

# 研究終了報告書

## 「自然条件下で光合成誘導時間を連続的に推定する手法の開発」

研究期間：2017年10月～2021年3月

研究者：小野 圭介

### 1. 研究のねらい

わが国の稲作は、貿易や産業構造の変革と高齢化にともなう従事者の減少に直面し、大きな転機を迎えている。担い手への農地集約が進んでいるが、大規模な区画は均一化が困難で生産性や品質に悪影響を及ぼす。他方、気象環境の激化により、平均的な昇温に加え、短期的な高温、乾燥、強風、降水等のイベントが作物生産に及ぼす影響も懸念されている。さらに世界に目を向ければ、劣悪環境での農業生産性の向上は喫緊の課題である。これらの課題を解決するために、不均一で変動の大きい環境でも省インプットで安定した生産を継続できる品種や栽培法の開発が必要と考え、そのためのフェノタイピングやストレス診断の新たな技術基盤を構築することが本研究の目的である。

これまで、作物の光合成に関する形質評価やストレス診断は、定常状態での最大速度に着目して行われてきた。定常状態の最大光合成速度が乾物生産の最重要形質であることは言うまでもないが、実際に生育する圃場や群落は、光等が絶え間なく変化しており、そのような変動環境への適応も作物の生産性の向上に重要であることが近年改めて指摘されている。そのうち、光環境への追従速度に相当するのが光合成誘導時間( $\tau$ )である。 $\tau$ は光合成回路の起動速度とも例えられ、短いほど日射環境の変化に敏感に対応できる。最近の研究では、 $\tau$ には大きな品種間差があること、施肥量やストレスで変化することが明らかになりつつあり、収量性や生育診断の指標として有用であることが示唆されている。しかし、従来の $\tau$ の測定法は、暗順応した葉を対象にリーフチャンバーを用いて求めるもので、実際に作物が生育している自然条件下での適用は原理的に不可能である。また、基本的に葉面でのガス交換を測定する必要があるため、サンプル数に限界がある。

渦相関法に代表される微気象学的手法は、圃場の群落レベルの $\text{CO}_2$ 交換速度を非接触かつ連続的に計測できる。また、リモートセンシング指標の一部は、光環境に応じた光化学系の変化を捉えられることが示されている。そこで本研究では、水稻を対象に、これらの手法を活用し、自然条件下における作物の $\tau$ を面的かつ連続的に推定する手法の開発を目指す。開発した手法は、作物の光合成特性に関するハイスループットフェノタイピングや各種ストレス検知等の目的で試験研究機関における育種や栽培法開発の現場への普及を想定している。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究は大きく2つの技術開発を目標とした。1つは、光合成変動の時系列から動的に光合成誘導時間 $\tau$ (動的 $\tau$ )を算出する手法の開発、いま1つは、それを群落レベルに適用して $\tau$ のマッピングを可能にするための技術開発である。前者は光合成速度を実測するが、後者はリモートセンシング技術を用い、光合成誘導プロセスと対応関係がある分光反射指標を用いる。まずポット個体の個葉を対象とし、次に個葉の結果を踏まえて野外の群落を対象として

技術開発を順に行った。

個葉では、ポット栽培したイネ 2 品種とダイズ 1 品種を対象に様々な光変動パターンで計測を行い、基準となるパターンとガス交換データから動的  $\tau$  を算出するスキームを開発した。光合成誘導は、①カルビンサイクルへの電子供給(数秒)、②カルビンサイクルの立ち上がり(数十秒～数分)、③気孔開閉(数分～数十分)の 3 つの異なる時間スケールを持つプロセスから成り立っていると考えられているが、ここで開発したスキームは、主に①と②を対象としている。得られたデータから、このスキームによって求められた動的  $\tau$  には品種・種間差があること、従来の手法により求められた  $\tau$  (静的  $\tau$ ) は主に③を反映していることが明らかとなった。

群落では、まず、従来の渦相関法の利用を工夫するにより、30 秒スケールで群落スケールのガス交換(光合成速度)を計測する技術を開発した。これによって、個葉実験で開発した動的  $\tau$  算出スキームを適用することが可能となり、群落かつ自然条件下で水稻の  $\tau$  の連続的な試算に成功した。そのデータから、自然条件下の光合成誘導時間は、植物側の状態のみならず、日々の日射の自然変動パターンの相違により、上述①～③の影響の多寡を反映した変化を示す可能性があることが示唆された。

マッピングに向けては、まずポット栽培イネを対象にスポットの分光反射率を連続測定するシステムを開発し、光化学系の活性指標と考えられてきた Photochemical Reflectance Index (PRI) の動的  $\tau$  を測る技術を開発した。さらに、ハイパースペクトルカメラを用いて分光反射率画像を連続計測し、同様の手法が適用可能であることが明らかになった。この指標は上記の光合成誘導プロセスの②に近いメカニズムによって変化することから、②の代替指標と見なせる可能性があるが、圃場での適用性ととも今後の検討課題として残された。

## (2) 詳細

### サブテーマ 1 個葉レベルの光合成誘導時間を動的に計測する手法の開発

#### 1) 手法の開発

個葉レベルでは LED 光源を内蔵した光合成蒸散計測装置を利用できるため、様々な光パターンを用いて動的な光合成誘導時間(動的  $\tau$ )を計測し、それらの差異と実用性を検討した。最終的に、もっと効果的な光パターンを見出した。さらに光強度等を調整し、計測スキームを完成させた。

#### 2) 従来法(静的 $\tau$ )との比較

暗順応後に測定する従来法による光合成誘導時間(静的  $\tau$ )と 1)で開発した手法による動的  $\tau$  の比較を、イネ 2 品種、ダイズ 1 品種に対して行った。静的  $\tau$  は主に気孔の開く速度と対応していたが、動的  $\tau$  はそれとの関係性は低く、より時間スケールの短い応答との関連が示唆される結果が得られた。また、品種・種間差も見られた。

### サブテーマ 2 自然条件下の水稻群落を対象とした光合成誘導時間の計測手法の開発

#### 1) 手法の開発

群落レベルでは、個葉のような光合成蒸散測定装置が利用できないため、大気中の  $\text{CO}_2$  乱流輸送から群落光合成速度を計測する渦相関法を利用した。しかし、従来の渦相関法は、

十分な渦をサンプルするために 15~30 分程度の時間を要した。そこで本研究では、計測システムを増やし、データ処理においても工夫を行うことで、15~30 秒の時間分解能を達成した。

## 2) 動的 $\tau$ の計測

1)の手法、および個葉のスキームを用いて、つくば市真瀬において水稻群落の動的  $\tau$  を計測した。これにより、日中 3~5 時間のデータに基づく動的  $\tau$  の約 40 日間の動態が明らかとなった。動的  $\tau$  の日々の変動は、植物側の状態のみならず、日射の自然変動パターンの変動によって誘導プロセスが異なることが影響すると推察された。現在は光合成時系列に対して 1 つの  $\tau$  値しか求められないため、今後、データ処理法や関数形を改良して、複数の  $\tau$  値を算出できるようにする予定である。

## サブテーマ 3 光合成誘導時間のマッピング手法の開発

### 1) 個葉(スポット)

まず水稻を対象に、個葉の分光反射率の経時変化を明らかにした。自然光下で分光反射率を秒スケールで連続測定する技術が存在しなかったため、計測システムの開発から着手した。試作を繰り返しつつ、最終的に非常に頑健なものを構築できた。これを用いて PRI が光強度に応じて比較的短時間に変化することがわかり、その動的  $\tau$  を求めたところ、酵素関係のレスポンスを反映していると思われる結果が得られた。そこで、PRI は光合成誘導の一部プロセスを反映していると判断し、次のマッピングに取り組んだ。

### 2) 個体群、群落(マッピング)

ポット栽培したイネとダイズを対象に、ハイパースペクトルカメラで分光反射率の面的分布とその時系列を計測し、上述のスキームで PRI の動的  $\tau$  を求めたところ、イネについては、動的  $\tau$  の算出が可能であり、その値も 1)の個葉と同程度であることがわかった。一方ダイズは、PRI の変動が小さく、計測ノイズの影響を大きく受けていた。手法として現実的に利用可能であることはわかったが、今後データをさらに増やして検証を重ねる必要がある。今後、分光反射の経時変化が光合成誘導の何を代表しているのか、さらに詳しく研究を行う予定である。

## 3. 今後の展開

得られたデータのうち、手がつけられていないものが多数あるため、まずはその解析を進める。その後、動的  $\tau$  の遺伝的な背景やストレスとの関係性を解明し、育種や栽培管理の現場で役立つよう計測・解析システムをパッケージ化にするとともに、学術的には光合成の評価・メカニズム研究へと発展させることを考えている。また、本領域での経験を生かし、従来の農業分野の研究フレームワークに情報科学を積極的に取り入れ、農学の情報科学の融合のために尽力したいと考えている。

## 4. 自己評価

前例のない計測を複数含む研究構想であったが、技術開発の基礎部分については目標をおおよそ達成した。一方、限られた時間で、新たな技術に挑戦することと検証を十分に行うことの両立に苦心し、一部先送りとなった部分もあった。初めての個人研究かつ技術開発を目標とした研究であったにも関わらず、途中で挫折することなく進められたのは、統括をはじめ領域メンバーの様々なサポートがあったからこそと考えている。領域会議で専門を生かしたセミナーを

行ったり、ワークショップ開催に積極的に参加したり、領域の活性化にも貢献できた。人的ネットワークの構築を含め、研究分野開拓の端緒としては十分な進捗があったと自己評価している。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:2件(予定)

- |  |
|--|
| 1. Ono et al. Dynamic estimation of photosynthetic induction under controlled and natural light environments. Plant, Cell & Environment. (準備中) |
| 2. Ono et al. Short-term response of plant reflectance indices under natural light environments. Plant, Cell & Environment. (準備中)              |

### (2) 特許出願

なし

### (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 小野圭介(2018)農耕地におけるフラックスの長期モニタリング:これまでの役割と今後の展望. 日本農業気象学会 2018 年全国大会.
2. 小野圭介、細井文樹(2019)オーガナイズドセッション企画「近接リモートセンシングを活用した陸域生態系モニタリングの高度化に向けて」. 日本農業気象学会 2019 年全国大会.
3. 小野圭介、伊勢武史、水落裕樹、皆川まり (2019)圃場スケールでの出穂検知. 日本農業気象学会 2019 年全国大会.
4. 小野圭介、伊川浩樹、宮田明(2020)渦相関法の平均化時間短縮に関する検討. 日本農業気象学会 2020 年全国大会.