

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

(1) 世界の高温稲作地帯における高温と乾燥ストレスモニタリング

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 吉本真由美・福岡峰彦

平成27～29年度合計予算額 26,969千円
(うち、平成29年度当初予算額 8,093千円)

[要旨] 近年、世界の高温稲作地域では、開花期高温不稔などの高温障害が発生しており、今後の地球温暖化や降水パターンの変化などの気候変化でさらに激化することが懸念されている。しかし、高温障害に直接関与する水田群落内の微気象は群落上とは異なり、そのギャップが高温障害の発生要因の解明や正確なリスク評価を妨げている。このため本研究では、電源の確保が難しい途上国の水田でも高精度で群落内の気温・湿度を測定できる自立型群落微気象測定装置

(MINCER)により、広範囲の気候を含む国内外11サイト（インド、スリランカ、フィリピン、ミャンマー、中国、台湾、日本、アメリカ合衆国、セネガル、ベナン、ガーナ）の水田を観測対象とした、群落内微気象と高温障害のモニタリングネットワーク（MINCERnet）を構築した。全サイトの開花日・開花時刻、群落内外の気温・湿度、不稔率等からなるデータセットを作成し解析を行ったところ、気候の違いにより群落内外のギャップが大きく異なることが明らかとなった。乾燥気候では群落蒸発散による冷却効果が大きいため、開花時間帯の群落内気温は群落上より低い、湿潤気候では冷却効果が小さく、群落内気温の方が高くなる場合もあった。

群落微気象モニタリング結果を用いて、既存の穂温推定モデルIM²PACTを改良した。モデルで推定した穂温は、湿潤な気候の中国やアメリカ合衆国等で群落内気温より高くなり、極乾燥条件のセネガルでは穂温が群落内気温より低くなった。これに伴い、穂温で見ると最も高温なサイトは中国であり、ついでフィリピン、アメリカ合衆国、ガーナの順となり、群落上や群落内の気温のサイト間順位と異なることが明らかとなった。共通品種IR64の不稔率と温度変数との関係を調べたところ、群落上気温よりも、群落内気温、穂温との関係性が高く、穂温と最も高い相関関係

($r=0.96$) が得られた。また、高温不稔発生の温度閾値は、従来の群落上の一般的な気温を説明変数とした場合には34～35℃と報告されていたが、穂温を説明変数とした場合には30～31℃付近に存在する可能性が示唆された。穂温を指標とすることで、耐性品種導入による不稔率低減効果や感受性品種での不稔率増大を定量的に評価することが可能となった。

高温・乾燥ストレス試験のプロトコルが完成し、開花期の落水処理による群落内の昇温・乾燥化という微気象変化をMINCERにより高精度で測定できた。落水処理による不稔率の増大の8割程度が、処理に伴う穂温の上昇で説明できる可能性が示唆され、乾燥ストレスが群落微気象や穂温を介して高温不稔に及ぼす影響を世界で初めて明らかにした。

[キーワード] 水田、イネ、不稔、高温障害、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いる¹⁾が、その影響を検出し、適応のために役立てる試みは進行していない。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を早期に検出することは、日本の食料安定確保および世界の貧困地域における食料事情の改善のために重要である。

これまで、地球温暖化の中・長期的な影響は、気候予測値と作物モデルを用いたシミュレーションから推定されてきたが、近年頻発する異常気象による作物収量の変動や、進行しつつある温暖化の影響の実態を監視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。作物群落内は植物の蒸散や水面からの蒸発、茎葉による日射や気流の遮断などにより群落上とは異なる気象条件を有するためである。例えば、1990年代より高温不稔の発生頻度が増している中国長江中下流域では、気温が一般に高温不稔発生の閾値とされる35°Cを超える日は少ない一方、オーストラリアの水田では日最高気温がしばしば40°Cを超えるにも関わらず、開花期高温不稔の被害は報告されていない。これらの不整合は、一般気象観測と作物群落内の熱環境の違いが原因である。すなわち、湿潤な気候の中国長江流域では穂の蒸散が抑制され、穂温が気温よりも高い傾向にあるが²⁾、乾燥した気候のオーストラリアでは植物が盛んに蒸散し穂の温度が気温より大幅に低かったことが一因と考えられる³⁾。したがって、世界のイネの高温不稔の発生リスクを評価するためには、一般気象観測による気温ではなく、イネの穂温あるいは穂が直接曝されている群落内の気温を基準とすることが必須であり、水田群落内の微気象を気候横断的にモニタリングし、穂温を基準とする新たな閾値を再定義することが極めて重要である。

さらに、将来の気候変動による降水パターンの変化は、水田生態系、特にアジアやアフリカの天水田における水利用を制限し、高温と乾燥の複合ストレスによる大幅な減収をもたらす可能性が懸念されている。しかし、水位や土壌水分といった水資源に関連する生産擾乱要因を含めた農作物生産情報は不足しており、特に高温と乾燥の相互作用が群落微気象変化を通じて高温不稔に及ぼす影響は未解明である。したがって、将来高温不稔による減収が懸念される世界の稲作地域において、モニタリングと実験によって、水資源に関連する生産擾乱要因を含めた作物の生産環境・収量情報を収集することが重要である。

2. 研究目的

農業環境技術研究所（現 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、以下、農環研）ではこれまでに、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れる自立型群落微気象測定装置（MINCER、Micrometeorological Instrument for Near Canopy Environment of Rice）を開発した⁴⁾。2009年10月には農作物高温障害に関するワークショップを開催し⁵⁾、これを契機としてアジアを中心とする8カ国（インド、スリランカ、フィリピン、ミャンマー、中国、台湾、日本、アメリカ合衆国）からなる耕地微気象観測ネットワーク（MINCERnet）を構築し⁶⁾、水田群落内の気温・湿度のモ

モニタリングを試験的に実施してきた。本研究課題では、さらにアフリカの3カ国（セネガル、ベナン、ガーナ）をネットワークに加え、アジアからアフリカ、アメリカに至る広範な気候条件を横断する11カ国の稲作地域の水田において、気候変動がコメ収量・品質に及ぼす影響を検出するため統一的手法による群落環境のモニタリング体制を確立する。これにより、イネの高温障害に直接関与する穂の温度に基づく、高温不稔の発生指標を新たに定義して、その指標を基に障害発生リスク分布を提示し、さらに、乾燥ストレスなど土壌水分の違いによって収量の気候変動影響が異なるかを明らかにすることを目的とする。

これらを達成するため、まず、これまでに使用したMINCERの劣化度合いを全面的に調査し、必要に応じて検定・修理・交換を行う。また近年、構成部品の供給が終了し、増備機や故障代替機の確保に支障が生じることが予想されたため、耕地微気象モニタリングの安定的な継続を図るために、MINCERの第2世代機（2G）を開発する。初年度のキックオフ会議での議論を踏まえ、全サイトで共通の標準品種（IR64）を供試し、これまでの一般気象観測による日最高気温等に代わる、世界の群落内外の微気象のギャップを反映した高温不稔の発生指標を新たに定義する。また、高温耐性の異なる品種の応答の品種間差異に着目した品種応答試験、および高温と乾燥の複合ストレスによる高温不稔への影響解明を目的とした高温・乾燥ストレス試験を行い、現在および将来のイネ高温不稔リスクに関わる耕地微気象環境・収量情報データを収集し、解析を行うことを目的とした。

3. 研究方法

(1) 自立型群落微気象測定装置（MINCER）の更新と次世代機（2G）の開発

2010年度から試験的にモニタリングを実施してきた8サイト（インド、スリランカ、フィリピン、ミャンマー、中国、台湾、日本、アメリカ合衆国）では、自立型群落微気象測定装置（MINCER）の劣化が見込まれたため、MINCERの通風ファンモーターの劣化程度を定量化する統一した調査手法を開発して、各国に調査を依頼し、必要に応じて修理・交換を行った。8サイトのMINCER内の温湿度センサ付小型データロガーを回収して農環研内の温湿度制御室で検定を行い、センサの経時の変化やロガーの劣化程度を調べた。一方、近年MINCERを構成する部品の供給が終了し、増備機や故障代替機の確保に支障が生じることが予想されたため、MINCER第2世代機（2G）を開発した。

(2) モニタリングサイトと圃場実験・モニタリングの概要

表1、図1に、全11サイトの位置情報を示す。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MINCERを設置し、群落内外の気温・湿度を連続測定した。収量調査方法を統一し、不稔率や収量構成要素のデータを収集した。

表1 MINCERnet モニタリングサイトの緯度・経度
（■は後述のグラフで用いる各サイトのシンボルカラー）

Site	Latitude	Longitude
Senegal	16.54 ° N	15.19 ° W
Benin	6.37 ° N	2.38 ° E
Ghana	9.35 ° N	0.95 ° W
India	11.00 ° N	85.31 ° E
Sri Lanka	8.10 ° N	80.47 ° E
Myanmar	19.32 ° N	96.27 ° E
Philippines	15.67 ° N	120.89 ° E
China	30.36 ° N	112.05 ° E
Taiwan	24.03 ° N	120.69 ° E
Japan	36.02 ° N	140.12 ° E
USA	30.07 ° N	94.29 ° W

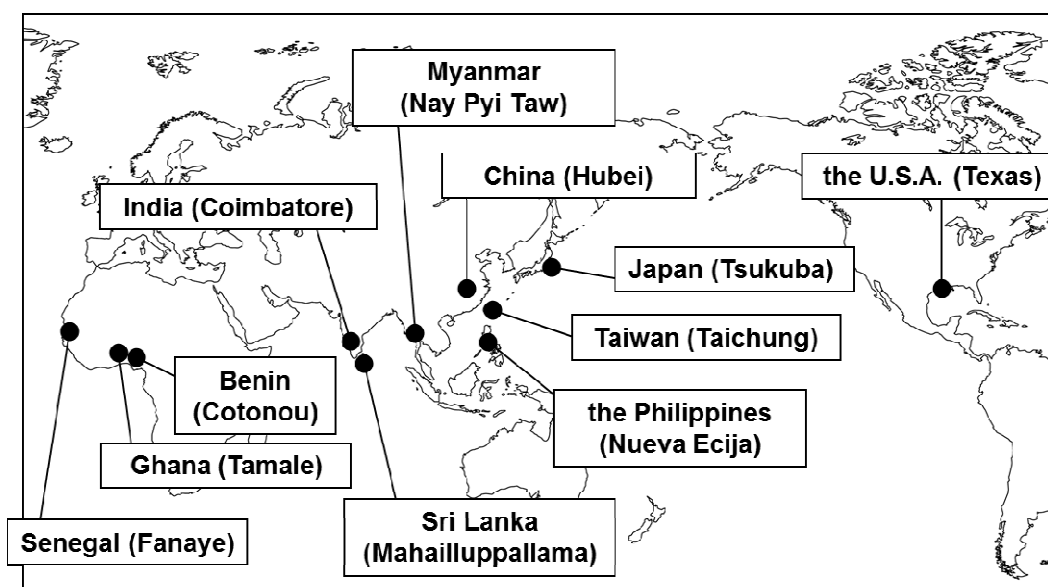


図1 MINCERnet モニタリングサイト

① 予備的モニタリングデータによる群落内外の微気象ギャップの評価

キックオフ会議開催前の期間、予備的モニタリングを実施した。供試品種は各サイトの現地品種とし、各サイトで2作期設け、どちらか1作期は出穂・開花期に高温に遭遇するように栽培した。2010年以降の旧MINCERnetにおけるモニタリングデータも含め、全サイトの開花日・開花時刻、群落微気象、収量からなるデータセットを作成し、群落内外の微気象ギャップと高温不稔との関係を解析した。

② 共通品種（IR64）の供試による高温不稔リスク分布の解析

キックオフ会議での議論を踏まえ、世界で入手しやすく汎用性が高いインディカ品種（IR64）を共通品種とし、全11サイトで供試した。また全11サイトのうち、気候の異なる6サイト（セネガル、ベナン、インド、フィリピン、中国、日本）を品種応答試験サイトとし、高温耐性の異なる品種の応答の品種間差異に着目した圃場試験を実施した。供試品種は、高温不稔に対して標準的な品種（IR64）、耐性品種（N22）、感受性品種（IR52）の3品種である。

イネの高温に対する感受性（脆弱性）は、開花期と穂ばらみ期に高まり、特に開花期の開花時間帯に最も高いことが知られており⁷⁾、開花時刻は高温不稔誘発にとって重要な情報である。観測者の主観による開花判定の偏りを排除するため、デジタルカメラで開花期の水稻群落をインターバル撮影し、客観的な開花時刻データを収集した。また、群落内外の気温差、および群落内気温と穂温の差を定量化し、モデル化を進めるために、MINCERによる群落内外の気温・湿度以外に必要な気象要素として日射量と風速がある。そこでソーラーパネルと充電池で駆動される高精度データロガーで、日射量と風速を連続測定する簡易な気象測定システムを構築し、気象観測システムのないサイトに設置した。さらに、穂温や群落微気象プロセスモデルの検証のため、ハンディタイプの高精度放射温度計（MI-230, Apogee Instruments, USA）により、開花時刻や日中の穂温・群落表面温度を手動でスポット測定した。

③ 開花期落水試験による乾燥ストレスが高温不稔に及ぼす影響の評価

高温と乾燥の複合ストレスによる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5サイト（ガーナ、スリランカ、ミャンマー、台湾、アメリカ合衆国）で実施した。常時湛水の対照区（Control）と出穂予定日の約1週間前に落水する乾燥区（Drought）を設け、両処理区の群落内の気温・湿度および群落上の気温・湿度をMINCERで連続測定した。乾燥区では、土壌水分センサ（ECH20 probe EC-5, Decagon, USA）を埋設し、落水による土壌の乾燥過程をモニタリングした。供試品種はIR64を必須とし、それに追加してN22やIR52、もしくは現地品種とした。品種応答試験と同様に、必要なサイトに日射量と風速を連続測定する簡易な気象測定システムを設置し、デジタルカメラによる開花時刻の同定、高精度放射温度計による穂温・群落表面温度の手動測定を行った。

4. 結果・考察

(1) 自立型群落微気象測定装置（MINCER）の更新と次世代機（2G）の開発

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、植物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を目的として、2009年に農環研で開発された⁴⁾（図2）。従来、農耕地や自然生態系など電源の確保が困難な場所での気温測定には、百葉箱や自然通風式シェルターが使われることが多かったが、植物群落内においては茎葉が自然通風を遮断するため、日射がシェルターやセンサを昇温させ、放射や風速など気象条件の変化や群落形態の違いに応じて数℃もの測定誤差を生じさせる。このためMINCERは、イネ群落内でも正確に測定を行えるよう強制通風式シェルターを採用している。温湿度センサ付小型データロガー（LogStick, LS350-TH, Osaka Microcomputer Inc., Osaka, Japan）を格納した通風管内は太陽電池と充電池で駆動するファン（Solar Vent MPV #70441, ICP Solar Technologies Inc., Canada、ただし、日射条件により通風速度を変えるよう内部回路を改良）により常時通風され、群落内の任意の高度で測定できるよう、装置は高さを調節できる三脚に架装されている。通風管を通過して昇温した測定後の排気は、群落内の環境を乱さないように群落上に排出される。

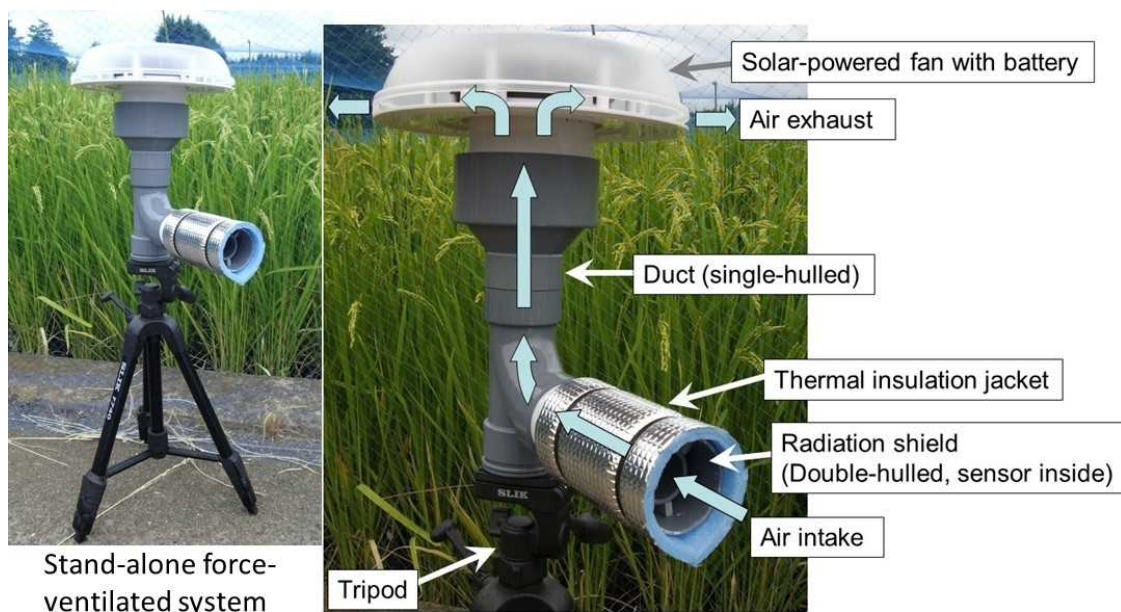


図2 自立型群落微気象測定装置（MINCER）の概要

イネ群落内の微気象観測においてはこれまで、水田のような泥濘地での測器の設置やファンの電源の確保に多大な労力を要することが大きな問題であり、また、測器の設置には複雑な配線作業が必要で、気象観測の専門家以外にとっては難しいことも問題であった。これらの問題を解消するため、MINCERはイネ群落内での気温および湿度の観測に必要な機能をすべて取り込んだうえで、扱いやすいようにパッケージ化したものである。

MINCERは、その第1世代機（1G）が本研究課題における共通測器として2009年から世界11ヵ国で100台以上が運用に就いており、初年度に装置の劣化度合いを全面的に調査し、必要に応じて検定・修理・交換を行った。しかしながら、近年1Gを構成する部品の供給が終了したため、将来、増備機や故障代替機の確保に支障が生じることが予想された。そこで、一部を再設計することにより動作信頼性の向上と保守性の改善を図ったMINCER第2世代機（2G）を開発した（図3）。

特に、本研究課題における群落内での強制通風に重要なソーラーファン部分を新設計とした。主な改良点は以下の通りである。

- 1) ファンモーターをブラシレスタイプに変更して長寿命化した。
- 2) ファンモーターをCRU（Customer Replaceable Unit：顧客交換可能ユニット）化した。これにより、現地担当者が容易に交換できるようになった。
- 3) 従来は別体だった、ファンの作動状況をモニターするデータロガーを内蔵化し、取り扱い易くした。
- 4) 輸送・収納時に占める容積を1割以上削減した。
- 5) 代替が可能な部品または自ら容易に生産できる部品（3Dプリント等）を採用し、今後の供給に支障が生じにくいようにした。



図3 MINCER 第1世代機（左）と開発された第2世代機（右）

なお、2Gのソーラーファンは1Gとの後方互換性が確保されており、現在稼働している1Gのソーラーファン部分をそのまま2Gのそれに置き換えるレトロフィットが可能である。したがって、引き続き1Gの資産を活かしつつ、順次2Gへの更新が可能である。これにより、耕地環境モニタリングネットワークを安定的に継続し、シームレスにデータを収集することが可能となった。

(2) 予備的モニタリングデータによる群落内外の微気象ギャップの評価

イネ群落においては、穂が一度に出るわけではなく、気候や品種により異なるが1～2週間かけて出穂する。このため、予備的モニタリングデータについて、出穂日（＝全体の50%の穂が出た日）およびその前後5日間の11日間を出穂期間と定義し、その期間の各サイトの出穂日、開花時刻、群落上（開花期の群落高の2倍の高さ）および群落内（開花期の穂の高さ）それぞれの気温と湿度からなるデータセットを作成した。なお、予備的モニタリング当時、ガーナサイトは他サイトのような既存の水田圃場でなく河川氾濫源を対象とした予備観測であったこと、ミャンマーサイトは、カウンターパートの研究機関（ミャンマー農務省）の都合で欠測となったことから、本章では割愛する。

① 気温・湿度の日変化

図4に各サイトの出穂期間における群落上の気温と湿度の10分平均値の分布を示す。セネガルでは、高温の作期1で出穂期間の25%、やや冷涼な作期2でも出穂期間の5%で35℃以上と酷暑であった。台湾を除く全サイトで、片方または両方の作期において出穂期間の25%で30℃を超えており、温帯のサイトでも夏季の出穂期間には熱帯のサイトに近い高温条件となることがわかった。

気温の日較差が最も大きいのはセネガルで、期間平均で15.6℃に達した。次いで日較差が大きいのはインド、スリランカでそれぞれ13.2℃、11.1℃であった。これらのサイトでは湿度の日変化も大きく、日中はセネガルで相対湿度10%以下、インドで20%以下まで低下するなど乾燥した気象条件であった。一方、気温の日較差が小さいのは、台湾（期間平均で6.1℃）、ベナン（6.2℃）、中国（6.4℃）で、これらのサイトでは、日最低湿度が60%以上、湿度の中央値が90%程度という多湿な気象条件であった。

同出穂期間におけるイネ群落内（穂の高さ）の気温・湿度の10分平均値の分布を図5、また、群落内外の気温差を図6に示す。群落内（図5）では全体に気温・相対湿度の分布範囲が群落上（図4）と比べて狭くなり、高温域の気温のサイト間差異が小さくなるとともに、湿度は全体に高くなった。これは植物群落の気候緩和作用、すなわち、茎葉による日射遮蔽や植物の蒸散・水面からの蒸発による群落の蒸散冷却による。酷

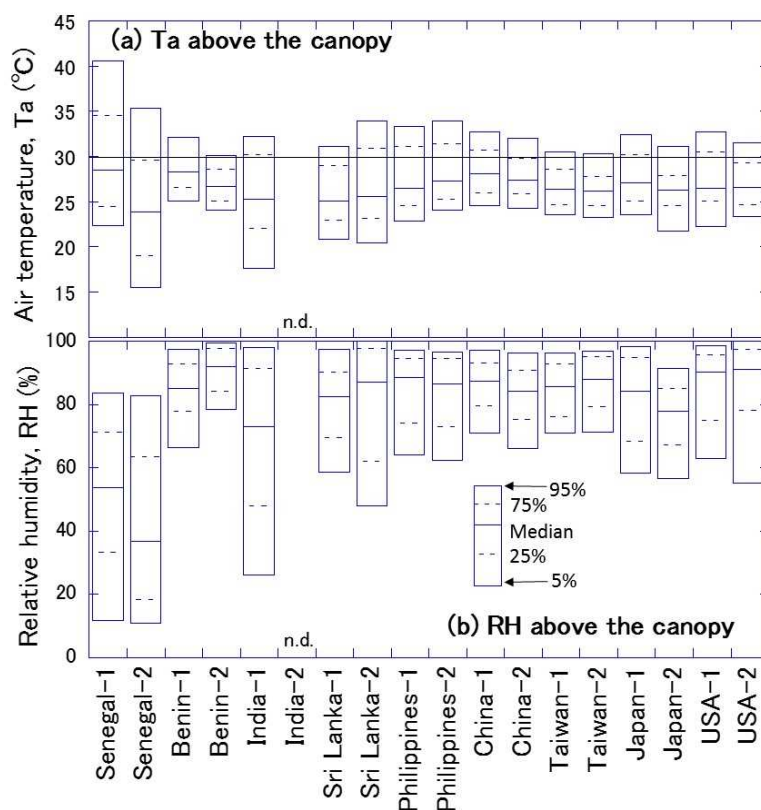


図4 出穂期間の群落上の気温と相対湿度の全10分平均値データのパーセンタイル図。横軸の表記は[サイトの国名-作期]を表す。n.d.は欠測。

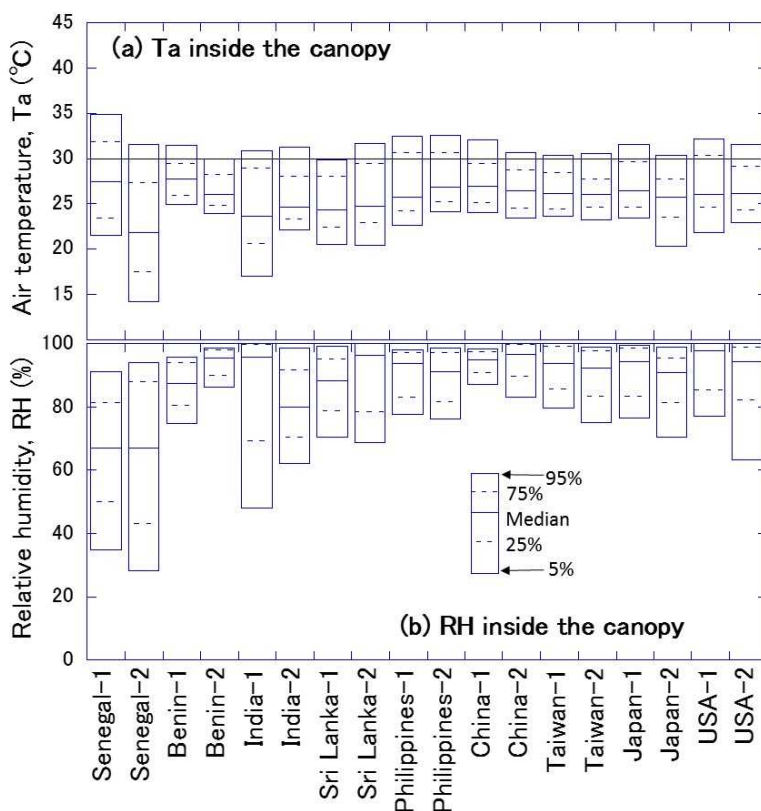


図5 出穂期間の群落内（穂の高さ）の気温と相対湿度の全10分平均値データのパーセンタイル図。

暑のセネガルでは、極乾燥気候のため、日中、植物の蒸散や水面からの蒸発が促進され、群落の蒸発冷却効果が大きく、群落内の気温が群落上より6°C以上低くなる場合がある一方、ベナンや東南アジアなどの湿潤な気象条件下では蒸散・蒸発が抑制され、それによる群落冷却効果が小さく、特に台湾や日本、アメリカでは群落内気温の方が群落上より高い場合があった(図6)。

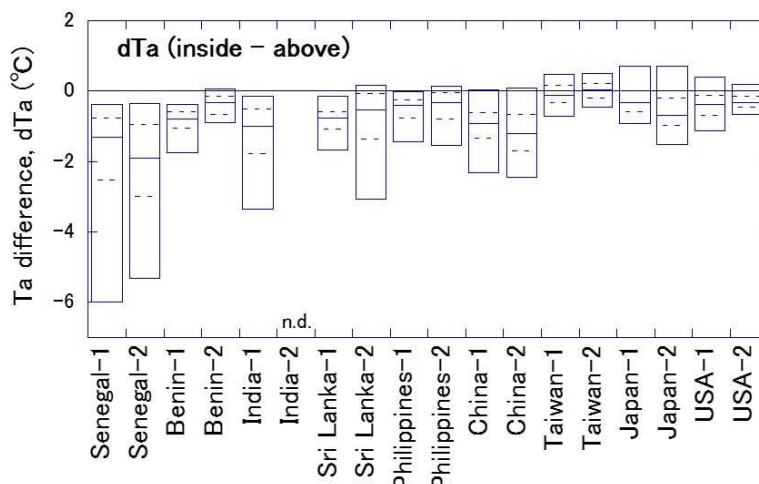


図6 出穂期間の群落内外の気温差(群落内-群落上)のパターン。n.d.は欠測。

② 開花時間帯

不稔からみたイネの高温に対する感受性(脆弱性)は出穂期の開花時間帯に最も高いことが知られており⁷⁾、開花時刻は高温不稔誘発にとって重要な情報である。図7は、各モニタリングサイトでの概観による開花の開始(Start)・最盛期(Peak)・終了(End)の時刻の平均値である。アジアとアメリカの7サイトでは現地時間の午前9時頃から正午にかけて開花し、開花盛期は10~11時であるが、アフリカのセネガル、ベナンでは開花時間帯が長く遅く、開花盛期は正午過ぎであった。正午過ぎから15時頃までの時間帯は、一般に一日の中でも最も気温が高く、セネガル、ベナンでは開花時に高温に遭遇するリスクが高い可能性が示唆された。ただし、予備的モニタリングデータにおける開花時刻は概観によるデータであり、より定量的な解析を行うため、キックオフ会議以降はデジタルカメラによるインターバル撮影を導入した。

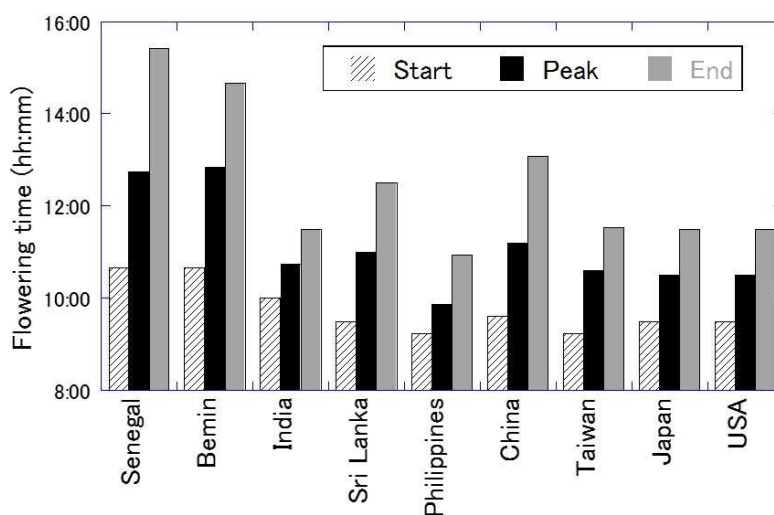


図7 各モニタリングサイトでの概観による開花時刻。Startは開花開始、Peakは開花盛期、Endは開花終了時刻を表す。ただし、時刻は現地サイトの標準時刻。

③ 開花時間帯の気温・湿度

各モニタリングサイトにおける開花時間帯(図7の開花開始時刻から開花終了時刻まで)の気温と湿度を抽出した。図8に群落上と群落内(穂の高さ)における、開花時間帯の気温と湿度の10分平均値の分布を示す。また、開花時間帯における群落内外の気温差の分布を図9に示す。

セネガル、ベナン、スリランカ、フィリピン、中国の5サイトでは、植物群落の気候緩和作用により、開花時間帯の群落内の気温が群落上より低くなったと考えられ、群落内外の気温差(気温

に対する群落の冷却効果)はセネガルで1.1~4.3℃、スリランカで0.2~1.4℃、その他のサイトで0~1.2℃程度であった。この5サイトの中ではバナンの湿度レベルが最も高く、群落の冷却効果は1℃以下で小さかった。台湾、日本、アメリカでは、開花時間帯の群落内の気温は群落上と同じか、むしろ台湾、アメリカでは群落内の方が高くなる傾向があった。台湾、アメリカでは、開花時間帯が午前中で、群落上の湿度レベルがそもそも80%と高く、蒸散が抑制されるために群落冷却効果が小さいと考えられた。このように、群落内外の気温差(ギャップ)には湿度の影響が大きく、ある程度湿度で説明できるが、同じ湿度条件でも群落内外の気温差が異なる例もあり、開花時刻や日射量・風速などの気象条件の違い、さらには植物の気孔コンダクタンスや葉面積密度など群落の蒸散特性の違いが、各サイトの開花時の群落内微気象を決定していると考えられた。

開花時間帯の群落内気温を比べると、セネガル、フィリピン、バナンの順で気温分布が高く、開花時の穂は、セネガルでは25~34℃、フィリピンでは29~31.6℃、ベナンでは29~

30.9℃の高気温に遭遇した。開花時間帯の群落内湿度が最も高かったのは中国と台湾(84%以上)で、次いで、フィリピン、日本、アメリカ(79%以上)であった。高湿度条件では、穂の蒸散が抑制されるため、強日射・低風速条件などの気象条件下では穂温が群落内気温よりも上昇する可能

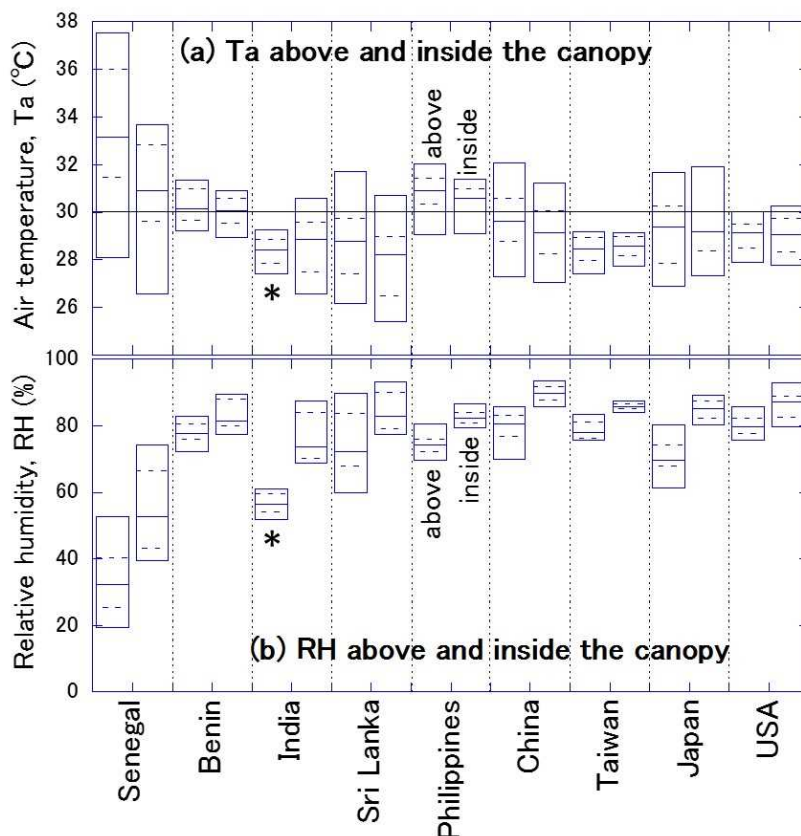


図8 開花時間帯における群落上と群落内(穂の高さ)の気温と相対湿度の分布。ただし、2作期分を合わせ群落上(左)、群落内(右)を並べて表示した。*インドの群落上データは1作期分のみで、2作期分を含む群落内データと比較できない。

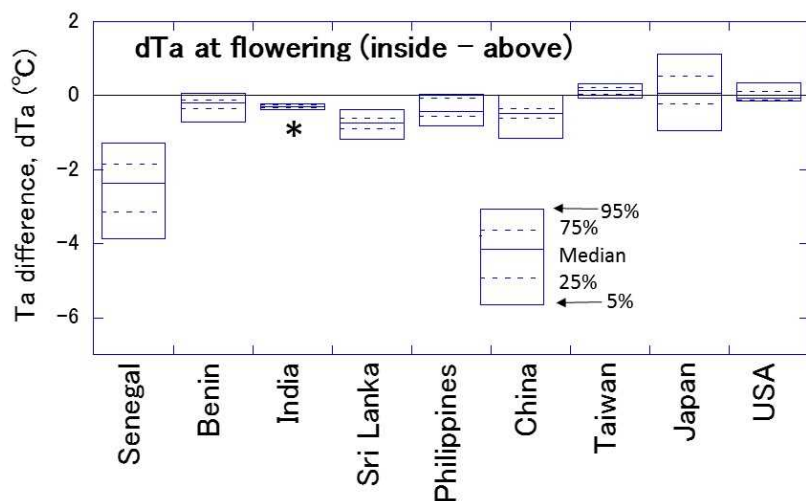


図9 開花時間帯における群落内外の気温差(群落内-群落上)のパーセンタイル図。各サイトについて、2作期分を合わせて表示。*インドは1作期分のみ。

性がある。特に群落内気温が高いフィリピンでは、さらに穂温が上昇し、開花期高温不稔リスクを高める可能性が示唆された。

④ 不稔率

予備的モニタリングのデータセットと2010年から試験的に実施してきた旧MINCERnetのデータと併せて、不稔率 (Sterility, %) と耕地微気象要素との関係の解明を試みた。

従来、農耕地における環境情報の不足から、イネ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。そこで、図10(a)に群落上気温の日最高値との関係、図10(b)に群落内 (穂の高さ) の気温の開花時間帯の平均値との関係を示した。ともにデータのばらつきが大きく決定定数は低いものの、群落上の日最高気温よりも、群落内の開花時刻の平均値の方が、不稔率との関係性がやや高い傾向が認められた。このことから、イネ高温障害、特に開花期高温不稔の実態とメカニズム解明には、群落内の微気象環境の把握が必要であることが改めて確認された。

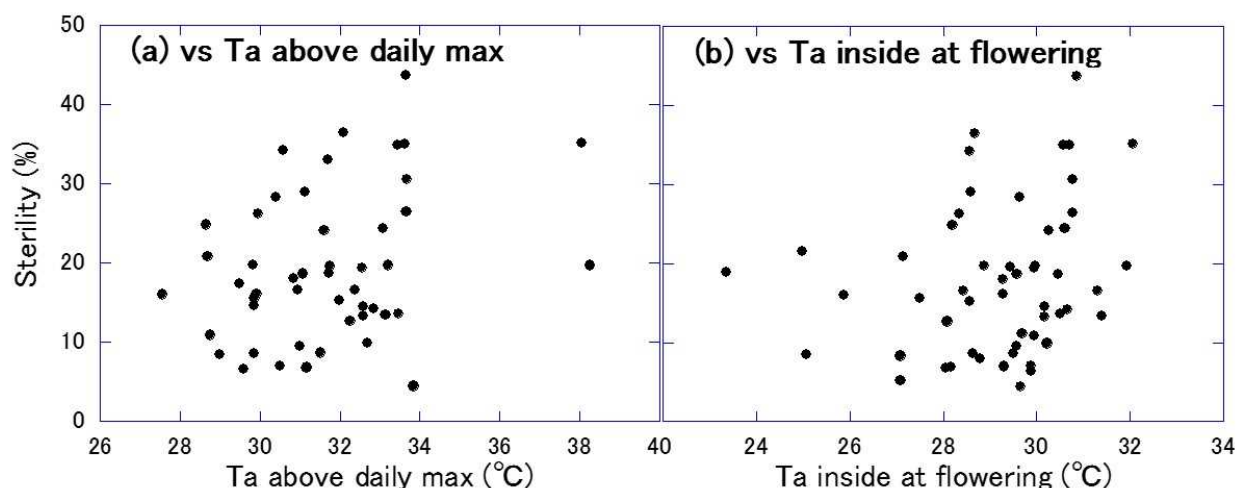


図 10 全モニタリングサイトの不稔率 (Sterility, %) と気温との関係。(a)群落上の日最高気温との関係、(b)群落内 (穂の高さ) の気温の各サイトの開花時間帯における平均値との関係。

開花時間帯の群落内気温を用いても、不稔率との関係性において依然としてデータのばらつきが大きい。これは各サイトの現地品種を供試したため、高温不稔の感受性の品種間差異が主要な要因と考えられる。また、イネの開花頻度は開花時間帯内で一定ではなく、一般に開花盛期にピークを持つ分布となるため⁸⁾、不稔率の説明変数として、開花時間帯の単純平均温度ではなく、重み付けや積算効果の導入が必要な可能性がある。さらに、群落内気温と穂温との関係がサイト (気候) によって異なり、不稔率をモデル化するためには、稔実に直接関わる穂温を説明変数とする必要があると考えられた。従来のチャンバーや制御温室などの閉鎖系実験では、高温不稔が誘発される気温閾値が34~35°Cと報告されている⁹⁾が、本モニタリングネットワークにおける開放系の一般水田圃場では、それより低い日最高気温での誘発が認められ (図10(a))、群落内気温でみると29~30°C付近に閾値が存在する可能性が示唆された (図10(b))。

(3) 共通品種 (IR64) の供試による高温不稔リスク分布の解析

全11サイトで統一した共通品種 (IR64) を供試した栽培試験について、各サイトの作期におけるIR64の出穂期間 (出穂日とその後5日間の6日間とした) の開花時間帯における群落内外の微気象のデータセットを作成し、IR64の不稔率の温度応答を解析した。なお本解析では、最寄りの気象観測所のデータ仕様に合わせて、1時間平均値のデータセットとした。

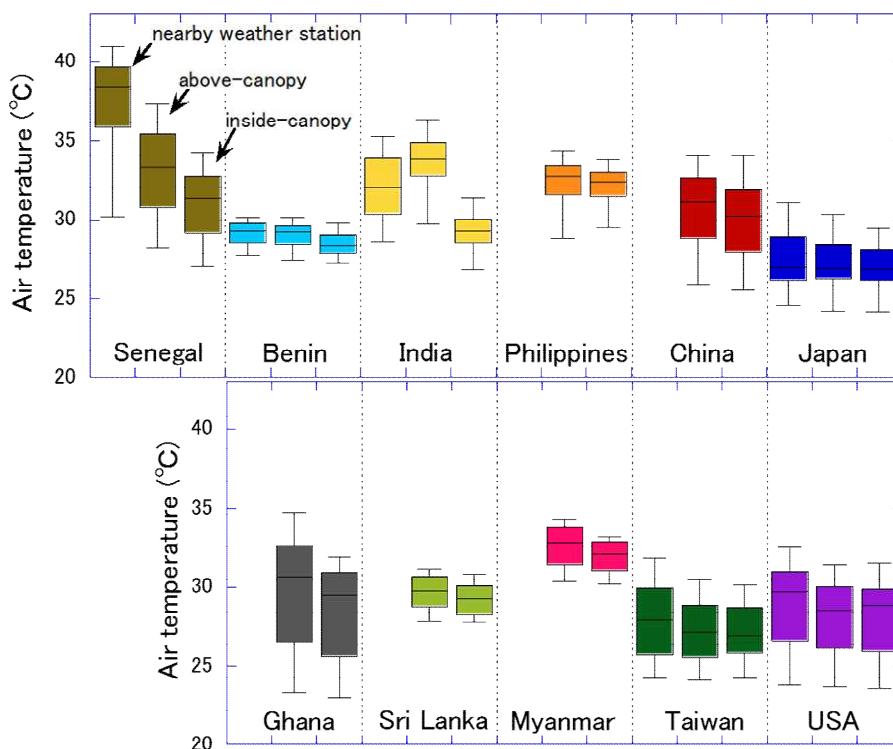


図 11 共通品種 IR64 の供試試験における、出穂期間・開花時間帯の気温の分布。各サイトにおいて、左から最寄りの気象観測所での気温・群落上の気温・群落内の気温を表す。

① 出穂期、開花時間帯における群落内外の微気象

全サイトの、標準の湛水状態で栽培したIR64の出穂期間の開花時間帯における群落内外の気温 (図11) と湿度 (図12) の分布を箱ひげ図で示した。最寄りの気象観測所の気温・湿度が入手できたサイトではそれらも示した (nearby weather station)。どのサイトも、最寄りの気象観測所から群落上、群落内へと植物体に近づくほど、気温は低く、湿

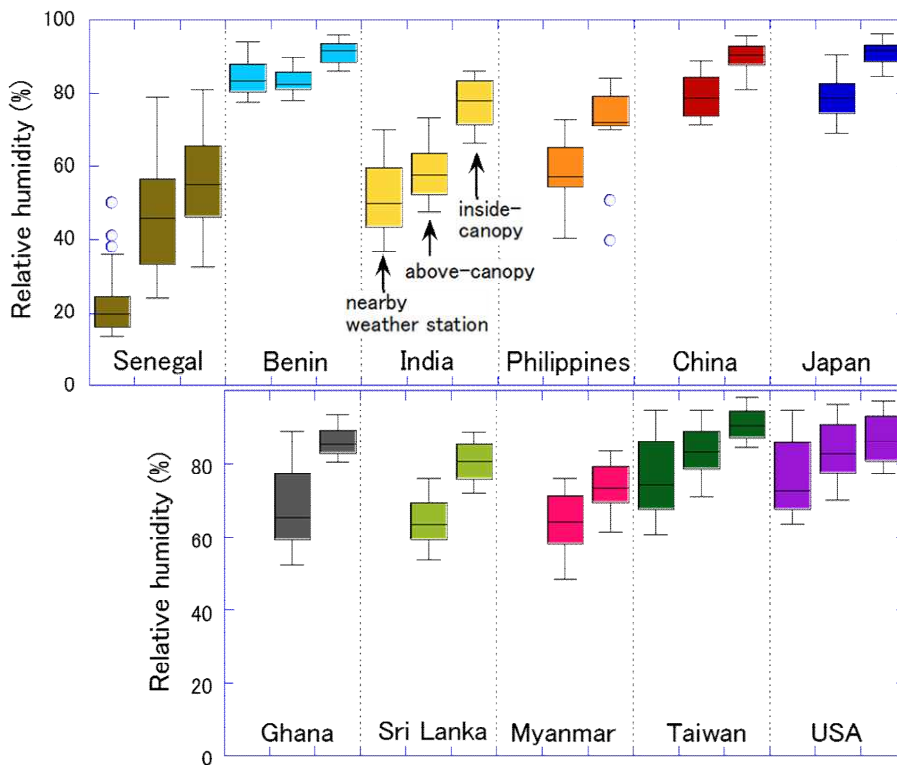


図 12 共通品種 IR64 の供試試験における、出穂期間・開花時間帯の相対湿度の分布。詳細は図 11 と同様。

度は高くなる傾向が認められた。これは、前述のとおり茎葉による遮光、植物群落の蒸散や水面からの蒸発による群落の蒸散冷却による。特に極乾燥条件のセネガルサイトでは、植物群落の蒸散冷却効果が大きく、最寄りの気象観測所と群落内の気温のギャップは、期間中の中央値で7°C程度に達し、また湿度は、最寄りの気象観測所での20%に対し、群落内で56%に上昇した。一方、湿潤な気候のベナン、中国、日本、台湾、アメリカ合衆国のサイトでは、群落内外の気温差は小さいものの湿度差は存在し、群落内の湿度は日中の開花時間帯でも80%を超える場合が多かった。

このような群落内の湿度環境の差異は、穂の蒸散量の違いを通じて穂温に直接影響する。そこで、既存の穂温推定モデルIM²PACT¹⁰⁾による穂温の推定を試みた。

IM²PACTは穂と穂周辺の群落内大気との間のエネルギー収支過程を備えた群落熱収支モデルであるが、日本の微気象データを基に開発されたため、気象条件の適用範囲が限られていた。極乾燥から湿潤に到る幅広い気候条件下でのMINCERによる群落内外の気温・湿度を適用しモデルを改良した。また、高精度放射温度計による穂温・群落表面温度のスポット測定データを用いて、葉層のバルク気孔コンダクタンスや穂の蒸散コンダクタンスを逆推定し、検証した。図13に群落内外の気温、推定した穂温の分布を示す。ただし、ミャンマーサイトは解析対象期間の日射量と風速のデータが欠測のため、穂温を計算していない。モデルで推定された

穂温は、湿潤な気候のベナン、中国、日本、台湾、アメリカ合衆国において、群落内気温より高くなり、極乾燥条件のセネガルにおいては逆に穂温が群落内気温より低くなった。これに伴い、穂温で見ると最も高温なサイトは中国であり、ついでフィリピン、アメリカ合衆国、（変動幅が大きい）ガーナの順となり、群落上や群落内の気温のサイト間順位と異なることが推定された。

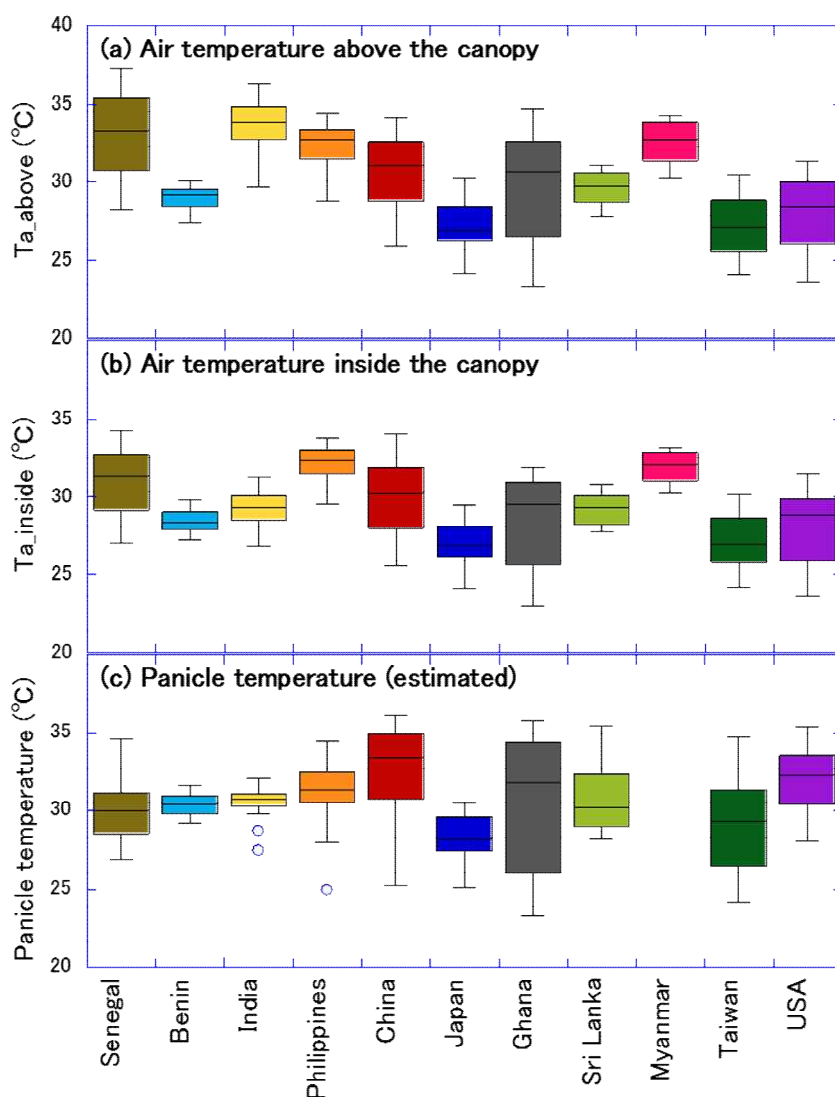


図13 共通品種 IR64 の供試試験における、出穂期間・開花時間帯の(a)群落上気温、(b)群落内気温、(c)モデルで推定した穂温の分布。ミャンマーサイトは解析対象期間の日射量と風速のデータが欠測のため、穂温を計算していない。

② 不稔率との関係

IR64の不稔率と図13の各温度変数の開花時間帯の平均値との関係を図14に示す。なお、アメリカ合衆国のサイトは、登熟期～収穫前の悪天候（台風）で不稔率を含む収量データがないため、本図に含まれていない。また前述のとおり、ミャンマーサイトは穂温の計算値がないため、穂温との関係(c)に含まれていない。日本サイトでは、出穂期間中の気温は他サイトと比べて高くなかったが（図11）、不稔率が28%と高かった。日本サイトでは出穂の約2週間前の減数分裂期にあたる8月2～3日に18℃を下回る低温にあたっており、高温不稔ではなく低温による不稔の可能性が考えられた。日本サイトのデータを除くと、不稔率は、群落上気温よりも、群落内気温、穂温との関係性が高く、穂温と最も高い相関関係（ $r=0.96$ ）が得られた（図14(c)）。また、高温不稔発生の温度閾値は、従来の群落上の一般的な気温を説明変数とした場合には34～35℃と報告されているが、穂温を説明変数とした場合には30～31℃付近に存在する可能性が示唆された。

品種応答試験のサイトにおける耐性品種（N22）と感受性品種（IR52）を追加した不稔率との関係を図15に示す。群落上気温を指標にした場合、高温不稔耐性の異なる品種間差異は不明瞭であるが、開花時間帯平均穂温を指標とすることで、耐性品種（N22）導入による不稔率低減効果や感受性品種（IR52）での不稔率増大を定量的に評価することが可能となった。

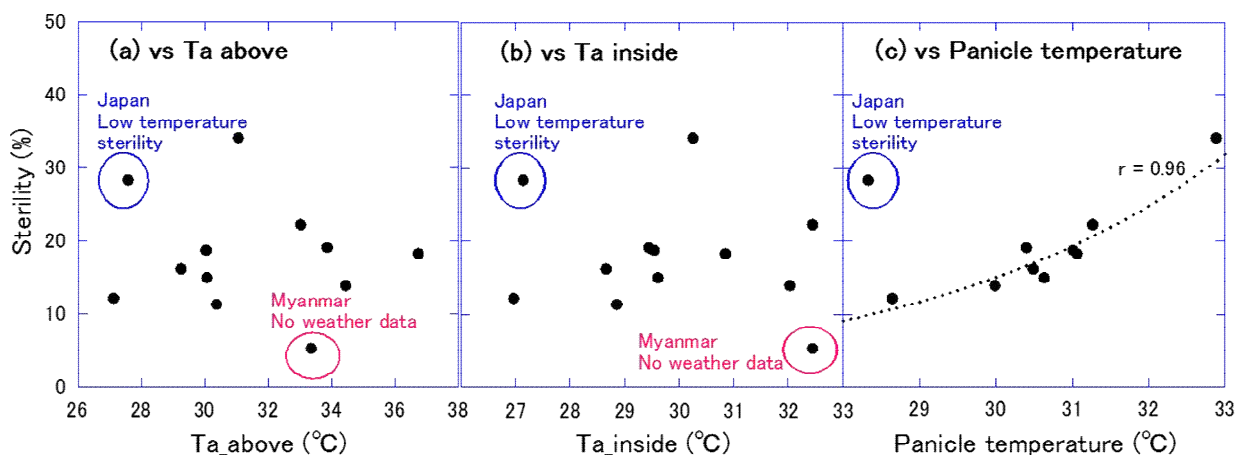


図14 IR64栽培試験における、群落上気温(a)、群落内気温(b)、モデルで推定した穂温(c)の開花時間帯平均温度と、不稔率との関係。

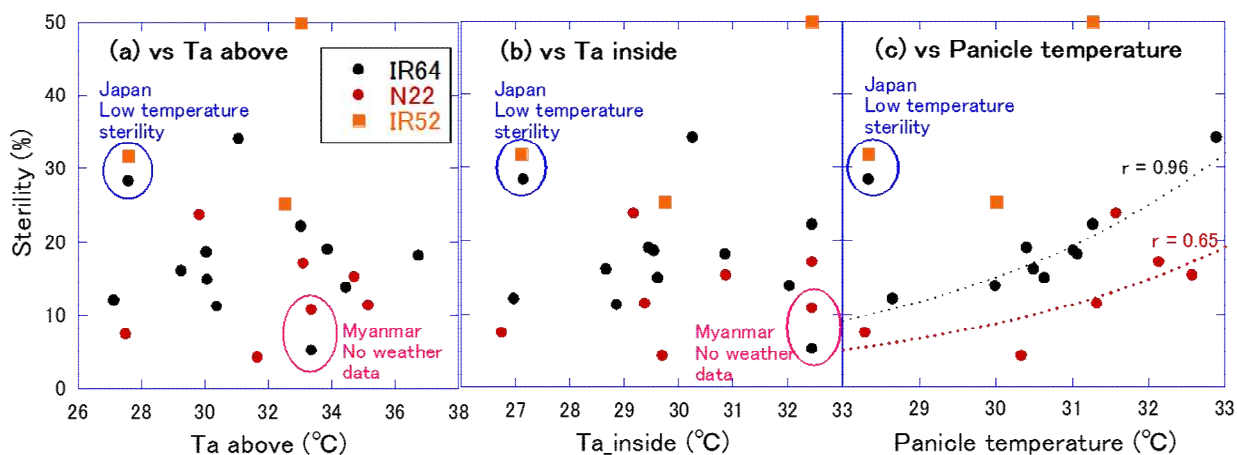


図15 高温不稔耐性の異なる3品種（IR64, N22, IR52）の、群落上気温(a)、群落内気温(b)、モデルで推定した穂温(c)の開花時間帯平均温度と、不稔率との関係。

③ 高温不稔リスク評価

開花時間帯平均穂温と不稔率との関係式（図15(c)）を用いて、現在および将来（現在+2°C）の高温不稔リスク評価を試みた。まず、各サイトについて、実際の出穂日を含む生育期間30日間の気象データセットを作成し、穂温推定モデルIM²PACTで穂温を計算した。データセットの30日間の中で出穂日を移動させて、それぞれの出穂期間に対する不稔率を算出し、不稔率の分布範囲を各サイトの生育期間中に発生しうる不稔率（=高温不稔リスク）とした。将来の気象条件については現在の気温+2°Cとし、湿度は、湿潤な温暖化条件（相対湿度が現在と同じ）と乾燥した温暖化条件（絶対湿度が現在と同じ）の2通りの条件で穂温を計算し、平均した。ミャンマーサイトについては、当該試験地（ネピドー）の気象観測所データが欠測のため、代替参考値として約150 km北方のマングレーの気象観測所のデータを使用した。穂温推定モデルにおける、日射量や風速など気温・湿度以外の気象条件や、葉層のバルク気孔コンダクタンスや穂の蒸散コンダクタンスなど植物群落側のパラメータは、現在と将来とで同じとした。

図16に現在、図17に将来（現在+2°C）の気候での不稔率の分布を示す。現在の気候条件で高温不稔リスクが最も高いのは中国とアメリカ合衆国、ガーナのサイトであり、中国では50%の確率（分布の中央値）で不稔率が23%を超えると推定された。ついで高温不稔リスクが高いのはフィリピン、台湾、ミャンマーサイトであり、酷暑のセネガルサイトやインドサイトでは、低湿度条件のため穂温が気温より低く、湿潤・高温な気候のサイトに比べて高温不稔リスクが低いと

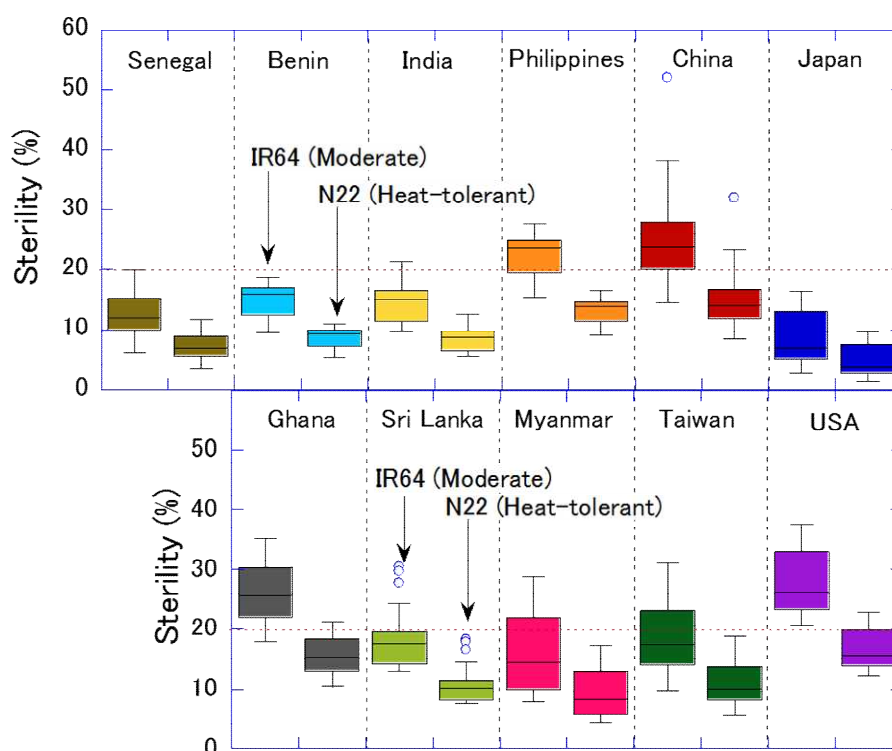


図 16 開花時間帯平均穂温と不稔率との関係式を現在の気候条件（試験の栽培作期の気象条件）に適用して推定した不稔率の分布。各サイトにおける左側は標準的な品種（IR64）、右側は高温不稔耐性品種（N22）を栽培した場合の不稔率の範囲を示す。

推定された。将来の温暖化後においても同様の傾向で、湿潤な気候の中国やアメリカ合衆国のサイトでリスクが高く、中国では、不稔率分布の中央値が23%から32%に増大したが、高温不稔耐性品種（N22）を導入することで、温暖化後の不稔率（中央値）を18%まで低減できると推定された。

・上のように、高温不稔に直接関与する穂温を基準とした新しい関係式を策定することで、従来、群落上の日最高気温等で評価されてきた世界の高温不稔リスクの分布が大きく変わる可能性が示唆された。ただし、本解析に用いた穂温と不稔率の関係式および群落微気象データセットは、

単年（1作期、もしくは一部の熱帯サイトでは2作期）の測定結果に基づくもので、圃場試験の年次反復により不稔率の温度応答式の確度を上げることが必須であり、さらに気象条件は年々変動することから、複数年の群落微気象データセットの収集が不可欠である。

また、本解析では穂温推定モデルにおける植物群落側のパラメータを現在と将来とで同じであると仮定したが、穂温の重要な決定因子の一つである穂の蒸散コンダクタンスの環境応

答は、気候条件により異なる可能性がある。例えば、乾燥した気候条件では湿潤な条件より穂が乾燥しやすいため、蒸散コンダクタンスが低下し、乾燥気候のセネガルやインドでの穂温の蒸散冷却がモデル推定より小さい（＝穂温が高い）可能性などである。また、気候変動により開花時間帯が変わり、開花穎花が遭遇する温度域が変わる可能性もある。これらのことから、より高精度な高温不稔リスク評価のためには、多様な気候条件において、一般気象要素、穂温や群落温度、地温、群落内微気象などの生産環境データ、開花時刻やその分布データ、不稔率などの収量データを総合的に収集・蓄積し、現在・将来の環境下で開花時穂温を推定できるよう穂温推定モデルの頑健性を高め、不稔リスクモデルを構築する必要がある。

(4) 開花期落水試験による乾燥ストレスが高温不稔に及ぼす影響の評価

高温と乾燥の複合ストレスによる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5サイト（ガーナ、スリランカ、ミャンマー、台湾、アメリカ合衆国）で実施した。各サイトのIR64の出穂期間の開花時間帯における群落内外の気温と湿度の分布を箱ひげ図で示した（図18）。最寄りの気象観測所の気温・湿度が入手できたサイトではそれらも示した（nearby weather station）。図中の(C) (D)はそれぞれ対照区（Control）と乾燥区（Drought）の群落内のMINCERデータを表す。ただし、ミャンマーサイトの乾燥区はセンサ不調により欠測、アメリカ合衆国サイトでは、落水処理途中で降水があったため乾燥ストレスがかけられていない。

ミャンマーとアメリカ合衆国を除く3サイトでは、乾燥区の群落内気温が対照区に比べて高く、湿度は低かった。これは、乾燥区では水体がなく、日中、露出した高温の土壌表面から群落

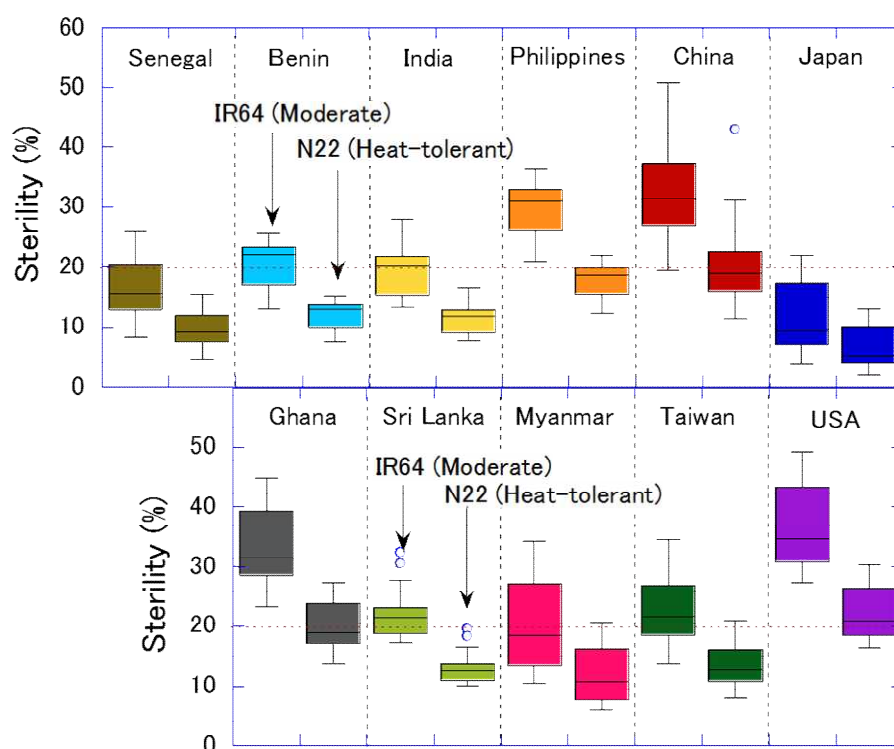


図 17 開花時間帯平均穂温と不稔率との関係式を、将来の気候条件（現在+2℃）に適用して推定した不稔率の分布。詳細は図 16 と同様。

内が加熱されること、乾燥ストレスにより葉の気孔が閉じて蒸散が低下し、葉層の蒸散冷却効果が減ったために葉温が上昇し、群落内が高温・乾燥化したことが要因である。

乾燥区(D)と対照区(C)の群落内気温(中央値)の差は、スリランカサイトで1.15°C、台湾サイトで0.23°Cで、比較的乾燥した気候のスリランカサイトの方が強い乾燥ストレス条件となっており、土壌の乾燥による地温

上昇や気孔の閉鎖が大きかったと考えられる。同時期に手でスポット測定した穂温データでは、落水処理による穂温の上昇は、スリランカサイトで約2.5°C、台湾サイトで0.8°Cと、群落内気温の上昇よりも大きかった。このことから、スリランカ、台湾サイトとも、乾燥区の穂温は、穂近傍の群落内気温上昇によるだけでなく、乾燥ストレスに伴う穂蒸散コンダクタンスの低下により上昇したものと考えられた。

不稔率は、落水処理により、スリランカサイトで15.0%から40.8%に、台湾サイトで12.1%から17.6%に増大した。IR64の穂温と不稔率の関係性(図14(c))を用いて、両サイトの落水処理に伴う穂温の上昇による不稔率増大を推定すると(図19)、上昇した穂温から推定された乾燥区の不稔率は、スリランカサイトで33.8%、台湾サイトで13.3%となり、実測の不稔率(40.8%、17.6%)の8割程度の値となった。このことは、乾燥区の高温不稔増大の8割程度が、落水処理に伴う群落微気象の変化や穂蒸散コンダクタンスの低下による「穂温の上昇」で説明できる可能性を意味する。

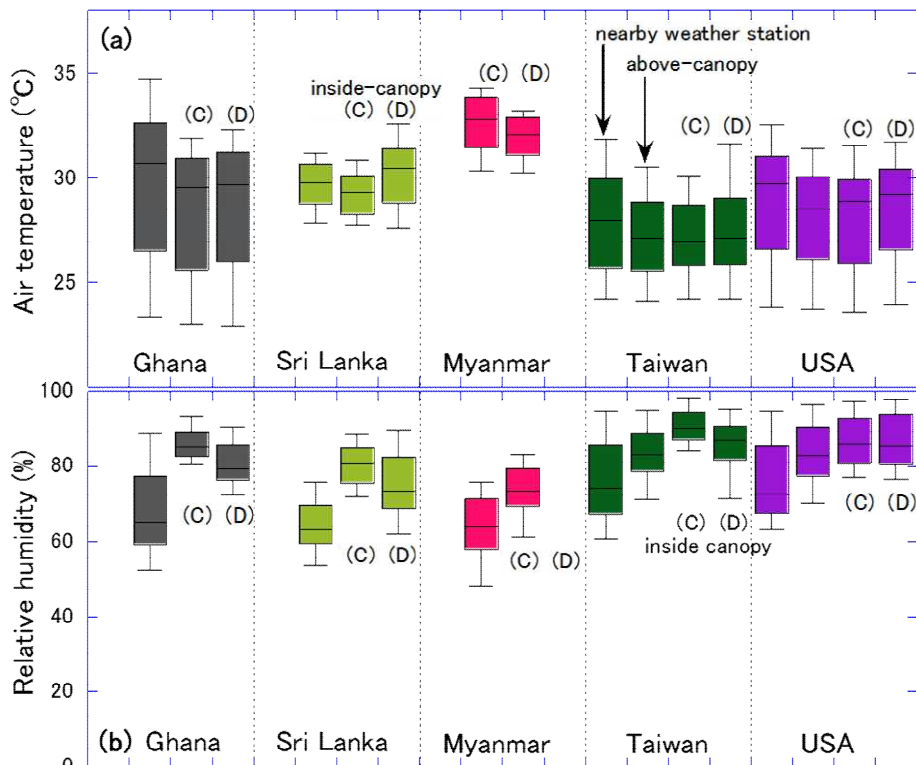


図 18 開花期落水試験における、出穂期間・開花時間帯の気温(a)と相対湿度(b)の分布。各サイトにおいて、左から最寄りの気象観測所、群落上、対照区群落内(C)、乾燥区群落内(D)の気温・湿度の範囲を表す。

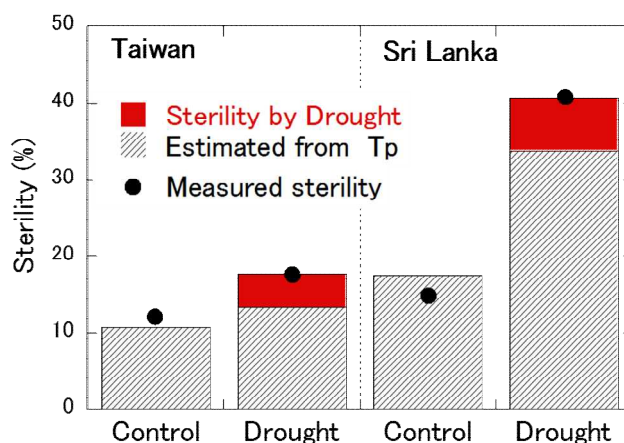


図 19 開花期落水処理による不稔率増大と、同処理による穂温上昇との関係の解析例

世界の天水田では、乾燥ストレスによる減収、特に温暖化に伴う高温と乾燥の複合的ストレスの収量への影響が重要な課題となっており、将来の気候変動や水資源の制限による影響を最小限とするために、多くの乾燥ストレス試験が行われているが、乾燥ストレスによる群落微気象や穂温の変化を介した高温不稔発生のプロセス解明は、世界で本研究課題の他には例がない。作物生産環境の応答に物理的過程を組み込むアプローチは、気候変動影響予測の高精度化だけでなく、将来の水資源変動下の適応策の有効性の定量化にも貢献できると考えられ、今後もプロセス解明のためのデータ蓄積が必要である。

5. 本研究により得られた成果

- (1) アジアからアフリカ、アメリカに至る広範な気候条件を横断する11カ国の稲作地域の水田において、異常気象や温暖化がイネ高温障害に及ぼす影響を検出し、解析するための統一的手法による群落環境のモニタリング体制を確立した。
- (2) 気象の専門家でなくても容易かつ高精度で水田群落内の微気象を測定できる自立型群落微気象測定装置 (MINCER) を更新した。MINCERの次世代機 (2G) を開発し、耕地環境モニタリングネットワークを安定的に継続し、シームレスにデータを収集することが可能となった。
- (3) セネガルやインドなど乾燥した気候のサイトでは、植物の蒸散や水面からの蒸発による群落冷却効果が大きいと、開花時間帯の群落内気温は、最寄りの気象観測所や群落上より低いが、ベナンや東南アジアなどの湿潤気候のサイトでは冷却効果が小さく、特に、開花時間帯の気象条件が湿潤な台湾やアメリカのサイトでは、同じか群落内気温の方が高くなる場合もあった。
- (4) 極乾燥から湿潤に到る幅広い気候条件下での群落微気象モニタリング結果を用いて、既存の穂温推定モデルIM²PACTを改良した。モデルで推定した穂温は、湿潤な気候の中国やアメリカ合衆国等で群落内気温より高くなり、極乾燥条件のセネガルでは穂温が群落内気温より低くなった。これに伴い、穂温で見ると最も高温なサイトは中国であり、ついでフィリピン、アメリカ合衆国、ガーナの順となり、群落上や群落内の気温のサイト間順位と異なった。
- (5) 不稔率と温度変数との関係を調べたところ、群落上気温よりも、群落内気温、穂温との関係性が高く、穂温と最も高い相関関係 ($r=0.96$) が得られた。また、高温不稔発生の温度閾値は、従来の群落上の一般的な気温を説明変数とした場合には $34\sim 35^{\circ}\text{C}$ と報告されているが、穂温を説明変数とした場合には $30\sim 31^{\circ}\text{C}$ 付近に存在する可能性が示唆された。穂温を指標とすることで、耐性品種導入による不稔率低減効果や感受性品種での不稔率増大を定量的に評価することが可能となった。
- (6) 高温・乾燥ストレス試験のプロトコルが完成し、開花期の落水処理による群落内の昇温・乾燥化という微気象変化をMINCERにより高精度で測定できた。落水処理による不稔率の増大の8割程度が、処理に伴う穂温の上昇で説明できる可能性が示唆され、乾燥ストレスが群落微気象や穂温を介して高温不稔に及ぼす影響を明らかにした。

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) Tian, XH., Matsui, T., Li, S., Yoshimoto, M., Kobayasi, K. and Hasegawa, T. 2010: Heat-induced floret sterility of hybrid rice (*Oryza sativa* L.) cultivars under humid and low wind conditions in the field of Jiangnan Basin, China. *Plant Prod. Sci.*, 13, 243-251.
- 3) Matsui, T., Kobayasi, K., Nakagawa, H., Yoshimoto, M., Hasegawa, T., Reinke, R. and Angus, J. 2014: Lower-Than-Expected Floret Sterility of Rice under Extremely Hot Conditions in a Flood-Irrigated Field in New South Wales, Australia *Plant Prod. Sci.*, 17, 245-252.
- 4) Fukuoka, M., Yoshimoto, M. and Hasegawa, T., 2012: MINCER: A novel instrument for monitoring the micrometeorology of rice canopies. 68, 135-147.
- 5) MARCO2009, ワークショップ-2, 地球温暖化に伴う農作物高温障害の発生, 予測と適応戦略, <http://www.niaes.affrc.go.jp/marco/marco2009/program/workshop/02.html>
- 6) Yoshimoto, M., Fukuoka, M., Hasegawa, T., Matsui, T., Tian, XH., Vijayalakshmi, C., Singh, MP., Myint, TT., Weerakoon, WMW., Lafarge, T., Lur, HS., Tapley, L., 2012: MINCERnet: A global research alliance to support the fight against heat stress in rice. *J. Agric. Meteorol.*, 68, 149-157.
- 7) Satake, T. and Yoshida, S. 1978: High temperature-induced sterility in indica rice at flowering. *Jpn. J. Crop Sci.*, 47, 6-10.
- 8) Nguyen, DN., Lee, KJ., Kim, DI., Anh, NT. and Lee, BW., 2014: Modeling and validation of high-temperature induced spikelet sterility in rice. *Field Crops Res.*, 156, 293-302.
- 9) 松井勤 2009:開花期の高温によるイネの不稔. *日作紀*, 78, 303-311.
- 10) 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, *J. Agric. Meteorol.*, 67(4), 233-247

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌)

なし

(2) 口頭発表

- ① 吉本真由美, 福岡峰彦, 臼井靖浩, 長谷川利拓 (2015) 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, 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」講演要旨, (独) 農業環境技術研究所, 3-4
- ② Mayumi Yoshimoto, Minehiko Fukuoka, Yasuhiro Usui, Toshihiro Hasegawa, Hirofumi Nakamura (2015) Elevated CO₂ might exacerbate the heat stress of rice via micrometeorological change -MINCER in FACE experiment-, MARCOシンポジウム 2015 サテライトワークショップ「国際的な耕地微気象観測網による気候変動下のイネ高温障害リスク評価の革新」, (独) 農業環境技術研究所
- ③ Mayumi Yoshimoto (2015) Summary of monitoring results and proposal of the next phase

- MINCERnet, MARCOシンポジウム 2015 サテライトワークショップ「国際的な耕地微気象観測網による気候変動下のイネ高温障害リスク評価の革新」, (独) 農業環境技術研究所
- ④ Mayumi Yoshimoto (2015) Manual measurement of canopy temperature and panicle temperature by IRT thermometer, Apogee MI-230, MARCOシンポジウム 2015 サテライトワークショップ「国際的な耕地微気象観測網による気候変動下のイネ高温障害リスク評価の革新」, (独) 農業環境技術研究所
- ⑤ Mayumi Yoshimoto (2015) Strategy for detecting multiple stresses of heat and drought, MARCOシンポジウム 2015 サテライトワークショップ「国際的な耕地微気象観測網による気候変動下のイネ高温障害リスク評価の革新」, (独) 農業環境技術研究所
- ⑥ Mayumi Yoshimoto (2015) Weather station for general meteorological components, MARCOシンポジウム 2015 サテライトワークショップ「国際的な耕地微気象観測網による気候変動下のイネ高温障害リスク評価の革新」, (独) 農業環境技術研究所
- ⑦ Xiaohai Tian (2015) Recent heat issues and the micro-meteorological characteristics of rice canopy under heat in the middle Yangtze, China, MARCOシンポジウム 2015 サテライトワークショップ「国際的な耕地微気象観測網による気候変動下のイネ高温障害リスク評価の革新」, (独) 農業環境技術研究所
- ⑧ Chwen-Ming Yang and Hsu-Sheng Lur (2015) Effects of planting density and canopy microclimate on yield and quality of rice, MARCOシンポジウム 2015 サテライトワークショップ「国際的な耕地微気象観測網による気候変動下のイネ高温障害リスク評価の革新」, (独) 農業環境技術研究所
- ⑨ Norvie L. Manigbas (2015) Genotype yield performance under high temperature conditions in PhilRice, Nueva Ecija, Philippines, MARCOシンポジウム 2015 サテライトワークショップ「国際的な耕地微気象観測網による気候変動下のイネ高温障害リスク評価の革新」, (独) 農業環境技術研究所
- ⑩ Chenniappan Vijayalakshmi and Dhashnamurthi Vijayalakshmi (2015) Interaction of heat and drought stresses in rice: Physiological dissection of tolerance mechanisms using MINCER data, MARCOシンポジウム 2015 サテライトワークショップ「国際的な耕地微気象観測網による気候変動下のイネ高温障害リスク評価の革新」, (独) 農業環境技術研究所
- ⑪ W. M. W. Weerakoon (2015) Impact of heat and drought stress on rice in Sri Lanka, MARCOシンポジウム 2015 サテライトワークショップ「国際的な耕地微気象観測網による気候変動下のイネ高温障害リスク評価の革新」, (独) 農業環境技術研究所
- ⑫ Lee Tarpley and A. R. Mohammed (2015) Current situation in the US rice industry and the nature of night temperature effects, MARCOシンポジウム 2015 サテライトワークショップ「国際的な耕地微気象観測網による気候変動下のイネ高温障害リスク評価の革新」, (独) 農業環境技術研究所
- ⑬ Elke Vandamme, Kokou Ahouanton, Abdoulaye Sow, Kazuki Saito and Pepijn A. J. van Oort (2015) MINCERnet observations at AfricaRice, MARCOシンポジウム 2015 サテライトワークショップ「国際的な耕地微気象観測網による気候変動下のイネ高温障害リスク評価の革新」, (独) 農業環境技術研究所

- ⑭ Minehiko Fukuoka (2015) Micrometeorology measurement inside the canopy by MINCER, MARCOシンポジウム 2015 サテライトワークショップ「国際的な耕地微気象観測網による気候変動下のイネ高温障害リスク評価の革新」, (独) 農業環境技術研究所
- ⑮ M. Yoshimoto: MINCERnet: International research network to support the fight against heat stress of rice, NARO-MARCO International Symposium “Soil Carbon Sequestration: needs and prospects under the 4 per 1000 initiative”. 2017.2, Tsukuba, Japan.
- ⑯ Mayumi Yoshimoto and Minehiko Fukuoka (2018) A brief guide of MINCERnet program, NARO-MARCO Symposium 2018 on “MINCERnet: Multi-site monitoring network to cope with the heat stresses of rice under the climate change”. 2018.1, Tsukuba, Japan.
- ⑰ Xiaohai Tian (2018) Heat-induced floret sterility of rice under humid and low wind conditions in the field of Jiangnan Basin, China, NARO-MARCO Symposium 2018 on “MINCERnet: Multi-site monitoring network to cope with the heat stresses of rice under the climate change”. 2018.1, Tsukuba, Japan.
- ⑱ Lee Tarpley (2018) High nighttime temperatures in the southern U.S. and the effects on rice fertility, NARO-MARCO Symposium 2018 on “MINCERnet: Multi-site monitoring network to cope with the heat stresses of rice under the climate change”. 2018.1, Tsukuba, Japan.
- ⑲ Norvie L. Manigbas (2018) Current situation of heat-induced sterility in the Philippines and field screening for high temperature tolerance breeding, NARO-MARCO Symposium 2018 on “MINCERnet: Multi-site monitoring network to cope with the heat stresses of rice under the climate change”. 2018.1, Tsukuba, Japan.
- ⑳ WMW. Weerakoon and Silva Chandradasa (2018) Impact of drought and temperature stress on rice in Sri Lanka, NARO-MARCO Symposium 2018 on “MINCERnet: Multi-site monitoring network to cope with the heat stresses of rice under the climate change”. 2018.1, Tsukuba, Japan.

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

- ① Mayumi Yoshimoto (2015) Challenges and Net-working for Rice Research for Climate Change in Japan, Keynote speech at the Inception meeting of collaborative project on “Capacity Enhancement in Rice Production in Southeast Asia under Organic Agriculture Farming System”, Philippine Rice Research Institute, Nueva Ecija, the Philippines.
- ② Mayumi Yoshimoto, Minehiko Fukuoka, Toshihiro Hasegawa (2016) MINCERnet: Multi-site

monitoring network of heat stresses and micrometeorology in rice paddies under various climates, NIAES Series No. 6 "The Challenges of Agro-Environmental Research in Monsoon Asia", NIAES, 61-82.

- ③ 農業と環境、MARCOワークショップ「国際的な耕地微気象観測網による気候変動下のイネ高温障害リスク評価の革新」開催報告（2016年 No.189、（独）農業環境技術研究所）
- ④ 農環研ニュース「イネの高温障害について世界の研究者が集結」（2016年 109号、（独）農業環境技術研究所）
- ⑤ ニュース農業と環境、世界の水田での開花時高温不稔の実態にせまる（2018年3月 No.112、農研機構農業環境変動研究センター）
- ⑥ 広報NARO、農研機構－MARCO国際シンポジウム開催（2018年 No. 7、農研機構）
- ⑦ 日本農業新聞、稲高温障害国際シンポ 品種改良の方向探る（2018年1月27日全国版、農研機構－MARCO国際シンポジウム開催とMINCERnetの研究活動の紹介）

（6）その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

初年度にはMARCOシンポジウム2015 サテライトワークショップ「国際的な耕地微気象観測網による気候変動下のイネ高温障害リスク評価の革新」を、最終年度には農研機構－MARCO国際シンポジウム“MINCERnet: Multi-site monitoring network to cope with the heat stresses of rice under the climate change”を開催した。これらの国際シンポジウムは一般にも公開し、本研究課題の成果や国際的な観測網の重要性と本ネットワークが果たす役割について広く紹介した。

本研究課題で得られた、高温不稔に直接関与する群落熱環境（穂温）と収量のモニタリングデータとそれに基づく不稔モデルは、今後開発される高温不稔耐性の育種素材の有効性の評価や適応技術の見直しのための基礎データとして、気候変動の影響への適応計画に直接貢献するものである。また、これまでモニタリングデータが欠落していた開発途上国の耕地環境データの収集を通じて、現地での適応技術の推進を支援することができる。さらに、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、中国や熱帯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。

また、作物の生育・収量予測モデルは、温暖化影響予測において中心的な役割を果たしており、国際的な農業モデル研究プロジェクト（AgMIP）のグループと連携し、本研究課題で収集された水田環境情報と作物生育・収量データを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。

(2) 干ばつ・冠水ストレス常襲地帯での水田群落内モニタリングとイネ生育データの集積解析

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

平成27～29年度合計予算額	4, 5 6 2千円
(うち、平成29年度当初予算額	1, 3 6 9千円)

[要旨] 水環境が不安定なガーナ国北部地域において、水管理、品種、および、施肥法の違いがイネの群落微気象環境と生育収量に及ぼす影響を明らかにした。具体的には、高温ストレスに最も感受性の高い出穂期間中の日最高気温が、乾季作で平均34.5～35.0度と極めて高い温度を示すものの、いずれの品種においても高温ストレスにともなう不稔の発生は軽微であった。この要因として、乾季作では、活発な蒸発散と雨季作に比べて開花時刻が平均36分早まることにより、開花中の最高群落温度が28.4～30.6度まで低下し、高温ストレスが回避されたことを示した。幼穂分化期から出穂期にかけて水ストレスを与えた場合に、常時湛水に比べて収量が10～15%低下するものの、MINCERによる連続的な群落温度の計測から、同時期の軽微な水ストレスによる収量低下は、開花時間（午前）中の高温ストレスよりも、午後の気孔閉鎖と夜温上昇にともなう光合成活性の低下および呼吸量の増加にともなう可能性が示された。また、ケイ素の施用は不稔率への有意な効果はないものの、現地主要品種のJasmine85に対して25～26%の安定した増収効果を示した。すなわち、(1) 平均気温が極めて高いガーナ北部の乾季作においても、開花時刻の早期化と活発な蒸発散にともなう群落温度の低下により高温ストレスが回避できていること、(2) 開花期間中の群落温度や不稔率に対して、出穂前の軽微な水ストレスの直接的な影響は比較的小さいこと、(3) 対象地域における主要品種の高温ストレス感受性はIR64と差異はないこと、(4) ケイ素の施用がイネ増収に寄与し、その効果は品種特異的であることが明らかになった。これらの成果は、2件の国際シンポジウム「MARCO サテライトワークショップ2015—気候を横断する耕地微気象観測網によるイネ高温障害リスク評価の革新—」（2015年11月つくば市開催）および「気候変動下のイネの高温障害にたちむかう国際観測ネットワークMINCERnet」（2018年1月つくば市開催）で公表された。

[キーワード] イネ、ガーナ、河川氾濫原、水ストレス、高温ストレス、ケイ酸施肥

1. はじめに

サブサハラ地域に約3,000万ヘクタール存在する河川氾濫原は、比較的肥沃な土壌を有することや、季節的な湛水により畑作物との土地競合が回避できることから、イネの潜在的可耕地として、地域の食料安全保障に貢献することが期待されている¹⁾。一方で、河川氾濫原は、水量の変化により、冠水と干ばつの両方のリスクを有する気象変動に脆弱な稲作生態系でもある。また、サブサハラ地域の多くは、熱帯気候に属しており、気候変動にともない、高温ストレスによるイネの生育障害のリスクが高まることも予測される。これまで、水条件が大きく変動するサブサハラ地域の生産現場において、圃場の水動態が群落内微気象、および、高温障害や水ストレスを含むイ

ネの生育・収量に及ぼす影響を定量的に観測した研究はほとんどみられない。

2. 研究目的

本研究では、水環境が不安定かつコメ生産への高温ストレスの影響が懸念されるガーナ国北部の天水田地域を対象に、圃場の水動態の違いが群落微気象とイネの高温ストレスならびに生育収量に及ぼす影響を明らかにすること、また、高温と不安定な水環境という複合的ストレスを回避するための対策として、品種および施肥法の違いによる影響を評価することを目的とした。

3. 研究方法

ガーナ国北部の隣接する2つ農家圃場において、生育期間を通して湛水した「常時湛水圃場（以下、F圃場）」と出穂2週間前から出穂ごろまで軽微な水ストレスを加えた「乾燥処理圃場（以下、D圃場）」の2つの異なる水環境を設定した。各圃場において、地域の主要品種である Jasmine85 と熱帯地域の連絡試験共通品種とした IR64 の2品種に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反復の乱解法で処理区を設置した。栽培試験は、2016年と2017年の雨季（7月～11月）、および2017年の乾期（2月～6月）の計3回実施した。

栽植密度は、畝間30cm×株間15cm（22.2株/m²）で、プロットサイズは5.7m×4.5m（19畝×30列）＝25.65m²とした。播種直後に、非選択性除草剤のグリホサートと土壌処理剤のペンディメタリンを散布し、その後、適宜、手取り除草を実施した。施肥条件は、全プロットに対して、基肥として、NPK化成肥料（23:10:5）を7gN：3gP₂O₅：1.5gK₂O/m²等量で表層施用、+Si区には農業用シリカゲル（富士シリアル化学）を約20g SiO₂/m²等量で追加施用し、播種50日後に、硫酸アンモニウムを5gN/m²等量で追肥した。

次に、生育期間中の圃場環境を計測するため、圃場近郊に気象観測装置（Onset社）を設置し、各圃場内に、土壌水分センサー（Decagon社）、地温センサー（T&D社）、および、水位計（Onset社）を設置した。幼穂分化期ごろに、群落の温湿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。MINCERでは、設置から成熟期まで2分毎に群落の温湿度を記録した。

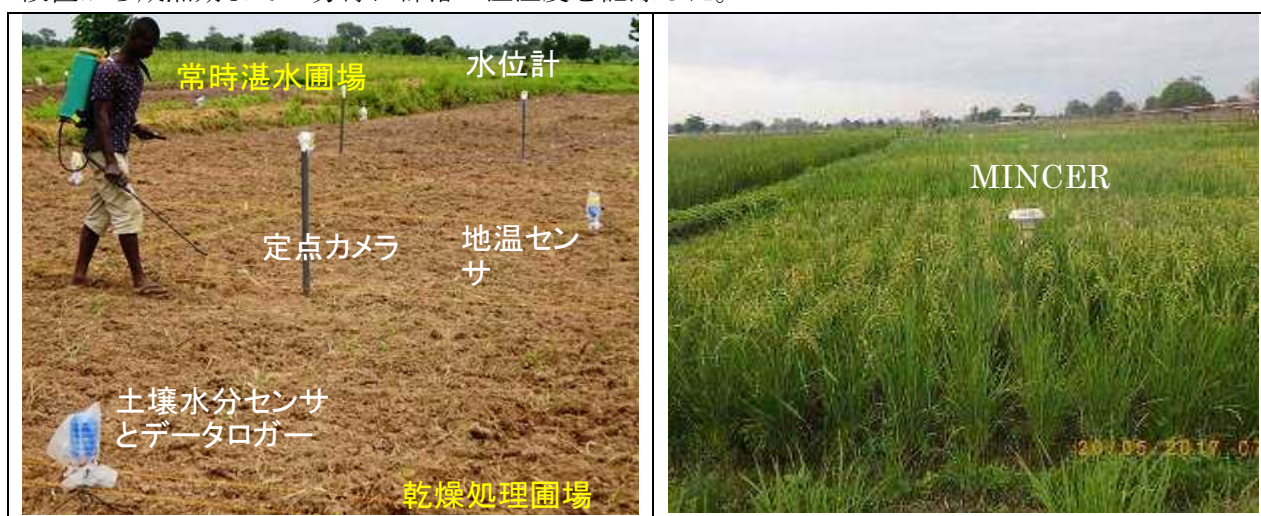


図1. 圃場観測機器の設置の様子。

4. 結果・考察

(1) 雨季作と乾期作の気象条件および群落温湿度環境の比較

雨季作と乾期作における生育期間中の日最高気温と日平均相対湿度の推移を図2にまとめた。乾期作では、特に生育初期に38℃を超える極高温が多発しており、IR64とJasmine85それぞれの出穂期1週間の日最高気温の平均値は35.0℃および34.5℃であった(IR64の出穂がJasmine85に比べていずれの作期も7~10日早かった)。一方、雨季作では、相対湿度は高いものの、両品種の出穂期1週間の日最高気温の平均値は29.8℃~30.8℃の範囲にあった。過年度の気象データも同様の傾向であり、標準的な雨季の栽培時期においては、雲量が多く日射量もそれほど高くないことから、ガーナ国北部では、イネの出穂期に極高温に曝されるリスクは比較的小さいと考えられた。

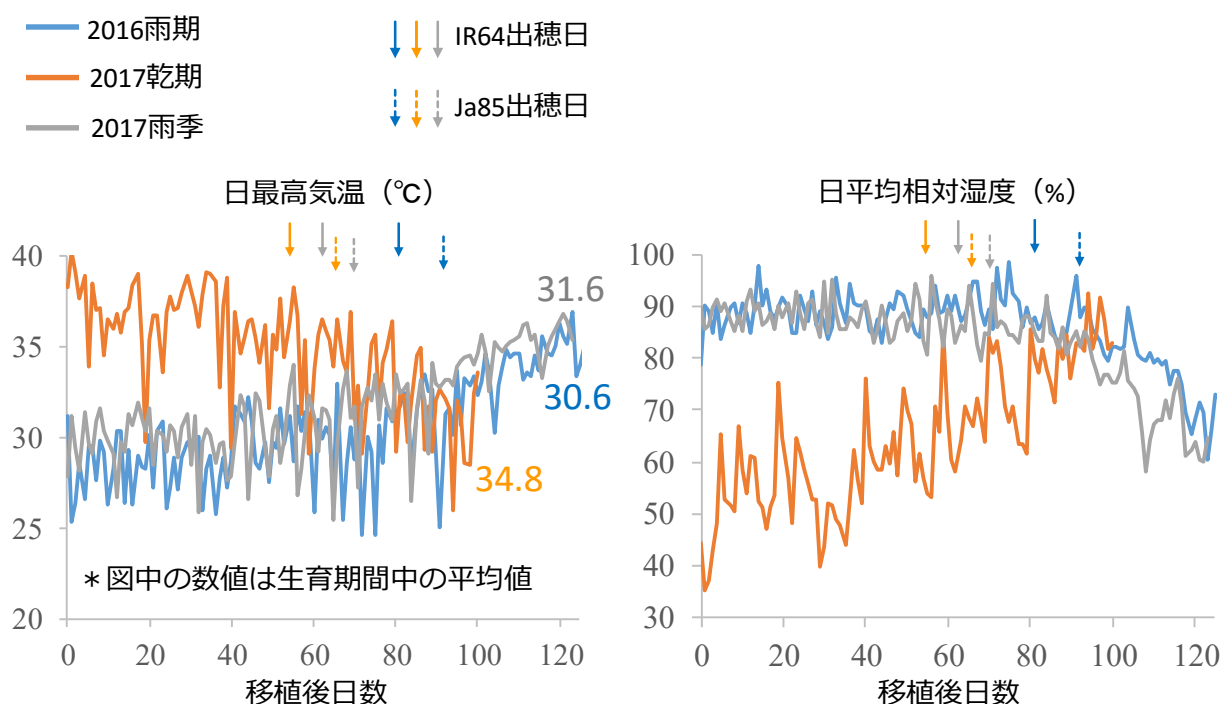


図2. 生育期間中の日最高気温と日平均相対湿度の推移

次に、乾季作と雨季先において、水環境の違いが出穂期間中の群落温度に及ぼす影響を比較した(図3、2016年と2017年の雨季作は同様の傾向を示したので、2017年のみのデータを示した)。乾期作において、群落温度は大気温に比べて最大6.0℃高く、大気温と群落温度の差は、F圃場で特に大きくなる傾向にあった。時間軸で変化をみると、大気温と群落温度の差が最も大きくなるのが午後3時ごろであり、F圃場とD圃場の群落温度の差が顕著になるのは、午後3時~0時ごろであった。雨季作においては、大気温と群落温度、もしくはD圃場とF圃場の差異はいずれも乾期作に比べて小さく、午前中は群落温度が大気温より高い傾向にあった。乾期作では、飽差が大きく活発な蒸発散が生じることで群落温度が大気温に比べて大きく冷却されるものの、D圃場では午後に水ポテンシャルが低下し、気孔が閉鎖することによりF圃場に比べて蒸散冷却の効果が小さくなり、図3のような温度変化がみられたものと考えられた。

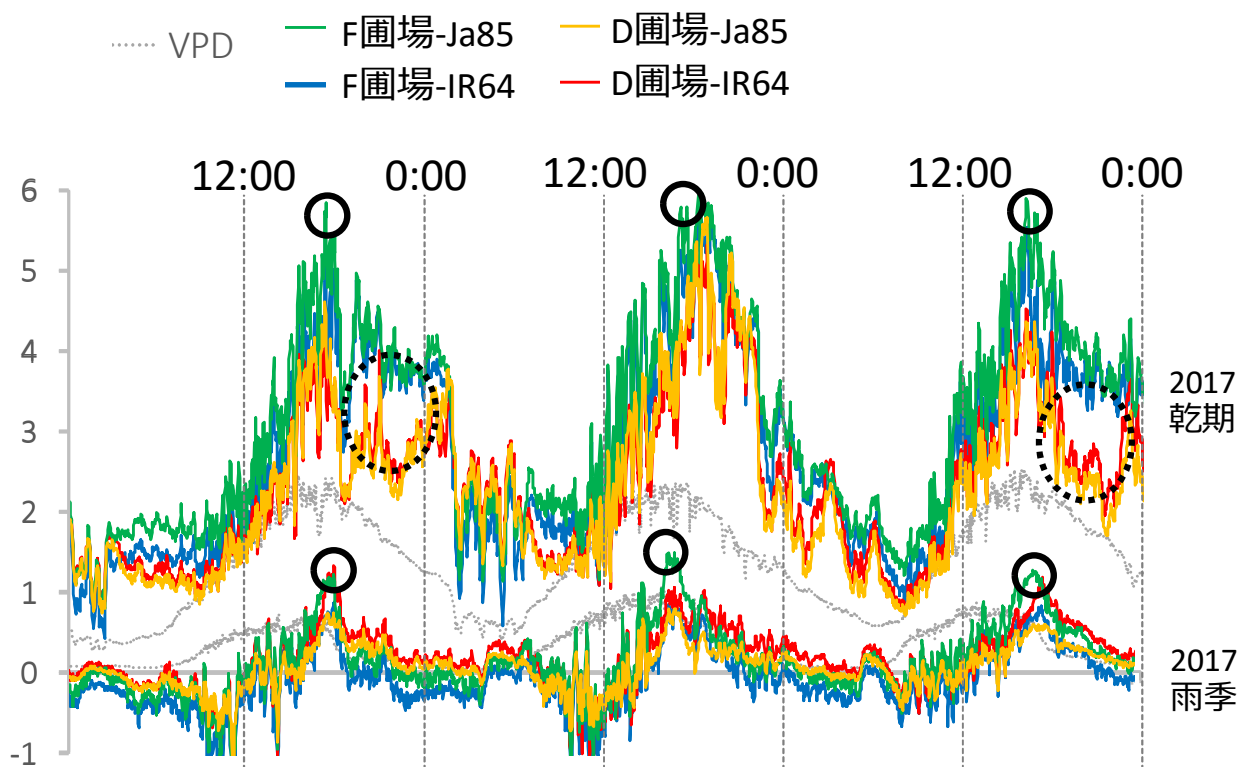


図 3. 出穂 50% ± 1 日における大気温度と群落温度との温度差の推移の時間変化 (2 分毎)

(2) 作期による開花時刻の変化と開花時間中の群落温度に及ぼす影響

出穂期前後の開花時刻を調査したところ、いずれの品種および水環境においても雨季作に比べて乾期作の開花が平均で 33-44 分早くなることが分かった。乾期作では、午前中の湿度が低く、温度上昇が早い影響による可能性が考えられた。開花時刻の早朝化と上述の活発な蒸発散にともなう群落温度の低下により、開花時間中（開花始めから開花終わり）の群落最高温度は、F 圃場の場合、乾期作で 28.4~29.0℃、雨季作で 28.4~28.7℃とほとんど差がなくなることが示された。D 圃場においては、乾期作の同開花時間中の群落最高温度が 30.1~30.6℃とやや高くなるものの、日最高気温と比べると、開花時間中の群落温度は極めて低く抑えられることが分かった。

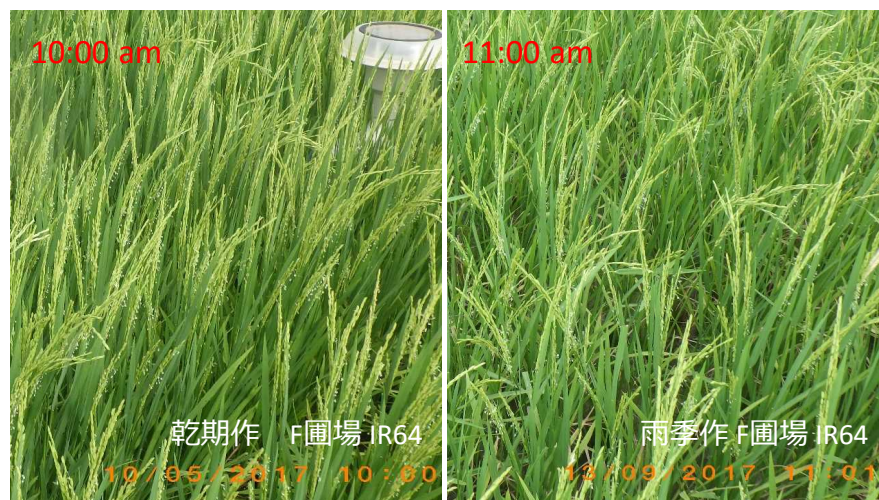


図 4. 乾期作では雨季作に比べて開花時刻が早くなる

表 1. 出穂期間中の作期別の開花時刻、大気温、群落温度の比較

		日の出時刻	開花始め	日最高気温	開花時間中の群落最高温度	
乾期作 IR64	D	5:43	9:47	35.0	-6.2°C	30.1
乾期作 IR64	F	5:43	9:48	35.0	→	28.8
雨季作 IR64	D	5:51	10:31	29.8	-1.4°C	28.5
雨季作 IR64	F	5:51	10:18	29.8	→	28.4
乾期作 Ja85	D	5:41	10:06	34.5		30.6
乾期作 Ja85	F	5:41	9:48	34.5		29.0
雨季作 Ja85	D	5:52	10:39	30.3		29.0
雨季作 Ja85	F	5:52	10:26	30.3		28.7

(3) 品種、水管理、および施肥法の違いがイネ収量に及ぼす効果

各処理区の籾収量を比較した (表 2)。雨季作の収量は IR64 が 4.44~5.21 t ha⁻¹、Jasmine85 が 4.67~5.86 t ha⁻¹、乾季作の収量は IR64 が 4.48~5.26 t ha⁻¹、Jasmine85 が 5.83~6.90 t ha⁻¹、の範囲にあり、IR64 に対して Jasmine85 が、雨季作に対して乾期作の収量が、平均してそれぞれ 18.9%および 7.8%有意に高かった。次に、F 圃場と D 圃場を比較すると、雨季作の Jasmine85 で差はみられなかったものの、同処理区を除くと、それぞれ出穂前の軽微な水ストレスにより収量が 10~15%有意に低下し、その低下程度は乾期作でより顕著になることが分かった。また、Si の施用効果に品種との有意な相互作用がみとめられた。すなわち、Si の施用により、Jasmine85 は 25~26%有意に増収する一方で、IR64 ではその施用効果がみられなかった。相互作用の要因は不明であるが、これまで検証されていない西アフリカの水田圃場でケイ酸施用の収量への実質的な効果を示したこと、また、その品種間差異を観測したことは新規性の高い結果といえる。

表 2. 品種、水管理、および Si 施用が作期別の収量に及ぼす効果

品種	水管理	Si 施肥	収量 (t ha ⁻¹)	
			雨季作 (2016と2017の平均値)	乾期作
IR64	D圃場	+Si	4.70 cd	4.58 d
IR64	D圃場	-Si	4.44 d	4.48 d
IR64	F圃場	+Si	5.21 bc	5.11 cd
IR64	F圃場	-Si	5.08 bcd	5.26 c
Ja85	D圃場	+Si	5.56 ab	5.90 bc
Ja85	D圃場	-Si	5.40 ab	5.83 bc
Ja85	F圃場	+Si	5.86 a	6.90 a
Ja85	F圃場	-Si	4.67 cd	6.07 b

同一アルファベットを付した数値は5%水準 (Tukey HSD)で有意差なし。

(4) イネ収量と高温ストレスとの関係

出穂期から登熟期間中の高温ストレスの影響を受けると考えられる登熟歩合、不稔率、および千粒重の処理間差を比較した。白未熟粒の発生については、いずれの供試品種もインディカ系統で判別が難しかったため、評価に加えなかった。また、登熟歩合と不稔率はほぼ同等の傾向を示した。図 5 に示すように、収量と登熟歩合、もしくは収量と千粒重にいずれも有意な相関はなく、処理間にみられた収量差の要因として、開花期の高温ストレスによる不稔発生という現象は観察されなかった。この要因として、(2) で考察したように、極高温条件にあった乾期作においても、開花の早朝化と活発な蒸発散による冷却効果により、開花時間中の群落温度がいずれも 30 度前後のせまい範囲におさまリ、高温ストレスの顕著な影響が生じなかったことが考えられた。開花時間中の最高群落温度と登熟歩合の関係と比較しても、有意な相関はみられなかった (図 6)。

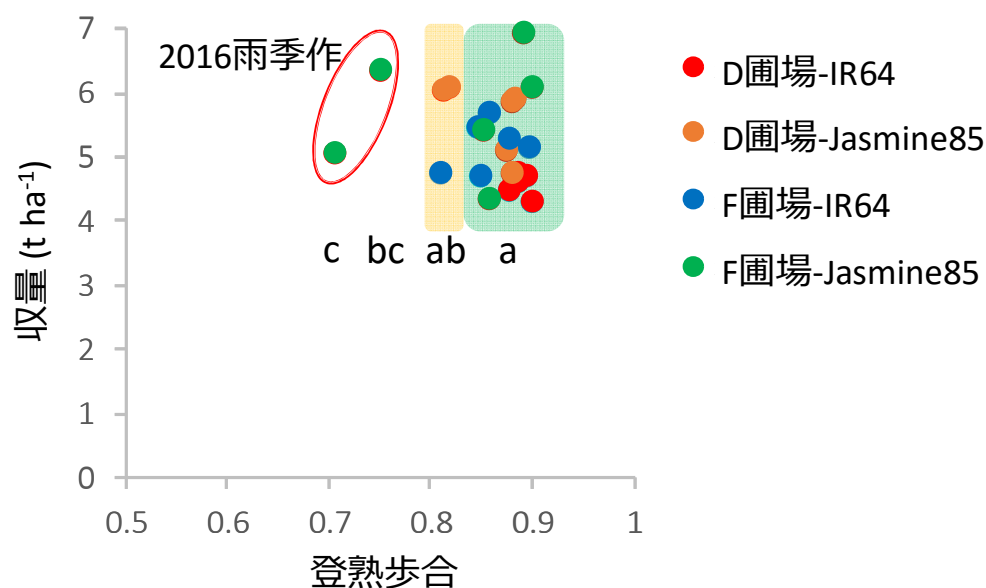


図 5. 登熟歩合と収量との関係。

図中の同一アルファベットで囲われたデータ群は登熟歩合に 5%水準で有意差なし (Tukey HSD)。

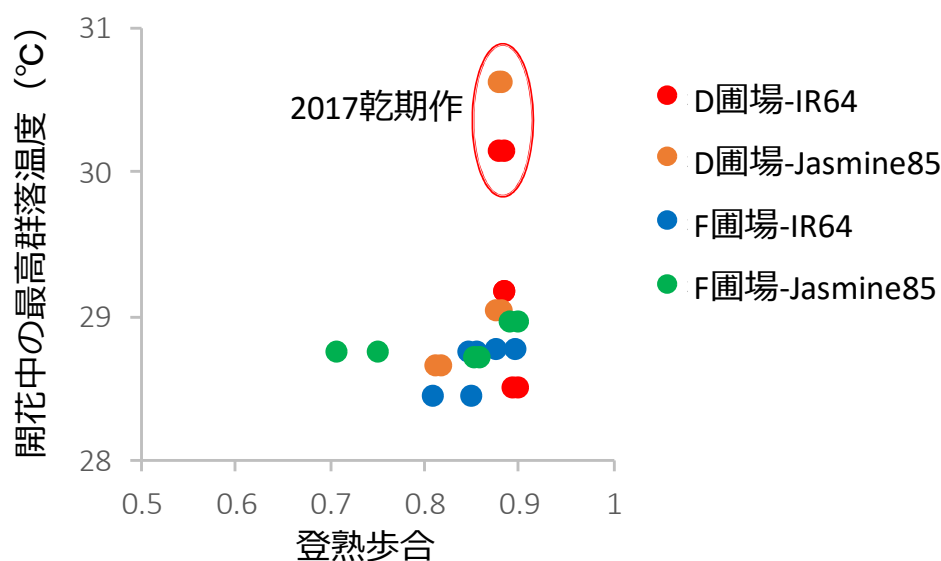


図 6. 登熟歩合と開花中の最高群落温度との関係。

5. 本研究により得られた成果

生産環境の不安定さから気候変動に脆弱な地域として位置づけられる西アフリカにおいて、MINCERによる連続測定により、水環境、施肥管理、および品種の違いが群落の微気象環境とイネの高温ストレス及び生育収量に及ぼす影響を捉えた希少な研究成果があげられた。特に、大気温が高い乾期において、開花時刻の早期化と活発な蒸発散にともなう群落温度の低下により高温ストレスの影響が抑制されていること、出穂前の軽微な水ストレスは午後から夜間にかけての群落温度上昇に大きな影響を与えること、および地域で広く栽培される品種の高温ストレス感受性が評価されたことは、いずれも気候変動にともなう地域のコメ生産への影響を予測する上で極めて重要な知見といえる。加えて、本研究を通して、MINCERによる群落温度計測、デジカメ撮影による開花期診断、コメの外観形質評価などの操作・観測技術がカウンターパート機関（SARI）に移転され、コメ需要が高まる西アフリカにおいても、日本が先導するイネの高温ストレスに関するモニタリングネットワークを拡大した意義は大きいと考えられる。

6. 引用文献

- 1) 辻本泰弘、2015年. アフリカのコメ増産に貢献するための肥培管理. JATAFFジャーナル2(8), 42.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表

なし

(2) 口頭発表

Tsujimoto, Y., Dogbe, W., 2015. Geographical dynamics of rice yield and field environment in a floodplain ecosystem of Northern Ghana. 国際シンポジウム「MARCO サテライトワークショップ2015－気候を横断する耕地微気象観測網によるイネ高温障害リスク評価の革新－」（2015年11月つくば市開催）

Tsujimoto, Y., Dogbe, W., 2018. Effect of water stresses and silica fertilization on heat stress and production of rice in West Africa. 国際シンポジウム「気候変動下のイネの高温障害にたちむかう国際観測ネットワークMINCERnet」（2018年1月つくば市開催）

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

なし