

UAV を用いた高潮・高波・津波直後の港湾外郭施設の
初期被災調査に関するガイドライン

目 次

1. はじめに	1
2. 外郭施設の被災形態と浸水被害の特徴	1
2.1 外郭施設の被災形態と UAV による被災の把握	1
2.2 浸水状況と浸水深、浸水高	3
3. 関係法令の遵守と関係機関との調整	4
3. 1 各種関係法令	4
3. 2 関係機関との調整	4
4. UAV を用いた港湾構造物の初期被災調査の流れ	5
4. 1 概 要	5
4. 2 RTK 非搭載 UAV による点検の流れ（標定点を利用した写真測量の流れ）	5
4. 3 RTK 搭載 UAV による点検の流れ（標定点を利用しない写真測量）	9
4. 4 測量精度	12
4. 5 浸水範囲と越波量の推定	12
4. 6 UAV を用いた最新の調査	14
5. おわりに	15
参考文献	15

1. はじめに

本ガイドラインは、高潮・高波・津波による港湾外郭施設の被災状況とその周囲の浸水被害状況の UAV を用いた初期調査に関するものである。初期調査は、「被害状況の概略把握調査」と「施設の利用可否の判定調査」から構成されるが、本ガイドラインは前者、すなわち「被害状況の概略把握調査」に関するものである。

大規模地震・津波後の調査手法については、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（下巻：参考技術資料）（平成 30 年）」に記載されており、本ガイドラインはこのうち UAV による調査に関連している。

なお、本ガイドラインでは UAV による写真測量について記載しており、レーザーを用いた測量については記載していない。UAV による測量は日々進歩しており、レーザー測量を含む新技術の活用を妨げるものではない。

2. 外郭施設の被災形態と浸水被害の特徴

2.1 外郭施設の被災形態と UAV による被災の把握

外郭施設としては防波堤、護岸、堤防、胸壁、離岸堤、潜堤などがあり、それぞれ以下のような被害形態がある。

- ・防波堤：ケーソンの滑動・転倒、ケーソン壁の破損、消波ブロックの散乱・沈下
- ・護岸：パラペットの倒壊、吸出しによる背後の陥没、消波ブロックの散乱・沈下、背後土砂洗堀等によるケーソン等の堤体の移動
- ・堤防：パラペットの倒壊、越波・越流による背後法面・天端の損傷、波浪による前面被覆工の損傷、法尻洗堀に伴う前面法面の損傷、前面・背後法面および天端面の損傷に伴う破堤、堤防内部の砂の吸出しによる天端の沈下、消波ブロックの散乱・沈下
- ・胸壁：堤体の滑動・転倒、堤体周囲の洗堀
- ・離岸堤・潜堤：堤体の沈下、消波ブロックの散乱・沈下

このうち、島防波堤や離岸堤、潜堤は、陸地から離れているため、これまでは船舶で被災調査を実施する必要があった。津波や台風通過直後にはその変状を早期に確認することが求められるものの、海上が波で荒れる、あるいは漂流物が散乱するなどして船舶による調査を実施するまで長期間を有する場合も多い。また、消波ブロックはその高さを計測することが難しく、過去には図 2.1 のように消波ブロックの上に人が登って直接計測するなど、危険をとまなう場合もあった。また、護岸のように陸上から近づくことができる場所でも、図 2.2 のように測量の実施が困難な場合も多く、非接触な測量方法が必要とされる場合が多い。

近年、UAV による写真測量がより簡易に行われるようになってきたことから、今後、島防波堤や護岸、堤防の変形や消波ブロックの沈下量の計測にも、UAV による測量が促進さ

れるものと期待されている。



図 2.1 過去における消波ブロックの沈下量の直接計測



図 2.2 護岸の決壊状況

2.2 浸水状況と浸水深、浸水高

大規模な浸水被害が発生した場合には、まず図 2.3 のように浸水の痕跡を計測し、その場所の浸水深（地盤から痕跡までの高さ）（図 2.4 参照）を調べる。また、その場所の地盤高が分かれば、浸水高（海面から痕跡までの高さ）を求めることができる。

地盤高が地盤沈下等で変わっている場合には別途測量が必要になる。この際、浸水範囲が広く、広範囲の測量が必要な場合には UAV による写真測量が効果的になる。ただし、通常の UAV では GCP（標定点，Ground Control Point）が必要となり、GCP の測量に時間を要してしまうため、測量時間が限られている場合には工夫が必要である。

RTK-GNSS 搭載 UAV のように GNSS 測量を必要としない場合には、測量時間を少なくすることが可能である。しかし、コンテナターミナルのような広大なエリアを測量するには時間を要する。このような場合、若干精度は低下するものの撮影高度を 100m まで上げて測量することで、広範囲の測量を実施することもできる。この場合の誤差は約 5 cm である。仮に 3 万 m² の広範囲を撮影するには高度 30m の撮影の場合 281 分、高度 100m の場合 37 分であり広範囲であっても比較的短時間に測量可能である。



図 2.3 浸水深（地盤から痕跡までの高さ）の測定

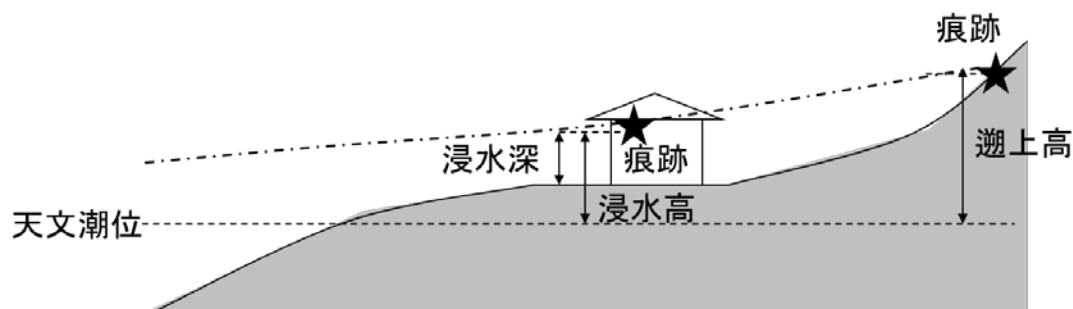


図 2.4 浸水深と浸水高

3. 関係法令の遵守と関係機関との調整

3. 1 各種関係法令

UAV を用いた港湾構造物の被災調査および緊急点検は「航空法」に則って実施する必要があるのに加え、「測量法：作業規定の準則（平成 28 年 3 月 31 日一部改正）」、「UAV を用いた公共測量マニュアル(案)(平成 29 年 3 月改正)」を参考にして点検を実施するのが望ましい。

※「UAV を用いた公共測量マニュアル」

本マニュアルでは総則にて以下の事項が記載されている。

- ・安全の確保 ・作業計画 ・工程管理 ・精度管理
- ・測量成果の検定 ・成果及び資料等の様式 ・運用基準 ・適用地区

また、「UAV による空中写真を用いた数値地図作成」については以下の点が、

- ・作業計画 ・標定点の設置 ・撮影 ・空中三角測量 ・現地調査

「空中写真を用いた三次元点群作成」については以下の点が

- ・作業計画 ・標定点及び検証点の設置 ・撮影 ・三次元形状復元計算
- ・点群編集 ・三次元点群データファイルの作成 ・品質管理 ・成果等の整理

また、港湾構造物の点検において「航空法」における考慮が必要になると考えられる項目を抜き出し以下に述べる。飛行禁止区域での飛行は、国土交通大臣の許可の取得が必要となる。港湾施設が都市（東京、千葉、神奈川、名古屋、大阪、神戸、広島など）に近い場合、飛行禁止区域のうち人口集中地区に該当する可能性が高い。また、飛行に関係しない人や物件との距離が 30m 以下となる場合および目視外飛行に対しては国土交通大臣の承認が必要になる。このような許可・承認は、オンラインでも申請が可能で、少なくとも飛行開始予定日の 10 日（土日祝日を除く）前までに手続きしなければならない。

また、UAV を飛行させる際には、ドローン情報基盤システム（飛行情報共有機能）に飛行日時・経路・高度等の飛行計画を登録することで、他の UAV や航空機の運航者と情報共有を行い衝突や通信の混信などのリスクを下げることができる。

さらに、万が一の事故に備えドローン等の賠償責任保険へ加入しておくことが望ましい。上記の許可・承認においては、保険加入が条件となっている。また、事故を起こした場合には、国土交通省・空港事務所等へ情報提供をすることが推奨されている。

無人航空機の飛行ルール、事故の情報提供先などの情報

https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html#a

3. 2 関係機関との調整

UAV を用いた港湾構造物の被災調査および緊急点検は、港湾管理者、各管区海上保安本部等、各関係機関との調整のうえで実施する必要がある。

4. UAV を用いた港湾構造物の初期被災調査の流れ

4. 1 概 要

UAV による測量には写真測量とレーザー測量があり、ここでは主に写真測量について述べる。また、飛行時の UAV の位置座標が正確に測定できる場合には撮影された写真と UAV の位置情報から写真測量が実施できるのに対し、正確な UAV の位置座標が測定できない場合には測定対象にいくつかの標定点（GCP: Ground Control Point）を設置して写真測量を実施する。ここでは、4.2 項で標定点（GCP）を利用した写真測量を、4.3 項で RTK 搭載型 UAV による標定点を用いない写真測量について述べる。

4. 2 RTK 非搭載 UAV による点検の流れ（標定点を利用した写真測量の流れ）

ここでは RTK 非搭載 UAV と標定点を用いた場合の写真測量の流れを示す。

① 事前準備・測量計画：

自動航行アプリケーション（図 4.1）により 1 回のフライトごとの測量範囲を決定する。必要な精度により高度を定めると、バッテリー容量に合わせた測量範囲が決定される。バッテリー1つ当りの飛行可能時間に対して余裕を見た実際の飛行時間を設定する。なお、当日の風などの状況によりバッテリーの消耗の仕方が変化することに留意する必要がある。



図 4.1 自動航行アプリケーションの事例（予想飛行時間が示されている）

② 標定点の設定：

標定点を設定し、その位置の測量を行う。画像解析ソフトウェアにおいて標定点を設定する際、標定点は画像上分かりやすい地点に設定しておくことが望ましい。また、そのような地点が見られない場合、対空標識を用意しておく。



図 4.2 標定点の位置座標の測量

③ 飛行判断：

現地において風や雨の状況をもとに飛行可否の判断をする。また、飛行可能であっても風が強くバッテリーの消耗が早まることがあるので留意する。低温状態でもバッテリーの消耗が早くなることがある。風が強い状況では、飛行できたとしても風で機体が横向きになってしまい、測量に使用できない写真（図 4.3(b)）になることがある。また、強風時には離陸地点に着陸させることも困難が伴う。標定点の測量を踏まえて現地と計画とで違いがないか確認し必要があれば修正する。対空標識を設置する必要がある場合は UAV を飛行させる前に設置する。

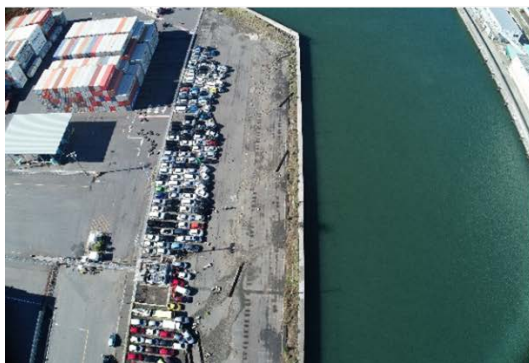


図 4.3(a) 正常な写真

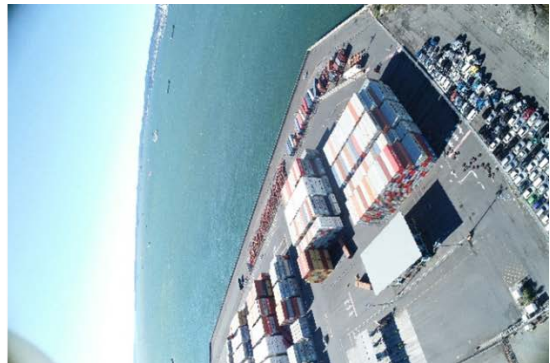


図 4.3(b) 機体が横向き状態で撮影された写真

④ UAV 飛行：

自動航行アプリケーションにより飛行させる。送信機と UAV との距離が離れすぎた場合、あるいは、建物等の遮蔽物がある場合、UAV とプロポ間の通信が切れる場合がある。その場合、瞬間であればそのまま測量を続ける。多くの場合はゴーホーム機能により UAV が自動で離陸地点に戻ってくるがそうした事態にならないよう留意する。

⑤ 画像解析：

測量終了後、画像解析ソフトウェアにより解析を行う。ソフトウェアに撮影された写真や標定点（GCP）の位置座標を入力し(図 4.4)、まず簡易なアラインメントを実施し、初期の点群データを作成する。初期のアラインメントの後、標定点を撮影された画像に設定し、座標を入力する。この際、画像 1 枚ごとに標定点のズレを修正する。その後、再度アラインメントを実施し、高精度の点群データ (図 4.5)、高密度クラウド (図 4.6)、DEM (Digital Elevation Model) (図 4.7) およびオルソ画像 (図 4.8) を作成する。



図 4.4 初期アラインメントの後、画像に標定点を設定

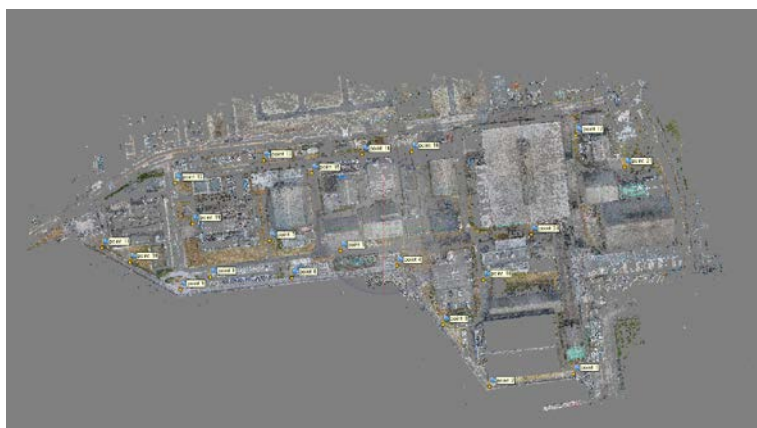


図 4.5 アライメント後の点群データ



図 4.6 高密度クラウド（高密度点群）

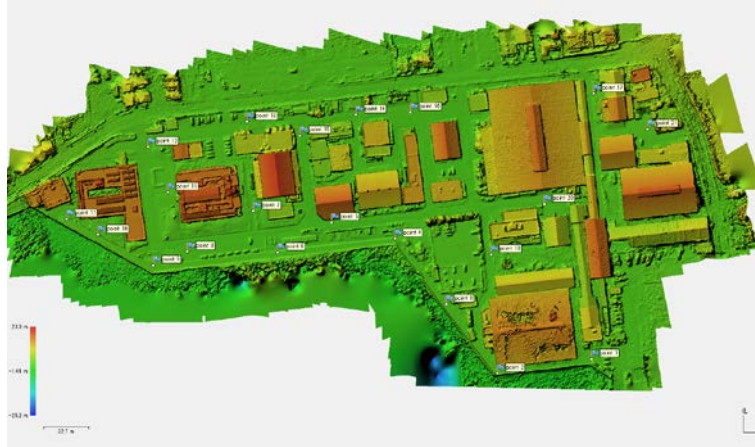


図 4.7 DEM (デジタルエレベーションモデル)



図 4.8 オルソ画像 (カメラレンズの影響をなくした画像)

4. 3 RTK 搭載 UAV による点検の流れ（標定点を利用しない写真測量）

UAV を用いた測量は「UAV を用いた公共測量マニュアル(案) (平成 29 年 3 月改正)」に則って行うのが望ましい。ただし、最新の RTK 搭載型 UAV などを用いることで、このマニュアルに則らずともより簡便に実施できる場合もある。

ここでは RTK 搭載型 UAV として DJI 社製の Phantom4 RTK（図 4.9）を用いた場合の手順を示す。



図 4.9 DJI 社製 Phantom4 RTK

①事前準備・測量計画：

4.3 項と同様に自動航行アプリケーション（図 4.10）により測量範囲を決める。

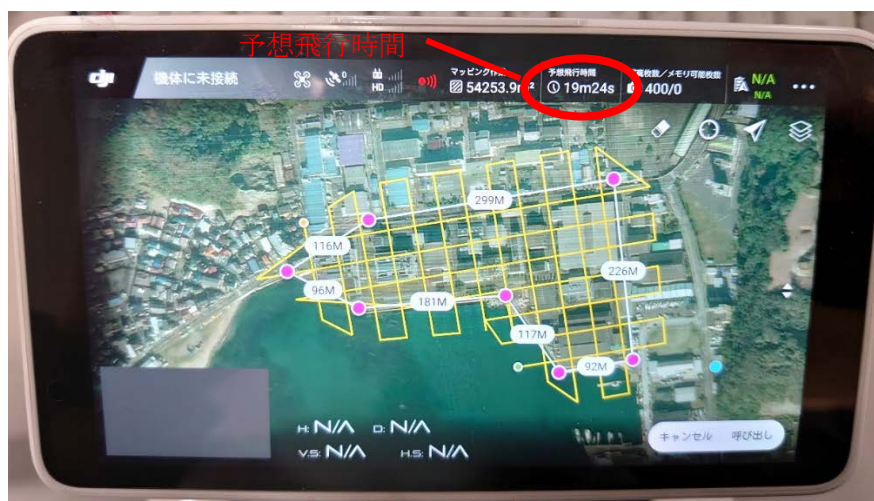


図 4.10 自動航行アプリケーション

②飛行判断：4.3 項と同様に実施する。

③基地局設置：

固定基地局（図 4.11）を現地において設置する。上空への視界が開いている場所が望ましい。基地局を設置した後、その座標点を入力する（図 4.12）。入力する座標は事前

に設置点を定めて入手しておくか、現地においてその場で測量を行う。座標入力の際、アンテナ高を加算して入力する。



図 4.11 固定基地局 (D-RTK2)

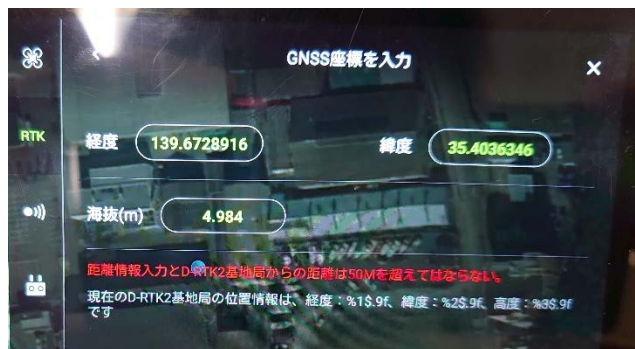


図 4.12 基地局の座標の入力

④UAV 飛行：4.3 項と同様に実施する。

⑤画像解析：

測量終了後、画像解析ソフトウェアにより解析を行う。ソフトウェアに撮影された写真や標定点 (GCP) および UAV 搭載カメラのパラメータ (図 4.13) を入力する。その後アライメントを実施し、点群データ、オルソ画像、DEM 等を作成する。

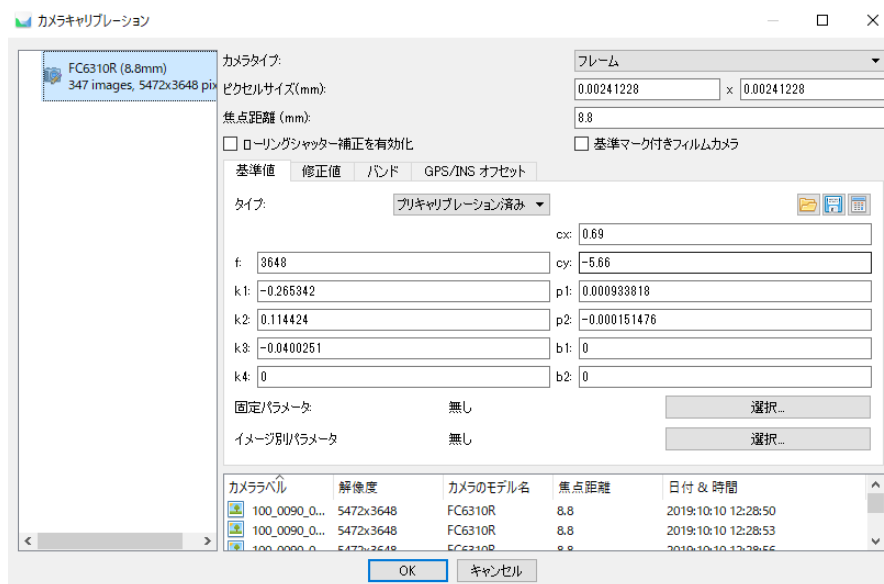


図 4.13 カメラパラメータの入力



図 4.14 高密度クラウド (高密度点群)

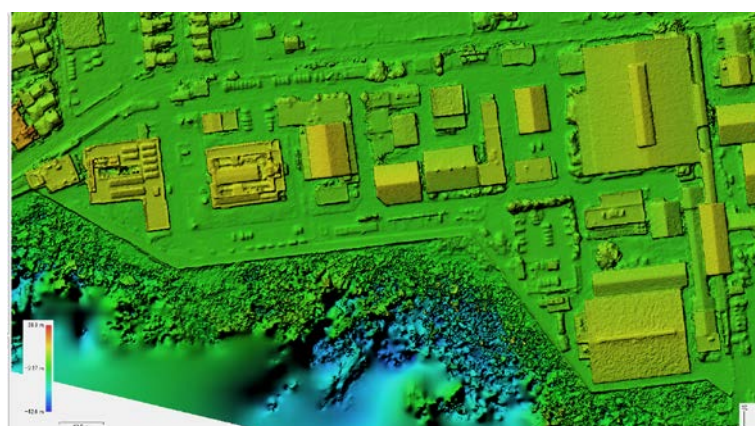


図 4.15 DEM (デジタルエレベーションモデル)



図 4.16 オルソ画像 (カメラレンズの影響をなくした画像)

4. 4 測量精度

UAV を用いた写真測量の精度は数cmである。したがって、対象とすべき現象は数cmの誤差を含んでも実用上問題のない現象である。たとえば、消波ブロックの形状は凹凸に富んでおり、少ない移動量でも高さが大きく変化してしまう。そのため、消波ブロックの高さは面平均の高さで評価の方が妥当である。したがって、消波ブロックの移動のような現象では数cmの測量誤差でも許容できるものと考えられる。

図 4.17 は防波堤の高さを高度 40m の高さから測量したものである。RTK 非搭載、搭載ともに同程度の測量精度を持っており、RTK 搭載型ドローンによって測量誤差は最大約 7 cm, 平均約 2 cm だった。100m 高度から撮影した場合でも、10 cm 以下の誤差となっている。



図 4.17 防波堤の高さ方向の測量誤差（高度 40m で撮影した場合）

4. 5 浸水範囲と越波量の推定

外郭施設の設計や被災の評価にあたっては、その越波量、越流量を評価する必要がある。浸水範囲とその地盤高さ、および海水の越波、越流時間が推定できるならば、災害時の越波量、越流量をおおよそ評価することが可能である。

図 4.18 はある地区の地盤の標高と浸水高を示している。地盤の標高は RTK 搭載型ドローンによって計測されたものであり、浸水高は別途計測された浸水痕跡の高さである。いずれも災害直後に計測されたものである。この図から浸水範囲は護岸法線から 600m の範囲にあり、浸水体積は図中のハッチングされた面積から、1m 幅あたり

$$(600 \times 0.5) / 2 = 150 [\text{m}^3/\text{m}]$$

であったことがわかる。

越波によって海水が流入していた時間は約 1 時間と想定されており、1 秒間 1m 幅あたりの越波量は

$$150 / 3600 = 0.04 [\text{m}^3/\text{m}/\text{s}]$$

であったものと推定される。

このように、ドローンによる写真測量により、災害時の越波量をおおむね推定できることがわかる。

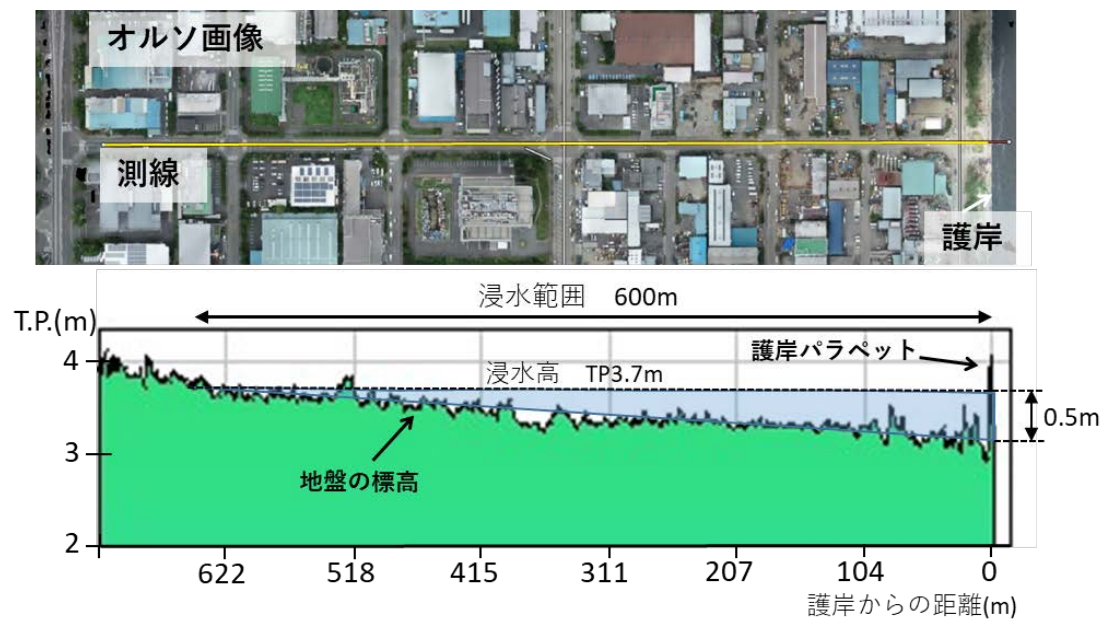


図 4.17 ドローンによる地盤高の測定により浸水高を推定した事例

4. 6 UAV を用いた最新の調査

UAV を用いた調査は日々進化しており、調査対象や測量精度も高度化している。

図 4.19 は浅海域グリーンレーザーによる測量である。写真測量のみでは海中の測量を実施できないが、浅海域グリーンレーザーを用いることで海上から数 m の水中まで連続的に計測することが可能である。

一方、海中をマルチビームソナーにより測量し、海上部を写真測量と組み合わせることも実施されている。図 4.20 はそれらの組み合わせによる離岸堤の測量結果であり、数 10m の海中から海上部までを連続的に測量することが可能となっている。



図 4.16 浅海域グリーンレーザーによる離岸堤周囲の等深線データ
(株式会社パスコ提供)

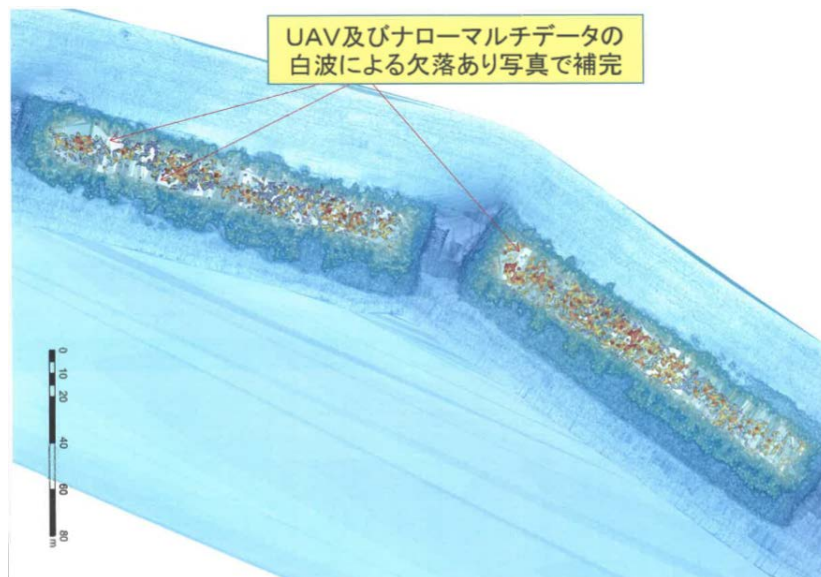


図 4.16 UAV 及びナローマルチビームデータの組み合わせによる
水中から水上までの連続測量 (株式会社パスコ提供)

5. おわりに

本ガイドラインでは UAV を用いた高潮・高波・津波による港湾外郭施設の被災状況とその周囲の浸水被害状況の概略把握調査について記述している。主に UAV による写真測量とその精度についても記載している。

なお、UAV による測量は日々進歩しており、本ガイドラインで記載した技術より優れた新技術の活用が今後、期待される。

参考文献

川口真吾・鶴田修己・高坂雄一・岡崎裕・朝比翔太・酒井和也・鈴木高二朗(2019) : UAV を用いた港湾構造物の計測技術に関する検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.75, No.2, pp. I_121-I_126.

川口真吾・鈴木高二朗・鶴田修己(2019) : RTK-GNSS 受信機を搭載した UAV による浸水データの測量に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.75, No.2, pp. I_1297-I_1302.