

調査報告書

食料安全保障と栄養安全保障： 歴史的背景と世界が目指す方向性

はじめに

CRDS 特任フェロー 柴田 大輔

1960年代以後の海外からの食料輸入に伴う食料自給率の低下は、日本の食料安全保障に関する多くの議論を引き起こしたが、現在に至るまで自給率の低下は続いている。幸いなことに、国内での深刻な食料不足は生じてこなかった。その背景には、これまでの安定な国際情勢と日本の経済力の強さと安定性が貢献してきた。急激な外的要因が生じれば国民が困窮する可能性があるとの危機感は常に認識されてきたが、対策は十分にはとられていない。つまり、外的要因を予測することの不確実性が、現状をよしとする正常性バイアスを引き起こしている。

一方、地球環境は人類にとって不都合な方向に確実に向かっていることが科学的根拠に基づいて示されており、食料生産の低下が予見されている。温室効果ガス排出に伴う気候変動ばかりではなく、プラネタリーバウンダリーで示されている環境要因の多くが地球の限界を超えており、生物生産を支えている生物多様性も危機的状況である。このような地球環境悪化への科学的予測は、長期的視点で持続可能な食料供給を行うことの重要性を示しており、技術革新のための強力な研究開発支援が必要である。

本報告書では、世界と日本の食料供給の現状を概観し、長期的には食料安全保障を支えるのは「土地利用」を軸とした持続可能な食料生産であり、そこには技術革新が重要であること、僅か数品目の大量の穀物を貿易する現在の食料供給から、人類の健康に必要な栄養を確実に供給する栄養安全保障へと変化する必要があることを述べる。この栄養安全保障を達成するプロセスは、過度な肉食の抑制に繋がり、海外からの飼料輸入の依存度を下げ、日本の自給率向上につながることになる。

エグゼクティブサマリー

科学技術振興機構 研究開発戦略センター（JST-CRDS）ライフサイエンス・臨床医学ユニットでは、健康で持続可能な食の実現に必要な研究開発に関する調査を、2023年から複層的に進めてきた。その概要を図1に示す。

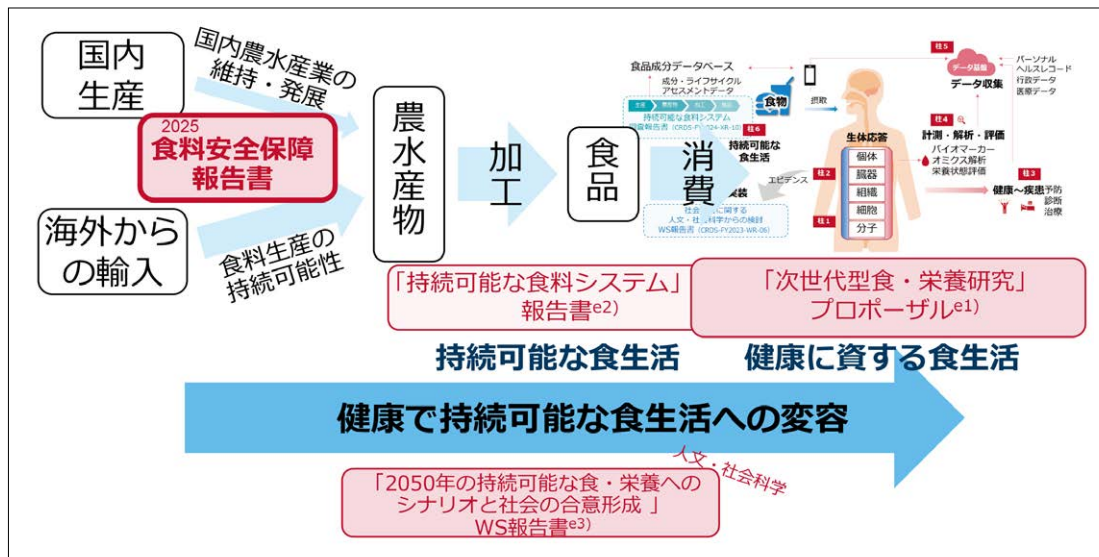


図1 健康で持続可能な食の実現に関わる研究開発調査と関連報告書の概要

健康で持続可能な食の調査の一環として、食料安全保障の根幹である安定供給に焦点をあて、本報告書を取りまとめることとした。あわせて、食料需要に応える供給を実現するという視点だけでなく、ヒトの健康維持に必要な栄養を供給するという栄養安全保障についても紹介する。健康に資する食に関する研究開発については、既刊「次世代型食・栄養研究」プロポーザル^{e1)}で重点的に取り上げ、また、食料システムによる地球環境負荷の実態とその対策については既刊の調査報告書「持続可能な食料システム」^{e2)}にまとめたため、本報告書では食料生産技術に重点を置いて調査を進めた。なお、食の変容を社会全体で進めるためには、人々の食に対する意識や行動、価値観を理解し、尊重することが不可欠である。市民参加型の政策決定を模索するための基盤として、人文・社会科学の研究が重要な役割を担う。食の変容に関する人文・社会科学の最近の動向については、JST CRDSワークショップ報告書「2050年の持続可能な食・栄養へのシナリオと社会の合意形成～人文・社会科学からのアプローチ」^{e3)}を参照されたい。

食料安全保障（Food security）は1979年の国連「食料安全保障行動計画」を端緒とする、比較的歴史の浅い言葉である。1960年代からの緑の革命によって作物の大増産が可能になり、結果として生じた余剰作物の用途としての、食料援助がその起源である。1996年に制定された食料安全保障の柱は、供給（Availability）、アクセス（Access）、利用（Utilization）の三つであった。その後、作物取引が大規模にグローバル化し、作物貿易が国際経済や地政学リスクによって翻弄されるようになると、経済的にゆとりのある国々においても安定供給が課題となり、2001年に食料安全保障の四つ目の柱、安定（Stability）が追加された。

1960年代以降、大量供給が可能になった作物を利用して畜産が隆盛し、人類の畜肉消費量は2024年までの約60年間で約47倍に増えた。これはこの間の人口増加の約19倍である。日本においてもこの約60年間で、一人当たりの肉類消費は3.7倍になり、畜産飼料と畜産物の輸入量が急増した結果、食料自給率は73%から38%まで下落した。畜産を支えるトウモロコシと大豆、そして肉類を大量輸出できる国は限られており、日本を含む世界の多くの国々がこのグローバル作物供給網に依存している。この供給網は気候変動による異常気象や、地政学リスク、国際経済の変調、需給バランスの変化などによって容易に影響を受け、1970年代以降、世界的な食料価格の高騰は何度も起きている。従って、短期的には食料供給の最大のリスクは、こうした異常気象などによるグローバル作物供給網の脆弱性であり、輸入食料への依存率の高い日本はその影響を受けやすいと言える。

日本国内での食料供給に目を向けると、2025年現在、日本の食料自給率は40%以下である。農水産業従事者が減少し、荒廃農地が増加するなど、国内農水産業を維持し、発展させるには課題が山積みである。国内農水産業の維持・発展には、産業政策は重要であるが、生成AIやデータ科学が実用段階を迎えている現在、その政策の土台となる農水産業関連データの拡充と連携、解析、そしてモデルの構築による予測や試算が可能になりつつあると言える。国内で必要とされる食料の供給量や流通の状況、燃料や農業資材の供給が滞った際の生産量変化の予測、国内に存在する活用可能な資源量の把握と、それを利用した場合の生産量の予測など、生産から流通・消費までを一貫してつなぐデータ基盤は現在のところ、整備されていない。しかし、こうしたデータ基盤が整い、予測と評価のデータ科学を推進することで、不測の事態における実行可能な対策を立てることが出来るようになって考えられる。また、データを駆使して農業生産の高効率化と経営改善、環境負荷低減などを同時に目指す、スマート農業を推進することで、肥料などの農業資材や限りある農地を高効率に活用し、自給率の向上にも資する。

現在の食料安全保障は、その起源が余剰作物の使途であったことから、作物の大量生産が前提となっており、食料の供給状況に主眼が置かれている。人類の肉類消費がこれまで通りの勢いで増加し続ければ、より多くの作物生産が必要になり、農業生産による地球環境負荷は増大し、地球環境の持続可能性は破綻する恐れがあると考えられている。一方、先進国を中心に不健康な食生活に由来する、肥満や糖尿病、循環器疾病が蔓延していることから、ヒトの健康維持に必要な栄養供給を把握するための研究開発が、2020年代前半から世界各地で進行している。健康維持に必要な栄養の摂取に適した食の内容を把握し、肉類の摂取に過度に依存しない食生活へと変容させることで、持続可能な食料供給を目指すこの動きは、次世代の食料安全保障の方向性として、栄養安全保障と呼ばれる。無制限な食料需要に応える食料供給体制を構築してきた時代から、持続可能な栄養供給を模索する時代へとわろうとしている。ヒトの健康維持に必要な栄養の把握に加え、持続可能な食料供給に適した食生活の解明、現在の主流であるカロリー優先で高収量なトウモロコシ、大豆、コメ、麦類から、高栄養で低環境負荷な多種多様な作物への変換、流通ロスの削減など、栄養安全保障の実現には様々な分野が協働する研究開発が必要である。

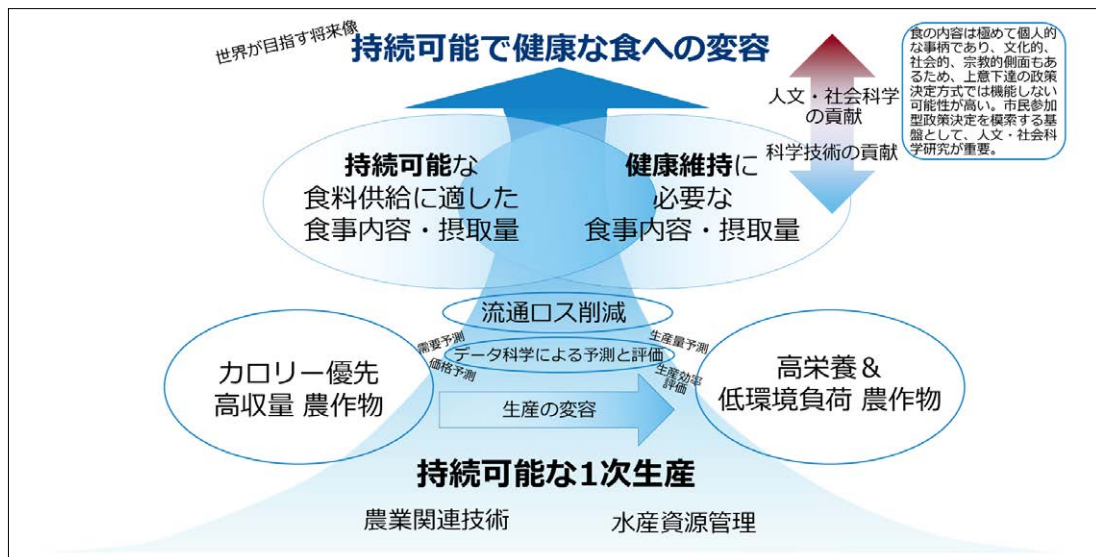


図 ii 持続可能な食料生産を基盤とした健康に資する持続可能な食への変容

参考文献

- e1) 科学技術振興機構研究開発戦略センター「戦略プロポーザル 次世代型食・栄養研究～地球環境の持続可能性とヒトの健康を両立する食・栄養の実現へ～」(2025年3月), <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-SP-03.html>, (2025年11月25日アクセス)
- e2) 科学技術振興機構研究開発戦略センター「調査報告書 持続可能な食料システム」(2025年3月), <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-RR-13.html>, (2025年11月25日アクセス)
- e3) 科学技術振興機構研究開発戦略センター「ワークショップ報告書 2050年の持続可能な食・栄養へのシナリオと社会の合意形成～人文・社会科学からのアプローチ」(2024年3月), <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2023-WR-06.html>, (2025年11月25日アクセス)

目次

1	食料安全保障とは	1
1.1	グローバルな食料安全保障の定義とその歴史的経緯.....	1
1.2	日本における食料安全保障.....	2
2	日本と世界の食料供給	4
2.1	日本の食料供給構造.....	4
2.1.1	資材.....	4
2.1.2	生産.....	8
2.1.3	流通・消費.....	10
2.2	世界の食料供給.....	11
3	食料安全保障と栄養安全保障	14
3.1	穀物大量供給の限界と栄養バランスの重要性.....	14
3.2	持続可能な食料供給に向けた「食の変容」の提言.....	14
3.3	持続可能な栄養安全保障実現へのアプローチ.....	15
4	日本とグローバルの食料安全保障に関わる課題	17
4.1	食の変容と技術開発の歴史.....	17
4.2	まとめと今後の展望.....	19
	参考文献	21
付録	研究開発事例	24
	(A) 予測・評価のデータ科学.....	24
	A-1. 利用可能な国内資源量の把握と経済性評価.....	25
	A-2. 栽培環境変化等に応答する作物収量予測技術.....	27
	(B) 省資源生産.....	29
	B-1. 作物肥料と農薬.....	29
	B-2. 畜産飼料.....	32

B-3. 水産飼料	33
(C) 生産力の向上（省力生産、環境負荷削減）	34
C-1. 光合成の革新	34
C-2. 植物工場：環境変化に左右されない安定した生産のための基盤技術	35
C-3. スマート農業	35
C-4. 水産養殖における成長速度向上	36
(D) 代替生産技術、食品関連技術	37
付録の参考文献	38

1 | 食料安全保障とは

1.1 グローバルな食料安全保障の定義とその歴史的経緯

1960年代からの「緑の革命」により、農作物の大量生産が始まった。これは、草丈を低くする遺伝資源を活用して品種改良された穀物品種に、ハーバー・ボッシュ法によって生産された化学肥料の大量使用を組み合わせた農法で、世界的に穀物生産量が飛躍的に増大した現象を指す。草丈を低くする遺伝資源は、日本の小麦品種の農林10号由来である。太平洋戦争終戦時に、アメリカ農務省天然資源局が日本から農林10号を持ち帰り、これがメキシコの国際トウモロコシ・コムギ改良センター（International Maize and Wheat Improvement Center: CIMMYT）のBorlaugをリーダーとする研究グループに分与され、メキシコのパン小麦と交配されて超多収品種が生み出されたのである¹⁾。緑の革命は、大量の穀物生産を可能にし、余剰穀物が発生する状況を生み出したことで、以下のような歴史的展開をもたらした。余剰となった穀物は家畜の飼料として利用されるようになり、畜産が世界的に普及したほか、大量生産された穀物は国際市場で取引されるようになり、食料供給のグローバル化が進んだ。また、安定的な供給を実現するために食料の需要と供給を予測するモデルの研究が開始され、さらに余剰穀物を活用した国際的な食料援助も行われるようになった²⁾。

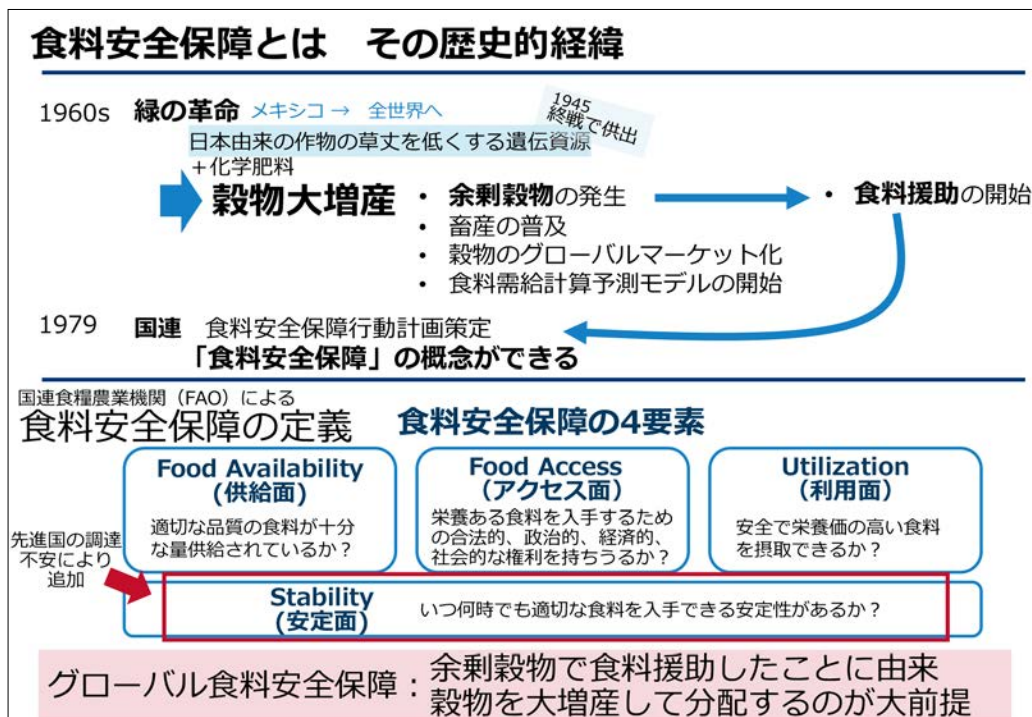


図1-1 食料安全保障の歴史的経緯と定義

食料安全保障（Food security）という用語は1979年の国連「食料安全保障行動計画」をその端緒とする。緑の革命によって生じた余剰作物の用途として開始した、食料援助がその起源であり、1996年に、国連食糧農業機関（United Nations Food and Agriculture Organization: FAO）によって制定された食料安全保

障の柱は、供給（Availability）、アクセス（Access）、利用（Utilization）の三つであった。その後、作物取引が大規模にグローバル化し、作物貿易が国際経済や地政学リスクによって翻弄されるようになると、経済的にゆとりのある国々においても安定供給が課題となり、2001年に食料安全保障の四つ目の柱、安定（Stability）が追加された²⁾。このように食料安全保障では、穀物を大增産してそれを国際的に分配することが大前提となっている（図1-1）。

1.2 日本における食料安全保障

2024年に改正された「食料・農業・農村基本法」では、基本理念の中に「食料安全保障の確保」が新たに明記された。これにより、食料安全保障が初めて法的に位置づけられ、政策の重要な柱となった。改正「食料・農業・農村基本法」では、食料安全保障について、従来の「食料の安定供給」に加え、「良質な食料が合理的な価格で安定的に供給され、かつ、国民一人一人がこれを入手できる状態」と定義された。また、食料の安定供給については、世界の食料の需給及び貿易には不安定な要素があることから、国内の農業生産の増大を図ることを基本とし、あわせて安定的な輸入と備蓄の確保を図る、としている（図1-2）。

日本においては、2020年の食料安全保障確立対策整備交付金を皮切りに、食料安全保障に関わる施策が農林水産省を中心に次々と打たれてきた。2023年の食料安全保障強化政策大綱改定、2024年の食料・農業・農村基本法改正および食料供給困難事態対策法は、日本の食料安全保障政策を「平時からの構造転換」と「有事対応」の二つの側面から支える枠組みである。ウクライナ危機や資材価格高騰等により輸入依存リスクが顕在化したことを背景に、従来の「不測事態対策中心」から、平時を含む連続的なリスク管理へと政策の重心が移行している点がその特徴である。

食料安全保障強化政策大綱は、2022年策定後、2023年12月に改定され、過度な輸入依存からの脱却とサプライチェーン全体の強靱化を柱としている。小麦、大豆、飼料作物など海外依存の高い品目の国内生産の拡大、水田の汎用化、畑地化、米粉利用拡大、生産資材の国産化、耕畜連携や養殖飼料の国産化等を通じて、国内生産力の強化と調達多元化を同時に進める方向性が示された。また、スマート農水産業、買物難民対策、フードバンクや子ども食堂への支援などを通じて、国民の食料アクセス確保も食料安全保障の一要素として扱っている。

こうした法令を上位から規定するのが、2024年に改正された前述の食料・農業・農村基本法である。また、2024年に制定された食料供給困難事態対策法は、この基本法の理念を有事モードで具体化する危機管理法制である。気候変動や物流途絶等により国内供給が大幅に不足するリスクの増大を前提に、異常気象等の兆候段階から食料供給困難事態対策本部を設置し、重要品目の需給把握、事業者への報告徴収、立入検査、輸入拡大、生産拡大、出荷調整の要請及び計画届出の指示、必要に応じた計画変更指示や財政支援、最終的には生産転換や割当、配給までを段階的に発動し得る枠組みを規定している。

総じて、基本法改正が食料安全保障を農政の中核理念として条文上明確化し、強化政策大綱改定が輸入依存型からレジリエントな食料システムへの構造転換を平時の実行計画として示し、食料供給困難事態対策法が異常時における統合的な需給調整の法的手段を整備した構造となっている。この三層の組合せにより、日本の食料安全保障政策は、平時から不測時までを一体として扱うリスクガバナンス体制へ再編されつつあると言えよう。グローバルにおける食料安全保障と同様、日本が規定する食料安全保障は、食料の質に言及しているものの、供給により重点が置かれている点で一致する。

食料安全保障とは：日本における位置づけ

2024年、**食料・農業・農村基本法**改正。
 「食料安全保障」の言葉が盛り込まれ、その概念が明確化された。
 改正前は「食料の安定供給の確保」。

改正 食料・農業・農村基本法による
◆食料安全保障を支える三つの柱

- 食料の安定供給
- 不足時に備えた対応
- 食料安全保障に関わる状況の把握

◆食料の安定供給を支える三つの柱

食料の安定供給

国内の農業
生産の増大

安定的な
輸入

備蓄の活用

【近年の関連政策動向】

2020年 食料安全保障確立対策整備交付金

2022年 食料安全保障確立対策推進交付金
 食料安全保障平準化事業
 食品原材料調達安定化対策事業
 肥料価格高騰対策事業
 経済安全保障推進法施行（経産省）
 肥料を特定重要物資に指定（経産省）

2023年 国内肥料資源活用総合支援事業
 食品原材料調達リスク軽減対策事業
 畜産環境対策総合支援事業
食料安全保障強化政策大綱 改定
 飼料自給率向上緊急対策事業
 食品の安全確保推進研究推進事業（厚労省）

2024年 **食料・農業・農村基本法 改正**
食料供給困難事態対策法
 国産飼料増産対策補助金
 飼料穀物備蓄流通合理化事業

※黒字：農水省補助金事業

図 1-2 日本の食料安全保障を支える三つの柱と近年の法制度に関する動きのまとめ

2 | 日本と世界の食料供給

2.1 日本の食料供給構造

日本の食料供給は、国内生産による「自給」と海外からの「輸入」の二大要素によって成り立っている。現在、食料自給率は約40%前後で推移しており、残りの約60%は輸入に依存している（図2-1）。2.1では、自給と輸入の2項目に分けて日本の食料供給について解説し、世界の食料供給の安定については2.2で記載する。

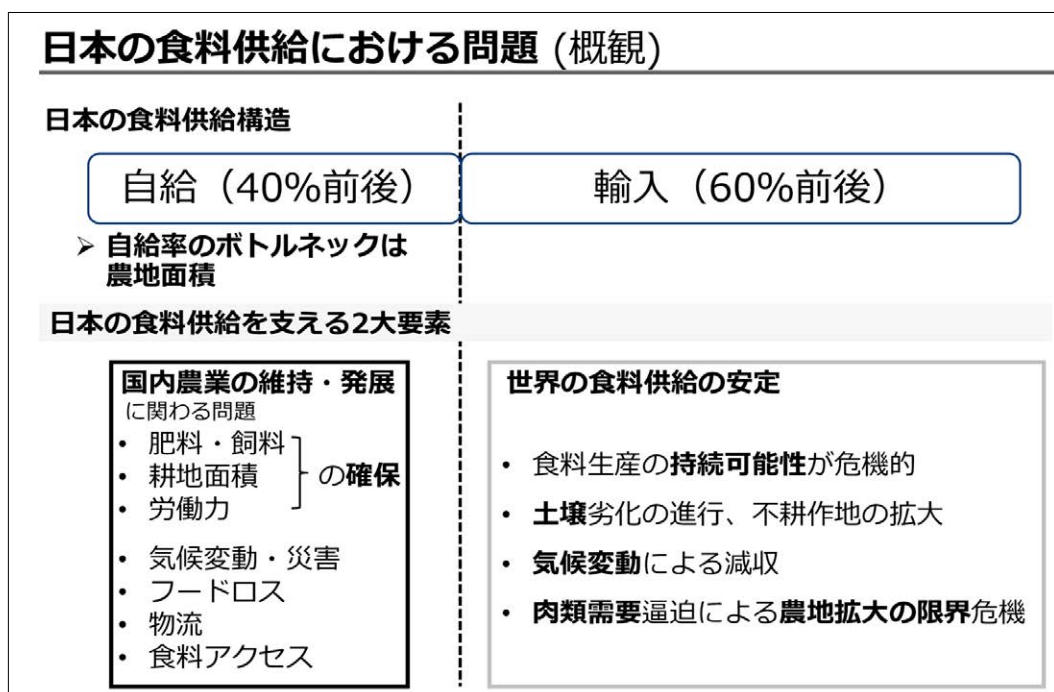


図2-1 日本の食料供給構造

日本の農業と水産業による食料の国内供給について、資材、生産、流通・消費に分けて概観する。資材の供給に関わる研究開発については、付録の「(B) 省資源生産」で事例を紹介する。

2.1.1 資材

資材の項目では、肥料、畜産飼料、農薬、農地を検討する。

【肥料】

作物栽培に必要な肥料成分は窒素、リン、カリウムであるが、そのほぼ全てを輸入しており、肥料自給率はほぼ0%である（図2-2）。

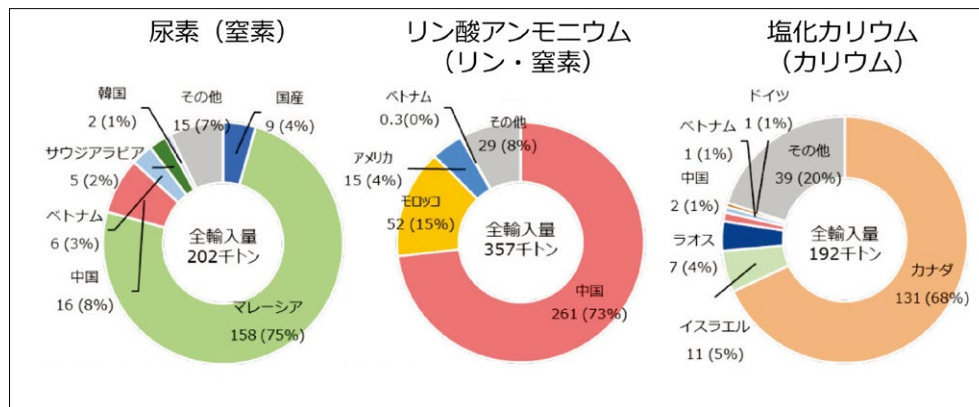


図2-2 化学肥料原料の輸入相手国と輸入量 (2023年7月～2024年6月)

(出典：農林水産省 「我が国の食料事情について」³⁾)

肥料原料の窒素は空気中の窒素分をアンモニアに変換するハーバー・ボッシュ法によって生産されるが、ハーバー・ボッシュ法では大量の石油エネルギーを消費するため、産油国や大規模施設で安価に製造できる国が主たる輸出国となっている。WITS 2023年データでは、中国、エジプト、サウジアラビア、オマーンの順に尿素の輸出量が多い。日本の尿素輸入はマレーシアからが75%を占める(図2-2)。日本がリン酸アンモニウムの形で輸入しているリンは、産業グレードで利用可能な高品位リン鉱石の分布が地球上の限られた地域に偏るため、世界の多くの国が輸入に依存する肥料分である。高品位リン鉱石はオーストラリア、モロッコ、中国、チュニジアなどに多くの埋蔵量があることが知られており、原鉱としての輸出量はモロッコ、ペルー、ロシア、エジプトなどが上位に入るが、肥料原料として利用されるリン酸アンモニウムの輸出国上位は、多い順にモロッコ、中国、サウジアラビア、米国となる。日本はリン酸アンモニウムの輸入量の約73%を中国から輸入している(図2-2)。塩化カリウムの形で輸入されるカリウムの原鉱石も、その存在量は地球上でかなり偏っており、主要な輸出国は多い順にカナダ、ドイツ、米国、ラオスとなっている(WITSデータ2023年)日本は約70%をカナダから輸入している(図2-2)。

このように、日本は肥料のほぼ全成分を輸入に頼っているが、リンは国内の埋蔵量が極めて少なく、カリウムはほぼ算出しないため、輸入以外の選択肢がない。リンについては1944年まで沖大東島(沖縄県)のラサ島鉱業所、1950年まで北大東島(沖縄県)リン鉱山でグアノ由来のリン鉱石の採掘が行われていたが、現在では国内で操業するリン鉱山は存在しない。なお、1979年の調査で沖大東島のリン鉱石の埋蔵量は350万トンと推定され、沖大東島は2025年現在もラサ工業が所有するが、米軍の射爆撃場として使用されている。窒素については原料が空気中の窒素であるため、論理的には国内生産も可能であるが、生産には大規模な設備投資が必要であり、輸入品に対して競争力のある価格で販売できるかどうかについて検討が必要である。2023年の米国農務省の記事⁴⁾によれば、2020年の全世界の肥料取引において、金額ベースでの輸出シェア1位はロシア(シェア13%)であり、ロシア、ベラルーシ、中国の金額ベースでの輸出シェアは合計で30%である。ウクライナ危機等の地政学リスクにより、2022年5月をピークに肥料価格は高騰したが、2023年3月までに、肥料輸出価格はウクライナ危機発生前の水準に戻った。しかし、リン鉱石の価格だけは緩慢な上昇を続けている⁴⁾。

【畜産飼料】

図2-3に示すように、畜産飼料全体の自給率は26%であり⁵⁾、特にトウモロコシ、大豆、飼料米が原料の濃厚飼料の自給率は13%である。2022年のデータでは、トウモロコシは主として米国とブラジルからの輸入となっている⁶⁾。大豆については、2002年から一貫して、日本は主として米国産大豆を輸入している。世界

の飼料作物の供給状況は、2002年から2022年までの間に大きく変わった。トウモロコシでは、米国産トウモロコシの最大の輸入国は2002年には日本だったが2022年には中国が米国産トウモロコシの最大の輸入国となった⁶⁾。大豆については、2002年には米国が全世界の輸出量シェア48%を占めていたが、2022年には輸出量シェア1位はブラジルで、およそ55%を占めるようになった⁶⁾。このように飼料作物のグローバルマーケットは激動しており、地政学リスクや気候変動などの影響も相まって、不安定な状況が続いている。飼料の将来的な安定供給のためには、世界の穀物の生産予測と流通予測が欠かせないが、こうした予測技術については付録・研究開発事例（A）で解説する。

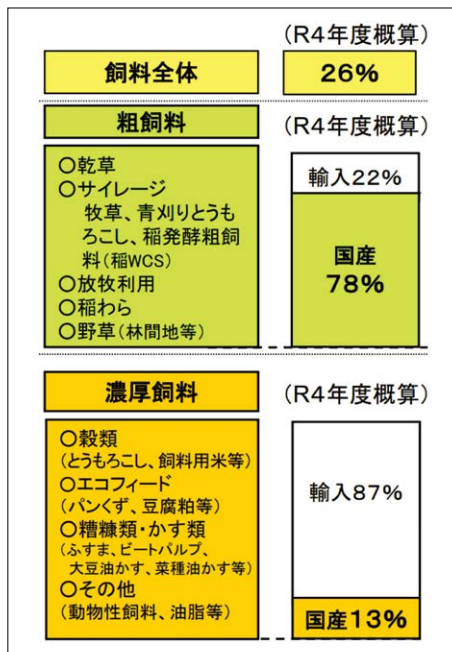


図2-3 飼料自給率の現状

(出典：農林水産省「飼料自給率の現状と目標」⁶⁾)

【農薬】

2023年度の農薬の国内出荷量は2.8万トンで、輸入量は1.7万トンであった。輸出货量は2.6万トンで、輸出と輸入の割合は均衡している⁷⁾。農薬の国内出荷量は作付面積の減少に伴い、2015年以降ではおおむね減少傾向である⁷⁾。

【農地面積】

日本の耕地面積（休耕地や作付け準備中の土地も含むが耕作放棄地は含まない）は2024年データで約427万ヘクタールだが、延べ栽培面積は386万ヘクタールで、耕地利用率は約90%であった⁸⁾（図2-4）。2024年11月の農林水産省資料⁹⁾によると、2030年にはコメ、麦、大豆などの栽培面積は34%、露地野菜は31%、施設野菜は28%、果樹は45%減少する見込みである（図2-5；2020年比）。

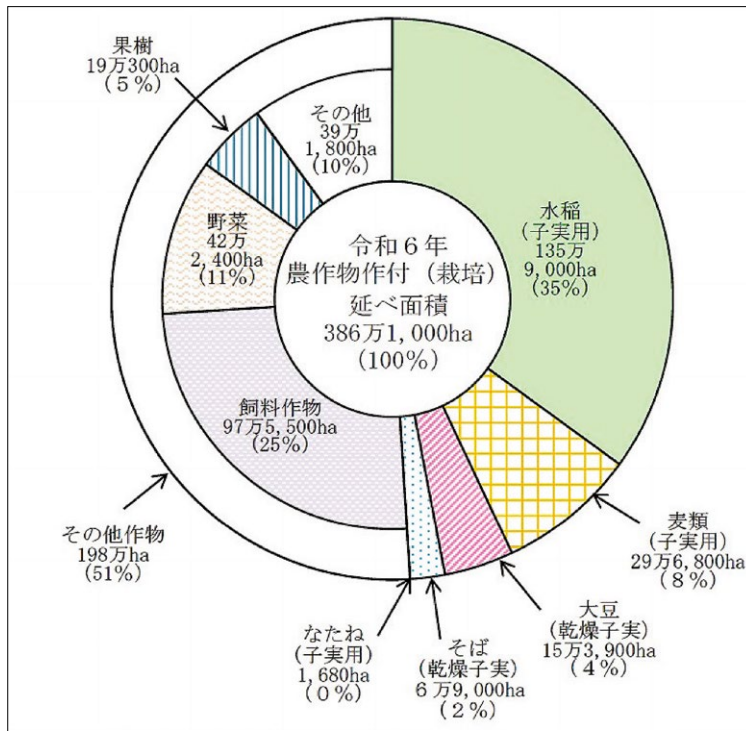


図2-4 2024年の日本の農地面積（栽培面積）

(出典：農林水産省「令和6年農作物作付（栽培）延べ面積及び耕地利用率」⁸⁾)

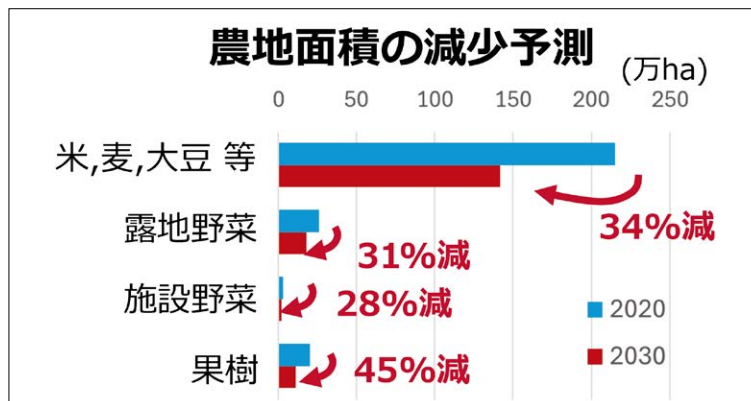


図2-5 2030年の日本の農地面積の減少予測

(出典：農林水産省「基本計画の策定に向けた検討の視点 我が国の食料供給（農地、人、技術）⁹⁾」をもとにCRDSで作成)

日本の国民一人当たりの農地面積は、人口が多く山間地が多い国情を反映して、諸外国と比較すると極めて狭く、スイスの約1/5である(図2-6)¹⁰⁾。現在の日本の食生活を維持し、主要な輸入農産物の生産を国内で賄おうとすると、現在の国内農地面積の3倍以上が必要になるとされている¹⁷⁾ ことと考え合わせると、日本の自給率の低さは、この一人当たり農地面積の狭さと密接に関係していると言える。

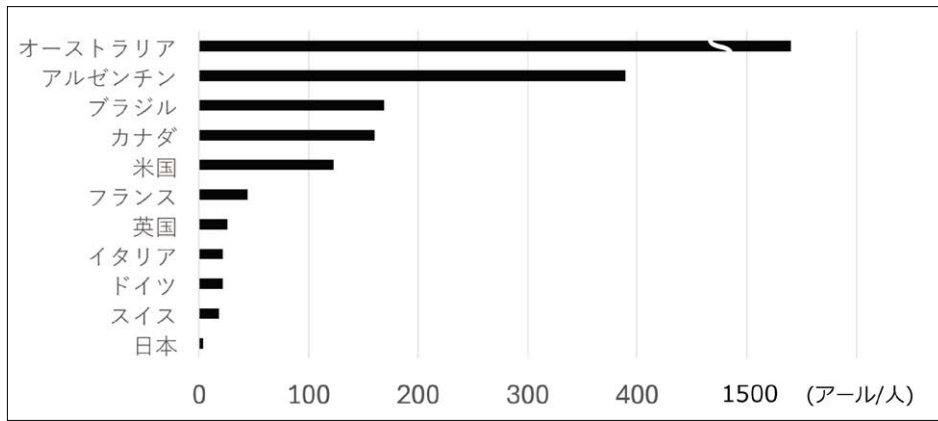


図2-6 人口一人当たりの農地面積比較
(出典：東北農政局資料¹⁰⁾をもとにCRDSで作成)

2.1.2 生産

生産については、一次産業従事者数と農水産物の生産量を検討する。

【一次産業従事者】

農林水産省データによると、2020年の基幹農業従事者数は約136万人で、2005年から約39%減少した。2024年11月に公表された農林水産省予測⁹⁾によると、2030年にはさらに大幅な減少が見込まれている(図2-7)。また、個人経営専業農家の収益は、2022年で362.9万円と報告されており¹¹⁾、事業収益が小さく、経営の持続性に課題があることが指摘されている。収益性の低さは、新規就農者の減少や後継者不足の一因となり、国内の農業生産の維持における大きな課題である。

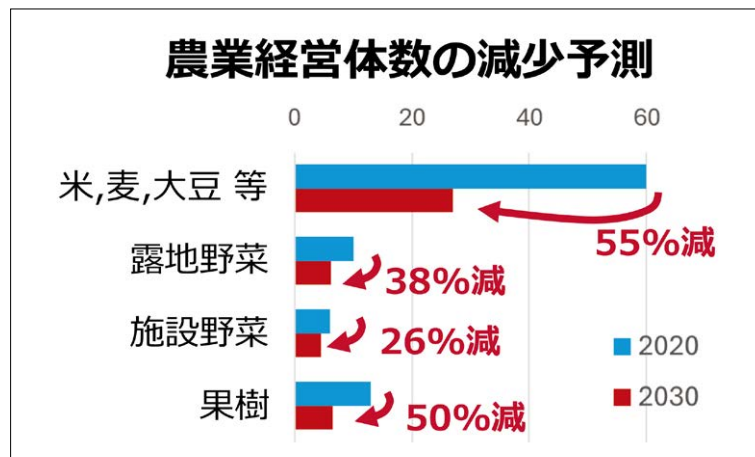


図2-7 2030年の農業従事者の減少予測
(出典：農林水産省「基本計画の策定に向けた検討の視点 我が国の食料供給(農地、人、技術)⁹⁾」をもとにCRDSで作成)

漁業従事者も継続的に減少しており、2020年には約13.6万人で、2003年と比較して42%の減少であった⁹⁾。

【農産物生産量】

2023年から高騰が著しいコメの生産量のデータ（図2-8）を見ると、2021年以降の作況指数は100以上を維持しており、生育不良ではなかった。玄米重量で見ると2017年以降、コメの生産量は緩やかな減産傾向にあり、2017年と比較すると2023年の玄米生産量は60万トン程度少なかった。この間、最も減産量が大きかったのは新潟県で、約7.5万トン減産した。2018年度に国の減反政策は終了したが、農林水産省による「主食用米等の需給見通し」が毎年発表される他、各都道府県が独自に生産量を決定したり、飼料米や大豆・麦類などの栽培に補助金が交付されたりなど、実質的にはコメの減産が推進されてきたと言える。2018年以降の作物統計データを見る限り、全国の主食用のコメの生産量は、この農林水産省の「需給見通し」で示された数値よりも多い。2025年現在、主食用米の流通は極めて複雑化しており、生産者が大規模集荷業者である農業協同組合に出荷する他にも、小売業者との直接契約や地方創生応援税制（ふるさと納税）の返礼品としての流通、食品加工業者との直接契約など多岐にわたっている¹²⁾。主食用米は年間を通じて順次精米されて出荷され、民間在庫量の変動によって小売価格も変動する。災害や気候変動等による精米ベースでの供給量の変化、小麦の輸入価格との比較による割安感や割高感、外国人観光客の増減など、様々な要因によって主食用米の価格は変動する¹²⁾。主食用米を主として国内だけで消費するとの前提で、過不足なくほぼ自給だけで安定して賄うには、あらゆる事態を見越した精密な生産計画を立てる必要があると言える。

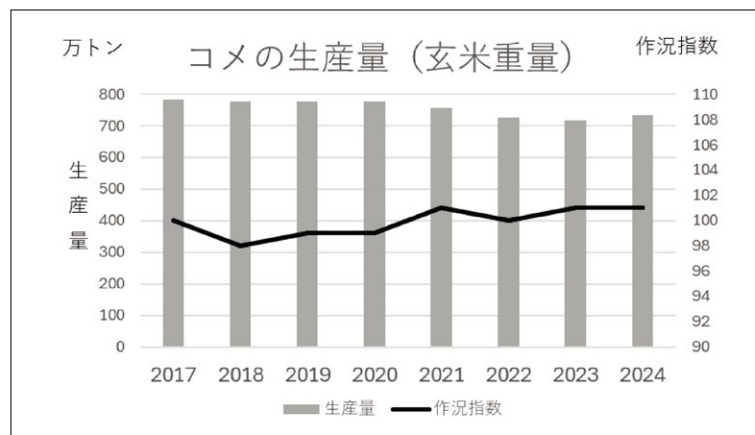


図2-8 コメ（玄米重量）の生産量推移

（出典：農林水産省 作物統計のデータをもとにCRDSで作成）

また、国土交通省資料¹³⁾によれば、1980年代と比べると、土砂災害の発生件数は着実に増加しており、干ばつや猛暑と合わせ、農産物への影響は今後より拡大していくと考えられる。水稻では猛暑によって米粒が白濁する白未熟粒の発生が顕著になっており、2000年代以降、西日本を中心に白未熟粒を含まない1等米比率が、県によっては0%となる品種も出現した¹⁴⁾。白未熟粒は精米時に欠けや割れの原因ともなり、精米後の歩留まりを下げることから、精米の流通量を減少させるという影響もあった¹²⁾。このように、農産物生産量は気候変動による負の影響を受けている。

生産量予測に関する研究開発事例については、付録「(A) 予測・評価のデータ科学」でその事例を紹介する。

2.1.3 流通・消費

流通・消費の項目では資材・農産物価格、運送業従事者数、食生活と食料自給率の変化を取り上げる。

【資材・農産物価格】

地政学リスクによって肥料などに輸出制限がかかり、2022年から生産資材価格が高騰したが、2023年5月以降、価格は下落傾向にある（図2-9）¹⁵⁾。しかし、2022年以前の価格まで下落するかどうかは不透明である。一方で、2022～2023年にかけて主要な食品メーカー195社において月間2千品目超の食品価格の値上げが常態化し、「値上げラッシュ」が続いたが、2024年からは値上げする食品の品目数が6割程度減少し、食品価格の値上げは一段落しつつある¹⁶⁾。一方で、生産資材価格の高騰は、十分に農産物価格に反映されているとは言えず（図2-9）¹⁵⁾、生産者の経営を圧迫している可能性がある。

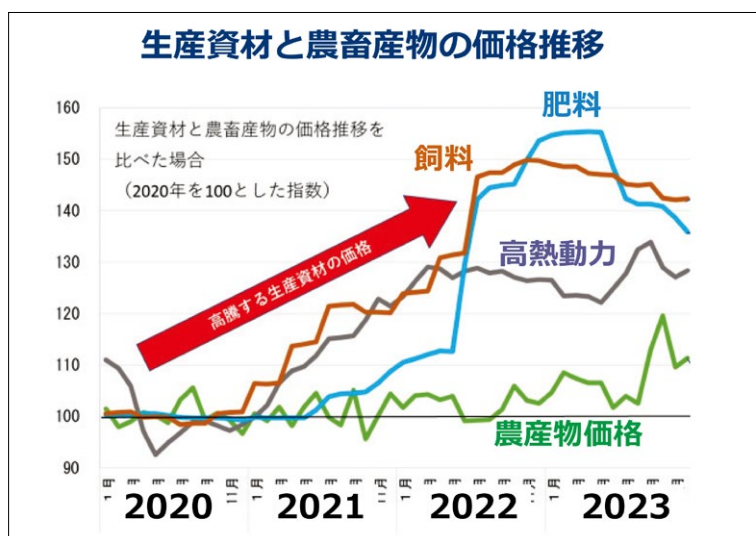


図2-9 生産資材価格と農畜産物の価格推移
 (出典：鹿児島県ウェブサイト¹⁵⁾に掲載のグラフにCRDSで加筆)

【運送業従事者数】

食料の安定供給のためには、効率的で強靱な流通システムも重要である。日本では、物流を支える従事者の減少が進んでおり¹⁷⁾、食料品を含む物資の輸送に影響を与える可能性がある。また、全国的に、食料品店へのアクセスが困難な「買い物難民」が存在し、地域住民の食料アクセスに制約が生じている。2024年度において、食料品の買物が不便・困難な住民に対する行政による対策が必要な市町村は、88.1%にのぼり、そのうち、行政による対策を実施している市町村の割合は75.5%であった¹⁸⁾。

【食生活と食料自給率の変化】

1965年には73%あった食料自給率は、2024年には38%まで減少した³⁾（図2-10）。この背景には、国民の食生活の劇的な変化がある。具体的には、1965年から2024年の間に、コメの1人当たり消費量が50%以上減少した一方で、肉類は3.7倍、油脂は2.2倍に増加した³⁾。一方、この間、一人当たりの小麦消費量はほぼ変化していない。

現在の日本の食生活を維持し、主要な輸入農産物の生産を国内で賄おうとすると、現在の国内農地面積の3倍以上が必要になるとされており¹⁹⁾、これは現実的にはほぼ不可能な数値であると考えられる。図2-6でも

示したように、我が国の食料供給構造における主要なボトルネックの一つは、農地面積の制約であると言える。日本は国土の多くが中山間地であり、大規模な農地拡大には限界がある。

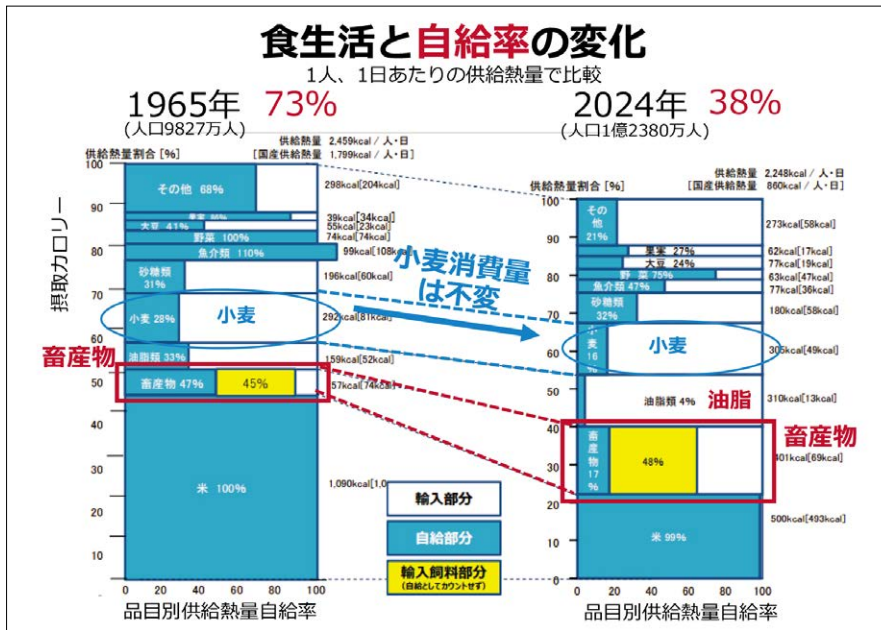


図 2-10 1965年と2024年の食料消費構造の比較
(出典：農林水産省「我が国の食料事情について」³⁾ をもとにCRDSで加筆)

2.2 世界の食料供給

人類の活動、特に食料生産が地球環境に与える負荷は、「プラネタリーバウンダリー（地球の限界）」の多くの指標で限界に達していると指摘されている²⁰⁾。これは、人類が食料供給を維持できるかどうかの瀬戸際の問題であり、「地球にやさしい食料生産」というレベルを超えた、人類の生存基盤に関わる課題となっている。

プラネタリーバウンダリーとは、地球のシステムが安全に機能するために守るべき環境限界値を示す概念であり、食料生産はこれを押し上げる主要な要因の一つである。食料システムは世界の温室効果ガス排出量の約3分の1を占めており²¹⁾、農地拡大や大規模農業の実施、農業機械の使用などが排出源となっている。肥料の過剰な使用や漏出はリンや窒素の物質循環を大きく攪乱し、水質汚染や海洋生態系への影響を引き起こしている。さらに、農地の拡大や農薬の使用は生物多様性の減少に寄与し、森林伐採を伴う農地拡大は土地利用の変化を通じて生物多様性の喪失や炭素吸収源の減少をもたらしている。2025年現在、地球上の居住可能地の約半分にあたる41%が農業に利用されており、その大部分が家畜生産に関連していることも報告されている²²⁾。加えて、農業用水の大量消費は淡水資源の枯渇の一因となり、農薬やマイクロプラスチックといった新規物質による汚染も環境負荷として問題視されている。食料システムは環境に影響を与える大きな要因であることが報告され²²⁾、人口増加に伴って2010年から2050年の間に食料生産による環境負荷は50～90%増加すると予測されており²³⁾、これらの結果は現在の食料生産が持続可能ではないことを示している。

以下、農業の持続可能性危機についていくつかの例を挙げる。

【土壌劣化と不耕作地の拡大】

人類の活動による土壌劣化と不耕作地の拡大は、世界の食料供給の持続可能性に影響を及ぼしている。土

壤劣化の主な原因には過密放牧、森林伐採、不適切な農地管理があり、これらの要因によって土壌は侵食され、肥沃度が低下し、生産能力が損なわれている。土壌劣化は世界各地で広範囲に進行しており、一部の地域では植物の生産量が50%以上低下する状態に達している²⁴⁾。また、土壌劣化は農地の放棄を伴う不耕作地の拡大にもつながっており、その背景には食料アクセスの不良や農家収入の低迷といった複合的な要因が存在する²⁵⁾。劣化した土地は作物の生産に適さなくなり、結果として食料供給の基盤を一層弱める要因となっている。

【気候変動による収穫量減少】

気候変動は、世界の農業生産に大きな影響を与え、将来の食料供給を不安定化させる要因となっている。NASAのウェブサイトに掲載された研究²⁶⁾によると、気候変動により世界の収穫量は減少すると予測されている。特に穀類の大規模生産地では、一部で40%減という大幅な収穫量減少が予測される一方で、地域によっては40%増の予測も出ており、地域差が大きくなる可能性がある。このような生産量の不安定化は、食料価格の高騰や供給不安を引き起こし、世界的な食料安全保障を脅かすことになる。

各国は、気候変動対策と食料生産の持続可能性向上を目指した施策を進めている。例えば、日本では「みどりの食料システム戦略」(農林水産省)が推進されており、欧州では「Farm to Fork」戦略が掲げられている。これらの戦略は、温室効果ガス排出削減、農薬・化学肥料削減、フードロス削減、持続可能食品の普及、そして技術開発・社会受容の推進を目標としている。また、持続可能な農業に関するグローバル規格として、ISCC (国際持続可能性カーボン認証) やSAI Platform (食品メーカーによる持続可能性認証)、GAP (持続可能な農業に関する認証) などが普及し、生産から消費までのフードチェーン全体で持続可能性の向上が図られている。

【増大する肉類需要と地球環境への影響】

世界の食料供給の持続可能性に影響を与える要因の一つとして肉類需要の急増が挙げられる。FAOのデータによれば、世界の肉類消費量は1990年から2020年の間に2倍以上に増加しており²⁷⁾、この間の世界人口増加が1.47倍にとどまっていることから、1人当たりの肉類消費量が大幅に増加していることがわかる。日本においても肉類消費は増加傾向にあり、この世界的傾向と同様である。肉類生産、特に牛肉生産には大量の穀物飼料が必要であり、そのための農地拡大が世界各地で進められている。現在、地球上の居住可能地のおよそ40%が農業に利用されており、そのうちの84%は家畜用農地であるとされる²²⁾。こうした農地拡大は森林伐採を伴うことが多く、温室効果ガス排出量の増加、生物多様性の喪失、土壌劣化など地球環境への大きな負荷をもたらしている。さらに、農薬や化学肥料の使用を削減する取り組みが進んだとしても、肉類需要の増加に伴う農地拡大を回避することは難しいという構造的な問題が存在する。これは、日本の食料自給率の低さの一因である「肉類消費増による飼料穀物輸入増」と、世界的に見られる「肉類消費増に伴う農地拡大と地球環境制約」とが同じ構造に根差していることを示しており、食の持続可能性向上のためには、世界の食料生産システムの根本的な変革が必要であることを示唆している。

以上、日本の食料供給を支える課題を、自給部分と輸入部分に分けてまとめると図2-11のようになる。自給率向上のボトルネックは農地面積の制約であり、少ない農地面積を最大限に活用する、国内農業の維持と発展が重要な課題である。約60%を占める輸入分を安定して調達するには、世界の食料供給の安定が不可欠であり、そのためには農業の持続可能性や気候変動、肉類需要の継続的な拡大などが問題となる。

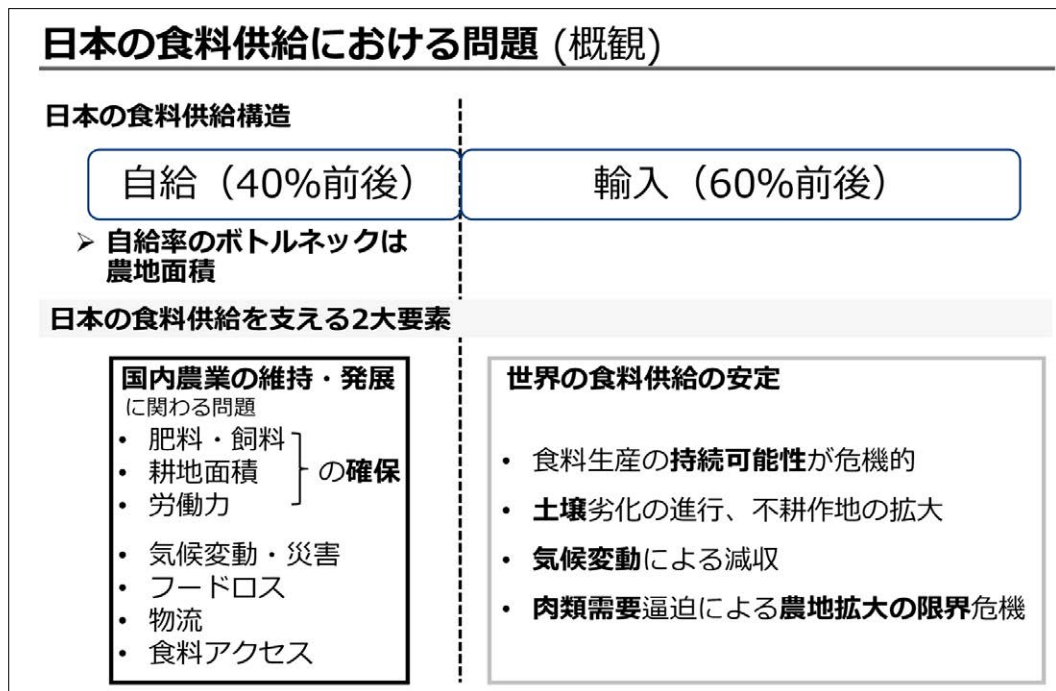


図2-11 日本の食料供給における問題の整理（図2-1を再掲）

3 | 食料安全保障と栄養安全保障

3.1 穀物大量供給の限界と栄養バランスの重要性

1960年代の緑の革命以降、食料安全保障の初期の定義は主に穀物の大量供給を指し、飢餓やカロリー不足といった課題への対応として一定の効果を持っていたが、次第にその限界が明らかになった。カロリーが充足していてもタンパク質やその他の必須栄養素が不足すれば健康は維持されず²⁸⁾、例えばカロリーが足りているにもかかわらずタンパク質不足によって生じる、クワシオルコルと呼ばれる腹水貯留の症状が知られている²⁹⁾。この認識を踏まえ、食料安全保障の概念は穀物の量的確保から、健康維持に必要な栄養バランスの取れた食料供給を意味する「栄養安全保障」へと転換が進みつつある²⁸⁾。この新しい概念では「何をどれだけ供給すべきか」という問いが重視され、ヒトの健康維持に必要な栄養と食生活を具体的に把握するための研究開発が世界各地で進められている。例えば17万人以上を対象にウェブベースで10年間追跡し食生活と疾病の関連を大規模に調査する研究などが行われている³⁰⁾。ヒトの健康維持に必要な栄養と食生活に関する研究開発については、JST CRDS 戦略プロポーザル「次世代型食・栄養研究」³⁰⁾を参照されたい。

3.2 持続可能な食料供給に向けた「食の変容」の提言

栄養安全保障の実現、そして地球環境の持続可能性を両立させるためには、現在の食料システム、特に食のあり方そのものに「変容」が必要であるとの提言が国際的に活発化している。

2019年頃から、地球環境の持続可能性とヒトの健康を両立する食について、国際的な議論が活発化し、多くの国際機関や欧州を中心に指針・提言が出されるようになった。その主要な動向を以下に示す。

- 2019年1月、EAT-Lancet財団はFood Planet Health Healthy Diets From Sustainable Food Systemsと題する画期的な報告書を公表し、持続可能な食料システムに適合した推奨食事摂取量を提言した。先進国は肉類摂取を削減すべきである、との指摘がある³¹⁾。
- 2019年7月、FAO/世界保健機関（WHO）はSustainable healthy diets-Guiding principles（持続可能で健康的な食事に関する指針）を発表した³²⁾。
- 2019年8月、気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC）は気候変動と土地に関する報告書の中で、バランスの取れた食事はヒトの健康と気候変動の緩和を実現すると提言した³³⁾。
- 2019年9月、国連は持続可能な開発に関するグローバル・レポートにおいて、6つの重要なエントリポイントのうちの1つとして、持続可能な食料システムと健康的な栄養パターンの構築を挙げた³⁴⁾。
- 2020年5月、欧州委員会はFarm to Fork戦略を策定し、健康と環境に配慮したアクションプランを提示した³⁵⁾。
- 2020年10月、欧州委員会はFood 2030 Pathways for Actionにおいて、持続可能で健康的でインクルーシブな食料システムをドライブする研究イノベーション政策を示した³⁶⁾。
- 2021年9月、国連は国連食料システムサミットを開催し、5つのテーマのうちの1つとして、食料消費の持続可能性（健康的な食事）を掲げた³⁷⁾。
- 2023年12月、国連気候変動枠組条約締約国会議（COP28）において、FAOが食料システム脱炭素ロー

ドマップを提示し、2050年までに全ての人が健康的な食事をとることを目標とし、環境に配慮した食事ガイドライン改定などの行動指針を示した³⁸⁾。

これらの動きは、食料問題が単なる生産量や飢餓のレベルを超え、地球の持続可能性と人類の健康という二つの極めて重要な課題に直結しているという共通認識が国際社会で形成されていることを示している。

2019年のEAT-Lancet委員会による提言³¹⁾は、持続可能な食料システムに適した食事内容として、各国の食事摂取量との比較を通じて具体的な推奨量を示した。この提言の主なポイントは、先進国における肉類摂取量の削減である。例えば、2017年度のデータによると、米国や英国の1人1日当たりの牛肉・豚肉摂取量がそれぞれ185g、128gであるのに対し、EAT-Lancetの推奨量はわずか14gである。鶏肉についても、米国153g、英国88gに対し、推奨量は29gと大幅な削減が提言されている。一方、豆類やナッツ類はEAT-Lancetの推奨量が各国の摂取量よりも高い傾向にあり、植物性タンパク質の重要性が示唆されている³¹⁾。

このような比較は、欧米を中心とする先進国が肉類を過剰に摂取している現状と、持続可能性を優先する食生活への変容の必要性を明確に提示している。日本の肉類消費も増加傾向にあるため、この提言は日本にとっても無関係ではない。

3.3 持続可能な栄養安全保障実現へのアプローチ

持続可能な栄養安全保障を実現するためには、健康で持続可能な食への変容が不可欠である。このためには、科学技術の進展と人文・社会科学の貢献という多角的なアプローチが必要である。

【科学技術の貢献】

科学技術の進展により、食料システムの持続可能性向上を介してグローバルスケールでの栄養安全保障に大きく貢献することができる。短期的、長期的観点の視座から、必要な研究開発課題を整理すると図3-1のようにあらわすことができる。

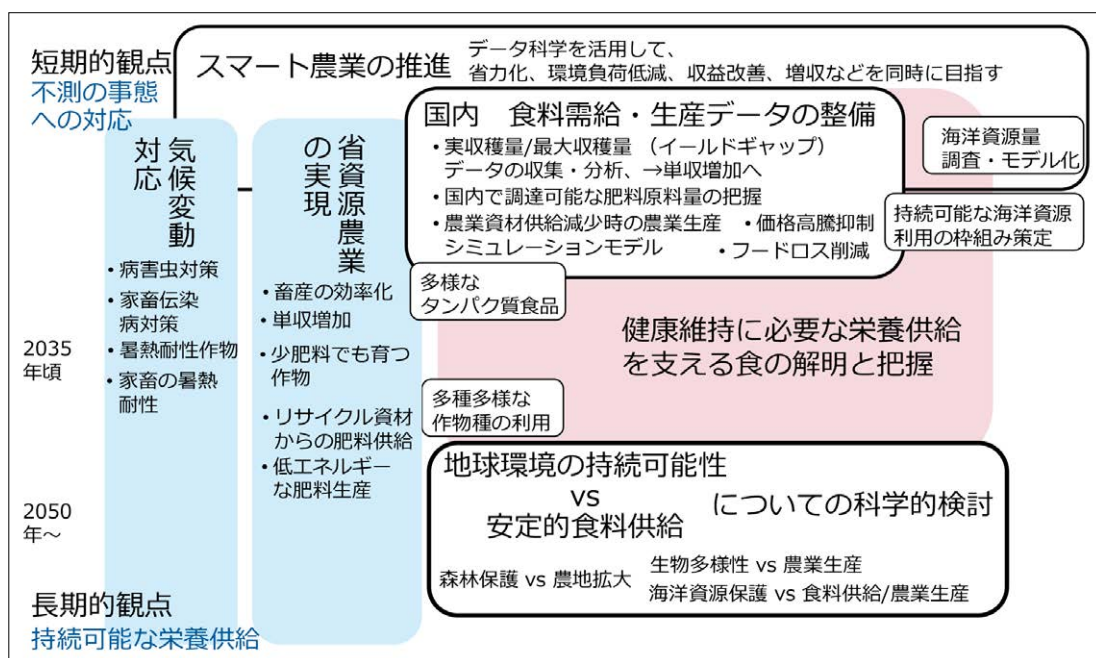


図3-1 食料安全保障、栄養安全保障に貢献すると考えられる技術課題の整理

【人文・社会科学の貢献】

「食」は、ヒトの健康だけでなく、文化的、社会的、宗教的な側面を強く持つ極めて個人的な事柄である。このため、単に科学技術の進歩や政府による上意下達の政策決定方式だけでは、人類全体の「食の変容」を促すことは難しいと考えられる。そこで、人文・社会科学的なアプローチとして以下のような研究開発が必要だと考えられる。

- 市民参加型政策決定の模索：食の変容を社会全体で進めるためには、人々の食に対する意識や行動、価値観を理解し、尊重することが不可欠である。市民参加型の政策決定を模索するための基盤として、人文・社会科学の研究が重要な役割を担う。食の変容に関する人文・社会科学の最近の動向については、JST CRDSワークショップ報告書「2050年の持続可能な食・栄養へのシナリオと社会の合意形成 ～人文・社会科学からのアプローチ」³⁹⁾を参照されたい。
- 文化・社会・行動変容の研究：食文化の多様性を踏まえつつ、より持続可能で健康的な食生活への行動変容を促すための効果的なコミュニケーション戦略や、社会制度の設計においては、人文・社会科学からの貢献が重要である。

このように、持続可能な栄養安全保障の実現は、科学技術が提供する選択肢と、人文・社会科学の提供する社会受容と行動変容の道筋が両輪となって進められるべき複合的な課題であると言える。

以上、科学技術と人文・社会科学が両輪となって進めるべき、持続可能な栄養安全保障への移行についてまとめると、図3-2のようになる。

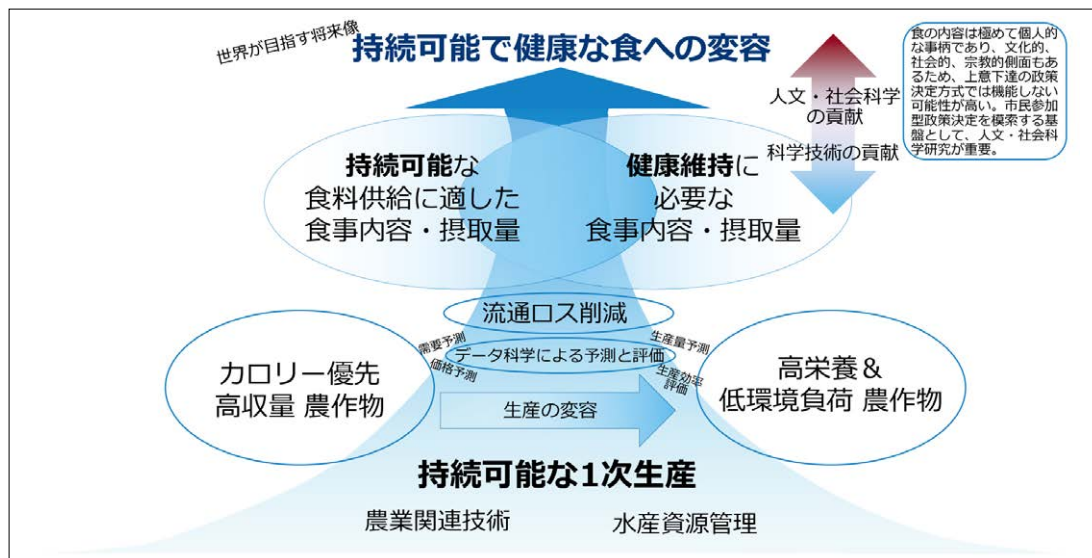


図3-2 持続可能な食料生産を基盤とした健康に資する持続可能な食への変容（図iiを再掲）

4 | 日本とグローバルの食料安全保障に関わる課題

日本の食料安全保障は、グローバルな問題と共通する部分が多い一方で、その低い自給率と輸入依存度の高さゆえに、世界情勢の影響を受けやすい。日本とグローバルの食料安全保障に関わる課題は、図4-1のように整理することが出来る。

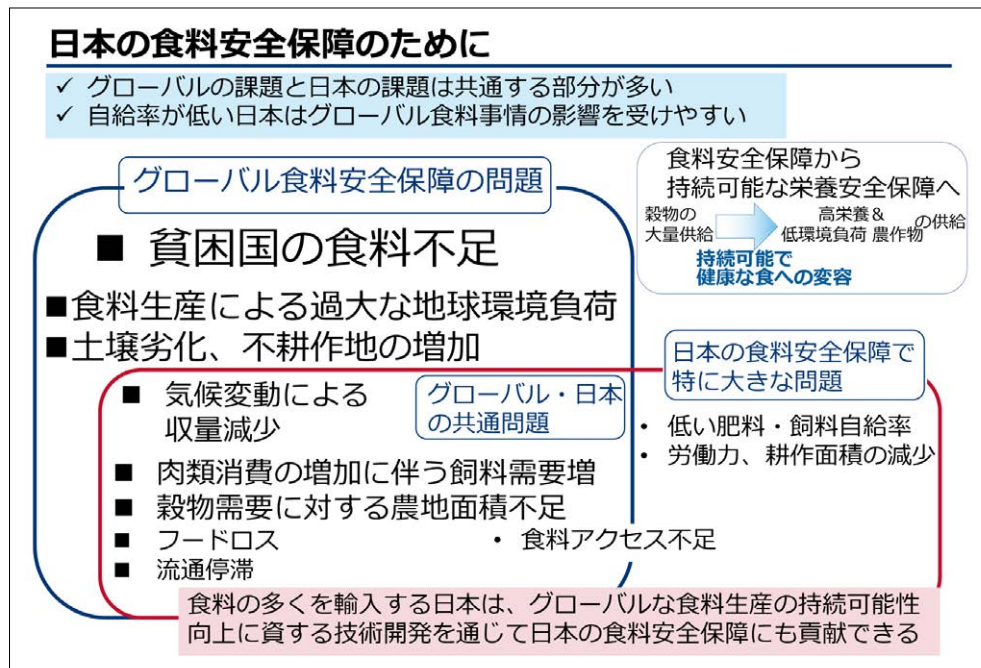


図4-1 日本とグローバルの食料安全保障に関わる問題の整理

第3章で述べたように、安定的な栄養供給を実現するためには、持続可能で健康な食への変容の推進が必要であるが、ここで、過去の人類の食の変容と科学技術の進展について振り返ってみたい。

人類は、過去数百年の間に既に2回の大規模な「食の変容」を経験しており（図4-2）、持続可能な栄養安全保障の実現のためには、もう一度「食の変容」を起こす必要があると言える。食料生産に関する研究開発の歴史は長く、日本もその中で重要な貢献をしてきた。

4.1 食の変容と技術開発の歴史

人類の食の変遷と食料生産に関わる研究開発の歴史について図4-2にまとめた。16世紀後半、アメリカ大陸からの新種の作物が欧州に流入し、世界に普及して大規模な食の変容①が起きた。この時流入した作物は、トウモロコシ、ジャガイモ、トマトなどである。19世紀、アイルランドでジャガイモ疫病が大流行し、ジャガイモは壊滅的な不作となり、100万人が死亡したと言われている。この食料危機により、単一作物への依存の脆弱性が認識されることとなった。

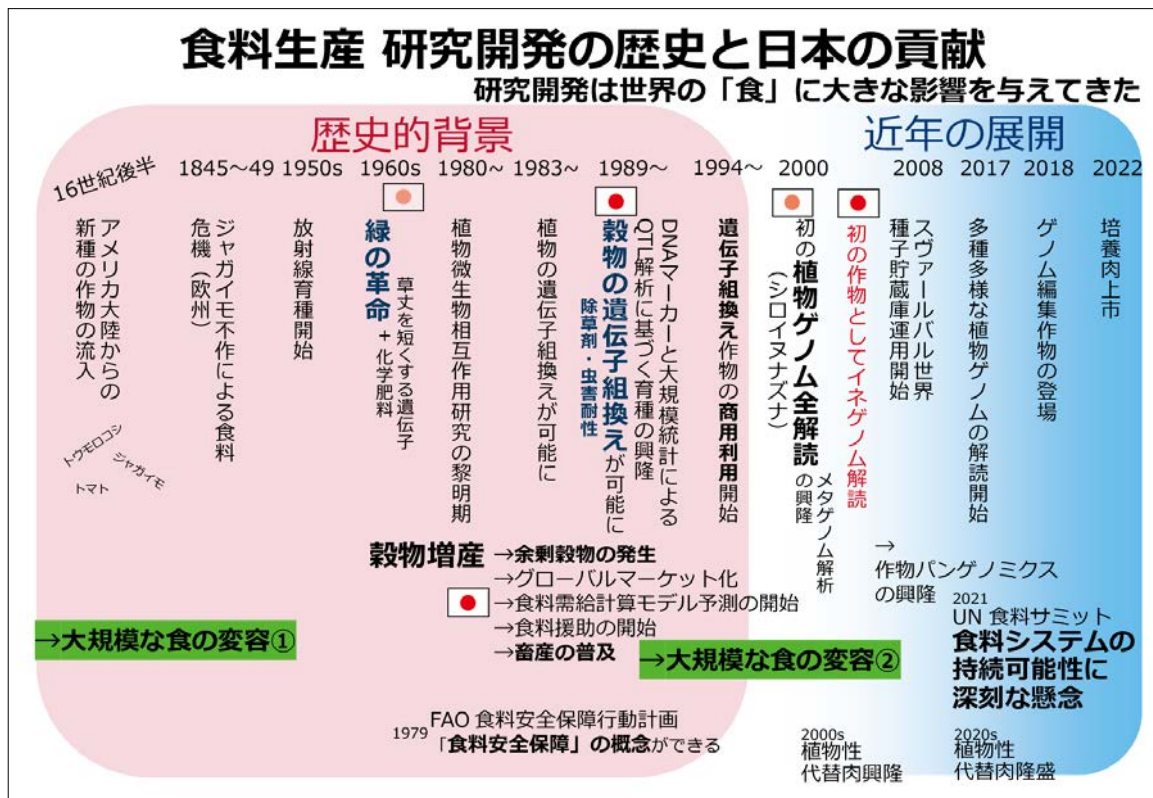


図4-2 食の変容、食料生産に関わる研究開発の歴史と日本の貢献

放射線育種の歴史は古く、第二次世界大戦終結後の1950年代に開始され、作物の品種改良の新たな道が開かれた。

1960年代になると、「緑の革命」が世界的な穀物大增産をもたらした。その背景は、日本の農林10号由来の草丈を低くする遺伝資源と化学肥料の組み合わせにより、メキシコから全世界に穀物が増産され、余剰穀物の発生、グローバルマーケット化、畜産の普及、食料援助の開始など、大規模な食の変容②が起こった。

グローバルマーケット化した食料の需給については、グローバルな需給予想を可能にする経済モデルが1970年代から開発され、現在でも改良を続けながら活用されている。1970年代に日本の農林省の大賀らが日本で開発した世界食料需給モデル (World Basic Food: WBF) は、その後1979年の世界コメモデル、新WBF (1982年) へと発展し、大賀、杉原、小山らがFAOに在籍していた1993年のWorld Food Model (WFM) 構築へと継承された⁴⁰⁾。その後、WFMは経済協力開発機構 (The Organisation for Economic Co-operation and Development: OECD) とFAOが共同で開発したAGLINK-COSIMOモデルに統合された。つまり、FAOの世界食料モデルの系譜には日本発のWBF系モデルが深く組み込まれており、日本発の世界食料需給モデルは国際的な基盤を築いたと言える。

1979年、FAOによる食料安全保障行動計画が策定され、「食料安全保障」の概念が誕生した。

1980年ごろから、植物微生物相互作用研究の黎明期を迎え、メタゲノム解析の興隆にも繋がった。

1983年には植物の遺伝子組み換えが可能になり、穀物増産に寄与した。当初は単子葉植物の遺伝子組み換えが困難であったが、日本たばこ産業がイネ科の遺伝子組み換え技術を開発し、モンサントなどの海外大手種苗会社がこの技術を利用して遺伝子組み換えトウモロコシ (イネ科) を開発し、巨利を得ることとなった。

1989年ごろから、DNAマーカーと大規模統計による量的形質遺伝子座 (Quantitative Trait Loci: QTL) 解析に基づく育種が興隆した。1994年には、遺伝子組み換え作物の商業利用が開始され、除草剤・虫害耐性作物が普及した。1996年に日米欧合同で開始したシロイヌナズナの全ゲノム解読プロジェクトは、2000年に初の植物ゲノム全解読を達成した。千葉県予算でかずさDNA研究所のチームが解読した部分は

極めて高解像度でエラーが少なく、ここで培われた技術力は、後の様々な生物種の高度なゲノム解読技術として活かされた。

2008年にはノルウェーの北極圏に近い場所であるスヴァールバルで、気候変動、自然災害、戦争などによる植物の絶滅に備え、世界中の農作物の種子を永久凍土の地下に保管する施設、世界種子貯蔵庫の運用が開始され、作物遺伝資源の保全が進む。

2017年ごろから、多種多様な植物ゲノム解読の報告が急増し、2021年頃からの作物パンゲノミクス研究開発の興隆に繋がった。作物パンゲノミクスは、作物ゲノム進化や害虫・作物病とのゲノム共進化を辿り、農業上有用な遺伝子を近縁種から探して活用する学問領域であり、先端交配技術を駆使することで遺伝子組み換えでない有用品種の作出につながると注目度が高い。

2018年には初のゲノム編集作物が開発され、2021年から市場で流通するようになった。

2021年の国連食料システムサミットにおいて、食料システムの持続可能性に深刻な懸念が示された。2022年には、培養肉がシンガポールで初めて上市されるなど、代替食品の開発が進んでいる。

上記の歴史を振り返ると、日本は食料生産の研究開発において、世界に重要な貢献をしてきたと言える。

- 遺伝資源と育種技術：緑の革命のきっかけとなった草丈を低くするイネの遺伝資源は、日本の小麦品種、農林10号である。これは、世界の穀物増産に直接的に貢献した。
- イネ科植物の遺伝子組み換え技術：日本たばこ産業によるイネ科植物の遺伝子組み換え技術の開発は、その後のトウモロコシなどの遺伝子組み換え作物の開発に不可欠な基盤技術となり、世界の穀物生産に大きな影響を与えた。
- ゲノム解読技術：モデル植物シロイヌナズナのゲノム解読における、かずさDNA研究所チームの貢献は、高解像度なゲノム情報を取得する技術力を培い、その後の高度なゲノム科学の発展に繋がった。
- 経済計算モデル：1970年代に日本で開発された農産物の未来の需要量、供給量、流通経路、価格等を計算予測するマクロ経済学ベースの統計モデルは、現在もFAO、OECDにおいて運用されている需給モデルの基礎として活用されている。

このように、歴史的に日本は遺伝資源の探索と育種技術、そして基礎的な科学技術開発で世界の食料事情の改善に貢献してきた。食料の多くを輸入する日本は、今後もグローバルな食料生産の持続可能性に対し、積極的に研究開発で貢献していく必要がある。バイオテクノロジーを駆使した高栄養かつ低環境負荷な農作物や代替食品の開発は、その重要な方向性の一つである。

4.2 まとめと今後の展望

本報告書では、食料安全保障が直面する現代的課題を、日本の食料供給の現状、世界の食料供給が抱える持続可能性の危機、そして食料安全保障から栄養安全保障への概念的転換という多角的な視点から分析した。

主要な論点としては、以下の点が挙げられる。

- 日本の食料自給率が低い理由は、主に肉類消費の増加に伴い、国内農地では賄えない量の穀類の輸入が必要になったからである。
- 輸入依存度が高い日本にとって、世界の食料生産の持続可能性は極めて重大な問題である。
- 世界の食料生産は、地球環境汚染、肉類消費の増加による農地の拡大、気候変動により持続可能性の危機に瀕している。
- 先進国を中心に、世界の食を持続可能にするために、畜産物消費を抑え、持続可能で健康的な食への

変容が試みられている。

- 科学技術は食料生産の持続可能性向上に貢献することができる。
- 歴史的に、日本は遺伝資源の探索と育種技術で世界の食料事情の改善に貢献してきた。
- バイオテクノロジーを駆使した、培養肉や植物性代替食品といった農産物の代替生産方法の開発が脚光を浴びている。

人類はこれまでに二度の大規模な「食の変容」を経験してきた。現在、我々は地球環境の限界と栄養バランスの課題に直面し、持続可能な栄養安全保障を実現するために、三度目の「食の変容」が求められる時代にいる。この変容は、高栄養かつ低環境負荷な農作物の開発、流通ロス削減、代替生産方法の革新といった科学技術の力だけでなく、食が持つ文化的・社会的側面を考慮し、市民参加型の政策決定を促す人文・社会科学の貢献が不可欠である。

食料の多くを輸入に依存する日本は、グローバルな食料システムの変化に強い影響を受ける立場にある。そのため、国内の農業基盤を強化しつつ、国際社会と連携し、持続可能な食料システムへの転換を積極的に推進することが求められる。これまでの日本の研究開発の知見と経験を活かし、未来の食料安全保障、ひいては栄養安全保障の確立に向けて、多方面からの取り組みを加速させていく必要がある。

参考文献

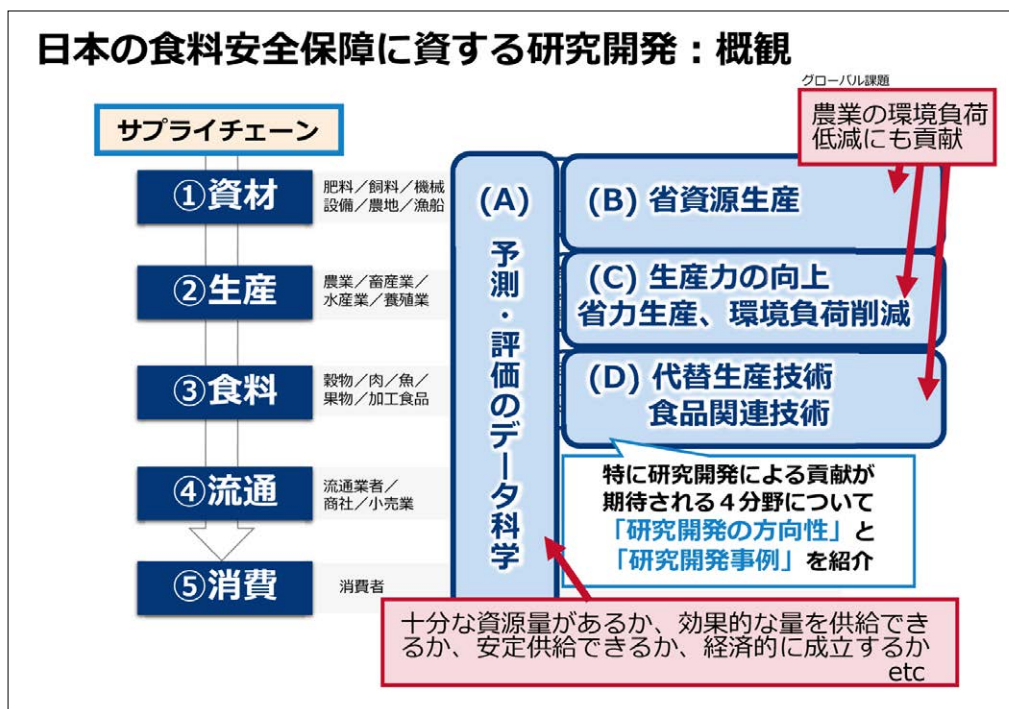
- 1) 阪本寧男「作物は一日にしてならず —コムギ半矮性遺伝子のたどった道」『化学と生物』24 (1986年11月):759-763.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/kagakutoseibutsu1962/24/11/24_11_759/_pdf (2025年11月25日アクセス)
- 2) George-André Simon, “Food Security:Definition, Four dimensions, History – Basic readings as an introduction to Food Security for students from the IPAD Master, SupAgro, Montpellier…” (March 2012)
<https://www.fao.org/fileadmin/templates/ERP/uni/F4D.pdf> (2025年11月25日アクセス)
- 3) 農林水産省「我が国の食料事情について 令和7年10月」
https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/zikyu_ritu/attach/pdf/panfu1-42.pdf (2025年11月25日アクセス)
- 4) Jennifer Kee, Lila Cardell, Yacob Abrehe Zereyesus, Global Fertilizer Market Challenged by Russia’s Invasion of Ukraine. United States of America Department of Agriculture Economic Research Service
<https://www.ers.usda.gov/amber-waves/2023/september/global-fertilizer-market-challenged-by-russia-s-invasion-of-ukraine> (2025年11月25日アクセス)
- 5) 農林水産省「飼料自給率の現状と目標」
<https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/tikusan/attach/pdf/r5bukai2-10.pdf> (2025年11月25日アクセス)
- 6) 農林水産政策研究所「世界の食料需給の動向と中長期的な見通し 令和7年4月」
https://www.maff.go.jp/primaff/seika/attach/pdf/250418_2034_01.pdf (2025年11月25日アクセス)
- 7) 農林水産省「農業をめぐる情勢 令和7年4月」
<https://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/noyaku/attach/pdf/index-7.pdf> (2025年11月25日アクセス)
- 8) 農林水産省「令和6年農作物作付（栽培）延べ面積及び耕地利用率」
https://www.maff.go.jp/j/tokei/kekka_gaiyou/sakumotu/menseki/r6/menseki/index.html (2025年11月25日アクセス)
- 9) 農林水産省「基本計画の策定に向けた検討の視点 我が国の食料供給（農地、人、技術）」2024年11月
<https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/kikaku/bukai/attach/pdf/241106-3.pdf> (2025年11月25日アクセス)
- 10) 東北農政局 岩手県拠点 近藤 康光 令和7年9月「食料」をめぐる情勢について
https://www.maff.go.jp/tohoku/tiiki/iwate/photo/attach/pdf/r07_iw-1.pdf (2025年11月25日アクセス)
- 11) 農林水産省「農林水産統計 農業経営統計調査 令和5年農業経営体の経営収支」
https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukei/einou/pdf/einou_23.pdf (2025年11月25日アクセス)
- 12) 農林水産省「今般の米の価格高騰の要因や対応の検証 令和7年8月」

- <https://www.maff.go.jp/j/syouan/keikaku/soukatu/attach/pdf/index-494.pdf> (2025年11月25日アクセス)
- 13) 国土交通省「令和6年は過去平均(統計開始以降)を上回る土砂災害が発生～令和6年の土砂災害発生件数を公表～」
https://www.mlit.go.jp/report/press/sabo02_hh_000156.html (2025年11月25日アクセス)
- 14) 九州沖縄農業研究センター「温暖化による米の品質低下の実態と対応について」
<https://www.naro.go.jp/laboratory/karc/contents/ondanka/ondanka1/index.html> (2025年11月25日アクセス)
- 15) 鹿児島県「食料・農業・農村基本法」や生産資材価格の高止まりに関連する情報
https://www.pref.kagoshima.jp/ag01/nouseibu_nouseika/seisansizai.html (2025年11月25日アクセス)
- 16) 帝国データバンクレポート「食品主要195社価格改定動向調査—2025年8月」
<https://www.tdb.co.jp/report/economic/20250731-neage/> (2025年11月25日アクセス)
- 17) 国土交通省資料「物流を取り巻く現状と課題」
https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/buturyu_douro/pdf01/03.pdf (2025年11月25日アクセス)
- 18) 農林水産省「令和6年度「食品アクセス問題(買物困難者)」に関する全国市町村アンケート調査結果の公表について」
https://www.maff.go.jp/j/shokusan/eat/attach/pdf/access_genjo-11.pdf (2025年11月25日アクセス)
- 19) 農林水産省「食料・農業・農村基本計画 令和7年4月」
https://www.maff.go.jp/j/keikaku/k_aratana/attach/pdf/index-61.pdf (2025年11月25日アクセス)
- 20) Katherine Richardson et al., Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances* 9 (2023):eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>
- 21) Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D. et al. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food* 2, 198–209 (2021).
<https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>
- 22) J. Poore, T. Nemecek, Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science* 360 (2018) :987-992. <https://doi.org/10.1126/science.aaq0216>
- 23) Springmann, M., et al. Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* 562 (2018) :519–525. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0>
- 24) Pete Smith et al., Status of the World's Soils, *Annual Review of Environment and Resources* 49 (2024) :73-104. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-030323-075629>
- 25) Teodoro Lasanta, José Arnáez, Estela Nadal-Romero, Chapter Three - Soil degradation, restoration and management in abandoned and afforested lands, Editor:Paulo Pereira, *Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection*, Elsevier, 4 (2019) :71-117. <https://doi.org/10.1016/bs.apmp.2019.07.002>.
- 26) NASA Scientific Visualization Studio, Impact of Climate Change on Global Agricultural Yields, (March 2, 2022) <https://svs.gsfc.nasa.gov/4974> (2025年11月25日アクセス)
- 27) Food and Agriculture Organization, 3.3 Livestock commodities, World agriculture:towards 2015/2030 An FAO perspective,
<https://www.fao.org/4/y4252e/y4252e05b.htm> (11月25日アクセス)

- 28) Hamid El Bilali, et al., Food and nutrition security and sustainability transitions in food systems. *Food and Energy Security* 8 (2019): e00154, <https://doi.org/10.1002/fes3.154>
- 29) Bhutta, Z., Berkley, J., Bandsma, R. et al. Severe childhood malnutrition. *Nat Rev Dis Primers* 3, 17067 (2017). <https://doi.org/10.1038/nrdp.2017.67>
- 30) 科学技術振興機構研究開発戦略センター「戦略プロポーザル 次世代型食・栄養研究～地球環境の持続可能性とヒトの健康を両立する食・栄養の実現へ～」(2025年 3月) , <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-SP-03.html>, (2025年11月25日アクセス)
- 31) Walter Willett, et al., “Food in the Anthropocene:the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems,” *Lancet* 393 (2019): 447-492. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(18)31788-4).
- 32) Food and Agriculture Organization of the United Nations, “Sustainable healthy diets:guiding principles,” World Health Organization, <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516648>, (2025年11月25日アクセス)
- 33) Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC special report “Climate Change and Land”, (2019) <https://www.ipcc.ch/srccl/> (2025年11月25日アクセス)
- 34) United Nations Department of Economic and Social Affairs, Independent Group of Scientists appointed by the Secretary-General, Global Sustainable Development Report 2019: The Future is Now – Science for Achieving Sustainable Development, (United Nations, New York, 2019). https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/24797GSDR_report_2019.pdf (2025年11月25日アクセス)
- 35) Farm to Fork Strategy, For a fair, healthy and environmentally-friendly food system, https://food.ec.europa.eu/document/download/472acca8-7f7b-4171-98b0-ed76720d68d3_en?filename=f2f_action-plan_2020_strategy-info_en.pdf (2025年11月25日アクセス)
- 36) Food 2030 – Pathways for action 2.0 – R&I policy as a driver for sustainable, healthy, climate resilient and inclusive food systems, Publications Office of the European Union, 2023, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/365011> (2025年11月25日アクセス)
- 37) Nutrition for Growth (N4G), TOKYO NUTRITION FOR GROWTH (N4G) SUMMIT & UN FOOD SYSTEMS SUMMIT https://nutritionforgrowth.org/wp-content/uploads/2021/09/N4G_UN_FoodSysSummit_9.23.pdf (2025年11月25日アクセス)
- 38) Food and Agriculture Organization of the United Nations, Achieving SDG2 without breaching the 1.5C threshold:A Global Roadmap , <https://www.fao.org/interactive/sdg2-roadmap/assets/3d-models/inbrief-roadmap.pdf> (2025年11月25日アクセス)
- 39) 科学技術振興機構研究開発戦略センター「ワークショップ報告書 2050年の持続可能な食・栄養へのシナリオと社会の合意形成～人文・社会科学からのアプローチ」(2024年3月) , <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2023-WR-06.html> (2025年11月25日アクセス)
- 40) 農林水産省「2018年における世界の食料需給見通し(概要版) 世界需給モデルによる予測結果平成21年1月」 https://www.maff.go.jp/primaff/seika/attach/pdf/090116_2018_02.pdf (2025年11月25日アクセス)

付録 研究開発事例

付録では、食料安全保障、栄養安全保障に関わる近年の研究開発例を紹介する。本編では目的別に課題を整理したが、付録・技術編では下表に示すようにサプライチェーンに沿って、関連する技術領域を紹介し、それぞれの研究開発例がどのような課題解決に貢献しうるかを記載した。



図A 日本の食料安全保障に資する研究開発の技術分類

(A) 予測・評価のデータ科学

食料安全保障の観点からは、需要に十分に応える食料の供給を確保することは重要である。農林水産省が毎年公表する「食料需給表」では、生産・輸入・在庫・消費の実績を集計し、供給量から最終的な需要量の算出が行われている。国内生産量は「作物統計調査」や「農業産出額統計」により、都道府県・作物別に毎年調査され、収穫面積や10アール当たり収量の算出も行われる。さらに、輸入量と輸出量は財務省「貿易統計」から、期首・期末の在庫量は事業者報告や政府備蓄データから得られる。また、米、麦、大豆など主要作物については、家計調査や外食産業データを基に需要量見通しを毎年策定し、生産調整の指標としている。さらに、販売時点（Point of Sale：POS）情報など民間データを活用して短期的な消費動向を補完し、経済変数を組み込んだモデル分析により中長期的な需要予測も行われている。一方、栄養安全保障の観点からは健康の維持に十分な栄養量の把握が重要であるが、この点についてはJST-CRDS 戦略プロポーザル「次世代型食・栄養研究」^{a1)} に詳しいのでそちらを参照されたい。

こうした需給量の把握は、生産、流通、消費の結果として年単位でのデータの整理をもとに行われている。一方、食料自給率の向上を目的とした生産調整、また食料供給困難事態対策法で定められる生産転換が必要な事態となった際に備えるためには、様々な条件下での生産量変化について精度の高い予測をもとに、生

産戦略を立てる必要がある。こうした観点から、この章では、食料生産量予測を取り扱う農水産業データ科学の領域で、食料安全保障に貢献すると考えられる研究開発課題とその実例について、肥料資源量、水産資源量、作物収量予測の領域からいくつか紹介する。

A-1. 利用可能な国内資源量の把握と経済性評価

1. 資源量の把握と推定

【肥料資源の賦存量】

日本の農業は、肥料の主要成分である窒素・リン・カリウムのほとんどを海外からの輸入に依存している。特にリン鉱石やカリ鉱石は可採地域が限られ、ロシアや中国など特定国への依存度が高い。このため、国際市況の変動や地政学的リスク、輸送コストの上昇が肥料価格を直撃し、結果として農産物価格の上昇を招いている^{a2)}。近年では、2022年以降の国際肥料価格高騰により、国内の農業経営が大きな影響を受け、食料安定供給の脆弱性が顕在化した。

これに対処するため、日本政府と地方自治体は、肥料原料の国際依存度を下げるとの循環型資源利用の拡大を進めている。具体的には、下水汚泥焼却灰や鉄鋼スラグからのリン回収、食品廃棄物や家畜ふん尿からの有機質肥料製造、海藻・骨粉など未利用バイオマスの活用に加え、根粒菌などの微生物の窒素固定能を利用した生物的窒素供給の促進も注目されている^{a3)}。これらの取り組みは、廃棄物処理と資源循環を一体化し、肥料供給の国内循環を高めることを目的としている。農林水産省は国内肥料資源の利用拡大プロジェクトや「肥料取締法」の改正等を通じて、再生資源由来肥料の品質基準や安全性評価を整備し、民間企業による事業化を後押ししている^{a4)}。

2025年度に公募が開始されたJSTの経済安全保障重要技術育成プログラム（Kプログラム）の「合成生物学、データ科学等の先端技術を利用した肥料成分の有効活用・省肥料化・肥料生産等に関する技術（食料安定生産）」でも、こうした生物機能利用による肥料自給力の強化が重点課題として掲げられている。

さらに、令和4年12月27日付で閣議決定された「食料安全保障強化政策大綱」においては、2030年までに堆肥・下水汚泥資源等の国内資源利用量を倍増させ、肥料（リンベース）に占める国内資源割合を40%まで引き上げることが明記されている。未利用資源からのリン再生利用可能量については、「国内のリン肥料資源の賦存量・再生利用量と必要量」の比較試算が行われており、リン肥料資源として53,300tP/年、肥料原料等として141,100tP/年という輸入・賦存量データを基に、再生利用可能量およびその経済性が検討されている^{a5)}。また、国土交通省が令和7年6月に公表した「下水汚泥の肥料利用拡大に向けた成分分析調査結果について」では、下水汚泥中のリン、窒素、カリウムなどの肥料成分および重金属類の含有量が詳細に分析・提示されており、安全性や資源化効率を評価する基礎データが整備されつつある^{a6)}。一方で、河川からの有機物の流入は沿岸の海洋生物の生存を支えているため、リンなどの肥料成分を過度に回収すると、沿岸生態系に深刻な影響を及ぼす可能性が指摘されている^{a7)}、^{a8)}。したがって、生物多様性との調和を図りながら適切な回収バランスを保つ必要があり、そのためには資源量のモニタリングや生態系への影響評価など、多項目のデータを統合した科学的予測と評価の体系を構築することが求められている。

これらの資源リサイクルや未利用バイオマス、微生物の活用によって、実際にどの程度の肥料成分を国内で賄えるのかは依然として明らかではない。食料安全保障においては必要量の確保が重要であり、利用可能な資源量の定量化とその経済性の評価を進めることが、今後の持続的な農業生産を支える鍵となる。

【水産資源量の把握と維持】

国際的な水産資源量の把握は、多様なデータ系列を統合し、資源状態と将来予測を科学的に推定する方

法論に基づくものである。中心的枠組みである年齢構造モデルは、漁獲量、体長組成、産卵量、標識再捕などを組み合わせた統計的キャッチアットエイジ推定を行う手法である。この統計的キャッチアットエイジ推定とは、年齢別に観測された漁獲量や生物学的情報から、各年齢群の生残や加入を数学的に逆算し、資源全体の動態を再構成する方法である。特に北太平洋や大西洋で広く用いられる Stock Synthesis (SS3) モデルは、国際的に標準化された統合モデルとして高い信頼を得ている^{a9)}。一方、データが十分に蓄積されていない沿岸小規模漁業などにおいては、生産量モデルやデータ限定型モデルが補完的に用いられる。代表的手法である捕獲量—最大持続生産量法 (Catch-Maximum Sustainable Yield method : CMSY) は、資源の回復力と漁獲履歴を用いて最大持続生産量 (Maximum Sustainable Yield : MSY) を推定するものであり、FAO や複数の地域漁業管理機関において実務的に利用されている^{a10)}。

これらのモデルを支える基盤調査として、米国海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration : NOAA) や国際海洋探査委員会 (International Council for the Exploration of the Sea : ICES) が実施する音響調査やトロール調査があり、魚群の密度や分布の直接情報を提供することで、モデル推定の妥当性を裏付けている。こうした推定結果は総許容漁獲量 (Total Allowable Catch : TAC) の設定に用いられ、国際交渉や国内管理措置の科学的根拠となっている。ICES や NOAA は、科学的助言と TAC を厳密に連動させる仕組みを採用している。世界の資源状態を総括した研究は、これらの資源評価モデルが持続可能な漁業管理の成功に貢献してきた、としており^{a11), a12)}、国際的にはこの一連の枠組みが科学的資源管理の基幹として機能している。すなわち、統合モデル、生産量モデル、データ限定型モデル、そして広域調査による多面的情報の統合が、世界の水産資源量把握の信頼性と政策的実効性を支える基礎となっている。

日本における水産資源量の把握には、国際的標準と共通の手法が用いられているものの、魚種や海域によって異なる。主要魚種では、仮想集団個体数解析 (Virtual Population Analysis : VPA) や年齢構造生産モデル (Age-Structured Production Model : ASPM)、統合型モデルの SS3 などの年齢構造モデルが中心的役割を果たしており、産卵親魚量・漁獲死亡係数・将来予測の推定に用いられている^{a13)}。加えて、サンマやイワシ類では音響調査、底魚類ではトロール調査が毎年実施され、観測に基づく直接的なバイオマス推定が行われている。沿岸の小規模資源や情報不足資源では、生産量モデルやデータ限定型評価法 (CMSY など) が補助的に利用されている^{a14)}。これらの評価結果は、水産研究・教育機構が毎年公表する「我が国周辺水域の漁業資源評価報告書」^{a15)} に体系的に整理されている。また、マグロ類など国際的な海域を回遊する魚種では、西部中部太平洋まぐろ類委員会 (Western and Central Pacific Fisheries Commission : WCPFC)、大西洋まぐろ類保存国際委員会 (International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas : ICCAT) 等による国際的な資源評価が用いられている。

しかし一方で、日本の沿岸小規模魚種の評価が不十分である、との国際的な批判もある。日本は主要魚種については国際標準のモデルを用いるものの、沿岸資源ではデータ系列の不足や地域ごとの評価体制のバラツキが存在し、多くの資源が未評価とされてきた^{a11)}。特に、日本沿岸の多くの魚種が長期間にわたり、資源量が MSY 水準に対しどれだけ残っているかを示す比率である、 B/B_{msy} を大きく下回り、国際的には「管理が最適化されていない事例」と考えられている^{a12)}。また、資源評価の公開性は近年大きく改善したものの、長期的には海外機関に比べて分析コード・前提条件の透明性が限定的であったという指摘がある。ICES や NOAA はモデルの設定、パラメータ、使用データ、コードの公開が徹底しているのに対し、日本は評価報告書の公開が中心で、モデル選択の根拠や感度分析の詳細が必ずしも十分に公開されていない。上記の課題については、近年の改革によって改善が進み、FRA のデータ公開拡大、TAC 制度改革、管理目標値の導入など、国際的整合性の高い管理へと発展しつつあるものの、沿岸資源のデータ不足や科学的助言の強制力強化など

の課題について対応することが求められていると言える。

農林水産省の資料^{a16)}によれば、1965年から2024年の間に、魚介類の自給率は110%から45%に下落し、一日当たりの供給カロリーも99 kcalから77 kcalに下落している。精密なデータ計測とモデルを活用した水産データ科学を推進することで、適切な水産資源管理と利用につなげ、魚介類の自給率を向上させることは、食料自給率の向上、ひいては日本の食料安全保障にも貢献すると考えられる。

A-2. 栽培環境変化等に応答する作物収量予測技術

【現実収量と最大可能収量の比較（イールドギャップ）】

山地が多い国土を持つ日本では、限られた農地を高効率に活用することが食料自給率を高めるカギとなる。そのためには、単位面積当たりの収量（単収）増加は特に重要な課題となる。ここでは、大豆生産を例に、単収増加に関わる研究開発においてデータ科学の重要性を述べる。

日本の食生活においてよく消費される基礎的な食品であるにも関わらず、自給率が24%と低い大豆について、農林水産省は、生産量の向上を努力目標の一つに定めている^{a17)}。大豆の生産量を向上させるため、大豆の作付けに対して水田活用の直接支払交付金などの助成金を整備する等の政策に加え、第3期・戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「豊かな食が提供される持続可能なフードチェーンの構築（2023～2028）」においてもサブ課題「植物性タンパク質（大豆）の育種基盤構築と栽培技術確立」として研究開発にも取り組んでいる。

日本の大豆生産においては単位面積当たりの収量が低いことが課題となっている。地域別10アールあたり大豆の収量は、最も高い北海道（2.4トン）^{a17)}であっても米国イリノイ州（4.3トン）の半分強である。単収は品種によっても決まっているが、実収量に大きな影響を与えるのは、環境条件や栽培管理である。日射や気温、水分、土壌の肥沃さといった自然条件に加え、肥料の与え方、播種の時期、病害虫の管理など人為的な要因も大きく影響する。これらの要因が最も良い状態でそろったときに得られる「理論上の上限収量」と、実際の農場で得られる「現実の収量」との間には差が生じる。この差を明らかにするのがイールドギャップ（Yield gap）研究であり、作物の潜在能力をどこまで引き出せるかを科学的に示すことで、生産性向上に貢献する^{a18)}。理論上の上限収量は理想条件を仮定した作物モデルの出力値と実際の高収量事例による検証とを組み合わせることで求められ、地域別に標準化された指標として、イールドギャップ分析の基礎として用いられる。代表的なモデルにはAgricultural Production Systems sIMulator (APSIM)^{a19)}やDecision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)^{a20)}などがあり、これらは気象データ（気温、日射量、降水量など）、土壌特性、作付時期、品種特性などを入力条件として、日単位の光合成・蒸散・乾物生産などをシミュレーションする。

米国ではコーネル大学、アイオワ州立大学、ネブラスカ大学などが中心となって、イールドギャップの調査・定量分析が体系的に行われており、大豆、トウモロコシ、小麦について継続的な解析が行われている。例えば、アイオワ州立大学やネブラスカ大学の取組では、圃場観測データと作物モデルを用いて地域ごとの潜在収量・実収量およびギャップ要因を数値的に把握し、公表している。この分析結果に基づき、Extension Service（農業普及組織）は農家に対して、播種の時期と密度を適正化し、灌漑と排水を最適化するとともに、早晚性や耐暑・耐病性を考慮した品種を選定し、特にリンやカリウムのバランスを重視した土壌養分管理の推奨などが行われた。これにより、従来の経験則に依存した栽培からデータに基づく管理への転換が進み、結果として10～20%の単収向上が報告されている^{a21)}。

一方、日本では、全国規模、あるいは都道府県単位で網羅的、経時的にイールドギャップを計測、公表する仕組みはないものの、学術的な解析は存在する。日米間での大豆の現実平均収量/最大収量比は1980年代初頭にはほぼ同じであったが、その後米国ではこの比は上昇し（実際の単収と上限収量の差が縮小）たが、日本ではこの比はほぼ横ばいのみであった^{a18)}。前述の通り、米国ではこの間データ活用農業の貢献もあり、栽培管理技術の向上があったと考えられる。2015年に日本で実施された、大豆の高収量、低収量農家への聞き取り調査では、水田での大豆栽培の宿命とも言える、湿害が低収量の最大要因であるとされている^{a18)}が、どの程度の湿害がどの程度の低収量を引き起こすのかなど、定量的な分析は行われていない。全国を対象とした網羅的、経時的なイールドギャップ解析が進めば、単収増加のポテンシャルの高い地域や、より湿害に強い品種を導入すべき地域などが明確になり、単収増加を軸とした大豆の自給率向上を目指す生産戦略の策定に重要な役割を果たすと考えられる。

【有機農法や肥料調達に支障が出た場合の収量減少予測】

EUのFarm to Forkや日本のみどりの食料システム戦略では、化学肥料や化学農薬の使用量削減を推進している。窒素投入量の削減は作物収量の減少をもたらすため^{a22)}、化学肥料に代えて有機肥料を利用する場合、使用量が適切でないために平均で約19%減収することが知られている^{a23)}。従って、有機肥料への置き換えを推進して化学肥料の使用を積極的に削減する場合、有機肥料の施肥量が不足であれば作物収量が減少する可能性がある。収量維持に必要な施肥量は圃場の土壌肥沃度とも密接に関係するため、全国レベルでの網羅的な土壌肥沃度の把握と、適切な施肥設計のための収量維持に必要な施肥量と実際の施肥量の把握が必要である。適切な施肥設計がないまま化学肥料の投入削減が実施された場合、或いは化学肥料の調達不足を想定した場合の収量変化を予測することは、農業資材の調達に支障が出た場合の食料安全保障戦略の立案において重要である。利用できる肥料の量が少ない場合の、主要作物の将来収量低下を定量予測するような包括的・全国規模の予測研究が必要であると考えられる。

【気候変動による作物収量変化予測】

IPCCで気候変動の影響、適応、脆弱性に関する情報を統括しているワーキンググループ2において詳しい情報が整理されている。2022年2月に発表されたIPCC第6次評価報告書（Sixth Assessment Report : AR6）「気候変動2022：影響、適応、脆弱性」では、作物の収穫量予測モデル（作物モデル）による、気候変動の影響予測が紹介されている^{a24)}。報告書によると、今世紀末までに、どの温室効果ガス排出シナリオにおいても、トウモロコシの収量は大幅に減少し、コメは大きな変化がなく、大豆は高排出シナリオにおいては増収する可能性もあるが、予測の振れ幅が大きい。小麦も世界各地で減収傾向となるが、アフリカやアジアを除き、トウモロコシよりは減収の程度が小さいことが予測されている^{a24)}。この収量予測モデルにおいては、高濃度CO₂が光合成の基質となって成長が増進する効果については考慮していないため、この予測の精度は必ずしも高くない可能性がある。

グローバルで取引される大量の作物は、極めて限られた供給地から世界各国へと輸出されており、これらの供給地での収量の変動は価格変動に直結する。また、取引される作物の大半が飼料として消費されていることから、畜産物価格にまでも影響する。作物供給量変動の長期予測が可能になれば、その予測結果を、輸入国側は調達戦略に、輸出国側は作物種の変更や気候変動に適応した品種の開発などの供給戦略に活かすことができる。従って、気候変動による作物収量への影響予測は農学分野においても、極めて重要な研究開発トピックであり、世界各地で収量予測モデルの精度を高める研究開発が進められている。

2025年には、世界12,658地域・6主要作物の長期データを用い、生産者による気候変動への適応効果を実証的に推定した研究成果も発表されている^{a25)}。この論文によると、地球平均気温が1℃上昇するごとに、

世界の作物生産は年間 5.5×10^{14} kcal減少し、これは1人あたり1日約120kcal（推奨摂取量の4.4%）に相当する。適応と所得増加により、2050年には損失の23%、2100年には34%が緩和されるが、コメを除く主要作物では大きな損失が残る。影響は貧困地域だけでなく、現在の主要穀倉地帯にも及び、世界の食料安全保障のためにはさらなる技術革新や適応拡大が必要であることを示唆するものとなった^{a25)}。

(B) 省資源生産

日本の肥料自給率はほぼゼロ^{a16)}であるため、近年、肥料原料価格が乱高下しがちであることを踏まえると、省資源農業を目指す研究開発は、農業生産のコストを引き下げて適切な価格で食料を供給するという観点から、食料安全保障に資する研究開発であると言える。食料生産に関わる資材では、燃料も自給率ゼロであるため、食料生産におけるクリーンエネルギーの利用推進や省エネ技術の革新は重要な課題であるが、この課題については、食料供給に特化しない広範な技術課題が幅広く存在するため、別の機会に取り上げることとする。

肥料・農薬・飼料などについて資源循環を高め、輸入依存を低減することは、地政学リスク等に翻弄されて乱高下しがちなグローバルマーケットから受ける影響を少しでも軽減し、食料生産に関わる資材のより安定な調達につながる。食料生産を省資源化する取り組みについて、作物肥料と農薬、家畜飼料、水産飼料の項目に分けて事例をいくつか紹介する。

B-1. 作物肥料と農薬

作物肥料の主要成分は窒素、リン酸、カリウムである。中でも窒素肥料の投入量は収量と比例関係にあることが多いため、窒素肥料の確保は収量を確保する上で極めて重要である。現在の窒素肥料は化石燃料を大量に燃焼するハーバー・ボッシュ法により、空気中の窒素をアンモニアに変換して生産されているため、化石燃料資源を保有する国で生産されていることが多い。ハーバー・ボッシュ法によるアンモニア生成は大量の温室効果ガスを排出することから、水素キャリアや農業の温室効果ガス排出削減を目的として、低エネルギー型アンモニア合成に関する研究は大きな注目を集めている^{a26)}。

化石燃料資源を保有しない日本は、ほぼ全ての窒素肥料を輸入しているため、化石燃料に依存しないアンモニア生成方法を開発できれば、肥料を自給できるようになる可能性が高まる。実用化を見据えた低エネルギー型アンモニア合成の研究開発では、電気化学、光触媒、プラズマ触媒、ケミカルルーピングといった技術分類を挙げる事が出来る^{a26)}。

基礎研究の部門では、上記の4分類に相当せず、窒素固定細菌の硝酸還元酵素の機能を模した分子触媒型アンモニア合成の研究開発も展開されている。東京大学の西林らは、常温・常圧で窒素ガスと水からアンモニアを合成するモリブデン触媒を開発し、触媒を改良することでこれまでのアンモニア生成速度の世界最高記録を更新し続けている。2023年には、触媒によるアンモニア生成機構の詳細な解析から、律速段階を特定し、計算化学を活用した分子設計によって最適化した触媒を開発した^{a27)}。具体的には、触媒分子内のイミド錯体のN-H結合開離エネルギーを低く抑えるよう配位子を改変し、予測に従って合成したところ、新触媒が高活性を示した。これにより、化石燃料を大量に消費する従来のハーバー・ボッシュ法に代わり、二酸化炭素をほとんど排出しない次世代型グリーンアンモニア合成技術への期待が大きく高まったと言える。

作物は毎日微量の肥料分を吸収するが、毎日化学肥料を与えるのは労務コストがかさむため、通常は作物の栽培中の施肥は数回しか行われぬ。施肥された作物は与えられた肥料を短期間で全て吸収することは難しいため、多くの肥料分が作物に吸収されないままに土壌微生物によって分解され、二酸化窒素などの温室

効果ガスとなったり、雨とともに耕地から流出したりする。農業では、この植物が吸収しきれない分量を見越して施肥を行うため、窒素肥料の投入量は作物が必要とする量よりも多くなり、農家にも地球環境にも高コストとなっている。従って、自給率ゼロの肥料資源の節約、生産コスト削減、地球環境保全のどの観点からも、化学肥料削減は重要な課題である。化学肥料の投入量を削減する技術は、(ア) 作物が必要とする量を必要とする場所に施肥する可変施肥技術（精密農業）、(イ) 微生物の利用、(ウ) 肥料分が少なくても育つ作物品種の開発の3つに大別することが出来る。

最も実用化が進みつつ、かつ研究開発も同時並行で進んでいる技術は(ア)の可変施肥である。ドイツBASF社がグローバルに展開する精密農業サービスのXarbioでは、Sentinel-1（マイクロ波撮影）やSentinel-2（光学撮影）等の人工衛星による画像をもとに、圃場の作物の生育状況を経時的に観察し、圃場内で生育が遅れている部分について「地力（土壌そのものが持っている作物を育てる力）が低い」と判定し、地力が低い部分に施肥を勧める。地力データはスマート農機連携により、可変施肥機能付き田植え機や可変施肥機能付き肥料散布機などにより、重点的に施肥を行うべき場所には多く施肥を行うことが出来る。Xarbioサービスでは、肥料分のうち、窒素、リン酸、カリウムのどの成分が足りていないか、まで判定する機能はついていないため、現状では肥料の成分比までを変化させた可変施肥は行うことが出来ない。しかし、日本で行われた実証実験では10～50%の肥料投入量の削減が可能であったと報告されている^{a28)}。

一方、トラクター等の農業機械に搭載可能な土壌プローブ型センサー（オンザゴー型土壌センサー）で、土壌有機物、電気伝導率、土壌テクスチャー、圧密度などを走行中に計測し、可変施肥のためのマップ作製を行う技術（米国、Veris Technologies社）などが実装されているが、土壌プローブ型のセンサーで窒素、リン、カリウムを即時定量して可変施肥を行う技術については、産学ともに研究開発途上である。オンザゴー型土壌センサーの最大の難しさは、土壌がきわめて不均質であるため、走行しながら得られる物理的な値から窒素、リン、カリウムなどの肥料成分を安定して推定することに本質的な限界がある点である。水分や有機物の量が少し変わるだけでセンサーの反応が大きく揺れ、地域や土の種類が変わると別の測定結果になってしまうため、どこでも同じ精度で測れる技術にすることが難しい。このため、土壌分析室の化学分析に匹敵する精度でリアルタイム計測を実現するには、多くの技術的課題が残されている^{a29)}。

続いて、(イ)の微生物の利用を取り上げる。窒素化学肥料の投入量削減を目指す技術として、窒素固定微生物を利用する方法がある。作物付着型の窒素固定微生物は、付着した作物の極近傍で窒素供給を持続的に行うため、流出や土壌微生物による分解といったロスが減り、温室効果ガス発生も抑制されることが期待されている。こうした性質を利用して、化学肥料依存の緩和に寄与し得る新たな技術オプションとして、作物付着型窒素固定微生物が近年大きな注目を集めている。マメ科植物に共生する根粒菌もマメ科植物に窒素を供給するが、マメ科植物にしか共生できず、また、根粒という特殊な器官を形成する必要があるため、マメ科以外の作物に根粒菌を利用する技術を開発するには高い壁が存在する。一方、作物付着型窒素固定微生物は、根粒菌のような特殊な器官を形成せず、作物に付着しているだけなので、幅広い作物種に应用可能であるという点でより実用的な選択肢であると考えられている。

作物付着型の窒素固定微生物の活用例としては、米国Pivot Bio社の微生物資材、PROVEN®40がある。PROVEN®40は窒素肥料存在下でも窒素固定活性を維持するよう遺伝子組換えではない遺伝子制御された微生物資材であり、従来の固定菌が肥料濃度上昇で機能停止する課題を克服した点に特徴がある。トウモロコシなどの作物で収量向上が報告され、微生物肥料の実用化を進める代表的事例となっている。日本のTOWING社の「宙炭」も、付着型窒素固定微生物を活用した農業資材の一例であり、20～50%の化学肥料投入量削減が可能である。宙炭は地域の未利用バイオマスを炭化して得られる多孔質バイオ炭に、土壌由

来の有用微生物群を選抜して付着・定着させることで、窒素固定を含む土壌中の栄養供給機能を高める設計となっている。このバイオ炭は微生物の生育を支える安定した棲息空間を提供し、施用後は作物根圏周辺で微生物活性が高まることで、化学肥料への依存を低減しつつ、土壌の肥沃度を改善する効果を発揮する。また、炭化材による炭素貯留を通じて温室効果ガス削減へも寄与し、土づくりの高速化を可能にする点が特徴である。

いずれの場合も、微生物資材による窒素肥料供給は化学肥料を100%代替できるものではなく、20～50%程度の範囲の窒素分の代替供給が可能であるが、その代替量は土壌、気象、作物管理、作物品種などの諸条件に左右されることに留意する必要がある。付着型窒素固定微生物は、極めて酸素濃度の低い環境でしか生育できないことと、生育している土壌中のアンモニウム濃度が高いと窒素固定能を発揮しない^{a30)} ため、化学肥料との併用が難しいという難点がある。カルタヘナ法に抵触しない方法で、土壌中のアンモニウム濃度が高くても窒素固定能を発揮するような系統を作出する等の工夫が必要であると考えられる。

一方、水稲においては水に浸かっている期間が長いという特異な環境を反映して、水稲が特定の微生物との共生関係を築き、化学肥料ゼロでも化学肥料投入水田に比べ6～7割の収量を得ることが可能であることが知られている。最近、こうした無施肥水田で水稲の根圏に生息する窒素固定微生物について長期的な大規模解析が行われ、水稲の生育段階に応じて優占する窒素固定菌が変化し、また土壌の栄養条件に応じて根圏で選択的に濃縮される菌群があることが見いだされた^{a31)}。こうした水田窒素固定菌群と作物とのクロストークを解明し、合成微生物叢を設計することで水田の化学肥料削減につながるものと期待されている。

最後に、(ウ) 肥料分が少なくても育つ作物品種の開発例を紹介する。窒素肥料の削減については、窒素肥料の利用効率が高い作物の作出も行われている。前述のように作物に与えた窒素肥料は、作物が短期間で全てを吸収することが出来ないため、土壌微生物によってアンモニアが硝酸を経て温室効果ガスである二酸化窒素に変換され、大気中に放出される。イネ科の植物には、このアンモニアを硝酸に変換する微生物の増殖を抑制する抗生剤を根から分泌する機能、生物的硝化抑制 (Biological Nitrification Inhibition : BNI) 能があることが知られている。2021年、日本の国際農林水産業研究センターのスバラオらは、野生種に近い、BNI機能を持つコムギから、BNI機能を増強する遺伝領域を特定し、交配によって実用小麦品種にBNI機能を持たせたところ、通常の半分の量の窒素肥料でも、収量を維持できたことを報告した^{a32)}。2024年から4年間の計画で、メキシコの国際トウモロコシ・小麦改良センター (International Maize and Wheat Improvement Center : CIMMYT) がリーダーとなって、デンマークのノボ・ノルディスク財団から3億円強の投資を受け、トウモロコシや小麦、ソルガムなどのイネ科作物でBNI機能を持つ品種の実用化研究を展開している。

リンについては、高濃度にリンを含むリン鉱石 (高品位リン鉱石) が算出する場所は地球上でも限られた地域であり、世界中の国がこの限られた地域から高品位リン鉱石を輸入して肥料に加工して使用している。含有するリン濃度が低い低品位リン鉱石は高品位リン鉱石よりは広い範囲に存在するが、含有するリン濃度が低く精製にコストがかかるため、現在のところ産業用途にはほとんど用いられていない。国際農林水産業研究センターのサリオウらは、低品位リン鉱石と作物残渣・根圏土壌を用いて発酵させたリン鉱石土壌添加堆肥が、化学肥料並みを開発した成果が報告し、この低品位リン鉱石を低コストで効果的に活用する方法を開発した^{a33)}。リン鉱石と根圏土壌を添加した堆肥において、リン酸塩を溶けやすくする微生物量が遺伝子量で約2.4倍、酵素量で約2.3倍に増加し、ソルガムを用いた実証試験では従来の堆肥に比べ1.5～1.7倍の収量を示し、現地での実証実験では化学肥料と同等の増収効果を得た^{a33)}。本研究は化学肥料が普及していないアフリカでの作物増産を志した研究ではあるが、高品位リン鉱石の供給が停滞するような状況では、様々な場所で活用可

能であると考えられる。

省資源生産の観点からは、農薬の使用量を減らす取り組みも盛んである。特に化学農薬の削減は、地球環境の持続可能性向上にも寄与するため、農業の持続可能性向上という観点から長期的な視野では食料安全保障にも貢献する。

連作障害の主要因の一つである、線虫による農業被害は全世界で年間数十兆円にも上る^{a34)}。現状では燻蒸剤によって線虫を駆除しているが、この殺虫剤は環境負荷が高い。線虫が植物の根に寄生するメカニズムについては、熊本大学の澤らによって、植物寄生線虫を作物の根に誘引する役割を担う誘引物質の同定^{a35)}や、線虫が植物から栄養分を獲得するために植物に分泌させるペプチドの同定^{a36)}などが進んでいる。誘引物質については、人工的に合成した誘引物質で作物の根が存在しない場所に線虫を誘導し、宿主に到達できない線虫を餓死させるなどの利用方法が考えられる。

防除薬剤の低減という視点では、狭い波長範囲だけを照射するUV-B光による植物免疫制御技術にも注目が集まっている。この技術は2010年代にモデル植物シロイヌナズナから得られた知見^{a37)}をベースとして、2020年代に入ってから施設園芸を中心に、様々な作物において実用化が進められている。特定波長だけのLED照射が可能な技術を持つ日本の日亜化学は、大阪公立大学との共同研究により、特定波長の光刺激が免疫関連遺伝子群を選択的に活性化し、防除薬剤の低減につながる可能性を示した^{a38)}。2024年3月から病害虫抑制効果のある308nmUV-B LEDが量産化され、ハウス栽培のイチゴなどで活用されている。また、弱いUV-B照射が植物のストレス記憶を形成し、実際に乾燥や高温などにさらされた際にストレス耐性を発揮することが報告されており^{a39)}、化学農薬削減のためにはUV利用は重要な技術要素になっていくと予想される。

B-2. 畜産飼料

畜産分野では、より少ない飼料でより多く畜産物を得る（飼料利用効率の向上）ことで、単位生産量あたりの省資源化を図る研究開発が展開されている。2021年には地球上で生産される穀物の4割弱が畜産飼料として消費されており^{a40)}、飼料利用効率を上げることで畜産に必要とされる飼料の増加を抑制することは、畜産物の安定供給を考える上でも重要な取組みと言える。具体的には、精密畜産（Precision Livestock Farming：PLF）や自動給餌・ロボティクスの導入、飼料改良などを組み合わせることによって、飼料、水、エネルギーや労働力といった資源の削減と、持続的な生産性維持の両立を目指した研究開発が進行中である。

PLFは、畜舎の映像解析、加速度センサー、音響センサー等から得られたデータをリアルタイム処理し、個体識別、給餌量自動計測、採食回数、反芻行動、体重変化、疾患リスク等を感知して過剰給餌の削減、疾病の早期検知、飼料効率の向上等に貢献する^{a41)}。様々なセンサーからの情報を統合して家畜の行動を分析したり、疾患リスクを判断したりする過程では、機械学習の活用が進んでいる^{a42)}。家畜の摂食行動をリアルタイム映像から機械学習を活用して分析し、各個体の飼料摂取量の予測が可能であることが報告されている^{a43)}。また、個体識別機能付き自動給餌機を用いた研究では、各ブタの成長・摂取量データに基づき毎日アミノ酸要求量を推定して配合を変えることで、従来の給餌法と比較して、タンパク質・リジン供給量を約7～27%削減しつつ増体を維持でき、窒素排泄や環境負荷・飼料コストを大きく減らせることが示された^{a44)}。

高消化性飼料の開発や、腸内微生物制御に効果を発揮する飼料添加物の開発も進展している。まず、高消化性タンパク飼料素材の観点からは、微生物バイオマスや副産物由来の高消化性プロテイン飼料原料を開発し、高消化性飼料を用いることで、同じ生産量に対する粗タンパク供給量を減らしつつ排泄窒素を削減することで、環境負荷低減が可能であることが報告されている^{a45)}。

ウシやヒツジ、ヤギなどの反芻動物が強力な温室効果ガスであるメタンを排出するため、畜産の地球環境負荷低減を目指して、畜産メタンの排出を抑制する研究開発が進んでいる。その代表例としては、反芻動物用メタン抑制剤3-nitrooxypropanol (3-NOP) を挙げることができる。乳牛への3-NOP給与によりメタン排出を約30%低減し、かつ乳量や飼料摂取量には悪影響がないことが示された^{a46)}。論文報告から6年後の2021年、オランダのDSM社から乳牛用メタン排出抑制剤、Bovaerが発売され、ブラジルとチリを皮切りに順次世界展開されている。

こうした畜産の地球環境負荷低減に資する技術は、長期的な視点からは、畜産物の持続可能な供給を支え、グローバルレベルでの食料安全保障につながる技術開発課題である。

B-3. 水産飼料

水産分野での省資源化は、養殖におけるスマート養殖技術を中心に進展している。スマート養殖では、スマート養殖に適した養殖魚の育種と、そうした品種の養殖に最適化され、コストカットを実現する精密給餌システムの開発が進んでいる^{a47)}。

養殖に適した魚類の品種改良と給餌技術の進展は、近年の養殖業の高度化を支える中核的要素である。まず品種改良では、遺伝学・ゲノミクスの発展により、成長速度、餌効率、病害抵抗性、環境耐性を高めた系統の育成が急速に進んでいる。とくに選抜育種とゲノム選抜を組み合わせた手法は、サケ科魚類、ティラピア、コイなど主要養殖種で高い成果を挙げ^{a48)}、従来よりも短期間で改良効果を実現している。また、極端な水温変動や低酸素など、気候変動下で顕在化する環境ストレスに耐える新系統の育成も進められ、安定生産に直結する技術として重視されている^{a49)}。

給餌技術では、自動給餌機の進化が特に顕著である。従来の時間制御型から、カメラ映像や音響センサーに基づいて魚群行動や摂餌状況を解析し、最適な量とタイミングで給餌するAI搭載型へと進化した^{a50)}。これにより餌料の無駄が減少し、餌料費削減、成長促進、残餌抑制による水質悪化防止が可能になっている。さらに、改良品種の特性に合わせた精密給餌が可能となり、遺伝的ポテンシャルを最大限に引き出す管理が求められている。加えて、IoTによる水質・行動データの統合管理が、給餌制御と連動する、データ駆動型養殖を支えつつある^{a51)}。これらの技術は、生産効率と環境持続性の両立を可能にする基盤として、今後の養殖産業の競争力強化に不可欠である。

上述のように、養殖魚の育種はスマート養殖において重要である。東京海洋大学の吉崎らによる代理親魚技術^{a52)}は、この育種を加速する技術として、世界的にも注目されている^{a53)}。この代理親技術は、成長の遅い高価値な魚種の生殖細胞を、成長の早い小型魚種に移植して目的種の卵や精子を得る画期的手法であり、世代時間を大幅に短縮して効率的な選抜育種を可能にする。また、大型魚種の育種に伴う飼育コストを削減し、小規模設備でも改良系統の造成が可能となる点で産業的意義が大きい。さらに、生殖細胞の保存と再生産が可能となるため、絶滅危惧種を含む遺伝資源の保全にも応用できる^{a54)}。これらの要素が相まって、代理親技術は魚類育種の手速、柔軟性、経済性を根本から高める基盤技術として評価されている。

また、現在、養殖飼料は魚粉が使われているが、魚粉価格の高騰、野生魚資源への依存リスク、環境負荷低減要求の強まりがあり、国際的にも魚粉を代替する養殖飼料の開発が注目を集めている^{a55)}。欧州では、サケ・スズキ目を中心に昆虫ミール、微生物タンパク質、単細胞タンパク質の大規模実証が進んでいる^{a56)}。北米では、メタン発酵由来の単細胞タンパク質や藻類バイオマスを用いた配合飼料が開発され、代替原料のライフサイクル評価（Life cycle assessment：LCA）に基づく低環境負荷飼料の研究が加速している^{a57)}。

魚粉に依存しない飼料の開発は、野生魚資源への負荷を減らし、価格変動リスクを抑えるとともに、国内外で調達可能な多様なタンパク質の利用拡大を可能にする。さらに、魚粉代替による栄養組成の最適化と加工技術の改良により、成長性能や肉質を維持しつつ環境負荷の低減を図り、気候変動下の安定生産を通じて食料安全保障に資する基盤技術である。

(C) 生産力の向上（省力生産、環境負荷削減）

農畜水産物の生産性を大幅に高め、労働力不足や環境制約下でも安定した食料生産を可能にする技術基盤の構築も、食料安全保障に直結する。この章では、生産力向上に資する技術分野として、農作物の生産基盤となる光合成の革新、環境条件に左右されない生産を実現する植物工場、水産養殖における成長速度向上、複数の課題を同時に解決に導くスマート農業について触れる。

C-1. 光合成の革新

光合成はあらゆる農産物の生産性の基盤であるため、その活性向上にグローバルな注目が集まっている。光合成活性向上に関する世界的な研究プログラムとしては、まず、ビル&メリンダ・ゲイツ財団が支援する、Realizing Increased Photosynthetic Efficiency (RIPE) が挙げられる。RIPEは2012年から継続する長期プロジェクトであり、総額70百万ドル程度（約100億円）の支援を受け、光合成を担う酵素がCO₂の代わりに酸素と反応することで植物がCO₂を排出してしまう、光呼吸による光合成効率低下の抑制^{a58)}、強光条件下で光を熱エネルギーに変換して葉緑体を保護するNon-Photochemical Quenching (NPQ) 機能の改良^{a59)} など、主として基礎研究の領域で目覚ましい成果を上げてきた。

同じくビル&メリンダ・ゲイツ財団が支援する、C4 Rice Project は国際稲研究所（International Rice Research Institute：IRRI）が主導するプロジェクトで、2008年に開始し、現在では国際共同研究によって基礎研究を中心に様々な研究成果を報告している。C3光合成とは、稲、コムギ、大豆などの多くの作物が用いる光合成システムであり、CO₂固定の最初の産物が炭素（C）を3つ含む有機酸であることに由来する。しかし、CO₂固定を担うRubiscoが酸素とも反応するため光呼吸が起こり、特に高温・強光下では光合成効率が低下する。一方、トウモロコシやサトウキビが用いるC4光合成では、葉内にメソフィル細胞と維管束鞘細胞の役割分化があり、細胞内のCO₂濃縮機構によって光呼吸を極めて低く抑えるため、光・温度ストレス下でも高い光合成能力を発揮する。Ermakovaらは、C4光合成の生化学経路を構成する複数の酵素群を、わずか1つの遺伝子コンストラクトでまとめてイネに導入することに成功した^{a60)}。本研究では、C4光合成を担う主要な酵素の発現がイネで安定して誘導され、それらが代謝的に機能することが確認された。これは、C4経路の部分的な再構築に必要な酵素群を植物体内で同時発現させる技術的課題を克服した点で大きな前進であり、C3作物を高効率C4型へ段階的に転換するための重要な基盤技術と言える。

また、米国エネルギー省（Department of Energy：DOE）主導で光合成、バイオマス生産、代謝変換を統合して高付加価値バイオ製品を生み出す技術基盤を構築する目的でCenter for Advanced Bioenergy and Bioproducts Innovation（CABBI）が2017年に約115百万ドル（約170億円）で創設されている。CABBIから報告されている光合成効率向上に関する著名な成果としては、光合成効率向上に資する遺伝資源の同定^{a61)} などがある。

日本でも光合成能力の向上に関するユニークな研究開発が進んでいる。東京大学の矢守らは、2025年、アントラキノン類が強光ストレスによる光合成能力の低下を抑制することを見だし、植物体に散布することでトマトやレタスの収量向上につながったことを報告した^{a62)}。光合成でCO₂固定を担う酵素（Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase：Rubisco）の活性は低いいため、Rubiscoの改良は光合成効率向

上を目指す上で重要なポイントである。Rubiscoの遺伝情報は葉緑体ゲノムにコードされているが、これまで葉緑体ゲノムの改変技術がほぼなかったため、分子生物学的なRubisco改良を試みた例は極めて少ない。近年、葉緑体ゲノムのゲノム編集が可能になり^{a63)}、実用化のための技術も集積してきたため、今後は、葉緑体ゲノム編集によるRubisco改良を通じた光合成活性の向上に関する報告が増加することが予想される^{a64)}。

C-2. 植物工場：環境変化に左右されない安定した生産のための基盤技術

気候変動の進行により、干ばつや極端高温などの異常気象が頻発し、IPCC AR6では、作物生産の損失頻度は20世紀中盤以降増加していると報告されている^{a65)}。グローバルにおいても露地栽培に依存した従来の農業は安定的な生産が困難になりつつある今、環境条件を精密に制御できる施設園芸、特に人工光を用いた植物工場は、長期保存の効かない青果物の安定供給を確保するための重要な選択肢となりつつある。植物工場は気温、光、湿度、二酸化炭素濃度を最適化できるため、外部環境に左右されない高い生産性と品質を実現し、気候リスクの増大に対する強靱な食料供給システムの構築に寄与することが期待されている。また、植物工場は従来型農業よりも用水量が大幅に少なく、排液の再利用や栄養分の循環が可能であるため、資源を無駄にしない生産方式としての発展も期待される。ビル内や都市部の空きスペース、砂漠など耕地の確保が難しい地域での食料生産の場となる可能性も秘めており、多様な意義がある。一方、照明や空調などのエネルギー消費によるコスト高が実用化を拡大する壁となっており、企業や産学連携での研究開発が進められている。このように、植物工場の研究開発は、植物工場からの安定食料供給に加え、植物工場での生産システムをグローバル展開するという観点からも、食料安全保障を支える戦略的技術開発として位置付けることができる。

現在の人工光型植物工場は発光ダイオード（light-emitting diode：LED）照明を利用しており、LEDでは屋外圃場の太陽光レベルの強光を再現できないため、商用栽培として成立しているのは、弱光条件でも生育が可能なレタスなどの葉物野菜に限られている。一方、屋外圃場では光強度、CO₂濃度、葉面温度、湿度が絶えず大きく変動しており、こうした変動環境下では光合成活性が著しく低下することが報告されている^{a66)}。これに対して、人工光型植物工場では各種環境パラメーターを一定に制御できるため、作物によっては圃場環境を上回る収量を実現し得る。従来、強光を必要とするトマトや枝豆は人工光型植物工場での栽培は困難と考えられてきたが、根が常に空気と栄養液の両方に触れられる溶液膜栽培（Nutrient Film Technique：NFT）を採用し、全ての葉が均等に光を受けられるように設計した植物工場では、圃場を上回る収量が得られることが示されている^{a67),a68)}。このような人工光型植物工場で作産されたトマトや枝豆は、食味や栄養成分の点でも、安定して圃場レベルを上回っていた^{a67),a68)}。こうした成果は、葉1枚ずつの光合成活性を丹念に計測し、光合成活性を最大化させる環境条件を構築した結果得られたものであるため、光合成研究の発展形という側面もあり、光合成研究の重要性を示す好例である。

植物工場の弱点であるエネルギー消費については、エネルギー消費モデルを構築し、植物工場の持続可能性向上に向けた技術開発の方向性を模索する取り組みが続いている。例えば、植物工場が従来の圃場での農業や温室に比べてどのようにエネルギー消費と資源利用効率を改善できるかを体系的に分析した例がある^{a69)}。この例では、照明、空調換気設備、CO₂供給、水循環など主要要素をモデル化し、LED技術革新と環境制御の最適化によってエネルギー消費を大幅に低減できる可能性が示されている。

C-3. スマート農業

作業の効率化に加え、投入する肥料や農薬の削減、農産物の品質と収量向上、地球環境負荷の削減といった、複数の目標の同時達成を目指すスマート農業は、少ない労働力で収量を維持し、経営を改善させることが鍵となる日本の食料安全保障においても重要な技術項目である。スマート農業とは、データを駆使した単

純な機械化を推進するものではなく、時に拮抗するよう見える様々なパラメーターを最適化することで、多項目の目標達成を目指すものである。詳しい解説は2025年12月公開予定の「研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野～領域別動向編～（2026）L2.03 スマート農林水産業」の項目^{a70)}を参照されたい。

ここでは、フィールドフェノミクスの活用によるフードロス削減と農家利益最大化の研究開発例を挙げる。圃場で栽培されるブロッコリー個体を対象に、ドローンによる作物の撮像とAIによる画像解析を組み合わせることで、圃場内の全個体の花蕾サイズを非破壊・自動で推定し、収穫適期や規格外の発生を予測するワークフローを確立した^{a71)}。ドローンによる全個体空撮を2年間継続して行い、AIを活用した画像解析を組み合わせることで、ブロッコリーの花蕾サイズを高精度（2～3 cm以内の誤差）で推定でき、気象データと組み合わせることで約10日後まで個体単位でのサイズ分布の時系列推定が可能になった。さらに、ブロッコリーの全個体のサイズ変化と、サイズごとの出荷価格を組み合わせ、全個体を収穫したと仮定したときの総出荷価格を日毎に計算すると、収穫日が1日変わるだけで規格外が最大約5%増加し、収入が最大約20%減額することも判明した。このシステムを用いて収穫日を決定することで、規格外野菜の割合を最小化し生産者の収入を増やす可能性が示され、全個体の大きさを測定するというシンプルな技術が、規格外野菜を減らし、収入の向上と環境負荷の低減という一挙両得につながることを示唆しており、環境負荷と高品質化などを同時に追求するスマート農業の研究開発の好例である^{a71)}。

C-4. 水産養殖における成長速度向上

動物性タンパク質の需要が増える中、高タンパクで低脂質、必須アミノ酸やオメガ3脂肪酸（EPA・DHA）を多く含み、健康志向によく合致する魚介類の消費が、グローバルレベルで伸びている。消費拡大を続ける魚介類の供給を支えるのが、水産養殖技術とその革新である。特に、養殖魚の成長速度向上を目的とした研究開発が、ゲノム編集・選抜育種・環境制御技術の三領域で大きく進展している。

養殖魚のゲノム編集では、京都大学の木下らがCRISPR/Cas9によりマダイの筋肉量の増加を抑制する因子であるミオスタチン遺伝子を標的破壊し、骨格筋成長の抑制を解除した結果、筋線維径の肥大と筋量増加が得られた^{a72)}。ゲノム編集により作出された個体では、同齢の対照群に比べて筋肉量が顕著に増え、体長は短縮する一方で、全体重に占める可食部の割合が増加した。また、同じ量の飼料を投入量しても、ゲノム編集により作出された個体の体重増加は大きく、得られる可食部も多いことから、飼料利用効率が向上し、生産性が向上したと言える。ミオスタチン遺伝子の破壊は安定に次世代へ伝達され、形質の固定化も可能である点が確認され、魚類における成長関連遺伝子改変の有効性を示した技術的成果と言える^{a72)}。このマダイのゲノム編集の技術基盤は、2014年にメダカを用いて確立された魚類におけるゲノム編集技術^{a73)}である。ゲノム編集マダイは2021年、京都大学発のベンチャー企業、リージョナルフィッシュ社から厚生労働省にゲノム編集技術応用食品及び添加物の食品衛生上の取扱要領に基づく届出がなされ、市場での流通が可能になっており、オンラインでの販売が行われている。国内初のゲノム編集魚介食品として上市した点で国際的にも先駆的である。

ノルウェーのサケ・マス養殖ではゲノム選抜技術を用いて成長率と飼料効率を向上させた高性能系統が確立され^{a74)}、大西洋サケ養殖業では、成長・疾病抵抗性などの主要形質に対して SNPアレイを用いたゲノム選抜が導入されつつあり、従来の家系選抜よりも高精度に育種価を推定できる^{a75)}ことが報告されている。これらの技術は気候変動下で高成長・高効率な養殖魚を実現する基盤として国際的にも注目を集めている。

(D) 代替生産技術、食品関連技術

様々なタンパク質食品、脂質、嗜好性食品などの多様な食品原料の国内生産を可能にし、調達を選択肢を拡大するとともに、食品の品質向上やフードロス削減により食料供給全体の強靱性を高めることも食料安全保障に資する。例えば、現在、日本における自給率が2%しかない食用油脂について、油糧作物から生産するには広大な農地が必要であり、山間地が多い日本では農地面積の制約で増産が難しい。一方、藻類を大量培養する工場設備から供給する、という選択肢が増えることは、海外からの供給が不安定になったときの安定供給に資する可能性があり、食料安全保障に資すると言える。

従来と異なる方法で食料生産を行う技術は、代替生産技術と呼ばれ、欧米では19世紀末から植物性の畜肉代替食品の開発が行われてきた^{a76)}。近年では地球環境負荷の高い畜産物の消費を抑制する目的で、欧州を中心に畜産物代替食品の研究開発が進んでいる。実用化が始まっているものとしては、植物性タンパク質を使って畜肉のような加工食品を生産する分野である植物性代替肉^{a76)}、牛乳や卵の成分等を遺伝子組換え微生物に生産させる精密発酵^{a77)}、藻類でEPAやDHAなど食品機能成分を高効率に生産するもの^{a78)}、タンパク質を豊富に含む微生物をまるごと粉末にしてタンパク質原料とするもの^{a79)} などがある。開発途上のものとしては、畜産動物の筋細胞を*in vitro*で培養する培養肉^{a80)}、コーヒーやカカオなど気候変動の影響で生産量変動が激しい農産物を植物培養細胞技術を活用して生産しようとする^{a81)}もの、藻類でパルミチン酸やオレイン酸といった食用油脂成分の生産^{a82)}などが挙げられる。

こうした代替生産技術で生産された食品原料は、そのままでは従来食品の代替とならないため、様々な食品加工技術の開発も進んでいる。具体的には、畜肉の食感を再現するために3Dフードプリンターを用いる技術^{a83)}や、代替生産された原料は使用しないものの、植物性原料のみで鶏卵代替製品を設計する技術^{a84)}などを挙げることが出来る。3Dフードプリンターについては、使用できる食品原料の種類が増え、より複雑な形状を成型することが可能になっており、食品安全の観点からの議論も活発になってきた^{a85)}。

また、代替食品の嗜好性を高め、従来型食品の食味向上にも資する、美味しさの科学の発展も著しく、スタートアップや産学連携による研究開発を中心に、味覚や嗅覚、脳での感覚処理を含めた複合的な研究が急速に展開している。例えば、飽和脂肪酸を含む植物油を加熱した際の、乳製品や牛肉等に含まれるメチルケトンやラクトンといった動物性食品のおいしさを司る香気成分が生成するメカニズムの解明^{a86)}等が進んでいる。詳しい解説は2025年12月公開予定の「研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野～領域別動向編～（2026）L2.06 食料・フードテック」^{a87)}を参照されたい。

付録の参考文献

- a1) 科学技術振興機構研究開発戦略センター「戦略プロポーザル 次世代型食・栄養研究～地球環境の持続可能性とヒトの健康を両立する食・栄養の実現へ～」(2025年3月),
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-SP-03.html>, (2025年11月25日アクセス)
- a2) 鹿児島県「「食料・農業・農村基本法」や生産資材価格の高止まりに関連する情報」
https://www.pref.kagoshima.jp/ag01/nouseibu_nouseika/seisansizai.html, (2025年11月25日アクセス)
- a3) 科学技術振興機構研究開発戦略センター「調査報告書 持続可能な食料システム」(2025年3月),
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-RR-13.html>, (2025年11月25日アクセス)
- a4) 農林水産省「国内肥料資源の利用拡大プロジェクト」
https://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/s_hiryo/kokunaishigen/zenkokukyougikai/project.html, (2025年11月25日アクセス)
- a5) 三島慎一郎「日本における未利用資源からのリンの再生利用」『農研機構研究報告』第4号(2020): 1-9. https://www.jstage.jst.go.jp/article/naroj/2020/4/2020_1/_pdf/-char/ja (2025年11月25日アクセス)
- a6) 国土交通省「下水汚泥の肥料利用拡大に向けた成分分析調査結果について(令和7年6月)」,
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001739748.pdf> (2025年11月25日アクセス)
- a7) Harashima, Akira, Evaluating the effects of change in input ratio of N:P:Si to coastal marine ecosystem. *Journal of Environmental Science for Sustainable Society* 1(2007): 33-38.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jesss/1/0/1_0_33/_pdf/-char/ja?utm
- a8) Liu J, et al., Change of the Long-Term Nitrogen and Phosphorus in the Changjiang(Yangtze) River Estuary. *Frontiers in Marine Science* 9(2022): 885311.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2022.885311>
- a9) Methot RD, Wetzel CR. Stock synthesis:A biological and statistical framework for fish stock assessment and fishery management. *Fisheries Research* 142(2013): 86-99.
<https://doi.org/10.1016/j.fishres.2012.10.012>.
- a10) Martell S, Froese R. A simple method for estimating MSY from catch and resilience. *Fish and Fisheries* 14(2013): 504-514. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2012.00485.x>.
- a11) Hilborn R. Reflections on the success of traditional fisheries management. *ICES Journal of Marine Science*. 71(2014): 1040-1046. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu034>.
- a12) Free CM, et al., Impacts of historical warming on marine fisheries production. *Nature* 574(2019): 95-98. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2616-y>.
- a13) 半沢祐大, 「Stock Synthesis(SS)を用いた資源量推定」『水産海洋研究』88巻3号(2024): 206-207.
- a14) 宮川光代, 岡村寛, 「漁獲量データしかないときの資源評価手法」『黒潮の資源海洋研究』21号(2020): 31-35. <https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2010931967.pdf> (2025年11月25日アクセス)
- a15) 水産研究・教育機構「水産資源調査・評価推進委託事業」
https://www.fra.affrc.go.jp/shigen_hyoka/ (2025年11月25日アクセス)
- a16) 農林水産省「我が国の食料事情について 令和7年10月」
https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/zikyu_ritu/attach/pdf/panfu1-42.pdf (2025年11月25日アクセス)
- a17) 農林水産省「国産大豆の需要動向について 令和7年8月7日」

<https://www.maff.go.jp/hokuriku/seisan/daizu/attach/pdf/r7daizukaigi-2.pdf> (2025年11月25日アクセス)

- a18) 白岩立彦「日本の大豆はなぜ低収不安定か ——開発が進んだ生産技術と普及のための課題」*農業と経済* 88巻1号(2022): 161-170.
- a19) Horie T, et al. Crop productivity and environmental change in Japan. *European Journal of Agronomy*. 19(2003): 409–423. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9).
- a20) Horie T, et al. Modelling and prediction of global environmental change impacts on rice production in Asia. *European Journal of Agronomy*. 19(2003): 443-453. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7).
- a21) van Ittersum MK, et al. Yield gap analysis with local to global relevance - a review. *Field Crops Research*. 143(2013): 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.004>.
- a22) Zhang X, et al. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Science of The Total Environment*. 814(2022): 154982. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154982>.
- a23) Seufert, V., Ramankutty, N. & Foley, J. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature* 485(2012): 229–232. <https://doi.org/10.1038/nature11069>
- a24) Hasegawa, T. et al. A global dataset for the projected impacts of climate change on four major crops. *Scientific Data* 9(2022): 58. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01150-7>
- a25) Hultgren, A. et al. Impacts of climate change on global agriculture accounting for adaptation. *Nature* 642(2025): 644–652. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09085-w>
- a26) Hafiz Sharjeel Ahmed, et al., Sustainable pathways to ammonia: a comprehensive review of green production approaches, *Clean Energy*, 8(2024): 60-72. <https://doi.org/10.1093/ce/zkae002>
- a27) Yuya, Ashida, et al. Catalytic production of ammonia from dinitrogen employing molybdenum complexes bearing N-heterocyclic carbene-based PCP-type pincer ligands. *Nature Synthesis* 2(2023): 635–644. <https://doi.org/10.1038/s44160-023-00292-9>
- a28) BASF Digital Farming GmbH. Field Manager – Nutrition. xarvio Digital Farming Solutions. <https://ag.xarvio.com/global/field-manager/nutrition> (2025年11月25日アクセス)
- a29) Elena Najdenko, et al., Rapid in-field soil analysis of plant-available nutrients and pH for precision agriculture - a review. *Precision Agriculture* 25(2024): 3189–3218. <https://doi.org/10.1007/s11119-024-10181-6>
- a30) Dixon, R., Kahn, D. Genetic regulation of biological nitrogen fixation. *Nature Reviews Microbiology* 2(2004): 621-631. <https://doi.org/10.1038/nrmicro954>
- a31) Asahi Adachi, et al., Field dynamics of the root endosphere microbiome assembly in paddy rice cultivated under no fertilizer input, *Plant and Cell Physiology*, 66(2025): 1086–1101. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcaf045>
- a32) G.V. Subbarao, et al., Enlisting wild grass genes to combat nitrification in wheat farming: A nature-based solution, *Proceedings of National Academy of Sciences of United States of America* 118(2021): e2106595118, [https://doi.org/10.1073/pnas.2106595118\(2021\)](https://doi.org/10.1073/pnas.2106595118(2021)).
- a33) Sagnon, A., et al., Amendment with Burkina Faso phosphate rock-enriched composts alters soil chemical properties and microbial structure, and enhances sorghum agronomic performance. *Scientific Report* 12(2022): 13945. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18318-1>

- a34) Nicol, J.M., et al, (2011). Current Nematode Threats to World Agriculture. In: Jones, J., Gheysen, G., Fenoll, C. (eds) *Genomics and Molecular Genetics of Plant-Nematode Interactions*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0434-3_2
- a35) Morihiro Oota, et al., Rhamnogalacturonan-I as a nematode chemoattractant from *Lotus corniculatus* L. super-growing root culture. *Frontiers Plant Science* 13(2023): 1008725. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1008725>
- a36) Allen Yi-Lun Tsai et al., Root-knot nematode chemotaxis is positively regulated by l-galactose sidechains of mucilage carbohydrate rhamnogalacturonan-I. *Science Advances* 7(2021): eabh4182. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abh4182>
- a37) Demkura PV, Ballaré CL. UVR8 mediates UV-B-induced Arabidopsis defense responses against Botrytis cinerea by controlling sinapate accumulation. *Molecular Plant* 5(2012): 642-52. <https://doi.org/10.1093/mp/sss025>.
- a38) Tsurumoto, T., et al., Transcriptome and metabolome analyses revealed that narrowband 280 and 310 nm UV-B induce distinctive responses in *Arabidopsis*. *Scientific Report* 12(2022): 4319. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08331-9>
- a39) Shoaib N et al., Potential of UV-B radiation in drought stress resilience: A multidimensional approach to plant adaptation and future implications. *Plant, Cell & Environment* 47(2024): 387-407. <https://doi.org/10.1111/pce.14774>
- a40) Food and Agriculture Organization “World food and agriculture – Statistical Yearbook 2021”, Rome, Rome. <https://doi.org/10.4060/cb4477en>.
- a41) Sarah Morrone, et al., “Industry 4.0 and Precision Livestock Farming (PLF) :An up to Date Overview across Animal Productions, *Sensors* 22(2022): 4319. <https://doi.org/10.3390/s22124319>
- a42) Garcia Rodrigo, et al., A systematic literature review on the use of machine learning in precision livestock farming. *Computers and Electronics in Agriculture* 179(2020): 105826. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105826>
- a43) Saar M, et al., A machine vision system to predict individual cow feed intake of different feeds in a cowshed. *Animal*. 16(2022): 100432. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100432>.
- a44) Candido Pomar, Aline Remus, Precision pig feeding: a breakthrough toward sustainability, *Animal Frontiers*, 9(2019) 52–59. <https://doi.org/10.1093/af/vfz006>
- a45) Chojnacka K, et al., Innovative high digestibility protein feed materials reducing environmental impact through improved nitrogen-use efficiency in sustainable agriculture. *Journal of Environmental Management* Aug 1(2021) <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112693>.
- a46) Alexander N. Hristov, et al., An inhibitor persistently decreased enteric methane emission from dairy cows with no negative effect on milk production. *Proceedings of National Academy of Sciences of United States of America* 112(2015): 10663-10668. <https://doi.org/10.1073/pnas.1504124112>.
- a47) Jesse Thornburg, Feed the fish: A review of aquaculture feeders and their strategic implementation. *Journal of the World Aquaculture Society* 56(2025): e70016. <https://doi.org/10.1111/jwas.70016>
- a48) Yáñez JM, et al., Genome-wide association and genomic selection in aquaculture. *Reviews*

- in Aquaculture*. 15(2023): 645-675. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.100000>.
- a49) Jie Hu, Jie Yang, Huan Liao, Progress on stress resistance breeding in fish, *Reproduction and Breeding* 4(2024): 267-278. <https://doi.org/10.1016/j.repbre.2024.09.004>.
- a50) Daoliang Li, et al., Automatic recognition methods of fish feeding behavior in aquaculture:A review. *Aquaculture* 528(2020): 735508. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735508>
- a51) Wang, C., et al. Intelligent fish farm - the future of aquaculture. *Aquaculture International* 29(2021): 2681–2711. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00773-8>
- a52) Yoshizaki, G., Yazawa, R. Application of surrogate broodstock technology in aquaculture. *Fisheries Science* 85(2019): 429-437. <https://doi.org/10.1007/s12562-019-01299-y>
- a53) Megan N. Moran, et al., Optimising commercial traits through gene editing in aquaculture:Strategies for accelerating genetic improvement. *Reviews in Aquaculture* 16(2024): 1127-1159. <https://doi.org/10.1111/raq.12889>
- a54) Ian Mayer, Martin Pšenička, Conservation of teleost fishes:Application of reproductive technologies. *Theriogenology Wild* 4(2024): 100078, <https://doi.org/10.1016/j.therwi.2024.100078>.
- a55) Shiyang Gao, et al., Microalgae as fishmeal alternatives in aquaculture:current status, existing problems, and possible solutions. *Environmental Science and Pollution Research* 31(2024): 16113-16130. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32143-1>
- a56) Violeta Kalemi, et al., Replacing fishmeal with an insect meal blend:Implications for intestinal microbiota in European seabass, *Aquaculture Reports* 43(2025): 102939, <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.102939>.
- a57) Brandi Mckuin, et al., Comparative life cycle assessment of marine microalgae, *Nannochloropsis sp.* and fishmeal for sustainable protein ingredients in aquaculture feeds. *Elementa* 11(2023): 00083. <https://doi.org/10.1525/elementa.2022.00083>
- a58) Paul F. South et al., Synthetic glycolate metabolism pathways stimulate crop growth and productivity in the field. *Science* 363(2019) eaat9077. <https://doi.org/10.1126/science.aat9077>
- a59) Johannes Kromdijk et al., Improving photosynthesis and crop productivity by accelerating recovery from photoprotection. *Science* 354(2016): 857-861. <https://doi.org/10.1126/science.aai8878>.
- a60) Maria Ermakova, et al., Installation of C4 photosynthetic pathway enzymes in rice using a single construct. *Plant Biotechnology Journal* 19(2020): 575-588. <https://doi.org/10.1111/pbi.13487>.
- a61) Feyissa, Biruk A. et al., An orphan gene BOOSTER enhances photosynthetic efficiency and plant productivity. *Developmental Cell* 60(2025): 723-734. <https://doi.org/10.1016/j.devcel.2024.11.002>.
- a62) Yuchen Qu, et al., Identification and characterization of compounds that improve plant photosynthesis and growth under light stress conditions. *Communications Biology* 8(2025): 300. <https://doi.org/10.1038/s42003-025-07582-2>
- a63) Nakazato, I., et al., Targeted base editing in the plastid genome of *Arabidopsis thaliana*. *Nature Plants* 7(2021): 906–913. <https://doi.org/10.1038/s41477-021-00954-6>
- a64) 科学技術振興機構研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野

- ～領域別動向編～（2026年）L2.02 育種」 <https://doi.org/10.82643/crds-fr-l-ab-br>
- a65) Intergovernmental Panel on Climate Change, “SIXTH ASSESSMENT REPORT Working Group II – Impacts, Adaptation and Vulnerability Fact sheet – Food and Water”. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGII_FactSheet_FoodAndWater.pdf（2025年11月25日アクセス）
- a66) Wataru Yamori, Photosynthetic response to fluctuating environments and photoprotective strategies under abiotic stress. *Journal of Plant Research* 129(2016): 379–395. <https://doi.org/10.1007/s10265-016-0816-1>.
- a67) Hanaka Furuta, et al., A novel multilayer cultivation strategy improves light utilization and fruit quality in plant factories for tomato production. *Frontiers in Horticulture* 4(2025): 1633097. <https://doi:10.3389/fhort.2025.1633097>.
- a68) Tomoki Takano, et al., Sustainable Edamame production in an artificial light plant factory with improved yield and quality. *Scientific Reports* 15(2025): 32083. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-17131-w>
- a69) Dafni Despoina Avgoustaki, George Xydis, Chapter One - How energy innovation in indoor vertical farming can improve food security, sustainability, and food safety?, Editor: Marc J. Cohen, *Advances in Food Security and Sustainability*, Elsevier, 5,(2020): 1-51. <https://doi.org/10.1016/bs.af2s.2020.08.002>.
- a70) 科学技術振興機構研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野～領域別動向編～（2026年）L2.03 スマート農林水産業」 <https://doi.org/10.82643/crds-fr-l-ab-br>
- a71) Haozhou Wang, et al., Drone-Based Harvest Data Prediction Can Reduce On-Farm Food Loss and Improve Farmer Income. *Plant Phenomics* 5(2023): 0086. <https://doi.org/10.34133/plantphenomics.0086>
- a72) Kenta Kishimoto, et al., Production of a breed of red sea bream *Pagrus major* with an increase of skeletal muscle mass and reduced body length by genome editing with CRISPR/Cas9. *Aquaculture* 495(2018): 415-427. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.05.055>
- a73) Satoshi Ansai, Masato Kinoshita, Targeted mutagenesis using CRISPR/Cas system in medaka. *Biology Open* 3(2014): 362-371. <https://doi.org/10.1242/bio.20148177>.
- a74) Ingun Næve, et al., The power of genetics: Past and future contribution of balanced genetic selection to sustainable growth and productivity of the Norwegian Atlantic salmon (*Salmo salar*) industry. *Aquaculture* 553(2022): 738061. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738061>.
- a75) Jose M. Yanez, et al., Genome-wide association and genomic selection in aquaculture. *Reviews in Aquaculture* 15(2023): 645-675. <https://doi.org/10.1111/raq.12750>
- a76) Ishamri Ismail, Young-Hwa Hwang, Seon-Tea Joo, Meat analog as future food: a review. *Journal of Animal Science and Technology* 62(2020): 111-120. <https://doi:10.5187/jast.2020.62.2.111>.
- a77) M.B. Nielsen, A.S. Meyer, J. Arnau, The Next Food Revolution Is Here: Recombinant Microbial Production of Milk and Egg Proteins by Precision Fermentation. *Annual Review of Food Science and Technology* 15(2024): 173-187. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-072023-034256>

- a78) Daniel Gabriel Barta, Vasile Coman, Dan Cristian Vodnar, Microalgae as sources of omega-3 polyunsaturated fatty acids:Biotechnological aspects. *Algal Research* 58(2021): 102410. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102410>.
- a79) Jani Sillman, et al., Bacterial protein for food and feed generated via renewable energy and direct air capture of CO₂:Can it reduce land and water use? *Global Food Security* 22(2019): 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.09.007>.
- a80) Mark J. Post, et al. Scientific, sustainability and regulatory challenges of cultured meat. *Nature Food* 1(2020): 403–415. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0112-z>
- a81) Heikki Aisala et al., Proof of Concept for Cell Culture-Based Coffee. *Food and Beverage Chemistry/Biochemistry* 71(2023): 18478-18488. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04503>
- a82) Claire A. Fawcett, et al., Microalgae as an alternative to oil crops for edible oils and animal feed. *Algal Research* 64(2022): 102663. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102663>.
- a83) Yaxin Wen, et al., Development of plant-based meat analogs using 3D printing:Status and opportunities. *Trends in Food Science & Technology* 132(2023): 76-92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.12.010>.
- a84) McClements, D.J., Grossmann, L. A brief review of the science behind the design of healthy and sustainable plant-based foods. *npj Science of Food* 5, 17(2021). <https://doi.org/10.1038/s41538-021-00099-y>
- a85) Zhu, Wenxi, et al., Three-Dimensional Printing of Foods:A Critical Review of the Present State in Healthcare Applications, and Potential Risks and Benefits, *Foods* 12(2023): 3287. <https://doi.org/10.3390/foods12173287>
- a86) Kanji Aoyagi, et al., Preparation of saturated fatty acid hydroperoxide isomers and determination of their thermal decomposition products – 2-alkanones and lactones. *Food Chemistry* 21(2024): 101074. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101074>.
- a87) 科学技術振興機構研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野～領域別動向編～（2026年）L2.06 食料・フードテック」
<https://doi.org/10.82643/crds-fr-l-ab-br>

作成メンバー

総括責任者	永井 良三	上席フェロー	ライフサイエンス・臨床医学ユニット
リーダー	桑原 明日香	フェロー	ライフサイエンス・臨床医学ユニット
メンバー	柴田 大輔	特任フェロー	ライフサイエンス・臨床医学ユニット

調査報告書

CRDS-FY2025-RR-03

食料安全保障と栄養安全保障： 歴史的背景と世界が目指す方向性

令和 7 年 12 月 December 2025

ISBN 978-4-86829-022-3

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。
著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
なお、本報告書の参考文献としてインターネット上の情報が掲載されている場合、当該情報はURLに併記された日付または本報告書の発行年月の1ヶ月前に入手しているものです。
上記以降の情報の更新は行わないものとします。

This publication is protected by copyright law and international treaties.
No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.
Any quotations must be appropriately acknowledged.
If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.
Please note that all web references in this report were last checked on the date given in the link or one month prior to publication.
CRDS is not responsible for any changes in content thereafter.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



CRDS

<https://www.jst.go.jp/crds/>

