

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：82111

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14950

研究課題名（和文）葉の寿命と環境馴化を考慮した光合成能力のモデル化：最適化仮説の統合

研究課題名（英文）Modeling leaf photosynthetic capacity by combining optimization theories for leaf senescence and environmental acclimation

研究代表者

木村 建介（Kimura, Kensuke）

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業環境研究部門・研究員

研究者番号：10885502

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000 円

研究成果の概要（和文）：植物葉の光合成能力は環境への馴化や葉の老化によって、時間的に大きく変動する。本研究では、葉の寿命に対する光合成能力のモデルと、葉の環境に対するモデルを統合し、新たな光合成能力のモデルを構築することを目的とした。光合成能力を評価するためには、1枚の葉で30分以上の時間を要する測定が必要のため、既存の測定法ではモデル化に十分なデータを取得できないと考えられた。そこで、光合成速度を高速で評価できる手法を新たに開発することで、大量の光合成能力のデータを取得することが可能となり、その手法を利用して光合成能力のモデル化を試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した光合成速度の高速評価法を用いることで、葉の光合成能力を簡易に推定できるだけでなく、光合成の情報に基づく育種・栽培研究の高速化が期待でき、農業分野での利用も見込まれる。また、食物連鎖の出発点となる植物の光合成は、人間を含む地球上すべての動物の生活に深く関わっているため、本手法は、生態学や生物多様性の研究においても活用されることが期待される。さらに、本手法で構築している光合成能力のモデルが完成すれば、作物の生育や収量の予測だけでなく、全球規模での植物の炭素同化シミュレーションにも応用可能と考えられる。

研究成果の概要（英文）：The photosynthetic capacity of plant leaves fluctuates significantly over time due to acclimation to environments and leaf senescence. The aim of this study was to construct a new model of photosynthetic capacity by integrating a model of photosynthetic capacity considering leaf lifespan and a model considering environmental acclimation of the leaves. Since evaluating photosynthetic capacity requires measurements that take more than 30 minutes per leaf, it was considered that sufficient data for modeling could not be obtained using existing methods. Therefore, I developed a new method that can quickly evaluate photosynthetic rate, making possible to obtain a large amount of data on photosynthetic capacity. Finally, I tried to model photosynthetic capacity using this method.

研究分野：農業気象学

キーワード：光合成 環境馴化 老化 モデル 高速評価 ハイスループットフェノタイピング

1. 研究開始当初の背景

作物生産において、光合成は、作物の生育および収量を決定づける重要な生理生態反応である。近年の気候変動に伴う異常気象の頻発化によって、作物の生育および収量の不安定化が危惧されており、光合成のメカニズムを理解し活用する技術は、その重要性が今後さらに増すものと考えられる。光合成のメカニズムに関する研究は数多くあり、光合成の環境応答のメカニズムを定式化した光合成生化学モデル (Farquhar et al., 1980, *Planta*) が、作物の生育予測や収量予測に広く活用されている。光合成モデルを利用するためには、作物自身が持つ光合成能力 (葉緑体における最大カルボキシル化速度と最大電子伝達速度) の情報が不可欠である。しかしながら、光合成能力の測定には相当な時間 (1 枚の葉に 1 時間弱) を要するため、栽培期間中に取得できるデータ数には制限がある。そのため、光合成モデルを利用した既存の生育・収量予測においては、光合成能力を栽培期間中で一定とみなす場合が多い。しかし実際には、作物の光合成能力は、葉齢の増加と周辺環境への馴化に伴い大きく変動するため (Wilson, et al., 2001, *Plant, Cell Environ.*), 生育や収量の予測結果に大きな誤差が生じることが指摘されている (Luo et al., 2018, *Agric. For. Meteorol.*)。したがって、より正確な生育・収量予測のためには、光合成能力の変動を説明可能なモデルが必要と考えられる。光合成能力と葉の寿命や周辺環境との関係は、数種の植物においてモデル化されているが (Kumarathunge et al., 2019, *New Phytol.*), それらは回帰に基づく種依存の経験的なモデルであり、合理的なモデルとは言い難い。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究では、葉の寿命と環境への馴化を考慮した、より合理的な光合成能力のモデルを構築することを目的とした。この目的を達成するために、植物の最適化仮説を利用する。最適化仮説とは、「植物は、蒸散による水損失、光合成能力を決定する葉への窒素分配といった投資はできる限り小さくし、光合成生産といった利潤はできる限り大きくできるように自身を最適に調節している」という仮説である。本研究では、葉の寿命に対する最適化仮説 (Kikuzawa, 1991, *Am. Nat.*) と、葉の環境に対する最適化仮説 (Wright et al., 2003, *Am. Nat.*) を統合し、新たな光合成能力のモデルを構築する。

3. 研究の方法

光合成能力のモデル化のためには、まず光合成能力のデータが大量に必要である。そこで、実際の作物圃場において光合成能力の同定を行った。光合成能力の同定には以下の 2 つの手法を利用することを当初計画していた。

- 1) 光合成測定装置を用いて同定する手法 (下図 a)。この手法は現在最も一般的であり、正確に光合成能力を同定することが可能であるが、同定に相当な時間 (1 枚の葉に 30 分 ~ 1 時間程度) を要する。そのため、光合成能力のデータを大量に取得するためには、この手法のみでは不十分と考えられた。
 - 2) 葉の分光分布から同定する手法 (下図 b)。この手法は、葉の分光反射率を測定し、機械学習によって光合成能力を推定するというものである (Serbin et al., 2012, *J. Exp. Bot.*)。これにより、光合成能力の同定がわずか数十秒で完了し、より大量のデータを得ることが可能となるが、その精度にはばらつきがあることが多い。そこで本研究では、葉の分光反射率に加えて新たに分光透過率も測定する。これにより、学習させる分光情報が従来の 2 倍となり、機械学習による推定精度の向上が見込まれる。
- 2) の手法によって精度良く光合成能力が推定できれば、効率よくデータを取得可能となり、モデル構築に多くの時間を費やすことが可能となる。1 年を通して効率よく光合成能力のデータを得るために、栽培時期の重複が少ないダイズとコムギを供試作物として採用した。

モデル構築に関しては、葉の寿命に対する最適化仮説と環境に対する最適化仮説は、できる限り投資 (水損失や窒素分配) を抑えて利潤 (光合成) を得ようという植物の戦略を仮定している。光合成能力は、葉の窒素濃度によって主に決定されるため、本研究では、2 つの最適化仮説に共通する窒素分配の項を光合成能力の変化に置き換えることで、2 つの仮説を統合し、光合成能力のモデル化を試みた。

4. 研究成果

当初予定していた分光反射率から光合成能力を同定する手法の精度が奮わず (決定係数が 0.6 程度)、光合成能力の馴化を評価する上で十分とは言えない結果となり、急遽別の手法の開発を行うこととなった。分光反射に変わる代替の方法として、葉のクロロフィル蛍光測定と葉の熱収支解析を用いて、葉の光合成速度をガス交換測定無しで高速に推定可能にする方法を構築した。こ

の手法を用いて推定した光合成速度と光合成生化学モデルによって光合成能力を逆算することが可能である。この手法の構築に相当な時間を要したため、本研究期間内に光合成能力のモデルの完成には至らなかった。現在は新手法で得られた光合成能力のデータを用いてモデルの骨格を構築しているところである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kimura Kensuke, Kumagai Etsushi, Fushimi Erina, Maruyama Atsushi	4. 巻 47
2. 論文標題 Alternative method for determining leaf CO ₂ assimilation without gas exchange measurements: Performance, comparison and sensitivity analysis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plant, Cell & Environment	6. 最初と最後の頁 992 ~ 1002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/pce.14780	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木村建介, 熊谷悦史, 伏見栄利奈, 丸山篤志
2. 発表標題 ガス交換測定によるパラメータ同定を必要としない個葉光合成速度の 推定モデルの検討：葉面境界層コンダクタンスの重要性
3. 学会等名 日本農業気象学会2023年全国大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------