

### 船舶搭載型レーザースキャナーの精度検証及び水路測量への応用<sup>†</sup>

友久武司<sup>\*1</sup>, 高畑亮太<sup>\*1</sup>, 森 弘和<sup>\*2</sup>

Accuracy verification of a vessel-mounted laser scanner  
and its application to hydrographic surveys<sup>†</sup>

Takeshi TOMOHISA<sup>\*1</sup>, Ryota TAKAHATA<sup>\*1</sup>, and Hirokazu MORI<sup>\*2</sup>

#### Abstract

A technology has been developed to measure topographies and features on land in three dimensions using a vessel-mounted laser scanner while performing multibeam echo sounders. As a first step to examining whether this technology can be used in hydrographic survey for nautical charting, we tried to measure the coastline using a laser scanner. In this trial measurement, we devised procedures of bias value measurement and accuracy confirmation and verified the horizontal position accuracy of the point cloud data measured by the laser scanner. Accuracy verification showed that there was almost no difference between the position of point cloud data measured by the laser scanner in calm sea and the coastline measured by the kinematic GNSS, so we concluded it can be used to draw the coastline on nautical charts. On the other hand, the measurement accuracy was inferior in rough seas. In addition, measurement by laser scanner enables the precise measurement of the coastline such as wave-dissipating blocks and is expected to be applied to vertical clearance measurements under bridges and position measurement of buoys and fishing implements.

#### 1 はじめに

陸上においては、車両に地上移動体搭載型レーザースキャナーを搭載し移動しながら地形・地物等を測定し3次元データを作成するモバイルマッピングシステムが普及してきており、海上においてもマルチビーム音響測深を行いながら船舶に搭載したレーザースキャナーにより陸上部の地形・地物等を測定する技術が開発されている。

今後、船舶搭載型レーザースキャナー（以下

レーザースキャナーと呼ぶ）により取得した3次元データが、港湾施設の位置、形状の測定等へ活用され、測定作業の安全性向上や効率化が期待されるため、海図の作成のための水路測量における活用についても検討する必要がある。

水路測量において陸上部の地形等を測定する項目のひとつに海岸線の測量があるが、現在の海岸線の測量手法は、記帳式、キネマティックGNSS、空中写真測量によるものが主である。

<sup>†</sup> Received August 25, 2022; Accepted October 20, 2022

\* 1 第一管区海上保安本部 海洋情報部 Hydrographic and Oceanographic Department, 1st Regional Coast Guard Headquarters

\* 2 沿岸調査課 Coastal Surveys Division

レーザースキャナーにより取得した3次元データを海図記載の海岸線として採用する測定手法について検討するために、測定条件の違いでどの程度影響があるか等、知見を得る必要がある。

本稿では、レーザースキャナーにより取得した海岸線等のデータの水平位置の検証を行うとともに、その結果を踏まえ実際に水路測量でも試行したので報告する。

また、水路測量の分野において海岸線の測量以外にもレーザースキャナーによる測定が活用できると想定する項目について述べる。

## 2 使用機器

使用したレーザースキャナーは、Velodyne Lidar社製VLP-16であり、VLP-16を測位・動揺検出器 (Applanix社製POS/MV WM) 及びマルチビーム音響測深機 (NORBIT社製WBMS) に接続し測定を行った (Fig. 1)。VLP-16の円筒形ユニットの上の面を進行方向に向けて横倒しに艀

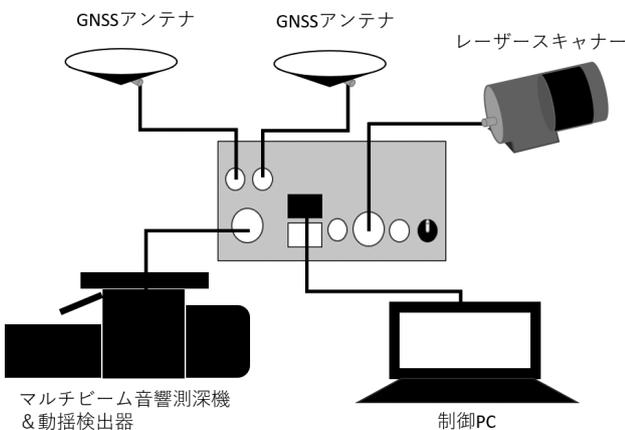


Fig. 1. Equipment configuration of the vessel-mounted laser scanner. The laser scanner and the multibeam sonar head, integrated with a motion sensor, are connected to the control unit with an embedded POS/MV receiver section. This configuration has reduced the wiring workload during installation.

図1. 船舶搭載型レーザースキャナーの機器構成。コントロールユニットには動揺検出器が一体となったマルチビーム音響測深機のソナーヘッドとレーザースキャナーが接続され、POS/MVの受信部は内蔵されているため、結線が少なく艀装作業が軽減されている。

装し (Photo 1), 1分間に600回転で360度方向のスキャンを行うよう設定した。VLP-16の主な仕様をTable 1に示す。

取得した測位データ及び動揺補正 (ヘディング, ピッチ, ロール) データは、後処理キネマティック測位・動揺解析ソフトウェア (POSPac MMS) を使用し、国土地理院提供の今期座標に変換した電子基準点情報により後処理キネマティック処理を実施した (住吉・他, 2019)。レーザースキャナーのデータは、水深データの収録処理においても使用している統合型水路測量用ソフトウェア (HYPACK) を使用し収録するとともにデータ処理を行った。

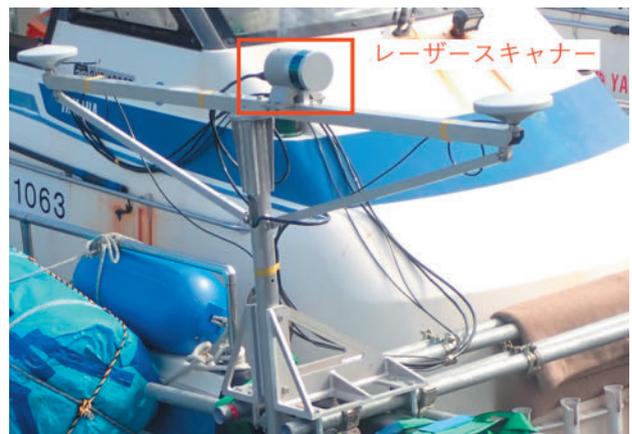


Photo 1. The installed VLP16 with its top surface facing forward.

写真1. 上面を進行方向に向けて艀装したVLP16.

Table 1. Specifications of VLP16.

表1. VLP16の仕様 (Velodyne LiDAR, Inc., 2019).

測定範囲 (水平)	360° 全方位
測定範囲 (垂直)	30° (2° 間隔16チャンネル)
測定距離	~100m
測定精度	± 3cm
測定点数	約30万点/秒
回転速度	5~20Hz
寸法	直径103mm × 高さ73mm
重量	830g
測定方式	TOF方式
レーザークラス	CLASS 1

### 3 バイアス値の測定

海洋情報部が所有する VLP-16 は、レーザースキャナー部と測位・動揺検出部が一体の構成ではないため、作業開始前にオフセット値やバイアス値の測定が必要である。レーザースキャナーの各種バイアス値（ヨーバイアス値、ピッチバイアス値、ロールバイアス値）の測定（パッチテスト）方法は、海外の水路測量用ソフトウェア開発会社等の資料やウェブサイトに掲載されているが、その方法が各社毎に異なっていた。例えば、パッチテストを井桁測線の中央にある物標で実施する方法 (Burnett, 2018) 等があったが、日本の港湾ではそのような物標が港内に多く存在しないため、測量区域付近において容易に測線を計画でき、かつバイアス値を精細に求めることができるパッチテストの方法を検討した。検討の結果、下記のとおりバイアス値を求め良好な結果を得た。なお、バイアス値は概ね 0.05 度単位まで決定した。

ヨーバイアス値は、ポール等の対象物に対して等距離で挟む、もしくは対象物に対して片舷方向で距離が異なる同方向の測線を設定し、対象物の位置が一致するヨーバイアス値を求めることで算出した。ロールバイアス値は、岸壁の上面もしくは階段等の対象物に対して等距離の往復測線を設定し、対象物の高さが一致するロールバイアス値を求めることで算出した。ピッチバイアス値は、電柱等の細長く高い対象物に対して等距離の往復

測線を設定し、対象物の傾きが一致するピッチバイアス値を求めることで算出した (Fig. 2)。

### 4 測定位置精度検証

2021 年 5 月、小樽港内において、レーザースキャナーの測定位置精度検証を実施した。検証にあたり、小樽港北防波堤に約 250 m 間隔で 3 か所検証点を設置し、事前に GNSS 受信機 (SOKKIA 社製 GCX3) を用いてリアルタイムキネマティック法 (RTK) により位置測定を行った。

レーザースキャナーによる測定は、検証点に三脚を使用して直径 0.03 m のポールを鉛直に設置し実施した。測線は、ポールから距離 40 m、70 m の往復測線を港内側及び港外側に設定し、各々の測線において 3 か所のポール位置の測定を行った (Fig. 3)。測定時の海況は、港内側は静穏であり動揺はピッチ概ね 1.5 度以内、ロール概ね 5 度以内であったが、港外側は風浪 0.5 m 以上で海況が荒れており動揺はピッチ概ね 3 度以内、ロール概ね 10 度以内であった。

測定条件を海況静穏の測定距離 40 m、海況静穏の測定距離 70 m、海況時化の測定距離 40 m、海況時化の測定距離 70 m に分け、往復測線による検証点 3 か所の測定により条件毎に 6 回の測定結果が得られようにしたが、海況静穏の測定距離 70 m においては、点群が得られない検証点があり 4 回の測定結果のみとなった。

取得したデータからポール部分の点群のみを抽

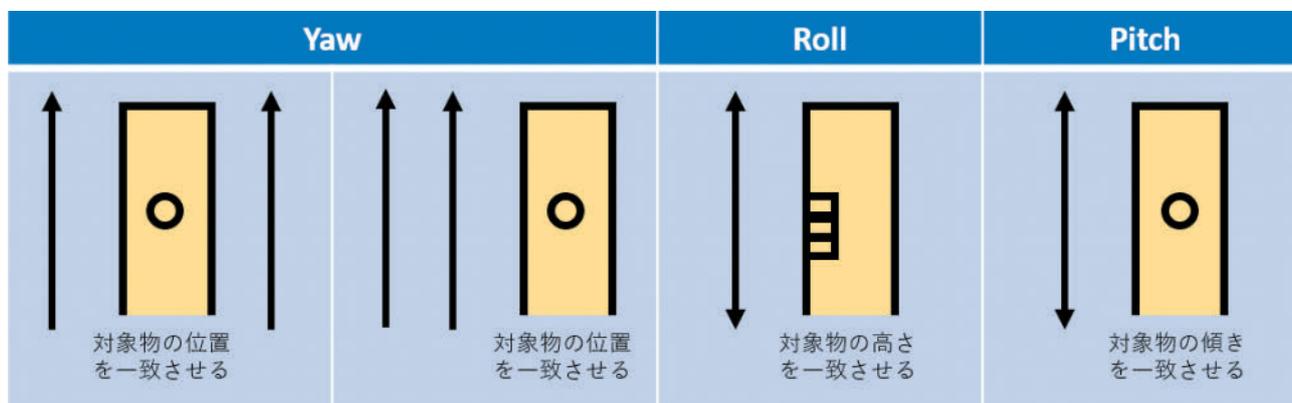


Fig. 2. Patch test procedure for the laser scanner on the accuracy verification at Otaru port.

図 2. 小樽港での精度検証試験で実施したレーザースキャナーのパッチテスト方法。

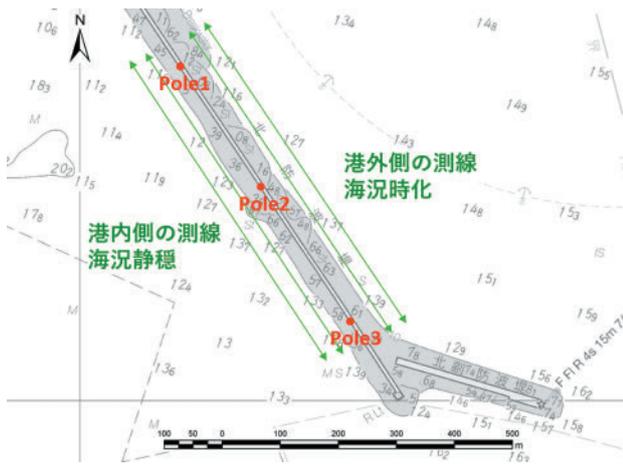


Fig. 3. Survey lines and verification points for accuracy verification of the laser scanner.

図3. レーザースキャナーによる測定精度確認の測線と検証点位置.

出し、各ポールにおける点群の水平位置の分布を示した結果を Fig. 4 に示す。海況静穏の測定距離 40 m の測定は、検証点の点群は円状の分布が見られるが、その他の条件では点群がばらついており、水平座標からではポールの形状の判別が難しいという結果となった。

点群の水平位置精度検証のため、検証点における精度のより高い測定法 (RTK) による測定値を仮の真値とみなし、RTK の水平座標とレーザースキャナーの各測定点の水平座標の二点間距離を較差 ( $\delta$ ) として算出し、以下の式により平均二乗誤差の平方根 (RMS 誤差:  $M$ ) を求めた。

$$M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}}$$

海況や測定距離により 4 条件に分け、各々の条件で測定した  $M$  の平均値、最大値、最小値の結果を Table 2 に示す。測量法第 34 条で定める作業規程の準則 (国土地理院, 2020) の車載写真レーザ測量の項目において、数値図化用データと調整点との較差を点検し、精度が得られていない区間については、再移動取得又は調整点による調整処理を行うものとしてされており、水平位置の許容範囲は地図情報レベル 500 で 0.15 m 以内、地図情報レベル 1000 で 0.30 m 以内となっている。今回の検証では、海況静穏の測定距離 40

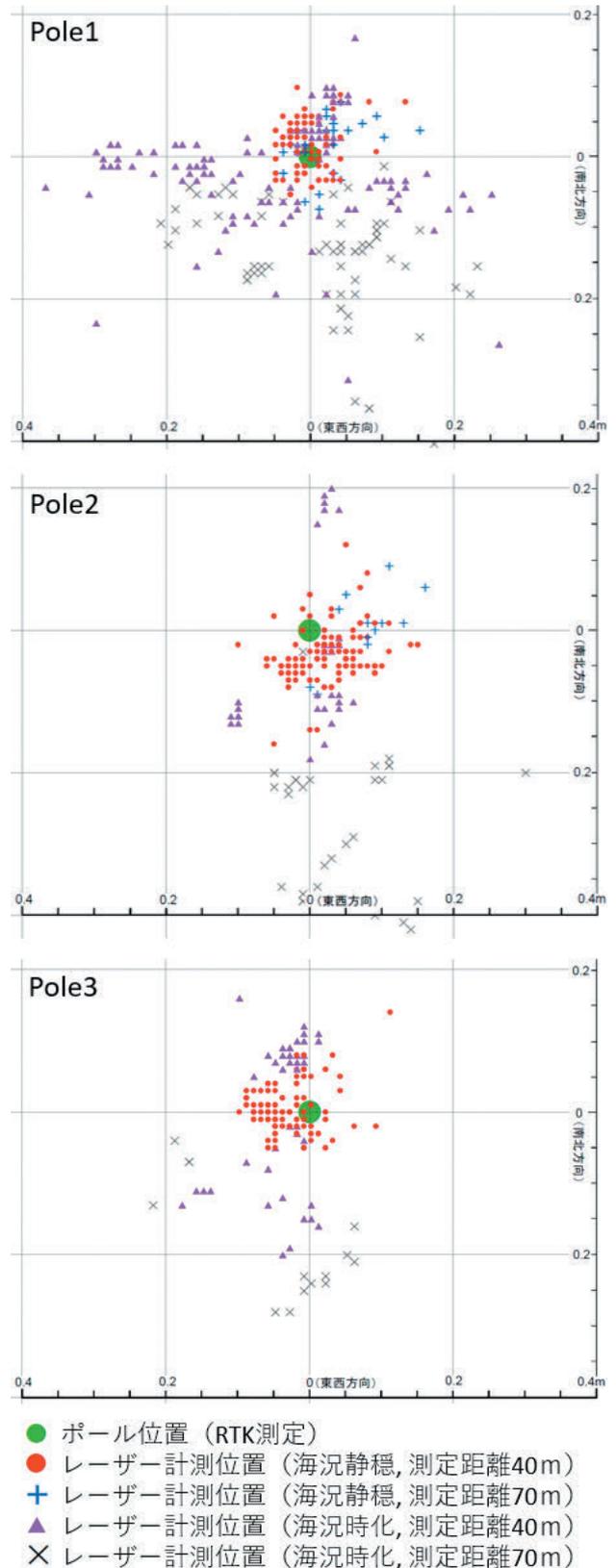


Fig. 4. Horizontal distribution of the point cloud data representing the verification points measured by the laser scanner.

図4. レーザースキャナーによる検証点測定における点群水平位置の分布.

Table 2. Horizontal positioning results of the laser scanner at the verification points.

表 2. レーザースキャナーによる検証点の水平位置測定結果.

測量する船舶に搭載したレーザースキャナーから検証点までの測定距離・測量時の海況	データセットの数	RMS誤差 平均値	RMS誤差 最大値	RMS誤差 最小値
測定距離40 m 海況静穏	6	0.06 m	0.08 m	0.04 m
測定距離70 m 海況静穏	4	0.08 m	0.11 m	0.06 m
測定距離40 m 海況時化	6	0.12 m	0.20 m	0.06 m
測定距離70 m 海況時化	6	0.24 m	0.37 m	0.17 m

m の場合は、M が 0.1 m 以内であり良好であった。一方、海況が荒れて動揺が激しい条件による測定では、M が 0.2 m 以上となる場合があり、点群データを海図に描画する海岸線の資料に使用するには疑義が生じる結果となった。

## 5 海岸線測定値の検証

海図に描画する海岸線の資料としてレーザースキャナーにより測定した点群が使用できるか検討するため、2021 年 9 月、小樽港内の岸壁において、レーザースキャナーを使用し海岸線測定値の検証を実施した。海図に描画する海岸線の測定方法として、キネマティック GNSS により海岸線の屈曲点を測定し、その点をつないでいく方法がある。キネマティック GNSS により測定し決定した海岸線に対して、レーザースキャナーにより測定した点群は、どの程度差が生じるかを検証した。キネマティック GNSS による測定は、GNSS 受信機 (Trimble 社製 R10) を使用し VRS-RTK により測定した海岸線 (岸壁角の位置を測定し、角の 2 点をつないだ直線) を使用した。レーザースキャナーによる測定は、海況が静穏な条件で実施し、岸壁から 15 m, 35 m, 55 m 離れた往復測線を設定し海岸線の点群を取得した。

上記往復測線によりレーザースキャナーで取得した点群の岸壁部のみを抽出し、点の位置から RTK により測定した海岸線に垂直な直線を引き

Table 3. Comparison of shoreline positioning results measured by realtime kinematic GNSS (RTK) and the laser scanner: averaged horizontal distances and horizontal distances at cumulative relative frequency 0.95 of the point cloud data from the shoreline determined by RTK.

表 3. RTK とレーザースキャナーの海岸線位置測定結果の比較. RTK により測定した海岸線と点群の水平距離の平均値と累積相対度数 95% となる水平距離の値.

測量する船舶に搭載したレーザースキャナーから海岸線までの測定距離	RTK により測定した海岸線とレーザースキャナーで取得した点群の水平距離の平均値	RTK により測定した海岸線とレーザースキャナーで取得した点群の水平距離で点群全体のうち 95% の累積相対度数となる水平距離
15 m	0.05 m	0.13 m
35 m	0.04 m	0.14 m
55 m	0.07 m	0.19 m

その長さを求めることで、点と海岸線の水平距離を算出した。RTK により測定した海岸線と点群の水平距離の平均、水平距離の相対度数を算出し点群全体のうち 95% の累積相対度数となる水平距離を求めた結果を Table 3 に示す。

平成 14 年海上保安庁告示第 102 号による水路測量における測定又は調査の方法に関する告示 (海上保安庁, 2009) において、海岸線の水平位置の測定の誤差の限度は、岸壁や防波堤等で 2 m である。今回の検証では、測定距離 15 m においては、点群のうち 95% は RTK により描画した海岸線から 0.13 m 以内に位置し、測定距離 35 m においては 0.14 m 以内に位置し、測定距離 55 m においては 0.19 m 以内に位置したことから、レーザースキャナーにより測定した点群をもとに海図の海岸線を描画することは可能と考える。

## 6 水路測量での試行

2022 年 7 月、岩内港港湾測量においてレーザースキャナーを使用し、海図に描画する海岸線の測定を行った。測定にあたり、レーザースキャナーの精度確認を実施するため、防波堤先端にポールを設置し、レーザースキャナーにより測定したポール位置を RTK により測定したポール位置と

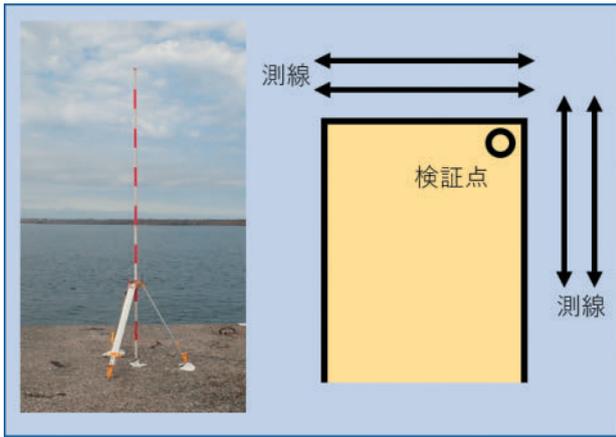


Fig. 5. Accuracy validation procedure in the hydrographic survey of Iwanai Port.

図 5. 岩内港の水路測量で実施した精度確認方法。

比較した。レーザースキャナーによる測定は、Fig. 5 のとおり防波堤と平行及び直交の距離を変えた往復測線（測定距離 20 m 及び 40 m の測線）により実施し、ポールの測定位置について第 4 章で述べた RMS 誤差を求めた結果、全ての測定において 0.15 m 以内となった。なお、上記精度確認のため取得したポールや防波堤のデータは、バイアス値の決定やオフセット値の確認にも兼用した。

海岸線の測定においては、精度確認時のレーザ測定距離よりも遠くならないよう海岸線から 40 m 以内の測定距離となる測線を設定し測定を実施した。往復測線で測定し、各測線により測定したレーザースキャナーの点群に差異がないことを確認したうえで、海岸線の抽出を行った。

レーザースキャナーを使用すると、海岸線の形状を細かく測定することができ、特に消波ブロックの海岸線については、RTK では機材を持って水際に進出し移動することが困難で精細な測定が難しかった水際線の位置も容易に測定することができる (Fig. 6)。また、消波ブロックや傾斜護岸等において海岸線を測定する際、満潮時の高潮痕を探して最高水面時の海岸線を推定しその位置を測定していたが、レーザースキャナーにより低潮時に海岸線を測定すれば、点群自体が基準面からの高度を持つことを利用し、最高水面と陸地が接する箇所を特定することで海岸線を測定すること

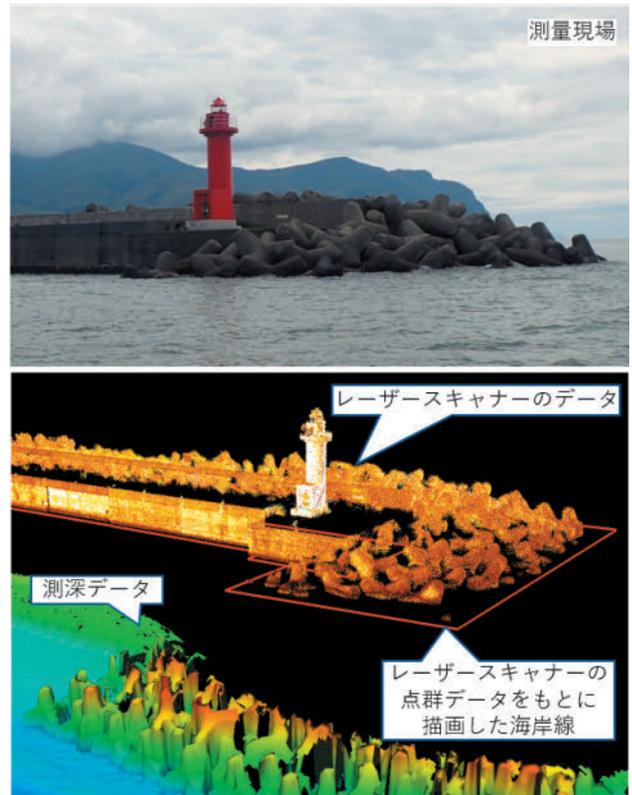


Fig. 6. Point cloud data of a shoreline covered with wave-dissipating blocks.

図 6. 消波ブロックの海岸線の点群データ。

ができる。

岸壁においては、防舷物の形状を容易に測定することができることから、防舷物の位置を 1 つ 1 つ測定することなく図化することができるので、側傍測深図のような 1/1,000 から 1/3,000 の大縮尺の図も容易に作成できる。また、海岸線と海底地形を同時に表示することにより、陸上の構造物とその直下の海底地形を自由な方向から視覚的に表示し、海陸の地物との関係を把握することができる (Fig. 7)。

海岸線以外にもレーザースキャナーにより、海面上の浮標や筏の点群を取得し位置測定が可能であった (Fig. 8)。これまで漁具の位置や範囲の測定では、水面下の引綱などを確認しながらゆっくりと漁具に近づき測定していたことから、作業効率化と測量船の安全の確保が見込まれる。

また、VLP-16 はカメラ搭載の機種ではないため、取得した点群に色情報は付与されていないが、反射強度の情報は付与されている。路面標示

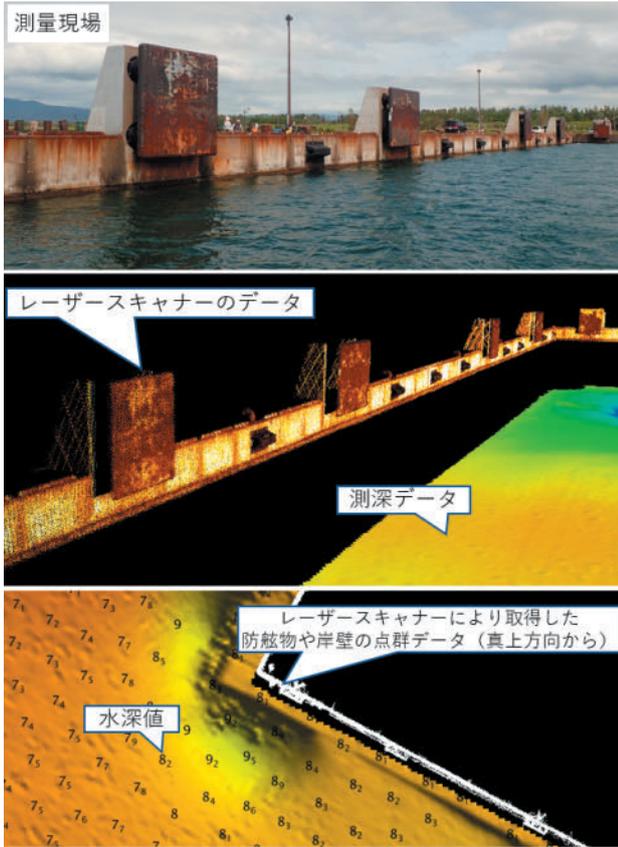


Fig. 7. Shoreline point cloud data of a quay.

図7. 岸壁の海岸線の点群データ.

反射テープ (3M 社スコッチレーン) を防波堤に貼付け、色の違いによる反射強度の差により、テープ部分の点群の特定が可能であったことから (Fig. 9)、色情報がなくても反射強度の情報から色が異なるターゲット部分の特定が可能と考える。また、反射強度の情報があることにより、構造物の色の差が分かる場合もあり (Fig. 7)、位置情報のみと比較し海岸線の形状がより把握しやすくなる。

## 7 まとめ

本検証で用いたレーザースキャナーの測定値の不確かさの要素としては、測位精度、動揺検出器の測定精度、レーザ測定精度、オフセット値測定精度、バイアス値測定精度、潮位観測精度等が考えられる。レーザースキャナーの点群の位置精度を上げるため、船位決定は RTK 等の精度の高い方法で測定を行うこと、オフセット値やバイア

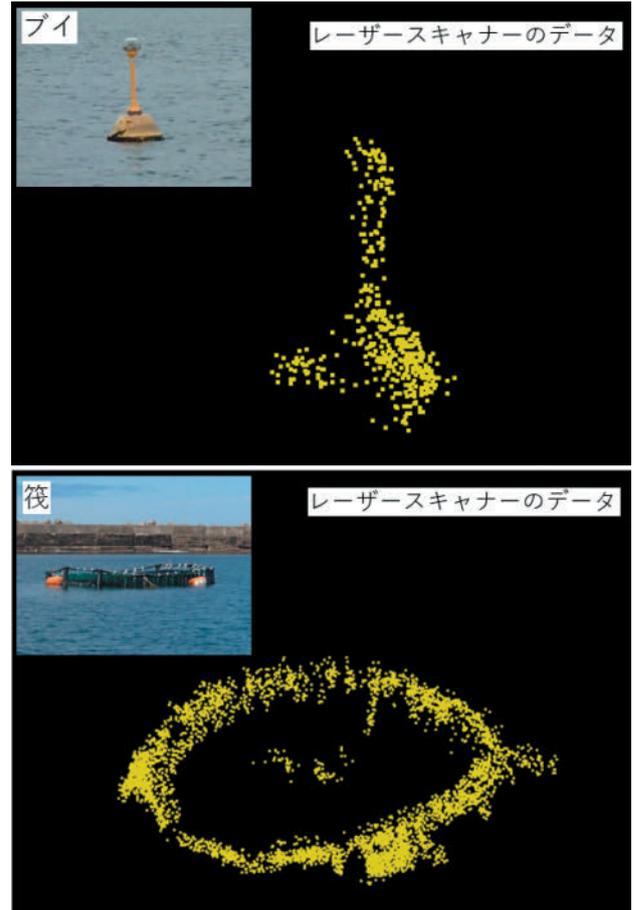


Fig. 8. Point cloud data of a buoy and a raft.

図8. ブイや筏の点群データ.

ス値の測定を正確に行うこと、海況が穏やかで動揺が小さい状況で測定すること、測定精度や点群数を考慮したレーザの測定距離を設定することが重要である。精度確認を行った上で、本検証のように十分な精度があれば、レーザースキャナーは水路測量での海岸線等の測定において有用と考える。

今回、消波ブロックの海岸線測量においては、従来の測定方法よりも高精度かつ高密度な測定が実施できたが、それ以外の構造物においても、レーザースキャナーを使用した測定が有効な場面はあると考える。例えば、橋梁の桁下高や架空線の高さの測定は、これまで最高水面と位置関係が測定されている3点以上の基準点から経緯儀等を使用し測定していたが、下から見上げる形となるので、最下部の特定が難しく経験が必要であった。レーザースキャナーを使用すると、可航高の

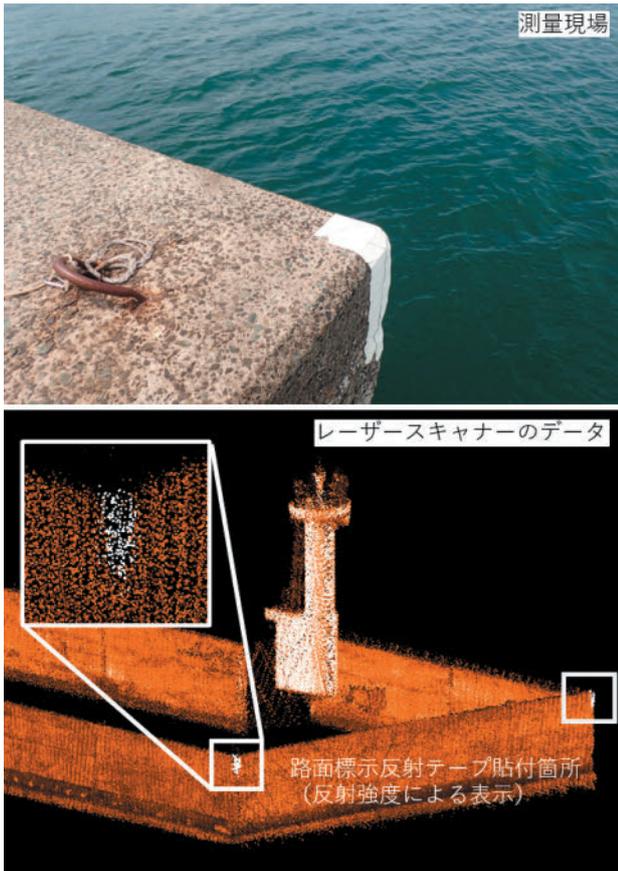


Fig. 9. Display of the difference in reflection intensity contained in the point cloud data obtained by the laser scanner.

図9. レーザースキャナーの点群の反射強度差による表示.

測定が必要な地点の往復観測により容易に測定できる. Fig. 10 のように海面と橋桁の垂直間隔(船舶の可航高)を空間的に把握できると考えるため, 今後レーザースキャナーの点群の鉛直成分の精度評価を行い可航高測定が水路測量において活用できるかどうか, またその標準的な手法を検証していきたい.

レーザースキャナーは, 水に濡れている部分の反射強度が低下するという報告(丹治・他, 2010)があり, 水面付近の地物の点群取得時は, 測定時において写真撮影を行い取得した点群と比較する必要がある. これまで, 岩礁帯等アクセスが難しい海岸線においては, 接線法や沖掛り法等により測定を行っていたが, 今後海水で濡れている水面付近の海岸線のデータ取得度合いを検証し十分な点群が取得できるのであれば, 海岸線の精

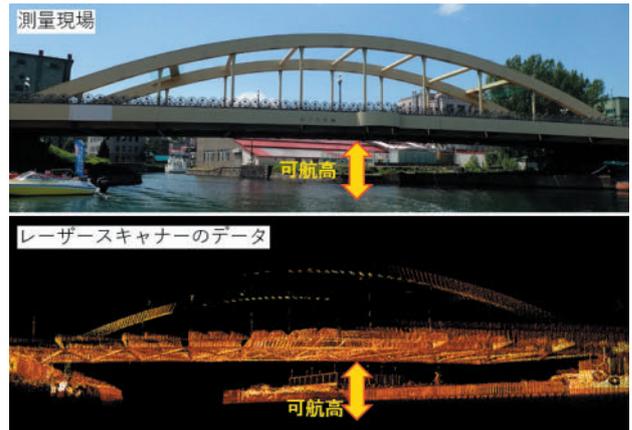


Fig. 10. Image of vertical clearance of the bridge and the point cloud data obtained by the laser scanner.

図10. 橋梁の可航高とレーザースキャナーの点群のイメージ.

細な測定とともに水面上に現れる岩礁の高さも測定することができると思う.

次世代の電子海図では, 橋梁等可航高の記入が必須となっており, 日本ではこれまで測定を必須としてこなかった項目が多く含まれている. 陸上の地物を立体的に測定できるレーザースキャナーによる測定は, 地物をそれぞれ個別に測定してきたこれまでの手法と比べると, 測深を行いながら同時に測定できるので, 格段に効率化することができる. また, レーザースキャナーによる測定は, 捨石や岩礁帯, 浮標等から一定の距離を置いて測定ができるため, 底触の危険が少なく波浪の影響を受けにくいため安全面においてもメリットがある.

## 謝 辞

海洋情報部沿岸調査課 吉澤 信官には, レーザースキャナーの測定メカニズムや機器特性についてご教授頂きました. また, 本原稿を書く上で, 査読者及び編集者の方には有益で適切なお助言を頂きました. ここに記して感謝いたします.

## 文 献

Burnett, J. (2018) Performing a LIDAR/Laser Patch Test on Non-Aerial Vessels of

Opportunity, [https://www.hypack.com/File%20Library/Resource%20Library/Technical%20Notes/09\\_2018/Performing-a-Non-Aerial-LIDAR-Laser=patch-Test.pdf](https://www.hypack.com/File%20Library/Resource%20Library/Technical%20Notes/09_2018/Performing-a-Non-Aerial-LIDAR-Laser=patch-Test.pdf), Accessed 6th Oct. 2022.

海上保安庁 (2009) 海上保安庁告示 (平成 14 年 4 月 1 日第 102 号, 平成 21 年 3 月 31 日第 110 号により一部改正), 海上保安庁, 東京都.

国土地理院 (2020) 作業規程の準則 (平成 20 年国土交通省告示第 413 号, 令和 2 年 3 月 31 日国土交通省告示第 461 号により一部改正), 国土地理院, 茨城県.

住吉昌直・松本良浩・吉澤 信・安原 徹 (2019) マルチビーム測深における高精度後処理測位・動揺データの有用性, 海洋情報部研究報告, 57, 62-74.

丹治史哉・三浦太佳也・後藤光亀 (2010) 地上型 3 次元レーザースキャナにおける被測定物と反射強度の関係, 平成 22 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 土木学会東北支部, 仙台市, 2011 年 3 月 5 日.

Velodyne LiDAR, Inc. (2019) VLP-16 User Manual, Velodyne LiDAR, Inc., USA.

度が劣る結果となった. なお, レーザースキャナによる測定は, 消波ブロック等の海岸線において精細な測定が可能となるほか, 橋梁の桁下高や浮標や漁具の位置の測定等への応用が見込まれる.

## 要 旨

マルチビーム音響測深を行いながら船舶に搭載したレーザースキャナにより陸上部の地形, 地物を 3 次元に測定する技術が開発されており, 海図作成のための水路測量において活用できるか検討する第一歩として, レーザースキャナによる海岸線の測定を試行した. 本試行の過程において, バイアス値測定方法や精度確認方法を考案するとともに, レーザースキャナにより測定した点群の水平位置精度検証を実施した. 精度検証により, 海況が静穏な場合は, レーザースキャナの点群位置がキネマティック GNSS により測定した海岸線に対してほぼ差異が認められなかったことから, 海図の海岸線を描画する資料に使用できると考える一方, 海況が荒れた場合の測定は精