

3次元リモートセンシングによる 森林の構造的特徴量の計測

太政 謙次 *Kenji Omasa*

東京大学 大学院農学生命科学研究科
生物環境情報工学研究室 教授

細井 文樹 *Fumiki Hosoi*

東京大学 大学院農学生命科学研究科
生物環境情報工学研究室 特任講師

中井 洋平 *Yohei Nakai*

東京大学 大学院農学生命科学研究科
生物環境情報工学研究室 修士課程

森林生態系の機能解明や生物多様性の保全のためには、森林の構造的特徴量を効率良く正確に計測し、その変化をモニタリングしていくことが必要とされる。本稿では、航空機と地上におけるスキャニングライダーを用いて、樹高やバイオマス、葉面積密度分布、葉傾斜角分布などの森林の構造的特徴量の3次元リモートセンシングについて紹介する。

1 はじめに

世界の陸地面積の約3割を占める森林には、陸上生物種の約8割が生息・生育しているといわれている¹⁾。これらの生物種の生息・生育の場である森林は複雑な3次元構造を有し、森林内部の光環境や、気流、気温、湿度、二酸化炭素濃度などの微気象がその構造によって変化する²⁾。そして、森林そのものの成長や、そこに生息・生育する動植物に影響を及ぼす。このため、森林生態系の機能を解明し、その生物多様性を保全するためには、生態系・生物多様性を対象とした地球観測の一環として、森林の3次元構造を効率よく正確に計測し、また樹高やバイオマス、葉面積密度などの森林の構造的特徴量の変化をモニタリングすることが重要である。さらに、広域情報を得るための航空機や人工衛星からのリモ

ートセンシング手法の開発利用が必要となる^{3)~5)}。

従来から、森林の構造的特徴量を測るために、航空写真測量や合成開口レーダー、人工衛星搭載のマルチスペクトルセンサーなどを利用したリモートセンシングの研究がなされてきた³⁾⁵⁾⁶⁾。しかし、これらは広域情報の取得には優れているが、精度の点で問題がある。近年、森林の構造計測に、航空機搭載型スキャニングライダー^{*} (scanning lidar, SL) が活用されるようになり、森林の樹高やバイオマスなどが効率良く正確に得られるようになってきた^{4)7)~10)}。一方、持ち運び可能な可搬型SLは、航空機搭載型SLよりもさらに高い距離精度および空間分解能を有する。この特徴を利用し、森林の樹高や胸高直径、バイオマス、葉面積密度、葉傾斜角分布などの高精度計測が行われるようになってきた^{10)~14)}。

本稿では、筆者らの研究を中心に、航空機搭載型SLや可搬型SLを用いた、森林の樹高やバイオマス、葉面積密度垂直分布、葉傾斜角分布などを求めるための新しい3次元リモートセンシングについて紹介する。

2 航空機搭載型SLによる 森林の3次元リモート センシング

航空機搭載型SLによる森林計測では、地上でのビーム径が数十cm程度の「スモールフットプリント (small footprint)」

[スキャニングライダー]

レーザービームを対象にスキャン照射し、その反射光を検出することで、対象の3次元点群距離画像データを得る装置。

(footprintとは「地上でのビーム径」を意味する)と呼ばれるタイプが最も多く利用されている。この装置を用いて、地上でのビーム径とビーム間隔が同程度になるよう飛行条件やレーザー照射条件を設定することにより、地表の観測面を高い解像度でもれなくスキャンすることが可能となる。こうした設定により、森林に生育する個々の樹木の詳細かつ高精度な3次元構造計測が行われるようになってきた⁴⁾⁷⁾⁸⁾¹⁰⁾。図1に、航空機(ヘリコプター)搭載型SLシステムによる森林の3次元リモートセンシングの概念図を示す。このシステムでは、航空機の進行方向に対して直角方

向にパルスレーザーを地表面へスキャン照射し、地面や樹木から返ってくる反射パルスの飛行時間をもとに地表面との距離を計測し、地形や樹冠の3次元形状を取得する。反射パルス受光モードには、レーザー光が反射して最初に戻ってくるパルスを受光するfirst pulse mode (FP-mode) と、レーザー光が反射して最後に戻ってくるパルスを受光するlast pulse mode (LP-mode) の2種類がある。取得された距離データとground GPS (global positioning system) により正確に計測された基準位置(三角点に設置)、航空機に搭載されているGPSおよび航空機の位置や姿勢

を計測するIMU (inertial measurement unit) のデータ、さらにはレーザーのスキャン角のデータから、地上のレーザー反射位置の3次元座標を得る。この3次元座標をもとに、一定のメッシュ間隔により標高を表す標高メッシュデータ (digital elevation model, DEM) を作成する。FP-modeは、レーザー光が計測対象物に当たり反射して最初に戻ってくるパルスを受信するモードであるため、このモードにより得られた標高メッシュデータ (FP-mode DEM) は、樹木が生育している場所ではその位置で最も高い樹冠の標高を与える。一方、LP-modeは、レーザー

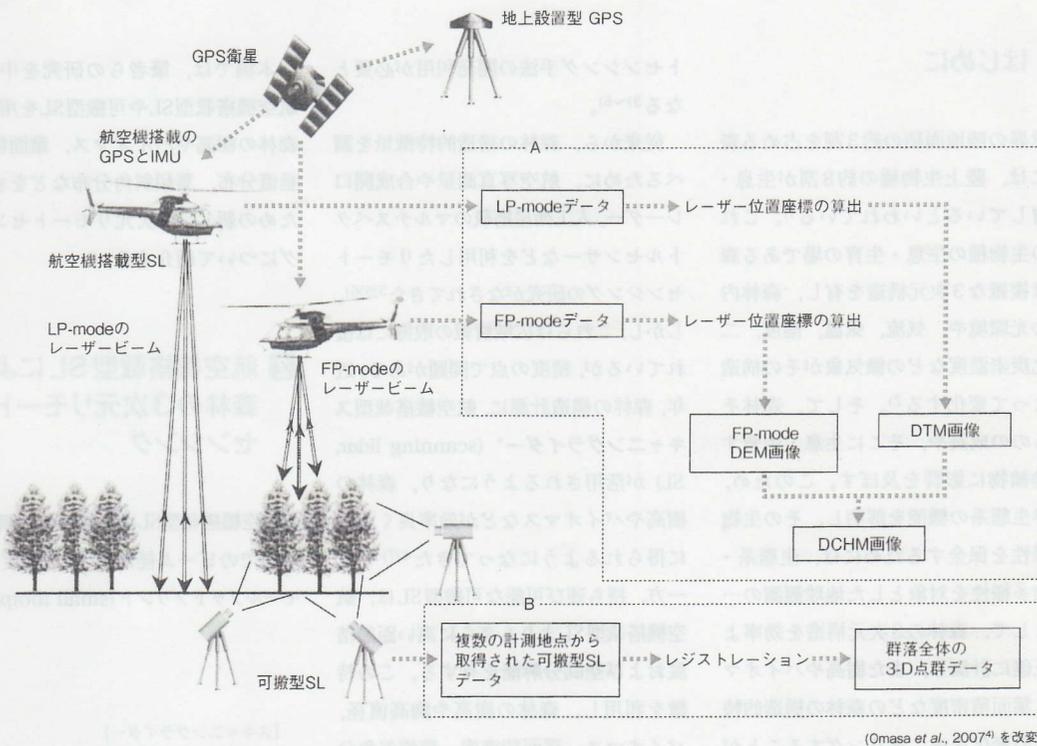
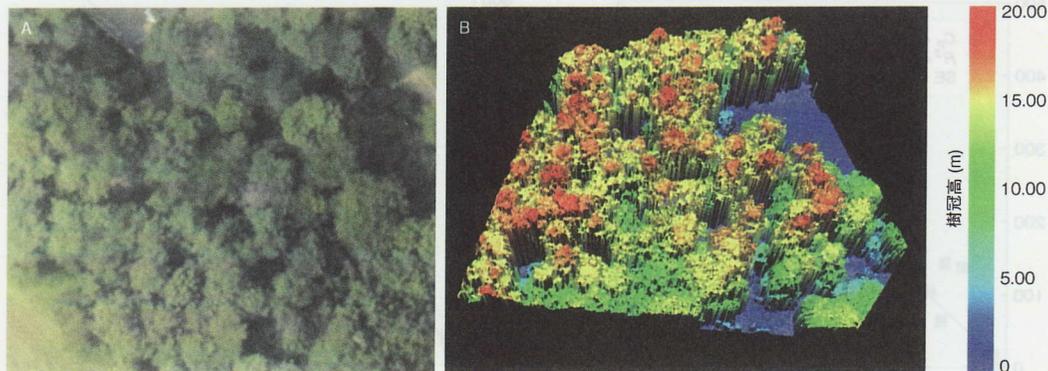


図1 ヘリコプター搭載型SLシステムおよび可搬型SLシステムによる森林の3次元リモートセンシングの概念図



A: 対象エリアの航空写真
B: FP-mode DEMからDTMを引くことによって求められたDCHM（樹冠高）の鳥瞰図

図2 ヘリコプター搭載型SLによる森林の3次元計測の例¹⁰⁾

光が計測対象物に当たり反射して最後に戻ってくるパルスを受信するモードであるため、パルス光が樹間を通して地面まで到達した場所では地表面の標高を与える。そのため、このモードにより得られた標高メッシュデータ(LP-mode DEM)において、標高が特に低い場所を抽出し、補間処理を行うことにより、地表面の形状を表す標高メッシュデータ(digital terrain model, DTM)を得る。さらにFP-mode DEMからDTMを引くことによって、地表面の起伏の影響を除いた正味の樹冠高を表すメッシュデータ(digital canopy height model, DCHM)が得られる。

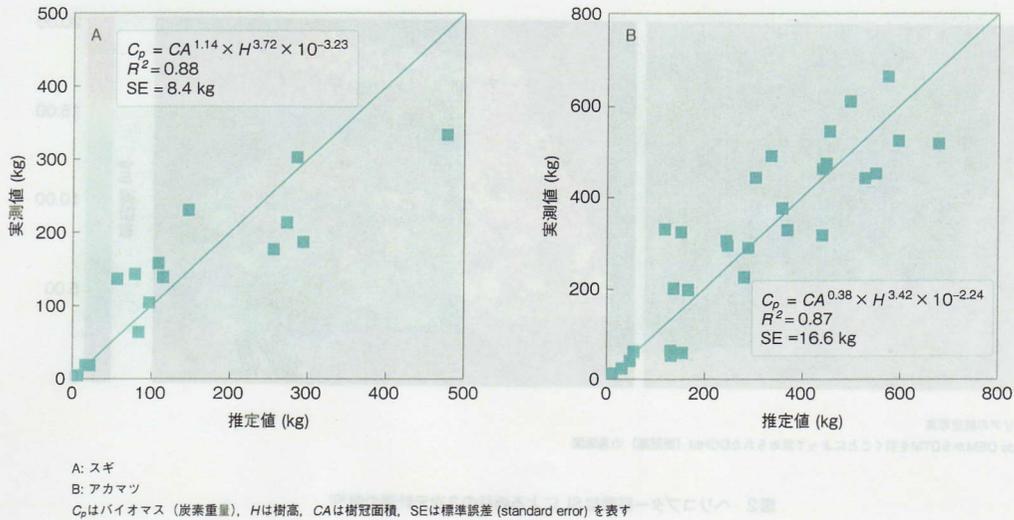
上記システムを用い、ヘリコプター搭載型SLにより森林のバイオマス(炭素蓄積量)を推定できる⁸⁾¹⁰⁾。具体例として、図2Aのアカマツやスギを中心とした針葉樹と、常緑性の低木が生育している森林を対象とした¹⁰⁾。図2Bは、同じサイトのヘリコプター搭載型SLで取得した3次元データにより作成さ

れた対象エリアのDCHM鳥瞰図である。個々の樹木の樹冠高や樹冠形状の違いが細部にわたって再現されているのがわかる。ここで得られたDCHMの空間解像度は30 cm、グローバル座標系からの絶対位置の誤差は20~30 cm、基準点からの相対位置の誤差は15 cm以内であった。得られたDCHMと航空写真から、アカマツを30本、スギを15本抽出し、これらの樹冠面積(樹冠を地面へ投影したときの投影面の面積)を航空写真からwatershed法を用いて、またそれぞれの樹冠における樹高をDCHMの最高高さから算出した。樹高については、平均平方二乗誤差(RMSE)で約20 cmと、高い精度で計測ができていることが確認された。さらに、樹高と樹冠面積という2つの特徴量を説明変数とし、実測データより算出したバイオマス(炭素重量)を目的変数とした重回帰式を作成し、そこから求めたバイオマスの推定値と実測データより算出した値との比較を行った(図3)。図3より、アカマツ、スギともに樹高

と樹冠面積を変数とすることで、精度良くバイオマスを推定できることがわかる。樹高と樹冠面積は、それぞれ樹木の垂直方向と水平方向の構造的特徴量と考えることができ、この2つの特徴量を推定に用いることで、樹木の3次元構造を反映したバイオマス推定が可能になる。

3 可搬型SLによる森林の3次元リモートセンシング

可搬型SLは航空機搭載型SLのような広域計測は難しい半面、持ち運びが可能である利便性と、きわめて高い距離精度および空間分解能を有しており、森林の樹高や胸高直径、バイオマスの高精度計測に活用されるようになってきた¹¹⁾。さらに、可搬型SLにより、樹木の葉面積密度(leaf area density, LAD)の垂直分布も計測されるようになってきた^{12)~14)}。その重要性から、

図3 ヘリコプター搭載型SLによるバイオマス (炭素重量) の推定¹⁰⁾

現在に至るまで、破壊計測である層別刈り取り法や群落内での光の減衰を利用した方法などさまざまな方法でLAD測定が行われてきた。しかし、いずれの方法も計測効率や計測精度の問題を有している。そこで、可搬型SLの高い距離精度および空間分解能と、自動化されたスピーディーなデータ取得性能を生かし、筆者らは可搬型SLによるLAD計測法であるVCP-method (voxel-based canopy profiling method) を考案した⁴⁾¹³⁾。VCP-methodでは、可搬型SLから照射されるレーザー光線は、樹木に対してある角度をもった状態で入射される。また、可搬型SL

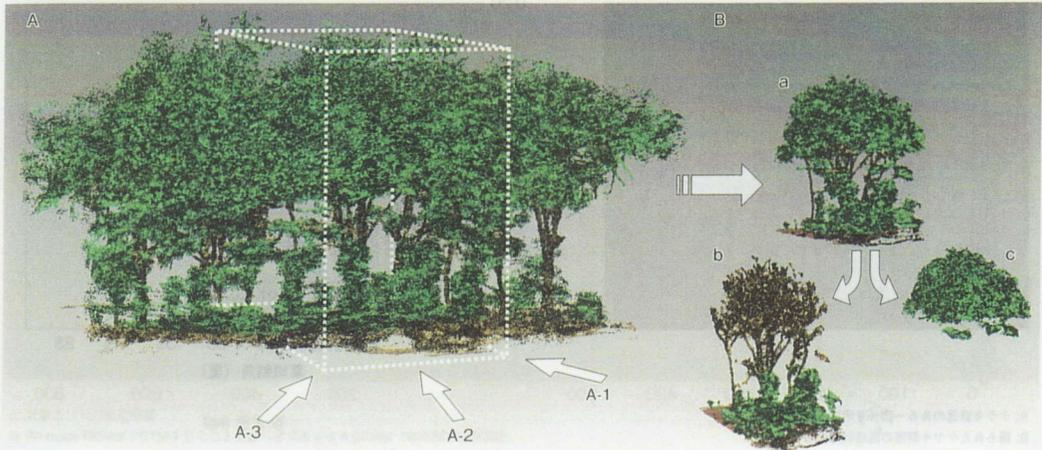
の測定位置は、樹木を取り囲む複数の地点に設置される (図1)。こうした配慮により、樹木の下層にさえぎられることなく、樹木の全体にわたって樹冠内部の葉までレーザー光線が十分に照射され、その位置情報を得ることが可能となる。各測定地点から得られたデータはコンピューター上でレジストレーション (位置合わせ) され、その位置情報はボクセルに変換される。ボクセル (voxel) とは3次元格子点上の立方体であり、この立方体に値をもたせることで3次元情報を表現するもので、2次元平面上のピクセルに相当する。さらに、ボクセルの中には葉の位置情報だけではなく、樹冠内部を進むレーザーの光跡に関する情報も付与される。このレーザーの光跡および葉の位置情報を用いることで、樹木に入射するレーザー光線が各高さでどのくらいの頻度で葉に衝突するかという衝突頻度が算出される。このレーザー光の

衝突頻度に、葉傾斜角分布の影響を補正する補正項を乗じ、LADの算出を行う。

この方法を樹高13 mの広葉樹 (ケヤキ) 群落に適用した例を紹介する¹⁴⁾。測定に際しては4 × 8 mの測定プロットを群落の林床に設置し、そのプロット内部に2 × 2 mのコードラート (区画) を8個設置し、コードラートごとにLADの垂直分布の算出を試みた。可搬型SLは、time of flight法を測距原理とする距離精度±8 mmのものを使用し、群落を取り囲む6カ所の測定地点から計測を行った。計測の際、レーザービームの中心入射角 θ_m (レーザービームの垂直方向スキャンの中心角を示し、垂直上向きを0度とする) の水準を複数設定した。図4は、可搬型SLにより計測されたケヤキ群落の3次元点群画像である。図4Aに示すように、ケヤキ群落の葉や幹、枝に加え、下層植生、地面などが詳細な3次元画像として再現されていることがわかる。この画像に含まれている

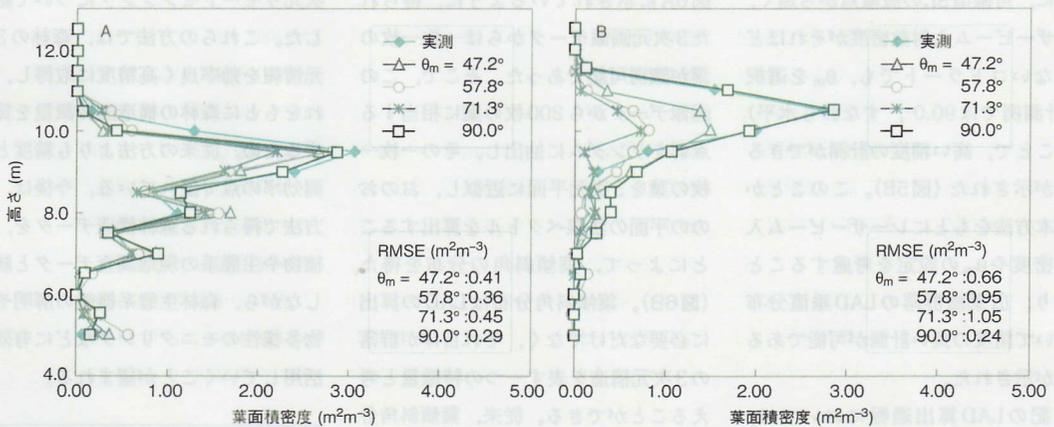
【葉面積密度】

植物を高さ方向にある幅をもった層に分割した場合、その層の単位体積あたりにどれだけの葉面積が存在するかを表す量であり、その垂直分布は樹木の3次元構造を表す代表的な指標である。



A: 計測されたケヤキ群落と計測プロット（破線部）。A-1～A-3は可搬型SLのレーザービームの方向を示す
 B: 葉とそれ以外の部分の分離の様子。a: 分離前, b: 分離された葉以外の部分（幹、枝、下層植生、地面）、c: 分離された葉

図4 可搬型SLにより計測されたケヤキ群落の3次元点群距離画像¹⁴⁾



A: ライダー設置位置に近いコドラート
 B: ライダー設置位置から遠い計測プロット中央のコドラート
 θ_mはレーザービームの中心入射角, RMSEは平均平方二乗誤差を表す

図5 VCP-methodにより算出されたコドラート単位のケヤキ群落LAD計測結果¹⁴⁾

ケヤキの葉以外の部分は、LADの算出において誤差要因となるため、画像データから削除する必要がある。そのため、落葉期に可搬型SLで同一対象

を計測し、その画像データを着葉期の画像データから引き、葉とそれ以外の部分を分離した(図4B)。

図5は、計測プロット内のある2つの

コドラートにおけるケヤキ群落のLAD垂直分布算出結果を示す。可搬型SLの設置点近く、レーザービーム入射数密度(単位体積あたりに入射するビームの

- 5) 加藤正人・編著. 改訂 森林リモートセンシング, 日本林業調査会, 2007.
- 6) Goward, S. N. & Williams, D. L. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, **63**, 887-900 (1997).
- 7) 大政謙次, 秋山幸秀, 石神靖弘, 吉見健司. 日本リモートセンシング学会誌, **20**, 34-46 (2000).
- 8) Omasa, K., Qiu, G. Y., Watanuki, K., Yoshimi, K. & Akiyama, Y. *Environ. Sci. Technol.*, **37**, 1198-1201 (2003).
- 9) Næsset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyypä, H., Hyypä, J. *et al. Scand. J. Forest Res.*, **19**, 482-499 (2004).
- 10) Nakai, Y., Hosoi, F. & Omasa, K. In: *Proceedings of the ISPRS Workshop Laser Scanning*, 2009. (In press.)
- 11) 大政謙次, 浦野豊, 小熊宏之, 藤沼康実. 日本リモートセンシング学会誌, **22**, 550-557 (2002).
- 12) Lovell, J. L., Jupp, D. L. B., Culvenor, D. S. & Coops, N. C. *Can. J. Remote Sens.*, **29**, 607-622, (2003).
- 13) Hosoi, F. & Omasa, K. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **44**, 3610-3618 (2006).
- 14) Hosoi, F. & Omasa, K. *J. Exp. Bot.*, **58**, 3464-3473 (2007).



大政 謙次 *Kenji Omasa*

東京大学 大学院農学生命科学研究科 生物環境情報工学研究室 教授

1975年, 愛媛大学大学院農学研究科修士課程修了。1976年, 環境庁国立公害研究所(現・国立環境研究所)入所。1985年, 東京大学博士号(工学)取得。1998年, 筑波大学生物科学研究科教授(併任)。1999年より現職。



細井 文樹 *Fumiki Hosoi*

東京大学 大学院農学生命科学研究科 生物環境情報工学研究室 特任講師

1995年, 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了, 古河電気工業株式会社入社。2008年, 東京大学大学院農学生命科学研究科博士課程修了。2008年より現職。



中井 洋平 *Yohei Nakai*

東京大学 大学院農学生命科学研究科 生物環境情報工学研究室 修士課程

2008年, 東京大学農学部卒業, 東京大学大学院農学生命科学研究科修士課程入学, 現在に至る。