

高解像度可搬型スキャニングライダーを用いた イチョウの葉傾斜角分布季節変化の計測

Measurement of Seasonal Change of Leaf Inclination Angle Distributions in Ginkgo Trees using a High Resolution Portable Scanning Lidar

水城秀平、細井文樹、大政謙次

Shuhei Mizuki, Fumiki Hosoi 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

1-1-1Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

(2015年3月13日受付、2015年4月14日受理)

ABSTRACT

Ginkgo trees were scanned in May, September and November by a high resolution portable scanning lidar to estimate leaf inclination angle (LIA) distributions of different three seasons. From the obtained data, 150 leaves were selected in each season and a plane was fitted to each leaf by a least-squares method. LIA was estimated from the zenith angles of the fitted plane's normals. By aggregating these angles, the LIA distributions in each season were obtained. The resultant distributions were different each other and the seasonal change was observed. The difference seemed to reflect the growth conditions such as bud break, leaf expansion, defoliation. The results were compared with the ones of Japanese zelkova trees that grow in the same site and difference was observed between the distributions of ginkgo trees and Japanese zelkova ones. Several factors such as structural difference, species specific characteristics seemed to be causes of the difference.

Key words : ginkgo, leaf inclination angle, point-cloud image, portable scanning lidar

1. はじめに

葉の傾き、すなわち葉傾斜角は植物キャノピー内の光環境や葉温の調節など、植物の生命活動の維持に関わる重要な要素の一つである (Medina et al., 1978; Muraoka et al., 1998; Niinemets, 2010)。葉傾斜角はその重要性から、これまでクリノメータや分度器、3次元デジタルライダなどによって計測されてきた (Sinoquet et al., 1998; Gratani and Ghia, 2002)。しかし、これらの器具を用いてキャノピー内の葉の傾斜角を一枚一枚計測するのは非常に手間のかかる作業であり、特にサイズの大きな木本植物などではその計測は非常に困難な作業であった。一方、植物

の3次元構造計測に可搬型スキャニングライダー (Light Detection and Ranging: LiDAR) が活用されるようになってきた (Hosoi and Omasa, 2006, 2007; Omasa et al., 2007; Côté et al., 2009; Dassot et al., 2011)。本装置は、対象に向けてレーザービームを水平、垂直にスキャン照射し、その反射光を検出することで、対象の高精度・高解像度3次元点群画像を効率よくスピーディーに取得できる。そのため、本装置により得られた3次元点群画像から植物の構造パラメータを導出することにより、従来の構造計測に伴う多大な労力を削減することが可能となる。細井ら (2007) は本装置を用い、常緑広葉樹の葉傾斜角分布の算出が可能であることを示し、従来の葉傾斜角分布計

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

測に要した労力の削減が可能であることを示した。この方法は効率よく葉傾斜角分布の算出が可能であるため、繰り返し計測が容易に行え、小麦やイネなどの作物を対象とした例では、成長段階毎の葉傾斜角分布の計測が可能であることが示され、各成長段階で葉傾斜角分布に違いがあることが明らかにされた (Hosoi et al., 2009; Hosoi and Omasa, 2012)。また、本方法による常緑広葉樹を対象とした季節毎の葉傾斜角分布計測も報告されている (Hosoi and Omasa, 2009)。この研究では、芽吹きから展葉期、さらには落葉期直前の葉傾斜角分布の違いが明確に示され、季節の推移とともに変化していく環境条件とそれに適応する植物の構造変化という観点で、有益な情報を与えるものであった。このような季節変化に伴う植物の葉傾斜角分布の変化というものは、樹種によって異なることが予想され、樹種毎にその変化をとらえることが重要となる。しかしこれまで、可搬型スキャニングライダーを用いた葉傾斜角分布季節変化の計測は限られた樹種でしか行われていない。そこで本研究では、これまで行われてきた樹種以外の対象としてイチョウを選択し、可搬型スキャニングライダーにより季節毎の葉傾斜角分布を算出し、その特徴と季節毎の葉傾斜角分布が形成される要因について考察する。

2. 計測対象および方法

茨城県つくばみらい市の人工林を本研究の対象地とした (Hosoi and Omasa, 2007)。本対象地には、スギ、アカマツ、イチョウ、ケヤキなどが生育していた。対象地より対象木としてイチョウ群落を選択し、その林床に $4 \times 5 \text{ m}^2$ の計測プロットを設置し、その領域内を対象とした。対象木の樹高は 15 m、平均葉面積密度は 2005 年 8 月において $0.82 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ であった (Hosoi et al., 2014)。

対象木の 3 次元点群画像の取得には、高空間分解能可搬型スキャニングライダー (TDS-130L 改、パルステック工業) が使用された。本装置は照射されたレーザービームが対象に当たって戻ってくる散乱光を CCD センサーにて取得し、受光した CCD センサー上の位置から、発射されたレーザービームが対象のどの位置に当たったかを判別し、その位置をもとに三角測量の原理により対象までの距離を算出する。水平方向スキャンはサーボモーターにて、垂直方向スキャンはガルバノミラーにてそれぞれ行われ、これらのスキャン角度と対象までの距離を記録することで、3 次元点群画像データが取得される。本装置の計測可能距離は 3.5 ~ 10.0 m、その空間解像度は 5 m で 1 ~ 2 mm である。本装置を用い、対象木の高

さ 5.4 m の一部の領域の測定を行い、3 次元点群画像を得た。測定時期は 2006 年 5 月と 9 月、11 月の 3 時期とした。測定時期毎に測定条件をできるかぎり一致させるため、レーザーの中心天頂角を $45 \sim 52^\circ$ の範囲として、各時期で天頂角になるべく差がでないようにした。また、ライダー本体を設置した地面に目印を残し、各測定時期で装置を同一地点に設置できるようにし、かつ測定エリアを毎回写真撮影し、写真内にある特徴的な枝などを目印にしながらかきスキャン範囲の設定をし、各時期でスキャンエリアに違いが生じないように配慮した。本装置は 1 スキャンに 30 分程度の時間がかかるため、測定中に吹く風の影響を受ける。そこで、なるべく風の少ない日を測定日に設定するとともに、風の影響により葉が動いた場合は、無風状態になるまで待ち、再度同一カ所の測定を繰り返し、風の影響を極力排除するよう配慮した。

得られた対象木の 3 次元点群画像は mm オーダーの解像度を有しているため、一枚一枚の葉が識別可能であった (Fig. 1)。そこで、点群画像から一枚の葉をコンピューター上で手動にて選択し、一枚の葉に相当する点群に対して最小二乗法にて 3 次元平面をフィッティングさせた。フィッティングさせた平面の法線に着目し、この法線の天頂角をその葉の葉傾斜角として算出した (Fig. 2)。各測定時期の画像につき、150 枚の葉をランダムに選択して平面フィッティングと天頂角の算出を行い、各時期それぞれ 150 枚分の葉傾斜角を算出、これに基づいて葉傾斜角分布を算出した (Hosoi and Omasa, 2007)。得られた葉傾斜角分布を各時期で比較し、その違いの有無を検討した。また、既往の研究で報告された同一対象地にあるケヤキの 3 時期葉傾斜角分布 (Hosoi and Omasa, 2009) との比較も行った。このケヤキの樹高は 12.5 m、平均葉面積密度は $0.57 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ であった。なお、本方法



Fig. 1. An example of a 3-D point cloud image of ginkgo leaves taken by a high resolution portable scanning lidar.

により得られる葉傾斜角の精度については、既往の研究にある3種類の広葉樹での実測と本方法から得た値との比較結果（平均誤差は 2.8° 以下、Hosoi and Omasa, 2015）より、本対象においても同程度の誤差であると判断した。

3. 結果および考察

Fig. 3(a) に得られた3時期のイチョウ葉傾斜角分布計測結果を示す。3時期を通して、比較的ブロードな分布

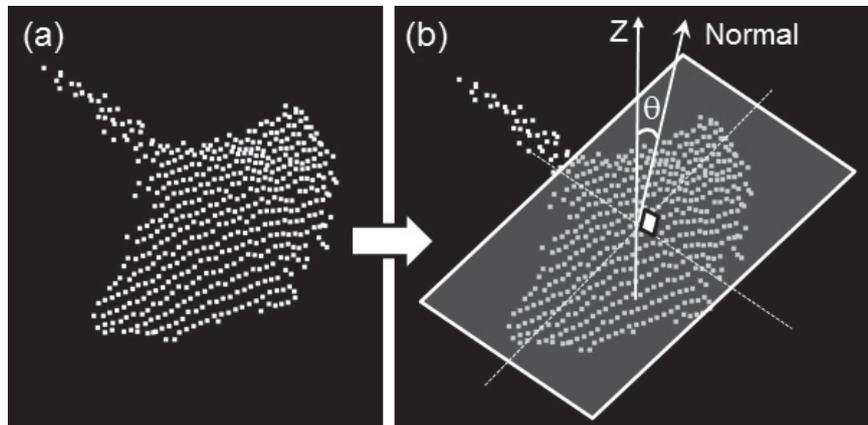


Fig. 2. Leaf inclination angle estimation from a leaf image obtained by a high-resolution portable scanning lidar. (a) An example of a set of points corresponding to a ginkgo leaf. (b) A plane fitted to a point set of a leaf. θ is the LIA, derived from the angle of the normal with respect to the zenith.

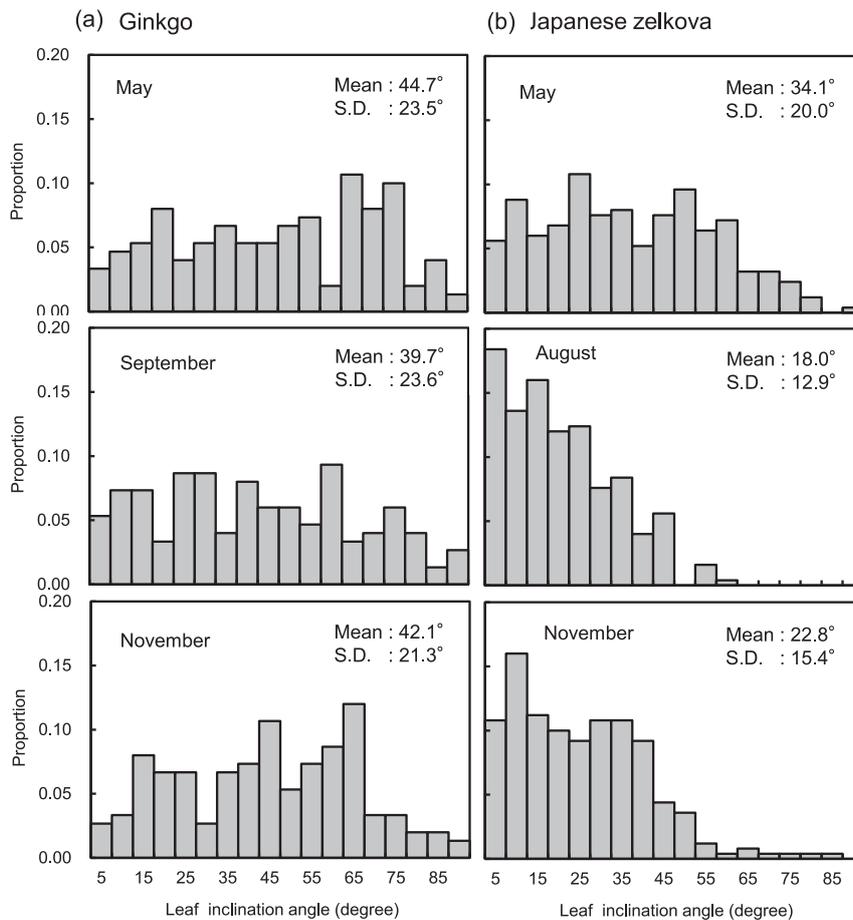


Fig. 3. Lidar-derived leaf inclination angle distributions in different three seasons for (a) the ginkgo trees and (b) Japanese zelkova trees ((b) is modified from Hosoi and Omasa, 2009). S.D.: standard deviation.

を有していた。5月においては65°付近にピークが見られ、平均値は44.7°、標準偏差は23.5°であった。9月においては明確なピークは存在せず、平均値が39.7°となり、5月と比べて低い角度の割合が増えた。標準偏差は23.6°と5月とほぼ同じ値であった。11月では9月と比較してより高い角度の比率が増え、65°にピークが見られた。平均値は42.1°と9月よりも分布がより高い角度にシフトしたことがわかり、標準偏差は21.3°であった。Fig. 3(b)は比較として転載したケヤキの3時期葉傾斜角分布計測結果である(Hosoi and Omasa, 2009)。3時期を通じた比較では、イチヨウのほうがケヤキよりも高い角度の分布が多かった。5月においてはイチヨウ、ケヤキともにブロードな分布であったが、特にイチヨウのほうがより高い角度にピークがあり、平均値もイチヨウのほうが高かった。イチヨウの9月とケヤキの8月の計測については、ケヤキが低い角度に分布が集中しているのに対し、イチヨウでは分布がどこかの角度に集中分布するような傾向は見られなかった。なお、この両者の分布の測定された月は異なるものの、測定日の違いは10日程度であるため、ここでは同時期として比較を行っている。11月においてはイチヨウ、ケヤキ両者ともに9月(ケヤキの場合は8月)の分布に比べ、高い角度に分布がシフトする傾向が見られたが、イチヨウのほうがより高い角度に分布がシフトしていたことが分かった。分布の広がりについては、他の月同様、イチヨウの方がより広く広がっていることが分かった。

芽吹き直後のイチヨウの葉は、垂直に近い高い葉傾斜角を有するものが多い。本計測対象地のイチヨウは4月に芽吹きが始まるが、5月の計測時点でまだ芽吹きの際の比較的高い傾斜角を有する葉も残存していたものと考えられ、これらが5月の高い角度の分布に寄与しているものと考えられる。一方、5月においては芽吹きから展葉にシフトし始めた葉も多く、これらの葉傾斜角は芽吹きの際の葉傾斜角よりも低くなるものが多いため、低い角度まで万遍なく分布が存在していたものと考えられる。こうした現象は同一対象地のケヤキにおいても同様にみられたものであった(Hosoi and Omasa, 2009)。一方、9月において展葉は完了しており、樹木全体で効率よく受光できる状態になっていたものと考えられる。しかし、低い角度の分布が増えたものの、9月の分布は5月と比べて大きく分布が変化したわけではなかった。Fig. 3(b)の8月のケヤキの場合は展葉して効率よく光を得ようと、葉傾斜角が低い、すなわち水平に近い角度の葉が大幅に増えたが、この例と本対象のイチヨウとはかなり傾向が異

なっていた。比較として挙げたケヤキのように、得られる光がなるべく多くなるように展葉とともに葉を光の方向、すなわち水平近くに向けるものもあるが、場所や種によっては強光阻害を回避するため、葉を垂直に近づける例も報告されている(Muraoka et al., 1998)。イチヨウが強光阻害を回避するために葉の角度を高く保ったかどうかは、本研究では判断できないが、少なくとも同一対象地のケヤキとは異なるフォーメーションによって、環境、特に光環境への適応がなされていることが分かる。また、別の研究では群落上層で葉傾斜角を高くして樹冠内部まで光を通過させ、群落全体の受光効率を上げるような葉傾斜角分布の例も報告されている(Utsugi et al., 2006; Niinemets, 2010)。こうした観点では、本対象のイチヨウはケヤキと比べて樹高も葉面積密度も高く、水平に近い葉傾斜角分布では樹冠のある一部分の受光量が増えたとしても、樹冠全体に光を分配することが難しく、そのためより高い角度の葉傾斜角分布が増えた可能性も考えられる。こうした観点からは、対象そのものの構造だけでなく、対象周辺にある樹木の存在も合わせて考えてみる必要がある。対象のイチヨウの周囲には同程度の樹高を持つイチヨウが密に接していて、対象の上方にのみオープンスペースがあり、周囲にはオープンスペースが少なかったのに対し、比較したケヤキの場合は、その上方に加え、南側面に比較的大きなオープンスペースが存在しており、周辺環境がイチヨウと異なっていた。このオープンスペースから太陽光が入射することを考えると、上方から十分な光が入射しないイチヨウでは、15 mもの樹高をもつ樹冠全体に光を分配するには、水平に多くの分布をもつ葉傾斜角分布は適していなかった可能性がある。一方、ケヤキの場合は上方と側面から十分な光が入射するため、水平に多くの分布をもつ葉傾斜角分布でも十分に群落内に光を分配できたのではないかと考えられる。こうした対象木を取り巻く周囲の樹木の状態も対象に入射する光の量や方向に影響を及ぼすため、葉傾斜角分布の形成に影響を及ぼしていた可能性が考えられる。次に11月においては、ケヤキの場合は紅葉し、落葉も始まっていた。この状態では葉は水平ではなく垂れ下がった状態に変化しており、そのため高い角度の分布が増えていた(Fig. 3(b)の11月の分布)。イチヨウの場合も葉の黄化が進行し、落葉し始めていたため、ケヤキの場合と同様に葉の垂れ下がりが起き、高い角度の分布が増えたものと考えられる。

本研究によって示されたイチヨウの葉傾斜角の季節分布はケヤキと類似する点も見られたが、展葉期では大きな違いがあることが確認された。この違いは上述したよ

うに、イチヨウとケヤキで樹高や枝の配置、葉面積密度の違い、さらには周囲の樹木の配置の違いなどがあり、こうした構造や周辺環境の違いが葉傾斜角分布の違いに反映されたと考えることが可能である一方で、イチヨウとケヤキのもともとの葉の付け方の違いや強光に対する耐性の違いなど、樹種固有の特性が反映されていた可能性も考えられる。

4. おわりに

本研究ではイチヨウ群落を対象とし、高解像度可搬型スキャニングライダーにより、対象の一部の3次元点群画像を5月、9月、11月の3時期に取得した。得られた各時期の画像から、それぞれ150枚ずつランダムに葉を選択し、各葉に相当する点群に3次元平面をフィッティングし、その平面の法線から葉傾斜角を算出、3時期の葉傾斜角分布を得た。得られた分布は各時期毎に異なっており、その変化については芽吹きや展葉、落葉直前の状態などが反映されたものと考えられた。既往の研究で報告されたケヤキの例と本研究の結果を比較したところ、特に展葉期である9月の分布に大きな違いが見られた。この原因としては、ケヤキとイチヨウの樹高や葉面積密度など構造上の違いや対象木を取り巻く周囲の樹木の状態の違いが考えられたほか、樹種固有の特性に起因している可能性も考えられた。本研究においてこれらの要因を分離することは困難であるが、異なる種での比較に加え、同一の種で構造や周囲の樹木の状態の違う対象による比較を行うなど、それぞれの要因が葉傾斜角分布にどのように影響しているのかを明らかにしていくことが重要であると考えられる。

引用文献

Côté, J. F., Widlowski, J. L., Fournier, R. A. and Verstraete, M. M., 2009: The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from terrestrial lidar. *Remote Sens. Environ.*, **113**, 1067-1081.

Dassot, M., Constant, T. and Fournier, M., 2011: The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. *Ann. For. Sci.*, **68**, 959-974.

Gratani, L., and Ghia, E., 2002: Changes in morphological and physiological traits during leaf expansion of *Arbutus unedo*. *Environ. Exp. Bot.*, **48**, 51-60.

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: Estimation of vertical plant area density profiles in a rice canopy at different growth stages by high-resolution portable scanning lidar with a lightweight mirror. *ISPRS J. Photogramm.*, **74**, 11-19.

Hosoi, F. and Omasa, K., 2015: Estimating leaf inclination angle distribution of broad-leaved trees in each part of the canopies by a high-resolution portable scanning lidar. *J. Agric. Meteorol.*, in press.

Hosoi, F., Nakai, Y. and Omasa, K., 2009: Estimating the leaf inclination angle distribution of the wheat canopy using a portable scanning lidar. *J. Agric. Meteorol.*, **65**, 297-302.

Hosoi, F., Ueno, U., Mizuki, S. and Omasa, K., 2014: Estimation of leaf area density profiles of ginkgo trees by the ground and high position measurements using a portable scanning lidar. *Eco-Engineering*, **26**, 45-49.

Medina, E., Sobrado, M. and Herrera, R., 1978: Significance of leaf orientation for leaf temperature in an Amazonian sclerophyll vegetation. *Radiat. Environ. Bioph.*, **15**, 131-140.

Muraoka, H., Takenaka, A., Tang, Y., Koizumi, H. and Washitani, I., 1998: Flexible leaf orientations of *Arisaema heterophyllum* maximize light capture in a forest understorey and avoid excess irradiance at a deforested site. *Ann. Bot.(London)*, **82**, 297-307.

Niinemets, Ü., 2010: A review of light interception in plant stands from leaf to canopy in different plant functional types and in species with varying shade tolerance. *Ecol. Res.*, **25**, 693-714.

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.

Sinoquet, H., Thanisawanyangkura, S., Mabrouk, H. and Kasemsap, P., 1998: Characterization of the light environment in canopies using 3D digitising and image processing. *Ann. Bot.(London)*, **82**, 203-212.

Utsugi, H., Araki, M., Kawasaki, T. and Ishizuka, M., 2006: Vertical distributions of leaf area and inclination angle, and their relationship in a 46-year-old *Chamaecyparis obtusa* stand. *Forest Ecol. Manag.*, **225**, 104-112.