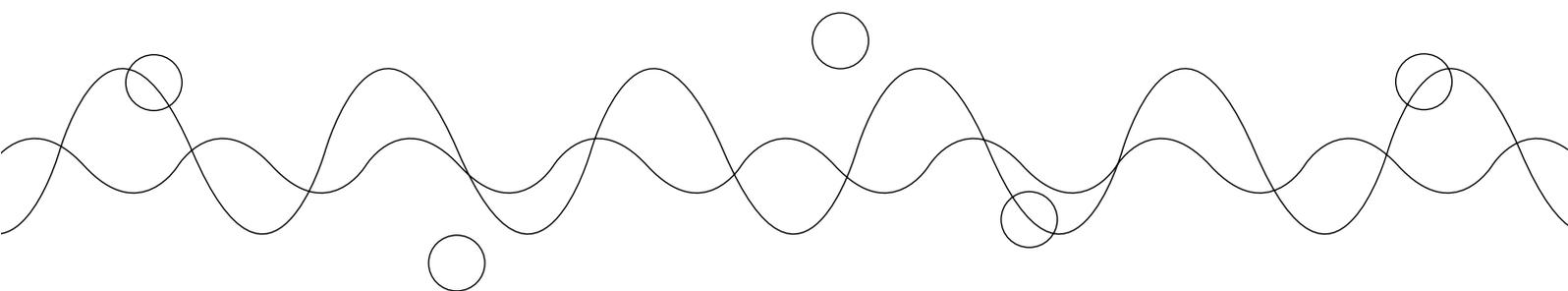
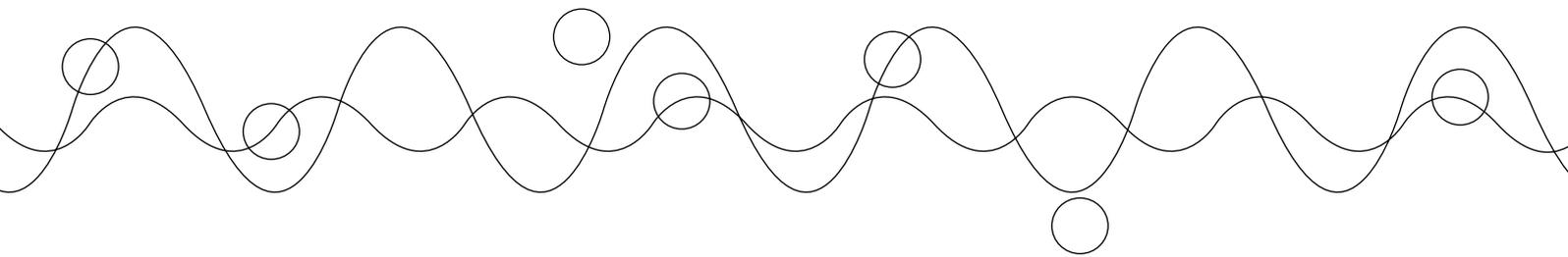


CRDS-FY2009-WR-11

**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**



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

「緑の革命」に代表される育種や栽培技術を基盤とした穀物の大量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、これらの技術は、エネルギーや化学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新たな課題が生じる要因にもなった。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研究の成果である植物の分子生物学的知見を活用し、新しい植物生産技術の確立に資する研究開発を検討することとした。

「フィールドにおける植物の環境応答機構と育種技術」とは、環境に適応した作物をゲノムレベルから設計するための研究開発で、資源消費量を低減させた持続的な植物生産に寄与することが期待される。本ワークショップでは、このような課題設定の下に、生理学、育種学、生態学、計算科学等の学術分野や民間企業等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等、研究システム面での課題と、実験室の成果のフィールド展開等、研究面での問題が明らかになった（図1）。

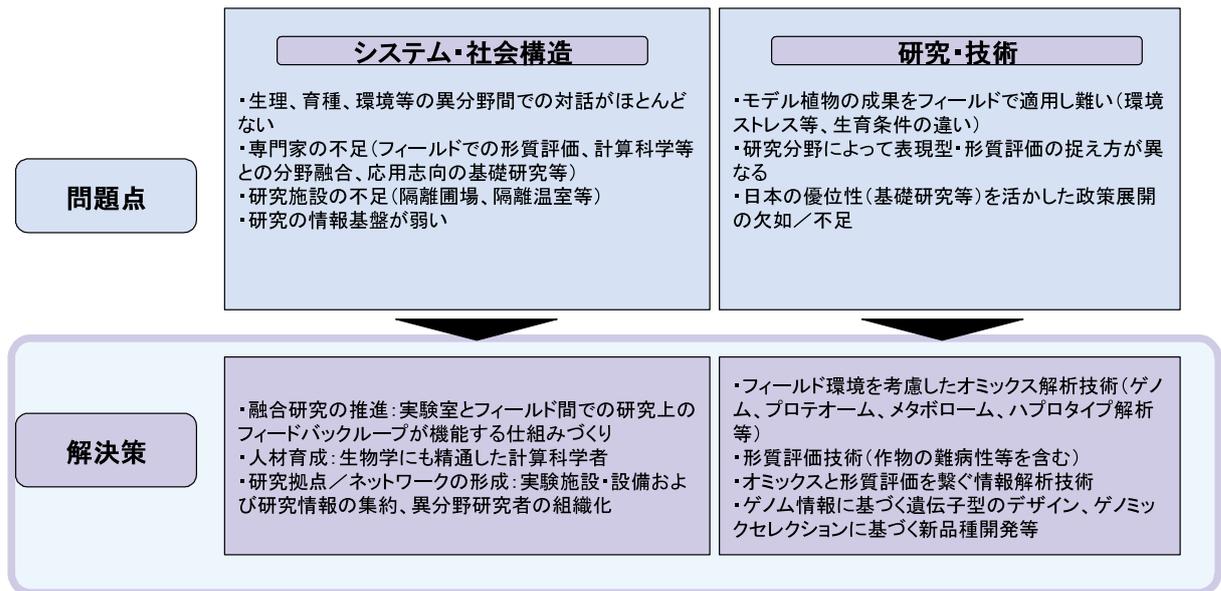


図1：ワークショップで抽出された問題点と解決策のポイント

以上を踏まえ、JST/CRDSは研究システム面での課題を解決するために、「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」を重視し、政策として取り組む必要性等についてさらなる検討を行うこととした。また、研究面での課題解決に資する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定量的な形質評価技術の開発」、また「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」に関する研究開発を今後の重要課題として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

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)

## 目 次

エグゼクティブサマリー

1. ワークショップ概要 .....	5
2. ワークショップ詳細 .....	9
3. 考察および今後の戦略立案に向けた方針 .....	81

## 1. ワークショップ概要

### 1.1 開催主旨

植物科学分野では、作物収量の向上を目的とした研究開発として、特定の生理機能を制御する遺伝子の同定・解析、遺伝子導入による機能改変植物（作物）の作出、フィールドでの実証実験、などの基礎から応用に至る様々なフェーズで研究開発が行われている。しかしながら、実験室レベルで得られた知見に基づいて作出された機能改変植物がフィールドで予想通りの機能を発揮しない等、研究開発上の課題が生じている。すなわち、基礎研究の成果が応用研究に適応できていない状況にある。

上記のような課題は、実験室とフィールド環境とのギャップが大きく影響しているものと考えられる。目的とする形質をフィールドで発現させるためには、植物が実際に生育するフィールド環境を考慮した遺伝子の設計を行い、実験室とフィールドでの成果を限りなく近づけることが重要である。このような課題を解決するには、分子生理、育種、生態生理等を専門とする研究者が連携し、植物の環境応答機構に関する統合的な理解とそれに基づく新しい育種技術の開発が一つのブレイクスルーになる。しかし、現状では、これらの研究者コミュニティの連携が十分に行われているとは言い難く、これが新技術創出等のボトルネックにもなっている。

そこで、本ワークショップでは、上記のような異分野の研究者を一堂に会した場を設定し、ここでのディスカッションを通じて、上記課題等の解決策を打ち出すことを目的とした。具体的には、ワークショップのセッションを3つに分け、わが国が取り組むべき重要な研究開発、技術開発、そしてそれらの推進方策のそれぞれについて検討を行った。

(3つのセッションでの検討事項)

- ・ フィールドにおける植物の環境応答機構の統合的解明
- ・ 植物の環境応答機構に基づく育種技術
- ・ 上記2つの研究開発の推進方策

## 1.2 フィールドにおける植物の環境応答機構の統合的解明

### 1.2.1 研究開発の現状

- ・ 日本の植物研究は、シロイヌナズナおよびイネの基礎研究については世界トップレベルである。一方、これら成果の応用については世界に遅れを取っている。
- ・ 世界的な研究のトレンドは、情報技術を活用したゲノム解読や生理制御遺伝子の同定、QTL解析等である。このような流れの中で、中国、韓国等のアジア各国も急速に存在感を示しはじめ、作物増産を目的とした研究開発が活発化している。
- ・ しかしながら、収量の様な複雑な形質に対しては、ゲノミクスを活用した基礎研究の知見が応用化まで十分につながっていないのが現状である。
- ・ 課題としては、実験室から温室に移した時点で生じる様々な形質変化の要因の特定が行われていないことや、フィールドにおける植物の分子生理的なメカニズムがブラックボックスとなっていることなどが挙げられる。

### 1.2.2 今後の研究開発課題

実験室とフィールド環境の成果を統合する研究が必要である。すなわち、植物生理の知見に基づき機能設計・育種された品種について、フィールド試験を行い、その結果を再度植物生理研究にフィードバックさせる。これを繰り返し行うことで、理論的に設計された植物機能とフィールドで実際に発現する植物機能とのギャップを埋めて行く必要がある。特に重要な研究開発としては以下のような課題が挙げられる。

- ・ 複数の遺伝情報と表現型情報の相関に関する研究開発
- ・ 遺伝子型に基づいた選抜育種技術
- ・ 環境応答機構に基づく遺伝子型デザイン技術の開発

また、上記研究開発を推進するうえで、フィールド環境の再現技術や自然生態系の応用予測、研究・情報インフラの整備、人材育成などが重要となる。

## 1.3 植物の環境応答機構に基づく育種技術

### 1.3.1 研究開発の現状

- ・ 育種や組換えに関する技術開発の分野では、気象情報や遺伝情報を加味した作物の設計技術や情報技術を活用した定量的な形質評価技術に関する取組みなどが行われている。
  - 作物設計技術：気象情報に加え、遺伝的情報を加味した作物シミュレーションモデルを作成し、イネの出穂時期予測やゲノム設計を試みる研究が行われている。今後は、多数の遺伝子が関与する形質、形質間のトレードオフおよび環境との相互作用などの検討が特に課題になると予測される。
  - 形質評価技術：画像や動画の解析による形質（フェノタイプ）の数値化、データ取得等が、一部の植物では既に行われている。今後は、GWAS（ゲノムワイド関連解析）を切り口に、遺伝情報と表現型をいかに関連付けていくかが重要となる。
- ・ また、形質発現の分子メカニズムの解明が十分に行われていないことも課題として挙げられる。このため、オミックスを活用した遺伝子ネットワークの解析を行い、この解析結果に基づき合成生物学的アプローチで代謝系等を再現することで、より詳細なメカニズムの理解へとつなげることができる。
- ・ 企業における現在の課題は、新品種の作出において「数打てば当たる」方式（有用な遺伝子を導入した作物個体を多数作製し、目的とする形質を有する作物を選抜する方式）のアプローチとなっている。よって、成功確率を上げたり、開発期間を短縮化したりする育種等の新技術に対するニーズはコスト縮減の意味でも極めて高い。

### 1.3.2 今後の研究開発課題

形質に関連する分子ネットワークの解明および遺伝子改変技術等の高度化により、遺伝情報と形質との関係を明確化する基盤技術の確立が求められる。なお、これを実現する上で、情報技術の活用が必要不可欠である。例えば米国では iPLANT プロジェクトが実施されている。これは、計算機上で植物のゲノム情報や機能発現に至るプロセスをシミュレーションすることを目的としたプロジェクトである。また、このような基盤技術の構築が重要なのはもちろんであるが、研究を実施する際には、成果が基礎研究に留まらないよう、環境変化に適応した作物生産やバイオマス植物の育成等、応用への展開を見据えた取り組みが重要である。

## 1.4 研究開発の推進方策

分子生理、育種、生態生理等を専門とする研究者が連携し、植物の環境応答機構に対する統合的な理解や育種等の新技術の開発を進めるための具体的な推進策としては、以下の基盤構築が必要と考えられる。

- ・ 組織：分子生理から生態系のレベルまでのマルチスケールで研究を行うことができるコンソーシアムの形成
- ・ 教育：分野間の橋渡しを担えるインターディシプリナリーな人材（*agronomist*, *ecophysiologicalist* 等）の育成（博士課程からの育成も想定）
- ・ 拠点：データや施設を共有するための拠点形成

また、研究開発の推進にあたり、次の事項についても考慮が必要となる。

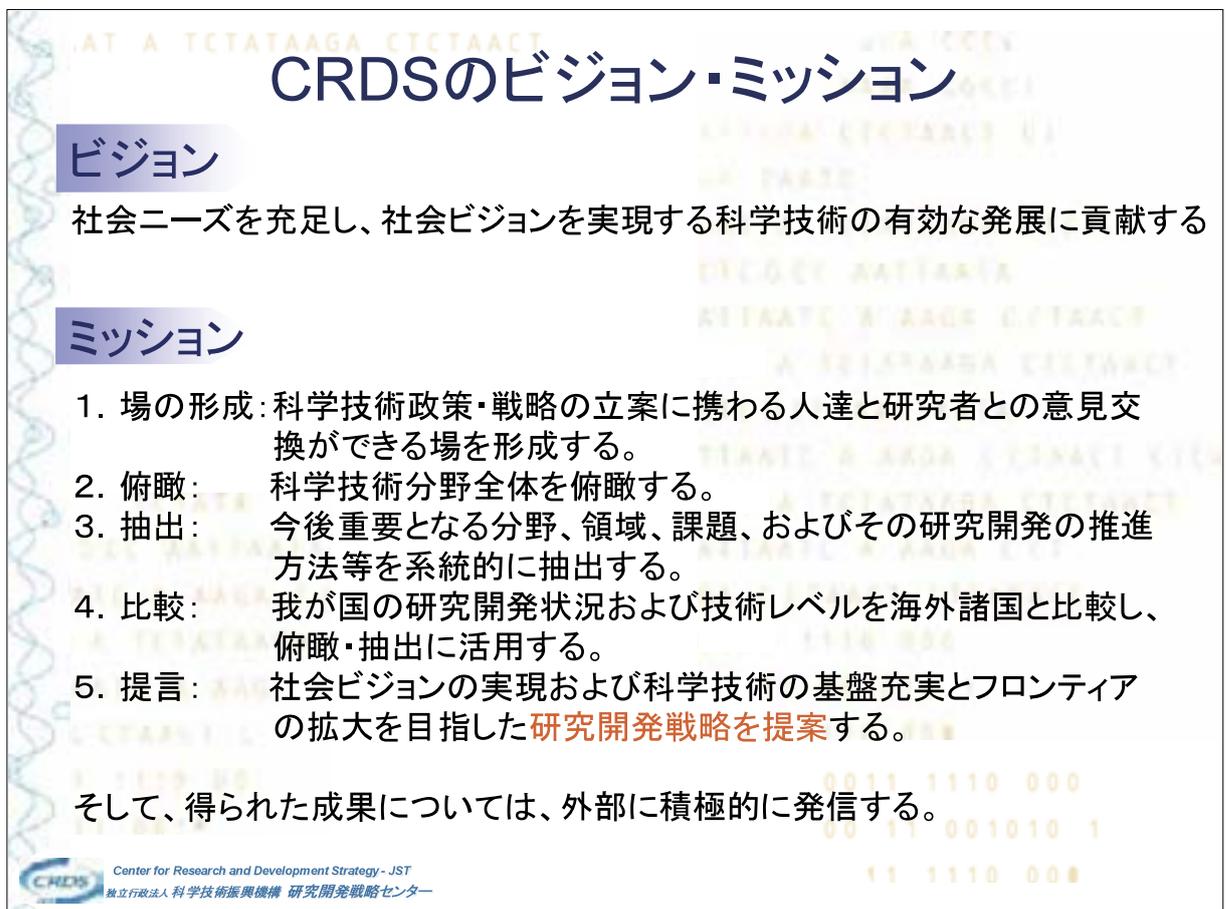
- ・ 遺伝子組換えに対する社会受容（パブリックアクセプタンス等）
- ・ 地球温暖化に対する適応（アダプテーション）や生物多様性に対する配慮
- ・ 中国、インド等の台頭への対応（経済成長に伴う食糧消費の増加、環境汚染の深刻化等）

## 2. ワorkshop詳細

### 2.1 主旨説明

#### 2.1.1 CRDS のミッション

研究開発戦略センター（CRDS）は、科学技術振興機構（JST）における研究戦略の企画・立案部門として平成 15 年に設立された。「社会ニーズを充足し、社会ビジョンを実現する科学技術の有効な発展に寄与する」というビジョンのもと、「政策関係者と研究者との意見交換の場の形成」、「科学技術分野全体の俯瞰」、「重要課題の抽出」、「研究開発・技術レベルの国際比較」、「研究開発戦略提言」をミッションとして活動している。



# CRDSのビジョン・ミッション

## ビジョン

社会ニーズを充足し、社会ビジョンを実現する科学技術の有効な発展に貢献する

## ミッション

1. 場の形成：科学技術政策・戦略の立案に携わる人達と研究者との意見交換ができる場を形成する。
2. 俯瞰：科学技術分野全体を俯瞰する。
3. 抽出：今後重要となる分野、領域、課題、およびその研究開発の推進方法等を系統的に抽出する。
4. 比較：我が国の研究開発状況および技術レベルを海外諸国と比較し、俯瞰・抽出に活用する。
5. 提言：社会ビジョンの実現および科学技術の基盤充実とフロンティアの拡大を目指した**研究開発戦略を提案する。**

そして、得られた成果については、外部に積極的に発信する。

 Center for Research and Development Strategy - JST  
独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター

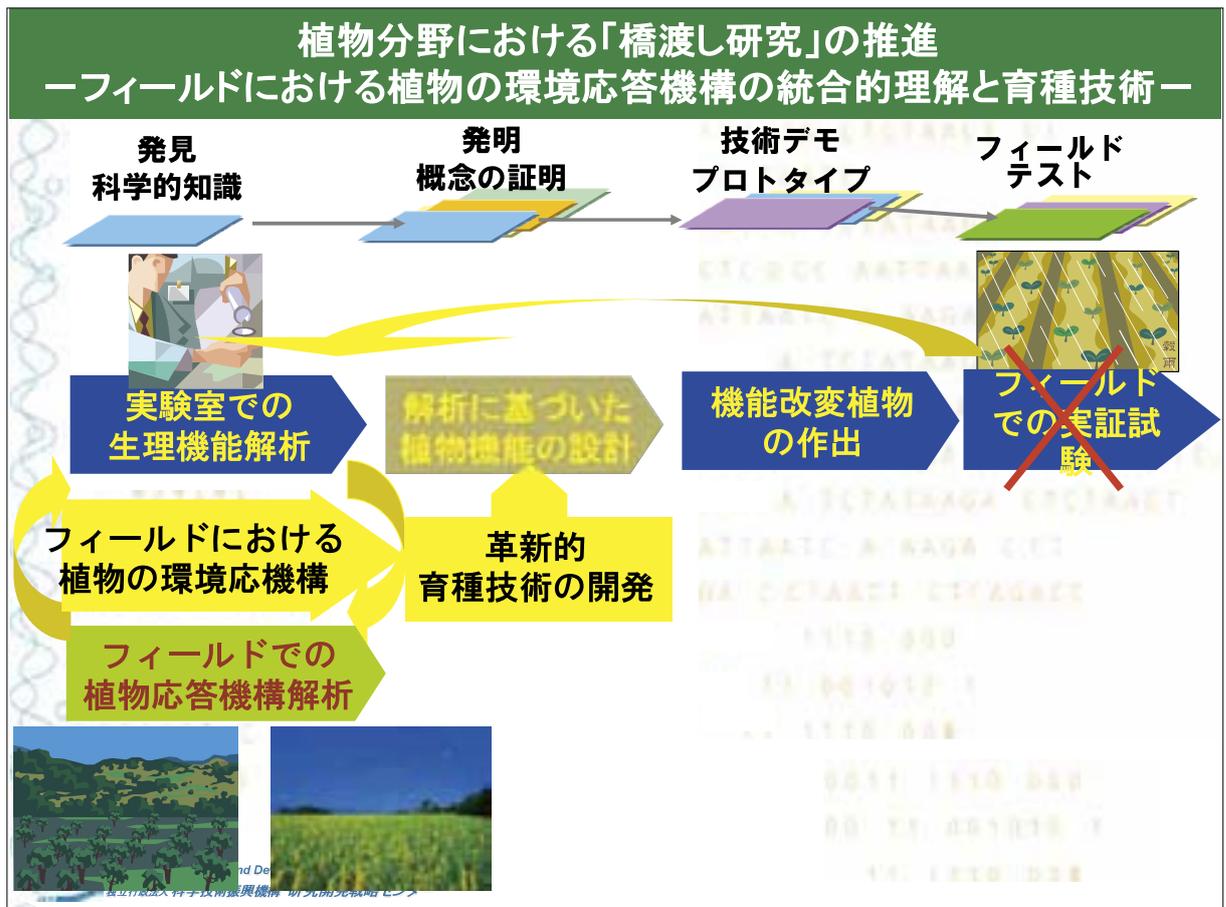
### 2.1.2 植物科学研究の現状と課題

これまでの植物生産研究は、生理機能を有する遺伝子の解析、解析結果に基づく植物機能の設計、機能改変した植物の作出、フィールドでの実証実験という出口までの流れに沿って研究開発が進められてきた。しかし、現在、実験室で発現した機能がフィールドで想定通りの機能を発揮しないという問題が生じている。すなわち、実験室での評価とフィールド環境での評価とに乖離がある。このような現象は、実験室とフィールドで環境の違いから生じており、特にフィールドでの応答機構の理解が不十分であると考えている。

この理解に向けたアプローチは2つ考えられる。

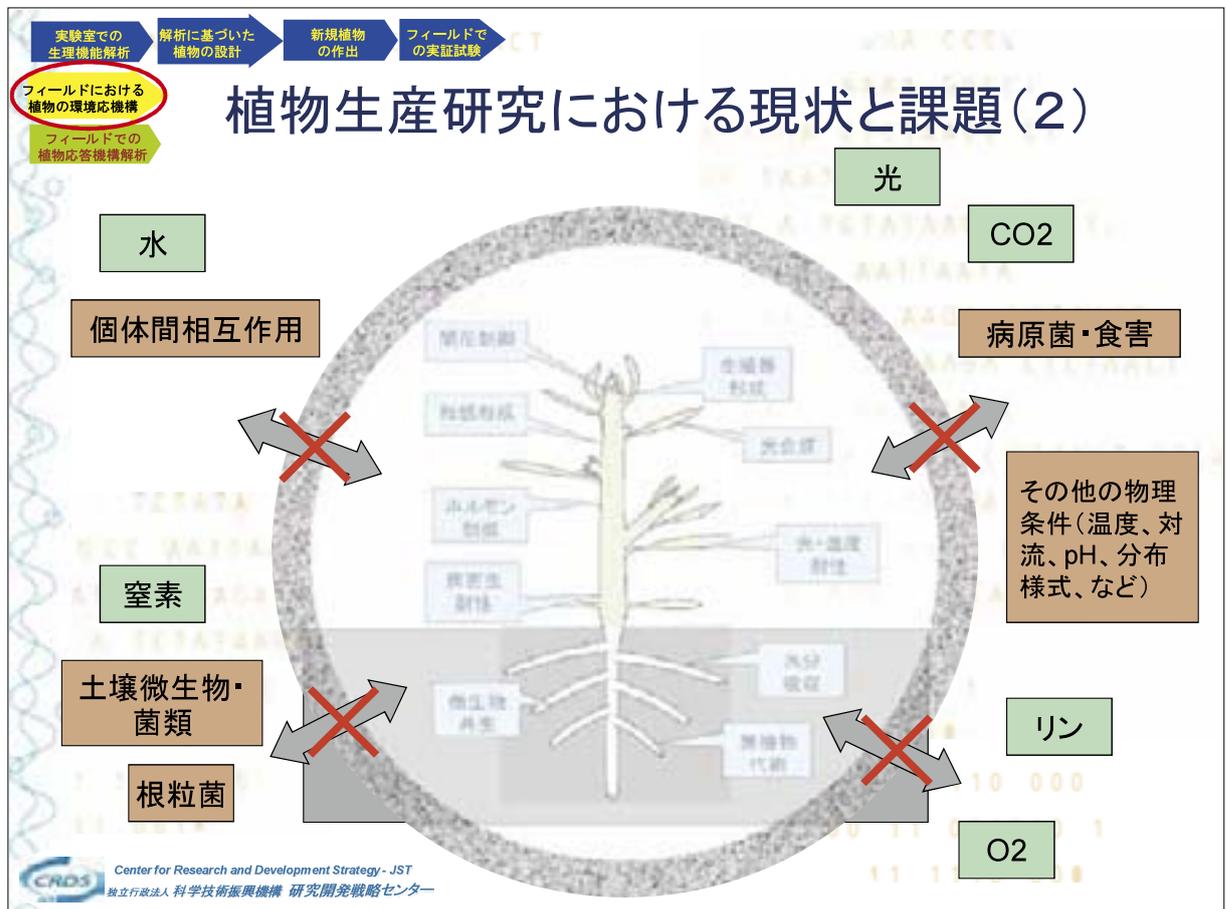
一点目は、マクロ的な生態学者の視点での応答機構を実験室中の研究者へとフィードバックし、これに基づいて統合的に環境応答機構を理解する方法である。そして、二点目は、フィールドで組換え植物の機能が意図した通りに発現しなかった場合に、その情報をまた実験室に返して、その挙動を解明する方法である。

さらに、植物の機能設計技術の開発も必要である。実験室とフィールドで得られた知見に基づいて育種や組換えの新しい技術を開発し、作出した植物を再びフィールドへと展開する。つまり、図の黄色の部分で円滑に回すことで、基礎的な知見を応用研究へと“橋渡し”する。



これまでの分子生理学者は、植物の機能解明に関する研究を実験室という特殊環境下で行ってきた。これらの研究に関しては、これまでに多くの成果を挙げており、著名な学術誌へも多数の論文が掲載されている。しかし、実際にその成果をフィールドに移すと意図したような結果が得られずこれが実用化への展開を遅延する要因となっていた。図に示したように、フィールドでの植物生長は、水や光また様々な他の生物との相互作用のもとに成立している。よって実験室での成果をフィールドで活かすためには、こういった相互作用や環境と植物の関係を包括的に理解する必要がある。

しかしながら、この灰色の部分には未だに分断されているところが非常に多い。実験室で分子生理を行っている研究者とフィールドで生態生理や育種を行っている研究者との間で、未だに溝があると考えている。なぜ、その溝がうまく埋められないのかということ、このワークショップで議論したいと考えている。



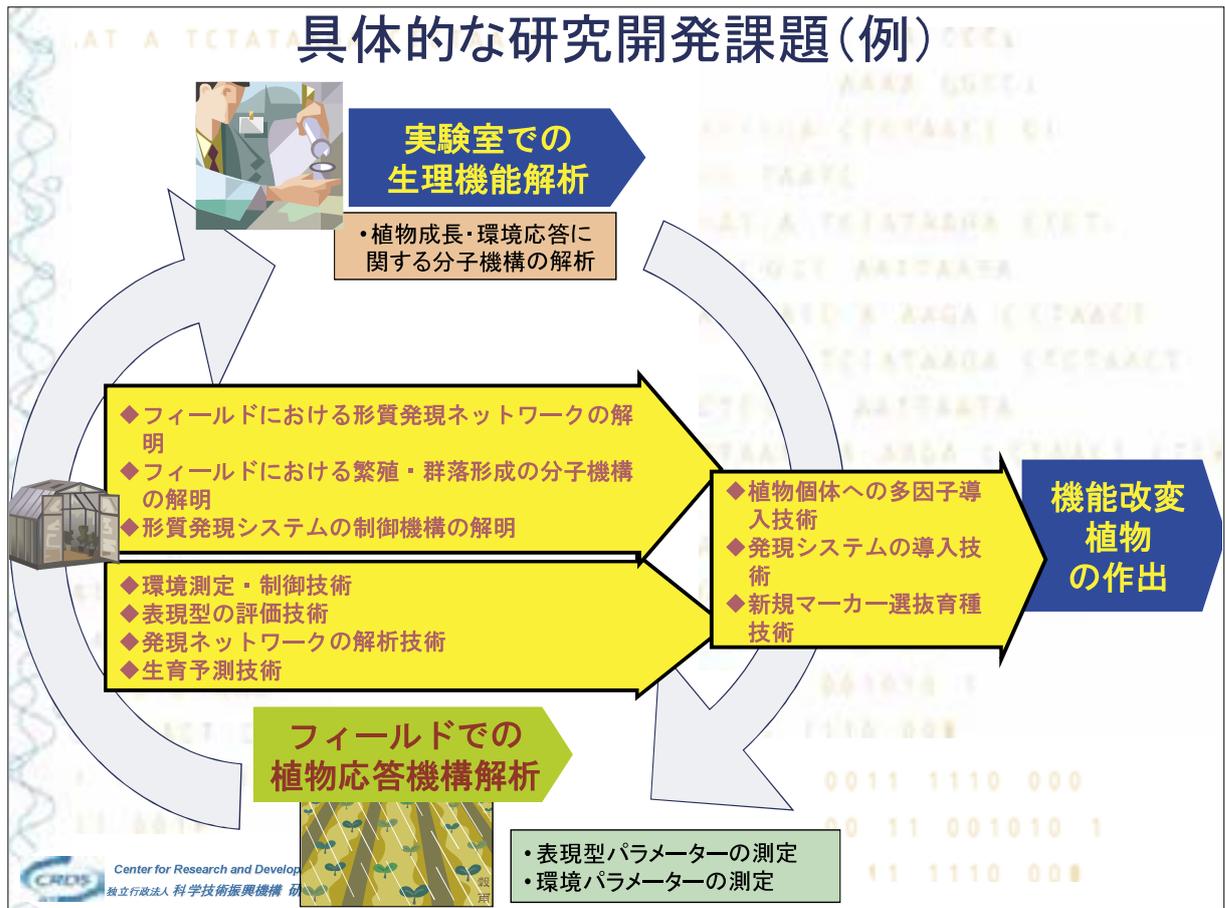
[1] ワークショップ概要

[2] ワークショップ詳細

[3] 考察および今後の戦略立案に向けた方針

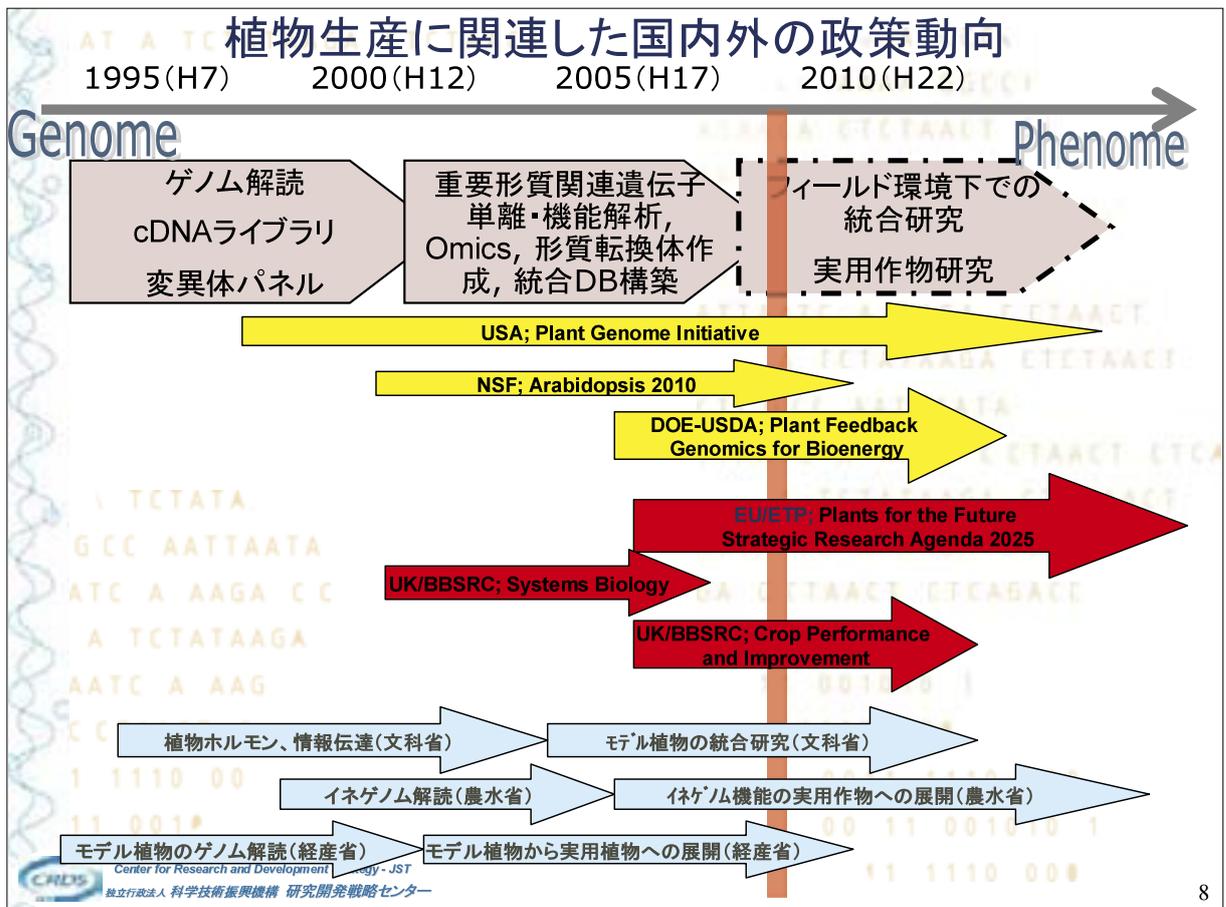
### 2.1.3 CRDS が提案する具体的な研究開発

CRDS で、インタビューなどを踏まえて抽出した具体的な研究開発課題例を示す。これまで、実験室では植物の成長や繁殖などの分子応答機構に関する情報、また、フィールドでは、表現型のパラメーターや環境パラメーターの測定というような情報が蓄積されている。それらをうまくフィードバックさせ、新たな理解に基づいた機能改変植物を作出する必要がある。具体的な課題としては植物個体の包括的な理解に関する研究開発、それらに資するような技術開発さらに、得られた情報に基づいて新しい作物を育種する技術という、3つの理解とテクノロジーを提案する。



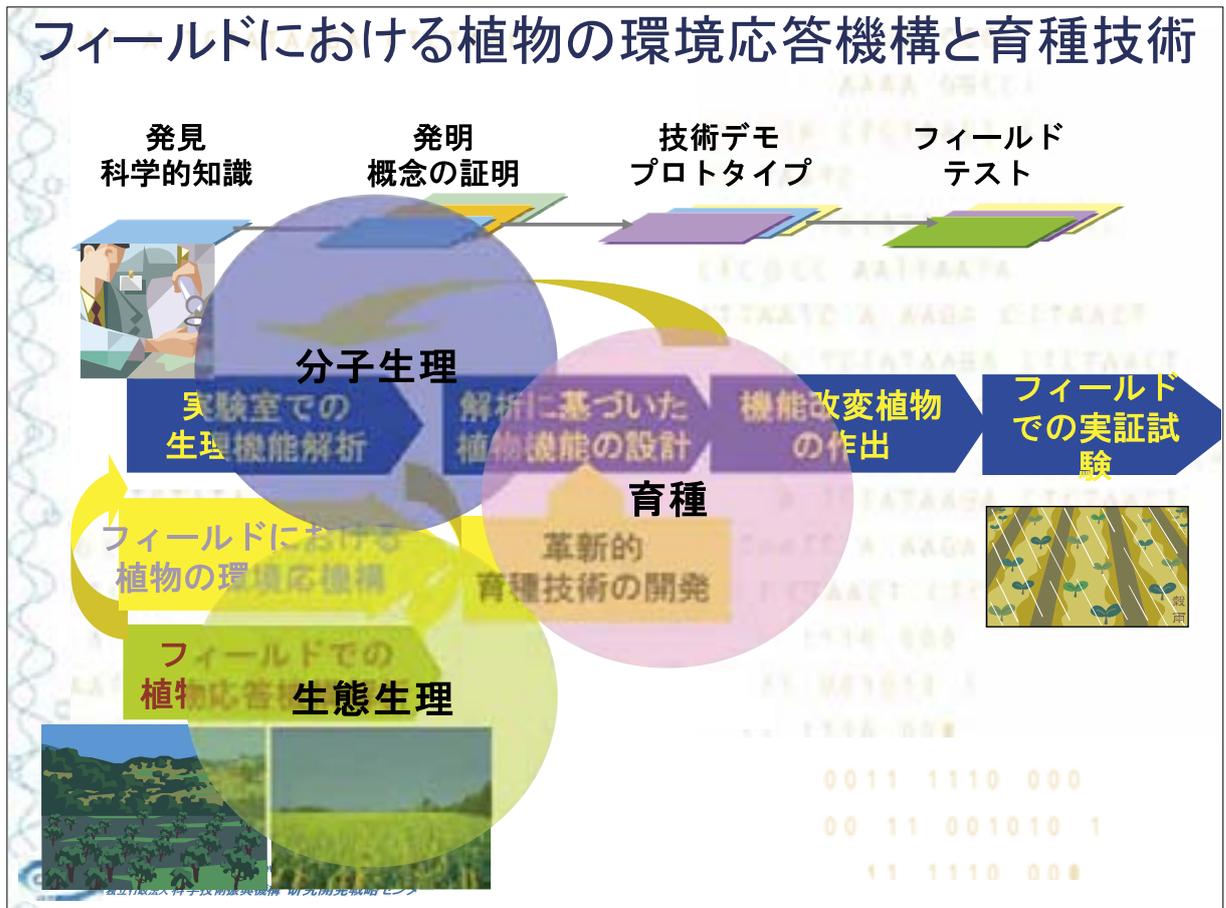
### 2.1.4 植物科学研究の動向

2009年、世界各国における研究動向は、ゲノムからフェノームという大きな流れの中にある。すなわち、1990年代の後半からゲノム解読が進み、cDNA等のライブラリーが構築された。その後およそ10年で遺伝子の機能、それからデータベースの統合がなされた。そして現在は、それらのモデル植物の成果をまさに実用作物へ繋げていく、またはフィールドでどのような応答機構をしているのかを調べていく研究開発が主流である。米国を例にあげると、Plant Genome Initiativeのもとに、初期はシロイヌナズナの遺伝子解析を行い、現在はDOEやUSDAで実用作物に対する取り組みが行われている。一方、ヨーロッパでも、BBSRCがシステムバイオロジーによる統合的な理解をある特定の系に基づいて行ってきており、現在はCrop Performance and Improvementという形で、実用作物を志向した研究開発を実施している。日本も現在同じフェーズにある。例えば文部科学省では、理化学研究所や大学などの研究機関において、様々なモデル植物の解析が進んでいる。また、農林水産省では、イネゲノムをベースに実用作物の展開が行われている。さらに、経済産業省では早くからモデル植物から実用植物へと展開する流れを構築している。ただ、実際には実験室とフィールドとを繋ぐ研究開発はほとんどなされていないのが現状である。今まさに、各国がこのような取り組みを行っている中で、JSTとしてもそこにフォーカスしたファンディングが必要ではないかと考えている。



### 2.1.5 推進方策

これまで、植物科学の分野では、実験室では分子生理学者、フィールドでは生態生理学者および育種学者といった研究者が、それぞれ独立して研究を行ってきた。今後、植物機能の統合的な理解と新しい育種等の技術開発を進めていく上で、これらの分野の研究者を結集させて研究を行うべきなのか、それとも、従来通りそれぞれ独立した形で個々の重大な課題に取り組むべきなのか検討の必要があると考えている。また、基礎と応用間に今どのような問題があり、それらを繋げるための研究開発、技術開発についても本ワークショップの中で明らかにしていきたい。



## 2.2 セッション 1. 「橋渡し」に関する課題の抽出

### 2.2.1 「フィールドにおける植物の環境応答と育種技術」への提言

篠崎 一雄（理化学研究所 植物科学研究センター）

シロイヌナズナとイネの日本における植物研究はトップクラスであり、ゲノム研究も含めて非常にレベルが高い。しかし、実際、世界的にバイオテクノロジーの応用への流れが強い傾向にある中、日本ではうまくトランスレーションされていないことが一つの大きな問題として挙げられる。

シロイヌナズナに関しては、基礎研究の成果を応用展開するためのフィールドでの評価が課題である。2010年の国際的なプロジェクトは、全遺伝子の機能を解析するためのリソースの整備、データベース構築などを行う、システムバイオロジーの方向に進んでいる。実際に色々なシーケンサーの技術が近年急速に進歩したことで、生態環境での多様性のことも含めて基礎研究で明らかにされた様々な遺伝子をどう応用するか、ということがこれからの10年の一つの大きな流れになるだろう。

一方、イネ研究においては、農水省のイネゲノム研究が中心となり、様々なリソースも含めて研究が進展している。重要なQTL遺伝子も報告され、世界的に競争が激化している。特に日本、中国、韓国においては、リソース整備、シーケンスにおいても競争関係にあり、様々な育種形質にかかわる制御遺伝子などが明らかにされてきている。こういった制御に関わるような遺伝子を今後どう育種に展開していくのかが問題となる。

上記二つに共通する課題としては、GM作物の開発と商業栽培（実際の圃場で作物を植える段階）がある。コールド・スプリング・ハーバー研究所のアジアのコンファレンスセンターが開所し、遺伝子組換え作物をアジアでどう展開するかということが議論された。この中で、特に注目されているのは、BTのイネを中国で商業栽培するかどうかである。中国が認めれば、インドでも進み、また、現在の遺伝子組換えは、一つの遺伝子だけではなく、多重な遺伝子を組み合わせて育種するという方向に変化してきていることなどから、今後大きな変化が起こることが予想される。日本においては、サントリーが青いバラを今年11月3日に国内で商業栽培したものを発売した。これは初めての遺伝子組換え植物であり、GM作物の研究推進、国民の理解という点において、画期的な成果といえる。

## 「フィールドにおける植物の環境応答と育種技術」への提言

理化学研究所、植物科学研究センター 篠崎一雄

### 1. シロイヌナズナ、イネでの環境応答研究と生長制御に関する分子生物学、ゲノム機能研究

- ・世界トップクラスの日本の基礎植物科学、イネ遺伝学
- ・モデル植物のシロイヌナズナ、イネゲノム研究、ゲノム機能研究での国際的な成果と貢献（シロイヌナズナで28%、イネゲノムで55%のゲノムシーケンス、完全長cDNA、変異体リソースの整備と利用）

ゲノム育種、遺伝子組換え技術の進歩、基本特許の期限切れによる利用の拡大、GM作物、バイオリファイナリー作物の開発へ向けて世界の植物バイオテクノロジーは急速に進化

国際的レベルの植物科学の成果が、作物の育種研究やバイオテクノロジーへの橋渡しがなぜ進まないのか。その解決策は？

### 3. イネ研究のアジアでの急進展

- ・イネゲノム精密解読、マーカー整備、完全長cDNA、変異体リソースの整備などで研究が加速
- ・作物の育種形質に関するQTL解析とゲノム情報を利用したQTL遺伝子の同定
- ・イネの栽培系統、野生系統の研究への発展と新規有用形質遺伝子の探索

イネ研究は、圃場での有用形質の探索へ向けて研究が発展。国際的大競争(日本、中国、韓国、と欧米)

従来の育種で選ばれた制御遺伝子(転写因子、ホルモン代謝、ホルモン応答など)をどう利用するか。

### 2. シロイヌナズナ研究の新たな進展

- ・2010プロジェクトによるリソースの整備、データベース、解析方法の充実などにより、システムバイオロジーなどへ新たな展開
- ・植物の生長向上、バイオマス生産、環境ストレス耐性、病害虫耐性に関する遺伝子ネットワークに関する研究の進展
- ・生態変異のリソースを用いた環境応答と多様性に関する研究
- ・育種、バイオテクノロジーへの応用につながる遺伝子の探索の進展と作物への応用展開が活発化

シロイヌナズナでの遺伝子研究の成果を応用展開するためには、遺伝子組換え体のフィールドでの評価が必須

次世代シーケンサー、多機能マイクロアレイを用いた多様性に関する研究の新展開、および環境での評価への展開

### 4. 急速に進む作物、樹木のゲノムシーケンス解析、およびGM作物の開発と商業栽培の動き

- ・高速シーケンサーによるゲノム解析  
アメリカ(JGI)、中国(BGI)での解析の加速化  
Complete Genomics社: ヒトゲノムシーケンスが40万円
- ・モンサントの戦略、その成功と独走、及び穀物メジャーの戦略
- ・農業耐性ダイズ、BT-トウモロコシ、BT-ワタの普及と、BT-ナス(インド)の商業栽培へ
- ・BT-イネ圃場試験の成果と商業栽培利用への動き(中国)
- ・日本では青いパラが国内での商業栽培により11月3日に発売
- ・日本政府はGM作物の研究推進と国民理解の推進

提言に関して、一つは、モデル植物での環境応答研究とフィールドでの環境応答研究のギャップを我が国においてどう埋めるかである。これは、温室中心のモデル植物の基礎的な遺伝子研究をフィールド中心の生理研究に結びつける研究が必要ということと、実験圃場へのアクセスを可能にするような横断的な研究プロジェクトをCRESTのようなもので立てていくことが重要である。

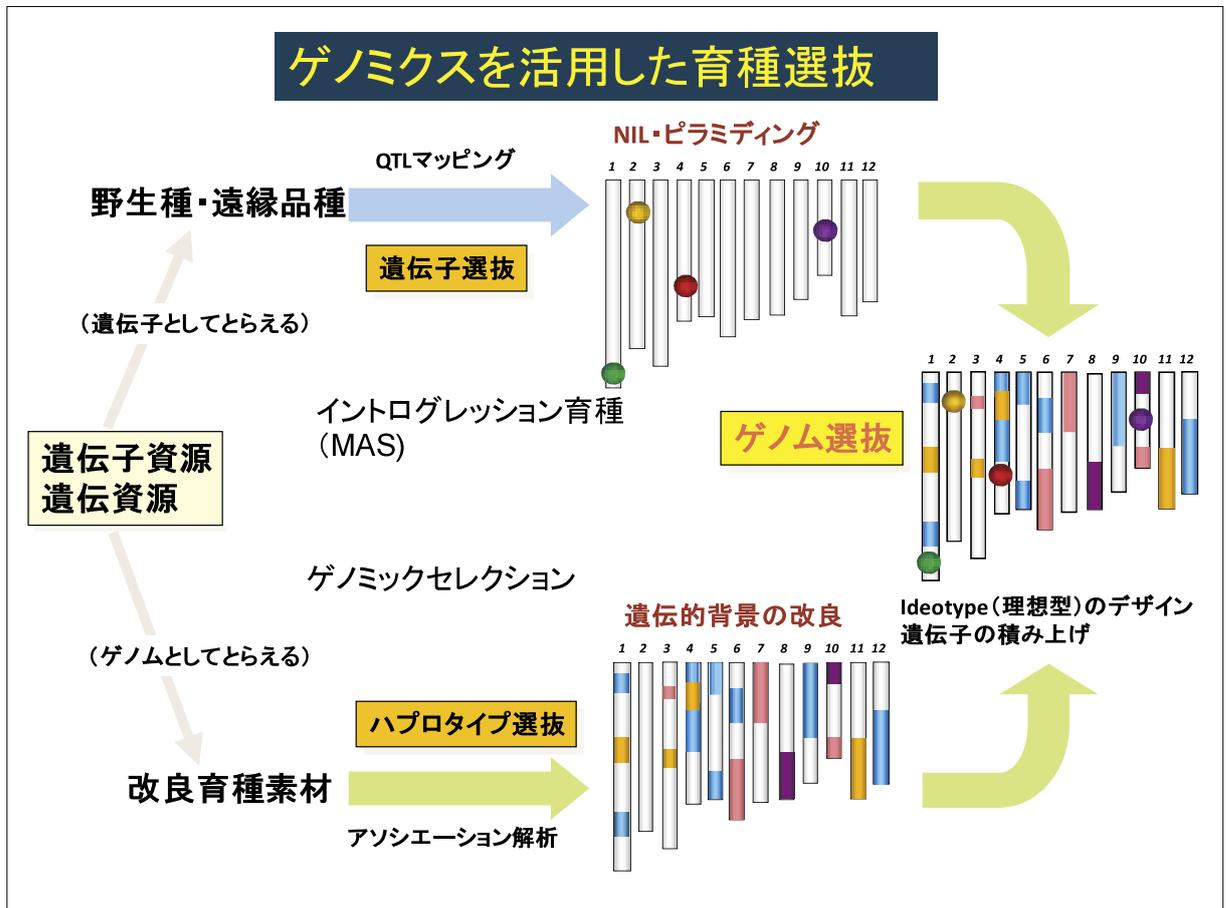
基礎研究と実際の圃場を結びつけるようなファンディングを進めることで、基礎的な研究者がフィールドでの研究に関心を持ち、フィールドでの研究者の情報が基礎研究者へとフィードバックさせることが可能となる。それによって、研究に新たな進展が見込めるのではないかと考える。これを契機として、基礎分野とフィールドの研究者が協力して実行できるようなプロジェクトを様々なレベルで発案していくことが必要だ。

もう一つは、フィールド研究拠点の整備の重要性である。例えば普通のシロイヌナズナの研究者はフィールドに非常にアクセスしにくい。そのようなものを可能にする拠点整備と連携プログラムが必要である。ゲノム解析が急速に進んでいる中で、情報解析の拠点も当然必要となろう。

最後に、日本の研究、特に医学系でも基礎医学からのいわゆるトランスレーショナルリサーチという非常に大きな課題について述べたい。これは、やはり人材の育成や評価を通じて、そのような応用展開に関心を持ち、これを進める人材をどう育てるかを考えていく必要があると考えている。

### 2.2.2 フィールドにおける植物の環境応答と育種技術

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)

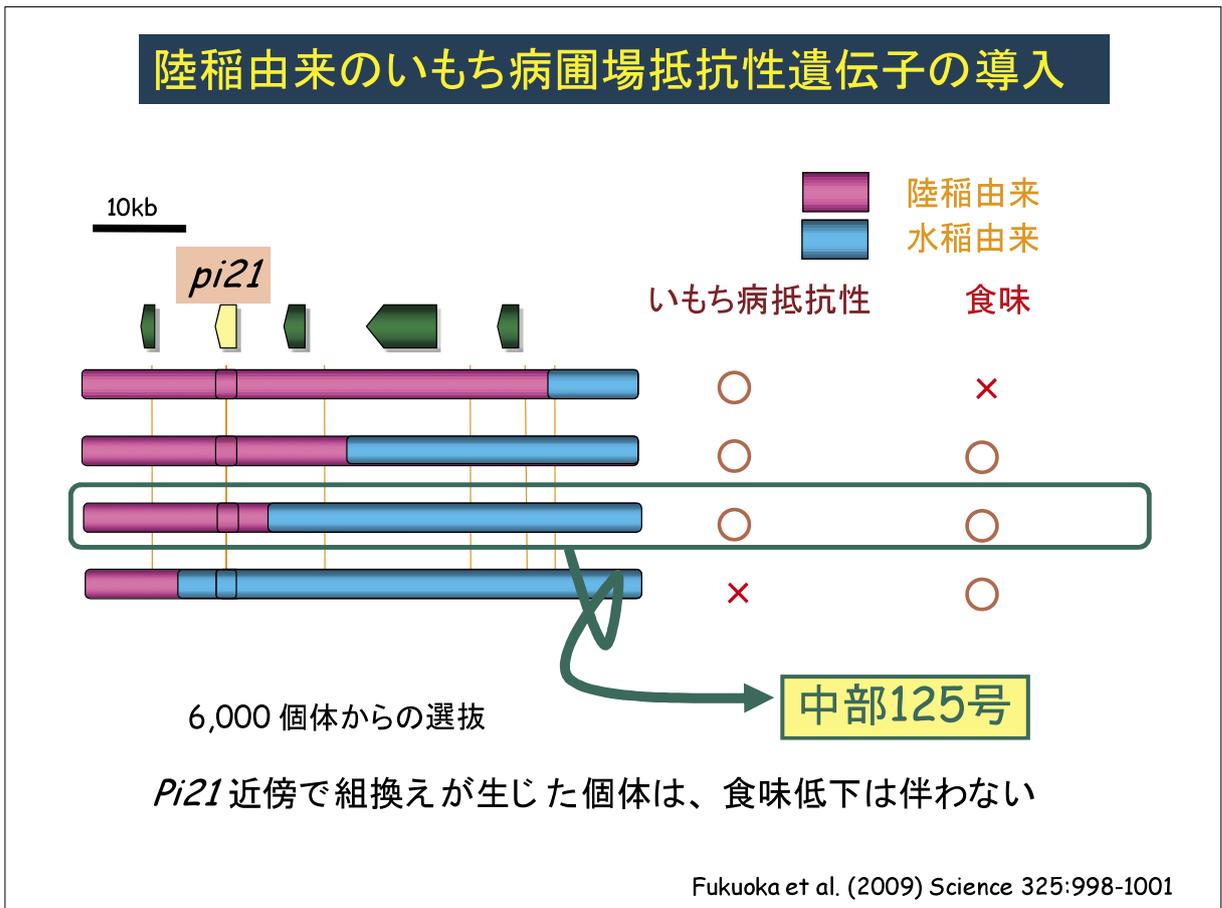


ゲノム配列解読が進み、ゲノミクス自体が品種育成に大きく貢献するようになったのは事実で、特定の抵抗性遺伝子などを有用品種に導入するマーカー選抜技術はもう現場で役に立っている。しかし、現場では収量に代表される様なもっと複雑な形質を実際には選抜しているが、そのような複雑形質にはまだまだゲノミクスを背景とした基礎研究が追いつかない状態であり、必ずしもマーカー選抜技術が選抜に役に立っているとはいえない。そのような点で、図の上の部分（イントログレッション育種）は確立されているが、下の部分、要するにゲノム全体を見ながら、どういう遺伝子の組み合わせがいいのかということデザインして新しい品種づくりに組み込んでいくゲノミックセレクションの部分はまだ取り組まれていない部分であり、今後重要になる部分である。そのためにも、現場と基礎研究の密接な連携は必要である。

[1] ワークショップ概要

[2] ワークショップ詳細

[3] 考察および今後の戦略立案に向けた方針



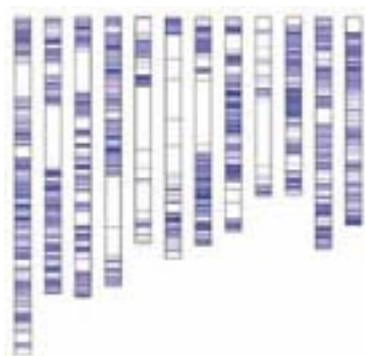
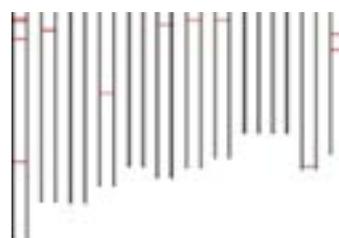
例えばゲノムマーカー選抜は、いもち病に対する病害抵抗性遺伝子を選抜するときに、その遺伝子の近くに存在する望ましくない遺伝子を削り込むような形で役立っている。その結果、イネ育種の長い歴史の中で、食味低下を引き起こす遺伝子の連鎖により、どうしても利用できなかった陸稲の持ついもち病抵抗性遺伝子をマーカー選抜によって取り込んだ新しい品種ができたことは、今年の成果である。

## 日本型品種に用できるSNPタイピングアレイ

現在、4000以上のSNP候補について検証中

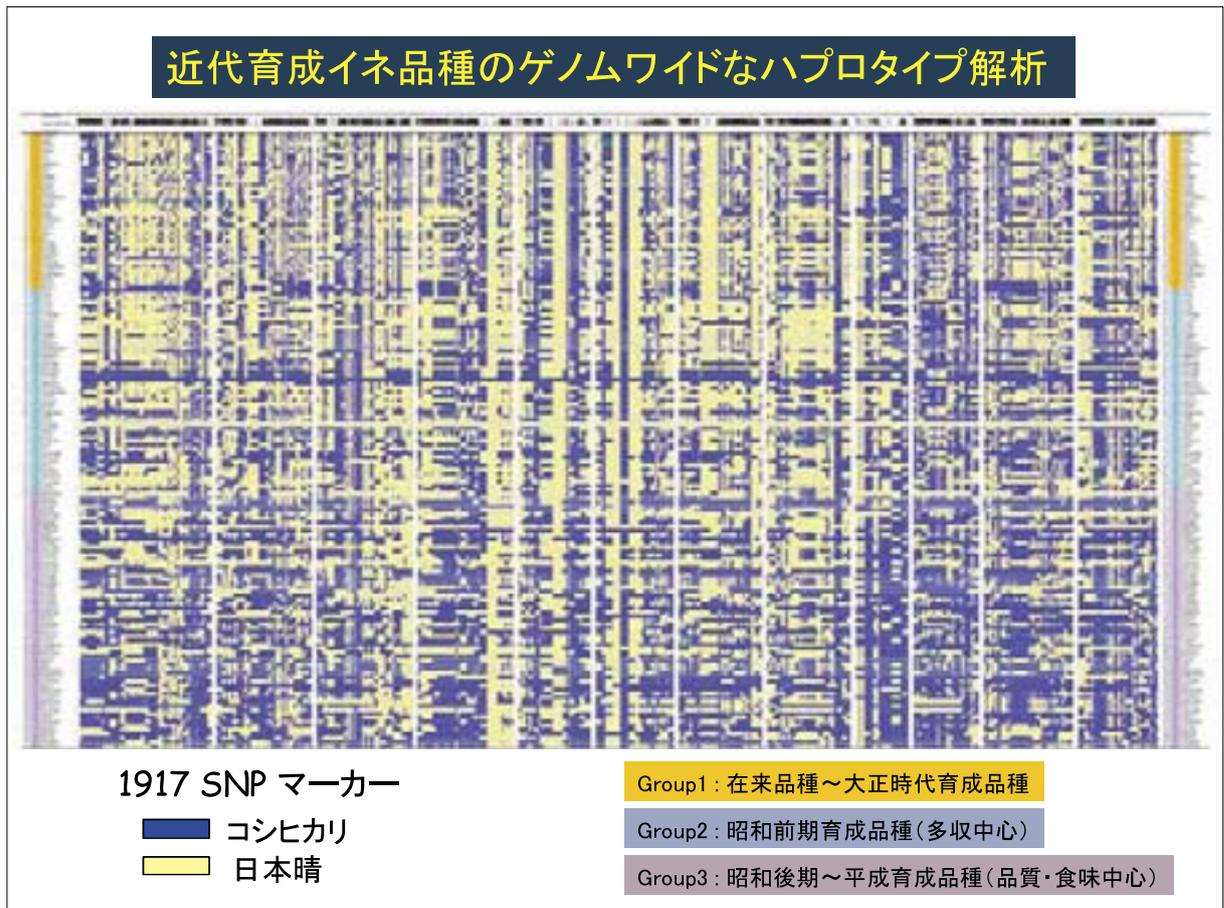


日本品種のSNPアレイ(1917種)



ゲノムワイドな大規模なSNP解析が可能になった

また、次世代シーケンサー技術の進展と、そこから得られる情報をゲノムのSNPsタイピングに応用する形で、日本の品種のSNPアレイのようなものが簡単にデザインできるようになり、ゲノムワイドに遺伝子型がどう組み合わせられているか、親品種からの染色体がどのように組み合わせられているかということが簡単にわかる時代になってきた。



先の図は、日本で育成されたイネイネの 151 品種について、古い品種から新しい品種までを縦に並べたものである。染色体の各領域がコシヒカリ型か日本晴型かということで色分けしている。このような解析によって、新しい品種は古い品種のどの部分の染色体を引き継いだのかということが一目瞭然にわかるようになってきた。ゲノム解析技術がこの数年の間に急速に進展してきたことは、現場と基礎研究の場の連携において非常に重要なポイントになる。このような新技術を、いかに現場に反映させるかが、“融合”を考えたときに一つの大きな課題になるからだ。

形質評価が難しかったり手間がかかったりするような形質の選抜は、ゲノム全体を見ながら、遺伝子型をデザインして有望系統を作出する。そして、遺伝子型をベースにつくり出した品種がフィールドでどのようなパフォーマンスを示すかを検証し、その結果を参考にしてさらにもう一回遺伝子型のデザインに戻るといった現場とラボのシャトル育種による品種改良も実現すると期待される。

現実的な問題として、育種は非常に末端の部分で物を作っているため、物ができるまでにトライ・アンド・エラーのような基礎的な部分を組み込むのは困難である。要するに、予算や目標などに関して、トライ・アンド・エラーを許容できるような余力のある組織作り、仕組み作りが重要であり、さらに、基礎研究を行っている研究室が育種現場の問題を直視しながら研究していくことも要求される。

新しい技術を使った新育種選抜が、環境に応答する特定の形質を育種技術と融合させる形で“橋渡し”に繋がっていくのではないかと。このような次世代育種はイネ以外にも世界中でゲノム情報が続々と公開されているので、様々な作物に応用できると考えている。

### これからの課題

品種改良の現場で問題となる形質は、現在解析が進んでいる形質より、さらに複雑であり、ゲノム情報を活用するために基礎情報は十分ではない。

形質評価が難しい(収量、高温耐性など環境によってその評価が大きくふれる評価の手間が多大)

ゲノムワイドな多型解析手法が確立しつつあることから、より複雑な形質の育種選抜におけるゲノミックスの融合は十分可能

これまで遺伝子型は選抜指標にならなかったが、今後は遺伝子型による選抜も可能になると予想される(ハプロタイプの違い(遺伝子型)と形質の違いを関連づけるとともに、それらの情報を選抜指標として活用)。

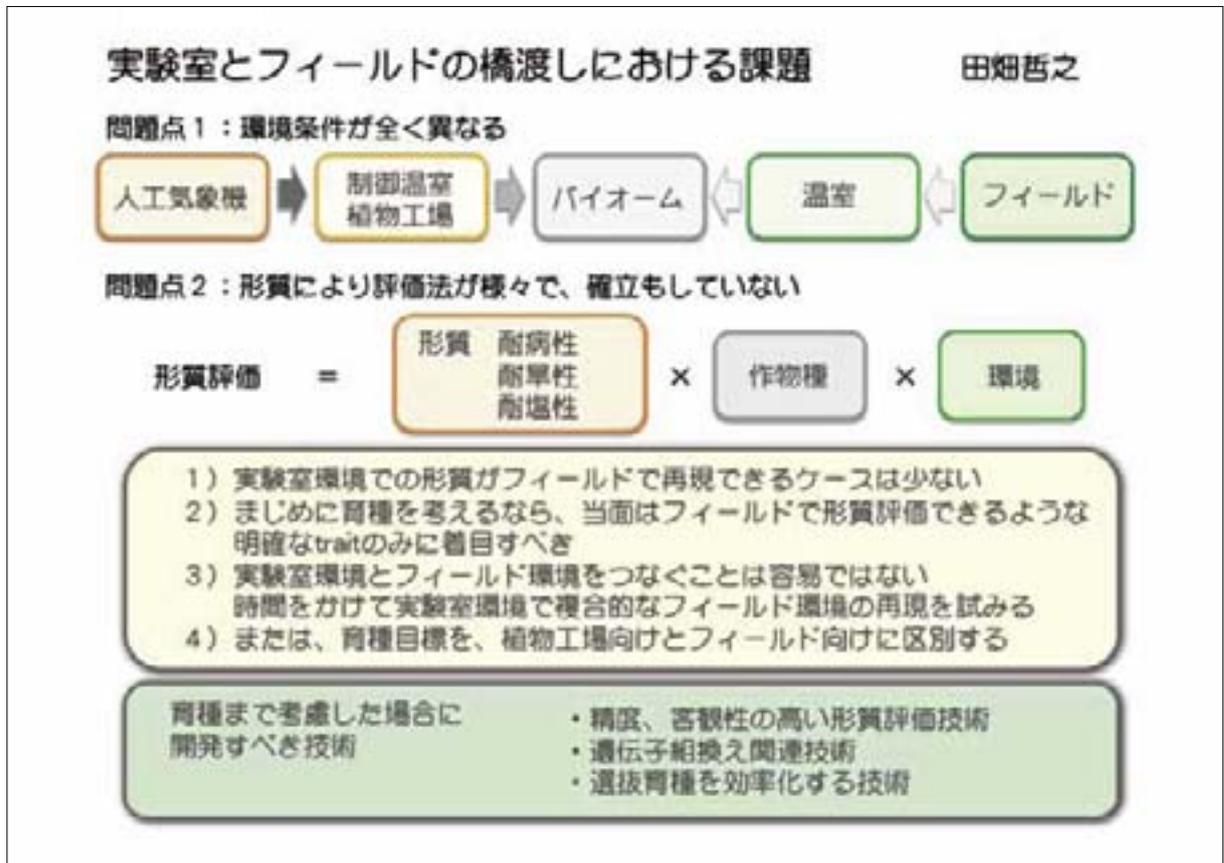
育種選抜にも、有用形質の遺伝解析(基礎研究)から出てくる有用遺伝子(ハプロタイプ)情報をもとに理想型のデザインとその作出、仮説検証、再デザインのサイクルを持ち込む良い機会。



育種現場と基礎研究のラボが共通の目標で取り組む必要

### 2.2.3 実験室とフィールドの橋渡しにおける課題

田畑 哲之 (かずさ DNA 研究所)



一つ目の問題点は、実験室とフィールドを繋ぐことは、環境条件が全く違うので大変困難なことにある。実験室では、通常、人工気象機を使うことが典型であり、せいぜい、制御温室、あるいは生産の現場では植物工場が非常にコントロールされた環境条件として挙げられる。さらに、人工環境、バイオームのようなものまで展開される。一方、フィールドにおいては、せいぜい温室まで持っていき、この2つの間でも実際形質評価が変化するため、どう繋がるのかよく解らない。実際に、モデル植物を使って人工気象機を用いて研究している形質評価を温室で比較した論文も幾つかあるが、現状では非常に困難である。

二つ目の問題点は、形質評価法の問題である。形質評価は、主に遺伝子型と環境との関係で成立する。実際に様々な作物があることや形質も様々であるため、評価法を工夫しなければならない。さらに環境要因が加わると、正確な形質データが得られず、比較ができない。

また、研究者の興味の違いにも問題がある。基本的に、植物生理学者は、最終的に物を作ることに興味がなく、それを意識した研究を行っていない。それぞれの立場で発言するだけで、結局はうまくいかない。そのようなことに意識を持っている人を見つけること、あるいは、そのような人を養成することが非常に重要である。

以上から、実験室環境での形質がフィールドで再現できるケースは、まずない。フィールドで形質評価できるような、はっきりしたトレイトのみで育種を行うべきだ。また、数

年のプロジェクトで実験室環境とフィールド環境を繋ぐことは不可能である。そのため、もっと長期的に、複合的なフィールド環境の再現をする技術を開発することが先ず必要である。あるいは、短期で成果を得るために、育種目標を植物工場で正確な評価を得られるようにすること、もう一つは、フィールドで物ができるような形質にすることである。

最後に、育種まで考慮した場合、開発すべき技術を二点挙げる。一つは、画像解析や質量分析などを用いた精度と客観性共に高い形質評価技術である。ここでは、耐病性評価など、客観的な評価が困難なものをいかに評価可能にするかが重要となる。もう一つは物をつくるための遺伝子組換え技術とそれに双方向的な関係にある選抜育種をいかに効率化するかという技術である。

## 2.2.4 「フィールド依存的な遺伝子機能の解析とその応用」

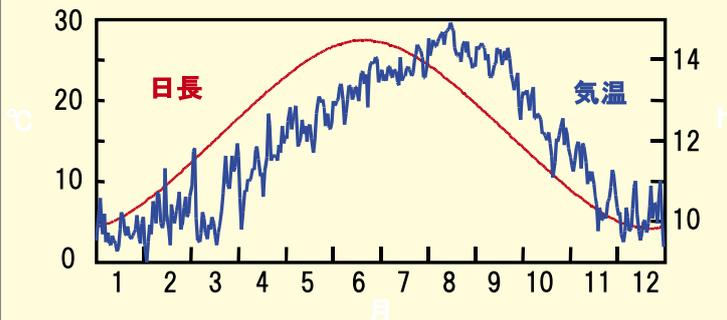
工藤 洋 (京都大学 生態学研究センター)

研究の資源として、野生植物とそれが維持されている自然生育地の重要性を強調したい。例えば、我々が扱っているシロイヌナズナに近縁なアブラナ科の野生種においても多様な生活史がみられ、自動自家受粉する自殖性のものや昆虫により花粉が運ばれる外交配性のものがある。また、高山の低温環境、生産性の低い林床環境、水位変動にさらされる水辺環境、光をめぐる競合が厳しい群落環境など、様々な環境への適応がみられる。

### 目標: 現在・将来の環境変動に対する自然・農業生態系の応答を予測できる植物科学を発展させる

#### フィールド(コンテキスト)とは

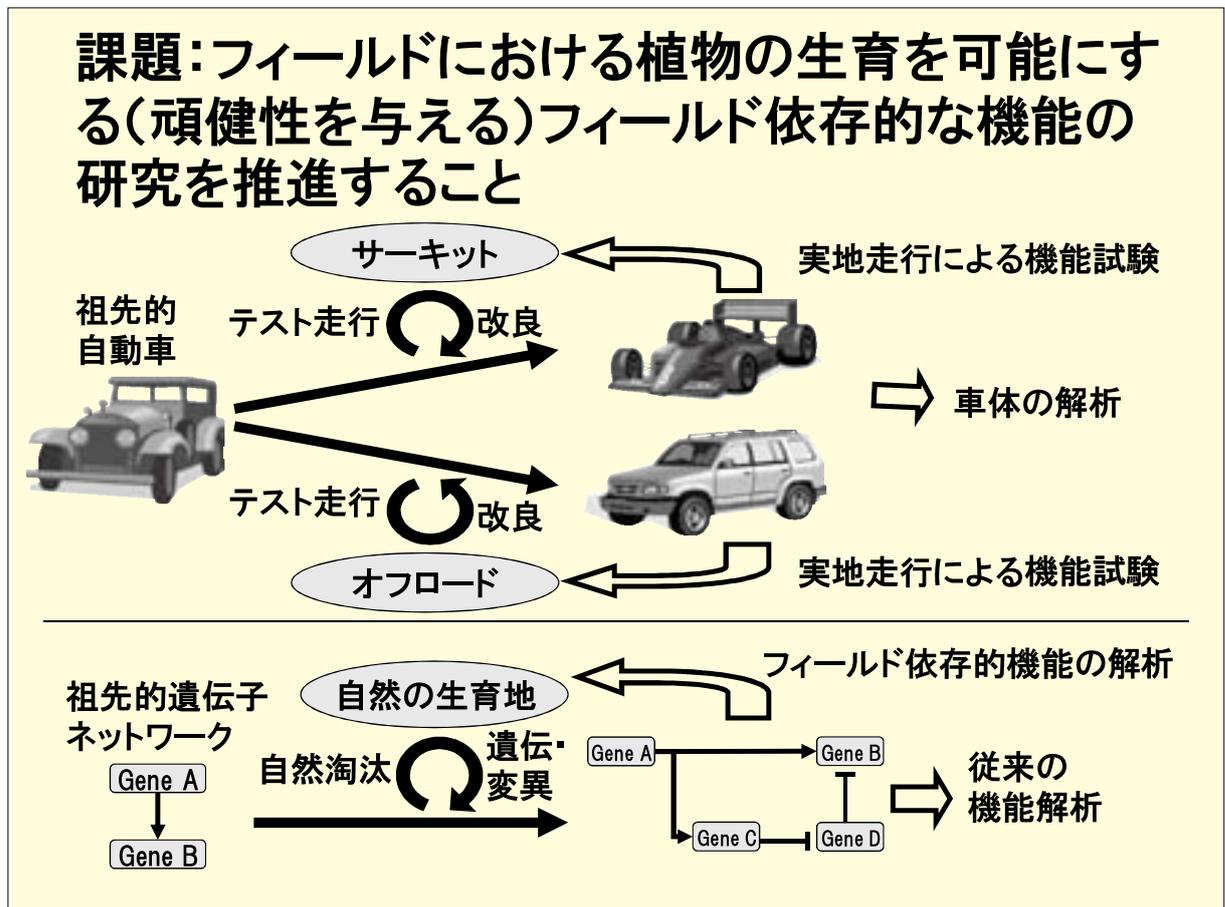
- = 自然生育地の環境、圃場環境
- 複雑な環境変動と群集の中での生育



- 植物の機能を考える上で重要な視点は、それらが特有のフィールド環境において役割を果たさねばならないという点である

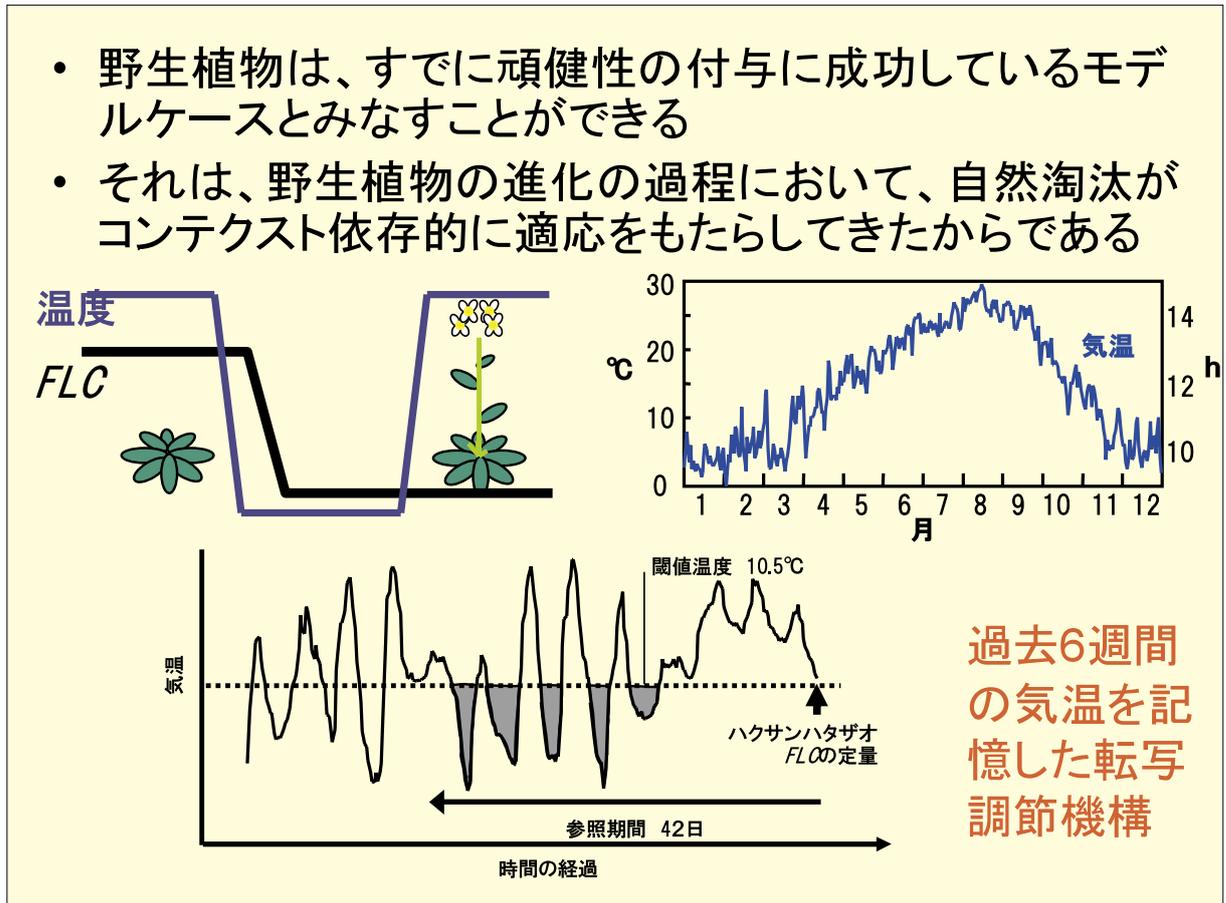
植物科学の目標が、現在・将来の環境変動に対する自然、農業生態系の応答を予測できるような科学として発展することであるならば、植物が実際に生育するフィールドというのを念頭に考えないといけない。フィールドというのは、植物の機能を評価する上での重要なコンテキスト(文脈・土俵)であり、それは自然生育地の環境であり、農作物なら圃場環境である。フィールドの最大の特徴は複雑な環境変動にある。例えば、日長と温度という2つの季節応答の代表的要因を考えると、日長が暦に従って規則的に変化するのに対して、温度は日変動とか週変動とかを伴う非常に複雑な変動を示す。この2つを見ただけでも、要素として全然違う特性を持っている。それだけではなく、植物同士の競争や、昆虫の食害などの生物的環境にもさらされている。このように植物がおかれている状況は、実験室で考える状況と比べると随分複雑である。植物の機能を考える上で、それがフィールド環境において役割を果たさなければならないという視点が重要なのは、このためである。

課題として考えられるのが、フィールドにおいて植物の生育を可能にしている機能とは何かということである。つまり、複雑な環境下でも機能しうる頑健性が重要であり、その頑健性を与えるフィールド依存的な機能を明らかにする研究を推進する必要がある。喩えとして、自動車の改良の過程を考えてみると、それがレーシングカーなら、テスト走行と改良を繰り返して、サーキットで走るような車にする。その過程においては必ず車体の解析だけでなく、実地走行による機能試験が行われている。オフロード車はがたがたの道で走るようになっており、これらを互いに場所を入れかえたら機能しない。それと同じことが生物の遺伝子にもいえる。祖先的遺伝子ネットワークが変異と淘汰とを繰り返して、今のものができ上がってきている。そこで、実地走行試験に当たるような研究が必要であり、フィールドに戻ってやって、フィールド依存的な機能の解析をすることで、どういった仕組みで頑健性が付与されているのかを明らかにすることが求められる。

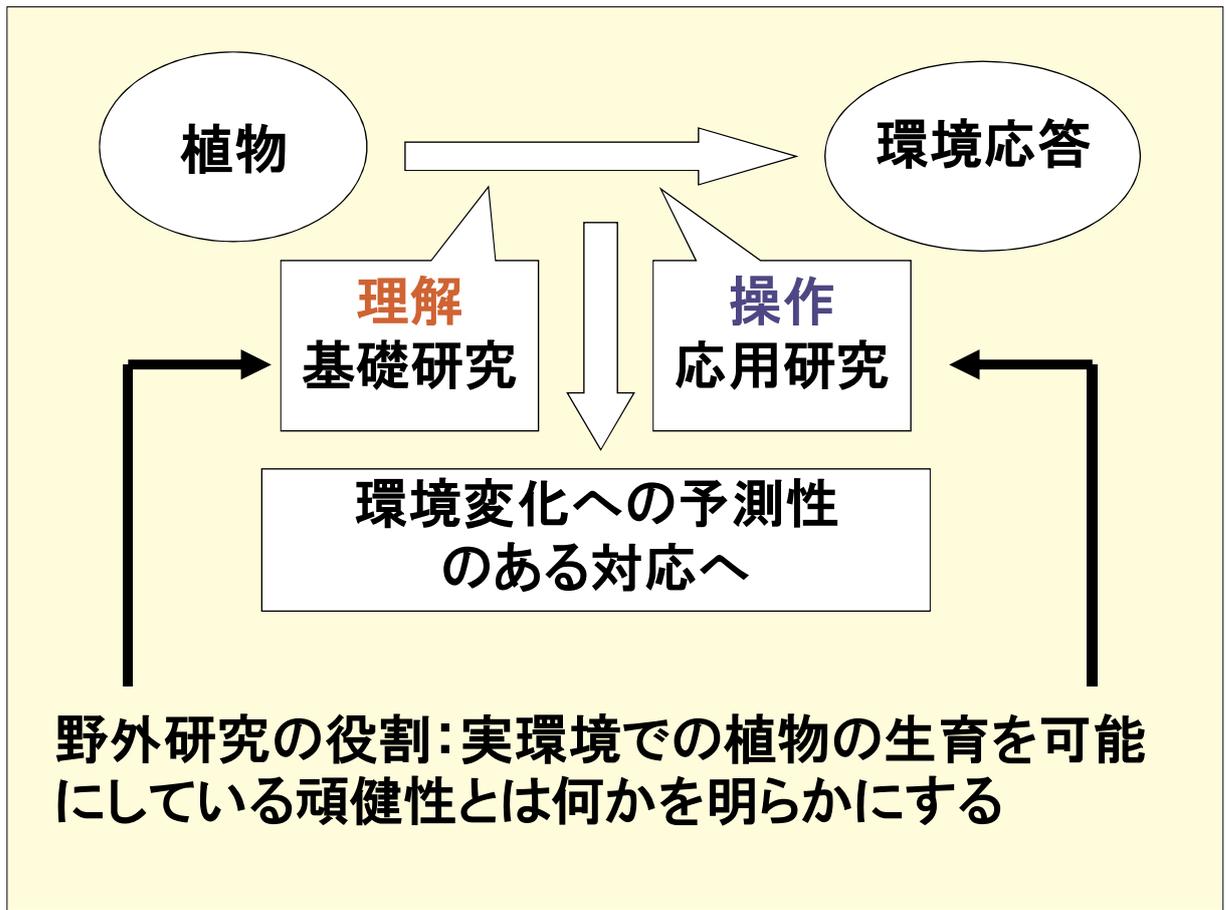


野生植物というのは既に頑健性の付与に成功しているモデルケースとみなすことができる。なぜならば、進化の過程において、自然淘汰がフィールド依存的に適応をもたらしてきているからだ。だから、自然に維持されている野生植物とその生育環境を研究することにより、どういう仕組みをもってフィールド環境で植物が頑健に生存を確保しているのかが明らかになる。そこで得られた情報は、作物に頑健性を付与するための基礎知識となる。

一例として、シロイヌナズナに *FLC* という遺伝子がある。これは温度が低くなると転写が低下して、それによって開花が起こるというもので、温度依存的に開花時期を決定している。その遺伝子が、野外の複雑に変動する気温の中で一体どのように頑健に機能するかを明らかにしようとするれば、野外に出て測定するという、実地試験が必要である。



実際に、*FLC* の転写量を多年生のシロイヌナズナ属植物を対象に2年間にわたって野外で測定した結果、この遺伝子が過去6週間の気温を記憶するように転写調節が行われていることが明らかとなった。この機構が、複雑な気温変動の中で季節応答をすることができるという頑健性を植物に与えていることを示している。クロマチン構造の変化を伴う *FLC* の転写調節機構は、野外での頑健性を伴う応答をよく説明する。このような形で生態学的な野外研究が、植物の機能解析において重要な貢献を果たし始めている。これは、従来の機能解析とは異なる、新しい研究アプローチである。



植物の環境応答に対する理解はまだ不十分である。野外研究の役割は、フィールドでの植物の生育を可能にしている頑健性を明らかにすることである。また、植物科学が環境変化に対して予測性のある対応をしていかなければならないと考えたときに、環境応答を操作するという、育種の発想が出てくる。その応用研究に対しても、自然生態系の頑健性にかかわる情報を解析することによって、野外研究は重大な成果をもたらすであろう。

[1] ワークショップ概要

[2] ワークショップ詳細

[3] 考察および今後の戦略立案に向けた方針

## 2.2.5 屋外圃場における開放系大気 CO<sub>2</sub> 増加実験 —学際的フィールド実験プラットフォームの一例

### 長谷川利拡 ((独) 農業環境技術研究所 大気環境研究領域)

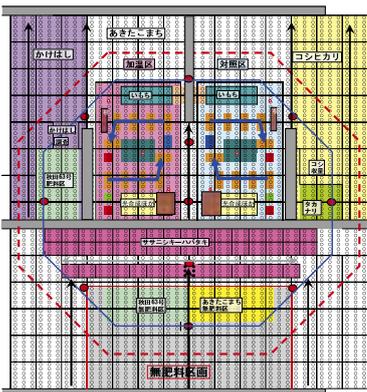
農業環境技術研究所では、農業が環境に及ぼす影響とともに、温暖化や大気 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇といった気候変動が作物に及ぼす影響の評価や適応のための研究を実施している。作物の環境応答は、主に温室や人工気象室といった室内実験によって明らかにされてきたが、フィールドでの実証的研究も重要視されるようになってきた。本報告では、フィールド実験の一例として、囲いを用いずに屋外圃場で高 CO<sub>2</sub> 濃度環境を実現する開放系大気 CO<sub>2</sub> 増加 (Free-air CO<sub>2</sub> enrichment, FACE) 実験を紹介する。FACE 実験は、世界的には既に約 20 年の歴史がある。日本では、私の前任者で、現在東京大学の小林和彦教授が東北農業研究センターの岡田益己博士 (現、岩手大学教授) と JST 戦略的創造研究推進事業 (CREST) で 1998 年から岩手県の雫石町で開始したのが最初で、世界初のイネ FACE 実験として重要なフィールド研究拠点となった。

**屋外圃場における開放系大気CO<sub>2</sub>増加実験 —学際的フィールド実験プラットフォームの一例**  
**主要研究テーマ: 将来の高CO<sub>2</sub>濃度条件に対する作物の応答と遺伝的変異の解明**  
 農環研 長谷川利拡

岩手県雫石町における水田FACE実験(1998-2008)



差し渡し12mの八角形区画内に土壌—作物—大気に関わる様々な分野の研究者が参画し、学際的研究を展開。



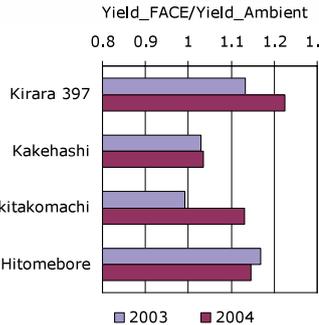
ガラス室におけるイネの高CO<sub>2</sub>応答の品種間差異の報告例



Ziska et al. 1996: J. Exp. Bot. (24Lポット、孤立個体の実験)

遺伝子、分子の環境応答—個体、群落での環境応答を結びつける研究分野が必要。そのためには、学際的フィールド実験プラットフォームと仮説を具体化したモデルの連携が重要。

Yield\_FACE/Yield\_Ambient



2003、2004年FACE実験における品種比較の結果。外気CO<sub>2</sub>区に対するFACE区に対する収量(比)

Shimono et al 2009: J. Exp. Bot.)

**2010年からは茨城県つくばみらい市にて新FACEプラットフォームを開設**



岩手県雫石町のイネ FACE 実験装置は、農家水田の一面に差し渡し 12m の八角形条の区画 (リング) を設け、八角形周辺に設置した CO<sub>2</sub> 放出パイプから、風向きに応じて CO<sub>2</sub> を放出し、リング内の CO<sub>2</sub> 濃度を周辺よりも 200ppm 高めるものである。

これまで、室内実験で CO<sub>2</sub> 濃度に対するイネの成長反応を個体レベルで調べた例では、極めて大きな品種間差異が報告されている (Ziska et al 1996)。雫石 FACE 実験における品種比較では、室内の孤立個体でみられたような大きな遺伝的変異は認められなかった

ものの、2割以上の収量応答を示す品種もあれば、ほとんど応答を示さない品種も認められるなど、圃場群落レベルでも遺伝的変異があることが確認された。品種間差異をもたらすメカニズムの解明は、気候変下で多収を得るために重要な適応シーズであると考えられる。FACE 実験では、このほかに水温上昇との複合的な影響、遺伝解析材料の利用、マイクロアレイによる CO<sub>2</sub> 濃度上昇に対する遺伝子機能の発現、気候変動条件下での水田からのメタン放出など、様々な学際的研究が展開されている。このように、多くの分野の研究者が同じ圃場を対象として耕地生態系の環境応答を研究することで、遺伝子型、環境、栽培管理の相互作用の解明や適応・緩和技術の開発とその検証が推進されるもの期待される。

零石での FACE 実験は、すでに開始から 10 年経過し、寒冷地におけるイネの CO<sub>2</sub> 応答解明に関しては一定の役割を果たした。平成 22 年度からはつくばみらい市に場所を移し、多様な遺伝資源を供試するとともに、遺伝子から群落レベルまで幅広分野の環境応答の実験プラットフォームとして活用できるように整備を進めている。

### 将来頻発が予測される高温ストレスへの対処、適応 主要研究テーマ：圃場条件での被害発生予測と耐性・回避性形質の探索

チャンバー実験における水稲不稔率と日最高気温の関係  
(金ら、1996)

37°Cで開花した穎花のうち、柱頭に花粉が20粒以上あったものの割合 (Matsui et al 2005)

2007 年夏の記録的猛暑下的水稲不稔調査事例から

1. 猛暑下で開花したイネの不稔率は通常よりも高かった。
2. 高温条件での不稔率は、室内実験の温度応答から予測される不稔率よりも低かった。
3. 開花時の穂温度が気温よりも低いこと、開花時刻と最高時刻のタイミングがずれていたことなどが、その原因と考えられるが、詳細な要因・メカニズム解明が必要。

長谷川ら(2008)

開花期高温ストレスへの耐性に著しい遺伝的変異とその要因の一例

わずかな葯の形態の違いによって、高温耐性が大きく向上する可能性。このほか、高温を回避するための形質も注目されている。これらが圃場において有効であるかを検証する必要がある。

温暖化に伴い、作物の高温ストレスの頻発が懸念されている。これまでの人工気象室の実験から、イネでは開花期頃の温度が高くなると受粉に失敗しやすくなり、不稔率が高まることが知られている。また、その温度依存性は極めて大きく、35°Cを超えると急激に不稔率が増加し、40°C近くになるとほとんどが不稔になることが、温度勾配型チャンバーを利用した実験で明らかにされた (金ら 1996)。屋外圃場においても、2007 年に関東・東海地域で観測した 40°C を越える猛暑の影響の実態調査で、通常よりも高い不稔率が認

められた。ただし、その程度はチャンバー実験の温度応答から推定されるほどは大きくなかった。このような圃場とチャンバー実験との違いを解明することは、将来の温暖化影響を適切に評価し、圃場条件で有効な適応技術を開発する上で極めて重要であり、フィールド科学における主要な研究課題の1つと考えられる。

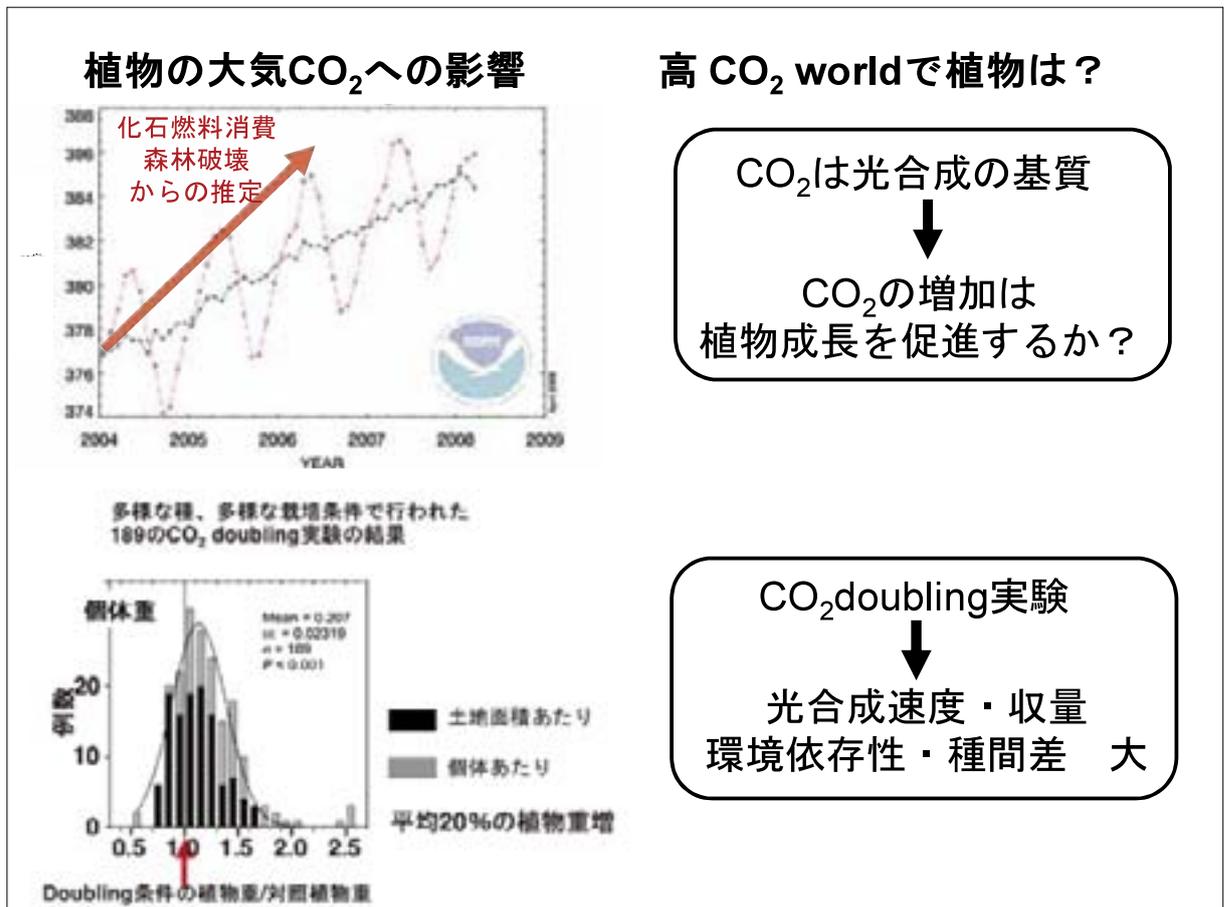
開花期の高温ストレスに対する耐性にも、大きな遺伝的変異があることが知られている。岐阜大学の松井勤准教授の研究によると、高温でも比較的安定した受精が行なわれる品種は、蒴の裂開程度が大きいものに対して、高温で不稔を多発する品種は裂開程度が小さかった (Matsui et al 2005)。花器の発達、すなわち、蒴の裂開という比較的微細な形態形質の遺伝的変異が、高温ストレス条件における受精の安定性に大きな影響を与えることが示唆された。このような形態形質のわずかな違いが、圃場条件における高温耐性に有効であるかを実証することもフィールド科学の重要な役割である。

圃場で生じる現象は複雑でかつ再現することが難しいことも多い。特に環境応答を対象とした形質については、環境条件の変動と発育ステージの進行に伴う作物の感受性の変化など、多くの要素を考慮した解析が必要である。したがって、生産性の向上、ストレス耐性の向上といった目的を達成するためには、戦略的な取り組みと実証が必要である。今後のフィールド科学には、現象の解析から将来の作物生産のデザインに結びつけ、さらに学際的な研究チームによってデザインを具体化することが望まれる。

### 2.2.6 植物生態学・分子生理学コンソーシアムによる陸上植物高 CO<sub>2</sub> 応答の包括的説明

寺島 一郎 (東京大学 大学院理学系研究科)

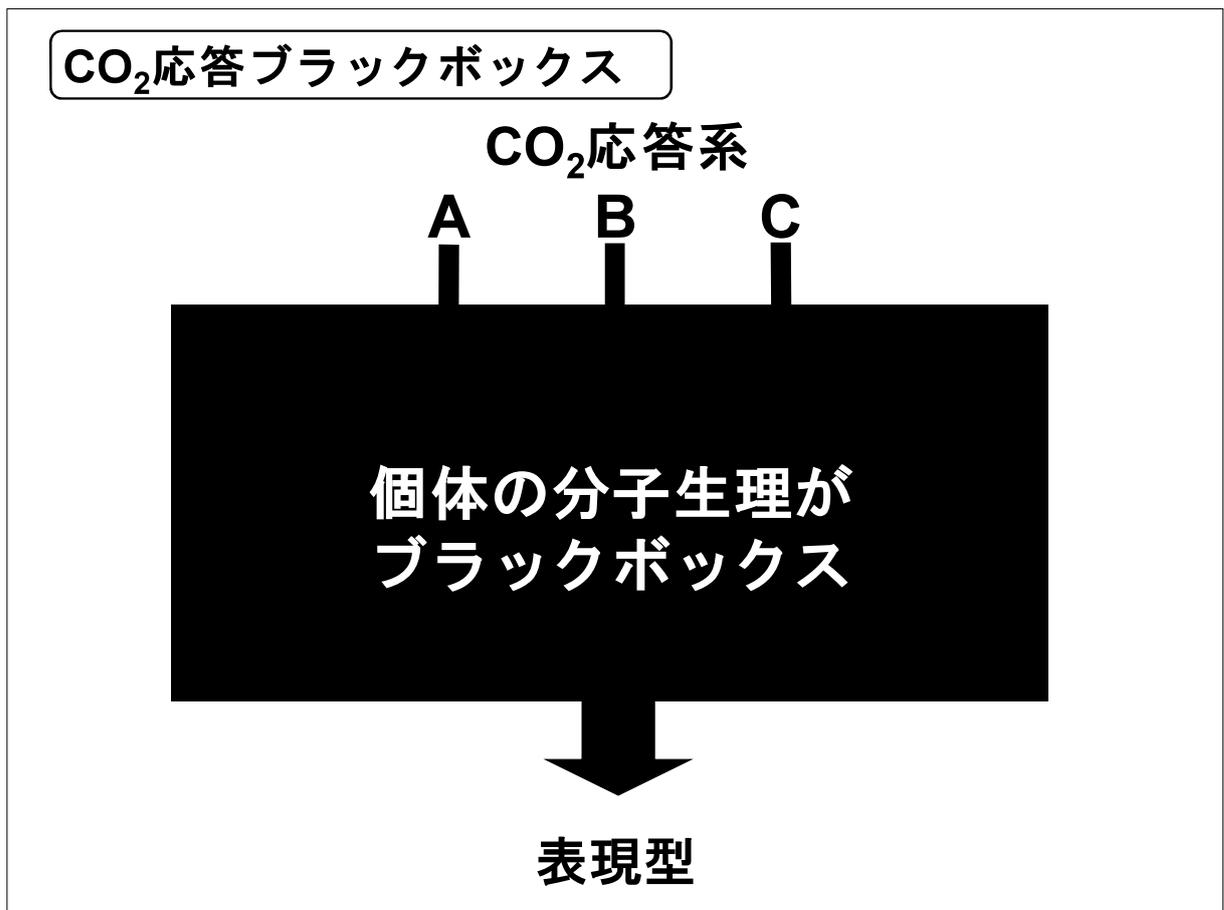
CO<sub>2</sub> 濃度の増加は解決しなければならない問題である。図の一番左上は、植物が多くの CO<sub>2</sub> を吸収することで、化石燃料から計算する CO<sub>2</sub> の上昇量が随分低く抑えられていることを示している。植物は多くの CO<sub>2</sub> を光合成の基質として吸収し、CO<sub>2</sub> が増加すると植物の成長を促進すると予想される。その促進の仕方は、一番左側の 189 CO<sub>2</sub> doubling 実験結果では、平均 20% の植物重増であった。このような CO<sub>2</sub> doubling 実験というのは世界中で実施され、多くのデータがある。



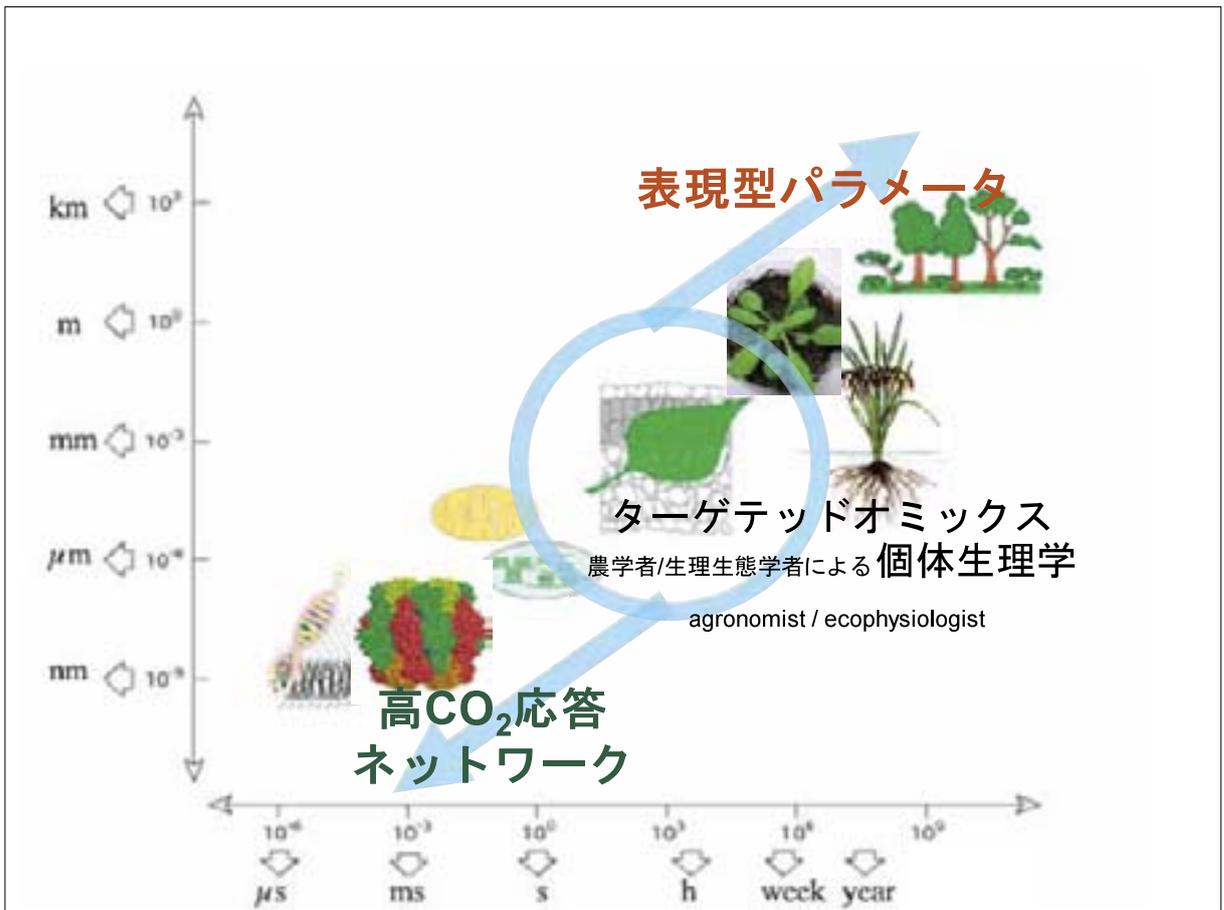
[1] ワークショップ概要

[2] ワークショップ詳細

[3] 考察および今後の戦略立案に向けた方針



植物の CO<sub>2</sub> に対する応答の分子メカニズムについては幾つかの系が明らかになった。また、表現型レベルのデータは多くあるが、やはり個体の分子生理、その CO<sub>2</sub> 応答系がどう表現型にどう繋がるかが不明瞭というのが現状である。



[1] ワークショップ概要

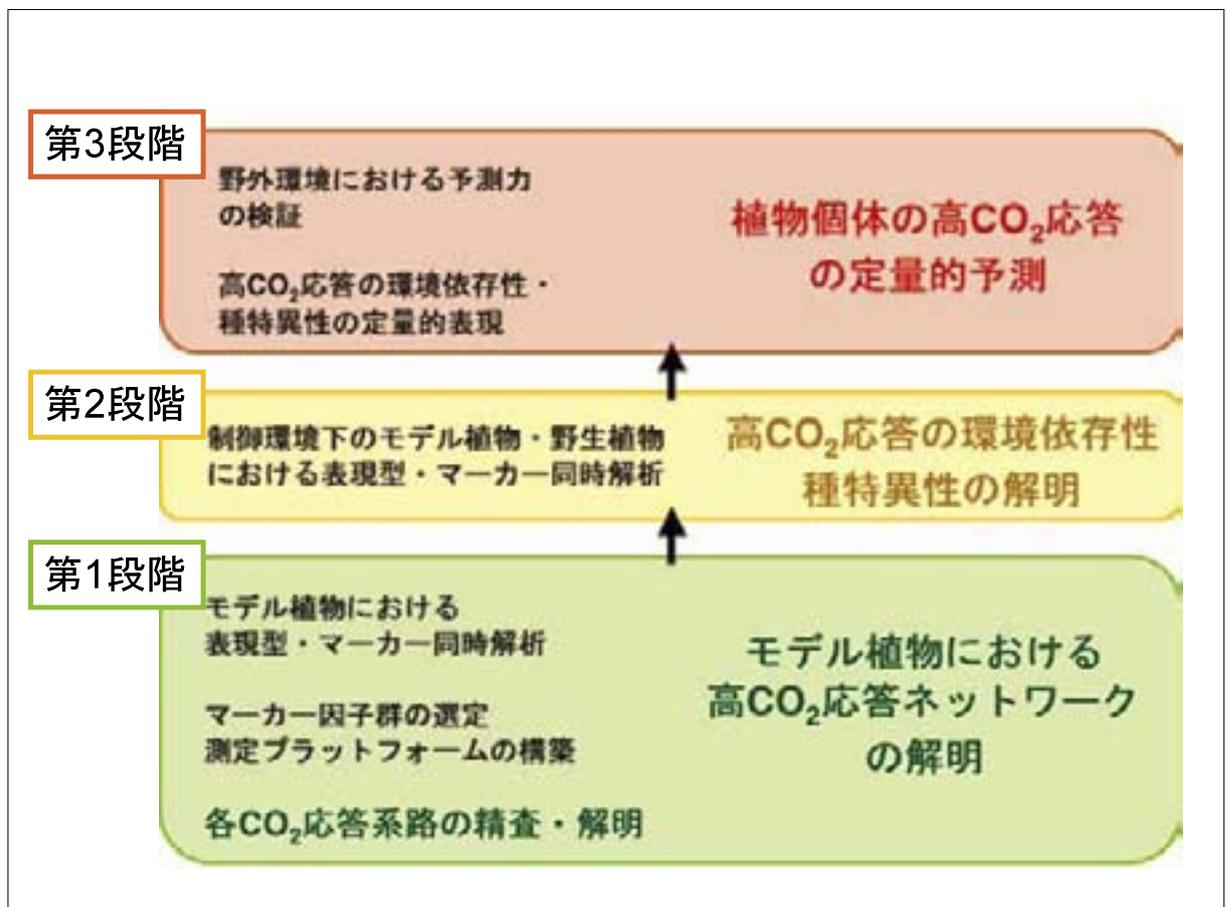
[2] ワークショップ詳細

[3] 考察および今後の戦略立案に向けた方針

表現型パラメーターのデータはマクロレベルに行くほど多く、個体レベル以上のデータが蓄積されている。一方、分子生物学者も、高 CO<sub>2</sub> 応答ネットワーク研究に関して、熱心に研究しているが、その間の部分を、農学者、**agronomist** や生理生態学者がハブとなって繋ぐべきと考える。そこで私は、マイクロレベルの研究で明らかになったことから、見当をつけることを頻繁に行うことで、表現型のパラメーターとネットワークとを結び付けることを主眼としたプロジェクトの計画を立てた。

そのプロジェクトは、まずモデル植物において安定した CO<sub>2</sub> 環境で血液検査のような簡便な検査を行い、パフォーマンスとの対応をつけ、さらに、そのエッセンスを生理生態学のレベルで利用するものである。これをフィールドレベル、FACE のレベルに広げていくと、CO<sub>2</sub> 応答がより理解できるようになるのではないかと考える。

これは植物の表現型を総合的に評価するシステムである。農学・生態学の研究者と分子生理学の研究者とが新学術領域の研究費によって、コンソーシアムで繋がる点で有効である。また、多角的な視点を持った若い研究者が育ってくれることを期待している。昔でいう agronomist の分野の偉い先生方との関わり合いもできるのではないか。基本概念として、CO<sub>2</sub> に負けない、好 CO<sub>2</sub> 作物、それから樹木、森林をきちんと維持していく基盤が形成できるだろう。



### 2.2.7 討論

今回のワークショップ参加者に事前にアンケートを取らせていただいている。その結果と先ほどまでの議論の結果をまとめると、次の通りとなる。

- ① モデル植物で得られた成果が実際のフィールドには適用し難い
- ② 実験室で得られた様々な基礎的知見が十分に応用展開できていない
- ③ 実験研究者と作物モデル研究者に得手不得手がある

AT A TCTATAAGA CTCTAACT

## アンケート結果:コンセプトについて1/2

現在は、、、

- モデル植物で得られた成果がそのまま実際のフィールドに適応しにくい(農林業や生態学におけるニーズとのミスマッチ)。
- 実験室で得られる様々な基礎知見が、「実験室データからの期待」以上には展開できていないことが多い。
- 世界的にみても、実験研究者と有益なディスカッションを行える作物モデル研究者は少ない。一方、実験研究者は、システムモデルのような包括的な考え方を得意としない場合が多く、得られた結果を異なるスケールに適用することが不得手。

Center for Research and Development Strategy - JST  
独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター

## (1) モデル植物と野生植物とのギャップ

基礎研究と応用研究を繋ぐ上で、モデル植物と野生植物の間で、どのような溝があるのか？

→アブラナ科の野生植物には、シロイヌナズナの配列情報が活用できる。モデル植物が多様な系統群の中で整備されればされるほど、野生植物へ展開できる事が増えていく。このような意味で、モデル植物における情報の整備が野外植物の研究に役立っている。同時に、様々な形質をもつ野生植物研究も、育種や進化に応用できるようになる。

→ナショナル・バイオリソース・プロジェクトで、ミヤコグサとダイズを繋げ、どのように応用していくかという問題に取り組んできたが、困難なテーマであり、未だ結論が出ていない。ただ、ミヤコグサは、南米、オーストラリア、イギリスの *Corniculatus* と呼ばれる牧草に応用できる。モデル植物はバイオリソースから考えると、アカデミックユースでのモデルである。日本やアメリカ、ヨーロッパでは、アカデミックユースと遺伝資源をはっきり分けて考えているが、東南アジアでは、作物改良のための遺伝資源と捉えている。マウス、ラットがヒトで応用できるように、植物においても早くそうなるべきである。

→モデル植物の役割が、5年前とは違ってきている。5年前は実際の作物あるいは植物研究を推進する上で、モデル植物を使うという観点であった。しかし、乾燥耐性や光合成能力の高さなどの機能についてはモデル植物の特定の形質は今後とも役に立つが、遺伝学的なモデルについては現場では役立たない。日本のイネの収量をヘクタール当たり 5t から 10t にするにはどうするかを考えると、モデル植物は役に立たない。

## (2) 表現型の捉え方の違い—1

実験室での研究では、例えば低温耐性については、実験室では 10℃、20℃の低い環境下での耐性を見る研究がある一方、水田では 1℃、2℃あるいは 0.5℃の差が収量に非常に大きな影響を及ぼす。植物生理学者とフィールド学者が、一つのプロジェクトに関わる際に、環境要因に対する表現型（形質）の捉え方の違いを、どのように折り合いをつけていけばよいのだろうか。

→両者が歩み寄るべき。非常に複雑な形質で圃場の最終的な収量や品質が決まってしまうときに、圃場側が全体での意味を考えてブレイクダウンをして、実験室側は実際に起こり得る範囲での現象に近づいていくことが必要。

→作物の研究は、最終的には収量が重要となるが、モデル植物の研究者はこれと異なる観点で研究をしている。乾燥耐性を例に挙げると、乾燥によって生きるか死ぬかのアッセイしかしていない。最終的にどのような環境条件で、どれだけシロイヌナズナの種の量が変わるのかということの研究していない。だから、シロイヌナズナを扱っているモデル研究者が収量を意識するためにも、作物研究者との共同研究を行うべきと考える。

矢野先生が始めた DREB プロジェクトは、CIMMYT（国際トウモロコシ・コムギ改良センター）や IRRI（国際稲研究所）にて、圃場で色々なストレス耐性の遺伝子をテストする良い機会になる。このように、基礎的な研究者がフィールドにアクセスするようなシステムが必要。モデル研究者がフィールドにアクセスできるような仕組みを作りながら、長期的に研究を行いイノベーションとして途上国に技術供与すれば良いのではないかと。

### (3) 教育について

→現場と研究室内での教育の問題があげられる。ものづくりには興味がない、農学部出身でありながら畑に入るのが嫌といった人材が出てしまう、日本の教育のあり方に問題がある。このため、最終的な研究推進段階では、若い人材をたくさん参画させる場があるべきと思う。例えば農業の分野だと、アメリカの大学と日本の大学の一番の違いは、日本の大学は研究だけで教育もエクステンションも行わないのに対し、アメリカの大学はずっと、エデュケーションとリサーチとエクステンションを一体的に行っている。その差が現在の日本とアメリカの生物学の大きな差になってきている。日本的な教育のあり方がこういった現場と研究室の間の乖離を生み出してしまったのではないかと。

### (4) 表現型のとらえ方の違い—2

→フィールド研究者と分子生物学者との間で、形質評価の方法に違いがある。フィールドの立場から見ると、狭い意味での乾燥耐性というのは非常に重要な構成要素ではあるが、様々なレベルの乾燥がある。低温、高温も同様である。成育のステージにもいろいろあり、最初の時期なのか、後の時期なのか、花が咲く時期が温度に弱いのか…といった仕分けをまずフィールドの研究者は行う。一方、分子生物学者は、戦略的に短時間でできる形質を評価している。これは、インキュベーターの中で、できれば細胞レベルの話に持っていきたいとの考えに基づいたものである。我々フィールドの研究者も、圃場で見つけた形質を実験室レベルに持っていければいいとは思いますが、うまくいかない。この原因としては、恐らく根系や通導組織や、その他の総合的な要因が圃場で反映されている可能性がある。フィールドレベルで役に立つ形質を分子生物学の俎上に乗せていくことが次の研究では非常に大事と思うが、これには、かなり大がかりにフィールドテストができる拠点が必要である。

### (5) 植物のフィールド研究拠点整備の重要性

大学の附属農場を現状ではどの程度利用できるものなのか。あるいは、利用できないような課題、問題点があるのか？

→現在各大学、特に農学部の場合は附属の農場を持っており、その一部は、例えば東北大学の場合は、附属農場ではなく「フィールド研究センター」等と名称を変更している。フィールドでの研究拠点整備については、既にある大学の附属農場をうまく利用できないのか？

→遺伝子組換え作物の場合は隔離圃場が必要なのだが、これがある付属農場は数少ない。一方、一般的なフィールドは、様々な大学が保有している。

→大学の附属農場は、当然実験のスケールや解析対象の形質によって色々な利用が可能である。育種の現実的な形質の改善には、きちんと整備された非常に広いフィールドがないと研究がうまくいかない。実験農場というレベルで済む場合とそうでない場合がある。表現型をどのように見るかを考える際に、何を対象とするかに応じてどういう仕組みが使えるのかを整理する必要がある。また、フィールドでの問題と実験室の研究者が問題にしたい部分とをどのようにうまくすり合わせていくか。こういった目標を整理してフィールド環境を考えないといけない。

### (6) 表現型のとらえ方の違い—3

→どのように評価するかは大変難しい。環境、処理、栽培の仕方等に応じてレスポンスは変わってくる。エキスパートがやったらうまくいくが、大学の学生がやったら何を見ているかわからなという場合もあり得る。このようなものを、きちんとサイエンスとして対応できると、もっと容易に組換え体をつくり、例えば温室の中でも同じように模擬的な環境をつくってスクリーニングをすることができる。この辺の評価方法の抽出というのはどこまで可能になるのか。

→現場に近づいたところでは、評価が難しい。収量を評価する際に経験豊かでないと、大学の学生レベルではノイズを抑えてはかることができない。フィールド環境をシェアできる仕組みがあればいい。ただこれをどうやってオンデマンドにするのかという問題がある。

→ファンディングが大切。基礎研究においても、ファンディングがプロモータとなっている研究がある。当然ファンディングに加えて圃場が使える、という両面が必要。つまり、良い研究提案では圃場へ展開する仕組みづくりが必要であり、そうでないものは基礎研究に特化したままで良い。

### (7) 小さい温室設備

→フィールドと同様、温室も使える場所が少ない。海外では企業の実験施設など、大きな温室で、たくさんの植物を育てている。一方、日本では、非常に小規模な実験施設で組換え植物を栽培・評価している例が多い。せめて温室だけでも大規模に持ち、栽培してみるといったところから進めることも大事。とにかく色々なところで、このような施設の整備が必要。

→キャンベラにある High Resolution Plant Phenomics Centre は 1960 年代に CSIRO のプラント・インダストリー部門が植物のブリーディングのために建てたものをリノベーションし、今のフェノミクスの時代にあわせて使っている。それから、アデレードにも新

しい温室をつくる計画を立てているようだ。これはオンデマンドで、こういう条件で育ててくれと言うと、テクニシャンが育ててくれるというシステムである。理想的なことに、近距離のリモートセンシングやサーモメトリー等を導入して、大雑把な表現型のスクリーニングを行うことのできる施設が隣接してある。こういう研究所は、フィールドではないが、その中間的位置付けで制御できるという意味では使いやすい。研究資金があって、コンソーシアムをつくって共通のテーマに取り組む場合には、こういう設備をまず利用するというのが非常にやりやすい仕組みになると思う。基礎生物学の分野では、基礎生物学研究所というのが共同利用施設としてそういう役割を果たしているはず。

→我々が一番避けなければいけないのは、資金があればもっと研究できるのだという短絡的な議論に陥らないことが必要。むしろ、今の日本のプラントサイエンスが日本の国家ビジョンあるいは社会の中でどう貢献でき、そのためにどのような投資が求められるかという観点で考えるべき。

→寺島先生の発表で、CO<sub>2</sub> 応答という具体的な目標を掲げたコンソーシアムをつくられているとあった。このように目的を共有し、フィールド科学者と基礎生物学者がタッグを組む。ファシリティーだけでなく、目的の共有というのが重要。

医学においては、人の命がかかっているので、iPS 細胞のような基礎的な科学というのがすぐに現場への応用まで念頭に置いた研究と同時並行的に進んでいる。しかし、植物科学の場合は、フィールド研究者はフィールドだけ、基礎生物の研究者は興味の範疇で研究するという状況。やはり真理の探求というのは非常に重要だ。逆にフィールドからおもしろい課題が結構あることを示し、目的を共有することが大切なのではないか。医学において「人の命」が根本にあるように、植物科学においても、食糧生産や自然などに対する寄与をうたった枠組みがあった方がいい。

## (8) 作物増産に向けて

作物の増産や生産において、こういう理解が足りないとか、こういう技術が足りないといったことを具体的に挙げていただきたい。

→生産という意味では、収量だと思う。それにどういう形質を考えるかである。工藤先生のおっしゃるフィールドでの頑健性、ロバストネス、これが重要。複雑な系に対応するための頑健性を持っているということと、もう一つは、一方を取れば他方が不足するというトレードオフ。こういうものを分子の言葉で何か考えられないかという視点で、要するに分子生物学をやっている人も、新しいところへ行きたいと思っているのだから、そういう人たちが新しいことを勉強しながら新しいものを見つけていくということになる形でファンディングができると良いのではないか。

植物生産を考える中で、問題点としてこういう理解が足りない、形質評価がきちんとできない、ファンディングするに当たってどういった技術やどういった理解のために投資が必要なのかを具体的に挙げていただきたい。

→学生でも簡単に評価できるような形質がない。形質間のトレードオフも含めて総合的に植物を見られるような学問分野が出てこない、植物生理は植物生理のまま、遺伝は遺伝のままで終わってしまう。今後は同じ表現型を見るにしても、遺伝から見る目と生理から見る目を融合させることで初めてシステムを理解できるというような動きになると思う。同じものを見る見方として、遺伝、環境、それからマネジメントも含めた3つをどのようにして見て、教育していくのかといった視点が、今後デザインや育種を行う上でも非常に重要。コンソーシアムを組んで、そういう目を養う場ができれば良いと考える。

## 2.3 セッション 2. 課題に資する研究開発の提案

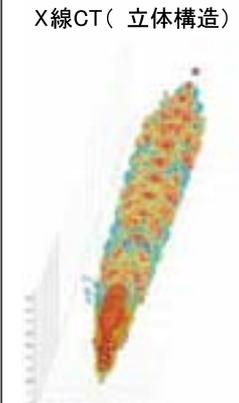
### 2.3.1 フィールドにおける植物の環境応答と育種技術 中谷 明弘 (東京大学 新領域創成科学研究科)

## 表現型と遺伝子型間の高次元な関連解析に基づく ハイスループット 育種支援技術

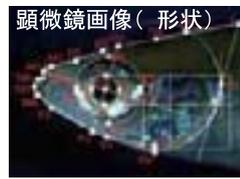
中谷 明弘 (東京大学大学院新領域創成科学研究科)

#### 複雑な表現型情報 (PT)

X線CT (立体構造)



顕微鏡画像 (形状)



経時データ



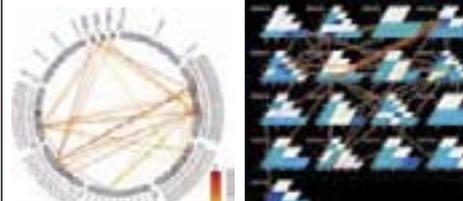
- ▶ 形質の抽出と数値化
  - ▶ 画像・動画処理
  - ▶ 多数の断片的な形質の統合
  - ▶ 主成分分析・因子分析

#### 複雑な遺伝子型情報 (GT)

マーカー (遺伝子型)



開花始日 (表現型)



サンプル

(サンプル×マーカー)×表現型



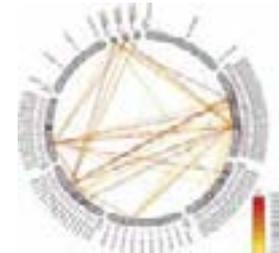
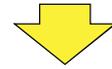



- ▶ GWAS (全ゲノム関連解析)
  - ▶ 複数ローカスの組み合わせ
  - ▶ Epistasis (ローカス間交互作用)
  - ▶ ローカス間ネットワーク

私は完全に情報系の人間で、実際に電気メーカーでスーパーコンピューターを作っていた時期もあり、現在、東京大学柏キャンパスで様々なバイオ系のアプリケーション作成、研究を行っている。ここに示した図は全て自分で作ったプログラムの出力結果である。基本的にテーラーメイドなプログラムを作っている。研究に必要な解析ソフトがないといったときに作成している。例えば、マウスの CT 画像を処理することで、エネルギー代謝に関して、脂肪の量や体内分布、あるいは、臓器の形状がどうなっているかというような複雑なフェノタイプの情報を数値化している。メダカの顔は非常に複雑な形状なので、丸や四角といったレベルのフェノタイプの表し方では全然解析にはならない。統計的にフェノタイプを抽出することで、詳細な違いを効率よく、かつ人間ができない作業レベルで行うことができる。

## 複雑な形質の複雑な遺伝的背景の探索

- ▶ 形質の定量的な評価手法
  - ▶ 高次元な形質の扱い・・・1つの値では表せない？
    - ▶ 多値形質
      - 部分形質の統合や選別
    - ▶ 互いに相関し合った形質
    - ▶ “応答”や“成長”といった動的な形質
- ▶ (高次元)全ゲノム関連解析手法
  - ▶ 組み合わせ最適化問題
    - ▶ 複数ローカス(多因子)
    - ▶ エピスタシス(非線形)
- ▶ 重たい計算処理
  - ▶ 解析アルゴリズムの改善
  - ▶ 並列・分散処理



形質の抽出の際には、数値化することを目標に画像処理を行う。また、行動というフェノタイプもあるので、動画の処理からもフェノタイプのデータを取る。この図はアカクロバーの例で、時間軸上の各点で経時的にとらえた複雑なフェノタイプのデータを、どうフェノタイプとして表すかという統計的な技術を開発している。例えば、多数の断片的な形質が出てきたとき、それをどう本質的な形質として表すか。また、逆に言うと、一つの形質と誤っていても実は複数の形質の集まりだったということにも対応しなければならない。例えば、脂肪の量は、全身よりも、特定の臓器の周りにどういった脂肪の量が分布しているのかを見るのが本質的だったりする。そのような複雑なフェノタイプを取ることをしている。これは植物、場合によっては人のデータにも応用することができる。

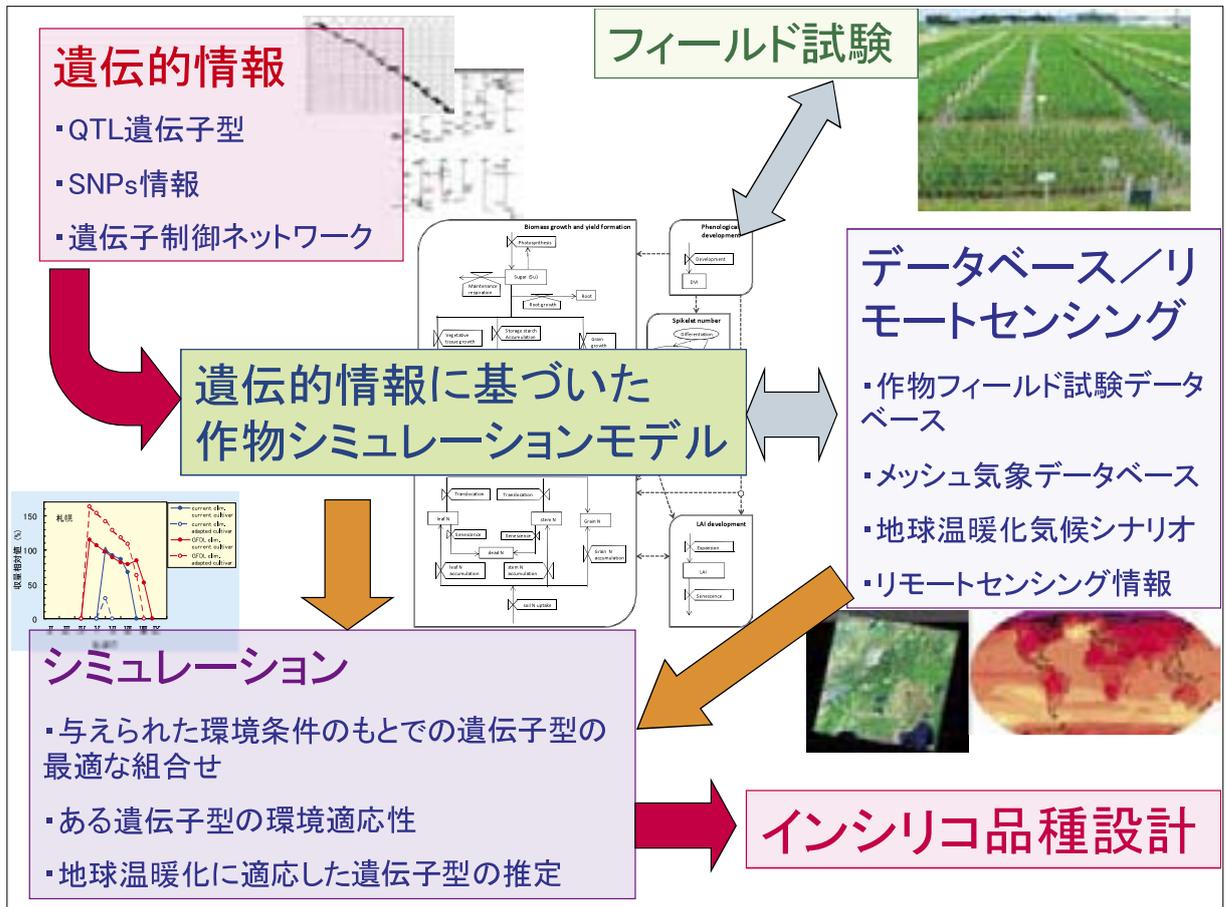
これからは、画像解析よりも、遺伝的な側面から、フェノタイプとジェノタイプの情報をどう関連させて取ってくるかが重要となってくる。その際のキーワードはGWASである。これを行う上で困難な点は、ピンポイントで単独の遺伝子だけを見れば良いわけではなく、Epistasisといった、複数のローカスの組み合わせ、ネットワークが重要になってくる。そのような、人間が論理的に処理し切れないものを計算機を使って効率的にデータを取得するためのアプリケーション作成を行っている。

### 2.3.2 作物のインシリコ品種設計

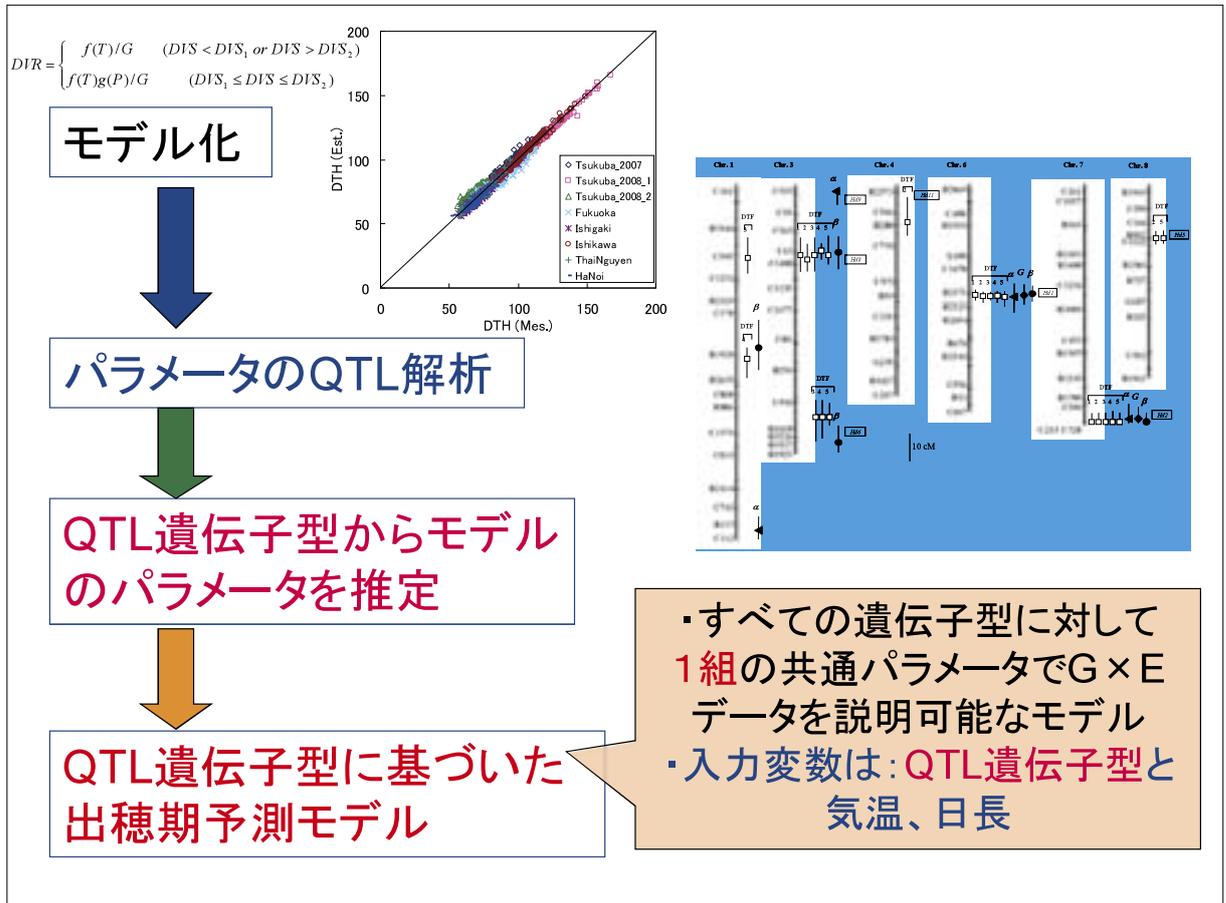
中川 博視 (石川県立大学 生物資源環境学部生産科学科)

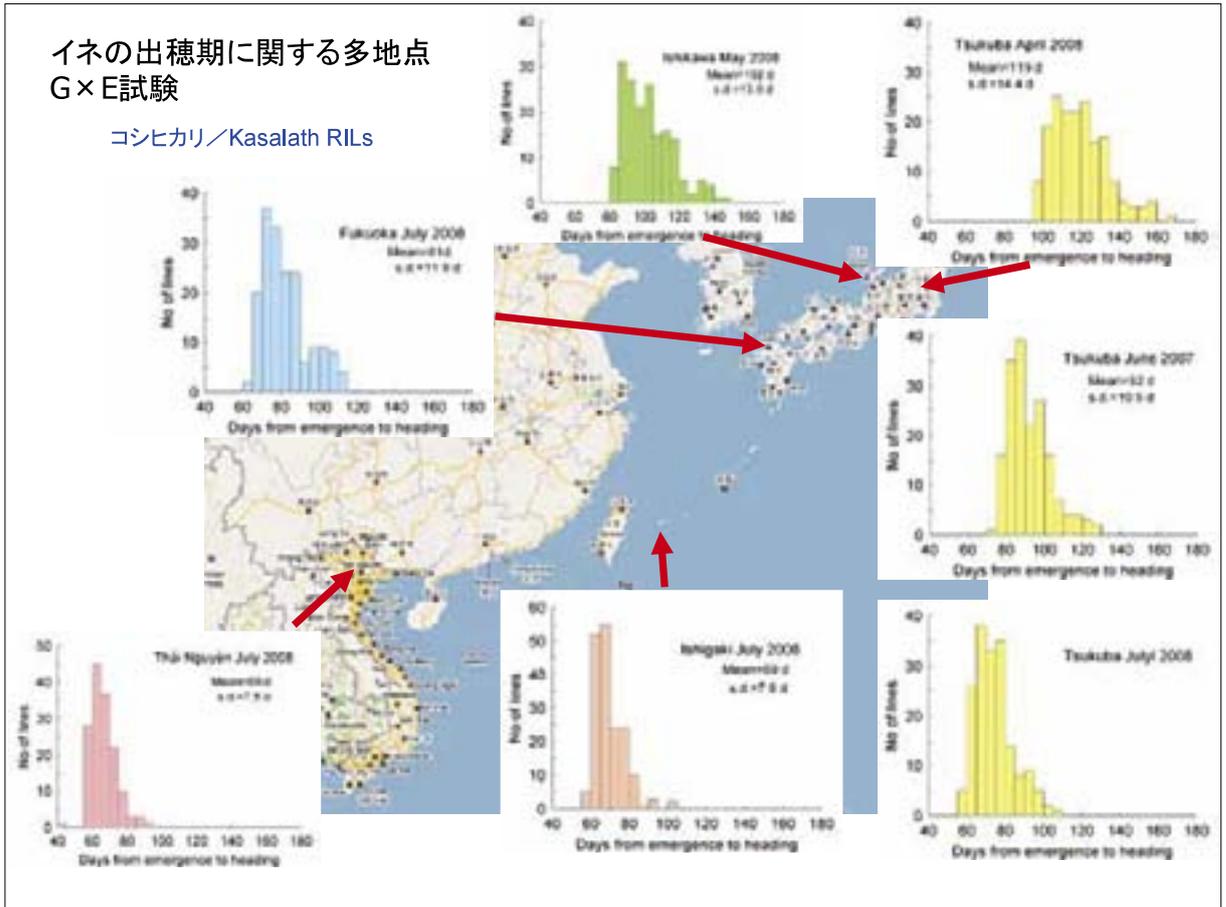
コンピューターシミュレーションによって将来的に作物の品種設計をできないか。これまで我々作物学者は大体、遺伝子型を少数しか扱わずに、その環境適応性を見てきた。一方で遺伝学者は、同じ環境条件のもとで複数の遺伝子型の違いを見てきた。その両者が一度に理解できるモデルがあれば、色々なことに役立つはずだ。

これまで作物のシミュレーションモデルは、遺伝的情報をほとんど加味していない形であったため、育種に寄与することはほとんどなかった。このため、我々は遺伝的な情報を加味したシミュレーションモデルを作っている。最近では、フィールド試験だけでなく過去のフィールド試験のデータやメッシュの気象データ等のデータベースも拡充した。これらを組み合わせてシミュレーションすることで品種設計ができないか検討を進めている。与えられた環境条件のもとで、遺伝子型の最適な組み合わせや、ある遺伝子型の環境適応性、あるいは地球環境が変化した場合、そこに適応する遺伝子型などの推定を行っている。



比較的簡単に精度高く形質評価ができ、しかも実用形質として重要な出穂期について研究を進めている。これは、長谷川先生達との共同研究で、コシヒカリと Kasalath の組換え近交系をベトナムから日本各地域にわたるまで栽培し、出穂までの日数のデータをとったものである。G × E 試験、いわゆる遺伝子と環境の相互作用を狙った試験である。

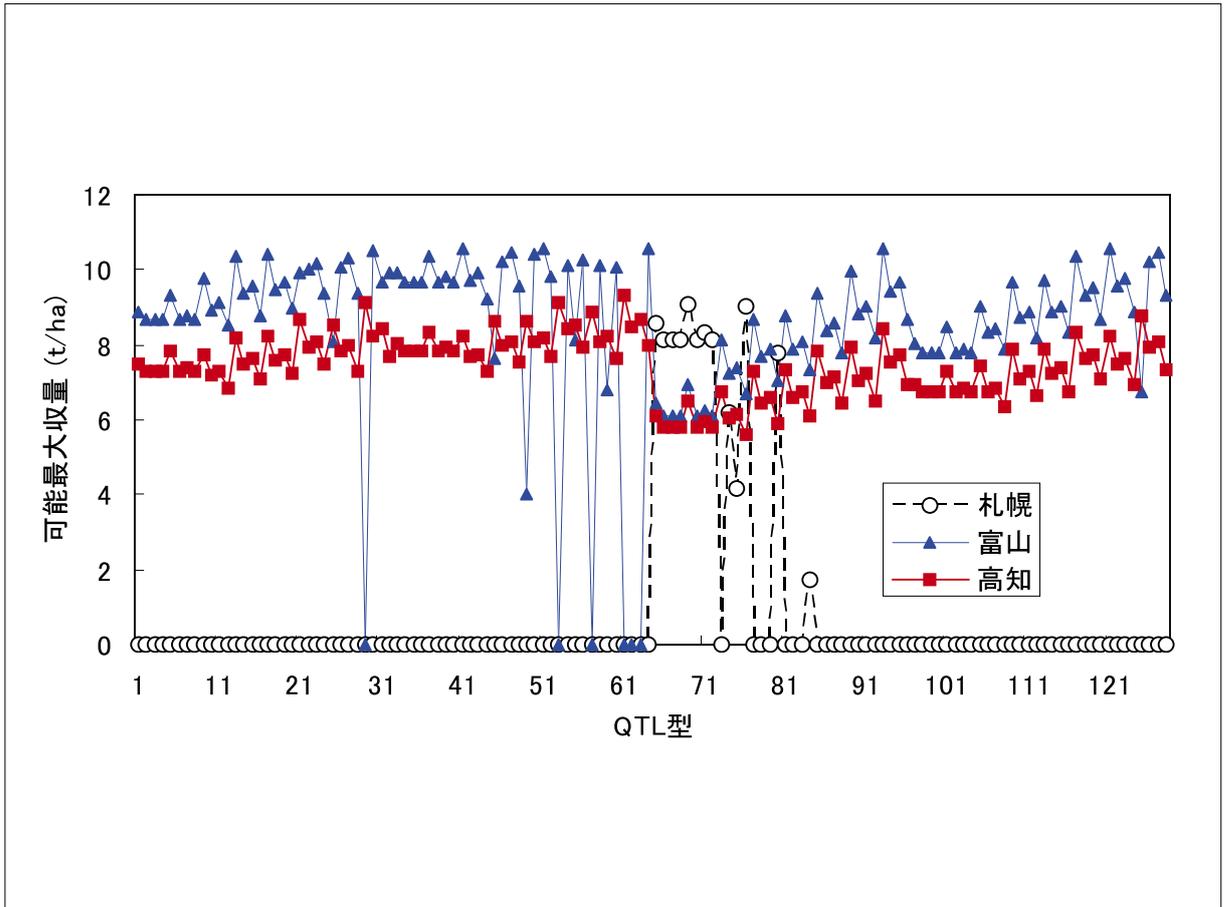




このような出穂期のデータをもとに、まず気温と日長の経過から、高精度に出穂までの日数を予測できるようなモデルを作成した。そのモデルのパラメーターを QTL 解析すると、遺伝子座が出てくる。次に、その QTL 遺伝子型からモデルのパラメーターを推定するサブプログラムを作成する。そしてこれを元に戻すと、QTL 遺伝子型に基づいた出穂期予測モデルができる。QTL 遺伝子型からモデルのパラメーターを推定する過程は単なる重回帰で経験的なものであるが、全ての遺伝子型に対してただ一組の共通パラメーターで、先ほどのような G × E データを説明可能なモデルができた。今までのモデルというのは、遺伝子型に応じて個別にパラメーターを与えていたが、ここでは QTL 遺伝子型を入力変数として取り込むことによって、パラメーターを一組だけ用いている。

さらに、そのような発育予測モデルをイネの生育収量予測モデルに組み込んだ。生育収量予測モデルは、光合成、物質生産、器官間での乾物分配などに基づいて収量を予測できるようなモデルである。発育以外のパラメーターは全部統一して、発育に関する遺伝子型の違いが収量に与える効果をシミュレーションで調べてみた。ここで、我々は 7 個の QTL の情報を活用した。それは、矢野先生達が明らかにされている既知の出穂期 QTL とも部分的には重なっている。7 個 QTL があり、そのそれぞれに日本晴と Kasalath の 2 つの遺伝子型があるので、結局、2 の 7 乗で 128 通りの出穂期に関する QTL 型があることになる。その全てに関して、様々な環境条件のもとでシミュレーションを行った。

[1] ワークショップ概要  
[2] ワークショップ詳細  
[3] 考察および今後の戦略立案に向けた方針



これは、白の丸が札幌、青が富山で、赤が高知の例で、横軸は先ほど述べた 128 通りの遺伝子型であるが、例えば札幌では栽培可能な遺伝子型というのは非常に限られている。それに対して、高知ではすべての遺伝子型で栽培可能である。また、札幌で栽培可能な遺伝子型は、富山や高知の地域では収量が低いという結果も出た。このように遺伝子型による環境適応性がシミュレートできそうである。

このシミュレーションから、各気象条件のもとで最適な出穂期の遺伝子型を抽出した。N が日本晴型で K が Kasalath の型の対立遺伝子である。例えば札幌では、ある 3 つの QTL が N、K、K の場合のみ成熟期に達する。また、推定された最適遺伝子型から算出される発育パラメーターから次のようなことが推定できた。β というパラメーターは、日長感応性の強さを表すパラメーターで、大きくなるほど日長感応性が強い。南に行くほど日長感応性が強くなっている。G は基本栄養成長性に近い概念のパラメーターである。この値は南で小さく、北上するに従って大きくなって、東北で最大になり、また札幌で小さくなった。このようなシミュレーションで抽出された各気象条件に適する発育特性は、従来の経験則に一致していた。

## 展望と課題

- **QTL情報の追加**: 出穂期の場合、*Lhd4*の情報を追加すれば、日本国内で実用化可能。
- 遺伝子の制御ネットワークや発現解析データに基づいた  
メカニスティックモデルの開発
- 他の重要形質への適用  
多数の遺伝子が関与する形質  
形質間のトレードオフが顕著な場合  
遺伝子-環境相互作用の大きい形質

出穂期の場合は、さらに *Lhd4* などの日本のイネの適応性を決めている主要遺伝子の情報を追加すればもっと実用化に近づくだらう。もう一つは、工藤先生の提案にあったように、遺伝子の制御ネットワークや発現解析データに基づいたメカニスティックなモデルが重要な課題になると思う。多数の遺伝子が関与する形質やその間のトレードオフが顕著な場合、遺伝子・環境相互作用が大きい場合等・実用形質はこういう場合が多いのであるが、遺伝子・環境相互作用に基づいた作物シミュレーションモデルの開発とそれを用いたシミュレーションによる品種設計の概念が役に立つのではないかと考える。

### 2.3.3 野生植物遺伝子資源の高度活用、あるいは未活用遺伝子資源を用いた持続的生物生産技術の開発

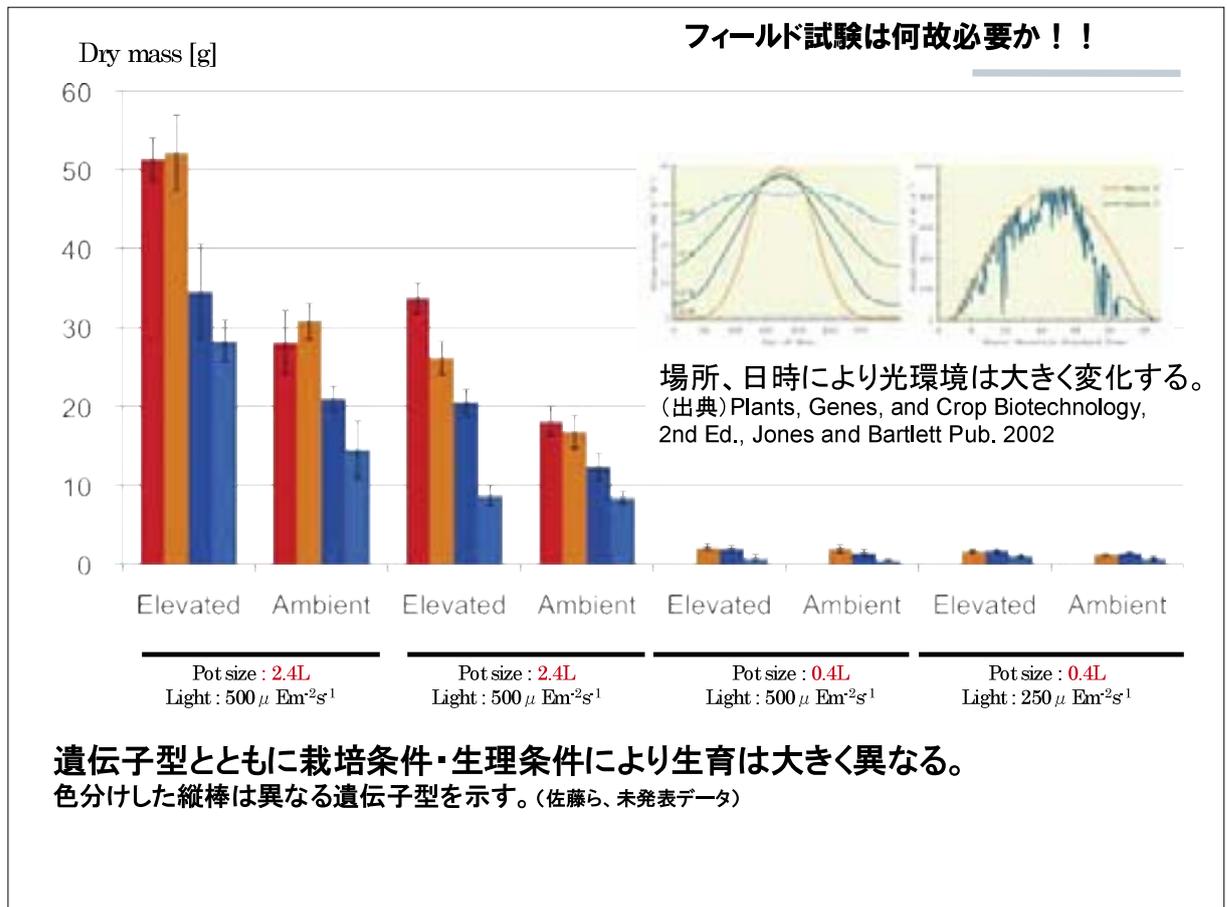
佐藤 文彦（JST/CRDS 特任フェロー、京都大学大学院 生命科学研究科）

植物科学研究において、最大の目標（アウトカム）は食料である。それ以外に、植物研究では、エネルギー、水、地球環境といった、いずれも 21 世紀に解決すべき課題に対しても、極めて大きな貢献が期待できる。具体的な課題例をあげるが、目標の達成には、実際に使える植物資源を開発していくことが重要である。そのために、遺伝子の単離と機能同定、さらには機能評価、また、単離した遺伝子の導入法の開発、遺伝子導入した植物の特性の収集、さらに、どのように栽培するか、まで研究開発することが必要である。

## （具体的な研究課題例）

- 野生植物資源を用いた高バイオマス植物の育成
- 野生植物資源を用いた化石エネルギー資源の利用を最小化した作物ならびに栽培法の開発
- 野生植物資源を用いた水資源の保全と浄化に適したハイテク植物の開発と環境保全技術の開発
- 野生植物資源を用いた変動する地球環境に適応するハイテク作物の開発と栽培技術の開発
- 野生植物のゲノム情報の迅速決定法と機能同定法の開発
- 遺伝子精密導入法の開発
- 変動する地球環境の再現と、同環境下における植物機能評価技術の開発
- 遺伝子機能評価のイメージング化とオートメーション化の開発
- 土壌等栽培環境の精密モニタリングシステムならびに、環境評価技術の開発

いくつかの課題があげられるが、まず、フィールド試験が非常に重要であるということを強調したい。図中（右上の挿入図）に示すように、栽培する地域の違いによって、また、同一の地域でも1日の間に、光を初め、様々な環境要因の大きな変化がある。実際、遺伝子組換え体であっても、栽培条件を変えて栽培すると、栽培した条件の違いによって、極めて大きなばらつきが出てしまう。例えば、図中で色分けされた4つのラインは、色ごとに異なる遺伝子型をもつものであるが、その遺伝子型の影響とともに、栽培環境がこれらの株の生育に極めて大きなばらつきをもたらすことがわかる。この例を見るまでもなく、小型の人工気象機や温室での栽培実験だけで、植物の特性を評価することは不十分であり、植物の特性評価においてフィールド試験は不可欠である。



実用的な品種の確立を行うには、大きく分けると、現場から選抜してくる方法と、ゲノム情報を活用し分子育種する方法の2つの方法がある。ここでは、ゲノム情報から、分子育種する場合、現在、こういったブレイクスルーがあり、これからどういう展望があるのかを紹介したい。具体的には、4つのポイントがあると考えている。その4つとは、ゲノム育種の新展開、遺伝子組換え技術の展望、統合オミックス、代謝工学と合成生物学の展望である。

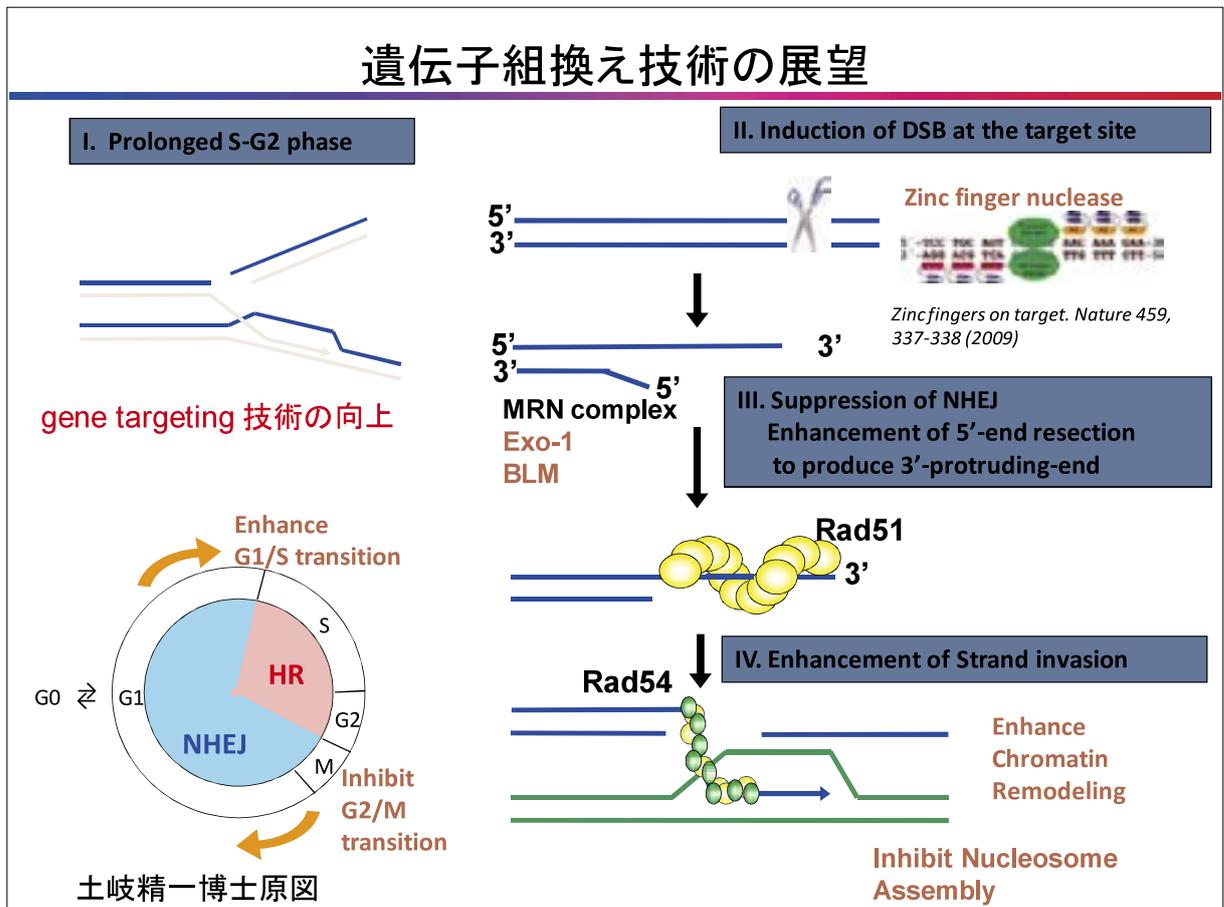
## ゲノム育種の新展開

- 未同定遺伝子の単離と利用: 陸稲におけるいもち病耐性遺伝子 *Pi21* の単離と不食味遺伝子との分離、わずか3kbの遺伝子距離での分離を可能とした (Fukuoka et al. *Science* 325, 998-1001, 2009)
- 野生株からの機能遺伝子の単離: うきイネや耐冠水性イネからの遺伝子単離、*SK1* (Hattori et al. *Nature* 460, 1026-1030 (2009)), *SUB1A* (Xu et al. *Nature* 442, 705-708 (2006))
- ピラミディング: 高収量性とワイ性遺伝子、*Gn1△d1* 等
- 以上の成果は、質の高いQTL解析を可能とする技術管理、ゲノム情報があったから、効率よくできたといえる。
- 次世代シーケンサーの開発によりゲノム解析は新しい時代に入っている。The draft genome of the cucumber, *Cucumis sativus* L. was assembled using a novel combination of traditional Sanger and next-generation Illumina GA sequencing technologies to obtain 72.2-fold genome coverage. *Nature Genetics*, Published online: 1 November 2009 | doi:10.1038/ng.475

ゲノム育種の新展開として紹介したいことは、詳細なゲノム情報をもとに、質の高いQTL解析ができるようになったということである。さらに、次世代シーケンサーの利用によりゲノム情報の解読が急激に進んでいる。2009年になり、次世代シーケンサーilluminaを用いて、キュウリのゲノムが解読されたことが2009年に報告されるに至っている。現在、ゲノム情報をもとに、矢野博士達が、わずか3kbの遺伝子間距離しかない不食味遺伝子といもち病耐性遺伝子を分離し、ゲノム育種に利用されているように、今後、さらなるゲノム育種の新展開が期待できる。

先に挙げたように、交配できる優良な遺伝子資源があれば、それを実用品種として育種し、フィールドに持っていきこうという段階になる。日本においても、イネの場合には、ゲノム育種が非常に有望であるといえる。一方、自然界に優良な遺伝子資源がない場合は、遺伝子組換えで導入することが必要であるが、ランダムに導入された遺伝子組換えによって色々な問題が起こるのではないかと懸念されている。この場合、相同組換えによって、部位特異的に遺伝子を導入することが非常に重要になる。

2009年、米国において、Zinc finger nucleaseを用いた効率的相同組換えが報告された。この方法を契機として、相同組換え過程のより詳細な理解と、より確率の高い、そして安全性の高い遺伝子組換え技術の開発が期待される。

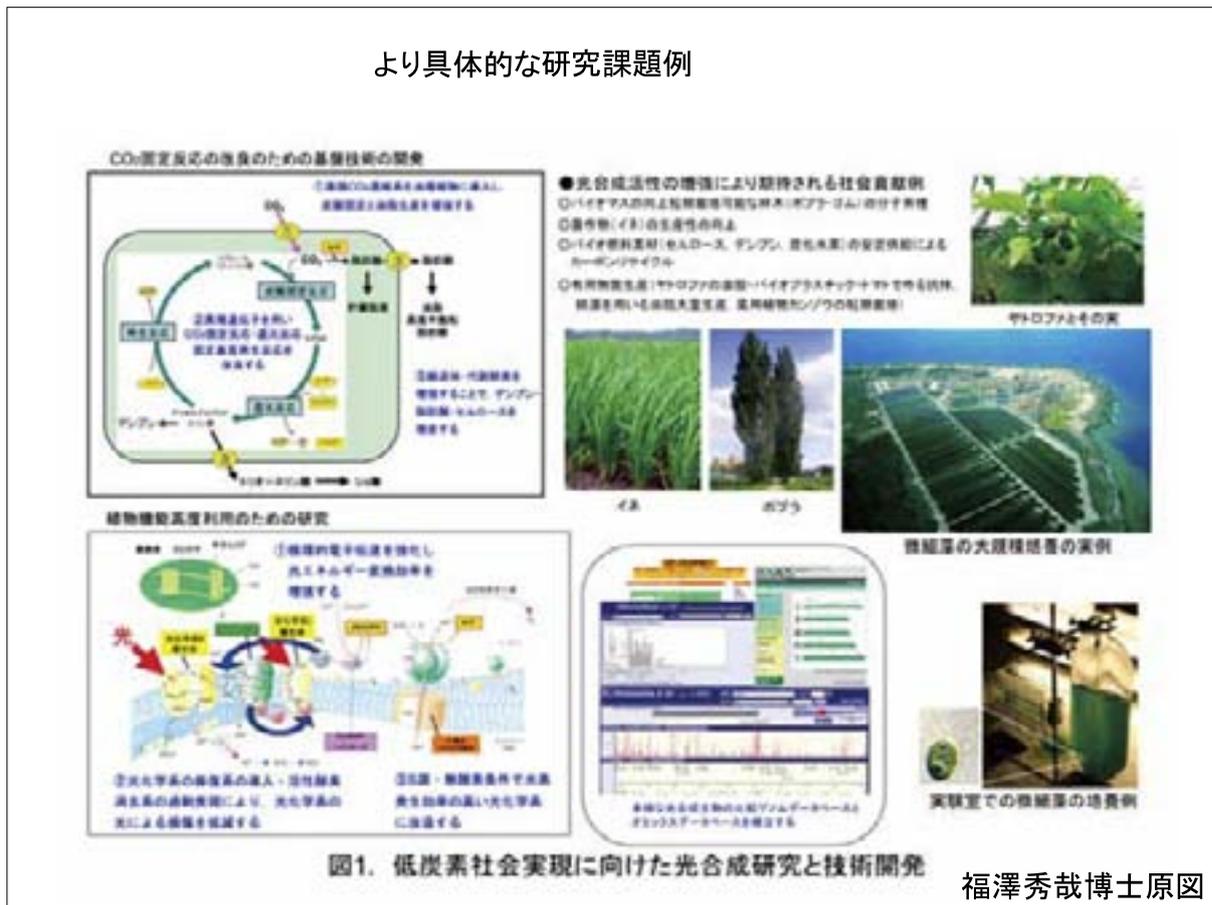


[1] ワークショップ概要

[2] ワークショップ詳細

[3] 考察および今後の戦略立案に向けた方針

なお、遺伝子機能の同定に関していえば、未だ遺伝子の理解は不十分であるといわざるを得ない。現在期待されていることは、ゲノム情報から遺伝子情報を抽出するときに、統合的なオミックス解析を行うことで、遺伝子機能の推定と、遺伝子ネットワークの解明が期待できることである。特に、転写因子のネットワークの解明は、今後の遺伝子機能の同定を加速するうえで重要である。



また、機能の同定された遺伝子は限られているとはいえ、遺伝子機能がわかってくると、単離された遺伝子を用いて代謝工学する、さらには、合成生物学で代謝系をもう一度作り直すことが可能になる。例えば、イソキノリンアルカロイド生合成系では、植物細胞の代謝工学とともに、大腸菌のなかにアルカロイド生合成系のプラットフォームをつくり、そこに新しく単離される遺伝子を組み込むことにより、単離した遺伝子がどのような機能を示すかを調べる事が可能になりつつある。このようなアルカロイド生産大腸菌が開発されると、それをタンクで生産したり、あるいは、新たに機能同定した遺伝子をもう一度植物に戻して植物の機能を高めることが可能になる。同様の手法は光合成についても可能であると期待している。光合成は植物バイオマス生産のキーファクターであり、その代謝工学、合成生物学・システムバイオロジーの発展は、植物科学研究のアウトカムの達成において極めて重要な貢献が期待できる。

### 2.3.4 植物バイオ業界と JT

#### 小鞠 敏彦（日本たばこ産業株式会社 経営企画部）

JT は現在、ライセンスを種苗会社などに使ってもらう立場である。主な顧客は、大手農薬会社・種苗会社などやベンチャー企業である。大手は、虫害耐性や除草剤耐性で事業化できているので、次に続く新規な形質遺伝子を求めている。ニーズは高い順に、多収、乾燥耐性、窒素利用効率となっている。要するに、多収を望んでいるということである。普通の多収、ストレスがあっても多収、窒素をやらなくても多収等である。耐病性は事業的にいろいろ難しい点があり、順位が落ちる。これ以外にはユニークな Enabling Technology についても需要がある。しかし、最終的なターゲットである作物で、実際に有用であることを暗示するデータが無いと買ってくれないという厳しい状況に最近なってきた。

## ライセンス顧客の動向

### ■ 主な顧客候補

- ◆ 種子会社: 主として、大手農薬系
  - ◆ モンサント、デュポン、シンジェンタ、BASF、バイエル、ダウ・・・
- ◆ バイオ燃料、Plant-Made-Pharmaceuticalsのベンチャーなど
  - ◆ しかし、ビジネスモデルは不明確、公的資金等に依存、将来性は依然不透明

### ■ まず要望するのは新規Trait遺伝子

- ◆ 1: 多収、2: 乾燥耐性、3: 窒素利用効率 …… 耐虫性、除草剤耐性、耐病性
  - ◆ 各社とも開発パイプラインに同様のTraitを配し、さらに強化中
    - 例(モンサント): 開発後期-乾燥、中期-多収、早期-窒素利用効率
- ◆ 対象作物: トウモロコシ、ダイズ、ナタネ、ワタ …… 燃料作物、イネ、コムギ

### ■ ユニークなEnabling technologyにも触手

- ◆ 遺伝子導入技術、遺伝子スタック、クリーンな形質転換体、規制対応コスト削減

### ■ 求められるデータ

- ◆ ターゲット作物、近縁植物(トウモロコシなら、最低でもイネデータ)
- ◆ 望ましくは圃場データ、最低でも(温室データ+圃場でも役立つ理屈)

For Discussion Purpose Only

November 9, 2009

3

Copyrights © 2009 Japan Tobacco Inc. All rights reserved.



## 顧客候補企業の開発Phaseとの関係

- 各社ともほぼ同様のPhaseの考え方で、開発パイプラインを管理  
(例示情報は、主としてモンサントのプレゼンから)
- 開発の道のりは長い: Phase IIから7年、全体で10年超100億の世界

Phase	Discovery	Phase I	Phase II	Phase III	Phase IV
内容	Gene/trait identification	Proof of concept	Early development	Advanced development	Pre-launch
必要期間	~4年	~2年	~2年	~2年	~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	遺伝子効果確認	大量形質転換、選抜	大規模圃場試験、規制データ	販売許可申請、種子増殖
使用植物	モデル植物	試験用品種	エリート品種	エリート品種	エリート品種
経費	~\$5M	~\$10M	~\$15M	~\$30M	~\$40M

アイデア検証から開発タイムラインには高い壁

トレイト技術のターゲット

Enabling Techのターゲット

For Discussion Purpose Only

November 9, 2009

4

Copyrights © 2009 Japan Tobacco Inc. All rights reserved.



大手の企業はフェーズという考え方にに基づき開発するパイプラインを管理している。その中で、アイデア、予備的な試験よりも先に進むものは極めてわずかである、一方で、数打たなければならないという面もある。開発タイムラインは Phase II からである。既に効果がある遺伝子、いわゆるエリート品種というものをを用いて大量の形質転換を行い、規制対応、商業化へと進める形質転換体を選ばれる。ライセンス商品と言えるのは、この Phase II に入ることのできる遺伝子からである。あるいはこの後半 (Phase III、IV) が最大 70 億円となるので、この部分のコストを低減できるような技術があれば人気は高い。

当社のライセンスは、既に 40 件以上の導出実績があるアグロバクテリウムを用いた穀類などへの遺伝子導入技術であり、世界的にも標準になっている。組換えトウモロコシの品種では、2004 年以降に栽培認可された品種のほとんどがこの方法を利用して作られた品種である。他に、ベクター・バックボーン配列の導入を抑制する技術、あるいは選抜マーカー遺伝子を排除する技術などにもライセンス実績がある。ただし、こういった Enabling Technology は、なかなか金銭価値が明らかにならないところがあり、今後、より利益の出やすい形質技術の方で商売をしていきたいところである。

## 既ライセンス特許例：単子葉への遺伝子導入法



*Agrobacterium tumefaciens*

野生型菌株 + 傷口での細胞分裂



非腫瘍誘導株 + 傷口での細胞分裂



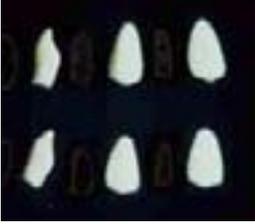
クラウンゴール

↓ **PureIntro**

非腫瘍誘導株 + 組織培養による細胞分裂誘導



カルス特許



未熟胚特許



単子葉形質転換体

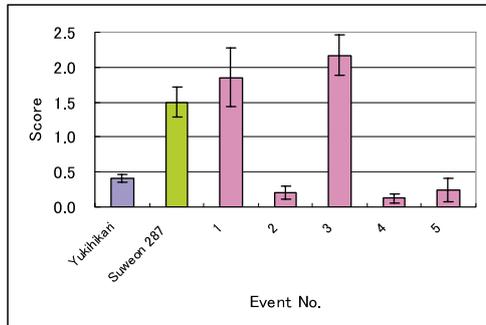
5 

For Discussion Purpose Only  
 November 9, 2009  
 Copyrights © 2009 Japan Tobacco Inc. All rights reserved.

## 今後のライセンス候補：新規乾燥耐性遺伝子など

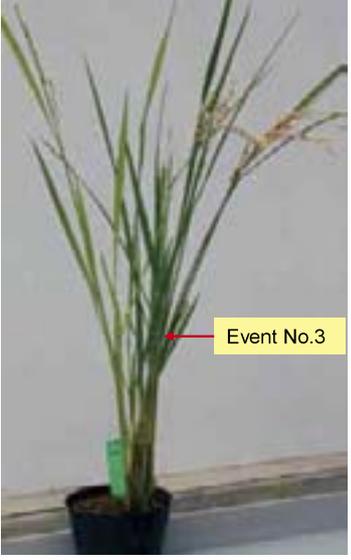
■ 今後はトレイト技術を売りたい ← Enabling Techより金銭価値明確

Two independent events were drought tolerant.



Event No.	Score
Yukihikari	~0.4
Suweon 287	~1.5
1	~1.8
2	~0.2
3	~2.2
4	~0.1
5	~0.3

Legend:  
■ : Stress sensitive check "Yukihikari"  
■ : Stress tolerant check "Suweon 287"  
■ : Transgenic



Three months after re-watering  
Flowering and fully ripening

8 

For Discussion Purpose Only  
 November 9, 2009  
 Copyrights © 2009 Japan Tobacco Inc. All rights reserved.

今期待している新規の乾燥耐性遺伝子は、ゲノム断片をランダムにスクリーニングするという乱暴な方法で探索したものである。現在もこの方法を使って乾燥や多収について有用な遺伝子探索に邁進している。

最後に、農業形質は非常にわからないところが多く、ブラックボックスの多い世界なので、とにかくできるだけ実用的な条件に近いところで大量に、大規模に形質を評価するという観点が非常に大事だと考えている。

## ゲノム断片ランダム選抜による遺伝子単離追求中

**30~40 kb のゲノム断片**

Genome 供与植物 → 30~40 kb のゲノム断片 → PureIntro® → 形質転換イネ

400 断片/週  
→ 20,000 断片/年

- ・顧客との早期連携がカギ
- ・まず、表現型を探索、メカニズムはその後

多収、乾燥耐性等の選抜 → 選抜断片 → PureIntro® → イネや他作物での効果確認

**TraitExplorer™**

For Discussion Purpose Only

November 9, 2009

9

Copyrights © 2009 Japan Tobacco Inc. All rights reserved.

### 2.3.5 討論

今回のワークショップ参加者に事前にアンケートを取らせていただいた結果を示す。議論の結果をまとめると、具体的な技術の開発あるいは新規植物の作出において着目すべき形質は、高生産性、高資源利用効率性、環境ストレス応答性、利用形態としてはバイオ燃料などが挙げられている。より具体的な研究開発課題や技術課題として何があるか、あるいはその技術開発に要求されるスペックは、高品質か、それとも環境のモニタリングなどの評価あるいは制御技術なのか。本セッションではこのような具体的な研究開発について検討を行いたい。

## アンケート結果：想定される研究課題について

- **技術の開発：**
  - **表現型に関する形質評価技術** (実験室内から自然環境まで)
  - 実験系で得られるomicsデータと表現型の関連付け技術 (**genotypeとphenotypeの相関を検出する技術**)
  - **形質関連遺伝子の単離・同定・人工的模擬環境または自然環境における機能評価技術** (SNP解析、QTL解析など)
  - 特定の形質に関連する**分子ネットワーク／メカニズムの解明・改変技術**
  - 遺伝子(群)の高度な**導入技術**
  - **大規模なゲノム情報の収集・解析技術**
- **植物(作物、樹木)の創出：**
  - **高生産性** (光合成、登熟、呼吸、窒素利用効率、形質のデザイン)
  - **高資源利用効率性** (窒素、リン、アルカリ土壌、塩類土壌、ケイ酸)
  - **環境ストレス応答性** (乾燥、高温、高CO2、オゾンなど)
  - **バイオ燃料**

Center for Research and Development Strategy - JST  
独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター

#### (1) 形質評価

→中川先生が紹介されたモデリングが様々な形質で行われることを期待している。これは、出穂期以外の形質においても可能なのか？可能な場合は、フィールドの環境整備や形質が研究推進上のハードルだと思う。

→同感である。形質評価がやはり鍵になる。形質評価が容易で精度の高いデータが手に入るものとして出穂期がある。一方、QTLの情報が多いのも研究を困難にする理由の一つ。適当な形質が無い場合には、人的資源が必要であり、力わざで形質評価を行わなければ、俎上にのせるデータがとれないのが現状。他に、多収性やストレス耐性といったところで特にトレードオフという問題が出てくる。植物が何かをすれば必ずコストがかかる。例えば、乾燥耐性に投資すれば、乾燥耐性はできるが、その分だけ別の投資が減少する。何かいいモデルケースがあれば是非やりたいと思っているが、難しさを感じている。

## (2) ゲノム断片ランダムスクリーニングにおける評価

ゲノムをランダムに導入するスクリーニングは魅力的だが、評価方法をどれくらい簡便化できるかが重要だと思う。乾燥耐性であれば比較的早く評価できると思うが、収量の評価は難しいのではないかな？

→乾燥耐性以外の評価は難しい。我々は乾燥耐性の評価方法として2種類行っている。水をやらずに生き残る厳しい選抜と、もう一つは、根の伸びの深さで選抜をかけている。多収については、収量は本当に難しいので、少し大きくなった、穂が大きくなった、背が高い、葉が大きいなど、どこか少しでも変化したものを選んでいく。温室で高密度に育てることで圃場条件をシミュレートしているような状態にして、選抜している。そして、できる限り早く圃場に進出させるために、温室で評価するよりむしろ、海外の企業との共同研究を行い、実際にトウモロコシに導入している。

→遺伝子組換え植物をつくる時に、普通の日本人の研究者の99%は、Phase IIのコンセプトを解く段階で終わっている。これが世の中に出すための重要なステップだと単純に考えてしまっている。それは、経験不足で知識が無いことに起因する。本来は、実用化というより、事業化という観点で物を考えていかないといけない。多くの遺伝子組換え研究者は、フェーズIII以降に70億円もの研究費がかかっていることを知らない。それができないから、海外にテクノロジーをライセンスで売って、向こうが何やっているかということのをのぞく程度になる。日本は高い技術がありながら事業化には失敗している。現在の日本のプラントサイエンスがそうだと思う。それを打破するために、産官学連携を十分にやっていかないといけない。

基本的には多収に関連する形質が重要で、多収あるいは乾燥耐性、そして窒素利用効率の順に重要ということがあったが、他にこのように着目すべき遺伝子の形質はあるのか。特にフィールド研究をしている中で見えてきたもの、あるいは遺伝子のネットワークという観点で考えたときに、着目すべきものはあるか？

→非常に限られた形質しかリストアップされていないのは、規制対応のコストと関係している。規制対応に、30億、40億円レベルでのお金がかかるため、大きな面積で栽培される圃場作物でないと商業開発自体が不可能なのだ。この理由から、現状ではダイズ、トウモロコシ、ワタ、ナタネの4種しか対象とならない。このような大型の作物でないと、開発パイプラインを考えられない。特にトウモロコシは、世界の種子市場の半分以上の価値を占めており、遺伝子組換え形質が登場したことによって、さらにその種子価格が倍になったという世界である。トウモロコシのことしかほとんど考えずに要望が出されるため、この程度の形質に限定されてしまうのが残念である。

### (3) 日本におけるアドバンテージ

想定される研究課題の中に、日本ならではの、あるいは日本の研究者にアドバンテージのある課題がないのはなぜか。例えば、畑作の場合、地球上の畑作地帯と比較すると日本は年間 1,500mm も雨が降る例外的な地域である。日本にとって、水ストレスは湿害になる。高温乾燥についても、世界的には問題だが、東アジアでは、耐冷性、冷害の方が問題である。そういう意味で、どうして基礎研究の中に、高温乾燥や塩類土壌とかアルカリ土壌などの要因が出てくるのか。

→実際に、日本でアルカリ土壌は、ごく限られた石灰岩地帯以外ほとんどない。しかし、日本の食糧を安定的に供給するためには、世界の食糧が安定的に供給されることが重要である。そのため、日本だけに限らず世界をターゲットにしてやらなければいけないということで、アルカリ土壌の研究を行っている。確かに、酸性土壌、たとえばアルミニウム過剰に対しては既に作物の候補ができているので、それらもターゲットにはなると思う。

→世界的に見ると、イネとトウモロコシの輪作ができるアジアモンスーン地帯での生産性向上が一番大切なのではないか。日本で言えば梅雨の間に畑作物、ダイズをつくる、米の後にムギをつくる。そういうときは本当に土壌、むしろ今度は過剰なのだが、そういう点がある意味では世界でもユニークであり、特に人口密度が一番高い、世界の人口の半分が住むアジアモンスーン地帯における農業の最大の課題ではないか。現在の新政権下でも自給率を上げる際の目標に出てくる作物は、コムギ、そしてダイズである。そうすると、湿害が重要になる。湿気への対応では大気と土壌が重要になると思う。

### (4) 日本における方策

育種目標を設定して、具体的に日本で推進すべきものは何か。それに基づき、基礎の部分で異分野の先生方はどの様に連携して行けばいいのか。また、技術開発をどうしたらいいのか。

→基礎研究とフィールドが非常に遠い。その例を紹介する。中国へ何度か渡航して、現地でストレス耐性のムギ類の選抜試験を行ったことがある。オオムギ、コムギを合わせて 1 万品種ほどを現地に植えて、10 年間、その中で非常にストレス耐性の高い品種が幸運にもできた。これが既に 1,000ha 単位で栽培され、中国科学院から名誉教授の称号をいただいた。しかし、実はこの品種を解析すると、その品種 A115 は、耐乾性、乾燥耐性においても、耐塩性においても、決して導入した品種の中のトップではなかった。要するに、耐塩性と耐乾性がある程度バランスよくあり、さらに現地で受け入れられるような農業形質があったため品種になったのである。特定の形質のチャンピオンにすれば解決するということはないのだ。

もう一つの例を紹介する。Phaseolus、インゲンマメを使って耐塩性の要因を調べた専門家が、適合溶質であるグリシンベタインがとてもきれいに品種間差を説明するという論文を書いて、意気揚々と現地へ出たのだが、現地では乾燥し過ぎて発芽しないので、グリ

シンベタインの前の段階で終わってしまう。やはり、要因解析的に非常にきれいな論文が書けても、なかなか現地は甘くないということを目の当たりにした例といえる。

→育種の立場から植物系の研究者にお願いしたいことが2点ある。一つは光合成である。篠崎先生からもあったように収量が一番重要である。収量は、生育期間と Radiation Use Efficiency と Harvest Index なのである。Harvest Index (収穫指数) というのは、緑の革命の際に CIMMYT や IRRI が実施した。しかし光合成については我々は効率をどこまで高めることができたかという、育種家としてはあまり自信がない。50年前と比べて光合成能力を高めたとすると、それを1枚の葉の面積レベルで言う表現と、もう一つは畑というポピュレーションで考えた場合での光合成能力がある。これを何とか高めないと、収量はもう伸びない。Harvest Index というのはもう 0.5 幾らまで上げているので、これ以上はもう理屈上、上がらない。そういう意味では光合成だと思う。しかし、これに関して、日本がどこまでできるか、比較優位性ということに関して少し出遅れているような気がする。

もう一点、特に日本で問題なのは、窒素利用だけではなく肥料の利用効率が非常に悪い農業を行っていることである。日本の農業は、単位面積当たりで最も化石エネルギーを使った農業を行っている。これは世界に恥ずべきことで、その中でも窒素をはじめとする肥料の利用効率を高めることができれば、これは環境にとってもいいことでもあるし、世界にとっても貢献するものだと思う。世界で使われている石油のうちかなりの部分が肥料に使われている。そのうちの半分以上がトウモロコシ、コムギ、イネという3つの作物で、全体の肥料のうちの15%がコムギで使われており、そのうち本当に植物に吸収されるのは3分の1で、あとの3分の2は環境汚染になっている。そういう意味では、窒素の利用効率を高める植物生理学、そしてそれをもとにした育種ができればいいと思う。

## (5) 情報

情報科学者、情報科学という分野の研究者がこういったプロジェクトに貢献できる部分はたくさんあるが、一方で、モデリング技術には、生物学的な知識が必要な面もある。情報科学者が貢献できる部分と、モデリング技術を担う生物学者が担う部分との違いは何か？

### 計算遺伝学・計算育種

- ▶ 大規模計算
  - ▶ 実応用の重要性・・・実データとの組み合わせ
    - ▶ 「計算機科学」と「計算科学」
    - ▶ 連続系アルゴリズム(数値)
      - ▶ 大規模シミュレーション(天体・気候)
        - 行列演算・連立方程式
        - cf. 地球シミュレータ
      - ▶ 非連続アルゴリズム(非数値)
        - 離散的アルゴリズム
        - ▶ 「ゲノム」や「バイオ」(食料・エネルギー・医療)
          - 組み合わせ探索
          - 文字列処理
  - ▶ 教育プロジェクト
    - ▶ 学部・大学院
      - 理学部 生物情報科学科
      - 大学院新領域創成科学研究科 情報生命科学専攻
    - ▶ 学際計算科学・工学人材育成プログラム
      - 東京大学 情報基盤センター他

Googleヒット数(2009/11/6)

“計算遺伝学”: 5件

“計算機遺伝学”: 8件

“計算育種”: 3件

“computational genetics”: 14,000件



→情報科学は「計算機科学」と「計算科学」に分かれる。「計算機科学」は、計算機自体を研究している純粋な情報系の分野である。一方で、私の立場は、「計算科学」の方で、計算機を使った科学を行う。例えば科学の部分を遺伝学とか育種に適用する。**computational genetics** は、例えば「計算遺伝学」や「計算機遺伝学」あるいは「計算育種」と訳すが、検索してもほとんどひっかかってこない。バイオロジカルなモデリングを行う研究者は、どちらかという「計算科学」の中で、計算生物学や情報生物学と呼ばれている立場にある。

東京大学情報基盤センターでは、「教育プロジェクト」としてスパコンを使った計算科学によって天体や気候のモデリングを行おうとしている。地球シミュレーターは、計算機自体とは関係ないが、地球を計算機の上に乗せて研究するものなので、食料やエネルギー、医療などに応用することで、アプリケーションとして貢献できるのではないかと考えている。

連続系アルゴリズムは、従来流体力学を使っており、我々のゲノムや遺伝学、遺伝子の組み合わせとは若干異なった計算方法を取らないといけない。いわゆる非連続的な、数値アルゴリズムではない扱いをしなければいけないものの、大規模な行列演算・連立方程式を解くのはスパコンである。いわゆる組み合わせ論や離散的なものはスパコンでは十分に取組まれていない。例えば、ゲノムやバイオロジーなど、いわゆるキラアプリという意味において「計算機科学」の研究者の実応用先として非常に高いニーズがある。そういうところは、15,000プロセッサもあるような巨大なスパコンがあるような部局と一緒に取り組んでいる。

医療の分野では、計算科学者と医者との融合が進んでいるが、植物の分野ではどうなのか。その際に何が、問題なのか。

→資金があると人は集まってくる。ただ、コミュニティとして必ずしも重なっていなかった部分もある。例えば統計遺伝学においては、統計学者と遺伝学者が共同研究してきたが、計算機と育種では**QTL**解析をたくさん行ってきたわけではない。やはりデータがなかったのが一つの原因である。

私自身は、10年以上前に、**QTL**解析を初めて試みたが、実データがなかった。例えば共同研究で製薬会社等とある程度の期間研究した後は、データを引き上げられてしまいもう研究できなくなってしまった。新規参入しにくい状況もあった。正確なデータでなくても良いので、何かあると参入しやすい。また、学生にとっても、実際のデータを使って研究するとリアリティーを持つことができ、何年か後にはプレーヤーとして参入してきてくれる。

→このような動きの中で「統合」は一つの大きなキーワードである。これだけ多く出てくる様々な情報を統合するツールとして、アメリカでは**NSF**のファンドにより、**iPlant**というプロジェクトが動き出している。そこでは、具体的に遺伝子レベルから個体、群落まで情報を統合しようとしている。まさに溢れている情報を組み立てて包括的に理解しようとするコラボレーティブなプラットフォームを**NSF**がサポートすることになっている。このような動向は確実に世界的に広がるであろう。これをネットワークでつなげていくような動きがいま、世界で起こっている。

→ iPlant のように大量に情報が蓄積されてきた結果を統合すべきというのは、イギリスの BBSRC のファンディングでも言われている。オーストラリアの方でもそのような機運は大分前から立ち上がっている。その中で日本は今日の取り組みを通じてまさに議論し始めたような状況だと思う。

→ 確率的な方法で見ていくモデルと仕組みを理解して仕組みを結合させていくモデルと、両方がある。今のところ、やはり仕組みが追いついていない。確率的なところから仕組みを組み入れたようなところになってくると、基礎的な基盤が充実するのではないかという期待がある。

→ バイオロジカルに要素をただ足しただけでは説明できないことがわかってきた段階である。決して個々の要素を研究して、それを足しても多くの要素がわかるわけではない。遺伝学においてもそのような **Epistasis** が重要だということがわかってきた。医療でなぜ先に進んだのかというと、医療は操作実験ができないために、個々の要素を追究できないため、外側からやらざるを得ない状態になったからである。生態学もシミュレーションや計算科学との距離が近い。遺伝学とか分子発生学においても明らかにデータが大量に得られるようになってきただけでなく、本質的に相加的でない部分をそこから抽出してきて、そのメカニズムを研究しないといけないという段階に来ている。もちろん野外の複雑な表現形質をはかることには困難さはあるが、それを超えなければならない。

→ 日本で多分今一番弱いところが、表現型とジェノタイプを結びつけるところである。理科系でありながら数学が弱い人間が農学部に行ったことが一つの理由。さらには、そもそも物を数字でとらえることが非常に弱くなっていて、例えば DNA にしてもバンドがあるかないか、遺伝学は塩基が 4 つという時代。ところが、表現型は要素が多過ぎてそこまでできていない。そこをどうするかというところで、公的機関として品種改良という点では、CIMMYT（国際トウモロコシ・コムギ改良センター）が一番の歴史を持っている。そこと一緒の研究しようとしたモンサント、パイオニア（デュポン）と比べてみると、計算技術に圧倒的な差がある。向こうの方が先見の明がある。しかしながら、実際のデータ、表現型としてのデータという、データポイントの数では、何億と CIMMYT が蓄積している。これは 50 年近く世界各地で積み上げた評価のデータがたくさんあるためであり、それをどうジェノタイプに結びつけるかということが今非常に重要な課題となっている。中谷先生の話にあった、こういう分野が参入してくることが、表現型、フェノタイプというものをうまく理解していく一番の基盤的な技術になるのではないか。

→ その計算科学的な手法をどううまく遺伝解析や育種に使っていくかが一番のポイントだと思う。結局、それが進まない理由は、意外とマテリアルがないことではないか。解析すべき材料がたくさんあり、品種もたくさんある。しかしながら、育種的に見ればそのゲノムを混ぜないといけないが、自殖性の作物は意外と混ぜっていない。そのため、ゲノムの手法や計算科学的な手法が出てきた。フェノタイプは難しいけれど、調べる方法がある。でも、価値のあるマテリアルが実は一番遅れている。それをみんな今一生懸命育種の分野でつくろうとしているが、ゲノムをシャッフルするような作業は長年行われてきて、例え

ば他殖性だとそれが実際に自然に起きてきたかもしれないのに、意外とそれが起こっていない。特に育種となると、非常にリージョナルなターゲットを目指すので、使う遺伝子資源が限定されると、ダイナミックなシャッフリングが行われにくい。そういう中で、先ほどのような計算科学的な手法やゲノムの情報が、ポテンシャルを使い切っていない。そこも一つうまくいかない理由。どうやって解決するかというと、地道にやっていくしかない。このような部分をうまく融合させるような、材料が少しでもできてきたらいい。もう一つ欠けているのは、モデルの結果を現場に出して、そこから得られたものをもう一回フィードバックするようなループがない。そこも工夫しないといけない。

→多収の品種を求めようとする、これまでとは全然違ったコンセプトとなるので、捨てられてきた品種がかえって多収になることもある。あきたこまちをはじめ、ごろごろと材料は転がっている、ぜひ取り組むべき。これからCO<sub>2</sub>濃度が高くなるのは必至で、恐らくシンク・ソースの問題、光合成はするが、同化産物の行き先がしばらくなく、フィードバック阻害がかかるので光合成は増えないといった問題が生じると思われる。それから、窒素をやり過ぎている場合でも同じことが起こる。そこからいくと、昔捨てた品種の中からそのシンク・ソースの関係というのを拾い出すということはまだ可能だと思う。また、栽培方法自体も随分工夫されてよくなってきている。私はそういう栽培法もフィールドサイエンスとしてもう一遍見直さなくてはいけない面が十分あると思う。集約的な農業で多収を目指した人たちが頑張るだけで終わってしまっているところが随分あって、それを根本的にやり直さなくてはならない時期に来ているのだと思う。それは植物を植える作物研究者だけではなく、いろいろな人たちが協力しないとできないものであり、大きなフィールドが待っているのだと思う。

→今、光合成において何が律速かということ、光が吸収されない、光のエネルギーコンバージョンなどである。本当にシンク・ソースで送り出しがちゃんとできているのかということもある。炭酸固定も重要である。一番わからないのはフォトコンバージョンのところで、これは非常にロスが大きいのだが、改善可能なのか、あるいは単に光のストレスを回避することが、植物にとってよりメリットがあるのかといった点がわからない。今までのセレクションの中では、収量が前面に出過ぎていたので、光合成の影響が逆にわからなくなっていた。それをもう一度、今まさに遺伝子レベルで解析できるようになってきた。だから、逆にそのような形で分子レベルからもう一度現場に戻していけるような時代がきているのではないか。既にイオンプラズムもあるので、そちらからのフィードバックと両方合わせると、まさに先ほど指摘のあった、表現型とジェノタイプとの結びつけが解決できるのではないかと期待している。

→今まで光合成といった大きな言葉で使われたものを、もっと分析的に見ていく。その手法として遺伝学者が期待したのは、例えば光合成能が高い系統と低い系統を交配してその中でどういう遺伝的要因が違うかが明らかにされたのだが、今度はそこから、どういう遺伝子があり、それがどう光合成に関係しているのかという、遺伝学の方が材料を準備して、そこに生理学系の人材が入ればもっと要素が統合化できるという点である。今、時代はこのような段階に入ってきているような気がする。

→光学的計測はものすごく発達している。光合成の律速要因は幾つかの光学的な測定で瞬時にわかる。そういうのを、ブドウ等でスキャンしていくと、畑でこれはできが悪いとか、これがいいとかがわかってしまう。それはすぐにデータとして取り込める。だから、プレジジョンアグリカルチャーとヨーロッパの人たちが言っているようなことを、表現型として最後に収量を見るだけではなく、育っていくときからずっとスキャンしてリアルタイムで追いかけて品種間差を見ることを行っている。光合成についても開発すれば、このようなことが可能である。蛍光というのは、光に当たった、緑の葉っぱに当たった中で2%ぐらいしか出てこないで、それが増減する様子を、周りのバックグラウンドをちゃんと差し引いて計算して、光合成の電子伝達速度を算出している。フィールドでリモートセンシングをやって正確なデータが得られる。こういうことが非常に進んでいるのに、日本ではうまく導入されていない。

→今の点について、確かにいろいろな技術が進んで、非常に詳細に情報を得られる。だが例えば遺伝解析を行う際には、そのスケールがちょっと大きくなったり、サンプルが多くなる。それに合ったような計測の仕方が最初からできている場合もあるし、そうでない場合もある。このようなときに、実はそこら辺がもしかしたら共同でやるチャンスなのかもしれないが、例えば光合成も個葉の光合成能力を直接遺伝解析するのは、それこそスーパーマンでなければあの炎天下に出ていけない。あるいはちょっとでも曇ったらもうデータがとれないというような、非常に天気左右されるような状態でやっている。もっと素早く何かができるということがあれば、恐らく今言われたように、すぐにでも遺伝解析とか、それが最終的には育種へという可能性もあるのだが、まだ非常に詳細にわかるものが必ずしもすべて現場で簡便にできない。逆にそこが、何か新しく基礎研究がどんどん例えば橋渡しの的に出ていけるチャンスにもつながる技術開発にもなる。

→光が当たって環境が変わると値も変わるので、それがネックでありおもしろい。さらに、少々長い時間、ロングタームの平均値をとる様なことが、例えば安定同位体を使うとできる。例えば直接とった葉の sucrose を抽出し、その安定同位体を測るだけで、どういう状況で光合成していたか、かなり予測できる。だから、短いタイムスケールのどれだけ光合成機能が働くかというのを知りたい測定とロングタームの測定と、各種取りそろえることができつつある。どのくらいのタイムスケールで物を考えるかによって、適切な方法は違ってくる。それくらいテクニックは進んできている。

## (6) リモートセンシング技術

リモートセンシング技術というのは、もうかなり成長の度合いをモニターして数値化できるようなところまで来ているのか。

→来ている。

色や生育を見るというあたりはどうか。実際にそれが環境情報とともに全部取れば、非常に重要な情報となる。モデル植物でも、ある形質を見ているばかりで、ライフサ

イクルにおいてそういうデータをとるということは今までやっていなかった。

→フランスにはこのような事に取り組む施設がある。

→フェノーム解析を今後どうするかは非常に重要。一体どういう形質をどうやって定量化し、今までわからなかった形質にまで抽出できるのか。今、生物学も定量化の時代で、定量化をして、それが形質と結びつくようにしないと予測できない。計算科学が入ってくる場合は、こういうことがあればこうなるだろうというふうに予測できないと意味がない。この辺をうまく取り入れられると、畑の問題も定量化できるのではないかと。とにかくモデル植物は非常に単純で、遺伝子を1個壊したら形質が出て、それで1本論文を書こうという、非常に単純なもの。そうではなくてもうちょっと微妙な形質をモデル植物でも見なければいけない。ノックアウトで表現型というところから、もっと違うところに行こうとしているのではないかと。

→確かにそのような技術が非常に重要で、それができるのが植物科学の特徴である。生態学ではフィールドにおいて動物の同じ個体を追跡し続けることは難しい。だから、ほとんど飼育下の研究か、1個体1個体別々に飼育した研究がほとんどである。フィールドで個体を追跡できるというのは植物科学の最大の強みである。その時点で既に利点を持っているので、そこでさきほどの光学的なデータを入れていくような仕組みや安定同位体を駆使することで、野外で実際に表現型を研究できる。これは、植物科学だけの問題としてではなくて、生物科学全体の中で植物科学がリードして取り組むべき課題だ。

どういう形質をどう定量化するかを具体的に進める場合、今足りない知識や技術という面で、どこに穴があるのか？

→フェノタイプで、メダカやマウスを評価する統一的な方法はない。画像処理技術の共通的なソフトウェアのパーツみたいなものは作れるが、特定の個体群において、あるいは同じマウスでも、全然脂肪のついていないもの、非常に脂肪だらけのものもいて、その2つの種類が同じソフトウェアで解析できるかどうかは解らない。例えば別の生物種になったときには、やはり地道につくり上げていくことが非常に生産性は悪いが必要であり、面白いところである。要素技術はもう意外とできているが、データ依存の部分はどうしてもそういう泥臭いところをやらざるを得ない。

→計測技術は非常に進んできている。リモートセンシング、特に遠隔計測なども色々な意味で発展してきてはいるが、計測技術側と植物学者側で基本的に対話が少ない。そのため、ミスマッチが起こる。個々の技術、例えば具体的にターゲットを絞って、例えばこれだけのシステムをこれぐらいの時間で実際にはからなければいけないのだが、実際にそれをやってほしいという具体的な要望と、全体的な仕組みの理解と、ターゲットを絞った形質の評価にどれだけ計測分野の人たちを巻き込めるかというのが重要になる。やり方によっては幾らでもできるので、このままいくと平行線に終わってしまう部分がある。そういう意味においても、融合は非常に重要。

## (7) 光合成以外の窒素の利用効率について

窒素利用の観点から、土壌等に関する技術、植物生理的な応答などに関してコメントを頂きたい。

→窒素利用率の向上は本当に大きな問題である。今後研究を進めなければいけない。また、肥料の方からも改良が進んでおり、スローリリース肥料というものがある。コーテッド肥料といって周りをコートし、その植物の生育ステージに合わせて肥料をリリースできるものも実際に開発されている。このため、植物の側と肥料の側とで肥料をうまくプログラムして利用効率を上げるということも可能である。それから、もちろん植物生理の分子機構を明らかにすることによって利用効率を高めた作物をつくるということも可能である。

## (8) 遺伝子導入技術

遺伝子の導入技術について、技術発展が望ましいのか、あるいは全く新しいものを何か望んでいるのか。また、導入のためのテクノロジーやQTL解析のためのテクノロジーなど、育種に向けたテクノロジーに国のファンドが必要かどうかについてコメントいただきたい。

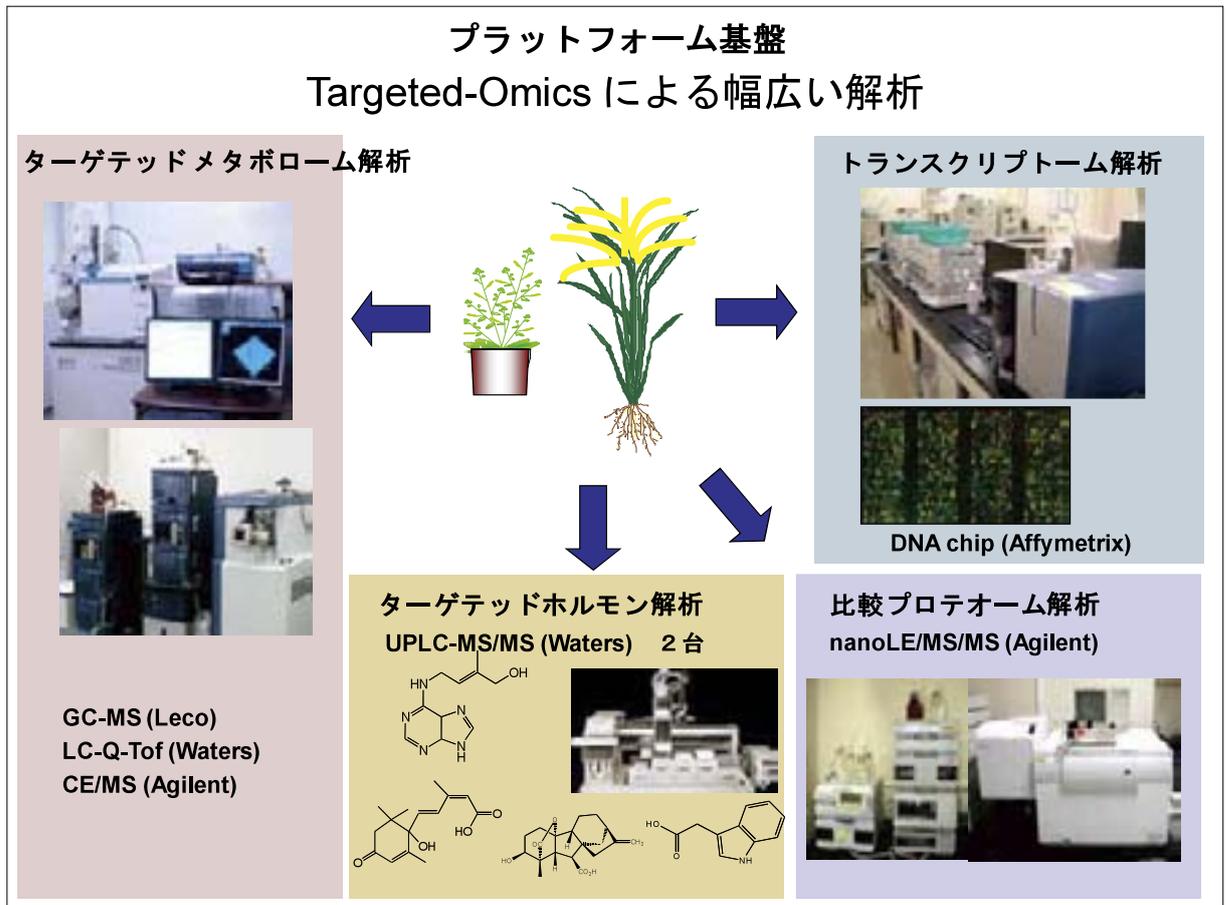
→Zinc finger nuclease もまだ完全ではないので、ピンポイントで遺伝子を導入する技術革新がまだ必要だと思う。ただ、ジーンターゲティングが使える技術になったことで、ある特定の遺伝子座にある変異を入れたり、遺伝子を置換することは可能になってきた。ノックアウトもまだ必要だと思う。ノックアウトしたものの上にもう一度新しい、望むような遺伝子をのせていけるのか。また、合成生物学的に組み立てられるかどうかということが非常に重要で、その上で表現型が評価されることも必要だ。

## 2.4 セッション3. 研究開発の推進方策

### 2.4.1 寺島 一郎 (東京大学 大学院理学系研究科)

推進方法として、組織づくりあるいは人材の養成、技術革新、および研究拠点の形成の3つがある。分子生理学から個体の生理生態、あるいはもっと上の生態系レベルまでの正しいスケールリングが可能になるようなコンソーシアムを作ることが重要である。そのコンソーシアムを乾燥耐性や、過湿などのテーマに対する、分子生理学から個体生理学に至る異なる分野の研究者が、興味を共有し合いながら議論ができる場にするのが課題解決に有効であるとする。

また、教育の問題がある。分野の壁をものともせず、興味を持つような人材を養成しなくてはならない。インターディシプリナリーな教育が、博士課程から必要だと思う。そのような学生を、コンソーシアムの共同研究に投入して、様々な分野の先生たちとの議論に参加させたり、共同研究をしたりするような機会が必要だと思う。教員としては、学問が細分化して業績主義になっている時に、のんびり他の分野も勉強しなさいというのは勇気がいるが、そのような人材育成が今、必要である。そうしなければ、**agronomist** や **ecophysiolgist** が絶滅してしまう。このような素養を持った人たちが育ってくれることを望む。



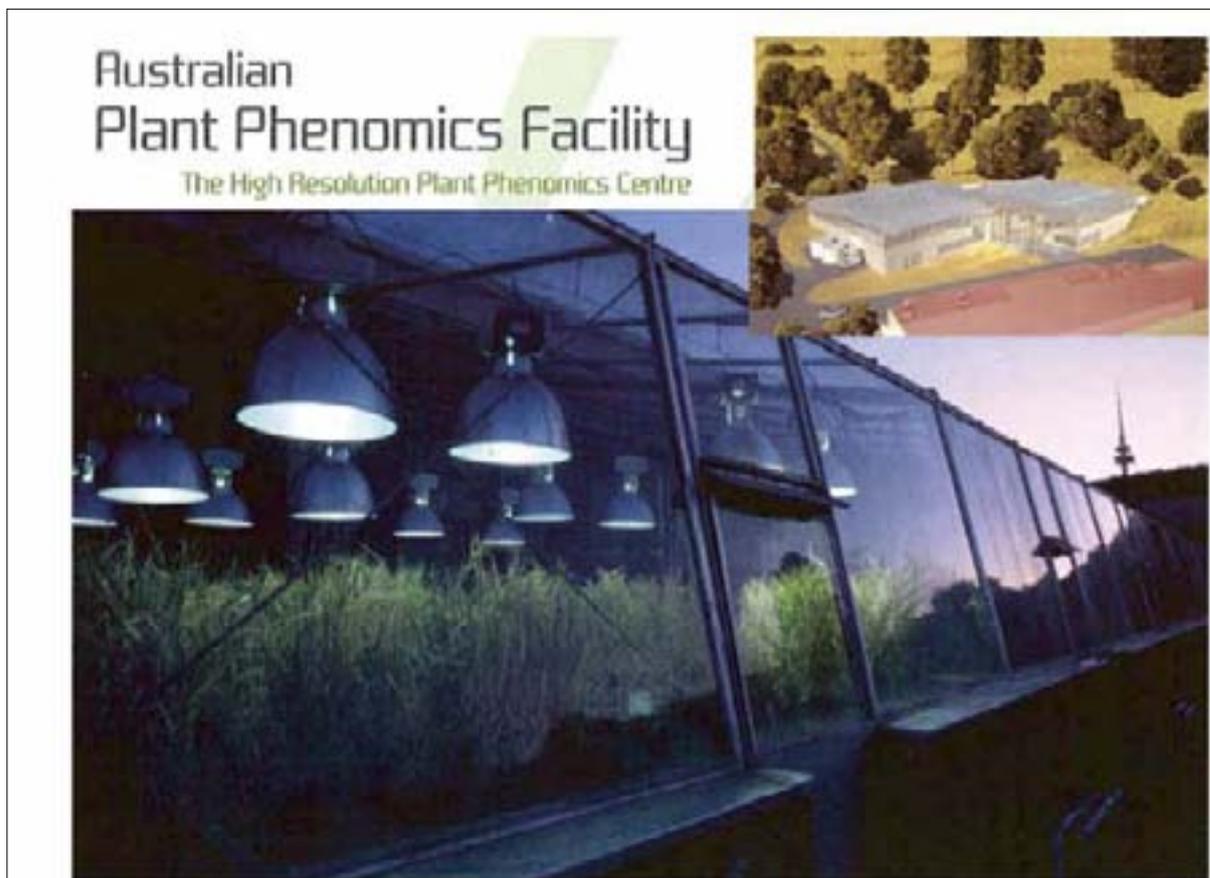
技術革新に関して、omics が非常に精緻を極めて様々なものが明らかにされている。この基盤に立って、例えば、医療における諸検査のイメージで、とにかく血を採りましょうなどと言われるが、植物の生育の様々な局面で、植物が今こういう状態であると判断できるようなシステムが必要である。分子レベルの仕事でいろいろとひっかかってきているものを一網打尽にするような簡易な omics、それを targeted と呼んでいるわけだが、そういうのを、プラットフォームを作ってやる。この諸検査は他にも使える道具になると思う。タイムスケールにおいては、瞬時に測定できるものから、長期間のデータを平均したデータを取得するような安定同位体のデータもある。そういうものを組み合わせることもできると思う。



近距離リモートセンシングやイメージングというのは非常に進歩している。要求を出せば作ってくれる会社はあると思う。現在、フランスではブドウの実をスキャンするだけで、アントシアニン量、糖度、クロロフィル、水分含量を瞬時に測定することができるポータブルシステムが用いられている。一株に八つぐらい実をつけているのだそうだが、それをずっとスキャンしていっただけで畑のマイクロトポグラフィと一致する精密なデータがとれる。昔は何週間もかかって一粒一粒と潰して測定していたものが、管理がすごく簡単になったと言っていた。そのプレジジョンアグリカルチャーは印象的だ。

安定同位体は、乾燥標品測定においても有効だが、光合成や呼吸をオンラインで測定すると、 $\text{CO}_2$  が葉緑体まで拡散するのにどのくらい抵抗があるかが分かる。アクアポリンが実は  $\text{CO}_2$  を通しているというのもわかっているが、そのアクアポリンがどれくらい開

いているか、植物は、シアン耐性呼吸という呼吸を行うが、その呼吸が全呼吸にしめる割合も安定同位体の酸素の 18 と 16 の比率をきちんと測定してやるとわかる。窒素の吸収は農学上大切で、根の呼吸の半分以上が窒素の吸収のために使われているわけで、呼吸の研究は非常に大切だ。



オーストラリアではこういった研究をするための施設をつくっている。1960年代につくられたファイトトロンのリノベーションをしながら、phenomicsに対応できるようにしてある。

[1]  
ワークショップ概要[2]  
ワークショップ詳細[3]  
考察および今後の  
戦略立案に向けた方針

## 2.4.2 「橋渡し」研究開発の推進方策

西澤 直子（東京大学 大学院農学生命科学研究科）

植物は、土壤中、環境中から 17 種類の無機元素を吸収して、光合成をする。このため、どの元素が欠けても植物は生育しない。アルカリ土壌、pH の高い土壌というのは、鉄が溶けにくいために植物は吸収できずに枯れてしまう。世界の約 30% がアルカリ土壌であり、そのような場所では鉄を吸収しにくいいため、植物の生産性が低下してしまう。このような土壌でも、高い生産性を上げられるような植物を作りたいと思い、植物の鉄吸収機構に関する研究を進めた結果、現在、3 つのアプローチによってアルカリ土壌耐性イネを作出することに成功した。

### 3つのアプローチによるアルカリ土壌耐性イネ

左；非形質転換体、右；形質転換体



キレート戦略  
強化イネ

還元戦略  
強化イネ

転写因子  
発現強化イネ

これは CREST の「植物の鉄栄養制御」というタイトルでのファンディングをいただいたものだが、まずはキレート戦略。土壌中の溶けにくい 3 価の鉄をキレートして溶出する能力を強化して、アルカリ土壌に強くなったイネ。それからもう一つは、3 価の鉄を 2 価に還元することによって、より水に溶けやすくして、鉄吸収能力が高まったイネを作った。さらに、鉄を吸収、獲得するために働く多くの遺伝子をまとめて制御しようということで、転写因子の発現を強化したイネを作った。このような 3 つのアプローチによって、それぞれ、アルカリ土壌に強い、つまりアルカリ土壌でも鉄が吸収できるイネを作っている。



これは、それを実際に隔離圃場で検定したときの様子である。この隔離圃場実験は、きちんとしたイネの試験ができる隔離圃場が他になかったため、東北大学の附属農場で附属農場長の三枝正彦先生との共同研究で行った。隔離圃場に石灰質アルカリ土壌を 100t 搬入し、石灰質アルカリ土壌水田を作成した。温室栽培で石灰質アルカリ土壌に強かった形質転換イネが圃場レベルでも耐性であるということを証明できた。

これを進める際に感じたことは、フィールド研究者との密接な連携が不可欠ということ、またフィールドの方から必要とされる作物を育種することが重要であるということ。我々は、幸いにも東北大学の三枝先生と同じ植物栄養学の分野というところで興味を共有でき、一緒になって密接な連携のもとでこのような試験ができた。そして、フィールドと実験室とのフィードバックの繰り返しというのが重要だということも感じた。この鉄欠乏に耐性の作物というのは、日本ではあまり必要とされていないが、世界的には非常に重要な問題で、実際に石灰質アルカリ土壌を抱えている国の研究者は、これを何とか解決したい、アルカリ土壌に強い作物、植物を作るとというのが夢である。

## 研究開発の推進方策

**フィールド 研究者との密接な連携**

**フィールド から必要とされる植物の育種**

**「橋渡し」を担うプレイヤー**

**知財管理**

**環境制御温室**

**様々な環境の圃場**

**観測データのマネージメント 手法**

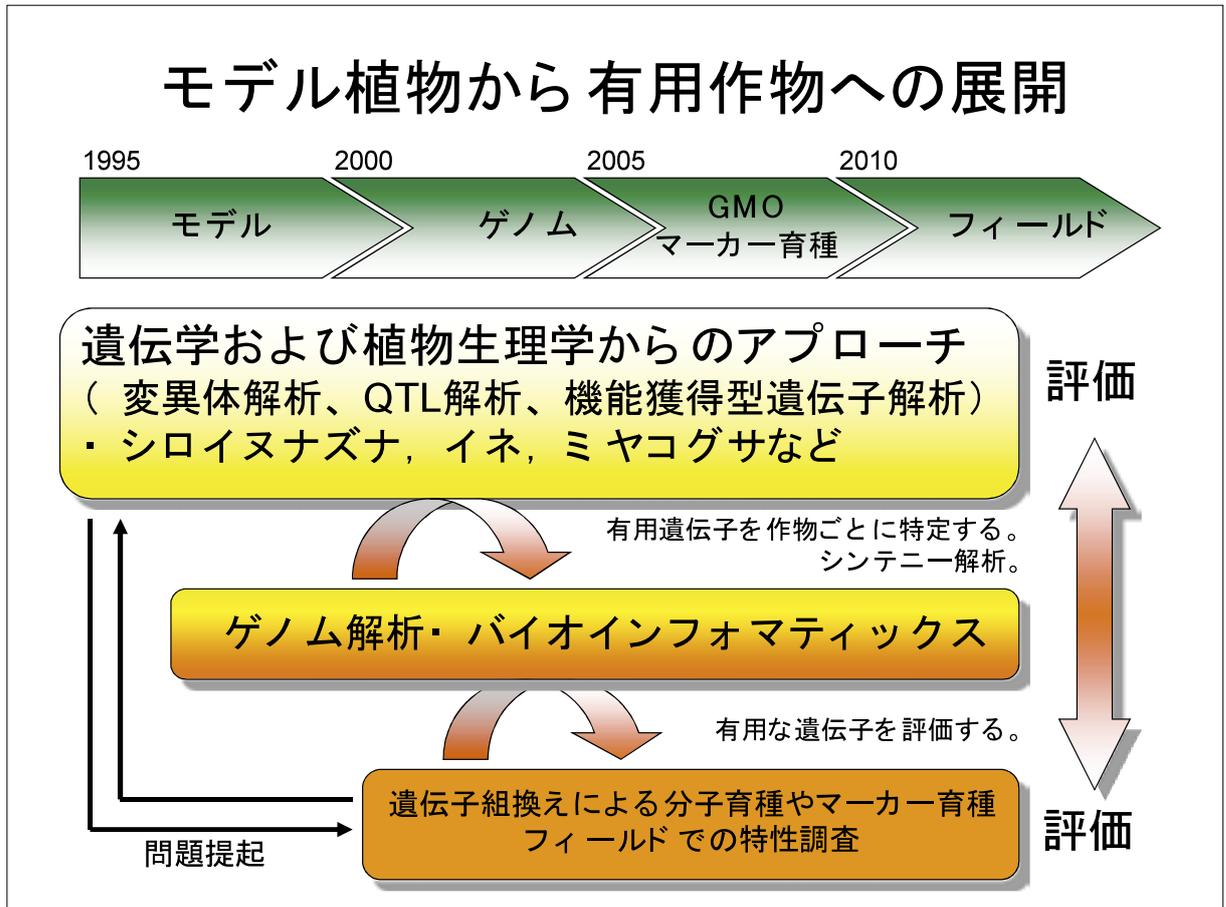
今回、実験室レベルからフィールド研究者への橋渡しが中心になっているが、それだけではなく、実際に圃場で耐性が確認された後にも、まだ、実用化、事業化するためには大きなギャップがある。2つのギャップ、死の谷、ダーウィンの海がある。

他にも細かいことでは、知財の管理というのをどうしたらいいか。これは大学の研究者はなかなか難しい。それから、環境制御温室。これは遺伝子組換えの植物をつくる場合には隔離温室が必須なのだが、現状では絶対数が足りない。どこの大学でも奪い合いになってしまう。

もう一つは、さまざまな生育環境の隔離圃場。これは私達が形質転換イネの石灰質土壌耐性を評価する時に、東北大学しか使えないために、わざわざ違う場所から土壌を運んできて隔離圃場内に水田をつくって試験をした。でも、そうではなくて、本来であれば日本だけでもさまざまな環境の土地あるいは土壌、それから気候等もあるので、さまざまな環境において試験圃場が整備されてほしい。

最後に、我々は圃場実験をするときに、観測データの一部として、毎日写真を撮った。また一カ月に一度学生が生育調査を行った。これだけではなく、観測データをある程度ルーチンに画像化して、あるいは数量化して取り込んで、それをマネージするというような手法が必要だと思う。

2.4.3 明石 良 (宮崎大学 フロンティア科学実験総合センター)



今までをまとめると、大きく分けて三つほどある。一つは、やはり今までのモデル植物を使った基礎的なもので、ここでは十分に評価されているということになる。その後、先ほどからバイオインフォマティクスの話も出ていたが、その部分を強化していき、さらに最後の、遺伝子組換えによる分子育種やマーカー育種のフィールド特性調査が出口になるのではないと思う。すなわち、今までの評価とこのフィールドの評価がともにイコールになっていくということで、この橋渡し研究の一つの成果が出るのではないかと考える。例えば基礎で出てきた重要な遺伝子は、当然フィールドに出てくる評価に対する遺伝子でもあるので、そこら辺のところはこのフィールドのところでも十分活用できるのではないかと考える。

例えば今私が使っている、ミヤコグサについて「モデル植物から有用作物への展開」という中で、ダイズは、先ほどから窒素肥料の話も出たが、根粒形成、そして窒素固定という非常に重要な形質を持っている。そこら辺のところは徐々に遺伝子も明らかにされ、ミヤコグサについては、かずさ DNA 研究所の田畑先生を中心とした成果により遺伝子もわかってきたので、これが一つの突破口になるのではないかと考えている。

もう一つは、武田先生からも提案があった耐湿性の部分である。今、ダイズでは耐湿性の品種というのは非常に重要視されている。ミヤコグサは日本在来の植物なので、様々な形質を持っている。それを使ってセレクションをかけ、その中から耐湿性の高いものを選んでいく。一つは、いわゆる在来種である遺伝子資源を用いて、環境耐性評価を行って

[1] ワークショップ概要

[2] ワークショップ詳細

[3] 考察および今後の戦略立案に向けた方針

くというのも重要ではないかと思っている。あとは、武田先生がオオムギで非常に重要な耐湿性の形質をとられているので、今度はマメに限らず、オオムギなどの違った作物からヒントを得て、異なる観点から耐湿性の遺伝子を探索することも重要ではないかと思う。

このようにして、例えば一つの繋がりを作ることによって新しい分野ができれば、そのところで必ず人材育成ができていくと思う。その人材育成を行って行く上でも、我々が一つの分野を作ることの重要性ができてくるのではないか。フィールド調査というのは、時間がかかる。通常的基础に比べたら1年、2年、特に宮崎でいうと、台風が来るとその1年が駄目になるぐらいに非常に厳しい状況だ。従って、フィールド研究をどこまで行っていくかは、なかなか難しいものではないか。幸いにも宮崎大学はP2まで使える温室、そして、ちょうど来週、約4,000平米の隔離圃場ができる。このような設備や研究が今回の提案した橋渡し研究の中で利用できるものと考えられる。

#### 2.4.4 討論

事前アンケート結果およびこれまでの発表で、大規模なフィールドテストなどを行う上で、プラットフォームとなるような拠点は欠かせないという意見がある一方、現状ではネットワークが必要という意見もある。またそういう大きい枠組みの中で責任者を明確化していくことが必要、あるいはこれまで agronomist あるいは ecophysiologicalist など、人材育成が必須であるという意見がある。これに対してコメントを頂きたい。

AT A TCTATAAGA CTCTAACT

## アンケート結果：推進方策について(体制)

- **ハード的な拠点は必要ないが、異分野の個人研究を統合する情報交換の場としてのネットワーク(組織)は必要。**
- **複数機関の緩やかなネットワークでは不十分で、同一拠点を利用した問題解決型チーム研究のような強い目的意識を持ったグループでの研究が必要。**
- **出穂・開花期以降で根系制限しない条件下で初めて評価が可能な形質も多々ある。それらに挑む場合は、大規模にフィールドテストを行うためのプラットフォーム(=拠点)、大型の環境制御装置、技能員などの人的支援が欠かせない。**
- **実験室から圃場までの密接な連携に基づく研究を行なうには、現状では施設に限りがある。**
- **責任者の明確化は必要。**
- **スペシャリストを束ねるチーム・リーダーの育成はジェネラリスト、agronomist、国際的な研究をリードする人材などの育成という面から必要。**

0011 1110 000  
00 11 001010 1  
11 1110 000

 Center for Research and Development Strategy - JST  
独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター

→拠点といった場合に、一つは隔離圃場が重要である。今は、規制があるので、隔離圃場の実験をしようとする、非常に労力がかかるので、集中的に拠点化をしないとできない。現状でそれを乗り越えようと思うと、今、組換えの指針の見直しがあるので、第1種、または2種使用から1.5種使用ぐらいの試験ができるようになれば恐らく変わるかもしれない。それがなければ、やはり隔離圃場というのは必ず拠点として必要なのではないか。

→隔離圃場をつくるのは非常に大変だった。できるまでに3年かかった。まず自治体から説明に行き、市まで説明に行き、経済連、特に宮崎は非常に厳しく、その後、3年目にやっと隔離圃場ができるようになった。大学側の事務に納得させることも重要であった。だから、もし、拠点を作るのであれば、3年、4年かかるので、早目早目にやることを勧める。

→それだけ時間がかかるのであれば、せっかくできたところはぜひ拠点化して利用させ

て頂きたい。京都大学も附洲町に移転が認められそうなので、もしそれができれば、何とか組換え圃場は作りたいと思う。

→フィールドワークと研究者との連携は必要だが、それ以外にも、技官のような方達の人件費と人の確保も重要な問題となる。それは施設の拠点といったときに、重要である。

→私も隔離圃場での収穫時に、朝日新聞をはじめいろいろな人が来るために、その準備だけでも大変。隔離圃場が欲しい理由の一つは、遺伝子組換え技術を使って何かをつくって、例えばこれが本当にアルカリに強いかどうかを確認したいという研究者としての気持ちである。もう一つは、それ以上に、事業化するためのステップとして温室から次の段階に進みたいというものがある。前者は研究者のわがまま的なところがある。事業化するという覚悟がないのならば、隔離圃場での実験はしてはいけないとも思う。隔離圃場の実験はリスクが伴うもので、そのリスクを受け入れるほどの社会的価値があるということを考えて、やるべきことだ。

→実際に我々が、隔離圃場実験をしたのは、これで新しいものをつくって世界的に使ってほしいと思ったから。そのときに、実験室からフィールドへのギャップ以上に大きい、事業化へのギャップがある。実際に隔離圃場である程度圃場レベルで検定ができて結果が出ているのに、それを事業化しようとするときに、日本の企業はいない。興味を示すのはアメリカの企業である。

→そこをちゃんとしないといけない。隔離圃場が云々、拠点が云々というときに、そういった先のことを考えて、例えばアメリカの企業と一緒にやるとかそれだけの覚悟がないといけない。

→私は、事業化より、大学で人材育成もできるということで時間をかけて隔離圃場を作った。あと安全性評価をしっかりとやっていくということ、これら二つをしっかりとってきた。

→実際に事業化しようとするときに、知財の管理をしっかりとすることが大切。アメリカの会社が興味を示しているときに、知財の管理をきちんとできるようなシステムも必要だと思う。

→知財の管理、例えばアメリカの会社と事業化するときに、向こうの法律家と交渉していかなければならない。それぐらいの覚悟が必要。しかしなかなか難しい。その部分の橋渡しのギャップというのは、ラボからフィールドに持っていくよりもさらに大変だ。

→遺伝子組換え作物を商業化するかどうかは、国家的な決断が必要。それを中途半端にやっている状況だと、せつかくの努力が実らないということになる。これだと研究費をもつ大きな民間も日本国内ではここまでするかやれなくて、あとは外にライセンスとして売るという方法しかない。経験を踏まえると交渉は大変なことだ。東京大学が米国企業との交渉に行っても惨敗になる。場合によっては賠償金を払う破目にもなる。そのぐらいの覚悟

が必要。

→米国企業も決して理不尽な人たちではない。ちゃんとこちらも専門家がいれば話ができる。日本で事業化できていない理由は、規模の面で事業化が期待できる作付面積の大きな作物はイネしかない上に、イネにおいては、多収が喜ばれない状況が過去40年も続いていることから、イネの出資事業というものが成立しない点にある。もう一つが、隔離圃場だけでなく形質転換の拠点も、様々な作物で必要。例えばイネ科の穀物類の場合、遺伝子導入が難しい場合でも、いい温室があって、いい未熟胚が取れるとできる。未熟胚が使えるとなると、その作物の栽培ができる人、いろいろな品種をよく知っている人、その作物の育種の相当の専門家が居ればさらに研究は進む。このように少なくとも4種類のタイプの専門家が拠点の形成には必要である。

→私も形質転換の拠点は必要だと思う。実際に遺伝子は持っていて、アイデアはあるけれどもできないというのが実情。理研でも形質転換ネットワークという形で窓口だけつくっている。やはり専門家とそういう遺伝子を持って試したいという人を繋いで、最終的に本当に形質転換した作物を実用化するかというところは非常に難しいが、形質転換の拠点を幾つか整備して、ファンディングしていくべき。

研究面での拠点、田畑先生の話にもあった、実験環境を制御していくというようなところで、温室も含めてどういったものがあるといいか。寺島先生の話にもあったオーストラリアのセンターはかなり研究面を意識した整備になっていたと思う。そのような形の、温室等も含めてどういったものが必要あるいは現状で使えるものがどういうものがあるかについて教えて頂きたい。

→FACEは日本が開発したシステムで、世界的に展開されている。これをうまく使って、組換えも使えるような形で評価できるようになれば、もっとこれからの地球環境変動に対する予測ができるのではない。

→FACEで高純度のガスが大学で必要になったときに、日本とイタリアでそれが大分使われるようになった。世界的に同じような実験設計でやるので、ネットワークも非常にやりやすいという面がある。つくばみらいに移転する際に、遺伝子組換えをやるかでFACEをつくるのでもその点が大きなネックになる。やる場合は大変なことになる。実際にその物理的な場があるということが非常に重要。特に圃場、フィールドということになると、遺伝的な応答に加えて土壌、それから作物、大気、この物質の循環を系として理解する場が非常に重要。それが教育にも繋がる。一つのモデルケースとしてFACEは非常にプラスの面がある。ただ、パーフェクトなシステムではないので、そこに人工気象室のデータの組み合わせや、もっと小さいレベルでの組み合わせをつくっていくと、スケールアップの問題も大分ギャップが縮まってくるのではないかと。

FACEの実施にあたっては環境を制御する施設がつくられた。それを開発するにあたっては、工学者の方々ともいろいろコミュニケーションをとりながらやっていた部分がある

と思うが、そういう人との交流という面と、あとは技術的にこういったものができてきたということが、FACE 立ち上げ時にあれば教えていただきたい。

→特に日本の場合、水田でやるという大きな制約があり、大きなものを置けないという中で、農業をわかっている環境制御のプロ、農学部での環境制御のプロがそこに加わったことが一番大きな要因だった。そういう方が自然を壊さずに、その土地にあるものを利用してできるというノウハウが非常に大きかった。後は、やり続ける上ではテクニシャンの存在が大きい。

## 2.5 総合討論

今回議論したような橋渡し研究というのを、どういったところに出口を求めたらいいのかというのを少し議論していただきたい。

→出口は、食糧問題と環境だと思う。現在、環境がキーワードになっているが、その中で環境と農業、食糧問題、それも日本だけではなくて世界へ向かって貢献していくといったメッセージが必要なのではないかな。

→フィールド科学という観点からすると、植物の応答を見るというだけではなくて、農耕地や自然生態であっても、農耕地の生態系の応答として環境応答をとらえるべきだと思う。その中で、環境というキーワードは当然入るし、環境への負荷を生態系としてどうとらえるか、あるいは今言われる緩和策にどれだけ貢献できるかといった意味での生態系応答と、植物改変による変化を我々はどれだけをマネージできるかという視点があると、フィールド科学の重要性がさらに高まる。

→理研の中で野依理事長が WEHAB+P ということをよくおっしゃる。Water、Energy、Health、Agriculture、Biodiversity、そして Poverty (貧困)。出口として、事業化があるとすれば、大量に物をつくる穀物メジャーが取り組むトウモロコシ、ワタ、ナタネ、ダイズの4つがある。もう一つは、国際貢献というキーワード。アフリカの貧困問題には、ゲイツ財団もファンディングしている。日本からそういう技術が出てくるということでも鳩山イニシアチブには貢献できる。だから、必ずしも産業の出口だけで全てを語る必要はないと思う。

もう一つは、環境の問題である。環境といった場合、今は低炭素と結びついて議論されている。水の問題も出てくる。これらを総合的に考えておく必要がある。流行ではなくて、10年、20年先の問題を見ておく必要がある。そのような提言がここから出されれば、すばらしいのではないかなと思う。

→遺伝子の単離とか、そういうレベルの研究はもうかなりやられてきているのではないかな。これから日本の課題というのは、そのタマを畑に持っていく、そして事業化に持っていくというところではないかな。もしも民間にいるのだったら、いろいろな大学の先生の研究で使われているいろいろな遺伝子をもらって、それを実際に畑で証明してみせる。そういうプロジェクトの作り方が重要。遺伝子組換え技術のボトルネックというのは、隔離温室から畑に落として、海外へ持っていくときの苦労まで含めて、商業化である。その克服のためには第一には畑に持っていったときに本当にこれは実験室で示されたような形質を示すのかという応答を、現場の畑で、実際の栽培の環境下にできるだけ近い環境下である隔離圃場で見ると。そこを拠点として考える。遺伝子組換えをやる人、そして遺伝子を単離した人、そしてそれを栽培生理学から分析する人、そういう人たちがみんな一緒になって仕事をすることによって、使えるものを見つけ出す。そこらあたりに研究そのものも絞り込んだ方がいいのではないかな。

→生態学者の立場から、生物多様性（Biodiversity）を保全するという事は、今もう社会の合意事項になったので、これに関して、どのように維持していくのか、科学者の立場としては理解する必要がある。今回の植物の環境応答の問題も、農業としての問題だけではなく、環境の問題にも関わる。生物の多様性が維持されるときに、植物の種が多様だとそこにいるそのほかの生物も多様であろうというレベルから、今や遺伝子応答のレベルで切り込んでいくことができる。陸上生態系で植物のバイオマスが一番大きいのだから、自然生態系も農業生態系も含めた植物の環境応答の仕組みを通して多様性の維持機構を理解するといった出口もあり得るのではないか。

→アダプテーション、適応という側面もこれから温暖化の絡みで重要視されるので強調していくべき。日本において、冷害、過湿というのが問題になっているということなのですが、環境が変化した場合、たとえば高温と多湿が組み合わさると、イネでも意外と高温に弱く、35℃を超えると実が実らないということから、現在でも九州ではお米が白く濁って品質が悪化するというような問題が生じている。そのような環境変化に対する適応という側面を強調されたらいいのではないか。

→内閣府の中に気候変動対応型社会をつくるタスクフォースというのがあり、その中では適応ということが議論されてきた。新政権になり25%削減とミティゲーションの方が前に出てきてしまっているが、海外貢献まで含めたアダプテーションの方が本当は大切だと思っている。その中には、恵まれていない国に対する支援、それを日本の科学技術を使ってやっていくという方針が必要と思う。

→この報告書の重要な側面として、この研究のどの部分をやるのが日本として優位性があるかという観点が必要。アメリカやオーストラリアとの比較も大事だが、例えば中国、インドとの比較、例えば表現型形質の表現型の評価において、人海戦術で中国にやられてしまう部分というのはたくさんある。その中で、日本としてどういうアプローチでやっていくのか、というような視点が入ると、よりクリアになって、この全体像がわかりやすくなるのではないか。

### 3 考察および今後の戦略立案に向けた方針

#### 3.1 食糧生産に係る新たなパラダイムの創出

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、経済学等の社会科学系や理学系の研究者が、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、結果的に貧困と飢餓の解消に一定の効果があつたと考えられている。以上を図示すると、図 3-1 (a) のように「科学」(人口増加・食糧不足に対する経済・社会学系および理学系研究者による警鐘) 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ていたととらえることができる。

しかしながら、このような新しい作物生産技術は、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壤微生物群の多様性損失など環境への負荷という新たな問題を招くこととなった(図 3-1 (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<sup>1</sup> 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 3-1 (b))。

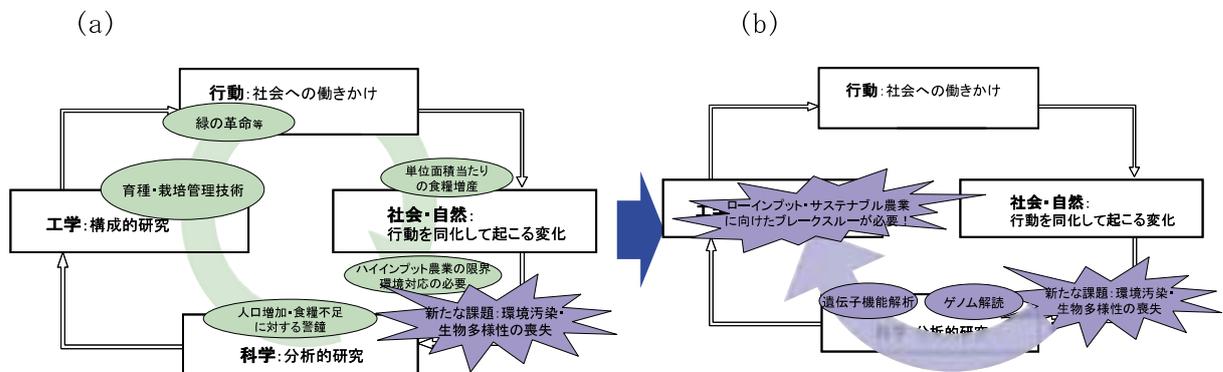


図 3-1 : 食糧生産に係る (a) 現在の問題 (b) 今回の提案

今後は、近年急速に進展している分子生物学の知見に基づきゲノム設計技術を確立すること等を通じて、資源少消費型の持続可能な農業という新たなパラダイムを創出することが一つの方向性と考えられる。

<sup>1</sup> 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

### 3.2 ワークショップ結果の考察および今後の方針

「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で開催したワークショップでの討議の結果、当該領域においては生理、育種、環境等の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。

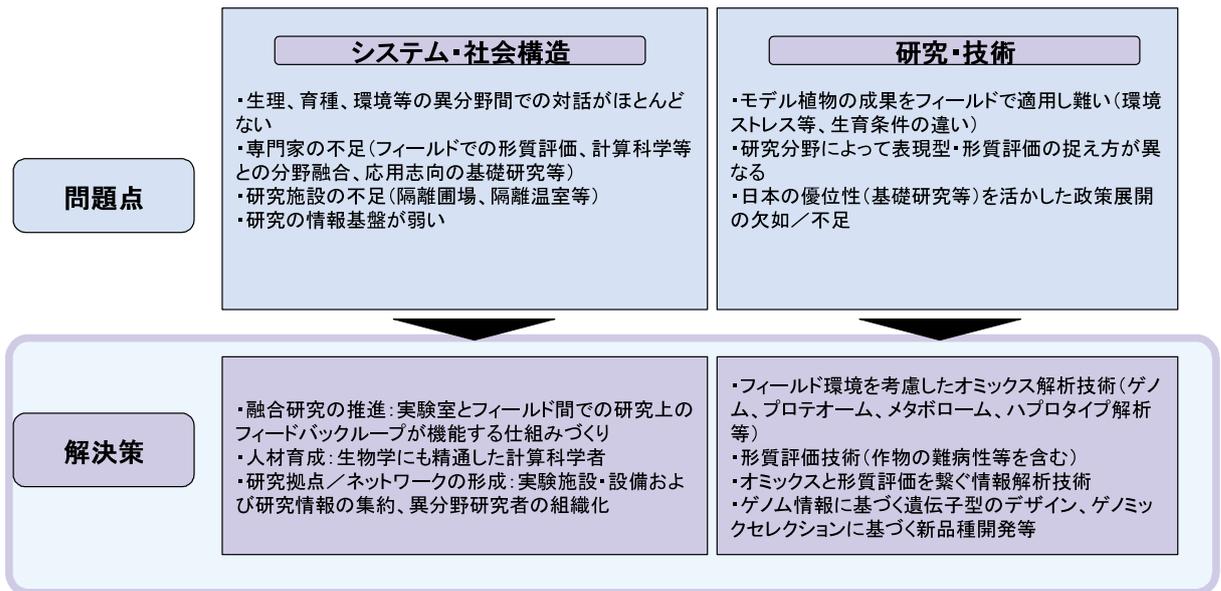


図 3-2 : ワークショップで抽出された問題点と解決策のポイント

ワークショップでの議論を踏まえ、JST/CRDS として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。

## ■ワークショップ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・政策システムユニット)
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-WR-11

### 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

平成 22 年 3 月

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター ライフサイエンスユニット

---

〒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](mailto:crds@jst.go.jp). Any quotations must be appropriately acknowledged.

---