

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：82111

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H06204

研究課題名(和文) 同位体フェノミクスによる高CO2時代の理想的イネ形質の探求

研究課題名(英文) Isotope phenomics: the quest for ideal phenotypes of rice plants under elevated-CO2 world

研究代表者

常田 岳志 (Tokida, Takeshi)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業環境変動研究センター・主任研究員

研究者番号：20585856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,700,000円

研究成果の概要(和文)：水田は世界人口の半数に主食のコメを供給する食糧生産基地である一方、強力な温室効果ガスであるメタンを大量に排出している。開放系大気CO2濃度増加実験(FACE)を実施し、様々なイネ遺伝資源に対する高CO2応答を実証的に調査した結果、現在の日本の主力品種と比べて高CO2による増収効果が大きい品種・系統が見出され、イネの形質としてシンク容量が重要であることが分かった。また多収かつ高CO2応答が大きいにもかかわらず、メタン排出量が少ない品種・系統が見出された。同位体による解析の結果、イネの根圏が関与する土壌有機物由来のメタン生成抑制/メタン酸化促進が低メタン化の重要なメカニズムであることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

増え続ける世界人口を養いつつ地球温暖化問題を解決するため、高CO2に対するコメ収量の応答を高めつつ、温室効果ガスであるメタンの排出を抑制する水田稲作が必要とされている。本研究で見出された高CO2に対する応答性の高い品種やその形質は、増加し続ける大気CO2を増収に結びつけるイネを選抜・育成する上で重要な知見である。また水田からのメタン排出については、これまで生産面とのトレードオフや、高CO2による排出増加の可能性が強調されてきた。本研究の結果、多収かつ高CO2応答が大きくてもメタン排出量が少ない品種が見出され、高CO2時代にコメ生産の増加とメタン排出低減を両立する新たな道筋が拓けた。

研究成果の概要(英文)：Rice paddies provide staple food for half the world population while they represent one of the largest anthropogenic sources of atmospheric CH₄, a potent greenhouse gas. In this study, free-air CO₂ enrichment (FACE) experiment was conducted to study responses of rice plants and CH₄ emissions to elevated [CO₂], and we found rice cultivars/lines that exhibited higher e-[CO₂] responsiveness than that of a popular Japanese cultivar (cv. Koshihikari). Large sink capacity was identified as one of the most important traits for the responsiveness. We also found low CH₄-emitting cultivars/lines but possess good e-[CO₂] responsiveness in grain yield. Isotopic analyses showed that lower CH₄ production from soil organic matter (SOM) and/or greater oxidation of SOM-born CH₄, presumably being relevant to greater root development, were the major mechanisms responsible for the lower CH₄-emission genotypes.

研究分野：農業環境工学

キーワード：水田 高CO2 イネ メタン

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

水田は世界人口の半数に主食の米を供給する人類最大の食糧生産基地である一方、強力な温室効果ガス「メタン」を大量に排出している。猛烈な勢いで上昇を続ける大気 CO₂ 濃度の増加は、コメ収量にはプラスに働くもののその程度は限定的であり(+200 ppm の増加で 0-15%程度の増収)、一方でメタン排出量を大きく増加させることが危惧されている。水田稲作におけるコメ収量の増加とメタン排出量低減の両立は、人類の生存を左右しかねない喫緊の課題である。

本研究の開始当初は、多様なイネ遺伝資源の高 CO₂ 応答に関する実証的なデータは極めて限られており、高 CO₂ 応答が品種・系統によって異なるメカニズムもほとんど分かっていなかった。またメタン排出量は高 CO₂ によって大幅に増加するとされており(+200 ppm で+20-50%もの増加)、その要因として高 CO₂ によるバイオマス増加によってメタンの炭素源となる有機物の供給が増える可能性が指摘され、収量増加とメタン排出にはトレードオフの関係があると考えられていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下 3 点とした：

(1) 実際の水田において開放系大気 CO₂ 濃度増加(Free-Air CO₂ enrichment, 以下 FACE)実験を行い、イネのバイオマス・収量・メタン排出等の高 CO₂ 応答を実証的に把握すること。

(2) FACE 実験に多様なイネ遺伝資源を供試することで、高 CO₂ 応答の品種・系統間差を調査するとともに、どのような形質が高い収量応答に結びつくかを明らかにすること。その際、安定同位体比を活用した新しい表現型解析手法を用いて、高 CO₂ 応答の背後にあるメカニズムを解明すること。

(3) FACE を炭素安定同位体比ラベル実験と見なし、メタン排出量の品種間差のメカニズムを炭素動態の面から解明すること。

3. 研究の方法

(1) FACE 実験：茨城県つくばみらい市の水田において、FACE 実験を実施した(図 1)。FACE は差し渡し 17 m の 8 角形の「リング」の周辺に CO₂ 放出用チューブを張り巡らし、風上側から制御的にリング内の CO₂ 濃度を高める装置である。リング中心の CO₂ 濃度を外気区と比べて 200 ppm 高めるように制御した。1 枚の水田に FACE 区および外気 CO₂ 区を 1 つずつ設置し、4 枚の水田をつかって 4 反復の圃場実験を行った。

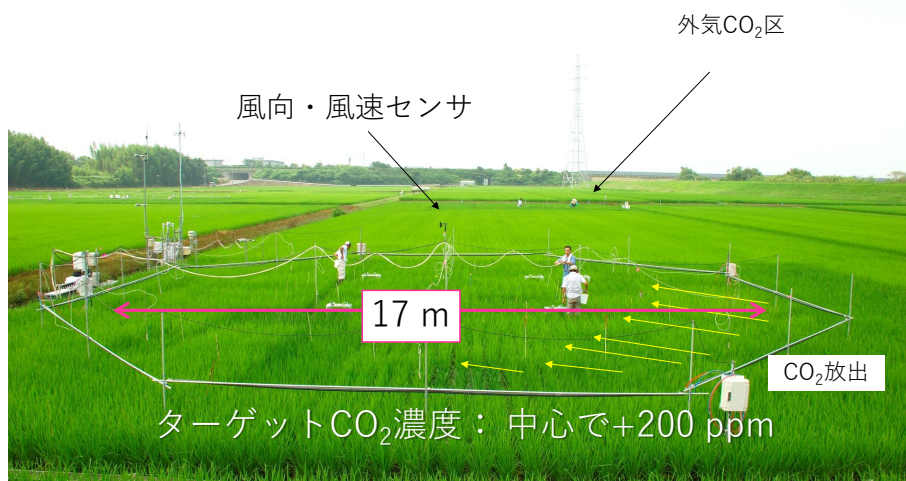


図 1 FACE 実験の様子。リング中央に風向・風速センサが設置されており、リング中心で外気 CO₂ 区よりも 200ppm 高い濃度になるように風上側から CO₂ を放出した。

(2) 供試品種・系統：各リング内に、様々なイネ品種・系統を供試することで、高 CO₂ 応答を屋外の条件で実証的に調査した。特にコシヒカリと比べて現在の外気 CO₂ 条件下で多収であり、高 CO₂ に対する応答も高い「タカナリ」に着目し、この 2 品種を親にもつ染色体部分置換系統群(Chromosome Segment Substitution Lines, 以下 CSSLs)を供試した。また世界のイネコアコレクション(World Rice Collection, 以下 WRC)のうち対照品種コシヒカリと熟期の近い品種も供試し、バイオマス・穂重の高 CO₂ 応答を調査した。

(3) 安定同位体比の測定：FACE 実験で得られた様々なイネ品種・系統のサンプル(玄米、ワラなど)を乾燥・粉碎し、安定同位体比質量分析計を用いて酸素($\delta^{18}\text{O}$)、窒素($\delta^{15}\text{N}$)、炭素($\delta^{13}\text{C}$)の安定同位体比を測定した。ただし世界的な供給不足によってヘリウム入手が困難となり、安定同位体比質量計を稼働させることが困難な状況が続いたため、現在は一部サンプルの分析に留まっている。残りのサンプルの分析は今後進める予定である。

(4)メタン排出量の品種間差の解明：メタン排出量が異なる品種によって異なるメカニズムを、炭素動態の面から解明するため、FACE を「炭素安定同位体のトレーサー実験」と見なした解析を行った。FACE 実験で暴露に用いる CO₂ の炭素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$)は大気 CO₂ の値よりも低いため、FACE 区と外気区のイネは異なる炭素同位体比を持つ。一方、同じくメタンの基質となりうる土壤有機物は、FACE・外気区とも同じ値を持つように予め揃えておく。その上で両区においてメタンの炭素安定同位体比を測定しその差をイネの同位体比の差と比べることにより、メタンの炭素源を栽培中の光合成産物と土壤有機物とに分けて定量した。

4. 研究成果

(1)高 CO₂ による乾物生産・収量の増加程度はイネの窒素栄養状態に大きな影響を受け、窒素を十分与えた場合は、*GN1a* や *APO1* など籾数を増やしシンク容量を高める遺伝子が増収率を高める効果を持つことがわかった。一方、低窒素条件では高 CO₂ による増加程度は小さいと考えられてきたが、多収品種タカナリは無窒素施肥条件下でも高い増収率を示すことが判明した。

(2)無窒素施肥条件下でも大きな高 CO₂ 応答を示すタカナリとその条件では収量が増加しないコシヒカりに着目し、コシヒカリ-タカナリの CSSLs を用いた試験を 2 年にわたって行った。CSSLs の中から籾数に関係する二つの遺伝子(*GN1a* および *APO1*)が関係する系統について調べたところ、タカナリ型の *GN1a* は外気 CO₂ 条件の収穫指数を高めたが、多窒素条件の結果とは異なり、穂重の高 CO₂ 応答には結びつかなかった。*APO1* がタカナリ型となった系統では、外気 CO₂ 条件の収穫指数は寧ろコシヒカリより低下するが高 CO₂ による増加が大きく、穂重の高 CO₂ 応答も高かった。以上より、無窒素施肥条件の高 CO₂ 応答は単純なシンク容量だけでは決定されず、他の要因も関わることが分かった。

(3)安定同位体比を用いた形質評価の一つとして、タカナリとコシヒカリの玄米サンプルの酸素安定同位体比の分析を行ったところ、CO₂ 条件によって $\delta^{18}\text{O}$ が明確に異なることがわかった。これは高 CO₂ に対するイネの生理的な応答とその品種間差が $\delta^{18}\text{O}$ に反映されており、例えば気孔開度の応答などが関わる可能性を示している。なお世界的なヘリウム供給不足によって同位体分析に必要なヘリウムの入手が困難となり、同位体比分析の大半は延期せざるを得なかった。今後、窒素吸収量、籾数などの形質と高 CO₂ 応答との関係を炭素/窒素/酸素の安定同位体比の面から解析する予定である。

(4)世界のイネ品種(WRC)の高 CO₂ 応答を調査したところ、無窒素施肥条件下でも穂重は多くの品種で増加すること、ただしその程度はほぼゼロから+30%以上におよぶ大きな品種間差があることが分かった。この結果、「低窒素条件下では高 CO₂ 応答が見られない」という既存の知見は、それまでに供試した品種の特性が影響していた可能性が高いことが示唆された。また世界のイネ遺伝資源の中には、タカナリよりも更に高 CO₂ 応答性を示す品種があることが分かった。

(5)高 CO₂ によるメタン排出増加は、生育前半には+30%程度と大きかったがイネの生育とともに減少し、出穂期頃には認められなくなった。このような生育ステージによる変化はイネの葉面積の傾向と比較的良く一致しており、メタン排出の応答はバイオマスよりもむしろ比較的短期の光合成量の変化に強く影響を受けることが示唆された。

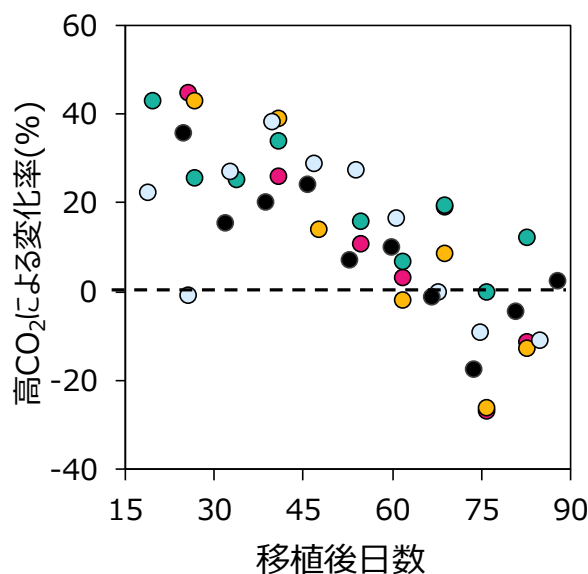


図2 メタン排出量の高 CO₂ 応答の生育ステージ依存性。異なる色は異なる年次を表す。年次に寄らず、高 CO₂ によるメタン排出量の増加は生育初期に大きく、出穂期頃(移植後 70 日前後)には見られなくなった。

(6)多収で高 CO₂ に対する収量応答も大きいタカナリは、コシヒカリと比べて乾物生産、特に根のバイオマスが大きい。そのため当初はコシヒカリよりもメタン生成の有機物源となる根の滲出物や枯死根

の供給が多く、メタン排出量が大きいと想定していた。しかし予想に反し、タカナリのメタン排出量はコシヒカリと比べて小さいことが判明した。このメカニズムを炭素動態・基質の面から調査したところ、タカナリでは土壌有機物から生成されたメタンの排出がコシヒカリと比べて大幅に少ないことが分かった。またコシヒカリ・タカナリの CSSLs について溶存メタン濃度を調査したところ、コシヒカリ背景の系統からコシヒカリと比べて有意に濃度が低い系統が見つかり、低メタン性に関する染色体領域の候補が見つかった。さらにコメ収量と溶存メタン濃度に関係性が見られなかったことから、高 CO₂ 環境下で多収を実現しつつ低メタン性をもった品種を選抜・育成できる可能性が確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2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 長谷川 利拡、酒井 英光、常田 岳志、林 健太郎	4. 巻 89(6)
2. 論文標題 水稲作における気候変動への土壌肥料的適応技術 1. 水稲のCO2増加に対する生育反応からみた窒素施肥の必要性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本土壌肥科学雑誌	6. 最初と最後の頁 491-496
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Kobayasi Kazuhiro, Eydi Mohammad Jawid, Sakai Hidemitsu, Tokida Takeshi, Nakamura Hirofumi, Usui Yasuhiro, Yoshimoto Mayumi, Hasegawa Toshihiro	4. 巻 22
2. 論文標題 Effects of free-air CO2 enrichment on heat-induced sterility and pollination in rice	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plant Production Science	6. 最初と最後の頁 374 ~ 381
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/1343943X.2018.1563496	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 臼井 靖浩、酒井 英光、常田 岳志、中村 浩史、中川 博視、長谷川 利拡	4. 巻 83(2)
2. 論文標題 気候変動に柔軟に対応したイネの栽培に向けて一大気CO2増加によるコメの外観品質低下と対策技術の開発ー	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 化学工学	6. 最初と最後の頁 125-128
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Hasegawa Toshihiro, Sakai Hidemitsu, Tokida Takeshi, Usui Yasuhiro, Nakamura Hirofumi, Wakatsuki Hitomi, Chen Charles P., Ikawa Hiroki, Zhang Guoyou, Nakano Hiroshi, Matsushima Miwa, Yashima, Hayashi Kentaro	4. 巻 10
2. 論文標題 A High-Yielding Rice Cultivar "Takanari" Shows No N Constraints on CO2 Fertilization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Plant Science	6. 最初と最後の頁 361
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpls.2019.00361	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

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 常田 岳志、林 健太郎、臼井 靖浩、荒井 見和、片柳 薫子、中村 浩史、酒井 英光、長谷川 利拡
2. 発表標題 炭素源から見たメタン排出量の品種間差～土壌・残渣由来のメタンは栽培するイネ品種によって異なるか？～
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2018年度大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池本 悠佳、八島 未和、林 健太郎、常田 岳志、大久保 卓、中村 浩史、長谷川利紘、酒井 英光
2. 発表標題 開放系大気CO2増加実験におけるタカナリおよびコシヒカリ根のアセチレン還元活性
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2018年度大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Guigue Julien, Takeshi Tokida, Hirofumi Nakamura, Toshihiro Hasegawa, Rota Wagai
2. 発表標題 Mean residence time and distribution of rice-derived C in distinct soil C pools of a paddy soil under elevated CO2
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2018年度大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 常田 岳志
2. 発表標題 大気CO2濃度の増加と温暖化が水田からのメタン排出におよぼす影響
3. 学会等名 農業農村工学会・土壌物理研究部会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 常田 岳志
2. 発表標題 農地からの温室効果ガス排出とその気候変動応答
3. 学会等名 日本農業工学会シンポジウム「農業における気候変化への適応と気象災害リスクの軽減」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 常田 岳志
2. 発表標題 水田からのメタン排出とその気候変動影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeshi Tokida
2. 発表標題 Increasing measurement throughput of methane emission from rice paddies with a mobile gas analyzer
3. 学会等名 International Symposium on Agricultural Meteorology (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 常田 岳志、林 健太郎、梶浦雅子、中島 泰弘、臼井 靖浩、中村浩史、酒井 英光、長谷川 利拡
2. 発表標題 安定同位体比から紐解く水田メタンフラックスの日変化メカニズム
3. 学会等名 日本農業気象学会2018年全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 常田 岳志、酒井 英光、張 国友、荒井 見和、矢野 翠、中村浩史、山本 敏央、林 健太郎、長谷川 利拡
2. 発表標題 無窒素施肥条件下におけるイネの高CO2応答：コシヒカリ - タカナリの正逆染色体断片置換系統群を用いた解析
3. 学会等名 日本作物学会第245回講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takeshi Tokida, Kentaro Hayashi, Miwa Arai, Yasuhiro Usui, Nobuko Katayanag, Hirofumi Nakamura, Hidemitsu Sakai, Toshihiro Hasegawa
2. 発表標題 Current-season photosynthates as the main C source for CH ₄ in rice paddies as revealed by FACE-induced 13C labeling
3. 学会等名 FACEing the future food production and ecosystems under a changing climate (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Takeshi TOKIDA, Kentaro HAYASHI, Yasuhiro USUI, Miwa ARAI, Nobuko KATAYANAGI, Hidemitsu SAKAI, Hirofumi NAKAMURA Toshihiro HASEGAWA
2. 発表標題 Growth-stage dependence of CH ₄ emissions from rice paddies exposed to atmospheric CO ₂ enrichment
3. 学会等名 FACEing the future food production and ecosystems under a changing climate (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 永澤裕人、西脇淳子、常田 岳志、荒井 見和、中村浩史、酒井 英光、長谷川 利拡
2. 発表標題 大気CO ₂ 濃度と窒素施肥が水田におけるメタンの生成および酸化に及ぼす影響
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 常田 岳志、柳井 洋介	4. 発行年 2019年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 59-78
3. 書名 実践土壌学シリーズ4土壌物理学 第4章温室効果ガス	

〔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
研究協力者	長谷川 利拡 (Hasegawa Toshihiro)		
研究協力者	酒井 英光 (Sakai Hidemitsu)		