

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(A)（海外学術調査）

研究期間：2015～2019

課題番号：15H02650

研究課題名（和文）多様な気候を横断する微気象観測網がイネ高温障害のリスク評価を革新する

研究課題名（英文）Micrometeorology monitoring network crossing diverse climate zones innovates risk assessment of heat-induced spikelet sterility of rice

研究代表者

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・主席研究員

研究者番号：40343826

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 31,800,000円

研究成果の概要（和文）：世界の主要なコメ生産地10カ国において、高温不稔の実態と水田熱環境のモニタリングおよび将来の気候変動等を想定した圃場実験を実施した。群落内の気温や穂温と群落上の気温との違いを穂温推定モデルで検証・再現し、従来の日最高気温に基づく経験モデルに代わる、穂温を基準とした新しい高温不稔モデルを構築した。現在および将来の湛水状態での水田では、乾燥した気候条件よりも湿潤な気候条件で穂温が上昇しやすいため、高温・湿潤な気候のサイトで不稔率が高くなったが、将来乾燥ストレスがかかった場合には、乾燥した気候ほど穂温が上昇し、不稔率が増大すると推定された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界の高温多湿から極乾燥に至る幅広い気候条件下での水田群落内の温湿度という貴重なデータを収集することができた。このデータを用いて汎用化された穂温推定モデルにより、従来、群落上の日最高気温等で評価されていた高温不稔リスク分布を、生殖器官である穂の温度を基準として評価することで革新的に描き換え、気候変動下のコメ生産の影響評価の不確実性を低減できた。さらに、将来の気候変動が高温不稔に及ぼす影響や耐性品種導入の有効性が気候によりどう変わるかについて、定量的なデータが得られ、今後適応策を推進するための基礎データとなりうる。

研究成果の概要（英文）：Field experiments were conducted in 10 major rice-producing countries in the world, monitoring the actual conditions of heat-induced spikelet sterility (HISS) and the thermal environment of paddy fields. The difference between the air temperatures inside the canopy and above the canopy was verified and clarified by the panicle temperature estimation model. A new HISS model based on panicle temperature was developed to replace the conventional empirical model based on the daily maximum temperature. In the present and future flooded paddy fields, the panicle temperature is more likely to rise, which increases the sterility rate, in the wet climate condition than in the dry climate condition. It was estimated that when drought stress was applied, the panicle temperature would increase, and the sterility rate would increase in the dry climate than in the wet climate.

研究分野：農業気象

キーワード：群落微気象 イネ 高温障害 穂温 気化冷却

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

大気中の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 等の濃度上昇による地球温暖化が、農業生産に深刻な影響を及ぼすと懸念されている。コメは世界人口の約半分が主食とし、熱帯～温帯の広範な気候に適応し栽培されてきたが、開花期や登熟期の高温は不稔や品質低下等の高温障害をもたらすことが知られている。高温障害による減収は喫緊の課題で、世界各国で実態調査や耐性品種選抜のための連携試験等が実施されつつある。しかし、それらにおける高温障害の評価基準や栽培環境の測定手法は国によって異なり、国や気候を横断する高温障害の実態把握や発生要因の解明には程遠いばかりでなく、測定手法の不統一による環境因子の誤差は誤ったリスク評価や品種選抜方針を導く可能性さえある。特に、イネの高温障害に直接関わる穂や群落内の熱環境と、一般的な群落上の気象との間にはギャップがあり、従来の最寄りの気象観測所等での日最高気温を用いた高温不稔の経験モデルでは、リスクの評価と予測に大きな誤差と不確実性をもたらしている。

### 2. 研究の目的

本研究では、アジアからアフリカ、アメリカに至る広範な気候を横断する 10 カ国の高温稲作地域での現在の一般水田において高温不稔の実態とイネ群落内の微気象のモニタリングを行う。一般水田モニタリングデータで、日本の水田を対象に開発した穂温推定モデル IM<sup>2</sup>PACT を検証して広範な気候に適用できるように汎用化し、従来の日最高気温に基づく高温不稔誘発の経験モデルに代わる、穂温を基準とした新しい高温不稔モデルを構築することを目的とする。また、将来を想定した乾燥ストレス試験・高 CO<sub>2</sub> 実験、共通品種栽培試験等の圃場実験を行い、群落内の微気象の変化プロセスをモデル化する。高温不稔モデルを全サイトの一般水田のデータに適用し、現在と将来の高温不稔リスク評価を革新することを目的とする。

### 3. 研究の方法

世界の主要なコメ生産地 10 カ国において、高温障害の実態と水田熱環境のモニタリングおよび将来の気候変動等を想定した圃場実験を実施した。実験サイトは、インド (タミルナドゥ)、スリランカ (マハイルッパラマ)、ミャンマー (ネピドー)、フィリピン (ムニョス)、中国 (荊州)、台湾 (台中)、日本 (つくば)、アメリカ (テキサス)、セネガル (ファナエ)、ベナン (コトヌー) の計 10 サイトである。農業環境技術研究所で開発された、電源の確保が難しい途上国の水田でもソーラーパネルを利用して強制通風が可能な自立型群落微気象測定システム (MINCER) を、群落上 (植生高の 2 倍の高さ) と群落内 (開花する穂の高さ) に設置し、出穂開花期～登熟期に気温と湿度を連続測定した。ハンディタイプの放射温度計で開花期と登熟期の穂温と群落表面温度を手動測定した。圃場近くに一般のウェザーステーションがないサイトでは、実験圃場脇で風速と日射量を測定した。出穂開花期の圃場に、デジタルカメラを設置して 10 分間隔でインターバル撮影し、開花時間帯を調べた。収量構成要素の調査方法をサイト間で統一し、不稔率は 70% エタノール溶液で浮いた初数の割合で求めた。現在の水田での熱環境モニタリングだけでなく、将来の気候変動および高温不稔耐性品種の導入を想定して、1) 開放系高 CO<sub>2</sub> 実験 (日本)、2) 乾燥ストレス試験 (スリランカ、台湾)、3) 高温不稔耐性品種試験 (全サイト) を実施した。これらの試験における群落微気象データを用いて穂温推定モデル IM<sup>2</sup>PACT を改良した。モデルで推定した穂温と群落表面温度が手動で測定した値と合うように、植物の蒸散速度や拡散係数等のモデルのパラメータを決定した。このパラメータを用いて全サイトの出穂開花期の穂温を推定し、開花時の穂温と不稔率との関係を調べた。

### 4. 研究成果

#### (1) 現在の気候における出穂開花期のイネ群落の熱環境

2015 年に全モニタリングサイトの研究協力者を招へいしてキックオフ会議を開催し、水田熱環境モニタリングや収量調査の統一的手法についての提案・議論と、目標達成に必要なサイト・品種の選定を行った結果、標準品種として高温不稔に対し中庸な感受性を持つ IR64 と高温不稔に耐性を持つ N22 を共通品種として供試することとした。図 1 に、IR64 群落における出穂開花期 (50% 出穂日を含む 6 日間) の開花時間帯の群落上 (Above) と群落内 (Inside) の気温の MINCER 実測値、および穂温推定モデル IM<sup>2</sup>PACT で推定した穂温 (Panicle) の分布を示す。

全体として、イネ群落内の気温は植物の蒸散や茎葉による日射の遮断などにより、群落上の気温より低い傾向が認められた。群落上と群落内の気温差は、乾燥気候のセネガルやインドで大きく、湿潤気候の日本、中国、台湾、アメリカなどで小さかった。これは、乾燥した気候ほど群落の蒸散が盛んに起こり、蒸発冷却効果が大きいためと考えられた。また穂温は、極乾燥気候のセネガルでは群落内気温より低く、群落内の湿度レベルが低いために、穂の蒸散が促進されて穂温が群落内気温よりも下がったためと考えられた。他サイトでは穂温が群落内気温よりも高い場合があり、特に中国や台湾では中央値で 2.5～3 程度高かった。これは、湿潤な気候帯では開花時間帯である午前中に湿度が高く、群落内は群落上よりさらに高湿度条件となるため、穂の蒸散が抑制されて穂温が上昇したと考えられた。

この結果、群落上気温でサイト間の熱環境を比べた場合には、セネガル、インドが高温であるが、穂温で比べた場合には、中国、フィリピンの方が高温となった。イネの生殖器官である穂の温度や穂近傍の気温は、群落上の気温と異なり、またその差異が気候により異なることが明らかとなった。

各サイトの不稔率と群落内外の気温や穂温との関係を調べたところ、群落上の気温と不稔率との関係性はほとんど認められなかったが、開花時間帯の平均穂温 ( $T_p$ ) と不稔率 ( $S$ ) との間に関係性が認められた。

$$IR64: S=0.004\exp(0.275T_p) \quad (R^2=0.86), \quad N22: S=0.0042\exp(0.266T_p) \quad (R^2=0.89) \quad (1)$$

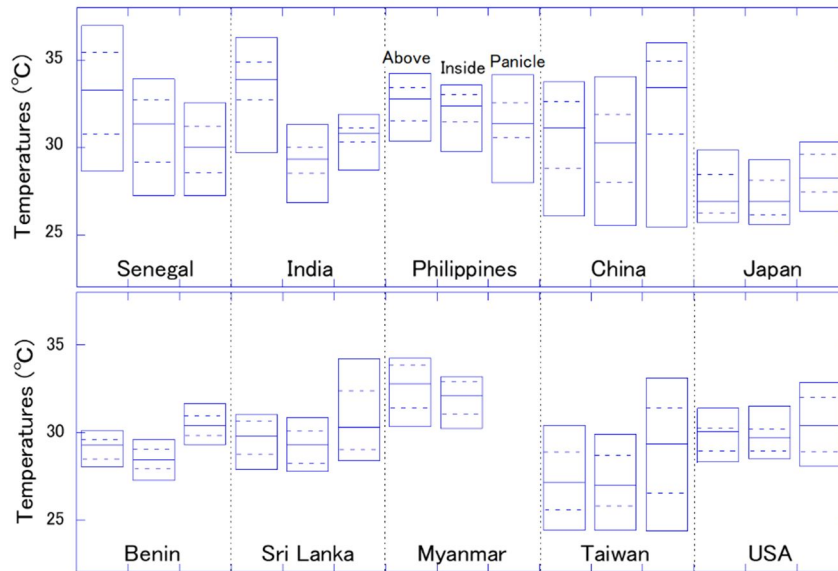


図1 10 サイトにおける出穂開花期（50%出穂日を含む6日間）の開花時間帯の群落上気温（Above）、群落内気温（Inside）、穂温（Panicle）の分布のパーセンタイル図。群落上と群落内の気温はMINCERによる実測値。穂温は穂温推定モデルIM<sup>2</sup>PACTによる推定値。ミャンマーは日射量欠測のため穂温を推定していない。

(2) 将来環境（高CO<sub>2</sub>、乾燥ストレス）下の穂温推定

開放系高CO<sub>2</sub>（FACE）における群落微気象の変化

日本のつくばみらい市FACE圃場のコシヒカリ群落における、高CO<sub>2</sub>による群落内微気象の変化をモデル化した。高CO<sub>2</sub>濃度により、出穂開花期の気孔コンダクタンスは35%程度低下し、それに伴い群落内の気温は最大1程度上昇、相対湿度は10%程度低下した。推定穂温は最大0.4程度上昇した（図2）。

乾燥ストレス試験における群落微気象の変化

比較的乾燥した気候のスリランカと湿潤な気候の台湾において、出穂開花の約1週間前に落水して開花期のイネに乾燥ストレスを与える乾燥ストレス試験を実施した。スリランカでは落水処理により群落内の気温が最大2以上上昇し、相対湿度は最大15%以上低下した（図3）。スリランカサイトでは気孔コンダクタンスを直接測定していないが、群落内微気象の変化から、気孔コンダクタンスが高CO<sub>2</sub>による気孔閉鎖（ ）よりも大きく低下したと推定された。穂温の実測値で穂温推定モデルのパラメータを決定した結果、乾燥ストレスにより穂の蒸散コンダクタンスも低下した可能性が示唆され、乾燥ストレスによる穂温の上昇は最大1程度と推定された。湿潤な気候の台湾では、スリランカに比べて乾燥ストレスによる群落内の高温・乾燥の度合いが小さく、穂温推定モデルのパラメータから、気孔コンダクタンスは低下するが穂蒸散コンダクタンスはほとんど変化しなかったことが示唆された（図省略）。

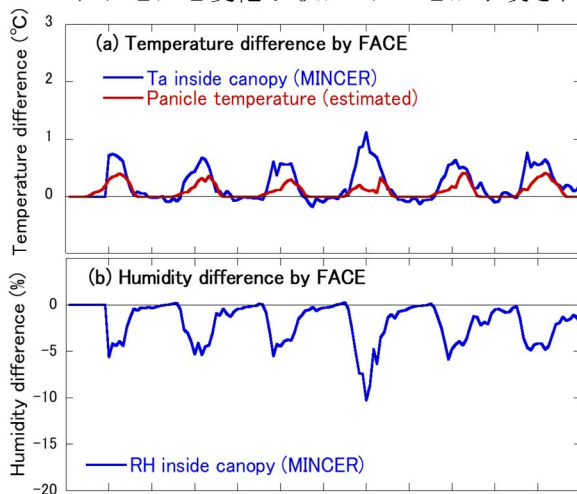


図2 日本の開放系高CO<sub>2</sub>（FACE）における群落内微気象変化（高CO<sub>2</sub>区 - 現CO<sub>2</sub>区の差）。

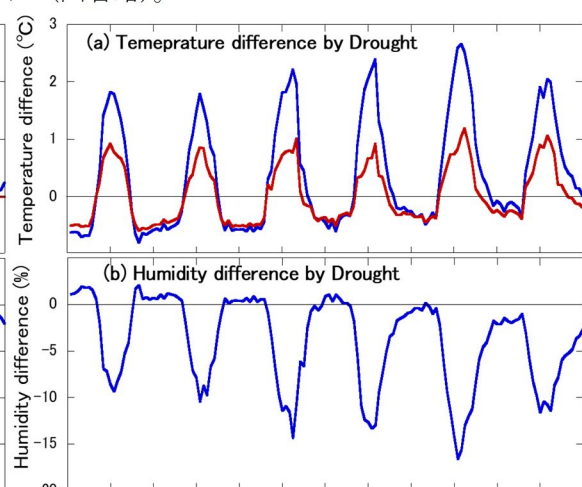


図3 スリランカの乾燥ストレス試験における群落内微気象変化（乾燥区 - 湛水区の差）。

(3) 現在および将来の高温不稔率の分布

現在のモニタリング水田、および将来の高CO<sub>2</sub>濃度や乾燥ストレス下を想定した試験水田圃場における群落微気象プロセスを穂温推定モデル IM<sup>2</sup>PACT に組み込み、全10サイトの出穂開花期の穂温を推定した。推定した穂温を(1)式に適用し、現在および将来の不稔率を推定した(図4)。

現在の気候条件における不稔率の分布

従来の閉鎖系実験等において、日最高気温が温度閾値 34~35 を超えると高温不稔が誘発され、閾値を超えて1 上昇すると不稔率が16%増大するという報告がある。それに基づきモニタリングサイトの群落上の日最高気温の出穂開花期間の平均値を適用して不稔率を推定してみると(図4a) 気温の日較差が大きかったセネガルやミャンマーで高い不稔率が推定され、他のサイトではほとんど不稔が発生しないという結果となる。しかし実際には、図4bに示すように中国、フィリピン、インドで高い不稔率が認められており、(1)式により開花時間帯の穂温の出穂開花期間の平均値で推定することができた。開花時穂温を指標とした場合、中国、アメリカ、ミャンマー、フィリピンで不稔率が高いと推定された。また、標準品種 IR64 を高温不稔耐性品種 N22 に切り替えることで、全サイトにおいて不稔率を低減することができると推定された。

将来の高温・高CO<sub>2</sub>濃度環境での不稔率の分布

穂温推定モデルにおいて、現在の気象条件の群落上の気温+2 を境界条件とし、また高CO<sub>2</sub>濃度条件での植物の蒸散パラメータを適用することで、高温(HT)、高CO<sub>2</sub>濃度(HC)環境下での穂温を計算し、不稔率を推定した(図4c)。不稔率のサイト間順位は変わらず、全体として不稔率が増大し、中国、アメリカ、ミャンマーでは現在の約30%から40%に不稔率が増大すると見積もられた。現在の気候条件では不稔率が10%程度の日本や台湾でも、将来の高温・高CO<sub>2</sub>濃度環境では14%程度に増大すると推定された。高温不稔耐性品種 N22 は、温暖化後も標準品種 IR64 に比べて不稔率を低減する効果があるが、それでも中国やアメリカでは30%近い不稔率となると推定された。

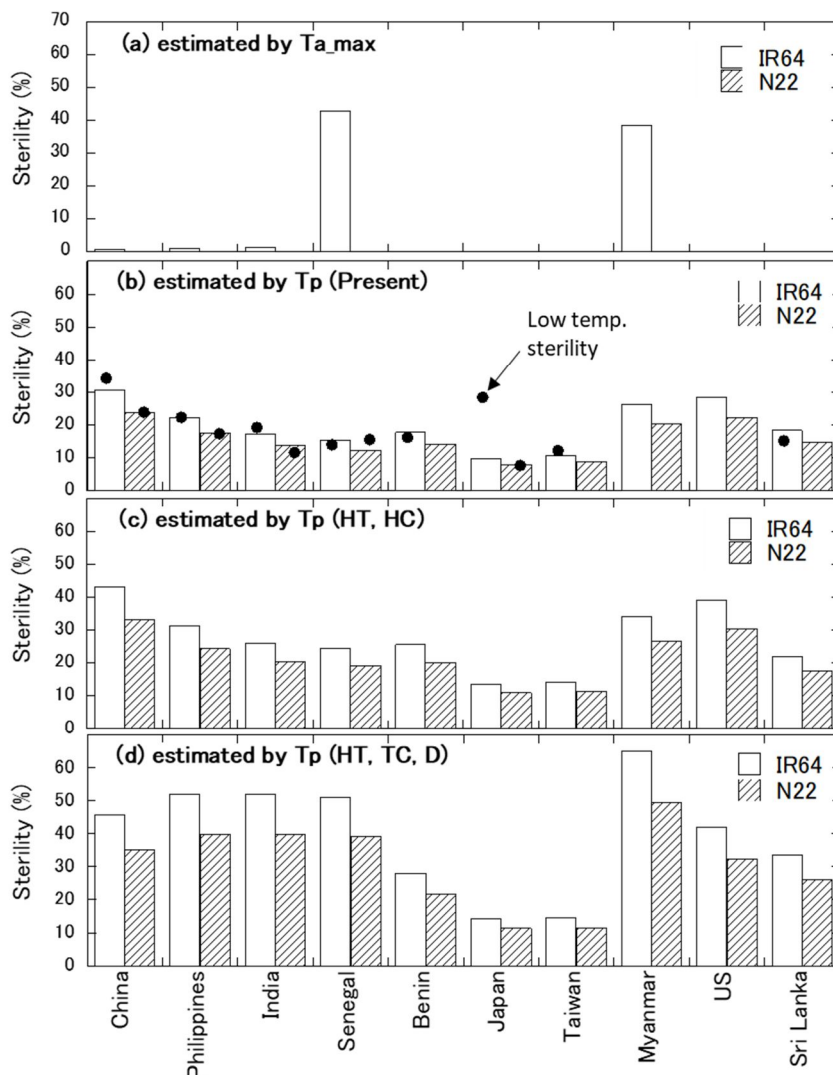


図4 10サイトにおけるIR64とN22の不稔率の推定値(コラム)と実測値( )。現在の気候条件における(a)群落上気温の日最高値で推定した不稔率と、(b)開花時間帯の穂温の平均値で推定した不稔率とその実測値。ならびに、開花時間帯の穂温の平均値で推定した(c)将来の高温・高CO<sub>2</sub>濃度条件(HT, HC)における不稔率と、(d)将来の高温・高CO<sub>2</sub>濃度条件・乾燥ストレス条件下(HT, HC, D)における不稔率(d)。(b)の日本のIR64の不稔率の実測値は、開花期前の低温による不稔の可能性がある。

#### 将来の高温・高CO<sub>2</sub>濃度環境および乾燥ストレス下での不稔率の分布

高温 (HT)・高CO<sub>2</sub>濃度 (HC) 環境および乾燥ストレス (D) 下の穂温を計算し、不稔率を推定した (図 4d)。ただし乾燥ストレスの影響については、穂温推定モデルにおいて、乾季などに比較的乾燥した気候となるサイト (フィリピン、インド、セネガル、ミャンマー、スリランカ) には、スリランカでの乾燥ストレス試験結果によるパラメータを、その他の湿潤な気候のサイト (中国、ベナン、日本、台湾、アメリカ) には、台湾での乾燥ストレス試験結果によるパラメータを適用した。

乾季などに比較的乾燥した気候となるサイトでは、乾燥ストレスによる穂温の上昇が大きく、フィリピン、インド、セネガル、ミャンマーでは不稔率が 50% を超えると推定された。一方、湿潤なサイトでは、乾燥ストレスに伴う不稔率の増加はわずかであった。

現在および将来の湛水状態での水田では、乾燥した気候よりも湿潤な気候のサイトで穂温が上昇しやすいため、湿潤な気候で不稔率が高くなる傾向が認められたが、将来乾燥ストレスがかかった場合には、乾燥した気候ほど穂温が上昇し、不稔率が增大すると推定された。ただし、本結果は落水処理に伴う穂温の変化をもとに(1)式を適用して不稔率を推定したもので、乾燥ストレスが直接不稔を增大させる影響は含まれていない。実際の乾燥ストレス下では、(1)式の関係性が変わったり、穂温上昇とは別の水分生理プロセスで不稔率が増大したりする可能性があり、不稔モデルを精緻化するためにはさらなる実験と解析が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mayumi Yoshimoto, Minehiko Fukuoka, Toshihiro Hasegawa	4. 巻 6
2. 論文標題 MINCERnet: Multi-site monitoring network of heat stresses and micrometeorology in rice paddies under various climates	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 NIAES Series No.6 "The Challenges of Agro-Environmental Research in Monsoon Asia"	6. 最初と最後の頁 61-82
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 該当する

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 2件/うち国際学会 10件）

1. 発表者名 吉本真由美
2. 発表標題 高温不稔発生における環境条件の影響
3. 学会等名 平成30年度関東東海北陸農業試験研究推進会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mayumi Yoshimoto and Minehiko Fukuoka
2. 発表標題 A brief guide of MINCERnet program
3. 学会等名 NARO-MARCO Symposium 2018 on "MINCERnet: Multi-site monitoring network to cope with the heat stresses of rice under the climate change"（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuhiro Kobayasi
2. 発表標題 Flower opening time in rice has wide genetic diversity related with geographic origin and responds to meteorological factors
3. 学会等名 NARO-MARCO Symposium 2018 on "MINCERnet: Multi-site monitoring network to cope with the heat stresses of rice under the climate change"（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tsutomu Matsui
2. 発表標題 Lower-than-expected spikelet sterility of rice under extremely hot conditions in a paddy field in New South Wales, Australia
3. 学会等名 NARO-MARCO Symposium 2018 on "MINCERnet: Multi-site monitoring network to cope with the heat stresses of rice under the climate change" (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mayumi Yoshimoto
2. 発表標題 MINCERnet: International research network to support the fight against heat stress of rice.
3. 学会等名 NARO-MARCO International Symposium "Soil carbon sequestration: needs and prospects under the 4 per 1000 initiative" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉本真由美, 福岡峰彦, 臼井靖浩, 長谷川利拡
2. 発表標題 気象条件が群落微気象におよぼす影響とイネの高温障害
3. 学会等名 第29回気象環境研究会「気候変動に対する植物の応答とその分子生物学的な理解に向けて」
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Mayumi Yoshimoto, Minehiko Fukuoka, Yasuhiro Usui, Toshihiro Hasegawa, Hirofumi Nakamura
2. 発表標題 Elevated CO2 might exacerbate the heat stress of rice via micrometeorological change -MINCER in FACE experiment-
3. 学会等名 MARCO Symposium 2015 Satellite Workshop; the kick-off meeting on "MINCERnet: Multi-site monitoring network of canopy micrometeorology and heat stresses of rice under the climate change" (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Mayumi Yoshimoto
2. 発表標題 Summary of monitoring results and proposal of the next phase MINCERnet
3. 学会等名 MARCO Symposium 2015 Satellite Workshop; the kick-off meeting on "MINCERnet: Multi-site monitoring network of canopy micrometeorology and heat stresses of rice under the climate change" (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Mayumi Yoshimoto
2. 発表標題 Manual measurement of canopy temperature and panicle temperature by IRT thermometer, Apogee MI-230
3. 学会等名 MARCO Symposium 2015 Satellite Workshop; the kick-off meeting on "MINCERnet: Multi-site monitoring network of canopy micrometeorology and heat stresses of rice under the climate change" (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Mayumi Yoshimoto
2. 発表標題 Strategy for detecting multiple stresses of heat and drought
3. 学会等名 MARCO Symposium 2015 Satellite Workshop; the kick-off meeting on "MINCERnet: Multi-site monitoring network of canopy micrometeorology and heat stresses of rice under the climate change" (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Mayumi Yoshimoto
2. 発表標題 Weather station for general meteorological components
3. 学会等名 MARCO Symposium 2015 Satellite Workshop; the kick-off meeting on "MINCERnet: Multi-site monitoring network of canopy micrometeorology and heat stresses of rice under the climate change" (国際学会)
4. 発表年 2015年



1. 発表者名 Mayumi Yoshimoto
2. 発表標題 Challenges and Net-working for Rice Research for Climate Change in Japan
3. 学会等名 Inception meeting of collaborative project on "Capacity Enhancement in Rice Production in Southeast Asia under Organic Agriculture Farming System" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015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	福岡 峰彦  (Fukuoka Minehiko)  (40435590)	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・上級研究員   (82111)	
研究分担者	松井 勤  (Matsui Tsutomu)  (70238939)	岐阜大学・応用生物科学部・教授   (13701)	
研究分担者	小林 和広  (Kobayasi Kazuhiro)  (90234814)	島根大学・学術研究院農生命科学系・准教授   (15201)	