

地上及び高所からの可搬型スキャニングライダー計測による イチョウ群落葉面積密度分布の推定

Estimation of Leaf Area Density Profiles of Ginkgo Trees by the Ground and High Position Measurements Using a Portable Scanning Lidar

細井文樹、上野 伸、水城秀平、大政謙次*

Fumiki Hosoi, Shin Ueno, Shuhei Mizuki and Kenji Omasa*

* 東京大学大学院農学生命科学研究科 〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1

* The University of Tokyo, Graduate School of Agricultural and Life Sciences
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

(2014年3月6日受付、2014年3月27日受理)

ABSTRACT

Ginkgo trees were scanned by a portable scanning lidar on the ground and at high positions above the ground. From the obtained data, the leaf area density (LAD) profiles were estimated by voxel-based canopy profiling method. In this method, information of laser beam traces is represented as attribute values of voxels in a 3-D voxel array and contact frequency of laser beams within the canopy is counted based on the attribute values. LAD was underestimated at the higher heights for the ground measurements and at lower heights for the high position ones. The root mean square errors (RMSEs) of the LAD estimations for the measurements on the ground and at high positions were 0.84 and 0.45 m^2m^{-3} , respectively. The LAD estimations derived from the ground and high position measurements were combined each other to improve the LAD underestimation, resulting in the LAD estimate with the RMSE of 0.31 m^2m^{-3} . The estimate was more accurate than the ones solely obtained from the ground measurements or high position ones.

Key words : Ginkgo, Leaf area density, Portable scanning lidar, VCP-method

1. はじめに

植物の構造と機能との関連性を明らかにするためには、植物の3次元構造を正確に計測する方法が必要となる。近年、航空機搭載型や可搬型のスキャニングライダー (Light Detection And Ranging : LiDAR) が植物の3次元構造計測に利用されるようになってきた (Næsset, 1997; Omasa et al., 2000, 2007; Lefsky et al., 2002)。この装置は、レーザービームを対象に向けてスキャン照射し、その反射光を検出することで、対象の3次元点群画像を効率よく、高い空間精度で取得可能である。植物の3次元構造を表す指標の一つとして、高さ毎の葉面積密

度 (Leaf Area Density: LAD) がしばしば用いられる。筆者らはスキャニングライダーにより得られた植物の3次元点群データをもとに、レーザービームの光跡に関する空間情報を3次元格子点状のボクセルの属性として表現し、そこからLADを算出するVCP-method (Voxel-based Canopy Profiling method) を考案した (Hosoi and Omasa, 2006)。本方法で正確なLADを得るためには、十分な数のレーザービームを樹冠内に到達させる必要がある。しかし、地上設置型の可搬型スキャニングライダーを用いる場合、樹冠中央部や上部にレーザービームが届きにくく、樹冠中央部や上部でLADの過小推定が生じやすい (Hosoi and Omasa, 2007)。一方、航空機搭載型スキャニ

*Corresponding author : Phone: +81-3-5841-5340, Fax: +81-3-5841-8175, E-mail: aomasa@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

ングライダーでは、樹冠の下層部にビームが届きにくく、樹冠下層部でLADの過小推定が生じやすい。こうした問題を解消するため、筆者らは、地上からの計測と高所又は航空機搭載型のライダーによる計測の両方を行い、それぞれのデータから得たLAD推定値を合成する方法を考案した。この方法により、それぞれ単独に計測した場合に生じる過小推定を相補うことができ、推定精度が向上することが示された (Nakai et al., 2009; Hosoi et al., 2010)。筆者らの検証により、本方法は樹高10 m程度のケヤキ群落にてその有効性が示されたが、それ以外の対象ではその有効性が示されていない。そこで本稿では、筆者らが以前対象としたケヤキよりも樹高が高く、かつLADの値も大きいイチヨウ群落を対象とし、地上と高所両方から可搬型スキャングライダー計測を行い、それぞれの計測データからLADを推定し、それらを合成することで、地上、高所単独計測の場合よりもLADの推定精度が向上するのかどうか検討を行った。

2. 計測対象および実測データ

本研究の対象地は、茨城県つくばみらい市にある人工林とした (Hosoi and Omasa, 2007)。この林地には、スギ、アカマツ、イチヨウ、ケヤキなどが生育していた。また、低層にはヤブツバキやモッコクといった常緑樹が生息していた。この対象地よりイチヨウ群落を選択し、その林床に4×5m²の計測プロットを設置した。実測データを得るために、可搬型スキャングライダーによる計測後に、1 mステップの層別刈取りにより各層のLADを算出した。実測データから、本計測対象のイチヨウ群落は樹高15 m、平均LAD値0.82 m²m⁻³であった。以前筆者らが対象としたケヤキ群落の樹高12.5 m、平均LAD値0.57 m²m⁻³ (Hosoi and Omasa, 2007)と比較して樹高、LAD値ともに高いことが分かった。

3. 方法

LADを算出する方法として、本研究ではVCP-methodを用いた (Hosoi and Omasa, 2006)。VCP-methodとは樹冠を取り囲む複数のライダー計測点から樹冠にレーザーを照射し、得られたデータをもとにレーザービームの光跡及び葉の位置情報をボクセルの属性として表現し、その属性値から樹木に入射するビームの葉に対する衝突頻度を求め、そこからLADを算出する方法である。

使用した可搬型スキャングライダーはRIEGL社製のLPM-25HAで、その測距原理はTime of flight法であり、2～60 mの計測範囲と±8 mmの距離精度を有す

る。垂直方向、水平方向スキャンの角度精度は0.009°であった。本装置を用い、地上及び地上10 mの高所からの計測を行った。地上からの計測は、2005年8月に計測プロットを取り囲む6地点から、 $\theta_m=57.8^\circ$ (ここで θ_m はレーザービームの中心入射角であり、レーザービームの天頂角方向スキャンの中心角に相当する)で計測したデータを用いた (Fig. 1)。ここで $\theta_m=57.8^\circ$ を選択したのは、この角度の場合、葉傾斜角分布の影響をあまり受けずにLADの算出が可能であり (Hosoi and Omasa, 2007)、葉傾斜角に起因する誤差を抑えることができるためである。高所からの計測については高所作業車を用い、イチヨウを取り囲む3か所にて可搬型ライダーを10 mの高さに上げて行った。この高さで計測を行ったのは、高所作業車の最大地上高が10 mであったためである。 θ_m は90.0°に設定した。この角度は以前行ったケヤキのLAD推定において、樹冠上層部から中央部の推定精度が比較的高かった角度であり (Hosoi and Omasa, 2007)、本研究でも適用することとした。これらの計測とは別に、～mmの距離精度と空間分解能を持つもう一台の高精度可搬型スキャングライダー (TDS-130 L改、パルステック工業)により地上から

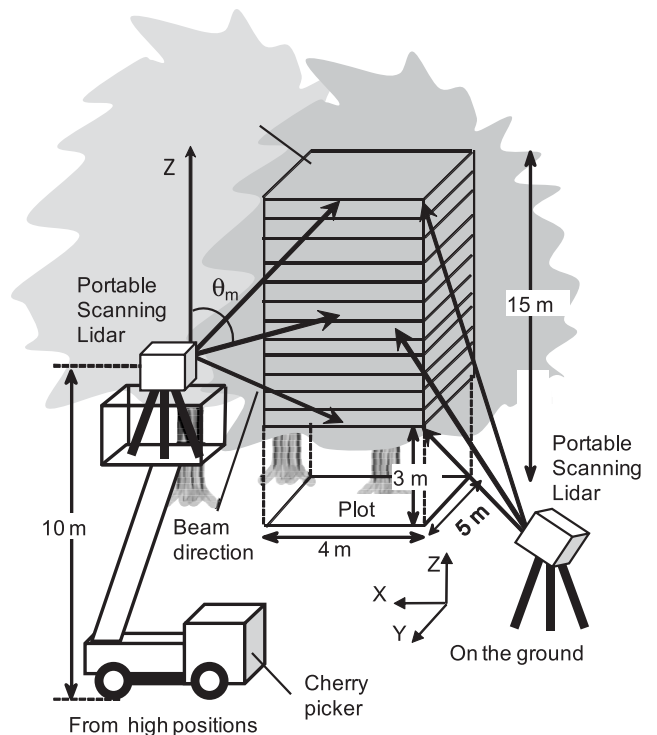


Fig. 1. An illustration of lidar measurements (Modified from Hosoi and Omasa 2009). Laser beam scanning to ginkgo canopy within a measurement plot by a portable scanning lidar on the ground and from high positions. θ_m represents the central incident angle of the laser beam.

イチヨウ群落を計測した。得られた計測データからイチヨウの葉傾斜角を算出した（方法の詳細は Hosoi and Omasa (2007) 参照）。2005 年の 8 月の測定後、2006 年の 2 月に再び地上から落葉状態のイチヨウ群落のライダー計測を行った。測定装置や条件は 2005 年 8 月と同様であった。

地上及び高所計測により取得したライダーデータをレジストレーション（位置合わせ）し、共通の座標系を付与した。その後、幹や枝などの非同化器官を LAD 計算から除外するため、2005 年 8 月の着葉期の点群データから 2006 年 2 月の落葉期の点群データを差し引いた。

次にボクセル化を行った。ライダーの分解能をもとに、一つのボクセルサイズを 5 mm × 5 mm × 5 mm に設定した。得られた 3 次元点群データから、以下の式によってボクセル座標系への変換を行う。

$$i = \text{Int} \left(\frac{X - X_{\min}}{\Delta i} \right) + 1 \quad j = \text{Int} \left(\frac{Y - Y_{\min}}{\Delta j} \right) + 1 \quad k = \text{Int} \left(\frac{Z - Z_{\min}}{\Delta k} \right) + 1 \quad (1)$$

ここで (i, j, k) はボクセル座標を表し、Int は最も近い整数値に値を丸める関数を示す。(X, Y, Z) はライダーデータ内の座標系におけるその点の座標を示し、(X_{min}, Y_{min}, Z_{min}) は (X, Y, Z) の最小値を示す。(Δi, Δj, Δk) はボクセルエレメントの各辺のサイズで、(5 mm, 5 mm, 5 mm) であった。式 (1) によってもとの点群データから変換された各ボクセルには属性値として 1 が付与される。次にレーザービームの全光跡をボクセル空間の中でトレースする作業を行った。あるボクセルが少なくとも 1 本以上のレーザービームと交わり、かつその属性が 1 でない場合、そのボクセルには属性値として 2 を与えた。各ボクセルに付与された属性をもとに、以下の式により LAD を算出した。

$$LAD(h, \Delta H) = \frac{\cos(\theta)}{G(\theta)} \frac{1}{\Delta H} \sum_{k=m_h}^{m_{h+\Delta H}} \frac{n_1(k)}{n_1(k) + n_p(k)} \quad (2)$$

θ はレーザービーム入射角、ΔH は垂直方向の層の厚み、m_h と m_{h+ΔH} は実際の高さ h と h + ΔH に相当するボクセル座標系での高さ方向の値、n₁(k) と n_p(k) は k の高さにある属性値 1 と 2 を持つボクセルの数である。n₁(k) / (n₁(k) + n_p(k)) の項は、レーザービームが高さ k で対象木に衝突した頻度を表している。cos(θ) / G(θ) は葉傾斜角とレーザービームの軌跡長を補正する項である。G(θ) はレーザービームの方向と直行する平面への葉の投影面積の平均値である (Norman and Campbell, 1989; Weiss et al., 2004)。各層に入射するビームの平均入射角

から θ を算出し、さらに上述した高精度可搬型スキャニングライダー計測により求めた葉傾斜角分布から cos(θ) / G(θ) を算出した。式 (2) を用いて高さ方向に層別の LAD を算出した。LAD 算出値について、地上計測データのみから算出した場合と 10 m の高所計測データのみから算出した場合、地上計測データと 10 m 高所計測データから算出した LAD を高さ 10 m を境に合成した場合について、実測との比較と誤差評価を行った。なお、地上計測データと 10 m 高所計測データとの合成については、高所計測のポジションが 10 m であったため、10 m 以上の高さでは高所計測の方が高精度であるとみなしてこちらの LAD 推定値を適用し、10 m より低い領域では地上計測データから算出した推定値を適用した。

4. 結果および考察

可搬型スキャニングライダーによるイチヨウ点群画像の例（地上計測）を Fig. 2. に示す。この図は各計測地点からのデータをレジストレーションした後に得られた点群を示しており、白破線がプロット内の領域である。プロット内に葉が密生している様子がわかる。また、幹や枝などの詳細な構造も再現されていることが分かる。

Fig. 3. に LAD 分布の実測値と可搬型ライダーデータからの推定値を示す。地上計測の結果は、6 m までは実測とよい一致を示したが、それ以上の高さでは著しい過小推定が見られた。一方、10 m からの高所計測では高さ 11 m 以上 15 m まで（対象木の最高点）は実測と比較的よい一致が見られた。それより低い高さでは、特に

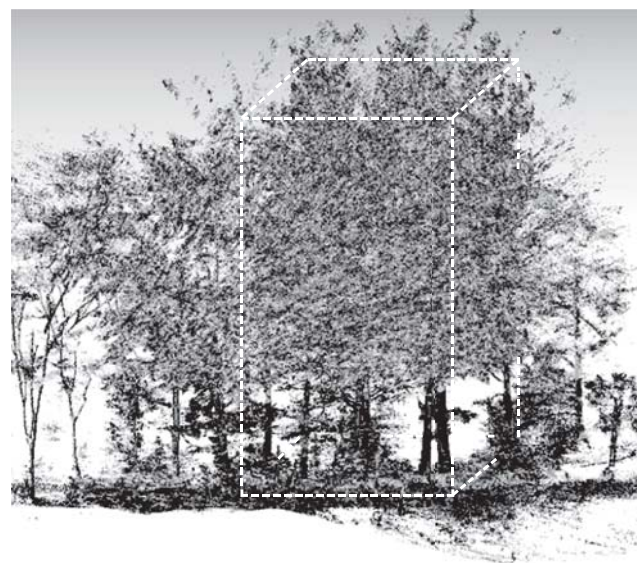


Fig. 2. A co-registered portable lidar image of the ginkgo canopy within the measurement plot. The area enclosed by white broken lines corresponds to the measurement plot.

高さ 6 ~ 10 m において過小推定がみられた。地上及び高所計測から得た LAD プロファイルを作成した場合においては、それぞれ単独の LAD プロファイルよりも過小推定が改善されていた。しかし、高さ 8 ~ 10 m の部分は合成した後でも過小推定が解消されなかった。この過小推定の要因の一つとして、計測プロットの周りにある樹木が対象領域へのレーザービームの侵入を妨げ、地上、高所どちらからの計測であっても、レーザービームを樹冠内部に十分に到達させることができなかつた可能性が考えられる。算出された LAD の二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error: RMSE) は、地上計測で $0.84 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ 、高所計測で $0.45 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ 、これらの合成で $0.31 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ であった。二つの計測から得た LAD を合成した場合が最も高精度となった。

Fig. 3 に示すように、地上計測では樹冠下層部の、高所計測では樹冠上層部の LAD 推定精度が高かった。ライダー設置点から近い部分 (地上計測では樹冠下層、高所計測では樹冠上層) にはレーザービームが十分な数到達し、LAD 推定精度が向上したが、計測地点から離れる (地上計測では樹冠上層、高所計測では樹冠下層) につれてビームが樹冠により遮られ、十分な数のビームが対象に到達できなくなり、過小推定が生じたものと考えられる。地上と高所の計測から得た LAD 推定値を合成することでそれぞれの過小推定を補うことができ、結果として二つの LAD の合成プロファイルが最も高い精度となった。これはケヤキを対象とした既往の論文と同様な結果となっている (Nakai et al., 2009; Hosoi et al., 2010)。このことから、本方法が既往の研究で報告されたケヤキ群落だけでなく、それとは異なる樹種で、かつ樹高も平均 LAD 値も異なる構造をもつ本対象のイチヨウ群落にも適用可能であることが示された。

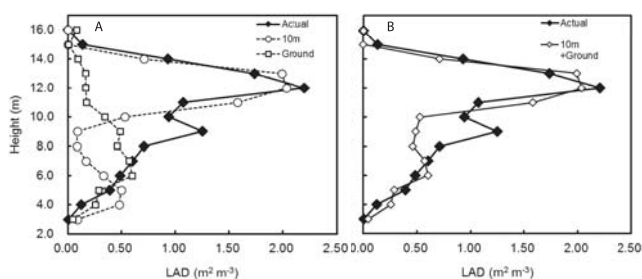


Fig. 3. Comparisons of LAD profiles of the ginkgo canopy derived from lidar measurements and the actual measurement. (A) Profiles obtained by 10m high position measurements, the ground measurements and the actual measurement. (B) Profiles obtained by combining LAD values of 10m high position measurements with the ones of the ground measurements, and the actual measurement.

本研究におけるイチヨウ群落においては、以前実験を行ったケヤキよりも平均 LAD 値が高いため、十分な数のレーザービームを樹冠内部に到達させる点ではより厳しい条件であると考えられる。しかし、LAD 推定値の RMSE は $0.31 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ と以前のケヤキの $0.32 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ と同程度であり (Nakai et al., 2009)、またケヤキの場合に大きく過小推定していた LAD プロファイルのピーク部分についても本研究の場合 (高さ 13 m に相当) ではケヤキの場合と比較すると誤差は小さかった。こうした結果になった一つの要因として、ライダーの設置点の違いが考えられる。本研究対象のプロットサイズ ($4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$) は以前のケヤキの場合 ($4 \text{ m} \times 8 \text{ m}$) よりも小さくなっており、そのため本計測における群落中心部と各ライダー設置点との距離はケヤキの計測の場合より短くなる。群落中心部と各設置点との距離が短くなれば、その分、群落内の葉や枝に衝突して途中で失われるレーザービーム数が減り、群落内部にビームが届きやすくなる (Hosoi and Omasa, 2012)。このことがケヤキの場合と同程度の LAD 推定精度が得られた要因の一つと考えられる。その他、ケヤキとイチヨウという樹種の違いに起因する葉の形状や葉の空間分布等の違いが、群落内に到達するレーザービーム数に影響を及ぼしていた可能性も考えられるが、今回の実験でその影響を見積もることはできなかった。今後は樹種固有の構造が、LAD 推定精度にどのように影響を及ぼすかを検証していくことも必要であると思われる。

5. おわりに

本研究ではイチヨウ群落を対象とし、地上及び 10 m の高所から可搬型スキャニングライダー計測を行い、得られた地上及び高所計測による LAD 推定値を合成する方法の有効性について検討した。VCP-method に基づき、群落を取り囲む複数の計測点を設置し、地上及び高所計測による LAD をまずは独立に算出した。実測値との比較では、地上計測では群落の下層、高所計測では群落の上層で高い推定精度を得た。地上及び高所計測による LAD 推定値を合成した場合、それぞれ単独の場合の過小推定を補うことができ、結果として単独の場合よりも高い推定精度を得た。本研究により、本方法が既往の研究で報告されたケヤキ群落だけでなく、それとは異なる構造をもつ本対象のイチヨウ群落においても、適用可能であることが示された。今後は様々な構造をもつ対象にて本方法の適用可否を検討していくことが必要であると考えられる。

引用文献

- Hosoi, F. and Omasa, K., 2006: Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **44**, 3610–3618.
- Hosoi, F. and Omasa, K., 2007: Factors contributing to accuracy in the estimation of the woody canopy leaf-area-density profile using 3D portable lidar imaging. *J. Exp. Bot.*, **58**, 3463–3473.
- Hosoi, F. and Omasa, K., 2009: Detecting seasonal change of broad-leaved woody canopy leaf area density profile using 3D portable LIDAR imaging. *Funct. Plant Biol.*, **36**, 998–1005.
- Hosoi, F. and Omasa, K., 2012: Measurements of vertical plant area density profiles of a rice plant using a portable scanning lidar. *Eco-Engineering*, **24**, 9–14.
- Hosoi, F., Nakai, Y. and Omasa, K., 2010: Estimation and error analysis of woody canopy leaf area density profiles using 3-D airborne and ground-based scanning lidar remote-sensing techniques. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **48**, 2215–2223.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G. and Harding, D. J., 2002: Lidar remote sensing for ecosystem studies. *Bioscience*, **52**, 19–30.
- Næsset, E., 1997: Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS J. Photogramm Remote Sens.*, **52**, 49–56.
- Nakai, Y., Hosoi, F., Akiyama, Y. and Omasa, K., 2009: Estimation of leaf area density of zelkova trees using airborne and portable scanning lidar systems. *Eco-Engineering*, **21**, 9–14.
- Norman, J. M. and Campbell G. S., 1989: Canopy structure. In: *Plant physiological ecology: field methods and instrumentation*. (eds. by Pearcy R.W., Ehleringer J., Mooney H. A., Rundel P. W.). Chapman and Hall, London, pp. 301–325.
- Omasa, K., Akiyama, Y., Ishigami, Y. and Yoshimi, K., 2000: 3-D remote sensing of woody canopy heights using a scanning helicopter-borne lidar system with high spatial resolution. *J. Remote Sens. Soc. Jpn.*, **20**, 394–406.
- Omasa, K., Hosoi, F. and Konishi, A., 2007: 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. *J. Exp. Bot.*, **58**, 881–898.
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G. J., Jonckheere, I. and Coppin, P., 2004: Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agric. For. Meteorol.*, **121**, 37–53.