

グリーンアジア レポートシリーズ

No.5

低投入型稲作のためのひこばえ栽培

白木秀太郎, Le Thi Hoa Sen



グリーンアジア

グリーンアジアレポートシリーズ No. 5

低投入型稲作のためのひこばえ栽培

白木秀太郎¹, Le Thi Hoa Sen²

1 国立研究開発法人 国際農林水産業研究センター

2 フエ農林大学

2025年4月



グリーンアジア

©国立研究開発法人国際農林水産業研究センター（国際農研（JIRCAS）, 2025）

このレポートは、農林水産省「みどりの食料システム基盤農業技術のアジアモンスーン地域応用促進事業」の下で「グリーンアジア」プロジェクトとして実施された研究に基づき、国際農研のスタッフが外部からの協力を得て作成したものです。本報告で述べられている考えや意見は著者のものであり、必ずしも国際農研のものではありません。本報告中の表記や資料の提示は、それぞれの国や地域の法的地位や発展段階、あるいは境界線に対する国際農研の意見や支持、承認を示すものではありません。

本報告は、読者の理解の一助として、英語で執筆された次の報告を和訳したものです。詳細な情報や微妙なニュアンスについては、原文を参照してください。

Shiraki, S. & Sen, LTH. (2025). Rice ratooning for low-input rice cultivation. *Green Asia Report Series*, No. 5. Japan International Research Center for Agricultural Sciences (JIRCAS)

権利と許可



本報告の利用条件は、クリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際（CC BY 4.0）

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> に準拠します。利用者は下記を含むクリエイティブ・コモンズライセンスの条件にて、本報告を複製・配布・翻案することができます。

表示 – 出典とライセンスを明記してください。白木秀太郎, Sen Le Thi Hoa (2025)、低投入型稲作のためのひこばえ栽培、グリーンアジア レポートシリーズ、No. 5. 国立研究開発法人国際農林水産業研究センター、License: CC BY 4.0.

<https://www.jircas.go.jp/ja/publication/gars-j/5>

第三者のコンテンツ – 国際農研は必ずしも本報告のコンテンツの各要素に対する所有権を保有してはいないため、本報告の内容の内、第三者が所有する個々の要素又は部分を使用しても第三者の権利を侵害することにはならないと保証するものではありません。もしそうした侵害に対して申立てが起きた場合、全責任を負うのは使用者となります。本報告の要素の再利用を希望する場合、そうした再利用に対する許可取得の必要性の有無の判断、及び著作権者からの許可取得は、再利用者の責任において行うものとします。要素の例としては図表や画像が挙げられますが、これに限定されるものではありません。

目次

要旨	iv
1: 序文	1
2: 再生二期作の概要	2
2.1: 日本における再生二期作の研究	2
2.2: 再生二期作の強みと弱み	3
2.3: 再生二期作の有用性	5
3: 再生イネの生理・形態的特徴	7
3.1: 再生イネの成長・収量特性	7
3.2: 再生イネの特異な生育相	10
3.3: 再生二期米の物性と食感	11
4: 再生二期作の栽培技術	12
4.1: 品種選定の基本	13
4.2: イネの再生力と一期収穫の適期	14
4.3: 一期収穫前後の水管理	15
4.4: 再生二期作における施肥	16
4.5: 多年生品種および早生品種の開発	17
5: 今後の研究課題と展開	18
5.1: 高い再生力を持つイネ品種の開発	18
5.2: イネの栄養繁殖メカニズムの解明	18
5.3: 機械収穫による収量損失	19
5.4: 病害虫および鳥獣害対策	19
5.5: 再生イネ栽培技術の普及とその課題	20
5.6: 市場価値および外部性の費用便益分析による経済的実現可能性の向上	21
5.7: アジアモンスーン地域への展開	21
6: 今後の展望	23
著者の貢献について	24
謝辞	24
参考文献	24

要旨

「持続可能な農業」とは、環境保護、経済的安定、社会的責任を重視し、さまざまな農法や技術を活用して、未来の世代にわたって安定した食料生産を目指す農業形態である。人口増加、気候変動、環境問題の進行により、国連の「持続可能な開発目標(SDGs)」の達成にはこの農業形態が不可欠であるが、その実現には多くの課題が存在する。国際的な食料市場の不安定化は、小規模農家の収益を不安定にし、持続可能な農業への投資や環境負荷低減の取り組みを妨げる。さらに、気候変動は収量の減少や品質の低下を引き起こし、農業生態系のバランスを崩すリスクを増大させている。

また、アジアモンスーン地域では、農家の高齢化や離農に伴う農業労働力不足が深刻化している。特に日本では、農業従事者の平均年齢が上昇しており、新規就農者の減少が顕著である。農業従事者の減少は技術の普及や農地の適切な維持管理に支障を来す恐れがある。そのため、労働力や資源投入を抑えつつ生産性を向上させる新たな農業技術の開発が求められている。

本レポートは、こうした課題に対応する一例として「水稻再生二期作」に焦点を当て、その特徴とアジアモンスーン地域での研究・普及上の課題を検討することを目的としている。再生二期作は、最初の稲の収穫後に株元から再び生えてくる新芽（ひこばえ）を利用し、連続して稲を栽培する方法である。この方法は、耕起、代かき、播種、田植えが不要であり、資材や労働力の削減が可能である。また、ひこばえの短い生育期間により、施肥や水管理の負担が軽減される。また、地域によっては洪水期前に収穫できるため、自然災害リスクの低減にも寄与する。

再生二期作の成功には、ひこばえの発生しやすい品種の選定が重要である。また、ひこばえは一期作収穫前から発達を始めるため、一期作の段階からひこばえの生育を考慮した施肥や水管理が効果的である。一方、収穫機械による株の踏み付けがひこばえの発芽率や収量を低下させる問題や、一期作での病害虫の影響が再生二期作にも継続するといった課題も存在する。

それでも、再生二期作は従来の二期作と比較して、労働生産性の向上、環境負荷低減およびコスト削減、さらには水資源の節約や温室効果ガス排出削減といった点で優れている。しかし、現状では中国の一部を除いて普及は進んでいない。普及促進には、農家への技術指導の強化、品種改良、および栽培技術の向上、さらには、地域ごとの農業経営データの分析、損益分岐点の明確化といった取り組みが不可欠である。

これらの取り組みを通じ、再生二期作は特定の条件下で実用的な生産技術としての可能性を高め、持続可能な農業技術としての普及が促進されることが期待される。

1: 序文

イネは一般的に、一度の播種と収穫で終わる一年生植物として扱われるが、日本を含むアジアモンスーン地域で栽培される多くの品種 (*Oryza sativa*) は多年生の特性を持つ。この特性を活用した栽培法が「ひこばえ栽培」である。「ひこばえ」とは、稲の刈り取り後に株元から再び生えてくる新芽のことであり、サトウキビやパイナップル、バナナでも同様の現象が見られる。本レポートでは、イネのひこばえを「再生イネ」(英語: ratoon rice)、その栽培法を「再生二期作」または「再生作」(英語: ratoon rice cropping)と呼ぶことにする。

日本では 1930 年以降、食料増産を目指し水稻の二期作が試みられたが、一期目の収穫から二期目の作付けまでの期間が短いため、労働過多や労働力の競合が問題となった。これを解決する手段として、再生イネを利用した再生二期作の研究が進められた(山本, 1987)。再生二期作では、ひこばえを用いて栽培を継続するため、播種や田植えが不要であり、種子や育苗・苗運搬にかかる資材や労働力を大幅に削減できる。また、生育期間が一期作より短縮されるため、施肥や水管理の省力化も可能である (Vergara et al. 1988)。しかし、日本の気候条件では再生二期作は温暖な高知県などの地域に限られている上、米需要の低下もその普及を妨げてきた。

近年、中国、インドネシア、タイ、韓国、日本といったアジアモンスーン地域では、農家の高齢化や離農に伴う農業労働力不足が深刻化している (Ngadi et al. 2023; Szabo et al. 2021)。日本では農業従事者の平均年齢が 2023 年に 68.7 歳へ上昇し、2015 年には耕作放棄地が 42 万 ha を超えた (農林水産省, 2024a, 2024b)。加えて、国際食料市場の混乱 (FAO, 2022)、肥料や飼料原材料価格の高騰 (World Bank Group, 2022)、さらに異常気象や気候変動が食料安全保障に深刻な影響を与えている (IPCC, 2022)。これらの要因により、労働力とコストの削減 (Zhang et al. 2023) および環境負荷の最小化 (Shen et al. 2021) を実現する再生二期作への関心が高まってきた。

再生二期作は収量の不安定さや栽培技術の未確立といった課題を抱えているが、これらを克服すれば、アジアモンスーン地域における持続可能な稲作の実現に寄与し、地域の食料安全保障に貢献する可能性がある。したがって、再生二期作の技術改良や普及に向けた研究の重要性はますます高まっている。

本レポートは、アジアモンスーン地域における持続可能な稲作技術としての「再生二期作」に焦点を当て、その有用性と課題について考察することを目的とする。まず、再生二期作の概念と技術的な特徴を概観し、次に再生イネの生理・形態的特徴について詳述する。さらに、これまでの研究成果や技術的課題を紹介し、将来的な展望について考察する。本レポートを通じて、再生二期作が農業生産性や持続可能性にどう貢献するか、将来の可能性を探る。

2: 再生二期作の概要

2.1: 日本における再生二期作の研究

再生二期作研究の先駆者である山本武雄教授（愛知教育大学）は、1960年代後半からイネの成長生理特性に基づき、従来の二期作を合理化するために再生二期作の研究に取り組んだ。その成果は山本（1987）の「水稻の再生二期作」に体系的にまとめられ、再生二期作の原理と応用が示された（図 1）。1985年には同大学の試験圃場（品種：ハマミノリ）において、再生イネを用いた水稻二期作により、 10 t ha^{-1} （一期作： 6.4 t ha^{-1} ，再生二期作： 3.6 t ha^{-1} ）の収量を達成している。



図 1：日本における再生二期作の栽培試験

出典：「水稻の再生二期作」（山本 1987）

見開き写真を複写しページの綴じ部分のみ画像加工。撮影年不明。

山本(1987)によると、日本における再生イネの最も古い記録は「日本書紀」天武紀の「一殖再収」という言葉に見られ、古くから「ひつじ」や「ひこばえ」として知られていた。しかし、近世では収量の低さから生産手段としての栽培は行われていなかった。近代に入ると、水稻二期作の普及とともに早生品種や早期栽培が導入され、一期作の収穫後に目立つようになったひこばえに関心が高まり、1965年頃から各地の試験場で再生二期作の研究が始まった。しかし、1969年以降のコメ生産調整政策や消費減少に伴い、増産技術である再生二期作への関心は低下し、実践は比較的温暖な高知県などに限られた。

近年、再生二期作が再び注目を集めている。その背景には、アジアモンスーン地域における農家の高齢化や離農による労働力不足が深刻化していることが挙げられる（Ngadi et al. 2023; Szabo et al.

2021)。さらに、気候変動への適応・緩和策や環境負荷低減技術への需要が高まっていることも要因とされる (Zou et al. 2024; Qi et al. 2024)。中国では、再生二期作の普及が最も進んでおり、作付面積は 1.08 百万 ha に達している (Yu et al. 2022)。

再生二期作は温暖化による気温上昇を利用し、生産性を向上させる技術でもある。2023 年、世界の年平均気温は過去 174 年間で最高を記録し(WMO, 2023)、これは日本の水稲品質にも大きな影響を与えた。一般的に水稲の生育には 1500℃から 2500℃の積算温度が必要とされるが、温暖化によって、再生二期作の実現可能性が高まっている。Nakano et al. (2020) の研究では、福岡県の試験圃場で多収品種を用いて年間 14.7 t ha⁻¹ (一期作 : 9.8 t ha⁻¹, 再生二期作 : 4.9 t ha⁻¹) を達成している。

再生二期作は、労働生産性と土地生産性の向上、環境負荷の低減、および気候変動対策といった多面的な役割を果たす水稲作付け体系である。今後の研究による技術改良とアジアモンスーン地域への展開を通じて、この栽培体系のさらなる発展が期待される。

2.2: 再生二期作の強みと弱み

水稲再生二期作は、収穫後のイネ株から伸長する側芽を連続的に栽培・収穫することで、労働生産性と土地生産性を向上させる栽培技術である。従来の二期作とは異なり、播種、育苗、移植などの作業とコストを大幅に削減し、短期間で収穫が可能となる。一方で、収量の不安定さや技術の未確立といった課題も存在する。以下に、先行研究で示された再生二期作の強みと弱みを整理する。

強み	弱み
<ul style="list-style-type: none"> ・ 代かき、育苗、移植の作業が不要 ・ 生育期間が短く、労働力、水資源、農業資材の投入量を大幅に削減 ・ 短期間における単位面積当たりの高い生産性 ・ 遺伝特性を保持した種子生産が複数シーズンにわたって可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 収量が不安定かつ低い ・ 再生力が弱い品種も多く、品種選定が必要 ・ 出穂のバラつきにより登熟の不均一さが発生しやすい ・ 一期作における病害虫が再生二期作に影響しやすい ・ 栽培管理体系が未確立で技術が未熟

労働・土地生産性の向上

再生二期作の最大の利点は、播種、育苗、移植の作業を省略できる点にある。日本国内の水稲作では機械化が進んでいるものの、人力に依存する播種、育苗、移植は労働時間の 27%を占めており、負担軽減には限界があり、稲作経営の大規模化が進む中、その負担が一層顕著になっている (農林水産省, 2018)。再生二期作はこれらの作業を不要にし、人件費削減および作業効率の向上を実現す

る。また、再生イネは生育期間が一期作に比べて 40～50%短縮されるため、水管理や施肥の回数が削減される。Yuan et al.(2019)は、再生二期作によって労働時間が従来の二期作に比べ 30%節約できることを報告している。

気候変動の緩和・適応策

再生二期作は、水資源の節減と温室効果ガス排出削減を通じ、気候変動の緩和および適応策として機能する。従来の水稻二期作と異なり、代かきが不要であることから、用水量を大幅に削減できる。これにより、水資源が限られた地域では再生二期作が有効な代替栽培技術となる。加えて、代かきや水管理にかかる機械運転時間が短縮されるため、二酸化炭素(CO₂)排出が抑制されるほか、生育期間の短縮により、水田からのメタン(CH₄)排出削減にも寄与する (Yu et al. 2021)。さらに、再生二期作は台風や洪水シーズン前に収穫が可能のため、自然災害による収量損失のリスクを軽減できる。

再生二期米の物性と食感

再生二期米は、生育条件やデンプン合成等への生理的影響を受け、一期米とは物性や食感が異なる。食感（咀嚼時の感覚、舌触り、歯ごたえ等）は嗜好性に関わる重要な要素であり、再生二期米は吸水性が高く、硬度、粘着性および弾力性が低い傾向がある (Zhang et al. 2021)。このため、再生二期米は一期米とは異なる食感や加工特性から、新たな消費者ニーズへの対応や市場開拓の余地があると考えられる。

再生二期作の課題

再生二期作には多くの利点がある一方で、収量の安定化かつ増加は依然として大きな課題である。再生イネの収量構成は、一期イネと比較して穂数の増加が認められるものの、一穂あたりの粒数が大きく減少する傾向にある。また、積算気温や日射量が低下する中緯度地域では、生育条件が不利となる。これらの課題を克服するためには、再生力の高い品種および栽培管理技術の確立が不可欠である。

2.3: 再生二期作の有用性

低投入型水稲作付けシステム

再生二期作は、資源・エネルギー利用効率の向上、単位水量当たりの収量向上を通じて、生産性向上と環境負荷低減を両立する持続可能な栽培技術である。

再生二期作（一期＋再生二期）は、従来の水稲二期作に比べ、トータルの収量は減少するものの、肥料、農薬使用量、機械運転時間、労働時間、および軽油・電気使用量が減少するため、収量当たりの生産コストを低減できる（図 2）。さらに、二酸化炭素排出量の削減および栄養塩類の流出抑制にも寄与し、気候変動の緩和や環境負荷の軽減に貢献する。

このように、再生二期作は経済的および環境的に優れた利点を提供する手法であり、従来の水稲二期作に代わる農業技術として多くの利益をもたらす可能性を秘めている。

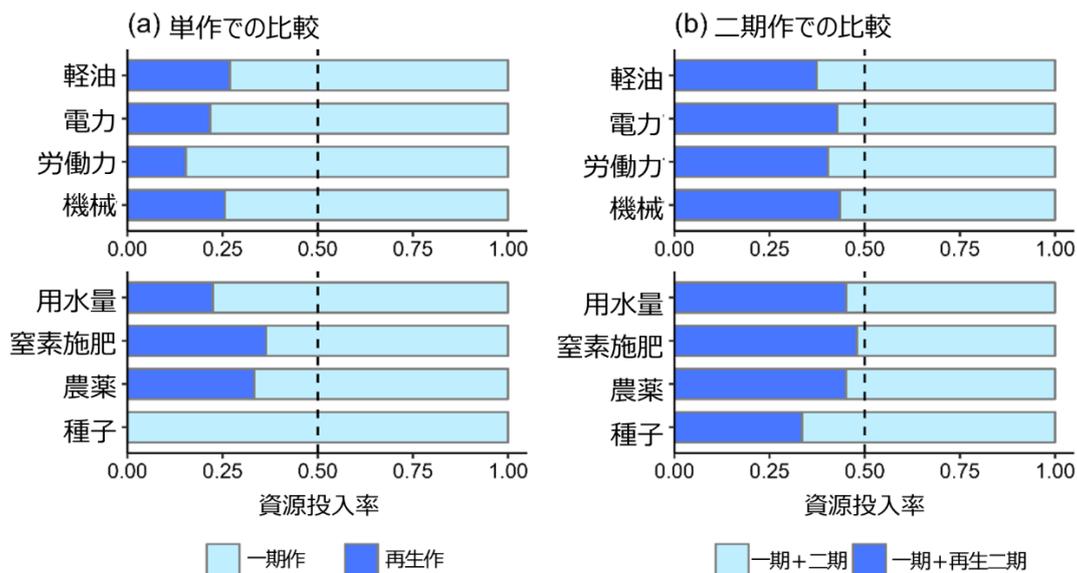


図 2：一期作と再生二期作、水稲一・二期作と水稲一期・再生二期作における資源投入率の違い

出典：Shen et al. (2021); Xu et al. (2022); Yu et al. (2021); Yuan et al. (2019)

(注) 単位面積当たりの投入量を収量水準で補正し、合計投入量を 1 として各投入率を算定。

自然災害による収量損失リスクの回避・軽減

洪水や台風の発生が頻繁する地域では、再生二期作の導入によって作付け期間を短縮し、自然災害による収量損失リスクを回避または軽減することが可能である（図 3）。これにより、地域の食料安全保障への貢献が期待される。

フィリピンのアルバイ州マサラワッグ、ミント、モーラロ地域では、再生二期作が伝統的に実践されている。これらの地域では、10月から12月の台風シーズンにおける従来の水稲二期作の損失リスクが40～80%と高いことから、台風前に収穫可能な再生二期作が広く普及している（FAO, 2013）。

ベトナムのクアンビン省南部に位置するレトウイ郡も、再生二期作が成功した事例の一つである。この地域は雨季に河川水が滞留しやすい氾濫原であり、従来の対策として農家は早生品種の導入や播種時期の前倒しを行ってきたが、洪水被害を完全に回避することは困難であった。しかし、2003年に再生二期作が試行されて以降、洪水前に確実に収穫が可能となった（Sen & Bond, 2017）。現在では、レトウイ郡におけるすべての氾濫原の水田で再生二期作が実施されている。

これらの事例は、再生二期作が自然災害リスクの回避および軽減に寄与する有効な栽培技術であることを示している。

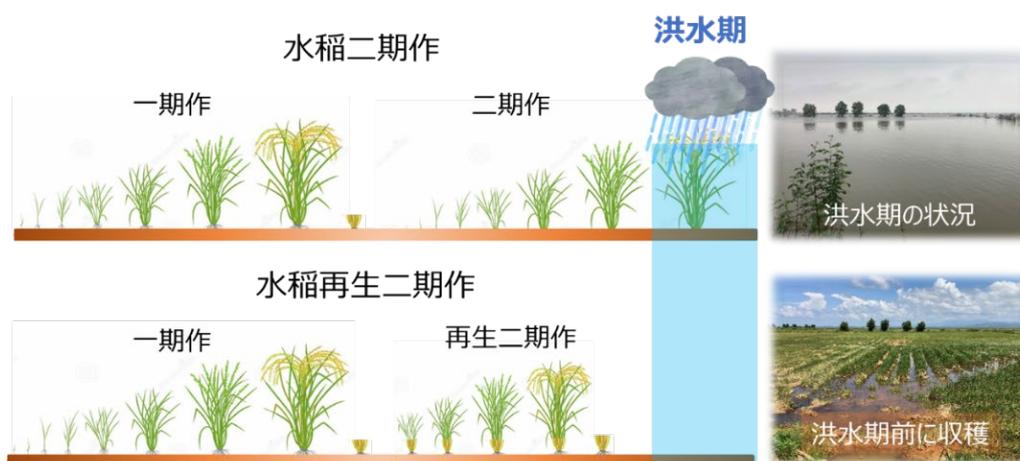


図 3：再生二期作は洪水期前の収穫が可能

(注) ベトナムのレトウイ郡の洪水期（上写真）と洪水前（下写真）の水田（写真 JIRCAS）

3: 再生イネの生理・形態的特徴

3.1: 再生イネの成長・収量特性

一期作と再生二期作間の収量の関係

イネの再生力は、遺伝的および環境的要因の影響を受ける複雑な特性であり、そのメカニズムは完全には解明されていない (Wang et al. 2020)。一般的に、再生二期作の収量は一期作の収量が高いほど増加する傾向が見られる (図 4)。しかし、地域や栽培条件によっては、一期作と再生二期作の収量関係は必ずしも一貫せず、正の相関、負の相関、あるいは相関関係が認められない場合もある。これまでに再生力の高いイネ品種やその特性に関する研究が多数行われてきたが、遺伝的および環境的要因の違いによって結果が異なることがあり、再生二期作の収量向上に向けた体系的理解にはさらなる研究が必要である。

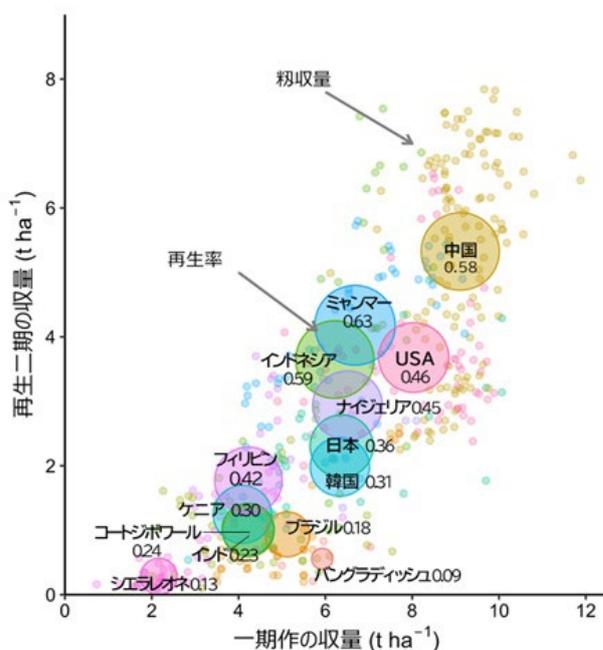


図 4 : 一期作と再生二期作の単位面積当たり収量の関係と再生収量比

出典 : Shiraki et al. (2024)

(注) 収量データは 51 の論文から抽出。小さい点が収量、大きい丸と数字は国別の再生収量比 (再生イネ/一期イネの収量) を表す。

再生イネの収量形態

再生二期作では、一期収穫後の株を利用する栽培方法により、イネの収量構成要素の役割が変化する。具体的には、一期作においては一穂あたりの粒数が多い「穂重型」の収量構成であるのに対し、再生二期作では多数の小穂を形成する「穂数型」へと草型が転換する (図 5)。この「穂数型」の草型では、有効分げつ数 (穂数) が収量を左右する重要な要素となる。再生イネは株元から新たに発生する分げつ芽であるため、分げつを促進させ、有効分げつを確保することが収量向上の鍵となる。したがって、再生二期作の成功には、高い再生力を持つ品種選定と再生力を向上させる栽培管理が重要となる。

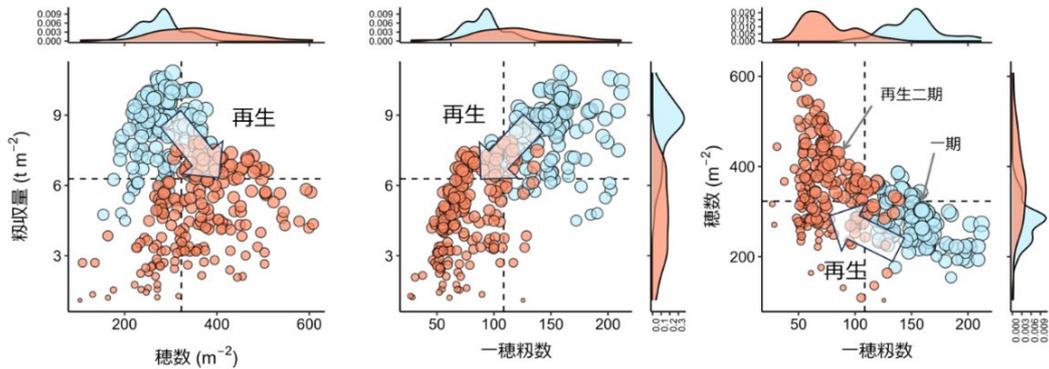


図 5：再生二期作における収量構成の変化（穂重型から穂数型へ）

出典：Shiraki et al. (2024)

（注）破線は形質別の全体平均値を示す。

イネの再生特性

イネ収量関連形質の再生比（最終的な再生イネの成長量／一期イネの成長量）は、地域ごとにばらつきがみられるものの、それぞれの形質において同様な傾向を示す（図 6）。具体的には、再生イネは一期作のイネに比べて茎数や穂数がそれぞれ 19%増加する一方で、草丈および一穂粒数はそれぞれ 23%および 48%減少し、生育期間は 41%短縮する傾向がある（中央値）。再生二期作の収量が低い主な要因は、穂数の微増に対して一穂粒数が大幅に減少することである。再生二期作の収量性向上には、イネの再生特性を考慮した戦略的な栽培管理が必要不可欠である。

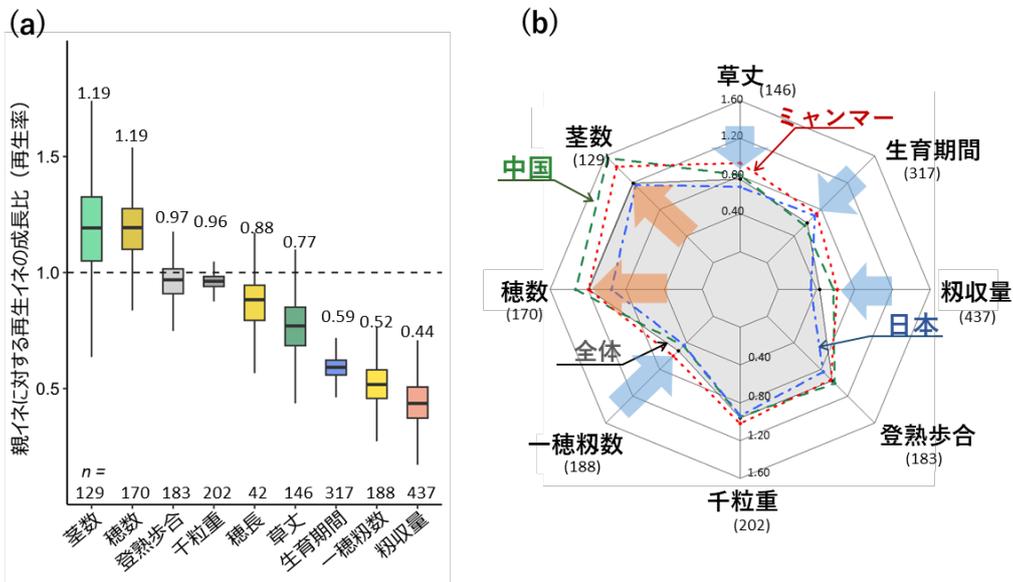


図 6：(a) 収量関連形質における再生比（一期作に対する再生二期作の割合）、(b) 日本、中国、ミャンマーおよび全体平均の比較

出典：Shiraki et al. (2024)

（注）n はデータ数。レーダーチャートの値は再生比の中央値。括弧内はデータ数を示す。中国は最も再生二期作が普及している地域であり、ミャンマーは再生イネ研究データが豊富な国である。

遺伝的・環境的要因の影響

イネの再生力は、遺伝的（収量性および早晩性）および環境的要因（地域性、窒素施用量、刈り取り高さ）に大きく左右される（図 7）。特に窒素施用量は、側芽の発現に大きな影響を与える要因である。側芽の再生は、収量関連形質の中で遺伝的および環境的要因の影響を最も受けやすい。一方で、千粒重、登熟歩合、生育期間、一穂粒数などは、再生二期作においても一期作と大きな差異が見られず、品種や栽培条件の影響を受けにくいことが示唆されている。

側芽の再生力は、品種選定や栽培管理によって最も操作しやすい要素である。具体的には、再生力の高い品種の導入、および一期作の収穫前後における適切な施肥管理によって、側芽の発現や伸長を効果的に促進することができる。しかし、一穂粒数や登熟歩合に関しては、現行の品種や栽培管理では制御が難しいことが示されている。

再生二期作の収量向上を図るためには、遺伝的および環境的要因がイネの再生に与える影響を十分に理解し、それに基づいた最適な栽培管理体系を構築する必要がある。これにより、再生力の最大化が可能となり、収量の安定化と増収が期待される。

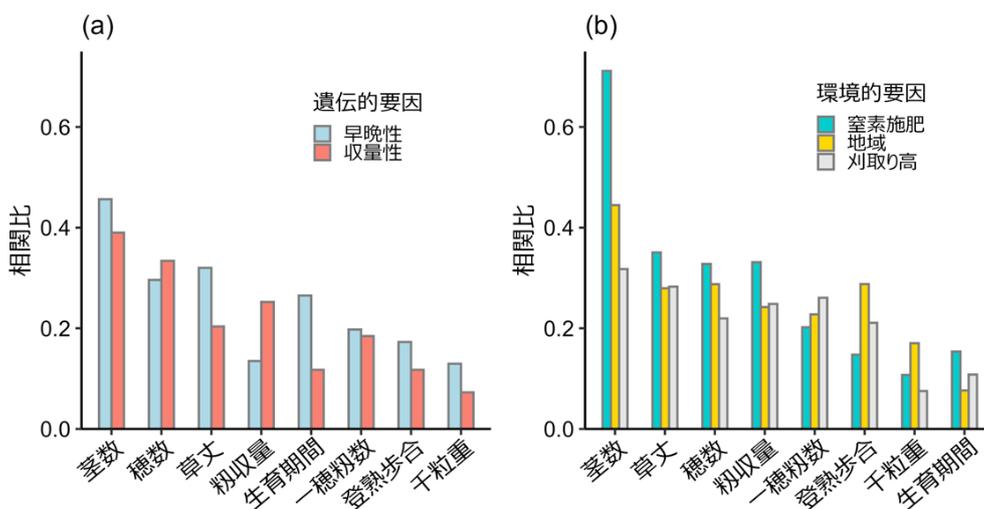


図 7：遺伝的および環境的要因が収量関連形質の再生に与える影響

出典：Shiraki et al. (2024)

(注) 一般的に相関比 0.1 未満で「相関なし」、0.1 以上で「相関あり」、0.25 以上で「やや強い相関」を示す。グループ分けは(a)収量性が小収(平均 4.0 t ha^{-1})、中収(平均 6.5 t ha^{-1})、多収(平均 9.0 t ha^{-1})、(b)早晩性が早生(平均 110 日)、中生(平均 130 日)、晩生(平均 147 日)、(c)地域性が南・東南アジア、東アジア、アメリカ、アフリカ、(d)窒素施用は少肥(100 kg N ha^{-1} 未満)、中肥(100 kg N ha^{-1} 以上 300 kg N ha^{-1} 未満)、多肥(300 kg N ha^{-1} 以上)である。

3.2: 再生イネの特異な生育相

一期作におけるイネの生育は、栄養成長から生殖成長への明確な転換期を経る。この転換期は、茎の成長点で葉原基分化が停止し、穂の分化が始まる時点を目指す。生殖成長では茎の節の分化が終了し、節間の数が決まり、節間伸長が開始される。

一方、再生二期作においては、栄養成長と生殖成長が同時に進行する競合的なプロセスとなる（山本, 1987）（図 8）。これは、再生イネとなる側芽が一期作の収穫前にすでに幼穂分化を開始していることに起因する。分化の順序は下位節ほど早く進行するが、その発育速度は上位節ほど速い傾向がある（吉田・穂園, 1995; Xu et al. 2020）。分化の進捗度合いには、品種および栽培条件の影響が大きく、遺伝的要因と環境的要因のいずれが主要な影響を与えるかについては未解明である。

このように、再生イネの生育相は一期作と大きく異なるため、再生イネとなる側芽の生育特性に応じた栽培管理が一期作の段階から重要となる。

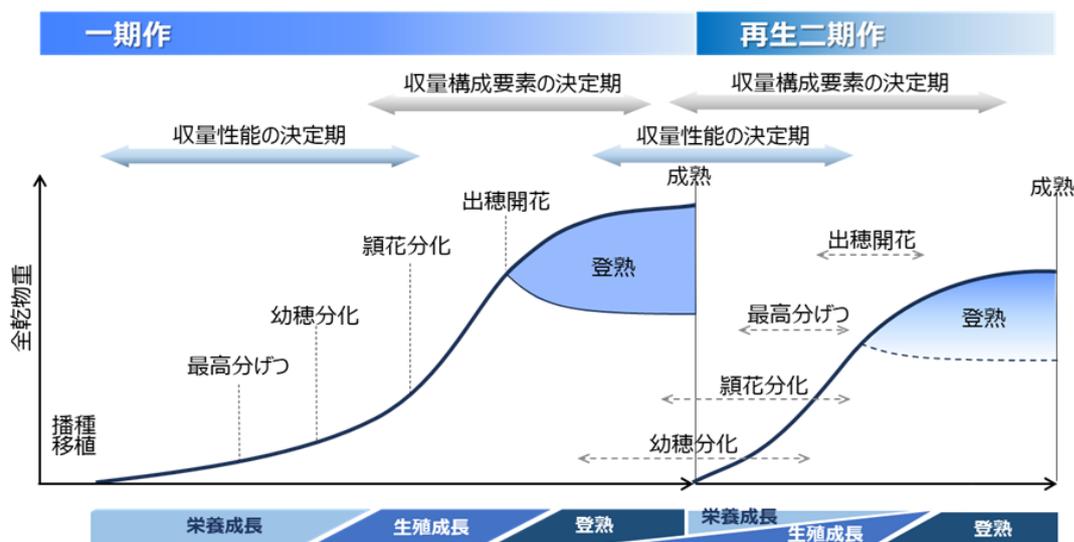


図 8 : 一期 + 再生二期における全乾物重の推移と子実形成・登熟

3.3: 再生二期米の物性と食感

再生イネは光合成産物を粉に効率的に転流する能力が高いとされ (Huang et al. 2020)、この特性が再生二期米の物性と食感に直接的な影響を及ぼしている。

再生二期米由来デンプンは、一期米と比較してアミロース含量が 8.4%~9.9%から 14.9%~16.4%へと約 2 倍に増加し (表 1)、その分、アミロペクチンの割合は有意に減少する。また、短鎖アミロペクチンの比率の増加に伴い、デンプンの平均鎖長および重合度が低下し、この構造変化はデンプンの結晶度および水溶解性の低下と関連していることが報告されている (Deng et al. 2021)。

これらの物性変化は、再生二期米の食感や加工特性に影響を与える。具体的には、以下の傾向が報告されている (Zhang et al. 2021) :

- ・加熱特性：ペースト温度が低いため、加熱しやすく調理時間の短縮が可能である。
- ・粘度特性：調理中のピーク粘度および破壊粘度が低く、調理中に粘りが弱い一方、調理後の最終粘度およびセットバック粘度が増加し、粘りが持続する。

これらの特性は、再生二期米を新しい食品開発や加工用途に活用できる可能性を示唆している。再生二期米の特性を活かした食品や加工品の開発を通じて、新たな市場ニーズに対応し、食文化の多様性および食品産業の発展に寄与することが期待される。

表 1：一期米と再生二期米の成分比較 (Zhang et al. 2021)

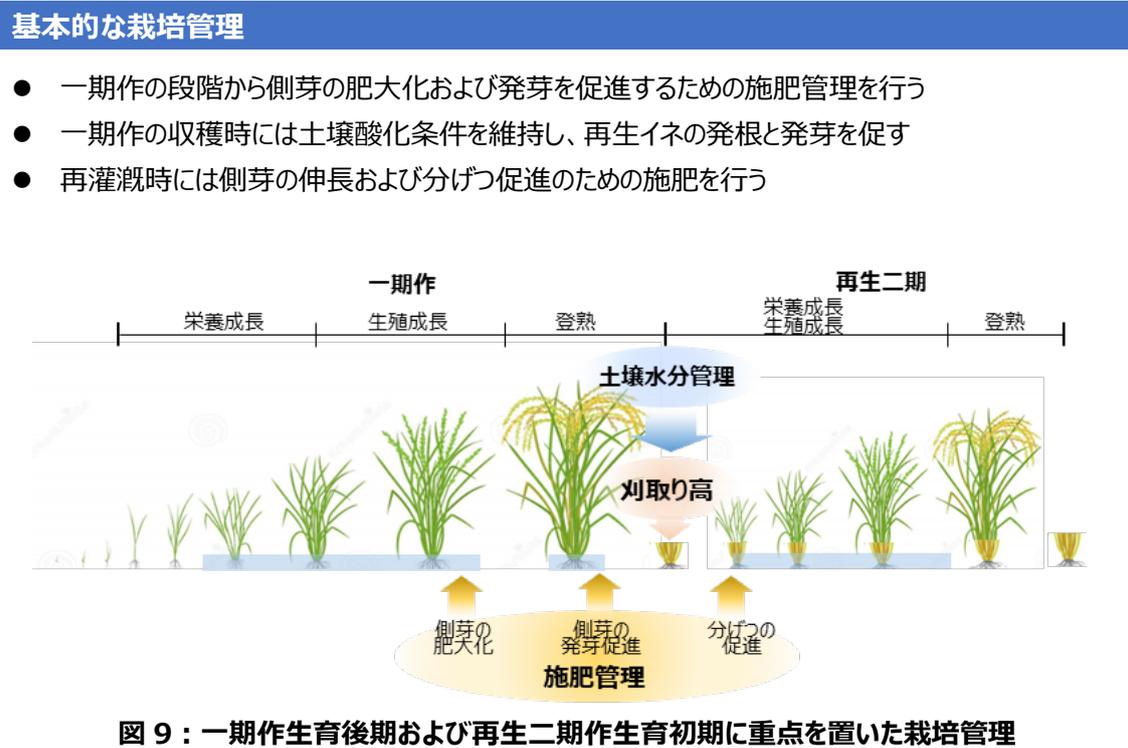
作物	デンプン(%)	アミロース(%)	タンパク質(%)	脂質(%)	灰分(%)
Qy-MC	81.5 ± 1.4 ^b	9.9 ± 0.05 ^b	8.4 ± 0.06 ^b	0.28 ± 0.01 ^a	0.30 ± 0.01 ^a
Qy-RC	80.4 ± 3.5 ^b	16.4 ± 0.08 ^d	7.9 ± 0.05 ^b	0.38 ± 0.02 ^c	0.29 ± 0.04 ^a
Flyx-MC	81.5 ± 0.3 ^b	8.4 ± 0.09 ^a	8.5 ± 0.04 ^b	0.35 ± 0.01 ^b	0.30 ± 0.01 ^a
Flyx-RC	75.7 ± 1.4 ^a	14.9 ± 0.05 ^c	7.9 ± 0.05 ^a	0.28 ± 0.01 ^a	0.40 ± 0.01 ^b

(注) Qy と Flyx はそれぞれ品種名 Quanyou822 と Fengliangyouxiang1 を表す。MC と RC はそれぞれ一期米と再生米を示す。データは平均値±標準偏差 (SD)を示す。列内の平均値が同じ文字を持つ場合、それらの平均値の間に有意差なし (p<0.05)

4: 再生二期作の栽培技術

再生二期作を効果的に実施するためには、一期作の生育後期および再生二期作の生育初期に重点をおいた栽培管理が求められる（図 9）。再生イネの側芽は、一期作の出穂以降に上位節から分化を開始し、収穫時点で幼穂が形成されている場合や、すでに伸長・出穂を開始する側芽も存在する。このため、再生二期作では、一期作の段階から栄養成長と生殖成長が同時に進行する生育相を考慮した栽培管理が不可欠である。

再生二期作における籾生産形態は「穂重型」から「穂数型」へと転換し、収量確保には有効分げつの確保が重要となるため、側芽の再生力を高め、その伸長を促進させる栽培管理が求められる。これにより、再生二期作の収量安定化が期待できる。



4.1: 品種選定の基本

再生二期作を成功させるためには、適切な品種選定が不可欠である。特に側芽の再生力に優れた品種の選定が重要である。これまでに栽培条件に適合し、再生力に優れた品種の探索が行われてきたが、良好な再生力を示す品種は限られているのが現状である。

再生力に優れる高い品種の特性として、高い乾物生産量、成熟期の根の乾燥重量および根活性、低い草丈、高い収量、単位面積当たりの穂数および一穂粒数の多さなどが報告されている。しかしながら、穂数や一穂粒数が少ない品種の方が再生力は高いとする報告もあり、見解が一致しない特性も存在する (Cai et al. 2019; Dong et al. 2017; Jichao & Xiaohui, 1996; Lin et al. 2020)。

現時点では品種選定における明確な判断指標は確立されていないため、試験栽培を通じた評価が不可欠である。以下の基本的な考え方と観察結果を総合的に検討し、再生二期作に最適な品種を選定することが推奨される。

品種選定の基本的な考え方

- **再生力**：一期収穫後の株あたり再生率（側芽の出現率）が高く、冷涼期や降雪前でも不稔が少なく登熟が確保できる品種を選定する。
- **トータル収量の最大化**：一期作および再生二期作の総収量を最大化するには多収品種が望ましい。特に、ソース・シンク容量の大きい品種は再生力が高く、再生二期作でも高収量が期待できる。
- **耐病害虫性**：再生イネは一期イネの親個体と遺伝的に同一であるため、病害虫が再生二期作に引き継がれるリスクが高い。耐病害虫性に優れた品種を選定することが重要である。
- **品質**：食味や嗜好性などの品質要因も考慮し、多収品種が必ずしも最適とは限らない点を踏まえ、品質と収量のバランスを評価する。
- **登熟期間**：品種の早晩性を考慮し、再生二期の出穂安全限界内で登熟が可能な品種を選定する。たとえば、日本では 8 月中旬までに収穫可能な早生品種が推奨される。一方、晩生品種は早生品種に比べ、再生二期作の生育期間が短縮しやすい傾向にあることに留意する。

4.2: イネの再生力と一期収穫の適期

再生二期作における側芽の再生力は、稈中の非構造炭水化物(NSC)および窒素濃度(N)に大きく依存し、NSCとNの蓄積量の変化が側芽の分化および成長に影響を与える (Yang et al. 2021)。

再生力の指標として刈り株後の再生株数 (再生率) を用いた場合、再生株数は乳熟期から糊熟期にかけて最も低下し、完熟期に近づくにつれて急速に増加する傾向が観察されている (図 10)。これは、乳熟期や糊熟期において同化物質が穂に優先的に転流され、稈中の貯蔵養分量が低下するためである。一方、完熟期には穂への同化物質の転流が停止し、余剰養分が稈中に再蓄積されることで再生力が向上する (山本, 1987)。

再生力を最大化するため、一期収穫の適期は一般に完熟期または完熟期直後とされる。再生二期作

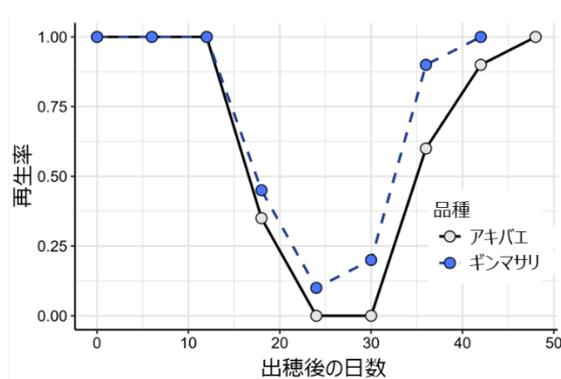


図 10 : 出穂日以降における再生率の変化

出典 : 山本 (1987)

のために収穫時期を通常より 1 週間程度早めることを推奨する報告もあるが、その効果を裏付ける具体的なデータは示されていない。我々のミャンマーでの栽培試験では、収穫時期を通常より 2 週間遅らせても再生力および収量に有意な変化は認められなかった (未発表)。これらの結果から、一期作の収穫は通常 of 適期で問題ないと考えられる。ただし、品種や栽培条件によって再生力への影響は異なるため、側芽の出芽や伸長状況と一期作の登熟状況を考慮し、収穫日を適宜微調整することが重要である。

収穫時の刈り取り高さの低減は、再生二期の生育期間を延長する効果が多くの研究で報告されている。この効果は、下位節の幼穂が未分化もしくは低分化状態のまま収穫期を迎えることによって、栄養成長および生殖成長期間が長くなるためと考えられる。したがって、再生二期作のための一期作刈り取り高さは、節位ごとの幼穂分化の進捗度に規定される可能性がある。

4.3: 一期収穫前後の水管理

再生二期作では、生育初期の再生率（一期作の株数に対する再生二期作の再生株数の割合）が高いほど、乾物重や籾収量が増加する傾向がある。したがって、再生率を高めるための適切な水管理が重要となる。土壌の乾燥は根の発達を促し、湛水は地上茎の伸長を促すため、一期収穫前後の水管理は、側芽の伸長と発根を促す土壌水分状態を作り出すことが求められる（図 11, 12）。



図 11：一期収穫後の土壌乾燥

(写真：JIRCAS, 2020 年撮影)

一期収穫時には、土壌を適度な乾燥状態に保つことが望ましい。土壌が乾燥することで酸素供給量が増加し、根の呼吸が活性化され、根の発達が促進される。適度な乾燥は程中のアミラーゼ（酵素）を活性化し、デンプンを分解して可溶性糖の含有量を増加させる。また、植物ホルモンであるゼアチンとゼアチンリボシドが増加し、側芽の分化や成長が促進されることが示唆されている（Zhang et al. 2022）。

土壌の乾燥は易分解性窒素化合物を増加させ、無機態窒素の供給を促進する根圏環境を形成する。これにより、土壌水分管理と施肥の相互作用が強まり、再生率向上が期待される。機械収穫によるローリングダメージ（収穫時の株の損傷）は、再生率の低下および収量ロスの原因となるが、適切な施肥や土壌水分管理によって、収量ロスが減少することが認められている（Zheng et al. 2022）。

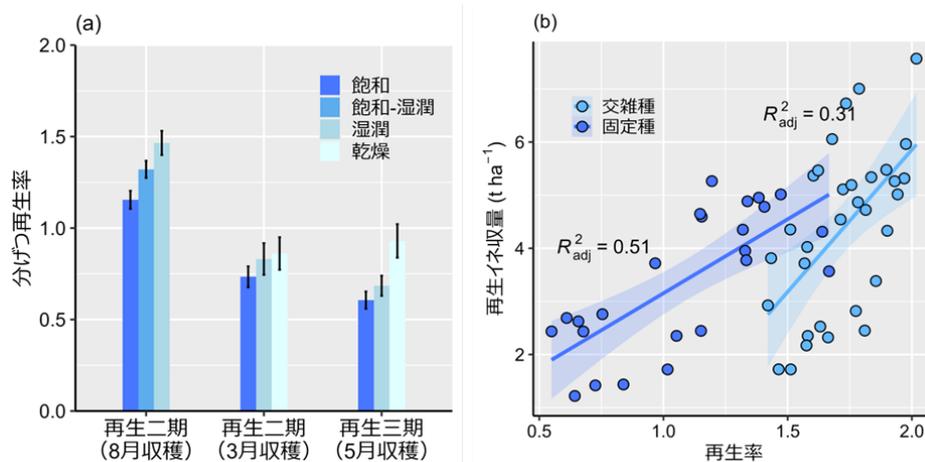


図 12：(a) 土壌水分管理が再生率に及ぼす影響、(b) 品種別の再生率と再生イネ収量の関係

出典：Shiraki et al.(2020)、Chen et al.(2018)

4.4: 再生二期作における施肥

水稻栽培において、施肥は生育段階に応じた重要な農業管理手段である。特に、分けつ期および幼穂形成期は施肥の重要な時期である。再生二期作では、一期作の出穂後に生殖成長が始まり、一期作収穫後は栄養成長と生殖成長が同時に進行する。このため、再生二期作からの施肥では遅く、一期作から再生二期作までを視野に入れた一貫した施肥管理が求められる。一期作の登熟期以降には、稈中への同化物の再蓄積を促し、側芽の分化や伸長に備えることが重要である。再生二期作のための一期作の施肥回数は、先行研究では、2～3 回行うことが提案されている（図 13）。

多肥栽培では、一期作と再生二期作の収量が負の相関がみられる場合がある（Zhou et al. 1995; Xu et al. 2005）。これは、稈中の養分蓄積が側芽の分化を促進し、早期出穂を誘発することに起因すると考えられる。再生二期作の施肥管理は一期作の生育状況に依存するため、一元的な管理は困難であるが、品種や土壌条件を考慮した施肥内容および施肥量を決定することが重要である。

施肥のタイミング

- **一期作の出穂後の施肥**：一期作の登熟歩合を向上させ、側芽の肥大化を図り、再生力を高める。施肥時期は出穂後 10～13 日（山本, 1987）、または 15～20 日（Sun et al. 1982; Nakano & Morita, 2008）などが推奨される。
- **一期作の収穫前の施肥**：側芽の分化を誘発し、伸長を促進する。施肥時期は収穫前 6～8 日後（山本 1987）、または出穂後 25～28 日後（Ling et al. 1989）などが推奨される。
- **一期作の収穫後の施肥**：側芽の伸長および分けつを促進し、幼穂形成に必要な栄養分を供給する。施肥時期は収穫後 2～5 日（Turner & McIlrath, 1988）、または収穫後 6 日（山本, 1987）などが効果的である。

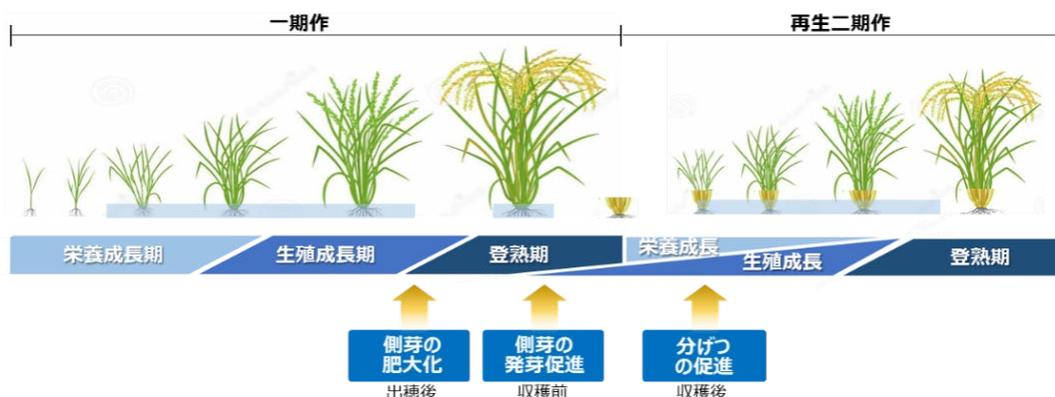


図 13：再生二期作における窒素施用のタイミング

4.5: 多年生品種および早生品種の開発

多年生品種の開発

中国では、再生イネの利点を最大限に活かすため、一年生の多収品種 RD23 (*Oryza sativa*) とアフリカの野生イネ (*Oryza longistaminata*) との交雑により、多年生イネ品種「Perennial Rice 23 (PR23)」が開発された (Zhang et al. 2023) (図 14)。RD23 は東南アジアで広く栽培されているインディカ種であり、市場性の高い品種として評価されている。PR23 は政府推奨品種に指定されており、稲作における労働生産性の向上が期待されている。

多年生型の野生イネは、同化産物を栄養成長や栄養繁殖に優先的に配分するため、一般に種子生産量が少ない傾向がある。しかし、*Oryza longistaminata* は地下茎を用いた栄養繁殖に加えて種子繁殖も可能である。この特性を受け継いだ PR23 は、2 年目以降の栽培管理コストを一年生品種と比較して半減できることが示されており、農業労働者不足の解消や稲作の生産性向上に寄与する可能性が高い。一方で、PR23 の導入にはいくつかの課題が指摘されている。連作や耕起回数の減少による土壌栄養素の偏りや、病害虫の増加リスクが挙げられる。また、収量が低下した場合、継続的な作付けで地下茎が土中深くに増殖するため、その除去には再播種よりも労力が必要になる点も課題として残る (Stokstad, 2022)。

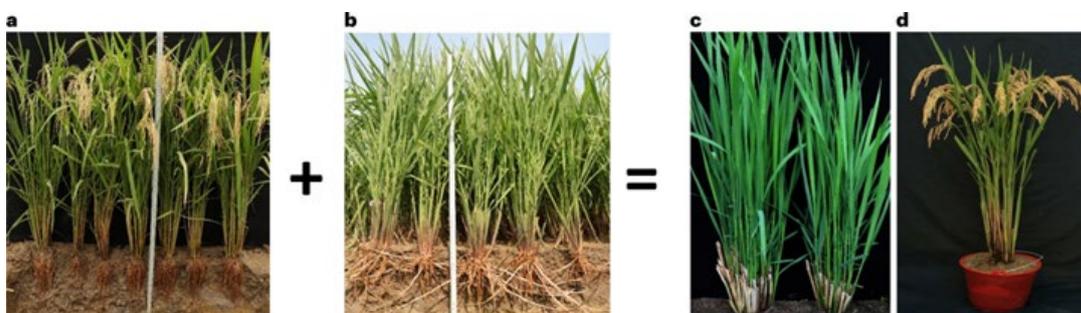


図 14 : 多年生品種の開発

出典 : Zhang et al.(2023)

(注) a: 一年生品種 RD23(*Oryza sativa*), b: 多年生品種(*Oryza longistaminata*), c: 地上部で優れた再生力を示す多年生イネ PR23 の選抜, d. 再生二期の PR23

再生能の高い早生品種の開発

再生能の高い多収性の早生品種の開発は、再生二期作の有用性を高める重要なアプローチの一つである。早生品種は生育サイクルが短いため、複数回の作付けが可能となり、土地生産性や資源利用効率の向上が期待される (Liang et al. 2024)。また、作付けごとに農家が市場需要や栽培条件に応じて品種を柔軟に選定できるという利点もある。さらに、早生品種の導入は、作付け時期が限られる温帯地域や水資源が不足しやすい地域において、再生二期作の適応力を高める効果がある (Dou et al. 2016; Zhijun et al. 2024)。このように、再生能の高い早生品種を活用することで、多年生品種とは異なるアプローチによって、稲作の柔軟性を向上させることができる。

5: 今後の研究課題と展開

5.1: 高い再生力を持つイネ品種の開発

再生二期作の生産性向上は、これまで施肥や水管理、収穫方法といった農業技術に大きく依存してきた。これは、再生力に優れた品種が限られているためである (Wang et al. 2020)。再生二期作の収量の安定化および増収には、高い再生力を持つイネ品種の開発が不可欠である。多年生品種「PR23」は地下茎を利用した栄養繁殖と種子繁殖が可能のため、従来のお米とは異なる特性を示す。

イネの再生力は、土壌水分、施肥、刈り取り高さなどの栽培管理に影響される。また、再生力は特定の遺伝子ではなく、複数の遺伝子が加算的に寄与する相加的遺伝子効果によって制御される (Wali & Mahadevappa, 1996)。近年、再生力に関わる遺伝子の解析が進展しており、再生力を制御する遺伝子「rice ratoon ability 3 (RRA3)」が発見された (Hu et al. 2022; Yao et al. 2023)。

RRA3 は、シロイヌナズナの NRX1 遺伝子のホモログであり、再生力と葉の老化抑制に関わるジスルフィド結合還元活性を持つタンパク質である。RRA3 は、イネのシトキニン受容体である *Oryza sativa* HK 4 (OHK4) と相互作用し、その二量体化 (2 つのタンパク質が結合すること) を阻害することでシトキニンシグナル伝達を抑制する。この作用により、側芽の過剰成長を抑制し、エネルギーおよび養分を節約しながら収量増加を可能にすると考えられている。今後の品種改良では、これらの遺伝子機構を利用することで、高い再生力を持つ品種の開発が実現する可能性がある。

5.2: イネの栄養繁殖メカニズムの解明

再生二期作は、一期作収穫後のイネ株からの栄養繁殖を行う栽培方法であり、種子繁殖を行う一期作とは成長発達および収量形態が大きく異なる。再生イネは、種子繁殖のイネと比べて、栄養成長期間が大幅に短縮され、一穂粒数が半減する特徴がある。

栄養繁殖型の多年生型野生イネと同様に、再生イネは同化産物を茎葉や根の再生・発達に優先的に配分する一方、種子生産への資源配分を減少させている可能性がある。栄養繁殖に関わる分子機構は、遺伝子、ホルモン、環境要因を含む複雑なプロセスであり、未解明な点が多い (別所-上原・天野, 2023)。分子生物学および遺伝子工学の進歩は、これらのメカニズム解明に大きく貢献する可能性がある。例えば、側芽の活性化、同化物の再配分、資源の割り当てに関与する主要な遺伝子やシグナル経路の特定が、再生二期作の増収技術の確立や品種改良に大きく貢献する可能性がある。

5.3: 機械収穫による収量損失

機械収穫による収量ロスは、再生二期作の栽培技術における主要な課題の一つである。大型収穫機械の走行する際に刈り株が踏みつぶされることで生理障害が生じ、収量ロスは 20～50%に達することが報告されている (Peng, 2023; Zheng et al. 2022)。特にアジアモンスーン地域で普及している散布直播では、イネ株が小さく、根が浅く根付いているため、機械走行による株の損傷が大きく、登熟が妨げられることが多い。この結果、機械収穫では手刈り収穫に比較して再生二期作の収量が半減する (図 15)。

この課題を解決するために、刈り取り方法の改善、機械走行後の株起こし技術、走行加重の分散および転圧耐性を持つ品種改良、株強化のための施肥など、さまざまな研究が行われている。しかし、これらの技術は現段階では部分的な成果にとどまっており、実用化には依然として多くの課題が残されている (Zou et al. 2024)。機械収穫における収量ロスを最小限に抑えるためには、さらなる技術開発と栽培管理体系の改善が求められる。

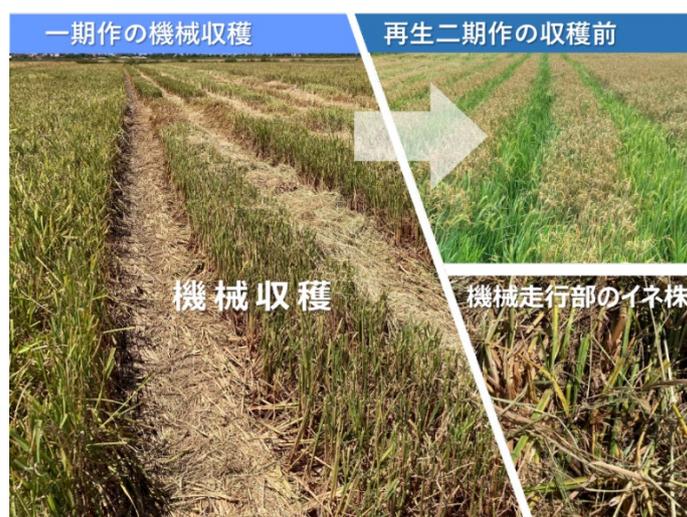


図 15 : 一期作の機械収穫時に踏みつぶされたイネと再生二期の収穫時の状況

(注) ベトナム・レトウイ郡における水稲再生二期作の農家圃場 (写真: JIRCAS, 2023 年撮影)

5.4: 病害虫および鳥獣害対策

再生二期作における病害虫の発生リスクは、一期作と同じ株が再成長することに起因して高まる。特に、一期作の収穫後の刈り株はウカカの繁殖場所となり、イネ縞葉枯病が拡大する傾向がある。イネ縞葉枯病のウイルスを媒介するヒメトビウカは、ベトナム北部や中国南東部から季節風に乗って日本に飛来する。近年、インドシナ半島や中国ではハイブリッド米の普及に伴い、殺虫剤の多用が進んだ結果、薬剤抵抗性をもつウカカが増加している。このウカカの増加が、被害拡大の一因であることが指摘されている (松村, 2014)。

イネ縞葉枯病のような虫媒伝染病は、一度発生すると経卵伝染により地域内での終息が困難であり、長期間な対策が不可欠となる。日本国内では、各地方公共団体が一期作収穫後の速やかな耕起を推奨しており、再生二期作を実施する場合はウンカ類に対する抵抗性品種の導入と徹底した防除対策が重要となる。一方で、鳥獣害も再生二期作における深刻な課題である。再生二期作は、通常の水稲作とは収穫時期が異なるため、周辺に作付けが少ない場合、鳥害が集中しやすく、収量損失が大きくなる。また、ネズミも刈り株を傷つけ、粃を食べて収量減少を引き起こす。

これらの問題に対処するため、鳥害には防鳥網や威嚇手段の導入が有効とされており、ネズミ被害については圃場の定期的な監視と迅速な駆除が必要である。再生二期作の安定的生産を実現するためには、病害虫対策と鳥獣害対策とを体系的に組み合わせた栽培管理が不可欠である。

5.5: 再生イネ栽培技術の普及とその課題

再生二期作は、省力化や環境負荷低減といった観点から、従来の水稲二期作に対する優れた代替手段として評価されている。しかし、再生二期作の導入地域は限定的であり、普及が十分に進んでいない現状がある。普及が進まない主な要因として、現地農家への技術移転や普及活動が不十分であることが挙げられる。

その結果、多くの農家が不安定で低い収量の問題に直面し、再生二期作の技術的な解決策にアクセスできない（図 16）。例えば、中国の華中やベトナムの中央州では、1990 年代以前から再生二期作の導入が試みられていたものの、不安定な収量と水資源の不足が障壁となり、普及が制約されていた。さらに、2014 年以前には、再生二期作が政府の米生産目標で優先度が低かったことから、必要な水



図 16：再生二期作の農家間の生育状況の違い

（注）ベトナム・レトウイ郡における水稲再生二期作の農家圃場（写真：JIRCAS, 2023 年撮影）

資源が十分に配分されず、農家の取り組みが制限されていた（Wang et al. 2023; Sen & Bond, 2017）。

加えて、農業機械化を促進する政策も課題となっている。機械収穫による株の損傷は再生二期作の収量ロスを増大させる要因となっており、普及を妨げる結果を招いている。また、普及員による技術指導が十分に行われていないことも、農家が再生二期作の価値や可能性を認識する機会を拒んでいる。

再生二期作は、省力的かつ低投入型の作付け体系であり、持続可能な稲作農業の実現に寄与する手法である。さらに、水資源の節約や温室効

果ガスの排出削減など、気候変動への適応・緩和策としての役割も期待されている。そのため、再生二期作の普及を加速させるには、農家への情報提供と技術指導の強化が不可欠であり、同時に多収品種の開発や栽培技術の改良が求められる。関係機関が連携を強化し、現地農家の実情に即した継続的かつ効果的な普及活動を推進することが必要である。

5.6: 市場価値および外部性の費用便益分析による経済的実現可能性の向上

再生二期作は労働力削減や生産コスト低減などの利点を有するが、その経済効果は地域の気候条件、農家の経営規模、労働力状況等に左右され、すべての水稻生産体系に適用できるわけではない。再生二期作の導入促進には、地域ごとの農業経営データを分析し、収益性や損益分岐点を明確にすることが重要である。

また、再生二期作は従来の二期作より栽培期間が短く、収穫時期も異なり、一期米と比べてアミノ酸含量が高いなど、独自の品質特性を有する (Zhang et al. 2021)。これらの特性の市場評価を見極め、需要動向に即した供給戦略を構築することが必要である。

さらに、今後の研究では、異なる農業条件下での収益性比較や、環境負荷を考慮した「真のコスト会計」(von Braun & Hendriks, 2023)に基づく包括的経済分析が期待される。これにより、再生二期作の持続可能性と経済的妥当性を総合的に評価し、普及の可能性を高めることができる。

加えて、再生二期作の市場価値向上には付加価値の増加が不可欠である。環境負荷低減や資源効率の向上といった利点はあるものの、現行の市場メカニズムでは十分に反映されていない (Conner, 2004)。消費者および市場の認知度を高め、適正価格設定を実現するため、地域ブランドの確立とマーケティング戦略の強化が求められる。

5.7: アジアモンスーン地域への展開

再生イネや多年生イネは、2023年10月にフィリピンのマニラ市で開催された第6回国際イネ会議のセッションで議論されるなど、世界の米生産分野で注目される技術である。かつては迅速な食料増産を目的とした再生二期作も、近年は特にアジアモンスーン地域における深刻な農業労働力不足と生産性向上の必要性、さらに、水資源の節約や温室効果ガスの排出削減といった環境面の利点から、気候変動対策として評価され、その期待が高まっている (Yu et al. 2021)。

アジアモンスーン地域は気候的条件や農業の社会経済的背景が多様であるため、再生二期作を効果的に展開するには、各地域の環境や課題に応じた適応技術の開発と普及戦略が不可欠である (Saito & Ichikawa, 2014)。各地域の降雨量や水資源量の違いに応じ、一期作の作付け

開始時期や水管理方法を調整する技術、並びに病害虫発生傾向に合わせた品種選定や防除技術を取り入れた栽培体系の構築が求められる。さらに、地域間での成功事例や失敗事例の共有、また、国際的な研究ネットワークの構築により、最新技術の迅速な導入や地域課題に即した技術改良を進める仕組みの構築などが必要である。

最後に、政策支援と経済的インセンティブの創出が普及促進の鍵となる。再生二期作の導入には用排水路などのインフラ整備が必要な場合があり、政府による補助金や技術支援が推進力となる。さらに、モデル農家の育成や環境負荷低減を評価する経済的インセンティブの提供により、技術採用が促進される。これらの取り組みを総合的に実施することで、アジアモンスーン地域における再生二期作の普及が促進し、持続可能な農業の実現に貢献できると期待される。

6: 今後の展望

日本の食料自給率は2021時点で38%であった。一方、政府は2030年度までに45%への引き上げを目標に掲げている。しかし、食生活の多様化や少子高齢化、世帯構造の変化により、コメの消費量は減少傾向にある。また、中山間地域などの生産性の低い水田では耕作放棄が進んでおり、一度放棄された水田は用排水路の閉塞や雑草の繁茂によって、稲作の再開が難しい状況にある。

コメは食料としてだけでなく、健康食品、化粧品、工業製品など多岐にわたる分野での利用が期待される素材であり、食料以外の分野においても有用な資源である。特に、生産コストが抑えられる再生二期作は、その応用範囲がさらに拡大する可能性がある。食味を追求しない用途においては、効率的な生産による供給量の増加が見込まれ、工業原料としての利用にも適している。バイオプラスチックの生産においては、石油由来の製品と同等の品質を持つ製品が実用化され、また、米の粃を微細化した微粉末は、栄養食品や化粧品の原料に活用され、粃殻の有効利用として注目されている。

今後の展開においては、再生二期作は農業分野における新たな付加価値の創出にも寄与する可能性がある。食味を重視しない工業利用等においては、生産効率の高さが再生二期作の強みとなり、農業経済の多様化を促進する手段となり得る。そのためには、再生二期作の普及促進と技術改良が重要な課題となる。品種改良や栽培技術の進展により、収量の安定化や生産効率の向上が実現すれば、再生二期作の適用範囲はさらに拡大し、農業課題を抱える地域に新たな可能性をもたらすことが期待される。再生二期作は、食料安全保障の強化のみならず、持続可能な農業体系の構築と地域社会の発展に貢献し得る技術として、今後の重要性が一層高まることが期待される。そのためには、研究開発の推進に加え、政策的な支援、生産者への技術普及、消費者への理解促進など、多角的な取り組みが必要となる。

著者の貢献について

白木、Sen が本レポート内容に関するアイデアを着想し、文献レビューを行い、データを編集し、原稿を執筆しました。

謝辞

本レポートは、農林水産省「みどりの食料システム基盤農業技術のアジアモンスーン地域応用促進事業」の下で「グリーンアジア」プロジェクトとして実施された研究に基づくものです。著者は原稿に関して貴重なコメントやアドバイスをいただいた国際科学諮問委員会委員の方々に謝意を表明します。

参考文献

- 別所-上原, 天野 (2023) 植物に見られる多様な栄養繁殖戦略. 植物科学の最前線, BJS-Review,14,14:108.
- Cai, H., Tabien, R. E., Xu, D., Harper, C. L., Samford, J., Yang, Y., You, A., Samonte, S. O. P. B., Holgate, L., & Jiao, C. (2019). Grain quality and yield of rice in the main and ratoon harvests in the southern U.S. *Journal of Agricultural Science*, 11, 1-13.
- Chen, Q., He, A., Wang, W., Peng, S., Huang, J., Cui, K., & Nie, L. (2018). Comparisons of regeneration rate and yields performance between inbred and hybrid rice cultivars in a direct seeding rice-ratoon rice system in central China. *Field Crops Research*, 223, 164-170.
- Conner, D. S. (2004). Expressing values in agricultural markets: An economic policy perspective. *Agriculture and human values*, 21, 27-35.
- Deng, F., Yang, F., Li, Q., Zeng, Y., Li, B., Zhong, X., ... & Ren, W. (2021). Differences in starch structural and physicochemical properties and texture characteristics of cooked rice between the main crop and ratoon rice. *Food Hydrocolloids*, 116, 106643.
- Dong, H., Chen, Q., Wang, W., Peng, S., Huang, J., Cui, K., & Nie, L. (2017). The growth and yield of a wet-seeded rice-ratoon rice system in central China. *Field Crops Research*, 208, 55-59.
- Dou, F., Tarpley, L., Chen, K., Wright, A. L., & Mohammed, A. R. (2016). Planting date and variety effects on rice main and ratoon crop production in South Texas. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(21), 2414-2420.
- FAO. (2013). Revitalizing rice ratooning to reduce risk and impact during hazard-prone months in the Bicol Region, Philippines. *Evaluation of FAO's Strategic Objective*.
- FAO. (2022). *Food Outlook – Biannual Report on Global Food Markets*. Rome: FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9427en>
- He, A., Wang, W., Jiang, G., Sun, H., Jiang, M., Man, J., Cui, K., Huang, J., Peng, S., & Nie, L. (2019). Source-sink regulation and its effects on the regeneration ability of ratoon rice. *Field Crops Research*, 236, 155-164.
- Hu, H., Gao, R., He, L., Liang, F., Li, Z., Xu, J., Yang, L., Wang, C., Liu, Z., Xu, J., & Qiu, X. (2022). Genetic dissection of rice ratooning ability using an introgression line population and substitution mapping of a pleiotropic quantitative trait locus qRA5. *Plants*, 11(9), 1134.
- Huang, J., Pan, Y., Chen, H., Zhang, Z., Fang, C., Shao, C., Amjad, H., & Lin, W. (2020). Physicochemical mechanisms involved in the improvement of grain-filling rice quality mediated by related enzyme activities in the ratoon cultivation system. *Field Crops Research*, 258, 107962.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (accessed on 6 July)
- Jichao, Y., & Xiaohui, S. (1996). Study on the relationship between heading date and economic characters of rice ratooning. *Journal of Sichuan Agricultural University* (In Chinese).
- Liang, Z., Ruiz-Menjivar, J., Zhang, L., Zhang, J., & Shen, X. (2024). Examining the effects of adopting early maturing crop varieties on agricultural productivity, climate change adaptation, and mitigation. *International Journal of Low-Carbon Technologies* (In Chinese), 19, 1256-1274.
- Lin, Q., Wu, W., Zhang, J., & Ye, Y. (2015). Dry matter accumulation and nutrient remobilization in ratoon crop of rice under different water and nitrogen managements. *Field Crops Research*, 183, 119-128.
- Lin, Q., Wang, Y. H., Lin, Q., Zhou, F. M., & Zhang, J. F. (2020). Yield formation and key screening indicators ratooning rice under simplified cultivation. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry* (Natural Science Edition), 48, 38-47.
- Ling, Q. H., Su, Z. F., Hou, K. P., Guo, H. W. (1989). Studies on the growth and panicle differentiation of resting

- bud and its application in rice plants. *Scientia Agricultura Sinica*, 22, 35–43.
- Nakano, H., & Morita, S. (2008). Effects of time of first harvest, total amount of nitrogen, and nitrogen application method on total dry matter yield in twice harvesting of rice. *Field Crops Research*, 105, 40–47.
- Nakano, H., Tanaka, R., Wada, H., Okami, M., Nakagomi, K., & Hakata, M. (2020). Breaking rice yield barrier with the ratooning method under changing climatic conditions: A paradigm shift in rice-cropping systems in southwestern Japan. *Agronomy Journal*, 112(5), 3975–3992.
- Ngadi, N., Zaelany, A. A., Latifa, A., Harfina, D., Asiati, D., Setiawan, B., Ibnu, F., Triyono, T., & Rajagukguk, Z. (2023). Challenge of agriculture development in Indonesia: rural youth mobility and aging workers in agriculture sector. *Sustainability*, 15(2), 922.
- 農林水産省. (2024a). 農業労働力に関する統計. <https://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/08.html>. (参照 2025-1-6).
- 農林水産省. (2024b). 荒廃農地の現状と対策. <https://www.maff.go.jp/j/nousin/tikei/houkiti/attach/pdf/index-35.pdf>. (参照 2025-1-6).
- 松村正哉. (2014). イネウカ類の薬剤抵抗性問題と防除対策. *日本農薬学会誌*, 39(1): 41–47.
- Page, Z., Akintayo, I., Roger, A., Paul, B., & Ziama, R. Z. (2023). Rice ratooning as a sustainable climate smart adaptation for agriculture in Liberia. *African Journal of Agricultural Research*, 19(1), 20–23.
- Peng, S., Zheng, C., & Yu, X. (2023). Progress and challenges of rice ratooning technology in China. *Crop and Environment*, 2(1), 5–11.
- Qi, D., Liu, K., Fu, M., Harrison, M. T., Shi, X., Liu, X., Voil, P., Zhang, Y., Radanielson, A., Wu, W., Chen, J., Jiang, Y., Zhang, J., Zhao, Q., & Peng, T. (2024). Dual purpose ratooned rice improves agri-food production with reduced environmental cost. *Journal of Cleaner Production*, 450, 141813.
- Saito, O., & Ichikawa, K. (2014). Socio-ecological systems in paddy-dominated landscapes in Asian Monsoon. *Social-ecological restoration in paddy-dominated landscapes*, 17–37.
- Sen, L. T. H., & Bond, J. (2017). Agricultural adaptation to flood in lowland rice production areas of Central Vietnam: understanding the ‘regenerated rice’ ratoon system. *Climate and Development*, 9(3), 274–285.
- Shen, X., Zhang, L., & Zhang, J. (2021). Ratoon rice production in central China: Environmental sustainability and food production. *Science of The Total Environment*, 764, 142850.
- Shiraki, S., Kywae, Thura, Lea, L. M., Thin, M. C., Kyaw, M., N., N., Oo, M. T., Loon, P. P., & Aung, T. K. (2024). The general ratooning ability of rice yield-related traits: A meta-analysis. *Agronomy Journal*, 1–16.
- Shiraki, S., Thin, M. C., Khin, M. H., & Yamaoka, K. (2020). Effects of the double-cutting method for ratooning rice in the SALIBU System under different soil moisture conditions on grain yield and regeneration rate. *Agronomy*, 10(11), 1621.
- Shiraki, S., Thin, M. C., Matsuno, Y., & Shinogi, Y. (2021). Evapotranspiration and crop coefficient of ratoon rice crop determined by water depth observation and Bayesian inference. *Agronomy*, 11(8), 1573.
- Stokstad, E. (2022). Perennial rice could be a ‘game changer’. *Science* (New York, NY), 378(6620), 586–586.
- Sun, X. H., Tian, Y. H., & Ren, T. J. (1982). Study on increasing yield of N applying for bud development on ratooning rice in main crop. *Agricultural Science and Technology in Sichuan*, 3, 1–4.
- Szabo, S., Apipoonyanon, C., Pramanik, M., Tsusaka, T. W., & Leeson, K. (2021). Agricultural productivity, aging farming workforce, sustainable agriculture, and well-being: household survey data from central Thailand. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5:728120.
- Turner, F. T., & McIlrath, W. O. (1988). N fertilizer management for maximum ratoon crop yields. In *Ratooning Rice* (pp. 187–195). International Rice Research Institute, Los Banos, Laguna, Philippines.
- Vergara, B. S., Lopez, F. S. S., & Chauhan, J. S. (1988). Morphology and physiology of ratoon rice. In *Rice Ratooning* (pp. 31–40). International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines.
- von Braun, J., & Hendriks, S. L. (2023). Full-cost accounting and redefining the cost of food: Implications for agricultural economics research. *Agricultural Economics*, 54(4), 451–454.
- Wali, C., & Mahadevappa, M. (1996). Genetics of ratooning ability in rice (*Oryza sativa* L.). *Indian Journal of Genetics*, 56(04), 472–476.
- Wang, F., Cui, K., & Huang, J. (2023). Progress and challenges of rice ratooning technology in Hubei Province, China. *Crop and Environment*, 2(1), 12–16.
- Wang, W., He, A., Jiang, G., Sun, H., Jiang, M., Man, J., Ling, X., Cui, K., Huang, J., Peng, S., & Nie, L. (2020). Ratoon rice technology: A green and resource-efficient way for rice production. *Advances in Agronomy*, 159, 135–167.

- World Bank Group. (2022). Commodity markets outlook: The impact of the war in Ukraine on commodity markets, *April 2022*. World Bank
- World Meteorological Organization. (2024). WMO confirms that 2023 smashes global temperature record. Retrieved from <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2023-smashes-global-temperature-record>
- Xu, H., Lian, L., Wang, F., Jiang, J., Lin, Q., Xie, H., Luo, X., Zhu, Y., Zhuo, C., Wang, J., Xie, H., Jiang, Z., Zhang, J. (2020). Brassinosteroid signaling may regulate the germination of axillary buds in ratoon rice. *BMC Plant Biology*, 20, Article 1–14.
- Xu, F. X., Xiong, H., Zhu, Y. C., & Wang, G. X. (2005). Effect of source-sink ratio on grain filling and the source-sink characteristics of high yield varieties of mid-season hybrid rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 38, 265–271.
- Xu, Y., Liang, L., Wang, B., Xiang, J., Gao, M., Fu, Z., ... & Huang, C. (2022). Conversion from double-season rice to ratoon rice paddy fields reduces carbon footprint and enhances net ecosystem economic benefit. *Science of the Total Environment*, 813, 152550.
- 山本武雄. (1987). 再改著. 水稻の再生二期作. 研文社. 1–415.
- Yao, Y., Xiang, D., Wu, N., Wang, Y., Chen, Y., Yuan, Y., Ye, Y., Hu, D., Zheng, C., Yan, Y., Lv, Q., Li, X., Chen, G., Hu, H., Xiong, H., Peng, S., & Xiong, L. (2023). Control of rice ratooning ability by a nucleoredoxin that inhibits histidine kinase dimerization to attenuate cytokinin signaling in axillary buds. *Molecular Plant*, 16(12), 1911–1926.
- Yang, D., Peng, S., Zheng, C., Xiang, H., Huang, J., Cui, K., Wang, F. (2021). Effects of nitrogen fertilization for bud initiation and tiller growth on yield and quality of rice ratoon crop in central China. *Field Crops Research*, 272, 108286.
- 吉田, 穂園. (1995). 早期水稻再生芽の成長に関する研究. 日本作物学会紀事. 64(1): 1-6.
- Yu, X., Tao, X., Liao, J., Liu, S., Xu, L., Yuan, S., ... & Peng, S. (2022). Predicting potential cultivation region and paddy area for ratoon rice production in China using Maxent model. *Field Crops Research*, 275, 108372.
- Yu, X., Yuan, S., Tao, X., Huang, J., Yang, G., Deng, Z., Xu, L., Zheng, C., Peng, S. (2021). Comparisons between main and ratoon crops in resource use efficiencies, environmental impacts, and economic profits of rice ratooning system in central China. *Science of The Total Environment*, 799, 149246.
- Yuan, S., Cassman, K. G., Huang, J., Peng, S., & Grassini, P. (2019). Can ratoon cropping improve resource use efficiencies and profitability of rice in central China? *Field Crops Research*, 234, 66–72.
- Zhang, Q., Liu, X., Yu, G., Duan, B., Wang, H., Zhao, H., ... & Liu, L. (2022). Alternate wetting and moderate soil drying could increase grain yields in both main and ratoon rice crops. *Crop Science*, 62(6), 2413–2427.
- Zhang, S., Huang, G., Zhang, Y., Lv, X., Wan, K., Liang, J., Feng, Y., Dao, J., We, S., Zhang, L., Yang, X., Lian, X., Huang, L., Shao, L., Zhang, J., Qin, S., Tao, D., Crew, T. E., Sacks, E. J., Lyu, J., Wade, L. J., & Hu, F. (2023). Sustained productivity and agronomic potential of perennial rice. *Nature Sustainability*, 6(1), 28–38.
- Zhang, W., Zhan, Z., Wang, H., Shu, Z., Wang, P., Zeng, X. (2021). Structural, pasting and sensory properties of rice from main and ratoon crops. *International Journal of Food Properties*, 24(1), 965–975.
- Zheng, C., Wang, Y., Yuan, S., Xiao, S., Sun, Y., Huang, J., Peng, S. (2022). Heavy soil drying during mid-to-late grain filling stage of the main crop to reduce yield loss of the ratoon crop in a mechanized rice ratooning system. *The Crop Journal*, 10(1), 280–285.
- Zhijun, P., Xiaowen, W., Chenyang, W., Yu, C., Long, C., Xiaohong, Z., ... & He, S. (2024). Analysis of yield and utilization of temperature and light resources of different types of ratoon rice varieties in central Anhui, China. *Acta Agriculture Zhejiangensis*, 36(7), 1492.
- Zhou, K. D., Ma, Y. Q., Liu, T. Q., & Shen, M. S. (1995). The breeding of subspecific heavy ear hybrid rice—exploration about super-high yield breeding of hybrid rice. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 13, 403–408.
- Zou, J., Pang, Z., Li, Z., Guo, C., Lin, H., Li, Z., Chen, H., Huan, J., Chen, T., Xu, H., Qing, B., Letuma, P., Lin, W., & Lin, W. (2024). The underlying mechanism of variety–water–nitrogen–stubble damage interactions on yield formation in ratoon rice with low stubble height under mechanized harvesting. *Journal of Integrative Agriculture*, 23(3), 806–823.
- Zou J, Xu H, Lan C, Qin B, Li J, Nyimbo W J, ... & Lin W. (2024). Regulation of photoassimilate transportation and nitrogen uptake to decrease greenhouse gas emissions in ratooning rice with higher economic return by optimized nitrogen supplies. *Field Crop Research*, 312, 109385.



国立研究開発法人
国際農林水産業研究センター

〒305-8686 茨城県つくば市大わし1-1
Tel. 029-838-6313 Fax. 029-838-6316

<https://www.jircas.go.jp/ja/greenasia/report>

