

3.6 グリーンバイオ

「グリーンバイオ」区分の俯瞰全体像

グリーンバイオ区分では、ライフサイエンス分野において、作物増産や持続性農業を目的とした「食料生産及び安全保障」、生態系や多様性の保全を目的とした「環境リノベーション」、及びバイオテクノロジー技術を用いて燃料や物質の生産を目的とした「物質生産・バイオリファイナリー」の3つのサブ区分で構成する。俯瞰図作成にあたって、ミクロな視点からマクロな要素までを含む大きな領域であることも含め、この区分の発展のためには、理学、農学、工学の連携、および産官学の連携によるシームレスな取り組みが必要である。

具体的な調査対象領域としては、「食料生産及び安全保障」サブ区分として「作物増産技術」、 「持続型農業」、 「高機能高付加価値作物」、 「食料安全保障概念の変遷と政策対応の課題」、 「物質生産・バイオリファイナリー」サブ区分として「バイオリファイナリー」、 「化成品原料/バイオ化学品」、 「バイオ医薬品・食品原料」、 「環境リノベーション」サブ区分として「資源・レアメタル回収」、 「生物多様性・生態系」、 「生体適応」、 「環境浄化」を含む構成となっている。

農林水産省の発表する食料自給率は減少の一途をたどる状況があるが、政府による「攻めの農業」として現在の4500億円の輸出額を2020年までに1兆円に拡大することを目標としている。日本と同様に自給率の低下が懸念されている韓国では「ゴールデンシード」プロジェクトによる種苗業界の立て直しが行われている。フェノーム解析や各種オミクス解析が充実してきており、またゲノム編集を含めた新しい育種技術(NBT)の開発により、食料生産技術は新たな展開を迎えつつある。こうした流れは、物質生産領域にもみられ、オミクス情報をもとに人工酵素を開発することで代謝経路を改変したり、複合的な微生物集団による食料増産や健康医療への貢献が行われつつある。近年、急速に発展した次世代シーケンサーは生物多様性、生態系分野でも革新的な技術として用いられ、新たな種同定や環境状態の把握に非常に大きな貢献をしている。こうした現状を踏まえ、上述の3サブ区分、11領域を俯瞰対象領域として調査を行った。

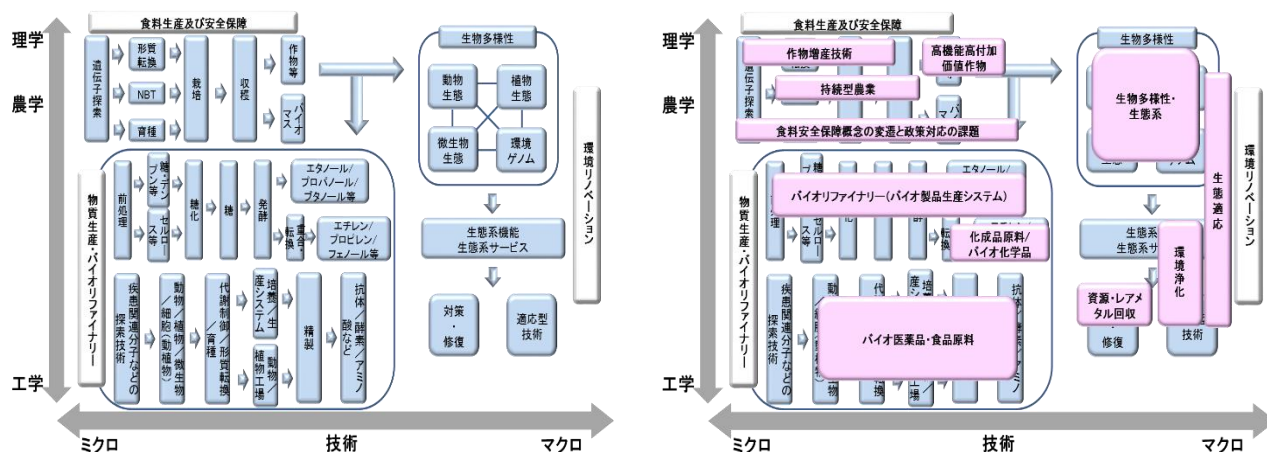


図 3-6 俯瞰図（左図）と、調査対象領域の位置付け（右図）

研究開発領域
グリーンバイオ

3.6.1 作物増産技術

(1) 研究開発領域名

作物増産技術

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

作物の生産性を向上させる技術に関する研究開発

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

作物増産技術は、作物の生産性を作物自体の遺伝的な面から改良する品種改良技術とその遺伝的能力を最大限に発揮させる栽培技術からなる。本章では、品種改良技術に注目し、主要作物として、イネ、ダイズ、コムギと野菜および果樹を対象として、生産性を向上させる技術に関する研究開発の現状と今後の動向をまとめる。

イネ：食料自給率向上と食用米の生産過剰基調解消のため、平成 10 年以降、ホールクロップサイレージ用、飼料米用品種育成を目標に、収量性の育種的向上に取り組み、全国での栽培をカバーする飼料用品種が育成・普及されている。また、米粉など加工用向けの多収品種も育成されている。飼料用や加工用品種の品質は食用に適さないものだが、食用の業務用多収品種（食味や外観品質などが一定の水準にある）の育成も行われている。最近では、農業経営者減少と大規模経営化が進行しており、競争力を意識した低コスト生産可能な多収品種の育成が進められている。耐病虫性についても、安定多収生産・農薬削減によるコスト削減と高付加価値の観点から精力的に育種に取り組み、いもち病、縞葉枯病、トビイロウンカ抵抗性を単独あるいは集積した品種が多数育成された。これらの育種には、DNA マーカー選抜が活用される場面が多く、育種の効率化と不良形質との連鎖解消に大きな力を発揮した¹⁾。

コムギ：食感、製粉性、小麦粉色などの品質が輸入銘柄より劣っていたため、収量性より品質に品種改良の重点は置かれた。北海道の秋播向けに 2007 年に育成された日本めん用小麦品種「きたほなみ」は、品質が外国銘柄と同等であり、収量性も従来品種「ホクシン」より 10%以上高い²⁾。しかし、品質に比べると収量性に関する生理学的な基盤研究や品種改良は十分ではない。国産コムギでは、赤かび病、穂発芽、コムギ縞萎縮病が収量の限定要因として重要視されている。穂発芽については、2011 年に最も効果の大きい 3A 染色体に座乗した QTL の原因遺伝子が *MFT* (*Mother of FT and TFL1*) であることが明らかとなり、穂発芽抵抗性が強いゼンコウジコムギ型と弱い Chinese Spring 型を識別できる CAPS マーカーが開発され、品種改良で利用できるようになった³⁾。また、コムギ縞萎縮病については、2010 年に 2D 染色体に座乗した抵抗性遺伝子 (YmIb) と近傍マーカーが報告され、戻し交配による品種改良が行われている⁴⁾。

ダイズ：低収要因としては、台風・冷夏などの気象条件、pH・窒素肥沃土などの土壌条件、干湿害、黒根腐病などの病虫害、雑草害、作期競合による播種・収穫遅れなどが考えられており⁵⁾、低収要因の回避・克服のために、栽培技術の改良とともに病虫害抵抗性、難裂莢性などを備えた品種の開発が急務である。高精度のマーカーが多数開発されて、様々な特性を付与することが容易になっているが、多数検体を扱うための選抜技術が未開発のため、通常の交配育種に全面的に適用するのは困難な状況である。このため、戻し交雑とマーカー選抜を組み合わせたピンポイント改良品種の開発が積極的に進められている。特に収量性に大き

く影響するダイズシストセンチュウ高度抵抗性や難裂莢性の導入は多くの品種で行われている。一方国内品種は野生種や海外品種に比べて遺伝的変異に乏しいことから⁶⁾、長期的視点から遺伝的背景を拡大して実単収を向上するために、海外品種を積極的に交配母本に活用した品種改良の取り組みが始まっている。

野菜：従来から耐病虫性は最も重要な育種目標である。病害抵抗性の中間母本が公的機関によって数多く育成され、実用品種の開発に利用されている⁷⁾。近年では DNA マーカー選抜が可能となった病虫害抵抗性も多い。トマトではモザイク病、葉かび病、萎凋病など 10 を超える抵抗性の遺伝機構が明らかとなっており、DNA マーカーによる選抜育種が進められている⁸⁾。アブラナ科根こぶ病抵抗性はハクサイから抵抗性遺伝子が単離され、マーカー選抜育種に利用されている⁹⁾。その他、キュウリ ZYMV 抵抗性¹⁰⁾、イチゴ炭疽病抵抗性¹¹⁾、ナス半枯病抵抗性¹²⁾、メロンワタアブラムシ抵抗性¹³⁾、ネギハモグリバエ抵抗性¹⁴⁾などの DNA マーカー選抜技術が開発されつつあり、DNA マーカーの育種現場への普及が進みつつある。一方で、育種素材となる遺伝資源の不足などにより対策が進まない病虫害も数多く存在し、継続的かつ規模を拡大した研究開発が強く望まれている。収量性育種に関する基礎研究は耐病虫性に比べて遅れており、その遺伝性や栽培生理学的な知見も限られている。高度に環境制御した植物工場型の施設が全国的に増大傾向にあることから、トマト、ナスなどのナス科果菜類では養液栽培向け多収品種の重要性が認識されつつあり、品質と収量性を両立した品種開発事例も報告されてきている^{15,16)}。また、着果安定性を大きく向上させる単為結果性が注目されており、新品種開発¹⁷⁾や原因遺伝子の単離とマーカー育種技術開発^{18,19)}が活発に進められている。アブラナ科およびネギ類を中心とした露地野菜では、普及 F1 品種の収量性は着実に向上しているが、加工業務用の占有率上昇を受け周年供給の安定が求められている。

果樹類：開花や結実の調節や収量を安定させるために、整枝・剪定などの栽培技術が、多くの樹種・品種で確立している。病虫害抵抗性品種の利用により果実や樹体への病害感染を少なくし、商品価値のない果実のロスを少なくすることが、品種改良の重要な目標である。平成 24 年 5 月 25 日に、農林水産技術会議で決定された「作物育種研究の今後の進め方について」²⁰⁾では、リンゴの斑点落葉病と黒星病に対する複合抵抗性、ブドウの黒とう病抵抗性、ナシの黒斑病および黒星病複合抵抗性、カンキツ類のかいよう病抵抗性、モモのせん孔細菌病抵抗性などが重要な改良ターゲットになっている。最新のゲノム解析技術を利用して、リンゴの斑点落葉病、ナシの黒斑病および黒星病の抵抗性遺伝子の染色体上の位置を決定して選抜マーカーを開発するとともに、原因遺伝子の同定が進められている。その他、多くの病虫害抵抗性について、選抜マーカーが開発されている。またニホンナシでは、黒星病抵抗性、黒斑病抵抗性などに関連する DNA マーカーを活用し、従来育種と比較して約 4 倍程度の規模拡大を実現している。リンゴ、カンキツ、ブドウなどの主要果樹類における病害抵抗性などに関連する DNA マーカーが、農研機構果樹研究所や公設研究機関で実用的に利用されている²¹⁾。

作物全般：作物全般を通じた技術開発の観点では、次世代シーケンサーによるゲノム解析が先行していたイネ、ダイズばかりでなく、コムギや野菜、果樹においても、多数の品種のゲノム解読が進み、遺伝子機能の解析や育種選抜に利用できるマーカー情報が充実してきている。これにより、単一遺伝子によって決定される病虫害抵抗性などについては、マーカー

選抜育種が急速に浸透している。その一方で、収量や品質、ストレス耐性などの形質では、関与する遺伝子が多く、それらの発現が環境に大きく左右されることから、単純なマーカー選抜育種法は適用できないケースが顕在化している。この問題を解決するために、特定の遺伝子に注目するのではなく、ゲノム全体を考慮して最適な遺伝子型をモデル化し、望ましい個体選抜を行うゲノミックセレクションが注目されている^{22,23)}。このゲノミックセレクションを実施可能にするゲノムワイドな一塩基多型マーカーの整備が多く作物で進んでおり、ゲノミックセレクションを検証し、次世代の育種技術として確立させることが、重要かつタイムリーな課題となっている。果樹では、複雑形質について、染色体全域を網羅する極めて多数の DNA マーカー情報をもとに、高品質・良食味果実を生み出す交配組合せを予測する『ゲノムワイド予測』技術について、その有効性が検証されている²⁴⁾。

突然変異による有用遺伝子の作出が改めて注目されつつある。ゲノム解読と重要な遺伝子の同定によって、より利用価値が高い遺伝子変異を積極的に選抜できる TILLING 法などの手法が一般化し、イネやダイズでは、遺伝子機能解析に利用されている。果樹、野菜についてもそのプラットフォーム構築が進んでいる。また、新しい植物育種技術（New Plant Breeding Techniques : NBT）の中でも、ターゲット遺伝子を特異的に改変するゲノム編集技術は、ターゲット遺伝子の切断のための新たな手法である CRISPR/Cas9 システムが開発され、ベクターデザインも容易になって、急速に植物にも浸透しつつある²⁵⁾。今後、遺伝子機能の解析はもとより、これらの技術を駆使した品種改良も進むと予想される。海外では、すでに標的変異技術により、白葉枯病耐性イネ²⁶⁾、オレイン酸高含量ダイズ²⁷⁾、雄性不稔トウモロコシ²⁸⁾、うどん粉病耐性コムギ²⁹⁾などの開発が進んでいる。また国内では、標的組換え技術により点変異の導入を行い、除草剤耐性のイネやトリプトファンを高蓄積するイネが育成されている³⁰⁾。尚、標的組換えによる必要な変異のみの普遍的な導入は、イネで日本の研究チームのみが成功しており³¹⁾、今後この技術のイネ以外の植物への適用が待ち望まれる。またゲノム編集技術と共に、早期開花遺伝子を利用したカンキツ類の世代促進³²⁾、ウイルスベクターと早期開花遺伝子を利用したリンゴの世代短縮技術の開発も新たな取り組みとして注目されている³³⁾。

ゲノム編集技術や早期開花技術などの NBT は、その過程で遺伝子組み換え（GM）技術を使用するものの、最終的な作物では導入遺伝子が除けることが大きな特徴である。現在、それらの NBT で作成した新作物を GM 作物として扱うべきかどうかの議論が各国で始まっている。特に、欧米を中心としたバイオテクノロジー企業や育種研究者は、その判断如何によって評価に関わるコストが大幅に異なり、大きな関心を寄せている。このような背景から欧州共同センター（Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies）は、2007 年に NBT に関する調査を開始し、2011 年に報告書を公開した（State-of-the-art and prospects for commercial development）。また、2012 年初めには、欧州委員会の新技術検討委員会（NTWG）がレポートをとりまとめたが、これらは現状報告であり、欧州としての具体的なスタンスが公表されるのは 2014 年秋以降になると思われる。一方米国では USDA が、NBT を用いた作物の一部については、ケースバイケースの判断ではあるが、「規制対象外」としている³⁴⁾。国内でも、遺伝子組換え技術を使って作った雄性不稔トウモロコシの後代で導入遺伝子を持たないものは、農林水産省と厚生労働省が非 GM 作物とする判断を 2013 年に行っている³⁵⁾。今後 NBT の画期的な品種開発への応用を進め

ると共に、NBT 技術の社会実装を目指すことが必要であろう。

（４）科学技術的・政策的課題

科学技術的課題

- ・ 政府の推進する攻めの農林水産業に対応するため、イネでは、需給にミスマッチのある業務用米や食料自給率向上に向けた飼料用米などの新規需要米・加工用米などの生産が推進されており、10年間で新規需要米・加工米の生産を150万トンにするのが目標。また担い手の減少に伴う大規模化、低コスト化に対応した品種・栽培技術が求められており、10年間で担い手の米生産コストを現状全国平均比4割減が目標³⁶⁾。
- ・ 野菜の品種育成は、中小規模の民間企業が担っており、DNA マーカー選抜技術の低コスト化、簡便化もしくは外部分業化が必要。野菜の品種開発で特徴的なF1化の普及に伴い、多くの品目において急速に品種系統群における遺伝的多様性が狭小化していることは重要な課題。遺伝資源、誘発突然変異集団の形質評価と有用育種素材の探索研究の有用性の再評価と体系的・戦略的な推進が必要。採種形質(自家不和合性、細胞質雄性不稔性制御機構、種子収量性、花成・生育相転換機構)の基礎研究の推進が必要。

政策的課題

- ・ 種苗会社、独法研究機関、地方自治体、大学などの個別セクタが戦略的に連携して急速に蓄積する膨大なゲノム情報を活用した研究開発を推進することのできる体制構築ならびにこれを誘導する研究推進施策の策定が不可欠。
- ・ 加工業務用需要が野菜の全需要の6割を占め、安価な外国産品の輸入が増加。用途に適合した品種、加工業務用に求められる低コスト、周年安定生産に対応する品種の育成のための研究開発を推進する必要性。
- ・ ゲノム編集などNBTについて、野菜育種の分野では民間種苗メーカーの関心が極めて高い。技術開発研究を強力に推進する施策を講じると同時に、従来型の遺伝子組換え生物との違いを踏まえた、NBTの取り扱いについての議論と制度設計が急務。
- ・ 公的機関による育成が中心であるイチゴは地方自治体として独自品種開発を望むために研究勢力が分散。国内での競争によって優れた品種が育成されてきたが、輸出産品としての重要性を鑑み、オールジャパンとしての育種体制を検討する必要がある。
- ・ 果樹では、高品質に加え、高付加価値や多様なニーズに対応する新品種の育成が求められている。たとえば、渋皮がむきやすく食べやすいクリ、βクリプトキサンチンなどの機能性成分の多いカンキツ、すり下ろしても褐変しないリンゴや果肉の赤いリンゴ、赤い梅酒・梅ジュース用のウメなどの品種育成を加速する必要がある。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・ 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)³⁷⁾: 総合科学技術会議が自らの司令塔機能を発揮して、府省の枠や旧来の分野の枠を超えたマネジメントに主導的な役割を果たすことを通じて、科学技術イノベーションを実現するために新たに創設するプログラム。農業分野では、府省連携により、従来技術では成し得なかった、①農業のスマート化、②画期的

な商品の提供、③新たな機能・価値の創造の3つの技術革新を実現させる。この中でNBT技術開発を実施する予定。

- ・農林水産省の委託プロジェクト「次世代ゲノム基盤プロジェクト」(平成25年度～29年度): イネでは、公設試のゲノム育種研究を推進するため、マーカー解析の支援体制を強化した委託プロジェクトも開始。園芸作物においては、国内生産量が多くゲノム解析が進展している作目を対象にして、生産安定性の確保、省力低コスト化、良品質や良食味性、加工適性、機能性成分、重要病害に対する抵抗性などに関わる有用遺伝子の同定、DNAマーカーの開発が行われている。野菜では、きゅうりの黄化えそ病抵抗性、はくさいの根こぶ病抵抗性、トマト及びナスの単為結果性、だいこんの辛み成分特性など、果樹では、りんごの斑点落葉病抵抗性、カラムナー性、かんきつのβ-クリプトキサンチン高含有化、くりの易渋皮剥皮性などに関わるDNAマーカー開発。
- ・イネ、ダイズ、コムギについては、ゲノム育種を活用した温暖化適応品種の開発、多収性をターゲット形質とする業務用・加工用品種、飼料稲品種の開発。
- ・2005年に結成された国際コムギゲノム解読コンソーシアム (IWGSC)³⁸⁾ (フランス、オーストラリア、アメリカ、イギリス、日本など57ヶ国参加。日本は6B染色体の塩基配列の解読を担当している) によって、2014年にIWGSCは、コムギ品種「チャイニーズスプリング」を用いて、ゲノム配列の概要解読に成功し、コムギがもつと想定されている遺伝子数にほぼ対応する約12万個の遺伝子と、これらの座乗染色体を明らかにした³⁹⁾。詳細解析は2016年までに完成させる予定であるが、概要配列のレベルでも、遺伝子機能解析やマーカー解析の効率化に大きく貢献できると思われる。
- ・2011年6月に開催されたG20農相会合の合意に基づき小麦イニシアチブ (Wheat Initiative) が2011年9月に正式に設立された。WIはコーディネーションプラットフォームとして、既存あるいは今後の研究プログラムのシナジー効果をサポートすることが目的である⁴⁰⁾。メンバーは15ヶ国 (アルゼンチン、オーストラリア、ブラジル、カナダ、中国、フランス、ドイツ、インド、アイルランド、イタリア、日本、スペイン、トルコ、英国、アメリカ)、2つの国際研究機関 (CIMMYT、ICARDA)、10の民間会社が参画している (2014年8月現在)。
- ・「食料及び農業のための植物遺伝資源に関する国際条約 (ITPGR)」へのわが国の加入を受け、種々の野菜において遺伝資源への関心が再び高まっている。また、ITPGR枠組み以外で二国間の交流を活発にする取り組み (PGRAsia) も開始された。
- ・欧米の種苗メジャーによる技術独占への対抗を目的として、国内種苗会社と海外の分子育種技術をもつベンチャーとの提携が進んでいる。

(6) キーワード

ゲノム育種、マーカー育種、GM育種、次世代突然変異育種技術、NBT、食料安全保障

（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	穀物 ○ 野菜 ○ 果樹 △	→ → →	<ul style="list-style-type: none"> イネではゲノム解読に引き続き、ゲノムリソース整備やそれらを利用した研究レベルは高い。 ダイズでは、エンレイの全ゲノム解読を終了するとともに、サポニンなどの成分改良、TILLING 法などの育種素材開発でも世界水準の研究を行っている。 コムギのゲノム解読国際コンソーシアムのメンバーとして共同解読を実施中。 トマト⁴¹⁾、イチゴ⁴²⁾、ダイコン⁴³⁾のゲノム解読に貢献。 自家不和合性研究では世界トップクラスの研究水準⁴⁴⁾。 ナス科単為結果性^{18,19)}、ネギ類の品質機能性関連形質の遺伝解析⁴⁵⁾などでも世界初の成果を上げている。 遺伝資源の保存/評価を継続的に推進。トマトでは大規模な変異系統群の開発と育種ツール開発を推進⁴⁶⁾。 果樹類では、ニホンナシなど一部の樹種で高密度 DNA マーカーの開発や連鎖地図開発などで成果を上げているが、ゲノム解読への貢献はほとんどない。
	応用研究・開発	穀物 △ 野菜 ○ 果樹 ○	→ → →	<ul style="list-style-type: none"> イネでは、主要な形質について DNA マーカーの開発および育種への導入が進行中。生産性の高い品種の開発は高いレベルにある。機能性に優れた GM 品種について隔離圃場レベルでの試験が実施されている。 ダイズでは、マーカーを利用した品種開発も行われている。また成分改良品種など新規用途品種の育成なども進んでいる。一方、多収性育種、成分改良品種の用途開発、生育期除草剤などの薬剤開発ではやや遅れている。 民間企業における実用品種開発の水準は世界トップレベル。自家不和合性の基礎知見を生かした F1 採種システムを開発している^{47,48)}。 台木品種の育成で世界をリードしており、接ぎ木栽培の高い普及率を支えている⁴⁹⁾。 果樹類では、多くの優れた品種を育成し、世界で最も食味・外観の優れた果実を生産してきた。
	産業化	穀物 × 野菜 ○ 果樹 ×	→ → →	<ul style="list-style-type: none"> イネ、ダイズ、コムギの育種については、品種開発は公的機関が中心。飼料用や米粉用の多収品種の生産に政府の補助があり、生産現場・実需で活用が増加中。 新規形質品種などは品種化・系統化されたものが少なくないが、実際の産業として実用化されたものは少ない。 民間種苗会社の野菜品種育成の水準は極めて高く、世界トップレベル。国産のシェアのみならず、世界でも高いシェアを誇る^{50,51)}。 国内の大手種苗会社が海外の研究会社との分子育種技術の提携を進める^{52,53)}。国内研究機関の技術開発力向上と産業化研究の充実も求められる。 果樹類の育種については、独立行政法人や公立研究機関による品種開発が中心。
米国	基礎研究	穀物 ◎ 野菜 ○ 果樹 ◎	↗ → →	<ul style="list-style-type: none"> イネでは、多収性育種の研究レベルは低い。ダイズは、ゲノム研究に続き、病害抵抗性、ストレス耐性などの研究が中心。 コムギは、ゲノム解読の国際コンソーシアムの重要なメンバー。 ダイズでは、モンサントなどの基礎研究については不明だが、州立大学を中心として、ゲノム情報を活用した遺伝子研究、窒素代謝や微量元素研究などの生理学的研究など全般的に大豆研究をリードしている。 トマトゲノム解読に伴うインフォマティクス情報の解析と公開では主導的に活動⁵⁴⁾、トマト遺伝資源の収集/利用/保存⁵⁵⁾、トマトをモデルとした果実成熟機構の解明研究^{56,57)}では世界をリードしている。 果樹類では、大学と USDA で共同研究体制をとり、主要果樹でのゲノム解読、高精度 DNA マーカー開発、遺伝資源の収集・保存・利用で、世界をリードする。RosBREED(http://www.rosbreed.org/)プロジェクトで、リンゴ、モモ、サクランボのゲノム研究を推進。
	応用研究・開発	穀物 ◎ 野菜 ○ 果樹 △	↗ → →	<ul style="list-style-type: none"> Monsanto をはじめとする巨大企業において研究開発が進められている⁵¹⁾。 公立研究機関、大学、民間企業がゲノム研究情報を用いた育種について連携し、情報交換や教育を推進している⁵⁸⁾。

研究開発領域
グリーンバイオ

	産業化	穀物 ○ 野菜 ◎ 果樹 ◎	→ ↗ →	<ul style="list-style-type: none"> 米国のバイオメジャーMonsantoは、Seminis、De Ruiterなどを買収し、世界第1位の販売量(推定)をあげている。その総合的な産業技術力は極めて高い。 ダイズでは、民間育種企業が開発した品種はすぐに普及に移され、産業化されている。基礎研究で得られた情報はいち早く産業化する体制を有している。 果樹類では、GM パパイヤ、リンゴを開発。
欧州	基礎研究	穀物 ○ 野菜 ◎ 果樹 ◎	→ ↗ →	<ul style="list-style-type: none"> 大学、公立研究機関、民間企業における研究水準は高い。ゲノム情報を利用した基礎・応用両面から世界をリードする研究を展開。 Wheat Initiative にフランス、ドイツ、アイルランド、イタリア、スペイン、英国が参画している。 現在のイギリスでの小麦収量 8.4t/ha を 20年で 20t/ha が可能となるような品種、栽培技術を開発する国家プロジェクト (20:20 Wheat) が Rothamsted Research を中心に 2012 年から開始されている⁵⁹⁾。 オランダ、フランス、イタリアを中心に、ナス科の育種/ゲノム研究を主導⁶⁰⁻⁶³⁾。 スペインは、ウリ科主要野菜のゲノム解読で先行し、ウリ科の遺伝解析用ツールを独自に揃えつつある^{64,65)}。 イチゴは他のバラ科果樹とともに Fruitbreedomics プロジェクトを推進⁶⁶⁾。 アブラナ科ゲノムについて、イギリスを中心として国際プロジェクトを推進⁶⁷⁾。 果樹類では、EU 内の大学・公的研究機関で共同研究体制をとり、主要果樹でのゲノム解読、高精度 DNA マーカー開発、遺伝資源の収集・保存・利用で、世界をリードする。FruitBreedomics (www.fruitbreedomics.com/)プロジェクトで、リンゴ、モモなどのゲノム研究を推進。
	応用研究・開発	穀物 ○ 野菜 ◎ 果樹 ○	→ → →	<ul style="list-style-type: none"> EU グラントを核として、国立研究所、大学、企業が連携し基礎研究から製品開発までを連携して担うシステムが機能している。 NBT 開発で世界を先導している。 トマトの施設栽培技術について、基礎的な栽培生理学的知見を元に現場レベルでの実証を経たかなりの蓄積をもつ。その知見を基礎として、産官学連携によるゲノム情報を利用した有用形質の解析による戦略的な品種開発を推進。
	産業化	穀物 ○ 野菜 ◎ 果樹 ○	→ → →	<ul style="list-style-type: none"> オランダは産官学ネットワークを介した需要の拾い上げと課題推進力に優れる⁶⁸⁾。トマト生産では産官学共同で開発された生産システム(高度環境制御温室を用いた栽培技術)とネットワークにより、単位面積当たりで世界トップの生産レベルを誇る。 イチゴでは苗供給から栽培、輸出など EU 内で体制が整っている。
中国	基礎研究	穀物 ○ 野菜 ◎ 果樹 ○	↗ ↗ ↗	<ul style="list-style-type: none"> イネでは、ハイブリッドの親品種の改良に、ゲノム育種が導入され、有用形質に関する遺伝解析が進展。重要形質の遺伝子単離や DNA マーカー開発が進展しており、レベルが高い⁶⁹⁾。 ダイズでは、中国科学技術院を中心とした研究グループ、省の研究所などが活発な活動を行っているが、連携は十分とれていない。大豆の原産国であることから、遺伝資源が豊富で遺伝資源の解析は進んでいる。 Wheat Initiative に参画している。 BGI を中心とするゲノム解読インフラの整備⁷⁰⁾により、野菜の各品目の参照ゲノム配列解読および品種系統間多型情報の開発を積極的に推進。キュウリ、ハクサイ、スイカ、キャベツのゲノム解読では中心的役割を果たす。 BGI で、ナシ、ウメなど多くの果樹類のゲノム解読を推進。
	応用研究・開発	穀物 △ 野菜 △ 果樹 △	↗ ↗ →	<ul style="list-style-type: none"> 優良品種の系譜解析から優良な遺伝子領域の推定、ジャスモン酸合成酵素(GmAOS1)の組み換えによるハスモンヨトウ抵抗性発現など様々な応用研究が進められている。 ネギ、タマネギ、イチゴなどでは自国の品種開発への意欲は大きく、一部の大学や研究機関でタマネギの大規模な育種研究を行っている。遺伝資源も豊富に保有しているとみられる。

中国	産業化	穀物 △	↗	<ul style="list-style-type: none"> 単位面積辺り高収量イネの開発という国家戦略の元に、ハイブリッド品種を中心に、技術力は極めて高い。イネについては、昨年応用研究の記載がここに該当。ハイブリッドライスの作付比率は70%近くまで上昇。 トマトなどをはじめとして、海外種苗会社の現地法人もしくは海外種苗会社が出資した現地種苗会社を中心となり、中国に適した品種開発を行っている模様である⁷¹⁾。 種苗会社がほとんどない東南アジア地域に種子を輸出している。 タマネギ、ネギ、ニンニクの生産量は世界一であり、日本への輸出量も多いことから、高品質化のための栽培技術レベルは急速に向上している⁷²⁾。また業務用野菜の加工技術も近代化しているとみられる。 日本の種苗メーカーの採種地としても重要⁷³⁾。 イチゴでは国内需要も増加しており、応用研究の進展とともに産業化は上昇傾向と思われる。
		野菜 △	↗	
		果樹 △	↗	
韓国	基礎研究	穀物 △	→	<ul style="list-style-type: none"> イネでは、国際ゲノム解読プログラムに参画。その後、耐病虫性や食味、耐冷性などで遺伝解析研究を実施⁷⁴⁾。基礎研究レベルはそれほど高くない。 ダイズでは、大豆研究については継続的な資金提供が少ないようで、後追い研究も多い。 トウガラシの遺伝・ゲノム解析について顕著な成果を誇る⁷⁵⁾。 ハクサイの重要形質の遺伝解析も重点的に推進している⁷⁶⁾。ダイコンのゲノム解読も独自に進めている。
		野菜 ○	→	
		果樹 △	→	
	応用研究・開発	穀物 △	→	<ul style="list-style-type: none"> イネでは、公的研究機関で主に食用のジャポニカ多収品種の育成を実施。飼料用多収品種の開発も行われている。 国産メーカー種子事業の向上を目指す国家プロジェクト（Golden Seed Project）が開始⁷⁷⁾。野菜ではトウガラシ、ピーマン、ハクサイ、ダイコン、スイカ、キャベツ、トマト、タマネギが重点品目。農村振興庁の研究機関や大学を中心に育種研究を重点化。 イチゴでは品種開発、施設園芸技術など積極的に行っており、一部は日本を凌いでいる。政府の重点輸出品目に指定されており、大学、国研においてイチゴ栽培技術及び育種研究を積極的に行っている⁷⁸⁾。
		野菜 ○	↗	
		果樹 △	→	
産業化	穀物 ×	→	<ul style="list-style-type: none"> イネでは、多収の食用品種が普及している。 施設園芸に対する補助（初期投資、電気代など）が大きいと、その発展は目覚ましいものがある。 イチゴの輸出に力を入れ、輸出用品種を選定し、韓国イチゴのブランド化を推進。2009年には2.4千t（日本は0.09千t）。 日本をはじめとする外国メーカーの品種が高いシェアを占めていることが問題として認識⁷⁹⁾。これを解決するため、国産メーカー種子事業の向上を目指す国家プロジェクト（Golden Seed Project）が2013より始動。種苗産業の海外資本化により一時的に野菜の品種開発は停滞していたが、近年、産学連携が盛んになっている。 パプリカは、国内消費が少なかったにもかかわらず、大量の果実が輸出を目的として生産され、現在では、重要な輸出農作物になっている⁸⁰⁾。 	
	野菜 ○	↗		
	果樹 △	→		

(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

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 安東 JATAFF Journal 2: 印刷中, 2014
- 2) 柳沢郎ら 北海道立農試集報 91:1-13, 2007
- 3) Nakamura et al. Plant Cell 23:3215-3229, 2011
- 4) Nishio T, et al. Euphytica 176:223-229, 2010
- 5) 梅本・島田(編集)、総合農業研究叢書第68号「大豆生産振興の課題と方向」、2013

- 6) Kaga A, et al. *Breed. Sci.* 61: 566-592, 2012,
- 7) 農研機構育成野菜品種一覧, <http://www.naro.affrc.go.jp/patent/breed/0300/index.html>
- 8) 畠中 タキイ最前線, 2010 年冬春号
- 9) 松元ら 農林水産研究ジャーナル 35(5)
- 10) Amano M, et al. *Theor Appl Genet* 104:586-591, 2013
- 11) イチゴ属植物の炭疽病抵抗性関連マーカーとその利用 特願 2013-186688, 2013.
- 12) 宮武ら 育種学研究 12 (別1) :91, 2010.
- 13) Fukino N, et al. *Theor Appl Genet* 118:165-175, 2008.
- 14) 山下ら、園学研 13 (別1) :135, 2014.
- 15) 平成 25 年度高度環境制御施設普及・拡大全国推進事業のうち次世代型通年安定供給モデル構築支援・環境整備事業報告書, 一般社団法人日本施設園芸協会, 2014.
- 16) 松永ら 園学研 12 (別2) :134, 2013.
- 17) Saito T, et al. *JARQ.* 43 (2): 123-127, 2009.
- 18) 単為結果制御遺伝子およびその利用 PCT/JP2013/070801, 2013.
- 19) Miyatake K, et al. *Theor Appl Genet* 124:1403-1413, 2012.
- 20) <http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/pdf/12052501.pdf>
- 21) 山本 JATAFF Journal 2: 印刷中, 2014
- 22) 岩田 作物研究 57 : 77-82, 2012
- 23) <https://hpci.cbrc.jp/modules/seminar/pdf/hpci2012-iwata.pdf>
- 24) Iwata H. et al. *BMC Genetics* 14:81, 2013.
- 25) 遠藤・土岐 遺伝 68: 135-139, 2014
- 26) Li, T. et al. *Nature Biotechnol.* 30: 390-392, 2012
- 27) Haun, W. et al. *Plant Biotechnol. J.* in press
- 28) Djukanovic, V. et al. *Plant J.* 76 : 888-899, 2013
- 29) Wang, Y. et al. *Nature Biotechnol.* in press
- 30) Saika et al. *Plant Physiol.* 156: 1269-1277, 2011
- 31) 横井ら 日本植物生理学会年会要旨集 2014 年 138
- 32) Endo T. et al. *J Japan Soc Hort Sci* 78: 74-83, 2009.
- 33) Yamagishi N. et al. *Plant Molecular Biology* 75:193-204, 2011
- 34) http://www.aphis.usda.gov/biotechnology/reg_loi.shtml
- 35) <http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000002tccm-att/2r9852000002tck7.pdf>
- 36) 農林水産省 新品種・新技術の開発・保護・普及の方針 2013
- 37) <http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/>
- 38) <http://www.wheatgenome.org/>
- 39) The International Wheat Genome Sequencing Consortium (IWGSC) *Science* 345:, 2014
- 40) <http://www.wheatinitiative.org/>
- 41) The Tomato Genome Consortium *Nature* 485:635-641, 2012.
- 42) Hirakawa H, et al. *DNA Res* 21: 169-181, 2014.
- 43) Kitashiba H, et al. *DNA Res* doi: 10.1093/dnares/dsu014, 2014.
- 44) Tarutani et al., *Nature*, 466, 983-986, 2010.

- 45) Ueda H, et al. Biosci Biotech Biochem 77:1809-1813, 2013.
- 46) ナショナルバイオリソースプロジェクト - トマト - <http://tomato.nbrp.jp>
- 47) Kitashiba H, et al. PNAS 108, 18173-18178, 2011.
- 48) 酒井 育種学研究 7:38-39, 2005.
- 49) Matsunaga H, et al., 15th EUCARPIA meeting on genetics and breeding of Capsicum and eggplant, 401-404, 2013.
- 50) ブロッコリー物語 <http://globe.asahi.com/feature/081103/side/04.html>
- 51) 種子産業 - 担い手の変化と市場の拡大 - 三井戦略研レポート, 2012.
- 52) http://www.takii.co.jp/info/news_baioseed.html
- 53) <http://www.sakataseed.co.jp/corporate/news/20131127.html>
- 54) Solanum Genome Network, <http://solgenomics.net>
- 55) Tomato Genetics Cooperative, <http://tgc.ifas.ufl.edu>
- 56) Nguyen CV, et al. Plant Cell 26(2):585-601, 2014.
- 57) Klee HJ, Giovannoni, JJ, Annu Rev Genet 45: 41-59, 2011.
- 58) The Solanaceae Coordinated Agricultural Project (SolCAP), <http://solcap.msu.edu>
- 59) <http://www.rothamsted.ac.uk/our-science/2020-wheat>
- 60) 150 Tomato Genome ReSequencing project, <http://www.tomatogenome.net>
- 61) Pascual L, et al. J.Exp.Bot. 64:5737-52, 2013.
- 62) Portis, E. et al. PLoS ONE 9: e89499. 2014
- 63) Verlaan MG, et al. PLOS Genetics, 9, e1003399, 2013.
- 64) Esteas C, et al. Theor Appl Genet 126:1285-1303, 2013.
- 65) Garcia-Mas J, et al. PNAS 109:11872-11877, 2012
- 66) <http://www.fruitbreedomics.com>
- 67) <http://www.brassica.info>
- 68) <http://www.foodvalley.nl/English/default.aspx>
- 69) Yuchun Rao et al. Plant Cell Rep 33:551-564, 2014
- 70) <http://bgitechsolutions.com/applications/animal-plant/>
- 71) Wang Y, et al., BMC genomics 2013 14:836
- 72) 中国における野菜種子生産の概況 (野菜情報 2012年11月号)
- 73) 中国における野菜生産・輸出の動向 (野菜情報 2012年12月号)
- 74) RDA Impact of global warming and countermeasures for the stable rice production:pp103
- 75) Kim S, et al. Nat Genet 46(3): 270-278, 2014.
- 76) Li X. et al. DNA Res 20, 1-16, 2013
- 77) https://www.gsp.re.kr/eng_index.jsp
- 78) Korean Strawberry Fact Book 2012 (Research Center of Fruit Vegetables for Export, The University of Seoul, ISBN 978-89-87750-71-2)
- 79) 東亜日報 <http://japanese.donga.com/srv/service.php3?biid=2011101704138>
- 80) 柳ら 韓国の農業・貿易戦略, 農林水産政策研究所, 交渉戦略プロジェクト研究資料 第4号
<http://www.maff.go.jp/primaff/koho/seika/project/pdf/kousyo4-7.pdf>

3.6.2 持続型農業

(1) 研究開発領域名

持続型農業

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

農業の化石資源依存度を低下させ、長い将来にわたり安定かつ持続的に食糧生産を維持し、向上させるための研究開発

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

3-1. 食糧生産の動向と多資源投入型農業

人類は農業生産を高めることで人口を増加させてきた。この40年間で世界の人口は倍増し、それに伴って世界の穀物生産高を2.5倍程度増加させてきている。しかし特定の年や地域では食糧不足や供給不足が問題となり、世界の安定的な発展には食糧生産能力を高めることが不可欠である（食料安全保障概念の変遷と政策対応の課題参照）。

穀物生産高を高める方法は二つあり、一つは耕作面積を広げること、もう一つは単位面積当たりの収量を高めることである。この40年間、世界の耕地面積は増えておらず、単位面積あたりの肥料（消費量、窒素肥料約4倍、リン酸肥料約2倍）、農薬、化石燃料などの資源の投入量を高めることで食糧増産が実現されてきた。イネ、コムギなどで開発された矮性品種での高収量の実現には十分な施肥が不可欠であった。ただ、増産目的で多量に投入された窒素肥料の2/3以上は作物に吸収されることなく環境に放出され、河川や湖沼、海域の富栄養化をもたらし、生態系破壊、漁業への打撃を与えている。地下水資源に頼る灌漑農業は地下水位の低下をもたらしている。現在の多資源投入型農業は、限られた資源を多量に利用し、環境に悪影響をもたらすという二つの面で持続性に問題がある。

3-2. 持続型農業へ向けての課題

持続可能な農業に改変して行く必要性は認識されているが残された課題は多い。食糧生産を増加させ、環境への影響少なくするためには、収量を維持しつつ農業を持続型にして行くことが求められている。その実現のための課題としては、収量を維持（増加）させつつ、農作業回数を減らすこと、合成や輸送に資源を費やす肥料や農薬の使用量や使用回数を減らすこと、水を効率的に利用することなどが挙げられる。また、これまで農業の難しかった環境でも一定の農業を可能にする技術開発も広い意味での持続性農業に貢献する。さらに重要な点としては、このような変更が農業者、消費者に経済的なメリットを与えるような方式で進められて行く必要がある。

3-3. 国内外の動向

①肥料低減

肥料の利用量を減らすには三つの方向性が考えられる。肥料の施用方法を含めた質の改善、作物の改良を通じた肥料低減、環境微生物を用いた作物への栄養供給強化である。

肥料の改善に関して、耕地に施された肥料のうち作物に吸収される割合は、窒素やカリウムで3割程度、リン酸で1割程度である。一般には安価な化学肥料は即効性があるが、短時間のうちに効果が無くなる傾向がある。肥料効果の持続性を高めるために緩効性肥料が開発され、肥料の施用量と施用回数を減らすことにつながっているが、緩効性肥料は高価であり農

業者のコスト高を招く。また、圃場に肥料を均一に散布することは難しく、圃場内の作物の生育は一様でないことが多い。この改善のために、作物の生育状況を空中からの撮影などで把握し、生育状況に応じた施肥を行うことで、圃場内での生育を均一化する農業（precision farmingと呼ばれる）が一部の先進国で行われており、肥料の施用量の低減につながっているが、多額の投資とインフラが必要となる。肥料の施用量を適正化するには圃場の土壌の栄養状態を分析しそれに対応した施肥を行うことがわが国を含めた先進国では広く行われてきており、一定の効果を挙げている。しかし、このような技術は一定の施肥低減は可能であるものの、それ以上の低減をすることは難しく、施した肥料の利用効率を高める効果は少ないので、環境への負荷低減も一定の効果以上は望めない。

より高い効果を出すためには、作物の改良を通じた肥料低減が重要である。低肥料耐性作物を開発できれば、肥料の使用量を低減することができる。ただし、低肥料を目的とした作物の育種は限定的な例でしか実現していない。この分野では基礎的な研究成果が多く、土壌から吸収される14種類の無機栄養素の吸収を担う輸送体はすでに報告されている。さらには、遺伝子組換えを用いて低肥料耐性作物の作出も報告されてきている。世界的にも必須元素の研究は精力的に進められているが、概して日本の研究レベルは高く、窒素、リン酸、カリウムなどの多量要素についての基礎的な知見を集積しており、特に微量必須元素については低肥料耐性植物の開発においても諸外国をリードしている状況にある。

低肥料化のもう一つの有効な手段が土壌微生物などの環境微生物の利用である。マメ科植物は根に根粒という空気中の窒素ガスをアンモニアに変換する能力のある組織を作るため、窒素肥料が少なくても良好に生育する。この能力を他の作物に付与する試みが長く続けられており、最近ではBill & Melinda Gates Foundationがこの分野の国際プロジェクトに資金援助をしている。その基礎となる根粒形成機構については、日本の研究は世界をリードしてきている。また、土壌に存在する菌根菌やエンドファイトと呼ばれる微生物はリンや窒素を植物に供給していることが知られているが、当該分野においても日本の豊かなイネの研究基盤を用いて菌根菌の着生に重要な遺伝子が見いだされ、土壌微生物の資材としての開発が進められている。

②農薬低減

農薬低減には、農薬の必要度が低い作物を開発することが重要であり、作物の病虫害抵抗性の研究がなされている。イネのいもち病に対する耐性については世界をリードする成果をあげるとともに、遺伝子座を用いたいもち病耐性の品種が育成され、農業利用が始まっている。イネの害虫ウンカに対する耐性についての研究も進められている。これら優れた成果の一方で、病虫害は自分自身に変化することによって、作物側の耐性を打破すること知られており、今後も新しい耐性遺伝子を発見し、導入して行く努力が必要である。また、害虫の予測を行ったり、異なる病虫害抵抗性をもつ複数の作物をどのように栽培すると病虫害被害を低減できるかについての数理的な解析に基づいた作付けなども行われている。農薬の改善も進められており、新しい作物を開発することによる低減化とすでに開発された農薬や耐性品種をより効率的に利用して低減化する努力の双方が進められている。

③ストレス耐性付与

より広い意味での持続的農業の実現には、作物に様々な環境ストレス耐性を付与することが重要である。将来の農業は気候変動の影響を受け、現在の気象とは異なる条件でも農業を

持続することを考えると、すでに述べた低肥料耐性や病虫害耐性に加えて、高温や低温耐性、干ばつに対する耐性を強化することが重要である。我が国の研究はこの分野でも優れた成果を挙げてきている。アルカリ土壌に対する耐性を付与する遺伝子、乾燥に対する耐性を付与する遺伝子などが同定され、育種的な利用を目指した研究が進められている。

（４）科学技術的・政策的課題

科学技術的課題

- ・ 低肥料耐性育種の推進：DNA 配列の決定法やゲノミックセレクションなどを含むゲノム育種技術の急速な進展を利用した低肥料耐性育種が中国や欧米で進められている。わが国では基礎的な研究は高いレベルにあるものの、その育種への展開は必ずしも十分でない。基礎的な研究から応用への展開には、国内外の圃場での栽培試験データの取得、ゲノム育種技術との連携、数理的な統合理解などを進めて行く必要がある。
- ・ 作物生育の簡易測定技術の開発：肥料低減の実現には多数の作物の生育状況や土壌の状況把握が重要である。このために圃場での作物個体の生育を簡便に測定する技術の開発が重要である。小型無人ヘリコプターを利用した航空写真の利用が有効であると考えられるが、解析技術開発とその育種や施肥への応用はこれからの課題である。
- ・ 環境微生物を用いた低肥料栽培技術の開発：土壌中の微生物を利用して窒素やリン酸などの栄養を作物に供給することができれば、施肥を低減することができ、施肥が十分に行えない地域での作物生産を高めることにつながる。植物と環境微生物の相互作用研究、有用な土壌微生物の共生を利用する技術開発が重要である。
- ・ 耐病虫害、耐環境ストレス耐性育種の推進：世界のトップレベルにある当該分野の基礎研究の成果を育種に効率的に結びつけて行くことが求められている。

政策的課題

- ・ 世界へ貢献する技術としての持続的農業開発の位置づけ：持続的農業の開発はわが国の農業への貢献も大きいですが、より世界の農業への貢献を重視すべきであり、国際貢献としての技術開発をすることが重要である。こうした技術開発により、世界の持続的農業に貢献し、特に比較的経済的に恵まれない国々に大きな貢献をする。持続的農業開発を国際貢献と位置づけることで、開発の方向性や応用範囲を明確にすることができ、応用技術の開発に結びつく。
- ・ 新しい開発技術の法的位置づけの確立：持続的農業開発は新しく開発された育種技術を利用するとともに、無人ヘリによる空中撮影などの新しい技術開発を生み出すものと考えられ、新しい技術についての法的な位置づけ（規制や安全管理など）を確立する必要がある。
- ・ 持続的農業によって生産された農産物のプレミアム化：持続的農業を開発し広めることは将来の人類の繁栄に極めて重要であるが、持続的農業によって生産された生産物が特に優れた品質をもつ訳では必ずしも無い。その中で持続的農業を普及させる政策が必要であると考え。一つの方策としては、「持続的農業」を「有機農業」の様な位置づけで定義し、その定義によって、消費者がプレミアムを感じることができるよう制度を作ることが重要であると考え。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・低肥料特に低窒素耐性育種の必要性は世界的に共有されており、各国独自のプロジェクトに加えて、Bill & Melinda Gates Foundation もプロジェクトに援助を進めている。わが国でも農林水産省のプロジェクトとして、低肥料耐性の開発や土壌微生物の利用が進められており、一定の成果を挙げつつあるが、わが国の種苗企業などにはこれらの知見を基にした育種を行う体力は一部のベンチャー企業を除いて無く、公的機関が育種を進めている現状である。
- ・窒素、リン酸、カリの低減に資する遺伝子の同定や低肥料耐性機構の解明は精力的に進められており、わが国の研究者も重要な貢献をしている。
- ・イネの低窒素耐性の研究は中国で特に精力的に進められており、遺伝子組み換え（GM）により低窒素耐性を付与できる遺伝子や、低窒素耐性に関与する遺伝子が報告されてきている。中国は自国での食糧確保のために食糧増産を進めてきたが、肥料の施用量が大幅に増加し環境汚染を引き起こしている。この問題を解決するために、積極的な研究投資を進めている。
- ・土壌微生物と植物の相互作用研究は、欧米で重要視されプロジェクト研究が進んでいる。アメリカとドイツの研究グループが実験室レベルでの網羅解析を進めている。わが国では土壌微生物の研究実績は高いレベルにあり、植物研究との連携が進められている。
- ・マメ科植物の窒素固定研究はわが国の研究レベルは極めて高く、低肥料への応用に重要な窒素固定活性を制御する遺伝子やホルモンの同定が世界に先駆けて行われてきた。その一方で、このような成果を応用する努力は不足している。
- ・ヘリコプターを用いた圃場観測システムは先進国では開発されつつある。画像撮影技術や画像解析技術はわが国のレベルは極めて高い。ヘリコプターの自動操縦装置の開発や作業ロボットの開発については先進国各国が開発競争を繰り広げている。
- ・有機農法や自然農法が一部の国の一部の人の間でもはやされているが、これらの農法のグローバルな意味合いや農業の発展の歴史におけるこれらの農法の位置づけは一般の市民には理解されていない。それにもかかわらず、一部の市民はこれらの農法で収穫された農産物にプレミアムな価値を見だし、高い値段でも購入する。持続型農業についても一般市民がプレミアムな価値を見出す政策誘導が必要であるが、このような政策誘導はわが国ではなされていないし、国際的にも例は知られていない。

（6）キーワード

低肥料、低農薬、低インプット、低エネルギー、低肥料耐性、病虫害耐性、システム理解、育種技術、無人ヘリコプター、画像解析システム、農作業の効率化、土壌微生物、エンドファイト、根粒、菌根菌

（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"> 複数の必須元素について我が国の研究者が世界に先駆けてトランスポーターを見いだしたり、その発現制御機構を見いだしており、研究レベルは高い¹⁻⁴⁾。 土壌微生物と植物の相互作用についての研究も数多く、マメ科植物との共生に必須な遺伝子やその制御に重要な遺伝子を複数同定している。 土壌微生物のメタゲノム解析についても多くの実績がある。 育種要素技術がイネを中心に開発されてきている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> トランスポーターを用いた遺伝子導入技術を用いた低肥料耐性植物の作出について、世界で初めての報告をしている^{5,6)}。 イネを用いた低肥料耐性を付与するマーカー開発が農林水産省のプロジェクトとして進められてきており、窒素の吸収を促進する遺伝子が見いだされている。 土壌微生物の培養物を含む農業資材が開発され、圃場での有効性が確かめられた例が報告されている⁷⁾。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 低肥料耐性育種については、独立行政法人や公立研究機関によって開発が進められており、民間種苗会社の関与は少ない。 微生物資材が植物の生育促進効果をうたって企業から発売されている⁸⁾。 無人ヘリコプターの産業技術応用は盛んに進められている⁹⁾。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 植物の栄養生理の分子機構の解明はあまり積極的に取り組まれていない。むしろ企業が基礎研究まで取り組んでいる傾向がある。 土壌微生物と植物の相互作用については、University of North Carolina のグループなどが世界をリードする成果を挙げている¹⁰⁾。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 企業による応用・開発研究はモンサントやシンジェンタなどで進められている。 USDAはストレス耐性に関する技術開発に取り組んでいる。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> モンサントやシンジェンタなどが精力的に産業化に取り組んでおり、同じ施肥で収量が高い品種を開発している。
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ドイツ、フランス、イギリス、スペインを中心に肥料成分の吸収利用について、多くの基礎研究が進められており、EU がプロジェクトとして支援することを通じて、共同研究体制が構築されている。 根粒菌とマメ科植物の相互作用では世界をリードする研究室がデンマークにある¹¹⁾。 土壌微生物と植物の相互作用研究についてもドイツのマックスプランク研究所をはじめ複数の研究所が精力的に取り組む成果を挙げている¹²⁾。 作物の生育診断技術の開発もドイツが積極的に取り組んでいる。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究の成果を応用研究や開発に結びつける体制が比較的良く整備されている。 環境問題への市民の関心が高く、precision farming system を開発するなど、環境への配慮がなされた開発が行われている。 土壌微生物を利用した窒素供給によってアフリカの農業を救うプロジェクトをイギリスのグループが Bill & Melinda Gates Foundation の支援を受けて進めている¹³⁾。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 低肥料耐性育種の産業化の例は知られていない。 農業資材開発は進められてきており、天敵による害虫駆除システムの産業化などの例がある。

中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ イネを対象にした中国農業大学、南京農業大学、華中農業大学、中国科学院を中心に作物の低肥料耐性に関する研究が進められている。 ・ 窒素に対する応答機構や輸送についての研究も中国農業大学を中心に進められている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ トウモロコシの施肥体系の改善による低肥料栽培の実現についての報告が中国農業大学からなされている¹⁴⁾。 ・ 当該分野の応用研究開発に対して中国政府は積極的な支援を進めている。
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ 本分野について産業として取り組んでいるとは思われないが、政府は、高い単位面積当たりの収量を目指す農業の弊害として肥料の過剰施用が問題であると認識しており、中国政府は農家に肥料使用の低減を推奨している。 ・ 組換えイネについての圃場試験は行われており、低肥料での収量が高まったとの報告はなされているが、実際の農業に利用されているとの報告は現時点ではなされていない。
韓国	基礎研究	×	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 韓国では肥料についての研究はあまり進められていない。
	応用研究・開発	×	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 本分野に関しては応用研究・開発もあまり進められていない。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 本分野に関しては産業化もあまり進められていない。

(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

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Takano et al. Nature 420, 2002, 337
- 2) Tomatsu et al. PNAS 104, 2007, 18807
- 3) Takano et al. PNAS 17, 2010, 5220
- 4) Hirai et al., PNAS 101, 2004, 10205
- 5) Miwa et al. Plant J 46, 2006, 1084
- 6) Miwa et al. Science 318, 2007, 1417
- 7) <http://www.riken.jp/kankyohokokusho/2012/sp/highlight/study2.html>
- 8) <http://www.mayekawa.co.jp/ja/lp/Endophyte/>
- 9) http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK1400S_U4A410C1000000/
- 10) Lundberg et al. Nature 488, 2012, 86
- 11) [http://pure.au.dk/portal/en/persons/id\(f18b1608-17eb-4ff2-92d9-251f14f48a28\).html](http://pure.au.dk/portal/en/persons/id(f18b1608-17eb-4ff2-92d9-251f14f48a28).html)
- 12) Carvalhais et al. Front Plant Sci. 4, 2013, 235
- 13) <http://www.gatesfoundation.org>
- 14) Chen et al. PNAS 108, 2010, 6399

3.6.3 高機能高付加価値作物

(1) 研究開発領域名

高機能高付加価値作物

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

植物バイオテクノロジーを基盤に、生活習慣病・ガン・アレルギーなどを予防・改善する作物（食品）を研究開発、および栄養・健康機能性を有する農林水産物やその機能性に関する研究開発。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

3-1. 第一世代の遺伝子組換え作物の拡大

高機能高付加価値作物とは、作物の可食部に機能性成分を強化し、健康増進や病気の予防などに資する作物である。1996年に米国で始まった遺伝子組換え（GM）作物の商業栽培は当初170万ヘクタールであったが、2013年には27ヵ国、その総栽培面積は1億7,500万ヘクタールと、17年間で100倍以上に達した¹⁾。GM作物の多くはダイズ、トウモロコシ、ワタ、ナタネなどに除草剤や病害虫に対する抵抗性遺伝子を導入したもので、第一世代のGM作物と呼ばれている。また、掛け合わせ（ピラミディング）により、除草剤抵抗性と病害虫抵抗性の両方の性質をもつ新しい品種も作出され、ここ数年シェアを伸ばしている。GM作物の作付面積が急速に拡大した理由として、生産コストの削減や収量の増加に伴う収益の向上にとどまらず、農薬使用の低下による生産従事者の健康面に寄与した点も挙げられる。実際に、農業生産額は980億米ドルを超え、使用される農薬は4億7,000万kgも少なくなったと推定されている²⁾。GM作物の商業栽培に関しては我が国やEU諸国の多くは依然として導入に慎重な姿勢が見られるものの、米国を筆頭に現在商業栽培が拡大している国々では生産者にその利点が広く認知されている。これに加えて、深刻さが増す地球温暖化に伴う耕作可能地の減少と人口増加による食糧不足が懸念される中、米国のみならず、食糧事情がひっ迫している中国やインド、アフリカ諸国などの発展途上国でも、高温、干ばつ、塩害など悪条件でも生育できる作物の開発が今後急速に進む。

3-2. 第二世代の遺伝子組換え作物（機能性作物）の研究開発

世界的に見て、食生活の急激な変化、運動不足、喫煙などが相まって高血圧、肥満、糖尿病と言った生活習慣病は年々増加している。世界保健機関（WHO）の統計でも高血圧は、2025年には成人の30%にも達すると警告している³⁾。国内では健康ブームを背景に、日々の食生活の中で不足しがちなビタミン、ミネラル、アミノ酸などをサプリメントして補うことは広く浸透している。これらサプリメントや特定保健用食品（トクホ）など機能性食品の市場は2兆円近くにまで膨らんでいる⁴⁾。一方、欧米では日本のトクホに相当するものはニュートラシューティカル（nutraceuticals:栄養補助食品）と呼ばれ、機能性食品の国際市場は10兆円にも達すると見積もられている。

2013年6月の閣議決定により、トクホや栄養機能食品以外でも科学的な根拠を示すことで、サプリメントや健康食品に健康機能性を表示できることが認められた。また、同年10月には日本人の長寿を支える「和食」がユネスコ無形文化遺産へ登録されることが決まった⁵⁾。機能性成分を含む食材を通して、健康を維持し病気を予防することの有効性が広く認知

されたと言える。現在、ダイズ、コメ、トウモロコシ、ナタネ、ジャガイモ、レタスなどの作物に、ビタミン（A, C, E, 葉酸）、リシンなどの必須アミノ酸、ミネラル（鉄分、亜鉛）を強化したものが多数開発されている（表 1 を参照）。これらは消費者に、よりメリットをもたらすことから、第二世代の GM 作物と呼ばれている。この中で、健康油（オレイン酸や DHA、EPA、ステアリド酸などのオメガ 3 脂肪酸の割合を高めた油）を含有する作物の開発は健康意識の高まりから世界各国で精力的に進められており、高オレイン酸ダイズはすでに米国企業により商品化されている。ビタミン A の前駆体であるβ-カロテンを強化したコメはゴールデンライスと呼ばれ、乳幼児の失明予防を目的にスイス・ドイツで開発された。数年以内にはフィリピンで商業栽培される見込みである⁶⁾。この他に、医薬品的な成分を可食部に蓄積させ、特定の疾病・症状に有効な作物も日本を中心に開発が進められている（表 2 を参照）。

表1 健康機能性成分を強化した主な作物

強化した成分	作物*	機能性	開発国
β-カロテン	イネ、ナタネ、トマト、ポテト	失明予防・免疫力の向上	スイス・独、米国、英国、韓国
リコピン	パイナップル	抗酸化作用	米国
葉酸	イネ、トマト	胎児の正常な発育・妊婦の健康	ベルギー、米国
ビタミンA、ビタミンCと葉酸	トウモロコシ	健康増進	スペイン・独
ビタミンC	レタス、イチゴ、ポテト、トウモロコシ、トマト	抗酸化作用	米国、スペイン、ニュージーランド
ビタミンE	ダイズ、トウモロコシ、ナタネ、レタス	抗ガン作用・糖尿病	米国、韓国
オレイン酸	ダイズ、ナタネ、ワタ	心血管系疾患のリスク軽減	米国・豪ほか
DHA、EPA、ステアリド酸、アラキドン酸	ダイズ、ナタネ、ベニバナ		米国、カナダ
フラクタン（難消化性多糖類）	ポテト	肥満予防	米国・独ほか
フラボノール、イソフラボン	トマト、ポテト、ダイズ、トウモロコシ	骨粗しょう症・抗炎症	米国、英国、蘭、ポーランド
リシン、メチオニン、トリプトファン、スレオニン	トウモロコシ、小麦、トマト、イネ、ダイズ、ナタネ	栄養強化	日本、米国、ベルギーほか
ギャバ	イネ	高血圧予防・認知症予防	日本
鉄分、亜鉛	イネ、レタス、ダイズ、トウモロコシ	貧血予防、免疫強化	日本、米国、スイスほか

3-3. 高機能高付加価値作物の開発を巡る国際比較

米国は植物生理学、植物分子生物学など植物分野の基礎研究で質量共に世界をリードしている。また、モンサント社を始めとした巨大アグリ企業による様々な用途の作物の開発と商業栽培が数多く進行している。植物科学の水準がトップクラスの欧州は遺伝子組換え作物（食品）への根強い抵抗はあるが、研究開発は各国共に盛んであり、圃場レベルでの試験は数多くなされている。オーストラリアはナタネなど第一世代の遺伝子組換え作物の栽培は拡大しており、健康油など機能性作物の開発にも重点的に投資する見込みである。中国やインドも遺伝子組換えトウモロコシやワタなど第一世代の GM 作物の作付けが増えている。今後、機能性作物の開発を含めたバイオテクノロジー分野に巨大投資を行うことがすでに決まっている。日本は植物科学の研究水準そのものは極めて高い。広義の機能性作物で商業栽培が成功している例として、サントリーが開発した青いカーネーション、青いバラが挙げられる。最近では青いユリの開発も始まっている⁷⁾。

国内では国主導の GM プロジェクトにより、イネを中心として第二世代の GM イネの研究開発が 2012 年まで進められてきた（表 2 参照）。生活習慣病の各種症状（高血圧、糖尿病、肥満、高脂血症）

表2 医薬品的な成分を強化した作物*

強化した成分	作物	機能性	開発国
ラクトフェリン、リゾチーム	イネ、ポテト、タバコ	感染症予防	米国、仏ほか
イネ花粉のアレルゲン	イネ	花粉症緩和	日本
コレラ毒素の抗原タンパク質	イネ	コレラ予防	日本
イヌインターフェロンα	イチゴ	犬歯周病の治療	日本
ラクトスタチン	イネ	コレステロール低減	日本
ダイズβ-コングリシニン	イネ	中性脂肪の低減	日本
インフルエンザワクチン	タバコ、ジャガイモ	インフルエンザ予防	カナダ、日本
狂犬病ウイルスの免疫抗体	タバコ	狂犬病の予防	英国
ノボキニン	イネ、ダイズ	高血圧予防	日本
GLP-1（グルカゴン様ペプチド）	イネ	糖尿病予防	日本

*代表的な作物を表示

研究開発領域
グリーンバイオ

を予防・緩和する作物やワクチン成分（スギ花粉症、ダニアレルギー、コレラなど）を含む作物の開発が主にイネで進められ、‘たべるワクチン’と呼ばれている⁸⁾。花粉症を治療する米のように実用化に向けて治験が進んでいる例もあるが、政策的な問題や研究シーズの受け皿がないために、ほとんどが開発段階で留まっており実用化への道筋は混沌としている。

一方で、従来の育種技術で開発された高ファイトケミカル果菜類が市場に出回っている。また、農研機構により、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の品種より高めた品種育成を行い⁹⁾、これらを活用した製品開発もいくつか行われてきた。さらに、産官学連携による生活習慣病予防効果が期待される農作物、加工品の開発及びそれらの生産・流通技術の確立、医療機関との連携により疫病リスク低減への影響をヒトにおいて評価することで、栄養・機能性、安全性、特性情報など、農林水産物データベースの構築を目指している。また、個人の健康状態に応じたテーラーメイドな栄養指導システムの開発や健康維持・増進に寄与する「機能性弁当」（表3）の流通を目指した農研機構のプロジェクトが推進されている¹⁰⁾。

日本やEUだけでなく、多くの国でアンチGM運動が政策決定に大きな影響を与えており、新規の遺伝子組換え作物の栽培承認が何らかの形で制約を受けている。このような背景のもとで、閉鎖系での作物の栽培（植物工場）や植物培養細胞のタンク増殖により、医薬品などの付加価値の高い機能性物質を生産する動きが世界的に盛んになりつつある。国内では産官学の連携で植物工場と連携して医薬品を製造する事業が複数進んでおり、2013年10月には遺伝子組換えイチゴを用いた世界初の動物医薬品が認可された¹¹⁾。

（4）科学技術的・政策的課題

科学技術的課題

- ・ 実験圃場の問題：国内ではGM作物の試験栽培を行う上でカルタヘナ法に準拠した厳しい規制がしかれており、研究開発のため実際に圃場試験を行うことが極めて困難な状況にある。利用できる隔離圃場が国内では限られていることもそれに拍車を掛けている。商業栽培を行うまでのハードルが高いのはある程度仕方ないとしても、研究開発を行うための事務的な手続きを簡素化すると同時に、各地域に基盤となる隔離圃場をしっかりと整備し、実用化を見据えた研究開発を加速させる必要がある。現行の制度を嫌い、仲介業者を介して高額な委託料を支払い、海外で圃場試験を行うケースが最近頻繁に見られる。
- ・ 新しい植物育種技術（New Plant Breeding Techniques, NBT）への期待と課題：従来の遺伝子組換え作物の開発に閉塞感が漂う中、NBTへの期待が一段と高まっている。NBTにより作製された新しい付加価値の高い作物では従来の遺伝子組換え技術と異なり、導入された遺伝子が最終的にゲノムに残らないのが大きな特徴である。よって、カルタヘナ法に準じた規制を受けないことが予想され、新品種開発の時間と予算、及び商業栽培のコストが大幅に軽減されることが期待される。米国ではNBTにより開発されたトウ

表3 「機能性弁当」素材

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

モロコシがすでに商業栽培されている。農林水産省は2014年度の概算要求でNBT推進に関する新規予算を盛り込み、NBTを新品種開発の起爆剤にしたいようだ。しかしながら、NBTで作出した最終的な作物(プロダクト)から判断して規制を掛けないのか、作出途中では遺伝子組換え技術を使っているために、そのプロセスを基準にして規制を掛けるのか、未だに議論が続いており、米国を除いて各国の法律や規制の問題ともからみ統一的な見解を出すことは極めて難しいと思われる¹²⁾。なお、注目すべきこととして、米国・デュポン社が自社開発したNBTの一種である種子生産技術(SPT)によって作出された新品種のF₁ハイブリッド種子の商業栽培が2013年に始まったが、厚生労働省はこれに対してGM食品には当たらないと判断した。これは米国以外では初めてのケースである¹³⁾。更なる問題点としては、NBTの基本技術の多くは海外で開発されたため、今後の実用化を考えた場合、特許の許諾やそれに伴う費用も今後の大きな課題になる可能性がある。

- ・ 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、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・健康機能性の実証が必要である。
- ・ 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。

政策的課題

- ・ 社会的受容(PA)の問題：2013年下半年から遺伝子組換えパパイヤ(レインボー)が業務用向けに輸入が始まり、安全性だけでなく美味しさや調理のしやすさから好評であるという¹⁴⁾。各種アンケート調査からGM作物(食品)に対する抵抗感は徐々に低下はしているが、依然として忌避感はある。国民の間で社会的な受容(PA)を如何に高めていくかが今後の大きな課題である¹⁵⁾。今TPP(環太平洋戦略的経済連携協定)への参加の是非をめぐって、GM食品に関する関心が一段と高まっている。TPP加入によりアメリカからGM食品が大量に流入し、日本の食の安全が脅かされるという偏った報道も見られる。GM作物に対する地道な教育・啓蒙活動がより重要になっていると言える。また、GM作物・食品に対する抵抗があまり無い人がいても、それを購入することは現状では非常に難しい。もっとGM作物・食品に気楽にふれられ、購入できるような市場環境を作り出す必要がある。
- ・ 省庁間の縦割り慣習の弊害：GM植物(または、作物、食品)は研究目的により対応する機関が区分されている。すなわち、植物の基礎研究ならば文部科学省、作物(食品)開発ならば農林水産省、医薬品の原料ならば厚生労働省が窓口になる。しかし、機能性成分を強化し、付加価値を高めた作物の開発では、食品と医薬品の間にはグレーゾーンがあり、線引きは難しい。開発された作物ごとに省庁の権益に沿って判断するのではなく、安全性をまず担保した上で、どのような形で国民に提供することが最も妥当であり、

国民の利益になるのか、既存の制度を改変するのではなく、むしろ新しい審査機関を設けて対応する必要がある。

- ・ 高機能高付加価値作物の位置づけをめぐる問題：平成 23 年度の国民医療費の総額は前年度比 1 兆 6 千億円増の 38 兆 6 千億円で、人口一人当たりで 30 万円を超え、GDP に占める比率も 8%を超えた¹⁶⁾。日本社会は超高齢化が進み、増え続ける医療費を抑えるには「食」を基盤にした予防医学的な施策が最も有効であることは言うまでもない。今後どのような高機能高付加価値作物を開発し、どのように利用していけばよいのか、国民的な議論を喚起し、打開策を探らねばならない喫緊の時期に来ている。
- ・ 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、農林水産物の自主的な表示も認めており、農業生産者による機能性表示も可能となる。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¹⁷⁾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強力に策定・推進する必要がある。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・ 新しいゲノム編集技術 CRISPR/Cas9：ゲノム編集技術とは配列特異的な人工ヌクレアーゼで任意のゲノム配列を切断して、欠失変異を導入するものである。カルタヘナ法の規制を受けない可能性があり、最も期待されている NPBT の一つである。つい最近開発された CRISPR/Cas9 は従来のゲノム編集技術（ZFN や TALEN）とは異なり多くの利点が指摘されている。ゲノム上の標的となる配列に合わせて個別に人工ヌクレアーゼを設計する必要がなく、標的配列に結合する特異的なガイド RNA だけを設計するだけですむ¹⁸⁾。最初の論文が発表されてから半年も経たずに、シロイヌナズナとタバコで成功例が発表された¹⁹⁾。また、農業生物資源研究所（つくば）はイネでの成功例を報告している²⁰⁾。CRISPR/Cas9 の唯一の欠点である off-target 効果（非特異的な配列も切断）を解消するために、改良型 Cas9 が開発された。この結果、野生型 Cas9 を用いた場合に比べて、140 倍以上もヒト細胞で切断特異性が高まることが判明した²¹⁾。植物のゲノム編集にも適用できるものと期待される。
- ・ 理化学研究所環境資源科学研究センターの新設：2000 年にミレニアムプロジェクトの一環

として創設された「理研・植物科学研究センター」に代わり、「理研・環境資源科学研究センター」が2013年に新設された。官学の研究機関と連携したオールジャパンの研究体制で、基礎植物科学の研究成果を地球温暖化への対応、高収量・低肥料栽培の実現、健康増進に資する高機能高付加価値作物の開発などの橋渡し研究へ展開するためのプラットフォームを目指す²²⁾。

- ・官民を上げての植物工場の設立とこれに連携した高機能付加価値作物の栽培：2009年に経済産業省は9つの研究機関を選び、植物工場を整備した。様々な異業種の民間企業もまた植物工場の建設、栽培、販売事業にこぞって乗り出している。2011年からは東日本大震災からの復興の切り札として被災3県の各地で植物工場の計画や稼働が進んでいる。しかし、現段階では作物の種類が限られていることやコスト高から大きな市場を形成するまでには至っていない。一方、次世代型の植物工場と植物遺伝子工学を融合し、付加価値の高い機能性作物の栽培が注目を集めている。官民一体となったプロジェクトで開発された遺伝子組換えイチゴはイヌの歯周病治療薬インターフェロンを生産するもので、動物用医薬品として世界で初めて認可された。この他、コレラ毒素に対するコメ型ワクチンをコメに蓄積した「ムコライス」が東大医科学研究所により、家禽用経口投与型インフルエンザワクチンを蓄積した遺伝子組換えジャガイモが産総研北海道センターと北里研究所生物際剤研究所により開発されている²³⁾。先行する海外では、カナダ Medicago 社はタバコ葉を用いてインフルエンザワクチンを生産している。イスラエルの Protalix Biotherapeutics 社はニンジンやタバコ由来の培養細胞を用いて遺伝疾患の一種であるゴーシェ病の治療薬を生産している²⁴⁾。2012年には米国での販売承認を得ており、すでに販売がなされている。
- ・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²⁵⁾、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月からスタートすることとなった。
- ・「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²⁶⁾、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。

（6）キーワード

高機能性作物、高付加価値作物、生活習慣病、健康機能性成分、植物工場、社会的受容（PA）、NBT、ゲノム編集、ワクチン、医薬品、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、新しい機能性表示制度

（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"> 植物生理学や植物細胞分子生物学の研究レベルは高く、前者の学会誌のインパクトファクターは植物分野でベスト10以内に位置し、後者は日本のGM作物情報発信の拠点になりつつある²⁷⁾。 イネリソースはDNAマーカー、ゲノム情報、cDNAや変異株を含めた遺伝資源、網羅的な遺伝子発現プロファイルまで世界で最も整備されている。 植物（特にシロイヌナズナとイネを用いた）の機能性成分の蓄積に関する代謝生理学（二次代謝産物）および代謝産物のメタボローム解析、及び重要形質遺伝子（光合成能、開花時期、環境ストレス耐性など）の機能解析のレベルは高く研究成果も多い。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 農水省のGM作物プロジェクトで、イネゲノムリソースを活用した分子育種学研究が推進され、様々な高機能高付加価値イネが開発されている。 クミアイ化学によりGM作物の社会的受容（PA）に重要な植物由来の選抜マーカーが開発されている。 大学・独法研究機関と民間企業が連携した「花きCRES-Tプロジェクト」は植物バイオ事業の商業化を目指したモデルケースとして期待されている。 ゲノム編集コンソーシアムが広島大学をプラットフォームとして設立され、国内で研究環境が整備されつつある。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 青いバラとカーネーションの開発に成功したサントリーは販売エリアを全国にまで拡大し、海外販売も開始している⁷⁾。 スギ花粉症治療米の医薬品としての治験に向けた実用化研究が国主導で開始されており、平成32年度までに実用化を目指す²⁸⁾。 物工場内で栽培された遺伝子組換えイチゴを原料に製造した動物用医薬品「インターフェロンα」の販売が2014年3月に始まった²⁹⁾。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 大学や公的な研究機関での基礎研究のレベルは非常に高く、アメリカ植物科学の学会誌、The Plant CellとPlant Physiologyは植物科学分野でトップ2を維持している²⁷⁾。 機能性作物の研究開発の基盤となるほぼすべての分野において世界をリードしていると言って過言ではない。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 現在研究開発を進めている機能性作物の種類、付加した形質の種類、研究開発の特許数、圃場栽培の実施件数など他国を大きく引き離している³⁰⁾。 NBTに関する特許は官民合わせて世界全体の2/3を占める³¹⁾。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> モンサント社を筆頭に多くのアグリ企業やバイオベンチャー企業が誕生し世界展開している。第一世代のGM作物の開発・商業化では圧倒的な強さを誇っている。 第二世代のGM作物の研究開発（高オレイン酸低リノレン酸ダイズ、オメガ3脂肪酸ダイズ、高リシントウモロコシなど）でもいくつかは商業栽培に進み、USDAの承認を受けて商業栽培に向けて進んでいる作物も多い³²⁾。 バイオ企業はベニバナ、ジャガイモ、パイナップルといった非穀物でも機能性を富化した作物の開発に着手し始めている。 モンサント社は2014年4月に干ばつに強いトウモロコシ（枯草菌のコールドショックタンパク質を組み込んだ）の世界初となる商業栽培を始めた³³⁾。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 米国同様に、欧州諸国（英国、ドイツ、フランス、スイス、スペイン、オランダ、ベルギーなど）は大学、試験研究機関ともに植物分野の基礎研究のレベルは高い。植物科学の雑誌The Plant Journalはアメリカの2雑誌に続いてランクされている²²⁾。

欧州	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 米国同様に、欧州諸国（英国、ドイツ、フランス、スイス、スペイン、オランダ、ベルギーなど）は大学、試験研究機関ともに植物分野の基礎研究のレベルは高い。植物科学の雑誌 <i>The Plant Journal</i> はアメリカの2雑誌に続いてランクされている²⁷⁾。 ・ GM 作物の作出に必須なアグロバクテリウムを基盤とした植物形質転換の分子機構の多くが欧州で解明された。 ・ 基礎研究の成果を活用し、世界に先駆けて遺伝子組換え植物の作出に成功するなど（ベルギー、1980年）、高い技術開発力をもつ。 ・ オランダでは官民上げて NBT を推進しており、米国以外で最も特許件数が多い³¹⁾。 ・ 植物基礎研究と圃場を用いての応用研究が一体となった VIB (Department of Plant Systems Biology, ベルギー) のように、研究と市場のギャップを橋渡しすることを実現する研究施設が充実している。 ・ EU 加盟国の中で GM 作物に関する政策や商業栽培の実施で足並みが揃わず、EU 圏内で研究開発を進める上での障害になっている。これに加えて、GM 作物の栽培承認作業は大きく停滞しており、穀物メジャーの中には EU での新規申請を断念するケースもでてくる⁶⁾。 ・ EU では例外的に GM 作物の商業化に積極的な英国で、GM コムギの試験栽培が進んでいる⁶⁾。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ BASF プラント・サイエンス（独）、バイエル・クロップ・サイエンス（独）、シンジェンタ（スイス）など世界展開するアグリバイテク企業が多数ある。米国同様に高い技術力を有する。EU は未だに日本同様に遺伝子組換え作物の認可、流通面で規制が厳しいため、欧州の主要なバイテク企業の多くは南米諸国、インド、中国などに進出して合弁事業を展開する事例が増えている。 ・ スペインは EU の中では遺伝子組換えトウモロコシの商業栽培が拡大しており、2013年には約14万ヘクタールに増加し、前年比で19%の増加した⁶⁾。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ 植物生理学、植物分子生物学、植物細胞学分野において、年々主要な国際誌への発表件数が増えている。海外で活躍していた研究者の帰国組が牽引役となっていると思われる。 ・ 2008年に創刊された <i>Molecular Plant</i> はわずか5年でインパクトファクターが植物科学でベスト4に位置づけられた²⁷⁾。 ・ 北京ゲノム研究所 (BGI) はイネの栽培品種と野生種合わせて50のゲノム塩基配列を詳細に調べ、650万の SNP（一塩基多型）を検出した。イネゲノム育種への貢献が期待できる³⁴⁾。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ 海外のバイオ企業と連携してイネ新品種（乾燥耐性、高収量など）の開発に取り組み、野外試験を進めている。 ・ ゲノム編集技術を用いてイネゲノムを改変した成果を2013年に相次いで発表した。
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2013年に国内栽培が認められているのはワタ、イネ、トウモロコシとパパイヤで、実際の商業栽培はワタとパパイヤのみである。 ・ オリジン・アグリテック社のように急成長するバイテク企業も出現しており、国内で商業栽培を拡大している。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 主要な国際誌への発表件数は確実に増えている。基礎研究のレベルは年々向上していると言ってよい。 ・ 日本や中国のように、国際的に高評価される植物科学の雑誌はまだでない。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ トウガラシの遺伝子を用いたゴールデンライス（ビタミンAを強化したコメ）³⁵⁾や心臓疾患の予防に効果のあるレスベラトロールを強化したコメ、ビタミンEを強化したダイズなど³⁶⁾、政府機関主導で研究開発が進む。機能性作物の開発を含めたバイオ産業分野への投資額が一層拡大することが予想されるために、研究開発の水準もさらに上向くと予想される。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 多くの機能性作物の開発が実験室レベルにとどまり、一般圃場での GM 作物栽培が禁止されていることもあり、商業栽培は行われはしない。 ・ 国の研究機関が広大な隔離圃場を有しており、試験圃場での栽培は日本よりも進んでいる。このため、形質の評価に圃場栽培を容易に利用できる。韓国での圃場栽培を日本の研究機関が利用する例も見られる。

研究開発領域
グリーンバイオ

(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

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 世界の遺伝子組換え作物の商業栽培に関する状況：2013年
<http://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/46/topfacts/default.asp>
- 2) Gilbert N, A hard look at GM crops. Nature, 497:24-26, 2013.
- 3) Kearney PM, et al. Global burden of hypertension: analysis of worldwide data. Lancet., 365:217-223, 2005.
- 4) 2014年版 特定保健用食品 栄養機能性食品 サプリメント市場総合分析調査
<http://www.seedplanning.co.jp/press/2014/2014060501.html>
- 5) 日経バイオ年鑑 2014「食品概論」日経 BP 社, 日経バイオテク ONLINE
- 6) 日経バイオ年鑑 2014「遺伝子組換え作物・食品を巡る世界各地の動き」日経 BP 社, 日経バイオテク ONLINE
- 7) 日経バイオ年鑑 2014「樹木/芝/花」日経 BP 社, 日経バイオテク ONLINE
- 8) 新農業展開ゲノムプロジェクト：物質生産・機能性作物の開発 2008-2012.
<http://cropgenome.project.affrc.go.jp/kenkyu/koubo/gmc.html>
- 9) 農研機構 HP、農研機構「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
- 10) 機能性をもつ農林水産物・食品開発プロジェクト
http://www.naro.affrc.go.jp/project/f_foodpro/index.html
- 11) 日経バイオ年鑑 2014「農畜産物を使ったタンパク質生産」日経 BP 社, 日経バイオテク ONLINE
- 12) 鎌田博：新しい育種技術「NBT」. 生物の科学 遺伝 NTS 社 pp. 107-111, 2014.
- 13) <http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000002tccm-att/2r9852000002tck7.pdf>
- 14) 日経バイオ年鑑 2014「伝子組換え作物・食品を巡る国内の最近の動き」日経 BP 社, 日経バイオテク ONLINE
- 15) 平成 20 年度・21 年度科学技術振興調整費「遺伝子組換え技術の国民理解に関する調査研究」
<http://www.life-bio.or.jp/jst/report2009.pdf>
- 16) 平成 23 年度国民医療費の状況
<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-iryohi/11/dl/kekka.pdf>
- 17) http://www.mhlw.go.jp/file.jsp?id=145680&name=2r985200000353cp_1.pdf
- 18) 佐久間哲史：RNA 誘導型ヌクレアーゼ：CRISPR/Cas システムによるゲノム編集. 細胞工学 秀潤社 pp. 515-517, 2013.

- 19) Li J-F Li, et al. Multiplex and homologous recombination-mediated genome editing in *Ara-bidopsis* and *Nicotiana benthamiana* using guide RNA and Cas9, *Nature Biotech.*, 31:688-691, 2013.
- 20) 三上雅史他: イネに適した CRISPR/Cas コンストラクトの選定. 第 32 回日本植物細胞分子生物学会 (盛岡) 大会・シンポジウム講演要旨集, p. 84, 2014.
- 21) Guilinger JP et al. Fusion of catalytically inactive Cas9 to FokI nuclease improves the specificity of genome modification. *Nature Biotech.*, 32:577-582, 2014.
- 22) 独立行政法人理化学研究所環境資源科学研究センター,
<http://www.s.affrc.go.jp/docs/ibunya/pdf/2-3-3.pdf>
- 23) 日経バイオ年鑑 2014 「植物工場」日経 BP 社, 日経バイオテク ONLINE
- 24) Kaiser J, Is the drought over for pharming? *Science*, 320:473-475, 2008.
- 25) http://www.caa.go.jp/foods/pdf/140730_2.pdf
- 26) <http://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/kihyo02/131205.html>
- 27) JCR-Impact-Factors-List-2013, <http://www.drmehrdad.com/PDF-files/27.pdf>
- 28) アグリ・ヘルス実用化研究促進プロジェクト
<http://www.maff.go.jp/j/aid/hozyo/2012/gijutsu/pdf/12.pdf>
- 29) DS ファーマアミナルヘルス, http://animal.ds-pharma.co.jp/pdf/20140324_i_007.pdf
- 30) Graff, DG et al. The contraction of agbiotech product quality innovation. *Nature Biotech.*, 27:702-704, 2009.
- 31) Lusser, M et al. Deployment of new biotechnologies in plant breeding. *Nature* 30:231-239, 2012.
- 32) Waltz, E, Food firms test fry Pioneer's trans fat-free soybean oil. *Nature Biotech.*, 28:769- 770, 2010.
- 33) Marshall, A, Drought-tolerant varieties begin global march. *Nature biotech.*, 32:308, 2014.
- 34) Xu, X et al. Resequencing 50 accessions of cultivated and wild rice yields markers for identifying agronomically important genes. *Nature Biotech.*, 30:105-111, 2012.
- 35) 唐辛子の遺伝子を用いて開発したゴールデンライス
<http://www.intlcss.org/files/congress-proceedings/2008-papers/cs4-s2/cs4-s2-o5-sun-hwa-ha.pdf>
- 36) USDA-FAS GRAI レポート-韓国
<http://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Agricultural%20Biotechnology%20Annual%20Seoul%20Korea%20-%20Republic%20of%207-17-2013.pdf>

3.6.4 食料安全保障概念の変遷と政策対応の課題

（1）研究開発領域名

食料安全保障概念の変遷と政策対応の課題

（2）研究開発領域の簡潔な説明

国内外における食料危機の発生が、どのように食料安全保障概念の変遷をもたらし、現実の政策対応にいかなる影響を与えてきたのか、理論的・実証的検証によって明らかにしながら、食料安全保障をめぐる議論に貢献するとともに、適切な食料安全保障政策の企画立案に資することを目的とする。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

「食料安全保障」は、研究開発領域の対象というよりも、食料需給変動や食料アクセス問題に対処するための現実的な政策対応の在り様に関するものである。そのような前提の下、まず国際的な（国外の）議論の変遷について俯瞰する。

食料の安定確保は、人間にとって生命維持の根源に関わる基礎的重要事項であり、各国における社会安定の基盤を成す要因として欠くことができない。近年でも、2008年の国際穀物相場の急騰と食料を求める民衆暴動、2011年の東日本大震災後の食料・飲料供給ルートの寸断、環太平洋パートナーシップ（TPP）協定参加による食料農業への悪影響の懸念など、食料安定確保が人々の生活に深く関わっていることの証左である。食料の確保を取り巻く諸リスクに対処する政策理念として用いられるのが、食料安全保障であり、Food Securityの日本語訳として理解されている。Food Securityが、明確な定義を伴う公的用語として国際的に登場したのは、わずか40年ほど前で、1970年代前半に発生した世界食料危機への対応を協議した1973年のFAO（国連食糧農業機関）総会において、事務局長提案により採択されたものである。その後、量的側面に加えて、需要側の購買力などアクセスを含めた定義づけの議論が行われ、1996年、世界食料サミットにて、「ローマ宣言」及び具体的な方策を示す「行動計画」が採択された。現在、国際的にFood Securityの定義として広く参照されているのは、行動計画の冒頭に掲げられた次の一文である。

Food security exists when all people, at all times, have physical and economic access to sufficient, safe and nutritious food to meet their dietary needs and food preferences for an active and healthy life.

この定義については、Food Securityに必要な要素として、量的充足(availability)、物理的・経済的入手可能性(access)、適切な利用(utilization)、安定性(stability)が考慮されている。この定義の特徴は、先進国・途上国、輸入国・輸出国、慢性的危機・一時的危機などの別を問わず、様々な事態に対応する普遍性の高いものとされている。

以上の国際的な食料安全保障を巡る動きの中、日本はやや特異なプロセスを経ている。日本で初めて食料安全保障が統一的に用いられるようになったのは、1980年の農政審議会答申「80年代農政の基本方向」であり、第2章「食料の安全保障－平素からの備え－」において、食料供給の安定のためには、国内生産の確保を図る一方、輸入に依存せざるを得ないものについては安定輸入の確保を図ることが重要であり、また不測の事態への備えとして、備蓄に加え、「平素からの農業生産の担い手の育成を中心として、優良農地、水資源の確保、農業技

術の向上を含め総合的な食料自給力の維持強化」を図ることの必要性が述べられている。現行の食料・農業・農村基本法（平成 11 年法律第 106 号）における食料政策の基本的考え方が、この時期におおむね形成された。さらに現在に至るまで、日本の食料安全保障を巡っては、農業・農政改革とも絡んで熱い政策議論が続いている。先進諸国の中にあつて、格段に低い食料自給率水準（カロリーベースで平成 24 年度は 39%）を問題視する多くの論者がいる一方で、低いとはいえ、この食料自給率は自由主義国家の下で国民が選択した自然な帰結であり、万が一に備えた潜在的な自給力が維持されていれば、それほど問題にする必要はない、むしろ農外からの参入者を増やすことなどにより競争力・自給力の向上を図る方が適切だとする論者もいる。高水準の農業保護を維持し、国民経済的・政治的コストを負担してもそれに見合う便益が確保できるかどうか、社会経済学的研究領域における冷静な検証が望まれる。

（4）科学技術的・政策的課題

- ・食料安全保障関連研究は、政治学、国際関係論、経済学など多様な学問研究領域が関わる。また、国際食料需給の中長期予測モデルの開発、農業の多面的機能（外部経済性）の理論的検討、世界貿易機関（WTO）などの国際貿易規律における輸出国・輸入国関連義務規定のあり方などの研究成果も重要である。反面、研究領域としての広域化・複雑化は避けられず、全体像を適切に整理把握しながら包括的・総合的アプローチをとることが重要である。
- ・今後の日本の TPP や WTO を巡る交渉プロセスにおいて、食料安全保障に対する配慮をいかに交渉結果に取り込むことができるかは極めて重要である。食料安全保障は、理念的に日本の交渉姿勢に標榜されてはいるものの、現実には、国内生産者保護への露骨な政治的配慮が色濃く、冷静な食料安全保障論が空論化してしまう恐れがある。
- ・国際交渉に加え、日本国内において農業分野の規制制度改革の議論が活発になる中、食料安全保障を巡る議論は、様々な立場の政治家、農業関係者、研究者を巻き込んだ、政治的・思想的な議論に陥りやすい傾向があることから、冷静な科学的議論を進めるうえで、当該研究開発領域の役割は極めて重要である。
- ・日本の農産物の輸出産業化する動きがある中で、global GAP (Good Agricultural Practices) 認証取得による、農産物生産の安全管理が重要である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・1996 年世界食料サミットは、その「ローマ宣言」で 2015 年までの飢餓人口の半減を表明し、2000 年の国連総会は、「国連ミレニアム宣言」を採択して、2015 年までの飢餓・貧困人口の半減をミレニアム開発目標に盛り込んだ。その後 2002 年、2009 年にも食料サミットが開催され、同目標の達成について確認した。
- ・2013 年 10 月、FAO が国際農業開発基金（IFAD）と国連世界食糧計画（国連 WFP）と共同で毎年発表している「世界の食料不安の現状（SOFI）」報告書によると、2011～13 年の間、世界で約 8 億 4200 万人、およそ 8 人に 1 人が、健康で活発な生活を送るために十分な食料が得られず慢性的な飢餓に苦しんでいた。その大半は開発途上国に住んでいる一方、先進国でも 1,570 万人が栄養不足である。世界食料サミットで確立された目標を達成するには、2015 年までに開発途上国の飢餓人口数を 4.98 億人削減する必要があるが、現

在の削減率から見ると手の届く範囲にはない。

- ・日本では、農林水産大臣の諮問機関である食料・農業・農村政策審議会において、政府が中長期的に取り組むべき方針を定めた「食料・農業・農村基本計画」の変更に関連し、食料自給率などの目標設定の考え方を含めた検討が進められている。
- ・日本農業経済学会では、2012年度大会において、「我が国が直面する食料のリスクと日本農業の課題」と題してシンポジウムを開催した。『農業経済研究』（84(2)80~94）は、このシンポジウムの特集号として刊行され、現時点で最もわかりやすいかたちで、国内外の食料安全保障論についての動向を整理したものとして評価できる。

（6）キーワード

食料安全保障、食料自給率、食料自給力、食料需給予測、食料備蓄、国連ミレニアム宣言、栄養不足人口、世界食料サミット

（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	研究水準	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 1990年代には、ガット UR（ウルグアイ・ラウンド）交渉の妥結、食料の安定供給を明文化した新しい基本法制定などがあって、食料安全保障に関する数多くの論文や著作が発表されたが、2000年代以降、農政改革や FTA（自由貿易協定）交渉関連の議論の中で頻りに言及されることはあっても、学術研究テーマとしての発表数は減少してきた。
	政策対応	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 新基本法の制定以降、農林水産省に食料安全保障課が設置され、食料安全保障問題に省をあげて対応する体制が整備されるとともに、毎年度、海外食料需給レポートが公表されるなど活発な動きがみられるようになった。 （輸入国の立場からみた）世界食料需給の中長期見通しに関する研究が、農林水産省農林水産政策研究所を中心に進められ、2009年以降、毎年結果が公表されている。
	理解促進・社会との対話	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 内閣府が、数年毎に食料供給に関する国民の意識調査を実施し、国民の多く（7~8割）が、食料自給率の低さに不安をもっていることが明らかになっている。
米国	研究水準	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 農産物の大輸出国であることから、食料安全保障そのものに関する研究成果はそれほど多くない。ただし、世界食料需給予測については、各機関が活発に取り組んでおり、農務省（USDA）、あるいはミズーリ大学などを中心とした食料農業政策研究所（FAPRI）がそれぞれの結果を定期的に公表している他、世界銀行及び国際食料政策研究所（いずれもワシントン D.C.所在）も不定期に結果を公表している。
	政策対応	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 米国における食料安全保障は、軍事も含めた総合的な安全保障論の一部を構成し、特定国を対象にした「農産物輸出禁止措置」にみられるように、戦略物資としての食料が度々利用されることが特徴である。 一方、農務省予算の 7~8割は、貧困者層へのフードスタンプ（食料引換券）プログラムが占めるといわれており、米国の食料安全保障は、こうした国内貧困者層の生活保護の側面から理解されているともいえる。
	理解促進・社会との対話	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 現在、上記政策対応による食料の現物支給対象人口は、全人口の 15%を超えともいわれており、この制度が伝統的な生活保護政策として米国社会に根付いていることを示している。
英国	研究水準	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 内閣府が中心となって食料安全保障関連の政策研究に取り組み、「食料の重要性：21世紀の戦略に向けて」（UK Cabinet Office 2008）及び英国の新たな国家食料戦略である「Food 2030」（UK HM Government 2010）が発表された。 並行して環境・食料・農村省（DEFRA）でも多様な指標による食料安全保障の定量分析・評価を行い、2009年に公表した。
	政策対応	○	→	<ul style="list-style-type: none"> EUの集団的な食料安全保障体制（共通農業政策（CAP））に組み込まれることを選択する一方で、二度の大戦や世界食料価格高騰の経験などから、食料自給志向的な政策と自由主義的な政策との間で揺れ動いてきた。
	理解促進・社会との対話	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 日本に比べれば穀物自給率が比較的高いことや EU の集団的な食料安全保障体制下にあることもあって、食料安全保障に関する国民理解が、それほど進んでいるとは考えられない。
FAO	研究水準	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> これまで、食料安全保障問題に関する研究成果を多数刊行してきており、その質・量は、他機関の追随を許さないが、途上国に偏重し過ぎているのではないかと、との批判が先進国を中心に高まっている。
	政策対応	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 2008年の国際穀物相場高騰、近年のバイオ燃料への穀物利用増加による価格上昇、国連ミレニアム目標の達成困難な情勢、サブサハラ諸国を中心とした途上国の貧困など、依然として直面する課題が多い。 OECD と共同で、世界の中期的な食料需給予測のためのモデルを開発し、2005年以降その結果を毎年公表している。また 2030年及び 2050年の長期見通しについて、FAO 独自に結果を得て公表した。
	理解促進・社会との対話	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 食料サミットについては、1996年の第1回会合以来、2002年、2009年に開催し、1974年設立の世界食料安全保障委員会（CFS）の活動も継続中である。上述のように、途上国（特にアフリカ諸国）に偏重し過ぎた活動が先進国から批判される傾向がある。

研究開発領域
グリーンバイオ

OECD	研究水準	◎	→	・ 食料農業問題に関しては、先進諸国の農政改革に関する研究成果を数多く公表してきたが、近年、食料安全保障に関する研究にも取り組んでいる。2013年に“Global Food - Security Challenges for the Food and Agricultural System”を刊行した。
	政策対応	△	↘	・ 食料安全保障を含む食料農業問題の議論を行い、必要に応じてその成果を刊行することによって、各国の政策決定者に影響を与える。 ・ 世界食料需給に関し、2005年以前は、その独自開発モデル AGLINKによる中期予測の結果を公表していたが、上述したように、現在 FAOとの共同作業に発展している。
	理解促進・社会との対話	△	→	・ 加盟国が欧米先進国（農産物輸出国）主体のため、FAOのような途上国、あるいは日本のような農産物の純輸入国に対する理解は、全体として低い。不必要な政府介入を否定し、貿易自由化の促進が、世界の食料安全保障に好影響を与えるとの自由主義的立場を尊重する姿勢。

(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

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料（全体参考資料）

- ・ 株田文博（2012）「食料の量的リスクと課題」『農業経済研究』84(2)80-94
- ・ 坪田邦夫（2007）「フードセキュリティとは—国際的潮流」『農業と経済』（昭和堂）73(8)36-54
- ・ 是永東彦他（2001）『国際食料需給と食料安全保障』（農林統計協会）（個別参考資料）
- ・ FAO（2006）Food Security: Policy Brief, Issue 2.
- ・ Sen. A. (1983) *Poverty and Famines: An Essay on Entitlement and Deprivation*. Oxford University Press
- ・ World Bank (1986) *Poverty and Hunger: Issues and Options for Food Security in Developing Countries*.
- ・ World Food Summit (1996) *World Food Summit Plan of Action*.
- ・ 速水祐次郎・神門義久(2002)『農業経済論新版』（岩波書店）
- ・ 田代洋一（2012）『農業・食料問題入門』（大月書店）
- ・ 荘開津典生・生源寺眞一(1995)『こころ豊かなれ日本農業新論』（家の光協会）
- ・ 農林水産省(2011)『不足時の食料安全保障マニュアル』
- ・ 農林水産省『食料需給レポート』（2007～）
- ・ 農林水産省『食料・農業・農村の動向』（毎年度）
- ・ 農林水産省農林水産政策研究所『世界の食料需給の中長期的な見通しに関する研究報告書』（平成20年度～毎年度）
- ・ 農林水産省 GLOBAL G.A.P.の概要
(http://www.maff.go.jp/j/seisan/gizyutu/gap/global_gap.html)
- ・ GLOBAL G.A.P.協議会 (<http://www.japan-globalgap.com/>)

3.6.5 バイオリファイナリー

(1) 研究開発領域名

バイオリファイナリー (バイオ製品生産システム)

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

バイオマスの分解によって得られた糖を微生物などがもつ発酵技術を用いて物質変換を行い、化学品、バイオエタノールやバイオディーゼルを体系的に生産するシステム。オイルリファイナリー(石油系製品生産システム)に代わる次世代の化学産業として注目されている。特にバイオエタノール、バイオディーゼルなど燃料となる化学製品に関してはバイオ燃料とよばれる。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

現在までの経済発展、技術社会の確立は化石燃料の利用に依存し続けている。この非再生エネルギーの枯渇が最大の懸念となっているにも関わらず、未だに世界エネルギー需要は急速に増加し続けている。また人口増加を支えてきた食料生産増加も、肥料生産のようにエネルギー依存状態である。こうした化石燃料の燃焼により温室効果ガスの排出が行われ、気候変動・地球温暖化の深刻なリスクに直面している。こうした地球規模の問題に対して 2012年に国際科学会議を中心として”Future Earth”構想が提案され、この中にはエネルギー問題にもふれられている。省エネルギーと再生可能エネルギー源の開発による化石燃料消費抑制は地球規模での喫緊の課題である¹⁾。こうした中、米国ではバイオリファイナリーを一大国家戦略として位置づけており、世界的にも 2030年にはその市場規模が 30兆円と予測されている²⁾。これまではトウモロコシやサトウキビからえられる砂糖やデンプンを原料としてバイオエタノールが生産されている。特にブラジルではフレックス燃料車の普及、25%以上のバイオエタノール混合(E25)が義務付けられていることから、サトウキビからのエタノール生産が国家プロジェクトとして振興されている。

ただ、こうした食料をもとにしたバイオエタノール生産により穀物の価格高騰が引き起こされた。そこで近年では、食料生産との競合を避けるため、木材や草本などの非可食セルロースを原料とした生産技術開発が行われている。第二世代バイオ燃料とよばれるセルロース系バイオ燃料はコーンエタノールよりも温室効果ガス削減効果(ガソリン比で最大 86%削減)が大きい。セルロース系バイオエタノール生産では細胞壁の強固な構造を弱めるための前処理、また糖化工程における糖化酵素の必要量とコスト高がボトルネックとなり経済性が低い状況となっている。また発酵過程においても通常酵母に代わり *Zymomonas mobilis* をデュポンでは用いている³⁾。

エタノール続くバイオ燃料として注目されているのがブタノールである。ブタノールはエネルギー密度が高く、既存設備が使用可能である。またイソブタノールの方が *n*-ブタノールよりもオクタン価が高いため、優れたバイオ燃料となる可能性がある。また、ブタノールはオリゴマー化や水素化により容易にジェット燃料へ転換可能であることも注目される要因である。ブリティッシュ・ペトロリアム (BP) 社とデュポン社が合同設立した Butamax 社はエタノールからイソブタノールを生産しているが⁴⁾、バイオマス原料から直接バイオブタノールを発酵する方法として、ブタノール・アセトン(ABE)生産菌による ABE 発酵法の改

良などが研究されている⁵⁾。地球環境産業技術研究機構（RITE）ではブタノール生合成系遺伝子を導入したコリネ型細菌を用いた方法により、非可食バイオマス由来の混合糖（C5+C6糖類）を原料とした高効率バイオブタノール生産技術開発を行っている⁶⁾。

また食料生産と競合しないという点で、藻類を用いたバイオ燃料生産が注目されている。藻類の単位面積あたりの油脂生産効率は大豆の数百倍にあたる⁷⁾。米国では DOE 主導のもと国家藻類バイオ燃料ロードマップを発行⁸⁾、また世界各国も藻類研究開発を積極的に進めており、第三世代のバイオ燃料とよばれている。国内においても戦略特区として耕作放棄地を用いて屋外での大量培養実験を行う藻類バイオマスエネルギー実用化プロジェクトや東北復興次世代エネルギー研究開発プロジェクトが進行している。この中では独立栄養性 *Botryococcus braunii* 及び増殖速度が速い従属栄養性 *Aurantiochytrium* が主に用いられている。オイル産出藻類の多くがトリアシルグリセロールを蓄積するが、上記2種はボトリオコッセン及びスクアレン（互いに異性体）というトリテルペノイド炭化水素を多く含む。これらは高いエネルギー密度をもち、石油の主成分で、従来のクラッキング法で軽油、ジェット燃料へ 60-70%の効率で変換可能、化成品原料としても利用可能である⁹⁾。

また汚泥や食品廃棄物を原料としてメタン菌によりメタンを発酵させるバイオガスの利用があげられる。また発酵廃液には有機物や窒素、リンを含むので液体肥料としての利用が始まっている。

（4）科学技術的・政策的課題

- ・近年、石油価格が高騰したとはいえ、バイオ燃料のコスト高は問題となっており、米国では補助金によるバイオエタノール生産が行われている。また、セルロース資源の革新的な糖化方法がないことも最大のネックとなっている。セルロースからのエタノール、ブタノール生産が実用化レベルまで達することができれば、発酵原料として供給量が飛躍的に上昇する。古くからわが国における発酵技術水準は高いが、米国、ブラジルなどのように国家プロジェクトとして産官学連携で、トップダウン型推進体制を構築する必要がある。
- ・制度的な問題などとしてガソリンへの混入割合を国家主導で決定することが重要である。米国では各州政府がバイオエタノール最低使用基準を設定している。こうした取り決めはバイオエタノール需給に大きな影響を与えている。米国におけるバイオエタノールの需要量が年率 5%増加することが予測されている。ただし、バイオ燃料か食糧生産かの議論があることから、非可食部からのバイオエタノール生産が重要課題とされている。
- ・世界最大のバイオエタノール生産量を誇る米国ではブレンドウォールとよばれる E10 の壁に直面している。これはガソリンへのバイオエタノールのブレンド比率を 10%(E10)として対応してきたが、バイオエタノール生産の急成長から、再生可能燃料の義務的利用目標 (RFS)を上回る生産量に達している。その後も生産量は伸びているがブレンド比率を上げない限り、米国内での消費ができない状況になっている。E15 の導入も検討されており、2007 年以降の車と軽トラックに限定して使用されるが、安全面の懸念から E10 以上の混合燃料を給油する設備の普及がとどまっている。フレックス車の普及も限定的であり、現状、欧州、ブラジルへの輸出により消費していることから、バイオ燃料生産に関する研究開発が後退するとの懸念もある。
- ・2012 年からわが国でも導入された電力固定価格買取制度 (FIT) は、再生可能エネルギー

の普及拡大の目的で、世界各国でも再生可能エネルギーの助成政策として用いられている。わが国でもこの流れを受け、木質チップや畜産糞尿や汚泥からのバイオマス発電事業が開始されている¹⁰⁾。ただ、電力会社 5 社が 2014 年 10 月時点で再生可能エネルギーの新規契約を中断したことから、太陽光発電も含め再生可能エネルギー普及の後退が危ぶまれている。欧州のように再生可能エネルギー優先して、火力、原子力発電を抑制するといった推進姿勢を明確に示す必要がある。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・2014 年 9 月、アイオワ州にある POET-DSM Advanced Biofuels, LLC (Project LIBERTY) 所有の工場において、セルロース系バイオエタノール生産プラントで商業生産を開始した¹¹⁾。これには米国エネルギー省が 1 億ドルのプラント建設費用、農務省による農業廃棄物の配送支援、アイオワ州政府とロジステックによる 2 千万ドルが補助金として支援された。最大生産量は 9.5 万 kL/年で、原料は農業廃棄物であり、米国環境保護庁が推進している再生可能燃料基準に現実感を与えている。こうした流れを受け、デュポンなどもセルロース系バイオエタノール生産の開始が予定されている。
- ・RITE 発のベンチャー企業 Green Earth Institute ではかずに Green Earth 研究所を設立し、RITE バイオプロセス法（コリネ型細菌を用いた増殖非依存型発酵技術）による化学品生産の実証実験を行っている¹²⁾。
- ・バイオ燃料のみならず、バイオ化学品生産のため人工代謝経路設計プログラム(M-path)が開発されている¹³⁾。ここでは天然由来の酵素での代謝経路構築のみならず、人工酵素による新たな経路の提示も行われる。こうしたプログラムおよび人工酵素を創出することにより、高効率なバイオ化学品の生産体系を構築しつつある。人工酵素創出など、合成生物学的手法を用いた物質生産は今後重要となると考えられる。米国 Genomatica 社では 1,4-ブタンジオールの生産にあたり、最終段階に必要な酵素を大腸菌に導入することで、その生産に成功している¹⁴⁾。また、米国 DARPA が 1.1 億ドルを投資して、合成生物学的アプローチなどを用いて 1000 の新規な有用化合物をつくる計画（1000 分子プロジェクト）を発表している¹⁵⁾。これには既知分子の高効率作製、石油由来の方法では作製できない化合物作製、新規分子開発が含まれ、化学合成原料として利用可能な化合物を合成しようとしている。

（6）キーワード

バイオ燃料、バイオエタノール、イソブタノール、セルロース、バイオガス、ボトリオコクセン、スクアレン、人工酵素、人工代謝経路

（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"> NC-CARP や CREST などの国家の資金導入が厚くなり、有用微細藻類の発見、ソルガムの品種改良など、基礎研究は確実に進展している。特に、スーパーソルガムは年間 29.8 トン/ha の全糖収量が記録され、エタノール収量(年間 17.7kL/ha、サトウキビの約 2 倍の能力)¹⁶⁾への貢献のみならず、製糖業界への貢献も考えられる。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> RITE 及び Green Earth Institute によるバイオブタノール、化学品生産の開発が進められている⁶⁾。 藻類バイオ燃料の実証化に向け、野外開放系を用いた検証が始まっている⁹⁾。デンソーにより軽油産生藻類 <i>Pseudochoricystis</i> の野外実験が行われている¹⁷⁾。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 農水省は、2007 年から北海道で二か所（原料過剰でん菜及びコメ）、新潟で一か所（原料コメ）で行われていた国産バイオエタノール製造・販売事業を 2014 年度で支援の打ち切りを発表した¹⁸⁾。 農業残渣、家畜糞尿、食品廃棄物、汚泥などが利用可能なバイオガス発電事業が地域エネルギー事業として展開されつつある。ただし、電力の接続制限がされている状態では事業継続が難しくなり、バイオマス事業が後退する可能性もある。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 米国では DOE や USDA の強力な支援にもとづく複数のプログラム、および BP 社が出資する EBI などに、多くの研究者が参入し、研究層は厚く、基礎研究レベルは非常に高い。特にセルロース系エタノールや藻類バイオ燃料など第二、第三世代バイオ燃料の研究が行われている。 国防省 DARPA により、1000 分子プロジェクトが遂行されており、人工酵素創出なども含め、研究開発が進んでいる。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ベンチャー企業などを中心に実用化への技術開発が進められている。 セルロース系エタノールの応用研究プロジェクトが進められているが、技術面・財政面の課題から計画の遅延が見受けられる。セルロース糖化コストの低減技術が開発されれば実用化へと加速すると考えられる。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> バイオエタノール生産量は世界 1 位で産業界の積極参入が行われている。 Project LIBERTY においてセルロース系バイオエタノール生産の商業化が始まり、第二世代エタノール生産事業が緩やかではあるが進行している。 Abengoa Bioenergy がカンザス州において世界最大級のセルロース系バイオエタノール生産設備がオープン。年間 1 億 L の生産を目指す。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> バイオ燃料などエネルギー問題を環境問題や農業問題からとらえており、環境への影響が大きい第一世代バイオ燃料を制限し、第二世代バイオ燃料にシフトしている。 光合成研究など、植物生理学や遺伝学の基礎研究について欧州諸国で先導している。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ディーゼル車が普及している EU ではバイオディーゼル燃料の開発が進んでいる。 新世代バイオ燃料の開発にインセンティブが与えられて、開発が盛んになっている。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 欧州においても第二世代バイオリファイナリーの商業化デモプラントの建設が推進されている。 イタリアの Beta Renewables 社が開発した PROESA プロセスとよばれる非可食バイオマスの糖化、エタノール生産技術の世界展開を行っている。すでに米国、中国、ブラジルへの展開が行われている。

中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> グリーンバイオ全体に対して論文数が急激に増加している。 界第三位のバイオエタノール生産量を誇ることから、バイオ燃料の生産に関する研究が急速な勢いで進んでいる。 トウモロコシ、小麦からの第一世代バイオエタノールの生産は食品安全保障のため制限されたこととともない、キャッサバ、サツマイモ、スイートソルガム、セルロース系原料などに重点をおいた研究が進められている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> セルロース系バイオエタノール生産に関しては技術的な問題に直面しており、商品化には至っていない。 ウキクサを用いたバイオ燃料製造の可能性が示唆されている。食肉製造の際に豚などからでた油など食用油の原料にできない油を用いてボーイングと中国企業がジェット燃料の開発を行っている。このように食料と競合しない原料からのバイオ燃料の生産システム開発も進んでいる。
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 外国企業と中国官民の合弁が進んでおり、バイオエタノール生産に拍車をかけている。上述の PROESA プロセスを用いて Project Fuyang として安徽省にバイオリファイナリーの建設が進んでいる。 バイオディーゼルの原料として廃油を使用しているが、木材油としてヤトロファなどの大規模栽培が可能となっている。
韓国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 先進的バイオマス研究開発基盤の形成を目指した施策がはじまり、バイオ燃料や素材転換に関する特許数が近年大幅に増大している。
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> 政府主導でのバイオ燃料、バイオ素材関連に力を入れている。サムスン、LGなど大手メーカーによる研究開発が進んでいる。また、海藻類バイオマスを利用したバイオ燃料開発も進められている。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> バイオ燃料としてバイオディーゼルが使用されているが、バイオマス資源に恵まれないため、原料はダイズ、廃油、輸入パーム油がメインである。混合比率の上昇に伴い、バイオディーゼルの消費量が増加傾向にあることから、産業の発展が望まれている。

(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

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) <http://www.cger.nies.go.jp/cgernews/201310/275002.html>
- 2) <http://www.datamonitor.com/>
- 3) Winters, P. (2011) Current Status of Cellulosic Biofuel Commercialization
- 4) <http://www.butamax.com/>
- 5) 小林元太 (2011) 「古くて新しいアセトン・ブタノール発酵」 生物工学、89 巻、319-322
- 6) 「研究活動概説・バイオ研究グループ・バイオリファイナリーの世界動向と実用化への取り組み」 RITE Today 2014
- 7) Chisti (2007) Biodiesel from microalgae. Biotechnol. Adv. 25, 294-306.
- 8) http://www1.eere.energy.gov/bioenergy/pdfs/algal_biofuels_roadmap.pdf
- 9) http://www.tsukuba-sogotokku.jp/project/project3_measure/
- 10) http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/renewable/biomass/index.html
- 11) <http://poet-dsm.com/liberty>

- 12) <http://www.gei.co.jp/>
- 13) Araki et al. (2014) M-path: A compass for navigating potential metabolic pathways. *Bioinformatics*, doi: 10.1093/bioinformatics/btu750
- 14) Yim et al. (2011) Metabolic engineering of *Escherichia coli* for direct production of 1,4-butanediol. *Nat. Chem.* 7, 445-452.
- 15) http://www.darpa.mil/Our_Work/BTO/Programs/Living_Foundries.aspx
- 16) <http://sol-hd.jp/>
- 17) <https://www.denso.co.jp/ja/news/event/tokyomotorshow/2011/booth/pdf/biofuel.pdf>
- 18) バイオ燃料生産拠点確立事業検証委員会報告（平成 26 年 5 月 9 日）

3.6.6 化成品原料／バイオ化学品（再生可能化学品ならびにバイオプロセス製造品）

（1）研究開発領域名

化成品原料／バイオ化学品（再生可能化学品ならびにバイオプロセス製造品）

（2）研究開発領域の簡潔な説明

化学的あるいは生物学的手法によりバイオマス原料から製造される化学品。ならびに、微生物や酵素などの生体触媒を活用した低環境負荷プロセスにより製造される化学品。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

バイオ化学品は、①化学的あるいは生物学的手法によりバイオマス原料から製造される化学品（再生可能化学品）、ならびに、②微生物や酵素などの生体触媒を活用した低環境負荷プロセスにより製造される化学品（バイオプロセス製造品）、の総称である。①は再生可能資源への移行に、②はエネルギー使用効率の改善に貢献する。

バイオ化学品は、化石資源への原料偏重・エネルギー依存を低減することで二酸化炭素排出削減への貢献が期待される。また、使用時の燃焼により直接二酸化炭素を排出することになるバイオ燃料とは異なり、二酸化炭素の固定期間を長くできるメリットがある。したがって、二酸化炭素などの温室効果ガス削減（低炭素化）を目指す世界的動向から考えると、バイオ化学品の開発や事業化への取り組みは、持続可能な循環型社会の構築に重要となる。

再生可能化学品に関しては、2012年頃までは、発酵生産可能なエタノール、プロパノール、ブタノールから石油リファイナリーの基幹物質であるエチレン、プロピレン、ブチレンを作り、既存石油化学プロセスのモノマー原料として利用する取り組みが活発であった。また、これらのアルコール類に加え、米国エネルギー省（DOE）が戦略的基幹化学品とした炭素数3から6の様々な化学品に誘導可能な12化合物（コハク酸、アスパラギン酸、グルタミン酸、イタコン酸、グルカル酸、レブリン酸、2,5-フランジカルボン酸、3-ヒドロキシプロピオン酸、3-ヒドロキシブチロラクトン、グリセロール、ソルビトール、キシリトール）を対象とした研究開発もさかんに行われてきた。すでに発酵生産技術があったグルタミン酸、アスパラギン酸、コハク酸、イタコン酸に加え、アクリル酸原料となる3-ヒドロキシプロピオン酸、ならびに、キシリトールの発酵生産法が新たに開発されている。これらのバイオ化学品については、本来微生物が生産可能な化合物に関して、その生産性をいかに向上させるかが研究開発課題の中心となっていた。一方、2,5-フランジカルボン酸、レブリン酸、ソルビトールについてはグルコースからの化学的誘導法が検討されてきた。このように、政策的にも企業戦略的にも積極的な取り組みが行われているものの、実際に商品化・販売に至っている再生可能化学品の例は、デュボン社が発酵生産する1,3-プロパンジオールなど、ごく一部にとどまっている。

2012年以降は、代謝工学、大規模遺伝子組換え技術、バイオインフォマティクス、システム生物学、合成生物学の進展にともない、自然界に存在している微生物には本来合成できない、あるいは、合成が困難な化合物の生産に研究が移行してきている。この際ターゲットとなっている化合物は、化石資源由来のポリマーを代替しうるモノマー原料が主となっている。具体的には、1,4-ブタンジオールなどのジオール類、ペンタン-1,5-ジアミンなどのジアミン類、イソブテン、ファルネセンなどが挙げられる。これらについては、海外のベンチャ

一企業を中心に開発が行われ、我が国の化学企業が合成原料として生産物を導入する構図となってきた。

今後の展開においては、化石資源由来ポリマーを代替するモノマー原料などを中心に、人工的な生合成経路の導入など合成生物学的手法による育種開発が活発化すると想定されている。あわせて、これらのバイオ化学品が、還元度の高い化合物であることから、酸化度の高い糖質などからの発酵生産時に必要となる還元力、エネルギーをいかに効率よく発酵原料から獲得し、結果として、原料に対する発酵収率を向上できるかどうか課題とされている。具体的には、メタボローム解析と代謝工学を駆使した発酵微生物細胞内での酸化還元バランス、エネルギーバランスの制御技術、さらには、光合成による還元力・エネルギー供給や電気培養による還元力バランス制御など物理エネルギー変換系・制御系の導入も模索されている。また、発酵原料糖類から直接的に還元度の高い化合物を誘導する観点、ならびに、これまで生産が困難であった炭素数6以上の化合物の生産に対応する観点から、油脂の発酵生産技術にも注目が集まっており、藻類や油糧微生物（カビ・酵母など）を対象とした研究開発が活発化している。また、ポリマーを直接発酵生産するポリヒドロキシアルカン酸類の生産に関しても、長きにわたる生産プロセスの効率化を経て、実用化を目指した用途開発の段階へと移行してきている。一方、芳香族系のバイオ化学品開発に関しては、芳香族アミノ酸生合成経路の改変により得られる一部の化合物に研究対象がとどまっていたが、リグノセルロース由来のリグニンを出発原料とする取り組みも行われてきている。化学的手法や微生物を用いるリグニン変換反応の開発により、多様な分子構造を有するリグニンから特定の構造の芳香族会合物を選択的に誘導する技術の開発が盛んになっていくことが予想される。

目的化学品への変換プロセスのみを化学プロセスからバイオプロセス（微生物変換・酵素変換プロセス）へと転換することにより製造されるバイオプロセス製品においても、環境問題などに多大な貢献を成しうることが示されており、研究開発を行うことに重要な意義があることは間違いない。実際、欧州ではこの分野をバイオ化学品研究の重要分野ととらえており、主に、酵素触媒の高機能化を中心とした取り組みが盛んである。研究のトレンドとしては、含窒素化合物の立体選択的合成に有効な酵素群（トランスアミナーゼ、アミノオキシダーゼ）、不活性な炭素原子に直接酸素を導入しうる酸化酵素群（P450モノオキシゲナーゼ）に関する研究が挙げられる。含窒素化合物誘導酵素に関する最近の取り組みとしては、アミノ酸類からシアンを用いずにニトリル類を誘導しうる酵素群（ニトリル、アルドキシム代謝系酵素群）の開発も挙げられる。また、酸化酵素群に関しては、P450モノオキシゲナーゼより安定であることが想定されるジオキシゲナーゼ群に関する研究が活発化してきている。酵素の起源も微生物のみならず、植物・動物（昆虫）などへと多様化しており、また、結晶構造解析技術、進化工学の進展にともない人工的に機能改変した酵素の開発も活発化している。これまでにない基質特異性を示す酵素の開発は、バイオプロセスに活用される酵素触媒としての利用のみならず、人工代謝経路の構築にも有効であり、合成生物学的手法による発酵生産株の育種開発にも貢献している。さらには、微生物変換・酵素変換プロセスを発酵生産可能なバイオ化学品の変換技術としてとられ、バイオマス原料からの一気通貫型の化学品生産技術を開発する取り組みも見られる。これに関しては、油脂変換酵素の開発が活発化してきている。

（４）科学技術的・政策的課題

我が国や欧米諸国においても、政策的には 2050 年頃を目途にある程度（化石資源の 35～75%を再生可能資源へ転換）のバイオマスへの原料転換による低炭素化の実現を掲げているが、今後数年～10 数年間は化石資源由来の化成品市場と比較してバイオ化学品の市場はそのごく一部を担うにとどまるとの予想もあり、その上方修正には、バイオ化学品生産の技術革新による低コスト化もさることながら、政策的バックアップや社会におけるバイオ化学品の受け入れ体制の整備が重要である。

科学技術的課題として以下の項目が挙げられる。

- ・ バイオ化学品を多様化するための代謝経路ならびに高機能酵素の設計・構築技術の開発
- ・ 還元力・エネルギーバランスの制御技術の開発
- ・ 安定的・持続的生産を可能とする生産株への頑強性（ロバストネス）の付与
- ・ 油脂などの還元度の高い化合物群の発酵生産技術の開発
- ・ 高分子ポリマーの直接発酵生産技術の開発
- ・ 再生可能化学品の原料となる発酵原料糖供給の低コスト化
- ・ リグニンの高度利用技術の開発

以下に主な項目を解説する。

- 1) バイオ化学品を多様化するための代謝経路ならびに高機能酵素の設計・構築技術：代謝経路を多様化するための情報資源として、二次代謝を中心とした代謝系遺伝子の予測・解析技術の開発が必要となる。また、代謝経路を構成する様々な機能遺伝子を集積し効率的に生産するための大規模遺伝子改変技術の構築も必要となろう。さらに、人工的に設計した代謝経路に導入される新規な機能を有する酵素の創生・設計技術の開発が求められる。また、化学合成的手法とのハイブリット化技術も生産物の多様化には必要となろう。
- 2) 還元力・エネルギーバランスの制御技術：生産プロセスの効率化や還元度の高い化合物の生産に必要な NAD(P)H などの還元力ならびに ATP などの生物エネルギーを効率的に供給する代謝経路、酵素の設計と構築。これらの代謝経路、酵素をバイオ化学品生産に直接的に機能する代謝経路と協調させて発現制御するための、多数の遺伝子を精密かつ柔軟に制御する技術の開発。
- 3) 安定的・持続的生産を可能とする生産株への頑強性（ロバストネス）の付与：生産物に対する耐性を付与することにより、高濃度の生産物を蓄積させうる技術の開発。温度、pH などの環境に対する耐性を付与する技術の開発。
- 4) 再生可能化学品の原料となる発酵原料糖供給の低コスト化：バイオマス原料からの発酵原料糖生産におけるコストの大部分は糖化酵素のコストにある。酵素力価の向上による使用酵素量の削減、ならびに、酵素生産の効率化によるコスト削減が求められる。

これらの課題に加えて、バイオマス原料の安定確保と低コスト化に向けた取り組みも必要であろう。自国でのバイオマスの大量確保は困難ではあるものの、植物の生育促進技術（光合成機能の強化、根圏微生物機能の解析と利用）の開発や新資源としての独立栄養微生物（CO₂固定微生物、微細藻類、海洋性大型藻類など）の開発・利用などがこれからの技術課題としてあげられる。実際の生産場所は、国内に限られるわけではなく、開発技術は海外転移され活用されうる。

政策的課題としては、海外のバイオエタノール導入に見られるような行政の経済的サポー

トや、バイオ化学品導入を促進するための制度改革が重要である。新しいバイオ化学品も一旦社会に受諾され生産量が増大してくると、スケールメリットに起因してある程度の生産コストの低下が期待できよう。また、バイオ化学品に由来する新たな素材の性状・性能評価にかかる経済的負担の低減、認証手続きに柔軟性を持たせることなどにより、早期な社会実装をサポートすることも重要である。さらには、石油化学工業が提供してきた化合物群とは性状・性能が異なるバイオ化学品の化合物体系を、積極的に受諾すべく社会意識の改革を促すことも必要であり、教育面を中心に行政のイニシアティブが求められる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

大型プロジェクトの動向に関して、海外では積極的な展開が見られる一方で、我が国の取り組みは極めて限定されたものにとどまっており、対外的な競争力強化が充分であるとは言いがたい。バイオ系産業への研究開発助成は、主にバイオエタノールなどのバイオエネルギー生産や藻類研究に偏重しており、バイオ化学品生産に関するものは、経済産業省が取り組んでいる「革新的バイオマテリアル実現のための高機能化ゲノムデザイン技術開発」があるが、十分な支援が成されているとは言えない。他省庁も含め、より積極的な取り組みを期待したい。

米国の主なプロジェクト動向

- 1) 米国DARPA（国防総省の国防高等研究計画局）の研究支援：2011年から、Advanced Tools and Capabilities for Generalizable Platforms (ATCG)として、バイオ化学品・燃料の生産株の育種開発研究の支援を開始し、2013年からは、これを相補するプログラムとして1000 Molecules Programを開始。生物学的手法を用いて1000種の化合物を生産することを目標に、バイオ化学品生産研究を支援。2014年8月にBiological Robustness in Complex Settings (BRICS) Programの概要を発表。バイオ化学品・燃料生産菌株の頑強性（ロバストネス）を高める育種研究を推進するなど、着実な進展を見せている。
- 2) 米国ARPA-E（エネルギー高等研究計画局）の研究支援：ARPA-E（Advanced Research Projects Agency-Energy）は、エネルギー省がプログラム部局の新規部門として立ち上げたもので、国防総省の国防高等研究計画局（DARPA）をモデルに、エネルギー分野でのハイリスク・ハイペイオフ型のファンディングを行っている。バイオ燃料に対する支援が主であるが、それと関連して、「効率的なCO₂固定を可能とする低コストバイオ触媒の開発」、「太陽エネルギー利用の高効率バイオ燃料製造を実現するシアノバクテリアの設計・開発」、さらには、未来資源として位置づけているメタンなどのC1化合物を原料とするバイオ化学品生産など、次世代のバイオ化学品生産技術の開発に関連する課題も支援されている。

欧州の酵素研究動向

バイオプロセスに活用する酵素研究が活発な欧州では、含窒素化合物の立体選択的合成に有効な酵素群（トランスアミナーゼ、アミノキシダーゼ）に注目が集まっており、2013年に、スウェーデン・ストックホルムにて、1st International Symposium on Transaminase Biocatalysisが開催され、関連研究者の情報交換が図られている。2015年には、第2回目の会議がドイツ・グライフスバルトにて開催予定である。また、不活性な炭素原子に直接酸素を

導入しうる酸化酵素群への関心も高く、2008年から2013年の間、European Union's 7th Framework Programmeの一環として (OXYGEEN)プロジェクトが行われ、P450モノオキシゲナーゼ、 α -ケトグルタル酸依存性ジオキシゲナーゼ、Baeyer-Villigerモノオキシゲナーゼなどを対象とした研究が行われた。その中から、P450モノオキシゲナーゼ研究がより集中される形で、P4FIFTYと称される研究プロジェクトとして2012年から4年間の予定で推進されている。

バイオ化学品における開発動向例

- 1) コハク酸: バイオポリマー類の原料としてバイオマスからの生産が国内外（三菱化学、DSM社など）で事業化されている。コハク酸と1,4-ブタンジオール（コハク酸から化学変換で生成）の共重合によるバイオポリマーの生産が進められているが、三菱化学は1,4-ブタンジオールの生産プロセスに米国ベンチャー Genomatica社が開発したバイオマスからの直接発酵生産技術を取り入れると発表している。また、BioAmber社はオンタリオに年産30000トン規模のコハク酸プラントを建設し、2015年に稼働させると発表している。
- 2) ファルネセン・スクワレン: 米国の再生可能化学品開発企業Amyris社が、サトウキビを圧搾して得られる糖液を醗酵しファルネセンを効率的に発酵生産する技術を開発。ブラジルメーカーの醗酵槽を使ってスクワランの前駆体としてのファルネセンの製造を始める。ファルネセンを二量化してスクワレンに誘導し、水素添加（硬化）でスクワランにするという製造工程になる。クラレ、高砂香料、日光ケミカルなどがポリマー原料、化粧品原料、香料素材として活用している。
- 3) イソブテン: フランスGlobal Bioenergies社が、グルコースをブタジエンへ直接変換するために必要なすべての酵素を同定。mevalonate diphosphate decarboxylase、oleate hydrataseの改変酵素が、3-hydroxyisovalerateあるいはisobutanolからのイソブテンの生成工程にそれぞれ活用されている。イソブテンを再生可能原料から直接生産する代謝経路を、LanzaTech社の一酸化炭素を資化する微生物に導入することを検討。
- 4) バイオポリエステル: カネカでは、植物油脂を発酵原料にPHBH（3-ヒドロキシ酪酸と3-ヒドロキシヘキサノ酸の共重合ポリエステル）の発酵生産技術を開発。「カネカバイオポリマー アオニレックス」の名称で用途開発を展開中。
- 5) バイオポリエチレンテレフタレート: 米国Gevo社は、発酵生産したイソブタノールからバイオマス原料由来のパラキシレンの量産に成功、東レがこれをテレフタル酸へと誘導し、このテレフタル酸を利用した完全バイオマス原料由来ポリエチレンテレフタレート（バイオPET）の重合、繊維化、フィルム化に成功。
- 6) グリーンベンゼン: Anellotech社が、proprietary zeolite-based catalystによる木質リグニンの化学分解により様々な芳香族化合物の生産を検討。
- 7) 油脂発酵: 米国DuPont社が油糧酵母を、我が国では、京都大学を中心に油糧糸状菌を用いる効率的な油脂発酵プロセスの開発が行われている。また、旭硝子・産総研の共同研究により、バイオポリエステルに活用されるジカルボン酸・セバシン酸に誘導可能なリシノール酸の分裂酵母での分泌生産の基盤技術が確立されている。いずれのプロセスもさらなる生産性の向上が求められている。
- 8) その他、開発が行われている代表的なバイオ化学品・研究開発企業などを下記に例示する。

- ・プロピレングリコール（ADM／米国、三井化学、など）
- ・アクリル酸（Dow／米国、Novozymes／デンマーク、日本触媒、など）
- ・ブタジエン（Genomatica／米国、など）
- ・無水マレイン酸（Metabolix／米国、など）
- ・フマル酸（Myriant／米国、など）
- ・アジピン酸（Verdezyme／米国、Rennovia／米国、Celexion／米国、Draths/ Amyris／米国、Myriant／米国、Rivertop／米国）
- ・ペンタン-1,5-ジアミン（東レ・味の素、など）
- ・ヘキサメチレンジアミン（Draths・Amyris／米国、Genomatica／米国、など）
- ・カプロラクタム（Draths・Amyris／米国、Genomatica／米国、など）
- ・テレフタル酸（Draths・Amyris／米国、Genomatica／米国、Gevo／米国、など）
- ・レブリン酸（Segetis／米国）
- ・1, 3-プロパンジオール（Metabolic Explorer／フランス、SK／韓国、など）

（6）キーワード

微生物生産、発酵生産、代謝工学、システム生物学、合成生物学、微生物変換、酵素工学、バイオ化成品、バイオ化学品、バイオプロセス、バイオポリマー、バイオプラスチック

（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"> 微生物の機能改変、特に発酵微生物の育種改良技術については、物質生産に資する応用研究につながる代謝工学に関する分野での世界への貢献は大きい。オミクス技術や代謝フラックス解析などを統合したシステム生物学・合成生物学による微生物改変にむけ、バイオインフォマティクスと協調した人工代謝経路の設計など新たな展開が注目される。また、生産株に耐熱性や生産物耐性などの頑強性を付与する耐性工学とも呼ばれる研究領域も進展を見せている。 これまでに培われてきた微生物の有用性が評価され、バイオマス変換特性の高い機能改変微生物に関するインパクトの高い論文が多く輩出されており、世界から注目されている。 発酵分野の企業においても、これまでの研究を活かしたバイオ化成品生産の技術開発に関する基礎研究にも力を入れ始めている。潜在力ある独自の宿主微生物細胞を保有する利点をうまく活用することが技術の優位性を高めている。 タンパク質結晶構造解析などに基づく酵素触媒の高機能化研究も積極的に行われている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 微生物育種や発酵・醸造は我が国が得意としてきた分野であり、伝統的に強みをもつ発酵技術を背景に培養のスケールアップや発酵生産システムの開発に強みをもつ。 バイオエタノールを中心に進められている実証プラントの経験から、プロセス開発（システムエンジニアリング）分野にも強みがある。 開発された高機能化酵素を物質生産触媒として用いる酵素合成プロセス開発のみならず、代謝工学のツールとして活用する研究開発も行われている。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 様々な企業が産業化を目指し検討を進めているが、発酵分野に強い企業や化学変換を得意とする企業などがお互いの強みを活かし合って共同で事業化を進めている。これは国内だけに限らず、国外の企業・ベンチャーなどとの国際的な共同開発や提携が進められている。 国土の狭さや安価なバイオマス資源の不足などから、実際の実用化展開は海外に軸足が置かれている。 海外のベンチャー企業を中心にモノマー原料などの生産技術開発が行われ、我が国の化学企業が合成原料として生産物を導入しポリマーなどの最終製品へと加工する構図となってきた。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 米国の大学・公的機関における基礎研究レベルは非常に高く、ほとんどの分野において世界をリードしている。国防省、エネルギー省などからの巨額の予算投資も行われている。バイオ化学品の目先の用途のこだわらず、とにかくバイオマス原料から生物的手法によって生産しうる可能性を探る基盤研究が展開されており、ライセンスの確保の観点からしても非常に強力であると言える。 ゲノム情報、情報処理技術を駆使した代謝工学とその発展形とも言える合成生物学に、研究の力点が置かれている。 酵素触媒開発において、タンパク質工学を駆使した高機能化、さらには、人工的なタンパク質設計による酵素開発、進化学工などが新しい基礎技術分野として発展しつつある。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 大手化学メーカーやベンチャー企業が新しい技術開発を進めている。特に、バイオリファイナリーの技術開発に関しては他国をリードしている。 バイオマスから糖を生産するための酵素の高機能化、経済的高効率生産技術の開発に力を入れている。 様々なフィードストックを有している点で強みがある。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> デュボン、カーギルなどの大手化学企業が、国内のバイオマス資源の豊富さを基に、技術開発から産業化までを進めている。バイオ燃料開発が政府資金主体であることとは、少し異なる状況にある。 ベンチャー企業を中心に開発されたバルク化成品原料のバイオ化が、大手化学企業に技術移転（買収）されてきており、実用化に向けた評価がなされは始めている。 生産物の利用における政府の支援体制（税制優遇など）も確立しており、社会実装が比較的容易となっている。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> メタボローム・フラックス解析や合成生物学的な手法を用いた微生物のデザイン技術で多くの先導的な成果を生み出している。 大学などの研究機関だけでなく、BASF/ドイツ、DSM/オランダなどの大手化学企業も積極的な基礎研究を進めており、学会などにおいても中心的な役割を果たしている。

研究開発領域
グリーンバイオ

	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 上記の米国における応用研究・開発に似た状況にある。 酵素触媒開発において、タンパク質工学を駆使した高機能化研究が、米国と肩を並べる形で進められている。
	産業化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> BASFやDSMなどの化学系有力企業も積極的に取り組んでおり、コハク酸やアジピン酸といったいくつかのバイオ化成品生産プラントが進行しつつある。 高機能化酵素のライブラリを提供するベンチャー企業が大学からのスピンオフとして数多く設立され、大手化学企業に酵素触媒を提供している。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 論文の質には大きなばらつきがあるが、著名な国際誌にも中国発の研究が紹介されるようになってきた。論文数は非常に多くなってきており、ここ数年の質の向上には目を見張るものがある。一方、オリジナリティーはまだ低く、他国の後追いつ的な内容が目につく。しかし、キャッチアップのスピードは速い。 中国では、科学技術人材の呼び戻し政策の継続的实施により、優秀な留学生在が多数帰国し、世代交代が図られている。また、著名な外国人研究者の研究機関への招へいも行い、研究レベルの底上げを図っている。このような人材を中心に、国や各省が積極的な集中投資を行い、国際共同研究を進め研究水準が急速に上昇させようとしている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> バイオエタノール生産に関する研究開発が多く進められており、バイオマスの糖化やアルコール発酵プロセスに関する研究開発は精力的に進められている。その技術が、化成品生産の研究開発に応用されている。
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> アミノ酸や抗生物質などの大型発酵設備を有する国内企業が多数存在しており、他の化成品への展開を精力的に模索中である。 バイオエタノール生産に関する研究開発経験を活かし、化成品生産の研究開発が積極的に行われ着実な進展が見られているが、ダウンストリーム技術に難があり、生成物の質の保証が課題となっている。 国内企業のみでの実用化も行われているが、外国企業と中国官民の合弁によるバイオエタノール生産も進められており、基礎研究は不十分でもバイオ化成品分野への進出も加速される可能性がある。
	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究レベルにおいて質の高い研究が見られ、微生物育種分野でのシステム生物学の観点を取り入れた研究が世界の注目を集めている。
韓国	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> バイオマスからのバルク化成品原料の生産研究を、米国追随型ではあるが、強化しようとしている。
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 技術開発力の強さやバイオマス資源の少なさは、日本とほぼ同じような状況にある。そのため、国内プラントの規模はそれほど大きくなり得ず、バイオ化成品生産でも高い技術力をもつて今後海外に展開していくと予想される。

(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

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考資料

1) 革新的バイオマテリアル実現のための高機能化ゲノムデザイン技術開発:

http://www.meti.go.jp/policy/tech_promotion/kenkyuu/saishin/44.pdf

2) Advanced Tools and Capabilities for Generalizable Platforms (ATCG) :

<https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&id=d70f94af2f98e65620d1f089f35f375b&tab=core&cvview=1>

3) 1000 Molecules Program:

http://www.darpa.mil/Our_Work/BTO/Programs/Living_Foundries.aspx

- 4) Biological Robustness in Complex Settings (BRICS) Program:
<http://globalbiodefense.com/2014/08/13/darpa-synthetic-biology-baa-released/#sthash.RAKxpivr.dpuf>
- 5) ARPA-E (Advanced Research Projects Agency-Energy) のプロジェクト:
ARPA-E: <http://en.wikipedia.org/wiki/ARPA-E>
ELECTROFUEL: <http://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-programs/electrofuels>
PETRO: <http://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-programs/petro>
REMOTE:
<http://www.materials360online.com/newsDetails/39761;jsessionid=6E6F95082C10E29FD245C32CCFAFB102>
IMPACCT: <http://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-programs/impacct>
- 6) メタンの利用 : <http://cen.acs.org/articles/92/i25/Business-Roundup.html>
- 7) 1st International Symposium on Transaminase Biocatalysis:
<http://www.biotech.kth.se/biochem/transam/>
- 8) P4FIFTY : <http://www.p4fifty.eu/>
- 9) OXYGREEN: http://cordis.europa.eu/project/rcn/88265_en.html
- 10) コハク酸生産 : <http://cen.acs.org/articles/92/i26/Business-Roundup.html>
- 11) レブリン酸生産 : <http://www.segetis.com/>
- 12) 1,3-プロパンジオール生産 : <http://cen.acs.org/articles/92/i27/Business-Roundup.html>
- 13) Mickel L. A .Jansen, Walter M. van Gulik. Towards large scale fermentative production of succinic acid. *Current Opinion in Biotechnology* 2014, 30:190–197.
- 14) Bianca N. M. van Leeuwen, et al. Fermentative production of isobutene. *Appl Microbiol Biotechnol* (2012) 93:1377–1387.
- 15) Roger A. Sheldon. Green and sustainable manufacture of chemicals from biomass: state of the art. *Green Chem.*, 2014, 16, 950–963.
- 16) Harry Yim, et al. Metabolic engineering of *Escherichia coli* for direct production of 1,4-butanediol. *Nature Chemical Biology*. 2011, 7, 445-452.
- 17) R. Kajaste. Chemicals from biomass - managing greenhouse gas emissions in biorefinery production chains - a review. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 1-10.
- 18) Volker F Wendisch. Microbial production of amino acids and derived chemicals: Synthetic biology approaches to strain development. *Current Opinion in Biotechnology* 2014, 30:51–58.
- 19) Irina Borodina, Jens Nielsen. Advances in metabolic engineering of yeast *Saccharomyces cerevisiae* for production of chemicals. *Biotechnol. J.* 2014, 9, 609–620.

3.6.7 バイオ医薬品・食品原料

（1）研究開発領域名

バイオ医薬品・食品原料

（2）研究開発領域の簡潔な説明

生物機能を活用した抗体・酵素などの医薬品、アミノ酸・ペプチドなどの食品および食品原料の生産および品質評価に係る研究開発。ただし、タンパク質の構造解析、機能解明のための基礎的な分子生物学、古典的天然物有機化学などに関わる領域は含まない。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

抗体・酵素などの医薬品生産

1980年代以降、遺伝子組み換え技術、細胞培養技術などを駆使し、従来法では生産困難であったヒト型成長ホルモンや各種医療用酵素、サイトカイン、成長因子、ワクチン、モノクローナル抗体などのタンパク質を生産する技術が医薬品応用を目的として研究されてきた¹⁾。現在、一般に医薬品としての抗体、酵素などは多くの場合、遺伝子組み換え技術と細胞培養技術の両方を利用している。1990年代後半からゲノム科学が爆発的に進展し、生命現象や疾病の機構解明が飛躍的に進捗した結果、治療標的になりうるタンパク質や、医薬品候補と考えられるタンパク質に係わる膨大な量の情報が得られるようになってきた。また、タンパク質工学、具体的にはタンパク質の構造解析技術や、改変技術、修飾技術などが発展を遂げ、天然に存在する酵素・抗体を元にして副作用低減、安定性向上などを目的とした新規医薬品用タンパク質の設計が行えるようになってきた。今後実用化が進むと期待できる。抗体医薬は多くの場合、拮抗薬として実用されてきたが、近年、作動薬（作用薬）として機能する抗体が実用化段階に多く入りつつある²⁾。低分子合成医薬品に比べて組み換えDNA技術と細胞培養技術に基づくタンパク質バイオ医薬品の生産コストは顕著に高くなる。実用化のためには効能もさることながら、医療費抑制、患者負担軽減のためのコストダウンが必須となる。生産性は製品算出量（タンパク質生産量）を投入で除した値で表現できる。投入コストは、原料費、用役費、労務費、設備減価償却費などで構成されるが、どの要因に注目してプロセスを改良するのかがケースバイケースといえる。一般的に培養装置内の生産物濃度を高めることがもっとも重要と考えられるが、血清などの高額培地成分を使用する場合は、原料費あたりの生産量も注目する必要がある。また、実験室スケールでは高収率であってもタンパク質のフォールディングプロセスが大規模実施には適さなかったり、除去困難な不純物が含まれる場合は、工場スケールで実施では以外に高コストになる場合もあるので、生産プロセスの最適化には十分な検討が必要である。例えば、動物培養細胞による生産と微生物による生産では、微生物による生産の方がコストが低いと思われがちだが、一概にそうとは言えない。動物培養細胞を用いた場合、大部分のタンパク質は正常に翻訳後修飾（配糖体化、フォールディングなどを含む）を受けて培地中に分泌されるのだが、微生物（特にバクテリア）を用いる場合、翻訳後修飾が十分には行われず、ミスフォールディングの結果、インクルージョンボディを形成する割合が多い、また、除去困難な不純物を取り除く精製に手間がかかる場合が多く、先入観ほど微生物が有利では無い。近年、ピヒア属酵母を用いた生産系や、昆虫培養細胞や、植物葉肉細胞を生産系とする方法論も開発されている。用途に応じた

最適な方法論を取ることが大切であり、今後の技術蓄積が期待される。近年、初発抗体医薬の特許権切れによる後発類似品（バイオシミラー）開発競争が激化しているが、当該分野で我が国が優位性を保てる担保は無い³⁾。集中的な研究投資が必要である。

アミノ酸・ペプチド

古くから、アミノ酸は小麦や大豆などに由来する植物性タンパク質の酸加水分解によって生産されていたが、必ずしも生産性の高い方法論とはいえなかった。1950年代に入り、微生物発酵によるアミノ酸生産が工業化された。日本国内においてコリネバクテリウム属細菌によるL-グルタミン酸発酵法の開発成功に端を発し⁴⁾、発酵生産企業の研究部門と大学・公的研究期間との連携により大きく発展し、現在においても世界のアミノ酸発酵技術のトップクラスを維持している。現在では各種アミノ酸発酵技術が開発され、グローバルに展開している。L-グルタミン酸は現在では200万トン超の市場を形成している。飼料用のアミノ酸としてのL-リジン市場は、100万トン超と言われている⁵⁾。アミノ酸発酵産業は、その他の発酵産業と同様に、主として農産物由来の発酵原料を用いるため、資源が循環するサステイナブルな工業技術と考えられている。環境付加の低減のためのゼロ・エミッション化研究も進んでいる。発酵後廃液や発酵残渣に含まれる窒素、リン、無機元素などはできる限り肥料などの形で有効利用し、資源循環に資するシステム構築が進んでいる。原料からのアミノ酸生産効率向上に対する研究開発戦略として、生産菌株の育種研究の他に、従来の代謝フラックス解析に加えて、非定常状態における代謝動態解析や、代謝バランス解析、代謝制御解析などの新規な工学的手法の適応が試みられている^{6,7)}。L-アミノ酸の実際の製造拠点は主として消費地あるいは原料供給地に近い海外にシフトしている。近年、タンパク質構成成分ではないD-アミノ酸の生理的機能の研究がさかんに行われるようになってきた。これまでも、特殊な二次代謝物質（抗生物質など）の重要構成要素としては注目されてきたが、最近、一般の食品中にもD-アミノ酸が含まれ、第二次機能（味覚）に影響を及ぼすことが示唆されている。L-アミノ酸はほとんどが発酵生産されており、食品添加物として使用可能である。一方、D-アミノ酸は我が国においては、D-アラニン、D-スレオニン、D-メチオニン、D-トリプトファンのみが食品添加物として認められているに過ぎない。今後、他のD-アミノ酸の食品原料としての解明がなされれば、新たに発酵産業としての重要性が生まれると考えられる。その他、タンパク質構成成分ではない分岐アミノ酸の発酵生産も研究が行われており、今後の研究展開が期待される。

ペプチドは、アスパルテームに代表されるように種々の味覚性能（甘味、渋味、塩味、旨味、その他）や生理活性を有することが期待される。ヨーグルト、チーズなどの乳製品や伝統的な発酵食品である納豆や味噌、醤油などに呈味ペプチドが含まれることは知られていたが、アミノ酸と比して含有量が少ないため、系統だった機能研究がこれまで進んで来なかった。1990年代後半にオーム科学の一連としてペプチドを網羅的に探索するペプチドーム解析という概念が生まれるにいたり、ペプチドの機能に注目があつまるようになった。近年、旨味の強さに影響を与えるジペプチドの報告がなされた⁸⁾ことを契機として、種々の味覚を強めたり弱めたり、あるいは方向性を変えたりする機能を有するペプチドの存在が示唆され、研究されていると思われるが、まだ、水面下である。また、前述のD-アミノ酸に記載したが、生理活性ペプチドの構成アミノ酸に含まれるD型アミノ酸の関与についても全く知見が無

い。本領域は日本が強みを発揮できる領域であり、集中的な研究が期待される。一方、大量にペプチドを生産する方法としては、タンパク質の加水分解物（酵素加水分解や酸加水分解）から精製するという試みは古くから行われており、大豆タンパク質や、かつお節の加水分解物から様々な機能性ペプチドが発見されている⁹⁾。一部は機能性食品として実用化されているが、まだまだ、希少であり今後の展開が期待される。

食品/生薬の機能解析

食品の機能は、第一次機能（栄養機能）、第二次機能（嗜好、食感機能）、第三次機能（健康性機能・生体調節機能）に大別され、すべての食品が上記を有している。一方、生薬は我が国の法律では、日本薬局方収載されている歴とした医薬品であり、一線を画すものである¹⁰⁾。しかしながら、全容未解明の多成分から構成される多機能コモディティである生薬は含有成分と薬効の相関関係解析が極めて困難であり、低分子純品から構成される通常の医薬品の薬効解析戦略は全く通用しない。現時点において、生薬の機能解析は、食品の第三次機能解析戦略を踏襲する以外の良策は無い。中国・日本では、古くから「医食同源」という言葉が伝承されてきたが、これは、生薬機能と食品の第三次機能の区別していないことを表現している。上記の状況を鑑みて、本項では生薬を敢えて食品機能解析研究の対象として取り上げる。食品の機能解析研究のこれまでの経緯を振り返ると、戦後の食糧難の時代には、国民のカロリー不足による健康障害が深刻であり、食品の第一次機能増強が国是として研究開発の主対象となった時期があった。その時期には、おいしさ（第二次機能）は、後回しにされ、第三次機能は考慮されてこなかった。その後、高度成長期を経て飽食の時代を迎え、国民の食の健康問題はカロリー不足からカロリー過剰に移行するとともに、より美味しいもの、より健康によいものを求めて第二次機能、第三次機能の増強が研究課題として浮上してきた。第一次機能研究が食品中の主成分であるタンパク質、脂質、糖質などの質と量の向上が主題であり、研究戦略立案は比較的容易であった。対して、食品の第二次機能、第三次機能は食品中に含まれる複数の微量成分主成分が相乗的に作用することで形成されることが多く、性能評価も困難だった。そのような理由から、長い間、進捗が遅かった。

近年、技術の進展に伴い、主として食品の第三次機能研究は進展を遂げている。食品の第三次機能研究はいわゆる「健康食品ブーム」からさかんになり、特定保健食品（トクホ）の認証を受けることが市場価値を担保することにつながるという雰囲気形成と呼応し、大手食品企業研究所を中心としてさかんに研究された。その中で、効能を担う成分がある程度特定され、容量依存性が確認された一部の食品については第三次機能研究は一定の成果を挙げている。しかしながら、研究の多くが培養細胞や実験動物を用いたシステムにおける要素還元型研究であり、ヒトが経口摂取した場合における機能発現との相関関係は担保されていない。生薬の機能研究も実は類似の状況にある¹¹⁾。

食品の第二次機能（おいしさ）は、嗜好・官能に係わる性能であり、コモディティとしての商品価値に直結する重要な性能であるが、その定量的比較が極めて難しい性能といえる。これまでは、食品製造会社が独自の尺度で二次機能を規定し、熟練者による官能試験によって性能評価を行ってきた。各社の技術は公表されること無くノウハウとして秘匿され、技術の一般性、拡張性を検証されること無く現在にいたっている。微妙な二次機能の差異を定量的に官能するためには、熟練が必要であるが、各社とも、熟練官能試験者は高齢化が進

んでおり、技術の伝承に不安を抱えている。最近、熟練官能試験者からの技術移転を念頭に置いて、定量的分析型官能試験（QDA 試験）などによる食品官能性能の客観的定量的記述をする試みが各社において徐々に行われるようになってきた。さらに、メタボロミクス（網羅的代謝物解析）の技術を食品解析に応用することにより、食品の二次機能と食品含有多成分間の網羅的相関解析の可能性が示された。食品企業を中心にして、食品製造原料入荷分析、食品製造工程管理、製品の嗜好性能鑑定、保管流通工程の最適化などへの応用に対し、各社がノウハウとして秘密裏に研究着手している状況にある。日本薬局方に収載される生薬の市場における品質評価は流通業者の官能試験に依存していると述べたが、当該官能試験者も熟練者の高齢化に伴う技術移転問題が表面化している。

（４）科学技術的・政策的課題

抗体・酵素などの医薬品生産

バクテリア、酵母、動物培養細胞、植物、動物組織など、様々な生産系が研究されており、それぞれのシステムが長短所を有しており、現状ではどれが最適解かの判断は困難を極める。コストを決定する重要要因に着目して工学的見地から各生産方法の定量的性能比較をできるだけ早期に国策研究として実施すべきである。当該研究は、ある程度のスケールのパイロットプラントを用いた実験となるため、大学研究室での実施は困難である。拠点形成を実施し、産学連携研究として実施するのが望ましい。当該研究を適切に推進するためには、学術論文を成果として求めることは慎むべきである。

今後、続々と拮抗薬あるいは作動薬としての抗体医薬品が続々と市場に登場することが見込まれるが、組み換え医薬品および細胞培養医薬品の品質・安全性確保にかかわるガイドライン整備をさらに推進するような行政が必要とおもわれる。その際、安全性を担保することだけを考慮して不必要なスペックの規制を設定することなく、必要最小限のしかしながら、十分安全が確保できるラインを科学的に決定することが肝要である。さらに、抗体医薬の後発類似品（バイオシミラー）の国内外市場は莫大であり、当該市場を占有するための生物工学的研究に対する支援も加速すべきと考えられる。

アミノ酸、ペプチド

L型アミノ酸の発酵生産について日本は世界でもっとも進んだ国であり、主として数社の発酵生産企業で研究開発が推進されている。今後も当該傾向は継続すると思われる。さらなる生産技術向上のためには、合成生物学や、最新のゲノム科学などが必要とおもわれる。新鋭技術を有する大学研究者と出口を有する企業との産学連携研究を支援するシステムが必要と思われる。近年、D型アミノ酸の種々の生理活性が謳われ、研究競争が激化していくと考えられる。当該研究を成功に導く鍵の一つが迅速かつ正確なD型アミノ酸分析技術の開発ならびに、実用化である。本分野は日本は世界でもトップレベルであるが、油断するとあっという間に優位性は消失する。優位性を安定拡大させるための研究戦略が必要である。

既存の製品ペプチド生産については、タンパク質原料の加水分解による製造が大半であり、今後の発酵生産技術の進展を推進するような基盤技術の開発が望まれる。発酵生産についても生産性向上のためには、既存戦略を超えた斬新な考え方が必要と思われる。さらに、種々の生理活性を有するペプチドの効果的同定技術の開発が期待される。

食品/生薬の機能解析

日本食は、世界に誇れる食文化であり、欧米、中国などの大消費地を有する輸出産業に発展する可能性を有する。そのためには、最高の日本食の定量的表現方法の開発急務である。研究推進のためには、食品のプロファイリング基盤技術を開発している大学研究者と出口の食品製造を手がける企業との共同研究が望ましい。また、複数の食品のアソートメント（例えば、日本酒、醤油、味噌、発酵食品、その他）を念頭に入れた複数企業の共同研究体制も模索することは極めて重要である。

ペプチドなどの呈味性能、生理活性などを定量的に表現するためには、新たな高解像度第二次機能解析方法ならびに、第三次機能の定量的評価技術の開発が必須である。フィールド評価のための大規模ヒト介入試験の支援なども念頭にいれなくてはならない。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

抗体・酵素などの医薬品生産

無血清培地を用いた動物培養細胞によるタンパク質生産も実例が数多く報告されはじめており、動物細胞生産系のさらなるコストダウンが期待できる。現状では CHO 細胞のみが突出して使用される培養細胞株となっている。これは、米国 FDA が正式に承認しているのが CHO 細胞のみであるという社会背景に依存する。製薬企業は CHO 細胞以外一方の商業製造は念頭に置かない。国策研究として CHO をしのぐ培養株の開発の是非を徹底的に検証すべきである。（結果として CHO 細胞に特化するという結論でも構わない）、植物果実などへワクチンタンパク質を発現させ、果実を直接食することで免疫しようとするいわゆる食べるワクチンなどの開発も進んでいる模様である。微生物一辺倒だった物質生産の世界で、常識を換える状況が近未来に現実になると思われる。ただ、安全性の面での担保は得られていないようである。

アミノ酸、ペプチド

臨床検体（主として血液）中に含まれるアミノ酸の正確な定量データ（アミノインデックス）と種々の疾病との相関関係が明らかになってきた。今後、臨床診断などへの応用が期待される。D-アミノ酸の呈味への貢献が続々と報告されてきており、基盤研究が進捗すれば、近未来には、実用化が期待できる。実用化の鍵は分析方法の高度化、低コスト化と思われる。

食品/生薬の機能解析

近年、食においしさを追求する傾向が高まってきた。また、食品の安全が最重要課題となりつつある。食品に含有する種々の代謝物の定量的網羅分析結果と観測対象の定量的性能の相関解析の研究も近年増加傾向である。食品機能の定量解析技術を用いて収穫後処理、保管、流通条件の最適化により競争力のある輸出コモディティーとしての食品という分野を創出することが国策として求められる。

（6）キーワード

アミノ酸、ペプチド、抗体、食品、生薬、二次機能、三次機能、メタボロミクス、プロファイリング

（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"> ・アミノ酸発酵技術は世界トップレベル。 ・食品の第三次機能研究は多くの大学でさかんに行われている。 ・食品成分と第二次機能の相関解析の研究はごく一部の大学、企業で行なわれている。 ・残留農薬分析や重金属分析関連の研究は高いレベルにある。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・食品の第二次機能に係わる本格的な開発研究は企業の一部で実施されていると思われるが、顕在化していない。
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・アミノ酸発酵産業の実用化技術開発は日本が世界一。 ・食品の第二次機能の担保は、熟練官能者の技能に依存。 ・ナノフーズ技術などの応用は企業で研究進捗。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・合成生物学という新しい概念で微生物発酵の根本を変える可能性。 ・食品の第三次機能研究については、欧州に遅れをとっている模様。 ・ナノフーズ技術などについては不明。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・食品工学を研究しているアカデミアは日本よりも多い。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・第二次機能が重要な食品について、自動車同様大量一括生産方式の傾向。
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ナノフーズ技術研究では、世界をリードしている。 ・プロバイオティクス研究（乳酸菌など）では世界をリード。食品の第三次研究についても技術蓄積あり。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・EUも食品機能研究に積極的に支援する姿勢。 ・国境を超えたアカデミアの連携もある。オランダのワーゲニンゲンのフードバレーなどは、世界的研究拠点。近年、デンマークが一代拠点を確立して攻勢模様。 ・ペプチド研究も活発に実施。
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・食品の第二次機能については、手づくり的に丁寧に産業化する傾向。 ・ナノフーズ技術などの新鋭技術は、大手の食品メーカー、乳業メーカーが中心となって推進している模様。
中国	基礎研究	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・生薬の新処方に関する研究はさかん。臨床検討が容易。 ・ナノフーズ技術などについては不明。 ・食品の第二次機能解析については、近年研究者増加。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・生薬研究を中心に、基礎から応用までシームレスに進捗。 ・二次機能研究についても同様。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・経済発展に伴い、食の安心・安全についても関心が高まってきたが、システムとして安全の担保は技術的に達成できていない状況。近未来には解決できるのか不明。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・生薬の成分研究などは大学などでさかんに行われている。 ・新鋭技術については、それほど活発とは思われない。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・食品の第三次機能開発や、生薬の組織培養による大量生産などの研究が行われている。 ・培養細胞による生産研究も行われている。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・大手の食品企業によって新鋭技術の応用展開が行われていると推定される。

（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

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) 日経バイオ年鑑 2014
- 2) 金子佳寛（2013）「抗体医薬品生産培養技術の課題と展開」生物工学会誌、91 巻、512-513
- 3) 日本製薬工業協会 「バイオシミラー：科学のおよび規制上の考察」
http://www.jpma.or.jp/medicine/bio/pdf/bio_02.pdf
- 4) http://www.kyowahakko-bio.co.jp/company/recruit/overview/history/episode_01/
- 5) 児島宏之（2006）「アミノ酸製造」Microbiol. Cult. Coll. 22, 45-48
- 6) 清水和幸（2012）「システム生物学および細胞の統合的代謝制御に関する研究」生物工学会誌、90 巻、2-19
- 7) 清水浩ら（2012）「代謝工学の創成と発展－代謝解析とオミクス研究との融合」生物工学会誌、90 巻、619-620
- 8) Kaneko et al. (2011) Biosci. Biotechnol. Biochem. 75, 1275-1282
- 9) 食品機能性の科学、2008
- 10) <http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/iyaku/yakkyoku/>
- 11) 津川裕司ら（2011）「メタボリックプロファイリングによる食品/生薬の品質評価」化学と生物、49、683-688

3.6.8 資源・レアメタル回収

（1）研究開発領域名

資源・レアメタル回収

（2）研究開発領域の簡潔な説明

レアアース、白金族金属などレアメタルの確保戦略として、国内の都市鉱山（使用済み製品、歯科用貴金属、工程内スクラップ、工業廃液・排水）を対象に、レアメタルなど有用金属リサイクル率を大幅に引き上げられる地域完結型バイオ技術を研究開発し、レアメタル好循環が実現できる持続可能サプライチェーン構築に貢献する。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

3-1 都市鉱山からのレアメタル回収におけるバイオ技術の必要性

我が国モノづくり産業（製品の市場規模、年間150兆円）にとって、産業のビタミンと呼ばれるレアメタル（地金の市場規模、年間3兆円）は、各種製品（自動車、家電、IT機器など）の生産に必要な不可欠な金属（元素）である。例えば、ハイブリッド自動車のモーターや風力発電機用の高性能磁石、最先端の情報端末などに使用されている希少金属である。ところが、レアメタル消費大国であるわが国には、その天然資源（鉱石）を国内に保有しないことから、レアメタルの需要逼迫や価格高騰などで海外からの調達に困難な状況に陥る資源クライシスに対する不安がつきまとう。現に、2010年9月には「尖閣諸島沖での中国漁船衝突問題」が起こり、中国が対日レアアース輸出を禁止したことからレアアース価格が高騰したことは記憶に新しい。このときの中国の輸出規制が2014年には世界貿易機構（WTO）により協定違反と認定され、磁石製造に使用するレアアース量を削減する研究開発が進められたことから、2014年時点では供給リスクは低減されつつある。一方、中国政府が打ち出したレアアース政策（輸出関税の設定・引き上げ、輸出量を元素ごとに制限するなどの保護政策）の影響を受けて、中長期的にはレアアース価格が高騰する可能性が高く、価格リスクに対する対策を講じることが急務の課題である。今後、天然資源保有国による資源ナショナリズムの進展が大いに予想され、レアアースや白金族金属（PGM）などレアメタルの適正価格における安定供給の確保が重要課題となっている。また長期的な視点に立てば天然資源の枯渇が大いに憂慮される。このような社会状況のなか、レアメタルの国内自給率を向上させる対策を講じることが焦眉の課題である。幸いにも国内には、全世界における各種金属埋蔵量の10%にも相当するレアメタルなど有用金属が、都市鉱山（使用済み製品、歯科用貴金属、工程内スクラップ、工業廃液・排水）に存在すると試算¹⁾されている。資源リスクの高いレアメタルなど有用金属は自国で調達することが最善であり、国内の都市鉱山を開拓し、使用済み製品からレアメタルなど有用金属を回収・循環利用できるリサイクル技術を新たに確立することの重要性は日増しに高まっている。

ところが、世界有数の都市鉱山に埋蔵されるレアメタルなどの回収は、遅々として進んでいない。例えば、PGMは、エネルギー・環境分野で重要な触媒用途（燃料電池、自動車）での使用量が全体の約50%を占めており、材料、医療、電子など幅広い分野でも需要が高まっている。国内には年間輸入量の何倍ものレアメタルが都市鉱山に存在はするが、我が国のPGMリサイクル率（リサイクル量/年間需要量）²⁾は白金が21～33%、パラジウムが22～39%、

ロジウムが7～11%と「もったいない」状況が続いている（2007～2011年度）。地金価格が高く収益性の高いPGMでさえも、国内リサイクル率が低レベルであることは、都市鉱山の開発に対しては現行リサイクル技術だけでは不十分であることを端的に物語っている。

従来技術のボトルネックを端的に言えば、「都市鉱山に希薄な濃度レベルで存在するレアメタル・貴金属を、効率よく、経済的に回収できる実用化リサイクル技術」の欠如である。この技術的課題を乗り越えるための「切り札」として期待できるものが、従来の化学的、物理的回収技術に比べて、低コスト・低エネルギーで高効率なレアメタル回収が達成できるバイオ利用回収技術である。常温・常圧下での微生物反応を利用するレアメタル・貴金属回収バイオプロセスについて、これまでに要素技術から実用化事例まで、国内研究者によって最新の研究成果³⁾が報告されつつある。これらの中には、PGM・金を選択的に、効率よく分離・回収できるうえに、これらレアメタル・貴金属の回収速度が大きく、小型バイオ反応装置を用いても迅速に回収操作が完了するバイオ回収技術⁴⁾が研究開発されている。この新規バイオ利用リサイクルは、従来リサイクルと比べて、設備費や運転費を大幅に削減できる。その上、回収ターゲットの金属は、地金価格が高く収益性が高いPGM・金であることから、採算性の点からもリサイクル事業化に結びつき易い。このような特長を備えた新規バイオ技術は、使用済み製品が集積する地域においてレアメタル・貴金属リサイクル事業を起こす新たなビジネスチャンスを創出する。まさに、「有用金属の地消地産」を実現する地域完結型バイオ環境技術を研究開発し、レアメタル好循環が実現できる持続可能なサプライチェーン構築に貢献することが、本研究開発領域のミッションである。

3-2 レアメタルなどリサイクルに係る国内外の動向

我が国では2009年7月に経済産業省が「レアメタル確保戦略⁶⁾」を取りまとめたが、その翌年には「尖閣諸島沖での中国漁船衝突事件」をめぐって緊張関係が生じ、中国は対日レアアース輸出禁止措置をとった。これを契機に、レアアースなどのレアメタルの重要性や、その供給を過度に特定国に依存することの問題点が浮き彫りになった。このレアアースに係る中国問題が契機となって、欧米においても「クリティカルマテリアル(Critical materials)」という表現でレアメタル確保に関する関心が高まり始めた。金属資源問題に対する日米欧共通の問題意識の高まりを受けて、国際的な取り組みとして、レアアース安定供給確保のための日米欧三極ワークショップ⁷⁾が、2011年10月にワシントンDC、2012年3月に東京、2013年5月にブリュッセルにおいて開催された。世界のレアアース市場で大きな需要を有する日米欧の政策当局者（経済産業省・NEDO、米国エネルギー省、欧州委員会）およびレアアース研究開発分野の専門家などが一堂に会して、レアアース代替技術やリサイクル技術などの有効利用を目指した取り組みや、協力体制の構築について議論が行われた。

(4) 科学技術的・政策的課題

- ・シーアイランド・サミット（2004年6月）において、発展途上国、先進国を問わず、経済発展、経済開発をする場合には環境保護を重視しなくてはならないという観点から、我が国は『廃棄物「3つのR」コンセプト』の重要性を訴え、G8の合意を得た。しかし、各種使用済み製品などからのレアメタル回収（都市鉱山の開拓）に至っては、その提唱国である我が国でさえも「3つのR」への取り組みが、科学技術ならびに政策の両面におい

て十分ではない。

- ・ 現行の有用金属（貴金属、銅）リサイクルでは、重厚長大な銅製錬所（国内に10か所程度）における高エネルギー型熔解技術（1000℃付近）が主流となっており、地域で収集された金属スクラップは遠距離の銅製錬所に輸送され、製錬所でスクラップから有価金属が回収されている。これでは、折角の努力（使用済み製品の大量収集、金属スクラップの選別）が地域では報われない。成長戦略の一つとして、地域で集めた金属スクラップは地域でリサイクル事業化して収益をあげる「有用金属の地消地産」を実践し、地域の収益力の強化と雇用・人材問題への対応を図るためには、地域完結型リサイクル技術の研究開発が必要である。
- ・ 都市鉱山の開発における技術的ボトルネックを端的に言えば、「都市鉱山に希薄な濃度レベルで存在するレアメタル・貴金属を、効率よく、経済的に回収できる実用化リサイクル技術」の欠如である。この解決策の一つとしては、大学などの研究機関におけるレアメタル回収に係るバイオ技術シーズが現存することから、これらシーズを商業化技術にまでに成長させるために、大学・企業との産学連携で、大量処理・生産を前提とした微生物の探索、コストや操作性などの最適化検討などの実用化課題の解決を支援するファンディング制度が求められる。さらに、日本発のレアメタル回収技術を世界各地で展開する前に、基本特許に加えて周辺特許、PCT国際特許を含めた特許網を構築する知財戦略を実践することも重要であり、知財プロパーの確保と財政支援が必要である。
- ・ さらに、新たなバイオ技術シーズを創出するためには、ライフサイエンス分野の研究者の参画が不可欠であるが、彼らの大多数はレアメタルなど有用金属（無機物）を対象にした研究に対して全く関心を示すことがなかった。昨今のレアメタルを取り巻く社会情勢を踏まえ、レアメタル回収に係る基礎研究とその産業応用に向けて、ライフサイエンス研究者が化学や物理の各学術基盤をもつ研究者・技術者と異分野融合する仕掛けをつくり、新たな複合領域「都市鉱山のバイオベース開発（仮称）」を提案・開拓する必要がある。このためには、関連省庁（経産省・環境省・農水省・文科省）の横断的連携によって、基礎研究を担う大学研究者を支援するファンディング制度の充実が肝要である。
- ・ 持続可能な社会の構築に向けて種々の取り組みがなされている状況のなか、微生物機能を活用するレアメタルなどリサイクル技術の創出は、「自然に学ぶ持続可能なモノづくり」として非常に興味深く、技術革新に結びつくテーマであり、学術的な観点からも意義深い。ただし、バイオ技術だけがオールマイティーであると過信は禁物である。他の実用化技術と同様に、リサイクル技術にも生物、化学、物理の基盤が不可欠であるとの認識から、異分野が融合した新しい研究分野の構築が求められる。新しい実用化技術は物理・化学・生物の基盤の三位一体によって生まれると柔軟に考え、眠れる都市鉱山を国内金属資源に変えることができる真の技術の研究開発が俟たれる。
- ・ レアメタルに係る政策の面では、レアメタルを長期的かつ安定的に確保する仕組み作りとして、学際・総合的視野から、都市鉱山からレアメタルの好循環が実現する「持続可能なレアメタル資源管理」を実現するための戦略を考究・討議して政策提言を行うための戦略会議を設立すべきである。戦略会議のメンバーとして、バイオ分野、資源・素材分野、環

境分野、プロセス工学分野の工学者とともに、行政学、科学技術政策および経済学を専門とする社会科学者の参加が不可欠である。

- ・国際的な取り組みとして、過去に3回開催された「レアアースに関する日米欧三極ワークショップ⁷⁾」をベースに、参加国をG7各国、資源大国オーストラリア、南アフリカなどにまで拡張するとともに、レアアースという一種類から最重要10種程度にまで対象レアメタルの幅を広げ、天然資源を持たないがゆえに資源ナショナリズムとは無関係の我が国がリーダーシップを発揮して、レアメタル資源に係る機関との国際連携を構築・強化を図ることが肝要である。政策当局者およびリサイクル技術などの専門家がレアメタル確保戦略について意見交換し、グローバルな観点から考究・討議して政策提言を行う政策立案会議の設立が求められる。

(5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・自然界に存在する金属イオン還元細菌（*Shewanella* 属細菌）がPGMイオン（白金、ロジウム、パラジウム）や金イオンを細胞表面にナノ粒子として還元・濃縮する現象（バイオミネラリゼーション）⁸⁾が発見された。この新しい現象を基に研究を展開すると、常温・常圧、60分程度の短時間、かつ高収率で、希薄溶液中のPGMイオンなどを還元して金属ナノ粒子を細菌細胞表面に回収できることが判明したことから⁹⁾、低エネルギー・環境調和型リサイクル技術を世界に先駆けて創出できる。また、別の切り口で捉えると、微生物の細胞表面に産出されるナノ粒子は、粒子径分布が狭く、ダントツの触媒活性を発揮することが見い出された^{9,10)}。したがって、バイオミネラリゼーションをベースに、PGMナノ粒子触媒の斬新なバイオ調製技術を創出することもできる。
- ・これまで食品・医薬分野で商品化されたシームレスカプセル化技術¹¹⁾が上記の新技術シーズ（バイオミネラリゼーション）と組み合わせられ、リサイクル現場における微生物ハンドリングを簡便にする実用化技術として、貴金属・レアメタル回収用の「還元細菌を内包したカプセル」が世界に先駆けて創製された。この微生物カプセルは、従来技術の課題（希薄な状態で存在する貴金属・レアメタルに対して、高効率・低コスト回収が不可能）を解決するためのアイテムであり、廃棄物（使用済み製品、廃液）を新たな金属資源（都市鉱山）に変えるリサイクル事業を起こすビジネスチャンスを開くと期待できる。
- ・経済産業省は、中国によるレアアース問題を契機に、2010年10月に「レアアース総合対策」を策定し、平成22年度（2010年度）補正予算では、レアアース確保対策として代替材料・技術開発のために100億円程度のプロジェクトが実施された。直近のプロジェクト「平成23年度希少金属使用量削減・代替技術開発設備整備費等補助金（レアアース・レアメタル使用量削減・利用部品代替支援事業）」では、総投資額は約86億円規模であり、二次公募では30件、補助金総額約30億円が採択¹²⁾された。このうちでバイオ利用リサイクル技術に係るテーマが1件ながら採択されており、金属リサイクル分野へのバイオ技術の導入が認知され始めたと考えられる。
- ・米国エネルギー省は、自国のエネルギー安全保障上で必要とされるレアアースなどクリティカルメタル（我が国ではレアメタルと表現）の国内供給不足を解決する技術開発機関と

して CMI (Critical Materials Institute) ¹³⁾ を設立した。その研究拠点となる国立エイムズ研究所を中核として、国立研究所や大学、民間企業が参画し、5年間で約120億円の予算規模で、レアアースなどの採掘・製造・代替・有効利用・リサイクルに関する革新的な技術開発が行われている。

- ・ 欧州では、英国政府がレアメタル安定供給の政策を強化するために ORM (Office of Resource Management) を設立し、備蓄、リサイクルなどを促進すると 2014 年 7 月にプレス発表 ¹⁴⁾ した (予算規模については不明)。また、世界最大のリサイクラーと称されるユミコア社 (本社ベルギー、世界各国に関連会社)、また世界大手の白金族金属の生産業者であるジョンソン・マッセイ社、ヘレウス社、BASF 社などにおける貴金属リサイクルの市場規模は、我が国をはるかに凌駕していると推測できる。日本発信の新規バイオ利用リサイクル技術の特許ライセンスを販売する相手先として、動向を注視する必要がある。

(6) キーワード

資源ナショナリズム、レアメタル、レアアース、都市鉱山、リサイクル、バイオミネラリーゼーション (溶液中の有価物の固体粒子化)、バイオソープション (溶液中の有価物の吸着)、バイオリッチング (固体からの有価物の抽出)

（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"> 微生物を利用するレアメタル回収に関する基礎的研究のレベルは高い。溶液中の白金族金属、金、セレンを還元・回収（バイオミネラリゼーション）できる微生物（金属イオン還元細菌）、また溶液中のレアアース、インジウム、コバルトなどを吸着分離（バイোসorption）できる各種微生物（細菌、アミング酵母など）について研究が行われている^{3,4}。さらに、リチウムイオン電池の正極活物質からのレアメタルの抽出（バイオリーチング）に有効な微生物についても研究されている⁴。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 微生物を使って自動車用触媒から白金族金属を回収する方法、また微生物を使ってリチウムイオン電池からレアメタル（リチウム、マンガン）を回収する方法が産学連携で研究開発されている¹⁵。 都市鉱山からの効率的レアメタル回収の実現に向けて、独自のバイオカプセル技術を用いてレアメタル回収モジュールが試作された¹⁶。 NEDO（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構）は2013年9月に米国エイムズ研究所とレアアースの有効利用、リスク低減に関する活動を推進するため、協力協定を締結した¹⁷。これを受けて「第1回日米希少金属ミーティング」を開催し、レアメタルのサプライチェーン、リサイクル技術、及び磁性材料の理論研究について日本の研究者らと情報交換が行われた¹⁷。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> レアメタル回収用の微生物カプセルを大量生産（年間30~40トン）できる製造設備が、森下仁丹(株) 長浜工場に完成した。 森下仁丹(株)とオリックス環境(株)が、電子基板などの廃棄物からバイオカプセルを活用したレアメタル・貴金属回収の事業化検証を開始した¹⁸。 従来の乾式製錬所を中心に据えた金属リサイクルから脱却し、使用済み製品の集積地域において有用金属リサイクルが実施できる地域完結型技術を研究開発・事業化するために、政策も含めて新たなアプローチが必要である。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> レアメタル、ベースメタルの回収に関する大学・国立機関における基礎研究レベルは高く、研究成果も多い。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 米国エネルギー省は、自国のエネルギー安全保障上で必要とされるレアアース資源の国内供給不足を解決する技術開発機関としてCMI（Critical Materials Institute）⁷を設立した。 CMIにおける研究拠点であるエイムズ研究所を中核として、国立研究所や大学、民間企業が参画し、レアアースなどの採掘・製造・代替・有効利用・リサイクルに関する革新的な技術開発が行われている⁷。現時点では、バイオ利用リサイクル技術を開発したという情報は無い。
	産業化	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> 現時点ではレアアース・レアメタルのリサイクルに関して見るべき産業化事例はないが、CMIの設立⁷を契機に、米国でのレアアース回収などに関する基礎研究、応用研究・開発、産業化が急速に進展することが予想される。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 過去（2003-2006年）にバイオマイニング（天然鉱石からのベースメタルのバイオ抽出技術開発）に関する大規模国際プロジェクトが実施された研究土壌があり、有用金属のバイオ利用回収に関する基礎研究を推進する基盤はでき上がっている。 都市鉱山からのレアメタル回収の基礎研究は活発に行われている。 英国ラフバラー大学には、サステイナブル研究センター（The Centre for Sustainable Manufacturing and Reuse/Recycling Technologies）が設置されており、金属リサイクルに関するライフサイクルアセスメントなど社会科学的研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 英国バーミンガム大学L.E. Macaski教授の研究グループでは、バイোসorptionやバイオミネラリゼーションを利用するレアメタル（特に白金族金属）回収について応用研究が進められている。 英国政府がクリティカルメタルの安定供給のために政策強化、ORM（Office of Resource Management）を設立し、備蓄、リサイクルなどを促進する¹⁴。このORMの設立を契機に、英国でのレアアース回収に関する応用研究・開発が積極的に行われることが予想される。

欧州	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 世界最大のリサイクラーと称されるユミコア社（本社ベルギー、世界各国に関連会社）では、レアメタル（白金族金属）を中心としたリサイクルが実施されている¹⁹⁾。日本発信の新規バイオ利用リサイクル技術の特許ライセンスを販売する相手先として、動向を注視する必要がある。 世界大手の白金族金属の生産業者であるジョンソン・マッセイ社（英国）、ヘレウス社（本社：ドイツ）、BASF社（本社：ドイツ）などにおける白金族金属リサイクルの市場規模は、我が国をはるかに凌駕していると推測できる。なお、2013年6月にはジョンソン・マッセイ社（東京）、2013年9月にはBASF社（スイス、東京）、2014年5月にはヘレウス社（東京）が、バイオミネラルリゼーションを利用するレアメタル回収技術について情報収集のために日本人研究者と面談している。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 2011年に「International Biohydrometallurgy Symposium」が中国で開催されて以降、論文のレベルは別として、鉱石（天然資源）のバイオリーチングに関する論文の発表件数が急増している。 都市鉱山を対象にしたバイオリーチングやバイオソープションに関する論文は増加傾向にあるが、バイオミネラルリゼーションに関する論文は見当たらない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 海外の廃棄家電品などを輸入して貴金属などのリサイクル事業は現に行われているが²⁰⁾、古典的な方法によってリサイクルが実施されており、環境に対して多大な負荷を与えていると推測される。基礎研究から地道に知見を積み上げてリサイクル技術を作り上げる応用研究・開発については、情報が入手できなかった。
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 金(ゴールド)の鉱石を処理対象に、海外技術（BHPビリトン社、英国の鉱山系企業であり、南アフリカで大規模操業）を導入して、バイオリーチング商業化プラントが2001年から稼働している。 世界中から廃棄家電品などを買い集めて、自国内（台州市など）での貴金属リサイクルを強力に推進しているようである²⁰⁾。ただし、技術レベルは非常に低く、環境負荷が大きい方法でのリサイクルと推測される。 前首相（胡錦濤）の時代から、豊富なレアメタル資源を自国に持ちながら、アフリカを始め世界各国に対して資源外交を積極的に展開中であり、その動向を注視する必要あり。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 日本や中国に比べると、レアメタル回収に関する研究報告は少ない。 レアメタル資源確保に向けて、韓国地質資源研究院などが国内資源の探査を行っている²¹⁾。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> レアメタル回収について、応用研究はそれほど行われていない。 G20首脳会議など多国間の外交チャンネルを使って、レアメタル分野の国際協力を進めている。例えば、ボリビアとはリチウム抽出の技術協力を、カザフスタンなど中央アジアとはレアアース資源の共同探査、アフリカでもレアメタル共同探査を進めている^{21, 22)}。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 都市鉱山からのレアメタル回収について、産業化まではまだ至っていないと考えられる。 中央アジアに対して韓国政府がレアメタル、レアアースの獲得を目的とした資源外交を積極的に推進しており、韓国の経営者が中央アジアを有望な市場の1つと見ている²³⁾。

(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

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 原田幸明, 醍醐市朗, よくわかる「都市鉱山」開発、日刊工業新聞社 (2011)
- 2) 鉱物資源マテリアルフロー ((独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構)
http://mric.jogmec.go.jp/public/report/2012-12/2012120116_PGMs.pdf
- 3) 小西康裕 (監修), “特集: レアメタル・貴金属回収バイオプロセスの最前線”, バイオインダストリー (シーエムシー出版), Vol. 31, No. 2, pp.3-61 (2014)
- 4) 小西康裕, レアメタル・貴金属回収に有用な微生物とその機能, バイオインダストリー, 31 (2), pp.4-12 (2014)
- 5) 小西康裕, 田川大輔, 微生物カプセルによるレアメタル・貴金属の環境調和型回収, 自動車技術, 67(11), 95-100 (2013)
- 6) 経済産業省 WEB サイト <http://www.meti.go.jp/committee/summary/0002319/g90728e01j.pdf>
- 7) (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 WEB サイト
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100210.html
<http://www.nedo.go.jp/content/100531109.pdf>
- 8) 小西康裕, 金属イオン還元細菌による貴金属・レアメタルの分離と回収, 環境資源工学, 60, 90-95 (2013)
- 9) 小西康裕, 金属イオン還元細菌を用いるバイオミネラリゼーションによる貴金属ナノ粒子触媒の創製, 触媒, 55, 232-238 (2013)
- 10) JST, A-STEP【FS ステージ】探索タイプ事後評価一覧 (平成 24 年度下期終了課題) 分野ナノテクノロジー・材料 http://www.jst.go.jp/a-step/hyoka/tansaku_h2607/tansaku_c.html
- 11) 田川大輔, バイオカプセルによる工業廃水・電子基板などからのレアメタル・貴金属回収, バイオインダストリー, 31 (2), pp.56-61 (2014)
- 12) 経済産業省 WEB サイト
<http://www.meti.go.jp/information/downloadfiles/c120810a01j.pdf>
- 13) (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 WEB サイト
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100224.html
- 14) Metal Bulletin (日刊), 7 頁, 2014 年 7 月 11 日
- 15) 日本経済新聞, 2013 年 4 月 30 日 朝刊
- 16) 森下仁丹(株)プレス発表 (2013 年 5 月), http://www.jintan.co.jp/pdf/file_4.pdf
- 17) (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 WEB サイト
http://www.nedo.go.jp/ugoki/ZZ_100243.html
http://www.nedo.go.jp/ugoki/ZZ_100302.html
- 18) 森下仁丹(株)プレス発表 (2014 年 2 月),
http://www.jintan.co.jp/pdf/140226_jintan01a_file.pdf
- 19) ユミコア社 WEB, <http://www.umicore.jp/ja/>
- 20) NHK クローズアップ現代 (2011 年 1 月 18 日放送「『都市鉱山』を狙え～レアメタル争奪最前線」), <http://www.j-cast.com/tv/2011/01/19085946.html>
- 21) 東洋経済新報, http://www.toyo-keizai.co.jp/news/topics/2010/post_4165.php
- 22) 首相官邸 WEB, <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/package/dai9/siryou1.pdf>
- 23) 船井総合研究所の運営サイト「経営企画室.com」<http://www.keieikikaku-shitsu.com/report/3>

3.6.9 生物多様性・生態系

(1) 研究開発領域名

生物多様性・生態系

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

生物多様性の構造・機能および環境との相互作用と応答の解明、生物多様性機能と生態系サービス評価法の研究開発、および生物多様性情報に基づいた生物資源の持続的活用と生物規範技術に関する知識の創出。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

3-1. 生物多様性の構造・機能および環境との相互作用と応答の解明

生物多様性は、遺伝子多様性、種多様性、生態系多様性という、複数のレイヤーで構成されている。そのうち種多様性とは、ある場所に存在する種の多様性であり、生物多様性を解明する上で最も基盤的な情報である。現在、地球上には約 180 万種の生物が認識されているが、これは地球上の総生物種の一部でしかなく、1000 万～1 億種の存在が推定されている。特に、土壌や水中に生育する微生物については解明が遅れている。微生物相の解明は、この数年で普及してきた次世代シーケンサーの登場で新たな進展が期待されている。しかし、未知生物由来のメタゲノム情報は国際的に大量に得られるようになったが、生物の同定方法や遺伝子機能解析技術に関する基礎情報が不足している。生物分布情報に関しては、国際機関である GBIF¹⁾ (Global Biodiversity Information Facility) により、4 億件を超える情報がインターネット上で公開されているが、対象分類群や地域に偏りがある（特にアジア地域が不足）。生物分布情報収集の国際的トレンドとしては、デジカメやスマートフォンを使用した、市民参加型の調査が普及しつつある。

種レベルの多様性に比べ、遺伝子レベル、生態系レベルでは解明度が低いが、最近の遺伝子・ゲノム解析技術の発達により、急速に発展する可能性ができてきた。特に生態系レベルの多様性で重要となる生物間相互作用は、相互作用の検出からその機能的関係まで踏み込んだ研究が始まりつつある。この分野の基盤とし利用可能な分子遺伝学的研究でのマメ科植物と根粒菌やアーバスキュラー菌との共生の解明²⁾、サンゴの全ゲノム解読³⁾などの遺伝子・ゲノム分野の研究成果があり、遺伝的多様性および環境との相互作用に結びつけることで、生物多様性の機能的側面の解明が急速に進むと思われる。これらの知見は、保全や利用への基盤となり、生物資源の活用、産業化につながるが、そのデータベース化や統合化は国内ではそれほど進んでいない。一方で、EU の pro-iBiosphere プロジェクト⁴⁾による生物多様性に関する知見管理システム構築や米国主導の EOL⁵⁾ (Encyclopedia of Life) への、生物機能情報や形態画像情報の付加など、国際的には生物多様性情報の利用に向けた統合化が始まっている。

3-2. 生物多様性機能と生態系サービス評価法の研究開発

生物多様性条約第 10 回締約国会議 (COP10) において制定された愛知目標 (ポスト 2010 年目標 (2011-2020)) の目標達成に向けた生物多様性評価が必要とされている⁶⁾。GEO-BON では現在、生物多様性評価のための指標 (indicator) を策定する作業が行われているが、ま

だ十分な指標策定までには至っていない。その背後には、利用できる生物多様性情報がまだ十分ではないことがある。生態系サービス評価の基盤としての生物多様性評価基準の重要性がさらに増してきている。

地球温暖化影響評価に関しては、GBIFなどに蓄積されている生物分布情報に基づき、生態ニッチモデリングと多様な気候変動シナリオを用いた分布変化・絶滅予測がさまざまな生物群で行われている。海洋では水温上昇や濁度など個別の要因の研究や海洋酸性化の影響に関する研究が推進されている⁷⁾。新たな気候モデルを用いたサンゴ分布など生態系変化に関わる将来予測が行われている⁸⁾。これらは複数の要因が複合的に作用していると考えられるが、生態系機能の解明や環境との相互作用などの情報が十分でない。

生態系サービス評価に関しては、国際科学パネルであるIPBES⁹⁾（Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services）が2012年に設立され、第一次評価書の策定作業中である。生態系サービス推定のための包括的なソフトウェアの開発としてNatural Capital Projectにより総合パッケージInVEST¹⁰⁾

（<http://www.naturalcapitalproject.org/>）の開発が行われている。ただし、現時点での生態系サービスの推定アルゴリズムは単純なものであり、解析地域に合わせたパラメータ最適化が必要とされる。

3-3. 生物多様性情報に基づいた生物資源の持続的活用と生物模倣技術に関する知識の創出

生物多様性に関する知識に基づいた応用研究や産業化は今後大きなイノベーションを生み、多大な経済効果が期待される分野である。例えば、地球の気候変動の進行に対して、生物資源の持続的利用には、生物や生態系の特性に知識に基づく適応的管理が不可欠である。国際的には生物模倣技術は新たなフェーズに入ろうとしている。これまでの素材や生物機能の模倣に加え、生物の行動や生態系、進化の模倣を取り入れた研究開発や応用が模索されている。EUでは、ドイツを中心に大規模な生物規範技術開発プロジェクトが始まり、国際的には生物模倣技術の規格化が進められている¹¹⁾。2010年の米国・ファイナンシャルタイムのレポートでは、生物規範技術は2025年に年間3000億ドルの経済効果が予測されている。生物模倣技術を利用した実際の研究開発は、工学分野を中心に行われているが、そのシーズとなる発想は生物多様性分野からの情報提供が重要となる。国内では、科学研究費の新学術領域にて「生物多様性を規範とする革新的材料技術」が採択され、生物の微細構造の画像データベースの作成と、新たな検索方法が提案されている¹²⁾。愛知目標に関して、企業は生物多様性に大きな影響を与えているため、その保全と持続可能な利用に向けた取り組みが強く要請されている。山林事業を展開する企業（住友林業など）では、独自に「生物多様性宣言」や行動指針、長期目標を制定している¹³⁾。この中では生物多様性再生・維持・拡大の目標設定として、「国内社有林に於けるモニタリング調査」、「海外植林事業に於ける、HCVF（保護価値の高い森林）の調査」、「社有林内に生息する可能性がある絶滅が危惧される動植物のリスト（レッドデータブック）の作成と社員・請負業者への配布」、「国内外山林事業に於ける森林認証制度の認定取得」などが含まれる。

（４）科学技術的・政策的課題

4-1. 生物多様性の構造・機能および環境との相互作用と応答の解明

- ・生物多様性解明にむけての技術的課題は、それぞれの多様性レベルにおいて存在する。種レベルの多様性解明は、すべての多様性研究の基盤であるため、全生物を網羅したインベントリ研究手法の確立と、種の同定と新種記載を迅速に進める作業フローの確立する必要がある。特に新種記載は、従来の手法では最も時間のかかる作業であるため、DNA バーコーディングなどの分子生物学的手法を取り入れた、新しい作業フローの作成、および論文出版と同時に関連データベースへ情報が入るような情報技術を取り入れた電子出版の政策的サポート、補助金を使用した研究のデータのアーカイブ登録の義務化などのオープン・サイエンス政策の促進を行う必要がある。
- ・次世代 DNA シークエンサーの登場により、野生生物種の全ゲノム配列決定も可能になり、多様性生物学分野でも利用されてきている。特にこれまで効率のよい解析方法が存在しなかった微生物の生物相やその機能解析に対して大きなインパクトを与えている。例えば、土壌中では、どのような生物種が、どれくらい存在し、どのような生態的機能を担っているかはこれまで情報を得るのが困難であった。新しい技術を利用することで、メタゲノムや発現遺伝子の解析が可能となってきた。生態系機能と結びつけての大型研究プロジェクトが、米国や中国ですでに開始されている。日本でも大型プロジェクトとして環境 DNA 解析は行われているが、全体的には、検出された遺伝子と、実際の生物種や生態系の中での機能の関係などに踏み込んだ研究はまだ十分に進んでおらず、特に情報解析手法の新たな開発を含め積極的に進める必要がある。このような研究は、生態系機能の応用研究や、新たな遺伝子資源の開発などにもつながるものとして大きな期待を持てる。
- ・生物多様性条約において、名古屋議定書¹⁴⁾が発効となり、発展途上国が遺伝資源という観点から生物の採集や利用について厳しい制限が予想される。この事態に対応し、米国やアジアでは中国・韓国が国家戦略として熱帯地域の開発途上国への研究投資を始めている。日本は 1960 年代より、東南アジアの開発途上国を中心に生物多様性に関する共同の基礎研究を行ってきたが、生物多様性の応用研究や産業化を見据えたより密接な研究協力体制を構築していくのが急務である。
- ・日本人の、日本国内や東アジア・東南アジアでの生物多様性研究は、国際的に見て高い水準にある。しかし、最近の長期間必要な基礎研究への予算削減と、分類学者の減少・高齢化などにより、生物多様性研究の潜在力に翳りが見られるので、対策が必要である。

4-2. 生物多様性機能と生態系サービス評価法の研究開発

- ・生物多様性の保全・持続的利用を政策として、効率よく効果的に実行するには、科学的知見に基づいた計画作成が求められている。そのため、まず生物多様性の情報基盤のさらなる充実が求められる。現在、GBIF において利用可能な生物分布情報は 4.4 億件であるが、その中で日本の生物の情報は 330 万件に過ぎない。一方で日本の所有する生物多様性情報は数億件と推定されている。このギャップの主要因はデータ所有者が公開に消極的なことである。日本での多様性分野研究の発展のためには、オープン・サイエンスのポリシーに

基づき、現状の改善を図る必要がある。幸い、GBIFの国内ノード活動やその他のプロジェクト（たとえば文部科学省のGRENE環境情報¹⁵⁾）で情報加工および発信の体制はできているので、各省庁や独立行政法人などの情報所有者に働きかけ、生物多様性情報の公開を進める必要がある。

- 生態系サービスの推定に関しては、上記のような生物多様性情報基盤の充実とともに、推定方法の研究開発が必要である。生態系機能の推定までは、基盤情報を充実することにより実現が可能であるが、生態系機能から人間社会にとっての恩恵である生態系サービスの推定を行うためには、その一部に価値判断を入れる必要があるため、新たな枠組みが必要となる。その1つは地域社会の政策決定者や住民などの関係者（ステークホルダー）との対話によるフィードバックであり、さらにそのための情報視覚化のためのツール開発などが必要となる。また、各地域で生物多様性情報から生態系サービスの推定を容易に行えるようにするための、アプリケーション開発およびそのためのアルゴリズム研究が必要とされる。

4-3. 生物多様性情報に基づいた生物資源の持続的活用と生物模倣技術に関する知識の創出

- 生物多様性に関する知識に基づいた応用研究や産業化は今後大きなイノベーションを生み、多大な経済効果が期待される分野である。例えば、地球の気候変動の進行に対して、生物資源の持続的利用には、生物や生態系の特性に知識に基づく適応的管理が不可欠である。社会実装の必要性。単に科学的研究のみでなく、実際の利用には社会学者と協力して、ステークホルダーとの対話により、現実的な案として社会実装をしていく必要がある。
- 生物模倣技術の分野は単に材料技術分野だけではなく、今後の方向性として生態系や進化を規範とするパラダイムシフトによる技術革新が予測される。しかし、生物多様性分野と工学分野とのコミュニケーション基盤は十分ではない。この分野の発展を促すためには生態系の機能や生物間相互作用、進化様式などの新しいタイプの生物多様性情報を集積・統合して、幅広いユーザーが利用可能な基盤を作る必要がある。

(5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- 国際な生物多様性情報基盤の構築は、ここ数年でかなり進み、種名データベースのCOL¹⁶⁾(Catalogue of Life)は既知種180万種中の150万種が採録され、生物分布情報ではGBIFが提供する情報は4億4千万件を超えた。また、種同定のためのDNAバーコードライブラリを構築するiBOL¹⁷⁾(International Barcode of Life)では登録種数が20万種を越え、登録配列数は300万件を越えた。これらの情報に基づき、マッシュアップ手法で種の百科事典構築を目指すEOLは、種特性情報や形態画像情報、生物間相互作用情報が扱えるようになった。このように国際的な生物多様性情報基盤は、質・量ともに着実に充実してきている。その一方で、集積分類群や地域の偏りが見られ、分類群では昆虫以外の無脊椎動物が、地域ではアジアとアフリカ地域の情報が少なく、これらの充実を力を入れなければならない。また、これらの情報を以下に効率よく検索し、利用できるようにする

という点と、応用アプリケーション・ソフトウェアの開発を進めることも必要である。そのような目的で、EU では pro-iBiosphere を立ち上げている。

- ・地球環境研究の国際プログラムの再編が進み、国際科学会議（International Council for Science: ICSU）参加のプログラムおよびその関連プロジェクトの統合された Future Earth¹⁸⁾とよばれる巨大な枠組みが 2013 年に作られた。Inter-disciplinarity（自然科学、社会科学、工学、人文学などの学術分野の垣根をこえた「学際性」）と Trans-disciplinarity（学術と社会の間の垣根をこえる「超学際性」、社会のさまざまなステークホルダーの参加）が重要視されている。この Future Earth 計画は、主要先進国の研究助成機関の連合体であるベルモントフォーラムも連動している。生物多様性分野でも、生物多様性影響評価や生態系サービス予測の結果を社会に反映させていくためにも Inter-disciplinarity と Trans-disciplinarity を意識した研究開発に取り組む必要がある。
- ・生物模倣技術は、生物の形態や機能を規範とすることにより、これまで新素材や機能性の開発に数々のイノベーションを作り出してきた。そして最近では、生態系や進化を規範とすることにより、低エネルギー作動、少廃棄物社会、適応的順応策など、地球環境に対して低負荷な技術を作り出すといった研究へと広がりを見せている。また、生物模倣技術の定義や内容などの ISO による国際標準化がドイツ主導で始まっていて、国際的な関心が高まっている。このような生物模倣技術を進めるにあっては、規範となる生物に関する情報、特に生物多様性情報の基盤整備を行うことが不可欠である。

（6）キーワード

生物多様性、種多様性、遺伝的多様性、生態的多様性、生物間相互作用、DNA バーコーディング、生態系サービス、生物模倣技術

（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"> 日本国内や東アジア・東南アジアでの生物多様性研究は、高いレベルにある。生物相の解明などは、最近の長期間必要な基礎研究への予算削減と、分類学者の減少・高齢化などにより、生物多様性研究の潜在力に翳りが見られる。 地球環境観測（GEOSS）の観点から、生物多様性観測の重要性が認識されている。環境研究総合推進費戦略的研究開発領域 S-9 など、大規模プロジェクトにより、観測の組織化が行われアジア地域での研究は進んでいる。 ゲノム解読などの分野の研究は特筆すべき進展があるので、生物多様性研究への展開が期待される。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 生物多様性保全や自然再生事業など、生物多様性情報を利用した取り組みに向けての研究開発が進みつつある。 生物多様性を応用研究につなげる方向性として生物模倣技術に関してのプロジェクトが行われている。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 生物多様性研究そのものは、応用研究や産業化の基礎研究であり基盤であるため、現時点では産業化までは至っていない。しかし、今後、生態系サービスや生物多様性の持続的利用、遺伝資源など経済活動に密接に関わることが期待される。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究は高いレベルにあり、特に最先端の機器や情報科学を用いた生物多様性研究が発展している。 NSF の生物多様性関連大型プロジェクトが行われている。 民間の資金を活用した活動、特に市民活動と連携した生物多様性プロジェクトが盛んである。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究の成果を、生物多様性の持続的利用に向けた環境科学へ発展させている。 生物多様性評価や生態系サービス推定のアプリケーション・プログラムが作られ、高い市場シェアを有する。 オープンサイエンスポリシーを推し進め、NOAA や NASA の衛星観測データなど、数多くの環境関連データセットを整備している。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 将来の産業化へ向けて、国家戦略として生物多様性分野の研究活動への投資が行われているが、まだ十分な成果は上がっていない。
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 博物学の時代からの伝統を引き継ぎ、基礎研究は高い水準にある。また、近年EUとして生物多様性研究に力を入れており、特に生物多様性情報学分野への研究投資が行われている。 EU 主導の生物多様性関連の新プロジェクトが複数進行中。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 応用研究に関しては、日本と似た状況であるが、生物多様性情報学の基盤構築は発展している。
	産業化	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> 日本と同様、産業化へ向けての国家戦略として生物多様性分野の研究活動への投資は少ない。 EU として、生物模倣技術への支援が開始され、生物多様性情報の整備は進みつつある。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 生物多様性分野では、20世紀後半は基礎研究を担う研究者が少なかったため、あまり高い水準の研究は行われてこなかった。しかし、現在は、積極的な研究への資金導入と研究者育成が行われ、基礎研究においても研究水準が急速にあがり、論文数では日本を上回っている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 国家戦略として、遺伝資源の観点から生物多様性研究の大型プロジェクトが進んでいて、生物多様性情報の整備も進んでいる。 BGI を中心にゲノム情報の集積が進んでおり、それらの情報の応用が期待される。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 将来の産業化へ向けて国家戦略として生物多様性分野の研究活動への投資が行われているが、まだ産業化には十分に結びついていない。
韓国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 生物多様性分野に携わる研究者数が増えており、基礎研究の研究水準が急速にあがっている。 新たに複数の国立自然史系博物館が建設され、生物多様性研究活動を開始している。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 国内機関の生物多様性データを統合し、データベース化し、研究者コミュニティや一般社会に情報を提供している。 民間企業も加わって、環境修復技術の研究や応用・実践も行われる。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 将来の産業化へ向けて国家戦略として生物多様性分野の研究活動への投資が行われているが、まだ産業化には十分に結びついていない。

豪州	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 大学・公的機関における基礎研究水準は高い。 サンゴ礁研究では世界をリードしている。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> Atlas of Living Australia Project¹⁹⁾により、多様な生物多様性情報の収集および電子化が進んで情報基盤が整備されたとともに、開発されたソフトウェア・ツール群が国際的に利用され始めている。 重要海域や保全優先区域選定のためのソフトウェア Marxan が開発され、世界中で活用されている。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> まだ十分な産業化には至っていない。

(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

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Global Biodiversity Information Facility (GBIF), <http://www.gbif.org>
- 2) Hakoyama, T. et al. 2009. Nature 462, 514-7.
- 3) Shinzato, C. et al., 2011. Nature, 476, 320–323.
- 4) pro-iBiosphere, <http://www.pro-ibiosphere.eu/>
- 5) Encyclopedia of Life (EOL), <http://www.eol.org>
- 6) Convention on Biodiversity: Aichi Biodiversity Targets, <http://www.cbd.int/sp/targets/>
- 7) Brownman, H.I., 2008. Marine Ecology Progress Series, 373, 199-309.
- 8) Yara, Y. et al., 2012. Biogeosciences Discussions, 9, 7165–7196.
- 9) Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), <http://www.ipbes.net/>
- 10) InVest (<http://www.naturalcapitalproject.org/>)
- 11) ISO/TC 266 Biomimetics, http://www.iso.org/iso/standards_development/technical_committees/other_bodies/iso_technical_committee.htm?commid=652577
- 12) 生物多様性を規範とする革新的材料技術 <http://biomimetics.es.hokudai.ac.jp/>
- 13) <http://sfc.jp/information/news/2012/2012-03-15.html>
- 14) Convention on Biodiversity: The Nagoya Protocol on Access and Benefit-sharing, <http://www.cbd.int/abs/>
- 15) Green Network of Excellence 環境情報分野 <http://grene.jp/>
- 16) Catalogue of Life, <http://www.catalogueoflife.org/>
- 17) iBOL (International Barcode of Life), <http://ibol.org/>
- 18) Future Earth, <http://www.icsu.org/future-earth>
- 19) Atlas of Living Australia Project (ALA), <http://www.ala.org.au/>

3.6.10 生態適応

（1）研究開発領域名

生態適応

（2）研究開発領域の簡潔な説明

生態系の構造と機能、ならびに生物間相互作用の研究基盤を発展させることで、生態系が本来有する環境変化への適応力（レジリエンス）のメカニズムを解明し、そうした生態系の性質を、生物多様性や生態系サービスの保全、気候変動や災害の緩和などに活用することで持続可能な社会の実現に寄与する研究開発領域。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

3-1. 生態系が有する環境変化への適応力（レジリエンス）のメカニズム解明

生態系の重要な構成要素である生物多様性そのものの解明が1992年のリオ・地球サミット以降、生物多様性条約をはじめとする国際的な取り組みとして進められるようになった。これらは、国際組織（GBIF:Global Biodiversity Information Facility）¹⁾、政府レベル、そして市民レベルといった多様な主体による生物多様性モニタリング事業、生物相のインベントリ調査、そして種の同定や調査手法についてのキャパシティービルディングなどがある。同時に、生物多様性の過去から現在にわたる博物館標本や文献の情報収集と整備も進められている。こうした情報ならびに解析パッケージの提供を受け、生物種の絶滅リスク評価や優先的保護区の選定が可能となり政策に活用できるようになってきた。生物の分布情報と気温や標高などの環境要因の双方から行う対象生物種の分布予測や保全優先地域などは地図上に面的に示すことが可能であるため、生物多様性と政策の親和性を高める効果を生み出している。さらに、リモートセンシングを活用した生態系評価についての研究開発も活発になり、森林などの一部の生態系については、広域で、生物多様性と種々の生態系機能（生産や分解能力など）の地図化が可能になってきた。また、最近の遺伝子・ゲノム解析技術の発達を受け、種のDNAバーコーディングが進められている。こうした遺伝子技術や情報は、今後、形質が不明瞭な種の判別、新しい生物多様性モニタリング手法の開発、野生生物の保全などに幅広く活用されることが期待される。特に、絶滅危惧野生生物種については全ゲノム解読や全個体ジェノタイプングが研究レベルで実施されるようになっており、将来的に向け絶滅危惧種の積極的な保全活動への活用が期待される。

生物多様性条約制定以降、生物多様性の価値づけに係る研究の流れとしては、生物多様性が生態系に果たす役割を明確に評価するために、生物多様性と生態系機能(BEF: biodiversity and ecosystem function)の関係に関する研究が展開された。少し遅れて、生態系が人類社会に提供するサービスを評価する研究、生物多様性と生態系サービス(BES: biodiversity and ecosystem service)についての研究が展開している。

BEFは実験と検証という手法で、この20年の間に陸域、海洋、淡水域の500以上のタイプの生物について600以上の実験研究が実施され²⁾、1)生物多様性の損失は、生態系の生産、分解、栄養塩循環などの生態系機能の効率を下げる。2)多様な生物群集ほど生産性が上がるという結果は、多様性が高いと生産性に大きく寄与する重要種が含まれる確率が高くなるからであり、生物種の機能形質に着目することで、生態系機能の予測が高まる。3)生

物多様性は生態系機能の安定性を増加させる。4) 生物多様性の損失と生態系機能の損失の関係は非線形であり、生物多様性の損失が増えるに従い機能の損失変化は加速する。5) 生態系には種の多様性損失より機能形質の多様性の損失のインパクトが大きく現れる。6) 食物連鎖の栄養段階をまたがる多様性の損失は、一つの栄養レベル内の多様性の損失より、より強く生態系機能に影響する、といったことが明らかにされた。しかし、これらは時空間スケールとも小規模で単一の「生態系」(例えば、草地の植物群集のみを対象)で得られた結果であるため影響の出方が過小に評価されていると考えられている。そのため、現実の生態系に近い時空間スケールでの関係性の解明ならびに影響評価と予測の現実性を高めるため、より長い時間スケールで、多数の生態系プロセスを包む生態系を対象とした研究開発が強く求められている³⁾。特に、気候変動などの環境変化が各生態系の生態系機能に与える影響評価・予測は、大スケールのデータに基づいた解明が求められている。現在、様々な外的圧力に対応する形で消失リスクの高い機能形質を明らかにする研究、食物連鎖などをはじめとする様々な生物間相互作用を考慮した上で生物多様性損失が生態系機能に及ぼす影響を解明する研究、生物多様性の損失のインパクトを、気候変動、オゾン層の破壊、汚染など他の環境変動の大きさと比較し生態系機能の劣化の程度を評価する研究⁴⁾などが展開している。中でも、炭素循環に係るフラックスは気候とのフィードバックがあるため知見が集積されてきている。

一方、BESは生物多様性の主流化がなかなか進まなかったのとは対照的に、2005年MA(Millennium Ecosystem Assessment)⁵⁾の公表を契機に国際社会に急速に浸透した。BEFを生態系の基盤サービスと位置づけ、それを土台に、我々人間社会が生態系から得ている様々な恩恵を、供給、調整、文化サービスに分類整理することで、生態系ごとに、個別のサービスを認識させるとともにサービスごとの価値づけを実施し、土地利用(ランドスケープ)の改変や変化が各サービスに及ぼす影響評価についての手法開発や評価が展開中である。現段階では、生物多様性と生態系サービス(供給と調整)との関係については強い連関があることは示されているものの、その出方に一定の方向性はなく結論を得るには研究の蓄積が必要である。本研究は、生物学・生態学に留まらず、社会経済や文化を取り入れた分野横断研究として展開しているのが大きな特徴である。国際的にはMAの流れを引き継ぐ形で2012年IPBES(Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services)⁶⁾が設立され、科学的評価、能力開発、知識の創出、政策立案支援を4つの柱として、2014年から2018年までの5年間に実施する18の作業計画が決定されスタートした。日本からも2014年7月現在で19名の専門家が選出されている。IPBESでは「生物多様性」、「生態系サービス」ならびに「人間社会の福利」のMAでの関係フレームが拡張され、「社会関係資本」や「制度・統治」なども組み込まれた。成果は2020年目標(愛知目標)以降の生物多様性条約の評価や目標に活用されることが期待できる。

生態系はある程度の攪乱や環境変動に対し、その機能を失わずに維持できる「レジリエンス」を備えている。これは生態系の適応力とも言うことができる。系の安定性や攪乱に対する系の応答については、従来からの理論的研究に加え、1990年代後半には外的攪乱に対する生態系のレジームシフトについての野外観察の事例が複数の生態系で報告されるようになり、外的攪乱のタイプや大きさ、それを受ける生態系の特徴の双方から生態系の非線形の応答パターンやその要因についての解明が展開された。2010年に発表されたGBO3(Global Bio-

diversity Outlook³⁾の結語でも、生物多様性と生態系の状態の突然の変化が度々起こるが、変化の転換点（tipping points）へ導く閾値は広範囲で、フィードバックの増幅、タイムラグの効果のため、変化の予測と制御は困難で、一旦起きると回復が困難（不可逆的）であることが言及された。ここ 2-3 年、変化予測のためのティッピングポイントの検出技術の開発などが、LTER (long-term Ecological Research 本報告文(5)注目動向「米国の動向」に後述) など具体的な長期の生態系モニタリングデータを活用する形で活発に進んでいる^{8,11)}。また、地球規模や地質時代といった時空間スケールでの研究も展開している^{12,13)}。

3-2. 生態系の適応力（レジリエンス）を活用した研究技術開発

生態系への配慮を欠く土木工事などが河川や港湾などで多くなされ、生物多様性と生態系機能が大きく損なわれたことへの反省や、日本では河川法など幾つかの法律の枠組みに環境が入った 1990 年代後半から、生態系管理や自然再生（Ecosystem-based management や Ecosystem-based adaptation and mitigation）が生態学の知識に基づいて順応的に実施する技術開発や成功事例が集積しつつある¹⁴⁾。さらに、生物多様性と生態系についての知識が増えるに従い、持続可能な社会の実現のために、生態系や生態系の仕組みをより活用してこうと、現在、様々な生態系適応技術の開発が行われている¹⁵⁾。

農業技術では、化学肥料と農薬に強く依存した単一栽培型農業の脆弱性を克服する持続可能な適応型技術として、作物品種を混作することによる病害の抑制¹⁶⁾、天敵による害虫被害の軽減や花粉媒介昆虫の活動性を高めるための周辺景観の管理¹⁷⁾、気候変動などの環境ストレスに対応する品種を育成するための作物の遺伝的多様性の収集・保存¹⁸⁾などの開発が行われている。

森林資源管理技術では、木材供給だけでなく森林の多面的機能を活用する適応型技術として、病害虫による被害、森林火災、台風などの自然災害による被害を緩和する樹木の多様性と空間構造を活かした混交林による森林資源管理技術¹⁹⁾、シカやサルなど増大する野生動物の被害を緩和する林地や農地などの景観配置の管理²⁰⁾、津波・高波被害の緩和のための海岸林管理²¹⁾などの研究技術の開発がある。

特に熱帯林については、21 世紀に入っても南・東南アジア、南米、アフリカでの消失に歯止めがかからない状況があり、その保護・保全は、気候変動の緩和と生物多様性保全の双方の点から国際的に優先度の高い課題である。保護区は設定されてはいるものの、保護区周辺の森林の消失が著しい。しかし、その存在は保護区の生態系機能を高めることがしられるため、商業的な生産を目的とする土地利用であっても多面的機能を備えた森林生態系が適切な管理により維持されていることが必要であり、熱帯林の持続的利用を目指す技術として、低インパクト伐採やアグロフォレストリーなどが実施されている。低インパクト伐採²²⁾は、利便性や商業的価値の高い樹木を優先的に伐採する択伐ではなく、林内破壊や生物多様性の減少を最小限にする管理手法の開発、アグロフォレストリー²³⁾は、熱帯林を切り払いプランテーションが拡大する中、地域住民の慣習として古くからおこなわれてきた、多様な樹木、様々な作物の栽培や畜産を行う複合的な管理で、土壌の肥沃化や土壌流出防止、病害虫の制御、生物多様性の保全、高い炭素固定能など多面的な機能を有する。また、炭素固定の点からも優れている。REDD (UNFCCC 2007) や REDD-plus (UNFCCC 2009) などの国際的枠組みもでき社会経済的な検討が進められている。

また、気候変動に対応するための品種改良²⁴⁾や樹種の積極的移植²⁵⁾などについての検討も、そうした「人為的な」管理技術が引き起こすと考えられる別の側面での生物多様性や生態系影響への検討も含めて行われている。

海洋資源の保全と利用に関する適応技術では、乱獲により枯渇が進む漁業資源の持続的管理技術²⁶⁾、劣化の進む沿岸域（藻場や干潟）の再生²⁷⁾、海洋保護区（MPA: Marine Protection Area）の設定²⁸⁾、環境負荷低減型の養殖生産技術²⁹⁾などについての技術開発が進展している。

都市における適応型技術では、将来的に人口が集中する都市の景観計画に生態系機能を取り入れる技術の開発が実施されている。例えば、ヒートアイランド現象の緩和のための都市林の設計³⁰⁾、都市の洪水制御機能として集中豪雨の流量増大インパクトを緩和して雨水を循環させ都市域に滞留させる手法³¹⁾などが検討されている。都市から排出される道路流出水などの汚染水を直接公共用水域に流出させないための人口湿地の造成¹⁵⁾や都市緑地の景観配置を工夫して生物多様性の維持効果を高める生態系ネットワーク³²⁾の造成なども検討されている。

さらに、新興感染症の発生や拡大の予防・緩和に、生物多様性や景観の異質性などが役立つことなどがわかってきており¹⁶⁾、防疫技術の活用なども考えられている。

湿地、森林、沿岸システムなど健全な生態系は、人間社会がハザードに晒されることを緩和し人間の暮らしを支える、すなわち人間社会の社会・経済的なレジリエンスを高める役割がある自然のインフラストラクチャーであるとの認識が広がっている。人工のインフラストラクチャー（グレイインフラ）に比べ、低コストのグリーンインフラストラクチャーとして、気候変動や災害のリスク緩和に積極的に活用すべきだとする Eco-DRR（Ecosystem-based disaster risk reduction）が 2013 年に UNEP³³⁾や IUCN³⁴⁾から提案されている²¹⁾。

生物多様性と生態系サービスを活用して人々が気候変動に適応できるように助ける戦略（EbA：Ecosystem-based approaches for adaptation）は、CBD(2009)サブスタや UNFCCC(2011,2013)でも取り上げられている。ただ、まだ体系だった研究がなく成功事例やケーススタディーの記述に留まっている³⁵⁾。ここ、数年でこうした研究は大きく進展するのではないかと考えられる。

（４）科学技術的・政策的課題

4-1. 生態系が有する環境変化への適応力（レジリエンス）のメカニズム解明

- ・生態系が有する環境変化への適応力（レジリエンス）のメカニズム解明は、時間・空間の両方からより大きなスケールでの研究が必要である。少なくとも 10 年以上に渡る長期のモニタリングや広域をカバーする観測を保証するファンディング制度が必要である。また、長期にわたり実証的な研究ができるフィールドサイトは、森林、草地、沿岸域、湖沼、河川、湿地などの生態系ごとに大学の附属施設などを有効に活用できるようにインフラを整備すべきである。開発独法の研究機関においても生態系のフィールド観測サイトや設備の拡充などが求められる。米国ではすでに 1990 年代半ばより NSF の資金サポートで LTER（long-term Ecological Research）の複数のサイトが戦略的に運営されており、長期にわたるモニタリングや検証実験などが活発に行われてきた。米国では NSF の資金サポートで LTER を受けた研究は 3 年後にはデータの公表が義務付けられているため研究者側も努力で応えている。さらに、米国では生態系のティッピングポイントの検出などに関する研

究も、蓄積された長期モニタリングデータを活用して先んじて実施され成果を出している。我が国でも JaLTER（日本における長期生態系モニタリングサイト）が大学や開発独法の研究機関の研究者主導で組織運営されているが、ファンディングは個人研究者の科研費などに頼っている現状である。生物多様性や生態系は、地域ごとに生物構成種も異なるなど地域特異性があるため、日本のみならずアジア地域の生物多様性・生態系観測拠点のインフラとファンディングの充実が望まれる。

- ・生物間相互作用の研究展開については、各生態系や生物群集構成などにより異なるため、地域ごとに生物種や生態系をよく理解している研究専門家集団の知識に大きく依存する。そのため、研究専門家集団の育成と安定した職の提供が重要である。また、身近な自然の減少に伴い幼少のころから自然と生物に親しみ、生物についての知識を吸収する機会が減っていることとも関連し、生物多様性や生態系の重要性についての啓蒙・啓発活動を担う専門家の育成も大切になる。現在は、生態学の知識を学んだキャリアの職種が企業や行政職に用意されていないことが本分野の主流化を阻害するボトルネックとなっている。
- ・生物多様性や生態系サービスの研究は社会経済や文化を取り入れた分野横断研究として展開する国際的な潮流である。そのため、生態学の専門家自身が分野横断的な研究指向をもつ必要がある。また、急速に研究の国際化が進んでおり、分野横断や国際共同研究を支援するファンドや制度が必要である。特に、アジア地域の生物多様性や生態系についての現地調査などには、相手国との相互理解、情報の収集、相手国の研究者の育成、名古屋議定書の発効による知財など、研究マネージにも相当な時間をとられるため、研究ファシリテートする制度や人材が用意されることが有効である。
- ・生物多様性や生態系の基盤的な研究技術を適応技術として活用する場合にも、基盤的な知識をもつ研究者と技術的な応用分野の研究者との連携が必要である。同じプログラムやプロジェクトで協働できるような制度の拡充が必要である。また、産官学連携をより推進させることも有効である。

4-2. 生態系の適応力（レジリエンス）を活用した研究技術開発

- ・生態系の適応技術の実装には、生態学と実学（工学・農林水産学・医学）のみならず、生態系の保全や活用について、社会・経済面でのインセンティブをどのように構築するかといった社会制度の研究とそれとの密な連携が不可欠となる。現代の社会経済システムでは、一部の供給サービスを除く生態系サービスが、タダ同然に扱われており、そのことが、これほど大きな生物多様性の損失と生態系の劣化を引き起こすに至った原因でもある。生態学と工学・農林水産学・医学といった実用的科学技術のみならず、社会学、社会心理学、経済学、法学などとの *trans-disciplinary* なフレームでの研究プログラムを組んで進めていく必要がある。そうした意味でも、研究者の側にたった研究プロジェクトのマネージャやファシリテート機能が重要になる。近年、大型プロジェクトには、研究者OBがプログラムマネージャーなどで就くが *fund agency* と研究者との事務連絡を実施しているに留まっている。また、第三者としての研究評価委員は、制度としては必要であるが、必ずしも、研究の進展や発展を支援するものではない。
- ・生物の分布は地史に基づいて決まっており、国や行政区とは無関係である。しかし、適応技術の施策の実施は、土地の行政区や所轄省庁ごとに行われることが多いため、例えば水

域生態系を扱う場合に重要となる流域単位での空間スケールや対象とする生物の移動分散や再生産の時間を考慮した時空間スケールでの施策などの実施が困難な状況がある。生物多様性や生態系の保全・活用に関わる施策については、効力のある府省連携を組む必要が求められる。

- ・生態系適応技術にも深く関係する生物多様性情報（データ）と知財の関係性の整理が必要である。文献から収集した過去の生物の分布情報データなどの「生物多様性分布情報データベース」は、今後、何らかの制度で copy-left になっていかないと社会還元が遅れると考えられる。例えば、希少種や絶滅危惧種の分布情報は、それらの種の生息地保護のために研究者にはオープンにされない場合があり、優先的保護区の設定など新規の知識・政策情報に活かされない場合が生じている。環境省などの公的資金で行われているモニタリングサイト 1000 事業などでは GBIF への登録が前提とされているものの、他府省のモニタリング事業などでは扱いが曖昧である。また、生物多様性・生態系についてのモニタリングや情報整備には、必ずしも公的資金が十分投入されておらず、研究者が主体となるレベルに留まっており、普及や活用のボトルネックになっている。
- ・国際的な課題として、気候変動枠組条約に生物多様性や生態系の研究者の参加が少ない。UNFCCC と CBD の連携や IPCC と IPBES の連携なども今後の課題である。
- ・新たな遺伝子組み換え作物の利用など、遺伝子技術の発達などに伴い生態系の人為的管理が進んでいくことが想定される。今後、倫理面からの検討や社会的合意形成を図る手法なども必要になってくると考えられる。科学技術の進歩により、めまぐるしく変化・「発展」している現代社会にあって、短期的利害にとらわれることなく長期的な見通しをもつて行動することが必要となっている。「ヒト」が進化的な発達において、物事の認知能力や危機管理、未来志向に、こういった特性を示すのかを歴史的文脈で理解し、そのような理解を適応技術に取り入れていくことも必要になる。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

国際的動向

Future Earth にはベルモントフォーラム（funding agency）が用意され3か国以上の共同研究としての本分野の公募研究が始まっている。IPBES の最近の動向については3-1. で述べたとおり、2014年から2018年までの5年間に実施する18の作業計画が決定されスタートし、おのおので専門家会合が開催された。今後 report の writer が900名世界中から公募される見通しである。本委員は地域性、マイノリティ、ジェンダーバランスにも配慮がある。日本では女性の研究者数が圧倒的に少なく、また、重要な地位に就いていない傾向が他国より明白に表れている。

生態系についての基礎研究では NSF の資金に基づき米国が圧倒的にリードしている。生物多様性や生態系の適応技術の実装については英が進んでいる。「生態系サービス」という考え方もヨーロッパ・キリスト教的な価値である。自然そのものを聖地とする、また、精霊が棲むとする、アジア社会やアジア諸国の歴史や地域性に適合した科学を構築するための人材、資金が必要である。

日本の動向

2008-2012年の期間に東北大学のグローバル COE プログラム「環境激変への生態系適応に向けて教育研究」が実施された。2011年の東日本大震災、IPCC 第5次評価報告書、将来の人口減少などを受け、学術会議環境学委員会環境政策・環境計画分科会（2014）³⁶からは「いのちを育む安全な沿岸域の形成に向けた海岸林の再生に関する提言」、学術会議環境学委員会自然再生分科会（2014）からは「復興・国土強靱化における生態系インフラストラクチャー活用のすすめ」（予定）など、生態適応の活用を求める提言が公表された。現在、環境研究総合推進費ではS14「気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究」が準備されている。具体的な都市の持続性や気候変動に対する土地利用や生態系の最適利用戦略の研究には、まだ生態適応が取り入れられていない。

アメリカの動向

NSFなどの資金をバックに1990年代からLTER（long-term Ecological Research）を主導的に、かつ戦略的*に実施してきた。世界中の各種生態系の長期モニタリングサイトの整備とデータの蓄積、データベース化の促進（研究者がデータを公表することを奨励するデータペーパー制度の創設）、LTERサイトでの実験などを活用し、生物多様性と生態系機能の関係に関する実験的研究、レジームシフトやティッピングポイントなどの検出に係るモデリングなどで研究を先導している。しかし、一方で、技術の適応については、ヨーロッパほど積極的ではない。例えば、GIについては、EUや英国と異なり、GIの技術を経済的な利益につなげようとする意図での技術開発を進めている。主に都市の水循環の管理や気候変動の緩和に適用。雨水管理や洪水防止にグリーンインフラを適用することで、インフラ整備の費用対効果を高めるなど、経済的な利益を追求。都市緑化や都市における雨水対策が主である。（* 発展途上国の生態系情報について、学生を米国で育成し、母国への帰国後LTERのサイトを担当させるなど）

ヨーロッパの動向

生物多様性と生態系機能の関係に関する実験的研究、レジームシフトやティッピングポイントなどの検出に係るモデリングなどの研究は活発に実施され成果をあげている。生態適応という考え方に捉われることなく、生物多様性・自然再生に自然環境のネットワークを積極的に取り入れ、より豊かな生態系サービスを得ようとする政策が動いている。EU Green Infrastructure Strategy³⁷、Communication from the Commission 2013³⁷や英国ではNatural England's Green Infrastructure Guidance³⁸など。

中国・韓国の動向

中国では汚染が深刻化しているため、生態系機能を活用した適応技術に巨額の研究費をつぎ込んでいく。博士号取得研究者の就職率は高い。また、海外で職を得ている中国人研究者を北京大学など中国国内の大学機関の客員教授として採用し、研究費をサポートする、また共同研究を推進するなど論文を量産している。生物多様性については、場の保全には熱心でなく種の保存に研究費が回っている。

韓国は、2014年10月平昌でCOP12が開催される予定であり、最近、韓国の環境研究所の

一部門であった生物多様性・生態系の研究部門は **Institute of Ecology** として独立させ国として力を入れている。

（6）キーワード

生態適応、生態系適応、生態系機能、レジリエンス、ティッピングポイント、ヒステリシス、レジームシフト、生物多様性、生物間相互作用、生態系サービス

（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"> 2009年のJ-BON、AP-BONの設立、および2010年のCBD-COP10開催以降、生物多様性観測の重要性が認識されてきた。環境研究総合推進費戦略的研究開発領域 S-9「アジア規模での生物多様性観測・評価・予測に関する総合的研究」（2011-2015）の生物多様性評価の研究などに多くの人材を投入し、東北大学のGCOEの終了以降、生態系機能や生態系適応への研究資金の投入が継続的になされていない。 一部の大学での研究に大きく依存している。大学付属研究機関の役割として、従来、農学・林学といった学問分野での利用に留まっており、生物多様性や生態系の研究への積極的活用が遅れている。 生物多様性・生態系分野への研究予算が欧米や中国・韓国と比べて十分でないなど問題がある。 生物学のミクロ研究（分子生物学や生化学）とマクロ研究（生態学）の連携が希薄である。 生態系研究は横断的な性格を有するが、研究体制や予算配分において省庁の縦割りとなっていて、研究を効率的に発展させる点で問題がある。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 日本は、技術面が得意であるが、生態学者は往々にして技術に疎く、生態学の知識がない研究者が応用研究や開発に携わっており、生態学的に捉えて「生態適応」と言えないような技術も多々ある。分野を越えた研究プロジェクトに資金を投入することで、解決されていくと考えられる。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 一部、都市の屋上の緑化、都市公園のデザインなど、従来の造園学が生物多様性などを取り入れた形で産業化されているといえるかもしれないが、本来、自然をそのまま活用することは大きな経済的利益を生み出さないし、速攻的な効果を期待する分野でなく産業化は進みにくい。ただ、日本の恵まれた自然環境を活用した良質のエコツーリズムなど、産業化できる材料はある。今後、自然再生や生物多様性の持続的利用、遺伝資源からの利益の公平な配分（ABS）など、経済活動に密接に関わることが期待される。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> NSFの資金、LTERのインフラ、研究者層の厚さなどにより基礎研究は高いレベルにありインパクトの高い雑誌に多数の論文を発表している。 NOAAやNASAが衛星データに基づくデータセットの整備、最先端の機器、情報整備なども抜きん出ている。 気候変動への適応や緩和などについての研究も抜きん出ている。 米国は広大な国立公園が国有地として整備されており、そこを拠点に生態系に関する様々なデータがとられ、研究に活用されている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> カリフォルニアなどは、すでに気候変動などの影響による乾燥化が著しく進んでいる。また、森林火災なども発生している。ハリケーンによる災害や海水面の上昇への対応、科学的データに基づいた漁業資源の保全など、基礎研究の成果をもとにした社会実装が進んでいる。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 将来の産業化へ向けて、国家戦略として生物多様性分野の研究活動への投資が行われている。 グリーンインフラストラクチャーについては、ヨーロッパほどには関心は高くないようである。

研究開発領域
グリーンバイオ

欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 米国ほどの派手さはないが、研究水準は高く、多くの論文がインパクトの高い雑誌に公表されている。 博物学の時代からの伝統があり、EUとして生物多様性・生態系研究に力を入れている。CBD, GBIF, IPBES, Future Earth など多くの国際的枠組みで各国をリードしている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> Ecosystem based approach については、実装への努力が多国間の協力としてなされてきている。特に、河川や流域管理については、一国では解決が困難であり、努力と克服の姿勢がある。環境の課題に敏感で熱心に取り組んできた背景や、トラスト運動や寄付などをする国民性、NGO 活動なども盛んであることが関係している。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 技術開発は進められている。
中国	基礎研究	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> 1990年代後半ごろまで、生物多様性研究への関心は高かった。これは、伝統的に中国科学院が分類学研究に力を入れてきたことや、大型の機器などがなくともできる地道な研究により達成が可能であったこと、また、中国大陸が多くの気候帯を含む生物多様性の宝庫という面もあり、絶滅危惧種や希少種が多く存在しており欧米研究者の関心も高かった。しかし、経済発展路線の影響で、保全より保存研究にシフトした。また、他国で活躍する研究者層が厚い印象を受ける。 2000年代の初頭は、中国における環境問題の深刻さと生物多様性の危機が世界的注目を集め、主要な中国人研究者がこのことに関わる研究を活発に行った。しかし、近年は生物多様性のみの研究では研究費獲得が難しく、かつ中国は論文数や掲載雑誌のインパクトファクターをかなり重視することから、多くの研究者はこれらをより満足する研究内容にシフトしてきている。 生物多様性や生態系情報は、国家の厳しい管理下に置かれている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 国家戦略として、遺伝資源の観点から生物多様性研究の大型プロジェクトが進んでいる。 自然環境の劣化により、自然再生などの研究に莫大な予算が計上されている。ほとんどが、基礎生態学の知識が乏しい研究者などにより実施されているケースも見受けられ、1990年代の日本のように短期的な成果を追い求める環境工学的傾向の強い研究が多い。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 将来の産業化へ向けて、国家の投資が行われている。
韓国	基礎研究	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> 2014年COP12の開催前に Institute of Ecology を設立、国として本分野の研究に力を入れている。まだ、目立つ論文の公表はない。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 民間企業も加わって、河川環境修復技術の研究や応用・実践も行われている。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 進んでいるとはいいがたい。

(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

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Global Biodiversity Information Facility (GBIF) <http://www.gbif.org>
- 2) Cardinale, B.J et al. (2012) Nature, 486, 59-67.
- 3) MacDougall et al. (2013) Nature, 494, 86-89.
- 4) Hooper et al. (2012) Nature, 486, 105-108.
- 5) the Millennium Ecosystem Assessment: <http://www.maweb.org/en/index.aspx>

- 6) Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES)
<http://www.ipbes.net/>
- 7) GBO3 (Global Biodiversity Outlook 3) <http://www.cbd.int/gbo3/>
- 8) Wang,R. et al. (2012) Nature, 492, 419-422.
- 9) Scheffer, M.et al. (2012) Science, 338, 344-348.
- 10) Carpenter,SR et al. (2011) Science, 332, 1079-1082.
- 11) Batt,RD et al, (2013) PNAS, 110, 17398-17403.
- 12) Higgins and Scheiter (2012) Nature, 488, 209+
- 13) Barnosky et al. (2012) Nature, 486, 52-58.
- 14) 日本生態学会(2010) : 自然再生ハンドブック 地人書簡
- 15) 東北大学生態適応グローバル COE 編(2013):生態適応科学
http://gema.biology.tohoku.ac.jp/textbook/TOHOKU_tanpage_sizeM.pdf
- 16) Keesing,F et al. (2010) Nature, 468, 647-652.
- 17) Takada,MB et al. (2012) Biological Control, 60, 169-174.
- 18) Feuillet,C et al. (2008) Trends in Genetics, 24, 24-32.
- 19) Boyd,IL et al. (2013) Science, 342, 823+.
- 20) Enari, H and Suzuki, T. (2010) Landscape and Urban Planning, 97, 83-91.
- 21) Temmerman, S. et al. (2013) Nature, 504, 79-83.
- 22) Boissiere, M. et al. (2013) Ecology and Society, 18, 4, UNSP 13.
- 23) Phalan,B et al. (2011) Science, 333, 1289-1291.
- 24) White, T et al. (2014) Forests, 45, 301-309.
- 25) Marris, E (2009) Nature, 459, 906-908.
- 26) Worm,B. et al. (2009) Science, 325, 578-585.
- 27) Weinstein MP et al. (2014) Ecological Engineering, 65, 71-87.
- 28) Edgar, GJ et al. (2014) Nature, 506, 216+.
- 29) Shi, HH et al. (2013) Aquaculture, 410, 172-178.
- 30) Stone, B et al. (2013) Environmental Science and Technology, 47, 7780-7786.
- 31) EPA(2014) EPA's Green Infrastructure Program,
http://water.epa.gov/infrastructure/greeninfrastructure/gi_training.cfm
- 32) Levey DG (2005) Science, 309, 146-148.
- 33) UNEP "Disasters, Environment and Risk Reduction (Eco-DRR)" Master's Module,
<http://www.unep.org/disastersandconflicts/Introduction/DisasterRiskReduction/Eco-DRRMa sterModule/tabid/106372/Default.aspx>
- 34) IUCN (2013) 減災 (災害リスク軽減) のための環境の手引き—人間の安全保障と気候変動適応のための健全な生態系。日本語版製作・発行 生物多様性 JAPAN
- 35) Doswald, N. et al. (2014) Climate and Development, 6:2, 185-201.
- 36) 日本学術会議 (2014) <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-t140423.pdf>
「いのちを育む安全な沿岸域の形成に向けた海岸林の再生に関する提言」
- 37) Europe Comission 欧州委員会 (2013) EU Green Infrastructure Strategy, Communication from the Commission
- 38) Natural England (2011) Natural England's Green Infrastructure Guidance

3.6.11 環境浄化

（１）研究開発領域名

環境浄化

（２）研究開発領域の簡潔な説明

「環境浄化」には、物理的、化学的、生物的に環境汚染を浄化する方法があるが、ここでは生物的浄化をその領域として捉える。生物による環境浄化は、「バイオレメディエーション」と呼ばれ、微生物や植物の生物学的な働きを利用して、汚染された土壌、水、大気に含まれる汚染原因物質を無害な物質に分解し浄化する技術として取り上げる。

（３）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

3-1. バイオレメディエーション技術による浄化対象環境汚染物質

一般に、バイオレメディエーションは、汚染された土壌及び地下水の浄化法が主に上げられるが、国や地域によっては河川や海洋の汚染を生物的に浄化することも含まれる。近年、土壌汚染（地下水汚染を含む）が問題となる中、その浄化手段として研究開発・実用化が進み、生物による分解、濃縮除去技術の有効性も示されてきている。

対象となる主な環境汚染物質としては、ベンゼン、トルエン、エチルベンゼン、キシレンなどの石油製品（BTEX）、鉛に代わるハイオクガソリン添加物のメチルターシャリーブチルエーテル、工業用ポリ塩化ビフェニール（PCB）、ドライクリーニングなどに使用されるトリクロロエチレンなどの塩素系溶媒、化学工業跡地に多い、フェノール、クレゾールなどのモノ芳香族炭化水素、ポリサイクリック芳香族炭化水素（PAHs）、ダイオキシンなどの有機塩素系難分解物質や汚染重油などの分解や水銀、カドミウム、鉛、ヒ素などの重金属に加えて、プルトニウム、ウラニウム、放射性セシウム、ストロンチウム、さらには殺虫剤や除草剤の残留農薬、過剰使用化学肥料からくる窒素、カリウム、リンなどの河川への汚染物質までその対象が広がっている。

3-2. バイオレメディエーションの工法

土壌地下水汚染対策としてのバイオレメディエーションは、「バイオスティミュレーション」および「バイオオーグメンテーション」に分けられ、「ファイトレメディエーション」および「遺伝子組換え技術」も別分類されることもある。

①バイオスティミュレーション工法：汚染土壌や河川・海洋などにすでに生息している微生物を増殖させるに必要な酸素や栄養物質を注入・添加して、それら微生物を活性化させ、汚染物質の分解などを促す方法。米国では、ガソリンスタンドや航空燃料の漏洩汚染の除去に、欧州では油汚染、農薬汚染、ガソリン汚染浄化に実施されている。EU ではスペイン、イタリアなど地中海の汚染地域で、微生物、海藻などによる浄化効果を広範囲に調査している。日本では、化学工場跡地の残留化学物質の除染に利用されている。

②バイオオーグメンテーション工法：対象とする汚染物質の分解活性や蓄積能をもっている微生物を培養して、汚染場所に添加（接種）する方法。地中・水中に分解菌がいなければスティミュレーション法よりも浄化効果が期待できる。米国、欧米、日本での実施例も多い。キノコ栽培による汚染物質の分解浄化も行われている。

③ファイトレメディエーション工法：植物による汚染物質の吸収除去法。特に、微生物や化学的に分解できないカドミウム、鉛、水銀などの重金属を植物により吸収濃縮させた後、焼却して灰にして保管する。米国やインド、ラテンアメリカなどで実施例がいくつかあるが、欧州や日本では研究開発段階がほとんどである。

④遺伝子組換え技術：上記2) および3) の微生物及び植物の遺伝子組換えにより、分解活性や重金属蓄積能を飛躍的にあげた研究開発例は多い。海洋での重油汚染の分解浄化に適した組換え細菌も開発されている。野外の汚染地域では、国の規制や環境団体の反対で実施例はほとんどない。

バイオレメディエーションの工法には、「施設型」と「現場型」があり、従来の多くは汚染土壌を掘削し、別の場所に運搬して処理する「ランドファーミング」と呼ばれる施設型が実施されている。最近では汚染された場所で浄化処理する「原位置浄化法」（英語で *in situ remediation*）の現場型が注目されている。

3-3. バイオレメディエーション工法の利点と問題点

生物の特性を利用したバイオレメディエーション工法は、低コストかつ環境負荷が低い技術として、今後の利用拡大が期待されている。従来から行われてきた浄化法は、汚染土壌などを掘削あるいは汚染水をポンプアップして処理場に運搬し、高温で化学物質などを分解、昇華させたり、オゾンなどの化学的酸化により無害化させたりする方法であった。従来法の方が、分解浄化効率は高く、短期間で浄化が確実であるが、掘削運搬と処理場が必要なことからコスト高となる。トリクロロエチレンなどの塩素化エチレンの浄化例によると、施設型のランドファーミング法は原位置浄化のバイオオーグメンテーション法に比較して、約10倍のコストがかかる。かつ臭気や煙など処理場近くの住民の承諾が得られにくい現状がある。

一方、バイオレメディエーション工法は浄化に期間がかかる、土壌の状態や地下水の流れにより効果が異なる、寒冷地には適さないなどの問題がある。しかし、汚染場所にアクセス不能な区域に採用でき、原位置浄化法はその効率上利点が多い。広範囲な汚染に対して有利である。稼働中の場所でも実施可能であり、修復後の環境負荷がなく、二酸化炭素の生成も少ない。

バイオスティミュレーション工法は、天然に生息する菌を利用するため環境調和型であり低コストである。住民の理解も得やすいが、浄化に時間がかかることが多い。一方、バイオオーグメンテーション工法は、スティミュレーション工法で浄化できない場合有効であり、浄化時間も短縮できる。PCBやダイオキシンなどの難分解化合物に有効である。実験室で効果があっても、実施場所で同じ効果が出るかどうか分からない。培養菌を加えるため行政や住民の理解を得るのに努力と時間がかかる。特に遺伝子組換え改良菌に対しては、安全であっても市民の抵抗が予測される為、企業は敬遠している。ファイトレメディエーション工法は、重金属など化学分解できない汚染物質の吸収除去に有効である。植物を植えるため二酸化炭素削減になり、汚染地帯の景観改善を図ることになり住民に歓迎されるが、根が吸収する範囲に限られ、浄化に時間がかかる。何もしないで汚染地のままほっておくよりも、まず適当な植物を栽培することが推奨される。

こうした技術的問題よりも、掘削、運搬、処理業社の既得権による抵抗が問題である。

3-4. 国内の動向

主として土壌を浄化する手段に利用されるため、土地取引の経済状況に左右される。過去十年間、年々土壌浄化全体に対するこの技術の比率は上昇しているが、未だ10%に満たない。しかし、平成22年に改正された土壌汚染対策法の施行により、掘削移動のランドファーミングよりも原位置浄化法が推奨され、今後の利用拡大が期待される。拡大理由として、技術的信頼性が徐々に確立してきた、コストが低下してきた、浄化期間の非急性、汚染土壌運搬・処理地域住民の抵抗などから原位置浄化のニーズが高まっている。

国内の土壌汚染のブラウンフィールド（土壌汚染により利用価値が低下した土地）は、生活や健康への安全性に加えて、土地売却が困難となる経済的意味からもその対策が求められている。潜在的なブラウンフィールドは平成19年度において約2.8万haあり、その汚染浄化には4.2兆円必要とされている（社団法人土壌環境センター報告）。土壌汚染が存在する可能性ある土地は、27.2万haにおよぶと見積もられ、その対策費は数十兆円必要とされる。国内における土壌汚染調査および汚染浄化ビジネスの市場規模は、2008~2010年度の社団法人土壌環境センターや矢野経済研究所の調査結果から推測して2014年度においても2千億円程度にとどまると思われる。このことは、先のブラウンフィールドにおいても、汚染土壌の浄化がほんの一部に留まっていることを示している。このことはまた、地下水や河川の汚染も広い範囲が残っていることをも示している。浄化処理前に、土壌、地下水、河川の汚染状況調査が必要となることから、浄化の施工方法、スケジュールの検討、サンプルの分析業務、測定機器の販売、修復事業および浄化過程及び浄化後のモニタリングと解析などのビジネスが展開される。現在環境浄化を実際に受注している国内企業は約100社であり、測定機器メーカーや分析・販売業者はそれを上回る数がある。しかし、大手ゼネコン4社で環境浄化事業の50%のシェアを占めている。

基礎研究として、フェノール系化合物、ダイオキシンやPCBsなどの難分解化合物の微生物分解と、その遺伝生化学、遺伝子組換え細菌の構築などは、文部科学省および経済産業省のプロジェクトもあって、一時期世界をリードしていたが現在は停滞気味である。

日本には、バイオレメディエーション専門学会はないが、環境関連学会、土壌生態系関連学会、農芸化学会、生物工学会などが、この分野を包括している。しかし、諸外国に比べ生物的環境浄化分野の研究者人口は少なく、上記基礎研究以外、実地応用研究はあまり活発とは思えない。

3-5. 海外の動向

バイオレメディエーション技術による環境浄化は、米国において実施されて以降、各地の様々な土壌、地下水汚染の浄化に用いられてきた（U.S. Geological Survey, 以下USGS）。発端は、1975年にチャールストン郊外において軍のジェット燃料が8万ガロン漏出し、10年後には住宅地まで汚染が広がったこと。1992年にUSGSの科学者たちにより、バイオスティミュレーション工法が提唱され、実施1年後に汚染の75%が減少した。その後、多くの実施例が報告された。例えば、ミネソタ州の原油汚染浄化、マサチューセッツ州の汚泥流出浄化、ニュージャージー州の塩素系溶媒の浄化、サンフランシスコ湾の農薬の浄化、フロリダ州のクレオソートの浄化などが、2000年までに実施された。この時点で約6億ドル要したとされる。米国環境保護局によると、土壌汚染対策に年間60~80億ドルが30~35年間必要と

され、2千億ドルの市場規模が見込まれ、浄化対象地域は約30万サイトと推定されている。こうした背景から、バイオレメディエーションに関するワークショップや国際会議も数多く開催されてきた。

一方、欧州においては、ヨーロッパバイオテクノロジー学会、環境微生物関連学会などがバイオレメディエーション分野を包括し、毎年多くのシンポジウムや国際会議を開催している。石油関連汚染、農薬汚染や重金属汚染が主な対象で、バイオレメディエーションの研究と浄化試験は、オーストラリアや米国と同じような動向である。

アジアの環境汚染は経済発展に伴い、1960～1980年代の日本と同じように、深刻である。中でも、中国では国土の約16%、耕地の19%が重金属や農薬などで汚染されていることが、中国環境保護部と国土資源部の全国土壌汚染状況調査の公表で明らかとなった。地下水、河川、湖水、大気汚染状況は同じく深刻と思える。このことは、農産物や身体への影響が直接考えられることから、早急に対策をとることが求められている。

韓国においては1990年代以降、環境予防、汚染環境の浄化、再生利用技術と製品開発が盛んとなり、2009の政府環境部のグリーン成長の国の目標が後押しして、世界の環境産業をリードする目標を立ててきた。

タイ、フィリピン、インドネシア、マレーシアにおいてもバイオレメディエーション研究は、大学や国立研究所などで行われ、一部日本との研究協力協定も結ばれている。インドでは、特に植物を用いたファイトレメディエーション研究開発が盛んで、毎年この分野の国際学会も開催している。ラテンアメリカやエジプト、ナイジェリアなどのアフリカにおいても、それぞれの環境に適したバイオレメディエーション分野の研究や浄化実験の研究調査報告がなされている。

(4) 科学技術的・政策的課題

- ・バイオレメディエーションによる環境浄化を古くから推奨してきている米国環境保護局(EPA)は、市民への説明を積極的におこなっている(A Citizen's Guide to Bioremediation)。日本の環境省もガイドラインをインターネットなどで提供しているが、一般市民には効果的に届いていない。バイオレメディエーションによる原位置浄化法が広く行き渡らないのは、技術面よりも従来から慣れ親しんできた地方公共団体が、利権がらみで従来法から脱却しないことが大きな要因と思われる。
- ・現在アジアでは、土壌汚染に関する法令が制定されているのは、日本、台湾、韓国で、中国、タイ、マレーシア、インドネシアでは条例などは有るが、早急な法令制定を急いでいる。これらの国では、米国型のリスク評価の仕組みの導入を予定しており、対象物質数も日本より多く、その分析はUSEPA(全含有量)が基本となっている。そのため、日本の環境政策と違った対応を海外展開のためには求められる。
- ・韓国は、政府主導による環境政策により、内需拡大、雇用創出を目指した環境ビジネスが官民一体で動いている。現在の技術力は、欧米や日本とまだ差があるが、近いうちに環境ビジネスでは日本を追い越すことが予想される。
- ・バイオレメディエーション利用のポテンシャルは高いが、成果を得るのに長期間を要することから、大学の卒業論文や修士論文研究になりやすく、結果的に日本ではこの分野の学術研究が低調となっている。一方で、様々な汚染物質を浄化する微生物の探索と改良は、

日本の得意とするところであり、大学や公設機関への研究開発が国によって推奨されれば、環境微生物研究も推進され、海外展開するビジネスの拡大に貢献すると思われる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

5-1. 国内の動向

土壌浄化全体に占めるバイオレメディエーション工法の比率は、10%以下であるが、年々その比率が伸びていることから、今後原位置浄化法の増加とともに確実に伸びると予測できる。バイオレメディエーション工法が伸びる理由として、この技術の浄化効果が認識されてきたこと（実施成功例が増えている）、コストも低下してきていること（5年前より約30%コスト低下したという栗田工業報告がある）、土壌浄化の緊急性が低下していることおよび汚染土壌の処理場への運搬と処理場付近の住民の反対が強いことなどが考えられる。特に、汚染物質分解能にすぐれた微生物の開発によりバイオオーグメンテーション法が浸透していくと予想される。例えば、(株)大阪生物環境科学研究所では、オーダーメイド微生物を活用した環境浄化事業を展開している。

一方で、重金属を結合する改良 MT タンパク質やファイトケラチンを根粒菌内で発現させマメ科植物との共生によるカドミウム汚染土壌の浄化研究や大気中の NO_x や SO_x 汚染物質を選択的に吸収するツタなどの植物の育種など独創的研究も、農林水産省の遺伝子組換え植物の開発プロジェクト下でなされた。また、最近福島原発事故により汚染された土壌中の放射性セシウムの光合成細菌による吸着除去法も開発され、20万ベクレル・kg 土壌の畑の浄化を実施して、放射線汚染規制値以下の野菜栽培も成功している。重金属などのレメディエーションは、レアメタル回収に利用できる。

5-2. 国外の動向

米国において最近も多くの研究が行われている。例えば、コールタールに含まれるナフタレン分解細菌によるニューヨーク郊外の地下水汚染の浄化、トルエンやエチルベンゼンなどの炭化水素を分解する嫌気性菌の分離、製紙工場廃液から分離した特殊細菌によるテトラクロロフェノールのバイオミネラリゼーション、石油汚染土壌の酵母と細菌の共培養による浄化実験、核兵器開発で汚染された土壌のウランを浄化する特殊細菌による実験などの報告がある。また排水中の農薬や土壌のディーゼル油汚染をきのこ類で浄化するマイコレメディエーションや海藻による海洋の DDT の浄化、ボストン湾の PAHs やポリサイクリックアロマティック炭化水素の微生物浄化や重金属を吸収蓄積するシダ類の選択やその遺伝子解析などの注目される研究が相次いでいる。最近では人工細菌のデザイン化が進んでおり、近い将来環境浄化を目的にした微生物の合成が可能となるだろう。

欧州においては、最近の多くが原位置浄化工法であり、ある企業では、欧州 14 カ国で 500 以上のプロジェクトを請け負っている (Regenesis Ltd.)。ギリシャ、イタリア、ポルトガル、スペインでは EU の補助金のため土壌汚染より地中海の重油や環境汚染物質の生物学的処理の研究調査が多い。欧州における環境浄化のうちバイオレメディエーションが占める割合は、約 17% である。オーストラリアでは、バイオレメディエーション技術を応用した侵食した石の遺跡の浄化の実験、またポーランドでも虫食いで傷んだ古文書の浄化の試験があり、応用範囲の拡大が見られる。

土壌、地下水、河川、大気汚染の深刻な中国において、最近の5ヵ年計画で土壌汚染の浄化に約4900億円の予算を充てたが、将来的に数十兆円以上必要となると推測される。そこで、欧米や日本のこの分野への技術協力が求められている。最近、日本の企業も原位置浄化法の技術や飲料水の浄化技術の技術移転も行っている。韓国においては、土壌・地下水汚染の浄化技術を2017年までに先進国並みとする目標を立てている。バイオレメディエーションに関して、特に優れた研究開発は行われていないが、原位置浄化法などすぐに日本の技術を取り入れ、中国やインド、東南アジア、アフリカ諸国にビジネス展開してくることが予想される。

最近では、日本や欧米各国において、環境汚染は収束に向かっているとの見方から、この分野の研究開発が低調となっている。しかし、急速に経済発展する中国をはじめとするBRICS諸国や東南アジアは、環境汚染そのものが深刻化しているため、日本の技術進出が期待されている。しかしその技術もすぐに韓国や中国にフォローアップされ、ビジネスにおいて遅れをとることが懸念される。しかし日本は、伝統的に応用微生物学が優れているため、新しい実用的微生物を探索し、絶えず先端の技術開発を国のプロジェクトとして推進しなければならない。またタンカー事故による重油汚染や地震などによる広範囲の汚染に備えて環境省、経産省や企業も、日本の環境汚染地域においてバイオレメディエーション技術を積極的に利用して、実績を蓄積しておく必要がある。

（6）キーワード

バイオレメディエーション、原位置浄化法、バイオスティミュレーション、バイオオーグメンテーション、ファイトレメディエーション、ブラウンフィールド

（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"> 難分解性環境汚染物質の浄化微生物の探索、分解経路の遺伝生化学研究および組換え細菌の構築など、世界的のトップレベルにあった 科研費などプロジェクトが終了したのち次第に研究が低調になってきた。 大学、公設機関のこの分野の研究者人口が減少傾向にある。日本の環境汚染が収束に向かっていることも関連している。 国内においてこの分野に特化した専門学会がなく、日本微生物生態学会、日本土壌微生物学会、環境バイオテクノロジー学会、日本菌学会、日本極限微生物学会、日本生物工学会、日本環境学会、日本農芸化学会などがこの分野を包括している。したがって、バイオレメディエーションの国際会議の開催もない。 前記5学会が合同で環境微生物学合同大会を開催するのは、よい傾向である（日本微生物生態学会 2014年ホームページ参照）。 日本学術会議の微生物学研連は、上記学会の連携を行っているが、細菌学会など医学系に偏りやすい傾向がある。
	応用研究・開発	○	↘	<ul style="list-style-type: none"> 応用研究は、基礎研究に比べて低調である。 環境省推進プロジェクト：POPs 候補物質「難分解性 PPCPs」の環境特性と地球規模での汚染解析」 農林水産省推進プロジェクト：「遺伝子組換え技術を用いた次世代型植物の開発に関する研究」（平成 11 年～17 年）により、環境保全機能を付与した植物の新規開発がなされた。中でも、大気汚染物質の SOx、NOx などをビル壁面に這わせたツタで浄化する研究や金属結合タンパク質をレンゲソウで発現させて、Cd 汚染稲田の浄化研究は、独創的である。 光合成細菌を利用した、福島原発汚染土壌の浄化試験は成功例として特筆される
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 環境調査、環境浄化、環境設備など環境ビジネス企業は 100 社以上あるが、ゼネコン大手 4 社で 50% のシェアである。 市場は毎年数%伸びている。 汚染土壌の掘削・移動・施設内処理の「施設型」から汚染現場で浄化する「原位置浄化法」に向かっている。この技術をもった企業はまだ少ない。 優れた微生物を分離・育種する技術開発は大学などとの共同研究が必要で、国の支援も必要である。 自治体の環境担当者の指導・育成が必要。自治体により許認可に差があるのを国が統一する必要がある。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 環境汚染物質の微生物分解に関する、遺伝生化学的研究報告が数多くあるが、環境浄化に関しては日本とは逆に応用研究の方が盛んである。研究費獲得に対して、応用研究が獲得しやすく、実績成果が求められるためと思われる。 バイオレメディエーションに関する国際会議、シンポジウム、ワークショップは、2000 年以前は多く開催されたが、最近では欧州での開催が多く、米国からの招待講演も多い。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> バイオスティミュレーション、バイオオーグメンテーション、遺伝子組換え技術はすべて米国で最初に開発された。 海洋の重油汚染浄化を目的とした遺伝子組換え細菌が最初に開発された。 ガソリン、ディーゼル油、MTBE、ジェット燃料、重油などの石油化合物、PCP、クレオソートなどの防腐剤、アセトン、トルエン、PCB などの有機溶媒、農薬・殺虫剤の分解、汚染土壌・地下水の浄化が主なターゲットとなっている。 スパーファンド修正法のもと、1976 年に資源保護回復法の制定、1986 年に地下貯蔵タンク漏出基金の制定がなされた。 国防省による米軍基地跡地の土壌汚染対策研究開発プログラム。 エネルギー省による重金属汚染土壌の浄化研究開発補助金。 農務省、NASA のバイオレメディエーション関連予算などがある。しかし、最近では助成金が低下傾向にある。

米国	産業化	◎	↓	<ul style="list-style-type: none"> ・ 米国環境庁（EPA）が環境保全基準、ガイドライン、監視、指導、市民への広報を行っている。 ・ スーパーファンドサイト、ブラウンフィールドサイトの浄化が州政府や企業によりなされている。 ・ 2002年以降土壌ガス吸引法が減少し、バイオレメディエーションの比率が年々増加している。 ・ インディアナ州でのトリクロロエタン汚染土壌のスティミュレーション法による浄化。 ・ シリコンバレーでの塩素化合物や溶剤汚染土壌のオーグメンテーション法による浄化。 ・ 国防省管轄サイトでの地下水汚染のファイトレメディエーションによる浄化。 ・ その他多くの汚染地における原位置浄化が企業により実施されている。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基礎研究は盛ん。 ・ 難分解環境汚染物質を分解する微生物の生化学や遺伝子解析が多くなされている。 ・ PCBなどの塩素系化合物の代謝生化学プロジェクト（マンチェスター大学他）。 ・ 環境調査のためのメタゲノムプロジェクト（フランス、ベルギー、オランダの大学共同研究）。 ・ 毎年数多くのこの分野の国際会議、シンポジウムが開催されて活発である。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地中海に面した国では、重油、難分解化学物質、農薬などの海水中の汚染調査が広範囲に行われている（EU補助金）。 ・ きのこによる環境浄化プロジェクト（英国、米国、ドイツ、スペイン、オランダの大学の共同研究）。 ・ 重金属汚染土壌浄化プロジェクト。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ EUの環境保全基準を欧州バイオ産業協会 EuropaBio（グローバル企業90社、中小企業1800社が加盟）が制定。 ・ 重油、ガソリン、農薬汚染土壌の浄化が、原位置浄化法により実施されている。 ・ 揮発性有機化合物、ベンゼン、トルエン、エチルベンゼン、キシレンなどの石油系溶媒汚染土壌はスティミュレーション法で実施された（オランダ）。 ・ 炭化水素汚染土壌のオーグメンテーション法およびファイトレメディエーション法により浄化（ドイツ、UNBRELLAコンソーシアム）。 ・ 規制に厳しいドイツ、英国、オランダなどよりその他のEU諸国において汚染サイトが多いことから、その市場が見込まれる。
中国	基礎研究	×	↓	<ul style="list-style-type: none"> ・ ほとんど見るべきものがない。
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ 最近研究報告が増えている。
	産業化	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ 土壌汚染、地下水汚染が深刻で、急速に浄化が始まっているが、バイオレメディエーションによる浄化実績は今のところほとんどない。 ・ 日本企業による、農村地帯などにおける分散型排水処理モデル事業の施設が設置され平成21年より共用開始（日本土壌法ネットワーク）。 ・ 日本や韓国企業による飲料水の浄化は、バイオ技術も取り入れてビジネスが過激化しつつある。しかしすぐに、中国独自でビジネスにすることが予測される。 ・ 近い将来アジア地域やアフリカにビジネスを展開するであろう。
韓国	基礎研究	×	↓	<ul style="list-style-type: none"> ・ 日本や欧米の後追い研究報告が少しあるが、オリジナルな研究はほとんど見受けられない。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 政府として力を入れている（政府環境部のグリーン成長戦略）。 ・ 下水・排水処理技術はほぼ日本並みとなった。 ・ 土壌・地下水の浄化技術を2017年までに欧米並みにする。

研究開発領域
グリーンバイオ

	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2008 年の環境産業部門の売り上げは前年より約 20%の増加であった（韓国環境資源公社統計）。 ・ 政府手動による環境政策により、内需拡大、雇用創出を目指した環境ビジネスが官民一体となって動いている。 ・ 水ビジネスではすでにグローバルに展開しており、近い将来土壌の浄化分野においても日本を上回る企業の進出が予測される。
その他	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ オーストラリアのこの分野の基礎研究は、欧米、日本と同等である。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ インドは、研究開発に積極的である。ルクノールでファイトレメディエーション国際会議を毎年開催している。 ・ インドネシアにおいて、化学工場廃棄物、農薬殺虫剤、重金属汚染の浄化プロジェクトを政府主導で実施している。 ・ 日-タイバイオレメディエーション共同研究（J-RAPID プログラム）。
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ 今後日本、欧米、韓国企業の環境ビジネス展開が進展すると予測される。

（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

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) 環境対応技術開発などバイオインダストリー安全対策調査、バイオレメディエーション事業実態調査報告書、(株) テクノリサーチ研究所、平成 22 年
- 2) A citizen's guide to bioremediation, United States Environmental Protection Agency, www.wpa.gov/superfund/sites
- 3) U.S.EPA contaminated site cleanup information, <http://clu-in.org/techfocus/default.focus/see/Bioremediation/cat/Overview/>
- 4) Bioremediation: nature's way to a cleaner environment, U.S. Geological Survey, <http://water.vsgs.gov/wid/html/bioremed.html>
- 5) T.Y. Sylva and C. M. Kinoshita, Agriculture-based remediation program-Technology development and train in bioremediation, proceedings of the 2000 Conference on Hazardous Waste Research
- 6) Helder J. et al., Anaerobic bacteria metabolism of hydrocarbons, FEMS Microbiology Reviews, 22: 459-473 (1998)
- 7) I M.M. Gillespie and J.C. Phip, Bioremediation, an environmental remediation technology for the bioeconomy, Trends in Biotechnology, 31: 329-332 (2013).
- 8) C. Zhang et al., Synergistic effect of yeast-bacterial co-culture on bioremediation of oil-contaminated soil, Bioremediation J., 18: 136-146 (2014).
- 9) S.K. Karn et al., Bioremediation of 2,3,4,6-tetrachlorophenol by *Bacillus* sp. and *Staphylococcus* sp. isolated from secondary sludge of pulp and paper mill. Bioremediation J., 18: 93-99 (2014).
- 10) EcoWatch, Mushrooms used for bioremediation to clean pesticides from Oregon waterways, <http://ecowatch.com/2014/01/23/>

- 11) Wikipedia, Mycoremediation, <http://en.wikipedia.org/wiki/mycoremediation>.
- 12) K. Ruder, Super microbe cleans up uranium, Genome News Network.
<http://www.genomenewsnetwork.org/articles/>
- 13) K. Dalke, Metal-eating microbe *Geobacter metallireducens* swims, Genome News Network,
<http://www.benomenewsnetwork.org/articles/>
- 14) S.E. DeWeerd, The world's toughest bacterium, Genome News network,
<http://www.benomenewsnetwork.org/articles/>.
- 15) J. I. Xiaoci et al., Assessing long term effects of bioremediation: soil bacterial communities 14 years after polycyclic aromatic hydrocarbon contamination and introduction of a genetically engineered microorganism. OMICS, 2155-6199 (2013).
- 16) The Economist, Bioremediation* bottom feeders, <http://www.economist.com/node/18584104/>
- 17) Earth Sciences: Uranium bioremediation under-mined, Nature Communications, Dec. 18 (2013)
- 18) N.K. Dhama et al., Application of calcifying bacteria for remediation of stones and cultural heritages, Frontiers in Microbiology, doi:10.3389/fmicb,26 June(2014).
- 19) B. Reinert, Seaweed cleans up, Genomes News Network,
<http://www.benomenewsnetwork.org/articles/>
- 20) A. Marcus, In Boston Harbor, microbes clean up,
<http://www.benomenewsnetwork.org/articles/>.
- 21) M. Sainger et al., Remediation of nickel-contaminated soil by *Brassica juncea* and effect of the metal on some metabolic aspects of the plant. Bioremediation J., 18, 100-110 (2014).
- 22) A. Marcus, Cleaning up arsenic, <http://www.benomenewsnetwork.org/articles/>.
- 23) K. Ruder, Synthetic genome has potential value for energy and environment,
<http://www.benomenewsnetwork.org/articles/>.
- 24) K. Ruder, Ferns remove arsenic from soil and water,
<http://www.benomenewsnetwork.org/articles/>.
- 25) A. G. Iyagba and U. S. Offor, Effect of crude oil and biostimulant on growth extract of maize and cowpea, European Scientific Institute, 10, No 6 (2014).
- 26) F. Fava et al., Minute of II experts group meeting and of the general assembly of the section report, EMB2013, Bologna (2013).
- 27) Bioremediation used to alleviate surface water pollution,
<http://phys.org/news/2012-09-bioremediation-alleviate-surface-pollution.html>
- 28) Proceedings of the Microbial Resource Management for Bioremediation of Polluted Marine Environments, Tunisia, Jan 16-18 (2014).
- 29) Advance technologies for contaminated site remediation, Regenesi,
<http://www.Regenesis.com/worldwide/>
- 30) O. Uhlik, Bioremediation,
<http://cxiotul.cz/projekty-vav/seminare/bioremediation-TUL-7-5-uhik> (2013).
- 31) 那須毅寛、日中土壤汚染対策政策セミナー、東京、JICA (2012).
- 32) 西山徹、中国における新たな土壤汚染基準、産業と環境 4月号 (2008).

- 33) J. Chin and B. Spegele, 中国、農地の5分の1近くが汚染。The Wall Street Journal, April 16 (2014).
- 34) 末松顯成、韓国の環境産業について、JETRO ソウル事務所報告 (2010) .
- 35) 日本土壌浄化法ネットワーク、韓国・中国での設置事例、
<http://www7b.biglobe.ne.jp/~npo-dojo/4%20page5/kaigai.html>
- 36) ATM N, Amin, バングラデッシュの環境課題とその政策的対応、OECD 会報 64-1209。
- 37) S. Shrruthi et al., Bioremediation of rubber processing industry effluent by *Pseudomonas* sp., Inter. J. Res. Environ Sci. Technol., 2: 27-30 (2012).
- 38) Bioremediation in Manila, Philippines, Before It's News, Oc. 21 (2013).
- 39) Thailand, Japan collaborate on bioremediation, BioSpectru, Jan. 22 (2013).
- 40) Alvarez APM Alejandra (ed.), Bioremediation in Latin America, Springer (2014).
- 41) State-of-the-art report on bioremediation, its applications to contaminated sites in India, Ministry of Environment & Forest, 12/05 (2011).
- 42) R. K. Sinha et al, Bioremediation of Contaminated Sites: A Low-Cost Nature's Biotechnology for Environmental Clean up by Versatile Microbes, in Plant & Earthworms, Solid Waste Management and Environmental Remediation (T. Faerber and J. Herzog, eds.), Nova Science Publishers, Inc. (2009).
- 43) 村岡元司、土壌汚染関連ビジネスの最新動向と今後の可能性、産業と環境、9月号、17-19 (2012).
- 44) R. Sriprang and Y. Murooka, Accumulation and detoxification of metals by plants and microbes, in Environmental Bioremediation Technologies (S.N. Singh & R. D. Tripathi eds.), Springer, 77-100 (2007).
- 45) Y. Murooka et. al., Bioremediation of heavy metals through symbiosis between leguminous plant and rhizobium with engineered metallothionein and phytochelatin synthase genes, in Microorganisms in Industry and Environment (A.Mendez-Vilas, ed.), World Scientific, 235-238 (2011).
- 46) 佐々木健、竹野健次、光合成細菌による放射能汚染土壌の実用的除染と農業への還元利用、生物工程、92: 281-283 (2014).
- 47) 室岡義勝、生物プロセスシステム工学による FUKUSHIMA の創成、生物工程、92:291-297 (2014).
- 48) 中田晴彦、POPs 候補物質「難分解性 PPCPs」の環境特性と地球規模での汚染解析、
<http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/special/houkoku/data/pdf/slide/RF-0904slide01.pdf>