

地上型レーザースキャナを用いた単木の葉面積密度分布推定におけるビームの入射状況と風の影響を考慮した精度検証

誌名	日本リモートセンシング学会誌 = Journal of the Remote Sensing Society of Japan
ISSN	02897911
著者名	押尾,晴樹 浅輪,貴史
発行元	日本リモートセンシング学会
巻/号	36巻5号
巻号補足	
掲載ページ	p. 545-554
発行年月	2016年11月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



論文

地上型レーザースキャナを用いた単木の葉面積密度分布推定
におけるビームの入射状況と風の影響を考慮した精度検証押尾晴樹^{*1}・浅輪貴史^{*1}Verifying the Accuracy of the Leaf Area Density Distribution of an Individual Tree Derived from
Terrestrial Laser Scanning while Considering the Penetration of Beams
into the Crown and the Influence of WindHaruki OSHIO^{*1} and Takashi ASAWA^{*1}

Abstract

A terrestrial laser scanner-based method for estimating the leaf area density (LAD) distribution is examined while considering the degree of penetration of the laser beams into the tree and the influence of wind, which can lead to errors in outdoor measurements. Two Japanese zelkova (*Zelkova serrata*) trees of 6 m in height were used. Each tree was scanned from four positions, each at a distance of 4.5 m from the tree. To evaluate the influence of wind on the estimation accuracy of the LAD distribution, laser-beam-transparent sheets were installed around one tree to block the wind. LAD distributions with a voxel size of 0.3 m × 0.3 m × 0.3 m were estimated based on a previously developed method in which the contact frequency between laser beams and leaves was calculated. Through these estimations, two different methods for using data acquired from multiple scanning positions were examined. In the first method, all scanned data and the calculated LAD were integrated (Integration). In the second, the LAD was calculated for each scanning position, and the maximum LAD was adopted for each voxel (Selection). The estimated leaf area was compared with the measured area by stratified clipping. When the wind was blocked, the difference in the estimation accuracy between the Integration and Selection methods was small, even though the number of incident laser beams on each voxel in the Selection method was smaller than that in the Integration method. The estimation errors in determining the leaf area for the upper, middle, and lower layers of the tree were 10–15 % for both methods. When the wind was not blocked and the wind speed reached 0.5 m/s, the LAD was overestimated by both methods, but the difference between the LAD estimated with and without the sheets was within 10 % in the Selection method. Conversely, the LAD estimated by the Integration method was 20 % greater than that estimated by the Selection method. These results indicate that the Selection method is suitable for estimating the LAD distribution in outdoor spaces.

Keywords : Leaf area density distribution, terrestrial laser scanner, voxel, urban greening, *Zelkova serrata*

1. はじめに

都市緑化樹木には日射遮蔽、蒸散、光合成などを通じた環境調整効果（熱環境の緩和、光・紫外線環境の改善、CO₂固定、大気浄化など）が期待されている。葉の3次元的な分布は樹冠の光の吸収・透過量に大きく影響する^{1)~3)}ことから、その情報を整備することは樹木の維持・管理に加えて、前記の環境調整効果を明らかにする上で重要である。葉の分布の表現には、樹冠を3次元的なグリッド（voxel）に分割し、各 voxel に葉面積密度（Leaf Area Density (LAD)）を与える方法が多く用いられている^{1)~3)}。LAD とは単位体積あたりの葉の片側の総面積であり、m²/m³ の単位をも

つ。LAD 分布は直接測定が困難であるため、航空機レーザ計測を用いた推定方法がこれまでも研究されてきており^{4)~6)}、広域にわたって情報を整備できる点から実用的である。しかしながら、樹木の環境調整効果の評価に求められる LAD 分布の空間スケールや精度の検討、航空機から推定した LAD 分布の精度検証、航空機からは情報を得にくい樹冠下部の補完などのためには、地上において高精度に LAD 分布を推定する方法が求められる。

地上における LAD 分布の測定方法として、細いプローブを樹冠に挿入し、葉との接触回数をカウントするポイントコドラート法⁷⁾⁸⁾が挙げられる。プローブの挿入数を増やせば高精度な情報を取得できるが、多大な労力を要する。一方で葉の密度を簡易に測定することができる gap

(2016. 5. 23 受付, 2016. 9. 9 改訂受理)

^{*1} 東京工業大学

〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-G5-2

^{*1} Tokyo Institute of Technology, 4259-G5-2, Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 226-8502, Japan

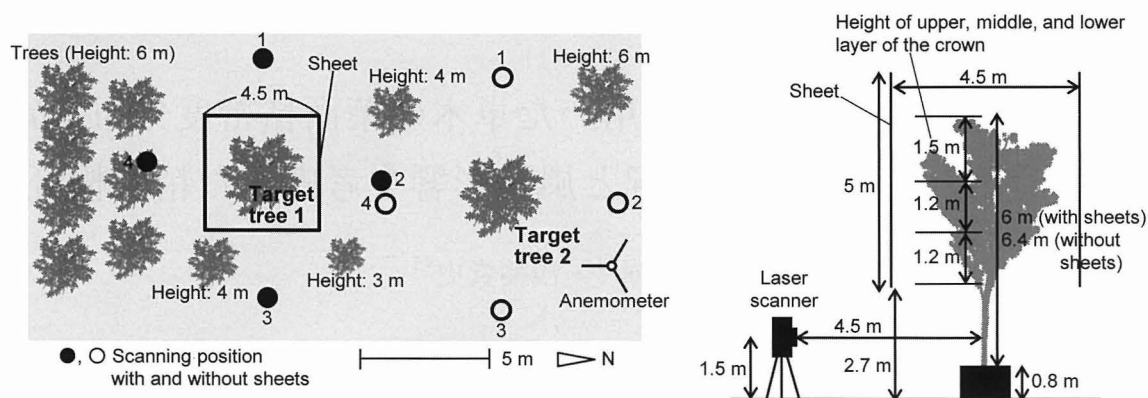


Fig. 1 Plan view of the experimental field (left) and elevation view of the measurement method by terrestrial laser scanner (right).

fractionに基づく方法^{9)~11)}では、LADの分布を捉えることは困難である。そこで本研究では、地上型レーザースキャナに注目する。既往研究では、樹高や胸高直径の推定¹²⁾¹³⁾、葉の形状の再現¹⁴⁾、梢端部の検出能力の検証¹⁵⁾などが行なわれており、樹木の形態情報取得への有用性が確認されてきた。研究例は多くないもののLAD分布の推定に対する適用可能性も示されている^{16)~21)}。

既往研究では、レーザービームが届かない領域を減らすために、複数地点から計測を行うことが有効とされている¹⁷⁾¹⁹⁾。一方で複数地点からの計測は、風で枝葉が動き各地点のデータが重ならないことによるLADの推定誤差をまねく可能性がある。既往研究では森林などを対象としているため風の影響は小さいと見なされ検証されていないが、都市域に多く見られる孤立状態の樹木はより風の影響を受けやすいと考えられる。そこで本研究では、樹冠内のレーザービームの入射状況と風の影響を考慮しながら、地上型レーザースキャナによりLAD分布を推定する方法について検討し、その推定精度を明らかにすることを目的とする。

2. 使用データと方法

2.1 測定サイトと対象樹木

測定サイトは愛知県みよし市内にあるトヨタ自動車バイオ・緑化研究所 (35° 8' N, 137° 6' E) の実験圃場である。都市緑化に見られる一般的な樹種と大きさの樹木として、6 mを超えるケヤキを対象とし、風がLAD分布の推定精度に及ぼす影響について検討するために、樹木をシートで囲んで風を遮った状態 (CASE 1) と、シートなしの状態 (CASE 2) においてレーザースキャナによる計測を行った。風がない条件は安定した気圧配置の朝方などでも可能であるが、本研究ではより検証に適した条件を作るため、対象樹木をレーザービームの波長帯における透過率が95.6%のフッ素樹脂フィルムシートで囲んだ。2個体のケヤキを検証に使用し、1個体をCASE 1の計測に (ケヤキ 1)、もう1個体をCASE 2の計測に用いた (ケヤキ 2)。ケヤキ 1とケ

Table 1 Specifications of the laser scanner used.

Scan angle range	-40°~60° (Vertical scan) 360° (Horizontal scan)
Angle measurement resolution	0.0005°
Wave length	1550 nm
Beam divergence	0.3 mrad (7 mm in diameter when leaving the instrument: 8.5 mm@ distance of 5 m.)
Ranging accuracy	5 mm
Repeatability	3 mm

ヤキ 2 はともに同一圃場で接ぎ木によって生産された15年生の個体で、樹高・胸高直径はそれぞれ6 m・8.8 cm及び6.4 m・8.0 cmであった。Fig. 1に対象樹木と隣接木の位置関係を示す。ケヤキ 2には風がほぼ遮られることなく当たる配置である。また、この樹木から4.3 m離れた位置で地面からの高さ4 mに三次元超音波風向風速計を設置して風速を測定した。2本の対象樹木には定期的に灌水を行っており、正常に生育していた。

2.2 レーザースキャナによる計測

高密度・高精度・高速な計測が可能なレーザースキャナ (VZ-400 (RIEGL)) を使用した。この装置は、対象物からの反射レーザービームを1 nsごとにサンプリングして反射パルスの波形を再現し、そこからパルスのピークを特定することでビームが反射された位置の情報を取得する。1つの発射レーザービームに対して複数のピークが検出された場合には、それぞれの対象物の位置情報を取得可能である。本論文では、最初と最後の反射パルスをファーストリターン、及びラストリターン、それらの間の反射パルスを中間リターン、ピークが1つだけのものをシングルリターンと呼ぶ。Table 1に使用したレーザースキャナの仕様を示す。

2012年8月29日に計測を行なった。計測日の天候は晴れ、昼間の平均風速は0.9 m/sと風が弱い日であった。Fig. 1に示すように、それぞれの対象樹木の周囲4地点から計測を行った。葉のスケール (長さ7~9 cm, 幅3~4 cm程度) よりも十分細かい約2 mmの間隔でレーザービームが照射されるように、0.02°の間隔でビームを発射した。その結

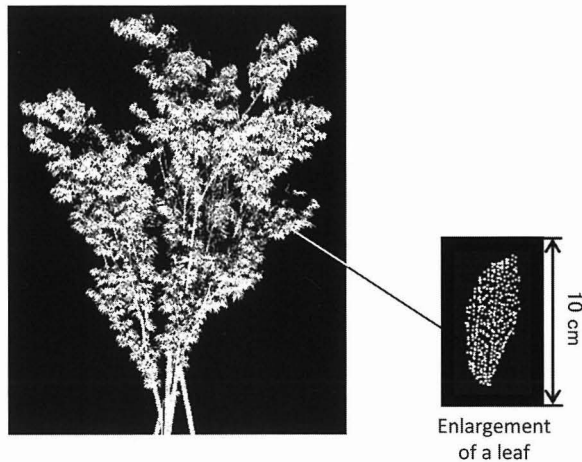


Fig. 2 Laser scanner data of *Z. serrata* scanned with sheets.

果, Fig. 2 のように葉の形状を明確に識別できるデータを取得した。1 地点あたりの計測時間は 1 分 30 秒から 2 分程度であった。風を遮るためのシートの幅は 4.5 m, 上端の高さは 7 m, 下端の高さは 2.7 m であり (Fig. 1), 上面は空いた状態とした。

2.3 レーザースキャナデータの前処理

はじめに, 各地点のデータの位置合わせをした。計測時に樹木の周囲に置いた複数の反射材を参照点として, データ処理ソフト (RiSCAN PRO (RIEGL)) を用いて各地点のデータを共通の座標系に変換した。本研究では, z 軸を鉛直方向とし, x, y 軸がそれに垂直な面上にある右手系の直交座標系を用いた。このとき, 各地点のデータ間で参照点の位置に約 5 mm のずれが見られ, 樹冠全体としてもこの程度のずれを含んでいると考えられる。各データにはフライングポイント, またはゴーストポイントなどと呼ばれるエラーの点 (実際には物体がない位置に存在するデータ) が含まれていた。このようなデータは, レーザービームの発射時に比べてパルス形が乱れた反射波により生じるとされている²²⁾。そのため, 波形の乱れを表す値である deviation (リターンの 3 次元座標値と同時に記録される) が 12 以下のリターンを正しいデータとして抽出した。この閾値は明確な判別基準が現状ないため, 目視判読により決定した。

次に, 樹木の点群を葉の点と枝の点に分離した。本研究では手動で分離を行なった。密度の高い葉群中に存在した枝にはその太さによらずレーザービームが到達しにくく, 枝の連続性が確保されないため, 目視で葉の点か枝の点を判別できない場合があった。そのような場所の点は葉に分類したが, 到達するビーム数が少ないため, LAD の推定精度に及ぼす影響は小さいと考えられる。枝の分離に関して, 葉と枝のビームの反射強度の差による方法¹⁹⁾ や, 葉と枝におけるリターンの分布パターンの違いを用いた方法²³⁾ が提案されている。このような方法が今後確立されれば自動での分離が可能となると考えられる。

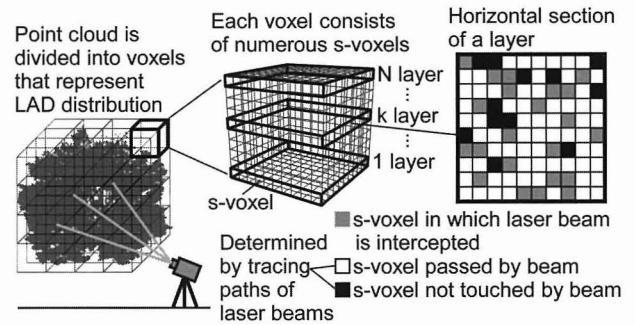


Fig. 3 Schematic of method for estimating LAD distribution.

2.4 LAD 分布の推定

2.4.1 推定方法の原理

本研究では, LAD 分布の推定方法として Hosoi and Omasa の方法¹⁶⁾¹⁷⁾ に着目した。Fig. 3 にこの方法の模式図を示す。はじめにレーザー計測データ (点群) を計測の空間分解能と同程度のスケールの voxel (本研究ではこれを s-voxel と呼ぶ) に分割する。次にレーザービームの光跡をトレースして s-voxel の種類 (ビームを遮蔽, ビームが通過, ビームが到達しない) を決定する。そして, ポイントコードラット法の原理に基づき, 葉とレーザービームの接触確率を用いて各 voxel の LAD を算出する (式 (1))。

$$LAD = \frac{1}{\Delta H} \cdot \frac{\cos(\theta)}{G(\theta)} \sum_{k=1}^N \frac{n_i(k)}{n_i(k) + n_p(k)} \quad (1)$$

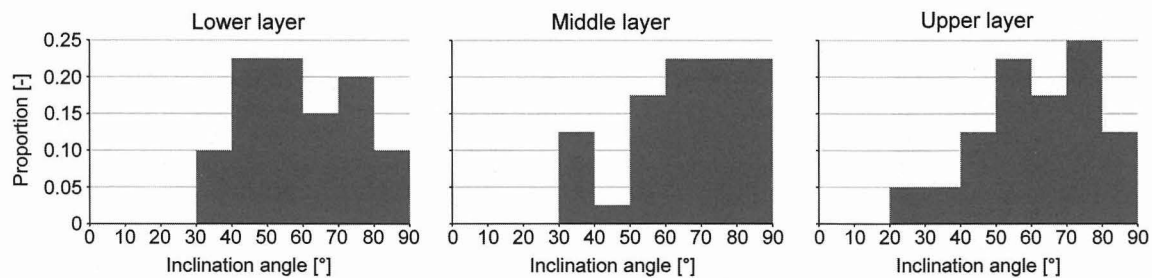
ここで, ΔH は voxel の高さ, θ はレーザービームの天頂角, $G(\theta)$ はビームに垂直な平面への単位面積の葉の投影面積, N は voxel 内の層の数 ($\Delta H \div$ s-voxel の高さ), $n_i(k)$ は k 層におけるリターンを含む s-voxel の数, $n_p(k)$ は k 層におけるビームが通過した s-voxel の数である。

2.4.2 統合法による推定

Hosoi and Omasa¹⁶⁾¹⁷⁾ はレーザービームが届かない領域を減らすために, 複数地点のデータを統合した上で, 2.4.1 の方法に従いビームの光跡をトレースして LAD を算出した。群落の一部などにおいて voxel ごとに LAD の精度検証が行なわれているが, 風により複数地点のデータが重ならない場合には, 式 (1) の $n_i(k)$ が増加して LAD の推定誤差につながる可能性がある。上記のように複数地点のデータを統合して LAD 分布を推定する方法を, 本研究では統合法 (Integration) と呼ぶこととし, 2.4.4 に示す計算条件のもと LAD の推定を行なった。

2.4.3 選択法による推定

Béland et al.¹⁹⁾ は, 異なる地点のデータは異なるレーザービームの入射天頂角を有することから, 地点別に LAD 分布を推定した後, 各 voxel において複数地点の中から 1 地点の LAD を選択する方法を用いた。この方法では各 voxel につき 1 地点のデータを用いることから, 複数地点を用いる場合に比べて voxel 内のレーザービームが届かない領域が増加し, LAD の推定精度が低下する可能性がある。

Fig. 4 Leaf inclination angle distribution of *Z. serrata* scanned with sheets.

る。一方、枝葉が voxel をまたいで揺れなければ風の影響を受けない点で有利とみられる。上記のように voxel ごとに 1 地点の LAD を選択する方法を、本研究では選択法 (Selection) と呼ぶこととし、統合法に加えて選択法による推定を行なった。地点別の LAD 分布の推定には 2.4.1 の方法を用いた。Béland et al.¹⁹⁾ は 1 地点の選択に voxel へのレーザービームの入射数²⁵⁾²⁶⁾を用いたが、voxel へのレーザービームの入射数が多くても、手前の枝葉に遮られることで voxel 内の葉にビームが当たらない場合もあると考え、本研究では入射数ではなく LAD の推定値が最大の地点を選択した。

2.4.4 計算条件

s-voxel のサイズはレーザービームの照射間隔を考慮して $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ とした。voxel サイズに関して Béland et al.²⁴⁾ は、(1) voxel サイズが小さすぎると葉の大きさのためにポアソン分布が成り立たなくなることで、(2) voxel サイズが大きすぎると葉の分布の不均一性 (クランピング) の影響が生じること、また (3) レーザービームが届かない領域を特定するという観点から、適切な voxel サイズが存在すると指摘している。従来のようにプローブを用いたポイントクラウド法ではこれらの影響は小さいと考えられるが、レーザースキャナを用いた場合にはビームが届かない領域があるために (1)–(3) の問題が顕著になるとみられる。すなわち、例えば式 (1) においては、ビームが届かない領域における葉とビームの接触確率は、同じ層内のビームが届く領域における確率と同様と見なされることになり、葉がある程度一様に分布する必要があると仮定される。また、(1) と (2) の voxel サイズの設定は LAD 分布を用いて放射伝達計算を行なう際にも重要になると考えられる。そこで本研究では、voxel の 1 辺の長さが葉の寸法の 10 倍よりも少し短い場合 (対象のケヤキの葉と同程度のスケールである長さ 10 cm、幅 4 cm の楕円形の葉を有するシアの木の場合は約 0.3 m) に上記 (1) (2) の影響が小さくなるという指摘²⁴⁾ を踏まえ、voxel サイズを $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ とした。ここで葉の寸法とは、幅や長さの平均、すなわち葉を平面と見なしたときに、その平面上の様々な向きの直線が葉を横切る長さの平均である。(3) は計測条件によって大きく異なるため、本研究でも検討項目とした (樹冠内のレーザービームの入射状況)。

樹冠内のレーザービームの入射状況の影響を調べるため

に、推定に使用する地点数を変えて推定を行なった。すなわち、1 地点のデータを用いた場合 (地点 1, 地点 2, 地点 3, 地点 4)、2 地点のデータを用いた場合 (地点 1・3, 地点 2・4)、3 地点のデータを用いた場合 (地点 1・2・3, 地点 2・3・4, 地点 3・4・1, 地点 4・1・2)、4 地点のデータを用いた場合 (地点 1・2・3・4)、それぞれについて推定を行なった (地点番号は Fig. 1 参照)。1 地点のデータを用いた場合は、統合法も選択法も同じ推定を行なっていることになるため、以下では 1 地点の場合は選択法に含めた。

式 (1) の $G(\theta)$ を求めるために必要な葉の傾斜角は、以下のようにレーザースキャナデータから取得した。ケヤキ 1 の樹冠を上層、中層、下層 (Fig. 1) に分け、それぞれの層から葉群を選び、各葉群から 40 枚の葉をランダムに抽出した。それぞれの葉について、目視で葉の形状を最もよく識別できた 1 地点のデータを用い、葉の中の離れた位置にある 3 つのリターンを手動で選択して、その 3 点を含む平面の法線の天頂角を葉の傾斜角とした。そして、各層において 10 度間隔の頻度分布を求めて (Fig. 4)、 $G(\theta)$ の算出に用いた。スキャナの測距精度は 5 mm であるが、10 cm の長さスケールの葉の傾きの判別は可能であると考えられる。既往研究¹⁶⁾¹⁷⁾ では、樹冠の中心部に入射するレーザービームの天頂角を各 voxel の $G(\theta)$ の算出に用いている。本研究では、地点間の入射天頂角の違いを補正するために、voxel の中心部に入射するビームの天頂角を用いて地点ごとに $G(\theta)$ を算出した。さらに統合法の場合には、各地点のリターンを含む s-voxel の数で重み付け平均をして、voxel の $G(\theta)$ の算出を行なった。

ビームの一部のみが葉に遮られることはレーザースキャナによる gap fraction の推定誤差の要因となると指摘されている²⁷⁾²⁸⁾ ように、植生の計測においてはビーム径に注意する必要がある。Béland et al.¹⁹⁾ はビーム径の影響を補正する方法を提案している。対象樹木として長さ 10 cm、幅 4 cm 程度の楕円形の葉を有するシアの木に対して、レーザービームの入射間隔 0.5 cm、ビームの直径 1.5 cm となるように計測した場合、中心が葉に当たったビームの割合は 70–80% 程度としている。本研究ではビーム径が Béland et al.¹⁹⁾ よりも小さく葉のスケールは同程度であるため、中心が葉に当たるビームの割合はより高く誤差も小さいと考え、補正は行なわなかった。

2.5 レーザービームの入射状況の評価指標

樹冠内のレーザービームの入射状況を評価する指標として、レーザービーム入射率 LIR (Laser beam Incident Ratio) と、対象領域がレーザービームのフットプリントに覆われる割合に関する指標である Ω (laser beam coverage index)⁴⁾ を用いた。統合法と選択法それぞれについて、使用した地点数ごとにこれらの指標を算出した。

LIR はレーザービームが到達した s-voxel の割合であり、式 (2) で表される。 $N_{s\text{-voxel}}$ は voxel 内の s-voxel の数である。

$$\text{LIR} = \left(\sum_{k=1}^N n_i(k) + n_p(k) \right) / N_{s\text{-voxel}} \quad (2)$$

Ω は式 (3) で算出され、各層にどの程度漏れなくレーザービームが照射されているかを表す。

$$\Omega = A_{\text{beam}} \times N \exp(-K \cdot \text{LAI}_{\text{cum}}) \quad (3)$$

A_{beam} と N は、対象領域に入射するときのレーザービームのフットプリントの面積（最下層に入射するときのレーザービームの水平断面積）と 1m^2 あたりの入射ビーム数である。 $\exp(-K \cdot \text{LAI}_{\text{cum}})$ は、手前の枝葉で遮られることによるビーム数の減少を表しており、 K は消散係数、 LAI_{cum} は Ω を計算する層までの LAI (Leaf Area Index) の積算値である。Hosoi et al.⁴⁾ は、 Ω が大きくなるほど LAD の推定誤差が減少し、 Ω に対する誤差の変化は地上レーザー計測も航空機レーザー計測も同様であることを示した。

レーザービームが真下から入射する場合には、 Ω はある高さにおいて 1m^2 あたりがレーザービームに覆われる面積である。しかしながら、レーザービームが斜めから入射する場合には、ビームの光跡と LAI_{cum} はあまり関係がない。そこで本研究では、voxel 内の各層で A_{beam} と N を考えることとし、 N は $N_{t\text{-layer}}$ に置き換えた。 $N_{t\text{-layer}}$ は点群がない状態でトレースを行ったときの入射ビーム数 (1m^2 あたり) である。そして、式 (3) の $\exp(-K \cdot \text{LAI}_{\text{cum}})$ は $N_{a\text{-layer}}/N_{t\text{-layer}}$ に置き換えた。 $N_{a\text{-layer}}$ は各層への実際の入射ビーム数である。すなわち、各層において $A_{\text{beam}} \times N_{a\text{-layer}}$ により Ω を算出した。そして各層の Ω の平均値を voxel の Ω の値とした。

2.6 刈り取りによる葉面積の実測

レーザースキャナによる計測の後、ケヤキ 1 を対象とし、樹冠の層ごと（上層、中層、下層 (Fig. 1)）に全ての葉を刈り取った。その際、サンプルとして各層から葉群を 1 つずつ選択し、刈り取った葉をフラットベッドスキャナで画像化して葉面積を測定した。上層、中層、下層におけるサンプルの葉の生重量はそれぞれ、50.6 g, 91.3 g, 60.4 g、全ての葉の生重量は 3.22 kg, 1.78 kg, 0.71 kg であった。その後全ての葉を乾燥させ、乾燥重量を測定した。葉面積と乾燥重量の関係は陽葉と陰葉で差がないことを確認した上で、式 (4) により各層の葉面積を求めた。

$$\text{LA}_{\text{layer}} = \frac{\text{LA}_{\text{sample}} \cdot \text{DW}_{\text{layer}}}{\text{DW}_{\text{sample}}} \quad (4)$$

ここで、 LA_{layer} と $\text{LA}_{\text{sample}}$ は各層における全葉面積とサンプルの葉面積、 DW_{layer} と $\text{DW}_{\text{sample}}$ はそれぞれ各層における全ての葉とサンプルの乾燥重量である。

2.7 分析方法

LAD の推定精度に関して、次の 3 点について分析を行った。① 樹冠内のレーザービームの入射状況 (LIR, Ω) と LAD の推定精度の関係、② 計測時の風が LAD の推定精度に及ぼす影響、③ ビームが入射しにくい領域における LAD の推定誤差の補正方法。

① のために、CASE 1 において、統合法により推定した葉面積及び選択法により推定した葉面積を刈り取りによる葉面積と比較した。比較は各層（上層、中層、下層 (Fig. 1)）において行なった。層ごとの葉面積の推定値は、各 voxel の葉面積の推定値 ($\text{LAD} [\text{m}^2/\text{m}^3] \times 0.3^3 [\text{m}^3]$) を積算して求めた。

② について、風により枝葉が揺れる場合、voxel 内で揺れる場合と voxel をまたいで揺れる場合がある。選択法は 1 つの voxel につき 1 地点のデータを使うため、voxel をまたいで枝葉が揺れる影響のみを受けるとみられる。そこでまずは、以下のようにして風が選択法による LAD 分布の推定精度に及ぼす影響を調べた。隣り合う 2 つの地点の LAD 推定値の相関性を、CASE 1 と CASE 2 で比較した。両 CASE で相関性が変化しなければ、風が選択法の精度に及ぼす影響は小さいと考えられる。このとき、レーザービームの入射状況の違いに伴う地点間の LAD の推定精度の差を小さくするために、2 地点の Ω がともに 14 以上かつ、地点間の Ω の差が 2 以下の voxel を使用した。この条件を満たしていても、手前でレーザービームが遮蔽され、ある地点からは認識できる葉が隣の地点のデータでは認識できない場合があったため、そのような voxel は手動で解析から除いた。選択された voxel は 2 地点からレーザービームが良く入射する樹冠の外周部に位置しているため、風の影響を受けやすいと考えられる。同一地点から風向・風速の異なる条件で計測を行うことが理想的だが、刈り取りやシートの設置など他の作業の関係上、計測回数に制限があったため複数地点からの計測を優先し、ここでは上記のような方法を用いた。

次に、CASE 2 において、統合法により推定した葉面積と選択法により推定した葉面積を比較することで、voxel 内で枝葉が揺れる影響も含めて風の影響を考察した。

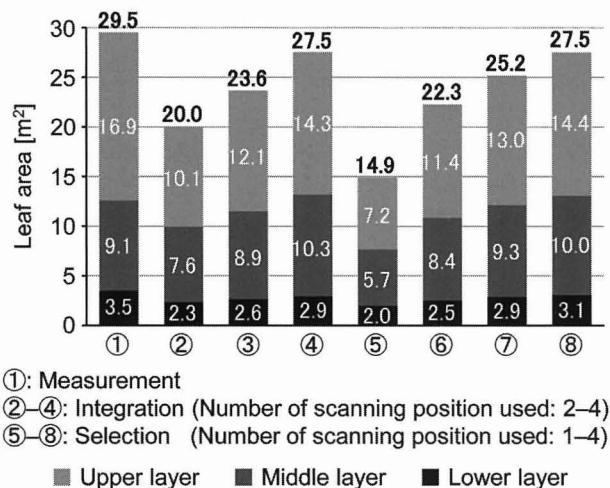
本研究の対象樹木に対して高精度に LAD 分布を推定できたとしても、より大きな樹木ではレーザービームが届きにくい場所が増え、推定精度が低下する可能性がある。そこで、レーザースキャナによる推定方法をより一般的な条件に適用できるよう、③ のために、CASE 1 において葉面積の推定誤差と誤差指標との関係について分析した。

3. 結果と考察

3.1 風を遮った条件における統合法による推定結果

Fig. 5 に CASE1 におけるケヤキ 1 の葉面積の実測値と推定値（統合法及び選択法）を示す。図中の ②-④ は統合法による結果（使用した地点数 2-4）、⑤-⑧ は選択法による結果（使用した地点数 1-4）である。Fig. 6 には統合法による葉面積の推定誤差、 Ω 、LIR を示す。 Ω と LIR は葉を含む voxel の平均値である。また、使用した地点数ごとに地点の組み合わせが複数存在する（例えば 2 地点を使用した場合は、地点 1・3 と地点 2・4）が、Fig. 5, 6 はそれらを平均した結果を示している。計測時のシートの外の方平均風速は 0.4 m/s であり、風が弱い条件であった。シート内において、計測した点群データからは、複数地点のデータを重ね合わせる際の誤差である 5 mm より大きな葉の位置のずれは生じていなかった。

Fig. 6 より、LAD の推定に使用した地点数が増加すると Ω と LIR も増加しており、樹冠内のより多くの場所にレーザービームが届くようになったことが分かる。2 地点を用いた場合、上層と下層では葉面積が 30% 以上過小推定さ



①: Measurement
②-④: Integration (Number of scanning position used: 2-4)
⑤-⑧: Selection (Number of scanning position used: 1-4)
■ Upper layer ■ Middle layer ■ Lower layer
Number above the bar: Total leaf area
Number in the bar: Leaf area for each layer

Fig. 5 Leaf area of *Z. serrata* scanned with sheets derived by actual measurement, Integration, and Selection.

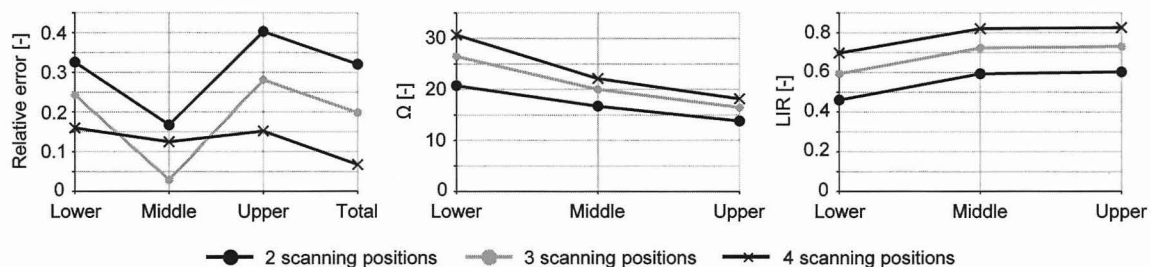


Fig. 6 Relative error in leaf area, Ω , and LIR derived by Integration for *Z. serrata* scanned with sheets. Results are plotted for each number of scanning position according to layer of the crown.

れたが (Fig. 5 ②, Fig. 6), 地点数を増やすことで大幅に誤差が減少した。中層では 4 地点を用いた場合には逆に葉面積が若干過大推定された (Fig. 5 ④)。これは葉の配置が関係していると考えられ、計測方向から見た場合に葉が空隙を埋めるように分布していた可能性がある。しかしながら、上層と下層と比べても大きな誤差にはなっていない。全葉面積の推定誤差は、2 地点を用いた場合に 32%, 4 地点の場合には 7% であり、いずれも過小推定であった。

Ω は上層ほど小さくなった。これは、対象としたケヤキは上部ほど樹冠が広がるため、レーザービームが入射しやすい地点とそうでない地点が生じたためである。下層では、 Ω が大きいにも関わらず葉面積の推定誤差は上層と同程度であった。この原因は、下層において LIR が小さいこと、すなわちレーザービームの入射天頂角が大きくなり、voxel 内の各層に入射するレーザービームの間隔が大きくなったためと考えられる。

3.2 風を遮った条件における選択法による推定結果

Fig. 7 に同様にケヤキ 1 を対象とした選択法による葉面積の推定誤差、 Ω 、LIR を示す。中層を除いては使用地点数が増えるほど誤差が減少したことや、 Ω と LIR の高さ変化の傾向、及び下層では Ω が大きいにも関わらず誤差が大きいことは統合法と同様であった。4 地点のデータを用いた場合、各層における葉面積の推定誤差は 10-15% ほどであり、樹冠全体では 7% の過小推定であった。統合法の結果と異なる点としては、使用地点数を増やすと誤差が減少したにも関わらず、 Ω や LIR は使用地点数 2 地点以上では増加していないことが挙げられる。

1 地点から 2 地点にした場合には、2 地点目からのレーザービームは 1 地点目とは反対側から入射するため、 Ω と LIR が大幅に増加した。2 地点以上では Ω と LIR がほとんど変化しなかったのは、 Ω が大きくても、手前の葉と重なって voxel 内の葉にビームが到達しない場合があったためと考えられる。本研究で用いた推定方法は原理的に LAD を過小推定しやすいことから、LAD の推定値が大きい地点を選択することで誤差を小さくできたとみられる。ただし 3.4 で述べるように、レーザービームがほとんど遮蔽されずに入射する voxel と、遮蔽の影響が大きい voxel とを比較した場合には、 Ω の差が大きくなり、LAD の推定誤差と Ω には明確な関係性が見られた。そのため、

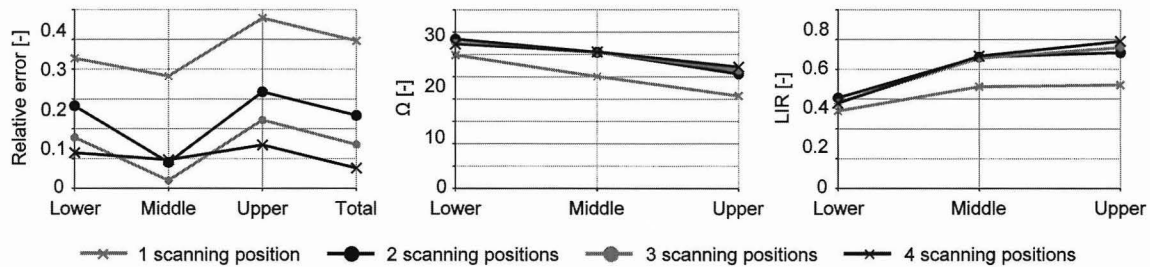


Fig. 7 Relative error in leaf area, Ω , and LIR derived by Selection for *Z. serrata* scanned with sheets. Results are plotted for each number of scanning position according to layer of the crown.

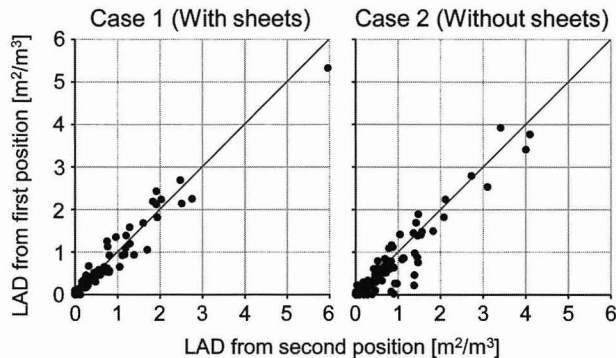


Fig. 8 Scatter plot of LAD derived from a scanning position and that derived from the adjacent position, separately depicted for *Z. serrata* scanned with and without sheets.

樹冠内のどこで過小推定が生じているかの判断には Ω が使用できると考えられる。

前記の通り選択法では、 Ω や LIR は統合法の半分程度であるにも関わらず、葉面積の推定誤差は統合法と同程度であった。これは、統合法のように各 voxel において枝葉による遮蔽の影響を受けた他地点のデータを追加しても、精度の向上につながらないことを示している。以上のように風を遮った状態では、統合法と選択法の差は小さいことを確認した。

3.3 風が LAD の推定精度に及ぼす影響

Fig. 8 に、選択法を用いた場合に選定した複数の対象 voxel において、ある 1 つの地点から取得した LAD とその隣の地点から取得した LAD の散布図を、CASE 1 と CASE 2 について示す。また、Table 2 に 2 地点の LAD の決定係数 (R^2) と LAD の推定値の平均を示す。CASE 2 の計測時の平均風速は 0.5 m/s と弱風であった。CASE 1 では、プロットが 1:1 ラインに近く (Fig. 8 左側)、Table 2 より 2 地点の LAD の R^2 は 0.95、大きい方の LAD と小さい方の LAD の比は 1.24 であった。Fig. 8 の右側に示すように CASE 2 ではばらつきが大きくなり、ある地点からの LAD は $1.0 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 程度であるにも関わらず、他地点からは $0.1\text{--}0.2 \text{ m}^2/\text{m}^3$ である voxel も存在した。これは、風により voxel をまたいで枝葉が揺れる影響を表している。しかしながら R^2 は 0.89 であり、2 地点の LAD には高い相関があった (Table 2)。また、大きい方の LAD と小さい方の LAD の比

Table 2 R^2 for the plots in Fig. 8 and mean value of estimated LAD.

	Case 1 (With sheets)	Case 2 (Without sheets)
R^2	0.95	0.89
Mean LAD (Higher LAD from 2 positions was used)	0.52	0.72
Mean LAD (Lower LAD from 2 positions was used)	0.42	0.53

は 1.36 であった。すなわち、大きい方の LAD が風の影響を受けたと考えられた場合でも、風が選択法による LAD の推定に及ぼす影響は 10% 程である。

Fig. 9 にケヤキ 2 の、4 地点のデータを使用した場合の統合法及び選択法による葉面積の推定結果を示す。樹冠中層において、CASE 1 では統合法と選択法の差は数% であった (Fig. 5 ④, ⑧)。しかしながら CASE 2 では、統合法による葉面積が選択法に比べて約 20% 大きかった (Fig. 9 の中層において、選択法は 12.9 m^2 、統合法は 15.5 m^2)。これは voxel 内で枝葉が揺れる影響を表している。選択法では中層において過小推定は生じておらず (3.2)、また上記のように風により 10% ほど推定値が大きくなった。すなわち Fig. 9 の中層の結果は、0.5 m/s と風が弱い条件でも統合法を用いると LAD が大幅に過大推定される場合があることを示している。上層では、中層に比べて統合法と選択法の差が小さくなった。この理由は、統合法ではレーザービームの遮蔽による過小推定と風による過大推定が相殺されたことと考えられる。しかしながら、風により過大推定されているのか真値に近づいているのかをレーザースキャナデータのみで定量的に把握することは難しいとみられる。

以上のように、選択法では 1 つの voxel につき 1 地点のデータを使うにも関わらず葉面積の推定精度が高いことと、統合法では葉面積が大幅に過大推定される場合があることから、風がある条件での LAD 分布の推定には選択法が適している。

3.4 LAD の推定誤差の補正に関する検討

3.2 の結果では、CASE 1 において 4 地点のデータを用いたとき、葉面積の大幅な過小推定は生じなかった。これは、本研究で対象とした樹木が比較的小規模であったこと

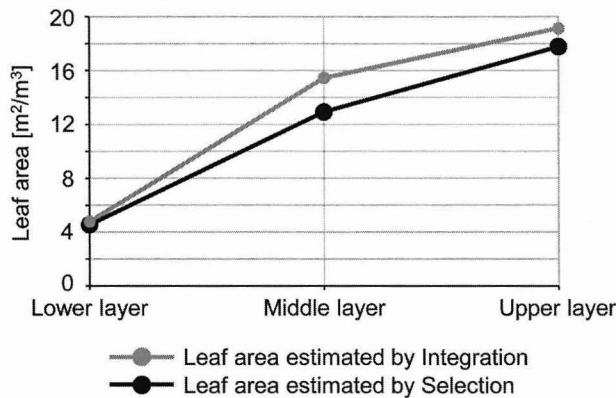
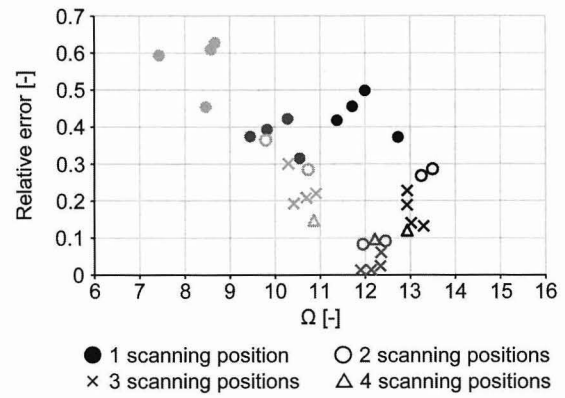


Fig. 9 Leaf area for each layer of *Z. serrata* scanned without sheets estimated by Integration and Selection.

から、樹冠全体にレーザービームが届きやすかったためと考えられる。より大きな樹木にも選択法を適用できるように、選択法による葉面積の推定誤差と既往の誤差指標 Ω の関係を調べた。LIR は枝葉による遮蔽の影響とは無関係にレーザービームの入射天頂角により値が変化するため Ω を使用した。Fig. 10 に、CASE 1 における葉面積の推定誤差と Ω の関係を示す。ここでは、地点の組み合わせごとに結果を示した（例えば 2 地点の場合、地点 1・3 と地点 2・4 の結果を平均せずに分けて示した）。

Fig. 10 において、各 Ω に対する相対誤差は下層の方が上層・中層よりも大きい。3.1 で述べたように、樹冠下層では voxel 内の各層へのレーザービームの入射間隔が大きくなることが影響し、 Ω が上層や中層と同程度であっても LAD の推定誤差が大きかったとみられる。上層や中層では Hosoi et al. の結果⁴⁾ と同様に、誤差が Ω の増加とともに明確に減少した。このような誤差と Ω の関係を整備することで、選択法による LAD の推定誤差を補正できる可能性がある。下層のように水平面へのレーザービームの入射角が大きい場合であっても、鉛直面においてレーザービームと葉の接触確率を計算することで、上層や中層と同様の Ω と推定誤差の関係が得られると考えられる。

Ω の値は計測条件（ビーム径やビームの照射間隔など）によっても大きく変化する。Hosoi et al.⁴⁾ は、ビーム径 1.5–2 cm 程度でビーム径と照射間隔がほぼ等しくなるような条件でケヤキ群落の計測を行ったところ、 Ω が 2–3 以上になると LAD の推定誤差が小さくなるとしている。本研究では、ビーム径 8 mm、照射間隔 2 mm で計測を行なったが、ビームの照射密度がより低かったとしても LAD の推定精度は大きくは低下しなかった可能性がある。すなわち、Fig. 10 において Ω が 7–9 では誤差が大きい、これは voxel の手前でビームが遮蔽されたためである。ビームの照射密度が低い場合、 Ω が 7–9 であっても遮蔽の影響を受けていなければ誤差はより小さいと考えられる。近年では高速でビームを照射する計測が可能になっていることから、本研究や Béland et al.¹⁹⁾ のようにビーム同士が重なり



Gray: Upper layer Dark gray: Middle layer Black: Lower layer

Fig. 10 Relative error in leaf area plotted against Ω for *Z. serrata* scanned with sheets, derived by Selection.

合うようなデータも一般的に利用できると考えられるが、様々な測定方法で LAD 分布の情報を整備できるように、今後はビームの照射密度やビーム径と LAD の推定精度との関係を整備してゆくことが重要である。

4. ま と め

樹冠内のレーザービームの入射状況と風の影響を考慮して LAD 分布の推定精度を検証することを目的とし、シートで囲んだケヤキと囲んでいないケヤキを対象とし、周囲 4 地点からレーザースキャナによる計測を行った。複数地点のデータを統合して用いる方法（統合法）と voxel ごとに 1 地点のデータを選択する方法（選択法）により LAD 分布を推定し、刈り取りによる葉面積の実測値と比較した。

風を遮った条件では、統合法と選択法による LAD の推定精度の差は小さかった。統合法、選択法ともに、4 地点のデータを用いた場合、樹冠上層、中層、下層における葉面積の推定誤差は 10–15% であり、樹冠全体では 7% の過小推定であった。選択法は統合法に比べて、入射するレーザービーム数やビームで覆われる面積が半分ほどであったが、LAD の推定精度にはほとんど差が見られなかった。これは、統合法のように voxel 内の葉が最も良く見えている地点に加えて枝葉による遮蔽の影響を受けた他地点のデータを追加しても、精度は向上しないことを示している。選択法、統合法ともに、総葉面積の誤差を 20% 以下にするには 3 地点、10% 以下にするには 4 地点からの計測が必要であった。

弱風であっても 0.5 m/s 程度の風がある条件で選択法を用いると、風を遮った場合よりも LAD が 10% 大きく推定された。また同様の風条件のもと統合法を用いると、葉面積が選択法よりも 20% 大きく推定されることがあった。すなわち、風速は小さくても風がある条件で統合法を用いると、LAD が大幅に過大推定される箇所が生じる可能性がある。風の影響は、結果としてレーザービームが届かな

いことによる LAD の過小推定を補うことになる。しかしながら、これには原理的な妥当性がなく、風の影響を定量的に評価することは難しいため、有効な LAD の補正方法にはならない。voxel 内の各層へのレーザービームの入射間隔に注意することで既往の誤差指標により誤差を補正できる可能性があることから、選択法はより大きな樹木や密な樹木にも適用できると考えられる。選択法を用いる場合であっても、風が強くなると枝葉が voxel をまたいで揺れる影響が大きくなるため、本研究で扱った 0.5 m/s 程度の弱風時に計測を行うことが望ましいと考えられる。

謝 辞：レーザースキャナによる計測や刈り取りによる葉面積の実測には清水克哉氏（トヨタ自動車株式会社 パイオ・緑化研究所）、久保田光政氏（ダイトウテクノロジー株式会社）の協力を得た。ここに記して深謝の意を表する。

引用文献

- 1) D. Whitehead, J. C. Grace and M. J. S. Godfrey : Architectural distribution of foliage in individual *Pinus radiata* D. Don crowns and the effects of clumping on radiation interception, *Tree physiol.*, 7 (1-4), pp. 135-155, 1990.
- 2) H. Sinoquet, G. Sonohat, J. Phattaralerphong and C. Godin : Foliage randomness and light interception in 3-D digitized trees: an analysis from multiscale discretization of the canopy, *Plant Cell Environ.*, 28 (9), pp. 1158-1170, 2005.
- 3) A. Iio, Y. Kakubari and H. Mizunaga : A three-dimensional light transfer model based on the vertical point-quadrant method and Monte-Carlo simulation in a *Fagus crenata* forest canopy on Mount Naeba in Japan, *Agr. Forest Meteorol.*, 151 (4), pp. 461-479, 2011.
- 4) F. Hosoi, Y. Nakai and K. Omasa : Estimation and error analysis of woody canopy leaf area density profiles using 3-D airborne and ground-based scanning lidar remote sensing techniques, *IEEE T. Geosci. Remote*, 48 (5), pp. 2215-2223, 2010.
- 5) Y. Song, M. Maki, J. Imanishi and Y. Morimoto : Voxel-based estimation of plant area density from airborne laser scanner data, *Proc. ISPRS Workshop Laser Scanning 2011*, Calgary, Canada, pp. 209-212, Aug. 2011.
- 6) H. Oshio, T. Asawa, A. Hoyano and S. Miyasaka : Estimation of the leaf area density distribution of individual trees using high-resolution and multi-return airborne LiDAR data, *Remote Sens. Environ.*, 166, pp. 116-125, 2015.
- 7) J. W. Wilson : Inclined point quadrats, *New Phytol.*, 59 (1), pp. 1-8, 1960.
- 8) J. W. Wilson : Estimation of foliage denseness and foliage angle by inclined point quadrats, *Aust. J. Bot.*, 11 (1), pp. 95-105, 1963.
- 9) A. R. G. Lang, X. Yueqin and J. M. Norman : Crop structure and the penetration of direct sunlight, *Agr. Forest Meteorol.*, 35 (1-4), pp. 83-101, 1985.
- 10) J. M. Welles and J. M. Norman : Instrument for indirect measurement of canopy architecture, *Agron. J.*, 83 (5), pp. 818-825, 1991.
- 11) J. M. Chen and J. Cihlar : Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurements of leaf-area index, *Appl. Optics*, 34 (27), pp. 6211-6222, 1995.
- 12) 吉見健司, 細井文樹, 清水 庸, 山田博章, 大政謙次 : 可搬型 Scanning Lidar を用いた地表面と樹冠高の 3 次元計測, *Eco-Engineering*, 16 (3), pp. 203-207, 2004.
- 13) 大政謙次, 浦野 豊, 小熊宏之, 藤沼康実 : 可搬型 Scanning Lidar データを用いたカラマツ林の樹林マッピングと胸高直径及びバイオマスの推定, *日本リモートセンシング学会誌*, 22 (5), pp. 550-557, 2002.
- 14) F. Hosoi, K. Nakabayashi and K. Omasa : 3-D modeling of tomato canopies using a high-resolution portable scanning lidar for extracting structural information, *Sensors*, 11 (2), pp. 2166-2174, 2011.
- 15) 戸田健太郎, 中村彰宏, 大藪崇司, 前中久行 : 地上型レーザースキャナを用いた 3 次元計測における樹高の推定, *日本緑化学会誌*, 35 (1), pp. 69-74, 2009.
- 16) F. Hosoi and K. Omasa : Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar, *IEEE T. Geosci. Remote*, 44 (12), pp. 3610-3618, 2006.
- 17) F. Hosoi and K. Omasa : Factors contributing to accuracy in the estimation of the woody canopy leaf area density profile using 3D portable lidar imaging, *J. Exp. Bot.*, 58 (12), pp. 3463-3473, 2007.
- 18) T. Takeda, H. Oguma, T. Sano, Y. Yone and Y. Fujinuma : Estimating the plant area density of a Japanese larch (*Larix kaempferi* Sarg.) plantation using a ground-based laser scanner, *Agr. Forest Meteorol.*, 148 (3), pp. 428-438, 2008.
- 19) M. Béland, J.-L. Widlowski, R. A. Fournier, J.-F. Côté and M. M. Verstraete : Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements, *Agr. Forest. Meteorol.*, 151 (9), pp. 1252-1266, 2011.
- 20) M. Béland, J.-L. Widlowski and R. A. Fournier : A model for deriving voxel-level tree leaf area density estimates from ground-based LiDAR, *Environ. Modell. Softw.*, 51, pp. 184-189, 2014.
- 21) D. V. der Zande, J. Stuckens, W. W. Verstraeten, S. Mereue, B. Muys and P. Coppin : 3D modeling of light interception in heterogeneous forest canopies using ground-based LiDAR data, *Int. J. Appl. Earth Obs.*, 13 (5), pp. 792-800, 2011.
- 22) http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegl/downloads/RIEGL_VZ-400_News_03-2009.pdf (2016. 4. 19)
- 23) 根来昇吾, 細井文樹, 大政謙次 : 着葉期の落葉広葉樹を対象とした可搬型スキャニングライダーデータからの非同化器官の抽出, *Eco-Engineering*, 24 (2), pp. 51-55, 2012.
- 24) M. Béland, D. D. Baldocchi, J.-L. Widlowski, R. A. Fournier and M. M. Verstraete : On seeing the wood from the leaves and the role of voxel size in determining leaf area distribution of forests with terrestrial LiDAR, *Agr. Forest. Meteorol.*, 184, pp. 82-97, 2014.
- 25) S. Durrieu, T. Allouis, R. Fournier, C. Vêga and L. Albrech : Spatial quantification of vegetation density from terrestrial laser scanner data for characterization of 3D forest structure at plot

- level, Proc. SilviLaser 2008, Edinburgh, UK, pp. 1-8, Sept. 2008.
- 26) J.-F. Côté, R. A. Fournier and R. Egli : An architectural model of trees to estimate forest structural attributes using terrestrial LiDAR, Environ. Modell. Softw., 26, pp. 761-777, 2011.
- 27) F. A. Ramirez, R. P. Armitage and F. M. Danson : Testing the application of terrestrial laser scanning to measure forest canopy gap fraction, Remote Sens., 5 (6), pp. 3037-3056, 2013.
- 28) F. M. Danson, C. Giacosa, R. P. Armitage : Two-dimensional forest canopy architecture from terrestrial laser scanning, Proc. ISPRS Working Group VII/ 1 2007, Davos, Switzerland, Mar. 2007.

〔著者紹介〕

●押尾 晴樹（オシオ ハルキ）



所属：2014年東京工業大学大学院博士課程修了，博士（工学）。現在，東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系 都市・環境学コース 特別研究員。所属学会：日本リモートセンシング学会，日本建築学会，日本赤外線学会，日本ヒートアイランド学会。

E-mail : oshio.h.aa@m.titech.ac.jp

●浅輪 貴史（アサワ タカシ）



2003年東京工業大学大学院博士課程修了，博士（工学）。東京工業大学助手，エーアンドエー株式会社主任研究員を経て，現在，東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系 都市・環境学コース 准教授。研究分野及び研究歴：都市・建築環境工学，ヒートアイランド，都市・建築の熱環境シ

ミュレーションツールの構築，CAD・GIS，微気候・住環境評価，LiDARを用いた都市環境情報の解析等。主な所属学会：日本リモートセンシング学会，日本建築学会，日本ヒートアイランド学会，空気調和・衛生工学会他。

E-mail : asawa.t.aa@m.titech.ac.jp