

マルチリターン航空機LiDARデータと植生放射伝達モデル による都市緑化樹木の日射遮蔽効果の計量化

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 梅干野, 晁 宮坂, 聡
発行元	日本リモートセンシング学会
巻/号	35巻1号
巻号補足	
掲載ページ	p. 10-22
発行年月	2015年1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

マルチリターン航空機 LiDAR データと植生放射伝達モデル による都市緑化樹木の日射遮蔽効果の計量化

押尾晴樹^{*1}・浅輪貴史^{*1}・梅干野晃^{*2}・宮坂 聡^{*3}

Quantification of Solar Shading Effect of Urban Trees Using Multi-Return Airborne LiDAR Data
and a Radiative Transfer Model of Vegetation

Haruki OSHIO^{*1}, Takashi ASAWA^{*1}, Akira HOYANO^{*2} and Satoshi MIYASAKA^{*3}

Abstract

In this study, we demonstrate a method for quantifying the solar shading effect of urban trees. Leaf area density (LAD) distribution is estimated using multi-return airborne light detection and ranging (LiDAR); then, the estimated distribution is applied to a radiative transfer model of vegetation to calculate the direct photosynthetically active radiation (PAR) transmittance. When first and single returns are used to estimate the LAD distribution, which is the same as the previously developed methods by other researchers, LAD is estimated with a large error in the lower part of the crown. The estimation error is an obstacle for an accurate calculation of direct PAR transmittance. Therefore, a method using the last and intermediate returns in addition to the first and single returns was examined. We verified the estimation accuracy of the LAD distribution using the terrestrial LiDAR data of a single Japanese zelkova (*Zelkova serrata*) tree. We confirmed that using the last and intermediate returns improves the estimation accuracy of the entire crown area, especially in the lower part of the crown. Improvement of the spatial resolution of the external crown geometry and correction of the LAD for the voxels where there are no airborne LiDAR returns from the leaves were also conducted. Subsequently, the estimated LAD distribution was applied to a radiative transfer model, and then, the direct PAR transmittance was calculated. The PAR under the *Z. serrata* tree was measured using a device with a 1-m probe in which PAR sensors are embedded. We obtained PAR distribution by moving the device in the direction perpendicular to the probe, and the calculated transmittance was then compared with the measured one. The comparison showed that when the estimated LAD distribution with the LAD correction is used, direct PAR transmittance is accurately calculated, regardless of solar altitude.

Keywords : Airborne LiDAR, Leaf area density distribution, Solar shading, Terrestrial LiDAR, Radiative transfer model of vegetation

1. はじめに

近年、夏季における都市熱環境悪化の対策として樹木による緑化が注目されている。各地方自治体が緑の基本計画を策定し緑化を推進してゆく中で、緑化の実施状況は緑被率のような緑の量をもとに評価されている¹⁾²⁾。しかしながら、人が通行・滞在する空間の熱的快適性を向上してゆくためには、街区スケールにおいて個々の樹木が熱環境に及ぼす効果を評価することが重要である。樹木が熱環境に及ぼす影響として、日射遮蔽、蒸散作用、風速の低減などが挙げられる。本論文では、人の快適性への影響が大きい

放射環境の改善に寄与する、日射遮蔽効果を計量化する方法について議論する。日射遮蔽効果を評価するためには、木陰が覆う範囲（太陽方向からの地表面や地物に対する樹冠の投影面）と樹冠の日射透過率の情報が必要となるが、そのような情報を地上からの調査により整備することは困難である。そこで、情報を整備する方法として航空機 LiDAR (Light Detection and Ranging) に注目する。

航空機 LiDAR により樹冠の日射透過率を算定する方法として、レーザーが樹冠を透過する確率を用いる方法と、葉の密度を推定してそれをもとに放射伝達計算を行う方法が考えられる。前者は航空機の飛行位置により日射透過経路が限られてしまい汎用性も低いいため、本研究では、日変

(2014. 6. 30 受付, 2014. 12. 5 改訂受理)

^{*1} 東京工業大学大学院総合理工学研究科
〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G5-2

^{*2} 放送大学
〒261-8586 千葉市美浜区若葉 2-11

^{*3} 中日本航空株式会社
〒480-0202 愛知県西春日井郡豊山町大字豊場若宮 17-1

^{*1} Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 4259-G5-2, Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, 226-8502, Japan

^{*2} The Open University of Japan, 2-11, Wakaba, Mihama-ku, Chiba, 261-8586, Japan

^{*3} Nakanihon Air Service CO., LTD., 17-1, Toyobawakamiya, Toyoyama-cho, Nishikasugai, Aichi, 480-0202, Japan

化などにより日射の入射方向が時々刻々と変化することを考慮できるように後者の方法を用いる。葉の密度の情報としては、樹冠内には葉が一様に分布していないことや、樹種・剪定・生育状況などにより樹冠構造が異なることを考慮できるように、個々の樹木の LAD (Leaf Area Density) 分布を整備することが有効である。LAD とは、単位体積あたりの葉の片面の総面積であり、 m^2/m^3 の単位をもつ。LAD 分布は、voxel ベースで表現することにより、植生の放射伝達モデル³⁾に加えて、熱環境シミュレーション⁴⁾や CFD (Computational Fluid Dynamics) シミュレーション⁵⁾の樹木領域に適用できる情報となる。また、様々な太陽高度・方位に応じて樹冠の投影面を算出することもできる。一方、voxel サイズが大きくなるに従い、樹冠の投影面や日射透過率の算定精度が低下する。そこで本研究では、樹冠の形状や葉群の分布を表現することができるよう、1m 以下の空間スケールにおける LAD 分布の整備を目標とする。

航空機 LiDAR により LAI (Leaf Area Index)⁶⁾⁷⁾や葉群の分布⁸⁾⁹⁾を推定する手法が研究されているが、LAD 分布を扱った研究は少ない。中井ら¹⁰⁾は航空機 LiDAR と地上型 LiDAR を組み合わせることで LAD 分布を推定する手法を提案している。ファーストリターンとシングルリターンのみで構成されるデータを用いているため、航空機 LiDAR データのみを使用した場合、キャノピーの最上部を除いては推定値と実測値の差が大きくなっている。これは、日射透過率の算定において誤差の要因となる可能性がある。また、中井らと同様の原理で PAD (Plant Area Density) 分布を推定した Song et al.¹¹⁾は、ラストリターン、中間リターンを含むデータを取得したが、それらを含めると計算時に誤差が生じるとして、ファーストリターンとシングルリターンのみを用いている。ラストリターンや中間リターンにはレーザーが樹冠を透過した情報も含まれるため、マルチリターンデータの利用方法については検討が必要と言える。

葉の密度情報から樹冠の日射透過率を求めるための放射伝達計算に関して、樹木の配置や形状、葉の密度などを入力して、キャノピーからの反射光や林床の光環境をシミュレーションすることができる放射伝達モデルが開発されている¹²⁾¹³⁾。地上型 LiDAR により個々の樹木の形態情報を取得し、それをもとに放射伝達シミュレーションを行い、光合成有効放射 (PAR: Photosynthetically Active Radiation) の透過量の算定とその精度検証を行なった研究が見られる¹⁴⁾¹⁵⁾。しかしながら、航空機 LiDAR により個々の樹木の LAD 分布を取得してシミュレーションを行った例は見られない。

そこで本研究では、マルチリターン航空機 LiDAR データから推定した LAD 分布と植生放射伝達モデルを用いて、樹木の日射透過率の算定を行い、その精度を明らかにすることを目的とする。

2. 検討内容

2.1 LAD 分布の推定に関する検討項目

様々な角度から入射する日射を考慮するためには、樹冠下部も含めて LAD 分布を再現することが必要である。そこで、まず前章で述べた課題点に基づき、既往研究における航空機 LiDAR を用いた LAD 分布の推定手法を、ラスト、中間リターンも含めたものに改良する。その推定精度の検証には地上型 LiDAR を用いる。レーザーが十分入射する条件であれば、地上型 LiDAR により LAD を精度よく推定できる¹⁶⁾¹⁷⁾ため、特に樹冠下部において高精度な検証が可能である。

航空機 LiDAR のラスト、中間リターンを使用した場合でも、樹冠上部でのレーザーの遮蔽のためにレーザーが届きにくい樹冠下部では、推定精度が低下する。航空機からのレーザーの入射天頂角は通常小さいため、太陽高度が低くなると、そのような推定誤差が日射透過率の算定精度に及ぼす影響が大きくなると考えられる。そこで、航空機からのレーザーと日射の入射方向が異なる場合にも適用できるように LAD の補正を行う。また、樹冠の投影面を再現できるように、筆者らの既往研究¹⁸⁾をもとにして樹冠外周部の voxel サイズについても検討する。

2.2 日射遮蔽効果の評価指標

樹木の日射遮蔽効果としては、日陰を作る、すなわち直達日射を遮ることが第一に重要であることから、直達日射を評価対象とする。樹冠の下に到達する直達日射には樹冠の空隙を通過した成分と枝葉で散乱 (反射・透過) した成分が含まれる。本研究では、これらの成分のうち特に影響が大きい、空隙を通過した成分を高精度に算定することが重要であるという考えのもと、葉による散乱が小さい PAR を対象に透過率の算定と精度検証を行なう。そこで、推定した LAD 分布と植生放射伝達モデルを用いて直達 PAR 透過率を算定する。そして、樹冠下における PAR を、ある地点ではなく分布として実測することで、算定精度を検証する。

3. 解析に使用したデータとその処理

3.1 航空機 LiDAR データ

本研究では多くの樹種から成る街路樹や都市公園が存在する名古屋市久屋大通を解析対象地区として選定した。1m 以下の空間スケールの LAD 分布を推定するために、高密度な航空機 LiDAR データを取得した (飛行コース直下の地上部における点密度が約 20 点/ m^2)。Table 1 に航空機 LiDAR 観測の概要を、Fig. 1 に対象地区の航空写真 (LiDAR 観測と同時に撮影) と飛行コースを示す。観測高度は 350 m であり、レーザーのフットプリントの直径は 17.5 cm である。使用した観測システムの特徴として、距離方向の分解能が従来よりも大幅に改善されていることが挙げられる。スキャナの性能として距離分解能は 0.6m¹⁹⁾であり、

Table 1 Airborne LiDAR observation specifications.

Date: 2010.9.6	Observation system: SAKURA
Altitude: 350 m	(Heliborne system, Nakanihon Air Service)
Point spacing on the ground under the flight course:	
0.25 m (scan direction), 0.2 m (flight direction)	
Scanner: LMS-Q560 (RIEGL)	Wave length: 1550 nm
Ranging accuracy: 20 mm	Laser beam divergence: 0.5 mrad
Range resolution: 0.5 m	Number of targets per pulse: unlimited

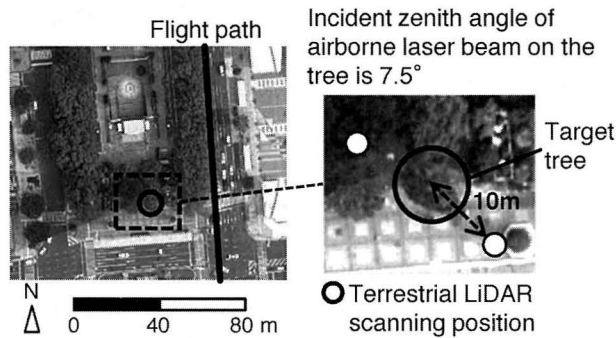


Fig. 1 Aerial photograph of the study site (acquired simultaneously with LiDAR), airborne LiDAR observation flight path, location of the zelkova tree used in the analysis, and terrestrial LiDAR scanning positions.

実際のデータでは 0.5 m 程度ターゲット同士が離れていればそれぞれを識別可能であると報告されている²⁰⁾。Fig. 2 に取得したデータを示す。

航空機 LiDAR の観測範囲の中から、検証対象とする樹木を以下のように選定した。街路樹として一般的に用いられ、また、樹冠下部でレーザーが届きにくくなる部分も含めて評価を行うために、樹種としては盃型の樹冠形状を有するケヤキとした。次に、平均的な形態の特徴を有するケヤキを用いて検証を行なうために、航空機 LiDAR データから得られる樹高や航空機からのレーザーが樹冠を透過して地表面に達する確率について、対象地のケヤキの中から平均的な値をもつ個体²¹⁾を選定した。このケヤキには葉が疎な部分も密な部分も存在することから、葉の粗密のバリエーションを考慮して LAD 分布の推定精度や直達 PAR 透過率の算定精度を検証することができる。選定した対象樹木の位置は Fig. 1 に示す通りであり、天頂付近からレーザーが入射している。Fig. 2 に対象樹木の点群を示す。樹高 10.5 m、樹冠長 7 m、枝張 8.5 m であり、約 1900 点から構成されている。ファースト、中間、ラスト、シングルリターンの割合は、0.41, 0.13, 0.11, 0.35 であり、1つの入射パルスあたりのリターン数は最大で 5 であった。

3.2 フィールドデータ

3.2.1 地上型 LiDAR データ

航空機 LiDAR による LAD 分布の推定精度を検証するために、地上型 LiDAR を使用した。地上型 LiDAR を用いれば、10 m 程度の測定距離の場合、1 cm 以下の点間隔で情報を取得できる。レーザーが十分入射する条件であれば

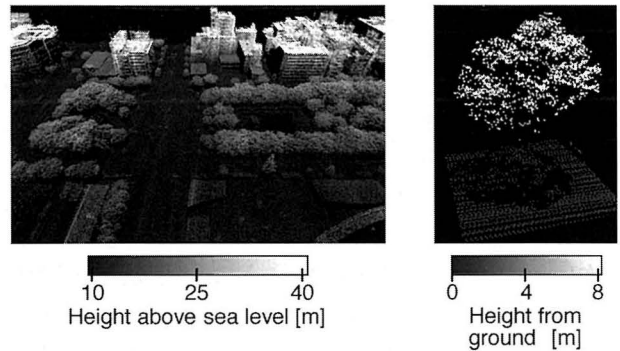
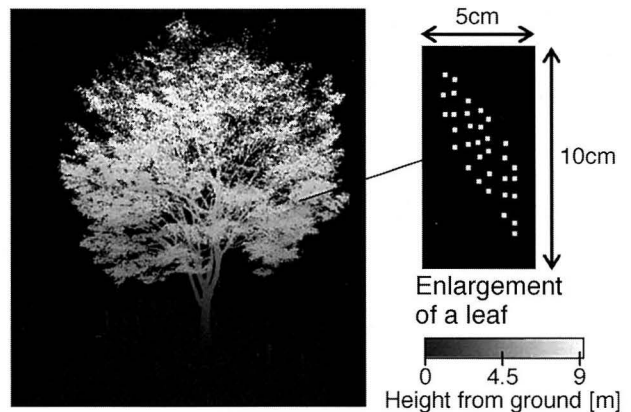

 Fig. 2 Airborne LiDAR data (left : study site, right : *Z. serrata* used in the analysis).

Table 2 Terrestrial LiDAR observation specifications.

Date: 2010.9.2	Scanner: VZ-400 (RIEGL)
Scan angle range: -40–60° (vertical), 360° (horizontal)	
Interval between consecutive laser shots: 0.04°	
Point spacing: 7 mm (vertical plane at 10 m ahead)	
Wave length: 1550 nm	Ranging accuracy: 5 mm
Laser beam divergence: 0.3 mrad	


 Fig. 3 Terrestrial LiDAR data of the used *Z. serrata*.

LAD も高精度に推定できる¹⁶⁾¹⁷⁾。Fig. 1 に示す 2 地点から地上型 LiDAR により対象樹木の測定を行った。Table 2 に測定の概要を示す。10 m 先の鉛直面においても点間隔は 7 mm であり、Fig. 3 のように樹冠の外周部では葉の形状を識別できるデータを取得した。

3.2.2 地上型 LiDAR による LAD 分布の算出

Hosoi and Omasa の手法¹⁶⁾をもとにして、地上型 LiDAR データから LAD 分布を算出した。Hosoi and Omasa は、レーザーの軌跡をトレースすることでレーザーと葉の接触確率を求め、ポイントコードラット法におけるプローブと葉の接触確率と葉面積の関係式 (式 (1)) により LAD を算出している。

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

ΔH : voxel の高さ, θ : レーザーの天頂角, $G(\theta)$: レーザーに垂直な平面への単位面積の葉の投影面積 (葉面の単位法線ベクトルとレーザー方向の単位ベクトルの内積, 各 voxel の平均的な葉の傾斜角と入射レーザーの平均的な天頂角を用いて計算される), N : voxel 内の層の数, $n_i(k)$: k 層において遮蔽されたレーザーの数, $n_p(k)$: k 層を通過したレーザーの数

本研究では, 風の影響を小さくするために, 各 voxel について地上レーザー入射率²²⁾²³⁾ が大きい測定地点による LAD を採用した。風の影響とは, 風により枝葉が揺れることで複数の測定地点のデータが重ならず, 葉面積の過大推定につながることである。地上レーザー入射率とは, N_a/N_i で表される。 N_a は各 voxel への地上からのレーザーの実入射数, N_i は測定装置と対象 voxel の間に葉や枝などの遮蔽物がない場合の入射数である。すなわち, Hosoi and Omasa¹⁶⁾ と同様の計算方法により, 各測定地点のデータから全 voxel の LAD と地上レーザー入射率を算出し, voxel ごとに入射率が高い測定地点による LAD を選択した。筆者らの既往研究²¹⁾ を踏まえ, 航空機 LiDAR による LAD 分布の推定は $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.5\text{m}$ の voxel により行

なったため, 地上型 LiDAR においても同様の voxel サイズで LAD 分布を算出した。式 (1) における $G(\theta)$ の算出に必要な葉の傾斜角は, 樹冠の上部・中部・下部それぞれから選択した葉群について, 地上型 LiDAR 点群から 30~40 枚の葉をランダムに抽出して, 葉を平面と見なしたときの法線の天頂角を測定した。そして, 10 度間隔の頻度分布を求めて $G(\theta)$ の算出に用いた。

地上からのレーザー入射数が減少すると LAD の算出精度が低下する¹⁷⁾²⁴⁾。そこで, 高精度な検証を行なうために, 地上レーザー入射率が 0.8 以上の voxel のみを航空機 LiDAR による結果との比較に使用した²¹⁾。特に, 航空機からの LAD の推定が困難な樹冠下部は, 地上からのレーザーの入射率が高いため, LAD の検証は有利に行うことができる。本研究では, 葉と枝を区別せずに上述の計算を行なったが, 以下のようにして葉が占める voxel のみを抽出して検証に用いた。対象樹木の地上型 LiDAR 点群を手動で葉と枝の点に分離した。そして, voxel 内の点のうち 90% 以上が葉の点である voxel を検証に使用した。

3.2.3 樹冠下における PAR の分布

航空機 LiDAR データから推定した LAD 分布と放射伝達モデルによる直達 PAR 透過率の算定精度を検証するために, 2013 年の 8 月と 9 月に検証対象のケヤキの樹冠下において PAR の分布を測定した。航空機観測 (2010 年 9 月) との間には 3 年の差があり, この間に樹形や葉の量, 分布が変化する可能性のある要因として樹木の成長や剪定が挙げられる。これに対し, 3 年の間に数回現地を視察し, 剪定がなかったことを確認している。また次の理由から, 本研究の結論に影響する程の成長による変化はなかったと判断した。3.2.1 で述べた地上型 LiDAR データから求めた樹影形状と, 実測から得られた樹影形状の間に明確な差は見られなかった。二時期で複数の地点から撮影した写真を二値化して空隙率を比較したところ, 2013 年の方が空隙率が小さかったが, その差は平均で 1.3%, 最大でも 2.2% であった。

樹冠下のセンサに入射する PAR には, Fig. 5 に示す成分が含まれている。対象樹木のみ影響を考慮して検証を行なうために, 樹冠を通過してセンサに入射する PAR と樹

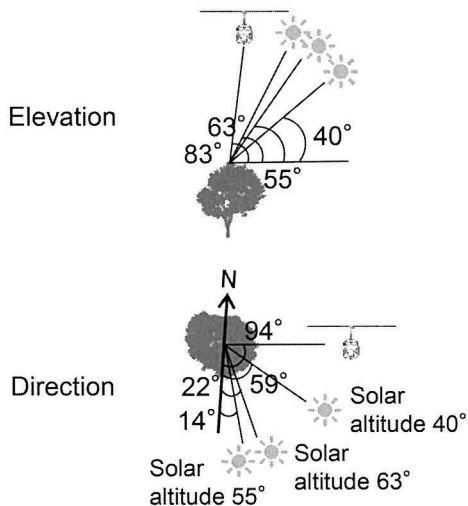


Fig. 4 Solar altitude, solar direction, and incident angle of airborne laser beam.

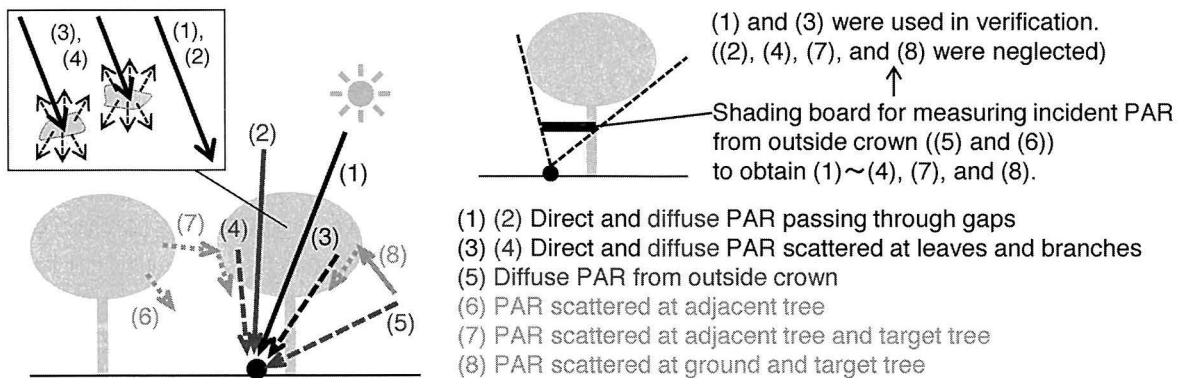


Fig. 5 Components of incident PAR on the sensors.

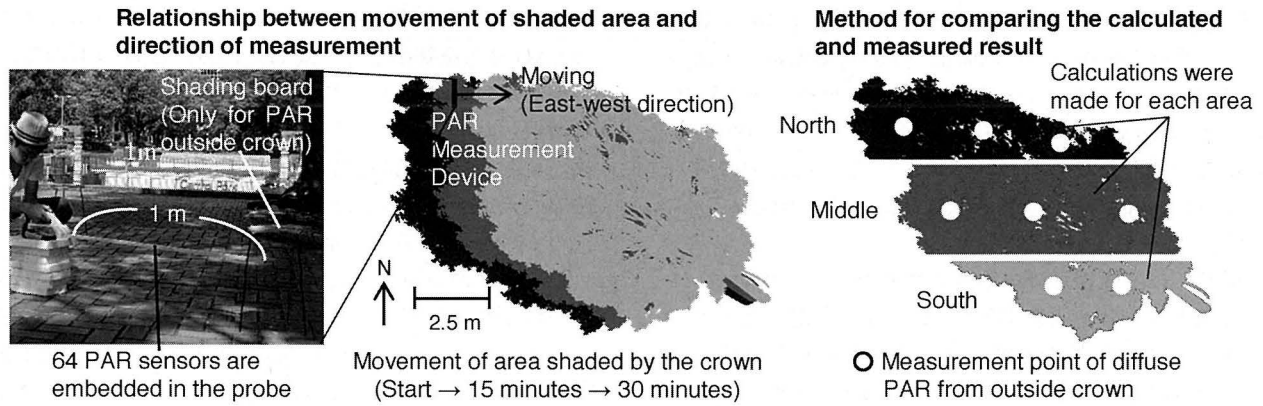


Fig. 6 Measurement method of PAR distribution under a single tree.

冠の外から入射する PAR を分離した。この分離は、測定点から見て樹冠を隠す遮蔽板 (Fig. 5) を用いて、樹冠外から入射する PAR を測定することで行なった。遮蔽板は地上型 LiDAR データから作成した。Fig. 5 に示す樹冠を通過した成分のうち、周囲の樹木や地表面で散乱した後に対象樹木で散乱した成分 ((7), (8)) は、PAR の直達成分 ((1), (3)) に比べて小さく、快晴日であれば PAR の天空散乱成分 ((2), (4)) も同様に小さいと考えられるため、測定結果を樹冠を通過した直達 PAR によるものとして検証に使用した。この測定値を、樹影の外で測定した直達 PAR の強度で除することで、直達 PAR 透過率を求めた。

樹影には、樹冠の空隙を通過して直接 PAR が照射する部分と、枝葉の影になっている部分が存在する。通常の光量子計では点での測定となるため、そのような分布を考慮して樹冠下の PAR の量を測定することは困難である。そこで、実測には植物群落 PAR 分布測定装置 (SunScan, Delta-T 社製, Fig. 6) を適用した。この測定装置は 1m のプローブを有しており、64 個の PAR センサが埋め込まれている。プローブと直交する方向に移動することで PAR の分布の測定を可能とした。本研究では 0.2m 間隔で移動して測定を行った。航空機 LiDAR では樹冠下部の LAD の推定精度が低いことが推察され、太陽高度が低くなるほど、LAD の誤差が PAR 透過率の算定精度に及ぼす影響が大きくなると考えられる。そこで、検証のために太陽高度が異なる条件で実測を行なった。夏季快晴日において、太陽高度 (測定開始時刻と測定終了時刻の中間の時刻における高度) が 63° (2013 年 8 月 27 日), 55°, 40° (2013 年 9 月 18 日) の時間帯に実測を行った。Fig. 4 に太陽高度、太陽方位と航空機からのレーザー入射角の関係を示す。

1 つの時間帯における測定には約 30 分の時間を要した。その間には、樹影の移動と伸長によって地表面における PAR 分布に変化が生じるため、ある 1 つの太陽高度・方位のみを対象に計算を行うと、実測と比較することができない。そこで、樹影を、北側・中央・南側の 3 つの領域に分けてそれぞれで計算を行い実測と比較することとした (Fig. 6)。すなわち、各領域の測定開始と測定終了の中間の時刻

において計算を行なった。各領域の測定は 10 分以内に完了したため、計算と実測の差は 5 分以内であり、樹影の移動と伸長の影響は無視できるとした。

Fig. 6 には樹冠外からの PAR を測定するための遮蔽板を用いた測定地点も示している。1 つの領域に対して、遮蔽板なしの測定を行い、次に遮蔽板ありの測定を行った。そして、次の領域の測定に移った。また、各領域における測定の前後に、一般的な直達日射計と同様の開口角 5° に相当する大きさの遮蔽ボールを用いて、樹影の外で直達 PAR の強度を測定した。そして、式 (2), (3) により直達 PAR 透過率を求めた。なお、天空 PAR の割合は、太陽高度 63°, 55°, 40° のときにそれぞれ 0.26, 0.18, 0.21 であった。

$$PAR_{pass} = PAR_{total} - PAR_{out} \quad (2)$$

$$\tau_{directPAR} = PAR_{pass} / PAR_{incident} \quad (3)$$

PAR_{pass} : 樹冠を通過してセンサに入射した PAR, PAR_{total} : 遮蔽板なしの場合の PAR の測定値, PAR_{out} : 遮蔽板ありの場合の PAR (樹冠外から入射した PAR) の測定値 (PAR_{total} の測定点から最も近い、同領域内の遮蔽板ありの測定点の値を使用), $\tau_{directPAR}$: 直達 PAR 透過率, $PAR_{incident}$: 樹冠に入射した直達 PAR (各領域における測定の前後に樹影の外で測定した直達 PAR の平均値)

4. 手 法

4.1 航空機 LiDAR データによる LAD 分布の推定

4.1.1 既往研究の手法

LiDAR データから LAD 分布を推定する方法として、Hosoi and Omasa の手法¹⁶⁾ が挙げられる。この手法では、樹冠の点群を LiDAR の空間分解能と同程度の空間スケールの voxel (LAD 分布を表現する voxel と区別するため、本研究では subvoxel と呼ぶ) に分割し、レーザーの軌跡をトレースする。各 voxel の各層 (式 (1), 層の数は voxel の高さ ÷ subvoxel の高さ) において、レーザーを遮蔽した subvoxel とレーザーが通過した subvoxel の数をカウント

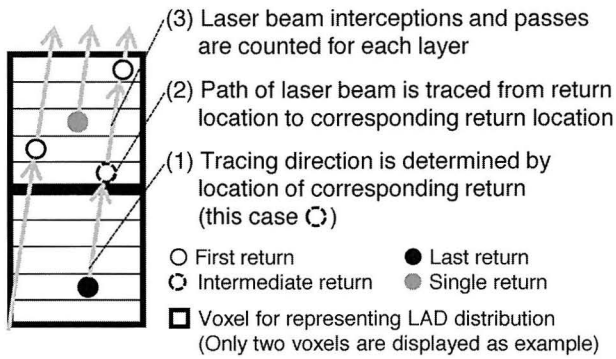


Fig. 7 Schematic of the present method for estimating LAD distribution.

し、式 (1) により LAD を算出する。

地上型 LiDAR を用いれば、高精度に LAD 分布を推定できることが示されている¹⁶⁾¹⁷⁾。しかしながら、航空機 LiDAR では、樹頂点から高さ 1 m の範囲以外は誤差が大きい¹⁰⁾。これはファーストリターンとシングルリターンのみで構成されるデータを用いていることが原因と考えられる。またトレースを行う際に、リターンを引き起こした入射レーザーの軌跡をトレースしているレイが、リターンを含む subvoxel に当たらない可能性もある。Song et al.¹¹⁾ は、リターンの位置から航空機の方へトレースを行い、経路上の voxel においてレーザーの遮蔽をカウントしているが、ラスト、中間リターンからもトレースを行うと 1 つのレーザーをダブルカウントすることになるとして、これらは用いていない。また、航空機の飛行コースとレーザーのスキャン方向が垂直であると仮定していることも誤差の要因となる。各レーザーの軌跡の情報があれば、ラスト、中間リターンも考慮して、正確にレーザーの軌跡をトレースできる可能性がある。レーザーの軌跡の情報は、飛行コースや機体の傾きを記録した SBET (Smoothed Best Estimated Trajectory) (例えば、Korpera et al.²⁵⁾) により得られる。

4.1.2 本研究の手法

本研究では、通常ユーザーが入手する情報である点データのみからラスト、中間リターンも考慮しながらレーザーの軌跡をトレースし、各 voxel におけるレーザーの遮蔽と通過を再現することで、LAD 分布を推定する手法を用いる。LAD の算出式は式 (1) と同様である。航空機 LiDAR データから検証対象樹木の点群を抽出し、LAD 分布を表現する voxel に分割した。本研究では、葉が含まれるにも関わらず航空機 LiDAR のリターンが含まれない voxel が少なくなるように、筆者らの既往研究²¹⁾ の結果から $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ の voxel を用いた。また、各 voxel 内の層の厚さは、中井らの既往研究¹⁰⁾ と同様に 0.1 m とした。式 (1) における $G(\theta)$ の算出に必要な葉の傾斜角分布は、地上型 LiDAR データから求めた頻度分布 (3.2.2) を使用した。 $n_i(k)$ は層内の点数であり、 $n_p(k)$ は層を通過したレー

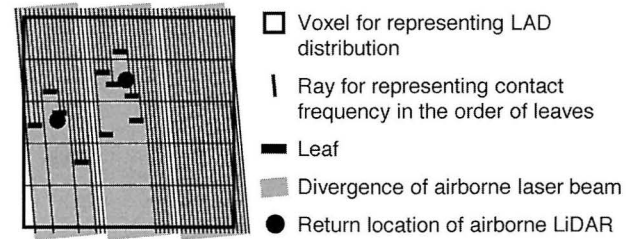


Fig. 8 Schematic of relationship between contact frequency in the order of leaves and airborne LiDAR data.

ザーの数である。後者は以下のようにレーザーの軌跡をトレースすることで求めた。

Fig. 7 に本研究の手法の模式図を示す。ラストリターンまたは中間リターンの位置から、1 つ前に記録された中間リターンまたはファーストリターンの位置までトレースを行った。1 つの入射パルスに対する複数のリターンの位置座標は連続して記録されるため、データファイルからあるリターンに対する前後のリターンを探すことができる。これにより正確な方向へのトレースが可能となる。ファーストリターンやシングルリターンの位置からはセンサへ向けてトレースを行った。ファーストリターンについては、次の中間またはラストリターンによりトレースの方向を決定した。シングルリターンについては、前後のリターンがないため、ファーストリターンのトレース方向の平均値を用いた。

式 (1) は葉の空間スケールにおける光線と葉の接触を考えたときに正確に成り立つが、航空機 LiDAR の footprint はそれよりも大きい (本研究では 17.5 cm)。すなわち、航空機 LiDAR の分解能と葉の空間スケールにおける光線と葉の接触確率の関係は Fig. 8 のようになる。ポイントクラウド法では、プローブの挿入間隔が葉の空間スケールより大きくても葉群の特徴を捉えることができることを考慮すると、航空機 LiDAR によっても同様のことが可能であると考えられる。また、式 (1) は死角がないことを前提としているが、航空機 LiDAR では、シングルリターンやラストリターンが生じるとそれよりも下部の情報は得ることができない。ある層においてレーザーが到達する場所としない場所で同じような葉の分布であれば、レーザーが到達しないことの影響は小さいため、ある程度のレーザーの入射数が確保されていれば航空機 LiDAR が LAD の推定に適用できると考えた。本研究では、葉と枝の点群を区別せずに用いた (ただし 3.2.2 で述べたように、LAD の推定精度の検証には葉の voxel のみを用いている)。葉と枝は傾きが異なるものの、直達 PAR 透過率の算定に対する影響は小さいと考えたためである。蒸散効果を評価するためには、PAR が葉と枝のどちらで吸収されたのかが重要になるため、枝も考慮した樹木の 3 次元形態情報の推定は今後の課題とする。

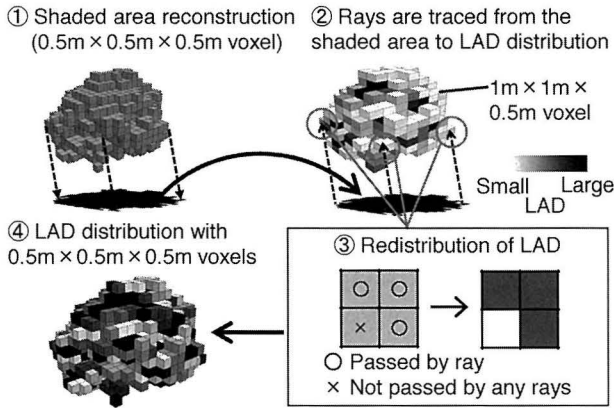


Fig. 9 Method for improving spatial resolution of external geometry of the crown.

4.1.3 LAD の補正

前項の推定結果においては、葉を含むにも関わらず航空機 LiDAR のリターンを含まない voxel (航空機 LiDAR により未抽出の voxel) も存在している。航空機からのレーザーと日射の入射方向が近い場合には、未抽出の voxel には日射も入射しにくいいため、未抽出の voxel が直達 PAR 透過率の算定精度に及ぼす影響は小さいと考えられる。ここでは、入射方向が異なる場合にも対応するために LAD の補正を行なった。中心 voxel と同一高さの 8 近傍 voxel のうち枝葉を含む voxel の数と、中心 voxel に枝葉が含まれる確率の関係を、地上型 LiDAR データを用いて分析した結果から、以下のような補正方法を用いた。同一高さの 8 近傍 voxel のうち 5 個以上の voxel で航空機 LiDAR による LAD が 0 より大きい場合に、中央の航空機 LiDAR のリターンを含まない voxel に、周囲の voxel の LAD 推定値の平均値を与えた。

4.1.4 樹冠外周部の高分解能化

日射遮蔽効果の評価においては、樹冠の投影面の再現も重要となる。voxel サイズが大きくなると樹冠の投影面の再現精度は低下するが、筆者らの検討結果¹⁸⁾によると、voxel サイズが 0.5m 以下であれば投影面の再現精度の変化は小さい。また、本研究の航空機 LiDAR データに対して、0.5m×0.5m×0.5m の voxel を用いると、未抽出の voxel が増加するために LAD 分布の推定は困難であるが、樹冠の投影面は高精度に再現することができる¹⁸⁾。そこで、Fig. 9 の方法を用いて、樹冠の外周部のみの voxel サイズを 1m×1m×0.5m から 0.5m×0.5m×0.5m に高分解能化した。樹冠の航空機 LiDAR 点群を 0.5m×0.5m×0.5m の voxel に分割し、ある太陽高度・方位を想定して投影面を計算した。その投影面上に 4.1.2 で推定した 1m×1m×0.5m voxel の LAD 分布を配置し、投影面 (Fig. 9 ①で樹冠の voxel が投影されたメッシュの中心点) から太陽の方向へレイをトレースした。そして、1m×1m×0.5m voxel を 4 つの 0.5m×0.5m×0.5m voxel に分割し、その中でレイが通過した voxel に 1m×1m×0.5m voxel 内の葉面積を再

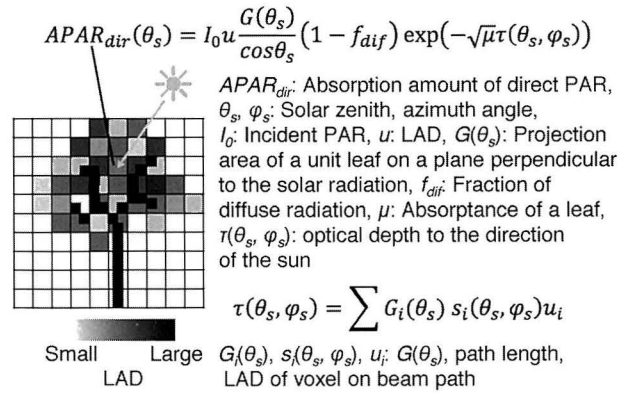


Fig. 10 Schematic of the radiative transfer model used in this study (FLiESvox³⁾¹²⁾).

分配した。これは原理的にも妥当な再分配方法である。太陽高度 30°, 60°, 90°, 太陽方位 45°おきに上記の計算を行なった。

4.2 使用した植生放射伝達モデル

4.1 において推定した LAD 分布をもとに、直達 PAR 透過率を求めるための放射伝達モデルとして、Kobayashi and Iwabuchi によるモデル (FLiES (Forest Light Environmental Simulator))¹²⁾ の voxel バージョン (FLiESvox)³⁾ を用いた。FLiES はモンテカルロ法を用いた放射伝達モデルであり、大気と植生キャノピーを結合して解析することが可能である。データの入力や計算も容易である。樹木形状は回転楕円体や円錐などで表現されており、樹冠内部はそれぞれ一定の密度の葉の領域と枝の領域から構成されている。これに対し FLiESvox は、各 voxel に任意の LAD を与えることができる。

Fig. 10 に FLiESvox の概念図を示す。Lambert-Beer 則をもとにして各 voxel の PAR の吸収量が計算される。対象 voxel と光源を結ぶ直線上の voxel を考慮して、対象 voxel に対する光学的厚さを求めており、葉での散乱成分は Goudriaan により提案された式²⁶⁾ で近似されている (図中 APAR の式における exponential の部分において、光学的厚さに葉の PAR 吸収率の平方根 $\sqrt{\mu}$ がかかっている)。幹や枝の voxel は葉の voxel とは別に透過しない voxel として設定することができる。G 関数を求めるための葉の傾斜角の分布関数は spherical, planophile, erectophile 分布²⁷⁾ から選択する仕様になっているが、FLiESvox はオープンソースであるため、より実際に近い分布関数を与えることも可能である。2 章で述べたように、本研究では樹冠の空隙を通過する成分を重視して検証を行なうために、PAR を対象としている。今後、FLiES のアルゴリズムを voxel ベースの計算に拡張することで、近赤外域も含めた日射の全波長域に対して樹冠内での散乱も考慮した評価を行ってゆく。

4.3 直達 PAR 透過率の算定

4.1 で推定した対象樹木の LAD 分布と FLiESvox を用いて直達 PAR 透過率を算定した。4.1.3 で示した LAD の補

Table 3 Input parameters for radiative transfer model.

Parameter	Source	Value
LAD	Airborne LiDAR	Estimated LAD for each voxel
Leaf reflectance and transmittance of PAR	Reflectance and transmittance spectral by spectral radiometer and solar spectral model (Bird ²⁸⁾)	0.07, 0.10
Leaf inclination angle distribution	Elliptical distribution acquired by terrestrial LiDAR	$\varepsilon = 0.984$, $\theta_m = 44.4^\circ$
Woody area density and woody reflectance	No woody area was assigned. All airborne LiDAR points are used as leaf points.	-
Incident PAR	This parameter did not affect results because transmittance was used for the verification. However, measured value was used.	Measured value
Fraction of diffuse PAR	Direct PAR was used for the verification.	0
Solar zenith and azimuth angle	Calculation using latitude and longitude of the target tree	Shown in Fig. 4

正を行った場合と行なわなかった場合それぞれを用いて算定を行なった。樹冠を通過した成分を対象としているため、周囲の樹木や構造物は再現しなかった。以下の理由から、PARの実測値に周囲のビル群からの反射が及ぼす影響はないと判断した。対象樹木からビル群までは70m以上離れており、検証対象の時間帯においては、ビル群からの直達PARの反射が対象樹木の樹冠を通過することはない。天空PARについては南東側の建物壁面からの反射が考えられるが、この壁面は実測を行ったときの太陽高度・方位に対しても太陽を背にしており、高輝度の天空PARを反射することではなく、この壁面からの反射成分は無視できる。

Table 3に入力パラメータの一覧を示す。葉のPAR吸収率は、葉のPAR領域の分光吸収率とBirdモデル²⁸⁾により再現した夏季晴天日の分光放射スペクトルを用いて算出した。分光吸収率は、筆者らが単木樹木の熱・水収支のモデル化のために実験圃場において蒸散量計測を行っているケヤキ²⁹⁾³⁰⁾を対象に、分光放射計(FieldSpec 4, ASD社製)により測定した値を用いた。これは検証対象のケヤキとは異なるケヤキに対する測定値であるが、検証対象のケヤキも吸収率を測定したケヤキも乾燥ストレスなどを受けている様子は見られなかったため、分光吸収率の差は小さいと考えられる。葉の傾斜角の分布は、地上型LiDARにより得た頻度分布(3.2.2)をKuuskらが提案した楕円分布関数³¹⁾で近似した結果を入力した。4.1.2で述べたように、葉と枝は傾きが異なるものの直達PAR透過率の算定に対する影響は小さいと考え、本研究では樹冠の航空機LiDAR点群を全て葉の点として扱っているため、枝のvoxelは設定しなかった。3.2.3で述べたように、樹冠を通過した天空PARは直達PARに比べて大幅に小さいことから無視できると考えて、直達PAR透過率を算定して検証に用いるため、直達PARのみを計算対象とした。太陽高度と方位は、Fig. 6に示す各領域の測定開始時刻と終了時刻の中間の時刻のものを、対象地の緯度・経度から算出した。

5. 結果と考察

5.1 検証に用いた地上型LiDARの測定結果

高精度な検証を行なうために、地上レーザー入射率が

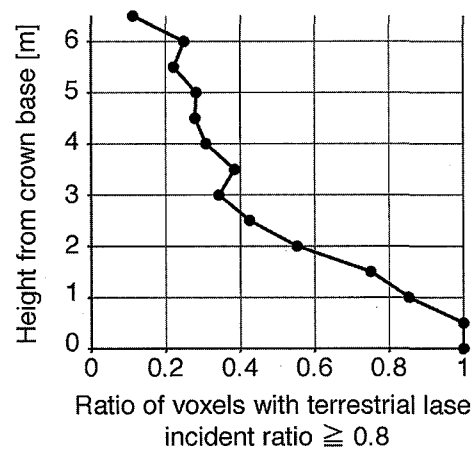


Fig. 11 Ratio of voxels used in the validation (terrestrial laser beam incident ratio ≥ 0.8) to all voxels at each height.

0.8以上のvoxelのみを航空機LiDARとの比較に用いることとした(3.2.2)。Fig. 11に地上レーザー入射率が0.8以上のvoxelの割合を示す。樹冠長が7m、voxelの高さが0.5mであるため、14の層に分けて各層における割合を示している。樹冠上部ほど地上からのレーザーが届きにくいいため、割合が低下している。しかしながら、最上層を除くと樹冠上部であっても20~30%のvoxelは検証に使用できることが分かる。樹冠上部では、航空機からのレーザーの入射数のvoxel間のばらつきが小さいと考えられるため、この20~30%のvoxelで検証が可能であるとした。樹冠下部では、航空機からのレーザーの入射数のばらつきが大きいため検証が重要になるが、Fig. 11に示すように多くのvoxelが検証用に確保されていることから、樹冠下部における検証も可能である。

Fig. 12にLAD分布の推定に用いた葉の傾斜角の頻度分布を示す。同図には、放射伝達モデルへの入力に用いた楕円関数による近似結果も示している。40°~50°をピークに対照的な分布をしており、下條らが都市部のケヤキ6~10本を対象に実測した結果³²⁾と近い分布となっている。本研究では葉の傾斜角を地上型LiDARデータから求めたが、毎回地上型LiDARによる測定が必要であることは実用的とは言えない。そこで、Ryu et al.³³⁾のようにデジタルカ

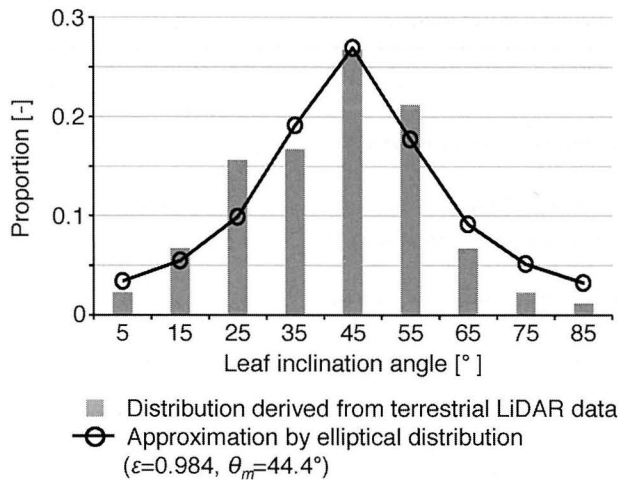


Fig. 12 Distribution of leaf inclination angle of the used *Z. serrata* derived from terrestrial LiDAR data and its approximation by elliptical distribution used in radiative transfer model.

メラを用いた方法により、対象地のいくつかの樹木を対象に傾斜角分布を測定することが有効である。そのような測定も困難な場合は、spherical, erectophile, planophile 分布²⁷⁾やベータ分布³⁴⁾、楕円分布³¹⁾などの近似の有用性が高いと考えられる。そのためには、Pisek et al.³⁵⁾のように樹種ごとに最適な近似モデルやモデルのパラメータが整備されることが求められる。

5.2 LAD 分布の推定精度

5.2.1 航空機 LiDAR と地上型 LiDAR による LAD 分布の比較

4.1.2 で推定した LAD 分布の精度を、地上型 LiDAR による LAD 分布 (3.2.2, 5.1) を用いて検証した。Fig. 13 に航空機 LiDAR による LAD と地上型 LiDAR による LAD の散布図を示す。(2), (3) は本研究の手法による結果を示しており、(2) はファースト、ラスト、シングルリターンを用いた場合の結果、(3) は中間パルスも含めた全てのリターンを用いた結果である。(1) には比較用に、ファーストリターンとシングルリターンを用い、本研究と同様にリターンの位置の情報のみから推定を行なう Song et al.の手法¹¹⁾を用いた場合の結果を示している。図中の 1 つ 1 つのシンボルが $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ voxel の結果を表している。樹冠上部と下部では結果の傾向が異なると考え、分けて表示している。

Fig. 13 (1) に示す Song et al.の手法を用いた結果では、樹冠上部においても推定値がばらついており、 R^2 は 0.68 である。過大推定となっているのは、ファーストリターンよりも下の領域において、実際にはレーザーが通過している部分がカウントされず、レーザーの遮蔽のみがカウントされたためである。樹冠下部では、ファーストリターンやシングルリターンを含む voxel がほとんど存在しないため、推定値が 0 の voxel が多く、 R^2 は 0.12 である。このことから、

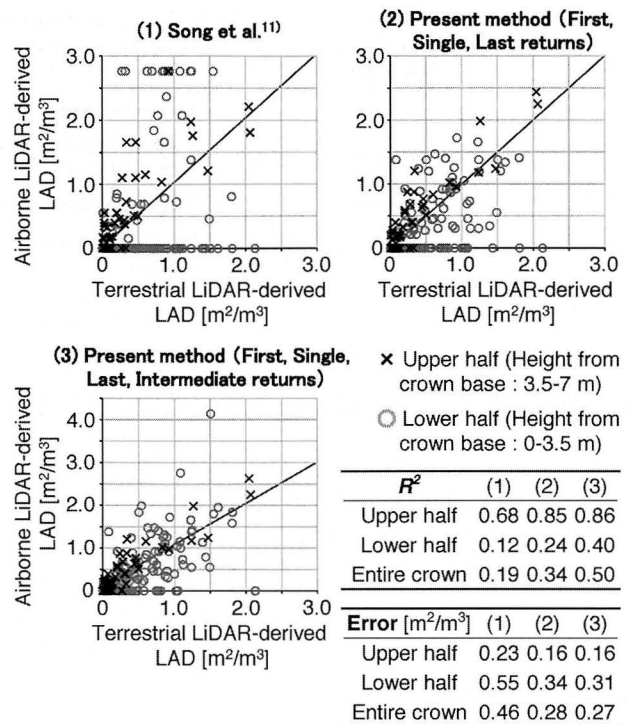


Fig. 13 Scatter plot of LAD estimated by airborne LiDAR and that calculated by terrestrial LiDAR.

ファーストリターンとシングルリターンのみを用いることは、直達 PAR 透過率の算定に対して不利になると言える。これに対し、ラストリターンを加えて本研究の手法で推定した結果 (Fig. 13 (2)) では、樹冠上部において多くの voxel が 1:1 ラインに近づいている。 R^2 は 0.85 である。樹冠下部においてはばらつきが見られるものの、絶対誤差の平均値は $0.55\text{ m}^2/\text{m}^3$ から $0.34\text{ m}^2/\text{m}^3$ に改善された。次に、中間リターンも含めた結果 (Fig. 13 (3)) においては、中間リターンのみを含んでいた voxel の推定値が 0 でなくなったこともあり、特に樹冠下部における相関性が改善され R^2 は 0.4 となった。以上の結果から、ラストリターンと中間リターンを用いた本研究の手法の有効性が確認できる。

本研究の手法においても過大推定となっている voxel が存在する理由としては、全てのリターンを 1 つのレーザーの遮蔽と見なしていることが挙げられる。すなわち、式(1)においてリターンの種類によらず $n_i(k)$ に 1 を加えていることである。実際には、LAD が小さい voxel ほどレーザーの反射強度が小さいと考えられるため、今後は反射強度を考慮した手法について検討する必要がある。Fig. 13 (3) において地上型 LiDAR による LAD が 1 や 1.5 の voxel において極端に過大推定されている voxel が存在する。これは、voxel に入射する航空機からのレーザー数が少なく、かつ入射したレーザーの多くが中間リターンを返したためである (式(1)における $n_p(k)$ が、より多くのレーザーが voxel に入射する場合に比べて小さく算出されている)。反射強度を考慮することでこのような誤差も小さくすることができると考えられる。

5.2.2 推定誤差とレーザー入射数の関係

Hosoi and Omasa¹⁷⁾ は地上型 LiDAR による LAD 分布の推定の際に、推定誤差と voxel へのレーザーの入射数の関係を分析している。また、航空機 LiDAR と地上型 LiDAR を用いた LAD 分布の推定において、誤差を説明する指標として、レーザーのフットプリントが覆う面積や対象 voxel に到達するまでのレーザーの遮蔽などを考慮したもの²⁴⁾を提案している。葉の空間スケールよりもフットプリントの面積 × レーザーの入射数が同程度であっても、レーザーの入射数が多い方が高精度に LAD を推定できると考えられる。そこで本研究では、LAD の推定誤差と voxel への航空機からのレーザーの入射数の関係を求めた (Fig. 14)。入射数が 0-3 のクラスでは推定誤差が大きいが、8-11 のク

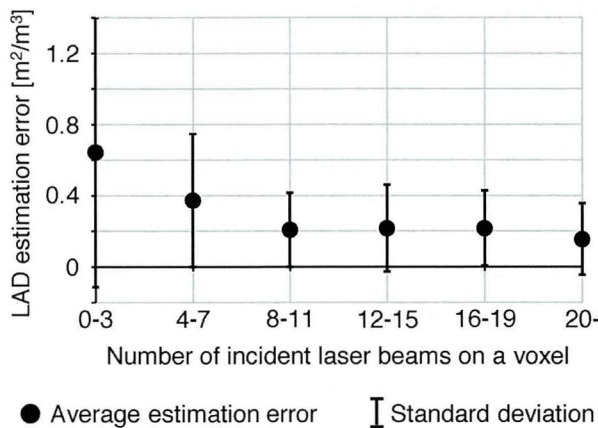


Fig. 14 Variation of LAD estimation error according to number of incident laser beams on a voxel.

ラスへ向けて小さくなって行き、それ以上の入射数では誤差の変化は小さい。このことから、10 以上のレーザー入射数が推定精度を確保するための目安になると言える。また、対象としたケヤキと同様の葉群の構造を有する広葉樹においては、樹冠内での入射数の分布を調べることで LAD の推定精度を予測することができる。

5.3 直達 PAR 透過率の算定精度

Fig. 15 に、直達 PAR 透過率の実測結果と、航空機 LiDAR により推定した LAD 分布と放射伝達モデルを用いて算定した結果を示す。4.1.3 で示した LAD の補正を行ったものを用いた結果を示している。また、比較用に Song et al.の手法¹¹⁾により推定した LAD 分布を用いた結果も示している。算定結果における 1 メッシュのサイズは 0.5m である。実測結果においては 1 本の縦のラインの幅が 0.2m であり、樹冠の空隙を通過して直接 PAR が照射する部分と、枝葉の影になっている部分の分布を取得できていることが分かる。太陽高度 63° の場合も 40° の場合も、本研究の手法による LAD 分布から算出した透過率の分布は実際の分布の傾向をよく再現している。例えば 63° の場合は、北から東にかけて透過率が低い領域があることやそれに比べ西側の透過率が高いことである。Song et al.の手法による LAD 分布を用いた場合は、LAD が過小推定されているために、樹影全体として透過率が過大推定されている。ファースト、シングルリターンのみを用いていることから樹冠下部の再現精度が低いこと、特に太陽高度が 40° の場合に過大推定になる傾向が強い。

Table 4 に各太陽高度に対する樹影全体の透過率の計算結果と実測結果を示す。樹影全体の透過率とは、計算においては樹影内の全てのメッシュの透過率の平均値、実測に

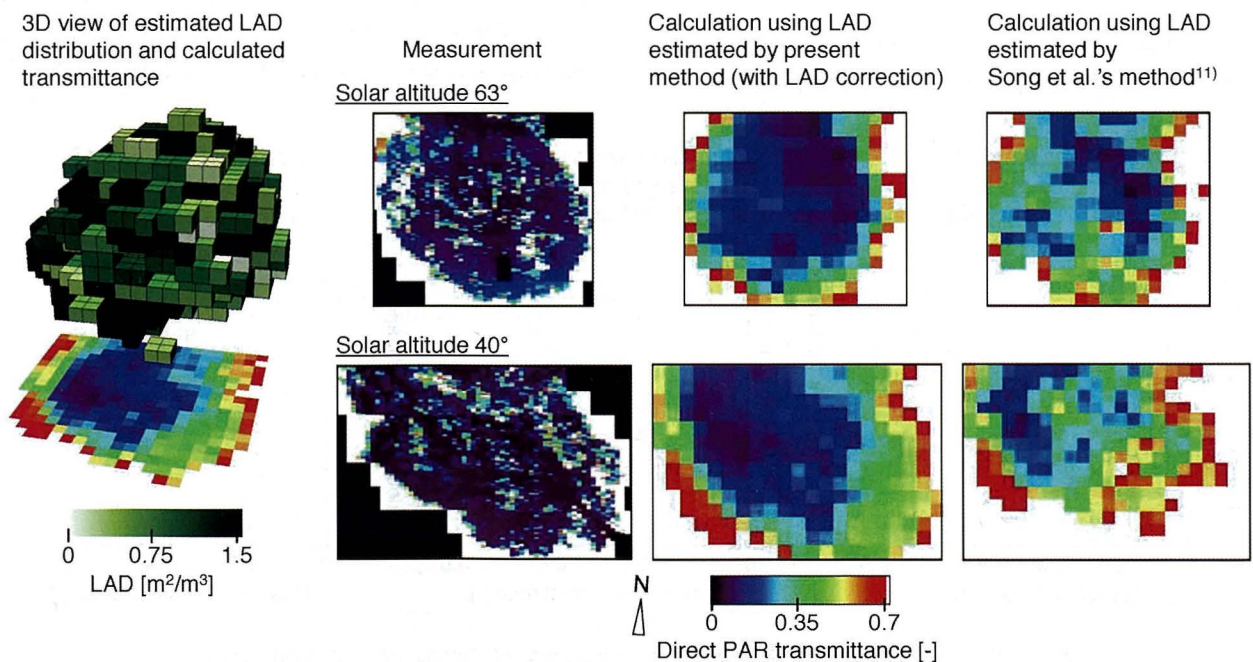


Fig. 15 Calculated and measured direct PAR transmittance.

おいては樹影内の全ての測定値の平均値である。また、Fig. 16 に Fig. 6 に示す各領域（北側・中央・南側）における計算値と実測値の関係を示す。太陽高度 63°の時間帯において、北側の領域の測定中に入射 PAR の変動が見られてため、北側の領域は解析から除いた。これは小さな雲によるものであり、他の領域の測定時には影響していない。ここでは、3.1.3 で述べた LAD の補正の影響を調べるために、補正なしの場合の結果も示している。

補正ありの場合の樹影全体での誤差は、太陽高度 63°の場合に 0.03、他の高度の場合に 0.06 であり、日射遮蔽効果の評価のためには十分な精度であると言える。各領域の結果を見ると、太陽高度 55°の場合において、南側の領域で大きく過大推定されている。これは樹冠の形態の特徴によるものであり、樹冠下部に航空機からのレーザーが到達しない一方で樹冠の空隙を通して太陽の方向からはよく見えていた部分が存在しており、その部分が樹影の南側に投影されたためである。しかしながら、中央と北側の領域では誤差が小さい。太陽高度 40°の場合、中央と南側の領域において誤差が生じている。これは直達 PAR が低い太陽高度で南東から入射するために、樹冠下部が南東側に投影されたことによるが、大きな誤差にはなっていない。LAD の補正なしの場合、太陽高度 63°においては計算値と実測

値がよく一致している。しかしながら、太陽高度が低くなると 0.1 ほどの誤差が生じている。この結果は、航空機からのレーザーの入射方向と日射の入射方向の差が大きくなると、航空機からのレーザーが到達しにくく LAD の推定精度が低い樹冠下部の影響が無視できないことを示している。ファースト、シングルリターンのみを用いた Song et al. の手法¹¹⁾ による LAD 分布を用いた場合、太陽高度が 55°と 40°の場合 0.15 以上の誤差が生じている。太陽高度 63°では誤差が小さいが、Fig. 13 に示すように樹冠上部における過大推定と下部における過小推定が相殺した結果であり、原理的な妥当性はない。

以上より、本研究の LAD の推定手法と LAD の補正方法を用いることで太陽高度によらず高精度に直達 PAR 透過率を算定可能である。Fig. 15 や Fig. 16 に示すように、LAD が高く透過率が低い部分も含めて、樹冠下の直達 PAR 透過率の分布を再現できたことから、本研究の手法が葉が密な樹木も含めて透過率の算定には適用できると考えられる。ただし、本研究では平均的な葉の密度や樹高を有するケヤキを対象に検証を行なっているため、より葉が密になった場合の LAD の推定精度については、今後検証が必要である。また、今回は対象樹木の地上型 LiDAR データの分析に基づく LAD の補正方法を用いているため、樹冠の構造が異なる樹木に対する補正方法の適用性の検討も今後の課題となる。

6. ま と め

マルチリターン航空機 LiDAR データと植生放射伝達モデルを用いて樹木の日射遮蔽効果を計量化する方法について検討を行なった。まず、ファースト、シングルリターンに加えてラスト、中間リターンを考慮して LAD 分布を推定する手法を示し、地上型 LiDAR を用いることで推定精度の検証を行なった。次に、推定した LAD 分布を放射伝

Table 4 Quantitative comparison between calculated and measured direct PAR transmittance.

Solar altitude	Measured	Calculated (LAD by present method with correction)	Calculated (LAD by present method without correction)	Calculated (LAD by Song et al.'s method)
63°	0.30	0.27	0.31	0.37
55°	0.24	0.30	0.33	0.40
40°	0.28	0.34	0.38	0.44

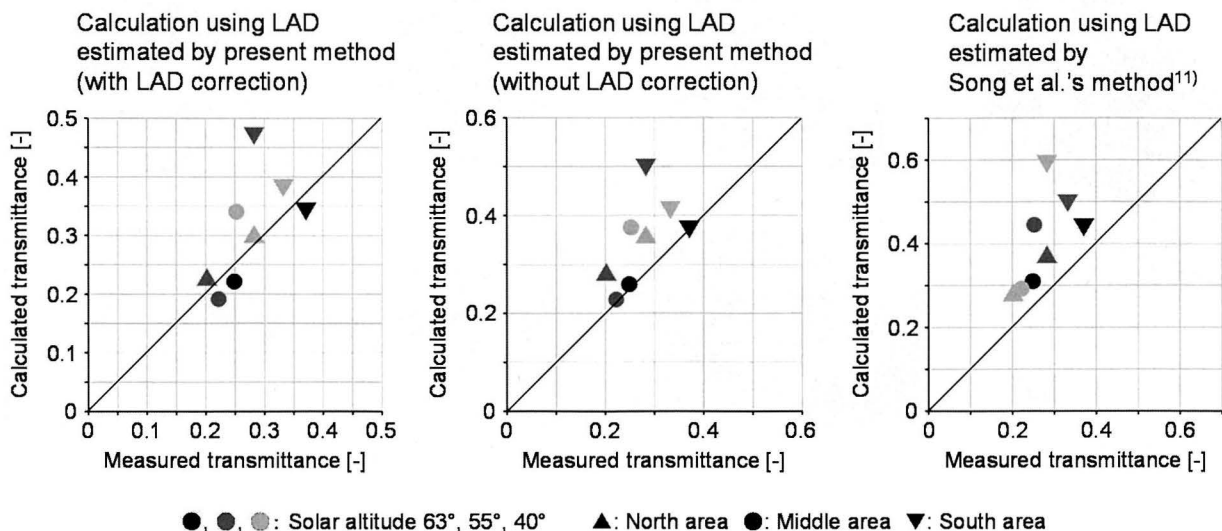


Fig. 16 Scatter plot of calculated and measured direct PAR transmittance for each region in the shaded area (Fig. 6).

達モデルに適用して直達 PAR の透過率を算定し、実測値と比較することで精度検証を行なった。得られた知見は以下の通りである。

ファースト、シングルリターンのみを用いる既往研究の手法により LAD 分布を推定した場合、樹冠上部であっても、主に過大推定となる誤差が生じた。本研究の手法を用いた場合、平均的な葉の密度や樹高を有するケヤキにおいて、樹冠全体、特に樹冠下部において推定精度を改善できることを確認した。本研究の手法はリターンの位置の情報のみを用いるため計算も容易である。また、voxel へのレーザーの入射数と LAD の推定誤差の関係から、10 以上の入射レーザー数が精度を確保するための目安となる。

推定した LAD 分布に対し、周囲の voxel の LAD をもとにして航空機からのレーザーが届かない voxel の LAD の補正を行い、放射伝達モデルの入力条件として用いることで、太陽高度によらずに 0.05 前後の誤差で直達 PAR の透過率を算定可能であることを示した。LAD が高く透過率が低い部分も含めて樹冠下の直達 PAR 透過率の分布を再現できたことから、本研究の結果の適用範囲は、対象とした平均的な葉の密度の樹木に限らないと考えられる。ただし、葉が密な樹木における LAD の推定精度に関しては今後検証が必要である。LAD の補正を行わなかった場合には、太陽高度が低くなると誤差が生じた。この結果は、航空機からのレーザーの入射方向と日射の入射方向に差がある場合、航空機からのレーザーが届きにくい樹冠下部の LAD 推定誤差の影響が表れることを示している。

これらは、単木の樹冠構造や林分構造の把握、またその下の光環境の解析にとって有用な結果となり得る。今後は、航空機 LiDAR の反射強度を考慮した LAD の推定手法について検討を行い、樹冠構造や葉の密度が異なる樹木も対象に検証を行なってゆく。また、推定した LAD 分布と放射伝達モデルを用いた方法により、街区スケールにおける樹木の日射遮蔽効果の評価を行ってゆく。

謝 辞:本研究における地上型 LiDAR による測定にはリーグルジャパン株式会社の協力を得た。また、放射伝達モデルを用いた解析には小林秀樹博士（独立行政法人海洋研究開発機構）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) 国土交通省ホームページ, http://www.mlit.go.jp/crd/daisei_ryokuhi_index.html (2014.10.27)
- 2) 千代田区緑の実態調査及び熱分布調査業務報告書, 千代田区, 2011.
- 3) FLiESvox, <https://sites.google.com/site/fliesdevelop/home> (2014.6.9)
- 4) T. Asawa, A. Hoyano and K. Nakaohkubo : Thermal design tool for outdoor spaces based on heat balance simulation using a 3D-CAD system, *Building and Environment*, 43, pp. 2112-2123, 2008.
- 5) 神山健二, 大橋征幹, 成田健一 : 葉面積密度を代表面積とした樹木の抵抗係数に関する風洞実験, *日本建築学会計画系論文集*, 69 (578), pp. 71-77, 2004.
- 6) J. L. R. Jensen, K. S. Humes, L. A. Vierling and A. T. Hudak : Discrete return lidar-based prediction of leaf area index in two conifer forests, *Remote Sensing of Environment*, 112, pp. 3947-3957, 2008.
- 7) F. Morsdorf, B. Kötz, E. Meier, K. I. Itten and B. Allgöwer : Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction, *Remote Sensing of Environment*, 104, pp. 50-61, 2006.
- 8) Y. Wang, H. Weinacker and B. Koch : A LiDAR point cloud based procedure for vertical canopy structure analysis and 3D single tree modeling in forest, *Sensors*, 8, pp. 3938-3951, 2008.
- 9) T. Sasaki, J. Imanishi, W. Fukui, F. Tokunaga and Y. Morimoto : Fine-scale replication and quantitative assessment of forest vertical structure using LiDAR for forest avian habitat characterization, *Forest Science and Technology*, 8 (3), pp. 145-153, 2012.
- 10) 中井洋平, 細井文樹, 秋山幸秀, 大政謙次 : 航空機及び可搬型スキャニングライダーを用いたケヤキ群落の葉面積密度分布の推定, *Eco-Engineering*, 21 (1), pp. 9-14, 2009.
- 11) Y. Song, M. Maki, J. Imanishi and Y. Morimoto : Voxel-based estimation of plant area density from airborne laser scanner data, *Proceedings of the ISPRS Workshop Laser Scanning*, Calgary, Canada, XXXVIII-5/W12, pp. 209-212, Aug. 2011.
- 12) H. Kobayashi, and H. Iwabuchi : A coupled 1-D atmosphere and 3-D canopy radiative transfer model for canopy reflectance, light environment, and photosynthesis simulation in a heterogeneous landscape, *Remote Sensing of Environment*, 112, pp. 173-185, 2008.
- 13) J. -L. Widlowski, T. Laverigne, B. Pinty, M. M. Verstraete and N. Gobron : Rayspread: A virtual laboratory for rapid BRF simulations over 3-D plant canopies. In G. Frank (Ed.), *Computational Methods in Transport. Lecture Notes in Computational Science and Engineering Series*, 48, pp. 211-231, 2006.
- 14) 牧 雅康, 高橋厚裕, 岡野哲郎, 小熊宏之 : 可搬型 3 次元レーザー スキャナデータと放射伝達モデルを用いた林床光環境の推定手法の開発, *日本リモートセンシング学会誌*, 32 (2), pp. 77-87, 2012.
- 15) S. Bittner, S. Gayler, C. Biernath, J. B. Winkler, S. Seifert, H. Pretzsch, E. Priesack : Evaluation of a ray-tracing canopy light model based on terrestrial laser scans, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 38 (5), pp. 619-628, 2012.
- 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 Trans. Geosci. Remote Sens.*, 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, *Journal of Experimental Botany*, 58 (12), pp. 3463-3473, 2007.
- 18) H. Oshio, T. Asawa, A. Hoyano and S. Miyasaka, Estimation of three-dimensional structure of individual trees using multi-pulse airborne LiDAR, *Proceedings of International Sympos-*

- sium on Remote Sensing 2014, Busan, Korea, Apr., 2014.
- 19) W. Wagner, A. Ullrich, V. Ducic and T. Melzer : Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 60, pp.100-112, 2006.
- 20) 千田良道, 山下 悟, 村手直明, 都竹正志 : ヘリコプター搭載型波形記録式レーザー計測システムによる高品質データ, 日本写真測量学会平成 19 年度秋季学術講演会発表論文集, pp.199-202, Oct. 2007.
- 21) 押尾晴樹, 浅輪貴史, 梅干野晃, 宮坂 聡 : 航空機 LiDAR を用いた都市空間における樹木の形状情報の抽出精度, 日本リモートセンシング学会誌, 33 (5), pp.350-359, 2013.
- 22) S. Durrieu, T. Allouis, R. Fournier, C. Vega and L. Albrech : Spatial quantification of vegetation density from terrestrial laser scanner data for characterization of 3D forest structure at plot level, *Proceedings of SilviLaser 2008*, Edinburgh, UK, pp. 325-334, Sep. 2008.
- 23) M. Béland, J. Widlowski, R. A. Fournier, J. Côté and M. M. Verstraete : Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements, *Agricultural and Forest Meteorology*, 151 (9), pp.1252-1266, 2011.
- 24) 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 Trans. Geosci. Remote Sens.*, 48 (5), pp.2215-2223, 2010.
- 25) I. Korpela, A. Hovi, F. Morsdorf : Understory trees in airborne LiDAR data — Selective mapping due to transmission losses and echo-triggering mechanisms, *Remote Sensing of Environment*, 119, pp.92-104, 2012.
- 26) J. Goudriaan : Crop micrometeorology: a simulation study. *Computer simulation in agriculture and its supporting science*, Pudoc, Wageningen, 1977.
- 27) C. T. de Wit : Photosynthesis of leaf canopies, *Agricultural Research Report no. 663*, Pudoc, Wageningen, 1965.
- 28) R. E. Bird : A simple, solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance, *Solar Energy*, 32 (4), pp.461-471, 1984.
- 29) 浅輪貴史, 梅干野, 清水克哉, 久保田光政 : 大型重量計を用いた単木樹木の蒸散量の計測法とその精度確認, 日本緑化工学会誌, 38 (1), pp.67-72, 2012.
- 30) 浅輪貴史, 梅干野, 清水克哉, 久保田光政 : 大型重量計を用いた夏季におけるケヤキ単木の蒸散特性の分析, 日本緑化工学会誌, 39 (4), pp.534-541, 2014.
- 31) A. Kuusk : A fast, invertible canopy reflectance model, *Remote Sensing of Environment*, 51, pp.342-350, 1995.
- 32) 下條正貴, 吉田伸治, 大岡龍三 : 街路樹の樹冠についての工学的深さ, 葉面積密度, 入射角度特性の実測, 日本建築学会 2003 年度大会 (東海) 学術講演梗概集, D-1 環境工学 I, pp.609-610, Sep. 2003.
- 33) Y. Ryu, O. Sonnentag, T. Nilson, R. Vargas, H. Kobayashi, R. Wenk and D. D. Baldocchi, : How to quantify tree leaf area index in an open savanna ecosystem: A multi-instrument and multi-model approach, *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, pp.63-76, 2010.
- 34) N. S. Goel and D. E. Strebel : Simple beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies, *Agronomy Journal*, 76, pp.800-802, 1984.
- 35) J. Pisek, O. Sonnentag, A. D. Richardson and M. Möttus : Is the spherical leaf inclination angle distribution a valid assumption for temperate and boreal broadleaf tree species?, *Agricultural and Forest Meteorology*, 169, pp.186-194, 2013.