

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H03077

研究課題名（和文）高い光合成能力を持つイネ品種の将来の気候変動下における水利用動態の解明

研究課題名（英文）Water use of high-yielding rice varieties under changing climate

研究代表者

伊川 浩樹（Ikawa, Hiroki）

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・北海道農業研究センター・主任研究員

研究者番号：10754393

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：慣行的に栽培される水稲品種であるコシヒカリと高い光合成能力を持つ水稲品種であるタカナリやオオナリに着目し、それらの生理特性の相違が群落全体の水利用に及ぼす影響を観測により明らかにした。タカナリやオオナリは、コシヒカリと比べて個葉・群落の両スケールで高い光合成を發揮した。タカナリやオオナリの高い群落光合成量と蒸散量は、個葉レベルでの高い光合成能力、葉内CO₂輸送能力、気孔開度に依存すると考えられ、それらを再現する水田生態系モデルが構築された。観測結果では、フェノロジーの品種間差が生育期間全体の光合成量に及ぼす影響も無視できず、今後のモデル開発に有用な知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在および将来の作物需要を支える上で、高い光合成能力は、水稲のような主要な作物に必要な形質である。一方で、光合成特性は、作物群落の水利用（蒸散散）とも密接に関わっているため、作物が高い光合成を發揮することで、どの程度、水需要に対する影響があるのかを把握する必要がある。本研究では、光合成に比べて蒸散散の品種間差は小さい結果を示した。観測と生態系モデルの両者によるアプローチにより、多様な形質を持つ水稲や他の作物に対しても同様の評価を行うための指針となる。

研究成果の概要（英文）：Canopy photosynthesis and evapotranspiration were compared between a common rice cultivar (Koshihikari) and high-yielding rice cultivars (Takanari & Onari). Compared with Koshihikari, Takanari and Onari achieved a greater canopy photosynthesis and water use due to their high leaf photosynthesis capacity, mesophyll CO₂ transfer, and stomatal conductance. Based on the physiological properties, a rice ecosystem model was developed. Furthermore, observations suggest the phenology effect is also important for the cumulative canopy production over the growth period.

研究分野：生物気象学

キーワード：水稲 蒸散散 光合成 多収品種 生態系モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高い光合成能力を持つイネ品種の栽培は、将来の世界の食料需要を賄うための有望な戦略と期待されている。しかし、光合成能力が高い品種は一般に気孔開度が大きく、蒸散による水消費の増加が懸念されている。申請者らは、光合成能力が高いイネ品種(タカナリ)は、観光の栽培品種(コシヒカリ)より気候開度が4割ほど大きい、蒸散量の違いは1割未満であること、および高CO₂環境下では蒸散量が減少することを報告した(文献)。しかし、上記の研究で示した結果は特定の生育ステージ、気象条件および品種に限定されて知見である。

2. 研究の目的

本研究では、以下の3点について、野外計測および室内実験、モデル解析により解明する。

- (1) 高い光合成能力を持つ水稻の品種の日々の蒸散量や光合成は、生育期間を通じてどのように変化し、最終的な水利用効率(収量/蒸散量)にどのような影響を与えるのか?
- (2) 今後予想される大気環境(気温やCO₂濃度)の変化は、水稻の蒸散量や水利用効率にどのような影響を与えるのか?
- (3) 水稻の蒸散量や水利用効率は、どのような遺伝子に支配されているのか?

3. 研究の方法

(1) 慣行的に栽培されている品種コシヒカリが作付けされている水田と、高い光合成能力を持つと考えられる品種オオナリが栽培されている水田において、生育期間を通じた群落光合成と蒸発散の測定をおこなう。なお、比較する2圃場は類似した気候条件を有する。

コシヒカリが作付けされている茨城県つくば市真瀬に位置する水田観測サイトは、本研究に先立って10年以上の渦相関法による群落光合成と蒸発散の観測データの蓄積がある。当観測サイトにおける蒸発散の時間変動について本研究の代表者によって報告されている(文献)。オオナリが作付けされている茨城県龍ヶ崎市の水田においては、本研究が開始する前年度に、真瀬の観測サイトと同様の渦相関法による観測システムを立ち上げた。

(2) 特定の気象条件における蒸散量や水利用効率の品種間比較は、の計測で把握することが可能であるが、多様な気象条件や将来の大気環境下における予測は困難である。そこで本研究では、独自に開発した群落光合成・微気象モデルと作物モデルを結合し、将来予測される大気環境の変化が生育期間を通じた蒸散量や水利用効率に与える影響について、モデルシミュレーションにより評価する。

水田生態系モデルの蒸散・光合成に関わる生理パラメータは、2015~2017年に研究代表者らが実施した開放系大気CO₂増加実験における計測データ(文献)などを用いて決定し、モデルの検証はの実験ならびに、CO₂濃度を制御した自然光型の温度勾配型実験施設(グラディオトロン)におけるイネ栽培実験で実施する。本研究で使用する数値モデルについては、葉内のCO₂拡散を考慮した光合成モデルを使用する。葉内CO₂拡散抵抗の測定は容易ではないため、これまでのモデルではほとんど考慮されて来なかった。しかし葉内CO₂拡散抵抗を考慮しないと将来の気候変動環境下における植物の光合成の見積もりを大きく誤る可能性が示唆されている。

(3) 開放系大気CO₂増加実験施設とCO₂濃度を制御した自然光型の温度勾配型実験施設を利用して、水稻の日々の光合成・蒸散・水利用効率と遺伝子発現応答を調べる。

アクアポリン(水チャネル)は、水やCO₂を透過する膜タンパク質であり、作物の蒸散や光合成に対して、重要な役割を担っている。各アクアポリンの微気象環境に対する発現量応答を、群落光合成・微気象モデルのパラメータ(各部位の通水抵抗、葉内CO₂拡散抵抗など)と関係づけることで、コシヒカリとタカナリ(またはオオナリ)との差を調べることで、蒸散量や水利用効率を支配している遺伝子候補の抽出が期待される。個々のアクアポリンの役割の解明が進むと期待される。アクアポリンと共発現している各種遺伝子群からも、候補となる新たな遺伝子が見つかる可能性がある。またタカナリの高い光合成能力には、高い窒素吸収能力と葉内窒素濃度の高さが関係していることがこれまでの研究で示されていて窒素輸送に関わる遺伝子群の発現量の環境応答に対する2品種間の環境応答に対するコシヒカリとタカナリ(またはオオナリ)との差を調べることで、高い窒素吸収能力の維持に関係した遺伝子候補が抽出できる。

4. 研究成果

(1) 真瀬と龍ヶ崎の水田におけるコシヒカリとオオナリの群落光合成と蒸発散の3カ年(2018-2020)の比較において、オオナリの圃場がコシヒカリの圃場より、生育期間を通じた光合成と蒸発散が大きく、先行研究(文献)であり本研究でも開発を進めるモデルの結果を部分的にサポートする結果であった。光合成に関して、観測結果の方がモデルよりも両群落の差異が大きかったことに対して、枯れあがりの速度の違いがモデルでは考慮できていないことと考察された。これらの結果は学会発表で公開され(文献)、論文公表に向けた準備がされている。観測によ

て当初の研究目的は概ね達成されたが、フェノロジーの品種間差を作物モデルで考慮することで、生育期間全体の水田の光合成と蒸発散を見積もることは、今後の課題である。

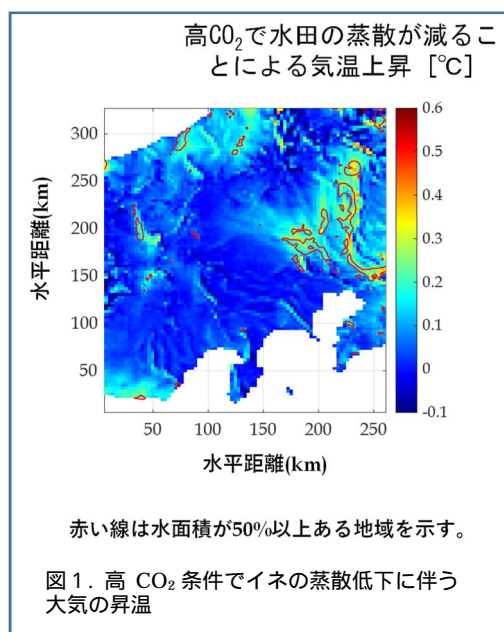
(2) 葉内 CO_2 拡散抵抗を考慮した水田生態系モデルの開発を進める上で、2017 年度に行った開放系大気 CO_2 増加実験のデータと、同位体を用いた室内における追加試験より、多収品種であるタカナリは慣行的に栽培される品種のコシヒカリに比べて、最大光合成能力、葉内 CO_2 輸送能力、および気孔コンダクタンスが高いことを示し研究論文を発表した(文献)。この研究論文で報告した水稻の生理特性をもとに、イネの生育モデルの開発を進めている。

当初の研究計画にはなかったが、文献の成果をもとに、水田生態系モデルと局地循環モデルを組み合わせ、高 CO_2 によって、イネの気孔が閉じることで、植物体の温度が上がり、水田地帯では日中気温が 0.4 ほど上昇することを示した(文献)。この結果は、本研究代表者が所属する農研機構と北海道大学による共同のプレスリリースにより紹介された。

これら一連の研究により、当初の研究目的であった、気候変動が水稻の蒸散量や水利用効率に影響を与えるのみならず、気候変動の影響を受けた水稻から大気へのフィードバック作用についても、一つの知見を示すことができた。

(3) 本研究では、2020 年度に温度勾配型実験施設による観測と、本研究期間以前の 2017 年に開放系大気 CO_2 増加実験のそれぞれで取得された植物体サンプルに対して、遺伝子発現解析と代謝物質(メタボローム)解析をおこなった。温度勾配型実験施設においては、遺伝子発現応答を調査するための植物体サンプリングに平行してイネの蒸散などの生理特性の測定データがあり、それらをもとに、高 CO_2 がイネの蒸散に与える影響は、大気の乾燥度合に関係することを示し、学会発表を行った(文献)。

遺伝子発現解析は一般社団法人クロックミクスに委託したものの、植物体サンプルの取得や準備などには、多くの時間を必要とする。従って本研究期間より以前にイネを対象におこなった環境操作実験のデータをもとに、植物体内の水輸送をコントロールすると考えられるアクアポリンを含めた、根と葉の全遺伝子発現量と、植物に対する大気の蒸散要求の関係性を示した(文献)。当初の計画であった、温度勾配型実験施設と開放系大気 CO_2 増加実験の両実験施設において取得された遺伝子発現データに基づく、蒸散と遺伝子発現の解析については、文献で得られた結果との整合性などに着目しつつ、今後の課題として残された。



< 引用文献 >

Ikawa, H. et al. (2018) Increasing canopy photosynthesis in rice can be achieved without a large increase in water use- a model based on free-air CO_2 enrichment. *Global Change Biology*, 24, 1321-1341

小野ら (2022) 水稻多収品種オオナリの群落ガス交換特性について. 農業気象学会全国大会 2022

Ikawa, H. et al. (2019) High mesophyll conductance in the high-yielding rice cultivar Takanari quantified with the combined gas exchange and chlorophyll fluorescence measurements under free-air CO_2 enrichment. *Plant Production Science*, 22(3), 395-406

Ikawa, H. et al. (2021) Heat-Mitigation Effects of Irrigated Rice-Paddy Fields under Changing Atmospheric Carbon Dioxide based on a Coupled Atmosphere and Crop Energy-Balance Model. *Boundary-Layer Meteorology*, 179, 447-476.

Ikawa, H. et al (2022) Multiplicative sensitivity of rice canopy evaporation to atmospheric carbon dioxide, temperature, and humidity, Abstract for International Symposium of Agricultural Meteorology

Kuwagata, T. et al (2022) Hydrometeorology for plant omics: potential evaporation as a key index for transcriptome in rice. *Environmental and Experimental Botany* 196, 104724

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ikawa Hiroki, Kuwagata Tsuneo, Haginoya Shigenori, Ishigooka Yasushi, Ono Keisuke, Maruyama Atsushi, Sakai Hidemitsu, Fukuoka Minehiko, Yoshimoto Mayumi, Ishida Sachinobu, Chen Charles P., Hasegawa Toshihiro, Watanabe Tsutomu	4. 巻 179
2. 論文標題 Heat-Mitigation Effects of Irrigated Rice-Paddy Fields Under Changing Atmospheric Carbon Dioxide Based on a Coupled Atmosphere and Crop Energy-Balance Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Boundary-Layer Meteorology	6. 最初と最後の頁 447-476
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10546-021-00604-6	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 該当する

1. 著者名 Ikawa Hiroki, Sakai Hidemitsu, Chen Charles P., Soong Tik Hang, Yonemura Seiichiro, Taniguchi Yojiro, Yoshimoto Mayumi, Tokida Takeshi, Zhang Guoyou, Kuwagata Tsuneo, Nakamura Hirofumi, Avenson Tom, Hasegawa Toshihiro	4. 巻 22
2. 論文標題 High mesophyll conductance in the high-yielding rice cultivar Takanari quantified with the combined gas exchange and chlorophyll fluorescence measurements under free-air CO2 enrichment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plant Production Science	6. 最初と最後の頁 395-406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/1343943X.2019.1626253	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 該当する

1. 著者名 Kuwagata Tsuneo, Murai-Hatano Mari, Matsunami Maya, Terui Shingo, Nagano Atsushi J., Maruyama Atsushi, Ishida Sachinobu	4. 巻 196
2. 論文標題 Hydrometeorology for plant omics: Potential evaporation as a key index for transcriptome in rice	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Environmental and Experimental Botany	6. 最初と最後の頁 104724 ~ 104724
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.envexpbot.2021.104724	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Hiroki Ikawa, Toshihiro Hasegawa, Etsushi Kumagai, Hitomi Wakatsuki, Tsuneo Kuwagata
2. 発表標題 Multiplicative sensitivity of rice canopy evaporation to atmospheric carbon dioxide, temperature, and humidity
3. 学会等名 International Symposium of Agriculture and Meteorology 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野圭介、伊川浩樹、宮田明
2. 発表標題 水稲多収品種オオナリの群落ガス交換特性について
3. 学会等名 農業気象学会全国大会2022 (国際学会)
4. 発表年 2022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	長谷川 利拡 (Hasegawa Toshihiro) (10228455)	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・グループ長 (82111)	
研究分担者	米村 正一郎 (Yonemura Seiichiro) (20354128)	県立広島大学・生物資源科学部・教授 (25406)	
研究分担者	小野 圭介 (Ono Keisuke) (20549555)	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・上級研究員 (82111)	

6. 研究組織（つづき）

	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	関山 恭代 (Sekiyama Yasuyo) (60342804)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・高度分析研究センター・上級研究員 (82111)	
研究分担者	桑形 恒男 (Kuwagata Tsuneo) (90195602)	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・再雇用職員 (82111)	

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1件

国際研究集会	開催年
陸上植物と気象環境の相互作用を解明するためのワークショップ(Prof. Jordi Vila-Guerau de Arellano 氏を招待して)	2020年～2020年

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