

グリーンアジア レポートシリーズ

No.1

アジアモンスーン地域における科学・技術・ イノベーションの適用を通じた持続可能な 食料システムの変革の推進

「グリーンアジア」プロジェクトの背景と主要な課題

飯山みゆき、金森紀仁、小林慎太郎、舟木康郎



グリーンアジア

グリーンアジアレポートシリーズ No. 1

アジアモンスーン地域における科学・技術・イノベーションの 適用を通じた持続可能な食料システムの変革の推進

「グリーンアジア」プロジェクトの背景と主要な課題

飯山みゆき^{1*}、金森紀仁¹、小林慎太郎¹、舟木康郎^{1*}

1 国立研究開発法人 国際農林水産業研究センター

* 責任著者

2023年9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）），2023

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。

Iiyama, M., Kanamori, N., Kobayashi, S., & Funaki, Y. (2023) Driving sustainable food systems transformation in the Asia-Monsoon region with science, technology, and innovation. *Green Asia Report Series*, No. 1. 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。飯山みゆき、金森紀仁、小林慎太郎、舟木康郎 (2023)、アジアモンスーン地域における科学・技術・イノベーションの適用を通じた持続可能な食料システムの変革の推進、グリーンアジア レポートシリーズ、No. 1. 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/1>

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

概要.....	iv
1：序論.....	1
2：アジアモンスーン地域の定義.....	3
2.1：アジアモンスーン地域とは.....	3
2.2：アジアモンスーン地域の地理的境界.....	5
2.3：世界的文脈におけるアジアモンスーン地域の人口動態・経済的シェア.....	7
2.4：社会経済の地域内多様性.....	10
3：アジアモンスーン地域の農業部門の特徴.....	12
3.1：農業部門の主な特徴.....	12
3.2：その他の重要な農業・食料産品.....	16
3.3：農業システムの集約性.....	19
4：アジアモンスーン地域における食料システム変革の課題への対応.....	21
4.1：気候緊急事態と環境危機.....	21
4.2：農業部門に由来するGHG排出.....	22
4.3：STIを展開する文脈としてのアジアモンスーン地域.....	25
5：結論.....	28
著者の貢献について.....	30
謝辞.....	30
参考文献.....	30

概要

アジアモンスーン地域には、東アジア、東南アジア、南アジアの経済域が含まれる。本レポートで採用したアジアモンスーン地域の定義に基づくと、2018年時点で推定 33 億 4000 万人、すなわち世界人口の 44%が世界の総陸地面積の 9%に相当する面積に居住しており、この地域はまた、世界の GDP の 28%を占めている。アジアモンスーン地域の人口は 2050 年までに少なくとも 4 億 2000 万人増えると予測されており、食料安全保障を確保し貧困を撲滅するために食料生産を拡大する必要がある。一方、この食料生産拡大の必要性は、農業部門における二酸化炭素以外の温室効果ガス（GHG）の排出（同地域の世界シェア 40%）削減との間で深刻なトレードオフを伴う。持続可能な農業の実践に向けたパラダイムシフトを不可避とする考えが世界的潮流となりつつあるなか、この地域における食料システムの変革を後押しするうえで、環境負荷の緩和と食料生産性の向上を同時に実現可能な科学・技術・イノベーション（STI）を早急に特定・考案する必要がある。

アジアモンスーン地域の農業部門は、高温多湿、水田稲作、小規模農家、という特徴を有し、極めて集約的な農業体系に適した環境を形成している。この地域の農業体系の集約性は、ヨーロッパやアメリカ大陸など、世界の他の地域とは一線を画している。気候緊急事態（climate emergency）や環境危機に直面するなか、生産性を犠牲にすることなく環境持続性に資する効果的な STI を特定・考案するためには、アジアモンスーン地域の農業部門のこうした際立った特徴を考慮する必要がある。

アジアモンスーン地域の農業部門はますます異常気象にさらされるようになってきており、作物の生産性や品質への悪影響が懸念されている。同時に、この地域の農業部門で発生する二酸化炭素以外の GHG 排出量は世界の総排出量の 40%を占めており、主な排出源には、水田（CH₄）と肥料の非効率的な使用（N₂O）が含まれる。したがって、生産性を犠牲にすることなく環境負荷を削減するために、この地域では STI の導入を早急に加速させる必要がある。アジアモンスーン地域内には、地域固有の状況にきめ細かく合わせる必要はありつつも、広域に普及可能な基盤（scalable）農業技術の実践を通じて食料システムの変革を迅速に実施するための条件となりうる共通の特徴が多く存在する。アジアモンスーン地域は、これらの共通する特徴を利用し、知識を共有することで、「規模の経済」を実現すべきである。

世界人口・経済に占めるアジアモンスーン地域の重要性を鑑みると、同地域における食料システムの変革が成功すれば、気候変動の緩和や持続可能な農業生産への相乗効果の可能性が実証され、世界に大きな影響をもたらされるだろう。STI を実証し、これを普及に繋げるための経験や教訓を共に学習することを可能にする環境が整備されることで、この地域は食料システムの迅速な変革を

実現する重要な機会を手にするようになる。

2021年5月に食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立をイノベーションで実現する「みどりの食料システム戦略」を策定した日本の農林水産省は2022年4月、「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」を開始した。農林水産省は国際農林水産業研究センター（国際農研（JIRCAS））を同事業の実施機関に指定し、国際農研は「グリーンアジア」のプロジェクト名にて、活動を行っている。このプロジェクトは同地域における基盤農業技術の導入の加速化を目的とする。プロジェクトでは、その目的を達成する仕組みとして、この地域にとって有用で適用可能な研究結果および成果に関する日本やその他の国・エコノミーの情報について収集・分析・提供を実施する。プロジェクトの結果および成果は、政府関係者、研究者、普及員、生産者、民間部門を含む、さまざまな関係者の参考となり、アジアモンスーン地域、そしてその他の地域における持続可能な食料システムへの変革に貢献することが期待される。

1：序論

現在、世界の食料システムは地球の健全性（planetary health）に脅威をもたらす多くの課題に直面している（Rockström et al. 2009）。農業からは、人為的な温室効果ガス（GHG）の総排出量のうち約 25%が排出されており、その大部分を占めるのが、土地利用の変化および森林伐採に由来する二酸化炭素（CO₂）、水田および家畜の腸内発酵に由来するメタン（CH₄）、化学肥料の使用に由来する一酸化二窒素（N₂O）である。食料システム全体では、この割合は 30%に達する可能性がある（Tubiello et al. 2021）。同時に、食料システムは極端な気候の影響を特に受ける部門であり、異常気象は食料と栄養の不安に拍車を掛け、その影響は食料サプライチェーンのネットワークを通じて世界中に拡散する可能性がある（Willet et al. 2019）。

2021 年 9 月に開催された国連食料システムサミットでは、持続可能な食料システムへの変革が不可欠であることが示された。食料システムには、農業（畜産を含む）、林業、水産業、食品産業に由来する食料の生産、集荷、加工、流通、消費、および処分（損失または廃棄）のあらゆる関係者、および関係者同士が繋がる付加価値活動、さらにはこれらの活動が組み込まれている幅広い経済・社会・物理環境が含まれる（von Braun et al. 2021）。持続可能な食料システムを構築するには人間の健康と環境持続性を密接に結びつけている食生活を根底から見直す必要があり、生産から消費にいたる全ての段階において従来通りのやり方から脱却するためのパラダイムシフトが必要となる（Willet et al. 2019）。一方で、食生活は特定の社会経済的背景および文化的文脈に深く組み込まれているため、システムレベルでの変革の実現は、エビデンスに基づく科学と政策の対話を通じた、関係者の行動変容を必要とする。食料システムの関係者の関心が極めて多様であることを考えると、制度変革プロセスは、慎重な調整を要請するものであり、そのため必然的に時間がかかることを覚悟する必要がある。

差し当たっては、技術革新、すなわち農業分野における科学・技術・イノベーション（STI）の導入を可能な限り早急に推し進め、極端な事象や気候変動に対する食料システムの強靱性（レジリエンス）を構築する必要がある。推進すべき農業 STI は、資源の効率的利用および生物多様性の再生を促進することで GHG 排出量などの環境負荷を削減するだけでなく、食料生産性および関係者の収益性を向上させることも期待される。一方、STI の導入を加速できるかどうかは関係者のニーズと制約に適切に対処できるかどうかにかかっている。農業環境の多様性を鑑みれば、「万能な」アプローチは存在しない（no one-size-fits-all approach）。一部の緩和策は、それが地域特有のニーズに対応したものでない限り、他の持続可能な開発目標とのトレードオフが生じる可能性がある。トレードオフを克服し、環境持続性および生産性向上の双方を達成するには、地域特有の農業生

態学的条件および社会経済的条件に適した STI 群を特定し、これをカスタマイズすることが極めて重要となる。

Clift and Plumb (2008) によると、人類の約 3 分の 2 がモンスーンの影響を受ける地域に住んでいる。こうした地域の 1 つ、アジアモンスーン地域には、東アジア、東南アジア、南アジアの経済域が含まれる。この地域の課題に取り組むには、高温多湿な気候および稲作を主体とした小規模農業体系が規定する集約的食料生産に適した STI が必要となる。一方、この地域の域内において農業、林業、水産業部門を特徴付ける農業生態学的条件と社会経済的条件が極めて多様であることを考えると、万能なアプローチは存在しないとの考え方は地域内にも適用されるべきである。

最新の IPCC 報告書 (IPCC 2021a, 2021b) は、この地域がより頻繁に異常気象に見舞われていくことを予想しており、2022 年 8 月だけを見ても、中国南部で記録的な熱波と干ばつが、パキスタンでは平年の約 10 倍のモンスーン降雨による壊滅的な洪水が発生した。この地域が気候緊急事態に適応しつつ、環境フットプリントを最小限に抑えながら食料システムの強靱性 (レジリエンス) を向上させるには、STI の導入を加速していくことが不可欠である。

世界経済にとってのアジアモンスーン地域の重要性を考えると、持続可能な食料システムへの変革を成功させることには地球規模での意義がある。アジアモンスーン地域内には、地域固有の状況にきめ細かく適応させた STI の普及展開を通じて食料システムの変革を迅速に実施するための条件となりうる共通の特徴が多く存在する。例えば、日本は STI を通じて生産性と持続可能性の両方を達成するために食料システムの変革を推進しているが、その実践の一部は、現地のニーズに合わせて調整を行うことで他の国やエコノミーにも適用できる可能性がある。こうした観点から、日本は、パートナー間のネットワークを強化し、科学的根拠に基づき、アジアモンスーン地域にとって有用で同地域に適用可能な情報を共有することを通じて、同地域に貢献する役割を担っている。

本研究の目的は以下の 4 つである。(i) アジアモンスーン地域を定義し、世界の食料システムの文脈においてその重要性を位置付ける；(ii) 同地域の農業部門の主だった特徴、特に高温多湿な気候、水田稲作を主体とした農業、小規模農家についての情報を整理する；(iii) 気候緊急事態と環境危機が迫る昨今において、STI を駆使して同地域の課題に取り組むことを提案する；(iv) 持続可能な食料システムに関する日本政府の新たな戦略のもとで、アジアモンスーン地域におけるイノベーションの加速を促す目的のため、さまざまな関係者に対し、科学的根拠に基づく情報を生成・共有するフォーラムやネットワークセンターを設置する構想を紹介する。

2 : アジアモンスーン地域の定義

この地域の世界的な重要性にもかかわらず、この地域に関する定義については合意がないように思える。人口動態、経済、GHG 排出量などの見地から、常に最新の信頼できる統計を用いて同地域の世界シェアを推定するには、地理的境界に基づく具体的な定義が必要になる。この章では、地域内の多様性に留意しつつ、世界における同地域の人口動態および経済的な重要性を推計する目的から、同地域を定義することを試みる。

2.1 : アジアモンスーン地域とは

「モンスーン」という言葉はアラビア語の「マウシム (mausim) 」に由来し、「マウシム」とは一年を通して方向がほぼ 180 度変化する季節風を意味する (Kyuma 2009) 。モンスーン気候における降水パターンは、1 年の間で雨期と乾期が入れ替わる季節サイクル、すなわち高温多湿の夏と乾燥した冬により特徴付けられる (Liu et al. 2015; Zurbenko and Luo 2015) 。IPCC 報告書 (IPCC 2021a, 2021b) の「付録 V : モンスーン」によると、世界的に見て、モンスーン地域は、降水量の年較差 (現地における夏期と冬季の差) が 2.5mm/日を超える地域と定義される。アジアモンスーン地域には、東アジア、東南アジア、南アジアが含まれる。ケッペンの気候区分によれば、熱帯気候と温帯気候が同地域の大部分を占めている (図 1) 。高温多湿な気候条件下では人口収容力が高くなるため、この地域は世界で最も人口の多い地域となっている (図 2) 。

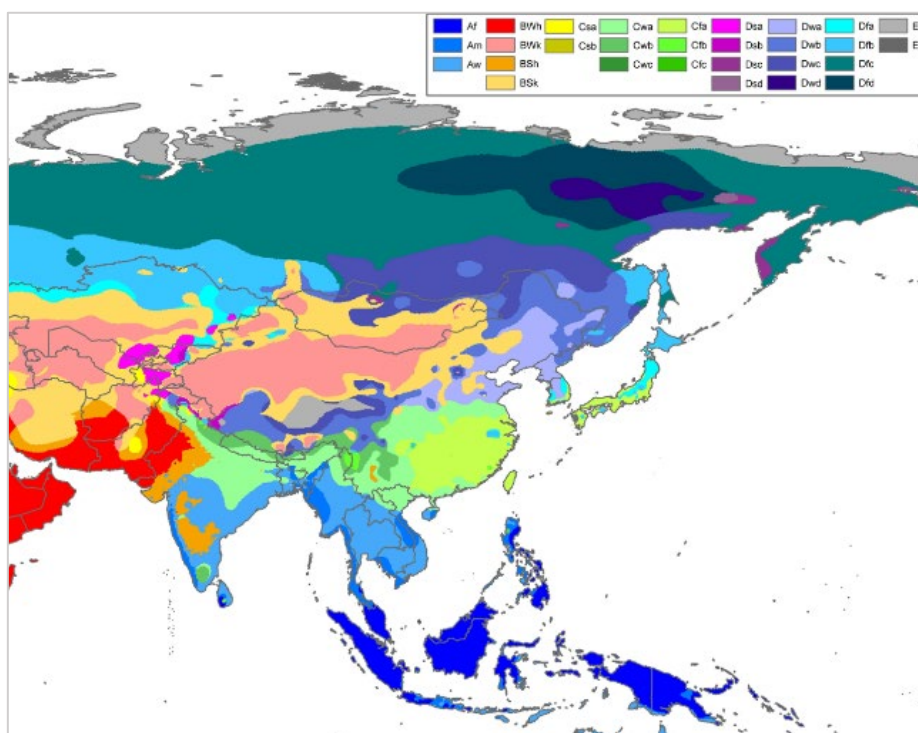


図 1 : ケッペンの気候区分図 (アジア)

<https://www.worldmap1.com/asia-koppen-map>

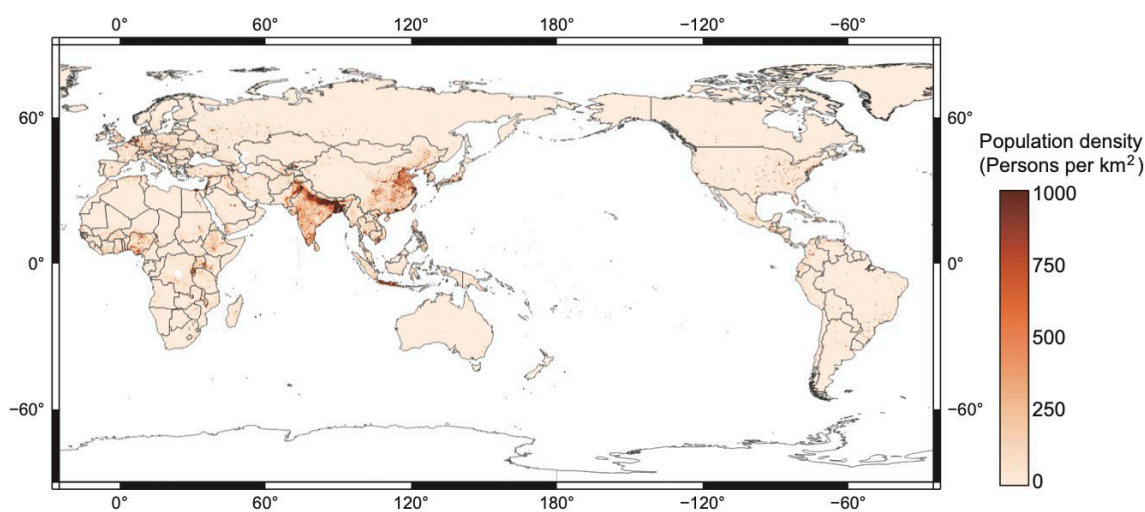


図 2 : 人口密度図

<https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/gpw-v4-population-density-rev11>

Kyuma (2009) は、アジアモンスーン地域を推定するにあたり、中国については暫定的に、陸地面積の 50%、そして人口および耕地面積の 90%を組み入れている。一方、アジアモンスーン地域に関する地理的境界に関する定義がなければ、この地域の過去から現在、そして予見可能な未来に至る持続可能な食料システムへの変革のあるべき姿を世界的な文脈で議論することは難しい。

この地域の地理的境界を定義するに当たり、気候帯の境界が、人口動態統計および経済統計の

基本単位である政治的な境界または行政的な境界と必ずしも一致していないことが課題である。本研究は、世界の食料システムにおけるアジアモンスーン地域の重要性を位置付けるという観点から、気候帯の境界と行政的な境界の折り合いをつけることで、本研究におけるアジアモンスーン地域の暫定的な定義を提案する。

2.2 : アジアモンスーン地域の地理的境界

アジアモンスーン地域の空間的な境界を定義する上で、本レポートは農業気候条件による境界と行政的な境界がある程度一致する気候区分を参照することとする。というのも、どのような農林水産業が行われるかは、温度や降水量といった植生を規定する局地的な気候条件の影響を強く受けるからである。最もよく引用される気候区分体系の一つであるケッペンの気候区分（Köppen 1884）は、もともと局地的な植生を基に世界の地域を分類するために提案されたものである。改訂版ケッペン気候区分では、世界は主に気温を基準として 5 つの気候帯に分割され、さらに各気候帯は気温または乾燥度に基づいて細分化される（表 1）。

表 1 : 改訂版ケッペン気候区分に基づく主要気候帯の区分

記号			説明	基準
第1	第2	第3		
A			熱帯	最寒月の平均気温が18°C以上
	f		- 熱帯雨林	最小雨月の降水量が60mm以上
	m		- モンスーン	最小雨月の降水量が60mm未満かつ $(100 - (r/25))$ 以上 ¹
	w		- サバンナ	最小雨月の降水量が60mm未満で $(100 - (r/25))$ 未満
B²			乾燥帯	年間降水量の70%以上が夏半年に降り、かつrが $(20t + 280)$ 未満、または年間降水量の70%以上が冬半年に降り、かつrが20未満、もしくは夏半年と冬半年の両方で降水量が年間降水量の70%未満であり、かつrが $(20t + 140)$ 未満 ³
	W		- 砂漠	rがB帯に分類される上限値の半分未満 (上記参照)
	S		- ステップ	rがB帯に分類される上限値未満かつこの上限値の半分より大きい
		h	- 熱い	tが18°C以上
		k	- 寒い	tが18°C未満
C			温帯	最暖月の平均気温が10°C以上かつ最寒月の平均気温が18°C未満で-3°Cより高い
	s		- 乾燥した夏	夏半年の最小雨月の降水量が30mm未満かつ冬半年の最多雨月の3分の1未満
	w		- 乾燥した冬	冬半年の最小雨月の降水量が夏半年の多雨月の10分の1未満
	f		- 乾期なし	降水量が年間を通じて均一に分布。sの基準もwの基準も満たさない。
		a	- 暑い夏	最暖月の平均気温が22°C以上
		b	- 暖かい夏	月間平均気温が10°C以上の月が4か月以上かつ最暖月の平均気温が22°C未満
		c	- 寒い夏	平均気温が10°C以上の月が1~3か月かつ最暖月の平均気温が22°C未満
D			亜寒帯	最暖月の平均気温が10°C以上かつ最寒月の平均気温が-3°C以下
	s		- 乾燥した夏	C帯と同じ
	w		- 乾燥した冬	C帯と同じ
	f		- 乾期なし	C帯と同じ
		a	- 暑い夏	C帯と同じ
		b	- 暖かい夏	C帯と同じ
		c	- 寒い夏	C帯と同じ
		d	- 非常に寒い冬	最寒月の平均気温が-38°C未満 (a、b、cではなくdの符号を用いる)
E			寒帯	最暖月の平均気温が10°C未満
	T		- ツンドラ	最暖月の平均気温が0°Cより高く、かつ10°C未満
	F		- 氷雪	最暖月の平均気温が0°C以下

¹ r は平均年間総降水量 (mm) を、t は平均年間気温 (°C) を意味する。その他すべての気温は月平均 (°C) を、その他すべての降水量は平均月間総降水量 (mm) を意味する。

² B 気候帯の指定基準を満たす気候はすべて、その他の特性に関係なく、B 気候帯に区分される。

³ 「夏半年 (the summer half of year)」は、北半球については 4~9 月、南半球については 10~3 月と定義される。

⁴ 現代の気候体系のほとんどが標高の役割を考慮している。高地帯は、Trewartha (1968)から採用した。

(参考文献) Arnfield (2020)、Critchfield (1983)、Peel et al. (2007)

改訂版ケッペン気候区分 (図 1) によると、東アジア、東南アジア、南アジアの大部分が温帯気候 (C) および熱帯気候 (A) に分類されるが、それらの分布は赤道からの距離すなわち緯度だけでなく、山脈の存在、海岸からの距離、海岸流の影響など、その他の地理的条件の影響も受ける (Liu et al. 2015)。

南北に長く延びる日本の気候は主に温帯気候 (C) であり、ほとんどの行政単位 (県) が Cfa (温暖湿潤気候) に区分される (オンライン補足資料 1)。北海道と長野県は寒冷な Dfb (亜寒帯湿潤気候) に区分されるが、本研究では、日本はアジアモンスーン地域に属し、温暖湿潤気候が支配的であるとみなす。ほとんどの東アジア諸国・エコノミーでは、陸地面積の多くが温帯気候 (C) のうち Cfa (温暖湿潤気候) または Cw (温暖冬季小雨気候) に区分されるが、例外として、モンゴルは主に亜寒帯 (D) および乾燥気候 (B) に、北朝鮮は冷帯気候 (D) に区分される。

東南アジアの多くの国は熱帯気候 (A) に属する。東南アジアで代表的気候が Am (熱帯モンスーン気候) に分類されるのは唯一ミャンマーで (表 2)、その他多くの東南アジア諸国の大部分は

Af（熱帯雨林気候）および Aw（サバンナ気候）に分類される。南アジアは大まかに 2 つのグループに分けられる。1 つは熱帯気候が支配的なグループ（バングラデシュ、スリランカ、モルジブ）、もう 1 つが主に温暖気候にあるグループ（ブータン、インド、ネパール、パキスタン）だが、パキスタンには乾燥気候の地域も見られる。

本研究では、東アジア、東南アジア、南アジアのうち、国内地域の大部分が Af（熱帯雨林気候）、Am（熱帯モンスーン気候）、Aw（サバンナ気候）、Cw（温暖冬季小雨気候）、Cfa（温帯湿潤気候）、Cfb（西岸海洋性気候）のいずれかに該当する 23 の国・エコミーをアジアモンスーン地域とみなすこととする（表 2）。

2.3 : 世界的文脈におけるアジアモンスーン地域の人口動態・経済的シェア

この定義によってアジアモンスーン地域を国・エコミーの境界を用いて分類する際の課題は、アジアモンスーン地域の人口および経済的な重要性を実際の気候帯の範囲以上に過大評価する可能性である。例えば、中国とインドのように広大な領域を抱える国の場合、「モンスーン」気候区分から外れている領域部分も大きい（乾燥しすぎている（B）もしくは寒すぎる（D））。このため、これら 2 カ国については、データを行政（省、州）レベルで検証し、ケッペン気候区分のうち Af、Am、Aw、Cw、Cfa、Cfb に該当する行政単位を、アジアモンスーン地域に含まれるものとみなした（オンライン補足資料 2）。

この 23 の国・エコミーの全域を対象とする場合、世界人口の 52%に相当する 39 億 9000 万人が世界の総陸地面積の 15%に住んでいることになり、この地域の GDP は世界の 33%を占めた（表 3）。中国とインドについては、アジアモンスーン気候の行政単位のみを抽出すると、ケッペン気候区分のうち Af、Am、Aw、Cw、Cfa または Cfb に該当する行政単位が、それぞれ総陸地面積の 33%、69%に相当した。一方、両国では、相対的に多くの人および経済活動が「モンスーン」気候帯に集中しており、人口と GDP のシェアでそれぞれ、中国では 75%・78%、インドでは 77%・73%を占めた。したがって、本研究の目的で採用したアジアモンスーン地域の境界線に基づくと、2018 年時点で推定 33 億 4000 万人、すなわち世界人口の 44%が世界の総陸地面積の 9%に相当する面積に住んでおり、この地域の GDP は世界の 28%を占めることになる。

言い換えると、アジアモンスーン地域は、世界の陸地面積のわずか 10%も占めていないにもかかわらず、世界的にみて人口動態上そして経済的に極めて大きな存在感を有している。アジアモンスーン地域の人口密度は、1 平方キロメートル当たり 292 人（11,445,000km²に 33 億 4000 万人が居住）であり、これは世界平均（1 平方キロメートルあたり 59 人。76.3 億人を 1 億 3000 万 km²で割った数字）のほぼ 5 倍に相当する。

表 2 : ケッペン気候区分を基準としたアジアモンスーン地域を構成する国・エコノミーのリスト

地域	国・エコノミー	年間平均 気温 (1991-2020)	年間降雨量 (1991-2020)	ケッペン気候区分																				
				A:熱帯気候			B:乾燥帯気候		C:温帯気候						D:亜寒帯気候						E:寒帯			
				Af	Am	Aw	BW	BS	Cs	Cw	Cfa	Cfb	Cfc	Ds	Dwa	Dwb	Dwc	Dwd	Dfa	Dfb	Dfc	Dfd	ET	EF
東アジア	日本	12	1800								◎	○												
	韓国	12	1668								◎	○												
	台湾	23	2405								◎													
	香港	23	2400								◎													
	中国	8	644		○				○	○	◎													○
東南アジア	シンガポール	28	2253	◎																				
	ブルネイ	27	3661	◎																				
	マレーシア	26	3239	◎	○																			
	タイ	27	1494	○	○	◎																		
	フィリピン	26	2333	◎	○																			
	インドネシア	26	3097	◎	○	○																		
	ベトナム	25	1750		○	○					◎	○												
	カンボジア	28	1871		○	◎																		
	ラオス	24	1512		○	◎					○													
	ミャンマー	24	1940		◎	○					○													
東チモール	25	1043			◎																			
南アジア	バングラデシュ	25	2477		○	◎				○														
	ブータン	12	2053							◎							○							○
	インド	25	1169		○	○			○	◎		○					○							
	ネパール	13	1375							◎														
	パキスタン	21	397				○	○	○		◎													
	スリランカ	28	1607	◎	○	○																		
	モルジブ	28	2365	○	◎																			

(注) ◎ : その国・エコノミーにおける代表的気候区分、○ : その国・エコノミーにおけるその他の気候区分

表 3 : アジアモンスーン地域に属する国・エコノミーの面積、人口、GDP、およびそれらの世界シェア

地域	国・エコノミー	総面積 (1,000 km ²)	総人口 (10,000人、2018年)	総GDP (10億米ドル、2018年)
東アジア	日本	378	12,720	5,037
	韓国	100	5,178	1,725
	台湾	32	2,373	609
	香港	1.11	737	361
	中国	3,146 [33%]	104,536 [75%]	10,783 [78%]
東南アジア	シンガポール	0.7	564	376
	ブルネイ	6	42.1	13
	マレーシア	330	3,200	359
	タイ	514	6,641	506
	フィリピン	299	10,098	347
	インドネシア	1,920	26,700	1,042
	ベトナム	329	9,762	245
	カンボジア	181	1,630	24
	ラオス	240	701	18
	ミャンマー	680	5,141	67
東チモール	15	126.1	2	
南アジア	バングラデシュ	147	16,555	274
	ブータン	38	75.4	2
	インド	2,154 [69%]	101,606 [77%]	2,091 [73%]
	ネパール	147	2,970	33
	パキスタン	796	20,777	315
	スリランカ	66	2,103	88
	モルジブ	0.3	53.4	5
地域合計		11,445	334,289	24,321
世界		130,000	763,100	86,274
地域シェア (%)		9	44	28

(注) 中国とインドについては、ケッペン気候区分のうち Af、Am、Aw、Cw、Cfa または Cfb に属する行政単位のみアジアモンスーン地域に含め、両国におけるそれらの割合を括弧内に示す。

アジアモンスーン地域の経済は成長が予測される一方、食料安全保障の確保は引き続き重要な課題となっている。最近の国連 (FAO, IFAD, UNICEF, WFP, and WHO 2022) の推計によると、世界で 7 億 200 万人～8 億 2800 万人 (中央値 7 億 6800 万人) の飢餓人口のうち、2 億 7800 万人のアフリカ (地域人口の 20.2%) を絶対数で超える、半数以上の 4 億 2500 万人がアジアに (地域人口の 9.1%) 住んでおり、同時にアジア人口の 10.5% が深刻な食料安全保障の不安を抱えている。

国連の世界人口推計 (UN World Population Prospects) によると、中位推計シナリオでは、21 世紀の間に、世界人口に占めるアフリカの人口の相対的なシェアが増加することにより、アジアモンスーン地域の人口の世界に占める相対的なシェア (中国、インドにおけるこの人口はそれぞれの総人口の 75%、77%と推定) は、2020 年の 44% から 2050 年の 40% に、さらに 2100 年には 31% に減少する (図 3)。一方、この国連の中位推計シナリオでは、2050 年までに、この地域の人口の絶対値は 4 億 2000 万人増加して 38 億 8000 万人になることが予測されている。

それゆえに、この地域は、増加する食料需要に対応して食料安全保障の確保と貧困撲滅を実現し、予測される経済発展と都市化の結果もたらされる食生活の変化に対応するため、食料生産を拡大する必要がある。

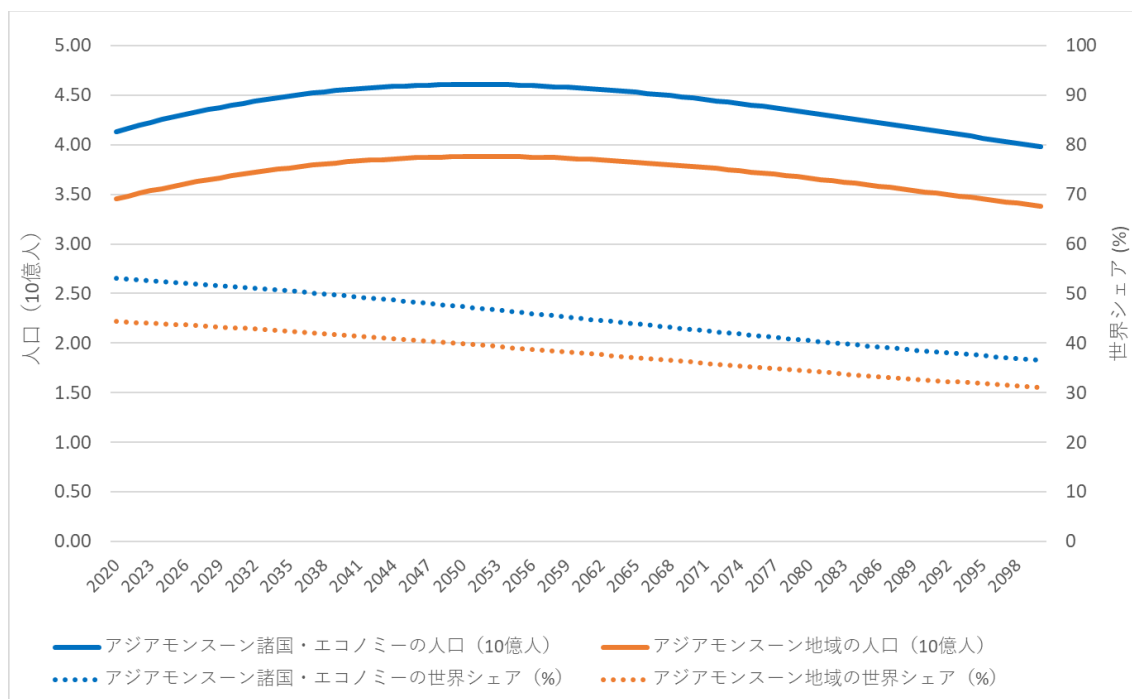


図 3 : アジアモンスーン地域の人口

(出典) 国連世界人口推計 2019.

(注) 中国とインドのアジアモンスーン地域人口はそれぞれ、国の総人口の 75%、77%と推定される (表 3)。

2.4 : 社会経済の地域内多様性

アジアモンスーン地域は地域全体として世界で重要な地位を占める一方、域内において社会経済的に極めて多様である国・エコノミーを抱えることもまた事実である。例えば、食料・栄養安全保障の状況と経済発展の水準は、アジアモンスーン地域内の国・エコノミー間で大きく異なる。深刻な人道危機に直面する国がある一方で、G20 参加国もある。同時に、アジアモンスーン地域は、ほぼ 100%の人口が都市に集中する国や依然として大部分の人口が農村に暮らす国、そして高齢化が急速に進む国や巨大な若年人口を抱える国など、人口動態が極めて多様な国・エコノミーで構成される。実際、東アジアの国・エコノミーおよび東南アジアの都市国家では都市化および高齢化が進んでいる。特に日本では過去 20 年間で高齢化が劇的に進み、2000 年に 25%だった高齢者依存比率 (労働年齢人口に対する高齢者人口の比率) が 2018 年には 50%にまで上昇し、2050 年には 80%に達するとさえ予測されている (World Bank WDI; OECD Data)。対照的に、

東南アジアや南アジアの一部の国では、多くの人々がまだ農村部に住み、若年層の割合も大きい。

社会経済や人口動態の多様性を反映して、2020年時点においてアジアモンスーン地域の GDP に占める農林水産部門のシェアもばらつきが大きく、都市国家（シンガポール）では1%未満、高度に産業化が進んでいる国（日本など）では1%程度、対照的にネパールやパキスタンでは23%とさまざまである。東南アジアや南アジアの上位中所得国および下位中所得国の多くでは、農林水産部門の GDP シェアは7%を超えており、世界平均の4.3%を上回っている（World Bank WDI）。

3 : アジアモンスーン地域の農業部門の特徴

アジアモンスーン地域は豊富な降水量と温暖な気候に恵まれており（Tanaka 2006）、これが地域における土地利用と人口動態の条件を規定し、農業部門の特徴を形成している。この章では、アジアモンスーン地域の農業部門の主な特徴、特に集約的な農業システムの特徴について説明する。アジアモンスーン地域が世界において比較優位性を持つ農業・食料産品についても述べる。

3.1 : 農業部門の主な特徴

この地域の農業部門の最も注目すべき特徴は、高温多湿、水田稲作を主体とした農業、中小規模の農業者の割合の高さにあり、以下に説明するように、これらは相互に関連している。

高温多湿な気候

アジアモンスーン気候は高温多湿で知られている。アジア・オーストラリアのモンスーン地域における極端な降雨に対する人為的影響を研究した Liu et al.（2021）によると、アジアモンスーン地域は高密度な人口に新鮮な水を供給する、夏期の豊富なモンスーン降雨によって特徴づけられている（図4）。

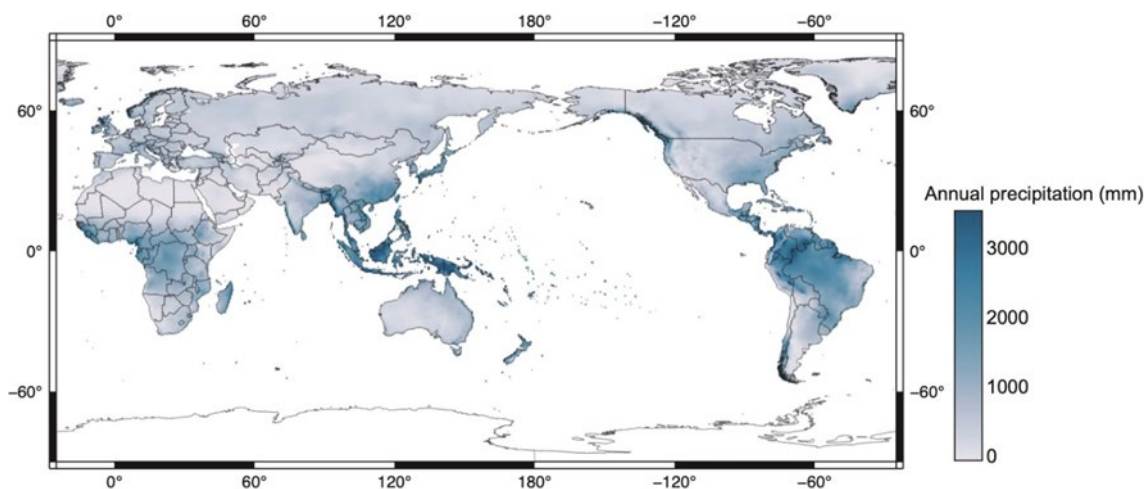


図4 : 平均年間降水量分布

<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/download-data>

この地域の温暖湿潤気候は特に天水条件下での農業生産に大きな影響を与える。干ばつであれ洪水であれ、降水量の経年変動は生産に影響を与えるが、季節内における雨期と乾期の間の変動も、天水で育つ農作物の生育段階の違いによってその生育や収穫量に影響を与える（Gadgil & Kumar 2006）。温暖湿潤気候では雑草もよく繁殖し、雑草は光と栄養を求めて作物と競合するため、農家は除草作業に資本や労働力を投入する負担も抱えることになる（Chauhan 2013）。

また、高温多湿な気候では、特に類似した作付け体系が広域で採用されているような場合において、多くの植物病害虫が深刻な脅威となる（Gadgil & Kumar 2006）。アジアモンスーン地域の多湿な気候では、多くの植物病害虫は越境性で、効果的な防除が困難であり、抵抗性を獲得しやすい。長びく乾期は特にハモグリバエ等（leaf miners）、一部の昆虫にとって都合が良い一方、雨期は多くの菌類病を誘発するなど、アジアモンスーン地域において農産物に大きな損失をもたらす（Gadgil & Kumar 2006）。

水田稲作を主体とする農業

高温多湿な気候および広範な低地の展開とも密接に関連するもう一つの際立った特徴は、食料生産の基盤として水田稲作システムが優勢であることである（Kyuma 2009）。全世界で栽培される主要な稲品種である *Oryza sativa* L. は、この地域が原産であると考えられている（Gadgil & Kumar 2006）。稲は、高温、多湿、低照度、豊富な降雨を特徴とする熱帯多雨の気候においてよく生育する。天水地域での栽培に必要な総雨量は月間 20 cm または年間 1000 mm である。稲栽培の重要な特徴である移植は降雨に依存しており、播種の約 1 か月後に行われる（Gadgil & Kumar 2006）。

世界の稲のほとんどがアジアモンスーン地域で栽培されており、ここでは、モンスーン降雨と熱帯サイクロンの発生時期が稲の主要栽培期と重なっている（Nelson 2016, 図 5）。稲栽培は当初、広範囲に浸水する低地への適応策として始まったが、時が経過するにつれ、灌漑を必要とする地域にも展開していった（Kyuma 2009）。例えば、若干古い参考文献によると、中国では稲の総栽培面積と生産量の 90% 以上を占める主要稲作地帯は、主に亜熱帯気候または熱帯気候が支配的な秦嶺（しんれい）山脈と淮河（わいが）の南側に位置しており（Defeng 2000）、これは本レポートのアジアモンスーン地域の定義と一致する。インドでは、稲は主に年間降水量の多い天水地域で栽培されるが、灌漑を要する地域でも栽培されており、米はインドの東部および南部で主食となっている（Siddiq 2000）。

アジアモンスーン地域において、南アジアと東南アジアの米生産にとって最も重要な制限要因は降雨パターンである一方、東アジアの高緯度地域、特に日本の東北部と北部では気温と日射量の条件

が重要となる（Gadgil & Kumar 2006）。過去数十年にわたり、栽培期間の短い改良品種の導入などの米栽培技術の変化によって、メコンデルタなどの熱帯地域における稲を中心とした作付けパターンが単作から二毛作・二期作へと変化し、その結果、稲栽培システムの大幅な集約化が実現してきた（Tanaka 2006）。

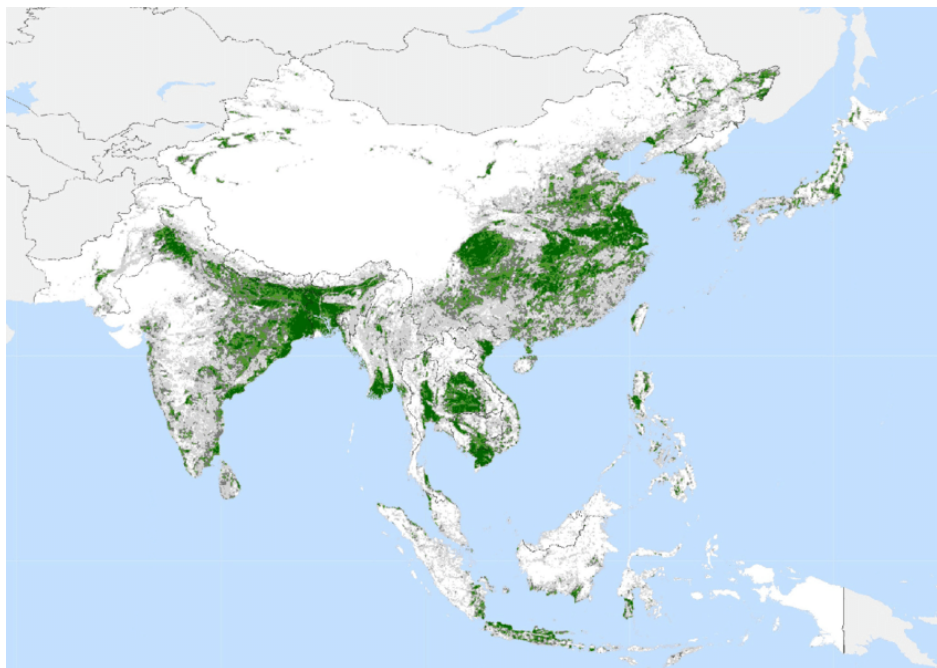


図 5 : 2000～2010 年頃のアジアの主要稲作地域（Nelson 2016）

https://www.researchgate.net/figure/Major-rice-growing-areas-in-Asia-circa-2000-2010-from-MODIS-Based-on-Figure-3-from-47_fig4_301698869

表 4：世界におけるアジアモンスーン地域の稲栽培

地域	国・エコノミー	稲作面積 (ha) 2018年	米生産量 (t) 2018年	米収量 (t/ha) 2018年	米輸出量、精米換算 (t) 2018年	米輸入量、精米換算 (t) 2018年
東アジア	日本	1,470,000	10,606,000	7.1	44,041	609,538
	韓国	737,673	5,195,437	6.9	64,124	386,490
	台湾	271,506	1,949,796	7.1	56,847	101,551
	香港	0	0		16,959	325,803
	中国	30,189,450	212,129,000	6.9	2,062,304	3,027,372
東南アジア	シンガポール				40,098	287,092
	ブルネイ	783	1,569	2.0	2,103	37,208
	マレーシア	699,980	2,639,202	3.7	19,654	808,055
	タイ	10,647,941	32,348,114	3.0	11,073,000	14,946
	フィリピン	4,800,406	19,066,094	3.9	212	1,764,329
	インドネシア	11,377,934	59,200,534	5.1	3,211	2,253,746
	ベトナム	7,570,741	44,046,250	5.7	5,244,394	66,448
	カンボジア	3,036,117	10,892,000	3.5	505,178	39,084
	ラオス	848,174	3,584,700	4.2	41,817	28,943
	ミャンマー	7,149,311	27,573,589	3.8	1,616,758	3,192
東チモール	17,694	57,000	3.2	98	90,057	
南アジア	バングラデシュ	11,515,000	54,416,000	4.7	8,254	1,012,158
	ブータン	15,082	63,890	4.2	16	71,504
	インド	44,156,450	174,716,730	3.9	11,579,628	6,502
	ネパール	1,469,545	5,151,925	3.5	10	739,476
	パキスタン	2,810,030	7,201,966	2.5	3,912,607	8,149
	スリランカ	1,040,954	3,929,831	3.7	4,891	197,993
	モルジブ					31,992
地域合計		139,824,771	674,769,627	4.8	36,296,204	11,911,628
世界		165,751,531	759,066,702	4.5	46,050,442	46,295,837
地域シェア (%)		84	89		79	26

(出典) FAOSTAT.

この表では、中国とインドの国データはアジアモンスーン地域に合わせて調整されていない。

Kyuma (2009) は、アジアモンスーン地域の稲作面積と米生産量の世界シェアは 90%に達することから、この地域は必然的に世界の穀倉地帯とみなされていると述べている。本レポートで定義したアジアモンスーン地域に該当する国・エコノミーの稲栽培の世界シェアを推計してみたところ、中国とインドの非モンスーン地域にある行政単位（中国については例えば北京、インドについては例えばパンジャブ）のシェアを除外していないため過大評価である可能性があるものの、表 4 が示すように、米の生産量と貿易量の世界シェアにおける同地域の重要性は明確である。具体的には、アジアモンスーン地域は世界シェアで、耕作面積の 84%、生産量の 89%、輸出量の 79% を占めており、Kyuma (2009) の主張が依然として有効であることを示している。

中小規模の農業者の割合の高さ

2.3 で説明したように、アジアモンスーン地域は極めて高い人口密度によって特徴づけられる。多くの国・エコノミーの農業部門において、小規模農家の割合が高く（図 6）、面積が 1ha 未満の農場が大多数である (Lowder et al. 2014; Yamaguchi 2021; Giller et al. 2022)。データは農場面積の分布に限定されているが、中国、インドネシア、ベトナム、インド、ネパール、日本では、1ha 未満の土地で農業を営む生産者の割合が最大であった (OECD/FAO 2017)。こうした小

規模農場の規模と水稲農業が組み合わさった一般的な傾向は、必然的に土地と労働力の使用の集約化をもたらす（Tanaka 2006; Kyuma 2009）。アジアモンスーン地域には耕作用に拡大できる土地が残されておらず、既存の農地で持続的に生産を集約化することに集中するほかない（Kyuma 2009）。

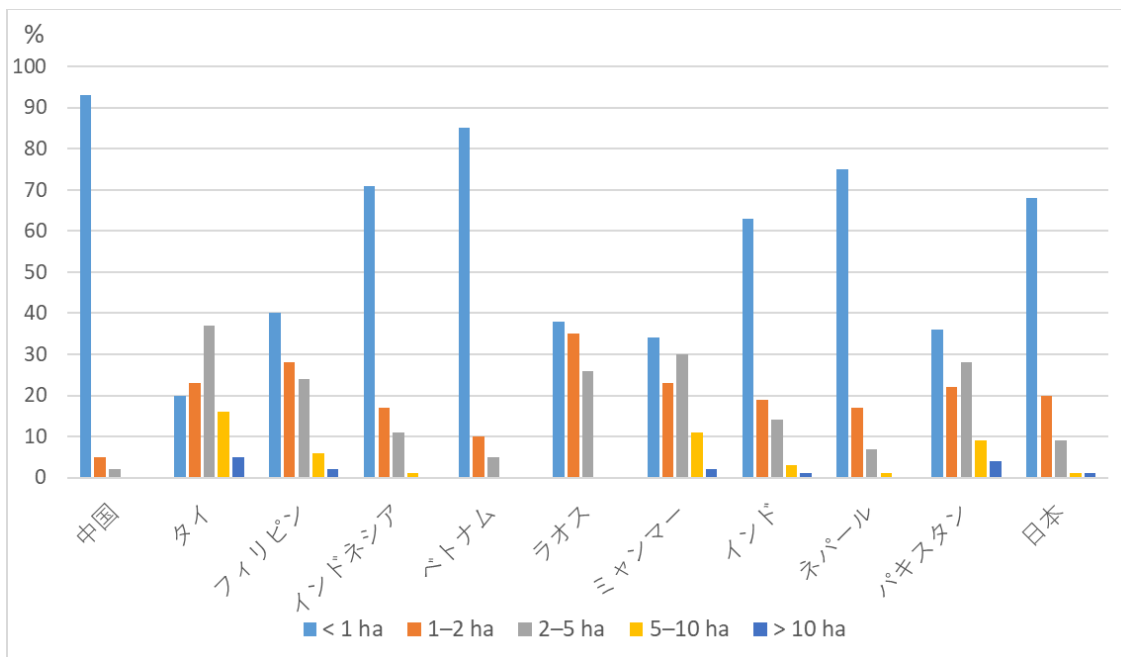


図 6：土地の規模による農家の分布

(出典) FAO 2014.

3.2：その他の重要な農業・食料産品

本レポートの定義のアジアモンスーン地域は 6 つの特徴的な温帯および熱帯の気候帯を含んでいるが、さらに局地的な地理的要因もあいまって、各気候帯内でも農業生態学的な多様性が顕著になっている。したがって、アジアモンスーン地域の農業部門は林業や水産業とともに、地域内及び世界の人々に対し、貿易を通じて栄養価の高い食料だけでなく、戦略的に重要な産業向け商品作物を供給することができる。

小麦

米はアジアモンスーン地域で主食としての地位を確立しているが、中国、インド、パキスタンでは小麦も重要な作物であり、生産量の世界シェアで 2018 年現在それぞれ、1 位（18%）、2 位（14%）、7 位（3%）となっている（FAOSTAT）。小麦栽培に最適な地域はモンスーン気候帯から外れるものの、米と小麦の二毛作は主要な農業食料システムとして、世界の 2400 万 ha のうちインド・ガンジス平原が 1350 万 ha を占めており（Chhokar et al. 2007; Jat et al. 2021）

(その大部分がインドにある(1000 万 ha))、ネパールで最も広く採用される作付けパターンでもある(Gautam et al. 2021)。

農産品

アジアモンスーン地域内における農業生態学的ニッチは特定の農産品の栽培に比較優位性をもたらしている。特にパーム油に関しては、2018 年の世界生産量の 88%を(インドネシア、マレーシア、タイがそれぞれ 60%、24%、4%)、茶に関しては、世界生産量の 77%を(中国、インドがそれぞれ 29%、20%) 占めている(FAOSTAT)。また、この地域は、FAO 統計(FAOSTAT)が「果物、熱帯生鮮(fruit, tropical freshness)」と定義する農産物の世界生産量の 80%を占めている(個々の熱帯果物は国際的には主流でないためか、個別に集計されていないと想定される)。一部の国・エコノミーでは、この一般的なカテゴリーのもとで、マンゴー、アボカド、パイナップル、ナツメヤシ、パパイアが報告されており、上位 6 位までの生産国は、インド(24%)、中国(15%)、フィリピン(13%)、タイ(11%)、インドネシア(9%)、バングラデシュ(4%)となっている。世界シェアにおける相対的な重要性は下がるものの、アジアモンスーン地域の一部の国・エコノミーが生産量の世界のトップ 10 に入っている農産物として、サトウキビ(41%: インド 20%、タイ 7%、中国 6%、パキスタン 3%他) やコーヒー(29%: ベトナム 15%、インドネシア 7%他) が挙げられる。

畜産

2015 年における世界の食肉生産に占めるアジアモンスーン地域のシェアは、牛肉が 16%、鶏肉が 28%、豚肉が 57%であった(FAOSTAT、表 5)。中国だけで、世界の豚肉生産量の 47%、牛肉の 9%、鶏肉の 12%を占めた。2000~2015 年期におけるこの地域の食肉生産の伸びは世界の生産量のそれを上回っている。例えば、ミャンマーの牛肉、鶏肉、豚肉の生産量は 400~630%伸びたほか、南アジア諸国の鶏肉生産量の伸び率も 200%を超えた。インドに関しては、乳生産量で高い世界シェアを誇っている(世界の総生産量の 19%)。

表 5：世界におけるアジアモンスーン地域の畜産業

地域	国・エコノミー	家畜(食肉)生産					
		牛肉2015年 トン	対2000年 比較	鶏肉2015年 トン	対2000年 比較	豚肉2015年 トン	対2000年 比較
東アジア	日本	481,019	-9	2,131,974	78	1,254,283	0
	韓国	323,000	6	790,000	111	1,217,000	33
	台湾	6,400	31	533,073	-16	832,183	-10
	香港	6,900	-62	25,348	-61	122,354	-24
	中国	5,552,010	20	12,075,000	44	56,454,000	42
東南アジア	シンガポール	36	-3	77,680	-9	21,341	2
	ブルネイ	482	-85	23,491	109	52	6
	マレーシア	43,672	198	1,511,442	133	222,598	39
	タイ	144,702	11	1,629,034	56	936,356	35
	フィリピン	205,708	8	1,185,914	122	1,775,712	46
	インドネシア	506,661	49	2,030,884	153	330,213	-20
	ベトナム	299,700	219	700,873	137	3,491,600	146
	カンボジア	55,470	-2	16,794	-14	111,618	6
	ラオス	31,828	94	26,465	173	73,438	166
	ミャンマー	357,261	404	1,505,000	605	863,235	631
東チモール	1,317	-2	922	-11	11,393	78	
南アジア	バングラデシュ	191,649	11	185,500	97		
	ブータン	4,483	-25	1,063	366	704	-45
	インド	931,645	-6	3,263,810	278	361,686	-22
	ネパール	50,108	4	45,458	259	20,135	37
	パキスタン	882,000	110	1,074,000	228		
	スリランカ	22,774	-21	164,450	160	1,694	-3
	モルジブ						
地域合計		10,098,825	25	28,998,175	85	68,101,595	43
世界		63,434,353	14	103,773,808	77	119,320,818	33

(出典) FAOSTAT.

この表では、中国とインドの国データはアジアモンスーン地域に合わせて調整されていない。

林業

アジアモンスーン地域は世界の総森林面積の 13%を占めるが、樹種が温帯種、亜熱帯種、熱帯種と多様であること以外にも、地域内のパターンは極めて多様である（World Bank WDI）。例えば、日本は森林に覆われた山岳景観に恵まれているが、過去 20 年間、森林は国土面積の 68%を占めてきた。一部の国は植林事業を通じて森林面積を増やした様子である（例：ベトナム（38%→49%）、ブータン（65%→71%）、中国（19%→23%））。一方、その他の国では大規模な森林伐採が行われており、これはとりわけ、インドネシア（56%→49%）、カンボジア（61%→48%）、およびミャンマー（53%→44%）で顕著である。

水産業

養殖業はアジアモンスーン地域のもう一つの主な特徴であり、世界の生産量のほぼ 90%（World Bank WDI, 表 6）、そして世界の内水面水産業の 64%を占めている（FAO 2022）。しかし、その世界シェアおよび傾向は国やエコノミーによって異なる。世界最大の水産養殖国である中国の

2000年における生産量の世界シェアは71%であった。中国は依然として重要な水産養殖国であるが、他の国・エコノミーのシェアが増大したことで、生産量が2.2倍に増加したにもかかわらず、過去18年間で相対的な世界シェアが58%にまで低下している。特に注目すべきがインドネシアで、生産量が対2000年で15倍に達し、世界シェアも2000年の2%から2018年の13%に増加している。

表6：世界におけるアジアモンsoon地域の水産養殖業

地域	国・エコノミー	水産養殖生産量			
		2000(mt)	2010 (mt)	2018 (mt)	2018年/2000年
東アジア	日本	1,291,735	1,151,101	1,032,675	0.8
	韓国	667,883	1,377,233	2,278,850	3.4
	台湾				
	香港	4,988	4,338	4,133	0.8
	中国	29,749,708	47,789,756	66,135,060	2.2
東南アジア	シンガポール	5,112	3,499	5,702	1.1
	ブルネイ	113	500	1,116	9.9
	マレーシア	167,898	581,243	391,977	2.3
	タイ	738,155	1,286,122	890,864	1.2
	フィリピン	1,100,902	2,545,967	2,304,361	2.1
	インドネシア	993,727	6,277,925	14,772,104	14.9
	ベトナム	513,517	2,701,317	4,153,323	8.1
	カンボジア	14,430	60,000	254,050	17.6
	ラオス	42,066	82,100	108,200	2.6
	ミャンマー	98,912	852,791	1,131,706	11.4
	東チモール	0	1,554	1,610	
南アジア	バングラデシュ	657,120	1,308,515	2,405,416	3.7
	ブータン	30	46	224	7.5
	インド	1,942,531	3,790,021	7,071,302	3.6
	ネパール	15,023	28,230	59,000	3.9
	パキスタン	12,485	140,101	159,083	12.7
	スリランカ	4,420	8,058	30,921	7.0
	モルジブ				
地域合計		36,729,020	69,990,417	103,191,677	2.8
世界		41,724,570	78,020,020	114,500,000	2.7

(出典) World Bank WDI.

(注) WDI は台湾のデータに言及していない。この表では、中国とインドの国データはアジアモンsoon地域に合わせて調整されていない。

3.3：農業システムの集約性

以上、アジアモンsoon地域の農業部門の特徴をまとめると、地域内の多様性は認めつつも、3.1で説明した共通の条件（高温多湿、水田稲作を主体とした農業、中小規模の農業者の割合の高さ）が、高度に集約的な農業システムに適した環境を形成してきたことが伺える。集約的な農業システムは、一方では何世紀にもわたって極めて多くの人口を養ってきた（Kyuma 2009）。他方において、高温多湿な気候のもとでは集約的な農業の実践、とりわけ栽培歴を通じて雑草や病害虫の防除作業に対する投入財の需要が高くなると同時に（Chhokar et al. 2007; Jat et al.

2021)、小さな経営規模の下で労働集約的な栽培慣行が必要となる (Otsuka 2013)。

この地域の農業システムの集約性は、この地域特有の農業生態学的要因 (特に高温多湿な気候) と社会経済的要因 (小さな農場経営面積) によって条件付けられ、ヨーロッパやアメリカ大陸など、世界の他の地域の事情とは異なる (Giller et al. 2022)。例えば、大陸ヨーロッパや北アメリカの一部の地域では大規模農場のもとで畑作や家畜放牧が行われている (Giller et al. 2022)。アジアモンスーン地域の多くの国・エコノミーでは面積 1ha 未満の農場が一般的だが、高度な機械化が進むヨーロッパやアメリカ大陸では 100ha を超える農場が一般的である (Yamaguchi 2021)。

次の章で説明するように、気候緊急事態や環境危機に直面するなか、生産性を犠牲にすることなく環境持続性の向上に資する効果的な STI を特定・考案するためには、上記のようなアジアモンスーン地域の農業部門の際立った特徴を考慮する必要がある。ヨーロッパやアメリカ大陸の農業部門の農業生態学的条件および社会経済的条件の下で効果的な STI の実践が、アジアモンスーン地域で機能するとは限らない。むしろ、アジアモンスーン地域内には、高温多湿な気候、水田稲作、小規模農家、といった多くの共通する特徴があり、そのことが広域に展開可能な STI を地域固有の状況にきめ細かく調整することで迅速な食料システムの変革を実現するための条件を提供するであろう。

4 : アジアモンスーン地域における食料システム変革の課題への対応

世界の食料システムは、人為的な気候変動がもたらす多くの課題に直面している。アジアモンスーン地域もその例外ではなく、農業生産に悪影響を与える極端な事象にますますさらされるようになっていく。食料・栄養の安全保障を損なうことなく増加する人口に対応し、同時に環境負荷を削減しつつ、食料システムの気候災害や環境災害に対する強靭性（レジリエンス）を高めるために、STI が緊急に必要とされている。さらに、アジアモンスーン地域の世界的重要性を鑑みれば、各地域の状況に合わせて STI を適用し、この地域における食料システムの変革を実現できれば、世界的なインパクトをもたらすであろう。この章では、アジアモンスーン地域における食料システムの変革の課題と機会について説明する。

4.1 : 気候緊急事態と環境危機

農業は気候変動や極端な事象に特に脆弱な部門である。気候緊急事態と環境危機によって収量の低下や品質の変化がもたらされる可能性からは、アジアモンスーン地域も免れることはできない。

アジアモンスーン地域において、毎年のモンスーンによる降雨は農業にとって極めて重要な天水の供給源である。一方、アジアモンスーン地域の域内各地において、程度は異なるものの、干ばつおよび洪水の両方の頻度が急増していることと関連し、モンスーンのパターンの変化が観察されている（Clarke et al. 2022）。最近の研究によると、100年に一度起こりうるような強度の洪水に直接さらされる18億1000万人（世界人口の23%）のうち、12億4000万人が南アジアと東アジアに集中している（Rentschler et al. 2022）。一方、より少ない日数に集中して雨が降ることが予測されるため、干ばつが悪化する可能性も高くなっており（Clarke et al. 2022）、その結果、アジアモンスーン地域全体において、水ストレスの空間的変動および時間的変動が増幅する傾向にある（Kim et al. 2020）。

主要な稲作地帯は、洪水、土壌と水の塩類化、そして気候変動による海面上昇により発生する海岸浸食が起こりやすいデルタ低地部に広がっており、このためにとりわけ気候リスクが高いホットスポットとなっている（Lenton et al. 2019; Kontgis et al. 2019; Smajgl et al. 2015）。この脅威は以前考えられていたよりも深刻であり、最近の研究では、一部のデルタの海拔は以前の推定よりはるかに低く、デルタの一部は持続的でない地下水採取や排水によって生じる地盤沈下を経験していることが示唆されている（Minderhoud et al. 2019; Kulp & Strauss 2019; Rentschler et al. 2022）。

地球温暖化による気温上昇だけでも、植物の生物学的な季節周期に影響を与えることで深刻な問題を引き起こす。最近の世界規模の研究が示したように（Yoshimoto et al. 2022）、稲は広範な気候によく適応しているものの、開花中は熱の影響を非常に受けやすく、特にアジアモンスーン地域によくみられる湿潤な気候では熱誘発性の不稔が発生する。

気温が上昇すると、農家にとって害虫や病気のリスクがさらに高まる可能性があるほか、温暖化によって、一部の害虫の宿主範囲と地理的分布が拡大する可能性もある（IPPC Secretariat 2021）。ある研究によると、世界の平均地表気温が 1℃ 上昇するごとに世界規模で主要穀物の大幅な収量損失が 10～25% 進み、温暖化によって昆虫の数および代謝率の両方が増加する地域で最も深刻な影響が生じると推定されている（Deutsch et al. 2018）。この研究では、気温が 2℃ 上昇すると、アジアモンスーン地域の重要な主食である米に対する害虫による収量損失が 19% 増加し、年間 92 メガトンの損失が生じると予測している（Deutsch et al. 2018）。

FAO の調査によると、2008 年から 2018 年の間に世界規模の災害が発生して開発途上国の作物や家畜の生産量が減少したことで、約 1,085 億米ドルの損失が発生した。地域別では、アフリカ（サハラ以南と北アフリカの両方）で 300 億米ドル、ラテンアメリカとカリブ海地域で 290 億米ドルの損失に対し、アジア（アジアモンスーン地域には限定されない）で 490 億米ドル相当の最大の損失が生じた（FAO 2021）。気温の上昇や極端な事象の観察が近年増えていることを踏まえると、気候変動が農業部門に与える影響は今後数年間で増大することが予測される。

4.2 : 農業部門に由来する GHG 排出

農業部門は気候緊急事態や環境危機がもたらす不確実性から影響を受けるだけでなく、人為的 GHG の主たる排出源である。全体として、アジアは農業部門に由来する GHG の世界排出量の 44% を占める一方（FAO 2016）、アジアモンスーン地域の国・エコノミーは、農業部門で発生する世界の CO₂ 以外の GHG 排出量、すなわちメタンガス（CH₄）および一酸化二窒素（N₂O）の排出量の 40% を占めている（図 7）。

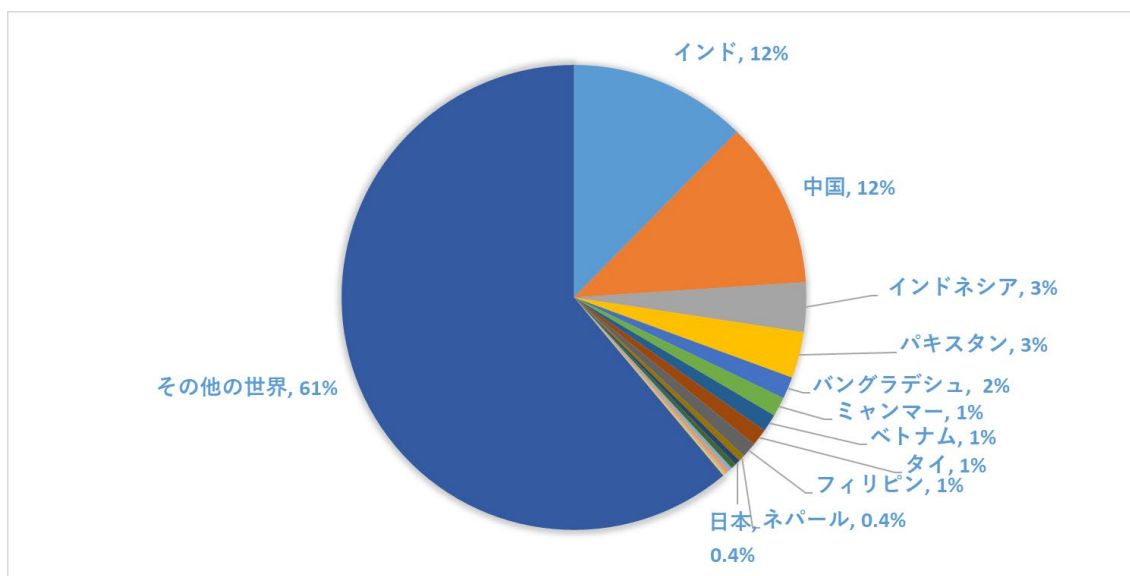


図 7：世界シェアにおけるメタン（CH₄）と一酸化二窒素（N₂O）の合計排出量の世界シェア

（出典）World Bank WDI.

（注）WDI は台湾のデータに言及していない。中国とインドの国データはアジアモンスーン地域に合わせて調整されていない。

アジアモンスーン地域を構成する国・エコノミーの農業部門における主要な GHG 排出源は、森林伐採や土地利用変化による CO₂ 排出に加えて、主に水田や家畜の腸内発酵による CH₄ 排出（世界全体の 41%）と非効率的な窒素肥料の使用による N₂O 排出（世界全体の 36%）が含まれる（Tubiello et al. 2021; World Resources Institute）。人口の特に多い国、すなわちインドと中国がこの地域の CH₄ と N₂O の排出量の大部分を占めている（図 8、図 9）。アジアモンスーン地域の食料システムにおける主な GHG 排出源を以下に簡単に概説する。

既に説明したように、米はアジアモンスーン地域の大部分で非常に重要な主食になっており、ほとんどの国・エコノミーでは耕作地の 50%以上で稲作が行われている（Kyuma 2009）。世界の総米生産量のほぼ 90%がアジアモンスーン地域で生産されているため、世界の水田から排出される CH₄ の 90%がこの地域で発生している（Smith et al. 2014）。歴史的にみてアジアモンスーン地域の人口収容力を鑑みれば、水田稲作体系の持続可能性は何世紀もかけて証明されてきたが、水田は CO₂ の 25 倍の温室効果係数を有する CH₄ の特に重要な人為的排出源の 1 つでもある（IPCC 2007, 2014）。家畜は CH₄ の主要排出源であり、反すう動物の生産は植物由来食料の生産と比較して単位重量当たりの GHG 排出量のはるかに多いと推定される（Xu et al. 2021）。このため、経済発展に伴う収入の増加および都市化に対応して動物性由来食料の需要が増していることが懸念事項の 1 つとされる（Asia Development Bank 2021）。

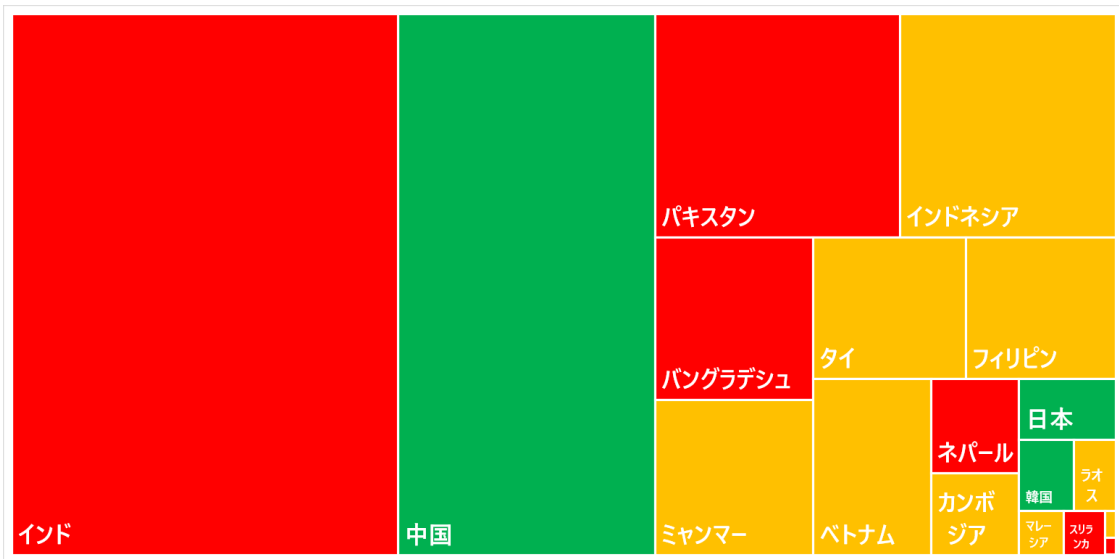


図 8 : アジアモンスーン地域の農業部門からのメタン (CH₄) 排出量

(出典) World Bank WDI.

(注) WDI は台湾のデータに言及していない。中国とインドの国データはアジアモンスーン地域に合わせて調整されていない。

カラーコード：緑 - 東アジア； オレンジ - 東南アジア； 赤 - 南アジア。

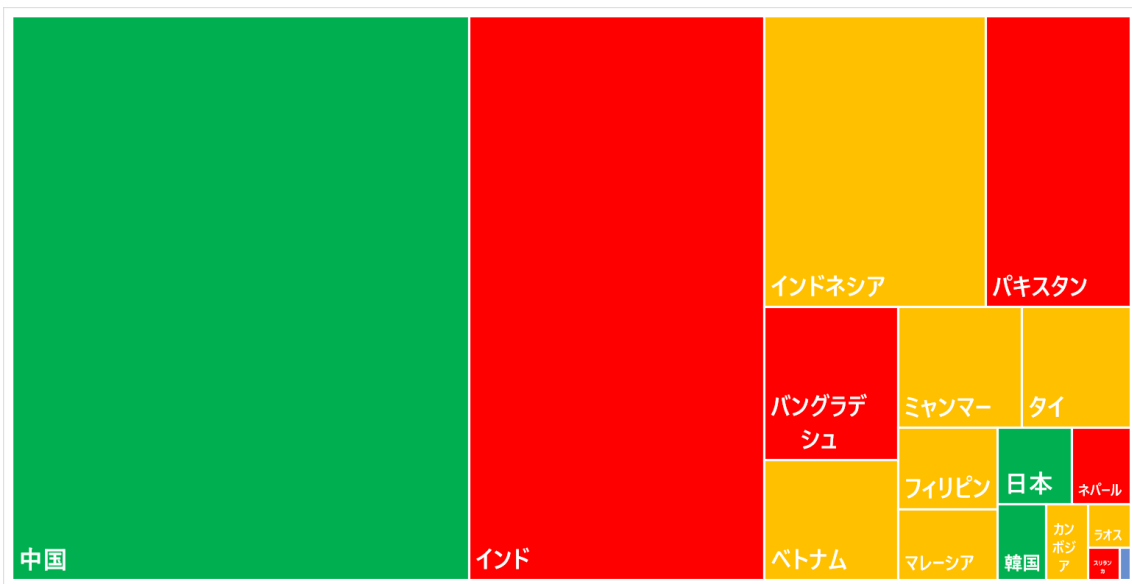


図 9 : アジアモンスーン地域の農業部門からの一酸化二窒素 (N₂O) 排出量

(出典) World Bank WDI.

(注) WDI は台湾のデータに言及していない。中国とインドの国データはアジアモンスーン地域に合わせて調整されていない。

カラーコード：緑 - 東アジア； オレンジ - 東南アジア； 赤 - 南アジア。

N₂O は非常に強力な GHG であり、CO₂ の約 298 倍の温室効果を有する (IPCC 2014)。作物生産における化学肥料の使用が増加しており、これには畑からの N₂O 排出を必然的に伴う。食料生産の増加において、窒素肥料の使用量減少には生産性との強いトレードオフがある一方、投入される肥料のほぼ 50% が作物に吸収されず、深刻な汚染物質として地下水に染みだすか、

GHGとして大気中に排出される (Subbarao et al. 2021)。化学肥料および農薬の過度な使用も水や土壌を汚染し、結果として生物多様性の喪失に寄与している。

4.3 : STI を展開する文脈としてのアジアモンスーン地域

農業部門に壊滅的影響をもたらす気候緊急事態や環境危機に対する懸念が高まる (IPCC 2021) なか、アジアモンスーン地域は、この地域および世界の食料と栄養の安全保障ニーズを損ねることなく、農業部門における GHG 排出の削減を加速させる方法を早急に特定する必要がある。アジアモンスーン地域特有の気候変動および環境課題に対応できる STI の導入が緊急に必要とされている。したがって、地域問題の解決に最適な STI の特定を加速させることが非常に重要である。

持続可能な農業の実践に向けたパラダイムシフトは、いまや避けられない世界的潮流となりつつある。アジアモンスーン地域の国・エコノミーは STI への投資を推進するさまざまな取組を既に実施しているが、この地域が他の国・エコノミーから教訓を得ることは重要である。多くの国・エコノミーはカーボンニュートラルに向けた野心的な数値目標を既に設定しており、その公約には食料システムにおける低排出目標も含まれている。例えば、EU は、(1) 持続可能な食料生産を実現し、(2) 食料安全保障を確保し、(3) 持続可能な食品加工・卸売り・小売り・ホスピタリティ・食品サービスの実践を奨励し、(4) 持続可能な食料消費と健康的で持続可能な食生活への移行を推進し、(5) 食品ロスと食品廃棄物を削減し、(6) 食料サプライチェーンにおける食品偽装への取組を通じて、消費者、生産者、気候、環境にとってより良いフードチェーンを構築する「農場から食卓まで戦略 (Farm to Fork Strategy)」を提案している。米国では、2022年8月、GHG 排出量を削減し、土壌や樹木における炭素貯留を増加させる「気候スマート農業実践」の推進を含む「インフレ抑制法」にバイデン政権が署名し、成立させている(The White House 2022)。

一方で、特定の状況で提唱される STI が他の状況でも機能するとは限らない。つまり、「万能な」手法などないのである。本レポートの第3章で強調したように、アジアモンスーン地域には特徴的な農業生態学的条件および社会経済的条件がある。したがって、アジアモンスーン地域の農業部門における食料システムの変革への取組は、人々の食料および栄養の安全保障ニーズを損なうことなく GHG 排出量を削減すべく、高温多湿な気候、水田稲作、小規模農業を特徴とするこの地域の集約的農業体系に特有の制約に対応したものである必要がある。むしろ、アジアモンスーン地域は、これらの共通する特徴を利用して、地域として知識の共有とコミットメントを推進する協力を通じて、技術応用展開への「規模の経済」を追求すべきである。

アジアモンスーン地域の国・エコノミーに共通する特徴があることを踏まえると、日本で開発・応用された農業技術の一部、及び日本の国立農業研究機関や大学とのさまざまな国際共同研究を通じてこの地域の国・エコノミー向けに開発された技術は、ローカルなニーズに合わせて調整することで適用

できるものと期待される。アジアモンスーン地域における農業生態学的条件および社会経済的条件に応じて、日本の国立農業研究機関や大学で既に開発・実証されているデジタル技術を含むさまざまなスマート農業技術も検討される可能性がある。

この観点から、日本の農業研究機関で近年開発された技術をまとめた「技術カタログ」を作成することが望ましい。国際農林水産業研究センター（国際農研（JIRCAS））が日本の他の農業研究機関の協力を得て作成するこのカタログには、間断灌漑（AWD）や生物的硝化抑制（BNI）小麦を用いた技術など、この地域で導入・普及展開可能な基盤（scalable）農業技術を含む（図 10）。この技術カタログは、政府関係者、研究者、普及員、生産者、民間部門を含む、アジアモンスーン地域のさまざまな関係者にとって参考となろう。しかし、持続可能な食料システムを確立するための「万能な」解決策はなく、たとえ普及展開可能な農業技術が開発されたとしても、そうした技術を環境の異なる国・エコノミー間で最適化・調整する必要がある。

メタン発酵消化液と間断かんがいの組合せによる温室効果ガス排出削減技術

生産 実証 品目:水稲 温室効果ガス削減

概要

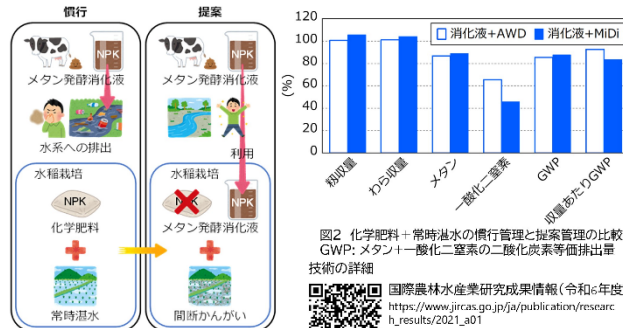
未利用のまま排出されているメタン発酵消化液を水稲栽培の肥料として、間断かんがいと組み合わせて利用することで、化学肥料の使用を削減し、水稲収量を減らすことなく水田からのメタン等の温室効果ガス(GHG)排出を削減できる。

背景・効果・留意点

ベトナムでは家畜糞を原料とする小規模バイオガス生産とその家庭内利用が普及しているが、窒素等の植物養分を多く含む廃液(メタン発酵消化液)は未処理のまま水系へ排出されている。このメタン発酵消化液を、化学肥料の代わりに水稲栽培の肥料として施用した上で水田を一時期乾かす間断かんがいと組み合わせることで、地域資源を有効利用しつつ、水稲栽培からのGHG排出量を削減できる。

ベトナムの事例では、牛糞を原料とするメタン発酵消化液を、田面水深-を指標とした間断かんがい(AWD)や日本型の中干し+日数を指標とした間断かんがい(MIDI)と組み合わせて用いた場合(図1)、消化液を水系に排出して化学肥料を施用する常時湛水の慣行管理と比較し、籾収量ややわら収量を減らすことなく、メタン排出量を11~13%、一酸化二窒素排出量を35~54%それぞれ削減した(図2)。本技術は、家畜糞を原料とするメタン発酵消化液を肥料として利用する他の水稲作地域にも適用できる。

-田面水深=水田における水位。湛水すればプラス、排水で地表より下がればマイナスと計測する。



技術の詳細
国際農林水産業研究開発センター(令和6年度)
https://www.jircas.go.jp/ja/publication/research_results/2021_a01

問い合わせ
info-greenasia@jircas.affrc.go.jp
国立研究開発法人 国際農林水産業研究センター JIRCAS 国際農研

窒素肥料を低減しても収量を維持できる生物的硝化抑制(BNI)強化コムギ

生産 実証 品目:コムギ 温室効果ガス削減 化学肥料低減

概要

野生コムギ近縁種から生物的硝化抑制(BNI*)能を導入したBNI強化コムギは、圃場土壌での硝化を抑制することで、窒素施肥量を低減しても収量が維持でき、同時に一酸化二窒素(N₂O)排出や水圏汚染などの環境負荷を低減できる。

*BNI: Biological Nitrification Inhibition

背景・効果・留意点

土壌での硝化を抑制する物質を作物が放出することで、窒素肥料として施用されたアンモニア態窒素から、硝酸態窒素への土壌での変換が抑制される。これを生物的硝化抑制(BNI)能と呼ぶ。野生コムギ近縁種からBNI能を導入したBNI強化コムギ(図1)はBNI能が5倍程度に強化され、窒素利用効率が向上する。このため、窒素施肥量を6割削減しても親品種との子実収量(図5)に有意差がなく、穀粒のタンパク質含量、製パン特性にも影響しない。窒素施肥量の低減は強力な温室効果ガスである一酸化二窒素(N₂O)の排出を抑制する(図6)ため、既存品種をBNI強化コムギに代えることで、温室効果ガスの削減が可能となり、同時に、土壌に吸着されにくい硝酸態窒素による水圏汚染を低減できる。

BNI能の発揮には土壌条件(pH等)の影響があることに留意する必要がある。

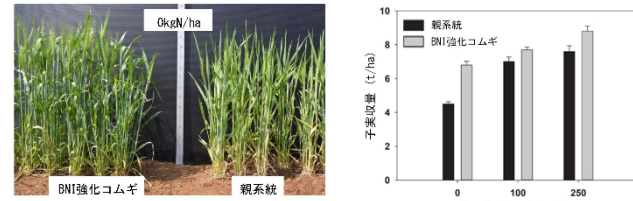


図2 異なる施肥基準におけるBNI強化コムギと親系統の子実収量



図3 BNI強化コムギと親系統の根圏土壌からのN₂O排出量

技術の詳細
国際農林水産業研究開発センター(令和6年度)
https://www.jircas.go.jp/ja/publication/research_results/2021_a04

問い合わせ
info-greenasia@jircas.affrc.go.jp
国立研究開発法人 国際農林水産業研究センター JIRCAS 国際農研

図 10 : アジアモンスーン地域の生産力向上と持続性の両立に資する技術カタログ Ver.1.0

5：結論

世界は脱炭素社会の実現に向けて進んでいる。日本では、2021年5月、農林水産省が、食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立をイノベーションで実現する「みどりの食料システム戦略」（以下、「みどり戦略」という。）を策定した。

このような取組を成功させるには、科学的基盤に基づく必要があり、適切な STI の応用を通じ、食品と栄養の安全保障を損なうことなく環境負荷を軽減しつつ、食料システムの強靱性（レジリエンス）の向上を推進する必要がある。世界諸地域の多様な農業体系を特徴付ける農業生態学的条件および社会経済的条件が一律でないことを踏まえ、STI の適用に「万能な」手法はないことに留意することが重要である。本研究が示したように、アジアモンスーン地域（日本もその一部）は高温多湿な気候、水田稲作、小規模農業によって特徴付けられる。生産性を損なうことなく GHG 排出量を削減するには、生産者が直面する特定の課題に対応するため、地域特有の農業生態学的条件および社会経済的条件に合わせて適切な STI 群を特定し、カスタマイズする必要がある。

他方、農業生態学的条件および社会経済的条件が類似する国・エコノミーは、潜在的 STI の経験を共有することにより、それらの STI の普及拡大が期待できる。地域内の国・エコノミーが気候条件や生産構造の特徴を共有するアジアモンスーン地域には、さまざまな関係者が科学的根拠に基づく情報を作成・拡散するためのフォーラムやネットワークセンターを設置することで、潜在的な STI を応用していく経験を共有し、食料システムを迅速に変革する重要な機会が存在する。

こうした状況を踏まえ、国際的な共同研究事業を通じて開発途上地域の農業技術向上に貢献することを使命とする国際農研は、2021年11月、シンポジウム「アジアモンスーン地域における持続的な食料システム実現に向けたイノベーション：『みどりの食料システム戦略』に資する国際連携に向けたプラットフォーム」を開催した。このシンポジウムの議論では、地域の食料システムの変革に関わる課題と機会に関する情報提供、そしてコンセンサス形成を通じて関係者のコミットメントを後押しする地域プラットフォームが必須であることが取りまとめられた。

2022年4月、農林水産省は「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」を開始した。農林水産省は国際農研を同事業の実施機関に指定し、国際農研は「グリーンアジア」のプロジェクト名にて、活動を行っている。「グリーンアジア」プロジェクトはみどりの食料システム国際情報センター（以下「みどり国際情報センター」という。）を設置している。同センターは、優れた科学者および主要な農業研究機関・大学の研究所長等で構成される国際科学諮問委員会の助言の下、農林水産技術の既存および最新の情報を収集・分析する。

みどり戦略が主に日本におけるイノベーションを推進するものであるのに対し、「グリーンアジア」プロジェクトは、日本の国立農業研究機関や大学によって開発された技術を含め、アジアモンスーン地域に関する研究結果・成果を収集・分析・管理・普及する仕組みを通じて同地域における基盤農業技術の導入の加速化を目的とする。みどり国際情報センターは、日本とアジアモンスーン地域の国立農業研究機関、大学、国際農業研究機関の研究者だけでなく、政府関係者、普及員、生産者、民間部門を含むさまざまな関係者のネットワークセンターであるべきである。よって、同センターによって生成される情報は、科学的根拠に基づくと同時に、さまざまな関係者が利用できるものである必要がある。

同センターは上述した地域プラットフォームとして機能するものではないが、アジアモンスーン地域のさまざまなパートナーをつなぐネットワークを強化し、この地域にとって有用かつ適用可能な科学的根拠に基づく情報を共有し、国際農研やその他の国立研究機関のネットワークを利用してこの情報を発信することで、この地域の食料システムの変革に貢献するという重要な役割を果たすと期待される。アジアモンスーン地域の総合的な重要性を考えると、この地域における食料システムの変革は、世界的にみても気候変動の緩和や持続可能な農業生産の相乗効果を示すことができる。プロジェクトの結果および成果はさまざまな関係者の参考となり、アジアモンスーン地域、およびその他の地域における持続可能な食料システムへの変革に貢献することが期待される。



図 11 : グリーンアジアの概念的枠組み

著者の貢献について

飯山、金森、小林、舟木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

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くものです。著者は特に以下の方々に謝意を表明します。

- 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。
- 本論文の当初のアイデア、特にアジアモンスーン地域における知識共有プラットフォームの必要性に関して貴重な意見をいただいた、Mr. Sridhar Dharmapuri（国連食糧農業機関）、Dr. Jon Hellin（国際稲研究所）、植田康成氏（国際協力機構（当時））、白戸康人博士（農研機構）、林慶一博士（国際農研）。
- 気候区分データを生成・編集していただいた、林田宏一氏、久保知之氏、出来明日翔氏、西本光希氏（すべて PwC）。
- 人口密度図および平均年間降水量分布を作成していただいた酒井徹博士（国際農研）。

参考文献

- Arnfield AJ. (2020) Köppen climate classification. *Encyclopedia Britannica*.
<https://www.britannica.com/science/Koppen-climate-classification>.
- Asia Development Bank. (2021) *Asian Development Outlook Update, September 2021. Transforming Agriculture in Asia*. <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/726556/ado2021-update-theme-chapter.pdf>
- Chauhan BS. (2013) Strategies to manage weedy rice in Asia. *Crop Protection* 48: 51-56.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.02.015>
- Chhokar RS, Sharma RK, Jat GR, Pundir AK, Gathala MK. (2007) Effect of tillage and herbicides on weeds and productivity of wheat under rice-wheat growing system. *Crop Protection* 26(11): 1689-1696.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.01.010>
- Clarke B, Otto F, Stuart-Smith R, Harrington L. (2022) Extreme weather impacts of climate change: an attribution perspective, *Environ. Res.: Climate* 1 012001.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2752-5295/ac6e7d>
- Clift PD, Plumb A. (2008) *The Asian Monsoon Causes, History and Effects*. ISBN: 9780521847995.
http://assets.cambridge.org/9780521847995/frontmatter/9780521847995_frontmatter.pdf
- Critchfield HJ. (1983) *General Climatology*. 4th ed. Prentice-Hall, New Jersey.
- Defeng Z. (2000) Bridging the Rice Yield Gap in China.
<https://www.fao.org/3/X6905E/x6905e08.htm#BRIDGING%20THE%20RICE%20YIELD%20GAP%20IN%20CHINA%20Zhu%20Defeng> in Papademetriou MK, Dent FJ, Heratheds EM. *Bridging the Rice Yield Gap in the Asia-Pacific Region*. Food and Agriculture Organization of the United Nations Regional Office for Asia and the Pacific. Bangkok, Thailand, October 2000.
<https://www.fao.org/3/X6905E/x6905e00.htm#Contents>
- Deutsch CA Tewksbury J, Tigchelaar M, Battisti DS, Merrill SC, Huey RB, Naylor RL. (2018) Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science* 361(6405): 916-919.
<https://www.science.org/doi/10.1126/science.aat3466>
- European Commission (2020) *A Farm to Fork Strategy*. Brussels, 20.5.2020 COM(2020) 381 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52020DC0381>
- European Union (2020) *Farm to Fork Strategy*. Brussels. https://food.ec.europa.eu/system/files/2020-05/f2f_action-plan_2020_strategy-info_en.pdf
- FAO (2014) *The State of Food and Agriculture 2014. Innovation in Family Farming*. Rome.
<https://www.fao.org/3/i4036e/i4036e.pdf>

- FAO (2016) *The State of Food and Agriculture 2016*. CLIMATE CHANGE, AGRICULTURE AND FOOD SECURITY. Rome. <https://www.fao.org/3/i6030e/i6030e.pdf>
- FAO (2021) *The Impact of Disasters and Crises on Agriculture and Food Security: 2021*. Rome. <https://www.fao.org/3/cb3673en/cb3673en.pdf>
- FAO (2022) *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation*. Rome, FAO. <https://www.fao.org/3/cc0461en/cc0461en.pdf>
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO (2022) *In Brief to The State of Food Security and Nutrition in the World 2022*. Rome, FAO. <https://www.fao.org/3/cc0640en/cc0640en.pdf>
- Gadgil S, Kumar KR. (2006) The Asian monsoon - agriculture and economy. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/3-540-37722-0_18.pdf in Wang B. *The Asian Monsoon*. Springer Praxis Books. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Gautam R, Shri Shrivastav CP, Lamichhane S, Baral BR. (2021) The residual effect of pre-rice green manuring on a succeeding wheat crop (*Triticum aestivum* L.) in the rice-wheat cropping system in Banke, Nepal. *International Journal of Agronomy* 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/4142743>
- Giller K, Andersson J, Delaune T, et al. (2022) The Future of Farming: Who will Produce Our Food? *Papers of the 2021 Rural Development Report*. 83 IFAD Research Series. IFAD. <https://www.ifad.org/documents/38714170/45740531/RS83-formatted-web-v3.pdf/98080357-b3a8-6b46-ab57-395615b25b72?t=1655298571969>
- IPCC (2007) *Fourth Assessment Report. Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf
- IPCC (2021a) *Sixth Assessment Report. AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf
- IPCC (2021b) *Sixth Assessment Report. AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis Regional Fact Sheet: Asia*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/factsheets/IPCC_AR6_WGI_Regional_Fact_Sheet_Asia.pdf
- IPPC Secretariat (2021). *Scientific Review of the Impact of Climate Change on Plant Pests – A Global Challenge to Prevent and Mitigate Plant Pest Risks in Agriculture, Forestry and Ecosystems*. Rome. FAO on behalf of the IPPC Secretariat. <https://www.fao.org/3/cb4769en/cb4769en.pdf>
- Jat HS, Kumar V, Kakraliya SK et al. (2021) Climate-smart agriculture practices influence weed density and diversity in cereal-based agri-food systems of western Indo-Gangetic plains. *Sci Rep* 11: 15901. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95445-1>
- Kim JB, So JM, Bae DH. (2020) Global warming impacts on severe drought characteristics in Asia monsoon region. *Water* 12(5): 1360. <https://doi.org/10.3390/w12051360>
- Kontgis C, Schneider A, Ozdogan M, Kucharik C, Tri VPD, Duc NH, Schatz J. (2019) Climate change impacts on rice productivity in the Mekong River Delta. *Appl Geogr* 102:71-83, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.12.004>
- Köppen W. (1884) Die Wärmezononen der Erde, nach der Dauer der heissen, gemässigten und kalten Zeit und nach der Wirkung der Wärme auf die organische Welt betrachtet (The thermal zones of the earth according to the duration of hot, moderate and cold periods and to the impact of heat on the organic world). - *Meteorol. Z.* 1, 215-226. (Translated and edited by VOLKEN E. and S. BRONNIMANN - *Meteorol. Z.* 20 (2011), 351-360). http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Koppen_1884_2.pdf
- Kulp SA, Strauss BH. (2019) New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. *Nat Commun* 10: 4844, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12808-z>
- Kyuma K. (2009) *Nature and Agriculture in Monsoon Asia. Keynote Lecture. MARCO Symposium 2009. Challenges for Agro-Environmental Research in Monsoon Asia*. October 5-7, 2009. National Institute of Agro-Environmental Sciences (NIAES), at Tsukuba, Japan. https://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/marco/marco2009/english/program/S-0_Keynote_Kyuma_Kazutake.pdf
- Lenton TM, Rockström J, Gaffney O, Rahmstorf S, Richardson K, Steffen W, Schellnhuber HJ. (2019) Climate tipping points - too risky to bet against. *Nature* 575: 592-595. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-03595-0>
- Liu J, Qiao S, Li C, Tang S, Chen D, Geng G. (2021) Anthropogenic influence on the intensity of extreme precipitation in the Asian-Australian monsoon region in HadGEM3-A-N216. *Atmospheric Science Letters*. 25 March 2021. <https://doi.org/10.1002/asl.1036>
- Liu X, Guo Q, Guo Z, Yin Z-Y, Dong B, Smith R. (2015) Where were the monsoon regions and arid zones in Asia prior to the Tibetan Plateau uplift? *National Science Review*, 2(4): 403-416. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwv068>
- Lowder, SK, Scoet J, Singh, S. (2014), *What do we really know about the number and distribution of farms and*

- family farms worldwide?, Background paper for The State of Food and Agriculture 2014, ESA Working Paper No. 14-02, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
<https://www.fao.org/3/i3729e/i3729e.pdf>
- Minderhoud PSJ, Coumou L, Erkens G, Middelkoop H, Stouthamer E. (2019) Mekong delta much lower than previously assumed in sea-level rise impact assessments. *Nat Commun* 10, 3847.
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-11602-1>
- Nelson A. (2016) *Space to grow : geo-information for food security : inaugural address by Andy Nelson, professor of spatial agriculture and food security*, 21 April 2016, University of Twente, Enschede, The Netherlands : e-book + powerpoint. University of Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC). http://www.itc.nl/library/papers_2016/scie/nelson_spa.pdf
- OECD Data. Old-age dependency ratio. <https://data.oecd.org/pop/old-age-dependency-ratio.htm> (accessed 2023-03-24).
- OECD/FAO (2017), *OECD-FAO Agricultural Outlook 2017-2026*, OECD Publishing, Paris.
<https://www.fao.org/3/I7465e/I7465e.pdf>
- Otsuka K. (2013). Food insecurity, income inequality, and the changing comparative advantage in world agriculture. *Agricultural Economics* 44: 7-18. <https://doi.org/10.1111/agec.12046>
- Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA. (2007) Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification. *Hydrology and Earth System Sciences* 11: 1633–1644.
- Rentschler J, Salhab M, Jafino BA. (2022) Flood exposure and poverty in 188 countries. *Nat Commun* 13, 3527.
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-30727-4>
- Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature* 461(7263): 472-475. <https://www.nature.com/articles/461472a>
- Siddiq EA. (2000) Bridging the rice yield gap in India.
https://www.fao.org/3/X6905E/x6905e09.htm#BRIDGING%20THE%20RICE%20YIELD%20GAP%20IN%20INDIA%20E.A.%20Siddiq* In Papademetriou MK, Dent FJ, Heratheds EM. (2000) *Bridging the Rice Yield Gap in the Asia-Pacific Region*. Food and Agriculture Organization of the United Nations Regional Office for Asia and the Pacific. Bangkok, Thailand, October 2000.
<https://www.fao.org/3/X6905E/x6905e00.htm#Contents>
- Smaigl A, Toan TQ, Nhan DK, Ward J, Trung NH, Tri LQ, Tri VPD, Vu PT. (2015) Responding to rising sea levels in the Mekong Delta. *Nat Clim Chang* 5:167-174, <https://doi.org/10.1038/nclimate2469>
- Smith P et al. (2014) Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Subbarao G, Kishii M, Bozal-Leorri A, et al. (2021) Enlisting wild grass genes to combat nitrification in wheat farming: a nature-based solution. *PNAS*, 118(35). <https://www.pnas.org/content/118/35/e2106595118>
- Tanaka K. (2006) *Environment and Sustainable Agriculture in Monsoon Asia*. *Environmental Science*.
https://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/sinfo/sympo/h18/20061212/pdf/s2_tanaka.pdf
- The White House (2022) *FACT SHEET: How the Inflation Reduction Act Helps Rural Communities*. Washington D.C. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/08/17/fact-sheet-how-the-inflation-reduction-act-helps-rural-communities/> (accessed 2023-03-24).
- Trewartha GT. (1968) *An Introduction to Climate*. 4th ed. McGraw-Hill, New York.
- Tubiello FN, Rosenzweig C, Conchedda G, et al. (2021) Greenhouse Gas Emissions from Food Systems: Building the Evidence Base, *Environ. Res. Lett.* 16 065007. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac018e>
- UN World Population Prospects 2019. <https://www.un.org/development/desa/pd/news/world-population-prospects-2019-0>
- von Braun J, Afsana K, Fresco LO et al. (2021) Food system concepts and definitions for science and political action. *Nat Food* 2: 748-750. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00361-2>
- Willett W, Rockström J, Loken B, et al. (2019) Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet* 393(10170): 447-492.
[https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(18\)31788-4/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(18)31788-4/fulltext)
- World Bank World Development Indicators (WDI). <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators> (accessed 2022-06-16).
- World Resource Institute. This Interactive Chart Shows Changes in the World’s Top 10 Emitters. December 10, 2020, By Johannes Friedrich, Mengpin Ge and Andrew Pickens. <https://www.wri.org/insights/interactive-chart-shows-changes-worlds-top-10-emitters> (accessed 2023-03-24).
- Xu X, Sharma P, Shu S, et al. (2021) Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods. *Nat Food* 2: 724-732. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00358-x>
- Yamaguchi F. (2021). Changing Farm Size and Agricultural Productivity in Asia. Background Paper. <https://www.adb.org/sites/default/files/institutional-document/731791/adou2021bp-farm-size-agri-productivity-asia.pdf> in Asia Development Bank (2021) Asian Development Outlook Update, September

2021. Transforming Agriculture in Asia.
<https://www.adb.org/sites/default/files/publication/726556/ado2021-update-theme-chapter.pdf>
- Yoshimoto M, Fukuoka M, Tsujimoto Y, et al. (2022) Monitoring canopy micrometeorology in diverse climates to improve the prediction of heat-induced spikelet sterility in rice under climate change. *Agricultural and Forest Meteorology* 316: 108860. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108860>
- Zurbenko I, Luo M. (2015) Surface humidity changes in different temporal scales. *American Journal of Climate Change*, 4: 226-238, https://file.scirp.org/pdf/AJCC_2015060214115143.pdf



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>

