

世界のコメ生産地における気候変動適応策の有効性評価のための耕地環境ストレスモニタリング

(1) 世界の高温コメ生産地での耕地環境ストレスモニタリングによる気候変動適応策の有効性評価と早朝開花性系統の高温回避性の現地調査

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 気候変動適応策研究領域 吉本 真由美
 中日本農業研究センター 水田利用研究領域 石丸 努

平成30—令和3年度合計予算額 47,009千円
 (うち、令和3年度当初予算額 11,714千円)

【要旨】 異常気象の多発や地球温暖化の進行は、作物生産の脅威になることが懸念されており、その影響を検出し適応のために役立てる必要があるが、既に顕在化している作物収量への温暖化の負の影響の実態を監視しつつ、気候変動適応の影響の実態を把握する試みは限られており、農業に及ぼす影響の全体像をとらえることが極めて難しい。農業分野における体系的な温暖化影響モニタリングが進展しない主な原因は、農耕地環境、特に作物群落内の環境情報の不足であり、本研究課題は、世界の主要なコメ生産地域を網羅するモニタリングネットワークにより、イネの高温障害・収量と水田微気象の包括的モニタリングを継続・発展させるとともに、各種の気候変動適応策の導入が、植物体の生育・生理や水田群落微気象の変化を通じて、穂温や高温障害に及ぼす影響のメカニズムを解明することを目的とする。

セネガル、コートジボワール、ガーナ、マダガスカル、インド、スリランカ、ミャンマー、フィリピン、中国、台湾、日本、アメリカ合衆国の12サイトにおいて、有望な気候変動適応策である高温耐性品種(N22)や早朝開花性品種(IR64-*qEMF3*)等を用いた水田での連携栽培試験を実施した。また、将来の水資源変動を想定した乾燥ストレス試験も実施し、現在および将来環境下で、早朝開花性の導入がイネ群落内微気象の変化を通じて生産性に及ぼす影響を解明するためのモニタリングデータを収集した。COVID-19の世界的な感染拡大に伴い、一部のサイトではロックダウン等のために実験を実施できなかったり、欠測が生じたりしたものの、多様な気候のサイトで水田群落微気象と高温障害のモニタリングデータを集積することができた。

開花期高温不稔に関わる穂温は、最寄りの気象観測所の気温や群落上の気温と異なり、その温度差は気候条件によって異なった。穂温を指標とすることで高温不稔誘発を定量的に評価でき、各適応策品種の有効性の評価が可能であることを世界で初めて実証的に明らかにした。高温耐性品種(N22)は標準品種(IR64)より安定して不稔率を低くすることができた。早朝開花性品種(IR64-*qEMF3*)は標準品種(IR64)に比べて、開花時の群落内気温や穂温を1.5~3.0℃低くすることができ、乾燥ストレス実験でも同様に開花時の高温

を回避できることがわかった。高温開花性導入による不稔低減効果については、高温耐性品種（N22）ほど明瞭ではなく、開花時の高温回避以外の微気象要因（低風速や高湿度条件）が受粉の安定性に影響している可能性も示唆された。

一方、ミャンマーやフィリピンでの酷暑や極乾燥条件の圃場試験結果の解析では、早朝開花性の導入による高温不稔低減効果が実証され、早朝開花性系統は乾燥ストレス条件下でも早朝に開花する特性を維持できることが明らかとなった。高温と乾燥ストレス条件下でコメの生産性を向上させるためには早朝開花性QTL (*qEMF3*) と乾燥耐性QTLとの集積が必要であることが示唆された。

〔キーワード〕 水田、イネ、高温不稔、早朝開花性、環境ストレス、群落微気象、穂温

1. はじめに

異常気象の多発や地球温暖化の進行は、作物生産の脅威になることが懸念されており¹⁾、その影響を検出し、適応のために役立てる必要がある。異常気象による生産変動を把握するとともに、長期的な温暖化の影響ならびに適応策の効果を早期に検出することは、日本のみならず世界の貧困地域における食料安全保障を達成する上で極めて重要な課題である。

平成27年11月には政府として初の「気候変動の影響への適応計画」が策定され、できるだけ手戻りを回避し適時的確に適応を進めていけるよう各分野において影響評価を実施し、必要に応じ見直すことが求められている。しかし、既に顕在化している作物収量への温暖化の負の影響の実態を監視しつつ、気候変動適応の影響の実態を把握する試みは限られており、農業に及ぼす影響の全体像をとらえることが極めて難しいのが現状である。農業分野における気候変動適応の取り組みを踏まえた体系的な温暖化影響モニタリングが進展しない主な原因は、農耕地環境、特に作物群落内の環境情報の不足である。地上気象観測地点は、世界各地に点在するが、多くは都市部にあり農村部における気象観測点は少ない。さらに、一般気象観測と作物群落における環境は異なる。「気候変動が世界各地のコメ収量に及ぼす影響を予測するための耕地環境ストレスモニタリング」(H27-29年度実施 地球環境保全試験研究費)によって、気候変動影響の検出を目的とした、世界の主要なコメ生産地域を網羅するアジア・アフリカ・アメリカの水田群落内微気象のモニタリングネットワークを構築した。今後、適応の取り組みによる高温障害の低減効果を定量化するために、モニタリングネットワークを継続・発展させ、穂温を基準として再定義された閾値や指標を用いて評価することが極めて重要である。

一方、温暖化による農作物の減収に対する適応策については、農業気象、栽培、育種など複数の分野で研究・開発が進められている。イネの開花期高温不稔は、開花時に穂の穎花（イネの花）が高温にさらされた場合に、開花時の受粉が阻害されて不稔となる高温障害で、従来の室内実験から温度閾値34～35℃を超えると急激に不稔率が増え始めることが知られている²⁾。地球温暖化の進行により、このような開花時の高温不稔の発生が、世界のコメの生産に多大な影響をもたらすことが懸念され、生理的に高温に強い高温不稔耐性品種の探索・育種や、作期移動による高温期の回避といった栽培・気象的手法など様々な分野での適応策の研究・開発が進められている。近年、気候変動適応策として有望視されている手法の一つが、

イネの早朝開花性の導入である。イネの早朝開花性は、気温の低い早朝に開花させることで開花時高温不稔を軽減すると期待されており³⁾、その特性を現在主流の品種（例えば日本ではコシヒカリ）に導入することで、良食味や高生産性などの現品種の優位性をそのまま保ちつつ、開花時刻だけを早くすることにより、高温を回避することができるようになると期待されている。しかし、その高温回避効果は屋外の高温の圃場条件で実証されておらず、早朝開花性が高温条件下で地球規模でのコメ生産を維持できる有効な形質かどうか、定量的な評価が必要である。また、世界のコメ生産地域の気候は多様であり、それぞれの適応策がどのような気候条件において有効で、どれだけ高温障害を低減できるのかといった汎用性・有効性についての定量的な評価はほとんど行われていない。さらに、耕地環境の年々変動や降水パターンの変化により高温と乾燥の複合ストレスが発生した場合には、これらの適応の有効性の範囲や程度が異なる可能性がある。したがって、これらの問題を体系的に解決し、気候変動影響について、より精度の高い予測研究を強化するためには、穂温や穂近く気温を基準として、高温障害低減に至る各適応策の作用メカニズムを解明することが必須であり、そのための統一的手法による広域連携試験と、そこでの精度の高い群落微気象モニタリングが必要である。

2. 研究目的

農業環境技術研究所（現 農研機構 農業環境研究部門）が開発した自立型群落微気象測定装置（MINCER）は、電源の確保が難しい開発途上国の水田でも、群落内の気温と相対湿度を強制通風で精度良く測ることができる⁴⁾。従来、農耕地における環境情報の不足から、イネの高温不稔誘発の指標として、最寄りの気象観測所等における日最高気温が用いられることが多かった。しかし「気候変動が世界各地のコメ収量に及ぼす影響を予測するための耕地環境ストレスモニタリング」（H27-29年度実施 地球環境保全等試験研究費）において、アジア・アフリカを中心とする11カ国の水田を対象にモニタリングネットワーク（MINCERnet）を構築し、MINCERで群落内外の気温をモニタリングしたところ、穂が直接曝される群落内気温は群落上に比べて4℃も低い場合から1℃以上高い場合まであり、気候の違いによって群落内外に大きなギャップが存在することが明らかとなった。また、従来、室内実験の知見から高温不稔誘発の閾値は34～35℃とされてきたが、屋外の水田での群落内気温でみると閾値が29～30℃付近である可能性がある等、新たな知見が得られた。

本研究課題では、アフリカの主要なコメ生産国の一つであるマダガスカルをMINCERnetに加え、世界のコメ生産の主要部を横断する計12カ国の水田において、イネの高温障害・収量と水田微気象の包括的モニタリング体制を継続してデータを収集する。それを活用して、将来、気候変動適応策として有望視されている高温不稔耐性品種の導入や早朝開花性による高温回避などの対策技術の有効性を評価するための連携試験を行う。これにより、各種の気候変動適応策の導入が植物体の生育・生理や水田群落微気象の変化を通じて、穂温や高温障害に及ぼす影響のメカニズムを解明することを目的とする。

これらを達成するため、初年度である平成30年度に、新規参画サイトにおける観測の準備を進めるとともに、共通供試品種とした適応策有望品種の種子の譲渡と現地圃場での増殖を行うなど、イネの高温障害・収量と水田微気象の包括的モニタリング体制を整え、令和元年

度（2019年度）より連携栽培試験を開始した。最終年度である令和3年度（2021年度）まで、標準品種（IR64）やその早朝開花性品種（IR64-*qEMF3*）、高温耐性品種（N22）の共通品種を供試した栽培試験を行うとともに、一部のモニタリングサイトでは将来の水資源変動を想定した乾燥ストレス試験を実施し、現在および将来環境下で、早朝開花性の導入がイネ群落内微気象の変化を通じて生産性に及ぼす影響を解明するためのモニタリングデータを収集することを目的とする。さらに、ミャンマーおよびフィリピンにおける酷暑や極乾燥条件の圃場実験で、イネの早朝開花性が開花時の高温不稔の発生軽減を定量的に解析するとともに、これまでに乾燥ストレス条件で試験した早朝開花性系統の開花特性や穂温についても解析し、イネの早朝開花性が開花時の高温不稔を軽減できるかを定量的に評価することを目的とする。

3. 研究方法

（1）適応策品種の有効性評価のための連携栽培試験

図1に本研究におけるMINCERnetモニタリングサイト、表1に本報告書で用いる略称と位置情報を示す。2020～2021年はCOVID-19の世界的な感染拡大のため、アメリカ合衆国やインド、スリランカ、ガーナなど一部のサイトでは栽培試験を実施できない年やモニタリング要素の欠測、データ回収遅延が生じた。また、ミャンマーでは社会的事情から通信状況が不安定となり、測器の輸送やデータの回収に遅延が続いた。これらの事情により欠測があるものの、全サイトの水田微気象と不稔率のデータを収集することができた。

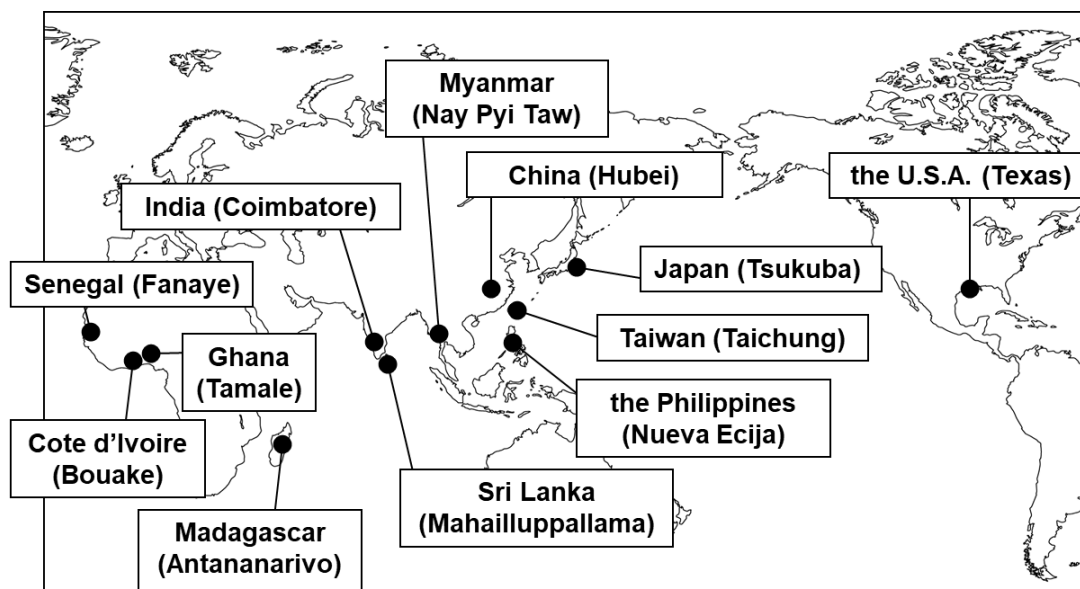


図1. MINCERnet モニタリングサイト

連携栽培試験では、標準品種であるIR64、IR64に早朝開花性を導入したIR64-*qEMF3*、高温耐性品種であるN22を共通品種として栽培した。また比較のため高温感受性品種（高温不稔に弱い品種）であるIR52を一部サイト（日本、フィリピン、インド）で栽培した。出穂・開花期から登熟期（出穂から30日程度）に、群落内（穂の高さ）および群落上（植生高の2倍の高さ）に、自立型群落微気象測定装置（MINCER）を設置し、群落内外の気温・湿度を連続測定した。ただし、アメリカ合衆国と中国サイトは、初年度に早朝開花性品種（IR64-*qEMF3*）の

種子を送付できず、これを用いた栽培試験ができないため、群落内微気象データ解析においてはIR64のモニタリングデータで代替する。

さらに、最寄りの気象観測所のデータが利用可能なサイトでは、気温、湿度、日射量、風速の時別データを参照した。日射量、風速データとMINCERによる水田圃場の群落内の気温・湿度を、穂温推定モデルIM²PACT (Yoshimoto et al., 2011)⁵⁾に適用し、穂の温度の推定を試みた。

表 1. MINCERnet 全サイトの略称と位置情報

Symbols	Site	Latitude	Longitude
SN	Senegal	16.54 ° N	15.19 ° W
CI	Cote d'Ivoire	7.67 ° N	5.05 ° E
GH	Ghana	9.35 ° N	0.95 ° W
MG	Madagascar	18.83 ° S	47.48 ° E
IN	India	11.00 ° N	85.31 ° E
LK	Sri Lanka	8.10 ° N	80.47 ° E
MM	Myanmar	19.32 ° N	96.27 ° E
PH	Philippines	15.67 ° N	120.89 ° E
CN	China	30.36 ° N	112.05 ° E
TW	Taiwan	24.03 ° N	120.69 ° E
JP	Japan	36.02 ° N	140.12 ° E
US	USA	30.07 ° N	94.29 ° W

(2) 開花期の落水処理による乾燥ストレス試験

将来の水資源変動環境下の高温不稔への影響解明を目的とした開花期落水試験を、気候の異なる6サイト（ガーナ、マダガスカル、スリランカ、ミャンマー、フィリピン、台湾）で実施した。ガーナとマダガスカルの両サイトでは、水資源の制限だけでなく、風化土壌に起因するケイ素欠乏が重大な問題となっており、適応技術開発においても施肥・水管理対策の検討が急務であることから、ケイ素施肥（2水準）と水管理（節水と常時湛水）を組み合わせた設計で乾燥ストレス試験を実施しており、詳細についてはサブテーマ2を参照されたい。残りの4サイトでは、湛水区（Flooded）と、出穂予定日の約1週間前に落水する乾燥区（Drought）を設け、出穂・開花期のイネに乾燥ストレスをかけた。両処理区の群落内および群落上の気温・湿度をMINCERで連続測定した。

乾燥ストレス試験においても、（1）と同様に、MINCERで測定した群落内の気温・湿度を穂温推定モデルIM²PACTに適用することにより、乾燥ストレス下の穂温を推定した。

(3) ミャンマーにおける猛暑の水田圃場環境下での評価

熱帯で広く普及しているインド型品種「IR64」と、IR64に野生種*Oryza officinalis*由来の早朝開花性QTLである*qEMF3* (Hirabayashi et al. 2015)⁶⁾を導入した「IR64-*qEMF3*」を実験に供試した。試験地はミャンマー国ネピドー市のイエジン農業大学の水田圃場である。開花期に30分おきに開花調査を行い、日の出時刻からその日の開花ピーク時刻（FOT50）や開花終了時刻（FOT90）を算出した。収穫期に「IR64」と「IR64-*qEMF3*」をそれぞれ1プロット当たり10-12株収穫し、収量と収量構成要素を決定した。登熟歩合は水により充実粒を選別し算出した。株収量および千粒重は水分含有率14%に換算した。

(4) 強い乾燥ストレス条件下における早朝開花性系統の開花特性

「IR64」と「IR64-*qEMF3*」を2014年雨期にフィリピンの2つの水田圃場に移植し、そのうち1圃場は出穂前に落水し、開花期に乾燥ストレス処理を行った。もう1つの圃場は湛水のままであった。開花期に30分おきに開花調査を行い、（3）と同様にFOT50とFOT90を算出した。また穂温推定モデル（IM²PACT; Yoshimoto et al. 2011）⁵⁾と気象の実測値を用いて、開花測定日の「IR64」と「IR64-*qEMF3*」における湛水条件と乾燥条件の穂温を推定した。

4. 結果・考察

(1) 群落微気象の特徴と群落内外のギャップ

図2に、表1のサイトにおける標準品種（IR64）群落の出穂・登熟期間（出穂日を含む20日間）の全時別データの気温と湿度の分布を示す。

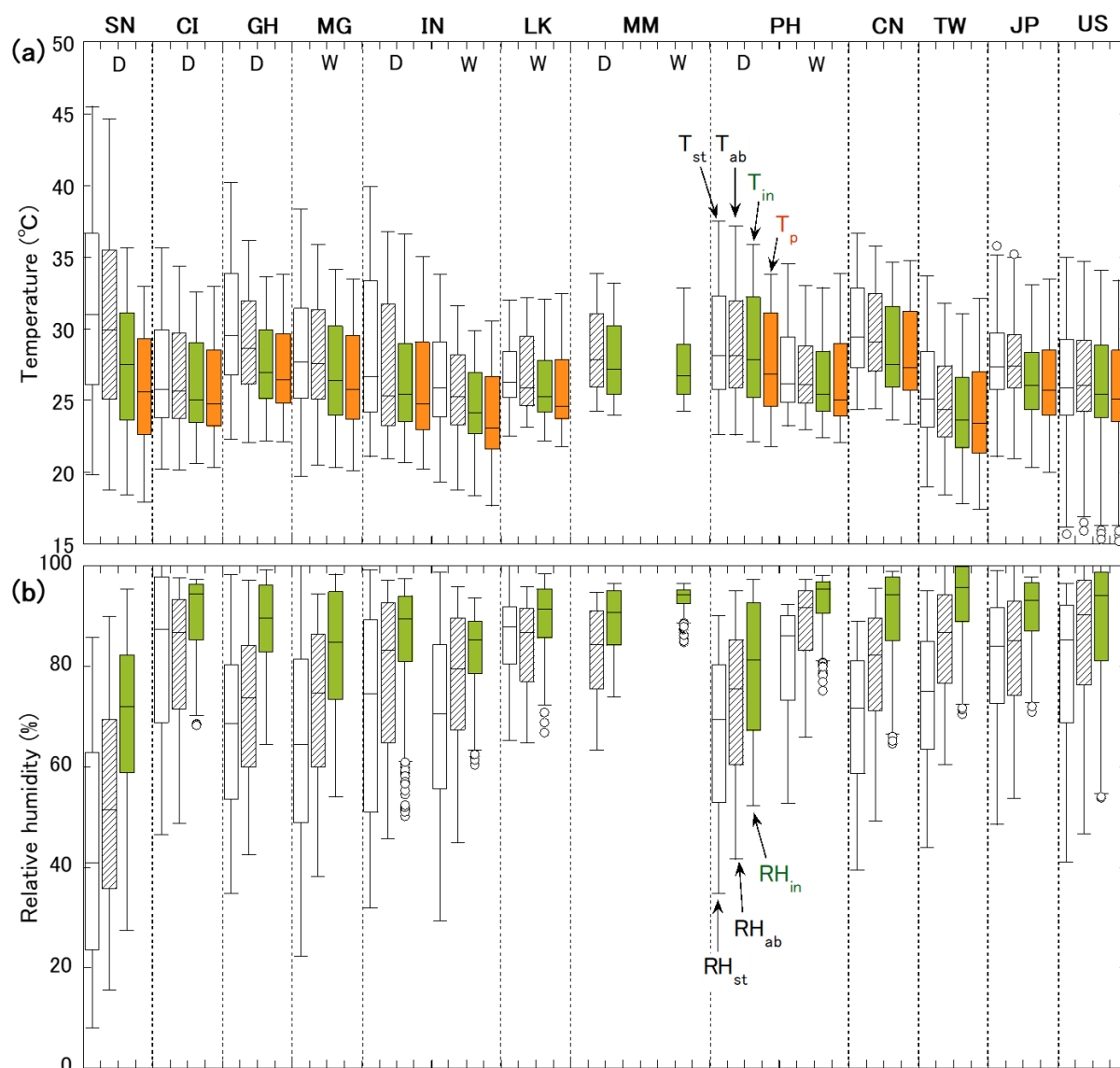


図2. 12サイトの出穂・登熟期間における気温 T と穂温 T_p (a)、相対湿度 RH (b)の分布。下付き文字はst:最寄りの気象観測所、ab:群落上、in:群落内、p:穂を示す。熱帯サイトのDは乾季、Wは雨季を表す。ミャンマー(MM)の雨季(W)の群落上気温・湿度は欠測、また最寄りの気象観測所のデータがないため穂温(T_p)を推定できなかった。

最寄りの気象観測所(T_{st})や群落上気温(T_{ab})でみると、気温の日較差が最も大きかったのは、セネガルで、日最高気温が 45°C 近くに達し、昼夜で 20°C 以上の気温差があった。このとき湿度(RH_{st} , RH_{ab})の日較差も大きく、日中20%を下回る非常に乾燥した大気条件となるが、夜間には90%近い湿潤な条件となった。一方、気温の日較差が小さかったのは熱帯サイト

(スリランカ、フィリピン)の雨季や温帯サイト(中国、台湾、日本、アメリカ)で、日最高気温が35℃を超えることはほとんどないものの、夜の気温が高く、特に中国では夜間も25℃付近を下回らなかった。熱帯サイトでは、乾季の方が雨季より気温が高く湿度が低い傾向があった。ただしミャンマーの乾季は天候不順であったため、例年の乾季に比べて湿度が高めであった。

群落内(T_{in} , RH_{in})では群落上(T_{ab} , RH_{ab})に比べて気温が低く湿度が高い。これは主に植物群落の蒸散による蒸発冷却効果によるものである。また穂温(T_p)は、群落内気温(T_{in})よりも低く、セネガルや熱帯乾季の乾燥気候ほど差が大きい傾向があった。これも穂の蒸散による蒸発冷却効果によるものと考えられる。このため、最寄りの気象観測所から群落上、群落内、穂にかけて、温度・湿度の傾斜が形成されており、その勾配は乾燥気候ほど大きく、湿潤気候では勾配が緩やか(またはほとんど勾配なし)であった。その結果、最寄りの気象観測所や群落上の気温でみるとセネガルや熱帯(ガーナ、インド)の乾季などの乾燥気候で高温であるが、高温不稔に関わる穂温は、乾燥気候サイトよりも湿潤な気候のフィリピン乾季や中国の方が高くなる傾向が認められた。

(2) 不稔率の分布

図3に、本研究期間中の栽培試験における標準品種(IR64)と、適応策有望品種である早朝開花性品種(IR64-*qEMF3*)、高温耐性品種(N22)の不稔率を示す。

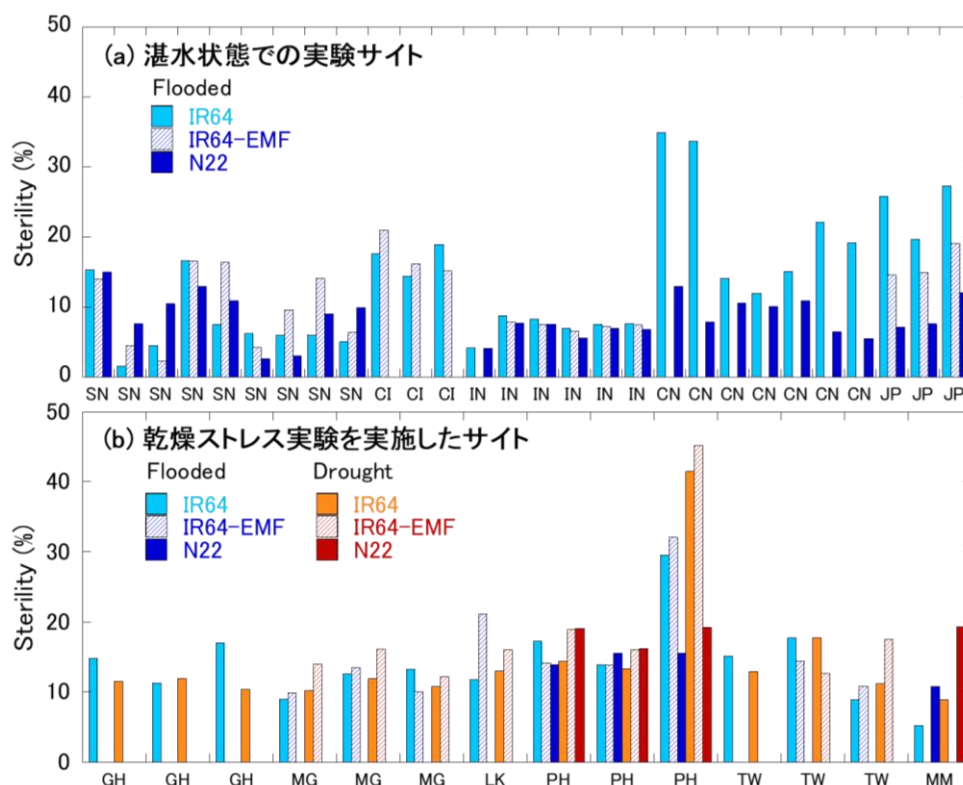


図3. 標準品種(IR64)、早朝開花性品種(IR64-*qEMF3*)、高温耐性品種(N22)の不稔率の分布。アメリカ(US)はコロナ禍のため不稔調査が実施されなかった。(a)は常時湛水状態での実験、(b)は開花期落水による乾燥ストレス実験。

標準品種（IR64）の不稔率の分布に着目すると、酷暑のセネガルや熱帯（ガーナ、インド）の乾季よりも、より湿潤な気候のフィリピン、中国、日本において不稔率が高い作期が出現していることがわかる。高温耐性品種（N22）の不稔率は、全サイト、全作期を通じてほぼ15%以下で、安定して低い不稔率であった。早朝開花性品種（IR64-*qEMF3*）導入の不稔低減への効果は、全体として N22 と比べると明瞭ではなかったが、標準品種（IR64）の不稔率が高かった日本では、早朝開花性により不稔率が減少した。

乾燥ストレス実験を実施した6サイト（図3b）に着目すると、フィリピンの1作期において乾燥ストレスにより不稔率増大が認められた。ここでは、高温耐性品種（N22）では乾燥ストレス下においても不稔率を低く抑えられていたが、早朝開花性品種（IR64-*qEMF3*）は、常時湛水下でも乾燥ストレス下でも、IR64 と同程度かやや増大した不稔率となった。その他の乾燥ストレス実験のサイト・作期では、乾燥ストレスによる不稔率の変化は小さかった。

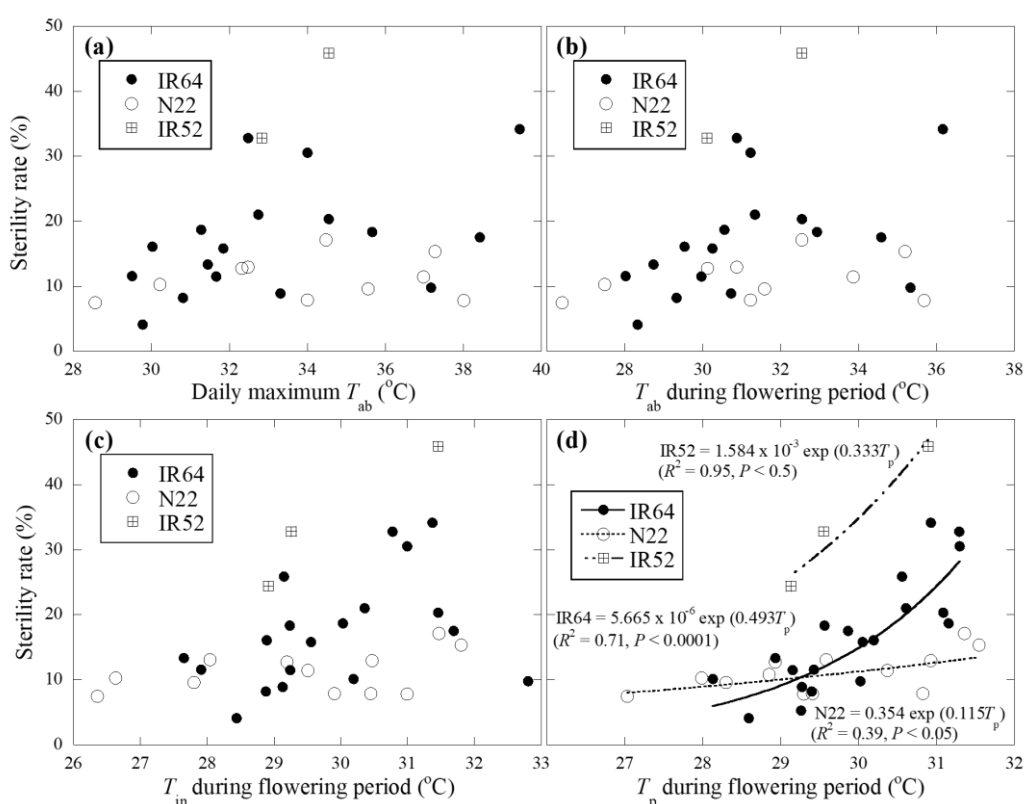


図4. 標準品種（IR64）、高温耐性品種（N22）、高温感受性品種（IR52）の不稔率と様々な温度変数との関係。(a) 群落上気温 (T_{ab}) の日最高値、(b) 開花時間帯の群落上気温 (T_{ab})、(c) 開花時間帯の群落内気温 (T_{in})、(d) 開花時間帯の穂温 (T_p) と不稔率との関係を示す。H27-29 年度実施の地球環境保全等試験研究費「気候変動が世界各地のコメ収量に及ぼす影響を予測するための耕地環境ストレスモニタリング」の不稔率データを含めて解析した。

図4に、標準品種（IR64）、高温耐性品種（N22）、高温感受性品種（IR52）の不稔率と様々な温度変数との関係を示す。群落上気温 (T_{ab}) や群落内気温 (T_{in}) とは不稔率との間に有意な相関は認められず（図4 a-c）、開花時間帯の穂温 (T_p)（図4 d）との間にのみ有意な相関が認められた。穂温を指標とすることで、標準品種（IR64）に対する高温耐性品種（N22）

の高温不稔低減効果を定量的に評価することができることが示された。なお、室内実験でなく屋外の一般水田で、多様な気候帯を横断して高温耐性品種導入による高温不稔の低減効果を実証的に明らかにした本研究は、世界で初めての成果である。

(3) 早朝開花性導入に伴う開花時間帯の微気象の変化

図5に、標準品種（IR64）と早朝開花性品種（IR64-*qEMF3*）のそれぞれの開花時間帯における群落内の気温（ T_{in} ）と湿度（ RH_{in} ）および推定した穂温（ T_p ）の分布を示す。

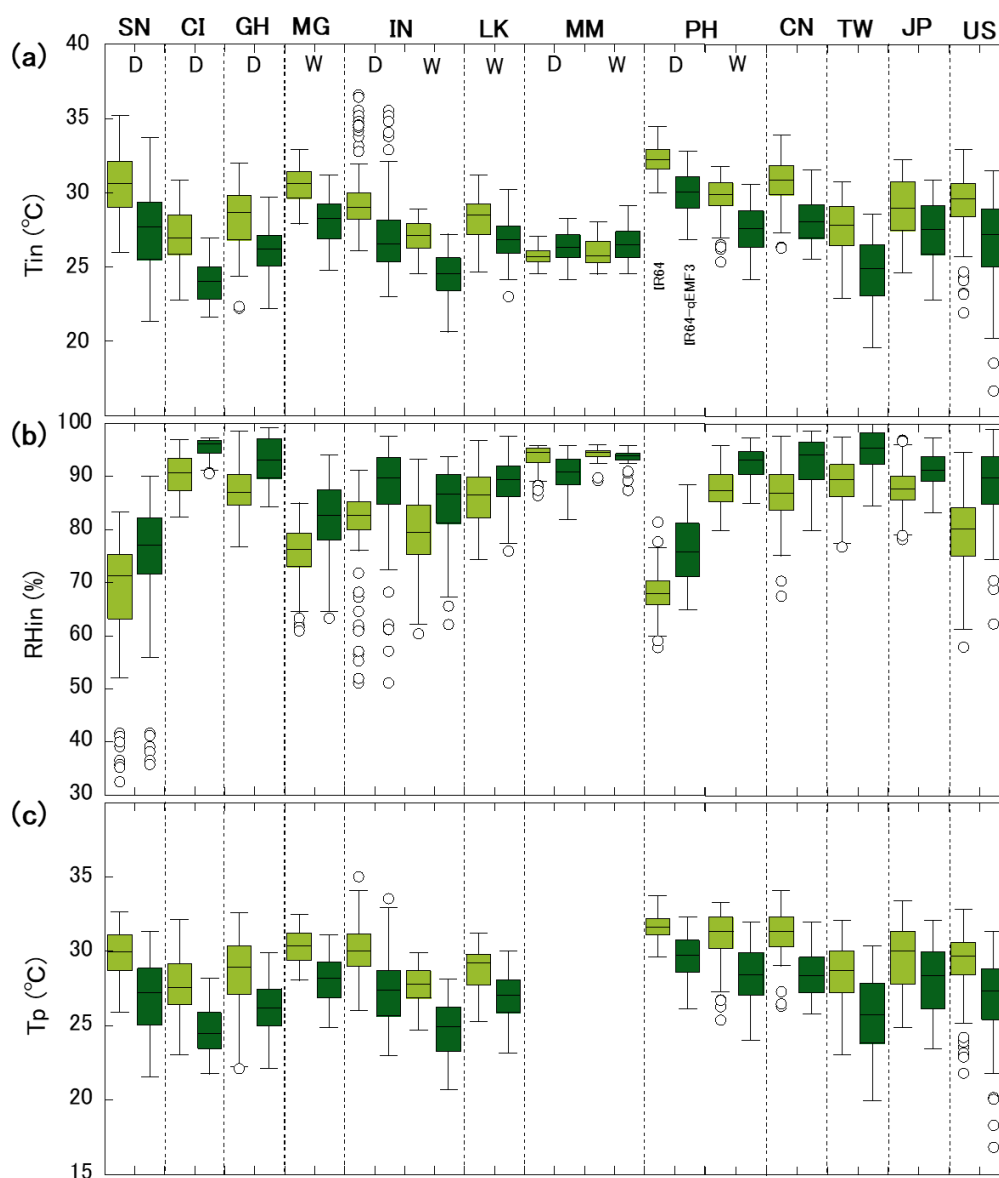


図5. 標準品種（IR64：黄緑）と早朝開花性品種（IR64-*qEMF3*：緑）の開花時間帯の(a)群落内気温（ T_{in} ）、(b)群落内湿度（ RH_{in} ）、(c)穂温（ T_p ）の分布。IR64-*qEMF3* 種子譲渡できなかった中国（CN）、アメリカ（US）や、IR64-*qEMF3* を用いた栽培試験ができなかった作期では代わりに IR64 のデータで代替。ミャンマー（MM）は最寄りの気象観測所データがないため穂温を計算できなかった。

ここで開花時間帯とは、イネ群落において、開花始めから開花盛期を迎え開花が終わるまでの3~4時間を指す。デジタルカメラのインターバル撮影による解析結果から、全サイトで、平均として開花盛期の時間帯が1-2時間早くなることがわかった。穂温を計算するデータセットが時別値であるため、本解析ではポテンシャルとして2時間開花盛期が早まると設定した。また、セネガルで他サイトより開花時刻が遅れるというモニタリング結果に基づき、両品種の開花時間帯を下記のように設定し、群落内の気温・湿度、穂温データを抽出した。

・セネガル

IR64: 10:00~14:00

IR64-*qEMF3*: 8:00~12:00

・セネガル以外

IR64: 9:00~12:00

IR64-*qEMF3*: 7:00~10:00

早朝開花性の導入により、開花時の群落内気温 (T_{in})、開花時穂温 (T_p) とともに(天候不順のミャンマーを除き) 1.5~3.0℃程度下げることができた。IR64の開花時穂温 (T_p) はフィリピンの乾季・雨季、中国において高く、中央値で31℃を超えていたが、早朝開花性の導入で、フィリピン乾季には30.0℃、フィリピン雨季と中国では28.4℃まで下げることができた。

一方、開花時の群落内湿度 (RH_{in}) は、(天候不順のミャンマーを除き) 早朝開花性の導入により上昇し、セネガルやフィリピン乾季では早朝開花時に75%程度でまだ低いものの、他のサイト・作期では平均90%と非常に高湿度条件となることがわかった。高湿度条件での開花時の受粉の安定性については未解明であるが、開花イベントには植物体内の水分生理に関わること、また、イネは風媒花であることから、早朝開花時の高湿度・低風速条件など穂温以外の気象要素が、受粉の安定性に影響する可能性が考えられる。

(4) 乾燥ストレス下の早朝開花性導入の効果

開花期落水試験を実施した6サイトについて、早朝開花および乾燥ストレスによる群落内微気象の変化を図6に示す。ミャンマーの乾季が天候不順のため高湿度条件となったこと、スリランカやフィリピンの雨季、台湾がもともと湿潤な気候であること等から、6サイトの実験のうち落水処理により強い乾燥ストレスをかけることができたのはフィリピンの乾季、マダガスカルのみで、それ以外の実験では湛水区 (Flooded) と乾燥区 (Drought) の間の処理間差は小さかった。フィリピン乾季やマダガスカルの乾燥ストレス下でも、早朝開花による高温回避性は有効であり、開花時群落内気温 (T_{in})、開花時穂温 (T_p) とともに、早朝開花により2℃程度温度を下げる事ができた。フィリピンの乾季では、標準品種 IR64 の群落内気温 (T_{in}) の分布の中央値は、湛水区で32.2℃であったが、乾燥区では33.5℃にまで上昇した。しかし乾燥区に早朝開花性品種を導入することで、IR64の湛水区よりも低い温度(31.3℃)にまで開花時間帯の遭遇気温を下げる事ができることがわかった。

開花時穂温 (T_p) に着目すると、フィリピン乾季では、湛水区、乾燥区ともに、早朝開花性を導入することで穂温は2℃程度下がるものの、依然として中央値が30℃付近と早朝に開

花しても穂温が高いことから、不稔を回避できなかった可能性がある（図3b）。

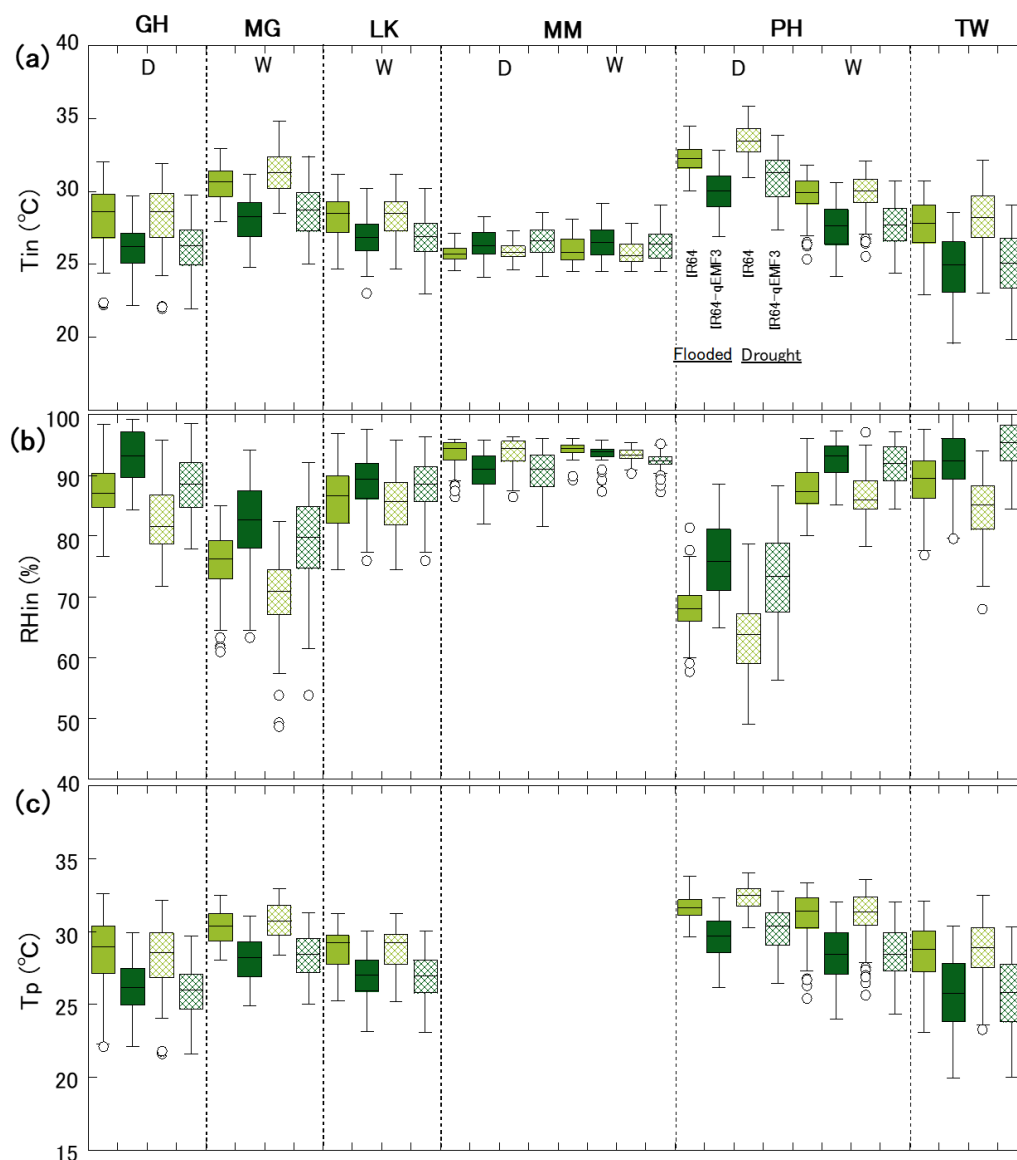


図6. 開花期落水試験での、標準品種（IR64：黄緑）と早朝開花性品種（IR64-*qEMF3*：緑）の開花時間帯の(a)群落内気温（ T_{in} ）、(b)群落内湿度（ RH_{in} ）、(c)穂温（ T_p ）の分布。ミャンマー（MM）は最寄りの気象観測所データがないため穂温を計算できなかった。各サイトにおいて左から順に、湛水区（Flooded、色塗り）のIR64、IR64-*qEMF3*、乾燥区（Drought、ハッチ）のIR64、IR64-*qEMF3*を表す。ただし、図5と同様に、IR64-*qEMF3*を用いた栽培試験ができなかった場合は代わりにIR64のデータで代替。

（5）ミャンマーにおける猛暑の水田圃場環境下での評価

開花時刻と開花日の気温との関係を図7に示す。全てのシーズンにおいてFOT50とFOT90ともに、「IR64-*qEMF3*」の方が「IR64」よりも早い時間に開花していたが、開花時刻はシーズンによって変わっていた。「IR64」と「IR64-*qEMF3*」に共通して、日平均気温が高いほど開花時刻（FOT50, FOT90）は早まっており、開花時刻と開花日の日平均気温との間には、各

遺伝子型で有意な負の相関関係がみられた（図7A,D）。この結果は開花時刻が *qEMF3* による遺伝的影響と気温による環境的影響を受けて決定されることを示す。次に日平均気温を日最高気温と日最低気温に分けて解析した。「IR64-*qEMF3*」では開花時刻と開花日の日最高気温との間に有意な負の相関関係がみられたのに対し（図7B,E）、「IR64」では開花時刻と開花日の日最低気温との間に有意な負の相関関係がみられた（図7C,F）。インディカ品種では開花時刻と開花日の日最低気温との間に有意な負の相関関係がみられることは、すでに Julia and Dingkuhn (2012)⁷⁾により報告されているが、開花時刻と開花日の日最高気温との関係に関してはまだ報告されていない。*qEMF3*は品種とは異なる開花特性をイネに付与するユニークな遺伝子であることを示唆する。

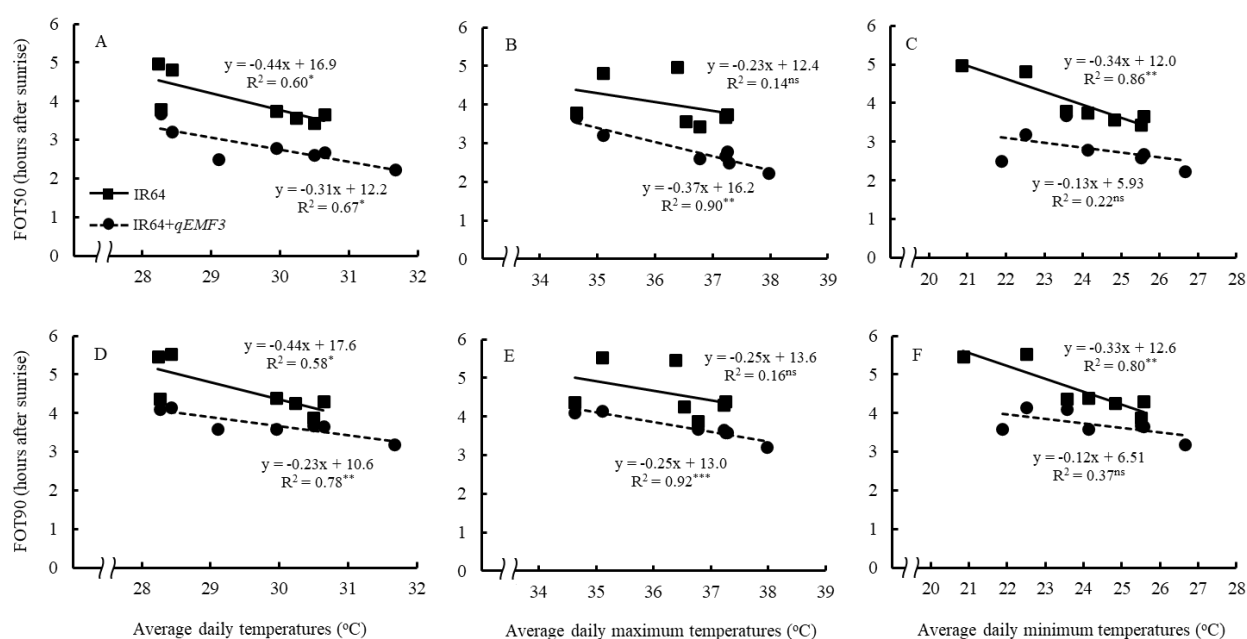


図7. 「IR64」と「IR64-*qEMF3*」の開花時刻（FOT50とFOT90）と開花日の気温との関係。

A-C; FOT50, D-F; FOT90. A, D; 日平均気温. B, E; 日最高気温. C, F; 日最低気温.

*, **, ***, $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$. nsは有意性なし.

また、「IR64-*qEMF3*」の「IR64」に対する収量の優位性に関する収量構成要素の重回帰分析に関して、収量増加に対して著しい効果をもたらしているのは、稔実率のみであった（図8A）。さらに開花時の高温不稔は日中の最高気温によってもたらされる（Ishimaru et al. 2016）⁸⁾ため、出穂期の最高気温と稔実率との関係を解析したところ、両者の関係は図8Bのような折れ線モデル（Ohtsuka 1995）⁹⁾で表すことができた。折れ線モデルによると両遺伝子型で稔実率が低下する閾値の最高気温があり、「IR64」は36.1℃以上で、「IR64-*qEMF3*」は36.9℃以上で稔実率が減少することが分かった。「IR64」と「IR64-*qEMF3*」の0.8℃の差は、開花時刻の差に起因すると考えられる。また最高気温の閾値以上でも、稔実率の減少程度は「IR64-*qEMF3*」の方が「IR64」よりも緩慢であった（図7B）。「IR64-*qEMF3*」の開花時刻は最高気温との相関が高い（図7B,E）ことが関係している可能性がある。

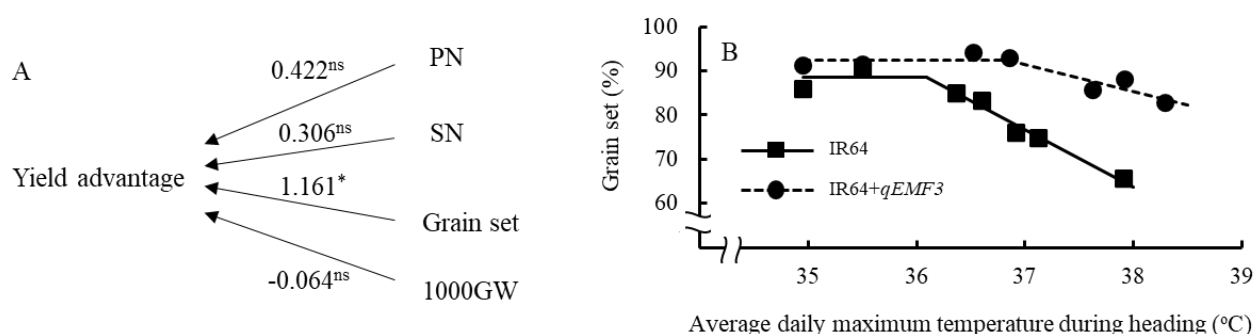


図 8. 「IR64-*qEMF3*」の「IR64」に対する収量の優位性に関する収量構成要素の重回帰分析 (A) と、出穂期の最高気温 (°C) と稔実率 (%) との関係 (B) .

PN, 穂数. SN, 1 穂粒数. Grain set, 稔実率. 1000GW, 千粒重. 各収量構成要素から収量の優位性に向かって矢印にある数字は重回帰係数を示す.

*. $P < 0.05$; ns, not significant.

(6) 強い乾燥ストレス条件下における早朝開花性系統の開花特性

開花期に穂の水ポテンシャルが $-1.0 \sim -1.5$ MPa の乾燥ストレス処理を行い開花時刻を観察したところ、「IR64」と「IR64-*qEMF3*」に共通して水ストレス処理による開花時刻に変化はみられなかった (表 2) 。しかしながら乾燥ストレス処理がより弱いシーズンでは、

「IR64-*qEMF3*」への乾燥ストレス処理によって開花時刻が早くなったことから、「IR64-*qEMF3*」では水ストレスの強度によって開花時刻が変化すると推察された。

また、「IR64」と「IR64-*qEMF3*」の穂温を実測したところ、同じ時刻帯では遺伝子型間差はみられなかった (図 9 A) 。一方で乾燥ストレス区では 8:30-9:00 においても、10:30-11:00 においてもそれぞれの時刻帯の湛水区よりも穂温が有意に高く、かつ同じ乾燥ストレス区でも 8:30-9:00 に比べて 10:30-11:00 では有意に穂温が高かった。穂温推定モデルによると、

「IR64-*qEMF3*」は穂温が直線的に増加している時刻帯で、まだ穂温が低い時刻帯に開花しているのに対し、「IR64」は穂温がすでに最高に達している時刻帯に開花することが分かった (図 9 B) 。乾燥ストレス処理区では、開花時刻が遅いとイネ穎花はより一層厳しい高温条件にさらされるが、「IR64-*qEMF3*」は開花時刻を早朝に行うことで厳しい高温条件から逃避できると考えられる。

表 2. 湛水条件と乾燥ストレス条件下における「IR64」と「IR64-*qEMF3*」の開花時刻 (FOT50 と FOT90)

Genotype	Treatment	Flower opening time (hours after sunrise)	
		FOT50	FOT90
IR64	Flooded	4.0 ab	4.8 a
IR64- <i>qEMF3</i>		2.7 c	3.7 ce
IR64	Drought stress	4.3 a	4.8 a
IR64- <i>qEMF3</i>		2.7 c	3.2 e

FOT50とFOT90で異なる文字はTukey-HSDによる検定において5%水準で有意な差があることを示す。

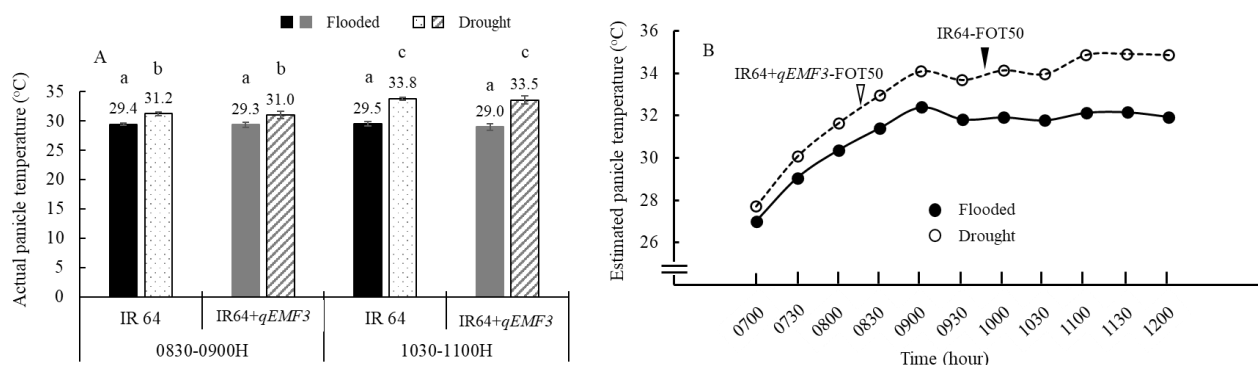


図9. 2014年雨期の穂温実測値 (A) と穂温推定値 (B) .

Aで異なる文字はTukey-HSDによる検定において5%水準で有意な差があることを示す.

Bは「IR64」と「IR64-*qEMF3*」の間で穂温の違いがないことを前提に、湛水区と乾燥ストレス処理区で時刻別の穂温を推定した. 「IR64」と「IR64-*qEMF3*」のFOT50の時刻を矢頭で示す.

5. 成果

- (1) 世界の主要なコメ生産地からなる水田群落微気象とイネ高温障害のモニタリングネットワークにおいて、気候変動適応策の有効性評価のための連携栽培試験を実施した。COVID-19の世界的な感染拡大に伴い、一部のサイトではロックダウン等のために実験を実施できなかったり、欠測が生じたりしたものの、多様な気候のサイトで水田群落微気象と高温障害のモニタリングデータを集積することができた。
- (2) 開花期高温不稔に関わる穂温は、最寄りの気象観測所の気温や群落上の気温と異なり、その温度差は気候条件によって異なった。穂温を指標とすることで高温不稔誘発を定量的に評価でき、高温耐性品種などの各適応策品種の有効性や限界の評価が可能であることを世界で初めて実証的に明らかにした。
- (3) 早朝開花性品種を導入することで、開花時の穂が遭遇する群落内の気温や穂温を1.5～3.0℃低くすることができ、乾燥ストレス実験でも同様に開花時の高温を回避できることを明らかにした。高温開花性導入による不稔低減効果については、高温耐性品種 (N22) ほど明瞭ではなく、開花時の高温回避以外の微気象要因 (低風速や高湿度条件) が受粉の安定性に影響している可能性も示唆された。
- (4) 熱帯の酷暑条件の水田圃場において、早朝開花性の導入による高温不稔回避効果を実証することができた。また乾燥条件下では開花時刻が遅くなると、より一層厳しい高温ストレスにさらされるが、早朝開花性系統は乾燥ストレス条件下でも早朝に開花する特性を維持できることが明らかとなった。高温と乾燥ストレス条件下でコメの生産性を向上させるためには早朝開花性QTL (*qEMF3*) と乾燥耐性QTLとの集積が必要であると示唆された。

6. 引用文献

- 1) IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability. Part A:

Global and sectoral aspects. Chapter 7 Food security and food production system. 485-534.

- 2) Satake, T., and Yoshida, S., (1978) High temperature-induced sterility in Indica rices at flowering. 日作紀 47, 6-17.
- 3) Ishimaru, T., Hirabayashi, H., Ida, M., Takai, T., San-oh, YA., Yoshinaga, S., Ando, I., Ogawa, T., Kondo, M. (2010) A genetic resource for early-morning flowering trait of wild rice *Oryza officinalis* to mitigate high temperature-induced spikelet sterility at anthesis. *Annals of Botany*, 106, 515-520.
- 4) Fukuoka, M., Yoshimoto, M., Hasegawa, T. (2012) MINCER: A novel instrument for monitoring the micrometeorology of rice canopies. *Journal of Agricultural Meteorology*, 68, 135-147
- 5) Yoshimoto M, Fukuoka M, Hasegawa T, Utsumi M, Ishigooka Y, Kuwagata T. (2011) Integrated micrometeorology model for panicle and canopy temperature (IM²PACT) for rice heat stress studies under climate change. *Journal of Agricultural Meteorology* 67, 233-247.
- 6) Hirabayashi H, Sasaki K, Kambe T, Gannaban RB, Miras MA, Mendioro MS, Simon EV, Lumanglas PD, Fujita D, Takemoto-Kuno Y, Takeuchi Y, Kaji R, Kondo M, Kobayashi N, Ogawa T, Ando I, Jagadish KSV, Ishimaru T (2015) *qEMF3*, a novel QTL for the early-morning flowering trait from wild rice, *Oryza officinalis*, to mitigate heat stress damage at flowering in rice, *Oryza sativa*. *Journal of Experimental Botany* 66, 1227-1236.
- 7) Julia C, Dingkuhn M. (2012) Variation in time of day of anthesis in rice in different climatic environments. *European Journal of Agronomy* 43, 166-174.
- 8) Ishimaru T, Seefong X, Nallathambi J, Sathishraj R, Yoshimoto M, Phoudalay L, Samson B, Hasegawa T, Hayashi K, Arumugam G, Muthurajan R, Jagadish SVK. (2016) Quantifying rice spikelet sterility in potential heat-vulnerable regions: Field surveys in Laos and southern India. *Field Crops Research* 190, 3-9.
- 9) Otsuka Y. (1995) Application of intersecting straight line models for analysis of cultivars' ecological characteristics. *Breeding Science* 45, 135-138.

〔研究成果の発表状況〕（課題開始年度—令和3年度）

（1）誌上発表（学術誌）

- Yoshimoto M, Fukuoka M, Tsujimoto Y, Matsui T, Kobayasi K, Saito K, van Oort PAJ, Inusah BIY, Vijayalakshmi C, Vijayalakshmi D, Weerakoon WMW, Silva LC, Myint TT, Phyo ZC, Tian X, Lur HS, Yang CM, Tarpley L, Manigbas NL, Hasegawa T (2022) Monitoring canopy micrometeorology in diverse climates to improve the prediction of heat-induced spikelet sterility in rice under climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 316, 108860.
- Ishimaru T, Hlaing KT, Oo YM, Lwin TM, Sasaki K, Lumanglas PD, Simon EVM, Myint TT, Hairmansis A, Susanto U, Ayyenar B, Muthurajan R, Hirabayashi H, Fukuta Y, Kobayasi K, Matsui T, Yoshimoto M, Htun TM. (2022) An early-morning flowering trait in rice

can enhance grain yield under heat stress field conditions at flowering stage. Field Crops Research 277, 108400.

Ishimaru T, Sasaki K, Lumanglas PD, Cabral CLU, Ye C, Yoshimoto M, Kumar A, Henry A. (2022) Effect of drought stress on flowering characteristics in rice (*Oryza sativa* L.): A study using genotypes contrasting in drought tolerance and flower opening time. Plant Production Science, accepted.

(2) 口頭発表

Ishimaru T. (2021) A broad application of an early-morning flowering trait to enhance heat resilience in rice. Global Rice Conference 2021. 24-25th September 2021. India (Online).

Ishimaru T. (2021) Heat resilience in rice by early-morning flowering trait. ACSAC10 (第10回アジア作物学会議). 8-10th September 2021. Nagoya (Online).

石丸 努(2022) 早朝開花性を利用した開花時高温不稔の回避. 第32回気象環境研究会. 2022年3月14日. オンライン (Teamsウェビナー) .

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

吉本真由美、2018年度日本農業気象学会賞学術賞「農耕地等生態系における微気象観測とモデリングによる気候変動の影響解明」、2019年3月28日

(5) 一般への公表・報道等

農研機構プレスリリース予定(時期未定)「国際的な水田観測ネットワークによる世界のイネ高温不稔誘発の実態解明」

(6) 研究分野における成果の発展・牽引

- ① 2019年度には、これまでの成果とその行政貢献的・学術的観点からの活用面等について、環境省および農林水産省職員への勉強会を実施した(環境省で2019年3月26日)。
- ② 2018年7月23日に埼玉県熊谷市で日最高気温41.1℃を記録するなど、2018年は7月中旬から8月にかけて関東・東海等の広範囲で記録的猛暑が続き、国内で初めてイネの開花期高温不稔による被害が顕在化する可能性が懸念された。本研究課題代表者(吉本真由美)は、分担研究者(石丸努)らと協力して、高温だった府県と連携して高温不稔発生実態の緊急調査を主導した。不稔率は作況等の基幹統計調査項目に含まれていないことから、本研究課題における調査プロトコルの精査と並行して不稔調査方法の標準化、効率化の検討を進めるなど、国内におけるイネの高温不稔発生の実態解明に関する研究を牽引している。
- ③ 2019年は関東等で梅雨明けが遅く、梅雨明け後の8月前半は2018年の高温を上回る猛

暑に見舞われたことから、本研究課題代表者（吉本真由美）と分担研究者（石丸努）らは2018年に引き続き、府県と連携して高温不稔発生実態の緊急調査を主導した。2018年の調査結果と併せて国内の高温不稔発生状況に関する解析を行い、論文としてとりまとめ公表した。なお、本調査結果については、2022年1月18日に農研機構からプレスリリースを行い、2022年3月14日には国や地方自治体の農業試験研究機関の研究者や一般市民を対象に報告し議論を深めるため、ウェビナー形式で気象環境研究会を開催した。

- ④ 近年の国内の夏季高温による農作物の被害が多発していることから、本研究課題代表者（吉本真由美）らの研究グループでは、2013年以降毎年、夏季の農業気象（高温に関する指標）としてイネの高温障害に関連する気象情報をWebで発信している。課題代表者（吉本真由美）は本研究課題における日本サイトで微気象モニタリングデータを蓄積しつつ、穂温推定モデルを改良し、全国の47気象官署地点について開花期高温不稔に関連する穂温の推定を担当しており、国内の農業分野における温暖化影響モニタリングの高度化に貢献している。

（7）政策への寄与・貢献

複数の気候変動適応策オプションに関する影響評価の実証データが得られるため、世界の稲作地域における気候変動およびその適応下のコメ生産性の「脆弱」地域を浮き彫りにすることができ、気候変動下での食料安全保障への影響の地図化に寄与するとともに、脆弱な地域への適応援助方針の決定のための基礎データとなる。

アジア、アフリカを中心とする国際ネットワークでのモニタリング体制を維持・継続・発展させることで、開発途上国における観測能力の向上、人材育成を含む科学技術外交を推進するとともに、我が国単独では得られない、海外の質の高い気候変動適応の影響評価に関するデータが継続的に収集される。一方、国内に先駆けて既に高温不稔による減収が顕在化している海外の水田における耕地環境と高温障害のモニタリングデータは、高温不稔誘発・軽減のメカニズムの解明に役立ち、農林水産省気候変動適応計画における国内の高温不稔耐性品種の開発における科学的知見としても役立つ。

多様な気候条件下の気候変動適応策の有効性についての実証データは、ユーザーにとって扱いやすいベンチマークデータセットとして整備し、気候変動下の農業分野の影響評価や適応策立案における収量予測精度の向上に寄与する方針である。特に、国際的な農業モデル相互比較・改良プロジェクト（AgMIP）と協調して、イネ生育・収量予測モデルの精度を検証し、必要な改良を行うことにより、世界の食料変動予測の高精度化に貢献できると考えられる。

世界のコメ生産地における気候変動適応策の有効性評価のための耕地環境ストレスモニタリング

(2) アフリカの脆弱稲作生態系における高温障害と生産性モニタリングと早朝開花QTLの現地品種への導入

国立研究開発法人 国際農林水産業研究センター

生産環境・畜産領域 辻本 泰弘

生物資源・利用領域 高井 俊之

平成30—令和3年度合計予算額 18,555千円

(うち、令和3年度当初予算額 4,552千円)

【要旨】本サブテーマでは、気候変動に脆弱、かつ、気候変動による食料安全保障への脅威が最も深刻なサブサハラアフリカ（以下、アフリカ）を対象として、水管理、ケイ素施肥、および、早朝開花性系統の導入といった栽培対策が、イネの群落内温度、高温障害、および生産性に及ぼす影響を解明することを目的とする。さらに、育種素材を用いた実用的な適応策を提供するために、マダガスカルおよびスリランカの主力品種に早朝開花性QTL-*qEMF3*を導入する。ガーナとマダガスカルの農家圃場で、群落微気象と圃場水分環境の測定機器を設置し、両系統を用いた栽培試験を2019年と2020年の2年間にわたり実施した。COVID-19の影響を受けて一部のデータ回収に遅延が生じているものの、IR64-*qEMF3*による開花時間の早朝化とそれにとまなう開花ピーク時の群落温度の低下を同時に捉えることに成功した。一方で、IR64-*qEMF3*は、IR64に比べてやや不稔率が高い傾向があることが分かった。いずれの試験地および年次においても、ケイ素施肥と水管理に相互作用がみられた。すなわち、非湛水管理において、ケイ素施肥が有意に増収効果をもつこと、ケイ素施肥により、日中の群落内気温が低下する傾向にあることが示された。また、過年度に得られた非湛水管理がイネの群落内気温と不稔率および収量に及ぼす効果について、原著論文ならびに国際農林水産業研究成果情報として成果を発信した。以上から、高温条件が多発するアフリカの2つの稲作地域での栽培試験を繰り返すことで、早朝開花性遺伝子、水管理、ケイ素施肥が群落の微気象や収量に及ぼす影響に関する実測データを蓄積することができた。また、マダガスカルおよびスリランカ両国の主要品種に早朝開花性QTLを導入するための世代促進を進め、スリランカの主要品種であるBG251GSRについては、準同質遺伝子系統の候補個体を選抜することができた。

【キーワード】早朝開花性イネ、高温ストレス、マーカー選抜育種、節水栽培、ケイ素施肥、ガーナ、マダガスカル、スリランカ

1. はじめに

アフリカは、その多くが熱帯気候に属し、かつ、灌漑設備などの生産基盤が乏しいことか

ら、異常気象にともなう突発的な冠水害や干ばつ、もしくは高温ストレス障害などを受けやすく、気候変動による作物生産へのリスクが最も高い地域である¹⁾。また、灌漑が整備された地域においても、気候変動にともなう一時的な降雨不足や人口増加および都市化による水競合などで農業用地に利用できる水資源が制限され、節水稻作がより広範囲で求められることも予測される。

しかし、これまで、水条件が限られた圃場環境下でのイネへの高温ストレスの影響を評価した研究事例は極めて少なかった。我々の研究グループでは、ガーナ北部のイネ生産圃場において、生育期間中の水条件の違いがイネの群落内温度および高温ストレス障害に及ぶ影響を評価し、特に、気温が高く湿度の低い乾期作での節水管理は、水ストレスを受けない程度の湿潤土壌条件であっても、湛水条件に比べて群落内温度の上昇を引き起こし、開花時間中の高温ストレスにともなう不稔率の増加や維持呼吸の増加にともなう収量低下を招くことを明らかにした（本試験研究費H27-29年度「気候変動が世界各地のコメ収量に及ぼす影響を予測するための耕地環境ストレスモニタリング」最終報告書）。この結果は、栽培時期や水管理によっては、同地域で高温ストレスのリスクが既に高く、その対策が急務であることを示唆している。

イネ生産における高温ストレス対策としては、上述の水管理に加えて、通常のイネ品種よりも開花時間を早めて日中の高温を回避する早朝開花の特性を有する系統の開発が挙げられる。これまでに、国際農林水産業研究センター（以下、国際農研）は、農研機構およびフィリッピン国際稲研究所（IRRI）とともに、早朝に開花する早朝開花性を野生イネから見出し、その遺伝要因QTL-*qEMF3*を同定し²⁾、同QTLを用いた育種素材の開発、具体的には熱帯地域のイネ主要品種であるIR64にQTL-*qEMF3*を導入した準同質遺伝子系統（IR64-*qEMF3*）を作出した。

また、本研究グループは、アフリカ広域のイネ生産圃場で風化土壌に起因するケイ素欠乏が蔓延していることを指摘しており³⁾、イネの蒸発散能と密に関わるケイ素欠乏の改善が水の制限された環境での群落温度の調整や高温ストレスの回避に繋がる可能性が考えられる。しかし、こうした、種々の栽培対策がどの程度、高温ストレスの適応策として役に立つのか、また、異なる栽培環境での汎用性はどうかなど、実際の生産現場において定量的に評価された事例はない。

2. 研究目的

本研究では、本試験研究費H27-29年度により群落微気象と圃場の水条件の観測システムが既に整備されたガーナに、サブサハラ第2のコメ生産国で、高温ストレスのイネ生産への影響モニタリングが皆無であるマダガスカルを新たな対象地域に加えることで、成果の汎用性を高める。さらに、これら2地点において、水管理、早朝開花系統の導入、および施肥技術など高温ストレスに有効と考えられる種々の栽培対策がイネの群落温度、高温ストレス、および生産性に及ぼす影響を定量評価する。また、本研究は、イネを高温から回避させる育種戦略に着目し、早朝開花性QTL-*qEMF3*をマダガスカルとスリランカの現地主力品種に導入することを目的とする。

3. 研究方法

(1) アフリカの脆弱稲作生態系における高温障害と生産性モニタリング

気温が高くかつ大規模な稲作地帯であるマダガスカル北西部およびガーナ北部において、マダガスカル国立農村開発応用研究センター（FOFIFA）およびガーナサバンナ農業研究所（SARI-CSIR）と共同で、IR64-*qEMF3*を用いた栽培実験を実施した。2018年度に現地で種子増殖を行い、2019年～2021年にかけて、マダガスカルでは3作期、ガーナでは4作期にわたる栽培試験を実施した。うち、ガーナにおける2作期の試験は、感染症対策による移動制限のため、必要な観測を行うことができなかった。両地点および各作期における試験設計および観測項目は、以下の通り共通とした。すなわち、各地点の隣接する2つの農家圃場において、生育期間を通して湛水した「常時湛水圃場（Flood）」と出穂2週間前から出穂期にかけて非湛水湿润条件とした「非湛水圃場（Drained）」の2つの異なる水環境を設定した。さらに、栽培対策の有効性評価のため、それぞれの水条件に対して、IR64-*qEMF3*およびIR64の2系統とケイ素施用の有無による2水準の施肥法（-Siと+Si）を組み合わせた4処理×4反復を乱解法で設置した。

生育期間中の圃場環境を計測するため、圃場近郊ないし圃場内に気象観測装置を設置し、各圃場内に、土壤水分センサー（Decagon社）、地温センサー（T&D社）、および、水位計（Onset社）を設置した（図1）。続いて、幼穂分化期ごろに群落温度の変化を記録するための自立型気象観測装置（MINCER）、および開花時間の自動観測のためのデジタルカメラを設置した。いずれも台数が限られているため、MINCERは群落上の温湿度計測のための1台に加えて、ガーナでは、「常時湛水圃場」と「非湛水圃場」のIR64（-Si）とIR64-*qEMF3*（-Si）から2反復ずつ、マダガスカルでは、「常時湛水圃場」のIR64（-Si）から2反復、「節水圃場」のIR64（-Si）、IR64-*qEMF3*（-Si）、IR64-*qEMF3*（+Si）から2反復ずつの各地点で計9台を設置した。デジタルカメラは、各地点、作期で利用可能な台数に応じて、IR64-*qEMF3*のプロットを優先して設置した。デジタルカメラの画像および圃場での観測から、各処理区の出穂日（約50%の穂が出た日）を決定して、出穂日に前後3日間の晴天日を加えた計7日間の群落内および群落上部の気温変化を開花期間中の微気象として比較した。成熟期に、坪刈り調査により収量を決定し、抜き取り調査により不稔率を含めた収量構成要素を決定した。

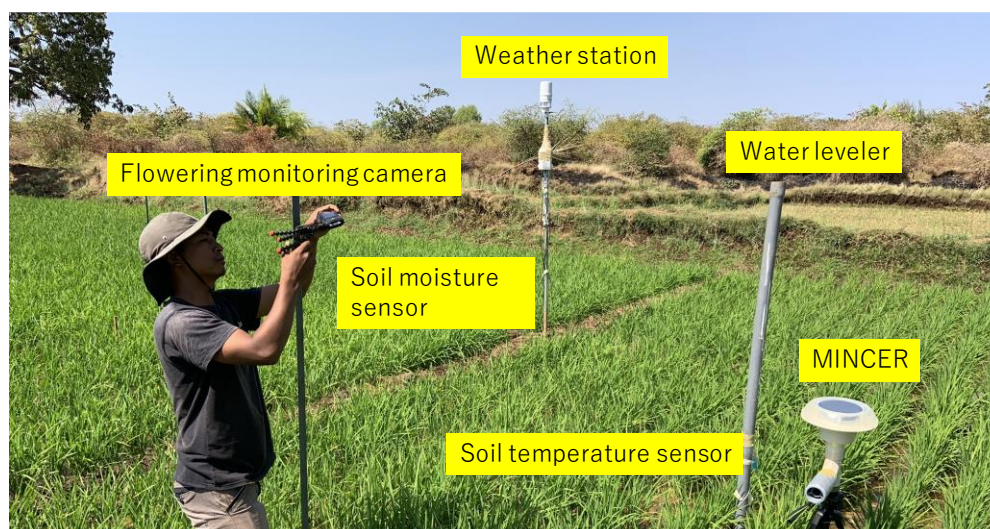


図1. マダガスカル北西部における圃場環境計測の様子。

（２）早朝開花性系統の高温回避性の現地調査と早朝開花QTLの現地品種への導入

昨年度までの試験において、マダガスカル品種X265およびF0FIFA160背景でBC₂F₁、BC₄F₁種子をそれぞれ獲得し、スリランカ品種BG251GSR、Bg300背景でBC₄F₂、BC₃F₁種子をそれぞれ獲得した。これら種子由来の個体と親品種を5月～10月にかけて茨城県つくば市の国際農林水産業研究センター八幡台水田圃場で栽培した。BG251GSR背景については、出穂期までに*qEMF3*領域が供与親品種型に固定し、背景がBG251GSR型に固定した準同質遺伝子系統

(BG251GSR-*qEMF3*) の選抜を試み、出穂期に開花時刻を親品種とともに調査した。その他の品種背景については、出穂期に親品種による戻し交配を進めた。BG251GSR-*qEMF3*および交配が成功した個体について

Illumina Infinium 7k SNP chip
を用いて遺伝子型調査を行った。

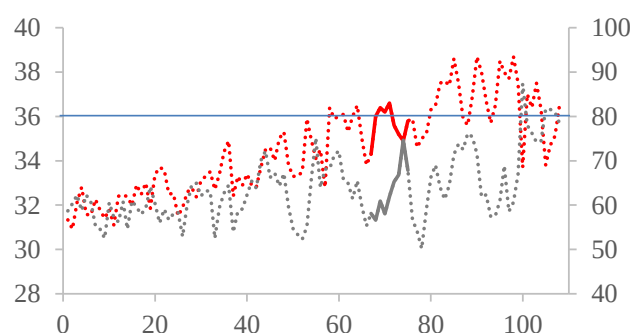
4. 結果・考察

（１）アフリカの脆弱稲作生態系における高温障害と生産性モニタリング

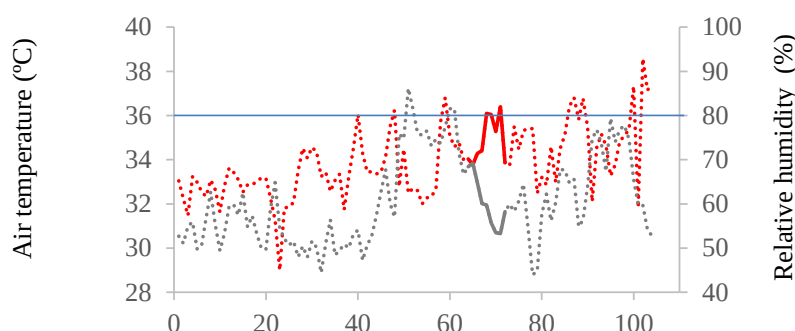
ー栽培環境ー

新型コロナウイルスの感染症対策にともなう影響が比較的小さく、解析に耐え得るデータを収集することができたマダガスカルでの試験結果を中心に考察した。まず、図2に2019年～2021年の3作期におけるイネ生育期間中の日最高気温と日平均湿度の推移を比較した（試験圃場内に気象観測装置を設置）。いずれの年次においても、移植から成熟期にかけて日最高気温が上昇し、湿度もやや増加する傾向がみられた。出穂期前後（実線で示した期間）には、36℃を超える日がいずれの作期でも複数回観測された。特に、2021年は、出穂期間中に日最高気温が38℃を観測する日がみられ、最も高温ストレスリスクの高い年次であった。

(A) 2019



(B) 2020



(C) 2021

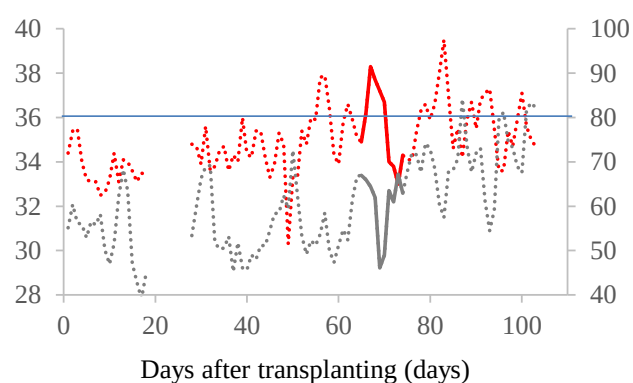


図2. マダガスカル試験地点における移植から収穫までの日最高気温（赤）および日平均湿度（グレー）の推移。実線は出穂日前後の期間を示す。

次に、イネ生育期間中の圃場水位と非湛水圃場での土壤水分ポテンシャルの推移を比較した（図3）。いずれの年次においても、常時湛水圃場（Flood）での全生育期間および非湛水圃場（Drained）における落水処理以外の期間は、10～15cm程度の圃場水位を維持した。

非湛水处理圃場の落水期間において、2019年の最低水位は－5cm程度であり、土壤水分ポテンシャルの低下もほとんどみられなかった。2020年も、最低水位が－40cmに、土壤水分ポテンシャルが－20kPaに低下した日が一日観測されたが、2019年と同様に、イネに水ストレスを与えない圃場容水量以上の湿潤条件を与えることができた。一方、2021年は、灌漑水の不足から水位および土壤水分ポテンシャルが大きく低下した。ただし、これは出穂後の登熟期であり、開花期間中の水条件としては、－10kPa、すなわち圃場要水量以上の土壤水分条件が維持されていたと考えられた。すなわち、3か年を通して、出穂（開花）期の水条件として、湛水圃場では適正な湛水条件、非湛水圃場では表面水はないもののイネが水ストレスを受けない高い土壤水分含量を維持していたと考えられた。

次に、MINGERによる出穂期の群落内気温を比較した（図4）。いずれの年次においても、日の出（5時20分～30分ごろ）後の群落内気温の上昇程度は非湛水条件で大きく、日没前にかけて水条件による群落内気温差が広がった。結果、非湛水条件と湛水条件で日中の群落内気温に最大1.0～1.1℃の差がみられた。一方で、夜間の群落内温度は水管理の違いによる影響は小さい、もしくは、非湛水条件でやや低い傾向がみられた。同様に土温（地上から6cm深さ）の

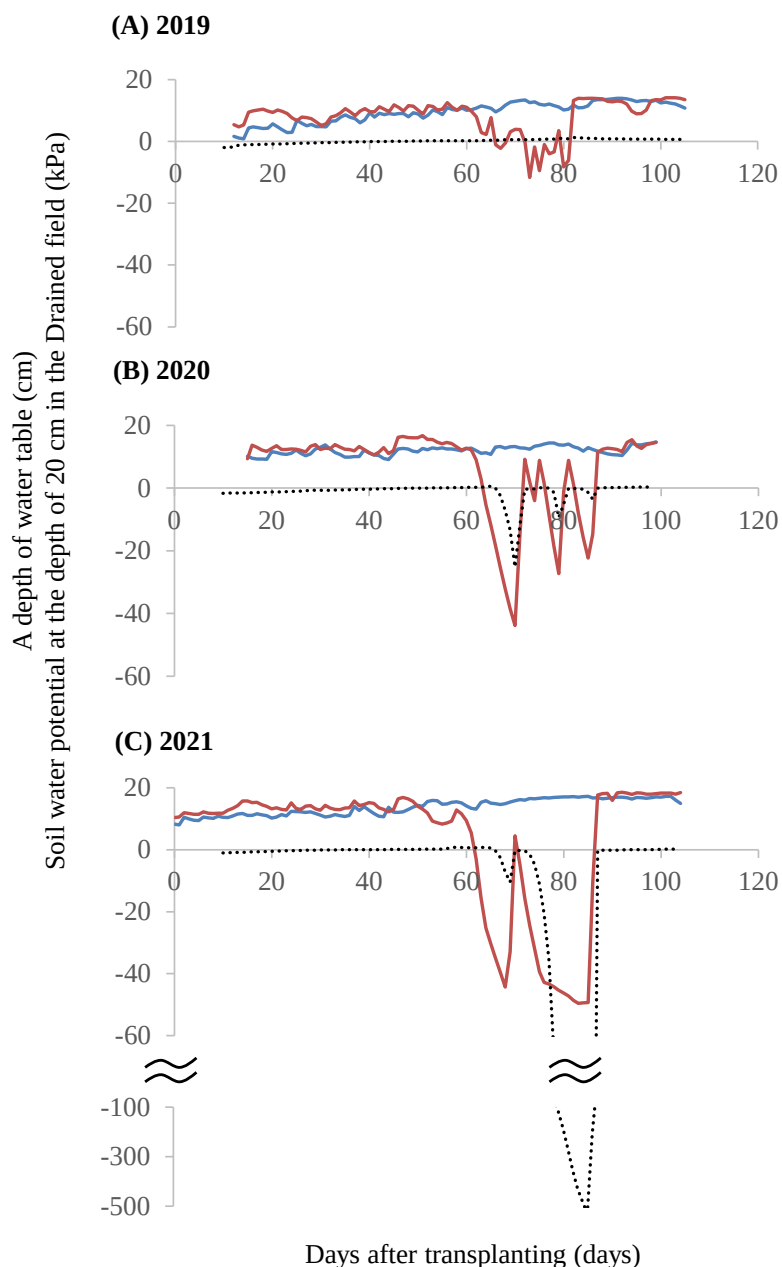


図3. マダガスカル試験地点における移植から収穫までの湛水圃場（青：Flood）と非湛水圃場（赤：Drained）の水位変化および非湛水圃場の土壤水分ポテンシャル（点線）の変化。

日中変化を比較すると、非湛水処理により、日中の最高土温が上昇、夜間の最低気温がより低下する傾向が顕著にみとめられた（図5；代表して2021年のデータを図示したが他の年次も同じ傾向であった）。水条件の違いによって、土温に最大3.0℃の差が生じた。

図4. マダガスカル試験地点における湛水圃場（Flood）と非湛水圃場（Drained）での出穂期の群落内温度の日変化（出穂期±3日間の平均値を示す）

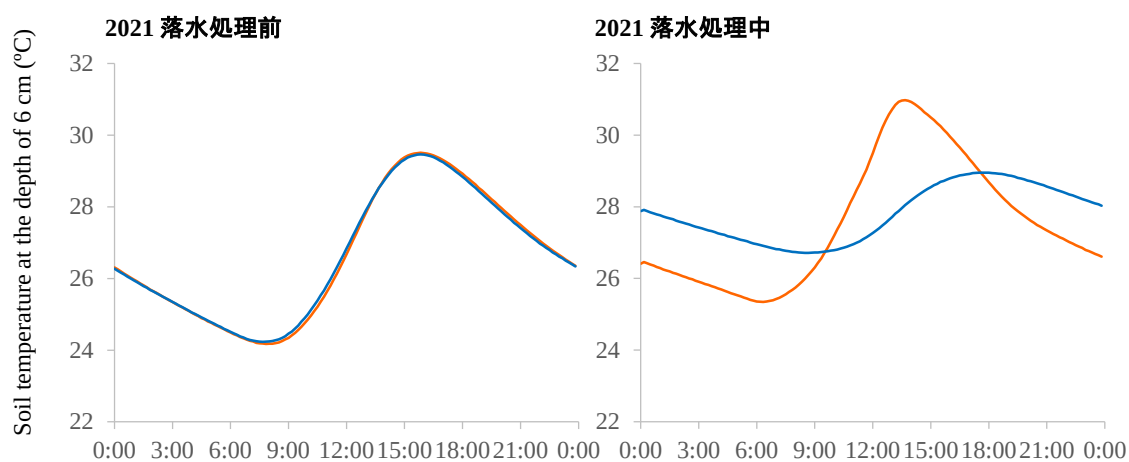
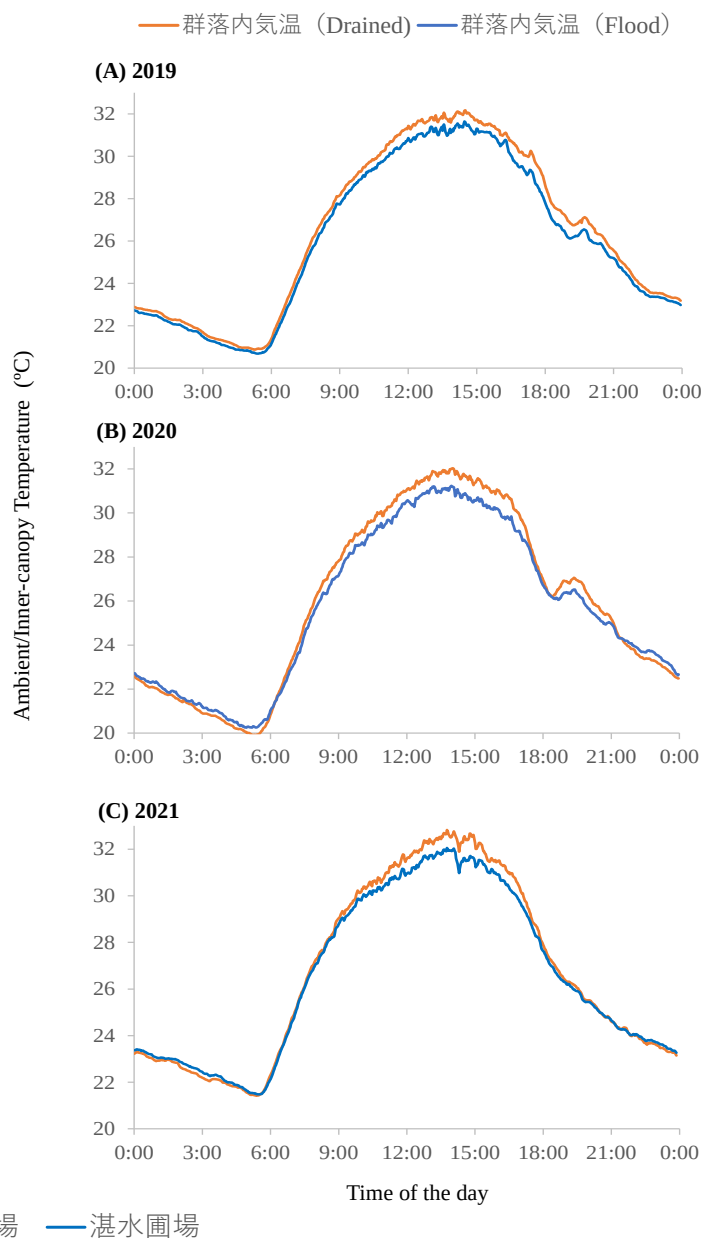


図5. 水管理の違いによる土温の日変化（非湛水＝落水処理前と処理中）

－*qEMF*による早朝開花効果および開花中の群落気温への影響－

水管理条件や施肥条件に関わらず、NIL-*qEMF3*およびIR64の開花ピーク時刻は、それぞれ9時00分～9時31分および10時27分～10時47分の範囲にあり、*qEMF3*を導入することで、IR64に比べて、1時間17分～1時間31分、開花ピークが早くなることが確認された（表1）。

表1. NIL-*qEMF3*およびIR64の開花ピーク時刻の比較

		NIL- <i>qEMF</i>	IR64	早朝化程度 (h)
2019	湛水圃場	9:18	10:43	1:24
	非湛水圃場	9:03	10:35	1:31
2020	湛水圃場	9:28	10:46	1:17
	非湛水圃場	9:31	10:47	1:15
2021	湛水圃場	9:11	10:33	1:21
	非湛水圃場	9:14	10:27	1:12
出穂日±3日間の平均値 (n=7)				

早朝開花効果によって、開花ピーク時刻に観測された最高気温（水田内に設置した気象観測装置で計測）は、NIL-*qEMF3*がIR64に比べて、1.47～1.52℃低くなった。さらに、MINCERで計測した両品種の群落内温度で比較すると、開花を早めることによる効果は水管理により異なることが分かった。すなわち、両品種の開花時刻に観測された群落内最高気温の差は、湛水条件で0.09～0.34℃、非湛水条件で0.32～0.54℃であり、非湛水条件の方が、開花を早めることによる群落内気温の抑制効果が大きくなった。両品種の群落下で計測した土温についても同様の違いがみられ、開花時刻に観測された最高土温の品種間差は、湛水条件で0.29～0.54℃、非湛水条件で1.47～1.52℃であった。これは、図4および図5に示した通り、NIL-*qEMF3*の開花時刻からIR64の開花時刻、もしくは日の出から正午にかけての群落内気温および群落下土温の上昇が、非湛水条件でより大きくなることに起因した。この傾向は3作期を通して観測され、早朝開花による高温ストレス回避効果が非湛水（畑）条件でより大きいという興味深い知見が得られた。

－収量および高温不稔への影響－

系統および水管理の違いが収量と不稔率に及ぼす影響を比較した（表2）。上述の通り、開花時刻の群落温度については、系統と水管理による顕著な違いがみられたが、収量や不稔率に及ぼす影響は、本実験系では、必ずしも明瞭な結果が得られなかった。これは、両品種の出穂日が少しずれること（IR64がNIL-*qEMF3*より1～2日早い）、高温不稔は必ずしも気温のみの影響を受けるわけではない（湿度なども関係）こと、高温不稔への感受性が両品種で違う可能性があること、などの要因が考えられた。

ケイ酸施肥の効果を比較すると、非湛水条件において、3作期の平均として9%の有意な増収効果があることが確認された（図6）。観測機器の不足により微気象への変化を捉えることはできなかったが、ケイ酸施肥により非湛水条件でのイネ生育になんらかの正の影響があることが考えられた。

表2. 系統および水管理の違いが籾収量と不稔率に及ぼす効果

			収量t/ha	不稔率%
2019	湛水圃場	IR64	5.6 a	9.6 ab
		NIL-qEMF	5.7 a	8.6 ab
	非湛水圃場	IR64	5.3 a	10.3 b
		NIL-qEMF	5.2 a	13.4 a
2020	湛水圃場	IR64	5.3 a	11.7 a
		NIL-qEMF	5.2 a	14.8 a
	非湛水圃場	IR64	5.2 a	10.7 a
		NIL-qEMF	4.8 a	14.5 a
2021	湛水圃場	IR64	5.1 a	12.5 a
		NIL-qEMF	5.2 ab	10.6 a
	非湛水圃場	IR64	4.5 b	10.4 a
		NIL-qEMF	4.5 b	14.2 a

異なるアルファベットを付した数値は5%水準 (Tukey HSD)で有意。

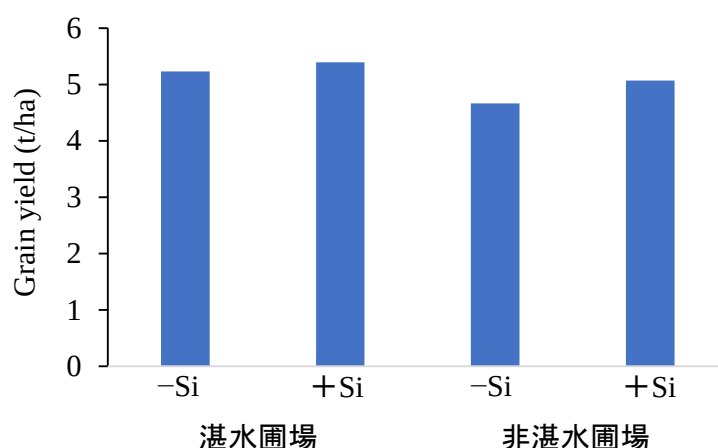


図6. 水管理とケイ酸施肥の相互作用が籾収量に及ぼす効果 (3作期の平均値)

(2) 早朝開花性系統の高温回避性の現地調査と早朝開花QTLの現地品種への導入

BG251GSR背景で、*qEMF3*を含む約2.7Mbのゲノム領域が供与親品種ホモ型に固定し、遺伝背景がほぼBG251GSRホモ型に固定した準同質遺伝子系統 BG251GSR-*qEMF3*を選抜し育成を完了させた(図7)。BG251GSR-*qEMF3*および親品種BG251GSRをつくば市の水田環境において、開花時刻を約1週間調査した結果、日々の環境により開花開始時刻は異なるものの、親品種BG251GSRよりも40分~2時間早く開花することを観察した(図8)。F0FIFA160背景については、遺伝背景がF0FIFA160に置換し、*qEMF3*を含むターゲット領域約3.6Mbがヘテロ型となったBC₅F₁個体をF0FIFA160-*qEMF3*の候補個体として選抜した(図7)。Bg300およびX265背景については、遺伝背景にヘテロ型が複数残るBC₄F₁種子およびBC₃F₁種子を獲得した。

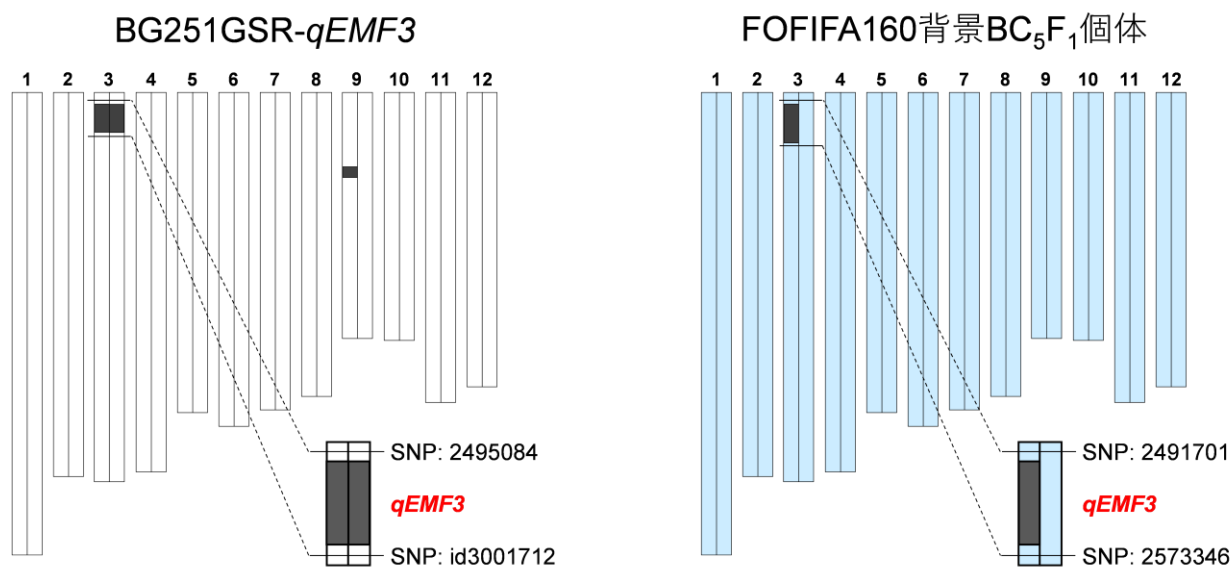


図 7. BG251GSR-*qEMF3* と FOFIFA160 背景 BC_5F_1 個体のグラフ遺伝子型。白塗りは BG251GSR 型、水色塗りは FOFIFA160 型、黒塗りは IR64-*qEMF3* 型を示す。



図 8. 2021 年 8 月 12 日における親品種 BG251GSR および BG251GSR-*qEMF3* の開花の様子。BG251GSR は 10:40 頃から咲き始め、11:10 頃に開花がピークに達した。一方、BG251GSR-*qEMF3* は 9:20 頃に咲き始め、9:50 頃にピークに達した。

5. 成果

気候変動に脆弱、かつ、気候変動による食料安全保障への脅威が最も深刻なアフリカ地域を対象とした現地圃場実験を複数年にわたって繰り返し実施することにより、IR64-*qEMF3*による開花時間の早朝化とそれとともなう開花ピーク時の群落温度の低下を同時に捉えることに成功した。特に、非湛水条件においては、水ストレスが生じない程度の高い土壌含水率を維持したとしても、日の出～南中にかけての土温および群落気温の上昇率が湛水条件に比べて大きくなるため、開花時刻の早朝化による高温抑制の効果が大きいことが明らかになった。また、本研究によって、スリランカ品種BG251GSR背景で、開花時刻を早める準同質遺伝子系統BG251GSR-*qEMF3*を育成した。また、その他3品種の遺伝背景においても、*qEMF3*の導入を進めた。

6. 引用文献

- 1) Kotir, J.H. 2011. Climate change and vulnerability in Sub-Saharan Africa: A review of current and future trends and impacts on agriculture and food security. *Environment, Development and Sustainability* 13, 587-605.
- 2) Hirabayashi, H., et al. 2015. *qEMF3*, a novel QTL for the early-morning flowering trait from wild rice, *Oryza officinalis*, to mitigate heat stress damage at flowering in rice, *O. sativa*. *Journal of Experimental Botany* 66, 1227-1236.
- 3) Tsujimoto, Y., et al. 2014. Limited Si-nutrient status of rice plants in relation to plant-available Si of soils, nitrogen fertilizer application, and rice-growing environments across Sub-Saharan Africa. *Field Crops Research*, 155, 1-9.

〔研究成果の発表状況〕（課題開始年度－令和3年度）

（1）誌上発表（学術誌）

Tsujimoto, Y., Abraham, F., Inusah, B., Dogbe, W., Yoshimoto, M. Fukuoka, M. 2021. Different effects of water-saving management on canopy microclimate, spikelet sterility, and rice yield in the dry and wet seasons of the sub-humid tropics in northern Ghana. *Field Crops Research* 260: 107978.
doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107978

（2）口頭発表

該当なし。

（3）出願特許

該当なし。

（4）受賞等

該当なし。

（５）一般への公表・報道等

2020年度国際農林水産業研究成果情報「非湛水管理による水稻栽培が群落内気温の日変化と収量に及ぼす影響」https://www.jircas.go.jp/ja/publication/research_results/2020_b12

（６）研究分野における成果の発展・牽引

分担研究者（石丸努、高井俊之）らのグループが保有する早朝開花性系統は、国際農林水産業研究センター、農研機構、国際イネ研究所等の共同研究者とともに独自に同定・開発された世界で唯一の貴重な評価・育種素材である。このため、その早朝開花性能や高温不稔軽減効果を、実際の熱帯の開発途上国の現地水田で評価する本研究課題の成果は他に例がなく、適応策オプションの多様化、実用化において世界の気候変動適応策の開発研究をリードしている。さらに、現地品種への早朝開花性QTLの導入は、開発途上国における育種的適応技術の実装に直結している。

（７）政策への寄与・貢献

開発途上国（特にアフリカ各国）における農業生産は、温暖化や水資源変動等の気候変動に脆弱であり、影響評価と適応技術の開発は、農業生態系の維持と食料安全問題に直結する喫緊の課題である。本研究課題で明らかとなる、現地での耕地微気象と生産性のモニタリング結果は、現在および将来の気候変動下の対象地域での稲作普及政策を決定するための基礎データとなる。また、現地のニーズに応じた適応のための施肥・水管理手法の開発や、実際の現地主力品種への早朝開花性QTLの導入を行うことで、気候変動のみならず、世界の政情不安により食料安定供給が脆弱な途上国における現在および将来の農業生産性を安定させ、持続可能な食料生産システムの構築に直接貢献する。