

3.4 食料・バイオリファイナリー

＜区分の俯瞰全体像＞

「食料・バイオリファイナリー」区分は、ライフサイエンス系の基礎的な学問分野から派生する生物系技術のうち、植物、微生物に関わる分野を対象とする。微生物学、植物科学、生態学など複数の基礎科学領域にまたがり、食料生産、物質生産、環境リノベーションへの応用につながるという観点から、近年特に社会的なニーズが高いものを中心に、以下の7領域を設定した。これら以外にも重要な研究領域が存在することは認識しており、次回の俯瞰（2019年）に向けた調査を実施予定である。

表 3-3 「食料・バイオリファイナリー」区分領域一覧

領域名	領域設定の観点
グリーンバイオ関連基礎科学	微生物学、植物科学、生態学などの分野全体の知識基盤
バイオリファイナリー	植物バイオマス資源活用・生産技術体系
作物増産技術	草本性・木本性作物の作物増産技術
持続型農業	窒素およびリンの持続的施用と評価技術、共生微生物利用技術
高機能高付加価値作物	機能性成分強化作物開発
食品原料（機能性成分）	ヒトの健康の維持・増進などに役立つ機能性成分
リン・レアメタル回収	有限かつ代替不可能な資源の回収

「グリーンバイオ関連基礎科学」は、微生物学、植物科学、生態学などの学術から派生し、食料生産、物質生産、環境リノベーションを目標とする基礎基盤研究領域である。他の全ての研究領域に関わる。近年の次世代シーケンサーの性能向上などにより、これまで困難であった生物間相互作用研究の進展が期待されている。

「バイオリファイナリー」は、植物バイオマス資源を原料に、石油代替となる燃料や化成品など多様な製品を製造する生産技術体系および研究領域である。原料バイオマスごとに、木本（木質）、草本、藻類についての動向を述べる。

「作物増産技術」は、穀物および野菜などの草本性作物、果樹などの木本性作物の作物増産技術である。育種的アプローチ（遺伝的能力の改善）と耕種的アプローチ（栽培環境の改善）に大別し、草本性および木本性の作物についてそれぞれの動向を述べる。

「持続型農業」は、人類が生存を続けていくために必要な食糧生産を、地球環境に不可逆的な負の影響を与えずに持続的に継続していくための研究開発領域である。環境負荷の低減を目指した窒素やリンの施用・評価・技術、共生微生物の利用技術を中心にとりまとめた。

「高機能高付加価値作物」は、ヒトの健康を維持増進させることが期待される植物由来成分を多く含む作物開発である。長年蓄積された育種研究をもとにした「機能性作物」開発について、官民両方の動向について述べる。

「食品原料（機能性成分）」は、ヒトの健康の維持・増進、体調の維持・管理、QOLの向上などに役立つ可能性のある物質、機能性成分に関する研究領域である。高齢化などの近年の社会ニーズを受けて、抗酸化成分やアミノ酸などを中心にとりまとめた。

「リン・レアメタル回収」は、有限かつ現時点で代替不可能な資源であり、農業および各種

産業に必須の元素であるものとして、リンおよびレアメタルの回収にかかる研究領域について取り上げた。

以下に、区分4「食料・バイオリファイナリー」の要素技術マップと、今回取り上げた研究開発領域の関係を概観する図を示す。

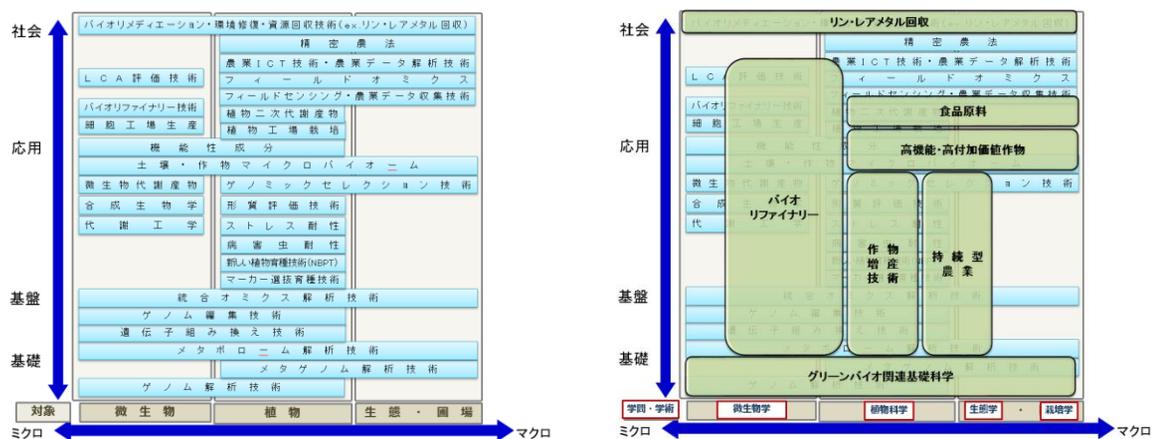


図 3-1 「食料・バイオリファイナリー」区分の要素技術マップ（左）と、今回取り上げた研究開発領域の概観図

3.4.1 グリーンバイオ関連基礎科学

（1）研究開発領域の簡潔な説明

グリーンバイオ^{注1)} 関連の基礎基盤研究・技術領域。食料生産、物質生産、環境リノベーション等を目標とし、対象は主として、微生物、植物、生態系（たがいに相互作用する植物・動物・微生物などの生物叢全体、という概念を含む）である。

※注：本報告書で用いる「グリーンバイオ」の定義は調査報告書「グリーンバイオ分野における研究開発の重要課題と統合的推進」（CRDS-FY2015-RR-08）¹⁾で述べたとおり。対象は植物、微生物、および生態系であり、農業に資するバイオテクノロジー以外にも、微生物を用いた産業用バイオテクノロジー技術および生態系を扱う基礎科学から派生した技術群も包含する。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

グリーンバイオ関連の基礎基盤研究領域の共通する動向は、高性能の核酸塩基配列解読装置（次世代シーケンサー）の登場と普及により、環境中のあらゆるサンプルから膨大な生物多様性情報を取り出すことが可能となったことである。これにより、複雑な生物種間の相互作用ネットワークから微生物-微生物、あるいは宿主-微生物の相互作用研究がこれまでよりも大規模かつシステムティックに行えるようになった。今後爆発的に増えると予想される微生物などのバイオリソース、および生物多様性情報を、どのように維持管理し活用していくかは、既存のカルチャーコレクションやデータベースの維持・活用とともに、極めて重大な課題となる。

本稿では、微生物、植物、生態系と、ミクロからマクロにいたる視点にわたって、食料生産、物質生産、環境リノベーション等を目標にしたグリーンバイオ関連の基礎研究領域についてまとめた。以下、微生物学、植物科学、生態学の順に述べる。

【微生物学】

微生物は伝統的発酵食品の生産者として、その存在が認識される以前の古代から利用されてきた。また微生物は大腸菌、出芽酵母に代表されるように、生物学、分子生物学の基礎研究のためのモデル生物として多くの研究の材料となり、成果を上げてきた。2016年、ノーベル医学生理学賞を受賞した大隅良典博士の研究がその実例である。1920年代後半に発見され1940年代に大量生産が可能になった抗生物質は、微生物が生産する医薬品として、世界中の製薬企業の新薬開発のターゲットとなった。2015年にノーベル医学生理学賞を受賞した大村智博士の成果はこの延長線上にある。1960年代に日本が世界をリードしたアミノ酸産業は、化学合成では困難な異性体の合成を微生物および微生物由来酵素が開拓した典型例である。洗剤用酵素や希少糖などでは、微生物利用が製品の大幅なコストダウンをもたらし、新しい産業の創生、利用分野の開拓などにつながった。同様に環境汚染への解決手段として汚染物質の除去手段として環境修復（バイオレメディエーション）では、人工難分解物質の微生物による分解といった利用が進められている。これらの生命科学研究とバイオテクノロジーの産業化はつねに、新規微生物の発見に始まり、新規機能の開発、育種、といった研究開発がリードしてきた。各時代に応じて、研究材料として多様な形での微生物資源が求められている。

2000年代後半頃から、土壌をはじめとして水圏、排水処理汚泥など様々な環境を対象に、16SrRNA や 18SrRNA のシーケンス配列を利用した微生物プロファイリングについての研究が行われるようになった。Operational Taxonomic Unit (OUT、ある一定以上の類似性、一般的には 96-97%程度の相同性、を持つ配列同士を一つの菌種のように扱うための操作上の分類単位) をベースにし、ごく一部の部分配列をもとに大まかに微生物集団の全体像を把握する解析が中心であった。近年はさらに、次世代シーケンサーの性能向上およびコストの劇的な低下の影響で、個々の微生物種のゲノム解析や遺伝子発現解析を含めた、総合的かつ網羅的解析を目指す方向性にある。同時に、微生物群の分離・培養技術も向上し、モデル植物や作物の根圏等からコア微生物叢が単離、同定されてきている。

今後の微生物の未知機能の発見と開発においては、次のような基盤整備が求められる。(a) 未知機能探索のための多種多様な微生物株の取得(アクセス)、(b) 発表された研究成果の保全のための微生物株の保存体制とそれを利用した発展的研究の担保、(c) 微生物の多様性を認識し、効率的な探索と利用を可能にする分類学的研究の推進、(d) 生物多様性条約、名古屋議定書による生物資源の国際移転の円滑化や安全性に関する法令遵守と知的財産権管理、(e) カルチャーコレクションの整備とその国際ネットワーク化、(f) 塩基配列情報や生理的特性、分類情報などのデータベースの開発と、論文情報や安全情報などの他のデータベースとのリンク。これらは、応用研究や産業化のためだけではなく、研究評価、公的機関の国際共同研究、留学生の研究課題などにも影響を与える重要な要素である。

【植物科学】

植物を中心とした生物間相互作用研究は、大別すると、植物とそれに被害を与える生物(主に微生物を主とした病原体、昆虫、植物を含む)との相互作用、植物と相利共生をむすぶ生物(主に菌根菌および窒素固定菌)との相互作用、そして、比較的新しい分野である植物圏の生物叢研究、3つに大別される。これらの相互作用は、複数の生命体がかかわる多様な現象であり、農業の生産性や森林・水圏などの環境保全などに大きな影響を与える。相互作用にもとづく生物間の関係性もダイナミックに変化するため、従来は解析が非常に難しい研究領域であった。近年の次世代シーケンサーの性能向上によりゲノム・トランスクリプトーム解析のコストが下がってきたこと、環境モニタリングデータ等のビッグデータのデータ収集および解析技術が著しく向上してきたことなどにより、最先端の研究領域となってきた。以下、植物-病原体(微生物、昆虫、植物を含む)相互作用の研究、相利共生に関する研究に大別して説明する。植物圏の生物叢研究の具体的な内容は、生態学の項で詳述する。

<植物-病原体相互作用の研究>

これまでは、主に解析が比較的容易だった植物-ウイルス、植物-細菌の相互作用に集中して研究が行われてきた。つまり、あるモデル植物とあるモデル病原体の1対1の関係から、相互作用を規定する因子(病原性エフェクター蛋白質、病原体分子パターン、およびそれらを認識するレセプター)の同定とその機能解析が中心であった。次世代シーケンサーの性能向上およびコストの劇的な低下により、植物の研究対象が穀物や野菜、果実等の作物に拡大し、それらに寄生する多様な病原体との研究が始まっている。特に、主流は実害の大きい病原体の解析にシフトしてきている。例えば、カビや卵菌(藻類に近い糸状タイプの菌、19世紀のジャガイモ飢饉を引き起こした生物群としても知られる)、土壌線虫など駆除が難しく

培養が難しい病原体、アフリカ等で被害額の大きい寄生植物^{2, 3)}などがあげられる。これらの病原体は、真核生物であり、比較的ゲノムが大きく、かつ形質転換法が確立してないため、機能解析が困難なことが多い。また、病原体のゲノム解析により、進化のスピードが速い多様な遺伝子群を多く保持していることがわかってきた⁴⁾。これらの遺伝子の機能はほとんど不明であり、またそれらの遺伝子によって生産される二次代謝産物も多様かつ新奇なものが多く含まれると予想される。これら遺伝子群の機能解析および、植物微生物間の相互作用に関与する低分子化合物の同定とその利用が期待できる。

<相利共生に関する研究>

地上に生息する植物のほとんどは、菌根菌に代表される真菌門（カビ・キノコなど）の生物と共生し、生育に必要な栄養を吸収している。特に、菌根菌は土壤中のリン酸の吸収に大きく関与しており、宿主の植物の生育に影響を与えている。また、マメ科植物に代表される根粒細菌による窒素固定も、栄養条件が悪い土壌の利用や、化学肥料の削減に非常に重要である。これまでマメ科モデル植物の遺伝学的解析から、菌根菌の共生と根粒菌の共生には共通の遺伝子群が関与していることがわかってきた。これら共通の遺伝子群の機能解析および、下流の遺伝子群の同定と機能解析が、相利共生の総合的理解と応用への鍵を握ると考えられる。また、培養法、形質転換法が確立されてはいないが、ゲノム解析などを用いた真菌側の研究も盛んになってきており、真菌側の共生因子などの理解に大きな進展が予想される。

【生態学】

生態系が果たす機能は、肥沃な土壌形成、送粉サービス、環境浄化、温室効果ガスの固定や消去、水の保持、など極めて多面的である。生態系の再生と設計に関わる研究を統合することで、複合的な問題に取り組む枠組みを提供できると考えられる。しかし、生態系内には無数の生物種が生息し、その生物種間の相互作用ネットワークは非常に複雑である。従来、生物の系統ごとに研究者層が分かれ「縦割り」構造が形成されており、生態系全体の動態を理解するには限界があった。しかし、次世代シーケンサーを用いた生物多様性研究の勃興後は、全生物に共通の物質、DNAをもとに分析・解析技術の標準化が可能となった。これにより、従来の「縦割り」研究の枠を超えて、生態系内の様々なタイプの生物間相互作用を極めて効率的に解析することができ、さらにその知見を統合することが可能になると予想される。それらを通じて、未知の共生ネットワーク構造や食物網のループ、ひいては新たな生態系機能の発見につながると期待される。膨大なDNA情報に基づく生物群集・生態系研究において、日本は先駆的な業績をあげつつある⁶⁾。生物種間のネットワークに関する知識が飛躍的に増大し、その生態系内での機能に関する知識が深まれば、農地や水産資源の管理、また、自然生態系の再生において新たな戦略が見いだされるであろう。DNA情報に基づく大規模生物多様性分析で解明が期待される生態系の機能について、植物圏の生物叢研究および、水域生態系研究について以下に例示する。

<植物圏の生物叢研究>

① 土壌中の菌根菌群集とその動態

植物の陸上進出のごく初期から、植物は菌根菌との共生関係を結んでいた。菌根菌類は、土壌中の窒素、リン、水を植物に提供する基幹的な役割を担っている。また、菌根菌類は、高温・乾燥・病原生物に対する宿主植物の抵抗性を高める役割を担っており、極めて重要な機能を自然・農地生態系内で果たしている。今後は菌根菌の多様性と群集構造解析およ

び菌根菌種ごとの詳細な機能解析などを通じた基礎情報の蓄積が、農業技術への新たな展開へ向けて必要である。

②植物内生菌の多様性と共生微生物間の相互作用

近年、植物の葉・茎・根に膨大な数の真菌や細菌が共生していることがわかってきている。菌根菌の一部を除いて大多数は機能未知で、「内生菌」と呼ばれている。最近の研究から、一部の内生菌が菌根菌やその他の微生物と宿主の関係を制御している可能性が浮上してきた⁷⁾。共生微生物同士の相互作用ネットワークの解明を進めることで、有用微生物が共生しやすく、病原生物が侵入しにくい植物体を設計する手がかりが得られると期待される。

③共生者・寄生者で結ばれる植物どうしのネットワーク構造

林産物と食料の生産を同時に行うアグロフォレストリーなど、複数の植物種の栽培を基本にした農地生態系の管理が世界的に拡大している。このような新たな動きの背景にはいくつかの理由がある。第一に、複数の植物を栽培することで、農地が裸地化する時期がないために、土壌の流失や劣化が起こりにくい。第二に、生物多様性が高い生態系ほど、安定性が高い傾向にあるため、病虫害の発生による壊滅的被害が発生しにくい。第三に、多品目の生産により、異常気象や農産物価格の変動によるリスクが軽減される。日本ではまだ普及していないが、気象・国際経済環境の変動に対応する上で、こうした複数作物栽培の技術が重要性を増してくるであろう。こうした多品目栽培を見越し、植物種間でどのように菌根菌や内生菌、寄生菌を共有しているのか大規模に解明し⁸⁾、植え合わせのよい植物の組み合わせを科学的に検討していくことが期待される。

<水域生態系の食物網構造>

水産資源の枯渇は国際社会の喫緊の課題である。漁業資源の管理を効率的に行うためには、食物網構造に関する知見を蓄積し、水域生態系のしくみについて理解を精緻化していく必要がある。捕食者の体内に残る餌種の DNA をハイスループットに分析することによって⁹⁾、食物網研究を加速させることができると期待される。

(3) 注目動向

【国内動向】

- ・ 純粋培養できない微生物の複合系での培養、試料の微生物の全体の遺伝子プロファイル解析するメタゲノム解析技術、または細胞一個からでもゲノムの塩基配列決定ができる技術など、新しい技術、考え方の導入が進んでいる。
- ・ 微生物株の取得：1980年代までは日本企業の研究者も海外で自由に試料採集をしてきたが、生物多様性条約の規制のある現在では、海外の試料を用いた研究には、原産国の法令遵守に注意が必要であり、国際共同研究が必須である。
- ・ 次世代シーケンサーの登場により、これまで考えられなかった規模で生物種の多様性と群集構造を解明できるようになってきた^{10, 11)}。土壌や水の中に含まれる DNA（「環境 DNA¹²⁾」）を分析すれば、そこにどのような生物種が存在するのか、ハイスループットに分析可能になった。得られた DNA 情報をもとに、データベースの DNA 配列と照合し、生物の同定を行う技術を「DNA バーコーディング」と呼ぶが、この技術を完成する理

論が日本人研究者によって構築された¹³⁾。また、この理論をもとにした自動生物同定プログラムがウェブ上で公開された (<https://www.fifthdimension.jp/products/claident/>)。このプログラムを用いれば、あらゆる生物群の多様性解析を高速かつ自動で行うことが可能である。

- 膨大な種数を誇る微生物について、その種間相互作用を解明するのは従来非常に困難であったが、その状況を克服する解析が現れはじめている。例えば、ヒトの糞便サンプルや植物体サンプルをもとに、宿主体内で共存しやすい微生物種のパアや、共存できない微生物種のパアを解明することができるようになってきた。多数の宿主サンプルを次世代シーケンサーで同時解析することにより、共存・非共存のネットワークを統計解析によって解明することも可能になった¹⁴⁾。こうした微生物種間ネットワーク解析をもとに、微生物生態系内で重要な役割を果たす「コア（中核）微生物」の存在が示唆されるようになった⁷⁾。
- ERATO「野村集団微生物制御プロジェクト」が平成28年5月にスタートし、集団微生物の制御技術の創出を目指した研究が推進されている。植物圏微生物叢研究にも応用可能な技術の開発が行われている。
- CREST「環境変動に対する植物の頑健性の解明と応用に向けた基盤技術の創出」、さきかけ「フィールドにおける植物の生命現象の制御に向けた次世代基盤技術の創出」が平成27年10月にスタートし、植物のフィールドでの環境変化への適応のため分子レベルの設計に基づく基盤開発が行われている。
- AMED CREST「ヒトの微生物叢と宿主の相互作用・共生の理解と、それに基づく疾患発症のメカニズム解明」が平成28年4月にスタートした。開発される技術が植物圏微生物叢研究にも応用可能となる可能性がある。
- 名古屋大学WPIトランスフォーマティブ生命分子研究所 (ITbM) および理化学研究所環境資源科学研究センター(CSRS)が平成25年にスタートし、ケミカルバイオロジー、有機化学、植物科学を融合する研究基盤が構築された。
- 新学術領域「植物細胞壁の情報処理システム」(平成24年開始) および「植物の成長可塑性を支える環境認識と記憶の自律分散型統御システム」(平成27年開始)、が設置され、植物の環境への応答を多角的に理解する領域が発足した。
- 新学術領域「生合成リデザイン」(平成28年開始) が採択され、植物、微生物等の生合成遺伝子群と低分子化合物を網羅的に解析する領域が発足した。
- 日本国内において、生態学・微生物学・情報科学・数理生物学の専門家が集う研究会(エコミメティクス研究会) が結成され、定期的に分野融合のための研究イベントやシンポジウムを企画している。

【海外動向】

- 原核生物(細菌とアーキア)の新種の発表はこの数年800種/年以上になっており、多くは分類学者以外による発表である。原核生物ではそれが2000年までに世界的に集中的に進められ、ほぼすべての細菌種のrRNAの塩基配列が決定されたことは分類体系の構築だけではなく、微生物のゲノム解析に基づく遺伝子解析の利用において重要な基盤を形成した。

- ・生物多様性条約と知的財産権：生物多様性条約の骨子は、生物多様性の保全、持続可能な利用、公平な利益配分である。同時に、研究、教育の促進もうたっており、各国は適切な管理の下、利用促進の環境を整備しなければならない（2016年現在、日本は生物多様性条約を批准しているが、名古屋議定書は批准していない）。生物資源の取得や移転は国の当局の事前承認が必要であるが、名古屋議定書を担保する国内法を整備した国はきわめて少なく、明確な手続き法が確立していない。現状、生物資源の移転や利用については、研究者同士ではなく大学等の組織間で協定を締結することで研究活動との調和が期待されている。知的財産権としては微生物を使った特許についてはそのクレームを担保する微生物株の取得を可能にするように特許微生物寄託センターが各国に整備されている。国際特許に対しては世界知的財産機構(WIPO)によるブダペスト条約に基づき、1カ所の国際寄託当局(IDA)に寄託することにより加盟国への特許出願が可能になっているが、この制度と生物多様性条約の調和についてはこれからの課題として残されている。(インドとブラジルは手続きのための国の法令が整備されている)
- ・カルチャーコレクション：かつて各国に最低1つは微生物株の公的な保存機関（公的カルチャーコレクション）が存在したが、近年は運営のための公的研究資金の不足により、各国さまざまな形態をとるようになってきている。基本的にカルチャーコレクションでの微生物の保存は、寄託者の研究成果に基づくものであったが、最近では、カルチャーコレクションは法令遵守、知財管理の点からも、自らの技術で品質を管理し、利用者に提供する必要に迫られている。さらに、加速度的に増えているゲノム情報を活用するためには微生物株の取得は必須であるが、ゲノム情報を担保できる微生物株の提供には高度な品質管理が求められている。また、国際的な移転、各国の機関との微生物株の共有のための基盤整備も必要で、OECDでは2001年にバイオテクノロジーに求められる生物資源センター(BRC)について報告書をまとめ、2007年にはその運営のためのベストプラクティスガイドラインを作成している。また、近年、単独では培養できないが、特定の微生物の共存状態で培養可能な微生物の場合は、共存微生物存在下で保存提供するCo-cultureの考え方が保存機関にも導入されてきている。
- ・データベース：微生物保存機関は保有微生物株の学名、履歴、分離源、培地と培養法、分類学的情報などをカタログとして出版してきたが、最近ではデータベースとしてオンラインで公開するのが一般的である。これらには各保存機関独自の微生物資源の他、公定試験の使用株や分類学的基準株など、日本国内、あるいは国際的に共有すべき微生物株は複数の微生物保存機関で保有している。これらの複数の保存機関で保存情報のネットワーク化はもとより、塩基配列情報などの他のデータベースとのリンクなどが進められている。保存機関情報については、WFCCの下部機関として世界データセンター(World Data Center for Microorganisms, WDCM)がいろいろなデータベースを構築しており、各保存機関の動向も把握できる。
- ・複数タイプの相互作用ネットワークを同時に解析する動きが、イギリスや北欧の研究者の中から現れてきている。しかし、そこで分析対象となっている相互作用ネットワークは未だに生態系内の構造のごく一部にとどまっている。
- ・米国では、大統領主導での総合的微生物叢研究プロジェクト(\$121M, National Microbiome Initiative)が発足した。

- ・ 米国植物病理学会から”Phytobiome”という概念が 2013 年頃に提唱され、2015 年 7 月に”Phytobiome Initiative”のキックオフミーティングがワシントン DC で開かれた。”Phytobiome”とは、植物とそれを取りまく生物集団および環境を指す。2016 年に発表されたロードマップによれば、”Phytobiome”中の相互作用は土、植物、および農業生態系の健全性に絶大な影響を及ぼすため、”Phytobiome”の研究は、世界の持続的な食料、飼料、繊維の持続的な生産の確保に極めて重要であるとしている。戦略的なファンディングと官民連携研究が必要と訴え、関連研究費の増加や、”Phytobiome Alliance”という官民連携体制の構築、および学術雑誌”Phytobiomes”の発刊に向けて活動中である。

（4）科学技術的課題

- ・ 従来、微生物の分類には、形態、生理試験、細胞成分などの表現型性状に基づき分類学者によって専門的に行われてきた。近年、rRNA の塩基配列が共通のものさしとして使われるようになり、専門の分類学者でなくとも微生物の分類学的位置が容易に決定でき正確に記述されるようになった。原核生物では 2000 年までに世界的に集中的に進められ、ほぼ全ての細菌種の rRNA の塩基配列が決定され分類体系が構築された。それらに基づき現在では、細菌の rRNA の遺伝子を決定し、未知のものであれば新種の可能性が高いとして報告されるようになった。
- ・ 99%の微生物は難培養性といわれ、単離できる微生物は氷山の一角と考えられている。難培養性微生物の培養技術の開発が急務である。
- ・ 土壌は非常に多様であり、環境に適応した微生物も多様である。このため、様々な場所、様々な植物、様々な環境要因におけるサンプリングが必要となり、ビッグデータ解析技術、データストレージ、菌株ライブラリーの維持等、大型のプロジェクトが必要である。
- ・ 土壌から単離、同定された微生物を他の土壌に移植しても微生物叢を再構成することは難しい。微生物叢の構築原理を理解できていないためであると考えられている。
- ・ 植物病原菌のフィールドでの分子疫学的な情報はほとんどない。
- ・ 微生物が生産する低分子化合物は非常に多様性が高い。ゲノムシーケンスにより、生合成遺伝子群が数多く見つかっているが、そのほとんどが機能未知の酵素群である。
- ・ 加速度的に進行する環境悪化は、アフリカや中国といった地域だけでなく、日本の農業環境も大きく変える恐れがある。異常気象による悪影響を和らげるためにも、生態系が本来持つ「バッファー」としての機能を最大限に活かす農地管理が今後求められてくる。
- ・ タンパク質の供給源として重要な水産資源についても、枯渇が懸念されている。現在の漁獲規制は十分ではなく、魚種によっては急速にその個体数が減少している。「共有地の悲劇」として典型的な事例と言える。漁獲規制や漁獲枠をめぐる国家間の交渉では、漁業資源量の将来予測に関する説得力のある科学的情報が必要となる。しかし、水圏食物網の構造は複雑で、まだその構造に関する知見は乏しく、説得力のある情報を提供する生態学的な技術の開発が待たれている。

（５）政策的課題

- ・微生物を材料とした研究開発を基盤とし、農業・畜産への応用、医学・薬学への応用、産業化につながる可能性は多数ある。しかし、微生物には感染症法、植物防疫法、家畜伝染病予防法など、安全のための法令とともに生物多様性条約関連の相手国側の規制がある。微生物には WHO によって定義された危険度によってバイオセーフティレベル(BSL)が指定され、それに基づいた梱包と輸送法によって国際的な移動をさせなくてはならない。しかし実情では、個々の微生物種に対して各機関ごとの規制レベルで行っており、国際的な情報共有のためのデータベースとネットワークの整備が求められる。
- ・日本国内では主要なカルチャーコレクション 23 機関が参加している日本微生物資源学会を中心に日本細菌学会、日本臨床微生物学会などが連携して新種の発表などについて行けるようなデータベースを構築するための専門家の作業分会の設立が提案されている。ヨーロッパでも同様な動向がある。
- ・生物多様性条約は自国の生物資源について国家の主権的権利を認め、生物資源の国際移転には移転の条件(MAT)に対して国家による事前合意(PIC)が必要であるとしている。しかしほとんどの国はそれを担保する国内法が整備されていない。海外との生物材料を取り扱う共同研究の場合は、大学対大学など、組織間の公式な協定を締結して実施しているのが現状である。海外の微生物資源の利用のためには国家間レベルで合意した包括的覚書 (Memorandum of Understanding, MOU) を締結し、これを PIC とし、そこで承認された国際プロジェクトを実施することにより、生物多様性条約に則った生物資源を共有する共同研究を実施することが望ましい。
- ・微生物の全ゲノム配列が加速度的に蓄積されているとはいえ、メタゲノム解析は未培養の微生物群集に対して行われると、遺伝子の保有者が分類学的に何であるかはまだ特定するのは難しい。そのような中で生物多様性条約第 13 回締約国会議において合成生物学で用いられる遺伝子及び遺伝情報に対する権利が大きな議論となり、あらためて提供国と利用国の間で論争の火種になっている。
- ・遺伝子資源の確保の意味から、異国間での菌株ライブラリーの委譲、交換が難しくなると考えられる。生物資源管理の厳しい提供国に関しては、協働研究プロジェクト推進中に、生物資源の移転や利用に関するインフラの整備をすることが一つの解決策となる可能性がある。これにより、研究成果の保持や後継プロジェクトでの生物資源の効率的な利用が可能になった実例がある (JST-SATREPS 事業)。
- ・全国規模での微生物叢技術開発基盤の構築が必要である。特に、難培養微生物培養技術基盤、微生物叢再構築技術、微生物ライブラリーシステムが必要となる。
- ・新規化合物の微量同定基盤の構築が必要である。
- ・ビッグデータインフォマティクスの構築：例えば、フィールド病原菌ゲノム疫学にもとづく病害予報システムなど。
- ・微生物資材のマーケティング戦略、微生物叢ベンチャー企業の育成
- ・温室効果ガスの増大や生物多様性の減少、農作不適地の増加、漁業資源の枯渇といった問題がますます深刻化している。
- ・これまで個別の問題として認識されることの多かった、地球温暖化・生物多様性の喪失・土壌劣化・環境汚染・漁業資源の枯渇・新たな病原体系統の進化といった問題が相

乗効果を及ぼしながら「合流」し、食料生産の不安定化や環境難民の増大を引き起こし始めている。こうした問題が転換点（tipping point）を越えつつある。地球上の人々の「運命がグローバル化」した現在においては、資源・食料・環境汚染の問題について、地球規模で収支を合わせていくためのリーダーシップおよび、そのリーダーシップを担えるだけの生態学的基盤を構成し、生態系の再生・設計を担える人材を育成することが、速やかに求められる。

- これまでの生態学研究から、生物多様性の高い生態系がより安定なシステムであることがわかっている。しかし、このまま生物の絶滅が続けば、生態系の動態がますます不安定化し、重要な生態系機能が失われてしまうと考えられる。生物多様性の価値を経済的に評価する試みが数多くなされてきたが、その結果はどれも、生物多様性の喪失が破滅的な経済コストを生じることを予測している。絶滅危惧生物が逃げ込める環境を、自然生態系の再生と農地生態系の設計を通じて行っていく必要がある。
- 生態系全体の健全な動態を理解してはじめて、生態系から供給される機能の最大化がはかれる。多面的かつ極めてうまく働くシステムとしての生態系機能を、個別に研究するのではなく、一つの研究プロジェクトの中で統合することが必要である。
- すでに標準化が進んできている DNA 分析技術を用いれば、迅速かつ大規模に生物群集の構造が解明され、調査対象の生態系の状況を高精度で評価することができるようになると期待される。その情報をもとに生態系の動態を予測し、適切な管理戦略を提案することが将来的に可能になると期待される。ただし現段階では、生態系の構造と動態に関する人類の知識が不完全で断片的であり、上記の技術革新を基盤に速やかに研究体制を整える必要がある。分析技術面で先駆的な業績を挙げている日本は、包括的な生態系研究において国際的なリーダーシップを取れる潜在力を秘めており、若手研究者が活躍する研究環境の整備が望まれる。

（6）キーワード

微生物、微生物叢（マイクロバイオーム）、ファイトバイオーム、寄生、共生、植物免疫、窒素固定、リン酸吸収、寄生植物、病原体ゲノミクス、フィールドゲノミクス（分子疫学）、菌根菌、根粒細菌、低分子化合物、微生物資材、生態系、次世代シーケンサー、環境 DNA、土壌劣化、生物多様性、生態系機能、生物群集、食物網、カルチャーコレクション、生物多様性条約、名古屋議定書、アクセス、利益配分、データベース、国際移転、ブダペスト条約、NBRP、GBIF、WFCC、

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ゲノム解析やケミカルバイオロジー手法を駆使して寄生植物ストライガにおける土壤中発芽誘導因子のレセプターの発見など成果をあげている^{2,3)}。 微生物叢ネットワークの研究が増えてきている⁵⁾。 河川や海の中に溶けた魚類等のDNAを検出する「環境DNA」技術について、世界的な研究拠点を形成している⁷⁾。 あらゆる生物群を対象に次世代シーケンシングによるメタバーコーディングを可能にする手法とプログラムが開発されている⁸⁾。 上記の先駆的な手法をもとに生物間相互作用ネットワークを大規模に解明する手法について、世界に類例がない手引書が出版されている（「DNA情報で生態系を読み解く」⁹⁾）。 微生物学、バイオインフォマティクス、生態学、数学の若手が集まり、微生物生態系の動態を解明するための分野横断型研究グループが立ち上がっている（「エコミメティクス研究会」）
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 農業微生物資材の商品化は長年行われてきており、市場はあるものの、科学的根拠を示している商品が少ない。 環境DNAを用いた応用研究がこれから急拡大することが期待される。 植物体内やヒト体内の微生物叢動態について、微生物学、生態学、数理生物学の専門家が連携した共同研究が立ち上がりつつある。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ハワード・ヒューズ研究所を中心にベイツ財団、ムーア財団等による基礎研究の促進がおこなわれている。 NSFによる米国、カナダ、フランス共同の土壌メタゲノムプロジェクト（Terragenome）が進行中。 2016年オバマ政権時代にホワイトハウス主導で、総合的微生物叢研究プロジェクト（\$121M, National Microbiome Initiative）が立ち上がった。 APSによるPhytobiomes, ASPBによるPlantae等の新ジャーナルを立ち上げ、新規分野のコミュニティーを積極的に立ち上げている。 生物群集動態の基礎研究で重厚な研究者層を持ち、「先住者効果」や「代替安定性」の研究で先駆的な業績を挙げている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> モンサントやデュポン等の大型企業を中心とする安定した応用研究がおこなわれ、フィールド計測、データ解析、ゲノム多様性利用の育種等の開発研究が進められている。 モンサントはClimate Corporationを買収し、詳細気象データの収集と農業への応用を進めている。 Agbiome等ベンチャー企業による土壌微生物の収集とその商品化が進められている。 デュポンはTaxon Bioscienceを買収し、微生物叢研究とその利用を開始した。 CRISPERを用いたゲノム編集による作物の実用化が積極的に行われている。 植物を取り巻く微生物などのシステムを統合的に理解しようというPhytomiomeプロジェクトが立ち上がっている。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> カルチャーコレクションが初めて生まれたのはチェコスロバキア（当時）であり、微生物の分類学的研究と保存機関の運営には積極的である。しかし、公的予算のみによる維持は難しく、現在の国家レベルのコレクションは、民間、州や連邦の公的予算、自己収入の加算など様々な形態で運用している。今後は遺伝資源へのアクセスがEU規制で厳しくなる可能性がある。EU離脱予定の英国は独自の立場で運用の可能性あり。 ERCでは、基礎研究に重点が置かれ、植物の免疫、発生、エピジェネティクスを中心に、開発が進められている。当該領域での基礎研究が進展する可能性が大きい。 イギリスのジョン・イネスセンターは、植物と微生物のゲノム解析のセンター（TGAC）を開設し、この分野の研究に積極的に取り組んでいる。

			<ul style="list-style-type: none"> ・イギリスで、フィールドにおける病原体ゲノム解析が始まっている⁴⁾。 ・ドイツ、スイスでシロイヌナズナ等の根圏微生物叢の解析が進んでいる¹⁵⁾。 ・ドイツでは National Research Strategy Bioeconomy 2030 を立ち上げ、「Bioeconomy International」(10MEURO/Year)「Plant Breeding Research for the Bioeconomy」のプログラムを通して、作物、バイオマスの育種と微生物の相互作用による応用プログラムを展開している。 ・スイスでは Agroscope による微生物叢研究を展開している。 ・陸上生態系を対象に、植物や昆虫類で構成される複数タイプのネットワークを統合して解析する試みがなされているが、解析されているネットワークの数も種類もまだ少ない(イギリス; Michael J.O. Pocock)¹⁶⁾ ・DNA バーコーディングを利用して食物網構造を大規模に解明しようという試みが、フィンランドの研究者(Helena K. Wirta)を中心に進んでいる¹⁷⁾。 ・マックスプランク研究所を中心として、植物体内の複雑な微生物叢の動態が研究されている。 ・イギリス王立協会が Philosophical Transactions of the Royal Society of London 誌で 'From DNA barcodes to biomes' という特集号を組んだ(September 2016; volume 371, issue 1702)。 	
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・今後厳格化されるEU規制が文面通りに運用されると、微生物そのものの持ただけでなく微生物を用いた製品にも規制が及ぶので、基礎ならびに応用研究にも影響が波及する可能性がある。 ・イギリス BBSRC は Strategic Longer and Larger grants (sLoLas) を展開し、微生物叢研究と応用をその重要領域の一つと定めて展開している。 ・デンマーク Novozymes は Monsanto と提携し、BioAg Alliance を立ち上げ、微生物叢の商業的利用開発を推進している。 ・ドイツ大手 BASF は平成28年5月、マイクロバイオームを利用した植物保護技術の開発をめざす新規R&Dセンターを設立すると発表した。 ・植物と菌根菌の関係における進化的な力学を考慮した上で適切な農地管理を提案するグループが出てきた(オランダの E. Toby Kiers らのグループ)¹⁸⁾。
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・細菌、アーキアの新属新種の発表数では世界一であるが、研究の新規性は乏しい。 ・中国科学院は英国の J I C と連携して植物-微生物研究拠点(CEPAMS)を発足させた。 ・Shanghai Center for Plant Stress Biology (PSC) を立ち上げ、日本人 PI 三名を含む研究体制で、植物と微生物等の環境応答研究を推進している。 ・植物および微生物研究者が非常に多く、研究の質もかなり高くなってきた。 ・Molecular Plant 誌を立ち上げ、被引用数を引き上げ、研究の底上げを行っている。 ・中国科学院を中心とする分厚い研究者層が構築されてきており、生態学分野における躍進が著しい。次世代シーケンシングによる DNA バーコーディング等、現代的な技術を利用した研究が急増している。
	応用研究・開発	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ChemChina は農業バイオテック大手 Syngenta の買収し、微生物叢研究の企業内ベンチャー Symbiota を手中に収めた。 ・今のところ顕著な成果はみられないようであるが、環境問題が国家的に焦眉の仮題であり、また、研究者層の充実が進んできていることから、今後、応用研究面でも世界の中核になっていく可能性を秘めている。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ソウル大学を中心にトウガラシゲノムを整備し、病原抵抗性の分子育種を進めている。 ・ソウル大学を中心にいもち病菌ゲノムとその機能解析が進んでいる。 ・KRIBB は植物と微生物の相互作用に関与する化合物の研究を進めている。
	応用研究・開発			<ul style="list-style-type: none"> ・特に情報なし ・顕著な傾向は見えていない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ : 研究・技術開発(プロトタイプの開発含む)のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗: 上昇傾向、→: 現状維持、↘: 下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 「グリーンバイオ分野における研究開発の重要課題と統合的推進」(CRDS-FY2015-RR-08)
- 2) Tsuchiya et al., *Science* 349:864-868 PARASITIC PLANTS. Probing strigolactone receptors in *Striga hermonthica* with fluorescence. (2015)
- 3) Conn et al. *Science* 349: 540-543 PLANT EVOLUTION. Convergent evolution of strigolactone perception enabled host detection in parasitic plants. (2015)
- 4) Hubbard A, et al. *Genome Biology* 16: 23 Field pathogenomics reveals the emergence of a diverse wheat yellow rust population. (2015)
- 5) Toju, H. et al. *Science Advances* 1:e1500291, Below-ground plant–fungus network topology is not congruent with above-ground plant–animal network topology. (2015)
- 6) 東樹宏和. DNA 情報で生態系を読み解く—環境 DNA・大規模群集調査・生態ネットワーク— (共立出版, 2016).
- 7) Toju, H., Yamamoto, S., Tanabe, A. S., Hayakawa, T. & Ishii, H. S. Network modules and hubs in plant-root fungal biomes. *Journal of the Royal Society Interface* 13, 20151097 (2016).
- 8) Toju, H., Sato, H. & Tanabe, A. S. Diversity and spatial structure of belowground plant–fungal symbiosis in a mixed subtropical forest of ectomycorrhizal and arbuscular mycorrhizal plants. *PLOS ONE* 9, e86566 (2014).
- 9) Hata, H. et al. Diet disparity among sympatric herbivorous cichlids in the same ecomorphs in Lake Tanganyika: amplicon pyrosequences on algal farms and stomach contents. *BMC Biology* 12, 90 (2014).
- 10) Toju, H., Guimarães, P. R., Jr, Olesen, J. M. & Thompson, J. N. Assembly of complex plant–fungus networks. *Nature Communications* 5, 5273 (2014).
- 11) Toju, H., Guimarães, P. R., Jr, Olesen, J. M. & Thompson, J. N. Below-ground plant–fungus network topology is not congruent with above-ground plant–animal network topology. *Science Advances* 1, e1500291 (2015).
- 12) Minamoto, T., Yamanaka, H., Takahara, T., Honjo, M. N. & Kawabata, Z. i. Surveillance of fish species composition using environmental DNA. *Limnology* 13, 193-197 (2012).
- 13) Tanabe, A. S. & Toju, H. Two new computational methods for universal DNA barcoding: A benchmark using barcode sequences of bacteria, archaea, animals, fungi, and land plants. *PLOS ONE* 8, e76910 (2013).
- 14) Yamamoto, S. et al. Spatial segregation and aggregation of ectomycorrhizal and root-endophytic fungi in the seedlings of two *Quercus* species. *PLOS ONE* 9, e96363 (2014).
- 15) Bai, Y. et al. *Nature* 528, 364-369 Functional overlap of the *Arabidopsis* leaf and root microbiota. (2015)

- 16) Pocock, M. J., Evans, D. M. & Memmott, J. The robustness and restoration of a network of ecological networks. *Science* 335, 973-977 (2012).
- 17) Wirta, H. K. et al. Complementary molecular information changes our perception of food web structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 111, 1885-1890 (2014).
- 18) Verbruggen, E. & Toby Kiers, E. Evolutionary ecology of mycorrhizal functional diversity in agricultural systems. *Evolutionary Applications* 3, 547-560 (2010).

3.4.2 バイオリファイナリー

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

デンプンやセルロース、植物油などを含む植物バイオマス資源を原料に、石油代替となる燃料や化成品など多様な製品を製造する生産技術体系および研究領域。植物バイオマスは、大気中の二酸化炭素を固定して生育した植物の構造体であるため、その燃焼により大気中の二酸化炭素濃度を増加させない持続可能な資源である。バイオリファイナリーの原料として、本稿ではおもに、食料との競合を避けることが可能な非可食の植物バイオマス資源を中心に取り上げる。バイオリファイナリー技術は、再生可能で循環型の社会の構築に向けた重要な基盤の一つになると期待されている。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

植物の光合成などによって生産される再生可能な資源を、石油の代わりに化成品やエネルギー源として利用することを(石油から化成品やエネルギー源を生産することを oil refinery と呼ぶのに対して)「バイオリファイナリー (biorefinery)」と呼ぶ。欧米では、バイオリファイナリー技術を基盤の一つとした「バイオエコノミー (bioeconomy, あるいは biobased economy, biotechnomy とも。日本語ではバイオ経済、あるいは生物経済とも)」が今後急速に拡大するという予想のもと、国家戦略が掲げられている。バイオリファイナリーを社会実装するためには、バイオマス生産植物の選択と、生産に関する技術の他に、植物バイオマスの前処理技術(植物バイオマスに含まれるセルロースなどの強固な構造体を微生物が直接利用可能な低分子へと変換する工程)、発酵生産技術、生産物の分離技術など、多様な要素技術を開発し、開発した各要素技術を統合して最適化する必要がある。本稿では、バイオリファイナリー研究開発領域について、おもに非可食のバイオマス原料、木本(木質)、草本、藻類の3種類についてとりあげ、それぞれ「木本(木質)バイオリファイナリー」、「草本バイオリファイナリー」、「藻類バイオリファイナリー」として述べる。

【木本(木質)バイオリファイナリー】

木本(木質)バイオマスは、人間によって利用可能な光合成産物の大部分を占め、賦存量が莫大であることから、今後の人類が循環可能なエネルギーやマテリアルを確保していくために重要な資源と認識され、その有効利用が望まれている。

FAOの統計¹⁾によると、我が国は国土の約7割が森林(25Mha)で、森林面積を国土面積で割った森林率は69%となり、欧州の森林国として知られるフィンランド(22Mha、75%)やスウェーデン(28Mha、73%)とほぼ同じ規模の森林を持つことが分かる。しかしながら、国内における木材の伐採量は年間1,600万m³で、スウェーデン(8,000m³)の1/5、フィンランド(5,200m³)の1/3しかない²⁾ことから、我が国は「豊富な森林資源を持つのにうまく利用できていない国」と言える。

木材の主成分は、グルコースの多量体であるセルロースと、様々な種類の単糖からなるヘミセルロース、そして芳香族化合物の多量体であるリグニンである。人類は木材そのものを建築用材や薪として利用する以外にも、古くからセルロース繊維を取りだして紙として利用してきたが、都市部における非木造建築の増加や、紙の需要低迷によってこれまでの利用法

とは違う木材の使い方が求められており、その結果として木材を原料とする木質バイオリファイナリーに対して、国内外で大きな期待がかけられている。

上述した木質バイオマスの三大成分（セルロース、ヘミセルロース、リグニン）は、木の種類によって組成や構造に若干の違いはあるものの、この三大成分を利用することは世界的に共通の目的である。よって国内・海外を問わず研究のアプローチはほとんど大差ない。多糖であるセルロースとヘミセルロースは、加水分解によりグルコースやキシロース、マンノースなどの単糖に変換され（このプロセスは糖化と呼ばれる）、それらを発酵して目的の化合物を得る。

1970年代のオイルショック時から半世紀近くわたって行われているバイオ燃料（特にバイオエタノール）研究では、グルコースを酵母で発酵してエタノールを生産するという古くからの手法に加え、ヘミセルロースから得られるキシロースを高効率でエタノール発酵できる遺伝子組換え酵母などが開発されてきた。また、単糖は比較的容易に発酵できるため、その他にも生分解性プラスチックなどに利用可能な乳酸や、様々な化成品に変換可能なコハク酸を生産するプロセスなどが開発されている。一方で、軽微な化学/物理処理によってセルロースを微繊維化した「セルロースナノファイバー（Cellulose Nanofiber）」は、様々なマテリアルに利用可能であることから、糖化をしないバイオマス利用として注目されている。

木質バイオリファイナリーに関する国策は、各国の地球温暖化に対する考え方や二酸化炭素の削減目標、エネルギー事情等に深く関与するため、国によってその立ち位置は大きく異なる。森林面積は広いが森林率が低い米国（森林面積が 310Mha で世界第 4 位、森林率は 35%）や中国（森林面積が 208Mha で世界第 5 位、森林率は 25%）では、トウモロコシなどの穀物由来の草本バイオマスの利用を強く進めており、先に挙げたフィンランドやスウェーデンのような森林国とは、木質バイオマスの利用に対して明らかな温度差がある。また、バイオエタノールの生産に関しては米国と並んで世界最大の生産国であるブラジルは、森林面積は 494Mha で世界第 2 位、森林率も 62% と高いが、主にサトウキビに含まれるショ糖（スクロース）から直接エタノールを作る第一世代のバイオエタノール生産が主である。また、セルロース系バイオマスからの第二世代エタノール生産に関してもサトウキビの絞りかす（バガス）の利用により大きな注目が集まっているため、草本バイオマスの利用研究が先行している。わが国の場合は森林の利用状況や穀物生産量、使用している石油の量などを考えるとき、明らかに木本と草本双方由来のバイオマス利用を考えなければ、持続性や再生産性を確保できないと考えられる。現在ヨーロッパ³⁾および米国⁴⁾では、バイオマスやバイオリファイナリーの上位概念である「バイオエコノミー（地上および海洋の生物による再生産が可能な経済社会）」に関する研究とイノベーションに対して重点的にサポートを行っており、2015 年末に採択され 2016 年 11 月に発効した「パリ協定」の内容を考えても、バイオマスの利用は我が国に取って急務であると考えられる。

【草本バイオリファイナリー】

草本系バイオマスは、樹木など木本系バイオマスと比べて、原料とするバイオマス作物の世代時間が短く育種が容易であり、単位面積当たりの年間生産量が高く、植物体の分解が容易であるなどの利点がある。デンプンやサトウキビの廃糖蜜を原料とするバイオリファイナリー技術の開発により、2000 年代にはバイオエタノールの発酵生産が商業化された。しかし、バイオエタノールがガソリン代替輸送燃料として市場に普及した結果、資源利用における食

料生産との競合が新たな社会問題化した⁵⁾。そこで近年では、農業残渣(廃棄物)などの非可食なリグノセルロースバイオマスを利用する第二世代バイオ燃料の生産技術が、研究開発の主流となっており、ライフサイクルアセスメント（LCA）を用いた環境影響評価も行われている⁶⁾。現在バイオエタノール生産の主要原料となっているサトウキビの他、農業との競合をさけるために、従来の食料・飼料生産には適さない“限界耕作地”における栽培を想定したススキ、ソルガム、スイッチグラスの利用や、農業残渣としてのトウモロコシ茎葉、麦わら、稲わら等の利用が、地域特性に応じて研究されている⁷⁾。

また、原料の非可食資源へのシフトと共に、生産物の多様化が近年顕著となっている⁸⁾。化学、繊維、医療、自動車などの分野への応用を想定して、化成品のプラットフォームとしての前駆体や、ポリマー素材としての脂肪族および芳香族モノマー⁹⁾、あるいは高分子としてそのまま成形加工可能なバイオポリマーが¹⁰⁾、バイオベース化成品として生産技術開発され、その一部はすでに製品化している^{11,12)}。

【藻類バイオリファイナリー】

微細藻類（藻類バイオマス）は、食料や色素生産（アスタキサンチンなど）でも産業応用され、近年注目を集めている。現在は、より効率的に藻類バイオマスを生産するための技術開発や、多様な微細藻類がもつ機能性成分の利用に関して研究が進められている。一方で、単位面積あたりの生産量ポテンシャルの高さを活かして、最終的にはバイオ燃料として利用できるように各種の研究開発が集中的に行われている¹³⁾。

微細藻類由来のバイオマスについては、藻体そのものの活用についても進められているが、バイオリファイナリーという観点からは、色素と燃料の生産をゴールとする研究テーマが多い。その中でも特にバイオ燃料に関する研究は産官学連携で進められており、複数のグループが国内ではそれぞれ異なる種類の微細藻類からの燃料生産を目指している。その背景には、国内ではエネルギー資源を海外に過度に依存していることの是正を目指していることが挙げられる。また、海外（主に米国）では国防という観点もあり、政府機関等の助成をもとに微細藻類による燃料生産の研究開発が行われてきている¹⁴⁾。そのような状況のもと、国内では、社会実装を目指すうえで培養に不可欠な大量のCO₂と水を再利用する形で供給可能かについて検証が行われており、基本的には廃水、排ガスさらには排熱をどのように培養に組み合わせるかという検証が実証実験レベルで行われつつある。中長期の目標としては、節目の2020年を目途に、得られた藻類バイオマスからの燃料製造が掲げられている。

一方で、ここ数年で米国内の藻類関連企業の中には、大きく研究開発の方向性を変えるところが出てきているのも大きな特徴と言える。特にバイオ燃料を目的としていた企業が、食品に焦点を当て事業を進めているような動きがみられ、DHAやEPAといった不飽和脂肪酸に着目しているとみられる¹⁵⁾。

（3）注目動向

【木本（木質）バイオリファイナリー】

- ・ アメリカ農務省による「Woody Biomass Utilization Grant」2013年から開始された木質バイオマス利用研究に対するプロジェクトで、本年までに約20億円（総額19.1百万ドル）が補助されている。

- ・ 木質バイオマスからバイオオイル生産手法の開発のために、カナダ国およびケベック州から AE Côte-Nord Bioenergy Canada 社に対して約 60 億円 (76.5 百万カナダドル) が支給された¹⁶⁾。(2016 年 7 月)
- ・ ノルウェーの Borregaard 社が微繊維化セルロースの開発研究および商品化で EU から約 30 億円 (25 百万ユーロ) の補助を受けた。(2016 年 4 月)
- ・ 国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議(COP21)においてパリ協定が採択され、(2015 年 12 月) 2016 年 11 月に発効した。
- ・ 木材由来のパルプからセルロースナノファイバーを高効率で取り出す方法を開発した東京大学磯貝教授が、森林分野のノーベル賞と言われる「Marcus Wallenberg 賞」を受賞した。(2015 年 9 月)
- ・ ヨーロッパ研究分野ネットワークは「Sustainable forest management and optimized use of lignocellulosic resources」に関する 13 課題に 16 億円 (13.7 百万ユーロ) を補助するとした¹⁷⁾。その中で木質バイオリファイナリーに関する課題は「樹皮由来の断熱材開発」「木材由来ナノコンポジット」「間伐材等からの油脂生産」「ピノシルビン (松由来の抽出物) の食品への利用」「紙の高強度化」「リグニンからの高付加価値品生産」「木材からのマテリアルおよび燃料生産」。(2014 年 11 月)
- ・ 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) による「非可食性植物由来化学品製造プロセス技術開発:木質系バイオマスから化学品までの一貫製造プロセスの開発」助成・委託先を決定した。(2013 年 9 月)
- ・ ヨーロッパ連合 (2012 年 2 月) および米国 (2012 年 4 月) でバイオエコノミー戦略を策定した。

【草本バイオリファイナリー】

- ・ 最新のゲノム編集技術を利用したイネや小麦など草本系バイオマス植物の機能改変に関する研究が進んでいる¹⁸⁾。
- ・ LCA による経済性評価:単位面積当たりの年間生産量が高いリグノセルロースバイオマスほど CO₂削減効果が高い¹⁹⁾。草本バイオマスのなかでも、ソルガム、ミスカンサス、ダンチクのバガス利用は、木本系バイオマスと比べて、単位面積当たりの CO₂排出削減量が 2 倍ほど高いと試算されている。
- ・ 独 BASF と Saarland 大 Wittmann 博士らのチームは、微生物の代謝改変技術を用いて 100%バイオ由来のポリアミドである bio-nylon PA5,10 を生産した²⁰⁾。
- ・ 北陸先端大・金子博士らのチームは、微生物発酵産物である 4-アミノ桂皮酸を素材にして、世界最高強度の透明樹脂を開発した²¹⁾。引っ張り強度は 407 MPa、ガラス転移温度は 243°Cに達し、低炭素社会の構築に必須のガラス代替軽量プラスチックとしての利用が期待される。
- ・ 英国においてメタボリックエンジニアリング研究が加速している²²⁾。

【藻類バイオリファイナリー】

- ・ 1970 年代の「サンシャイン計画」、1990 年代の「ニューサンシャイン計画」に続き、国内で藻類研究が三度目の盛り上がりを見せている²³⁾。NEDO 支援による鹿児島での実証、国土交通省による佐賀県での実証事業 (B-DASH)、そして経済産業省資源エネルギー庁主導の実証プロジェクト等が将来の事業化に向けて動いている^{24, 25)}。その中で、NEDO

によるプロジェクト以外はいずれも藻類培養と廃水処理や燃料生産を組み合わせたテーマであり、数年内にその成果が得られるとみられる。

- ・ デンソーによる熊本県での実証評価、九州地方において複数の実証事業が行われている。特に、デンソーは年間 20 KL を産出するための技術確立を 2018 年に実証事業地にて行うとしている²⁶⁾。その一方で、一概に比較はできないがユーグレナ社は 2019 年には年間 125 KL 生産可能なプラントを横浜で稼働するとしている²⁷⁾。
- ・ 2012 年には微細藻燃料開発推進協議会といったオールジャパン体制を目指した協議会も設立され、関係者がそれぞれ共通の課題を克服するべく情報交換等を行っており、一貫生産システムの構築を行おうとしている。
- ・ 2014 年には次世代航空機燃料イニシアチブが設立され²⁸⁾、藻類バイオマス以外のバイオマスも含め、原油に依存しない燃料の実用化に向けて、こちらも国全体として目標達成に向けて各種課題に取り組んでいる。

（４）科学技術的課題

【木本（木質）バイオリファイナリー】

一般的なリファイナリー技術から考えると、沸点の違いから石油を軽油やガソリン・ナフサ、重油などに分留するのと同様に、木質バイオマスを成分毎に分離する技術開発を行うことが、バイオリファイナリーの根本であると言える。しかしながら、石油の場合には熱をかけることで成分分離ができるのに対して、熱処理だけでバイオマスの成分分離を行うには限界がある。そこで機械的に成分分離する物理処理、薬品などによって分離する化学処理、さらに酵素や微生物などを用いる生化学処理を組み合わせることになるが、これはほぼ製紙工程と等しい。現在の製紙プロセスは「パルプ繊維の強度を保ちながらいかに白い繊維を生産するか」が目的であり、リグニンを多く含む「黒液」は熱源として用いられているが、バイオマス利用ではその用途やその後のプロセスによって様々な処理を考える必要がある。すなわち、バイオマスをどのように利用するかによって技術開発の仕方が大きく異なるため、基礎研究からのボトムアップが非常に重要となる。その中で今後重要となると考えられる科学技術開発に関して以下に列挙する

- ・ 成分利用しやすいバイオマスの開発：組換え植物を用いず、品種改良で必要となる成分を多くさらに抽出しやすい形で含む植物の育種が重要と考えられる。
- ・ 物理/化学処理と生化学処理の融合：昨今、多くの変換プロセスで穏やかな化学処理と酵素を用いるケースが増えてきているため、化学系の研究者または企業と生化学系研究者のコミュニケーションは必須と考えられる。
- ・ 新規木質バイオマス変換生物の探索：現在我々が用いている変換プロセスは、自然界に比べると明らかにエネルギーの損失が大きい。新規木材腐朽菌、メタゲノムなどを用いた新規酵素の探索は必須である。

【草本バイオリファイナリー】

- ・ バイオマスの供給：バイオリファイナリーに適した高収量（単位面積当たりの年間生産量が高い）の“バイオリファイナリー植物”を育種・選抜する必要がある。その際、土地の農業利用と競合しない、乾燥耐性、低栄養要求性、高高塩耐性などの特性を備える

植物をデザインすることが望ましい。

- ・ バイオマスの前処理：不均一で多様な成分で構成されるバイオマスから糖など目的物質の収量を最大化するための革新的な前処理・糖化技術を開発する必要がある。セルロースの分解に用いる糖化酵素は非常に高コストであるため、糖化酵素の高活性とこれに適合した前処理法の開発を通じてプロセスコストを削減する必要がある。
- ・ バイオマスの前処理：バイオマスを構成する3成分（セルロース、ヘミセルロース、リグニン）の、選択的な成分分離技術が求められている。さらに、リグニンの有効利用に向けて、リグニンの構造決定、および非変性状態での単離技術の確立が求められている。
- ・ 変換プロセス：微生物発酵における生産性の向上と化合物の多様化を達成し、2次変換プロセス（ダウンストリームを含む）との適合性を図ることで、生産コストを削減し新たなニーズを開拓する必要がある。
- ・ 社会実装：合成生物学アプローチによる、非天然かつ新規な化合物の生産技術開発が注目されている²⁹⁾。これら新規な化合物の活用法と用途開発を併せて進める必要がある。

【藻類バイオリファイナリー】

- ・ これまでに多くの微細藻類が発見されているものの、経済性を成立させつつ商業的生産が行える種類は現在のところ非常に限られている。その原因の一つとして、効率的な培養法が確立しておらず採算が見合うだけのバイオマスを一定期間内に確保できないことが挙げられる。その一方で、赤潮のように、望まれない場面で意図せずに微細藻類が大量に増殖してしまうこともあり、それを防ぐ手段も求められている。すなわち、微細藻類の培養技術については、今後も知見を集積することが必要と考えられる。
- ・ 一方で、現在培養技術が確立されている種類に対しては、よりその生産性を上げるためや新規な物質生産を可能とするために、遺伝子組換えによるデザインを施すことはこれまでに多く行われてきているが、解決すべき課題も多い。特に、目的の遺伝子が発現しなくなるジーンサイレンシングは、どのような遺伝子を発現対象として選ぶにせよ、現時点では避けては通れない問題である。そのため、ジーンサイレンシングの影響を最低限に抑える技術開発および、その技術に適した株を選抜育種することが求められている。
- ・ さらに、数年前より台頭しているゲノム編集技術については、種類が非常に限定されているものの、微細藻類においてもTALENやCRISPR/Casの系の適用が実際に可能であるとの報告がなされ始めている^{30,31)}。一方で、実際にどの程度応用に即したものであるかは今後の研究課題の一つと言える。
- ・ また、藻体由来のバイオマスそのものではなく、特定の物質生産に焦点を当てると、目的物質をいかに効率良く取り出すかということが課題となる。具体的には、抽出精製法の改良および最適化、可能な限り培養増殖させたのちに、簡便に抽出精製できる方法が望まれる。

（５）政策的課題

【木本（木質）バイオリファイナリー】

本領域は主に経済産業省、農林水産省、環境省の管轄であるが、文部科学省はもちろん、国土交通省や内閣府からも補助金などが支出されてきた。これは国レベルで大変重要な分野であることを認識している結果だと考えられるが、その一方で府省連携に関しては難しい場合が多い。その主な原因はバイオマスの特有の事情が考えられる。バイオマスの生産工程は農林業との関係が深い、変換工程はむしろ化学系企業などの範疇となり、さらにその背景には環境対策の視点が加わるために、カバーしなければならない範囲が非常に広く、各省庁で得意とする部分が大きく異なることが主な理由であると考えられる。これは欧米でも同様の傾向にある。一方で、本領域の時間スケールから考えると、わが国特有の「短期プロジェクト型の予算」にはそもそも合わない性質の領域であると言える。すなわち、木の成長が最低でも5年以上かかるのに対して、3～5年で成果を出さなければならないとなると、変換手法の改良程度の研究しか見込めないのが実情である。欧米では石油価格の乱高下等に影響されないように、基礎研究から開発、実用化の各フェーズを継続的におこなって続けられるようにしているのに対して、我が国では各フェーズにシーケンシャルに予算を付けている傾向が強い。我が国は1980年代に本領域においてトップレベルの研究が行われていたにもかかわらず、バイオテクノロジーが本格的に動き始めた1990年代にほとんどバイオマス研究が行われなかった結果、本領域でのアドバンテージを大きく失うこととなった。今後の政策としては、ブームを作るのではなく、継続的な支援が必要であると考えられる。

【草本バイオリファイナリー】

日本：各省庁による個別のファンディングが行われているものの連携がうすいため、実証に向けた有機的なプロジェクトの構築が難しい。木本系バイオマスでは実証研究が進められつつあるが、草本系バイオマスでは、農水省のソフトセルロース利活用技術確立事業を最後に、実証研究の継続的開発がなされておらず、エタノール生産においても、その継続的な検証は困難となっている。更に、エタノールや乳酸に係る基盤研究グラントは少なくなりつつあり、研究の継続性も困難となりつつある。一方で、多様な化学品などの基礎研究への研究資金の投資が活発になってきている。

【藻類バイオリファイナリー】

科学技術的課題のところで記載した、微細藻類におけるゲノム編集技術はすでに一部の微細藻類で解決されつつあり、今後はそういったゲノム編集を適用した株をどのように扱うかについて明確な指針が求められる。特に微細藻類は光合成を行い、二酸化炭素を固定しながらバイオマスを獲得できることが、酵母や大腸菌等との明確な違いであり、閉鎖系だけでなく開放系での培養を実施可能性が高いからである。すでにアメリカのカリフォルニア州にあるUCSDにおいては、EPA承認のもと屋外で組換え体の微細藻類培養が可能である。もちろん周辺環境へのリスク評価について慎重に検討しながら実施することとなるが、日本国内においてもそういった検証を行うための枠組みがあることで、一段と研究が加速する可能性がある。もう一方で、燃料等の直接人が摂取しないものについてはゲノム編集技術や遺伝子組み換えといったバイオテクノロジーの安全性やリスク評価について寛容な意見も多いが、食品（色素）等では一般消費者から一定の理解を得るのに時間がかかることが予想される。ゆえに、一般消費者に対する啓蒙活動を継続的に丁寧に行うことが重要である。

（6）キーワード

バイオリファイナリー、木質バイオマス、草本バイオマス、藻類バイオマス、セルロース、ヘミセルロース、リグニン、バイオエコノミー、木材腐朽菌、二酸化炭素削減、地球温暖化、循環型社会、再生可能資源、気候変動、前処理、酵素糖化、発酵生産、微細藻類、バイオ燃料

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> セルロースナノファイバーに関する研究を主として、木質バイオマスの繊維利用に関する基礎研究は比較的高いレベルにある。 現在はリグニン利用に関するいくつかのプロジェクトが動いているが、政策的な後ろ盾が多くないためか次期プロジェクトの方向性が見えない。 すでに応用段階に入ったという判断のもと、基礎研究がほとんど行われていない状況。基礎研究の継続性が鍵か。 CREST や ALCA など国家主導の研究資金の投入により、バイオマス植物育種と有用化合物生産、新規バイオ素材の開発など、グリーンイノベーションに関する研究が進展している³²⁾。 植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発（NEDO）³³⁾ 府省連携によるセルロースナノファイバーの実用化研究が加速されつつある。 各種微細藻類を利用した物質生産のプログラムが ALCA 等で積極的に行われている。また、CREST や ImPACT 等でも幅広く藻類を対象としたテーマが存在している。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 木質バイオマスの繊維利用の新しいトレンドであるセルロースナノファイバーを生み出した国として、研究開発・実用化が産官学で行われている。 化成品製造に関しては欧米に大きく水をあけられている。石油依存の体質から抜けられない事情があるのか。 バイオマスを用いたバイオエタノールや乳酸生産に関する実証研究では、新規のプロジェクトの動きが鈍化している。 セルロースナノファイバーの実用化研究が積極的に行われている。 複数省庁から藻類を対象とする実証事業が定期的に募集される等、オールジャパン体制での目標達成に向けた動きがみられる。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 草本バイオマスを先行させた結果を木質バイオマスにフィードバックする形で基礎研究が淡々と続けられている。政権の後押しがあるためか。 ウィスコンシン大学および大学内にある米国農務省（USDA）の林産学研究所（http://www.fpl.fs.fed.us/）が長年木質バイオマスに関する研究を続けており、基礎研究レベルは非常に高い。 DARPA BAA – Living Foundries 1000 Molecules Program 国防省 DARPA により合成生物学的アプローチ等により 1000 種の新規有用化合物を創製する計画が始動（1000 分子プロジェクト）³⁴⁾ UCSD が微細藻類で遺伝子組換え体の屋外培養を行うなど、先進的な研究が行われている。DOE 等によるファンディングも継続的に存在している。
	応用研究・開発	○	↘	<ul style="list-style-type: none"> 木質バイオマスからバイオ化成品やバイオオイルを生産するプロセスの実用化が、多くのベンチャー企業によって続けられている。もともと大企業が参入しにくい領域であることがかえって好都合であると考えられる。 シェールガス・オイルとの競合や草本バイオマス利用を考えると、木質バイオマスの利用に真剣に取り組んでいくかどうかは疑問が残る。 生産物の多様化：自動車産業では、タイヤの原料である天然ゴムの代替となるバイオイソプレレンが商業化（グッドイヤー）；繊維産業では、40% が植物（コーン）由来の繊維バイオベースポリマーが商品化（DuPont） Geomatica 社は再生可能原料ベースの 1,4-ブタンジオールの製造を独 BASF とのライセンス契約により世界規模で展開している³⁵⁾。 Amyris 社はバイオマスからディーゼル燃料やジェット燃料を生産する技術を開発し、フランス Total 社とのジョイントベンチャーによるサトウキビバガスからのバイオ燃料生産を 2020 年から開始する予定³⁶⁾。 POET-DSM Advanced Biofuels（米国）セルロース系バイオエタノール 例年、Algae Biomass Summit と呼ばれる応用研究や開発にフォーカスした会合が開かれており、メジャーな企業も参加しており、関心の高さをうかがわせる。

欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・バイオエコノミー戦略の傘の下、莫大な基礎研究費が付けられている。 ・製紙産業やエネルギー産業がこぞって本領域の基礎研究に出資をしていることに注目すべきか。 ・英国において代謝工学研究が活発化している。 ・FP7においても関連研究が継続されている。 ・Alga Europe と呼ばれる会議が定期的で開催されており、基礎的な研究が多く発表されたりしている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・パリ協定を受けて気候変動に関わる技術開発をビジネスチャンスと捉える傾向にある。環境意識の高さも要因の一つか。 ・北欧（フィンランド・スウェーデン）では林業政策と融合させて、木質バイオマスを木材、エネルギー（熱）源、繊維、化学品原料など広範囲で利用するためのプラットフォームができつつある。 ・バイオ燃料に関して日米と比較すると、あまり目立った動きは見られていない印象である。
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・木質バイオマスに関する研究は継続的に行われているが、エネルギー利用が主である。バイオリファイナリーという観点では草本バイオマスの利用でより盛んに研究が行われている。
	応用研究・開発	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・2010年～15年に再生可能エネルギーに40兆円投資しており、木質バイオマスの利用もその中に含まれる^{37,38)}。 ・バイオエネルギー会社の一つである Kaidi 社が、木質バイオマスを化成品に変換する会社をフィンランドに設立。10億ユーロ（1100億円）の出資³⁹⁾。 ・Novozyme との連携によるバイオエタノール生産を行っている。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・木質バイオマスのバイオリファイナリーに関わる研究者の数が多くない。 ・潜在的に石油の輸入依存度と森林率の高い国であるので、木質バイオマスのバイオリファイナリー研究を推し進める可能性は十分ある。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・木質バイオマスは主にペレットや発電に用いられており、化成品等への変換利用は少ない。 ・本質的に日本と同じ状況なので、木質バイオマスを化成品に変換するような利用に力を入れてくる可能性が高い。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) Food and Agriculture Organization of the United Nations 「Global Forest Resources Assessment 2015」
- 2) (社) 日本経済調査協議会「欧州における林業経営の実態把握」2011年7月
- 3) Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe:
http://ec.europa.eu/research/bioeconomy/pdf/201202_innovating_sustainable_growth_en.pdf
- 4) National Bioeconomy Blueprint:
https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/national_bioeconomy_blueprint_april_2012.pdf
- 5) Pimentel D (2003) Ethanol fuels: Energy balance, economics, and environmental impacts are Nnegative. Nat Resour Res. 12(2):127-134
- 6) Cherubini F, Bird ND, Cowie A, Jungmeier G, Schlamadinger B, Woess-Gallasch S (2009)

- Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resour Conserv Recy* 53 (8):434-447.
- 7) Energy crops (2010) Ed. Halford NG, Karp A, RCS publishing, UK.
 - 8) Bio-based chemicals -Value added products from biorefineries-
<http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Task-42-Biobased-Chemicals-value-added-products-from-biorefineries.pdf>
 - 9) Tateyama S, Masuo S, Suvannasara P, Oka Y, Miyazato A, Yasaki K, Teerawatananond T, Muangsin N, Zhou SM, Kawasaki Y, Zhu LB, Zhou ZM, Takaya N, Kaneko T (2016) Ultrastrong, transparent polytruxillamides derived from microbial photodimers. *Macromolecules* 49 (9):3336-3342.
 - 10) Nobuta K, Teramura H, Ito H, Hongo C, Kawaguchi H, Ogino C, Kondo A, Nishino T (2016) Characterization of cellulose nanofiber sheets from different refining processes. *Cellulose* 23 (1):403-414.
 - 11) <http://biosciences.dupont.com/about-us/collaborations/goodyear/>
 - 12) ソロナ®
http://www2.dupont.com/DuPont_Home/ja_JP/ProductsandServices/AlphabeticList/SoronaEP.html
 - 13) Radakovits R, et al. *Nature Communications*, 2012. (DOI:10.1038/ncomms1688)
 - 14) National Algal Biofuels Technology Review 2016
http://energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f33/national_algal_biofuels_technology_review.pdf
 - 15) Terravia (社名変更前は Solazyme) <http://terravia.com/>
 - 16) <http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2016/07/19/canada-and-quebec-to-provide-c76-5-million-to-ae-cote-nord-bioenergy-canada/>
 - 17) <http://www.woodwisdom.net/joint-calls/joint-call-2013-2017/>
 - 18) Shan Q, Wang Y, Li J, & Gao C (2014) Genome editing in rice and wheat using the CRISPR/Cas system. *Nat Protoc.* 9, 2395-2410.
 - 19) Cherubini F, Bird ND, Cowie A, Jungmeier G, Schlamadinger B, Woess-Gallasch S (2009) Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resour Conserv Recy* 53 (8):434-447.
 - 20) Kind S, Neubauer S, Becker J, Yamamoto M, Volkert M, von Abendroth G, Zelder O, Wittmann C (2014) From zero to hero - Production of bio-based nylon from renewable resources using engineered *Corynebacterium glutamicum*. *Metab Eng* 25:113-123.
 - 21) Tateyama S, Masuo S, Suvannasara P, Oka Y, Miyazato A, Yasaki K, Teerawatananond T, Muangsin N, Zhou SM, Kawasaki Y, Zhu LB, Zhou ZM, Takaya N, Kaneko T (2016) Ultrastrong, transparent polytruxillamides derived from microbial photodimers. *Macromolecules* 49 (9):3336-3342. <http://www.jaist.ac.jp/whatsnew/press/2016/04/22-1.html>
 - 22) UK Synthetic Biology Strategic Plan 2016 - Biodesign for the Bioeconomy
 - 23) 日本経済新聞 2016年7月18日付
 - 24) 株式会社ユーグレナ (2020年に向けた国産バイオジェット・ディーゼル燃料の実用化計画の始動について) <http://v4.eir-parts.net/v4Contents/View.aspx?cat=tdnet&sid=1308402>

- 25) 株式会社 IHI（バイオ燃料用微細藻類の屋外大規模培養設備の公開）
http://www.ihico.jp/ihico/all_news/2015/press/2015-5-21/
- 26) 株式会社デンソー（微細藻類を使ったバイオ燃料の大規模実証設備を建設）
<http://www.denso.co.jp/ja/news/newsreleases/2015/150819-01.html>
- 27) 株式会社ユーグレナ IR 資料
- 28) 次世代航空機燃料イニシアティブ <http://inaf-japan.tumblr.com/>
- 29) <http://globalbiodefense.com/2013/07/15/darpa-baa-living-foundries-1000-molecules-program/#sthash.P9qCgSsC.dpuf>
- 30) Daboussi et al. Nature Communications, 2014 doi:10.1038/ncomms4831
- 31) Nymark M, et al. Scientific Reports, 2016. (DOI: 10.1038/srep24951)
- 32) <http://www.jst.go.jp/presto/plantsci/index.html>
<http://www.jst.go.jp/presto/bioenergy/info/theme.html>
http://www.jst.go.jp/alca/kadai/prj_06.html
http://www.jst.go.jp/alca/kadai/prj_07.html
- 33) http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100595.html
- 34) <http://globalbiodefense.com/2013/07/15/darpa-baa-living-foundries-1000-molecules-program/#sthash.P9qCgSsC.dpuf> <https://www.broadinstitute.org/news/7263>
- 35) https://www.basf.com/press-photos/jp/photos/releases/2015_10_05_BASF-Genomatica-License-Agreement_JP.pdf
- 36) <http://www.airtotal.com/About-us/biojet.html>
- 37) IRENA, 2014. Renewable Energy Prospects: China, REmap 2030 analysis. IRENA, Abu Dhabi. <http://www.irena.org/remap/>
- 38) <http://www.biomassjapan.jp/environmentnews/environmentnews/269.html>
- 39) <http://www.goodnewsfinland.com/chinese-company-plans-to-build-billion-euro-biorefinery-in-kemi/>

3.4.3 作物増産技術

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

「遺伝的能力の改善」あるいは「栽培環境の改善」を通して、穀物・野菜・果樹などの増産および生産性の安定を図る研究領域。本稿では、穀物・野菜などの草本性の作物と、果樹の木本性の作物についてそれぞれ述べる。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

世界人口は、1年に7千万人増えており、今世紀末には100億人に達すると推定されている。一方、これに反比例するかのようになり、世界における健全な農地は、半乾燥地化、アルカリ土壌化、酸性土壌化により、1年に500万～600万ヘクタール減少し（日本の農耕地面積は450万ヘクタール）、作物生産に大きな影を落とすつつある。近い将来、食料が不足するのは火を見るより明らかである。人類は今、食料と農業生産に関して深刻な状況に追い込まれつつあり、作物の増産とこれを可能にする新しい技術の開発は喫緊の課題となっている。日本の食料事情はさらに深刻で、カロリーベースで約60%を海外に依存している。とくに、重要作物であるコムギ、ダイズ、トウモロコシの海外依存度はそれぞれ86%、96%、100%となっており、日本の将来に大きな不安を投げかけている。

作物の生産力の向上には2つの側面からのアプローチが必要である。ひとつは、「作物の遺伝的能力を大幅に拡大すること、すなわち、画期的な育種を実現すること」（育種的アプローチ）であり、他方は、「作物の栽培環境を改善すること」（耕種的アプローチ）である。収穫部位は作物の種類によって異なっているため、増産技術も作物種・収穫部位にあわせて行わなければならない。例えば、イネやコムギでは子実、ホウレンソウやコマツナでは葉（茎を含む）、ニンジンやダイコンでは根、トマトやキュウリや果樹では果実、が収穫部位である。なお、作物の増産には、生産性に関わるポテンシャルを遺伝的に高めること（育種）が何よりも重要であるが、生産性の制限要因（病虫害・雑草などの各種ストレス）を育種によって取り除くこと（抵抗性あるいは耐性の付与）、果樹などにおいては、低樹高による密植化・早期成園化、ライフサイクルの倍速化、機械化による規模拡大化、スマート農業などによる果実収量の増大、なども重要である。以下、穀物・野菜などの草本性の作物と、果樹などの木本性の作物について述べる。

【穀物・野菜など】

育種的アプローチ（遺伝的能力の改善）：過去の歴史を振り返ると、作物の生産性の向上は、育種の成果によるところが大きく、今後もこれは不変であろう。育種的アプローチは、1900年のMendelの遺伝法則の再発見とこれにつづく遺伝研究に基づいて発展してきた。Mendelの遺伝法則は、異なる特性をもった2つの品種（系統）を交雑すると両親の望ましい形質をあわせもつ個体が獲得できることを示しただけでなく、交雑育種を实践するうえで重要な交配母本の効果的選定や、交雑後代における形質分離の予測等を可能にし、育種効率を飛躍的に向上させた。実際に、日本のイネの単位面積当り収量（玄米）は1900年当時の約2.5倍まで向上した（減反政策による生産調整がなければ、さらにアップしただろう）。交雑以外にも放射線や化学変異原処理（人為突然変異の誘発）、組織培養、転移因子の利用、遺伝子組み換え、なども開発されてきているが、遺伝子組み換えを除くと交

雑と同様、変異の獲得に確実性がないこと、また、遺伝子組み換えにあつては市民からの反対が根強いことから、これら手法に代わる新しい効率的変異創成技術の開発が希求されている。育種的アプローチの近年の動向について、「ゲノム編集技術」、「マーカー選抜育種（MAS）とゲノミックセレクション」「遺伝資源の開発・保存、遺伝子の網羅的解析」「遺伝子組み換え（GMO）品種の開発」「エピジェネティック変異の利用」の各項目ごとに述べる。

<ゲノム編集技術>

ゲノム編集技術は、ヌクレアーゼを利用して、部位特異的に標的遺伝子を改変する（塩基の削除、置換、挿入）技術であり、新たな変異創成技術としての期待が大きい。日本や欧米、中国などがこぞってこの技術の開発と高度化に取り組んでおり、熾烈な国際競争が行われている。日本における本技術の基盤構築は欧米に比べて若干の遅れがみられていたが、最近になって、我が国発の技術の開発が進み、欧米や中国と横一線の競争状態になっている。なお、ヌクレアーゼとしては、ZFN（ジンクフィンガーヌクレアーゼ）、TALEN（タレン）、CRISPR/Cas9（クリスパー・キャスナイン）が開発されているが、最近では、CRISPR/Cas9が効率的であると考えられている。

<マーカー選抜育種（MAS）とゲノミックセレクション>

マーカー選抜育種（MAS）は、すでに有効な育種選抜法として定着しており、その利用は今後ますます増加するものと考えられる。重要遺伝子に関する分子マーカーの作成は継続すべき重要課題である。

ゲノミックセレクションとは、ゲノム情報に基づいて個体の遺伝的能力を予測して優良個体を選抜する方法である。収量性など多くの遺伝子が関与する形質の改良に有効であると考えられている。我が国においては、イネのみならず、野菜、果樹などでも、その効果の検証が進められているが、欧米や中国においても同様の研究が進められている。本法によると、栽培試験を行わなくても優良個体の選抜が可能であること、また、育種年限の短縮も可能であることから、新たな効率的育種選抜法として期待が寄せられている。

<遺伝資源の開発・保存、遺伝子の網羅的解析>

ゲノム編集技術やゲノミックセレクションを行いたくても、ターゲットとなる遺伝子の情報がなければ、実行に移せない。したがって、遺伝資源の開発・保存、遺伝子の網羅的単離と機能解析、遺伝子間相互作用の解析（形質発現に至るまでの遺伝子カスケード）、データベース化は、今後も重要な研究課題として取り上げられなければならない。しかし、残念ながら、我が国においては、長期的視野に立った本課題に対する研究支援資金が官民ともに薄く、いずれこれを実行している中国や欧米に大きな後れをとることになるのではないかと危惧される。本課題に対する研究支援強化が「作物増産技術」（育種的アプローチ）における最も重要な点であると考えられる。すなわち、新品種育成の国際競争に勝つためには、有用遺伝資源の開発・保存、育種素材となる品種・系統における遺伝子の網羅的解析、ゲノムワイド関連解析（Genome Wide Association Study ; GWAS）、それらのデータベース化を重点的に実施する必要がある。

< 遺伝子組み換え（GMO）品種の開発 >

遺伝子組み換え作物の社会実装は、きわめて困難な状況にあるが、長期的視野に立つと、GMO 品種開発の試みは継続すべきと考える。ゲノム編集技術は、ある遺伝子型個体のゲノムを改変するものであり、異種生物からの有用遺伝子を導入できる遺伝子組み換え技術ほど大幅な表現型改変はできないであろう。

< エピジェネティック変異の利用 >

DNA の配列変化によらず、遺伝子の発現を制御・伝達するシステムであり、近年、このシステムを利用した変異創成技術の開発、および、このシステムと適応進化との関係究明が進められている。このシステムには主に DNA メチル化とヒストン修飾が関与している。

耕種的アプローチ：穀物・野菜における耕種的アプローチの動向について、「ICT を活用した農業の実現」「土づくりによる増産（安定生産を含む）の実現」の項目について述べる。

< ICT を活用した農業の実現 >

欧米では、ICT を利用した精密農業が、施設園芸のみならず、広大な畑地でも進められており、日本においても、農業を取り巻く種々の問題（農業後継者不足問題もその一つ）解決にむけて、ICT を活用した精密農業の推進が政府によって進められようとしている。現在、日本においては植物工場などの施設栽培で ICT 化が進んでいるが、これをさらに推進するとともに、屋外の田畑においてもその利用を進め、国際競争に負けないスマート農業を実現しようとしている。

< 土づくりによる増産（安定生産を含む）の実現 >

第二次世界大戦以降の農業は、多肥、多農薬の投入と、これに適応した品種の開発によって大きな進展をみせた。しかしながら、多肥・多農薬の長期にわたる連用は、農地の疲弊を促し、近い将来、農業そのものが実施できなくなる可能性がある。このような状況にあって、農学者および農業者が実践すべきことは、疲弊しつつある農地を持続可能な農地に変換すること、すなわち、疲弊した土地で「土づくり」を行うことである。「土づくり」の重要性については、これまで、多くの研究者によって指摘され、堆肥等の有機物の投入が推奨されてきた。しかし、多肥・多農薬栽培を続けた農地では、せっかく投入した有機物の分解が進まず、宝の持ち腐れになっている。新たな視点からの「土づくり」に関わる研究を進める必要がある。

土壌中に存在する有機物の分解には、土壌中に棲む微生物（真正細菌、古細菌、藻類など）の働きが不可欠であり、微生物が多様でなければ、分解される有機物の種類は限定される。したがって、「土づくり」のもっとも有効な方法は、土中の微生物の多様化を図ることであろう。具体例を 1 つ挙げると水稲や野菜、果樹類の栽培実験を通して、アミノ酸、ビタミン類、有機酸等の混合液の極少量散布（1 平方メートル当たりたったの約 2 cc）が、バイオマスを増加させるとともに、病害の発生を著しく軽減することを認めている。このような現象から、混合液の散布によって上層に棲む土壌微生物叢の活性化を促し、同時に、活性化された微生物が混合液と同様の成分を産生することによって、微生物叢の自然循環（食物連鎖）が回復し、微生物の多様化が図られると推測している。土壌微生物の多様化は、微生物間の捕食および拮抗関係を自然の状態に戻すため、特定の病原菌が優占できなくなり、土壌感染性病害（連作障害を含む）が回避されるのではないかと考える。

【果樹】

果実は日本の食後に食べる「フルーツ」、「くだもの」として親しまれてきた。その大部分は生食として消費されるが、贈答用にも使われたため、必ずしも食生活に欠かせない食品ではなく、外観的品質が重視され、かつ糖度が高く良食味で贅沢な食品というイメージがある。よって、日本では高品質品種（外観（見た目）が良く、大果で高糖度の選抜）の育成が行われてきた¹⁾。一般的な栽培は樹間を十分にとって育てる疎植大木栽培で、また、摘花（果）、袋かけ、剪定などの集約的な管理¹⁾、さらに、光センサーを用いた選果により、良食味の果実が出荷されている²⁾。そのため、経営規模は小さく（2ha未満の経営体が85%）、労働力を集約的に投入した経営体となっている²⁾。例えば、10aあたりのリンゴの労働時間は、米国では機械化が進み70~90時間であるが、日本ではその3~4倍の273時間で労働コストは高くなっている²⁾。また、果樹生産者の高齢化により作付面積は減少し、単位当たりの収量は減少、あるいは、横ばいである²⁾。さらに、農林水産省は消費の拡大に取り組んできたが、果実の摂取量が近年減少している²⁾。このような状況下で、持続的な果樹経営を進めるには大規模化により省力化、低コスト化を図り、単位面積当たりの生産量の増大が必要である。一方、海外では果実はビタミン類、ミネラル及び食物繊維の摂取源として重要であるという認識が強いことから、1日の摂取量は多く、カジュアルフルーツとして位置づけられている。そのため欧米では肥培管理、収穫、選別を行う機械を導入した大規模経営によってコストダウンを図る³⁾とともに、海外輸出を視野に生産を行っている企業体が多い。

世界的には温暖化による気候変動と人口増加が進む中で、作物の増収と安定した持続生産が共通の課題になっている。作物の増収と安定生産には育種技術と栽培技術の開発が必要である。果樹の育種では、ゲノム情報を活用した品種開発の基礎研究が欧米を主導に行われ^{4, 5, 6, 7, 8)}、パパイヤなど遺伝子組換え（GMO）果樹が商業化されている中で⁹⁾、遺伝子組換えの痕跡が残らない手法が開発され注目されている⁷⁾。また、病害虫に抵抗性を備えた新品種の育成にDNAマーカーの活用が進んでいるが、高収性などの量的形質について育種⁶⁾はこれからの課題である¹⁰⁾。一方、栽培技術としては、イタリアが開発したリンゴの高密度植栽培法¹¹⁾が世界展開する動きを見せている。日本で開発した樹体ジョイント栽培法¹²⁾が国内に普及している。また、二期作¹³⁾や周年栽培化^{14, 15)}が可能な品目もあり、ライフサイクルの倍速化により増収が期待できる。さらに、各国で環境や作物のモニタリング、位置情報のセンシング、GPSによる自律走行などのオートメーションや農業ロボットなどの技術^{3, 8)}を活用したスマート農業（精密農業）¹⁶⁾により作物の能力を最大に発揮させる栽培システムの開発が行われている。

（3）注目動向

【穀物・野菜】

国内動向：作物増産は農学研究者にとってもっとも関心の高いテーマであり、多収性に関与する遺伝子やハプロタイプの同定、ゲノム編集技術の開発・高度化、ゲノミックセレクションの有効性について種々の作物種において研究が行われている。政府が主導する農業生産に関わる以下の事業の中でも、これらの課題は取り上げられており、主要作物の増産に資する多くの知見が急速に集積されつつある。ただし、土づくりに関しては、外来

微生物の投入による効果の解析が若干行われているが、微生物の多様化による土づくりについてはほとんど研究が行われていない。

<内閣府戦略的イノベーション創造事業>

内閣府総合科学技術・イノベーション会議が主導し、府省や従来の研究分野間の連携によって、社会を飛躍的に変える科学技術イノベーションを強力に推し進めていく国家事業である。農林水産業に関しては、「農業のスマート化」と「農林水産物の高付加価値の技術革新の実現」を目標とする事業である「次世代農林水産業創造技術（アグリイノベーション創出）」が展開されており、現在3年目に入っている（平成28年11月現在）。このなかで、「作物増産技術」に関わる課題が設定されている。

<農林水産省競争的資金>

- ① 農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業（農林水産・食品分野の成長産業化）
- ② 「知」の集積と活用による革新的技術創造促進事業
- ③ 農林水産省委託プロジェクト研究」など

以上のような農林水産省競争的資金補助金事業、さらに、農林水産省管轄の国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）の通常業務の中でも、「スマート農業」実現のための「作物増産技術」の研究・開発が行われている。

海外動向：

作物の増産を目的とする育種のおよび耕種の研究は、欧米のみならず中国などでも種々の角度から絶えず行われてきている。上述のゲノム編集技術に関しては、知的財産権の獲得という命題もあり、国際競争が熾烈になっている。ゲノム編集技術の実践に当たっては、ターゲット遺伝子の同定が必須であり、この方面からの研究も熾烈な競争になっている。

人口の多い中国では、2008年11月に『国家食糧安全中長期計画綱要（2008～2020年）』のもと、重要作物の多収化に向けた事業が展開され、イネのジャポニカ固定種で直立穂が利用されるなど、固定観念にとらわれない育種が行われ、イネの単位面積当たり収量の大幅な増加が実現している（現在6.5トン/ヘクタール）。

ICTを活用した農業技術に関しては、欧米や中国でも、作物の生育状況、気象や土壌条件等のデータを基にきめ細かい農業生産を行う精密農業に注目が集まっている。施設園芸における、自動冠水や自動温度調節などの精密化に加え、田畑におけるドローンによるデータ収集や、農業用機械の自律運転などを用いた精密が進められている。米国では、これに関連するベンチャー企業への投資が増加している（2015年の前年比：2倍）。

【果樹】

国内・海外の共通の動向

<DNAマーカーの開発と新品種の育成^{6,7)}>

病害虫抵抗性に関するDNAマーカーの開発により早期選抜が可能になっている⁵⁾。しかし、果樹は複雑で大きなゲノムをもつものが多いことから、収量に関する量的形質の遺伝子の特定はこれからの課題である。

<高密度植栽培法¹¹⁾>

おい性台木を使い長めのフェザー（副梢）を発生させた苗を密植して栽培する低樹高・高密度植栽培法（トールスレンダースピンドルブッシュ樹による高密度植栽培）が開発され、収量が約2倍以上となる。

国内：

＜樹体ジョイント栽培¹²⁾＞

日本では樹の枝の先端を隣の枝とつなげる樹体ジョイント栽培が開発され、早期の収量が増加する。

＜施設を利用した二期作栽培および連続開花結実栽培（四季成り化）^{13, 14, 15)}＞

温帯性果樹は1年に1回しか果実を収穫できない。施設栽培を利用したブドウでは落葉を促進して萌芽させ、1年に2回収穫する2期成りの技術が開発されている。ブルーベリーでは果実収穫直後の株を短日低温処理すると新梢先端から開花が順次行われることにより、連続的に開花と結実がみられる。この方法により周年での果実収穫が可能になり、収量が自然栽培の約5倍となる。

＜農業機械の自動化技術＞

果実の運搬など重労働時の人力作業をサポートするウェアラブルアシストスーツの開発が進んでいる¹⁷⁾。

海外：

＜遺伝子組み換え果樹^{4, 5, 6, 7, 8, 9)}＞

リンゴを始めとしてGMO果樹に関して世界各国で試験が行われ、米国、中国では、GMパパイヤなどが商業栽培まで進んでいる。

＜農業機械の自動化技術^{3, 16)}＞

米国ではモニタリング、センシング、自律走行などのオートメーション技術の開発が進んでいる。

＜生体情報と環境情報の統合による栽培管理＞

ドイツは画像処理で成育状況や収量を把握するシステムを開発している¹⁹⁾。また、米国では枝径を測定し、灌水するシステムが開発されている³⁾。

（4）科学技術的課題

【穀物・野菜】

＜育種的アプローチ＞

- ・ 作物の増産には育種的アプローチが効果的であるが、これを実践するためには、生産性に関与する形質や遺伝子を同定する必要がある。しかし、前者に関しては、1960年代から、イネやコムギで多くの研究がなされてきているものの明確な結論は得られていない。多くの品種・系統のゲノムワイド関連解析を行い、収量性に関与する遺伝領域を明らかにするとともに、それらのデータベース化による情報整理が重要な課題になると思われる。
- ・ ゲノム編集技術は、新育種技術として現在最も期待されている技術であるが、植物以外の生物種（微生物）における開発も進んでいる。植物以外で行われている技術開発にも関心を持ち、積極的に活用したい。

＜耕種的アプローチ＞

- ・ 各作物における光合成能、転流、養分吸収能などは、当然、遺伝的支配を受けており、改良が可能であろう。しかし、これら形質の生理学的研究があまり進んでおらず、これらの遺伝的改良によってどの程度生産性が向上するのか予測がつかない。

- ・ 土壌微生物の多様性程度を評価する簡便な方法の開発が求められる。
- ・ 土壌微生物の多様化が難分解性の有機物の分解につながると思われるが、この方面の研究はほとんど行われていない。
- ・ ICT の活用による精密農業に必要なコスト計算が求められる。

【果樹】

<育種的アプローチ>

- ・ 果樹の収量倍増計画を先ず育種面から考えると、1)収量と関連する遺伝子の解析と DNA マーカーを使った育種技術の確立、2) 本体の遺伝子を組換ええない新たな遺伝子組換え技術による遺伝子導入技術の確立、さらに、3)育種期間の超短縮技術の確立が必要になる。近年、次世代シーケンサーに象徴されるゲノム解析機器や情報解析技術が急速に進歩しているので、収量など量的形質に関わるマーカー開発は最先端の機器の導入を行い、早急に開発すべきである。また、リンゴの'ふじ'育成には交配から 23 年間の歳月がかかっている。育種年限の短縮化は不可欠な研究課題である。そこで、京都大学の荒木氏が開花を制御する FT 遺伝子を発見し¹⁹⁾、岩手大学の吉川教授がリンゴに感染する RNA ウイルス(リンゴ小球体潜在ウイルス ALSV)に FT 遺伝子を組み込み、発芽した実生に感染すると、リンゴ自体を組換えることなく、1 年以内で開花、結実させることができた²⁰⁾。本技術は他の果樹にも利用できる技術として応用すべきである。
- ・ 次に、栽培面から考えると、収量を増加させるには、1)リンゴのような高密度栽培法、2)ライフサイクルの短縮化法の確立、3)生体情報と環境情報の統合による栽培管理が必要になる。疎植大木栽培から密植低木栽培への技術の集積が必要になるであろう。また、栽培施設の中で低木の個体を密植し、さらに二期作、周年栽培を行うことにより、収量の増大が飛躍的になると期待される。一方、植物体の生体情報を正確に把握し、それら情報を活かした制御により収量の最大化が期待できる¹⁶⁾ことから、生体情報と環境情報の統合による栽培管理に関する研究を推進すべきである。

(5) 政策的課題

【穀物・野菜】

- ・ ゲノム編集技術の社会実装には、何よりも市民の理解が必要である。関係省庁は、その社会実装に向けた全国基盤戦略を構築することが肝要である。
- ・ 農業の国際競争力をつけるために、政府は、イネ品種の超多収化を求めているが、日本における超多収育種は「生産調整」のあおりを受けて一時中断していた。したがって、超多収品種の育成にはしばらくの時間が必要であろう。
- ・ ICT の活用による精密農業は、施設園芸のほか大規模圃場で威力を発揮すると謳われているが、米国並みの大規模化は不可能と思われる。それでも、ICT を活用して精密農業を行うメリットがあるのか、疑問である。
- ・ 農業者の多くは、「土づくりは絶対に必要である」と考えているにもかかわらず、有効な情報がないせいか、ほとんど行われていない。政府の強い指導の下、他国に先駆けて「国をあげての土づくり」を開始すべき時期にきている。

【果樹】

- ・ 日本では遺伝子組換え作物を受け入れない傾向は強いが、世界では特定遺伝子の導入し

た GM 果樹が作成され実験が進められている^{4, 5)}。一方、新たな遺伝子組換え技術⁵⁾が開発されつつあるので、日本では新育種技術（NPBT）⁶⁾を積極的に取り入れ、政策的に推進していく必要がある。

- ・ イタリアで開発された高密度植栽培法¹¹⁾は EU のほかアメリカやインド、中国、韓国、日本の各国に導入されたことから、標準化された栽培技術は世界展開できる。樹体ジョイント栽培¹²⁾は国内での普及が始まっているが、世界展開を視野に入れた取り組みが必要である。技術の標準化を行い、国内における実証圃場の設置、海外からの視察の受け入れ、海外への普及を積極的に政府は支援すべきである。
- ・ 世界中でゲリラ豪雨、台風などによる果実の落果と傷害、高温による日焼けや着色不良果の発生、冬期の低温不足による開花数の減少が報告され、生産を不安定にしている²¹⁾。このような状況が続くと、政策的に果樹産地の移動も視野に入れ、既存産地の熟練者のノウハウを継承するネットワーク構築が必要である。これまでの日本の優れた熟練の要素技術と、生体情報、環境情報を統合することにより、他国と異なった IOT モデルの構築に繋がると考えられる。

（6）キーワード

作物増産技術、育種、新育種技術（NPBT）、栽培、遺伝資源、遺伝子の同定・機能解析、ゲノム編集、ゲノミックセレクション、ゲノムワイド関連解析、エピジェネティック、ICT、精密農業、植物工場、施設園芸、土壌の疲弊、土壌微生物の多様化、施肥、超多収、イネ、コムギ、ダイズ、野菜、DNA マーカー、GM 果樹、早期選抜、低樹高、高密度植栽培、樹体ジョイント栽培、早期成園化、わい性台木、施設栽培、ライフサイクルの倍速化、二期作、連続開花結実（四季なり化）、ウェアラブルアシストスーツ、果実収穫機、収穫ロボット、スマート農業、地球温暖化

（7）国際比較

作物の増産は、人類の生存基盤を支える重要な営みであり、いずれの国も熱心に取り組んでおり、その中でも熱心な日本と先進国、中国との間に大きな差はない。基礎研究、応用研究の区別なく、ほぼ横一線で研究が進んでいると考えてよい。ただし、日本のコムギとダイズの単位面積当たり収量は、これら諸国と比べてとりわけ低い水準である。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大学、農研機構などで多収育種をターゲットとする研究が行われている。 ・ ゲノム編集技術の開発と高度化に関する研究が積極的に行われている。 ・ ICT を活用した精密農業による増産を目指した研究が行われている。 ・ 土づくりに関する基礎研究が遅れている。 ・ 果樹の育種期間を短縮できる技術として、RNA ウィルスに FT 遺伝子を組み込むことで、1 年以内で開花、結実させることが可能な技術が開発された⁶⁾。 ・ DNA マーカーによる品種の同定が進められている⁶⁾。病害虫などの抵抗性などの質的形質に関わる遺伝子マーカーは開発されているが、収量性など量的形質に関わるマーカーは開発されていない¹⁰⁾。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ 農研機構において多収品種の開発が行われている。 ・ 農林水産省関係事業により、道府県でも多収性育種が行われている。 ・ 種々の作物でゲノム編集技術による品種開発の試みが行われている。

				<ul style="list-style-type: none"> ・土づくりに関する研究開発が進められている。 ・高収量技術の高密植栽培法¹¹⁾や樹体ジョイント栽培が開発されている¹²⁾。 ・ライフサイクルを早くすることによる2期作のブドウハウス栽培¹³⁾、ブルーベリーの周年栽培が報告され、増収が期待できる^{14,15)}。 ・運搬など重労働時の人力作業をサポートするウェアラブルアシストスーツの開発が進んでいる¹⁷⁾。 ・地球温暖化と異常気象への対応による果実の安定生産技術として、環状剥皮などの技術が開発されている²¹⁾。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・大学、農務省などで多収育種をターゲットとする研究が行われている。 ・ゲノム編集技術の開発と高度化に関する研究が積極的に行われている。 ・ICTを活用した精密農業による増産を目指した研究が行われている。 ・土づくりに関する基礎研究が遅れている。 ・遺伝子組み換え果樹の育成が積極的に行われている^{3,4,7,8)}。また、連鎖地図の統合、DNA マーカーの開発が行われている。さらに、バイオインフォマティクスを利用したメカニズムの解析が行われている^{7,8)}。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・民間企業と農務省、大学との連携により多収品種の開発が行われている。 ・種々の作物でゲノム編集技術による品種開発の試みが行われている ・GMO 作物の開発が進んでいる。 ・米国では GPS を活用した自動化技術の応用が展開している³⁾。多様な機能を持つ農業ロボット、画像処理による果実検出、多関節マニピュレータ、果実をパイプで吸引搬送する自動搬送車の開発を行っている³⁾。
欧州	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・大学と民間企業との連携により多収育種をターゲットとする研究が行われている。 ・ゲノム編集技術の開発と高度化に関する研究が積極的に行われている。 ・ICT を活用した精密農業が行われている。米国をリードしている ・リンゴ、モモなどバラ科果樹およびイチゴのゲノム研究を推進 (EP7)^{4,5,8)} ・EU 内大学・公的研究機関で共同研究体制をとり、ゲノム研究と栽培技術 (高品質生産システム) の開発を行っている (Horizon2020)^{4,5,8)} ・園芸作物について定量的な表現型解析のための画像解析アルゴリズムが開発されている¹⁸⁾。CROP プロジェクトで農業ロボットを開発中である³⁾。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・大学と民間企業との連携により多収品種の開発が行われている。 ・種々の作物でゲノム編集技術による品種開発の試みが行われている。 ・チロル地方のスピンドル苗リンゴ栽培 超高密植栽培 (フェザー苗を利用した早期成園化を目指した矮化栽培) で増収している (イタリア)¹¹⁾。 ・ベリー類において気候変動に対応した高収量・収穫期拡大・環境負荷低減を目指して新しい遺伝形質と栽培システムの開発を推進 (EUberry)²²⁾。 ・農業使用量を半減させるプロジェクト (ECOPHYTO2018) が進められている²³⁾。 ・有機施設栽培の持続可能性と生産性を向上させる取り組みを行っている²⁴⁾。
中国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・大学と政府農業部研究機関などで多収育種をターゲットとする研究が行われている。 ・ゲノム編集技術の開発と高度化に関する研究が積極的に行われている。 ・ICT を活用した精密農業による増産を目指した研究が行われている。 ・果樹の全ゲノムの解析が国家プロジェクトとして行われ 華中農業大学は国産オレンジの全ゲノムマップを作成した²⁵⁾。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・多収品種の開発が行われている。 ・種々の作物でゲノム編集技術による品種開発の試みが行われている ・遺伝子組み換え果樹 (パパイヤ) が商業化している²⁶⁾。 ・省エネルギー・低エミッションの日光温室を中心に、果樹の施設栽培が 17.8 万 ha (全施設面積の 3.8%, 2014) 行われ、作期の拡大が研究されている²⁷⁾。 ・果樹園の正確な測位データ図を瞬時にして獲得し、果樹の成長と分布の情報を正確に把握できる技術を開発した²⁸⁾。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・品種判別としての DNA マーカーが開発されている²⁹⁾。 ・環境配慮型農業機械、エネルギー節約型農業機械の開発を行っている³⁾。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・韓国国立園芸科学院では低農薬栽培の安定生産技術の開発が行われている³⁰⁾。また、気候変動に対応した安定生産の確立、新たな高機能性物質の探索などの研究が行われている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) 荻原勲編著. 図説園芸学. 朝倉書店. 2006.
- 2) 農林水産省. 果実をめぐる情勢. 2016.
- 3) 農業・食品産業技術総合研究機構. 海外技術調査報告. 2013.
https://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/.../files/0510-1020.pdf
- 4) 藤岡典夫. 農林水産政策研究. 16:65-77. 2009.
- 5) 農林水産省農林水産技術会議事務局. 海外調査資料59. 2012.
- 6) 日本学術会議. 植物における新育種技術. 2014.
- 7) R.J.Schnel and P.M Priyadarshan Editors. Genomics of tree crops. Springer. 2012.
- 8) 特許庁. 平成26年特許出願技術動向調査報告書(概要). 農業関連技術. 2015
- 9) Ye Changming and Huaping Li. 20 years of transgenic research in China for resistance to Papaya ringspot virus. Tsansgenic Plant Journal. 58-63. 2010.
- 10) 園芸学会. 平成28年度秋季大会研究発表およびシンポジウム講演要旨. 15(2):31-39.2016.
- 11) FAO (Edited by Julien de Meyer).Apple-producing family farms in South Tyrol: An agriculture innovation study. 2014 www.fao.org/3/a-i3789e.pdf
- 12) 神奈川県農業技術センター. 樹木の樹体ジョイント仕立て法. 特許. 第48955249. 2012.
- 13) 小野章男ら. 園学雑. 62(別2): 118-119. 1993.
- 14) 荻原勲ら. 技術情報協会. 307-315. 2013.
- 15) 荻原勲ら. JATAFFジャーナル. 4(8). 2016.
- 16) 農林水産省. スマート農業の実現に向けた取組と今後の展開方向について. 2015.
- 17) 遠山茂樹ら. 研究ジャーナル. 32(3). 2009.
- 18) German Plant Phenotyping Network (DPPN).http://www.dppn.de/ppn/EN/Home/home_node.html
- 19) Abe, M., Araki,T et al. Science 309 (5737), 1052-1056. 2005.
- 20) Yamagishi N, Kishigami R, Yoshikawa N. Plant Biotechnol J. 12(1):60-8 2014
- 21) 農林水産省.平成25年地球温暖化影響調査レポート. 2014.
http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyoo/ondanka/pdf/h25_ondanka_report.pdf
- 22) EUBerry Report Summary. http://cordis.europa.eu/result/rcn/167742_en.html
- 23) Ecophyto 2018. <http://agriculture.gouv.fr/accord-cadre-biocontrrole>
- 24) Biogreenhouse. <http://www.biogreenhouse.org>
- 25) Science portal chaina 2012.
http://www.spc.jst.go.jp/policy/science_policy/organization/org_12.html
http://www.spc.jst.go.jp/news/150503/topic_3_06.html
- 26) Ruan Xiao-lei et al. http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-HZNY201003026.htm

- 27) 陳青雲. 施設園芸・植物工場. 特別セミナーシンポジウムテキスト. P111-139. 2016.
- 28) Science portal chaina 2015. http://www.spc.jst.go.jp/news/150503/topic_3_06.html
- 29) Kang H, et al. Korean J. Breed. Sci 4:364-371, 2014.
- 30) National institute of horticulture and herbal science.
http://www.nihhs.go.kr/english/sub/sub02_02.asp

3.4.4 持続型農業

（1）研究開発領域の簡潔な説明

ヒトの生存のために必要な食料生産を持続的に続けるための研究開発領域。おもに、農作物による一次生産における、リン・窒素などの化学肥料の利用と、植物と共生する微生物の利用について、本稿では述べる。リン・窒素などの化学肥料の利用については、環境への負荷を低減しつつ食料生産を維持あるいは増産するための技術開発領域、共生微生物利用については、現在の慣行的な農業と比較して環境に対する負荷および人為的な投入（コストなど）を低減できる農業を目指す基礎・基盤的研究開発が主な方向性である。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

ヒトは生存するために食料が必要であり、農業・漁業・畜産業は食料を供給する産業として営まれる。ヒトの生存のために必要な栄養素は糖質、脂質、タンパク質、ビタミン類、ミネラルで、これらの栄養素は食品の形で供給され食事として摂取される。これらの栄養素のそれぞれの生合成経路を辿ると、すべての栄養素の原料は土壌、大気、水から供給される無機物である。すなわち、糖質と脂質は植物の光合成によって二酸化炭素と水から合成され、タンパク質は土壌中のアンモニウムイオン、硝酸イオンと糖質から、ビタミン類は植物・動物・微生物の細胞で合成され、ミネラルは土壌や海水中の無機物が植物・動物・微生物を経由して吸収される。このように土壌や大気中の無機物を、植物が糖質やタンパク質、脂質などの有機物に変換することによって、ヒトにとっての食料生産が成り立っている。つまり 72 億人の地球人口を支えるための食料はすべて土壌、海洋での生物生産によって維持されている。

地球人口は増加の一途をたどり、今や 70 億人を超え、人口増加が停止するときには 90 億人とも 100 億人とも見積もられている。地球の農業が十分な食料を生産することが出来るのかどうか、食料供給が不安視されたこともあったが、現在では化学肥料の増産によって食料の量は確保されるだろうと見込まれるに至った。問題は、100 億人の人口をまかなうだけの多肥農業を展開した場合、はたして環境が耐えられるのか、どの程度の期間、この規模の食料生産が持続できるのか、という疑問が呈されるに至った。すなわち、食料不足の怖れは克服されたものの、現在の規模の食料生産が、どのくらいの期間、地球環境に不可逆的な負の影響を与えないで継続できるのか、という命題に変質した。

【リン・窒素利用】

有史以来、ヒトの義務は人口の増加に見合う量の食料を生産することであり、飢餓を回避するために食料増産の努力が続けられてきた。実際に食料が不足する場合には飢饉が発生して食料生産能力を超える人口の増加は抑制されてきた。地上の食料生産の最大の制限因子である窒素肥料、窒素化合物は、1913 年のハーバー・ボッシュ法の発明によって、ヒトが必要とするだけの量を生産することが可能になり、さらに食料の生産方法、貯蔵加工方法、運搬方法などが改善され、いまや食料危機は、必要な場所に必要量の食料が供給されないために発生するようになった。

しかし、一方で、窒素肥料の施肥によって環境の富栄養化が顕著になってきた。これは肥料に含まれる窒素化合物の、作物による吸収利用率が低いため、作物に吸収されなかった窒

素成分が環境中に漏出するために生じる。さらにヒトの排泄物、食べ残し、食料として生産される作物、家畜のうち、実際に食用されない部分（非可食部）が、食料供給の増加に伴って急増している。これら、いったん有機物に変化した窒素化合物や作物に吸収されなかった窒素化合物は、微生物による代謝を受けて最後には硝酸イオンとなって地下水、河川水、陸水、海水に漏出し、それぞれの領域で富栄養化をもたらす。さらに畜産業が、小農による有畜農業からコストの削減、生産性の向上をねらった多頭飼育に変質することによって家畜排泄物が集中して有機物の局所濃度が高まることによって周辺地域で陸水、河川水、地下水、海水の富栄養化が顕在化しはじめた。

水圏が富栄養化すると生物相が変化し、特定の藻類の突発的な繁茂によって水質劣化や悪臭、景観の破壊などが見られるようになる。生物相の変化は、単にこれまで見慣れてきた昆虫や動物の姿が見えなくなるだけでなく、病原性微生物、病原性生物にとっての宿主動物の分布の変化も誘発し、細菌、糸状菌、ウィルスなどによる病気が頻発する危険性も高まる。陸水を水道水として利用する場合には、微生物によって硝酸イオンが還元されると亜硝酸イオンとなるため、飲用者にチアノーゼといった健康被害を引き起こす。特に乳児は胃が十分に酸性になっていないため、硝酸イオンを摂取すると胃で還元されて亜硝酸イオンを生成し、その結果、酸素結合型ヘモグロビンの濃度が低下してチアノーゼを起こす。

肥料の三要素のひとつとされるリンはリン酸の形で細胞の代謝に必須の化合物だが、農業におけるリン肥料の給源として 20 世紀以降はおもにリン鉱石が用いられてきた。リンが作物の肥料として重要な働きをしていることは 19 世紀に世界で初めての人造肥料が硫酸処理した骨粉だったことでも知ることが出来る。リン鉱石は産出される鉱山が偏在し、掘削可能な埋蔵量が限られていることもあり、今後も現在の勢いで人口が増加し続けるとリン鉱石が不足する可能性が指摘されている。肥料としてリンが土壤に与えられた場合、土壤中のカルシウムイオンや鉄、アルミニウムイオンと難溶性のリン酸塩を形成するため、作物による利用効率は低い。このため継続的な施用が必要になる一方、与えられたリンは次第に蓄積しはじめた。いまや施設栽培（ビニールハウスなど）や連作される野菜作圃場では作土へのリンの集積が顕著である。陸水中のリン酸濃度が陸水域のバイオマスを制御する因子であることが知られており、食料生産を目的としたリンの施肥による陸水の富栄養化が心配される。滋賀県では水田への田植え前に代かきして発生する土壤懸濁液を排出するが、そのとき土壤微粒子に吸着されたリンが琵琶湖に流入し富栄養化の原因となる。酸性雨や過剰の窒素施肥によって土壤 pH が低下した場合、土壤に蓄積されたリンが急激に可溶化される可能性もある。このように土壤に蓄積したリンは環境に対して潜在的な危険因子である。

こうした状況のもとで、肥料と農業がもたらす富栄養化を規制しようとする動きが先進国には見られる。それが有機農業、有機農産物の希求という形で顕在化する。しかし、こうした環境への配慮は、食料が十分に供給される、あるいは食料の供給に社会的な不安がない場合に限ってなされる。社会的不安という立場からは、農業が低収入の人々によって担われている側面もあり、生活の不安定さをさらに増長しかねない肥料や農薬の削減にはいまだに社会のコンセンサスが得られない。例えば中国の場合、経済的には大きな発展を遂げたが、多くの人口を養うために耕作では窒素肥料の大量投入が顕著であり、国内では各地で富栄養化による水質・土壤・大気劣化が心配されているが、環境問題よりも食料の安定供給が優先される。欧州では耕作地に施肥された窒素肥料、家畜排泄物中の窒素化合物の流亡による地

下水の硝酸イオン汚染、硝酸イオンが高濃度で含有される葉菜類の市場出荷が報告されている。これらの事案に対して、英国では地下水の硝酸イオンが高い地域を硝酸塩脆弱地域に指定して、農地への窒素施肥量の上限、家畜糞の農地還元量に規制値を設けている。さらに英国ではハウレンソウ、レタスなどの葉菜類に含有される硝酸塩についても上限値を定め、それを超える作物の出荷を禁止している。わが国でも葉菜類の硝酸態窒素濃度に対して、窒素肥料を過剰に与えないようにという行政指導が行われたが、具体的な規制は行われていない。また、家畜排泄物については、その保管や処理についての法律は整備されているが、圃場での施用方法、施用量などについての規制はない。中国、韓国でも畜産農家に対する排泄物処理に関する法律は整備されているが、堆肥や尿の使用に関する規定も規制もない。

リンの過剰施肥については、窒素と異なり過剰に施肥されても土壌に固定され環境への影響が少ないため、農業における経費削減という視点で問題視される場合がほとんどである。しかし、日本のように相対的に農産物の価格が高く、しかも火山灰母材の土壌が多い地域ではリン肥料の過剰施肥が常態化している。これまでに過剰に施用されたリンは土壌に強く吸着されるため、作物や環境にあまり影響しないとする意見が強かったが、実際にはさまざまな作物の生育異常がリンの過剰に起因する可能性も報告されるようになっており、リンの過剰障害についてはさらに研究が必要である。

一方で生産に有機合成農薬や化学肥料を使わなかった生産物を有機農産物として認証する動きは世界的に広がっている。しかし、化学肥料を用いない生産方法が環境への窒素負荷を軽減できるかどうかには疑問があり、慣行農法と有機農法の比較が盛んに行われている。しかし、すでに述べたように、窒素化学肥料が開発され大量に生産されはじめたことによって食料不足をもたらす窒素不足はすでに解消された。しかし、その結果として、肥料の過剰施用、食事に供されない有機物、家畜排泄物によって土壌の有機物汚染が進行している。環境保全型農業とは、単に化学肥料や化学合成農薬を使用しない有機農業ではなく、地球上の元素の循環の輪の中に食料生産／消費／廃棄の環を構築し直すことを意味しており、地球人口100億人の地球の環境の許容できる状態を長らえさせるために求められる農業の改質である。

【共生微生物利用】

地球温暖化による農業環境の変化、埋蔵資源の枯渇による将来的な化学肥料の払底など、長期的に見た農業生産に対して現状の農業体系は必ずしも立ち行かないと考えられている。収量（生産量）を現実的に担保するためには環境ストレス耐性や農薬低減などの他、肥料低減に対する育種および栽培における要素技術の研究開発が重要になる。ここでは持続型農業に資する研究のうち主に肥料低減に関して、微生物共生を利用した研究開発領域について記述する。

微生物共生については、対象となる微生物の植物に対する効果とそのメカニズム上明白なケースと、必ずしもそうでないケースで研究開発動向が大幅に異なる。前者に該当する微生物は「細胞内共生」というキーワードでくることができ、土壌微生物が宿主植物と共生することで宿主が必要な窒素やリンなどの栄養分を供給することで、肥料低減につながる。これらはダイズなどマメ科植物と共生する窒素固定細菌である根粒菌、および陸上植物の8割と共生するアーバスキュラー菌根菌が挙げられ、近年の基礎研究における飛躍的な進展に加え、資材化などの応用研究・開発においても一定の成果が見られる。一方、土壌微生物のうち、根圏（根および根の周囲）に生息する多様な種（根圏微生物として総称）については、

堆肥などの資材に含まれることを効能として謳った商品が出回っているものの、その効果については必ずしも明瞭ではない場合が多い。肥料低減の他に病原抵抗性の付与を通じた農薬低減の可能性が挙げられるが、植物に対する作用についての基礎研究は現状において限定的である。

以上のような状況において、これまでに特に根粒菌の遺伝学的解析から、共生に必要なとされる低分子化合物やタンパク質が明らかにされてきた他、根粒菌およびアーバスキュラー菌根菌の細胞内共生に必要な宿主植物の遺伝子の解析が進んでいる。特に後者については、マメ科モデル植物（タルウマゴヤシ、ミヤコグサ）における研究基盤が整備されたことで、それら植物遺伝子の機能解析を含め、近年の当該分野のトレンドとなってきた。

アメリカにおいては、トウモロコシの裏作として、また飼料用としてダイズの作付けが歴史的に重要であり、農務省（USDA）および大学を中心としたダイズ根粒共生の基礎研究に政府が力を入れてきた。またタルウマゴヤシのゲノム解析では世界をリードしてきた経緯がある。しかし近年は USDA および NSF からのファンディングは個別の基礎研究に向かなくなっている様子である。ヨーロッパでは、牧草であるアルファルファおよびその近縁種であるタルウマゴヤシを中心に基礎研究が充実しており、イギリス、フランス、ドイツなど各国のファンディングとともに、近年は環境問題の高まりに合わせて EU を主体とした予算措置（ERC など）が注目される。一方、わが国では科研費の単発的なファンディングで基礎研究がサポートされてきた経緯があり、また大型予算としては JST/CREST および JST/ACCEL の他、科学技術振興調整費によるグループファンディングが措置されてきた。農林水産省も交付金や委託プロジェクトで微生物共生の研究をサポートしてきたが、最近では減少傾向にある。ミヤコグサのゲノム解読はかずさ DNA 研究所が単体で進めてきたが、2回のバージョンアップ以降、サポートは終了している模様である。その他研究基盤としては宮崎大学を中心としてナショナルバイオリソース事業（NBRP ミヤコグサ・ダイズ）が動いている。

（3）注目動向

【リン・窒素利用】

- ・ 作物によって利用されなかった肥料窒素の環境中への流出が環境富栄養化の主因なので、肥料の利用効率を高めること、さらには少ない肥料で十分な収穫を挙げることができる品種改良が求められる。しかし、環境の負担が増えることに対して、直接的な不利益を被る人間がいるわけではないので、研究へのインセンティブが働きにくいのが実態である。環境負荷が負の経済効果をもつことを定量的に捉える手法が開発されるべきだろう。今後、窒素肥料に環境負荷税を掛けるのが現実的な対応であろう。
- ・ 窒素肥料の作物による利用率を高めるために、施肥された化合物を水に溶けにくくする技術が開発されている。特に、尿素に側鎖を導入して溶解度を下げることによって難溶性とした窒素化合物の肥料としての利用、水溶性の肥料粒の表面を被覆する技術（被覆肥料）が日本の会社によって開発されている。被覆剤としてポリオレフィン樹脂、硫黄、ポリウレタン樹脂などが利用されている。日本では、作物に対する施肥の回数を減らして労働生産性を高めようという目的でこれらの技術が開発された。こうした肥料は同時に肥料の利用率を向上させる機能も持っているが、使用の目的が環境保全

となると、被覆のためのコスト増加が肥料価格の増加となるため、市場での競争力は弱い。

- ・ イネ科牧草の中には、土壌中で起こるアンモニウムイオンの硝酸イオンへの硝化を抑制する物質を根から分泌する草種が見つかっている。また、硝化を抑制する物質も化学的に合成され、消化抑制剤入りアンモニア肥料として実用化されている。アメリカなど大規模農地では液化アンモニア（液安）を直接土壌中に灌注する施肥法が行われており、土壌中のアンモニウムイオンは容易に硝化され、雨水とともに溶脱、流亡する。アンモニアはアンモニウムイオンとして存在し、土壌の陽イオン吸着力によって土壌に保持されるので、硝酸イオンへの硝化を抑制すれば土壌への滞留時間は長くなると期待できる。このため硝化抑制剤によって環境の硝酸イオン汚染は抑制されると考えられるが、薬剤とその散布のコストを誰が負担するのが問題となる。
- ・ リンの利用効率に優れた育種（少ないリン施肥で収量が低下しない品種の選抜、育種）が広く行われている。
- ・ 有機農業（環境保全型農業）による有機性廃棄物の肥料としてのリサイクル利用は、作物への窒素供給という面では、その能力が不足するが、リンや微量必須元素の供給という点では非常に優れている。有機物の肥料としてのリサイクル利用と、そこに化学合成窒素肥料をうまく組み合わせて行く施肥体系が求められる。さらに、こうした肥料資源の再利用という視点からの有機農業、環境保全型農業の評価も求められる。

【共生微生物利用】

- ・ 根粒共生および菌根共生においては、マメ科モデル植物における分子遺伝学的解析が進化したことで、特に初期シグナル伝達経路についてその分子メカニズムの実体が明らかになりつつある²⁾。根粒菌の分泌する共生シグナルについては古くからその分子構造が知られていたが、2011年にはアーバスキュラー菌根菌も同様のリポキトオリゴ糖を共生シグナルとして利用することが明らかとなり、その後より単純な構造であるキチンオリゴ糖の関与も知られるようになった。これらの宿主植物受容体としてLysM型受容体キナーゼが同定され、デンマークの研究グループを中心としてその構造や結合特性など生化学的解析が進んでいる。また、シグナル伝達経路の下流で機能する転写因子については、両方の共生で共通するもの、またそれぞれ特有なものを含め、この数年で新たな因子が次々と明らかになっている³⁾。上記シグナル伝達経路の理解を前提に、マメ科植物以外の植物、特にイネ科植物（穀物）に根粒菌を感染させ、根粒で窒素固定を実現させようという国際プロジェクトが立ち上がっている（ゲイツ財団）。また、根粒共生の有無をゲノム比較で進化的に明らかにするプロジェクトも2件、ERCのファンディングで動いている。加えて、高タンパク質、低肥料栽培というマメ科作物の本来の特性を生かして、栽培技術をアフリカに浸透させる国際プロジェクトも成果を出している（ゲイツ財団）。
- ・ 根圏微生物一般については、モデル植物シロイヌナズナを用いた細菌メタゲノム解析が2012年にNature誌に発表されたことを機に、ノースカロライナ大学（アメリカ）およびマックスプランク植物育種学研究所（ドイツ）のそれぞれの研究グループが国際的に研究をリードしている⁴⁾。現状は微生物叢の把握とその動態解析であるが、ヒト腸内微生物叢研究の高まりを受けて、「マイクロバイオーム」のキーワードでアメリ

カ政府などが巨額のファンディングを実施しており、植物微生物共生の研究分野においてもブレークスルーになることが予想される。

（４）科学技術的課題

【リン・窒素利用】

- ・ 環境保全型農業の必要性を周知する上で最大のボトルネックは知識の欠如である。窒素やリンなど、本来ならば食料や樹木、草地の生育に必須の栄養元素が、人口の増加によって環境中に高い濃度で存在するようになったことが、環境の劣化、新しい病気のアウトブレイクを招いているという認識を持つことが重要である。
- ・ これまで食料を増産するための駆動力は多く機能してきたが、環境富栄養化による生態系の劣化、環境の価値の低下を定量的に評価する方法がない。このため環境を保全するためのコストをどのセクターが負担するのかのコンセンサスが得られていない。環境コストの査定方法を確立し、その評価に基づいて窒素肥料とリン肥料に一定の賦課金を課すことが現実的な対応であろう。

【共生微生物利用】

- ・ 土壌微生物の共生における競合について：フィールドにおいては多種多様の土壌微生物が根圏に存在しており、有用微生物の接種が必ずしも作物の生育に効果的であるとは限らない。病原微生物の場合と同様、共生微生物もエフェクターを分泌し、宿主植物への感染を制御していることが明らかになってきた。植物微生物共生におけるエフェクターの作用が明らかになることで、フィールドにおける接種効果を調節できるようになると考えられる。
- ・ 難培養微生物の利用について：土壌微生物叢のメタゲノム解析が進展するにつれ、ゲノムシーケンスとしては同定できるものの（Operational Taxonomic Unit p455, 3.4.1の項参照）、種として単離同定できていない土壌微生物が大半であることが明らかとなった。これは微生物の培養技術の進展が伴っていないことが1つの原因である。例えば根圏での培養単離技術が確立されることで、これら難培養微生物の機能解明と利用が期待できる。
- ・ 微生物叢としての作用について：根粒菌あるいはアーバスキュラー菌根菌は単独種での共生効果が明らかであるが、根圏微生物一般については、複数の種が協調することで宿主植物に作用している可能性が高い。基礎研究としてハードルの高い課題ではあるが、微生物叢としての相互作用を明らかにできる手法が確立されれば、根圏微生物の応用研究・開発に弾みがつくと思われる。
- ・ 穀物への根粒共生付与について：ダイズなどマメ科植物を含む真正双子葉植物とイネ・トウモロコシなどの単子葉植物は進化的に1億年以上前に分岐したと考えられており、その後の進化において遺伝子の機能が大幅に異なっている可能性がある。したがって、根粒菌との共生に必要なマメ科植物の遺伝子を穀物に導入することが必ずしも共生能の付与につながらない。根粒共生の進化は「窒素固定クレード」に含まれる植物にのみ見られることから、その原因を探ることで、構成生物学的なアプローチに寄与できると想定される。

（5）政策的課題

【リン・窒素利用】

農業は食料の確保のために必須の産業である。一方で農業生産者は、産業の中でもっとも小規模で弱い存在である（生産高が気象に影響される、規模が小さい、投資と利益の回収の間の時間が長い）。さらに技術の発達によって、食料を保存すること、加工すること、輸送すること、が可能になり、これは他国からの食料の輸入が増加する要因にもなった。また、農業生産は自然環境に制約されるので、技術革新によっても生産性（土地生産性、労働生産性）は大きくは向上しない。さらに多くの国で工業の発展を農業の発展に優先させるため、国民にとって安価な食料の確保と農家の収入増加、保護はしばしば対立する政策となる。環境保全型農業の必要性を論じるにあたり、農業の生産物は食料であるから、国あるいは地上自治体が、まずはその国民、構成員の食料をどのように確保するのか、俯瞰的なマスタープランを立てる必要がある。その点からも商社などの食料の輸出入はある程度行政のコントロールを受ける必要がある。そのうえで、行政サービスとしてのゴミ処理、特に有機性の廃棄物やヒトの排泄物をどのように処理するかについて、物質の収支も勘案したマスタープラン立案が求められる。その上で、国土保全、国土の環境の劣化を防止する立場から、ゴミの管理、有機性廃棄物の農業での再利用、水田の維持、海洋河川陸水の富栄養化の防止、などの視点でのマスタープランを立案し、これら三つの整合性のある総合的な立案が必要だろう。農業は単に食料を生産増産するだけではない。食料の供給、有機性廃棄物の処理、環境の保持の三位一体の政策が求められ、それこそが 21 世紀の農水省をはじめとするわが国の省庁の果たすべき職務だと考える。

自然エネルギーによって発電された電気の固定価格買取制度によって薪炭材や有機性廃棄物から電気を取り出す事業が進んでいる。有機物は生育に使われた肥料成分を含んでおり、有機物の分解は電気だけでなく肥料成分の抽出にも有効である。特にメタン発酵と呼ばれる有機物の嫌気分解、鶏糞ボイラーと呼ばれる鶏糞や牛糞の燃料化、木材の炭化、は有機物蓄積による環境負荷を減らし、副生成物の肥料としての再利用に有効なので、これらを促進する政策の意義として発電だけでなく環境負荷低減があることも PR するべきである。

【共生微生物利用】

ヨーロッパにおいては、イギリスでは BBSRC、ドイツでは DFG、フランスでは CNRS/INRA などによる各国のファンディングと EU における ERC のそれが、規模は異なるものの問題なく機能していると思われる。またアメリカにおいても、DOE、NSF、USDA などが協動的に研究政策に寄与していることが見て取れる。

一方、わが国では省庁間連携が重要視されているものの、予算措置においてはそれが必ずしも明白ではなく、微生物共生の研究分野に限らず植物科学研究一般において、基礎研究（文部科学省）と応用研究（農林水産省）の乖離が顕著である。競争的資金においてはこの問題は一部解消されているものの、アメリカおよびヨーロッパと比較して、大型プロジェクトの立案にとってはデメリットとなっていると考えられる。

（6）キーワード

硝酸イオン、アンモニウムイオン、アンモニア、リン、リン酸、環境の富栄養化、水質汚濁、地下水の富栄養化、有機物、土壌有機物、堆肥、環境保全型農業、有機農業、食料生産、細胞内共生、根粒菌、窒素固定、アーバスキュラー菌根菌、根圏微生物、メタゲノム

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 幅広く行われている。地球温暖化に関わる二酸化炭素、メタン、一酸化窒素、フロンなどの濃度規制につながる基礎研究が進められている。そろそろ窒素やリンなど土壌圏の汚染物質についての研究が緒に就いたところである。茶園（静岡県）、草地（根釧台地）など、特定の土地利用の地域では窒素の収支について環境調査などの視点で研究が進んでいる。リンは施設園芸、多肥地帯などで報告が見られるが、減肥の対策は立てられていない。 細胞内共生の基礎研究については、アメリカ、ヨーロッパと並んで顕著な成果を生み出している。 根圏微生物についても水田におけるメタゲノム解析を始め、独自の研究成果が見られる。 病理学や生態学との学際研究などで研究者層が広がりつつある。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 一部は会社の環境ビジネスとして取り組み始められた。メタン発酵消化液は有機農業適合資材と認められるなど、リサイクルの重要性は認識されはじめた。食料の自給率は低下し続けていて、国内で農業することが環境の維持に機能することをまず認知させる必要がある。 一時、共生微生物の資材化に向けて複数の企業の参画が見られたが、現在は限定的である。しかし近年の基礎研究の活性化を受けて再び参入の動きがある。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 幅広く行われているが、国土が広い畜産集中、肥料多肥の影響は限定的。 政府が National Microbiome Initiative を立ち上げ、根圏微生物叢のメタゲノムを含む研究を推進している。⁵⁾
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 養豚場からの排水が閉鎖海面の富栄養化をもたらしている事例（大西洋岸）が報告されている。 ノボザイムがモンサントと提携して共生微生物利用研究および商品化を大規模に進めている。⁶⁾
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 幅広く行われている。食料自給に対する考え方が日本とは違い、それぞれの国内農業を維持し食料自給率を維持することに関心が高い。有機農業に対する関心も高い。 一方、英国やフランスではコムギ作において土壌に対する過剰施肥と家畜排泄物の草地還元による地下水の硝酸イオン汚染に関心が高く、施肥量や還元量の総量規制が行われている。さらにホウレンソウやレタスなどの葉菜類の過剰硝酸塩には規制値を設けて出荷を禁止している。堆肥などの土壌中の挙動について研究が積み重ねられている。 John Innes Centre（イギリス）を中心としたグループが穀物への窒素固定能の付与の研究を進めている。⁷⁾ 根圏微生物叢のメタゲノムではマックスプランク研究所（ドイツ）が世界をリードしている。⁸⁾
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 技術の現場への応用が盛んである。 ヴァーヘニンゲン大学（オランダ）を中心となり、アフリカにおいてマメ科作物の栽培促進を展開している。⁹⁾
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 食料増産に力点が置かれているため、環境への気配りはまだ見えない。しかし陸水や河川の水質劣化から、これらの問題が存在していることに気がつきはじめている。 マメ科非モデル植物のゲノム解析で 1KP プロジェクトへの参入がある。¹⁰⁾
	応用研究・開発	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 農産物の収量には関心が高いが、環境への負荷にはほとんど興味がない。
韓国	基礎研究	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> 幅広く行われているが、学問領域の縦割りがはっきりしており、畜産と耕種の連携はあまり顕著ではない。有機農業への技術的な関心が高い。 植物微生物共生の基礎研究において目立った動きはない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 農業の環境負荷は認識されている。畜産の産業としての比率が、耕種農業、漁業に対して強いため、政府からの補助金が多く、制度の整備などが進んでいる。また業界への強い指導も行われているが耕種農業の衰退によって堆肥などの使用は滞っているらしい。 植物微生物共生の応用研究・開発において目立った動きはない。

- (註1) フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
- (註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない
- (註3) トレンド
↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) Young N, et al. Nature 480: 520–524, 2011.
- 2) Oldroyd GE. Nat Rev Microbiol. 11: 252-263, 2013.
- 3) Soyano T, Hayashi M. Curr Opin Plant Biol. 20: 146-154, 2014.
- 4) Hacquard S, et al. Cell Host Microbe 17: 603-616, 2015.
- 5) <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2016/05/12/fact-sheet-announcing-national-microbiome-initiative>
- 6) <http://www.novozymes.com/en/news/news-archive/2016/01/the-bioag-alliance-readies-new-microbial-solution-to-improve-corn-harvests>
- 7) <https://www.ensa.ac.uk>
- 8) <http://www.mpipz.mpg.de/schulze-lefert>
- 9) <http://www.n2africa.org>
- 10) <https://sites.google.com/a/ualberta.ca/onekp/>

3.4.5 高機能・高付加価値作物

（1）研究開発領域の簡潔な説明

農作物には、トマトのリコピン、ホウレンソウのルテインなどのように人間の健康を維持増進させることが期待される物質を含むものがあり、「機能性成分」、それらを含む農作物は「機能性作物」と呼ばれている。それら機能性成分のヒトへの効果を検証するとともに、品種改良・生産方法の改良などにより、機能性成分をより多く含む農産物およびその加工品を生産する技術を確立する。さらに、栄養・健康機能性を有する農林水産物とその一次機能から三次機能に関する研究開発を通して、「食」を通じた人々の健康維持・増進に寄与することを目指すものである。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

1984年に初めて食品の機能性を一次機能から三次機能に分ける概念と機能性食品の名称が提唱された。食品の一次機能とは栄養機能（カロリー、タンパク質、脂肪、糖質、ビタミン等必要な栄養素の補給）、二次機能とは嗜好・食感機能（色、味、香り、歯ごたえ、舌触りなどの美味しさ）、三次機能とは健康性機能・生態調節機能（生態防御、老化制御、疾患予防など生体の調節）である。同年に食品の三次機能に関する最初の国の大型研究プロジェクトによる体系的な研究が開始された。その後、農林水産省や文部省（当時）によって続けられた大型研究プロジェクトの成果を受け、1991年には食品の三次機能の表示制度としては世界初となる、機能を表示できる「特定保健用食品制度」が開始された。また、2001年にはビタミンとミネラル類の表示について栄養機能食品制度が導入された。さらに、昨年、2015年4月には、機能性表示食品制度が創設された。この間、米国や欧州を中心に、大規模なコホート研究が行われ、その結果、従来の5大栄養素以外にも健康の維持に重要な成分の存在が明らかになってきた。

わが国では現在、三次機能のみが大きく注目されているが、本来、食品には前述したように3つの重要な機能性がある。三次機能の研究は、これまでは疾病や疾病予備軍を対象にした研究が多く、最終的に薬との仕分けが難しくなる場合もあった。これまでの研究の結果、高機能性作物を、実際の食事や食品として供給する場合を考えると、まず通常の食材としての機能（一次機能と二次機能）を持つことが必須で、それにプラスする形での三次機能がなければ、食材としては使われないことが明らかとなった。つまり、これらの3つの機能性は本来不可分であり、今後は一体として、食事として供給されるべきであることを示すものである。

今後、高機能・高付加価値作物の有効性を検証するために、栄養・嗜好・生体調節機能の3つの機能を同時に評価するとともに、作物独自の未病マーカーを探索・決定して健康増進効果の検証方法を開発されることが期待される。また、食品が健康増進に役立ち、疾病予防に寄与していることが検証され、それを表示できることが、国民の健康維持増進に寄与するものと考えられる。

当該研究領域は、新規機能性成分の発見・効果検証から製品開発まで多岐にわたる。ここでは、上流から4分野に分けて研究開発内容の説明を行う。

① 機能性成分の健康維持・増進効果の検証

対象とする機能性成分の効果を検証しようとする研究であり、試験管内実験・動物実験・コホート研究・ヒト介入試験等様々なレベルの研究が存在する。試験研究の目的は主として、対象成分の効果（例：血中コレステロール低下・視力維持等）およびその効果を発揮するのに必要な摂取量を明らかにすることである。機能性成分の健康維持・増進効果検証については国を問わず研究が進められてきた。コホート研究により食事内容と疾病発生率・寿命などの関連を明らかにする研究は主に欧米で進められ、ポリフェノール接種の心臓疾患に対する効果やカロテノイド類接種のがん発生に対する効果などが検証されている。わが国では、「機能性をもつ農林水産物 食品開発研究プロジェクト」が農研機構を中心に実施され（2013-2015年度）¹⁾、産学官連携により、生活習慣病予防効果が期待される農産物/加工品の開発、生産・流通技術の確立とともに、医療機関との連携により、農産物やその加工品について、疾病リスク低減への影響をヒト介入試験により評価した。栄養・機能性、安全性、特性情報等を盛り込んだ農林水産物データベースを構築して、個人の健康状態に応じたテーラーメイドな提供システム・栄養指導システムの開発を行った。健康維持・増進に寄与する「機能性弁当」（高機能作物を使用した弁当）のヒト介入試験では、生活習慣病予防効果に関する知見が得られた。本プロジェクトでエビデンス実証を目指している高機能作物としては、高アミロース米、アミロペクチンロングチェーン米、高β-グルカン大麦、高ルチンダッタンそば、高β-コングリシニン大豆、高ケルセチンタマネギ、高β-クリプトキサンチン柑橘、高メチル化カテキン緑茶、高リコピン人参、高ルテインケール、高トリテルペンゴーヤである。

② 機能性成分を豊富に含む農作物の育種開発

機能性成分を含む農作物について、育種によってその含量を高め、高機能高付加価値作物を作出しようとする研究開発である。高機能作物の育種は、民間レベルでは野菜を中心にわれ、ファイトケミカル（健康によい影響を与えるかもしれない植物中に存在する天然の化学物質）含有量の多い果菜類が市場にも出回っている。タキイ種苗株式会社において20年前に、健康維持機能を持つ成分を多く含み、なおかつ食味に優れた「機能性野菜」の研究プロジェクトをスタートさせた。そして研究開発の結果、機能性成分を多く含む新しい野菜品種を育成、商品化することに成功した。「ファイトリッチ」シリーズと名付けられたこれらの品種は2015年5月現在15種類を数え²⁾、年々その品目・品種を充実させている。このように野菜品種を栄養成分からとらえて育成し、シリーズ化したことは世界でも前例のないことである。

国レベルでは農研機構が、米、大麦、大豆、ジャガイモ、サツマイモ、タマネギ、ゴマ、ダッタンそば、茶、柑橘、イチゴ、ヤーコンなどで、食物繊維、ポリフェノール、カロテノイド、リグナン、ビタミンなどの含有量を従来品種より高めた品種育成を行い³⁾、これらを活用した製品開発がいくつか行われてきた。

③ 生産方法による機能性成分の高含有化

機能性作物について、その栽培条件と機能性成分の含有量の関係を明らかにし、栽培法によって含有量を高めようとする開発研究。国内の例として、ファイトリッチシリーズのニンジン品種「こいくれない」を生産する企業「NKアグリ」で、農業ICT技術の利用により成分含有量の最も高くなるタイミングで収穫を行い、全国各地の産地からリレー出荷を行っていることが挙げられる。この「地域をつないで一つのバリューチェーン『リコピ

ン人参プロジェクト』は、農業 ICT の利用例として総務省「地域情報化大賞」部門賞を獲得している⁴⁾。

④ 機能性成分を損なわない食品加工

第6次産業などにおいて、機能性作物を加工・販売する場面は十分に想定される。その場面において、機能性成分の性質を把握し（熱に弱い・油溶性であるなど）、加工時に成分が損なわれないようにする、あるいは消化吸収の良い製品とするなど一層の付加価値を与えることを目的とした技術開発である。日本以外の国ではこれらの機能性成分はサプリメントの形態で摂取することが主に想定されている。日本ではその他に6次産業化などで加工品を販売する動きがあるが、加工法と機能性成分の関係については各加工品メーカーのノウハウによるところが大きく、研究状況は明らかでない。

(3) 注目動向

【国内動向】

<機能性表示食品制度>

- ・ 2015年4月から施行された機能性表示食品制度を活用して、2017年2月10日現在705品目の食品が届け出られている。その中で、生鮮食品として、ウンシュウミカン、大豆もやし、単一の農林水産物のみが原材料である加工食品（農産物）として、べにふうき緑茶、大麦、米、蒸し大豆、蒸し雑穀、トマトジュースなどが受理、販売されている。これは、効能についての科学的根拠（最終製品による臨床試験もしくは機能性成分についてのシステマティックレビュー）、および製品に含まれる機能性成分の含量担保（サンプリング検査による母集団の含量推定もしくは非破壊検査法による全量検査）の両者が満たされれば、消費者庁への届出をもって商品パッケージへの効能記載を可とする制度である⁵⁾。

表 3-4 機能性表示生鮮食品及び加工食品（単一の農林水産物のみが原材料であるもの）

品目	機能性関与成分	表示されている機能性
三ヶ日みかん	β-クリプトキサンチン	β-クリプトキサンチンは骨代謝のはたらきを助けることにより、骨の健康に役立つことが報告されています。
大豆もやし	イソフラボン	大豆イソフラボンは骨の成分を維持する働きによって、骨の健康に役立つことが報告されています。
べにふうき緑茶	メチル化カテキン	メチル化カテキンは、ハウスダストやほこりなどによる目や鼻の不快感を軽減することが報告されています。
大麦	β-グルカン	大麦β-グルカンにはLDL-コレステロールを下げる機能、腸内環境を改善する機能があることが報告されています。
米	γ-アミノ酪酸（GABA）	γ-アミノ酪酸（GABA）には血圧が高めな方に適した機能があることが報告されています。
蒸し大豆	イソフラボン	大豆イソフラボンには骨の成分の維持に役立つ機能があることが報告されています。
トマトジュース	リコピン	リコピンには血中HDL（善玉）コレステロールを増やす働きが報告されています。

- ・ 規制改革実施計画（2013年6月14日閣議決定）で、「食の有する健康増進機能の活用」

として、企業の責任で行う新たな機能性表示の検討を行うことが決定された。それを受けて、「食品の新たな機能性表示制度に関する検討会」が消費者庁に設置されて8回にわたって審議され⁶⁾、農林水産物を含む食品での自主的な新たな機能性表示制度が2015年4月からスタートした。

- ・「和食：日本人の伝統的な食文化」が2013年12月にユネスコ無形文化遺産に登録され⁷⁾、和食を構成する伝統的農作物も注目されている。このことは、伝統的農作物や地域農作物が、今後、世界的な新高付加価値作物として取り扱われる可能性を示唆するものである。
- ・地域で育まれた伝統と特性を有する農林水産物食品のうち、品質等の特性が産地と結び付いており、その結び付きを特定できるような名称（地理的表示）が付されているものについて、その地理的表示を知的財産として保護し、生産業者の利益の増進と需要者の信頼の保護を図ることを目的として、「特定農林水産物等の名称の保護に関する法律」（地理的表示法）が2014年6月に制定された。現在、登録高付加価値作物としては、あおもりカシス、夕張メロン、八女玉露、江戸崎かぼちゃ、鳥取砂丘らっきょうなどがある。

【海外動向】

- ・海外の機能性研究は、一次～三次機能性を栄養機能性の範疇として取り扱って実施されている。
- ・海外で健康と食品の関係が問題になっており栄養疫学研究が盛んに行われている。
- ・米国：がん、肥満（生活習慣病）、EU：血管系疾患、生活習慣病、アジア：貧富の二極化による低栄養と肥満（生活習慣病）
- ・海外の機能性表示制度では、届出制の表示が可能なのは米国のみで、米国もサプリメントだけのため、高機能・高付加価値作物で機能性を表示できるのは日本だけである。
- ・EU、米国、オーストラリア・ニュージーランド、日本の機能性表示に関する制度を比較すると、疾病リスク低減ではいずれも規制当局による審査・認可が必要であり厳しく制限されている⁸⁾。

<EU>①一般に認められたエビデンスに基づくヘルスクレーム、②新規かつ専有のエビデンスに基づくヘルスクレーム、③疾病リスク低減に関するヘルスクレーム、④子供の健康及び発達に関するヘルスクレーム（いずれもEFSAによる上市前の評価と認可が必要）があるが、健康な人に対する効果を検証する必要があり、認可された割合は①、②で11%以下となっており厳しい⁸⁾。メラトニン(時差ぼけ症状の緩和、睡眠に入るまでの時間の短縮)、紅麹エキス(血中コレステロールの正常化)、オリーブ油ポリフェノール(酸化ストレスからの血中脂質保護)、コリン(ホモシステイン代謝の正常化、脂質代謝の正常化、肝機能の維持)、ベタイン(ホモシステイン代謝の正常化)、トマト水抽出物(正常な血小板凝集の維持による健全な血流維持)などの認可がある。

<米国>①栄養表示教育法に基づくヘルスクレーム、②FDA近代化方に基づくヘルスクレーム、③条件付きヘルスクレーム、④構造・機能クレーム(届出制)があるが、条件付きヘルスクレームでは、摂取カロリーの増加につながらない低不飽和脂肪酸・低コレステロールの食事の一部として、「1日1.5オンスのクルミを食べることと、冠状動脈性心疾患のリスク低減との関連性を決定的ではないものの支持する研究が報告されています」、といったクレーム表現がある⁸⁾。

<オーストラリア・ニュージーランド>①一般レベルのヘルスクレーム(今まで認可され

たものから選ぶ方法、オーストラリア・ニュージーランド食品基準局 FRANZ による評価・認可を受ける方法、システマティックレビューにより FRANZ への届出を行う方法)、② 高度なレベルのヘルスクレームがあり、エルダーベリー抽出物の免疫機能の維持、フリーラジカルによる損傷からの保護、インフルエンザ等のウイルスからの保護、オオバコの肝臓コレステロールの分解を促進する胆汁酸吸収の減少、アップルサイダー酢の体脂肪減少、食欲減少などのクレームが承認されている⁸⁾。日本との違いは、評価の厳しさの高低はあるが、免疫系の正常な機能に寄与、ホルモン作用の調節の寄与、神経系の正常な機能に寄与が認可されていることである。

(4) 科学技術的課題

- ・ ライフステージ別健康維持・増進のための高機能作物の活用法の開発：健康で活力ある超高齢社会に向けた健康長寿延伸のためには、幼小児層の栄養問題や若い女性のい瘦（やせ過ぎ、肥満症の対極にある概念）の問題解決および、各年代層での各生活習慣病予防効果や、脳機能・運動機能・免疫機能・腸管機能の維持・増進効果のある高機能作物の活用が重要となる。そのためには、高機能作物に最適な栄養・健康機能性評価手法の開発やヒト介入試験による高機能作物（丸ごと食品）やその作物を用いた食事メニュー（複合食品、調理食品）の栄養・健康機能性の検証が必要である。
- ・ 高機能・高付加価値作物のデータベースの構築：高機能・高付加価値作物の有効な利用のためには、品目、品種、産地、栽培条件、収穫時期、加工・調理条件、保存条件、栄養成分含有量、機能性成分含有量、エビデンス、安全性などのデータを集約して、データベースとして整備し、広く公開する必要がある。
- ・ 高機能・高付加価値作物のエビデンスを獲得するための新たな手法開発：高機能・高付加価値作物は、サプリメントと異なりプラセボを設計することが難しい。また、マイルドな効果を検証するため、多大な例数を必要とする。そのため、高機能・高付加価値作物独自の未病マーカーの探索、健康増進効果の検証方法の開発などが必要となる。
- ・ 分析法の標準化：機能性を表示するためには、高機能・高付加価値作物の機能性成分含有量を定量する必要がある。そのため、機能性成分分析法の妥当性確認と標準化を進める必要がある。
- ・ 植物を構成する成分のうち明らかとなっているものはごく一部にすぎず、さらに機能性が解明されているのはごく少数である。また、機能性成分は単体で効果を持つのみならず、食物繊維なども含めた多くの成分が協力的に健康維持機能効果を発揮していると推測され、その全体像の解明が期待される。
- ・ 栽培法と機能性成分の関係は、前述のニンジンなどを除いて大規模な調査はほとんど行われておらず、機能性成分を高める栽培法は確立していない。今後、栽培方法、土壌条件、栽培環境など多数の要因を取得し、主要要因を解析する試験が進められることが望まれる。
- ・ 機能性表示のための全量検査に使用する、近赤外線などを利用した非破壊検査機は、一部の機能性成分（リコピンなど）に対応したものは開発されているが、現状では定量できない機能性成分も多く、各種機能性成分に対応する検査機が望まれる。加えて、現状では検査機の価格は数十万円～十数万円と高価であり、普及のためには生産者が気軽に

使用できる安価な検査機の開発が必要である。

（５）政策的課題

- ・ 高機能作物の機能性表示における指針・マニュアル作成：高機能作物をより高付加価値化し市場へ積極的に導入するためには、機能性表示が重要となってくる。特定保健用食品の申請は多大な費用と大規模な研究開発が必要であったが、新たな機能性表示制度においては、農林水産物への表示も認めており、農業生産者による機能性表示も可能となった。しかし、農林水産物に関しては、他の食品とは異なり認証・支援機関などもなく、今までのエビデンスの蓄積も少ないため、行政による表示制度活用のための指針・マニュアルの作成、丁寧な指導や高機能作物のエビデンス蓄積（高機能作物の研究レビューの整備）、高機能作物中の機能性成分の分析体制の整備が不可欠である。
- ・ 高機能・高付加価値作物の長期コホート研究による健康維持・増進効果の実証：和食がユネスコ無形文化遺産に登録されて、日本の伝統的農産物や地域農産物などに注目が集まるようになってきた。しかし、地中海食の栄養疫学研究成果（論文数）は 2042 報、日本食の研究成果は 130 報（2013 年 6 月、東大佐々木敏教授資料⁹⁾）であり、日本の農産物や日本食の長期コホート研究（栄養疫学研究）を政策的に推進しなければ、世界的に高機能・高付加価値作物としては認められず、海外輸出の急増には寄与できない。
- ・ 政府を挙げての健常人のライフステージ別健康維持増進のための「健康寿命延伸プログラム」の開発：健康で活力ある超高齢社会に向けた健康長寿延伸のための健常人の健康維持・増進のために、エビデンスが実証された高機能・高付加価値作物やそれを利用したレシピを活用した包括的なプログラムを協力を策定・推進する必要がある。そのためには、健康維持・増進効果を検証する新規なヘルスチェックシステムの開発が必要であり、政策としてそれを推進していく必要がある。
- ・ 機能性成分はあくまで食品の成分であり、疾病の治療を目的とした医薬品とは異なる。このため、その効能をどのように標記するかについては省庁によって意見が微妙に異なり、いまだにその基準が統一されているとはいいがたい。生産・販売者にとってグレーゾーンが広いことが販売上のネックとなっており、わかりやすい明確な基準の確立が強く求められる。
- ・ 育種による機能性成分強化に関しては、すでに解明された代謝系の遺伝子の機能を停止させることにより特定の成分を蓄積させることが有力な手段として想定される。現状では変異誘起処理を行った後にその遺伝子に変異を起こした個体を選抜する以外の方法がなく、多大の時間と費用が必要となっている。ゲノム編集などの新規植物育種技術を使用することができればより簡便に対象遺伝子の機能を停止させることができるため、現在曖昧になっているその法的な位置づけが明確化されることが望まれる。
- ・ 機能性作物および機能性成分のヒトに対する臨床試験にかかる費用は、それら作物の販売から得られる利益を考慮した場合著しく過大であり、多くの生産者にとって試験の実施は困難である。もう一つの科学的根拠であるシステマティックレビューについても、経験のない生産者には実施が困難であると考えられ、機能性表示制度の利用のボトルネックとなっている。メチル化カテキン・ β -クリプトキサンチン・ルテインなどの成分では公的研究機関によるシステマティックレビューが作成されているが、さらに他の

成分についても公的機関による支援が求められる。

（6）キーワード

栄養・健康機能性、高機能・高付加価値作物データベース、健康寿命延伸プログラム、ヒト試験、機能性表示食品制度、地理的表示（GI）、ファイトケミカル、機能性成分、機能性作物、ポリフェノール、グルコシノレート、カロテノイド、野菜、農産物、農産物加工品、交雑育種、新規植物育種技術、ゲノム編集、健康維持増進

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 高機能作物の機能性成分データベース開発が国研で実施され、都道府県では研独自の高機能作物の洗い出し作業が盛んに行われている。 高機能作物の品種育成は種苗メーカー中心に積極的に進められている。 日本においては、野菜の消費量が減少し、一方で生活習慣病が増加する状況において、ファイトケミカルによる健康維持増進効果の研究が積極的に進められている。各種機能性からのアプローチ、各作物からのアプローチの双方の報告が蓄積されている¹⁰⁾。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 高機能作物の機能性解明（臨床試験も含む）に関する農林水産省委託プロジェクトで研究が進行中である。 2015年4月施行機能性表示制度により、機能性生鮮食品への関心が、自治体、企業、JA等で高まり、県独自の高機能作物開発支援事業が多くの県で立ち上がり、農林水産省食料産業局の支援事業も多く進行中である。 既存のシステマティックレビューを用いて、機能性表示の届出を行うため、機能性成分の安定化を図るための技術開発研究が、大学、国研、公設試で積極的に行われている。 前述のように、育種により機能性成分を高めた野菜としてファイトリッチシリーズが上市されている。他に、製法によりスルフォラファン含量を高めたブロッコリースプラウト、高リコピントマトなどが販売されている。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 米国では1980年頃よりファイトケミカルの有効性が評価され始め、1990年には「デザイナーフーズ」計画においてがん予防に有効性のあるとされる野菜類が40種類ほど公開された¹¹⁾。1993年には計画は予算の関係で頓挫するが、その後も各種プロジェクトにより引き続き研究が進められている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 機能性食品（体の調子を整える栄養成分を強化した食品）では、ヨーグルト、食物繊維含有シリアル（消化管の健康、心臓病予防）、栄養成分添加ジュースなどが開発上位にある。 機能性作物に対する関心は高く、Seminis社よりスルフォラファン含量を高めたブロッコリー品種“Beneforte”が発売されている¹²⁾。また、“Five a day”などの運動を通じて、野菜・果物などの摂取量を増やし、健康維持増進につなげようとする動きも活発に進められている。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ポリフェノール（ファイトケミカル）に関する研究が盛んで、ブドウ、ベリー類、にんにくなどが研究対象。 疫学研究が多数実施されており、特に地中海食（オリーブ油、ナッツ、トマト等野菜、全粒粉パン、魚介類）と疾患との関連性を解明。 農作物の機能性に対しては、ヨーロッパでは特にオランダにおいて食生活と健康の関連についての研究が活発に行われている。 また、ワインのポリフェノール、地中海食など健康維持増進に効果があるとされる食品・食習慣が各国にあり、それぞれについての研究が進められている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 健康の新たなマーカー探索、健康に寄与する栄養・健康機能性成分探索、機能性食品開発がEU全体（大学、企業、国の機関の連携）でプロジェクトとして実施されている。

				<ul style="list-style-type: none"> ・育種および栽培法によるファイトケミカルの強化については、上市された商品はなく、顕著な成果は得られていない。むしろ、食生活の中での野菜・果物の消費を高めることにより摂取するファイトケミカルの量を増やそうとする取り組みが主となっている。
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・漢方薬的動植物やその抽出物の機能性研究、生理作用の解明に基づく機能物質の探索を実施（トウモロコシペプチド等タンパク質、ペプチド、食物繊維、藻類等） ・国内に多種多様な民族と生活様式を有する中国では、食生活の違いによるその後の疾病の発生状況などを調査し、関係を解明するコホート研究が多く行われている。その中で、ファイトケミカルの摂取量も1要因として解析の対象となっている。 ・漢方薬となる植物についてその有効成分を明らかにし、作用機作を解明する研究は活発に実施されている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・保健食品、普通健康食品とも急速に開発が進み（CFDAによると2014年は2010年の3倍の消費額で3000億元）、免疫力強化、疲労回復、栄養補助の順で上市が多い。国民の所得が増加するにしたがっていわゆる健康食品の需要は大きく伸びており、その一部ではファイトケミカルが使用されている¹³⁾。 ・野菜類などの機能性成分を人為的に高めようとする研究は活発でない。古くから「薬食同源」の考え方を持つ中国では、必要に応じて食品に薬草類のファイトケミカルなどを加えることで健康維持増進を図ろうとする考えが強いものと推測される。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・朝鮮人参の研究を中心に機能性成分研究が実施されている。 ・農作物および機能性成分の摂取に関するコホート研究などは実施されている¹⁴⁾などが、他の国に比してその頻度は高いとはいえず、顕著な活動・成果は見られない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・キムチ等韓国伝統食の健康への寄与について乳酸菌、野菜、香辛料について研究応用がなされている。 ・FOODPOLISを中心に機能性食品開発が実施されている。 ・農産物におけるファイトケミカル強化の活動・成果はほとんど見えていない。伝統的に十分な量の野菜類を摂取していること、健康維持増進に関してはチョウセンニンジン等の効用に対する信頼が篤く、他の野菜がそれほど重視されていないことが要因として推測される。
ニュージーランド・オーストラリア	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・FSANZ 食品安全基準 1.2.7に則って機能性を表示している。 ・ニュージーランドでは、機能性に関する科学プラットフォームに重点分野（健康的な離乳食、健康な胃腸、健全な免疫系、メタボ対策）を設けて集中的に研究を進めている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・食欲コントロール食品、消化機能改善食品、腸バリア機能を高める乳製品、山羊ミルク、抗メタボ効果をもつキウイ、気管支炎症を制御する機能性果物、グリーンムール貝と微細藻類を使った抗炎症食品などの研究を推進している。 ・ニュージーランドでは、食品の保健機能に関して権威あるバーチャルセンターを設立して、国内外の研究期間・業界と連携して研究を進めている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 「機能性をもつ農林水産物 食品開発プロジェクトー「医食同源」の考え方で健康で豊かな生活

を目指すー

http://www.naro.affrc.go.jp/project/f_foodpro/index.html

- 2) タキイ種苗株式会社 ファイトリッチ紹介ページ <http://www.takii.co.jp/tsk/phytorich/>
- 3) 農研機構 『品種 2012』 『品種 2014』
http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/pamphlet/kind-pamph/025205.html,
http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/hinshu2014.pdf
- 4) 総務省 「地方創生に資する「地域情報化大賞 2015」表彰事例の発表」
http://www.soumu.go.jp/soutsu/kinki/01sotsu07_01000767.html
- 5) 消費者庁 「機能性表示食品に関する情報」 <http://www.caa.go.jp/foods/index23.html>
- 6) 食品の新たな機能性表示制度に関する検討会報告書
http://www.caa.go.jp/foods/pdf/140730_2.pdf
- 7) 「和食；日本人の伝統的な食文化」のユネスコ無形文化遺産保護条約「人類の無形文化遺産の代表的な一覧表」への記載に関する審議結果について
<http://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/kihyo02/131205.html>
- 8) アシュレイ・ロバーツ、食品と開発,51(3),75-78(2016)
- 9) 「日本人の長寿を支える『健康な食事』-健康な食事の観点から、地中海食を題材に日本人の食事を考えるー 東京大学大学院 佐々木 敏教授 提供資料
http://www.mhlw.go.jp/file.jsp?id=145680&name=2r985200000353cp_1.pdf
- 10) 池上幸江ら、栄養学雑誌 61 (5) : 275~288, 2003
- 11) Caragay, A. B.: Cancer preventive foods and gradients. Food Technol. 4 : 65-68, 1992.
- 12) Mithen, R.F. Acta Hort. 1005:67-70, 2013
- 13) 日本貿易振興機構上海事務所, 「健康食品調査 (中国)」, 2016
- 14) Ko, Kwang-Pil, et al. Diabetologia 58.4: 726-735. ,2015

3.4.6 食品原料（機能性成分）

（1）研究開発領域の簡潔な説明

食品原料に含まれる成分のうち、人の健康の維持・増進、体調の維持・管理、QOLの向上などに役立つ可能性のある物質、機能性成分に関する研究領域。食品の機能性は、一次機能（栄養機能）、二次機能（嗜好・食感機能）、三次機能（生体調節機能）に分けられが（3.4.5参照）、本稿では特に、三次機能について取り扱う。機能性成分の生産・抽出・評価、さらにそれらを利用した食品の研究・開発・評価といった内容を含む。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

食品原料に含まれる機能性成分については、1980年代に一次機能から三次機能に分ける概念が提唱され、その後、大型プロジェクトによる体系的な研究が行われた。1991年に世界初となる、機能を表示できる特定保健用食品制度が開始した。2001年にはビタミンとミネラル類の表示について栄養機能食品制度が導入され、その後2015年に機能性表示食品制度が開始するに至った。本稿では、高齢化社会を背景に近年特に注目されているものとして、抗酸化成分、アミノ酸を中心に取り上げ、注目動向を紹介する。

【抗酸化成分】

植物は、多種多様な「植物化学成分（フィトケミカルズ; Phytochemicals）」を持っている。ファイトケミカルズは、高温や強力な紫外線による酸化傷害から植物自身を保護する機能を持つと考えられている。本来、植物が自己防御物質として生成した抗酸化物質を、ヒトが積極的に摂取することによる疾病予防の効果が大きく注目を集めてきている¹⁾。

わが国では、古くから抗酸化性に関する研究が活発に行われ、今までに多種多様な抗酸化能測定法を用いた食品の機能評価法が数多く開発されている。評価法に関する研究報告は米国よりもはるかに多い。しかし、異なる抗酸化機構をもつ抗酸化成分の活性は、互いに他と単純比較できない。また、抗酸化成分の摂取量と健康影響に関した生体内抗酸化作用に関する学術研究も不足していた。

日常の食生活で摂取する抗酸化食素材として、表—1に示したように、エース（ACE）と呼ばれるビタミンA、C、Eなどの「抗酸化ビタミン」やポリフェノール、さらには、カロテノイド、コエンザイムQや α リポ酸、エルゴチオネインなどの抗酸化機能が注目されてきている²⁾³⁾。その抗酸化機能性の評価のために、統一又は公定法化（分析値の妥当性確認）された方法がなかった。

以下に、抗酸化成分の評価方法とその標準化に関する研究と評価法の確立に向けた動向について述べる。米国では、食品や生薬中の抗酸化力を分析する方法としてORAC値の認知度が高い。既にORAC値を表記したサプリメントや飲料の上市が進んでおり、消費者に対し食品がどれだけ活性酸素を吸収する能力（抗酸化力）があるかが具体的な数値で示されている。しかしながら、ORAC法だけで抗酸化機能を全てカバーすることは難しいことが示唆されてきた。我が国では産官学が連携して、2007年4月に食品分析開発センターSUNATECが事務局となって、AOU研究会が設立され（<http://www.antioxidant-unit.com/index.htm>）、現在、100社（2016年11月16日現在）の企業も含めた産官学の連携により運営され、多くのデータの収集と解析が進められている。特に、ポリフェノール類やビタミンCなどの抗酸化表

示のためには、ORAC 法を中心とした AOU-P、また、アスタキサンチンやリコピンなどを含めたカロテノイド類に対しては、一重項酸素捕捉能 (SOAC; Singlet Oxygen Absorption Capacity) を基盤にした AOU-C 法を用いることで、ほとんどの食品の抗酸化単位として対応できることが明確となっている。

酸化ストレスは、喫煙や飲酒、過度の運動や紫外線、さらにさまざまな精神的なストレスでも生じ、その蓄積が生活習慣病の原因である、と考えられている。現在わが国で精力的に進められているのが、老年病と呼ばれる疾患の予防に重要なバイオマーカーを、酸化ストレスバイオマーカーと共にチップ上にインプリンティングする試みである。疾患予防バイオマーカーや酸化ストレスバイオマーカーに特異的なモノクローナル抗体を、スライドガラス上にスピコートされたアゾポリマーに照射によりインプリンティングすることで「抗体チップ」を作製する。ごく微量のサンプル (一滴の血液・唾液・尿など) から、化学発光で測定しようというものである。これらの技術は 2009 年 3 月には、大学発ベンチャー企業「(株)ヘルスケアシステムズ」社で事業化された。「抗体チップ」を予防医学の分野に応用することで、未病診断を行い、各個人に適した科学的根拠に基づく統合医療による治療への未病診断のツールになるものと期待している⁴⁾。

平成 27 年 4 月より、アベノミクスの一環として、「機能性表示食品」の制度がスタートした (3.4.5 にも記載あり)。今まで、我が国で食品の機能性を表示できるのは「特定保健用食品」と「栄養機能食品」に限られており、これら以外の食品に機能性表示を行うことは、医薬品医療機器法、食品衛生法、健康増進法により禁止されてきた。しかし、栄養機能食品については対象成分が限定されていること、特定保健用食品については、その安全性や有効性について、食品ごとに臨床試験が必要であり、時間も費用もかかるため、中小企業にはハードルの高いものであることが指摘されてきた。このような背景で、平成 25 年 6 月に規制改革実施計画が閣議決定され、企業等の責任で、科学的根拠をもとに食品に機能性表示を行うことができる新たな制度としてスタートしたものである⁵⁾。この新制度は、米国のダイエタリーサプリメントの表示制度を参考に検討され、事業者の自己責任で構造や機能の表示を行うことができるが、疾病リスク低減表示や、疾病名を含む表示等は原則として禁止されている。また、国の評価を受けたものではない旨、疾病の治療を目的としたものではない旨の表示が必須とされている。その結果、最終製品を用いた臨床試験の実施か、最終製品もしくは機能性成分に関する研究論文のシステマティックレビューの実施により、機能性の根拠を評価することとされた。

2017 年 2 月 10 日現在、705 品目の申請が認められている。特に注目すべき点は、機能表示に抗酸化性がとりいれられたことである。消費者庁食品表示企画課の担当官は制度施行前の 15 年 3 月、「抗酸化」の機能性表示の実現可能性について科学的見地からすると難しいとの見解を示していた (免疫機能表示に対しても同様)。しかし、その後、「抗酸化力を向上させ、日常的に疲れを感じる方の寝つき、眠りの深さ、寝覚めという体調の改善に役立ちます。」と、抗酸化力をメカニズムとして表現した機能性表示食品の最初の例として 2016 年 3 月にサプリメントが登録を受理された。今後、メカニズムではなく、科学的根拠に基づいた機能として抗酸化を表示できる機能性表示食品の開発が望まれる。科学的な根拠に基づいた抗酸化食品の開発が必要となっている。

評価系のヒト臨床への応用の動向について述べる。わが国では、チョコレートやココアに

含まれる機能性成分であるカカオポリフェノールの持つ動脈硬化予防作用を中心に、糖尿病や白内障などの予防、さらには、がん予防作用などについても、細胞レベルおよび実験動物レベルでの機能研究が行われてきた⁶⁷⁾。しかし大規模なヒト臨床研究は、欧米が中心となつて行われ、わが国ではほとんど行われてこなかった。欧米での大規模なヒト臨床研究では、1日に100グラム、500キロカロリー以上のチョコレートを摂取するもので、これらの研究では血圧低下や動脈硬化予防効果の結果は得られたものの、摂取カロリーも高く、体重が増加する結果も生じた。近年になって、わが国独自の取り組みとして、アジア系の人種に限ったチョコレート大規模調査を行った。カロリーの取り過ぎを避けるため、カカオポリフェノール高含有チョコレートを摂取する方法をとった。その結果、体重やBMIの増加はない状態で、高血圧状態の改善、HDLコレステロール値の上昇、精神的、肉体的活動にも安定という結果が得られた¹¹⁾。さらに、チョコレートの摂取前後で、BDNF（Brain-derived neurotrophic factor：脳由来神経栄養因子）が有意に上昇することがわかった。BDNFは、神経細胞の発生・成長・維持・再生を促進させる神経栄養因子（分泌性タンパク質）の一種で、海馬などの中枢神経系に多く存在している。血液中にも存在し、血液脳関門を通過すると考えられている。BDNFは、ニューロンの産生や神経突起の伸長促進、神経伝達物質の合成促進などに関与し、各種研究でうつ病やアルツハイマー型認知症や、記憶、学習といった認知機能と関連性が報告されている。運動や脳活トレーニングなどでBDNFが上昇し、認知症の予防とも関係すると考えられている⁸⁾。サプリメントの機能評価だけではなく、今後、日常食品や機能性農産物のような「機能性表示食品」の開発において、ポリフェノール⁹⁾をはじめとする抗酸化成分の果たす役割は重要になってゆくものと期待されている。

【アミノ酸】

アミノ酸とは炭素、酸素、水素、窒素の4原子と一部硫黄で構成され、広義にはその分子内にアミノ基とカルボキシ基の両方を持つ有機化合物の総称である。自然界には遊離体の形でもアミノ酸は存在するが、大部分のアミノ酸は、様々なタンパク質を構成して生物の体内に存在する。地球上には約700種類ほどのアミノ酸が見出されているが、タンパク質を構成するアミノ酸はわずか20種類であり、狭義にはこの20種類をアミノ酸と呼ぶ⁸⁾。

タンパク質は筋肉、内臓、血液、骨格、皮膚等の組織を形作り、また酵素、ホルモン、免疫抗体として、生体の生理機能を維持、調節している。さらに生体内の遊離体のアミノ酸はそれ自身が神経伝達物質として働くなどのほか、生体の各種生理・代謝機能を調整している。つまりアミノ酸は、生命活動を司る生命の基本物質のひとつである⁸⁾。

人は通常このアミノ酸を、摂取した食事の中のタンパク質から得ている。摂取したタンパク質は消化により、一旦アミノ酸に分解され吸収される。体内に吸収されたアミノ酸は、上述の生理・代謝の調節因子として働くほか、生体内のタンパク質の合成原料となる。アミノ酸を直接摂取する場合は、タンパク質を摂取する場合と異なり特定のアミノ酸だけを摂取することが可能となることと、タンパク質の消化の必要がなく容易に吸収されるため、生理・代謝の調節機能が期待され、食品の機能成分としても使用されている。

ヒトの機能性に関するアミノ酸の研究は、医薬品への応用を目的として始まった。初めてのアミノ酸の医薬品への応用は、アミノ酸輸液の開発であり、これはアミノ酸の工業生産が進んでいた日本で世界に先駆け1956年に製品化された。その後国内では、アミノ酸を主成分とする医薬用栄養剤などが上市されている。食品としては、1975年にアミノ酸飲料が発売。

1995年にはスポーツ用サプリメントとしてアミノ酸を主成分とする製品が販売開始となった。スズメバチアミノ酸混合物の基礎研究をもとにした商品を実際に施用した日本人選手が2000年の五輪マラソンで金メダルを獲得、2001年で世界新記録を出すなどの話題もあり、2001年には大手飲料会社複数社よりアミノ酸飲料が発売され大ブームとなった。これを契機にアミノ酸の生理機能に関する研究が加速され、アミノ酸を機能性成分として配合した健康食品等が開発・発売されている。2007年には、生命科学分野におけるアミノ酸の学術的研究を推進、奨励、啓発し、もって人類の健康・福祉の向上に資することを目的とし、日本アミノ酸学会が発足し、以後アミノ酸に関する研究活動を推進している¹⁰⁾。アミノ酸のみにフォーカスした学術団体は、世界でも稀である。

海外、特に米国においては、単品のアミノ酸がサプリメントとして発売されている。アミノ酸に期待する機能性については、主として、医学分野、スポーツ生理学分野における研究成果に基づき説明されている。

（3）注目動向

【国内動向】

- ・健康食品は、医薬品医療機器等法（旧薬事法）により、厳密に医薬品と区別されており、その機能性を表示し宣伝することは、特定保健用食品と栄養機能食品以外には禁止されていたが、平成27年より「機能性表示食品」制度が始まり、消費者庁長官に届出を行うことにより一定の科学的根拠に基づき、事業者の責任において、健康の維持及び増進に資する特定の保健の目的が期待できる旨の表示が可能となった。
- ・また、機能性表示食品制度に呼応する形で、2016年3月に特許・実用新案審査基準の改訂により、食品に関する発明の請求項に用途限定がある場合には、用途限定が請求項に係る発明を特定するための意味を有するものとして、食品の機能が用途発明として認められた。これにより従来は認められていなかった食品の新規機能性に関する特許の取得が可能となった。
- ・これらにより、アミノ酸に限らず機能性成分、および機能性成分を配合した食品の機能性に関する研究開発が活発化している。

【海外動向】

- ・米国では、野菜や果物をはじめとする各種抗酸化食品やサプリメントの持つ抗酸化性の標準化をしようという動きが活発となっており、とくに米国が積極的に取り組んでいる。米国農務省（USDA）と米国大学連携機関 Antioxidant Research Center が20年ほど前に抗酸化指標として提唱した ORAC (Oxygen Radical Absorbance Capacity) は、米国では抗酸化値の商品表示として施用されている。USDA が代表的な326品目の野菜・果物の抗酸化値リストを公開したので、健康食品市場に出回った多くの抗酸化食品が ORAC 値を表示し、抗酸化能を競うようになった。この ORAC 法は、標識物質の蛍光物質 (Fluorescein) がラジカル発生剤 (AAPH) と反応することにより生成したペルオキシラジカルの分解を、抗酸化成分が抑制する過程を経時的に測定する、という方法である²⁾。しかしその後2013年5月に農務省 (USDA) が、ホームページ上に掲載されていた市販の食品を中心とした ORAC 法による抗酸化力のデータベースを突然削除

した。ORAC 法だけでは正当な抗酸化力の測定法として不十分である可能性があるため、今後、抗酸化単位（Antioxidant Unit）の統一に、世界的にも拍車がかかるものと期待されている。

トコフェロール類		ナッツ、野菜、果物、油糧種子など (ビタミン E)
アスコルビン酸		野菜、果物など (ビタミン C)
カロテノイド類		野菜、果物など (β-カロテン、リコピンなど) 海洋産物 (アスタキサンチン)
フラボノイド類	フラボノール類	タマネギ、ブロッコリー (ケルセチン、ケンフェロールなど)
	イソフラボノイド類	大豆製品 (ダイゼイン、ゲネステインなど)
	カテキン類	茶、ココアなど (エピカテキン、エピカテキンガレートなど)
カテキンオリゴマー類		ココア、チョコレート、赤ワインなど
アントシアニン類		穀類、豆類、野菜、果物、ベリー類 (カシス、ボイセンベリー) など
コーヒー酸誘導体	クロロゲン酸	大豆、コーヒー
	オリザノール	米種子
リグナン類	セサミン、セサモリン、 セサミノール配糖体	ゴマ種子
	エンテロラクトン類	亜麻種子、カラス麦など
メラノイジン類		発酵大豆食品（しょうゆ、みそ）など
アミノ酸、ペプチド類		タンパク加水分解物 (魚肉、大豆タンパクなど)
テルペノイド類、フェノール類、 クルクミノイド類		ハーブ、スパイス
グルタチオン		ブロッコリー、豚肉製品
その他		コエンザイム Q10、α-リポ酸、エルゴチオネイン、フィチン酸など

(4) 科学技術的課題

- ・ 今後、日常食品や機能性農産物のような「機能性表示食品」の開発において、ポリフェノールをはじめとする抗酸化成分の果たす役割は重要になってゆくものと期待されている。
- ・ アミノ酸はマクロ栄養素であるタンパク質の構成成分であり、他の一般的な食品機能性成分と比較して大量にタンパク質の形で摂取している（日本人男性の平均で 1 日あたり約 70g、女性で約 60g）¹¹⁾。またアミノ酸は体内にも遊離およびタンパク質の形で多量に存在する。これらの事により、他の機能性成分・医薬品・化学物質と異なり、機能性の実証や体内動態の解析が困難であることが多い。
- ・ アミノ酸は、毎日摂取している（むしろ栄養素として摂取しなければならない）という意味では一般的に安全な物質であるが、一方で摂取許容量（上限摂取量）を定めることが困

難である。げっ歯類で求められた各アミノ酸の毒性学的な無影響量から、通常の化学物質での方法に則り人への外挿のための係数を乗じて摂取許容量を求めると、人の通常摂取量の範囲となってしまうアミノ酸も多く、人での研究で確認された許容量とは大きく乖離する。一方、人ですべてのアミノ酸で許与量を求めることは、健康障害がおこる摂取量を求める必要があり、倫理的に実施が困難である¹²⁾。人での機能性の実証や、許容量を求めるための手法開発が必要となっている。

- ・ アミノ酸、特にタンパク質を構成するL-アミノ酸は独特の苦みを呈し、食品としての官能特性に劣るものが多い。そこで、それらの味覚品質を改善あるいはマスクするための手法開発が必要である。
- ・ 溶解性が低いアミノ酸、水溶液中での安定性が低いアミノ酸もあり、食品への応用形態について制限がある。これら食品への応用品質を改善・克服するための技術開発が必要である。

（5）政策的課題

- ・ 機能性表示制度において、機能性の根拠として病者を対象としたデータが使用できない制限がある。健康の維持・増進という保健の目的とされているが、全くの健常人を対象として健康の維持・増進効果を立証するのは一般に非常に困難である。また一般消費者の期待は疾病リスクの低減や現存する疾病状態の改善にあるにもかかわらず、これらが目的外として除外されている。
- ・ 本制度は届出制であるが、届け出が受理されるまで、書類の不備の無いことが確認される必要があり、受理されるまでの期間が長くかかっており、事業者にとっては営業上の問題が生じている。一方届出制であるために、機能性・安全性の根拠について、科学的なレベルが様々であることが指摘されている。
- ・ 機能性の証明には、人を対象とした研究（臨床研究）が不可欠であるが、昨今の医薬品開発における医学倫理逸脱等の問題により、医学研究の実施の規則が厳格化され、その実施において多大な労力・準備・期間・費用を要する。食品の機能性に関する人を対象とした研究もこの医学研究に含まれるために、従来よりも人を対象とした研究の実施が困難になってきており、新しい機能の研究開発実施の阻害要因となっている。

（6）キーワード

抗酸化成分、抗酸化力、ポリフェノール、アミノ酸、タンパク質、生理機能、アミノ酸輸液、アミノ酸飲料、サプリメント、健康食品、スポーツ生理学、医薬品医療機器等法、機能性表示食品、食品の用途発明、栄養素、許容量、上限摂取量、味覚品質、溶解性、人を対象とした研究、臨床研究

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・食品原料の機能性成分研究については1980年代からの蓄積があり、基礎研究のレベルはある程度維持されている。2015年以降の食品科学分野でのアミノ酸の論文数は、世界3位。
	応用研究・開発	○	→	・食品/飲料会社を中心に、特定保健用食品制度や2015年に始まった機能性表示制度を利用するための商品開発研究などが盛んに行われている。2014年より約30機関が参画する内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」「次世代農林水産業創造技術」の中で「次世代機能性農林水産物・食品の開発」が継続中。
米国	基礎研究	◎	→	・抗酸化成分をはじめ、植物が機能性成分を産生する代謝経路の研究などの基礎研究のレベルは高い。
	応用研究・開発	◎	→	・巨大なサプリメント市場を背景に、圧倒的な研究開発力を誇る。
欧州	基礎研究	○	↗	・抗酸化成分の論文数は、スペインやイタリアが世界上位5位以内に入る。
	応用研究・開発	◎	→	・地中海食の健康増進効果などについての研究が活発に行われている。一方でヘルスクレームのためには欧州食品安全機関（EFSA）の評価が必要で、ノベルフード制度により新規原料の利用には一定のハードルがある。
中国	基礎研究	◎	↗	・抗酸化成分、アミノ酸とも、論文数が急激に伸びている。2015年以降の食品科学分野で米国を抜いて1位。
	応用研究・開発	○	↗	・健康食品の消費額は年平均成長率で30%と、健康に対する意識の高まりが需要を喚起している。 ¹³⁾ ・現在中国で販売されている（広義の）保健食品は、保健食品と、普通健康食品の2種類ある。認可・登録・管理業務は、国家食品薬品监督管理局（CFDA）が行っている。2015年7月末時点で、保健食品に批准されたは約1万6000件 ¹³⁾ 。
韓国	基礎研究	○	↗	・2015年以降の食品科学分野で論文数が7位。
	応用研究・開発	△	↗	・サプリメントに関する法制度化が進んでおり、健康機能食品制度（法律）がすでにある。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) 大澤俊彦(2011)「抗酸化食品」をめぐる現状と動向、おいしさの科学、vol.2, 120-123, エヌ・ティー・エス
- 2) 大澤俊彦、超簡単フードファクター（第2回 抗酸化フードファクターの魅力）、アンチエイジング医学—日本抗加齢医学会雑誌、9(2)、87-93、2013
- 3) 大澤俊彦、活性酸素と抗酸化物質、臨床医学、44(3)、183-190、2015
- 4) 大澤俊彦（2009）抗体チップによる未病診断・食品機能性評価の新しい展開、テラーメイド個人対応栄養学（日本栄養・食糧学会監修）、p.71-82、建帛社
- 5) 消費者庁ホームページ（<http://www.caa.go.jp/foods/pdf/syokuhin1443.pdf>）
- 6) 大澤俊彦、木村修一、古谷野哲夫、佐藤清隆共著：チョコレートの科学、朝倉書店、東京、2015

- 7) 大澤俊彦：カカオポリフェノールと健康長寿—細胞レベルからヒト臨床試験まで、第15回日本抗加齢学会総会シンポジウム（栄養と健康長寿～抗酸化食品・機能性成分に着目して～）、福岡、2015.6.30
- 8) 船山信次：アミノ酸 タンパク質と生命活動の科学，東京電機大学出版局，2009
- 9) 田口茂明，アミノ酸研究，2:5-10,2008
- 10) 日本アミノ酸学会 <http://www.asas.or.jp/jsaas/>
- 11) 国民健康・栄養調査，厚生労働省，
http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/kenkou_eiyou_chousa.html
- 12) 鳥居邦夫、門脇基二監修：アミノ酸科学の最前線 - 基礎研究を活かした応用戦略 - ，シーエムシー出版，2014
- 13) 健康食品調査（中国）
https://www.jetro.go.jp/ext_images/_Reports/02/2016/84dd8e088ba38d31/rphealth_pcs201603.pdf

3.4.7 リン・レアメタル回収

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

有限かつ現時点で代替不可能な資源である、リンおよびレアメタルの回収・利用を、生物学的手法を駆使して行う技術開発群。リンについては、枯渇すれば食料問題だけでなく広範な製造業にも深刻な影響が懸念され、また環境へ放出されれば負荷も大きい。レアメタルについても同様で、ハイテク産業に必須であるので枯渇による産業の不安定化が懸念され、環境への漏出は汚染を引き起こす。日本が科学技術立国として、また自然と共生した安心安全な持続社会構築をリードしていくためには、これらの資源について、環境適合技術によるグローバルで適正なマネジメント技術開発が必要である。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

本稿では、リン、およびレアメタルの回収・利用技術について、資源の乏しいわが国の視点、および地球的課題としての視点から述べる。

【リン回収・利用】

人類生存の3要件は、安定した気候、栄養分の循環、多様な生命と言われる¹⁾。安定した気候(例えば地球温暖化防止)と生物多様性の問題についてはすでに国際的な取組みが行われているが、次に取組むべき地球的課題としては、栄養分の循環、とくにリンの管理についてだろう。リンはすべての生物にとって欠くことのできない「生命の栄養素(bionutrient)」である。「緑の革命」によって、世界人口は約42億人増加したが、リン肥料がなければ決して実現し得なかったと言われている²⁾。現代農業は、食料生産に必要なほぼすべてのリンを天然のリン鉱石に頼っていることから、もしリン鉱石が枯渇すれば、地球全体の食の安全保障にとって深刻な脅威となる²⁾。食の安全保障は人類の生存に最も重要な課題のひとつであるが、「生命の栄養素」の確保なしにはありえない。

世界のリン鉱石は、モロッコ、中国、米国および南アフリカの4ヶ国に集中している³⁾。しかし、米国はフロリダ等のリン鉱床の枯渇が進み、1997年にいち早くリン鉱石の海外輸出を停止している。もし米国に続いて他の産出国もリン資源の困り込みに動けば、世界のリン需給はたちまち逼迫する。2008年、中国が四川省大地震の直後にリン製品の輸出制限を行った結果、リン鉱石の価格が一時的に8倍以上に高騰した(リンショック)。2009年、Cordellらは2030年前後がリン鉱石採掘のピークになると予測して世界的な注目を集めた⁴⁾。その後2011年に米国で世界のリン鉱石埋蔵量の見直しが行われ、現在のリン鉱石資源の耐用年数は約310年となっている⁵⁾。その結果、世界のリン鉱石埋蔵量の約75%は、モロッコ王国一国に集中していることが判明した⁵⁾。しかしこれら机上の計算上の数値には、リン鉱石資源の偏在による地政学的問題や品質の問題が全く考慮されていないので注意が必要である。とくに、世界最大規模の埋蔵量を誇るモロッコのリン鉱石には、有害カドミウムや天然放射性物質が多く含まれており、食の安全上重大な懸念となりつつある。

リンは代替不可能で、新しく作り出すことが出来ない。リンの危機を回避して食の安全保障に貢献するためには、従来の3R(リデュース、リユーズ、リサイクル)にとどまらず、資源効率性(resource efficiency)を高め天然地下資源への過度な依存を避けることが求

められている⁶⁾。一方、リンは湖沼や内湾の富栄養化を引き起こし、赤潮やアオコなど水利用や栽培漁業等に甚大な被害を与える原因物質の一つでもある。欧州やわが国は、閉鎖性水域の富栄養化防止のために、厳しいリンの排水規制を課しており、工場・事業所等排水からの脱リン技術の開発が進んでいる。また、わが国はリン鉱石を産出せず、リンの全量を海外からの輸入に頼っていることもあり、リン回収・リサイクル技術の開発が進んでいる。例えば、国土交通省が主に下水汚泥関係からのリン回収技術開発、農林水産省が食品廃棄物からのリン回収技術、NEDO が製鋼スラグなどの未利用リン資源を対象にリン回収技術の開発に予算を投じている⁷⁾。プロセスを最適化し良質で低価格のリサイクル品も作り出されているが、欧州のようにまだ国を上げて取り組むには至っていないこともあり、従来のリン肥料の流通経路を劇的に変えるに至っていない。

国際的にも、リン資源の確保と管理は、持続可能な人類社会の実現に関わる大問題であり、すでに問題解決のための技術開発や取り組みも始まっている。例えば、EU7 カ国によるリン資源リサイクルのための P-REX プロジェクトが 2012 年 9 月から実施されている⁸⁾。特に欧州において持続的なリン利用が政策課題になっている背景には、EU の基本的な経済成長戦略に、直線的な経済から循環型の経済への移行が組み込まれていることがある。リンを産出しない欧州にとって、リン資源問題に取り組むことは、持続的な農業の実現はもとより、経済のリン資源制約の解除と環境汚染の防止にも効果が期待できる。欧州が輸入するモロッコのリン鉱石には、カドミウムなどの有害金属が含まれており、それを輸入してリン肥料を製造するよりも欧州内の回収リンを活用した方が農地への負荷を低減できるメリットもある。2016 年、EU では回収リンを含むイノベーション肥料には循環型経済 (CE) マークの使用を認め、EU 加盟各国はイノベーション肥料の国内販売と国境を越えた取引を支援することが義務付けられている⁹⁾。日本でもリン資源リサイクル推進協議会が設立され、リン回収技術の社会実装のための情報交換や議論が行われている¹⁰⁾。

【レアメタル回収・利用】

レアメタルは自動車、液晶テレビ、携帯電話など様々なハイテク進化の時代への変化に必要な不可欠な素材であり、レアメタルの安定供給は世界の科学技術の発展にとってもはや死活問題ともなっている。しかし一方現代社会では、重金属による環境汚染が深刻さを増しており、環境や水資源の浄化が世界で声高に叫ばれている。日本では、足尾銅山鉛毒事件に始まり、水俣や神通川での重金属汚染事件を契機に、要求されている環境排水基準は厳しいものとなっており、環境浄化や水資源の確保の重要性が浸透してきている。

レアメタルは科学技術立国日本を支える重要な資源である。近年レアメタルの需要は、BRICs などの経済発展、特殊機能をもつ電子機器の開発、さらに、先進市場の要求により増大している。そのためレアメタルの国際価格は数倍から十倍程度まで跳ね上がっている。日本の備蓄金属も底をつくリスクがあるなどハイテク産業への影響は計り知れない。レアメタルは日本だけでなく、世界の現代社会や未来社会のアキレス腱とも言われている。このような状況の中、レアメタル類を自然界から効率よく集める技術や、廃棄された製品や排水中などから効率よく回収してリサイクルできるような技術の確立が急務となっている。物理化学的な手法と比べてより安価で有効であることから、生物機能を有効に利用して浄化を行う「バイオレメディエーション」が大きな可能性を秘めた技術として注目を集めている。

レアメタルとは、リチウム (Li)、ベリリウム (Be)、ホウ素(B)、チタン(Ti)、バナジウム(V)、クロム(Cr)、マンガン(Mn)、コバルト(Co)、ニッケル(Ni)、ガリウム(Ga)、ゲルマニウム(Ge)、セレン(Se)、ルビジウム(Rb)、ストロンチウム(Sr)、ジルコニウム(Zr)、ニオブ(Nb)、モリブデン(Mo)、パラジウム(Pd)、インジウム(In)、アンチモン(Sb)、テルル(Te)、セシウム(Cs)、バリウム(Ba)、ハフニウム(Hf)、タンタル(Ta)、タングステン(W)、レニウム(Re)、白金(Pt)、タリウム(Tl)、ビスマス(Bi)と希土類（いわゆるレアアースで、すべてで1種として数える）の31種の総称である。

一方、レアアースとは、希土類元素17種で、スカンジウム(Sc)、イットリウム(Y)、ランタン(La)、セリウム(Ce)、プラセオジウム(Pr)、ネオジウム(Nd)、プロメチウム(Pm)、サマリウム(Sm)、ユーロピウム(Eu)、ガドリニウム(Gd)、テルビウム(Tb)、ジスプロシウム(Dy)、ホルミウム(Ho)、エルビウム(Er)、ツリウム(Tm)、イッテルビウム(Yb)、ルテチウム(Lu)の総称で、レアメタルの範疇に入る。

これらのレアメタルは、ベースメタルに添加することにより、性能強化した構造材料の作成、また電子・磁性材料などの機能性材料の作成に必須の要素となっている。レアメタルは、身近な電子機器ほぼ全てに含まれ、さらなる機能の高度化の要求がエスカレートしている。レアアースは、化学的性質が互いによく似ており、同じ鉱石中に相伴って産出し、単独で分離することが難しい。一つ一つの元素の分離精製が特に難しく、精錬による濃縮に煩雑な操作とコストがかかるのが、「レア」な所以である。永久磁石には、Nd、Sm、Dy、光磁気ディスクには、Tb、Dy、蛍光体には、Y、Ce、Eu、Tb、レーザーには、Y、Ho、Yb、光ファイバー増幅器には、Er、Tm、コンデンサーには、Y、La、Nd、水素吸蔵合金には、Laが必須の元素となっている。レアメタル、レアアースともに、鉱業において銅、亜鉛、鉛などの副産物として産出され、経済性のため混合物のまま野積み放置されていることもある。

レアメタルは日本の経済活動において重要であるにも関わらず、その供給構造は極めて脆弱で輸入に完全依存している。またレアメタルは、アフリカ諸国、中央アジアや南米諸国など政情不安定な国に偏在し、世界情勢に価格が大きく影響される。そこで日本では、海外からの供給が困難になった場合に備えて、Ni、Cr、W、Mo、Co、Mn、Vの7種類が約3週間～1ヶ月分国家備蓄されている（ちなみに、石油は、約3ヶ月分備蓄）。レアメタルの安定供給のために、電子機器などの加工品を再生資源とするリサイクル技術が非常に重要な課題である。

（3）注目動向

【リン回収・利用】

- ・ 2016年3月、欧州肥料法改正案を発表。有機性廃棄物や二次資源からリサイクルされるリン肥料が基準を満たせば、イノベーション肥料として認定され、循環型経済(CE)マークを付けて流通させる制度を確立¹⁰⁾。
- ・ 2016年までに欧州と北米に20基をこえるリン回収プラントが稼働している。
- ・ 2015年12月、スイスが世界で初めて下水汚泥および食肉加工廃棄物からのリン回収を義務づけ。

- ・ 2015年12月、EUは6.5億ユーロを投じて、linear economy から circular economy への転換のための産業育成を発表。2030年までに下水汚泥の65%をリサイクルすることを目標にしている⁹⁾。
- ・ 2014年、欧州でリン鉱石を戦略物資に指定。
- ・ 欧州では、リンの排水基準を0.1mg/Lまで厳しくする動きがあり、すぐれたリン回収技術開発につながる可能性がある。
- ・ 持続的リン管理に関する国際研究プロジェクトGlobalTraPs¹¹⁾の世界会議が2013年6月に北京で開催された。
- ・ 2013年5月より全米科学財団(NSF)の資金による「持続的な食料供給のためのリン共同研究」プロジェクトが開始された¹²⁾。
- ・ リン資源リサイクル推進協議会¹⁰⁾が主体となり開催した「持続的リン利用シンポジウム」(第一回は平成26年3月、第二回は平成27年11月)にそれぞれ200名以上の参加者があった。
- ・ わが国のリン研究者が集まり、わが国初の「リンの事典」が編集され平成27年度に出版される。

【レアメタル回収・利用】

- ・ 「都市鉱山」という概念は、1980年代に、東北大学の南條道夫教授によって提唱された。「都市鉱山」とは、都市ごみとして大量に投棄・廃棄される家電製品をリサイクル技術の対象および再生資源とみなすものである。国内に蓄積されリサイクルの対象となる金属の量を算定すると、日本は世界有数の資源大国に匹敵するとも言われている。都市鉱山は天然鉱山よりも金属含有量が非常に高いという大きな利点ももつ。わが国の都市鉱山に存在する金の総量は6800トンと算出され、世界の天然埋蔵量の16%に相当する。銀の総量は6万トンで世界の天然埋蔵量の22%に相当する。これから需給不足が懸念されているインジウムは、1700トンで天然埋蔵量の61%、世界の消費量の4年分を保有していることになる。電気自動車の電池材料として期待されているリチウムも世界の消費量の7年分、排ガス除去触媒に重要なプラチナは5年分が埋蔵されていると算出されている。このように、レアメタルについては、わが国の都市鉱山に甚大な量が蓄積されており、世界トップの資源大国として、垂れ流しで無駄に使い放置するのではなく、リサイクルの重要性が認識され実行に移されねばならない。

(4) 科学技術的課題

【リン回収・利用】

- ・ 日本国内の畜産廃棄物にリンは約10万トン、下水汚泥に約5万トン、脱リンスラグに約11万トン含まれる。合計26万トンの二次資源リンは、国内農業に利用されるリン消費量約27万トンに匹敵する¹³⁾。
- ・ リンの resource efficiency + 3R の具体的な研究例としては、排水からの画期的なリンリサイクル技術はもちろんのこと、未利用リン資源の利用技術開発、省リン型の農業システムの開発、リンを効率よく土壌から吸収できる品種の育成なども重要な課題で

ある。

- ・ リンは産業上も重要である。世界のリンの約15%は、工業用のリンとして使われている。黄リンから製造される各種リン化合物は、自動車産業、電子部品産業や製薬・化学産業などにおいて、工業用原料として広く利用される。わが国には黄リン製造プラントが一つも存在せず、中国からの輸入はすでに期待できなくなっており、最後に頼りとしているベトナムがリン鉱石枯渇により生産できなくなると、わが国の製造業は深刻なダメージを被る。国内の二次資源（下水汚泥、畜産廃棄物や製鋼スラグ等）から回収したリンを用い、黄リンを製造する技術開発が急務である¹⁴⁾。
- ・ 米国科学アカデミーは、温暖化ガス排出量削減への貢献が期待されるバイオ燃料の生産にはリンのリサイクルが不可欠と結論している。バイオ燃料生産におけるリン回収再利用技術の開発も重要な課題になっている。
- ・ 製鉄業から廃棄される脱リンスラグは、最大の未利用リン資源であり、有効利用技術を開発する必要がある。また、化学工業分野から廃棄される亜リン酸などの未利用リン資源を有効利用する技術開発が課題である。
- ・ わが国の下水処理場の80%はコストおよび人手不足により、このままではリン回収を実施できない。より低コストで簡便なリンを回収する技術開発することが課題である。
- ・ 我が国の農地には、長年の過剰なリン肥料の施肥により、リンが蓄積した土壌がある。土壌中のリンを簡便に診断する技術を開発し、リン肥料の過剰使用を抑える必要がある。
- ・ 火山性の土壌において植物が吸収できない形態のリン（非可給態のリン）が蓄積している。非可給態のリンを植物が利用できる様に助ける微生物の開発も課題である。また、ソルガムなど増殖速度の速い植物を栽培し土壌に蓄積したリンを吸い上げた後に、緑肥として活用することも考えられる。

【レアメタル回収・利用】

- ・ 世界トップの都市鉱山を有するわが国としては、レアメタルを自然界から効率よく集める技術だけでなく、廃棄された製品や排水中などから効率よく分離・選択的回収する技術を開発することが非常に重要な課題である。従来技術では困難であった、濃縮回収と選択的特異的な個別回収に対して、革新的な技術、微生物を吸着剤とする「バイオアドソorbent」の開発への期待が大きい。
- ・ 微生物が金属イオンを吸着する作用に着目した場合、(1)細胞表層における吸着、(2)細胞内への蓄積後の細胞内タンパク質への吸着、の2つの過程に大別できる。(2)まで進んだ場合には、金属イオンの回収には細胞破碎が必要である。一方、(1)の細胞表層における吸着であれば、吸着に要する時間も短く、細胞破碎の必要もない。また、一度吸着に用いた細胞の再利用が可能である¹⁵⁾。
- ・ (1)の細胞表層での吸着が近年注目されている。生物の細胞表層デザインを可能にしたバイオ・アーミング技術（細胞表層工学技術）が確立されたことにより、バイオレメディエーションの新技术として細胞表層をデザインした新しいバイオアドソorbentが開発されつつある。細胞表層吸着を使った新しい金属イオン吸着システムは、有害重金属の吸着・回収だけでなく、レアメタルの回収にも威力を発揮する、先導的バイオ技術として期待されている¹⁵⁾。

- 細胞表層での吸着・回収システムは、ターゲットとして有害重金属だけでなく、レアメタルのような産業上価値の高い金属に対しても効果的であると期待される。資源回収に有用なレアメタル回収酵母の創製も可能となりつつある。レアメタルの1つである、モリブデンをターゲットとしたバイオアドソorbentの創製が既に試みられており、酵母の細胞表層デザインによる吸着・回収システムが利用可能であることが分かった。今後は、多種多様なレアメタル・レアアースへの対応技術および革新的バイオ素子創製基盤技術の展開が期待される¹⁵⁾。
- バイオ・アーミング技術によって、様々な機能性タンパク質を細胞表層にディスプレイすることが可能になった。各種金属イオンに特異的な吸着機能を付与したタンパク質分子を、細胞表層提示したアーミング細胞が作製されている。様々な金属イオンを細胞表層上で吸着・回収することのできる、多種多様なバイオアドソorbentとしてのアーミング細胞を、分子育種することが可能になってきた¹⁵⁾。多様なレアメタルやレアアースに対し、それぞれに選択的に対応する新しいタンパク質分子素子の創製も可能であると考えられる。今後、分子認識システムの基礎解析と更に実用的で魅力的な未来型環境適合資源リサイクルバイオシステムがアーミング技術を基に発展していくことが期待される。

（5）政策的課題

【リン回収・利用】

- わが国も、リン資源を持たない欧州と同じ様に、持続的リン利用への産業育成を始めるべきである。それには、持続的リン利用の重大性に関する社会的認知度の向上、回収リンを用いた肥料の利用を推奨、回収リンの品質保証やトレーサビリティなど情報公開する制度構築が重要である。
- リンの管理は人類生存に直結する地球的課題である。その重要性から考えると、この分野の研究者が非常に少なく、国による大型の研究・教育投資（特に若手人材育成）が求められている。
- 日本においては工業用リンの確保も考えなければならない。農業分野と工業分野にまたがる超域的なリンのバリューチェーンを構築する必要がある。

【レアメタル回収・利用】

- レアメタル回収・利用に対するバイオテクノロジーの研究領域は、技術的には日本が世界的にトップである。しかし政策的には、レアメタル回収・利用関連の研究は、旧来の金属研究領域が中心となっている。政策的に、バイオテクノロジーの寄与できる領域を拓くべきである。

（6）キーワード

リン、リン肥料、リン鉱石、リン資源リサイクル、汚泥、廃棄物、アーミング技術、細胞表層工学、レアメタル、バイオアドソorbent、メタルバイオテクノロジー

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・酸、アルカリ、熱などによる余剰汚泥からリンを取り出し、回収する技術が開発されている⁷⁾。 ・微生物のリン蓄積に関する基礎的研究のレベルは高い。リン鉱石と同等レベルのリン含量を示す微生物が開発されている⁷⁾。 ・不溶性リン酸化合物を溶解する微生物の研究も行われている。 ・菌根菌によるリンの有効利用技術開発が進んでいる¹⁶⁾。 ・低濃度のリンを濃縮する生物リアクターが開発されている⁷⁾。 ・鉄鋼スラグからの磁気分離法によるリン回収技術が開発されている⁷⁾。 ・回収リン酸からの黄リン製造技術開発ができれば極めて画期的な研究成果になる可能性が高いが、国の研究支援はなされていない。 ・レアメタル個々を特異的に吸収濃縮する微生物や植物、タンパク質やペプチドの探索が拡大した。 ・レアメタル個々を特異的に吸着濃縮するタンパク質やペプチドを提示できるアーミング技術が世界に先駆けて開発され、一つの微生物で多様なレアメタル（レアアースを含む）に対応できるバイオテクノロジー技術が完成している。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・リン資源リサイクル推進協議会において、様々なリン除去・回収・資源化技術の社会実装のための情報交換や議論が行われている¹¹⁾。 ・MAP法、HAP法と呼ばれる排水からのリン回収技術はあるが、まだコスト等の問題があり自治体での導入も容易でない。 ・ケイ酸カルシウムをベースにした安価なリン吸着剤が開発され、実証試験が行われているが、まだ実機導入には至っていない¹⁷⁾。 ・水処理、汚泥処理によって回収したリンの植害試験や肥効試験が行われており、コスト評価も行われている。 ・下水汚泥焼却灰からのリン回収技術が開発されている⁷⁾。また、汚泥焼却灰そのものの肥料化試験が行われている。 ・畜産廃棄物（豚ふん、鶏糞）からのリン回収技術が開発されている⁷⁾。鶏糞発電が行われ、灰を肥料原料にしている。 ・世界最速のリン吸着担体が企業で開発され、実証試験が行われている¹⁸⁾。 ・レアメタル個々を特異的に吸着濃縮するタンパク質やペプチドを提示できるアーミング技術が開発され、酵母一つで多様なレアメタル（レアアースを含む）に対応でき、リアクター化が進みつつあるが、政府の対応が遅れている。
米国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・2014年、持続的リン利用のための社会実装を推進する The North American Partnership for Phosphorus Sustainability (NAPPS) が立ち上げられている¹⁹⁾。 ・2013年、全米科学財団の資金による「持続的な食料供給のためのリン共同研究」プロジェクトが開始される¹³⁾。 ・2009年、Scientific American 誌でリン資源の重要性が訴えられる²⁰⁾。 ・アリゾナ州立大学で” Sustainable P Initiative ” が立ち上げられる。 ・レアメタル個々を特異的に吸収濃縮するバクテリアの探索が拡大している。 ・ファージを用いて、レアメタル個々に特異的に反応するペプチドの探索が拡大している。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・米国でもリン回収のための実機プラントがすでに10基稼働している。バイオ燃料生産にはリンリサイクルが不可欠であることが認識され、技術開発が始まっている。 ・レアメタル個々を特異的に吸収濃縮する大腸菌の利用が拡大している。 ・ファージを用いて、レアメタル個々に特異的に反応するペプチドの特許化が進行している。
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・リン回収の基礎研究は主にストラバイト（MAP法）を中心に行われている。 ・下水汚泥焼却灰の高温還元処理によるリン回収技術が開発されている。 ・ドイツ、デンマークなどで大型の科学研究費が出ており、基礎研究とともに人材育成に重要な役割を果たしている。 ・レアメタル個々を特異的に吸収濃縮する微生物の探索が拡大している。 ・ファージを用いて、レアメタル個々に特異的に反応するペプチドの探索が拡大している。

欧州	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・欧州ではリン資源問題を、技術の問題というよりも、社会的・政治的課題として捉え、社会構造を変革することにより問題解決しようとしている。 ・ESPP(European Sustainable P Platform)が活発に活動して、技術動向や様々な情報を流すとともにロビー活動している²¹⁾。 ・2016年、有機性廃棄物や二次資源からリサイクルされるリン肥料の推進を狙い、欧州肥料法改正案を発表¹⁰⁾。 ・ドイツ、フランスなど欧州7カ国によるリン資源リサイクルのためのP-REXプロジェクトが実施⁸⁾。 ・様々な現場でのMAP法によるリン回収法が導入されている。2013年にはオランダのアムステルダム市において、世界最大規模のリン回収装置を導入。汚泥脱水率の向上による汚泥処理費の削減が年間約2千万円としている。 ・レアメタル個々を特異的に吸収濃縮するバクテリアの利用が拡大している。 ・ファージを用いて、レアメタル個々に特異的に反応するペプチドの特許化が進行している。
中国	基礎研究	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・国がリン鉱石を戦略物資ととらえ、リン研究に投資しはじめた。2016年8月に世界リン会議(P Summit)が雲南省昆明市で開催。とくに畜産廃棄物の問題が深刻となり、研究費が出るようになっている。 ・先進国の後追いの研究が出てきている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・リン鉱石からリン酸を製造する際の石膏副産物が野積みされている。有害フッ素や重金属などが石膏に移行し、環境問題を引起しており、リン酸石膏の再利用が新たなビジネスを生んでいる。 ・日本のリン資源リサイクル技術に関して、中国リン酸国営企業が強い関心を示している。 ・レアメタル個々を特異的に吸収濃縮する大腸菌の利用が拡大している。 ・ファージを用いて、レアメタル個々に特異的に反応するペプチドの特許化が進行している。 ・日本のアーミング技術を模倣したバイオテクノロジー技術が展開し始めている。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・日本や中国に比べると研究報告のほとんどは脱リンである。 ・先進国の後追いの研究が出てきている。
	応用研究・開発	×	→	<ul style="list-style-type: none"> ・まだ、富栄養化防止対策に取り組んでいる段階であるが、リンリサイクルへの関心は高まっている。 ・先進国の後追いが多く独自性は薄い。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) Ruthe DeFries、食糧と人類-飢餓を克服した大増産の文明史、日本経済新聞社、2016
- 2) James Elser and Stuart White, Peak Phosphorus,2010:
http://www.foreignpolicy.com/articles/2010/04/20/peak_phosphorus
- 3) 大竹久夫／編著、リン資源枯渇危機とはなにか、大阪大学出版会、2011
- 4) Cordell et al., Global Environmental Change, 19, 292-305, 2009
- 5) USGS Phosphate Rock (2016)
http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/mcs-2013-phosp.pdf

- 6) Communiqué, G7 Toyama Environment Ministers' Meeting, Toyama, Japan, May 15-16, 2016
- 7) 大竹久夫／監修、リン資源の回収と有効利用、サイエンス&テクノロジー、2009
- 8) P-rex project: <http://p-rex.eu/index.php?id=13>
- 9) New Regulation to boost the use of organic and waste-based fertilisers:
http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-16-826_en.htm
- 10) リン資源リサイクル推進協議会: <http://www.jora.jp/rinji/rinsigen/>
- 11) Global TraPs: <http://www.uns.ethz.ch/gt/>
- 12) The Phosphorus Sustainability Research Coordination Network (P-RCN):
<https://sustainability.asu.edu/foodsystems/2014/12/17/phosphorus-sustainability-research-coordination-network/>
- 13) 大竹久夫、リンの自給体制構築し世界の模範国に、月刊公明 7、2016
- 14) P イノベーションー高純度リン素材の生産力確信によるリン循環産業の創造、早稲田大学総合研究機構リンアトラス研究所、2015
- 15) 植田充美、黒田浩一「アーミング技術によるメタルバイオテクノロジー：レアメタル資源の選別回収への展開」*Journal of Environmental Biotechnology* 2009 vol.9 p17-24
- 16) アーバスキュラー菌根菌宿主跡のダイズ栽培ではリン酸施肥を3割削減できる:
http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/harc/2013/13_038.html
- 17) 高機能リン吸着剤リントル:
http://www.taiheiyo-cement.co.jp/rd/rintoru/download/pdf/pamphlet_rintoru.pdf
- 18) 世界最速性能のリン吸着剤: <https://www.asahi-kasei.co.jp/asahi/jp/news/2007/ch070919.html>
- 19) The North American Partnership for Phosphorus Sustainability:
<http://articles.extension.org/pages/72826/the-north-american-partnership-for-phosphorus-sustainability-creating-a-circular-p-economy-as-part>
- 20) David A. Vaccari, Phosphorus: a looming crisis, *Scientific American*, 300, 54-59, 2009
- 21) ESPP: <http://www.phosphorusplatform.eu/>