

特定課題ベンチマーキング報告書

**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**

**Benchmarking Report on
Technologies in AgriBioscience**

平成22年10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
Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

エグゼクティブサマリー

将来的に予測される地球規模での環境変化や、食料需要の多様化、増大、その他の社会的変化などへの懸念から、新しい植物生産技術に対する社会的な期待が近年急速に高まっている。

JST 研究開発戦略センター（CRDS）では今後重要となる植物科学研究領域として「環境適応型の植物生産技術」を抽出し、その戦略的な推進の必要性などについて調査やワークショップの開催^[1]を通じて検討した。植物生産技術とは、ここでは自然環境への耐性や適応性、耕種管理に対する応答性などを植物に対して任意に付与または強化するための技術である。

検討の結果、提言書「戦略イニシアティブ 環境適応型作物のゲノム設計技術」^[2]をとりまとめたが、同書策定にあたっては当該分野周辺の国際的な技術水準や動向と我が国の現状との比較を行なうため、各種公開情報の収集・分析や現地調査を含む専門家へのインタビューを実施した。本書は、これらの比較調査のうち提言書と特に関連の深い調査結果についてとりまとめたものである。

調査の結果、主に以下の点が明らかとなった。

- ・ 将来的に予想される地球環境の変化や新興国の更なる発展などの社会変化に鑑み、研究開発ターゲットとして近年注目されている植物の形質は、高収量性、乾燥耐性、窒素利用効率、油脂の質や量に関する形質などであった。これらは従来の除草剤耐性などに比べてより高度な知見と技術を要する対象であり、世界の様々な研究開発機関が凌ぎを削って取り組んでいる。
- ・ 植物生産技術に関しては、欧米豪など農業を基幹産業として持つ国々を中心に、積極的な研究開発が行われている。とりわけ大学や公的研究機関と民間企業の共同研究が盛んで、基礎から応用への橋渡しが積極的に行われている。
- ・ 研究面での主流の1つは、植物個体のゲノムから表現型までの異なるスケールの科学的知見をいかに統合的に関連付け、活用するかという点にあった。これらを通じて、過去約10年にわたってシロイヌナズナなどのモデル植物を使って行われてきた植物の遺伝情報など分子レベルの膨大な情報の蓄積を次世代の植物生産技術へ繋げようとする取り組みが各地で行われていた。

- ・日本では、乾燥耐性に代表されるような重要形質関連遺伝子の同定など、分子レベルの情報の蓄積が世界的にも豊富である。実際に論文数や被引用回数などで見ると基礎研究の活動度は、「ストレス耐性」、「除草剤耐性」、「窒素利用効率」などで世界の中でも上位にあった。これらの蓄積は、上記のような次世代の植物生産技術の開発にあたって貴重な研究資源となりうる。
- ・ただし、当該分野の基礎研究の活動度では、欧米豪の国々が依然として多くの場合において首位を独占し、また「ストレス耐性」、「耐病性」、窒素、水、光などの「資源利用効率」では中国やインドが日本よりも上位、ときに首位に位置するなど台頭が見られたことから、今後も上記のような基礎研究における日本の優位性が保たれるか否かは不透明な状況であった。

植物生産技術に関する研究開発が直面する課題の1つは、これまでに蓄積された植物個体に関する——遺伝子型から表現型までの——膨大な情報をどう統合し、かつそれらを持続可能な植物生産などを通じて社会へ還元するためにどう活用できるか、という点にあった。また諸外国では、この課題の解決に対し、理学、農学、工学など異なる分野の専門家が連携して知見や技術のノウハウを提供し合い、さらにそれらを組み合わせることを行っている。わが国は、基礎研究においてこれまで蓄積された強みを十分に活かすことができれば、このような最先端の取組みの進展に対して貢献ないし進展を牽引することができるものと期待される。

- 【1】ワークショップ報告書 フィールドにおける植物の環境応答機構と育種技術、2010年、JST-CRDS
- 【2】戦略イニシアティブ 環境適応型作物のゲノム設計技術、2010年、JST-CRDS

Executive Summary

In the face of global environmental changes, there are concerns about the negative effects of such changes on plant growth, especially crop production. More food, however, is required owing to the rapid increase in human population, and food quality such as nutrient content, must also be improved. Furthermore, a reduction in the input of nitrogen during modern agricultural processes is needed to alleviate its impact on environmental degradation. Thus, scientists are under pressure to provide some solutions to these global issues.

As a result of an extensive survey on the science and technology (S&T) field relevant to plant science, the Center for Research and Development Strategy of the Japan Science and Technology Agency focused on technologies in AgriBioscience as one of the priority subjects in the research and development (R&D) of plant science to solve the global issues. Then, a further investigation on technologies that will enable us to improve the adaptation and/or tolerance of plants to present and future environments and to accelerate the breeding of crops was carried out.

Various types of information were collected, such as hot topics in academia, worldwide trends in the private sector, and facts and figures on both environmental changes and agricultural issues reported through governmental and nongovernmental organizations in order to reveal domestic and international trends and problems in S&T and its application to industry. Then, the trends and problems were compared between Japan and other countries. On the basis of the analysis, we prepared the report, *STRATEGIC INITIATIVE Technology for Genomic Design of Environmentally Adapted Crops*, proposing the importance of the promotion of technologies in AgriBioscience in Japan. Furthermore, supplementary facts involving basic information relevant to the technologies in AgriBioscience were also reported here.

The main points of the investigation are as follows.

- Current R&D targets for the breeding of crops are traits relating to high yield, drought tolerance, nitrogen use efficiency, and the mass and quality of oil seeds. These targets reflect global environmental issues and the

rapid economic growth of several developing countries. Because of the complexity of such traits, scientists have been competing to gain more scientifically comprehensive knowledge about plants and to develop relevant novel technologies.

- Agricultural countries such as the U.S., Australia, and several European countries are leading the R&D in breeding. In these countries, there are good collaborative relationships between universities, governmental research institutions, and private companies, bridging the gap from basic discovery to industrial application.
- One of the main goals in current plant science is to integrate different levels of information on a plant, from genotype to phenotype, for a comprehensive understanding of the plant, particularly its mechanism of response to the environment.
- Various types of genetic information and resources have been collected by Japanese scientists. Their research activities in terms of productivity, that is, the number of papers, and impact, that is, the number of citations of a paper, are relatively high in the world, especially in the following topics: stress tolerance, herbicide tolerance, and nitrogen use efficiency.
- Generally, several agricultural countries, such as the U.S., European countries, and Australia, have been leading research activity in the field of plant science related to breeding. On the other hand, research activity in China and/or India is increasing, particularly with regard to the following topics: stress tolerance, disease tolerance, and efficiencies of nitrogen, water, and light use.

There are many challenging problems in S&T in AgriBioscience: how to integrate the enormous amounts of, various types of information of a plant, from genotype to phenotype, and how to apply such information effectively for the benefit of society, particularly for sustainable plant/crop production. To solve these problems, experts in plant science, agricultural science, informatics, and engineering are required to cooperate with each other to supply and interactively combine their knowledge and techniques for integration and application. Japanese researchers are also expected to contribute, or even lead, the tackling of problems through the utilization of their knowledge about various types of genetic information and resources of plants and their expertise in informatics and engineering.

目 次

エグゼクティブサマリー／ Executive Summary

1. 背景と目的	1
2. 調査方法	3
3. 調査結果概要	
3.1. 国内外の動向調査	4
3.2. 海外調査	8
3.3. まとめ	11

<調査結果詳細>

A1. 国内外の動向調査結果詳細

A1.1. 気候変動と植物（作物）生産に関する現状	14
A1.2. 植物生産技術に係る近年の主な科学技術政策の動向	21
A1.3. 基礎研究における過去 10 年の傾向	27
A1.4. 企業における研究開発の近年の動向	40

A2. 海外調査結果（サイトレポート）詳細

A2.1. アメリカ合衆国	56
A2.1.1. 農務省農業研究局乾燥地農業研究センター	56
A2.1.2. エネルギー生物科学研究所ほか	59
A2.2. オーストラリア	62
A2.2.1. ビクトリア州アグロバイオサイエンスセンター	62
A2.2.2. 植物アクセレーターほか	65
A2.2.3. 高解像度植物フェノミクスセンターほか	70

1. 背景と目的

地球温暖化やそれに伴う異常気象（降雨または乾燥の変則化など）などの気候変動は、世界各地での自然の生態系の維持や作物生産に深刻な影響を与える可能性がある。その一方、途上国が急速に発展し、世界の人口が増加し続ける昨今では、一般的に作物の世界的な需要は今後ますます増大すると予想されている。また従来の作物生産は化学肥料の大量投入など環境高負荷型の農業技術の普及によって成功してきたが、土壌の劣化や地下水汚染など地球環境への影響が顕在化するに伴って、環境低負荷型の持続可能な農業技術の確立に対する社会的な期待が高まっている。

これらの背景を踏まえ、JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、植物科学、特に植物生産技術に関わる育種、生理、生態などの分野における国内外の研究開発の現状と問題点、今後国として推進すべき研究開発戦略などに関して検討を行った。具体的には、遺伝的情報の活用と表現型形質との関連付けによる植物個体の統合的理解の重要性、また気候変動環境下でも現在と同等あるいはそれ以上の収量の確保を実現できるような環境適応型の植物を作出し生産する技術の確立の必要性などを主な対象として検討した。またその一環として、平成 21 年 11 月には科学技術未来戦略ワークショップ「フィールドにおける植物の環境応答機構と育種技術」を開催し、関連分野において先端的な取り組みを行ない第一線で活躍する国内研究者や研究開発担当者による検討も行った^[1]。

以上の検討を通じて、JST-CRDS では「フィールドにおける環境変化に適応し、安定的に生育する作物を分子レベルから設計するための技術に関する研究開発戦略」を策定した^[2]。また同研究開発戦略に関連する国内外の動向、とりわけ世界における先端的な取り組みや我が国の現状などについて、より多角的に把握するため、海外調査を含む国際技術力動向調査を行った。

本書は、上記調査の中で植物生産技術に関する国内外動向、とりわけ日米欧豪を中心とした行政、アカデミア、民間企業における研究開発動向について情報を収集し、比較することで、当該分野における日本のポジショニングの現状を明らかにすることを目的としている。なおここでは植物生産技術にテーマを絞ることとし、米国を中心として盛んに取り組みが始まっているバイオエネルギーや、合成生物学を通じた新規化合物の設計、などに係る植物科学動向についての情報収集は必要に応じて行うのみとした。

【1】ワークショップ報告書 フィールドにおける植物の環境応答機構と育種技術、2010 年、JST-CRDS

【2】戦略イニシアティブ 環境適応型作物のゲノム設計技術、2010 年、JST-CRDS

2. 調査方法

本調査は「戦略イニシアティブ 環境適応型作物のゲノム設計技術」（2010年、JST-CRDS）の検討、作成を踏まえて JST-CRDS が実施した。行政、アカデミア、民間企業を対象に農学を含む植物科学、とくに植物生産技術に関して調査を行ない、日米欧豪を中心とする各国の動向把握を行なった。具体的には文献（関連省庁、研究開発機関、関連団体等が公開するホームページや刊行物、国内外の専門誌に掲載された論文やニュースなど）、文献統合データベース、専門家からの意見およびワークショップでの議論（参考：「ワークショップ報告書 フィールドにおける植物の環境応答機構と育種技術」、2010年、JST-CRDS）などを通じて情報収集と分析を行った。また以下に示す方々の協力を得て海外調査も実施（米国：2010年1月、豪州：2010年2月）し、先端的な取り組みを行う各研究機関における研究開発や支援に携わる人々の活動内容、施設整備、資金の裏づけ、研究プロジェクトの進捗度などについて情報収集し、分析を行った。

■海外調査にご協力いただいた方々（敬称略、五十音順）

- ・ 明石 良 教授（宮崎大学 フロンティア科学実験総合センター）
- ・ 寺島 一郎 教授（東京大学大学院 理学系研究科 生物科学専攻）
- ・ 長谷川利拡 上席研究員（独立行政法人農業環境技術研究所 大気環境研究領域）

■主な調査項目

- ・ 行政：主要な政策（研究イニシアティブやプログラム）の動向
- ・ アカデミア：文献データベースに基づく植物科学の研究動向。とくに従来の育種とゲノムを中心とした植物科学（分子生物学や植物生理学など）の動向
- ・ 民間企業：世界的な化学メーカーを中心とする種子（種苗）ビジネスの研究開発に関する現状と将来的な展望

3. 調査結果概要

3.1. 国内外の動向調査

■ 気候変動が植物（作物）生産に与えるインパクト

地球規模での気候変動により各地で高温、乾燥、大雨などの異常気象が頻発しており、作物収量や植生等への多大な影響が懸念されている。また近代農業など多様な経済社会活動とも相まって、各地で地下水位の低下、栄養塩類の流出による地下水汚染、土壌の塩類化、土壌浸食、土地の疲弊、砂漠化といった植物・作物の生育に多大な影響を及ぼしうる種々の問題が顕在化している。

以下では、世界で起きている環境変化が各地の植物生産に与えるインパクトについての事例を、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の報告^[3]などに基づき列挙した。

・ アフリカ

温暖化により、2020年までに複数の国において、降雨に頼る天水農業からの生産量は最大で50%減少する可能性がある。これらは地域の食料安全保障に大きな影響を与え、住民の栄養不足を悪化させると予想されている。

・ 豪州およびニュージーランド

2030年までに、旱魃や山火事の増加によって、オーストラリア南部・東部、ニュージーランドの東部の一部地域において農業と林業の生産量が減少することが予測されている。

・ 南ヨーロッパ

気候変動に対し脆弱である地域においては、高温と旱魃が予測され、水利用可能性や水力発電のポテンシャル、作物の生産性が減少すると予想されている。

・ アジア

東南アジア・南アジアにおいては、雨季にイネなどの作物が冠水することによる収量低下が深刻な問題となっている^[4]。

・ 南米

気温上昇とそれに伴う土中の水分の減少は、今世紀中にアマゾン東部の熱帯雨林がサバンナへ段階的に置き換わっていくことに繋がると予想されている。また熱帯ラテンアメリカの多くの地域における種の絶滅を通じて重大な生物多様性の

リスクがある。さらに食料の安全保障に対する悪影響を伴ういくつかの重要な作物の生産性の減少と家畜の生産性の衰退が予測されている。

・ 北米

21 世紀初頭の数十年間で気候変化が天水農業の総生産量を 5 ～ 20% 増加させることが予測されている。また植物の生育温度範囲のうち高温域近くにあたる地域では収量の変化が予測されている。

■ 植物生産技術に係る国内外の近年の政策動向

近年、欧米の主要な研究実施機関や政策提言機関は、植物科学におけるゲノム解読とその利用に関する研究を主要研究課題の 1 つに挙げている。また出口志向を強める中で、育種をゲノム情報の利用先の 1 つとして重要視している。

施策やファンディングの動向からは、1990 年代に盛んに行われていたモデル植物を対象としたゲノム解読、cDNA や変異体パネルの作成などは、それらを通じて得られた膨大なオミクス情報を統合的に扱った解析やモデル化へシフトしていることが分かった。さらに、近年はこれら生物に関する膨大な情報を野外の実環境情報と照らし合わせることで、植物の環境応答機構の解明や計算機上での再現を試みる、より高度な統合的研究が進められている。

米国では、1998 年に策定された Plant Genome Initiative の下で 2000 年前後からモデル植物のゲノム解読と網羅的な遺伝子機能解析などを目的とした研究が強力に推進されてきた。しかし現在は、それらを通じて蓄積された多様な知見や情報を、実用作物の作出、あるいはバイオ燃料用植物の生産に関する研究開発へ応用しようとする取組みが盛んに行われている。その中では DOE（エネルギー省）と USDA（農務省）の連携的なファンディングなど特徴的な取組みもあり今後の動向が注目される。

欧州でも、EU の ETP（ヨーロッパ・テクノロジー・プラットフォーム）が次世代の植物研究に関するイニシアティブを策定し、FP7（第 7 次フレームワーク・プログラム）下で植物機能の統合的理解を目的とした研究開発を推進している。欧州内の各国でも同様に植物のゲノム情報を利活用する動きが進んでいる。

日本では文部科学省と農林水産省を中心に植物関連のプロジェクトが推進されてきた。とくに文部科学省所管の理化学研究所ではシロイヌナズナのようなモデル植物を対象とした解析的な研究が行なわれ、農林水産省所管の諸研究機関ではイネのような実用作物を対象とした品種改良等の研究開発が行われてきた。また社会受容性の問題など国内での遺伝子組換え植物の研究、利用の推進に関しては内閣府や学術会議などから推進施策や提言が提示されている。

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

■ 文献検索結果から見た研究動向

文献統合データベースを用いて条件検索を行い、2000年から2009年までの10年間における研究の動向、すなわちアカデミアの活動度、について植物と作物を区別して調べた。調査では、論文数と被引用回数を用いて、(1)「組換え」、「ゲノム」、「育種」、「育種かつゲノム」といった研究アプローチ間での比較、(2)「ストレス耐性」、「耐病性」、「除草剤耐性」、「殺虫剤耐性」、「資源利用効率」などターゲットとする形質間での比較、(3)それらの年次推移、(4)国間比較、を行った。

まず研究アプローチに関しては、「育種かつゲノム」という分子レベルから育種にアプローチする研究が全体的に少ないことが分かった。研究ターゲットについては「ストレス耐性」、「資源利用効率」(窒素、水、光など)、「除草剤耐性」などに関する研究が比較的盛んに行われていたことが分かった。「資源利用効率」の中では窒素や水に関するものが最も多かった。

年次推移に関しては、植物に関する研究で「ゲノム」に関する研究の論文数が2004年から2006年の間に「組換え」に関する研究の論文数を追い抜いていた。一方、作物に関する研究では研究アプローチ、研究ターゲットともに大きな変化は認められなかった。

論文の本数や被引用回数に基づく国間比較では、頻繁に上位に位置する国は米国、豪州、カナダ、英国、中国、インドなどであった。中国、インドは「ストレス耐性」や「資源利用効率」などの形質において特に存在感を示していた。日本に関しては多くの項目において上位または中位で見られたことから、基礎的研究においては一定の成果を挙げていると考えられた。

■ 企業における研究開発動向

種子事業に取り組む世界的な企業の多くは農薬市場で上位を独占する大手化学メーカーであった。それらは農薬開発と並行して自社農薬に対する耐性を持った品種の開発を行い、他にも後述するような種々の形質に着目した研究開発を積極的に行っていた。また世界的には、社会的な要請を背景に、食料作物だけでなくエネルギー資源作物の作出に向けた取り組みを行う企業も出始めていた。一方、これらの世界市場において、日本企業が上位に入り込むケースは認められなかった^{※1}。ただし国内市場が縮小傾向にあるなかで、海外へ積極的に進出して現地での品種開発に挑戦する日本企業も出始めており、今後の動向が注目される。

医薬品同様、研究開発の各フェーズには多大な労力、時間、資金がかかる。欧米豪など農業を基幹産業として持つ国々では大学または公的研究機関における精

※1 ただし農薬市場では住友化学が上位10社に入っている。またエネルギー資源作物関連の詳細については今回は調査対象外とした。

力的な基礎研究と、その成果を応用化する企業との連携が良好で、地域固有のニーズや市場ニーズを反映した研究開発を推進する体制が整っていた。これに対し、日本では基礎と応用の間に溝があり、基礎研究の成果が産業になかなか結びつかないことが問題として認識されている。

遺伝子組換えに関する特許出願動向などを見ると、日本では特定の種に特化した技術開発が行われ、米国が他種へも応用可能な汎用性のある基盤的技術の開発を行うのとは対照的であった。また遺伝子組換え作物の導入という点では日本は規制の厳しさ、規制対応への取り組みの乏しさ、社会受容性の低さ、異なる研究分野間での交流不足などから十分に進んでいない様子が見られた。

大手化学メーカーを中心とする種子事業の研究開発のターゲットは、従来の病虫害耐性や除草剤耐性などのほか、将来的なニーズに従って高収量性、乾燥耐性、窒素利用効率、種子に含まれる油脂の量や質などが注目されていた。またこれらの新しいターゲットに取り組むにあたっては、既存の技術だけではなく、最新の計測機器やデータ処理・解析のための計算機等を積極的に活用する動きが世界的には見られた。

【3】 Climate Change 2007 : Synthesis Report,

http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_spm.pdf

【4】 <http://www.nature.com/nature/journal/v442/n7103/full/nature04920.html>

【1】
背景と目的

【2】
調査方法

【3】
調査結果概要

【4】
調査結果詳細

3.2. 海外調査

■ アメリカ合衆国

期 間：平成 22 年 1 月 9 日～ 1 月 16 日

調査者：長谷川利拡（独立行政法人農業環境技術研究所 大気環境研究領域 上席研究員）

中村亮二（JST-CRDS フェロー）

訪問先：

ロアメリカ合衆国農務省農業研究局 USDA-ARS（アリゾナ州フェニックス - マリコパ）

- ・アメリカ合衆国農務省農業研究局乾燥地農業研究センター（U.S. Arid-Land Agricultural Research Center, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service）

ロイリノイ大学（イリノイ州アーバナ - シャンペーン）

- ・イリノイ大学 ゲノム生物学研究所（University of Illinois, Institute of Genomic Biology）
- ・イリノイ大学 エネルギー生物科学研究所（University of Illinois, Energy Biosciences Institute）
- ・イリノイ大学 先端バイオエネルギー研究センター（University of Illinois, Center for Advanced BioEnergy Research）

概 要：

まずアメリカ合衆国農務省農業研究局（USDA-ARS）の Bruce Kimball 博士から、圃場における開放系温暖化装置の仕様や共同研究の進展状況について聴き取りを行なった。また同じく USDA-ARS の Jeff White 博士から、アメリカ国立科学財団（National Science Foundation, NSF）の資金援助を受けている、iPlant と呼ばれる研究組織と研究内容について話を聞いた。iPlant はゲノムレベルの利活用を目指す Plant Informatics や植物モデルの研究者が、Cyber Laboratory を利用して共同研究を進めるグループ（collaborative）である。

イリノイ大学では Institute for Genomic Biology で SoyFACE（ダイズを対象とした開放系大気 CO₂ 増加、Free-Air CO₂ Enrichment の略）を担当している A. Leakey 博士、D. Ort 博士、E. DeLucia 博士、植物燃料に関するプロジェクトを率いる S. P. Long 博士らからフィールド科学のチーム研究の実践方法、研究内容について意見を聴取した。C. Bernacchi 博士からは FACE に赤外線ヒーター区を導入した T-FACE の研究内容に関する説

明を受けた。T-FACE では、周年温暖化実験を実施しており、実際の圃場での実施状況を視察した。非作付け期間の処理では、土壌呼吸をマニュアルチャンバーで計測していた。Institute for Genomic Biology では、5 名の異分野の教員と多くの大学院生が、同じフィールドで極めて効率的に研究を推進している。インフラ、組織とも、世界最先端の研究チームであると認識した。

■ オーストラリア

期 間：平成 22 年 2 月 16 日～ 2 月 24 日

調査者：寺島一郎（東京大学大学院 理学系研究科 生物科学専攻 教授）

明石 良（宮崎大学 フロンティア科学実験総合センター 教授）

中村亮二（JST-CRDS フェロー）

訪問先：

□ラートローブ大学（ビクトリア州メルボルン）

- ・ 第一次産業省 バイオサイエンス研究部門 ビクトリア州アグロバイオサイエンスセンター（Victorian AgriBioscience Centre, Bioscience Research Division, Department of Primary Industries）

□アデレード大学（南オーストラリア州アデレード）

- ・ 連邦科学産業研究機構 植物の形状形質解析施設 植物アクセレレーター（Plant Accelerator, Australian Plant Phenomics Facility, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation）
- ・ オーストラリア植物機能ゲノミクスセンター（Australian Centre for Plant Functional Genomics）

□オーストラリア国立大学、連邦科学産業研究機構（南オーストラリア州キャンベラ）

- ・ オーストラリア国立大学 生物学研究所（Research School of Biology, Australian National University）
- ・ 連邦科学産業研究機構 植物の形状形質解析施設 高解像度植物フェノミクスセンター（The High Resolution Plant Phenomics Centre, Australian Plant Phenomics Facility, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation）

概 要：

メルボルン、アデレードおよびキャンベラにある大学および研究機関を訪問し、各機関・大学で研究内容の説明を受け、試験圃場等の視察をするとともに、調査研究テーマである「フィールドにおける植物の環境応答機構と育種技術」に関する質疑を通して、オーストラリアにおける本分野の関連研究

での現状や問題点を把握した。

現在の植物科学では、genomics の情報蓄積が先行している。Functional genomics と称して、表現型の解析も行われ始めたが、実際には、transcriptome、proteome、metabolome などの網羅的解析が主となっている段階であり、これらのオミクス解析と、植物の成長や機能に関する表現型の解析との間にはまだまだ大きなギャップがある。農業国であるオーストラリアにおいては、このギャップを早急に埋める必要性が特に強く認識されており、それが、このギャップを埋めるための新たな研究に取り組むための施設である、Australian Plant Phenomics Facility (Plant Accelerator と High Resolution Plant Phenomics Center) の早期設立に結びついている。この試みには世界が注目し、多くの共同研究等の提案が寄せられている。また、同様な施設が各国で建設され始めた。

新たな取り組みとして行う環境応答機構に関する研究は、コムギを中心に、ナタネおよび牧草にも展開されていた。特に、訪問した各機関とも、人工気象室またはフィールドにおいて、作物個体全体をイメージングシステムによりむらなく調査して、その生育状態を把握していた。例えば、ストレス環境下で作物を育成した際に、どの組織がダメージを受けて成長が衰退するか等の観察を、イメージングシステムを用いて定期的かつ定量的に行っていた。また、その解析データを、マイクロアレーなどによる遺伝子の発現と比較することで、作物の成長と遺伝子発現との関係を明らかにしようとしていた。このような表現型調査（フェノーム解析）と遺伝子発現（gene expression）の同時解析は、遺伝子の機能解析（Functional genomics）の新たな展開であり、今後の植物サイエンスおよび育種の発展のために最も注目すべき分野である。

オーストラリアは作物学およびそれに直接関係する光合成や水分生理などの研究に伝統的に強かったが、植物の個体レベルの現象に関わる研究では、上記のような施設建設が先行したこともありさらに世界をリードしつつある。また、このような研究の発展には、作物研究の意義を農民が良く理解しており、たとえば、コムギに関する主要な研究には農民も出資する Grains Research Development Corporation (GRDC) からの研究費が潤沢に充てられていること、などの背景状況もある。連邦および州政府も積極的に多額の研究費を出資している。

3.3. まとめ

植物生産技術に関する国際比較調査を実施した結果、当該分野におけるわが国の植物科学研究は、これまでの政策的な取り組みもあり、植物の重要形質に関する遺伝的情報など基礎的知見の蓄積が豊富で、今後はそれらを如何に高度に活用し、世界的にも新しい技術の開発・確立へ繋げるかという点に課題があることが明らかとなった。またこれらの実現には、社会的な要請を意識した目的志向型の異分野融合、ゲノムから表現型までの異なるスケールの情報を統合的に関連付けるための研究への挑戦、計測や情報処理等の先端技術の積極的な開発・導入・活用など、当該分野における研究開発の一層の進展とともに、長期的視野に基づく国による戦略的な支援が不可欠であることが、先進諸外国との比較から示唆された。

以下では、国内外の植物生産技術の現状について本調査を通じて明らかとなった点をまとめた。

- ・欧米豪などでは民間企業は大学や公的研究機関とも連携しつつ新しい植物生産技術の開発に取り組んでいた。その出口となる種苗産業では、世界中に展開する大手化学メーカーが、農薬市場同様に世界の種子市場を概ね独占していた。現在、彼らは従来の農薬耐性や病虫害耐性などに加え、社会的な要請を背景に、高収量性、乾燥耐性、窒素利用効率、油脂の質や量に関する形質など新たな研究開発ターゲットに着手していた。
- ・新たな研究開発ターゲットに対し、欧米豪の国々は政策的な支援も得つつ積極的に取り組んでいた。とくに環境ストレス耐性や資源利用効率などに関連する植物の形質についての知見や情報を、分子レベルから表現型レベルまで統合的に関連付け、さらに活用するための知見の蓄積や技術開発を、先端的な計測機器や解析技術を用いた統合的なアプローチで進めようとしていた。
- ・日本では海外の大手化学メーカーに匹敵する規模を持つ企業は見られなかった。また国内市場が縮小傾向にあることから、海外へ進出して現地での新品種開発などに取り組む動きが活発化しつつあった。
- ・日本の植物または作物関連の基礎研究では、先端的な計測機器や解析技術等を用いた統合的なアプローチを大規模に試みる顕著な動きは現在までにあまり見ることができなかった。そもそも日本の植物科学研究は、過去約 10 年間でゲノム解読など基盤的な研究の推進に政策的に取り組んできたこともあり、基礎

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

研究は比較的活発で質が高いが、それらを通じて得られた成果を応用に結びつける動きには乏しいことが従来から指摘されていた。またライフサイエンスやバイオテクノロジーの成果を活用して応用へ結びつけようとする際には、遺伝子組換え技術に関する規制の厳しさ、規制対応への取り組みの乏しさ、社会受容性の低さ、異なる研究分野間での交流不足などの課題も指摘されていた。

- ・文献調査等からは日本の基礎研究は「ストレス耐性」「除草剤耐性」「窒素利用効率」などに関して量（論文数）または質（被引用回数）で世界の上位にあることが明らかになった。ただし上位国の中心は欧米豪などの先進諸国であり、また新興国の中国やインドも「ストレス耐性」、「耐病性」、「資源利用効率」で日本よりも上位あるいは首位に位置していた。
- ・遺伝子組換えに関する近年の特許出願動向からは、日本はイネ科など特定の種に限定した技術が多く、対照的に米国はより汎用性のある基盤的技術を開発していたことが分かった。

<調査結果詳細>

A1. 国内外の動向調査結果詳細

A1.1. 気候変動と植物（作物）生産に関する現状

■ 気候変動が植物（作物）生産に及ぼすインパクト

ここ数年、世界各地で気候変動に伴う異常気象が頻発し、それらが主要穀物などの植物（作物）の生産に与える影響が懸念されるようになった。ここではそのような影響について、関連する主だった事例をまとめた。

気象庁の発表によると、2008 年と 2009 年は、世界各地で様々な異常気象が確認された^{[1] [2]}。たとえば図 1 に示すように、2008 年はアフリカ北部からアジア全域にかけて、3～11 月の間にたびたび異常な高温となった。またインド北部周辺では夏のモンスーンに伴う大雨（6～9 月）、ミャンマーではサイクロンによる洪水や高潮（5 月）、中国南部では梅雨前線による台風と大雨（6～11 月）があった。他にも欧州（7 月）、中東（10 月）、米国中西部（6 月）において例年になく大雨があった。他方、ここ数年干ばつが続く豪州南東部のように少雨が続く地域もあった。

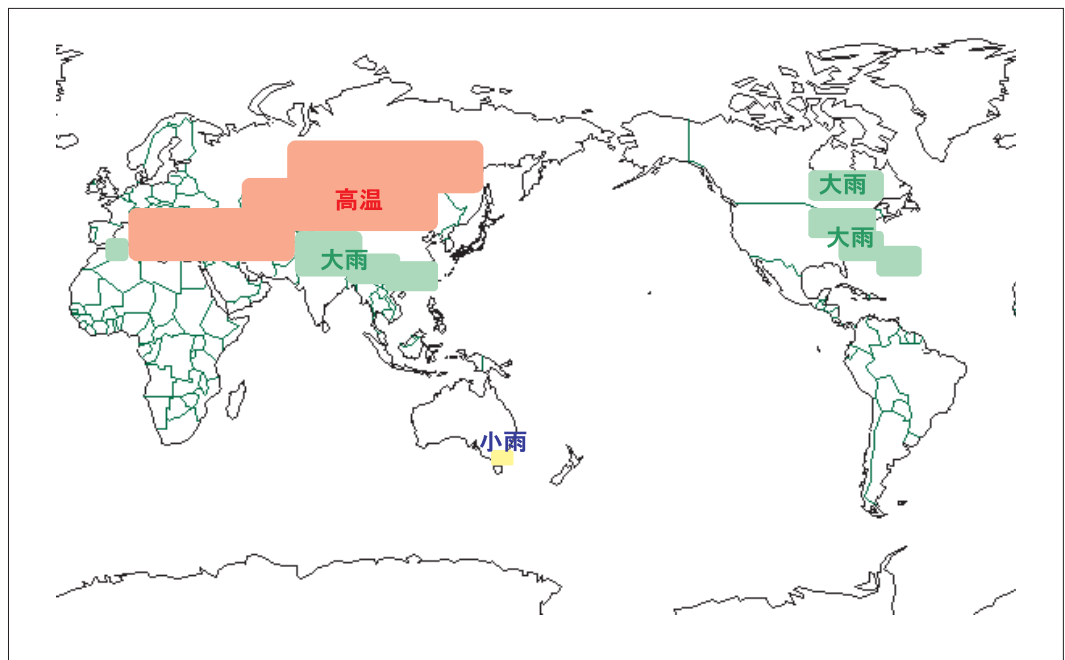


図1 2008 年（1 月～ 11 月）の世界の主な異常気象（気象庁の資料^[1] をもとに作成）

2009 年には、図 2 に示すとおり中国から中東（2～10 月）、ミクロネシアからインドネシア（4～11 月）、中米から南米北部（5～10 月）などでたびたび異常高温があった。豪州南東部では熱波により異常高温と少雨が続き、大規模な

森林火災も発生した（1～2月）。他方、米国中部では寒気の影響により低温が農作物に被害を与えた（10月）。またヨーロッパ北部、とくに英国では7月の降水量が記録的なものとなった。少雨はアルゼンチン北部周辺でも見られた（1、3～4月）。

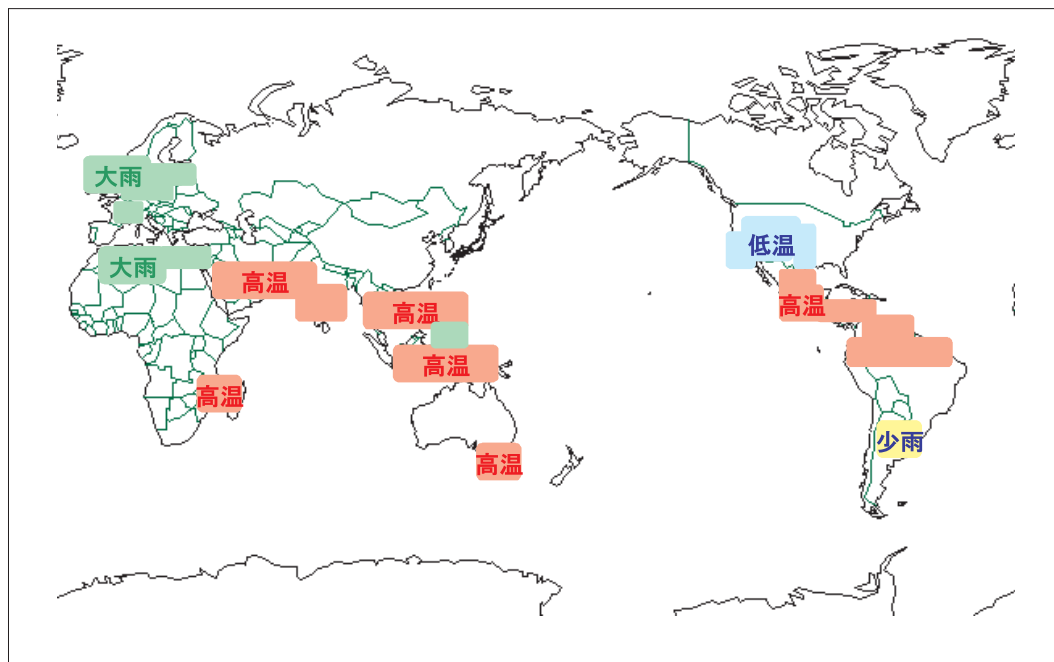


図2 2009年（1月～11月）の世界の主な異常気象（気象庁の資料^[2]をもとに作成）

このような異常気象の経年変化に関する動向については、同庁が5年毎に発表している「異常気象レポート」の中でまとめられている。最新の2005年版によれば、世界の多くの地域では異常高温の出現数が長期的に増加し、また異常低温の出現数が減少する傾向にある^[3]。降水量については異常多雨の出現数が増加し、異常少雨の出現数が減少する傾向にある。

頻発する異常気象など気候変動は穀物等の作物の収量に影響を及ぼすと懸念されている。温暖化の原因となっている大気中の二酸化炭素濃度の上昇が作物収量に与える影響を調べた研究によると、世界の主要穀物（コムギ、コメ、トウモロコシ、大豆）の生産量は1990年と比較して2020、2050、2080年のそれぞれで大幅に落ち込むと予測された（図3）^[4]。同研究の筆者らは、予測結果に基づき、作物収量の不足リスクを回避するために温暖化への対策を講じるだけでなく、温暖化後の適応策についても積極的に取り組むべきと指摘した。

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

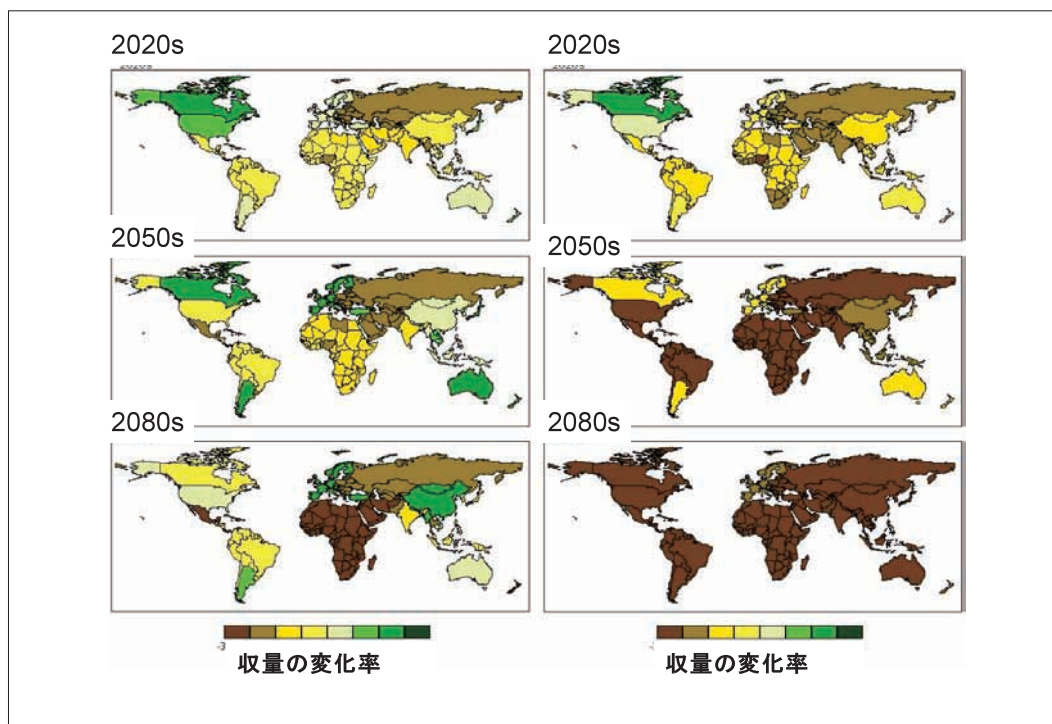


図3 1990年と比較した各年代の主要穀物の収量変化予測（シナリオ A1FI の場合）：CO₂ 濃度が上昇しなかった場合（左）と上昇した場合（右）（出典^[4] から図を一部抜粋）。CO₂ 濃度が上昇すると 2080 年代には世界のほとんどの地域で収量が 30% 以上減少すると予測された（図中の茶色地域）。

気候変動に起因したエルニーニョの発生も、将来的には干ばつや洪水といった異常気象を通じてトウモロコシやダイズの主要生産地域に影響を与え、結果的に穀物供給の世界的な不安定化を引き起こす可能性がある^[5]。これまでのところエルニーニョに伴う異常気象が世界の主要な穀倉地帯で実際に発生した事例はないが、今後そのようなことが生じた場合、世界の穀物供給は大きな影響を受けると予想されている^[5]。

以上のような現状を受けてと思われるが、学術分野においても気候変動と作物収量に関する取り組み（研究活動）が年々増加する傾向にある。JST-CRDSでは関連する研究の活動度を推定するため、文献統合データベースである ISI Web of Knowledge を用いて 1999 年から 2009 年までの論文数の年次推移を調べた。「climate change(気候変動)」、「crop(作物)」、「yield(収量)」の 3 つのキーワードを同時に含む論文を対象に調べたところ、その論文数は近年急速な伸びを示しており、特に 2009 年では 2005 年のほぼ倍にあたる論文が発表されていることが分かった（図 4）。

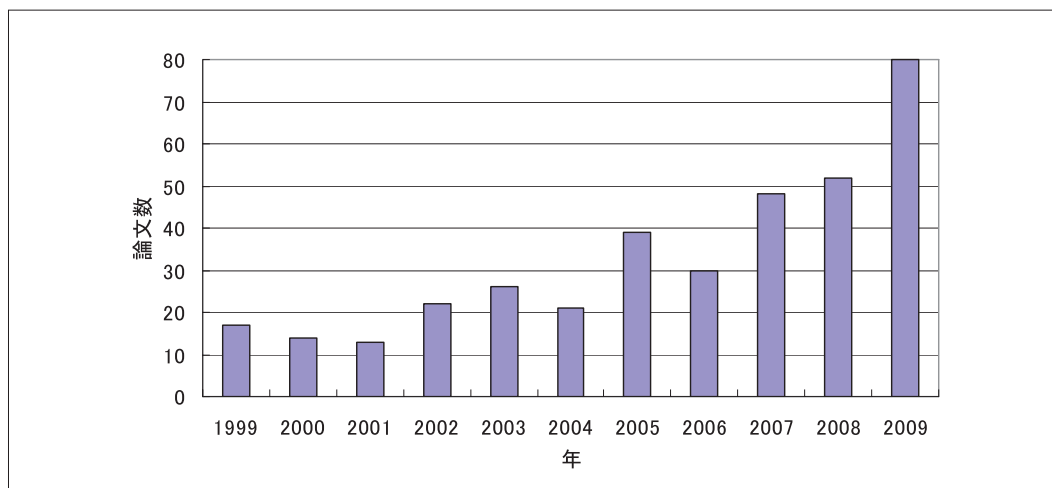


図4 気候変動と作物収量に関連する論文の数の年次推移

近年の顕著な伸びは、論文の被引用回数（累計）の年次推移でも同様であった。特に過去5年間の伸びは著しく、2005年に400回程度であった被引用回数は2009年には1,200回以上に達していた（図5）。以上より、気候変化と作物収量に関連する研究は年々活発になっており、学術分野でも注目が集まりつつあることが明らかとなった。

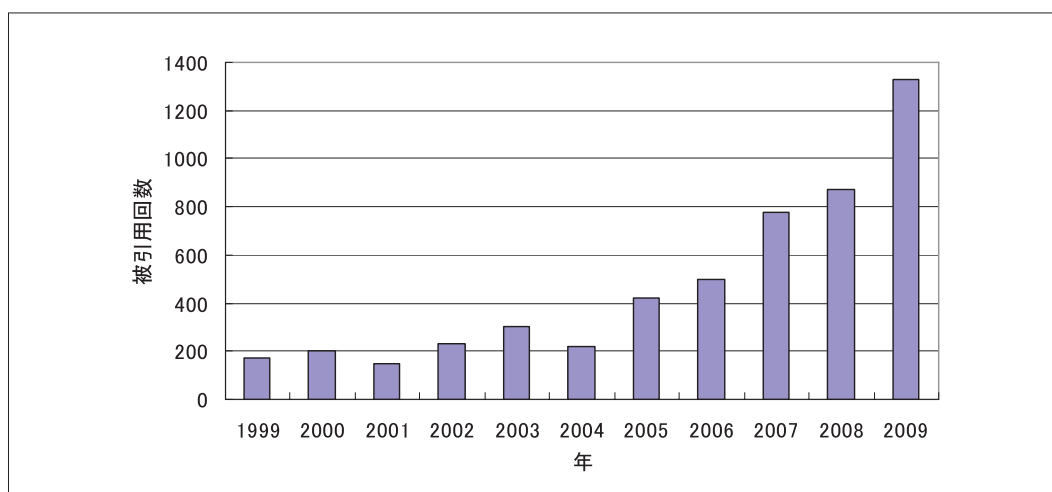


図5 気候変動と作物収量に関連する論文の被引用回数の年次推移

■ 植物（作物）の生長に影響を及ぼす様々な環境ストレス

気候変動は世界各地で突発的な異常気象をもたらし、気候の寒冷または高温化、あるいは土地の乾燥化または冠水、などを引き起こしている。これらは環境ストレスとして植物（作物）の生育に影響を与える。ここではそのような植物（作物）の生育に影響を与える各種環境ストレスについて主な事例をまとめた。

植物の生育には資源となる水、二酸化炭素、光の他に窒素やリンなどの無機栄養塩類と呼ばれる複数の元素が必須である。また、植物を取りまく温度、湿度、

pHなどの物理化学的環境や同種・異種生物との相互作用といった生物的環境もその生育に大きな影響を与える（図6）。しかしそれらの過不足は植物にとってストレスであり、結果的には生育が阻害される。農作物や樹木の場合にはこのような環境ストレスは致命的な収量減少を招きかねないため、農林業と関連する理学系または農学系の大学や企業の研究開発機関では、環境ストレスへの対応（または克服）が主要な研究開発課題の1つとなっている。

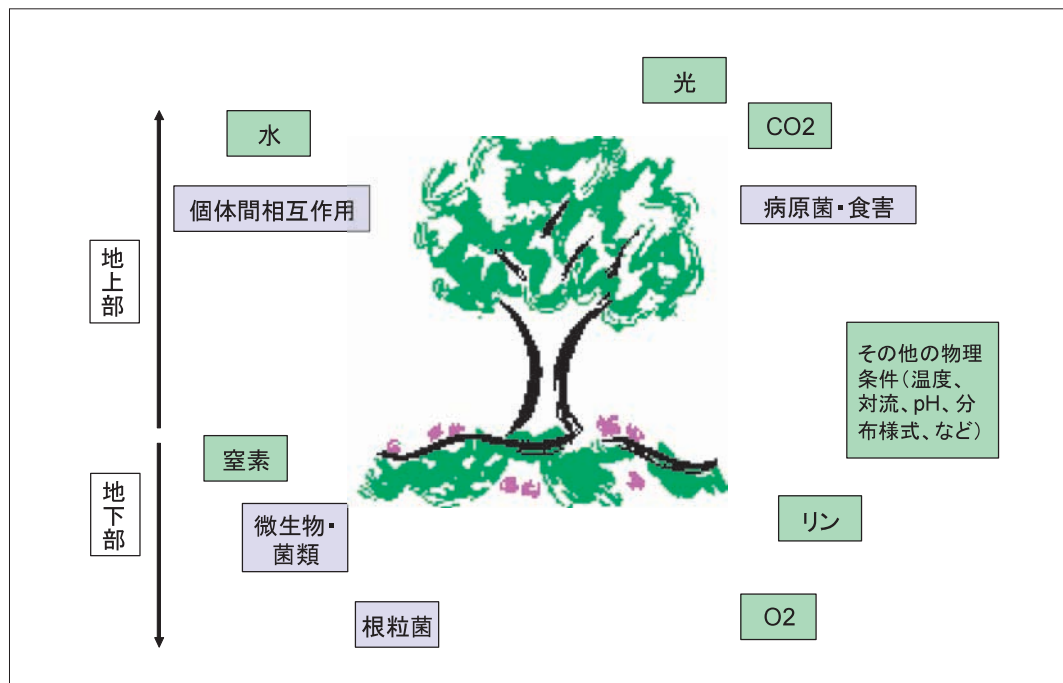


図6 植物（作物）を取りまく環境ストレス：物理化学的ストレス（緑）と生物環境ストレス（紫）。植物（作物）の生長は環境ストレスによって様々な影響を受ける。

環境ストレスを大別すると、強光、低温、高温、乾燥などの物理化学的ストレスと、害虫、病原微生物、同種・異種植物、動物などの生物学的ストレスの2種類がある。その中で植物（作物）生産の現場で重要視されている主なストレスには以下のようなものがある。

・光ストレス

植物は光合成を通じて大気中の二酸化炭素を体中に取り込み、生長に利用する。そのため光は植物にとって必須であり、生長に影響を及ぼすほどの光の過不足は一般的に光ストレスと呼ばれる。たとえば成長期などにおける日照不足は植物（作物）の収量を著しく減少させる要因にもなる。反対に強すぎる光は、光合成反応の場となる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、結果的に光合成効率を低下させる。また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ことにもなる。

・温度ストレス

温度ストレスは、高温、低温の2種類のストレスがある。高温ストレスは、植物個体の機能維持で重要な役割を担うタンパク質の変性や複合体の解離などによる機能喪失を引き起こし、結果として生育阻害の直接的な原因となる。低温ストレスは、細胞内外で水が凍ることによって各種生理活性（光合成、呼吸、物質の輸送など）が低下し、分子レベルではエネルギー生産の低下、活性酸素の蓄積、遺伝子の転写、翻訳阻害が生じ、また組織レベルでは花粉形成の阻害などが生じる結果、生育阻害や収量低下の原因となる。

・水ストレス

水ストレスには乾燥と冠水がある。乾燥は砂漠や半乾燥草原地域などでよく見られる。乾燥ストレス下では、植物は細胞の水分が失われ、様々な機能障害が誘発される。また光合成機能も低下するため生長等にも大きな影響がある。一方、大雨や洪水による土地の冠水はアジア地域の多雨地域で起こりやすく、イネなどの収量に大きな影響を及ぼしている。冠水は、特に根への酸素供給を大幅に制限し、根の生育悪化を招く。

・土壌環境ストレス

塩類集積土壌、アルカリ土壌、酸性土壌、重金属集積土壌に代表される「問題土壌」は世界の耕地面積の約7割を占める。これらの土壌では塩害、重金属過多、鉄欠乏、アルミニウム害、などが問題となる。塩害は高濃度のナトリウムが主な原因である。ナトリウムはカリウムとともに細胞の内圧や水分調節に必須の元素であり、これらの元素のバランス崩壊が細胞の機能異常を招く。細胞内の葉緑素の合成に必要な鉄の不足は生育等に大きな影響を及ぼす。アルミニウムは元素そのものが毒性を持つため、土壌中にアルミニウムイオンが溶け出すことにより根の発達が阻害される。

・生物的ストレス

ウイルス、細菌、糸状菌を初めとした感染性病原微生物あるいは食害を及ぼす害虫等は植物の生長に影響を及ぼす生物的ストレスの典型例である。病害をもたらす微生物の種類は植物種によって異なるが、農作物に影響を及ぼす病害虫の多くは既に同定・単離されており、古くから農薬などを利用した克服が試みられている。

- 【1】 2008年（平成20年）の世界の～天候（速報）～主な異常気象と気象災害～、2008年、気象庁、
<http://www.jma.go.jp/jma/press/0812/22b/world20081222.pdf>

- 【2】 2009 年（平成 21 年）の世界の天候（速報）～主な異常気象と気象災害～、
2009 年、気象庁、
<http://www.jma.go.jp/jma/press/0912/21b/world2009.pdf>
- 【3】 異常気象レポート 2005 概要版 近年における世界の異常気象と気候変動
～その実態と見通し～（VII）、2005 年、気象庁、[http://www.data.kishou.
go.jp/climate/cpdinfo/climate_change/2005sum/pdf/2005sum.pdf](http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/climate_change/2005sum/pdf/2005sum.pdf)
- 【4】 Parry et al. (2004), Effects of climate change on global food production
under SRES emissions and socio-economic scenarios, Global
Environmental Change 14: 53-67
- 【5】 第 32 回農業環境シンポジウム「21 世紀の農業と環境問題を考える」気候
変化・気象変動と農業・食料、2010 年、横沢正幸、
[http://www.niaes.affrc.go.jp/magazine/pdf/mgzn12301\(1\).pdf](http://www.niaes.affrc.go.jp/magazine/pdf/mgzn12301(1).pdf)

A1.2. 植物生産技術に係る近年の主な科学技術政策の動向

植物生産技術に関連する植物科学の進展には、技術革新はもちろん、食料増産や地球環境保全のような社会的な要請に基づく政策的な推進が重要である。ここでは近年の国内外の政策的な動向についてまとめた。

■ 国際的な取り組み

まず 1960 年代半ばに、当時食料危機が懸念されていたインドやパキスタンなど南アジアにおいてコムギの生産性向上を実現したことから「緑の革命」が始まった。これは、1940～50 年代にメキシコ政府の要請によって米国から同国へ派遣された研究者の 1 人であるノーマン・ボーローグ博士らが確立した、日本の背丈の低い農林 10 号を使った品種改良と、施肥、灌漑との組み合わせによる多収性の栽培技術が基になっている。この技術は中国やインドネシアへも広まった。この「緑の革命」には日本独自の品種（またはその半矮性遺伝子）のほか、その遺伝子と日長非感应性の組み合わせなど、日本で既に確立していたコムギやイネを栽培する技術が大きく貢献した^{[6] [7]}。

また 1960 年代半ばからは IUCN（国際自然保護連合）の国際的協力活動として IBP（International Biological Program、国際生物学事業計画、1965-1974）が行われた。IBP では、広域スケールでの生態系生態学や関連する種々の植物科学が国際的な枠組下で進められた。この中で日本は、『植物群落の生産力測定で世界をリード』した^[8]。

以上のように品種改良、施肥、灌漑による植物生産技術は食料増産に対して比較的短期間で目覚ましい成果を上げた。また植物生産に関連する科学的知見も蓄積された。しかしその後、食料増産のペースは次第に頭打ちとなり、同時に人口増加（需要の増大）、環境意識の高まり（環境低負荷または環境耐性など）など、植物生産技術に対する社会的要請は多様化し、かつ増大した。

■ 各国の近年の施策的動向

植物生産技術に関連する植物科学は、1990 年代以降のゲノムサイエンスの飛躍的な進歩によって大きく進んだ。バイオテクノロジーの進展もありゲノム情報を利活用した植物生産への期待が大きくなり、日本を含む世界各国の施策等でも強力に推進されるようになった。主な研究の流れと日米欧の動向を図 7 にまとめた。

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

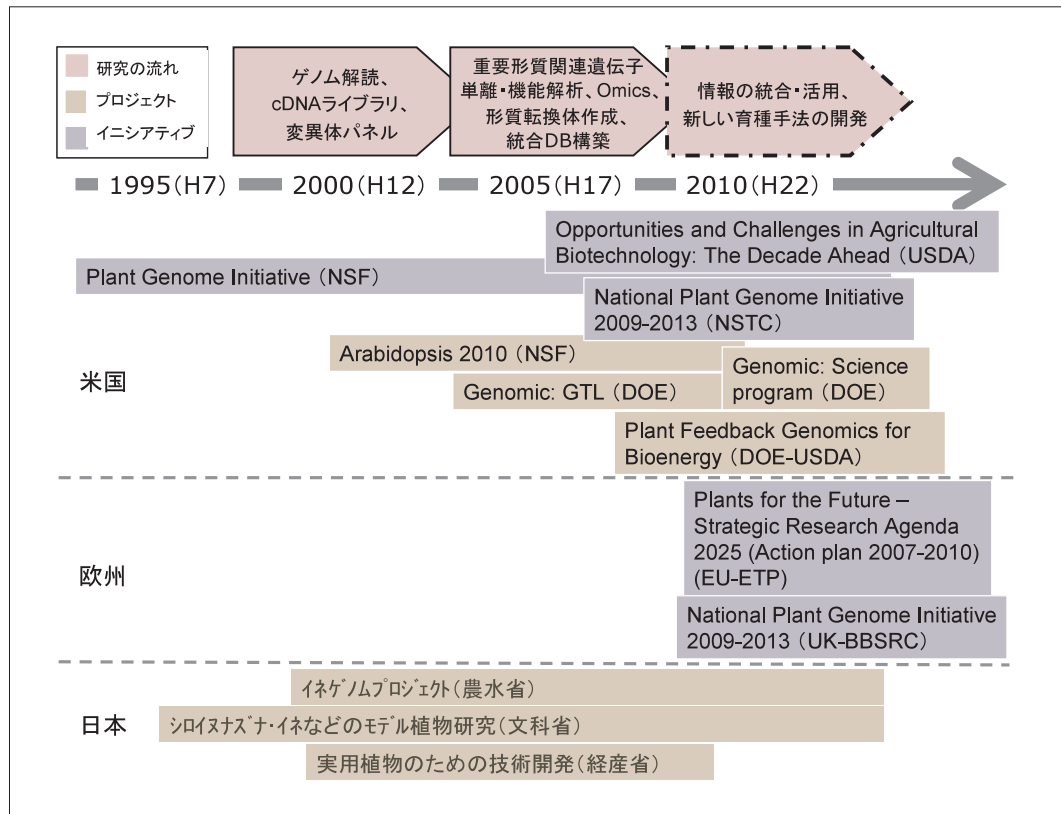


図7 ゲノムサイエンス、バイオテクノロジーに着目した植物生産技術に関連する植物科学の主な研究の流れと日米欧の政策的動向（カッコ内は実施機関）

(1) 米国

551 億ドルにもものぼる公的研究費の 51% はライフサイエンスに投じられる（2007 年）。その約半分は NIH を通じて健康関連の研究に充てられるが、植物科学関連の研究へも世界最大規模の研究費が NSF（国立科学財団）、USDA（農務省）、DOE（エネルギー省）などを通じて投じられている。

・ NSF

2009 年度予算総額は 64.9 億ドルで、うち生物科学研究（BIO）は約 6.5 億ドルとなっている。主要な植物科学関連予算としては「Plant Genome Research Program」の約 1 億ドルが、BIO の 5 領域の 1 つである「Integrative Organismal Systems」（約 2.1 億ドル）の中にある。

また NSF はモデル植物であるシロイヌナズナの網羅的な遺伝子機能解析（「Arabidopsis 2010」）やその遺伝情報の蓄積のためのデータベース TAIR（The Arabidopsis Information Resource）の維持、管理を行ってきた。現在はこれらへの資金援助を数年のうちに打ち切ることを公表し、世界的にも動向が注目されている^{[9] [10]}。モデル植物を用いた研究をいかに実用作物への応用に結びつけるかは、植物科学における世界的な課題として認識されている。

植物科学関連では、必ずしもゲノムに限らないが、NSF が Bill&Melinda 財団

と共同で実施する事業である BREAD (Basic Research to Enable Agricultural Development) も近年注目を浴びている。ここでは発展途上国の農業における問題解決に明確に繋がる研究プロジェクトを募集し、資金援助している。

・ USDA

2002 年農業保障・農村振興法の失効に伴い新たな農業法 (「Farm, Nutrition, and Bioenergy Act of 2007」) が施行されている。これに伴い従来の作物研究開発等に加えて野菜・果樹生産、生態系保全、再生可能エネルギーなどへの注力が新たに盛り込まれた。また USDA における研究開発を担う研究機関 ARS (Agricultural Research Service) は年間約 11 億ドル (2007 年) の予算で多様な植物科学研究を行なっている。その中には植物生産にゲノム情報を活用しようとする課題も含まれている。

また農学研究を担う新たな研究機関として NIFA (National Institute of Food and Agriculture) が 2009 年 10 月から USDA に創設された。ARS とは別機関で基礎研究支援を主に行うとされているものの、機関の予算は 2 億ドルと他の機関と比べて少ない^[11]。

・ DOE

DOE の生物学関連部門ではゲノム研究への投資が行なわれている。そのうち GTL Bioenergy Research Centers では 3 機関を対象に 5 年間で最大 1.25 億ドルのファンドを実施している。また JGI (Joint Genome Institute) というゲノム研究の拠点機関も運営しており、世界中の植物科学研究者に利用されている。

また DOE は USDA と連携して「Plant Feedback Genomics for Bioenergy」という事業も立ち上げている。植物生産に関わる植物の形質を分子レベルから解明し育種を加速させることが目的で、米国の植物科学研究者からも評判が高い (「A2 海外調査結果 (サイトレポート) 詳細」参照)。

・ NSTC

米国で省・機関を超えたプログラムを企画立案し調整する機能は、各省・機関のトップによって構成される NSTC (国家科学技術会議、National Science and Technology Council) が担っている。この NSTC の植物ゲノムの今後を検討するワーキンググループは、近年「National Plant Genome Initiative」(2009-2013) という、単一の細胞から個体全体まで、植物体を 1 つのシステムとして理解すべきとの考え方に基づく提言書を公開した。

(2) 欧州

欧州では EU の FP7 下で 9 つのテーマ領域が設定されており、そのうちの 1 つは「食品、農業、バイオテクノロジー」である。共同研究への助成として約 19.3 億ユーロが配分されており、助成総額の約 6%を占める。

また EU 周辺 20 カ国のアカデミックな組織に所属するメンバーから構成されている European Plant Science Organization と EuropaBio（欧州バイオ産業協会）が連携して取り組む ETP（European Technology Platform）が「Plants for the Future」という次世代の植物科学研究の方向性を 2007 年に提言した。そこでは下記のような戦略的研究課題を挙げている。

1. Healthy, safe and sufficient food and feed（安全、安心）
2. Plant-based products – chemicals and energy（バイオ燃料）
3. Sustainable agriculture, forestry and landscape（持続的農業、精密農業）
4. Vibrant and competitive basic research（基礎研究）
5. Consumer choice and governance（教育普及、対話と社会受容・支援）

このうち「Vibrant and competitive basic research（基礎研究）」では欧州で栽培されるの主要作物やその病原菌のゲノム解読、ゲノムから表現型までの統合的理解、システムバイオロジーを用いた新規有用形質の予測、情報インフラ整備などが重要項目として挙げられている。

(3) 英国

BBSRC（Biotechnology and Biological Sciences Research Council）は BIS（Department of Business, Innovation and Skills、ビジネス・イノベーション・技能省）所管の研究費助成機関で、予算総額約 2.9 億ポンドのうちの約 14% を植物学や微生物学関連の研究へ配分し、約 16% を農学関連の研究へ配分している（2006-2007 年）。

また BBSRC は 2003 年には「Strategic Plan 2003-2008」を公開している。下記のような項目を掲げ、科学的な面では「統合」をキーワードの 1 つとして掲げている。「統合」というキーワードの下、新たな作物、非作物（バイオ燃料、機能性植物など）の開発、“採算のとれる”持続的な農業および産業発展、基盤となるツールや技術の開発の推進を提言している。

- ・ Excellent Science

- Integrative Biology、Sustainable Agriculture、The Healthy Organism、Bioscience for Industry

- ・ Tools and Technology

- ・ People

- ・ Knowledge Transfer
- ・ Partnerships
- ・ Effective Organization

(4) 豪州

豪州にはイノベーション・産業・科学・研究省（Department of Innovation, Industry, Science and Research）所管の国内最大かつ世界でも最大規模の公的調査・研究機関である CSIRO（the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization）が植物科学研究の推進を中心的に行っている。CSIRO の予算は約 11.2 億ドルで、そのうちの約 4 億ドルが外部からの収入、約 7 億ドルが政府予算である。また植物科学研究のための共同利用施設である「The Australian Plant Phenomics Facility」を国内に 2 ヶ所設置し、世界的にも注目される取組みを先導的に行っている。詳細は本書の海外調査結果を参照。

(5) 日本

日本では農林水産省、文部科学省、経済産業省、環境省などが植物科学に関連する研究を支援している。このうち、植物生産技術という面からは環境省を除く 3 省が中心的な役割を担っており、主要な取り組みとして「新農業展開プロジェクト」（平成 20 ～ 24 年度、農林水産省）と、「ドリーム BT ジャパン」（平成 20 年度～、BT 戦略推進官民会議／総合科学技術会議）がある。

これまでは海外の動向と同じく、ゲノムサイエンスやバイオテクノロジーの進展に合わせた研究開発が行われてきている（図 8）。とくに、文部科学省所管の理化学研究所ではシロイヌナズナのようなモデル植物を対象とした解析的な研究が行なわれ、農林水産省所管の諸研究機関ではイネを中心とする実用作物を対象とした品種改良等の研究開発が行われてきた。これらの基礎研究における成果の内容は JST-CRDS による「ライフサイエンス 科学技術・研究開発の国際比較 2010 年版」に詳しい。また同書でも指摘されているように、日本は基礎研究に目覚しい進展がある一方で、それらを実用作物へ応用する取組みと成果には乏しい（「A1.4 企業における研究開発の近年の動向」参照）。農林水産省では下記のような研究支援を行ってはいるが、遺伝子組換え作物の実験ほ場での栽培が極めて困難であるなど社会的要因も相まって、その応用は進んでいない。なお遺伝子組換え植物に関する研究、利用に関しては内閣府や学術会議などから推進施策や提言が公開されている^[12]。

- ・ 農林水産省のファンディング例

→ 有用遺伝子活用のための植物（イネ）・動物（ブタ）ゲノム研究（農水：15 億／年）H14-H18

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

- ゲノム育種（ムギ、イネ）による効率的品種育成技術の開発（農水：15 億／年）H17-H21
- アグリ・ゲノム研究（ダイズ・コムギ）の総合的な推進（農水：32 億／年）H19-H23
- DNA マーカー育種による作物開発（イネ）（農水：3 億／年）H20-H24
- イネ DNA マーカー育種技術を活用した麦・飼料作物等イネ科新品種の開発（農水：7 億／年）H20-H24
- 遺伝子単離・機能解明等基礎的研究、研究基盤整備（農水：イネ：17 億／年、ムギ、ソルガム 3.5 億／年）H20-H24

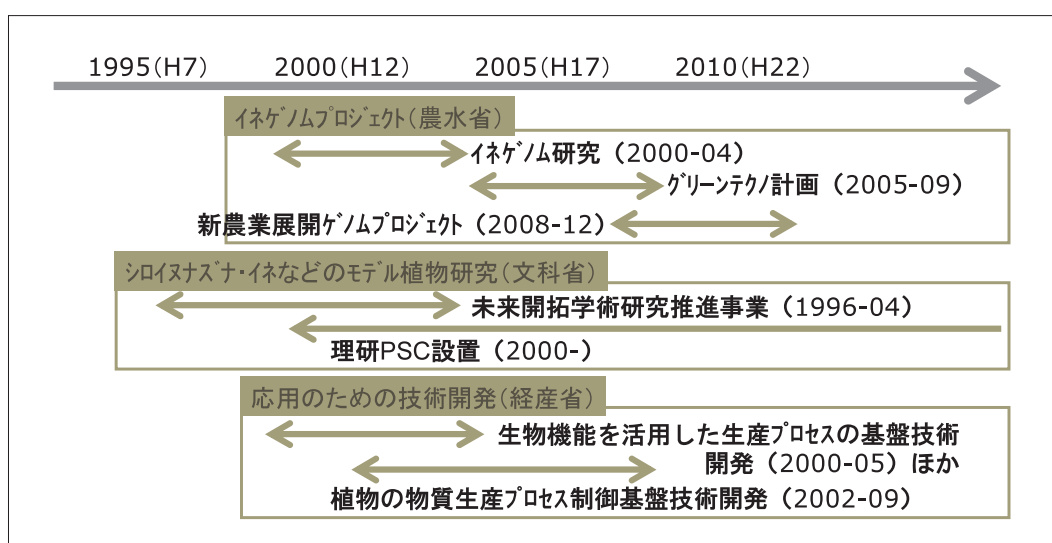


図8 日本における主要な植物科学研究プロジェクトの流れ

- 【6】 緑の革命への日本の作物科学の貢献、平成 20 年 12 月、岩永勝、農研機構シンポジウム
- 【7】 堀江武 (2009)、作物学のアイデンティティを考える 農学研究における還元的アプローチと統合的アプローチ、日作紀 78：399-406
- 【8】 「ライフサイエンス分野 科学技術・研究開発の国際比較 2010 年版」、2010 年、JST-CRDS
- 【9】 Abbott (2009), Plant genetics database at risk as funds run dry, Nature 462: 258-259.
- 【10】 Ledford (2010), Plant biologists fear for cress project, Nature 464: 154.
- 【11】 Buchen (2009), US agriculture research gets priority plan, 461: 580.
- 【12】 「提言 我が国における遺伝子組換え植物研究とその実用化に関する現状と問題点」、平成 22 年 7 月、日本学術会議

A1.3. 基礎研究における過去 10 年の傾向

植物科学のなかで植物生産技術との関連が予想される研究分野の動向を定量的に明らかにするため、文献情報から国内外の研究の活動度や内容に関する調査を行った。具体的には文献統合データベースである ISI Web of Knowledge から条件検索し、絞り込まれた学術論文を対象として論文数や被引用回数を比較した。なお植物科学に関する全般的な傾向は「ライフサイエンス分野 科学技術・研究開発の国際比較 2010 年版」（2010 年、JST-CRDS）に詳細が報告されている。

■研究のタイプ別論文数比較

文献の登録年^{※1}が 2000 ～ 2009 年のもの（10 年分）のうちキーワードを「plant」（植物）または「crop」（作物）とし、研究アプローチを「transgenic」（組換え）、「genome」（ゲノム）、「breeding」（育種）のいずれかとした条件検索を行なった。該当した文献についてはドキュメントタイプを「article」（学術論文）に限定し、国による分類はここでは行わなかった。

検索の結果、該当した論文の総数は“植物”関連で 21,278 件、“作物”関連で 3,887 件あり、両者の間には 5 倍以上の差があった（表 1）。植物を対象とした研究のうち“組換え”または“ゲノム”で該当した論文は 7,000 件以上と多く、“育種かつゲノム”で該当した論文の数は少数であった。作物を対象とした研究論文で最も多かったのは“育種”であり、“育種かつゲノム”で該当した論文が最も少なかった。本検索結果からは、“育種かつゲノム”で予想される分子レベルから育種にアプローチするような、植物科学研究と育種関連研究の間の中間的領域における取り組みは未だ多くはないことが分かった。

表 1 研究アプローチごとの論文数

研究アプローチ	植物	作物
組換え	7,867	1,092
ゲノム	7,672	789
育種	5,339	1,824
育種かつゲノム	400	182
計	21,278	3,887

次に研究上のターゲットとなる形質に関して条件検索を行なった。検索対象とする形質は、「stress tolerance」（ストレス耐性）、「nitrogen-use efficiency」

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

※ 1 ISI Web of Knowledge 中に登録されている論文の“年”情報は、その論文が雑誌に掲載された年ではなく、同データベースにその論文が収録された年を表す。

（窒素利用効率）、「water-use efficiency」（水利用効率）、「light-use efficiency」（光利用効率）、「resource-use efficiency」（資源利用効率）、「disease tolerance」（耐病性）、「herbicide tolerance」（除草剤耐性）、「pesticide tolerance」（殺虫剤耐性）を対象とした。

検索の結果、“ストレス耐性”、“資源利用効率”（窒素、水、光、資源含む）、“除草剤耐性”をターゲットとする研究は比較的数量が多かった（表2）。また“資源利用効率”の中では水と窒素が多かった。これらの一部は、現行の、あるいは気候変動に伴う将来的な乾燥または過湿といった水ストレスに関する諸課題と、化学肥料の大量投入のような環境高負荷型農業に関する課題を受けての取り組みと考えられる。また“除草剤耐性”については、農薬が種苗と並び大きな市場として存在することを背景に、研究が活発に行われているためと考えられる。

表2 研究ターゲットごとの論文数

研究ターゲット	植物	作物
ストレス耐性	998	164
資源利用効率	(小計) 1,679	(小計) 1,241
（窒素）	(354)	(221)
（水）	(1,198)	(918)
（光）	(84)	(53)
（資源）	(43)	(49)
耐病性	25	9
除草剤耐性	136	155
殺虫剤耐性	0	2
計	3,319	2,812

研究アプローチ（表1）と研究ターゲット（表2）の組み合わせによるより詳細な条件検索を行うと、どの研究ターゲットにおいても組換えや育種に関連する研究が相対的に多く行われていることが分かった（表3、表4）。いずれの研究ターゲットにおいても“組換え”や“育種”で該当した論文の数は相対的に多く、“ゲノム”や“育種かつゲノム”で該当した論文は少なかった。

表3 「plant」関連の研究アプローチ・研究ターゲット別論文数

研究ターゲット	研究アプローチ			
	組換え	ゲノム	育種	育種かつゲノム
ストレス耐性	257	64	54	7
資源利用効率	(小計) 32	(小計) 8	(小計) 87	(小計) 1
(窒素)	(12)	(1)	(17)	(0)
(水)	(16)	(7)	(67)	(1)
(光)	(2)	(0)	(1)	(0)
(資源)	(2)	(0)	(2)	(0)
耐病性	7	2	5	0
除草剤耐性	49	5	11	2
殺虫剤耐性	0	0	0	0

表4 「crop」関連の研究アプローチ・研究ターゲット別論文数

研究ターゲット	研究アプローチ			
	組換え	ゲノム	育種	育種かつゲノム
ストレス耐性	50	18	37	9
資源利用効率	(小計) 12	(小計) 6	(小計) 52	(小計) 1
(窒素)	(8)	(2)	(9)	(0)
(水)	(4)	(4)	(40)	(1)
(光)	(0)	(0)	(0)	(0)
(資源)	(0)	(0)	(3)	(0)
耐病性	0	0	2	0
除草剤耐性	54	5	10	0
殺虫剤耐性	0	0	0	0

論文数の年次推移

研究アプローチに関する論文数の年次推移を図9、図10に示す。いずれの研究アプローチでも2000年からの10年間では増加の傾向が見られた。植物関連の研究では“ゲノム”で該当する論文の数が“組換え”で該当する論文の数を2004年から2006年の間で抜き、以降その状態が続いている(図9)。先述のとおり2000年から2005年頃にかけてはシロイヌナズナやイネなどのゲノム解読や遺伝子機能解析が各地の国家プロジェクトとして推進された時期であった。そのため分子生物学的な植物科学研究のトレンドとして、ゲノム情報に基づく重要形質関連遺伝子の単離・機能解析などの研究が主流化していったと考えられる。

一方、作物関連の研究は“育種”で該当する論文が最も多く2000年比で3倍強の増加を示したが、“組換え”と“ゲノム”で該当する研究もそれぞれ5.3倍、2.7倍と大きな伸びを見せていた(図10)。作物関連の研究における分子レベルの取り組みが過去10年の間に急速に伸びている様子が伺われる。

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

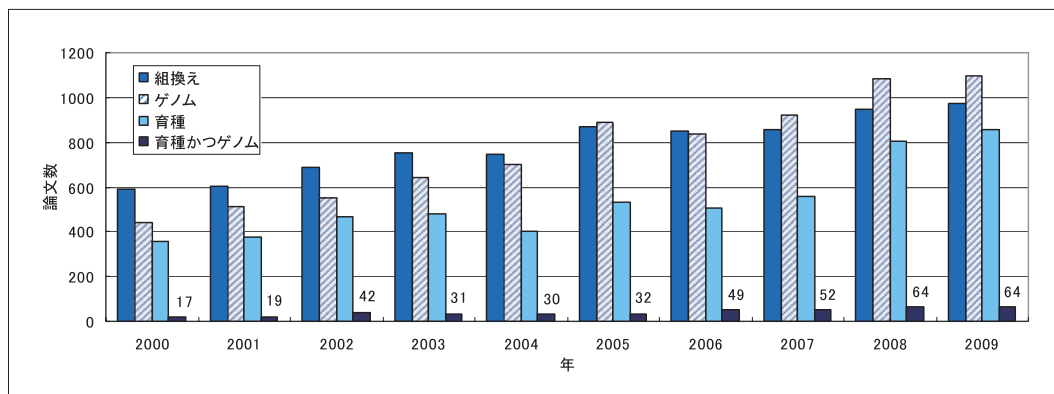


図9 研究アプローチごとの「plant」関連論文の年次推移（論文数は表1を参照）

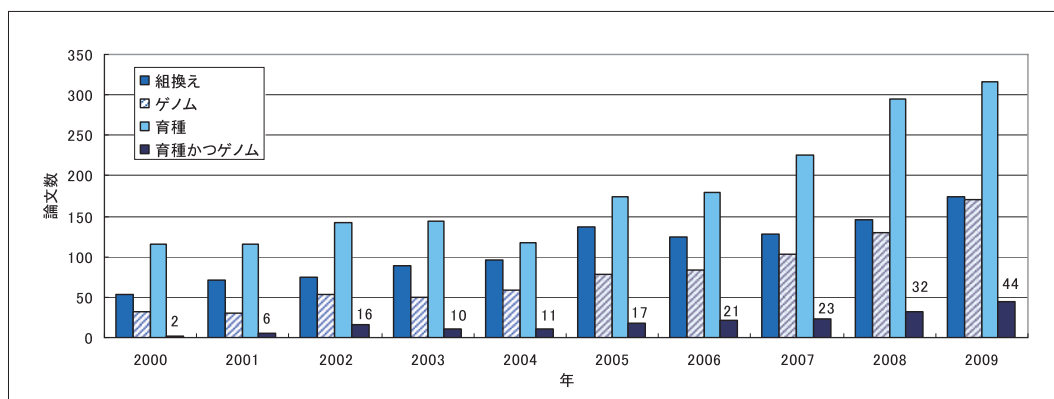


図10 研究アプローチごとの「crop」関連論文の年次推移（論文数は表1を参照）

研究ターゲットについての論文数年次推移を図11～図14に示す。“資源利用効率”で該当する論文は植物、作物を問わず数が最も多く、2000年比では3～4倍もの増加を示していた（図11、図12）。“資源利用効率”の内訳（割合）は比較的安定しており、“窒素”に関する研究はその年の論文総数の18%前後、“水”は75%前後、“光”は5%前後、“資源”は2%前後を占めていた（図13、図14）。

植物関連と作物関連の研究で大きく異なっていたのは“ストレス耐性”で該当する研究であった。いずれも2000年比で5倍以上の増加を示していたが、絶対数としては植物関連では200を超え、一方の作物関連では50を下回っていた（図11、図12）。日本でも乾燥ストレス応答に関連する遺伝子（DREB）の発見などストレス耐性についての植物科学研究で優れた成果を上げている。一方、作物を対象とした研究分野では、ストレス耐性は生物学的な複雑さゆえに取り組む形質としての難しさがあると言われる。また上述の植物科学研究におけるストレス耐性に関する成果も、作物を対象とした育種の現場には応用化されていない。ただし作物関連の研究分野ではストレス耐性は研究対象として近年注目され始め

ており、今後の進展が期待される（「A1.4 企業における研究開発の近年の動向」参照）。

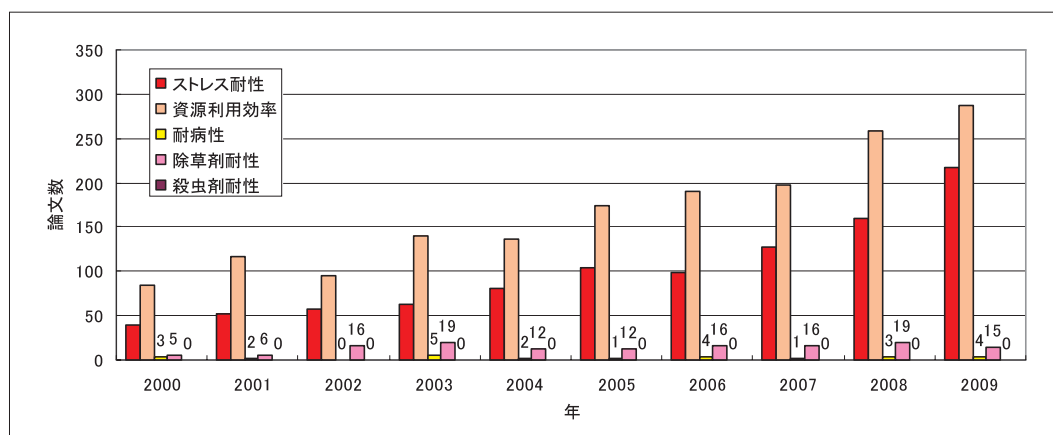


図11 研究ターゲットごとの「plant」関連論文の年次推移（論文数は表2を参照）①

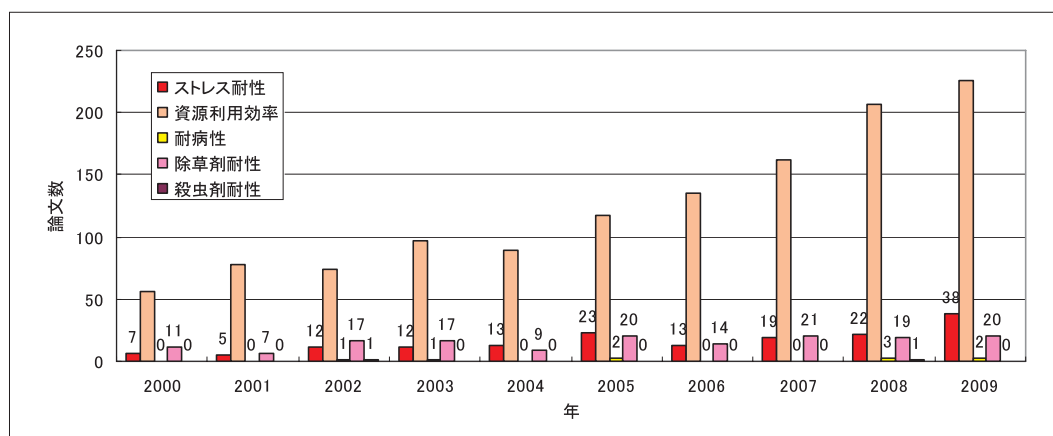


図12 研究ターゲットごとの「crop」関連論文の年次推移（論文数は表2を参照）①

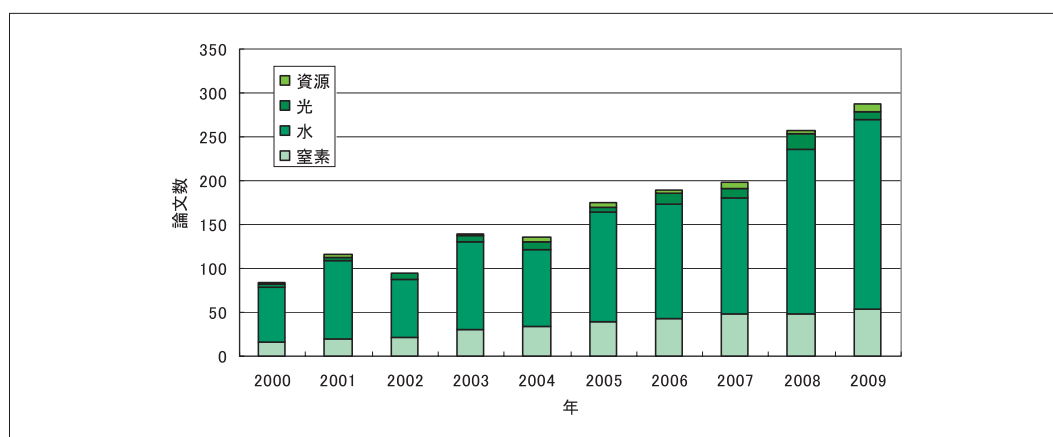


図13 研究ターゲットごとの「plant」関連論文の年次推移（論文の総数は表2を参照）②

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

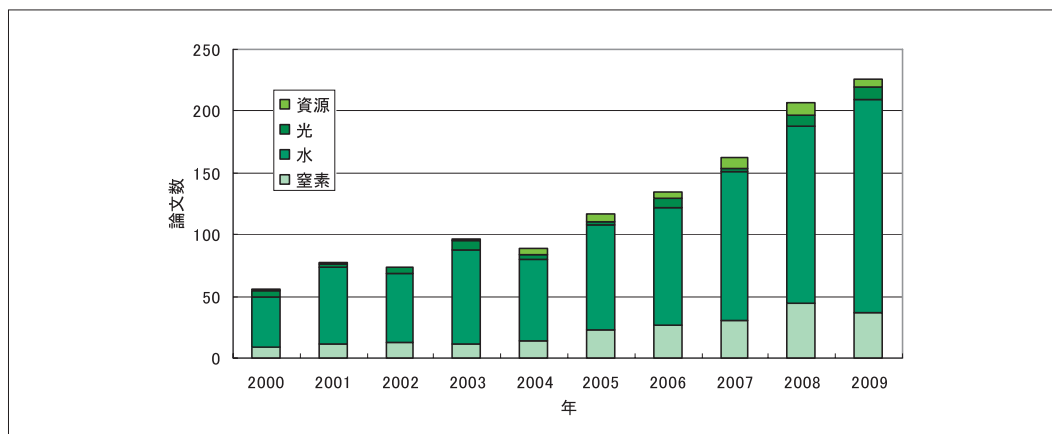


図14 研究ターゲットごとの「crop」関連論文の年次推移（論文の総数は表2を参照）②

■ 論文の被引用回数

条件検索にて該当した論文について被引用回数を集計し、研究アプローチおよび研究ターゲット間で比較を行った（表5、表6）。表3、表4と比較すると、論文数が多いものほど被引用回数も多いという傾向が見られたが、例外的に“ゲノム”で該当した論文は、論文数に対して被引用回数が極めて高かった。“ゲノム”では、ゲノムの解読や重要形質関連遺伝子の探索など、基盤的な情報の記載または発見に関わる論文も多数含まれていることが予想され、それらの論文が被引用回数に与える影響が考えられる。

表5 研究アプローチ・研究ターゲット別の「plant」関連論文被引用回数合計

研究ターゲット	研究アプローチ			
	組換え	ゲノム	育種	育種かつゲノム
ストレス耐性	4,738	703	577	194
資源利用効率	(小計) 462	(小計) 344	(小計) 824	(小計) 276
(窒素)	(118)	(0)	(92)	(0)
(水)	(335)	(343)	(707)	(276)
(光)	(9)	(0)	(0)	(0)
(資源)	(0)	(0)	(25)	(0)
耐病性	81	1	12	0
除草剤耐性	521	66	104	2
殺虫剤耐性	0	0	0	0

表6 研究アプローチ・研究ターゲット別の「crop」関連論文被引用回数合計

研究ターゲット	研究アプローチ			
	組換え	ゲノム	育種	育種かつゲノム
ストレス耐性	959	245	353	39
資源利用効率	(小計) 200	(小計) 49	(小計) 662	(小計) 0
(窒素)	(115)	(1)	(44)	(0)
(水)	(85)	(48)	(618)	(0)
(光)	(0)	(0)	(0)	(0)
(資源)	(0)	(0)	(0)	(0)
耐病性	0	0	1	0
除草剤耐性	529	74	153	0
殺虫剤耐性	0	0	0	0

■ 研究ターゲットごとの論文数の国別比較

論文数の上位20ヶ国を研究ターゲットごとに抽出し、植物（表7）と作物（表8）でそれぞれ国間比較を行なった。なおここでの国とは各論文著者の所属機関の所在国となる。

表7を見ると、植物ではほぼ全ての研究ターゲットにおいて米国が首位を占めていた。上位を欧米豪の国々が占める中で新興国の中国とインドの健闘も見られた。日本はそれらの国々と比べるとやや順位を落とすことがあるが、比較的上位に位置していた。とりわけ“ストレス耐性”、“除草剤耐性”、“窒素利用効率”などでは論文数が多かった。その他のアジア各国は上位で見られなかった。

いっぽう表8の作物では、同様にして米国が首位だったが、中国がそれに次ぐ健闘を見せていた。インドは植物の場合と比べると全体的に順位を落としていた。日本は植物の場合と同様に“ストレス耐性”が上位にあったほか、“窒素”、“光”、“資源”に関する資源利用効率関連で順位を上げ、上位に位置していた。“除草剤耐性”は順位を下げていた。植物同様にその他のアジア各国は上位で見られなかった。

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

表7 研究ターゲット別「plant」関連論文数上位 20ヶ国 (※1)

順位	ストレス耐性		耐病性		除草剤耐性		資源利用効率							
	国名	数	国名	数	国名	数	窒素		水		光		資源	
							国名	数	国名	数	国名	数	国名	数
1	米国	238	米国	7	米国	49	米国	61	米国	90	米国	16	オランダ	18
2	中国	166	インド	5	カナダ	19	カナダ	29	中国	77	オランダ	9	米国	9
3	日本	92	ドイツ	2	英国	18	中国	28	オーストラリア	71	中国	7	ケニア	7
4	ドイツ	71	中国	2	スコットランド	15	インド	21	インド	59	英国	4	中国	7
5	インド	62	南アフリカ	2	フランス	10	オーストラリア	15	イタリア	32	ドイツ	4	インド	6
6	カナダ	61	—	—	日本	9	ドイツ	15	トルコ	30	スペイン	4	イタリア	6
7	スペイン	57	—	—	ドイツ	8	英国	12	スペイン	25	カナダ	3	オーストラリア	5
8	韓国	54	—	—	オーストラリア	5	日本	12	ドイツ	23	ニュージーランド	3	フランス	5
9	フランス	47	—	—	韓国	4	オランダ	12	カナダ	22	オーストラリア	2	英国	3
10	英国	37	—	—	デンマーク	3	ブラジル	11	英国	19	オーストラリア	2	フィリピン	3
11	オーストラリア	29	—	—	インド	3	フィリピン	9	フランス	15	日本	2	カナダ	2
12	イタリア	28	—	—	イタリア	3	デンマーク	8	イラン	15	パキスタン	2	ドイツ	2
13	スウェーデン	21	—	—	中国	3	イタリア	7	日本	14	韓国	2	セネガル	2
14	パキスタン	20	—	—	スペイン	3	スペイン	7	メキシコ	13	スリランカ	2	スペイン	2
15	ベルギー	17	—	—	アルゼンチン	2	アルゼンチン	6	オランダ	13	—	—	ジンバブエ	2
16	メキシコ	17	—	—	ベルギー	2	フランス	6	ブラジル	12	—	—	—	—
17	アルゼンチン	16	—	—	スウェーデン	2	インドネシア	5	シリア	12	—	—	—	—
18	イスラエル	16	—	—	スイス	2	メキシコ	5	パキスタン	10	—	—	—	—
19	ロシア	16	—	—	台湾	2	タイ	5	南アフリカ	9	—	—	—	—
20	ブラジル	14	—	—	—	—	オーストラリア	4	ベルギー	8	—	—	—	—

(※1)「殺虫剤耐性」は該当しなかったため省略

表8 研究ターゲット別「crop」関連論文数上位 20ヶ国 (※1)

順位	ストレス耐性		耐病性		除草剤耐性		資源利用効率							
	国名	数	国名	数	国名	数	窒素		水		光		資源	
	国名	数	国名	数	国名	数	国名	数	国名	数	国名	数	国名	数
1	米国	43	インド	2	米国	49	米国	97	米国	121	米国	34	米国	16
2	インド	27	ナイジェリア	2	英国	45	中国	43	中国	85	オランダ	11	中国	5
3	中国	23	米国	2	カナダ	18	日本	34	オーストラリア	45	ドイツ	9	オランダ	4
4	日本	16	—	—	スコットランド	18	カナダ	30	スペイン	36	カナダ	8	オーストラリア	3
5	ドイツ	10	—	—	フランス	10	オーストラリア	27	カナダ	35	日本	7	フランス	3
6	カナダ	9	—	—	オーストラリア	8	フランス	26	インド	31	スペイン	6	ドイツ	3
7	スペイン	9	—	—	ドイツ	7	ドイツ	24	ドイツ	24	オーストラリア	5	ケニア	3
8	フランス	8	—	—	ベルギー	3	インド	22	イタリア	24	中国	5	ベルギー	2
9	オーストラリア	6	—	—	デンマーク	3	ブラジル	18	英国	23	英国	4	イタリア	2
10	イタリア	6	—	—	中国	3	オランダ	18	ブラジル	21	スウェーデン	4	日本	2
11	メキシコ	6	—	—	スペイン	3	英国	15	フランス	18	オーストラリア	3	スペイン	2
12	イスラエル	5	—	—	スイス	3	スペイン	15	トルコ	16	フランス	3	—	—
13	パキスタン	5	—	—	ブラジル	2	イタリア	12	日本	15	イタリア	3	—	—
14	韓国	4	—	—	インド	2	フィリピン	10	パキスタン	14	ニュージーランド	3	—	—
15	チュニジア	4	—	—	セネガル	2	アルゼンチン	9	イラン	12	スコットランド	3	—	—
16	トルコ	4	—	—	台湾	2	フィンランド	7	メキシコ	12	ベルギー	2	—	—
17	イラン	3	—	—	ウェールズ	2	パキスタン	7	スイス	10	チェコ	2	—	—
18	スウェーデン	3	—	—	—	—	スウェーデン	7	フィンランド	9	デンマーク	2	—	—
19	アルゼンチン	2	—	—	—	—	スコットランド	6	オランダ	9	韓国	2	—	—
20	ブルガリア	2	—	—	—	—	メキシコ	5	ベルギー	8	スイス	2	—	—

(※1)「殺虫剤耐性」は該当しなかったため省略

被引用回数上位 100 論文における国間比較

被引用回数が多い上位 100 論文を研究ターゲットごとに抽出した。これらについて著者が所属する研究機関の国ごとに論文数および被引用回数合計を集計し、引用度について国間比較を行なった。

まず表9、表10を見ると、“ストレス耐性”、“耐病性”、“除草剤耐性”、“殺虫剤耐性”の中では首位の米国に加えてカナダ、英国、フランス、豪州などが上位を占めていた。日本は植物、作物ともに“ストレス耐性”、“除草剤耐性”で上位での健闘が見られた。インドや中国は“ストレス耐性”で比較的高順位にあった。他のアジアでは韓国が植物関連で健闘が見られた。

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

表9 「plant」関連の被引用回数上位 100 論文を対象にした国間比較：論文数と被引用回数合計（※1）

順位	ストレス耐性			耐病性			除草剤耐性		
	国名	論文数	被引用回数	国名	論文数	被引用回数	国名	論文数	被引用回数
1	米国	34	1270	米国	6	74	米国	29	74
2	日本	15	1002	南アフリカ	2	41	カナダ	15	520
3	英国	8	857	中国	2	12	英国	14	262
4	カナダ	4	524	韓国	1	50	フランス	8	97
5	中国	4	457	スイス	1	10	日本	8	70
6	ドイツ	4	316	英国	1	8	スコットランド	5	37
7	インド	4	285	ブラジル	1	3	オーストラリア	4	99
8	スペイン	4	206	フランス	1	3	韓国	2	27
9	フランス	3	234	アルゼンチン	1	2	スウェーデン	2	18
10	イスラエル	3	195	ギリシャ	1	2	インド	2	15
11	スイス	2	98	インド	1	1	スペイン	2	7
12	フィンランド	2	96				アルゼンチン	1	45
13	メキシコ	2	92				ウェールズ	1	14
14	ベルギー	2	84				ドイツ	1	10
15	ブルガリア	2	80				デンマーク	1	7
16	モロッコ	1	109				フィンランド	1	7
17	オランダ	1	63				スイス	1	5
18	ニュージーランド	1	60				イタリア	1	4
19	オーストリア	1	57				ブラジル	1	3
20	オーストラリア	1	49				中国	1	3
21	韓国	1	40						
22	デンマーク	1	37						

（※1）殺虫剤耐性は該当なしのため省略

表10 「crop」関連の被引用回数上位 100 論文を対象にした国間比較：論文数と被引用回数合計（※1）

順位	ストレス耐性			耐病性			除草剤耐性			殺虫剤耐性		
	国名	論文数	回被引用	国名	論文数	回被引用	国名	論文数	回被引用	国名	論文数	回被引用
1	米国	23	91	米国	2	7	英国	35	655	オーストラリア	1	13
2	インド	13	386	フランス	1	3	米国	23	122	米国	1	1
3	中国	8	420	インド	1	1	カナダ	11	551			
4	カナダ	6	433	英国	1	1	フランス	6	60			
5	スペイン	6	81				スコットランド	5	42			
6	日本	6	101				スイス	2	30			
7	イタリア	4	72				デンマーク	2	23			
8	ドイツ	3	90				ウェールズ	2	18			
9	英国	2	111				スペイン	2	6			
10	オーストラリア	2	25				オーストラリア	2	4			
11	ポルトガル	2	19				日本	1	25			
12	トルコ	2	18				インド	1	13			
13	フランス	2	16				ドイツ	1	10			
14	オランダ	2	15				オランダ	1	10			
15	モロッコ	1	109				ベルギー	1	8			
16	オーストリア	1	56				アルゼンチン	1	7			
17	メキシコ	1	33				台湾	1	7			
18	ブルガリア	1	33				ポーランド	1	3			
19	ジンバブエ	1	28				セネガル	1	2			
20	チェコ	1	26				韓国	1	2			
21	スコットランド	1	20									
22	アルゼンチン	1	17									
23	ノルウェー	1	16									
24	ギリシャ	1	14									
25	スウェーデン	1	11									
26	パキスタン	1	8									
27	台湾	1	7									
28	イスラエル	1	7									
29	チュニジア	1	6									
30	韓国	1	6									
31	スイス	1	5									
32	シリア	1	4									
33	南アフリカ	1	3									

（※1）殺虫剤耐性は該当なしのため省略

次に表11、表12で資源利用効率に関する国間比較結果を見ると、植物、作物ともに米国が首位、カナダ、オランダ、ドイツ、豪州などがそれに次ぐ上位国だった。日本は、植物の“窒素利用効率”、“光利用効率”に関して引用度が高く、総論文数で上位にあった中国（表7）を上回る健闘を見せていた。総論文数で中国と並び上位に位置していたインド（表7、表8）は、引用度では中国と比べて順位を下げていた。その他ではアルゼンチンがとくに作物において健闘を見せていた（表12）。

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

表11 「plant」関連の被引用回数上位 100 論文を対象にした国間比較：論文数と被引用回数合計（つづき）

順位	窒素			水			光			資源		
	国名	論文数	被引用回数	国名	論文数	被引用回数	国名	論文数	被引用回数	国名	論文数	被引用回数
1	米国	23	673	米国	26	1001	米国	27	505	米国	12	180
2	日本	13	285	オーストラリア	13	603	オランダ	9	71	中国	5	32
3	カナダ	8	127	スペイン	10	406	カナダ	8	75	ドイツ	2	16
4	中国	7	96	中国	6	220	日本	5	29	オーストラリア	1	3
5	オランダ	7	167	ドイツ	6	226	オーストラリア	3	54	アルゼンチン	1	11
6	ドイツ	6	104	フランス	4	123	中国	3	12	ベルギー	1	6
7	オーストラリア	5	182	イタリア	5	63	ニュージーランド	3	77	チェコ	1	22
8	フランス	5	257	オランダ	4	135	デンマーク	2	12	フランス	1	22
9	イタリア	4	78	英国	3	107	ドイツ	2	31	ギリシャ	1	14
10	スウェーデン	4	76	カナダ	2	78	スコットランド	2	85	インド	1	3
11	フィンランド	2	23	デンマーク	2	74	スペイン	2	38	イスラエル	1	41
12	インド	2	32	イスラエル	2	114	スウェーデン	2	7	イタリア	1	5
13	アルゼンチン	1	10	日本	2	99	オーストリア	1	8	日本	1	3
14	ブラジル	1	12	ポルトガル	2	89	チェコ	1	1	ケニア	1	10
15	チェコ	1	26	スイス	2	95	英国	1	2	オランダ	1	9
16	英国	1	28	アルゼンチン	1	25	イラン	1	9	セネガル	1	11
17	エチオピア	1	22	オーストリア	1	28	パキスタン	1	7	スペイン	1	1
18	ギリシャ	1	13	ギリシャ	1	29	スロベニア	1	2	スウェーデン	1	30
19	インドネシア	1	21	インド	1	25	韓国	1	1	スイス	1	1
20	メキシコ	1	14	メキシコ	1	33	ベネズエラ	1	2	ジンバブエ	1	6
21	パナマ	1	11	ニュージーランド	1	24						
22	フィリピン	1	15	スロベニア	1	30						
23	スペイン	1	18	南アフリカ	1	66						
24	スイス	1	21	スウェーデン	1	30						
25	ベネズエラ	1	29	トルコ	1	42						
26	ジンバブエ	1	11	フィンランド	1	63						

表 12 「crop」関連の被引用回数上位 100 論文を対象にした国間比較：論文数と被引用回数合計（つづき）

順位	窒素			水			光			資源		
	国名	論文数	被引用回数	国名	論文数	被引用回数	国名	論文数	被引用回数	国名	論文数	被引用回数
1	米国	17	443	米国	23	688	米国	10	101	オランダ	11	51
2	カナダ	12	225	オーストラリア	18	863	オランダ	7	64	米国	6	8
3	中国	9	141	中国	11	302	中国	4	23	中国	5	82
4	イタリア	6	240	インド	7	148	ドイツ	3	15	イタリア	4	52
5	デンマーク	6	103	英国	5	226	英国	3	13	インド	3	28
6	ドイツ	5	106	イタリア	5	106	スペイン	3	24	オーストラリア	2	17
7	英国	5	87	アルゼンチン	5	86	スリランカ	2	37	ケニア	2	22
8	オーストラリア	4	69	スペイン	4	128	カナダ	2	21	セネガル	2	17
9	日本	4	55	トルコ	3	56	ニュージーランド	1	82	アルゼンチン	1	11
10	アルゼンチン	4	51	オランダ	2	78	デンマーク	1	42	英国	1	1
11	インド	4	212	デンマーク	2	77	イラン	1	15	フランス	1	5
12	オランダ	3	29	ポルトガル	1	57	パキスタン	1	7	ドイツ	1	3
13	ブラジル	3	42	スリランカ	1	50	イタリア	1	6	ギリシャ	1	14
14	スペイン	2	56	ニジェール	1	41	アルゼンチン	1	3	ジンバブエ	1	6
15	メキシコ	2	28	ドイツ	1	36	インド	1	2			
16	トルコ	2	6	メキシコ	1	33	韓国	1	1			
17	チェコ	1	42	スロベニア	1	30						
18	インドネシア	1	30	シリア	1	27						
19	フランス	1	27	ニュージーランド	1	24						
20	フィリピン	1	24	コロンビア	1	23						
21	コロンビア	1	18	イスラエル	1	23						
22	イスラエル	1	14	スイス	1	20						
23	エチオピア	1	12	フランス	1	20						
24	タイ	1	10	日本	1	18						
25	ヨルダン	1	8	カナダ	1	18						
26	ブルキナ・ファソ	1	7	モロッコ	1	17						
27	フィンランド	1	20									
28	韓国	1	6									

■ 国間比較に関するまとめ

以上より、文献検索による最近 10 年間の基礎研究動向結果からは、基礎的な研究を精力的に行なっているのは米国、豪州、カナダ、英国、フランス、オランダ、ドイツ、中国、インドなどであることが分かった。中国、インドはストレス耐性や資源利用効率など、近年注目される形質についての研究で存在感を示していることが明らかになった。また日本に関しては多くの項目において上位～中位で見られたことから、基礎研究においては一定の成果を挙げており、特に論文数では中国の下位となっても引用度で上回るなど、精力的かつ質の高い研究が行なわれている現状が確認された。

A1.4. 企業における研究開発の近年の動向

近年、食料消費の増大、素材や再生可能エネルギーの需要増大、安全と安心に関する意識の高まり、新興国の発展、等が背景となって植物生産に対する関心が世界的に高まっている。農業はこのような動きと関連の深い産業であるが、とりわけ種子や農薬などの農業生産資材に関する分野では植物生産における量の増加および質の向上へ向けた研究開発がバイオテクノロジーの活用を基軸として活発化している。これは、近年のバイオテクノロジーの進展が、遺伝的情報の操作性を向上させ、植物の生育特性（形質や環境への適応性など）を大きく左右する種子に対して以前よりも容易または効率的に経済的価値を付与することを可能にしているためである。

以上より、ここでは種子事業に係る企業の研究開発動向を調査した。

■ 関連市場と主要企業

現在、種子事業に取り組む世界的な企業の多くは農薬市場で上位を占める多国籍の大手化学メーカーである（表13）。世界の農薬市場は、これら大手化学メーカーが市場全体の8割前後を占める寡占状態となっている。これは00年のシンジェンタ（ゼネカとノバルティス）、01年のダウ（ダウとローム＆ハース）、02年のバイエル（アベンティスとバイエル）といった大型合併による巨大企業の誕生によるところが大きいと言われている。企業間の提携や買収は現在も頻繁に行なわれており、各社ともバイオテクノロジーの進展に対応するため技術基盤強化に取り組んでいる^[13]。市場の内訳は表14に示すとおり除草剤、殺虫剤、殺菌剤によってその9割以上が占められている。

種子事業に関しては、大手化学メーカーは、農薬開発と並行して、自社農薬に対する耐性を持った品種の開発や他の種々の形質に着目した研究開発を行なっている（詳細は本章の「大手化学メーカーの研究開発パイプライン」参照）。また燃料としてのバイオマス利用の流れから、近年は食料作物だけでなくエネルギー資源作物に取り組む企業も出始めている（「A2.1.2 エネルギー生物科学研究所ほか」で英国BP社の取り組みを紹介）。

表13 世界の農薬市場（単位 100 万ドル）。種子事業に取り組む世界的企業の多くは農薬市場で上位を占める多国籍の大手化学メーカー（※1）

順位	2001 年		2007 年	
	企業名	売上高	企業名	売上高
1	Syngenta	5,385	Bayer CropScience（独）	7,447
2	Aventis	3,842	Syngenta（スイス）	7,285
3	Monsanto	3,755	BASF（独）	4,291
4	BASF	3,105	Monsanto（米）	3,753
5	Dow	2,612	Dow AgroScience（米）	3,414
6	Bayer	2,418	DuPont（米）	2,400
7	DuPont	1,917	マクテシム・アガン（イスラエル）	1,895
8	マクテシム・アガン	784	ニューファーム（豪）	1,819
9	住友化学	733	住友化学	1,248
10	アリスタライフサイエンス	703	アリスタライフサイエンス	1,036

（※1）2001 年は住友信託銀行調査月報 2003 年 3 月号より引用。2007 年は 2009 年 12 月 30 日記事（日本経済新聞）より引用（住友化学が中国企業に競り勝つ形で豪州の大手ニューファームと業務・資本提携に向けた協議を始めることとなったという記事）

表14 世界の農薬市場（US\$ millions）（※1）

種類	2004 年	2005 年
除草剤	14,849	15,445
殺虫剤	8,635	8,871
殺菌剤	7,296	7,756
その他	1,569	1,633
合計	32,349	33,705

（※1）Cropnosis Ltd.、月刊ファインケミカル 2006 年 4 月号を参考に表作成

種子事業に関して日本で大手と位置づけられているのはタキイ種苗とサカタのタネであるが、売上高では上記のような世界の大手化学メーカーに大きく差をつけられている。たとえばタキイ種苗の 2008 年 4 月期売上高は 413 億円であり、サカタのタネは 2008 年 5 月期売上高が 324 億円だった^[14]。また世界の大手化学メーカーがダイズやトウモロコシなど主要作物を中心的に扱うのに対し、日本は野菜や園芸作物が中心という違いがある。

日本の種苗業界はこれら 2 社を頂点とした図 15 のような段階的な構造になっている。大別すると次の 3 群にまとめられる^[15]。

1. 大手：ほとんどの作物品種を網羅し、事業も全国展開している総合生産卸会社群
2. 準大手：競争力のある特定品目については自社で育種・生産・販売しているものの、他の品目については他社から仕入販売（店頭育種）をしている中小生産卸会社群

3. 中小生産卸：育種や生産には携わらず、地方卸や小売に特化している圧倒的多数の会社群

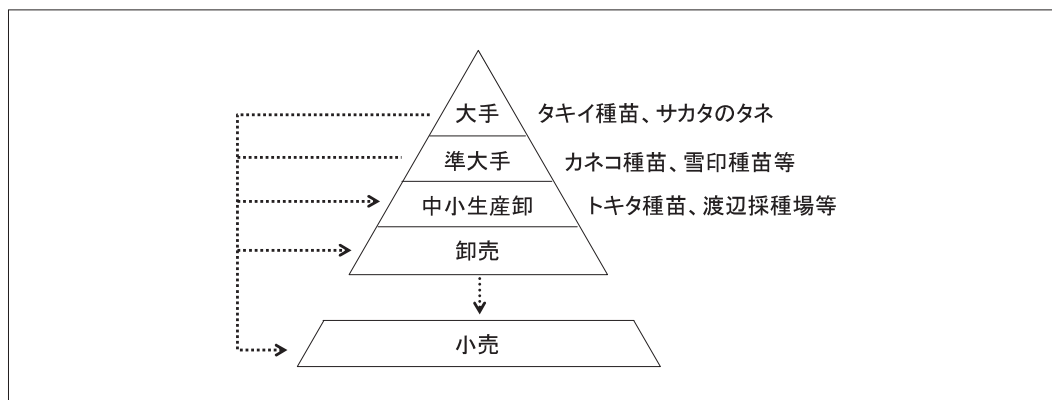


図15 種苗業界の構造（久野（1998）^[15] をもとに図作成）

日本全体では種子市場は縮小傾向にあると言われている。そのため海外展開が課題となっている。そのような中、タキイ種苗とサカタのタネは新品種開発の研究拠点をインドに新設した^[16]。またトキタ種苗も海外で現地の研究・営業員を倍増させる。現地の大学や研究機関と連携して新品種開発を手がけることで、インドおよび欧米向けの新品種の作出を目指すとしており、今後の動向が注目される。なお日本の大手化学メーカー等は、必ずしも種子事業ではないが、農業関連事業に多様な形で取り組んでいる。それらには、収穫量を高めるコメの種子増産や米社との提携による海外での農薬販売（三井化学）、豪農薬大手への出資や国内での農業生産への参入（住友化学）、野菜工場への参入（三菱ケミカルホールディングス、昭和電工）などがある^[17]。

【13】 例：ブラジルのサトウキビ研究センターである CTC と独 BASF の提携、独 Bayer CropScience による米バイオ企業 Athenix の買収、英 BP と米 Martek Bioscience の提携など（日経バイオテク 2009 年 9 月 28 日記事）

【14】 各社ホームページより引用

（タキイ：http://www.takii.co.jp/company/01_gaiyou.html、

サカタ：<http://www.sakataseed.co.jp/corporate/ir/highlight/index.html>）

【15】 久野（1998）、種苗事業の構造と機能に関する一考察 ―野菜種苗を中心にして―、農経論叢 54：21-37

【16】 日本経済新聞 2009 年 11 月 5 日記事

【17】 日本経済新聞 2010 年 4 月 10 日記事

■ 一般的な研究開発段階

大手企業の大半は研究開発から商業化までの各段階をフェーズに区切って管理しており、各々の位置づけは次のようになる。

→ DISCOVERY：新規形質遺伝子の基礎的探索・同定

(Gene/Trait Identification)

→フェーズ 1：使用する品種や遺伝子の特定 (Proof of Concept)

→フェーズ 2：実験室および圃場試験の実施の段階 (Early Development)

→フェーズ 3：開発した新品種の検証と規制データの作成

(Advanced Development)

→フェーズ 4：種子生産、商品化のための計画、認可手続き (Pre-launch)

各段階の特徴は表 15 のとおりである。商業的な可能性が高まるのは Phase2 以降と言われる。欧米豪など農業を主要な産業として持つ国々では大学または公的研究機関と企業との連携が良好であり、地域固有のニーズや、より大きな市場ニーズを意識した取り組みが行なわれており、大規模かつ先進的な取り組みも見られる（詳細は 3、5 章の海外調査結果を参照）。

表 15 各研究開発段階の特徴（※1）

フェーズ	Discovery	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
位置づけ	Gene/Trait Identification	Proof of Concept	Early Development	Advanced Development	Pre-launch
期間平均	2-4 年	2-4 年	2-4 年	2-4 年	2-3 年
成功確率	5%	25%	50%	75%	90%
候補数	数万	数千	数十	5 以下	1
実施事項	大規模スクリーニング、モデル植物での試験	遺伝子の絞り込み・最適化、試験用の作物品種への形質転換	選抜、一般的データの収集、選ばれた遺伝子（エリート品種）への大規模形質転換	形質の統合、大規模圃場試験、規制対応向けデータの収集	販売許可申請、種子増殖、市場調査
費用	～\$5M	～\$10M	～\$15M	～\$30M	～\$40M
備考	P2 以降が開発タイムラインとなる。 大半のライセンス商品もこれ以降の遺伝子。 P3 以降のコストは膨大。 コスト低減のための技術開発も重要。 欧米豪などでは基礎・応用間の連携がスムーズ。 日本は基礎研究で優れた成果を出しているが応用化に乏しい。				

（※ 1）大手化学メーカーの公開資料等をもとに作成（例：Monsanto、<http://www.monsanto.co.jp/news/release/080110.shtml>、http://www.monsanto.com/pdf/pipeline/pipeline_2009_phase.pdf）

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

一方、日本は、基礎的な植物科学研究が世界的にも高いレベルにあるものの、その応用化が進まず基礎研究の成果を産業へと十分に結び付けられていない（表16）。サントリーによる青いバラの開発は成功事例として有名だが、多くの大学や公的研究機関による研究はコンセプトを解く Discovery または Phase 1 の段階で終わってしまい、事業化への意識や経験が不足している^{〔18〕}。

表16 植物科学における科学技術、研究開発力比較（※1）

分野		植物科学									
中綱目		遺伝子発現と代謝制御		器官形成		開花制御・生長制御		環境・ストレス応答		生態生理	
国・地域	フェーズ	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	研究水準	◎	↗	◎	↗	○	↗	◎	↗	◎	↗
	技術開発水準	△	↘	○	→	△	→	○	→	○	→
	産業技術力	△	↘	○	→	△	→	×	→	△	↘
米国	研究水準	◎	↗	◎	↗	○	→	◎	↗	◎	↗
	技術開発水準	◎	↗	◎	↗	○	↗	◎	↗	◎	↗
	産業技術力	◎	↗	◎	↗	○	↗	◎	↗	○	↗
欧州	研究水準	◎	↗	◎	↗	○	→	◎	↗	◎	↗
	技術開発水準	○	↗	◎	↗	○	→	◎	↗	◎	↗
	産業技術力	○	↗	◎	↗	△	→	◎	↗	○	↗
中国	研究水準	○	↗	○	↗	△	↗	○	↗	○	↗
	技術開発水準	△	↗	△	→	△	↗	○	↗	×	↗
	産業技術力	△	↗	△	→	○	↗	◎	↗	×	→
韓国	研究水準	○	↗	△	↗	△	→	○	→	○	→
	技術開発水準	△	→	△	↗	△	→	×	→	×	→
	産業技術力	△	→	△	↗	△	→	×	→	×	→

（※1）「科学技術・研究開発の国際比較（2009年版）概要版」、2009年、JST-CRDSより抜粋

【18】ワークショップ報告書 フィールドにおける植物の環境応答機構と育種技術、2010年、JST-CRDS

■ 研究開発の一般的傾向

世界の種子ビジネスを牽引する大手化学メーカーは研究開発に対して積極的な投資を行っている（表17）。また割合で見ると日本の主要種苗メーカーも研究開発に対して大手化学メーカー並みの投資を行っているが、研究開発の内容や市場に与えるインパクトの大きさは必ずしもそれらと同等ではないと予想される。

ホームページから得られる公開資料などをもとに各社の研究開発の進捗状況、種苗業界を取り巻く主要な世界的動向、バイオテクノロジーに対する認識などを

以下にまとめた^[19]。

- ・事業の柱は農薬、種子、農業支援（途上国における技術支援など）。
- ・自社および連携先が保有する技術基盤を駆使して、（1）新規化合物の開発、（2）生産効率の向上、（3）遺伝的機能の向上、（4）遺伝子操作技術等の開発、等に取り組み、最終的には、雑草・害虫・病害の制御、生産技術の改善、新品種・形質の作出、植物による有用物質の生産、技術の企業化・アウトライセンス、等のビジネスへ実らせることを目指す。
- ・除草剤耐性や害虫抵抗性を持つ農作物など、より高い付加価値を種子に付与できるようになってきた。一方、害虫抵抗性作物が殺虫剤市場に与えるインパクトは現時点ではまだそれほど大きくない。そのため依然として農薬の重要性は高く、実際に各社の売り上げの大半を農薬が占めている。
- ・バイオテクノロジーの成果は農薬と種子の研究開発に大きなインパクトを与え、今後もそれは続く。農薬においては有望な化学成分を大量にテストしたり、遺伝子組換え技術を用いて化学物質が働く仕組みを開発初期の段階で明らかにしたりすることができる。種子では従来の育種プロセスにおいて有用な性質を持つ品種を遺伝子マーカーを利用して追跡したり、遺伝子組換え技術によって様々な農家に利益をもたらす作物を作り出したりできる。
- ・品種の研究開発では虫害、雑草、病気、収量などに関する形質が主なターゲットとなる。特に収量については、通常の高収、乾燥などのストレス環境下での高収（ストレス耐性）、少量窒素環境下での高収（窒素利用効率）に対するニーズが高まっている。虫害や雑草は既に農薬で事業化できており今後もそれが続く見込みである。耐病性は事業的に難しい点があるため取り組みはそれほど大規模ではない。
- ・高収以外では良質の油脂を多く含む品種や栄養成分構成良好な品種の開発など「質」に関するターゲットも増えている。
- ・各社が持つ世界中の研究開発拠点（実験圃場など）でフィールド・テストを行い、各種形質データや環境データを蓄積し、IT技術者による分析が行なわれている。
- ・最先端の技術を集約した研究開発拠点を設立し、開発スピードの向上にも努めている。たとえば Monsanto は、2005 年よりノースカロライナに Research Triangle Park を設立し、植物生理学や分子生物学の知見および技術を用いて新規遺伝子の探索から自動化されたグリーンハウスでの栽培、表現型形質の計測、多種多様なデータの大量処理・解析などを行なっている。また DuPont の植物バイオ部門である Pioneer は米ミズーリ州と連携してダイズ種子生産施設を建設する計画を 2010 年 3 月に発表している。そこでは自社独自の Accelerated Yield Technology（AYT）というシステムなどにより、自社の

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

持つ遺伝資源コレクション、バイオアッセイ法、コンピュータによる計算、分子育種法などを活用して、品種改良のスピードアップを図るという。

- ・農薬や種子に関する研究開発を高度化または効率化するための各種周辺技術（“Enabling Technology”）の開発も行われている。遺伝子導入技術、遺伝子排除技術、遺伝子スタック（形質を2つ以上併せ持つこと）、クリーンな形質転換体、規制対応コスト削減などに関するものがあるが、金銭価値を明示することが困難である場合も多く、事業としては厳しい場合が多い。

表17 種苗業界における世界および日本の主要な企業の売上高と研究開発費^(※1)

企業名（全体 / 部門）	FY	売上高	研究 開発費	売上高研究 開発費率	単位
Monsanto（全体）	2008	11,365	980	8.6%	百万 US\$
Syngenta（全体）	2008	11,624	969	8.3%	百万 US\$
DuPont（全体）	2008	30,529	1,393	4.6%	百万 EUR
（Agriculture & Nutrition）		8,000	–	–	百万 EUR
Bayer（全体）	2008	32,918	2,578	7.8%	百万 EUR
（Crop Science）		6,382	649	10.2%	百万 EUR
Dow（全体）	2008	57,514	1,310	2.3%	百万 US\$
（Agricultural Sciences）		4,535	44	1.0%	百万 US\$
BASF（全体）	2008	62,304	1,355	2.2%	百万 EUR
（Agricultural Solutions）		3,409	–	–	百万 EUR
住友化学（全体）	2008.3	18,965	1,054	5.6%	億円
（農業化学）		2,004	–	–	億円
タキイ種苗（全体）	2008.4	413	–	–	億円
サカタのタネ（全体）	2008.5	468	35	7.5%	億円
カネコ種苗（全体）	2008.5	440	5	1.1%	億円

（※1）各社の決算報告書や annual report を参考に表作成

【19】 各社ホームページなどから得られる公開資料ほか：

Monsanto（http://www.monsanto.com/pdf/pubs/2009/annual_report.pdf）、

Syngenta（http://www2.syngenta.com/en/investor_relations/financial_annual_reports.html#year2008）、

DuPont（<http://phx.corporate-ir.net/External.File?item=UGFyZW50SUQ9MzY5MjM3fENoaWxkSUQ9MzY1ODgyfFR5cGU9MQ==&t=1>）、

Bayer（<http://www.investor.bayer.com/en/reports/annual-reports/>）、

Dow（http://www.dow.com/financial/fin_reports/index.htm）、

BASF（<http://www.report.basf.com/2008/en/servicepages/welcome.html>）、

住友化学（<http://www.sumitomo-chem.co.jp/japanese/ir/tansin.html>）、

タキイ種苗 (http://bunnabi.jp/2011/cn_data.php?ccd2=70086#data2)、
 サカタのタネ (<http://www.sakataseed.co.jp/corporate/ir/library/yuho/index.html>)、
 カネコ種苗 (<http://www.kanekoseeds.jp/gyouseki.html>)、
 「ワークショップ報告書 フィールドにおける植物の環境応答機構と育種技術」(2010 年、JST-CRDS)、
 Research Triangle Park (http://www.monsanto.com/pdf/investors/2009/research_triangle_park_11_11_09.pdf)、日経バイオテク 2010 年 3 月 29 日記事

■ 大手化学メーカーの研究開発パイプライン

公開されている情報を基に大手化学メーカー 4 社の研究開発パイプラインを表 18、表 19 にまとめた。また以下に主なポイントをまとめたが、国内企業に関しては十分な情報を得ることができなかった。

- ・農薬(“crop protection”)は依然として重要な研究開発ターゲットの 1 つとなっており、表 4 においては Syngenta で最も多様な取り組みが見られる。
- ・種子に関しては各社ともトウモロコシ、ダイズを中心に、コットン(綿花)、キャノーラ、イネ、野菜、油脂用種子(oilseed)などを扱っている。限られた種のみがターゲットとなっているのは規制対応のコストなどと関連すると言われている。研究開発後期段階では極めて多額の費用がかかり(表 15)、大面積で栽培される作物でないと商業化が極めて困難なためである。
- ・各ターゲットの潜在的な市場規模は少なくとも約 60 億円以下(< 50M ユーロ。1 ユーロ = 120 円で計算。Bayer のダイズやコットンにおけるいくつかの品種など)で、多い場合は約 940 億円以上(> 1B ドル。1 ドル = 94 円で計算。Monsanto の高収量性トウモロコシ品種、Syngenta の各種農薬やトウモロコシ品種など)と見込むものもある。
- ・とくに高収量性、乾燥耐性、窒素利用効率、油脂の質や量に関する形質は市場性も高く将来性あるターゲットとして取組まれている。
- ・複数形質を持つ掛け合わせ品種も検討が行われている。例えば Monsanto の HP によれば SmartStax™ は『除草剤耐性と害虫抵抗性機能に関する 8 種類の遺伝子を合わせ持つスタック(掛け合わせ)トウモロコシ』として開発されている。
- ・表 18 ~ 21 に掲載されているターゲット以外で今後上市が予想されているものには、開発途上国で役立つ作物として期待されるキャッサバ、ソルガム、バナナなどがある^[20]。

表18 大手化学メーカーの研究開発パイプライン（件数）：PIONEER（2009年）

ターゲット	形質	Disco-very	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
corn	病害抵抗性 （炭疽性茎腐敗病抵抗性）					1
	乾燥耐性		1			1
	窒素利用効率		1			
	高収量性		1			
	虫害抵抗性・除草剤耐性		1		1	2
	種子処理		1	1		1
soybean	病害抵抗性（アジア型ダイズさび病抵抗性）		1		1	
	病害抵抗性 （菌核病菌抵抗性）		1			
	高収量性		1			
	虫害抵抗性（アブラムシ、 チョウ、シストセンチュウ、 カメムシなど）・ 除草剤耐性	1	3		1	1
	高品質種子		2			1
rice	除草剤耐性		1			
	虫害抵抗性		1			
canola	除草剤耐性 （グリフォサート）			1		
	高収量性		1			

表19 大手化学メーカーの研究開発パイプライン（件数）：Syngenta（2008年）（※1）

ターゲット	形質	Disco-very	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
crop protection	ストレス耐性				1	
	殺菌剤				1	
	種子処理				1	
	除草剤				1	
	殺虫剤			1		
	殺菌剤			2		
	除草剤	1				
	殺虫剤	1				
	植物の成長促進剤	1				
corn	虫害抵抗性（広範な鱗翅目）					1
	虫害抵抗性関連		1			1
	種子処理					1
	エタノール生産性・持続性					1
	乾燥耐性					1
	窒素利用効率		1			
soybean	除草剤耐性					1
	除草剤耐性（HPPD）				1	
	アブラムシ抵抗性					1
	センチュウ抵抗性					1
	さび病耐性			1		
	GM 病気・センチュウ抵抗性		1			

（※1） Syngenta の研究開発フェーズは“research optimization”、“early development”、“late development”、“elite development”となっていた。ここでは“research optimization”は“Phase 1”以前、“early development”は“Phase 2”、“late development”は“Phase 3”、“elite development”は“Phase 4”相当とした。

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

表20 大手化学メーカーの研究開発パイプライン（件数）：Monsanto（2007 年）

ターゲット	形質	Disco-very	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
crop protection	カメムシ抑制（コットン）		1			
	害虫抵抗性		1			
corn	乾燥耐性			1	1	
	窒素利用効率		1			
	広域高収量性			1		
	除草剤耐性（ラウンドアップ）					1
	除草剤耐性・害虫抵抗性				1	
	リジン含有など					1
	高油脂性		1			
soybean	広域高収量性		1	1		
	除草剤耐性（ラウンドアップ）					1
	除草剤耐性（ジカンバ）				1	
	除草剤耐性（ラウンドアップ）・ 鱗翅目害虫抵抗性				1	
	センチュウ抵抗性		1			
	病害耐性		1			
	高油脂性		1		1	
	omega3 含有性				1	
	低リノレン酸・高オレイン酸含有性				1	
	高ステアリン酸塩含有性		1			
cotton	乾燥耐性		1			
	害虫抵抗性			1		
	除草剤耐性（ジカンバ）		1			
canola	広域高収量性			1		

表21 大手化学メーカーの研究開発パイプライン（件数）：Bayer（2008年）

ターゲット	形質	予想される上市年								
		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
crop protection	殺菌剤			3						
	殺虫剤	1								
	除草剤	1	2		1					
	種子処理				2					
cotton	高品質繊維			2	1	1				
	高収量繊維									
	ニーズ対応型品種 （工業利用・土地固有性）									
oilseeds	収量	1				1				1
	農業的形質（定着性、植物体サイズ、耐病性、環境応答性）									
	生育初期の高成長性									
	雑草に対する競争優位性									
	均一成長									
rice	品質	1				1				
	穂先につくバクテリア耐性									
vegetables	トマト（皮の破れにくさ）	情報なし								
	メロン（香り強化）									
	玉ねぎ（保存期間延長）									
	きゅうり（収量）									

【20】 在日米国大使館 米国農務省 ニュースルーム「米国の農業におけるバイオテクノロジーの現状と展望」

■ 遺伝子組換え作物に関する現状

これまでの作物生産における目覚ましい世界的な発展は、主に「種子（品種）」、「農薬」、「化学肥料」、「機械」それぞれの技術革新によって支えられてきた。とりわけ「種子（品種）」に関しては遺伝子組換え作物（GM作物）が登場し、その是非に関しては賛否両論があるものの、世界各地で栽培面積の拡大が続いている（図16、図17）。

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

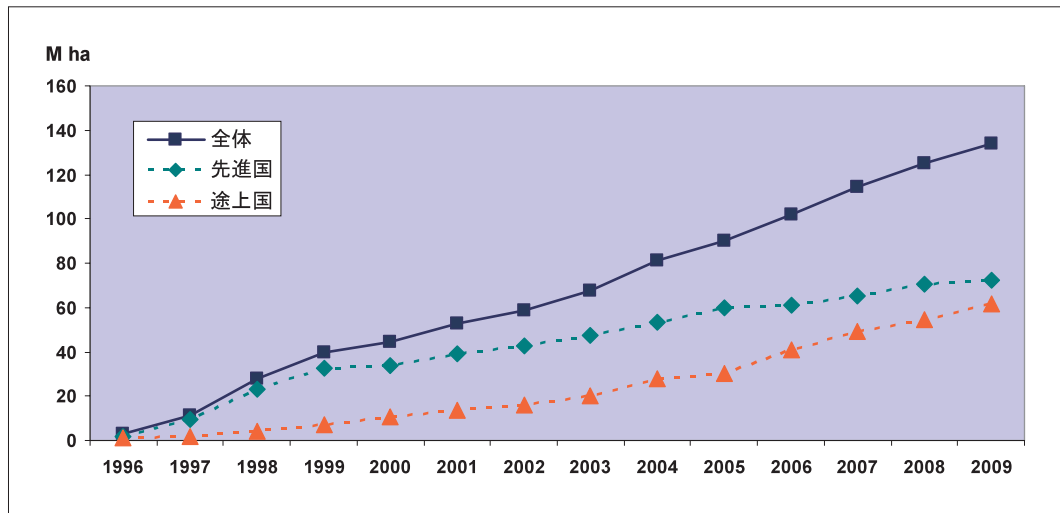


図16 1996年から2009年までの遺伝子組換え作物の栽培面積
(国際アグリバイオ事業団 (ISAAA) の公開資料等をもとに図作成)

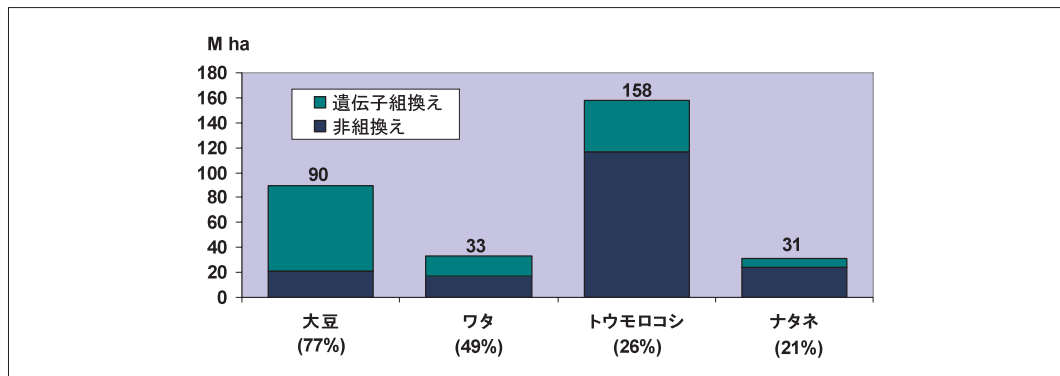


図17 主要作物の総栽培面積に占める遺伝子組換えの割合 (%) (2009年)
(国際アグリバイオ事業団 (ISAAA) の公開資料等をもとに図作成)

遺伝子組換え作物の商業栽培に関する現状を以下にまとめた^[21]。

- ・2009年の種子の市場規模は世界で105億ドル(約9,450億円)だった。また遺伝子組換えの種子を用いて生産された収穫物の市場規模は2008年にはトウモロコシ、大豆、ワタを合計して1,300億ドルであり、今後は年10～15%の割合で成長すると見込まれている。
- ・遺伝子組換え作物を栽培している国は2009年時点で25カ国(2008年にドイツが栽培中止、2009年からコスタリカが栽培開始)ある。その内訳は、発展途上国が16ヶ国、先進国が9ヶ国である。栽培面積で見ると世界全体のほぼ半分(46%)を発展途上国が占めている(図16)。さらに2015年までには先進国全体の栽培面積を超え、5割を超えると予測されている。
- ・主要作物4種を見ると、大豆では世界全体の栽培面積9,000万ヘクタールのうち4分の3以上が遺伝子組換えになり、ワタは同3,300万ヘクタールのほぼ半分を占める。トウモロコシは同1億5,800万ヘクタールの4分の1超、

ナタネは同 3,100 万ヘクタールの 5 分の 1 以上を遺伝子組換えが占めている (図 17)。

- ・形質別に見ると除草剤耐性が全体の 62% を占め最多となっている。複数の形質を併せ持つスタックと呼ばれるタイプの品種も重要性が増してきており、遺伝子組換え作物の 21% を占め、現在 11 ヶ国 (うち 8 ヶ国が発展途上国) で採用されている。
- ・遺伝子組換え作物に関する世界的な影響評価では 1996 ~ 2008 年の間の経済的利益は 519 億ドル (約 4 兆 6,710 億円) と算出され、主な要因は生産コストの減少 (50%) と収量増加 (1 億 6,700 万トン、50%) であるとされた。また殺虫剤の使用量は 8.4%、有効成分換算で 3 億 5,600 万 kg の減少となった。さらに遺伝子組換え作物による CO₂ 固定化は 2008 年だけで 144 億 kg となった^[22]。

除草剤開発を通じて得られた基礎的知見は除草剤耐性品種の作出に一定の役割を担ったと考えられる。またそれに伴って可能となった既存の除草剤とのセット販売は大手化学メーカーにとっては極めて強力なビジネスモデルになったと考えられる。これに該当しうる例には Monsanto の除草剤 Roundup に対する Roundup Ready や Bayer の除草剤グルフォシネートに対する LibertyLink がある。

一方、次世代の研究開発の潮流も垣間見られる。アメリカとカナダでは 2009 年から大豆の高収量品種の植え付けが新たに始まった。これにより遺伝子組換え作物は除草剤耐性などの第 1 世代から高収量の第 2 世代へという世代交代が始まったと見られている。また国際アグリバイオ事業団の「遺伝子組換え作物の商業栽培に関する概要書」(2009 年) では、コムギで緑の革命を成功させたボーローグ博士の時代を引き合いに出し、「当時はなかった気候変動に直面する現在は、水や化石燃料、窒素など資源への依存を減らしながら生産性を倍増させる必要があり、課題はさらに困難になっている」と述べられている。

また遺伝子組換え作物に関連する社会受容性の問題については、世界的にも下に例示するような種々の問題が指摘され議論が続いている。

- 食の安全性
- 環境への影響 (遺伝的多様性への影響、標的以外の生物への影響、Bt 耐性品種の管理)
- 技術の所有権 (民間企業の役割、知財)
- 倫理的配慮
- 国際貿易への影響

環境への影響（遺伝資源の利用）という面では生物多様性の観点からも近年注目されている。1992年に地球サミットで作成された「生物の多様性に関する条約（Convention on Biological Diversity、CBD）」では目的の一つとして「遺伝資源の利用から生ずる利益の公正かつ衡平な配分」が掲げられている。この目的に関わる問題は「遺伝資源へのアクセスと利益配分（Access and Benefit-sharing、ABS）」とも呼ばれており、2010年に名古屋で開催される生物多様性COP10でも議論されることになる。ABSおよびそこから派生する諸問題（例えば遺伝子組換え生物の輸出入により生ずる生物多様性の保全や持続的利用に対する損害への懸念など）は遺伝子組換え作物の社会受容性にも大きく関わるため、今後の動向は世界的な遺伝子組換え作物の栽培にも何らかの影響を与える可能性がある。

遺伝子組換え作物の栽培面積が途上国で増加の一途をたどっている。今後もニーズは高まると予想されているが、一方では、現状として遺伝子組換え作物がそれらの国々で必ずしも社会的に広く受け入れられていない^[23]。途上国に限らず社会受容性については、レギュラトリーサイエンスや人文・社会科学も含めた科学が、引き続きエビデンスを幅広く収集し、またそれらに基づき社会との対話に努める必要がある。

- 【21】 遺伝子組換え作物の商業栽培に関する概要書（第41号）、2009年、国際アグリバイオ事業団（ISAAA）、<http://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/41/default.asp>、等参照
- 【22】 Brookes and Barfoot (2010), Global Impact of Biotech Crops: Environmental Effects, 1996-2008, AgBioForum 13 (1)
- 【23】 Massarani et al. (2010), Science and Development Network

■ 日本における遺伝子組換え作物栽培の現状

特許庁によるイネの遺伝子組換えに関する近年の特許出願状況分析によれば、2001年当時の自国における特許出願件数に日米間で大きな差は見られなかった^[24]。一方、海外への特許出願件数では、米国が約400件あるのに対し日本は約100件と少なかった。また日本における外国出願人の出願傾向が「イネに限定したものは極めて少なく、イネ科植物を含む植物全体を対象とするもの」、かつ「遺伝子組換えに不可欠な「遺伝子導入技術」、「発現調整技術」に関するものが多かったのに対し、日本出願人の出願傾向は「イネ科植物に限定した技術が多い」という特徴があった。これらより、日本ではイネゲノム計画の推進を背景に、イネ固有の事情に即した技術開発が進められ、米国では汎用性のある基盤的技術の開発が進められていたことが分かった。

品種という観点からは、日本では現在、厚生労働省による安全性審査が終った

遺伝子組換え食品は 101 品種ある（2010 年 2 月 4 日現在）。それらの内訳はジャガイモ（8）、大豆（6）、テンサイ（3）、トウモロコシ（47）、ナタネ（15）、ワタ（19）、アルファルファ（3）となっている。2001 年に初めて官報掲載されて以降、毎年、複数品種が新たに追加されている。

また新品種を作出する過程の 1 つである遺伝子組換え作物の選抜に関しては、日本では場栽培を行なうことは事実上不可能とされている^[25]。そのため企業が産業化に取り組みにくい環境となっている。そのような中、農林水産省の規制が 2010 年 4 月より緩和された^[26]。これに伴い文部科学省の規制も緩和される見通しとなっている。文部科学省は大学などが研究の一環として行う場合に管轄となる。従来の日本では、諸外国と異なり、遺伝子組換え作物の隔離ほ場^{※1}における栽培に関して、分子生物学的特性の詳細が明らかでない初期世代を野外試験で選抜（スクリーニング）することができなかった。これには海外で既に実用化実績のある遺伝子組換え作物を国内で栽培するケースがこれまでの申請で主な対象となっていたために、生育特性等のデータが海外データとして事前に入手可能であったことが背景としてある。ところが実用化実績のない遺伝子組換え作物の場合にはそれが困難となる。今回の規制緩和によって、わが国における基礎研究の成果の応用化、すなわち研究開発の環境が多少とも改善されることが期待できる。

【24】特許出願技術動向調査報告 特許から見た遺伝子組換え作物について（改訂版）～遺伝子組換えイネを巡る状況～、2001 年、特許庁

【25】ライフサイエンス 科学技術・研究開発の国際比較 2010 年版、2010 年、JST-CRDS

【26】日経バイオテク 2010 年 4 月 26 日記事

※ 1 遺伝子組換え農作物がほ場外に持ち出されることを防ぐための設備を有し、管理が実施されるほ場のこと

A2. 海外調査結果（サイトレポート）詳細

JST-CRDS が行なった「フィールドにおける植物の環境応答機構と育種技術」に関する調査、および同名ワークショップでの検討を通じて得られた情報を基に、植物科学分野において、とりわけ植物生産と関わりが深い研究領域で、世界的にも注目すべき取り組みを行なう組織、機関、またはプロジェクトを訪問し、それらを運営する研究者らの問題意識、推進方策、取り組みの現状、取り組みに至った経緯、また研究施設等に関する現地調査を行った。ここでは調査を担当した有識者による報告を中心に、調査結果をとりまとめた。

A2.1. アメリカ合衆国

A2.1.1. 農務省農業研究局乾燥地農業研究センター

最初に訪問したアリゾナ州フェニックス郊外の Maricopa のアメリカ合衆国農務省農業研究局乾燥地農業研究センターでは、Jeff White 博士から iPlant Collaborative における研究状況を聴き取りした。iPlant は、アリゾナ大学を中核とするグループが、アメリカ国立科学財団（National Science Foundation, NSF）の助成を受けて形成した研究共同体で、現在、次の二つの大課題（Grand Challenges）が進行中である。

1. Assembling the Tree of Life for the Plant Sciences (iPToL、植物進化系統樹の構築)
2. Relating Genotypes to Phenotypes in Complex Environments (iPG2P 植物の遺伝子型と表現型のリンク)

このような研究共同体が発足した背景には、生物の遺伝的情報の収集技術が飛躍的な進歩を遂げる中で、その情報を有効に活用し、生物の進化や環境応答を統合的に理解するための手法が十分ではなく、そのことが遺伝情報の有効活用を阻んでいるという認識にあるものと考えられる。今回の調査では、特に iPG2P における活動について聴き取りを行なった。植物の表現型の決定を遺伝子型と環境の相互作用（G x E）として捉えようとする試みは多くあったが、遺伝子情報の収集が急速に進むとともに、今後著しい環境変動が予測されることから、この研究分野の重要性はこれまで以上に高まるものと考えられている。

iPlant Collaborative の特徴は、遺伝子から個体・群落に及ぶ様々なレベルの現象を、包括的かつ機構的に理解するための手法を共同研究することにある。すなわち、iPlant Collaborative では、新たに実験的なデータ収集を行なうのでは

なく、これまでに収集されたか、今後収集され得るようなデータを対象に、データの統合化、可視化を含むデータ処理方法を構築する手法を提供することを目的とする。iPG2P は 5 つのワーキング・グループ (WG) から成り^(※1)、聴き取りを行なった Jeff White 博士は統合ツールとしての作物モデルの構築のリーダーを務める^(※2)。作物モデル WG は、本来データ統合化 WG や統計的推論手法 WG と協調し、遺伝子型と成長のダイナミックスを関連付ける重要な役割を持つが、White 博士によると、これまでのところ、WG 間の連携は十分ではないのが実状のようだ。この要因については、WG 間をコーディネートする人材不足などが挙げられたが、それ以上の明確な回答は得られなかった。

iPlant とは別に、High Throughput Phenotyping (高い処理能力を持つ表現型測定) 技術にも大きな関心が寄せられていた^(※3)。この背景には、今日多くの遺伝解析材料が得られるようになった反面、計測に時間を要するような形質への興味が高まってきていることによる。屋外で使用可能な波長別反射測定装置や CCD カメラなどをトラクターや可動灌漑装置に搭載し、多系統が試験栽培される圃場をスキャンするような試みも開始している。今後、こうした表現型測定技術が G x E の解析に頻繁に用いられる可能性は高い。

Bruce Kimball 博士は、1989 年から世界に先駆けて実施された Maricopa の FACE (Free-Air CO₂ Enrichment、開放系大気 CO₂ 増加) プロジェクトのリーダーである。同 FACE プロジェクト終了後には、赤外線ヒータを利用した開放系温暖化実験装置を開発した。現在、約 10m² の区画を 3 ~ 4℃程度上昇させることに成功している。本装置は、アリゾナの他、後述するイリノイの SoyFACE や、中国チベット高原での実験にも利用され始めている。この温度処理法は、気温ではなく植物体温を上げる方法であり、温暖化影響としての解釈には注意を要するが、今のところ実現可能な開放系温暖化装置として、普及する可能性がある。Kimball 博士は、新たな開放系温暖化実験のチャレンジを、過去の室内実験の結果の普遍性、重要性を認識する大きな機会ととらえている。方法論に関して様々な批判があることは事実であるが、環境応答研究の発展のために、重要なステップを築かれた Kimball 博士の功績は、今後も高く評価されるものである。

(長谷川利拡 上席研究員 独立行政法人農業環境技術研究所 大気環境研究領域)

※1 5 つの WG は以下のとおり。

- ・ NextGen Sequencing (ゲノム解読 WG)
- ・ Data Integration (データ統合化 WG)
- ・ Visual Analytics (画像化 WG)
- ・ Inferential Tools (統計的推論手法 WG)
- ・ Integrated Modelling Framework (作物モデル WG)

※2 このWGで検討していたのは、process-based modelling といって植物の発生や成長などの生物学的プロセスを再構築しようとするモデルであった。

※3 多数点同時測定、高頻度測定（例：1時間ごと）、リモートセンシング（機器開発、効率化、データの統合化）などが課題となっていた。

主な調査協力者：

Bruce Kimball 博士、Jefferey White 博士

参考サイト：

- ・ iPlant Collaborative ホームページ：<http://iplantcollaborative.org/>
- ・ iPlant Collaborative 紹介パンフレット：
<http://ag.arizona.edu/pubs/general/resrpt2007/article12.pdf>
- ・ iPG2P に関する紹介：
<http://www.iplantcollaborative.org/leaflet/2009/11/16/the-iplant-leaflet-09-05>



写真1 (上左) iPlant Collaborative に関するインタビューを行った Jeffrey White 博士と本調査メンバーの長谷川利弘上席研究員(独立行政法人農業環境技術研究所 大気環境研究領域)。(上右) 農務省農業研究局乾燥地農業研究センター(USDA-ARS)のエントランス付近。(下) High Throughput Phenotyping(高い処理能力を持つ表現型測定)を行うための台車。屋外で使用可能な波長別反射測定装置や CCD カメラなどを搭載して大規模かつ経時的な計測を目指す。

A2.1.2. エネルギー生物科学研究所ほか

イリノイ州シャンペーン・アーバナにあるイリノイ大学では、ゲノム生物学研究所(Institute of Genomic Biology, IGB)、エネルギー生物科学研究所(Energy Biosciences Institute, EBI)、先端バイオエネルギー研究センター(Center for Advanced BioEnergy Research, CABER)での聴き取り調査を実施した。IGB は 2003 年に学際的な研究を促進するために設置された研究所で、分子生物学者から生態学者まで極めて幅広い分野の教員、ポスドク、大学院生らが、実験室、研究室を効率的、かつ学際的に共有していた。

IGB には、微生物から動植物の研究分野が混在する。その中で、気候変動の影響で優れた業績を上げているのが、Don Ort 教授が率いる SoyFACE グループ(ゲノム生態学)である。SoyFACE のグループには、主に 5 名の教員(うち、2 名が USDA-ARS の研究員)と 20 ~ 30 名の大学院生が、2050 年頃を想定した二酸化炭素濃度と、オゾン濃度、土壌水分、温度が作物や土壌の物質代謝に及ぼす複合的な影響を研究している。研究費は国立科学財団(NSF)、農務省

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

(USDA)、エネルギー省(DOE)などからと様々で、上記の環境要因に対する作物の応答を、単に生育・収量だけでなく、遺伝子発現や病虫害に対する感受性に至るまで包括的に研究を進めている。また、これまでは品種育成に関して具体的なプログラムは無かったが、ダイズの育種を手がけるモンサントが高濃度オゾンへの耐性向上に関して大きな関心を示すなど、今後、気候変動への適応に向けた育種プログラムが動き始める可能性もある^(※1)。

IGBと同じ建物の中に、EBIがある。これは、イギリスに本拠を置くBPが2007年からイリノイ大学などに10年間にわたる長期支援を決定し、その受け皿として設立された研究所である^(※2)。ここでは、生物のエネルギー利用に関する様々な側面を包括的に捉えて実践するための研究が展開されている。副所長を務めるSteve Long教授は世界的に著名な植物生理学者である。バイオエネルギーに関しては、ススキ属の生産性の高さに長年注目し、特に、3倍体の*Miscanthus giganteus*については、アメリカ中西部、ヨーロッパなどへの導入を進めてきた。EBI設立後には、*M.giganteus*だけでなく、その他の高生産性植物も含め、遺伝的改良、栽培管理、エネルギー化手法、環境への負荷(ライフサイクルアセスメント)、農家経営などを含めた総合的な研究を手がけている。また、同BPプロジェクトは、研究開発から普及までを含むプロジェクトで、様々な分野の研究者に加えて、弁護士も雇用し、エネルギーや作物栽培に関連する各種の法律への対応も十分に考慮されている。1民間企業からの研究支援であるが、10年という長期間のプロジェクトであること、プロダクトが明確であることなどから、基礎科学と実践分野の科学とが直結した研究、教育の両面からも優れた組織と考えられる。

CABERは、大学が設置する時限センターの1つで、2007年に発足した組織である。本組織は、大学がバイオエネルギー研究に戦略的に取り組むためにできたもので、大学の散在する関連分野のスタッフを集め、大型予算獲得の母体となることが期待されている。そのため、EBIとは異なり、具体的な研究活動をサポートするよりは、組織の枠組みを提供するものと考えられる^(※3)。所長のHans Blaschek教授によると、CABERにおいて、異分野を統合するようなプロジェクトリーダーが育って欲しいとのことであった。また、印象的であったのは、このような大型プロジェクトで活躍できる研究者の条件として、研究チーム全体を盛り立てるような気質が重要であるということであった。

＜まとめ＞

全般を通じて、気候変動、食料生産、エネルギー生産への関心の高さを改めて実感した。その中でゲノムから生態系を総合的に捉える研究の重要性が、大きく高まっていることは間違いない。iPlant Collaborative、イリノイ大学のIGB、EBI、CABERは、いずれもそのために発足した研究組織である。これらのうち、

IGB、EBI が傑出して具体的な成果をあげている。

IGB、EBI の成功の要因は、優れたリーダー、目標志向性、実際の研究フィールドの存在という3点に集約される。SoyFACE やバイオエネルギー検定圃場は、研究所からすぐ近くにあり、多くの研究スタッフが同じ圃場でデータを共有しながら、耕地生態系の異なる側面を研究している。また、実験室においては、隣の実験台で異なる分野の大学院生が実験を進めている。分野間の融合が起こりやすい状況を用意しているといえる。一方、方法論や組織の枠組みで集まるグループは、個別事象の研究の域を超えにくいのであろう。遺伝子型×環境の相互作用を理解し、うまく活用していくためには、具体性と目標志向性の高いテーマの立案と研究体制の構築が問われることになる。

(長谷川利拡 上席研究員 独立行政法人農業環境技術研究所 大気環境研究領域)

- ※1 オゾンについてはイリノイ、アイオワ、インディアナで NASA との共同研究も進んでいる。
- ※2 Steve Long 教授によれば、BP は長期支援の見返りとして EBI が新たに開発した技術や新たに取得したライセンスを優先的に利用する権利があるとのことだった。
- ※3 CABER が用意する研究スペースには大学向けと企業向けの2つがあり、後者では秘密保持への配慮もなされている。また CABER は教育にも力を入れており、サイエンスコースとビジネスコースのカリキュラムを用意して学士および修士の学生を受け入れている。ブラジル・サンパウロ大学との提携では研究上の利点だけでなく教育的な効果も見込んでいた。近年の USDA、DOE、NSF が教育に対するファンドを強化する傾向にあることも背景にあるとのことであった。

主な調査協力者：

Bruce 博士、Kimball 博士、Jeff White 博士、Don Ort 博士、Steve Long 博士、Damla Bilgin 博士、Hans Blaschek 博士、Evan DeLucia 博士、Tony Yannarell 氏、Angela Kent 博士、Tim Mies 氏、Tom Voigt 氏、Carl Bernacchi 博士、Andrew Leahey 博士、Ryan Stewart 博士、Jody Endres 氏

参考サイト：

- ・ Energy Biosciences Institute ホームページ：
<http://www.energybiosciencesinstitute.org/index.php>
- ・ Center for Advanced BioEnergy Research ホームページ：
<http://www.bioenergy.illinois.edu/>

- ・ Center for Advanced BioEnergy Research 概要紹介：
<http://bioenergy.illinois.edu/pdf/cb700261w.pdf>
- ・ SoyFACE ホームページ :<http://soyface.illinois.edu/>



写真2 (上左) 画面左端がゲノム生物研究所 (Institute of Genomic Biology, IGB)、右側がエネルギー生物科学研究所 (Energy Biosciences Institute, EBI)。(上右) フィールド科学を行なう研究者の研究スペース。(下左) 分子生物学など wet 系の研究を行なう研究スペース。上右のフィールド科学研究者の研究スペースとは同一フロアで物理的に近い位置関係にある。(下右) イリノイ大学キャンパスから車で 10 分程度の場所にある実験サイトにて。中央に開放系温暖化実験装置が見える。

A2.2. オーストラリア

A2.2.1. ビクトリア州アグロバイオサイエンスセンター

Victorian AgriBioscience Centre (VABC) はビクトリア州第一次産業省バイオサイエンス研究部門^(※1)の研究センターでラートローブ大学キャンパス内の R&D パークにあり、いわゆる日本の大学の産学官連携センターと同等の施設であった。センターは食料の生産量、質、加工技術の向上を目的とした州政府、大学、民間からの共同出資によって成り立っており、ラートローブ大学からは 1,200 万豪ドル (1 オーストラリアドルは約 80 円)、ビクトリア州イノベーション・産

業・地域開発省からは 500 万豪ドル、第一次産業省からは 280 万豪ドルの出資を受けている。

センターは Molecular Genetics and Genome Analysis（分子遺伝学とゲノム解析）、Discovery Technologies（有用遺伝子の探索）、Plant Gene Technology and Functional Genomics（植物遺伝子組換えおよび機能解析）、Computational Biology（バイオインフォマティクス）の 4 分野で構成されていた。分子遺伝学とゲノム解析では、次世代型シーケンサーを用いてゲノム解析を行っており、有用遺伝子の探索ではマイクロアレーおよびマイクロチップを作成して、新規な遺伝子を探索していた。特に、環境耐性、バイオマスや収量の増大、ウイルス病害抵抗性などを主な対象形質としていた。また、植物遺伝子組換えおよび機能解析では、主に寒地型牧草およびコムギの遺伝子組換えを行っており、特にコムギの遺伝子組換えは高い効率で成功していた。一方、バイオインフォマティクス分野は、次世代型シーケンサーで得られた大量の遺伝子、特に環境耐性遺伝子の解析が行われていた。これら 4 分野の研究スペースはセンター内部で隣接しているため、研究の様子や研究者間のコミュニケーションが日常的に行われるような構造となっていた。また同じ建物の上のフロアには VABC で開発された技術を用いてビジネスを行うベンチャー企業 4 社が研究スペースを保有していた（Molecular Plant Breeding CRC、Florigene、Gramina Pty Ltd.、Phytogene Pty Ltd.）。Florigene の元研究員が現在 VABC に所属するなど一部では人材の交流も行われているようであった（※2）。

またラトロブ大学とビクトリア州第一次産業省は、共同出資により、本施設に隣接するように AgriBioScience（アグロバイオ）センターを 2012 年に新たに開設する予定である。アグロバイオセンターは総工費 2 億 8,800 万豪ドルで、うち 3,000 万豪ドルが新しい機器等の設置に充てる予定であった。建物は約 24,000m² と現在の VABC の約 10 倍の規模であり、中には研究実験室、ガラス室およびフェノーム解析を行うハイスループットな形態調査用の施設（フェノーム解析）も完備させ、企業等が利用できる共同研究施設とする予定とのことであった。すなわち、アグロバイオセンターができることで企業側はアグロバイオセンターに実験室を構え、バイオサイエンス研究センターで開発した技術を用いて共同研究により作物の品種改良を行うことが可能となり、さらに最新の技術である植物のフェノーム解析を行うことができるようになると思われる。

（明石 良 教授 宮崎大学 フロンティア科学実験総合センター）

※1 ビクトリア州のバイオサイエンス研究部門は州内に 12 の研究サイトと 2 つの研究プラットフォームを持ち、328 人の研究スタッフと 58 人の学生によって農業に関連した研究開発を行っている。市場のニーズに基づき技

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

術、ツール、プロダクトの開発や新規遺伝子の探索、形質転換体作成を行ない、特許の取得も精力的に行っている。具体的な研究ターゲットは国レベルのポートフォリオに従って決まっており、ビクトリア州ではコムギであれば収量増加を目指した乾燥耐性および耐病性、その他にもオオムギ、ワタ、ライグラス、クローバー、カノーラ油用アブラナ、レンズマメ、ヒヨコマメなどを対象としている。

※2 VABC は Dow Agrosience 社のような大手化学メーカーなど複数の民間企業と共同研究を行っている。

主な調査協力者：

German Spangenberg 博士、John Mason 博士、Ben Cocks 博士

参考サイト：

- ・ラトロープ大学の The Centre for AgriBioscience 紹介ホームページ：
<http://www.latrobe.edu.au/agribio/>
- ・ビクトリア州第一次産業省の The Centre for AgriBioscience 紹介サイト：
<http://www.dpi.vic.gov.au/DPI/nrensr.nsf/LinkView/72DC31372512F529CA2572EA000E248E7B16ED7D9B5AE783CA2572EA0075473E>
- ・ビクトリア州と米国の Dow AgroSciences 社の共同研究に関するニュース（2009 年 5 月）：
<http://www.dowagro.com/newsroom/corporatenews/2009/20090519a.htm>
（共同研究の場所が上記のラトロープ大学内 The Centre for AgriBioscience になるという）
- ・上記ニュースの日本語版：
http://www.dowagro.com/jp/new/20090522_au.htm



写真3 (上左) ラトロープ大学 R&D パークにあるビクトリア州アグロバイオサイエンスセンター (Victorian AgriBioscience Centre, VABC) の概観。(上右) VABC でのインタビュー風景。(下左) 遺伝子組換えに用いるコムギ末熟胚を採取するためのコムギ栽培。(下右) 調査終了時 (左から寺島一郎教授、Spangenberg 教授、中村、明石良教授)。

A2.2.2. 植物アクセレーターほか

<施設の概要>

アデレード大学内に新設された The Plant Accelerator (植物アクセレーター) は、連邦科学産業研究機構 (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO) の The High Resolution Plant Phenomics Centre と姉妹施設である^(※1)。植物アクセレーターは、国家共同研究インフラ戦略 (National Collaborative Research Infrastructure Strategy, NCRIS)^(※2) から 1,050 万豪ドル、南オーストラリア州政府から 1,000 万豪ドル、アデレード大学から 590 万豪ドル、などの出資により総額 2,681 万豪ドルをかけて建設された植物栽培施設である。建物は斜面を利用して建てられており、部分的 2 階建て、全体の床面積は 4,485m² である。1 階にはアドミニストレーション室、研究室、バイオインフォーマティクスのためのコンピューター室、ポット植え込み室、種子採取室、植物体分析室、種々の測定機器室、機械室、それに総面積 250m² の人工気象器室などがある。2 階は全部が温室にあてられている。温室は南北に二分され、組換え体を取り扱うことのできる PC2 (日本の P2 と同じ)

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

区画と、組換え体を取り扱わない区画とがある。各区画の外側は、さまざまな栽培温度域に対応できる 24、48、72m² の合計 34 室の空調温室で囲まれている。また、このうち何室かは、完全暗黒になるようにカーテンを備えており、日長を自由にコントロールすることができる（通称 VIP 室）。温室は紫外線をよく透過させるアクリル製である。また、各区画の中央部の大型温室（Smarthouse）が 2 室ずつ計 4 室ある。

この Smarthouse には、種々の非破壊測定機器が置かれており、ポットを載せたカート（部屋あたり 600 台）が、施設全体で総延長 1.2 km におよぶベルトコンベヤによって順次測器を巡る。ポットの重量測定、自動給水、自動施肥も行われる。

主な測器を表 22 に示す。非破壊的測定のための光学機器が主となっている。まず、パネルで囲まれた空間（Imaging Hall）にポットを入れて、数方向から写真を撮影する（フランスの Lemna Tech 社製。各種のサイズのイメージング装置が各研究所にて使われていた）。これにより、まず、植物の外形がどのような成長を示すのかが、連続的非破壊的に観察できる。これを適切なプログラムによって処理することにより、葉面積成長や固体重の成長、あるいは病徴などを高い精度で追跡することが可能である。また近赤外部の測定により組織や土壌中の水分含量が、遠赤外部の測定により葉群の温度が測定可能である。さらに種々の波長の蛍光測定、反射率測定により、光合成活性の他、種々の物質含量（たとえば葉窒素含量、フラボノイド含量、アントシアン含量など）も測定できる（表 22）。今後も、この施設にふさわしい測定技術は順次導入の予定である。植物アクセラレーターのスタッフには、プログラムの開発のためのモデラー / バイオインフォーマティシャンが含まれて居る。彼らはデータ管理などを行うとともに、利用者と議論しながら、たとえば画像から植物サイズや病気の程度を予測するためのプログラムなどの、種々のプログラムを構築する予定である。

作物品種の挙動を調べる際には、作物をある環境で栽培して収量を測定するのが普通である。したがって、各品種の成長途中の情報は乏しい。このままでは、品種の遺伝子型と表現型との正確な対応は困難である。この施設の主眼は、様々な光学 Imaging 手法を用いて作物の成長を連続的に記録することを通して、表現型の特徴を、作物の一生を通じて捉えようという意欲的なものである。種々のステージに現れる各遺伝子の表現型を正しく評価できれば、それらの適切な組み合わせによりさらに優れた品種を創成する途も開かれる。

<プロジェクトの内容>

これまでに多くの作物品種が選抜されてきた。また、モデル植物や主要な作物のゲノム情報の整備にともない、多くの「有用」とされる遺伝子が同定されてきた。しかしながら、どのようにそれが表現型に現れ、収量に結びつくのかを解析

するのは容易ではない。これを植物アクセレレーターの所長である Mark Tester 教授^(※3)は、Phenotypic bottleneck とよんでいる。これは現在の植物科学の現状をきわめて的確に表現している言葉であろう。この大きなギャップを、最新の非破壊測定と、ロボティクス、バイオインフォーマティクスを駆使して、埋めようというのが、この植物アクセレレーターである。コムギなどの穀物、ブドウ、その他の主要作物の多くの品種を解析する期間を短縮し、すぐれた品種の選定を「加速」する。遺伝子改変植物についても同様の解析を行う。

植物アクセレレーターは、利用者が一定の使用料を支払い利用するものである。遺伝子改変植物の栽培も可能である。また、一般には厳しい検疫が必要な外国からの品種の直接導入などが認められており、植物アクセレレーター内で検疫が可能となっている。オーストラリアの大学・研究所の研究者、国内企業、外国の大学・研究所、外国企業などのカテゴリーで、料金体系が設定されるはずである^(※4)。

植物アクセレレーター自体にも、多くの研究スタッフが在籍し、独自の研究も展開する。新たな技術の導入にもどん欲であり、現在、MRI などの導入が計画されている。すでに述べたように、三次元画像から植物の成長パラメータを読み取るためのソフトウェアの開発等を行うための数理生物学者も常駐し、その他にも大学内のコンピュータサイエンスの専門家と連携をとっている。スタッフは利用者と議論して、さらに使いよい施設にすることに意欲を見せている。

<今後の展望>

2010 年 2 月末の調査の段階では、本施設は稼動しておらず、Smarthouse のベルトコンベアーシステムが試運転中であった。今後は、手はじめに、コムギやブドウの表現型の徹底的な解析が行われる。また、実際の野外でも同じ品種が解析されるので、温室内のデータと野外のデータとの擦り合わせも十分に行われるはずである。

植物科学では genomics の情報が先行している。functional genomics と称して、表現型の解析も行われ始めたが、実際には、transcriptome、proteome、metabolome などの網羅的解析が主となっている段階で、植物の成長や機能に関する表現型の解析との間には大きなギャップがある。このギャップが大きいことへの危機感は、農業に真剣に取り組む国で特に強い。このギャップを埋めるべく作られた Australian Plant Phenomics Facility には、世界が注目している（たとえば Finkel, E. (2009) Science 325: 380-381.）。またいくつかの国では、同様な施設が建設されつつある。

表22 自動測定システムの内容

	測定項目
カラーイメージング	バイオマス、構造、フェノロジー、病徴
近赤外イメージング	組織水分含量、土壌水分含量
遠赤外イメージング	植物体温度
蛍光、反射光イメージング	光合成機能、フラボノイド含量、窒素含量
自動重量計測、自動給水	水利用効率、乾燥条件の調節

(寺島一郎 教授 東京大学大学院 理学系研究科)

- ※1 CSIRO は世界最大規模の研究施設を全豪に展開し、かつ多様な研究開発を行う政府機関であり、研究内容は農業関連産業のほかに情報技術、工業技術、保健、持続可能エネルギー、気候変動、水資源、鉱業と鉱物、宇宙、環境、天然資源などを網羅する。The Plant Accelerator と The High Resolution Plant Phenomics Centre はその CSIRO の Plant Industry 部門にある The Australian Plant Phenomics Facility (APPF) が所管している。APPF は国家共同研究インフラ戦略 (NCRIS) の一環として設置されているため、最先端の研究環境を主に豪州国内の研究者に対して提供することを目的としている。
- ※2 NCRIS はオーストラリアの研究インフラ投資の戦略性を高めるため、2004 年に政府が設立したプログラムである。7 年間で 5 億 4,200 万豪ドルを予算配分する。
- ※3 Tester 教授はアデレード大学内にメインオフィスを構えるベンチャー企業 The Australian Centre for Plant Functional Genomics (ACPFG) の Federation Fellow も勤めている。ACPFG ではバイオテクノロジーを用いて wheat または barley の環境ストレス (乾燥、塩ストレス、気温、ミネラル欠乏、毒性など) 耐性を改善するための技術開発や研究開発が日本人研究者を含む国内外の研究スタッフによって行われている。
- ※4 ビジネスマネジャーの Meinecke 氏によれば、温室の使用料の設定は国内利用者と国外利用者の間で差別化し、またサイズや設定する環境条件に応じて変えるとのことだった。基本姿勢は利用者ニーズに即した運営とのことで、利用者は全体の 3 分の 2 が国内の研究機関および企業、残りの 3 分の 1 が海外の研究機関および企業と見込んでいた。また現在の NCRIS からの資金援助が 2011 年まで (2007-11) であるため、来年度までには自立的な運営が可能な状態にすることを目標としていた。なお現在のオペレーションコストは約 110 万豪ドル/年とのこと。調査を実施した 2010 年 2 月時点で温室の予約は全て埋まっており、同施設は順調な滑り出しとなっていた。

主な調査協力者：

Mark Tester 博士、Helli Meinecke 氏、Robin Hosking 氏、James Eddes 氏

参考サイト：

- ・ Australian Plant Phenomics Society のホームページ：
<http://www.plantphenomics.org.au/>
- ・ Australian Society for Plant Biologists の News letter：
<http://www.asps.org.au/phytogen/>
(2009 年 11 月号に Tester 教授による紹介記事がある)
- ・ International Plant Phenomics Network：
<http://www.plantphenomics.com/partners/>
- ・ The Plant Accelerator のホームページ：
<http://www.plantaccelerator.org.au/>
- ・ The Plant Accelerator, The Australian Plant Phenomics Facility のホームページ：
<http://www.plantaccelerator.org.au/>
- ・ The Australian Plant Phenomics Facility, CSIRO Plant Industry のホームページ：
<http://www.plantphenomics.org/>
- ・ CSIRO Fact Sheet：
[http://www.innovation.gov.au/Section/AboutDIISR/FactSheets/Pages/CommonwealthScientificandIndustrialResearchOrganisation \(CSIRO\) FactSheet.aspx](http://www.innovation.gov.au/Section/AboutDIISR/FactSheets/Pages/CommonwealthScientificandIndustrialResearchOrganisation%20(CSIRO)%20FactSheet.aspx)
- ・ National Collaborative Research Infrastructure Strategy のホームページ：
<http://crds.jst.go.jp/watcher/data/540-004.html>

[1]
背景と目的

[2]
調査方法

[3]
調査結果概要

[4]
調査結果詳細



写真4 （上左） The Plant Accelerator のエントランス付近。中央は Mark Tester 教授（The Plant Accelerator、アデレード大学）、（上右） Smarthouse の様子。ポットを載せたカート（部屋あたり 600 台）が、施設全体で総延長 1.2 km におよぶベルトコンベヤによって順次測器を巡る。詳細は本文参照。（下左）試験的にカートに載せられたポット。（下右）ポットに植えられた植物体を非破壊測定する Imaging Hall（Remna Tec 社製）。手前には自動給水のためのホースがある。

A2.2.3. 高解像度植物フェノミクスセンターほか

<施設の概要>

「Feeding the Ten Billion」で有名な Lloyd Evans らによって、1961 年に建設された CSIRO のファイトトロン^(※1)は、CSIRO が世界に誇ってきた施設である。分子生物学の興隆にともない、一時はこの施設を無用の長物とする向きもあった。The High Resolution Plant Phenomics Centre の本拠が、このファイトトロンを大規模に改装した場所に置かれているのは、表現型の科学の復権と深化を象徴している。The High Resolution Plant Phenomics Centre には、CSIRO に隣接する Australian National University の、光合成のメッカ、Research School of Biology も含まれる。

The High Resolution Plant Phenomics Centre の構築のための財源は、NCRIS（National Collaborative Research Infrastructure Strategy）からの 524 万豪ドル、CSIRO からの 580 万豪ドル^(※2)、Australian National University（ANU）からの 350 万豪ドル、州政府である Australian Capital Territory から

の110万豪ドルなどで、総額1,614万豪ドルにのぼる。本体施設は、2009年7月にオープンした。現在、ANUの施設の建設も急ピッチで進んでいる。CSIROの天然光ファイトトロン（屋上）は稼働を続けており、その1階に人工気象器が設置されている。また、その周囲には測定機器室が並んでおり、用途に応じた柔軟な測定が可能である。全体として、Adelaideの施設よりも、きめの細かい高精度の測定を目指している。ANUには25基の人工気象器が設置される予定である。CSIRO、ANUともに、種々の測定機器の導入を継続的に行う予定である。また、この施設は野外調査地における調査の本拠地でもある。今後、リモートセンシング技術はさらに精緻を極め、それによって得られる情報は、phenotypingにきわめて有用になると思われる。測定機器を搭載したトラクター、高所作業車、ヘリコプターによる非破壊的測定が行われている。また、携帯電話によって操作できる太陽光発電駆動のデータロガーによる情報収集システム（Pheno-net）の開発、テストを行っている。

このCanberraの施設は先述のAdelaideの施設と対をなすもので、high throughputを目指すというよりも、新技術の開発（high technology）、深化、基礎研究の展開などの役割を担っている（deep phenotyping）。基礎研究としては、世界的に広く用いられているアブラナ科のモデル植物シロイヌナズナ（*Arabidopsis thaliana*）の他に、コムギ等と近縁の単子葉植物モデルとして最近にわかに脚光を浴びている *Brachypodium distachyon*（染色体基本数5本、全ゲノムサイズ300 Mbp）、*Eucalyptus* 各種などを重点的に研究する。また、ecogenomicsの観点から、アブラナ科の *Hirschfeldia incana*（*Mediterranean mustard*）などを用いた研究にも着手する。また、野外における、非破壊測定技術のハード面、ソフト面の深化も目指している。

＜プロジェクトの内容＞

これまでの研究により、多くの遺伝子が作物生産に「有用」とされてきた。しかし、これらの遺伝子産物がどのような表現型につながり、収量に結びつくのかを解析するのは容易ではない。The High Resolution Plant Phenomics Centreでは、Phenotypingのさらなる効率化の手法を生み出すとともに、deep phenotypingをめざす。メンバーは、光合成炭素代謝の専門家であるCSIROのDr. Robert Furbankが所長、ANUの光合成の専門家である、Murray Badger教授やSusanne von Caemmerer教授などが研究に参画している。したがって、光合成に関してはきわめて強力なチームである。また、基礎研究を行っている世界の研究者も参画している。近距離リモートセンシングのHamlyn Jones教授、水分生理学のJohn Boyer教授、光合成機能の光学的測定を専門とするDavid Kramer教授などは、その一例である。また、フィリピンのIRRI（International rice research Institute）とのイネのC4化に関する研究など、国内外の共同研

究も多数計画されている。国際企業も興味を示し、モンサント、シンジェンタ、バイエルなどが使用を検討している。日本でもトヨタや JT から問い合わせがあるという。

<今後の展望>

2010 年 2 月末の調査の段階では、CSIRO の施設が順調に稼動していた。ANU の施設は建設中であった。オーストラリアは作物学に伝統的に強く、植物の個体レベルの現象に関わる研究では、施設建設が先行したこともありリードを続けるであろう。

(寺島一郎 教授 東京大学大学院 理学系研究科)

- ※1 ファイトトロンとは温度や湿度などの環境条件を独立して設定できる自然光型の植物育成装置である。いわゆる温室のような大型タイプや連棟型タイプがある。
- ※2 CSIRO は国からの予算の他、穀物研究開発機関である GRDC (Grain Research and Development Corporation) からも研究支援を受けている。GRDC の CSIRO に対する研究支援は毎年 30 課題程度の採択を目指し、科学者や関連機関・団体（農家含む）代表者からなる評価委員会によって選考が行われる。配分対象は大半が大学や民間企業となる。

調査協力者：

Murray Badger 博士、Robert Furbank 博士、Richard Richards 博士

参考サイト：

- ・ The High Resolution Plant Phenomics Centre, The Australian Plant Phenomics Facility ホームページ：
<http://www.plantphenomics.org/HRPPC>
- ・ Grains Research Development Corporation ホームページ：
<http://www.grdc.com.au/director/about/>



写真5 （上左）The High Resolution Plant Phenomics Centre 内の様子。手前には組み立て中だがアデレードの The Plant Accelerator と同様のベルトコンベヤが見える。部屋の奥には 10 台弱の人工気象室が並んでいる。（上右）植物体の植えられた小区画を自動で順次計測または解析する機器。（下左）アデレードの The Plant Accelerator と同様の計測設備（Renma Tec 社製）。計測デモを行なうセンター研究員（ポストドクター）。（下右）計測設備の内部。ベルトコンベヤに載った円筒形のポットが中央まで移動し、複数の角度から葉や根の形態が撮影され画像解析に用いられる。

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細



写真 6 （上左）太陽光発電駆動で携帯電話によって操作可能なデータロガー試作品。フィールドに複数設置することで便利な情報収集システムを構築できる。（上右）測定機器を搭載したヘリコプター。（下左・右）近距離リモートセンシングに関する実験風景。

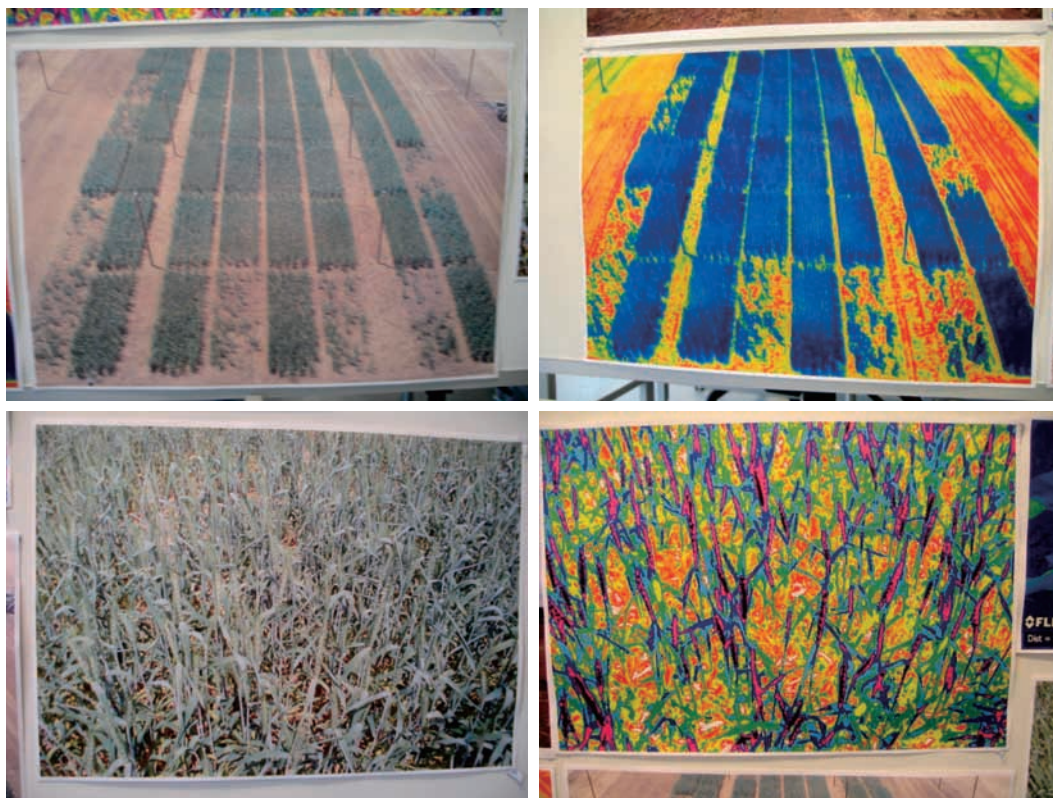


写真7 （上左・右）近距離リモートセンシング研究例。集団（群落）レベルの解析。（下左・右）近距離リモートセンシング研究例。個体～集団（群落）レベルの解析。

[1] 背景と目的

[2] 調査方法

[3] 調査結果概要

[4] 調査結果詳細

■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)
川口 哲	フェロー	(ライフサイエンスユニット)
岡山 純子	フェロー	(海外動向ユニット)
中村 亮二	フェロー	(臨床医学ユニット)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2010-GR-02

特定課題ベンチマーキング報告書

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

Benchmarking Report on Technologies in AgriBioscience

平成 22 年 10 月 October 2010

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.

