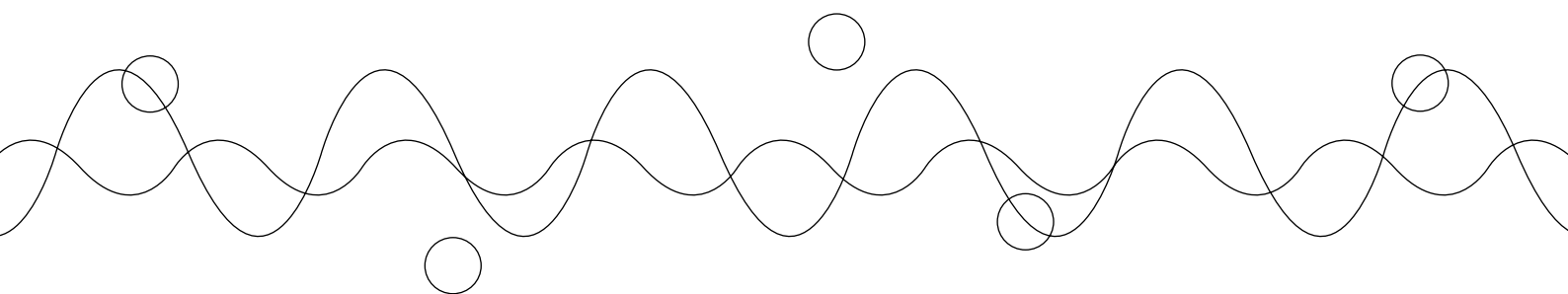


グリーン・バイオ・イノベーションの 創出に向けた戦略研究

～光合成生物の生産・利用に関する新技術の創出によるグローバル課題解決へのロードマップ～



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

Executive Summary

既に世界の共通の認識になっているように、21世紀には、化石燃料使用が2つの要素から制限される。その1つが枯渇あるいは極端な減少であり、他の一つがCO₂排出の問題である。代替エネルギーとしては原子力や太陽光電池などさまざまな手法が可能である。しかし、大型車両・船・飛行機の燃料としての炭化水素（エタノール）の供給は、原子力や太陽電池からでは不可能であり、シアノバクテリアのような細菌から、藻類、高等植物までの多様な光合成生物の太陽光を利用した化学合成に依存せざるを得ない。加えて、石油からは燃料以外にも様々な化合物が作られているが、これらの化合物の生産も将来は光合成生物が担うことになる。光合成生物がつくり出すバイオマスは、エネルギーに利用するだけでなく、食料として利用される。2050年には90億人と予測される地球上の人口を支えるためには、食料としてのバイオマス増産の革新的な技術開発が不可欠である。加えて、環境浄化、医薬品生産などにおいても光合成生物の利用価値は急激に高まっている。一方で、光合成生物は105ギガトンにも及ぶ大気中のCO₂を固定してバイオマスを生産している。この量は人間活動によるCO₂排出量の13倍に相当する。すなわち、大気中のCO₂削減においても、光合成生物の利用は大きな可能性を秘めている。

このように、光合成生物の利用は大いに期待されているが、我が国では、この利用を実現し、産業化までつなげる戦略は必ずしも明確ではない。そこで、本報告書では、この光合成生物を用いたイノベーションを「グリーン・バイオ・イノベーション」と名付け、光合成生物の利用に向けた戦略について、調査・分析を行った。本報告書の特徴の1つは、光合成生物の利用を俯瞰するという観点から、広く、かつ詳細な現状の調査を行ったことにある。対象としたのは、「環境修復、多様性利用」の観点からバイオマス生産、生物多様性利用、環境修復、「資源・エネルギー生産」の観点からバイオ燃料、化成品原料、医薬品原料・酵素等、「食料生産」の観点から作物増産技術、持続農業、機能性作物の創出、である。そして、調査結果を踏まえ、我が国の研究開発水準を把握し、諸外国との競争力比較を行った。その結果、「基礎研究分野では世界的に見て極めて高い水準にある一方で、全体として技術開発や産業技術力については欧米に先行されている」という、我が国の特徴が再確認された。同時に、多くの分野で中国の躍進がめざましく、我が国の技術開発の脅威になりつつある姿も明確になった。この状況はここ数年続いており、応用展開に向けた研究開発の重要性が再認識された。しかし、このアウトラインの理解よりさらに重要なのは、今回の詳細な調査により、光合成生物利用に係わる様々な分野の現状と課題が明白になったことであろう。

以上のような調査を下に、我が国の強み、将来性、産業技術展開力などを総合的に判断し、本報告書では、グリーン・バイオ・イノベーションを戦略的に推進するために必要な、新たな基礎的知見の創出と、その応用展開を見据えた以下の9つの領域を抽出した。以下に、その領域と位置付け（図1）を示す。

- ① CO₂資源化に資する高度光利用技術の開発
- ② 高生産・環境適応植物の設計と作出
- ③ 資源エネルギー低投入型の高バイオマス・高品質バイオマス生産植物の開発
- ④ 持続的農業生産技術の基盤となる作物デザイン技術
- ⑤ バイオマス増産にむけた食用・飼料用作物の次世代育種技術の開発
- ⑥ 植物工場等を活用した高付加価値植物の創製

- ⑦ 生物機能を活用したバイオリファイナリー、環境修復技術の開発
- ⑧ バイオ燃料・素材生産を目指した微細藻類の代謝改変とゲノム育種技術の確立
- ⑨ 植物多様性の化学資源の利活用に向けた基礎研究とトランスレーショナルリサーチ

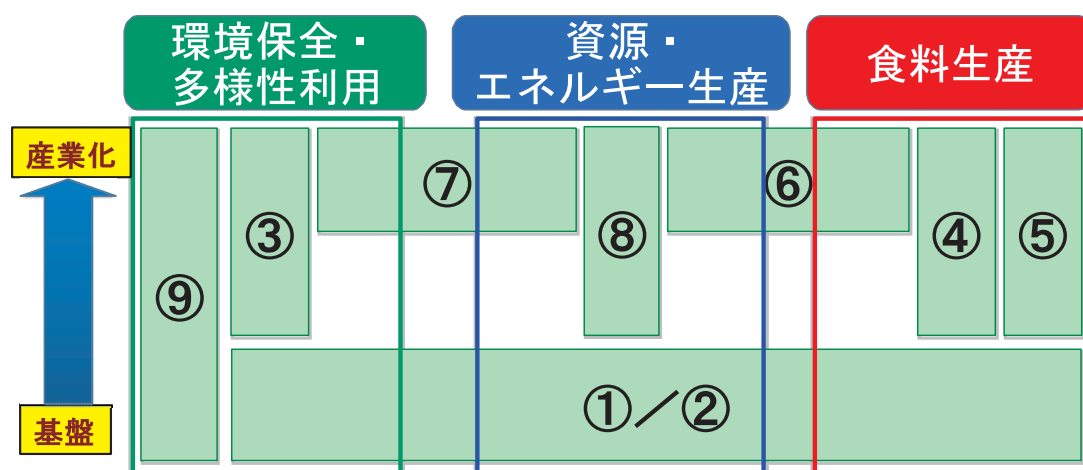


図1 光合成生物の利用に関する重要研究領域の位置付け

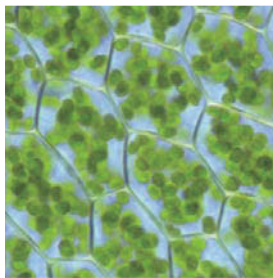
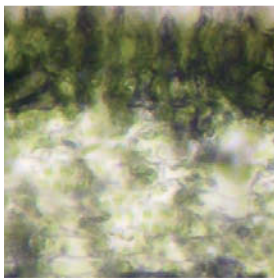
抽出された領域は、いずれも近年急速に進展した光合成生物のゲノム・遺伝子制御の理解に立脚した研究開発で、成果の社会実装に向けた技術的ボトルネックを解決するための課題である。したがって、今後、それぞれの重要領域を積極的に推進することで、我が国のグリーン・バイオ・イノベーションが広範囲で進展すると期待される。また、重要領域の俯瞰作業を通じて、いくつかの領域にまたがる関係も見えてきた。1つは、ほぼ全ての領域の基盤として、①高度光利用技術の開発と②環境適応植物の設計と作出技術の開発があるということである。言い方を変えると、これらの技術の開発は、極めて汎用性が高く、特に積極的な推進が望まれるということの意味している。2つめは、基盤的な領域だけでなく、多くの領域の相互の連携が相乗効果を生み出す可能性が高いことである。例えば、⑦生物機能を利用したバイオリファイナリー技術の開発と③高品質バイオマス生産植物の開発とが連携することでバイオリファイナリーの素材として適したバイオマス生産技術という新たな技術開発が可能になる。また、これに、⑥植物工場を組み合わせることで、組換え植物であるかどうかを気にすることなく、高品質のバイオリファイナリー素材開発が可能になる。3つめとして、これらの課題の推進において、異分野の研究者の融合、連携が必要であることも領域にまたがる特徴といえる。例えば⑦生物機能を利用したバイオリファイナリー技術の開発と環境修復技術の開発では、バイオリファイナリーのための工学、化学に加え、素材の生産に関与する、分子生物学、生化学、植物学、樹木の成長に関与する森林学、農学、また、環境修復では、分子生物学、農学、生態学などに加え、都市工学、環境学、社会学などの連携が必要となる。4つめとして、①、②のようなグリーン・バイオ・イノベーションの共通基盤が存在することに鑑み、大型の解析装置や専用圃場の整備などにより①、②の開発研究の拠点化を図ることで、効率的な投資の下でグリーン・バイオ・イノベーション全体の推進が図れると予測された。5つめとして、重要領域は新領域であり、その発展と継続には、若い力の結集と国際的な連携が必須という点である。したがって、国際連携を見据えた若手研究者の教育と連携を担うシステムの構築が本イノベーション成功の鍵の一つとなると考えられ

る。

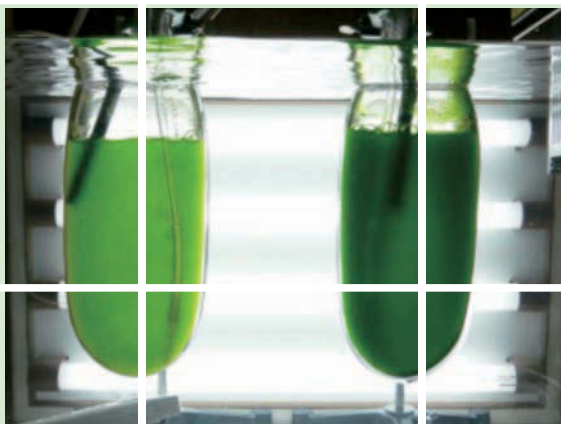
現在、諸外国では、金融危機、温暖化、石油価格の高騰などの課題解決に資する施策として、グリーン・イノベーションに関する多くの研究開発が実施されている。このような流れの中で、我が国では、昨年末に地球温暖化対策や持続的なエネルギー資源の確保に資する技術革新として「新成長戦略（基本方針）」（平成 21 年 12 月 30 日）が打ち出された。この中には、本報告書に関連するいくつかの研究開発が、すでに重要領域の一つとして盛り込まれている。しかし本報告書中では、全体を俯瞰するために敢えて、それらも含めた重点領域を抽出した。そのことにより、上述したように領域間の関連についても考察が可能になるからである。以上、CRDS では、総力を挙げてグリーン・バイオ・イノベーションに関する現状と課題を調査するとともに、今後の戦略的な取組みを提案した。今後の具体的な施策立案等において、本報告書が活用され、研究開発の推進により新技術の創出等に繋がることを期待したい。



グリーン・バイオ・イノベーションの 創出に向けた戦略研究



～光合成生物の生産・利用に関する
新技術の創出による
グローバル課題解決へのロードマップ～



はじめに

近年、諸外国では、地球温暖化への対応策として、エネルギー利用効率の向上や自然エネルギーの積極的な活用など、低炭素社会の実現に向けた様々な取り組みが行われている。しかしこれらの対応戦略においては、「経済の持続的な発展」「資源・エネルギー・食糧の確保」「地球環境の保全」の3つのバランスに関するいわゆるトリレンマ問題*が顕在化しており、これが施策化や成果の社会実装の妨げとなっている。一方、上記課題に関する技術は著しい進展を見せている。とりわけ、太陽光発電やバイオ燃料生産などの自然エネルギー分野においては、新材料の創製や新しいエネルギー生産技術の開発が進み、産業応用に向けた新たな展開が期待されている。このような状況を踏まえると、今後の研究開発戦略の策定においては、トリレンマ問題の「解」の探索およびこれらを踏まえた新技術の創出・導入などが重要な視点となる。

本報告書は、植物などの光合成生物の活用に関する研究開発の俯瞰とイノベーションの創出に向けた重要課題についてまとめている。光合成生物は、地球上の物質循環の起点であり、その存在は地球環境に大きな影響を及ぼしている。このため、その生産や利用が温暖化等の対策に有効であることは自明である。そこで、科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）では、上記トリレンマ問題の主要課題である「エネルギー利用効率の向上」、「化石燃料依存率の低減」、そして「エネルギー自給率の向上」を視座に、光合成生物の生産や利用に関する我が国の研究戦略について取りまとめることとした。光合成生物の当該分野への寄与は多岐にわたるが、ここでは特に顕著な貢献が期待される「環境保全・多様性利用」、「資源・エネルギー生産」、「食料生産」の3分野の15年後の世の中を見据えた中長期的な研究戦略を提案している。

取りまとめの経緯を以下に記す。戦略策定にあたり、CRDSでは、当該分野の全体像の可視化と対象とする研究開発の範囲を定めるため俯瞰図を作成した。次にこの図を基に多角的な調査を行い、研究開発の現状や動向等の把握を行った（第1章）。さらに、技術開発等に関する国際的な競争力の比較を行うために、米国、欧州、中国、韓国、日本を対象としたベンチマークを行った（第1章）。そして、これらの結果を根拠として、日本が今後取り組むべき重要研究領域を抽出し、その具体的な研究戦略を取りまとめた（第2章）。なお、執筆にあたっては、植物生理学、生態学、育種学、微生物学、化学工学などの多様な分野の科学者および企業における開発研究者などに協力を頂いた。

グリーン・イノベーションに関する施策は、米国を中心とした諸外国において様々な取り組みが行われている。そしてその多くは、環境改善や保全に関する新技術の創出とそれらを基盤とした産業振興および経済成長を目標としている。我が国でも平成23年度の予算編成において、総合科学技術会議は、「グリーン・イノベーション」と「ライフ・イノベーション」を国の重要な研究開発テーマに位置付けた。このような国内外の情勢を踏まえると、本書は時宜を得た戦略提案書であり、その意義は大きい。CRDSでは、このようなグリーン・イノベーション関連施策において、本報告書が施策立案の一助となり、研究開発等の推進によって日本の独自技術の創出や経済成長へ寄与が実現されれば幸いと考えている。

* 持続的社会研究協議会「持続型社会へ向かうエネルギービジョン」2005年8月
<http://rmo.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/jizoku/docs/2Press050916.pdf>

目 次

Executive Summary

はじめに

第 1 章 グリーン・バイオ・イノベーションに資する研究開発の俯瞰とトレンド

1-1	グリーン・バイオ・イノベーションに資する研究開発の俯瞰	2
1-2	「環境修復、多様性利用」	5
1-2-1	バイオマス生産（CO ₂ 固定化技術） 「概況」、「林木（樹木）生産」、「草本（植物）その他生物生産」	6
1-2-2	生物多様性利用 「概況」、「生態系の利用」、「種間多様性の利用」、「種内の遺伝的多様性の利用」	13
1-2-3	環境修復 「概況」、「土壌汚染修復」、「大気汚染修復」、「水域・海洋汚染修復」、「砂漠緑化、乾燥耐性の育種」、「寒・湿・熱地での植物生産」	20
1-3	「資源・エネルギー生産」	33
1-3-1	バイオ燃料 「概況」、「バイオエタノール」、「バイオブタノール」、「バイオガス」、「バイオディーゼル」、「バイオ軽油」、「バイオ水素」	34
1-3-2	化成品原料 「概況」、「バイオエチレン」、「バイオプロピレン」、「ポリ乳酸」、「ポリアミド」、「ポリエステル」	43
1-3-3	医薬品原料・酵素等 「概況」、「低分子医薬品」、「バイオ医薬品」、「ワクチン」、「研究用試薬」、「その他」、「植物工場」	51
1-4	「食料生産」	61
1-4-1	作物増産技術 「概況」、「穀物・飼料作物」、「野菜類」	62
1-4-2	持続農業 「概況」、「低肥料農業」、「減農薬農業」、「高効率水利用農業」、「低環境負荷農業」	74
1-4-3	機能性作物 「概況」、「健康増進」、「生活習慣病」、「アレルギーの予防と緩和」	81

第 2 章 グリーン・バイオ・イノベーションに向けた重要な研究開発領域

2-1	CO ₂ 資源化に資する高度光利用技術の開発	90
2-2	高生産・環境適応植物の設計と作出	93
2-3	資源エネルギー低投入型の高バイオマス・高品質バイオマス生産植物の開発	96
2-4	持続的農業生産の基盤となる植物共生デザイン技術	98
2-5	バイオマス増産にむけた食用・飼料用作物の次世代育種技術の開発	100
2-6	植物工場等を活用した高付加価値植物の創製	102
2-7	生物機能を活用したバイオリファイナー、環境修復技術の開発	105
2-8	バイオ燃料・素材生産を目指した微細藻類の代謝改変とゲノム育種技術の確立	108
2-9	植物多様性の化学資源の利活用に向けた基礎研究とトランスレーショナルリサーチ	111

Appendix

A	検討経緯	114
B	執筆者・協力者一覧	114

第1章

グリーン・バイオ・イノベーションに資する 研究開発の俯瞰とトレンド

1-1 グリーン・バイオ・イノベーションに資する研究開発の俯瞰

1-2 「環境修復、多様性利用」

- 1-2-1 バイオマス生産（CO₂ 固定化技術）
- 1-2-2 生物多様性利用
- 1-2-3 環境修復

1-3 「資源・エネルギー生産」

- 1-3-1 バイオ燃料
- 1-3-2 化成品原料
- 1-3-3 医薬品原料・酵素等

1-4 「食料生産」

- 1-4-1 作物増産技術
- 1-4-2 持続農業
- 1-4-3 機能性作物



本章では、光合成生物を活用したグリーン・イノベーションに関する研究開発を俯瞰し、それぞれの現状とトレンド、科学技術等の国際比較について纏めている。

1-1 グリーン・バイオ・イノベーションに資する研究開発の俯瞰

既述のとおり、光合成生物の利用は多岐にわたる。そのなかでも、とりわけ寄与が大きい分野は、「環境保全・多様性利用」、「資源・エネルギー生産」、「食料生産」の3分野である（図1）。本書では、これら3分野の研究開発を俯瞰し、それぞれを3つの項目（中綱目）に分類している。そしてさらにそれらを3つの領域に分け、領域を構成する主な研究開発の現状、トレンド等について調査・分析を行っている。なお国際比較は中綱目に対して行い、研究水準、技術開発水準、産業技術力の3つの研究開発フェーズについて、米国、欧州、日本、中国、韓国の5カ国間の比較を行っている。



図1 グリーン・イノベーションに資する研究開発の俯瞰図

3つの分野およびそれらを構成する中綱目は以下の通りである。

環境修復・多様性利用

CO₂ 固定能を有する光合成生物の増産技術、同生物を活用した土壌、大気等の環境修復、生態系や多様性の利用、に関する研究開発。

バイオマス生産

多様な生態系の把握とそれらを構成する植物、林木などの増産に関する研究開発

多様性利用

生態系から受けるサービスや生物の種の多様性を利用した有用植物生産に関する研究開発

環境修復

光合成生物による土壌や大気環境修復、耐性植物による砂漠などの緑化に関する技術開発

資源・エネルギー生産

光合成生物を原料に石油代替燃料を生産したり、植物の個体内で医薬品などの付加価値の高い物質を生産する技術に関する研究開発。

バイオ燃料

バイオエタノールの生産性向上や光合成生物での燃料生産に関する研究開発

化成品原料

ポリ乳酸等のバイオプラスチックの生産に関する研究開発

医薬品原料・酵素等

光合成生物の代謝物の医薬品としての利用や高分子医薬品（抗体等）の生物個体内での生産技術に関する研究開発

食料生産

植物や共生生物のゲノム情報を活用し作物の収量向上や機能付与に関する技術の確立を目的とした研究開発。農業生産における低エネルギー化技術等の開発も含む。

作物増産技術

イネ、葉菜類、飼料作物等のゲノム育種を中核とした研究開発

持続農業技術

水や窒素等の土壌物質の有効利用や生物共生機構を活用した作物生産技術

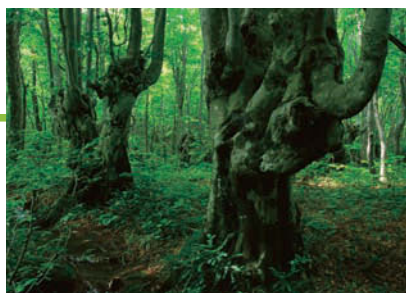
機能性作物生産技術

機能付与により疾病等の緩和に資する高機能作物の作出を目的とした研究開発

以下、それぞれの中綱目に関する研究開発の現状を俯瞰し、現在の課題や研究のトレンド、国際的な競争力等について詳述する。

1-2

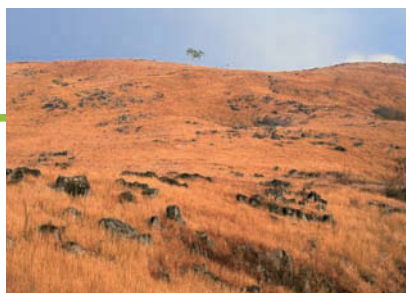
「環境修復、
多様性利用」



1-2-1 バイオマス生産



1-2-2 生物多様性利用



1-2-3 環境修復

1-2-1 バイオマス生産（CO₂ 固定化技術）

【概況】

植物の光合成による大気中の CO₂ 固定とバイオマス生産は、植物自身の生長と繁殖の基礎をなす営みであるが、人間社会にも食料、燃料、繊維、木材、薬品など様々な産物を供給する源となっている。その総量は、地球全体で年間約 105 ギガトン（1 ギガトン＝10⁹ トン）（炭素重）^[1] におよび、人間活動による CO₂ 放出量（年間約 8 ギガトン炭素）の約 13 倍の規模となっている。従って、今後の気候変動予測、影響評価、緩和策（グリーン・イノベーションを含む）を論じるにあたり、生物圏によるバイオマス生産は根本的な項目の一つとなっている。

上記のバイオマス生産総量は、陸上植物と海洋植物プランクトンによる光合成純生産（総光合成から植物自身の呼吸を引いた正味量）であり、全体の 54% が陸上、46% が海洋で行われていると考えられている^[1]。海洋におけるバイオマス生産の特徴として、食物連鎖・食物網が発達していて、プランクトンは速やかに動物プランクトンや魚類に補食されるため、純生産に比較して植物バイオマスが極めて少ない。一方、陸上では、植物に生産されたバイオマスが、樹木の幹や根などの動物に利用されにくい形態（セルロース、リグニンなど）で大量にストックされている。しかし陸上でも、気温や降水量の低い気候帯では、高木は生存できず、草本や低木が優占する。

バイオマス生産量を広域的に把握することは、人類の生存基盤として重要であり、特に 1960 年代の人口爆発以降に大規模な研究が実施された。代表的プロジェクトである「国際生物学事業計画（IBP）」では、世界の代表的な生態系タイプについて標準的手法によるバイオマス生産測定が行われ、上記の総量評価を行う基礎データを提供した。その中で、我が国の研究者は、手法開発から熱帯林での最大規模の測定実施まで、顕著な貢献をしている^[2]。その成果として、世界的には、草原などの乾燥地や寒冷地が陸地面積の半分以上を占め、バイオマス生産についても陸上の約 4 割を占めていることが明らかになった^[1]。近年では、現地観測だけでなく衛星観測や生態系モデルを用いた広域評価手法が開発されている。我が国でも、科学技術振興調整費「炭素循環に関するグローバルマッピング」が実施され、バイオマス生産の全球マップが作成された^[3]。

引用文献等

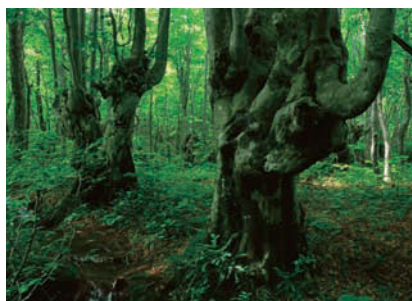
[1] Science (1998) 281, 237-240.

[2] 熱帯林の生態、吉良竜夫著、1983 年、人文書院

[3] http://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/chousei/news/2001/news221.htm

【林木（樹木）生産】

森林の機能には、水源かん養、土砂の崩壊・流出の防止、木材生産などがあり、最近では二酸化炭素（CO₂）吸収による地球温暖化軽減に期待が高まっている。いずれの機能においても樹木（バイオマス）の増産技術の開発がボトルネックであり、環境に適応しつつ高い成長力を有する新品種の開発が求められている。とりわけ、全陸地の約 30% に達している荒漠地（乾燥地、未利用地、耕作疲弊地など）の緑化に資する樹木開発などは格好のターゲットとなっている。このような広大な荒漠地の樹木等による緑化は、地球上の CO₂ 固定量の向上に寄与するだけでなく、これらの木質利用が農業生産と競合せず、バイオマスの持続的利用にも貢献するからである。近年のバイオマス利用としては、木材の建築物等への利用による炭素貯蔵機能、木質バイオマスを利用したバイオエタノール、木の粉を固めたペレット、さらには木材の成分からバイオプラスチックなどをつくるマ



1-2-1 バイオマス生産



1-2-2 生物多様性利用



1-2-3 環境修復

リアル利用などが盛んである^[1-2]。

我が国におけるバイオマスの増産技術に関しては、「イノベーション 25」で策定された環境保全に貢献するスーパー樹木の開発が特筆される^[3]。スーパー樹木とは遺伝子組換えによって有用な機能を向上または付与させた樹木(GM 樹木)のことである。また、林野庁の「森林・林業分野における遺伝子組換え技術に関する研究開発の今後の研究方向について」の中でも、地球温暖化軽減に貢献する GM 樹木の開発が述べられている。この中では、ゲノム情報の基盤整備、木質バイオマス生産性向上技術、耐乾性・耐塩性等ストレス耐性付与技術や病虫害抵抗性付与技術などが具体的な課題として挙げられている^[4]。このことから、開発されたスーパー樹木が商業植林に利用されると、地球温暖化の軽減だけでなく、木質バイオマスの安定供給に貢献できると考えられる。なお、上記報告書の中では、導入遺伝子の拡散防止策として、花成抑制技術や不稔化技術の開発の重要性についても述べられている。

一方、木質等を利用したバイオ燃料生産技術に関しては、経済産業省を中心に様々な施策が実施されている。例えば、産業技術総合研究所ではエタノール等の微生物変換に関する研究開発が、また、NEDO ではバイオエタノールだけでなくバイオディーゼル開発のための基礎的研究が進められている。今年度から、理化学研究所で木質バイオマスの生産と利活用の推進のための異分野融合研究(植物科学-微生物科学-酵素科学-化学工学)のためのバイオマス工学研究プログラムが開始した。これらのバイオマス関連研究の推進に伴い、低炭素社会構築に貢献する画期的な技術開発が期待される。

引用文献等

- [1] バイオマス・ニッポン <http://www.maff.go.jp/j/biomass/index.html>
- [2] 平成 23 年度科学・技術重要政策アクションプラン
<http://www8.cao.go.jp/budget/action.html>
- [3] イノベーション 25 <http://www.cao.go.jp/innovation/innovation/point.html>
- [4] 森林・林業分野における遺伝子組換え技術に関する研究開発の今後の研究方向について
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/hozen/070831.html>

【草本(植物)生産・その他生物生産】

近年の地球環境問題を受けて、バイオマス生産が将来的にどう変化するかを予測するための研究が進められている。その代表的な課題としては、IBP の後継プログラムと言える、地球圏・生物圏国際共同研究計画(IGBP)^[1] などがある。大気中の CO₂ 増加は、温暖化の原因となるだけでなく、植物の光合成を促進する「施肥効果」を及ぼす。その定量化のため、世界各地でオープン・トップ・チャンバー実験や野外高 CO₂ 暴露実験(FACE)が実施されており、大気 CO₂ 倍増時にバイオマス生産は一時的に 30% 程度増加するが、その程度は栄養塩の

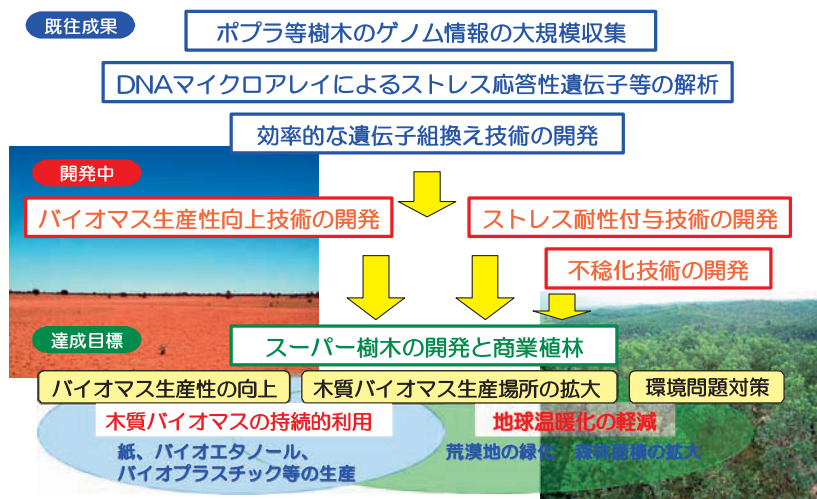


図1. 環境保全に貢献するスーパー樹木の開発

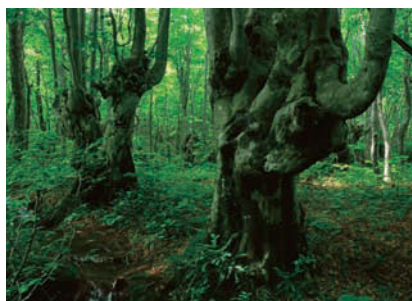
制限などにより漸減する^[2]ことが示されている。国内では、イネの CO₂ 応答を解明するための FACE 実験が（独）農業環境技術研究所を主体に実施されている。将来予測においては、植物（樹木、草本）から微生物を含む生態系を扱うモデルを用いた予測が不可欠のツールとなっており、IPCC 報告書にも生態系のモデルを組み入れた地球システムモデルによる予測結果が反映されている。我が国でも、（独）国立環境研究所や（独）海洋研究開発機構において、バイオマス生産を含めた炭素循環をシミュレートするグローバルモデルの開発研究が進められている。また、今年度から JST において藻類、水生微生物を用いたバイオ燃料関連のプロジェクトが開始する等、様々な研究提案が進められており、研究開発の進展が期待される。

引用文献等

- [1] <http://www.igbp.net/>
 [2] Proceedings of the National Academy of Science, USA (2005) 102, 18052-18056.
 [3] http://senryaku.jst.go.jp/teian/koubo/03_h2204.html

「バイオマス生産」に関する科学技術・研究開発の国際比較と注目動向

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↑	・アジア各地に観測サイトを持ち、バイオマス生産および CO₂ 交換に関する研究・長期モニタリングを行っている（関連プロジェクト：JaLTER、JapanFlux）。 ・現地観測に基づくバイオマス生産（純一次生産）に関する研究を世界的にリードしていた時期があったが、現在ではそのアドバンテージは相当程度に失われている。 ・「環境ストレス応答」や「形態形成」など植物科学分野の研究レベルは高く、世界への貢献は大きい。 ・森林総研と理研はポプラやスギの完全長 cDNA の大規模収集^[1-2]を、かずさ DNA 研と王子製紙はユーカリの完全長 cDNA の収集^[3]とゲノム解読を進め、世界から注目されている。 ・シロアリ腸内細菌が持つ高活性セルラーゼの遺伝子が単離され、バイオエタノール生産のコストダウンに繋がる可能性がある。
	技術開発水準	○	↑	・観測技術の開発能力は非常に高い。一方、衛星観測やモデルを用いた広域評価・統合化では欧米に後れをとっている分野が多い。今後に向けて、衛星観測（例：GCOM）やモデル開発に向けた取組が活発化しつつある。 ・軽量の高 CO₂ 暴露実験（FACE など）が、小林、岡田らによって日本で開発され、世界標準となっているが、設置数は、主に予算的な制限から、米国や欧州に大きく後れをとっている。 ・木質バイオマスからのエタノール製造については、日本独自のアルカリ蒸解・酵素法が開発されており、実証プラントがつくられている。 ・大学、森林総研や民間企業の共同研究により、リグニンからのバイオプラスチック製造に成功している。 ・王子製紙は耐乾燥性ユーカリ^[3]や酸性土壌耐性ユーカリ、日本製紙は耐塩性ユーカリ、森林総研はオゾン耐性・耐乾燥性・耐塩性ポプラや花成制御技術の開発^[4]に成功しており、大学を含めバイオマス生産性を向上した GM 樹木の開発^[5-7]を進めている。理研で新たに開始した異分野融合研究のバイオマス工学研究プログラムは木質バイオマス生産性向上とバイオ素材の開発に向けた微生物科学、酵素科学、化学工学を連携させたプログラムであり新たな取り組みとして注目されている。



1-2-1 バイオマス生産



1-2-2 生物多様性利用



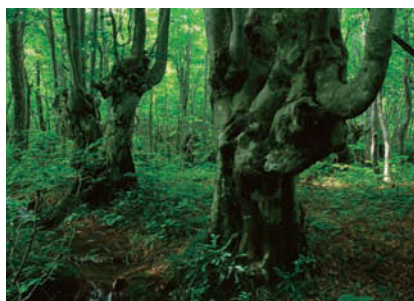
1-2-3 環境修復

	産業技術力			・草本などにより生産されたバイオマスは、放牧地の畜産業などに利用されているが、企業による取組は少ない。 ・木質バイオマスからのエタノール製造は産業化されていない。バイオプラスチック製造は採算性が高く、産業化が期待できる。 ・GM 樹木の野外試験は 8 例しかなく、今後増加させる必要がある。企業との連携、海外との連携研究は今後ますます重要になると考えられる。
米国	研究水準	◎	↑	・FACE などを用いた高 CO₂ 暴露実験は、森林やその他の生態系において大規模に展開されており、環境変動に対するバイオマス生産の応答に関する知見が積み上げられている。 ・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。 ・ポプラのゲノム解読^[8] が終了し、ユーカリ^[9] や針葉樹のゲノム研究にも莫大な研究費が投入されている。 ・バイオマス生産・炭素固定に関して、現地観測、衛星観測、モデル開発ともに最高水準にある。特に広域評価においては、NACP (North America Carbon Project) が進行中であり、国内の森林や草原におけるバイオマス生産および炭素収支に関する研究が推進されている。
	技術開発水準	◎	↑	・観測ネットワークの充実度やモデル開発において世界をリードしている。 ・衛星観測によるバイオマス生産力の広域評価は、NASA および NOAA により 1980 年代から継続された蓄積がある。 ・スーパーセルラーゼの開発にも成功しており、エタノール発酵の技術開発に関しては他国を圧倒している。 ・リグニンの改質^[10-13]、ファイトレメディエーション^[13-14]、開花制御^[15-16]、バイオマス生産性向上を目指した GM 樹木の開発に成功している。
	産業技術力	◎	↑	・草本（スイッチグラスなど）などによるバイオマス生産は、バイオ燃料の供給源として注目を集めているが試験段階であり、現在では穀物が主流となっている。 ・木質バイオマスからのエタノール製造は産業化されていないが、バイオエタノールの市場の 50% 以上を米国の企業が占めており、高い産業技術力を有する。木質ペレットの生産量も多い。 ・木質バイオマスからのバイオプラスチック製造は産業化されていない。 ・GM 樹木の野外試験は 300 件をはるかに上回り、商業植林が現実的となっている。
欧州	研究水準	◎	↑	・大学および研究機関における基礎研究の水準は極めて高い。 ・英国は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。 ・スウェーデンを始め北欧は樹木の研究に強みを持つ。 ・EU 主導のプロジェクト (CarboEurope) により、欧州の森林や草原におけるバイオマス生産力・炭素収支に関する大規模研究が行われた (CarboEurope は 2008 年度で終了)。後継課題として ICOS (Integrated Carbon Observation System) が進行中である。
	技術開発水準	◎	↑	・観測技術やモデルの開発において世界的に高い水準を持っている。FACE による高 CO₂ 暴露実験も行われているが、スケールの面では米国に一步及ばない。 ・地球環境モデリングの分野では、英国ハドレーセンターが世界的な研究を主導する立場にある。 ・シンジェンタなど、作物の育種技術に強みを有する企業が多数存在している。 ・歴史的に発酵技術に強みをもち、アルコール耐性を有する酵母の遺伝子改変技術に成功している。 ・リグニンの改質^[17]、開花制御^[15]、バイオマス生産性向上^[18-19] を目指した GM 樹木の開発に成功しており、技術開発水準は高い。

	産業技術力	◎	↑	・企業として草本などのバイオマス生産およびその評価に向けた産業技術的取組は活発ではない。 ・木質バイオマスからのエタノール製造は産業化されていないが、シェルのメジャーがバイオエタノールの生産を手がけ、米国企業並みの競争力を有する。 ・木質ペレットは北欧やドイツなどで生産量が多い。
中国	研究水準	○	↑	・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ており、このような人材を中心に国際共同研究を進め、研究水準が急速に上昇している。 ・海外留学から戻った研究者の中には、国際誌に複数の論文を発表してきた著名な研究者が含まれる。彼らが、中国国内で多数の学生を育成することで急速に研究体制が拡充しつつある。 ・潤沢な予算を背景に、現地観測、モデル、そして高 CO₂ 実験などのバイオマス生産関連研究が大規模に開始されている。
	技術開発水準	○	↑	・国内のバイオマス生産および炭素吸収量を把握するため、観測ネットワークやモデル開発が推進されている。 ・GM 作物の開発に莫大な研究費が投入されており、米国の GM 産業も積極的に支援している。 ・GM 樹木の開発では、病虫害耐性やストレス耐性の付与、リグニン改質などを中心に研究が進行している。
	産業技術力	△	→	・企業として草本などのバイオマス生産およびその評価に向けた産業技術的取組は活発ではない。 ・木質バイオマスからのエタノールやバイオプラスチックの製造は産業化されていない。 ・開発された Bt ポプラの商業栽培（約 400ha）が開始され、世界から注目されている。
韓国	研究水準	△	↑	・欧米などからの帰国研究者は積極的に研究成果を国際誌に発表し、研究水準が急速に上昇している。 ・国内に生態系機能に関する観測サイトがあり、インベントリを用いた研究も行われている。衛星観測やモデルを用いたバイオマス生産力評価は少ない。
	技術開発水準	△	↑	・諸外国で開発された観測技術やモデルを積極的に導入して、バイオマス生産の評価技術水準を高めつつある。 ・リグニン利用に関しては高い技術力を有する。 ・GM 樹木の開発は進展しているとは言い難い。
	産業技術力	△	→	・企業として草本などのバイオマス生産およびその評価に向けた産業技術的取組は活発ではない。 ・木質バイオマスからエタノールやバイオプラスチックの製造は産業化されていない。
全体コメント：バイオマス生産を、草原も含めた多様な生態系において広域に把握する試みは、大規模で統合的なプロジェクトを展開した欧州と米国で進んでいる。特に米国は、DOE を中核に莫大な予算を投じるなど、世界をリードしている。日本は、基礎研究の重要な論文を時折発表しており、植物生理分野の基礎研究レベルは平均して高い。しかしながら、様々な制約から広域展開と統合解析の面で後れをとりがちである。その点、中国は人材的にもインフラ的にも急速にレベルアップしている。今後は日中韓による協力により当該分野の研究をアジアがリードしていく可能性もある。その中で、日本がどうプレゼンスを保つあるいは高めるかが課題となる。				

(注 1) 現状 [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている]
 ※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。

(注 2) トレンド [↑：上昇傾向、→現状維持、↓下降傾向]



1-2-1 バイオマス生産



1-2-2 生物多様性利用



1-2-3 環境修復

引用文献等

- [1] BMC Genomics (2008) 9, 383
- [2] BMC Genomics (2007) 8, 448
- [3] Plant Biotechnology (2009) 26, 109-113
- [4] Plant Cell Physiol. (2008) 49, 291-300
- [5] Plant Physiol. (2003) 132, 1177-1185
- [6] Plant Physiol. (2008) 147, 552-561
- [7] バイオプロセスハンドブック、(2007) エヌ・ティー・エス、pp.668-674
- [8] Science (2007) 313, 1596-1604
- [9] <http://eucalyptusdb.bi.up.ac.za/>
- [10] Nature Biotechnol. (1999) 17, 808-812
- [11] Nature Biotechnol. (2006) 24, 395-396
- [12] Plant J. (2008) 54, 569-581
- [13] Nature Biotechnol. (1998) 16, 925-928
- [14] Proc. Natl. Acad. Sci. USA (2007) 104, 16816-16821
- [15] Nature (1995) 377, 495-500
- [16] Plant J. (2000) 22, 235-245
- [17] Nature Biotechnol. (2002) 20, 607-612
- [18] Nature Biotechnol. (2000) 18, 784-788
- [19] New Phytol. (2004), 137-145

関連総説等

- (1) Boerjan W. (2005) Biotechnology and the domestication of forest trees. Current Opinion in Biotechnology 16:159-166
- (2) Food and Agriculture Organization of the United Nations: Preliminary review of biotechnology in forestry, including genetic modification. (Forest Genetic Resources Working Papers, FRG/59E). Rome: FAO (2004)
- (3) van Frankenhuyzen K., Beardmore T. (2004) Current status and environmental impact of transgenic forest trees. Canadian Journal of Forest Research 34: 1163-1180
- (4) Imhoff, M. L., L. Bounoua, T. Ricketts, C. Loucks, R. Harriss, W. T. Lawrence, (2004) Global patterns in human consumption of net primary production. Nature 429: 870-873.

【注目動向】

- ・ポスト京都議定書の温暖化対策国際枠組みに、CDM（クリーン開発メカニズム）による植林活動に加えて、REDD（発展途上国における森林減少劣化の防止）が導入される可能性が高いことから、衛星観測を用いた森林監視の取組が進められている。
- ・バイオマス生産は、生態系が持つ公益的機能（生態系サービス）のうち、供給サービスに関係するものであり、生物多様性とも関係が深い。（つまり、生物多様性が高い生態系は、バイオマス生産能力が高く、かつ環境変動に対して安定性が高いと考えられている。） そのため、2010年に名古屋で開かれる生物多様性条

約との関連からも注目される。

- 木質バイオマスからのエタノール製造については、どの国でも産業化は進んでいない。一方、木質ペレットは原料となる木材チップを粉砕して圧縮成型したもので、米国、北欧、ドイツなどで生産量が高いが、日本、中国や韓国でも生産されている。設備投資は少なく済み、どこの国でも生産可能である。
- リグニンからのバイオプラスチックの製造については、リグニンを低分子化し、組換え微生物を利用して単一化合物のピロンジカルボン酸を作り、そしてポリマー化する技術開発が国内の大学、公的機関、民間企業で成功している。
- ポプラ完全長 cDNA の塩基配列情報は理研の「**SABRE** (セイバー)」^[1]、スギ完全長 cDNA の情報は森林総研の森林生物遺伝子データベース **ForestGEN**^[2] が公開している。

引用文献等

[1] <http://134.160.66.22/sabre7/SABRE0101.cgi>

[2] <http://forestgen.affrc.go.jp/>

伊藤昭彦（国立環境研究所）、篠原健司（森林総合研究所）



1-2-1 バイオマス生産



1-2-2 生物多様性利用



1-2-3 環境修復

1-2-2 生物多様性利用

【概況】

生物多様性の利用によるグリーン・イノベーションとしては、環境変動にともなう食糧安全保障、低炭素社会システムの構築、機能性素材開発と資源確保などのための種間の多様な遺伝子資源の探索、有用植物種内で植物の収量、生長、環境耐性などに関する有用遺伝子探索、といった方向性と、生態系を構成する種や遺伝子の多様性を利用した生態系や生物生産システムの制御という方向に大別できる。

有用植物についてのゲノム解読以降、量的な農業形質の違いに関わる遺伝子座（QTL）の単離が急速に進み、有用遺伝子探索とそれによる有用作物設計を目指した研究が推進されつつある。また、種間の多様性については、20万種類以上あるといわれている植物の二次代謝物の中から、栄養成分、健康機能成分、薬用成分および、バイオ燃料やバイオ素材としての糖・脂質などの資源化に有用な遺伝子探索が進められているほか、シダ植物やコケ植物の多様な物質吸収・蓄積能や、塩性植物などのストレス耐性システムの理解と利用によって環境浄化や資源回収、荒漠地での植物生産などを狙った資源探索が行われている。こうした多様性利用には、次世代シーケンサーを大規模に用いた新しい解析方法が導入されている。

一方、生態系や生態系の構成種の多様性を利用したグリーン・イノベーションは、これとはかなり方向性の異なった技術を目指している。すなわち上記研究開発が遺伝子というミクロスケールの研究開発に軸足を置いているのに対し、当該分野は群落の形成やそれらの人への影響などマクロスケールでのアプローチが主流である。例えば、農林水産の分野では、短期の経済性や効率が最大化されると、生態系が単純化し生物多様性が失われるケースが多い。しかし、一定の生物多様性を保全することにより、病虫害の発生リスクを低下させ、送粉などの生態系サービスを確保することが可能になる。このような生態系における多様性の効果や生物多様性もつ経済効果に関する研究などが盛んになりつつあり、これらの成果は社会的影響も持ち始めている。

【生態系の利用】

1990年代中ごろから2000年代前半に、主として欧米の研究者によって、種の数进行操作して生態系全体の機能に与える影響をみる実験的研究が急速に増加した。これらの研究によって、生物多様性の高い生態系では、バイオマスや生産速度が高く、生産力の安定性も高まる傾向があることが示されている。また、他の栄養段階の生物個体群や生態系全体の物質循環などに、多様性がどのような影響を与えるかに関する知見が蓄積された。これらの多くは基礎研究であるが、食糧や材料の生産、防災、気候調節などの面で生態系を利用する際の基本的理論として大きな発展をみた^[1]。日本や中国の研究者の一部は、初期からこうした研究の重要性をみとめ、一定の貢献もあった。近年では、こうした研究のメタアナリシスが進み、生物多様性が生態系機能に果たす役割が一般化されつつある。

一方、生態系や生物多様性の利用は、Millennium Ecosystem Assessment（MA）^[2]の報告以来、「生態系サービス」という概念が国際的にも確立された。この報告書では、これまで経済的にもあまり評価されてこなかった生態系サービスが社会経済にも重要であることを示し、世界的にも注目された。報告書に関わったのは欧米の研究者が多く、アジアの研究者は少ない。

これらの一連の研究のなかから、生物多様性の高いシステムを保つことで病虫害のリスクを低下させたり（生物制御サービス）、農作物の送粉サービスを確保できたりするという効果を定量的に把握する研究が多数発表され、生態系や生物多様性が生態系サービスに与える効果の定量化が進みつつある。こうした成果は、TEEB（The Economy of Ecosystem Services and Biodiversity）報告書^[3]としてまとめられつつある。こうした効果には不確実性の高いものがあり、確率過程やリスクを考慮した技術が必要となるため、具体的な技術として

の発展はまだ不十分である。しかし、生態系や生物多様性を利用した、環境負荷の低い持続的な生物生産システムを可能とする技術として、今後体系化が進むと考えられる。日本では、最近 2-3 年で生態系サービスの経済評価などが進んできたが、生態系や生物多様性の特性を利用した持続性の高い具体的な生物生産技術の開発は、今後の課題といえる。

一方では、開発などの事業を行う際に、米国やヨーロッパの一部の国では、その事業で生息地を失われる生物を保全するために、生息地ミチゲーションを行う「生物多様性オフセット」という手法が発達しつつある^[4]。これによって、生物多様性の保全や生態系サービスの確保が図られると同時に、ミチゲーションを行う土地などを予め確保して売買するミチゲーションバンキングが産業として発達しつつある。日本では、オフセットが義務付けられていない上、生息地評価の手法開発も始まったばかりである。

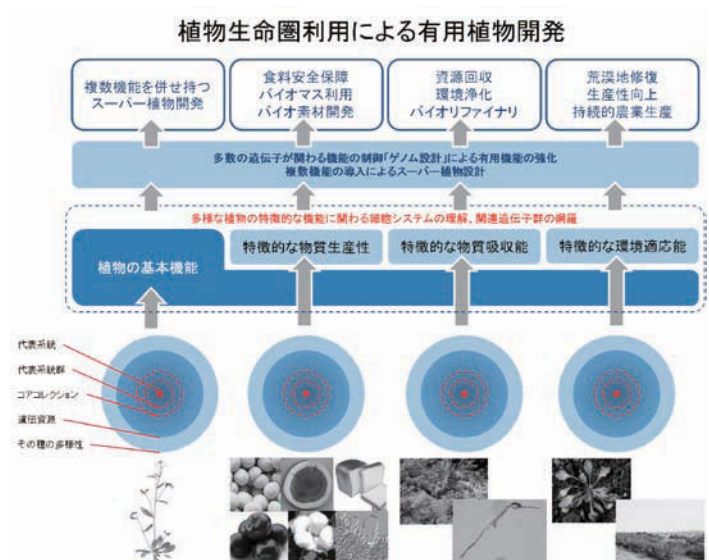
引用文献等

- [1] Naeem et al. (eds) 2009. Biodiversity, ecosystem functioning, & human wellbeing. An ecological and economic perspective. Oxford University Press.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. (<http://www.millenniumassessment.org/en/index.aspx>)
- [3] European Communities, 2008. The economics of ecosystem services and biodiversity.
- [4] Business and Biodiversity Offset Program (<http://bbop.forest-trends.org/>)

【種間多様性の利用】

グリーン・イノベーションの主要施策は、地球上の遺伝資源、環境資源の知識に基づく技術開発が不可欠な研究分野を幅広く含む。特に、環境変動にともなう食糧安全保障、低炭素社会システムの構築、機能性素材開発と資源確保は、地球上の多様な生物の生存戦略の背景にある細胞システムを理解し活用する技術開発が求められている。バイオ燃料やバイオ素材、環境浄化など、植物に由来するコモディティが多様化する昨今、同時に生命現象計測技術の革新的向上にともない、実用動植物や環境微生物叢など、地球上の生命圏を網羅的なターゲットにして、利用価値の高い遺伝子や代謝ネットワークを遺伝子資源として獲得することが課題といえる。

多様な植物がもつ多様な物質生産性を、人類は食物や素材として利用してきた。モデル植物のシロイヌナズナで高等植物の基本機能の理解が深化する一方で、果実や樹木、藻類など、それぞれの有用植物が提供する特徴的なシステムの理解にフォーカスした研究が加速している^[1]。農業上あるいは産業上重要度の高い実用植物について、総合的な基盤整備として、全ゲノム解読などゲノム情報リソースの整備、遺伝資源の収集などバイオリソース整備が進展している。それぞれの植物種での有用遺伝子探索とその利用には、植物種ごとの形質転換技術の開発も課題である。米国 JGI-DOE では、これまでに、12 植物種のゲノム情報がリリースされ、2010 年 7 月現在 32 植物種が解読中である^[2]。植





1-2-1 バイオマス生産



1-2-2 生物多様性利用



1-2-3 環境修復

物種間でゲノム情報を比較し特徴を描出する比較ゲノム研究と情報基盤は、増加の一途をたどる植物ゲノム情報の利用を担保するために必須である。

植物は種ごとに特有の代謝物をつくり、代謝物は植物界全体で 20 万種類以上あるといわれている。二次代謝物の中には、栄養成分や健康機能成分、薬用成分などが存在する。また、デンプンやセルロースなどの糖質高分子、微細藻類が生産、蓄積する脂質などは、バイオ燃料やバイオ素材としての資源化が出口となる。これらの有用代謝物の増産や利用技術の開発には、それぞれの植物種での特徴的な代謝システムの解明と代謝工学の推進による生産性の向上が課題である。また、シダ植物やコケ植物の多様な物質吸収、蓄積能や、塩性植物などのストレス耐性システムの理解と利用が、環境浄化や資源回収、荒漠地での植物生産に有用とされる。

植物の多様性の背景にあるシステムの総合的な知識と、体系的に収集される有用遺伝子群は、遺伝子の集合体であるゲノムを部分的に設計することで多数の遺伝子が関わる機能の制御を試みる「環境適応型作物のゲノム設計技術」^[3]の推進によって、植物機能の再構成と改変への利用が想定される。

引用文献等

[1] Achievements of the National Plant Genome Initiative and New Horizons in Plant Biology (2008)

[2] <http://genome.jgi-psf.org/programs/plants/plant-projects.jsf>

[3] <http://crds.jst.go.jp/output/pdf/09sp11.pdf>

【種内の遺伝的多様性の利用】

地球環境の変化や人口増加にともない、生産性の向上による有用植物の安定的確保は喫緊の課題である。もっとも実践的な解決手段は、植物の収量、生長、環境耐性などに関わる遺伝子群の探索、そして、その作用機序の理解に基づく、有用植物の設計といえる。遺伝子探索・単離は、種内の表現型の違いと関連するゲノム多型の違いを見いだすことで進められるため、種内の多様性とそれを利用できる形で整備した遺伝資源は、潜在的な有用遺伝子のプールとして必須基盤となる。変異源や導入遺伝子による変異創出も、遺伝資源の拡大と遺伝子単離への活用大きく貢献する。

モデル植物のシロイヌナズナでは、2000 年のゲノム解読以後、高等植物の基本的な機能の理解を進めるために、遺伝子の変異体系統の整備が世界的に推進され、遺伝子の単離と機能解析が進められた。昨今の塩基配列解読技術の飛躍的な進展にもなつて、種内の多様性をもつ環境適応性に関わる遺伝子や、進化的に重要な役割を果たしたと考えられる遺伝子の探索研究が推進されるようになった。シロイヌナズナ 1001 プロジェクトでは、欧米の複数の研究機関が参画し、1000 のシロイヌナズナ系統のゲノム解読を行う。シロイヌナズナ自然集団のもつ表現型の違いとゲノム多型の関連を見いだすことが目的で、1 つの種が提供する遺伝子機能を網羅するものと期待されている^[1]。

種内の多様性を利用した有用植物開発のプロセス



イネでは、2004 年のゲノム解読以後、量的な農業形質の違いに関わる遺伝子座（QTL）の単離が急速に進んだ。国内では、2008 年から新農業展開ゲノムプロジェクトとして、イネのゲノム情報と遺伝資源を活用し、有用遺伝子探索とそれによる作物のゲノム育種を目指した研究が推進されている^[2]。また、国際イネ研究センター（IRRI）を中心として、イネの代表的な系統のゲノム塩基配列の違いが調べられている^[3]。

遺伝子探索をさらに加速するために、遺伝資源のハイスループットな表現型解析、ゲノム多型解析の双方が重要となる。北京ゲノムセンターなど、次世代シーケンサーを大規模に導入したシーケンシングセンターの拠点化が急速に進んでおり、数々の実用植物について複数系統ずつのゲノム解読が計画されている。また、大規模な表現型解析拠点の整備が欧米やオーストラリアを中心に進み、モデル植物だけでなく、イネ、トウモロコシ、ムギ類など、作物の遺伝資源を対象とした高速表現型解析により可視的な違いに関わる遺伝子の探索が実用植物で進められている^[4-5]。また、メタボロームやホルモノーム解析基盤の整備により、植物ホルモンや代謝物の生合成などに関する、実験室条件下では大きな表現型の違いは示さないが、有用な遺伝子の探索も期待されている。

多様性の基礎研究とその利用のための研究開発のためには、遺伝資源の収集はますます重要になると考えられる。そのためのバイオリソース研究の推進とリソースセンターによる野生種や栽培種の遺伝資源の収集、保存が重要である。日本では農水省のシードバンク、リソースセンターで作物、イネなどの遺伝資源が収集されている。また、文科省では、ナショナルバイオリソースプロジェクトが 2001 年から開始して、実験植物や作物のリソースが収集されて研究の基盤として重要な役割を果たしている。今後は、これに加えて、多様な遺伝子資源の収集、保存、解析などにおける植物園や博物館の役割を見直し、これらの機能が充実されなければならない。

引用文献等

- [1] <http://www.1001genomes.org/>
- [2] <http://cropgenome.project.affrc.go.jp/kenkyu/index.html>
- [3] <http://beta.irri.org/news/index.php/press-releases/entire-genetic-diversity-of-rice-to-be-revealed-and-shared.html>
- [4] <http://www.plantaccelerator.org.au/>
- [5] http://www.plantphenomics.com/datapool/pdf/JPPC_plant_phenotyping_EPSO2009_Lejeune.pdf



1-2-1 バイオマス生産



1-2-2 生物多様性利用



1-2-3 環境修復

「生物多様性利用」に関する科学技術・研究開発の国際比較と注目動向

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↑	- 生物多様性と生態系機能の関係については、生産力の安定性や食物網の安定性などいくつかの注目される研究もあり、水準は高い。 - 日本独自の技術を活かして、多様な植物種の完全長 cDNA リソース整備で世界をリードしている。 - イネ、シロイヌナズナの変異体リソース整備で成果を上げている。それらを利用した質の高い研究成果がある。 - 農水省ジーンバンク、ナショナルバイオリソースプロジェクト、NITE NIBC など、遺伝資源の拠点化が進められた。 - 微細藻類を始めとする 1 万株以上の海洋微生物のカルチャーコレクションなど、バイオ燃料などの出口が明快なリソースが整備されつつある。
	技術開発水準	○	↑	- 生物多様性が生物制御や送粉などの生態系サービスに与える効果に対する定量的研究が見られ始めた。 - 生物資源研究所 QTL センターの遺伝資源を用いた遺伝子探索、イネ品種開発の水準は極めて高い。 - 遺伝子組換え実用植物の圃場試験は海外との連携で進められつつある（国際農研、理研など）。
	産業技術力	△	→	- 生物多様性に関して、国内企業の取り組みは企業イメージと関連した保全的なものにとどまり、多様性の利用には至っていない。 - 種苗会社、建設会社の一部、JT などは、遺伝資源、ゲノム科学による植物育種を行っている。
米国	研究水準	◎	↑	- 多様性と生態系機能の関係についての研究を 1990 年代から常にリードし、常に先端的研究を生み出している。 - シロイヌナズナ野生種の多様性研究、ゲノムワイド関連解析などで高い成果がある。 - ABRC（シロイヌナズナ）、USDA-ARS（作物）など、中心的なバイオリソースセンターが存在する。 - JGI-DOE は世界のゲノムシーケンシング拠点の 1 つである。 - ワシントン大、NCGR、CVI（旧 TIGR）、など大規模なシーケンシング基盤をもつ研究機関が多数あり、高いスループットをもつ。 - iPG2P: Relating Genotype to Phenotype in Complex Environments が iPlant 内で進行中である。 - USDA は Coordinated Agricultural Project を作物で展開し、遺伝資源、ゲノム科学の育種展開を試みている。 - リファレンスゲノムの解読から代表系統群の多様性解析（リシーケンシング）までが、シームレスに推進される研究計画が進んでいる。
	技術開発水準	◎	↑	- 生態系サービスの概念の定着、分類をへて、定量的評価が数多く行われている。経済学的評価を行った研究もいくつか出版され始めており、今後具体的な技術としての体系化が進むものと予想される。 - 多様な植物種のゲノム解読とともに、関連バイオリソースの整備を体系的に進めるため、その後の開発研究の推進に強い。 - トウモロコシに加えて、サトウキビ、ブラキポディウム、スイッチグラス、ミスカンサスなどイネ科雑草のバイオマス利用技術の開発研究を進めている。

	産業技術力	○	→	・生物多様性を利用した環境負荷の低減や持続性の確保が一般にも浸透しつつある。生物多様性オフセットが導入され、成功例もいくつか報告されているが、産業として大規模な展開には至っていない。 ・Monsant 社、Dupont 社などは、農業分野のみならず、植物育種の分野でも多くのパイプラインを有している。
欧州	研究水準	◎	↑	・英国、ドイツなどが中心となり、TEEB で生態系サービスの経済評価を国際的にリードしている。 ・米国と並んで、生物多様性と生態系機能の研究をリードし、EU 加盟国間での共同研究やエコトロン（環境や多様性を制御する実験装置）などで国際的に研究をリードしてきた。 ・シロイヌナズナ野生種の多様性研究、ゲノムワイド関連解析などで高い成果がある。 ・欧州の遺伝資源に関する組織として、欧州共同体遺伝資源共同プロジェクト（ECPGR、European Cooperative Project for Genetic Resources）が存在する。 ・INRA（仏）を中心にコムギ、IPK（独）を中心にオオムギのゲノム解読が進められている。 ・JIC（英）の研究グループを中心に草本モデル植物のゲノム解読が完了した。 ・NASC（英）はシロイヌナズナ系統を 30 万整備している。MPI（独）の研究グループはシロイヌナズナ 1001 プロジェクトの推進メンバーの 1 つである。
	技術開発水準	◎	↑	・BASF Plant Science などが、作物研究プラットフォームを大学や研究機関、企業に提供。コメやトウモロコシのような主要作物の収穫量を増大し、環境ストレス耐性を改善する遺伝子発見が主要テーマに中国、韓国、台湾の研究機関とアジア連携を展開。VIB（ゲント大）とも植物育種研究で連携している。 ・デンマークの DLF-Trifolium 社がバイオ燃料の生産により適した、分解しやすい牧草種の開発に取り組む。
	産業技術力	○	↑	・いくつかの国で生物多様性オフセットが実行されており、BBOP など、ミチゲーションバンキングなどの試みが始まっている。 ・シンジェンタ（スイス）は、実践的な GM 植物開発企業で、世界各地に現地法人を展開している。 ・Plant Genetic Systems 社（ベルギー）、KeyGene 社（オランダ）などが植物ゲノム科学を駆使した品種開発をすすめている。
中国	研究水準	○	↑	・生物多様性と生態系機能の研究には一部の研究者が初期から参加しており、近年では独自の研究も見られるようになってきている。 ・北京ゲノムセンターは、代表的なゲノムセンターの 1 つとして、世界規模の共同プロジェクトである「1000 人ゲノム」への参画、さらに「1000 動物 / 植物」、「10000 微生物ゲノム」プロジェクトを開始している。すでに、インディカイネゲノム、キュウリゲノムなどの解読で成果をあげている。 ・中国科学院昆明植物研究所で、野生生物遺伝資源を管理する「中国西南野生生物遺伝資源バンク」が完成し、あわせて 8,444 種、7 万 5,000 株近くの野生生物遺伝資源が収集・保管されている。 ・北京 NIBS をはじめ、実用植物の開発研究を進める研究拠点を整備している。
	技術開発水準	△	→	・生物多様性を利用して環境負荷を低減するという技術の方向性が定着していない。生物多様性オフセットの動きもまだほとんど見られない。 ・生態系サービスの評価に対する関心は高いが、定量的評価や経済評価に関する動きはまだ少ない。 ・当初から、遺伝子組換え作物先進国として、圃場試験レベルでの高い開発水準をもつ。 ・昨年、モンサント社がバイオテクノロジー研究センターを北京に開設し、中国の研究企画との連携が加速している。



1-2-1 バイオマス生産



1-2-2 生物多様性利用



1-2-3 環境修復

	産 業 技 術 力	△	→	・中国発の、植物多様性、新植物をグリーン・イノベーション分野あるいは関連市場に展開する企業はまだ存在しない。 ・今年開かれる China Seed Expo2010 では、国内の種苗会社の参加が目立つ。
韓国	研究水準	△	→	・生物多様性と生態系機能の研究で注目されるものはほとんどない。 ・Korea National Research Resource Center (KNRRC) が遺伝資源整備事業を担う。 ・Korea Research Institute Of Bioscience And Biotechnology の The 21C Frontier R&D Program の 1 つに Plant diversity research Center が設置されている。
	技術開発水準	△	→	・生態系サービスの評価についての関心はあるものの、定量的評価や経済評価に対しての目立った動きはない。 ・Crop Functional Genomics Center は BASF と連携を開始した。主にイネ、ダイズ、唐辛子の 3 種類の植物の機能ゲノム研究を行う。
	産 業 技 術 力	△	→	・生物多様性を利用して環境負荷を低減するという技術の方向性が定着していない。生物多様性オフセットの動きもまだほとんど見られない。 ・多くのライフサイエンス系企業は、医学・製薬系で、植物多様性研究からグリーン・イノベーション分野への展開は期待が薄い。
全体コメント：この分野では、米国とヨーロッパの共同研究や、MA、TEEB など国際的な報告をめぐる動きが顕著であり、日本の研究者も関わっているものの、中心的な役割は果たせていない。ただ、2010 年の CBD-COP10 が名古屋で開催されることもあり、情報が急増し、トレンドも変化しつつある。研究開発の基盤整備に関しては、どの国と地域も、植物の多様な機能の理解に向けて、実用植物に対して研究基盤の適用を始めている。シーケンシング拠点は種内多様性利用の正否を左右するキーププラットフォームといえる。				

(注 1) 現状 [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている]
※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。

(注 2) トrend [↑：上昇傾向、→現状維持、↓下降傾向]

【注目動向】

- ・2010 年 10 月の生物多様性条約の第 10 回締約国会議(CBD-COP10)では、TEEB の本報告が出ることであり、生態系サービスの経済評価が進むものと考えられる。また、生物多様性オフセットやミチゲーションバンキングなどについても、COP10 の中で議論が進むものと考えられ、こうした分野の進展は今後著しいだろう。
- ・シロイヌナズナ 1001 プロジェクトが進行している。種内多様性の情報を徹底して網羅する注目すべき研究といえる。
- ・北京ゲノムセンターは、高速シーケンサーの大規模な整備を行い、世界のシーケンシング拠点になりつつある。パンダゲノム解読など、De novo 解読により多様な生物種のゲノム解読を推進している。コンソーシアム型の従来のゲノムプロジェクトは、プロジェクト途中で後塵を拝する可能性が高い。

中静透（東北大学）、持田恵一（理化学研究所）

1-2-3 環境修復

【概況】

環境修復とは、近年の人間活動の活発化や経済成長にともなって、著しくバランスがくずれたり変化したりした環境を生物の機能を活かして本来の状態へ再生する技術のことである。産業化・都市化を起因とする汚染物質を浄化しようとする技術から、気候変動を起因とする砂漠化、寒・湿・熱地を再生しようとする技術まで、修復対象の種類や規模・空間はさまざまである。いずれの環境修復技術も修復対象地域や空間が広範囲であること、修復対象（化学物質や環境因子）が多岐にわたることから、技術開発基盤には生物の多彩な機能を活かした取り組みが主流となっている。すなわち、環境修復とは、地球環境の中で進化と適応を繰り返してきた生物から学ぶ技術の開発であり、また生物のもつ多彩な潜在能力（毒性物質の超集積性や劣悪な環境に対する耐性）を活かした高度な技術を指向とした開発である。環境修復では、人の健康の保護と生活環境の保全が達成されることが究極の目的である。

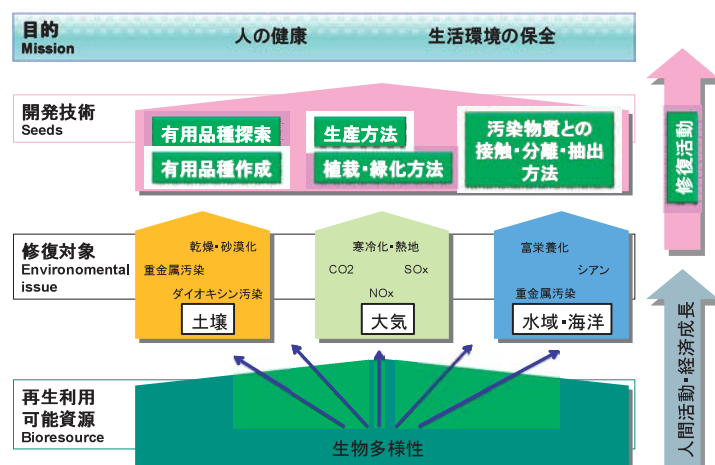
環境修復の課題は、土壌環境、大気環境、水域・海洋環境の無機・有機汚染物質を浄化する技術の開発と、砂漠緑化、寒・湿・熱地で植物を生産する技術の開発である。安全・安心な農作物・飲料水の確保、再生可能エネルギーを大量に生産する開発課題は急務であることから、世界中で規制強化による大規模な市場が創出されており、米国をはじめとして諸外国では、各種企業、公立、民間研究グループが、環境修復技術の開発にむけた取り組みを実施している。日本においても環境規制は強化傾向にあり、市場成長の将来性が有望視されている。高い浄化能力をもつ植物及び微生物の発見、植物・微生物・汚染物質間の相互作用の解明、植物・微生物の組み合わせ及び遺伝子組換え技術の応用などによる効率的な環境修復技術の確立が緊急な課題である。

環境修復の重要性は、21世紀の半ばに訪れる人口の急増化を起因とする食糧問題、水紛争、エネルギー危機へ対応できる高度な技術として開発することである。開発技術は何か一つの新しい植物や微生物を作り出せば一挙に解決ということではなく、いくつかの技術を体系的複合的に組み合わせて解決策の創出を図ることが重要である。植物の分子育種とそのための分子生物学的基礎研究が開発の基盤情報となる。個々の基盤情報をもとにバイオエンジニアリング、土木・工学の分野の研究へと進める必要がある。

【土壌汚染修復】

土壌は、水、大気、生物とともに環境の重要な構成要素であって、人類の生活や経済活動の基盤である土地を構成している。また、食糧の生産や物質循環、生態系機能の維持の要として重要な役割を果たしている。近年の人間活動や産業発達の活発化とともに様々な無機・有機汚染物質による低濃度かつ広範囲な土壌汚染が世界中で問題となっている。重金属類等の無機汚染物や残留農薬、揮発性有機化合物、PCB（ポリ塩化ビフェニル）、ダイオキシン類、石油等の有機汚染物による土壌汚染が、人の健康及び生活環境を脅かしている。こ

環境修復の概要

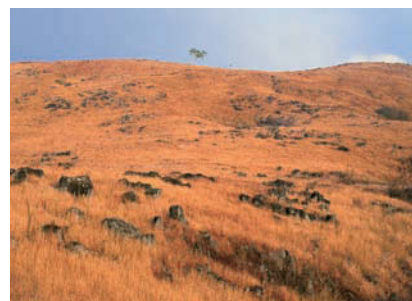




1-2-1 バイオマス生産



1-2-2 生物多様性利用



1-2-3 環境修復

れら土壌汚染の修復には従来の物理化学的手法だけでは対応が困難なため、生物による環境修復（bioremediation）技術の開発が進められている。特に、植物を活かしたファイトレメディエーション技術が注目されている^[1]。

ファイトレメディエーション技術は、主に地上部での処理技術と根圏での処理技術とに大別される。地上部での処理技術では、植物に吸収、移行、蓄積させた後、収穫する方法（phytoextraction）と植物に吸収させた後揮散させる方法（phytovolatilization）がある。根圏での処理技術では、物質などを分泌して根圏土壌に固定する方法（phytostabilization）、根からの分泌物によって土壌微生物活性を高めて微生物分解を促す方法（phytostimulation）、酵素などを放出して分解する方法（phytotransformation）がある^[2]。

ファイトレメディエーション技術の開発には、汚染物質に対する当該植物の生理学的・分子生物学的研究や生態学的研究などによる基礎的な知見が不可欠である。例えば、汚染物質の吸収機構に関する研究では、トランスポーターとそれをコードする遺伝子の解析がもっともさかんに進められている。また汚染物質の植物体内輸送と蓄積機構にかかわる研究では、リンゴ酸、クエン酸、マロン酸などの有機酸や、システイン、グリシンなどのアミノ酸などにより汚染物質が無毒化され、その後、体内輸送され細胞内の液胞に貯蔵されていることが確かめられている。効率的なファイトレメディエーションを行う目的での遺伝子組換え体植物の利用は、大きな期待がもたれる分野である。ファイトケラチンは重金属ストレスによって誘導され、ファイトケラチンの前駆体であるグルタチオンが重金属の解毒に強く関与していることを利用した重金属除去対応型の組換え体の作製が行われている。また有害有機化合物についてはシトクローム P-450 モノオキシゲナーゼを導入した組換え体の作製が行われている。ただし遺伝子組換え体の生態系影響が明らかにされていない現状において、実用化にむけた展開は難しい状況にある。これに対して、有用な自然変異をもつ植物種や集団、個体の探索が実施されている。超蓄積植物（hyperaccumulator）という用語が 1976 年に登場し、当初はニッケルを対象とした植物に対して用いられていたが、諸外国では様々な重金属超蓄積植物の探索が精力的に実施され、現在では約 400 種類の重金属超蓄積植物が報告されている。具体的には、アブラナ科の *Alyssum lesbiacum*、*Thlaspi caerulescens* などはカドミウム、ニッケル、鉛などを地上部に著しく集積することが知られており、乾燥重量当たり 1～5%に達する。また *Pteris vittata* によるヒ素の集積などが報告されている。さらに重イオンビーム照射技術を活かした育種による新しいファイトマイニング技術の開発分野も期待されている。また、東大ではカドミウムを高蓄積できるイネの開発にも成功しており、それらの成果の応用が期待されている。

欧米等諸外国では、法律による包括的な対応が図られている。1980 年代から、米国のスーパーファンド法をはじめとして、オランダの土壌保護法、英国の環境法、ドイツの連邦土壌保護法などが制定されている。これらの法律は、汚染土壌の修復義務を規定しており、汚染土壌に対する迅速かつ責任ある対応を義務づける厳しい責任追及主義を採用している。日本では、土壌汚染が深刻な問題となる事例が増加する社会的背景にともない法規制の強化が取り組みられ、2003 年（平成 15 年）2 月 15 日から土壌汚染対策法が施行された。本法では、土壌中に含まれることに起因して人体への健康被害を引き起こすおそれのある物質を特定有害物質と定め、セレン、フッ素、ホウ素、カドミウム、鉛、六価クロム、ヒ素、総水銀など、計 25 物質が特定有害物質に指定されている^[3]。また CODEX（国際食品規格委員会）では米をはじめとした食物のカドミウム含有基準を設け、基準値以上のカドミウムを含む農作物は販売することが出来ない。土壌汚染修復技術の開発は重要な課題のひとつであることに間違いはない。

引用文献等

- [1] CMC 出版. 2009. 特集 植物による環境保全・浄化のポテンシャル. バイオインダストリー 11.
- [2] 森敏・前忠彦・米山忠克（編）. 2001. 植物栄養とバイオテクノロジー、pp.237-276. 植物栄養学. 文

永堂出版.

[3] 環境省環境管理局. 2003. 土壤汚染対策法の概要. 環境浄化技術 2 : 1-4.

【大気汚染修復】

大気中の 78% は窒素である。窒素は大量に存在しているにもかかわらず、窒素欠乏が人類の発展の限界をもたらすと考えられていた時代があった。すなわち 1900 年代の初め頃、人類の発展の限界は、人口増加の限界と解釈され、窒素肥料の欠乏に由来する食糧生産の限界がおとずれと考えられていた。つまり、窒素分子を構成する窒素原子同士は三重結合で強く結ばれているので、雷光をとまなう空中放電による窒素分子の酸化あるいはニトロゲナーゼを有する一部の微生物による窒素分子の還元でしか、植物へ供給できる硝酸 (HNO_3) やアンモニア (NH_3) を生成することができないということが危惧されていたのである。ところが、ガソリンエンジンおよびディーゼルエンジンの発明を象徴とした近世の科学技術開発の進歩は大量の窒素を地球環境に附加する原因となった。すなわち大量の窒素酸化物が自動車から排出されることになり、現在では、大気汚染、酸性雨、生態系の富栄養化、窒素過剰現象をまねくこととなった。自然界には大気や水の中に存在する窒素分子の酸化および還元プロセスが存在し、生態系の維持に必須のアンモニアや硝酸を供給している。現在では、これらの自然起源の窒素化合物の供給を超えて、地球環境に附加される人為起源の窒素化合物 (NO_x) の量が激増している^[1]。

近年、街路樹などに用いられている樹種を対象とした様々な実態調査が進められている^[2]。概ねの結論として、植物の種類によって大気中の窒素汚染に対する感受性や耐性が異なっていることや窒素酸化物を栄養としている可能性もあることなどが報告されている。したがって、大気中の過剰な窒素濃度に耐性かつ窒素化合物を多く吸収する植物の探索がなされている。さらに、遺伝子組換え体による研究もなされているが、現在では重イオンビーム照射技術による有用樹種の作製などより実用化にむけた取り組みが実施されている。その他に光触媒作用で分解する技術などがある。このように、過剰な濃度で存在する大気中の窒素化合物 (NO_x) を除去する技術の開発が世界各国で進められているが、窒素汚染の歴史と現状に対する科学的な調査の拡充と、これに基づく対策、そして地球環境の中での生物地球化学的物質循環 (Biogeochemical cycles) を視野に入れた将来に対する展望と指針の構築が今大きな問題である。

世界保健機関 (WHO) は古くから大気汚染、特に人の健康に対する有害性に着目し、1972 年に WHO の専門家委員が大気基準に関する報告書を出版している。有害影響の見られる血中汚染物質濃度にもとづいて基準値が設定されている。また、現在の米国環境保護局 (U.S.EPA) では生物の摂取量 (バイオアベイラビリティ) にもとづいて基準値が設定されている。日本では、大気汚染防止法にもとづき環境基準が設定されているのは、ベンゼン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、ジクロロメタンの 4 物質のみである。ただ、鉛など重金属類、 SO_x やメタンなどによる汚染、 CO_2 濃度の上昇を修復することを目的としたモニタリング調査は数多くなされている。さらに焼却炉から発生する複合的な大気汚染源を対象とした植物の遺伝子応答解析 (マイクロアレイ解析) も試みられているが、単一汚染源に特異的に応答する遺伝子を選抜することは非常に困難な状況である。

引用文献等

[1] 佐竹研一. 2010. 地球環境に附加される自然起源と人為起源の窒素化合物. 地球環境 15: 97-102.

[2] 森川弘道. 2000. 植物利用による環境修復 - ファイトレメディエーション -. ISBN4-900830-58-5

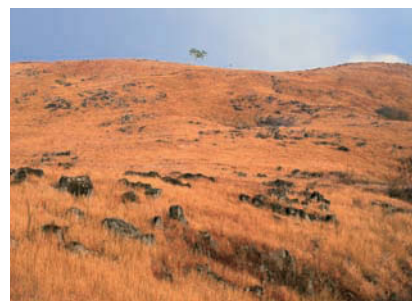
[3] 須藤恵美・吉田佳代・榊原均. 2008. イネ環境アレイによる環境毒性の定量的・定性的診断とその可



1-2-1 バイオマス生産



1-2-2 生物多様性利用



1-2-3 環境修復

視化。文部科学省経済活性化のための研究開発プロジェクト、一般産業廃棄物・バイオマスの複合処理・再資源化プロジェクト、平成 19 年度 安全性グループ成果報告書 67-77。

【水域・海洋汚染修復】

地球上に存在する水の量はおよそ 14 億 km^3 であるがそのうち 97.5% が海水で占められ、淡水は 2.5% である。しかも淡水の大部分は南極と北極など極地の氷や氷河であり、実際に使用できる河川水などの淡水の量は 0.8% にすぎない^[1]。農業と工業においてはこのわずかな量の淡水が貴重な天然資源として利用されている。水は生物が存続していく上で欠かせないものであり、このことは生命が誕生してから今日まで変わることがない。将来の私たち人間が存続しつづけるためにも水資源の安全かつ安定な供給が必須であることに間違いはない。現在すでに世界の水資源は深刻な状況にある。2006 年の国連のまとめによれば、世界では 11 億人が安全な水を飲むことができず、2025 年には 30 億人が水不足に陥ると報告している^[2]。地球温暖化が進めば、降水のパターンが大きく変わり、水資源の偏在化、海面上昇や局地的な洪水、干ばつ、渇水の発生、砂漠化の進行が、また人為的には急速な工業化や都市化や人口増加の影響から世界的な水不足と水質悪化、水源汚染が進行することで、より安全な飲料水の確保にむけて様々な問題が浮上すると報告されている^[2]。

日本では産業排水分野は公害問題の時代から環境意識の時代へと移行している。環境基本法に基づく水質汚濁に係る環境基準では、カドミウムやシアンなどの人の健康の保護に関する環境基準（健康項目 26 項目）と、pH や BOD（生物化学的酸素要求量）などの生活環境の保全に関する環境基準（生活環境項目 8 項目）の環境基準を達成するために水質保全対策が実施された。公用水域における環境基準値の 2005 年度での達成状況は、健康項目は 99.1% とほぼ全国的に達成されており良好な状態にある。対して生活環境項目は 83.4% と改善余地がある。また達成率は、河川（87.2%）、海域（76.0%）、湖沼・内湾（53.4%）で、閉鎖性水域のさらなる改善が必要である。水環境汚染の修復技術として、物理処理技術、化学処理技術、生物処理技術、電気・磁気による処理技術などが一般的とされてきたが、近年、微細気泡（マイクロバブル）、温度・圧力、紫外線、植物および植物性固体物質による処理技術が新しい排水処理技術として注目されている^[3]。

植物は太陽光をエネルギー源に空気中の二酸化炭素を炭素源に利用してバイオマス生産を営む独立栄養生物であり、これを生物触媒として用いる水域・海洋汚染の修復技術は絶対的な経済性と環境適合性を有している。具体的には、窒素やリンなど閉鎖性水域の富栄養化低減技術の開発が進められている。浮遊植物（ホテイアオイ、ボタンウキクサ、ウキクサ、ハス、ヒシなど）、抽水植物（アシ、ガマ、パピルスなど）、沈水植物（オオカナダモ、フサモなど）を植栽した修復技術がある。植物体への取り込みのみではなく、窒素については根圏の微生物による硝化と嫌気部分での脱窒、リンについては塩形成の促進による沈殿除去が指摘されている。ただし修復機構の実態解明は今後の課題となっている。植物・微生物系など生態系の中でみられる複数の生物により演じられる修復原理の解明には、メタゲノム解析などによる基盤研究技術の果たす役割が大きく、また主流となっている。重金属類による水質の修復技術の開発も進められている。例えば根を利用した修復技術（Rhizofiltration）がある。東南アジアの河川に流れ込む工場廃水中のカドミウム、鉛、水銀などを浄化するために食用のヨウサイが使用されている。

世界において上下水道の民営化市場の 7 割から 8 割を寡占しているのはウォーターメジャーと呼ばれる欧州の巨大水企業 3 社である。仏ヴェオリア・エンバイロメント、仏スエズ、英テムズ・ウォーターがそれである。水ビジネスの市場は現在約 60 兆円規模だが、途上国の経済発展と都市化にともなう水需要の急増で、2025 年には 100 兆円に拡大するといわれている^[1]。日本では、廃棄された携帯電話や家電などからプラチナやパラジウムなどのレアメタルを回収する動きは進んでいるが、産業排水からの回収は普及していない。主な

理由は回収にかかるコストが高いためである。植物を活かした安価な回収システムを開発することで新たな市場を獲得できる可能性がある。現在、日本の非鉄鉱山企業 DOWA 社と理化学研究所においてコケ植物を用いたレアメタル・貴金属資源回収技術の開発が進められている^[4]。中空糸ろ過膜を用いた海水の淡水化分野や医薬・食品・農業分野でも注目されている機能水の効果などに新たなニーズが高まれば質の高い水市場が成長する可能性があり、日本の企業開発技術や基盤研究成果が新たなシーズとなる可能性は十分にある。

引用文献等

- [1] CMC 出版. 2009. 2010 年水処理・水浄化・水ビジネスの市場 (ISBN978-4-7813-0208-9).
- [2] 人間開発報告書 2006 概要
(http://www.undp.or.jp/publications/pdf/undp_hdr2006.pdf).
- [3] 吉田隆. 2007. 排水・汚水処理技術集成. NTS.
- [4] 井藤賀操・本間善弘・中塚清次・小松由佳梨・川上智・榊原均. 2010. ヒョウタンゴケによる水環境保全と金属資源回収技術. 植物の生長調節 45:64-72.

【砂漠緑化、乾燥耐性の育種】

世界的に、耕作地の乾燥化と砂漠化 (desertification)、それを導く土地の荒廃化が深刻な問題となっている。土地の荒廃化により、水分の低下、土壌の栄養分の流出、灌漑により誘導される塩性化、土地の酸性化などが、作物育成の障害となっている。2005 年の報告では、全表土のおよそ 41% を占める広義の乾燥地 (乾燥地、半乾燥地、半湿潤乾燥地) が土地の荒廃化の脅威にさらされており、そのうちの 10 ～ 20% がすでに荒廃化していると推測されている。土地荒廃化のなかで砂漠化と同様に問題となっているのが塩害である。不十分な灌漑の為に塩性化土地が増加している。灌漑農作地のおよそ 20% で塩による影響が認められ、毎年 2,500 ～ 5,000km² が耕作不能に陥っている^[1]。この問題を解決する為に、1996 年に国際的な砂漠化防止条約 (UNCCD) が発効されている (現在 193 ヶ国が締結)。

現在、土地の荒廃化はその土地に特有の自然環境の変化や人為的な影響 (過剰耕作、過剰牧畜、森林伐採) など様々な要因が複合的に絡み合っており、単純な方策では解決できないと認識されている。国際的取り組みの現在の対抗策は、現状の把握の段階からようやく具体的な対応プログラム導入の段階に移りつつある。対応策は多くの場合、耕作手法の改良と新たな技術の導入による持続可能な農業および緑化が主である。具体的には、塩害や土壌の酸性化を引き起こさないような有効な灌漑方法の導入、牧畜の適正な管理、適正な肥料の投与、無計画な森林伐採の禁止、植林とその維持、などである。現実問題としては、乾燥地のほとんどが貧困に苦しむ地域と重なっており、十分な灌漑施設や肥料の購入などは容易に進まず、問題となっている。実際、砂漠化問題の深刻化の為に近年肥料の価格が上昇しており、土地荒廃化問題は事態が明らかに成る程複雑化する様相を呈している。

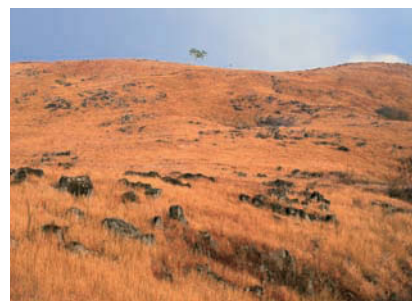
これらの問題を打開する一つの方策として、乾燥地域でも生育可能な作物の開発が世界各国で進められている。2007 年の UNCCD の報告では^[2]、各国の研究機関、大学、企業で乾燥や塩に耐性を持つ遺伝子組換え作物の開発が進められているが、未だ実用段階に入っていない旨が記載されている。しかし、遺伝子組換え作物は耐病性作物や耐除草剤作物で一定の成果が挙げられており、乾燥や塩耐性植物の開発が進められている。ただ、知られているように遺伝子組換え植物の導入には様々な問題が挙げられており、今後何らかの解決策を見いだすことが迫られる。また、実用化を含めた研究開発には、組換え体育成に関する制約などが多く、国際的な共同研究が必要となっている。さらに、遺伝子組換え作物の開発競争が激化し、企業が利益を獲得する為に



1-2-1 バイオマス生産



1-2-2 生物多様性利用



1-2-3 環境修復

秘密裏に進めていることが多く、有効な手段として容易に利用できるまでに時間がかかる可能性がある」と指摘されている。これらの遺伝子組換え作物の開発に関わる問題を回避する一つの方策として、有用作物やその近縁種から耐性に有効な遺伝子座を QTL 解析などで見だし、それを利用した交配種の作成が盛んに試みられている。この手法では周辺への環境への影響はほとんどないと考えられ、広く利用可能な耐性作物の作出が期待されている。最近イネで塩耐性を付与するナトリウムトランスポーター遺伝子が同定されたが^[3]、同様のアプローチは他の作物にも適応可能である。この様な手法に必須の情報がゲノムマーカーである。現在様々な作物のマーカー作成が精力的に進められている。

研究界では、モデル植物シロイヌナズナ、イネなどのゲノム解読、これらを用いた基礎研究から、乾燥などのストレス応答に関わる転写因子、応答因子が数多く分離され、これらの人為的制御によりある程度の耐性付与が確認されている^[4]。この分野ではシロイヌナズナ、イネを利用して理化学研究所、国際農林水産業研究センター、東京大学などが世界をリードする研究開発を進めている。応用に関しては、農水省で科学技術外交政策に関連して開始した通称「DREB プロジェクト」が始まり、国際農研や理研で開発された組換え遺伝子を利用して、IRRI（フィリピン）、CIAT（コロンビア）、CYMMIT（メキシコ）では、乾燥ストレス応答に関わる DREB 転写因子、アブシジン酸や適合溶質の合成酵素などのストレス応答高発現組換え体イネやコムギを作成し、乾燥耐性を獲得した品種の開発を進めている。同様な研究はダイズやピーナッツなど他の作物でも進められている^[5]。また、砂漠化問題の包括的問題解決についても、各国の研究機関で進められて

土地荒廃化(乾燥、砂漠化)に対抗する バイオテクノロジー



いる。我が国では鳥取大学が砂漠における植物生産の生態学的・栽培学的研究の共同研究拠点として整備され、国内外の研究を推進している^[6]。乾燥、低温、高温などの非生物ストレス研究においては理化学研究所、国際農林水産業研究センター、東京大学のチームの分子生物学的研究が世界的に注目されている。また、植物のストレス研究の共同研究拠点として岡山大学、組換え植物研究の共同研究拠点として筑波大学が整備され、今後これらを積極的に利用し成果を高める制度の導入が本研究分野の発展において重要なポイントとなる。さらに地球規模問題の解決のためには国際的な機関との共同研究を進める必要があり、農水省の DREB プロジェクトや JST-JICA の地球規模問題解決のための共同研究に関わるプロジェクトは、応用展開へ向けて重要な役割を果たすと期待される。

土地荒廃化地域の経済的および政治的状態の問題のため、乾燥耐性作物のこれらの地域での大規模栽培は、短期的には難しいと考えられるが、これらの問題が解決の方向に向かえば、耐性作物の要求度は高まるだろう。我が国としては、ストレス耐性分野での基礎研究、イネ、オオムギ、コムギなどのリソースを活用し、乾燥、塩耐性、金属耐性作物の作出を進めるべきと考える。また、農業技術、環境基盤整備を積極的に援助し、今後日本の先端技術が現地により受け入れ易くする体勢を作っていく努力も必要ではないか。そのような国際貢献のための共同研究は特に重要である。また、北米、ヨーロッパ、豪州では、天候不順による収量減少を避ける為に、ストレス耐性、病害虫耐性、増収量の作物の要求が高まっている。このような市場は既にメジャー種苗会

社が各種耐性作物を販売し独占しようとしているので、さらに有効性が高い作物を作成し、参入することが必要と考える。そのような作物を国際作物研究機構や国内の種苗企業と開発できれば、大きな市場を獲得できる可能性がある。

引用文献等

- [1] UNCCD: Down to Earth 2008, UNEP Global Deserts Outlook 2006, UNCCD GEO4 report.
- [2] UNCCD: GEO4 report.
- [3] Ren et al., Nature Genetics, 37, 1141-, 2005.
- [4] Hirayama & Shinozaki, Plant J., 61, 1041-, 2010.
- [5] 独立行政法人 国際農林水産業研究センター 17 年度報告書、
CIMMYT (http://apps.cimmyt.org/english/wpp/gen_res/dreb.htm).
- [6] 鳥取大学乾燥地研究センター (<http://www.alrc.tottori-u.ac.jp/>).

【寒・湿・熱地での植物生産】

気候が寒冷、高温、または土地が湿地であるために耕作できない土地が地球上には多くある。食料問題が深刻化を増す現在、これら耕地不適地域でも生育可能な作物が望まれている。また、天候を人為的に変える手法を人類は未だ獲得するに至っていない為、突発的な天候不順により引き起こされる環境の変化は農業に多大な影響を及ぼす。米国のある試算によると、この様な病害虫を含まない環境ストレスの農業への影響は予想以上に大きく、概ね期待できる収量の半分が失われているとのことである^[1]。つまり、天候の変化に関連した環境ストレスに耐性を持つ作物があれば、収量が今の倍になるという訳である。地球規模の温暖化の影響により天候不順の割合が増すと同時に降水量の高緯度地域での増加と低緯度地域での減少が予想されており、天候変化による作物収量減少が危惧されている^[2]。

植物はある程度以上の低温にさらされると、生理活動に様々な障害が発生し生育が阻害され作物の収量が減少する。低温障害は細胞レベルでは生体膜の流動性減少による膜を介した反応及び活動（光合成、呼吸、物質の輸送）の低下、これによるエネルギー生産の低下、活性酸素の蓄積、核酸の高次構造形成による遺伝子の転写、翻訳阻害が主と考えられている。組織レベルでは花粉形成の阻害などがイネなどの作物で見られ、収量の低下を招く大きな問題となっている。これまでの研究から、膜の脂質成分の不飽和化による流動性向上や RNA 結合蛋白質、更には適合溶質と呼ばれる一連の物質の生産向上により、低温耐性が付与されることが示されている^[3]。また、低温応答に関わる転写因子の研究も進んでおり、将来これらを用いた技術により耐性効率の良い作物が作られることも期待できる。日本ではイネの低温耐性に関する研究が進んでいるが、最近では温暖化に伴い高温耐性に関する研究に関しても注目されている。

土地の冠水は、植物育成に多大な影響を及ぼす。我が国では国土が比較的急峻な為に、このような状況は起きにくい、大陸ではしばしば起きる問題である。冠水は、植物の根への酸素供給を低下させ根の生育、状態を悪化させ、その結果作物の収量減少を招く。植物の根は、低酸素状態時にアルコール発酵を行いある程度の生育を可能にしている。この発酵に関わる酵素群の機能上昇によりある程度の低酸素耐性が付与されることが知られている^[4]。また、最近イネに於ける冠水時の徒長誘導に深く関わる因子が、浮きイネの QTL マーカー遺伝子の解析から ERF 転写因子であることが明らかになり、この因子により徒長能を飛躍的に増大できることが示されている^[5]。

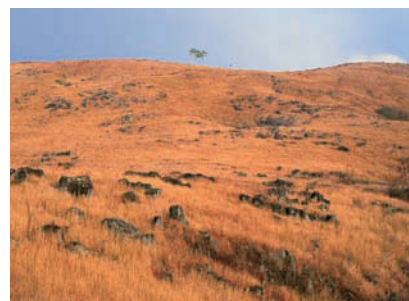
植物は他の生物同様に高温に対して感受性を示すが、ある程度馴化することが知られている。その基本的馴



1-2-1 バイオマス生産



1-2-2 生物多様性利用

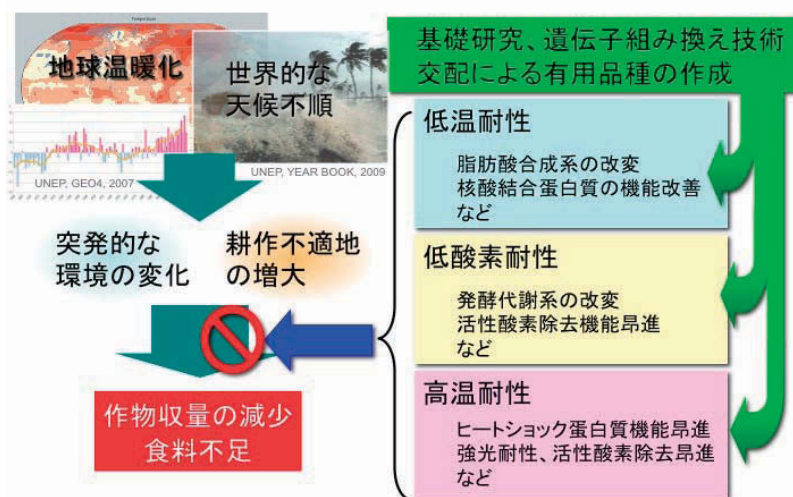


1-2-3 環境修復

化機構は、原核生物や他の真核生物と同様にヒートショック蛋白質の機能によることが示されている。通常の生育環境では、高温ストレスは乾燥や強光といった他のストレスと共に負荷されることが多く、現在の解釈ではこのような状況下では乾燥、強光がより植物の生育に直接的な害を及ぼすと考えられている。例えば、C4作物は通常より5度程生育温度を上昇しても光合成能には影響がなかったとする報告もある^[6]。高温ストレス誘導に関わる転写因子の研究、乾燥ストレス応答とのクロストークに関わる転写因子のDREB2に関する研究が進展している。強光は、葉緑体の光化学系に直接または間接的に傷害を引き起こし、光合成効率を低下させる。また、過剰な光エネルギーは活性酸素種の誘導を招き様々な生理活動に悪影響を及ぼす。強光ストレス対策としては、光化学系複合体構成要素のリサイクル機能の解明、効率化、または活性酸素除去機能の向上が挙げられる。また、過剰なエネルギーを無害に逃がす光呼吸システムの増強も有用と考えられる。

天候不順による影響も大きい、そのダメージによる病害虫への抵抗性低下が、大きな問題となっている。乾燥などのストレスも含め、それぞれのストレスに耐性を示すという特別な作物品種は販売されていないようである。一方で、どのストレスにも強く、ストレス存在下でも病気、害虫にも強いという品種が販売されているようである。また、植物を「頑丈にする」為の肥料、生育改善材が注目を集めている。我が国の種苗会社や研究機関でもその開発を進めている。特にケミカルバイオロジ的なアプローチによりそのような薬品の探索も進められている。

寒・湿・熱地での植物生産



引用文献等

- [1] Biochemistry & Molecular biology of plants 4th edit., American Society of plant physiologist, 2002.
- [2] IPCC: AR5, (<http://www.ipcc.ch/>).
- [3] Kodama et al., Plant Physiol, 107, 1177-, 1995, Nakaminami et al, PNAS, 103, 10122-, 2006 など.
- [4] Australlian Govenment, National Action Plant for Salinity and Water Quality (<http://www.napswq.gov.au/>), Christianson, et al., Plant Cell Physiol., 51, 21-, 2010 の introduction に引用されている文献、Colmer & Voesenek, Functional Plant Biology, 36, 665-, 2009 など.
- [5] Hattori et al., Nature, 460, 1026-, 2009.
- [6] Dwyer et al., Plant Cell Environ. 30, 53-, 2007

「環境修復」に関する科学技術・研究開発の国際比較と注目動向

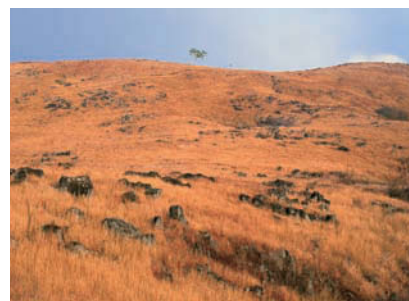
国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↑	・ イネやタバコなど分子育種を用いた基礎的研究は高いレベルにあり、重金属耐性機構に関する論文の引用数から、この分野の研究をリードしている。 ・ 特にメタロチオネイン様物質に関わる重金属の無毒化機構の解明や遺伝子組換えによる耐性植物の作成などで世界をリードしている。 ・ シロイヌナズナ、イネなどのモデル植物を用いた乾燥、低温、高温などの非生物的ストレスに関する基礎的研究は高いレベルにあり、論文の引用数から、この分野の研究をリードしている。 ・ 特に各種ストレス応答に関わる転写因子、情報伝達因子、イオントランスポーターの同定、機能解析などでの貢献は大きい。 ・ 岡山大学の植物の環境ストレス研究が共同研究拠点事業として取り上げられている。さらに科学研究費で「植物の環境突破力」や「植物の環境感覚」に関わる新学術領域研究プロジェクトが開始しており、環境ストレス研究に関して発展期を迎えている。この他に、生研センターやCREST研究でも関係する課題の研究プロジェクトが進められている。 ・ 国際共同研究に関しては、国際農研を中心にした研究プロジェクトが作物の乾燥ストレス耐性に作物の開発に大きな役割を果たしている。
	技術開発水準	○	↑	・ 外来の遺伝子を導入することで植物に重金属耐性能を付与する技術の開発、乾燥耐性や低温耐性を付与する技術開発は特筆に値する。 ・ 特に多様なイネ品種とのゲノム情報を活用した育種によって、今後様々なストレス耐性品種の開発が期待できる。 ・ 木本性ヤナギ、コシアブラ、ハクサンハタザオ、タカネグンバイ、ミゾソバ、モエジマシダ、ヒョウタンゴケ、ヘビノネゴザなど複数の重金属超集積植物について技術開発も進められており、多様な汚染物質に対応できるポテンシャルがある。 ・ 特許情報から推察するに、国内対応型の環境修復技術の開発が進められているが、決定的な技術開発には至っていないようである。しかし、基礎研究機関と企業との連携も高まりつつあり、高いポテンシャルを持っていると考えられる。 ・ ストレス応答主要転写因子や、転写抑制ドメインなどを用いての、乾燥や低温ストレス耐性付与技術の開発は特筆に値する。 ・ 特に多様なイネ品種とのゲノム情報を活用した育種によって、今後様々なストレス耐性品種の開発が期待できる。 ・ コムギ、オオムギ、ハクサイ、など他の作物についてもマーカー作成などが進められており、多様な品種開発のポテンシャルを持っている。 ・ 特許情報から推察するに、企業において独自にストレス付与技術の開発を目指しているが、決定的な技術開発には至っていないようである。しかし、基礎研究機関と企業との連携も高まりつつあり、高いポテンシャルを持っていると考えられる。
	産業技術力	○	↑	・ 環境汚染修復の国内の市場は、規制強化と連動する要素が大きく、土壌と閉鎖系水域における産業技術力が求められているものの企業は個々に自社内対応する傾向がある。 ・ 規制強化の効果は、現状は覆土などによる対策を主として進められているが、後はリサイクル社会構築型の産業技術力が期待される分野である。 ・ 国内の研究機関、大学等と企業との連携システムが未成熟であり、むしろ公団体などでオンサイト事業として活動している側面が目立つなど国際市場としての成長はこれからの課題である。 ・ ストレス耐性作物の国内の市場は、それほど大きくはなく、この分野の産業技術力が特別高い訳ではない。しかし、国際貢献としての研究開発は着実に進展している。 ・ 国内の種苗会社は近年、海外に積極的に進出し、各国での拠点形成、欧米の企業の買収、出資により、技術力の向上とシェアの拡大に努めている。



1-2-1 バイオマス生産



1-2-2 生物多様性利用



1-2-3 環境修復

米国	研究水準	◎	↑	・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、特に EPA（環境保護局）を中心とした活動が世界をリードしている。論文数、その引用数からも優位性が裏付けられている。 ・生態影響関連研究やバイオアベイラビリティにもとづいた規制値の取り決めなどわが国とはシステムが異なった視点での研究分野が広がりをみせている。 ・米国の大学・公的機関における植物のストレス応答に関する基礎研究レベルは非常に高く、特にゲノム科学、網羅的解析研究、計算科学で世界をリードしている。論文数、その引用数からも優位性が裏付けられている。 ・USDA の National program302 にストレス耐性関連研究が組み込まれ、国としてこの分野の研究を後押ししている^[1]。 ・モデル植物シロイヌナズナのみを用いた研究への資金は削減される方向にあり、今後作物を対象にした研究が活発になると予想される。一方で、これが基礎研究の低下につながる可能性も指摘されている。
	技術開発水準	◎	↑	・大学と EPA（環境保護局）とベンチャー企業の連携が強く、関連分野の技術開発において、高いレベルを保っている。 ・この分野で保有する特許、情報は圧倒的である。
	産業技術力	◎	↑	・米国にはモンサント、デュポンという、世界第一位、第二位の巨大種苗会社があり、その産業技術力は、他の国、地域を圧倒している。 ・これらの企業では、ストレス耐性作物の販売も始めている^[2]。 ・これらの企業は、世界各国の種苗企業を買収し、世界規模で技術、情報、シェアの占有を目指している^[3]。
欧州	研究水準	◎	↑	・植物の環境ストレスに関して、ドイツ、英国、など中心に基礎研究において高い研究レベルを持っている。 ・有用植物の探索において世界に先駆けて調査・収集活動が進められ有用品種を取り扱った研究において伝統をほこる。 ・ドイツは、代謝物解析研究で優位な立場に立っている。 ・スペインは研究水準も向上し、乾燥耐性に関わる研究においても頭角を現している。 ・欧州各国間の連携が高まっており、全体の研究レベルが上がっている。
	技術開発水準	◎	↑	・技術開発力は高い。また、それを育成する環境も整備されている。例えば、オランダでは食料関係の研究機関と企業を結びつける研究都市が設けられ、様々なベンチャー企業が生み出され成功を収めている^[4]。
	産業技術力	◎	↑	・ウォーターメジャーと呼ばれる欧州の巨大水企業 3 社ヴェオリア・エンパイロメント（仏）、スエズ（仏）、テムズ・ウォーター（英）が世界的産業技術力と市場を占有している。 ・シンジェンタ（スイス）、リマグレン（仏）など、作物の育種技術有する種苗企業が多数存在している。これらの企業では、ストレス耐性作物の販売も始めている。また、世界各国の種苗企業を買収し、技術、情報の占有を目指している^[3]。
中国	研究水準	○	↑	・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、優秀な留学生が多数帰国しているが、このような人材を中心に、この分野の研究水準は急速に上昇している。 ・中国研究者の論文の質には大きなばらつきがあるが、著名な国際誌にも定期的に中国発の研究が掲載されるようになってきている。 ・経済成長を背景に、巨額の研究費が投入されており、設備、機器も非常に充実している。研究レベルは今後さらに飛躍的に高まると予想される。

	技術開発水準	○	↑	・研究成果の実用作物への応用が重視されており、遺伝子組換え作物への技術開発に積極的である。 ・国内の環境格差・貧富の格差と政策動向と技術開発水準との関連については未知数であるものの、当面は緩やかな規制下での技術水準開発が求められると考えられる。 ・深刻な砂漠化問題に悩まされており、技術開発が進められている。今後そのレベルは高まると予想される。
	産業技術力	△	↑	・世界的に高い技術、能力持つ企業は未だ知られていないが、研究の旺盛さを考慮に入れば、数年後には産業技術力はかなり高まると考えられる。
韓国	研究水準	○	↑	・基礎研究レベルにおいて質の高い研究の論文が認められる。
	技術開発水準	○	↑	・国際規格にもとづく技術開発がなされている。 ・NICS など、ストレス耐性作物の育種をアジアなどの研究機関とともに積極的に進めている^[5]。 ・国の機関 KRIBB がバイテク企業の育成を押し進めている。
	産業技術力	△	→	・国が企業の育成、海外企業との連携、進出を後押ししているようで、今後の推移は注目すべきである。 ・現段階では、本課題に関連した事業を進めている種苗会社はないようである。しかし、国が企業の育成、海外企業との連携、進出を後押ししているようで、今後の推移は注目すべきである。
全体コメント：研究、技術、企業の面全てで、米国の有位性は圧倒的である。ついで欧州がこれを追いかけるという状況である。日本は、基礎研究で重要な論文を時折発表しており、植物生理分野の基礎研究レベルは平均して高いが、産業面での遅れは否めない。中国は、経済力を背景に研究を協力的に推進しており、植物の研究に於いてもその発展ぶりは顕著である。数年後には、我が国の研究レベルに追いつくことは間違いなく、更に追い越す勢いである。ただ、中国の国内の研究レベルの格差は深刻で、今後国内の研究教育がどのように進むか注視したい。韓国も研究レベルアップが図られ日本のレベルに近づきつつある。この他の特筆すべき国はインドである。経済成長をバックに、様々な企業が育っており、この分野の特許数も非常に多く、先進国との連携研究も盛んなようである。今後、注目すべき国と考えられる。				

(注1) 現状 [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている]

※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。

(注2) トレンド [↑：上昇傾向、→現状維持、↓下降傾向]

【注目動向】

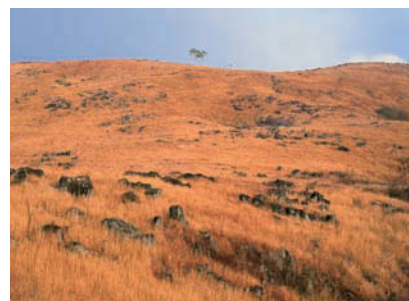
- ・中国の研究グループによりヒ素による土壤汚染修復植物候補としてモエジマシダが Nature に報告されてから、圧倒的な数の研究論文が報告された。また実用化研究も世界各地で進められている。新規な有用種あるいは品種が発見・報告されることの研究界・産業界への波及効果は計り知れない。
- ・大手種苗会社各社が各種ストレス耐性作物品種の販売を始めている。詳細な情報はないが、交配による品種開発による物と考えられる。これらの市場への広まり、評価がどうなるか注目される。
- ・様々な作物のゲノム解読が進められている。これにより、交配による品種開発が加速化される。この状況下で、どの国の研究機関、企業が主導権を握るか、注目される。
- ・遺伝子組み換えによる耐性作物の開発が進んでいる。最終的に効果が確認されたとして、今後これらがどのような扱いを受けることになるか、また、世界から受け入れられるようにするにはどのような手段が適切か、世界規模での適切な対応が求められると考えられる。食用でなければ民衆に受け入れられ易いという指摘もあり、食用以外の植物に遺伝子組み換え技術を導入し緑化対策用の植物を作出すべし、という意見もある。



1-2-1 バイオマス生産



1-2-2 生物多様性利用



1-2-3 環境修復

引用文献等

- [1] http://www.ars.usda.gov/research/programs/programs.htm?np_code=302
- [2] <http://www.monsanto.com/products/genuity.asp>
<http://www.monsanto.com/droughttolerantcorn/default.asp>
http://www.pioneer.com/CMRoot/Pioneer/research/pipeline/spec_sheets/Drought_2010_vF.pdf
- [3] <http://globe.asahi.com/feature/081103/index.html>
- [4] <http://www.nfia-japan.com/news/itochu.html>、NHK 海外ネットワーク（2010/6/26 放送）
- [5] <http://english.mest.go.kr/>、Biotechnology_in_Korea_0905.PDF
- [6] <http://crds.jst.go.jp/output/pdf/10gr02.pdf> フィールドにおける植物の環境応答機構に基づいた植物生産技術の開発に関する国際技術力動向調査

井藤賀操（理化学研究所）、平山隆志（岡山大学）

1-3

「資源・エネルギー生産」



1-3-1 バイオ燃料



1-3-2 化成品原料



1-3-3 医薬品原料・酵素等



植物工場

1-3-1 バイオ燃料

【概況】

植物由来のエネルギー（バイオ燃料）は、古来、人類にとって主要なエネルギーであった。化石燃料である石油の利用が一般化して、その重要性は低下したが、現在でも世界の総エネルギー消費量の約 10%は木質等のバイオ燃料と考えられる（講座 現代エネルギー・環境論、電力新報社）。石油価格の高騰、大気中炭酸ガス濃度の上昇による地球温暖化等の問題により、今後、資源循環型社会の構築のため、バイオ燃料の利用が再び活発になることは必然と考えられる。我が国でも、現政権が昨年末に打ち出した「2020 年度温室効果ガス排出量、05 年度比 25%削減」を実現するためには、カーボンニュートラルとされるバイオ燃料の利用拡大は必須である。

バイオ燃料は、その利用形態から、固体・液体・気体の 3 種に大別される。そのうち、木質チップなどの燃焼用固体燃料の利用は容易な方法として今後も需要が伸びていくであろうが、輸送用燃料としての使い勝手等から、エタノール、ブタノール、植物油脂等液体燃料の需要が増すと考えられる。ただし現状ではこれらの燃料生産は、食糧の供給と競合する可能性がある。現在、世界各国でセルロース成分等の食糧にならない部分からのアルコール生産が活発に行なわれており、2015 - 2020 年以降、本格的な実用化が見込まれる。一方、油脂については、大豆等の植物に比べて生産性が圧倒的に高いといわれる微細藻類による油脂生産が最近注目を集めており、菌株育種、栽培法・回収法の確立などの基盤研究が世界各国で今後益々活発化するであろう。

バイオガス（メタン）発酵については、近年、都市廃棄物や汚泥の処理・エネルギー回収システムとして脚光を浴びている。このシステムの特徴は、有機廃棄物をエネルギー資源とするところにあり、特に最近、都市中心部にこのシステムを設置し、ゴミ処理を兼ねたローカルエネルギーを生産する試みが注目されている（ストックホルム市、ソウル市等）。技術的には、菌叢や菌数の制御による発酵の効率化が今後の最大の課題である。

【バイオエタノール】

バイオエタノールは植物由来の液体燃料として最も注目され、かつ普及が進んでいる。2006 年、全世界で約 5,000 万 KL のエタノールが生産された^[1]。2008 年には、その生産量は 6,700 万 KL と大幅に増加している。その主な生産国は、米国とブラジルである。特にブラジルは唯一の純輸出国となっており（約 350 万 KL を輸出:2006 年）、今後も生産量・輸出量の増大が見込まれている。現在、世界の砂糖消費量は既に頭打ちになっており、ブラジルにとってサトウキビからのエタノール生産は、広大な土地を利用して農業を振興し雇用を確保しようという政策の中心となっている。また現時点では全く目立たないが、その他の南米諸国もブラジル同様のポテンシャルを有している。一方の米国にとっては、バイオエタノールはトウモロコシデンプンの価格維持策および自国の液体燃料確保のための安全保障対策という意味合いが強かった。しかし、食糧との競合の問題等から、今後コーンスターチからのエタノール生産の大幅拡大は望めず、エイリアンサス・スイッチグラス等の食べられないバイオマス（セルロース等）からのアルコール生産技術の確立が急務となっている。

我が国では、「バイオマス・ニッポン総合戦略（農水省）」（2006 年改訂）^[2] および「新・エネルギー国家戦略（経済産業省）」（2006 年）^[3] において、国産バイオエタノール生産拡大に向けた取組に対する支援などが明記された。2011 年度生産目標 5 万キロリットルに対し、2007 年度はわずか 90KL の生産量に留まったが、2010 年度、北海道の 2 箇所の実証施設がそれぞれ年産 15,000KL の本格生産に入った。

バイオエタノール生産に関する研究開発は原料となるバイオマスの生産とより効率的な燃料変換技術の開発、さらには廃棄物を出さないトータルシステムの開発が重要である（図 1 参照）。原料バイオマスの確保はバイオ燃料生産における重要課題であり、そのためには、栽培地の確保と単位面積当たりの生産性の向上が必



1-3-1 バイオ燃料



1-3-2 化成品原料



1-3-3 医薬品原料・酵素等



植物工場

要である。バイオマス生産はそれぞれの国や地域によって状況が大きく異なるため、それぞれに合った技術開発が必要であるが、共通して言えることは、旧来の育種技術に加えて、近年発展の著しい遺伝子操作技術の導入が必須と考えられることである。栽培地の確保では、乾燥地、塩害地、金属汚染地等での栽培可能植物の開発、生産性の向上では、単位面積あたりのバイオマス生産量の向上、エネルギーとなる原料（糖質成分）の蓄積比率の向上、必要とされる肥料量の低減化、投入労働力の削減などが中心的な課題である。研究対象となる植物種としては、地域によってトウモロコシ・コムギ・サトウキビ・テンサイ等、多種類にわたるバイオ燃料用の草本類が挙げられる。

変換技術については、糖質原料の場合には副産物利用も含めた燃料生産総合システムが既に確立している。しかし、セルロース等を原料とするいわゆる第二世代のエタノール生産技術は未だ確立しておらず、生産コストや環境負荷の低減に向けた技術開発が主な課題となっている。特に前処理を含む糖化技術の確立は急務であり、安価な繊維質分解酵素の探索・改変または硫酸などの触媒や有機溶媒を使った場合の環境調和型技術の確立、蒸留・脱水工程のエネルギー低減または、蒸留によらないエタノール濃縮法の開発、さらには糖化残渣・発酵廃液の有効利用などが必要とされる。

我が国は、主要な生産国に比し大量のバイオマスの生産を可能とする広大な耕地を有していない。このため、耕作放棄地の積極的な利用、さらには稲ワラなどの未利用バイオマスの利用など、生産されるバイオマス全量を有効に利用する総合システムの開発が重要とされる。また、わが国で開発された新技術による海外生産を視野に入れた取り組みなども今後益々重要となる。

引用文献等

- [1] 世界のバイオエタノール政策の展開と課題

http://www.fae-forum.org/introduce/pdf/study/80gakusyu/80_1shiryou.pdf

- [2] バイオマス・ニッポン <http://www.maff.go.jp/j/biomass/index.html>

- [3] 新・エネルギー国家戦略

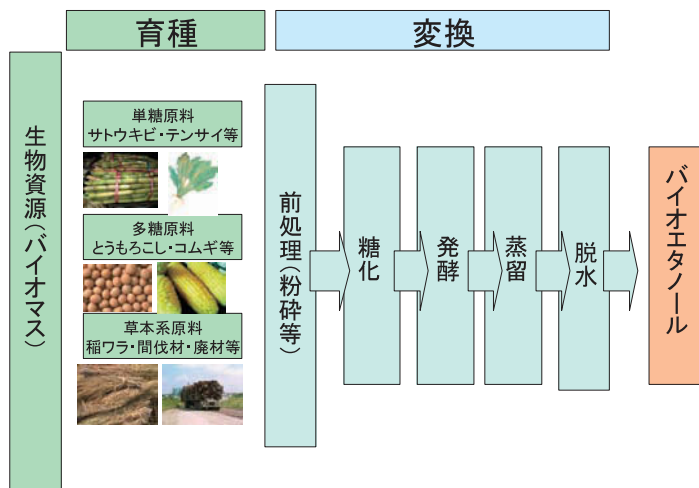
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/energy-strategy/index.htm>

【バイオブタノール】

バイオブタノール生産は、第二次世界大戦終期、石油に代わる代替航空燃料としてわが国でも積極的に研究開発がなされたが、戦後の石油化学の勃興と共に一度は消え去っていった。しかし、近年の石油危機、地球温暖化危機と共に再び見直されつつある。ブタノールがエタノールより優れているのは、(1) 燃焼熱が高い、(2) 水との分離が容易である、(3) 化学品原料としての価値が高い、等の点である。

初期のバイオブタノール生産は、主にアセトン・ブタノール菌により行なわれていた。しかしこの菌の利用

バイオエタノール研究開発の俯瞰



については、(1)生産物としてアセトン・ブタノール・エタノールの混合物を生産する（ABE 発酵）、(2)有機溶媒耐性が高くない、(3)偏性嫌気性菌であり、取り扱いが容易でない、特に今日に至るまで有効な遺伝子操作技術が確立していない、等の問題点があり、最近では、日本および欧米において、遺伝子操作でブタノールのみを著量蓄積するように改変した微生物（大腸菌、コリネ菌等）を用いた発酵生産に期待が高まっている。海外ではデュポン社が近い将来の大量生産を計画しており、わが国でも RITE 菌（コリネ菌）を利用した生産技術がほぼ確立される状況にある。今後、早ければ 5・10 年以内に商業生産に向かうと考えられる。技術的には、遺伝子操作による (1)生産量・生産速度の向上、(2)基質となるバイオマスの多様化、(3)製品回収、廃棄物処理の効率化、等が今後激しい競争にさらされるであろう。

【バイオガス】

一般に、バイオガスといえば廃棄物の発酵によって得られるメタンガスを指す。このメタン発酵技術は、古くより廃棄物処理技術として開発されてきたが、最近では廃棄バイオマスからのエネルギー回収手段として注目を集めている。この技術の最大の特長は生産物がガス状で雑多な液状廃棄物からの回収が容易なこと、欠点は (1)微生物反応の中でも特に時間がかかること、(2)処理後の廃液の BOD が高いこと、(3)40%程度の炭酸ガスを含むこと、等である。逆に言うと、この欠点の克服が技術開発の焦点である。

反応効率については、粒状微生物塊や担体を用いて微生物濃度を増すこと、多種多様の微生物叢を制御すること、等が進められている。このうち粒状微生物塊の利用は UASB 法として既にオランダで開発され、固体を含まない廃液に適用されている。固体を含む廃液についてはわが国の固定床発酵が極めて効率的である。現在、この固定床に電流を流して発酵を効率化しようとする研究が NEDO プロジェクトで進んでいる。今後は、メタン発酵中の菌叢およびその活性を制御する技術の開発が重要となろう。

発生したメタンをどのように利用するかも重要な課題である。現在、特に北欧では、生成バイオガスからメタンを精製、これを圧縮して公共バスの燃料にすることが活発である。また、暖房や給水の熱源にすることも行なわれている。今後はメタンガスタービンの開発、燃料電池への利用等が重要課題となろう。さらにメタン発酵廃液は高 BOD であり、その処理には多大な費用・エネルギーを要する。このため液肥（液体状の肥料）としての有効利用がほぼ必須と考えられる。既にわが国でも福岡県大木町等で液肥化が試みられているが、自動車燃料としての利用も含めて、今後、地方都市での実証研究が急務となろう。

【バイオディーゼル】

油糧作物（ナタネ・ヒマワリ・ダイズ・パーム）の油脂（脂肪酸トリグリセリド）をメタノールとエステル交換反応を経て、酸素を含むグリセリンを分離除去して得られる「脂肪酸メチルエステル（Fatty Acid Methyl Ester; FAME）」がバイオディーゼルと呼ばれ、ディーゼルエンジンの燃料（軽油・重油）の代替液体燃料として注目されている。

ディーゼルエンジンは元来、落花生油を圧縮熱で点火して燃焼するエンジンとして発明され、その後、化石燃料の軽油に切り替わり広まった。昨今は、天ぷら油などの植物油廃油が FAME 化処理でリサイクルされて燃料として利用されつつある。ただ、脂肪酸メチルエステルは、軽油に比べゴム・樹脂を劣化させる、酸化を受けて劣化し易く、寒冷地で固化するなどの問題点がある。我が国で流通しているディーゼルエンジン自動車は、100%バイオディーゼル燃料の使用を前提としては製造されておらず、品質の一定な FAME が確保できないことから、軽油との混合利用も割合が限られている。品質の確保に課題が残る。

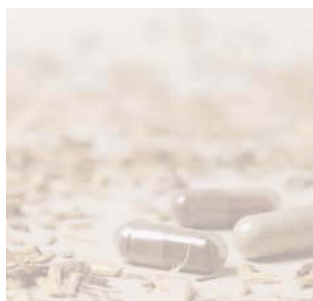
一方、FAME は、食糧として利用可能な植物油脂が原料であるため、食糧価格の高騰を招いたことが問題となっている。そこで、非可食の植物由来油脂（例えばヤトロファやカメリナ）が注目されている。また、食



1-3-1 バイオ燃料



1-3-2 化成品原料



1-3-3 医薬品原料・酵素等



植物工場

用でない微細藻類は、単位面積当たりの収量の高さから、新たな油脂資源として注目されている。微細藻類は太陽エネルギーを利用して工業的に培養生産が可能であり、光合成産物のデンプンを細胞内で変換し、窒素欠乏など特定の生育環境に移すと油脂を蓄積する。ただし、油脂の蓄積条件と細胞の培養至適条件が異なることから、培養工学的技術よりもむしろ生育制御ならびに代謝制御に関する基礎的理解がまだ不足している。

また、微細藻類の形質転換法やゲノム情報、トランスクリプトーム、プロテオーム、メタボロームの整備が急務の課題である。遺伝子導入と遺伝学解析が可能な緑藻はクラミドモナスに限られており（福澤 et al. 2008）、デンプン合成能を失った変異株で油脂が細胞の 20%以上蓄積する例が知られており、変異株や遺伝子操作技術の利用が注目されている（Li et al. 2010）。特に遺伝子導入が可能となった緑藻・珪藻での知見が先行していることから、その分子育種法の進展が期待されている。

参考文献

- (1) 福澤秀哉、久保雄昭、山野隆志：緑藻クラミドモナスのゲノムから植物と動物の機能を探る。蛋白質核酸酵素（共立出版）53: 1133-1143（2008）
- (2) Li, et al. *Metabolic Engineering* 12: 387-391（2010）関連法
- (3) 石油代替エネルギーの開発及び導入の促進に関する法律（昭和五十五年五月三十日制定、最終改正：平成二一年七月八日）
- (4) 農林漁業有機物資源のバイオ燃料の原材料としての利用の促進に関する法律（平成 20 年法律第 45 号）
- (5) バイオディーゼル燃料製造の取組を支援する法律

【バイオ軽油】

バイオディーゼル燃料の中で「水素化バイオ軽油（BHD: Bio Hydrofined Diesel）」と呼ばれ、廃食用油、パーム油などの油脂を触媒存在中で水素化した炭化水素がバイオ軽油と呼ばれる。酸化の原因になる二重結合を持たないので酸化されずに安定である。ただし、炭素鎖が長いことから、低温では軽油よりも粘度が高くなるため、既存の車両に使う場合には、混合率 10%程度までが限界である。低温流動性を高める必要があるが、原料が食用である点や、水素化するエネルギーが必要である点が、今後の検討課題である。

第 3 世代のバイオ燃料として注目されているのが、緑藻由来の炭化水素である。軽油に近い炭素鎖をもつ炭化水素を生産・蓄積する緑藻がこれまでに複数種見出されている。その利用にあたっては、バイオディーゼル燃料の原料である植物油脂の場合と異なり、メタノールを用いるエステル交換反応が不要となり、クラッキングと精製により航空機に利用可能なジェット燃料に変換できる。実際 JAL は「バイオ・フライト」と称して 2009 年 1 月にカメリナ（84%）、ヤトロファ（15%）、藻（1%）由来の混合燃料でボーイング 747 型機をデモ飛行させている^[1]。この緑藻の大量培養による炭化水素生産には、近年、各国政府（特に米国エネルギー省と空軍）をはじめ、石油メジャーが大規模な研究投資を行っている。これまで、細胞の培養法と炭化水素抽出・精製法に重点を置いた工学的研究は先行しているが、炭化水素の生合成

CROP	OIL YIELD (GALLONS/ACRE/YR)
Soybean	48
Camelina	62
Sunflower	102
Jatropha	202
Oil palm	635
Algae	1,000-6,500 ^b

単位面積あたりの油生産量
www.sce-net.jp/enrgypdf/bioalga.pdf

過程に関わる代謝酵素ならびに遺伝子の実態は、未だに解明されておらず、基盤となる生化学情報が蓄積されていないのが現状である。

近年、米国は2010年5月国家藻類バイオ燃料ロードマップ^[1]を発表しており、ヨーロッパ各国も第3世代のバイオ燃料生産法として微細藻類の活用を目指した応用指向型研究を大規模に推進している^[2]。特に、炭化水素を生産する藻類のゲノム解析、遺伝子導入による炭化水素や油脂の組成変換を目指した、形質転換系の開発や炭素代謝（炭化水素生産）関連遺伝子の同定、代謝変換による増殖制御等に関連する研究、大量純粋培養系の確立、省エネルギー型炭化水素抽出法の開発が期待されている。

微細藻類に期待が寄せられる理由は、(1)特別な耕地を必要とせず、不毛の土地でも良い (2)種を選べば、塩水でも淡水でも生育し、真水を必要としない (3)耕地当たりの収量が従来の他のバイオ植物に比べて数十倍と高い (4)生産過程で温暖化ガスCO₂を吸収し、カーボンニュートラルである (5)隣接する発電所等の排ガス中のCO₂を吸収できる種も見出されている (6)炭化水素、油脂、水素ガス、デンプンを生産する種が知られている、などが考えられる。

引用文献等

[1] <http://press.jal.co.jp/ja/uploads/20090130.pdf>

http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/algal_biofuels_roadmap.pdf

[2] <http://www.algae.wur.nl/UK/applications/energy/Biofuels/>

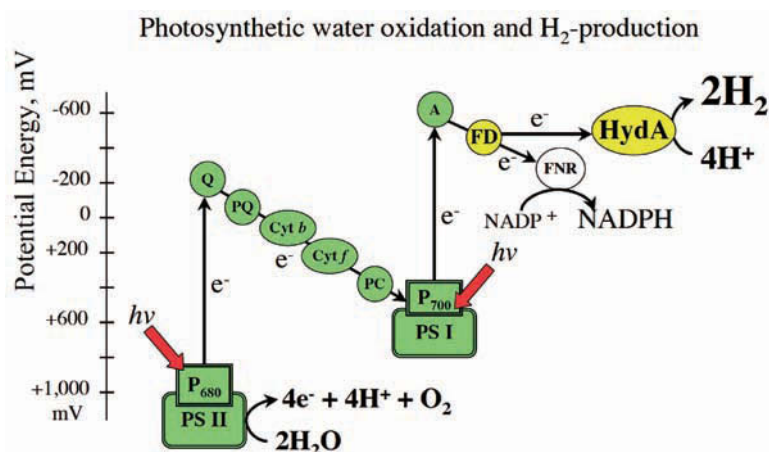
[3] Chisti, Y., 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25 (3), 294–306.

[4] 米国 National algal biofuels technology roadmap, May 2010

【バイオ水素】

近年、第3世代の燃料として、光エネルギーを利用した微細藻類の活用によるバイオ水素の生産が検討されており、特に米国とドイツでは、大規模な予算で基礎研究が進められている。太陽エネルギーを利用する生物由来の水素発生の知見は、基礎的知見の蓄積が必要な段階ではあるが、サステナブルな常温での水素生産を実現するには重要な課題である。

水素を発生する微細藻類は、シアノバクテリア（ラン藻）と緑藻に大別できる。シアノバクテリアの中でも窒素固定を行う種では、光化学系Iで生じた還元力が窒素の還元に使われる。しかし、ニトロゲナーゼの副反応により、窒素ばかりでなく水素イオンにも電子が伝達され、プロトンが還元され水素が発生する（右図参照）。細胞内で発生する水素は、通常は[FeNi]ヒドロゲナーゼにより細胞に回収されるが、このヒドロゲナーゼ活性をノックアウトすることで水素発生が促進される（Masukawa et al. 2007）。ニトロゲナーゼとヒドロゲナーゼ両者は酸素により活性阻害を受けることから、水素発生を行わせるには細胞を無酸素だけではなく無窒素条件に置く必要がある。ラン藻は耐





1-3-1 バイオ燃料



1-3-2 化成品原料



1-3-3 医薬品原料・酵素等



植物工場

制が単純で、遺伝子操作が容易な種が知られているが、酸素発生を伴わないヘテロシスト（窒素固定を行う異型細胞）への分化の制御や、生育速度が下記の緑藻に比べて遅い点が課題である。

緑藻には、栄養源飢餓条件で水素を連続的に発生する種が知られている。光化学系 II の活性が低下して、酸素発生速度が低下し、呼吸による酸素吸収速度があるバランス点に到達すると嫌気的環境が形成されて、ヒドロゲナーゼ活性が上昇し、それまで光化学系 I を利用して水素発生が起こる (Melis et al. 2000) ヒドロゲナーゼへの電子の伝達に必要な光合成電子伝達系と、循環的電子伝達機構については、フェレドキシンや NADH デヒドロゲナーゼを中心に、近年研究の端緒が開かれたところである。また、ヒドロゲナーゼの酸素に対する感受性を除去するために結晶構造の解析が進められている (Mulder et al. 2010)。また、反応効率を改良するための試験管内再構成実験が最近になって可能になった (Winkler et al. 2009) ことから、この分野の進展が期待できる。

近年、ゲノム解析が進められている緑藻クラミドモナス (Merchant et al. 2007) では、細胞の遺伝子発現と代謝変動を網羅的に解析できる技術が発展し、微細藻類においてゲノムデータベースや代謝データベースが整備されると、水素発生の調節機構や遺伝子工学的改良が急速に進展する可能性が高い。

参考文献

- (1) Melis A, et al. Plant Physiol. 122: 127–35 (2000)
- (2) Merchant et al. Science 318: 245–250 (2007)
- (3) Winkler, et al. J Biol.Chem. 52: 36620–36627 (2009)
- (4) Yoshino F. et al.: Marine Biotech. 69: 101–112 (2007)
- (5) Jans F. et al. PNAS 105: 20546–20551 (2008)
- (6) Muler DW et al. Nature 465:248–251 (2010)

「バイオ燃料」に関する科学技術・研究開発の国際比較と注目動向

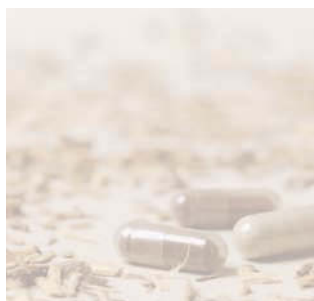
国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	・作物の育種や微生物の機能改変に関する大学・公的機関における基礎研究レベルは高く、研究成果も多い。 ・特に植物の器官や細胞壁形成に関する分野での研究レベルは世界最高水準である。 ・イネの育種技術が特筆される。QTLを活用した選抜育種によって、これまでも収量を高めた品種の開発に成功している。 ・ナタネなどの種子への脂質蓄積機構の解明や制御技術などが最近の成果として挙げられる。 ・発酵微生物の育種改良技術は、世界最高水準を維持しており、特に代謝機能改変や発酵材料の拡大で既に成果を収めている。今後は、発酵温度の改変、アルコール耐性の強化などさらに困難なテーマでの成果が期待される。
	技術開発水準	○	→	・国内における大規模な遺伝子操作作物の栽培試験に制約があり、今後アジアやブラジル等との共同研究の推進が期待される。 ・エタノール生産については、糖質・セルロース等の非糖質を原料とする場合も、基盤技術の水準は決して劣っていないが、現状では国内に大規模生産システムを持たず、今後は国外生産の可能性も含め、総合システムの確立が急務である。 ・ブタノールについては、今後欧米との激しい技術開発競争が続くであろう。
	産業技術力	○	→	・バイオエネルギーの製造・販売で世界の市場に参入している企業はない。現在、実証試験を行っている企業もCSR的な観点で取り組んでいる企業が多い。国産エタノールは総合的な農政の中で考えられるべきであり、エネルギー産業としては海外展開が必須と思われる。
米国	研究水準	◎	↑	・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。特にエネルギー省ならびに国防省(空軍)の巨大予算に支えられ、基礎研究の展開が急激に進展している。 ・セルロース系バイオマスを用いたバイオエタノール製造の実用化に向けて、米国エネルギー省が詳細なロードマップを示し、多額の資金を提供している。バイオマス生産では植物の細胞壁合成とその利用に関する研究やリグニンの少ない木質資源の生産等に強みを持つ。特にゲノム解析を担うエネルギー省管轄下のGJIのオープンな運営により新しいエネルギー生産の基盤となる微生物や藻類のゲノム解析が進められている。
	技術開発水準	◎	↑	・糖質原料の第一世代エタノールに関しては、蒸留廃液の飼料としての利用技術まで含めて完成されたものを有している。 ・セルロース等からの第2世代のエタノール生産では世界的酵素メーカーとも連携して、世界をリードしている。 ・藻類由来のバイオディーゼル燃料の製造変換技術も世界をリードしている。
	産業技術力	◎	↑	・アーチャー・ダニエル・ミッドランド社を始めとして約60社のバイオエタノール生産企業がある、国家の各種保護の下、高い産業技術力を有する。 ・約40社のベンチャー企業がパイロットプラントによって藻類由来バイオディーゼル燃料を製造を開始している。
欧州	研究水準	◎	↑	・一般に科学的な基盤研究に強みを持つ。 ・ドイツ、オランダ、英国ではオーキシン輸送に関連した形態形成の研究で顕著な成果を挙げており、北欧は樹木の研究に強みを持つ。 ・英国は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。 ・フランスではCNRSが藻類の探査を世界各地の公海で進めており、遺伝資源の獲得を進めている。



1-3-1 バイオ燃料



1-3-2 化成品原料



1-3-3 医薬品原料・酵素等



植物工場

	技術開発水準	◎	↑	・シンジェンタなど、作物の育種技術に強みを有する企業が多数存在している。 ・伝統的にメタン発酵技術および生成メタンの利用法に強みを持つ。
	産業技術力	◎	↑	・シェルなどのメジャーがバイオエタノールの生産を手がけ、米国企業並みの競争力を有する。 ・スウェーデンにおいては、国内の農民組合と組んだ総合的なバイオマスエネルギーシステムの構築に取り組んでいる。
	研究水準	○	↑	・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ているが、このような人材を中心に、国際共同研究を進め研究水準が急速に上昇している。 ・米国との新規学術雑誌 Molecular Plant の創刊に見られるように、植物研究の水準が世界的に認識されてきた。 ・器官形成分野の論文の質には大きなばらつきがあるが、著名な国際誌にも定期的に中国発の研究が掲載されるようになった。
中国	技術開発水準	△	→	・バイオマスエネルギー生産の実践大国であり、研究成果の実用化が重視される。遺伝子組換え作物への技術開発にも積極的である。現在、糖類から生産する新たなエタノール工場の建設は禁止されており、国内に豊富に存在するワラからの生産技術の開発に力を注いでいる。固体発酵法等、国の実情に合った技術開発が国際的に注目されている。 ・メタン発酵も実践大国であり、三位一体または四位一体型といわれる中国独特の戸別エネルギー供給システムを開発、実践した。
	産業技術力	○	→	・大規模なバイオエタノール工場を5箇所に持ち、世界第3の生産国となっている（190万KL、2008年）。 ・国内消費が中心となろうが、国の実情に合ったエネルギーの生産システムは、国際的にも通用するものになっていくであろう。
韓国	研究水準	○	↑	・植物の器官形成分野の基礎研究レベルにおいて質の高い研究が散見される。個々の基盤技術に関しては、米国などからの帰国研究者を中心に国際レベルを維持している。 ・ごく最近では、米国の影響か、微細藻類による油脂生産を目指す研究者が増加している。
	技術開発水準	△	↑	・個別にはリグニン利用に関しては高い技術力を持ち、欧州の主要企業とのライセンス契約に至った例も複数みられる。 ・メタン発酵については、ソウル市や釜山市で都市ゴミを材料とする発酵システムを稼働、その運転経験によってさらに世界最新鋭のシステム開発に向かっている。
	産業技術力	○	↑	・日本以上にバイオマス資源に恵まれず、国内におけるバイオエタノールの本格生産はあまり考えられていないようである。 ・廃棄物メタン発酵については、今後の強化が期待されている。
全体コメント：バイオ燃料生産の基礎研究では、DOEを中核に莫大な予算を投じる米国が世界をリードしている。日本は、植物生理分野および微生物育種分野の研究レベルは平均して高く世界レベルを維持している。中国・韓国は、優秀な留学生や欧米で実績を挙げた研究者が多数帰国しており、国全体の底上げが図られている。応用研究でも欧米が先導しているが、例えば、藻類の研究分野では、日本で採取された種が食料や栄養補助食品として利用されているなど、我が国も独自の分野で存在感を示している。ただ、付加価値の高い藻類由来の物質生産に特化されており、燃料としての利用には基盤研究の推進が必要である。特に、遺伝子組換え体の利用については、閉鎖系での培養によるエネルギー利用もしくは有用物質生産の産業化は実現の可能性が十分にある。中国、韓国は日本との間の技術格差はまだあるが、中国のバイオエタノール、韓国のメタン発酵共に極めて実践的であり、技術開発力、産業技術力共に予断を許さない。				

(注1) 現状 [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている]

※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。

(注2) トレンド [↑：上昇傾向、→現状維持、↓下降傾向]

【注目動向】

- ・サトウキビ全ゲノムの解読：米国においてサトウキビの全ゲノム解読が行われた。これを受け、DOE と USDA がマッチングファンドを開設し、単糖を高度に蓄積させた新品種の開発と新たなエタノール生産プロジェクトがスタートした。
- ・ゲノム合成研究の進展：遺伝情報を基に多糖類合成経路を丸ごと設計する技術が開発されている（DOE）。また同様の技術によって従来にない機能を有する新しい微生物が構築されている（クレグベンター研究所）。
- ・スウェーデンにおいて、2007 年から 6 年計画で MicroDriveE（Microbially Derived Energy）といわれる総合バイオマスエネルギー生産システムの研究開発が始まった。
- ・ブラジルにおいては、カンピーナス大学（UNICAMP）において NIPE-Unicamp Ethanol Project が第Ⅲフェーズに入った。それに関連して、2007 年、カンピーナスに Bioethanol Science and Technology Center（CTBE）が設立された。カンピーナスはサンパウロ州内のブラジルのバイオエタノール生産地域の中心都市。カンピーナス大学はブラジル 3 大大学のひとつ（あとの二つはリオデジャネイロ大学とサンパウロ大学）。
- ・2008 年 2 月、中国政府、糖質からのアルコール工場を新たに建設することを禁止。
- ・2009 年 8 月、韓国ソウル市中心部（市役所前広場）に民間の投資事業として、東大門環境資源センターが完成。2010 年 5 月現在、乾式メタン発酵システム（生ゴミ 98 トン/日）が順調に稼動。
- ・2009 年 7 月、エクソンモービル社がシンセティック・ジェノミクス社（Craig Venter 社長）と藻類由来の燃料生産に 200 億円の投資を行い「藻類バイオ燃料研究開発プログラム」を開始。
- ・ボーイング社が植物と藻類由来のジェット燃料で飛行実験に成功（2009 年）。
- ・オランダ政府が 5 年計画で藻類バイオエネルギー研究を予算総額 700 万ユーロで推進（2007）。2020 年には、石油資源の 10% を藻類由来の燃料に置き換える事が 2007 年の時点では目標とされている。
- ・微細藻類の光合成炭酸固定を強化する CO₂ 濃縮機構に関する国際会議が 2010 年 8 月日本で開催される。
- ・2009 年 1 月 7 日に米国コンチネンタル（CA）航空がヤトロファと藻由来のバイオ燃料でボーイング 737-800 型機のテストフライトに成功。

引用文献等

- ・ <http://www.algae.wur.nl/UK/applications/energy/Biofuels/>
- ・ <http://science.kwansei.ac.jp/~matsuda/CCM7WP/CCM7>

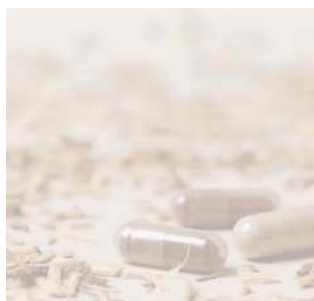
五十嵐泰夫（東京大学）、福澤秀哉（京都大学）



1-3-1 バイオ燃料



1-3-2 化成品原料



1-3-3 医薬品原料・酵素等



植物工場

1-3-2 化成品原料

【概況】

プラスチックや合成繊維などの原材料をはじめとする多くの化学製品は、現在そのほとんどが石油由来のナフサから作られている（図1）。しかし、石油資源枯渇および地球温暖化の問題を回避しつつ現代社会の快適な暮らしを維持するためには、化学製品製造プロセスの原料を石油からバイオマスへと転換することが必須である。図1に赤字で示す様に、多くの基幹化学原料はバイオマス原料からの生産が可能であり、大規模な転換が可能である。実際、後述するように多様な化学品において、そのバイオ化を目指した研究開発が世界で激化している。化学品をバイオマス由来に変換した場合、二酸化炭素排出量削減に対する効果は大きい。また、バイオマスから作られるバイオ繊維やバイオプラスチックは環境に優しい素材との認識から、それを使った多様な産業で環境適合の観点から製品の競争力を上げ、ひいては日本の産業競争力向上への波及効果は大きい。

バイオテクノロジー戦略大綱（経済産業省 2002）ではバイオマスプラスチック全体の利用の拡大が提言され、「2020年には植物由来プラスチックを全消費プラスチックの2割程度まで導入する」と目標が掲げられた。これは日本のプラスチックの消費量からすると年間200万トンバイオマスで作ることとなる。一般社会においてもバイオプラスチック・繊維製品への関心は年々高まり、近年のバイオプラスチック・繊維の世界市場は年8%も増加している。2010年現在のバイオプラスチックの世界市場は22万トン、日本市場は1万1千トンである。

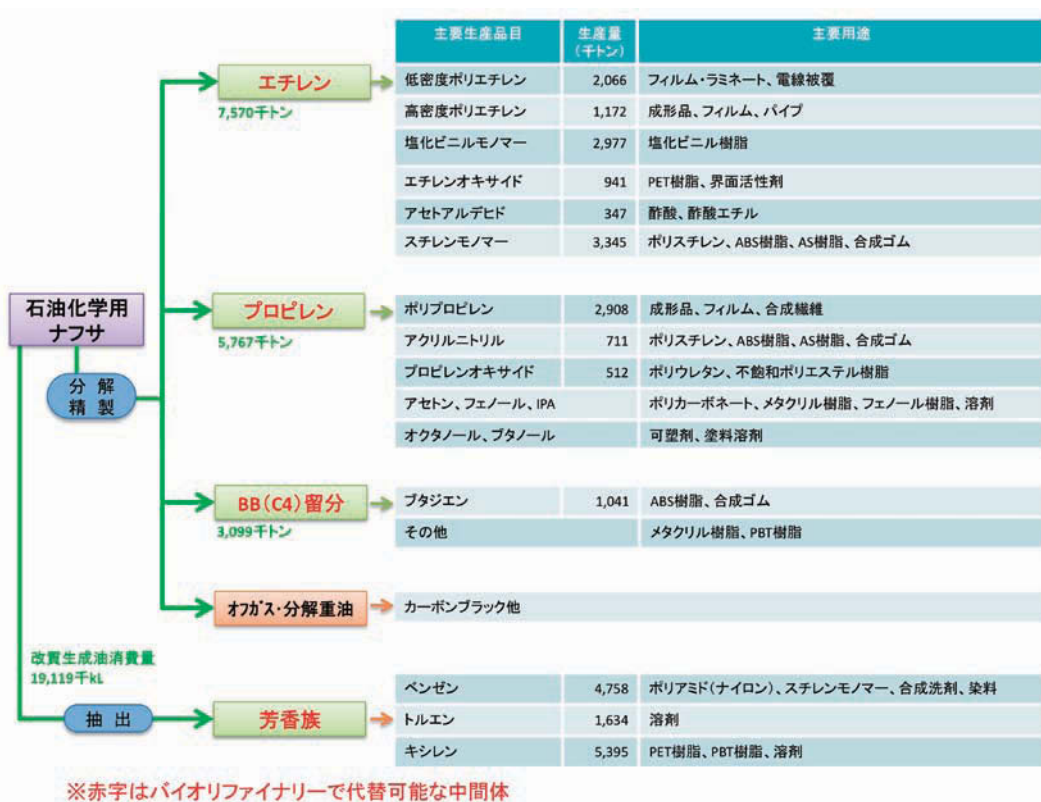


図1 石油由来ナフサから製造される主な化学製品

バイオマスから大規模に化成品原料を生産するには、それらを効率よく生産できる微生物を、先端バイオテクノロジーを総動員して造り出すとともに、工学・農学分野が協力して、バイオマスの生産、前処理・分解、スケールアップ、分離・精製を含めた統合的な化成品原料製造プロセスを確立していくことが重要である。すなわち、プロセスの簡略化や省エネルギー化に向けた、微生物育種技術やプロセス技術の革新が極めて重要であり、強力な研究開発の推進が求められている。こうしたグリーン・イノベーションを達成できれば、持続可能な低炭素社会の実現を大きく前進させると期待される。

【バイオエチレン】

エチレンは合成繊維、合成樹脂、合成ゴムなど石油化学製品の重要な原料である（図2）。2006年度におけるエチレンの生産能力は国内だけでも年間約700万トン以上、世界累計で約1億2000万トンであり、今後も着実に伸びていくことが予想されている^[1]。現在、エチレンは主にナフサを800–900℃の高温にて熱分解して製造されているが、石油資源の枯渇に対応するためにバイオマス由来の効率的なエチレン製造プロセスを早急に確立していく必要がある。

エチレンは天然に植物が生産する経路が知られているが、その生産量は微量であり、化成品原料として利用するのは困難である。現在考えられる最も現実的かつ効率的なバイオエチレン生産方法は、バイオエタノールを160–170℃程度で脱水（分子内脱水）することにより得る方法である（図2）。従来、触媒としてゼオライトや固体酸などが利用されてきたが、生じた水が反応を阻害するためにその収率は95%程度にとどまっていた。最近、我が国で、シリカ系のナノ細孔にニッケルを担持させた新触媒（Ni-MCM-41）を用いて、収率をほぼ100%にまで高めることに成功している。これは、触媒が疎水性であるため、脱水後の水を直ちに排出できる事によるが、今後の実用化が期待されている。またこの触媒を利用すれば、エタノールからプロピレンなどのオレフィンも作ることができると期待されている。

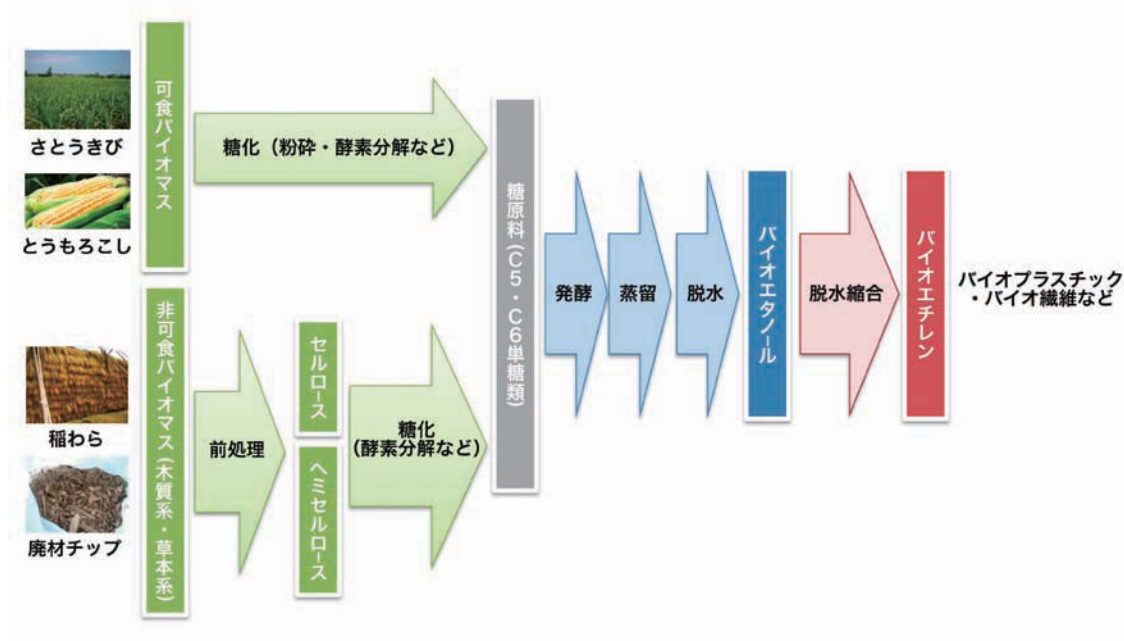


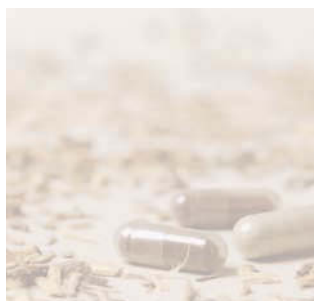
図2 バイオエチレン生産



1-3-1 バイオ燃料



1-3-2 化成品原料



1-3-3 医薬品原料・酵素等



植物工場

一方バイオエチレンの原料となるバイオエタノールは、広大な耕地面積を活かした米国およびブラジルがその主な生産国となっている。世界のバイオエタノール生産量は年間 5,000 万キロリットルを超え、特にブラジルは世界最大の輸出国となっている。米国やブラジルでは、トウモロコシやサトウキビを原料にしてバイオエタノールを生産している。しかしながら、バイオエタノール生産量の急速な増加から食料生産との競合が問題となり、非可食バイオマス（稲ワラ、間伐材、廃材チップなど）から生産することが強く求められている。我が国においても、「バイオマス・ニッポン総合戦略」および「新・エネルギー国家戦略」にそった国産バイオエタノール生産拡大の取組みが進行しているが、とりわけ、非可食バイオマスを原料としたバイオエタノール（第 2 世代バイオ燃料）生産技術の開発は、世界をリードしながら進んでいる。燃料としてだけでなくバイオエチレンの原料となるバイオエタノールの非可食バイオマスからの生産は、今後より一層注目を浴びることは明白であり、さらに研究開発を加速していくことが不可欠である。

引用文献等

[1] 世界の石油化学製品の今後の需給動向

<http://www.meti.go.jp/press/20080523005/20080523005-1.pdf>

【バイオプロピレン】

プロピレンは、樹脂・繊維・合成ゴム・香料・染料・医薬中間体・工業中間体など様々な化成品の原料として利用されている原料であり、代表的な製品としてポリプロピレンが挙げられる（図 1）。平成 21 年における経済産業省の生産動態統計結果によると、日本国内においてポリプロピレンの生産量は約 250 万トンであり、約 4,000 億円の市場規模がある。なお、ポリプロピレンの世界消費量は約 4,500 万トンで、約 4～5 兆円程度の世界市場と推定される。その他のプロピレン誘導体の日本国内生産動態をみても、酸化プロピレン（約 1,000 億円、47 万トン）、プロピレングリコール（約 100 億円、6.3 万トン）、ポリプロピレングリコール（約 450 億円、24 万トン）、フェノール（約 1,650 億円、79 万トン）、アクリロニトリル（約 700 億円、60 万トン）、合成ブタノール（約 160 億円、44 万トン）などがプロピレンを原料とした化学品として挙げられる。プロピレンはエチレンとともに、ナフサを熱分解することにより生産されているが、石油資源の枯渇に対応するためにエチレン同様、バイオマス由来の効率的なプロピレン製造プロセスを早急に確立していく必要がある。

バイオマスからのプロピレン製造方法はいくつかの選択肢を取ることが可能である。すなわち、エタノール、*n*-プロパノール、*i*-プロパノール（イソプロパノール）、*n*-ブタノール等の高級アルコールを微生物発酵によって生産し、いくつかの化学的変換プロセスを経ることでバイオプロピレンを合成することができる（図 3）。バイオプロピレンもバイオエチレン同様、非可食バイオマスを原料とした技術開発が重要である。現在、*n*-*i*-プロパノールや *n*-ブタノールについてはグルコースや廃糖蜜等の糖原を用いた発酵生産が試みられている。我が国においては、特に、バイオエチレンの項でも述べたエタノールからの化学変換技術、および、*i*-プロパノールや *n*-ブタノールの大腸菌等の微生物を用いた発酵生産技術、に関する検討が活発に試みられており、世界をリードする研究成果が得られつつある。しかしながら、高級アルコールは微生物に対する毒性も強く、生産性を飛躍的に向上させるためには、微生物の革新的な性能向上やプロセス技術を含む総合的な技術開発が必要である。さらに今後、微生物によりこれらの高級アルコールを非可食バイオマスから発酵生産する技術開発を加速することが極めて重要である。バイオプロピレン生産は、その「重要度の高さ」から、バイオエチレン同様、今後注目を浴びることは明らかであり、グリーン・イノベーション達成のために研究開発を促進していくことが不可欠である。

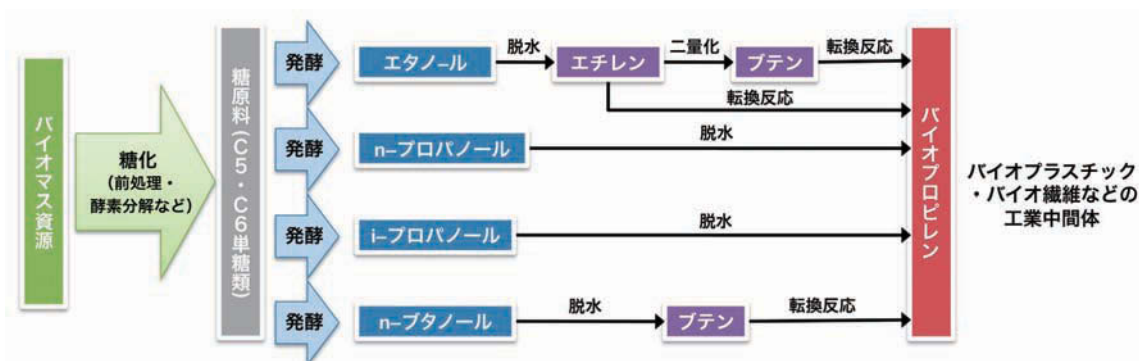


図3 バイオプロピレン生産プロセス

【ポリ乳酸】

現在の乳酸の世界市場は約 23 万トンであり、その市場規模は順調に拡大している。環境調和型材料として注目を集めているポリ乳酸は、光学異性体である L-乳酸もしくは D-乳酸のモノマーの重合体であり、その市場は 2012 年には約 450 億円程度に上ると予測されている。更に 10 年後には、化石燃料依存からバイオマス依存の生産へシフトし、その世界市場規模は 1 億ドルを越えると言われている。生物の多くは元来 L-乳酸のみを利用しているため、現在の市場には L-乳酸ポリマーが主流である。しかし、現在市場にあるポリ乳酸(L-乳酸ポリマー)は融点が 180℃しかないため用途が限定的であるのに対して、L-体と D-体それぞれのホモポリマーを重合して得られたステレオコンプレックス体は融点が 50℃以上向上する。そのため、D-乳酸は現在市場にある L-乳酸ポリマーの改質剤として注目されており、高耐熱性を示すステレオコンプレックス型ポリ乳酸はプラスチック、フィルムのほか、繊維製品への応用が期待されている。しかし、高品質なステレオコンプレックス体を生産するには、高い光学純度の D-乳酸モノマー（99% の D-乳酸を含み、L-乳酸の含有率は 1% 以下）が要求される。現行市場には高い光学純度かつ安価な D-乳酸モノマーが存在しないため、安価でかつ高い光学純度の乳酸モノマーの生産技術開発が活発に行われている。我が国でも、化学メーカーや繊維メーカーが相次いでこの乳酸モノマーの生産技術開発に力を入れ始めている。

ポリ乳酸生産の原料となる高光学純度の乳酸は、現在はサトウキビからの糖蜜や、トウモロコシなどのデンプン質バイオマスを糖化したグルコースから発酵生産されている。需要のさらなる拡大を目指した低コスト化のために、乳酸生産の高効率化が試みられており、乳酸菌に加えて、大腸菌や各種の酵母を用いた発酵生産技術の開発が進んでおり、L-乳酸に加えて、D-乳酸の生産も可能になりつつある。今後は非可食バイオマスからの乳酸生産を目指して、バイオマス糖化や発酵後の分離精製プロセスなど、各種要素技術を統合したプロセスの構築が課題である。例えば、バイオマス分解物中に含まれる発酵阻害物に対する微生物の耐性強化、多様な糖を同時発酵可能な微生物の育種、耐酸性微生物を用いて中和の不要な発酵生産技術の開発、そして乳酸モノマーの省エネルギー的な精製技術、培養後に培養液中で直接ポリマー合成する技術、などの研究開発が進められている。さらには、微生物において直接乳酸ポリマーを合成する技術開発も試みられている。

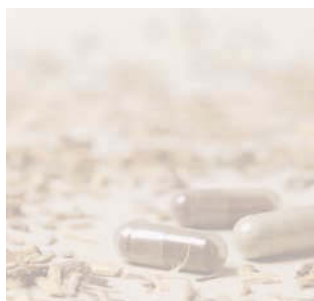
我が国では、乳酸生産に適した微生物の改変に積極的であり、いくつかのトップ企業がバイオマスからの乳酸生産技術において世界をリードしている。しかし、今後は世界中で乳酸生産の研究開発が激化することも予想され、継続した積極的な取り組み、投資が必要である。



1-3-1 バイオ燃料



1-3-2 化成品原料



1-3-3 医薬品原料・酵素等



植物工場

【ポリアミド】

ポリアミドは合成繊維やプラスチック樹脂として広く用いられ、従来は石油由来の原料を重合することにより生産されてきた。ポリアミドはアミド結合のポリマーで、脂肪族骨格のものはナイロンと呼ばれる。その炭素数によりポリアミド4、6、10、11などがあり、それぞれ特性や用途が異なるが、近年、これらのポリアミドのバイオ法での生産技術開発が国内・海外で活発に行われている。一例としてポリアミド11（ナイロン11）は、耐摩耗性、吸水性などの特性を有し成型加工性に優れたエンジニアリングプラスチックであるが、フランスでは植物由来の非可食油を用いて ω アミノ酸を合成して重合することでバイオポリアミド11を製造している。製造されたポリアミド11は100%バイオマス由来のプラスチックである。

またポリアミドは、バイオ由来の有機酸（ジカルボン酸）と脂肪族アミン（ジアミン）を重合させることにより生成することができる。これよりバイオマス由来の糖類を原料として微生物発酵により脂肪族アミンと有機酸のモノマーをそれぞれ生産し、それらを組み合わせて重合することにより様々な特性を持つバイオナイロンを生産する研究が始まっている。

バイオプラスチックや生分解性プラスチックの研究は以前においては欧米が先行していたが、現在国内では産官学による実用化研究が積極的に行われており世界をリードする情勢にある。しかしながら、競争が激しいことから、今後より一層、研究を加速することが重要である。

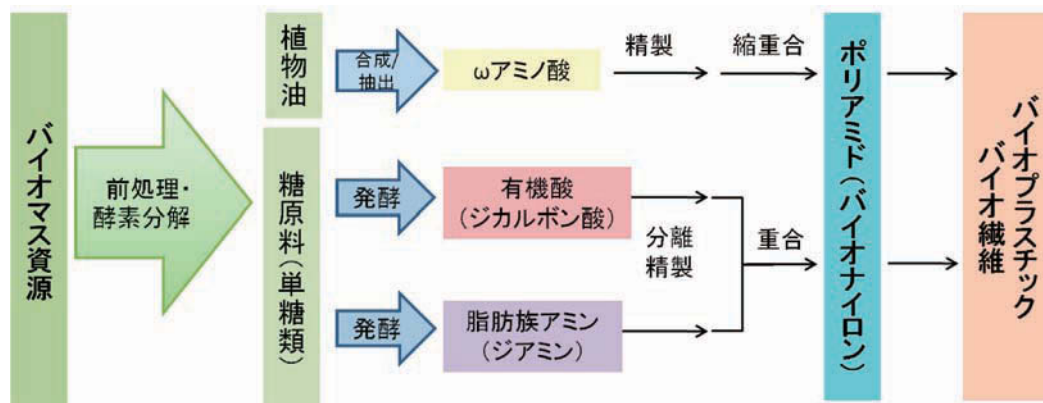


図4 バイオポリアミドの生産プロセス

【ポリエステル】

ポリエステルは、繊維、樹脂、フィルムなど様々な用途に用いられる。ポリエステルは元来、石油由来の原料より生産されてきた。バイオベースのポリエステルは、(1)微生物由来ポリエステル (2)モノマーをバイオ由来原料として製造されるポリエステルの二種が挙げられ、いずれも近年開発が行われているものである。

微生物由来のバイオポリエステルは、自然界（コンポストや消化汚泥）で完全に生分解するなど石油系のプラスチックと異なる特徴を持つ。微生物バイオポリエステルは発酵生産物として得られ100%バイオマス由来のものを生産することができる。主な微生物バイオポリエステルであるポリ-3-ヒドロキシブチレート(PHB)は植物油などから組換え大腸菌を用いて大量生産する方法が開発され、アジアや南米での生産が行われている。中国、ブラジルでは年産1,000トン規模のプラントが稼働し、米国企業でも大規模なプラントが構築されている。

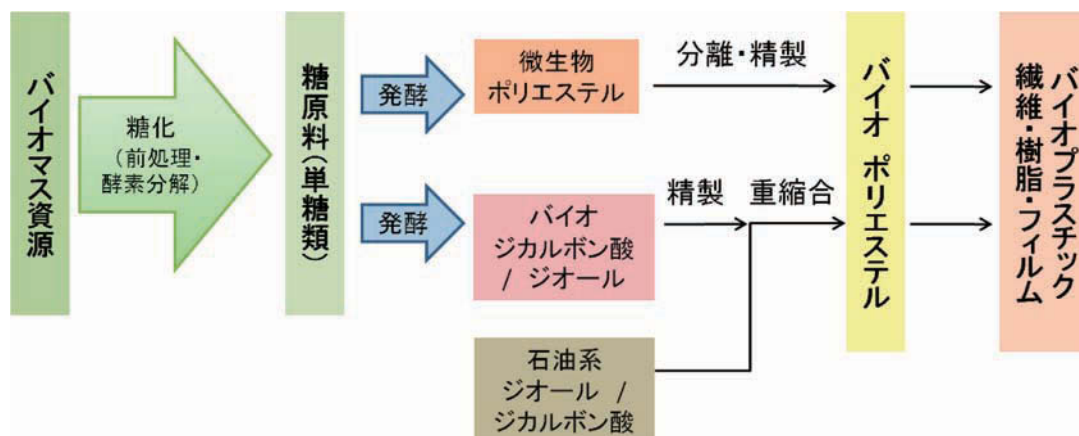


図5 バイオポリエステル生産

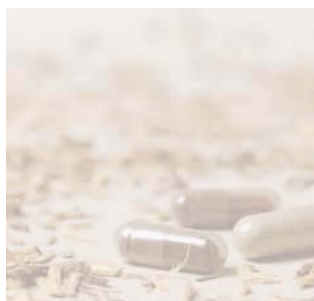
一方モノマーをバイオマス原料から生産するバイオポリエステルとして、PTT樹脂（ポリトリメチレンテレフタレート）やPBSが挙げられる。熱可塑性ポリエステル樹脂であるPET樹脂等は石油を原料として製造されてきたが、その代替の一つとして、バイオマス原料から発酵したジオール（1,3-プロパンジオール）を用い石油由来のジカルボン酸（テレフタル酸）と重合したPTT樹脂が米国で開発され製造されている。PTT樹脂は重量約35%がバイオマス由来となる。バイオマス由来PTT樹脂は従来のポリエステル樹脂のように成型しエンジニアリングプラスチックとして用いられる。また、生分解性高分子であるポリブチレンサクシネート（PBS）もモノマー原料の一部にバイオマス発酵産物を用いることにより生産することができる。PBSは微生物発酵コハク酸を用い1,4-ブタンジオールと共重合することにより重量50%をバイオマス由来とすることができ、国内企業では原料変換のための開発が行われている。バイオ由来のジカルボン酸とジオールを組み合わせバイオ化率100%のバイオポリエステルを実生産することは今後の産官学の課題である。バイオポリエステルやバイオポリアミドは、機能性の違いなどから、既存の樹脂材料の部分的代替が可能というのが現状であり、実用化に向けた更なる研究開発が必要である。



1-3-1 バイオ燃料



1-3-2 化成品原料



1-3-3 医薬品原料・酵素等



植物工場

「化成品原料」に関する科学技術・研究開発の国際比較と注目動向

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↑	・バイオマスの糖化・発酵工程に用いる微生物の育種に関する大学・民間企業・公的機関における基礎研究レベルは高く、研究成果も多い。 ・特に微生物の機能改変については、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バイオロジーによる微生物改変が注目されている。 ・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。
	技術開発水準	◎	↑	・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、伝統的に強みを持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持つ。 ・バイオマスの前処理については、パルプ産業や重工産業が有する独自のプロセスの有効性に対する評価が高い。 ・高水準の技術として膜製造技術が注目され、膜分離による濃縮や不純物に成功し、世界的にも高い評価を得ている。 ・バイオエタノールを中心に実証プラントが稼働し、プロセス開発（システムエンジニアリング）が積極的に進められている。
	産業技術力	○	↑	・現在、実証試験を行っている企業が多く、今後の大規模展開が期待される。大規模展開に向けては、原材料から最終産物の生成までを一貫して行うプロセスの開発が求められ、企業間の連携も重要になると考えられる。
米国	研究水準	◎	↑	・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。 ・特にセルロース系バイオマスを用いたバイオエタノール製造の実用化に向けて、米国エネルギー省が詳細なロードマップを提供しており、実証プラントからパイロットプラントへと生産規模を拡大している。
	技術開発水準	◎	↑	・硫酸処理を中心に前処理の技術に強みを持つ。 ・セルロース系バイオマスのガス化によるバイオ燃料の生産プロセスの開発にも成功している。 ・さまざまな有用フィードストックを有している点で強みがある。 ・酵素の開発にも成功しており、酵素のオンサイト生産とタイアップしたバイオ燃料生産を可能にしている。 ・クロストリジウム細菌、大腸菌、酵母など様々な微生物をベースに有用株のスクリーニングを大規模に進めている。 ・バイオリファイナリの技術開発に関しては他国をリードしている。
	産業技術力	◎	↑	・デュポン、カーギルなどの数多くのバイオ燃料生産企業があり、酵素メーカーによるオンサイト生産とタイアップしている。 ・バイオエタノールの市場の50%以上を米国の企業が占めており、高い産業技術力を有する。
欧州	研究水準	◎	↑	・さまざまなバイオマス原料を活用し、多種多様なバイオ製品を生産するための研究開発を行っている。 ・菜種油などを用いたBDF生産には強みがある。 ・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。
	技術開発水準	◎	↑	・ノボザイム社（デンマーク）をはじめ酵素生産に強みを有する企業が存在している。 ・バイオ燃料の生産用に最適化された農作物や樹木の育成を行うため、新しい多生産型の農業システムや林業システムを導入している。

	産業技術力	◎	↗	・シェル社（オランダ）などのメジャーがバイオエタノールの生産を手がけ、米国企業並みの競争力を有する。 ・BASF や DSM 等の化学系有力企業も積極的に取り組んでいる。
中国	研究水準	○	↗	・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掲載されるようになった。 ・米国研究機関とのタイアップ研究も増加し、中国への技術の移転が進みつつある。
	技術開発水準	△	↗	・欧米や日本のプロセス開発をベースに積極的に技術開発を行っている。 ・豊富なフィードストックを武器に、酵素メーカーともタイアップして大規模プラントを次々に建設し、実証実験を行っている。
	産業技術力	△	↗	・日本同様、バイオ燃料の製造・販売で世界展開を見せている企業は存在しないが、実証プラントの製造規模は日本を上回る。
韓国	研究水準	△	↗	・基礎研究レベルにおいて質の高い研究が見られ、微生物育種の分野ではシステムバイオロジーの観点を取り入れた研究が世界の注目を集めている。 ・海洋バイオマスの有効利用を目指した大規模プロジェクトもスタートした。
	技術開発水準	△	↗	・バイオマスの変換技術の中でも特にリグニン利用に関しては高い技術力を持ち、欧州の主要企業とのライセンス契約に至った例も複数みられる。
	産業技術力	△	↗	・日本同様、バイオ燃料の製造・販売で世界展開を見せている企業は存在しない。
全体コメント：本分野でも、DOE を中核に莫大な予算を投じる米国が世界をリードしている。日本は、基礎研究のレベルが高く重要な論文を発表しているだけでなく、微生物の育種を中心に前処理、蒸留、膜分離などの技術力が高いため、今後の大規模プラントの製造・実証を急速に進める必要がある。欧州は環境への関心が高く、農業分野と工業分野が手を組んで積極的にバイオ燃料の導入を進めており、基礎研究のレベルも非常に高い。中国・韓国は、優秀な留学生や欧米で実績を挙げた研究者が多数帰国しており、国全体の底上げが図られている。				

（註 1） 現状 [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている]
 ※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。

（註 2） トレンド [↗：上昇傾向、→現状維持、↘下降傾向]

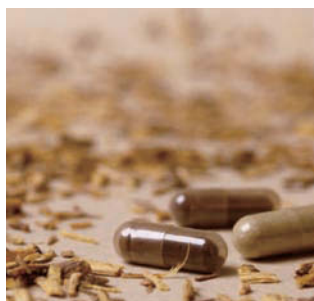
近藤昭彦（神戸大学）



1-3-1 バイオ燃料



1-3-2 化成品原料



1-3-3 医薬品原料・酵素等



植物工場

1-3-3 医薬品原料・酵素等

【概況】

本項で述べる低分子医薬品、バイオ医薬品、ワクチン、研究用試薬などはいずれも高度の知識集約型の生産物であり、生産物が複雑な化学構造や修飾を要し、最先端科学による分子メカニズムに依拠したバイオテクノロジー生産物である。従って、資源の少ない日本が最も優先的に取り組むべき高度の知識集約型産業である。また、植物工場もそこでの生産物は、高級野菜、樹木の苗生産、バイオ産業用植物の増殖・苗生産、薬用植物の生産、園芸療法の場合、遺伝子組換え植物生産など、いずれも高付加価値生産物であり、これらもまた資源が少なく国土の狭い我が国において取り組むべき産業である。これらの知識集約型の高付加価値植物生産は、米国や中国、アジア発展途上国、中南米米国の大規模農業に対して我が国が差別化を図ることができ、おそらく唯一他国に対して独創性をもって優位性を保てるイノベーション領域である。従って、この分野は日本の植物科学および農業産業が、将来の他国との差別化、優位性堅持を考えたときに最も強力に推進すべき重点領域の一つである。

【低分子医薬品】

植物は古くから低分子医薬品の宝庫であり、精密合成化学や計算科学が発達した現在もその重要性は変わらない。例えば、1981年～2006年に開発された低分子新薬の起源を見ても、そのうち34%は天然化合物あるいはその誘導体であり、29%は天然成分をまねた薬理活性母核、あるいは天然物生合成経路を参考に作られている。純粋に合成化学的に得られた新薬はのこりの37%にすぎず、約60%の新薬は天然成分の知見があって始めて世に出たものである^[1]。これらの天然成分には、植物のみならず微生物や海洋生物由来の成分もあるが、植物がその主要な起源であることに変わりはない。このように天然化合物が新薬の豊富な源である理由は、その構造の多様性が医薬品のそれとよく一致している事による。すなわち、天然物と医薬品の化学的多様性空間は、コンビナトリアル化学による領域とさらに多くの範囲をカバーし、天然物のカバーする空間は実用化された医薬品のそれと類似している^[2]。これが新薬の多くが天然物由来である理由である。このような植物のもつ大きな化学的多様性は、動けない植物が自らの生存のために発達させた化学的生存戦略（捕食者や外敵に対する防御、受粉のための昆虫誘因）の成果である。

単一成分からなる有名な植物医薬品には、抗白血病薬のビンクリスチン、ビンブラスチン、抗癌薬のパクリタキセル（タキソール）、抗癌薬のカンプトテシン誘導体（イリノテカン、トポテカン）、鎮痛薬のモルヒネ、抗マラリア薬のアルテミシニンなどがあり、世界中で約120の植物成分が抽出、単離されて医薬品として用いられている^[3]。これらの単一化合物の医薬品に加え伝統医薬の知識に基づいた生薬、ハーブエキス、漢方薬などの植物粗抽出物を医薬品として用いる場合も多い。さらに、これらは医薬品のカテゴリーを超えて、健康機能食品、サプリメント、栄養機能成分（Nutraceutical）として用いられるケースもある。

植物由来の低分子医薬品の世界マーケットは2005年で180億米国ドルと見積もられ、2011年には260億米国ドルに生長すると見積もられている^[4]。新規の植物医薬品は抗癌薬、抗感染症薬（特に、抗ウイルス、抗寄生虫薬）を中心に開発が進められているが、その他に免疫関連医薬や中枢神経系作動薬にも注目が集まっている。現在、抗癌薬に限って見ても植物由来の60化合物が開発パイプラインに乗っている^[4]。

これらの植物医薬品の生産は、基原植物の選抜と栽培あるいは半合成との組み合わせ（ビンクリスチン、ビンブラスチン、パクリタキセル、カンプトテシン、モルヒネ、アルテミシニン）の場合が多いが、植物培養細胞を用いたバイオテクノロジー生産（パクリタキセル、薬用ニンジン）も用いられている。また、酵母などの異種細胞を用いたコンビナトリアルバイオケミストリーを目指した研究も活発である（アルテミシニン、ビンク

リスチン、ビンブラスチン、パクリタキセル、カンプトテシン、グリチルリチン)。

しかし、地球上の植物種の総数が 25 万～ 50 万種と見積もられているが、例えば米国国立癌研究所で行われた広範な植物エキスを使った抗癌成分のスクリーニングに限ってみても 35,000 種の植物エキスが調べられたに過ぎず、全植物種の 10%以下を調べただけである。さらに、現在ではますます困難になる絶滅危惧種の入手、活性成分の生産性向上、野生植物の伐採による植物資源の枯渇などの問題がある。

参考文献等

- [1] Newman and Cragg, J. Nat. Prod. 2007, 70: 461-477
- [2] Feher and Schmidt, J. Chem. Inf. Comput. Sci. 2003, 43: 218-227
- [3] Farnsworth, N. R. 1988. Screening plants for new medicines. Chapter 9 in Biodiversity, ed. E.O. Wilson. Washington, D.C.: National Academy Press.
- [4] Saklani and Kutty, Drug Discovery Today, 2008, 13: 161-171

【バイオ医薬品】

バイオ医薬品は、植物の遺伝子組換え技術を用いて、本来植物が生産しない哺乳類等の免疫関連物質や生体防御因子の遺伝子を植物に導入・発現させ、生産する技術と、従来植物が生産し、これまでも医薬品成分として活用されてきた物質、主に二次代謝物の生産技術に大別される。

前者においては、特に治療用抗体、サイトカイン類や治療用酵素の生産に関する研究開発が欧米企業を中心に行われている。これらのバイオ医薬品を遺伝子組換え植物で生産させる技術は、従来の哺乳類培養細胞等による生産方法において懸念される哺乳類の病原体等の混入リスクが極めて低いこと、生産コストが非常に低い、植物体のままであれば室温での保存が可能なため、従来必須である保管や輸送などのコールドチェーンが不要になる、等の植物ならではの優位性が挙げられている。これらの点から、植物でバイオ医薬品生産の技術的可能性が示唆された 1990 年初頭から現在に至るまで、この分野における論文数は、常に右肩上がりが増加している^[1]。

加えて、Nature Biotechnology 誌 (2007 年) の集計によると、米国農務省への、これらバイオ医薬品を生産する遺伝子組換え植物の野外栽培試験申請件数が約 270 件となっており、実用化を目指した開発が急ピッチで進んでいる。

実用化の具体的例としては、海外のベンチャー企業において、先天性遺伝疾患に対する治療用酵素を遺伝子組換えニンジン¹の培養細胞で生産させる試みが、昨年末時点で FDA の認可間際に来ており、大手製薬企業が一時金 6,000 万ドルでライセンスを獲得したというニュースがあり、遺伝子組換え植物による人用のバイオ医薬品生産の第一号と期待されている。

植物や微生物を用いたバイオ医薬品生産系において懸念されるのは、哺乳類との翻訳後修飾様式の相違により、医薬品としての活性が損なわれる、逆にアレルギー性を有する可能性が指摘されてきたが、植物においては、近年の研究開発により、植物特異的糖鎖構造の除去技術や哺乳類型糖鎖構造を持たせる技術開発も格段に進歩してきている。

今後の課題は、これらバイオ医薬品を生産する遺伝子組換え植物体を、どこで、どのように栽培・生産するか、すなわち、遺伝子拡散防止と医薬品製造に関する基準の両方をクリアする生産技術開発が必要である。我が国は、閉鎖型植物工場と水耕栽培による技術開発で、世界を一步リードしているが、未だ緒についたばかりで、さらなる研究の加速化が必要である。

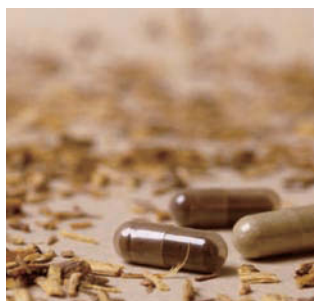
一方、従来植物が生産する医薬品成分、例えば、抗ガン剤の一部や抗インフルエンザウイルス薬の主成分等、



1-3-1 バイオ燃料



1-3-2 化成品原料



1-3-3 医薬品原料・酵素等



植物工場

植物由来の医薬品成分は多様に実用化されているが、これらの生合成経路や関連遺伝子群の解析は進んでいない。わが国においては、モデル植物のゲノム解析は進められてきたが、今後、実際の有用物質を生産する実用植物のゲノム解析および二次代謝経路のプロファイリングは重要な課題であり、欧米においては企業が独自にこれらの解析を進めており、このままでは諸外国に知財の占有化を許す事態を招きかねない。

参考文献等

[1] Plant Biotechnology Journal (2010) 8, pp. 525–528

【ワクチン】

ワクチンは、対象疾患療法に用いられる医薬品と異なり、予防医薬のカテゴリーに入る。我が国のワクチン市場は、ヒト用ワクチンで 707 億円（2008 年）、動物用ワクチンで 240 億円（2007 年）と、先進諸国の中で突出して低い。しかし、昨今の新型インフルエンザや口蹄疫ウイルスの流行に見られるような感染症の流行対策として、世界的にもワクチンを含む予防医薬の重要性が高まってきている。事実、世界保健機関（WHO）の白書では、ワクチン市場が過去 8 年間で 3 倍に拡大してきたと報告している^[1]。国内のワクチン市場の拡大予測も、2018 年にはヒト用ワクチンだけで 1,800 億円の市場^[2]、これに癌ワクチンが実用化されれば、これだけでも年数百から数千億円の市場が見込まれると予測され^[3]、ワクチン業界においても次世代型ワクチンの開発が急務とされている。

従来のワクチン製造方法は、動物細胞もしくは微生物培養による生産が主流と考えて良いが、これを遺伝子組換え植物で生産しようという研究開発は、20 年ほど前から欧米企業を中心に行われ、その開発報告もバイオ医薬品の 2 倍以上に上ってきている^[4]。2006 年には、遺伝子組換えタバコの培養細胞を用いて生産したニワトリのウイルス病に対する経口投与型ワクチンが、米国農務省の許認可を得、遺伝子組換え植物による世界初のワクチンとなった。

このように遺伝子組換え植物を用いたワクチン生産方法の開発が急展開している理由は、植物生産は大量生産が容易のみならず、コールドチェーンが不要、生産の低コスト化が大幅に図れることに加え、植物工場のような管理生産方法を用いても、従来方法に比べて CO₂ の排出量が 1/3 程度に削減が可能な点がある。さらには、次世代型ワクチンの一つ、粘膜ワクチンのさらなる実用化により注射器・針の医療用廃棄物の削減も期待される。

一方、ワクチンは医薬品と異なり広く大衆的に用いる必要があり、非常に安価で大量生産が可能である必要がある。特に産業用動物ワクチンは、より低価格化が求められる。加えて、一つのワクチンで多くの疾病に対応可能な多機能ワクチンや、ワクチン効果の持続性が高いワクチン開発などが望まれている。

この課題の解決のためには、植物におけるワクチン遺伝子の高発現・高蓄積技術、複数のワクチン遺伝子の発現技術、経口投与型アジュバントの新規開発が必要である。加えて、食料品と異なるため、閉鎖型植物工場のような管理下における計画・安定・清浄なワクチン生産植物の栽培・生産技術開発という新しい要素技術の開発が急務である。

米国や EU においては、これらを視野に入れた大きなプロジェクトを立ち上げ、早期の実用化・技術の知財化に非常に積極的に取り組んできている。

引用文献等

[1] http://www.unicef.or.jp/osirase/back2009/0910_08.htm

[2] <http://www.mylifenote.net/2010/05/12/20100512fuji02.pdf>

[3] <http://www.seedplanning.co.jp/press/2006/1017.html>

[4] Plant Biotechnology Journal (2010) 8, pp. 525–528

【研究用試薬】

植物の遺伝子組換え技術を応用して、組換え植物で研究用試薬を生産させる技術開発は、医薬品や機能性食品、育種開発等に比べて最も実用化までの工程が短い。事実、遺伝子組換えトウモロコシで生産した β グルクロニダーゼが米国の試薬メーカーから発売されたのを皮切りに、アビジンやトリプシンなど複数の植物生産研究用試薬は既に海外企業より上市されている。

研究用試薬の植物生産の利点は、大量生産、大幅な低コスト化、抽出前の材料の室温保存が可能という点にある。例えば、従来法では、鶏卵から抽出・精製し販売されているアビジンを20g生産するのに、原材料の鶏卵は約1トン必要となる。これに対して、同じ量のアビジンを遺伝子組換えトウモロコシで生産する場合、わずか1ブッシェル（144リットル）のトウモロコシで済む。この例からも植物生産系がいかに大量生産かつ低コスト生産系であるかがわかる。加えて、植物は光合成で物質生産を行う独立栄養型の生物であり、CO₂を吸収して物質生産を行う唯一の生物生産システムである。したがって、従来の生産系を植物生産系に代替することで、将来的に大きなCO₂削減効果が期待できる。

また、本来植物が生産しない試薬成分の場合、植物は目的物質と類似した成分を有しないため抽出・精製工程の簡便化が図れることも大きい。これらの点に加え、研究用試薬は生産物の研究用試薬としての品質保証が重要であり、医薬品等や食品では、さらに求められる安全性等の検証の比重は低いことでも、製品化へのハードルが非常に低い。

すでに、米国やEUにおいては、このような研究用試薬を含む有用物質を生産する遺伝子組換え植物の野外栽培に関するガイドラインがそれぞれ策定されており^[1-2]、野外で大規模な栽培・収穫、保存、抽出・精製、製品化という道筋が確立されている。一方、我が国では食品・飼料としての安全性が担保されない遺伝子組換え植物の野外での栽培は行えない。そのため、食品・飼料との交雑・混入を確実に回避可能な隔離された環境での栽培・生産が必須となる。したがって、管理可能な小規模栽培・生産における実用化・産業化のためには、いかに植物で目的物質の生産性を上げるか、という基盤的技術開発が課題である。

引用文献等

[1] http://www.ema.europa.eu/docs/en_GB/document_library/Scientific_guideline/2009/09/WC500003154.pdf

[2] http://www.aphis.usda.gov/brs/pdf/Pharma_Guidance.pdf

【その他（ワクチン等の開発動向等）】

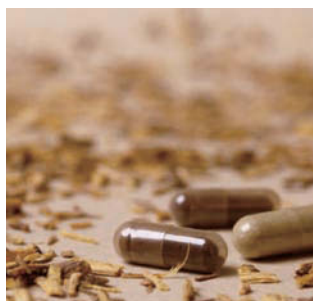
世界では一年間に5,700万人が亡くなり、その内の25%に相当する1,500万人は感染症に起因すると推定されている^[1]。言うまでもなく、ワクチン接種が感染症からヒトを守る上で最も有効である。植物を用いた経口ワクチンの製造は価格面だけでなく、その安全性、常温でも長期間保存可能なこと、輸送性の点などから多くの利点があり、開発途上国の医療問題に大きく貢献する。現在までに開発されている経口ワクチンとして、毒素原性大腸菌易熱性毒素B (LTB)、コレラ毒素B (CTB)、B型肝炎ウイルス、ロタウイルス (VP7)、SARS、



1-3-1 バイオ燃料



1-3-2 化成品原料



1-3-3 医薬品原料・酵素等



植物工場

日本脳炎に対するものが上げられる^[1]。表3はヒトへの臨床試験に進んだワクチンを示している^[2]。この中でB型肝炎のワクチンは商業製造のための栽培が始まっており、ヒトのゴーシェ病の治療薬であるグルコセレブロシダーゼは臨床試験の最終段階に来ている。ゴーシェ病は遺伝性の代謝異常の奇病であり、約5千人の患者は治療薬におおの年間約20万ドルの負担を強いられている。このような希な先天的代謝異常疾患の場合、治療薬の製造は通常極めて高コストになることから、植物を用いたワクチン製造は期待されている。

このように植物を用いて製造した医薬品（PMP, Plant-Made Pharmaceuticals）に多くの欧米バイテク企業が注目している。その理由として、PMPは従来の製造法に比べて低コストで生産できるだけでなく、高タンパク質生産とスケールアップのしやすさ、動物で製造されたタンパク質と同等の生理活性を持つこと、ヒトの病原菌混入などの心配もなく安全性の点でも優れていることが挙げられる。

引用文献等

- [1] H. Daniell et al., Plant-made vaccine antigens and biopharmaceuticals, Trends in Plant Sci., 14: 669-679 (2009)
- [2] J. Kaiser, Is the Drought over for pharming?, Science, 320: 473-475 (2008)

「医薬品原料・酵素等」に関する科学技術・研究開発の国際比較と注目動向

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	- 植物医薬品のスクリーニングは薬学分野で古くから行われ研究水準は高い。 - 植物二次代謝産物の基礎研究とバイオテクノロジー研究は世界第一位のレベルにある。 - 大学・公的機関におけるモデル植物に関する基礎研究レベルは高く、研究成果も多い。 - 特に「環境ストレス耐性」など育種に関する分野での世界への貢献は大きい。 - 実用作物種や物質生産に関する基盤技術研究レベルの質は高いものの、量は圧倒的に少ない。
	技術開発水準	○	→	- 製薬企業の多くは植物からの医薬品開発研究を中止したが、生薬、漢方薬メーカーは独自の開発力をもっている。 - 食品メーカーからの植物健康機能成分への参入が活発である。 - 新規の植物ウイルスベクター開発技術に成功している。 - 品種改良、形質改良の遺伝子操作技術は言うまでもなく、物質生産関連の遺伝子操作技術においても強みを持つが、実用化には直結していない。 - 産総研が医薬・ワクチン生産の植物工場を開発、世界初の実証試験を本格的に実施中、世界をリードしている。

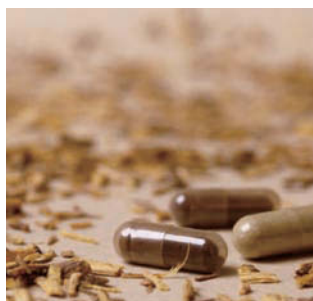
	産業技術力	○	↑	・長寿社会に向けて、生薬・漢方薬、食品メーカーの開発力が期待される。アカデミアとの連携により実用化の加速が期待される。 ・遺伝子組換え植物の実用化を担う企業が無い。農業分野においては、国の指導による実用化政策が必要である。 ・ワクチン、医薬品生産と植物工場利用に関しては、企業が直接参入可能なため実用化へ進み始めている。今後の研究開発投資によっては、世界をリードできる可能性がある。
米国	研究水準	◎	→	・アカデミアにおける研究人口、研究水準は相対的に高くはないが、NIH が薬用植物データベース・トランスクリプトーム解析のプロジェクトを開始した。ゲノムカナダでも同様のプロジェクトを開始した。 ・企業における基礎・実用化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。 ・特にワクチン生産に関しては、人に対する試験研究も実施され、動物試験以上の基礎データの積み上げがある。
	技術開発水準	◎	→	・大学発バイオベンチャーは活発である。 ・医学・薬学・獣医学・農学分野の融合、共同実施体制が容易に進んでいる。
	産業技術力	◎	↑	・パクリタキセルのバイオ生産を行う Phyton Biotech 社など戦略的なバイオベンチャーが活発である。 ・ワクチン生産などドイツ財団やロックフェラー財団などの出資による大きなプロジェクトが進められている。 ・企業による隔離生産圃場や植物製剤用 GMP 施設などが既にある。 ・研究用試薬などは既に実用化されている。
欧州	研究水準	○	→	・ドイツ、オランダ、フランスなどで日本とほぼ同程度かそれ以下の研究水準を有する。 ・EU のフレームワークにおいて、遺伝子組換え植物による医薬品生産に関する大きなプロジェクトが 2004 年から進行している。 ・特に植物による抗体生産、ヒト型糖鎖修飾技術に強みがある。
	技術開発水準	◎	→	・ノバルティス社（スイス）では天然医薬品の開発パイプラインを維持、強化している。 ・バイエル社（ドイツ）は買い取ったマグニコン技術で物質生産技術の世界的寡占化を目指している。 ・植物での物質生産能を増強する基盤技術開発において強みがある。
	産業技術力	◎	↑	・ベルギー、フィンランドでは植物医薬品のバイオ生産を行うバイオベンチャー SoluCel 社が設立された。 ・ドイツなどに植物製剤化施設を建設済である。 ・製薬企業や工業用酵素企業が参入している。 ・実用植物のゲノム解析が企業主体で進められている。
中国	研究水準	○	↑	・伝統的な植物科学研究が継続している一方、薬用植物を中心に 1000 植物のデータベース・トランスクリプトーム解析がスタートするなど大量ゲノムデータ取得への動きが急である。 ・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ている。このような人材を中心に、国際共同研究を進め研究水準が急速に上昇している。 ・植物による医薬品やワクチン生産、機能性物質生産に関する国際シンポジウムなどを多頻度で開催している。
	技術開発水準	○	→	・技術水準は高いとはいえないが、政府をあげて技術開発に積極的である。 ・研究成果の実用作物への応用が重視されており、遺伝子組換え作物への技術開発に積極的である。



1-3-1 バイオ燃料



1-3-2 化成品原料



1-3-3 医薬品原料・酵素等



植物工場

	産業技術力	△	→	・自国の資源植物の保護と囲い込みの動きが急であり、外国企業からの資源植物へのアクセスが制限されつつある。 ・実用化を担う自国企業は見あたらないが、欧米の大企業の参入が予想される。
韓国	研究水準	○	→	・薬用ニンジン、トウガラシ、ニンニクなどの薬用植物、香辛植物のゲノム研究や分子生物学研究が盛んである。 ・植物医薬品と健康食品の研究開発も活発である。 ・欧米の研究機関に所属している韓国研究者による研究成果の著名国際誌発表は増えつつある。
	技術開発水準	○	↑	・植物成分を元にしたバイオベンチャーへのアカデミアからのスピンアウトも奨励されている。 ・特異的な傾向は現段階では特に見られない。
	産業技術力	△	↑	・薬用ニンジンのバイオ生産企業が実用レベルに達している。 ・現時点で特に目立った動きは表面化していない。
全体コメント：植物医薬品の基礎研究では、日本次いで欧州がリードしている。中国は、自国の植物資源の保護政策に向かっている。韓国は日本と似た状況にあるが、薬用ニンジン、トウガラシ、ニンニクなどでリードしている。米国は戦略的なバイオベンチャーが活発である。植物医薬品の開発実用研究はノバルティスのようなメガファーマが引っ張っていくものと予想される。生薬・漢方薬、健康機能性食品などはいずれの国においても今後注目される。一方、バイオ医薬品やワクチン生産は基礎研究から実用化研究まで一貫して欧米企業が中核となり、莫大な予算と研究者を投じて開発が進んでいる。日本は、この分野においては圧倒的に研究機関・研究者の数は少なく、したがって成果報告数も少ないが、レベルは世界に引けを取らない。特に実用化へ橋渡しとなる植物工場を用いた生産に関する基盤技術開発は、世界トップレベルである。中国・韓国は、優秀な留学生や欧米で実績を挙げた研究者が多数帰国しており、国全体の底上げが図られている。両国と日本との間の技術格差はまだ開いてはいるが、今後、急速に縮まっていくものと予想される。				

(注1) 現状 [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている]
※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。

(注2) トレンド [↑：上昇傾向、→現状維持、↓下降傾向]

【注目動向】

- ・中国のBGIとカナダの共同で始まった、1000Plantプロジェクトは中国の薬用植物を中心に1000種の植物のゲノムトランスクリプトーム解析を行うものであり、重要なターゲットは植物医薬品の開発である。同じようなプロジェクトが、ゲノムカナダ、米国NIHのプロジェクトでも開始されている。この面で日本は明らかに遅れをとっている。

斉藤和季（千葉大・理化学研究所）、松村健（産業技術総合研究所）

【植物工場】

植物工場は、気象の影響を受けずに農作物を周年・計画生産するシステムとして 1980 年代に実用化された。植物工場は光源の利用法で 2 種類に分けられる^[1]。一つは太陽光の採光のために被覆面に透過率の高いガラスやフィルムを用い、必要に応じて人工光で補光する太陽光・人工光併用型、もう一つは光線不透過でかつ断熱性の高い被覆資材を用い、人工光源のみを利用する人工光型である。植物工場は生育環境を制御し、養液栽培を用いるため、生産物の品質が安定し、かつ生産性が高い。ここでは人工光型の植物工場に焦点をあててその特徴を説明する。

植物工場は施設内外の物質の出入りを極力抑えるために、閉鎖型システムと呼ばれる。温度、湿度、光、ガス、風、培養液などの栽培条件を最適に制御し、また病原菌の侵入と繁殖を最小限に抑えることにより継続的に高品質の作物を育成できる。培養液の水は植物体に吸収されて葉から蒸散して水蒸気になる。露地や温室ではこの水蒸気は大気中に拡散されるが、植物工場では水蒸気をエアコンで除湿水として回収し、培養液の水に再利用するため、水の使用量が極めて少ない。また閉鎖系のため炭酸ガス施用が可能で、好適な温湿度と光条件の下で光合成の効率を最大化することができる。このように植物生育の基本資源である水、肥料、二酸化炭素の高度な有効利用ができるため、省資源、省コストの環境にやさしい生産システムである。

植物工場は食料供給のための農作物生産に加えて、植林用樹木の苗生産、バイオ産業用植物の小植物体の増殖と苗生産、薬用植物の生産、園芸療法の場合などへの応用が期待できる。このような背景のもと、2000 年代に入り、植物工場を遺伝子組換え体植物を用いる医薬品原材料の生産の場を用いる考えが提唱された。植物工場は遺伝子拡散防止の機能を付加すれば遺伝子組換え作物の実験施設として使え、さらには商業栽培施設として運用可能である。我が国では、植物工場を用いて遺伝子組換え植物による医薬品原材料を生産するための研究開発プロジェクトが開始されている^[2]。植物工場は生育環境を自由にコントロールできるため、遺伝子組換え植物の能力を最大限に活かすことができる。その考えに基づいて遺伝子組換え植物を作出し、目的有用物質の発現と蓄積を最適化する生育条件を見出すという、バイオテクノロジー研究者と植物工場研究者が協調して研究開発を行う新しい複合領域が誕生し、その進展が期待されている。

引用文献等

[1] 「農商工連携研究会植物工場ワーキンググループ報告書」

http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/plant_factory/p_working_group/pdf/houkoku.pdf

[2] 「植物機能を利用した高度モノ作り基盤技術開発／植物利用高付加価値物質製造基盤技術開発プロジェクト評価（中間）報告書」

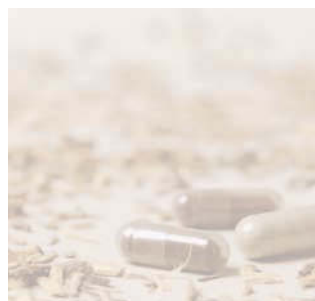
http://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/e00/03/h20/312.pdf



1-3-1 バイオ燃料



1-3-2 化成品原料



1-3-3 医薬品原料・酵素等



植物工場

「植物工場」に関する科学技術・研究開発の国際比較と注目動向

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↑	- 大学を中心に、植物工場の環境構築、植物の栽培管理、養液栽培に関する研究蓄積があり、研究水準は高く、研究成果も多い。 - 特に「人工光下の植物反応」と「人工光植物生産」に関する研究は世界的にみてトップクラスである。 - 植物の生理情報の非破壊計測、栽培管理の機械化・自動化に関する研究水準が高く、植物工場の大規模化・省力化への展開が期待できる。
	技術開発水準	◎	↑	- 照明メーカーの人工光源（蛍光灯、高輝度放電ランプ、LED など）の開発力が高く、その光源を植物工場用に改良する技術開発は世界的にみて先行している。 - 空調メーカーの省エネ型の空調機の開発力および製品水準が極めて高い。その空調技術を核として、ゼネコンや空調メーカーが手がける植物工場の環境制御技術は世界的にみてトップである。 - 収穫物管理と食品加工（ポストハーベスト）の技術力が高いため、植物工場の収穫物を商品に仕上げる工程管理とトレーサビリティを確立できる。
	産業技術力	○	→	- 世界的にみて人工光型の植物工場が農業分野で実用化されているのは日本だけである。 - これまではベンチャー企業が植物工場を建設する事例が多かったため、新規企業の参入や産業力強化に必要な基盤整備、例えばハードウェアの標準化や規格化がなされていない。
米国	研究水準	○	→	1990年代までは宇宙開発における月面農場や国際宇宙ステーション内植物栽培試験室の研究開発のために NASA と大学に膨大な研究費が投入されて、人工環境下の植物生産に関する研究水準は世界一であった。しかし 2000 年代に入り、宇宙開発関連事業の停滞により関連研究の多くは中止された。 - 他方、農業用の植物工場については商業化されていないため、関連する研究はあまり行われていない。
	技術開発水準	○	→	ガラス温室等の従来の施設園芸に関する技術開発は幅広く行われている。
	産業技術力	△	→	スペースシャトルや宇宙ステーション内の植物栽培室の技術開発の成果は民間企業へ技術移転し、研究用の機器・資材として世界的に販売されている。
欧州	研究水準	○	↑	- 施設園芸としての太陽光・人工光併用型の大規模な植物工場が多数実用化しているため、研究もそれに応じて盛んである。 - オランダは国家戦略として、太陽光・人工光併用型の植物工場を環境負荷の少ない半閉鎖型の農業生産システムと位置づけて、ワグeningen大を中心に積極的に研究開発に取り組んでいる。 - ノルウェーやスウェーデンは、緯度が高く日射量が少ないため光に関する関心が高く、「光と植物生育」に関する高水準の研究成果を出している。
	技術開発水準	◎	→	- オランダは、大学や国研よりもメーカーに技術開発力がある。農業経営者と一緒に実用的な技術開発に取り組んでおり、レベルは高く、世界的にみて最も活発である。 - 人工光型植物工場の事業化する動きがあるが、技術を持っていないので、日本に調査に来る団体が増えている。
	産業技術力	◎	→	オランダ等の施設園芸国のメーカーは、国内市場が飽和気味のため、率先して輸出に取り組んでおり、北米、アジア、日本へ多数の商品を輸出している。

中国	研究水準	×	↗	・2000 年前後までは露地農業が中心で施設園芸後進国であった。このため、温室や植物工場に関する研究者の数は少なく、レベルも高いとは言い難い。最近、人口増や所得増加などの影響で施設園芸が急速に発展しており、研究者数が増加している。 ・研究水準は依然として低く、日米欧の既往研究の後追いが多いが、中国農業大学や国研が猛烈な勢いで研究を開始しており、注目される。
	技術開発水準	△	↗	・自国の技術はほとんど無いが、海外への技術調査、外国研究者の招聘、留学帰国者の技術指導等の成果もあり、一昨年あたりから、質は高くないものの人工光型植物工場が誕生している。
	産業技術力	×	↗	・現在は皆無である。しかし、研究者の増加や植物工場の整備状況などから、施設園芸先進国として、メーカーに輸出力が備わると可能性は考えられる。
韓国	研究水準	○	↗	・施設園芸国であり、この 20 年間ほどで施設園芸面積をかなり増やしている。施設園芸に関する研究者の数は日本に比べるとかなり少ないが、研究水準は高い。 ・中国同様、ここ数年、人工光型植物工場のブームになり、大学や国研で猛烈な勢いで研究が開始されている。
	技術開発水準	○	↗	・サムソン、LG などの総合電気メーカーが LED 照明の商品化に取り組み、日本に勝る商品を出しつつある。その背景から、大学やベンチャー企業の光源に LED を用いる植物工場の技術開発が盛んになりつつある。 ・ここ 1、2 年、ロッテなどの食品メーカーが植物工場の実用化に取り組んでおり、日本の農業用植物工場の開発の歴史の 20 年から 10 年後追いをしている様子である。
	産業技術力	△	↗	・現在は皆無であるが、産業実践力が高いため、5 ～ 10 年後には人工光型植物工場の市場に大企業が参入し、日本企業と競争することが予想される。
全体コメント：人工光型植物工場はバイオ産業を含む様々な植物産業で活用できる生産システムであり、この分野は日本が世界をリードしている。Plant factory という和製英語は世界中の関連分野で認知され、日本の取り組みは欧米の施設園芸先進国から注目されている。植物工場は日本の工学技術をベースに開発されたものである。今後一層の研究投資、産業投資が行われれば、日本の先端的な自然エネルギー活用技術やリサイクル技術を積極的に取り入れた省資源、省コストの環境にやさしい生産システムとして世界をリードする技術として発展することが期待されている。				

(注 1) 現状 [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている]
※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。

(注 2) トренд [↗：上昇傾向、→現状維持、↘下降傾向]

後藤英司（千葉大）

1-4

「食料生産」



1-4-1 作物増産技術



1-4-2 持続農業



1-4-3 機能性作物の創出

1-4-1 作物増産技術

【概況】

世界人口が 2050 年に 90 億を超えることが予想される中、2009 年の飢餓人口は 10 億人を超えた。20 世紀後半、農業生産力の向上に伴い、飢餓人口は僅かに減少の傾向を示していたが、今世紀に入って新たな食糧危機などの影響で再び増加に転じており、この傾向は現在も続いている。この飢餓に苦しむ人たちの多くはアジアやアフリカ、特にアジアに集中しており、日本がこの問題の解決に果たす役割は大きい。この増加し続ける人口を養うために、作物の生産量のさらなる向上は必須であるが、そのために必要な土地や水がどこまで利用可能であるかについては議論が分かれている。OECD-FAO は今後、ラテン米国やアフリカを中心に現在の耕作面積を約 2 倍（16 億ヘクタール）に増加させることが可能という試算を公表しているが、一方で、英国王立協会はこのような試みは現地のエコシステムや生物多様性に大きな影響を与えると警告しており、持続可能な農業生産の重要性を強調している^[1]。

このような状況下で、作物生産性の向上は人類にとっての最重要なミッションであり続けている。1996 年から始まった遺伝子組み換え作物（GM 作物）の商業栽培は、様々な社会的な議論の渦中に晒されながらも、栽培面積を急速に増加し続け、2006 年には 1 億ヘクタールを越え、2009 年時点で 1.3 億ヘクタールに達している^[2]。その対象とする形質も、初期の除草剤耐性や耐病虫害性だけでなく、例えば作物の品質を改変し、高い栄養価や健康増進に役立てる改良や砂漠化・土壤汚染・地球温暖化などの環境問題に適応した作物改良と言った多岐に亘った形質を対象とした展開がなされている（1-4-3 機能性作物の項参照）。

作物生産性向上に向けての、もう一つの技術的トレンドはゲノム情報を基にしたゲノム育種である。農業的重要形質のほとんどは複数遺伝子により調節される複雑形質であり、従来のメンデルの法則に則った単純遺伝学では解析できなかった。最近のゲノム情報はこの状況を打破し、QTL 解析を用いることにより原因となる遺伝子の個数や貢献度を予測できるようになった。さらに、染色体置換システムを利用することにより、原因遺伝子の単離・機能解析も可能となるばかりでなく、遺伝子を利用した分子育種の道を拓いた。最近は複数の QTL 遺伝子をエリート品種に集積する QTL ピラミディングも現実的となりつつある。このような最先端技術を含めて、現在育種の現場に急速に普及しつつある分子マーカーを用いたマーカー育種手法は、劣悪形質を排除し優良形質のみをエリート品種に導入する方法として確立しつつある。

今後のトレンドは、GM 育種とマーカー育種の 2 つを重要なツールとして、これらの手法をさらに効率化するとともにこの両者を組み合わせることにより、さらなる作物生産性向上を目指すことになる^[3]。

引用文献等

[1] Food: The growing problem. Nature 466, 546-547 (2010)

[2] http://www.cbijapan.com/d_investigation/d_investigation_13.html

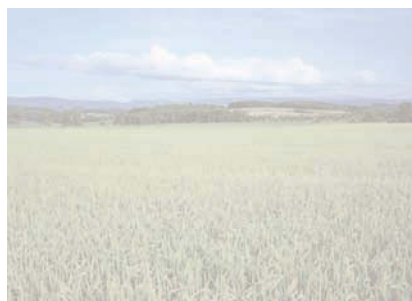
[3] Takeda, S. and Matsuoka, M. (2008) Genetic approaches to crop improvement: responding to environmental and population changes. Nature Rev. Genet. 9, (6) 444-457.

【穀物・飼料作物】

我が国の主要穀類としては、イネ、コムギ、オオムギ、ダイズがあげられる。イネの国内生産量は 831 万トンで我が国の消費のほぼ全部を自給している。一方、コムギの生産量は 67 万トンであり、主に製粉、パンや製麺用の原料として利用されているが、全消費量の約 85% は米国、カナダ、オーストラリアなどからの輸入に依存している^[1]。ダイズの国内生産量は 23 万トンで、国内消費量の 95% を輸入に依存している。国内生



1-4-1 作物増産技術



1-4-2 持続農業



1-4-3 機能性作物の創出

産量が極めて少ないダイズやコムギにおいては、不良栽培環境の回避や耐性獲得に対応することで、安定生産を図る方向で研究や品種開発が進められてきた。具体的にはダイズやコムギの耐湿性の改善や回避が挙げられる。しかしながら、いまだに耐湿性を改善する研究成果は得られていない。

イネにおいても、生産過剰の問題から増収を目的とした研究課題はこの数年前まではほとんど無かった。直播適性、病害抵抗性などの獲得による間接的には生産の低コスト化が主目標である。しかしながら、近年のカロリーベースでの食料自給率の向上のために、飼料としてのイネの利用、米粉の用途拡大による米消費の拡大などにむけて、多収穫米への注目が高くなり、行政ニーズとしての研究の必要性が高まっている。イネの育種、特に独立行政法人の研究センターを中心に、日本型品種とインド型品種の交雑による超多収の飼料イネの新品種が育成されてきている。

イネの収量増大にむけての遺伝解析ならびに遺伝子研究としては、イネゲノム解読から得られた充実したゲノムリソースと情報を背景に、近年大きく研究が進んでいる。具体的には、収量に間接的に影響を与える出穂期の研究以外に、収量の決定要因の種子数を増加させる遺伝子として、Gn1a および WFP 遺伝子が単離・同定されている。また種子の大きさを決定する遺伝子としては、GS3、GW2 および qSW5 などが次々に単離・同定されている。収量を構成する 2 大要因のシンクサイズ（器の大きさ）とソース能力（光合成能）にわけられるが、これらの遺伝子はすべて、シンクサイズに関与するものである。単純に器だけを大きくしても、実質的な収量増大への効果は大きくないのが現状である。したがって、現在はソース能力に関与する遺伝子の解析が強く望まれていると言える。また多収イネで不可欠な性質は耐倒伏性であり、これらを強化する遺伝子（半矮性）や強かん性の研究が進んでいる。日本においては、種子生産にかかるコストの問題や食味・品質の問題から、ハイブリッド育種はほとんど行われていない。

我が国の飼料自給率は 26%（2009 年）と低く、大量の飼料穀物を海外から輸入している。中国などの食肉需要の増大、米国合衆国のトウモロコシ実のバイオ燃料利用により、2008 年には飼料の国際価格が高騰し、わが国の畜産経営を著しく圧迫し家畜生産の不安定化の要因となっている。将来にわたる持続的な家畜生産とその安定供給のためには、国産飼料生産の大幅な増大により飼料自給率を飛躍的に向上させることが急務となっている。

平成 21 年度の我が国の飼料作物の栽培面積では、牧草が 76 万 4,100ha、青刈りトウモロコシが 9 万 2,300ha、ソルガム 1 万 8,700ha、その他青刈り作物が 1 万 2,700ha、青刈り麦類 9,250ha の順で多く、その他青刈り作物の中では稲発酵粗飼料用の青刈り稲の作付けが増加している。牧草は、寒地型イネ科牧草（オーチャードグラス、チモシー、イタリアンライグラスなど）、暖地型イネ科牧草（ギニアグラス、ローズグラスなど）、マメ科牧草（アカクローバーなど）に大別される。多収性、多回刈り性、低温、乾燥、湿害などのストレス耐性を育種目標に品種が開発されている^[2]。ホールクロップサイレージ用飼料作物は、多収性、高 TDN（可消化養分総量）、高嗜好性等を目標に品種育成が行われている。北海道を中心に栽培されているサイレージ用トウモロコシでは、多収性の単交雑 F1 品種が育成され、最近では耐倒伏性の高い品種が開発されている。寒地、暖地ともにデント種とフリント種との組合せから多収性が得られ、茎葉部の消化性が優れることが明らかにされている。ホールクロップの消化性の向上のため、雌穂重割合の増加、リグニン含量低下のための褐色中肋 brown midrib (bmr) 遺伝子の利用が行われている。水田転作圃場で栽培されるサイレージ用トウモロコシでは湿害による生育不良の問題があるため、根の通気組織が発達するテオシント種と栽培種との交雑し、耐湿性親系統と F1 系統の DNA マーカー選抜が行われている。九州を中心に栽培されているサイレージ用ソルガムは、子実用とあわせて品種開発が行われ、実用品種は細胞質雄性不稔系統を利用した 1 代雑種育種法が中心となっている。極晩性・未出穂タイプの F1 品種「天高」、「風立」が育成され、DNA マーカーを用いた温度感応性、日長感応性遺伝子の染色体領域の特定などの研究が進められている。多回刈り適性の改良のため、再生

能力の高いスーダングラスを花粉親としてスーダン型ソルガム品種の育成が行われている。トウモロコシと同様に茎葉部の消化性の改良のため、リグニン合成酵素遺伝子に変異のある *bmr* 遺伝子の利用が進められ、サイレージ品質および嗜好性の向上が認められている。また、組合せ能力、多収性、消化性等の重要形質について DNA マーカー選抜が進められている^[3]。

休耕田、耕作放棄地の有効利用のため、水田における飼料米用、稲発酵粗飼料用水稲の栽培が奨励されている。飼料用米品種では子実多収性、サイレージ用では、高バイオマス、高 TDN、高嗜好性、耐倒伏性を育種目標に、耐倒伏性の長稈品種が育成されている^[4]。ゴールドハル形質はリグニン合成酵素の欠損により生じ、ゴールドハル形質をもつ品種の開発が進められている^[5]。現在、飼料米品種は北海道、新潟県において米デンブンのバイオエタノール用原料作物としても利用されている。

引用文献等

- [1] 農林水産基本データ集 <http://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/index.html>
- [2] 平成 21 年産飼肥料作物の作付（栽培）面積（農林水産省）
<http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/menseki/index.html#y3>
- [3] <http://rms1.agsearch.agropedia.affrc.go.jp/contents/kaidai/shiryosakumotsuNo29>
- [4] 加藤浩 2009. 飼料用イネ専用品種の特性と育種の現状（農研機構）
<http://www.naro.affrc.go.jp/ET/h21/pdf/7-2.pdf>
- [5] Ookawa, T., Yasuda, K., Kato, H., Sakai, M., Seto, M., Sunaga, K., Motobayashi, T., Tojo, S. and Hirasawa, T. 2010. Biomass production and lodging resistance in ‘Leaf Star’, a new long-culm rice forage cultivar. *Plant Prod. Sci.* 13: 58-66.

【野菜類】

我が国の野菜栽培面積は長期的には減少傾向にあり、過去 10 年間で栽培面積・出荷量とも 10% 程度減少している^[1]。しかし、品目別では消費者の消費動向を反映し、ダイコン等のように 20% 以上の減少を示すもの、トマト、イチゴ等の横ばいで推移しているもの、ブロッコリー等の 30% 以上の増加を示すものなど様々である^[1]。一方、近年の食生活の変化により、外食・中食産業向けの加工業務用に適した特性を持つ野菜の需要増加も著しい^[2]。このように、野菜の生産・供給に求められるニーズはますます多様化し、かつ流動的となってきた。これに応えるための技術要素として画期的新形質をもつ野菜品種の育成に対する期待は極めて高く、その技術向上に対する DNA マーカー技術等のゲノム学的アプローチの重要性は広く認識されつつある。

我が国の大学・大学院において育種学・遺伝学を専攻する講座では、研究対象に野菜を取り上げる事例は伝統的にアブラナ科を扱ってきた東北大を中心とするグループを除きごく限られている。その中で、文科省ナショナルバイオリソースプロジェクトでトマトを対象とした活動が筑波大学を中心として開始されたことは注目される^[3]。農水省傘下の試験研究機関では農研機構（野菜茶業研究所、他）が当該分野におけるほぼ唯一の研究機関である。野菜の遺伝資源収集と評価、先導的形質を導入したパイロット的な品種・育種母本の育成と実用化^[4-6]を行うとともに、DNA マーカーの大量開発やゲノム情報の育種利用技術開発を進めている^[7-13]。基盤情報整備においてはトマトなどの世界的に重要な野菜とともにナス、ハクサイ、ネギなど、海外と比較して我が国で特に重要性の高い品目のデータ蓄積に重点をおいていること、また、実用品種および育種母本を実験材料に用いて応用研究を重視したリソース整備を進めている点を特徴とする。一方、公立（都道府県）の農業試験研究機関では地方特産品目を対象とした育種研究が行われているがその規模は概して小さく、また自治体の枠



1-4-1 作物増産技術



1-4-2 持続農業



1-4-3 機能性作物の創出

を越えた研究展開はほとんど見られない。

我が国の生産現場で栽培されている野菜は民間種苗会社の育成品種が多く、その品種開発における技術水準は世界でもトップレベルを誇る。我が国の農業生産物の輸出 (2,637 億円：2009 年) のうち種子類は 100 億円を超え、農作物では最も輸出額が多い産品であるが、そのほとんどは野菜の F1 種子である^[14]。しかしながら、我が国の種苗会社の企業規模はトップ企業でも世界的に見れば中堅・中小企業の範疇に入り、DNA マーカー技術などの先端育種技術の開発研究を独自に展開できるほどの資金力は持たない^[15]。

ここ数年のいわゆる次世代型 DNA シーケンサーの普及によりゲノム解読研究を巡る情勢は大きく変化し、野菜などの非モデル作物でも全ゲノム解読が精力的に進められている。野菜ではトマトの遺伝子座乗領域の配列解読が国際共同体制で推進され、2010 年中にそのデータが公開される予定である^[16]。中国では独自にキュウリのドラフト配列を解読し限定公開を開始している^[17]。また、米国、欧州、中国を中心として、ハクサイ^[18]、メロン^[19]、イチゴ (2 倍体野生種)^[20]、スイカ^[21]、レタス^[22] などのゲノム解読が進捗中である。これらの野菜のゲノム解読に関して、我が国はかずさ DNA 研究所と野菜茶業研究所が独自の資金でトマトの 8 番染色体を解読完了したことで一定の国際的貢献を果たしているが^[16,23]、それ以外の品目についてはほとんど関与できていない。その結果、野菜のゲノム配列の情報リソース開発における我が国のプレゼンスは欧米のみならず中国・韓国と比較しても極めて低い。

中国の北京ゲノム研究所 (BGI) では次世代型シーケンサーによりここ数年で 1,000 種の動植物ゲノムを解読するとの計画を公表し、共同研究を呼びかけているが、その中には多くの野菜も含まれている^[24]。キュウリゲノムの例^[25] にみられるように、このような枠組みで解読された配列情報は共同研究相手との資金関係によって非公開とされる場合がある。ゲノム解読のコストが下がり、ある程度の資金力によって網羅的なゲノム配列情報を得ることが可能となってきたことから、これまでのようにゲノム解読の成果を基本的に人類共通の知的財産と位置づけて公開を原則とした状況は今後変化する公算が大きく、関与した研究勢力内での情報の囲い込みが進むことが予想される。

ゲノム情報を利用した野菜の応用研究の組織的な動きは特に欧州で目立つ。世界的に最も重要な野菜であるトマトおよびジャガイモについてはゲノム解読、遺伝子機能解析、メタボローム、途上国支援等の多様な側面からの研究を EU 各国の共同で産学官連携により統合的に推進するプロジェクト (EU-SOL) が進行中である^[26]。また、オランダ、フランス、スペインなどを中心とした SPICY 計画^[27] では、ピーマン (トウガラシ) をモデルケースとして植物の生育モデルと DNA マーカーを用いたグラフ遺伝子型情報の統合解析によって収量性に関する詳細かつ大規模な解析を行う計画である。米国でもミシガン州立大を中心にトマトおよびジャガイモの網羅的 DNA 多型情報の収集を進めている^[28]。

世界における野菜の種苗生産はモンサント、デュボン、シンジェンタなどの巨大企業 (バイオメジャー) がトップ 3 を占めている。これは近年目立ってきたバイオメジャーによる中小独立系種苗会社の買収の動きによるものであり、最近ではモンサントが 2005 年に世界第 1 位の野菜種苗会社であったセミニスを約 1400 億円で、さらには 2008 年にオランダのデルイータ社を約 800 億円で買収するなど、中小種苗会社のバイオメジャーへの吸収・統合の動きが活発化している^[29-30]。韓国では主要種苗会社のほぼ全てがバイオメジャーへ統合された^[31]。

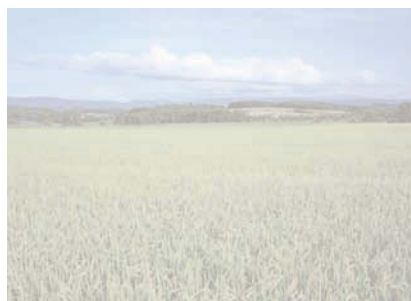
一方、このようなバイオメジャーの動きに対抗し、日本企業も含めた中小規模の種苗会社が共同でゲノム解析技術関連のバイオベンチャーに出資し、DNA マーカー育種の技術力を確保しようとするという動きが注目される。また、オランダでは「フードバレー」と呼ばれる食品産業クラスターがワーゲニンゲンに構築され、大学、公的研究機関、食品および種苗関連企業が官民共同で知の集積と新規ビジネス開拓を行うコンソーシアムが組織されている^[32]。

引用文献等

- [1] 農林水産省作況調査（野菜・長期累年、http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_yasai/index.html）
- [2] 農林水産省生産局（加工・業務用野菜をめぐる現状、http://www.maff.go.jp/j/seisan/kakou/yasai_kazitu/pdf/yasai_meguji_220623.pdf）
- [3] 文部科学省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/>）
- [4] 農水省技術会議事務局 農業新技術 2008（あのみのもり）、同 2010（フユヒカリ）（http://www.s.affrc.go.jp/docs/new_technology.htm）
- [5] 農研機構プレスリリース（<http://vegeta.naro.affrc.go.jp/press/20081031/20081031.html>）
- [6] 松尾ら（1985）野菜試報 C8: 1-22.
- [7] Shirasawa et al. (2010) Theor. Appl. Genet. 121: 731-739.
- [8] Ohyama et al. (2009) Mol. Breed. 23: 685-691.
- [9] Nunome et al. (2009) Theor. Appl. Genet. 119: 1143-1153.
- [10] Fukuoka et al. (2010) Gene 450: 76-84.
- [11] Suwabe et al. (2006) Genetics 173: 309-319.
- [12] Tsukazaki et al. (2008) Theor. Appl. Genet. 117: 1213-1223.
- [13] Fukino et al. (2008) Theor. Appl. Genet. 118: 165-175.
- [14] 農林水産省（農林水産物輸出入概況、http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kokusai/houkoku_gaikyou.html）
- [15] 初田（2009）TechnoInnovation 73: 11-16.
- [16] Solanaceae Genomics Network (http://solgenomics.net/genomes/Solanum_lycopersicum/)
- [17] Cucumber Genome DataBase (<http://cucumber.genomics.org.cn/page/cucumber/index.jsp>)
- [18] Wang (2010) Plant and Animal Genome XVIII, W104.
- [19] Benja et al. (2010) Plant and Animal Genome XVIII, P053
- [20] Shulaev et al. (2010) Plant and Animal Genome XVIII, W249
- [21] USDA (http://www.ars.usda.gov/research/projects/projects.htm?accn_no=418516)
- [22] Matvienko et al. (2010) Plant and Animal Genome XVIII, P014
- [23] Asamizu et al (2007) Plant biotechnology 24: 5-9.
- [24] Beijing Genomics Institute (1000 Plant and Animal Reference Genome Project, <http://ldl.genomics.org.cn/page/plant.jsp>)
- [25] The Cucumber Genome Initiative (http://cucumber.genomics.org.cn/page/cucumber/MTA_v1.pdf)
- [26] EU-SOL (<http://www.eu-sol.net/>)
- [27] SPICY (<http://www.spicyweb.eu/>)
- [28] SolCAP (<http://solcap.msu.edu/index.shtml>)
- [29] <http://www.monsanto.co.jp/news/release/200502G.shtml>
- [30] <http://monsanto.mediaroom.com/index.php?s=43&item=611>
- [31] 深町（2004）（野菜情報・調査報告（海外）、農畜産業振興機構：<http://vegetable.alic.go.jp/yasaijoho/kaigai/0409/0409kaigai1.html>）
- [32] Food Valley (<http://www.foodvalley.nl/English>)



1-4-1 作物増産技術



1-4-2 持続農業



1-4-3 機能性作物の創出

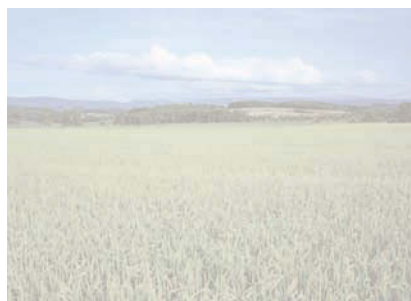
「作物増産技術」に関する科学技術・研究開発の国際比較と注目動向

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	・イネではゲノム解読に引き続き、充実したゲノムリソースの整備やそれらを利用した出穂期やシンクサイズに関する研究は極めて高い。 ・耐病虫性に関する研究水準も高い。 ・飼料作物ではトウモロコシ、ソルガム、ペレニアルライグラスなどを中心にゲノム、形質転換、QTLに関する研究論文が多い。 ・最先端のイネゲノム研究を基盤に、同じイネ科の飼料作物への応用研究が開始されている。 ・世界的に牧草地の乾燥ストレスに関する論文が多い中で、耐湿性のQTLなど降水量の多い我が国特有のストレス耐性に関する研究に特色がある。 ・高密度DNAマーカー連鎖地図開発はトマト、ナス、ピーマン、ハクサイ、ネギ、メロンなどで世界と比肩しうる成果を上げている^[1-7]。実用系統を母本に用いた応用研究指向に特色があり、病害抵抗性、着果特性、開花特性等の重要農業形質の遺伝解析における研究水準は高い。 ・26,000点を超える数多くの遺伝資源を収集し、その保存・評価を継続的に進めている^[8]。トマト、メロンでは誘発突然変異系統群の開発研究も行っている^[9-10]。 ・アブラナ科の自家不和合性の遺伝機構に関する研究では世界トップクラスの研究水準を維持^[11]。ネギ類の細胞遺伝学でも特色のある研究を展開^[12]。 ・トマトゲノム解読ではこれまでのモデル植物での経験を生かし、最終とりまとめ段階で主導権を確保^[13]。 ・次世代型シーケンサーを駆使した非モデル植物ゲノムのDe NovoシーケンシングやDNA多型データの大量取得とゲノム選抜への利用などの最新研究トレンドに対する取り組みは世界的にみて大きく遅れている。
	技術開発水準	◎	→	・イネでは飼料用の固定品種の育種が進んでいる。 ・マーカー選抜への応用も進んでいるが、収量に関するゲノム育種はイネなどを除きまだ未開拓である。 ・ハイブリッド、種属間雑種などを利用し、我が国の気候に適した高収量の飼料作物品種の開発が行われている。飼料イネの品種開発、生産技術開発では世界をリードしている。 ・民間企業における実用品種育成の水準は世界でもトップレベルであり国内生産における国内育成品種のシェアは極めて高い。輸出産品として国外でも高い評価を受けている^[14]。 ・新規遺伝資源の導入と育種素材化、パイロット品種育成については独法研究機関を中心に研究を推進しておりその水準も高い^[15]。 ・ウリ科、ナス科等では複合病害抵抗性や高収量性をもたらす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^[16-17]。 ・ほとんどの野菜品種はF1化が進んでいる。自家不和合性研究の基礎知見を生かし、また、独自のCMS素材開発によってアブラナ科のF1採種システムを確立^[18-19]。ナス科でも独自のCMS素材を開発し、採種システムを開発中^[20]。

	産業技術力	○	→	・イネ、ダイズ、コムギの育種については、独立行政法人や公立研究機関による品種開発が中心。民間育種はほとんどなくなった。 ・コメの価格が低く抑えられており、米生産基盤の維持は将来大きな問題となる。 ・米国に比べて規模は小さいが、公的機関、民間企業において品種開発が行われている。 ・民間種苗会社における品種育成の技術水準は極めて高く、その高い品質と純度が高評価を受けている。野菜の品質は外観・食味などに日本独自の方向性があり欧米でのニーズとの互換性は低い、日本の高品質・高日持ち性品種への評価が高い中国、東南アジア等に種苗を販売するなど販路を広げている^[14] ・中国での高付加価値をもつ野菜生産では日本品種が多く用いられている。中国での輸入種子におけるシェアは我が国が1位で、2位の米国の2倍以上となっている^[21]。 ・企業規模は海外のバイオメジャーと比較して小さく、買収圧力への対抗措置として、ゲノム情報利用技術の開発力向上が喫緊の課題となっている^[14]。
米国	研究水準	○	↑	・イネでは、ゲノム解読における貢献は大きかったが、その後の多収性育種に関する研究レベルは低い。 ・ダイズは、ゲノム研究に引き続き、大手種子会社や USDA などにおいて病害抵抗性、ストレス耐性などの研究が中心。 ・コムギについては、塩基配列解読の国際コンソーシアムの重要なメンバー。 ・トウモロコシを中心にいずれの飼料作物においても米国のゲノム、形質転換、QTL、生理に関する基礎研究レベルは非常に高く、世界をリードしている^[22]。 ・ジョージア大学等の研究グループは飼料用トウモロコシ品種 B73 のゲノム解読、アイオワ州立大学等の研究グループはソルガムのゲノム解読を 2009 年に終了している。 ・現在、USDA と DOE の支援により大学、公立研究機関の共同で、高バイオマスイネ科作物のゲノムの完全解読を進めている^[22-23]。 ・とくに飼料作物の収量、高消化性、ストレス耐性に関わる研究水準は高く、高収量、糖化性、低リグニンなど飼料作物と育種目標に近いバイオ燃料の研究に応用されている。 ・大学と USDA との共同研究体制をとり、遺伝資源の収集・保存・利用において、多くの品目で世界をリードする^[24]。 ・トマト^[25]、キュウリ^[26]、メロン^[27]、スイカ^[28]、キャベツ^[29]、タマネギ^[30] など主要な野菜においてそれぞれ大学・USDA 等を中心に高密度連鎖地図開発や QTL 解析、重要遺伝子の単離と機能解析など基礎的な研究とリソース開発が進められている。 ・トマトをモデルとした果実成熟機構の解明研究では非常に高い研究レベルを維持し、世界をリードしている^[31-32]。アブラナ科の自家不和合性に関する基礎研究でもその研究水準は高い^[33]。
	技術開発水準	◎	↑	・米国では大学、公的機関、民間企業、農業経営者が一体となり、基礎研究の実用化、開発された生産技術の普及が行われている。 ・イネの開発は USDA を中心に高収量だけでなく、高消化性、高糖性などバイオマスの質、ストレス耐性に関する基礎研究の実用化、技術開発に積極的に取り組んでいる。 ・飼料作物の品種開発において、世界をリードしている。 ・大学では基礎研究だけでなく品種開発プログラムも推進されている^[34-35]。 ・バイオメジャーは公的機関の研究成果のみならず、自前での研究開発に力を入れており、ゲノム情報を利用した品種開発に積極的に取り組んでいる。
	産業技術力	◎	↑	・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^[14]。その総合的な産業技術力は極めて高い。



1-4-1 作物増産技術



1-4-2 持続農業



1-4-3 機能性作物の創出

欧州	研究水準	◎	↑	・大学、公立研究機関、民間企業における研究水準は高く、コムギ、オオムギなどムギ類を中心に、ゲノム解読に着手している。英国等の欧州各国での多年生イネ科牧草、マメ科牧草の遺伝、育種に関する研究を行っており、マーカー選抜のための飼料作物データベース (FoggDB)^[36] を公開している。 ・トマト、ジャガイモについて英国・ドイツ・オランダ・フランス・イタリア・スペインなどを中心に EU のプロジェクトを組織^[37]。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。トマトゲノム解読を立ち上げた米国から主導権は現在では欧州へ移っている。 ・オランダでは大学・企業・公的研究機関が連携した分子育種および食品産業のクラスターをワーゲニンゲンに拠点化。中堅・中小の種苗会社とバイオベンチャーが集結^[38]。 ・スペイン・フランス・イスラエルを中心にメロンのゲノム研究を推進。病虫害抵抗性^[39-40]や雌雄判別^[41]等の重要農業形質の遺伝子単離が進む。 ・アブラナ科では INRA (フランス) で細胞質雄性不稔の基本特許を保有^[42]。英国ではゲノム解読を先導^[43]。ドイツでは代謝産物や形態・生態特性についての QTL 解析やアソシエーション解析が進んでいる^[44-45]。 ・SPICY プログラム：収量性に関与する多数の構成要素を RIL を用いて複数の場所で複数年次の測定データから解析。生育モデル構築へつなげ、収量性の遺伝的解析を目指す。ピーマンをモデルとして、オランダ、フランス、スペインを中心とした欧州の多くの研究機関が参画^[46]。
	技術開発水準	◎	↑	・EU などの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。 ・バイオメジャーの 1 つバイエルが中国 (BGI)、オランダ (キージーン) などと共同でナタネの全ゲノム配列を解読。キャベツ類、ハクサイ類へ波及^[47]。 ・シンジェンタ、バイエルなどの巨大企業が独自開発したゲノム情報を利用した品種開発・遺伝子特許開発を推進^[48]。中堅・中小企業は大学・公的研究機関と連携しクラスターを形成^[14,49]。
	産業技術力	◎	↑	・オランダを中心として園芸分野において高い技術水準を維持。世界をリードする品種開発技術を誇る。 ・脂肪酸組成などの成分育種 (アブラナ科)^[50]、異種間交雑による有用遺伝子の導入 (キャベツ類^[48]、タマネギ^[51])、栄養繁殖から種子繁殖への変換 (ニンニク) などの先導的形質についても、DNA マーカー技術を用いて実用化し品種開発へつなげている。
中国	研究水準	○	→	・ハイブリッドの親品種の改良に、ゲノム育種が導入されつつある。 ・近年の遺伝子研究の水準は急速に高まっており、出穂期、種子数、草型などに関与する遺伝子の解析が進んでいる。 ・ハイブリッドの親品種を材料に、有用形質に関する遺伝解析が進展。 ・北京ゲノム研究所 (BGI) では野菜を含めあらゆる生物種のゲノム解読を次世代型シーケンサーで強力に推進。欧米との協力や海外留学を経た帰国研究者らによってその研究水準は急速に向上。キュウリ^[52]、ハクサイ^[53]のゲノム配列データを大量解読。今後数年で 1,000 種の動植物種のゲノム解読を計画^[54]。 ・キュウリについては国際コンソーシアムにおいて連鎖地図作成、EST 解読、全ゲノム解読に中心的役割を果たす^[51-55]。これを利用した QTL 解析や遺伝子単離の報告も多く^[56-57]、キュウリゲノム研究では世界をリードする存在。 ・国境を接する近隣アジア諸国からナス、ピーマン (トウガラシ) などの非常に大きな多様性を持つ遺伝資源を収集。 ・トウモロコシ等の飼料作物におけるゲノム研究などの分野で連携研究を行っており、ある程度高い研究水準を有する。

	技術開発水準	△	↑	・自家食用では中国産品種が使われているが、都市周辺、海外向け産地などでは国外種苗メーカーの品種が多く利用され、外国企業の技術への依存度が高い。外資系種子の販売量が増加、全体の 50% 以上を占める^[58]。 ・遺伝子組換え野菜の開発・実用化を積極的に進めている^[59]。
	産業技術力	△	↑	・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（主にインディカ種）を中心に、技術力は極めて高い。ゲノム情報を活用することにより、さらなる品種改良とその普及が期待されている。 ・公的機関（農業科学院など）が品種開発の中心を担う。大学がそれに次ぐ勢力であり、民間（農業法人）の勢力は小さい。品種開発から普及までを産学官連携で推進している。育種の水準はそれほど高くないが、DNA マーカーを利用した育種にも取り組み始めている。 ・ウイルス抵抗性の遺伝子組換えトマトおよびピーマンが商業栽培されている^[60]。
韓国	研究水準	△	→	・ハクサイの全ゲノムシーケンスの国際プロジェクトを立ち上げ、中心的に推進してきたが、昨今では中国と英国に主導権を奪われた感がある^[61]。 ・トウガラシのゲノムリソース開発では国際的に高く評価される研究展開を行っている^[61-63]。トマトのゲノムシーケンシングにも参画し、平均水準以上の貢献を果たしている^[63]。 ・韓国の飼料は、濃厚飼料と稲ワラ中心で、日本と同様輸入に依存している。そのため、飼料作物の研究活動度はあまり高くなく、国立の作物研究所、畜産研究所における飼料作物の研究規模も小さい。最近、飼料用のイネ、オオムギ、ライムギ、ライコムギ、エンバクの開発研究を行っている。また、緑色技術研究開発政策により、バイオ燃料用のスイートソルガム、ミスカンザス等のエネルギー作物の開発に重点をおいている。
	技術開発水準	△	→	・ダイコンの新たな CMS を見だし権利化するなど一定水準の技術開発力はある^[64]。 ・飼料作物の品種開発水準はあまり高くない。バイオ燃料用のスイートソルガム、ミスカンザス等のエネルギー作物の開発を開始している。
	産業技術力	△	→	・海外資本の民間企業においてハクサイやダイコンの F1 品種開発を進める。日本企業の育種素材に利用されている。 ・種苗開発会社は自国用品種開発のほか、日本への種子輸出のための品種開発・採種技術に定評があったが、メジャー企業による買収が進み、日本向け品種の育成技術力は低下^[65]。 ・飼料作物育種に関する技術力は低い。

全体コメント：（イネ研究）研究開発は日本がこれまで圧倒的にリードしてきた。米国は、イネのゲノム解読を積極的に進め追い上げを図っている。一方、近年、中国の研究レベルが遺伝子機能解析を中心に急速に高まっている。品種開発では、日本は自殖固定品種中心の品種開発であるが、中国南部ではハイブリッド育種が中心、北部においてもジャポニカ種のハイブリッド育種が注目されている。ハイブリッド育種に関しては、インドやベトナムの取り組みが注目される。

（野菜研究）先端的植物科学、特にゲノム情報を利用した画期的新形質を持った植物の開発という観点から我が国の野菜研究をみた場合、欧米に比べ人的・資金的研究リソースに乏しいなかで我が国独自の発展を遂げ、一定の研究・技術開発水準を確保しつつ高品質で高付加価値をもつ種苗開発へとつなげて国際競争力を確保してきている。しかし、急速に進むゲノム情報開発の高速化・個別化やそれに伴う研究開発トレンドの急激な変化への対応が遅れ気味であり、早急な対策が求められる。欧米ではバイオメジャーの豊富な資金力と産学官連携による高い研究水準によって世界をリードしている。欧州で特にみられる中堅・中小セクターの連携構築のアクティビティも注目される。中国では BGI に代表されるゲノム解読センターの台頭が注目され、国際的な共同研究開発におけるプレゼンスの向上が著しい。これをどのように自国の技術開発・産業技術力向上へつなげるかは今後の課題である。韓国はハクサイおよびトウガラシで国際的に高い基礎研究水準を維持していたが、その主導権を欧州および中国に奪われつつある。主要種苗メーカーのバイオメジャーへの吸収に伴い人的資源の流動化がみられ、技術水準も低下傾向にある。

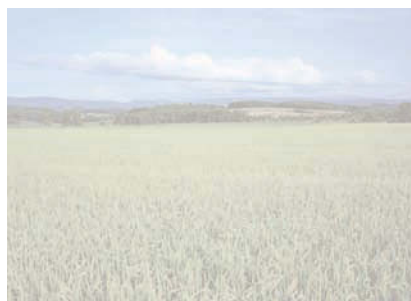
（飼料作物研究）基礎研究、技術開発ともに飼料を大量に輸出している米国が世界をリードしており、大学、公立研究機関が連携し、飼料用トウモロコシ、ソルガムのゲノム解読を終了している。日本は米国に比べると、飼料作物に関する研究活動度は小さいが、イネゲノム研究を基盤とするゲノム、QTL に関する基礎研究、品種開発のポテンシャルは高い。オーストラリアの他に、中国、ブラジル、インドなどの新興国における研究活動が増加している。日本の飼料イネ研究は、中国、韓国をリードし、多数の専用品種の開発が行われている。

（注 1） 現状 [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている]
 ※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。

（注 2） トренд [↑：上昇傾向、→現状維持、↓下降傾向]



1-4-1 作物増産技術



1-4-2 持続農業



1-4-3 機能性作物の創出

【注目動向】

- ・ DNA マーカー技術・遺伝子解析技術が種苗開発に不可欠であるとの認識が育種企業に浸透。これらの技術を独自開発できるバイオメジャーが中堅規模の種苗メーカーを吸収し、野菜の種苗開発へ進出する動きが目立つ。
- ・ 次世代型シーケンサーの普及により、野菜などの非モデル作物のゲノム解読が欧米および中国で急速に進む。DNA マーカー開発につながる系統間 DNA 多型情報をリシーケンシングによって大量取得できる基盤が多くの品目で構築されつつある。
- ・ 一定の資金力を持つセクターによる全ゲノム情報および網羅的 DNA 多型情報取得が可能となり、情報のプライベート化・囲い込みが一般化しつつある。
- ・ ゲノム解読の完了を見据え、EU のグラントによりトマトおよびジャガイモのゲノム情報利用による総合プロジェクト (EU-SOL) が稼働。

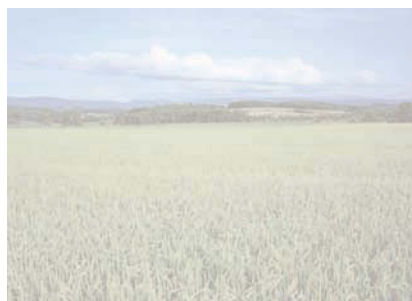
引用文献等

- [1] Shirasawa et al. (2010) Theor. Appl. Genet. 121: 731-739.
- [2] Ohya et al. (2009) Mol. Breed. 23: 685-691.
- [3] Nunome et al. (2009) Theor. Appl. Genet. 119: 1143-1153.
- [4] Fukuoka et al. (2010) Gene 450: 76-84.
- [5] Suwabe et al. (2006) Genetics 173: 309-319.
- [6] Tsukazaki et al. (2008) Theor. Appl. Genet. 117: 1213-1223.
- [7] Fukino et al. (2008) Theor. Appl. Genet. 118: 165-175.
- [8] NIAS Gene Bank (http://www.gene.affrc.go.jp/index_en.php)
- [9] Saito et al. (2009) J. Jpn. Soc. Hort. Sci 78: 6-13.
- [10] Ezura and Fukino (2009) Plant Biotechnology. 26: 359-368.
- [11] Suzuki et al. (2009) Plant Cell Physiol. 50: 1857-1864.
- [12] Masuzaki et al. (2007) J. Hort. Sci. Biotechnol. 82: 393-396.
- [13] http://solgenomics.net/genomes/Solanum_lycopersicum/index.pl
- [14] 初田 (2009) TechnoInnovation 73: 11-16.
- [15] 農水省技術会議事務局 農業新技術 2008 (あのみり)、同 2010 (フユヒカリ) (http://www.s.affrc.go.jp/docs/new_technology.htm)
- [16] 農研機構プレスリリース (<http://vegetea.naro.affrc.go.jp/press/20081031/20081031.html>)
- [17] 松尾ら (1985) 野菜試報 C8: 1-22.
- [18] 植工研、特開平 1-218530、特開平 2-303426、特開平 6-141716
- [19] サカタのタネ、特開平 7-31307
- [20] Saito et al. (2009) J. Jpn. Soc. Hort. Sci. 78: 425-430.
- [21] 2008 年中国税関統計
- [22] USDA-ARS 2009. National Program 301. Plant genetic resources, and genetic improvement. Annual Report FY 2009.
- [23] Xu, Y., D.J. Skinner, Wu, H., Rojas, N. Araus, J.L., Yan, J., Gao, S., Warburton, M.L. and Crouch, J.H. 2009. Advances in maize genomics and their value for enhancing genetic gains from breeding. Int. J. Plant Genomics 1-30.

- [24] GRIN (<http://www.ars-grin.gov/>)
- [25] Fulton et al. (2002) *Plant Cell* 14: 1457-1467.
- [26] Robbins et al. (2009) *Theor. Appl. Genet.* 119:621-634.
- [27] Cuevas et al. (2008) *Theor. Appl. Genet.* 117:1345-1359.
- [28] Levi et al. (2006) *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 131:393-402.
- [29] Li et al. (2003) *Theor. Appl. Genet.* 107:168-180.
- [30] Kuhl et al. (2004) *Plant Cell* 16:114-125.
- [31] Sheehy et al. (1988) *Proc Natl Acad Sci U S A.* 85:8805-8809.
- [32] Oeller et al. (1988) *Science.* 254:437-439.
- [33] Nasrallah et al. (2002) *Science* 297:247-249.
- [34] Univ. Florida/IFAS (Tomato Breeding Program, <http://tombreeding.ifas.ufl.edu/>)
- [35] New Mexico State Univ. (Onion Breeding Program, <http://onion.nmsu.edu/>)
- [36] <http://ukcrop.net/perl/ace/search/FoggDB>
- [37] EU-SOL (<http://www.eu-sol.net/>)
- [38] Food Valley (<http://www.foodvalley.nl/English>)
- [39] Genoplante-Valor et al. (2004) WO/2004/072109.
- [40] Nieto et al. (2006) *Plant J* 48: 452-462.
- [41] Boualem et al. (2008) *Science* 321: 836-838.
- [42] 酒井 (2006) 育種学研究 7 (別 1,2) 38-39.
- [43] Brassica Info (<http://www.brassica.info>)
- [44] Lou et al. (2007) *J Exp. Bot.* 58: 4005-4016.
- [45] Zhao et al. (2007) *Genome* 50: 963-973.
- [46] SPICY (<http://www.spicyweb.eu/>)
- [47] Bayer Crop Science (<http://www.bayercropscience.com/bcsweb/cropprotection.nsf/id/8AAD8BA3537C1DDBC125764A002DE77C>)
- [48] Syngenta Participations AG (2004) WO2004013334
- [49] KeyGene N.V. (2007) WO2007100243
- [50] http://www.bayercropscience.com/bcsweb/cropprotection.nsf/id/SF_Laga
- [51] SeedQuest, (2006) (News release 16,043, <http://www.seedquest.com/News/releases/2006/june/16043.htm>)
- [52] Huang et al. (2009) *Nature Genet.* 41:1275-1283.
- [53] <http://brassicadb.org:8081/brad/index.php>
- [54] <http://ldl.genomics.org.cn/page/index.jsp>
- [55] Ren et al. (2009) *PLoS ONE* 4 (6) e5795.
- [56] Liu et al. (2008) *J. Phytopathol.* 156: 691-697.
- [57] Li et al. (2009) *Genetics* 182: 1381-1385.
- [58] 法制日報 (2010.3.16) : 国家知識権保護局・副局長談話
- [59] Chen et al. (2003) *Toxicology* 188: 297-307.
- [60] ISAAA (2009) (Global Status of Commercialized GM Crops, <http://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/41/pptslides/default.asp>)



1-4-1 作物増産技術



1-4-2 持続農業



1-4-3 機能性作物の創出

- [61] BrGP (<http://www.brassica-rapa.org>)
- [62] Kim et al. (2008) BMC Plant Biol. 8:101.
- [63] Lee et al. (2007) Plant Biotechnology 24: 11–16.
- [64] Nahm et al. (2005) Theor. Appl. Genet. 111:1191-1200.
- [65] 深町 (2004) (野菜情報・調査報告(海外)、農畜産業振興機構 : <http://vegetable.alic.go.jp/yasaijoho/kaigai/0409/0409kaigai1.html>)

矢野昌裕 (農業生物資源研究所)、福岡浩之 (野菜・茶業研究所)、大川泰一郎 (東京農工大学)

1-4-2 持続農業

【概況】

世界人口の増加に比べて、世界の耕地面積は増加することなくほぼ一定で推移している^[1]。人口増に伴い、優良農地は都市化される。食糧生産を支えているのは単位面積あたりの収量増である。収量増のためには、品種改良に伴った肥料、農薬の利用が不可欠であるが、これらが農地土壌の劣化や環境負荷の原因となっている。現代の農業は窒素肥料無しには成立しない。1910年代にハーバーとボッシュによって開発された大気中の窒素をアンモニアに還元する方法を用いて、人類は無尽蔵の窒素肥料資源を手にしたが、その一方でこれにより地球の窒素循環において、生物によって固定される窒素に匹敵する窒素が化学的に固定され、環境に放出され続けている^[2]。リン酸やカリウムは重要な肥料成分であるが、資源は限られており^[3]、リン酸肥料の原料であるリン鉱石は産出国である米国や中国が既に輸出禁止措置をとっている。このような状況において、環境負荷を低減し、エネルギー消費を抑ええた長期に亘って持続できる農業が求められている。

持続農業の実現には、低肥料、低農薬、不良土壌での生産向上、環境低負荷、高効率水利用農業が必要である。窒素肥料の合成には世界の原油消費の数%が利用されているとされ、窒素肥料の低投入化は環境に流亡する窒素の量を減らすことができるだけでなく、世界の原油消費を減らすことに貢献する。リン酸やカリウム資源を海外に依存している日本では低肥料農業は国の食糧安全保障上も重要である。低農薬等による低環境負荷農業は持続できる環境の維持、ひいては人類の将来に亘る生存に不可欠である。通常の作物の生育に適さない不良土壌でも生育する作物を開発することは、地球全体の環境を保全しつつ持続的に農業を営む為に重要である。また、農業活動により農耕地から亜酸化窒素ガス（ N_2O ）やメタンなどの温室効果ガスが発生しており、この低減化が必須である。

これらの重要な課題の多くについては、既にシーズとなる知見が得られている。低肥料でも生育する植物^[4]や、病害に抵抗性を示す植物は既に実験レベルでは開発されている^[5]。低肥料農業に貢献する根粒菌や菌根菌などの共生微生物に関する基礎知見や、環境負荷低減化に役立つ土壌微生物の動態や機能についての知見も蓄積されて来ている。これらの知見をより幅広い分野と統合させることにより、農業に役立ち、将来にわたって持続可能な農業を実現できるようになるであろう。

引用文献等

[1] <http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/anpo/5-5.html>

[2] <http://www.nikkei-science.com/page/magazine/9712/N.html>

[3] http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h20_h/trend/part1/chap1/t1_03.html

[4] Miwa et al., Plant Journal. 46, 1084 (2006); Miwa et al., Science 318,1417 (2007); Ishimaru et al., Proceedings of the National Academy of Sciences USA 104: 7373 (2007)

[5] Fukuoka et al., Science 325, 998 (2009)

【低肥料農業】

緑の革命は単位面積当たりの穀物生産の倍増をもたらしたが、この農法は同時に施肥、特に窒素肥料を多く要求する。窒素肥料の吸収効率（施用した肥料のうち、植物に吸収される割合）は通常 30% 程度であり、それ以外の肥料は環境に放出される^[1]。放出された窒素などの肥料成分は湖沼の富栄養化や海洋の赤潮の原因となる。収量を低下させずに肥料の投入量を低下させられれば、環境負荷を低減し、肥料製造や輸送、散布に必



1-4-1 作物増産技術



1-4-2 持続農業



1-4-3 機能性作物の創出

要なエネルギー消費を抑えることができる。

低肥料農業の実現には三つの道筋が考えられる。一つは施肥手法の改善である。施肥は通常植物の根から離して行う。これは高濃度の有効成分を含む肥料が根に触れると根に障害を与えるためである。根から離れた場所に与えられた肥料は土壌溶液中を拡散し根に到達するため、吸収効率が落ちてしまう。この欠点を改善するために、肥料成分が容易に溶けださない肥料（緩効性肥料）が開発され、イネの場合には苗箱に直接肥料を与え、そのまま収穫まで生育させる手法が開発されている。この方法にすると、肥料の吸収効率は70%以上にまで高まる。しかし、この手法には問題点もある。緩効性肥料は高価であること、栽培体系の変更が必要となることである。

もうひとつの手法としては、植物の養分の吸収効率を高めたり、吸収された養分の利用効率を高める方法である。近年の植物科学の進歩により、栄養吸収に働くトランスポーターを活性化することによって、植物の養分吸収を効率化し、生育を改善することが実験室レベルでは可能になっている^[2]。また、植物の根から土壌に存在する不溶性の栄養素（鉄）を可溶化させる酵素を放出させ、養分吸収を高めることにも成功している^[3]。さらには、転写因子を利用して吸収された養分の利用効率を高めることによって、植物の生育を改善することにも成功している^[4]。これらの技術のシーズを発展させ、実際の作物や農業に役立てることによって、世界の農業の低肥料化に貢献できる。

もう一つは土壌の共生微生物の利用である。根粒菌や菌根菌と呼ばれる土壌の微生物が植物と共生することで、植物は空気中の窒素ガスからアンモニアを得ることができるようになり、菌根菌が感染することで土壌中に固定されたリン酸が吸収されやすくなる。これらの微生物の利用によって低肥料化を実現できる可能性がある。

低肥料化と共に重要な課題は、不良土壌に耐性な植物の作出である。世界の陸地の3割は酸性土壌、4割はアルカリ性土壌であるといわれている。塩類集積土壌も広がっており、これらの土壌での植物生育は不十分であり、農業生産に適さない。これら土壌での植物生育の阻害は、不良環境での養分吸収の阻害である。低肥料耐性の植物の作出は、不良土壌での作物生産につながり、これまで未利用の土地が利用されることによって、世界の農業生産を押し上げる効果がある。

研究レベルで成功している低肥料農業を可能にする植物改良を農業に役立てるためには、各種作物のゲノム解読と遺伝子情報の基盤整備、世界各地の実情に応じた低肥料農業に適した肥料の開発と普及等、様々な分野の協力が必要である。

引用文献等

- [1] 森 敏ら 「植物栄養学」 文永堂出版
- [2] Miwa et al., Plant Journal. 46, 1084 (2006)
- [3] Suzuki et al., Soil Science and Plant Nutrition 54: 77 (2008)
- [4] Yanagisawa et al., Proceedings of the National Academy of Sciences USA 101, 7833 (2004)

【減農薬農業】

農薬は現代農業に不可欠な資材である。農業では広い面積に同じ種類の植物を栽培することが多く、特定の害虫や病気の影響を受けやすくなる。ジャガイモに発生した疫病が19世紀のヨーロッパを食糧危機に陥れ、特にアイルランドで飢饉をもたらしたことは有名である^[1]。より最近の例では、ハワイのパパイアが1990年代にパパイヤリングスポットウイルスによって壊滅的な被害を受けたが、その後、ウイルス抵抗性を付与する

遺伝子を導入したパパイヤが栽培されるようになり生産は持ち直している。ハワイのパパイヤのほとんどは遺伝子組み換えである。2009年には日本政府による安全性確認が行われ、輸入が行われるようになっている^[2]。現在でも病虫害は作物生産を阻害している。アフリカではイナゴの大発生が作物生産に壊滅的な被害を与えている。

このような病虫害に対抗する手段として、農薬が使われて来た。病虫害に毒性を示し、植物には比較的毒性の低い物質を農薬として散布することで、害虫をおさえ、病気を抑制し、作物生産を守って来た。しかし、その一方で、農薬の毒性が、農家の健康被害に結びついたり、農地に残留した農薬が、耕作等に影響をおよぼしたり、農薬が害虫だけでなく、益虫にも影響を与え、ひいては生態系に影響を及ぼしたりしたため、農薬は悪いイメージを持たれるようになってしまっている。実際は現在の日本の農業で用いられる農薬は、残留性や毒性の低く、選択性の高いものが大半であり、使用方法も厳密に管理されるようになったこともあり、農薬による健康上の実害は報告されていない。しかしながら、長期的には作物の病虫害耐性を高めることは、持続農業の実現に極めて重要である。

このような観点から、植物と病虫害の相互作用についての研究が長年行われて来ており、植物病虫害に対する耐性を付与する遺伝子が発見され、前述のパパイヤの例の様に一部既に利用されている。病原体のゲノム解析もすすめられている^[1]。害虫に対しても毒性を示す細菌由来の遺伝子を導入することによって、トウモロコシや綿の害虫による食害が軽減されるようになっている^[8]。しかし、一方で、病原菌や害虫は絶えず進化をしており、植物側の持つ耐性遺伝子を打ち破る病原菌や害虫が出現するようになっている。今後のグリーン・イノベーションに向けた持続農業の発展には、絶え間なく病虫害に対する抵抗性遺伝子を同定し、それを作物から単離したり、作物に導入することによって、病原菌や害虫の進化に対応できるような遺伝子資源を持つ必要がある。

また、もう一つの大切な研究課題は植物ウイルスに対する耐性の付与である。植物ウイルスに有効な農薬は開発されていない。植物ウイルスの複製機構等が明らかになりつつある今、植物ウイルスに対してのみ作用する薬剤の開発も可能であると思われる。また、植物ウイルスの植物への感染過程の研究が精力的に進められて来ており、そのような研究からこれまでに無い新たな植物ウイルスに対する抵抗性付与の手法が開発されることが重要である。

引用文献等

[1] Haas et al., Nature 461, 393 (2009)

[2] <http://www.niaes.affrc.go.jp/magazine/118/mgzn11804.html>

[3] http://www.biotech-house.jp/glossary/glos_103.html

【高効率水利用農業】

近年の人口増加に見合った農業生産は、灌漑農業による面が大きい。米国中西部、オーストラリア、地中海沿岸諸国などの比較的降水量の少ない地域だけでなく、中国や東南アジアや南アジア等でも灌漑は重要である。日本の水田の灌漑は河川水が主で、地下水に頼る地域でも、十分な降水量があるために、水源が枯渇することは少ないが、灌漑に頼った農業の中でも半乾燥地での地下水に頼った農業は地下水の枯渇を既に招いている。また、灌漑水が蒸発することによって、土壌に塩類が集積し、植物生育を阻害するようになっていく。オーストラリアやトルコ等では、塩類に加えてホウ酸の土壌への蓄積が作物の生育を阻害するようになってしまっている。このような問題から世界各地で農地が作物生産に適さなくなり、放棄されるようになっている。持続的



1-4-1 作物増産技術



1-4-2 持続農業



1-4-3 機能性作物の創出

農業には、このような負の連鎖を断ち切る技術開発が必要である。

水利用の効率化には、水管理技術の改善が重要である。水分保持能のある資材を用いた栽培や、灌水方法の改善によるさらなる水利用の効率化を図ることが重要である。

また、もう一つの戦略として植物の改良が有効である。乾燥地でも地下には水分が残されている場合が多く、深く根を張ることのできる植物の開発や、乾燥や塩類集積土壌でも生育できる植物の開発、ホウ素を過剰に含む土壌でも生育できる植物の開発が重要である。この分野においては、日本研究が世界をリードしている。乾燥に対して耐性を付与する転写因子が同定され、その転写因子の発現を乾燥条件でだけ高めることによって、乾燥に耐える植物を作出することに成功している^[1]。また、ホウ素の輸送体を利用して、高い濃度のホウ素を含む土壌でも生育できる植物の開発も報告されている^[2]。アルカリ塩類が集積するような場合には、鉄をはじめとする金属の吸収効率が落ちてしまうが、遺伝子導入によって、アルカリ塩類が集積した土壌でも生育することのできる植物が作出されている^[3]。これらは、いずれも日本発の優れた研究成果である。

この日本発の優れた研究成果を持続農業の展開につなげていくためには、日本国内における組換え植物の実験圃場の整備、開発主体を日本で作ること、などの課題が残されている。

引用文献等

[1] http://park.itsc.u-tokyo.ac.jp/pmp/Research/Res3_j.html

[2] Miwa et al., Science 318,1417 (2007)

[3] Ishimaru et al., Proceedings of the National Academy of Sciences USA 104: 7373 (2007)

【低環境負荷農業】

持続農業は環境に負荷をかけない農業である。農業は土壌から温室効果ガスを発生させ環境に負荷を与えている。CO₂に比べて温室効果が高いとされるメタンやN₂Oが農耕地土壌から発生している。これらのガスは土壌中の微生物の働きにより特定の環境下で発生するものであり、発生に関与する土壌微生物や環境要因を知り、制御することによって、発生の低減化を図ることができる^[1]。

農業は前述のように肥料、農薬に由来する環境負荷をかけており、それらの使用の低減化には土壌微生物が貢献する。

土壌微生物には、空気中の窒素を固定する能力を持つものも多く含まれている。マメ科植物と根粒を作る根粒菌だけでなく、植物の根や茎などに侵入するエンドファイトと呼ばれる一群の微生物は窒素固定に貢献しており、これらエンドファイト等の窒素固定能を持つ微生物についての解析を進めることを通じて、窒素固定の効率化を図り、窒素肥料の施用を低減することが重要である^[2]。

エンドファイトや植物の葉面や根圏に生息する土壌微生物には、植物の病気に対する抵抗性を高めたり、植物病原菌の感染を防いだりする作用を持つものがある。これらの微生物を活用する事は農薬の低減化につながる^[3]。

土壌中に生息して作物に感染する土壌病害菌や作物の根に寄生する線虫による被害は甚大である。感染が広がると広範囲の土壌の薬剤消毒が必要となり周辺環境への負荷が大きい。一方で、土壌の他の微生物が土壌病害を抑止することもある。そのため、土壌の生物性を解析・評価して、土壌病害や線虫害を予測・早期診断・予防する手法を開発する必要がある^[4]。

土壌－植物圏の微生物の解析はこれまで培養を基に行われて来ていたが、土壌に存在する微生物の99%以上は培養困難であると考えられている。この難培養微生物も含めて土壌生物の群集構造や機能を調べる手法として、土壌から生物由来のDNAやRNAを直接抽出し、様々な分子生物学的手法により解析する方法がある。

近年は、DNA シーケンス技術の急速な発展により、土壌 DNA・RNA 情報を丸ごと解析する「メタゲノミクス」が確立されつつある^[5]。これらの方法を駆使することで、温室効果ガス発生の低減化技術、有用エンドファイトの発見と利用、土壌病害・線虫害の早期診断と予防技術などにつながると期待される。

引用文献等

- [1] IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, Chapter 8: Agriculture
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch8.html
- [2] 化学と生物、43,788-794 (2005)
- [3] 微生物と植物の相互作用－病害と生物防除－、百町・對馬編、ソフトサイエンス社 (2009)
- [4] http://www.niaes.affrc.go.jp/project/edna/edna_jp/index.html
- [5] 難培養微生物研究の最新技術Ⅱーゲノム解析を中心とした最前線と将来展望ー、大熊・工藤編、シーエムシー出版 (2010)

「持続農業」に関する科学技術・研究開発の国際比較と注目動向

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↑	・植物の養分吸収や栄養条件に対する応答に関する大学・公的機関における基礎研究レベルは極めて高く、研究成果も多い。 ・特に鉄、ホウ素、亜鉛、ケイ素、カドミウム等の微量元素、有用元素、有毒元素についての研究は群を抜いている。 ・乾燥耐性植物の作出を世界に先駆けて成功させ、耐性機構の研究が精力的に進められている。 ・植物病原菌に対する応答に関する研究レベルも高く、世界から注目されている。 ・土壌微生物の解析手法の開発や解析分野で世界をリードしている。
	技術開発水準	○	↑	・低肥料耐性を付与する遺伝子や乾燥耐性を付与する遺伝子等について特許が取得されている。 ・これらの遺伝子を導入した植物の圃場試験が行われ、実用化へ向けた試験が進んでいる。 ・作物への遺伝子導入技術も開発されつつある。
	産業技術力	○	↑	・作物改良への企業の参入は限定的である。土壌微生物を利用した技術については、建設会社などが国際競争能力のある技術力を持っている。 ・遺伝子組み換え植物の受け入れには時間を要する。
米国	研究水準	○	↑	・米国の大学・公的機関における基礎研究レベルは一般的に高いが、低肥料耐性耐性を示す植物の開発については、日本に比べて研究開発は遅れている。 ・病害抵抗性に関しては、研究水準は極めて高く、多くの重要な遺伝子が見いだされている。 ・塩類障害に対する耐性を付与する遺伝子を世界に先駆けて発見している。
	技術開発水準	◎	↑	・遺伝子組み換え植物の開発に強みを持っている。 ・微生物を利用した取り組みにも強みを持っている。微生物ゲノム、メタゲノム解析と解析データのインフォマティクスの体制が整っている。
	産業技術力	◎	↑	・米国ではモンサント社などが形質転換作物の開発と試験、販売の実績を持っており、当該分野で世界をリードしている。



1-4-1 作物増産技術



1-4-2 持続農業



1-4-3 機能性作物の創出

欧州	研究水準	◎	↑	・ドイツ、オランダ、英国、フランスは伝統的に栄養輸送の研究が盛んに行われて来ており、幅広い強みを持っている。 ・共生微生物の研究でも世界をリードしている。 ・土壌微生物研究も伝統的に強い。共同体制で土壌メタゲノム解析にいち早く取り組んでいる。
	技術開発水準	○	↑	・シンジェンタなど、作物の育種技術に強みを有する企業が多数存在している。
	産業技術力	○	↑	・欧州では遺伝子組み換え植物に対する反対意見は米国に比べて根強く、米国ほどの強みを持っていない。
中国	研究水準	○	↑	・中国では、植物の栄養についての研究は盛んで、伝統がある。海外から優秀な留学生が多数帰国し研究水準が急速に上昇している。
	技術開発水準	○	↑	・研究成果の実用作物への応用が重視されており、遺伝子組換え作物や組換え微生物の技術開発に積極的であり、フィールドでの試験も積極的に行われている。
	産業技術力	△	→	・日本同様、持続的農業分野で世界展開を見せている企業は存在しない。
韓国	研究水準	△	↑	・韓国は栄養輸送についての優れた研究を行っているグループがあるものの、全体としては、植物の栄養に関する研究が活発でなく、研究水準もそれほど高いとは言えない。 ・環境微生物の研究水準が徐々に高まっている。
	技術開発水準	△	↑	・有用遺伝子の単離については、それほどの強みがないものの、形質転換植物の圃場試験は日本より良く進んでいる。
	産業技術力	△	↑	・日本同様、持続的農業分野で世界展開を見せている企業は存在しない。
全体コメント：持続農業の基礎研究の状況はそれぞれの分野に寄って異なっている。栄養研究では日本が世界をリードしている。病害耐性については、米国が中心となって研究をリードしている。日本は、基礎研究の重要な論文を時折発表しており、持続農業に関する基礎研究レベルは平均して高い。中国・韓国は、優秀な留学生や欧米で実績を挙げた研究者が多数帰国しており、国全体の底上げが図られている。両国と日本との間の技術格差はまだ開いてはいるが、今後縮まっていくものと予想される。				

(注1) 現状 [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている]
 ※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。

(注2) トレンド [↑：上昇傾向、→現状維持、↓下降傾向]

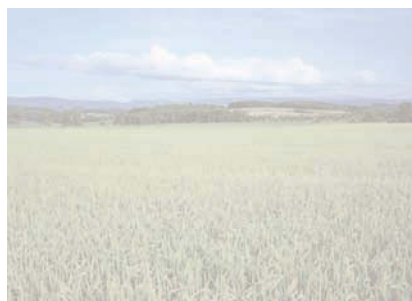
【注目動向】

- 肥料資源、特にリン酸とカリウムについては、中国や米国が国内資源の輸出禁止を打ち出しており、これらの資源に頼らない持続農業の開発が急がれている。
- 日本では、農耕地のリン酸はこれまでの施肥により比較的高いレベルにあるが、リン酸やカリウム資源を持たず、環境に放出されるリン酸やカリウムの回収技術が開発されつつある。
- 中国では、単位面積あたりの窒素肥料の施用量が日本の3～4倍レベルで推移して来たが、これに伴う、洞庭湖の汚染（藻の繁殖等）などが問題となり、この数年は、窒素肥料の利用効率向上と施用量の低減を国家政策として進めている。これに伴って、肥料の要求度の低い作物の開発研究にも力が入られている。
- オーストラリアや米国等で干ばつが頻発するようになっている。水利用の効率化は極めて重要な課題となっている。
- 欧米や日本などの先進国では、有機農業が低環境負荷農業あるいは低農薬農業として位置づけられて発展する傾向にあるものの、有機農業では現在の世界の人口を支えるだけの食糧生産はまかなえないことも明らかであり、化学肥料や環境に対する影響の少ない農薬を適切に用いた農業の発展が重要である。
- 近年のゲノムサイエンスの急速な発展によって、各種作物や果樹などの全遺伝子配列が決定されるようになってきている。低肥料で育つ植物や病害に強い植物は知られており、これらの遺伝子配列が決定されていくと、これまでは無い研究のアプローチで作物改良が進んでいく可能性がある。
- 土壌微生物の研究は主に先進国で進められて来ているが、培養に依存しないで解析する分子生態学的解析やメタゲノミクス解析の進展により、様々な土壌や様々な環境に応じて多種多様な微生物が存在していることが明らかになってきており、これらの発見を基に、持続農業に資する微生物や技術が開発されていく可能性が高い。
- 農耕地土壌が発生源の一つとなっている亜酸化窒素ガス（ N_2O ）は温室効果を持つだけでなく、21世紀のオゾン層破壊の最大の要因になることが2009年に報告された。

藤原徹（東京大学）、妹尾啓史（東京大学）



1-4-1 作物増産技術



1-4-2 持続農業



1-4-3 機能性作物の創出

1-4-3 機能性作物

【概況】

遺伝子組換え作物の商業栽培は1994年にスタートしたが、わずか15年あまりで25カ国、その総作付面積は1億3,400万ヘクタールと我が国の国土面積の実に3倍以上に達した^[1]。遺伝子組換え作物の多くはダイズ、トウモロコシ、ワタなどに除草剤や病害虫に対する抵抗性を付与したものである。これらは第一世代の遺伝子組換え作物と呼ばれているが、生産コストの低減や収量の増加がもたらされたことで急速な拡大につながった。世界的な食糧不足と中国などの新興国の食肉需要の増大による飼料作物不足とが相まって、これら遺伝子組換え作物の作付けは今後も年率10%以上のペースで増大すると予測されている。一方、我が国では様々な遺伝子組換え作物の栽培がすでに認可されているにも関わらず、国民の間で社会的受容が進んでいないことも要因となり、青いバラなどの花卉（かき）を除き商業栽培はほとんどなされていない。しかし、上記に見られる遺伝子組換え作物の世界的な普及により、国内の研究開発にも注目が集まっている。消費者メリットの大きい機能性作物もその一つといえる。現在、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・ガンと言った生活習慣病は年々増加している。WHO（世界保健機関）の統計でも高血圧症は増加傾向にあり、2025年には成人の30%にも達すると警告している。国内では健康ブームを背景に健康美容食品の市場は約1兆8千億円にも膨らんでいる^[2]。このような背景から、遺伝子組換え操作を活用して、「健康増進」や「生活習慣病」の諸症状に効果がある機能性成分を既存の作物に強化することで、より付加価値の高い作物の開発が進められている。更に、ワクチンのような医薬品としての成分を作物に付加することで、年々深刻な問題となっているスギ花粉症などの「アレルギー症状」の緩和につながる作物の開発もまた進められている。これらの作物は第二世代の遺伝子組換え作物と呼ばれている。また、医薬品成分そのものを作物の可食部に蓄積させた、いわゆる「経口ワクチン作物」も急速に進展していくものと予想される。これは、従来の医薬品と比べ、生産コストが低く、注射針を使わない経口投与の手軽さと安全性とが相まって発展途上国の医療問題を解決する切り札として注目されているからである。

引用文献等

[1] 世界の遺伝子組換え作物の商業栽培に関する状況：2009年

<http://www.hobia.jp/isaaa/2009.html>

[2] 健康美容食品市場調査を分析

http://www.group.fuji-keizai.co.jp/press/pdf/100326_10028.pdf

【健康増進】

我が国は急速な高齢化が進み65歳以上の人口の割合は20%を超えており、世界的に見ても超高齢社会に入っている。2003年に厚生労働省は健康寿命の延伸と生活の質の向上を目的として「健康日本21（21世紀における国民健康づくり運動）」を施行した。この中では食品の機能性に関する表示基準も定められており、国民の間では食品を通じた健康に対する意識が一段と高まった。このような中、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として補うことは広く浸透している。これらサプリメント、特定保健用食品（トクホ）、栄養機能食品などのいわゆる、機能性食品は急成長を続けており、2兆円に迫る国内市場にまで拡大した^[1]。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）と呼ばれており、機能性食品の国際市場は10兆円と見積もられている。

有用な遺伝子を植物体に組み込み発現させることで、植物が本来持つ生理活性成分を更に強化したり、他の生物の合成系を人為的に付与することで、毎日食する米、野菜、果実などにミネラル、ビタミン、アミノ酸などの機能性成分をより付加することができれば、サプリメントに頼ることなく安価でかつ手軽に不足分を補うことが可能になる。これは先進国の健康問題だけでなく、開発途上国の健康福祉にも大きく貢献する。現在、表 1 に示すように国内外で様々な健康機能性成分を強化した作物が開発されている。2000 年に開発途上国の子供の失明予防や免疫力の強化のために、視物質の元になる、ビタミン A 前駆体の β -カロテンを強化したゴー

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
葉酸	イネ	胎児の正常な発育・妊婦の健康	ベルギー
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
ビタミンC	レタス、イチゴ、ポテト、トウモロコシ	抗酸化作用	米国、スペイン
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
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	トウモロコシ、小麦、トマト、イネ	栄養強化	日本、米国、ベルギーほか
コエンザイムQ ₁₀	イネ	アンチエイジング	日本
ギャバ	イネ	認知症予防・抗ストレス	日本
鉄分	イネ、レタス、ダイズ	貧血予防	日本、米国、スイスほか

*代表的な作物を表示

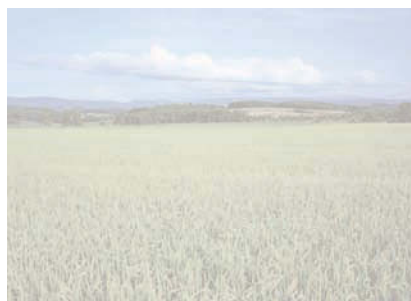
ルデンライスがスイスとドイツとの共同で開発された。現在のゴールデンライスは、コメだけで1日に必要なビタミンA摂取量のほぼ半分を補えるまでに改良された。IRRI（国際イネ研究所、フィリピン）はゴールデンライスの2011年の実用化を目指している^[2]。2007年には葉酸強化米（*folate-biofortified rice*、注：葉酸は妊娠時に大量に消費されるため、不足により胎児の発育不良と妊婦の貧血などの障害が発生する）が開発され、中国で母子の健康改善に与える葉酸強化米の効果がつい最近報告された^[3]。2008年にはスペインでビタミンA・Cおよび葉酸を強化したトウモロコシの開発が成功している^[2]。リシン、メチオニン、トリプトファンなど本来穀物に少ない必須アミノ酸を強化した作物の開発も進められている。国内ではサプリメントとして広く普及しているコエンザイムQ₁₀、認知症の予防効果や抗ストレス作用が認められるギャバ、貧血症に効果がある鉄分を強化したコメの開発が行われている^[3]。世界的にみて鉄分や亜鉛などミネラル高含有の作物（イネ、トウモロコシなど）の開発は盛んであり、我が国で開発された鉄分強化米は動物試験により貧血症状の回復が確認されている。

引用文献等

- [1] 2010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/2010/2010080501.html>
- [2] 日経バイオ年鑑 2010「遺伝子組換え作物を巡る世界各国の動き」日経BP社、pp. 926-937 (2009)
- [3] H. De Steur et al., Health impact in China of folate-biofortified rice, *Nature Biotechnol.*, 28:554-556 (2010)
- [4] シリーズ 21世紀の農学 遺伝子組換え作物の研究（日本農学会編）養賢堂、pp. 1-43、(2006)



1-4-1 作物増産技術



1-4-2 持続農業



1-4-3 機能性作物の創出

【生活習慣病】

「平成 18 年国民健康・栄養調査結果の概要（厚生労働省）」^[1]によると、糖尿病や高血圧症は予備群を含めると、それぞれ 1,870 万人、3,970 万人にもものぼる。同年にこれらの症状の治療に要した医療費は 4 兆 5 千億円であり、国民医療費全体（25 兆円）の 20% 近くにもなる。特に、高血圧症は動脈硬化を引き起こし、心筋梗塞や脳卒中などの心血管系の重篤な病気につながる。その早期発見を目的として、2000 年に高血圧の基準値は従来の 160mmHg（上）/95mmHg（下）から 140 mmHg（上）/90 mmHg（下）に引き下げられた。また、40～74 歳のメタボリックシンドローム（注：内臓脂肪症候群とも呼ぶ。内臓に脂肪が蓄積することで、高血圧、糖尿病、高脂血症になりやすくなり、この場合脳心臓疾患のリスクが通常よりも更に高まる）はその予備群を含めて、男性は 2 人に 1 人、女性は 5 人に 1 人となっている。生活習慣病予防のための厚生労働省の対策として、メタボリックシンドロームの健康診断・健康指導の義務化が決められ、2008 年より始まっている。

生活習慣病の予防と緩和に効果を持つ植物由来の機能性成分としては様々なものが知られている。これら機能性成分を強化した主な作物は表 2 にまとめた。動脈硬化を予防し、心血管系の疾病のリスクを軽減するオレイン酸や魚油構成脂肪酸である DHA（ドコサヘキサエン酸）、EPA（エイコサペンタエン酸）、アラキドン酸などを強化した作物はダイズを中心に、ナタネで研究開発が進められている。米国企業が開発した、オレイン酸を付加したダイズは商業栽培が進んでおり、高オレイン酸ダイズ油として商品化されている。国内では現在これら高オレイン酸ダイズ 2 品種が食品安全性審査を終了している^[2]。我が国では主にイネを中心として多くの機能性成分を強化した米が開発されている。血清コレステロールや中性脂肪の低減に効果のあるラクトスタチンやダイズβ-コングリシニン、血圧正常化作用を持つアルブミン由来の改変ペプチド（ノボキニン）やギャバ、血糖値を下げるグルカゴン様ペプチド（GLP-1）などを蓄積した米の開発が進められており、いずれも動物試験によりその効能が検証されている^[3]。これらのいくつかは平成 20 年度から 5 年計画で実施されている「新農業展開ゲノムプロジェクト GMO 領域」で実用化に向けた研究開発が活発に進められている。

表 2 生活習慣病の予防に効果を持つ成分を強化した作物*

強化した成分	作物	機能性	開発国
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,EHA,アラキドン酸	ダイズ、ナタネ		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
ビタミンE	ダイズ、トウモロコシ	抗ガン作用・糖尿病	米国
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
ノボキニン、ギャバ	イネ、ダイズ	高血圧予防	日本
GLP-1	イネ	糖尿病予防	日本

*代表的な作物を表示

引用文献等

[1] 厚生労働省「平成 19 年国民健康・栄養調査結果の概要について」

<http://www.mhlw.go.jp/houdou/2008/04/h0430-2.html>

[2] 厚生労働省医薬食品局食品安全部「安全性審査の手続きを経た遺伝子組換え食品及び添加物一覧」

<http://www.mhlw.go.jp/topics/idsenshi/dl/list.pdf>

[3] 生物の科学遺伝「遺伝子組換え作物の社会的受容と食の安全」pp.46-49（2006 年 3 月）

【アレルギーの予防と緩和】

先進国では人口の30～40%が様々なアレルギー症（喘息、アレルギー性鼻炎、結膜炎、アトピー性皮膚炎など）に苦しんでいる。特に国内ではスギ花粉症は深刻であり国民の実に26%が罹患しており、予備群を含めると国民の半数以上になる。その治療のために、抗ヒスタミン剤、コルチコイド、抗炎症薬などの対処療法が一般に用いられ、医療関連費は年間で2,260億円、労働損失は600億円と推定されている^[1]。生活の質(QOL)の低下も考慮にいと、その社会的な損失は甚大である。その場しのぎの対処療法ではなく、より安全で効果的な免疫療法（注：アレルギーの元になる抗原を投与する方法。徐々に濃度を高めることで抗原による免疫反応が低下し、アレルギー症状が大幅に軽減される）の確立は緊急の課題である。国内ではイネを用いた健康機能性米の開発が長年に亘って行われてきた経緯から、スギ花粉のアレルギー成分（ペプチド）を組み込んだスギ花粉症緩和米がいち早く開発され、マウスを使った経口投与試験によりスギ花粉症に対する効果が確認されている。この場合、スギ花粉の抗原ペプチドは、貯蔵タンパク質の一部として白米部分で合成されるために、ヒトが摂食後も胃での消化を免れ、腸管関連リンパ組織から取り込まれて効果を発揮する。この手法はワクチンなどの医薬品成分をその生理活性を保持したまま標的細胞に効率よく運搬することを可能にした点で、汎用的かつ画期的な成果と言える。この米は食品としての安全性試験を終えて、2007年に厚生労働省が医薬品と判断したことから、薬事法に基づいた安全性評価試験が現在進められている^[2]。経口ワクチン米とも言える、抗アレルギー米の有効性が確認されたことで、ダニアレルギーを緩和する米など国民の間で深刻化している様々なアレルギーを緩和する米の開発を望む声が高まっている。スギ花粉症緩和米やダニアレルギー緩和米などの医薬品作物は本年度から5年計画でスタートした「アグリ・ヘルス実用化研究促進プロジェクト」（農林水産省）の中で医薬品として実用化を目指したプロジェクトが民間企業も加わって進められている。国外でアレルギー症状を作物の経口投与により予防・治療する研究開発は少ない。I型の糖尿病や関節リウマチといった自己免疫疾患の症状を緩和する作物の開発がある程度である。一方、作物が本来持つアレルゲン物質を低減させたものの開発例は多く、米国ではピーナッツ、ジャガイモ、ダイズ、小麦でそれぞれ開発されている。国内ではアレルゲン低減米として2種類の米が開発されている^[3]。

引用文献等

[1] 旧科学技術庁「スギ花粉症克服に向けた総合的研究」（2000）

[2] （独）農業生物資源研究所「スギ花粉症の研究開発について」

<http://www.nias.affrc.go.jp/gmo/>

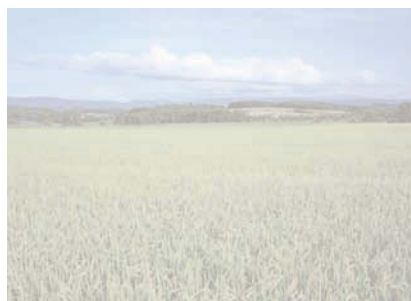
[3] Graff et al., Science, 27: 702-704 (2009)

「機能性作物」に関する科学技術・研究開発の国際比較と注目動向

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	- 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の機能解析のレベルは高く研究成果も多い。 - アミノ酸や二次代謝産物の生合成、貯蔵タンパク質の細胞内輸送やシンク組織での蓄積機構に関する分野は優れている。



1-4-1 作物増産技術



1-4-2 持続農業



1-4-3 機能性作物の創出

	技術開発水準	○	→	・イネゲノムの成果を活用した分子育種学的な研究が優れている。その中心である（独）農業生物資源研究所で機能性成分を付与したイネが多数開発されている。 ・JT（日本タバコ）によりイネを始めとした単子葉植物の効率の良い形質転換系が独自に開発され、世界的に広く用いられている。 ・クミアイ化学により遺伝子組換え作物の社会的受容に重要な植物由来の選抜マーカーが開発されている。 ・食物や植物から由来する機能性成分の同定や解析において多くの実績を上げている。
	産業技術力	△	→	・この分野の製造・販売で市場に参入している企業は青いバラを開発したサントリーのみである。純粋にアグリバイテク企業で参入しているものはない。催涙成分量を低減させたタマネギの開発にニュージーランドの研究機関とハウス食品が成功しており今後の商品化が期待される。 ・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いる。 ・ほとんどの企業は国内でのアンチ GM の流れからこの分野での研究開発からは撤退している。国民の多くが GM に不安を抱いているために、新しい GM 研究開発の潮流に参入しようという動きは国内企業にはまだ見られない。
米国	研究水準	◎	↑	・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い。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リードしていると言って過言ではない。
	技術開発水準	◎	↑	・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圧倒的に他国を引き離している。
	産業技術力	◎	↑	・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。第一世代の遺伝子組換え作物の開発・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ダイズ、高リジントウモロコシ等）でも幾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。
欧州	研究水準	◎	→	・米国同様に、英国と EU 諸国（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。特に、遺伝子組換え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。
	技術開発水準	◎	↑	・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（1980年、ベルギー）、高い技術開発力を持つ。除草剤耐性作物の開発など第一世代の遺伝子組換え作物の研究開発の多くが欧州で行われた。しかし、1998年に始まる GM 作物のモラトリアム（流通の停止）によって研究開発が一時的に停滞した。6年後の2004年にモラトリアムが解除されてからは再び研究開発は活発化している。
	産業技術力	◎	→	・BASF やバイエル・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、流通の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併事業を展開する事例が増えている。

中国	研究水準	○	↑	・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。
	技術開発水準	△	↑	・ワタ、トマト、ピーマン、ペチュニアの商業栽培とイネを始めとして多数の作物の試験栽培が進行中である。イネの研究開発への重点的な投資が目立つ。イネの商業栽培が数年以内に行われる見通しである。
	産業技術力	○	↑	・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。海外のバイテク企業との連携により今後大きく発展する可能性がある。
韓国	研究水準	○	↑	・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良い。
	技術開発水準	△	↑	・独自の機能性作物開発には至っていない。しかし、政府主導で今後バイオ産業分野への投資額が拡大することが予想されるために、研究開発の水準も上向く。
	産業技術力	△	↑	・機能性作物の研究開発、及び商業栽培を進めている企業はない。国の研究機関が広大な隔離圃場を有しており、圃場栽培の規制の緩和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。
全体コメント：機能性作物の基礎研究とそれを基盤にした研究開発では、両者の連携が密で多くのバイテク企業を持つアメリカがリードしている。欧州は基礎研究の分野では高い水準を保ち、研究開発力の高いバイオ企業を擁している。しかし、EU内でのGMに対する規制問題がネックとなり、EU内での商品栽培は必ずしも順調でなく、むしろ世界展開することで活路を見出そうとする傾向がある。日本は基礎研究のレベルは高く、大学や試験研究機関による研究開発は盛んであるが、国内でのGM規制の問題、シーズを商業栽培に導くパイプの未整備により、機能性作物での商品化への道は遠い。中国や韓国は基礎研究のレベルは日本に遅れを取っているが、遺伝子組換え作物の利用が国を挙げてのプロジェクトとして位置づけられており、特に食用のイネ、飼料用のトウモロコシを用いた機能性作物の開発では今後数年で大きく前進すると予想する。				

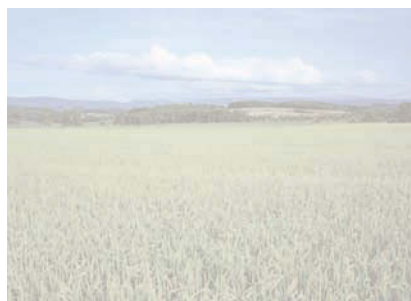
(注1) 現状 [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている]

※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。

(注2) トレンド [↑：上昇傾向、→現状維持、↓下降傾向]



1-4-1 作物増産技術



1-4-2 持続農業



1-4-3 機能性作物の創出

【注目動向】

- ・汎用性のある植物における遺伝子ターゲティング技術の開発

米国ダウ・アグロサイエンス社による **EXZACT™** 技術の開発。ターゲットとなる遺伝子の配列特異的なジンクフィンガーヌクレアーゼを用いて二本鎖切断を誘導することで、相同組換えを高頻度に誘発して特定の遺伝子のみを正確に改変する、汎用性の高い技術が開発された。これにより特定遺伝子の生体内での機能解明が加速するだけでなく、導入遺伝子の挿入部位を正確に予測できるために、有用な遺伝子組換え作物を作出する上でより安全な手段としても用いることが出来る。

- ・スタッキング（掛け合わせ）による複数耐性遺伝子を導入した品種の開発

米国モンサント社と米国ダウ・アグロサイエンス社とが技術提携によりトウモロコシ **SmartStax** を開発した。これは、複数の害虫抵抗性機能を持つ品種と同じく複数の除草剤耐性機能を持つ品種を掛け合わせるにより、害虫や雑草に対して包括的な防除が可能なトウモロコシ新品種である。このようなスタッキング手法は第二世代の作物にも広まると思われる。

- ・米国での機能性成分を発現するイネの商業栽培

抗菌作用を持つヒトラクトフェリンやリゾチームを高発現させたコメが米国のバイテク企業 **Ventria Bioscience** 社により開発。2007年に米国農務省は商業栽培を認めた。大規模な商業栽培が行われており、収穫したコメは現段階では下痢止めの医薬品や健康食品への添加利用がなされている。将来的には食品としての利用も想定される。

- ・ヨーロッパにおける遺伝子組換えポテトの商業栽培

ドイツのバイテク企業 **BASF** 社は、パルプや糊の工業原料として使うためにデンプン代謝系遺伝子発現のアンチセンス操作によりデンプン組成を改変したポテト品種 ‘**Amflora**’（注：アミロース含量を低下させて、逆にアミロペクチン含量を高めたもの）を開発。**Amflora** は商業栽培が認可され、今年から（2010年）ドイツ、スウェーデン、チェコで合計 250 ヘクタールの大規模栽培が進んでいる。来年からはオランダでの栽培も予定されている。

赤間一仁（島根大学）、高岩文雄（農業生物資源研究所）

第2章

グリーン・バイオ・イノベーションに向けた 重要な研究開発領域

- **2-1** CO₂ 資源化に資する高度光利用技術の開発
- **2-2** 高生産・環境適応植物の設計と作出
- **2-3** 資源エネルギー低投入型の高バイオマス・高品質バイオマス生産植物の開発
- **2-4** 持続的農業生産の基盤となる植物共生デザイン技術
- **2-5** バイオマス増産にむけた食用・飼料用作物の次世代育種技術の開発
- **2-6** 植物工場等を活用した高付加価値植物の創製
- **2-7** 生物機能を活用したバイオリファイナリー、環境修復技術の開発
- **2-8** バイオ燃料・素材生産を目指した微細藻類の代謝改変とゲノム育種技術の確立
- **2-9** 植物多様性の化学資源の利活用に向けた基礎研究とトランスレーショナルリサーチ

2-1 CO₂ 資源化に資する高度光利用技術の開発

●提案の内容

陸上には多種多様な光合成生物が生息するが、光合成のメカニズムは基本的には全種共通である。それらは機能の面から次の4つの反応で構成されている。1) 光エネルギーを吸収伝達し、反応中心で電荷分離を起こす集光・光化学反応。2) 反応中心の電荷分離に伴う水の分解とそれにつながる電子伝達系によるATPとNADPH生産を行う電子伝達反応。3) ATPとNADPHを利用してCO₂の受容体であるRuBPの生産を行うカルビン回路とCO₂固定を行う酵素Rubiscoによる反応。4) カルビン回路の代謝産物から光合成産物をつくるデンプン・ショ糖合成反応である。これら4つの反応は互いに複雑に制御されているが、地球上のさまざまな環境に適応し、光合成生物は数10億年の時を経て、1) から4) のいずれかの反応を特化させ、進化をとげた独自の光合成機構を有してきた。例えば、光が不足する林床で生育する植物は1) の集光機能に優れ、熱帯地域に生育する植物は2) の電子伝達機能を発達させている。また、寒冷地や乾燥地の植物は3) の優れた機能を持つRubisco酵素を有する。特に、乾燥地域ではRubiscoが触媒するCO₂固定反応にCO₂濃縮機能を付与したC4植物なども存在し、さらに乾燥が進む地域では夜間にCO₂吸収を行うCAM植物（サボテンなど）なども存在する。また、人類によって高度に育種された穀類作物は、一般に4) の糖の生産効率が高く、相対的に大きな貯蔵器官（シンク）を有することから、葉（ソース）での光合成活性も高い植物が多い。

近年の地球環境の急激な変動に対処するためには、数10億年かけて馴化適応してきた陸上植物の光合成を10年・20年の単位で予想される環境に最適化する必要がある。とりわけ、CO₂濃度の急激な増加に対しては、高CO₂環境下で最適化する光合成生物を作り出す必要があるし、乾燥化が進む地域では、水分の少ない環境下で光合成を最適化できる植物を必要とする。このような光合成生物を作り出すためには、特殊環境で特化した光合成反応の原理を理解し、これを有効利用する。そこで、本提案では、①想定された環境（高CO₂、乾燥など）に適応して特化した光合成機能を見出し、その鍵遺伝子を同定する。進展著しいゲノム科学を基盤とした、多様な環境下で生存する生物のゲノム解析は強力な武器となる。②転写・翻訳産物、代謝産物の網羅的解析であるオミックス解析を駆使することにより、光合成タンパク質の性質と制御機構を明らかにする。③貯蔵器官の貯蔵能力の増強を設計する。④1)～4)を考慮した光合成活性の最適化と増強のためのシミュレーションモデルを開発する。①～④の結果を踏まえ、想定環境で最適化させた光合成能を持つ作物や有用樹木等を、遺伝子導入、遺伝子改変により作出する。



(具体的な研究課題例)

- ・ 極限環境に適応した植物からのスーパー Rubisco の探索と有用植物への導入。
- ・ C3 植物の C4 化による高温・乾燥耐性の付与。
- ・ 電子伝達能を強化した高温・高 CO₂ 環境適応化植物の作製。
- ・ 有用植物のさらなる貯蔵器官の拡大。
- ・ CAM 植物の C4 化による生産性の向上。
- ・ 藻類光合成の有用遺伝子の陸上植物への導入。

●提案の根拠

光合成は生物界における非常に重要な代謝であるため、かつては世界中の多くの植物科学研究者が光合成研究に従事した。その結果、1960 年代には、光合成の全代謝の基本骨格はほぼ解明され、技法的にもラジオアイソトープトレーサー法が開発導入されるなど、生命科学全体をもリードする研究分野であった。日本においても田宮・藤茂の CO₂ 固定の酸素阻害の発見 (1949)、川島の Rubisco 結晶化の成功 (1970)、浅田らの活性酸素消去経路解明 (1984) などの世界的な成果がある。しかし、80 年代に始まる分子生物学の台頭、2000 年代にかけてのゲノム科学とそれを基盤とするシロイヌナズナを中心とした分子遺伝学の進展は新規有用遺伝子同定に画期的な成果を生み、植物科学研究の大勢を大きく変えた。そんな中、すでに代謝経路の主役が明らかになっている光合成研究にはそれらは必ずしも革命的な手法とはなりえなかった。その結果、技術革新の推進を重視する米国とそれを追従する日本における光合成研究の衰退は著しく、農業や伝統を重んじる欧州や豪州に遅れをとった感がある。米国において、植物初の全塩基配列解明タンパク質が Rubisco であったこと

(1980)、光呼吸経路が 80 年代初頭にシロイヌナズナの変異体解析で証明されたことなどは、その後の米国の光合成研究衰退を見ると皮肉な成果である。一方、光合成研究は地球規模での生態研究や環境変動問題とも密接にかかわり、日本の門司・佐伯の群落光合成理論 (1953) や光合成生化学を基盤に構築された Farquhar 理論 (1980) は、IPCC2007 (気候変動に関する政府間パネル) における地球陸上植物の CO₂ 吸収量算出と地球環境変化予想の基本モデルとして使われ、光合成研究の重要性が強く再認識された。

さて、主役経路はすでに明らかにされている光合成研究であるが、その成果にもかかわらず、人類は光合成そのものの改善には成功していない。植物による CO₂ 吸収増加やバイオエネルギー増産を目標とするならば、光合成増強はまさに中枢の研究課題である。残念ながら、高度に制御され、多様に進化した光合成の複雑な機構の改良は、研究進展の低調な期間もあり、まだ人類の英知を越えたレベルにある。しかしながら、近年整備が進みつつある転写翻訳・代謝産物解析装置などのオミックス解析の新技术に、光合成研究で独自に開発された非破壊解析手法であるクロロフィル蛍光解析やガス交換解析技術を組み合わせ、すでに充実しつつあるゲノム科学を基盤にした植物変異体材料を駆使することにより、必ずや光合成研究は大きく進展し、その増産を実現できる時代になるものである。

●成果の波及効果

本領域の研究成果は、人類の食糧増産と地球環境変化抑制に直接結び付くものであり、それらに関連する多くの学術研究分野の基盤的研究の成果として位置付けられるものである。また、人類社会への貢献としては、まず、光合成増強による作物増産が、現在進行する食糧問題解決のもっとも有効な切り札にある。人類の食糧の 80% 以上が植物由来 (重量ベース) であるが、その植物を栽培する農耕地拡大はもはや限界に近く、森林伐採を伴う手段しか残されていない。また、低開発国の食の変化に伴う家畜の穀類作物の飼料化 (人類の食物との競合)、バイオエネルギーとの競合問題もあり、光合成能力改善による作物生産の向上は単位土地面積当たりの食糧増産の手段として、もっとも強く望まれる最後の技術革新である。また、次に大気 CO₂ 削減にからむ環境問題対策においても、光合成増強による有用樹木の増産とバイオ資材・バイオエネルギーへの応用開発利用が強く望まれている。陸上植物の最大の CO₂ 吸収の担い手は森林で、例えば、日本の森林面接は農耕地の 5.5 倍、農作物の約 3 倍の CO₂ を吸収している。このように陸上植物の光合成機能増強の研究は、食糧と環境問題の重要な基盤研究である。

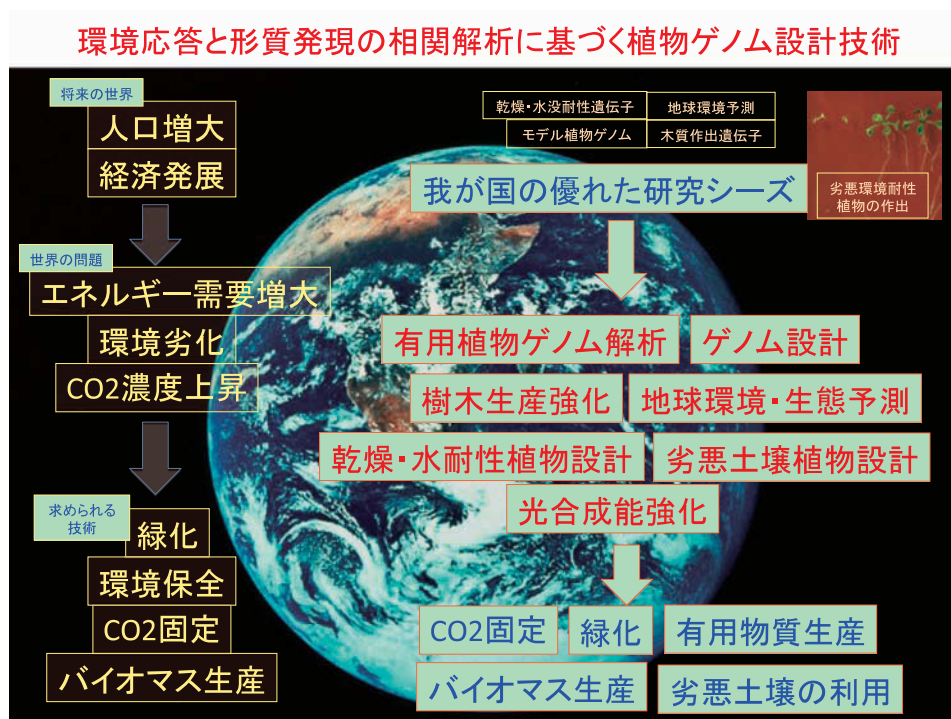
2-2 高生産・環境適応植物の設計と作出

●提案の内容

世界人口は2050年には90億に達するとされている。人口が増え、経済が活性化すると都市化が進行し、人々の生活は豊かになる。都市化は優良農地を宅地や工場に変えるため農地が縮小する。例えば、中国成都市ではこの30年間に人口は1.5倍になり農地は2/3に減少した。人口増加に伴って食糧やエネルギーに対するニーズが高まる。食料生産に必要な窒素肥料は高温高压下で空気中の窒素を固定する反応で窒素肥料製造に世界の石油消費量の5%が使われている。化石燃料の消費は温室効果ガスである二酸化炭素を大気中に放出してしまうため、バイオマスなどのリサイクル可能なエネルギーの供給が増々重要になる。さらに、近年の気候変動により、作物や植物の栽培に不適な地域が増えている。干ばつやそれに伴う塩害、また逆に水害はその年の収穫を減らすだけでなく、土壌の流亡などももたらし、耕作やバイオマス生産に適さない土地を増やしている。

このような状況を打破するために様々な取り組みが行われているが、劣化する環境に適応し高生産性を実現する「環境突破植物」の開発が重要である。このため、本領域では、世界の環境変動を観測し、得られたデータに基づいた将来予測を行う。我が国には世界に誇るべき地球シミュレーターが構築されており、環境変動に伴った生態の変化を、必要な調査も行いつつ推定する。推定結果に基づき地球の温度、水、土壌や栄養環境に適応する能力を高めた「環境突破植物」の開発を行う。具体的には、植物の温度、水、栄養条件に対する適応力を研究し、得られた成果を用いて植物の適応力を強化し、それを通じて植物の生産を向上させ二酸化炭素固定やバイオマス供給能を向上させる。

日本でのこれらの分野の研究は世界的にも高いレベルにある。アルカリ土壌で欠乏する鉄の吸収力を高めることによって、アルカリ土壌耐性を付与した例や、ホウ素輸送体を用いてホウ素欠乏や過剰耐性を高めた例、酸性土壌で問題になるアルミニウム耐性を高めた例などが日本発の成果として高く評価されている。今後、近年充実しつつあるゲノム情報を活用することにより、機能を格段に向上させた植物の開発が可能となりつつある。



(具体的な研究課題例) 本領域にて想定される個別の研究課題例を複数記載。

- ・ 乾燥や湿潤条件、高温や低温に耐えるに耐える植物の開発
- ・ 不良土壌や劣悪栄養に耐える植物の開発
- ・ 二酸化炭素固定を担う光合成機能の強化
- ・ 樹木生産の効率化と劣悪環境での生産研究
- ・ 有用植物ゲノム解析とゲノム設計研究
- ・ 地球環境変動の観測と予測
- ・ 生態系変動の調査と予測

●提案の根拠

植物科学分野の近年の状況としては、急速に発展した遺伝子の塩基配列決定法により、各種有用植物のゲノム情報が得られ、これまでのモデル植物を用いた基礎的な研究を有用植物に適用し、人類のこれからの生存に必要な性質を持った有用植物を選び出したり、設計して作り出したりすることが可能になりつつある。世界的に研究はモデル植物を用いた研究から実用植物を用いた研究へと広がってきている。乾燥に対する耐性を付与する遺伝子や、水害に耐性を付与する遺伝子、アルカリ土壌、酸性土壌に対する耐性を付与する遺伝子、栄養不足に対する耐性を付与する遺伝子が世界に先駆けて我が国で発見され、これらを用いて植物の環境耐性を高めた例が報告されている。樹木や樹木を構成成分である細胞壁の研究においては米国が多額の投資によって先行している面はあるものの、樹木の生長を促進する遺伝子は我が国で単離され応用研究が進められている。また、スーパーコンピュータを用いた環境予測は世界的に進められて来ているが、日本の地球シミュレーターによる水環境予測は世界的にも評価されている。

このような状況の中で、我が国の持つ極めて高い植物研究のシーズを実際の現場に応用していくには、環境予測とリンクした有用植物についての技術開発が必要である。我が国の研究の現状としては、優れた基礎研究のシーズを応用に結びつけることが必ずしも十分ではない。個別研究により得られて来たシーズをさらに発展させると共に、真の応用に結びつけるための国際的な協力体制も視野に入れた拠点の整備を進め、環境予測とリンクさせて有用植物に将来起こる環境変化に対応する能力を付与することができれば、地球レベルで予測されているエネルギー、環境問題に大きく貢献できると期待される。

●成果の波及効果

現在の地球に酸素をもたらし、人類が生存できる環境をもたらしたのは植物である。植物は劣悪な環境に耐え、バイオマスをはじめとする様々な有用物質を合成する能力をもっている。また、進化によって生まれた様々な植物が人類の生活を豊かにしている。有用植物の優れた機能の本質を解明することを通じて、本研究は植物の元来持つ優れた機能やその多様性を解明し、さらにはゲノム情報を駆使し生産能や環境適応能に優れた植物を設計、開発するものであり、現時点での植物の生存戦略についての理解を新しい次元に進めるだけでなく、世界全体でのバイオマス生産を高め、二酸化炭素固定を促進することにつながっていく。

日本は目標値を国際社会に提示して二酸化炭素削減を進めることを表明している。本研究はこれまで二酸化炭素固定が十分に行われなかった土壌での二酸化炭素固定能を高め、バイオマス生産によってカーボンニュートラルなエネルギーを供給する基本技術を開発するものであり、このような知的所有権は日本が国際社会に公約した二酸化炭素削減を進める上で極めて重要である。また、このような技術は世界の多くの国に経済的、社会的な恩恵をもたらすものであり、日本の技術によって恩恵を受けた人々が増えることによって、日本の国際的な地位の向上につながるものである。

2-3 資源エネルギー低投入型の高バイオマス・高品質バイオマス生産植物の開発

●提案の内容

再生可能エネルギーには、いろいろなものがあり、例えば、太陽エネルギー、水力エネルギー、風力エネルギー、地熱エネルギー、バイオマスエネルギー等がある。これらの再生可能エネルギーは何れも重要であるが、バイオマスは、賦存量が多く、カーボンニュートラルであるうえ、唯一液体燃料や工業原材料などの有機化合物を供給することができる点が極めて重要である。地球上に最も多量に蓄積しているバイオマス資源は木質(リグノセルロース)であり、今後、人類が生存を続けるうえで必須の低炭素・自然共生・循環型社会の実現に向けた切り札として、木質の持続的生産・高度利用システムの構築が強く求められている。

以上に鑑み、本提案は、高品質木質系バイオマスの持続的な低炭素・低コスト生産とその利用への開発研究を、木質科学及び植物科学の研究基盤の活用と異分野連携に基づき、産業との連携を通じて推進するものである。



対象とする技術分野としては、①持続的な木質生産・木質利用・細胞壁利用、②エネルギー植物開発、③草本・樹木リグノセルロース利用、④低炭素・低コスト生産技術開発、⑤バイオリファイナリー素材としてのバイオマス植物の改変技術、⑥高バイオマス生産性、悪環境耐性等を持つスーパー樹木の開発などがある。

研究体制としては、オールジャパンの木質科学研究者と、代謝科学、植物科学、材料科学、情報科学、森林科学、微生物科学、地域研究などの研究者と融合した異分野連携により推進する。

(具体的な研究課題例)

- ・木質バイオマスを低炭素・低コスト・持続的に生産する技術的・社会的基盤

- ・植物代謝科学、情報科学の融合による木質形成システムの目的基礎研究
- ・エネルギー植物のバイオマス生産機能を画期的に増強する技術基盤
- ・糖化・分解性を画期的に向上したエネルギー植物作出への技術基盤
- ・高品質リグノセルロースの新規ナノ材料化技術基盤
- ・逆転の発想に基づく高発熱リグノセルロース植物の育種と新規バイオ液体燃料生産技術基盤

●提案の根拠

バイオリファイナリー分野の研究においては、実用化に至った例は少ないが、米国では、植物研究に対する投資がモデル植物から実用植物へシフトしている。とりわけ米国では、Energy Biosciences Institute (EBI) が、10 年間 5 億ドルの規模で、バイオリファイナリーに適した植物の開発など、植物を中心とした研究をスタートさせている。一方、我が国は、木質成分科学や植物科学の研究水準は高いものの、実用化に向けた技術開発水準・産業技術力が欧米に劣っていることは否定できない（出典：ライフサイエンス分野 科学技術・研究開発の国際比較 2009 年版）。それでも、我が国の経済産業省は、木質のバイオ燃料化の開発を、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）を通して支援している。その結果、リグノセルロース系バイオマスの資源開発や代謝工学、リグノセルロースの変換等について、新規な発想に基づくわが国独自の様々な基盤技術が蓄積しており（出典：NEDO 平成 21 年度バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発（先導、要素）成果報告会予稿集）、当該分野において国際競争力を発揮できる基盤が整備されつつある。

当該分野の研究の多くは、木質バイオマス生産、木質成分の構造・形成・変換利用などの基礎研究に基づき知財化されてきたが、これらの技術の実用化に向けたボトルネックの一つは、木質利用の実用技術と連携したオールジャパンの分野融合型の新技術基盤開発研究の推進体制が整っていないことにある。この体制確立には、国としての支援が必要不可欠である。

また、木質は、デンプンのような貯蔵物質ではなく、高等植物の体を支える剛直な構造材料であり、そもそも簡単に分解利用されるようにはできていない。「木質バイオマスの使いにくさ」は、結局、「木質構成成分（リグニン、セルロース、ヘミセルロース）の存在状態（超分子構造）の剛直さ・複雑さ」に帰結される。この超分子構造の解明はかなり進んでいるものの、未だ十分には解明されていない。そして、この未解明部分こそ、木質バイオリファイナリー・バイオ燃料生産技術基盤確立の本質的なボトルネックとなっていることが、過去 10 年以上にわたる応用研究の結果、明白となった。しかし幸い、この超分子構造の解析では、我が国は世界をリードしている。そこで、木質科学、植物代謝科学、植物科学、情報科学等の融合によるオールジャパンの体制を整備し、この超分子構造解析及びその形成機構解明のための目的基礎研究を推進することこそが、10 年程度の中期的スケールで世界に先んじて木質系バイオマス利用のブレークスルーを実現するための、結局の近道である。

●成果の波及効果

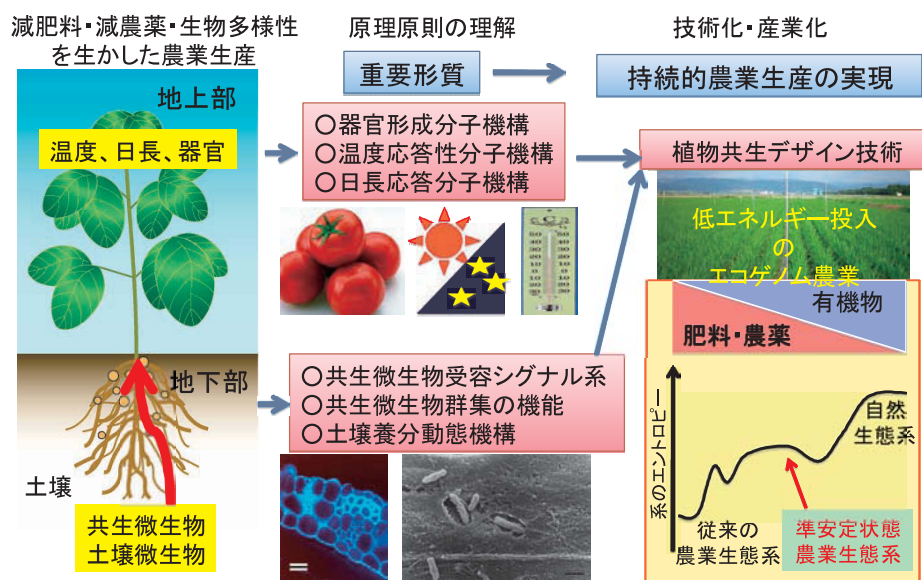
本領域の研究で得られる成果は、研究基盤の相乗的な強化をもたらす異分野研究ネットワーク構築の促進、若手人材の育成とアジアを中心とした国際連携・協力などへ波及するとともに、木質科学、植物科学、植物細胞分子生物学、育種学、生物工学、微生物科学など幅広い学術分野の発展に寄与することができる。

また成果の経済・社会への波及効果について、産学官の連携に基づく効率的な研究開発、研究開発への公費投入に対する国民の理解の促進、植物バイオマス生産と利用による新規雇用創出、環境・エネルギー技術の国内外への普及展開、CO₂削減効果、低炭素・自然共生・循環型社会の構築の促進などを挙げることができる。

2-4 持続的農業生産の基盤となる植物共生デザイン技術

人類は、灌漑による耕作地の拡大、化学肥料の多用による農作物の増収、エネルギー及び労力集約型の品種改良などにより、食料需要の増大に対応してきた。しかし、灌漑水の制限やエネルギー植物との栽培地の競合、化学肥料の多用による温室効果ガスや地下水汚染などの地球環境劣化などから、さらなる農耕地の拡大や肥料の多用は困難である。地球の人口は今後も増加が予想されることから、環境と調和した持続的食料生産の研究開発戦略は、人類の生存において極めて重要である。

本提案では、農業生産における省力や低コスト化、限られた農耕地での減肥料、減農薬農業生産の実現を目的に新しい植物のデザイン技術の開発を行う。具体的には、ゲノム情報を基盤とし、植物地上部の環境応答と器官形成プログラムの解明を行う。さらに、植物地下部における多様な共生微生物や土壌微生物のゲノム機能解明を行い、植物との共生機構の全貌を明らかにする。最終的には、上記知見を活用し、「低エネルギー投入のエコ農業生産技術」植物の分子共生デザイン技術を構築する。本研究により、温室効果ガス発生やエネルギー投入を低減化し、生産性を上げる「植物共生デザイン技術」や「エコゲノム農業」の開発が可能となり、世界に普及する。



(具体的な研究課題例)

- ・器官遺伝子群の解明と分子デザインの創成
- ・温度適応戦略の解明と広域温度適応作物分子デザインの創成
- ・光応答戦略の進化学的解明と日長反応分子デザイン技術の創成
- ・菌根菌、エンドファイトなどの共生微生物受容シグナル系の解明
- ・有機農業における微生物の作物生育促進・耐病性等の解明と利用
- ・農耕地の養分動態における植物遺伝子と土壌微生物の機能解明
- ・農耕地の温室効果ガスなどの環境負荷低減化技術の開発

●提案の根拠

【地上部技術】

単為結果の分子機構は十分に解明されていない。トマトは果実作物のモデルとしてゲノム解読が2010年に終了した。独自リソースを活用することで単為結果の分子機構の全容解明が期待され、今後はこれらを活用した重要遺伝子の解析・活用の国際競争が激化する。我が国では、イネを中心として、日長応答機構研究をリードしており、これを基盤として、次世代シーケンス技術を活用して、各種代表作物で日長反応機構研究が進むと期待される。育種母本が開発されれば、さまざまな日長応答性をもつ作物を自在に開発できる。

【地下部技術】

培養困難な微生物も含めて土壌や植物共生微生物の微生物群集の多様性と機能を解明が飛躍的に進みつつある。我が国では、菌根菌や根粒菌を受入れる共生ネットワーク研究で世界を先導している。さらに、植物組織から細胞濃縮法により共生微生物群集を得る技術が非常に優れている。このような利点を生かすことにより、作物生産のための共生菌を利用した化学肥料の削減や温室効果ガス削減などの持続的農業生産の基盤となる生物共生機構の活用が実現できる。

●投資する意義

【学術分野への寄与】

植物から多様な植物種での検証より、植物進化や適応進化の分子機構が明らかになる。培養困難な共生微生物にアクセスでき、群集レベルにおける植物の共生生物制御や共生微生物・土壌微生物の新規機能の学術的な解明が強く期待され、世界をリードできる。

【経済・社会への波及効果】

実用的単為結果品種が育成され、作物栽培の低コスト化、冷暖房費の低コスト化、作業省力化が期待できる。さらに、四季が明確な我が国において、日長にその花成や草姿が関係する作物を安定的に生産することが可能となる。また、日長応答反応を強く制御させることにより、さまざまな商品作物の花成を自由に制御できる技術開発ができる。

共生分野の研究が実施されれば、微生物接種資材や共生診断により低肥料・減農薬の実現に貢献できる。さらに、今までアクセス不可能な共生微生物を通じて発酵、食品、環境産業への波及効果も期待される。

地上部技術と地下部技術を統合することにより、温室効果ガス発生やエネルギー投入を低減化し、生産性を上げる「植物共生デザイン技術」や「エコゲノム農業」の開発という新しい農業技術のトレンドを作りうる。

2-5 バイオマス増産にむけた食用・飼料用作物の次世代育種技術の開発

●提案の内容

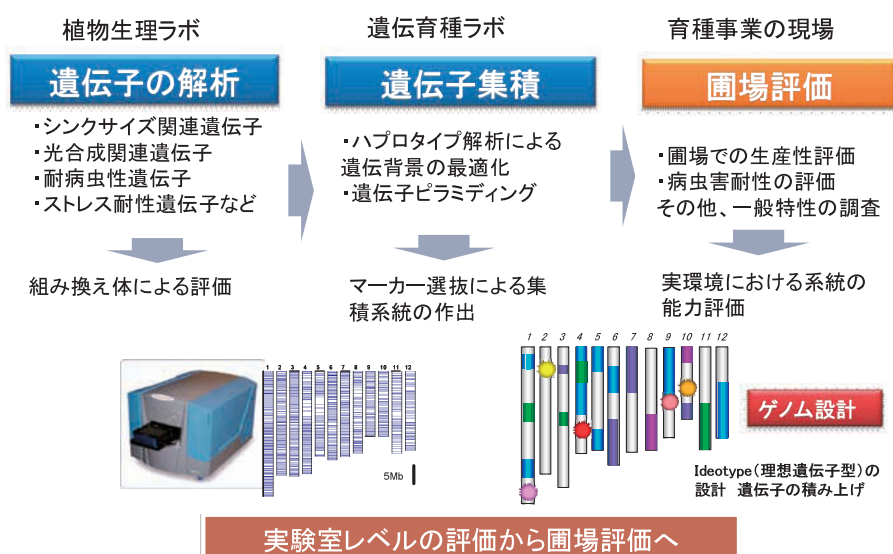
作物のゲノム解読の進展にともない、病虫害抵抗性などの単純な遺伝に従う形質の効率的な育種法はすでに実用化している。しかしながら、多収や高バイオマスに関する品種改良は依然として、従来の育種法に依存している。この理由は、多収には多数の効果の小さな遺伝子が関与し、またそれらが相互に関連することによって達成されていること、ならびに栽培環境の影響を受けやすいために、正確な評価ができにくいことなどが考えられる。したがって、これまでのマーカー選抜育種法とは異なる新たな育種法の開発が不可欠である。

本提案では、ゲノム解析によって得られる一塩基多型情報をもとに、ゲノムを構成する染色体ブロック（ハプロタイプブロック）を区別し、それらのバイオマス増大への寄与をアソシエーション解析法および QTL 解析法により明らかにする。また明らかとなったバイオマス増大に関わるハプロタイプブロックを組み合わせた理想ゲノムをデザインすることにより、高バイオマスを達成する。一方、安定的な作物生産を維持するためには、様々なストレス下環境に耐えることが必要である。日本では、環境ストレスとして低温が、また生物的ストレスとして病虫害などが、安定生産の障害となる、これらの抵抗性遺伝子については、近年の研究の進展が著しく、これまでに得られた成果を活用して、高バイオマス系統へストレス耐性遺伝子のマーカー選抜による導入を行う。ハプロタイプ選抜と主動遺伝子の導入によって作出された育成系統は、育種選抜が行われる圃場で、その収量性他の形質を正確に評価する。

本研究を遂行するためには、圃場レベルでの信頼性の高い収量評価、乾物量の評価とハプロタイプブロック識別によるゲノム構造解析を両立させることができる研究体制を構築することが不可欠である。

バイオマス増産にむけた食用・飼料用作物の次世代育種技術の開発

多収性、QTL解析、DNAマーカー選抜育種、ゲノミックセレクション、耐病虫性、不良環境適応
イネ、ダイズ、コムギなど



(具体的な研究課題例)

- ・穀物の収量を構成するシンクサイズを決定する遺伝的要因の解明
- ・穀物の光合成能力を決定する遺伝的要因の解明
- ・SNP解析によるハプロタイプブロックの定義と多収性との関連解析
- ・ゲノム塩基配列解析による SNP マーカー解析基盤の確立
- ・環境ストレスに適応する遺伝的要因の解明とそれらの高バイオマス系統への導入
- ・病虫害抵抗性に関する遺伝的要因の解明と高バイオマス系統への導入
- ・イネ、コムギ、ソルガム、ダイズに関する多収性遺伝子源の評価
- ・イネ、コムギ、ソルガム、ダイズに関する高バイオマス個体の選抜にむけた選抜母集団の作出

●提案の根拠

- ・イネでは、収量を構成する種子の数や大きさなどを決定する遺伝子の単離やその機能解析において、世界のトップを走っており、それらの研究成果は本研究課題における既往成果として利用できる。我が国は、ゲノム解読に引き続き、収量性を始めとする、有用農業形質の解析に不可欠な、実験系統群や SNA マーカーの基盤整備が進んでおり、本提案を遂行するにあたり有利な立場にある。
- ・イネでは SNP 情報が極めて充実してきており、その基盤形成が一定レベルで終わっているため、現時点で、提案課題に投資することによって、効果的に新育種法の開発につながる。ダイズ、ソルガムに関しては、ゲノム配列解読が終了した段階であり、SNP 解析基盤の形成に一定の投資をする必要がある。またコムギに関しては、ゲノム解読が完了していないことから、ゲノム解読への一定の投資が不可欠である。
- ・次世代シーケンサーの利用が可能となり、様々な作物において SNP マーカーの利用基盤が充実したことから、SNP マーカーの育種選抜への利用が期待されている。

多様なゲノムの小ブロックが混ざり合った個体集団（シャッフリング集団）の確保が早急に望まれるが、自殖性作物である、イネ、ダイズ、コムギなどでは、ゲノムの混合には手間と時間がかかる。したがって、直ちに主要穀類でゲノムのシャッフリングを開始することが不可欠である。

●成果の波及効果

主要作物、特にイネ、において高バイオマスや多収性に関する新育種技術が開発されることによって、イネでは他の複雑な形質、例えば環境ストレス耐性（回避）や低コスト栽培に適した直播適性への新育種法の水平展開が可能となり、コメの安定生産に貢献できる。一方、イネで確立した手法は、ソルガム、ダイズ、コムギなどの他の穀物、飼料作物に応用が可能である。新育種法の開発は、高バイオマス品種の開発を通じて、穀物の増産や安定生産に大きく貢献できる。

2-6 植物工場等を活用した高付加価値植物の創製

●提案の内容

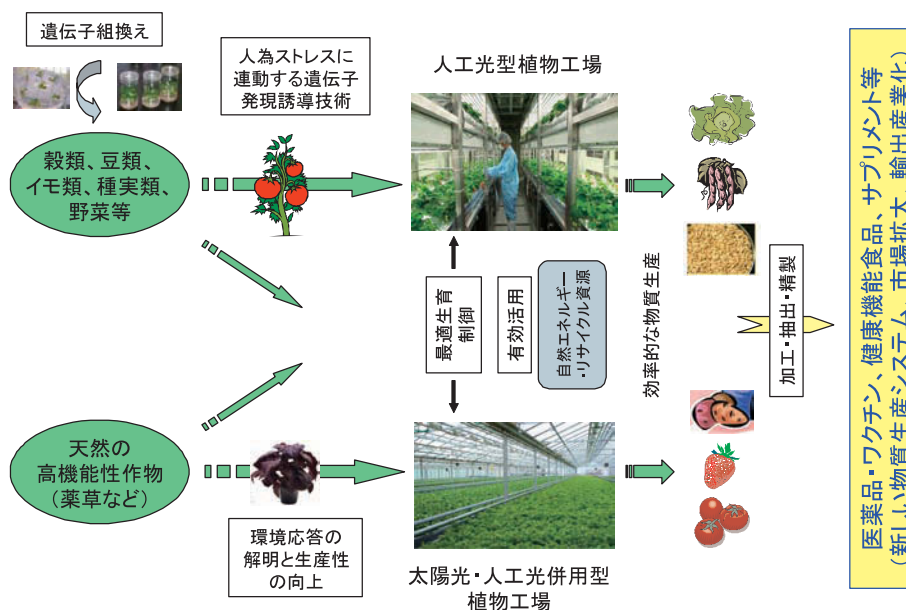
植物の機能を最大限に発揮させて高付加価値物質を生産するためには、植物工場等の制御環境の活用が有効である。本提案は植物工場等を活用した、1) 植物由来の低分子医薬品および遺伝子組換え作物によるヒト用と家畜用の医薬品・ワクチン、2) 高機能性作物および遺伝子組換え作物を用いた健康機能食品・サプリメント・栄養機能成分、の生産に関わる研究開発である。

目的の有用物質を安定的に高濃度で含有する遺伝子組換え植物を生産するためには、生育環境のコントロールが不可欠である。農業においては、自然条件下で食用作物に三大栄養素、ミネラル、ビタミン等を安定的に蓄積させる栽培技術は確立されている。しかし、遺伝子組換え植物の遺伝子発現は外的環境に不安定なことが多く、目的の有用物質の濃度変動が大きい。また高機能性作物の有用物質の多くは微量の二次代謝成分であり、その濃度も外的環境や栽培法の影響を受けやすい。

植物工場は、1) 自然界にない環境を創造できる、2) 人為的な環境ストレスを付与できる、3) 目的物質生産に理想的な生育環境を作れる、という他の生産系にない特徴がある。本提案は、この特徴を活かせる遺伝子組換え植物を作出し、制御環境下で目的遺伝子の発現誘導をコントロールしながら有用物質を高含有量・安定生産する技術を開発することにより、バイオ医薬品と機能性食品の市場拡大と輸出競争力のある産業の創出を目標とする。また、バイオ技術と水、肥料、二酸化炭素の使用量を最小限に抑える植物工場を融合して、省資源で環境調和型のユニークな物質生産系を確立する。

植物工場は、1) 自然界にない環境を創造できる、2) 人為的な環境ストレスを付与できる、3) 目的物質生産に理想的な生育環境を作れる、という他の生産系にない特徴がある。本提案は、この特徴を活かせる遺伝子組換え植物を作出し、制御環境下で目的遺伝子の発現誘導をコントロールしながら有用物質を高含有量・安定生産する技術を開発することにより、バイオ医薬品と機能性食品の市場拡大と輸出競争力のある産業の創出を目標とする。また、バイオ技術と水、肥料、二酸化炭素の使用量を最小限に抑える植物工場を融合して、省資源で環境調和型のユニークな物質生産系を確立する。

植物工場等を活用した高付加価値植物の創製(高機能性作物・医薬品生産)



(具体的な研究課題例)

- ・ 医薬品原材料および機能性食品生産のための遺伝子組換え植物の作出
- ・ 人為的な環境ストレスに応じて目的遺伝子を発現誘導する技術の開発
- ・ 薬草などの天然の高機能性作物の環境応答の解明および生産性の向上
- ・ 省資源・低コストの環境調和型植物工場の開発
- ・ 高機能性作物および遺伝子組換え植物の最適生育制御
- ・ ポストハーベストおよび加工・抽出・精製の技術開発

●提案の根拠

医薬品原材料用の遺伝子組換え植物や機能性を付加した作物の開発の歴史は浅く、製品化されたものは少ない。しかしその優位性や有用性は明らかであり、学界だけでなく産業界からの期待も大きい。生産の場を植物工場と決めれば、気象変化や病虫害の克服のための遺伝的能力の付与や機能改変の必要がないため、最先端の遺伝子組換え技術を導入しやすく、比較的短期間で目標の植物を作出できる。その結果、諸外国にはない、植物工場を用いる医薬品等生産を行う物質生産システムを確立することが可能である。

植物工場では植物種ごとにその最適な環境条件で育成できるため、光合成にもとづく生長が最適化される。その結果、植物工場の生産コストあたりの光合成効率は植物種間にほとんど差がないことが証明されている。そのため穀類、豆類、イモ類、種実類、野菜いずれの作物でもこの分野の候補作物となりうるため、この提案には、我が国の幅広い分野のグリーンバイオ研究者が参画できる。食用作物の利用は、家畜やペット用の医薬品や経口ワクチンも生産できる点が特長である。

我が国の製剤・食品原料のメーカーは薬草の多くを輸入に依存しており、国内生産の拡大が急務である。薬草などの天然の高機能性作物は、農作物と異なり栽培化されていない。そのため、光合成、形態形成、養分吸

収、物質生産などの試験データが少なく、栽培技術が確立されていない。そこで世界をリードする我が国の野菜・花きの栽培研究を参考にしつつ植物工場を前提とした研究開発をすれば、短期間で栽培化を達成でき、同時に、有用物質を高含有量・安定生産する技術も確立できる。

植物工場の特徴は、たとえば、1) 自然界にない環境－24時間連続明期、日長延長・日長短縮、昼夜の気温逆転で光合成、開花・結実、形態形成を制御して生育を最適化する、2) 環境ストレスの付与－強光・弱光、紫外線照射、ガス刺激、接触刺激、養分過剰・欠乏、水不足を与えて目的遺伝子の発現誘導をコントロールする、3) 物質生産に理想的な生育環境－1) と2) を合わせて目的の有用物質を高含有量で安定的に生産する環境を作り効率的に物質生産を行う、点である。

植物工場には太陽光・人工光併用型と人工光型がある。薬草などの天然の高機能性作物の生産は太陽光・人工光併用型が主に使われ、製造管理及び品質管理が要求される医薬品・ワクチン原材料用植物の生産は人工光型が使われるため、両型の開発が必要である。また、植物工場の食用野菜の研究とは切り離して、これらの植物の生産に特化する研究開発が必要である。

●成果の波及効果

高付加価値植物を生産する植物工場は立地条件を問わない。そのため、この物質生産システムは輸出が容易である。我が国とは気候の異なる国でもそのまま利用できる。バイオ技術を植物工場に組み込んで輸出できるため、輸出競争力を持つバイオ産業の一端を担うことが期待される。

施設園芸の立地条件は食料需要のある地域に限定されるため、必ずしも自然エネルギーやリサイクル物質をうまく活用できていない。しかし当植物工場はコスト削減のためにもむしろこれらの立地条件が適しており、環境調和型のバイオ産業として、地域活性化や資源リサイクルに貢献できる。

2-7 生物機能を活用したバイオリファイナリー、環境修復技術の開発

●提案の内容

ヒトは石油や鉱物など地下資源を利用して、産業・社会を高度に発達させ、暮らしや生活を豊かにしてきた。文明の発達とともに20世紀後半に地下資源の枯渇化危惧や公害問題を経験し、21世紀により環境意識の時代にたどり着いた。近未来の持続型・循環型社会の構築にむけて、太陽エネルギーによる二酸化炭素循環システムの本体である光合成生物を高度に利用することが強く求められている。本提案では、地上資源の利用とリサイクル社会形成にむけて、我が国の先端的な光合成生物研究を活かし、産業応用に直結する異分野融合型の新技術基盤開発研究を総合的に推進する。

対象とする技術分野としては、①植物バイオ燃料・バイオ素材に適した植物開発、②光合成生物由来のバイオ燃料・バイオ素材（バイオリファイナリー）技術開発、③光合成生物による資源回収・環境修復技術開発などがある。バイオ燃料には、バイオエタノール、バイオブタノール、バイオガス、バイオディーゼル、バイオ軽油が、バイオ素材としては、ポリエチレン、ポリプロピレン、ポリ乳酸、ポリエステル、ポリアミド、その他の新規バイオマス素材、さらには、医薬品・ワクチン生産が該当する。

持続社会ニーズ対応型の光合成生物を活かした技術を創成するために3つの視点に着眼する。①光合成生物の機能は商品の性能、②光合成生物の移動性は商品の流通性、③光合成生物の生産技術は商品の安定性。これら3つの視点を解決できる、①市場原理に対応すべく多様な機能スペックを自在に創出できる汎用性科学技術、②光合成生物を「材料・素材」としてとらえて、材料・素材（有用成分等）化する科学技術、③カーボンニュートラル型の材料・素材（有用成分等）を大量生産する科学技術、を創出する。

気候変動や人間活動に起因する砂漠化の修復から、産業化・都市化に起因する汚染物質浄化技術まで、環境修復技術の対象となる種類・規模・空間はさまざま多様である。よって、多様な光合成生物のさまざまな機能の理解と機能改変を環境修復技術の開発原理と位置付けることでアップライド指向の汎用性技術を創成する。



(具体的な研究課題例)

- ・植物バイオマス生産機能を画期的に増強する技術基盤
- ・植物・微生物機能、ナノテクノロジーを統合した新バイオ素材の研究開発
- ・植物代謝科学、情報材料科学の融合による未知有用化合物の研究開発
- ・情報工学との連携融合による合成ゲノム・合成生物学研究
- ・劣化環境、汚染環境を修復する植物の創成にむけた技術基盤開発
- ・資源の回収と循環、バイオリファイナリーを効率化する技術基盤開発

●提案の根拠

米国企業を中心として、遺伝子組換え農作物の大規模商業化が行われ、強い国際競争力を米国が発揮している。また、近年、中国において遺伝子組換え作物への大きな研究投資が行われている。このような農作物分野において実用化に向けた技術開発水準・産業技術力が欧米に劣っていることは否めない（出典：ライフサイエンス分野 科学技術・研究開発の国際比較 2008 年版）。一方、植物機能と微生物を統合したバイオリファイナリー分野の研究においては、実用化に至っている例は少ないが、米国では、植物研究に対する投資がシロイヌナズナからバイオリファイナリー・バイオレメディエーションが可能な実用植物へシフトしている。

経済産業省では、植物機能を利用した植物活用技術の開発を、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）を通して支援しており、トチュウからのゴム生産とリンクさせた二酸化炭素低減技術の開発、耐塩性を付与したユーカリ（紙パルプの主要樹種）の開発、化粧品、医薬品として使われるヒアルロン酸の植物での生産技術の開発などが成功しており、当該分野において国際競争力を発揮できる基盤が整備されつつある。また、工場廃水中の金を植物細胞で回収する技術開発が理研 - DOWA との共同研究で成功してい

る（平成22年5月29日「植物を利用したグリーン・イノベーションに向けて」と題したシンポジウムでの発表）。当該分野の研究の多くは、植物の物質吸収・蓄積機能、物質生産・貯蔵機能、微生物機能の活用などの基礎研究に基づいて知財化されてきたが、これらの技術を実用化するには、単に植物科学だけではなく、産業技術と連携した異分野融合型の新技術基盤開発研究を推進する必要がある、この部分がボトルネックとなっており、国としての支援が不可欠である。つまり、知財化された開発技術（シーズ）へさらに投資することで、商品化されると考えられる。幸いにも、国内での基盤研究のレベルは高く、先端計測基盤拠点である東日本拠点（理化学研究所・東京大学・東北大学）、中部日本拠点（名古屋大学・基礎生物学研究所）、西日本拠点（奈良先端大学・京都大学）、形質転換植物研究拠点（筑波大学）、ストレス応答研究拠点（岡山大学）などがあり、研究推進の受け皿となりえるという利点がある。

遺伝子組換え植物への規制が米国などに比べて厳しく、遺伝子組換え実用植物を用いた野外試験などの制限が研究開発を抑制している側面がある。実用植物を用いた産業化研究の推進と法整備が望まれる。

●投資する意義

成果は、研究基盤（インフラ）の強化・ネットワーク化、シナジー効果をもたらす異分野研究ネットワークの構築の促進、戦略的研究予算の重点投資、若手人材の育成とアジアを中心とした国際連携・協力などへ波及し、植物科学、植物学、植物生理学、植物細胞分子生物学、育種学、生物工学、光合成学、作物学など幅広い学術分野へ寄与することができる。

また成果の経済・社会への波及効果について、産学官のシームレスな研究開発、イノベーション・システムの構築、国民の理解の促進などへ波及する効果が期待できる。国策としての成果の波及効果として、資源の海外流出の防止、CO₂削減効果、持続型社会の構築ならびに移行の促進などを挙げることができる。

2-8 バイオ燃料・素材生産を目指した微細藻類の代謝改変とゲノム育種技術の確立

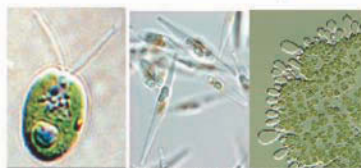
●提案の内容

食糧と競合しないバイオ燃料ならびに工業原料の生産に、光合成によって生育する微細藻類（植物プランクトン）の利用が期待されている。デンプン・脂質・炭化水素・水素の生産は、光合成に依存しており、生産性の大幅な向上が期待されている。生産能力を増強する技術開発には、光合成装置と生物種ごとに特徴をもつ代謝経路を理解することが重要である。

バイオ燃料として直接利用可能な炭化水素を生産することが知られている緑藻では、炭化水素の生合成経路や炭化水素生産の制御を担う調節遺伝子が未解明である、形質転換系がないなど、バイオ燃料生産能増強を実現するには、複数の克服すべき課題が存在する。（１）比較ゲノム解析に必要な精度の高いゲノム情報の取得、（２）比較ゲノムと生化学研究による代謝過程（生合成経路と分解経路）の解明、（３）CO₂濃縮ならびに代謝酵素遺伝子の単離と同定、（４）代謝酵素遺伝子の改変と形質転換系による生産制御技術の開発、（５）培養条件の変化や遺伝子導入による代謝酵素活性の操作による代謝変動の迅速な解析技術の開発、（６）同一の生産性の高い種を維持するためには、導入した遺伝子を安定化し、次の世代に安定に遺伝する系の開発、（７）燃料等の生産性を担う遺伝子を単離・同定し、増殖速度の速いモデル藻類に導入して、その代謝変動を評価する系を開発する。以上を進めることで、これまでになかった燃料等生産性をもつ藻類を育種する事が可能となる。

そのためには、（１）代表的なバイオ燃料生産藻類ならびにモデル緑藻におけるゲノム・トランスクリプトーム・メタボローム情報を取得し、その比較のためのデータベースを構築する。（２）バイオ燃料生産に係わる高効率の酵素を担う有用遺伝子を単離・同定する。（３）有用遺伝子を必要な時期に大量に発現させる遺伝子制御部品とその細胞への導入法を開発する。（４）有用遺伝子の発現もしくは、バイパス代謝系の抑制による細胞内代謝変化を短期間で評価できる代謝変動計測システムを確立する。これにより、燃料生産の効率の大幅な向上を目指す。

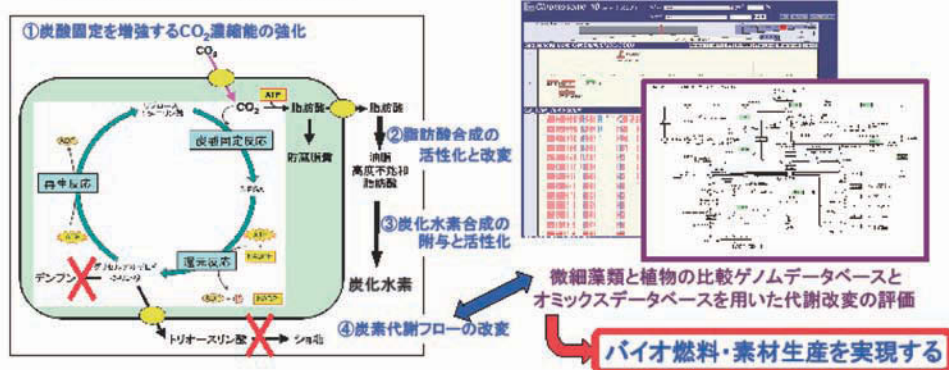
バイオ燃料・素材生産を目指した微細藻類の代謝改変とゲノム育種技術の確立



ゲノム情報と形質転換系が確立している
緑藻 *Chlamydomonas*(左)、珪藻 *Phaeodactylum*(中央)と
炭化水素を生産する緑藻 *Botryococcus*(右)

●光合成炭素代謝のゲノム情報・メタボローム情報を駆使した分子育種技術を開発し、バイオ燃料(炭化水素・油脂)、工業原料(プラスチック原料油脂)・生理活性物質(EPA・高度不飽和脂肪酸)の高効率生産を実現する。

- (1) 全ての原料となるCO₂の供給が確保であることから、CO₂濃縮を担う遺伝子を同定し、その強制発現系を確立し、培養条件を検討することで、バイオマス向上、培養期間短縮を目指す。
- (2) 炭化水素・油脂等の生合成遺伝子を同定し、機能改変酵素をコードする合成遺伝子を作成する。
- (3) ゲノム情報と形質転換系を用いて、合成遺伝子を導入し、その遺伝的安定化、発現制御を行う。
- (4) 遺伝子発現抑制系と強制発現系を用いることで、代謝をデザインする。藻類での代謝制御系と遺伝子制御系の改変株を、トランスクリプトーム・メタボローム解析により評価し、改変遺伝子のデザインにフィードバックする。



(具体的な研究課題例)

- ・緑藻ボトリオコッカスのゲノム解析による炭化水素生産に関わる遺伝子の単離・同定と、遺伝解析が可能でCO₂濃縮能を増強した緑藻クラミドモナスへの導入による炭化水素生産能の付与
- ・有用油脂生産に関わる遺伝子の同定と、異種藻類ならびに高等植物由来の有用油脂生産関連遺伝子の導入による油脂改変技術の開発
- ・海洋性珪藻フェオダクティラムへの遺伝子導入による有用脂肪酸ならびに炭化水素の生産技術の開発と発現制御技術の開発

●提案の根拠

次世代シーケンサーの登場により、これまで解読が何年もかかっていた微細藻類のゲノム解読が可能となり、さらに網羅的な転写ならびに代謝産物の変動を調べることが可能となってきた。また、米国を初めとして世界各国政府ならびに石油関連企業は、化石燃料の枯渇に対処する為のエネルギー確保に乗り出している。近年バイオ燃料(バイオエタノール)生産の為に穀物が利用され、穀物価格の高騰を招いていることから、食糧との重複のない生物資源として、藻類が注目され、エネルギー確保とカーボンニュートラルな光合成生物としての藻類の有用性が認識されてきた。

湿潤温暖な気候の我が国では、微細藻類の繁茂が顕著であり、特徴ある微細藻類の採取が過去50年以上にわたって進められており、世界に先駆けて微細藻類のカルチャーコレクションが東京大学応用微生物研究所(コレクションは現在、国立環境研究所に移管)において確立している。また、藻類を含む微生物を用いた有用物質生産においては、世界のトップレベルの研究水準を維持している。微生物の中でも光合成微細藻類を研究材

料とする研究者は、近年増加の傾向あり、生化学や遺伝学・ゲノム情報学との協力を進めることで、新技術が開発され、確保と燃料の確保が両立すると考えられる。

当該分野では、物質生産を目指した工学的アプローチが既に進められているが、微細藻類の多様性とゲノムレベルでの理解に基づいた研究事例が近年格段に進んできたことが挙げられる。特に、微細構造の遺伝子導入による代謝改変技術開発が、現在ボトルネックになっている。

●成果の波及効果

微細藻類における代謝系の網羅的解析、ゲノム解析を進めることで、生物の環境への適応順化について、生物学（生理学・遺伝学・生化学）はもちろん、培養工学や育種学・生物工学、環境工学、さらには、多量のオームデータ（ゲノム・トランスクリプトーム・メタボロームのデータ）の情報処理を担うコンピュータサイエンスへの貢献が期待できる。

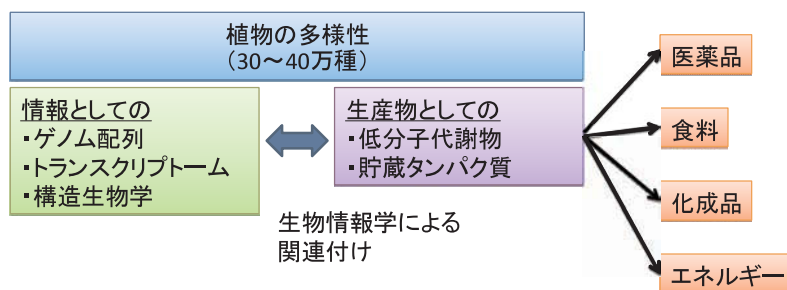
ゲノム解析技術の発展により、炭化水素や脂質などのバイオ燃料ならびに工業原料を効率よく生産する微細藻類を分子育種することが、現実味を帯びてきた、食糧と競合しないバイオ燃料生産技術の開発により、日本社会のエネルギー政策や、低炭素社会の実現に向けて成果が期待される。

2-9 植物多様性の化学資源の利活用に向けた基礎研究と トランスレーショナルリサーチ

●提案の内容

植物は一次生産者として低分子化合物やタンパク質を生産しており、それらを人類は食料、医薬品、化成品、エネルギーとして利用している。この物質生産性の根源は植物のもつ多様なゲノムに秘められている。従って、多様な植物の有する情報であるゲノム、トランスクリプトームがどのようにそれぞれの植物の物質生産性を規定しているかを解明することが必要である。そこで、この研究領域では植物多様性に秘められている多様な化学資源の根源を理解しそれをエンジニアリングし利活用するための様々な方面からの研究を推進する。従来のゲノム機能科学研究を超えて、構造生物学による化学的精密制御、モデリングなどバイオイノフォーマティクス、設計・合成生物学、日本の固有植物の研究と利用、生産の場としての植物工場の推進と利用、これらに関するアウトリーチと社会的理解、など基礎研究からトランスレーショナルリサーチまで幅広い分野の研究を積極的に推進する。

植物多様性の化学資源利用



- ✓ 次世代シーケンサーによる100~1000種の化学資源植物のゲノム、トランスクリプトーム解析
- ✓ これらの植物のメタボローム、プロテオームによる化学生産物とゲノムとの関連付け
- ✓ 多様な合成酵素群の構造生物学研究による生産の化学的精密制御
- ✓ 生物情報学の強力な推進
- ✓ 日本の固有植物の研究と利用
- ✓ 生産の場としての植物工場の利用
- ✓ アウトリーチと社会的理解

(具体的な研究課題例)

- ・次世代シーケンサーによる日本およびアジアの生薬基原植物のゲノム解読とメタボロミクスの統合
- ・エネルギー、化成品原料植物の次世代シーケンサーによるゲノム解析と生産性の向上
- ・医療現場で医薬品として使われている原料植物の統合オミクス解析による有効成分の生産研究
- ・設計・合成生物学研究のための代謝フラックスの数学的モデリング
- ・植物工場で生産されたタンパク性組換え医薬品の高度化に向けてのオミクス解析
- ・植物性医薬品、健康機能成分、化成品成分の設計・合成生物学と植物工場へのトランスレーション
- ・植物多様性の持続的利用のためのサイエンスコミュニケーションと研究社会学

●提案の根拠

- ・シロイヌナズナのようなモデル植物すら、そのナチュラルバリエーションに有用成分を作る遺伝子が隠されていることが最近明らかになってきており、植物のもつ自然多様性に大きな期待が寄せられている。
- ・技術的にも次世代シーケンサー、高性能質量分析計によるメタボローム、プロテオーム解析技術に飛躍的な進歩が見られている。
- ・特に、我が国においては植物のゲノム機能科学に強みがあることは各種の客観的調査（例えば、サイエンスマップなど）によって明確に示されている。
- ・また、ワシントン条約などで各国が生物資源の保護政策を打ち出しているなかで、我が国も固有の植物資源を有効に使う道を積極的に考えなければならない。同時に植物多様性の持続的利用のためのサイエンスコミュニケーションと研究社会学の推進が必要である。
- ・国土の狭い日本において植物工場のような技術は積極的な投資開発がなされなければならない。基礎研究から植物工場へのトランスレーショナルリサーチが必須である。
- ・設計・合成生物学は、化学、生物学、ゲノム科学、生物情報学、プロセス制御学などに立脚する新しい分野であるが、欧米においても模索中の将来有望な分野である。資源の少ない日本において積極的に推進すべき分野であり、植物の化学的多様性に立脚した研究は大きな特徴を有する。

●成果の波及効果

- ・植物の生存戦略であるゲノム多様性の解明に向けた研究が飛躍的に推進される。
- ・新しい植物医薬品、健康機能産業が振興する。
- ・植物工場関連の産業が振興する。
- ・設計・合成生物学の分野において植物化学資源をターゲットにしたバイオテクベンチャーが生まれる。

Appendix

A 検討経緯

B 執筆者・協力者一覧

A 検討経緯

2010年	3月	CRDSによる企画委員*の選定
同	4月	第1回企画委員会の開催
同	5月	執筆協力者の選定
同	8月	第2回企画委員会の開催（中間取り纏め）
同	10月	ライフサイエンス分野俯瞰ワークショップ グリーンテクノロジー分野分科会の開催 （報告内容に関する確認と修正）
同	10月	ライフサイエンス分野俯瞰ワークショップの開催（識者からの意見聴取）
同	11月	上記を踏まえた内容の改訂
同	12月	執筆者による最終確認

* 次項参照

B 執筆者・協力者一覧

（統括責任者）

福田 裕穂 JST 研究開発戦略センター 特任フェロー
東京大学大学院 理学系研究科 教授

（企画委員）

〔環境修復・多様性利用分野〕

篠崎 一雄 理化学研究所 植物科学研究センター センター長
寺島 一郎 東京大学大学院 理学系研究科 教授

〔資源・エネルギー分野〕

江面 浩 筑波大大学院 生命環境科学研究科 教授
原山 重明 中央大学 理工学部生命科学科 教授

〔食料生産分野〕

松岡 信 名古屋大学 生物機能開発利用研究センター 教授

（執筆協力者）

赤間 一仁 島根大学 生物資源科学部 准教授
五十嵐泰夫 東京大学大学院 農学生命科学研究科 教授
伊藤 昭彦 国立環境研究所 地球環境研究センター
井藤賀 操 理化学研究所 植物科学研究センター
梅澤 俊明 京都大学 生存圏研究所 教授
大川泰一郎 東京農工大学 農学研究院生命農学部門 准教授

後藤 英司	千葉大学大学院 園芸学研究科 教授
近藤 昭彦	神戸大学 工学研究科 教授
斉藤 和季	千葉大学大学院 薬学研究院 教授
重岡 成	近畿大学 農学部バイオサイエンス学科 教授
篠原 健司	森林総合研究所 研究コーディネーター
柴田 大輔	かずさ DNA 研究所 産業基盤開発研究部 部長
妹尾 啓史	東京大学大学院農学生命科学研究科 教授
高岩 文雄	農業生物資源研究所
中静 透	東北大学大学院 生命科学研究科 教授
平山 隆志	岡山大学 資源植物科学研究所 教授
福岡 浩之	農業・食品産業技術総合研究機構 野菜茶業研究所
福澤 秀哉	京都大学大学院 生命科学研究科 准教授
藤原 徹	東京大学大学院 農学生命科学研究科 教授
牧野 周	東北大学大学院 農学研究科 教授
松村 健	産業技術総合研究所 生物プロセス研究部門 グループリーダー
南澤 究	東北大学大学院 生命科学研究科 教授
持田 恵一	理化学研究所 植物科学研究センター
矢野 昌裕	農業生物資源研究所 QTL ゲノム育種研究センター センター長

(分科会参加者)

梅澤 俊明	京都大学 生存圏研究所 教授
江面 浩	筑波大学 大学院生命環境科学研究科 教授
近藤 昭彦	神戸大学 工学研究科 教授
篠崎 一雄	理化学研究所 植物科学研究センター センター長
寺島 一郎	東京大学 大学院理学系研究科 教授
原山 重明	中央大学 理工学部生命科学科 教授
福田 裕穂	東京大学 大学院理学系研究科 教授
藤原 徹	東京大学 大学院農学生命科学研究科 教授
牧野 周	東北大学大学院 農学研究科 教授
松岡 信	名古屋大学 生物機能開発利用研究センター 教授
山根精一郎	日本モンサント株式会社 代表取締役社長

(五十音順 / 敬称略)

※所属・役職等は本調査実施の時点

■報告書作成メンバー■

浅島	誠	上席フェロー	(ライフサイエンスユニット)
及川	智博	フェロー	(ライフサイエンスユニット)
川口	哲	フェロー	(ライフサイエンスユニット)
鈴木	響子	フェロー	(ライフサイエンスユニット)
高野	守	フェロー	(ライフサイエンスユニット)
福士	珠美	フェロー	(ライフサイエンスユニット)

グリーン・バイオ・イノベーションの 創出に向けた戦略研究

～光合成生物の生産・利用技術の創出によるグローバル課題解決へのロードマップ～

平成 23 年 2 月

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター ライフサイエンスユニット
Life Science Unit, Center for Research and Development Strategy
Japan Science and Technology Agency

〒102-0084 東京都千代田区二番町 3 番地
電 話 03-5214-7486
ファックス 03-5214-7385
<http://crds.jst.go.jp/>
©2010 JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
No part of this publication may be reproduced, copied,
transmitted or translated without written permission.
Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any
quotations must be appropriately acknowledged.

