

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1380 Dec 2020

水中ドローンを利用した港湾構造物の調査に関する検討

野上 周嗣・加藤 絵万

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 検討の方針	4
3. 従来法と水中ドローンによる調査の比較	4
4. 水中ドローンを利用した港湾構造物の目視調査に関する検討	5
4.1 港湾構造物の目視調査に必要な水中ドローンの仕様の確認	5
4.2 水中ドローンを利用した港湾構造物の目視調査	7
4.3 まとめ	11
5. 水中ドローンを利用した陽極消耗量調査に関する検討	11
5.1 調査方法の検討	11
5.2 実証実験	13
5.3 まとめと今後の展望	15
6. まとめ	15
7. あとがき	15
謝辞	15
参考文献	16
付 録	16

A feasibility study of an underwater drone for safe and effective investigation of port structures

Shuji NOGAMI*
Ema KATO**

Synopsis

Since most of the members of port structures are located in underwater, most of the inspections, such as visual inspection of piles and seabed ground and measurement of steel thickness of piles, is conducted by divers. The safety of performing the inspection is influenced by many factors, among them tidal and wave conditions, mooring and the cargo workings of the facility. The effective inspection devices to improve safety have been required for appropriate maintenance and management of port structures.

Underwater drones that can observe underwater conditions in real-time have become widespread in recent years. By using an underwater drone for the inspection of port structures, it is expected that the safety of the inspection can be improved. In this study, the scope of application and points to notice for the visual inspection of port structures using underwater drones was described. Moreover, a method for investigating anode consumption using underwater drones was proposed for reducing labor in underwater work.

Key Words: Underwater drone, port structures, visual inspection, anode consumption investigation

* Senior Researcher, Frontier Technologies for Structures Group, Structural Engineering Department

** Head of Group, Structural Mechanics Group, Structural Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5059 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:nogami-s852a@p.mpat.go.jp

水中ドローンを利用した港湾構造物の調査に関する検討

野上 周嗣*・加藤 絵万**

要 旨

港湾構造物の部材等の多くは海中部に存在するため、部材や海底地盤の洗堀・堆積等の目視や鋼材の肉厚測定等、大部分の調査が潜水士により行われる。しかし、その実施は波浪や潮汐等の海象状況、船舶の係留や荷役作業等の施設の利用状況に左右される環境下にあるため、安全で効率的な調査技術の開発が求められている。

近年、陸上からの遠隔操作によって水中を潜航し、搭載カメラによって水中の状況をリアルタイムで確認できる水中ドローンが普及している。港湾構造物についても、海中部の調査に水中ドローンを利用することにより、調査の安全性の向上や調査の実施による施設の利用制限を軽減できることが期待される。そこで、本検討では、水中ドローンを利用した港湾構造物の目視調査について、適用の範囲や留意点を明らかにするとともに、目視調査以外での水中ドローンの利用として、水中ドローンによる陽極消耗量の調査方法について検討した。

キーワード：水中ドローン，港湾構造物，目視調査，陽極消耗量調査

* 構造研究領域 構造新技術研究グループ 主任研究官

** 構造研究領域 構造研究グループ長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5059 Fax：046-844-0255 e-mail:nogami-s852a@p.mpat.go.jp

1. まえがき

港湾構造物の維持管理を効率的かつ効果的に実施するためには、点検・調査により構造物や部材の変状に関するデータを取得し、これに基づいて構造物や部材の現在および将来の性能を評価・予測したうえで対策の要否を判定し、適切な対策を実施することが重要である。

港湾構造物の部材等の多くは海中部に存在するため、部材や海底地盤の洗掘・堆積等の目視や鋼材の肉厚測定等、大部分の調査が潜水士により行われる。しかし、その実施は波浪や潮汐等の海象状況、船舶の係留や荷役作業等の施設の利用状況に左右される制約された環境下にあるため、全ての部材等に対して調査することは困難である。このため、安全で効率的な調査技術の開発が求められている。

近年、陸上からの遠隔操作によって水中を潜航し、搭載カメラによって水中の状況をリアルタイムで確認できる水中ドローンが普及している。水中ドローンを活用したインフラ構造物の目視調査については、既に、ダムを対象とした「水中部点検におけるロボット活用マニュアル(案)」¹⁾²⁾や、「海岸保全施設維持管理マニュアル」³⁾において海岸保全施設での活用事例などが公表されているところである。港湾構造物についても、部材や海底地盤の洗掘・堆積等の調査に水中ドローンを利用することにより、調査の安全性の向上や調査の実施による施設の利用制限を緩和できることが期待される。そこで、本検討では、水中ドローンを利用した港湾構造物の目視調査について、適用の範囲や留意点を明らかにするとともに、目視調査以外での水中ドローンの利用の可能性を検討することとした。

2. 検討の方針

まず、一般に市販されている水中ドローンと、潜水士による調査を比較し、水中ドローンによる調査の適用の範囲や留意点を整理した(3章)。

次に、港湾構造物の目視調査に必要な水中ドローンの仕様を事前検討したうえで、仕様を満足する水中ドローンを用いて港湾構造物の目視調査を行い、水中ドローンを利用した場合の利点および課題を明らかにした(4章)。

さらに、目視調査以外での水中ドローンの利用の可能性の検討として、水中ドローンによる陽極消耗量の調査を実施した(5章)。

3. 従来法と水中ドローンによる調査の比較

近年、様々な機能や価格の水中ドローンが登場しているが、ここでの記述は、以下の機能を有する水中ドローンを

対象とする。

- ・搭載されたカメラで海中の撮影が可能
- ・スラスタを使用して水平移動、潜航が可能

表-3.1 に従来から行われている潜水士による調査と水中ドローンによる調査について、安全性、調査項目、経済性等の観点から整理した表を示す。

水中ドローンは陸上から海中の状況を確認できるため、潜水士による調査と比較して点検者の安全性は高い。また、調査の計画深度については、水中ドローンは仕様の範囲内において潜水士より安全かつ容易に変更できる。

港湾の施設の点検診断ガイドライン⁴⁾によれば、「目視」は「点検者自らの目視。ただし、ドローン等により目視と同等に変状の把握ができ、劣化度を判定できると点検診断を実施する者が判断する新技術による場合も目視とみなす。」と定義されている。一般に、鋼管杭やケーソン等の海中にある部材には海生生物等が多数付着しているため、「目視」を実施するには付着物の除去が必要となる。水中ドローンを利用して付着物を除去したうえで「目視」することは困難であり、部材の外観を観察するのみに留まるものと考えられる。しかし、水中ドローンにより対象部材全体の外観をおおよそ把握することができれば、潜水士により付着物の除去を伴う「目視」を行う部材の選定や、鋼材の肉厚測定等の詳細調査を実施する箇所を選定することができる。ただし、いずれの手法においても、水中に濁りが発生している場合、「目視」および外観の観察は困難である。しかし、潜水士は、濁りが発生している場合、触診により形状の変化をおおよそ把握することで調査を行うことができる。

「目視」以外の調査を行う場合、潜水士であれば鋼材の肉厚測定や流電陽極方式の電気防食に用いるアルミニウム合金陽極の消耗量測定など様々な調査に対応できる。市販の水中ドローンを改良できる場合は、水中ドローンの積載量の範囲で、陸上から操作できる調査機器を搭載して目的に応じた調査に対応できる可能性がある。ただし、海生生物の除去が必要な調査については、水中ドローン単体での対応は困難である。

構造物の調査では、調査対象位置の特定が極めて重要であるが、いずれの手法においても、調査対象に水深や延長を示す目印がない場合でも、構造物に沿って水平あるいは鉛直に移動することによって調査位置を特定できると考えられる。ただし、水中ドローンは調査対象や周辺状況をカメラ映像で確認して調査位置を特定する必要があるため、海中に濁りが発生している場合は調査位置の特定は困難となる可能性が高い。

表-3.1 潜水士と水中ドローンによる調査の比較

項目	潜水士	水中ドローン	
安全性	<ul style="list-style-type: none"> 海中作業の安全性を確保するために対策が必要 予め計画した調査深度以深に潜水することは容易ではない 	<ul style="list-style-type: none"> 陸上で作業できるため安全性は高い 耐水圧等の性能の範囲内であれば容易に調査深度を変更できる 	
調査項目	目視	<ul style="list-style-type: none"> 付着物がある場合は除去した後に実施 濁りにより調査範囲が狭まる、または調査が不可能な場合がある 触診が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 付着物がある場合、外観を観察するのみ 海生生物等の除去は困難
	その他の調査	<ul style="list-style-type: none"> 様々な調査に対応できる 例：海底地盤の洗掘や堆積の測定、鋼材の肉厚測定、電気防食工(流電陽極方式)の陽極消耗量測定など 	<ul style="list-style-type: none"> 市販の水中ドローンでは困難 水中ドローンの改良が可能な場合、積載量の範囲内で陸上から操作できる調査機器を搭載できれば可能 ただし、海生生物等の除去が必要な調査は困難
調査対象位置の特定	<ul style="list-style-type: none"> 構造物・部材に水平・鉛直に移動することで位置の特定が可能 構造物に対する水平位置については、気泡でおおよその位置の特定が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 構造物・部材に水平・鉛直に移動することでおおよその位置の特定が可能 カメラ映像からの判断となるため、特定が困難な場合がある 	
調査時間	<ul style="list-style-type: none"> 潜水深度に応じて、高気圧作業安全衛生規則(高圧則)の定めによる潜水時間を遵守 	<ul style="list-style-type: none"> 稼働用の電源を供給できる限り潜水は可能 	
経済性	<ul style="list-style-type: none"> 潜水士の他に連絡員や送気員(他給気式潜水の場合)等の人員、潜水装備が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 十数万円程度から機体を手入できる ただし、機種によって移動できる方向が限られる場合がある 	

潜水士による調査の場合、潜水深度に応じて、高気圧作業安全衛生規則(高圧則)の定めによる潜水時間を遵守する必要がある⁹⁾。一方、水中ドローンは、稼働用の電源を供給できる限り潜水が可能のため、調査を中断することなく広範囲を調査できる可能性がある。

また、水中ドローンは機種によって移動できる方向が限られる場合があるものの、十数万円程度から入手できる。一方で、潜水士の場合、短時間の調査であっても送気員等の作業員や潜水装備を準備する必要があるため、水中ドローンと比較すると経済性に劣る場合がある。

4. 水中ドローンを利用した港湾構造物の目視調査に関する検討

第3章に示したとおり、水中ドローンは港湾構造物の‘目視’への適用は困難であるが、外観状態の観察に利用できる。本検討では、まず、安価な水中ドローンを使用して、外観状態の観察への適用性の確認と、円滑な調査の実施に必要なと考えられる仕様を確認した。その後、円滑な調査の実施に必要な仕様を有する水中ドローンにより、水中ドローンを利用した外観状態の観察の適用の範囲や留意点を改めて整理するとともに、調査実務での運用方法について検討した。

なお、以降では、港湾構造物の「外観状態の観察」を便宜的に「目視調査」と称する。また、以降に示す水中ドローンによる港湾構造物の目視調査の実施にあたっては、施設保有者および施設管理者等と調整し、許可を得ている。

4.1 港湾構造物の目視調査に必要な水中ドローンの仕様の確認

(1) 調査概要

港湾構造物の目視調査への水中ドローンの適用性と円滑な調査の実施に必要な水中ドローンの仕様の確認を目的として、2018年12月6日にケーソン式防波堤の目視調査を実施した。調査中、水中ドローンの操作および航行に支障となる気象・海象条件ではなかった。

(2) 使用機器

写真-4.1 および表-4.1 に使用した水中ドローンの主な仕様と構成を示す。購入した2018年当時では、比較的安価な水中ドローンである。機体には光学カメラ(以下、機体カメラ)が正面に1台搭載されており、スラストは水平移動(前後移動、旋回)用に水平2基、潜航浮上用に鉛直1基が搭載されている。深度センサ使って機体を一定の水深に留める機能を有する。機体カメラの映像の確認および録画はスマートフォンによって行う。機体カメラは機体の進行方向しか撮影できないため、機体下部に積載量の範囲内の撮影用

の 4K カメラ(GoPro®. 以下, 撮影カメラ)を追加で設置した. なお, 撮影カメラの映像はリアルタイムで確認できないため, 調査終了後に撮影した動画を確認することとした.



写真-4.1 使用した水中ドローン

表-4.1 使用した水中ドローンの主な仕様と構成

メーカー	PowerVision 社 (中国)
製品名	PowerRay
価格	約 30 万円
寸法	L465×W270×H126
重量	約 4kg
スラスト	水平×2 基 鉛直×1 基
最大速度	3kts(5.4km/時)
LED ライト	2 基
光学カメラ	機体カメラ: 4K~FHD デジタル
センサ	深度センサ
追加装備	撮影カメラ: 4K カメラ(GoPro®)

(3) 調査方法

ケーソン式防波堤のマウンドとケーソン側壁について, 水中ドローンによる目視調査を行い, 水中ドローンの操作性と機体カメラの映像を確認した. また, 撮影カメラを機体カメラの撮影方向に対して90度回転させた向きに設置し, 動画を撮影した.

(4) 調査結果

マウンドは, 機体カメラによる目視調査が可能であった. ただし, 潮流や波浪の影響によって, 水中ドローンが意図しない様々な方向へ流され制御困難となった. さらに, 使用した水中ドローンは水平に横移動できないため, 撮影向きでの修正が困難だった.

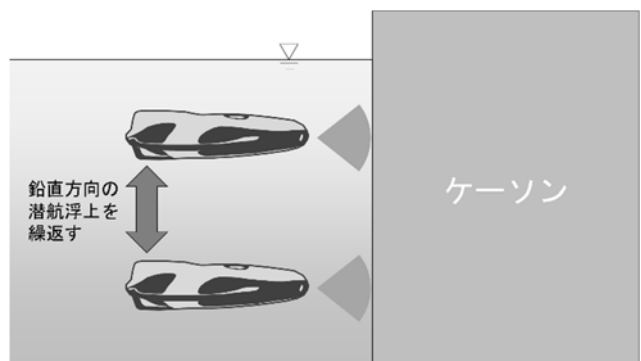
マウンド付近では水面付近と比較して濁りが発生していた(写真-4.2). 濁りが著しい時は周囲の状況が把握できず, 水中ドローンの位置を見失うことがあり, 水中ドローンを

水面上まで浮上させて位置を確認する必要があった.

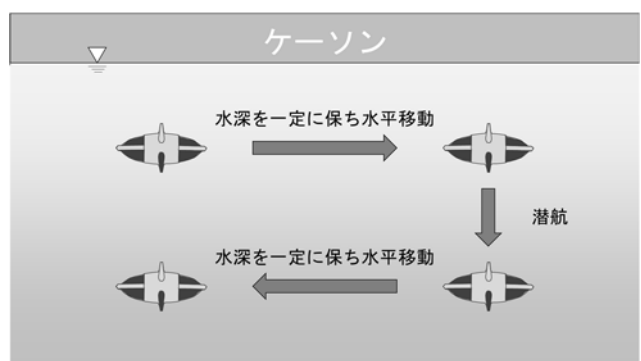
ケーソン側壁の外観状態は, 機体カメラを使用した場合, 十分に調査できなかった. 機体カメラでケーソン側壁を調査しようとする場合, 図-4.1のイメージ図のように鉛直方向の潜航浮上を繰り返し操作するか, 一定の水深を保って機体を法線平行方向に水平移動させる必要がある. しかし, 使用した水中ドローンの移動方向には制約があり, 機体を機体前面に対して水平に横移動させる機能や, 鉛直に潜航浮上させる機能は有していない. このため, 潜航浮上を繰り返すうちに, ケーソンから離れたたり, 壁面に衝突するほど近づいたりし, 機体カメラによる調査は不可能であった.



写真-4.2 マウンドの撮影画像(画像の奥がケーソン)



機体を鉛直方向に移動させる場合



機体を法線平行方向に水平移動させる場合

図-4.1 ケーソン側壁の調査のイメージ

水中ドローンの下面に取付けた撮影カメラについては、水中ドローンを一定の水深を保って法線平行方向に航行してケーソン側壁を撮影することで、写真-4.3のとおり側壁を調査することができた。



写真-4.3 ケーソン側壁の撮影画像(水深 4.0m 付近)

(5) 目視調査に必要と考えられる水中ドローンの仕様

水中ドローンによる目視調査では、機体を鉛直・水平両方向に操作し、調査対象を撮影する必要がある。また、ケーソン側壁に対しては、一定の水深を保って機体を法線平行方向に水平移動させて深度毎に撮影することが効率的であり、ケーソンの目地部に対しては、水平位置を保ったまま鉛直方向に機体を移動させて撮影することが効率的と考えられる。このことから、目視調査に利用する水中ドローンについては、鉛直・水平両方向の移動が可能であること、また、鉛直・水平方向での位置の保持をサポートする機能を有するものが適していると考えられる。

また、積載量の範囲内で撮影カメラを搭載することで、撮影漏れを防ぐことや撮影範囲を拡充することができる。

さらに、事前に調査地点の濁りの程度を把握して調査の可否を判断したり、陸上から潜水中の水中ドローンのおおよその位置を把握する方法を導入することが、円滑な調査の実施に有効と考えられる。

なお、市販の水中ドローンは一般に操作性に配慮されているが、港湾構造物の調査を円滑に実施するためには、継続的な操作練習が必要不可欠であることが確認された。

4.2 水中ドローンを利用した港湾構造物の目視調査

(1) 調査概要

水中ドローンによる目視調査の適用の範囲や留意点を明らかにすることを目的として、4.1で確認された仕様を満足する水中ドローンにより港湾構造物の目視調査を行った。

調査対象施設および対象部材は、A港の直杭式横棧橋の鋼管杭と背後土留め鋼矢板、ケーソン式護岸のケーソン、浮棧橋の係留索、B港のドルフィンの鋼管杭である。実施時

期は、2019年10月29日～31日(A港)、2020年1月21日～22日(B港)であり、いずれの撮影日も撮影および操作の支障となる気象・海象条件ではなかった。

(2) 使用機器と調査に当たっての工夫

1) 使用機器

写真-4.4 および表-4.2 に使用した水中ドローンの主な仕様と構成を示す。

使用した水中ドローンは、鉛直な潜航浮上と左右への水平移動が可能である。また、水圧・深度センサや3軸ジャイロ等の各種センサを使って機体を一定の水深に保持する機能を有している。水中ドローンの操作や調査で使用する上下に旋回可能なフルHDカメラ(以下、機体カメラ)1台が搭載されており、PC画面にてリアルタイムで確認することができる。

また、追加装備として、撮影用の4Kカメラ(GoPro®。以下、撮影カメラ)に加えて、対象物までの概略距離や対象物の概略寸法を把握するためにレーザーマーカを搭載した。

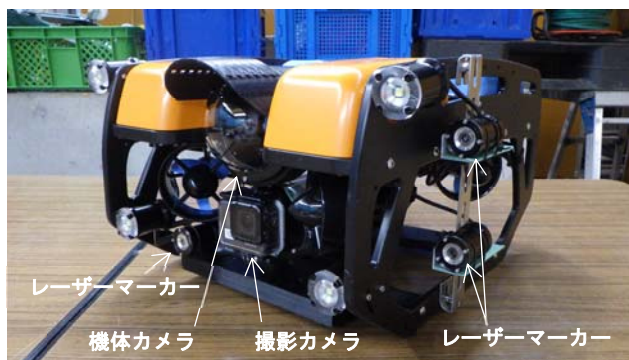


写真-4.4 使用した水中ドローン

表-4.2 使用した水中ドローンの主な仕様と構成

メーカー	Blue Robotics 社(米国)
製品名	BlueROV2
価格	約 100 万円
寸法	L457×W338×H254
重量	約 10kg
スラスト	水平×4 基(菱型配置) 鉛直×2 基
最大速度	2kts(3.7km/時)
LED ライト	1500 ルーメン/基×4 基
光学カメラ	機体カメラ：フル HD カメラ
センサ	水圧・深度センサ 3 軸ジャイロ 3 軸加速度 3 軸電子コンパス 内部気圧計 電流・電圧監視 浸水水濡れ監視
追加装備	赤色レーザーマーカ×4 基 撮影カメラ：4K カメラ(GoPro®)

(2) 調査に当たっての工夫

水中ドローンによる目視調査を可能な限り効率的に行うために、水中ドローンに下記2点の工夫を施した。

1) 水中ドローンの平面位置の簡易な把握のための工夫

使用した水中ドローンをはじめ、現状で市販されている多くの水中ドローンは、潜航した深度は把握できるが、水中での平面位置は把握できない。水中でも平面位置を把握できる機器が開発されているが、高額である。

そこで、エアコンプレッサーをつないだホースを水中ドローンに取付け(写真-4.5)、水面上の気泡の位置から潜航中の水中ドローンの平面位置を把握する方法を試みた。

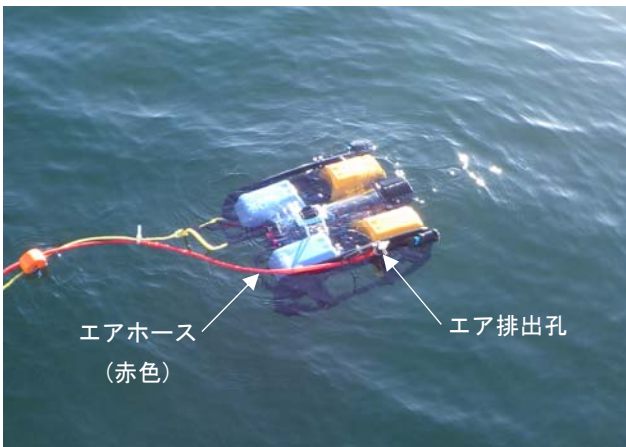


写真-4.5 エアホースを取付けた水中ドローン

2) テザーケーブルの引っ掛かり対策

直杭式横桟橋での撮影においては写真-4.6 に示すように、複数回、水中ドローンのテザーケーブルが引っ掛かり、潜水士により取外す必要があった。このことから、ケーブルの引っ掛かり対策として、写真-4.7 に示す物を使用した。

(3) 調査方法

目視調査は主として機体カメラで行い、補足と記録のために撮影カメラにて動画撮影した。港湾構造物の場合、ケーソンや鋼矢板、鋼管杭など同形状の部材が連続して構成されていることが多い。また、本検討で使用した水中ドローンは撮影画像(動画や静止画)に位置情報を付加することは不可能であるため、撮影画像のみから部材や劣化・変状の位置を推定することは困難である。そこで、機体カメラ映像のほか、撮影時刻や撮影深度などのセンサ情報が表示されるPC画面を録画し、記録した各部材の画像取得開始および終了時刻とPC画面を照合することで、撮影画像の部材や劣化・変状の位置を推定した。

また、調査地点の濁りの程度を把握するため、事前に透明度板による透明度測定を行い、撮影画像に及ぼす影響を確認した。透明度は、海洋表層の海水の透明さの度合いを

表す指標で、日中に直径30cmの白色の円板(透明度板)を水平にした状態で海水中に降下させ、上から見てこれが見えなくなる限界の深さをメートルで表したものである⁶⁾。

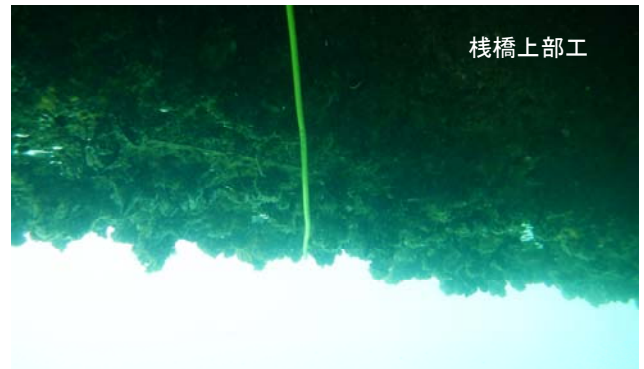


写真-4.6 テザーケーブルの引っ掛かり状況

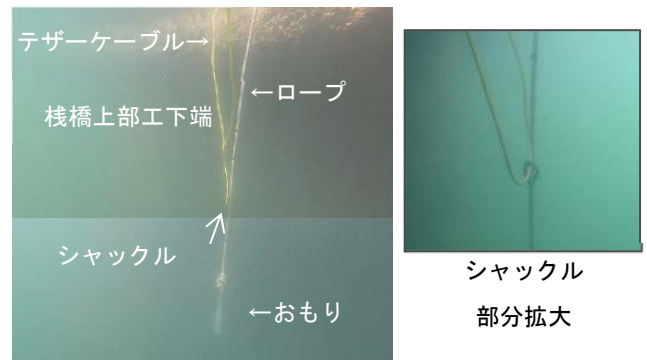


写真-4.7 ケーブル引っ掛かり対策

(4) 調査結果

各部材の撮影画像を写真-4.8～4.23に示す。なお、記載している水深は撮影時の水面を0mとしたものであり、実際の潮位とは異なる。

いずれの調査対象部材についても海生生物が多く付着していたため、部材本体の‘目視’は不可能であった。しかし、鉛直に浮上潜航できる仕様により、鋼管杭や鋼矢板の目視調査を効率よく行うことができたほか、左右に水平移動できるため、潮流や波浪の影響を受けても機体の向きの修正が容易であった。

写真-4.24に示すとおり、気泡により陸上から水中ドローンの平面位置を把握できた。気泡は波浪や潮流の影響を受けるため正確な平面位置を示すものではないが、この工夫により、水中ドローンの水平移動をある程度効率的に行うことができた。

表-4.3に調査時の透明度を示す。調査時に海底まで透明度板が見通せる時であっても、水中ドローンの機体カメラ映像で確認すると、海底付近では濁りが発生している場合があった。例えば、ケーソンの水深が浅い箇所では濁りは発生していなかったため、写真-4.15のように画像は鮮明であった。しかし、水深が深くなると写真-4.16のように濁りが発生しており、マウンド上では写真-4.17のように手前側のみ確認できる状況だった。以上のことから、透明度測定では、撮影画像の質を確保できる水深を正確に把握することはできない。しかし、調査箇所の濁りをある程度把握し、目視調査の実施の可否や撮影の限界水深の簡易的な判断に利用することは可能と考えられる。

表-4.3 調査時の透明度

測定箇所	透明度(m)
直杭式横棧橋・浮棧橋	4.4～5.8
ケーソン式護岸	3.9～5.2
ドルフィン	3.5～9.4



写真-4.8 鋼管杭(棧橋 水深1.5m付近)



写真-4.9 鋼管杭(棧橋 水深2.5m付近)

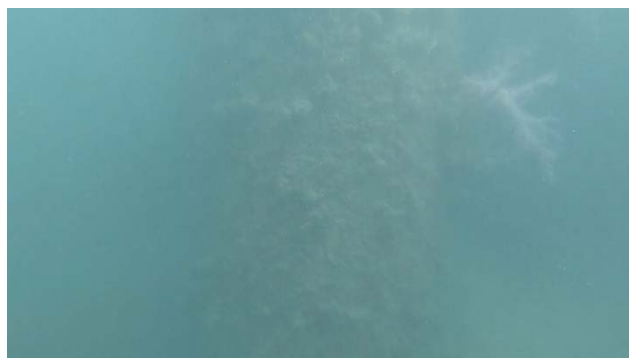


写真-4.10 鋼管杭(棧橋 水深5.0m付近)



写真-4.11 鋼管杭(棧橋 水深1.2m付近)



写真-4.12 鋼管杭(棧橋 水深3.0m付近)



写真-4.13 鋼矢板(土留め 水深 2.5m 付近)

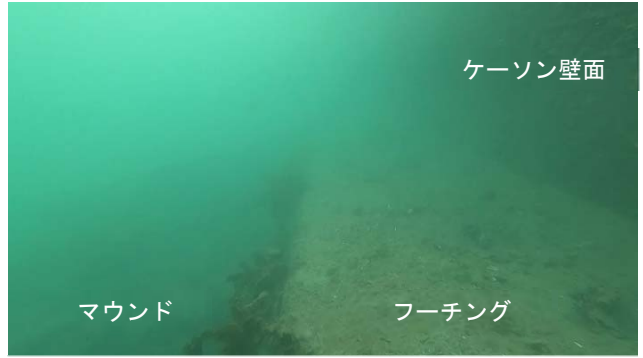


写真-4.17 ケーソン(水深 4.0m 付近)



写真-4.14 鋼矢板(土留め 水深 2.5m 付近)



写真-4.18 係留索(水深 1.0m 付近)



写真-4.15 ケーソン(水深 0.5m 付近)

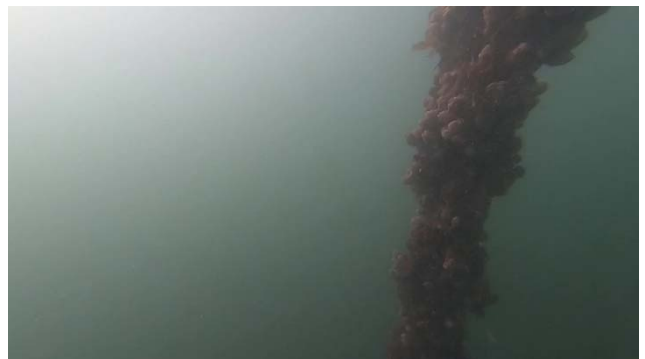


写真-4.19 係留索(水深 4.0m 付近)



写真-4.16 ケーソン(水深 2.0m 付近)



写真-4.20 係留索(水深 8.0m(海底) 付近)

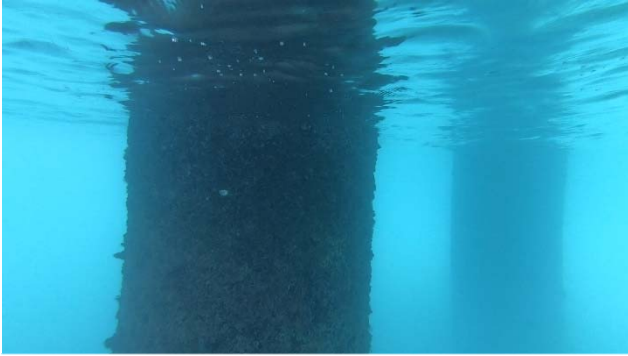


写真-4.21 鋼管杭(ドルフィン 水深 0.0m 付近)



写真-4.22 鋼管杭(ドルフィン 水深 2.6m 付近)



写真-4.23 鋼管杭(ドルフィン 水深 5.6m 付近)

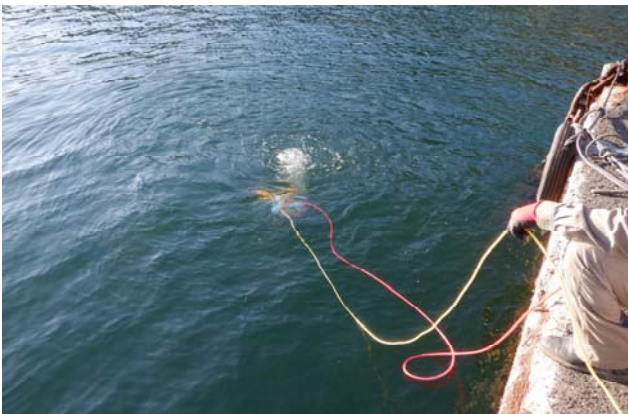


写真-4.24 エア排出状況

4.3 まとめ

本章では、港湾構造物の目視調査に必要な水中ドローンの仕様を明らかにするとともに、水中ドローンによる目視調査の適用の範囲や、円滑な調査の実施に向けて有効と考えられる調査の工夫を示した。

ここでの検討に基づいて、付録に水中ドローンによる目視調査の手順や、水中ドローンを利用するにあたって必要な準備、体制など運用方法を取りまとめた。

5. 水中ドローンを利用した陽極消耗量調査に関する検討

水中ドローンは、積載量の範囲内で様々な調査機器を搭載することが可能である。本検討では、目視調査以外での水中ドローンの利用として、水中ドローンを利用した陽極消耗量の調査について検討した。

5.1 調査方法の検討

(1) 陽極消耗量の調査方法

港湾鋼構造物の海中部の防食法として、一般にアルミニウム合金陽極（以下、陽極）による流電陽極方式の電気防食が適用されている。電気防食の防食性能を維持するためには、定期的な防食電位の点検と陽極の更新が必要であり、更新時期の予測と決定には陽極消耗量の把握が必要となる。調査方法としては、潜水士によって陽極の形状寸法を測定するか、陽極を陸上に引き上げて秤量する方法がある。

この他の調査方法として、陽極の発生電流量から陽極消耗量を算定する方法が提案されている⁷⁾。発生電流量は、写真-5.1 に示す水中クランプメーターにより測定する。潜水士が測定対象の陽極の心金にクリップを挟むことで、心金を流れている発生電流量が測定され、その値は陸上の表示器に表示される。両端の心金に対して測定を行い、その合計値を陽極の発生電流量とする。



写真-5.1 水中クランプメーター

陽極消耗量は、以下の式で算定することができる⁸⁾⁹⁾。

$$\text{陽極消耗量(kg)} = \frac{\text{陽極の発生電流量(A)} \times \text{陽極の設置時間(h)}}{\text{陽極の有効電気量(A}\cdot\text{h/kg)}}$$

陽極の発生電流量：陽極両端での測定値の合計
海中の陽極の有効電気量：2600 A・h/kg

本検討では、この調査において潜水士が担う役割を、図-5.1 に示すように、水中ドローンに代える方法を検討した。

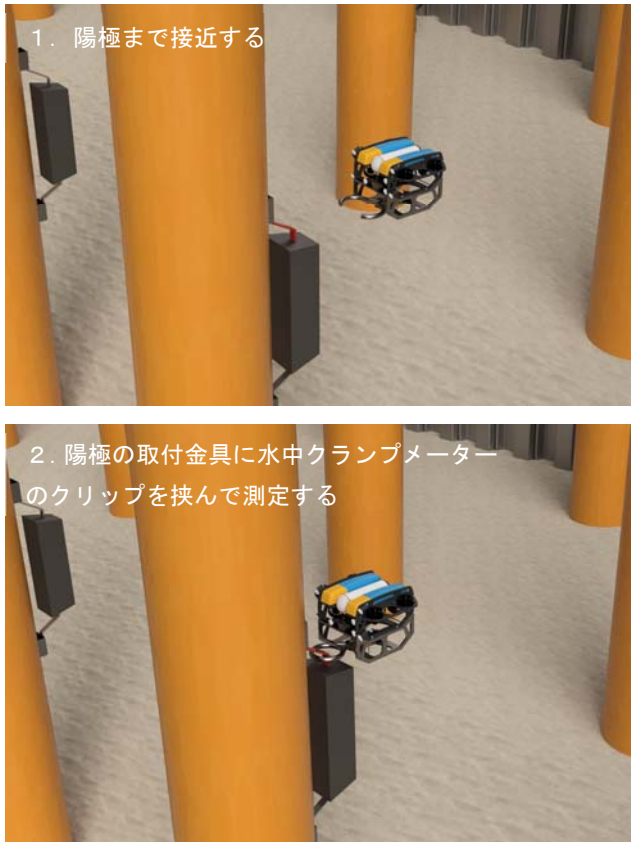


図-5.1 発生電流量の測定イメージ

(2) 水中ドローンの改良

陽極消耗量の調査に向けて、第4章で使用した水中ドローンを改良した。変更した主な仕様を表-5.1に示す。また、水中クランプメーターの仕様を表-5.2に示す。水中ドローンの機体前面下部に電流量測定用クリップ(以下、クリップ)を搭載した(写真-5.2)。クリップの操作を陸上で行えるよう、水中ドローンに可動装置を取付け、クリップが連動して開閉するように接続した。

また、陽極の視認のため、位置確認用カメラを機体カメラの下に取り付けた。さらに、作業環境に濁りが生じている場合にも陽極が確認できるよう、ソナーを機体上部に取

り付けた。ソナーの仕様を表-5.3に示す。

クリップおよび関連部品の搭載に伴う水中ドローンの重量増加による浮力の低下への対策として、鉛直スラストを追加した。

表-5.1 変更となった水中ドローンの主な仕様

寸法	L457×W575×H380
重量	約 18kg(クリップ含む)
追加装備	鉛直スラスト：2基 位置確認用カメラ：HD カメラ ソナー×1基, 電流測定用クリップ×1基

表-5.2 使用した水中クランプメーターの仕様

メーカー	The Swain Meter Company 社(米国)
製品名	Swain Meter DC Clamp-On Ammeters
機器構成	<ul style="list-style-type: none"> 電流測定用クリップ(5インチ) 名称：Swain portable DC amp clip 型番：MERTM2 電流計 名称：The Swain Auto MERTM DC Current Clamp Meter 型番：AMTM13 専用ケーブル 30m



写真-5.2 使用した水中ドローン

表-5.3 使用したソナーの仕様

メーカー	Blue Robotics 社(米国)
製品名	Ping360 Scanning Imaging Sonar
仕様	周波数：750 kHz ビーム幅：水平 2° 垂直 25° 範囲：最小 0.75m 最大 50m 範囲分解能：範囲の 0.08%

(3) 動作確認

実証実験に先立って、実験水槽に陽極の模型を設置し、水中ドローンの陽極への接近の難易と、陽極上下の心金をクリップで挟む動作を確認した。なお、動作確認で使用したクリップは、実物と同形状の模型を使用した。クリップの動作に問題ないことは確認されたが、機体カメラや位置確認用カメラによる陽極の視認が困難な場合があった。陽極上側の心金の位置は水中ドローンから見下ろすように確認できる(写真-5.3)ため、クリップで心金を挟むための適切な位置に水中ドローンを保持することは比較的容易だった。しかし、陽極下側の心金は、位置確認用カメラで真正面から位置や距離を視認しなければならない(写真-5.4)。このため、上側の心金と比較すると、水中ドローンを適切な位置に保持することに時間を要した。

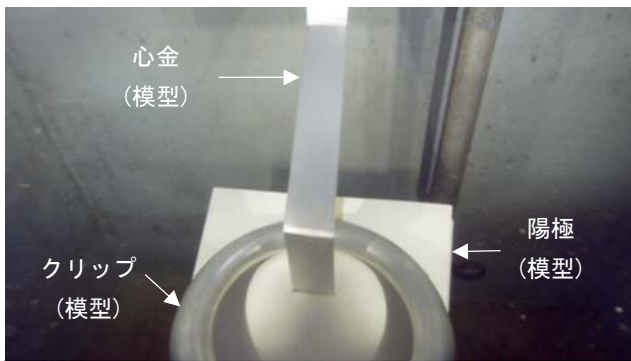


写真-5.3 動作確認の状況(陽極上側)

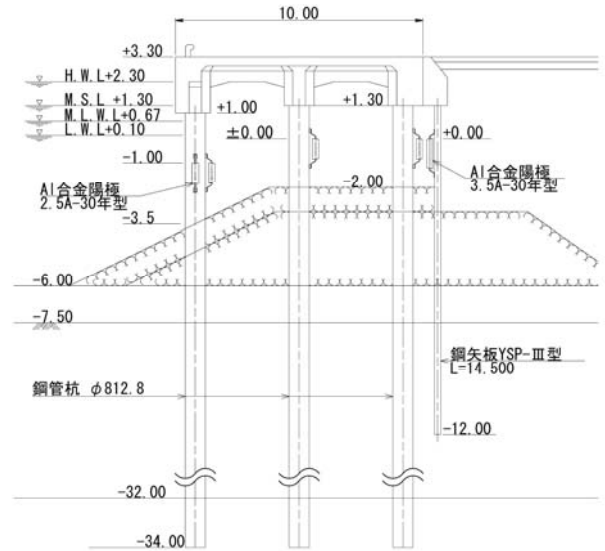


写真-5.4 動作確認の状況(陽極下側)

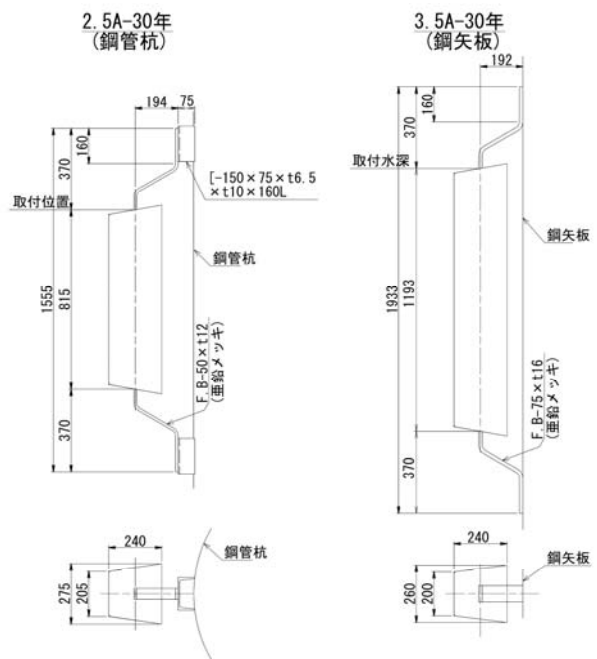
5.2 実証実験

(1) 実験概要

実証実験は、2020年10月19日～21日に、直杭式横棧橋の鋼管杭および背後土留め鋼矢板に設置された陽極を対象として実施した。陽極の配置および陽極の規格等は図-5.2のとおりであり、陽極の設置時期は、鋼矢板は2019年、鋼管杭は2020年である。調査中、水中ドローンの操作および航行に支障となる気象・海象条件ではなかった。



陽極の配置(標準断面図)



陽極の規格

図-5.2 実験対象施設

(2) 実験結果

まず、陽極の状態を観察し(写真-5.5～5.7)、その後、電流量測定を行った。なお、今回使用したソナーは、陽極や心金の位置や形状を把握できるスペックではないことが現地で明らかになったため、操作は全て機体カメラや位置確認用カメラの画像の視認により行った。

実証実験では、水中ドローンに搭載したクリップの動作に問題は生じず、潜水士による場合と同様に、陽極の発生電流量を測定することができた(写真-5.8~5.9)。陽極の発生電流量の測定値および測定値から算定した陽極消耗量を表-5.4に示す。ただし、鋼矢板の海底部付近の陽極については、水中ドローンによる土砂の巻き上げにより、下側の心金を視認できなかったため(写真-5.10)、適切な位置に水中ドローンを保持しクリップを操作することができず、電流量測定を中止した。なお、今回の実験条件下では、陽極1基の測定に要する時間は、平均で7分程度であった。

水中ドローンの航行については、目視調査時の使用とは異なる支障が生じた。水中クランプメーターの専用ケーブルは、水中ドローンのテザーケーブルと異なり水中において自重で沈むため、水中ドローンの航行に常に負荷をかける状態となっていた。このため、ケーブルの沈下対策として、テザーケーブルと束ねた上で、束ねたケーブルを陸上から延ばした補助棒で吊り、水中ドローンへの負荷を軽減させた。この工夫を施しても、目視調査時の使用と比較すると、水中ドローンのスラストの出力を上げる必要があった。円滑な調査の実施のためには、水中クランプメーター専用ケーブルに浮力材を取付ける必要がある。

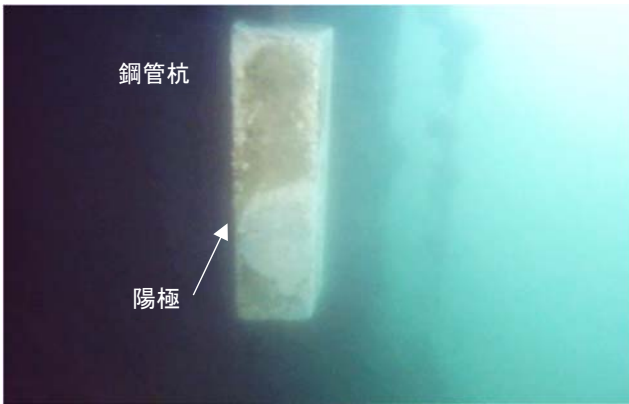


写真-5.5 陽極(鋼管杭)の設置状態(機体カメラ)

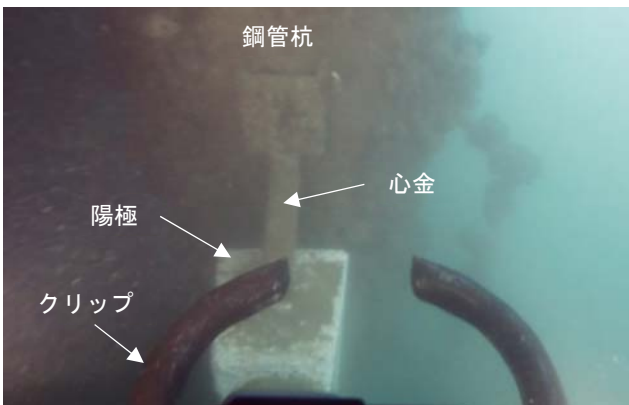


写真-5.6 陽極上側(鋼管杭)の設置状態(機体カメラ)



写真-5.7 陽極下側(鋼管杭)の設置状態
(位置確認用カメラ)

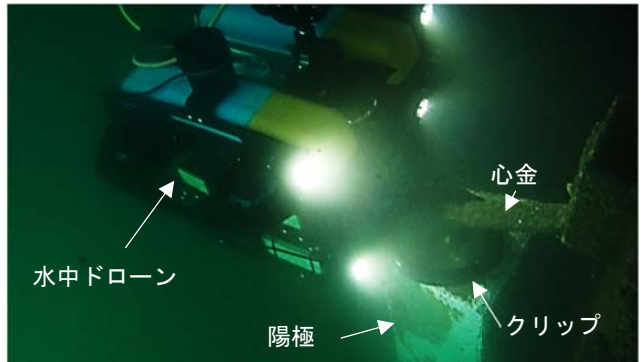


写真-5.8 発生電流量の測定状況(鋼管杭陽極上側)



写真-5.9 発生電流量の測定状況(鋼管杭陽極上側)

表-5.4 発生電流量の測定値および陽極消耗量の算定結果

測定箇所	発生電流量(A)			陽極消耗量(kg)
	上側	下側	合計	
鋼管杭 1	0.290	0.435	0.725	0.20
鋼管杭 2	0.206	0.283	0.489	0.14
鋼管杭 3-1	0.266	0.317	0.583	0.16
鋼管杭 3-2	0.269	0.394	0.663	0.18
鋼管杭 4	0.434	0.273	0.707	0.20
鋼管杭 5	0.162	0.279	0.441	0.12
鋼管杭 6	0.004	0.102	0.106	0.03
鋼矢板	0.431	—	—	—

※測定時点において、鋼管杭の陽極の設置期間は30日のため、設置時間を720時間として陽極消耗量を算定した。



写真-5.10 発生電流量の測定状況(鋼矢板陽極下側)

5.3 まとめと今後の展望

本章では、目視調査以外での水中ドローンの利用の検討として、水中ドローンによる陽極消耗量の調査について検討した。水中ドローンを利用することで、陽極の目視調査とあわせて陽極の発生電流量を測定でき、従来の潜水士による方法に代えることが可能であることが確認された。ただし、水中での著しい濁りの発生や、スラストによる土砂の巻き上げが懸念される海底部付近を調査する場合は、陽極の視認が困難であるため、本手法の適用は困難である。また、水中クランプメーター専用ケーブルの沈下についてもより効果的な対策が必要であるほか、現状の調査効率は水中ドローンの操作の熟練度による部分が大きいことも認識された。

濁りや海底部付近への対応としては、陽極や心金の形状を把握できるスペックのソナーを水中ドローンに搭載し、ソナー画像の視認により、水中ドローンを適切な位置に保持しクリップを操作する方法が考えられる。また、ケーブル沈下は、浮力材の付与により軽減される可能性があるほか、予め調査対象の構造物にケーブルを取り付ける中継器具を設置しておくことも有効であろう。これらの課題の解決は、水中ドローンによる港湾構造物の調査の完全無人化にも繋がるものであると期待する。

近年、AUVの展開や回収、監視を、AUVと水中音響通信により通信する中継器に担当させることで、海底探査の無人化を実現するシステムが開発されている¹⁰⁾。例えば、これを参考に、調査対象部材に予め音響や光通信等の発信装置を設置しておき、自動制御可能なROVと発信装置を照合することにより、ROVを自動で調査対象に接近させることも可能になると考えられる。ROV等のロボットを利用した構造物調査の完全無人化を早期に実現するためには、ロボット自体の開発や機能向上に頼るだけでなく、構造物側でもロボットが動作しやすいような工夫を施しておくことも重要と考えられる。

6. まとめ

本検討では、水中ドローンを利用した港湾構造物の目視調査について、港湾構造物の目視調査に必要な水中ドローンの仕様を明らかにするとともに、水中ドローンによる目視調査の適用の範囲や、円滑な調査の実施に向けて有効と考えられる調査の工夫を示した。

また、目視調査以外での水中ドローンの利用として、水中ドローンを利用した陽極消耗量の調査方法を提案した。

7. あとがき

近年、潜水士は高齢化による離職率が増加する中で、これを補い得る若手後継者の確保が困難な状況にある。そのため、潜水作業の省力化や効率化のため水中ロボット等の利用に関する検討が進められている¹¹⁾。また、国の取組みとして、インフラ維持管理の効率化のため、水中点検ロボット等の支援技術の利用が検討されている¹²⁾。

現時点において、水中ドローンを含めたロボットの性能は、潜水士と比較すると万能ではない。不適切なロボットの利用は、結果として非効率な作業を招く。しかし、ロボットの性能を正確に把握し、作業項目に応じて適切にロボットを利用すれば、安全で効率的な作業の実施が可能となる。ただし、現状では、必要に応じて従来方法も併用するなどの柔軟な対応が必要である。

本検討が、港湾構造物の安全で効率的な調査の実現の一助となれば幸いである。

(2020年11月2日受付)

謝辞

本検討の一部は、国土交通省四国地方整備局からの受託研究およびジビル調査設計株式会社との共同研究として実施したものである。また、本検討の実施にあたり、内閣府ならびに港湾管理者の方々から多大なご協力をいただきました。そして、メタロボティクスグループ田中敏成氏、喜多司氏、構造研究グループ田中豊氏、依頼研修員黒木賢一氏、平川恭奨氏(株式会社日本港湾コンサルタント)にご助言や実験にご協力いただきました。ここに記し、深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省総合政策局公共事業企画調整課：水中部点検におけるロボット活用マニュアル(案)【ダム堤体編】，2019.2.
- 2) 国土交通省総合政策局公共事業企画調整課：水中部点検におけるロボット活用マニュアル(案)【ダム放流設備編】，2019.2.
- 3) 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：海岸保全施設維持管理マニュアル，2020.6.
- 4) 国土交通省港湾局：港湾の施設の点検診断ガイドライン，第1部 総論，pp.6，2020.3.
- 5) 一般社団法人日本潜水協会：潜水作業安全施工指針(改訂版)，pp.64，2015.4.
- 6) 日本海洋学会：海洋観測ガイドライン，Vol.2 Chap.5，2018.4.
- 7) 財団法人沿岸技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(2009年版)，pp.196，2009.11.
- 8) 小林浩之，山路徹，審良善和，濱田秀則，志茂香:港湾鋼構造物に適用した電気防食システムの維持管理に関する研究，材料と環境 2013 講演集，pp.113-116，2013.
- 9) 小林浩之，山路徹，与那嶺一秀，審良善和，濱田秀則：港湾鋼構造物に適用した電気防食システムの維持管理に関する研究(第2報)，第60回材料と環境討論会講演集，pp.275-278，2013.
- 10) 各務均：無人海底探査システムの開発と運用，三井E&S 技報，No.3，pp.1-6，2020.
- 11) 一般社団法人日本潜水協会：潜水土後継者育成・技術伝承基本方針，pp.6，2017.7.
- 12) 内閣府：新技術・データを活用したインフラ維持管理の効率化とその横展開について(国土交通省)，第13回国と地方のシステムワーキング・グループ,2018.5,
<https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/special/reform/wg6/180510/agenda.html>,
2020.9.28 閲覧

付録 港湾構造物の目視調査における水中ドローンの運用方法(案)

港湾構造物の目視調査における 水中ドローンの運用方法（案）

令和2年11月

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

港湾空港技術研究所

目次

第1章 総論	1
1.1 本資料の目的.....	1
1.2 適用の範囲.....	1
第2章 水中ドローンによる目視調査.....	2
2.1 基本的な流れ.....	2
2.2 調査作業計画の策定.....	3
2.3 目視調査の実施.....	5
2.4 取得した画像データ整理・保存.....	6
参考1 水中ドローンの仕様.....	7
参考2 記録シート	8
参考3 水中ドローンの運用状況.....	10

第1章 総論

1.1 本資料の目的

本資料は、水中ドローンを利用した港湾構造物の目視調査の計画、実施および記録の方法について整理するものである。

【解説】

港湾構造物の部材等の多くは海中部に存在するため、部材や海底地盤の洗掘・堆積等の目視や鋼材の肉厚測定等、大部分の調査が潜水士により行われる。しかし、その実施は波浪や潮汐等の海象状況、船舶の係留や荷役作業等の施設の利用状況に左右される制約された環境下にあるため、全ての部材等に対して調査することは困難である。このため、安全で効率的な調査技術の開発が求められている。

本資料は、上記の対応の一案として、水中ドローンを利用した目視調査の運用方法について取りまとめたものである。

1.2 適用の範囲

- (1) 本資料は、港湾構造物の調査のうち、水中ドローンによる目視調査に適用する。
- (2) 本資料を適用する部材は、以下とする。
 - ・直杭式横棧橋：鋼管杭
 - ・岸壁・護岸：鋼矢板、ケーソン
 - ・ドルフィン：鋼管杭

【解説】

(1)および(2)について

本資料は、水中ドローンにより港湾構造物の外観状態の観察を実施する技術者が利用することを想定してとりまとめたものである。

一般に、鋼管杭やケーソン等の海中にある部材には海生生物等が多数付着しているため、港湾の施設の点検診断ガイドライン（国土交通省港湾局、平成26年7月（令和2年3月一部変更）に定義される‘目視’を実施するには付着物の除去が必要となる。水中ドローンを利用して付着物を除去したうえで‘目視’することは困難であり、部材の外観状態を観察するのみに留まるものと考えられる。しかし、水中ドローンにより対象部材全体の外観をおおよそ把握することができれば、潜水士により付着物の除去を伴う‘目視’を行う部材の選定や、鋼材の肉厚測定等の詳細調査を実施する箇所を選定することができる。ただし、水中に濁りや浮遊物が発生している状況下においては、水中ドローンに搭載されている光学カメラでは部材の外観形状も捉えることができない場合があることに留意しなければならない。

本資料は、Blue Robotics社製のBlueROV2（参考1）にて実施した実海域実験の成果に基づいたものであり、護岸のケーソン側壁、鋼矢板、および直杭式横棧橋及びドルフィンの鋼管杭の外観状態の観察を対象としている。BlueROV2以外の機器の利用や、類似の施設や部材の観察への本資料の適用については、実施者が判断するものとする。

なお、本資料では、港湾構造物の「外観状態の観察」を便宜的に「目視調査」と称する。

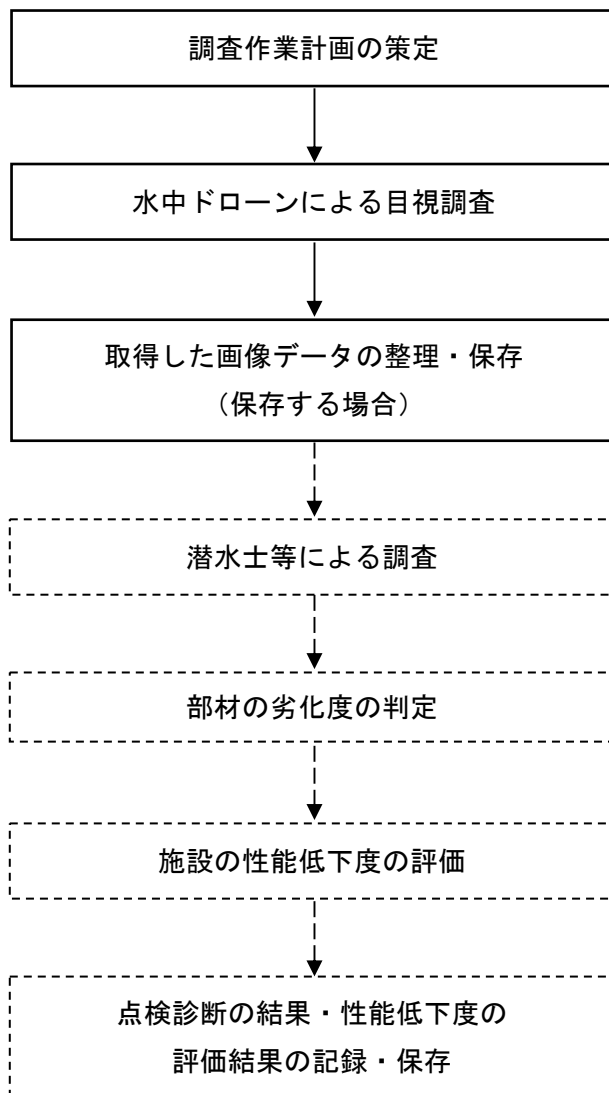
第2章 水中ドローンによる目視調査

2.1 基本的な流れ

水中ドローンによる目視調査は、以下に示す流れに従って行うことを標準とする。

【解説】

水中ドローンによる目視調査は、適切な手順で安全に実施されなければならない。基本的な流れを以下に示す。なお、本資料では「調査作業計画の策定」と「水中ドローンによる目視調査」、「取得した画像データの整理・保存」を対象としている。



2. 2 調査作業計画の策定

目視調査の対象とする構造物の設置環境、形状、施設の利用状況、周囲の海象条件等の水中部・気中の現地条件、使用する水中ドローンの性能等を考慮して、調査作業計画を策定する。

【解説】

港湾構造物およびその周辺海域は、施設の設置状況に応じて潮流や波浪等の条件が大きく異なるほか、荷役作業が行われていたり船舶が航行している環境にある。そのため、調査対象施設の海象条件や利用状況を勘案して、目視調査に必要な資機材等を準備するとともに、適切な手順等を予め計画した上で調査を実施する必要がある。

調査作業計画の策定に当たっての主な検討項目は、以下のとおりである。

①調査対象施設の資料収集

水中ドローンの適用の可否及び目視調査の作業計画の検討に必要な調査対象施設の設置環境、形状、周辺海域の海象条件等の資料を収集する。必要となる主な資料は以下のとおりである。

- ・標準断面図、全体平面図（CAD データが望ましい）
- ・過年度の点検診断等の調査結果
- ・調査対象施設の潮位、波高、流速データ
- ・調査対象施設水域の透明度に関するデータ
- ・施設利用船舶のタイムスケジュール

②現場踏査

収集資料の正否確認のため、必要に応じて行う。現場踏査を実施することで、収集資料に記載のない水中ドローンの操作に支障となる部材や船舶の係留状況等が判明する場合がある。主な確認項目は以下のとおりであり、いずれも陸上から目視確認することを基本とする。

- ・係留ロープの有無（スラストに絡まる恐れがあるため）
- ・港湾構造物の海洋生物等の付着物の有無、程度（付着物の程度によって目視調査できない恐れがあるため。また、ケーブルが付着物に引っ掛かる恐れがあるため）
- ・調査対象施設水域の透明度（画像取得に影響を及ぼす恐れがあるため）

③画像取得形式の検討

画像データの取得方法は、一般的に動画もしくは静止画となる。動画の場合、満遍なくデータを取得することが可能であるが、非常に大きいデータ量になる。また、報告等のための動画編集及び静止画の抽出を行った場合、画質が低下する。静止画の場合、動画から抽出した静止画より高画質な画像を得ることが可能である。しかし、一定の時間間隔で静止画撮影が可能な機能を有するカメラを使用する必要がある。そのため、画像取得形式は、画像データの使用用途やデータ保管方法などを踏まえた検討が必要である。

④水中ドローンの性能検討

①～③に基づき、水中ドローンに求める性能を整理したうえで、使用する機器を選定する。主な検討項目は以下のとおりである。

- ・画像取得性能（カメラの解像度、画角など）及びカメラ台数
- ・運動性能（波浪及び流速に対する性能、垂直潜航・浮上や水平方向移動の可否など）
- ・稼働時間

⑤ケーブルの引っかかり対策

一般的に、水中ドローンはケーブルを介して操作や画像等のデータを陸上へ送信するため、有線構造の機種が多い。ケーブルは付着物に引っかかりやすいため、調査対象構造物に多数の付着物がある場合は、予め潜水士を配備するなどの引っかかり対策を検討しておくことが望ましい。なお、検討の可否は、調査実施者が判断する。

⑥画像取得時刻の記録の検討

現状で市販されている多くの水中ドローンは GNSS 等を受信できないため、画像データ（動画や静止画）に位置情報が付与されない。港湾構造物の場合、ケーソンや鋼矢板、鋼管杭など同形状の部材が連続して構成されていることが多いため、画像データのみから部材の位置を推定することは困難である。部材の位置の推定が必要な場合は、調査時に各部材の画像取得開始時刻と変化点の時刻を記録するとよい（参考 2 を参照）。変化点は、水中ドローンが構造物に沿って水平に移動する場合は画像を取得している水深を変える時や目地等の構造物の境界が考えられる。また、水中ドローンが構造物に沿って鉛直に移動する場合は水面や海底面到達時が考えられる。

⑦関係機関への諸手続き

作業許可申請等の点検作業に必要な諸手続きを行う。なお、水中ドローンを運用する港湾構造物の付着物の程度等によってはケーブルの引っ掛かりなどの対応のため潜水士による潜水作業を実施する可能性がある。そのため、諸手続き時には潜水作業を想定した調整を行うことが望ましい。また、関係機関の担当者の理解を得るためにも、水中ドローンの使用目的や調査時の安全確保に関する配慮事項等について説明するとよい。

⑧施設利用者等との事前調整

円滑な調査作業の実施及び荷役作業等に支障を与えないため、施設利用者等と事前調整を行う。また、施設利用者等の理解を得るためにも、水中ドローンの使用目的や施設利用への影響（準備や調査に必要な陸上部分の使用範囲、使用日数、1日当たりの作業時間）等を説明するとよい。

⑨調査作業計画書の作成

上記①～⑧を踏まえて調査作業の計画書を作成する。なお、調査作業に必要な労務及び資機材、調査作業期間を設定するための水中ドローンの作業能力は以下を参考にすることができる。また、作業環境に応じて周辺監視員等の労務や安全設備等の資機材を適宜追加する。安全対策や環境対策は関係法令、関係機関及び施設利用者等の意見を踏まえ適切に計画するものとする。

I) 点検作業のための労務及び資機材 (1日当り)

名称	形状寸法	単位	数量	備考
交通車	ライトバン 2L	台	1	
作業責任者	記録兼監視	人	1	測量技師相当
操縦者	水中ドローンの操作	人	1	測量技師補相当
上廻り	ケーブルの取り扱い	人	1	普通作業員相当
水中ドローン		基	1	操作用 PC 等含む

※ケーブルの引っかかり対策の要否に応じて普通作業員を潜水士に代えることができる

II) 作業能力 (1日当り)

項目	作業能力	【参考】作業能力の算定を実施した施設	【参考】水中ドローンの操作方向
ケーソン	2,160 m ² /日	A 港ケーソン式護岸	法線平行方向
鋼管杭	648m/日	A 港直杭式横栈橋	法線直行方向
鋼矢板	1,728 m ² /日	A 港直杭式横栈橋 (護岸)	法線平行方向
係留索	1,080m/日	A 港浮栈橋	係留索に沿う
鋼管杭	864m/日	B 港ドルフィン	法線直行方向

※作業能力は1日6時間当たりの数値、1日当りの稼働時間は仮定値

III) 作業能力算定時の海象条件

項目	最大値		備考
	A 港	B 港	
波浪	0.1m	0.2m	A 港：波高計 B 港：目測
流速	1.0~4.5cm/s	未測定	A 港：流速計
風速	5m/s	6m/s	A 港・B 港：最大風速

2. 3 目視調査の実施

調査作業計画に従って、目視調査を実施することを基本とする。

【解説】

調査では、調査作業計画段階では判明しなかった水中ドローンが進入できない狭隘な箇所や図面に明示されていない部材、水面下の沈廃物の存在や、機器の不具合など、調査の実施に支障を来す事象が生じることがある。このため、調査の実施に当たっては、適宜、調査作業計画を変更し、潜水士による調査も併用するなどして対応しなければならない場合がある。

2. 4 取得した画像データ整理・保存

取得した画像データを保存する場合は、適切な方法を設定するものとする。

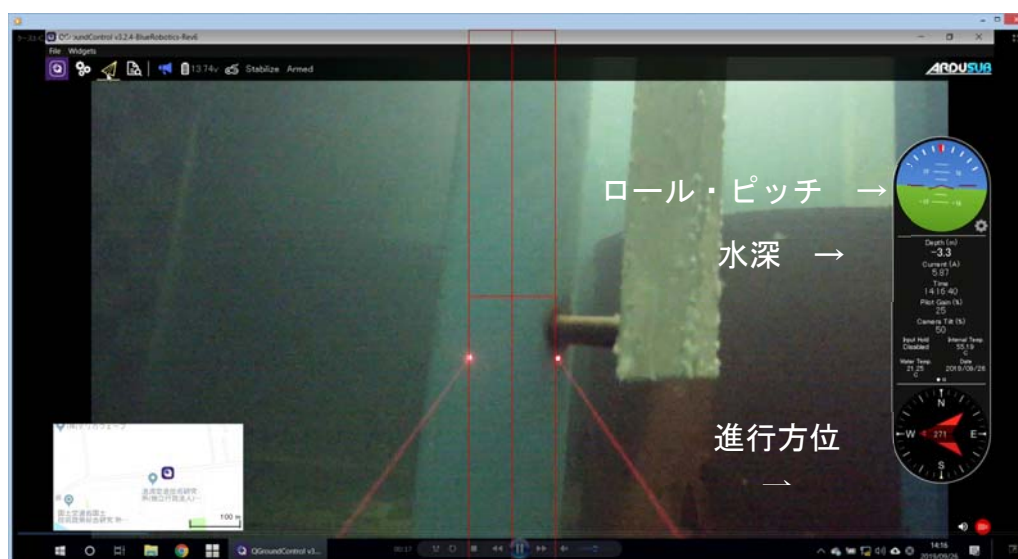
【解 説】

水中ドローンにより取得した画像データを蓄積することで、部材の外観の経時変化を把握できる。そのため、取得した画像データを保存する場合は、当該施設を供用している期間、画像データを保存するとよい。ただし、水中ドローンは1回の点検で数GB程度の画像データを取得する。一般的に港湾の施設は50年以上の長期にわたって供用されるためデータ量が膨大になることが想定される。供用期間中に管理担当者の交代や維持管理体制の変更も生じるため、確実に画像データが引き継がれるよう保管方法及び保管媒体を適切に設定する必要がある。

参考1 水中ドローンの仕様



項目	仕様
寸法	L457×W338×H254
重量	約 10kg
スラスタ	水平×4基（菱型配置） 垂直×2基
最大速度	2kts（3.7km/時）
LED ライト	1500ルーメン/基×4基
光学カメラ	機体カメラ：フルHDカメラ
センサ	水圧・深度センサ 3軸ジャイロ 3軸加速度 3軸電子コンパス 内部気圧計 電流・電圧監視 浸水水濡れ監視
追加装備	赤色レーザーマーカー×4基 撮影カメラ：4Kカメラ（GoPro®）



操作画面 (PC)

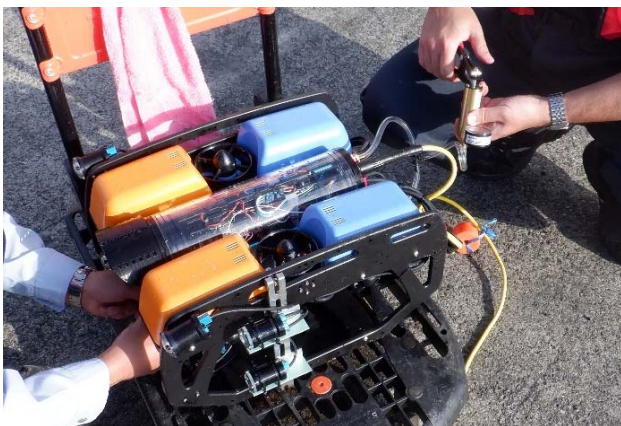
【動画で取得する場合】



【静止画で取得する場合】



参考3 水中ドローンの運用状況



参考1 水中ドローン準備状況



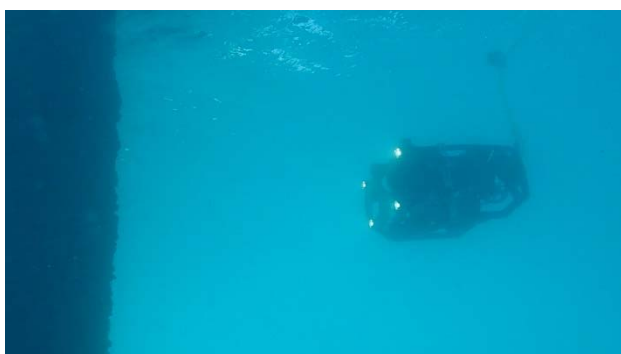
参考2 透明度測定状況



参考3 水中ドローンの投入



参考4 水中ドローンの潜航



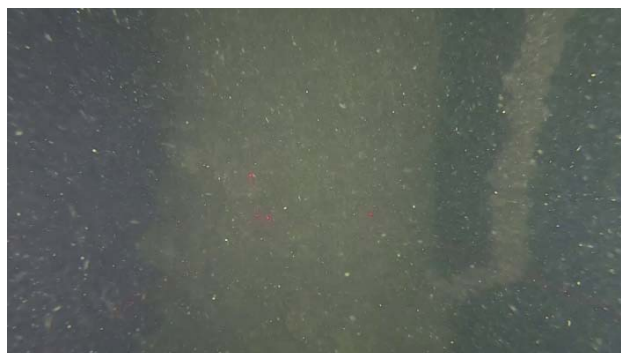
参考5 水中ドローンによる部材の画像取得



参考6 ケーソン壁面の画像



参考7 濁り発生時の鋼管杭の画像



参考8 浮遊物発生時の鋼管杭の画像

港湾空港技術研究所資料 No.1380

2020. 12

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2020) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。