

ATTAATC A AAGA C CTAAC TCTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA C CTAAC TCTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC
TGA C CTAAC TCTCAGACC

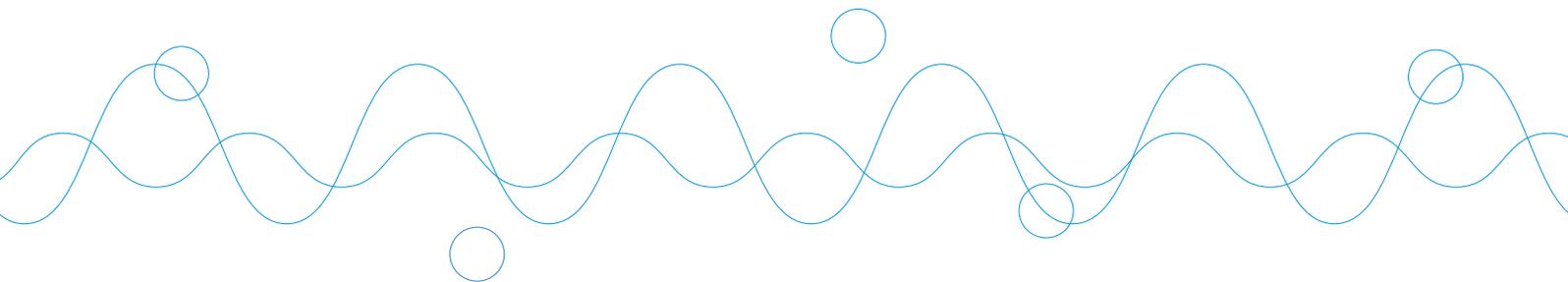
戦略イニシアティブ

環境適応型作物のゲノム設計技術

STRATEGIC INITIATIVE

Technology for Genomic Design of Environmentally Adapted Crops

0111 0101 00001
001001 0001 0000110
0101 11
0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
00110 11111100 00010101 011



Executive Summary

本イニシアティブは、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である。

資源多消費、環境高負荷型の社会経済活動が一因となり、地球上では将来的に全球レベルでの気温の上昇や、地域レベルでの降雨、乾燥の変則化などが現在よりも進行すると予想されている。このため、世界の多くの地域では、環境変化による作物生産への影響が懸念され、対応策の一つとして環境変化に適応した作物の作出技術に対する社会ニーズが高まっている。

このような社会的要請に対し、世界中の研究者や技術者が、植物科学における最新知見の統合や工学的技術の活用などにより、環境適応型作物の作出を目指した研究開発を実施している。これらは主に、欧米豪の公的研究機関や企業等で実施されており、植物の遺伝情報とフィールドの環境情報を統合的に解析し、その知見に基づき作物の機能を分子レベルから改変することを目的としたものである。

将来的に予想される環境変化はわが国も例外ではない。今後も限られた農地で作物を生産したり、世界的な食料問題に科学技術で貢献するためには、環境に適応し、安定的に生育する作物の作出へ向けた研究開発をこれまで以上に推進する必要がある。

以上を踏まえ、本イニシアティブでは、日本の基礎科学の強みを活かした作物生産技術として「環境適応型作物のゲノム設計技術」を提案する。本技術は、フィールドにおける植物の環境応答機構の包括的な理解に基づき作物を分子レベルから設計する技術である。これは現在主流となっている「遺伝子組換え技術」を高度に発展させた技術であり、質の高い基礎研究成果を継続的に生み出してきたわが国の植物科学と伝統的に競争力を持つ工学を融合させることによってはじめて可能になると考えられる。本提案では、世界の農耕地において作物生長の阻害要因となっている環境ストレス¹と資源利用効率²を主な対象として、以下の3つの課題を推進することにより新しい技術の確立を目指す。

1. 植物の環境応答機構に関する包括的定量解析
2. 作物の環境応答機構に関するモデルの構築
3. 遺伝子群の合成、導入による作物の形質³評価

課題1では、主にフィールドで生育する植物を対象にフィールド環境下での遺伝子と表現型との関連性を定量的に解析することを通じて環境応答機構の包括的な解明を目指す。課題2では、これまでの植物科学における知見の蓄積や課題1で得られる情報等を活用しながら、遺伝子と表現型との関連性をモデル化することを目指す。課題3では、課題2で構築したモデルから予測される環境応答に関する遺伝情報を用いて、遺伝子群の合成や作物への導入を実施し、さらに実験圃場での生育確認を行う。

1 環境ストレス：環境要因（温度、乾燥、土壌 pH など）が植物の生長に及ぼす負の影響

2 資源利用効率：水や窒素、炭素などの植物の生長に必要な因子の利用効率

3 形質：植物や作物の形態や機能

以上に示した課題の推進にあたっては、3 課題のそれぞれで得られる成果を互いに還元するようなフィードバック・ループの形成が重要である（図 1）。これは、フィールド環境は時間的にも空間的にも変動するため、そこから得られる種々の知見の確からしさや再現性に関しては一般的に不確実性が高いと言われるからである。



図 1. 「環境適応型作物のゲノム設計技術」で提案する 3 つの研究開発

本イニシアティブの推進によって植物本来の機能を最大限に活用したゲノム設計技術が確立されると、究極的には地域ごとの環境特性に応じた作物の作出が可能となる。従って、石油の多消費や化学肥料の大量投入を低減させ、かつ安定的な収量を確保する資源少消費型の持続的農業の実現という社会的効果も期待される。

なお本提案の技術が実際に社会に普及するためには社会受容の促進が重要である。このため研究の初期段階から透明性の確保、情報の迅速な公開などに積極的に関わり、科学的エビデンスに基づいた合理的な判断が社会においてなされるよう働きかけていくことが重要である。

Executive Summary

Climate change is one of the most important issues in our present and future lives. It is concerned that the global and regional climate change will negatively affect plant growth, including crop production, not only in Japan but also in other major agrarian regions of the world. Furthermore, conventional agricultural activities cause high levels of energy consumption. We, thus, must shift our farming methods from the conventional ones to alternatives.

In response to the concern mentioned above, plant scientists and engineers are required to conduct R & D to create environmentally adapted crops by applying the latest findings. Specifically, a cutting-edge research target is the integration of various levels of information, from genotype to phenotype, within a plant in order to understand its response to the environment in the field. Although such R & D is mainly conducted by enterprises and research institutions in the US, Europe and Australia, Japan also has the potential to tackle the issue by using our knowledge of basic plant science and engineering technology.

Therefore, CRDS proposed the R & D Initiative “Technology for Genomic Design of Environmentally Adapted Crops”, which is intended to strengthen the implicit function of plants. The genomic design technology is an advanced technology that correlates the molecular information of a plant genome with phenotypic output of the plant responding to the environment of the field. In this initiative, the following three complementary research issues were proposed.

1. Integrated quantitative analysis of the mechanism of the plant’s response to the field environment
2. Modeling of the mechanism of the plant’s response in the field environment
3. Design, synthesis and transduction of gene clusters and its evaluation

Here, we mainly focused on two characteristics of the plants : stress tolerance and resource use efficiency. These targets are more challenging compared with those that were focused on in the traditional genetic modification. Furthermore, we emphasize the importance of forming a feedback loop of the scientific knowledge, information and technology among R & D groups handling the three research issues mentioned above.

The consideration of social acceptance is also an important issue in developing the technology and promoting it in society. Therefore, solicitous assessment of the technology concerning its influence on the natural environment and human society should be performed, and the transparency of the research should also be secured.

As a consequence, a societal effect on establishing “Sustainable Agriculture” with low resource and energy consumption is expected to be realized on the basis of the technology we propose.

研究開発戦略センターでは、国として重点的に推進すべき研究領域や課題を選び、以下3種類いずれかの戦略プロポーザルとして発行している。

戦略イニシアティブ

国として大々的に推進すべき研究で、社会ビジョンの実現に貢献し、科学技術の促進に寄与する

戦略プログラム

研究分野を設定し、各チームが協調、競争的に研究することによって、その分野を発展させる

戦略プロジェクト

共通目的を設定し、各チームがこれに向かって研究することによって、その分野を発展させると同時に共通の目的を達成する

目 次

Executive Summary	1
第1章 提案の内容.....	6
コラム 1. 「遺伝子組換え技術」と「ゲノム設計技術」.....	8
第2章 研究投資する意義.....	10
第3章 具体的な研究開発課題.....	11
第4章 研究開発の推進方法.....	14
コラム 2. アメリカ・オーストラリアにおける植物科学研究の先端的な取組み事例	15
第5章 科学技術上の効果.....	19
第6章 社会・経済的効果.....	20
第7章 時間軸に関する考察.....	22
第8章 検討の経緯.....	23
参考資料	
1. 植物分野における各国施策・ファンディング動向	27
2. 植物科学分野の科学技術・研究開発の国際比較	29
3. 農薬・種苗関連企業の研究開発動向	30

第1章 提案の内容

近年、全球レベルでの気温の上昇や、地域レベルでの降雨、乾燥の変則化など、地球上の様々なレベルで環境の変化が予測されている。その結果、各地で作物収量への影響が懸念され、対応策の一つとして、環境変化に適応した作物の作出技術に対する社会ニーズが高まっている。

このような背景から、各国の大学、大手化学メーカーやベンチャー企業等が、各種環境ストレス耐性作物や資源利用効率の高い作物の作出を目指した研究開発を精力的に進めている。しかし環境ストレス耐性や資源利用効率と関連する作物の環境応答機構は、多くの遺伝子が関与する非常に複雑な機構であることから、このような機能を付与した作物の作出にはこれまでほとんど成功していない。そこで本イニシアティブでは、複雑な環境応答機構を遺伝情報と環境情報の関連性から明らかにし、その科学的知見に基づいた作物モデルの構築と、それらを基盤とした「環境適応型作物のゲノム設計技術」という新しい技術の確立を目的とした研究開発を提案する。

作物の生産性を向上させる技術としては、これまで茎や子実の生長⁴を促進させたり、害虫などに対する抵抗性を付与するために、主として遺伝子改変技術⁵が活用されてきた。遺伝子組換えに代表される本技術は作物の品種改良における中核的な技術の1つとしてこれまで新品種の開発に貢献してきた。しかし従来の遺伝子組換え技術はゲノムの特定の場所に遺伝子を導入することができなかつたり、形質に関係する多数の遺伝子を同時に制御できないため、複数の遺伝子の関与が予測されている環境ストレス耐性の付与は技術的に困難となっている。このような課題を克服するためには、植物の複雑な環境応答機構の分子レベルでの解明と、科学的知見に基づいた高度な遺伝子制御技術の開発が必要である。そこで、本提案では以下に示す3課題の総合的な推進により上記課題の解決に資する新技術の創出を目指す。

1. 植物の環境応答機構に関する包括的定量解析
2. 作物の環境応答機構に関するモデルの構築
3. 遺伝子群の合成、導入による作物の形質評価

まず課題1では、モデル植物⁶や実用作物⁷を対象とし、フィールド環境下で生じる植物の環境応答機構を包括的に理解することを目的とする。具体的な環境応答機構としては、世界各地の穀物生産地域において作物生長の阻害要因となっている環境ストレス（高温、高塩や過湿）と資源利用効率（炭素、窒素、水などの利用機構）の解明に集中的に取り組むことが重要である。

次に課題2では、作物のフィールドにおける形質発現機構のモデル化を目指す。ここ

4 生長：成長と同義。本報告書では植物分野で多用される生長で統一している。

5 遺伝子改変技術：遺伝子操作によって植物の形態や機能を人為的に改変する技術

6 モデル植物：研究上の利点を多くもつ植物種で複数ある。世界中でモデル植物を対象とする研究が進められたため、遺伝情報も非常に豊富である。シロイヌナズナやミヤコグサなどがある。

7 実用作物：食用、飼料用、工業的利用などを目的とした植物で、イネ、ダイズ、コムギなどがある。

では分子生物学的な研究を通じてこれまでに蓄積されてきた多数の遺伝情報や、形質に関する情報、上記課題1を通じて得られる新たな科学的知見や情報を活用して形質発現に関する数理モデルを計算機上で構築し、これに基づき任意のフィールド環境下で発現する遺伝子群や表現型を予測できる技術の開発を行う。

さらに課題3では、課題2で構築したモデルから予測される環境応答機構に関する遺伝情報を基に、実際にゲノムを設計、合成し、作物個体へ導入する。また本課題では、フィールド環境下での栽培によって作物個体の生育確認を行うとともに、遺伝子や表現型など各種の形質の評価を行う。

本イニシアティブでは、以上に示した研究開発の推進により、フィールド環境下の作物に関するゲノム設計技術の確立を目指す。フィールド環境は制御された室内環境と比べて時間的にも空間的にも多様な変動を示す。このため、そこから得られる種々の知見に関しては一般的に不確実性が高いとされている。よってこの問題を解決するためには、上記3課題のそれぞれから得られる科学的知見や情報、技術を互いに還元するようなフィードバック・ループの形成が重要である(図2)。また課題2からは成果物としてゲノム設計に資する基盤技術(モデル)が得られるが、このモデルの精度や汎用性の向上のためにも、上記のフィードバック・ループの形成が重要である。

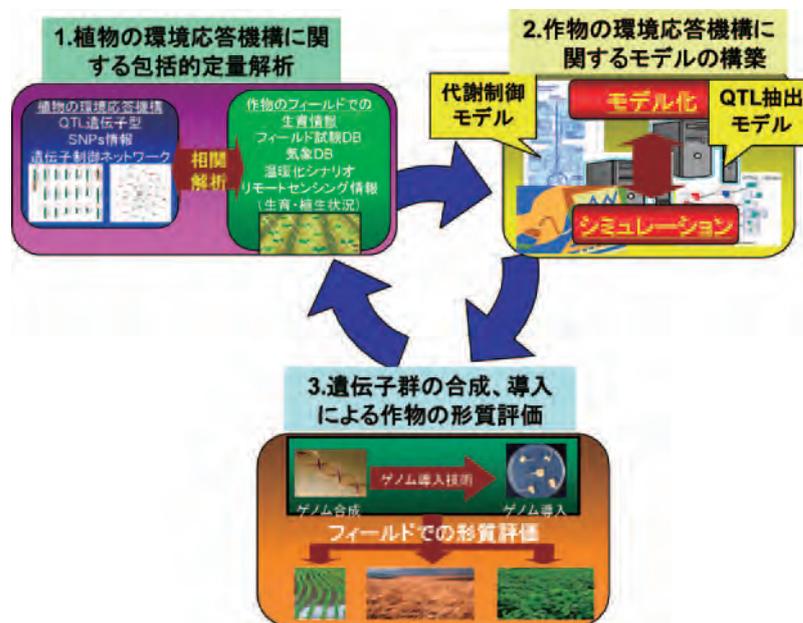


図2. フィードバック・ループの形成による研究開発の推進

なお本研究開発の推進にあたっては、植物の機能に関する多様な視点からの定量的解析が必要であるため、分子生理学、分子育種学、集団遺伝学、栽培生理学、生態生理学等、分子レベルからフィールドレベルに至るまでの異分野融合と、ゲノム解析や計算処理、モデル化を行う計算科学者や、フィールドで用いる計測技術や機器等の開発を行う技術系研究者の参画を促進する必要がある。さらに本イニシアティブで提案している研究開発はフィールドを対象としたものであるため、研究者からの提案内容によっては関連する国や地域の政府や自治体、研究機関等との連携も必要である。

コラム 1. 「遺伝子組換え技術」と「ゲノム設計技術」

遺伝子改変技術の代表例である「遺伝子組換え技術」は遺伝子の人為的な操作によって植物に新たな機能を付与する技術である。本技術の登場によって、植物への異種遺伝子の導入や、内在性の遺伝子発現の促進が可能となり、植物機能の抜本的な改変が行えるようになった。これまでに、除草剤耐性、病虫害抵抗性等、生産の効率化を重視した作物や、有害物質の減少、医薬品成分の可食部への導入等、消費者利益を重視した作物などが開発されている。2008年現在、全世界の大豆作付け面積の70%、ワタで46%、トウモロコシで24%、ナタネで20%が本技術によって生産されている（図3）⁸。

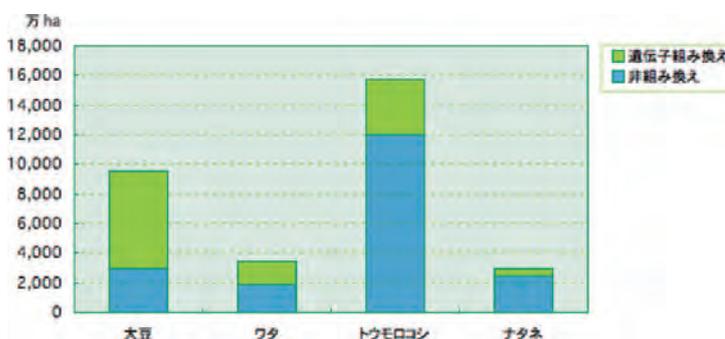


図3. 世界の総栽培面積に占める遺伝子組み換え作物の割合 (2008年)

上述のとおり、「遺伝子組換え技術」は作物への新機能付与などにおいて重要な技術であるが、食品としての安全性やフィールドで栽培した際の環境への影響等、様々な問題が懸念されている。このため、遺伝子組換え作物の栽培そのものを認めない国も多数存在する（図4）。したがって、研究開発の推進にあたっては、実施内容の透明性の確保、得られた知見等の迅速な公開、また法令の遵守に万全を期し、栽培地域においては住民の理解も考慮に入れた慎重な取り組みが必要である⁹。

8 <http://www.monsanto.co.jp/data/plantarea/index.shtml> 国際アグリバイオ事業団 (ISAAA)、日本モンサント社 HP (引用日 2010年3月4日)

9 遺伝子組換え作物の社会受容向上に関する取り組み：2009年、BT (Bio Technology) 戦略推進会議 (内閣総理大臣により開催) において「ドリーム BT ジャパン」が策定され、この中で GMO など新しいバイオテクノロジーについて、その有用性や安全性、環境への影響等について社会とのコミュニケーションをこれまで以上に図るための具体的な取り組みが述べられている。



図4. 遺伝子組換え作物の栽培を行なっている国々¹⁰

世界での栽培面積は 6,250 万ヘクタール（2008 年）。主な生産国は米国、カナダ、中国、ブラジルである。わが国では食用としての組換え作物の栽培は行っていないが、研究開発は複数の施設で実施されている。

本イニシアティブで提案している「ゲノム設計技術」は、「遺伝子組換え技術」を高度に発展させた技術といえる。その理由は、「遺伝子組換え技術」が 1～数個の遺伝子を植物に導入する技術であるのに対し、「ゲノム設計技術」は、多数の遺伝子の制御を、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技術であるためである（図5）。

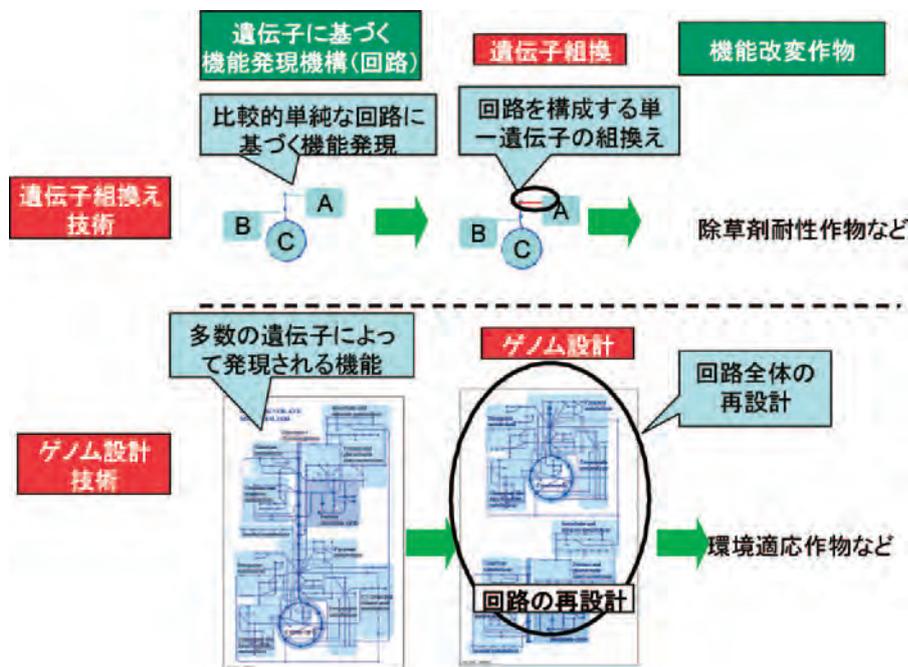


図5. 「遺伝子組換え技術」と「ゲノム設計技術」の違い

10 http://www.cbijapan.com/l_overseas/index.html バイテック情報普及協会 HP（引用日 2010 年 3 月 4 日）

第2章 研究投資する意義

本イニシアティブを推進する最大の意義は、食料生産に係る地球規模課題への寄与である。

植物科学の成果を基盤とした食料生産技術は、これまでも様々な地球規模課題に貢献してきた。例えば「緑の革命」では、経済学等の社会学者や理学者が、増え続ける人口とそれをまかなうための食料の不足への懸念から様々な警鐘を鳴らしたことに端を発し、農業従事者や農学研究者が育種や栽培技術の改良等を通じて作物の収率向上を目指すこととなった。このような運動は、貧困と飢餓の解消に一定の効果があったと考えられている。以上のような取り組みは、図6 (a) で示すように「科学」(人口増加・食料不足に対する理学者、経済・社会学者等からの警鐘) から「工学」(作物の収率向上を実現する育種・栽培管理技術の開発)、「行動」(「緑の革命」等の運動を通じた食料増産技術の世界への普及)、「社会・自然」(食料増産の実現)へと一連の連鎖が生じたためにもたらされたと考えられる。

しかしながら、そこでは生産における様々な段階において大量のエネルギーや化学肥料の投入を必要としたため、近年になり化石燃料の枯渇や土壌微生物群の多様性損失など環境に対する高負荷という新たな問題を招くこととなった(図6 (a))。現在、これらの問題へ対応するためには、資源多消費型農業¹¹から資源少消費型で持続可能な農業への移行が必要と考えられている(図6 (b))。

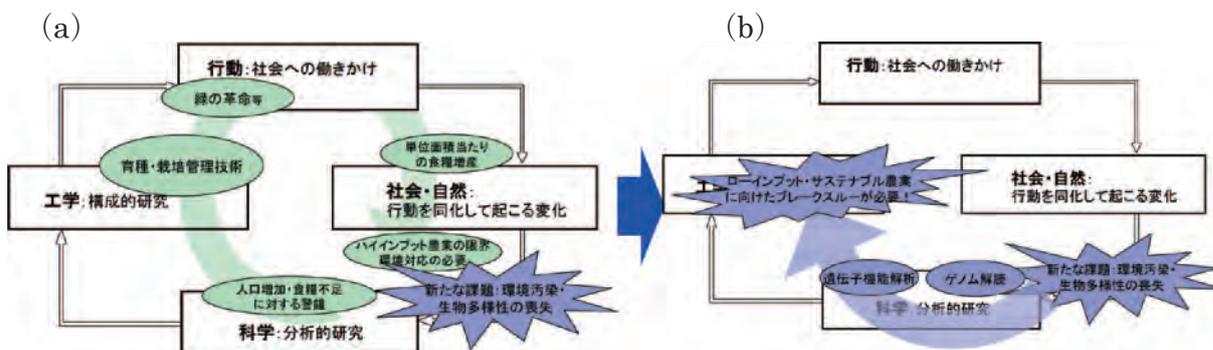


図6. (a)食料生産に係る現在の問題 と (b)今回の提案

そこで本イニシアティブでは、個々の栽培環境に適応して安定的に生育する作物の作出を目指して、植物本来の機能を最大限活用したゲノム設計技術の創出を提案している。本技術が確立されることによって、強光や塩などのストレスに対する耐性の付与が可能となったり、水や窒素など資源の利用効率を向上させることが可能になると、資源エネルギーの投入量や水の使用量を抑えた作物栽培、将来的には資源少消費型で持続可能な農業の実現への寄与が期待される(図6 (b))。

11 資源多消費型農業：エネルギーの大量投入により大量の作物収量を実現する農業

第3章 具体的な研究開発課題

1. 植物の環境応答機構に関する包括的定量解析

特定のフィールド環境下で生育する、植物個体の遺伝子（群）の挙動（時間的・空間的な発現パターンの変化等）と表現型との関係を定量的に解析することにより、環境要因・遺伝子（群）・表現型の相互依存性を解明する（図7）。また、その基盤的な知見として必要な、遺伝子（群）のフィールド環境における挙動の解析、表現型の計測・評価、環境要因の測定に関する研究や技術・機器開発も対象とする。

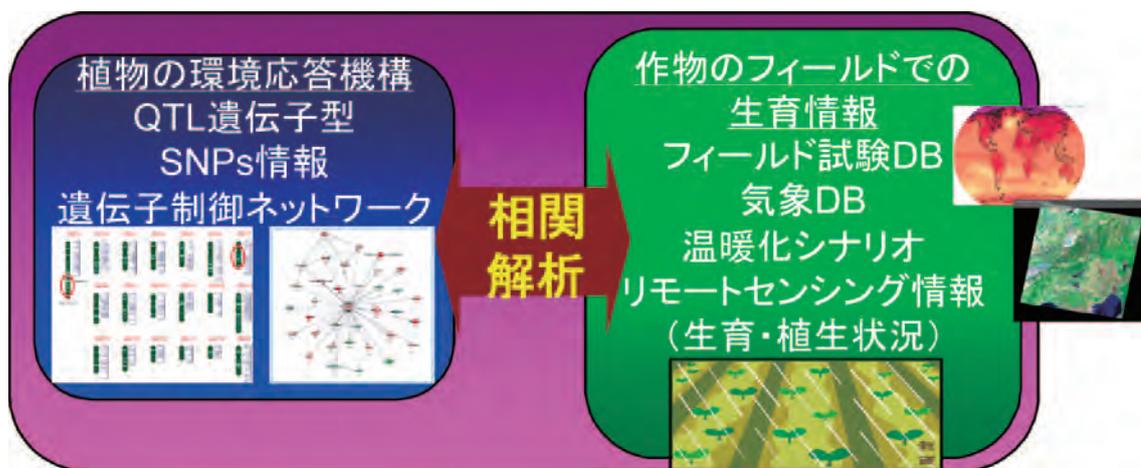


図7. 植物の環境応答機構に関する包括的定量解析

重要な表現型としては、ストレス応答（生長や繁殖に影響を及ぼす環境要因に対して植物個体が示す反応）と資源利用効率（吸収された水、窒素、炭素等の資源が植物個体の生長に実際に利用される割合）に関するものがある。これは、ストレス応答と資源利用効率が、既存の農耕地における単位面積あたりの生産量の増加や新たな土地での確実な作付け等に関わる重要な性質と考えられるためである。本課題では、これらの機能を大幅に改善し、フィールド環境下でも高い応答性を示す遺伝子（群）を環境要因や表現型と関連付けることを目指す。

環境要因としては、植物の生長に影響を与える大気中の二酸化炭素濃度（とくに高CO₂）と温度（大気および地中）、日本など地域レベルでしばしば深刻な問題となる湿度（乾燥および多湿）が重要である。ただし、フィールド環境は、複数の環境要因が相互作用し、時間的にも空間的にも変動する点が最大の特徴である。そのため、複数の環境要因の組み合わせや、ここに挙げた要因以外の環境要因との関連性も検討することは重要である。

対象とする植物種は、モデル植物（シロイヌナズナ、ミヤコグサ等）や実用作物（イネ、ダイズ、コムギ等）など、わが国のバイオリソースとして実績のある種が想定される。その理由は、遺伝情報が他の種と比べて多く蓄積されているためである。ただし、次世代シーケンサー等、昨今の遺伝子解析関連の機器開発の進展により、ゲノムの解読をより安価で容易に行なうことが可能となりつつある。このため、遺伝情報等についての知見が蓄積されれば、フィールド環境に自生する野生の植物種や果樹・野菜等の活用も対象に

含まれる。

なお、本イニシアティブでは従来のように単一の遺伝子を導入した組換え体を作製し、特定網室や隔離圃場で生育の確認を行う場合は、単純なフィールドテストに終わらせず、課題1の狙いに基づき環境要因・遺伝子（群）・表現型の相互依存性の解明へつなげるための情報収集を行うことが求められる。

(想定される課題要素)

- フィールドにおける植物の定量的機能評価（形質評価）法の開発
- ゲノム解読、遺伝子制御ネットワーク¹²・QTL¹³・SNPs¹⁴等の遺伝子解析
- フィールドでの遺伝子発現および表現型の評価・測定
- 遺伝子の挙動と表現型の相関解析
- 遺伝子発現または表現型の表出と関わる環境要因（物性）の測定
- 遺伝子解析、表現型の評価・測定、環境評価・測定を簡便かつ効率的に行うための技術、ツール、機器等の開発（迅速なデータ処理、大規模かつ経時的なリモートセンシング、スキャニング等非破壊的な表現型測定、複数データを統合したメタデータベース構築等）

2. 作物の環境応答機構に関するモデルの構築

課題2では、環境要因・遺伝子（群）・表現型の相互依存性を数理モデル化する（図8）。これにより、環境情報と遺伝情報に基づき表現型を予測することが可能となる。

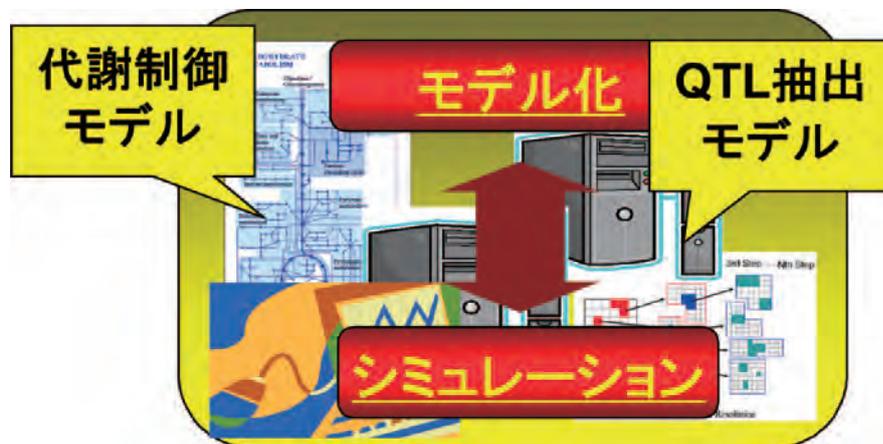


図8. 作物の環境応答機構に関するモデルの構築

作物の生産性に関する従来のモデルでは、遺伝情報に起因する表現型表出のメカニズムが考慮されていない。課題2では、気象データ、収量データ等の他にも、課題1で収集・解析される遺伝情報や表現型のデータもモデルに取り込み、より高次の情報の統合を目指す。

12 遺伝子制御ネットワーク：遺伝子の発現調節が相互に影響しあって調節されている様子のこと

13 QTL：Quantitative Trait Locus（量的形質遺伝子座）。大きさや数など量的な形質に関連する染色体上のDNA領域のこと。1種類の形質に対して複数の領域が特定されることがあり、そのなかには同形質に直接的に関連している遺伝子がある場合もある。

14 SNPs：Single Nucleotide Polymorphisms（一塩基多型）。別の個体のDNAを比べたときに塩基配列の中でときおり見られる1つの塩基の違いのこと。特定のタンパク質が作れなかったり、他個体と異なるものを作ったりすることにも繋がるため個体差や種差などの違いをもたらしている。

(想定される課題要素)

- QTL解析の結果等から予測される遺伝情報と表現型を確率論的に関連付けたモデルの構築
- 遺伝子制御ネットワーク等生物的な機能発現メカニズムに基づいたモデルの構築
- 遺伝情報と表現型を関連付けた上でフィールド環境の影響を組み込んだモデルの構築

3. 遺伝子群の合成、導入による作物の形質評価

課題1で得られた知見を基に課題2のモデル化が達成されると、ある環境下で任意の表現型を表出させるために必要な遺伝子群の組み合わせが特定できる。課題3では、これらの遺伝子群を合成して植物細胞に導入し、特定網室や隔離圃場等のあるフィールドで栽培を試みることによって、課題1および2の成果の妥当性や再現性を確認する（生育確認）（図9）。生育確認では形質評価のためにフィールド環境下での遺伝子や表現型の発現を定量的に解析する。



図9. 遺伝子群の合成、導入による作物の形質評価

なお、特定した遺伝子群の植物細胞等への導入が困難な場合は、遺伝子の合成や、合成した遺伝子を細胞内へ導入する技術開発も併せて行う。

(想定される課題要素)

- フィールドにおける課題1および2の成果の確認
- 任意の遺伝子群を合成する技術の開発
- 合成した遺伝子群を植物細胞中に導入する技術の開発

第4章 研究開発の推進方法

●課題の優先度

本提案の背景には、地球規模課題の解決という社会的ニーズの高まりに加え、モデル植物を中心とした植物の遺伝情報に関する知見の蓄積がある。しかし、これまでに明らかにされた遺伝情報は、フィールド環境下での植物個体の表現型や植物個体を取り巻く環境条件と必ずしも定量的な形で関連づけられていないことが課題となっている。したがって、現時点で最も必要なのは、フィールドにおける環境要因・遺伝子（群）・表現型を定量的に関連付ける知見、および情報を収集し解析するための手法・技術（機器を含む）の確立である。具体的研究開発課題で述べた課題1はこの点に焦点を当てており、最も注力すべきである。

具体的研究開発課題の2はモデルの構築を目的としたものであるが、本課題は既存の入手可能なデータを統合する場合と、データ収集から着手する場合の2通りのアプローチが考えられる。前者はすぐに取組むことが可能であるが、後者はデータの収集から始める必要があるため、比較的長い期間を要する。しかし後者は、必要とするデータ群の設計が可能となるため、モデルの完成度は前者よりも高くなる可能性がある。どちらのアプローチを選択するかは、提案者の独創性・独自性に依拠して決められるべきものであり、本提案では全く別のアプローチを含めて全てを排除しない。

具体的研究開発課題の3は特定の遺伝子群の合成および導入技術の開発と、ゲノム導入作物の生育確認と形質評価を目標としている。遺伝子群の導入は、従来の単一遺伝子の導入と比べてはるかに高度な技術が必要とされるため、研究方法や技術の面で多くの課題がある。このようなアプローチは合成生物学に代表されるような新興領域でもあるため、本イニシアティブの枠組み内で全てを実現することは極めて困難と考えられる。したがってここでの合成および導入にかかる技術開発は既存の技術の高度化を目指すのみに留める。一方、形質評価に関しては課題1、2の成果をフィールドで確認する重要な研究開発である。フィールドにおける植物の生育状況を詳細に確認（形質評価）することで、課題1、2へのフィードバックが期待できるため、その優先度は課題3の中においては相対的に高い。

●研究体制

本提案では課題毎にミッションを掲げ、そのミッションを共有する異分野の研究者が1つのチームとなって相互補完的に機能する体制を基本とする。

従来、遺伝子の機能解析等を行う研究者と、フィールド環境下で生育する植物の理解や育種・栽培等を行う研究者、また測定機器の開発や情報処理を専門とする工学的な研究者はそれぞれの研究分野において活動し、相互の知見や専門性を交流させる機会はほとんどなかった。本イニシアティブでは、研究の推進にあたって、任意のミッションの下でチームを編成し、理学、農学、工学等の異なる分野の専門性を相互補完的に生かすことが求められる。

そのためチームをまとめるリーダーの役割は極めて大きい。リーダーの資質としては、上記のような分野を俯瞰的に捉え、それぞれの利点を生かしつつ、ミッションの達成に向

けてバランス感覚を持ってチームを牽引する能力が必要とされる。本提案では、そのような人材が強く求められるが、同時に本提案の実施を通じた人材の育成も望まれる。

●関連諸国との連携の必要性

フィールド環境にフォーカスするのが本提案の柱の一つである。そのため、たとえばアジアやアフリカにおける農業向けの環境を対象とし、長期的には途上国における作物増産の実現を目指す試みも本提案では想定される。その場合には、実施場所のほか研究者間の交流も含めた国際的な連携が期待できる。

ただし、形質転換体の試験栽培においては、国内外を問わず十分な検討（法的に定められた場所での栽培や、社会受容性への配慮等）とリスクへの対応を条件とする。とくに国際連携においては、相手国の社会的な状況を十分に把握した上で実施されることが望ましい。

●想定されるファンディング形態

本イニシアティブでは、多様な作物種の形質に対してゲノム設計技術を確立するため、公募によって優れた提案を選定する競争的資金の活用が有効と考えられる。また国際共同研究も視野に入れたプログラム設計が肝要である。

コラム 2. アメリカ・オーストラリアにおける植物科学研究の先端的な取組み事例

植物生産技術には、人口増加による食料危機、気候変動、持続可能なエネルギー利用（バイオエネルギーの活用）という3つの主要な地球規模課題への貢献が求められている。この期待に対し、植物科学やバイオテクノロジーの研究者は得られた知見や技術を統合し、より高次のレベルで植物を理解して制御するという難題に取り組んでいる。遺伝子組換え作物に対しては様々な見方があるが、これまでのライフサイエンスやフィールド科学における知見を総動員して、近い将来に直面すると予想される地球規模課題に備える取組みは、農業を重要産業として持つ国においてすでに始まっている。ここでは、そのような取組みを世界的にリードする研究機関およびプロジェクトを紹介する。なお以下の取組みに関しては現地調査を行ったため、本イニシアティブに関連した基礎情報とともに別途報告書を取りまとめる予定である（2010年4月発刊予定）。

1. アメリカ

① Energy Bioscience Institute (EBI)

2006年にイリノイ大学は持続可能なエネルギー生産と消費の実現を目指すイニシアティブを立ち上げた。このイニシアティブに沿って2007年にはEnergy Bioscience Institute (EBI) とCenter for Advanced BioEnergy Research (CABER) という2つの機関を設置した。

EBI (図10) は英国British Petrol社の10年間に渡る長期のファンディングに

よって運営されている¹⁵。EBIは“a mission-oriented, multidisciplinary, team-science-based institute”（annual report 2008より抜粋）をモットーとしており、異分野の研究者の融合が進められている。代表的なプロジェクトは、分子生理学者（ミクロ）と生態学者（マクロ）の協同による高CO₂、高オゾン環境下でのダイズの生長や環境応答機構を包括的に解明する soyFACE（Soybean Free Air Concentration Enrichment）である。その他、日本にも自生するススキを材料にしたバイオエネルギー生産に関する研究がある。これらのプロジェクトでは新しい研究戦略の提案¹⁶や、フィールド環境下で実際に発現する遺伝子ネットワークや代謝ネットワークの解析¹⁷といった成果が挙げられている¹⁸。



図 10. イリノイ大学にある Energy Bioscience Institute (EBI)

イリノイ大学のキャンパス風景（上）。右側にある一連の建物が Energy Bioscience Institute。EBI の内部風景（下）。分子レベルの研究を行う実験スペース（下左）とフィールドで収集された諸データを解析する研究者や社会科学系研究者などがいる研究スペース（下右）が同一のフロアにあり、一つのプロジェクトに関わる研究者どうしが日常的に議論できるよう部屋の作りやレイアウトが設計されている。

② Center for Advanced BioEnergy Research (CABER)

CABER は持続可能なエネルギー生産とその消費を実現するための技術および製品の研究開発を支援する機関であり、イリノイ大学からの出資で運営されている。EBI

15 このファンディングはエネルギー問題の解決に資するバイオサイエンスの統合化と発展、分野融合、人材育成を目的としたものである。イリノイ大学の他にカリフォルニア大学バークレー校、ローレンス・バークレー国立研究所にも EBI が設置されている

16 たとえば Ainsworth et al. (2008) Targets for crop biotechnology in a future high-CO₂ and high-O₃ world, *Plant Physiology* 147 : 13-19, Leakey et al. (2009) Gene expression profiling : opening the black box of plant ecosystem responses to global change, *Global Change Biology* 15 : 1201-1213.

17 たとえば Leakey et al. (2009) Genomic basis for stimulated respiration by plants growing under elevated carbon dioxide, *PNAS* 106 : 3597-3602.

18 本イニシアティブでは課題 1 に相当する部分となると考えられる。

が基礎研究にフォーカスするのに対し、CABER は産業化を意識したテーマに重点を置きながら、太陽光の効率的利用からバイオ燃料や新規化合物の精製まで、持続可能なエネルギー生産のバリューチェーン全体を研究対象としている¹⁹。また2010年1月の時点で、産業界からの参画を促進するため企業も利用可能な研究施設の建設を新たに計画していた。企業が本研究施設でシーズ探索や理論の実証を行い、同キャンパス内にあるリサーチパークに移り研究開発フェーズをさらに進め、最終的には上市へという流れが想定されている。CABER は設置から2年が経ち、ブラジルのサンパウロ大学との共同研究や、NSF からの資金獲得等、活動の拡大へ向けた準備が進んでいる。

③アリゾナ大学

アリゾナ大学は植物科学研究の中でも大量の情報処理を必要とするバイオインフォマティクス研究に注力しており、情報インフラ整備を iPlant Collaborative というイニシアティブの下で進めている。情報インフラを活用する研究課題は公募を通じて集められ、植物の遺伝情報と表現型情報との関連付けを計算機上で試みる iPlant Genotype to Phenotype (iPG2P) プロジェクト等が採択された。iPG2P は5つのワーキンググループによって構成され、各グループがシーケンスデータの効率的な解析手法の検討、データ統合手法の開発、画像解析や視覚化技術の開発、統計解析技術の開発、統合モデルの構築を行っている²⁰。

2. オーストラリア

① High Resolution Plant Phenomics Centre (HRPPC)、Plant Accelerator

豪州のイノベーション・産業・科学・研究省所管の研究機関である Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) が設置した研究施設である。HRPPC はキャンベラ、Plant Accelerator はアデレードに位置している。両施設は、将来の変動環境に適応して生育できる作物の作出を目指し、植物の生長を包括的に解析し理解するための研究や、技術・機器の開発を行っている²¹。

② Biosciences Research Centre

2009年にビクトリア州・第一次産業省とラ・トローブ大学の共同イニシアティブによる設置が決定した(図11)。ビクトリア州のアグリビジネス活性化を目指しており、その目的に資する最先端の研究開発を進めるべく、ゲノム学、育種学、生理学等、異分野の研究者が共同で研究開発を行うことのできる場を提供する²²。同年には米国のダウ・アグロサイエンス社とビクトリア州がアグリバイオ技術を共同で開発するとの発表を行い、同センターがその拠点となる予定である。本共同研究プロジェクトでは、作物の産出高を改善するための技術開発に注力し、オーストラリアで第3

19 本イニシアティブでは課題3に近いが、テーマによっては課題3よりも応用指向が強いと考えられる。

20 本イニシアティブでは課題2に相当する部分となると考えられる。

21 本プロポーザルでは課題1に相当する部分となると考えられる。

22 本プロポーザルでは課題1および3に相当する部分となると考えられる。

位の主要作物であり、かつダウ・アグロサイエンス社も独自の品種を持つキャノーラや、トウモロコシ、コムギ、バイオエネルギー作物を対象とすると発表されている。



図 11. ラ・トロブ大学内に建設中の Bioscience Research Centre 概観イメージ²³

23 <http://www.dpi.vic.gov.au/dpi/nrensr.nsf/childdocs/-7B16ED7D9B5AE783CA2572EA0075473E?open>、2010年2月時点。ビクトリア州第一次産業省とラ・トロブ大学の共同出資で設置される。

第5章 科学技術上の効果

本イニシアティブへの投資による科学技術上の効果は、基礎研究成果の応用への展開促進、システムバイオロジーや合成生物学など統合的な植物科学研究の振興の2点である。

●基礎研究成果の応用への展開促進

わが国には、環境ストレス耐性や資源利用効率に関する分子生物学や生理学的な知見がこれまでの投資の成果として多数蓄積されている（参考資料2参照）。しかしながら、これらの基礎的知見を活用した新品種の開発が十分に行われているとは言い難い。その原因としては、研究材料として実際の作物種ではなくモデル植物が用いられることが多かった点や、研究において作物が実際に生育しているフィールド環境が十分に考慮されていなかった点などが考えられる。本イニシアティブでは、以上のような課題を克服するために、作物のゲノム設計技術の確立を最終目標とし、この技術を確認するためにモデル植物の知見を活用する。また研究開発の実施にあたっては、実際の栽培環境を強く意識し、フィールド科学との融合研究を推進する。以上のように、本提案ではこれまでに蓄積された基礎研究成果を実用作物へ応用する研究開発を指向するため、これまでの成果の有効活用が図られることが期待される。

●統合的な植物科学研究の振興

近年、生物の機能を統合的に解析したり、その機能を再現したりする科学技術がライフサイエンス研究の新しい潮流となりつつある。このような統合的な研究の流れは植物科学の分野も例外ではない（参考資料1参照）。本分野でも、システムバイオロジーや合成生物学が用いるような計算機を活用した統合的な研究手法が導入され、機能を定量的に解析したり、代謝物の生産経路を合成したりするような研究が先進諸国を中心に盛んに行われている。本イニシアティブで提案している課題もまさにこのような最新の研究手法を活用した研究開発といえる。例えば、フィールドにおける遺伝子と表現型の関連性を定量的に解析する研究開発では、計算機を活用することにより、植物に内在している多数の遺伝子が織りなす複雑な機能発現機構を詳細に明らかにすることが可能となる。また複雑な環境応答機構をモデル化し、計算機上で再現または予測することで、植物が持つ多様な生理機能の解明を格段に深めることが期待される。

第6章 社会・経済的效果

本イニシアティブへの投資による社会・経済的效果は、資源少消費型で持続可能な農業の実現へ向けた基盤が構築され、作物生産に係る地球規模課題へ寄与する点である。また、副次的効果としては、わが国の種苗産業等の産業競争力の強化が挙げられる。

●資源少消費型で持続可能な農業に向けた基盤の構築

従来の資源多消費型の作物栽培では、たとえば特定の化学肥料の継続的な大量投入によって土壌の酸性化が進行したり、土壌微生物群の多様性が減少したりするなど、環境への負荷が大きいと言われている²⁴。本イニシアティブで提案しているゲノム設計技術では、植物が本来有する機能を最大限に活用することにより、最小限の肥料投入で安定的な食料生産を実現することが可能となる。上記のような土壌の劣化は、世界各地の多くの農耕地で問題となることが予測されることから、本技術によって土壌の質が保持されると、将来の持続的な農業の実現に寄与することが期待される。

●気候変動に適応した安定な作物生産量の確保

近年、気候変動に伴う大規模な干ばつや長雨等の発生が作物の生産量の低下を招き、穀物価格にも大きな影響を及ぼしている。特に米国や豪州では記録的な干ばつにより、コムギなどの生産量が極端に低下したことが報告されている。このような激変する環境変化に対応するためには、従来とは異なる環境下でも安定的に生育する作物の作出が不可欠である。本イニシアティブで確立を目指すゲノム設計技術は、植物のゲノムを設計・改変することにより、例えば資源の利用効率を格段に高めることが可能となる。このため、上記のような環境変化においても一定量の作物を生産することが可能となり、結果として安定的な作物生産に寄与することが期待される。

●新たな植物生産技術による産業の競争力強化

本提案の実施を通じて創出される植物生産技術により、わが国の種苗関連産業の競争力の強化という経済効果も期待される。

遺伝子組換え技術を活用した機能改変作物に関しては海外の大手化学企業が市場を席巻している（参考資料3参照）。しかし現在市場に出回っているものは除草剤耐性または病虫害耐性の2つの機能を有する作物が中心で、環境ストレス耐性や資源利用効率など、より複雑な環境応答機構を持った植物機能の改変は、世界的にも研究開発の途上にある。

海外企業の研究開発は豊富な資本を背景に大量の組換え体を作製して試験栽培を行うといったものであるが、上市に至る確率は低く、それゆえ投資効率も高いとは言い難い。一方、わが国の種苗関連企業は良質の苗等を世界中に展開しているものの、その事業規模は海外の穀物メジャーに比べて10分の1程度に留まっている。しかし本提案にある植物ゲノムの設計技術が確立し、このような小規模の企業等でもその成果が利用可能となった場

24 J. H. Guo et al. (2010) Significant Acidification in Major Chinese Croplands, Science 19 : 1008-1010.

合には、品種改良の効率や確率を格段に高めると期待され、当該分野の産業競争力の強化に繋がる可能性が期待される。

第7章 時間軸に関する考察

本イニシアティブでは、昨今の地球環境問題や食料問題に鑑み、早急に研究開発に着手し、10年以内に複数の作物種においてゲノム設計技術が確立されるよう時間軸の設定を行う。

第1章で述べたように、提案する3つの課題は、それぞれがゲノム設計技術を確立するための要素研究として位置付けられている。よって、技術を構築するまでの期間は、対象とする作物の基礎的な知見の蓄積度や技術の成熟度によって大きく異なる。ただ、第4章でも述べたように、課題1の成果は技術開発の起点となるばかりか、モデルの精度の向上にも大きな影響を及ぼす。このため、課題1は他の課題に比べ優先度を高めた取り組みが必要と考えられる。よって課題1は早急に着手し、10年規模の研究開発を継続することにより、得られた成果を課題2や課題3に繋げていくことが重要である。

課題2のモデル構築に要する期間は作物種によって異なるが、10年を目途にプロトタイプレベルのモデルが構築されると期待される。10年というのは、実際にモデル構築で3年、精度向上や汎用性向上などを含めて10年程度の期間を要した事例があったことに基づく。よって、本イニシアティブでは、10年規模の研究開発を継続的に実施し、この間に企業等で開発が可能なレベルにまで高めたモデルの構築を目指すことを目的とする。

課題3では、特定の環境に適応する「遺伝子群の合成および導入技術の開発」と「合成ゲノム導入作物の形質評価」の2つの課題を提案している（第3章参照）。遺伝子やゲノムに関する技術開発は、既存の技術を改良する場合と全く新しい技術を開発する場合が考えられるが、前者は過去の事例から1年程度、後者は3～5年程度の研究期間を要すると思われる。形質の評価に関しては、既に遺伝子候補群が特定されているケースでは直ちに合成、導入を試み、圃場において生育や発現形質の確認を行う。この場合は、長くとも1年程度で一定の成果を求めるものとする。ただし、ここでの成果も課題1または課題2の研究開発へ反映し、最終的にはそれらの成果が再度、本課題へフィードバックされることになる。よって、課題3も他の課題同様、10年程度継続して研究開発を実施することが必要である。

第8章 検討の経緯

1. 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」

穀物生産技術を核とした「緑の革命」のような、かつての食料増産への取り組みは、貧困と飢餓の解消に一定の効果を与えた一方、エネルギーや肥料等を大量に投入する農法でもあったことから、資源消費や土壌における生物多様性の損失等の課題が生じる要因にもなっている。このような背景から（独）科学技術振興機構 研究開発戦略センター（JST/CRDS）では、資源少消費型の持続可能な農業を模索するため、近年のライフサイエンスの成果である植物の分子生物学的知見を活用し、新たな育種技術の確立に貢献するための方策を検討することとした。

これを受けて、上記の問題意識を具体化するため、研究開発課題として「フィールドにおける植物の環境応答機構と育種技術」という複数の研究分野にまたがるテーマ設定を行い、生理学、育種学、生態学、計算科学等の学術分野や民間企業の研究開発担当者を一堂に会し、研究および研究推進上の課題について検討を行った。その結果、当該領域においては異分野間の研究者のインタラクションがほとんどないという研究システム面での問題と、実験室でのモデル植物等の成果のフィールドへの展開ができていないという研究面での問題点が明らかになった。

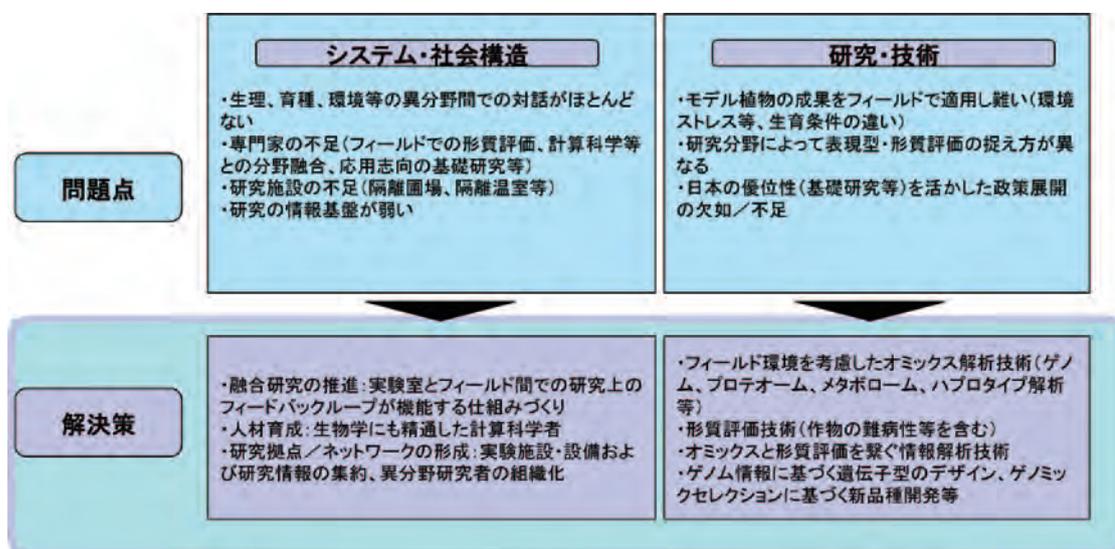


図 12. ワークショップで抽出された問題点と解決策のポイント

ワークショップでの議論を踏まえた結果、JST/CRDS は研究システム面での課題として特に、「基礎研究とフィールド研究との間でのフィードバックループが機能する仕組みづくり」を重視することとした。また、この課題を解決するための具体的な研究テーマとして、「フィールド環境を考慮したオミックス解析や形質評価」、「計算科学との連携」、さらにはここでの解析結果やゲノム情報等の情報基盤を活用した遺伝子型のデザイン、育種への展開を提案することとした。

【実施概要】

開催日時：平成 21 年 11 月 9 日（月）13 時～18 時

場所：研究開発戦略センター2F 大会議室

参加者：下表参照

氏名	所属
明石 良	宮崎大学 フロンティア科学実験総合センター
岩永 勝	(独) 農業・食品産業技術総合研究機構 作物研究所
工藤 洋	京都大学 生態学研究センター
小鞠 敏彦	日本たばこ産業株式会社 経営企画部
佐藤 文彦	JST/CRDSフェロー、京都大学大学院 生命科学研究科
篠崎 一雄	理化学研究所 植物科学研究センター
○武田 和義	岡山大学 資源生物科学研究所
田畑 哲之	かずさDNA研究所
寺島 一郎	東京大学 大学院理学系研究科
中川 博視	石川県立大学 生物資源環境学部生産科学科
中谷 明弘	東京大学 新領域創成科学研究科
西澤 直子	東京大学 大学院農学生命科学研究科
長谷川利拡	(独) 農業環境技術研究所 大気環境研究領域
矢野 昌裕	(独) 農業生物資源研究所 QTLゲノム育種研究センター

五十音順 敬称略
○コーディネーター

プログラム：

- **趣旨説明 13:00-13:30**
「Overview 現状と課題」
 - 川口哲
- **セッション1 13:30-15:00**
「“橋渡し”研究における課題」
 - 篠崎一雄
 - 矢野昌裕
 - 田畑哲之
 - 工藤 洋
 - 長谷川利拡
 - 寺島一郎
- **セッション2 15:20-16:50**
「課題解決に資する研究開発」
 - 中谷明弘
 - 中川博視
 - 佐藤文彦
 - 小鞠敏彦
- **セッション3 16:50-17:20**
「推進方策」
 - 寺島一郎
 - 西澤直子
 - 明石 良
- **セッション4 17:30-18:00**
「まとめ」: 全体討議およびCRDSによるまとめ

(敬称略)

2. 海外ベンチマーク調査*

① 米国調査

- 調査実施期間：平成 22 年 1 月 9 日～16 日
- 訪問者：
 - (独) 農業環境技術研究所 大気環境研究領域 主任研究員 長谷川利拡
 - (独) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー 中村亮二
- 訪問内容：

訪問先	面会者	インタビュー項目
USDA-ARS Arid-Land Agricultural Research Center (アリゾナ州・フェニックス)	Bruce A. Kimball 博士 Jeffery W. White 博士	iPlant Collaborative、ならびに iPlant Collaborative 内の GtoP プロジェクトに関するインタビュー。
Center for Advanced Bio-Energy Research (CAB-ER)、Energy Biosciences Institute (EBI) (イリノイ州・シャンペーン)	Hans P. Blaschek 博士 (Director and Assistant Dean of CABER) Stephen P. Long 博士 (Deputy Director of EBI) Andrew Leaky 博士 Carl Bernacchi 博士 Don Ort 博士 他	開放系大気 CO ₂ 増加実験プロジェクト (SoyFACE)、エネルギーバイオサイエンス関連研究機関 (EBI、CABER) に関するインタビューおよび研究インフラの整備状況調査。

② 豪州調査 (予定、2/2 現在)

- 調査実施期間：平成 22 年 2 月 16 日～24 日
- 訪問者：
 - 東京大学大学院 理学系研究科 教授 寺島一郎
 - 宮崎大学 フロンティア科学実験総合センター 教授 明石良
 - (独) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー 中村亮二
- 訪問内容：

訪問先	面会者	インタビュー項目
La Trobe University、Victorian AgriBiosciences Centre (ビクトリア州・ブンドゥーラ)	German Spangenberg 博士 (Professor、Executive Director、Biosciences Research Division、Department of Primary Industries)	ビクトリア州第一次産業省と La Trobe 大学が進めるイニシアティブ、およびダウ・アグロサイエンス社との共同研究に関するインタビュー。

<p>University of Adelaide、 Australian Plant Phenomics Centre (サウス・オーストラリア州・アデレード)</p>	<p>Mark Tester 博士 (Professor、Director、Australian Plant Phenomics Facility)</p>	<p>公的研究機関 CSIRO の植物研究施設 Plant Accelerator における植物の統合的理解に向けた取組みおよび研究インフラの整備状況調査。</p>
<p>High Resolution Plant Phenomics Centre (オーストラリア南東部・キャンベラ)</p>	<p>Robert Furbank 博士 (Scientific Director、High Resolution Plant Phenomics Centre)</p>	<p>公的研究機関 CSIRO の植物研究施設 High Resolution Plant Phenomics Centre における植物の統合的理解に向けた取組みおよび研究インフラの整備状況調査。</p>

* 調査結果については別途報告書を作成予定 (2010 年 4 月発刊予定)。

参考資料

1. 植物分野における各国施策・ファンディング動向

各国のファンディング動向から植物研究の世界の動向を探った。その結果、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や cDNA²⁵ の解析研究は、2000 年以降それらの膨大な情報 (Omics) を統合的に扱おうとする研究へとシフトしている状況が明らかとなった。近年になると、これらにフィールド情報を加え、より複雑な植物の応答機構を解析したり、成果を実用作物で確認するなど、より高度な統合的研究が進められている (図 13)。

各国の動向を個別に見ると、米国では 1998 年に策定された Plant Genome Initiative の下、2000 年頃からモデル植物の全遺伝子機能の解明を目的とした研究が実施されてきた。現在は、蓄積された知見を実用作物へ展開する研究や、バイオ燃料用植物の生産技術の開発に関する研究が盛んに行われている。DOE (エネルギー省) と USDA (農務省) がジョイントでファンディングを行う等、省庁の壁を超えた取り組みが特徴的であり、今後の動向が注目される。

また欧州では、EU の ETP (ヨーロッパ・テクノロジー・プラットフォーム) が次世代植物研究の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) の中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。国別では、英国が合成ゲノムに関する研究開発に力を入れている (ただし植物に特化したものではない)。ゲノムの設計や合成に関する技術開発は萌芽的な研究領域であることから、リサーチカウンスルが中心となって諸外国の助成機関 (米国 NSF 等) と連携し技術の標準化を睨んだ取り組みを行っている。

わが国は文部科学省と農林水産省において継続的に植物関連のプロジェクトが進行している。文部科学省所管の理化学研究所では、モデル植物や実用植物の代謝物の定量解析、生長機構に関するシステムバイオロジーを推進している。また農林水産省では、生物資源研究所を中心にイネゲノム情報を基盤とした研究開発が進められている。ここでは、遺伝子組換えや育種の技術によって様々な形質をターゲットにした品種の作出研究が行われている。

25 cDNA (相補的 DNA) : DNA の中でタンパク質に翻訳されて機能を発現していると考えられる部分 (DNA の中にはタンパク質に翻訳されず、機能が明らかとなっていない部分も多く存在している)。

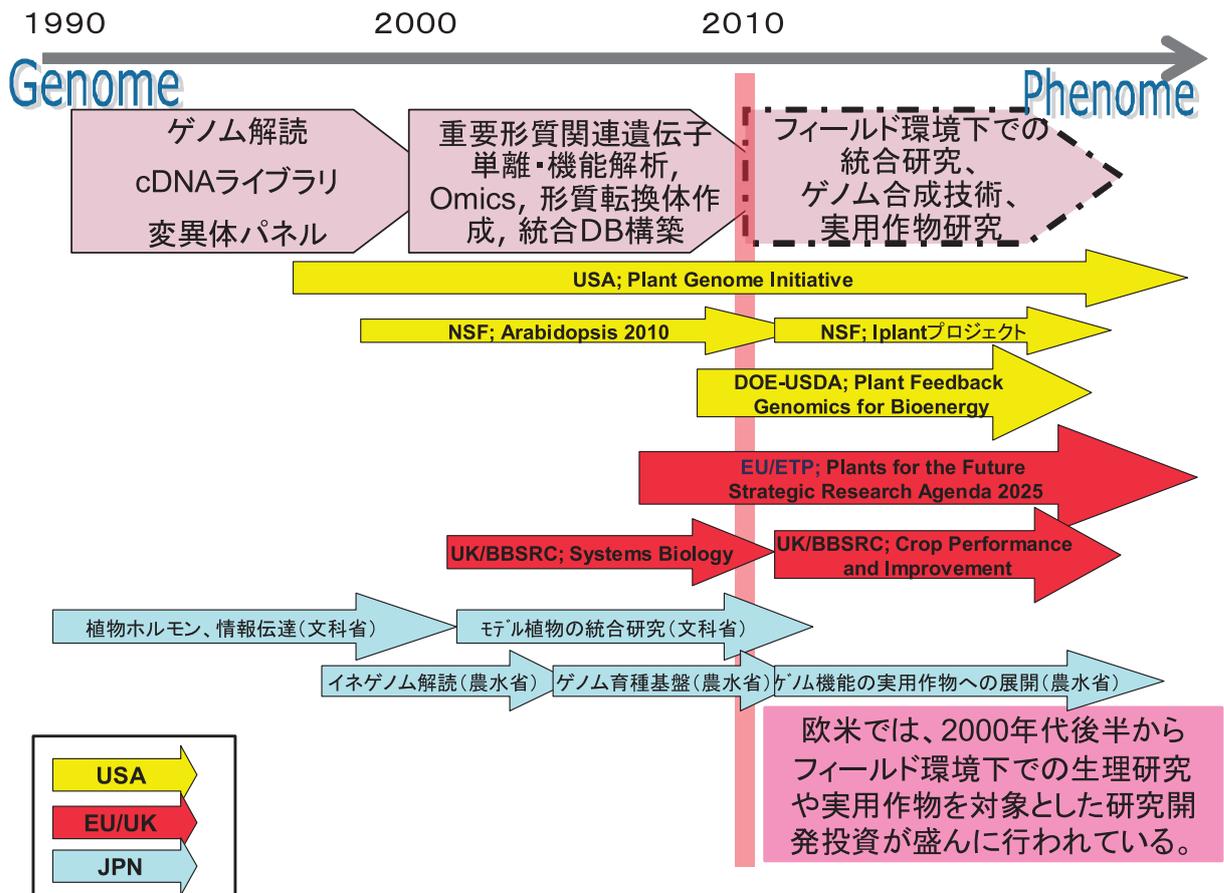


図 13. 植物研究の流れと各国の政策・ファンディング動向

2. 植物科学分野の科学技術・研究開発の国際比較

日本、米国、欧州、中国、韓国を対象とした植物科学分野における研究開発水準および技術力の国際比較調査を実施した結果、植物科学分野の研究開発は研究水準、技術開発水準、産業技術力のいずれのフェーズにおいても欧米が高い競争力を有することが分かった(表1)²⁶。わが国は高い研究水準を有するものの、応用展開が弱い。また本イニシアティブが特に関係している「環境・ストレス応答」の中綱目に注目してみると、最近5年間に掲載された英文の論文数では、米国、中国、日本、ドイツ、スペインの順に並んでいた²⁷。一方、特許の件数では米国が半数以上を占め圧倒的に優位な立場にあり、次いでドイツ、スイス、ベルギーの順となっている。日本では「乾燥ストレス・水ストレス・浸透圧および塩ストレス等の応答機構の基礎研究が高い研究水準にある」とあり²⁸、これらの応用展開が待たれるところである。また、同国際比較報告書中の注目動向の項には、中国の最近の動向が取り挙げられており、「単なる経済原理のみでなく環境や食料供給の点から取り組む姿勢として国家レベルで技術開発まで行う体制を整えてきている」とある。

表1. 植物科学分野における研究開発水準および技術力比較

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	△	→	△	↗	△	→	×	→	×	→

わが国は高い研究水準を有するが、技術開発、産業技術力などの応用展開が弱いことが分かる

強い
弱い

強い

科学技術・研究開発の国際比較(2009年版)概要版

26 科学技術・研究開発の国際比較(2009年)概要版 CRDS-FY2009-IC-01 P48 より抜粋
 27 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) CRDS-FY2009-IC-04 P227
 28 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) CRDS-FY2009-IC-04 P201

3. 農薬・種苗関連企業の研究開発動向

現在市販されている組換え作物は主に、欧米の化学メーカー（モンサント、シンジェンタ等）の農薬部門で開発されている。その多くは農薬と種子（GMOを含む）のセット販売やブラジル・アルゼンチン等の主要穀物生産地との連携により、高い利益を上げている（表2）。

表2. 農薬・種苗関連企業の財務データ（2008年）

企業名		売上(A) (単位:百万USD)	営業利益(B)(注1) (単位:百万USD)	研究開発費(注2) (単位:百万USD)	(B)/(A)
主要穀物 メジャー	モンサント	11,365	1,200	980	11%
	シンジェンタ	11,624	2,494	969	21%
	デュポン	30,529	3,650	1,393	12%
	(Agriculture & Nutrition部門のみ)	8,000	1,087		14%
	ダウ	57,514	1,321	1,310	2%
	(Agricultural Sciences部門のみ)	4,535	781	44	17%
		(単位:百万ユーロ)	(単位:百万ユーロ)	(単位:百万ユーロ)	
	バイエル	32,918	3,544	2,578	11%
	(Agricultural Sciences部門のみ)	6,382	918	649	14%
	BASF	62,304	6,463	1,350	10%
(Agricultural Solutions部門のみ)	3,409	705		21%	
日本企業		(単位:億円)	(単位:億円)	(単位:億円)	
	タキイ種苗	413	55		13%
	住友化学 (農業化学部門のみ)	18,965	1,024	1,054	5%
		2,004	209		10%

注1：欧米企業のデータは基本的に EBIT²⁹（金利税引前利益）だが、シンジェンタは EBITDA、デュポンは PTOI（税引前利益）。日本企業のデータは、タキイ種苗は経常利益、住友化学は営業利益。

注2：ダウ Agricultural Sciences 部門のデータは IPR & D³⁰ 費。

出典：各社 IR 情報をもとに作成

欧米企業の特徴は、ダイズ・トウモロコシ・綿等の実用作物を対象とした環境ストレス耐性の品種開発に力点を置いており、その多くが1つの作物種に対して複数の開発品目を有する。

我が国にも種苗生産を中核企業としている企業は多数存在している。いずれも小規模で多品種販売が特徴であり、遺伝子組換え技術を用いずに品種改良を行っている。市場占有率の高い品種もみられるが、マイナー作物が多いため欧米の企業に比べ収益は小さい。我が国では化学メーカーが種苗の生産や販売に積極的な取り組みが見られない点が、欧米の企業との大きな違いとなっている。

29 EBIT : Earnings Before Interest and Taxes

30 IPR&D (In-Process Research and Development) 仕掛研究開発費

■戦略プロポーザル作成メンバー■

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-FY2009-SP-11

戦略イニシアティブ

環境適応型作物のゲノム設計技術

STRATEGIC INITIATIVE
Technology for Genomic Design of
Environmentally Adapted Crops

平成 22 年 3 月 March 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.
