

非破壊計測を利用した作物の生育情報収集技術の開発

近畿大学農学部
農業生産科学科
廣岡 義博

はじめに

地球規模での気候変動に対応するためには、主要穀物の品種改良に加え、栽培技術の適正化が必要とされている。そのためには、圃場における作物形質の情報収集が不可欠であり、中でも、葉面積指数 (LAI) は、生育量を反映すると同時に、その後の群落の生産機能を左右する最も重要な群落形質である。LAI の計測方法は、破壊計測と非破壊計測の2つに大別される。破壊計測では、サンプルの収集や測定に手間がかかる上に同地点では1度の計測しかできず、多くの品種や環境における LAI 動態を把握するには適していない。一方、プラントキャノピーアナライザー (LI-COR, Lincoln, NE, USA) のような非破壊計測機器を用いることで、LAI 計測は簡易化され、経時的なモニタリングが可能となる。しかしながら、非破壊計測の推定精度上の問題により、その利用が停滞していた。

精密農業や高精度の収量予測のためには作物の生育情報を継続的に収集することが重要である。著者は、非破壊計測の利点を最大限に活用したプラントキャノピーアナライザーによる作物の成長動態および栽培環境の評価手法の開発に取り組んできた。ここでは、作物の生育情報を簡易的に収集した上で、成長動態および栽培環境を評価するための技術を紹介するとともに、今後のさらなる応用戦略について考察する。

LAI 動態の評価手法の開発

前述したように、LAI の簡易評価法として、魚眼レンズ画像を用いたプラントキャノピーアナライザーによる非破壊計測技術が開発されてきたが、推定精度が十分でないなどの理由からその利用が停滞していた。例えばイネに関しては、出穂期以降の LAI を計測することは難しく、出穂期までであっても推定誤差は約 30% と報告されている。そこで、著者らはプラントキャノピーアナライザーの簡易で計測に要する時間が短いという特徴を最大限に活かして多頻度の非破壊計測を行い、その計測値を数理モデルを用いて近似することで、誤差を減少させることができると考えた。多様な環境下で栽培されたイネ群落においてプラントキャノピーアナライザーで1週間に1~2

回の頻度で LAI 計測を行い、有効積算気温 (T ; $^{\circ}\text{C d}$; 基準気温 10°C) を x 軸にとり、ロジスティック関数や指数関数などの数理モデルによって近似することで LAI 動態に関するパラメータを算出した (図-1)。これらのパラメータを用いることで、生育動態に関する品種間差や栽培処理の違いを検出でき、また、いくつかのパラメータは、品種・環境間の交互作用を示さなかったため、各品種や生育環境の特性を定量的に評価できた (Hirooka *et al.* 2016a)。さらに、これらのパラメータは実際の作物の成長速度やバイオマス生産とも相関があることが明らかにされたため (Hirooka *et al.* 2021)、様々な栽培現場で活用されることが期待される。特に、多数の圃場環境下での生育動態の解析に有用であると考えられ、多品種間での評価、多様な生育環境の評価に貢献することが期待できる。

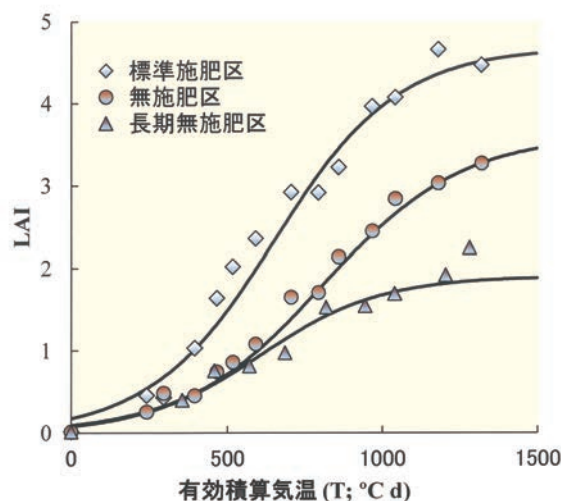


図-1 有効積算気温を x 軸にとり、異なる環境の LAI をロジスティック曲線で近似することによって成長動態をパラメータ化した (Hirooka *et al.* 2016a 改変)。

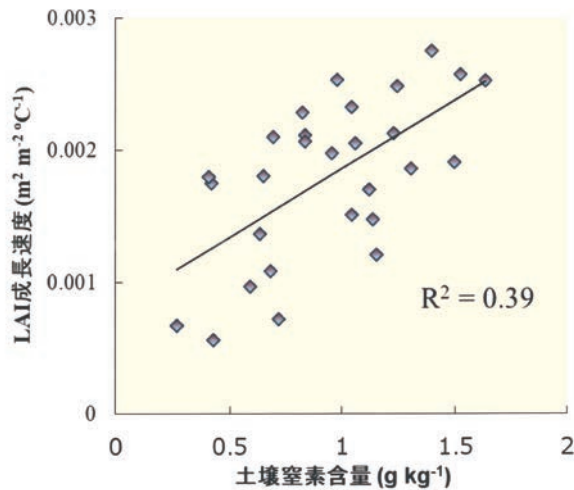


図-2 ラオス・ビエンチャン近郊における土壌肥沃度（土壌窒素含量）は非破壊計測と線形解析によって算出した LAI 成長速度によって推定できた (Hirooka *et al.* 2017 改変)。

評価手法の適用：多品種間評価

上記の評価手法を利用して、イネの成長動態に関する遺伝子型間のばらつきを評価した例を報告する。NIAS (National Institute for Agricultural Science, Japan) の様々な遺伝子型と表現型を持つ RDRS (Rice diversity research set of germplasm) と国際稲作研究所 (IRRI) が開発した高収量品種を用いることで、LAI 動態に関する遺伝子型間評価を行った (廣岡ら 2013)。これまでの研究では、RDRS の収量構成要素、光合成速度、気孔コンダクタンスなどのピンポイントでの定量的な調査は行われてきたが、経時的に生育動態を評価した例は少なかった。非破壊計測とパラメータ化を利用することで、RDRS の成長動態に関する遺伝子型の違いを明らかにし、インディカ米品種とジャポニカ米品種、RDRS 品種と高収量品種の LAI 成長速度の違いを定量的に明らかにした。また、複数のパラメータを利用することで主成分分析やクラスター分析などを用いた解析も可能となり、この結果、高収量品種と同様の LAI 動態が示される RDRS 品種が特定された。

評価手法の適用：農家圃場評価

東南アジアの水田では、農家圃場におけるイネの生育特性に関する情報は限られており、作物の栽培管理を改善するために必要な情報が不足しているのが一般的である。そのため、著者らが開発した非破壊計測を利用した評価手法は、不特定多数の農地を対象とした研究に適していると考えられる。また、多頻度の経時的な計測 (週に 1~2 回) によるパラメータ化が理想的ではあるが、少なくとも 4 回の LAI 計測値を用いた線形解析を行うことで、作物生育の圃場変動が大きい東南アジアにおいては、LAI 増加速度の制限要因を評価することができることを明らかにした (Hirooka *et al.* 2016b; 2017)。栽培管理が一律であった調査対象地域 (ラオス・ビエンチャン近郊) では、LAI 成長速度が土壌中の N および C 含有量と密接に関連していることを明らかにした (図-2)。また、x 切片によって推定された移植日は実測の移植日とよく一致していた。つまり、LAI の成長が旺盛なときに LAI を経時的に計測することで、土壌肥沃度や移植日の推定が可能であり、測

定のタイミングとしては、移植後約 2 か月までが最適であることを示した。また、栽培管理が多様であった対象地域 (カンボジア・プルサット州) においては、非破壊計測によって算出されたパラメータを共分散分析することによって、各要因が LAI 成長速度に与える影響を評価した。これによると、対象地域のイネの生産性は LAI 成長によって制限されており、LAI 成長は主に植え付け方法 (直播または移植)、水条件、土壌条件 (C 含有量, C/N 比) に依存していることが示唆された。農家圃場、特に海外の農家レベルの正確な情報を得ることは困難な場合が多いため、このような非破壊計測と線形解析といった簡易的な方法でイネの生産性を向上させるための重要な要素を定量的に評価できることは非常に有用であると考えられる。

LAI 垂直分布の評価手法の開発

上記の研究では LAI の動態に着目した解析を行ってきたが、LAI の垂直分布をモニタリングして定量化することも、作物の生育動態や光エネルギー利用の違いをより詳細に解析するための重要なアプローチである。しかしながら、LAI 垂直分布を計測するためには、層別刈り取り法などの非常に時間のかかる作業が必要であり、とりわけ経時的な計測は難しい。新品種では旧品種に比べて、光の垂直方向の減衰が比較的小さいことなどが示されている

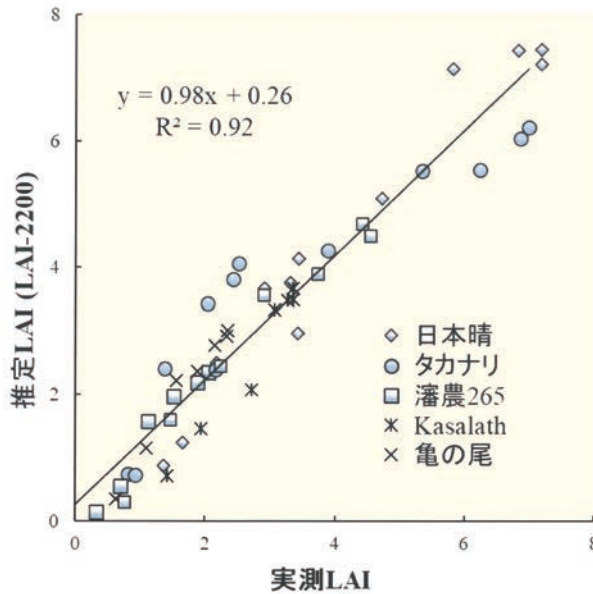


図-3 x cmの高さでLAI-2200によって測定されたLAI (推定LAI) は (x + 10) cmの高さ以上で層別刈り取り法によって測定されたLAI (実測LAI) とよく対応していた (Hirooka *et al.* 2018 改変)。

一方で、現在の栽培品種の群落構造が光の利用効率に与える影響を定量的に解析した研究はほとんどない。このことは上記のような理由から、多様な圃場環境下で異なる品種のLAI垂直分布を経時的に計測することが困難であったためである。著者らは、プラントキャノピーアナライザーを活用してLAI分布を定量的に評価するための方法を提案した (Hirooka *et al.* 2018)。x cmの高さでプラントキャノピーアナライザーによって測定されたLAIは (x + 10) cmの高さで層別刈り取り法によって測定されたLAIと、品種による偏りなく対応していることを示した (図-3)。LAIの層別値と積率モデルを用いることで、生育ステージ、品種、栽培管理によるLAI垂直分布の違いを定量的に検出できることが明らかとなった。例えば、上記の手法を用いて垂直分布の特性を定量化することで、イネ直立穂品種では生育後半のLAI垂直分布の重心が有意に高くなっており、このことが多収の主要因であることを示唆した (Makino *et al.* 2021)。

リモートセンシング研究への応用

衛星画像などのリモートセンシングデータからイネの生育特性に関する情報を収集することは、広域での圃場栽培を最適化するための重要な手法の一つである。Hirooka *et al.* (2015)では、非破壊計測で得られたLAI成長速度

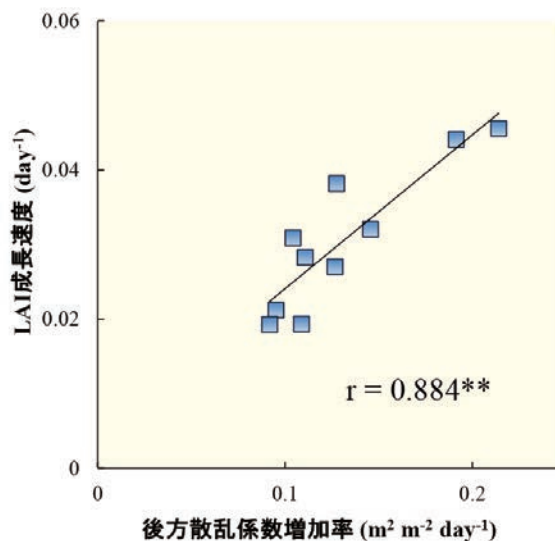


図-4 後方散乱係数が経時的に増加している圃場においては、プラントキャノピーアナライザー計測によるLAI成長速度を合成開口レーダーから得られたデータによって推定できた (Hirooka *et al.* 2015 改変)。

と合成開口レーダー (SAR) から得られた後方散乱係数 (Back Scattering Coefficient; BSC) の増加率は密接な相関を示すことを明らかにした (図-4)。これらの結果から、BSCが経時的に増加している圃場においては、SARによってイネの成長動態を広域に推定できることが示された。一方で、測定能の問題などから水田以外の雑草やあぜ道などを評価していると考えられるデータセットも多く存在し、地域スケールでの作物成長特性の評価については、さらに詳細な研究が必要であると考えられる。例えば、無人航空機 (通称ドローン) が注目されており、複数のリモートセンシング技術を網羅的に利用することで、それぞれの短所を補完しあい、生育情報を広域に収集するための技術開発に役立つと考えられる。

おわりに

農学研究において、作物形質の情報収集のために破壊計測の代わりに非破壊計測が行われることはあったが、それらの先行研究とは異なり、著者は、非破壊計測法の簡易で計測に要する時間が短いため多頻度の計測を行うことができるという利点に着目した。非破壊計測では、同じプロットを生育期間中に繰り返し測定することができるため、従来の方法に比べて作物の成長動態の評価が容易になる。さらに、経時的な非破壊計測と数理モデルを組み合わせることによって、LAI 動態だけでなく LAI 垂直分布の栽培品種や環境による影響を定量的に解析することが可能となった。これらの情報を経時的にモニタリングすることは多大な労力を必要とするため敬遠されてきたが、今後これらの手法を用いることで、より詳細な光合成能力や乾物生産性に対する群落構造の影響を解析するのに有用となるであろう。

著者らの研究では、イネの出穂期までのデータを使用していたが、その後の生育も重要な要素の一つと考えられている。そこで、プラントキャノピーアナライザーによって出穂期以降の葉面積の減少率を算出することは理論的に可能であるため、そういった指標を今後開発していく必要がある。また、生育後半の生理指標（葉身窒素濃度・

蒸散速度）などを考慮することによって生産性の推定精度が向上するため（Hirooka *et al.* 2021）、生理指標を非破壊的に計測する分光放射計測や熱画像カメラなどの様々な非破壊計測データとの統合を今後検討していく必要がある。また、著者は非破壊計測と数理モデルを用いることで、農家圃場における生産性の制限要因を定量的に示してきたが、栽培品種の違いは考慮していなかった。そのため、さらなる精度改善のため品種特性を非破壊的に判別する技術の開発も今後重要になると考えられる。

今回紹介した一連の研究ではイネを扱ってきたが、プラントキャノピーアナライザーを用いた LAI の非破壊計測は、これまでにマメ (*Phaseolus vulgaris* L.)、ワタ (*Gossypium hirsutum* L.)、トウモロコシ (*Zea mays* L.)、ダイズ (*Glycine max* [L.] Merr.) などでも報告されており、現在までに開発してきた評価手法をイネ以外の作物にも適用できる可能性は大いにある。例えば、日本ではダイズやコムギなどの作物は、施肥や害虫の管理など、栽培に関わる問題が多いため、その生育特性に関する情報を簡易的に収集することが望まれている。本記事で紹介した評価手法は、畑作物も含めたフィールド研究の潮流となっていく可能性があり、特に気候変動による収量減が問題となっているような現場で、作物の生産性向上のための有用な情報を得る

ツールとなるであろう。

文献

- 廣岡義博ら 2013. プラントキャノピーアナライザーを利用したイネの葉群動態の遺伝子型間変異に関する解析 作物研究 58, 51-56.
- Hirooka, Y. *et al.* 2015. Applicability of synthetic aperture radar (SAR) to evaluate leaf area index (LAI) growth rate of rice in farmers' fields in Lao PDR. *Field Crop. Res.* 176, 119-122.
- Hirooka, Y. *et al.* 2016a. Parameterization of leaf growth in rice (*Oryza sativa* L.) utilizing a plant canopy analyzer. *Field Crop. Res.* 186, 116-123.
- Hirooka, Y. *et al.* 2016b. Evaluation of cultivation environment and management based on LAI measurement in farmers' paddy fields in Pursat province, Cambodia. *Field Crop. Res.* 199, 150-155.
- Hirooka, Y. *et al.* 2017. Evaluation of the dynamics of the leaf area index (LAI) of rice in farmer's fields in Vientiane Province, Lao PDR. *J. Agric. Meteorol.* 73, 16-21.
- Hirooka, Y. *et al.* 2018. Parameterization of the vertical distribution of leaf area index (LAI) in rice (*Oryza sativa* L.) using a plant canopy analyzer. *Sci. Rep.* 8, 6387.
- Hirooka, Y. *et al.* 2021. A leaf area-based non-destructive approach to predict rice productivity. *Agron. J.* 113, 3922-3934
- Makino, Y. *et al.* 2021. Effect of flag leaf length of erect panicle rice on the canopy structure and biomass production after heading. *Plant Prod. Sci.* 24, 1-10.