高度と精度は関連があるものの高度と精度の比率は同等ではないが、水準測量と比較して約5cm以内の高さ精度を得ることが可能である。

ただし、このような高さ精度を得るには、撮影画像間で十分な重複が確保でき、かつ地上基準点を設置することが必要である。

なお、正確な高さを求める調査では、地上基準点を設置する際に、対象範囲内に検証点を設置することを薦める。検証点は、観測した成果の信頼性を高めるための措置である。

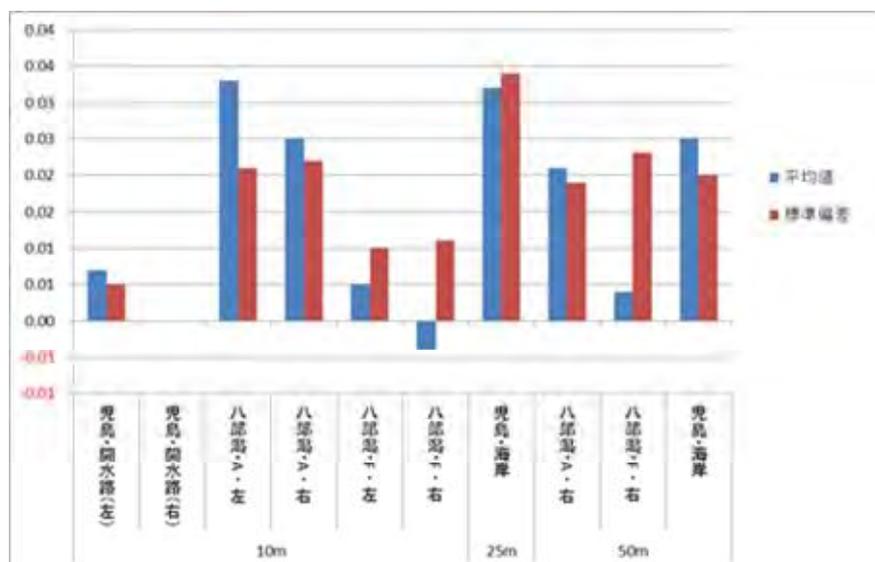
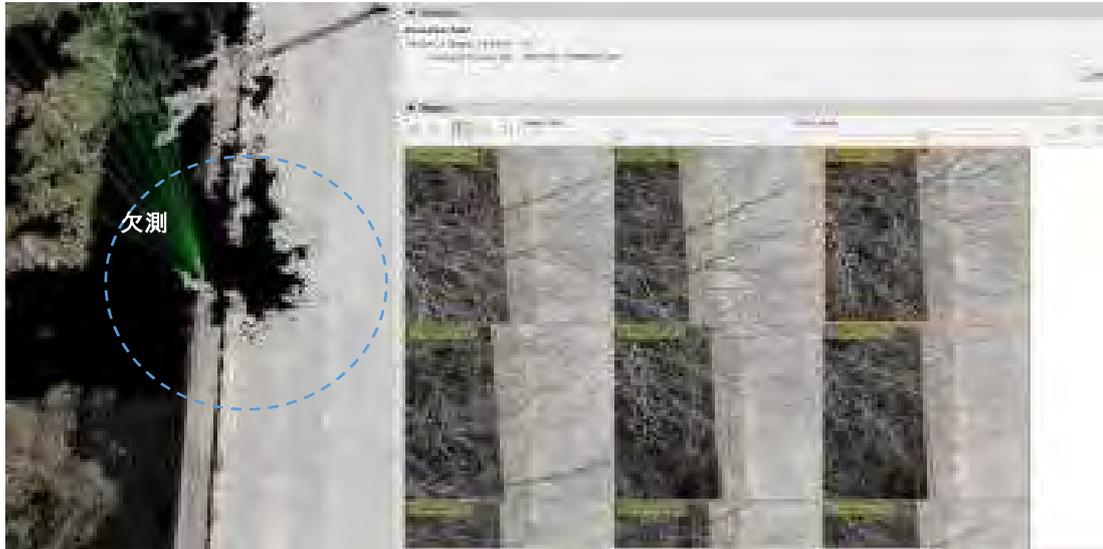


図 6.5 撮影高度と水利施設別の高さの精度事例 (平均値/標準偏差)

6.2.3 留意事項

UAVによる撮影画像において、水利施設の上空に灌木が覆っている場合(図6.6)には、三次元モデルにデータ欠測が発生することがある。このような場所では、UAV測量にてデータ作成ができないことを予め理解して調査することが必要である。

また、必要に応じて他の測量手法（地上測量）を併用することを検討しなければいけない。



上空から見た三次元データ欠損 データ欠損部の撮影画像（灌木が堤防を覆う）

図 6.6 データ欠測箇所事例

6.3 その他変状

その他変状は、UAV の写真画像および三次元モデルから確認する。主に、材料劣化や目地の劣化、周辺地盤の状況および雑草・堆積等の確認が可能である。

6.3.1 材料劣化

コンクリート構造物では、材料劣化が生じるとひび割れや浮き・剥落、鏽汁、エフロレッセンス（白化）、すりへり（摩耗）などの画像により認識可能な状態となることが多い。それら材料劣化の症状は、基本的にオルソ画像もしくは写真から判読することを基本とする。

6.3.2 目地の劣化

コンクリート製の開水路や海岸堤防・護岸などでは、数年すると土圧や水圧等の外力により、目地のコーナー部分に亀裂を伴う損傷を受けることが多い。また、開水路では、施工性の良さから近年はプレキャストの柵渠が整備されることが多く、側壁の背面土砂の流出に伴い目地部で部材のズレが生じているものも点在している。これら目地部の劣化は、写真画像によりその変状が把握できることから、写真による判読を基本とする。

6.3.3 周辺地盤

周辺地盤の沈下や隆起については、上空から撮影した写真で判読することが困難な場合が多いため、三次元モデルにより色つき標高表示や三次元点群データ等を斜めから確認することにより把握可能である。よって、地盤の起伏は、三次元モデルを活用して判読することを基本とする。

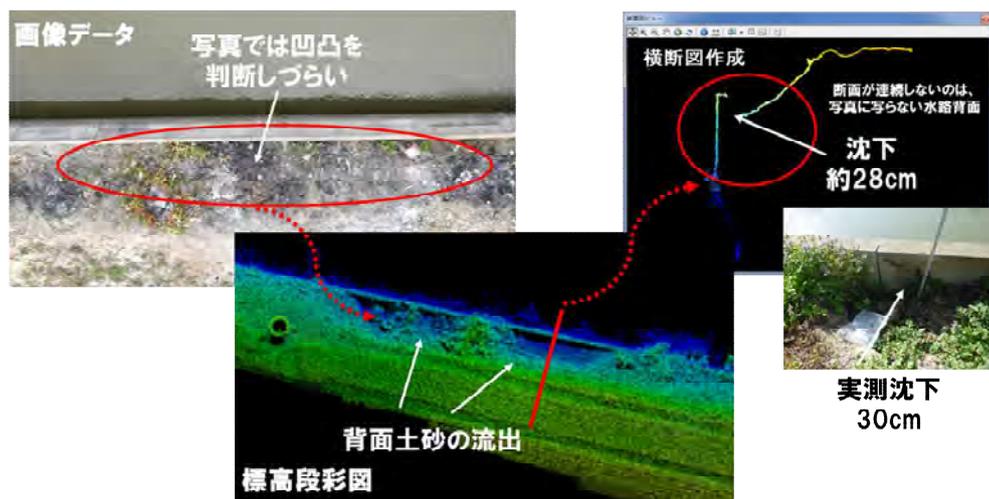


図 6.7 地盤沈下の確認例

6.3.4 雑草・堆積

雑草・堆積は、水中にある土砂堆積を除き、写真により確認できるため、写真による判読を基本とする。

7. 調査事例

7.1 作業計画書の記載例

作業計画書の記載内容について以下に示す。

1. 目的

本実験によって取得するデータは、官民連携共同研究開発において、損傷箇所の調査事例および水路と水田の測量精度の検証事例として利用することを目的とする。

2. 行政担当

行政機関名 部門 担当者

3. 現地調査主体

会社名

管理技術者：部門 担当者

4. 現地撮影

【調査日程・体制】

○測量日程：○月○日（曜日） 12:00～17:00（標定点の設置、計測）

○撮影日程：○月○日（曜日） 13:00～17:00

○撮影日程：○月○日（曜日） 9:00～12:00

※雨天の場合、翌日に実施もしくは中止・順延する

○調査体制：調査員4名程度

【使用機器】

現地調査で使用するドローン及び搭載カメラの仕様は、以下に示すとおりとする。

イメージ	ZionQC730	
	モータ軸間	730mm
	プロペラ径	18 インチ
	飛行時間	15 分～40 分
	航続距離	10km～25km
	測量面積	1km ²
イメージ	SONY α 6000	
	撮影素子	APS-C サイズ
	総画素数	約 2470 万画素
	画像ファイル形式	JPEG、RAW(ソニー ARW 2.3 フォーマット)
	外形寸法	約 120.0(幅) x 66.9(高さ) x 45.1mm
	質量	344g
	利用レンズ	16mm、35mm

図 1. 現地調査で使用する機器仕様

【調査方法】

ドローンの飛行は、離着陸地点（操縦地点）からドローンが視認できる範囲内で予めプログラミングしたコース上を自動航行し、離陸から着陸までの飛行時間は、10分程度を標準とする（電池最大容量 20分×安全率 0.6）。

また、飛行高度は、約 10m～50m以内とする。ドローンの飛行は、写真に示すとおり 3 名体制で行う。



写真 1. ドローン調査概要

【調査範囲】

調査範囲は、延長 100m～200m 程度で周辺民家への影響が少ない区間とする。

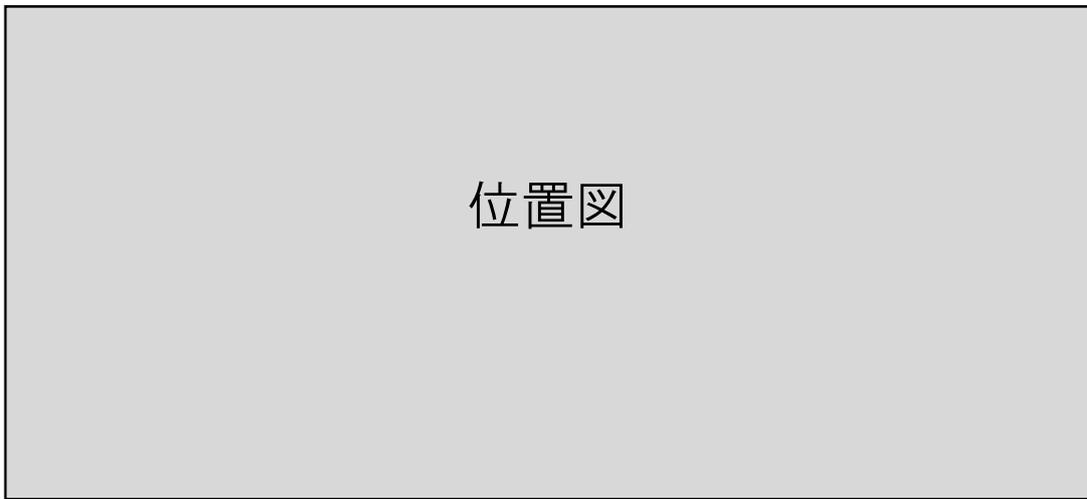


図 2. 現地調査範囲・位置図

【現地調査】

○調査範囲内でドローンを飛行させて、鉛直および斜め撮影を行う。

※撮影高度 10m、25m

※必要に応じて、雑草の除去

○撮影範囲内に標定点を VRS 測量により 5 点以上設置する。（後日実施）

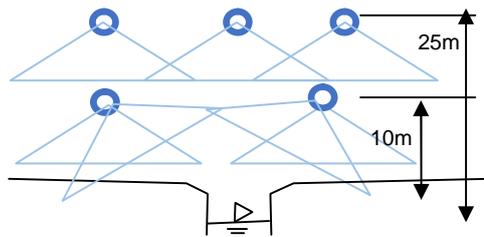


図 3. 飛行断面図

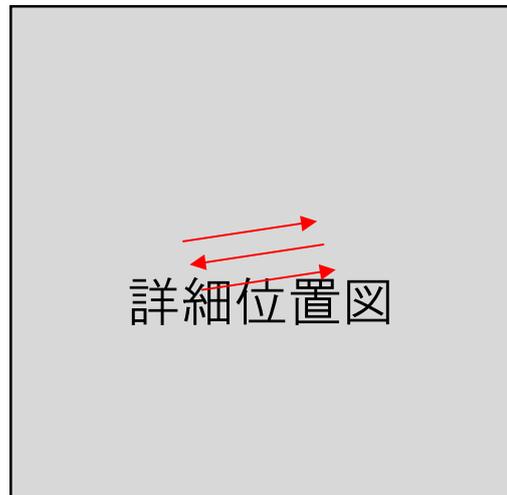


図 4. 飛行ルート

5. 安全管理

現地作業員は常に安全に心がけ、災害、緊急事態発生時また、その恐れがある場合は人命救助を最優先とし速やかに応急措置をとることとする。また、緊急時連絡体制表に従って関係機関に連絡を行い、その指示に従い速やかに措置をとることとする。

【調査の安全について】

- 作業員に対し、前日の十分な睡眠や当日の天候への対処を指導し、常に健康管理に留意させる。また、気分が優れない時は速やかに申し出るよう指導する。
- 余裕のあるスケジュールで行動し調査を実施する。
- 作業員の服装及び履物は運動性に優れたものとする。
- 作業着手前に作業全般についての安全ミーティングを開催し安全管理の確認を行う。
- 現場作業開始時は、KY 活動を行い安全確保に努める。
- 作業現場において災害または被害が発生した場合は、速やかに適切な処置を施すとともにその経緯を直ちに調査職員に報告する。
- 火気の使用を厳に慎み、煙草の吸い殻の始末等にも注意し、防火に努める。
- 作業中は、道路利用者（車両、歩行者）の通行の妨げとならないよう注意するとともに、事故防止に充分配慮して作業を実施するよう徹底する。
- 作業中は一般交通や歩行者に対し、細心の注意を払い、良識ある行動に努める。
- 現地調査中は、身分証を携帯する。



KY 活動実施例

【ドローンの安全について】

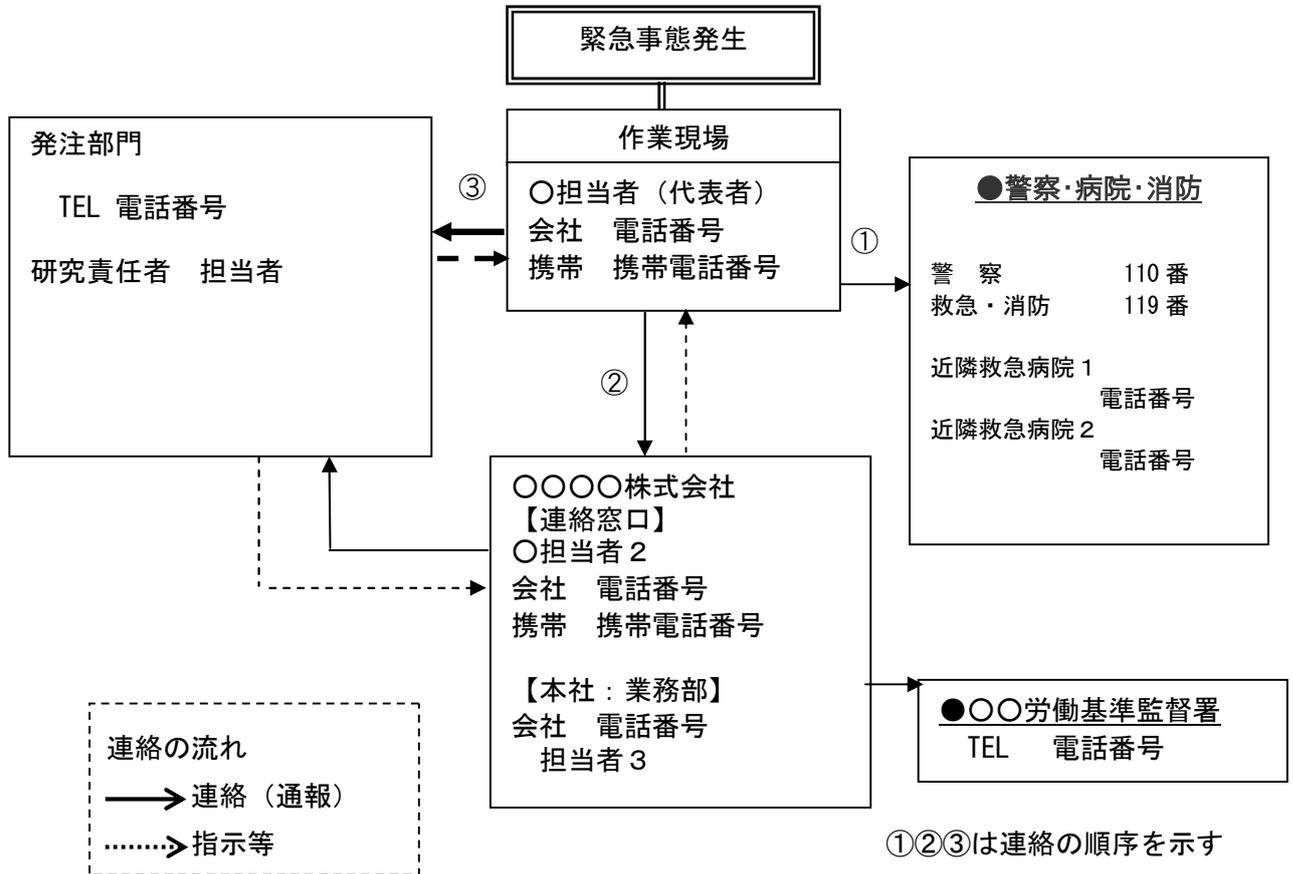
ドローンを利用した実験飛行にあたっては、以下の事項に留意して実施する。

- ドローンの操作を行う場合は、安全確認・操作連絡確認の徹底を図り事故防止に努める。
- 気象（降雨、風速）については、機器性能等を踏まえて安全を確認した後、実施する。
原則として、降雨時、平均風速10m/s以上では飛行しない。
- 飛行範囲内の障害物（高圧線等）を事前に確認し、障害物が存在する場合は飛行しない。
- 離発着場所は十分な広さのある場所(10m 四方以上)で行い、民地の利用は避ける。
また、公有地については、事前に利用の承諾を得て利用する。
- 飛行範囲及び周辺の土地利用に留意し、物的損害、人的な危険が想定される場合は、飛行しない（市街地上空、交通量の多い道路、鉄道の上空等）。
- 飛行は、非常時の対応を可能とするため、操縦基地から視認できる範囲で行う。
- 航空法、航空法の一部を改正する法律、電波法等を遵守して飛行する。
- 飛行時は、飛行区域内に見張り員を配置し、常に周辺状況や機体の状態を監視し、異常が発見された場合は、速やかに中止する。

6. 連絡体制

現地作業時に事故・災害が発生した場合には、被害を最小限にとどめる様に適切な処置を講ずるとともに、下記の緊急時の連絡網図に従って、速やかに、必要関係各所に連絡する。

【ドローンによる撮影調査】



初動対応

- 1) 作業従事者の待避
立入禁止（二次災害の防止）
- 2) 被災者の救出、応急処置
- 3) 関係機関への通報
（消防署、警察署）
- 4) 病院への連絡
- 5) 現状の保存と目撃者の確認
- 6) 発注者への連絡
- 7) 会社への連絡

事故発生時の報告要領

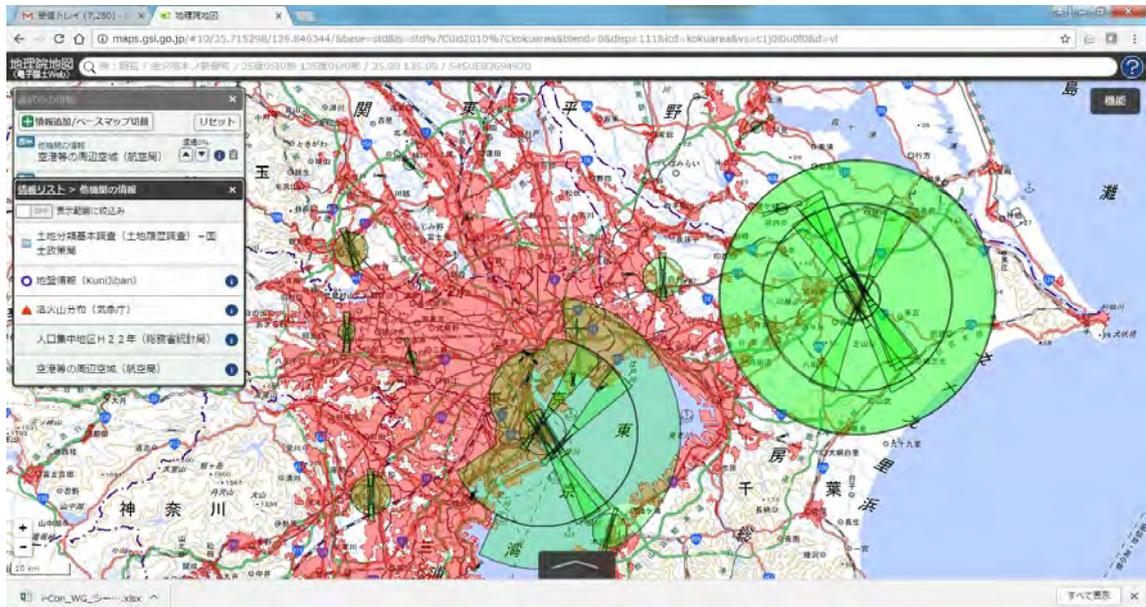
（落ち着いて、要点を、客観的に、手短かに）

順序	項目	報告（連絡）内容
1	どこの誰（報告者）	・所属 ・担当（管理技術者、現場作業担当者など） ・氏名 ・連絡先（携帯など）
2	どんな業務	発注者や業務名
3	いつ（発生日時）	〇〇日、〇〇時〇〇分頃
4	どこで（場所）	住所または調査地点などの具体的な場所
5	何が	事故の種類
6	どれだけ	規模（発生規模、災害規模、被害規模など）
7	どうなった	・事故の内容結果（人身事故か物損事故か、被害者は誰か） ・今の状況
8	どうした（処置）	・警察・消防・発注者への通報状況 ・二次被害防止策、被害の拡大防止策 ・第一発見者の所在 ・現場作業員の対応状況
9	これからどうする（指示を受ける）	・今後の行動予定（現場と会社の動き） ・今後の報告予定 ・客先、会社からの指示を受ける→具体的な行動の決定

以上

【参考資料】

- ・当該地区は、航空飛行制限、DID等の制約はない。



※地理院地図により、確認が可能

<http://maps.gsi.go.jp/#10/35.715298/139.846344/&base=std&ls=std%7Cdid2010%7Ckokuarea&blend=0&disp=111&lcd=kokuarea&vs=c1j0l0u0f0&d=vl>

7.2 UAV 撮影による施設点検事例

7.2.1 海岸堤防

(1) 基本的な考え方

海岸保全施設維持管理マニュアルは、巡視（パトロール）、定期点検（一次点検、二次点検）について点検手法を定義しており、これに従い具体的な点検が実施されている。二次点検では、目視にて実施した一次点検の結果、変状が確認された箇所において、その規模を把握する事が必要となっており、その損傷状況に応じて簡易な計測（損傷の規模を計測）と詳細な計測（潜水調査や試験を伴う）を実施する。

UAV で撮影した画像の点検は、写真による変状箇所の検出に加え、三次元点群データを整備することにより、その規模の検出を行う。

なお、適用範囲は、実験事例等から巡視（パトロール）および定期点検（一次点検、二次点検（簡易な計測））の一部とする。

(2) 点検項目と適用範囲

UAV で撮影した画像による点検項目及び UAV の適用範囲は、表 7.1 に示す項目とする。

なお、排水工については、水利施設（開水路）の点検で記載し、消波工については、本マニュアルの対象外とする。

表7.1 点検項目及び UAV の適用範囲

点検場所	点検項目	巡視 点検 ^{注1)}	点検内容と対応可(○)否(×)		利用成果	
			1次点検	2次点検	写真	3D ^{注2)}
天端	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 ○(幅 1mm 以上を対象)	ひび割れの長さ、ひび割れ幅 △(幅は不可)	○	×
	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 △(深さは不可)	○	×
	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 ○	○	×
	目地の開き、隣接スパンとの 相対移動量	○	隣接スパンとの高低差、ずれ、目地の開き の有無 ○(段差 6mm 以上を対象)	隣接スパンとの高低差、ずれ、 目地の開き幅 ○	○	○
	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 ○(幅 1mm 以上を対象)	ひび割れの長さ、ひび割れ幅 △(幅は不可)	○	×
	目地部、打継ぎ部の状況	—	目地材の有無、隙間・ずれの有無 ○(段差 6mm 以上を対象)	目地材の有無、隙間・ずれ幅 ○	○	○
	剥離・損傷	—	剥離・損傷の有無 ○	剥離・損傷の深さと範囲 △(深さは不可)	○	×
	沈下・陥没	○	沈下・陥没の有無 ○	沈下・陥没の深さと範囲 ○	○	○
	漏水	—	漏水痕跡の有無 ○	—	○	×
	植生の異常(繁茂等)	—	植生の以上(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 ○	—	○	○
砂浜	侵食・堆積	—	砂浜の侵食、浜崖形成の有無、浜幅減少 ○	砂浜の侵食、浜崖形成の有無、浜幅 ○	○	○

注 1) 巡視点検: 点検レベルは変状の有無の検出まで(○: UAV 撮影で対応可能、-: 維持管理マニュアルでは点検項目に該当しない)

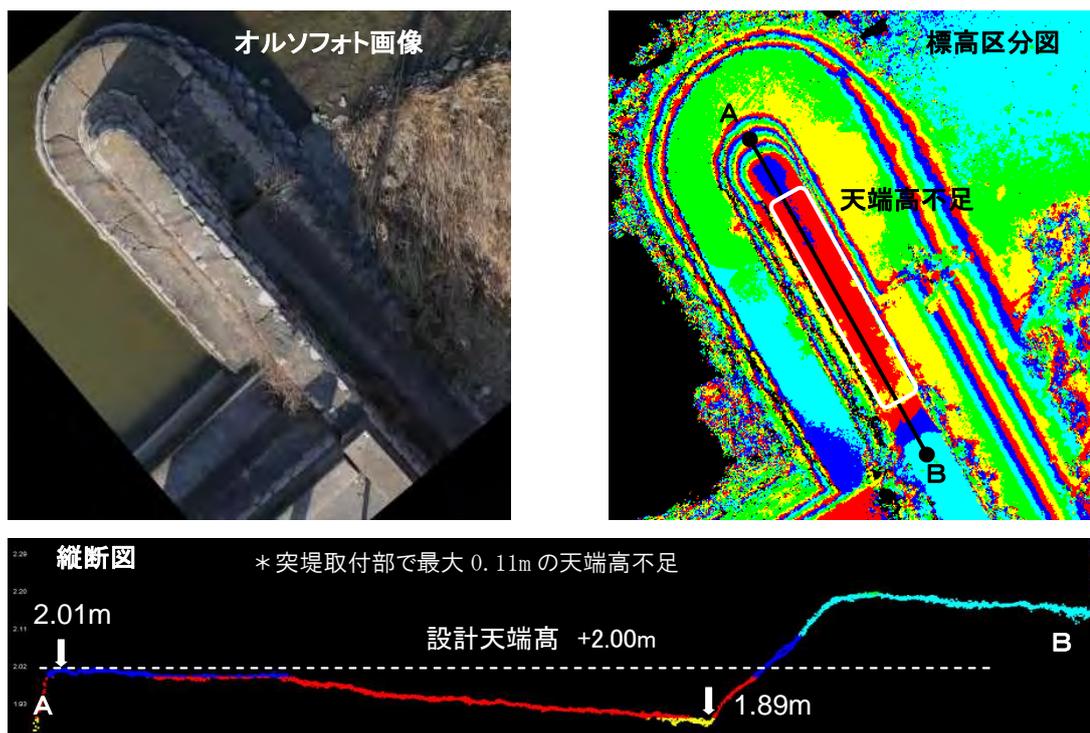
注 2) 3D: 三次元点群データ及びその加工成果

(3) 点検方法と検出事例

① 天端の高さ

- 天端の高さは、三次元点群データより作成した標高区分図、縦横断図から計測する。
- 基準高さ(設計高)との相対高、過年度計測高さとの差分は、縦横断図から算出する。

■ 天端の高さ計測例 (標高区分図、縦断図を利用した場合)



(基準高さの充足点分布、縦断図を利用した場合)

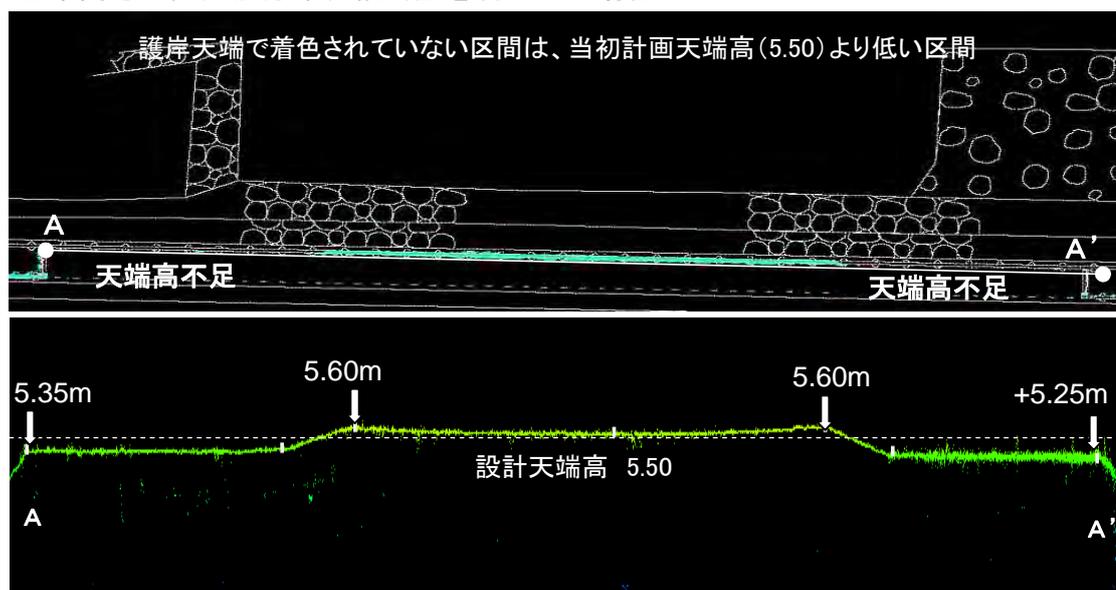


図7.1 天端の高さ計測例

② ひび割れ

○ひび割れは、垂直撮影および斜め撮影の単写真、オルソフォト画像より変状箇所・範囲を検出する。

注) 高度 3m で 0.2mm 以上まで検出可能であるが、飛行の安全面から高度 10m で 1mm 以上までの検出を標準とする。

○ひび割れの長さは、オルソフォト画像より直線的に計測する。

■ ひび割れの検出例



図7.2 ひび割れの検出例

■ ひび割れ長さの計測例



図7.3 ひび割れ長さの計測例

③ 剥離・剥落・欠損

○剥離・剥落・欠損は、単写真、オルソフォト画像、標高区分図より剥離・剥落・欠損箇所・範囲を検出する。
 ○欠損の深さは、検出箇所について三次元点群データから計測する。

■ 剥離・剥落（被覆石）の検出例



図7.4 剥離・剥落の検出例

■ 欠損の検出、計測例

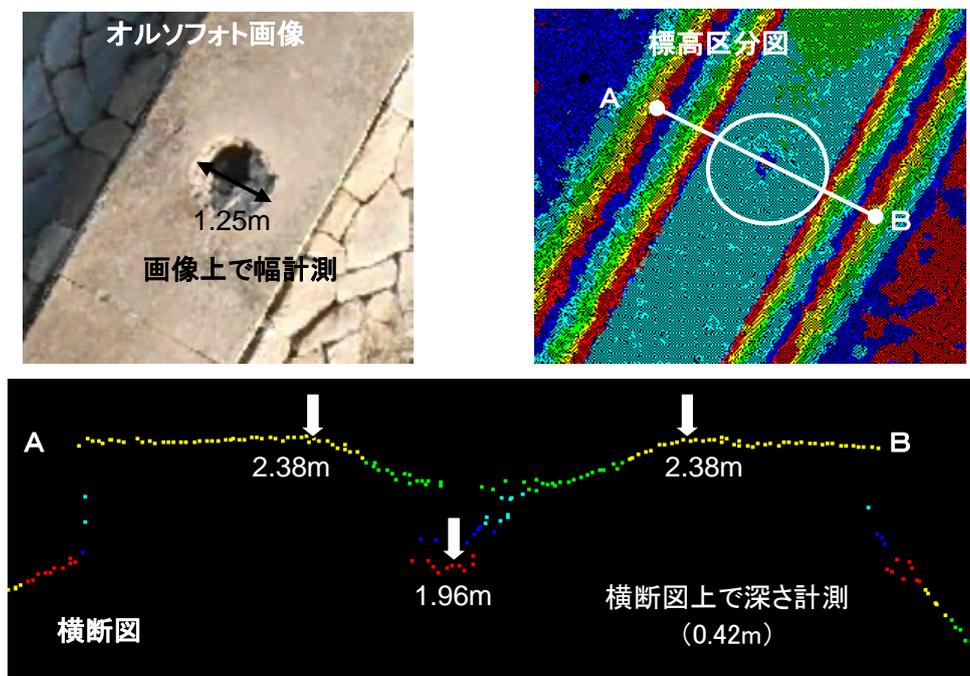


図7.5 欠損の検出、計測例

④ 鉄筋の腐食

○鉄筋の腐食・露出は、垂直撮影および斜め撮影の単写真、オルソフォト画像より錆汁箇所・範囲を検出し、露出長さを計測する。

■ 鉄筋の露出検出例

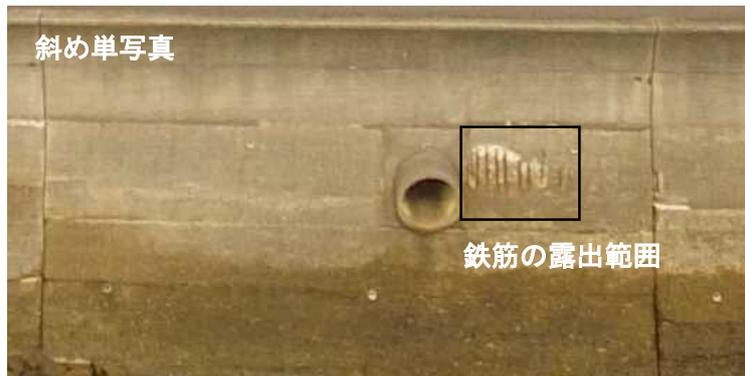


図7.6 鉄筋の露出検出例

⑤ 目地の開き、隣接スパンとの相対移動

○目地の開き、隣接スパンとの開き、平面的な相対移動量は、鉛直撮影および斜め撮影の単写真、オルソフォト画像より変状箇所・範囲を検出する。
○鉛直的な相対移動量は、三次元点群データから計測する。

■ 隣接スパンとの開き、隣接スパンとの相対移動量の計測例

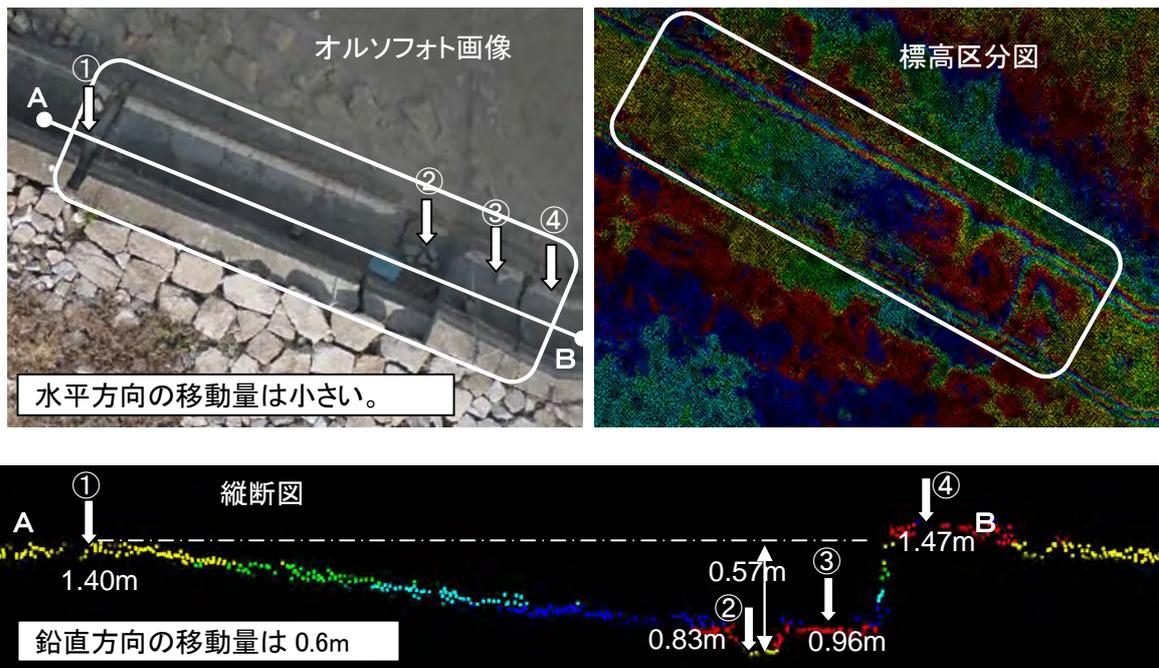


図7.7 隣接スパンとの相対移動量計測例

■ 目地の開き、相対移動量の検出例

○オルソフォト画像より、目地開き幅:10cm、ズレ幅 18cm

○横断面図より、目地開き箇所の段差はほとんどないことが確認できる。

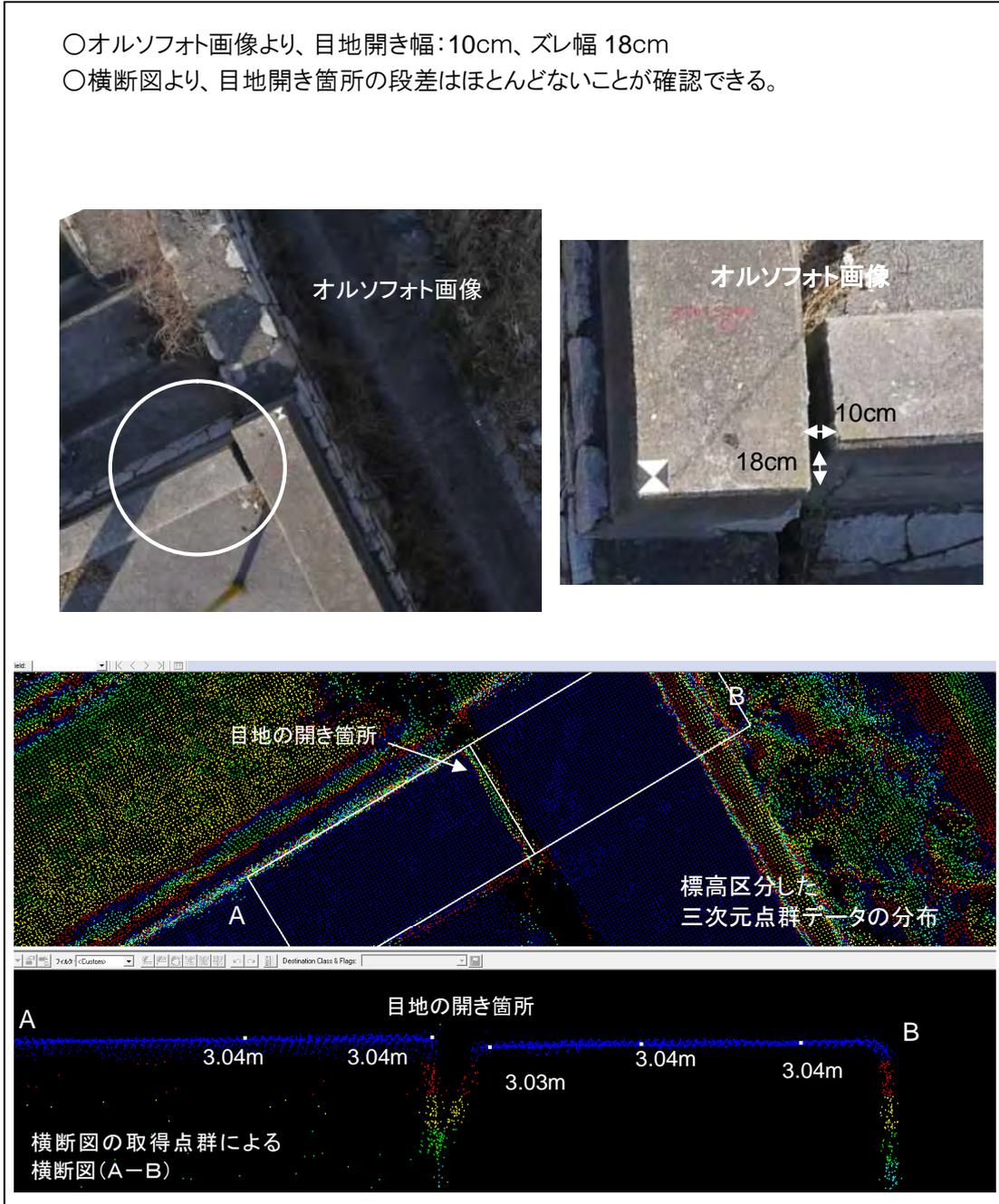


図7.8 目地の開き、相対的移動量の検出例

⑥ 沈下・陥没

- 沈下・陥没箇所、範囲は、三次元点群データより作成した標高区分図、等高線から検出する。
- 沈下量、陥没量は、基準高さ(設計高)との相対高、過年度計測高さとの差分を縦横断面図から算出する。

■ 沈下・陥没の検出例

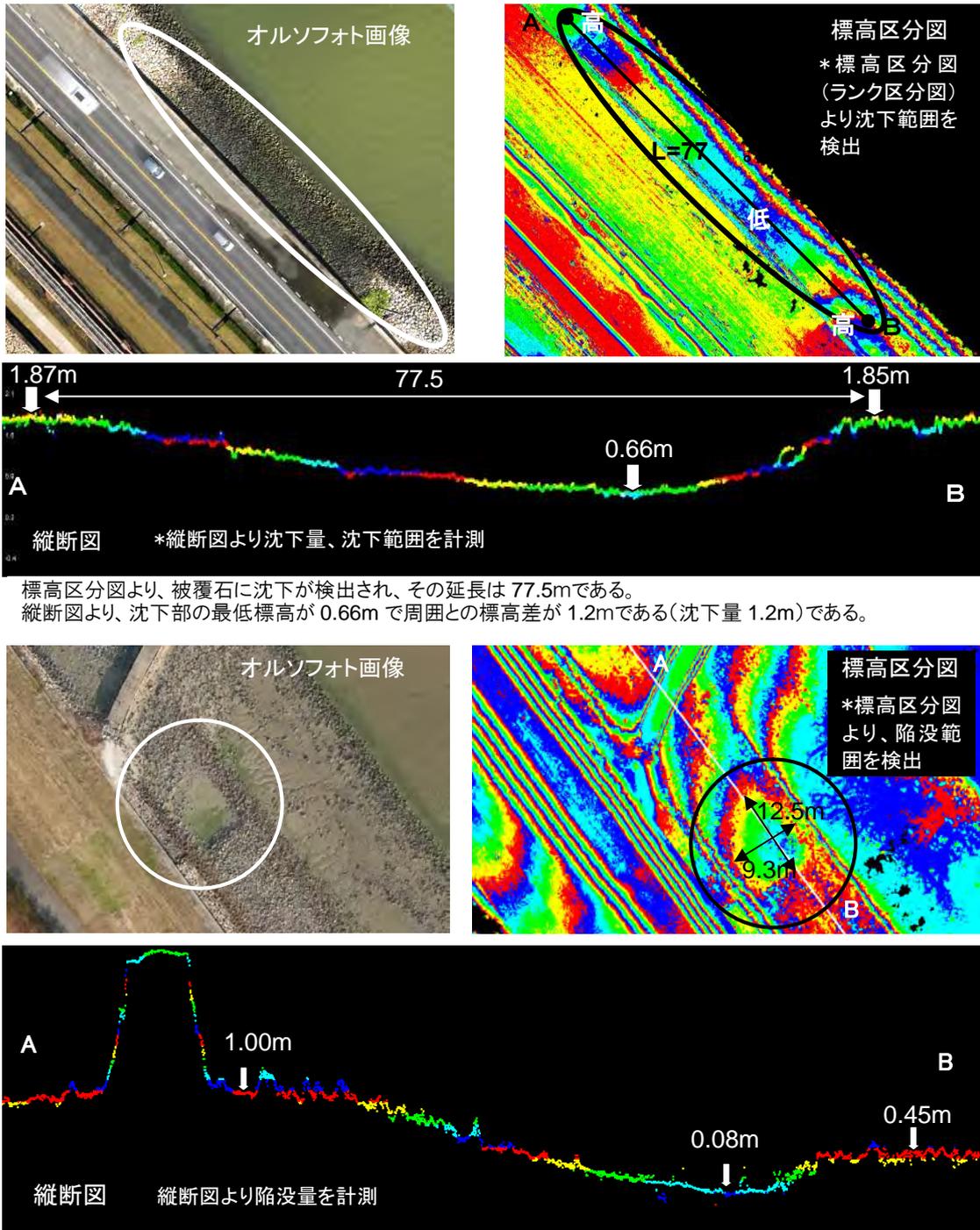


図7.9 沈下・陥没の検出例

⑦ 漏水

○漏水の痕跡は、垂直撮影および斜め撮影の単写真、オルソフォト画像より箇所・範囲を検出する。

⑧ 植生の異常(繁茂等)

○植生の繁茂範囲は、単写真、オルソフォト画像より検出する。

○樹木等の高さは、標高断面分布図(断面図)により計測する。

■ 植生繁茂状況の検出例

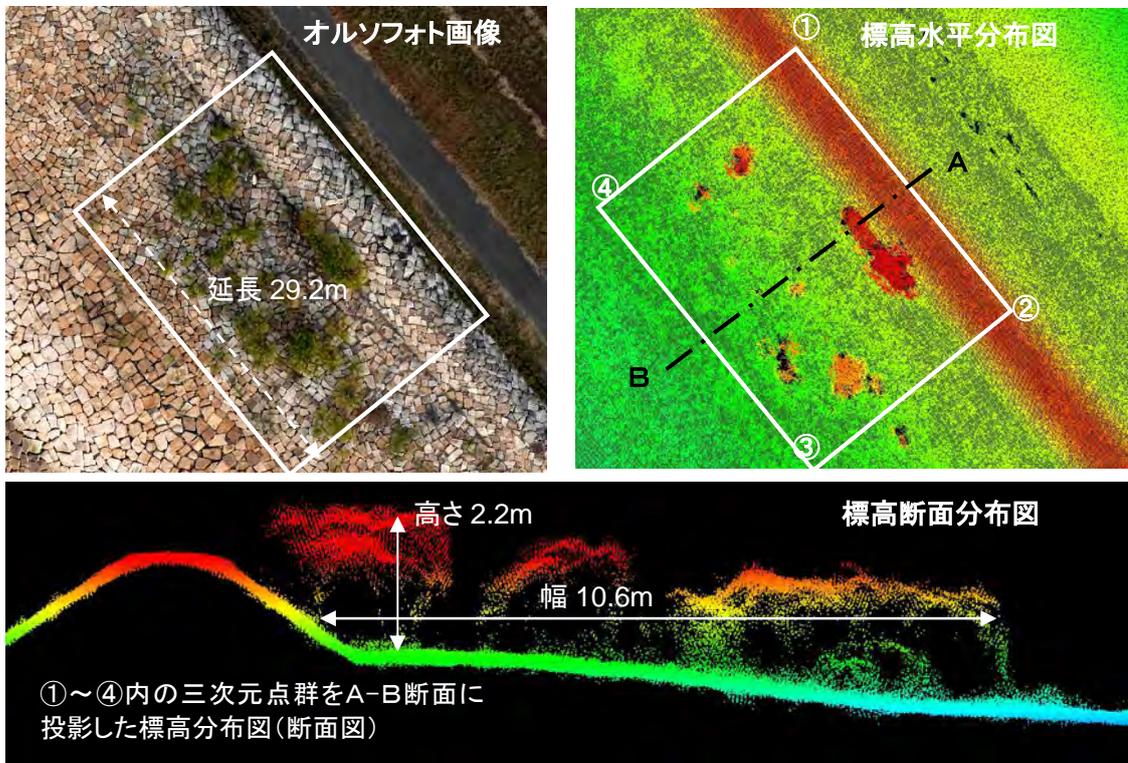


図7.10 植生の繁茂状況の検出例

⑨ 侵食・堆積（砂浜）

- 侵食・堆積箇所、範囲は、三次元点群データより作成した標高区分図、等高線から検出する。
- 侵食・堆積量は、横断面図から平均断面法により算定する。

■ 堆積区域の検出例

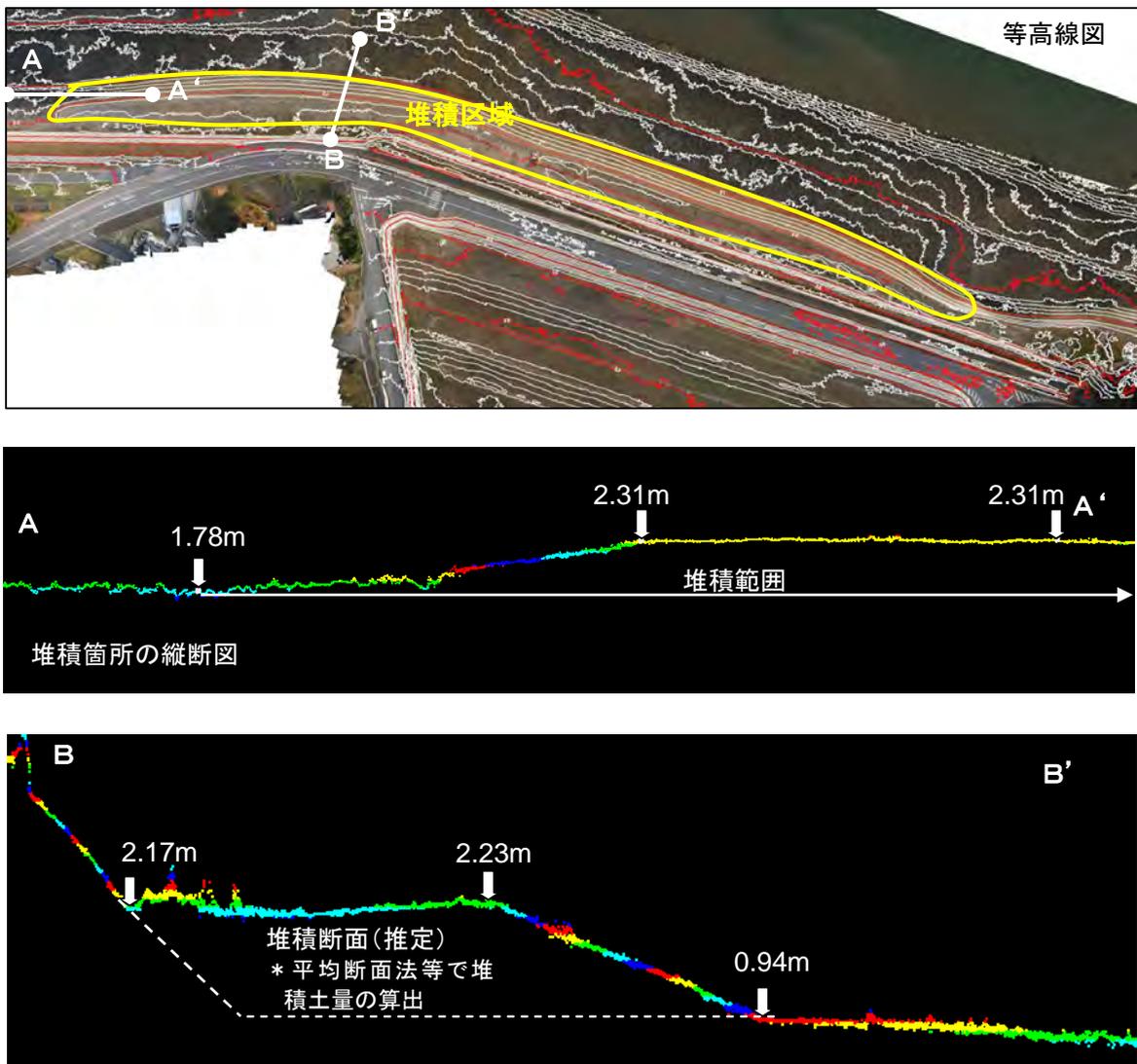


図7.11 堆積区域の検出例

7.2.2 開水路の変状検出

(1) 基本的な考え方

農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」では、1次点検（巡回目視）と2次点検（近接目視と計測）について点検手法を定義しており、これに従い具体的な点検が実施されている。

UAVで撮影した画像による点検は、写真による変状箇所の検出に加え、三次元点群データを整備することにより、その規模の検出を行う。

なお、適用範囲は、実験事例等から一次点検（巡回目視）と二次点検（近接目視と計測）の一部とする。

(2) 点検項目と適用範囲

UAVで撮影した画像による点検項目は、表7.2に示す項目とする。

表7.2 点検項目（構造に関する）及び UAV の適用範囲

	点検区分		現地 踏査 ^{注1)}	点検内容と対応可(○)否(×)	利用成果		
				点検項目	写真	3D ^{注2)}	
構 造	力学安全性	ひび割れ	最大幅	—	ひび割れの最大幅の計測	×	×
			延長	—	ひび割れの延長、範囲の計測	○	×
			有無の検出、タイプの判別	○	ひび割れのタイプ判別(幅 1mm 以上で判別)	○	×
		変形・歪み	変形・歪み量	○	変状の有無、歪量の計測(水平、鉛直)	○	○
		圧縮強度	圧縮強度(反発硬度)	—	簡易計測	×	×
	耐久性	材料劣化	浮き	○	変状の有無、変状範囲の計測	○	×
			剥離・剥落・スケーリング	○	変状の有無、変状範囲の計測	○	×
			ポップアウト(剥がれ)	○	変状の有無、変状範囲の計測	○	×
			(析出物)ゲルの滲出	○	変状の有無、変状範囲	○	×
			錆汁、変色	○	変状の有無、変状範囲の計測	○	×
			摩耗・風化	○	変状の有無、変状範囲の計測	○	×
			漏水(痕跡)	○	変状の有無、変状範囲の計測	○	×
			鉄筋露出	○	変状の有無、変状範囲の計測	○	×
		中性化	中性化深さ/中性化残り	—	写真、画像結果では点検不可	×	×
			鉄筋かぶり	—	写真、画像結果では点検不可	×	×
	安定性	地盤変形	背面土の空洞化	—	写真、画像結果では点検不可	×	×
			不同沈下	—	目視による有無、簡易計測(5cm)	○	○
	上記性能を含む 構造性能	目地の劣化	目地の開き(幅 1mm 以上)	○	変状の有無、箇所、開き幅の計測	○	○
			段差	○	変状の有無、箇所、段差の計測(6mm 以上を対象)	○	○
			止水板の破断	○	変状の有無	○	×
漏水痕跡			○	変状の有無、箇所	○	×	
周縁コンクリートの欠損等			○	変状の有無、箇所	○	×	

注 1)現地踏査:点検レベルは変状有無の検出まで(○:UAV 撮影で対応可能、-:維持管理マニュアルでは点検項目に該当しない)

注 2)3D:三次元点群データ及びその加工成果

(3) 点検方法と点検事例

① ひび割れ

○ひび割れは、垂直撮影および斜め撮影の単写真、オルソフォト画像より変状箇所・範囲を検出する。

注)高度 3m で 0.2mm 以上まで検出可能であるが、飛行の安全面から高度 10m で 1mm 以上までの検出を標準とする。

○ひび割れの長さ、範囲は、オルソフォト画像より直線的に計測する。

■ ひび割れの検出例

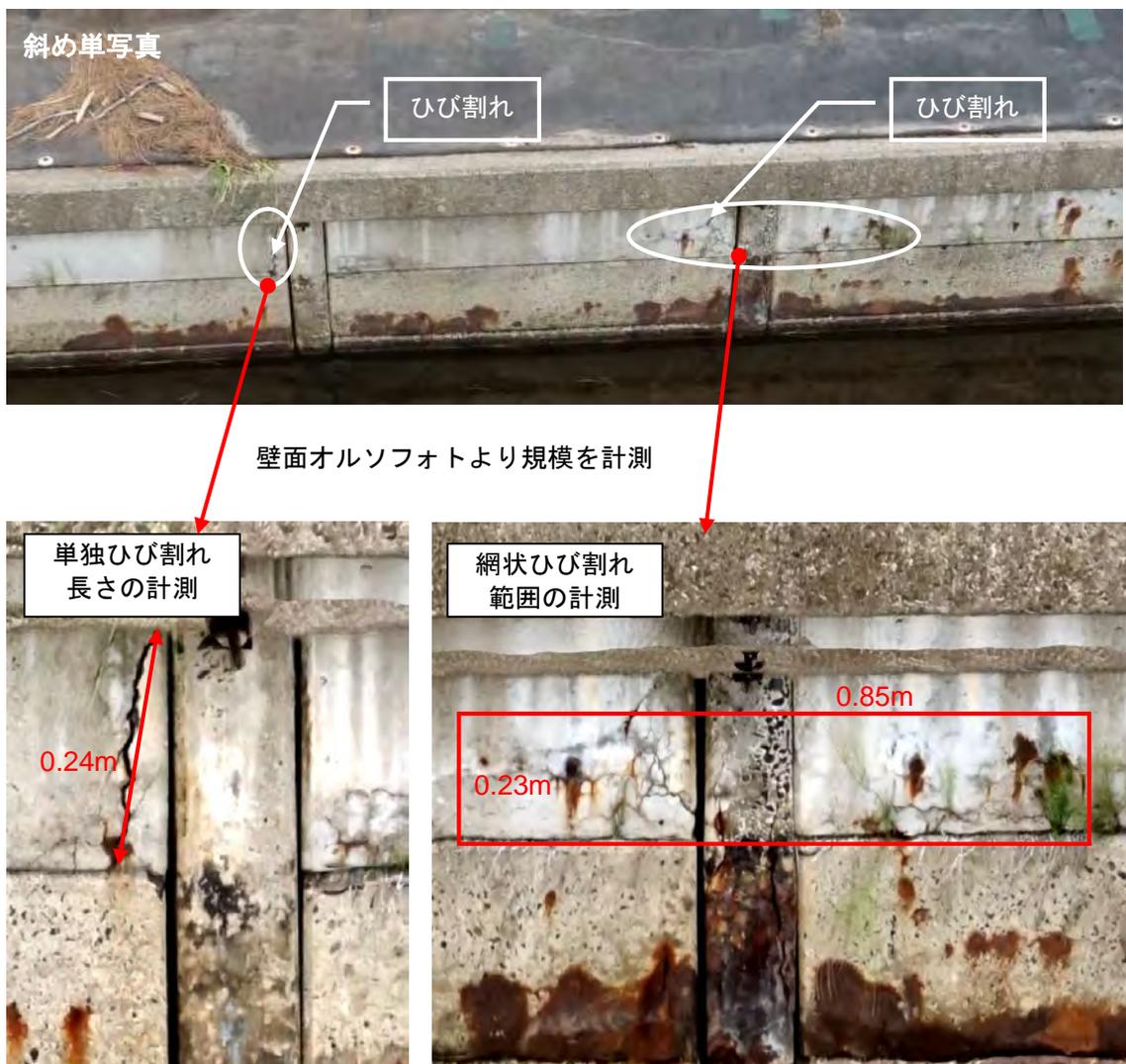


図7.12 ひび割れの検出例

② 変形・歪み、転倒・滑動、浮上、欠損・損傷

- 変形・歪み、転倒・滑動、浮上、欠損・損傷は、鉛直撮影および斜め撮影の単写真、オルソフォト画像より変状箇所・範囲を検出する。
- 相対変化量(水平、垂直)は、オルソフォト画像、三次元点群データから計測する。

■ 歪み(目地開き)の検出例

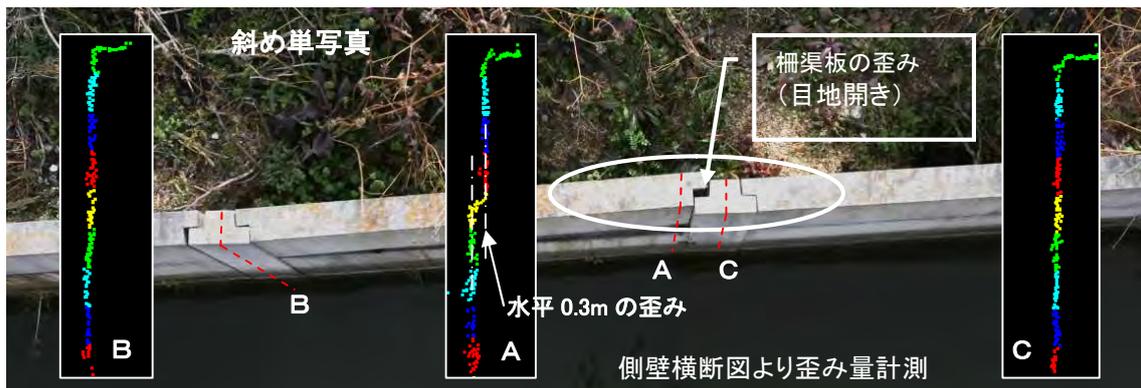


図7.13 側壁の歪み(目地開き)の検出例

■ 目地部の損傷(破断)の検出例



図7.14 目地部の損傷(破断)の検出例

③ 材料劣化

- 材料劣化は、開水路表面の状態について、垂直撮影および斜め撮影の単写真、オルソフォト画像により変状箇所を検出する。
- 変状範囲は、オルソフォト画像により計測する。

■ コンクリート表面の剥落、欠損の検出例



図7.17 コンクリート表面の剥落、欠損の検出例

■ 錆汁・変色、欠損、鉄筋の露出の検出例

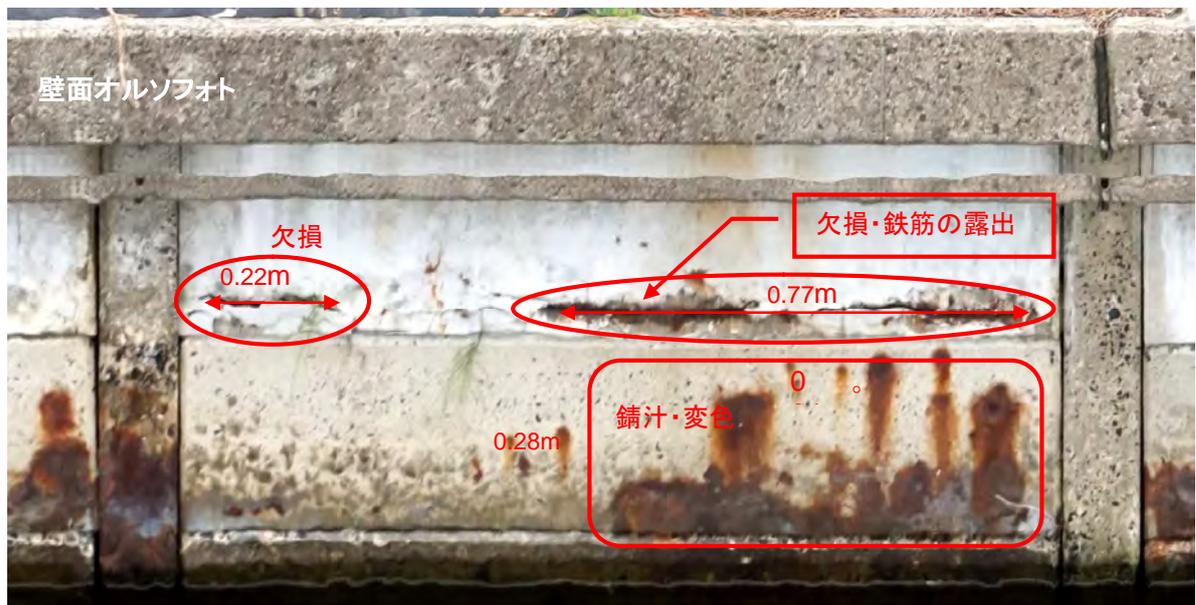


図7.18 欠損・鉄筋の露出の検出例

■ 鋼材の腐食の検出例



図7.19 鋼材の腐食の検出例

④ 地盤変形（背面土の空洞化）

○周辺地盤の変状（陥没、ひび割れなど）は、撮影した垂直、斜め画像及び標高分布図により検出する。

○周辺地盤の変状範囲、規模は、三次元点群データにより計測する。

■ 周辺地盤の変状検出例

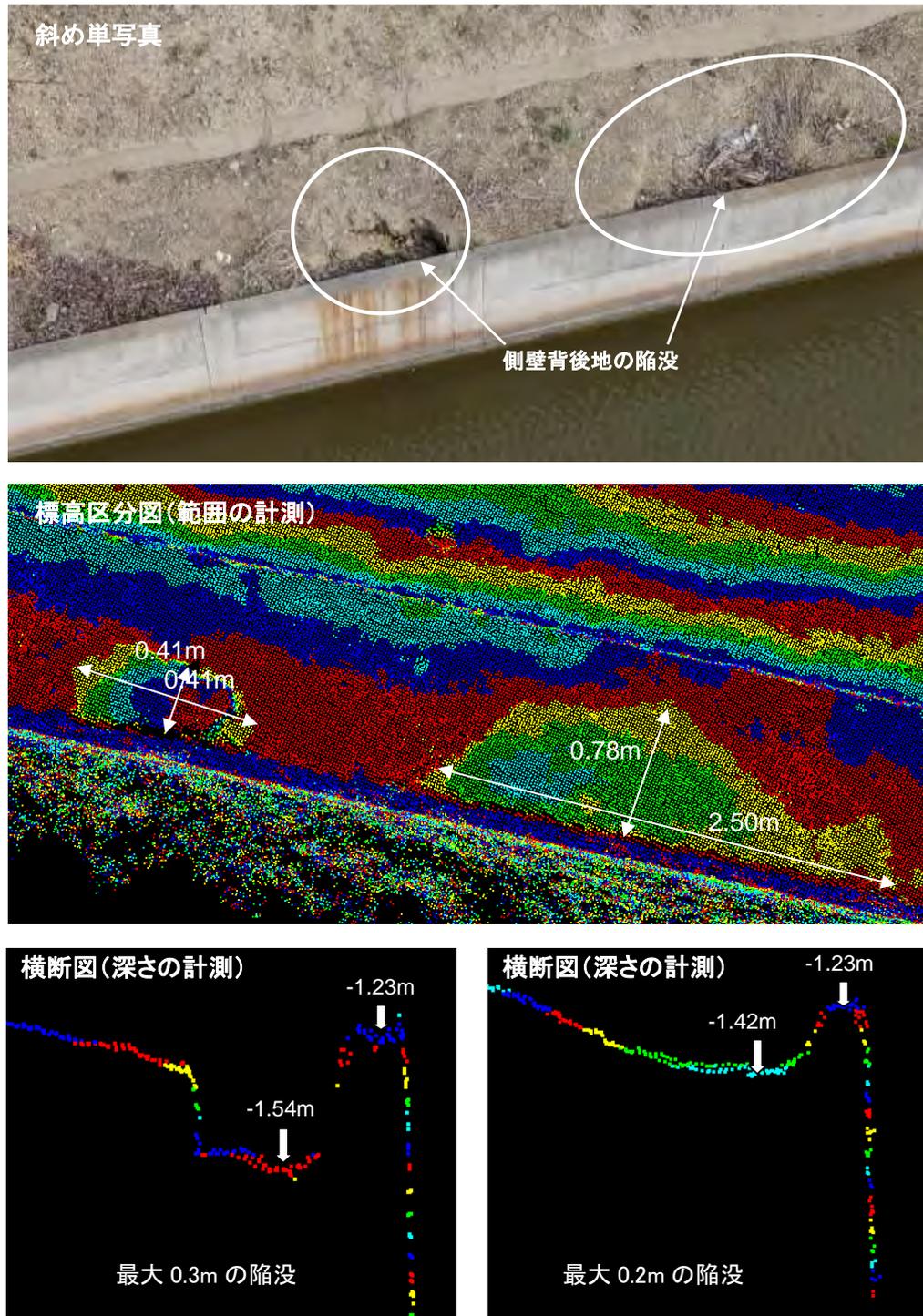


図7.20 周辺地盤の陥没の検出例

⑤ 不同沈下

- 不同沈下は、開水路側壁の天端高を計測することで検出する。
- 天端の高さは、三次元点群データより作成した標高区分図、縦横断図から検出する。
- 基準高さ(設計高)との相対高、標高は、縦横断図から計測する。
- 沈下量は、基準高さ(設計高)又は過年度計測高さとの差分を縦横断図から算出する。

■ 不同沈下の検出例

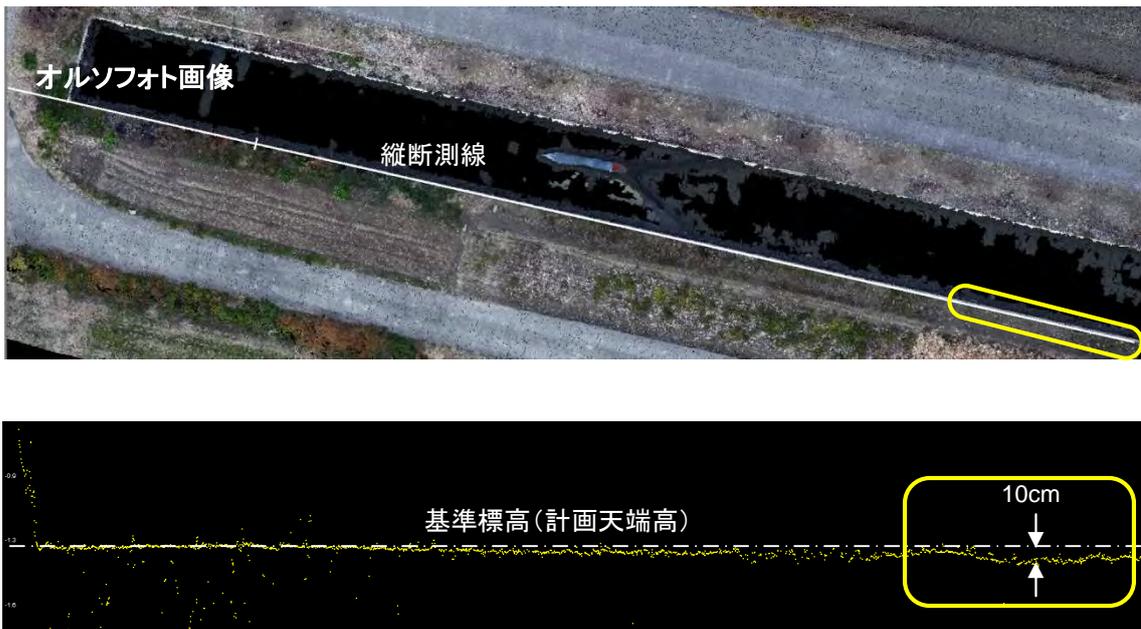
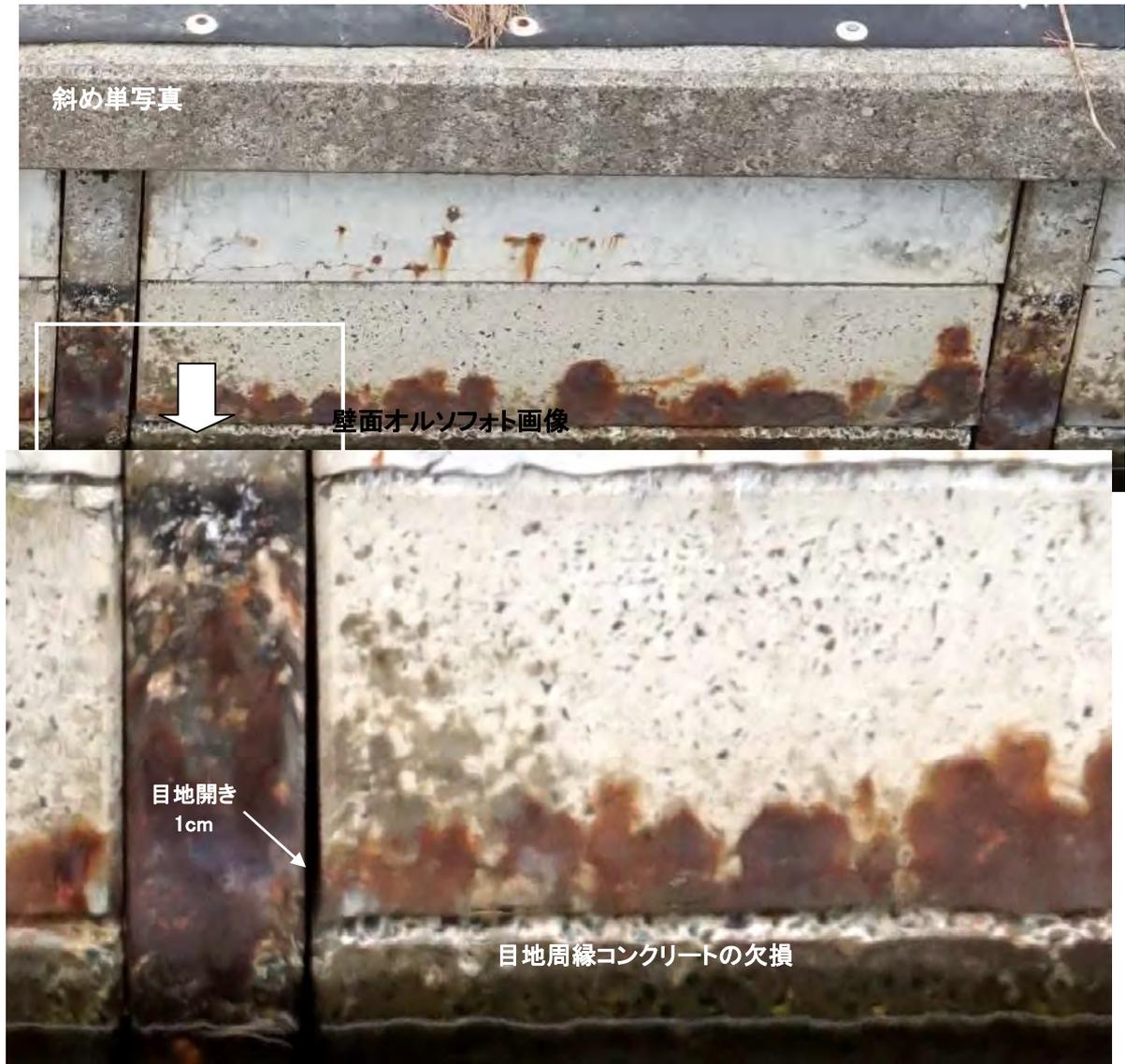


図7.21 不同沈下の検出例

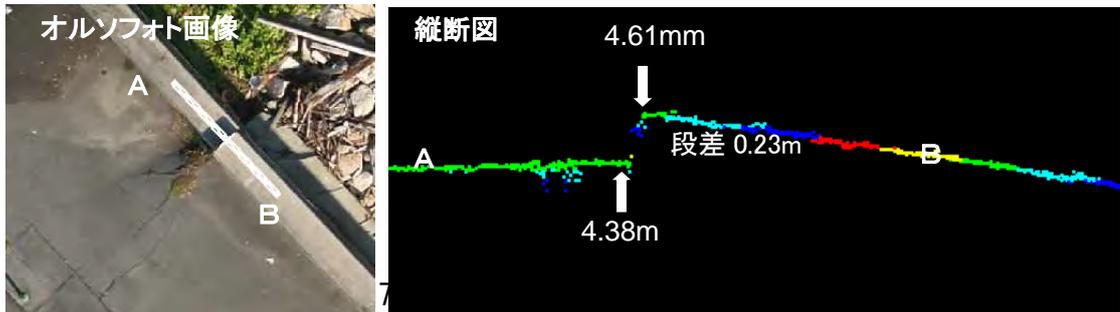
⑥ 目地の開き、段差

- 目地開き、段差、止水版の破断等の目地の劣化は、垂直撮影および斜め撮影の単写真、オルソフォト画像より変状箇所・範囲を検出する。
- 段差は、三次元点群データ(縦断図)より計測する。

■ 目地開き、周縁コンクリートの欠損検出例



■ 段差の検出・計測例



⑦ 漏水痕跡

○漏水・漏水痕跡などは、垂直撮影および斜め撮影の単写真、オルソフォト画像より箇所・範囲を検出する。

■ 漏水痕跡の検出例



図7.24 地の劣化による漏水の痕跡

○参考資料

- ・一般社団法人日本写真測量学会（2015）測量調査に供する小型無人航空機を安全に運航するための手引き， p. 36.
- ・熊田貴之・宇多高明・鈴木真二・酒井和也・野志保仁・森田 学・柄沢研治（2010）無人飛行機（UAV）による新しい海岸モニタリング手法. 海洋開発論文集， 26， pp. 1167-1171.
- ・三浦 麻・筑紫二郎・林 静夫・田中 明（2004）東松浦半島内の盆地における冬季の地形風と夜間昇温過程. 農業土木学会論文集， 231， pp. 249-258.
- ・Nex, F. and F. Remondino (2014) UAV for 3D mapping applications: a review. Applied Geomatics, 6(1), pp. 1-15.
- ・大石 哲・白谷栄作・桐 博英・高橋順二・水上幸治・村木広和（2015）UAVを使った低空画像解析による海岸堤防の劣化状態の検出. 土木学会論文集 B2（海岸工学）， 71(2)
- ・白谷栄作・桐 博英・高橋 順二・大石 哲・村木広和（2015）無人航空機(UAV)を活用したストックマネジメントの展望. 農業農村工学会誌, 83(10), pp. 839-842.
- ・飛田幹男, 神谷 泉, 岩橋純子, 中埜貴元, 高桑紀之：無人航空機による西之島空中写真の撮影とその分析, 国土地理院時報, 125, pp. 115～124 (2014)