

節水栽培条件下におけるイネの 生産性変動要因の解析

名古屋大学大学院生命農学研究科
生命技術科学専攻
生命技術国際協力学講座
協力ネットワーク開発分野

掛橋 孝洋
2022 年 3 月

目次

| | |
|--|--------|
| 要旨..... | - 1 - |
| 第 1 章 緒論..... | - 5 - |
| 緒論..... | - 6 - |
| 第 2 章 気象条件が節水栽培に対するイネの生育・収量反応に及ぼす影響..... | - 9 - |
| 緒言..... | - 10 - |
| 材料および方法..... | - 10 - |
| 結果..... | - 12 - |
| 考察および結論..... | - 15 - |
| 図表..... | - 19 - |
| 第 3 章 土壌条件が節水栽培に対するイネの生育・収量反応に及ぼす影響..... | - 29 - |
| 緒言..... | - 30 - |
| 第 1 節 異なる土壌における AWD がイネの生育および収量に及ぼす影響..... | - 32 - |
| 緒論..... | - 32 - |
| 材料および方法..... | - 32 - |
| 結果..... | - 36 - |
| 考察および結論..... | - 40 - |
| 図表..... | - 43 - |
| 第 2 節 酸性度の異なる土壌における節水栽培がイネの養水分吸収および収量に及ぼす影響..... | - 58 - |
| 緒言..... | - 58 - |
| 材料と方法..... | - 58 - |
| 結果..... | - 61 - |
| 考察および結論..... | - 63 - |
| 図表..... | - 66 - |
| 第 4 章 節水栽培条件下におけるイネの生育収量反応の品種間差異..... | - 73 - |
| 緒言..... | - 74 - |
| 第 1 節 陸稲品種と水稻品種の節水栽培条件に対する生育および収量反応の差異..... | - 75 - |
| 緒言..... | - 75 - |

| | |
|---|---------|
| 材料および方法 | - 75 - |
| 結果 | - 77 - |
| 考察および結論 | - 79 - |
| 図表 | - 81 - |
| 第 2 節 陸稲品種の節水栽培条件に対する適応性に関与する生理形質 | - 89 - |
| 緒言 | - 89 - |
| 材料および方法 | - 89 - |
| 結果 | - 92 - |
| 考察および結論 | - 95 - |
| 図表 | - 97 - |
| 第 5 章 節水栽培技術と他の栽培管理技術との組み合わせがイネの生産性に及ぼす影 響 | - 105 - |
| 緒言 | - 106 - |
| 材料および方法 | - 106 - |
| 結果 | - 109 - |
| 考察および結論 | - 113 - |
| 図表 | - 117 - |
| 第 6 章 総合考察 | - 129 - |
| 謝辞 | - 133 - |
| 引用文献 | - 135 - |

要旨

東アフリカに位置するケニアでは、近年、食習慣の変化や都市人口の増加により、コメの需要が急激に増加している。イネの生産性向上は、同国の食糧安全保障のための喫緊の課題である。ケニアの首都ナイロビの北東約 100km に位置し、標高約 1,200m のケニア山南麓に約 9,000ha の灌漑田を有するムエア灌漑地区は、同国の約 80% のコメ生産を担う重要な稲作地域である。この地域で栽培されている主力水稻品種である Basmati 370 は、香りと食味の良さから特に都市部の消費者に好まれている。増加したコメ需要を満たすためには、同灌漑地区におけるイネの栽培面積拡大および生産性向上の両面からのアプローチが必要である。しかし、貯水施設が十分に発達していないムエアにおいては、灌漑水の不足が頻繁に起こるため、コメの増産には限りある灌漑水の利用効率を高める節水稻作技術の確立が重要課題となっている。

灌漑田における代表的な節水栽培技術としては、Alternate wetting and drying (AWD) が挙げられる。AWD は、土壌が軽度に乾燥するまで灌漑水の供給を停止した後、浅い水深になるまで再灌水することを繰り返す灌漑方法であり、イネの収量を犠牲にすることなく水田の水消費量を削減する栽培技術として開発されたものである。このような節水栽培技術に関連する栽培試験は、これまでに世界各地で行われてきたが、イネの生育・収量反応に関する結果は必ずしも一致していない。この原因として、節水栽培条件下でのイネの収量反応が、土壌の乾燥程度だけではなく、土壌の性質、気象条件、イネ品種、組み合わせられる栽培技術などに影響を受けて変化するという仮説が考えられる。しかし、節水栽培条件下におけるイネの収量変動要因については、十分な研究が行われておらず、不明な点が多い。

ムエア灌漑地区に分布している土壌は主にバーティソル (黒綿土)、ニティソル (茶褐色土) およびフェラルソル (赤土) である。黒綿土は、粘土を多く含むため透水性が非常に低く、乾燥すると垂直方向に大きなひび割れが発生する。茶褐色土も粘土を多く含むが、団粒が発達しているため比較的水はけが良いという特徴を持っている。赤土は、鉄または

アルミニウムを多く含む風化土壌で、肥沃度が低い酸性の土壌である。また、ムエアは低緯度で標高が高いため、日射量が多いものの栽培期間中に気温が 18℃を下回ることがある。このような特徴をもつムエアの栽培環境下で有効な節水栽培技術を確立するためには、実際の栽培環境下での栽培試験を通して節水栽培条件に対するイネの生育・収量反応を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、ムエアの主力水稻品種である **Basmati 370** に加え、土壌水分変動に対する適応性が大きく異なる水稻および陸稲品種を供試し、現地の実際の栽培環境下での栽培試験およびポットや栽培ベッドを用いた制御環境下での実験を行い、節水栽培条件に対するイネの生育・収量反応が異なる原因を分析した。

第 2 章では、ムエアで 4 作期に亘り AWD がイネの生育と収量に及ぼす影響を調査し、これらの作期間で AWD がイネの収量に与える影響が異なる理由について解析した。その結果、AWD はムエアの主力水稻品種 **Basmati 370** の乾物生産を低下させるが、低温による登熟不良を緩和するため、低温年と温暖年で AWD に対する収量反応が異なることが明らかになった。

第 3 章では、物理的・化学的性質の異なるケニアの土壌を用いた栽培試験を実施し、節水栽培条件下におけるイネの生育・収量反応が土壌によって異なる原因を分析した。その結果、イネ収量に及ぼす AWD の影響は土壌の性質によって異なり、茶褐色土では影響が小さく、赤土では向上する場合と低下する場合があり、黒綿土では一様に低下することが明らかになった。赤土と黒綿土の AWD による収量低下要因は異なっており、赤土では窒素吸収量の低下に伴う籾数の減少が、黒綿土では水ストレスによる養水分吸収能力や乾物生産能力の低下が原因であると考えられた。また、赤土の窒素吸収量の低下には土壌の強酸性が、黒綿土の水ストレスには土壌のひび割れや塩濃度の高さが関係しているものと考えられた。赤土では、湛水により **Basmati 370** および **NERICA 1** に赤枯れが発生したが、その症状は AWD により緩和された。さらに、節水栽培条件下における土壌 pH の変化とイネ

の生育・収量反応との関係を明確にするため、硫酸アルミニウムを添加することにより強酸性化させた土壌を用いてポット試験を行った。その結果、強酸性土壌では、イネに対する水ストレスがほとんどない飽水条件下であっても、窒素吸収が常時湛水条件下と比べて抑制され、収量が低下することが明らかになった。

第 4 章では、節水栽培条件への適応性に関わるイネの形質を明らかにするため、**Basmati 370** に加えて、標準的な水稻品種として **Taichung 65 (T65)** を、低土壌水分条件に対する適応性に優れる陸稲品種として **IRAT109** と **NERICA 1** を供試し、AWD に対する生育反応や収量反応の違いについて調査した。その結果、陸稲品種は、AWD 条件への適応性が水稻品種よりも高く、その適応性には生育前半に光合成同化産物を根に優先的に分配する能力が関係していると考えられた。さらに、節水栽培条件に対する適応性に重要な役割を果たす根への乾物分配能力と、根の生理活性および水通導性との関係に着目して実験を行った。その結果、AWD 条件下における根への乾物分配能力に優れる **IRAT109** は、根域を拡大するとともに根の生理活性を高めることで、吸水能力を高く維持し、再灌水直後の葉の蒸散能力を高めていることが示唆された。

第 5 章では、節水栽培技術とほかの栽培管理技術との組み合わせがイネの生育および収量に及ぼす影響を明らかにするため、節水栽培技術、有機肥料の添加、広い移植間隔、1 株 1 本植えおよび播種後 8~12 日の乳苗の移植を組み合わせで圃場試験を行った。これら 5 種類の栽培管理技術は、ムエアを含む世界中の多くの地域で普及が試みられている **System of Rice Intensification (SRI)** を構成するものである。その結果、AWD 条件下では、**Basmati 370** の穂数が減少するため、広い移植間隔を組み合わせると収量低下に繋がることが明らかになった。

以上の結果に基づき、第 6 章では、ムエアにおける節水栽培技術の確立に向けた方向性について検討した。茶褐色土では、収量を犠牲にすることなく節水稻作が可能であることが明らかになった。一方、黒綿土では、水ストレスが生じない土壌水ポテンシャルであっ

ても、土壌のひび割れが発生しイネの生育を阻害することが明らかとなった。このため、黒綿土では、地下水位や土壌水ポテンシャルのみを指標とするのではなく、土壌のひび割れを目視により確認し、再灌水の時期を決定する必要がある。また、強酸性の赤土では、水ストレスがない飽水条件下であっても、窒素吸収が常時湛水条件下と比べて抑制され、収量低下を引き起こすため、節水栽培には適していないものと考えられた。ただし、熱帯高地にあるムエア灌漑地区においては、節水効果だけではなく、低温による登熟歩合低下を軽減する効果および強酸性土壌で問題となる赤枯れ症状の改善が、AWDのような節水栽培技術を導入する目的となり得る。

ムエアの主力水稻品種である **Basmati 370** の収量は、茶褐色土を除き、節水栽培により低下した。したがって、この品種は必ずしも節水栽培に適していないと考えられた。ムエアにおいて、イネの生産性を犠牲にすることなく節水栽培を導入するためには、**Basmati 370** の節水栽培条件適応性を品種改良により改善する必要がある。また、同品種の赤枯れ抵抗性の強化も重要な課題であると考えられる。現地での圃場試験の結果から、広い移植間隔を **Basmati 370** の節水栽培と組み合わせると収量低下に繋がることが示された。しかし、節水栽培条件に対する適応性が高い品種を用いたり、異なる気象条件や土壌で栽培したりした場合には、組み合わせの効果も変化する可能性がある。したがって、節水栽培技術とほかの栽培技術との組み合わせがイネの生産性に及ぼす影響は、対象とする栽培条件下でそれぞれ検証する必要がある。

以上より、栽培するイネ品種の節水栽培への適応性を理解した上で、土壌の性質や気象条件に合わせて土壌の乾燥程度や組み合わせる栽培管理技術を調節することにより、収量の低下を最小限に抑えた上で水田の水消費量を削減し、ムエアにおけるイネの栽培面積拡大に貢献することが可能であると考えられた。

第 1 章 緒論

緒論

コメは世界人口の半分以上にとっての主食であり、その消費量は人口増加に加えてアメリカや南米地域における食生活の変化に伴い増加している (Muthayya ら 2014). 世界で生産されるコメの 75%は灌漑水田で栽培され、世界の灌漑用水の約 34~43%を使用していると推定されている (Maclean ら 2013). しかし、農業部門で利用可能な水資源量は、非農業部門における水需要の急速な増加と世界的な気候変動に伴い減少しており、今後、農業生産への影響は深刻さを増していくと考えられている (Rosegrant ら 2010). イネは乾燥ストレスの影響を受けやすく (Bouman と Tuong 2001, Tuong と Bouman 2003), その生育にはトウモロコシやコムギの 2~3 倍の水が必要とされる (Swamy と Kumar 2011). このため、水資源の不足は、稲作の大きな制限要因となると考えられている (Bouman ら 2007). 持続的なコメ生産システムを実現するためには、節水型の栽培方法の開発と普及が重要である.

東アフリカに位置するケニアでは、近年、食習慣の変化や都市人口の増加により、コメの需要が急激に増加している (Mati ら 2011). 2017 年には、ケニアでは 634,852 t の米を輸入し、そのために 2 億 6400 万米ドルの出費を強いられるなど (FAO 2019), コメの増産は、同国の食糧安全保障にとって喫緊の課題である. ケニアでは、約 80%のコメが灌漑田で生産されている (MoA 2008, Ouma-Onyango 2014). ケニアの首都ナイロビの北東約 100km に位置し、標高約 1,200m のケニア山南麓に約 9,000ha の灌漑田を有するムエア灌漑地区は、同国におけるコメ生産量の約 80%を占める重要な稲作地域である. この地域で栽培されている主力水稻品種である Basmati 370 は、香りと食味の良さから特に都市部の消費者に好まれている (Kihoro ら 2013). 増加を続けるケニアのコメ需要を満たすためには、ムエア灌漑地区におけるイネの栽培面積拡大および生産性向上の両面からのアプローチが必要である. しかし、貯水施設が十分に発達していないムエアでは灌漑水の不足が頻繁に起こるため、コメの増産には限りある灌漑水の利用効率を高める必要があり、節水稻作技術の確立が重要課題となっている.

節水稻作技術の開発に関する研究は、これまでアジアを中心に進められてきた。代表的なものとして Alternate wetting and drying (AWD) や Aerobic rice system (エアロビック・ライス法) が挙げられる (Bouman ら 2007, Wassmann ら 2009)。AWD は、土壌が軽度に乾燥するまで灌漑水の供給を停止した後、浅い水深になるまで再灌水することを繰り返す灌漑方法であり、イネの収量を犠牲にすることなく水田の水消費量を削減する栽培技術として開発されたものである。一方、エアロビック・ライス法は、一般的には移植ではなく圃場に種子を直播し、生育期間を通じて非湛水状態を維持し、水ストレスをうけない程度に適宜灌水を行う方法である (Atlin ら 2006, Kato と Katsura 2014)。

節水栽培技術に関連する検証試験は、これまでに世界各地で行われてきたが (Rejesus ら 2011, Howell ら 2015)、イネの生育と収量に及ぼす影響に関する結果は必ずしも一貫していない。節水栽培によるイネの生産性低下については多数の研究結果が報告されており (Bouman と Tounk 2001, Carrijo ら 2017, Rungrat and Poothab 2019)、灌水停止後の土壌乾燥程度が大きいと収量の低下程度が大きくなることが示されている (Bouman と Tuong 2001)。一方、節水栽培条件下で栽培したイネの収量が湛水条件下よりも高かったとする報告も多く存在する (Pan ら 2009, Sriphirom ら 2019, Ye ら 2013, Zhang ら 2008)。節水栽培条件がイネの収量に及ぼす影響は、土壌乾燥強度の指標となる土壌水ポテンシャルが同程度に設定された研究間であっても必ずしも一致しない。このような不一致は、節水栽培条件下での収量反応が、土壌の乾燥程度だけではなく、土壌の性質、気象条件、イネ品種、組み合わせられる栽培技術などに影響を受けて変化する可能性を示唆している。しかし、節水栽培条件下におけるイネの収量変動要因については、十分な研究が行われておらず、不明な点が多い。

そこで本研究では、熱帯高地に位置するムエア灌漑地区における節水稻作の安定化に向けた技術開発の方向性を検討するため、現地の実際の栽培環境下での栽培試験に加え、ポットや栽培ベッドを用いた制御環境下での実験を行い、節水栽培条件に対するイネの収量

反応が異なる原因を明らかにすることを目的とした。実験には、ムエア灌漑地区における主力水稻品種である **Basmati 370** に加え、水ストレスに対する適応性が大きく異なる水稻および陸稲品種を用いた。

まず第2章では、ムエア灌漑地区の水田で4年間に亘り節水稻作の検証試験を行い、作期間で収量反応が異なる原因を分析した。次に第3章では、物理性および化学性が異なる土壌を用いて、節水栽培条件下におけるイネの生育・収量反応に及ぼす土壌の性質の影響を調査した。第4章では、ポット試験により、節水栽培条件下におけるイネの生育反応の品種間差異を生理学的に評価した。第5章では、節水栽培技術とほかの栽培管理技術との組み合わせによるイネの生産性の違いを検証した。第6章の総合考察では、気象条件、土壌環境、イネ品種および栽培技術の組み合わせの観点から、ムエア灌漑地区における節水栽培技術の確立に向けた方向性について検討した。

第 2 章 気象条件が節水栽培に対する イネの生育・収量反応に及ぼ す影響

緒言

イネの生育に影響を及ぼす気象条件は、栽培地点固有のものであり、緯度、経度、標高、地形などによって大きく影響を受ける。また、低緯度地域では、イネを栽培できる期間が長いため、気象条件の年次変動だけではなく、作付け時期による違いも考慮する必要がある (Samejima ら 2020)。ムエア灌漑地区のほとんどの稲作農家は 7 月から 8 月に播種を行い 11 月から 12 月に収穫する。また、収穫後の刈り株から発生するひこばえを栽培して 2 月頃に収穫する再生二期作を行っている (Kihoro ら 2013, Abdullahi ら 2003, Samejima ら 2020)。しかし、ムエアでは灌漑用水が不足するため、主作期の播種が 9 月から 11 月頃に遅れる農家もある (Kihoro ら 2013)。ムエアでは、作付け時期の遅れにより障害型冷害のリスクが増大し、耐冷性の弱い Basmati 370 の登熟歩合が低下することが報告されている (Njinju ら 2018, Samejima ら 2020)。そこで本章では、低温による登熟歩合の低下が問題となる熱帯高地に位置するムエア灌漑地区において、4 年間に亘り AWD がイネの生育および収量に及ぼす影響を調査し、AWD に対する Basmati 370 の生育・収量反応が作期によって異なる原因を解析した。

材料および方法

本実験は、2014 年から 2017 年の 4 年間、ケニア農畜産業研究機構 (KALRO)、ムエア支所のキロゴ圃場 (00°40' S, 37°18' E, 標高 1,168m) で実施した。同圃場の土壌は FAO-Unesco の分類法において、ニティソルに分類される。栽培開始前の土壌サンプリングを行い、pH (H₂O)、EC (電気伝導率; Electric conductivity)、交換性カリウム (K)、交換性ナトリウム (Na)、交換性マグネシウム (Mg)、交換性カルシウム (Ca)、鉄 (Fe)、亜鉛 (Zn)、マンガン (Mn)、リン酸イオン (P₂O₅) の土壌濃度と総窒素量 (Total N) 及び総炭素量 (Total C) を測定した (第 4-表)。K, Na, Mg, Ca は 1M の酢酸アンモニウムで抽出し、Fe, Zn, Mn, は 0.1 N の塩酸

で抽出した後、ICP 発光分析装置 (ICPE-9000, 島津製作所製) で抽出液中の濃度を決定した。P は Bray-II 法で測定した。Total C と Total N は炭素・窒素同時定量装置 (CN コーダ MT-700Mark2, ヤナコテクニカルサイエンス株式会社製) で測定した (第 2-1 表)。

各年の栽培期間における気象データ (気温, 降雨量, 日射量) は, 圃場内に設置した気象観測システム (Weather Bucket, アグリウェザー社製) のデータを利用した。処理区は, 湛水区 (CF 区) と間断灌漑区 (AWD 区) の 2 処理区を設け, 乱塊法, 3 反復とした。各区のサイズは 4 m × 7 m とし, 各区は, 灌漑水の移動を防ぐために畦波 (岩谷産業株式会社, 厚さ 0.5mm, 高さ 45cm) を使用した。AWD 区では, 移植後は湛水状態を維持し, 基肥を施肥後 (移植後 7~10 日) に, 水処理を開始した。AWD 区では, 地表面下 20 cm 以下に達した時点で, 湛水状態まで灌漑をおこなうことを登熟後期まで繰り返し栽培した。CF 区では, 登熟後期まで湛水状態を維持した。両処理区とも, 収穫の約 10 日前に, 各区に溜まっていた灌漑水を排水した。

地下水位は, 土壌に水が通過できる小孔を開けた塩化ビニル製の円筒を挿入し, 円筒内部における地表面からの水深によって決定した。また, 地下 20 cm の土壌水ポテンシャル (DIK-8333 pF メーター, 大起理化産業) を測定した。移植後から出穂期まで, 毎週, 土壌表面から約 5 cm の深さで, 土壌の電気伝導度および土壌温度 (FieldScout Direct Soil EC Meter 2265FSTP; Spectrum Technologies, Inc., Aurora, IL, USA), 土壌 pH (FieldScout SoilStik pH Meter 2105; Spectrum Technologies, Inc.), 土壌酸化還元電位 (ORP Meter 2010; Spectrum Technologies, Inc.) を測定した。

実験には, 実験圃場のあるムエア地域において, 主力品種である Basamati 370 を供試した。ムエア地域では, 一般的に農家は灌漑水の割り当てに応じて, 7 月より播種を開始する (Abdullahi ら, 2003; Samejima ら, 2020)。播種は, 7 月から 8 月に行う農家が最も多いが, その年の降雨量などにより灌漑水の割り当て状況は変動し, 播種時期が 1~2 カ月遅延する

ことも報告されている (Kihoro ら, 2013). このような背景を踏まえて, 本実験では, 2015 年および 2017 年は早播き条件で, 2014 年と 2016 年は遅播き条件で栽培を行った. 催芽粃を 2014 年 9 月 25 日, 2015 年 8 月 26 日, 2016 年 9 月 17 日, 2017 年 7 月 9 日に播種した. ハウス内で育苗後, 約 14 日齢の苗を 1 株 1 本植えて移植した. 栽植密度は, 条間 \times 株間 (栽植密度) を 30×30 cm (25 株 m^{-2}) とした. 移植前にすべての区に牛糞堆肥を 1 ha あたり 15 t (15 t ha^{-1}) を施用した. 施肥量および施肥時期は, 農家慣行法に従い実施した. 基肥として移植後 1 週間後に化成肥料を用い N, P, K をそれぞれ 25 kg ha^{-1} , 追肥として播種後約 21 日および 54 日頃に, それぞれ硫安を用い, 25 kg ha^{-1} 施用した.

各区とも無作為に選抜した 5 株の茎数および草丈を分けつ期から出穂期にかけて調査した. また, 分けつ期および出穂期において, 最上位展開葉または止葉の葉緑素含有量 (SPAD 値) を葉緑素計 (SPAD-502, Minolta 社製) で測定した. 止葉葉鞘から穂が出現した時を出穂とし, 目視により各区の半分以上の株で出穂した日を出穂日として記録した.

2014 年は, それぞれ 1.44 m² のサンプリング区を各 3 区設け, 地上部を地際より刈り取った. その他の年は, 1 m² のサンプリング区を各 1 区設け, 地上部を地際より刈り取った. 刈り取った地上部の穂数を測定した後, 粃は手作業で穂からはずし, 水選により登熟粃とその他の粃 (未登熟粃 + 不稔粃) に分け, 登熟歩合を調査した. 登熟粃の水分含量を測定し (Riceter f512; KETT Electric Laboratory, Tokyo, Japan), 千粒重および収量は, 水分含量を 14% に換算した値で表示した. 粃を外した地上部は, $80^{\circ}C$ の乾燥機で 3 日間以上乾燥させた後, 乾物重を測定した. 収穫指数 (HI) は, 粃重を全地上部乾物重で割って算出した.

結果

気象条件および土壌水分環境

各年の栽培期間中の平均気温は、2014 年は 21.8℃、2015 年は 21.9℃、2016 年は 21.5℃、2017 年は 22.1℃であり、同程度の値を示した (第 2-1 図)。また、2014 年、2015 年、2016 年および 2017 年の栽培期間中の最高平均気温は、それぞれ 28.5℃、27.9℃、28.3℃、29.7℃であり、2017 年を除く、3 か年の最高平均気温の差は小さかった。栽培期間中の最低平均気温は、2015 年 (17.1℃) および 2017 年 (16.8℃) において、2014 年 (15.7℃) および 2016 年 (16.0℃) と比較してやや高かった。2014 年、2015 年、2016 年および 2017 年の栽培期間中の降雨量は、それぞれ 201 mm、447 mm、193 mm、430mm であり、2015 年および 2017 年の降雨量は、2014 年および 2016 年より多かった。2017 年を除く 3 年の栽培期間中の日射量は、11.7~20.6 MJ m⁻² d⁻¹ の範囲にあった。移植から出穂期までの平均日射量は、2014 年が、2015 年と 2016 年と比較して、6.2%高かった (第 2-2 表)。各年の生育期間中の AWD 区における水ポテンシャルは、-2.5 kPa 以上で推移した (第 2-2 図)。生育期間中の地下水位が 15 cm 以下に達した回数は、2014 年、2016 年および 2017 年では 7~8 回だったのに対し、2015 年は 4 回と、その他の年より少なかった。生育期間中の土壌温度は、どの年も、CF 区と AWD 区の違いは見られなかった (第 2-3 表)。生育期間中の AWD 区における土壌 EC は、CF 区よりも低かった (2017 年を除く)。生育期間中の AWD 区における土壌 pH は、CF 区よりもやや低い値を示した。生育期間中の ORP は、CF 区が AWD 区より低い値を示した。

イネの生育、収量および収量構成要素

各年の出穂期における草丈、茎数および SPAD 値は、2017 年の SPAD 値を除き、CF 区と AWD 区の違いに有意な差は認められなかった (第 2-4 表)。各年の出穂期は、2014 年の AWD 区で除き、移植後 83~86 日の範囲にあり、明確な水処理の影響は認められなかった。分散分析の結果、収量および収量関連形質において、栽培年次の影響が認められた (第 2-5 表)。

また、水処理の影響は、1 穂粒数、単位面積当たりの粒数、登熟歩合、地上部乾物重および HI において認められた。栽培年次×水処理の交互作用は単位面積当たりの粒数、登熟歩合、収量および HI において認められた。栽培年ごとに CF 区と AWD 区を比較すると、1 穂粒数、単位面積当たりの粒数、千粒重では、有意な差は認められなかった(2014 年の 1 穂粒数を除く)。

単位面積当たりの粒数は、2014 年および 2015 年には CF 区が AWD 区よりも有意に高かったが、2016 年と 2017 年には両者の間に有意な差は認められなかった。登熟歩合は、2014 年および 2016 年は CF 区が AWD 区よりも有意に低かったが、2015 年と 2017 年には処理間差は認められなかった。すべての栽培年において、AWD 区の地上部乾物重は、CF 区よりも低下する傾向が見られた。収量は、2016 年は AWD 区が CF 区よりも有意に高かったが、2015 年は有意に低かった。また、2014 年および 2017 年の収量は、CF 区と AWD 区との間に有意差は認められなかった。HI は登熟歩合と同様の傾向を示した。

収量決定要因に関する解析

2014 年および 2016 年の収量は、収量関連形質のうち登熟歩合と最も高い正の相関が認められた(第 2-6 表)。また、2016 年の収量は、HI とも強い正の相関関係が認められた。一方、2015 年および 2017 年の収量は、単位面積当たりの粒数および地上部乾物重とそれぞれ最も高い正の相関関係が認められた。加えて、2015 年の収量は、穂数および 1 穂粒数とも有意な正の相関関係が認められた。いずれの年も、収量と千粒重との間には、有意な相関関係は認められなかった。

第 2-7 表は、登熟歩合に影響するとされる出穂前 14 日間および出穂後 14 日間の平均、最高、最低気温を示した。2017 年の出穂前後 14 日間の気温は、ほかの栽培年よりも高い傾向にあった。一方、2014 年および 2016 年における出穂前後 14 日間の平均気温および最高

気温は、ほかの年と変わらなかったものの、同期間の最低気温は、2015年および2017年と比較して低かった。CF区およびAWD区の両区において、登熟歩合は、出穂前14日間の平均最低気温と有意な正の相関関係を示した(第2-3図)。さらに、CF区の登熟歩合は、出穂後14日間の平均最低気温と有意な相関が認められたが、AWD区では認められなかった(図3f)。しかし、登熟歩合と出穂前後14日間の日平均気温および最高気温との間には、有意な相関関係は認められなかった。

考察および結論

本実験では、AWDにより、地上部乾物重の低下をもたらすことが明らかになった。本実験で供試したBasmati 370は水稻品種であり、一般的な水稻品種と同様に、栄養生殖期間中の生育においては節水栽培条件であるAWD区よりも湛水条件のCF区に適応しており、CF区において地上部生育が優れたものと考えられる。しかし、水管理に対する収量反応は、栽培年次によって異なっていた。2015年の収量は、AWDにより低下したが、2016年には増加した。また、2014年および2017年には、AWDが収量にもたらす影響は認められなかった。以上のように、ムエア地域において、水稻品種を用いてAWDを行った場合、乾物生産量では一貫して負の効果が見られたにもかかわらず、収量への影響は一貫していなかった。

一般的に、非ストレス条件下では、イネの収量は、主にソースサイズとシンクサイズによって決定される(Yoshida 1981)。本実験では、2015年および2017年のみ、ソースサイズとシンクサイズによって穀物収量が決定されていた。一方、2014年と2016年の収量は、主に登熟歩合によって決定されていた。つまり、2014年と2016年の収量は、ソースサイズやシンクサイズよりも栽培環境の影響を受けていたことが示唆された。

低温など気象不良条件下では、転流の指標である HI や登熟歩合は、収量と強い正の相関関係が認められることが知られている (楠谷ら 1985). 本実験では、2014 年と 2016 年の幼穂形成期と登熟期の低温により転流が阻害され、登熟歩合が低下したことが示唆された. Njinju ら (2018) も、ムエアの低温条件下で転流が阻害され、Basmati 370 の登熟歩合が低下したことを報告している. 本実験では、登熟歩合の低下は、出穂前 14 日間の平均気温ではなく、同期間の平均最低気温によってもたらされていたことが明らかとなった. Farrell ら (2006) は、たとえ平均温度が高く推移していても、夜間などに気温が急激に低下した場合には、不稔を引き起こす可能性あることを報告している. 2014 年と 2016 年の最低気温は、非常に低く (14.2~15.2 °C), 出穂前 14 日間の最高温度と最低温度の差は大きかった (12.2 °C~15.1 °C). したがって、登熟歩合の低下は、最低気温が低かったことにより、不稔の発生したことに起因したと考えられる. しかしながら、CF 区の登熟歩合は、出穂後 14 日間の平均最低気温との間に正の有意な相関関係が認められたことから、登熟過程においても低温の影響があったものと考えられる. これらの結果から、2014 年および 2016 年の CF 区で見られた登熟歩合の低下は、開花期の不稔と出穂後の登熟不良によるものであることが示唆された.

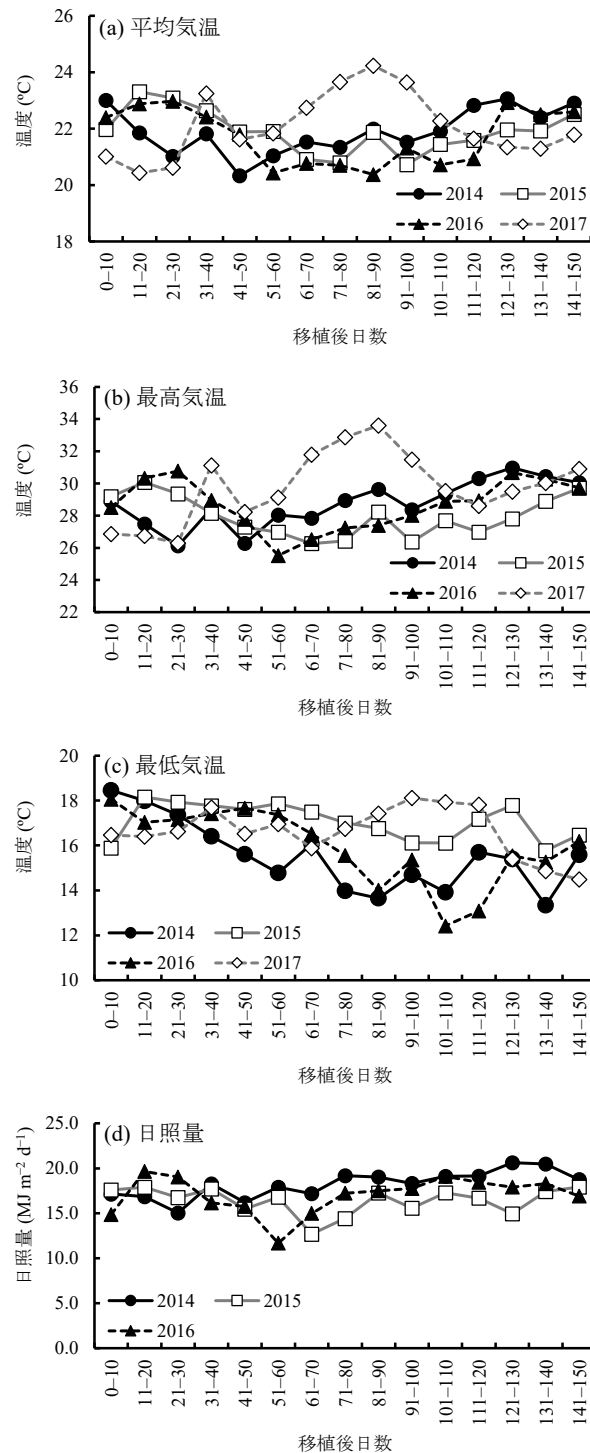
2014 年および 2016 年における低温による登熟歩合への低下は、AWD 区よりも CF 区で大きかった. つまり、繁殖期や成熟期にイネが低温にさらされた場合、AWD を行うことで、登熟歩合の低下を抑制する効果があることが示された. また、湛水を維持した CF 区は、還元化が進み、ORP が低下した. 張ら (2001) は、土壌が還元状態にあるとイネの根の活性は低下し、冷害を促進される可能性を報告している. 一方で、湿潤と乾燥を繰り返す AWD 栽培では、土壌は好氣的条件となり、イネの根は高い活性を維持することができる (Zhang ら 2008, Mishra ら 2010). このことから、AWD による登熟歩合低下の抑制効果には、AWD によって好氣的条件がもたらされた結果、根の活性を高く維持できたことによると示唆された. 2015 年および 2017 年の生殖成長期および成熟期の気温は、2014 年および 2016 年と

比較して高く、CF 区では登熟歩合の低下は見られなかった。このため、2015 年および 2017 年では、2014 年および 2016 年に見られた AWD による登熟歩合低下における抑制効果は認められなかった。Samejima ら (2020) は、本実験で供試した Basmati 370 は冷害に弱いこと、本実験を実施したムエアにおいて行われた耐冷性評価において、大きな品種間差があったこと報告している。このことから、耐冷性強度が異なる品種を用いて、AWD の効果を評価・検証する研究が必要である。

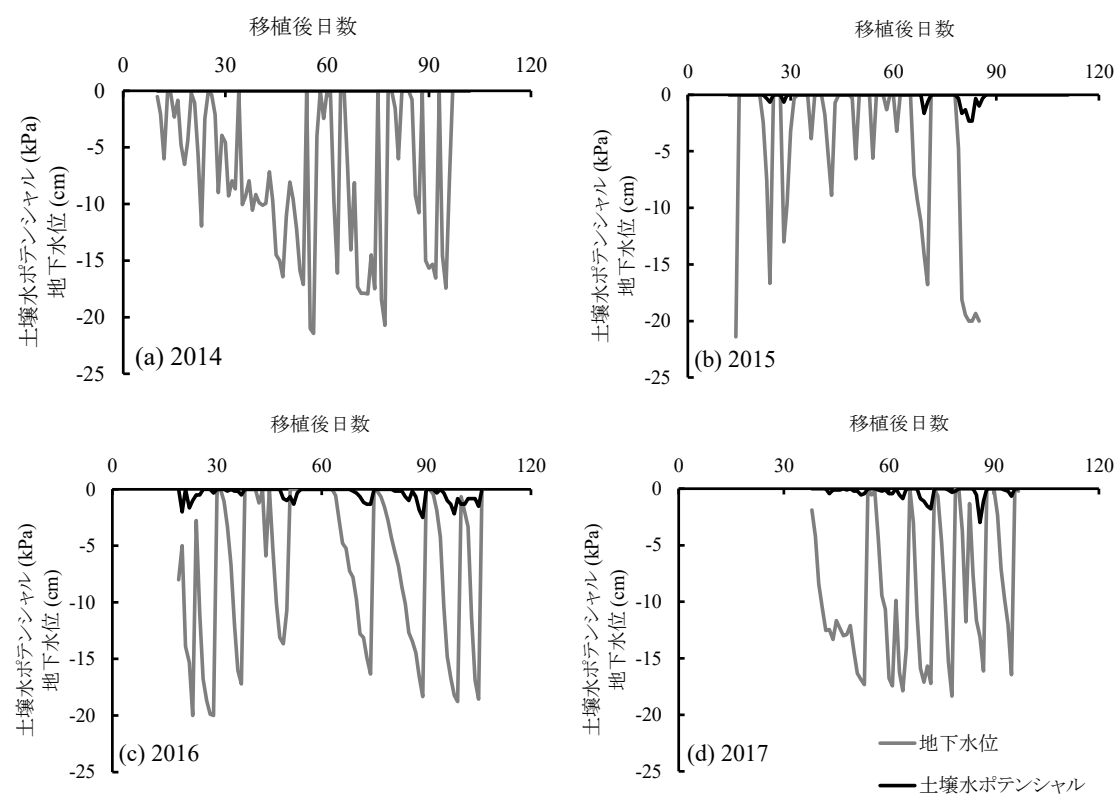
一般的に、AWD 栽培において、水ストレスによる収量低下を回避するためには、土壤水ポテンシャルは -30 kPa 以上を維持する必要があると報告されている (Lampayan ら 2015)。本実験では、AWD 区の土壤水ポテンシャルは、栽培期間を通じて -10 kPa を下回ることにはなかったことから、AWD によりイネが深刻な水ストレスを受ける土壤水分条件ではなかったと言える。加えて、2015 年の栽培期間中の総降雨量は、ほかの栽培年と比較して多かったが、本実験は灌漑設備の整った灌漑水田で実施しており、降水量の年次間差異は、イネの生育や収量に影響しない栽培条件だったと考えられる。また、日射量における年次間差異は比較的小さく、この要因が CF 区と AWD 区で見られた収量の差に影響したとは考えにくい。同様に、CF 区と AWD 区の間で見られた土壤温度、土壤 EC および pH の差異も軽微であり、これらの差異が収量に及ぼす影響は小さかったと考えられた。

本実験より、熱帯高地において、冷害に弱い水稻品種 Basmati 370 は、生殖成長期および登熟期における低温 (15°C 以下) の影響を受けると、登熟歩合が低下することが確認された。この低温による登熟歩合の低下は、AWD により軽減できることが明らかとなった。ケニアの熱帯高地では、降雨不足や灌漑水の割り当て状況によって、播種時期が遅延した場合、AWD 栽培を行うことで、Basmati 370 の生殖成長期の低温による登熟歩合低下のリスクを抑制できることが考えられる。しかし、本実験でも見られたように、熱帯高地における AWD 効果は、年次間差が大きく、効果に一貫性がない。これは、AWD 効果は気温条件に大きく左右されることを意味し、AWD 栽培を実施するあつたては、気象条件を十分に検討

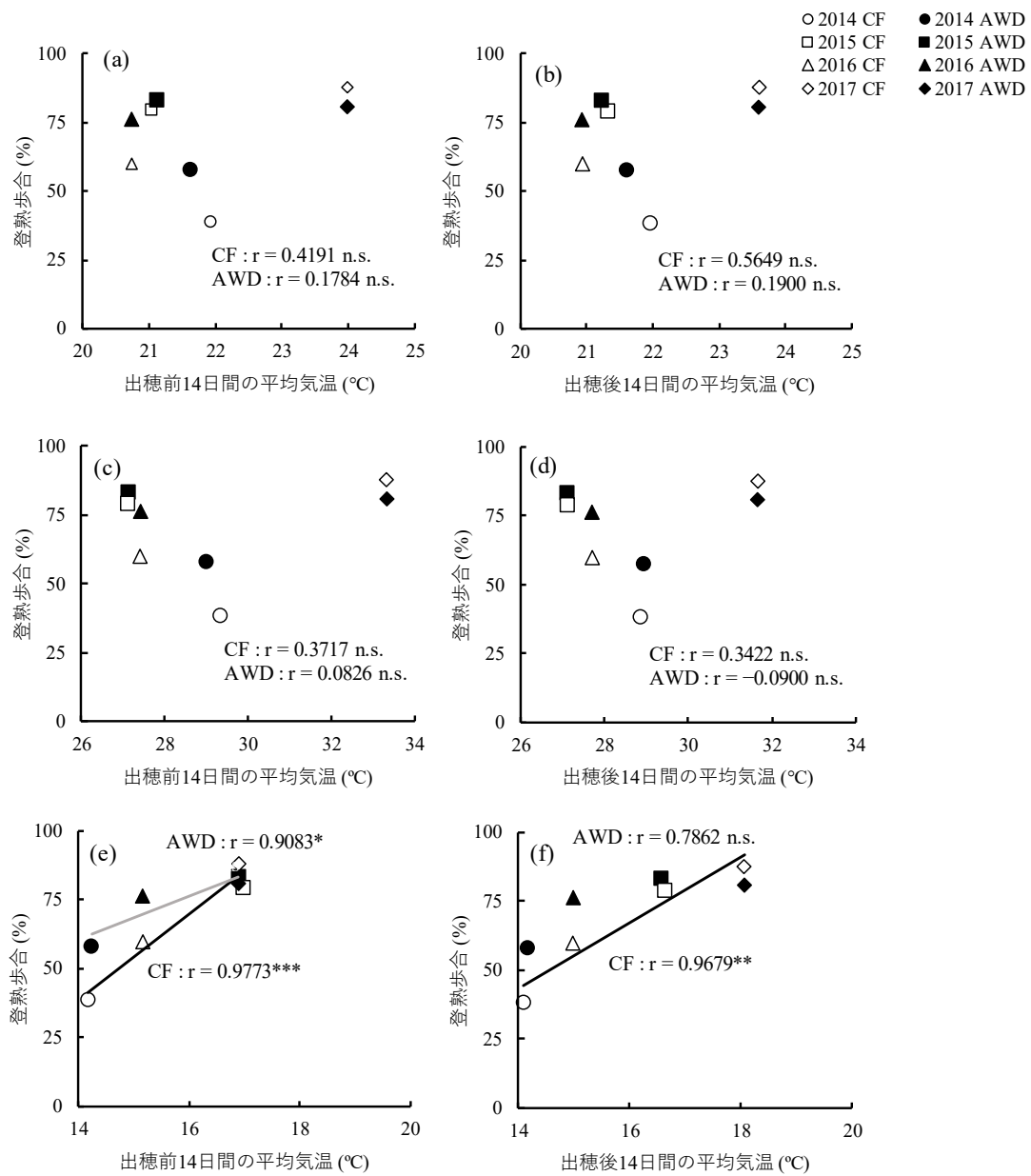
する必要がある．今後，AWD条件でのイネの生理学的反応および登塾歩合低下の抑制効果の関係についてより詳細な調査する必要がある．



第2-1図 各栽培年の生育期間中の (a) 平均気温, (b) 最高気温, (c) 最低気温および (d) 日照量の推移.



第2-2図 各栽培年の生育期間中の地下水位および土壌水ポテンシャルの推移.



第2-3図 出穂前後14日間の平均、最高および最低気温と登熟歩合との関係.

* ; 5%水準で有意であることを示す.

** ; 1%水準で有意であることを示す.

*** ; 0.1%水準で有意であることを示す.

n.s. ; 有意ではないことを示す.

第 2-1 表 実験開始前における，土壌 pH，EC および土壌養分の濃度.

| pH (H ₂ O) | EC mS cm ⁻¹ | K Cmol (+) kg ⁻¹ | Na Cmol (+) kg ⁻¹ | Mg Cmol (+) kg ⁻¹ | Ca Cmol (+) kg ⁻¹ | Fe mg kg ⁻¹ | Mn mg kg ⁻¹ | Zn mg kg ⁻¹ | P mg-P ₂ O ₅ kg ⁻¹ | Total C g kg ⁻¹ | Total N g kg ⁻¹ |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---|-------------------------------|-------------------------------|
| 5.24 | 0.48 | 0.35 | 0.20 | 2.97 | 7.06 | 188 | 43.3 | 0.19 | 753 | 33.0 | 2.55 |

K, Na, Mg, Ca はそれぞれ交換性のカリウム，ナトリウム，マグネシウム，カルシウムの濃度を示す.

P はリン酸濃度を示し，Bray-II 法により決定した.

Total C, Total N はそれぞれ土壌の総炭素含有量と総窒素含有量を示す.

第2-2表 各栽培年の生育期間中の日射量, 土壌温度, EC, pH, ORP の平均値.

| | | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
|---------------------------|-----|-------|-------|-------|--------|
| 日照量 (mJ m ⁻²) | CF | 17.5 | 16.5 | 16.5 | - |
| | AWD | 17.6 | 16.5 | 16.5 | - |
| 土壌温度 | CF | - | 22.1 | 22.2 | 24.1 |
| | AWD | - | 22.1 | 22.8 | 23.9 |
| EC (mS cm ⁻¹) | CF | 0.84 | 0.77 | 0.50 | 0.52 |
| | AWD | 0.58 | 0.70 | 0.45 | 0.52 |
| pH | CF | 5.77 | 5.45 | 5.47 | 5.48 |
| | AWD | 5.13 | 4.86 | 5.03 | 5.03 |
| ORP (mV) | CF | -30.9 | -17.6 | -47.4 | -108.1 |
| | AWD | 210.7 | 208.9 | 254.8 | 250.1 |

第 2-3 表 各栽培年の出穂期における草丈，茎数，SPAD 値.

| 栽培年 | 処理区 | 草丈 | | | 茎数 | | | SPAD | | |
|------|-----|-------|--------|----|-------|-------|-----|------|-------|---|
| | | (cm) | | | (/個体) | | | | | |
| 2014 | CF | 106.5 | ± 5.1 | ab | 20.9 | ± 3.6 | e | - | | |
| | AWD | 96.7 | ± 3.0 | b | 21.7 | ± 1.2 | de | - | | |
| 2015 | CF | 108.8 | ± 11.3 | ab | 33.0 | ± 3.0 | bcd | 39.7 | ± 1.5 | a |
| | AWD | 103.9 | ± 5.3 | ab | 30.1 | ± 2.5 | cde | 36.2 | ± 2.7 | a |
| 2016 | CF | 136.8 | ± 2.3 | a | 44.1 | ± 2.3 | ab | 40.5 | ± 2.2 | a |
| | AWD | 115.8 | ± 3.1 | ab | 36.4 | ± 5.9 | abc | 39.6 | ± 4.0 | a |
| 2017 | CF | 108.3 | ± 2.2 | ab | 47.7 | ± 2.0 | a | 38.0 | ± 2.4 | a |
| | AWD | 100.3 | ± 0.2 | ab | 46.0 | ± 0.9 | a | 27.5 | ± 1.2 | b |

図中の異なる文字は，LSD 検定で 5%水準の有意差があることを示す.

第 2-4 表 各栽培年における出穂日.

| | CF | AWD |
|------|-----------------|-----------------|
| 2014 | 2015/1/14 (85) | 2015/1/20 (91) |
| 2015 | 2015/12/9 (84) | 2015/12/8 (83) |
| 2016 | 2016/12/21 (86) | 2016/12/21 (86) |
| 2017 | 2017/10/11 (86) | 2017/10/11 (86) |

() 内の値は, 移植後日数を示す.

第2-5表 各栽培年における収量，収量構成要素，地上部乾物重および収穫指数.

| 栽培年 | 処理区 | 穂数 | 粒数 | | 登熟歩合 (%) | 千粒重 (g) | 地上部乾物重 | | 収量 (g m ⁻²) | 収穫指数 (%) |
|--------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-------------|------------|----------------------|----------|----------------------------|-------------|
| | | (/m ²) | (/穂) | (/m ²) | | | (g m ⁻²) | | | |
| 2014 | CF | 439.4 a | 148.2 a | 65029 a | 38.8 c | 19.4 d | 1790 a | 468.5 c | 0.27 c | |
| | AWD | 397.3 ab | 117.8 b | 46289 b | 58.0 b | 19.1 d | 1554 ab | 510.9 bc | 0.33 b | |
| 2015 | CF | 345.2 bc | 88.8 de | 30637 d | 79.1 a | 19.8 cd | 1446 abc | 480.4 c | 0.33 b | |
| | AWD | 278.9 c | 73.6 e | 20303 e | 83.4 a | 20.3 bc | 1034 d | 345.9 d | 0.34 b | |
| 2016 | CF | 345.9 bc | 109.2 bc | 37755 cd | 59.9 b | 21.1 ab | 1414 abc | 464.9 c | 0.33 bc | |
| | AWD | 379.6 ab | 93.9 cd | 35225 cd | 76.3 a | 21.0 ab | 1259 cd | 560.9 b | 0.45 a | |
| 2017 | CF | 368.9 ab | 101.0 bcd | 37331 cd | 87.7 a | 21.4 a | 1552 ab | 697.3 a | 0.45 a | |
| | AWD | 375.2 ab | 106.2 bcd | 39440 bc | 80.9 a | 21.3 a | 1531 ab | 677.9 a | 0.44 a | |
| 栽培年 | | ** | *** | *** | *** | *** | ** | *** | ** | |
| 処理 | | ns | ** | ** | * | ns | ** | ns | *** | |
| 栽培年×処理 | | ns | ns | ** | * | ns | ns | ** | * | |

* ; 5%水準で有意であることを示す.

** ; 1%水準で有意であることを示す.

*** : 0.1%水準で有意であることを示す

第 2-6 表 各栽培年における収量と収量関連形質の相関関係表.

| 栽培年 | 穂数 | 粒数 | | 登熟 歩合 | 千粒重 | 地上部 乾物重 | 収穫指数 |
|------|---------------------|---------|---------------------|----------|--------|----------------------|---------|
| | (/ m ²) | (/穂) | (/ m ²) | (%) | (g) | (g m ⁻²) | (%) |
| 2014 | -0.497 | -0.620 | -0.717 † | 0.802 * | -0.483 | -0.228 | 0.681 |
| 2015 | 0.760 † | 0.805 * | 0.962 ** | -0.228 | -0.427 | 0.941 ** | -0.023 |
| 2016 | -0.030 | -0.240 | -0.356 | 0.854 * | -0.603 | -0.073 | 0.846 * |
| 2017 | 0.549 | 0.049 | 0.713 † | -0.117 | -0.409 | 0.769 † | -0.303 |

†;10%水準で有意であることを示す.

*;5%水準で有意であることを示す.

**;1%水準で有意であることを示す.

***;0.1%水準で有意であることを示す.

第 2-7 表 各栽培年における出穂期前後 14 日間の平均, 最高および最低気温の平均値.

| 栽培年 | 処理区 | 出穂前 14 日間の平均 気温 | | | 出穂後 14 日間の平均 気温 | | |
|------|-----|--------------------|------|------|--------------------|------|------|
| | | 平均 | 最高 | 最低 | 平均 | 最高 | 最低 |
| 2014 | CF | 21.9 | 29.3 | 14.2 | 21.6 | 28.9 | 14.1 |
| | AWD | 21.6 | 29.0 | 14.2 | 21.6 | 29.0 | 14.1 |
| 2015 | CF | 21.1 | 27.1 | 17.0 | 21.3 | 27.1 | 16.6 |
| | AWD | 21.1 | 27.1 | 16.9 | 21.2 | 27.1 | 16.6 |
| 2016 | CF | 20.7 | 27.4 | 15.2 | 20.9 | 27.7 | 15.0 |
| | AWD | 20.7 | 27.4 | 15.2 | 20.9 | 27.7 | 15.0 |
| 2017 | CF | 24.0 | 33.3 | 16.9 | 23.6 | 31.7 | 18.1 |
| | AWD | 24.0 | 33.3 | 16.9 | 23.6 | 31.7 | 18.1 |

第 3 章 土壤条件が節水栽培に対する イネの生育・収量反応に及ぼ す影響

緒言

イネの節水栽培条件下における生育・収量反応が研究事例によって異なる主な原因のひとつとして土壌の違いが挙げられる。土壌は栽培地域によって異なり、その性質によって節水栽培条件下におけるイネの生育・収量反応は影響を受けると考えられる。土壌水分特性は土壌の種類によって異なるため、同じ含水率の土壌であっても植物が利用できる水分量は異なる。また、節水栽培のために灌水を停止した後の土壌の乾燥速度や水ポテンシャルの低下速度は土壌の透水性などに大きく左右される。これらのことから、土壌の物理性の違いが、節水栽培条件下におけるイネの生育・収量反応に影響を及ぼすことが予想される。

土壌の化学性も節水栽培条件下におけるイネの生育・収量反応に影響を及ぼすと考えられる。Carrijo ら (2017) は、土壌 pH が 7 以上のアルカリ性土壌における節水栽培は、イネの収量を低下させることを報告している。一方、pH が 5 を下回るような強酸性土壌における節水栽培がイネの生育および収量に及ぼす影響は明らかにされていない。水田においては、湛水により還元状態になるため土壌 pH は高く維持されるが、土壌が乾燥し酸化が進むと土壌 pH は低下する。土壌 pH の低下は、リン酸吸収の抑制、カルシウムやマグネシウムなどの不足、鉄イオンやアルミニウムイオンによる障害を引き起こす要因である (松中 2003)。このため、強酸性土壌では、水ストレスを受けない飽水条件下であってもイネの収量が低下する可能性がある (Mishra と Salokhe 2010)。このほかには、塩分濃度の高い土壌では、節水栽培はイネの生産性低下を加速させることが報告されている (Menete ら 2008)。

以上のように、節水栽培条件下におけるイネの生育・収量反応は、土壌の種類によって影響を受けるものと考えられる。しかしながら、節水栽培条件下におけるイネの生育・収量反応が土壌によって異なる詳しい原因については明らかにされていない。そこで本章で

は、物理的・化学的性質の異なる土壌を用いた栽培試験を実施し、節水栽培条件下におけるイネの生育・収量反応が土壌によって異なる原因を分析した。

第 1 節 異なる土壌における AWD がイネの生育および収量に及ぼす影響

緒論

ムエア灌漑地区に分布している土壌は主に黒綿土とも呼ばれるバーティソルとニティソルである。また、ムエア灌漑地区の周辺に分布するフェラールソルにおいても小規模ながら稲作が行われている。バーティソルは、粘土を多く含むため透水性が非常に低く、乾燥すると垂直方向に大きなひび割れが発生する。ニティソルも粘土を多く含むが、団粒が発達しているため比較的水はけが良いという特徴を持っている。フェラールソルは、鉄またはアルミニウムを多く含む風化土壌で、肥沃度が低い酸性の土壌である。そこで、本節ではムエア灌漑地区において、バーティソル、ニティソルおよびフェラールソルに分類される土壌を用いて節水栽培をおこない、土壌の性質の違いがイネの生育、収量および養水分吸収に及ぼす影響を調査した。

材料および方法

実験 1

1. 栽培方法の概要

実験は、2017 年 7 月～12 月にケニア農畜産業研究機構 (KALRO) ムエア支所のキロゴ圃場 (00°40' S, 37°18' E, 標高 1168m) にある土壌が異なる 2 種類の水田、すなわちニティソル (以下、茶褐色土) の水田とバーティソル (黒綿土) を客土して造成した水田を利用して行った。供試品種はムエアの主力水稻品種である Basmati 370 とした。7 月 26 日に催芽処理した Basmati 370 の種子を育苗箱 (ポット 448 育苗箱 みのる産業) に播種し、8 月 16 日に 15 cm × 30 cm の間隔で 1 株あたり 2 本の苗を移植した。肥料は移植後 3 日に N, P, K をそれぞれ

れ化成肥料 (N:P:K=17:17:17) で 25 kg ha^{-1} の割合で施肥し、移植後 21 日、45 日に N を硫酸アルミニウムで 25 kg ha^{-1} の割合で追肥した。水管理方法は、常時湛水で維持する湛水区と、移植後 27 日から灌漑水の供給を止め、 -20 cm の水位に達したら、再び浅い湛水まで灌水することを登熟期まで繰り返す AWD 区の 2 区とした。圃場の設計は土壌の種類を 1 次因子とする分割区法で 4 反復とした。

2. 測定項目および測定方法

1) 土壌の性質、土壌水分状態および灌漑水量の測定

栽培開始前の土壌の性質について、pH (H_2O)、EC (電気伝導率; Electric conductivity)、交換性カリウム (K)、交換性ナトリウム (Na)、交換性マグネシウム (Mg)、交換性カルシウム (Ca)、鉄 (Fe)、亜鉛 (Zn)、マンガン (Mn)、リン酸イオン (P_2O_5) の土壌濃度と総窒素量 (Total N) 及び総炭素量 (Total C) を測定した (第 3-1 表)。K, Na, Mg, Ca は 1 M のアンモニウムアセテイトで抽出した後、Fe, Zn, Mn, は 0.1 N の塩酸で抽出した後、ICP 発光分析装置 (ICPE-9000, 島津製作所製) で抽出液中の濃度を決定した。P は Bray-II 法で測定した。Total C と Total N は炭素・窒素同時定量装置 (CN コーダ MT-700Mark2, ヤナコテクニカルサイエンス株式会社製) で測定した。土壌の水位は土壌に水が通過できる小孔を開けたビニール製の円筒を挿入し、円筒内部における地表面からの水深によって決定した。土壌水ポテンシャルは土壌表面から 20cm の深さに土壌水ポテンシャル測定器 (DIK 8333 pF メーター 大起理化工業) を挿入することで測定した。

2) 地上部生育の測定

移植後 23 日から 1 週間に 1 回、各土壌の水管理条件において任意に選んだ 5 個体について、手作業で茎数、草丈を測定し、葉緑素計 (SPAD-502, Minolta 社製) を用いて最上位展開葉の葉緑素含量 (SPAD 値) を測定した。

3) 収量および収量構成要素の測定

出穂後 40 日以降で穂軸の先端が茶色になった時、各反復から生育が平均的な 25 株を目視で選定し、地上部を切り取り、収量および収量構成要素の測定に用いた。切り取った 25 株の穂数を数えた後、手作業で脱穀し、脱穀された粳は、水選によって登熟粳と未登熟粳に分けた。粳以外の地上部は 70 °C の乾燥機で 4 日間乾燥させ、地上部乾物重を測定した。粳は、風乾した後に総重量を測定し、登熟粳は 20 g の粳数、未登熟粳は 5 g の粳数を 3 回計測することで、登熟歩合を算出した。登熟粳については、粳数を数えた粳の水分含有率 (Riceter f5, ケット科学研究所) を測定し、水分含有率が 14 % の 1000 粒重を算出した。粳数、登熟歩合、1000 粒重の値から収量を算出した。

実験 2

1. 栽培方法の概要

実験は 2017 年 9 月～2018 年 3 月にケニア農畜産業研究機構 (KALRO) ムエア支所にある実験圃場に栽培ベッドを設置して行った。実験には、Basmati 370, Taichung 65 (T65) および NERICA 1 の 3 品種を供試した。土壌処理区を設定するため、ムエア灌漑地区内で採取したフェラールソル (以後、赤土) とバーティソル (黒綿土) を供試した。

実験圃場に縦 1.4 m, 横 2.2 m, 深さ 25 cm の区画で穴を掘り、そこにビニールシートを敷いた後、赤土または黒綿土を約 20 cm の深さで客土した。各区画は 3 分割され、品種ごとの小区画とし、2017 年 10 月 11 日に播種した 3 品種の苗を 11 月 1 日に 1 株当たり 1 本ずつ縦 20 cm × 横 20 cm の間隔で移植した。

水管理方法として、各土壌について、常時湛水で維持する湛水区と、移植後 21 日まで浅く湛水で維持した後、灌漑水の供給を止め、土壌水ポテンシャルが -20 kPa を下回ると浅く湛水になるまで再灌水することを繰り返す AWD 区の 2 区を設けた。圃場の設定は、土壌の種類 2 水準、水管理方法 2 水準、品種 3 水準を乱塊法で 4 反復とした。移植後 2 日に

N, P, K を化成肥料 (N:P:K=17:17:17) でそれぞれ 25 kg ha⁻¹ ずつ施用し, 移植後 21 日と 45 日に N を硫酸アンモニウムとして 25 kg ha⁻¹ の割合で追肥した.

2. 測定項目および測定方法

1. 土壌条件に関する測定

AWD 区について, 土壌表面から 20 cm の深さの土壌水ポテンシャルを pF メーター (DIK 8333 pF メーター 大起理化工業) を用いて測定した.

栽培開始前の土壌の性質について, 交換性カリウム (K), 交換性ナトリウム (Na), 交換性マグネシウム (Mg), 交換性カルシウム (Ca), 鉄 (Fe), 亜鉛 (Zn), マンガン (Mn), リン酸イオン (P₂O₅) の土壌濃度と総窒素量 (Total N) 及び総炭素量 (Total C) を測定した (第 3-2 表). K, Na, Mg, Ca は 1 M のアンモニウムアセテイトで抽出した後, Fe, Zn, Mn, は 0.1 N の塩酸で抽出した後, ICP 発光分析装置 (ICPE-9000, 島津製作所製) で抽出液中の濃度を決定した. P は Bray-II 法で測定した. Total C と Total N は炭素・窒素同時定量装置 (CN コーダー MT-700Mark2, ヤナコテクニカルサイエンス株式会社製) で測定した. 土壌化学性の指標として, 移植から収穫まで, 経時的に土壌の酸化還元電位 (ORP), pH, EC 値, を測定した. 土壌の ORP, pH はそれぞれ ORP メーター (Exstick-RE300, Spectrum Technologies 社製) と pH メーター (Soilstick pH Meter, Spectrum Technologies 社製) で各区画 3 か所について土壌表面から約 3 cm の深さで測定した. 土壌 EC 値は, 貫入式土壌 EC 計 (FieldScout Direct Soil EC Meter, Spectrum Technologies 社製) で約 5 cm の深さを測定した.

3. 地上部生育および収量に関する測定

AWD 区における土壌乾燥による水ストレスの影響について測定するため, 土壌が約 -20 kPa となった時のイネの葉の気孔コンダクタンスをリーフポロメーター (Leaf porometer,

Decagon Device 社製) で各区画，各品種の生育が平均的な 3 個体を選んで測定した．測定は赤土では移植後 41 日，59 日，86 日，黒綿土では移植後 43 日，56 日，86 日に行った．

出穂期と登熟期に各品種 6 個体ずつ地上部のサンプリングを行なった．出穂日は，止葉葉鞘から穂が出現した日とし，登熟期は出穂日から 40～42 日後とした．出穂期の測定では，サンプリングするイネの穂が出現している止葉について葉緑素計 (SPAD-502, Minolta 社製) で葉の葉緑素含有量 (SPAD 値) を測定した後，地上部を根元から切り取って葉と茎に分けた．葉面積計で葉面積を測定した後，80℃の乾燥機で乾燥させて地上部乾物重の測定をした．登熟期の測定では地上部を根元から切り取った後，穂と茎葉部にわけ，穂数を数えてから，脱穀した．脱穀した籾は水選により登熟籾と未登熟籾に分けられ，風乾させた後それぞれの重さと籾数を測定し，登熟歩合を算出した．登熟籾は水分含有率 (Riceter f5, ケット科学研究所) を測定し，14 %の水分含有率における 1000 粒重とした．籾数，登熟歩合，1000 粒重の値から収量を算出した．

4. 地上部の養分吸収に関する測定

登熟期にサンプリングした個体について，各品種地上部乾物重が平均的な 3 個体を選定し，粉砕機で粉砕した後，窒素とリンの濃度測定に用いた．粉砕した植物体粉末は，過酸化水素を添加した濃硫酸を添加した後，420 °Cで 30 分熱することで分解した．窒素濃度は，水酸化ナトリウムで蒸留した分解液中の窒素を硫酸で滴定することにより測定した．リン濃度は，分解液をモリブデンブルー発色させた後，710 nm の波長を分光光度計 (紫外可視分光光度計 UV-1800, 島津製作所製) で測定することで決定した．

結果

実験 1

1. 土壌水分状態および灌漑水量の推移

茶褐色土および黒綿土における水位と土壤水ポテンシャルの推移の結果を第 3-1 図に示した。両土壤において、土壤水ポテンシャルが -10 kPa を下回ることはなかった。茶褐色土は土壤水位が -20 cm に達した際の土壤水ポテンシャルは $-3\sim 0\text{ kPa}$ であった。黒綿土においては土壤水位が -20 cm に達した際の土壤水ポテンシャルは、 $-8\sim 0\text{ kPa}$ であった。イネの栽培期間中に投入した灌漑水量は、茶褐色土では湛水区で 212 m^3 、AWD 区で 97 m^3 であった。黒綿土では湛水区で 136 m^3 、AWD 区で 117 m^3 であった(第 3-2 図)。

2. 茎数, 草丈, SPAD 値の推移

茶褐色土について、茎数、草丈に水処理の有意な影響はなかった(第 3-3 図)。SPAD 値は移植後 79 日の測定において、AWD 区で有意に低下した。黒綿土について、茎数、草丈に水処理の有意な影響はなかった。SPAD 値は、移植後 58 日、移植後 100 日の測定において、AWD 区で有意に低下した。

3. 収量, 収量構成要素, 地上部乾物重

茶褐色土では収量、収量構成要素および地上部乾物重に水処理の有意な影響はなかった(第 3-3 表)。黒綿土は、AWD 区の収数および収量が湛水区より有意に小さくなった(第 3-4 表)。

実験 2

1. 土壤の水分状態および化学性の推移

第 3-4 図に各土壤の AWD 区における土壤水ポテンシャルの推移を示した。赤土は、AWD 区で 9 回の土壤乾燥と湛水の繰り返しがあり、移植後 59 日の測定において土壤水ポテンシャルが -30 kPa を下回り、その他の土壤乾燥時の土壤水ポテンシャルは -30 kPa より高かった。黒綿土は、AWD 区で 9 回の土壤乾燥と湛水の繰り返しがあり、土壤水ポテンシ

ャルは-30 kPa より高い値で推移した。黒綿土では AWD 区において、土壌乾燥により土壌表層に大きなひび割れが発生したが赤土ではみられなかった (第 3-5 図)。

赤土、黒綿土ともに AWD 区の土壌 ORP は 100 mV 以上の高い値で推移し一方で、湛水区では、日数の経過とともに両土壌の土壌 ORP が低下した (第 3-6 図)。赤土、湛水区の土壌 ORP は移植後 44 日で初めて 0 より低い値となり、移植後 86 日の測定で-172 mV に達した。黒綿土、湛水区の土壌 ORP は移植後 86 日の測定で初めて 0 より低い値となり、この時の-77 mV が最も低い値となった。

赤土について、湛水区における土壌の pH は、日数の経過とともに土壌の pH が大きく上昇し、移植後 100 日の測定では pH が 6.5 に達し、AWD 区より 1.3 高い値となった。AWD 区の土壌 pH は移植後 30 日までは 4.5~4.6 の間で推移し、移植後 44 日以降の測定からは 4.8~5.2 の間の値で推移した。黒綿土の pH は水管理方法による差はなく、5.4 から 6.5 の間で推移した。

赤土において、移植後 30 日の土壌 EC 値は湛水区では 0.18 mS cm^{-1} 、AWD 区では 0.15 mS cm^{-1} であった。湛水区の土壌 EC 値は日数の経過とともに上昇し、移植後 93 日の土壌 EC 値は湛水区で 0.32 mS cm^{-1} 、AWD 区で 0.18 mS cm^{-1} となった。黒綿土の EC 値は赤土より大きく、湛水区の土壌 EC 値は、 1.6 mS cm^{-1} ~ 2.0 mS cm^{-1} 、AWD 区の土壌 EC 値は 1.4 mS cm^{-1} ~ 2.2 mS cm^{-1} であった。移植後 58 日の測定を除いて、AWD 区の土壌 EC 値は湛水区に比べて 0.1~0.3 高い値で推移した。

2. AWD 区の土壌乾燥時における葉の気孔コンダクタンス

赤土では、移植後 41 日において、Basmati 370 の気孔コンダクタンスが AWD により低下した。赤土そのほかの測定では、すべての品種について、水管理方法による気孔コンダクタンスの有意な差はなかった (第 3-7 図)。黒綿土では、移植後 43 日において、NERICA 1 と T65 の気孔コンダクタンスは AWD 区が湛水区より小さくなった。黒綿土のその他の測

定では、すべての品種について水管理方法による気孔コンダクタンスの有意な差はなかった。

3. 出穂期の地上部生育

出穂日は AWD 区の方が湛水区より遅い傾向があったが、有意な差はなかった (第 3-5 表)。葉の SPAD 値は、赤土では Basmati 370 と T65 は AWD 区で低い値となり、黒綿土では Basmati 370 の SPAD 値は AWD 区で高い値となった。葉面積は、黒綿土の NERICA 1 と T65 で AWD 区の方が湛水区より大きかった。地上部乾物重は、赤土の Basmati 370 は AWD 区の方が湛水区より大きかった、黒綿土の NERICA 1 と T65 は、AWD 区の地上部乾物重が湛水区より小さくなった。

4. 登熟期の収量、収量構成要素および地上部乾物重

穂数は、土壌と水管理方法の交互作用があり、赤土では品種に関わらず湛水区と AWD 区に有意な差がなかったが、黒綿土ではすべての品種で AWD 区の穂数が湛水区より小さくなった (第 3-6 表)。赤土において、Basmati 370 の 1 穂粒数は AWD 区で湛水区より多くなった一方で、T65 の 1 穂粒数は AWD 区で湛水区より少なくなった (第 3-7 表)。黒綿土では、NERICA 1 と T65 の 1 穂粒数は、AWD 区で湛水区より有意に少なくなった。赤土の粒数は、T65 のみ水管理方法による有意な差があり、湛水区に比べて AWD 区で粒数が少なくなった。黒綿土では NERICA 1 と T65 の AWD 区の粒数は湛水区より少なくなった。登熟歩合には土壌、品種、および水管理方法の交互作用があった。赤土では Basmati 370 と NERICA 1 の登熟歩合は AWD 区の方が湛水区より高かったが、T65 の登熟歩合に水管理方法による有意な差はなかった。黒綿土では、T65 のみ AWD 区の登熟歩合が湛水区より小さかった。1000 粒重は、黒綿土の Basmati 370 と NERICA 1 について湛水区より AWD 区で小さくなった。収量には土壌、品種、水管理の交互作用があった。赤土では、Basmati 370 と

NERICA 1 の収量は AWD 区の方が湛水区より高かった一方で、T65 の収量は湛水区の方が AWD 区より高かった。黒綿土ではすべての品種について、AWD 区の収量は湛水区より低くなった。地上部乾物重は、赤土ではすべての品種について水管理方法による差はなかったが、黒綿土では品種に関わらず AWD 区の方が湛水区より低くなった。

5. 登熟期の窒素とリンの吸収量

赤土では、すべての品種について地上部乾物の窒素濃度が湛水区より AWD 区で低くなった (第 3-8 表)。Basmati 370 と T65 は、AWD 区の地上部窒素吸収量が湛水区より小さくなった。NERICA 1 と T65 で乾物のリン濃度が AWD 区で湛水区より低かった。T65 は AWD 区のリン吸収量が湛水区より小さかった。

黒綿土では、すべての品種について、地上部乾物の窒素濃度に水管理方法による差はなかった。窒素吸収量は NERICA 1 と T65 について、湛水区の方が AWD 区より大きかった。NERICA 1 と T65 のリン濃度は湛水区より AWD 区で小さくなった。リン吸収量はすべての品種について、AWD 区の方が湛水区より低かった。

考察および結論

赤土と黒綿土における AWD 処理は、土壤水ポテンシャルが同程度に推移したにもかかわらず、土壤 pH および EC の変化は大きく異なった。赤土では、常時湛水条件下における土壤 pH および EC の値が大きく上昇し、時間の経過とともに AWD 条件下における値との差が広がった。一方、黒綿土では、土壤 pH と EC は水管理方法によりほとんど影響を受けなかった。このように、水管理条件が土壤の化学性に及ぼす影響は、土壤の種類によって大きく異なることが示された。

実験 1 では、茶褐色土と黒綿土で AWD による土壤水ポテンシャルの低下は -10 kPa 程度に抑えられており、乾燥ストレスの影響は小さいと考えられる程度であったにもかかわらず

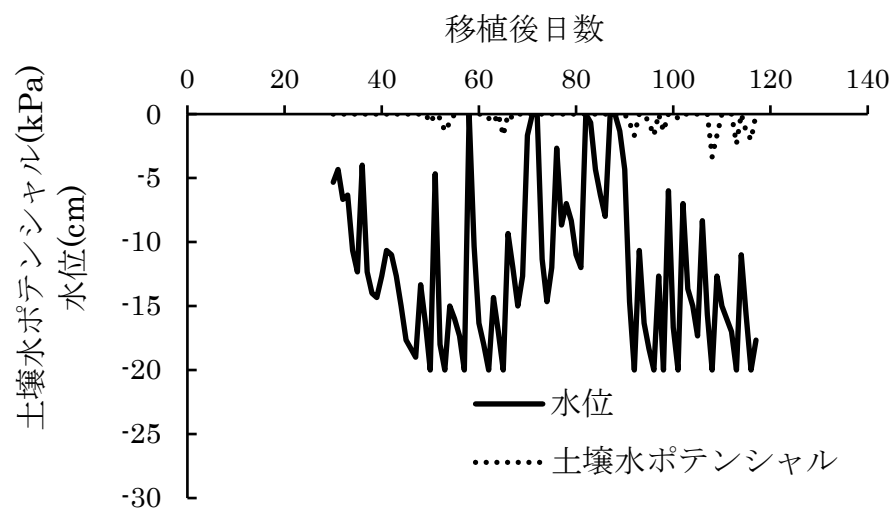
ず、黒綿土でのみイネの収量が低下した。このことから、同じような水管理条件であっても、黒綿土は収量が低下しやすいことが明らかになった。

実験 2 で用いた強酸性の赤土では、湛水条件により移植直後から土壌の ORP が低下するとともに pH および EC 値が上昇し、pH は 6.5 に達した。一方、AWD 条件下では、土壌の ORP は高く、pH や EC 値は低く維持されるなど、湛水条件下とは大きく異なった。赤土において、イネの生育に及ぼす AWD の影響としては、土壌乾燥時のイネの気孔コンダクタンスの低下は小さく、地上部乾物重の低下なしで、すべての品種の地上部窒素濃度が低下し、NERICA 1 と T65 はリン濃度も低下した。つまり、赤土では、湛水を維持することで土壌が還元化し、土壌に固定されていた養分が可溶性となってイネに吸収されたと考えられる。一方、好氣的土壌環境をもたらす AWD 条件下では酸性が維持されたため、イネが吸収可能な可給態養分が減少し、イネの養分吸収量を低下させた可能性がある。しかし、赤土における AWD がイネの収量に及ぼす影響は品種によって異なり、Basmati 370 と NERICA 1 は登熟歩合の向上により収量が増加し、T65 は 1 穂粒数の低下により収量が低下した。本実験では、赤土の湛水条件下でのみ Basmati 370 と NERICA 1 に葉の赤枯れ症状が認められ、登熟歩合がそれぞれ 35.5 % と 52.5 % と低い水準であった。赤枯れ症状は、酸性土壌の水田で多く発生し、土壌の嫌気化により可溶性となったヨウ素イオンや鉄イオンの吸収で起こるとされている (山田ら 2006, 北川ら 2018)。また、赤枯れ症状によってイネの登熟歩合が低下することが報告されている (北川ら 2018)。このことから、本実験においても赤土の湛水条件下では、土壌の嫌気化に伴い、ヨウ素イオンや鉄イオンが可給態となりイネに吸収されたことで、赤枯れ症状が起こり Basmati 370 と NERICA 1 の登熟歩合が低下したものと考えられる。また、地上部のヨウ素吸収に伴う赤枯れ症状の発生には品種間差があることから (山田ら 2006)、T65 は Basmati 370 や NERICA 1 より赤枯れ症状が起こりにくく登熟歩合への影響が小さい品種であることが示唆された。

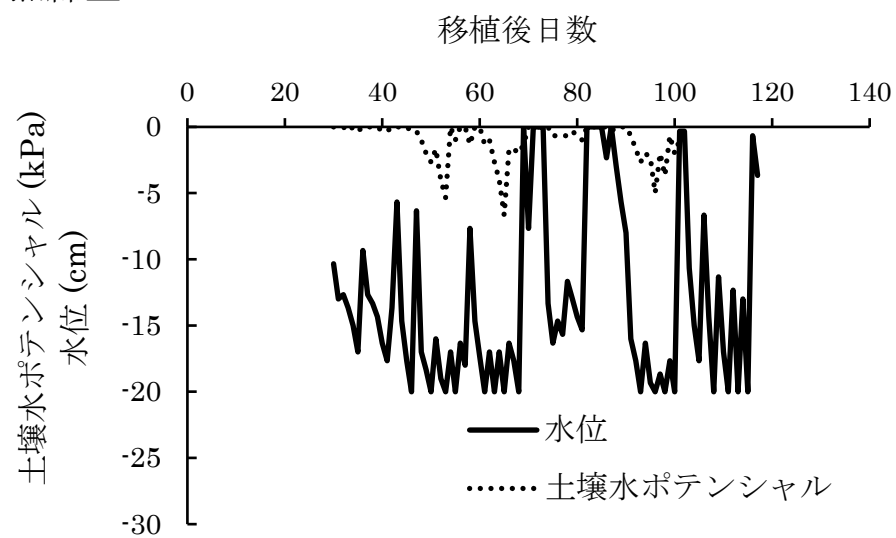
黒綿土では、すべての品種において、AWDにより地上部乾物重および収量が低下した。AWDによる土壌乾燥時にNERICA 1とT65で気孔コンダクタンスが大きく低下し、Basmati 370においても低下傾向を示していたことから、水ストレスによる養水分吸収の低下が収量低下の要因となったと考えられる。本実験では、赤土と黒綿土で深さ 20 cm の土壌水ポテンシャルに大きな差はみられなかったにもかかわらず、イネへの水ストレスは、黒綿土でより強く発生した。この要因として、黒綿土の高い EC 値と土壌乾燥時の土壌表層に現れたひび割れが考えられる。イネ生育期間における黒綿土の EC 値は 2.0 mS cm^{-1} 前後であった。これはイネが塩ストレスを受ける値であり、AWDによってさらに高められる傾向があった。これまで、EC が 2.0 mS cm^{-1} 程度の塩類集積土壌において AWD による収量低下が大きくなることが報告されており (Menete ら 2008), 本実験でも、同様の結果となったと考えられた。さらに、イネは根を表層に多く分布させるが、黒綿土で発生した土壌表層のひび割れは、イネの根を土壌外に露出させ養水分吸収を低下させるとともに、多くの土壌表層の根を切断し、養水分吸収能力を低下させた可能性がある。

以上より、イネ収量に及ぼす AWD の影響は土壌の性質により異なり、茶褐色土壌では影響が小さく、赤土では向上する場合と低下する場合があり、黒綿土では一様に低下することが明らかになった。赤土と黒綿土の AWD による収量低下要因は異なっており、赤土では窒素吸収量の低下にともなう収数の低下、黒綿土では水ストレスによる養水分吸収能力や乾物生産能力の低下が要因となっていると考えられた。また赤土の窒素吸収量の低下には土壌の強酸性が、黒綿土の水ストレスには土壌のひび割れや塩濃度の高さが関係している可能性があると考えられた。

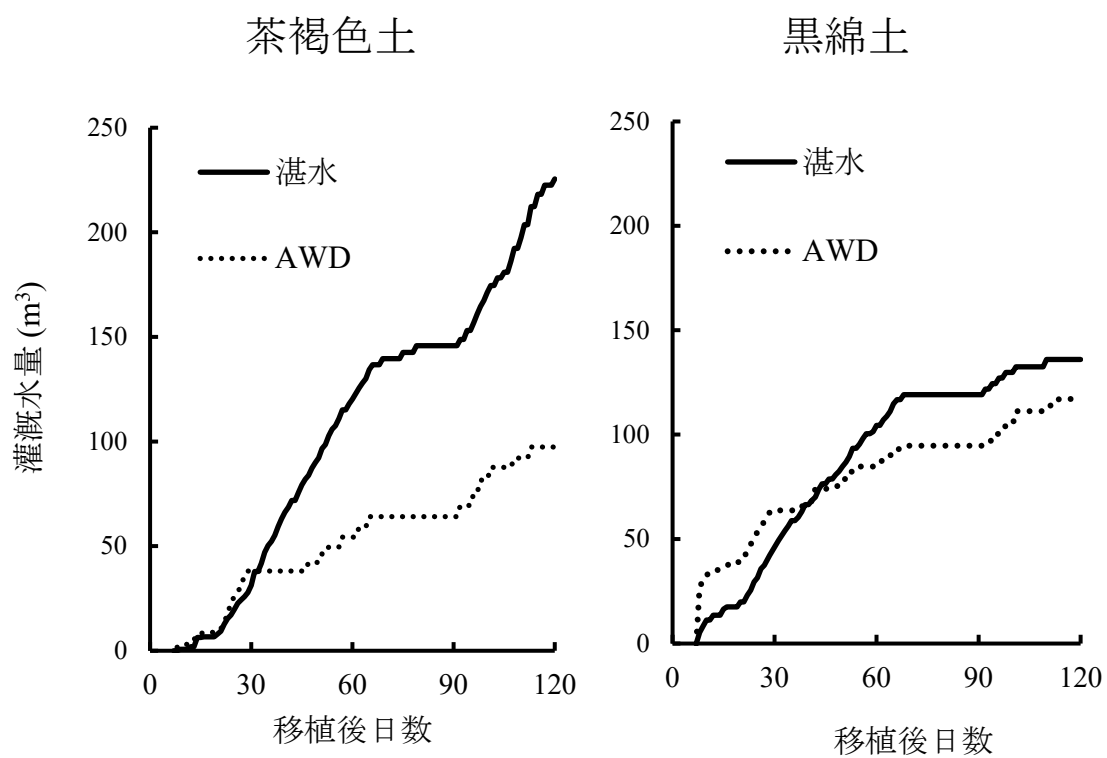
茶褐色土



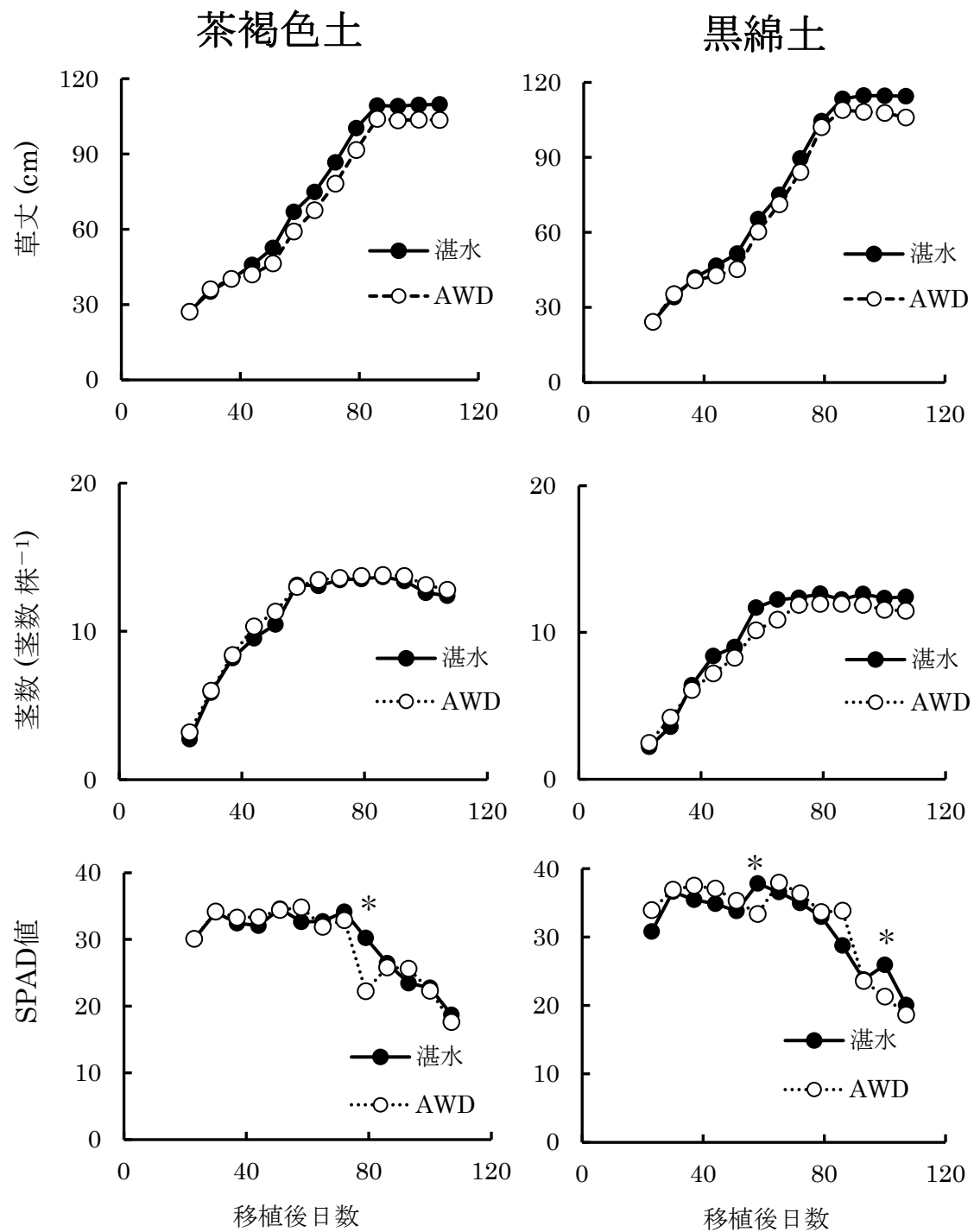
黒綿土



第3-1図 黒綿土と茶褐色土における土壌の水位および水ポテンシャルの推移.

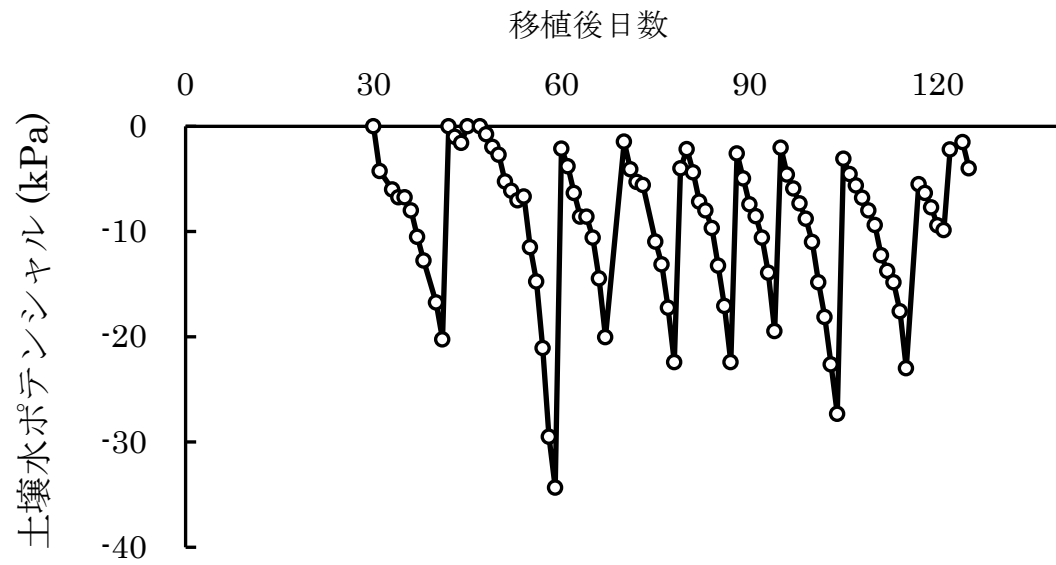


第3-2図 茶褐色土と黒綿土におけるイネ栽培期間中の積算灌漑水量.

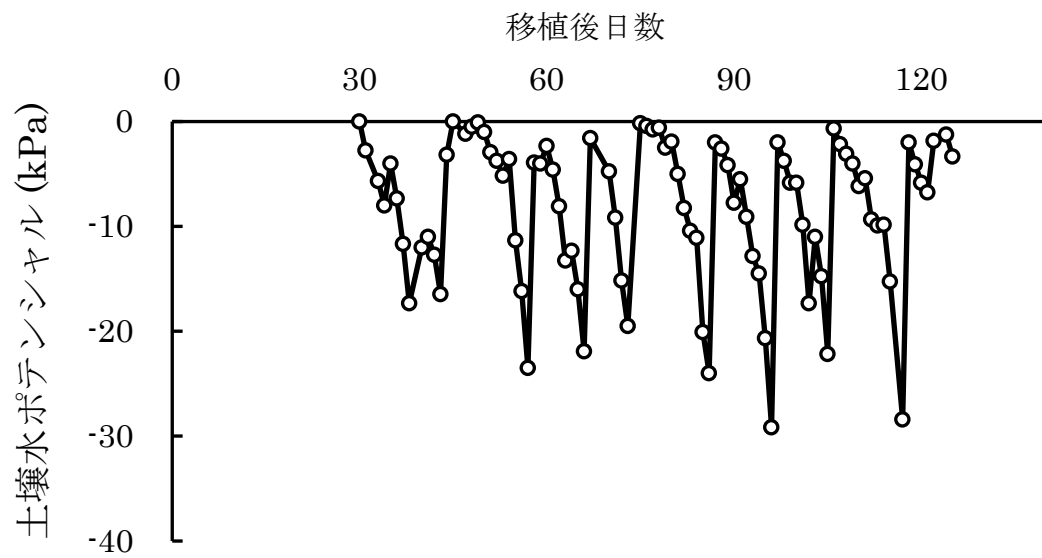


第3-3図 茶褐色土および黒綿土の茎数草丈，SPAD値に及ぼす水管理方法の影響。

赤土



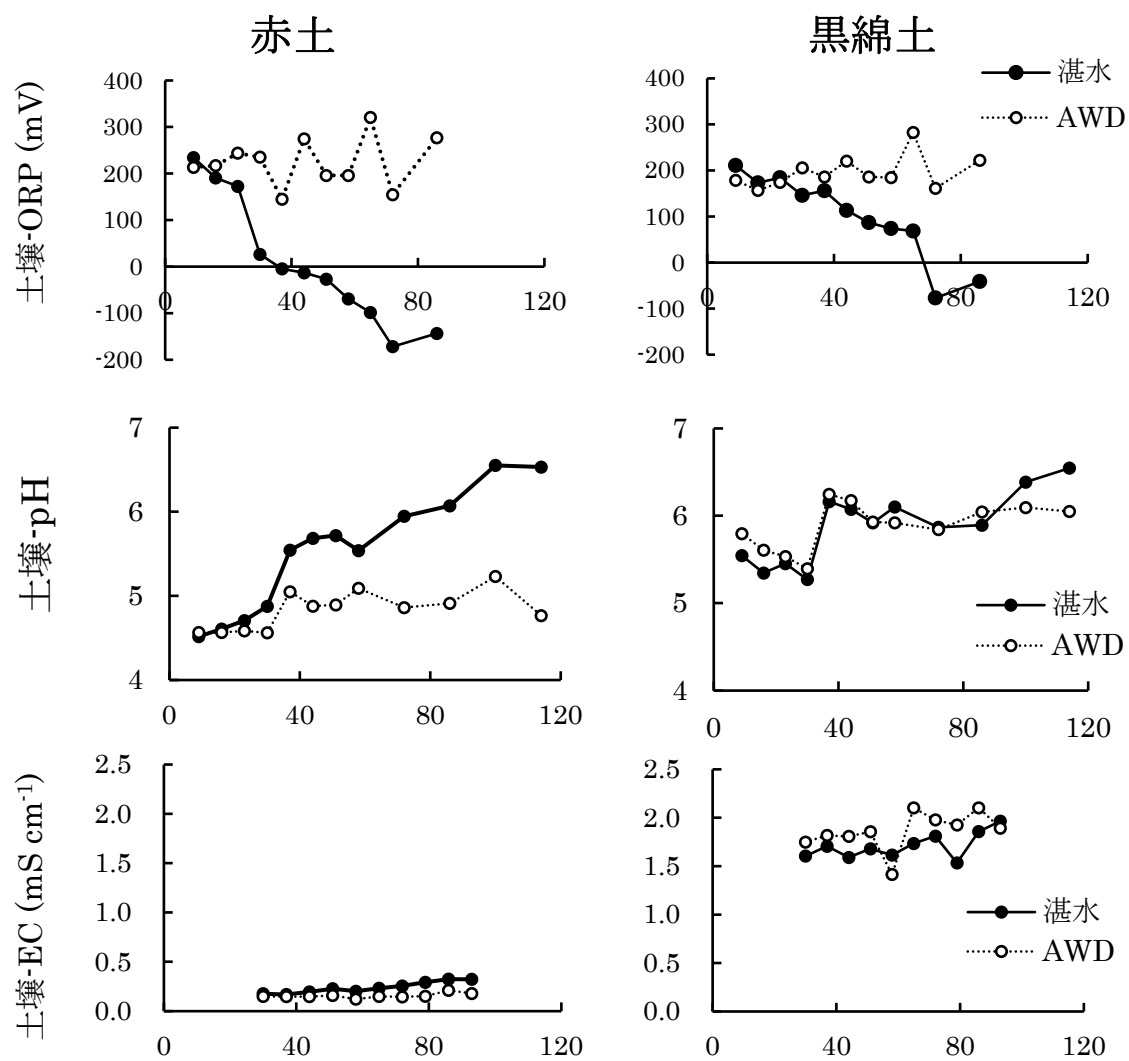
黒綿土



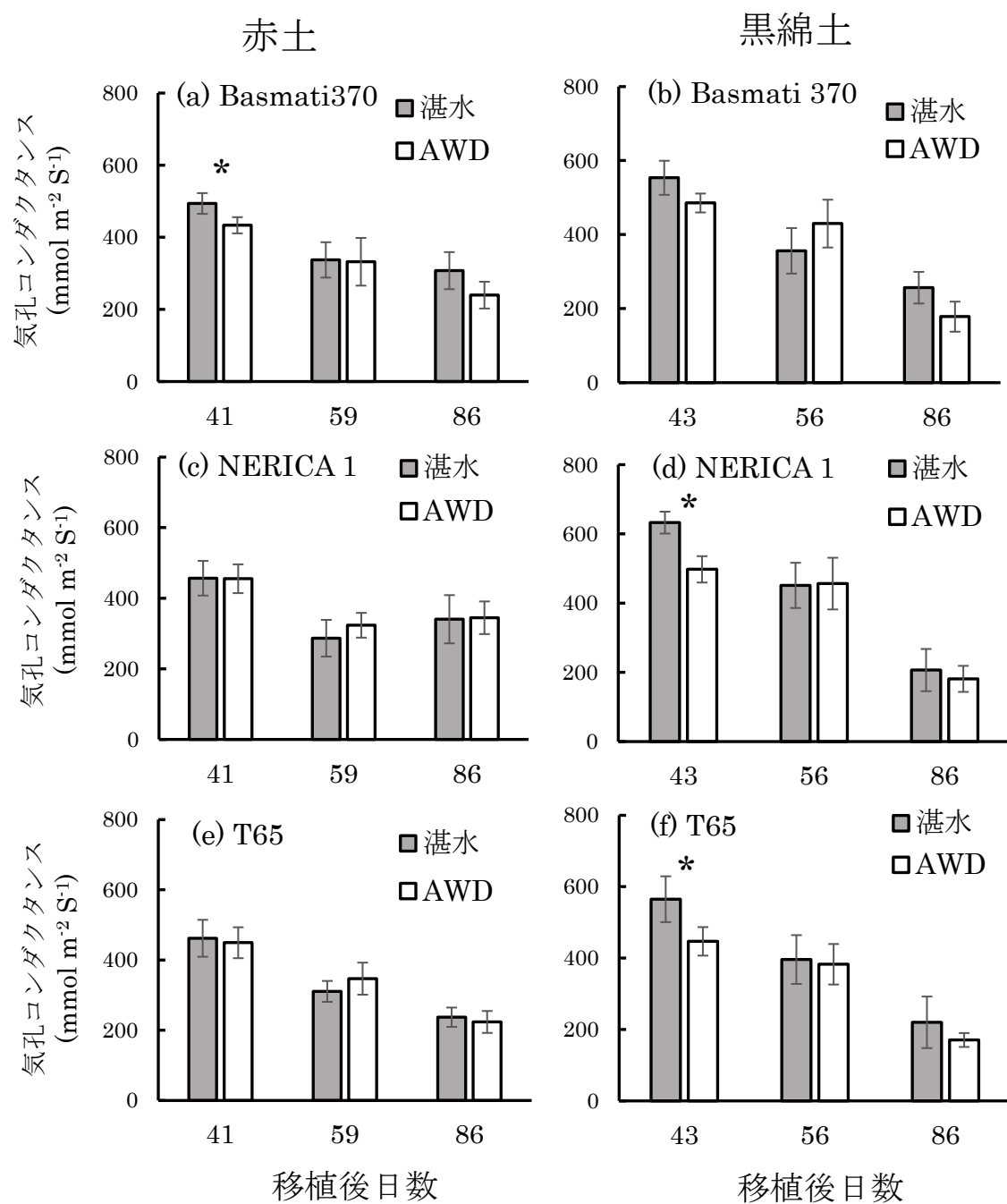
第3-4図 赤土と黒綿土における AWD 区の土壌水ポテンシャルの推移。



第3-5図 赤土および黒綿土のAWD区土壤乾燥時における土壤表層の状態.



第3-6図 赤土と黒綿土における土壌酸化還元電位 (ORP), pH, EC 値の推移。



第3-7図 赤土(a,c,e)と黒綿土(b,d,f)のAWD区土壤乾燥時におけるBasmati 370, NERICA 1, T65の気孔コンダクタンスの値.

図中の*は、水管理方法の影響について、T検定で5%水準の有意差があることを示す.

第3-1表 栽培開始前における，土壌 pH，EC および土壌養分の濃度

| 土壌 | pH (H ₂ O) | EC mS cm ⁻¹ | K cmol (+) kg ⁻¹ | Na cmol (+) kg ⁻¹ | Mg Cmol (+) kg ⁻¹ | Ca Cmol (+) kg ⁻¹ | Fe mg kg ⁻¹ | Mn mg kg ⁻¹ | Zn mg kg ⁻¹ | P mg-P ₂ O ₅ kg ⁻¹ | Total C g kg ⁻¹ | Total N g kg ⁻¹ |
|------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|---|----------------------------------|----------------------------------|
| 茶褐色土 | 5.68 | 0.49 | 0.57 | 0.26 | 5.23 | 10.30 | 190.50 | 31.50 | 0.40 | 741.15 | 29.87 | 2.05 |
| 黒綿土 | 6.35 | 1.35 | 0.59 | 1.01 | 17.59 | 48.95 | 25.59 | 60.05 | 0.39 | 19.81 | 14.18 | 0.76 |

K, Na, Mg, Ca はそれぞれ交換性のカリウム，ナトリウム，マグネシウム，カルシウムの濃度を示す．

P はリン酸濃度を示し，Bray-II 法により決定した．

Total C, Total N はそれぞれ土壌の総炭素含有量と総窒素含有量を示す．

第3-2表 栽培開始前における，土壌 pH および土壌養分の濃度

| 土壌 | K Cmol (+) kg ⁻¹ | Na Cmol (+) kg ⁻¹ | Mg Cmol (+) kg ⁻¹ | Ca Cmol (+) kg ⁻¹ | Fe mg kg ⁻¹ | Mn mg kg ⁻¹ | Zn mg kg ⁻¹ | P mg-P ₂ O ₅ kg ⁻¹ | TotalC g kg ⁻¹ | TotalN g kg ⁻¹ |
|-----|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---|------------------------------|------------------------------|
| 赤土 | 0.31 | 0.38 | 0.94 | 1.34 | 1.24 | 24.73 | 0.28 | 26.24 | 10.49 | 0.85 |
| 黒綿土 | 0.71 | 0.86 | 20.21 | 45.32 | 30.73 | 93.11 | 0.61 | 43.84 | 16.02 | 0.85 |

K, Na, Mg, Ca はそれぞれ交換性のカリウム，ナトリウム，マグネシウム，カルシウムの濃度を示す．

P はリン酸濃度を示し，Bray-II 法により決定した．

Total C, Total N はそれぞれ土壌の総炭素含有量と総窒素含有量を示す．

第3-3表 土壤，水管理方法が収量，収量構成要素および地上部乾物重に及ぼす影響.

| | 穂数 (10^5 穂 ha^{-1}) | 1 穂 粒数 | 粒数 (10^7 粒 ha^{-1}) | 登熟 歩合 (%) | 1000 粒重 (g) | 収量 (t ha^{-1}) | 地上部 乾物重 (t ha^{-1}) |
|--------|-------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------------|-------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| 土壤 | ns | * | *** | ns | *** | *** | *** |
| 水管理 | ns | ns | ns | ** | ns | * | ns |
| 土壤×水管理 | ns | ns | * | * | ns | * | ns |

第3-4表 茶褐色土および黒綿土における収量，収量構成要素および地上部乾物重.

| 土壌 | 水管理 | 穂数 (10^5 穂 ha^{-1}) | 1 穂 粒数 | 粒数 (10^7 粒 ha^{-1}) | 登熟 歩合 (%) | 1000 粒重 (g) | 収量 (t ha^{-1}) | 地上部 乾物重 (t ha^{-1}) |
|----------|-----|-------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------------|-------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| 茶褐色 土 | 湛水 | 30.9 | 76.9 | 23.6 | 96.0 | 23.4 | 5.3 | 10.2 |
| | AWD | 32.2 | 74.9 | 23.8 | 93.3 | 22.9 | 5.1 | 9.8 |
| | 有意差 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| 黒綿土 | 湛水 | 37.6 | 93.8 | 32.9 | 94.7 | 25.1 | 7.8 | 16.2 |
| | AWD | 33.4 | 83.7 | 27.9 | 94.4 | 25.0 | 6.5 | 13.1 |
| | 有意差 | ns | ns | * | ns | ns | * | ns |

図中の*は各土壌における水管理方法の影響について，T検定で5%水準の有意差があることを示し，nsはないことを示す.

第3-5表 赤土と黒綿土における各品種のイネの出穂日および出穂期の葉の SPAD 値，葉面積，地上部乾物重に及ぼす水管理方法の影響.

| 土壌 | 品種 | 水管理 | 出穂日 (移植後日数) | 葉の SPAD 値 | 葉面積 (10 ² cm ²) | 地上部乾物重 (g 個体 ⁻¹) |
|---------|----------------|-----|----------------|--------------|---|---------------------------------|
| 赤土 | Basmati 370 | 湛水 | 71 | 35.8 | 9.1 | 18.8 |
| | | AWD | 78 | 33.4 | 11.5 | 25.6 |
| | | 有意差 | ns | * | ns | * |
| | NERICA 1 | 湛水 | 64 | 43.5 | 9.6 | 18.2 |
| | | AWD | 64 | 42.5 | 8.5 | 18.3 |
| | | 有意差 | ns | ns | ns | ns |
| | T65 | 湛水 | 82 | 36.4 | 11.6 | 27.1 |
| | | AWD | 85 | 32.9 | 11.4 | 29.8 |
| | | 有意差 | ns | * | ns | ns |
| 黒綿 土 | Basmati 370 | 湛水 | 75 | 33.6 | 11.2 | 32.5 |
| | | AWD | 76 | 35.2 | 11.4 | 28.9 |
| | | 有意差 | ns | * | ns | ns |
| | NERICA 1 | 湛水 | 70 | 38.1 | 9.4 | 24.7 |
| | | AWD | 75 | 37.0 | 7.4 | 17.6 |
| | | 有意差 | ns | ns | ns | * |
| | T65 | 湛水 | 83 | 34.8 | 10.2 | 31.6 |
| | | AWD | 86 | 35.2 | 7.8 | 22.9 |
| | | 有意差 | ns | ns | ns | * |

図中の*は各品種において，T検定により5%水準で水管理方法による有意差があることを示し，nsは有意差がないことを示す.

第3-6表 イネの収量，収量構成要素および地上部乾物重におよぼす，土壌の種類，品種，水管理の影響.

| | 穂数 | 1 穂粒数 | 粒数 | 登熟歩合 | 1000 粒重 | 収量 | 地上部乾物重 |
|---------|-----------------------|-------|-----------------------|------|---------|----------------|----------------|
| | (10^5 穂 m^{-2}) | | (10^7 粒 m^{-2}) | (%) | (g) | (t ha^{-1}) | (t ha^{-1}) |
| 土壌 (S) | *** | *** | ns | *** | * | * | ns |
| 品種 (V) | *** | *** | *** | *** | *** | * | *** |
| 水管理 (W) | *** | *** | *** | *** | ns | *** | *** |
| S×V | * | ns | ** | *** | ns | *** | ** |
| S×W | * | ns | ** | *** | ** | *** | *** |
| V×W | ns | *** | ** | *** | ns | *** | ns |
| S×V×W | ns | ns | ns | *** | ns | * | ns |

分散分析 (ANOVA) により，*は 5 %水準，**は 1 %水準，***は 0.1 %水準で有意差があることを示す

第3-7表 赤土と黒綿土における各品種の収量，収量構成要素および地上部乾物重によ
ぼす水管理方法の影響.

| 土壌 | 品種 | 水管理 | 穂数 (10^5 穂 m^{-2}) | 1 穂 粒数 | 粒数 (10^7 粒 m^{-2}) | 登熟 歩合 (%) | 1000 粒重 (g) | 収量 ($t\ ha^{-1}$) | 地上部 乾物重 ($t\ ha^{-1}$) |
|---------|----------------|-----|--------------------------------|-----------|--------------------------------|-----------------|-------------------|------------------------|--------------------------------|
| 赤土 | Basmati 370 | 湛水 | 32.4 | 54.9 | 17.8 | 35.5 | 20.0 | 1.4 | 8.1 |
| | | AWD | 29.8 | 65.6 | 19.5 | 79.4 | 20.0 | 3.0 | 9.0 |
| | | 有意差 | ns | * | ns | * | ns | * | ns |
| | NERICA 1 | 湛水 | 21.5 | 71.1 | 15.3 | 52.5 | 28.2 | 2.3 | 8.3 |
| | | AWD | 20.8 | 73.0 | 15.2 | 83.2 | 29.3 | 3.7 | 8.9 |
| | | 有意差 | ns | ns | ns | * | ns | * | ns |
| | T65 | 湛水 | 33.6 | 64.4 | 21.7 | 85.4 | 25.8 | 4.7 | 11.2 |
| | | AWD | 33.6 | 39.0 | 13.1 | 82.4 | 25.8 | 2.8 | 10.2 |
| | | 有意差 | ns | * | * | ns | ns | * | ns |
| 黒綿 土 | Basmati 370 | 湛水 | 34.1 | 76.7 | 26.1 | 82.1 | 20.2 | 4.3 | 12.4 |
| | | AWD | 28.4 | 74.8 | 21.3 | 79.6 | 19.1 | 3.2 | 9.5 |
| | | 有意差 | ns | ns | ns | ns | * | * | * |
| | NERICA 1 | 湛水 | 20.1 | 84.2 | 16.9 | 84.6 | 28.6 | 4.0 | 10.2 |
| | | AWD | 13.8 | 70.6 | 9.7 | 82.4 | 27.4 | 2.2 | 6.0 |
| | | 有意差 | * | * | * | ns | * | * | * |
| | T65 | 湛水 | 29.5 | 66.4 | 19.6 | 91.1 | 26.3 | 4.7 | 13.2 |
| | | AWD | 22.9 | 46.5 | 10.7 | 83.7 | 24.6 | 2.2 | 8.8 |
| | | 有意差 | * | * | * | * | ns | * | * |

図中の*は各品種において，T検定により5%水準で水管理方法による有意差があることを示し，nsは有意差がないことを示す.

第3-8表 登熟期の窒素とリンの吸収量におよぼす水管理方法の影響.

| 土壌 | 品種 | 水管理 | 窒素 (N) | | リン (P) | |
|-----|-------------|-----|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| | | | 窒素濃度 | 窒素吸収量 | リン濃度 | リン吸収量 |
| | | | (mg N g ⁻¹ 乾物) | (mg N 個体 ⁻¹) | (mg P g ⁻¹ 乾物) | (mg P 個体 ⁻¹) |
| 赤土 | Basmati 370 | 湛水 | 4.1 | 131.1 | 1.6 | 52.4 |
| | | AWD | 3.0 | 108.6 | 1.2 | 41.0 |
| | | 有意差 | * | * | ns | ns |
| | NERICA 1 | 湛水 | 4.3 | 144.2 | 1.4 | 45.8 |
| | | AWD | 3.3 | 117.6 | 1.0 | 36.3 |
| | | 有意差 | * | ns | * | ns |
| | T65 | 湛水 | 3.8 | 172.4 | 1.4 | 63.2 |
| | | AWD | 2.6 | 105.9 | 1.0 | 40.7 |
| | | 有意差 | * | * | * | * |
| 黒綿土 | Basmati 370 | 湛水 | 2.2 | 106.6 | 1.3 | 65.6 |
| | | AWD | 2.2 | 83.6 | 1.0 | 36.2 |
| | | 有意差 | ns | ns | ns | * |
| | NERICA 1 | 湛水 | 2.5 | 101.2 | 1.6 | 65.0 |
| | | AWD | 2.5 | 60.7 | 1.2 | 28.4 |
| | | 有意差 | ns | * | * | * |
| | T65 | 湛水 | 2.6 | 138.0 | 1.6 | 82.8 |
| | | AWD | 2.4 | 85.4 | 1.1 | 39.1 |
| | | 有意差 | ns | * | * | * |

図中の*は各品種において、T検定により5%水準で水管理方法による有意差があることを示し、nsは有意差がないことを示す。

第2節 酸性度の異なる土壌における節水栽培がイネの養水分吸収および収量に及ぼす影響

緒言

第1節において、AWD条件下におけるイネの生育・収量反応は土壌の種類によって異なることが明らかになり、その主な要因のひとつとして土壌 pH が関係していることが示唆された。強酸性の赤土における節水栽培は、イネのリンおよび窒素吸収を抑制し、収量低下を引き起こすと考えられた。しかし、赤枯れ症状が発生した品種があったため、節水栽培条件下における土壌 pH の変化とイネの生育・収量反応との関係を明確にすることは出来なかった。また、水管理方法の違いは、土壌 pH だけではなく様々な土壌の性質の変化をもたらしていたことから、赤土におけるリンおよび窒素吸収量の低下が、土壌の強酸性に起因するものなのか、そのほかの土壌の性質が要因となっているのかは不明である。そこで第2節では、土壌に硫酸アルミニウムを添加させることで人為的に強酸性土壌を作成し、酸性度の異なる土壌における節水栽培がイネの養水分吸収および収量に及ぼす影響を調査した。

材料と方法

1. 栽培方法の概要

実験は2016年の6月から10月に、名古屋大学大学院生命農学研究科付属、フィールド科学教育研究センター、東郷フィールドにあるビニールハウス内でポット栽培により行った。品種は水稻品種のT65を供試した。種子は1000倍希釈のベンレートで消毒した後水道水で浸漬することで催芽処理を行い、三河培土を敷き詰めた1穴約1.5 cmの育苗箱に1穴1

粒ずつ6月6日に播種した。均一に生育した苗を選択し、各ポット1本ずつ7月9日に移植した。

側面下部に2.3 cmの穴が開いた直径16 cm、高さ20 cmの円筒状ポットを使用した。側面下部の穴は、根や土は通過できないが水を通すことのできるシート(ネトマール 日本甜菜製糖株式会社製)で覆った。土壌養分のポット外への溶出を制限するため、すべてのポットは水を入れた容量10 Lのバケツの中に置き水はポット外側のバケツから下部の穴を通して供給することとした。ポットには2 mmの篩に通した後風乾させた3.5 kgの砂質壤土を詰めた。ポットに添加する前の土壌の性質は、pH (H₂O) が5.5、総炭素が4.40 g kg⁻¹、総窒素が0.55 g kg⁻¹ (C/N コーダ, ヤナコテクニカルサイエンス株式会社製)、可給態リンが0.14 g kg⁻¹、交換態アルミニウム (Al) が3.65 mg kg⁻¹であった。

土壌は、砂質壤土に硫酸または硫酸アルミニウムを添加することにより4種類の土壌の性質を設け、1つは肥料のみ添加する非酸性土壌、3つは酸性土壌とした。酸性土壌は硫酸アルミニウムを土壌1 kgあたり6 mmol (12 mmol Al kg⁻¹ 土壌) 添加することで作成した12 Al 土壌、硫酸アルミニウムを土壌1 kgあたり3 mmol (6 mmol Al kg⁻¹ 土壌) 添加することで作成した6 Al 土壌、ポットあたり9 mmolの硫酸を添加することにより作成した硫酸土壌とした。

元肥として0.2 gの窒素を硫酸アンモニウムとして、0.2 gのリン酸を過リン酸石灰として、0.2 gのカリウムを塩化カリウムとして添加し土壌に混ぜ込んだ。追肥として移植後26日と移植後42日に0.1 gの窒素を硫酸アンモニウムとして添加した。

移植後6日までは、ポット側面下部の穴はビニールで覆い、ポットから水が出ないようにすることでポットを浅い湛水条件で維持した。移植後7日から、ポット外側のバケツから水を供給し、ビニールを外してバケツから水を内部に供給するようにし、3つ水処理方法で生育した。水処理方法は、常時湛水で維持する湛水条件と、バケツの水深を5 cm～10 cmで維持することにより、土壌含水比を約25%～30%で維持するようにした飽水条件、湛

水と土壌含水比を 15 %で 5 日間維持することを繰り返す土壌水分変動条件とした。土壌水分変動条件の土壌乾燥時は、11 時～12 時、15 時～16 時の 2 回灌水することで 15%の土壌含水比を維持するようにし、乾燥期間終了後は 3～5 cm の水深で維持するようにした。土壌が 15 %の含水比で維持された期間は、7 月 30 日～8 月 3 日、8 月 12 日～8 月 16 日、8 月 27 日～8 月 31 日、9 月 12 日～9 月 16 日であった。

ポットの配置は、4 種類の土壌と 3 種類の水管理方法を 5 反復とする完全無作為化法で行った。

2. 測定項目および測定方法

1) 土壌に関する測定

土壌水分変動条件の土壌含水比は土壌の重さを測ることで、測定した。土壌の ORP と pH はそれぞれ ORP メーター (Exstick-RE300, Spectrum Technologies 社製) と pH メーター (Soilstick pH Meter, Spectrum Technologies 社製) で土壌表面から 3 cm の深さについて 1 週間に 1 回測定した。

2) 地上部生育に関する測定

地上部の最上位展開葉における葉緑素含有量を葉緑素計 (SPAD-502, Minolta 社製) で 1 週間に 1 回、移植後 25 日から登熟期まで測定した。出穂日は止葉葉鞘から穂が出現した日とした。出穂日前後で水分変動条件のポットが土壌乾燥期間である 8 月 30 日 (移植後 52 日) の 9 時から 14 時の間に、葉の気孔コンダクタンスと光合成速度を光合成測定装置 (LI-6400XT, メイワフォーシス株式会社製) を用いて各処理条件について 3 反復ずつ測定した。

3) 収量および収量構成要素の測定

出穂から 40 日後に地上部を採取し、各ポットについて収量、収量構成要素、地上部乾物重を測定した。採取した地上部は穂と茎葉部に分けられ、茎葉部は 80 °C の乾燥機に入れて乾物重を測定した。穂は穂数を計測した後脱穀し、水選により登熟粳と未登熟粳に分けた。登熟粳、未登熟粳は、それぞれ風乾した後重さと数を測定し、登熟歩合を算出した。登熟粳は水分含有率 (Riceter f5, ケット科学研究所) を測定し、14 % の水分含有率における 1000 粒重とした。粳数、登熟歩合、1000 粒重の値からポット当たりの精粳重として収量を算出した。

4) 地上部の窒素、リン、カリウム濃度の測定

各ポットの地上部について、穂と茎葉部を粉砕機で粉砕した後、窒素、リン、カリウムの濃度測定に用いた。粉砕した植物体粉末は、過酸化水素を添加した濃硫酸を添加した後、420°C で 30 分熱することで分解した。窒素濃度は、水酸化ナトリウムで蒸留した分解液中の窒素を硫酸で滴定することにより測定した。リン濃度は、分解液をモリブデンブルー発色させた後、710 nm の波長を分光光度計 (紫外可視分光光度計 UV-1800, 島津製作所製) で測定することで決定した。分解液のカリウム濃度は炎光光度計 (Flame photometer, BMB technologies 社製) で測定した。

結果

1. 土壌の ORP と pH の推移

各土壌条件のすべての水管理方法において、ORP は移植後日数の経過とともに低下し、湛水で最も低下した。飽水と水分変動の ORP は移植後 28 日の測定から低下が小さくなり安定した値で推移した (第 3-8 図)。

無添加土壌の pH は、水管理方法による違いが小さく、移植後 16 日から徐々に上昇し、移植後 72 日には 6.5~6.8 の値に達した (第 3-9 図)。12Al 土壌の pH は、すべての水管理方

法で移植直後は 4.2～4.3 の値であったが、湛水と水分変動により上昇し、移植直後 72 日は、湛水、飽水、水分変動でそれぞれ、6.8, 4.3, 6.3 となった。すべての水管理方法で 6A1 土壌の pH は移植直後で 4.6～4.7 であり、移植後 72 日は、湛水、飽水、水分変動でそれぞれ 6.8, 5.4, 6.3 となった。硫酸土壌では、移植直後は 4.4～4.7 となり、生育日数の経過とともにすべての水管理方法で pH は徐々に上昇し、移植後 72 日には湛水、飽水、水分変動でそれぞれ 6.8, 6.2, 6.4 となった。

2. 葉の SPAD 値、気孔コンダクタンスおよび光合成速度

葉の SPAD 値は、無添加土壌、6A1 土壌、硫酸土壌において、移植後 74 日において、水管理方法による違いがみられ、無添加土壌では水分変動が、6A1 土壌と硫酸土壌では水分変動と飽水が、湛水より高くなった (第 3-10 図)。12A1 土壌では、移植後 25 日に水分変動で SPAD 値が高くなったが、その他の移植後日数では水管理方法による有意な差はなかった。

移植後 52 日において、12A1 土壌で、水分変動の気孔コンダクタンスは、湛水、飽水より有意に低下した (第 3-11 図)。無添加土壌、6A1 土壌、硫酸土壌では、水分変動により、湛水、飽水より気孔コンダクタンスが低下する傾向がみられた。光合成速度はすべての土壌条件において、水管理方法による有意な影響はなかった (第 3-12 図)。

3. 収量、収量構成要素、地上部乾物重

穂数は、土壌条件および水管理方法による有意な差はなかった (第 3-8 表)。1 穂粒数はすべての土壌条件において、水分変動により有意に低下した。湛水管理において、12A1 土壌の 1 穂粒数は 6A1 土壌より有意に大きくなった。登熟歩合は、無添加土壌において、飽水と水分変動で湛水より小さくなった。1000 粒重は、12A1 土壌において、水分変動が最も大きく飽水で最も小さくなった。硫酸土壌では湛水の 1000 粒重が飽水、水分変動より有意

に大きくなった。収量は、すべての土壌条件において水分変動が、湛水や飽水より小さい値となった。12Al 土壌では湛水と飽水の収量に有意な差があり、湛水で高くなった。湛水管理において、無添加土壌と 12Al 土壌では有意な収量の差があり、12Al 土壌で高くなった。

4. イネ地上部の窒素、リン、カリウム吸収量

窒素吸収量は、12Al 土壌において水管理方法による有意な差があり、湛水は飽水、水分変動より大きくなった (第 3-9 表)。湛水管理では、土壌条件により窒素吸収量に有意な差があり、12Al 土壌は、無添加、6Al、および硫酸土壌より大きな窒素吸収量であった。リン吸収量は、無添加土壌および 12Al 土壌では水分変動で最も小さくなり、6Al 土壌では湛水で最も小さくなった。湛水管理において、12Al 土壌のリン酸吸収は無添加、6Al、硫酸土壌より大きくなった。カリウム吸収量は、12Al 土壌と 6Al 土壌では飽水が最も大きくなった。飽水管理において 6Al 土壌と硫酸土壌のカリウム吸収量は無添加土壌より有意に大きくなった。

考察および結論

硫酸および硫酸アルミニウムを添加した土壌は移植直後の pH を大きく低下させ、土壌が強酸性となった。好気土壌条件において、硫酸のみの添加であると pH が大きく上昇した一方で硫酸アルミニウムを添加した土壌であれば、その上昇は抑えられた。これは土壌の pH を低下させるために添加した硫酸アルミニウムの量が硫酸のみの添加より大きな量であったことが要因であると考えられる。このため、アルミニウムなどのイオン量が多い強酸性土壌の方が、イオンの量が少ない強酸性土壌に比べて、好気条件において pH が低い値で安定しやすいと考えられた。一方で湛水条件や一定の湛水期間がある土壌水分変動条件であ

れば、すべての土壌の pH は 6.0~6.5 に収束した。この変化は ORP の低下とともに進行しており、土壌嫌気化に伴う硫酸イオンなどの還元化によって pH が上昇したと考えられた。

イネは比較的強酸性土壌への適性が高い作物であるが、節水栽培や好気栽培のような土壌が好氣的な条件での検証はあまりされていない。本実験では、硫酸アルミニウムを添加した強酸性土壌において、土壌が好氣的で強酸性が継続された飽水管理でも、SPAD 値に非強酸性の無添加土壌との違いはみられず、収量は無添加土壌と同程度となった。つまり、本実験の強酸性土壌の場合、硫酸やアルミニウムがイネの生育および収量に生理障害として与えた影響はとても小さかった可能性が高い。これまでの研究でも、強酸性による水素イオンの増加自体がイネの生育に及ぼす影響は小さいと考えられ (松中 2003)、イネは作物の中でアルミニウムイオンに対する耐性が高い (Famoso ら 2010) とされているが、本実験でも、アルミニウムや硫酸の濃度がそれほど高くない強酸性土壌においては、土壌の強酸性自体がイネの生育および収量を減少させる可能性は低いと考えられた。

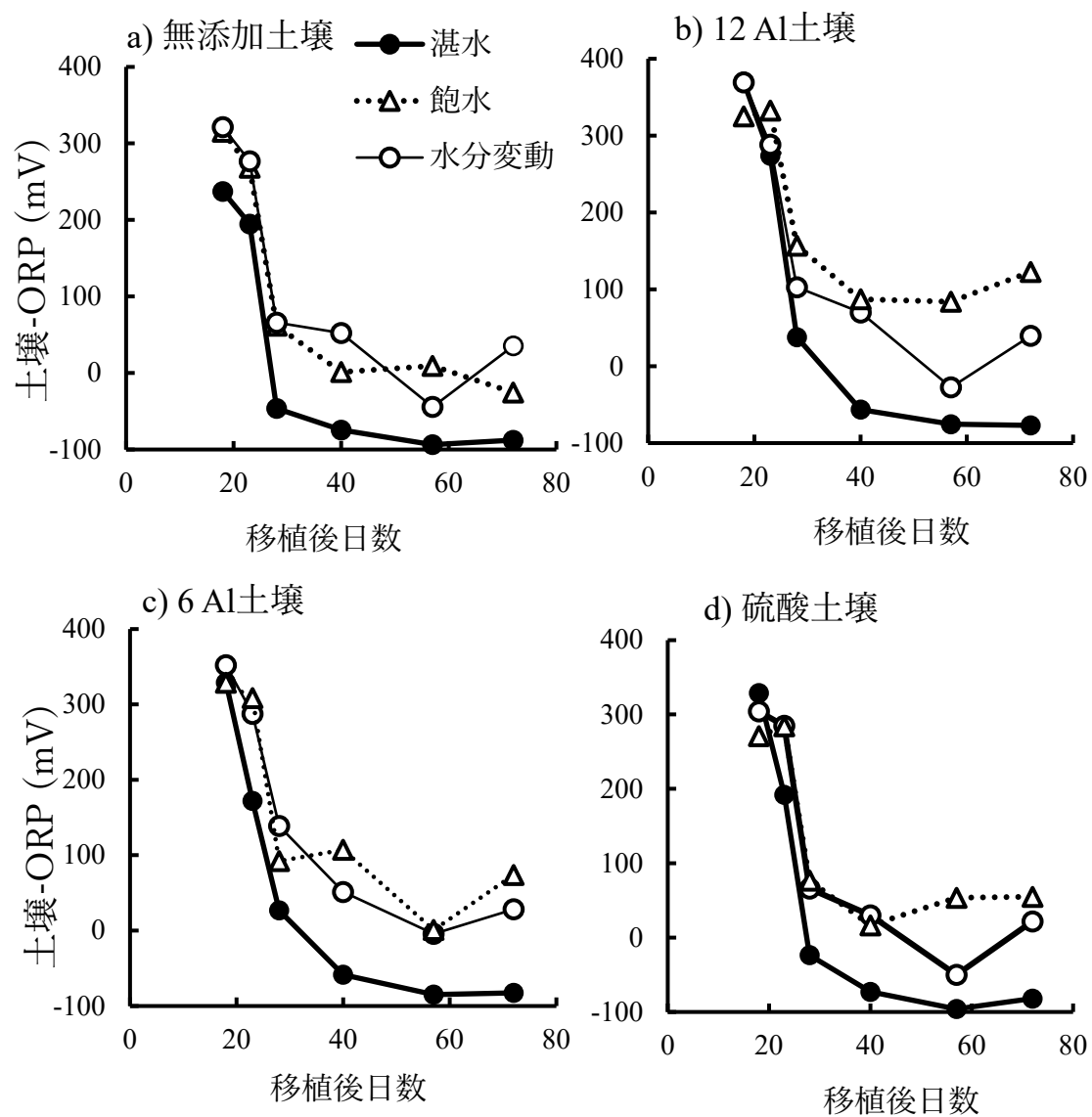
酸性成分を添加していない無添加土壌は、すべての水管理方法で、地上部乾物重や収量が最も小さい傾向がみられ、本実験では、硫酸アルミニウムの添加により土壌が強酸性である方が、イネの乾物生産や収量は高くなる可能性があると考えられた。

湛水と飽水で収量に差があったのは 12Al 土壌であった。これは、湛水の場合、12Al 土壌のイネ収量がほかの土壌条件より高い一方で、飽水ではすべての土壌で同程度の収量となったためであった。飽水では、土壌含水比が 25%~30% で維持されており、出穂期の気孔コンダクタンスの低下がみられず、無添加区では飽水による地上部乾物重や収量の低下がみられないことから、本実験の飽水による水管理では水ストレスがイネ生育に及ぼす影響はなかったと考えられる。12Al 土壌では、生育後半も湛水により高い SPAD 値を維持しており、窒素吸収量がほかの土壌に比べて有意に大きいことから、湛水条件における窒素吸収量の大きさが葉の光合成能力を高く維持させ、イネの生育および収量の向上に寄与した可能性が高いと考えられた。つまり、強酸性土壌では、イネへの水ストレスがない飽水の

ような好気条件であっても、窒素吸収量が常時湛水より低下することで、収量の減少をもたらす可能性が示された。

本実験では、イネのリンや窒素の吸収が 12A1 土壌で促進された理由は明らかにされなかったが、土壌が強酸性であると、窒素の硝化が抑えられることが分かっており (Kermmitt ら 2006)、硝酸態窒素の脱窒による土壌窒素の損失が抑えられた可能性がある。また、土壌が酸性であると、嫌気条件において有機体窒素の無機化量が増加すること (Kader ら 2013) も報告されている。本実験でも、湛水管理は土壌を嫌気化させており、飽水条件と ORP の差が大きくなっていたことから、有機体窒素の無機化量が大きくなることで、イネがより多くの窒素養分を吸収出来た可能性がある。以上のことから、生育初期の土壌強酸性と湛水管理の組み合わせは、イネの窒素養分の吸収に適しており、土壌が好気化することで、窒素吸収が低下し、イネの収量が低下する可能性があると考えられた。

強酸性土壌は、非強酸土壌に比べて、水管理方法の違いが土壌化学性に大きく影響し、強酸性土壌では、常時湛水により pH が大きく上昇することが明らかとなった。強酸性土壌では、好氣的な飽水条件でイネを生育させると湛水条件より収量が低下する可能性があり、窒素吸収量の低下がその要因となっている可能性が示唆された。



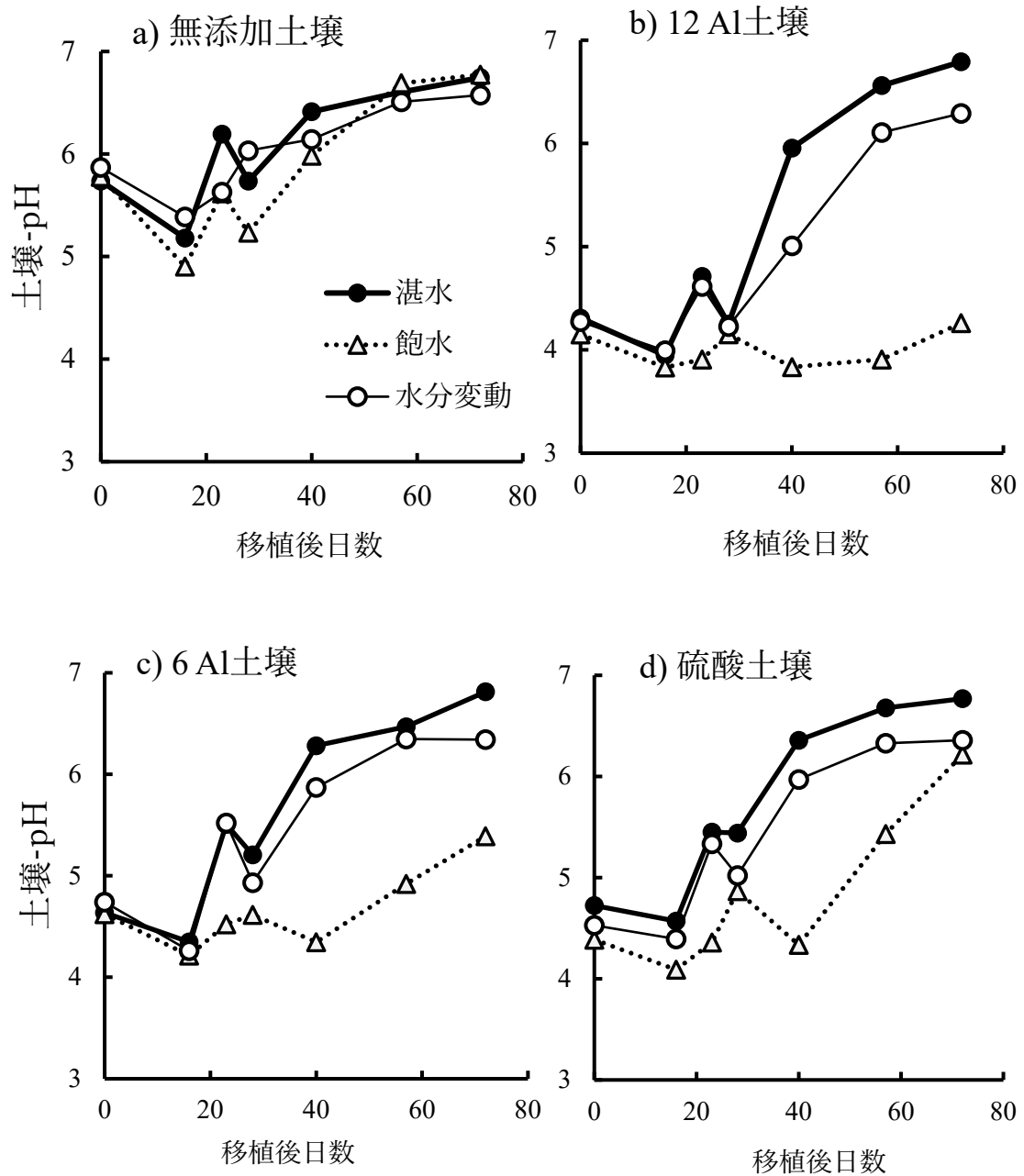
第3-8図 各土壤条件における土壤-ORP (酸化還元電位) の推移

a) 無添加土壤 肥料のみを添加する土壤

b) 12Al 土壤 土壤 1 kg あたり 6 mmol の硫酸アルミニウムを添加した土壤

c) 6Al 土壤 土壤 1 kg あたり 3 mmol の硫酸アルミニウムを添加した土壤

d) 硫酸土壤 ポットあたり 9 mmol の硫酸を添加した土壤



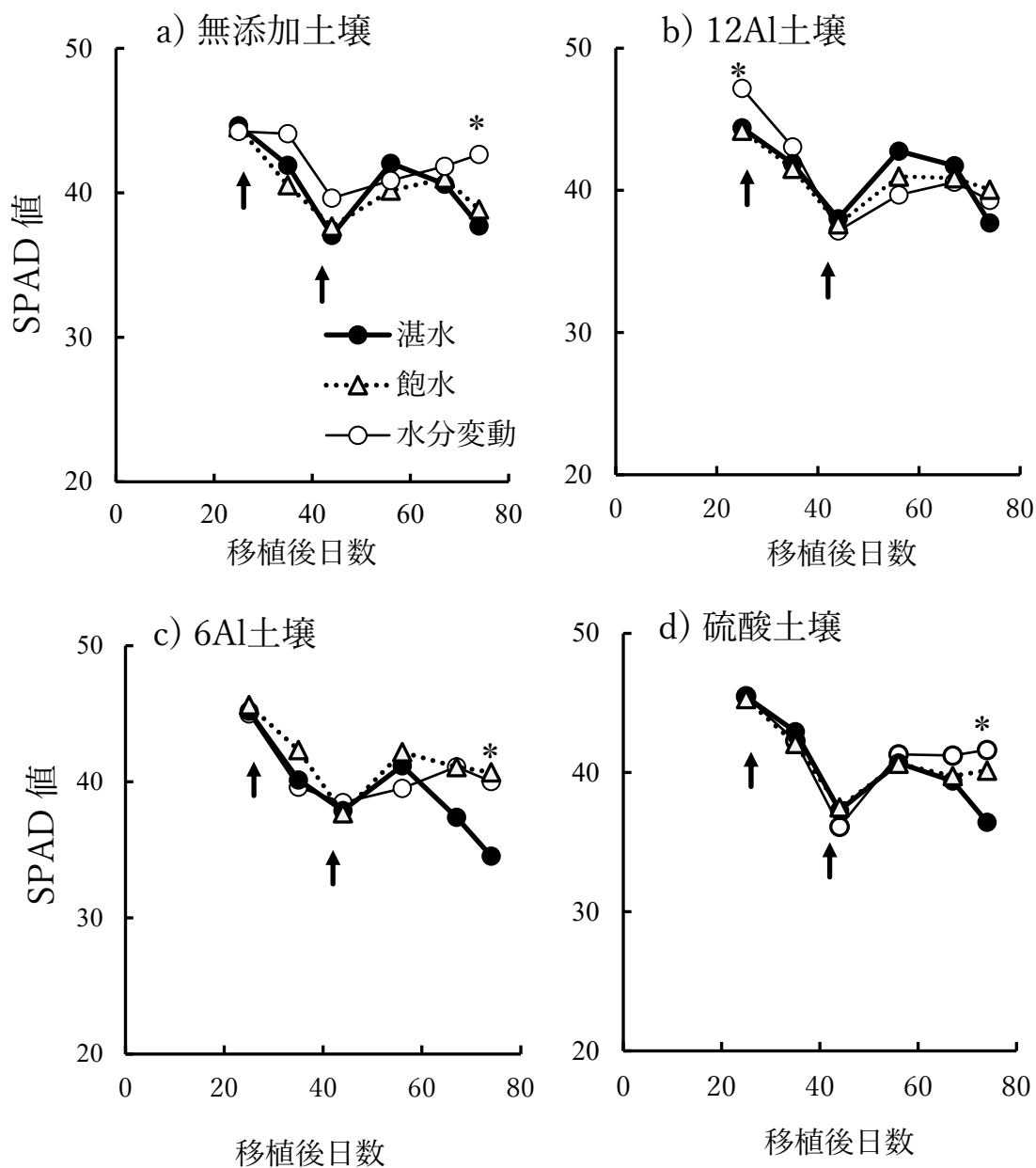
第3-9図 各土壤条件における土壌-pHの推移

a) 無添加土壤 肥料のみを添加する土壤

b) 12Al土壤 土壤1kgあたり6mmolの硫酸アルミニウムを添加した土壤

c) 6Al土壤 土壤1kgあたり3mmolの硫酸アルミニウムを添加した土壤

d) 硫酸土壤 ポットあたり9mmolの硫酸を添加した土壤



第3-10図 各土壌条件におけるイネの葉のSPAD値の推移.

a) 無添加土壌 肥料のみを添加する土壌

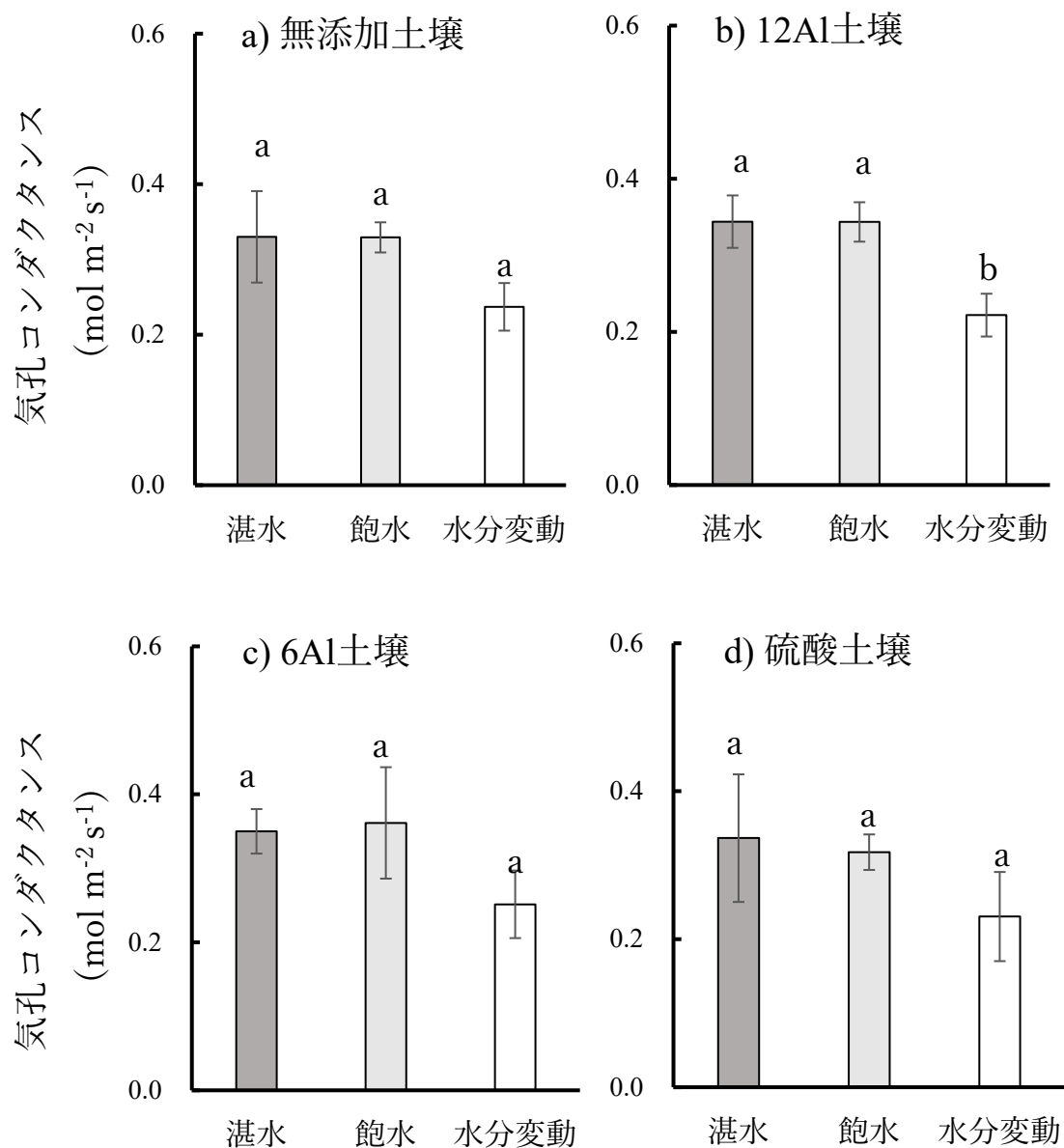
b) 12Al土壌 土壌1kgあたり6mmolの硫酸アルミニウムを添加した土壌

c) 6Al土壌 土壌1kgあたり3mmolの硫酸アルミニウムを添加した土壌

d) 硫酸土壌 ポットあたり9mmolの硫酸を添加した土壌

図中の矢印は窒素を追肥した日を示す.

図中のアスタリスクは、各移植後日数において、ANOVAにより5%水準で水管理方法による有意な差があることを示す.



第3-11図 各土壤条件において、水管理方法の違いがイネの気孔コンダクタンスに及ぼす影響。

測定は8月30日(移植後52日)に行われた。

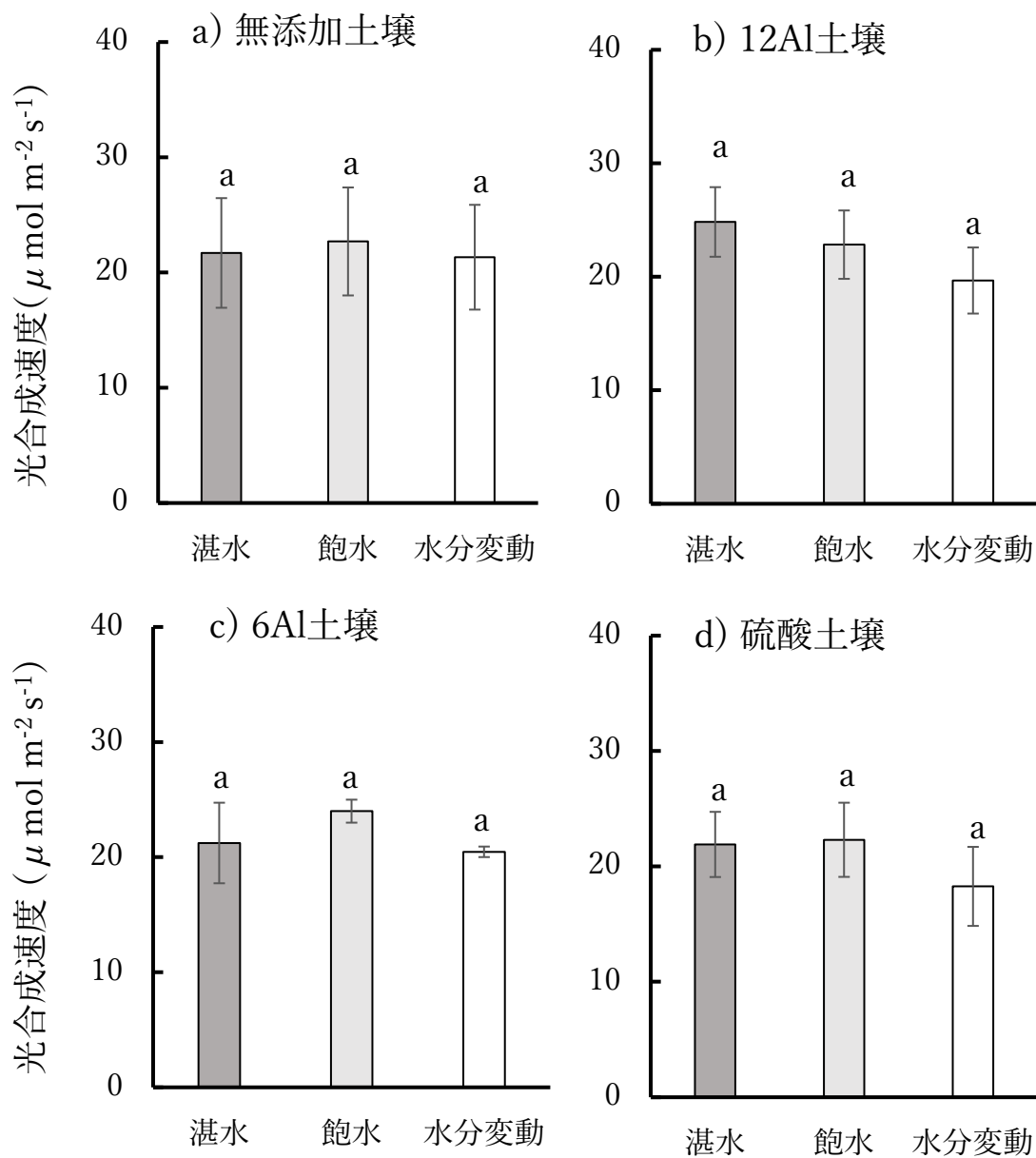
a) 無添加土壤 肥料のみを添加する土壤

b) 12Al土壤 土壤1kgあたり6mmolの硫酸アルミニウムを添加した土壤

c) 6Al土壤 土壤1kgあたり3mmolの硫酸アルミニウムを添加した土壤

d) 硫酸土壤 ポットあたり9mmolの硫酸を添加した土壤

図中の異なる文字は、水管理方法によりTukey検定で5%水準の有意差があることを示す。



第3-12図 各土壤条件において、水管理方法の違いがイネの気孔コンダクタンスに及ぼす影響.

測定は8月30日(移植後52日)に行われた.

a) 無添加土壤 肥料のみを添加する土壤

b) 12Al土壤 土壤1kgあたり6mmolの硫酸アルミニウムを添加した土壤

c) 6Al土壤 土壤1kgあたり3mmolの硫酸アルミニウムを添加した土壤

d) 硫酸土壤 ポットあたり9mmolの硫酸を添加した土壤

図中の異なる文字は、水管理方法によりTukey検定で5%水準の有意差があることを示す.

第 3-8 表 収量，収量構成要素に及ぼす土壌条件と水管理方法の影響.

| 測定項目 | 水管理 | 土壌条件 | | | | | | | | | | | |
|--|------|-------|----|----|----------|---|---|---------|---|----|------|----|----|
| | | 無添加土壌 | | | 12 Al 土壌 | | | 6 Al 土壌 | | | 硫酸土壌 | | |
| 穂数 (穂 pot ⁻¹) | 湛水 | 13.8 | a | A | 14.0 | a | A | 15.4 | a | A | 13.4 | a | A |
| | 飽水 | 14.4 | a | A | 13.8 | a | A | 14.2 | a | A | 13.0 | a | A |
| | 水分変動 | 14.6 | a | A | 14.2 | a | A | 15.3 | a | A | 13.8 | a | A |
| 1 穂粒数 | 湛水 | 74.2 | a | AB | 81.0 | a | A | 70.6 | a | B | 75.3 | a | AB |
| | 飽水 | 70.8 | a | A | 75.1 | a | A | 79.7 | a | A | 78.0 | a | A |
| | 水分変動 | 55.4 | b | A | 54.8 | b | A | 54.0 | b | A | 59.0 | b | A |
| 登熟歩合 (%) | 湛水 | 90.3 | a | A | 90.2 | a | A | 89.9 | a | A | 89.7 | a | A |
| | 飽水 | 86.8 | b | A | 87.7 | a | A | 86.6 | a | A | 86.9 | a | A |
| | 水分変動 | 87.1 | b | A | 87.6 | a | A | 87.2 | a | A | 89.4 | a | A |
| 1000 粒 (g) | 湛水 | 28.0 | a | A | 28.1 | b | A | 28.3 | a | A | 28.7 | a | A |
| | 飽水 | 27.3 | a | A | 27.4 | c | A | 27.3 | a | A | 27.8 | b | A |
| | 水分変動 | 27.5 | a | B | 28.7 | a | A | 28.2 | a | AB | 27.9 | b | AB |
| 粒収量 (g plant ⁻¹) | 湛水 | 25.8 | a | B | 28.6 | a | A | 27.4 | a | AB | 26.0 | a | AB |
| | 飽水 | 24.1 | a | A | 24.9 | b | A | 26.4 | a | A | 24.3 | a | A |
| | 水分変動 | 19.4 | b | A | 19.5 | c | A | 20.1 | b | A | 20.2 | b | A |
| 地上部 乾物重 (g plant ⁻¹) | 湛水 | 54.3 | ab | A | 57.5 | a | A | 57.8 | a | A | 54.8 | ab | A |
| | 飽水 | 57.2 | a | AB | 53.7 | b | B | 57.9 | a | A | 55.9 | a | AB |
| | 水分変動 | 50.2 | b | A | 50.8 | b | A | 51.6 | b | A | 50.4 | b | A |

無添加土壌 肥料のみを添加する土壌

12Al 土壌 土壌 1 kg あたり 6 mmol の硫酸アルミニウムを添加した土壌

6Al 土壌 土壌 1 kg あたり 3 mmol の硫酸アルミニウムを添加した土壌

硫酸土壌 ポットあたり 9 mmol の硫酸を添加した土壌

表中の異なる小文字のアルファベットは，各測定項目について，同じ土壌条件において水管理方法により Tukey 検定で 5%水準の有意差があることを示す.

表中の異なる大文字のアルファベットは，各測定項目について，同じ水管理方法において土壌条件により Tukey 検定で 5%水準の有意差があることを示す.

第 3-9 表 イネの窒素 (N), リン (P), カリウム (K) の吸収量におよぼす土壌条件と水管理方法の影響.

| 測定項目 | 水管理 | 土壌条件 | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|------|-------|----|---|----------|---|----|---------|----|---|------|---|---|
| | | 無添加土壌 | | | 12 Al 土壌 | | | 6 Al 土壌 | | | 硫酸土壌 | | |
| N 吸収量 (mg N pot ⁻¹) | 湛水 | 272 | a | B | 298 | a | A | 266 | a | B | 278 | a | B |
| | 飽水 | 285 | a | A | 279 | b | A | 282 | a | A | 279 | a | A |
| | 水分変動 | 261 | a | A | 270 | b | A | 270 | a | A | 267 | a | A |
| P 吸収量 (mg P pot ⁻¹) | 湛水 | 82 | ab | B | 95 | a | A | 78 | b | B | 86 | a | B |
| | 飽水 | 91 | a | A | 95 | a | A | 89 | a | A | 91 | a | A |
| | 水分変動 | 78 | b | A | 84 | b | A | 88 | a | A | 84 | a | A |
| K 吸収量 (mg K pot ⁻¹) | 湛水 | 559 | a | A | 536 | b | A | 587 | ab | A | 591 | a | A |
| | 飽水 | 550 | a | B | 580 | a | AB | 614 | a | A | 591 | a | A |
| | 水分変動 | 511 | a | A | 530 | b | A | 542 | b | A | 525 | a | A |

無添加土壌 肥料のみを添加する土壌

12Al 土壌 土壌 1 kg あたり 6 mmol の硫酸アルミニウムを添加した土壌

6Al 土壌 土壌 1 kg あたり 3 mmol の硫酸アルミニウムを添加した土壌

硫酸土壌 ポットあたり 9 mmol の硫酸を添加した土壌

表中の異なる小文字のアルファベットは、各測定項目について、同じ土壌条件において水管理方法により Tukey 検定で 5%水準の有意差があることを示す.

表中の異なる大文字のアルファベットは、各測定項目について、同じ水管理方法において土壌条件により Tukey 検定で 5%水準の有意差があることを示す.

第 4 章 節水栽培条件下におけるイネ の生育収量反応の品種間差異

緒言

節水栽培条件に対するイネの収量反応には品種間差がある。Matsuo と Mochizuki (2009) は、節水栽培に対する収量反応は陸稲品種と水稻品種で異なること、陸稲品種の中に AWD への適応性が高い品種があることを明らかにし、陸稲品種の AWD に対する高い適応性に根の活性を高く維持する能力が関係している可能性を指摘した。土壌の乾燥に伴う根の水分吸収の低下はイネの生育を抑制する。したがって、AWD 条件下でイネの生育を高く維持するためには、土壌乾燥時または再灌水時の根の吸水能力および蒸散能力の維持が重要であると考えられる。AWD よりも土壌の乾燥程度が大きい水分変動条件下でイネの生育を維持するためには、根域を拡大し、根の吸水を高く維持する能力が重要であることが報告されている (Kato と Okami 2010)。このような根系形質は AWD への適応性にも関わると考えられる。また、通気組織の存在により、ほかの作物に比べて水通導抵抗が大きいイネの根では (Miyamoto ら 2001)、代謝が抑制される低温のような条件下において水通導性は大きく低下する (Murai-Hatano ら 2008)。したがって、根の生理活性の違いが、AWD 条件下における養水分吸水能力に関与し、AWD に対する適応性の品種間差異をもたらしている可能性がある。

以上の背景より、第 4 章では、節水栽培条件への適応性に関わるイネの形質を明らかにすることを目的とした。第 1 節では、陸稲品種と水稻品種の節水栽培条件に対する生育反応や収量反応の違いについて調査した。第 2 節では、第 1 節で示された節水栽培条件に対する適応性に関与すると考えられた根への乾物分配能力と、根の生理活性および水通導性との関係に着目して実験を行った。

第1節 陸稲品種と水稻品種の節水栽培条件に対する生育

および収量反応の差異

緒言

本節では、陸稲品種と水稻品種を湛水条件と節水栽培条件で栽培し、水管理方法の違いがイネの生育および収量反応に及ぼす影響を調査するとともに、陸稲品種の節水栽培条件への適応性に関わる形質を解析した。

材料および方法

1. 栽培方法の概要

実験は、名古屋大学生命農学フィールド科学研究センター、東郷フィールドにあるビニールハウス内で2015年と2016年の5月～10月に実施した。ビニールハウス内に高さ約25 cmの木枠を作り、その中にビニールシートを敷いて土壌を約20 cmの深さで客土した。1区画の大きさは縦3.6 m × 横1.5 mとし、6区画用意した。灌水は各区画の土壌表面に設置したノズルの取り付けられた塩化ビニール管からおこなった。水稻品種としてジャポニカ品種の台中65号(T65)とインディカ品種のBasmati 370、陸稲品種としてIRAT109とアフリカのイネ生産性向上のために開発されたNERICA 1の4品種を供試し、NERICA 1とBasmati 370は2015年のみ使用した。2015年は5月28日に供試した4品種の種子を、2016年は5月9日にT65とIRAT109の種子を三河培土が敷き詰められた育苗ポットに播種し、2015年は6月17日、2016年は6月3日に縦25 cm × 横15 cmの間隔で1株あたり1本の苗を移植した。1区画を品種の数により4区画、または2区画の小区画にわけ、小区画ごとに同一品種を栽培した。水管理方法の違いにより、2つの試験区を設定し、常時湛水条件で維持する湛水区と、土壌表面から20 cmの深さの土壌水ポテンシャルが-50 kPa～-30 kPaに

達するまで灌水を停止した後、浅く湛水にするまで灌水する作業を繰り返すAWD区の2区とした。試験区の配置は水管理方法の違いを1次因子とする分割区法で3反復とした。肥料は、窒素(N)、リン酸(P)、カリウム(K)をそれぞれ硫酸、過リン酸石灰、塩化カリウムで施肥し、移植2日前に元肥としてN,P,Kをそれぞれ 60 kg ha^{-1} 、 90 kg ha^{-1} 、 90 kg ha^{-1} の割合で土壌に混ぜ込み、2015年は、移植後30日と46日、2016年は移植後30日と52日にそれぞれ 30 kg ha^{-1} のNを追肥した。

2. 測定方法および測定項目

1) 土壌水分状態の測定

AWD区において、土壌水ポテンシャルを経時的に測定するため、各区画に3本のテンシオメータ(DIK-8333, 大紀理化工業社製)を土壌表層から20 cmの深さに設置した。

2) AWD区土壌乾燥時の葉の気孔コンダクタンスの測定

AWD区の土壌乾燥がイネの蒸散能力に及ぼす影響を測定するため、AWD区の水ポテンシャルが -50 kPa ～ -30 kPa となった日に、IRAT109とT65について、各水処理区から任意に選んだ3個体の最上位展開葉における気孔コンダクタンスをリーフポロメーター(Decagon Device社製)で測定した。測定は、2015年は移植後29, 44, 60日に、2016年は再灌水する前の土壌が最も乾燥した全ての日に、午前10時から午後1時の間で行った。

3) 地下部、地上部の生育に関する測定

2015年は最高分けつ期(移植後45日)、出穂期～穂ぞろい期、登熟期に各品種5個体ずつ地上部を採取した(第4-1表)。出穂日は止葉の葉鞘から穂が出現した日と定義し、出穂期～穂ぞろい期の採取は、水稻品種が陸稲品種より出穂が遅かったため、陸稲品種と水稻品種で分けて行った。登熟日の採取は各品種出穂後40～45日に行い収量の測定にも用いた。

2016年は最高分けつ期(移植後49日)、出穂期から穂ぞろい期(出穂後10日)、登熟期(出穂

後 30 日) に、各品種から 5 個体ずつ地上部を採取した。地上部を採取した個体は 70 °C の乾燥機で 4 日間以上乾燥させた後、乾物重を測定した。

2015 年の最高分けつ期の個体、2016 年の最高分けつ期、出穂期～穂ぞろい期、登熟期の個体において、T65 と IRAT109 の地下部の採取も行った。地下部の採取方法は、各品種 3 個体について、直径 20 cm のステンレス製円筒を土壤に挿入することで土壤表面から深さ 20 cm (全層) の土壤塊を採取した。採取した土壤塊から根を洗い出し、WinRHIZO (Recent Instruments Canada 社製) で根長を測定した後、70°C の乾燥器で 4 日間乾燥させて根乾物重を測定した。また地上部乾物重と根乾物重の値から、地上部乾物重当たりの根乾物重を示す R/S 比を算出した。

4) 収量および収量構成要素の測定

2015 年は登熟期に地上部を採取した出穂後 40～45 日の個体について、2016 年は地上部の測定とは別に出穂後 40 日に収穫した個体について、収量および収量構成要素の測定を以下の方法で行った。はじめに採取した個体を穂と茎葉部に分け、穂数を計測した後に脱穀した。脱穀した粳は水選により分け、風乾した後沈んだ粳と浮いた粳の数を数えて登熟歩合を測定した。沈んだ粳については、粳数と粳の水分含有率 (Riceter f5, ケット科学研究所) を測定し、水分含有率が 14 % の 1000 粒重を算出した。収量は、粳数、登熟歩合、1000 粒重から算出した。

結果

1. AWD 区における土壤水分状態

2015 年と 2016 年の AWD 区の土壤水ポテンシャルは最も土壤が乾燥した時で -50kPa ～ -30 kPa の土壤水ポテンシャルで推移した (第 4-1 図)。2015 年は湛水期間に比べて乾燥期

間が長く、9回土壌乾燥と湛水が繰り返され、2016年は湛水期間が乾燥期間より長く、6回土壌乾燥と湛水が繰り返された。

2. AWD 区土壌乾燥時における葉の気孔コンダクタンス

2015 年は測定した全ての日において、両品種について、水処理が気孔コンダクタンスへ及ぼす影響に有意な差はなかった (第 4-2 図)。2016 年は、IRAT109 について、移植後 87 日において、AWD の土壌乾燥時の気孔コンダクタンスが湛水区より低下した (第 4-3 図)。T65 については、移植後 59 日、66 日、87 日において、AWD の土壌乾燥時の気孔コンダクタンスが湛水区より有意に低下した。

3. 収量および収量構成要素

2015 年において、T65 と Basmati 370 の収量は AWD 区で湛水区より低下した (第 4-2 表)。収量構成要素については、T65 は粒数、Basmati 370 は穂数および粒数が AWD により有意に低下した。IRAT109 と NRICA 1 については、2015 年は水管理方法による収量、収量構成要素への有意な影響はみられなかった。

2016 年は、T65 の収量に水管理方法の有意な影響はなかったが、1 穂粒数が AWD によって低下した。2016 年の IRAT109 については AWD 区の収量および粒数が湛水区より高くなった。

4. 最高分けつ期、出穂期～穂ぞろい期、登熟期の地上部乾物重

最高分けつ期において、2015 年、2016 年ですべての品種について AWD による地上部乾物重の低下傾向となり、2016 年の IRAT109 のみ有意な低下があった (第 4-3 表)。出穂期～穂ぞろい期において、Basmati 370 のみ AWD により地上部乾物重が有意に低下し、T65 低下傾向であった。IRAT109 と NERICA 1 の地上部乾物重に水処理による有意な影響はなか

った。登熟期において、2015 年の Basmati 370 について、AWD により有意に低下し、T65 について、低下傾向があった。

5. 最高分けつ期，出穂期～穂ぞろい期，登熟期の根長，根乾物重，R/S 比

2015 年の登熟期において、T65，IRAT109 両品種について、根長は AWD により増加する傾向があった (第 4-4 表)。2016 年は、最高分けつ期において T65 の根長が AWD により有意に低下したが、IRAT109 の根長に水処理による有意な影響はなかった。2016 年の最高分けつ期，登熟期は水処理による有意な影響はなかった。

2015 年の登熟期は、根乾物重に水処理による有意な影響はなかったが、R/S 比について IRAT109 は AWD により有意に低下した (第 4-5 表)。2016 年は最高分けつ期において T65 の根乾物重が AWD により有意に低下し、R/S 比が低下する傾向であった。IRAT109 の根乾物重は水処理による有意な影響はなく、R/S 比が AWD により有意に高くなった。出穂期～穂ぞろい期，登熟期においては、水処理による有意な影響は両品種でみられなかった。

考察および結論

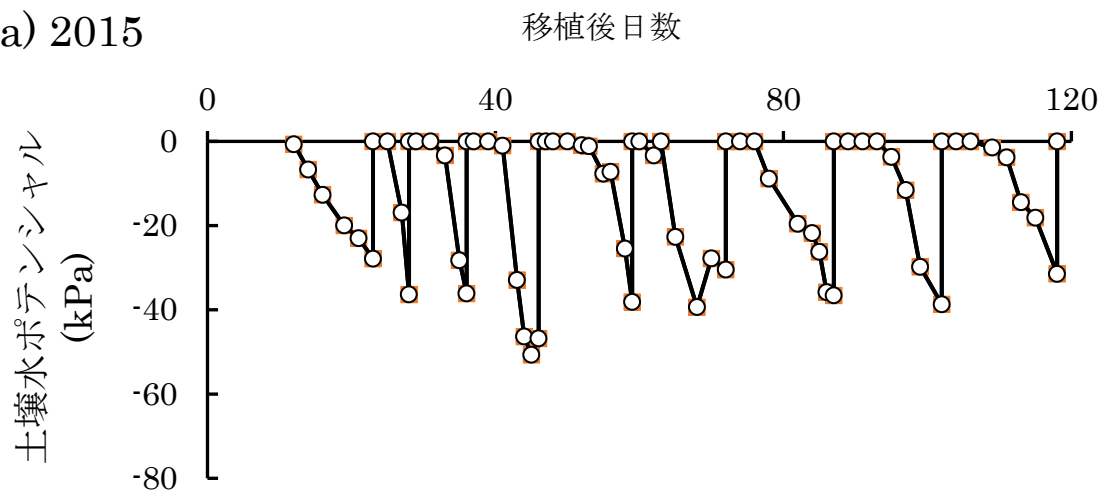
2015 年は水稻品種である T65 と Basmati 370 で籾数が低下したが、地上部乾物重の有意な低下は Basmati 370 のみであった。Basmati 370 の気孔コンダクタンスは本実験では測定しなかったが、土壌の乾燥に伴う水ストレスにより地上部乾物重生産能力が低下し、穂数が減少し、収量の低下をもたらしたと考えられる。一方、T65 に関しては、2015 年において AWD による気孔コンダクタンスの低下や地上部乾物重の有意な低下はなかったものの、籾数が低下し、収量が低下した。また、2016 年においても 1 穂籾数は有意に減少した。籾数が決定される幼穂形分化期から出穂期は、最も水ストレスへの影響を受けやすい生育段階であることから (Kikuta ら 2016)、T65 の収量低下は土壌の乾燥に伴う一時的な水ストレスで籾の形成が抑制されたことが要因であると考えられる。気孔閉鎖のような水ストレスへ

の応答が起きる以前に、水ストレスによる細胞の水ポテンシャル低下は、細胞伸長能力を低下させることから、気孔閉鎖による光合成能力の低下がなくても、籾数が決定されるような生育段階と土壌の乾燥期間が重なることで、収量低下が起きる可能性があると考えられた。

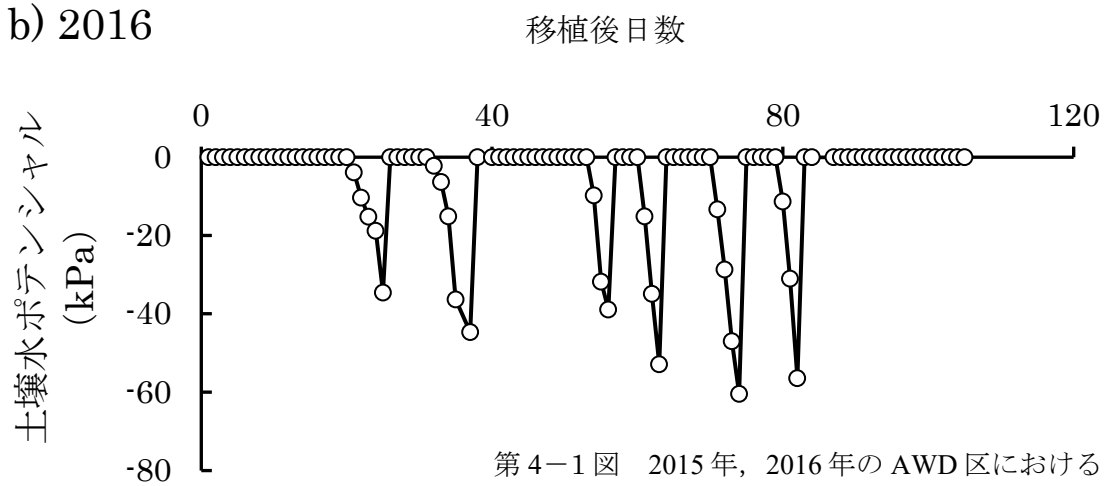
一方、陸稲品種である IRAT109 と NERICA 1 は、AWD による籾数や収量の低下はみられず、2016 年の乾燥期間が短い AWD では IRAT109 の収量が向上した。また、出穂期以降では AWD による地上部生育の低下はみられず、籾数も低下しなかった。このことから、陸稲品種は AWD 条件への適応性、つまり AWD によるイネの収量の低下が起こりにくくする能力に関わる形質を有しており、特に出穂期までの籾数が決定される期間の反応が重要であると考えられた。

本実験では、陸稲品種 IRAT109 が有する AWD の適応性に関わる形質として、根の反応性の違いが関与している可能性が示された。2016 年の最高分げつ期において、T65 は AWD による地上部乾物重の有意な低下はなかったが、根長および根乾物重の有意な低下がみられ、R/S 比は AWD で低下する傾向を示した。一方、IRAT109 の最高分げつ期における地上部乾物重は AWD により低下したが、根長および根乾物重に有意な差はなく、R/S 比は AWD によって高くなった。このことから、水稻品種が、土壌の乾燥過程で地上部に優先的に光合成同化産物を分配したのに対し、陸稲品種は根への光合成同化産物の分配を優先したものと考えられた。根へ分配された光合成同化産物は、根域の拡大とともに根の代謝能力の向上による活性の維持などにも消費されると考えられる。根域の拡大や根の代謝活動は葉の水ポテンシャルや蒸散能力の維持に重要な要素である。つまり、IRAT109 は土壌の乾燥を経験することで、戦略的に光合成同化産物を根へ分配し、節水栽培条件への適応性を高めることで、AWD 条件への適応している可能性がある。以上より本研究では、陸稲品種は AWD 条件への適応性が水稻品種より高く、その適応性には生育前半に光合成同化産物を根に優先的に分配する能力が関係していると考えられた。

a) 2015

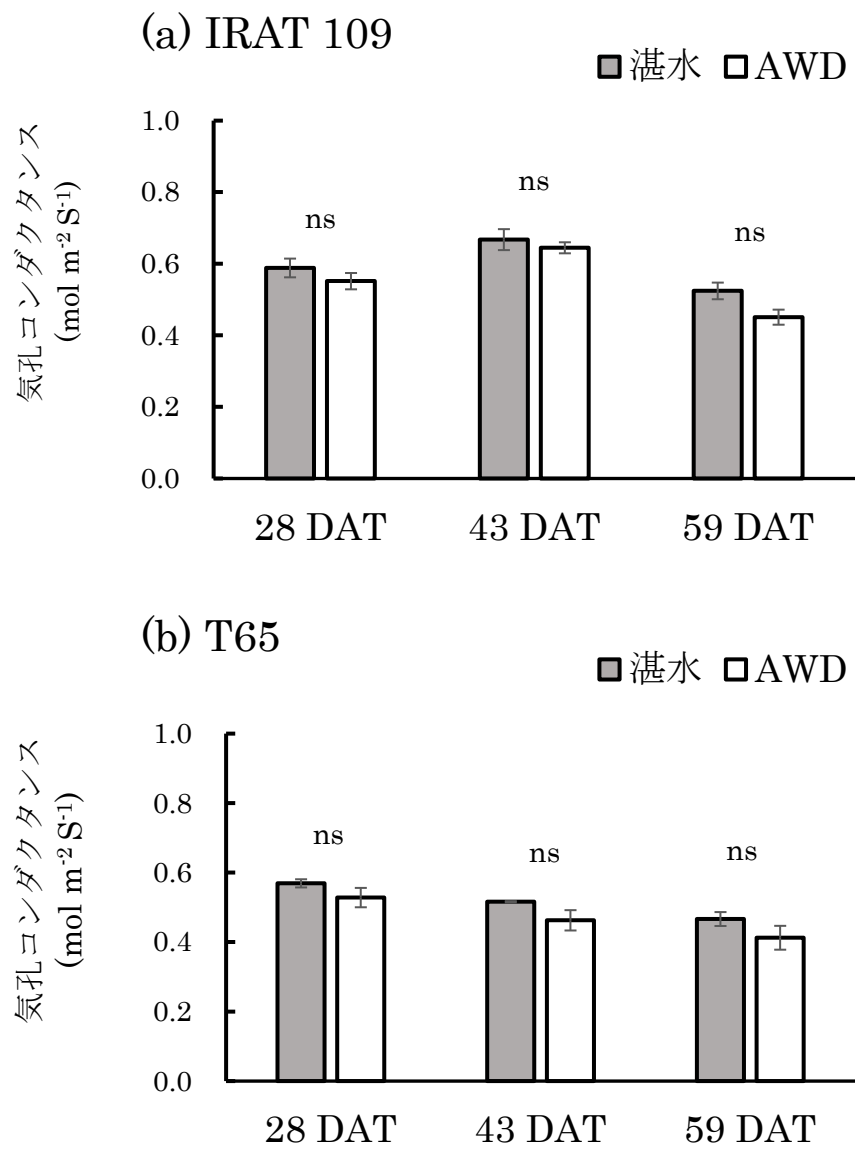


b) 2016

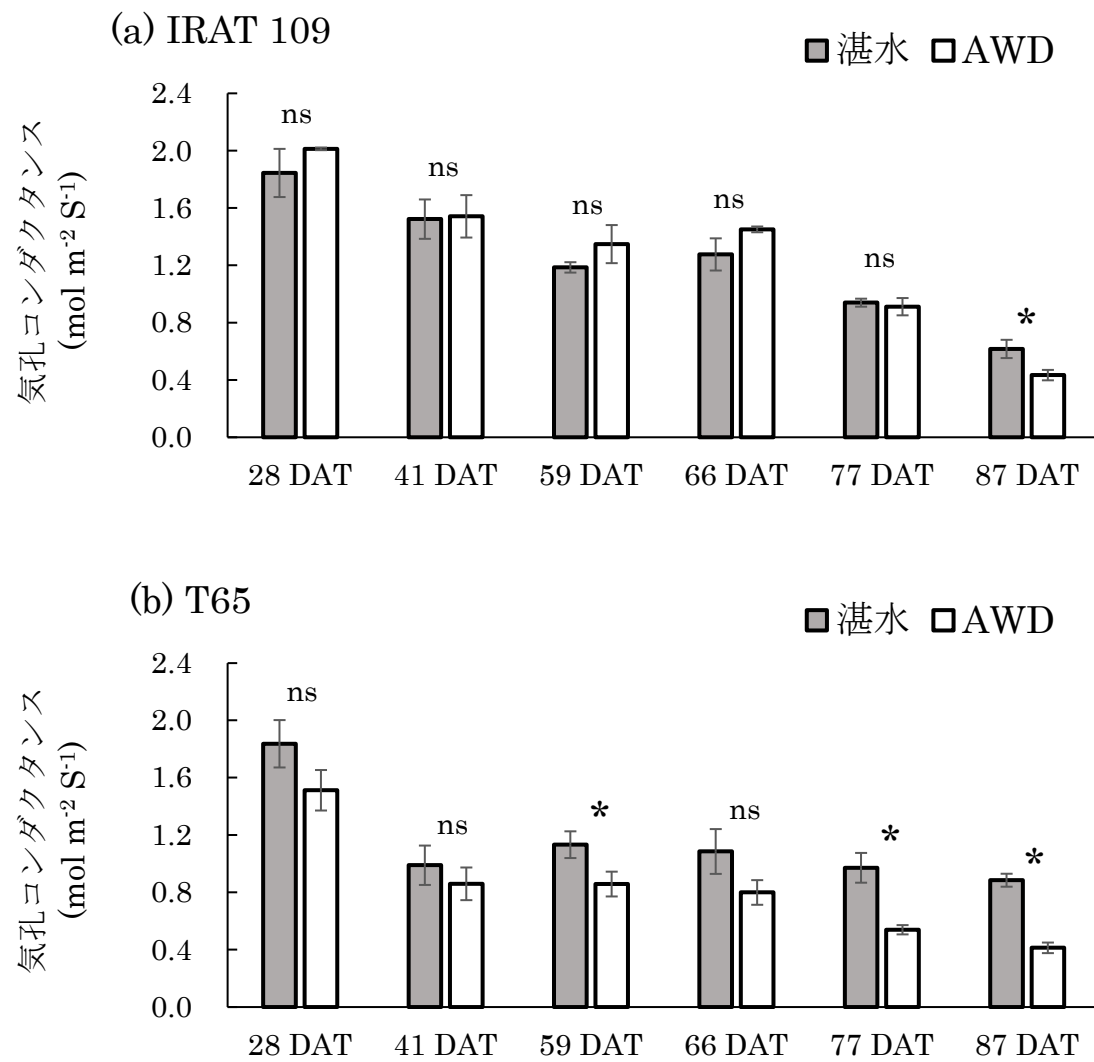


第4-1図 2015年, 2016年のAWD区における

土壌水ポテンシャルの推移.



第4-2図 2015年のAWD区土壌乾燥時の葉の気孔コンダクタンス.
DAT 移植後日数



第4-3図 2016年のAWD区土壌乾燥時気孔コンダクタンス.

DAT 移植後日数

図中の*は、水管理の影響について、T検定で5%水準の有意差があることを示し、nsは有意差がないことを示す.

第4-1表 2015年と2016年の各品種の地上部採取日および出穂日の移植後日数.

| 年 | 品種 | 採取日（移植後日数） | | | | 出穂日 （移植後日数） |
|------|-------------|------------|---------------|----------|----------|----------------|
| | | 最高 分けつ期 | 出穂期～ 穂ぞろい期 | 登熟期 | | |
| | | | | 出穂後 30 日 | 出穂後 40 日 | |
| 2015 | T65 | 45 | 86 | NS | 113 | 72 |
| | Basmati 370 | 45 | 86 | NS | 127 | 83 |
| | IRAT109 | 45 | 70 | NS | 95 | 55 |
| | NERICA 1 | 45 | 70 | NS | 104 | 64 |
| 2016 | T65 | 49 | 79 | 99 | 109 | 69 |
| | IRAT109 | 49 | 69 | 89 | 99 | 59 |

NS 採取していない日.

第4-2表 2015年と2016年の各品種における収量および収量構成要素.

| 年 | 品種 | 水管理 | 穂数 (穂 m ⁻²) | 1穂 粒数 (粒 穂 ⁻¹) | 粒数 (10 ⁴ 粒 m ⁻²) | 登熟歩 合 (%) | 1000 粒重 (g) | 収量 (g m ⁻²) |
|------|----------------|-----|----------------------------|----------------------------------|--|-----------------|-------------------|----------------------------|
| 2015 | T65 | 湛水 | 253.3 | 89.8 | 22.7 | 88.8 | 29.4 | 593.6 |
| | | AWD | 228.9 | 80.1 | 18.2 | 89.2 | 28.0 | 457.4 |
| | | 有意差 | ns | ns | * | ns | ns | * |
| | Basmati 370 | 湛水 | 273.3 | 139.3 | 38.1 | 72.0 | 23.5 | 643.7 |
| | | AWD | 220.0 | 144.0 | 31.5 | 74.3 | 23.9 | 562.6 |
| | | 有意差 | * | ns | ** | ns | ns | * |
| | IRAT109 | 湛水 | 203.0 | 119.3 | 24.2 | 72.8 | 33.1 | 582.9 |
| | | AWD | 208.1 | 126.0 | 26.1 | 77.9 | 33.6 | 686.6 |
| | | 有意差 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| | NERICA 1 | 湛水 | 151.1 | 122.8 | 18.5 | 76.9 | 26.3 | 374.8 |
| | | AWD | 142.2 | 137.3 | 20.5 | 86.1 | 27.0 | 477.5 |
| | | 有意差 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| 2016 | T65 | 湛水 | 222.2 | 113.8 | 25.3 | 90.0 | 28.6 | 651.0 |
| | | AWD | 235.6 | 101.3 | 23.9 | 89.3 | 28.6 | 609.1 |
| | | 有意差 | ns | * | ns | ns | ns | ns |
| | IRAT109 | 湛水 | 167.1 | 130.0 | 21.7 | 74.6 | 36.6 | 591.9 |
| | | AWD | 181.3 | 137.5 | 24.9 | 75.7 | 37.0 | 697.3 |
| | | 有意差 | ns | ns | * | ns | ns | * |

図中の*は、水管理の影響について、T検定で5%水準の有意差があることを示し、nsは有意差がないことを示す.

第4-3表 最高分けつ期，出穂期～穂ぞろい期，登熟期における各品種の地上部乾物重.

| 年 | 品種 | 水管理 | 地上部乾物 (g 個体-1) | | |
|------|-------------|-----|-------------------------|---------------|------------------|
| | | | 最高 分けつ期 ^a | 出穂期～ 穂ぞろい期 | 登熟期 ^b |
| 2015 | T65 | 湛水 | 15.0 | 40.4 | 57.6 |
| | | AWD | 13.6 | 33.8 | 52.5 |
| | | 有意差 | ns | ns | ns |
| | Basmati 370 | 湛水 | 18.3 | 49.4 | 82.1 |
| | | AWD | 14.1 | 42.7 | 68.5 |
| | | 有意差 | ns | * | * |
| | IRAT109 | 湛水 | 18.6 | 33.0 | 52.1 |
| | | AWD | 17.4 | 32.1 | 58.0 |
| | | 有意差 | ns | ns | ns |
| | NERICA 1 | 湛水 | 15.2 | 22.0 | 40.0 |
| | | AWD | 13.7 | 24.0 | 43.7 |
| | | 有意差 | ns | ns | ns |
| 2016 | T65 | 湛水 | 15.9 | 40.1 | 51.5 |
| | | AWD | 15.3 | 41.0 | 54.6 |
| | | 有意差 | ns | ns | ns |
| | IRAT109 | 湛水 | 20.1 | 36.7 | 41.0 |
| | | AWD | 17.6 | 37.8 | 46.1 |
| | | 有意差 | * | ns | ns |

図中の*は，水管理の影響について，T検定で5%水準の有意差があることを示し，nsは有意差がないことを示す.

^a 2015 年は移植後 45 日，2016 年は移植後 49 日に採取した個体で測定

^b 2015 年は出穂後 40 日，2016 年は出穂後 30 日に採取した個体で測定.

第 4-4 表 2015 年, 2016 年の分けつ期, 出穂期～穂ぞろい期, 登熟期における T65 と IRAT109 の根長.

| 年 | 品種 | 水管理 | 根長 (m 個体 ⁻¹) | | |
|------|---------|-----|--------------------------|---------------|-----------------------|
| | | | 最高 分けつ期 ^a | 出穂期 ～穂ぞろい期 | 登熟期 ^b |
| | | | (m 個体 ⁻¹) | | (m 個体 ⁻¹) |
| 2015 | T65 | 湛水 | NA | NA | 291 |
| | | AWD | NA | NA | 339 |
| | | 有意差 | | | ns |
| | IRAT109 | 湛水 | NA | NA | 286 |
| | | AWD | NA | NA | 336 |
| | | 有意差 | | | ns |
| 2016 | T65 | 湛水 | 271 | 413 | 291 |
| | | AWD | 177 | 363 | 339 |
| | | 有意差 | * | ns | ns |
| | IRAT109 | 湛水 | 245 | 374 | 286 |
| | | AWD | 227 | 348 | 336 |
| | | 有意差 | ns | ns | ns |

NA 採取, 測定していないことを示す.

図中の*は, 水管理の影響について, T検定で5%水準の有意差があることを示し, nsは有意差がないことを示す.

^a 2015 年は移植後 45 日, 2016 年は移植後 49 日に採取した個体で測定.

^b 2015 年は出穂後 40 日, 2016 年は出穂後 30 日に採取した個体で測定.

第 4-5 表 2015 年, 2016 年の分けつ期, 出穂期～穂ぞろい期, 登熟期における T65 と IRAT109 の根乾物重および R/S 比.

| 年 | 品種 | 水管理 | 最高分けつ期 ^a | | 出穂期～穂ぞろい期 | | 登熟期 ^b | |
|------|---------|-----|-----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| | | | 根乾物重 | R/S 比 ^c | 根乾物重 | R/S 比 ^c | 根乾物重 | R/S 比 ^c |
| | | | (g 個体 ⁻¹) | | (g 個体 ⁻¹) | | (g 個体 ⁻¹) | |
| 2015 | T65 | 湛水 | NA | NA | NA | NA | 2.44 | 42.38 |
| | | AWD | NA | NA | NA | NA | 2.06 | 39.24 |
| | | 有意差 | | | | | ns | ns |
| | IRAT109 | 湛水 | NA | NA | NA | NA | 2.22 | 42.61 |
| | | AWD | NA | NA | NA | NA | 2.12 | 36.53 |
| | | 有意差 | | | | | ns | * |
| 2016 | T65 | 湛水 | 1.42 | 88.96 | 1.93 | 48.02 | 1.64 | 32.00 |
| | | AWD | 1.14 | 75.83 | 1.76 | 42.89 | 1.69 | 31.01 |
| | | 有意差 | * | ns | ns | ns | ns | ns |
| | IRAT109 | 湛水 | 1.42 | 70.69 | 1.93 | 52.74 | 1.40 | 34.14 |
| | | AWD | 1.62 | 91.52 | 1.76 | 46.47 | 1.51 | 32.91 |
| | | 有意差 | ns | * | ns | ns | ns | ns |

NA 採取, 測定していないことを示す.

図中の*は, 水管理の影響について, T検定で5%水準の有意差があることを示し, nsは有意差がないことを示す.

^a 2015 年は移植後 45 日, 2016 年は移植後 49 日に採取した個体で測定.

^b 2015 年は出穂後 40 日, 2016 年は出穂後 30 日に採取した個体で測定.

^c 地上部乾物重 (g) あたりの根乾物重 (mg) で算出.

第2節 陸稲品種の節水栽培条件に対する適応性に関する生理形質

緒言

第1節より，陸稲品種は節水栽培条件下において，栄養成長期に根へ優先的に光合成同化産物を分配することが節水栽培条件への適応性に関与している可能性が示された．このため，本節では，陸稲品種 IRAT109 について，節水栽培条件下における根への乾物分配能力が根の生理活性や吸水能力および葉の蒸散能力にどのように貢献しているのかについて調査した．

材料および方法

1. 栽培方法の概要

実験は 2018 年の 7 月から 8 月に名古屋大学東山キャンパスの生命農学研究科の敷地内にあるビニールハウスの中で行った．第1節で使用した IRAT109 と T65 を供試した．内部の面積が 200 cm²，高さが 20 cm の円筒形ポットに，2 mm のふるいにかけて後に風乾した壤土質土壌を 4 kg 敷き詰め，N:P:K (14:14:14) の化成肥料を N，P，K がそれぞれポットあたり 90 mg 添加される割合で混ぜ込み，1.2 L の水を加えて 1 日間静置した．この土壌に，2 日間水道水で浸漬した T65 と IRAT109 の種子を 7 月 13 日に土壌に 3 粒ずつ直播した．すべてのポットについて播種後 7 日に生育した 3 個体の苗のうち 2 個体を間引き，1 ポット 1 個体のイネとなるようにした．播種後 25 日となる 8 月 7 日まで浅い湛水条件で維持した後，水処理を開始した．水処理は浅い湛水条件で維持する常時湛水条件と，約 18 %の土壌含水比 (Soil moisture content: SMC) まで乾燥処理した後 3 日間湛水にし，2

度目の乾燥処理により再び土壌含水比を約 18%にした後 3 日間湛水にする乾燥条件の 2 条件とした。

T65 と IRAT109 における両水処理条件のポットについて、播種後 30 日、33 日、36 日、39 日、46 日、49 日の計 6 回、4 個体ずつ測定とサンプリングをした。各サンプリング日の乾燥処理をしたポットにおける土壌水分状態は、播種後 30 日、33 日、36 日については、1 回目の乾燥処理により土壌含水比がそれぞれ、25%、22%、18%になった日とした。播種後 39 日のサンプリングは 1 回目の乾燥処理後灌水し、湛水状態で 3 日経過した日とし、2 回目の乾燥処理により土壌含水比が約 18 %となったときに播種後 46 日のサンプリングをした。播種後 49 日のサンプリングは、2 回目の乾燥処理後湛水にし、そのまま湛水状態で維持して 3 日経過した日におこなった。

2. 測定項目および測定方法

1) 蒸散速度の測定

蒸散速度は重量法によって、ポットの重さを測ることで測定した。本実験では、ポットの重さの減少速度が、ポット内で生育されるイネ全体の蒸散速度と土壌表面からの水分蒸発速度の合計であると仮定し、ポットの重さの減少速度から水分蒸発速度を除いた値をイネの蒸散速度とした。土壌表面からの水分蒸発速度はイネを生育させていないポットの重さを測ることで測定した。

常時湛水条件と乾燥条件および乾燥後の再灌水直後における蒸散速度について比較するため、乾燥条件のポットの土壌が乾燥状態である播種後 30 日、33 日、36 日、46 日については、蒸散速度の測定を以下の方法で 2 回行った、1 回目は、乾燥条件の土壌が乾燥状態である時に乾燥条件と湛水条件の蒸散速度の測定を行った。2 回目は、1 回目の測定の後乾燥条件のポットに灌水して湛水条件とてから約 1 時間経過した後に、乾燥条件と湛水条件のポットの蒸散速度の測定を行った。1 回目の測定は、両水処理条件のポットについて、

乾燥処理をしたポットの土壌含水比がそれぞれ 25 %, 22 %, 18 %, 18 %となっている 9 時 30 分から 11 時の間の 1 時間で行った。2 回目の測定は、乾燥条件のポットが浅く湛水になってから約 1 時間経過した 12 時から 13 時半の間の 1 時間に行った。乾燥条件のポットがすでに湛水状態となって 3 日経過している播種後 39 日と 49 日の蒸散速度の測定は 12 時から 13 時半の間の 1 時間で 1 度のみ行った。

2) 根の形質に関する測定

各サンプリング日における蒸散速度の測定の測定終了、14 時から 15 時半の間の 1 時間について、出液速度の測定を行った。本実験では、地表面から約 10 cm のところで茎を切断し、その上に事前に重さを測定した脱脂綿を置いてビニール袋で包み、1 時間経過後の脱脂綿の重量増加速度で出液速度を測定した。土壌が最も乾燥した播種後 36 日および 46 日に採取した出液について、出液の溶質濃度は自動浸透圧計（蒸気圧法オズモメーター 5520 型 WESCOR 社製）を用いて測定した。

出液速度の測定後、土壌をポットから抜き取り、水道水で洗った後地上部と地下部に分けて根部を取り出した。取り出した根を 500 ml の蒸留水に浸漬させ、浸漬前、浸漬 30 分後と 1 時間後に蒸留水の酸素濃度を測定することで、根の酸素消費速度を測定した。根の酸素消費速度を根の乾物重で割ることにより根の呼吸速度を算出した。WinRHIZO (Recent Instruments Canada 社製) で根の表面積を測定した後、70 °C の乾燥機で 4 日間乾燥させ根乾物重を測定した。根の酸素消費量を根乾物重でわることで根呼吸速度を算出した。Ishikawa ら (2014) の文献で示された以下の式を参考にして、浸透圧差を駆動力とする根の水通導性 ; $L_{pr} (os)$ を算出した。

$$L_{pr} (os) = J_v / (\sigma \times \Delta \Psi_s)$$

J_v は根表面積当たりの出液速度， $\Delta \Psi_s$ は出液と土壌溶液の溶質濃度差であり，本実験では土壌溶液の溶質濃度を 0 と仮定した． σ は出液の栄養塩類の反射係数であり，イネでは 0.4 と推定されている (Miyamoto ら 2001)．

4) 地上部生育に関する測定

地上部は，葉と茎にわけ，葉については葉面積計 (LI-3000C メイワフォーシス株式会社製) で各個体の葉面積を測定した，葉と茎を 70 °C の乾燥機で 4 日間乾燥させて地上部乾物重を測定した．イネ全体の蒸散速度を葉の葉面積でわることにより，単位葉面積あたりの蒸散速度とした．

5) 土壌含水比と土壌水ポテンシャル

各土壌含水比における土壌水ポテンシャルについてテンシオメータを用いて測定した値から，土壌水ポテンシャル値を算出した．

結果

1. 土壌水分状態の推移

土壌含水比は播種後 27 日の 40 % から徐々に低下し，播種後 37 日と播種後 46 日に 18 % に達したところで灌水され 40 % となった (第 4-4 図)．含水比 18 % の時の土壌水ポテンシャルは -35 kPa 程度であった．

2. 地上部乾物重，根乾物重および R/S 比

地上部乾物重は，T65 について播種後 46 日に水処理による有意な影響があり，乾燥条件で湛水条件より小さくなった (第 4-5 図)．IRAT109 については，播種後 36 日と播種後 49 日において乾燥条件の地上部乾物重が湛水条件より小さくなった．

根乾物重においては、T65 の播種後 39 日において、乾燥条件で小さくなる傾向がみられた。IRAT109 については、すべてのサンプリング日について水処理による有意な影響はみられなかった。

R/S 比は、T65 は播種後 39 日に乾燥条件で小さくなり、IRAT109 は播種後 49 日に乾燥条件により大きくなった。

3. 出液速度

播種後 33 日において、T65 の出液速度は、常時湛水条件より乾燥条件で高くなった（第 4-6 図）。播種後 36 日は T65、IRAT109 の両品種について、乾燥条件で出液速度が高くなった。再灌水 3 日後の測定である、播種後 39 日、49 日においては、乾燥条件で出液速度が小さくなった。2 度目の乾燥条件である播種後 46 日は、IRAT109 のみ乾燥条件で出液速度が高くなった。

4. 根表面積

根表面積は、播種後 39 日の測定時のみ IRAT109 について水処理による有意な差があり、乾燥条件で大きくなった（第 4-7 図）。播種後 46 日においては IRAT109 について乾燥条件により根の表面積が大きくなる傾向があった。

5. 播種後 36 日および、播種後 46 日における根表面積あたりの出液速度、出液の溶質濃度および浸透圧差を駆動力とする根の水通導性

播種後 36 日において、根表面積あたりの出液速度は両品種乾燥条件により高くなり、出液の溶質濃度は乾燥条件で低くなった（第 4-8 図）。浸透圧差を駆動力とする根の水通導性は両品種乾燥条件で大きくなった。

播種後 46 日において、根表面積あたりの出液速度は IRAT109 は乾燥条件で大きくなる傾向があった。出液の溶質濃度は IRAT109 で乾燥条件により低くなった。浸透圧差を駆動力とする根の水通導性は、IRAT109 について乾燥条件により高くなった。

6. 根の呼吸速度と浸透圧差を駆動力とする根の水通導性の関係

両品種について、根の呼吸速度と浸透圧差を駆動力とする根の水通導性に指数関数的な有意な正の相関関係があり、IRAT109 の相関係数は T65 より高かった (第 4-9 図)。播種後 46 日において、T65 は乾燥条件と湛水条件の呼吸速度に差はなかったが、IRAT109 は乾燥条件が湛水条件より呼吸速度が高くなった。

7. 浸透圧差を駆動力とする根の水通導性と葉面積あたり蒸散速度の関係

T65 は、浸透圧差を駆動力とする根の水通導性と 1 回目の測定における単位葉面積当たりの蒸散速度とは相関関係がなかった一方で、2 回目の測定における葉面積当たりの蒸散速度と有意な相関関係があった (第 4-10 図)。

IRAT109 は浸透圧差を駆動力とする根の水通導性は 1 回目の測定における単位葉面積あたり蒸散速度と負の相関関係であった一方で、2 回目の測定における単位葉面積当たりの蒸散速度とは有意な正の相関関係があった。

8. 1 回目と 2 回目の測定における単位葉面積当たりの蒸散速度の差

すべての播種日の水処理条件において、1 回目の単位葉面積当たりの蒸散速度に比べて 2 回目の単位葉面積当たりの蒸散速度が大きくなった (第 4-11 図)。播種後 36 日と播種後 46 日の測定において、IRAT109 は湛水条件に比べて、乾燥条件の方が蒸散速度の差が有意に大きくなった。

考察および結論

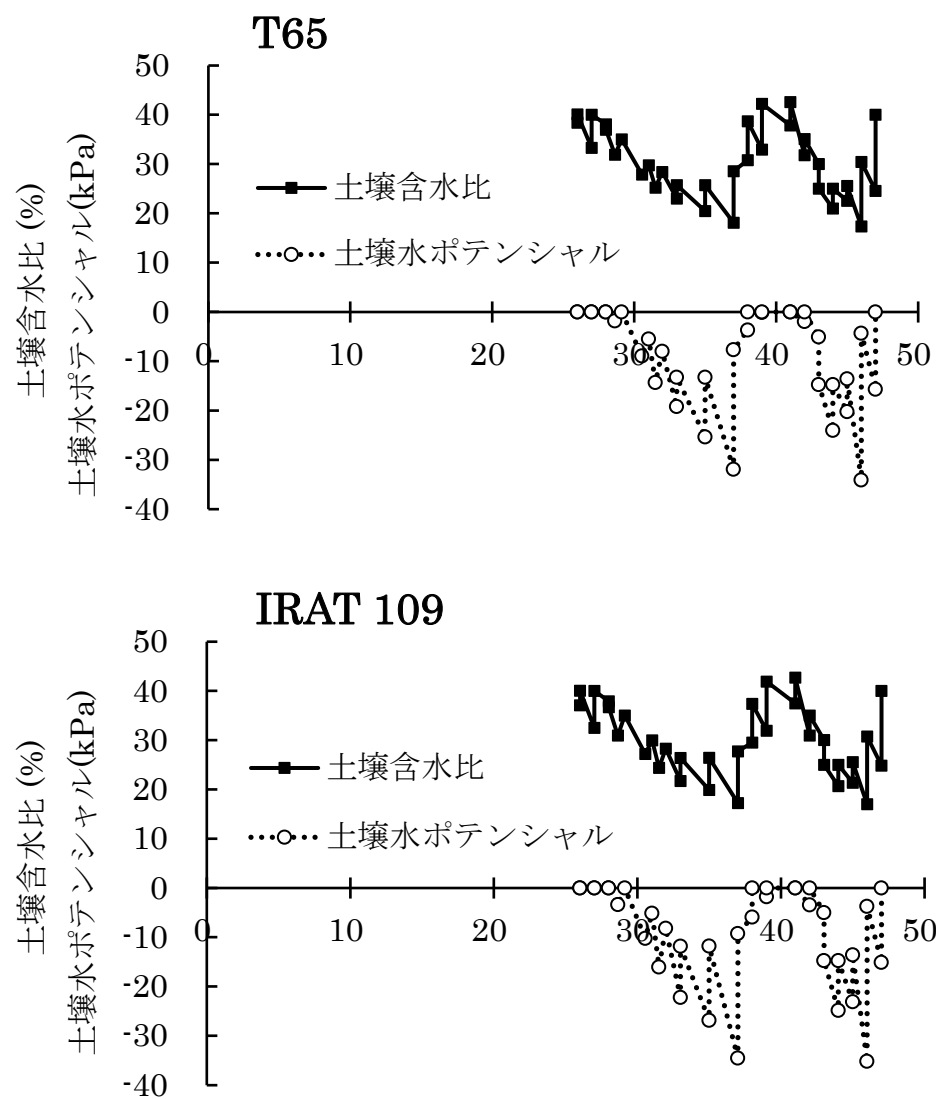
前節の結果と同様に、T65 は乾燥条件により R/S 比が小さくなり、IRAT109 は乾燥条件により R/S 比が大きくなる傾向がみられた。このことから、本実験のようなポット栽培条件においても、IRAT109 は節水栽培条件により光合成同化産物を根に優先して分配することが示された。

根の活性の指標とされる出液速度は乾燥条件により高まり、IRAT109 については 2 度目の乾燥条件でも高められた。この 2 度目の乾燥条件における結果は、以前に報告された、Matsuo と Mochizuki (2009) の結果を支持するものであった。以前の研究では、乾燥条件により出液速度が向上する原因については説明されなかったが、本実験では、乾燥による出液速度の向上は、浸透圧差を駆動力とする根の水通導性の向上が原因であることが示唆された。浸透圧差を駆動力とする根の水通導性は、細胞間経路の水通導性の指標とされており、イネは特にアポプラスト経路のバリアが多いことから (Schreiber ら 2005)、細胞間経路の水通導性が根の吸水量に影響を与えていると考えられる。さらに、根の浸透圧差を駆動力とする根の水通導性は、乾燥条件の再灌水直後における葉面積当たりの蒸散速度の向上に貢献していたことから、IRAT109 は土壌の乾燥により細胞間経路の水通導性を高め、再灌水直後の吸水能力および蒸散能力を回復および向上させていると考えられた。本実験では、1 度目の乾燥条件である播種後 36 日では両品種、乾燥条件により水通導性が大きく向上したが、2 度目の乾燥条件である播種後 46 日では両品種通導性が小さくなり、IRAT109 のみ乾燥により向上していた。このことから、特に、IRAT109 の節水栽培条件への適応性は、1 度目の生育初期の乾燥条件よりも、2 度目の乾燥条件にみられたように細胞間経路の根の水通導性が小さくなった生育段階において、乾燥に反応して水通導性を高める能力が重要であることが示唆された。

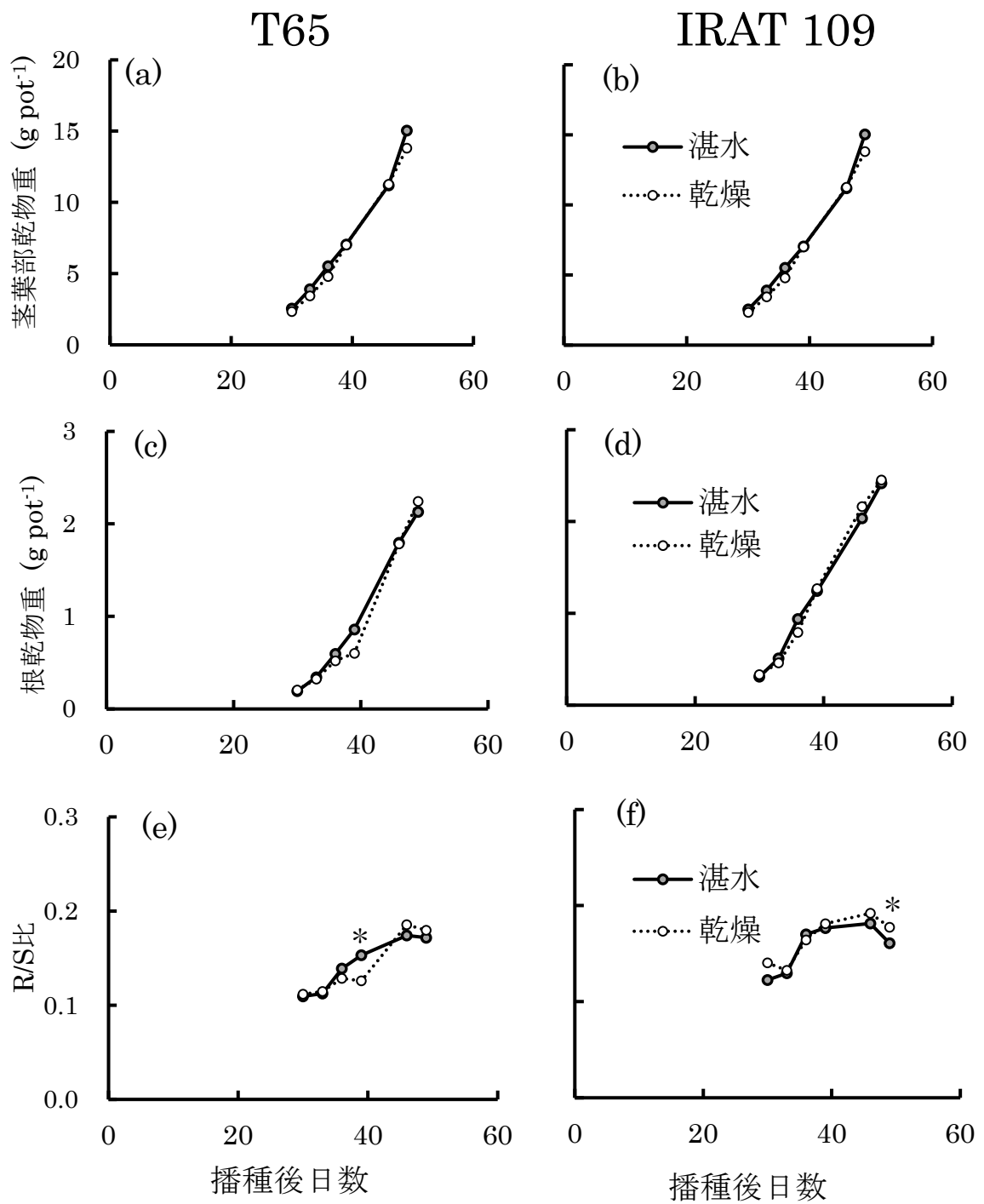
本実験において、浸透圧差を駆動力とする根の水通導性と根の呼吸速度との間には高い相関関係が認められ、根の生理活性の高さが、細胞間経路の高い水通導性をもたらしている

るものと考えられた。これまで、陸稲品種の土壤水分変動条件への適応性に関わる形質として、側根形成の促進のような可塑的な根の反応性が土壤乾燥時の蒸散能力の高さに貢献することは報告されているが (Niones ら 2012), 根の呼吸のような生理活性の貢献については明らかにされていなかった。本実験において、根の呼吸能力で示される生理的反応性についても節水栽培のような土壤水分変動条件への適応性に寄与することが示された。この生理的反応については、節水栽培条件における土壤乾燥時の蒸散能力ではなく、乾燥後の再灌水直後に蒸散能力を向上させていると考えられた。

陸稲品種は水稻品種に比べて節水栽培条件への適応性が高く、根の形質の違いがその適応性をもたらしていることが明らかにされた。特に陸稲品種 IRAT109 は、節水栽培条件に反応して、根へ光合成同化産物を優先的に分配することで、根域を拡大するとともに、根の生理活性を高めることで、根の吸水能力を高く維持し、再灌水直後の葉の蒸散能力を高めていることが示唆された。

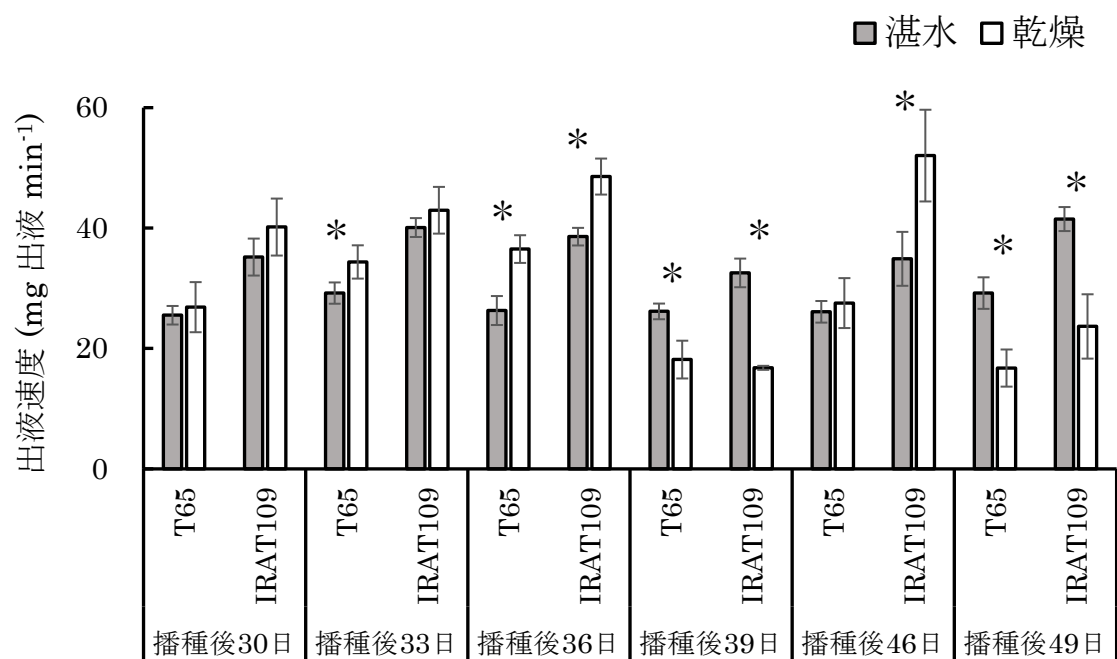


第4-4図 T65 と IRAT109 の乾燥条件における土壌含水比と土壌水ポテンシャルの推移.
土壌水ポテンシャルは土壌含水比の値から算出した.

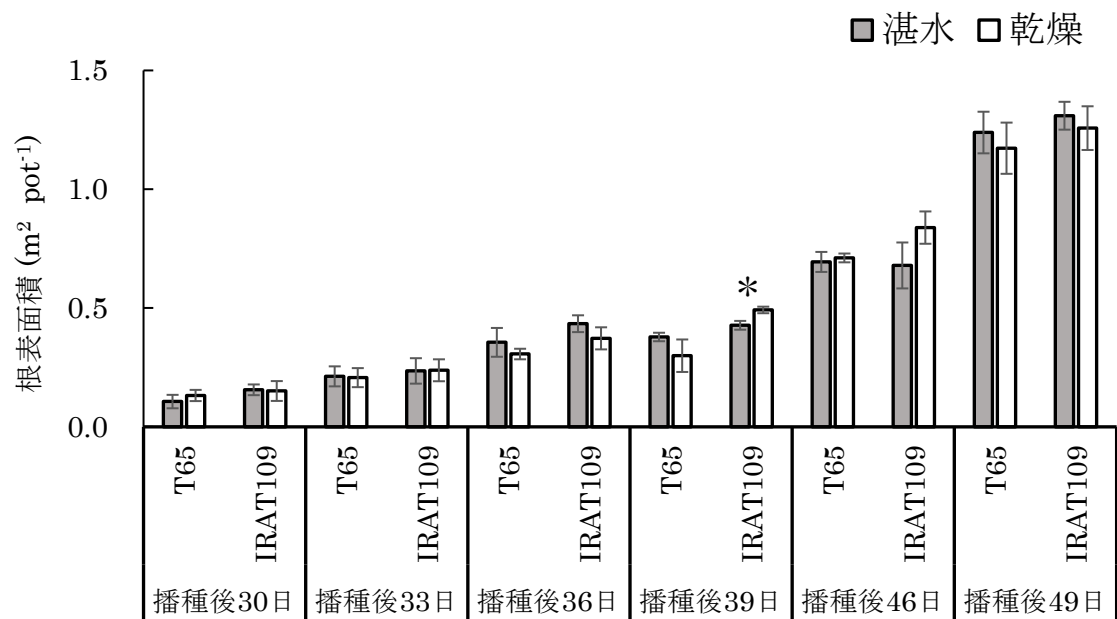


第 4-5 図 T65 (a, c, e)と IRAT109 (b, d, f) の各水処理条件における地上部乾物、根乾物重および R/S 比の推移.

図中の*は、水管理方法の影響について、T 検定で 5%水準の有意差があることを示す.

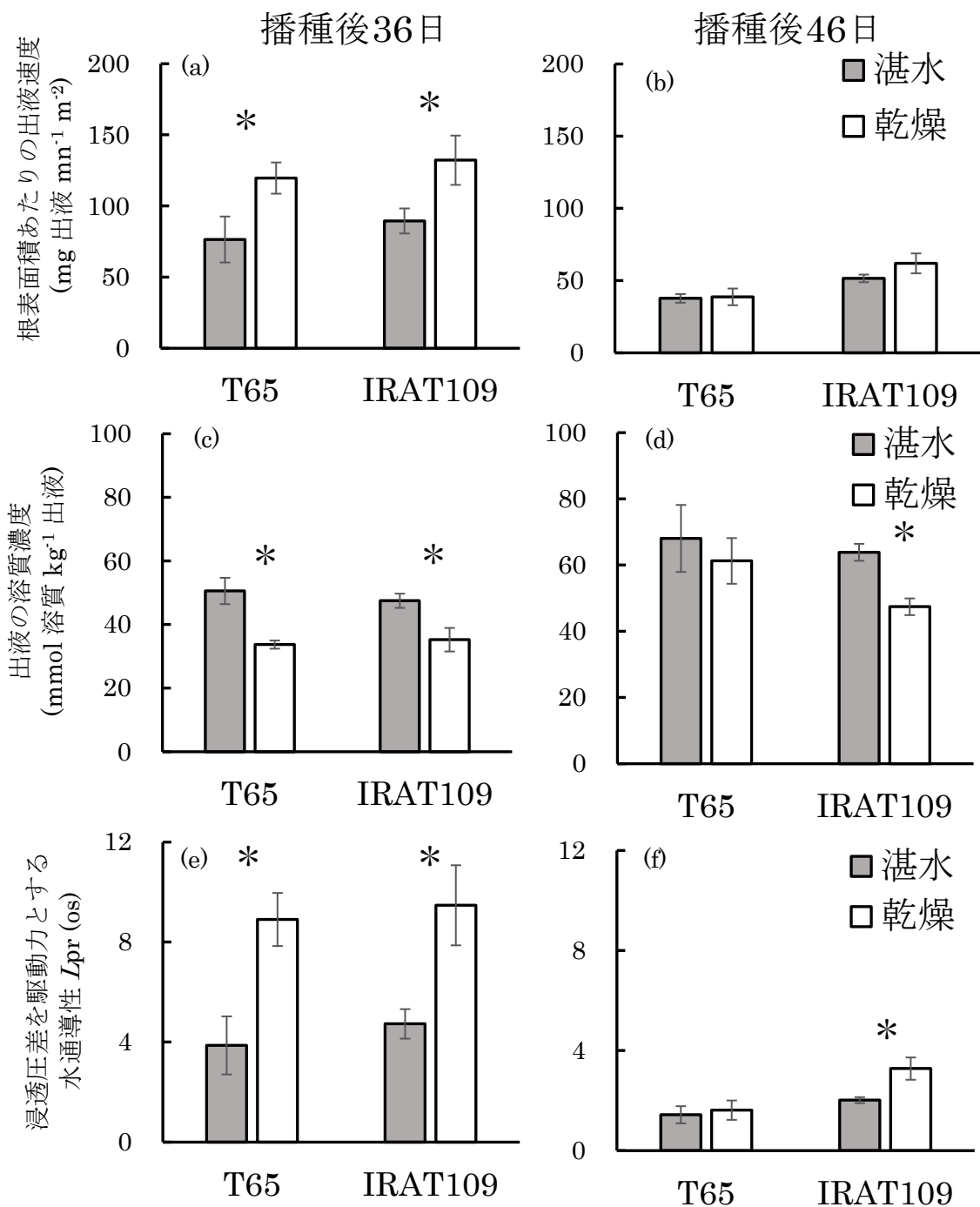


第4-6図 各播種後日数において、水処理がT65とIRAT109の出液速度に及ぼす影響。
 図中の*は、水管理方法の影響について、T検定で5%水準の有意差があることを示す。



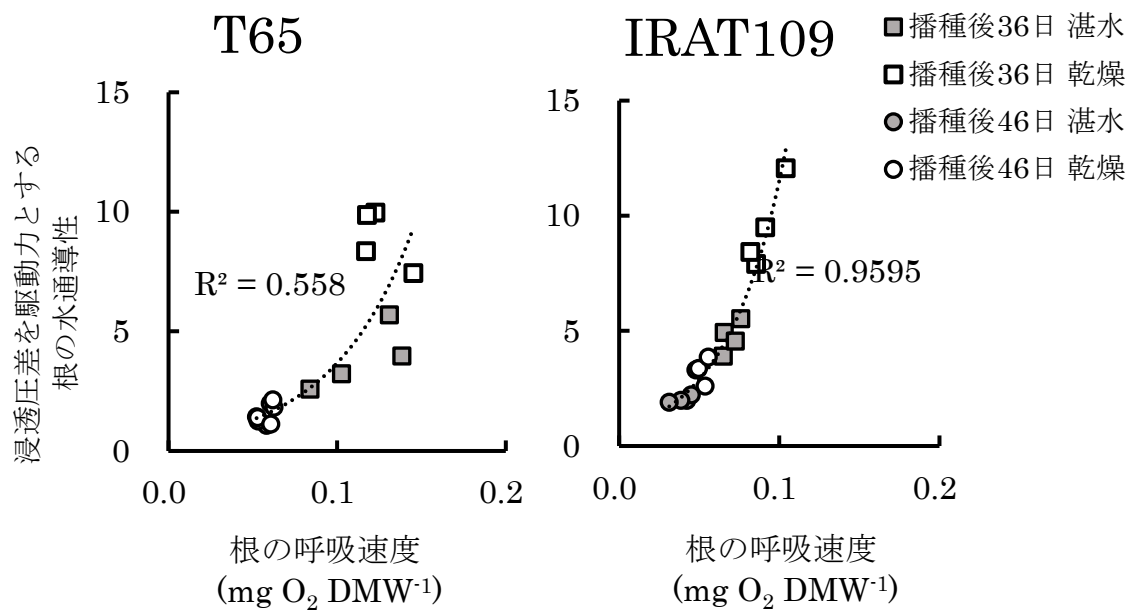
第 4-7 図 各播種後日数において、水管理方法の違いが T65 と IRAT109 の根表面積に及ぼす影響.

図中の*は、水管理方法の影響について、T 検定で 5%水準の有意差があることを示す.

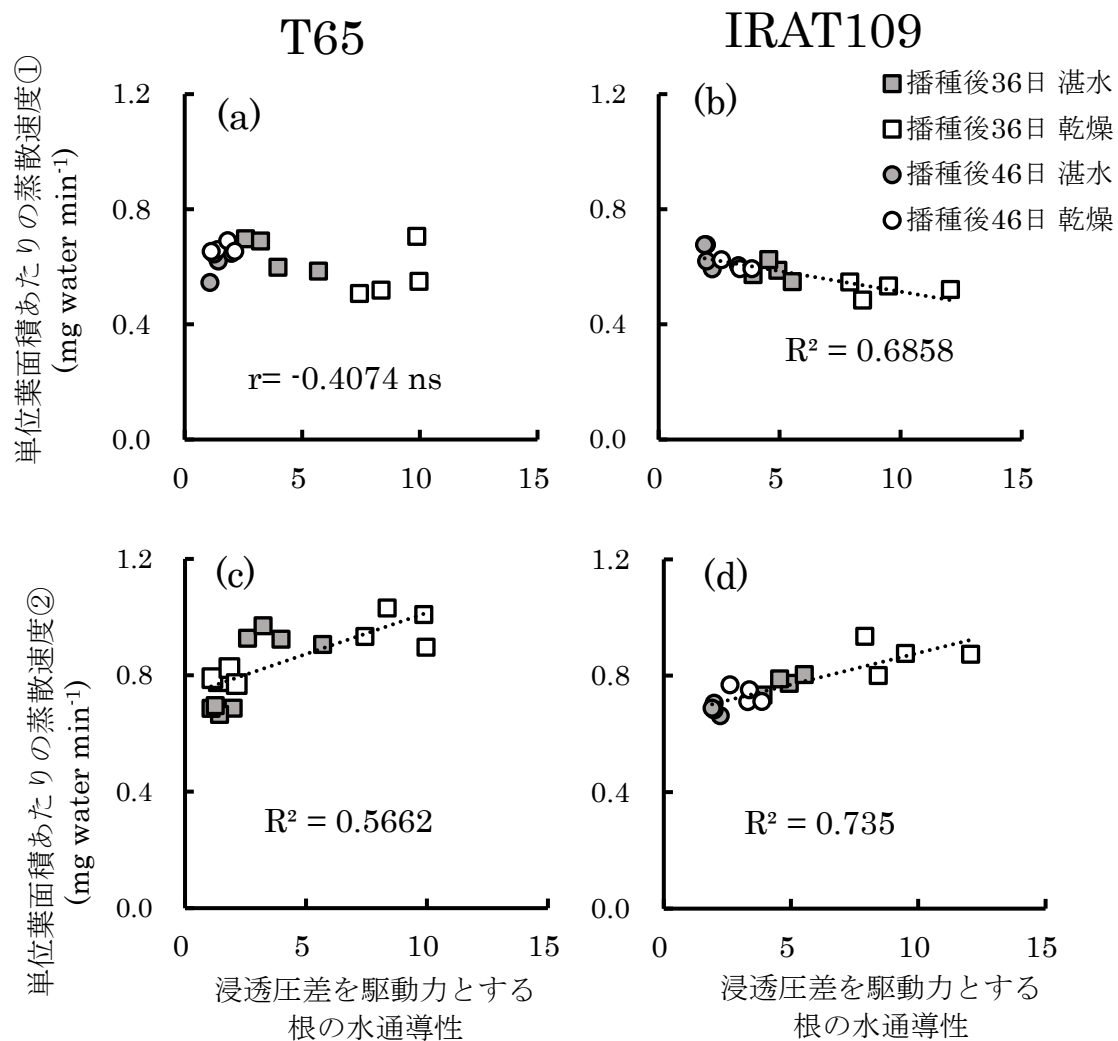


第4—8図 播種後36日(a,c,e), 46日(b,d,f)において, 水管理方法の違いがT65とIRAT109の根表面積あたりの出液速度, 出液の溶質濃度, 浸透圧差を駆動力とする水通導性に及ぼす影響.

図中の*は, 水処理の影響について, T検定で5%水準の有意差があることを示す.

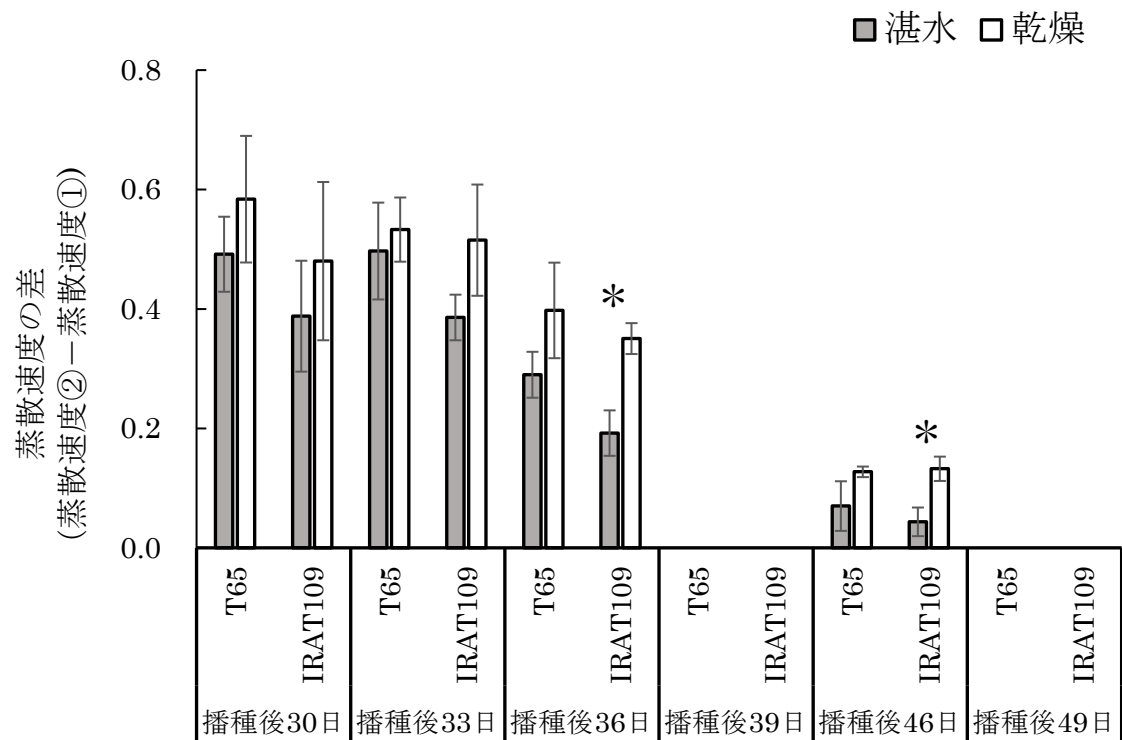


第4-9図 播種後36日と播種46日における根の呼吸速度と浸透圧差を駆動力とする根の水通導性の関係 (n=16).



第 4－10 図 播種後 36 日と播種後 49 日における乾燥条件再灌水前の葉面積あたり蒸散速度(a,b), 乾燥条件再灌水後の葉面積あたり蒸散速度(c,d)と浸透圧差を駆動力とする根の水通導性との関係.

両水処理条件において、蒸散速度①は 9 : 30～10 : 30 の間の 1 時間、蒸散速度②は、11 : 30～13 : 00 の間の 1 時間に測定. 蒸散速度②は乾燥条件のポットを再灌水して約 1 時間経過した後に測定.



第4-11図 1回目に測定された蒸散速度①(乾燥条件再灌水前)と2回目に測定された蒸散速度②(乾燥条件再灌水後)の差.

両水処理条件において、蒸散速度①は9:30~10:30の間の1時間、蒸散速度②は、11:30~13:00の間の1時間に測定. 蒸散速度②は乾燥条件のポットを再灌水して約1時間経過した後に測定.

図中の*は、水処理の影響について、T検定で5%水準の有意差があることを示す.

第 5 章 節水栽培技術とほかの栽培管理技術との組み合わせがイネの生産性に及ぼす影響

緒言

多くの研究において、節水栽培技術がイネの生産性に及ぼす影響はほかの栽培技術と組み合わせた条件で調査がされている。灌漑水の不足による生産性の低下が大きな問題となっているムエア灌漑地区では、節水栽培技術と有機肥料の添加、広い移植間隔、1株1本植えおよび播種後8～12日の乳苗の移植の組み合わせから構成される System of Rice Intensification (SRI) の栽培方法により、農家の慣行栽培方法に比べて、使用する灌漑水量が減少するとともに収量が大きく向上するとされている (Mati ら 2011, Omwenga ら 2014)。しかし、これらの研究では、節水栽培技術がイネの生産性に及ぼす影響や、ほかの栽培技術との組み合わせによる収量性の違いについては明らかにされていない。節水栽培技術とほかの栽培技術との組み合わせに関する研究としては、より若い苗の移植 (Mishora と Sahloke 2008) や有機肥料の添加 (Tujimoto ら 2009) との組み合わせによって収量が増加したことが報告されている。一方、広い移植間隔との組み合わせにより収量が低下したとの報告もある (Tujimoto ら 2009)。これらのことから、節水栽培条件下におけるイネの生産性を最大にする栽培技術の組み合わせは、栽培環境やイネ品種により異なるものと考えられる。したがって、ある稲作地域に節水栽培を導入する場合、その土地での最適な栽培技術の組み合わせを検証することが重要である。そこで本章では、ムエア灌漑地区における節水栽培で生産性向上に寄与する栽培技術を明らかにするため、同地域の主力水稻品種 Basmati 370 を供試し、SRI を構成する5つの栽培技術の組み合わせ効果を検証した。

材料および方法

1. 栽培方法

実験は、2014年9月～2015年3月、2015年8月～2016年2月、2016年9月～2017年3月の3期間において、ケニア農畜産業研究機構 (KALRO)、ムエア支所のキロゴ圃場 (00°40′

S, 37°18' E, 標高 1168 m) で行った。実験圃場の土壌はニティソルに分類される。実験には、ムエアの主力水稻品種 **Basmati 370** を供試した。

試験区として異なる水管理方法、肥料、移植間隔、1 株苗数、苗齢の組み合わせで構成される 7 処理区 (T1~T7) を 3 反復設けた (第 5-1 表)。処理区 T1 は、慣行の栽培技術の組み合わせとして、湛水、化学肥料のみの添加、普通の移植間隔 (20 cm × 20 cm)、1 株 3 本移植、中苗 (播種後 21 日) 移植の組み合わせで構成した。処理区 T2 は、SRI 技術の組み合わせとして、節水栽培技術である間断灌漑、有機肥料の添加、広い移植間隔 (30 cm × 30 cm)、1 株 1 本移植、乳苗 (播種後 12 日) 移植、の組み合わせで構成した。処理区 T3~T7 は、各栽培技術の影響を評価できるように 1 つの慣行技術と 4 つの SRI 技術の組み合わせで構成した。試験区の配置は、本実験では灌漑方法の都合上完全な乱塊法が困難であったため、湛水条件の 2 処理区 (T1, T7) と間断灌漑条件の 5 区 (T2, T3, T4, T5, T6) で圃場を分け、それぞれを乱塊法で配置した。各試験区は縦 7 m × 横 4 m とし、各試験区間に 1 m の間隔を設けた。

播種後 21 日の中苗を移植する T1 と T3 は、1 年目、2 年目、3 年目の作付けにおける移植日はそれぞれ、2014 年 10 月 16 日、2015 年 9 月 16 日、2016 年 10 月 10 日とした。播種後 12 日の乳苗を移植する T2, T4, T5, T6, T7 の 1 年目、2 年目、3 年目の作付けにおける移植日はそれぞれ、2014 年 10 月 21 日、2015 年 9 月 7 日、2016 年 9 月 21 日とした。

肥料はすべての処理区において、移植後 2 日に化成肥料 (N:P:K=17:17:17) を窒素、リン、カリウムの量が 1 ha あたり 25 kg となるように施肥し、移植後 20 日と移植後 50 日にそれぞれ硫安を窒素量が 1 ha あたり 25 kg となるように追肥した。有機肥料を添加した試験区については、移植前に 1 ha あたり 15 t の牛糞堆肥を施用した。間断灌漑をする試験区は、1 度目の追肥から灌漑水の供給を停止し、土壌の水位が -20 cm に達したら浅い湛水条件まで灌水することを収穫期まで繰り返した。除草は随時手作業により行い、雑草の影響を最小限に抑えるようにした。

2. 気象データおよび土壌条件に関する測定

各年の栽培期間における気象データ (気温, 降雨量, 日射量) は, 気象観測システム (Weather Bucket, アグリウェザー社製) を設置して測定した. 間断灌漑をする試験区の土壌水位は, 水が通過するための小孔を開けたビニールパイプを土壌に貫入し, パイプ内の水の高さを計測することで管理した. 地下 20 cm の土壌水ポテンシャルをテンシオメータ (DIK-8333, 大起理化工業社製) で測定した. 圃場の土壌は FAO-Unesco の分類方法でニテイスルに分類され 2014 年, 栽培開始前の土壌の性質について, pH (H₂O), EC (電気伝導率; Electric conductivity), 交換性カリウム (K), 交換性ナトリウム (Na), 交換性マグネシウム (Mg), 交換性カルシウム (Ca), 鉄 (Fe), 亜鉛 (Zn), マンガン (Mn), リン酸イオン (P₂O₅) の土壌濃度と総窒素量 (Total N) 及び総炭素量 (Total C) を測定した (第 5-2 表). K, Na, Mg, Ca は 1 M のアンモニウムアセテイトで抽出した後, Fe, Zn, Mn, は 0.1 N の塩酸で抽出した後, ICP 発光分析装置 (ICPE-9000, 島津製作所製) で抽出液中の濃度を決定した. P は Bray-II 法で測定した. Total C と Total N は炭素・窒素同時定量装置 (CN コーダ MT-700Mark2, ヤナコテクニカルサイエンス株式会社製) で測定した. 移植後における土壌の酸化還元電位 (ORP) と pH はそれぞれ ORP メーター (Exstick-RE300, Spectrum Technologies 社製) と pH メーター (Soilstick pH Meter, Spectrum Technologies 社製) を用いて 1 週間に 1 回, 約 3 cm の深さで測定した.

3. 収量, 収量構成要素, 地上部乾物重に関する測定.

各試験区の生育が平均的な 5 株のイネについて, 茎数, 草丈を 2 週間に 1 回手作業により測定した. 分けつ期および登熟期において, 最上位展開また止葉の葉緑素含有量 (SPAD 値) を葉緑素計 (SPAD-502, Minolta 社製) で測定した. 止葉葉鞘から穂が出現した時を出穂とし, 目視により各試験区の半分以上の株で出穂した日を出穂日として記録した. 1 年目

(2014 年～2015 年) の収穫は、各試験区から 1.2 m×1.2 m の区画で 3 か所について地上部を根元から刈り取った。2 年目および 3 年目の収穫は、各試験区から 1 m² の区画で 1 か所について地上部を根元から刈り取った。刈り取ったイネの穂数を数えた後、籾と藁に分け、籾は水選によって登熟籾と未登熟籾にわけた。登熟籾、未登熟籾は風乾した後重さを測り、それぞれについて 1000 粒の重さを測定することで総籾数および登熟歩合を算出した。登熟籾は、水分含有率 (Riceter f5, ケット科学研究所) を測定し、14 %の水分含有率における 1000 粒重とした。籾数、登熟歩合、1000 粒重の値から収量を算出した。藁は 80℃の乾燥機で 3 日間以上乾燥させたのち、乾物重を測定し、籾の総重量と藁の乾物重を合わせた重さを地上部乾物重とした。

4. 統計解析

圃場の水管理の都合により湛水条件の 2 区と間断灌漑条件の 5 区がわかれているが、本実験では、7 試験区 3 反復の乱塊法とみなして統計分析を行った。各栽培技術がイネの収量および収量構成要素に及ぼす影響は、重回帰分析の手法の 1 つである数量化I類によって分析した。

結果

1. イネ栽培期間中の気象データ

第 5-1 図に三作期における、栽培圃場の気温の推移を示した。イネ栽培期間中の日平均気温は 2014/2015 年、2015/2016 年、2016/2017 年でそれぞれ 21.9 °C, 21.9 °C, 21.7 °Cであった。イネ栽培期間中の総雨量は 2014/2015 年、2015/2016 年、2016/2017 年でそれぞれ 201 mm, 447 mm, 213 mm であった。イネ栽培期間中の総日射時間は 2014/2015 年、2015/2016 年、2016/2017 年でそれぞれ 877 時間, 879 時間, 876 時間であった。

2. 土壌水分状態および土壌 ORP, pH の推移

2014/2015 年の土壌の水位は 0 cm を下回る期間が長く、湛水条件の日はあまりなかった (第 5-2 図). 2015/2016 年の土壌水位は-15 cm 以下となる日は 4 回ほどで高い水位で維持された. 2016/2017 年の土壌水位は-15 cm 以下となる日が 8 回あった. すべてのイネ栽培期間において土壌水ポテンシャルが-10 kPa を下回ることにはなかった.

土壌の ORP について, 2014/2015 年と 2016/2017 年は移植直後から湛水条件である T1 と T7 は 0 mV を下回る値で推移し, 水管理を終了した出穂期以降で上昇した (第 5-3 図). 2015/2016 年は, 移植直後では試験区による違いは無かったが, 2~3 週間後から T1 と T7 の ORP は 0 mV を下回り, 出穂期以降も低い値で維持した. 土壌の pH について, 2014/2015 と 2016/2017 は水処理開始から 1 週間後には T1, T7 の pH が他の試験区より高くなり, 出穂期まで継続した. 2015/2016 年は水処理開始から 1 週間後から T1 と T7 で他の試験区より高い pH となり出穂期以降も継続した (第 5-4 図). 湛水条件の試験区 (T1, T7) におけるイネ栽培期間中の土壌の平均 pH は 2014/2015 年, 2015/2016 年, 2016/2017 年でそれぞれ 5.88, 5.50, 5.42 であった. 間断灌漑の試験区 (T2, T3, T4, T5, T6) における土壌の平均 pH は 2014/2015 年, 2015/2016 年, 2016/2017 年でそれぞれ 4.98, 4.77, 4.98 であった.

3. 2015 年および 2016 年の分けつ期と登熟期における茎数, 草丈, SPAD 値

2015/2016 年における分けつ期の茎数は, T1 と T5 が T2, T3, T6, T7 より有意に大きくなった (第 5-5 図). 出穂期には T1 が他の試験区より有意に大きい茎数となった. 2016/2017 年における分けつ期の茎数は T1 と T5 が他の試験区より有意に大きくなった. 出穂期の茎数は, T1 と T5 は T2, T3 より有意に大きくなった. 2015/2016 年の分けつ期と出穂期における草丈について, 試験区による有意な差はなかった. 2016/2017 年は, 分けつ期において T5 と T7 の草丈は T1 と T3 に比べて大きくなり, 出穂期において T7 は他の試験区より有意に大きな草丈となった. SPAD 値は, 2015/2016 年の分けつ期で, T4 と T5 は他

の試験区より小さな値となった。2016/2017年のSPAD値は、分けつ期においてT1とT3はT7に比べて有意に小さい値となり、出穂期には試験区による有意な差はなかった。

4. 各試験区の収量および収量構成要素

穂数は栽培年、試験区および栽培年と試験区の交互作用について有意な影響があった(第5-2表)。2014/2016年の穂数に試験区による差はなく、2015/2016年の穂数はT1が他の試験区より有意に大きくなり、2016/2017年の穂数はT5がT3より有意に大きくなった(第5-3表)。1穂粒数は栽培年と試験区による有意な影響があった。2014/2015年の1穂粒数は、T7がT1、T4、T5およびT6より有意に大きく、2015/2016年の1穂粒数はT7がT2、T3、T4およびT6より有意に大きく、2016/2017年は試験区による有意な差はなかった。粒数は栽培年と試験区および栽培年と試験区の交互作用に有意な影響があった。2014/2015年の粒数はT7が他の試験区より有意に大きく、2015/2016の粒数はT1がT2、T3、T4、T6より有意に大きく、T7はT2とT4より大きくなった。2016/2017年の粒数は試験区による有意な差はなかった。登熟歩合は栽培年と試験区に有意な影響があった。2014/2015年の登熟歩合はT1がT6より有意に小さく、2015/2016年の登熟歩合はT1がT3、T5、T6より有意に小さく、2016/2017年は試験区による有意な差はなかった。1000粒重は、栽培年、試験区及び栽培年と試験区の交互作用について有意な影響があった。2014/2015年の1000粒重はT1がT6より有意に大きく、2015/2016年の1000粒重に試験区による有意な差はなく、2016/2017年の1000粒重はT1がT2、T5、およびT6より有意に大きくなった。収量は栽培年、試験区および栽培年と試験区の交互作用について有意な影響があった。2014/2015年の収量はT1がT6より有意に小さくなり、2015/2016年の収量に試験区による有意な差はなく、2016/2017年の収量はT1がT2、T5、T6より有意に小さくなった。地上部乾物重は栽培年と試験区について有意な影響があった。2014/2015年の地上部乾物重は試験区による有

意な差はなく，2015/2016 年の地上部乾物重は T1 が T2 および T4 より大きくなり，2016/2017 年の地上部乾物重は T1 が T2，T3 および T4 より大きくなった。

2014/2015 年と 2016/2017 年は登熟歩合と収量に有意な正の相関関係があった(第 5-4 表)．2015/2016 年は穂数及び地上部乾物重と収量に有意な正の相関関係があった．2016/2017 年は 1000 粒重と収量に有意な負の相関関係があった。

5. 数値化I類による各栽培技術が収量，収量構成要素，地上部乾物重に及ぼす影響の評価．

穂数に対して有意な影響があった栽培方法の項目は，2014/2015 年は水管理と移植間隔，2015/2016 年は水管理，肥料，移植間隔，2016/2017 年は移植間隔であった(第 5-5 表)．2014/2015 年と 2015/2016 年の水管理の影響については，両年で間断灌漑は負の効果であった．すべての栽培年における移植間隔の影響については，広い移植間隔は負の効果であった．1 穂数に対して有意な影響があった栽培方法の項目は，2014/2015 年は肥料，2016/2017 年は移植間隔と 1 株苗数であった．2014/2015 年の肥料の影響については，有機肥料の投入は 1 穂数に正の効果を示した．2016/2017 年は，移植間隔について広い移植間隔は負の効果を示し，1 株苗数について 1 本移植は正の効果を示した．登熟歩合に対して有意な影響があった栽培方法の項目は 2014/2015 年は水管理，2015/2016 年は水管理と 1 株苗数，2016/2017 年は水管理と苗齢であった(第 5-6 表)．すべての栽培年について最もレンジが大きいのは水管理であり，間断灌漑が正の効果を示した．登熟歩合に対して，2015/2016 年の 1 株苗数については 1 本移植が正の効果を示し，2016/2017 年の苗齢については乳苗が正の効果を示した．1000 粒重に対して有意な影響があった栽培方法の項目は，2014/2015 年は苗齢，2015/2016 年は水管理，2016/2017 年は 1 株苗数であった．1000 粒重に対して，2014/2015 年の苗齢については乳苗が負の効果を示し，2015/2016 年の水管理については間断灌漑が負の効果を示し，2016/2017 年の 1 株苗数については 1 本移植が負の効果を示した．収量に対して有意な影響があった栽培方法の項目は，2014/2015 年は水管理，移植間隔および 1 株苗数，

2015/2016 年は水管理と移植間隔, 2016/2017 年は水管理, 1 株苗数及び苗齢であった (第 5-7 表). 収量に対する水管理の影響について, 2014/2015 年と 2016/2017 年は間断灌漑が正の効果を示した一方で, 2015/2016 年は間断灌漑が負の効果を示した. 収量に対する移植間隔の影響について, 2014/2015 年は広い移植間隔が正の効果を示し, 2015/2016 年は広い移植間隔が負の効果を示した. 収量に対する 1 株苗数の影響について, 2014/2015 年と 2016/2017 年の両栽培年において 1 本移植は正の効果を示した. 収量に対する苗齢の影響について, 2016/2017 年において乳苗は正の効果を示した. 地上部乾物重に対して有意な影響があった栽培方法の項目は, 2014/2015 年は水管理, 2015/2016 年は水管理と移植間隔, 2016/2017 年は水管理, 肥料および移植間隔であった. 地上部乾物重に対する水管理の影響について, すべての栽培年において間断灌漑は負の効果を示した. 地上部乾物重に対する移植間隔の影響について, 2015/2016 年と 2016/2017 年の両栽培年において広い移植間隔は負の効果を示した. 地上部乾物重に対する肥料の影響について, 2016/2017 年において有機肥料の投入は負の効果を示した.

考察および結論

本実験では, 試験区がイネの収量へ及ぼす影響に栽培年による違いがみられた. これは, 2014/2015 年と 2016/2017 年では, T1 の収量が最も小さくなっていたが, 2015/2016 年では試験区による有意な差がなかったためであると考えられる. 収量と有意な相関があったのは, 2014/2015 年と 2016/2017 年では登熟歩合であった一方で, 2015/2016 年は穂数であった. また, 水管理が登熟歩合に及ぼす影響は 2014/2015 年と 2016/2017 年は, 2015/2016 年より大きくなっていた. これらのことから, 水管理が登熟歩合に及ぼす影響が栽培年によって違うことが収量の影響に違いをもたらした大きな要因であることが示唆される. 2014/2015 年と 2016/2017 年では特に, 湛水条件による登熟歩合への負の効果が大きくなっており, 湛水条件の T1 と T7 で登熟歩合が小さくなった一方で, 間断灌漑条件では栽培年

による登熟歩合の変化は小さくかった。湛水条件における 2014/2015 年, 2016/2017 年と, 2015/2016 年のイネの登熟能力の違いに影響する環境条件として, 出穂期前後の気温が考えられる。出穂期前後の気温について, 平均気温では栽培年による大きな違いはないが, 最低気温では 15°C を下回る日が 2014/2016 年と 2016/2017 年では 15~20 日ほどあった一方で, 2015/2016 年では 3 日間のみであった。出穂期前後の低温はイネの登熟能力を低下させることは報告されている (Satake と Koike 1983)。また, 15°C を下回るような温度に根がさらされることは, 大きな根の給水能力の低下を招くことも分かっている (Murai-Hatano ら 2008)。本実験では登熟能力の低下が不稔粒の増加が要因であるのか受精後の未登熟によるものかについては明らかにされなかったが, 出穂期前後の低温が, 湛水条件の不稔粒や未登熟粒を大きく増加させた可能性が考えられた。一方, 低温による不稔粒の発生には根の生理活性の大きさが関係していること (Yamamoto と Nishimura 1986) や低温による給水能力の低下にはアクアポリンのような細胞の水チャネルの活性が影響していることが示されている (Murai-Hatano ら 2008)。これまでの研究において, 間断灌漑により湛水条件に比べて根の活性が向上することが報告されている (Mishra と Salokhe 2011)。また, 本実験で用いた圃場の土壌は, 鉄イオン濃度が高い一方, カリウムイオンの濃度が低く, 長期間の嫌気条件で根の活性低下や枯死が起こりやすい性質であった (Becker と Asch 2005)。本研究では, 根の活性の調査は行っていないが, 間断灌漑による根の活性の向上が, 低温による不稔の増加や水吸収能力の低下を抑えた可能性があると考えられた。

間断灌漑の効果として, 上記の登熟歩合に対する正の効果がみられた一方, 地上部乾物重についてはすべての栽培年で負の効果であり, 2014/2015 年と 2015/2016 年においては穂数に対して負の効果があった。本実験では, すべての栽培年において, 湛水条件により土壌の ORP が大きく低下し, 嫌氣的になった一方, 間断灌漑をすると土壌は好氣的に維持されていた。これまでの研究において鉄イオンが多く pH が低い土壌では, 土壌嫌気化による窒素無機化量が大きいことが報告されており (Kader ら 2013), 本研究でイネが栽培された

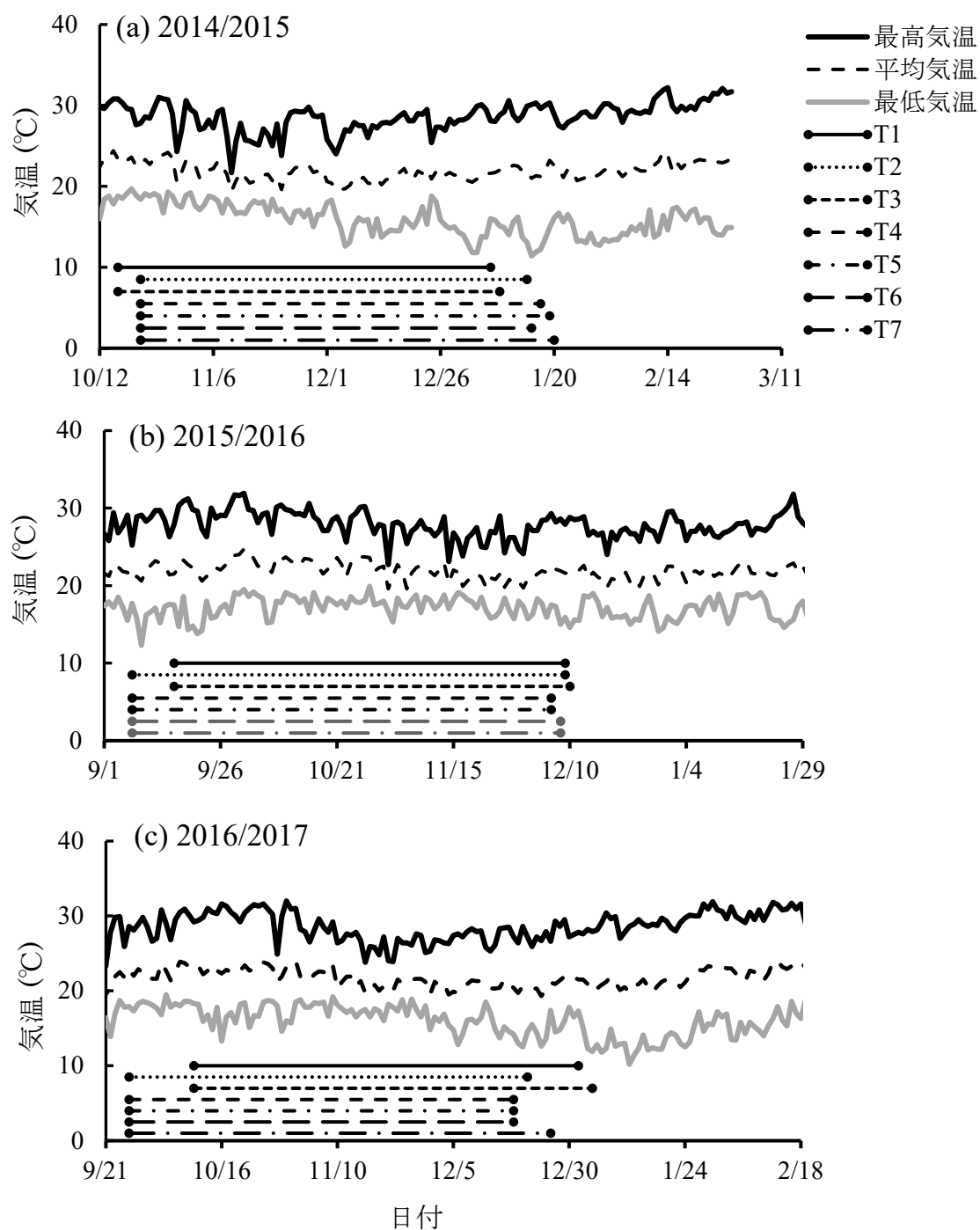
土壌も移植前の土壌は酸性であり、鉄イオンの濃度も高いことから、湛水条件における無機化窒素量の増加が間断灌漑条件より高い分けつ能力や乾物生産能力をもたらした可能性がある。

移植間隔の違いは穂数に大きな影響を及ぼした。すべての栽培年において、広い移植間隔は穂数を減少させ、2015/2016 年は収量および地上部乾物重も広い移植間隔により低下した。イネは移植時に広い株間であっても分けつ数を増加させることで、面積当たり茎数を補償することができるとされる。しかし、肥沃度が低い土壌では、イネの分けつ能力が発揮されにくいことから、より狭い移植間隔を検討する必要があるとされている (Uphoff ら 2011)。本実験を実施した圃場の土壌の性質において、Basmati 370 を栽培する場合においては、30 cm × 30 cm という移植間隔では分けつによる補償が十分になされないため、最適な移植間隔の検討が必要である。

2014/2015 年と 2016/2017 年においては 1 株苗数について収量に有意な影響があった。両栽培年において 1 株 1 本移植は正の効果を示し、2016/2017 年は 1 穂粒数に対して 1 株 1 本移植の正の効果があった。San-oh ら (2006) は 1 株苗数が 3 本であるより 1 本である方が葉の窒素量が増加し、登熟期の光合成速度が高くなるとしているが、本研究では 2016/2017 年の分けつ期および登熟期における SPAD 値について、1 株 3 本移植である T4 と他の試験区との間に有意な差はなかった。本実験では、1 株 1 本移植が特定の生育段階および収量構成要素へ及ぼす影響は小さかったが、最終的な収量の向上には貢献したものと考えられた。

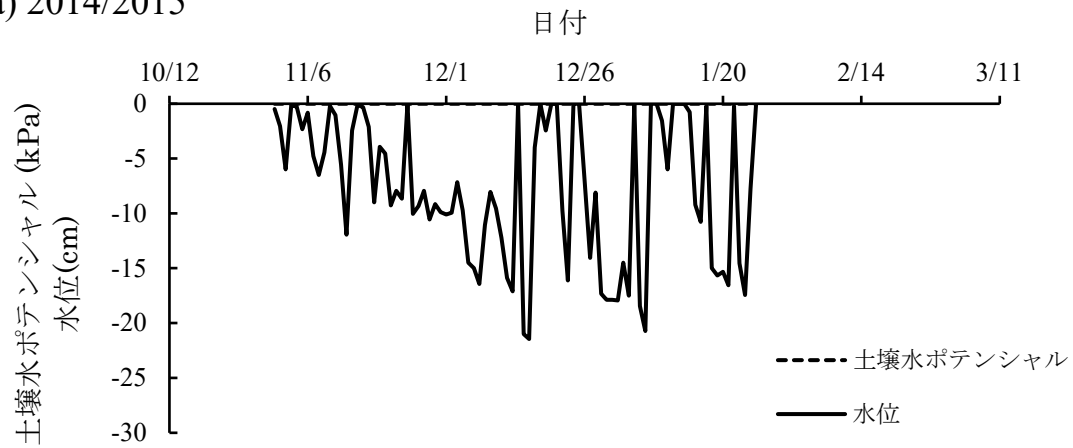
収量について試験区による有意な差があり、2015/2016 年および 2016/2017 年で最も収量が大きくなったのは T5 (間断灌漑、有機肥料の投入、普通の移植間隔、1 株 1 本移植、乳苗移植) であった。T5 は分けつ期から高い穂数が維持されており、2016/2017 年では登熟期についても広い移植間隔と間断灌漑が組み合わされた他の試験区より高い茎数が維持されていた。間断灌漑や広い移植間隔はともに穂数に負の効果を示していたことから、間断灌漑と広い移植間隔の組み合わせは面積当たりの茎数を減少させ穂数を顕著に減少させ、収量

の低下を招くと考えられる。ムエア灌漑地区での **Basmati 370** の栽培において、間断灌漑と組み合わせる最適な移植間隔については、より詳細な調査が必要である。

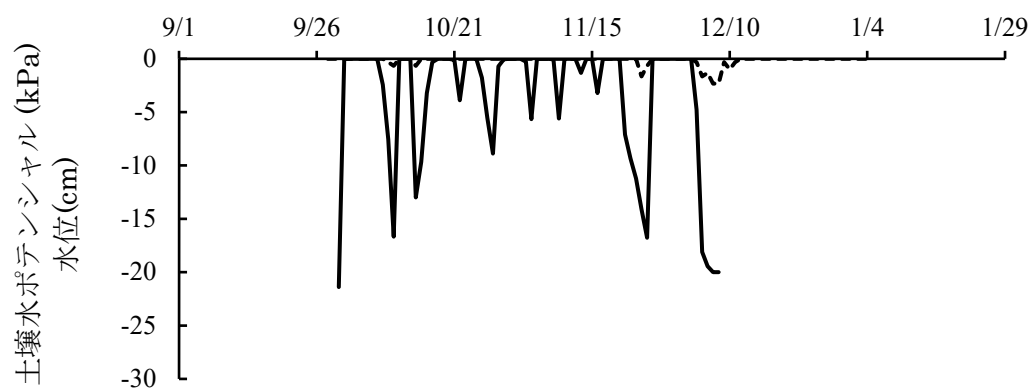


第5-1図 栽培期間中のイネの栽培期間中の最低気温、最高気温および平均気温の推移。
図中の線は、始点が各試験区の移植日、終点が各試験区の出穂日を意味する。

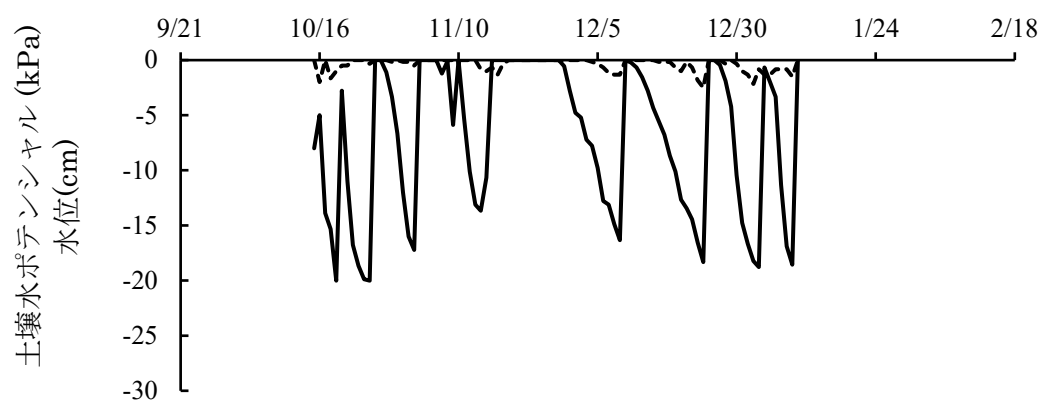
(a) 2014/2015



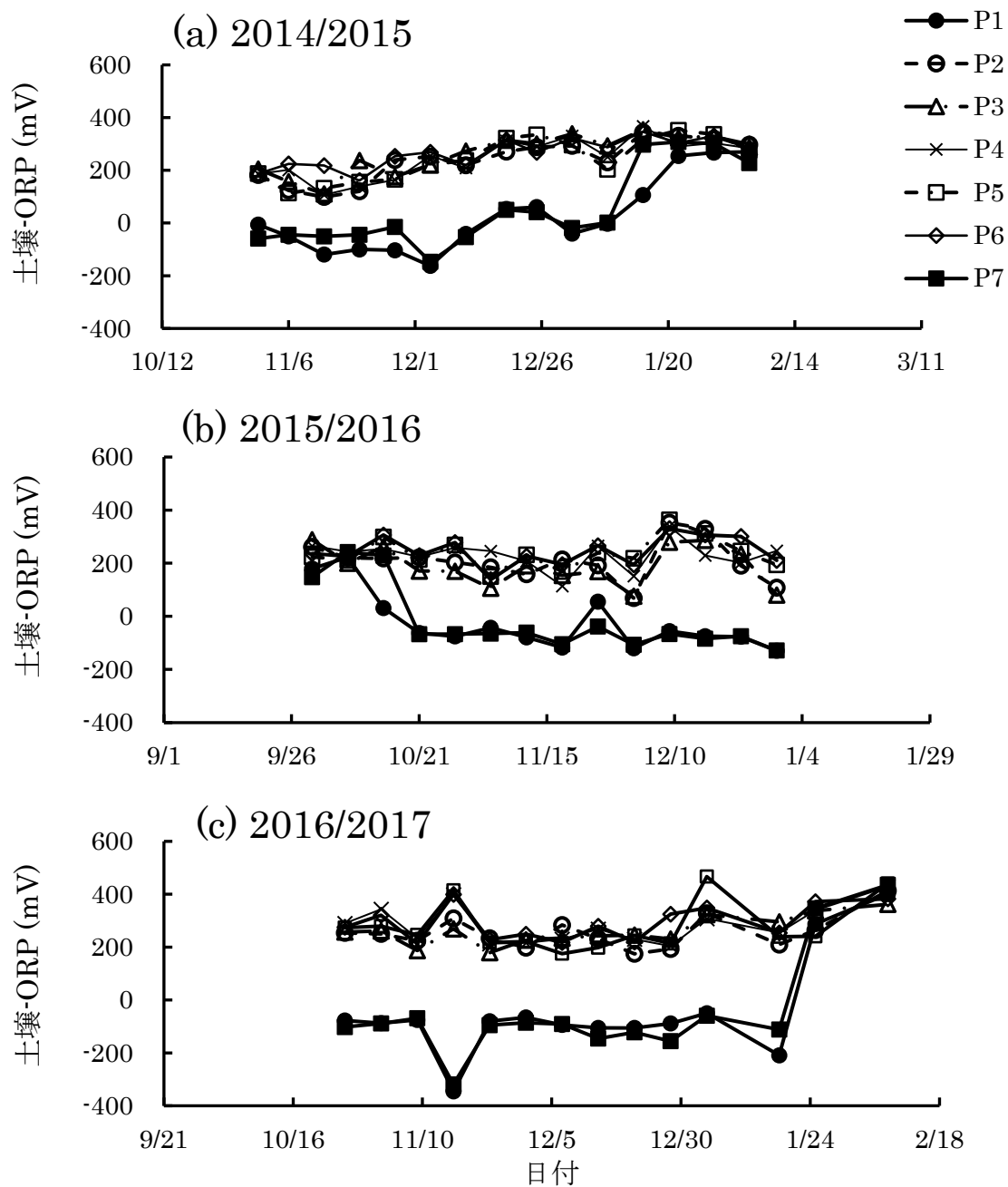
(b) 2015/2016



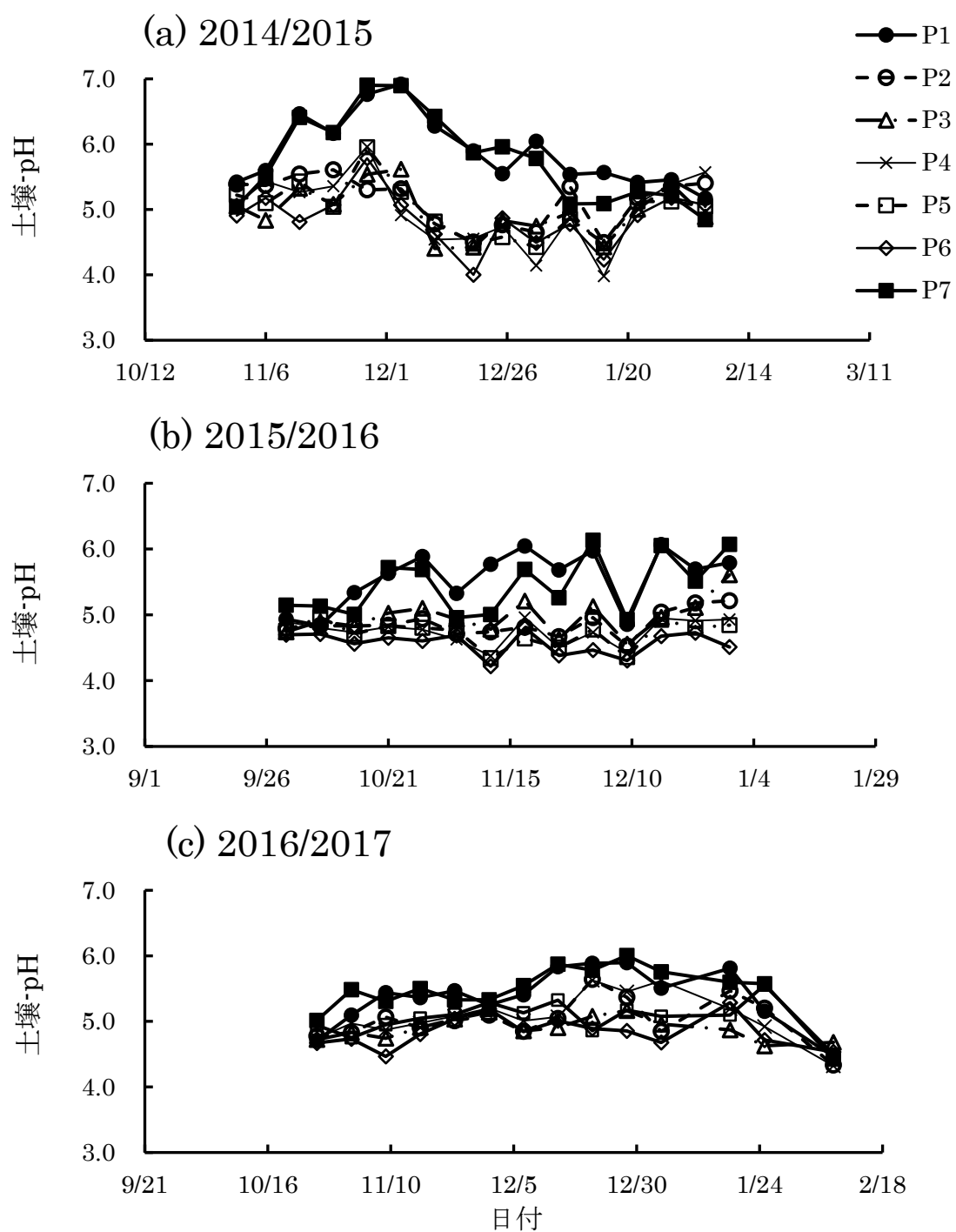
(c) 2016/2017



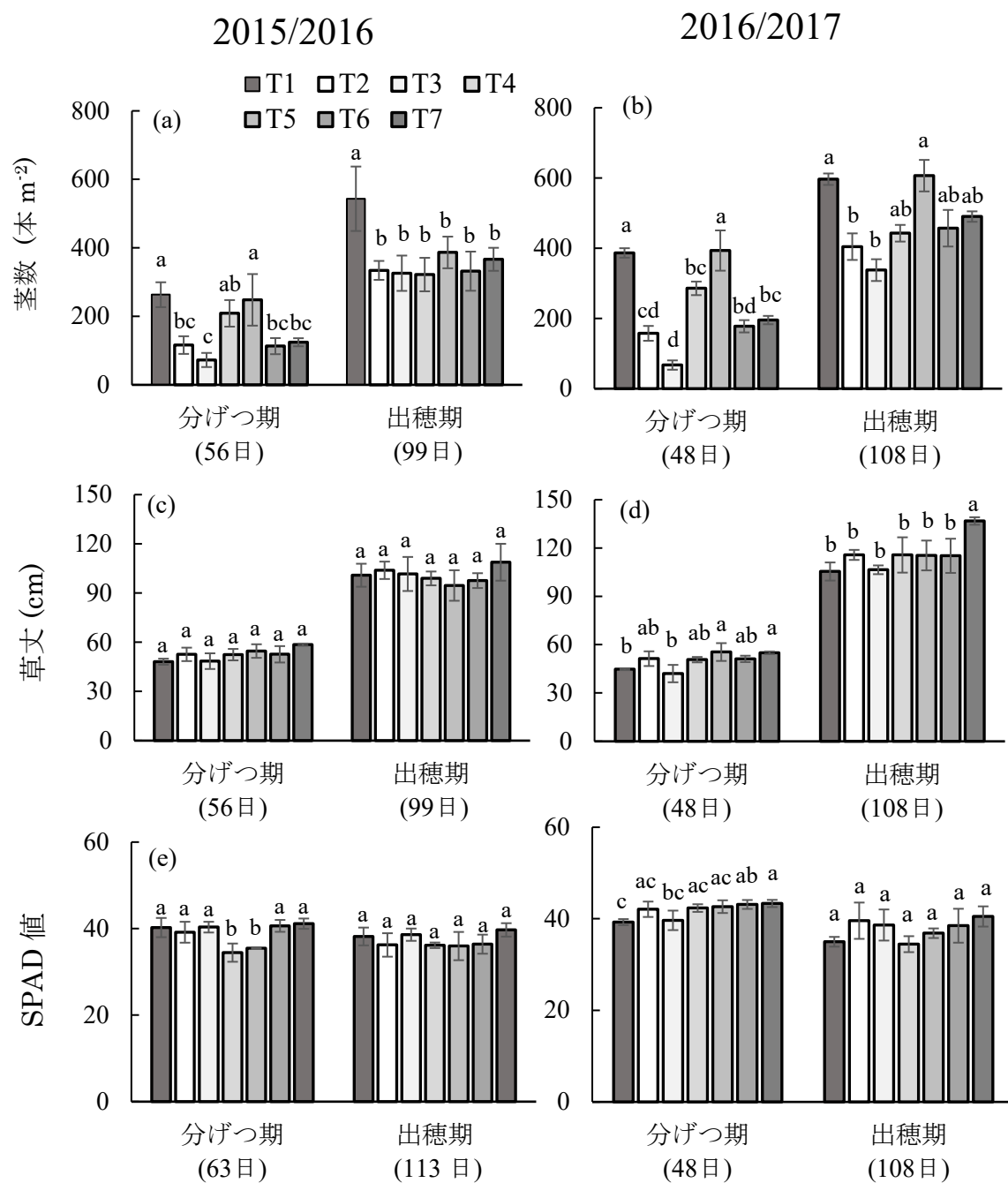
第 5-2 図 間断灌漑条件の試験区におけるイネ栽培期間中の土壌水ポテンシャルと土壌水位の推移.



第5-3図 イネ栽培期間中の土壌酸化還元電位 (ORP) の推移.



第 5-4 図 イネ栽培期間中の土壌 pH の推移.



第5-5図 2作期目(2015/2016)と3作期目(2016/2017)における分げつ期と出穂期のイネの茎数(a, b), 草丈(c, d), SPAD値(e, f).

カッコ内の日数は測定日の播種後日数を示す.

図中の同一測定日における異なるアルファベットは試験区により Tukey 検定で 5%水準の有意差があることを示す.

第 5-1 表 各処理区の栽培技術の組み合わせ.

| 処理区 | 水管理方法 | 肥料 | 移植密度 | 1 株 苗数 | 苗 齢 |
|-----|-------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|------------------|
| T1 | 常時湛水 ^a | 化学肥料 のみ | 普通 (20 cm × 20 cm) | 3 | 中苗 (播種後 21 日) |
| T2 | 間断灌漑 ^b | 化学肥料 + 有機肥料 ^c | 広い (30 cm × 30 cm) | 1 | 乳苗 (播種後 12 日) |
| T3 | 間断灌漑 | 化学肥料 + 有機肥料 | 広い (30 cm × 30 cm) | 1 | 中苗 (播種後 21 日) |
| T4 | 間断灌漑 | 化学肥料 + 有機肥料 | 広い (30 cm × 30 cm) | 3 | 乳苗 (播種後 12 日) |
| T5 | 間断灌漑 | 化学肥料 + 有機肥料 | 普通 (20 cm × 20 cm) | 1 | 乳苗 (播種後 12 日) |
| T6 | 間断灌漑 | 化学肥料 のみ | 広い (30 cm × 30 cm) | 1 | 乳苗 (播種後 12 日) |
| T7 | 常時湛水 | 化学肥料 + 有機肥料 | 広い (30 cm × 30 cm) | 1 | 乳苗 (播種後 12 日) |

^a 移植から収穫まで常時湛水で維持する

^b 移植から出穂期まで土壌の水位が -20 cm に達したら再灌水することを繰り返す.

^c 有機肥料は牛糞を使用.

太字の栽培方法は慣行法を想定した栽培方法を意味する.

第 5-2 表 イネの収量，収量構成要素および地上部乾物重におよぼす，栽培年および試験区の影響.

| | 穂数 (10^5 本 ha^{-1}) | 1 穂粒数 (粒 穂 $^{-1}$) | 粒数 (10^7 粒 ha^{-1}) | 登熟歩合 (%) | 1000 粒 重 (g) | 収量 (t ha^{-1}) | 地上部 乾物重 (t ha^{-1}) |
|---------|--|-------------------------|-------------------------------------|-------------|--------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| 年 | *** | *** | *** | *** | *** | ** | *** |
| 試験区 | *** | *** | *** | *** | * | ** | *** |
| 年 × 試験区 | * | ns | ** | ns | * | ** | ns |

分散分析 (ANOVA) により，*は 5 %水準，**は 1 %水準，***は 0.1 %水準で有意差があることを示す.

第5-3表 各栽培年における試験区の収量，収量構成要素および地上部乾物重.

| 年 | 試験区 | 穂数 | | 1穂 粒数 | | 粒数 | | 登熟 歩合 | | 1000 粒重 | | 収量 | | 地上部 乾物重 | |
|---------------|-----|---------------------------------------|----|----------------------|----|---------------------------------------|----|----------|----|------------|----|-----------------------|----|-----------------------|----|
| | | (10 ⁵ 本 ha ⁻¹) | | (粒 穂 ⁻¹) | | (10 ⁷ 粒 ha ⁻¹) | | (%) | | (g) | | (t ha ⁻¹) | | (t ha ⁻¹) | |
| 2014 /2015 | T1 | 44.3 | a | 100.2 | b | 44.5 | b | 25.6 | b | 21.0 | a | 2.3 | b | 15.8 | a |
| | T2 | 39.7 | a | 116.7 | ab | 46.3 | b | 58.0 | ab | 19.1 | ab | 5.1 | ab | 15.0 | a |
| | T3 | 35.9 | a | 116.1 | ab | 41.7 | b | 61.0 | ab | 21.0 | ab | 5.3 | ab | 13.9 | a |
| | T4 | 39.3 | a | 105.6 | b | 41.6 | b | 64.6 | ab | 19.4 | ab | 5.0 | ab | 14.1 | a |
| | T5 | 43.4 | a | 106.8 | b | 46.3 | b | 56.0 | ab | 19.4 | ab | 4.8 | ab | 15.3 | a |
| | T6 | 40.6 | a | 101.2 | b | 41.0 | b | 72.5 | a | 19.4 | b | 5.8 | a | 13.5 | a |
| | T7 | 45.2 | a | 142.9 | a | 64.2 | a | 38.8 | ab | 19.4 | ab | 4.7 | ab | 17.9 | a |
| 2015 /2016 | T1 | 48.9 | a | 73.3 | ab | 35.9 | a | 67.9 | b | 20.1 | a | 4.8 | a | 15.6 | a |
| | T2 | 27.9 | b | 73.6 | ab | 20.3 | c | 83.4 | ab | 20.3 | a | 3.5 | a | 10.3 | b |
| | T3 | 28.4 | b | 78.6 | ab | 22.5 | bc | 84.4 | a | 20.3 | a | 3.8 | a | 11.2 | ab |
| | T4 | 28.1 | b | 71.1 | b | 20.0 | c | 81.6 | ab | 20.3 | a | 3.3 | a | 9.7 | b |
| | T5 | 37.1 | b | 75.3 | ab | 27.9 | ac | 84.6 | a | 20.7 | a | 4.9 | a | 13.6 | ab |
| | T6 | 30.5 | b | 77.3 | ab | 23.6 | bc | 86.4 | a | 20.7 | a | 4.2 | a | 11.1 | ab |
| | T7 | 34.5 | b | 88.8 | a | 30.6 | ab | 79.1 | ab | 19.8 | a | 4.8 | a | 14.5 | ab |
| 2016 /2017 | T1 | 41.8 | ab | 80.2 | b | 33.5 | a | 48.5 | a | 22.3 | a | 3.6 | b | 20.2 | a |
| | T2 | 38.0 | ab | 93.9 | ab | 35.2 | a | 76.3 | a | 21.0 | b | 5.6 | a | 12.6 | b |
| | T3 | 30.4 | b | 101.7 | ab | 31.0 | a | 69.5 | a | 21.2 | ab | 4.5 | ab | 12.5 | b |
| | T4 | 34.1 | ab | 86.7 | ab | 29.7 | a | 79.4 | a | 21.6 | ab | 5.0 | ab | 13.1 | b |
| | T5 | 42.8 | a | 84.9 | ab | 36.1 | a | 78.0 | a | 21.6 | b | 6.0 | a | 15.6 | ab |
| | T6 | 36.1 | ab | 94.1 | ab | 34.1 | a | 79.3 | a | 21.2 | b | 5.7 | a | 14.4 | ab |
| | T7 | 34.6 | ab | 109.2 | a | 37.8 | a | 59.9 | a | 21.1 | ab | 4.6 | ab | 14.1 | ab |

図中の同一年における異なるアルファベットは試験区により Tukey 検定で 5%水準の有意差があることを示す.

第 5-4 表 収量構成要素および地上部乾物重と収量の相関係数 (r) (n=21).

| 年 | 穂数 (10 ⁵ 本 ha ⁻¹) | 1 穂粒数 (粒 穂 ⁻¹) | 登熟歩合 (%) | 1000 粒重 (g) | 地上部 乾物重 (t ha ⁻¹) |
|-----------|---|-------------------------------|--------------|----------------|-------------------------------------|
| 2014/2015 | -0.358 | -0.128 | 0.912 | -0.168 | -0.401 |
| 2015/2016 | 0.726 | 0.397 | -0.143 | 0.091 | 0.865 |
| 2016/2017 | 0.129 | 0.109 | 0.750 | -0.456 | -0.152 |

太字の数字は $|r| > 0.433$ ($\alpha=0.05$)であることを示す.

第5-5表 数量化1類分析による穂数と1穂粒数に対する各栽培管理項目の相関係数(|r|), レンジと各栽培方法のカテゴリースコア.

| 年 | 項目 | カテゴリー | 穂数 | | | 1穂粒数 | | |
|---------------|------|-------|----------------------|------|----------|----------------------|------|----------|
| | | | (穂 m ⁻²) | | | (粒 穂 ⁻¹) | | |
| | | | r | レンジ | カテゴリースコア | r | レンジ | カテゴリースコア |
| 2014 /2015 | 水管理 | 湛水 | 0.51 | 42.5 | 30.3 | 0.36 | 28.7 | 20.5 |
| | | 間断灌溉 | | | -12.1 | | | -8.2 |
| | 肥料 | 化学のみ | 0.23 | 8.7 | 6.2 | 0.45 | 18.5 | -13.2 |
| | | +有機 | | | -2.5 | | | 5.3 |
| | 移植間隔 | 普通 | 0.47 | 37.1 | 26.5 | 0.35 | 12.7 | -9.0 |
| | | 広い | | | -10.6 | | | 3.6 |
| | 1株苗数 | 3本 | 0.13 | 4.1 | -3.0 | 0.36 | 13.3 | -9.5 |
| | | 1本 | | | 1.2 | | | 3.8 |
| | 苗齢 | 中苗 | 0.15 | 38.0 | -27.2 | 0.17 | 2.2 | -1.6 |
| | | 乳苗 | | | 10.9 | | | 0.6 |
| 2015 /2016 | 水管理 | 湛水 | 0.66 | 70.6 | 50.5 | 0.37 | 9.9 | 7.0 |
| | | 間断灌溉 | | | -20.2 | | | -2.8 |
| | 肥料 | 化学のみ | 0.50 | 30.3 | 21.6 | 0.14 | 1.6 | -1.1 |
| | | +有機 | | | -8.6 | | | 0.5 |
| | 移植間隔 | 普通 | 0.77 | 96.3 | 68.8 | 0.22 | 3.6 | -2.6 |
| | | 広い | | | -27.5 | | | 1.0 |
| | 1株苗数 | 3本 | 0.40 | 6.2 | 4.4 | 0.41 | 7.8 | -5.6 |
| | | 1本 | | | -1.8 | | | 2.2 |
| | 苗齢 | 中苗 | 0.41 | 9.5 | 6.8 | 0.08 | 0.3 | -0.2 |
| | | 乳苗 | | | -2.7 | | | 0.1 |
| 2016 /2017 | 水管理 | 湛水 | 0.16 | 1.7 | 1.2 | 0.09 | 10.6 | 7.6 |
| | | 間断灌溉 | | | -0.5 | | | -3.0 |
| | 肥料 | 化学のみ | 0.25 | 16.9 | 12.1 | 0.30 | 4.6 | -3.3 |
| | | +有機 | | | -4.8 | | | 1.3 |
| | 移植間隔 | 普通 | 0.65 | 84.1 | 60.1 | 0.54 | 13.7 | -9.8 |
| | | 広い | | | -24.0 | | | 3.9 |
| | 1株苗数 | 3本 | 0.13 | 3.1 | -2.2 | 0.49 | 12.0 | -8.5 |
| | | 1本 | | | 0.9 | | | 3.4 |
| | 苗齢 | 中苗 | 0.08 | 39.7 | -28.4 | 0.10 | 3.0 | 2.2 |
| | | 乳苗 | | | 11.4 | | | -0.9 |

太字の数字は|r| > 0.433 (α=0.05)であることを示す.

レンジ 各項目の目的変数(穂数, 1穂粒数)への影響力を示す.

カテゴリースコア 各項目内の各カテゴリーの目的変数(穂数, 1穂粒数)に対する重みを示す.

第5-6表 数量化1類分析による登熟歩合と1000粒重に対する各栽培管理項目の相関係数.

($|r|$), レンジと各栽培方法のカテゴリースコア.

| 年 | 項目 | カテゴリー | 登熟歩合 | | | 1000粒重 | | |
|---------------|------|-------|-------------|------|----------|----------------------|-------|----------|
| | | | (%) | | | (10 ⁻² g) | | |
| | | | $ r $ | レンジ | カテゴリースコア | $ r $ | レンジ | カテゴリースコア |
| 2014 /2015 | 水管理 | 湛水 | 0.68 | 27.2 | -19.4 | 0.25 | 2.8 | -2.0 |
| | | 間断灌溉 | | | 7.8 | | | 0.8 |
| | 肥料 | 化学のみ | 0.15 | 6.5 | 4.6 | 0.27 | 4.0 | 2.8 |
| | | +有機 | | | -1.8 | | | -1.1 |
| | 移植間隔 | 普通 | 0.41 | 10.0 | -7.2 | 0.27 | 3.0 | 2.2 |
| | | 広い | | | 2.9 | | | -0.9 |
| | 1株苗数 | 3本 | 0.27 | 1.4 | -1.0 | 0.27 | 3.0 | 2.1 |
| | | 1本 | | | 0.4 | | | -0.8 |
| | 苗齡 | 中苗 | 0.33 | 5.0 | -3.6 | 0.84 | 164.4 | 117.4 |
| | | 乳苗 | | | 1.4 | | | -47.0 |
| 2015 /2016 | 水管理 | 湛水 | 0.64 | 7.6 | -5.4 | 0.49 | 60.1 | -42.9 |
| | | 間断灌溉 | | | 2.2 | | | 17.2 |
| | 肥料 | 化学のみ | 0.33 | 0.3 | -0.2 | 0.07 | 24.0 | 17.2 |
| | | +有機 | | | 0.1 | | | -6.9 |
| | 移植間隔 | 普通 | 0.41 | 2.1 | -1.5 | 0.09 | 27.1 | 19.3 |
| | | 広い | | | 0.6 | | | -7.7 |
| | 1株苗数 | 3本 | 0.53 | 5.1 | -3.7 | 0.17 | 11.6 | -8.3 |
| | | 1本 | | | 1.5 | | | 3.3 |
| | 苗齡 | 中苗 | 0.42 | 2.4 | -1.7 | 0.16 | 10.2 | -7.3 |
| | | 乳苗 | | | 0.7 | | | 2.9 |
| 2016 /2017 | 水管理 | 湛水 | 0.69 | 19.2 | -13.7 | 0.23 | 2.2 | 1.6 |
| | | 間断灌溉 | | | 5.5 | | | -0.6 |
| | 肥料 | 化学のみ | 0.27 | 0.2 | 0.2 | 0.28 | 13.9 | 10.0 |
| | | +有機 | | | -0.1 | | | -4.0 |
| | 移植間隔 | 普通 | 0.30 | 1.2 | -0.8 | 0.42 | 46.6 | 33.3 |
| | | 広い | | | 0.3 | | | -13.3 |
| | 1株苗数 | 3本 | 0.27 | 0.3 | 0.2 | 0.44 | 52.1 | 37.2 |
| | | 1本 | | | -0.1 | | | -14.9 |
| | 苗齡 | 中苗 | 0.48 | 9.6 | -6.9 | 0.25 | 6.6 | 4.7 |
| | | 乳苗 | | | 2.7 | | | -1.9 |

太字の数字は $|r| > 0.433$ ($\alpha=0.05$)であることを示す.

レンジ 各項目の目的変数(登熟歩合, 1000粒重)への影響力を示す.

カテゴリースコア 各項目内の各カテゴリーの目的変数(登熟歩合, 1000粒重)に対する重みを示す.

第5-7表 数量化1類分析による収量と地上部乾物重に対する各栽培管理項目の相関係数.

($|r|$), レンジと各栽培方法のカテゴリースコア.

| 年 | 項目 | カテゴリー | 収量 | | | 地上部乾物重 | | |
|---------------|------|-------|-----------------------|------|----------|-----------------------|------|----------|
| | | | (t ha ⁻¹) | | | (t ha ⁻¹) | | |
| | | | $ r $ | レンジ | カテゴリースコア | $ r $ | レンジ | カテゴリースコア |
| 2014 /2015 | 水管理 | 湛水 | 0.55 | 1.07 | -0.76 | 0.59 | 3.15 | 2.25 |
| | | 間断灌漑 | | | 0.31 | | | -0.90 |
| | 肥料 | 化学のみ | 0.31 | 0.01 | 0.01 | 0.14 | 1.25 | -0.89 |
| | | +有機 | | | 0.00 | | | 0.36 |
| | 移植間隔 | 普通 | 0.53 | 0.99 | -0.70 | 0.15 | 0.53 | 0.38 |
| | | 広い | | | 0.28 | | | -0.15 |
| | 1株苗数 | 3本 | 0.47 | 0.72 | -0.52 | 0.04 | 0.63 | -0.45 |
| | | 1本 | | | 0.21 | | | 0.18 |
| | 苗齡 | 中苗 | 0.40 | 0.42 | -0.30 | 0.08 | 0.88 | -0.63 |
| | | 乳苗 | | | 0.12 | | | 0.25 |
| 2015 /2016 | 水管理 | 湛水 | 0.51 | 0.81 | 0.58 | 0.68 | 3.44 | 2.46 |
| | | 間断灌漑 | | | -0.23 | | | -0.98 |
| | 肥料 | 化学のみ | 0.27 | 0.21 | 0.15 | 0.27 | 0.09 | 0.07 |
| | | +有機 | | | -0.06 | | | -0.03 |
| | 移植間隔 | 普通 | 0.55 | 0.90 | 0.64 | 0.58 | 2.60 | 1.85 |
| | | 広い | | | -0.26 | | | -0.74 |
| | 1株苗数 | 3本 | 0.09 | 0.67 | -0.48 | 0.09 | 1.37 | -0.98 |
| | | 1本 | | | 0.19 | | | 0.39 |
| | 苗齡 | 中苗 | 0.11 | 0.19 | -0.14 | 0.28 | 0.13 | 0.09 |
| | | 乳苗 | | | 0.05 | | | -0.04 |
| 2016 /2017 | 水管理 | 湛水 | 0.60 | 0.91 | -0.65 | 0.52 | 1.74 | 1.24 |
| | | 間断灌漑 | | | 0.26 | | | -0.50 |
| | 肥料 | 化学のみ | 0.24 | 0.15 | 0.10 | 0.54 | 2.00 | 1.43 |
| | | +有機 | | | -0.04 | | | -0.57 |
| | 移植間隔 | 普通 | 0.12 | 0.48 | 0.34 | 0.67 | 3.20 | 2.28 |
| | | 広い | | | -0.14 | | | -0.91 |
| | 1株苗数 | 3本 | 0.49 | 0.59 | -0.42 | 0.35 | 0.71 | 0.51 |
| | | 1本 | | | 0.17 | | | -0.20 |
| | 苗齡 | 中苗 | 0.65 | 1.07 | -0.76 | 0.41 | 0.11 | 0.08 |
| | | 乳苗 | | | 0.31 | | | -0.03 |

太字の数字は $|r| > 0.433$ ($\alpha=0.05$)であることを示す.

レンジ 各項目の目的変数(収量, 地上部乾物重)への影響力を示す.

カテゴリースコア 各項目内の各カテゴリーの目的変数(収量, 地上部乾物重)に対する重みを示す.

第 6 章 総合考察

第6章 総合考察

本研究の目的は、節水条件に対するイネの収量反応が異なる原因を解明し、低温による登熟歩合の低下が問題となる熱帯高地に位置するムエア灌漑地区における節水稻作の安定化に向けた技術開発の方向性を検討することである。まず、第2章ではムエア灌漑地区の水田で4年間に亘り節水稻作の検証試験を行い、作期間で収量反応が異なる原因を分析した。次に、第3章では物理性および化学性が異なる土壌を用いて節水栽培条件下におけるイネの生育・収量反応に及ぼす土壌の性質の影響を調査した。さらに、第4章ではポット試験により、節水栽培条件下におけるイネの生育反応の品種間差異を生理学的に評価した。また、第5章では節水栽培技術とほかの栽培管理技術との組み合わせによるイネの生産性の違いを検証した。その結果、節水栽培条件下におけるイネの生育・収量反応が研究事例によって必ずしも一致しない原因として、栽培が行われた場所や時期によって気象条件および土壌の性質が異なることが関係していることが明らかになった。また、節水栽培条件への適応性には品種間差異があり、好氣的な土壌環境への適応能力が関係していた。さらに、ムエアの栽培環境下における Basmati 370 を使った節水栽培では、SRI を構成する栽培技術の一つである広い移植間隔を組み合わせると収量低下に繋がることが明らかになった。本章では、これらの研究結果に基づき、気象条件、土壌環境、イネ品種および栽培技術の組み合わせの観点から、ムエア灌漑地区における節水栽培技術の確立に向けた方向性について検討した。

ムエア灌漑地区では、灌漑水の不足などのため作期が遅れ、生殖成長期に低温に晒されることにより登熟歩合が低下することが問題となっている。また、ムエアでは標高 1,100 m～1,400 m の地域で稲作が行われており、比較的標高の高い地域では通常の作期であっても冷害が発生する。気温は年によっても変動するため、冷涼年には通常の作期であっても低温による登熟不良が発生する場合がある。このような栽培環境においては、節水効果だ

けではなく、低温による登熟歩合低下を軽減する効果を期待して AWD のような節水栽培技術を導入することが考えられる。しかし、温暖年や標高が低く低温による登熟不良が発生しにくい環境下では、節水栽培により乾物生産が低下し、収量が低下する可能性がある。したがって、ムエアの通常の作期における節水栽培では、土壤の乾燥が進み乾物生産の低下が引き起こされる前に再灌水を行うことが重要である。

ムエアでは、黒綿土、茶褐色土および赤土の 3 種類の土壤で稲作が行われている。乾物生産を低下させない節水方法は、これらの土壤毎に異なるものと考えられる。黒綿土では、イネの水ストレスとはならない土壤水ポテンシャルであっても、土壤にひび割れが発生し、根が切れるため水ストレスと養分吸収の低下が起こり、乾物生産が抑制されることが考えられた。このため、黒綿土では、地下水位や土壤水ポテンシャルのみを指標とするのではなく、土壤のひび割れを目視により確認し、再灌水の時期を決定する必要がある。一方、強酸性の赤土では、イネへの水ストレスがない飽水条件下であっても、窒素吸収が常時湛水条件下と比べて抑制され、収量は低下した。飽水条件下におけるイネの窒素吸収の低下は、硫酸アルミニウムを添加することで人為的に強酸性にした土壤でも認められた。これらのことから、赤土は節水栽培には適していない可能性がある。しかしながら、赤土の湛水条件下においては、赤枯れが発生し収量が大きく低下するイネ品種があることが確認され、節水栽培により症状が緩和された。したがって、赤土においては、節水効果よりも赤枯れ症状を改善することを目的として節水栽培技術を導入することが考えられる。また、赤枯れに対する抵抗性には、品種間差異があることが知られている。ムエアの主力水稻品種である **Basmati 370** は赤枯れに弱かったため、赤土での栽培に適していない可能性がある。赤土での稲作においては、赤枯れ抵抗性の品種を導入することが重要であると考えられる。他方、茶褐色土における節水栽培条件下では、イネの収量は湛水条件下と同程度であった。したがって、ムエアにおいては、節水栽培の導入に最も適した土壤であると考えられる。

本研究では、**Basmati 370** の収量は、茶褐色土を除き、節水栽培により減少した。したがって、この品種は節水栽培に必ずしも適していないと考えられる。一方、陸稲品種 **IRAT109** は、節水栽培条件に反応して根に光合成同化産物を優先的に分配し、根域を拡大するとともに根の生理活性を高めることで根の吸水能力を高く維持できることが明らかになった。**IRAT109** のこのような形質は、節水栽培条件下において有利に働くと考えられる。ムエアにおいて、イネの生産性を犠牲にすることなく節水栽培を導入するためには、**IRAT109** が有する根系形質を **Basmati 370** に導入する、あるいは節水栽培に適した品種にケニアの消費者が好むアロマや食味などの形質を付与するなどして、ムエア向けの節水栽培条件適応品種を作出することが重要である。また、**Basmati 370** の赤枯れ抵抗性の強化も重要な課題であると考えられる。

本研究では、広い移植間隔を **Basmati 370** の節水栽培と組み合わせると収量を低下させる効果があることが示唆された。一方、節水栽培と有機肥料の添加、1 株 1 本植え、乳苗移植との組み合わせの効果については明確にはならなかった。しかしながら、節水栽培に対する適応性が高い品種を用いた場合、組み合わせの効果も変化する可能性がある。また、本研究で明らかになった通り、節水栽培条件下におけるイネの生育・収量反応は、気象条件や土壌の性質に影響を受ける。したがって、節水栽培技術とほかの栽培技術との組み合わせがイネの生産性に及ぼす影響は、実際の栽培環境下で検証する必要がある。

以上より、栽培するイネ品種の節水栽培への適応性を理解した上で、土壌の性質や気象条件に合わせて土壌の乾燥程度や組み合わせる栽培管理技術を調節することにより、収量の低下を最小限に抑えた上で水田の水消費量を削減し、ムエアにおけるイネの栽培面積拡大に貢献することが可能であると考えられる。

謝辞

主指導教員の名古屋大学農学国際教育研究センター実践アフリカ開発研究室 榎原大悟准教授には、本研究の実施の機会を与えて戴き、その遂行ならびに論文作成にあたり終始多大なご指導を賜りました。ここに深謝の意を表します。浅沼修一名古屋大学名誉教授(元農学国際教育研究センター教授)、名古屋大学大学院生命農学研究科植物生産科学専攻 山内章教授(元農学国際教育研究センター長)、名古屋大学アジア共創教育研究機構 江原宏教授(農学国際教育研究センター長)および名古屋大学農学国際教育研究センター 犬飼義明教授には、副指導教員として日頃より研究についてのご助言と細部にわたるご指導をいただきました。ここに感謝の意を表します。

北野英己名古屋大学名誉教授(元生物機能開発利用研究センター教授)は、名古屋大学大学院生命農学研究科附属フィールド科学教育研究センター(東郷フィールド)の利用にあたり便宜を図って下さいました。心より感謝申し上げます。名古屋大学大学院生命農学研究科植物生産科学専攻 土井一行准教授には、貴重な種子を提供していただきました。心より御礼申し上げます。伊藤香純名古屋大学農学国際教育研究センター 准教授には、研究成果の社会実装や国際協力について貴重なご意見をいただきました。心より御礼申し上げます。名古屋大学大学院生命農学研究科植物生産科学専攻 三屋史朗准教授および名古屋大学農学国際教育研究センター 仲田麻奈助教には、実験手法、調査測定方法、機器の使い方など多岐にわたってご指導を頂きました。ここに感謝の意を表します。

農業・食品産業技術総合研究機構北海道農業研究センター研究員 鮫島啓彰博士(元名古屋大学農学国際教育研究センター研究機関研究員)には、ケニアでの実験や調査において、多大なご協力を頂きました。心より御礼申し上げます。広島大学大学院総合生命科学研究科 菊田真由実助教(元名古屋大学アジア共創教育研究機構特任助教)には、日本およびケニアでの研究遂行にあたり日頃より調査方法や分析手法について適切なご指導と貴重な助言

をいただきました。ここに感謝の意を表します。名古屋大学全学技術センター技術職員 田原保樹氏には名古屋大学大学院生命農研究科附属フィールド科学教育研究センター (東郷フィールド) での実験実施にあたり技術支援をいただきました。ここに感謝いたします。

ケニアでの研究には、ケニア農畜産業研究機構 (Kenya Agricultural and Livestock Research Organization: KALRO) ムエア支所の研究施設を利用させていただきました。KALRO ムトゥワパ支所研究員 (元 KALRO ムエア支所長) John Kimani 博士には、現地滞在の便宜を図っていただくとともに研究実施にあたり貴重なご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。KALRO ムエア支所研究員 Daniel Menge 博士 (元名古屋大学大学院生命農学研究科研究員) と KALRO ムエア支所研究員 Emily Gichuhi 博士には、ケニアにおける研究遂行にあたり、実験の準備、技術支援、現地研究補助員の方々との連携など様々な面で協力いただきました。ここに感謝の意を表します。KALRO ムエア支所研究員 Symon Njinju 氏からは、実験実施にあたり多大なご協力をいただきました。心よりお礼申し上げます。

本研究の一部は、JST/JICA 地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS) 「テラーメード育種と栽培技術開発のための稲作研究プロジェクト」により実施しました。同プロジェクト業務調整員 櫻井厳氏には、現地での安全管理や実験実施に係る事務手続きの面で多大なるご支援をいただきました。心より感謝申し上げます。また、同プロジェクトの実験補助員や運転手の方々に支えられて研究を行うことができました。ここに感謝いたします。

名古屋大学農学国際教育研究センターおよび名古屋大学大学院生命農研究科植物生産科学専攻作物ストレス制御研究室の学生の皆様からは、圃場や実験室での作業にご協力いただき、セミナー等で建設的なご意見を多くいただきました。農学国際教育研究センター事務補佐員および技術補佐員の方々からは、事務手続きを中心に多くの場面でご支援をいただきました。心より感謝申し上げます。

引用文献

- Abdullahi, M., Mizutani, M., Tanaka, S., Goto, A., & Matsui, H. (2003). Changes in water management practices in the Mwea Irrigation Scheme, Kenya from 1994 to 1998. *Rural and Environment Engineering*, 44, 60-67.
- Atlin, G. N., Lafitte, H. R., Tao, D., Laza, M., Amante, M., & Courtois, B. (2006). Developing rice cultivars for high-fertility upland systems in the Asian tropics. *Field crops research*, 97(1), 43-52.
- Becker, M., & Asch, F. (2005). Iron toxicity in rice—conditions and management concepts. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168(4), 558-573.
- Bouman, B. A. M., Humphreys, E., Tuong, T. P. and Barker, R. (2007). Rice and Water. *Advances in Agronomy*, 92, 187-237.
- Bouman, B. A. M., & Tuong, T. P. (2001). Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. *Agricultural water management*, 49(1), 11-30.
- Bueno, C. S., Bucourt, M., Kobayashi, N., Inubushi, K., & Lafarge, T. (2010). Water productivity of contrasting rice genotypes grown under water-saving conditions in the tropics and investigation of morphological traits for adaptation. *Agricultural water management*, 98(2), 241-250.
- Carrijo, D. R., Lundy, M. E., & Linquist, B. A. (2017). Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 203, 173-180.
- Chapagain, T., & Yamaji, E. (2010). The effects of irrigation method, age of seedling and spacing on crop performance, productivity and water-wise rice production in Japan. *Paddy and Water Environment*, 8(1), 81-90.

- Famoso, A. N., Clark, R. T., Shaff, J. E., Craft, E., McCouch, S. R., & Kochian, L. V. (2010). Development of a novel aluminum tolerance phenotyping platform used for comparisons of cereal aluminum tolerance and investigations into rice aluminum tolerance mechanisms. *Plant physiology*, 153(4), 1678-1691.
- Farrell, T. C., Fukai, S., & Williams, R. L. (2006). Minimising cold damage during reproductive development among temperate rice genotypes. I. Avoiding low temperature with the use of appropriate sowing time and photoperiod-sensitive varieties. *Australian Journal of Agricultural Research*, 57(1), 75-88.
- Howell, K. R., Shrestha, P., & Dodd, I. C. (2015). Alternate wetting and drying irrigation maintained rice yields despite half the irrigation volume, but is currently unlikely to be adopted by smallholder lowland rice farmers in Nepal. *Food and energy security*, 4(2), 144-157.
- Kader, M. A., Sleutel, S., Begum, S. A., Moslehuddin, A. Z. M., & De Neve, S. (2013). Nitrogen mineralization in sub - tropical paddy soils in relation to soil mineralogy, management, pH, carbon, nitrogen and iron contents. *European Journal of Soil Science*, 64(1), 47-57.
- Kato, Y., & Katsura, K. (2014). Rice adaptation to aerobic soils: physiological considerations and implications for agronomy. *Plant Production Science*, 17(1), 1-12.
- Kato, Y., Okami, M. and Katsura, K. (2009). Yield potential and water use efficiency of aerobic rice (*Oryza sativa* L.) in Japan. *Field crops research*, 113(3), 328-334.
- Kihoro, J., Bosco, N. J., Murage, H., Ateka, E., & Makihara, D. (2013). Investigating the impact of rice blast disease on the livelihood of the local farmers in greater Mwea region of Kenya. *SpringerPlus*, 2(1), 1-13.
- Kikuta, M., Makihara, D., Arita, N., Miyazaki, A., & Yamamoto, Y. (2017). Growth and yield responses of upland NERICAs to variable water management under field conditions. *Plant Production Science*, 20(1), 36-46.

- 北川壽・市原泰博・原嘉隆・中野恵子 (2018). 長崎県北部の水稻葉枯症水田における水管理の違いが発症程度と収量に及ぼす影響とその要因. 日本作物学会紀事, 87(2), 198-208.
- 楠谷彰人 (1985). 北限地帯における水稻の生産生態に関する研究 II 冷害年における収量および収穫指数の品種間差異. 日本作物学会紀事, 54(2), 120-126.
- Lampayan, R. M., Samoy-Pascual, K. C., Sibayan, E. B., Ella, V. B., Jayag, O. P., Cabangon, R. J., & Bouman, B. A. M. (2015). Effects of alternate wetting and drying (AWD) threshold level and plant seedling age on crop performance, water input, and water productivity of transplanted rice in Central Luzon, Philippines. *Paddy and Water Environment*, 13(3), 215-227.
- Latif, M. A., Ali, M. Y., Islam, M. R., Badshah, M. A., & Hasan, M. S. (2009). Evaluation of management principles and performance of the System of Rice Intensification (SRI) in Bangladesh. *Field Crops Research*, 114(2), 255-262.
- Maclean, J., Hardy, B., & Hettel, G. (2013). *Rice Almanac 4th Edition*:: Source book for one of the most important economic activities on earth. IRRI.
- Mati, B. M., Wanjogu, R., Odongo, B., & Home, P. G. (2011). Introduction of the system of rice intensification in Kenya: experiences from Mwea irrigation scheme. *Paddy and Water Environment*, 9(1), 145-154.
- 松中照夫 (2003). 土壌学の基礎: 生成・機能・肥沃度・環境. 農山漁村文化協会, 389pp.
- Matsuo, N., & Mochizuki, T. (2009). Growth and yield of six rice cultivars under three water-saving cultivations. *Plant Production Science*, 12(4), 514-525.
- Menete, M. Z. L., Van Es, H. M., Brito, R. M. L., DeGloria, S. D., & Famba, S. (2008). Evaluation of system of rice intensification (SRI) component practices and their synergies on salt-affected soils. *Field Crops Research*, 109(1-3), 34-44.
- Mishra, A., & Salokhe, V. M. (2008). Seedling characteristics and the early growth of transplanted rice under different water regimes. *Experimental Agriculture*, 44(3), 365-383.

- Mishra, A., & Salokhe, V. M. (2010). Flooding stress: The effects of planting pattern and water regime on root morphology, physiology and grain yield of rice. *Journal of agronomy and crop science*, 196(5), 368-378.
- Miyamoto, N., Steudle, E., Hirasawa, T., & Lafitte, R. (2001). Hydraulic conductivity of rice roots. *Journal of experimental botany*, 52(362), 1835-1846.
- Murai-Hatano, M., Kuwagata, T., Sakurai, J., Nonami, H., Ahamed, A., Nagasuga, K., Matsunami, T., Fukushi, K., Maeshima, M. & Okada, M. (2008). Effect of low root temperature on hydraulic conductivity of rice plants and the possible role of aquaporins. *Plant and Cell Physiology*, 49(9), 1294-1305.
- Muthayya, S., Sugimoto, J. D., Montgomery, S., & Maberly, G. F. (2014). An overview of global rice production, supply, trade, and consumption. *Annals of the new york Academy of Sciences*, 1324(1), 7-14.
- Niones, J. M., Suralta, R. R., Inukai, Y., & Yamauchi, A. (2012). Field evaluation on functional roles of root plastic responses on dry matter production and grain yield of rice under cycles of transient soil moisture stresses using chromosome segment substitution lines. *Plant and Soil*, 359(1), 107-120.
- Njinju, S. M., Samejima, H., Katsura, K., Kikuta, M., Gweyi-Onyango, J. P., Kimani, J. M., Yamauchi, A. & Makihara, D. (2018). Grain yield responses of lowland rice varieties to increased amount of nitrogen fertilizer under tropical highland conditions in central Kenya. *Plant Production Science*, 21(2), 59-70.
- Omwenga, K. G., Mati, B. M., & Home, P. G. (2014). Determination of the effect of the system of rice intensification (SRI) on rice yields and water saving in Mwea Irrigation Scheme, Kenya. *Journal of Water Resource and Protection*, 6, 895-901.

- Pan, S., Cao, C., Cai, M., Wang, J., Wang, R., Zhai, J., & Huang, S. (2009). Effects of irrigation regime and nitrogen management on grain yield, quality and water productivity in rice. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7(2), 559-564.
- Rejesus, R. M., Palis, F. G., Rodriguez, D. G. P., Lampayan, R. M., & Bouman, B. A. (2011). Impact of the alternate wetting and drying (AWD) water-saving irrigation technique: evidence from rice producers in the Philippines. *Food Policy*, 36(2), 280-288.
- Rosegrant, M. W., Ringler, C., & Zhu, T. (2009). Water for agriculture: maintaining food security under growing scarcity. *Annual review of Environment and resources*, 34, 205-222.
- Rungrat, T., & Poothab, C. (2019). Short-term water deficit stress induces anthocyanin accumulation and changes in grain yield and yield components in colored rice grain. *Agriculture and Natural Resources*, 53(3), 292-297.
- Samejima, H., Katsura, K., Kikuta, M., Njinju, S. M., Kimani, J. M., Yamauchi, A., & Makihara, D. (2020). Analysis of rice yield response to various cropping seasons to develop optimal cropping calendars in Mwea, Kenya. *Plant Production Science*, 23(3), 297-305.
- Samejima, H., Kikuta, M., Katura, K., Menge, D., Gichuhi, E., Wainaina, C., Kimani, J., Inukai, Y., Yamauchi, A. & Makihara, D. (2020). A method for evaluating cold tolerance in rice during reproductive growth stages under natural low-temperature conditions in tropical highlands in Kenya. *Plant Production Science*, 23(4), 466-476.
- San-oh, Y., Sugiyama, T., Yoshita, D., Ookawa, T., & Hirasawa, T. (2006). The effect of planting pattern on the rate of photosynthesis and related processes during ripening in rice plants. *Field Crops Research*, 96(1), 113-124.
- Satake, T., & Koike, S. (1983). Sterility caused by cooling treatment at the flowering stage in rice plants: I. the stage and organ susceptible to cool temperature. *Japanese Journal of Crop Science*, 52(2), 207-214.

- Satyanarayana, A., Thiagarajan, T. M., & Uphoff, N. (2007). Opportunities for water saving with higher yield from the system of rice intensification. *Irrigation Science*, 25(2), 99-115.
- Schreiber, L., Franke, R., Hartmann, K. D., Ranathunge, K., & Steudle, E. (2005). The chemical composition of suberin in apoplastic barriers affects radial hydraulic conductivity differently in the roots of rice (*Oryza sativa* L. cv. IR64) and corn (*Zea mays* L. cv. Helix). *Journal of Experimental Botany*, 56(415), 1427-1436.
- Sriphrom, P., Chidthaisong, A., & Towprayoon, S. (2019). Effect of alternate wetting and drying water management on rice cultivation with low emissions and low water used during wet and dry season. *Journal of cleaner production*, 223, 980-988.
- Swamy, B. P. M. and Kumar, A. (2011). Sustainable rice yield in water-short drought prone environments: conventional and molecular approaches. In Teang Shui, Lee eds., *Irrigation Systems and Practices in Challenging Environments*. In Tech, Croatia. 149-168.
- Tsujimoto, Y., Horie, T., Randriamihary, H., Shiraiwa, T., & Homma, K. (2009). Soil management: The key factors for higher productivity in the fields utilizing the system of rice intensification (SRI) in the central highland of Madagascar. *Agricultural Systems*, 100(1-3), 61-71.
- Uphoff, N., Kassam, A., & Harwood, R. (2011). SRI as a methodology for raising crop and water productivity: productive adaptations in rice agronomy and irrigation water management. *Paddy and Water Environment*, 9(1), 3-11.
- 山田秀和・女川裕司・足立健夫・高橋克征・米林甲陽 (2006). 土壌ヨウ素とイネ赤枯れ病の関連性, *土肥誌*, 77, 563-568.
- Yamamoto, T., & Nishimura, M. (1986). Relation between the Tolerance to the Sterility Type of Cool Injury and the Amount of Bleeding Water in Rice Plants. *Japanese Journal of Breeding*, 36(2), 147-154.

- Yang, J., Huang, D., Duan, H., Tan, G., & Zhang, J. (2009). Alternate wetting and moderate soil drying increases grain yield and reduces cadmium accumulation in rice grains. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(10), 1728-1736.
- Yoshida, S. (1981). *Fundamentals of rice crop science*; International Rice Research Institute: Los Baños, Philippines, 269pp.
- Wassmann, R., Jagadish, S. V. K., Heuer, S., Ismail, A., Redona, E., Serraj, R., Singh, R. K., Howell, G., Pathak, H. & Sumfleth, K. (2009). Climate change affecting rice production: the physiological and agronomic basis for possible adaptation strategies. *Advances in agronomy*, 101, 59-122.
- Ye, Y., Liang, X., Chen, Y., Liu, J., Gu, J., Guo, R., & Li, L. (2013). Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use. *Field Crops Research*, 144, 212-224.
- 張祖建・中村貞二・西山岩男 (2001). イネの穂ばらみ期耐冷性に及ぼす相対的根量および根の生理的活性の変化の影響. *日本作物學會紀事*, 70(1), 84-91.
- Zhang, H., Zhang, S., Yang, J., Zhang, J., & Wang, Z. (2008). Postanthesis moderate wetting drying improves both quality and quantity of rice yield. *Agronomy Journal*, 100(3), 726-734.