

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K19104

研究課題名（和文）時系列並列解析によるイネ光合成誘導の多様性および遺伝要因の解明

研究課題名（英文）Diversity and genetic factors in rice photosynthetic induction by time series parallel analysis

研究代表者

安達 俊輔（Adachi, Shunsuke）

東京農工大学・（連合）農学研究科（研究院）・准教授

研究者番号：30717103

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：日本の温帯ジャポニカイネ166品種の強光照射後の光合成応答（光合成誘導）の多様性を評価した。そして在来品種である愛国もちが突出して迅速な光合成誘導を示すことを見出した。この要因として、強光照射直後の葉内の光合成活性の迅速な上昇、ならびに気孔伝導度の迅速な上昇が挙げられた。そして、愛国もちの迅速な光合成誘導は、変動光環境下での成長量を増大する効果があった。ゲノムワイド関連解析の結果、光合成誘導の迅速化に関わるゲノム領域を第3、5染色体上に見出した。原因遺伝子を解明することにより、植物の光合成誘導の制御メカニズムを解明できると期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光に対する光合成の応答性を高めることは、光エネルギーを無駄なく利用し、作物の生産性を高めることに貢献する。本研究で我々は、在来品種である愛国もちが日本のイネ品種の中で突出して迅速な光応答性を高めることを発見し、その生理・遺伝メカニズムの一端を明らかにした。また野外のような変動する光環境では、他の品種にくらべて植物の成長性にも優れることを見出した。愛国もちは、イネ品種の物質生産性の改良のための育種素材として役立つと期待される。

研究成果の概要（英文）：We evaluated the diversity of photosynthetic responses (photosynthetic induction) of 166 Japanese rice cultivars after stepwise irradiation increase. We found that Aikoku Mochi, a native variety, showed remarkably rapid photosynthetic induction. This was attributed to a rapid increase in photosynthetic activity in the leaves immediately after high light irradiation and a rapid increase in stomatal conductivity. The rapid photosynthetic induction of Aikoku Mochi showed increased growth under fluctuating light condition relative to constant light condition. Genome-wide association study revealed genomic regions on chromosomes 3 and 5 involved in the rapid induction of photosynthesis. Identification of the causal gene is expected to elucidate the regulatory mechanism of photosynthesis induction in plants.

研究分野：作物生理学

キーワード：光合成誘導 ゲノムワイド関連解析 気孔伝導度 炭酸固定 変動光 自然変異 イネ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

作物群落が受容する光強度は、雲の動きや植物同士の遮蔽によって、数秒から数分の時間間隔で大きく変動する。一方、光によって駆動される葉の光合成の応答はきわめて緩慢である。たとえば、弱光条件におかれた作物が突然の強光条件に晒された場合、光合成速度が上昇し安定化するまでに数分~数十分の時間を要する。この光合成誘導の遅れによる作物生産量の損失は約 20% と試算されているため、光合成誘導にかかる時間を短縮し、光応答を促進することができれば作物生産性の向上に結びつくと期待される (Tanaka et al. 2019)。しかし、作物の光合成誘導の品種間差に関わる研究はまだあまり行われておらず、品種間差をもたらす生理要因や遺伝要因の見も乏しい。

2. 研究の目的

本研究では、イネの品種間の光合成誘導の差異に関わる生理・遺伝要因の解明を目的とした。具体的には、日本で育成されたジャポニカイネ 166 品種を主な実験材料として用い、(1) 大規模光合成測定実験によって日本のイネ品種の光合成誘導の自然変異を明らかにすること、(2) ゲノムワイド関連解析によって光合成誘導の自然変異の品種間佐に関わるゲノム領域を特定すること、(3) 突然変異体を用いた生理解析を通じて遺伝子作用の詳細を解明すること、である。なお、本研究期間では、(2) のゲノムワイド関連解析において有望遺伝子特定まで至らなかったため、(3) の着手には至っていない。

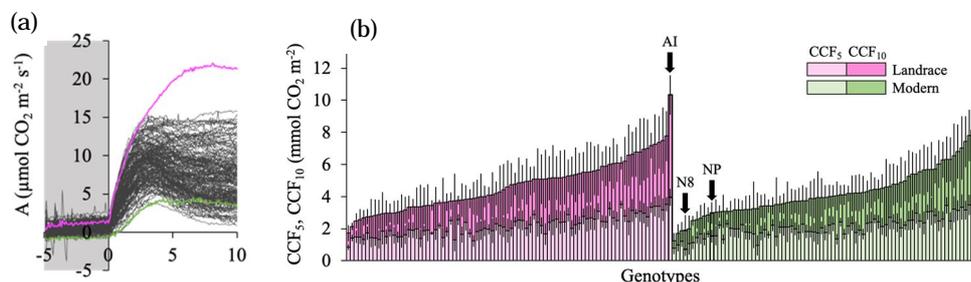
3. 研究の方法

日本で育成されたジャポニカイネ 166 品種 (在来品種 86、育成品種 80、8 反復) を 2L サイズのポットで約 1 ヶ月間野外栽培した。前日に暗条件に静置した植物体に対して、8 台の光合成蒸散測定装置 (LI-6400, LI-COR 社) を用いて弱光 5 分 ($50\mu\text{mol m}^{-2} \text{ photon s}^{-1}$) → 強光 10 分 ($1500\mu\text{mol m}^{-2} \text{ photon s}^{-1}$) の条件で光合成速度ならびに関連パラメータを測定した。光合成誘導の差異に関わる要因を明らかにするため、種々の CO_2 環境で光合成誘導を評価する Dynamic-ACi 解析を実施し、光合成誘導時の酵素キネティクスならびに律速段階の解析を行った (Taniyoshi et al. 2022)。また人工気象器内にて変動光環境を作り出し、定常光環境に対する植物成長量の違いを評価した。ゲノムワイド関連解析に関しては、(Yano et al. 2016) によって得られたゲノムシーケンス情報に基づいて SNP 多型を抽出し、R パッケージである "rrBRUP" を用いた線形混合モデルによって解析を実施した。

4. 研究成果

(1) ジャポニカイネの光合成誘導の多様性

強光照射後の CO_2 同化速度 (A) ならびに光合成パラメータの応答には、幅広い品種間差異が認められた (第 1 図 a)。A 値の強光照射後 10 分間の積算値である CCF_{10} は、これら品種の間で約 8 倍の差異が認められた (第 1 図 b)。一般的に日本で育成された品種群は遺伝的多様性が小さく、光合成速度の差異も小さいと考えられているが、光合成誘導の違いについては、世界のイネ品種群と比べても遜色ないことが明らかとなった (Taniyoshi et al. 2020)。なかでも在来品種の「愛国もち」の CCF_{10} は突出して大きく ($10.3 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2}$)、光合成誘導が大きいことが知られているインディカ品種「タカナリ」にも近い値であった ($12.9 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2}$)。21 品種を選定して翌年に再実験を行ったところ、2 カ年の CCF_{10} に高い正の相関が認められ、「愛国もち」はここでも最大の CCF_{10} を示した。すなわち「愛国もち」は日本のイネ品種の中で最も光合成誘導が迅速であり、有望な育種素材であると結論された。

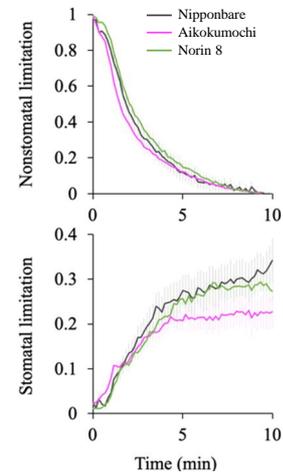


第 1 図 (a) 日本のイネ 166 品種の強光照射後の CO_2 同化速度(A)の推移、(b) 強光照射後 5 分間および 10 分間の CO_2 同化量の積算値。

(2) 光合成誘導の差異に関わる生理的要因

光合成誘導中の気孔伝導度と CCF_{10} との間には強い正の相関が認められた。一方、 CO_2 同化活性と気孔伝導度とのバランスで決まる葉内 CO_2 濃度は、 CCF_{10} と強い負の相関が認められた。すなわち、光合成誘導の速度に最も強く影響するのは CO_2 同化に関わる葉の内部の酵素活性であり、気孔伝導度の効果は副次的であることが示唆された。

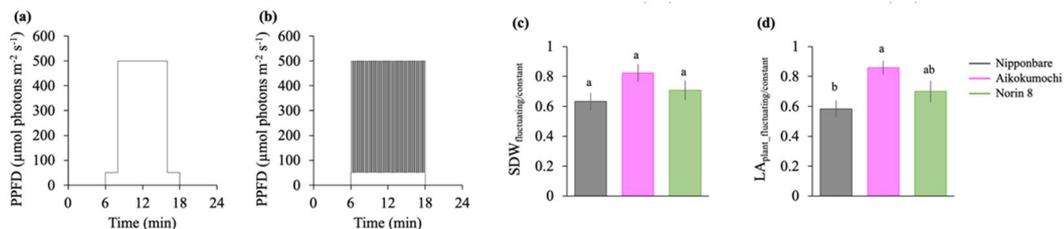
「愛国もち」「日本晴」「農林8号」の3品種に絞って Dynamic-ACi 解析を行ったところ、「愛国もち」は低 CO_2 濃度環境で迅速な光合成誘導を示し、高 CO_2 濃度環境では違いが見られなくなることがわかった。また Kaiser et al. (2017) による律速段階解析の結果、強光照射3分間の最大カルボキシル化速度および最大電子伝達速度が高いこと、その後の時間帯には気孔伝導度が大きいことが総合的に「愛国もち」の迅速な光合成誘導に寄与していたと判断された(第2図)。



第2図 光合成誘導中の光合成律速要因のモデル解析。

(3) 変動光条件下における物質生産

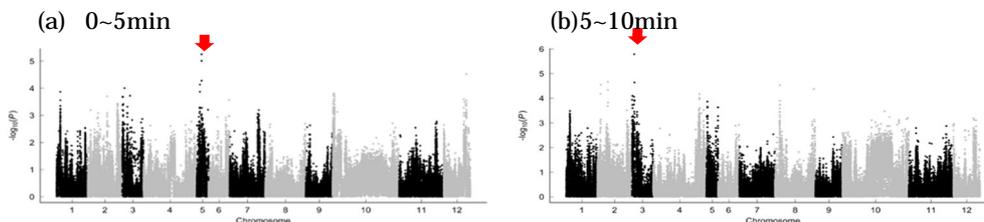
連続する変動光環境に対する植物体の反応を「愛国もち」「日本晴」「農林8号」の3品種を用いて解析した。定常光または変動光に設定した人工気象器内でこれら品種を栽培したところ、変動光環境下における「愛国もち」のバイオマス量(対定常光比)が上記2品種に比較して有意に高いことが示された(第3図)。すなわち、「愛国もち」の迅速な光合成誘導は、変動する光環境において物質生産を高める効果を有することになる。



第3図 人工気象器内の変動光環境における植物成長。(a) 定常光環境の光条件設定、(b) 変動光環境の光条件設定、(c) 1ヶ月後の地上部バイオマス量、(d) 1ヶ月後の葉面積(いずれも変動光環境/定常光環境の比)

(4) ゲノムワイド関連解析による候補ゲノム領域

ゲノムワイド関連解析の結果、強光照射後5分間の光合成積算値に関わるゲノム領域を第5染色体上に、5分から10分間の光合成積算値に関わるゲノム領域を第3染色体にそれぞれ見出した(第4図)。このように光合成誘導の速さに影響する遺伝子は強光照射後の時間帯によって異なっていた。一方、ピーク領域に存在する遺伝子のアノテーション情報のみからは、光合成誘導に関わる遺伝子候補を特定することが出来なかった。そこで我々は、「愛国もち」と「日本晴」を交配して組換え近交系約100系統を育成し、次世代シーケンス解析によるジェノタイプングを実施した。この系統群を利用して原因遺伝子の特定を目指す計画である。



第4図 光合成誘導に関わるゲノムワイド関連解析。(a) 光強度照射後0~5分間の CO_2 獲得の積算値、(b) 光強度照射後5~10分間の CO_2 獲得の積算値を対象とした解析。それぞれの点は SNP を示し、赤矢印は候補ゲノム領域を示す。

参考文献

Tanaka et al. (2019) Current Opinion in Plant Biol. 49:52-59. Taniyoshi et al. (2022) Physiol. Plantarum 174:e13825. Taniyoshi et al. (2020) Plant Prod. Sci.:1-9. Yano et al. (2016) Nature Genetics 48:927. Kaiser et al. (2017) J. Exp. Bot. 68:5629-5640.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 2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 Taniyoshi Kazuki, Tanaka Yu, Adachi Shunsuke, Shiraiwa Tatsuhiko	4. 巻 174
2. 論文標題 Anisohydric characteristics of a rice genotype ‘ <scp>ARC</scp> 11094 ’ contribute to increased photosynthetic carbon fixation in response to high light	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physiologia Plantarum	6. 最初と最後の頁 e13825
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/ppl.13825	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 -
1. 著者名 Sakoda Kazuma, Adachi Shunsuke, Yamori Wataru, Tanaka Yu	4. 巻 -
2. 論文標題 Towards improved dynamic photosynthesis in C3 crops by utilizing natural genetic variation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Experimental Botany	6. 最初と最後の頁 erac100
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/jxb/erac100	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Honda Sotaro, Imamura Ayumu, Seki Yoshiaki, Chigira Koki, Iwasa Marina, Hayami Kentaro, Nomura Tomohiro, Ohkubo Satoshi, Ookawa Taiichiro, Nagano Atsushi J., Matsuoka Makoto, Tanaka Yu, Adachi Shunsuke	4. 巻 159
2. 論文標題 Genome-wide association study of leaf photosynthesis using a high-throughput gas exchange system in rice	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Photosynthesis Research	6. 最初と最後の頁 17 ~ 28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11120-023-01065-3	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 HONDA Sotaro, OHKUBO Satoshi, ARAIE Toshitake, AKIYAMA Shigeyuki, AOKI Naofumi, TANAKA Yu, ADACHI Shunsuke	4. 巻 92
2. 論文標題 葉のCO2同化速度の簡便迅速測定システムの開発	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Crop Science	6. 最初と最後の頁 289 ~ 299
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1626/jcs.92.289	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Adachi Shunsuke, Stata Matt, Martin Duncan G, Cheng Shifeng, Liu Hongbing, Zhu Xin-Guang, Sage Rowan F	4. 巻 191
2. 論文標題 The Evolution of C4 Photosynthesis in Flaveria (Asteraceae): Insights from the Flaveria linearis Complex	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plant Physiology	6. 最初と最後の頁 233 ~ 251
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/plphys/kiac467	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 谷吉和貴・関佳彬・平松将真・田牧陸男・浅木直美・松岡信・田中佑・安達俊輔
2. 発表標題 日本の水稻166品種を用いた光合成誘導反応の変異解析
3. 学会等名 日本作物学会第233回講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷吉和貴・宮本愛梨・浅木直美・松岡信・田中佑・安達俊輔
2. 発表標題 日本の水稻品種における光合成誘導反応の変異をもたらす生理的要因の解析
3. 学会等名 日本作物学会第233回講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sotaro Honda, Ayumu Imamura, Yoshiaki Seki et al.
2. 発表標題 Genome-Wide Association Study of Leaf Photosynthetic Rate in Rice Using a High Throughput Gas Exchange System
3. 学会等名 6th International Rice Congress
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shunsuke Adachi
2. 発表標題 Photosynthesis prediction by field transcriptome
3. 学会等名 Taiwan-Japan Plant Biology 2023
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
研究分担者	田中 佑 (Tanaka Yu) (50634474)	岡山大学・環境生命自然科学学域・准教授 (15301)	光合成誘導の多検体測定と大規模データを用いたモデル解析

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
---------	---------