

研究トピックス

可搬型スキャニングライダーによる水稻の生育ステージ毎の垂直構造計測

細井文樹・大政謙次 (東京大学大学院農学生命科学研究科)

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。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。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、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労力のかかる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。一方、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。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。この可搬型スキャニングライダーによって、水稻の生育ステージ毎の PAD 垂直分布推定が可能であることが示されている (Hosoi and Omasa, 2012a)。本稿では、その方法について紹介する。

2. 材料及び方法

水稻品種はコシヒカリで、茨城県つくばみらい市の水田に2010年5月1日に株間、条間ともに30cmにて機械移植された。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1.2m×1.2m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3.5~10mの範囲を計測可能で、その解像度は5mで1~2mmである。本装置を計測プロットから3.5m離れた地点に設置し、イネの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。なお、垂直に近い角度でのビーム入射を行うため、実験当初はライダー本体をキャノピー上部に配置してスキャンを行っていたが、重量のあるライダー本体をこのように配置することは現場では困難が伴った。そこで、ミラーを対象の近傍に設置し、レーザーをミラーで折り返し、ミラーの角度によって入射角をコントロールする方法を考案した (図2 (b))。本方法はその後の実験 (Hosoi and Omasa, 2012b) でその有効性が確認されている。

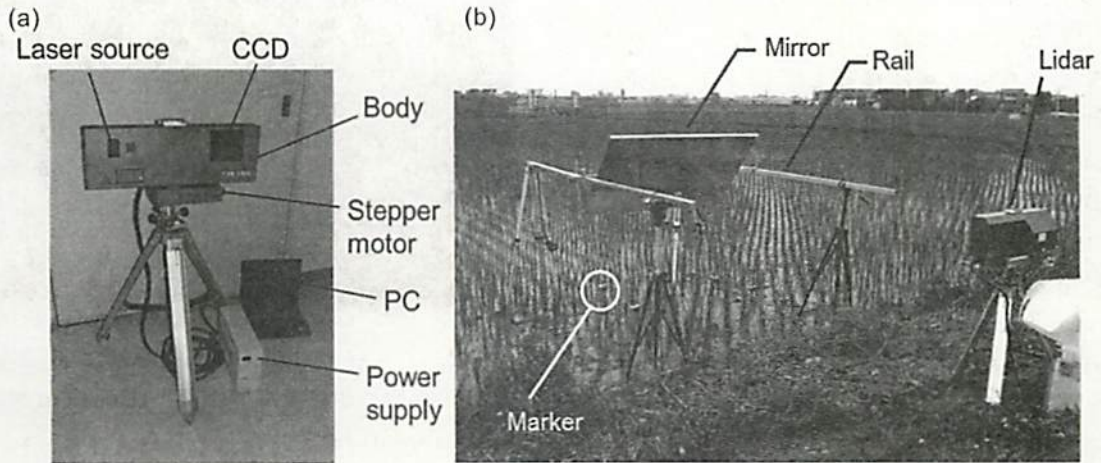


図1. 計測機器と方法. (a) 使用された可搬型スキャニングライダー. (b) ミラーを使用した計測方法 (Hosoi and Omasa, 2012b).

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  $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 1\text{mm}$  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。

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

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。 $\theta$  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。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10cm間隔 (5月27日の計測のみ5cm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、市販のスキャナーを用いて 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

水稲のライダー計測により得られた3次元点群画像の例を図2に示す。極めて詳細な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図3(a)~(e)に示す。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、70cmと80cm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。RMSE (Root Mean Square Error: 二乗平均平方根誤差) は5月～8月でそれぞれ、0.36, 0.45, 0.95, 1.81  $\text{m}^2\text{m}^{-3}$ であった。図3(e)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。回帰直線から分かるように、若干の過大評価の傾向が見られたが、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。

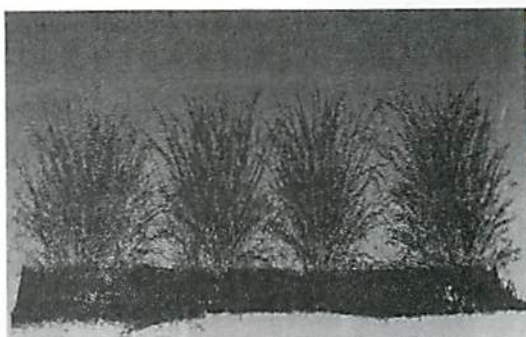


図2. ライダー計測により得られた6月17日のイネ3次元点群画像 (Hosoi and Omasa, 2012a).

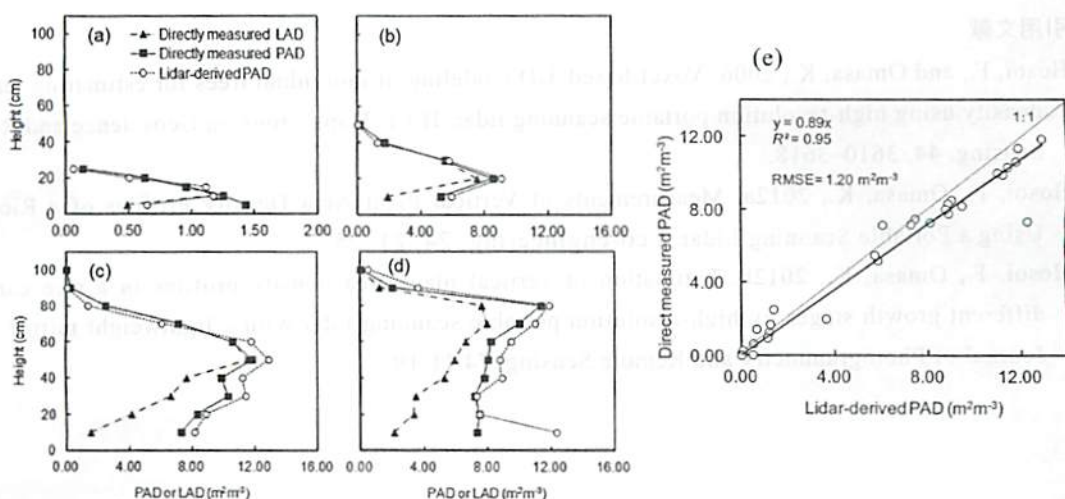


図3. 各生長ステージ毎のPADプロファイル。(a)5月27日、(b)6月17日、(c)7月13日、(d)8月14日 (e)測定全期間。■ 実測PAD 間実測LAD、○ ライダーから算出したPAD (Hosoi and Omasa, 2012a).

レーザー入射角度が垂直より水平に近い角度である場合、(図4, Case 2)、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(図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。そ

ここで本実験では、垂直により近い  $30^\circ$  を中心入射角とし、軌跡長を減らす方法を採用した。その結果、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、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。

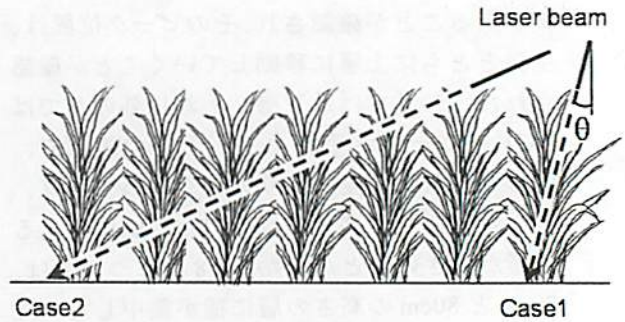


図 4. レーザービームが群落内に入射する様子。  
Case1: 垂直に近い入射、Case2: 水平に近い入射。破線はレーザーのキャノピー内での通過距離 (Hosoi and Omasa, 2012a).

#### 4. 今後の課題

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

- 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 Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 3610–3618.
- Hosoi, F., 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., 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. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 74, 11–19.