

水中ドローンを活用した港湾の施設における 鋼構造物の点検マニュアル(案)



令和8年3月

国土交通省 四国地方整備局
高松港湾空港技術調査事務所

目次

1 本マニュアルの目的及び適用範囲	1
1.1 目的	1
1.2 適用範囲	3
1.3 用語の定義	4
2 法的な考慮事項	5
3 水中ドローンの選定及び関連機材の準備	6
3.1 水中ドローンの選定	6
3.2 関連機材	11
3.3 操縦者の任命	12
4 事前準備	13
5 現地作業	16
6 作業効率	20
7 その他（水中ドローン関連技術、今後の期待される関連技術）	20
7.1 画像処理	20
7.3 肉厚測定	24
7.4 その他	25

【資料編】

- ・高松港での水中ドローンによる調査の実証試験結果
- ・代表的な水中ロボの選定について
- ・その他の技術

1 本マニュアルの目的及び適用範囲

1.1 目的

本マニュアルは、鋼構造の一般的な港湾施設の水中部の状態を安全・効率的かつ潜水士によらずに点検する手段の一つである水中ドローンを用いた調査に関する手順及び留意点等を取りまとめたものである。ここで、マニュアル作成にあたり、高松港で既存栈橋を対象とした実証実験を行っており、そこで得ることができた知見を併せて記載した。

なお、本マニュアル作成にあたり、点検及び診断に関する主な基準については、従来通り、「港湾の施設の点検診断ガイドライン（平成26年7月、令和3年3月一部変更）、国土交通省港湾局」や「港湾の施設の維持管理計画策定ガイドライン（平成27年4月、令和5年3月一部変更）、国土交通省港湾局」に準ずるものとし、本マニュアルにより上記のガイドラインを変更するものではない。

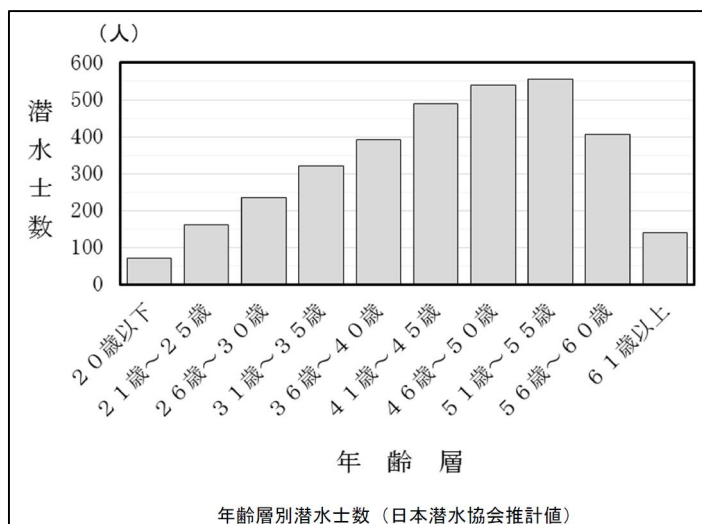
※垂直面の構造物は、「光学機器を活用した水産基盤施設の点検の手引き～水中ドローンと垂下式カメラの活用～（令和4年3月）」も参考とすることができる。

【解説】

(1) 本技術の導入の背景

① 建設業界の技術者不足及び老朽化インフラの増加

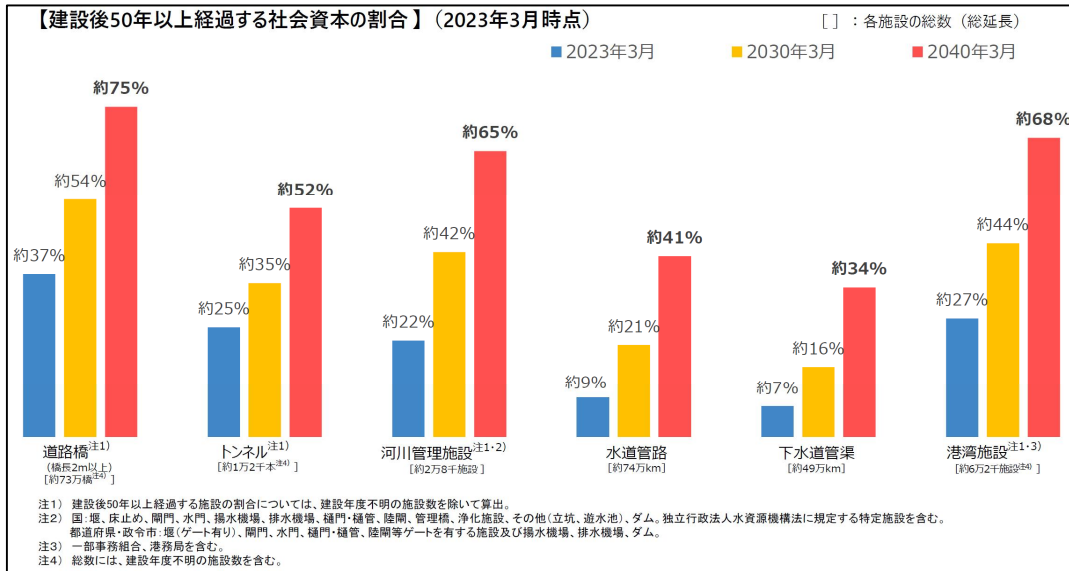
今後、建設後50年以上経過する施設が増加する中で、老朽化した施設は、詳細点検診断を行うことが必要となるため、水中部の点検需要は高まると考えられる。港湾施設の点検を、港湾施設の構造を理解した上で実施することができる潜水士の不足・高齢化により、業務の円滑な遂行が困難になりつつある。



※潜水士後継者育成・技術伝承基本方針 平成29年9月 一般社団法人 日本潜水協会より抜粋

図 1-1 年齢別潜水士数

現存するインフラの多くは高度経済成長期に整備されていることから、今後、供用期間を迎えるインフラが急激に増加することが想定される。これらのインフラのうち、港湾施設の水中部目視点検は、潜水士が施設水中部の劣化状況を目視により把握する方法が一般的であるが、潜水士の不足に加えて、地震等災害発生後の臨時点検の際には安全上確保の観点より、栈橋下部等に潜水士が入ることが困難となり、水中部の点検が困難となるケースも考えられる。



出典：国土交通省ホームページ（https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/_pdf/50year_percentage.pdf）

https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html

図 1-2 建設後 50 年以上経過する社会資本の割合（2023.03 算出）

② 社会経済情勢の変化

近年、デジタル技術の普及・拡大により、ロボティクス技術の革新が急速に進んでおり、これまでの潜水士を前提とした業務そのものが効率化し、さらに抜本的に変革する「デジタル・トランスフォーメーション（DX：Digital Transformation）」が様々な業界・業種で本格的に進展しており、リモート化やデジタル化、自動化、見える化等が推進されている。

また、近年の AI の進化・普及に伴い、画像からの変状検出等、港湾の維持管理での活用が期待されている。

③ インフラ分野の DX の推進

インフラ分野においてもデジタル技術を活用して、社会資本や公共サービスを変革すると共に、業務そのものや組織、プロセス、建設業や国土交通省の文化・風土や働き方を変革し、インフラへの国民理解を促進すると共に、安全・安心で豊かな生活を実現するため、インフラ分野の DX が推進されている。インフラ分野の DX のうち、i-Construction の推進を通じて、デジタル技術の積極的な活用が進められている。

このうち、水中ドローン（遠隔操作が可能な小型の無人潜水機）を活用することで遠隔操作により安全に水中部の状況把握が可能となること、人手不足の中、潜水士によらずに従来の点検方法に対して省人化、点検作業の効率化等が期待される。

1.2 適用範囲

本マニュアルの適用範囲は、鋼構造の一般的な港湾施設（鋼矢板式、鋼管矢板式、栈橋式等）の水中部に発生する損傷劣化の確認を目的とした付着物のケレンを伴わない詳細定期点検診断または臨時点検診断の水中目視点検とする。

【解説】

鋼構造の港湾施設の水中部には、鋼材の腐食・開孔・亀裂・損傷等、被覆防食工には、錆やふくれ・塗装のはがれ等の被覆の劣化、電気防食工には、陽極の脱落、全消耗、ぶら下がり、海底地盤の土砂等の堆積等が発生する可能性があり、それらの損傷・劣化が進行すると港湾施設の機能低下につながる恐れがある。

従来、詳細定期点検診断等において潜水士による目視点検を行ってきたが、潜水士によらない安全かつ効率的な方法として、水中ドローンを用いた遠隔操作する方法が試行されている。

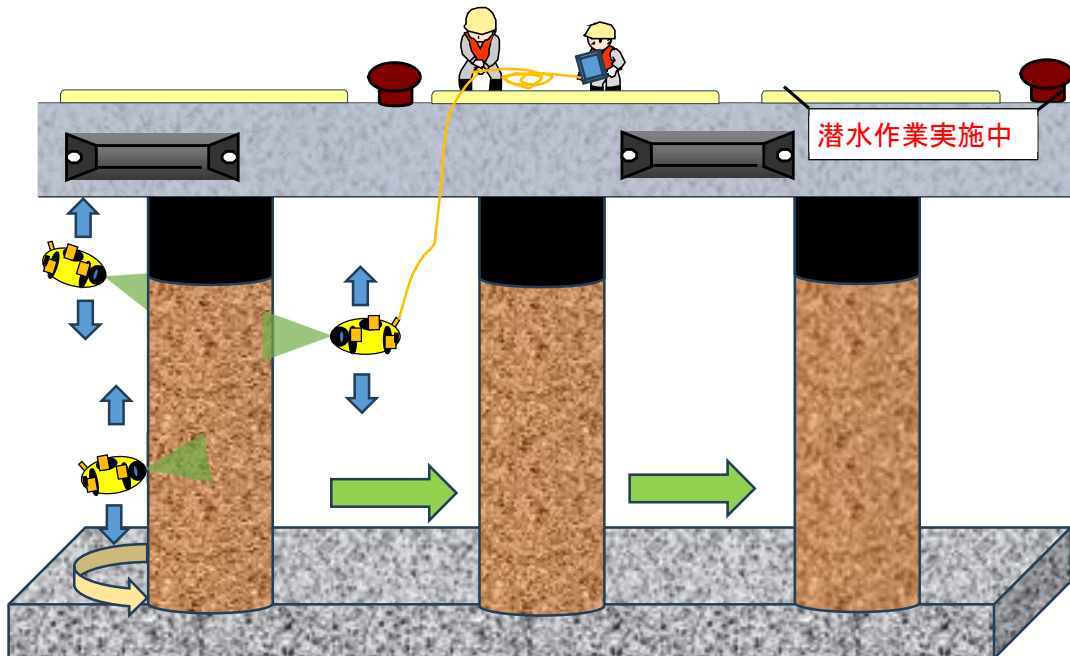


図 1-3 水中ドローンを用いた栈橋式構造の点検診断実施イメージ

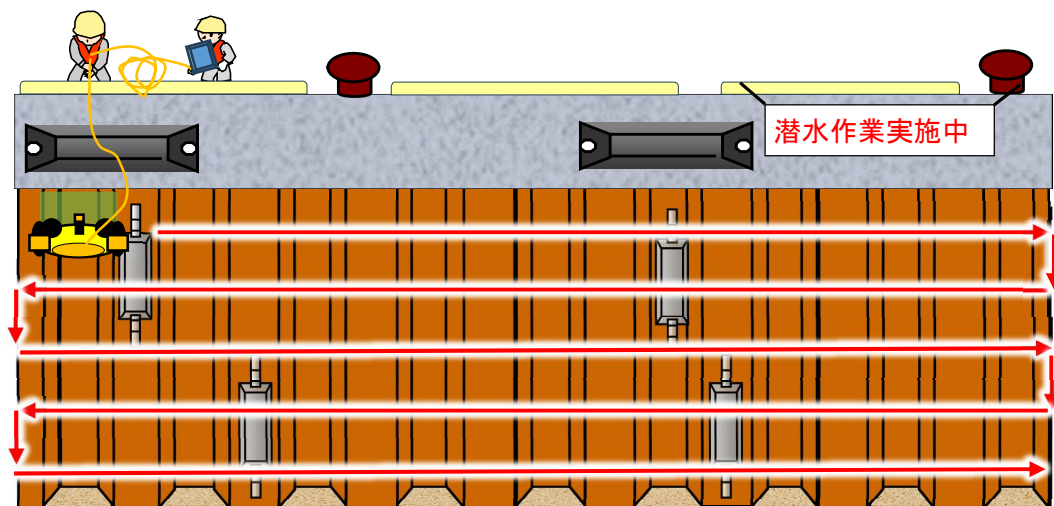


図 1-4 水中ドローンを用いた鋼矢板式構造の点検診断実施イメージ

1.3 用語の定義

本マニュアルで使用している主な用語の定義を以下に示す。

表 1-1 用語の定義

用語	定義
水中ドローン	遠隔操作型無人潜水機 ROV (Remotely Operated Vehicle)」の一種で、陸上と潜水機をケーブルで接続して遠隔操作が可能な無人潜水機で水深数十メートルまでの比較的浅い海域で用いられる機種
DX	Digital Transformation の略称。進化したデジタル技術を浸透させることで、人々の生活をより良いものへ変革すること。
i-Construction	「ICT の全面的な活用 (ICT 土工)」等の施策を建設現場に導入することによって、建設生産システム全体の生産性向上を図り、もって魅力ある建設現場を目指す取組。
SfM	Structure from Motion の略称。各写真の特徴点抽出と写真間の特徴点の対応付けを行い、因子分解法によりカメラ位置とパラメータの算出を行う。
MVS	Multi-View Stereo の略称。SfM で推定した画像特徴点と複数のステレオペア画像から高密度点群モデルを作成する技術
点群データ	空間座標 (x,y,z) と色情報 (R,G,B) を持った点の情報を集めたデータ
解像度	画素の細かさを表す尺度。ピクセル数で示す。(例 ; 1920×1080pix)
港則法	港内における船舶交通の安全と港内の整頓を図ることを目的とした法律であり、主務官庁は海上保安庁。港則法が適用される港は港則法第 2 条に基づく政令によって定められている。
海上交通安全法	船舶交通がふくそうする海域における船舶交通について、特別の交通方法を定めるとともに、その危険を防止するための規制を行なうことにより、船舶交通の安全を図ることを目的とした法律であり、主務官庁は海上保安庁。海上交通安全法が適用される海域は海上交通安全法第 1 条に基づく政令によって定められている。

2 法的な考慮事項

水中ドローンの港内における使用にあたっては、港則法、海上交通安全法に基づく作業許可申請、作業許可届出等が必要となる。また、港湾管理者との調整が必要となる場合がある。

【解説】

(1) 港則法

政令で指定された特定港や指定港に適用される。適用港は、日本国内に 500 港程度あり、海図に港界（ハーバーリミット）ととして記載されている。港内における海上作業を行う場合、第 31 条に基づき作業許可申請が必要となる場合があるため、作業実施の際は、管轄の海上保安部に問い合わせを行う必要がある。

(2) 海上交通安全法

この法律は、東京湾、伊勢湾、瀬戸内海の 3 海域における船舶交通の安全を図るために制定された法律で、適用海域において作業を行う場合は、第 40, 41 条に基づき所轄の海上保安（監）部長を経由して、管区海上保安本部長に届出を行う必要がある可能性があるため、管轄の海上保安部に問い合わせを行う必要がある。

(3) 港湾管理者、施設利用者

港湾施設内で作業を行う場合は、港湾管理者、施設利用者への周知、届出、申請が必要となる場合がある。作業実施の際は、港湾管理者に施設利用の問い合わせを行い、届出、申請の必要の有無の確認と、施設利用者（周知先）について確認を行うこと。

3 水中ドローンの選定及び関連機材の準備

3.1 水中ドローンの選定

使用する水中ドローンは、潮流等の流況に対応可能な機動性や、ケーブルの引っ掛かり等の障害を回避できるような操作性、変状を確認可能なカメラやライトの機能、別途計測センサーを搭載する場合は、ペイロード性能等を考慮して選定する。

※機種を選定については、巻末の資料を参照

【解説】

水中ドローンが潜航する場所は濁り等により、視界不良となりやすいことから、鋼構造物に接近する必要があること、水流に対して自由に移動できることが必要であることに留意し、以下の点に考慮して選定する。

- ・カメラの解像度が十分で、変状を鮮明に確認できること
- ・対象構造物の方向へカメラが向けるように水中ドローンの方向転換が容易であること
- ・対象構造物との距離を一定に保つ機能、もしくは障害物と接触しないように細かな制御が可能な機能を有すること
- ・確認した場所が特定できるように、水深や方向を確認する機能を有すること
- ・光量が少ない箇所でも破損等の変状が検出可能な撮影性能もしくは十分な光源を有すること

【参考】実証実験に用いた機体

実証実験においては以下に示す機体を使用した。使用機体は比較的小型かつ全方向移動が可能（8基のスラスターを搭載）であり、バッテリー交換が容易に行えることから、連続的な運用が可能である。

表 3-1 実証実験で使用した機体

水中ドローン名称	CHASING M2S
機体	
重量	約 4.5kg
外形寸法	380×267×165mm
最大水深	100m
最大速度	1.5m/s (3kn)
駆動時間	2～4 時間 (バッテリーは交換可能)
カメラ解像度	12MP (動画 4K)
ライト光量	4000 ルーメン
オプション	レーザースケイラー

また、水中ドローンに搭載するカメラは、「港湾の施設の点検診断ガイドライン（平成 26 年 7 月、令和 3 年 3 月一部変更）」における、鋼構造物（矢板式係船岸・直杭式横棧橋等）の点検診断項目や劣化度の判定が可能な解像度で撮影する必要がある。

表 3-2(1) 詳細定期点検診断様式（点検診断の項目及び劣化度の判定基準：矢板式係船岸 1/2）

対象施設	点検診断項目の分類	点検診断の項目		点検方法	劣化度の判定基準
矢板式係船岸	I 類	エプロン	吸出し、空洞化	電磁波レーダ 削孔による目視確認 等	<input type="checkbox"/> 吸い出しが生じている。もしくは、その可能性がある(空洞化が認められる)。 a <input type="checkbox"/> 防砂板が破損している。 <input type="checkbox"/> 防砂シートが破損している可能性がある。 b <input type="checkbox"/> 空洞が生じている可能性がある。 c ---- d <input type="checkbox"/> 吸い出しは生じていない(空洞化が認められない)。
		鋼矢板等	鋼材の腐食、亀裂、損傷	潜水調査	a <input type="checkbox"/> 腐食による開孔や変形、その他著しい損傷がある。 b ---- c ---- d <input type="checkbox"/> 腐食による開孔や変形はない。
		海底地盤	洗掘、堆積	潜水調査 ・海底面の起伏	a <input type="checkbox"/> 岸壁前面で深さ1m以上の洗掘がある。 <input type="checkbox"/> 洗掘に伴い、マウンド等や岸壁本体への影響が見られる。 b <input type="checkbox"/> 岸壁前面で深さ0.5m以上1m未満の洗掘がある。 c <input type="checkbox"/> 深さ0.5m未満の洗掘又は堆積がある。 d <input type="checkbox"/> 変状なし。

出典：港湾の施設の点検診断ガイドライン（平成 26 年 7 月、令和 3 年 3 月一部変更）

表 3-2 (2) 詳細定期点検診断様式 (点検診断の項目及び劣化度の判定基準：矢板式係船岸 2/2)

対象施設	点検診断項目の分類	点検診断の項目	点検方法	劣化度の判定基準			
矢板式係船岸	Ⅱ類	鋼矢板等	塗装	潜水調査 ・錆やふくれ ・塗膜のはがれ	a <input type="checkbox"/> 広範囲に錆やふくれが認められる。 <input type="checkbox"/> 錆を伴うはがれや割れが広範囲に発生している。 <input type="checkbox"/> 欠陥面積率が10%以上である。 <input type="checkbox"/> 大きな錆やふくれがある。		
				b <input type="checkbox"/> 錆を伴うはがれが広い範囲に発生している。 <input type="checkbox"/> 欠陥面積率が0.3%以上10%未満である。			
				c <input type="checkbox"/> 錆やふくれが点在している。 <input type="checkbox"/> 塗膜のはがれや割れが点在している。 <input type="checkbox"/> 欠陥面積率が0.03%以上0.3%未満である。			
				d <input type="checkbox"/> 初期状態とほとんど変化なく、健全な状態である。 <input type="checkbox"/> 欠陥面積率が0.03%未満である。			
			重防食被覆	潜水調査 ・被覆の劣化	a <input type="checkbox"/> 重防食被覆の劣化が著しく、鋼材が腐食している状態。 b <input type="checkbox"/> 一部に鋼材まで達する被覆の劣化が生じ、鋼材の腐食が認められる。 c <input type="checkbox"/> 鋼材まで達しない被覆の損傷が多く見られる。 d <input type="checkbox"/> 変状なし。		
				超厚膜形被覆	潜水調査 ・膜厚測定 等	a <input type="checkbox"/> 超厚膜形被覆の劣化が著しく、鋼材が腐食している状態。 b <input type="checkbox"/> 一部に鋼材まで達する被覆の劣化が生じ、鋼材の腐食が認められる。 c <input type="checkbox"/> 鋼材まで達しない被覆の損傷が多く見られる。 d <input type="checkbox"/> 変状なし。	
					耐食性金属被覆	潜水調査 ・被覆の劣化	a <input type="checkbox"/> 耐食性金属被覆の損傷が著しく、鋼材が腐食している状態。 b <input type="checkbox"/> 一部に鋼材まで達する被覆の損傷が生じ、鋼材の腐食が認められる。 c <input type="checkbox"/> 鋼材まで達しない被覆の損傷が多く見られる。 d <input type="checkbox"/> 変状なし。
						水中硬化形被覆	潜水調査 ・膜厚測定 等
			ペトロラタム被覆				潜水調査 ・保護カバー ・ボルト、ナット
				モルタル被覆			潜水調査 ・保護カバー ・モルタルの劣化、損傷
					電気防食工 (流電陽極方式)		陽極 潜水調査 ・現存状況の確認(全数)
						電気防食工 (外部電源及び電気設備方式)	詳細調査 ・端子の変色 ・ボルト、ナットのゆるみ 等

出典：港湾の施設の点検診断ガイドライン (平成 26 年 7 月、令和 3 年 3 月一部変更)

表 3-2(3) 詳細定期点検診断様式（点検診断の項目及び劣化度の判定基準：直杭式横棧橋 1/2）

対象施設	点検診断項目の分類	点検診断の項目		点検方法	点検結果の整理 または 劣化度の判定基準	
直杭式横棧橋	I類	土留部背後エプロン	吸出し、空洞化	電磁波レーダ 削孔による目視確認 等	a	<input type="checkbox"/> 吸い出しが生じている。もしくは、その可能性がある(空洞化が認められる)。 <input type="checkbox"/> 防砂板が破損している。 <input type="checkbox"/> 防砂シートが破損している可能性がある。
					b	<input type="checkbox"/> 空洞が生じている可能性がある。 <input type="checkbox"/> 目地板に顕著な劣化、裂傷、損傷がある。
					c	<input type="checkbox"/> 目地板に軽微な劣化、裂傷、損傷がある。
					d	<input type="checkbox"/> 吸い出しは生じていない(空洞化が認められない)。
		鋼管杭	鋼材の腐食、亀裂、損傷	潜水調査 ・開孔の有無 ・表面の傷の状況	a	<input type="checkbox"/> 腐食による開孔や変形、その他著しい損傷がある。
					b	---
		c	---			
		d	<input type="checkbox"/> 腐食による開孔や変形はない。			
土留部		潜水調査、詳細調査 等 (土留部の形式に従って適切に行う)		土留部の構造形式に従って、ケーソン式係船岸又は矢板式係船岸の点検診断様式を準用する。		

出典：港湾の施設の点検診断ガイドライン（平成 26 年 7 月、令和 3 年 3 月一部変更）

表 3-2(4) 詳細定期点検診断様式（点検診断の項目及び劣化度の判定基準：直杭式横棧橋 2/2）

対象施設	点検診断項目の分類	点検診断の項目	点検方法	劣化度の判定基準		
直杭式横棧橋	Ⅱ類	鋼管杭	塗装	潜水調査 ・錆やふくれ ・塗膜のはがれ	a	<input type="checkbox"/> 広範囲に錆やふくれが認められる。 <input type="checkbox"/> 錆を伴うはがれや割れが広範囲に発生している。 <input type="checkbox"/> 欠陥面積率が10%以上である。
					b	<input type="checkbox"/> 大きな錆やふくれがある。 <input type="checkbox"/> 錆を伴うはがれが広い範囲に発生している。 <input type="checkbox"/> 欠陥面積率が0.3%以上10%未満である。
					c	<input type="checkbox"/> 錆やふくれが点在している。 <input type="checkbox"/> 塗膜のはがれや割れが点在している。 <input type="checkbox"/> 欠陥面積率が0.03%以上0.3%未満である。
					d	<input type="checkbox"/> 初期状態とほとんど変化なく、健全な状態である。 <input type="checkbox"/> 欠陥面積率が0.03%未満である。
			重防食被覆	潜水調査 ・被覆の劣化	a	<input type="checkbox"/> 重防食被覆の劣化が著しく、鋼材が腐食している状態。
					b	<input type="checkbox"/> 一部に鋼材まで達する被覆の劣化が生じ、鋼材の腐食が認められる。
					c	<input type="checkbox"/> 鋼材まで達しない被覆の損傷が多く見られる。
					d	<input type="checkbox"/> 変状なし。
			超厚膜形被覆	潜水調査 ・膜厚測定 等	a	<input type="checkbox"/> 超厚膜形被覆の劣化が著しく、鋼材が腐食している状態。
					b	<input type="checkbox"/> 一部に鋼材まで達する被覆の劣化が生じ、鋼材の腐食が認められる。
					c	<input type="checkbox"/> 鋼材まで達しない被覆の損傷が多く見られる。
					d	<input type="checkbox"/> 変状なし。
			耐食性金属被覆	潜水調査 ・被覆の劣化	a	<input type="checkbox"/> 耐食性金属被覆の損傷が著しく、鋼材が腐食している状態。
					b	<input type="checkbox"/> 一部に鋼材まで達する被覆の損傷が生じ、鋼材の腐食が認められる。
					c	<input type="checkbox"/> 鋼材まで達しない被覆の損傷が多く見られる。
					d	<input type="checkbox"/> 変状なし。
			水中硬化形被覆	潜水調査 ・膜厚測定 等	a	<input type="checkbox"/> 水中硬化形被覆の劣化が著しく、鋼材が腐食している状態。
					b	<input type="checkbox"/> 一部に鋼材まで達する被覆の劣化が生じ、鋼材の腐食が認められる。
					c	<input type="checkbox"/> 鋼材まで達しない被覆の損傷が多く見られる。
					d	<input type="checkbox"/> 変状なし。
			ペトロラタム被覆	潜水調査 ・保護カバー ・ボルト、ナット	a	<input type="checkbox"/> 保護カバーが脱落し、ペトロラタム系防食材が露出または脱落し、鋼材表面に錆が出て いる。
b	<input type="checkbox"/> 保護カバーや当て板に亀裂がある。 <input type="checkbox"/> ボルト、ナット、バンド材に腐食が見られる。					
c	<input type="checkbox"/> 保護カバーが変色または白亜化している。 <input type="checkbox"/> 保護カバーの表面に微細なクラックが見られる。 <input type="checkbox"/> ボルト、ナット、バンド材等にゆるみがある。 <input type="checkbox"/> 端部シールの部分的剥離が見られる。					
d	<input type="checkbox"/> 変状なし。					
モルタル被覆	潜水調査 ・保護カバー ・モルタルの劣化、損傷	a	<input type="checkbox"/> 保護カバーが広い範囲で脱落している。 <input type="checkbox"/> モルタル表面に、錆汁が認められる。 <input type="checkbox"/> モルタルが欠落し、鋼材表面に錆が発生している。 <input type="checkbox"/> (カバー材およびモルタル層を除去したとき)、鋼材の肉厚の減少が確認される。			
		b	<input type="checkbox"/> 保護カバーや取付け材にひび割れが見られ、一部に保護カバーの剥がれが見られる。 <input type="checkbox"/> 軽微な錆汁は見られるが、錆の流れ出しはない。 <input type="checkbox"/> (カバー材を除去したとき)モルタルに多数のひび割れが発生し、錆汁が見られる。			
		c	<input type="checkbox"/> 保護カバーに変色や白亜化等が見られる。 <input type="checkbox"/> 表面にクラックが認められるが、その範囲は1%以下である。 <input type="checkbox"/> ボルト、ナット、バンド材等の保護カバー取付け材に緩み等がある。			
		d	<input type="checkbox"/> 変状なし。			
電気防食工 (流電陽極方式)	陽極	潜水調査 ・現存状況の確認(全数)	a	<input type="checkbox"/> 陽極が脱落又は全消耗している。 <input type="checkbox"/> 陽極取付に不具合がある。(ぶら下がり)		
			b	----		
			c	----		
			d	<input type="checkbox"/> 脱落等の異状はない。		
電気防食工 (外部電源方式)	直流電源及び電気設備	詳細調査 ・端子の変色 ・ボルト、ナットのゆるみ等	a	<input type="checkbox"/> 端子の変色、ボルトやナットのゆるみ等がある。		
			b	----		
			c	----		
			d	<input type="checkbox"/> 変状なし。		

出典：港湾の施設の点検診断ガイドライン（平成26年7月、令和3年3月一部変更）

3.2 関連機材

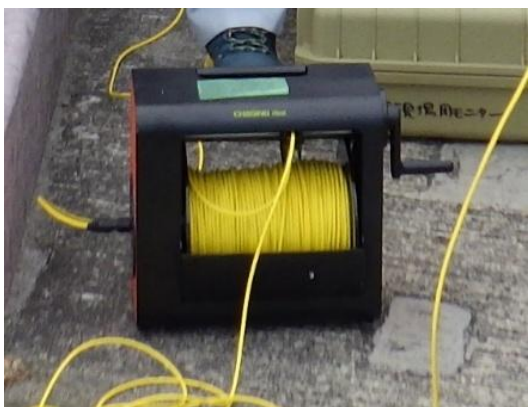
水中ドローンを円滑かつ安全に運用させるために必要な機材を準備する。

【解説】

(1) 水中ドローンに係る機材

- ・水中ドローン運用にあたり使用する機材として、以下を準備する。
- ・水中ドローン機体、ケーブルリール、カメラ用モニタ、操作用プロポ、充電器等備品
- ・予備バッテリー（想定する潜航時間、回数に応じて準備）
- ・円型ステンレスリングもしくはシャックル（ケーブル引っ掛かり対策）

ケーブルリール



ステンレスリング（ケーブル引っ掛かり対策）

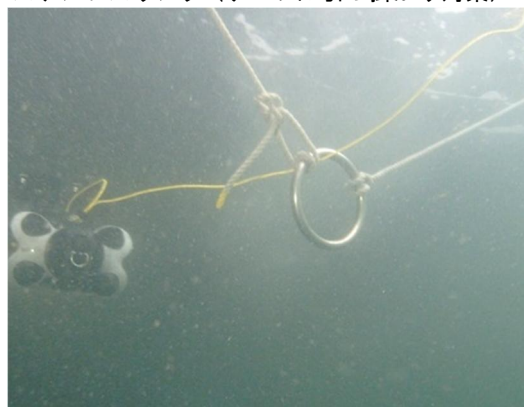


図 3-1 関連機材

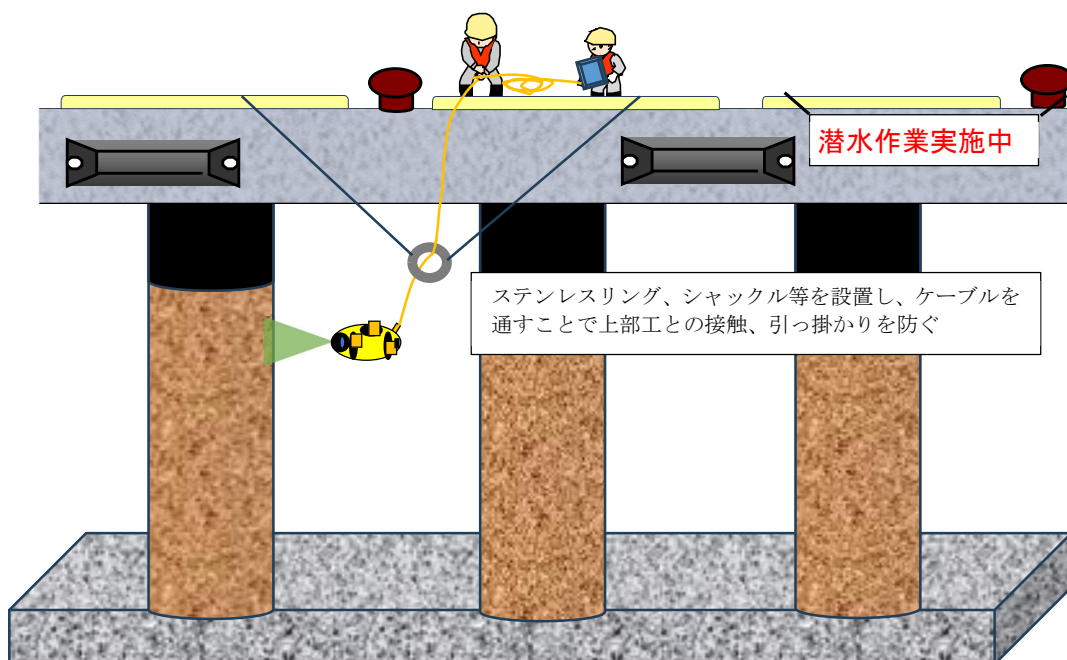


図 3-2 ケーブル引っ掛かり対策イメージ

3.3 操縦者の任命

操縦者は、使用機体の操作に習熟しており水中ドローンを安全に操作させることができる技術を有する者を任命する。

【解説】

操縦者は、水中ドローンのケーブルが構造物等に引っ掛かり、帰還できなくなる事態を起こさないように操縦する必要があるため、操作に習熟している者を任命することとする。水中ドローンは潜航後、水中ドローンのカメラ映像を確認しながら操縦することになるが、基本的に水中ドローンとつながっているケーブルはカメラ映像には映らないため、ケーブルがどのように漂っているのかを想定しながら、障害物を避けねばならない。水中部の構造物は牡蠣殻等の突起のある付着物が多く、ケーブルが引っ掛かりやすい。鋼管杭の点検等では、水中ドローンの鋼管杭を周回するように操縦する必要があることから、ケーブルが鋼管杭に巻き付きやすく、特に注意が必要である。また、鋼構造物には陽極が取り付けられていることが多く、陽極にケーブルが絡まりやすいことに注意する必要がある。

また、変状の位置を特定するためには、水中ドローンがどの場所にいるのかを把握する必要がある。操縦者は、施設構造について図面等を確認して把握し、点検中は可能な限り連続して構造物が映るようにカメラ向きを調整して撮影し、矢板の枚数や鋼管杭の数等から、位置を把握しながら操縦する必要がある。水中ドローンの操縦では、水流や波力等の影響も受けるため、安定した操縦が難しいことから、予め操縦に慣れておく必要がある。

4 事前準備

現地における点検に先立ち、現地の状況を踏まえた調査計画の立案及び関係機関への許可・申請等の手続きを行う。

【解説】

事前準備では、調査計画及び作業時の安全管理計画を取りまとめ、海上保安部等関係機関への許可・申請手続き等を行う。

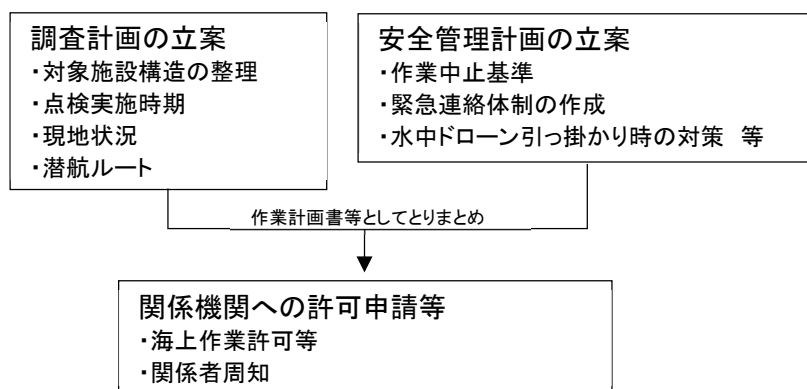


図 4-1 事前準備フロー

表 4-1 実施にあたっての手続き

手続き	ROVによる点検	(参考) 潜水士による点検
海上保安部への許可申請、届出	△ (必要に応じて)	○
港湾管理者・利用者への周知	○	○
地先漁協への周知	△ (必要に応じて)	○

※注) 調査実施場所毎に必要な手続きが異なるため、関係機関へ確認を行うこと

(1) 調査計画の立案

調査計画は以下の点を考慮する。

① 対象施設構造の整理

部材によって確認する変状が異なることと、鋼構造物の場合は水深によって防食方法の違いにより構造が異なることがあるので、予め断面図を確認し、構造の境界となる水深を整理しておく。また、陽極等の突起物を整理し、ケーブルの引っ掛かりを防ぐように潜航ルートを作成する資料とする。

② 点検実施時期

点検実施時期は、以下を考慮して安全・確実な時期を設定する。

- ・潮流（特に潮流の影響を受けやすい場所については、潮位差の小さい時間帯を設定する）
- ・天候（荒天の有無、風況、波浪）
- ・水質（透明度、濁度）
- ・周辺工事等の予定（対象施設内での工事・他調査の有無）等

③ 現地状況

潜航に支障のある現地の状況を把握し、潜航ルート設定及び安全管理計画に反映する。

- ・点検対象施設の風況・波浪・気象の詳細
- ・支障物件（作業可能時間、係留船舶、荷役貨物・車両、進入困難箇所等）の有無
- ・第三者の立入の可能性
- ・周辺における工事・荷役作業等の有無

④ 潜航ルート

航空写真や図面等をもとに着水地点及び潜航ルートを設定する。潜航ルートは、ケーブルの動きも考慮するものとし、特に鋼管杭を点検する際には、ケーブルが鋼管杭に巻き付かないように設定する。なお、水中ドローンがバッテリー駆動の場合は、1度に潜航できる時間が制限されているが、水温や水流、バッテリーの劣化等によってもバッテリーの稼働時間に幅があるので、余裕を持った潜航ルートを設定することが望ましい。

[参考] 実証実験時の潜航ルート（鋼管杭）の考え方

点検対象を鋼管杭とした実証実験では、水中ドローンが鋼管杭の周囲を回った後に、逆回りでケーブルを鋼管杭から離れた後に次の鋼管杭に移動するように設定した。

[参考] 潜航ルート（鋼矢板）の考え方

点検対象が鋼矢板の場合は、調査対象区域をくまなく撮影する必要があることから、水中ドローンのカメラの向きは鋼矢板の正面を向いた状態で、矢板に対して水平移動するように設定した。水平移動も格子状に移動し、未測箇所が生じないように移動する。そのためには、あらかじめ、鋼矢板（撮影対象物）と水中ドローンの距離によって、画角（撮影範囲）がいくつになるのかを確認しておく必要がある。

(2) 安全管理計画

点検を安全に実施するための安全管理計画を立案する。安全管理計画の一例を以下に示す。

- ・ 現地で想定されるリスクを洗い出し、リスクを回避するための対応策を検討する。
- ・ 現地で作業実施可否を判断するための作業中止基準を定める（参考：表 4-2）。
- ・ 作業体制を明確にし、作業時や緊急時の連絡体制を明確にする。
- ・ 緊急時（水中ドローン引っ掛かり時等）の対応策を明確にする。

※安全対策（潜水士、安全監視船の配備等）は、現場条件により異なるため注意が必要である。

[参考] 実証実験時の作業中止基準

実証実験では表 4-2 のように定めた。なお、潮流の作業中止基準は水中ドローン各機体によって異なるため、使用機体の実績に応じて適切に定める必要がある。

表 4-2 作業中止基準（参考）

風速	10m/s 以上
波高	0.5m 以上
潮流	1 ノット以上 ^{※1}
津波	発生の恐れがある場合すべて ^{※2}
波高	1m 以上
地震	震度 4 以上

※1 潮流の作業中止基準は各機体の航行実績に応じて適切に定める。

※2 津波注意報・海上風警報・緊急地震速報（警報）より判断

水域での作業となるため、作業者の海中への落水及び周辺の荷役作業・工事等との錯綜、水中ドローン引っ掛かり時等の事故防止対策を講じる（例えば、水中ドローンの引っ掛かり時であれば、引っかかった際には潜水士による回収を行う等）。

(3) 関係機関への許可申請等

調査計画立案後、関係機関への許可申請及び事前調整を行う。想定される許可申請は以下の通りであるが、事前調整の実施先は対象港湾ごとに港湾管理者及び海上保安部に確認する必要がある。

なお、海上作業許可は承認までに 1 か月程度の期間を要するため、点検実施時期までに余裕をもって許可申請を行うこと。

① 作業許可申請（届出）（必要に応じて）

水中ドローンによる目視点検作業を行う場合、港長または海上保安本部長の許可が必要となる場合がある。なお、本申請の要否については事前に対象港湾を所管する海上保安部に確認すること。

② 港湾施設行為許可（必要に応じて）

港湾施設において点検等を行う場合に、港湾施設行為許可が必要となる場合がある。なお、対象施設の位置する地方自治体における申請手続きの要否・方法及び様式等については、事前に確認すること。

5 現地作業

現地においては、作業条件が事前準備において想定していた状況であるか十分確認したうえで、所定の手順に基づき安全かつ適切な点検を実施する。

【解説】

水中ドローンを用いた点検は、海象等の現地条件の変化や機材トラブル等事故のリスクが比較的高い作業であることから、あらかじめ定めた手順に基づき確実に実施すること。

作業手順は作業内容、現場条件、機材の特性に応じて適宜設定する。現地作業手順の一例を以下に示す。

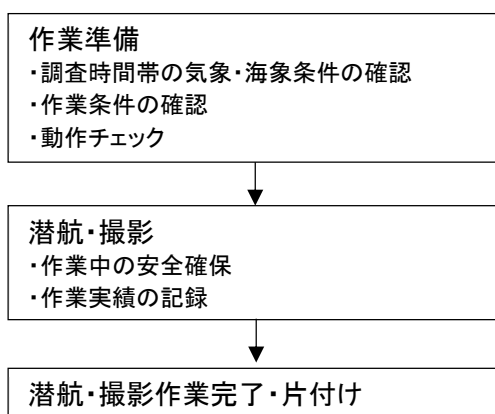


図 5-1 現地作業フロー

(1) 作業準備

現地において作業の準備及び現地状況の確認を行う。現地における主な確認項目は以下のとおりである。

① 作業時間帯の気象・海象条件の確認

作業時間帯の気象・海象条件について現況及び予報を確認する。作業時間帯において作業中止基準に抵触する可能性がある場合は、その状況の監視（観測）の頻度・方法及び確認担当者を作業開始前に定める。

② 作業条件の確認

周辺の荷役・離着岸の作業状況、海象（波高・潮流等）及び気象より、現地作業の安全に支障がないことを確認する。なお、潮流は潮位表を確認し、潮流が速くなる時間帯を予め想定しておく。

③ 動作チェック

本撮影に先立ち動作チェックを行い、水中でのドローンの操作性、撮影画像の画質及び光量・濁りの状況を確認する。晴天の場合、モニタが見えにくくなることがあるため、モニタ用のサンバイザーやテント等でカメラ映像をはっきりと確認可能な環境を整える。

(2) 潜航・撮影

作業準備完了後、水中ドローンを潜航させ所定の範囲の撮影を行う。潜航中は以下について随時確認を行い作業中の安全確保を図る。

- ・ 気象・海象の変化（風況、波浪、潮流等）
- ・ 周辺の荷役作業・船舶離着岸及び工事実施状況、航走波の影響
- ・ バッテリーの状況（予定する潜航時間が確保できるか）
- ・ 撮影した画像の画質
- ・ 構造物（撮影対象物）とカメラとの離隔

なお、撮影に先立ち、対象となる鋼構造物部材の一部について寸法の実測や撮影範囲内にスタップやリボンテープ等を設置しておくことで、撮影した損傷劣化等の規模や画像を使用したモデル作成の際の目安とすることができる。

また、作業進捗の確認及び次回の調査計画の参考とするため、1潜航毎のタイムスケジュールの実績及び撮影範囲を記録しておくことが望ましい。



図 5-2 水中ドローン潜航状況

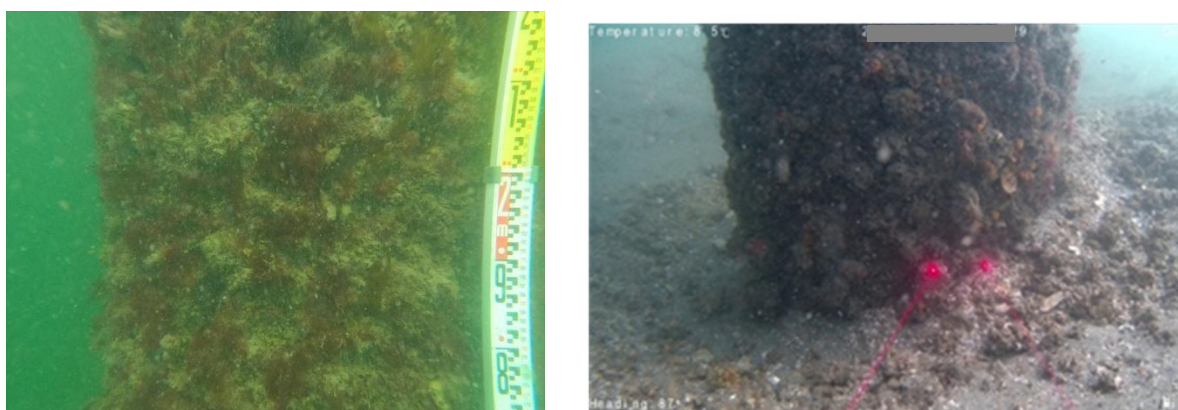


図 5-3 撮影データのイメージ

【留意点】

ケーブルリールからの繰り出し方法は、先に必要な分の長さをリールから引き出し、ケーブルを岸壁上等に絡まないように束ねておき、ROVの動きに応じて作業員が必要な長さを海中に出し入れすることにより、絡まり、引っ掛かりを防止する。特に栈橋奥部へ潜航する場合は、杭、付着物、基礎捨石、陽極等へのケーブルの引っ掛かり、挟まり等のリスクが高いことに留意する必要がある。

(3) 作業完了・片付け

潜航・撮影作業完了後、撮影データと飛行範囲・潜航ルートを照らし合わせ、撮影データに抜け漏れがないか確認する。その後、機材の回収・片付けを行う。

ROV については、水道水を貯めた容器内でプロペラを回転させて十分な洗浄を行う。

(4) 結果整理

調査結果の整理については、取得した画像を整理し、「港湾の施設の点検診断ガイドライン（平成 26 年 7 月、令和 3 年 3 月一部変更）、国土交通省 港湾局」を参考に整理を行う。

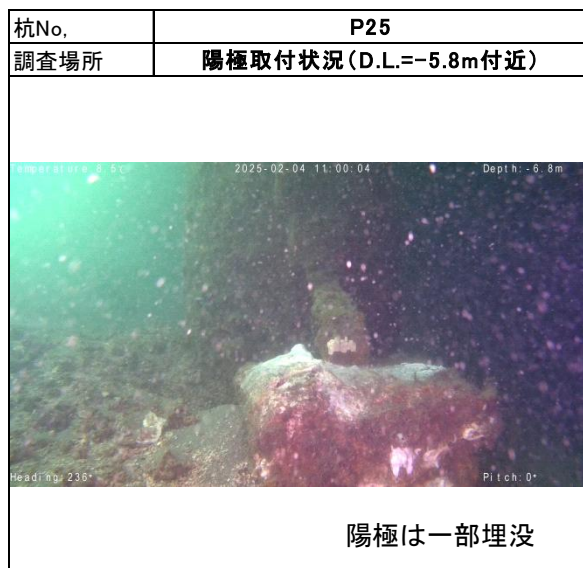
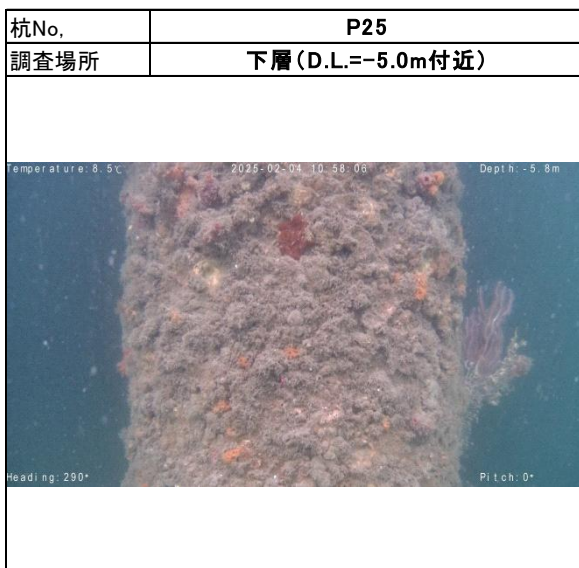
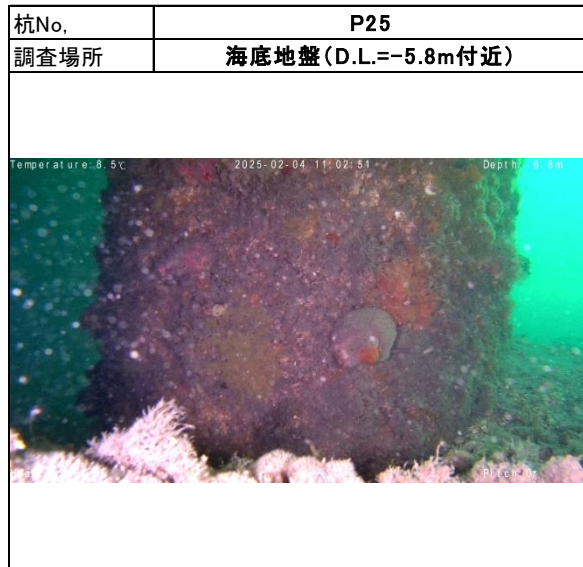
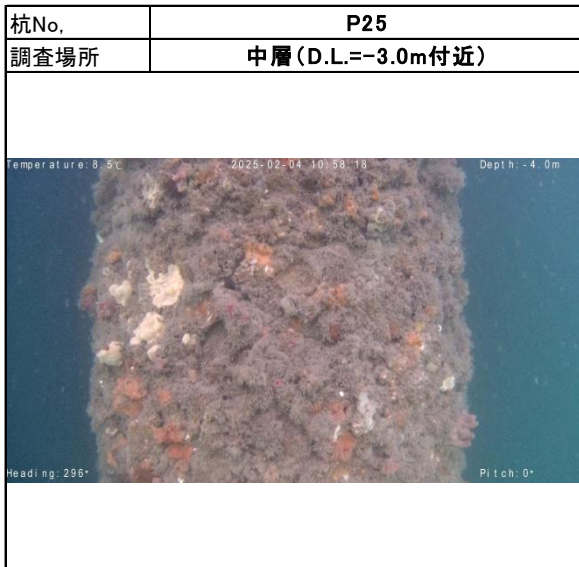
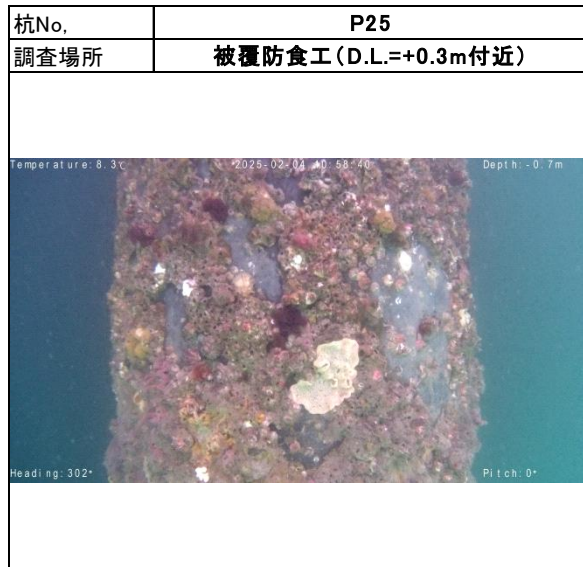
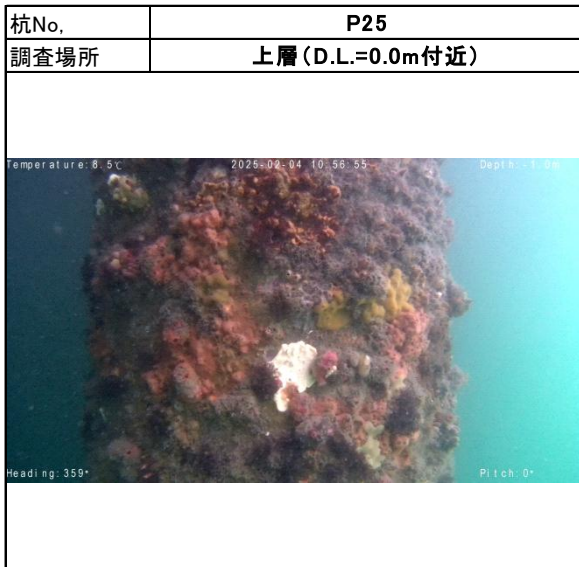


図 5-4 調査結果の事例

6 作業効率

水中ドローンによる目視点検は、調査対象の構造、調査当日の濁り、波、流れ等の条件に作業効率が左右される。

- ・ 矢板係船岸等の施設は、調査面が平面的であるため、水中部において水中ドローンを操縦しやすく、栈橋構造等の複雑な構造と比較して作業効率（広い面積の調査が可能）が高い。
- ・ 作業時に濁りがある場合は、水中ドローンのカメラ画像が不鮮明になる。また、浮遊物が多い場合も、カメラの焦点が調査対象に合いにくくなるため、調査時間がより多く必要となる。
- ・ 波が高い場合、流れが速い場合は、水中ドローンの操縦が困難になるため、作業効率が低下する。

7 その他（水中ドローン関連技術、今後の期待される関連技術）

7.1 画像処理

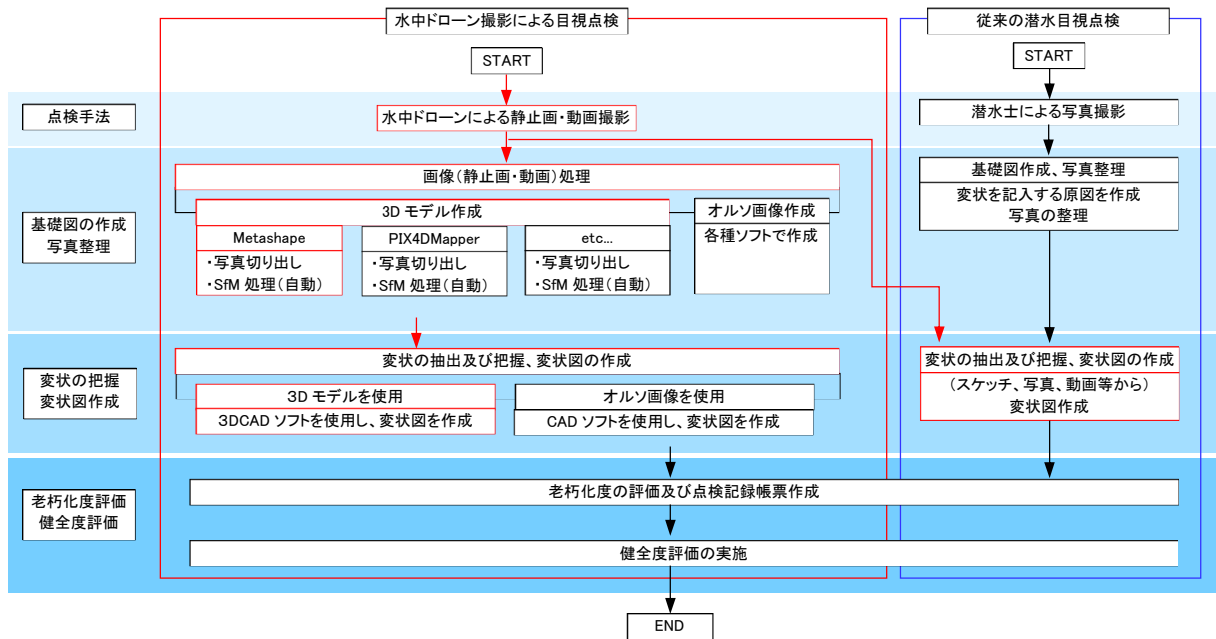
水中ドローンで撮影した画像（静止画・動画）について、画像処理を行うことが可能である。

撮影した画像を使用して部材の状態評価を行うために、必要に応じて画像処理を行う。画像処理の要否及び方法については、施設の状態や診断に係る内業の方針を踏まえて選択する。

表 7-1 撮影画像を用いた点検診断の方法の例

区分	方法	内容	留意点	効果的な適用
画像処理無し	撮影画像を直接参照して診断	撮影画像をPC上で確認しながら部材の劣化度評価及び変状図の作成を行う。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 撮影画像をそのまま使用するため画像処理の必要無し。 ・ 撮影位置がどの部位であるか、潜航ルートを確認しながら判断する必要があるため損傷劣化位置の特定に時間を要する場合がある。 ・ 画質は非常に明瞭である。（ただし、撮影画像の解像度による） 	詳細定期点検診断や局所的に水中部の確認を行いたい場合に適している。
画像処理有り	オルソ画像を作成して診断	撮影画像からオルソ画像を作成し、それを用いて劣化度評価及び変状図の作成を行う。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 撮影動画から画像を切り出しもしくは撮影委写真から SfM 処理等を行った後、オルソ画像を作成する。 ・ オルソ画像は写された像の形状が正しく、位置も正しく配置されており、変状の位置が視覚的に分かりやすい。画像上で位置、面積及び距離など計測するためには、連続する撮影画像の内にスケールを入れておく必要がある。 	オルソ画像を作成することによって、全体図を作成することができることから、変状の位置が分かりやすくなる。鋼矢板等の平面的な構造をもつ施設の点検診断に適している。
	3Dモデルを作成して診断（フォトグラメトリー）	撮影画像から3Dモデルを作成し、それを用いて劣化度評価及び変状図の作成を行う。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 撮影動画から画像を切り出しもしくは撮影委写真から SfM/MVS ソフトウェアを用いて3Dモデルを作成する。 ・ 3Dモデル作成にあたっては、PCの性能やモデル作成精度によって、処理時間が長くなる。 ・ 3Dモデル作成処理の中で解像度が低下する傾向がある。 ・ 3Dモデル上で位置、面積及び距離など計測するためには、連続する撮影画像の内にスケールを入れておく必要がある。 	解析用写真の取得および解析に時間がかかるものの、鋼管杭等の立体的な構造の施設においては、変状位置が視覚的に分かりやすく、適している。

水中ドローン点検と従来の潜水目視点検の点検診断フローを図 7-1 に示す。



※実証実験におけるフローを赤矢印で示す。

図 7-1 点検診断フロー

※オルソ画像、3Dモデル作成（フォトグラメトリー）を作成するための機材

- ・水中カメラ（タイムラプス機能を有するカメラを別途取り付ける）
- ・水中ライト（フォトグラメトリーを行う上で、水中部での十分な明るさを確保することによりシームレスデータを得られやすいことから、水中ドローンに搭載されているライトに加えて水中ライトを追加すると良い。）

表 7-2 オルソ画像、3Dモデル作成（フォトグラメトリー）用カメラ等の仕様（例）

機種	仕様
<p>GoPro HERO8 (GoPro 社製)</p> <p>※タイムラプス機能付</p>	<p>○防水用ハウジング（オプション）</p> <p>○LED ライト 2 基追加</p>

オルソ画像、3D モデルは市販の SfM/MVS ソフトウェアを使用して作成することが可能であるが、水中では不規則な水流があることから、水中ドローンを用いて撮影面と一定の距離を保ちながら撮影することが難しい。このため 3D モデルには歪みが生じる可能性がある。また、水中では濁りにより不明瞭な画像や光量不足のため暗い画像となる可能性がある。光量を確保するために、ライトを使用した場合にはライトによって生じた影により、マッチングができないもしくは、影自体が 3D モデルに反映される可能性がある。また、3D モデル作成処理の中で画像解像度が低下する傾向があり、微細な損傷劣化が判別できない可能性がある点について注意する必要がある。

[参考] SfM/MVS ソフトウェアによる処理

SfM (Structure from Motion) では多くの視点から撮影した写真を基に、各写真のパターンマッチングを行い、写真撮影位置を推定する。推定した写真位置を基に MVS (Multi-View Stereo) で対象物の高密度な 3 次元点群データ (生データ) を取得する。データを扱いやすくするために、点群データをもとに多角形の集合体からなる 3D モデルの作成が可能である。また、撮影した写真をテクスチャとすることで、実物に近い 3D モデルの作成が可能となり、オルソ画像の作成も可能である。



図 7-2 SfM/MVS 処理の概要

[参考] SfM/MVS ソフトウェア

3D モデルを作成するための SfM/MVS ソフトウェアの例を表 7-3 に示す。モデル作成精度・所要時間や価格、制約条件 (処理可能な画像数等) 等を確認して使用すること。

表 7-3 SfM/MVS ソフトウェアの例

No.	ソフト名	開発社名	作成概要
1	Metashape	Agisoft(ロシア)	撮影画像をインポートすることで 3D モデルの自動作成が可能
2	PIX4Dmapper	PIX4D(スイス)	

[参考] オルソ画像および 3D モデル (フォトグラメトリー)

○鋼矢板のオルソ画像の一例



○鋼管杭の 3D モデル (フォトグラメトリー) の一例 (※実証実験データより作成)

側面から確認



上方から確認

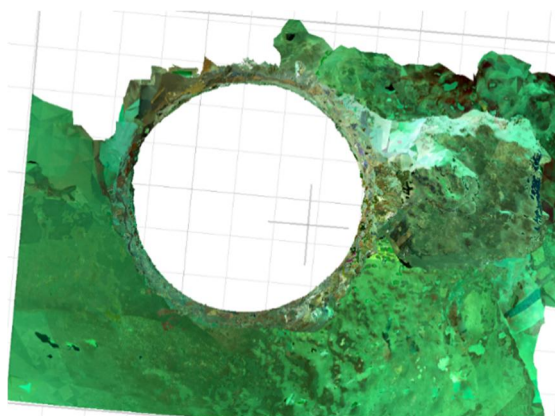


図 7-3 オルソ画像および 3D モデル (フォトグラメトリー)

7.2 肉厚測定

(1) ROV による肉厚測定（超音波式）

ROV による肉厚測定は、付着物のケレンを行い除去して鋼材表面を露出させる必要があるが、牡蠣殻等が固着している場合は、付着物の除去が困難で現時点では課題がある。

実証試験の結果、牡蠣殻等の固着により ROV によるケレンが出来なかったため、ダイバーによりケレンした箇所を ROV に搭載した超音波厚み計（Cygnus ROV Mini Mountable）を用いて計測を行った結果、ROV が水流や波高により動いてしまう影響で一部外れ値が確認されたが、ダイバーの計測値と近い値を得ることが出来た。

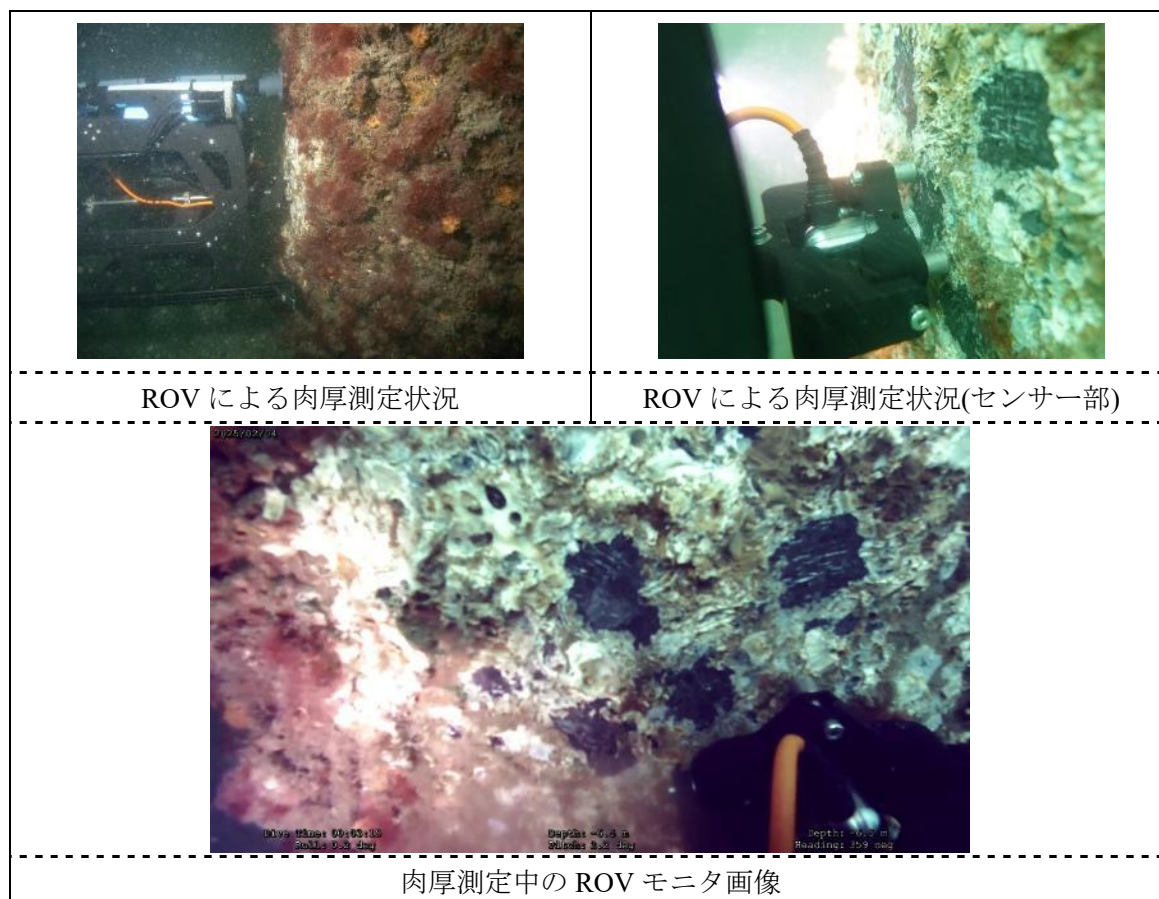


図 7-4 ROV による肉厚測定状況写真

(2) 非接触肉厚測定

実証試験では、ROV による肉厚測定と同様に付着物のケレンが実施できなかったため、ダイバーがケレンした箇所で ROV に搭載した非接触肉厚測定器(SPEC-01)を用いてキャリブレーションを実施し、鋼管杭の肉厚を計測した。ダイバーによる肉厚測定結果との比較では、調査結果に振幅があり、平均するとダイバーの計測値よりやや厚めの結果となった。

なお、計測の際には、波浪（有義波高 0.2m 程度）の影響によりセンサーが動揺し、計測できないことが多く、ケレンとセンサーの揺れを低減させる工夫が今後の課題である。

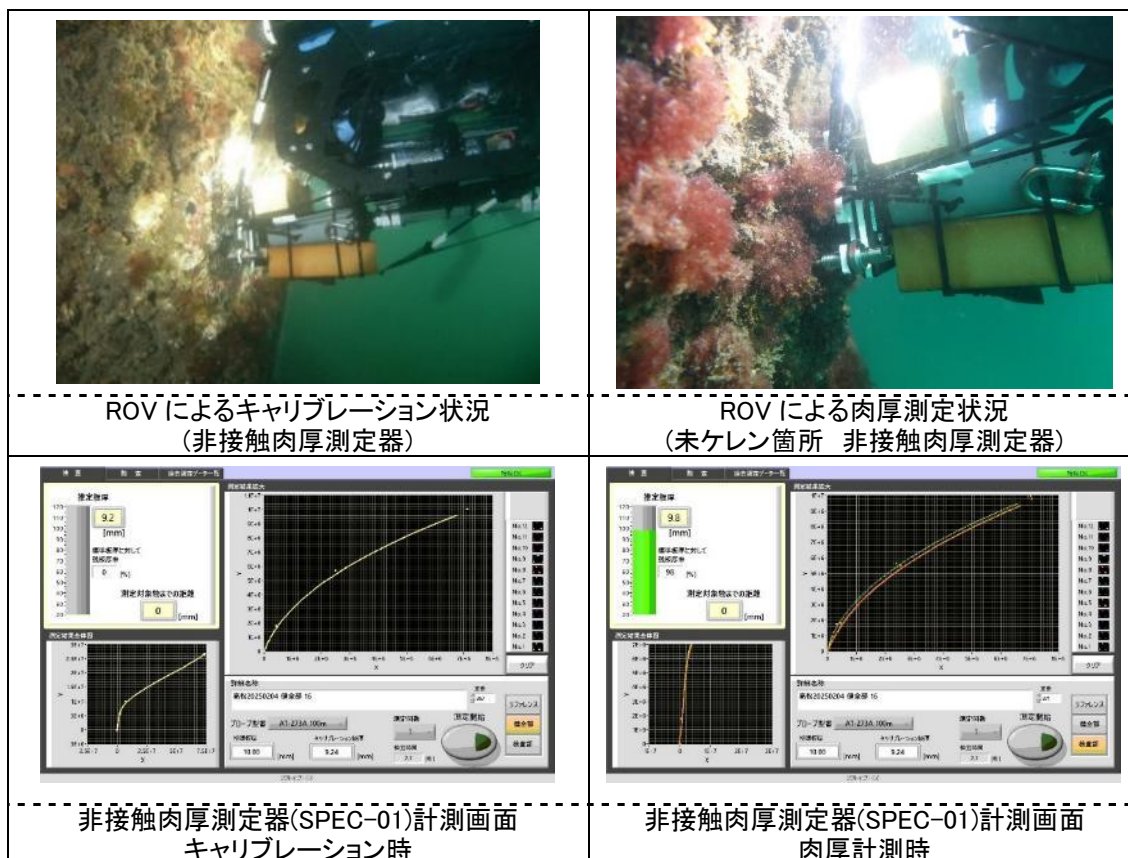


図 7-5 ROV による肉厚測定状況写真 (非接触肉厚測定器)

7.3 その他

その他の新技術については、下記資料等を参考にすることが出来る。

- ・港湾の施設の新しい点検カタログ (令和 7 年 4 月版) 国土交通省港湾局
 - ・港湾施設の点検・補修技術ガイドブック (2025 年版) (一財) 港湾空港総合技術センター
- なお、適宜、更新されるためホームページ等で最新版を確認すると良い。

【資料編】

- ・高松港での水中ドローンによる調査の実証試験結果
- ・代表的な水中ロボの選定について
- ・その他の技術

1 高松港での水中ドローンによる調査の実証試験結果

高松港において実施した実証試験の以下に概要を示す。

- ・実施場所：高松港玉藻地区-6m 岸壁船首尾係船岸（栈橋式）
- ・調査実施日：令和7年2月4日
- ・内容：①水中ロボを用いた目視調査
②鋼管杭水中部の3D点群データの作成（フォトグラメトリー）
③ROVによる水中部の肉厚測定

1.1 水中ロボを用いた目視調査

鋼管杭 P15、P25、P35 の計3本について、水中ロボ(ROV)を用いた目視調査を実施した。本施設では、フェリーの入出港が頻繁に行われることから、安全のため ROV を都度回収したため、鋼管杭1本につき1～2潜航で実施した。実施した鋼管杭を図 1-1 に示す。

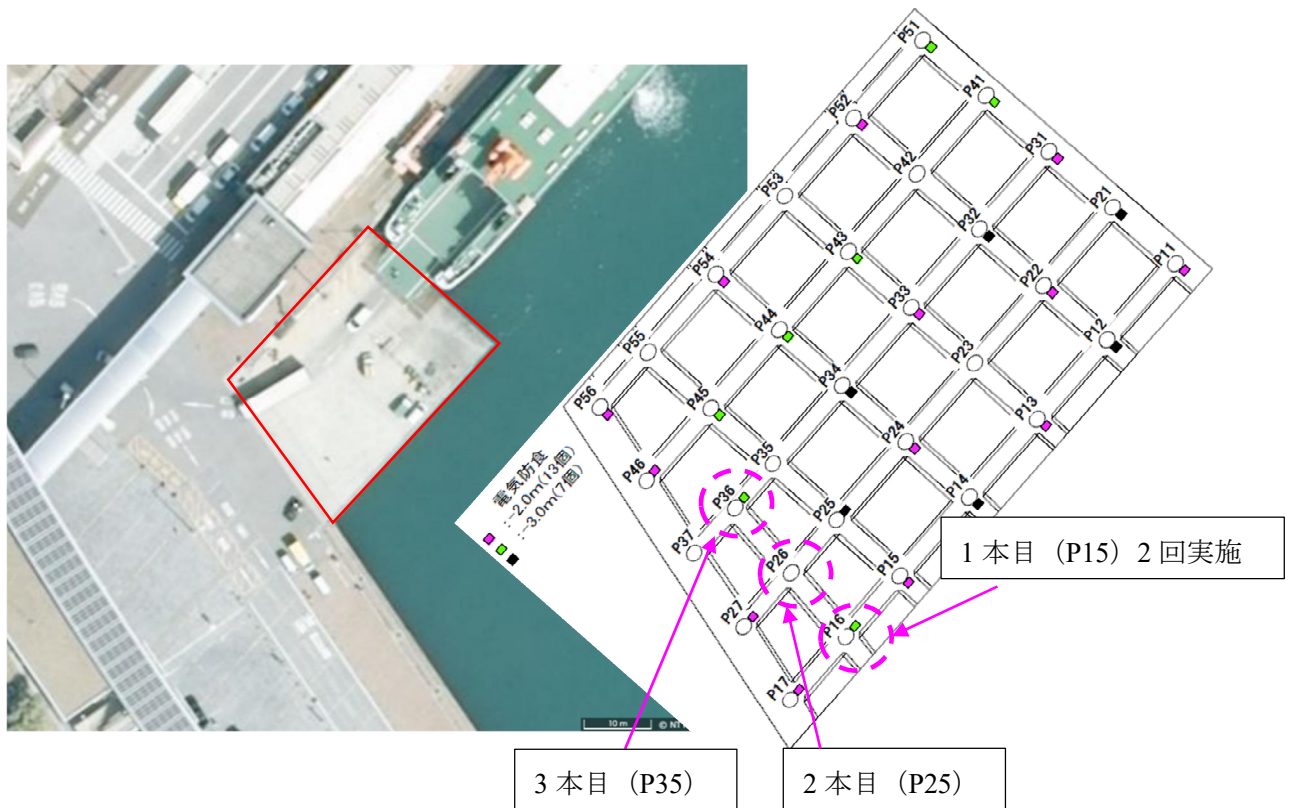


図 1-1 栈橋下部における水中ロボを用いた目視調査実施箇所

実証試験は、3本の鋼管杭で実施した。本調査は、作業効率を算出することも主たる目的であり、P15 調査実施の際にケーブルが陽極に絡んだため、時間を正確に計測するため再調査を実施した。

- ・1本目 P15 で実施（1回目）
- ・1本目 P15 で実施（2回目）
- ・2本目 P25 で実施
- ・3本目 P35 で実施

作業状況写真を図 1-2 に示す。

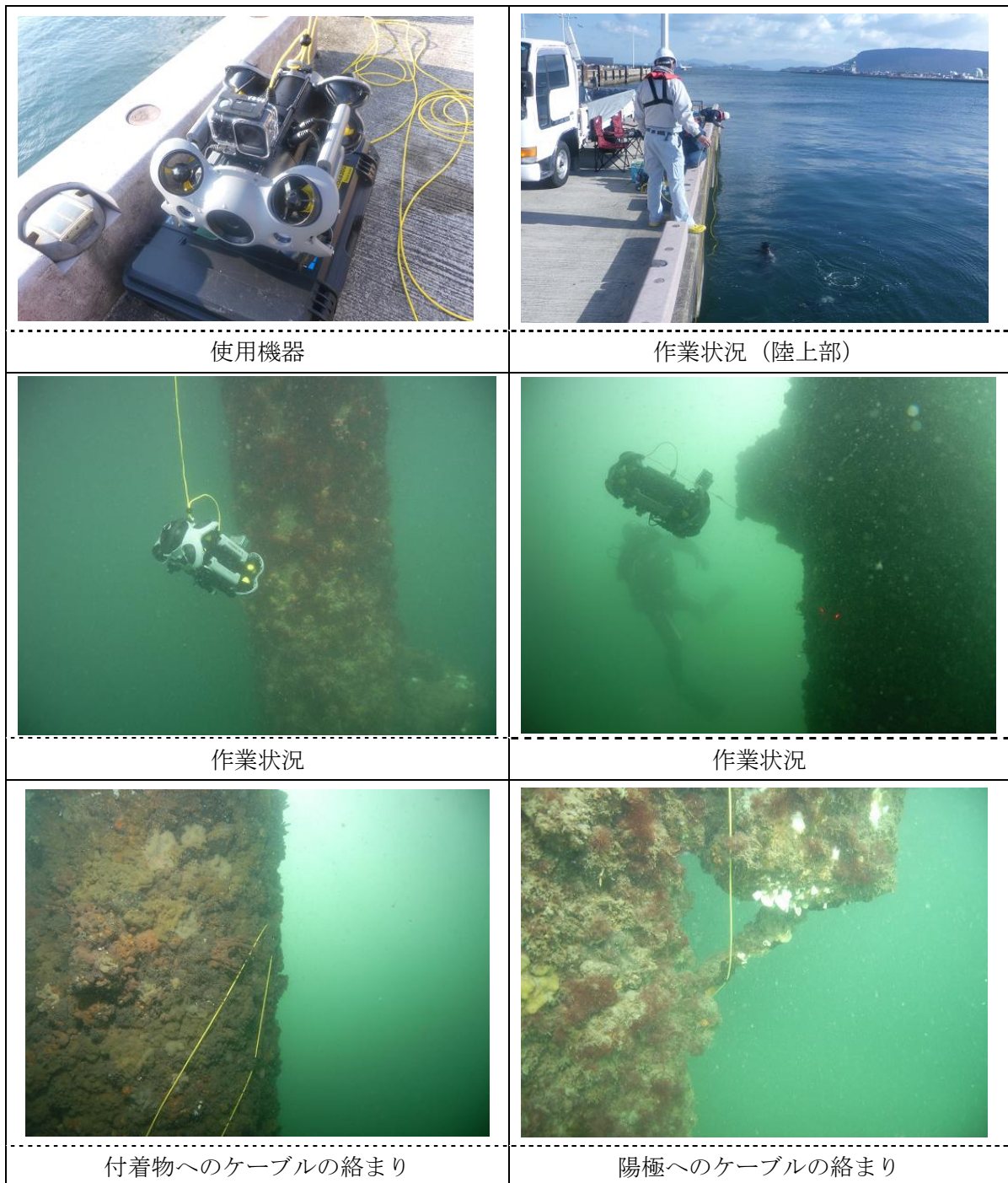


図 1-2 水中ロボを用いた目視調査実施状況

※P15 の 1 回目の帰還時にケーブルが付着物・陽極に引っかかる等の時間のロスあり
鋼管杭 1 本について、2 回潜航
ROV の移動時間については、それぞれ 1 回分として計上
鋼管杭 1 本あたりの作業時間としては、潜航 1 回目と 2 回目の合算値を計上

(1) 作業時間の計測

ROV 運転記録から算出した作業時間の平均を表 1-1 に示す。なお、鋼管杭間の移動は 7 秒程度であったが、実際に調査対象の鋼管杭に到着してから、調査を開始する位置（方向・水深・ケーブルの位置・ROV の姿勢等）を調整することに時間を要していた(移動を含めた平均値は 0:01:11)。連続して隣り合う鋼管杭を調査する際にも、同様に調査開始位置を調整する時間がかかることから、調査地点の移動時間のみでなく、位置決め時間の合算として時間を算出している。

なお、フェリーの着岸を除き、流速（0.17m/s 以下）、波浪（有義波高 0.2m 程度）、透明度（4m 以上）の海象条件が、作業に影響を及ぼすことはなかった。

表 1-1 水中ロボを用いた目視調査の作業平均時間

作業項目	作業時間(実績)	備考
ROV 投入前準備	0:01:37	0:01:15～0:01:52 の 3 回平均
ROV 投入	0:00:08	0:00:06～0:00:08 の 4 回平均
調査地点まで移動・位置決め	0:01:11	0:00:30～0:01:31 の 4 回平均
ROV 目視調査(1 本あたり)	0:10:58	0:08:47～0:12:46 の 3 回平均
調査地点から帰還	0:02:48	0:01:30～0:04:05 の 4 回平均
ROV 回収	0:00:11	0:00:05～0:00:16 の 4 回平均
事前機材準備	0:30:00	1 回のみ計測
バッテリー交換	0:04:16	1 回のみ計測
機材片付け(※)	0:04:42	1 回のみ計測

※“機材片付け”は、現地での機体のケーブル等の取り外し、水分のふき取り、専用箱への収納のみの時間を示す。

なお、機材を持ち帰り後、水道水の中でプロペラを回し（メンテナンスモード（自動洗浄）、塩分、砂等の洗浄後、十分乾燥させた。

(2) ROV による目視観察結果

鋼管杭の目視観察結果を表 1-2 に示す。

表 1-2 鋼管杭の目視観察結果

点検診断の項目		P15	P25	P35
鋼管杭	鋼材の腐食、亀裂、損傷	腐食による開孔や変形は確認されなかった	腐食による開孔や変形は確認されなかった	腐食による開孔や変形は確認されなかった
被覆防食工 (重防食被覆)	被覆の劣化	変状なし	変状なし	変状なし
電気防食工 (流電陽極方式)	現存状況の確認(全数)	脱落等の異状はない	脱落等の異状はない	- (陽極未設置箇所)
海底地盤	洗掘、堆積	堆積あり	堆積あり	堆積あり
備考	-	-	陽極の一部が埋没していることを確認	海底にフェンスのようなもの(金網・クランプ)を確認

1.2 鋼管杭水中部の3D点群データの作成（フォトグラメトリー）

鋼管杭 P17 について、フォトグラメトリー用の撮影を実施した。

なお、フェリーの着岸を除き、流速（20cm/s 以下）、波浪（有義波高 20cm 程度）、透明度（4m 以上）の海象条件が、作業に影響を及ぼすことはなかったが、浮遊物、太陽光による逆光等の影響が、SfM/MVS ソフトによる画像処理に影響を及ぼした可能性がある。

作業状況を図 1-3 に示す。

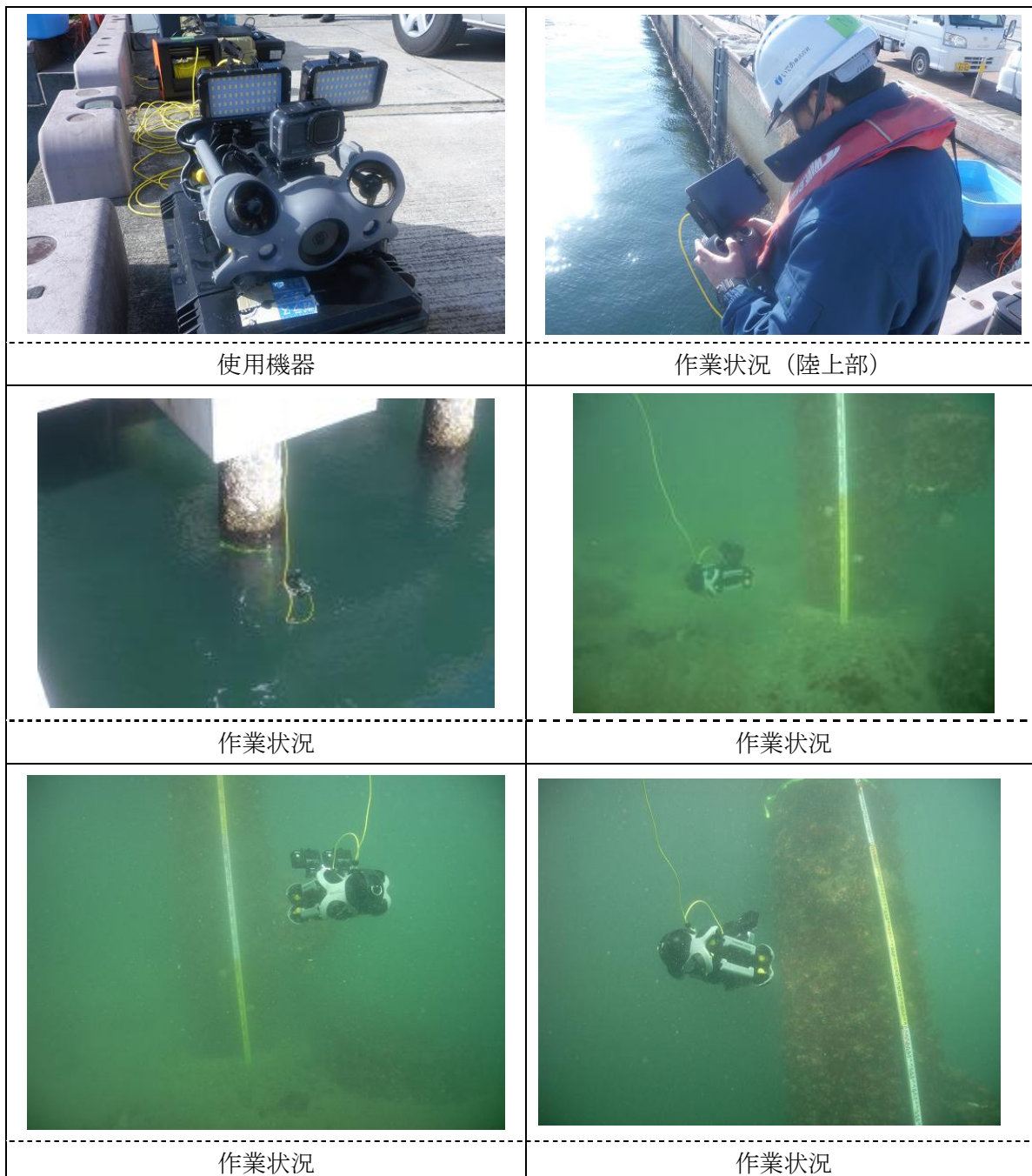


図 1-3 フォトグラメトリー用の撮影実施状況

実施作業にかかった時間および撮影枚数を表 1-3 に示す。また、撮影画像例を図 1-4 に示す。

表 1-3 実施作業にかかった時間および撮影枚数

項目		内容
撮影時間		21.4 分
撮影枚数		2752 枚
撮影方向	上下方向	27 本
	左右方向(杭を周回)	2 本(2 周)



図 1-4 撮影画像例 (タイムラプス撮影により連続的に 2752 枚を撮影)

撮影した画像を使用し、SfM/MVS ソフトを用いた解析により、3D 点群データを作成した。使用した SfM/MVS ソフトは、建設分野では一般的で広く使用されている以下の 2 種類 (比較のために 2 種類で実施) で、解析において写真は同じものを使用した。

- ・ Metashape (Agisoft 社 (ロシア) 製)
- ・ PIX4Dmapper(PIX4D 社 (スイス) 製)

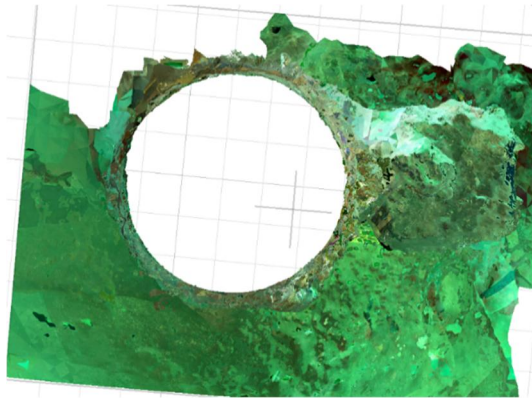
表 1-4 SfM/MVS ソフトでの解析処理の比較

項目		Metashape	PIX4Dmapper
解析成功枚数		2541 枚(2572 枚中)	785 枚(2572 枚中)
解析処理時間*		4 時間	4 時間 30 分
PC スペック	CPU	Intel Core i9 13980HX	Intel Core i9 Ultra9 185H
	GPU	NVIDIA GeForce RTX 4080 Laptop	NVIDIA GeForce RTX 4090 Laptop
	メモリ	64GB	64GB

※解析処理時間はパソコンの性能に大きく依存

どちらの SfM/MVS ソフトにおいても、一部解析ができない部分があった。しかしながら、Metashape は多くの枚数 (約 98.7%) が解析でき、Pix4D は 1/4 程度 (約 30.5%) の解析が限界であった。それぞれの解析結果 (3D データ) を図 1-5 に示す。

上方から確認



側面から確認

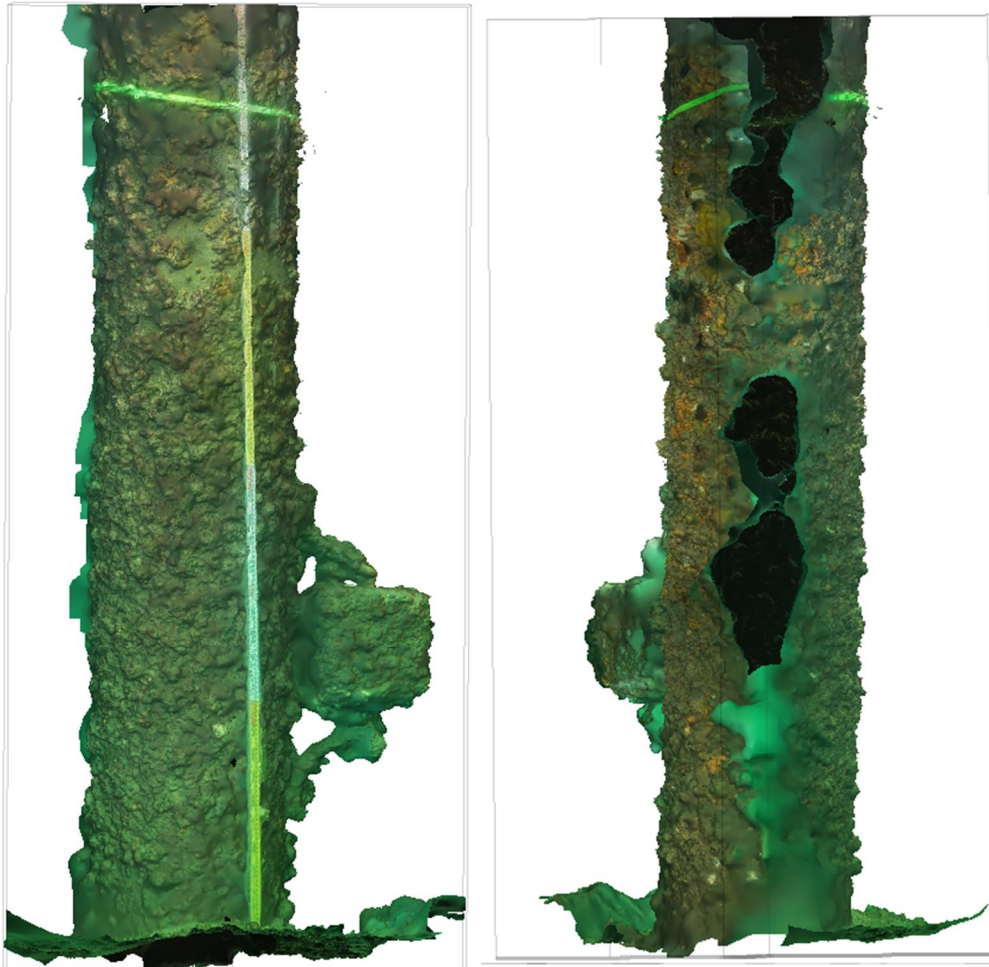


図 1-5 Metashape による 3D 点群データの作成結果 (P17)

1.3 ROVによる水中部の肉厚測定

ROVに搭載したブラシによるケレン、ROVに搭載した肉厚測定器および非接触肉厚測定器により、鋼管杭の肉厚計測を実施した。各作業時間の実績を表 1-5 に示す。

表 1-5(1) ケレン (ROV) による作業時間実績

作業回		時刻	作業時間	備考
潜航 1 回目	開始	9:04:23	0:05:44	P14 で実施
	終了	9:10:07		
潜航 2 回目	開始	9:32:51	0:08:16	P14 で実施
	終了	9:41:07		
潜航 3 回目	開始	9:49:50	0:06:04	P14 で実施
	終了	9:55:54		
潜航 4 回目	開始	10:53:35	0:16:06	P14 で実施
	終了	11:09:41		
潜航 5 回目	開始	13:16:48	0:17:36	P14 で実施
	終了	13:34:24		
潜航 6 回目	開始	13:48:43	0:16:04	P14 で実施
	終了	14:04:47		

表 1-5(2) 肉厚測定 (ROV) による作業時間実績

作業回		時刻	作業時間	備考
潜航 1 回目	開始	12:58:35	0:21:13	P17 で計測テスト
	終了	13:19:48		
潜航 2 回目	開始	13:49:56	0:15:15	P16 で計測 (データ取得時間 13:57~14:02)
	終了	14:05:11		
潜航 3 回目	開始	14:25:45	0:10:37	P16 で計測テスト
	終了	14:36:22		

表 1-5(3) 非接触肉厚測定 (ROV) による作業時間実績

作業回		時刻	作業時間	備考
潜航 1 回目	開始	12:53:59	0:26:24	P17 で計測テスト P16 で計測テスト
	終了	13:20:23		
潜航 2 回目	開始	13:40:01	0:11:28	P16 で計測テスト
	終了	13:51:29		
潜航 3 回目	開始	14:06:10	0:38:13	P16 で計測 (データ取得時間 14:10~14:30)
	終了	14:44:23		

(1) ROVによるケレンの結果

ROVによるケレン状況写真を図 1-6 に、ケレン後の鋼管杭の写真を図 1-7 に示す。表面の一部（海藻、ホヤの仲間等）は除去できたものの、**鋼管杭に張り付いているカキ殻が固着しており、除去できなかった。**

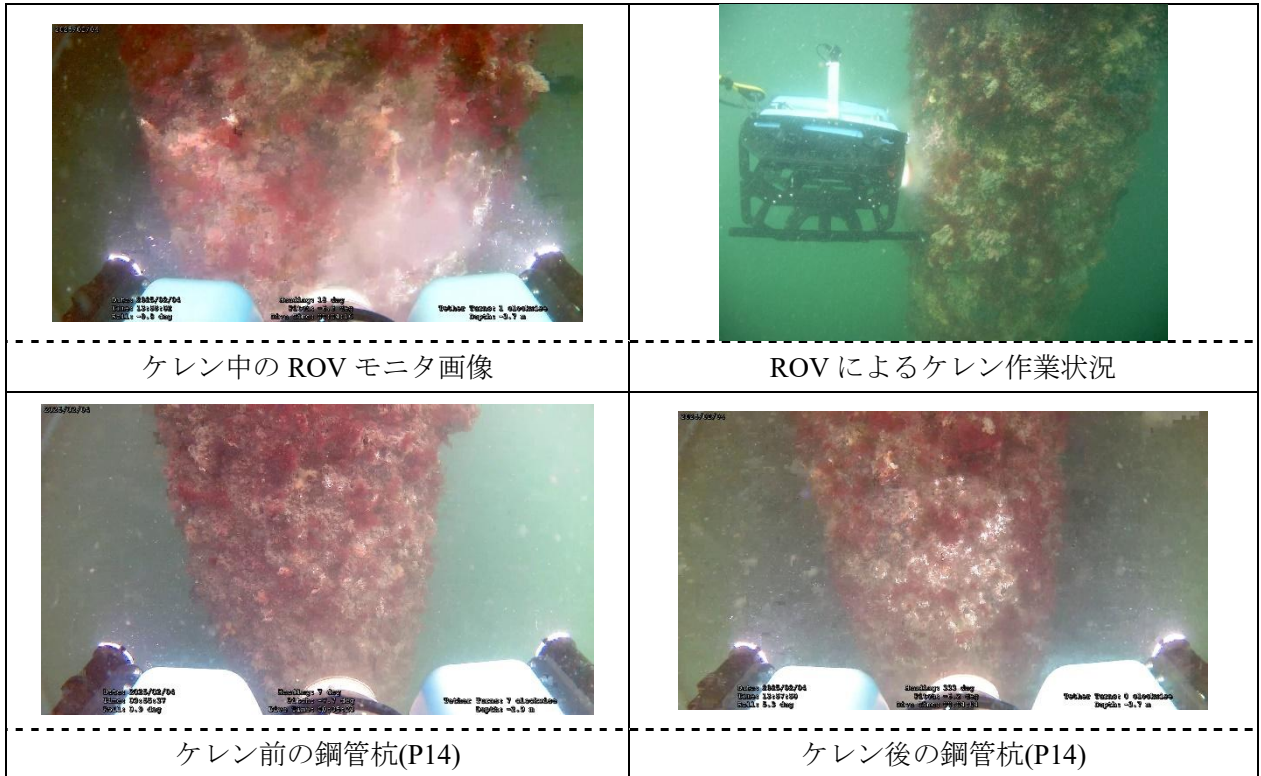


図 1-6 ROV によるケレン状況写真

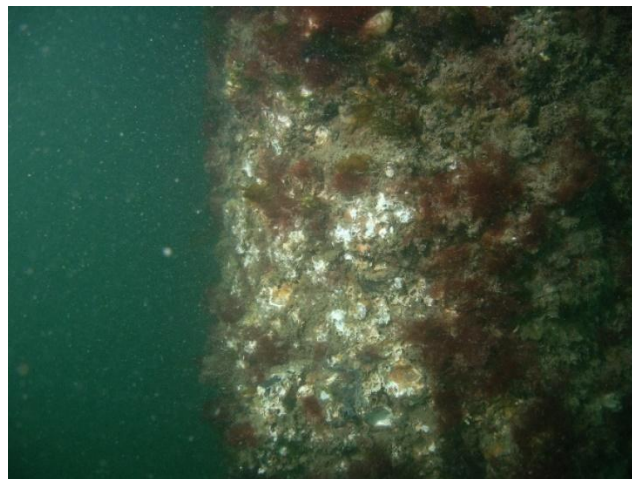


図 1-7 ROV によるケレン後の鋼管杭 (P14)

(2) ROVによる肉厚測定（超音波厚み計）

ROVによるケレンが出来なかったため、ダイバーによりケレンした箇所をROVに搭載したROV用超音波厚み計（Cygnus ROV Mini Mountable）を用いて、鋼管杭(P16)の肉厚を計測した。ROVによる肉厚測定状況写真を図1-8に、ROVによる肉厚測定結果を表1-6に示す。

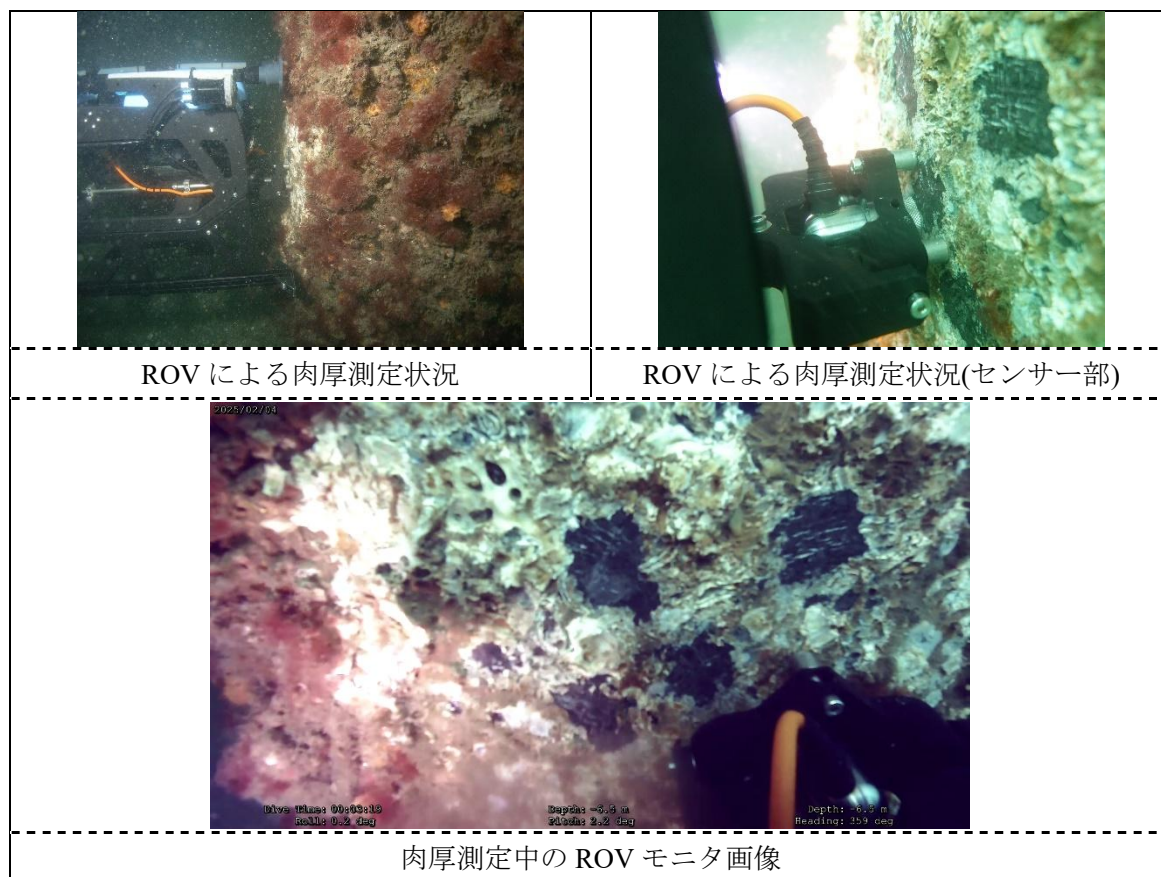


図 1-8 ROVによる肉厚測定状況写真

表 1-6 ROVによる肉厚計測結果(P16)

計測回数	計測時刻	肉厚(mm)	計測回数	計測時刻	肉厚(mm)
1回目	13:57	8.05	11回目	13:59	8.95
2回目	13:57	9.75	12回目	14:01	9.00
3回目	13:57	10.25	13回目	14:01	9.00
4回目	13:57	9.20	14回目	14:01	8.95
5回目	13:58	8.00	15回目	14:01	8.95
6回目	13:58	8.95	16回目	14:01	8.95
7回目	13:58	9.00	17回目	14:01	8.95
8回目	13:58	8.95	18回目	14:01	8.95
9回目	13:58	8.95	19回目	14:02	8.95
10回目	13:58	8.95			

※異常値と思われる値は除外した

ROV による肉厚測定結果が妥当な値であったかどうかを確認するために、ROV と同じ計測箇所
 でダイバーが超音波厚さ計 (UMX-2) を用いて鋼管杭(P16)の肉厚を計測した。ダイバーによる
 肉厚計測状況を図 1-9 に、ダイバーによる肉厚測定結果との比較を表 1-7 に示す。ROV による肉
 厚測定結果は、ROV が水流や波高により動いてしまう影響で一部外れ値が確認されたが、おおむ
 ね、ダイバーの計測値と近い値となった。

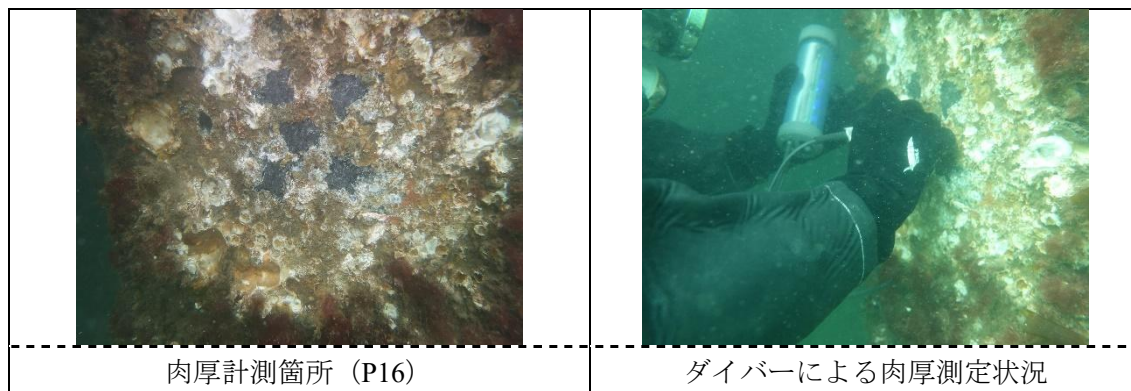


図 1-9 ダイバーによる肉厚測定状況写真

表 1-7 ダイバーによる肉厚測定結果との比較

ダイバーによる肉厚測定結果 (超音波厚さ計 (UMX-2)) (mm)	ROV による肉厚測定結果(平均) (Cygnus ROV Mini Mountable) (mm)
9.24	8.98

(3) ROVによる非接触肉厚測定

ダイバーがケレンした箇所（ダイバーによる肉厚測定を実施）でROVに搭載した非接触肉厚測定器(SPEC-01)を用いて、キャリブレーションを実施した(鋼管杭 P16 DL=-5.5m 付近)。キャリブレーション値は、前段に示した超音波厚さ計 (UMX-2) の計測結果 9.24mm を使用した。

キャリブレーション後、ケレンしていない箇所においても、ROV に搭載した非接触肉厚測定器 (SPEC-01)を用いて、鋼管杭の肉厚を計測した。ROV による肉厚測定状況写真（非接触肉厚測定器）を図 1-10 に、ROV による肉厚測定結果を表 1-8 に、ダイバーによる肉厚測定結果との比較を表 1-9 に示す。計測結果は 8.10~10.90mm と振幅はあるものの、平均するとダイバーの計測値よりやや厚めの結果となった。

なお、上層付近 (DL=0.5m) では特に計測の際には、波浪（有義波高 0.2m 程度）の影響によりセンサーが動揺し、計測できないことが多かった。

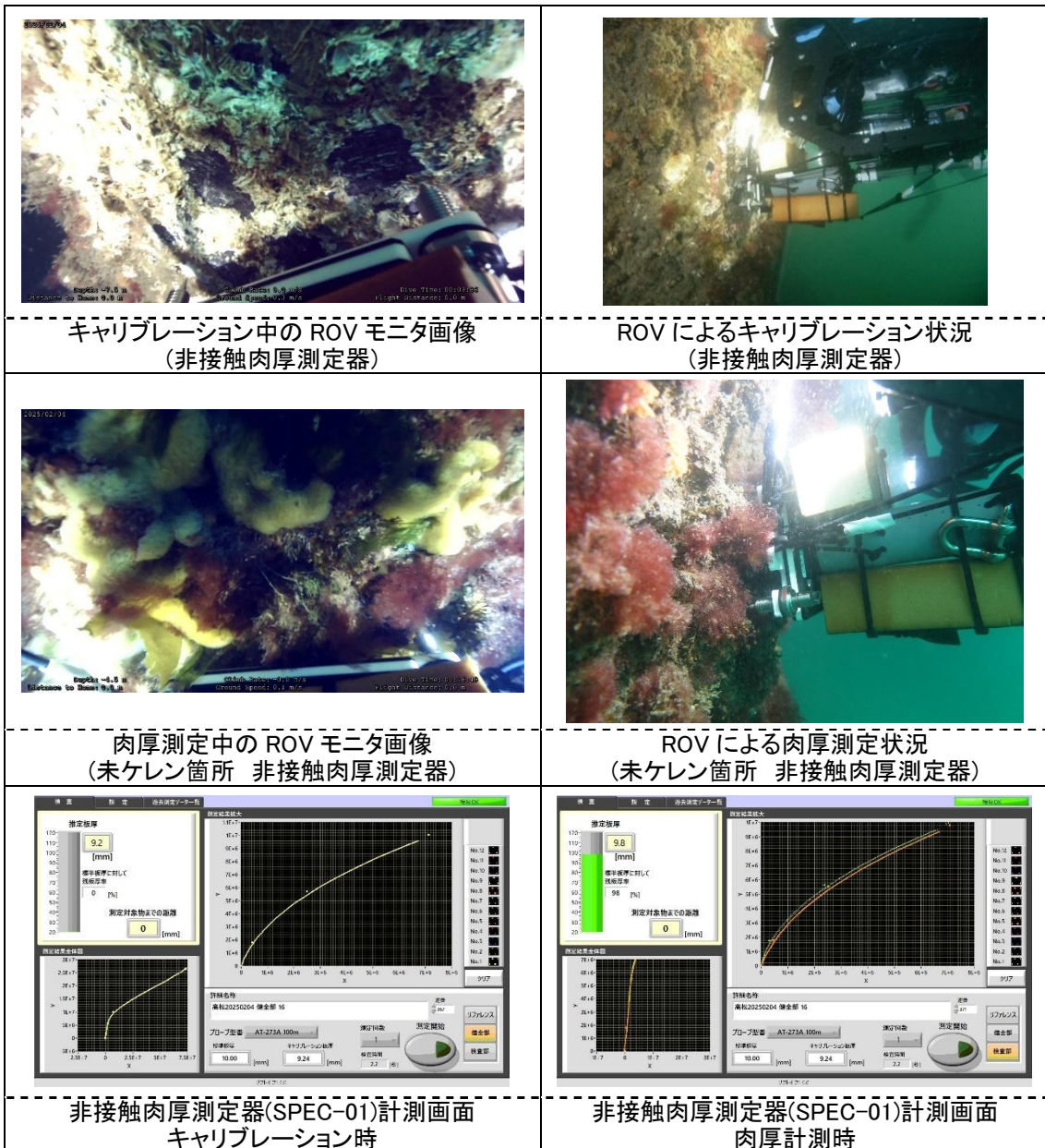


図 1-10 ROV による肉厚測定状況写真（非接触肉厚測定器）

表 1-8 (1) 非接触肉厚測定器による肉厚測定結果 (DL=-0.5m 付近)

計測回数	計測時刻	肉厚(mm)
1	14:27:21	8.10
2	14:29:28	10.90
肉厚(平均)(mm)		9.50

表 1-8 (2) 非接触肉厚測定器による肉厚測定結果 (DL=-2.5m 付近)

計測回数	計測時刻	肉厚(mm)
1	14:17:01	10.06
2	14:18:50	10.20
3	14:19:37	10.30
4	14:20:26	8.90
5	14:20:40	10.50
6	14:21:14	9.30
肉厚(平均)(mm)		9.88

表 1-8 (3) 非接触肉厚測定器による肉厚測定結果 (DL=-5.5m 付近)













計測回数	計測時刻	肉厚(mm)
1	14:09:50	10.30
2	14:10:19	10.50
3	14:10:19	10.10
4	14:12:21	10.24
5	14:12:29	9.77
6	14:12:51	9.29
7	14:13:03	10.22
8	14:14:59	8.77
肉厚(平均)(mm)		9.90

表 1-9 ダイバーによる肉厚測定結果との比較 (DL=-5.5m 付近)

ダイバーによる肉厚測定結果 (超音波厚さ計(UMX-2)) (mm)	ROVによる肉厚測定結果(平均) (非接触肉厚測定器) (mm)
9.24	9.90

2 代表的な水中ロボの選定について

表 2-1 代表的な水中ロボの選定（参考）

種類	機器等名称 (開発会社)	開発	機材写真 (参考 URL より引用)	性能	特徴 (アタッチメントは、カタログ等に掲載されているものを記載)	水中可視化技術	水中可視化技術	付着除去・非破壊・非接触		参考価格	参考 URL	備考
						カメラ等を活用	超音波を活用 (濁りの影響無)	付着物の除去	水中ロボによる 肉厚測定			
ROV	FIFISH V6 PLUS (QYSEA 社)	中国		解像度性能: 12M(4000×3000pixel 程度) サイズ: 横 331mm/高さ 143mm/奥行 383mm 重量: 5kg 最大潜航可能水深: 150m 最長稼働時間: 6 時間 最大搭載重量: 不明	小型で 12M のカメラを搭載。ライトも 6000 ルーメンと明るい。レーザースケールを標準装備しており、ターゲットのサイズを計測可能 アタッチメント: マニピュレータ・採水器・DVL・USBL 測位システム・水質計・イメージングソナー・マルチビームソナー	◎	×	×	×	40~200 万円程度 (安価)	https://www.cfd.co.jp/biz/product/detail/fifish-v6-plus-150m.html	-
	CHASING ・ M2 ・ M2 S ・ M2 PRO ・ M2 PRO MAX (CHASING 社)	中国		解像度性能: 12M(4000×3000pixel 程度) サイズ: 横 294mm/高さ 196mm/奥行 608mm 重量: 約 4.5~5.7kg 最大潜航可能水深: 100~150m 最長稼働時間: 4 時間(外部電源システム有) 最大搭載重量: 不明	オプションの外部電源(ショアベース電源システム)を利用すれば、稼働時間に制限なし。 アタッチメント: 水質計・採水器・ショアベース電源システム・マニピュレータ・レーザースケール・イメージングソナー・USBL 測位システム・DVL・マルチビームソナー	◎	×	×	×	30~90 万円程度 (安価)	https://www.cfd.co.jp/biz/product/release/chasing-m2pro-max.html	-
	SEASAM (Delair Marine 社)	仏蘭西		解像度性能: FullHD(1920×1080pixel) サイズ: 横 450mm/高さ 230mm/奥行 550mm 重量: 9kg 最大潜航可能水深: 100m 最長稼働時間: 1.5 時間 最大搭載重量: 不明	ダイバー追跡機能があり、ダイバーの作業時状況を船上においてリアルタイムで確認することが可能。 アタッチメント: なし	△	×	×	×	不明	https://www.sea-breath.com/product/notioplus/seasam	-
	BlueROV2 (BlueRobotics 社)	米国		解像度性能: FullHD(1920×1080pixel) サイズ: 横 338mm/高さ 254mm/奥行 457mm 重量: 約 12kg(バッテリー込み) 最大潜航可能水深: 100m 最長稼働時間: 2 時間 最大搭載重量: 1.2kg	組み立て式の ROV であり、アタッチメント以外のサードパーティーの部品を組み込みやすい。 アタッチメント: マニピュレータ・イメージングソナー・DVL・USBL 測位システム・マルチビームソナー・音響カメラ	△	△	◎	◎	100 万円程度	https://hovering.co.jp/kusatsu/water/bluerov2/	・ケレン装置搭載可能 ・超音波・非接触肉厚測定器搭載可
	DiveUnit300Lite (FullDepth 社)	日本		解像度性能: FullHD(1920×1080pixel) サイズ: 横 410mm/高さ 375mm/奥行 640mm 重量: 約 29kg(バッテリー込み) 最大潜航可能水深: 300m 最長稼働時間: 4 時間 ホバリング機能あり 最大搭載重量: 不明	ホバリング機能(DVL)を標準装備しており、豊富なアタッチメントを装備可能。 アタッチメント: マルチビームソナー・USBL 測位システム・ラインレーザー・金属探知機・肉厚測定器・マニピュレータ・採水器・高圧洗浄機	△	△	○	○	700 万円程度 (やや高価)	https://fulldepth.co.jp/product	-
	SRV-8 (OCEANBOTICS 社)	米国		解像度性能: FullHD(1920×1080pixel) サイズ: 横 430mm/高さ 330mm/奥行 500mm 重量: 19kg 最大潜航可能水深: 300m 最長稼働時間: 8 時間 最大搭載重量: 不明	スラスターが 8 つ装備されており、方向転換が得意。 アタッチメント: マルチビームソナー・USBL 測位システム・DVL・マニピュレータ・イメージングソナー	△	△	×	×	不明	https://oceanbotics.com/srv-8/	-
	Fusion (STRATEGIC ROBOTIC SYSTEMS 社)	米国		解像度性能: HD(1280×720pixel) サイズ: 横 477mm/高さ 275mm/奥行 686mm 重量: 25kg 最大潜航可能水深: 300m 最長稼働時間: 4 時間 ホバリング機能あり 最大搭載重量: 不明	イメージングソナー・サイドスキャンソナー・USBL 測位システム・DVL・レーザースケールを標準装備。AUV としても使用可能。 アタッチメント: マニピュレータ・ダイバーモジュール(モニタを介するダイバーへの位置情報伝達)	△	△	×	×	不明	https://www.nipponkaiyo.co.jp/product/srs-fusion/	-
	SeaROVER (Teledyne Benthos 社)	米国		解像度性能: 470TVL サイズ: 横 591mm/高さ 568mm/奥行 746mm 重量: 32kg 最大潜航可能水深: 300m 最長稼働時間: 制限なし 最大搭載重量: 不明	オープンフレーム構造でカスタマイズの自由度が高い機種。 水中 3D スキャナーを搭載 アタッチメント: マルチビームソナー・マニピュレータ・イメージングソナー・ADCP・DVL・USBL	△	○	×	×	数千円 (高価)	https://www.hydro-sys.com/files/product/files/catalog/073_SeaROVER_20160801.pdf	-
	FALCON (SAAB Seacye 社)	英国		解像度性能: 480TVL サイズ: 横 600mm/高さ 500mm/奥行 1000mm 重量: 60kg 最大潜航可能水深: 300m 最長稼働時間: 制限なし 最大搭載重量: 14kg	SAAB Seacye 社の中では一番小型で軽量の ROV。機体重量 60kg に対して、最大搭載重量は 14kg と大きい。 アタッチメント: USBL 測位システム・マニピュレータ・クリーニングブラシ・イメージングソナー・音響カメラ	△	△	×	×	不明	https://www.marimex.co.jp/catalog/rovauv/3970/	-
	H300V (Exail Robotics SAS 社)	仏蘭西		解像度性能: FullHD(1920×1080pixel) サイズ: 横 600mm/高さ 530mm/奥行 840mm 重量: 75kg 最大潜航可能水深: 300m 最長稼働時間: 制限なし 最大搭載重量: 8kg	高機動性の ROV で最大前進速度は 3.5 ノット。最大搭載重量も 8kg あるため、様々なアタッチメントを搭載可能。 アタッチメント: 水中 3D スキャンソナー・USBL 測位システム・マニピュレータ・サイドスキャンソナー・イメージングソナー・金属探知機	△	△	×	×	不明	https://www.hydro-sys.com/detail.php?pid=174&lid=9	-
AUV	i3XO EcoMapper AUV (YSI 社)	米国		解像度性能: - (カメラなし) サイズ: 横 147mm/高さ 147mm/奥行 2160mm 重量: 約 40kg 最大潜航可能水深: 100m 最長稼働時間: 6 時間 最大搭載重量: 不明	予め設定したルート(コース・深度)を自動航行することが可能。AUV の中では、比較的小型であり、人力での持ち運びが可能。AUV 本体と各種センサー類がパッケージ化されているため、機体に伴う労力はほぼゼロ。パッケージ化の中にはカメラは含まれていないものの、別途取り付けは可能。 パッケージ内容 DVL・INS・イメージングソナー・サイドスキャンソナー・水質計	×	○	×	×	不明 (非常に高価)	https://www.ejec.ej-hds.co.jp/case/maintenance/kouwantenken-2/	-
	TUNASAND 級 YOUZAN	日本		解像度性能: 4k サイズ: 横 700mm/高さ 770mm/奥行 1300mm 重量: 275kg 最大潜航可能水深: 2000m 最長稼働時間: 8 時間 最大搭載重量: 不明	低速かつ決められた高度で潜航し、海底環境を自動で精密に調査することが可能。「オープンフレーム構造」で調査内容に応じて搭載機器を交換可能。障害物を自動で検知・回避する機能や緊急時の自動浮上機能を備え、最大潜航可能水深は 2000m。 パッケージ内容 DVL・INS・USBL・イメージングソナー・サイドスキャンソナー・水質計	△	○	×	×	不明 (非常に高価)	https://www.ideacon.co.jp/technology/detail/20231019154926.html	-

【凡例】◎: 適用可能 ○: 適用は可能であるが課題有り(高価など) △: 適用の可能性はあるが、カメラの推奨画素数を満たしていない、高価かつ大型であるなどの制約が有り適用性が低い ×: 適用不可

注) 上記の表の内容は、令和 8 年 3 月時点での情報であるため、最新の情報を収集し選定することが望ましい。

3 その他の技術

3.1 AUV（自律型無人探査機）

AUVは、事前にプログラミングしておくことにより、自律制御（ケーブルレス）により水中を航行し、写真撮影、海底地形データの取得等が可能で広範囲での活動が可能である。

大型であることや非常に高価な機器であるため、現時点で港湾施設の点検に用いるには、課題がある。

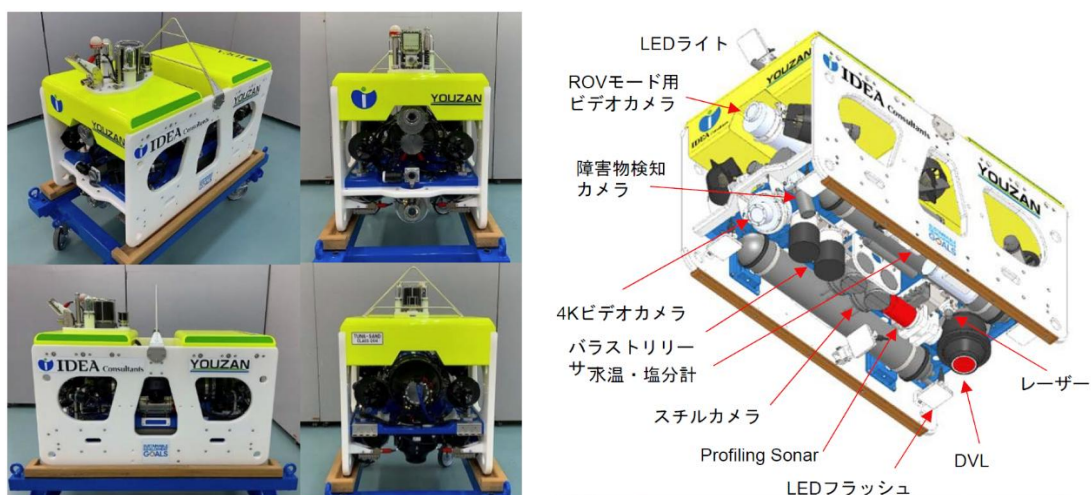


図 3-1 ホバリング型 AUV の仕様（例）

3.2 水中における位置特定技術

水中における位置の特定について、GNSS で使用される電波は水中では吸収されやすいため使用できない。そのため、現在、主に水中で位置特定技術として利用されているのは、主に水中音響測位と INS（慣性航行システム）を利用した 2 つの技術がある。

(1) 水中音響測位装置

水中に設置した送受信機間で音波による通信を行い、音波の到達時間と音速度から距離を各受信機間の時間差または位相差から方向を計算し、位置を特定する方法である。

水中部の位置特定が可能であり、海表面で GNSS のデータを取得しているため、潜航時間が長くても誤差の蓄積がないが、送受信機間の音波到達時間を計測することにより距離を計算しているため、ドップラー効果の影響、マルチパスの影響等により測位の誤差が大きくなる課題がある。

(2) INS(慣性航法システム)

INS(慣性航法システム Inertial Navigation System)とは、3つのジャイロセンサーと3つの加速度計を組み合わせたもので、各センサーから得られた角度と加速度および計測時間から相対的な位置、速度、方位、姿勢を計算する装置である。運用性が高く（ROVに取り付けるため、その他の装備が必要ない）、船との距離や障害物に影響を受けにくい。

潜航時間が長いほど、誤差が蓄積されて精度に影響を及ぼす。誤差（センサーによる測定誤差、重力による影響、積分時(台形近似)の誤差等）が時間とともに蓄積していくため、長時間の潜航時には誤差が蓄積し、大きくなるのが欠点である。

3.3 海中音響通信技術活用によるケーブルレス化

海中音響通信による浅海域海中における無線通信は、これまで遅延波などの影響により正常な通信が困難であったが、遅延波の影響を除去する時空間等化技術と環境雑音耐性向上技術を組み合わせることで、これは、従来の10倍以上高速となる伝送速度で、映像を送ることが可能な技術である。

本技術を活用することにより、ROVのケーブルレス化が可能になれば、ROVを使用する際の懸念事項のケーブルの絡まりがなくなるため、今後、活用が期待される技術である。

世界初、海中音響通信技術活用による1Mbps/300m伝送 を達成し完全遠隔無線制御型水中ドローンを実現

～6G-IOWNがめざす「超カバレッジ拡張」に向けて前進～

日本電信電話株式会社(代表取締役社長:島田 明、以下「NTT」)、株式会社NTTドコモ(代表取締役社長:井伊 基之、以下「ドコモ」)、NTTコミュニケーションズ株式会社(代表取締役社長:丸岡 亨、以下「NTT Com」)は、海中での高速無線通信の実現をめざし、海中音響通信技術^(※1)(以下、「本技術」)を用いた共同実験を行い、世界初の海中音響通信による浅海域(水深30m程度)での伝送速度1Mbps/300mを達成する伝送実験(以下、「本実験」)に成功しました。

本実験は、NTTが独自に研究開発した海中音響通信の高速化を実現する時空間等化技術^(※2)と安定化を実現する環境雑音耐性向上技術^(※3)を用いて、世界で初めて浅海域における伝送速度1Mbps/300mに達し、既存技術の10倍の伝送速度となる無線伝送実験に成功したものです。また、本技術に対応した世界初完全遠隔無線制御型水中ドローン(以下「本水中ドローン」)を実現しました。

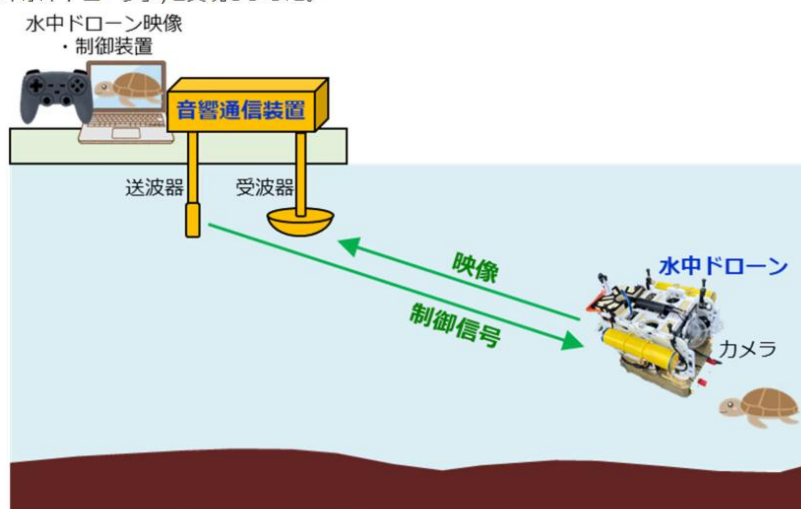


図3 水中ドローンのシステム構成

※NTTグループホームページより抜粋

3.4 参考となる資料

- ・港湾の施設の新しい点検カタログ 国土交通省港湾局
- ・港湾施設の点検・補修技術ガイドブック 一般財団法人 港湾空港総合技術センター

※適宜、更新されているため、最新版を活用することが望ましい。