

原著論文

中距離可搬型スキャニングライダーを用いた高所からの 水稲植物面積密度垂直分布の推定

Estimation of Vertical Plant Area Density Profiles of a Rice Plant by High Position Measurements Using a Middle Range Portable Scanning Lidar

草場剛史、細井文樹、内藤裕貴、大政謙次*

Takeshi Kusaba, Fumiki Hosoi, Hiroki Naito 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

(2016年2月18日受付、2016年6月22日受理)

ABSTRACT

A middle range portable scanning lidar was applied from a 10-m height place to estimate vertical plant area density (PAD) profiles of rice canopy at different growth stages. Voxel-based canopy profiling method was applied for the estimation. Resultant PAD estimates showed over estimation at middle to lower layers with the root mean square errors of 0.36, 0.45, 0.95, 1.81 m²m⁻³ in each stage. Laser beam coverage index Ω was calculated and related to absolute errors of PAD to investigate causes of the errors. This showed that lack of the number of incident laser beams into the internal canopy was a major cause of the error. Although the lidar-derived PAD showed overestimation in middle to lower layers, the PAD estimates of upper layers agreed well with the actual values. The accurate PAD estimates of upper five layers could offer good correlation to dry weight of ears with $R^2=0.988$.

Key words : plant area density, portable scanning lidar, three-dimensional imaging

1. はじめに

作物の構造は生育ステージごとに大きく変化し、その構造の変化を捉えることにより、作物栽培管理上有益な情報が多く得られる可能性がある。既往の研究において、作物の垂直構造と収量や光利用効率、窒素分配などとの関係が見出されてきた (Jones, 1992; Takahashi and Nakaseko, 1993; Milroy et al., 2001)。垂直構造を表す指標としては、地上部全器官の投影面積となる植物面積密度 (Plant Area Density: PAD) の高さごとの分布などが用いられてきた (Hosoi and Omasa, 2009, 2012a, 2012b)。生育ステージごとの PAD 高さ分布を効率よく計測するこ

とが出来れば栽培管理上有益となるが、その計測には層別刈取りなどの破壊計測が用いられることが多く、労力が極めて大きいだけでなく、対象物の破壊を伴うために同一サンプルによる生育ステージごとの変化を繰り返し計測するのは難しいという問題があった。筆者らはこの問題を解決すべく、高空間分解能可搬型スキャニングライダーを用い、小麦やイネの PAD 分布を計測する方法を考案した (Hosoi and Omasa, 2009, 2012a, 2012b)。この方法では mm オーダーの精度を有する可搬型スキャニングライダーを用いているため非常に精度が高く、さらに非破壊で効率よく PAD を計測できるという利点がある。しかし、筆者らが用いた高精度可搬型スキャニ

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

ングライダーは測定できる範囲が10 mと狭く、ごく一部のエリアでの計測に限定されてしまう。広いエリアでPADの高さ分布が計測できれば、エリアによって異なる生育状態を把握できる可能性がある。また広いエリアのPAD分布から相関によって収量推定を行うことにより(Hosoi and Omasa, 2009, 2012b)、エリアごとの収量の差異も把握できる可能性がある。これらの情報はエリアごとのきめ細かな生育管理に役立つものと考えられる。このようなある程度広い範囲の作物PAD計測をするためには、可搬型スキャニングライダーの必要とされる測距可能範囲は少なくとも数10 m以上となり、計測方法も可搬型スキャニングライダーを高所に設置するか、ドローンなどに搭載して行う方法が想定される。本稿では、数10 m以上の測距範囲をもつ可搬型スキャニングライダーを高所に設置し、得られた3次元点群画像からPAD分布を算出、その精度検証を行い、本装置の広範囲PAD計測への応用可能性について検討を行ったので報告する。

2. 計測対象および方法

計測は2010年5月～7月に茨城県つくばみらい市にある水田で行われた(Hosoi and Omasa, 2012a)。対象は水稻(品種コシヒカリ: *Oryza sativa* L. cv. Koshihikari)で、移植は5月1日に株間、条間ともに30cmで行われた。計測は5月29日と6月17日(ともに分けつ期)、7月16日(幼穂形成期)、8月13日(登熟期)の4回行われた。3次元点群データ取得のため、測定可能距離60 mで距離精度±8 mmの可搬型スキャニングライダー(RIEGL社製LPM-25HA)を用いた。この装置を高所作業車にのせて高さ10 mの高所に設置した。ライダースキャンの目標となるエリアとして、水田の中に1.2 m × 1.2 mの矩形の計測プロットを各計測日ごとに4か所設置した。この対象エリアならびに計測プロットは既往の研究(Hosoi and Omasa, 2012a)と同一であるが、計測に用いたライダーやその設置場所、計測方法は異なっている。このプロットが含まれるようにスキャンを行った。プロットからライダーまでの距離は13～16 mであり、ライダーから発射されたビームのプロットへの入射角(天頂角)は45～48°であった。また、プロットに入射するレーザービーム径は17～18 mmであった。

得られた3次元点群画像からPADを計算する方法として、Voxel-based Canopy Profiling法(VCP法)を用いた(Hosoi and Omasa, 2006, 2012a)。この方法では3次元点群データの各点を3次元のボクセルに変換し、さら

にレーザーの光跡を計算することで、各ボクセルにレーザービームが対象に衝突した情報と、衝突せずに通過した情報を付与していくものである。ボクセルの情報をともに、以下の式により、ある厚みをもった層のPADを算出する。

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

ここで $n_i(k)$ 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、それぞれレーザービームが衝突したボクセルと通過したボクセルの数を示す。 m_h は高さ h に相当するボクセル座標系における z 座標の座標値、 ΔH は層の厚み、 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。これについては、著者らが行った既往の研究(Hosoi and Omasa, 2012a, 2012b)にある方法、すなわち高解像度可搬型スキャニングライダー(解像度は5 mで1～2 mm)により取得された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平面近似して葉傾斜角を算出し、生育ステージごとの葉傾斜角の分布を得るという方法を用いた。

本実験で使用したプロットはHosoi and Omasa (2012a)で報告したものと同一で測定時期も同時期であるため、PAD精度検証のための実測値はHosoi and Omasa (2012a)で報告されているデータと同じものを用いた。この実測値はプロット内のイネの層別刈取りにより取得されたものである。

PAD誤差の要因を考察するため、以下に示すLaser beam coverage index Ω を算出した(Hosoi et al., 2010; Hosoi and Omasa, 2012b)。

$$\Omega = A_{beam} \times N \exp(-K \times PAI_{cum}) \quad (2)$$

ここで A_{beam} 、 N 及び K はそれぞれ計測プロットに入射するレーザービームの面積(m²) (スポットの水平面への投影面積)、入射密度(shots/m²)及び消散係数を表し、 PAI_{cum} はライダーデータから計算される各高さの積算植物面積指数を表す。この Ω とPADの絶対誤差との関係を算出した。

得られたPADからイネの収量推定が可能かどうか検討した。PADには穂、葉、茎が含まれており、収量推定のためには穂を葉や茎から分離して取り扱う必要があ

る。PADの実測データから、PADに対して穂がどのくらいの割合を占めるかを算出し、この割合を推定された最上層から5層目までのPAD（この層以外の層には穂が含まれていなかった）に乗じることで、各層の穂のPADを求めた。得られた各層の穂のPADと穂の乾燥重量との関係を検証した。

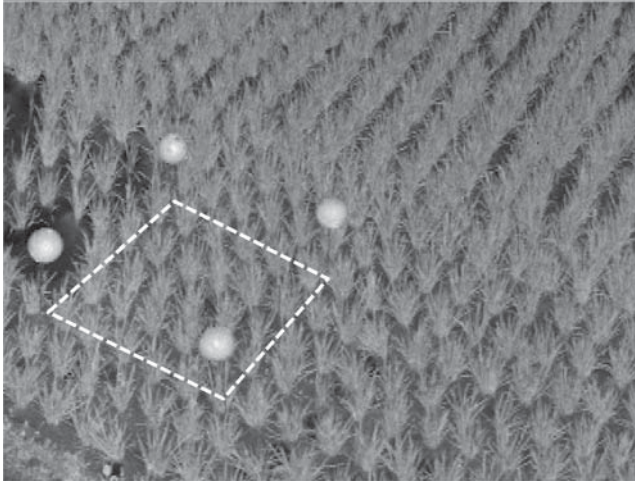


Fig. 1. A 3-D point cloud image of rice canopy on 17 June measured by a middle range portable scanning lidar. White spheres are references for lidar measurements and the area enclosed by the white broken line is a measurement plot. Intensity of returned laser pulses is expressed as shade in each point.

3. 結果と考察

Fig. 1は6月17日のライダー計測により得られた対象の3次元点群画像の例である。本スキャニングライダーは数10mオーダーの範囲を網羅できるため、筆者らは主として10数メートル以上の樹高をもつ木本群落に使用してきたが、草丈1m程度の本対象のような作物においても、葉の形状が分かる程度には対象の形状情報が捉えられていることが分かった。

Fig. 2はライダー計測値をもとに式(1)によって推定されたPAD値とその実測値とを比較したものである。なお推定値については、本研究で用いたスキャニングライダーを使用した場合と既往の研究（Hosoi and Omasa, 2012a）において用いられた近距離高空間分解能スキャニングライダーを用いた場合の二つを比較のためプロットしてある。区別のため、二種類のライダーについて、前者を中距離ライダー、後者を近距離ライダーと以降は呼ぶこととする（Fig. 2中、前者はMiddle range、後者はShort rangeと記載）。近距離ライダーでは、4月や8月の最下層を除き、実測とよい一致が見られる。一方、中距離ライダーでは上層は実測と比較的よい一致が見られたが、中層から下層にかけて、大幅な過大評価が見られた。推定値のRMSE（Root Mean Square Error: 二乗平

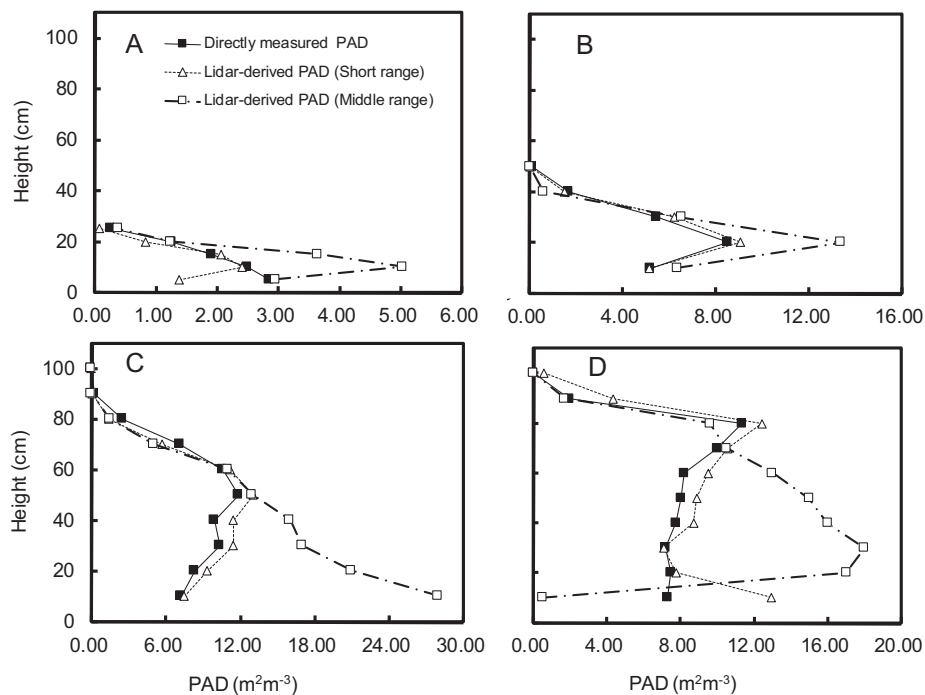


Fig. 2. Comparison of profiles among PAD derived from middle and short range lidars and directly measured PAD at each growth stage: (A) 29 May, (B) 17 June, (C) 16 July and (D) 13 August. Directly measured and short range lidar-derived PAD are referred from Hosoi and Omasa, 2012a.

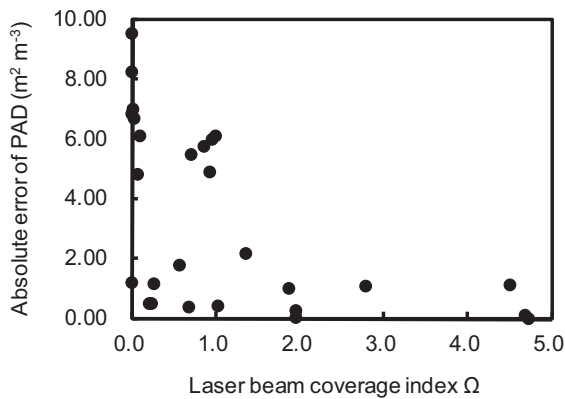


Fig. 3. Relationships between the laser beam coverage index (Ω) and the absolute errors of PAD.

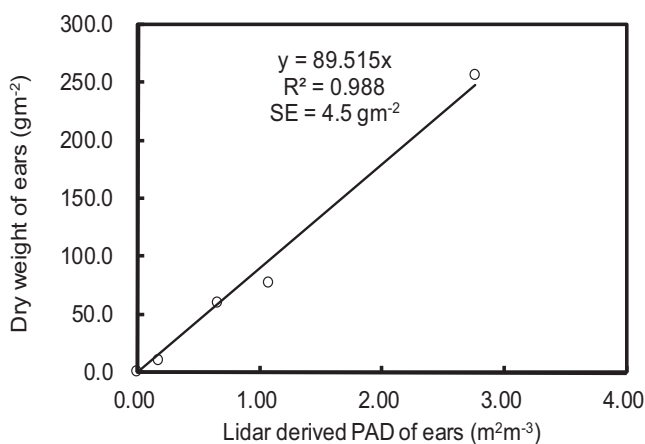


Fig. 4. Relationships between lidar-derived PAD of ears and dry weight of ears. SE: Standard Error.

均平方根誤差)は4月～8月でそれぞれ、0.36, 0.45, 0.95, 1.81 m^2m^{-3} であった。

推定されたPADをもとに Ω を計算し、PADの絶対誤差と比較したのがFig.3である。 Ω の値が1を下回る場合、各点のばらつきが大きくなるとともに、大きなPAD誤差をもつ点が多く見られたのに対し、 Ω の値が1以上になると誤差が小さく抑えられていることが確認された。Fig.4はライダーデータと穂の比率をもとに算出した穂のPADに対する穂の乾燥重量との関係である。 R^2 値は0.988とよい相関を得ることができた。

Fig.1に示す中距離ライダーの画像からはイネの形状が比較的良好にわかるものであったが、これは主としてキャノピー上層部で反射したレーザーからの信号を記録したものと考えられる。Fig.2に示すようにPADの推定誤差が中～下層にかけて大きくなっており、これは中～下層に到達したレーザービームが少なく、中～下層に関する十分な情報が得られなかったことによるものと考えられる。

この到達ビーム数の不足がPAD精度に影響していることを裏付けているのがFig.3の指標 Ω とPAD絶対誤差の関係である。この指標は対象領域の水平断面がどのくらい漏れなくレーザービームに照射されているのかを表している。値が1より小さい場合、ターゲットの水平断面のうち、レーザービームがカバーしきれていない領域が存在することを示し、値が1以上の場合はビームがもれなく断面を照射していることを示す(Hosoi et al., 2010)。本研究の対象においても、 Ω が1以下になると誤差が大きくなり、1より大きくなるにつれて誤差が小さくなっていくのが確認できる。これはレーザービームの入射数不足により、ビームがあたらない部分が生じ、それがPADの誤差を大きくしていると解釈できる。この結果は既往の木本群落や作物群落を対象とした研究の中で報告されたことと一致する(Hosoi et al., 2010; Hosoi and Omasa, 2012b)。本研究で使用した中距離ライダーによる結果と近距離ライダーを用いた既往の研究の結果を比較すると、後者は前者に比べ中層から下層にかけても誤差が小さく、後者の場合はレーザービームが比較的良好にキャノピー内部に到達していたものと考えられる。近距離ライダーの場合、垂直に近いレーザー入射角度(0度又は30度)を設定し、レーザービームの軌跡長を短くすることで下層までビームを到達させる配慮をしているが(Hosoi and Omasa, 2012a)、今回の計測では入射角度が45～48°と近距離ライダーの場合より角度が浅く、軌跡長が長くなってレーザービームが下層まで十分に到達できなかったと考えられる。今回は高所作業のため、レーザービームの入射角度を自由に変えることは難しかったが、入射角度の最適化をはかることにより、キャノピー内部へのレーザービーム到達数を上げ、PAD推定精度を上げられる可能性がある。また、今回の計測では一方向計測のみであったが、既往の研究では対象を取り囲む複数の方向から計測を行い、ある方向からは被陰されている部位も、別の方向からレーザーを通し、情報を得よう配慮している。このような複数方向からの計測も、本ライダーによるPAD推定精度改善に寄与する可能性がある。さらにビーム径によるPAD推定精度への影響も考える必要がある。近距離ライダーのビーム径は約5mmであったのに対し、本研究の中距離ライダーでは17～18mmと近距離ライダーの3倍以上の直径であった。ビーム径が小さい場合、キャノピーの隙間に入射してその内部まで進んでいくことができるようになり、結果としてビームの到達深度が増すことになる。一方、ビーム径が大きい場合、1ビームの断面をみれば

その一部は隙間を進んでいくが、1ビームの断面の大部分は植物体の表面に当たって反射する。この表面の部分の反射エネルギーが隙間に入射してキャノピー内部より返ってくる反射エネルギーより大きいため、この部分がライダーに検出されデータとして記録される。したがって、記録されたデータはキャノピーの表面部分が多くなり、キャノピー内部の情報が欠落することとなる。このような問題については、なるべく小さな径のライダーを使用することと、複数の反射パルスを検出可能なライダー (Multiple return lidar) や反射波形のすべてを記録するライダー (Waveform recording lidar) を使用することができれば、改善される可能性がある。

上述したような方法でイネの全層の PAD 精度を上げることが生育状態を診断する上では望ましいが、現状の方法でも上層の PAD 推定精度は比較的高い。特に収量推定に用いられる 8 月の PAD について、最上層から 4 層目までの RMSE は $0.92 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ であり、同じ層での近距離ライダーの PAD の RMSE $1.34 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ よりも精度は高くなっている。実測データから、穂の全重量の 97% が上層 4 層までに存在していることが確認されており、収量推定だけなら上層 4 層程度までの高さの PAD の精度が高ければ問題ないと考えることもできる。実際、これら上層の PAD 推定値から、Fig. 4 に示すように高い決定係数で穂の乾燥重量が推定できることが示され、これは本方法により上層の PAD を高い精度で推定できたためと考えられる。このように本研究で使用されたような典型的な中距離ライダーを適用した場合、PAD の高さ分布を正確に求めることについては課題が多いが、収量の推定であれば、比較的精度よく行うことが可能であると考えられる。このことは、測距可能範囲が狭い近距離ライダーでは難しいエリア毎の収量の差異を、中距離ライダーでは精度よく推定できることを示しており、この点は中距離ライダーの近距離ライダーに対する利点であると考えられる。

4. おわりに

本研究では、比較的広い範囲を網羅できる数 10 m 以上の測距範囲をもつ可搬型スキャニングライダーを高所に設置し、水稻の生育ステージごとの PAD 垂直分布を推定する方法について検証した。VCP 法をもとに算出した PAD 値については、特に中層から下層部の推定誤差が大きかった。その原因としては、レーザービームのキャノピー内部への入射数の不足が考えられ、そのことは laser beam coverage index Ω と PAD 絶対誤差との関係

によって裏付けられた。PAD の推定誤差が小さい上層部の PAD から、穂の乾燥重量が高い決定係数で推定可能であることが分かった。こうした結果を考えると、本研究で想定していたような比較的広い範囲の計測を視野にいった数 10 m 以上の測距範囲をもつ可搬型スキャニングライダーの用途については、まずは収量推定への適用が考えられ、生育診断に利用可能な PAD 分布の精度向上については、機器や測定方法を改善し、レーザービームのキャノピー内部への到達数を増やしていく必要があると考えられる。

引用文献

- Jones, H. G., 1992: *Plants and Microclimate*. 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge.
- 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., 2009: Estimating vertical plant area density profile and growth parameters of a wheat canopy at different growth stages using three-dimensional portable lidar imaging. *IS-RPS 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.
- Hosoi, F. and Omasa, K., 2012a: Measurements of vertical plant area density profiles of a rice plant using a portable scanning lidar. *Eco-Engineering*, **24**, 21-25.
- Hosoi, F. and Omasa, K., 2012b: 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. *ISRPS J. Photogramm. Remote Sens.*, **74**, 11-19.
- 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.
- 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.