

音響・レーザー機器を用いた3D可視化技術の開発と活用事例

いであ株式会社 環境調査事業本部 環境調査事業部
古殿 太郎、高島 創太郎、西林 健一郎、大野 敦生、坂本 葉月

インフラ老朽化や自然災害の増加、人口減少による潜水土の高齢化・不足、さらに持続可能な海洋の開発と海洋環境保全との両立などの課題に対して、音響・レーザー機器やROV、UAVといったロボットを活用した“3D可視化技術”は非常に有効である。3D可視化技術の開発と活用事例を紹介する。

1. はじめに

河川護岸や港湾、漁港、魚礁施設などのインフラは、多くが高度経済成長期に建設されたため老朽化が進み、維持管理・点検が必要とされる施設は膨大な数にのぼる。さらに地震や地球温暖化に伴う大規模災害によるインフラの破損も増加傾向にあり、過酷な状況下での速やかな点検・復旧が求められている。一方でインフラの点検は、主に調査員や潜水土が目視観察するため、結果にバラツキが生じやすく客観性に欠けることが指摘されている。水中部は濁水中や高流速、大水深では目視できないなど課題も多い。さらに人口減少・少子高齢化による熟練調査員、潜水土の不足も深刻な問題である。このような課題に対して国土交通省は、平成24年度より建設生産システムの効率化・高度化を目的に3Dモデルを設計・施工・維持管理に活用するCIM(Construction Information Modeling/Management)を、更に平成28年3月には「国土交通省生産性革命本部」を設置してi-Construction¹⁾を展開し、「生産性革命」に取り組んでいる。水産庁では、漁港施設機能の適切な発揮・施設の長寿命化・将来の維持管理費用の縮減を図るため、水産基盤ストックマネジメント事業を創設するとともに、「水産基盤施設機能保全計画の手引き」、「水産基盤施設ストックマネジメントのためのガイドライン」を策定し、対策を進めている^{2) 3) 4)}。

2030アジェンダでは、国際開発目標(SDGs)の一つとして“海の豊かさを守ること”を掲げ、海洋・海洋資源の持続可能な開発・利用と海洋環境保全に向けた取り組みが求められている。日本は周辺を海に囲まれた海洋立国であり、平成30年5月に第3期海洋基本計画が閣議決定された。海洋エネルギー・鉱物資源の開発、海洋再生可能エネルギーの利用促進、海洋環境の保全などが掲げられ、第2期SIP(内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム)での海のジパング計画⁵⁾など様々な取り組みが行われている。

インフラの点検・維持管理や深海・広範囲を対象とした海洋調査では、音響やレーザー機器によりインフラ形状や地形を“3Dモデルとして可視化”する技術やロボットの活用が有効である。本講演では陸上・水中インフラと水底地形、地質構造を可視化する技術とその活用事例をご紹介します。

2. 主な水中音響機器の概要

水深を計測するための音響機器は1920年代に開発され、当初は真下方向に1本の音波を発信し水底に反射して戻るまでの時間から水深を推定するシングルビームでの測深であった。1980年台に複数の音波を扇状に発信し海底形状を3Dで計測する音響機器が登場し、時代のニーズに合わせて発展した。2011年の東日本大震災では広域の海底がれき探査に活用され被災地の復興に大きな役割を果たした。

(1) マルチビームソナー

マルチビームソナー(以下MB)は音波を下方向に扇状に発信する音響機器で、調査船に艀装してGNSS、慣性航法装置と同期させることにより、航行しながら水底地形を3D計測する。MBの仕様とシングルビーム(SB)との比較を図1に示す。MBは一度に水深の約3倍の幅を計測できるため広範囲の効率的な測量・調査に適しており、周波数により浅海～水深10,000m以深でも使用できるため港湾の浚渫工事から海底資源探査まで広く普及している。音波の特性上複雑な形状や隅角部は乱反射により計測できない。MBにより計測した海底面の3D点群データを段彩図として図2に示す。海底形状はXYZ座標を持つ多数の点の集合により表現されるため、距離・面積・体積の算出が可能となる。3D点群データは視覚的に形状を把握しやすいように、水深が浅いと赤、深いと青となる段彩図で表現されることが多い。

項目	仕様
周波数	200~400kHz、700kHz
ビーム幅	0.5° × 1° (400kHz) 0.3° × 0.6° (700kHz)
ビーム数	256
スワス角	10~160°
測定範囲	400m

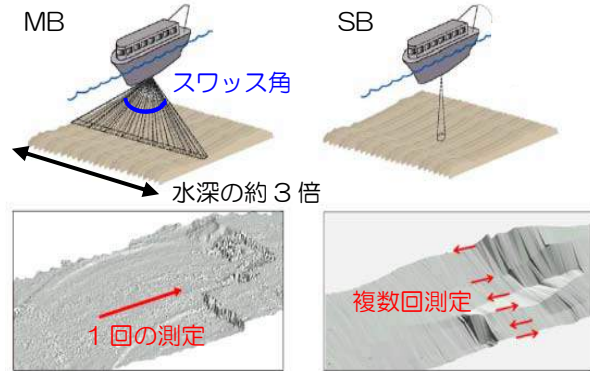


図1 MB(R2Sonic社製 Sonic2024)の仕様及びMBとSBの比較

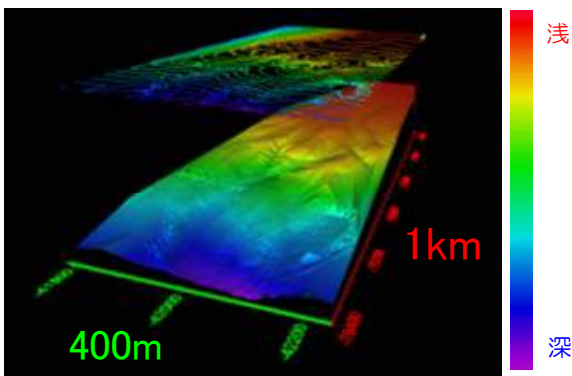
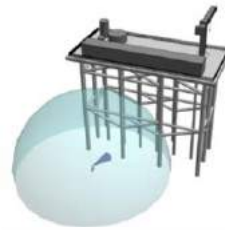


図2 海底面の3D点群データ

(2) 水中3Dスキャナー

水中3Dスキャナー(以下3DSC)は小型・軽量の音響機器で、水底や水中構造物の形状を3D点群データとして計測する。3DSCの仕様を図3に示す。3DSCはMBに比べ周波数が高いため、より高精度・高密度な3D点群データを取得できる。3DSCはソナーヘッドを上下・左右に回転させながら音波を発信するため、護岸などの垂直構造物や水面付近の計測も可能である。一方、計測可能距離は最大で30m、最適距離は1m~15mとマルチビームソナーに比べて短く、水底に静置して計測するため広範囲の計測には適さない。3DSCで計測した栈橋鋼管の点群データを図4に示す。栈橋鋼管は水面付近まで計測されており、土砂の堆積も確認された。



センサー部	
周波数	1.35MHz
ビーム幅	1° × 1°
ビーム数	256
測定範囲	30m
パン・チルト機能	
水平方向(パン機能)	360°
垂直方向(チルト機能)	45° (15° × 3段)

図3 3DSC (Teledyne BlueView社 BV5000)の仕様

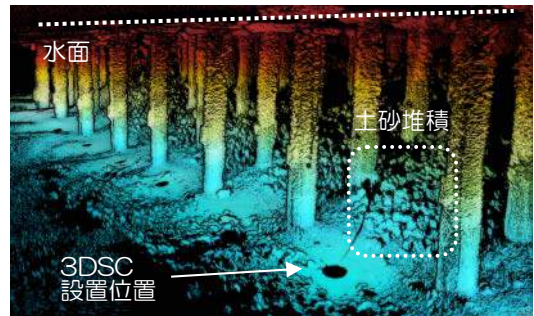


図4 栈橋鋼管の点群データ

(3) サイドスキャンソナー

サイドスキャンソナー(以下SSS)は曳航体の側面方向に音波を発信し返ってきた音波の反射強度を計測する機器であり、反射強度を色の濃淡として描画することで水底面の起伏を画像として表示する。計測概要と計測事例を図5に示す。SSSはMBに比べて一度に広い範囲を計測可能で、反射強度の違いから底質を礫・砂・泥・藻場等に分類することもできるため、水底地形の概査や沈船などの広域探査に使用される。一方、真下方向は計測できず誤差も大きいため、水中構造物等の形状がゆがむことがある。得られる画像は点群データではないためXYZ座標を持たず、CIMへ活用することが出来ない。

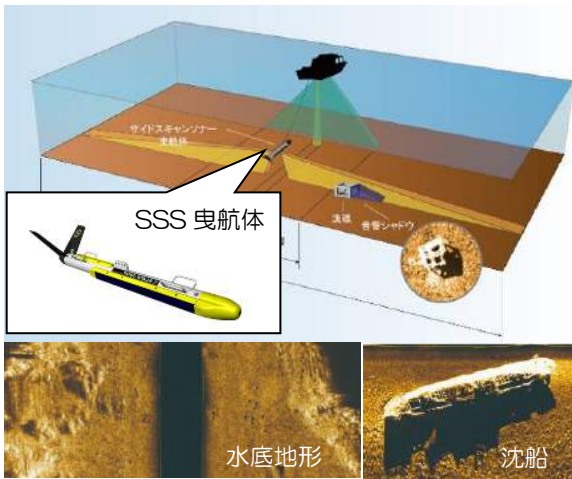


図5 SSSの計測概要と計測事例

(4) サブボトムプロファイラー

サブボトムプロファイラー(以下 SBP)は複数の周波数の音波を下方に発信し、各周波数の反射時間の差から水底の地層構造を計測する音響機器である。計測概要とSBPの仕様を図6に示す。100kHzの音波は軟泥層表面で反射されるが4~15kHzの音波は軟泥層を抜けてその下の固い層で反射するため、その時間差から軟泥堆積厚を推定する。いくつかのポイントで柱状採泥して軟泥層やその下の層の粒度組成を確認し、SBP計測結果と比較することで地質構造を把握する。SBPは作業船直下を計測するため測線をメッシュ状に配置し、計測したデータを処理ソフトで補完することにより地質構造を3D化して表現することが可能となる。

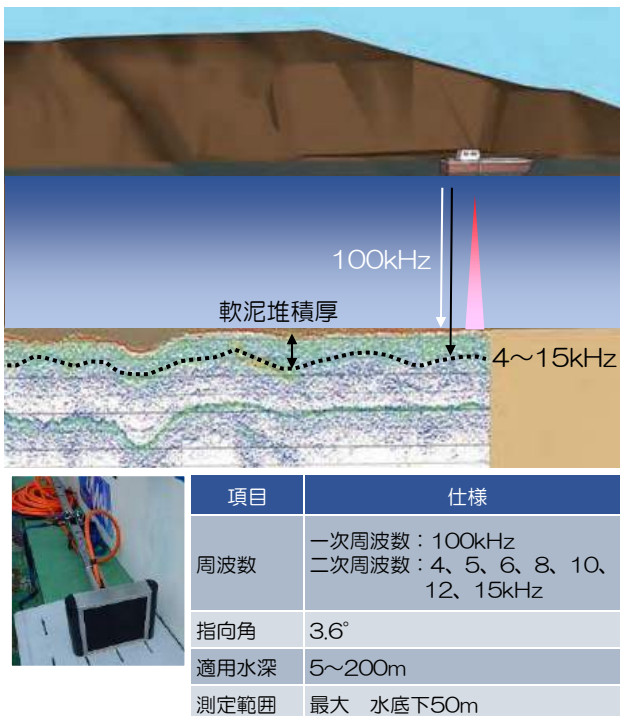


図6 SBP (Innomar Technologie 社 SES2000) の計測概要と仕様

3. 3DSCを活用した水中可視化技術の開発

3DSCは従来、水底に静置した状態で計測するため水深が深いと任意の場所に設置するのが困難で広域計測にも適さなかった。そこで小型軽量という3DSCの特徴を生かし、種々の機器に搭載して任意のピンポイントや広い水域を効率的に計測する技術を開発した。

(1) 水底静置による計測(従来法)

国土交通省関東地方整備局が推進するi-Constructionに寄与する案件として、平成28年度に国土交通省関東地方整備局と(一社)海洋調査協会間で共同研究協定を締結し、神奈川県横浜市にある京浜港ドックで3DSCの水底静置計測による実証試験を実施した。実証試験の概要を図7に示す。京浜港ドック内約25m×50mの範囲に模擬チムニーやマウンド、タイヤ、ロープ、ブロック等の供試体を配置し、陸上レーザーで3D計測した。その後ドック内を湛水し、三脚に据え付けた3DSCを船上から水底に静置して供試体を計測した。

計測結果を図8に示す。3DSCによりチムニー裏側の金属枠の形状も計測され、タイヤの片方は内部に残った空気の影響により立ち上がっていた。3DSCの精度確認結果を図9に示す。3DSCによるマウンド計測結果はより精度の高いレーザー計測と一致した。ブロックの計測では大きさや配置の誤差は2cm未満であった。3DSCの水底静置による計測は、後述する各種機器に搭載しての計測と比較し、最も誤差が小さく点群密度が高い。

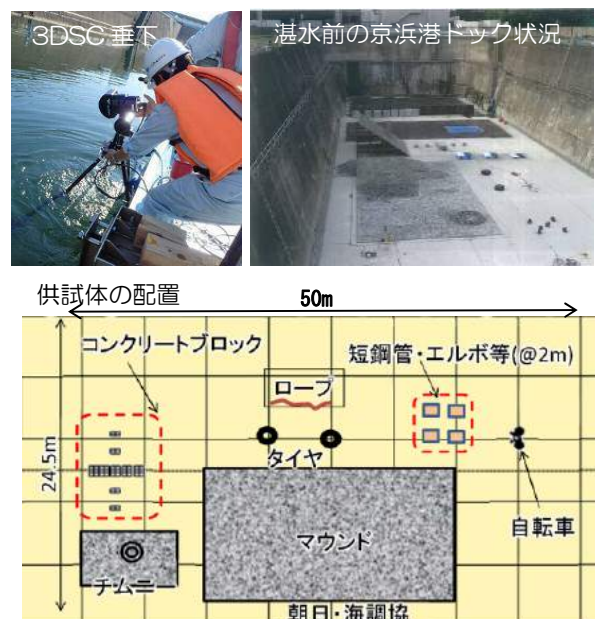


図7 3DSC水底静置計測 実証試験概要

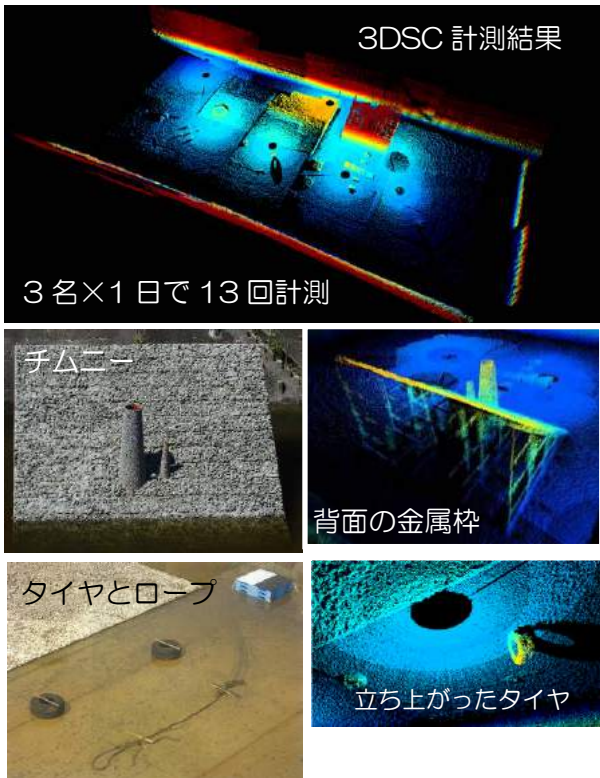


図8 3DSC 水底静置 計測結果

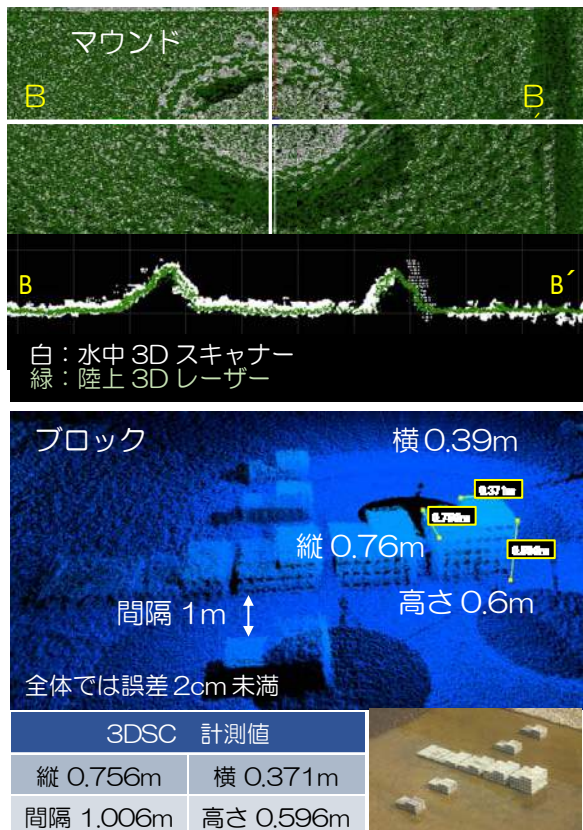


図9 3DSC 水底静置 精度確認結果

(2) クローラー運搬機による陸上からの計測

陸上から河川護岸や港湾岸壁を効率よく詳細に計測する技術開発のために、クローラー運搬機に3DSCを搭載して計測する手法を考案し、平成27年度の国土交通省総合政策局 次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進 水中維持管理分野現場検証(以下、水中ロボ現場検証)に応募した。3DSC搭載クローラー運搬機による計測概要を図10に示す。クローラー運搬機のアームに長さ約2mのポールを装着し下端に3DSC、上端にRTK-GPSを固定した後、3DSCを水面下に垂下して静止状態で計測した。3DSC計測は10m間隔で実施し、陸上部はレーザースキャナーで計測した。現場検証は魚道呑口を含む河川垂直護岸で3名×1日体制で実施し、検証技術の性能確認のために護岸にブロックを設置して、ブロックの位置、形状、サイズも把握した。

護岸計測結果を図11に示す。3DSCにより約80mの護岸を計測し、RTK-GPSの位置情報を基に各計測で得られた点群データを統合した。船舶が侵入できない魚道内部も計測し、魚道呑口周辺では土砂堆積と洗掘が確認された。更に魚道呑口上流にブロックを2個発見し詳細に計測した。3DSCにより計測したブロックを図12に示す。3DSCによるブロックサイズの計測誤差は2cm未満であったが、0.5m/sec程度の流速があり3DSCがわずかに振動したため、波打った形状となった。3DSC搭載クローラー運搬機は高濁度、高流速でも少人数で高精度な3D計測が可能であり、重機不要・普通車で運搬可能と高い汎用性を持つことから、水中ロボ現場検証委員会の最高評価を獲得し翌平成28年度の試行的導入技術に選定された。⁵⁾

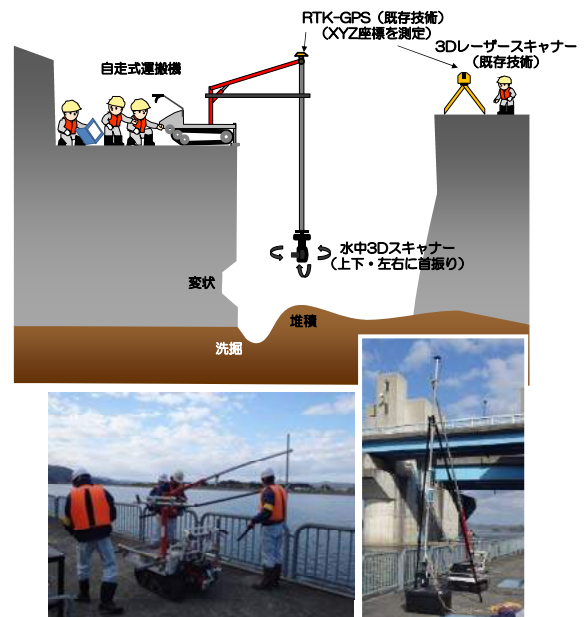


図10 3DSC搭載クローラー式運搬機による計測概要

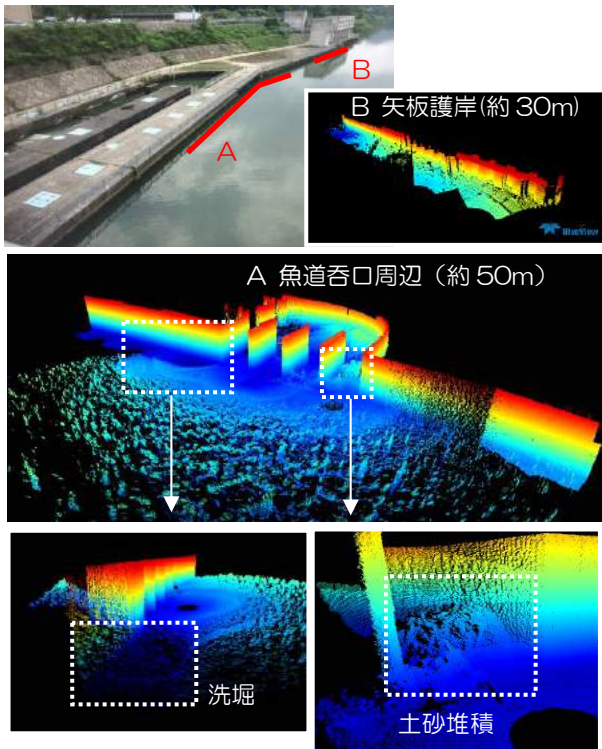


図 11 3DSC による護岸計測結果

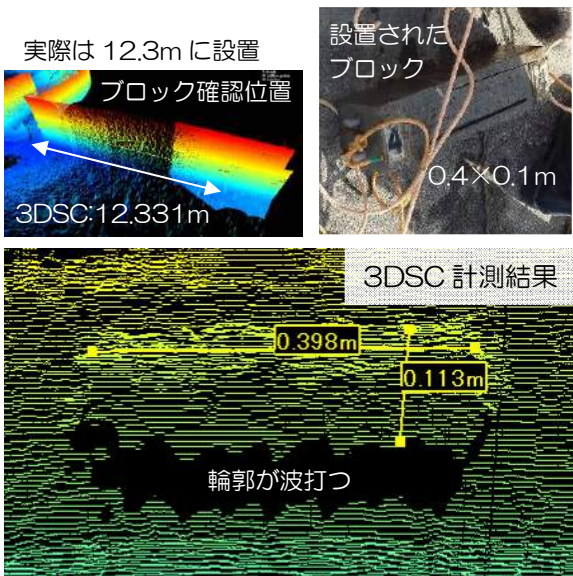


図 12 3DSC によるブロック計測結果

(3) 船舶艀装による機動性の向上

広い水域を効率的に計測するために 3DSC を GNSS、慣性航法装置と同期させる方法を模索し、マルチビームのように船舶に艀装して 2~3 ノットで航行しながら計測するシステムを開発した。計測概要を図 13 に示す。船舶艀装はクランプによりポールを船側に固定し、下端にソナーヘッド、上端に GNSS アンテナを取り付ける。船舶艀装計測により 1 日に約 10 万 m² の計測が可能となり、効率性が飛躍的に向上した。船舶艀装計測も国土交通省により平成 28 年度の試行的導入技術に選定された。

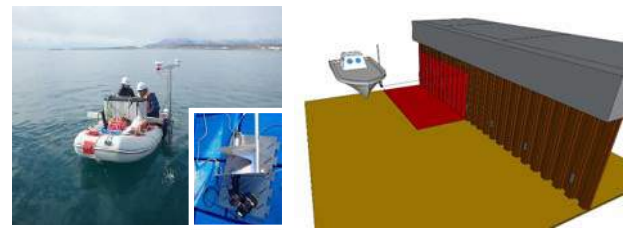


図 13 3DSC 船舶艀装による計測概要

船舶艀装による広域計測の事例を図 14 に示す。河川護岸では各個の消波ブロック形状が正確に再現され、一部にブロックの崩落がみられた。

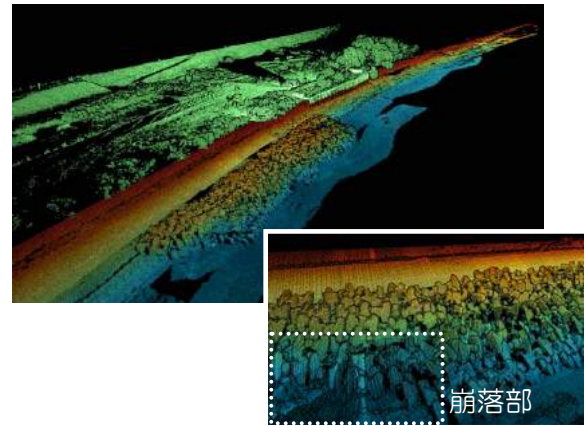


図 14 河川護岸計測結果(陸上部はレーザー計測)

船舶艀装の精度を確認するために、5cm 幅と 10cm 幅の隙間を持つ供試体を作成し、垂直護岸前面に垂下して計測した。計測結果を図 15 に示す。幅 10cm は供試体の形状を判別可能であった。幅 5cm は隙間を確認することはできたが、形状を把握することは困難であった。

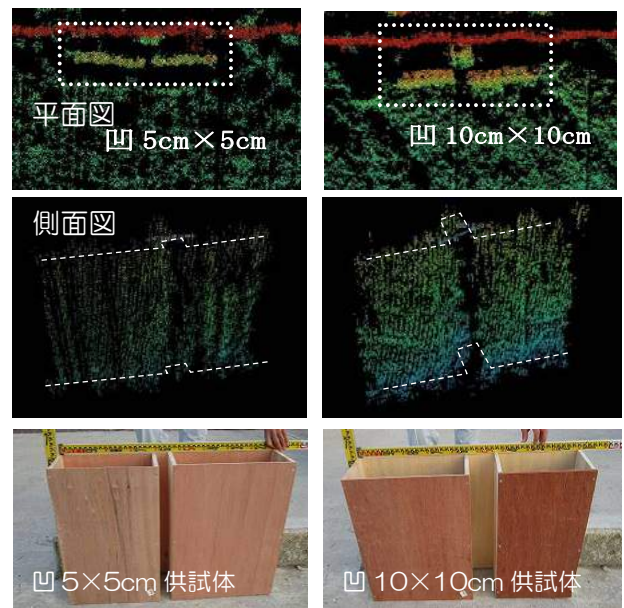


図 15 供試体計測結果(3DSC 船舶艀装)

次に、3DSC の船舶艤装と MB の計測概要を図 16 示す。3DSC 船舶艤装は対象物の形状や水深によりソナーヘッドの上下角（チルト角）を変えて複数回計測し、得られた点群データを統合することにより対象物の全体形状を把握する。スワス角は 42° で計測最大水深は 15m である。MB はスワス角が大きいため 1 回で広範囲を計測できるが、音波は下方向にしか発信できないため水面付近は計測できない。

3DSC と MB による水底構造物の計測結果を図 17 に示す。MB は周波数が低いため水底構造物の形状を正確に再現することが出来ず、点群密度も薄い。

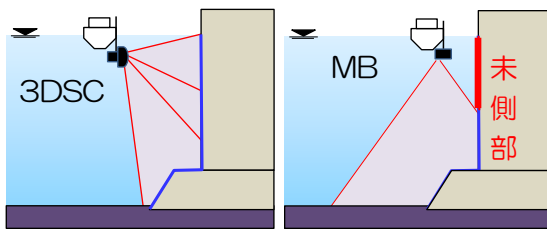


図 16 3DSC と MB の計測概要

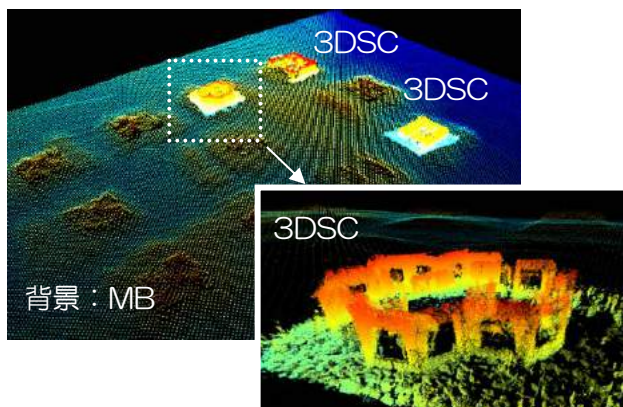


図 17 3DSC と MB による水底構造物計測結果

(4) ROV による水中でのピンポイント計測

水深 100m 以上の水域で任意の場所で 3D 計測・画像撮影するために、平成 25 年から 3DSC 搭載遠隔無人探査機（Remotely Operated Vehicle、以下 ROV）の開発に着手した。当時は 3DSC を搭載した ROV は市販されていなかったため、小型で推進力の強い ROV を選定し搭載機器やスラスタ、浮力材、錘の配置や形状を変えて複数回水中試験を行い、ベストな配置・形状を決定した。更に小型動揺センサーも搭載することにより、ROV 着底・浮遊状態での 3D 計測が可能となった。3DSC 搭載 ROV の計測概要と仕様を図 18 に示す。水中の ROV 位置は USBL（Ultra Short Base Line）方式のトランスポンダーにより作業船からの距離・方位として計測され、あらかじめ海図等を読み込んだ PC 画面上に表示される。



項目	仕様
最高速度・耐圧	3ノット（約5km/h） / 300m
スラスタ	水平2基、鉛直1基、側面1基
サイズ・重量	L75×W60×H57cm / 75kg
測位装置	USBL方式トランスポンダー
主な搭載機器	3DSC、ハイビジョンカメラ、マンピュレーター

図 18 3DSC 搭載 ROV の計測概要と仕様

3DSC 搭載 ROV の CIM への活用を検討するため、平成 26 年度、平成 27 年度の国土交通省 水中ロボ現場検証（ダム）に応募した。ダム取水口の計測結果を図 19 に示す。現場検証ではダム堤体の取水口を 3D 計測し、呑口とゲートに大きな変状がないことを確認した。呑口天端と直下には堆積物が確認された。3DSC では計測できないクラック等の微細な変状を確認するために堤体をカメラで撮影し、フォトマッピングソフトにより統合して 3D 化した（図 20）。ダム貯留水は濁りがあり直近から撮影する必要があったため、堤体の狭い範囲しか撮影できずごく一部しか 3D 化できなかった。一方、目地のような微細な構造も把握することが可能であった。

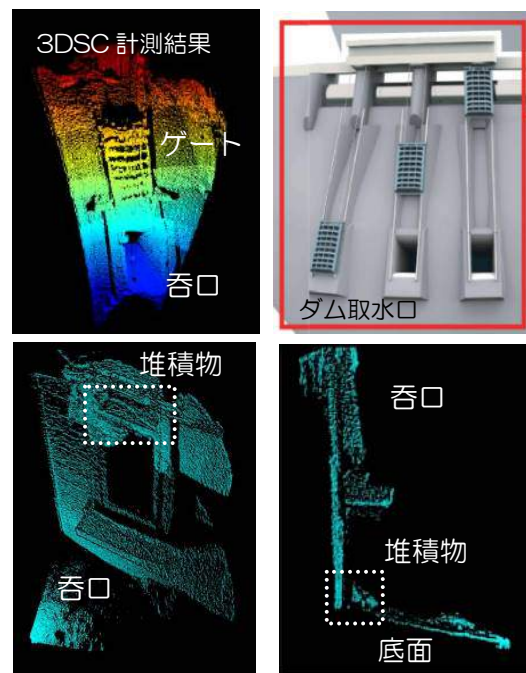


図 19 ダム取水口の計測結果

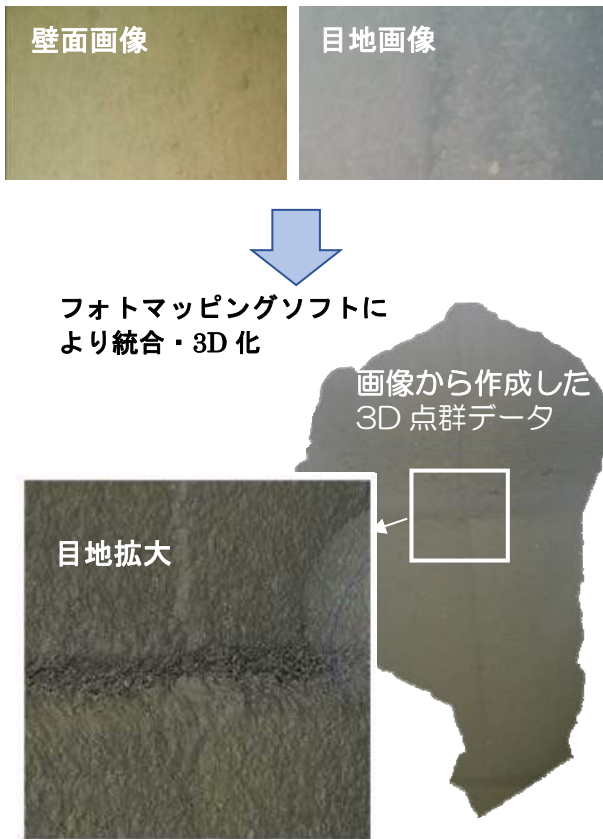


図 20 ダム堤体画像の 3D 化

3DSC 搭載 ROV はダム点検に特化していないため水中ロボ現場検証委員会の最高評価を得ることはできなかったが、他のロボットが画像撮影・解析機能に特化したものが多かったのに対し、唯一音響での 3D 計測が可能であることを示せた。⁵⁾3DSC は大規模出水によるダム堆積物状況確認など高濁度時の調査に活用されている。

4. 主な陸上 3D 計測機器の概要

陸上部の 3D 計測は主にレーザー計測と写真測量（画像撮影・ソフトによる 3D 化）がある。レーザー計測は水中の音響計測よりも高精度・高密度の 3D 点群データが取得でき、同時に画像を撮影することにより RGB（赤緑青）情報を取得して、点群に色を付けたり各種解析に用いることも可能である。計測には 1064nm の波長が用いられる。写真測量はレーザーでは計測できないクラック等の微細な変状も撮影されるため、AI による変状の自動抽出技術も開発されている。

(1) 陸上 3D 計測機器

陸上部の 3D 計測に使用される機器を図 21 に示す。三脚に据え付けるレーザースキャナーや一般にドローンと呼ばれる UAV（Unmanned Aerial Vehicle）は近年広く普及し、各種測量や工事、インフラ点検で日常的に使用されている。UAV は複数のプロペラを持つマルチコプターが一般的だが、当社は航続距離が長く搭載重量も大きいヘリコプタータイプの UAV を改良し、カメラと併せてレーザースキャナーも搭載した。MMS（Mobile Mapping System）は、車両に高性能なレーザースキャナーとカメラ、動揺補正装置、GNSS を搭載し、走行しながら周辺を計測する技術で、測量や地形図作成、道路の点検など様々な分野で活用されている。当社は MMS レーザーと 3DSC を船舶に艀装し水上部と水中部を移動計測する技術を開発した。

他に航空機やヘリコプターにグリーンレーザーを搭載し、陸上～浅水域を測量する手法もある。



UAV	
機体寸法(ローター展開時)	2360×400×660 mm
機体重量(動力用バッテリー含まず)	7.46 kg
最大ペイロード	16 kg
最大飛行時間	約50分(無風時)

図 21 陸上部 3D 計測機器

(2) 陸上部の 3D 計測事例

レーザーによる陸上部の 3D 計測事例を図 22 に示す。UAV によるレーザー計測は搭載する GNSS やレーザーが小型なため、他の機器によるレーザー計測に比べて精度が低い。MMS は広範囲を高密度で計測できるが、点群データのサイズが巨大になるため、高性能の PC やデータ処理ソフトが必要となる。



図 22 レーザーによる陸上部の 3D 計測事例

写真測量は、カメラの座標と対象物が映った複数の写真から対象物の座標を算出し 3D 化する測量手法である。UAV を活用して低空から撮影することにより、高密度の点群データを作成することが可能となる (図 23)。点群データの精度はカメラの位置精度、レンズの補正、写真の重複度等により異なり、草木がある場合はその下の地表部を測量することはできない。砂浜などの単調な画像はソフトが重複部を認識できないため、3D 化できない。

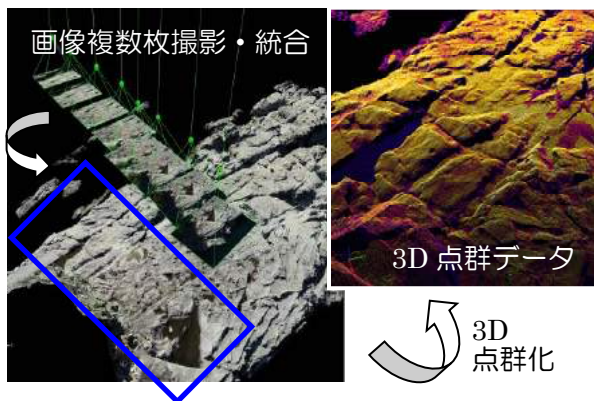


図 23 写真測量による 3D 点群データの作成

5. インフラメンテナンスへの活用事例

国土交通省は、民間企業等により開発された新技術にかかわる情報の共有・提供を目的とするデータベース NETIS (新技術情報提供システム) を運営している。3DSC 搭載クローラー運搬機と船舶艀装が 2018 年に「KT-180031-A 水中 3D スキャナーによる水中構造物の形状把握システム」として NETIS 登録された⁶⁾。現在、3DSC は河川、港湾施設等の点検・維持管理や災害時の緊急調査で幅広く活用されている。以下に具体的な事例を示す。

(1) 関門航路での海底異常物調査

関門航路は関門海峡を縦貫する全長約 50km、幅 500~2,200m、航路水深-12m の狭くて細長い水路で、1 日に 1,000 隻以上の船舶が航行する。潮位差により最大約 10 ノットの潮流が発生し、土砂が運ばれ航路内に堆積するため維持浚渫が必要となるが、太平洋戦争中の不発弾など危険物が残っている可能性がある。事前の磁気探査により浚渫に支障となる異常物が発見されたが、調査は船舶航行が少なく潮流の弱い 2 時間程度で実施する必要があり、潜水士による調査は危険・非効率であった。そこで 3DSC とサブボトムプロファイラー (SBP) による詳細調査を実施した。

3DSC による計測結果を図 24 に示す。MB では異常物を確認できなかったため、3DSC 船舶艀装によりスクリーニングし、僅かな砂漣の乱れから異常物の詳細位置を把握した。その後 3DSC を水底に静置して計測し、海底からの突出物を確認した。

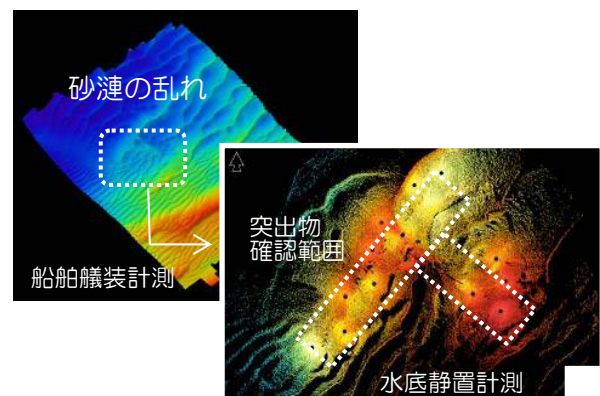


図 24 3DSC による海底異常物の計測結果

3DSC では海底面上の突出物しか計測できないため、異常物全体の大きさを把握できない。そこで海底地質構造の計測に用いられる SBP により地中部を計測した (図 25)。音波は地中の異常物で反射し明確な層が記録されたため、異常物の地中分布を正確に把握した。

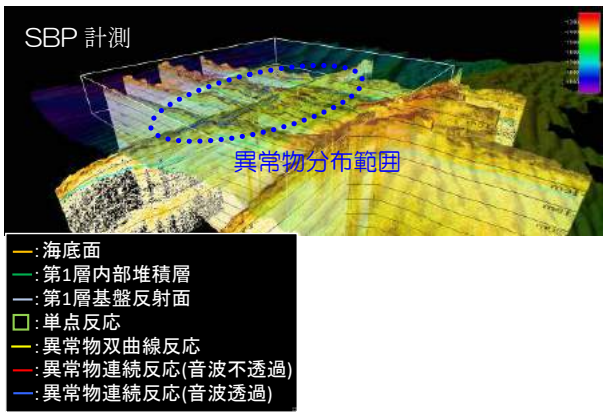


図 25 海底異常物の SBP 計測結果

磁気探査・3DSC・SBP による調査結果を図 26 に示す。磁気探査と SBP 計測結果は一致し、異常物は 2 つあり大きさから沈船と推定された。異常物 1 の 3DSC 水底静置による計測結果（拡大）と後日撮影された突出物画像は一致した（図 27）。

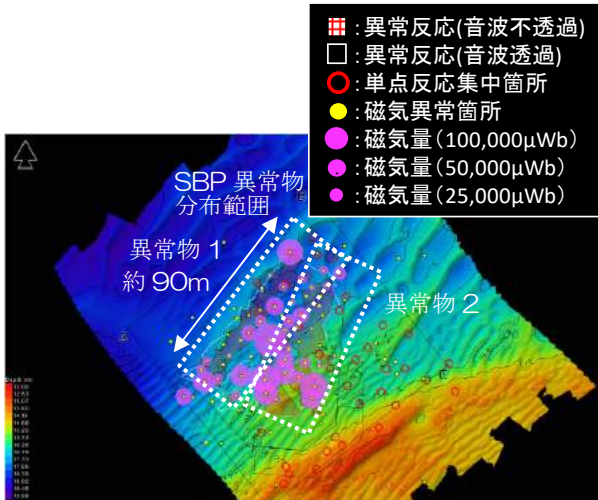


図 26 磁気探査・3DSC・SBP の計測結果

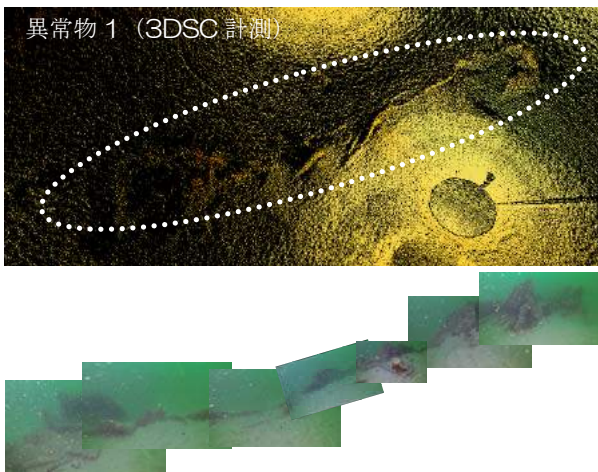


図 27 突出物の形状

(2) 定期点検への活用

橋脚基礎を含む道路施設は 5 年に 1 回の近接目視による定期点検が義務づけられているが、計測技術の発展により近接目視を支援する「点検支援技術」の活用が可能となった。点検支援技術は国土交通省ヒアリング・実証試験・有識者による検討により選定される。3DSC は船上から垂下することにより約 3 時間で橋脚周辺の洗掘状況を詳細に確認することが出来たため（図 28）、令和 2 年 6 月に点検支援技術に選定された（BR030024-V0020 水中 3D スキャナーによる水中構造物の形状把握システム）。⁷⁾現在は港湾施設定期点検の支援技術に応募している。

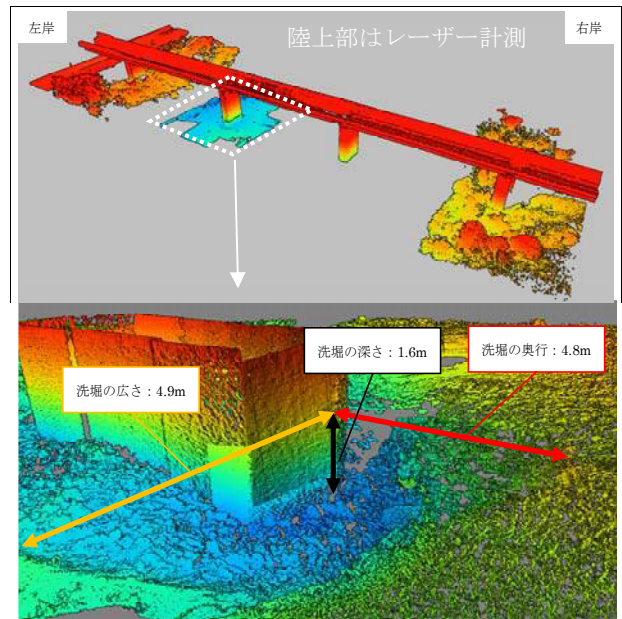


図 28 橋脚水中部計測結果

(3) 効率的な維持管理のための現況データ取得

i-Construction の一環として防波堤の長期的な沈下や災害による損傷などの変状を効率的に把握するためには、現在の状況を初期データとして 3D 計測する必要がある。防波堤の 3D データ計測事例を図 29 に示す。水中部を 3DSC 船舶艀装、水上部を UAV 写真測量し、陸上から水中のシームレスな 3D 点群データを効率的に取得した。

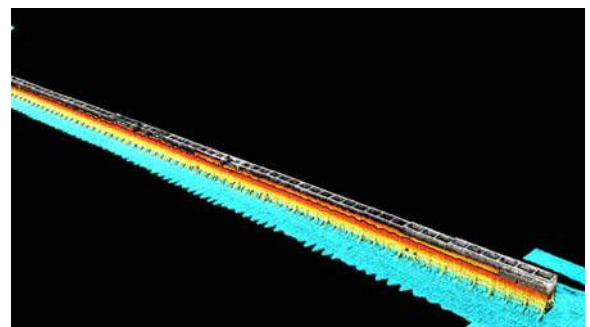


図 29 3DSC と UAV による防波堤の計測結果

(4) 点群データの処理・解析

音響やレーザー機器により取得された 3D 点群データ (.xyz) は、3DCAD 等のソフトで読み込めずファイルサイズも大きいので、そのままでは断面抽出やボリューム計算など設計図面との比較や変状解析ができない。点群を 3DCAD 等に展開し CIM による設計や施工・維持管理に活用するためには、TIN、Mesh 等のメッシュデータに変換する必要がある。これまでのデータ処理ソフトでは水底地形や平面的なインフラ構造物などのシンプルな形状しかメッシュ化できなかったが、最新のソフトでは、石積護岸のような複雑な形状の点群データもメッシュデータに変換できるようになった。

図 30 に石積護岸のデータ処理・解析事例を示す。点群データからの断面図は輪郭が曖昧で設計や精度の高い解析には活用できないが、メッシュデータの断面図は輪郭が明瞭で細い線となり活用可能となった。更に平成 29 年度と平成 30 年度のメッシュデータを重ね合わせることで、変化量が大きい＝損傷が進んだ箇所と損傷の程度を容易に把握することが可能であった。

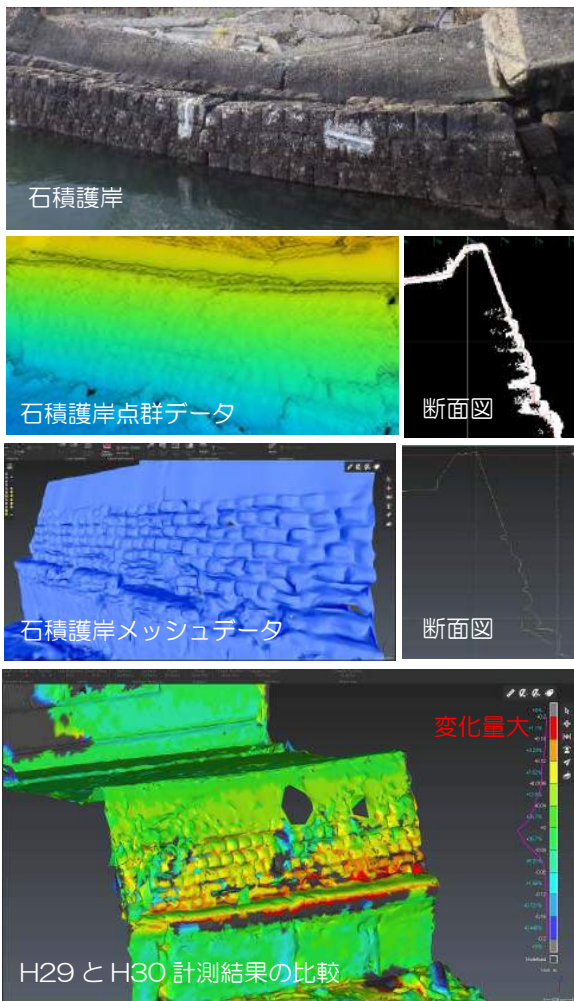


図 30 石積護岸のデータ処理・解析事例

6. 漁港漁場施設への活用

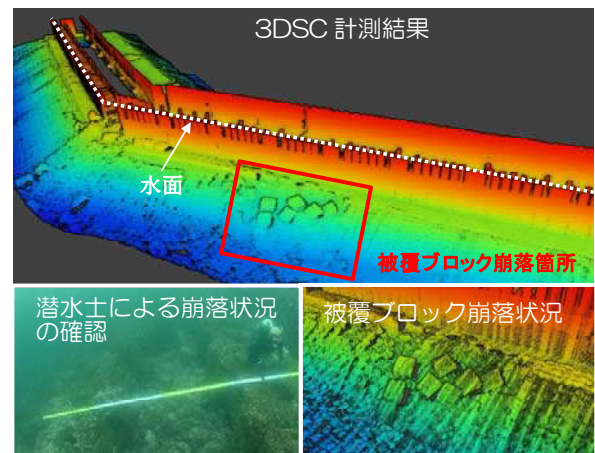
全国には約 3000 の漁港が存在し、点検・補修・更新等の維持管理費用の増大が懸念されている。漁港施設は 5 年～10 年に 1 回の定期点検が定められており、その結果を踏まえて潜水目視による詳細調査が実施される。漁港施設の老朽化度と性能低下の状態を表 1 に示す。水産庁は漁港漁場施設の長寿命化対策検討調査を実施し、平成 29 年からセンシング技術を活用した漁港施設の点検・診断技術の高度化を検討している。その一環として、3DSC 船舶艀装と MB により漁港施設を計測し、老朽化度の判断が可能か検討した。

表 1 老朽化度と性能低下の状態

老朽化度	部材の性能低下の状態
a	部材の性能が著しく低下している状態
b	部材の性能が低下している状態
c	部材の性能低下はないが、老朽化が発生している状態
d	老朽化が認められない状態

(1) 被覆工への適用検討

重力式防波堤を 3DSC と MB で計測し、被覆工の老朽化度判断への適用性を検討した。3DSC による計測結果と 3DSC、MB の適用性を図 31 に示す。3DSC、MB とも潜水土による目視結果と一致し、a～d すべてで適用可能であった。



	老朽化度の判断基準	判定可否	
		3DS	NMB
a	被覆工の散乱があり、かつ捨石材の流出が見られる。	○	○
b	被覆工の移動、散乱がある。	○	○
c	---	---	---
d	老朽化なし。	○	○

図 31 被覆工計測結果と老朽化度判断適用性

(2) 本体工の損傷への適用検討

重力式防波堤を 3DSC と MB で計測し、本体工の老朽化度判断への適用性を検討した。計測結果と 3DSC、MB の適用性を図 32 に示す。3DSC は欠損部を明確に確認することができ、a～b(10cm 以上の欠損)で適用可能で MB (50cm 以上の欠損)より適用性が高かった。

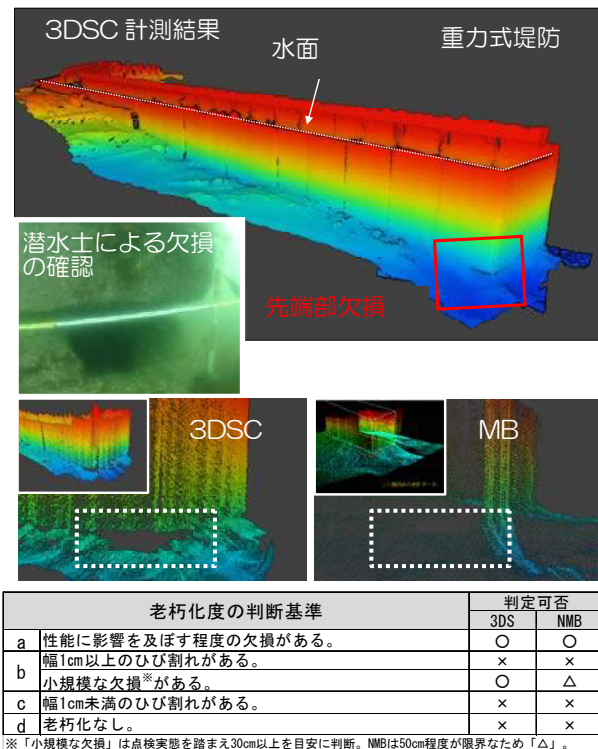


図 32 本土工計測結果と老朽化度判断適用性

(3) 電気防食工への適用検討

電気防食工が設置されている矢板式護岸を 3DSC と MB で計測し、防食工の老朽化度判断への適用性を検討した。3DSC による計測結果と 3DSC、MB の適用性を図 33 に示す。3DSC、MB とも防食工の欠落や全損耗がないことを確認し a~d すべてで適用可能であったが、ボルトのゆるみや軽度の摩耗は判別困難であった。

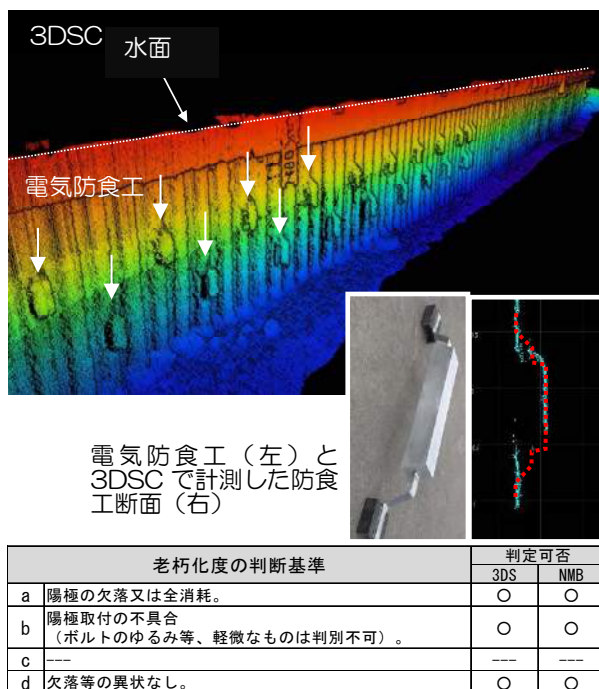


図 33 電気防食工計測結果と老朽化度判断適用性

(4) 矢板護岸への適用検討

矢板式護岸を 3DSC と MB で計測し、矢板護岸の老朽化度判断への適用性を検討した。3DSC による計測結果と 3DSC、MB の適用性を図 34 に示す。3DSC、MB とも a のみで適用可能であったが、3DSC は水面付近まで計測可能で潜水目視による結果と一致した。また孔食や発錆は確認できないが、開孔がある場合は横向きに音波を発信することにより、奥行の計測が可能となった。

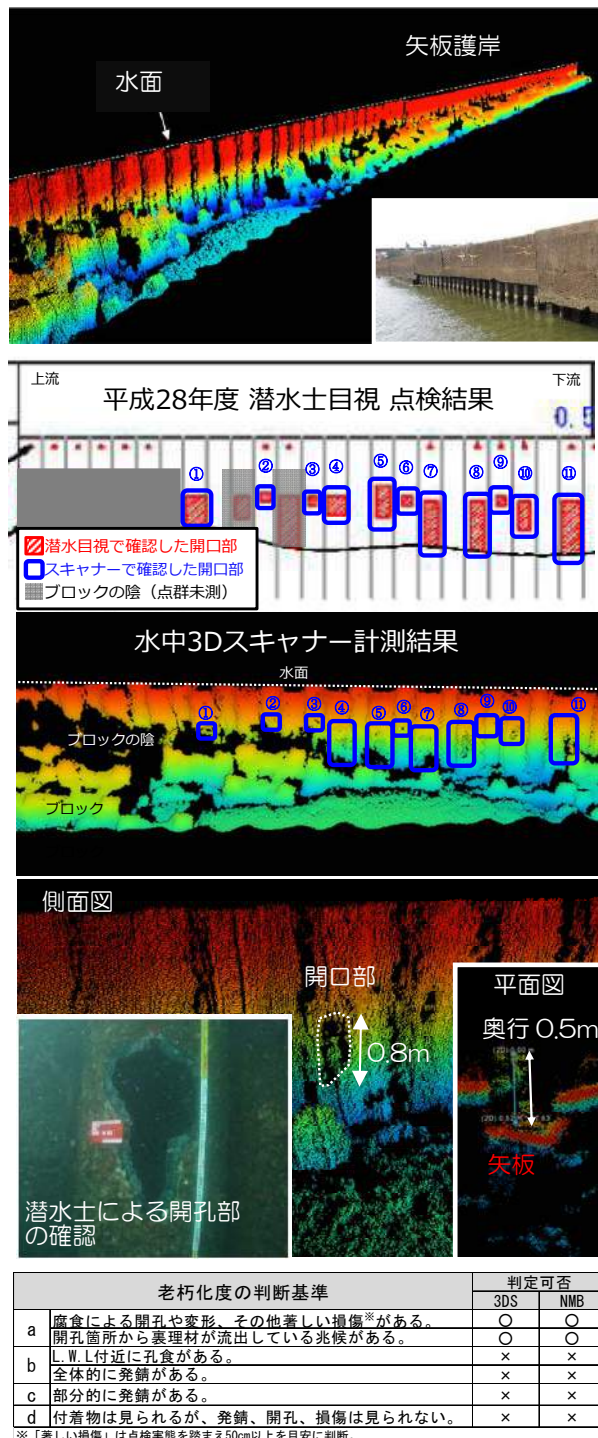


図 34 矢板護岸計測結果と老朽化度判断適用性

(5) 魚礁および魚群の計測

魚礁は全国各地の海域に設置され水産資源の安定保護・増殖に貢献しているが、水深が深く潮流の速い箇所が多いため、潜水目視による点検は非効率的であった。魚礁の魚介類蝟集効果は、これまで計量魚探や潜水観察、各種漁法による試料採取により評価されてきたが、計量魚探では音響エコーの強弱により個体数を推定しているため誤差が大きく、記録される画像も2次元平面であるため、立体的な評価・解析が困難であった。潜水観察や試料採取は局所的なデータから魚礁全体の蝟集効果を推定するため誤差が大きく、魚礁・魚群全体を計測・解析・評価することは困難であった。

これらの課題を解決するために3DSC搭載のROVにより魚礁を3D計測し、併せてカメラ画像から蝟集する魚介類の種を判別した(図35)。3DSCの計測結果から魚礁に大きな変状はみられず、魚群が個体の集まりとして確認された。現在、ソフトによる魚群の個体数・個体サイズの自動解析技術を開発中である。カメラで撮影した画像から、魚群はイサキであることを確認した。このように3DSCやROVを活用することにより、魚礁のメンテナンスや蝟集効果の判定に役立つことが徐々に判明してきている。⁸⁾

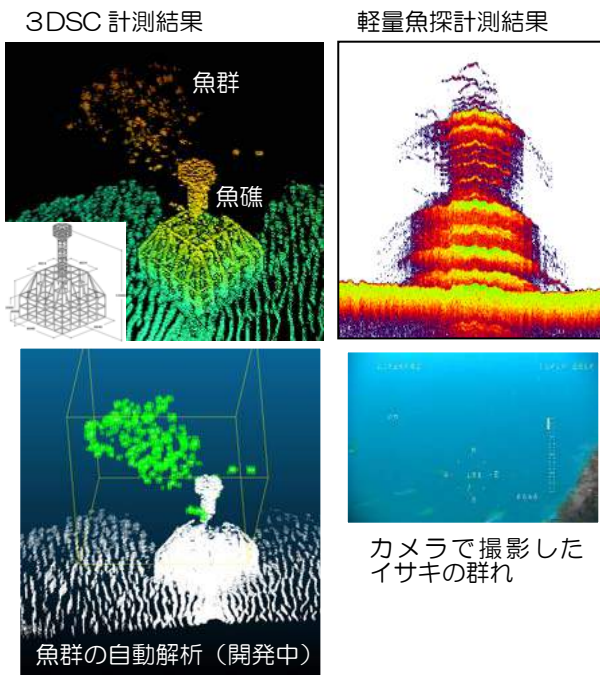


図 35 3DSC 搭載 ROV による魚礁調査結果

7. 海洋調査等への活用

熱水・ガス噴出海域での水中可視化技術の安定性・有効性を検証するため、鹿児島県錦江湾の若尊カルデラで実証試験を実施した。若尊カルデラは海底活火山の1つで、海底から熱水と火山性ガスが噴出している。熱水付近には、硫化水素やメタンなどから有機物を合成する細菌に基盤を置く熱水化学合成生態系が形成され、チューブワームの1種であるサツマハオリムシが生息する。

調査対象海域の海底をMBで計測してガス噴出位置を特定し、ROVを潜航させて3D計測・画像撮影した(図36)。水温・塩分濃度の変化が大きい海域でも3DSCとROVは正常に作動し、ガス噴出状況や周辺地形の点群データを取得した。サツマハオリムシはガス噴出口付近に分布し、カサゴもみられた。同様の手法により、旧日本海軍呂号潜水艦の探索・撮影や琵琶湖底の最深水中遺跡(水深71.5m)撮影に成功した(図37)。水中遺跡は古墳時代の土師器甕(ハジキカメ)と推定された。

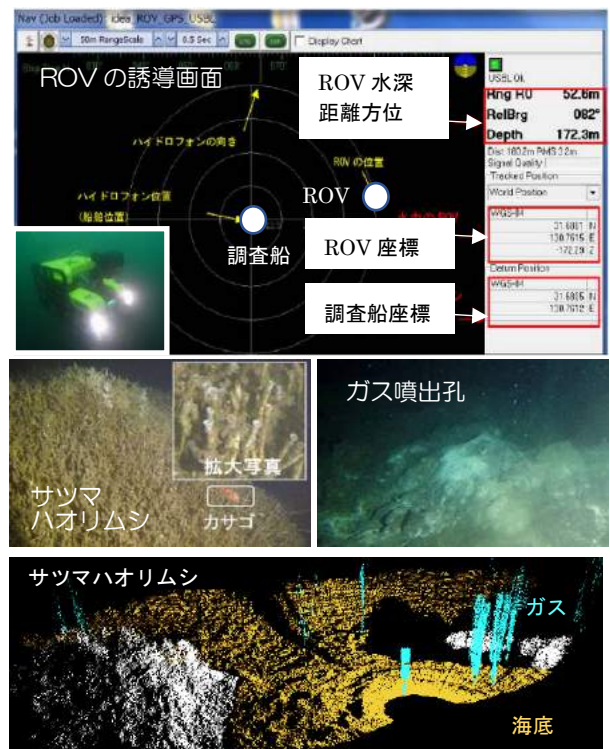


図 36 ROV の誘導とガス噴出孔周辺の調査結果



図 37 呂号潜水艦と琵琶湖水中遺跡

8. 今後の課題

インフラ維持管理を効率的に進めるためには水中部と陸上部をシームレスに3D化することが求められる。一方で、1つの手法で陸上から大水深まで計測できるセンシング技術は存在せず、音響やレーザーだけではクラックや変色等の微細な変状が把握できないことも大きな課題である。そのため、精度と効率性を両立させるためには、点検対象物の形状や条件に合わせて複数の手法を最も適切に組み合わせることが重要である。各点検手法の適用性を表2に、組み合わせイメージを図38に示す。

表2 各点検手法の適用性

計測条件 作業環境	広域の全体形状把握			クラック、 変色、発錆等 の微細な変状
	陸上部	水深0m ～2m	水深2m ～15m	
UAV、 レーザー	○	×	×	×
水中3D スキャナー	×	○	○	×
マルチ カメラ	×	×	○	○
調査員、 潜水目視	-	-	-	- (水深20m)

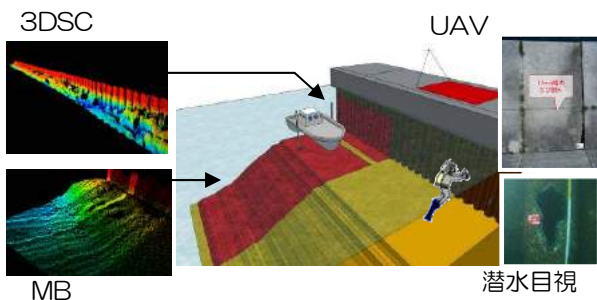


図38 各点検手法の組み合わせ

3Dデータの活用は、CIMのように計測・設計段階に費用・時間・労力を投入するフロントローディングが前提となっている場合と、橋脚水中部や漁港、港湾の定期点検のように極力コストを抑えた近接目視代替技術が求められる場合がある。3D可視化技術は、調査目的に合わせて活用することが重要である。今後は3D可視化技術のさらなる効率化とロボットによる自律計測技術(図39)の確立をめざす。

項目	仕様
潜航深度	2,000m
速度	0.6m/sec
サイズ	L1.3×W0.7×H0.8m
重量	275kg
搭載機器	スチルカメラ、4Kカメラ

図39 ホバリング型自律水中ロボット「YOUZAN」

9. おわりに

水中3Dスキャナーを活用した水中可視化技術は第3回インフラメンテナンス大賞 国土交通省優秀賞と日本水環境学会 2019年度技術奨励賞を受賞した。インフラメンテナンスへの活用や技術開発に御協力いただいた全ての関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省 i-Construction
<https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>
- 2) 水産庁：インフラ長寿命化計画（行動計画）
<http://www.jfa.maff.go.jp/j/seibi/gyokogyojo/pdf/140808.html>
- 3) 水産庁漁港漁場整備部：水産基盤施設機能保全計画の手引き
http://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_hourei/pdf/hozen150508.pdf
- 4) 水産庁漁港漁場整備部：水産基盤施設ストックマネジメントのためのガイドライン
http://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_hourei/pdf/sutom150508.pdf
- 5) 次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会水中維持管理部会：次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進 水中維持管理技術の現場検証・評価の結果. 平成28年3月30日
<http://www.mlit.go.jp/common/001125345.pdf>
- 6) 国土交通省 新技術情報提供システム NETIS番号KT-180031-A 水中3Dスキャナーによる水中構造物の形状把握システム
<http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/NewIndex.asp>
- 7) 国土交通省 点検支援技術性能カタログ（案）
<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/pdf/16.pdf>
- 8) 音響機器を用いた水中可視化技術の水産分野への応用、水産工学 Vol. 55 No. 3, pp. 223～229, 2019