

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26252004

研究課題名(和文) 開放系大気CO2増加および温暖化実験を利用した気候変動適応イネ遺伝子型の探索

研究課題名(英文) Study for climate change adaptive rice genotype by using free air CO2 enrichment system and temperature free air controlled enhancement system under field condition

研究代表者

酒井 英光 (SAKAI, Hidemitsu)

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 気候変動対応研究領域・上級研究員

研究者番号：00354051

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,500,000円

研究成果の概要(和文)：圃場において高温環境を実現する群落温度制御(T-FACE)装置を開発した。開放系大気CO2増加実験とT-FACEを組み合わせた処理により、不稔率が増加したことから、高CO2濃度による増収効果は高温によりほぼ打ち消された。高温による不稔の発生率は、積算温度の関数により定式化することができた。高CO2応答の遺伝的変異では、大きな変動幅が確認されたが、応答性の変異は分けつ数の応答と相関があった。また、高CO2による至穂日数の短縮にはHD1遺伝子の関与が示唆された。

研究成果の概要(英文)：We developed a Temperature Free Air Controlled Enhancement (T - FACE) system that realizes high temperature environment in a field. The combination of free-air CO2 enrichment and T-FACE treatments, rice yield increase by elevated CO2 was almost canceled, mainly due to an increased spikelet sterility. The spikelet sterility rate could be formulated by the function of integrated temperature at heading stage. A large fluctuation range was confirmed in the genetic variation of the high CO2 response, but the responsiveness was positively correlated with the tiller number response to elevated CO2. In addition, it was suggested that the HD1 gene was involved in shortening the number of days to heading by elevated CO2.

研究分野：作物学、農業気象学

キーワード：気候変動 イネ FACE 遺伝子型 温暖化 大気CO2増加

1. 研究開始当初の背景

温暖化の原因となる大気 CO₂ は光合成を行うための物質（基質）であり、大気 CO₂ 濃度の上昇は光合成速度を高める。気候シナリオと作物モデルを組み合わせて将来の主要穀類の生産を予測した研究では、CO₂ 増加による作物の光合成・成長の促進を考慮しなかった場合、2050～2080 年にはほとんどの地域で減収となるのに対し、CO₂ 増加による作物増収効果を考慮すれば増収が見込まれる地域もあり、世界的には大きな減収を免れることを予測している。CO₂ 増加による増収効果は、気候変動が農作物に及ぼす影響の中で数少ないプラスの要素である。したがって、気候変動への適応においては、予測される負の影響を最小限にとどめる技術だけでなく、高 CO₂ によるプラスの影響を、積極的に利用するための技術開発も重要である。

2. 研究の目的

将来の高温・高 CO₂ 濃度環境に適したイネ品種の遺伝的特性を屋外の開放系条件で明らかにするのが本研究の目的である。開放系条件で高 CO₂ 環境を実現する FACE (Free Air CO₂ Enrichment) 実験は、約 4 半世紀の実績があるが、同時に高温環境を実現するのは困難である。本研究では、FACE 試験区内に近年開発された群落温度制御装置 (T-FACE: Temperature Free Air Controlled Enhancement) を設置し、高 CO₂ 濃度による増収効果が、高温によってどのように変化するか検証する。また、遺伝的変異については、これまで限られた品種のみを対象としてきたが、本研究では多様なイネ品種を代表するコアコレクションを利用し、高 CO₂ 応答の品種間差異を調査し、遺伝的背景との関連を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) T-FACE 実験装置の開発と精度検証

2014 年度に装置を試作し、圃場において群落温度制御の空間分布を定期的に調査し、ヒーター角度、制御アルゴリズムの検証・改良を行った。2015、2016 年度にはつくばみらい FACE 水田圃場において、主区を CO₂ 濃度（現 CO₂ 濃度区 AMB、高 CO₂ 濃度区 FACE）、副区を群落温度（対照温度区 Tref、加温区 T-FACE）とする分割区法で実験を実施した。ただし T-FACE 処理は、主区 4 反復のうち、2015 年は 2 反復、2016 年は 3 反復で行った。加温区の区画は、2015 年は 2×2m の四角形 (4m²)、2016 年は一辺 1.4m の六角形 (5.1m²) で、それぞれ区画の隅に赤外線ヒーター (1000W, FTE-1000, Mor, USA) を、群落上 1m に俯角 45 度で設置した (図 1)。Tref 区、T-FACE 区の群落温度を精密放射温度計 (SI-111, Apogee, USA) で測定し、両区の温度差に基づきヒーターへの出力を PID で制御した。両年とも Tref+2 を目標に制御を行った。T-FACE 処理は出穂直前から 3 週間の 9:00～15:00 に行っ

た。

(2) 高群落温度が高 CO₂ に対する収量応答に及ぼす影響

FACE 試験区において、上記で開発された T-FACE を用い、温度と CO₂ の交互作用を対象とした処理を行った。高 CO₂ 処理については、生育期間を通じて、外気よりも 200ppm 高い水準を対象とした。一方、温度については、乾物生産よりも収穫指数への影響が大きいことから、感受性が最も高い開花期～子実成長期を対象に +2 を設定値とした。稔実、子実成長といった温度依存性の高い形質について調査を行い、温度と CO₂ 濃度の複合的影響を調査した。

(3) イネコアコレクションにおける高 CO₂ 応答の遺伝的変異

農業生物資源研究所で作成された世界イネコアコレクション (69 品種) を供試した。FACE 試験区において、イネのコアコレクションの中からつくばみらい市の日長条件にて出穂可能な品種群 (61 品種) を、2014～2016 年の 3 作期にわたり条栽培した。全品種について、出穂日を調査した。3 カ年とも、9 月中旬に収穫を行い、地際で刈り取りを行った。収穫日の時点で成熟に至らなかった品種についても同日に収穫した。刈り取った株は茎数を計測した後、乾燥機にて 80℃、72 時間以上乾燥させ、地上部乾物重および穂乾物重を測定した。

4. 研究成果

(1) T-FACE 実験装置の開発と精度検証

一辺 1.4m の六角形 (5.1m²) で FACE 試験区内に設置された 2016 年度の T-FACE 装置を図 1 に示す。



図 1. FACE リング内に設置された T-FACE 装置 (2016 年度)

高 CO₂ 濃度で気孔が閉じ気味になるため、Tref 区の群落温度は FACE 区の方が AMB 区より高かった (2015 年で約 0.5℃)、T-FACE 区と Tref 区の群落温度の差 (dT=T-FACE - Tref) は、4 ヒーターによる 2015 年には平均で、AMB 区で 0.45℃、FACE 区で 1.0℃であった (図 2)。AMB 区と FACE 区とで dT が異なる理由の一つとして、FACE 区では気孔が閉じ気味になるた

め、同じ熱量が付加された場合、顕熱に分配されやすいことが考えられた。また 2015 年には T-FACE 区の方が Tref 区よりやや風上側にあったため、同一リング内でも CO₂ 濃度が高かった。これにより FACE/T-FACE 区では FACE/Tref 区よりさらに気孔が閉じ気味となり、出穂時期も早まっていたことから、FACE/T-FACE 区でそもそも群落温度が高かったと推測された。2016 年は FACE リング内の Tref、T-FACE 区で同じ CO₂ 濃度となるよう配置を見直し、かつ 6 ヒーターとした結果、dT は平均で、AMB 区で 0.63、FACE 区で 0.94 となり、CO₂ 処理の有無による dT の差は小さくなった(図 2)。なお、水地温の Tref 区と T-FACE 区の間の温度差は T-FACE 処理期間と無処理期間とで変化が認められず、T-FACE 処理の影響は田面水・土壌には及んでいないと考えられた。

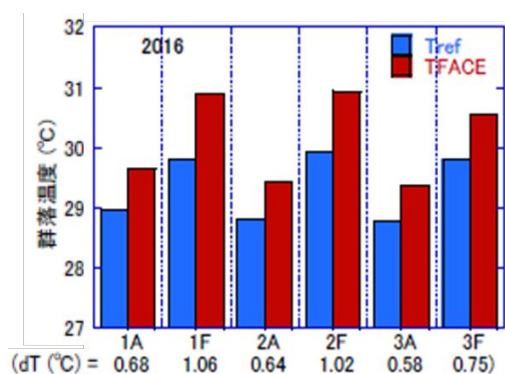


図 2. T-FACE 処理期間 3 週間の日中 (9:00-15:00) の群落温度の平均値 (2016 年)

(2) 高群落温度が高 CO₂ に対する収量応答に及ぼす影響

FACE 試験区内において T-FACE (群落温度制御) 装置を用い、温度と高 CO₂ の相互作用がイネに及ぼす影響を調査した。その結果、高 CO₂ 処理により、玄米収量は 2 カ年平均で 23.7% 増加したが、T-FACE による加温処理により増加率が 1.3% まで低下し、高 CO₂ による増収効果がほぼ消失した(図 3)。これには不受精の増加が大きく作用しており、不受精率は、加温処理によって有意に増加し、高 CO₂ と加温の同時処理でさらに増加した。

不受精率と温度との関係を解析したところ、CO₂ 条件に関わらず、出穂始めから 1 週間の積算温度との間で強い正の相関が得られた。そして、不受精率 (y) は、29 を基底温度とした積算温度 (day) を x とした場合、 $y=0.62x^2-4.33x+13.991$ ($R^2=0.7434$) で表せることが分かった(図 4)。

粗玄米の外観品質は、高 CO₂ 処理により低下し、高 CO₂ と加温との同時処理でさらに低下した。特に基部未熟粒の増加が顕著であり、高 CO₂ 処理により約 14% ポイント、高 CO₂ と加温との同時処理で約 17% ポイントの増加であった。

これまで大気 CO₂ 濃度の上昇は増収効果を

もたらすと考えられてきたが、高温が伴った場合には必ずしも増収になるとは限らないことが、本研究によって明らかとなった。本成果は、今後の食料生産予測において非常に重要な知見である。さらに、高温による不稔の発生が積算温度の関数として定式化されたことから、現在の作物モデルに導入することにより、将来予測の精緻化が期待される。

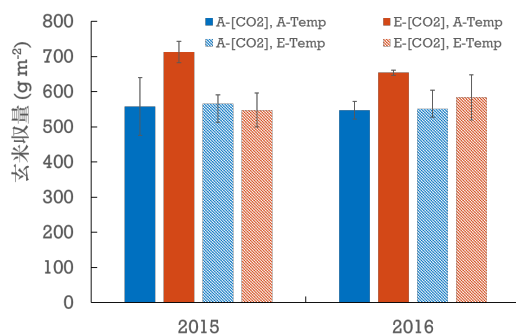


図 3. CO₂ 濃度の上昇と高温の処理が玄米収量に及ぼす影響 (凡例の A-[CO₂], E-[CO₂] はそれぞれ現在の CO₂ 濃度、現在+200ppm の CO₂ 濃度を表し、A-Temp、E-Temp はそれぞれ無加温処理、加温処理を表す)

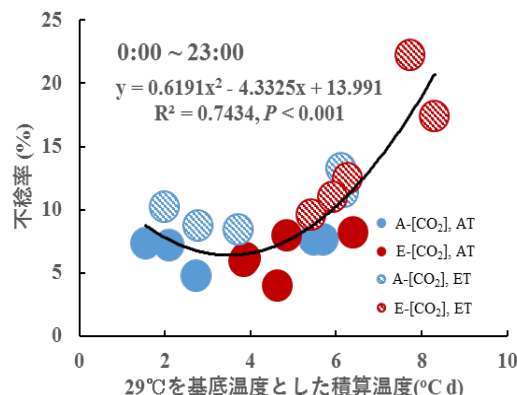


図 4. 不稔率と積算温度の関係 (凡例の A-[CO₂], E-[CO₂] はそれぞれ現在の CO₂ 濃度、現在+200ppm の CO₂ 濃度を表し、AT、ET はそれぞれ無加温処理、加温処理を表す)

(3) イネコアコレクションにおける高 CO₂ 応答の遺伝的変異

大気 CO₂ 濃度の上昇により出穂日は全品種 2 カ年の平均で 1.1 日早まり、品種間では 3 日前進から 1 日遅延までの応答幅がみられた。移植から出穂までの至穂日数は高 CO₂ 処理によっておおむね短縮するが、機能欠損型 HD1 遺伝子を持つ品種で短縮程度が大きかったことから、高 CO₂ に対する至穂日数の応答には HD1 遺伝子の関与が示唆された。高 CO₂ による至穂日数の短縮は、生育期間の短縮とおして増収効果を低下させる。本研究結果より、HD1 遺伝子の関与が示唆されたことは、将来環境に適応した品種の開発において重要な知見である。

地上部乾物重における高 CO₂ 応答性 (2014

~2016年の3カ年平均)の遺伝的多様性は、図5に示すとおりであった。大気CO₂濃度の上昇による地上部乾物重の増加率には大きな年次変動がみられ、3カ年平均では最小-6%から、最大39%までの幅がみられた。大気CO₂濃度上昇の効果が統計的に有意であった品種では、「DIANYU 1」(中国)の29.4%が最大であった。全品種平均の地上部乾物重増加率は12.3%であった。地上部乾物重の増加率は茎数増加率と正の相関関係($r^2=0.48$)がみられたことから、大気CO₂濃度上昇によるイネの地上部乾物重の増加は、主として分けつ増加によると考えられた。

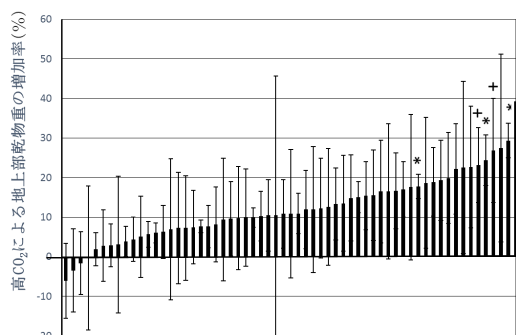


図5. コアコレクション(61品種)の地上部乾物重における高CO₂応答の多様性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計11件)

Hiroshi Nakano, Satoshi Yoshinaga, Toshiyuki Takai, Yumiko Arai-Sanoh, Katsuhiko Kondo, Toshio Yamamoto, Hidemitsu Sakai, Takeshi Tokida, Yasuhiro Usui, Hirofumi Nakamura, Toshihiro Hasegawa, Motohiko Kondo, Quantitative trait loci for large sink capacity enhance rice grain yield under free-air CO₂ enrichment condition, *Scientific Reports*, Vol.7, pp.1827, 2017, 査読有
DOI:10.1038/s41598-017-01690-8

Yasuhiro Usui, Hidemitsu Sakai, Takeshi Tokida, Hirofumi Nakamura, Hiroshi Nakagawa, Toshihiro Hasegawa, Rice grain yield and quality responses to free-air CO₂ enrichment combined with soil and water warming, *Global Change Biology*, Vol.22, pp.1256-1270, 2016, 査読有
DOI:10.1111/gcb.13128

Guoyou Zhang, Hidemitsu Sakai, Yasuhiro Usui, Takeshi Tokida, Hirofumi Nakamura, Chunwu Zhu, Minehiko Fukuoka, Kazuhiko Kobayashi, Toshihiro Hasegawa, Grain growth of different rice cultivars under elevated CO₂ concentrations affects yield and quality, *Field Crops Research*, Vol.179, pp.72-80, 2015, 査読有

DOI:10.1016/j.fcr.2015.04.006

〔学会発表〕(計33件)

Mayumi Yoshimoto et al., Changes of canopy micrometeorology by FACE and T-FACE and their effects on rice, International Symposium on Agricultural Meteorology, 2017年3月30日, 北里大学獣医学部(青森県・十和田市)

酒井英光ら, 世界イネコアコレクションにおける高CO₂応答の遺伝的多様性, 日本農業気象学会2017年全国大会, 2017年3月28日, 北里大学獣医学部(青森県・十和田市)

氏家和広ら, 開放系大気CO₂増加と登熟期群落加温の同時処理によるイネの不稔および登熟不全の発生, 日本作物学会第241回講演会, 2016年3月28日, 茨城大学水戸キャンパス(茨城県・水戸市)

〔図書〕(計1件)

Toshihiro Hasegawa, Hidemitsu Sakai, Takeshi Tokida, Yasuhiro Usui, Mayumi Yoshimoto, Minehiko Fukuoka, Hirofumi Nakamura, Hiroyuki Shimono, Masumi Okada, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, *Advances in Agricultural Systems Modeling 7: Improving Modeling Tools to Assess Climate Change Effects on Crop Response*, 2016, pp.45-68

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/outline/face/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 英光 (SAKAI, Hidemitsu)

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 気候変動対応研究領域・上級研究員
研究者番号: 00354051

(2) 連携研究者

長谷川 利拡 (HASEGAWA, Toshihiro)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・東北農業研究センター 生産環境研究領域・主席研究員
研究者番号: 10228455

(3) 連携研究者

吉本 真由美 (YOSHIMOTO, Mayumi)

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 気候変動対応研究領域・主席研究員
研究者番号: 40343826