

亜熱帯性海域における UAV グリーンレーザの 適用性に関する実証試験

佐久間 公太郎¹・遠藤 秀文²・長谷川 匡³・作田 啓¹・泉 正寿⁴

¹ 株式会社ふたば地域デザイン部（〒979-1113 福島県双葉郡富岡町曲田 55 番地）
E-mail: k-sakuma@futasoku.co.jp

² 正会員 株式会社ふたば（同上）

³ 株式会社ふたば空間情報事業部（〒963-0107 福島県郡山市安積 3 丁目 157 番地 2）

⁴ 正会員 博(工) 株式会社ふたば 空間情報事業部（同上）
E-mail: m-izumi@futasoku.co.jp (Corresponding Author)

グリーンレーザ（波長 532nm）は、水中の透明度が高い水域の地形計測に有効である。本報告では、小型のマルチコプター（UAV）に搭載できるグリーンレーザにより、水面下の海岸構造物、サンゴ礁、マングローブ林の各環境でのデータ取得を行い、陸上から水域までを高密度にカバーできること、グリーンレーザの点群と 30m 程度の低高度で撮影した写真と組み合わせることでサンゴの群体の識別が可能であること及びマングローブ林の分布状況（樹高、生息密度等）や地表面データが得られることを確認した。

Key Words : green lasers, UAV, underwater coastal structures, coral reefs, mangrove forests

1. はじめに

グリーンレーザ（波長 532nm）は、水中の透明度の高い水域の測深に有効である。日本におけるグリーンレーザを用いた航空レーザ測深（以下、ALB という）は、2003 年に海上保安庁によって導入され、性能検証は伊予灘で実施された¹⁾。これは、従来の測量技術では困難であった水面下の詳細な地形計測を可能にする画期的なものである。従来の近赤外線を用いたレーザは、陸地の地形計測が主な用途であったが、グリーンレーザは、浅海域や湖沼の地形、水面下の構造物の計測が可能となり、沿岸域管理や環境モニタリングにもその適用が広がると考えられる。グリーンレーザが導入される以前は、主に音響測深（ソナー）が用いられていた。音響測深は、音波を使って海底までの距離を測定し、これに基づいて地形を把握する技術であるが、音響測深機から 1 本の音波のみを発射して計測するため、調査範囲を何度も往復しなければならず、非常に時間がかかる上に、細かい地形の測定が難しいという課題も抱えていた。

近年では、これら従来技術を補完する新たな技術としてマルチビーム測深が広く採用されている。マルチビーム音響測深機は、一度に広範囲の海底をカバーできる多数の音波ビームを使用し、海底の地形を詳細かつ高精度

に測定することが可能である。特に複雑な地形や広範囲の地形計測に優れた性能を発揮し、3D マッピングや海底資源調査、環境モニタリングに有用である。しかし、浅海域では波浪や喫水の関係で作業船が浸入できず計測困難になるほか、ビームが照査される範囲は水深の 2-4 倍程度であることから測線を細かく設定しなくてはならず、計測の効率が悪くなる。

これに対し、グリーンレーザ技術はこれらの技術的課題を補完し、浅海域や沿岸部での高精度かつ効率的な測量を可能にした。具体的には、グリーンレーザの精度検証は、宇野女ら²⁾や中村³⁾によって行われており、その実用性が確認されている。

また、近年では小型化が進み、ライトバンで移動可能な小型のマルチコプター(UAV)に搭載できるグリーンレーザ（以下、UAV グリーンレーザという）も登場している。この UAV グリーンレーザによる精度検証は、中山ら⁴⁾により報告され、浅海域での活用については、西ら⁵⁾や山下ら⁶⁾によって消波ブロックの点検や海岸の砂浜管理への有用性について報告されている。また、透明度の高い亜熱帯性海域でのグリーンレーザの活用事例としては、ALB により石西礁湖（沖縄県）において実施され、対地高度約 500m で点群データの密度は、陸上で m^2 当たり 10 点～100 点、浅海域では 1～5 点程度計測できることを報告している⁶⁾。

本報告では、UAV グリーンレーザの適用性について透明度の高い亜熱帯性の浅海域においてサンゴ礁をどの程度の水深まで計測可能か、またサンゴの種の同定が可能か、及び密生しているマングローブ林下の地形情報が取得可能かについて実証試験を行ったので報告する。

2. 実証試験の概要

本実証試験は、UAV（無人航空機）に搭載したグリーンレーザを用いて、沖縄県本部町のサンゴ礁、海岸構造物及び名護市のマングローブ林を対象に実施した。目的は、空中から水面下のサンゴの群体の判別、海岸構造物の状況及びマングローブ林下の地形を把握できるか検討することである。実証試験地の概要を表-1 に、調査位置を図-1 に示す。

表-1 実証試験地の概要

対象地域	実証内容	飛行高度 飛行速度	濁度
①浜崎漁港	海岸構造物(水中)の状況把握	50m 2.0m/s	0.9ntu
②岬本部ビーチ	サンゴの群体の判別	40m 2.0m/s	1.3ntu
③名護市大浦	マングローブ林の地形取得	50m 2.0m/s	1.7-3.5ntu

(調査日時：①②2023.4.24,8:30-9:30, ③2023.4.25,8:40)

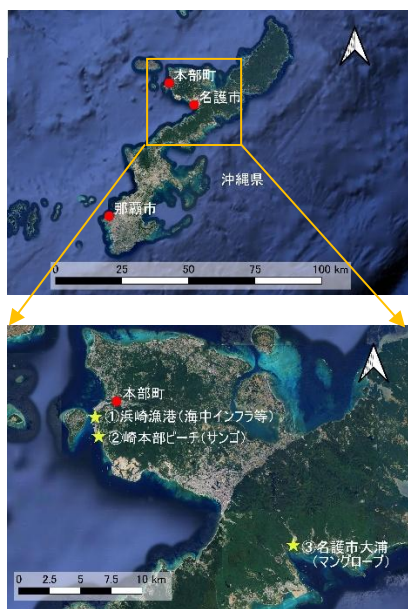


図-1 調査位置図

3. グリーンレーザの特徴

測量に用いられるレーザは一般的に波長 1,550nm の近赤外線が使用され、その特徴は指向性が高くビーム幅が

狭いため、図-2 に示すように樹林では樹木の頂部及び木漏れ日のように樹木の隙間を通過し地表面で反射するレーザにより樹木等の頂部 (DSM)、地表面高 (DEM) が計測できる。

一方、グリーンレーザは波長 523nm のレーザであり、近赤外線レーザと同様に指向性が高くビーム幅が狭いため近赤外線レーザと同様の計測ができるが、近赤外線は水に吸収されやすく水中や湿潤な地形の計測は困難であるが、グリーンレーザは水に吸収されにくいいため、水面と水底を捉えることができる。

実証試験に用いたグリーンレーザ (図-3) の仕様を表-2 に示す。

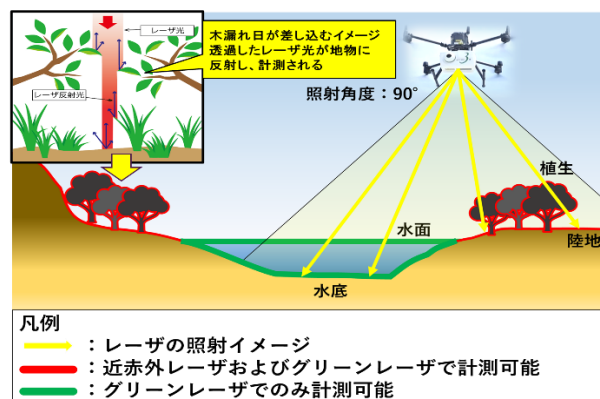


図-2 レーザ計測の特徴

表-2 グリーンレーザの仕様

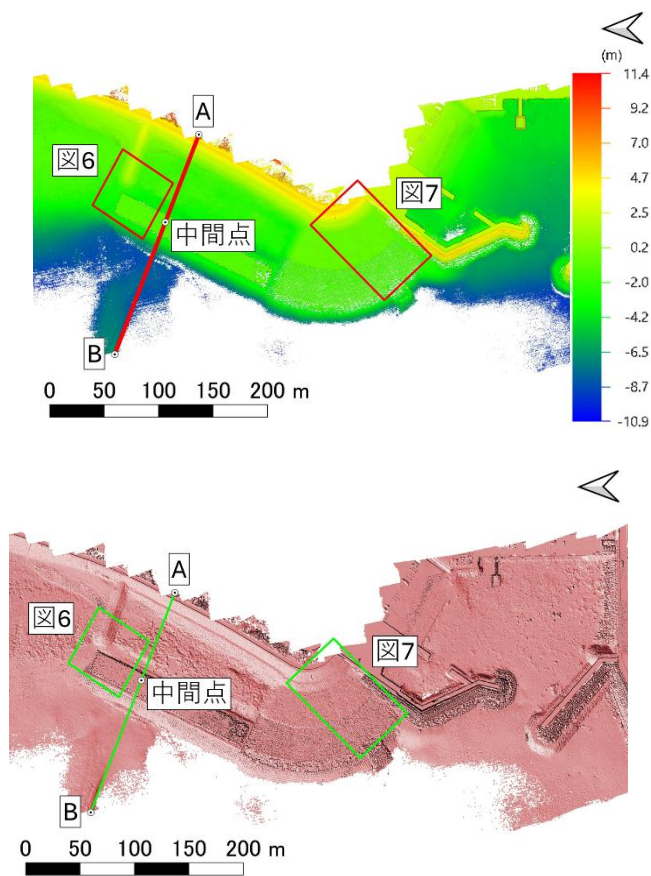
製品名	TDOT 3 GREEN
サイズ (約)	W270×D230×H150mm
重量 (約)	2.7kg (本体のみ/アンテナ除く)
レーザスキャナ仕様	
最長測定距離	≥10% 158m ≥60% 300m over
測距精度	≥10% ±15mm ≥60% ±5mm
パルスレート	60,000Hz
視野角	90° (±45°)
スキャン速度	30 走査/秒
レーザ波長	532±1nm
ビーム広がり角	1.5mrad
作動温度範囲	0～40℃ (結露しないこと)
アイセーフ機能	
対地高度<40m	：クラス 1 対地高度>40m
対地高度>40m	：クラス 3R
測深能力	
1～1.4 secchi※	
※1secchi は直径 30cm の白色円盤を水中に沈め見えなくなる深度	



図-3 実証に使用した UAV とグリーンレーザ

4. 海岸構造物

水面下の海岸構造物の点検や漁港内の地形計測においてグリーンレーザの適用性を本部町浜崎漁港周辺(図-1)で検証した。図-4 左方から潜堤、傾斜護岸、漁港と連続していることが確認できる。図-4 のA-B断面を図-5に示す。この時の最大計測水深は約8.8mであり、潜堤及び傾斜護岸のブロックの状況が把握できる(図-6、図-7、図-7)。図6の潜堤1ブロックの幅は3.0mで文献からの規格値とほぼ一致した。また、図-8に示す漁港は港内の海底地形及び消波ブロックの状況が把握できている。これから、グリーンレーザは港内埋没、水面下のブロック散乱状況等の調査に活用できるものと考えられる。



(上図：標高断彩表示 下図：赤色陰影表示)

図-4 浜崎漁港及び隣接する海岸の3次元点群モデル

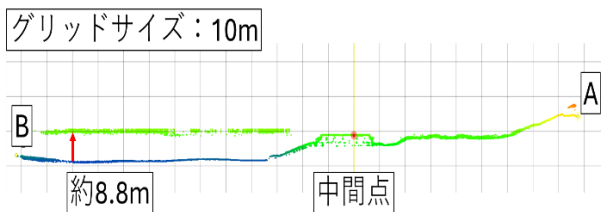
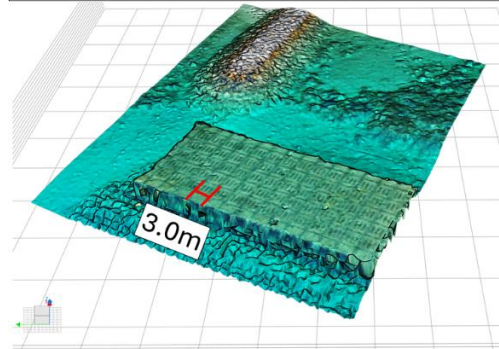
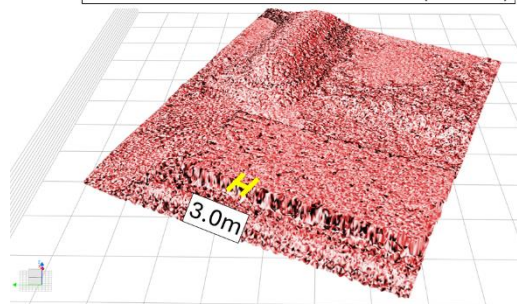


図-5 断面図

グリッドサイズ：8.5m×9.0m(横×縦)



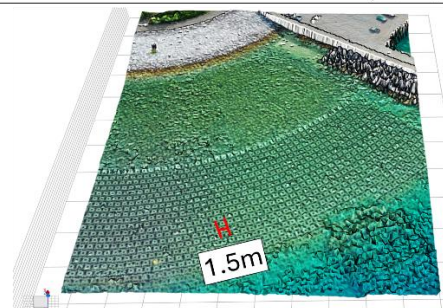
グリッドサイズ：8.5m×9.0m(横×縦)



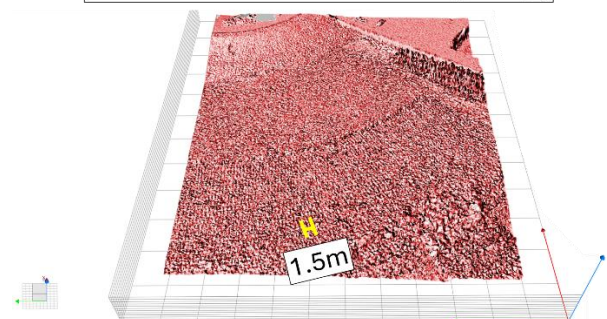
(上図：RGB表示 下図：赤色陰影表示)

図-6 突堤及び潜堤の状況

グリッドサイズ：8.5m×9.8m(横×縦)



グリッドサイズ：8.5m×9.8m(横×縦)



(上図：RGB表示 下図：赤色陰影表示)

図-7 傾斜護岸及び防波堤の消波工の状況

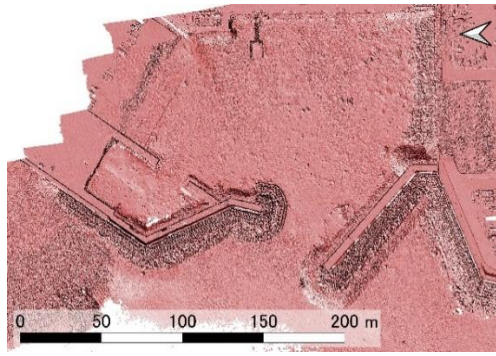


図-8 漁港内の海底地形

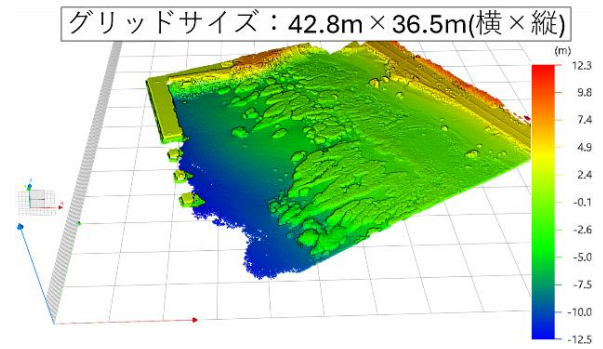


図-9 サンゴ礁の点群データ

5. サンゴ礁

(1) 地形データの取得

UAV グリーンレーザの測深能力はメーカーのカタログから透明度の約 1.5 倍程度とされており、これまで我々の調査実績では河川や漁港で最大約 3m であった。岬本部ビーチでは、UAV グリーンレーザを用いて水深約 12m までのサンゴ礁周辺の詳細な地形を捉えることができた（図-9）。UAV グリーンレーザでは計測が困難な深い水域では調査船によるマルチビームを使用し、調査船での計測が困難な浅海域では UAV グリーンレーザを併用することにより、サンゴ礁周辺の広域かつ詳細な 3 次元の地形データの計測が可能であることが期待できる。

サンゴ礁の生息状況や健全度調査に 3 次元地形データを活用することで沿岸防護機能の一つであるサンゴ礁の消波効果の定量化やその精度向上につながり、沿岸環境の防災・安全管理に資するものと考えられる。

(2) 群体判別

サンゴの形状から群体判別の可能性について検討した。グリーンレーザで取得した点群データから TIN (Triangulated Irregular Networks 不整三角網) データを作成し、オルソ画像の色データを重ねたものを図-10 に示す。これは 3 次元の立体図で様々な方向からサンゴを見ることができる。しかしながら、群体の判別は詳細度が重要になるため、対地高度を変えて直下写真を撮影し、この画像と 3 次元の立体図により判読を行った。表-3 に高度別に地上画素の寸法を示す。撮影範囲の水深は 3-4m である。この結果、高度 30m で計測することで直径約 50cm の卓状ミドリイシの群体を確認することができた（図-11）。潜水調査と併用することで群体の判別も可能であり、位置情報を持つ 3 次元地形データと組み合わせることで群体ごとの生育管理も可能と考える。撮影で使用した UAV カメラの性能を表-4 に、この時のレーザの計測諸元を表-5 に示す。

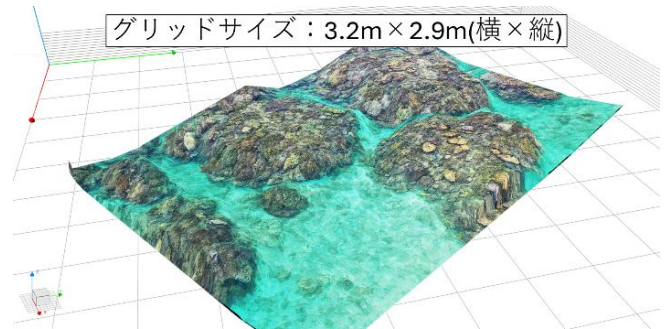


図-10 サンゴ群体の 3 次元立体図

表-3 高度別の撮影画像

飛行高度	
30m	80m
地上画素寸法	
0.7cm/pix	1.9cm/pix
撮影写真	

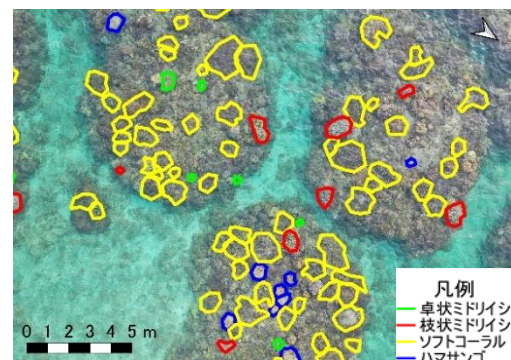


図-11 サンゴ群体の写真判読の結果

課題としてオーバハング部ではレーザが照射されない場合がありデータ取得が困難となることである。この結果、図-12に示すような白抜きの欠測部が発生する。このような場合は、飛行コースに垂直なコースを設定する等して欠測を生じさせない工夫が必要である。

また、写真撮影時の注意点として水面のハレーションがある。撮影のタイミングとして朝夕の海と陸の温度差が少なく風がない風時が望ましい。

表-4 写真撮影使用機器

Mavic2Pro (DJI 社製)	
有効画素数	2000 万画素
イメージセンサ	1 インチ CMOS
焦点距離	28mm

表-5 レーザの計測諸元

TDOT3 GREEN (アミューズワンセルフ社製)	
対地高度	40m
平均点密度	178.15 点/m ²

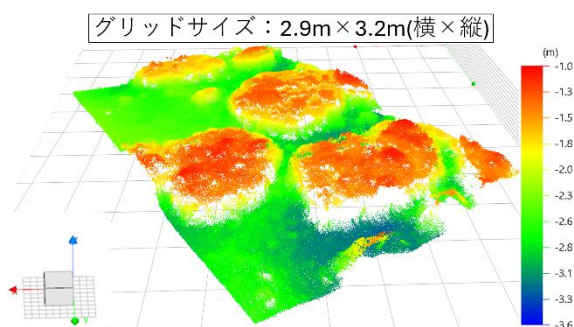


図-12 オーバハング部の欠測状況

6. マングローブ

マングローブ林 (図-13) の地表面取得のためグリーンレーザ計測を行った。計測データからノイズを取り除いたオリジナルデータ (DSM) と DSM からマングローブ林の木々や水面の点群を削除し、地表面を抽出したデータ (DEM) をそれぞれ、図-14、図-15に示す。木々の削除は点群の中で連続する最も高さの低いデータを地表面としそれより高い位置にある点群を木々として行った。図-15の地表面データから図左上①では、マングローブ林下のお椀を伏せた形状の地形が点在している様子が捉えられた。現地を確認したところ生物の巣穴と考えられる。中央部②は比較的平坦な地形が捉えられている。また、図右上③からは、筋状の地形から河川や水流の流路がど

のようにマングローブ林を通過しているのか推測することができ、水流解析にも利用できると考える。本実証ではマングローブ林の地表面抽出のため干潮時の水位が低い時間帯で計測したが、水部のフィルタリング時に水部と地表面の判別が困難な個所もあり、解析の精度・効率を上げるためには、20cm 程度以上の水深が必要なことが分かった。今回の計測により今まで捉えられてこなかったマングローブ林の地形情報をえることができた。さらに横断図からマングローブの直径や樹高が確認できるのでその植生密度から材積量の算出やブルーカーボンとして注目されている二酸化炭素の吸収量の推定、植林時の適正な樹種の選定などでの活用の可能性も広がる。また、干出して時間の経過していない地表面は湿潤であるがグリーンレーザでは計測することが可能であり、災害等の降雨後の地形情報取得にも有用であると考えられる。



図-13 UAV によるマングローブ林の写真画像

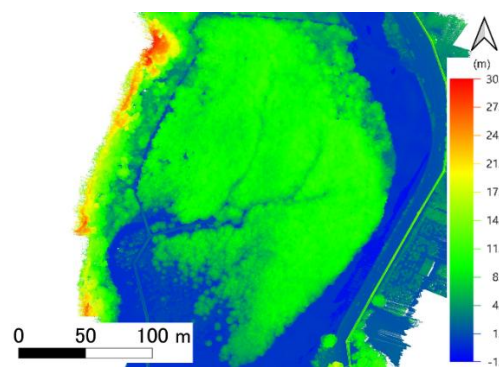


図-14 マングローブ林オリジナルデータ (DSM)

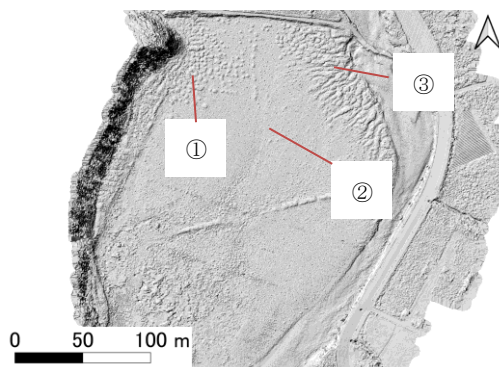


図-15 マングローブ林地表面データ (DEM)

7. まとめと課題

本実証試験において、UAV グリーンレーザを用いて水面下の海岸構造物、サンゴ礁及びマングローブ林でデータ取得を行い、それぞれの適用性を以下にまとめた。

(1) 水面下の海岸構造物の測定

海岸構造物の計測では、ブロックの状況を詳細に得ることができ透明度の高い海域で有効であり、サイドスキャンソナーやマルチビームと併用することによって陸上から水域までの地形、海岸構造物を高密度かつ広範囲に調査でき、位置情報も把握できることから海中インフラの維持管理に活用できると考えられる。

(2) サンゴ礁の地形計測と群衆判別

サンゴ礁の地形計測では、水深約 12m までの地形データを取得することができた。UAV グリーンレーザによる計測は、空中からサンゴ礁の広範囲な地形データを短時間で取得できるのが大きな利点である。潜水士による調査や調査船による音響機器では得られない広域のデータが取得できることから、サンゴ礁の保全や環境モニタリングに有効であり、沿岸環境の防災・安全管理においても活用可能であると考えられる。

しかし、UAV グリーンレーザではオーバーハング部でのデータ取得が困難な場合があり、多方向からの計測や、従来のダイバー調査や音響機器との併用が必要になる場合があると考えられる。

サンゴ群衆の判別については、グリーンレーザの点群のみでは困難であるが、30m 程度の低高度で撮影した写真と組み合わせることで群衆の同定が可能であることが分かった。このアプローチは、今後機械学習によるサンゴ群衆の判別へつなげていきたいと考えている。

(3) マングローブ林での地形計測

マングローブ林の計測では、これまで困難であったマングローブ林下の地形データを取得することができた。これは、水面下の地形や湿潤な地形は近赤外線レーザの波長は水に吸収されやすいため計測が困難であるが、UAV グリーンレーザは有効であることを示しており、ブルーカーボン生態系として期待される今後のマングローブ保全や再生計画において有用であると考えられる。

謝辞：調査にあたり沖縄県北部土木事務所及び本部町役場にご協力をいただきました。また、快く調査フィールドを提供いただきました「わんさか大浦パーク」に謝辞を記します。

REFERENCES

- 1) 戸澤実, 松本良浩, 岩本暢之, 小野智三, 矢島広樹: 航空レーザ測深機のテスト飛行について, 海洋情報部技報, 第 22 号, pp.1-6, 2004. [Tozawa, M. Matsumoto, Y. Iwamoto, N. Ono, T. Yashima, H : Test Flights of the Airborne Laser Hydrography system(JCG-SHOALS) in Japan, Technical Bulletin on Hydrography and Oceanography, Vol.22, pp.1-6, 2004]
- 2) 宇野女草太, 宮坂聡, 高橋弘: 航空機搭載型グリーンレーザ計測の実施報告と精度検証, 先端測量技術, 106 号, pp.58-62, 2014. [Unome, S. Miasaka, S. Takahashi, H : Report on Implementation and Accuracy Verification of Airborne Green Laser Measurement, ASSOCIATION OF Precise Survey & Applied Technology, No.106, pp. 58-62, 2014.]
- 3) 中村聡志: 砕波帯内における航空グリーンレーザ測定の精度検証, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.74, No.2, I_1447-I_1452, 2018. [Nakamura, S: Accuracy verification of airborne green laser bathymetry in the surf zone, Transaction of the Japan Society of Civil Engineers B2(Coastal Engineering), Vol.74, No.2, I_1447-I_1452, 2018.]
- 4) 中山真二, 折谷桂城, 竹下哲也, 石井孝之, 田中金時, 塚原聡平: 海岸保全施設の点検における UAV グリーンレーザ計測の適用性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.76, No.2, I_1393-I_1398, 2020. [Nakayama, S. Oritani, Y. Takeshita, T. Ishii, T. Tanaka, K. Tsukahara, S : Applicable study of UAV green laser scanner for maintenance of coastal conservation facility : Transaction of the Japan Society of Civil Engineers B2(Coastal Engineering), Vol.76, No.2, I_1393-I_1398, 2020.]
- 5) 西広人, 琴浦毅, 堀浩一, 今野洋幸: UAV を用いた消波ブロックの測量手法に関する検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.76, No.2, I_690-I_695, 2020. [Nishi, H. Kotoura, T. Sakai, K. Konno, H : Investigation on the surveying method of wave dissipating blocks using UAV, Transaction of the Japan Society of Civil Engineers B3(Coastal Engineering), Vol.76, No.2, I_690-I_695, 2020.]
- 6) 山下浩昭, 日室裕貴, 端詰将範, 河原正史, 安藤有輝, 森 大樹, 植木嘉朗, 安本善征: 砂浜管理における UAV グリーンレーザ計測の有用性に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.78, No.2, I_1057-I_1062, 2022. [Yamashita, H. Himuro, Y. Hashizume, M. Kawahara, M. Ando, Y. Mori, D. Ueki, Y. Yasumoto, Y : Usefulness of UAV green laser measurement in beach management, Transaction of the Japan Society of Civil Engineers B2(Coastal Engineering), Vol.78, No.2, I_1057-I_1062, 2022.]
- 7) 金田真一, 千葉達朗, 上橋幸二, 沓岐信二, 實村昂士: 航空レーザ測深 (ALB) による石西礁湖の海底地形, 写真測量とリモートセンシング, 58 巻, 1 号 pp2-3, 2019. [Kaneda, S. Chiba, T. Uehashi, K. Mimura, K : Seafloor Topography of Sekisei Lagoon Using Airborne Laser Bathymetry (ALB), Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 58, Issue 1, pp2-3, 2019.]
- 8) 国土交通省国土地理院: 作業規定の準則, 令和 5 年 3 月 [Geospatial Information Authority of Japan : Sagyoukiteinojyunsoku, March edition of 2023]

(Received February 4, 2025)

(Accepted May 15, 2025)

EXPERIMENT OF THE APPLICATION OF UAV GREEN LASERS WITHIN SUBTROPICAL MARINE AREAS

Kotaro SAKUMA, Shubun ENDO, Masashi HASEGAWA,
Hiromu SAKUTA and Masatoshi IZUMI

Green lasers (wavelength 532 nm) are effective for bathymetry in shallow and highly transparent waters with high underwater permeability. Conventional aerial laser surveying using near-infrared rays has been mainly used to measure the topography of land, but green lasers can measure the topography of shallow waters and lakes, as well as structures under the surface of water, and its application is expected to expand in coastal area management and environmental conservation. In this paper, we show that a green laser that can be mounted on a small multirotor (UAV) can acquire data in coastal structures, coral reefs, and mangrove forests under water, and provide high-density coverage from land to water. It was confirmed that coral colonies can be identified by combining the green laser point cloud and photographs taken at a low altitude of about 30 m, and that data can be obtained below the surface of mangrove forests and on the surface of moist water.