

## UAV搭載型LiDARを用いたマングローブ林内の広域地形測量 —西表島浦内川マングローブ林での計測事例—

笠井克己<sup>1)</sup>, 後藤和久<sup>1)</sup>, 柳澤英明<sup>2)</sup>

### A case study of topographic survey in the wide-area of mangrove forest at Urauchi River in Iriomote Island using UAV with LiDAR

Katsumi KASAI<sup>1)</sup>, Kazuhisa GOTO<sup>1)</sup>, Hideaki YANAGISAWA<sup>2)</sup>

**Abstract:** Mangrove forests only inhabit an elevation range above mean tide in the intertidal zone, which reflects the constraints imposed by tide and topography on mangrove forest habitats. For this study, topographic data of mangrove forest at Urauchi River on Iriomote Island were acquired using an RTK GNSS-controlled UAV with LiDAR equipment. Then DEM and DCHM were created from the obtained point cloud data. Although the acquired data must be validated further, our dataset is useful to clarify the overall relations among topography, mangrove distribution, and tree heights over a wide area. Furthermore, combined datasets obtained using Airborne LiDAR Scanning (ALS) and Mobile LiDAR Scanning (MLS) are expected to be useful to create a comprehensive dataset of the 3D point cloud of mangrove forests that is applicable to additional detailed analyses such as the distributions of individual tree species.

**Keywords:** Mangrove, LiDAR, UAV, ALS

#### 1. はじめに

潮間帯にのみ生息するマングローブは、汀線から後背地にかけての標高変化により優占する樹種が置き換わるゾーネーションを示す(菊池ほか, 1978)。ゾーネーションの規定要因には、潮汐のみならず地形的条件が密接に関わっており(Walsh, 1974), 潮汐作用は短期的には一定と考えると、マングローブ林内の地形を広範囲かつ3次元的に把握することが、マングローブ種の生育条件や変遷を理解する上で重要である。ところが、マングローブは樹種によって根が地表に張り出していること、満潮時には地面は水面下に位置すること、樹木が密集した状態で存在している場合が多いことなどから、マングローブ林は地形を測量しにくい環境にある。実際に、多視点空中写真測量(SfM)では、マングローブ林内の地形再現精度は低いことが報告されている(Lucas et al., 2000)。このような理由から、マングローブ林の地形を把握するための測

量は、オートレベルなどを使用した限られた範囲での断面測量(例えば、藤本・宮城, 2016)に留まり、広範囲の地形データを得ることが困難であった。一方、近年ではLight Detection and Ranging (LiDAR) 技術が発展し、この技術を用いればマングローブ林内の地形を広範囲かつ3次元的に捉えられる可能性が出てきた。LiDARとは、レーザー光を対象物に照射し、反射光が返ってくるまでの時間差を距離に換算することで対象物を点群として捉える技術のことであり、短時間で膨大かつ高精度の点群データを取得できる。マングローブ林を対象としたLiDAR測量は、近年になって世界的にも研究事例が報告されつつあり(例えば、Zhu et al., 2019; 山本ほか, 2022), 国内のマングローブ林での広範囲のLiDAR測量は、Airborne LiDAR Scanning (ALS) という有人または無人飛行機に測量機器を搭載して上空から測量する方法が宇野女(2020)により紹介されている。ALSを用いれば、レーザー光を地表面に向けて照射し地形を点群と

<sup>1)</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 E-mail: kasai-katsumi0316@g.ecc.u-tokyo.ac.jp Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Tokyo 113-0033 Japan

<sup>2)</sup> 東北学院大学教養学部地域構想学科 Department of Region Design, Faculty of Liberal Arts, Tohoku Gakuin University, Izumiku, Sendai, Miyagi 981-3193 Japan

して捉えられるため、SfM などでは困難であった樹木下や陰影部の地形も捉えることができる。そのため、地形を捉えにくいマングローブ林での適用可能性が指摘されている(宇野女, 2020)。ただし、有人飛行機を用いた測量は大規模かつ高価であり、近年普及が進む無人飛行機(UAV)を用いて、簡便に測量できることが望ましい。しかしながら、LiDARを搭載したUAVは近年普及し始めているものであり、特に地形測量に焦点を当てたマングローブ研究では活用可能性の検討がまだ不十分である。そこで本研究では、UAV(ドローン)による低高度かつ高密度なLiDAR測量を沖縄県西表島浦内川マングローブ林で行ったので、その事例について紹介する。

## 2. 調査地と手法

対象地域は、沖縄県西表島の浦内川マングローブ林である(図1)。浦内川は西表島北部を流域とする、河川延長約13.1 km、流域面積54 km<sup>2</sup>の河川である。主要マングローブ種はオヒルギ(*Bruguiera gymnorhiza*)とヤエヤマヒルギ(*Rhizophora stylosa*)である。藤本・宮城(2016)では、浦内川マングローブ林で比較的狭い範囲内に見られる帯状構造は、塩分濃度などの土壌化学性に対応したものではなく、冠水頻度や土壌の排水性能に対応したものであると考察されている。また、浦内川マングローブ林背後の淡水湿地には、1000 cal BP(cal BPは較正年代の単位で1950年を基準年として何年前かを示す)前後に離水したマングローブの根株やマングローブ堆積物が広範囲に分布していることから、約1000年前の地震隆起により一気に離水した後に、マングローブ林が海側に新たに形成されたと考えられている(Fujimoto and Ohnuki, 1995)。本研究では、UAVはMatrice 300 RTK(DJI社)、それに搭載するLiDAR計測機器はZenmuse L1(DJI社)を使用した。各機器のスペックを図1(c)に示す。計測は2022年7月13日に行った。なお、レーザー光では水面下の地形を捉えられないため、調査時間を大潮の低潮位の時間帯に限定して、基準局を置いた場所の高度から比高にして50mで飛行することで点群データを取得した。なお、水面下の点群データも取得できる場合があるものの、機器の性質上十分な精度は得られないと判断し、本研究では標高-1m以下の点群情報を用いないこととした。点群データの後処理にはDJI Terraソフトウェア(DJI社)を使用し、基準局の位置情報と東京湾平均海面(T.P.)基準の標高を与えることで、3次元の位置座標情報を持つ点群データを作成した。点群データの解析にはCloud Compare(EDF社)を用い、Zhang et al.(2016)が提案したCloth Simulation Filter(CSF)法によりUAVの点群データから植生点を排除して地上点のみを抽出した。CSF法とは、点群の上下を反転してそこに布を被せるように覆うことで地形モデルを形成し、それ

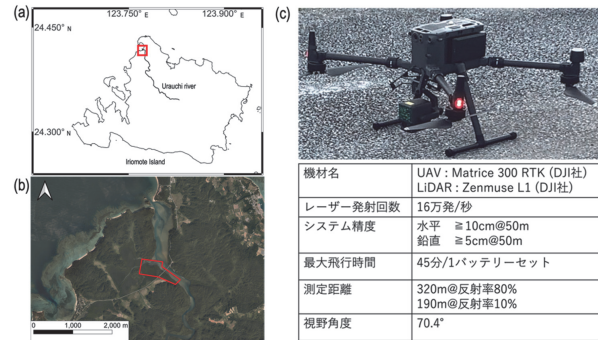


図1 (a): 西表島浦内川河口域における本研究の調査範囲(赤枠の範囲内)。 (b): 対象地域周辺の空中写真(国土地理院, 2012/11/16撮影)。赤枠内が測量範囲内。 (c): 測量に使用したUAVとLiDAR機器の写真ならびにスペック。

**Fig.1** (a) Survey area. (b) Aerial view of the area (data from GSI Tiles). Red frame denotes the survey area. (c) Specifications of UAV and LiDAR System.

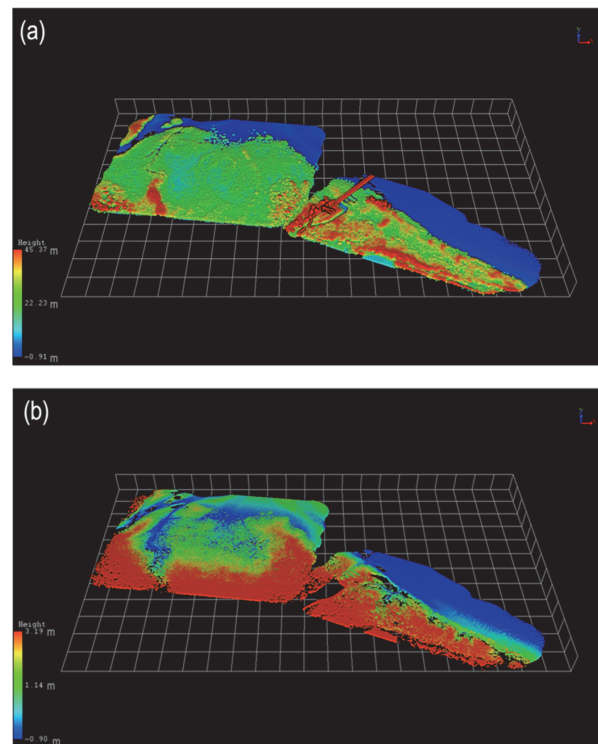


図2 (a): LiDAR測量で得られた点群データ(EDL表示、高度で色分け)。 (b): オリジナルの点群データにCloud CompareでCSFフィルターをかけ、地表面の点と判断された点群を抽出した図(EDL表示、高度で色分け)。一部データ欠損が生じ黒くなっているが、大部分では地表面にレーザー光が地表に到達している。背景の格子は50mグリッド。

**Fig.2** (a) Original point clouds obtained from LiDAR survey (EDL display, colored by height). (b) Processed point clouds determined to be the ground surface by CSF filtering (EDL display, colored by height). Although some area displayed black because of lack of ground points, the laser beam generally reaches the ground surface well.

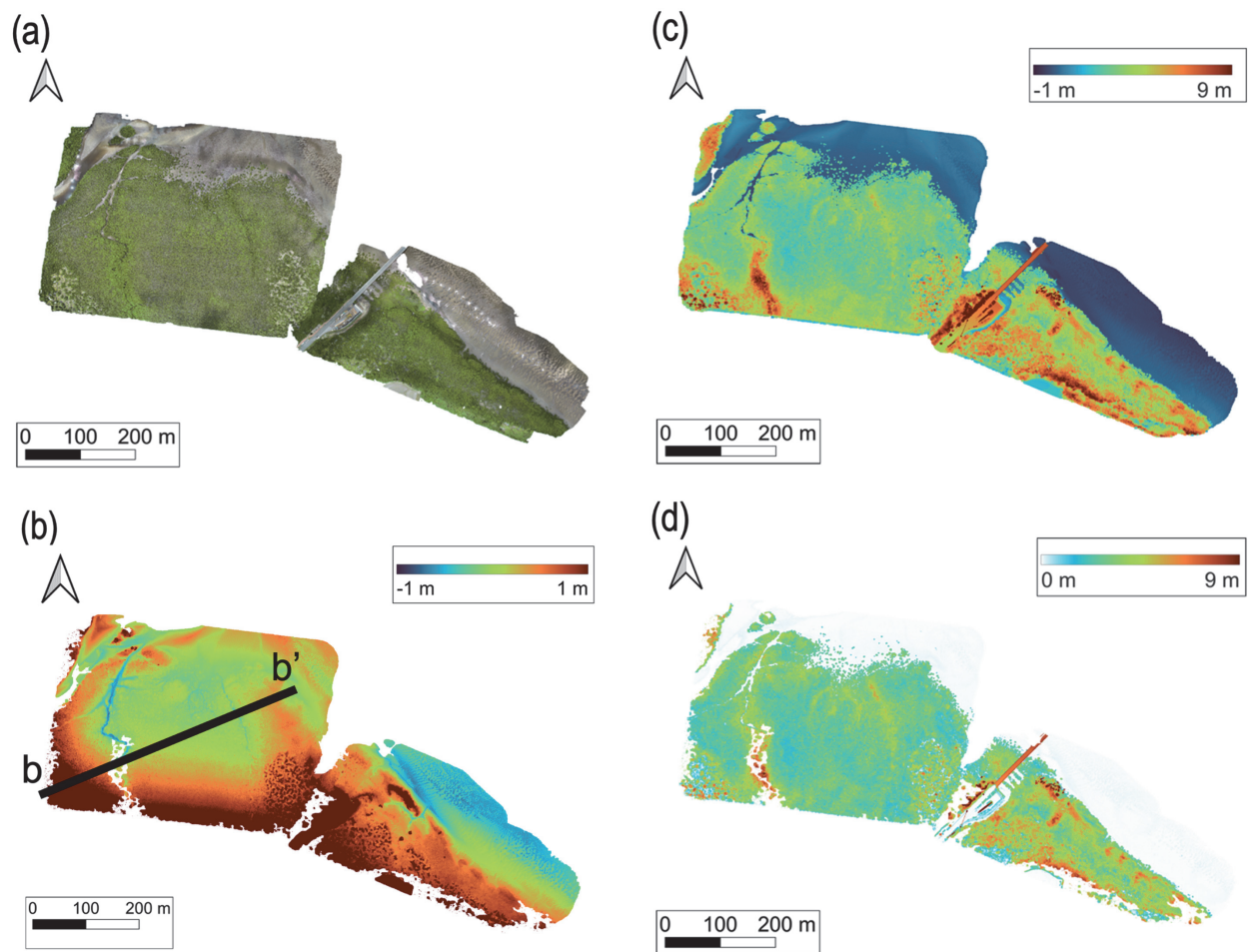


図3 (a): 空中写真から作成したオルソ画像。LiDAR 測量で得た点群データから LiDAR360 で作成した, (b): 数値標高モデル (DEM) と (c): 数値表面モデル (DSM)。DEM では空中写真では認識しにくいクリークの存在などが確認できる。DEM 中の測線 b-b' は図4の Fujimoto and Ohnuki (1995) の測線に対応。 (d): DSM と DEM の差分から作成した数値樹冠高モデル (DCHM)。クリーク沿いにおいて樹冠高が特徴的に高い。

**Fig.3** (a) Ortho image synthesized from aerial photographs. Point clouds obtained by LiDAR survey: (b) Digital Elevation Model (DEM), (c) Digital Surface Model (DSM), and (d) Digital Canopy Height Model (DCHM). The line b-b' in the DEM is corresponds to the line of Fujimoto and Ohnuki (1995) in Fig.4.

を点群と対応させることで植生や人工物等の点群を除去する手法である。さらに、地上点は点群が疎となるため、LiDAR360 (GreenValley International 社) を使用して点群の標高データを Inverse Distance Weighted (IDW) 法によって補間し、50 cm メッシュ数値標高モデル (DEM) を作成した。IDW 法とは、近接点の距離の逆数を重みとして加重平均で値を補完する手法のことで、近接する点ほど影響が大きくなる。また樹高等を把握するため、植生を除去していない点群データからグリッド内の最高点を抽出し、50 cm メッシュの数値表面モデル (DSM) を作成した。そして、得られた DSM から DEM を減算する事で数値樹冠高モデル (DCHM) の作成を行った。さらに、当該機器で同時取得できる空中写真を正射変換して合成を行うこ

とで、位置や面積、距離などが正確に反映されたオルソ画像 (山後, 2009) の作成も行った。空中写真の処理には Metashape Professional (Agisoft 社) を使い、各モデル及び画像の出力座標系には日本測地系 2011 における平面直角座標系第 XVI 系を使用した。

### 3. 結果

UAV の飛行は 2 回に分けて合計約 45 分行い、それぞれの計測データを組み合わせることで約 30 ha の範囲の点群データを取得した。LiDAR 測量により得られた点群データと、そこから CSF 法により地上点を抽出したものを図 2 に示す。図 2 (b) では、地表点が得られていない

と判断された場合はデータ欠損として背景と同色（黒色）に表示されるが、所々点群の抜けがあるものの、大部分では地表面にまでレーザー光が到達し、地上点が多く取得できている。これは、樹木の葉や枝の間を抜けて地表まで十分な量のレーザー光が到達し、点群が得られていることを示している。取得した空中写真と点群データをもとに作成したオルソ画像、数値標高モデル (DEM)、数値表層モデル (DSM)、及び数値樹冠高モデル (DCHM) を図 3 に示す。

#### 4. 考察

##### 4.1. LIDAR 測定の評価

LiDAR 測量を行ったことで、地表面の様子を詳しく捉えられ、従来の SfM では作成することが難しかった、DEM の作成を容易に行うことができた。これに加え、樹木等を含む表層の高度 (DSM) データが得られたことにより、従来は困難だった樹木や建造物そのものの高さを表す DCHM の作成も、50 cm メッシュという高解像度で行うことができた。作成した各種数値モデルの精度検証は今後必要であるものの、DEM に関しては本測量範囲に含まれる Fujimoto and Ohnuki (1995) の断面 b-b' と比較した結果、一部範囲外で比較できていないものの、標高値に大きな相違はなく、測量時期や方法の違いを考慮しても地形の凹凸を良く再現できていることが確認できた (図 4)。

##### 4.2. マングローブの植生

図 3 (b) の DEM と図 3 (d) の DCHM を見比べると、

マングローブ林内には細かいクリークが複数存在しており、その周辺の標高は相対的に低いものの、周囲より顕著に樹冠高の高い樹木が集まっていることがわかる。現地での確認が必要であるものの、樹高の違いは樹種や生育環境の違いを反映している可能性が考えられる。次に、マングローブは平均潮位より上位の潮間帯に生息するが、本調査地に一番近い潮位観測点である石垣港の 2017～2021 年の 5 年平均の潮位のデータによれば、本調査地でマングローブが生息できる範囲は、標高 0.16 m (平均潮位面)～0.98 m (朔望満潮位面) 付近の範囲となる。DEM から作成した 0.5 m 間隔での等高線と、平均潮位面から朔望満潮位面の範囲を図 5 に示す。図 5 (b) を見ると、平均潮位がマングローブの明瞭な生息下限高度には必ずしもなっていないことがわかる。これは、標高条件としては生息可能（または不可能）な範囲であるものの、その他の条件（底質や栄養塩等）により、まだマングローブが進出（または後退）していない可能性が考えられる。あるいは、平均潮位以上であるものの現在マングローブが生息していないエリアは、河川に面した部分に集中していることから、表層堆積物が軟弱で地盤高が安定していない上に、増水や洪水の影響を受けやすくマングローブが安定して成長できない可能性も考えられる。今回、広範囲の標高データが得られ地形的にマングローブが生息可能な範囲を示すことができたため、今後のマングローブ林の拡大予測または植林計画等にも活用できると期待される。一方、朔望満潮位面より上位の潮位が及ばない高度では、多くの場所でアダン (*Pandanus odoratissimus*) 等のマングローブ以外の植生の樹木が確認できた。

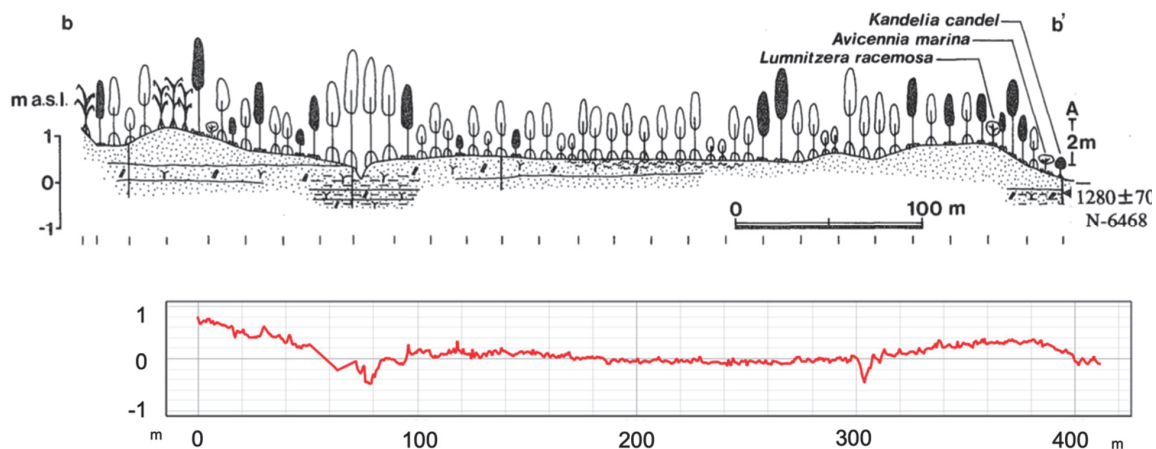


図 4 Fujimoto and Ohnuki (1995) の断面 b-b' (上) と DEM の断面図(下)を比較した様子。一部は DEM の範囲外で確認できないものの、地形の特徴を捉えられていることが確認できる。b-b' 断面右側の A は樹高のスケールを示す。Fujimoto and Ohnuki (1995) より許可を得て転載。

**Fig.4** Profile of DEM (lower) compared with Profile b-b' of Fujimoto and Ohnuki (1995) (upper). Although some of the data are outside of DEM, it can be confirmed that there is almost no significant differences between them. Reprinted from Fujimoto and Ohnuki (1995) with permission.

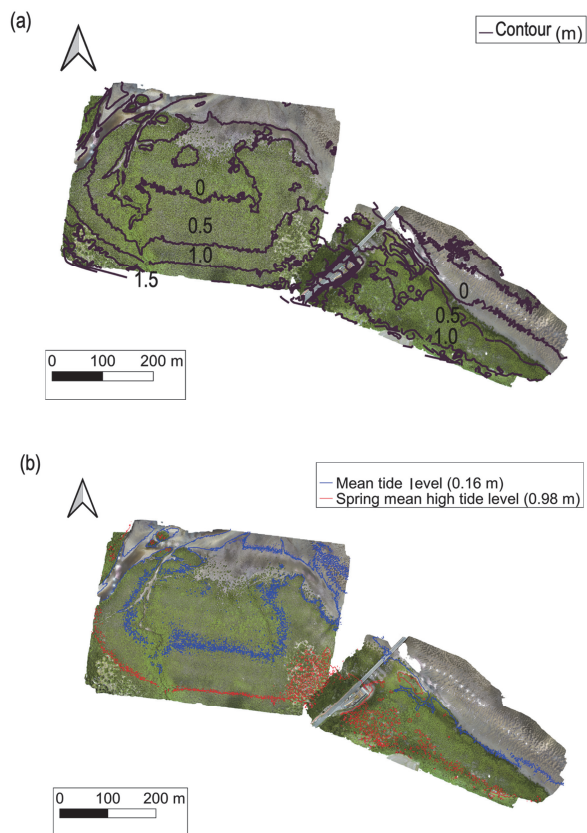


図5 (a): 0.5 m 間隔の等高線. (b): 平均潮位線 (青)と朔望満潮位線 (赤). 囲まれた部分が潮間帯の上半分に相当する. いずれも等高線で表示されているが, 微地形を反映して複雑な標高範囲が示されている.

Fig. 5 (a) A contour map with 0.5 m elevation interval. (b) Range of mean tide level (blue line) and spring high tide level (red line).

#### 4.3. 課題と将来展望

今回の調査は, マングローブ林を対象に LiDAR 測量を広範囲で行うことを目的とした予察的調査であり, 次のような課題が残る. まず, マングローブ林を対象とした場合の地形復元の精度評価はまだ十分にできていない. 精度を議論するには, 現地での基準点測量やオートレベルなどを用いた断面測量を行い, その結果と比較する必要がある. なお, 著者らが沖縄県石垣島で同様の LiDAR 測量を行った予察的な事例では, 基準点での測量結果と比較して鉛直方向に最大約 23 cm の誤差であった. 精度検証を待つ必要があるものの, 浦内川の測量時は石垣島での測量と比べて風況も良く, 良好な精度であったと見込まれる. 次に, UAV による ALS のみでは, 樹冠高や地表高は取得できるものの, 樹木の形状や林内の様相を把握することはできなかった. これらを把握するには, ALS データと, 地上型レーザー測量 (TLS) やモバイル型レーザー測量 (MLS) 等の, 林内からの測量データと組み合

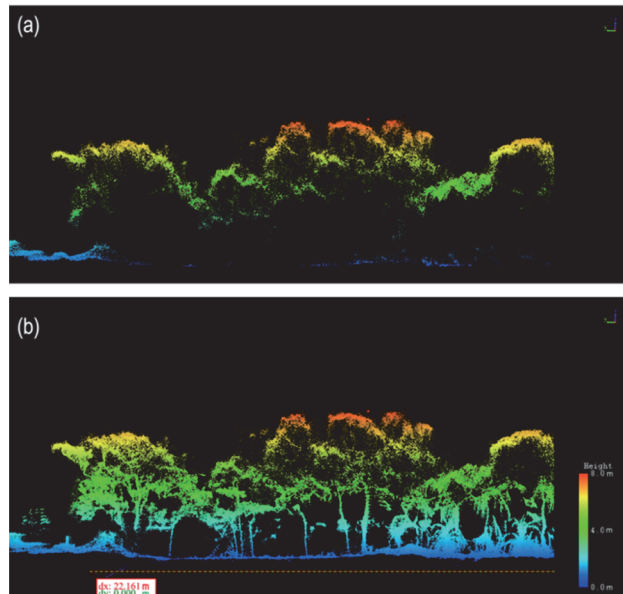


図6 浦内川での断面の様子. (a): ALS のみ, (b): ALS と MLS の組み合わせ. 上空および地上から得た点群データを組み合わせることで, 地表面および林内の樹形などの様相が補完できる.

Fig.6 Profile view of point cloud at Urauchi River. (a) ALS, (b) ALS and MLS.

わせることが有用である. 実際, 今回の調査範囲の一部において, 自己位置推定と環境地図作成を同時に行う SLAM 技術を搭載したバックパック型 LiDAR を用いて林内からの MLS 測量を予察的に行った結果を組み合わせると, ALS で得られなかった林内の様相が捉えられることがわかる(図6). ただし, 著者らの石垣島での検討では, ALS と MLS を組み合わせる際に誤差が生じる場合があり, 測量・解析手法の改良が必要である.

#### 5. まとめ

西表島浦内川マングローブ林を対象に, 広範囲の LiDAR 測量による点群データ取得を行った. その結果, LiDAR 測量を用いれば, SfM では樹冠の影響により作成が難しかった DEM や DCHM を容易に作成できることがわかった. これにより, 地形とマングローブの分布の関係, および地形と樹高の関係を面的かつ広範囲に推察することが可能となった. なお, 今回の調査は予察的なものであり, 現状では精度検証が十分にできていないため, 現地調査に基づく精度評価を行った上で学術利用する必要がある. また, ALS のみである場合, 地表面は捉えることは可能な場合が多いが, 樹木の形状を捉えることは難しい. よって, マングローブ林内の詳細な様相, 樹木の形状を捉えるには, 林内からの LiDAR 測量を組み合わせる必要がある.

## 謝辞

本調査にあたり、宮城 豊彦氏、馬場 繁幸氏には、調査地での便宜を図っていただき、ご説明を賜った。また、渋谷 仁氏、上遠野 輝義氏には測量結果の解析において、高橋 宏憲氏、木村 颯氏にはLiDAR 測定の計画、実行においてご協力を賜った。編集担当の藤本 潔氏および2名の査読者には、本稿を改善するにあたって有益なご意見を賜った。本研究の実施にあたりご協力とご助力を頂いた竹富町、環境省西表自然保護事務所、沖縄森林管理事務所の関係各位に深く感謝申し上げます。本研究は、科学研究費補助金 (21H04508) およびクリタ水・環境科学国内研究助成金を用いて行われた。

## 参考文献

- Fujimoto, K. and Ohnuki, Y. (1995) : Developmental processes of mangrove habitat related to relative sea-level changes at the mouth of the Urauchi River, Iriomote Island, southwestern Japan. *Quarterly journal of geography* 47 (1) : 1-12.
- 藤本潔・宮城豊彦 (2016) : マングローブ林の植生配列と微地形の関係およびその応用可能性. 藤本潔・宮城豊彦・西城潔・竹内裕希子編著『微地形学 - 人と自然をつなぐ鍵 -』80-104, 古今書院.
- 菊池多賀夫・田村俊和・牧田肇・宮城豊彦 (1978) : 西表島仲間川下流の沖積平野にみられる植物群落の配列とこれにかかわる地形 I . マングローブ林. 東北地理 30 (2) : 71-81.

- Lucas, R. M., Milne, A. K., Mitchell, A., Donnelly, B. and Ellison, J. (2000) : Use of stereo aerial photography for assessing changes in the extent and height of mangrove canopies in tropical Australia. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium* 5: 1880-1882.
- 宇野女草太 (2020) : 航空レーザー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.
- Walsh, G. E. (1974) : Mangroves: a review. In R. J. Reimold and W. H. Queen (ed.) *Ecology of Halophytes*. Academic Press, New York & London: pp 51-174.
- 山後公二 (2009) : 電子国土基本図 (オルソ画像) の整備について. 地図 47 (3) : 15-20.
- 山本敦也・宮城豊彦・馬場繁幸・古川恵太・宇野女草太 (2022) : LiDAR-SLAM によるマングローブ林の実態把握の可能性. 日本マングローブ学会大会講演要旨集 28: 10.
- Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X. and Yan, G. (2016) : An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. *Remote sensing* 8 (6) : 50.
- Zhu, X., Hou, Y., Weng, Q. and Chen, L. (2019) : Integrating UAV optical imagery and LiDAR data for assessing the spatial relationship between mangrove and inundation across a subtropical estuarine wetland. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 149: 146-156.