

可搬型スキャニングライダーを用いた水稻の 植物面積密度垂直分布の計測

Measurements of Vertical Plant Area Density Profiles of a Rice Plant Using a Portable Scanning Lidar

細井文樹、大政謙次*

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,

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

(2011年9月26日受付、2011年10月24日受理)

ABSTRACT

Vertical plant area density profiles of rice canopy at different four growth stages were estimated using a high-resolution portable scanning lidar. 3D point cloud data on the canopies were collected by a portable scanning lidar with laser beams inclined at zenith angle of 30°. This laser beam zenith angle was selected to avoid obstruction of the beam into the lower canopy by the upper part. Based on the lidar-derived images, PAD values were computed in each growth stage by using the voxel-based canopy profiling method. The values were compared with ones directly measured by stratified clipping. The root mean square errors were 0.36 to 1.81 m² m⁻³ at each growth stage and 1.20 m² m⁻³ across all growth stages. Plant area index was also estimated, with absolute percentage errors of 4.0 to 20.6% at each growth stage and of 9.9% across all growth stages.

Key words : Plant area density, Portable scanning lidar, Three-dimensional imaging, Voxel-based canopy profiling

1. はじめに

植物のもつ3次元構造はその機能と密接に関連しており、その関連性を検証することは極めて重要な課題である。植物の3次元構造を表す指標として、しばしばその垂直構造が取り上げられる。作物においては、垂直構造と作物キャノピー内での光環境や光利用効率、収量、成長速度、窒素分配などが関連付けられ、議論がなされてきた (Monteith, 1973; Jones, 1992; Takahashi and Nakaseko, 1993; Milroy et al., 2001)。その垂直構造を表す指標としては、しばしば高さ毎の葉面積密度 (LAD: Leaf Area Density) が用いられる。計測上、地上部器官の分離が困難な場合は、地上部全器官の投影面積を取り扱う植物

面積密度 (Plant Area Density: PAD) が LAD の代わりに用いられる (Hosoi and Omasa, 2009)。LAD 及び PAD を高さ方向に積分すると、それぞれ葉面積指数 (Leaf Area Index: LAI)、植物面積指数 (Plant Area Index: PAI) になる。作物においては特に生育ステージとその構造、機能との関連が非常に重要な視点であり、比較的短時間に変化していく生育ステージごとの垂直構造を、効率よく計測する方法が必要となる。

既往の研究では、その垂直構造計測に層別刈り取りなどの破壊計測法が用いられる場合も少なくなかった。しかし、その計測にかかる労力の大きさや同一サンプルで計測を繰り返し行えないといった点は、成長計測に適した方法とは言い難い。一方、非破壊かつ効率的な計測

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

が可能な Gap fraction 法などの間接法も作物構造計測に使用されているが (Grantz et al., 1993; Welles and Cohen, 1996; Behrens and Diepenbrock, 2006)、計測精度の問題や、計測条件の制約などの問題がある。

近年、可搬型スキャニングライダーが植物の3次元構造計測に利用されるようになってきた (Omasa et al., 2002, 2007, 2008; Lovell et al., 2003; Hosoi et al., 2010; Hosoi and Omasa, 2006, 2007, 2009)。この装置は、対象植物の3次元点群画像を高速で効率よく、かつ高い空間精度で取得可能で、既往の植物構造計測法の問題点を解決することが可能である。既往の小麦を対象とした研究において、可搬型スキャニングライダーを用い、生育ステージ毎の PAD 垂直分布を正確に推定できることが報告されている (Hosoi and Omasa, 2009)。現在までにこの方法の作物での有効性は小麦でしか確認されておらず、様々な作物に適用し、その有効性を検証することが望まれる。そこで本研究では、主要作物として極めて重要性の高い水稲について、可搬型スキャニングライダーによる生育ステージ毎の PAD 垂直分布の推定を行ったので報告する。

2. 計測対象および方法

実験は茨城県つくばみらい市の水田で 2010 年に行われた。水稲品種はコシヒカリで、5月1日に株間、条間ともに 30 cm にて機械移植された。倒伏防止のため、追肥は行われなかった。計測は分けつ期の 5月27日と 6月17日、幼穂形成期の 7月13日、登熟期の 8月14日に行われた。異なる4つの成長ステージの計測のために、水田の中に 1.2 m × 1.2 m の矩形の計測プロットが4か所設置された。

イネの3次元形状計測には、三角測量を測距原理とする可搬型スキャニングライダー (改良型 TDS-130L 3-D Laser scanner、パルステック工業株式会社) が使用された。この装置は 3.5 ~ 10 m の範囲を計測可能で、その解像度は 5 m で 1 ~ 2 mm である。ステッパーモーターによる回転マウントとライダーヘッド内のガルバノミラーにより、垂直及び水平方向のスキャンが可能となっている。

本装置を計測プロットから 3.5 m 離れた地点に設置し、イネのキャノピー斜め上方からレーザービームを照射した。その際のビーム入射角 (レーザービームの天頂角) の中心角は 30 度であった。画角の関係から、プロット内の領域全てを一回の計測によって網羅することはできなかった。そこで、一つの計測プロットについて、スキャン領域を変えながら、生育ステージ毎に 2 ~ 4 回の計測

を行い、プロット領域全てが網羅されるようにした。

PAD の計算には、Voxel-based Canopy Profiling 法 (VCP 法) を用いた (Hosoi and Omasa, 2006)。この方法ではまず、得られた複数のライダーデータを生育ステージ毎にレジストレーション (位置合わせ) し、データに共通の座標系を付与する。次に、一個あたり 1 mm × 1 mm × 1 mm のサイズのボクセル (ライダーの空間解像度から決定) で構成されたボクセルアレイを、計算機メモリ内の3次元配列として用意する。取得されたライダーデータをもとに、ボクセルアレイ上で、レーザービームの全光跡をトレースする計算を行う。レーザービームが対象 (水稲) に当たった場所のボクセルに属性値として 1 を、ビームが対象に当たらずに 1 本以上通過した場所のボクセルに属性値として 2 を、ビームが全く到達していない場所のボクセルの属性値として 3 を与える。ボクセルに与えた属性値をもとに、以下の式により PAD を算出する。

$$PAD = \frac{\cos \theta}{G(\theta)} \frac{1}{\Delta H} \sum_{k=m_h}^{m_h+\Delta H} \frac{n_1(k)}{n_1(k) + n_p(k)} \quad (1)$$

ここで $n_1(k)$ 及び $n_p(k)$ はボクセルアレイ内で k の高さにある層のうち、それぞれ属性値 1 及び 2 を持つボクセルの数を示す。 θ はレーザービーム入射角、 $\cos \theta / G(\theta)$ 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。 $G(\theta)$ 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 (Weiss et al., 2004)。 $G(\theta)$ の算出には、葉傾斜角分布を求める必要がある。そのため、まず各生育ステージのライダー3次元点群画像から、葉に相当する点群を目視により抜きだし、それぞれの葉を 15 mm ずつの小片に分割した。その小片をランダムに 200 個選択し、それらを3次元平面に近似し、その平面の法線ベクトルの天頂角から葉傾斜角を算出し、生育ステージ毎の葉傾斜角の分布を得た。

ライダー計測により得た PAD 値の精度検証に必要な実測値を得るため、ライダー計測終了後、プロット内のイネを 10 cm 間隔 (5月27日の計測のみ 5 cm 間隔) で層別刈取りした。刈取り後は葉、茎、穂に器官を分離し、市販のスキャナー (ScanBit MFS-A3, EXEMODE, INC.) を用いてスキャン画像 (JPEG 形式) を取得した。スキャンの際、スケールを共に写しこむことでスキャン画像 1 ピクセルあたりの実面積を算出し、これをもとに、スキャン画像から各器官の面積を求めた。各器官の面積を層毎に足し合わせ、それを各層の体積で割ることで、PAD の実測値を得た。なお、参考として葉の面積から、LAD 実測値の算出も行った。

3. 結果と考察

ライダー計測により得られた水稻の3次元点群画像の例を Fig. 1 に示す。詳細な3次元画像が取得できていることが分かる。

ライダー計測により算出したPAD垂直分布と、直接計測により得たPAD及びLAD実測値の垂直分布との比較を Fig. 2 に示す。まず実測値の傾向としては、5月を除き、PADの分布に一つのピークがあることが確認され、そのピーク位置は、生長とともに上層に移動していくことが確認された。5月では最下層、それ以外の月

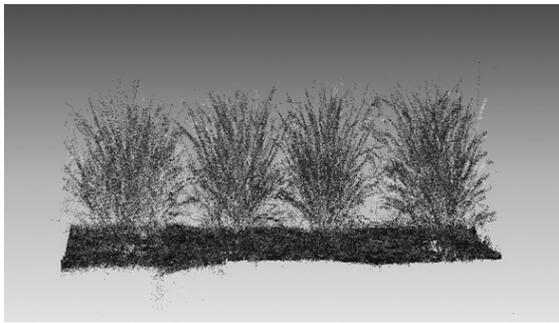


Fig. 1 A 3-D image of rice canopy on 17 June measured by a high-resolution portable scanning lidar. This image was obtained after registration of the several lidar images. Shading effect was added to this image by changing brightness of each point.

ではPADのピークとそれよりも下層の領域で、PADとLADの差がより大きくなっており、これらの領域で茎の寄与がPAD値に与える影響が大きいことが分かる。8月については、70 cmと80 cmの高さの層に穂が集中していたため、この高さにおいて、穂がPAD値に与える影響が大きいことが分かる。

ライダー計測から算出されたPAD値については、5月と8月の最下層を除き、概ね実測PAD値とよい一致を示した。5月の最下層は過小評価であり、その算出値は実測PADよりも実測LADに近い値を示した。7月、8月について、PADのピークとその下層領域において、若干の過大評価が見られた。8月の最下層については、大きく過大評価が見られた。ライダー計測から算出されたPAD値の平均値は、5月～8月でそれぞれ、0.70, 4.37, 7.99, 8.13 $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$ であり、RMSE（Root Mean Square Error: 二乗平均平方根誤差）はそれぞれ、0.36, 0.45, 0.95, 1.81 $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$ であった（本方法を小麦に適用した既往の研究 Hosoi and Omasa, 2009 では、4時期のPADのRMSEは0.28～0.79 $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$ ）。ライダー計測により得たPAD値を高さ方向に積分することによってPAIを求めたところ、5～8月でそれぞれ0.22, 2.19, 7.19, 8.13 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ となり、その絶対パーセント誤差は20.6%, 4.0%, 5.4%, 17.1%であった。

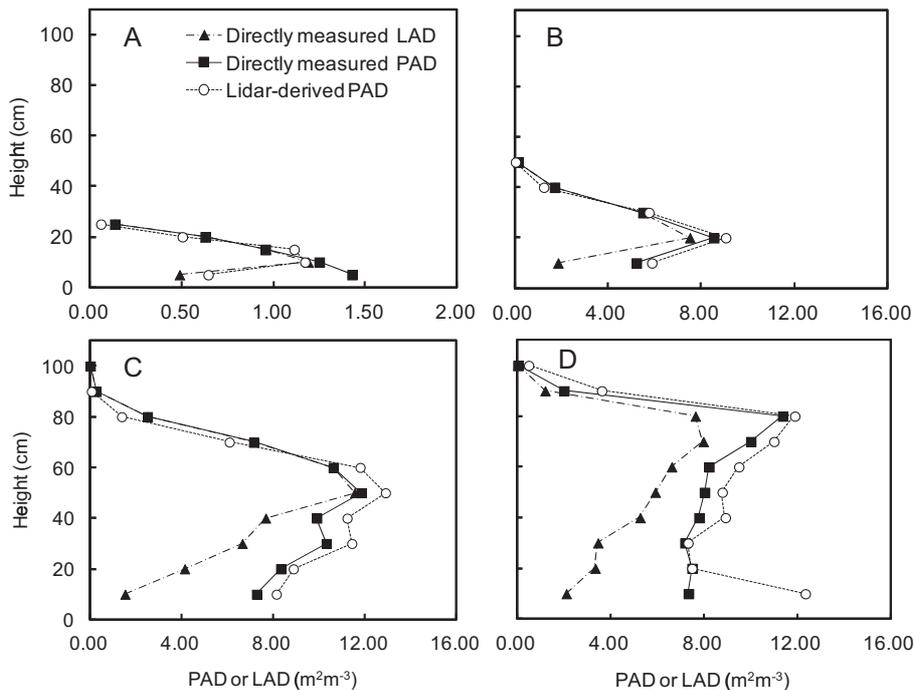


Fig. 2 Comparison of profiles among lidar-derived PAD, directly measured PAD, and directly measured LAD at each growth stage: (A) 27 May, (B) 17 June, (C) 13 July and (D) 14 August.

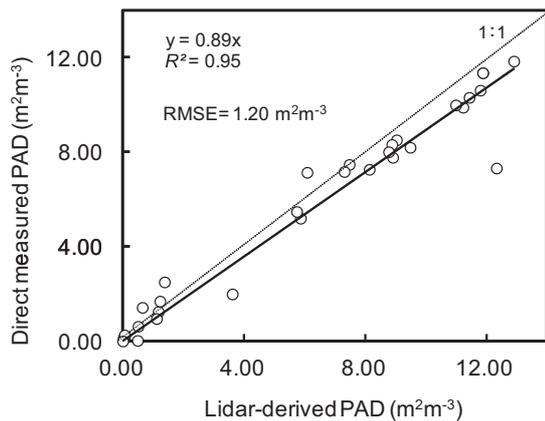


Fig. 3 Relationship between directly measured and lidar-derived PAD through all growth stages. RMSE, root-mean-square error.

Fig. 3はライダー計測により算出したPAD値と、直接計測により得たPAD実測値の全生育ステージでの比較である。回帰直線より、若干の過大評価の傾向が見てとれたが、RMSEは $1.20 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ で、全体としては概ね正確にPADを算出することができたといえる。PAIの全生育ステージの絶対パーセント誤差は9.9%であった。

式(1)の $G(\theta)$ を算出するためにライダー画像から求めた葉傾斜角分布に関して、その平均値は、5～8月でそれぞれ 45.3° 、 43.3° 、 64.2° 、 19.5° （角度が 0° のとき、葉は水平状態）であり、生育ステージによって葉傾斜角も異なる分布を示すことが分かった。

VCP法を用いた小麦を対象とした既往の研究において（Hosoi and Omasa, 2009）、レーザービーム中心入射角が 57.5° に設定されているが、この角度は、葉傾斜角分布によらず、 $\cos \theta / G(\theta)$ を一定値1.1で近似できるという利便性があり、利用された（Weiss et al., 2004）。しかし、この角度は垂直よりは水平に近い角度であり（Fig. 4, Case 2）、その場合、垂直に近い角度（Fig. 4, Case 1）よりも群落内でのレーザービーム軌跡長（Fig. 4の点線部）が長くなる。軌跡長が長い場合、ビームが群落内を進む間、途中で群落に衝突して失われるビーム数が増え、対象のPADの大きさによっては、十分な量のビームが群落下層も含めた群落全体に到達できなくなる可能性がある。既往の研究の小麦のPAD値では、これは問題にはならなかったが、本対象である水稻は小麦よりもPAD値が高く（Hosoi and Omasa, 2009をもとに、登熟期の実測値の比較で、平均2.1倍）、中心入射角 57.5° では十分な量のビームを群落全体に供給できない可能性があった。そこで本実験では、垂直により近い 30° を中心

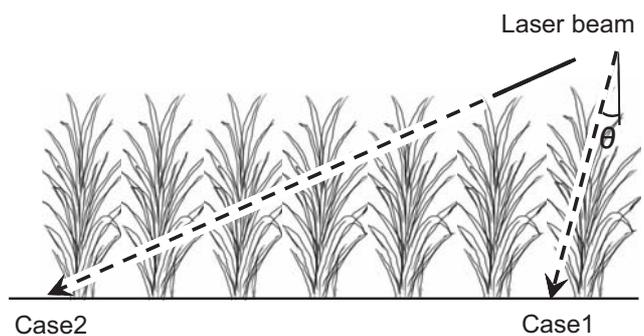


Fig. 4 An illustration of laser beam incidences into rice canopies. θ is an incident angle (zenith angle) of a laser beam. Case1: the incident angle is near vertical. Case2: the incident angle is more horizontal than the case 1. Broken parts of the beams show path lengths within the canopy.

入射角とし、軌跡長を減らす方法を採用した。その結果、既往の小麦の適用例（Hosoi and Omasa, 2009）ほど高精度ではないものの、全体としては概ね正確なPAD値を算出することができた。これは、一部の層（8月の最下層）を除き、群落全体にビームを十分に到達させることができたためと考えられる。このことから、水稻のような高いPADを持つ作物群落においても、入射角度の配慮により、レーザービームを群落全体に行き渡らせることで、正確なPAD算出が可能であることが示された。

5月の最下層のPAD過小評価については、その値がLADに近い値をとっていることから、ビーム自体は最下層まで供給され、葉には十分にビームが当たったものの、茎が葉によって遮蔽され、茎には十分にビームが到達しなかったものと推測される。一方、8月の最下層の過大評価は、入射角度の調節にも関わらず、群落下層まで十分なビームが到達できなかったものと考えられる。これは8月のPAD値が全体的に高いことが要因の一つとして考えられるが、同様にPAD値の高い7月では、最下層まではほぼ正確なPAD値が得られている。そこで考えられるのが、葉傾斜角の影響である。7月の葉傾斜角が垂直に近い葉傾斜角（平均値 64.2° ）を表しているのに対し、8月の葉傾斜角は、水平に近い傾斜角（平均値 19.5° ）であった。葉が水平に近い傾斜角の場合、本実験のように垂直に近い方向からビームが入った場合、ビームが葉に当たる頻度が、垂直に近い葉傾斜角の場合より高くなる。そのため、8月においては7月のように最下層までビームを十分に送ることができなかったものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、可搬型スキャニングライダーを用い、異なる生育ステージの水稲の PAD 垂直分布を推定する方法について検証を行った。レーザービームの中心入射角度を垂直に近い角度に設定し、得られた 3 次元点群データをもとに、VCP 法によるボクセルベースの光跡追跡の計算を行うことで、全生育ステージにわたり、ほぼ正確な PAD 垂直分布を算出することができた。

8 月の最下層の PAD 算出誤差の要因として葉傾斜角の影響が考えられたため、今後は、レーザービーム入射角を細かく変化させた実験を行い、葉傾斜角とレーザービーム入射角の関係について検証し、最下層の誤差の低減を目指す。また、地上部全器官の PAD としてだけでなく、葉、茎、穂といった各器官毎の面積密度に分離する方法（たとえば分光情報の利用など）を検討し、収量やバイオマスの推定などにも活用範囲を広げていくことが必要であると考えられる。加えて、本方法をさらに多くの作物群落に適用し、その適用可否を検証していくことが重要であると考えられる。

引用文献

- Behrens, T. and Diepenbrock, W., 2006: Using hemispherical radiation measurements to predict weight-related growth traits in oilseed rape (*Brassica napus L.*) and barley (*Hordeum vulgare L.*) canopies. *J. Agron. Crop Sci.*, **192**, 465-474.
- Grantz, D.A., Zhang, X.J., Metheny, P.D. and Grimes, D.W., 1993: Indirect measurement of leaf area index in Pima cotton (*Gossypium barbadense L.*) using a commercial gap inversion method. *Agric. For. Meteorol.*, **67**, 1-12.
- 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: Estimating vertical plant area density profile and growth parameters of a wheat canopy at different growth stages using three-dimensional portable lidar imaging. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, **64**, 151-158.
- 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.
- Jones, H. G., 1992: *Plants and Microclimate*. 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge.
- Lovell, J. L., Jupp, D. L. B., Culvenor, D. S. and Coops, N. C., 2003: Using airborne and ground-based ranging lidar to measure canopy structure in Australian forests. *Can. J. Remote Sens.*, **29**, 607-622.
- Monteith, J.L., 1973: *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, London.
- Milroy, S.P., Bange, M.P. and Sadras, V.O., 2001: Profiles of leaf nitrogen and light in reproductive canopies of cotton (*Gossypium hirsutum*). *Ann. Bot-London*, **87**, 325-333.
- Omasa, K., Urano, Y., Oguma, H. and Fujinuma, Y., 2002: Mapping of tree position of *Larix leptolepis* woods and estimation of diameter at breast height (DBH) and biomass of the trees using range data measured by a portable scanning lidar. *J. Remote Sens. Soc. Jpn.*, **22**, 550-557.
- 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.
- Omasa, K., Hosoi, F., Uenishi, T. M., Shimizu, Y. and Akiyama, Y., 2008: Three-dimensional modelling of an urban park and trees by combined airborne and portable on-ground scanning LIDAR remote sensing. *Environ. Model. Assess.*, **13**, 473-481.
- Takahashi, T. and Nakaseko, K., 1993: Seasonal changes in distribution of intercepted photosynthetically active radiation for layer and dry matter production in spring wheat canopy. *Jpn. J. Crop Sci.*, **62**, 313-318.
- 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.
- Welles, J. M. and Cohen, S., 1996: Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. *J. Exp. Bot.*, **47**, 1335-1342.