

## LiDAR-SLAMによるマングローブ林の実態把握の可能性

山本敦也<sup>1)</sup>, 宮城豊彦<sup>2)3)</sup>, 馬場繁幸<sup>2)</sup>, 古川恵太<sup>4)</sup>, 宇野女草太<sup>1)</sup>

### Preliminary study of understanding the structure of mangrove forests by LiDAR-SLAM

Atsuya YAMAMOTO<sup>1)</sup>, Toyohiko MIYAGI<sup>2) 3)</sup>, Shigeyuki BABA<sup>2)</sup>,  
Keita FURUKAWA<sup>4)</sup>, Sota UNOME<sup>1)</sup>

**Abstract:** Data collection in mangrove forests is labor-intensive and time-consuming, so an accurate and efficient approach is needed to replace traditional methods. This study was carried out measurements using LiDAR-SLAM for the purpose of understanding the structure in mangrove forests. The vertical structure of the mangrove forest was visualized by cross-sectional display of the acquired point cloud. In addition, we created raster data that expresses topography and canopy height, estimated the diameter at breast height for each tree, and introduced the results of verifying the accuracy of these estimates. In order to accurately evaluate the effectiveness of LiDAR-SLAM and its optimal operation method, it is necessary to continue to conduct measurement and analysis, and to consider the application limits according to forest conditions and equipment performance, as well as data processing methods to reduce errors.

**Keywords:** forest structure, handheld laser scanning, mangrove, SLAM

#### 1. はじめに

森林資源を持続的に利用する上で現存量の正確な把握は不可欠であり、地域ごとの森林状況に応じた正確な炭素量の収支を見積る必要がある(加藤, 2020)。近年、マングローブ生態系は、単位面積当たりの炭素貯留量が陸上生態系よりも高く、その炭素貯留機能が注目されている(Mcleod et al., 2011)。マングローブ林におけるバイオマスの推定を進める上で、対象となる毎木情報を面的かつ正確に把握することが重要である。これまでの現地調査は、ベルトトランセクト法による毎木情報及び典型断面における地形標高の直接計測を基本として実施されているが、密生する若齢木や潮汐を伴う泥濘んだ土壌条件の中での作業は多大な労力を要するため、従来手法に代わる

効率的な調査手法が求められている。

森林バイオマスを計測する手法として、精細な3次元データを広範囲に取得できるレーザ測量(LiDAR: Light and Detection and Ranging)が注目され、近年はセンサの軽量化・低価格化等により地上からのレーザ測量(Terrestrial LiDAR)の活用も進んでいる(加藤ほか, 2014; 早川・小口, 2016)。マングローブ林におけるレーザ測量として、航空レーザ(宇野女, 2020)やUAV及びバックパック搭載型レーザ(笠井ほか, 2022)の実施報告はあるものの、適用事例は未だ少ない現状にある。LiDARとSLAM(Simultaneous Localization and Mapping)の応用により実現した、手持ちで歩きながら計測ができるレーザスキャナを用いることで、枝や支柱根が複雑に入り組んだ林分にも入り込むことができ、林内の3次元構造データの取得、現地調査の効率化が期待される。そこで本稿で

<sup>1)</sup> 中日本航空株式会社 E-mail: atsuya.yamamoto@nnk.co.jp NAKANIHON AIR Co., Ltd. 17-1 Wakamiya, Toyoyama-cho, Nishikasugai-gun, Aichi 480-0202, Japan

<sup>2)</sup> 国際マングローブ生態系協会 International Society for Mangrove Ecosystems, Nishihara, Okinawa 903-0129, Japan

<sup>3)</sup> 地域情報カスタマイズユニット Geo Customize Mapping Unit, Saitama, Saitama, 330-0801, Japan

<sup>4)</sup> 海辺つくり研究会 Association for Shore Environment Creation, yokohama, kanagawa, 220-0023, Japan

は、マングローブ林内の構造把握を目的として、LiDAR-SLAMを用いたハンドヘルド型レーザスキャナによる計測事例を紹介する。

## 2. 調査地と方法

### 2.1. 調査地

調査地は、モーリシャス島の東側に位置する Ferney 及び Melville 地区である。Ferney は 5m 幅の帯状区、Melville は半径 5m の円形区が 3 つ設定され、毎木調査とオートレベルによる断面標高計測が実施された。両地区におけるマングローブ林の主な構成種は、オヒルギ (*Bruguiera gymnorrhiza*)、オオバヒルギ (*Rhizophora mucronata*) であり、両種のサイズは最大で胸高直径 20cm 程度、樹高は 12m 程度であった (表 1)。

### 2.2. 使用機材

使用機材は、ハンドヘルド型レーザスキャナ ZEB-HORIZON (GeoSLAM 社製) を用いた (写真 1)。レーザセンサに VLP-16 (Velodyne 社製) を搭載し、スキャナヘッドが回転することで後方以外の全周囲を計測することができる (表 2)。重量はスキャナ、データロガー、バッ

テリーを含めて 2.8kg 程度である。

計測手順について、まず事前準備として、対象区画の境界点及び計測の始終点において目印となるカラーコーンを設置し、対象物とスキャナとの距離が 5m 以内となるように歩行コースを計画した。計測時は、低速かつ一定のペースで歩行し、対象範囲における歩行可能な箇所を周回した。また、計測時間は、SLAM による累積誤差等を勘案し、10 分間以内となるように実施した。

### 2.3. データ処理

3 次元データ (以降、点群データ) の処理には、Micro Station (Bentley 社製) と TREND-POINT (福井コンピュータ社製) を使用した。まず対象範囲外となる点群を除去し、地表面を表す点群をグラウンドデータとして抽出するフィルタリング処理を実施した。また、点群の最低標高値を採用したものを数値地形モデル (DTM: Digital Terrain Model)、最高標高値を採用したものを数値表層モデル (DSM: Digital Surface Model) として、地表面と樹冠表層を表すラスターデータを作成した。格子間隔は 25cm とし、単位格子内における複数点の集約ないし欠測箇所の補間については、TIN 法により実施した。

表 1 調査対象木の概況

Table 1 Tree densities and sizes of target trees in each plot

区画名	区画面積 (m <sup>2</sup> )	立木密度 (N/100m <sup>2</sup> )	樹高(m)				胸高直径(cm)			
			平均	最大	最小	標準偏差	平均	最大	最小	標準偏差
Ferney	210.0	38.6	6.5	11.9	2.8	2.6	8.2	21.9	2.5	4.0
Melville 1	78.5	3.8	4.0	4.8	2.3	1.4	6.4	8.2	2.8	3.1
Melville 2	78.5	28.0	7.0	10.4	3.7	2.3	9.9	25.1	5.0	4.9
Melville 3	78.5	53.5	8.2	10.8	3.5	1.8	10.0	21.0	5.0	4.1

表 2 機材の性能諸元

Table 2 Specifications of installed LiDAR sensor

スキャナ名	Velodyne VLP-16
測距距離(m)	0.5~100
垂直視野角(°)	270
水平視野角(°)	360
測定点数 (点/秒)	300,000
測定精度(cm)	±3
レーザ波長(nm)	903
レーザクラス	クラス1



写真 1 使用機材 ZEB-HORIZON  
Photo 1 ZEB-HORIZON

### 3. 結果と考察

#### 3.1. 取得点群の状況

2022年8月12～15日の期間において、両地区とも9分間程度の歩行計測を実施し、約5千万点の点群を取得した(図1)。地表面から樹冠上部まで広範囲にわたる点群の断面表示により、単木ごとの樹木形状を詳細に確認することができる。内陸側の端部において取得点の密度が低くなったが、これはオオバヒルギの発達した支柱根によって計測時に進入ができなかったためである。樹木等の対象地物の再現性について、比較的大きな対象物であ

る幹や支柱根等の形状を明瞭に把握することができる(図2A)。一方、膝根や稚樹等、より小さな対象物は、ノイズ点が混じり込むことで輪郭がぼやけてしまい、やや不明瞭となったものの、識別は可能であった(図2B)。したがって樹木等の地物形状の推定精度の向上には、地物点に含まれるノイズを低減除去する事前処理が重要となることが考えられた。

#### 3.2. ラスターデータの作成

ラスターデータの作成結果を図3に示す。DTMは地面の起伏を、DCHM(Digital Crown Height Model)はDSMからDTMを差し引くことで林冠高を表現している。

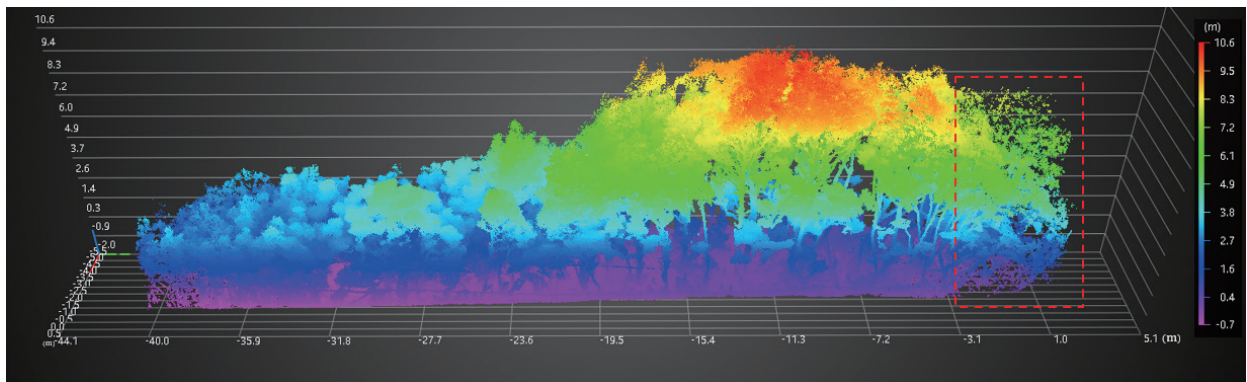


図1 調査区 Ferney における取得点群の状況  
赤破線内は計測時に進入できず、取得点密度が低くなった箇所を示す。  
Fig.1 3D point cloud in Ferney

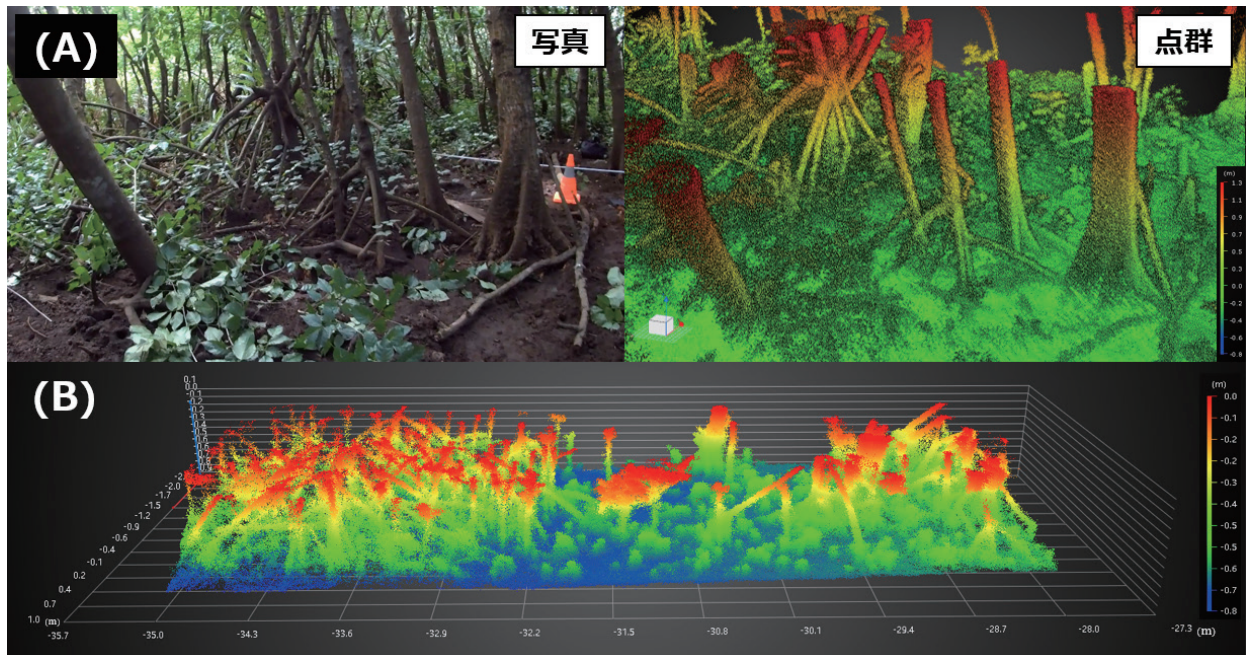


図2 調査区 Ferney における取得点群の詳細確認  
(A) 写真と点群の比較(高さ1.3mまで表示) (B) 膝根や稚樹の状況(高さ0.8mまで表示)

Fig.2 3D point cloud details in Ferney

(A) Comparison of photos and point clouds (up to 1.3 m in height) (B) Young tree and knee roots (up to 0.8 m in height)

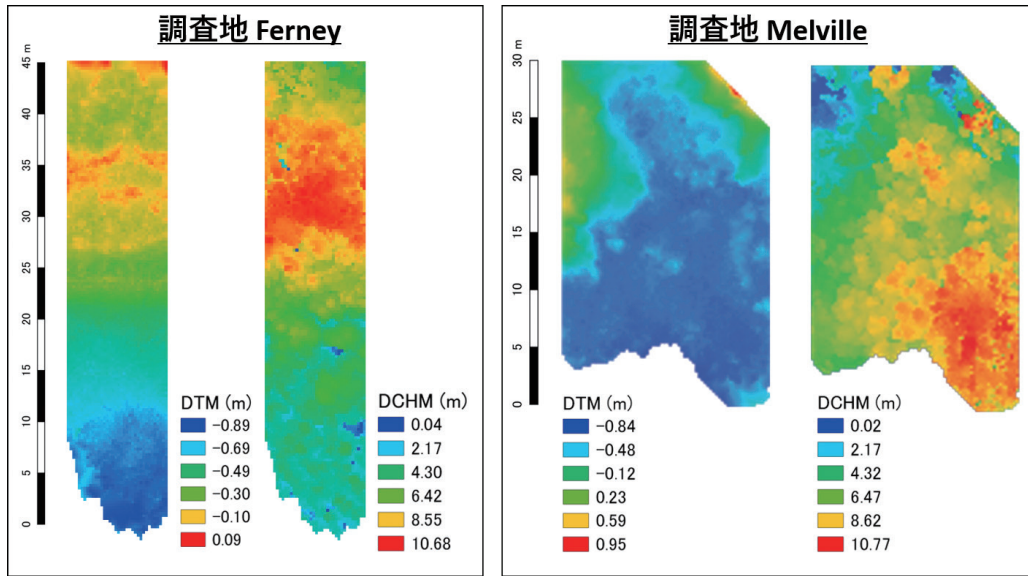


図3 各調査地におけるDTM(数値地形モデル)及びDCHM(林冠表層高モデル)調査地やモデルによって標高データの範囲が異なるため、色分けの閾値が異なっている。

**Fig.3** DTM (Digital Terrain Model) and DCHM (Digital Canopy Height Model) for each survey site  
Since the range of elevation data differs depending on the survey site and model, the thresholds for color coding are different.

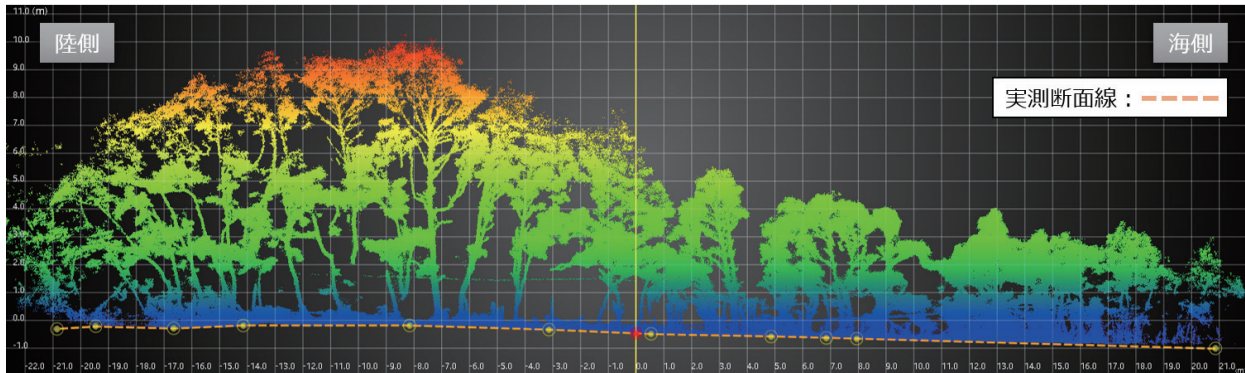


図4 実測断面線と断面点群の重ね合わせ(調査区 Ferney の例)  
**Fig.4** Overlay the field measured cross-sectional line on the point cloud in Ferney

DCHMについて、林冠高の最大箇所において実測値と比較した結果、調査区 Ferney においては、約1m程度の差異があったものの、調査区 Melville では、わずか3cmの差異であったことから、林冠高は概ね再現されていることが考えられた。

DTMについて、グラウンドデータを用いた内挿補間により数十センチ単位の地形起伏を表現した。その再現性を検証するため、オートレベルにより実測した断面線と当該断面のDTM及びその他点群の重ね合わせを行った(図4)。実測箇所における地形起伏の傾向はいずれも一致しており、標高値の平均較差は約5cmであった。また、計測時に進入ができなかった箇所において約20cmの最大較差が生じた。

マングロープの地上根付近におけるグラウンドデータは、支柱根等による遮蔽のため、根の直下では取得できず、根の隙間等の近傍から取得した点群のみで構成され、それを内挿補間することでDTMが作成される。その近傍一帯でグラウンドデータが欠測した場合において誤差が増大する可能性はあるものの、適切なコースや速度によって歩行計測し、グラウンドデータが地上根近傍から取得できれば、マングロープ林における地形評価は十分可能であることが考えられた。ただし、地上根直近の地形評価等、近傍の立木条件に応じた精度の違いについては引き続き検証が必要である。

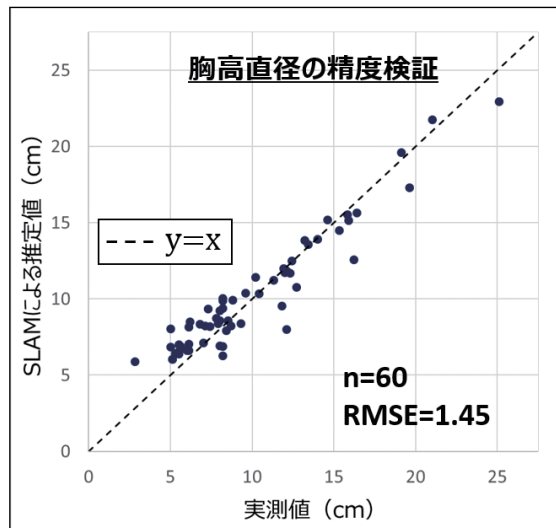


図5 実測値とSLAMによる推定値の関係

Fig.5 Relation between the field measured values and estimated values by LiDAR-SLAM.

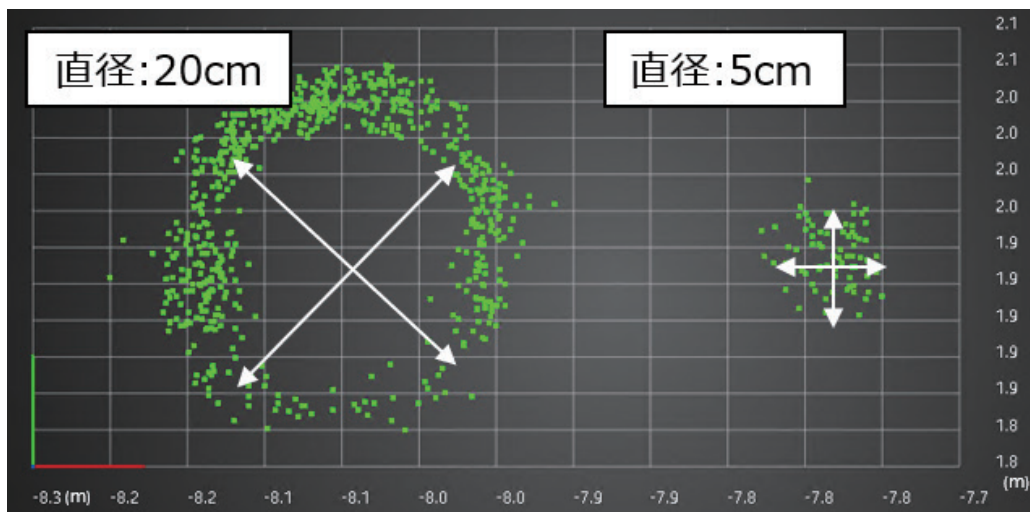


図6 胸高位置の幹断面

点群を樹幹軸と直交するように1cm幅で抽出した。矢印は直径の測定箇所を示す。小径な幹の場合、点群が輪状に分布しないため、幹表面の特定が困難である。

Fig.6 Trunk cross section at breast height

The point cloud was extracted with a width of 1 cm perpendicular to the trunk axis. The Arrows indicate where the diameter was measured. In the case of small-diameter trunks, it is difficult to identify the surface of the trunk because the point cloud is not distributed in a ring shape.

### 3.3 胸高直径の推定と精度検証

調査対象木の胸高直径を推定するため、取得点群を胸高位置において樹幹軸と直交するように1cm幅で抽出し、その断面点群から長辺とそれに直交する短辺の2方向で直径を測定し、その平均値を採用した。

調査区 Melville における胸高直径の推定値と実測値の関係を図5に示す。平均誤差は、1.14cm、RMSE (Root Mean Square Error) は1.45cmであり、10cm以下の幹径においては、プラスの誤差を持つ推定値が多くなる傾向がみられた。これは、レーザスキャナの性能上、相対

精度±3cmの範囲で、幹表面を表現する点群がばらついて分布するため、小径な幹においては、幹本来の位置を示す点群の判別が困難となったことに起因していることが推察された(図6)。

胸高直径10cm以下の小径木において推定精度が低下する現象は、同様の機種を用いた先行事例においてフィッティング方法を問わず指摘されている。また精度低下の理由として、サイズの小さい幹から取得される点群の密度は相対的に低くなり、機材のビーム発散角や距離精度による誤差を含む割合が多くなることを挙げている (Collob et

al., 2020; Balenović et al., 2021)。一方で、取得データの品質には、林分条件や計測方法が大きな影響を与える可能性が示されており、歩行する速度やコースによって品質が向上すること示唆している (Ryding et al., 2015)。引き続き、詳細な精度検証と現地条件に応じた計測手法の確立が求められる。

#### 4 まとめ

各地区 200m<sup>2</sup> 程度の調査対象区において、LiDAR-SLAM を用いて 9 分間程度の歩行による計測を実施し、取得点群よりマングローブ林内の垂直構造を可視化した。また、地形及び林冠高を表現するラスターデータの作成、立木単位の胸高直径推定を行い、それら推定値の精度検証について取り組み状況を紹介した。

LiDAR-SLAM による計測の主な利点は、誰でも扱える操作性の容易さ、連続的な歩行計測により作業時間を短縮できることにある。定点設置型の地上レーザ計測と比較した場合、作業効率は大幅に向上することが示されており、立木密度が高い林分等、厳しい計測条件における有用性が評価されている (James and Quinton, 2014; Ryding et al., 2015)。本計測は、調査員 1 名に対してコース選定や境界目印の設置等の計測準備に 40 分間程度、計測に 9 分間程度の合計 1 時間程度で実施した。同時期に実施した従来調査では、調査員 2 名に対して 3 時間程度の時間を要しているため、マングローブ調査に要する作業時間及び人員数を削減できる可能性は十分考えられる。

マングローブ林調査において、地上から取得した高密度な 3 次元点群データの活用により、任意箇所における地形断面、林分構造や樹形を机上で確認することが可能となる。さらに解析を進めることで、微地形や林冠表層構造のラスターデータの作成、林分の垂直構造の定量化等、従来調査によるデータでは考えることができなかった活用方法が期待される。

今後は、マングローブ林調査における LiDAR-SLAM の有効性及び最適な運用方法について正確な評価を行うため、引き続き計測及び解析を重ね、林分条件と機材性能に応じた適用限界、誤差低減に向けたデータ処理手法について検討する必要がある。

#### 謝辞

本研究は、公益信託 商船三井モーリシャス自然環境回復保全・国際協力基金の助成を受け、国際マングローブ生態系協会 (ISME) による「マングローブ生態系保全・再生と持続可能な利活用への技術支援と人材育成プロジェクト」の一部として実施された。モーリシャスの NGO

「Reef Conservation」および Ferney 地区のマングローブ生態系を所有する Ciel グループには、調査地の提供、共同での調査・意見交換など多岐に亘るご支援を頂いた。当プロジェクトの関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- Balenović, I., Liang, X., Jurjević, L., Hyyppä, J., Seletković, A. and Kukko, A. (2021): Hand-held personal laser scanning-current status and perspectives for forest inventory application. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 42 (1) : 165-183.
- Gollob, C., Ritter, T. and Nothdurft, A. (2020): Forest inventory with long range and high-speed personal laser scanning (PLS) and simultaneous localization and mapping (SLAM) technology. *Remote Sensing* 12 (9): 1509.
- 早川裕式・小口高 (2016) : 地形学における地上レーザ測量の活用. *地学雑誌* 125 (3) : 299-324.
- James, M. R. and Quinton, J. N. (2014): Ultra - rapid topographic surveying for complex environments: the hand - held mobile laser scanner (HMLS). *Earth surface processes and landforms* 39 (1) : 138-142.
- 笠井克己・後藤和久・柳澤英明 (2022) : LiDAR 技術を活用したマングローブ林内の微地形把握. *日本マングローブ学会大会講演要旨集* 28: 11.
- 加藤顕 (2020) : 森林モニタリングのためのレーザー技術. *計測と制御* 59 (5) : 326-330.
- 加藤顕・石井弘明・榎木勉・大澤晃・小林達明・梅木清・佐々木剛・松英恵吾 (2014) : レーザリモートセンシングの森林生態学への応用. *日本森林学会誌* 96 (3): 168-181.
- McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M. and Silliman, B. R. (2011) : A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO<sub>2</sub>. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9 (10): 552-560.
- Ryding, J., Williams, E., Smith, M. J. and Eichhorn, M. P. (2015) . Assessing handheld mobile laser scanners for forest surveys. *Remote Sensing* 7 (1): 1095-1111.
- 宇野女草太 (2020) : 航空レーザ計測システムの最新状況 - 奄美大島での計測・研究事例と最新技術の紹介 -. *Mangrove Science* 11: 27-35.