

俯瞰ワークショップ報告書

**ライフサイエンス・臨床医学分野
～主にグリーンバイオ分野を中心に～**



エグゼクティブサマリー

科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）では、国の科学技術イノベーション政策に関する提言書の作成にあたり、対象とする研究分野の国内外の研究動向や研究開発の注目動向などの網羅的な調査（俯瞰調査）を行っている。本報告書は、その俯瞰調査に際し、平成 26 年度に JST-CRDS が実施した、「グリーンバイオ」分野に関するワークショップの結果をまとめたものである。今回、グリーンバイオ分野として植物科学研究のみならず、微生物機能や生態系・多様性保全を含む形でワークショップを開催した。

本ワークショップの目的はグリーンバイオ分野を俯瞰することで、当該分野の研究開発の方向性の妥当性の検証と、優先的に実施すべき具体的方策の抽出に資する情報収集を行うことが目的である。政府が打ち出した「攻めの農林水産業」や環太平洋パートナーシップ（TPP）協定のように、食料安全保障に対する関心が高まっている。そうした中、科学技術による研究開発がどのように社会ニーズに貢献できるかを示すことは科学による貢献とともに、科学者の義務でもあり得る。本書ではアンケートおよび俯瞰活動を通じて明らかとなった科学技術の現状と社会的背景に関する説明を第 1 章にて、有識者検討会合の結果およびアンケート調査の概要を第 2 章から第 5 章にて説明する。これらの調査から浮かび上がった重要研究開発領域の要点整理を行った。農業・食料生産関連、微生物機能関連、生態系・多様性保全関連、それぞれにおける重要領域を第 6 章にて提案する。

2013 年の CRDS が発刊した俯瞰ワークショップ報告書「グリーン・テクノロジー分野」でも指摘があった通り、この分野の抱える課題が複雑化しており、単独の府省等で研究開発を実施するレベルではなくなっている。そうした中、内閣府主導の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）では「次世代農林水産業創造技術」が取り上げられ、農業分野に対する連携がはじまったことは非常に意義がある。また、上記報告書でも取り上げられている通り、具体的な出口の設計なしに研究開発投資が行われてきたという経緯も今後解決すべき問題点である。これは、わが国としてあるべき姿が明確でないことに起因するものと思われる。政府として「攻めの農林水産業」を成長戦略と位置づけていることから、この分野における国が関わる意義は明確になりつつある。そのため、わが国があるべき姿を明確に設定し、科学技術による貢献と制度的な改革も含めて、次世代基盤技術構築のための産官学協働体制を確立する必要があると考える。

以上を踏まえ、JST-CRDS ではこのような観点を今後も一層重視し、異分野、異業種を融合させ、具体的な研究テーマの検討、期待される研究成果、国際競争力等の分析を加えた上で更なる検討を行い、より実効性の高い研究開発戦略、研究体制、プラットフォームの提案を行い、包括的な戦略を提案していく予定である。

目 次

エグゼクティブサマリー

第1章 背景及び概要	1
1-1. CRDS のミッション及び俯瞰調査	1
1-2. グリーンバイオ分野における情勢及び社会的背景	1
第2章 グリーンバイオ（特に食料生産関連）俯瞰ワークショップ開催報告	6
2-1. 概要	6
2-2. 研究開発に関する検討の概要	7
第3章 グリーンバイオ プレ俯瞰ワークショップ	8
3-1. 概要	8
3-2. 趣旨説明及びアンケート概要	8
3-2-1. 農業・食料生産の情勢	8
3-2-2. 農業・食料生産の社会的背景	9
3-3. セッション1 食料生産技術の現状	9
3-3-1. 作物の品種改良技術の高度化にむけて	9
3-3-2. 種・ゲノム多様性による環境適応とその利用	11
3-3-3. 気候変動に対応した作物評価のための定量的フェノーム解析の 基盤研究	13
3-3-4. バイオマス生産技術開発から作物生産性向上へ	14
3-3-5. 植物ミネラルセンサーの解明とヒトの健康	16
3-3-6. 食糧増産へどのような研究があるか	18
3-4. 食料増産技術に関する討論	20
3-4-1. 農業・食料生産関連重要テーマ	20
3-4-2. 産官学協働拠点、産業化への視点	21
3-4-3. 制度的なボトルネック、5-10年後を見据えた研究	23
3-4-4. 持続性の高い人材育成の仕組み	23
第4章 グリーンバイオ俯瞰ワークショップ	31
4-1. 概要	31
4-2. 趣旨説明	32
4-2-1. 序論	32
4-2-2. グリーンイノベーション	32
4-3. セッション1 食料安全保障	32
4-3-1. 食料安全保障を巡る情勢	32
4-3-2. わが国の食料安全保障のあり方	35

4-4. セッション2 食料生産技術	37
4-4-1. 持続的農業生産技術	37
4-4-2. 国際競争力のある日本農業の実現	38
4-4-3. ゲノミックセレクションも含めたオミクス解析の作物研究への展開	40
4-5. セッション3 微生物機能	42
4-5-1. バイオリファインリー実現に向けた細胞工学の構築	42
4-5-2. レアメタルの好循環実現に向けた地域完結型バイオ利用リサイクル 技術の開発 ～都市鉱山のバイオベース開発～	44
4-5-3. 生物間インターフェースにおける機能的微生物コミュニティの 解析と応用～複合微生物系の解析による新たな微生物機能制御技術の 開発～	45
4-6. セッション4 生物多様性保全	47
4-6-1. 生物多様性情報学とその情報基盤	47
4-6-2. 森林の遺伝的多様性保全と持続的利用	49
4-6-3. 生物多様性保全と福祉的利用における有効性	50
4-7. セッション5 総合討論	52
4-7-1. 「食料生産」分野における総合討論	52
4-7-2. 「微生物機能」分野における総合討論	53
4-7-3. 「生物多様性保全」分野における総合討論	53

第5章 植物デザイン分科会	74
5-1. 概要	74
5-2. 趣旨説明	75
5-2-1. 植物デザインシステム	75
5-3. セッション1 植物デザインシステムの可能性について	75
5-3-1. 気候変動に対応した植物の生長評価のための定量的フェノーム解析の 基盤研究	75
5-3-2. 植物デザインシステム開発に対する感想	76
5-3-3. 植物デザインシステムに関して	76
5-3-4. 植物機能モデリングとフェノミクス	77
5-3-5. デザインと制御に向けた植物科学	78
5-3-6. 植物デザインシステム：代謝工学	79
5-3-7. ゲノム情報を活用した高速育種	80
5-3-8. モデリングを通じた有用植物の人為的デザイン	81
5-3-9. ゲノムから植物デザインへ	82
5-3-10. データ主導型イノベーションにむけて～ヘルスケアから 農作物の育種へ～	83
5-3-11. 植物デザインシステム：ベンチャー企業の視点から	85
5-3-12. 野菜種子市場	85
5-3-13. 植物デザインシステム：育種企業からの視点	86

5-4. 総合討論	87
第6章 グリーンバイオ分野俯瞰活動のまとめと考察	99
6-1. 要点整理	99
6-1-1. 農業・食料生産関連分野の要点	99
6-1-2. 微生物機能関連分野の要点	100
6-1-3. 生態系・多様性関連分野の要点	100
6-2. 植物デザインシステムと次世代育種基盤技術構築のための産官学協働体制	101
第7章 おわりに	104
付 録 ワークショップ参加有識者	105

第1章 背景及び概要

1-1. CRDS のミッション及び俯瞰調査

科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）は、吉川弘之センター長のもと、科学全体の俯瞰を行うことで、「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」というビジョンをもち、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立つて行うことを主たるミッションとする公的シンクタンクの1つである。本俯瞰ワークショップ報告書は、別刷りの「JST-CRDS 研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野（2015年）」を補完するものである。本調査は科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較、および様々な専門家や政策立案者との対話を通じて遂行されたものである。

1-2. グリーンバイオ分野における情勢及び社会的背景

1-2-1. 俯瞰調査およびアンケート調査概要

CRDS が作成したグリーンバイオ区分の技術俯瞰図を示す（図 1-2-1-1）。この分野は対象範囲が広いため、「食料生産及び安全保障」、「環境リノベーション」、「物質生産・バイオリファインリー」の3つのサブ区分を調査対象とし、調査・分析を行った。また、CRDS ライフサイエンス・臨床医学ユニットでは「研究開発領域等」に関するアンケート調査を行った。35名からの御回答を頂き、図 1-2-1-2 のような結果が得られた。「農業・食料生産」、「微生物機能」、「生態系・多様性保全」に分類でき、これは俯瞰調査での分類とほぼ同じ分類にあたることから、俯瞰報告書と比較検討すべき内容である。

グリーンバイオ分野は生命科学にとって最も基本的な土台であり、日本のこれからの生命科学の中で非常に重要だと考えられる。そのため、グリーンバイオ分野の立ち位置というのは議論すべき課題である。わが国の植物科学研究は世界的にも非常に強みのある分野である（図 1-2-1-3、NISTEP サイエンスマップ参照）。だが、その強みが応用、実用化へと活かされていないのが現状である。特に、社会との接点をどのように見極めるか、基礎からいった何が生まれたかという「出口を見据えた研究、出口から見た研究」を考慮する必要性がある。社会のあるべき姿を考え、どのように活性化すべきかが重要なポイントとなってくる。

1-2-2. 農業・食料生産分野の情勢及び社会的背景

食料生産の問題を考える上で、単なる食料だけでなく、農業全体をどのような仕組みにするか、農林水産業を含めて作物をどうするか、生物多様性をどう維持するかといった課題が山積している。こうした現状のなか、産官学協調して多面的に技術開発を進め、社会実装を考える必要がある。例えば、遺伝子組換え作物が日本で進まなかった背景は何が問題であったか。最近では、植物工場で水耕栽培の野菜がつくられるようになっているが、効率だけを求めたものが本当に良いのかといった問題もある。本当の意味での植物科学、食品というものはどうあるべきかを検討する必要がある。

国際情勢としては人口増加、食料危機が起きている一方で、国内情勢としては就農人口の

高齢化と減少が起きており、両面から食料供給の不安定化につながっている（図 1-2-2-1、1-2-2-3）。また、わが国の自給率は供給熱量ベースで 39%であり、先進国において、非常に低い水準である。最近の事情として、TPP 協定交渉が行われている。農林水産省試算によると、TPP 参加により、わが国の自給率は供給熱量ベースで 27%まで減少するとされている。農林水産物の生産減少のみならず、農業分野の多面的機能、水質保全等も含めると 1 兆 6 千億円の損失と考えられている（図 1-2-2-2）。このような中で、日本はほかの国に例を見ないぐらゐの少子高齢化である。その中でいかに必要な食料を確保していくかは、植物科学の成果、力を見せる部分としては重要な部分ではないかと考えられる。日本がこうした問題を解決できれば、少子高齢化が進みつつある他の国にも貢献できる。

地域経済は農業が基盤となっている場合が多いが、現在、基盤が崩壊してきて、地域経済の活力低下につながっている。最近の政策では農産物の輸出を考えており、現状約 4000 億円の農産物輸出額を 10 倍にするという目標を掲げている。こうした状況において、農業を国内にも海外にも貢献できる産業として成長させることが重要である。エネルギーと同様、食料生産に関してもオールジャパンで行うべき喫緊の課題であることは明白である。農業競争力の強化が 30 年言われ続けているが、なかなか競争力がついていない状況なので、何が問題なのか、どのような基盤研究が必要なのか考え直す時期かと思われる。日本で生産されている農作物は野菜が 40%、米 34%、果樹 13%、それ以外が 10%（図 1-2-2-4）と、米以外の部分がかなり重要である。地域経済は米のみならずこのような様々な食材が生産できるということに支えられている。食事バランスガイド（図 1-2-2-4）に示されているように、健康という観点からも、バランスよく様々なものを食べることが必要であり、研究の方向性を多様化する必要がある。このような取り組みは、国際的な食料の取り合いの時代において、食料の確保につながる。日本を倣って、日本の食料生産システムに他国があわせていけるような状況になれば、皆が安心して食べていけるような世界ができると考えられる。食料安全保障を考える上で食料増産が重要であることはもちろんであるが、その先の食品ということも考慮する必要がある。いくら食料が確保できたとしてもそれが食品として消費者に届けられないと無用となる。その際に大まかに 2 つのリスクが考えられる（図 1-2-2-5）。バリューチェーンの確立、食品の機能性というのは、食料増産とともに重要な研究開発分野である。

1-2-3. 微生物機能分野の情勢及び社会的背景

地球上のあらゆる生物は微生物と深い関わりをもつ。例えば農業分野において作物生産に重要な根圏環境やエンドファイトといった植物内生菌の影響、コンポスト製造、医療・食品産業において、ヒトや家畜を含めた動物の腸管、皮膚、口内環境が挙げられる。環境分野における汚泥処理技術、ものづくりにおける発酵や微生物変換など、様々な分野で微生物の機能を活用している。

従来の微生物研究の多くは単一の微生物、反応系を対象としたものが主流であり、そうした研究を通して技術的進歩がもたらされた。しかし、上記のような微生物の活動を考えるとコミュニティとして存在し機能していることは明白である。そうした複合微生物系の制御と利用の技術確立は産業的に非常に重要な意義をもち、根圏微生物叢の制御による作物成長増進や腸管細菌叢の利用による健康増進などが挙げられる。こうした微生物コミュニティの機能解明、さらに機能利用のための微生物コミュニティ制御技術が開発されてきている。

一方で微生物を徹底的に改良するという流れもある。それにはゲノムやメタボローム技術の進歩によりもたらされた、人工酵素の作出を含む合成生物学の流れによるものである。人工酵素を組み込むことで非生体化合物を作出し、工業利用を行うものである。天然にない酵素を作り出すという倫理的な問題は残されているにせよ、石油代替品や市場ニーズに沿った化合物を作出する技術は注目すべき動向である。

1-2-4. 生態系・多様性保全分野の情勢及び社会的背景

地球環境問題の深刻化とともに、生物多様性保全、生物多様性の持続的利用へ向けての取り組みが重要となってきた。持続的利用のために必要となる生物多様性情報学に関する研究開発は、国際的に重要課題となっている。これまでに個々の基本情報の集積は進んできたが、種特性や遺伝情報、生物間相互作用といった生物多様性情報を応用研究に利用するのに重要と考えられる情報の集積は不十分である。地球温暖化に対する生物多様性持続的利用のための適応的順応策は喫緊の課題である。生態系サービス（食料や水、気候の安定など、多様な生物がかかわりあう生態系から得ることのできる恵み）を持続的に受けられるよう、生態系サービスの評価手法の開発が、生態学に加え、環境経済学の専門家を加えた形で進められている。その内容は災害リスク緩和、気候変動適応、ブルーカーボン（海洋で生息する生物によって吸収される二酸化炭素）、生物模倣技術などに広がっている。

低環境負荷社会にむけては生物模倣技術が注目されている。生物の形態や機能を規範とすることにより、新素材や機能性の開発に数々のイノベーションが作り出されてきた。米国のレポートでは生物模倣技術により年間3000億ドルの経済効果を生み出すと推測されている。また、生態系や進化を規範とすることにより、低エネルギー作動、少廃棄物社会、適応的順応策など地球環境に対して低負荷な技術を作り出すといった研究へと広がりつつある。また、生態適用技術としてグリーンインフラ（防災と生態系の再生を同時に行う空間エリア）の整備は、国土保全上、ますます重要になると考えられる。こうした空間を災害時の緩衝空間として整備・配備し、平常時は生物が棲む地として生態系の保全につながるという動きも欧米を中心に始まっている。「EU グリーンインフラストラクチャー戦略」では生態系サービスの提供のために戦略的に自然・半自然地域を管理し、生物多様性保全と災害対策を目的とした氾濫原湿地の自然再生が行われている。また、米国では、屋上緑化、透水性舗装、緑地や湿地の確保といった取り組みが進められている。こうした取り組みは、平成22年に愛知県名古屋市で開催された生物多様性条約第10回締約国会議（COP10）において採択された、自然と共生する社会を実現することを掲げた「愛知目標」を具現化するためにも重要な取り組みである。このような認識のもと、国際科学会議を中心として「フューチャー・アース」構想が提唱された。この構想は「グローバルな持続可能社会の構築を目指して、地球環境変化に伴う様々なリスクに立ち向かう知を共創する」国際プログラムである。JST 社会技術研究開発センターが中心となって推進している通り、持続可能社会の実現には生態系や生物多様性保全が重要不可欠の研究事項となっている。

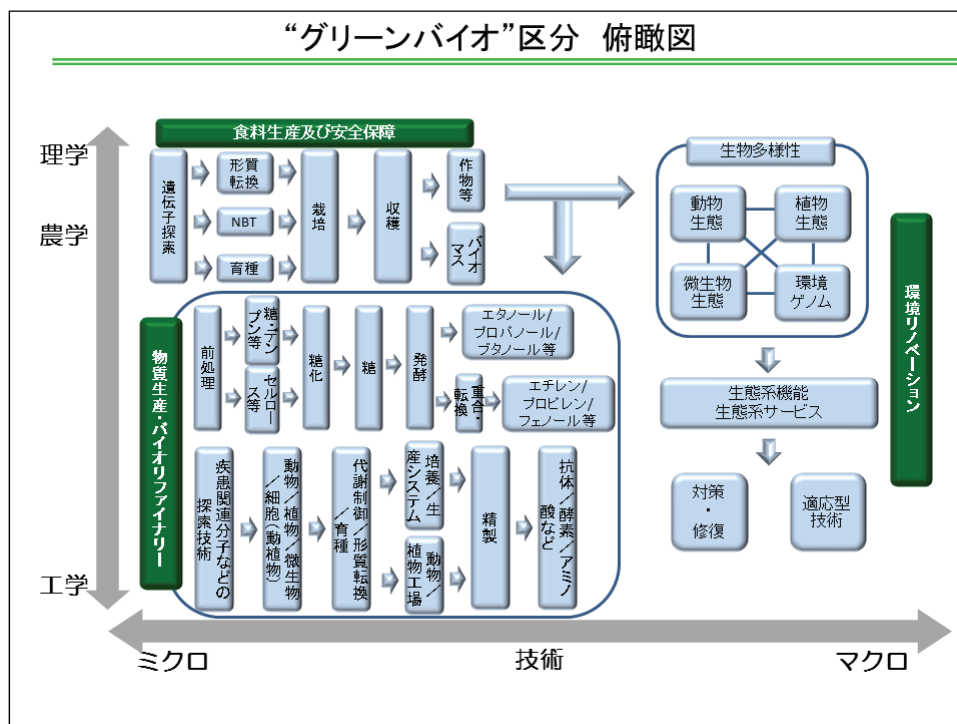


図 1-2-1-1

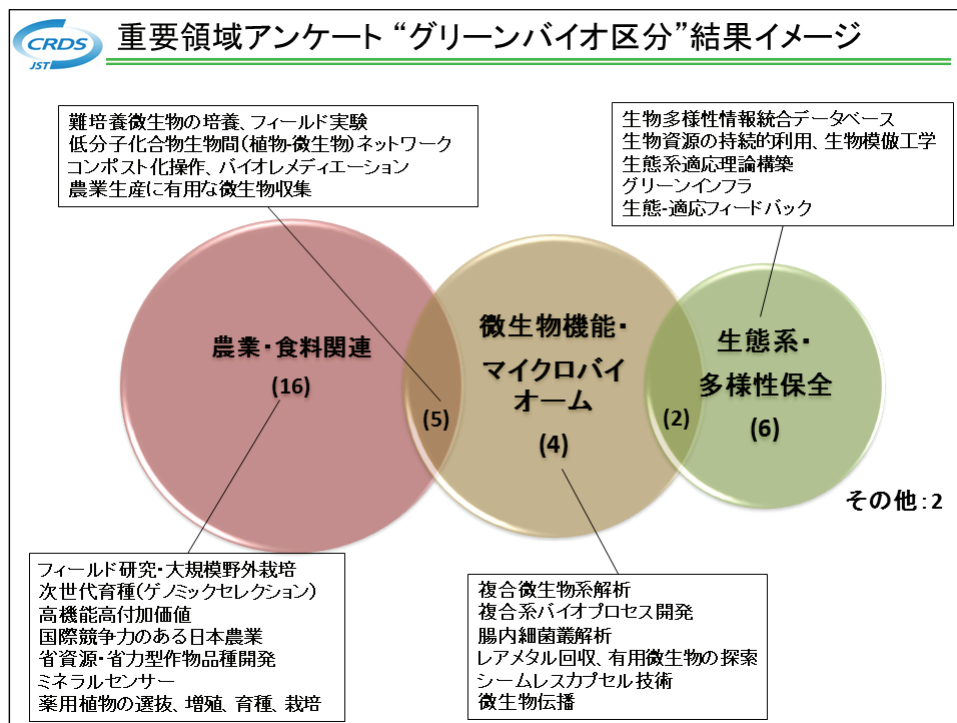


図 1-2-1-2

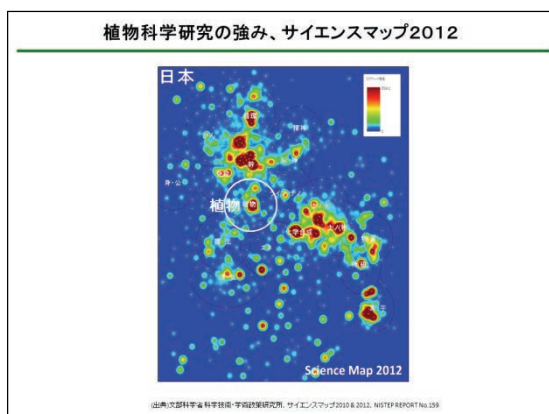


图 1-2-1-3

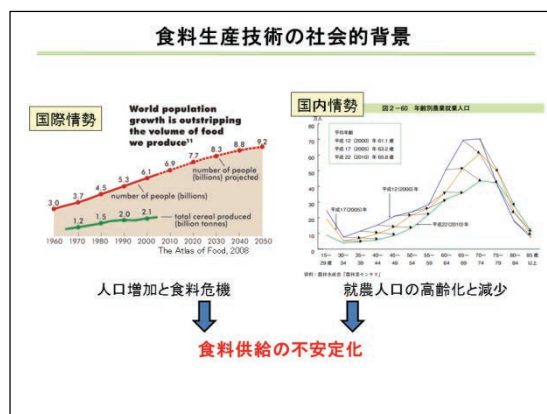


图 1-2-2-1

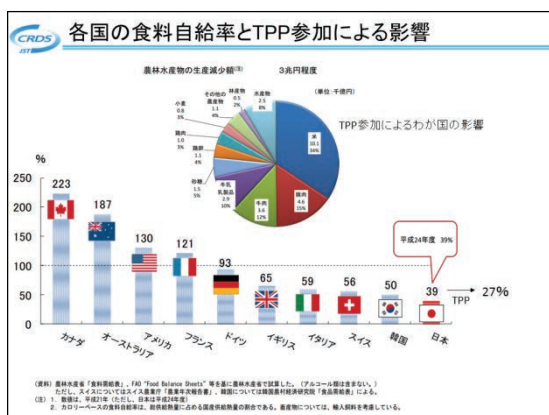


图 1-2-2-2

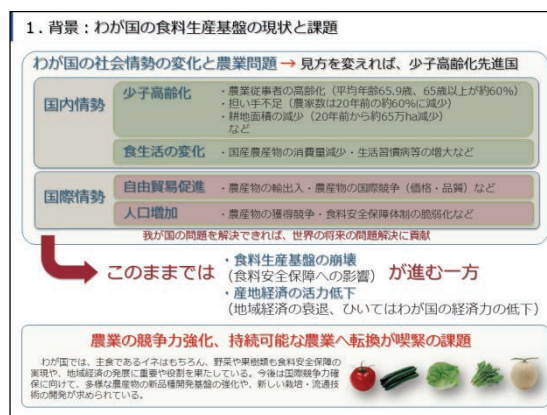


图 1-2-2-3

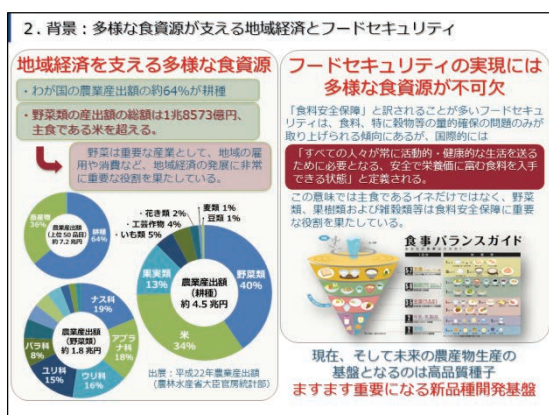


图 1-2-2-4

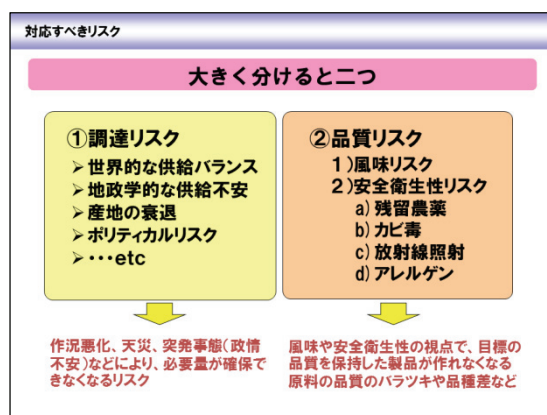


图 1-2-2-5

第2章 グリーンバイオ（特に食料生産関連）俯瞰ワークショップ開催報告

2-1. 概要

開催日 2014年5月29日（木）

開催場所 独立行政法人科学技術振興機構 東京別館2階A-1会議室

プログラム

グリーンバイオ（特に食料生産関連）俯瞰ワークショップ

「省資源・省力型食料生産技術開発」

CRDS 挨拶および趣旨説明 13:30-13:40

主催者挨拶	浅島 誠	(CRDS 上席フェロー)
趣旨説明	三浦 謙治	(CRDS フェロー)

セッション1 食料生産技術の現状 13:40-14:50

- ① わが国の食料生産基盤、食料安全保障の現状（江面浩：筑波大/CRDS 特任フェロー）
- ② 野外でのトランスクリプトームデータを使い倒す！～究極の生理学解析を目指して～（井澤毅：農業生物資源研）
- ③ フィールド研究から見た植物研究（篠崎一雄：理研）
- ④ バイオマス生産技術開発から作物生産性向上へ（福田裕穂：東京大）
- ⑤ 気孔調節による植物生産技術の向上（木下俊則：名古屋大）
- ⑥ 光合成機能維持によるステイグリーン植物の開発利用（坂本亘：岡山大）
- ⑦ 環境ストレスに応答する植物細胞骨格（橋本隆：奈良先端大）
- ⑧ 薬用植物の現状と国内生産に向けて（斉藤和季：千葉大）
- ⑨ 遺伝子組換え技術の実用化への課題（小鞠敏彦：日本たばこ産業）
- ⑩ 企業における食料の調達状況（今井真介：ハウス食品）
- ⑪ 微生物機能を活用する資源循環型作物生産（小川順：京都大）

セッション2 食料増産技術に関する討論 15:10-16:30

2-2. 研究開発に関する検討の概要

トランスクリプトーム解析によるモデル化といった植物科学研究と情報・統計解析とを融合させた研究、フェノーム解析といった工学的な計測技術を用いたハイスループットな表現型の定量解析の技術が非常に進んできている。次世代シーケンサーの登場により交配による育種を加速させるゲノミックセレクションとよばれる予測システムが構築されつつあり、フェノームなどのビッグデータとを組み合わせた新品種作出技術やその標準化に向けた研究開発は、国の農業戦略上極めて重要と考えられる。こうした取り組みは食料生産のみならず、バイオマス植物への応用も可能と考えられる（第5章 植物デザイン分科会参照）。わが国ではこれまでNC-CARPやCRESTの取り組みによりソルガムを用いたバイオマス燃料研究が進んできた。この中で得られた技術は、食料生産現場においても相互に補完しあうのはもちろんのこと、必要だとされているが研究が進んでいない分野、例えば薬用植物（図2-2-1）やマイナー作物などへも適用可能だと考えられる。

一方で新しい育種技術NBT（New Plant Breeding Techniques）とよばれる8種類の技術革新が進んでいる。特にTALENやCRISPR/Cas9システムを用いたゲノム編集技術の研究開発が著しく進んでいる（JST-CRDS 調査報告書 ゲノム編集技術参照）。この技術により、特定の部位に変異を導入することができ、遺伝子組換えのように痕跡が残らないということから、遺伝子組換えとして扱うのか、そうでないのかの議論が行われている。この点は科学技術面のみならず社会受容へ向けた取り組みも必要である。

植物研究の実用化を加速する上でフィールドの活用が重要となってくる。最先端フィールド研究支援ネットワークを構築して、ラボ中心の研究者とフィールド研究者をつなぐ方策が挙げられた（図2-2-2）。国内に存在する多くの圃場は整備が進まず老朽化しているところが多い。そこでこ入れをするとともに、未来の農業を意識できるシステム（ITやロボティクスの活用、フィールドでの計測技術）が必要となる。また、そうして出てきたビッグデータ処理解析の拠点をこのネットワーク内に設置することが重要である。少子高齢化に対応するための省力型作物や土壌の改良、土壌状態の把握技術、温暖化対策技術ということが重要となってくる。

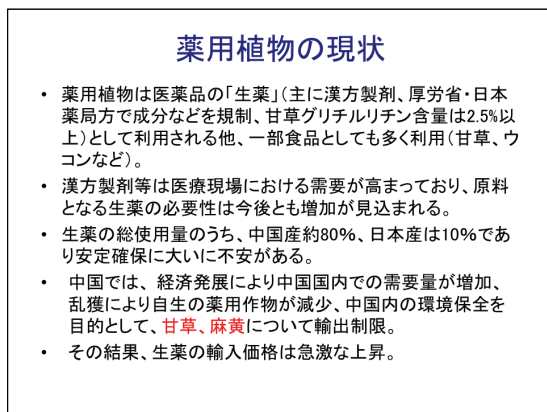


図 2-2-1

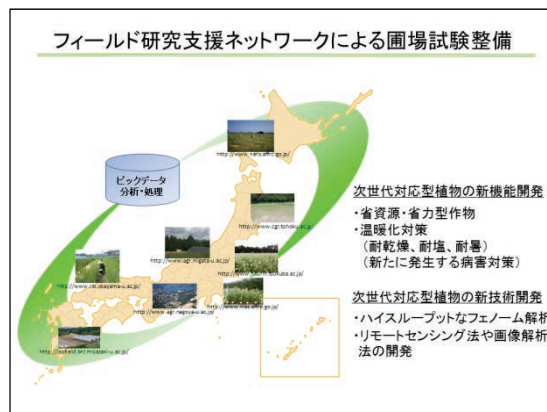


図 2-2-2

第3章 グリーンバイオ プレ俯瞰ワークショップ

3-1. 概要

開催日 2014年8月30日(土)

開催場所 独立行政法人科学技術振興機構 東京別館2階A-1会議室

プログラム

グリーンバイオ プレ俯瞰ワークショップ

開会挨拶、趣旨説明、アンケート概要報告 15:00-15:30

開会挨拶 浅島 誠 (CRDS 上席フェロー)

趣旨説明 三浦 謙治 (CRDS フェロー)

セッション1 農業・食料関連 15:30-17:00

- ① 作物の品種改良技術の高度化に向けて (矢野昌裕：作物研究所)
- ② 種・ゲノム多様性による環境適応とその利用 (倉田のり：遺伝研)
- ③ 気候変動に対応した作物評価のための定量的フェノーム解析の基盤研究 (篠崎一雄：理研)
- ④ バイオマス生産技術開発から作物生産性向上へ (福田裕穂：東京大)
- ⑤ 植物ミネラルセンサーの解明とヒトの健康 (西澤直子：石川県立大)
- ⑥ 食糧増産へどのような研究があるか (山根精一郎：日本モンサント)

セッション2 農業・食料関連に関する総合討論 17:00-18:00

討論議案説明 辻 真博 (CRDS フェロー)

閉会挨拶 江面 浩 (CRDS 特任フェロー)

3-2. 趣旨説明及びアンケート概要

3-2-1. 農業・食料生産の情勢

JST-CRDS ライフサイエンス・臨床医学ユニットでは、わが国の少子高齢化に伴う食料生産基盤崩壊の危機、国際的な人口増加による農産物の獲得競争の激化とそれに伴う食料安全保障上の課題に取り組むべく、わが国が推進すべきライフサイエンス研究開発戦略のあるべき姿及び研究成果実用化の隘路となっている体制・制度面等について調査・検討を実施している。

先日発行された NISTEP サイエンスマップ 2012 においても、わが国の植物科学技術は非常に高い水準にあることが示されている。しかし、その成果が必ずしも実用化にまでつながっていない現状が浮き彫りとなっている。本ワークショップでは食料・作物生産に関する研究開発、制度設計に研究戦略のフォーカスをあてる。植物学・農学の科学者及び種苗に関する有識者に参加頂き、わが国が推進すべき課題に関して包括的な研究開発戦略を検討する。

3-2-2. 農業・食料生産の社会的背景

「出口を見据えた研究と出口から見た研究」を念頭にして、社会からあるべき姿を見た際に、食の確保、食の安全性や生物多様性・環境など、いろいろな事項がグリーンバイオ分野に直接的に関係する。このことは植物の恩恵により地球が成り立っているということにもつながる。こうしたことから、グリーンバイオ技術に関する科学研究の現状分析等から、研究開発のトレンドを把握し、諸外国の橋渡し研究の現状調査により、わが国の課題を抽出・分析することが重要である。

食料生産技術という観点からは、国際情勢としては人口増加、食料危機が起きている一方で、国内情勢としては就農人口の高齢化と減少が起きており、両面から食料供給の不安定化につながっている。また、わが国の自給率はカロリーベースで39%であり、先進国において、非常に低い水準である（図1-2-2-1）。

3-3. セッション1 食料生産技術の現状

3-3-1. 作物の品種改良技術の高度化にむけて

＜矢野昌裕 所長：農業・食品産業技術総合研究機構 作物研究所＞

これから10年ぐらいの間に就農人口が減少して、経営形態が個別から大規模経営形態に移ると予測される。こうした農業形態の変化に対して、どういうふうに作物を変えていくか。米は余っているので、水田をどうやって畑に変えていって、ほかの作物に対してどうケアするかということを考えないといけない。今まで農水省の研究はイネに偏りすぎていたので、どう修正していくか、農業をどう維持していくかが大前提としてある。その中で育種技術について紹介する。

現在、イネ以外にもいろいろな作物でゲノム配列解読が進んでいる（図3-3-1-1）。品種ごとの配列も充実し、DNAマーカーの整備がいろいろな作物で行われているため、DNAマーカー選抜育種は確立した方法になっている。そういう背景のなか、農水省の委託プロジェクト（<http://cropgenome.project.affrc.go.jp/kenkyu/>）で研究開発が行われているが、10年後にどう農業が変わっていくかということを考えていくと、プロジェクトの戦略も少しずつ変える必要がある。

マーカー選抜であるが、育種家がずっとトライして全くできなかったいもち病抵抗性の改良を、マーカー選抜で可能にした事例である（図3-3-1-2）。いもち病に関しては、一つ一つの遺伝子改良だけでなく、複数の抵抗性遺伝子を一つの優良なバックグラウンドに積み上げていくことも可能となり、ある程度技術が現場に実装できる状況になった。こうした技術を背景に、より出口に近いところでそういう技術を利用するため、各県のニーズを拾いながら、ニーズに対して技術や情報を効率的に利用していくという仕組みでプロジェクトが動いている（図3-3-1-3）。DNAマーカー選抜の場合、少数の遺伝子の遺伝的な背景を置き換えていくということがベースになっている。ただ、農業上重要な形質（収量性、ストレス耐性など）の多くは多数の遺伝子による複雑な遺伝的支配や環境の影響を受けやすい。そこでゲノミックセレクション（GS）という考え方が出てくる（図3-3-1-4）。GSとは、育種をする変異をもった集団に対して、ゲノムワイドなマーカーの情報と表現型の情報、この2つを使って一番望ましい方向に向かうには、ゲノムがどう組み合わせれば良いかというモデルを構築して、

そのモデルに従って候補系統を選んでいくという、育種価で選んでいくという考え方である。現状、試験的に使えるようにはなっていない。GSを進めることで育種技術の高度化が進められると思うが、様々な問題がある（図 3-3-1-5）。特にゲノムシャッフリングでは材料に多様なものがないと、モデルをつくるのも難しい。またうまく混ざるような集団をつくるのに 5～7 年かかる。育種技術の高度化といっても 10 年単位の大きな仕事になる。また、表現型も人海戦術から情報化技術をいかに駆使して高度化するかという問題もある。イネの収量に関してもどこの部分に自動化や画像解析を入れるか、重さを適切に評価するかという部分で難しい問題を抱えているのが現状である。

質疑応答

Q:日本は大規模農業にだんだん移っていくだろう。休耕田とかを畑作に戻したとして、39%の自給率を 100%にもっていくには、どういう施策を考えたらよいか。

A:きちんとした答えを出せないが、水田でイネを中心に行っている現状を、どのように畑作に変えていくかということが一番問題になると思う。多収性イネが出てくれば、イネに関しては半分ぐらいでよいという予測もある。残った水田をどう畑作化し、野菜とかほかのものにうまくかえていくかということが、これからのポイントとなると思われる。

また、大規模化は中山間地がある日本の環境ではなかなかできない。ただし、経営形態が個人農家ベースでなく、法人が入ってきて、経営自体が法人経営の形になってくる。そうすると、品種のニーズも、今までは県単位のニーズが、会社単位で品種が求められる形になってくるのではないかな。

C:農水省の調査では自給率は 100%無理。今の栽培面積の 2 倍以上の面積が必要。日本の農業を考えるとときには、何を大事に育てるか、海外からいかにうまく輸入するかが鍵となる。

Q:日本では遺伝子組換え作物がなかなか出てこない。これについては何か手を打っていることはあるか。どうすればいいのかということも提言の中に織り込んでいただきたい。どうすれば世の中との邂逅できるか。我々が安全だと言ってもなかなか理解してくれない。

A:新しい技術 NBT では組換え体の考え方は徐々に変わりつつあると思う。全く新しい生物から遺伝子入れる場合は別だが、NBT のような場合は組換え体に扱わなくてもよいという考え方は世界中で少しずつ広まってくると思われる。ただ一方で、どれぐらいインパクトのある変化を遺伝子にもたせられるかというのは、これからの研究が必要である。そこは両輪で、より効果を認めてもらえるような研究をやらないといけない。

C:組換えはもう少し国民が納得するものが出るまで待つことになるだろうと思う。当面はゲノム育種を使っても十分にある程度のものを出すことを行うことになる。

Q:この技術に関して、イネで行うのか、それとも他の作物でやるのか。

A:イネはたまたまある程度進んでいて、技術的な部分で 1 つのモデルとして行う。ただ、イネの改良をいくらやっても自給率にあまり貢献しない。水田を畑作化したときに、野菜、イネ以外の穀物、果樹とかを農水としても今後重要視していく。

イネ以外について、ゲノムが解記されたといっても、まだ色々な投資がされていないので、人的エフォートも含め、そういったものに投資することである程度の進展はあると思っている。そういう意味ではゲノム育種がまずは中心になると思われる。イネは少し抑えて、ほかに投資しないといけないという状況になってきている。

C:日本の農業という観点で見ると、高品質とか安全性とか。世界的に見た場合、間違いなく

食料増産。だから、日本の技術を世界に展開するというスキームの方が生産的。工業製品も海外に出ている。だから、国内でやることと海外でやることを適切に分ける必要性あり。バイオマスも何回も議論しているが、国内でバイオマスは結局プロダクトにならない。外でやらないといけないので、産業化という場合には、外でやるための戦略をきっちり考える必要がある。

C:日本の技術を海外で適用して、それを日本に持ち込んだものは、ある意味自給率と考えてよいのではないかと思います。

C:だから、韓国は海外でつくって韓国に輸入している。

C:日本の技術は少ない面積で収量を上げるということは得意。そういう技術が海外に行って、食料増産になり、日本に戻ってくればその分自給率とを考えても自然ではないかと思います。

C:日本の強い農業というのは、やはり安全性、高品質でおいしいということなので、そういう面を強化する。アジアでも中産階級が増えているので、そこへ提供すれば、何らかの輸出産業にはなるかもしれない。

C:栽培技術も進化しているが、新しい品種が出てきたら、その能力をいかに発揮させるかという面での仕組みを作らないと、結局その能力の半分しか使いきれていないような状態で農業生産をやることになりかねない。農水では現場は出口志向になっていて、3,4 年先のことは考えても、10 年先のことはなかなか考えられない状態にある。栽培研究も、今ある品種に対してどううまいのをつくるかということに集約して、新しい技術を開発するための仕込みやチャレンジができていく。

C:日本の稲作技術が高いというが、収量はせいぜい 5 トンぐらい。海外では発展途上国でも 6, 7 トン。日本の技術を輸出する場合、考えないといけないのは、日本の育種技術を守りつつ、収量を高めていくということ。ダイズなどは全然追いついていない。収量増加を目指した育種の枠組みというのを作らないと難しい。

3-3-2. 種・ゲノム多様性による環境適応とその利用

＜倉田のり 教授：国立遺伝学研究所系統生物研究センター＞

微生物機能や生物多様性をうまく使って、食料生産技術に結びつけられないか。現代農業の弊害として、多肥料、多収量による土壌疲弊や栽培環境の破壊、多量薬剤使用による環境劣化、単一品種の収斂により多様性が欠落しつつあるという問題がある（図 3-3-2-1）。にも関わらず、植物を中心にしてどう変えたら増産できるかということだけに目が向いている。地球の中での植物の生育ということを考えると、膨大なネットワークの中で動いているということが認識できる。生産環境生物の多様性、相互作用、そういったパワーを使って改革ができないか。また、高効率の栽培環境を実現するため、品種と共生微生物、栽培環境の統合を行って、相互作用によって生育力の強化や収量増加を図り、栽培と環境復元力を両立させていけるか。

実際には生物種・ゲノム多様性と環境適応・生産向上問題を目指してグリーンバイオ技術を開発応用するということである（図 3-3-2-2）。第一の命題として、生物進化と多様性を解明して利用する。作物品種や野生種などのゲノム情報を解析・利用し、さらに生態系に存在している生産環境のメタゲノム解析を行う。小手先でいくつかの作物や微生物だけやっても、なかなか統合的な解決は図れない。これらの特性を徹底的に比較・検討してターゲットにす

べき課題を掘り起こして、利用価値の高い新規分野の創設と再構築を行うことができればと考えている。これはヒト・動物でも腸内細菌などの多様な共生微生物がいなければ多分生存は不可能だと考えられるのと同様に、農業環境圏、植物生存圏、森林圏、いろいろなところで共生と寄生の相互作用は不可欠。根系の土壌ネットワークとかエンドファイトによる植物保護システムとか、メタゲノム解析、相互作用解析により、どのようなものが、いつ、どのように存在するのかという分類。それとともに土壌成分も分析して、植物-微生物間相互作用解析、高効率相互作用品種開発、高効率相互作用微生物開発、相互作用組合せ最適化を行い、これらを使った栽培技術を実現するということを進める（図 3-3-2-3）。

役に立つ生物種についての紹介。線虫（図 3-3-2-4）、これは作物総生産の 1 割ぐらいを害しているといわれているが、実は地球上に 50 万種ぐらいの生息が推定されていて、陸上植物 30 万種に対して、それぞれ異なる線虫が寄生しているといわれている。それに対する対抗作物や忌避成分を出すような植物も知られている。害を及ぼす一部のものは分かっているが、相互作用特異性を利用して何をしているのかが分かっていない。

菌根菌（図 3-3-2-5、3-3-2-6）。植物の根に侵入する糸状菌で、土壌中に巨大なネットワークを張りめぐらし、自然界で最も大量の炭素固定を行っている。植物から与えられた炭素を使うことで菌根菌は増殖している。人間における大腸菌と同じぐらい植物にとって大事。菌根菌なくして陸上植物はなかったとも言われている。

窒素固定に関わる根粒菌（図 3-3-2-7）。植物に共生するエンドファイト（図 3-3-2-8）。これは植物体内に共生して、非常に強力に病原抵抗性や乾燥耐性などを付与できる。生殖サイクルと体細胞サイクルを繰り返すが、進化上長年の共生を続けているので多くの種で生殖は失われていて、無生殖で病斑なしに感染している。長年隔離されてきたため、異質倍数体が多く、その影響で分泌する 2 次代謝産物も大きく異なる。この異なりによって、いろいろな特性を植物に付与することができると考えられているが、一部しか解析されていない。

植物がもつ大きなファミリーとして CRP (cysteine-rich-protein) がある（図 3-3-2-9）。これは多様な情報伝達シグナルとして機能している。多くの植物で 500-800 あり、タルウマゴヤシではさらに 500 以上存在し、ほとんどが根粒形成に特化。CRP のサブファミリーには生殖器官特異的な発現を行って、種の認識に関わる重要な遺伝子である。

このように相互作用によって進化的に非常に多様性を含むようなものが生まれている。この状況を我々は理解していない。まずはそれを調べて、変異・進化の局面を切り取って利用すべきである（図 3-3-2-9）。その中から多様な方法論、宿主・共生種の開発、利用をおこなっていくことが良いという提案である。内容の一部は学術会議の大型研究計画に関するマスタープラン「グローバル環境資源基盤構築と食・エネルギー・資源開発 国際研究拠点形成」で取り上げられている（図 3-3-2-10）。

質疑応答

Q:植物工場は、自然環境に共生しながら作物を育てるという生物多様性を維持する考え方とは異なる方向。その点についてのお考えがあれば。

A:人口が爆発的にふえているときには、ある意味そのような方法も必要。でも結局長い目で見ると土耕栽培と植物工場が共存していくしかないと思う。

Q:グリーンバイオとしてはどういう哲学で食料や多様性を含めて考えていくかという上で非常に重要な意味を持つので、一時期だけのものではなく、持続的な発展をするためのシ

システムを考えて欲しい。

A:日本で技術を確立して、国際展開して、土地のあるところで栽培して、国内に戻していくような考えは必要。特に飼料作物は日本では面積的に無理。ただそういう技術は確立していない。

C:研究者はフィールドでやらないから永久に確立しないのではないかと。研究者がきちんとフィールドに行って、土壌の問題も含めて、フィールドの実際の中で一番適したものを調べる必要がある。

A:これだけ違うのだということを実際に見せる場面がないと、なかなか気づかない。実験室の中だけにいたのでは。

C:共生微生物の研究ははじまったばかりなので、実際にどういう環境でどういう組合せなのかということもやらないといけない。有機農法ではそういうことをやっている。その辺はこれからのテーマとして取り上げて、持続的生産としてやるというのはあると思われる。ただ、栽培技術であって、育種とは少し違う観点かと。

A:栽培技術として、経験則的なことを重視してやっている限りは、どういうところを改良したらよいか、いいものが生まれるかという観点は出てこない。

C:例えば線虫だと、農家にとって深刻な問題なので、かなりの農家がきちんと考えている。そういう点では線虫はまた違う別の扱いかと思う。メタゲノムに関しては、森林のメタゲノムはやられているが、野外の作物を植える場所と森林のメタゲノムは違う。どのような戦略で、どういう場所を目指してやるかということも行なわれていない。水田から畑作にする場合、その場で何を育てるかということも含めて、どういう土壌環境が必要で、そのときのメタゲノムは何か。その辺りも考えてやらないと、総花的にやっても何も出ないと思われる。

Q:約 30 年前にバイオテクノロジーが始まったときに、農作物の葉面にいる微生物とか、根面とか、植物内にいる微生物を、農作物の病虫害防除や収量増加に使おうとして、培養できる菌だけ培養して、接種したらいなくなった。当時は 1%以下の少ない集団の変化をみて色々なことに使おうとしていたが、今はメタゲノムにより生物種 50%ぐらいいは分かるようになってきた。30 年前に考えたことが、もう一度新しいテクノロジーによって可能になるのではないかと。

A:現実的にはなってきた。ただ、やはり難培養性というのはなかなか解決されない。

3-3-3. 気候変動に対応した作物評価のための定量的フェノーム解析の基盤研究

＜篠崎一雄 センター長：理化学研究所環境資源科学研究センター＞

必ずしもモデル植物やイネ研究の手法が全てに通用するわけではない。植物機能から実際の応用に持っていくということは、これからまさに考えなければならないことで、それをどう実現するかは、我々が知恵を出さなければならない。作物だけを考えると、収量が基本的に重要である。ゲノムシーケンサーが非常に発達したので、ゲノムに偏って志向してしまう。ただ、実際の作物現場では栽培環境が全く違うので、作物ごとの栽培管理技術が全く違う。Genotype と栽培環境、栽培の最適化ということをやらないといけない(図 3-3-3-1)。フィールドの作物の複雑性(図 3-3-3-2)は、良く考えないと、遺伝子だけ扱ってもなかなか進まないというのはそこにあると思う。作物の品種をまず中心において、その最適な栽培環

境と栽培技術。それから土の問題、土壤環境微生物を集約的にやるような最適化という問題に取り組む必要がある。また、オミクスはいくつかあるが実際の生産ということでは表現型以外にないと思う。作物の生育を定性でなく定量化して評価（フェノタイピング）する。土壤微生物の解析、根のフェノタイピングも取り組みが始まっている。

世界中でフェノミクス研究が活発に進んでいる（図 3-3-3-3）。実験室内、フィールド、飛行機を用いたもの。そのための画像解析技術で、工学的な研究者との連携が非常に重要となる。圃場環境は変わるので、どうやってモニターしながら最適化したものを実験室内で再現するか。なるべく省力で計測できて管理ができるような仕組みが工学的にできれば、生産性を上げるということに役立つ。研究室での研究は植物工場レベルにとどめて、圃場との連携ができる体制が必要。日本の基礎植物科学の研究で圃場研究は非常に遅れている。そのため圃場研究推進のための拠点ネットワークをつくって、圃場がしっかりしているところと連携する。作物技術開発が出来ているので、新しいゲノム編集もその一環であるので、国内拠点、国際的な拠点との連携を行う。もう一つはフィールドの定量的な研究をするための技術開発をする。これまで進めてきたオミクス解析があり、特に代謝産物や遺伝子プロファイルは非常に役に立つということが分かっており、それを利用した作物の解析はできると思われる。特にデータ解析が重要となるので、情報系の研究者が入る必要がある。

質疑応答

Q:サイエンスマップ（NISTEP）から、日本の農業あるいは植物科学のあり方、強みをどう活かせば良いかは読み取れるか。

A:サイエンスマップのほかにバルーンマップ（経済産業省）を見る必要がある。バルーンマップは工業生産高をもとに、実際にどれだけの収益を上げているかというもの。日本で見るとやはり自動車産業とか工学系。バイオ分野でもシェアが高いものがあつたが、内視鏡なのでやはり工学系。農業生産というのは見えてこない。だから工学系とどうつないで、それをシステムとして海外に展開できるかというのが非常に大きい。病院を輸出するというように、医療機器を売るだけでなく、システムとして売るやり方を今後考えないと日本は生き残れないかと思う。ただ、サイエンスマップとして植物科学はどこの機関も強い。

Q:植物は日本は非常に強いので、それをどう活かしていくかというところを、農学・工学も含めていい提案をしていただきたい。

A:理研は連携を広げている。フェノームも日立製作所とやればかなり変わってくると思われる。

Q:表現型解析を効率化するとき、フィールドに対してうまく適応していくかというところが現場を見ていてよく分からない。形は良いが、収量となると難しい。

A:現場を歩いてみる際のポイントがあるはずなので、そのようなポイントをデータベース化できるのではないかな。実際にどうやって何を見るのかがこれから重要。

3-3-4. バイオマス生産技術開発から作物生産性向上へ

<福田裕穂 教授：東京大学大学院理学研究科>

バイオマス研究の NC-CARP 代表として、NC-CARP で行っている植物 CO₂資源化プロジェクトは、農業のプログラムを動かす時にも参考になると考えている。NC-CARP は植物 CO₂資源化研究拠点ネットワークをつくるという大きなコンセプトであり、植物の研究者だけで

なく、化学、工学、農学、理学が一緒になって、CO₂の資源化に取り組んでいる（図 3-3-4-1）。最終的な工学産物をつくりたいときに植物をどう変えたらいいか、また、その改変植物から最終産物にいたる全体のプロセスを全員で検討している。研究プロジェクトだけでなく、企業との連携、教育にも力を入れている。工学と植物の共同作用により、CO₂資源化の関連する新たなパラメーターを作り出すことが可能になった。こうしたパラメーターをデータベース化して、多様な研究者間で共有するとともにフィードバックする。これにより、バイオマスとして使いやすいパラメーターが設定され、これをもとに植物をつくるということが可能になりつつある（図 3-3-4-1）。もう一つ大事なのが全体として投資したお金が回収できるかという問題で、LCA（Life Cycle Assessment、製品やサービスのライフサイクルを通じた環境への影響を評価する手法）を適切に計算する必要がある（3-3-4-2）。

最終的にこのプロジェクトの出口の1つをソルガムに絞り、日本発のバイオマス植物の作製を目指している。高バイオマス品種を選抜しているので、この品種に高糖性遺伝子を導入して、高糖性ソルガムを作製することを計画している（図 3-3-4-3）。CREST プロジェクトの1つとして（代表：堤伸浩教授（東大農））、ソルガムの環境ストレス耐性をメキシコ圃場で研究しており、最終的には高糖性と環境ストレス耐性を入れることで日本発のスーパーソルガム作製を目指している。

こうしたプロジェクトに必要なことは異分野融合である。このため、ネットワーク化による多様な分野間での意見交換、人材育成、最後の出口のための産学連携が重要である。これらをあわせてプログラムを作らないと最終的な出口につながらない。NC-CARP ではアジアにおける生産から利用までのネットワークを考えているが、農業も日本だけに閉じずにアジアに展開することを視野に入れて、パッケージ化した農業技術の展開が必要である。教育プログラムに関しては、海外に学生を連れて行って、海外の圃場で実習などを行っている（図 3-3-4-4）。

今後の展望としては、ソルガムに関して、最終的に必要になるのはフィールドベースのデータで、フィールドオミクス、フィールドベースのゲノムアソシエーションを行い、有用バイオマス関連遺伝子を見つけてきている。また、ヘリコプターを導入して、精度良く、かつ人手を使わずに成長量を評価するシステムを開発しつつある（図 3-3-4-5）。ただ、ヘリコプターではバッテリーが良いものがなくて、長時間運用できないのがネックである。衛星を使う方法も検討しているが、現状では解像度に問題がある。今は光学的にクロロフィル量を測定しているだけであるが、レーザーを工夫していろいろな情報がとれるようになると、コストをかけずに様々な植物の成長指標がとれるようになり、精度の高いフェノミクスができると考えている。今はソルガムベースであるが、この技術は樹木にも展開できる。

最後に NC-CARP の経験から意見を述べる。こうしたプロジェクトで重要なのはネットワークで、教育のネットワーク、産学の連携ネットワーク、研究ネットワークが必要である。農業分野のプロジェクトは農水省が中心になると思うが、大学や理研ともネットワークを組んでオールジャパン体制を作ることが重要である。さらに産学でバーチャルでもいいのでネットワークを組んだ技術開発が必要であろう。それをつなぐような若い人を教育する必要がある（図 3-3-4-6）。バイオマスに関してはヨーロッパで約 5000 億円のプロジェクト（Bio-based Industries Consortium）が動いており、農業、工業、研究者が一緒になって、今までばらばらだったものをネットワーク化しつつある。

質疑応答

C:ネットワーク化はすごく良い。今は別々の大学でネットワークを組んでいるが、1ヶ所に集まって場を共有するような新しいタイプのネットワーク化もあるのではないか。イメージとしてはヨーロッパの研究所で UMR というのをつくって、研究テーマを8年ぐらい推進して、8年経ったら継続するか新しいものをもう一回構築するというのがあり、大学や研究所、民間の人が集まっている。こうしたネットワークがいくつかあれば日本でも新しい芽がでるかと思う。

C:プロジェクトの継続性が必要なものもある。結局何も残らないのは大体5年でプロジェクトが終わってしまうことが原因かと。継続させる部分とそれを橋渡しできる部分をフォローアップする体制が必要。JST で新しく農業をやるならば、つなぎながら農水省とどの部分を一緒にやるか、あるいは企業を入れて NEDO へとつなぐ方策とか。そのようなスキームをファンディングエージェンシーが考えてくれないと、研究者がいくら頑張っても「いい論文が出ましたね」で終わってしまう。本当の意味で橋渡しをするならば、そのようなスキームを考えてもらわないと、研究者は踊っていて終わってしまうというだけ。

A:ソルガムはバイオマス植物なので農水省とバッティングしない。今、沖縄で試験を行っているが、最終的にはアジアのかなり広い面積で展開しないと、コストをかける意味がない。アジア展開には高糖性も入れるので、虫害の問題も出てくる。病虫害抵抗性に関してはいくつか導入を始めている。展開する際には、必要な遺伝子等を考えながらこのプロジェクトは動いている。作物に関しても、どの場所でどういう作物を選んでやるかということを考えないといけない。そのあたりは研究者と行政に近い人たちが議論して、どの辺の技術開発を目標にするかをきちんと決めないといけない。今まではばらばらに研究者がやっていたら良かったが、今後は本当に農業に役立つような技術開発をやらなくてはいけない時代になっている。

継続に関しても、みんな継続する必要はなく、成功事例だけをきっちりと最終的なところまでつなげる必要がある。あとネットワークは残しておいた方がよい。システムをつくったときに、どこかでほころびが生ずるので、そのときに元に戻れないと修復できない。だから、何かあったときに困るからネットワークは残しておいたほうがよい。

3-3-5. 植物ミネラルセンサーの解明とヒトの健康

＜西澤直子 教授：石川県立大学生物資源工学研究所＞

作物生産は人類生存の基盤である。その中でも植物の養分吸収が基盤であるというのが植物栄養学の考え方。植物は土壌から17種類の必須元素を取り込んでいる（図3-3-5-1）。食料増産ということを考えると、農耕地として生産性の極めて低い不良土壌が約60%あり、これらの不良土壌において作物の生産性を上げることが重要。不良土壌で生産性の低い原因は必須元素の不足、有害元素の過剰による生育障害が上げられる。人間は生命活動に必要な栄養素として食品からミネラルを摂取しているが、基本的には植物が土壌から取り込んだミネラルに由来している。土壌からの養分吸収において、重要なのがミネラルセンサーである。

イネでの挙動について、根から与えた鉄は14時間以内に止葉と穂に移行する。亜鉛では先に穂に移行する。亜鉛はタンパク質の合成やDNA合成に重要な元素なので、細胞分裂が

盛んなところに運ばれていき、鉄と亜鉛では異なる運ばれ方をする。窒素の場合、40 分ぐらいで、止葉に移行し、それから穂に移行する。また、鉄欠乏オオムギの場合、積極的に鉄を吸収して地上部の必要なところに運び込む。植物は 17 種類の必須元素を必要としているが、その根からの吸収と移行は、それぞれの元素によって異なる制御を受けていて、必要とされる部位に運ばれている。その必須元素の過不足を感知して、恒常性を維持するためにはミネラルセンサーが必要だが、その実態はほとんど分かっていない。提案としては、それぞれの必須元素に対応するミネラルセンサーを網羅的に同定して、不良土壌での収量増加、あるいは可食部のミネラル成分の増加によってヒトの健康に貢献しようということ。そこでは遺伝子組換え技術も使うし、イオンビームを用いた突然変異育種も可能である。

すでにいくつか既知のセンサーがあり、窒素の場合は硝酸センサーとして、細胞内外の硝酸濃度を感知する 2 つのセンサーが報告されている。窒素肥料は全世界のエネルギー消費の 1% を占めており、30～50% は植物に吸収されずに、環境中に拡散して環境汚染を引き起こしている。硝酸吸収を促進すれば、窒素肥料利用効率が上昇する。鉄欠乏の場合、様々な遺伝子発現が誘導されるが、それに応答するシス配列、転写因子が明らかになっている。転写因子そのものが鉄を結合するということも明らかにしている（図 3-3-5-2）。さらに新しい鉄欠乏性制御因子 HRZ1, HRZ2 も同定した（図 3-3-5-3）。これは植物以外にもヒトにも相同なタンパク質がある。このセンサーは負の制御因子なので、その働きを抑えると種子中の鉄含量が上昇する、つまりミネラル価の高いお米ができる（図 3-3-5-4）。また、石灰質土壌における鉄欠乏にも耐性である。イオンビーム育種によってカドミウム汚染土壌で栽培してもカドミウムを含まない「コシヒカリ環 1 号」を開発、品種登録をした（図 3-3-5-5）。センサーの研究によってこうしたことが出来てくると考えている。つまりセンサーを明らかにすることで、不良土壌耐性作物の開発による増産、ミネラル価の高い作物の開発、有害元素を含まない安全な作物の開発につながると考えられる（図 3-3-5-6）。

質疑応答

C: コシヒカリ環 1 号について、普及させるときに 1 つハードルがあり、どうやって宣伝するか。日本の品種が全てこの遺伝子を持てばよいが、特定のものだけもつと、栽培している場所に風評などがあがる可能性がある。県の場合非常にそこがデリケート。品種はすぐ出来るのでそれほど時間はかからないと思われる。

A: 実験のときも決して圃場の名前を言ってくれるなということがあった。

Q: セシウムは可能か。

A: 多分同じ手法で可能と考える。ただ、セシウムの場合ここまで劇的に吸収しないものはまだ取れていない。

Q: センサーとは何か。1 種類しかないのか。

A: 分らない。硝酸に関してはセンサーが硝酸トランスポーターだという報告があるし、硝酸誘導性遺伝子の転写因子 NLP が硝酸の有無によって細胞質から核に移動することで制御している。鉄の場合は鉄を結合する能力があつて、鉄を感知するタンパク質はあるということ。センサーが分かっているのは必須元素の中でも限られている。

Q: カドミウムの例だが、この場合の詳しい制御機構、センサーとの結びつきは分かっているのか。

A: 直接センサーとの結びつきは分かっている。変異は鉄とマンガンの輸送体にある。発現

はしているが、機能喪失型となっている。この輸送体の基質認識部位が明らかになれば（カドミウムのセンサーとも言える）、そこを変化させることによって、鉄とマンガンは吸収するがカドミウムは吸収しないようにすることが可能かもしれない。

3-3-6. 食糧増産へどのような研究があるか

＜山根精一郎 代表取締役社長：日本モンサント株式会社＞

食料増産にどういう研究があって、出口から見たらどうかという観点です。日本の食料を考えたときに、いくつかのリスクがある。まずは供給。日本の自給率は非常に低く、日本の農地面積では国産で 100%は無理なので、いかに日本人が食べる食料を確保しているのかという観点で食料問題を考えなければいけない。1 番目は地球温暖化。これが世界で食料生産を減らしていく（図 3-3-6-1）。IMF の報告書によると、温暖化により多くの地域で生産が落ちるといわれている（図 3-3-6-2）。海外の生産が落ちると、日本に供給出来なくなる。温暖化は日本だけでなく海外でも問題となっている。2 番目に世界人口の増加（図 3-3-6-1）。そうすると食料の取り合いになる。そのときに本当に安定した供給元が確保できるのかということも考える必要がある。3 番目として日本農業の生産性をいかに高めて国際競争力をつけていくかということ（図 3-3-6-1）。水稻栽培における 1 ha あたりのコストを比較すると日本では平均 120 万円ぐらいかかるが、アメリカだと 26 万円ぐらい（図 3-3-6-3）。5 倍の差があるので、価格差が問題になっている。経営規模を 15 ha 以上で平均すると 86 万円。さらに省力化が進む乾田直播を入れると 57 万円。2 倍ぐらいなら、持って来る費用だとか品質の問題といったところで対抗できるようになる。

これら 3 点をこれから考えていって、克服する技術が必要ではないか（図 3-3-6-4）。最初の温暖化には暑さ、塩分、乾燥に対して抵抗性をもったものが必要。遺伝子組換え乾燥耐性トウモロコシでは従来育種で作られた乾燥耐性トウモロコシより十分収量を維持できた。こうした技術を導入して、ストレスがきても十分な食料供給ができる技術というのが必要となってくる。温暖化すると雑草が生え、病害虫が増える。そういったものに対して抵抗性を持ったものをつくっていかないといけない。農業というのは実際は多くの温室効果ガス（約 15%）を出している。農機具の燃料消費、農場を耕すことによる土中の CO₂ やメタンガスの放出に起因する。温室効果ガスの削減という観点からも不耕起栽培というのが欧米で推奨されている。これをやるには雑草防除が問題になるので除草剤耐性技術が必要。温室効果ガスの中で窒素肥料も問題となる。半分ぐらいは作物に利用されず、分解されて NO₂（CO₂ の約 300 倍の温室効果）となる。窒素の有効利用技術は温室効果ガス削減に大いに貢献する。大事なのは温暖化しても収量を確保すると同時に、これらの技術をパッケージとして海外に展開して、増収分を日本に分けてもらうという形で食料安定供給を図っていく。これが日本が出来ることだと思われる。

生産性の向上の一例として、省力化できる技術として直播栽培がある。直播栽培にとっての問題は雑草であり、この問題を克服するために除草剤耐性技術が必要である。仮に遺伝子組換え除草剤耐性イネが開発されたとすると、生産コスト 12 万円/10a が直播で半分ぐらいに落ちる。150 万 ha の場合、5,000 億円/年の生産コスト削減が推定される。このように、一体どういう技術を開発していかなければならないかを考える必要がある。効率的な病害虫防除に関しての一例として、殺虫剤を非常によく使用するキャベツ栽培に害虫抵抗性を導入

した場合、約 85%のコスト削減につながり、1 万 ha で約 20 億円/年の経済効果が推定される。水や肥料の有効利用で省資源・省コスト、収量そのものを上げていくことが大事。

食料増産に向けた研究としては、社会がいろいろ変化しているので、変化に農業がどう対応していけるのか、どういうものを作り出したらいいのかという出口を考えていく必要があるのではないかと。温暖化に関しては、温暖化でも生産を維持・向上できる技術、農業が出す温室効果ガスを削減させるといったものを海外にパッケージとして展開し、海外の生産力を向上することで、日本に必要な食料を確保するという考え方もあるのではないかと。生産性を向上させる栽培法の開発、省力化・省コストを実現させる技術開発が必要なのではないかと考える（図 3-3-6-5）。

質疑応答

Q:日本のイネ生産額は約 1 兆 8,000 億円であり、5,000 億円をコスト削減すると価格を安くする方向に持って行けるのか。

A:国際競争力がつくので、海外からお米を輸入するメリットがなくなるということは、日本の稲作を守る上で大事なこと。

Q:パッケージを持ち出す先はアジアがメインか。

A:米ならばアジアだが、必ずしもアジアに限定する必要はない。どういうパッケージをつくることができるか、それが相手国にとってどれだけ魅力があるのかというところで決まる。ダイズやトウモロコシは輸入元が偏っている。リスク分散ということではほかのところにも広げていく。そのときにパッケージを提供して食料を確保するということが必要。

Q:直播のときの最大の問題は除草剤か。

A:除草剤が一番大きいと思う。

Q:技術をパッケージ化して提供する際に、日本はどのような作物の技術改良を戦略的に行うのが良いか。

A:作物の種類という、正直、トウモロコシやダイズは欧米が進んでいて追いつくためには労力が必要。狙い目は野菜とか、日本はもともと育種が強いが、そこに新しい技術を組み込んでいき、母本として提供できるかということは考えられる。マイナークロップと呼ばれる豆類とかも有望。例えば、耐暑性ができるといったら、それをその地域の、例えば東南アジアやアフリカだったらキャッサバとか陸稲とかに応用してもらえるとというように、幅広く考えていいのではないかと。ニーズの掘り起こしという、研究を考える 1 段階前のステップが必要。

Q:遺伝子組換えの質問。トウモロコシやダイズは加工する食べ物。油とか家畜の飼料とか。ゴールデンライスがなかなか普及しないのは、やはり食べ物だからか。

A:そのような見方も確かにある。ただ、トウモロコシはコーンフレークとして実際に食べている。果たして本当に食べ物だからなのかは考えていかなければならない。日本の弱いところは、物がなくて。架空の話をしている、遺伝子組換えの話をすると海外の農家が得して生産性が上がっているけれども、消費者は何も関係がないと。日本の農業の中で使えるものが出てきて、生産者のメリットの発言が出てこない今の状況は変わらない。やったから変わるかという何とも言えないが、最低限その段階がないと、遺伝子組換えのネガティブさはいつまで経っても変わらない。いかに早く生産者なり消費者なりがメリットを実感できるものが出てくるかというところが勝負かと。ゴールデンライスの問題も、

最初は量が少なくて、食べてもビタミン A は足りないので、遺伝子組換えを使って食べさせるのはいけないという議論があった。今は改良されたものが作られているが、それまでの経緯があるので、反対されている。ただバングラデシュは喫緊の課題なので、導入するかもしれないという話もある。研究の進め方が良くなかった部分もある。また、あまりに期待させて、年月を引っ張ってきたところもあり、難しくなったかと。2016 年には是非出して頂きたい。

Q: コムギはどうか。圃場でやってはいけないところで見つけたという話を聞いた。

A: 見つけたが、少なくとも商業栽培のものの中には入っていなかった。除草剤耐性コムギの開発はアメリカでは一時止まって、コムギの生産性が落ちた。トウモロコシもダイズも楽な遺伝子組換えに移り、コムギしか作れないところは何の恩恵も受けられないということで栽培面積も落ちていった。そのような中で一昨年からコムギ農家がまとまって、将来の生産性向上のために遺伝子組換えが必要だということで、政府に対して開発を進めて欲しいということを言っている。それは生産者の考え方で、消費者はどうなるかというところはまだ問題があると思うが、農業も産業なので、生産性を上げないと太刀打ちできない。そのような観点で考えた際に、コムギだけ生産性が向上できない、他のメジャークロップは生産性が向上して、どんどん良くなっているというところで、生産者が動き出しているというところはあるかと思われる。

3-4. 食料増産技術に関する討論

3-4-1. 農業・食料生産関連重要テーマ

CRDS:JST 内でも議論しており、農業・食料生産関連で基礎研究から出口に至るまでに様々な研究テーマ、制度的なものがあると議論している。研究分野としては植物、微生物の基礎研究、育種技術、インシリコでの作物やシミュレーションを行う研究も重要である。また育種でてきたものの有用性、安全性、生産性の評価、そのためのフェノタイプ解析、橋渡し研究。少し観点はずれるが栄養科学や生物多様性といった視点も考える必要あり(図 3-4-1-1~3-4-1-3)。

真に出口を見据えた有望研究としては日本が強い領域の研究。イネはやはりこれだけ研究して人口も多いので。この技術を輸出して増収に貢献すれば、それを日本に戻すということもあるのでは。

C: 農水の戦略としてはデリケートな部分。今は生産物に付加価値をつけて外に売るという強い農業という意味で強化している。技術移転は想定していない。ただ、ゲノム等、日本の中の枠に収まらない技術がいっぱい出てきているので、そういったものをどのように活かすかという面があると思われる。国際協力という枠の中ではやるが、産業としてそれを活かすような形はまだ出来ていない。

C: イネに関しては産業としてではなく、国際協力の枠組みでも良い気がする。

C: それで良いのかもしれないが、農水の本省がそれに対して価値観をもたないと予算がつかない。ODA もいろいろなところに投じられる中で、農業的な進出みたいな部分はあまり評価されていない。ただ、農研機構の理事長が新しくかわり、国際的な研究戦略も強化するという方針で動いているので、統合に向けて徐々にそのような仕組みも作っていかない

といけない。

3-4-2. 産官学協働拠点、産業化への視点

CRDS:近年、個々の研究をつなぐ、基礎研究の成果を活かすためにネットワーク化するというをやってきた。外国の例ではあるが、ケンブリッジ病院の場合、創薬開発のため同じ敷地内に産学官施設がある。ワーヘニンゲンの場合もフードバレーとして、大学の周りに民間の研究所が並んで、効率的な産学連携が行われ、世界の農業をリードする状況になっている。アメリカの場合も USDA が大学キャンパス内に建物を作って一緒に研究を行い、研究力や実用に結びつけるという点で効率よく行われている。フランスの CNRS や INRA でも大学や民間企業が入ったりしている。基礎研究の社会実装の加速化という点では、こういう試みもいいのではないかな。

C:非常に重要。低カドミウム米は東大と農環研が共同開発して、農環研と農研機構が品種登録まで行った。品種登録された米をそれぞれのイネに入れるという作業は農研機構が行っている。大学単独ではある一定のところまではできるが、それ以降の社会実装というところになると、官あるいは企業が参加しないと進まない。

C:非常に連携がうまくいった例の1つになっていて、この後は普及組織との連携が必要になると思う。

C:世界とも連携する必要がある。タイや中国では本当に使いたいと。国際的に展開することが必要。

C:実際に実験室でいろいろな技術を作って、それを品種なりに応用して、その品種を実際に圃場にもって行って試験するということから、ワンキャンパスに集まるというのは可能ではないか。ワンキャンパスでいろいろなプロジェクトが同時進行していれば、それなりに効率のいいものができるし、企業もいろいろなプロジェクトをみながら、どういう形で本当の出口のところに参与していくかというのが考えられる。ワンキャンパスで農場、必要な実験が全部できるということであればかなり効率よくなる可能性はある。ただ問題は、研究者がどこから移ってこなければいけないわけで、プロジェクトが終わったらどうするのかも含めて、長い目で見たときにどのくらい本当に必要なのかというのはちょっと難しい部分もある。

C:抽象的にやっても動かない。具体的にする必要あり。東大工学部荒川教授は、企業がその技術が欲しいから、いろいろな企業が同じループにきて、ラボを中心に一緒になってやっている。そのような格好では動く。世界的に突出した技術ならば企業が集まる。抽象的だと企業は入ってこない。今回も西澤教授が素晴らしい発見をして、この周りでやるということならば多分集まる。ある種のシーズがあったときに、そのシーズを展開できるような仕組みが必要。みんなが使いたくなるようなシーズをもつ研究者を見つける必要がある。

C:実際の農家の中には非常に熱心な方たちもいらっしゃる。そういう人たちを巻き込んで社会実装に向けるのが良いのではないかな。

CRDS:アメリカのエクステンションオフィスは日本では都道府県がエクステンションオフィスを持っている。フィルターがいっぱいあり、大学の先生がおもしろいことを考えても最後までいかない。たとえば大学の中に普及センターみたいなものを併設して、そこが直接大学の研究グループと一緒に農家の人と関わるようになるとか大きな仕組みの変更があ

れば、動くかと思われる。技術を出していく仕組みが、国内と国外とでは違う。そのあたりはもしかすると農水省と一緒にできれば、技術が生産現場に行きやすくなるのでは。省庁連携の時代なので、農水省と文科省がうまく連携できれば、技術の普及までいけるのではないか。

C:本来ならばいろいろな研究をやる場面が農水系のフィールドなどもあるのだと思うが、作物研の現状はもっと細かいニーズに対する品種づくりとか、栽培技術の確立とか、5年計画のなかでタイトに動かされているので、おもしろいものを持ってきても、そこにマッチングさせるのが難しい。それは仕組みが悪く、もう少しシーズをどうインキュベートするか、連携してやっていくような仕組みが必要。結局、現場では何か入ってきても分からない、忙しいという話になりがち。ゲノム育種自体がそのような状況なので、それを改善するためのバーチャルセンター（作物ゲノム育種研究センター）をつくっている。統合に向けて、そのような研究シーズ培養の部分を入れる仕組みが必要。

CRDS:大学にも農学部が抱えている農場があるので、そのようなところで実際に栽培している農家と情報交換できるようなところで学生が行くと、農業の現場が分かって入っていけるのでは。現状、線がひかれているので、もう少し連携をすると技術が社会実装されていく部分が進むのではないか。

C:大学の農学部の先生は、実際にそのようなことを望んでいるのか。そういうのが大事だという意識をもたないと長続きしない。

CRDS:大学の先生もいろいろかと。大学院から教育を変えていかないといけない。意識として、植物・食料の上に地球が成り立っているということから、農学部希望者が復活してきている。この時期にもう一回立て直す必要あり。農業が産業として成り立つかということを考えていかないといけない。産業として技術のパッケージ輸出を行い、海外でつくったものを日本に戻すという考えも必要。

C:日本が技術を輸出する際に、1つ考えられるのは温暖化に対抗できる技術ではないか。世界的にも進んでいない。耐暑性、耐乾性、耐塩性とか、実際に実用化できるものを作り出していけたら、遅れを取り戻せるだろう。これから地球温暖化になるのだから、温暖化対策技術をパッケージとして持っていくことができるし、世界各国作物を選ばずに何でもできる可能性があるのではないか。

C:やりたいと思っているがGMの限界があるのでやりにくい。NBTの問題もある。

C:ただ、育種の基本としてはそろえておく必要はある。

C:作物ごとに全く違うのでは。イネはアジアに特殊なもの、コムギは西洋化する過程で増えていく。研究者が下手に考えていても分からないところがあって、実際にどのようなものが売れるかというビジネスの視点がないと本当の応用というものが見えない感じがする。ビジネスの人がきちんと関わるとい仕組みが必要。食料の場合、健康な人が食べるので、薬より神経質。GMが受け入れられないのはそこかと。薬は命が危ないと飲む。タバコで作ったワクチン(ZMapp)でもいきなり注射する。食料に関しては現状選択肢があるので、わざわざGMを選ばないという状況がある。だから、健康な人が長寿に向けてメリットがあるものを、高品質で安全性のあるものを提供するというのがビジネスからいうと一番良いのかと思われる。

3-4-3. 制度的なボトルネック、5-10年後を見据えた研究

CRDS:有望な研究に制度的なボトルネックが存在する場合、その突破方法は何か。

C:品種がなかなか置き換わらない。何か付加価値をつけた品種を開発しても、その地域でブランド化された品種が採用され、結果的に産業的に一切貢献していない。農水には埋もれた品種というのがたくさんある。例えば DNA マーカーで選抜した品種は全く広まっていないという現状がある。例えば県単位でなく、経営形態が大きくなり法人化が進み、そういうところでは自社で新しい品種をどんどん広めていくという仕組みができれば、実際に普及につながっていくという流れはできてくると思う。

CRDS:5、10 年後を考えていく上で何が重要になっていくか。

C:地球温暖化を見据えた研究。農水でも 5 年ぐらい前から行われている。

C:文科省の CO₂ を意識したものはいくつかプロジェクトが進行している。

CRDS:温暖化の状況は恐らくいろいろなところで作物が作りづらくなっている。色が出ないとか甘くならないとか、これからの課題で重要な課題になってきている。東南アジアなど高温下でどうやって安定して生産するかというのはますます重要になる。具体的にどういう作物、植物を対象にするかというのはバリエーションが出るが、方向としては重要な技術である。

3-4-4. 持続性の高い人材育成の仕組み

CRDS:研究活動と人材育成の連動ということ。

C:ネットワークを作るしかない。異分野連携しておかないと絶対だめ。最終的に産業だとか農家だとか、実際に出口に近い人たちと組んでいろいろなことを考える必要がどうしてもある。農学部に行った人は農業経営者みたいなものにちゃんと行くべき。育種をやった人は本当に育種を活かしてほしい。だから、もう少し大規模経営とか魅力ある経営になってきたりすれば良い。

C:産業としておもしろみが出れば、農業分野へ人が流れる。

C:大学で人材教育をしてもらえると、農業をやっている企業側は人を採りやすくなる。今は遺伝子のことは分かるが、作物が全然分からないという学生が就職してくる。遺伝子組換えもそうだが、最後は育種である。1つ遺伝子を見つけて入れても、そのまま品種になるわけではなく、きちんと戻し加えていくとか、いろいろなことをやる。それが、実際の場面で栽培もやったことがある、育種も経験している、分子も分かるというと企業ニーズに合っている。

C:少し前の農学部の教育では農家への見学や実習というのを必ず取り込んでいた。現場を見ながら教育をしていたが、今はほとんどない。

C:NC-CARP を見ていると、リファイナリーの人と育種の人と、若い人たちがいろいろなことを言い出している。異分野融合という仕組みをつくれればあとは若い人たちが自分達で何か始めるので、そういう仕組みづくりを研究の中に取り入れていくというのは、今後の人材育成ということで非常に重要ではないか。



図 3-3-1-1

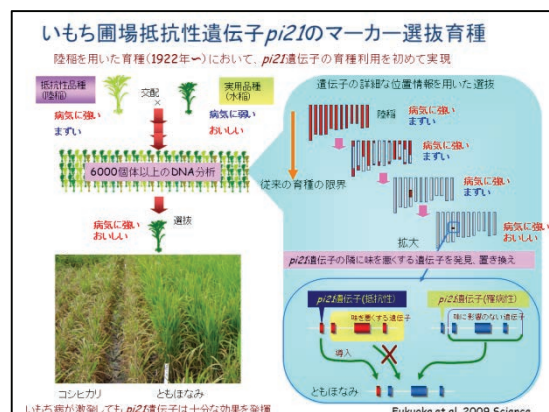


図 3-3-1-2

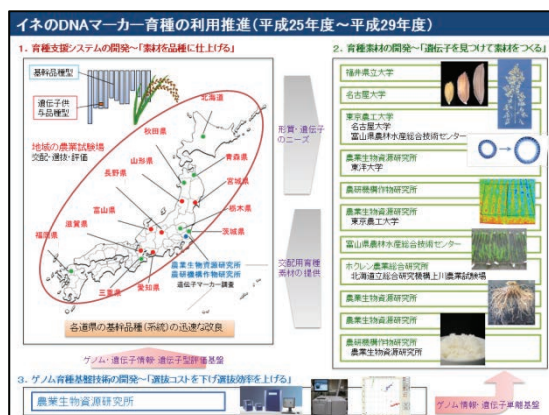


図 3-3-1-3

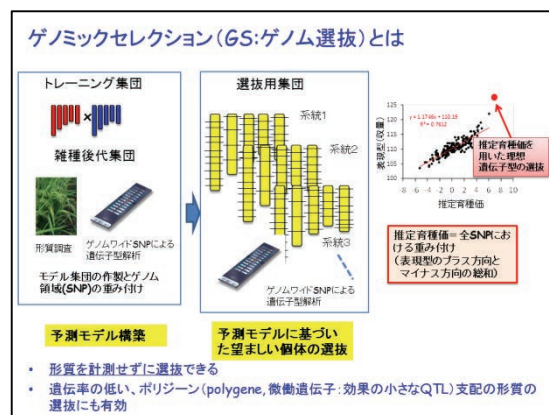


図 3-3-1-4

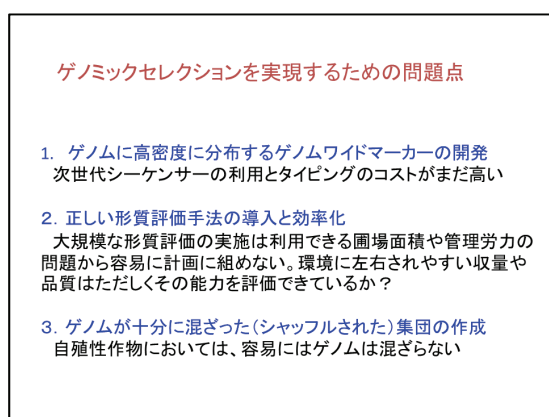


図 3-3-1-5

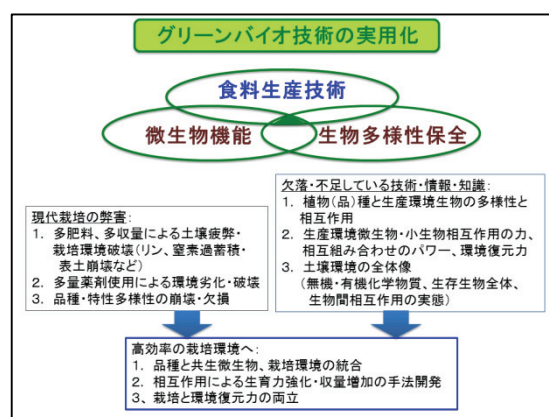


図 3-3-2-1

1. 生物種・ゲノム多様性と環境適応：生産向上問題を目指した
グリーンバイオ技術の開発・応用
 - ・ 生物適化と多様性を解明し、利用する
 - ・ 徹底的な作物品種・野生種ゲノム情報の解析・利用
 - ・ 徹底的な生産環境メタゲノム解析と問題の分析
2. 特性の徹底比較・検討
 - ・ 地域に根付いた在来種・品種と地場環境の特性解析
 - ・ 野生種をみよふ外来種の特性利用(形質・ストレス耐性、プロテオーム、メタボローム etc.)
 - ・ 機能性成分の優れたスクリーニング・環境特性調査と利用
3. ターゲットにすべき課題
 - ・ 網羅的解析と一点突破型課題との融合の設定に研究を解決
4. 利用価値の高い新規分野の創設・再構築
 - ・ 栽培土壌環境(全微小生物)・エンドファイト研究と作物生産の統合
 - ・ 相互作用にかかわる各バースの研究開発と全分野の統合
5. 分離された学問分野での知識・方法の統合
基礎生物学、化学、分子生物学、土壌肥料学、進化生物学、環境保全学、
農産加工応用微生物学、環境科学、植物保護科学、農薬化学、畜産学、林学、等の
横断的・分野融合が必要

图 3-3-2-2

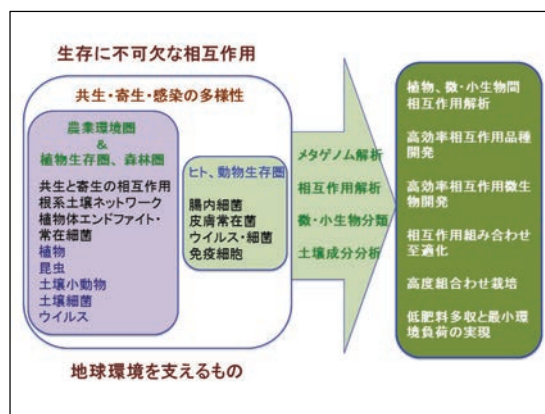


图 3-3-2-3

線虫

土壌中、海中を中心に50万種の生息が推定されている。
連作障害の要因の一つ。
全世界の作物生産の1割以上が線虫被害により失われて

30万の植物種に、それぞれ異なる線虫が寄生しているとも言われる。土壌表土1m中に含まれる生物としては、最も重い総重量を示す。

対抗作物：線虫の種により、忌避植物が効果のある事も知られていない。ネムタン草には**ギニアグラス**、クロタリシ、ネグランドバニタには**マリーゴールド**や**アサゲソウ**、アサゲソウには**ネムタン草**などがある。

体長1mm以下。

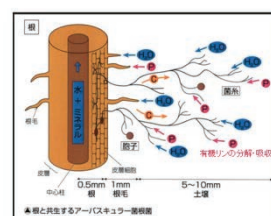
細菌・微生物をえさとする。

培養は困難。

2011年、地下3.6kmで生息が発見された。数千年以前からの生息と見られる。
2013年、南極数千年前の氷床より凍結休眠個体の生存再甦を確認。



图 3-3-2-4



菌根菌

菌根(きんこん)は、菌類が植物の根に侵入して形成する特有の構造を持った共生体。菌根を作る菌類を菌根菌という。菌根には7つの主要なタイプがあり、それぞれ関与する菌類や植物が異なり、構造も異なる。

アバースキューラ菌根、外生菌根または外菌根、内外生菌根、アルブイド菌根、モノロポイド菌根、エリコイド菌根、ラン菌根の7つの主要なタイプ、最近認識されてきたハニシメイト型菌根がある。

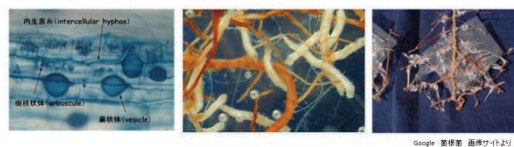


图 3-3-2-5



图 3-3-2-6

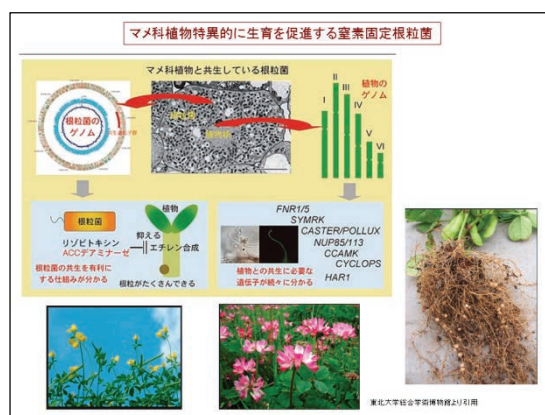


图 3-3-2-7

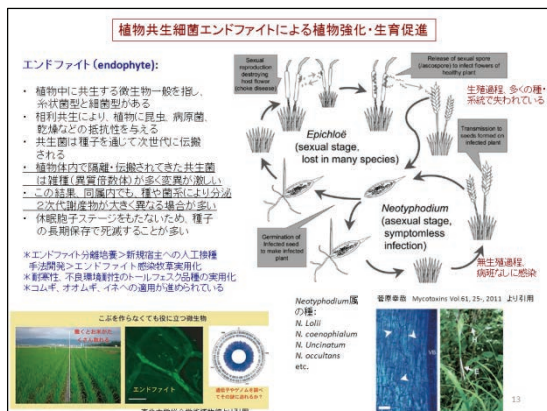


図 3-3-2-8

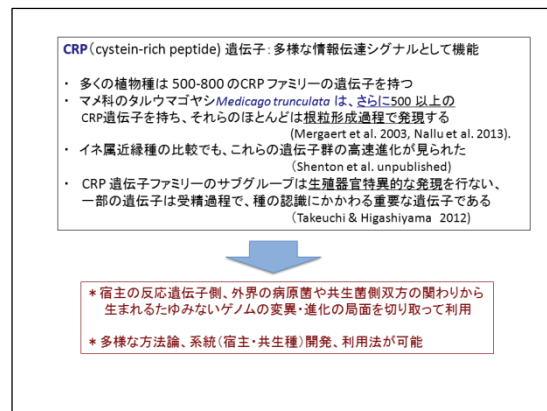


図 3-3-2-9

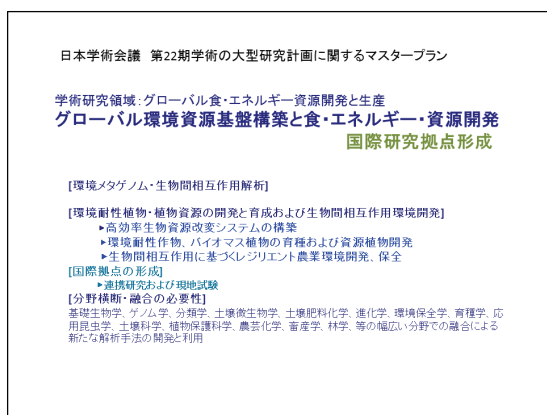


図 3-3-2-10

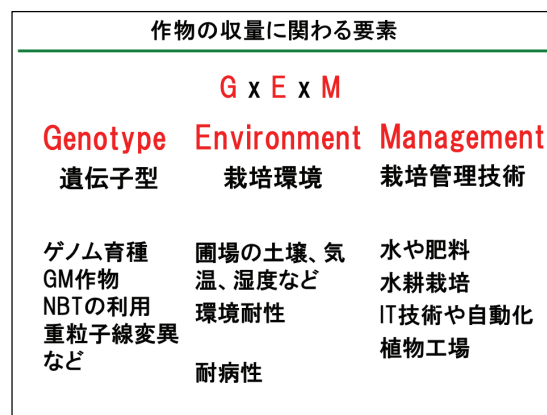


図 3-3-3-1

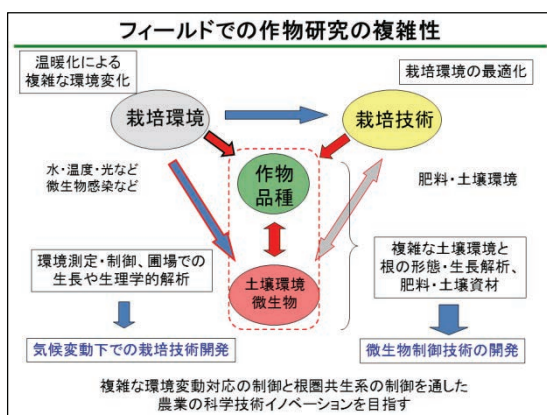


図 3-3-3-2

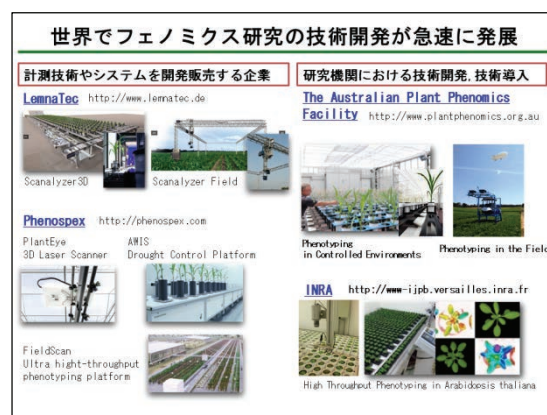


図 3-3-3-3

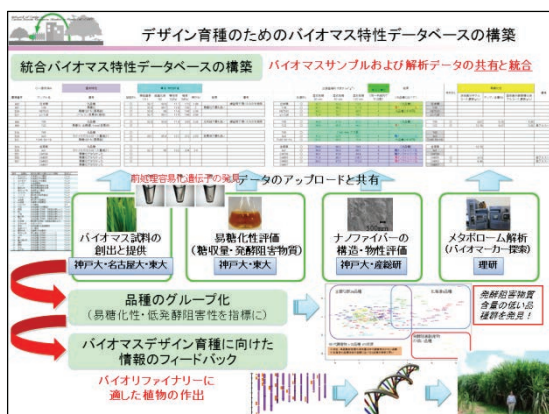


图 3-3-4-1

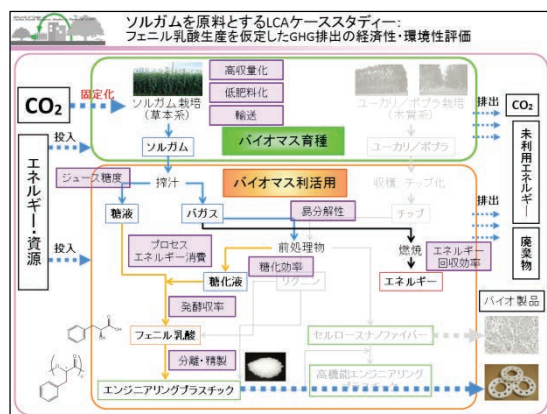


图 3-3-4-2



图 3-3-4-3

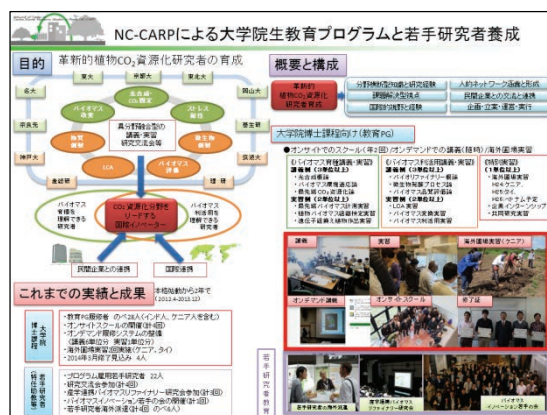


图 3-3-4-4



图 3-3-4-5

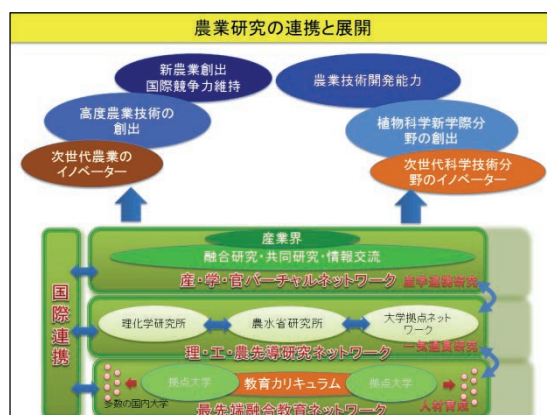


图 3-3-4-6

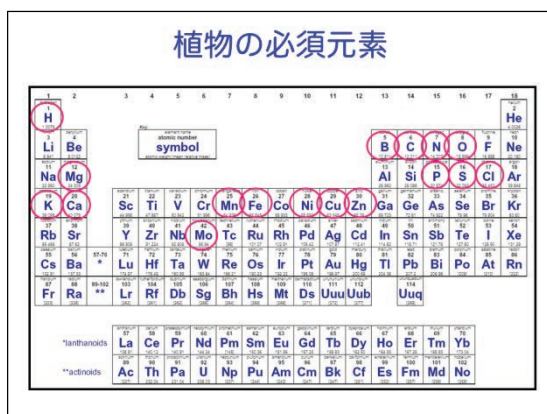


図 3-3-5-1

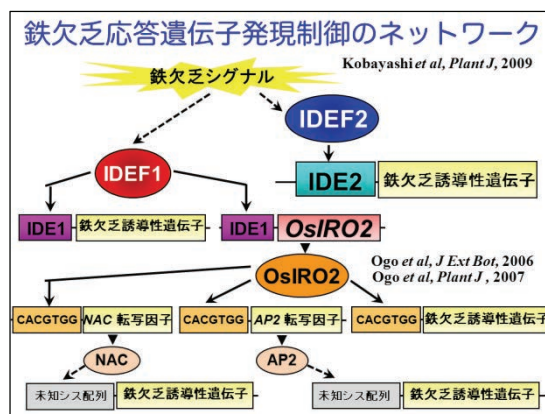


図 3-3-5-2

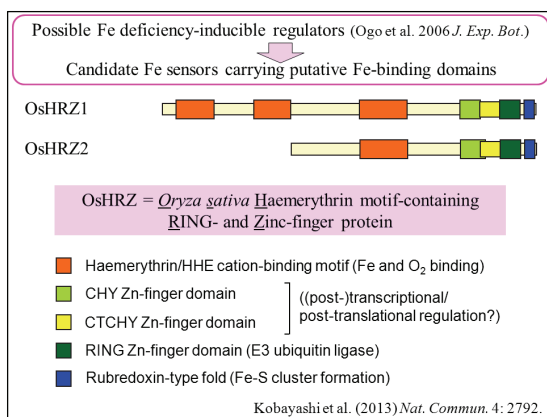


図 3-3-5-3

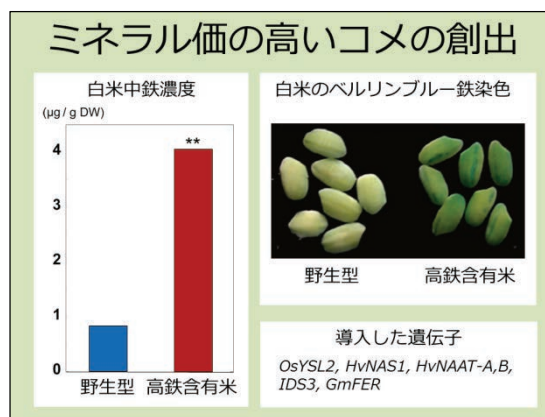


図 3-3-5-4

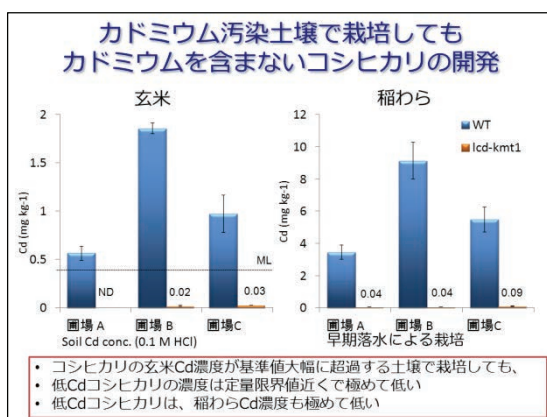


図 3-3-5-5

- 期待される成果**
1. 不良土壌耐性作物の開発による増産
 2. 不良土壌耐性エネルギー作物の開発
 3. とくにミネラル価の高い作物の開発
 4. 有害元素を含まない安全な作物の開発

図 3-3-5-6

食料供給の不安

- 食料の輸入量を確保出来るのか？
 - 地球温暖化により予測される農業生産の減少
 - 増大する世界人口の中で安定した供給元の確保が出来るのか？
 - 中国の穀物購買力
- 日本の農業生産性を高めて、国際競争力を持たせられるのか？

31

図 3-3-6-1

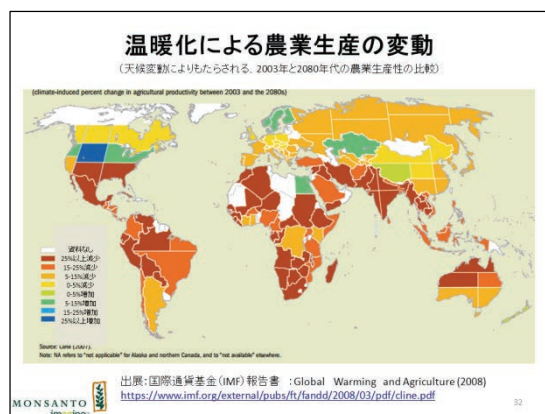


図 3-3-6-2

水稲栽培における1ヘクタール当たりのコスト比較

日本	全国平均 (1)	1,217,210
	経営規模15ha以上平均 (1)	863,770
	岩手県、乾田直播優良事例 (2)	568,450
米国	全米平均 (3)	259,660

(1) 農林水産省「平成24年度農作物生産費統計」
 (2) (独) 農研機構 東北農業センター「乾田直播マニュアルVer.2」
http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/kanden2.pdf
 (3) USDA-ERS Commodity Cost and Returns より引用(2013)、1ドル=100円で計算
<http://www.ers.usda.gov/data-products/commodity-costs-and-returns.aspx>

33

図 3-3-6-3

温暖化対策

- 耐暑、耐塩、耐乾技術の開発・導入
 - 遺伝子組換え技術
- 温暖化で増える雑草・病害虫への対処
 - 除草剤耐性、病害虫抵抗性(遺伝子組換え技術)
- 温室効果ガスの削減
 - 不耕起栽培の促進(遺伝子組換え除草剤耐性技術)
 - 窒素肥料の削減(遺伝子組換え窒素有効利用)

➤ これらの技術提供を基に食料の供給元確保

34

図 3-3-6-4

まとめ

➤ 食料増産に向けた研究

- 社会状況の変化に合わせた農業技術の開発が出口を考えるのに必要

- 地球温暖化対策
 - 温暖化の中で農業生産を維持・向上させる技術開発
 - 農業が出す温室効果ガスを削減させる技術開発
 - 技術供与で食料の供給元の確保
- 生産性向上
 - 生産性を向上させる栽培法の開発
 - 省力化・省コストを実現させる技術開発

35

図 3-3-6-5

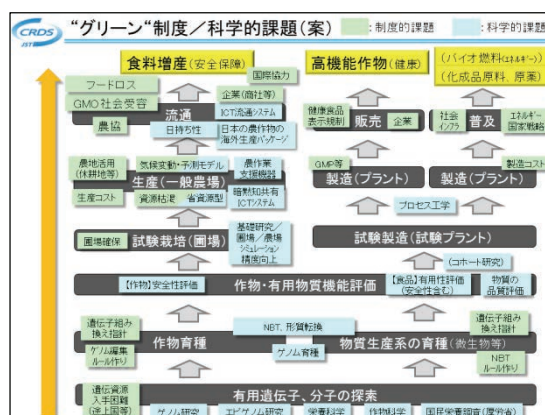


図 3-4-1-1

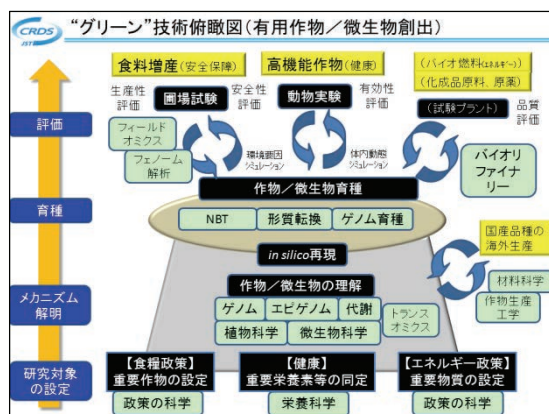


図 3-4-1-2

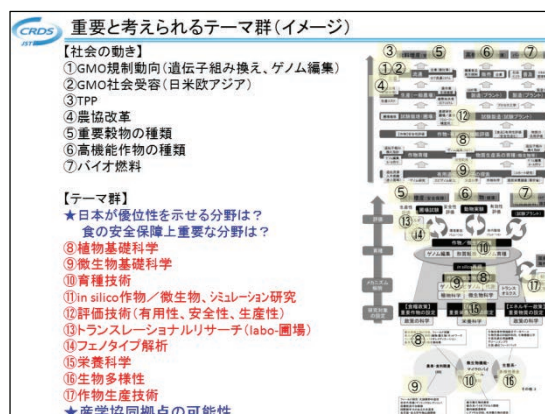


図 3-4-1-3

第4章 グリーンバイオ俯瞰ワークショップ

4-1. 概要

開催日 2014年10月2日(木)

開催場所 独立行政法人科学技術振興機構 東京別館2階A-1会議室

プログラム

グリーンバイオ俯瞰ワークショップ

開会挨拶、趣旨説明、俯瞰報告書概要報告 13:00-13:30

開会挨拶 浅島 誠 (CRDS 上席フェロー)

趣旨、概要説明 三浦 謙治 (CRDS フェロー)

セッション1 食料安全保障 13:30-14:00

食料安全保障を巡る情勢(渡部靖夫:法政大)

わが国食料安全保障のあり方(柴田明夫:資源・食糧問題研)

セッション2 食料生産技術 14:00-14:45

持続的農業生産技術(藤原徹:東京大)

国際競争力のある日本農業の実現(古木利彦:サカタのタネ)

ゲノミックセレクションも含めたオミクス解析の作物研究への展開

(松本隆:農業生物資源研)

セッション3 微生物機能 15:00-15:45

バイオリファインリー実現に向けた細胞工場の構築(近藤昭彦:神戸大)

レアメタルの好循環実現に向けた地域完結型バイオ利用リサイクル技術の開発

(小西康裕:大阪府立大)

生物間インターフェースにおける機能的微生物コミュニティの解析と応用

(小川順:京都大)

セッション4 生物多様性保全 15:45-16:30

生物多様性情報学とその情報基盤(伊藤元己:東京大)

森林の遺伝的多様性保全と持続的利用(津村義彦:森林総研)

生物多様性保全と福祉的利用における有効性(山口裕文:東京農業大)

セッション5 総合討論 16:45-18:00

総合討論司会 江面 浩 (CRDS 特任フェロー)

閉会挨拶 江面 浩 (CRDS 特任フェロー)

4-2. 趣旨説明

4-2-1. 序論

わが国の少子高齢化に伴う食料生産基盤崩壊の危機、国際的な人口増加による農産物の獲得競争の激化とそれに伴う食料安全保障上の課題、微生物機能向上による新分野創出、生物多様性保全に向けた課題に取り組むべく、わが国が推進すべきライフサイエンス研究開発戦略のあるべき姿及び研究成果実用化の隘路となっている体制・制度面等について調査・検討を実施している。本ワークショップでは食料生産・食料安全保障に関する研究開発、微生物機能向上、生物多様性保全に関する研究開発、制度設計に研究戦略の焦点をあてる。植物学・微生物学・生態学・農学の科学者及び種苗、社会科学的知見に立った食料安全保障に関する有識者に参加頂き、わが国が推進すべき課題に関して包括的な研究開発戦略を検討する。

4-2-2. グリーンイノベーション

社会からあるべき姿を見た際に、食の確保、食の安全性や生物多様性・環境など、いろいろな事項がグリーンバイオ分野に直接的に関係する。このことはグリーンバイオ分野の恩恵により地球が成り立っているということにもつながる。JST-CRDS ライフサイエンス・臨床医学ユニットでは地球・環境の“健康”につなげるジオヘルスイノベーションの推進を念頭に、わが国の課題を抽出・分析している。グリーンイノベーションには3つの価値創出（環境価値、社会的価値、経済的価値）が考えられる（図 4-2-2-1）。科学技術の貢献による社会への還元という意味でも非常に大きな役割を担うべき区分である。

各省庁等により自給率達成ロードマップが掲げられている（図 4-2-2-2）。軒並み低い自給率をどのように改善するかというのが現状の論点である。食料、森林資源に関しては農業、林業分野の振興、改善と科学技術との両輪で考える必要があるが、鉱物資源やエネルギーに関しても植物バイオマスや微生物等のグリーンバイオ技術を用いた研究が推進されている。これらの自給率上昇に工業的側面が関心が向けられるが、グリーンバイオ技術との連携による戦略を組むことで低コスト化が図れる。各自給率改善へは科学技術的な側面と制度的な側面もあるが、本ワークショップでの議論を通じた戦略案を示す（図 4-2-2-3～4-2-2-6）。

4-3. セッション1 食料安全保障

4-3-1. 食料安全保障を巡る情勢

＜渡部靖夫 教授：法政大学生命科学部＞

農業経済学という社会科学的視点から。まず、「食料」と「食糧」ではカテゴリーの大きさが違うことには留意すべき。穀類等を「食糧」、プラス魚、肉、野菜といった広い概念として「食料」がある。また、食料安全保障をリスクが起こったときにどのように対応するかといった政策的、現実的対応として考えている人は多いが、学術的テーマとして捕らえている人は少ない。但し、TPP 反対の論拠として「日本の食料安全保障が危なくなる」と言われるように、我々の生活には非常に身近な問題である。

最初に、国際社会が食料安全保障、“Food Security”をどのように見てきたかについて、歴史的に振り返ると、そもそも Food Security は、1973 年の FAO 総会で初めて公的用語と

して使われた（図 4-3-1-1）。1974 年には世界食料会議が開催され、「飢餓の撲滅」が世界宣言として採択された。さらに、1996 年には世界食料サミットが開催され、2015 年までに栄養不足人口を半減することが宣言され、2000 年のミレニアムサミットでは、もっと枠組みが大きくなって、1.25 ドル未満/日で生活している人口割合を半減させ、飢餓に苦しむ人口の割合を半減させるといった「ミレニアム開発目標」（MDG）が決定された。このように、国際社会は、フードセキュリティを真剣に考えているというメッセージを発し続けてきているのである（図 4-3-1-2）。

ところが実際に、国際社会が長く考えてきた食料安全保障の根底にあるのは、量的側面のみであった。しかし、量的側面に関しては、現実には農業投資・技術革新によって食料増産が達成された結果、先進国を中心に、むしろ過剰在庫が問題になってきた。そこで補助金をつけて輸出したりした。ところが現実には、一方で多くの途上国で何億もの人々が飢餓に直面していた。そこでインド出身の経済学者アマルティア・セン（1998 年ノーベル経済学賞）が、「大量の食料はそこにあるのに餓死者が多く出ているではないか。Food Security 問題というのは供給量が足りないことではなくて、食料へのアクセス権、つまり食料を生産、購入する entitlement がないからだ」と主張。1986 年には、「Poverty and FAMINE」を発刊して、国際的な Food Security の議論に非常に大きな影響を与えた（図 4-3-1-3）。現在の Food Security の定義は図 4-3-1-4 の通り。つまり、量があっても物理的、社会経済的にアクセス出来なければならないとされている。

一方、わが国では、1980 年に農政審議会が「食料安全保障」という訳をつけて、その定義を「国内生産の確保、安定輸入の確保、不測の事態に備えて備蓄の確保」とした。政府では、現在 39%の食料自給率（カロリーベース）を 2020 年度までに 50%に引き上げることを目標としている（図 4-3-1-5）。

- 食料安全保障を巡る国内議論の構図をみると、主張には、おおむね 3 つのタイプがある。
1. 農政ビッグバン派：食料安全保障の必要性を認めるが、その手段として平時の自給率向上を重視しているわけではない。食料自給率低下は貿易利益実現の裏返しであり、国民の選択の結果とするもの。
 2. 改革批判派：自給率低下を放置してきたことを批判し、自給率引き上げのための国境措置と国内生産強化策を主張。平時から基礎的食料生産体制を確保しなければならないとし、環境問題、地域振興、低所得者対策の観点からも農業振興は重要と主張。
 3. 農政派：上記 2 つの主張の中間的な立場。危機に対処するため、必要な食料を国内資源だけで生産できる体制の確立は必要であるが、いたずらな農業保護には反対し、急激な市場開放に備えた国内農業の維持強化を提案するもの。

現在、政府は、農政改革、規制改革、農外からの参入など、農業・農政について大きな動きを示している。このため、学術研究領域からも様々なデータ、検証の提供が必要となってきた。例えば、需給予測モデル、農業の多面的機能という経済外的な機能、国際規律など、様々な側面からの問題をとらえる必要がある（図 4-3-1-6）。

最近の注目動向としては、世界全体の栄養不足人口が 8.4 億人で 8 人に 1 人という、依然として厳しい状況にあること。しかもほとんどが発展途上国（図 4-3-1-7）。こうした情勢を踏まえて、日本農業経済学会は、2012 年度の大会で食料安全保障問題をテーマとして取り上げ、議論や研究成果の報告を行った結果を「農業経済研究」（84（2）, 80-94）に掲載してい

る。またごく最近では、「農業再生へ穀物偏重を改めよ」（2014年9月18日読売新聞社説）とのマスコミ報道が注目される。食料自給率の計算方法として、オリジナルカロリーベースと生産額ベースのどちらが適切か、という議論である。現在政府が使っているオリジナルカロリーベースでは、例えば国内産畜産物であっても、輸入飼料を使った分は国産とみなされない、野菜・果実はカロリーが低く自給率に貢献しないなど多くの問題点が指摘されている。生産額ベースの方が、野菜や果実も含まれるので、農業の力という意味では生産額ベースで65%を目標値と使うべきではないかとの主張もあり、今後こうした食料安全保障を巡る基本的な議論は避けられないだろう。

質疑応答

Q:米は基本的に自給している。カロリー自給率を上げるなら、もっと米以外の穀物を作らないといけないとなると、農業経済分野で本当に実現できるのかという議論はされているのか。

A:激しく議論されている。例えば問題視されているのが、耕作放棄地。日本全体で約40万haある。後継者の不足や、山奥などの不利な条件を抱える地域で、（米生産の持続ですら難しいのに）他作物を生産して自給率を上げるようなことができるのか。しかし一方で、土地資源はあるのにそれを有効利用していないことは問題だとする主張もある。国会でも地域再生問題を議論しているが、農業経済分野でも激しい議論がされている。もう一つ、家畜飼料の問題は深刻である。耕作放棄地に牧草を植え、牧草地をもっと利用して家畜を育てれば、当然自給率は上がる。しかし格安な輸入飼料の代わりに使えるだろうか。オリジナルカロリーベースでの自給率上昇を考える際に、飼料というのは重要なターゲットになる。

Q:世界の中で農業のモデル国はあるのか。日本がこれから進むべき道というのを教えて頂きたい。

A:世界の食料生産を支えている農業大国（アメリカ、オーストラリア、カナダ）は、そもそも付与されている自然資源のレベルが、日本とは全然違う。そんな中でも、模範生になり得るかもしれないのがヨーロッパ。ヨーロッパの農業経営規模は20-30haあるので、日本の10-20倍ではあるが、大陸型のようにスケールメリットで勝負しているわけではない。色々な農業が、それぞれの地域で行われており、農業政策としても、日本が手本とすべきところがたくさんある。一言で言えば、農業政策の枠組みを改革する必要がある。アメリカ、オーストラリアでは農業保護という考え方はほとんどなく、市場原理で動いているが、ヨーロッパの場合は、「直接支払」といって目的にかなう支払ならば農業政策として正当化され、それはきちっと出すべきという議論を行っており、日本も大いに参考にすべき（かなり類似の支払いを導入してきたがまだ不十分）。ヨーロッパは日本のモデルになる。

Q:ヨーロッパは地域の中でうまく回している。例えば、南で野菜を作って北に売り、北で穀物を作って南に持って行く。そういうものをアジアの中で回せる仕組みがあれば、ヨーロッパ型に向かっていけるのではないか。

A:ご指摘の通り。日本も大きい国で、多様な農業がある。地域特性に応じた多様な農業生産を展開していく、それをどのように政策的に、（あるいは我々学術研究の領域からも）支援していくか、基本的に重要である。

4-3-2. わが国の食料安全保障のあり方

＜柴田明夫 代表：株式会社 資源・食糧問題研究所＞

食料に限らず、自然・エネルギー・食料安全保障として、国民生活、経済・社会活動、国防等に必要な「量」の資源・エネルギー・食料を受容可能な「価格」で確保できること。日本が量を確保できないことはないと思うが、食料問題としてこれから価格がかなり跳ね上がるという事態は起こり得るかと思う。マーケットでは今、市場メカニズムを利用していくのが資源配分には一番適当だと言われている。一方で、市場メカニズムによらず資源を抑えにかかるような動きも出ている。つまり食料が戦略物質としての資源という特性としてあらわれてきている。食料問題は農業問題と食糧問題の2つに分かれる（図4-3-2-1）。農業問題は生産力が非常に強く需要の伸び以上に供給が増えて価格が下落するため、いかに農業を保護するかという先進国の問題。一方で、食料問題は需要の伸びが供給を上回って世界的な飢餓人口という形であらわれている発展途上国に良くみられる問題。この2つが併存しているところで色々な議論が出てくる。日本も例外でなく、この2つの問題が併存する形になっている。日本では900万トンの穀類を生産しているが、人口、面積が日本の半分のイギリスでは3000万トン、ドイツでは5000万トン近い穀類を生産している（図4-3-2-2）。経済大国は自国で基礎食料についてはカロリーベースで7割以上生産しているのが実態である。日本は3000万トンの穀物を恒常的に輸入している。これは1961年に農業基本法ができて以降、畜産振興に伴う餌は輸入するという構造の中で、3000万トンを輸入している。一方で、国内のコメ生産は40年間過剰である。不足と過剰が併存しているところが日本の問題である。安全保障といった場合には国内の生産力、備蓄、輸入を適宜組み合わせることであるが（図4-3-2-3）、3つとも危うくなっているのではないかな。国際マーケットの動きは2000年代に入ってから明らかに様相が変わってきている。下値が切りあがって乱高下が厳しくなっている（図4-3-2-4）。背景には中国の累積的な経済成長、それに伴う資源エネルギー・食料需要の拡大が大きな要因になっている（図4-3-2-5）。中国も意識しており、国内増産、海外の権益の獲得といった供給力確保、備蓄の拡充、省エネ促進といった3つの戦略を強めている（図4-3-2-6）。国際マーケットとしては、非常にボラティリティ、価格変動リスクが高まっている。価格水準が2-3倍に上がったことによって世界的な農業開発ブームが起こっている。その中身は新大陸型で1000-2000haの開発。装置化、灌漑整備。機械化、情報化、化学化、遺伝子組換えの導入、これらによって飛躍的に生産力が上がっているのが実態である。ただ、これは農業の工業化、脱自然化、普遍化、単作化である。一方で自然の領域に農業は属するので、地球温暖化、水制約の強まり、多様性の喪失、こうした現象も強まってきて、国際マーケットが荒っぽくなっている（図4-3-2-7）。こうした中、中国は着実に国家食料安全保障戦略を強めてきているし、中東・北アフリカでも急速に食料の輸入を伸ばしてきている。

90年代末から現代にかけて生産力が18億トンから24億トンへ飛躍的に強まっている。需要の伸びもあるが、24億トンのうち半分は餌で、餌の需要が伸びている（図4-3-2-8）。アメリカでも世界的にも食料生産が増えており、価格は緩んでいる（図4-3-2-9）。但し食料問題の解決には至っていない。中国では食糧生産が6億トンを突破しているが、輸入依存も高まり、7000万トンの輸入（図4-3-2-10）。主にトウモロコシ、大豆で、背景には企業養豚への転換がある。中東・北アフリカ地域はヨーロッパ圏並の人口を抱えていて、合わせて5億5000万人。ここでは国内生産は頭打ちで小麦、トウモロコシ、米の輸入が増えてきており、

世界の輸入量、穀物貿易の3分の1はこの地域である（図 4-3-2-11～13）。輸入が拡大する背景には人口増加と石油収入があるが、国内生産基盤は脆弱で、国際マーケットへの依存が強まる。そのため、荒っぽい国際マーケットの影響をこの地域は受ける。結果、社会的な不安が拡大するという構図になっている。そこで投資会社をつくって海外の農地を買収しているというランドラッシュが始まっている。これは日本の輸入の部分と重なり合う話なので、どう協力していくかが課題になる（図 4-3-2-14）。同じ構図は粉ミルクとか乳製品でも起こりつつある（図 4-3-2-15～16）。全粉乳輸出国であるニュージーランドでは供給力が頭打ちになっている。チーズに関しても日本はニュージーランドから輸入しているが、これから輸入が難しくなる。中国との競合。一方で日本の酪農、畜産は右肩下がり、生乳生産量は激減（図 4-3-2-17）。なかなか輸入が出来なくなって、国内でつくればいいといったときに、生産基盤がないということになりかねない。

それから、自然界の問題（図 4-3-2-18）、天候異常（図 4-3-2-19）、水の制約（図 4-3-2-20）を考えると、今まで日本は安くて良質なものをマーケットからいくらかでも調達できたという構図が、完全に終わりをつづけている（図 4-3-2-21）。食料安全保障に向けた日本・海外の協力が必要である（図 4-3-2-22）。

質疑応答

Q: 魚の問題はいかがか。

A: 魚も同じような構図。魚離れの中で日本の水産業は同じように高齢化、供給力はなかなか増えない。とはいえ 60 kg/人は食べているから、世界で最も食べている国ではある。輸入依存度が高まっている。しかし、日本市場はかつてのように優良な得意先ではない。中国とかが高く買ってしまい、中国向けに流れていくような状況。

Q: 日本食が世界遺産になって、日本としてはどんどん広めていく。そうすると魚の消費量が増えて、8割ぐらいは養殖にしないと間に合わないのではないかという話も聞くが。

A: 今、1億6000万トンが世界全体の生産量、消費量で、9000万トンが海産。これ以上とると自然が枯渇していく。養殖になると高級魚に低級魚を食べさせるという共食いの構図。フィッシュミールが必要。クロマグロの養殖の場合、1kg 太らせるのに 15kg 必要と言われている。肉の場合は 7kg。エネルギーも資源もそうであるが、1単位の資源を確保するために何単位のエネルギーを投入するか、エネルギー収支比（Energy Return on Investment）という概念が非常に重要になってきている。

Q: 「食」を支える萃点としての農業・農村を見直せ（図 4-3-2-23）と書いてあるが、今、何が一番問題なのか。どこを見直せば良いか。

A: 農村自体が弱体化している。日本の農業資源、水田農地、水資源、水源涵養林、地域社会、人材を含めて弱体化している（図 4-3-2-24）。ここを丸ごと活用して復活させていくような見直しが必要ではないか。アベノミクスによる成長戦略も重要であるが、成長の前提にまず安定があり、安定といえは一次産業の見直しが今こそ必要。農業・農村というのは、学問的にも様々な領域が絡むので、可能性は非常に高い。それが散在しており、活用されていないというのが問題。

Q: 社会的な問題というと、若い人たちが入ってくるような仕組みとか。

A: その通り。今までは交通の便が良くなると過疎化が進むという構図であったが、これから行き来ができるような仕組みが必要。都会と地域とを行き来するような。再生可能エネ

ルギーを産業用に使うのは無理かと思うが、地域の中で居住用に使うことは可能で、食料生産を止めずに、社会政策という面でも農村を見直していく必要がある。

4-4. セッション2 食料生産技術

4-4-1. 持続的農業生産技術

＜藤原徹 教授：東京大学大学院農学生命科学研究科＞

人口増加に伴い食料需要が増えるため食料生産を増やしてきた（図 4-4-1-1）が、この増加の要因は単位面積当たりの収穫量を増やしてきたことによる（図 4-4-1-2）。過去 40 年間で食料生産量は 2 倍に増加したが、世界の耕地面積は増えていない。つまり、単位面積あたりの収量を 40 年間で 2 倍にしてきた。緑の革命（green revolution）とよばれる育種、化学肥料の利用、農薬による病虫害防除、エネルギーを利用した機械化による大規模農業、灌漑による水利用を行ってきたことによるが、こうした営みは長らく続かないのではないかという懸念が増えている。この 40 年間で増産のため世界の窒素肥料の使用量は約 4 倍増加している。肥料コストは日本の米作では 12%だが、発展途上国では肥料コストが農業コストの 50%を超えるようなところもある。現在、生物によって固定された窒素量が約 1.4 億トンで、肥料用に 2/3 が化学固定されている。過剰分が環境中へ流れ出して、海洋生物が増殖して、無酸素水塊ができる。こうした問題が多くなるので、持続的に行うためには資源をなるべく使わず農業を実現するかが課題となり研究が続けられている。農業手法を改善することによって水利用効率を上げる、肥料施肥量を減らす、農薬を使う量を減らすということはこれまでもよく行われてきている（図 4-4-1-3）。ただ、育種を持続的な農業に利用するということはあまり行われておらず、これからの注目ポイントになっていくのではないか。手法開発としては、Precision Farming（植物の成長状態を観察し適切な量の肥料を与え、農薬をまくというモニタリングと農業実践を一緒に行う方法）。良い肥料の開発による使用量低下。農薬をなるべく使わないために異なった耐性をもつ植物を、ある地域で異なったパターンで植えることによって、いかに病気を抑えられるかということを経理的に解析して行うということが挙げられる。最近注目されているのは、UAV（Unmanned Aerial Vehicle、無人ヘリ）。軍事目的でない場合でも、災害現場における様子を空から撮影することも可能。同様に畑を空中撮影することで、どこにどれぐらいの植物が生え、その緑の程度はどのぐらいかといったことが分かる。こうした工学的観点からの農業管理を行い、効率化・持続化に役立てようという流れである（図 4-4-1-4）。

一方、育種的に日本の研究者は貢献している。育種に使えるような大事な遺伝子やマーカーを使って見つけてきて、交配によってピラミディングして良いものをつくっている（図 4-4-1-5）。成功例としてはいもち病圃場耐性品種、低カドミウム品種、水利用効率を高めるような深根性マーカーなど。こうしたアプローチから「イネの低コスト・省力化・環境負荷低減に資する有用遺伝子の同定と DNA マーカーの開発」（<http://cropgenome.project.affrc.go.jp/kenkyu/koubo/lct.html#kadai>）という農水省プロジェクトが立ち上がっており、遺伝子、マーカーを見つけて持続化を目指そうとしている。

これまでは研究を進めると遺伝子を見つけないというぐらいだったが、もう少し仕組みのレベルで理解できて、数理モデルを使って統合的に理解すると、植物を作ることはできないま

でも、植物の性質を予測しながら変化させるといったことが出来ていくと思われる（図 4-4-1-6）。例えばある栄養による蓄積を変化させるような一連のタンパク質を見つけ出して、その性質を調べることで、どのような配置にするとより効率よく吸収できるかが分かったりする。もう一つの可能性は無人ヘリを用いたフィールドでの観察方法。作物はゲノムのデータ予測が容易になってきた。このデータとフィールドでのフェノタイプを用いてモデルを構築する。例えば、肥料が少ないところ、環境の悪いところで育つ作物を育種に用いるにはどうすれば良いかということ予測できる。そのようなゲノミックセレクションが使われ始めている（図 4-4-1-7）。農業生産国のアメリカでは地下水が減少して、こうした中でどのように生産を持続させていくか。実践的なことも重要ではあるが、乾燥耐性や水利用効率の高い作物をいかにつくるかといったことがこれから重要になってくる。資源、環境に限界があることを認識しながら、縦の科学を進めると同時に、ほかの分野で見つかった手法を用いて今まで出来なかったことを進める横の科学が重要だと思う（図 4-4-1-8）。

質疑応答

Q: リンの枯渇や循環について対応策は。

A: リンは基本的に食べても減らないので、うまく循環できるはずだが、現代社会では循環されていない。農地に与えるリンは鉱石から採取する。そうしなければ、質を保証できないから。循環させることができれば、資源枯渇の問題は解消する。

Q: 数理モデルを使って予測することに関して、微生物でも難しいところではあるが、植物をデザインするとなると、どのような考え方か。個々の非常に細かい分子レベルからの積み上げか。

A: 積み上げてデザインすることは難しい。ある特定の性質については、そのことに影響を及ぼす要因がいくつか分かっているのので、そのメジャー因子とモデルを使って、どのような組合せにするとより効率が良くなりそうかは分かる。

Q: 窒素やリンを過剰に与えたために環境を壊しているのではないか。むしろそれを活かして固定化して、再循環させるようなことを考えなければならない。

A: 国によって状況が違う。日本の農地はリン肥料を長期間与えているので、日本の農地のリン濃度は非常に高い。また多量の食料を輸入しているので、その中に入っている窒素、リンを固定化するという議論がある。一方で、そのようなものがないところでは、いかに少ないものを効率よく利用できるかということになってくる。世界全体でみると、濃度が低くて困っている場所が多い。

4-4-2. 国際競争力のある日本農業の実現

＜古木利彦 執行役員 研究本部副本部長 掛川総合研究センター場長：

株式会社サカタのタネ＞

どうやって日本の農業を強くしていくべきかということを、種苗産業としては、どうやって勝ち残っていくか、世界をリードしていくか。背景として、日本は人口が減少して、農家も減少していることから、規模として野菜花卉ともに縮小傾向。一方、アジア、アフリカを中心として人口増大の中、経済的に発展著しい新興国では高品質な種苗、高品質な農作物を求める動きがある。気候変動として、温暖化の影響があり、日本の亜熱帯化、病害虫の増加により、日本の施設農業、露地農業が非常に難しくなり、生産の不安定さも増している。ゲ

リラ豪雨とかスーパー台風が露地作物生産を困難にしている。生物多様性条約、植物検疫等の強化が進んでいる。名古屋議定書が10/12に発効され、それに伴いEUでは規制法案も同時発効された。日本では具体的にどうするかが検討されているところではあるが、ヨーロッパだけでなく、世界全体に関わる問題であり、遺伝資源獲得の困難化をどのようにクリアしていくかが大事である。また、育種技術に関しては、アメリカを中心に遺伝子組換えによる穀物等の生産が非常に進んでいる。ただ、野菜等園芸作物はまだ遅れている。今は遺伝子組換え作物は受け入れられないという世論ではあるが、NBTといった新しい技術開発も、モンサント、シンジェンタといった大手は桁違いの投資をしている状況である（図4-4-2-1）。

世界の状況としてオランダと韓国を挙げる。オランダは北部地域がシードバレーと呼ばれ、そこに約20社以上の種苗関係、苗生産等々の会社が集中している。そこで協力し合って、優れた品種開発、技術開発を進めている。コンセプトとしてはより少ないものでより多くを生産。これは種苗開発、いろいろな種の加工開発技術があげられる。ただ単に量の供給のみではなく、健康、環境への貢献ということで、具体的には品種育成でも機能性、アレルギーフリーといったことも種苗会社では活発に行われている。それから持続可能社会ということで、オランダは持たざる国ではあるが、施設栽培が非常に進んでおり、エネルギー生産型の温室といったことも開発が非常に進んでいる。具体的には夏場のエネルギーを地下に蓄えておき、冬場の生産のためのエネルギーとして利用するというので、収支としてはエネルギー生産量の方が使用量を上回るぐらいのシステムが開発されている。では何故そこまで進むかということであるが、これはオランダのイノベーションボックスが背景にある。ヨーロッパのいくつかの国ではパテントボックスという、知的財産権に対する税制優遇制度があり、オランダはそれを更に発展させて、実際にオランダ国内で育種、育成された品種からくる売上に対する税制優遇がある。こうした優遇措置は欧米の主要な種苗会社がオランダに拠点を持っている要因でもあり、単に園芸王国という歴史的背景だけではない。オランダの種子輸出は15億ユーロという国の基幹産業として成り立っている（図4-4-2-2）。韓国はゴールデンシードプロジェクトといい、日本の農水省にあたる機関が育種、種苗産業に国策として力を入れるプロジェクト。これまで韓国の種苗産業は外資が中心であったが、近年、外資からの買い直しや、個人の育種家が大勢いる。韓国資本の種苗会社や個人育種家を政府がサポートしており、韓国としての育種産業を強化している。外資は一切の補助がない。また、シードバレーという構想でそのような研究機関を集中的に誘致するための施設もつくられつつある。また種を輸出するための港、シードポートの整備計画が進んでいる（図4-4-2-2）。最終的な目標は10-20年後に種子輸出1億ドル。現在韓国は圧倒的な輸入超過。オランダ、韓国は自国の農業とか種苗産業の保護というより、国際競争力をつけることが目的。日本は自国の農業保護がまず最初にきているというところが課題。

具体的にどうしたら良いか。イネは政府や大学で育種等にも力を入れている。ただ穀物に関しては、GMOを主体としたモンサント、パイオニア等海外勢の競争に入っていくのはハードルが高いので、園芸作物の強化が大事。もともと日本は育種でも、ものづくりという意味で非常に高い評価を受けている。野菜だけでなく、リンゴの「ふじ」に代表されるように、果実という面でも歴史的に育種のレベルが非常に高い国である。どうやって強化していくか。遺伝資源の獲得については生物多様性条約等々の問題解決は民間では限界がある。政府レベルで資源保有国との協定あるいは条約等を結ぶ、そういったシステムをつくる、そして日本

の種苗会社が使える体制をつくるのが大事。NBT も民間種苗業者には非常にハードルが高い。GMO かどうかまだ区別されていない技術なので、民間業者にとっては風評被害が恐ろしい。そういった意味では官学中心に積極的な開発が望ましい。育種素材の開発。これは民間会社では一番大事なことはあるが、穀物以外の園芸作物でももっと力を入れるべき。種苗会社における知財戦略として、育種技術や素材等を日本の知財として強化していく、それを輸出につなげ、日本の技術立国という部分を農業分野でも強みとして活かしていく必要がある。大学等で現場の育種を教えているところが少ない。アメリカでは大学によって得意作物分野をもち、実践的な育種を行い品種も発表している。そのようなところではブリーダーとしての教育も十分行われており、ブリーダーコースを設置している大学もある。残念ながら日本ではそういった状況ではない（図 4-4-2-3）。

育種産業の強化に加えて、日本のものづくりの強みを出すことが大事。規模拡大による生産性向上、競争力向上は日本では限界がある。日本はさらに技術力等を使って効率向上ということが大事。例えば太陽光利用型植物工場のような環境をモニタリングしながら栽培管理していくというのはオランダで行われているので現実的。日本では葉菜を中心に完全閉鎖型の人工光型植物工場といった技術開発も進んでおり、農業界のみならず工業界を巻き込んで更なる技術開発を行っていくことで生産性向上が可能ではないかと考えている。競争力のある農産物というと、低コストで輸出に耐え得るだけの競争力ある農産物を日本で生産していくことが大事。例えばオランダのようなエネルギー生産型温室。日本でもエネルギー再生型・生産型といった農業は十分可能かと思う。また、水や肥料の再生といった農業も十分可能。アメリカ、カリフォルニアでは過去は畝間灌漑が主流で、スプリンクラーによる灌漑にシフトしても水が足りないということで、点滴灌漑が主流になっている。使用する肥料量も低下させていくことに取り組んでいる。種苗業界は、育種の面でいかに少ない肥料で同じ結果を出すかといったことに取り組んでいるが、栽培技術開発面ではまだまだ取り組めることがたくさんある。育種産業の強化、栽培技術等の革新、それらを併せ持って高品質の農産物、高機能性農産物の生産、それらの輸出（図 4-4-2-4）ということで日本農業の将来を強くしていく必要がある。

質疑応答

Q:カルタヘナ関係の審査において、日本企業は自分のところでつくったものはほとんど出してこない。食料以外ならば生物多様性影響のみで済むはずだが。その辺に取り組むことは企業としては難しいのか。

A:非常に難しい。組換え技術に関しても常におくれをとらないように理解して身につけることは行う。ただ十分な社会受容が得られていないというのが一番のポイント。風評被害が一番怖い。

C:結論としては、園芸作物生産というのは非常に日本の特徴で、日本の農業再生を考えるとその部分への政策的な投資を行うということで宜しいかと。農業生産額からしても園芸作物を全て足した方がイネの生産額よりはるかに多いので。

4-4-3. ゲノミックセレクションも含めたオミクス解析の作物研究への展開

＜松本隆 センター長：農業生物資源研究所農業生物先端ゲノム研究センター＞

育種とは地域の優良品種に対して望ましい形質をもった系統や品種を交配して、もとの優

良形質をこわさずに望ましい形質を追加するという行為である。そのためには多様な自然変異をもっていること、望ましい個体を選抜できるという技術が必要（図 4-4-3-1）。多様な遺伝資源、イネでは4万の遺伝資源を農業生物資源ジーンバンク (https://www.gene.affrc.go.jp/index_j.php) にて確保している。こうした国内の遺伝資源が非常に重要になってくる。また世界で初めて作物ゲノムとして完了したイネゲノムを中心に、様々なゲノム情報を蓄積している（図 4-4-3-2）。ゲノム情報により DNA マーカー育種が可能となる。例えば良食味で耐病性品種を選抜するとなると、普通は生やして米にして食べてみないと分からないが、苗の時期に葉 1 枚から DNA を調べれば目的の個体を選抜できる（図 4-4-3-3）。実際に DNA マーカー育種を活用して、いもち病抵抗性遺伝子 *pi21* 遺伝子を用いた選抜育種を行った。コシヒカリというのは非常においしいがいもち病に弱い。これに陸稲のもっているいもち病抵抗性遺伝子を導入しようとしたが、1922 年以来全く成功しなかった。これは抵抗性遺伝子のすぐそばにある味を悪くする遺伝子が邪魔をしてコシヒカリの味を低下させてしまうため。DNA マーカーを用いてこの 2 つを切り離すことに成功して、コシヒカリの性質を受け継いでいもち病抵抗性である「ともほなみ」という品種作出に成功した（図 3-3-1-2）。現在、農水省プロジェクトで DNA マーカー選抜育種システムを全国に展開中である（図 3-3-1-3）。DNA マーカー育種は実際に現場で使われる技術ではあるが、重要な農業形質の多くは 1 つや 2 つの遺伝子からではなく、多数の遺伝子による複雑な支配を受ける。また環境の影響も受けやすいことから、一つ一つ改良していくだけでは難しいので新しい育種が必要となった（図 4-4-3-4）。次世代シーケンサーにより SNP の検出が可能となり、コシヒカリと日本晴の間に 7 万近くのマーカーが作れるようになった。これらたくさんのマーカーを用いた育種について 3 つ紹介する。

- ・ イネの系譜ハプロタイプ解析：イネは明治以来祖先品種が明らかにされている。例えばコシヒカリの遺伝子がどのように祖先品種から伝わり、最近の良食味品種に伝えられたかを SNP 解析と育種系譜でたどることができる。
- ・ ゲノムワイド相関解析 (GWAS)：マーカーを使って SNP の頻度と形質を統計的に解析する方法。これまでは遺伝解析として交配して子孫を作らなければならなかったが、その必要がなく、配列を比較するだけで可能（図 4-4-3-5）。
- ・ ゲノミックセレクション：小規模のトレーニング集団をつくり、収量や性質を網羅的に解析、および SNP パターンと比較して相関式をつくる。収量等を測定しなくても育種価をシミュレーション可能。つまりゲノタイピングを行い、SNP パターンを把握することで形質を計測せずに選抜することが可能（図 3-3-1-4）。最近では作物にも適用例が増えてきた（図 4-4-3-6）。前提として、ゲノムが多様であることが重要である。

オミクスという視点で考えるとトランスクリプトーム解析も次世代シーケンサーによる RNA-seq により大きく変化した。農業生物資源研究所では RiceXPro として 27,000 遺伝子の発現解析を公開している (<http://ricexpro.dna.affrc.go.jp/>)。遺伝子の働く器官・組織・時期を特定して、遺伝子機能アノテーションにつなげる仕組みである（図 4-4-3-7）。

ゲノム研究からマーカーをつくり育種機関に適用して望むような育種をするというのは日本、世界で実用化されている。次世代シーケンサーによる大規模ゲノム解読が進むようになって GWAS やゲノミックセレクションという方法が用いられ、新しい育種技術が開発されている。RNA-seq による遺伝子発現解析により、有用遺伝子の単離や栽培条件を制御したり

できる。オミクスでいうとフェノミクスやメタボロミクスが進んでいるが、研究はこれからというのが現状。

質疑応答

Q:ゲノム編集はかなり進んでいるのか。

A:特定の遺伝子を変えることによって育種をするという意味では恐らくまだ始まったばかり。TALEN や CRISPR といった新しい技術は開発されているが、農業作物に適用したというのは、まだ始まったばかり。SIP で実用化に持って行くというところ。

Q:知財の確保は。

A:品種ができれば種苗法によって守られている。つくったものに関して種苗は確保している。ただ、種苗法はそれを使って作った次の世代の品種の知財は守られていないのでなかなか難しいところ。1 回、次の世代を作ってしまうと誰でもつかえるという状況。技術側としては、新しい作物、新しい品種をつくるという品種作製のスピードを上げていくことでしか現状の制度では対抗する方法はない。

Q:現状、自然交配だけで品種改良をしているが、海外だと遺伝子組換えによるトウモロコシの生産が増加して、日本が輸入せざるを得なくなっている。今後の戦略、どのように考えていけば良いか。

A:大きな問題である。遺伝子組換えはゲノムに人為的に手を加えた後が残るので、作った機関の知財が守られる。ゲノム編集は跡が残らないので、組換えかどうかというよりも知財を守る方が大変なことになってくる。

Q:イネを種苗産業として考えた場合、今までの技術開発、ゲノミックセレクションも含め、色々な編集やデザインできるツールも技術もある。だから、これを種苗産業化して、色々な国のイネ品種をどんどん作って、種苗として売っていくみたいなことはイネでは出来るのではないか。世界のイネの種苗を席卷できるようなやり方もできるのかと。

A:可能かと。ただ、そのような発想が今までなく、国内農業をいかに還元するかということであったが、これからは農業法人や会社が農業に参入するとなると、マーケットは日本だけではなく。そうするとアジア向けのイネとかそういったものを積極的に育種することは技術的に可能。

4-5. セッション3 微生物機能

4-5-1. バイオリファイナリー実現に向けた細胞工学の構築

＜近藤昭彦 教授：神戸大学大学院工学研究科＞

微生物機能を使っていく上でいくつかの流れがある。1 つは合成生物学的アプローチ。最近非常に大きな投資がされている。米 DARPA では「1000 Molecules」プロジェクトとして、有用な 1000 分子の作製が行われている。分子自体に意味があるというより、それを作れるような技術を合成生物学によって作っていくというところが大切。ビジネスのターゲットの中でバイオ合成で作れたいものは非常に少ない。そのため、合成生物学的アプローチをとっている。生物が本来もっていないものを人工的にデザインして一連のクラスターとして微生物の中に入れて様々なものを作っていくという合成アプローチは世界的に大きな潮流となっている（図 4-5-1-1）。2 つめのアプローチは微生物の集団を人工的にデザインして、空間

的にうまく配置して活性化していくという人工微生物群集アプローチ。群集間のシグナルのやり取り等があるが、複雑なところを先端的な技術を使ってどのようにデザインして、制御できるかが鍵である（図 4-5-1-2）。これは有用物質を作るだけでなく、腸内フローラをどのように制御していくのか等、非常に重要な基盤技術であるとともに、アウトプットがものづくりから健康と非常に幅広い。

バイオリファイナリーということで、できるだけ簡単にものづくりをしないといけない。**One-step conversion**、つまりバイオマスを入れたら釜の中で目的のものが出来てくるといったことがどうやったら実現できるか。**CBP (Consolidated bioprocessing)** とよばれているが、なかなか実現できないので世界中が躍起になっている（図 4-5-1-3）。全てバイオ技術で出来れば良いが、なかなかそうはいかないので、化学触媒分野との融合も重要である。合成生物学の流れとしてはプラットフォームが重要。最初に有用なゲノムをとってきて、多様なゲノムをツールボックスとして揃える必要がある。いろいろな解析をするのにオミクス解析が重要になり、こうした技術を使い遺伝子クラスターを設計して長鎖 DNA を迅速に合成する。次にゲノム編集を迅速に行う技術、高効率に行う技術が必要となる。そうした出来た微生物のボトルネックを明らかにする目的でオミクス解析を行う。オミクス解析の膨大なデータを集約して、それを解析してボトルネックを見つけていく情報プラットフォームが重要となる（図 4-5-1-4）。

実際に設計する方法であるが、**Systems biology** により数理的に表せるようなものを作り、これをベースに新しい人工経路、代謝のパイプラインをデザインする。もう 1 つ **Synthetic biology** により生物が全くつくっていない物質を作らせるため人工酵素をデザインする。こうした人工的なパイプラインとパーツを組み合わせることにより完全な人工遺伝子を合成していく、こうした技術開発が重要になる（図 4-5-1-5）。人工代謝経路の設計ということで **M-path** プログラムを作製した（図 4-5-1-6）。アウトプットが生物にない物質の場合が問題。人工酵素を導入して目的の物質をつくるが、人工酵素は反応させたいものと近い酵素から作出する。これにより、今作れないものを作る。作れているが全く違う人工経路、優れた性能のものを作り出すということ。ここで重要になってくるのは人工酵素を迅速に作製すること。またそれをハイスループットで分析する方法の確立（図 4-5-1-7）。それからマルチオミクス解析によって出たデータを統合して取り扱える解析システムをつくり、生産性がでなかった際のボトルネックの鍵となる部分を導き出すということが必要となる（図 4-5-1-8）。

質疑応答

Q:安全性をどう確保するか。遺伝子組換えよりももっと人工的につくるので、一般市民からするともっと危険なものと捉えられる可能性が高いのでは。

A:いつも議論になっている。「合成生物学」という言葉は世界的にも慎重になっている。革新的な材料とか医薬品などアウトプットは食に関係しないところからスタートしている。また実際に行うことは今までより大きな遺伝子を導入するということで、従来技術の延長である。実際にアメリカでも 50 以上の遺伝子を改変させた微生物が作られており、産業的に使われているようなケースもある。

Q:技術開発、研究開発として一番ネックになっている部分はどこか。

A:人工酵素を迅速に作出するところ。オミクス解析のデータをどう使って生産性を革新的に上げていくかというところ。

4-5-2. レアメタルの好循環実現に向けた地域完結型バイオ利用リサイクル技術の開発 ～都市鉱山のバイオベース開発～

＜小西康裕 教授：大阪府立大学大学院工学研究科＞

レアメタルはものづくり産業を支える重要な素材であり、地金ベースで大きな市場規模である（図 4-5-2-1）。わが国には天然鉱石はないが、都市鉱山とよばれる使用済みの製品、廃液等の中に相当量のレアメタルが含まれている。試算では世界の埋蔵量の 10%に相当するぐらいの量が国内にあると言われているので、いかに技術開発をして国内の都市鉱山を開発してレアメタルを確保していくかが重要な課題になる。リサイクル率としては白金:27%、パラジウム:36%、ロジウム:9%。先行技術だけではリサイクル率の低い状況から脱し切れないので、いかに技術開発をして克服するかが問題となってくる。現状のリサイクル技術は乾式製錬法と湿式製錬法に大別される（図 4-5-2-2）。電子部品などの金属スクラップを乾式製錬所にもっていき、貴金属を回収している。そのため、地域でスクラップを選別して集めたとしてもなかなか報われない現状もある。リサイクル率が高くないという課題は、都市鉱山に存在するレアメタルは濃度が非常に希薄なので、希薄なものをいかに効率よく、コストをかけないでリサイクルできるかという技術開発が大事になってくる。その技術的課題を克服する切り札として、従来の化学的、物理的な技術だけでなくバイオ技術というものがここに使われるべきと思われる。国内でも 7 つ程度の研究室でレアメタル回収にバイオ技術を使う取り組みが始まっている。例えば、白金族、金に関しては、溶液中に溶けた金属を微生物機能を使って酸化還元反応で還元して、細胞表面に金属のナノ粒子として集めている（図 4-5-2-3）。室温で処理時間も非常に短くて、ワンステップで簡単に、回収効率も 90%以上といったことが可能となる。更に単に微生物で集めるだけでなく付加価値を高めるという意味で、回収した後で触媒として使うとか、高付加価値なリサイクルの可能性を見出した。先行技術に比べてエネルギーを使わず効率も良くて、コストもかからない技術の可能性があること、処理速度も速いので小型の設備を使って効率よく回収できるので都市鉱山が集積する地域でリサイクル技術をつくれる可能性がある（図 4-5-2-4）。集めた貴金属はナノサイズの粒子なので、触媒として、あるいは他の用途に付加価値を高めた形で回収できるという特徴も備えている。リサイクル技術としてのアプローチと新しい貴金属ナノ粒子の材料調製法としてのアプローチの 2 面を展開していける。今までは微生物を溶液中に懸濁させているが、リサイクルの現場で使いやすい形として、カプセル化技術が進行している。微生物をカプセルの中に入れて使い、ハンドリングを簡便にするものである（図 4-5-2-5）。また回収装置の試作機も開発中である（図 4-5-2-6）。

最終的な目標としては単に回収だけでなく、サプライチェーンを考えた上でのリサイクルに展開できないかと考えている。例えば、車の排気ガスに触媒として白金族が用いられているが、これを溶解し、微生物で回収し、ナノ粒子をつくり、もう一度車の触媒として使い、天然資源の投入を出来るだけ抑えていくというサプライチェーンの構築が重要になる。学術的な効果としては、バイオ技術をもとにしたリサイクルを進めていけばライフサイエンスの微生物機能を使っての環境分野への貢献、微生物機能を使ってナノサイズ粒子が作れるということで物質科学と、3 つの分野が融合したような新しいバイオベース元素戦略に貢献できるのではないかと考えている（図 4-5-2-7）。社会的な効果としては、都市鉱山が集積する地域でリサイクルをしてサプライチェーンを構築する。さらに金属を確保するターゲットとし

ては、都市鉱山に加えてわが国の排他的経済水域内にある海底鉱物資源への展開も可能性がある（図 4-5-2-8）。こうした研究は緒についたばかりなので、微生物に対する基礎的な研究、さらにどういうターゲットに対して微生物機能を活用するかという応用研究、さらに実用化では技術移転も踏まえてプロセス開発、さらに地域で使える装置として移動式のモバイルプラントの開発、知財の面も十分確保しながら研究開発を進める必要がある（図 4-5-2-9）。

質疑応答

Q:この微生物が使えるようになったのはどのような探索をしたからか。

A:この微生物はもともと鉄イオン還元菌ということで論文に掲載されていた。鉄イオンを還元する微生物は泥中にある微生物で酸素のない環境で、鉄イオンを使って呼吸している微生物である。鉄イオンの酸化還元電位が約 0.7V で、白金や金が還元されときの酸化還元電位とほぼ一緒なので使えそうだとということで使い始めた。

Q:今後もっと効率の良い微生物とか、ほかの金属を回収するという展開を考えたら探索がかなり重要になると思うが、そうしたアプローチは。

A:微生物を探索する上での指標としては酸化還元電位。自然界でどの金属種を成長のために使っているか。そのようなところに注目して探索すればほかの金属についても還元回収できる可能性はある。

Q:金、白金、パラジウムは数百万円/kg だがコバルト等は数百円/kg とか数千円/kg。こうしたものも将来的には回収の対象になってくるのか。また回収目的金属と回収のための微生物というのは 1 対 1 で対応してくるのか。

A:将来的にはコバルト等も回収対象となる。また、金属と微生物は対応があると思う。今のところは貴金属がターゲットなので収益があがるが、100 円/g のレアメタルの場合は技術的な面で改善することを考えないといけない。

Q:微生物で回収した金属を使うとなると濃度を上げられるかが課題か。

A:従来技術で吸着法やイオン交換樹脂、キレート樹脂とか、そのようなところで使われている濃度レベルに対しては非常に有効。高濃度のレアメタルを含む溶液を対象した場合は、現状では従来技術の方が優れている。

Q:出来たものは触媒として非常に良いとか、そういうことは分かっているのか。

A:モデル反応では、市販の触媒に比べて、バイオ調製触媒は同程度、それ以上の触媒活性がある。

Q:還元が必要ということだが、微生物は生きている必要があるのか。そうならば、維持するためのシステムというのはどう対応しているのか。

A:栄養源のない中性溶液中で休止細胞を使っているの、恐らく微生物は生きていると思う。溶液を酸性にした場合では微生物は死んでいるが、還元に関与する生体物質は失活していないと推測している。ターンオーバーはしていない。

4-5-3. 生物間インターフェースにおける機能的微生物コミュニティの解析と応用～複合微生物系の解析による新たな微生物機能制御技術の開発～

＜小川順 教授：京都大学大学院農学研究科＞

これまでの微生物機能開発は、環境から菌を単離して、集団から個性的なものを選び、その中身を解析することを研究の基盤としてきた。つまり、単離した微生物が化合物を合成し

たり分解したりする過程を模倣して、プロセスを開発し酵素触媒を開発し化学工業、物質生産に活用してきた（図 4-5-3-1）。化合物については非天然のものも扱う必要があり、人工酵素の開発といった合成生物工学的取り組みも盛んになってきている。これらの成果として多様な原料・製品に対応するバイオプロセスが開発されてきた。しかしこれからは、個を対象とする方向とは逆向きの、集団を対象とする研究から、新しい技術が成立してくると思っている（図 4-5-3-1）。集団の機能を活用する技術は、すでに多様なところで利用されているが、確立された制御技術はない。例えば作物栽培における根圏微生物群や、ごみ処理場の活性汚泥等があるが（図 4-5-3-2）、難培養微生物が主役となる非常に複雑な微生物コミュニティとなっており安定性、再現性が不十分である。また、体内の腸内細菌群も複雑な微生物コミュニティであり、我々自身の体と一体となって健康を維持する複合微生物系である（図 4-5-3-2）。このような生物間のインターフェースに存在する複合微生物系が発揮する機能を活用していくことが、これからの農業問題、環境問題、健康問題の解決、さらには新たな物質生産システムの開発にとって重要である。言葉としては **Designed consortia** というものがあり、自然にいる微生物と人工的に投入する微生物をあわせて複合微生物系つまりコンソーシアムをデザインしていくことを基盤に、それらを環境あるいは人体に投入して生態系を制御する **Controlled ecosystem** 技術を作り上げていくことが大事であろう（図 4-5-3-3）。現在はオミクス技術を中心とする解析技術が発展してきている。大切なのはこうした解析技術を、複合微生物系機能の社会実装にどう活用するかである。複合微生物系の機能を社会実装可能な技術、素材、製品としてつくりこんでいく取り組みを数多くこなして、経験値を上げていく必要がある。

農業分野における根圏微生物群の機能開発例から、複合系微生物を制御するための技術開発過程が、制御すべき環境要因を特定していく作業であることが分かる。資源循環型農業に重要な窒素循環においては、アンモニア酸化細菌や亜硝酸酸化細菌という単離培養できない微生物群が機能している（図 4-5-3-4）。したがって、これらの菌株を含む集団をマネージする必要がある。集団の中でのアンモニア酸化細菌や亜硝酸酸化細菌のバランスを、環境制御によりどうやって管理可能かを解析した結果、酸素量をバランスよく調節することが重要だと判明した。酸素量制御は、菌株の単離培養には有効ではないが、集団を構成する微生物間のバランスをマネージすることが可能であった。この開発過程にオミクス技術を活用することで、環境要因を整えることによって土壌中には 0.01% 以下しかいなかった窒素酸化に関する微生物が数%と何万倍も増え、今までになかったような微生物叢になり、窒素代謝において非常に能力が高いことを明確にしめすことができた。この複合微生物群は、科学的エビデンスが明確な実用的な菌剤となりうる（図 4-5-3-5）。

腸内細菌に関して、いろいろな微生物がおり（図 4-5-3-6）、健康状態によって菌叢が異なることがメタゲノム解析によりわかってきているが、その情報を社会実装可能な技術、素材、製品の開発にどう使うかが重要となる（図 4-5-3-5）。遺伝子データ、化合物データ等、たくさんデータがとれるが、問題はどこにどう狙いを定めていくかの見極めである。広く見ることと狭く見ることとをうまく融合させる必要がある。オミクス解析の非常に膨大な情報量をベースに、フォーカスした機能に関係する化合物の動態をしっかりと見ていくことによって、腸管内の環境を整備する化合物を製品として作りこんだり、腸管内に生息する微生物を菌剤としたり、有益な微生物が増える環境を情報として提供することが可能になってくる（図

4-5-3-5)。

複合微生物系制御技術は、新しい産業分野、必要とされている産業分野に、これまでにない技術やツールを、実装できる形で提供しうる。多様性の維持には多様性で対応する必要がある、そのためにはさらに複合微生物系解析技術や制御技術を深化させる必要がある。

質疑応答

Q:根をよく伸ばすことで窒素吸収の効率が良くなるという効果と、硝化を促進するという効果の2つがあるという理解でよいのか。

A:有機質肥料を効率的に利用するためには硝化を促進する必要がある、その実現に複合微生物系を活用した。根が伸びるということは副次的な成果として見えてきた。

Q:より優れたコンソーシアムをデザインしていくため、今回の知見や菌叢の解析から、さらに良いコンソーシアムをつくるにはどうすれば良いか。環境中となると変動が大きいと思うが。

A:非常にもどかしく悩んでいるところ。実際に使う現場における応用例をちゃんと積み上げる必要がある。オミクス情報は膨大なものが揃ってきており、その情報と現場の個別情報とをうまく比較、統合することによって、コンソーシアムをハンドリング出来るようになるのではないかと思います。

4-6. セッション4 生物多様性保全

4-6-1. 生物多様性情報学とその情報基盤

＜伊藤元己 教授：東京大学大学院総合文化研究科＞

バックグラウンドとして生物多様性情報にはどのような要請があるのか、どういうものを扱っているのか、集めたデータをどのように利用できるか、というところを例に挙げて説明する。

社会的な要請としては生物多様性と生態系の評価というのは、地球の生物多様性劣化に伴い重要となってきている。特に COP10 で策定された愛知目標の評価をするためには、生物多様性情報を集めて解析しなければならない(図 4-6-1-1)。生態系サービスという自然の恵みとして、国連ミレニアム生態系アセスメントでは4つの機能を想定している(図 4-6-1-2、4-6-1-3)。こうした生態系サービスが劣化しており、2012年 IPBES とよばれる生物多様性及び生態系サービスに関する政府間プラットフォームが設立された(<http://www.ipbes.net/>)。これは生態系サービスに関して、過去から現在までどのように変化して、このトレンドが継続した場合の将来予測と提言を行うことを目的としている。

生物多様性の評価に関しては、生物多様性、生態系のデータはたくさんとられているが、研究プロジェクトごとに目的が違い、データをとる方法もばらばらである。それを広く時間的、空間的に集めることが生物多様性評価には重要で、情報の管理、探索、整備、活用するためには単なるデータから、有用な情報に資する知識にして流通させる必要がある。そういうことを行うためのツールを提供するのが生物多様性情報学である(図 4-6-1-4、4-6-1-5)。生物多様性情報学が扱う情報は多岐にわたっている(図 4-6-1-6)。遺伝子は国際的に大きなデータベースが出来たが、遺伝子データベースに入ってくる種類は地球上の生物のほんの一部。様々なタイプの情報があり、統合して判読するのは大変である。その中で、分布情報に

関しては地球規模生物多様性機構（GBIF）という国際組織があり、国際的な統合化が進んでいる。（<http://www.gbif.org/>）。ここでは現在、地球上の生物の約 5 億件の分布情報を提供している。こうした GBIF のデータを使った論文が出てきており、年々増加している（図 4-6-1-7）。しかし、グラフ中に日本からの貢献が見られないように、アジア地域の情報が十分蓄積していない。論文の中では生態適地モデルの研究が数多く行われている（図 4-6-1-8）。これは実際の分布からモデルを作って分布の推定をする、あるいは温暖化した後どういう分布になるかを予測するというように使われている。日本でも環境省の植生調査データをもとに植物分布データをデータベース化している（図 4-6-1-9）。このような情報から何が分かるかであるが、土地利用の変化によって分布適地の増減を推定できるようになる（図 4-6-1-10）。例えばデング熱を媒介するヒトスジシマカという蚊の野生分布域（図 4-6-1-11）をもとにモデル化を行い、それを世界に投影してみて、もし仮にその地域に入り込んだ際にどこまで広がるか（図 4-6-1-12）を推定している。実際に図中の赤の推定域に対して、黄色のところで蚊が発見されている（図 4-6-1-13）。このような感染症の媒介昆虫の推定にも使うことが可能である。分布以外にも様々な情報を集積して解析することで生態系サービスの推定に使うことが可能となる。

DNA バーコーディングが現在、世界的に進められており、これは、種を同定するために標準的な DNA 配列を使う方法である（図 4-6-1-14、4-6-1-17）。この DNA バーコーディングにより同定が容易になるが、リファレンスのデータベースを完備しないとイケない（図 4-6-1-15）。利点としては自分自身で同定が可能なことと様々な状態のサンプルを同定できることである（図 4-6-1-16）。実際に DNA バーコーディングにより、形態では区別できないものがどんどん発見されている。このような生物多様性情報学においてはデータがないとイケないが、なかなかデータが提供されないという現実があるので、研究データのオープン化ポリシーの推進と持続可能なデータ・レポジトリを確立して維持する必要がある。

質疑応答

Q:日本ではどれくらいオープンになっていないのか。あるいはデータの質が違うということが問題か。

A:データのフォーマットとか質が違うのは情報技術の方で吸収できる。あとはオープンにするというマインドの問題。研究者以外にも省庁がかなりのデータをもっている。ただ目的外使用になるので提供できないということが多くあり、最初からオープンにするということで始めるのが重要。オープンサイエンスというのは世界的な潮流なので、補助金を出したところは最初からオープンにして欲しい。

Q:色々な使い方があると思われるが、どこが抜けているのか、どうすれば良いのか。

A:ビッグデータの 1 つなので網羅性がないとイケない。ある地域はデータが豊富だが、ほかのところが抜けているということがある。特に分布の問題に関しては、市民を巻き込んだ形で広く行わないとビッグデータとしての価値がなかなか上がらない。

Q:データのオープン化というのは、日本が特にオープン化されていないとか、欧米はオープン化されているといった傾向があるのか。

A:ある。アメリカではグラントをとったらデータは必ずレポジトリに入れないとイケないというポリシーが出来ている。DataOne というデータを格納・提供する組織も運用されている。生物多様性だけでなく生命科学や他の分野のデータも必ず入れる、そのための予算も

申請の時に積むというポリシーになっている。

Q: 日本からの論文が少ないというのはそのようなデータがオープン化されていないことが原因か。

A: 日本人が興味を多く持つ、日本やアジア地域の生物多様性に関するデータが非常に少ないので、解析しようにもまずはデータをとるところから始めなくてはならない。

4-6-2. 森林の遺伝的多様性保全と持続的利用

<津村義彦 領域長：森林総合研究所森林遺伝研究領域>

森林を持続的に利用し保全していくため、今後の方向性について説明を行う。日本国内で種苗を動かしてはいけないという樹種はスギ、ヒノキ、アカマツ、クロマツの4つのみである。これらは林業上重要なものなので、地域に適応した遺伝子型が存在すると考えて、林業種苗法が気候区分に基づいて1970年につくられた(図4-6-2-1)。この4種以外は樹木の移動を制限する法律はない。ただ、種苗を自由に動かし植栽すると健全に育たない現実がある。また、遺伝的に適応していないものを全然違うところに植えた場合、どういうことが起こるかは樹木では実験的に実施した例がない。外来集団を植栽すると、もともとあった集団の遺伝的特性が少しずつ崩れていって全体的に遺伝的多様性が減少し、その集団が衰退することにつながっていくという考え方がある。ブナの例であるが、太平洋側のブナを日本海側に植えた場合、外来集団の太平洋側のものは樹高2mぐらいだが、同一地域産の場合は樹高7mを超え成長が良い。地元産の方の成長が良く、この現象のことをホームサイトアドバンテージと呼ぶ。植栽の履歴の分かる森林を調査すると、ブナだけでなくいろいろな樹種でこのような事例がある。そのため全く環境の異なるところに持って行って苗を植えてしまうと、適応できず成長が悪くなることがある。その樹木が生き残り、F2以降になると、もとの林よりも衰退していくという現象が見られる。森林を守るためにどうすれば良いか。実際に大震災後で三陸の海外を緑化しようと、いろいろな地域から種を持ち込んで植えたが、南の方から持って来て寒さに耐えられない個体があると、将来的にもともとあった林まで衰退させてしまう可能性がある。そのため、森林総合研究所と複数の大学が協力して、遺伝的なガイドラインをつくっている。日本全体の分布域から材をとってきて、遺伝性の異なる2つのゲノムを調査すると地域性が分かれて、ここからは種苗を動かさない方が将来的に良いということになる(図4-6-2-2)。樹種によって必ずしも同じところに線は引けない。樹種ごとにガイドラインを作る必要がある。2011年に6機関で研究して5年間で広葉樹10種のガイドラインを発表した(<http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/documents/2nd-chukiseika20.pdf>)。こうやって森林を守ろうということで針葉樹も含めて現存データ40種をまとめている(図4-6-2-3)。

東南アジア熱帯林では持続的な林業を目指そうと択伐方式を採用している。例えばマレーシアでは胸高直径 50cm 以上の木だけを切っている。熱帯林の場合、種多様性が非常に高いために、同じ樹種がヘクタール当たり 1 本とか 2 本しかないのが一般的である。そのため過度に伐採を行うと同じ樹種の送粉昆虫がいなくなり、健全な受精が行われなくなる。そのため同樹種である程度の母樹密度を保つことが大事である(図4-6-2-4)。一例であるが、熱帯林で調査プロットを構築して、天然林と択伐林で花粉がどこから来ているか調査している(図4-6-2-5)。*Shorea curtisii*の天然林の場合、母樹の周り 100m くらいからほとんどの花粉が来ている。択伐林の場合は過度に伐採が行われているために外部花粉が十分になく生産され

た種子の半分以上が自殖になっている。樹木の場合、近交弱勢が強く出るために自殖の種子だとほとんど発芽せず、また発芽しても生育出来ない。過度に伐採が行われた森林では将来的にはもとの状態に戻らない可能性がある。こういう情報を蓄積して、熱帯林でも持続的に、健全な種子が生産されてもとの林と同じように品質の良い木材ができるようにしないといけない。また、森林は非常に長い年月をかけて形成されてきている。東南アジアに広域分布するフタバガキ科の樹種の遺伝的な違いを調べてみると、ボルネオとそれ以外で明瞭に違う(図 4-6-2-6)。コアレッセントシミュレーション解析の結果、7 万年から 3 万年ぐらい前にすでにこの遺伝的違いができていたことが明らかになった。これらの遺伝的な地域性は長い歴史的な経緯のもとに形成されているために遺伝子資源として保全していくことが必要である。

日本の人工林はスギ、ヒノキなどの有用針葉樹がほとんどで、これらの植林用の苗木生産のために育種が行われている。人工林は国土の 26.8%で 1000 万 ha あり、45%がスギ林である(図 4-6-2-7)。これまでにスギの genomic resource を整備してきており、遺伝子の情報からマーカーを作ってきた(図 4-6-2-8)。これを使って日本海側に分布するウラスギ系と太平洋側に存在するオモテスギ系を調べると遺伝的に分かれることから(図 4-6-2-9)、地域に適応した遺伝子があることの証拠である。こうした事例を蓄積して、有用な遺伝子がどこにあるのかをゲノムから調べていき、将来的には育種に使っていくという考えである。

質疑応答

Q:ガイドラインではあまり移動してはいけないという話があったが、逆に温暖化など環境が変わったときに影響はでないのか。

A:温暖化で移っていくが、分布可能範囲は予測できる。森林は 50 年では変わらず、そこで選抜や淘汰が繰り返されるので柔軟性はある。ただ 1 回つくってしまえば 100 年単位は使えんと思っている。

Q:雪に強いとか折れないというのは、どれぐらいの遺伝子が関与しているのか。

A:かなり複雑かと。ただ、材の強度に関しては遺伝率が非常に高いので、2 桁ぐらいの遺伝子が関与していると予測している。

Q:東北地方にほかの木を植えてしまったり、択伐とか、まだ情報を良く知らないからそういうアプローチになってしまうのか。

A:情報が伝わっていないこともある。NPO の人は善意で植えているが、将来的には禍根を残す可能性もある。

Q:普通に考えると、その地域に自生しているものを植えた方がいいのでは。

A:その通り。スギの場合は育種目的で、材生産であれば地域内からいいものを選んでいく。

Q:遺伝的な違いのほかに、材を使う上でも違いがあるのか。

A:材に関しては地域性が出ていない。

4-6-3. 生物多様性保全と福祉的利用における有効性

<山口裕文 教授：東京農業大学農学部>

生物文化としての多様性は、生物の地史的・歴史的な系譜と適応による側面と、人間社会に関わる生態系サービスとしての文化的な側面との二つでおおよそ形成されると考えてよい。多様性を保全利用するときの基本的な考え方に、科学的(文明的)合理性すなわち便利さや効率に加えて文化的合理性がある(図 4-6-3-1)。生物多様性に関するいくつかの技術のうち、

機能開発や資源利用の面は実行可能であるが、生活（福祉）活用となると、計画、実施、診断、評価という一連の技術体系がほとんどないといった状況である（図 4-6-3-2）。

生態系リスクの管理例として GM ダイズの問題があげられる（図 4-6-3-3）。生態系影響評価において GM ダイズ品種からツルマメに遺伝子に移るという課題があったが、問題となった当時は関連する生態系要素のおおよそも分かっていなくて、どれだけ花粉が飛ぶか程度のことしか評価されなかった。初期の実験では送粉昆虫の巣が少ない条件下で評価したため、交雑はほとんど確認できなかった。自然交雑率と品種からの距離の関係は理論的に図 4-6-3-4 のようなスロープになるが、スロープ全体を引き上げる条件をしっかりと評価すべきである。他殖率が最も高くなる状態で実験評価したうえで花粉拡散を低下させる管理の方法を策定しないといけないが、実際は単純な系で調べて、他殖率が低いから大丈夫としかしていない。送粉昆虫の量が多い状態で評価した生態学的手法に基づく管理技術を作っていない状況で GM 品種や組換え体の作出が進んでいる。組換えダイズをはじめとする GM 品種の普及には十分な条件の下で環境影響評価や診断技術を改良する必要がある（図 4-6-3-5）。これらの技術策定は困難ではない。現在は、GM 品種の使用を許認可するためのデータが取られているが、遺伝子拡散を管理するためのデータは集められていない。多様性保全のための生態学的な技術はまだほとんど研究されていない。

もう一点はリスクへの考え方である。社会的受容へのコンセンサスでは食文化の実態を無視して GM 品種を導入すると組換え技術の部分に対して違和感が生まれる。タンパク質が多いというような文明科学的な説得より、日本人がダイズとの文化的な親近性を歴史的にどのように形成してきたかを踏まえて普及・納得させていかないといけない。昔の育種家は社会的受容も踏まえて次の育種目標を設定していたので作出された品種が広がった。最近では作出した新品種のごく一部の良さだけが科学的合理性のみで説明されており、文化的な背景や人の心とか倫理というようなものへの対応が遅れている状態なので組換えダイズのような新品種が広がらない。これからの技術普及では考慮すべきである。

生物多様性の利用の面で生き物の福祉的活用が始まっている。例えばペットや花によって心安らぐ部分を使う目的である。しかし、安らぎや癒しを「どれぐらい」と評価する時に測れないという状態にある。この面の技術体系を調べていくと日本には聞香、茶湯、插花、鷹狩、物合などの要素に生き物を使った楽しみや遊びなどがたくさんある（図 4-6-3-6）。その中に生き物を癒しに生かす技術があるが、これらは、科学技術の対象とならず、明治維新以降の富国強兵策の推進のなかで排除された。戦争など社会情勢の変化に追随して欧米で形成された社会園芸やペット療法が日本に導入されたが、日本人の生活文化を踏まえた人の側の評価方法に対する技術開発が遅れているため、結局、役に立つらしい、意味があるらしいという抽象的な解釈に終わってしまっている。そこで、我々がもっている文化の伝統知を評価し直して数値化するなどの技術開発が必要である（図 4-6-3-7）。

絶滅危惧種や希少種は保全されるようになってきたが、古い在来品種は文化財と認定されないため文化財保護法では保全されないなどの法制上の問題も残されている。在来品種の多様性は、遺伝子だけあるいは種子だけ残っていても実効性が低く、在来品種がどのように作られ、維持されるかの知恵を伴って残されなければ品種の特性は維持されない。生物文化にかかわる伝統知を残して生物多様性を活用していかないといけない。

質疑応答

Q:いろいろな生物、文化に携わっている中で技術でありツールがあると思われるが、生物多様性があるのではなくてツールの情報をしっかり整理することが大事か。

A:情報を体系的にまとめて整理して、どのように使うかをこれから考えていかないといけない。情報がばらばらにあるのが現状。現状把握だけでなく、それに伴う知恵も整理すべき。

C:難しいが、ABS（遺伝資源へのアクセスと利益配分）や IPBES（政府間科学政策プラットフォーム）の関係で伝統的知識というもののかなりクローズアップされてきている。また、生物の保護技術のほうで素材とか機能というのがこれまで使われてきており、伝統的な知識をまとめていくというのは、生物模倣技術への展開には使えるのではないかと思っている。

4-7. セッション5 総合討論

4-7-1. 「食料生産」分野における総合討論

CRDS:「食料生産」、「微生物機能利用」、「生物多様性保全」として今回の俯瞰を行った。「食料生産」としては食料を安定的に安心して確保できる社会を構築する、それを次の世代につなげていくことが一番大切なこと。食料生産に関しては 8/30 にワークショップを行い議論が行われた（図 4-7-1-1～4-7-1-3）。

C:重要性が高まる技術の中で種子の保存技術は重要。多様性資源がないと育種は出来ないの、生きた状態で種を安価に保存できる技術が必要。

CRDS:遺伝資源の移動が難しくなっているため、どのように遺伝資源を維持してシェアしていくかという研究開発は重要。

C:在来種、例えば京野菜など保存しなければならない件数は多い。全てをジーバンクに入れるとなると大変な話になるので、効率的に種子を保存できる技術は必要。

CRDS:30 年前に農水省が各都道府県に地方の在来種を集めることを行った。だが、そうしたデータが上手くつながっていない、種がどうなってしまったか。うまく利用できるような形でデータが集める必要がある。

C:一部の素材は利用された部分があったが、かなりの地方野菜、伝統野菜は都道府県単位の財産の扱いになって県外へ出さないような感じのところもある。だから、遺伝資源としても日本全体で利用するようにしないといけない。

CRDS:皆でシェアすることと会社が出口に向かって利益を得る方向とコンセンサスを得ておく必要がある。韓国のゴールデンシードのような巨大プロジェクトを、日本で 10-15 年後を目指して種苗産業、日本農業の振興につながるならばシェアする部分と会社の個別の利益の部分との仕組みづくりが必要。プレコンペティティブなコンソーシアムの設立。

C:民間は手の内を明かしたくないということがあるが、国レベルで日本種苗会社のようなイメージで一緒にやれる仕事は多くあり、皆が使えるような取組であれば民間としても協力するのではないか。そこに産官学の連携が必要。遺伝資源も国と国が提携を結び、売上に対して一定のロイヤリティを支払うなら日本の種苗会社は自由に使えるという仕組みを作るという環境づくりが求められている。

C:研究開発としては、省資源で収量を上げていくことは広い意味では両立する。収穫するも

のの中に入っている量を減らすことは出来ないが、そこに至る過程への投資を減らすことをしないとイケない。贅沢に資源を使いつつ食料増産をしている今のやり方を少しずつ転換していくようなオプションをもっておかないといけない。多くのオプションを持っていた方が人類として良い。ある意味、良い種を持てるか、それを継続的に進めていくことが必要。また、食料増産のためには光合成研究が必要だし、植物成長研究も必要で、継続性が重要。継続的に研究を行い、オプションを増やしておくことが常に重要。

CRDS:日本は個別の技術、パーツは素晴らしいが、パッケージ化されていない。例えばラボとフィールドが全然つながっていないなど。

C:グループをつくり、種苗会社の売れるもの、農家が作りたくなるものを研究者側が理解しておき、こうしたシーズをパッケージングすることが大切。その意味ではフィールドのことも適切にデータ化する必要がある。

4-7-2. 「微生物機能」分野における総合討論

C:微生物においてパッケージ化は非常に弱い。ファーマンターを動かせるところは減っている。シームレスな研究開発が必要。微生物のデザインに関しても遺伝子工学とバイオインフォマティクスの融合的な研究体制が重要。

技術的には微生物を徹底的に良くする合成的なところと人工的な微生物コンソーシアムをデザインするところ。生物同士がメリットを共有しながら集合体としてデザインすること。微生物資源の拡充。メタゲノム解析により自然界の有用微生物情報が分かり、そのようなものが数多く取れる時代だが、まだ本気でやられていない。その多様性の中から優れたものを合成に入れていくという方向性。コンソーシアムのデザインとしてはバイオマスや廃棄物の利用。また化学触媒や化学的な技術と生物の技術をハイブリッドさせていく。推進体制としては、企業がメンバーシップフィーを出してプレコンペティティブなコンソーシアム構築。

C:無機物をターゲットしたバイオ技術が少ない。銅鉱石から銅を回収するというバイオリッチングは海外で実用化されている。微生物のスクリーニングから工業的に利用可能にする研究開発が必要。

C:資源循環と多様性への緻密の対応が必要。その意味で微生物の多様性を利用していく必要がある。1つの菌を探索してその能力の高いものを使うということもあり得るが、自然の中である集団を集団として機能の高い状態で取り出してうまく使い込むことも大事。植物、動物も含めた集団をマネージできる技術開発をしないとイケない。微生物の複雑系を扱うには食料生産とリンクする根圏や人間の健康に関わる腸管内を扱う必要がある。

4-7-3. 「生物多様性保全」分野における総合討論

CRDS:国の方策が用途を考慮した基礎研究に偏ってしまい、分類学が危機的な状況にある。多くの分類学研究ユニットが近年、消失あるいは消失の危機にある(図4-7-3-1)。例えば日本産の寄生蜂の多くが未記載であるにも関わらず、「一部の寄生蜂の同定を外国に依頼せざるを得ない事態に陥っている(広瀬(九大農、1993))」。これは寄生蜂に関わらず、日本での生物リストが出来ていないことから、多くの生物で未記載のものが多数存在している。それにも関わらず、分類の専門家を養成せず外国に依存する現状は、生態系サービ

スの評価においても考慮すべき問題である。

C:日本にいる生物リストが出来ていないことが大問題。どこに何があるか分かなければ何を保全するかが分からない。特に微生物はほぼ分かっていない。日本はこれだけ広い排他的経済水域と、北から南まで非常に変化に富んだ国土なので、生物資源としては非常に有望。ただ、探索の対象にしていない。どこにどのようなものがあるかを調べ、誰でも使えるように公開することが重要。例えばある細菌が有用なら近縁の細菌もよく似た性質をもつだろうということで系統関係を明らかにする。そうしたリストづくりが非常に重要。

社会的ニーズとしては生態系から受ける機能がどう変化していくかを定量化しないといけない。CO₂がどれだけ吸収されたか、窒素がどれだけ放出されたかの仕組みは分かっていない。全体的な生態系としてどのような機能をもっているかを明らかにする必要がある。

C:森林は生態系の一部で、微生物や草本、昆虫もいる。いかに保全して、将来人間が使えるような状態にしておくかが重要。遺伝学だけでなく生理学的な研究も必要。生態系から受けるサービスを評価できるようにする。

C:科学技術を展開していく際に文化的なものとのすり合わせをどうするかも考慮しないと適応しない。

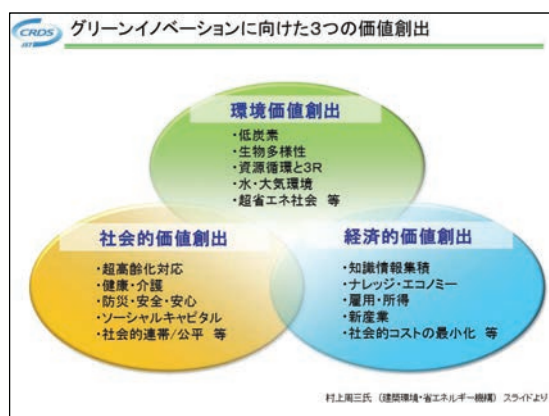


図 4-2-2-1

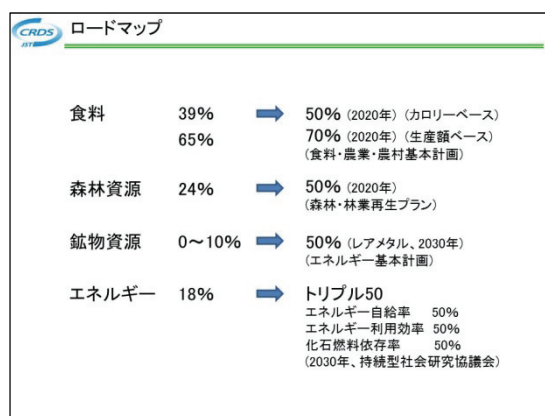


図 4-2-2-2

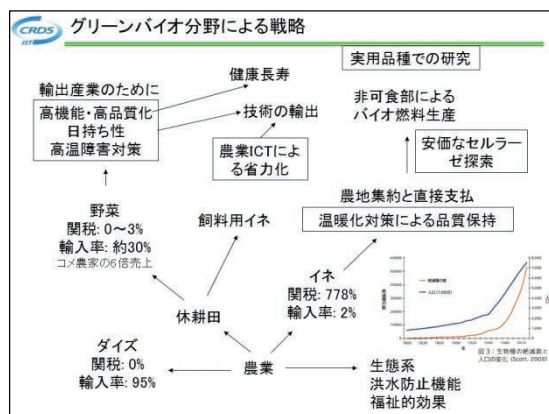


図 4-2-2-3

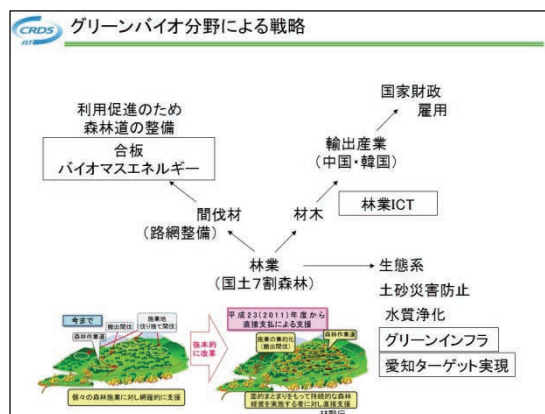


図 4-2-2-4

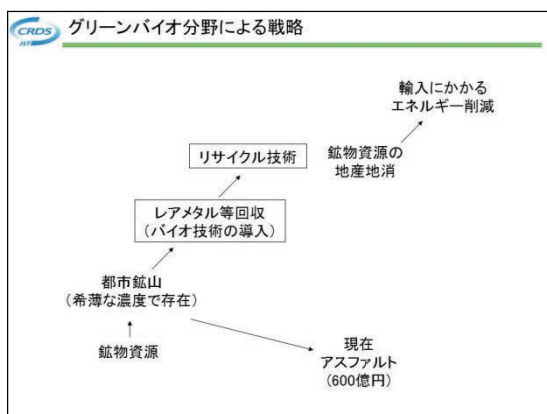


図 4-2-2-5

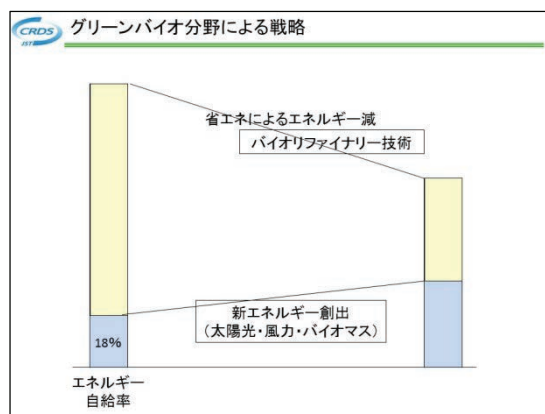


図 4-2-2-6

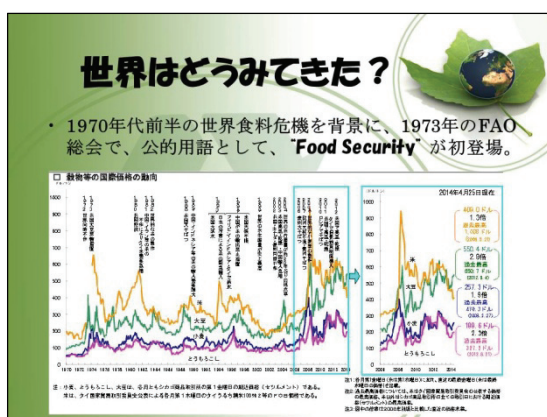


図 4-3-1-1

国際約束

- 世界食料会議(1974)**
10年以内に地球上から飢餓を撲滅する！(世界宣言)
- 世界食料サミット(1996)**
2015年までに、栄養不足人口を1990-92年に比べ半減！(ローマ宣言)
- 国連ミレニアムサミット(2000)**
2015年までに、1日1.25ドル未満で生活する人口の割合を、1990-92年に比べて半減させ、飢餓に苦しむ人口の割合も半減！(ミレニアム開発目標MDG)

図 4-3-1-2

食料アクセス権

後にノーベル賞を受賞するA. センは、以下を主張。

「大量の食料がそこにありながら、餓死者が出るのは、供給量が足りないのではなく、**食料へのアクセス権**、つまり食料を生産・購入する手段や資格（例えば土地、資産、雇用、教育など、これらを総称してSenはentitlementと呼んだ）がないからだ」

“Poverty and FAMINE” A. Sen, 1986

⇒ **Food Securityの定義に多大な影響**

図 4-3-1-3

Food Security の定義

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

フードセキュリティは、すべての人々が、あらゆるときに、活動的で健康な生活をおくるのに必要な食料上の要件と食の嗜好を満たすのに十分な量の、安全かつ栄養的な食料を、**物理的にも(社会)経済的にも手に入れることができる**ときに存在する。

図 4-3-1-4

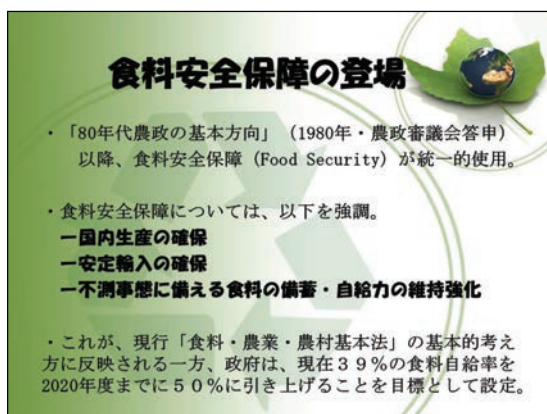


図 4-3-1-5



図 4-4-1-6

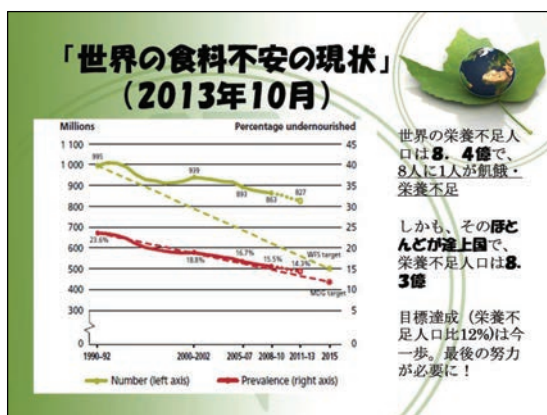


図 4-3-1-7

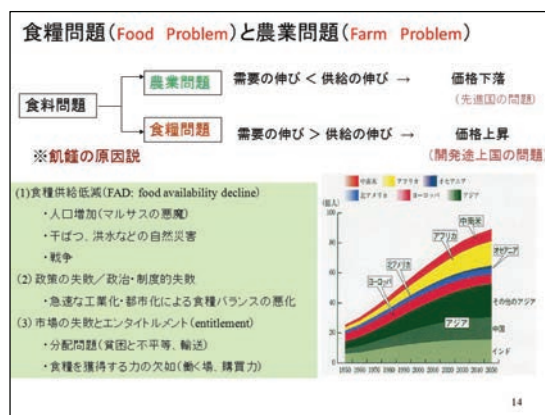


図 4-3-2-1

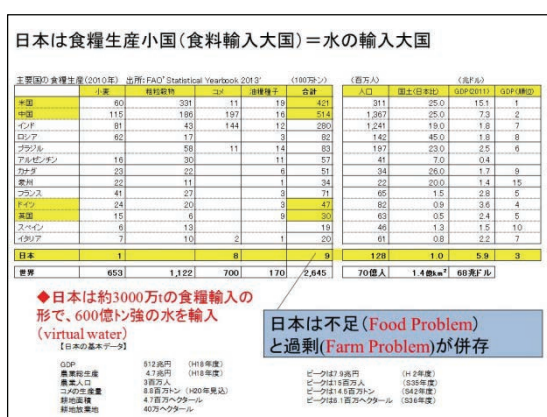


図 4-3-2-2

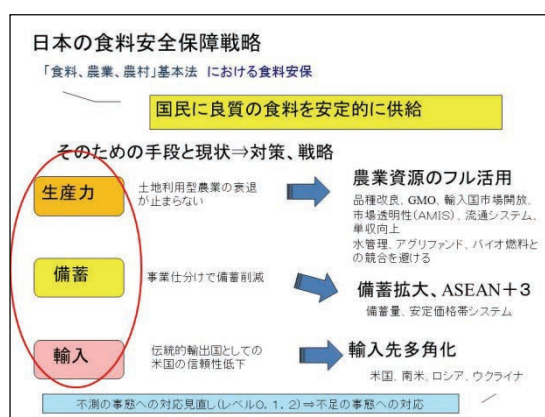


図 4-3-2-3

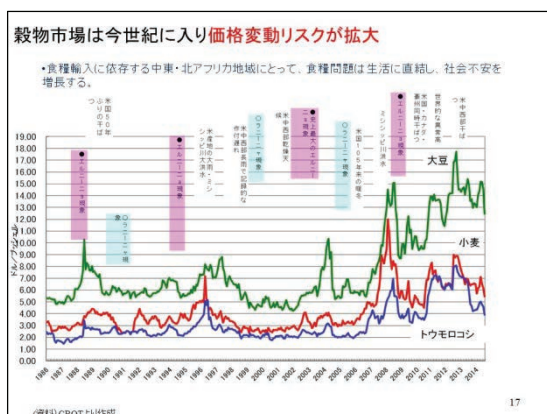


图 4-3-2-4

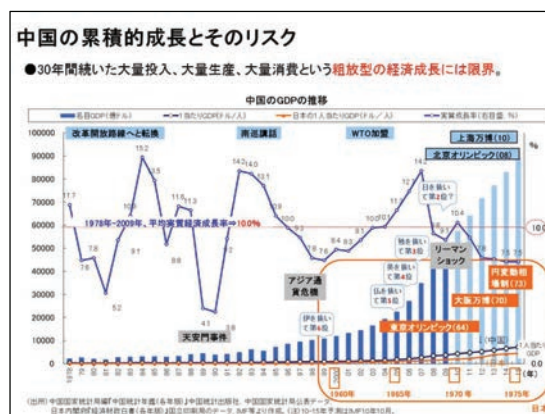


图 4-3-2-5

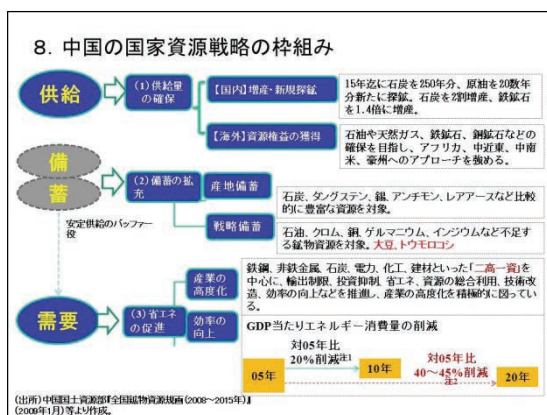


图 4-3-2-6

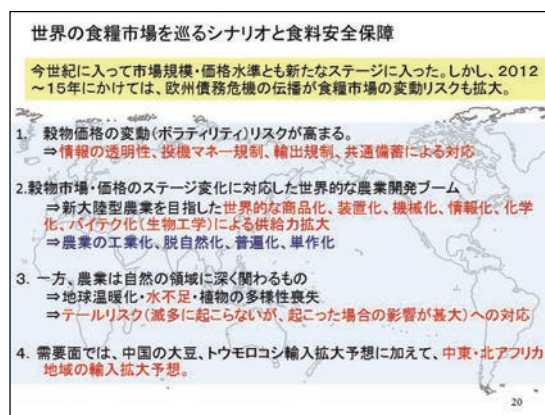


图 4-3-2-7

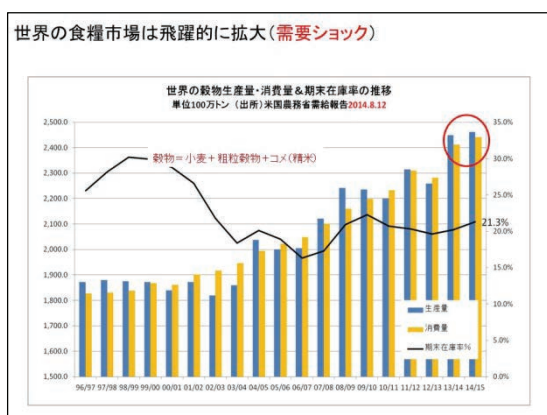


图 4-3-2-8

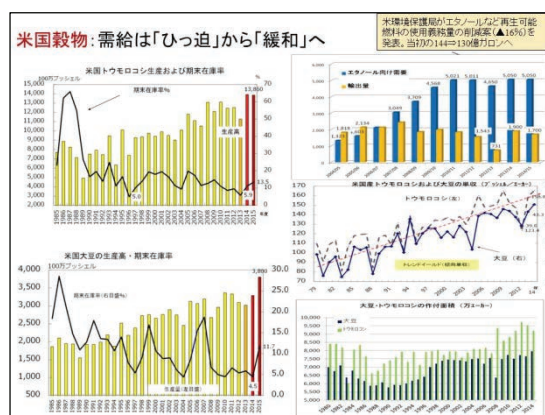


图 4-3-2-9

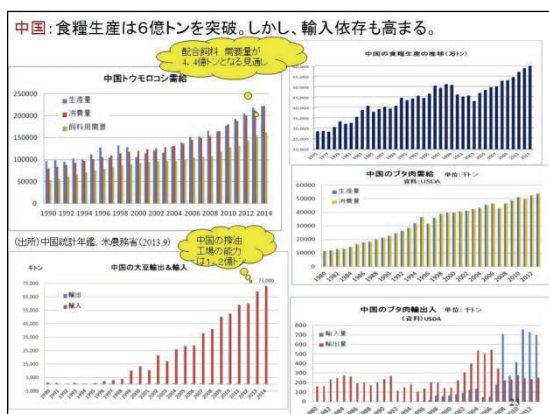


図 4-3-2-10

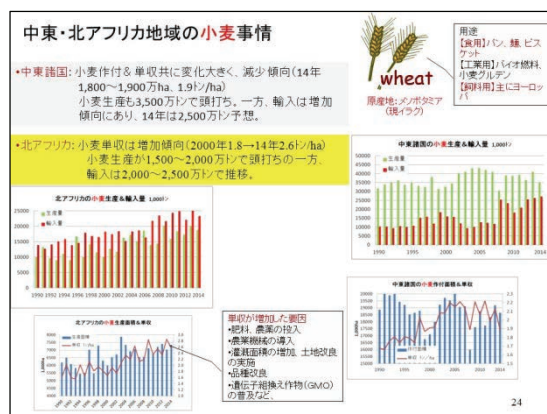


図 4-3-2-11

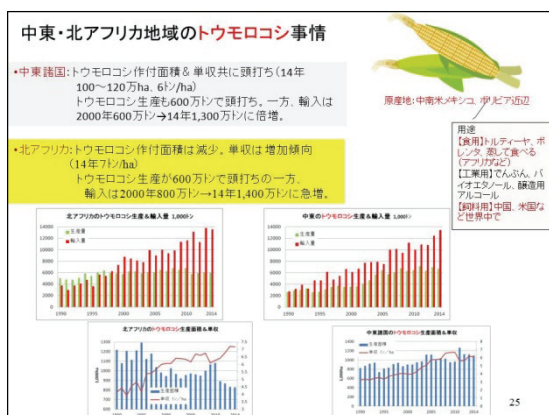


図 4-3-2-12

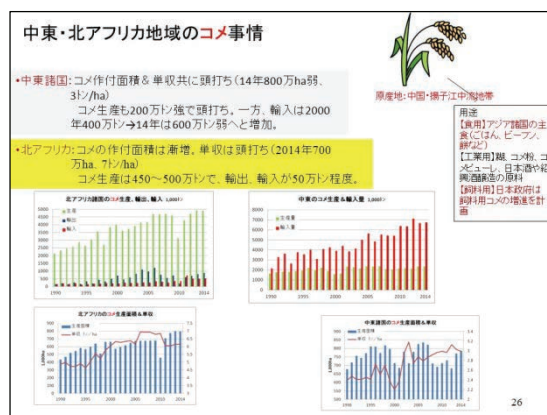


図 4-3-2-13

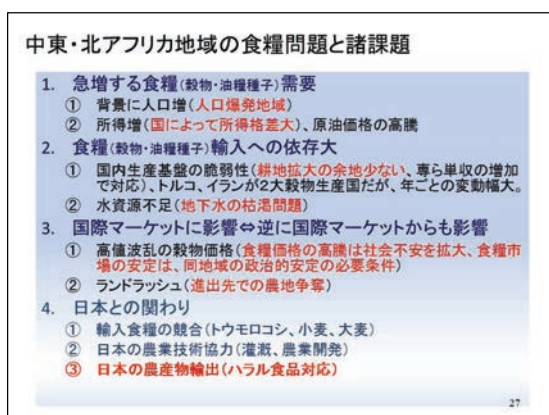


図 4-3-2-14

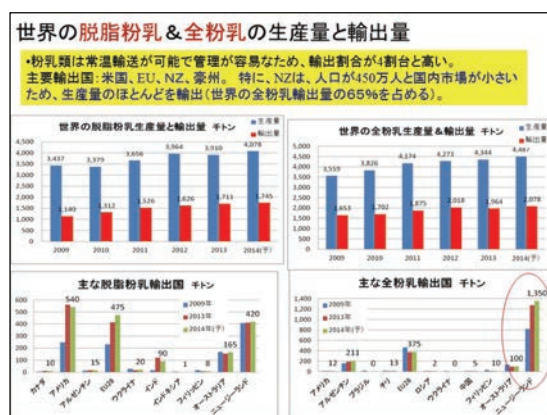


図 4-3-2-15

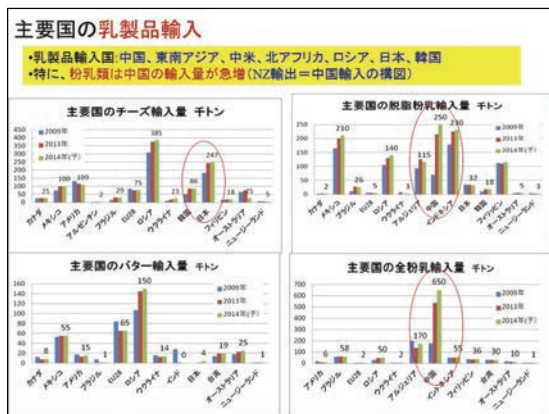


図 4-3-2-16

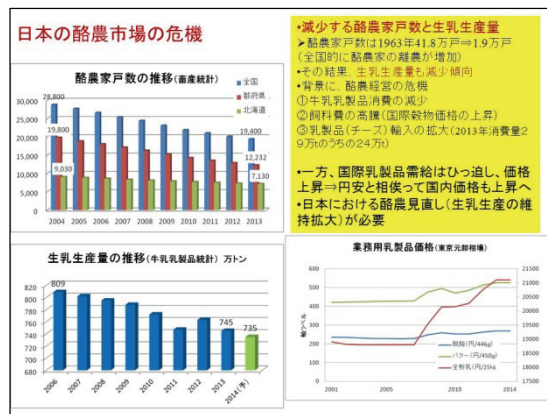


図 4-3-2-17

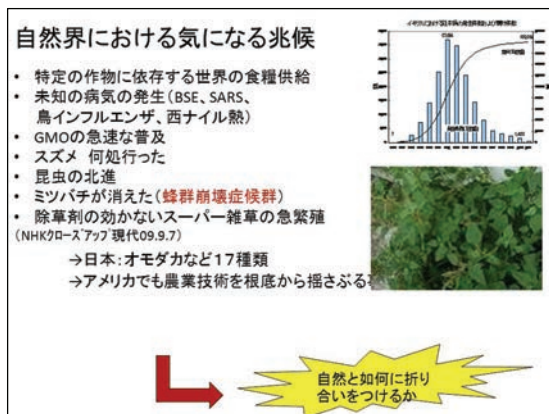


図 4-3-2-18

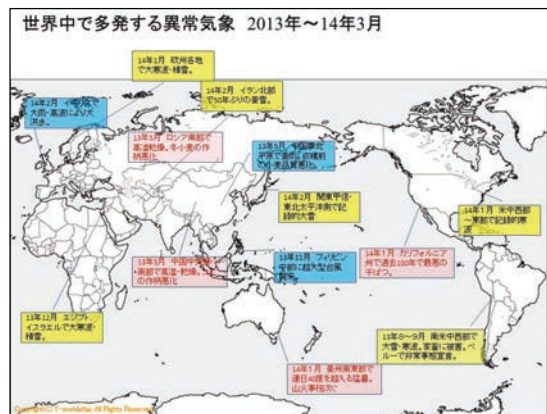


図 4-3-2-19

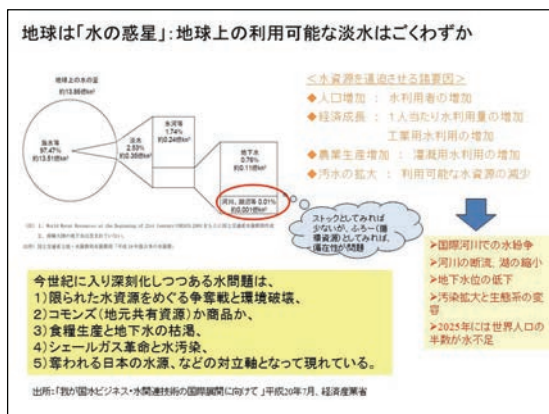


図 4-3-2-20

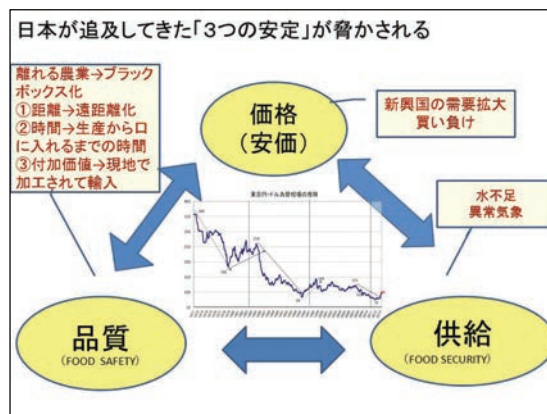


図 4-3-2-21

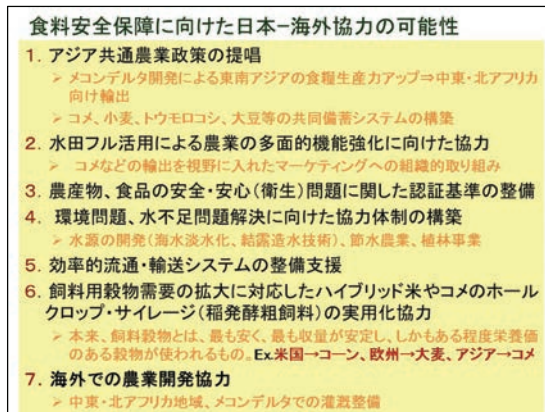


図 4-3-2-22

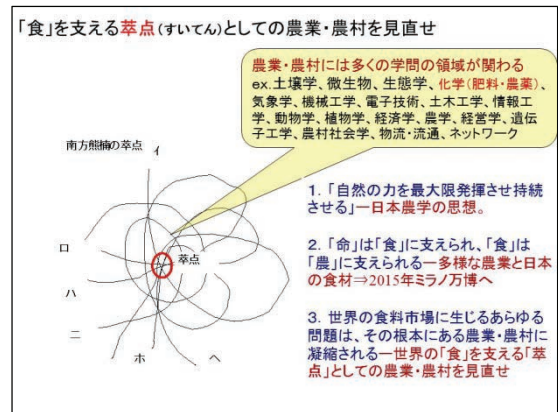


図 4-3-2-23

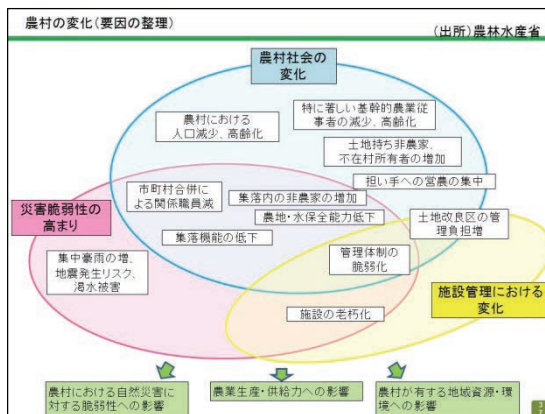


図 4-3-2-24

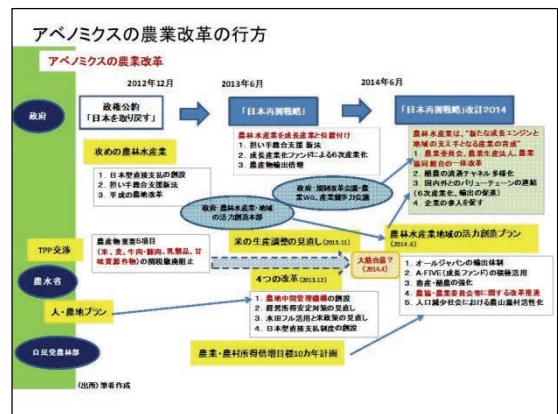


図 4-3-2-25

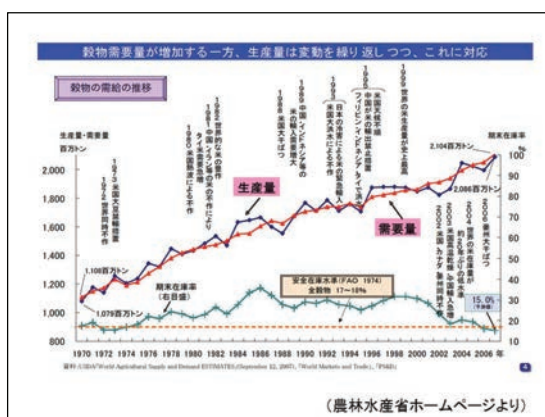


図 4-4-1-1

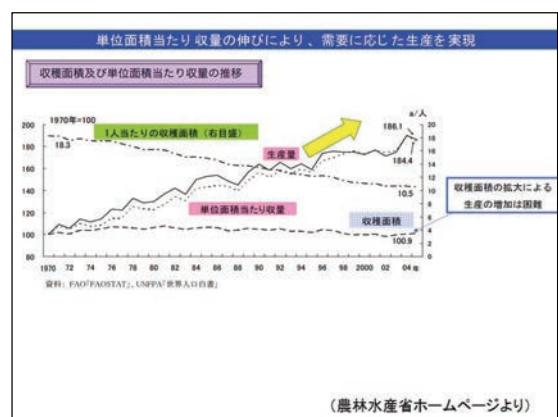


図 4-4-1-2

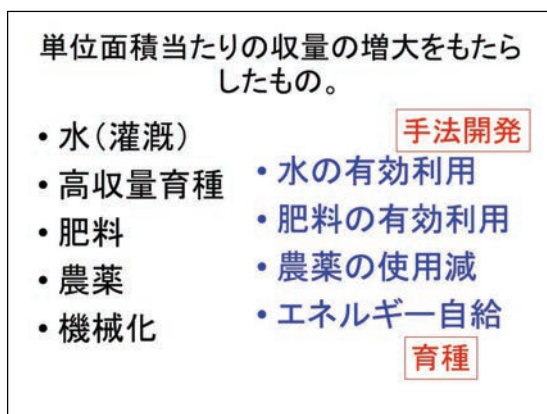


図 4-4-1-3

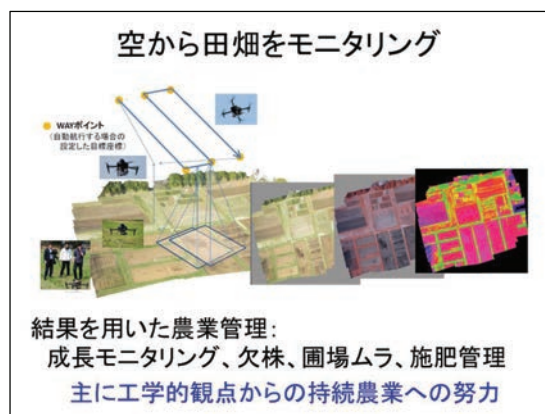


図 4-4-1-4

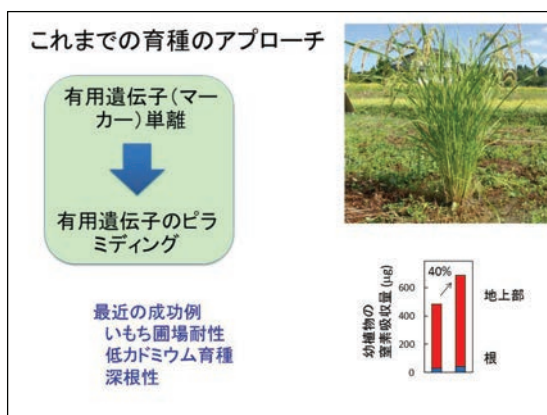


図 4-4-1-5

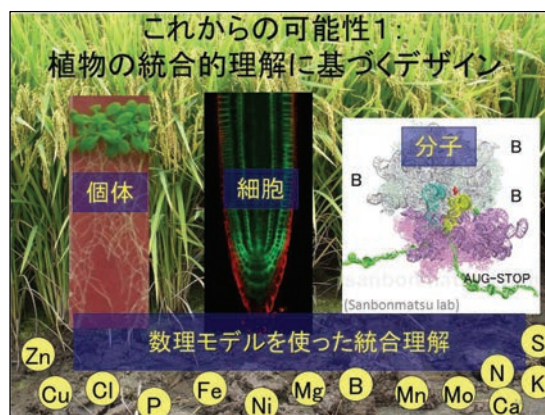


図 4-4-1-6

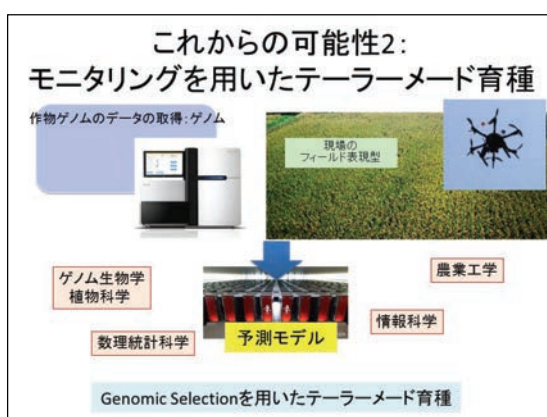


図 4-4-1-7

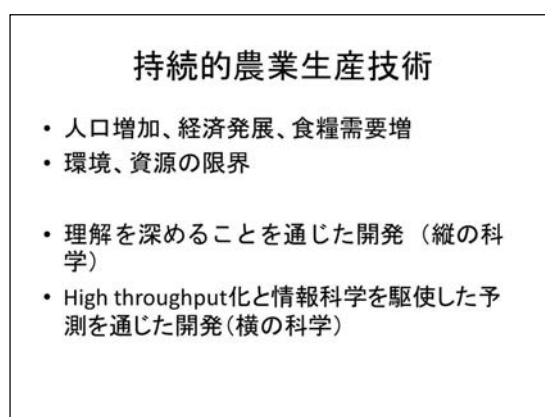


図 4-4-1-8

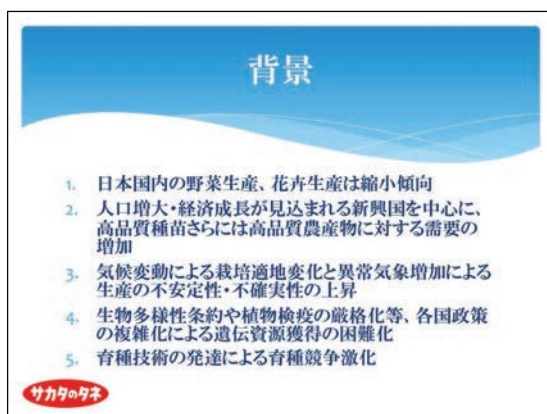


図 4-4-2-1



図 4-4-2-2



図 4-4-2-3



図 4-4-2-4

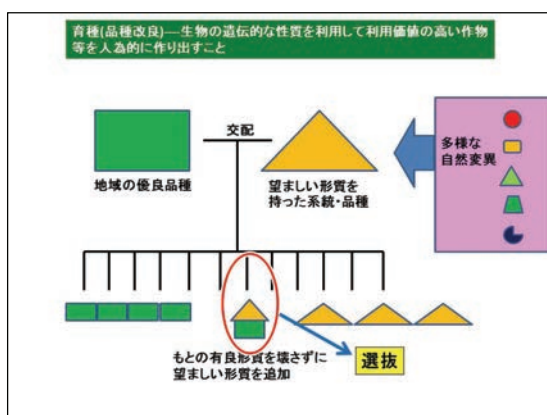


図 4-4-3-1

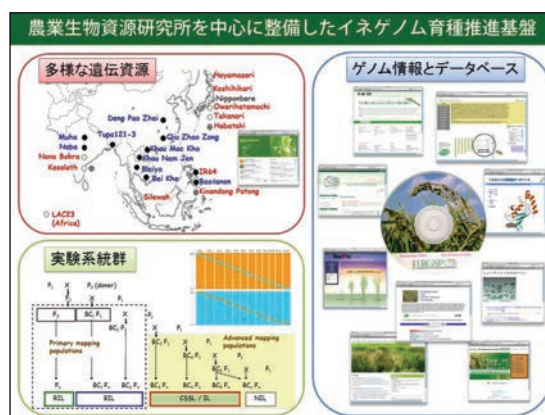


図 4-4-3-2

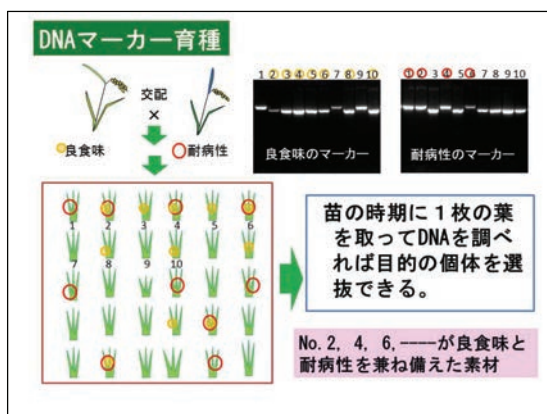


図 4-4-3-3



図 4-4-3-4

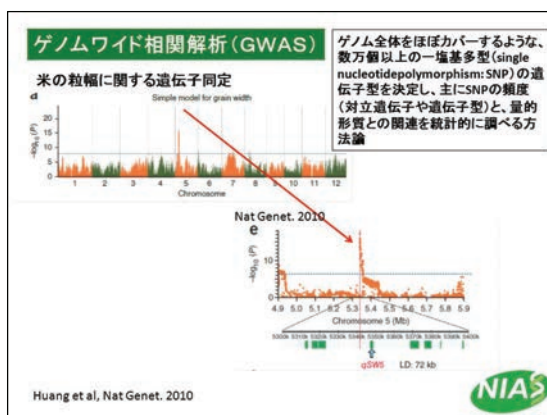


図 4-4-3-5

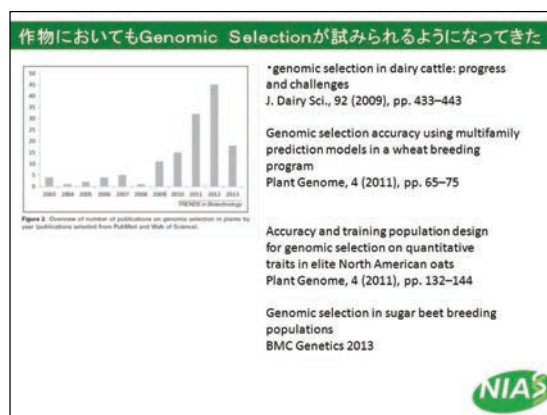


図 4-4-3-6

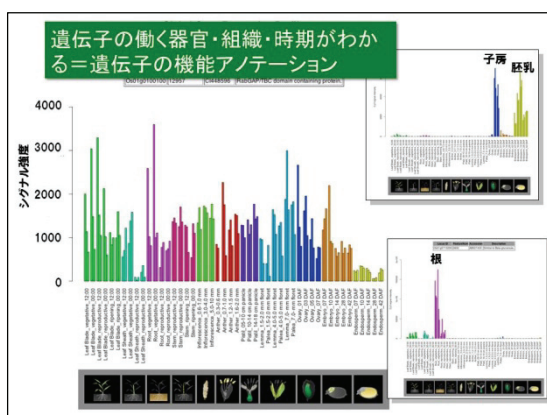


図 4-4-3-7

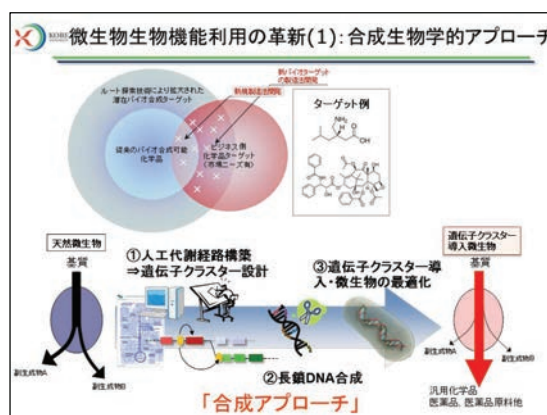


図 4-5-1-1



図 4-5-1-2

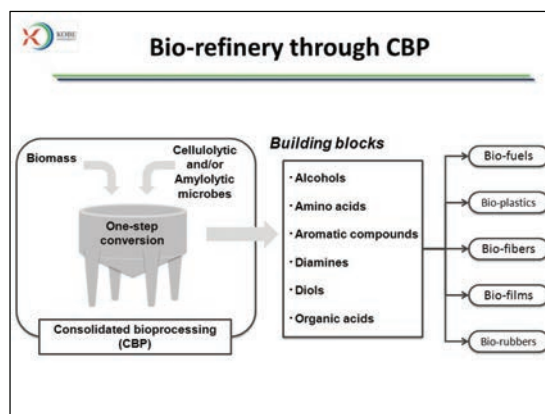


図 4-5-1-3

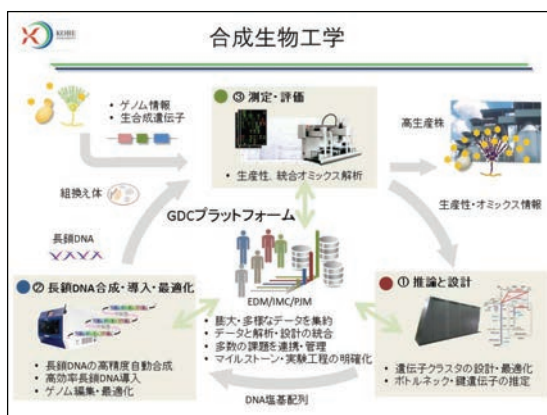


図 4-5-1-4

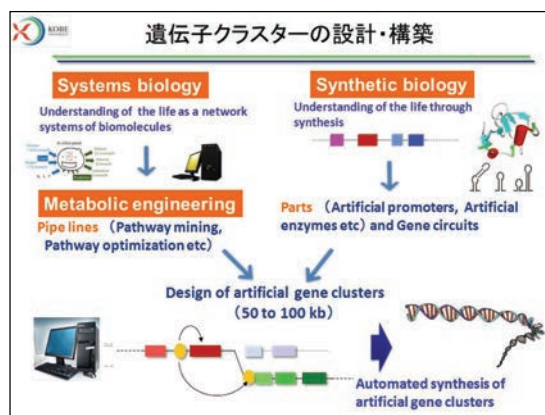


図 4-5-1-5

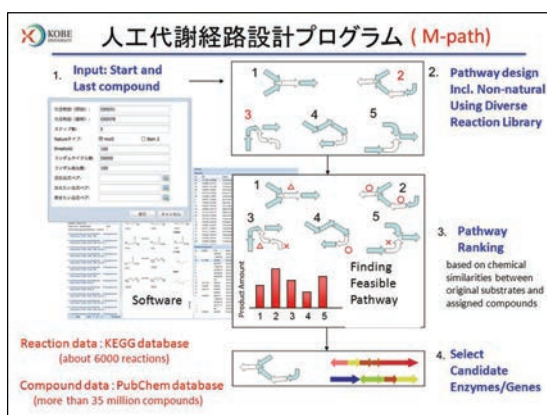


図 4-5-1-6



図 4-5-1-7

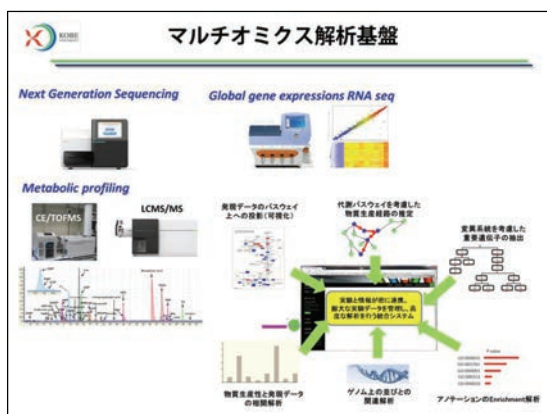


图 4-5-1-8

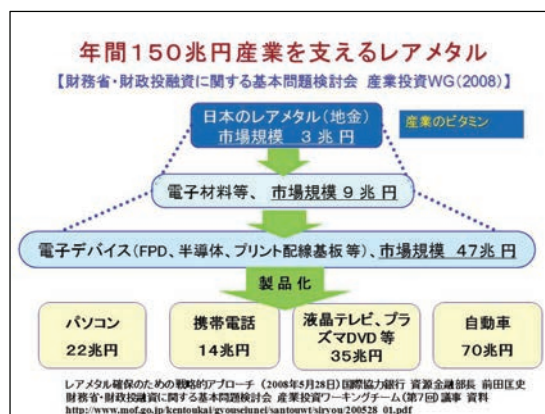


图 4-5-2-1

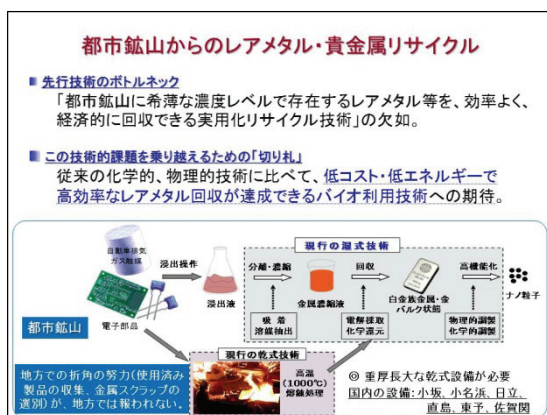


图 4-5-2-2

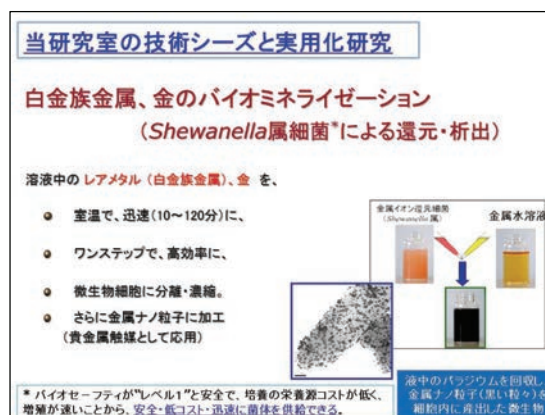


图 4-5-2-3

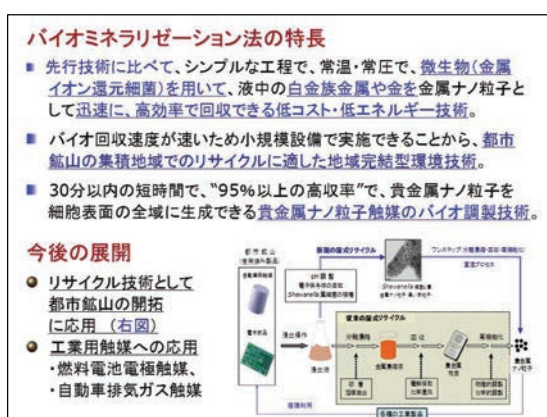


图 4-5-2-4

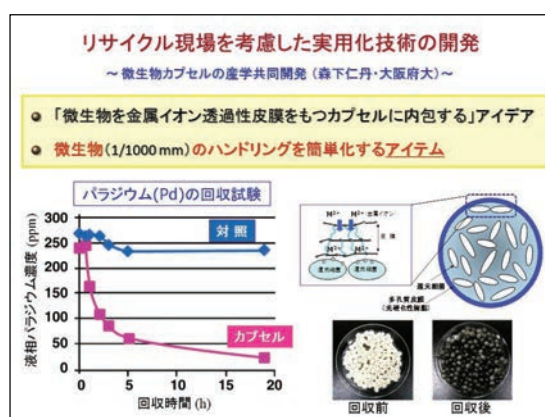


图 4-5-2-5



図 4-5-2-6

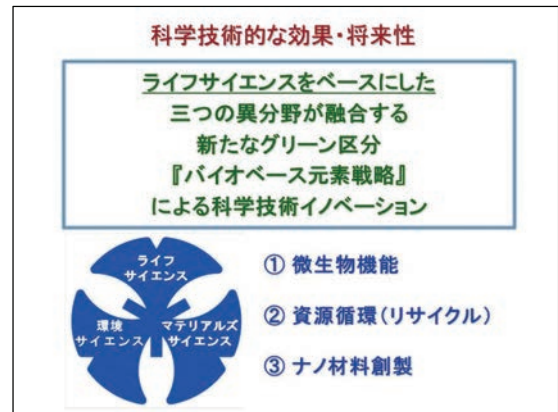


図 4-5-2-7

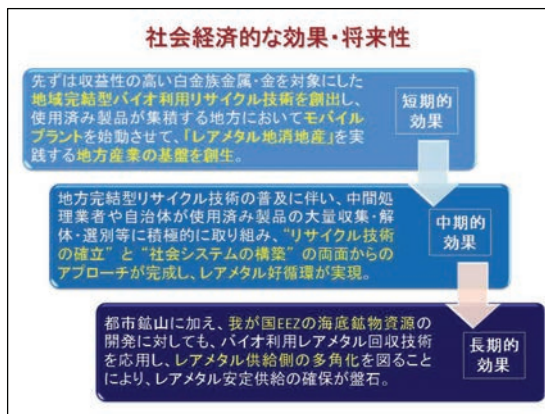


図 4-5-2-8

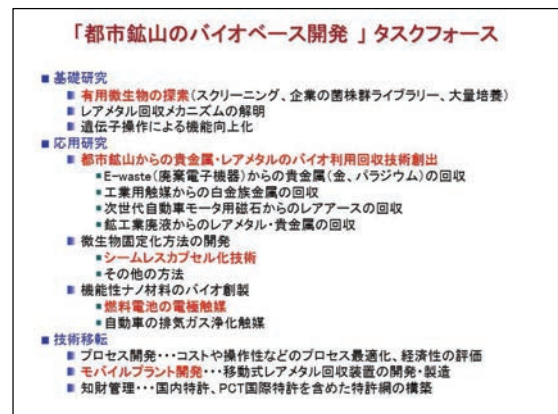


図 4-5-2-9

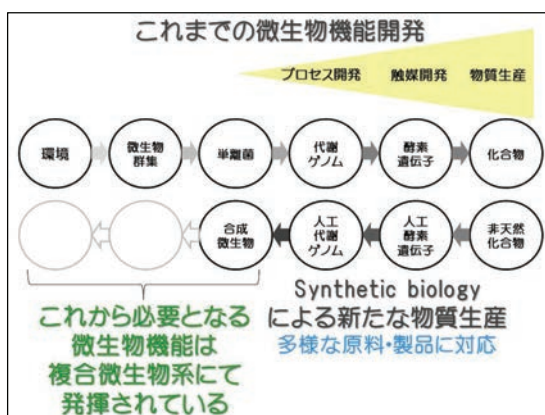


図 4-5-3-1

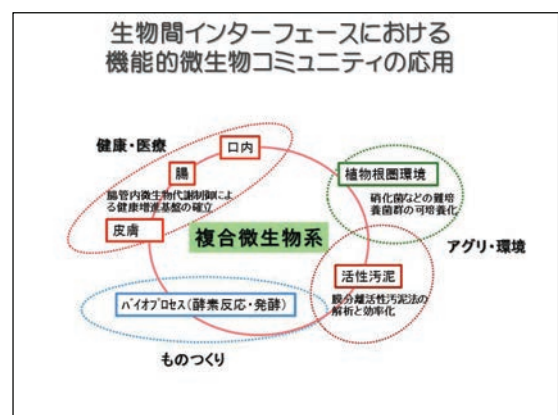


図 4-5-3-2

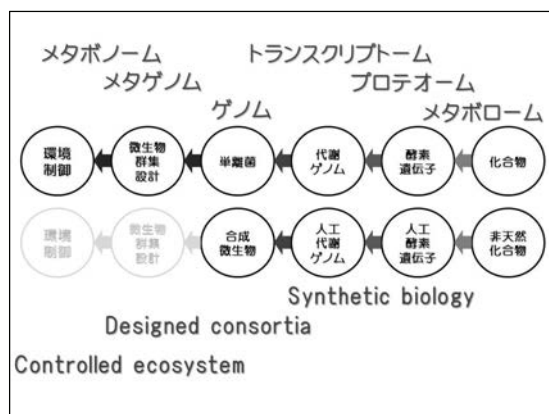


图 4-5-3-3

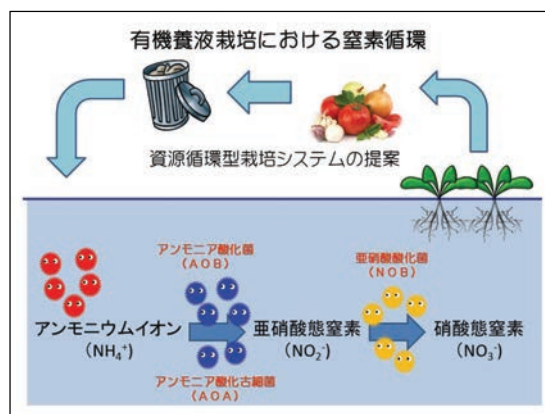


图 4-5-3-4

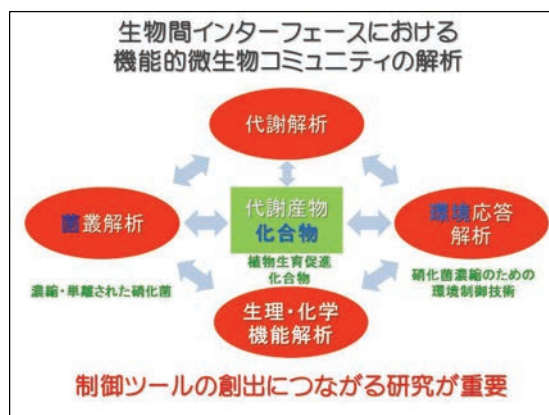


图 4-5-3-5

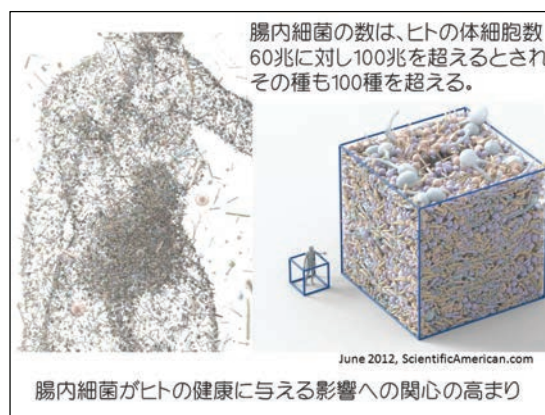


图 4-5-3-6

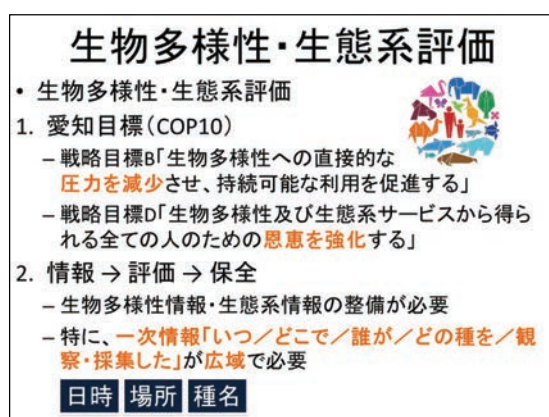


图 4-6-1-1



图 4-6-1-2

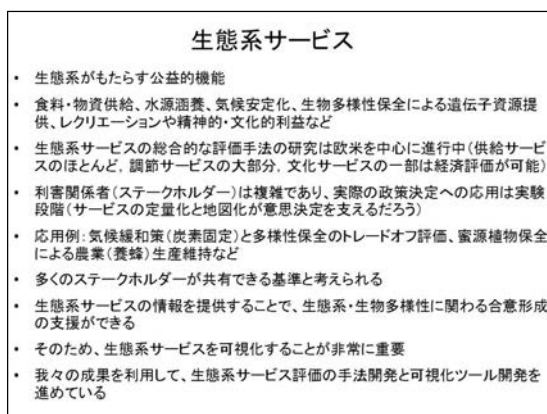


図 4-6-1-3

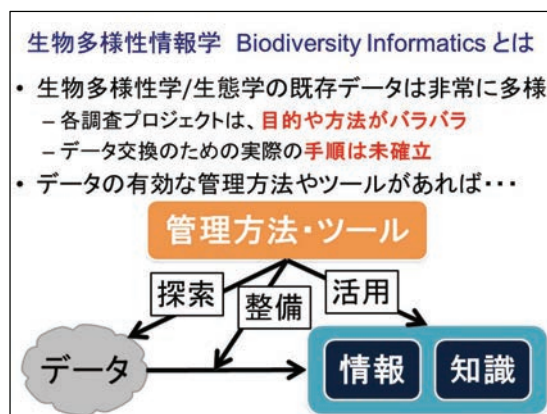


図 4-6-1-4

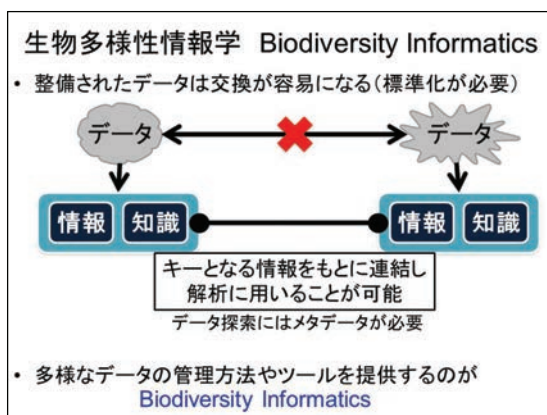


図 4-6-1-5

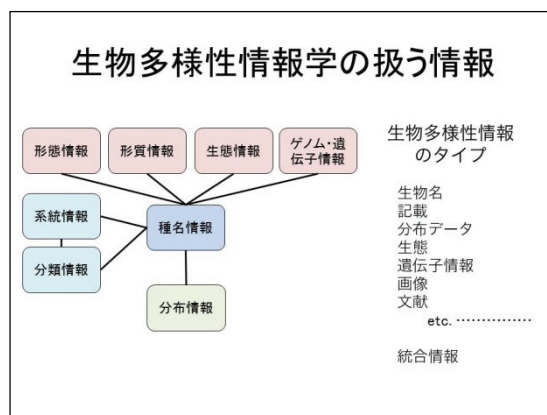


図 4-6-1-6

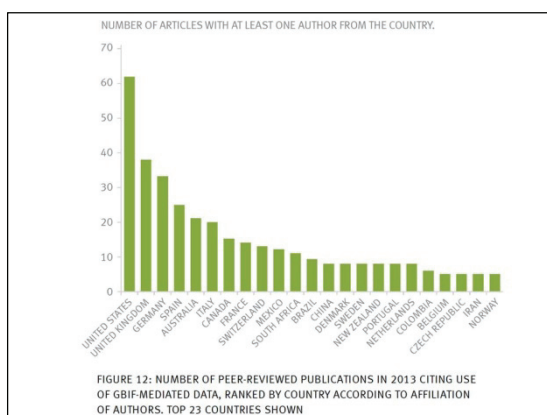


図 4-6-1-7

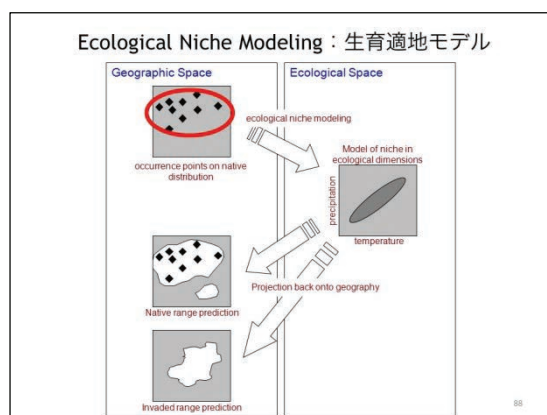


図 4-6-1-8



図 4-6-1-9

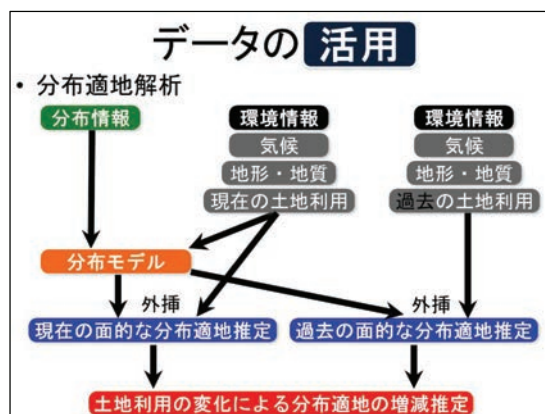


図 4-6-1-10

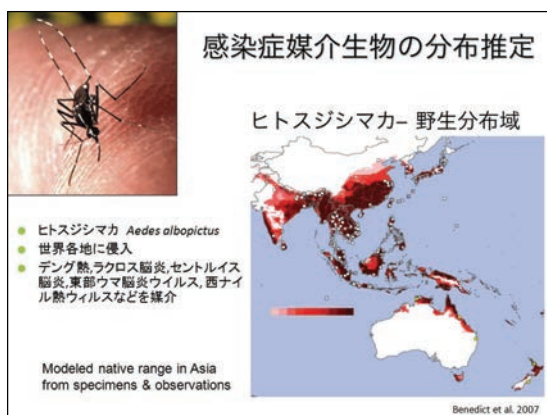


図 4-6-1-11

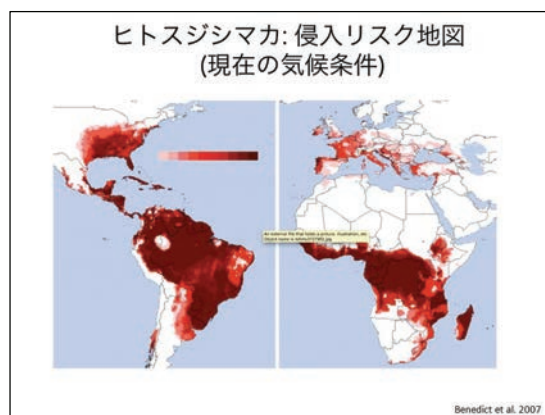


図 4-6-1-12

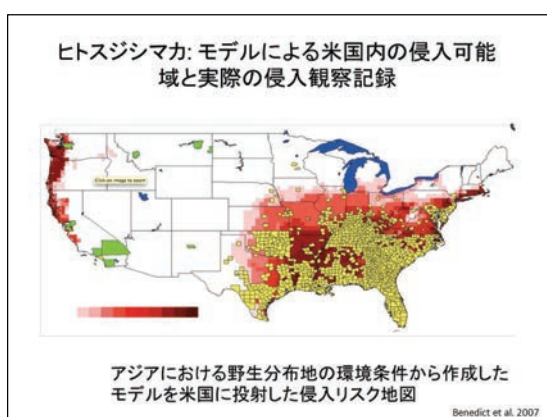


図 4-6-1-13

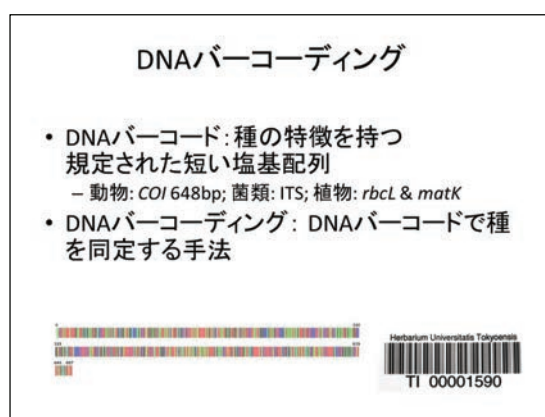


図 4-6-1-14

標準バーコード領域の設定

- バーコード領域に求められるものは:
1) 普遍性 2) クオリティ 3) 識別解像度
4) 適当な長さ
- 動物: ミトコンドリア *COI* 領域
- 菌類: 核 rDNA *ITS* 領域
- 植物: *rbcl* と *matk* を primary barcode として用いる
- 種レベルの識別は70%で可能
- 高解像度を求める際の supplementary barcodes (*trnH-psbA*, *ITS* ...)

図 4-6-1-15

DNAバーコーディングの利点

- 自分自身で同定できる
- 依頼できる分類学者は限定される
- 分類学者の知識を活用できる
- 様々な状態のサンプルを同定できる
- 生活史ステージ (eg. 卵や幼虫)
- 消化管内の食物/微生物の網羅的同定 (次世代シーケンサーの利用)

図 4-6-1-16

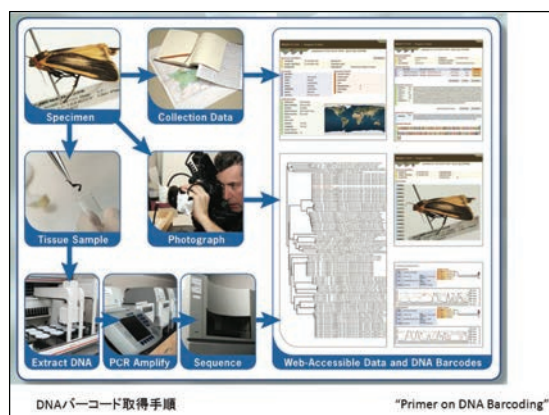


図 4-6-1-17

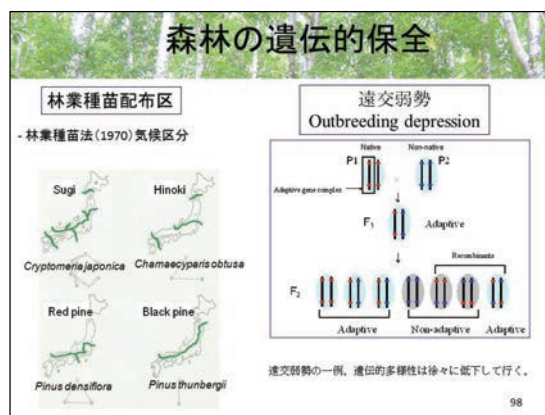


図 4-6-2-1

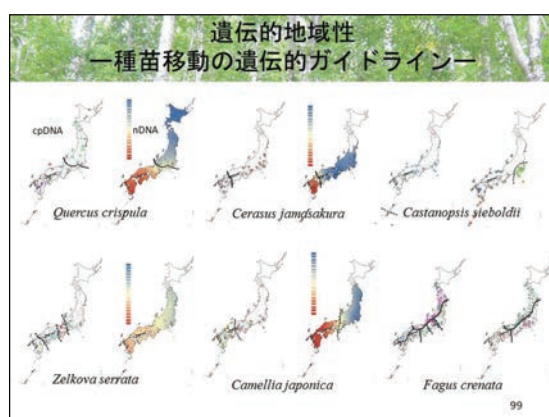


図 4-6-2-2

森林植物の遺伝的ガイドライン

- 広葉樹の種苗の移動に関する遺伝的ガイドライン(2011) 10 樹種
- <http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/documents/2nd-chukiseika20.pdf>
- 「森林植物の種苗配布の遺伝的ガイドライン」(40樹種、編集 中)

図 4-6-2-3

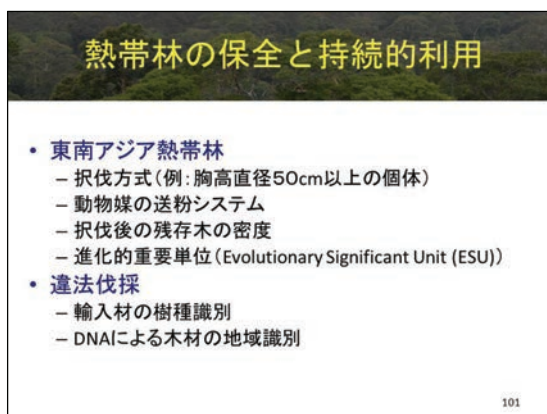


図 4-6-2-4

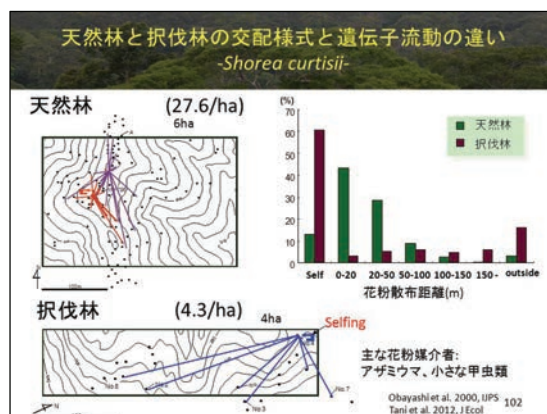


図 4-6-2-5

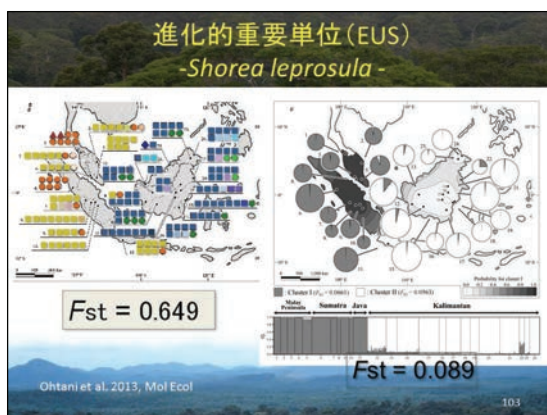


図 4-6-2-6



図 4-6-2-7

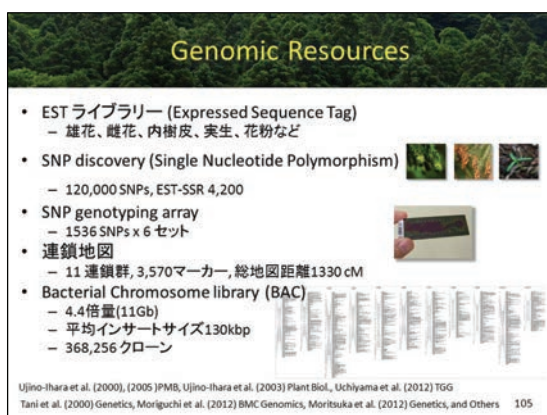


図 4-6-2-8

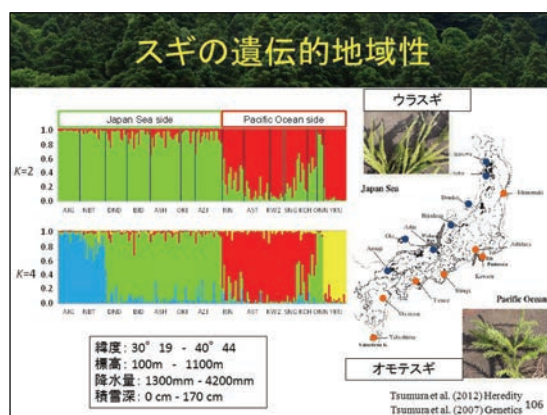


図 4-6-2-9

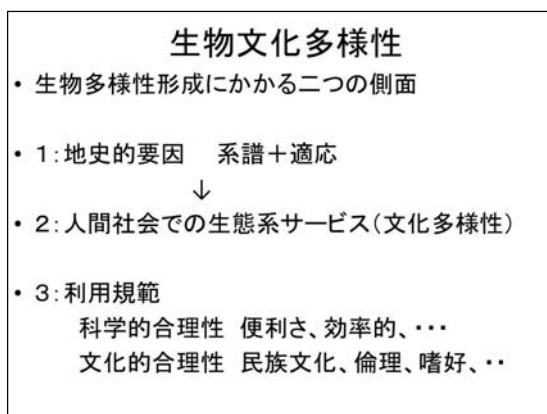


図 4-6-3-1

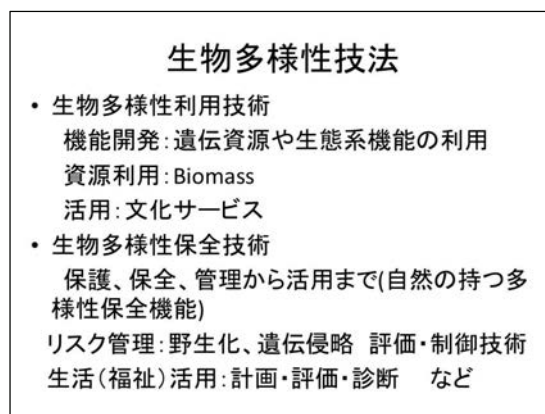


図 4-6-3-2

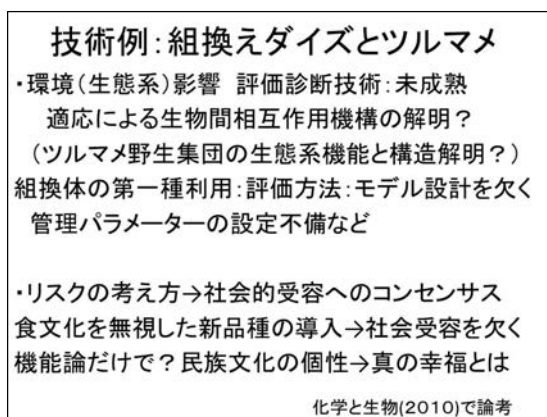


図 4-6-3-3

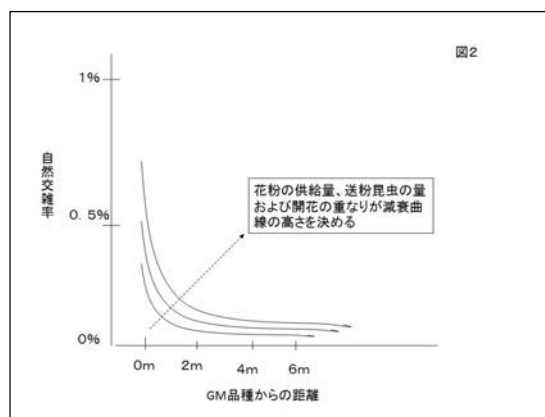


図 4-6-3-4

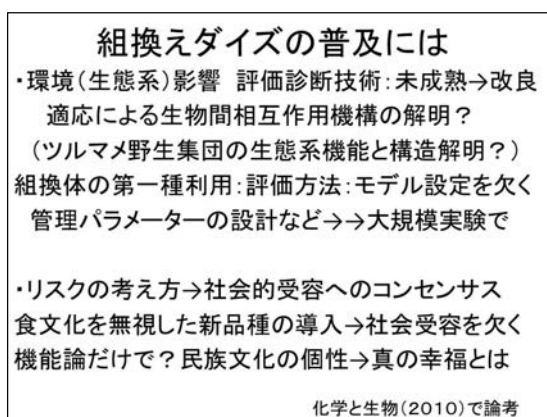


図 4-6-3-5

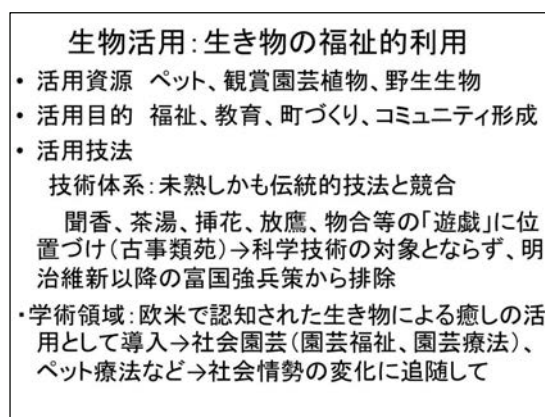


図 4-6-3-6

近未来の実用化へ

- 生物文化多様性を適切に使用し保全するには
- 園芸植物もペットも伝統知を内包した生物多様性
- 活用の実用化技術体系を構築
 - 課題の発掘と整理(生物文化多様性の構造解明)
 - 戦略的研究開発プログラム(解決序列、伝統知の評価・数量化法の開発、異分野領域間の協働)
- 真の幸福へ:日本人(世界)の民族文化深層の理解
 - 文化的合理性への裏付けが必要

図 4-6-3-7

8/30のプレ俯瞰ワークショップを受けて

食料自給率100%以上にするには、日本国内だけでは難しい

- 日本の技術のパッケージ化
- パッケージ技術を輸出して、他の場所で作って輸入(アジア等)

これから重要となる技術

- 温暖化対策(耐暑、耐乾燥、耐塩)
- 生産性向上(省力化・省コスト化技術)

わが国としてどのような作物の技術開発を行うか

- イネ、野菜類
 - (コムギやトウモロコシの育種技術は欧米が先行)
- 高機能性・高品質性
- 日本が育種で強いところに技術を組み込む
- マイナークロップとよばれる豆類は有望
- ソルガムは1つの例

図 4-7-1-1

アンケート及び8/30のプレ俯瞰ワークショップを受けて

真に出口を見据えた研究

- イノベーションを意識したJST主導のプロジェクト
- IFを意識すると、社会実装が疎かに、社会実装への期待を評価できる指標の必要性
- 社会的ニーズ・生産者ニーズに合った目標設定で社会受容の向上
- 価値観の問題に科学者が積極的ににかかわり社会の要求に敏感に対応する仕組みの構築が必要
- ものづくりには様々な高度な技術の集積が必要で、それを支える基礎科学+工学の発展ならびに応用が必要

産学連携・社会実装について

- 現場のニーズを把握する仕組みが弱い
- 大学では研究ができるが、社会実装となると産官協力必要
- そもそも大学の農学部は産学連携を望んでいるのか
- 関連企業と連携して、ベンチャー企業による成果実用化

図 4-7-1-2

アンケート及び8/30のプレ俯瞰ワークショップを受けて

人材育成の仕組み

- 基礎研究にも応用開発にも造詣の深い研究者の育成
- 異分野連携のネットワーク
- 橋渡しに適した人材、実証試験を担うことのできる人材
- 今の若手は異分野交流の枠組みをつくってやると、うまくいって交流を図るトップがそうした枠をつくるのが大事
- 生態系などでは長期的な立場に立った視点をもつ人材の育成が重要
- 農学部への志望者が急増しており、若い世代が日本社会の行く末を敏感に感じ取り、価値観に根本的な変化が生じている可能性がある。金銭的な富より、身近な人間との関わりや社会に対する貢献に希望を見出しているのではないかな。そうした彼らの受け皿となるような構造が現在存在するか？

図 4-7-1-3

表 2 昆虫分類学を主要研究テーマとする大学の研究ユニットの動向

最近 10 年間に消失	北海道教育大、富山大(理)、琉球大(農)、名古屋女子大、滋賀県立大	5
今後 10 年以内に消失へ	北大(理・環境)、帯広畜産大、筑波大(理)、信州大(教)、鹿児島大(理)、京都府大(農)、首都大(理工)、名城大(農)、南山大、大阪芸大、鹿児島女子短大	12
単独教員のため維持困難に	茨城大(理)、東大(農)、神戸大(農)、山口大(農)、鹿児島大(農)、大阪府大(農)	6
複数教員により維持可能	北大(農)、九大(農、比文)、愛媛大(農)、東京農大	4
最近 10 年間に加入	弘前大(白神)	1

日本学術会議農学委員会 応用昆虫学分科会 (2011)
『報告 昆虫科学の果たすべき役割とその推進の必要性』

図 4-7-3-1

第5章 植物デザイン分科会

5-1. 概要

開催日 2014年11月29日(土)

開催場所 独立行政法人科学技術振興機構 東京別館4階F会議室

プログラム

植物デザイン分科会

開会挨拶、趣旨説明 15:00-15:30

開会挨拶 浅島 誠 (CRDS 上席フェロー)

趣旨説明 江面 浩 (CRDS 特任フェロー)

セッション1 植物デザインシステムの可能性に関して 15:30-17:30

- ① 気候変動に対応した作物評価のための定量的フェノーム解析の基盤研究
(篠崎一雄：理研)
- ② 植物デザインシステム開発に対する感想 (田畑哲之：かずさDNA研)
- ③ 植物デザインシステム開発に関して (堤伸浩：東京大)
- ④ 植物機能モデリングとフェノミクス (彦坂幸毅：東北大)
- ⑤ デザインと制御に向けた植物科学 (永野惇：京都大)
- ⑥ 植物デザインシステム：代謝工学 (平井優美：理研)
- ⑦ ゲノム情報を活用した高速育種 (岩田洋佳：東京大)
- ⑧ インシリコモデリングを通じた有用植物の人為的デザイン (矢野健太郎：明治大)
- ⑨ ゲノムから植物デザインへ (伊藤剛：生物資源研)
- ⑩ データ主導型イノベーションにむけて
～ヘルスケアから農作物の育種へ～ (桜田一洋：ソニーコンピュータサイエンス)
- ⑪ 植物デザインシステム：ベンチャー企業の視点から
(高根健一：インプラントイノベーションズ)
- ⑫ 野菜種子市場 (酒井隆子：みかど協和)
- ⑬ 植物デザインシステム：育種企業からの視点 (山根精一郎：日本モンサント)

セッション2 総合討論 17:30-18:30

総合討論司会 江面 浩 (CRDS 特任フェロー)

5-2. 趣旨説明

5-2-1. 植物デザインシステム

わが国の植物科学研究は非常に強みのある分野であるにも関わらず（図 1-2-1-3）、その強みが応用、実用化へと活かされていない。食料自給率は 39%で、TPP により農水省試算によると 27%まで落ち込む可能性がある。海外に目を向けると食料の取り合いが始まっている。例えばインドネシアなどでは温暖な気候にも関わらず食料を輸入している。そのような状況の中、わが国がとるべき食料安全保障戦略としては、大規模化や IT、植物工場を利用したスマート農業の推進。戦略的イノベーション創造プログラムでも 1つの柱として研究開発が始まっている。ただ、これだけで 100%に達するのは困難であり、技術の開発及び技術の輸出を行い、海外における作物増産を達成させて、その見返りとして作物を輸入できる体制を検討する必要がある。本分科会では、植物科学基礎研究の強みと応用・実用化への隘路を埋める 1つ方策として植物をデザインするシステムを構築することで、様々な環境に適した作物を迅速に作出するための育種を支援するという構想に関する検討を行った。

技術を輸出するという場合、独自性があり、汎用性の高い技術というものが必要となる。また出口としては、温暖化対策技術や生育メカニズムの解明などがあげられる（図 5-2-1-1）。今現在、次世代シーケンサーを含め様々な機器の発達により、ゲノム、トランスクリプトーム、メタボローム等、オミクスデータを取得することが可能となってきた（図 5-2-1-2）。こうした情報をもとに予測を行い、検証実験を行う。これを繰り返すことで、コンピュータによる自己学習を行い、システムを高度化させていく（図 5-2-1-3）。このシステムの利用としては、経験と勘に頼る育種から、データに基づいた植物改良ができるようになれば良い（図 5-2-1-4）。それを外国へ適応させる形に改良するという事も考えられるのではないか。スパコン自体も NEC が 2017 年をめどに 500 万円で発売するという話もある。10 台つないでも 5,000 万円でできるようになるなどのツールが揃いつつあるのが現状である。

5-3. セッション1 植物デザインシステムの可能性について

5-3-1. 気候変動に対応した植物の生長評価のための定量的フェノーム解析の基盤研究 <篠崎一雄 センター長：理化学研究所環境資源科学研究センター>

植物科学は日本では強いが、応用は弱い。そこに問題点がある。植物科学の流れとしてシロイヌナズナ、イネにおける機能解明が進んだ。ではそれをどう使うか。藻類、樹木などの多様なものへの応用が進んでおり、これは次世代シーケンサーのおかげである。食料増産、バイオマスという資源循環的な生産システムの構築が 2050 年に向けて開発が望まれる。フィールドへどのように基礎科学から展開するか。作物品種、栽培環境、栽培技術の 3つが調和されないと作物はつくれない（図 3-3-3-1）。特に環境変動、栽培環境の最適化、土壌環境微生物との相互作用が重要（図 3-3-3-2）。植物の表現型を定量的に扱える時代が来ている（図 3-3-3-3）。フィールドの場合、環境情報が変動する。環境変動をモニターしつつ作物の成長を調べる必要がある（図 5-3-1-1）。センシングシステムやイメージング装置が進んでいるので、ハイスループットが可能。難しいのは土壌。どのような微生物とどのような作物が良いのかという研究もなされている。土壌を最適化しながら、表現型解析で成長を追うというこ

とができれば定量化が可能。基礎科学から農業へ出る場合、実験室から温室、圃場への移行をいかにつなぐかということが重要で、フィールド研究者と連携が必要である(図 5-3-1-2)。また、計測技術が進んでいる。ロボットやセンシングといった生命科学でない領域との連携が重要である。理研と生物資源研でフェノームを行っており、計測システムを構築してきている(図 5-3-1-3)。

質疑応答

Q:植物と微生物の相互作用は重要だが、データベースはどの程度整備されているのか。

A:土壌メタゲノムが動き始めている。共生微生物と成長を追った研究はなされていない。これから取り組むべき。

5-3-2. 植物デザインシステム開発に対する感想

＜田畑哲之 所長：かずさDNA研究所＞

イネゲノムシュミレータプロジェクトから 10 年経ち、技術レベルは上がっているが、基本的な課題は解決されていない。トランスオミクス解析において計測対象を何にするのか、感度を上げる必要があること、メタボロームの場合は物質特定の難しさが残る等、現在、玉石混交のデータのかたまりとなっている。情報技術を用いてモデリング、最終的にデザインという流れになるが、複雑性が問題となる。大腸菌でようやく使えるようになってきたが、葉緑体が入ったラン藻では複雑すぎて使える状態になっていない。データの精度も悪いのでチューニングの精度も悪くなり、実証に時間がかかるという問題点もある(図 5-3-2-1)。

課題として、本物とゴミを分別できるのか。様々な要素の結果を各要素に分解して解釈できるか。データを個々の現象と結びつけるだけの生物学的知識があるのか。検出感度は足りるのか。モデリングに関しても実証は時間をかけて精度を上げないといけないが、その方法が確立していない。モデリング専門家がどこまで生物学的問題の解決まで行うのか(図 5-3-2-2)。

実現に向けては、実証が可能な簡単なモデルケースを立てる。QTL 制御形質など複雑な農業形質についてもモデルケースを立てて調査する。要素技術やモデリング手法の改良・開発、技術・分野の融合が必要。人材が圧倒的に少ないのも問題である(図 5-3-2-3)。

質疑応答

Q:データの質が問題。もしやるならばモデルケースを立ててやるということか。

A:データをとるところからモデリングまでをきちんとやれているか確認しないとイケない。

5-3-3. 植物デザインシステムに関して

＜堤伸浩 教授：東京大学大学院農学生命科学研究科＞

日本の植物科学は世界トップレベル。だが産業化に対応できていない。海外展開を志向した新たな日本型アグリビジネスの確立が重要。また、これまでの農業問題として、資源多投型で、高コスト、高環境負荷、耕地の劣化を招いた。またフィールド研究はばらつきが大きくてスループットが低い、これこそが重要で植物の本質かと思う。研究室内でのシーズからフィールドにおける出口志向の研究が必要で、それにはリモートセンシングや統計モデリング等のハイスループット化が必要である(図 5-3-3-1)。実験室環境は極めて特殊な環境であり、環境のフラクチュエーション、ダイナミクスが植物の表現型を規定しており、フィー

ルドでの研究が重要である（図 5-3-3-2）。CREST でのソルガムプロジェクトであるが、ニーズの開拓から、栽培管理技術の改良によるニーズの多様化、新品種の作出、基盤技術の整備の中でグローバルな活躍をする人材の育成に取り組んでいる（図 5-3-3-3）。

5 年前の CRDS 戦略イニシアティブ「環境適応型作物のゲノム設計技術」（CRDS-FY2009-SP-11）でまさに今回と同じような議論がされている。では 5 年前と今では何が違うのか。大量のオミクスデータとそれを処理する計算機資源が揃ってきたことと、センサーと情報通信技術による効率的なフェノタイピングが可能になった。そこで、大量オミクス情報とフェノタイピングを基にした数理統計モデリングによるモデルに基づいた交配と選抜による品種育成と効率的な栽培管理技術をお互いに発展させるようなシステムを構築する必要がある（図 5-3-3-4）。また、この 5 年の間に中国はイネゲノム数千系統よみ、フェノタイピングも行っている。こうした中、今後達成されるべき研究開発技術として、フィールドにおける形質評価の効率化、オミクスデータの処理とモデリングの効率化、生物と情報の融合があげられる（図 5-3-3-5）。

質疑応答

Q:この 5 年間でテクノロジーがある程度進んだことでモデリングが可能になったか。

A:タイミングであろうということ。

5-3-4. 植物機能モデリングとフェノミクス

<彦坂幸毅 教授：東北大学大学院生命科学研究科>

植物機能モデリング

- ・メカニズムが分かっている、そこから因果関係をつないでいくというモデリングもある。そのようなモデリングと統計モデリングをつないでいけると考えている。
- ・例えば成長を良くしようとするとうる葉の光合成能力を上げないといけない。それには光合成酵素の量を増やさないとけない。そのためにはタンパク質を作る材料が必要となり、根からの吸収を増やす必要がある。そうすると葉の量が少なくなる。そうすると必ずしも成長が上がるとは限らない。様々な形質の間にトレードオフがあり、一つの形質の改変が必ずしも成長促進につながるとは限らない。トレードオフまで網羅した包括的な成長を説明するようなモデルが必要（図 5-3-4-1）。
- ・葉の光合成速度の場合、葉がどのようなポテンシャルをもっていることもあるし、環境がどのように影響するのかということもある。但し、環境要因の情報があれば短期応答に関する葉の光合成速度はほぼ完全に説明することが可能である（図 5-3-4-2）。難しいのは、複数の環境が混在する際の長期応答の予測は、定性的には分かっているが、定量的に予測することは難しい（図 5-3-4-2）。
- ・群落光合成速度（植生の CO₂ 吸収）も同様。
- ・応用の現状として、生態系物質循環モデルに適用。例えばこれから CO₂ が上昇し温暖化した際に、植物の物質生産が世界的にどのようなになるかを予測するようなモデルの精度を上げるといふ貢献も行っている（図 5-3-4-3）。

植物構造モデル

- ・コンピュータ内にバーチャルな植物を作り構造と機能の関係を探っている。植物の形を作るだけでなく、光環境や葉の相互被陰をシミュレートし、植物の受光量を計算している（図

5-3-4-4)。例えば、葉柄を短くして葉身を大きくしたり、その逆を行って、どの組み合わせが良いかというのをモデリングすることが可能となっている。そのことからどのようなアーキテクチャが受光量大か、光獲得競争に強いかを考えることができる（図 5-3-4-5）。光合成の環境応答も導入可能。

- ・ベースに因果関係から立ち上げたモデルとオミクスデータを比較することでモデリングの時間を減らせると思う。

フェノミクス

- ・日本の植物科学はマイクロ系のオミクス解析はものすごく強い。だが野外に出ない。フェノームの部分は国外に比べても弱い。
- ・現在 CREST 研究として、フェノミクスとゲノミクスの統合解析を行っている。様々なエコタイプを異なる CO₂ で育成し、形質の評価、ゲノム解析とトランスクリプトーム解析を併用して、候補遺伝子をピックアップして、候補遺伝子の形質転換体を作製して遺伝子機能を証明するというを行っているが、このようなことができれば良いかと思う（図 5-3-4-6）。

質疑応答

Q:生態学でも綿々と測定は行われているが、ハイスループット化していない。

A:衛星情報を上手く用いてやろうとしている。

5-3-5. デザインと制御に向けた植物科学

<永野 惇 JST さきがけ研究者：京都大学生態学研究センター>

基礎科学として植物のシステムを理解する上で、計測してそこから人が考えて理解することを繰り返してきた。そこをもう一歩進んで、予測するとかデザインするとなると、何らかの形で数学的表現であったり、計算可能な表現が必要である。予測ができればデザインすることは可能な場合もある。そこから計測に戻してリファインして修正することが重要である（図 5-3-5-1）。このサイクルをうまく回せるならば、システムに対する理解も深まる。使えるものならば社会実装にもつながる。

自分自身は、実際に圃場のイネの葉、約 500 サンプルのトランスクリプトームを行い、気象データとの間を統計モデリングにより予測できるようにした（図 5-3-5-2）。このモデリングには数 100 のデータが必要である。つくばの圃場でイネを育てている場合には非常に良く当たるモデルとなっている。今は日本晴であるが、そこに遺伝学的な材料を組み合わせ、**genotype** が違うものも含めて予測できるようになれば逆問題として、希望のトランスクリプトームを示すシステムをデザインすることが可能と考えられる（図 5-3-5-3）。では、なぜトランスクリプトームなのか。**Trait** を全て測るのは大変であり、**genotype** や環境のバリエーションの色々な組合せによって **trait** が決まる。ただ、形質は人間が理解可能な範囲しかバリエーションがない。なので、組み合わせはどこかで集束するが、データを見てみるとトランスクリプトームあたりなので、その部分の計測を行っている（図 5-3-5-4）。

使い道としては、例えばモンサントのデータではあるが、トウモロコシ葉において、窒素量の推移を予測する発現マーカーが作製され、窒素量の予測が可能であることが確認された。野生の自然環境下での植物の発現年変動を毎週ものを採りに行くと、季節変動遺伝子の検出ができる。これらの遺伝子を用いることで温暖化の影響などを発現量を通じて調べる

ことができるのではないかと。こういうことを行うには数 100 オーダーの検体が必要。デザインをするにはゲノミックセレクションやゲノム編集技術を導入できるし、また高時空間分解能な発現制御技術も必要となってくる（図 5-3-5-5）。予測のところで数理的な解析が必要。情報科学・データ科学の専門家との密接な共同研究がますます重要となってくる。

質疑応答

Q:情報科学の人からは、植物科学に対してどのようなデータが必要といっているか。

A:あればあるほど良い。ただ、何を知りたいのか、何をやりたいのかを、適切に考えてから相談して欲しい。漠然とした接触の仕方が多すぎるので、具体例を挙げる。そうすれば、これぐらいのデータが必要という明確な回答が得られる。過去のシミュレーターで上手くないのは、漠然と全体をシミュレーションするといった形になっている。そのようなことは出来ないで、具体例を考える必要がある。

Q:トランスクリプトームはとりやすいのか。

A:取りやすいと思う。個体的なゆらぎが少ないのと高分解で測定可能。

5-3-6. 植物デザインシステム：代謝工学

＜平井優美 チームリーダー：理化学研究所環境資源科学研究センター＞

メタボロミクスに関して、生物の持つ代謝制御メカニズムの理解がある。代謝を理解することで発生や成長の理解にもつながるという考え方もある。社会経済的な価値の創造としては有用生産物質がある（図 5-3-6-1）。微生物の方では発酵生産で主に用いられている。代謝のフラックス解析やメタボロームデータによるモデリングが行われ、代謝経路の予測や、有用物質生産の律速段階の予測が行われている。ただ、植物体、培養細胞では成功例がない。植物の代謝モデリングという研究を続けており、モデルケースをつくるため、まずはシロイヌナズナのカルス液体培養系で、同定された約 300 の代謝産物を用いてモデルを作ることを行っている（図 5-3-6-2）。ただちに直面した困難として、代謝産物データの空間解像度の低さという要素技術不足からくるもの、生物学データのインフォマティクスの不足がある（図 5-3-6-3）。情報科学からの視点ではデータが汚い、ノイズが大きいという、1 点の真の値が存在するという感覚があるが、生物学データには本質的に fluctuation があり、それを扱わないといけない（図 5-3-6-4）。具体的には空間解像度の高いデータ取得技術の開発が必要。植物ではここ 10 年でほとんど変わっていない。また、代謝産物量の fluctuation を扱うアルゴリズムを開発する必要がある（図 5-3-6-5）。Fluctuation が生物学の本質ならば、それを扱うようにしないとイケない。

質疑応答

Q:オルガネラごとの代謝解析として従来の分画法ではだめで、新しい分画法が必要ということか。

A:代謝を止めた状態で分画する必要があるが、そのような方法はまだない。部分部分では出来ているようであるが、メタボローム解析として使う技術の開発が必要。イメージングだと、特定の代謝産物となりメタボロームにならないし、まだ空間分解能が足りていなくてオルガネラ別には分からない。

5-3-7. ゲノム情報を活用した高速育種

＜岩田洋佳 准教授：東京大学農学生命科学研究科＞

人口爆発時代において、どのようなところの収量を上げないといけないか。乾燥地は地表の41%を占めている。このような不良環境において低資源で生産性を上げる農業が食料問題解決の鍵を握っている。今穫れていないところをどれだけ底上げできるかが重要。そのような乾燥地に21億人が住んでおり、ものすごく激しい乾燥地にも1億人が住んでいる。不良環境において生産量の向上は耕地拡大に依存してきたが、これからは作物側のポテンシャルを上げる必要がある(図5-3-7-1)。ゲノム情報を活用した高速育種としてゲノミックセレクションを想定している。これまでは表現型を圃場で見ているものを選抜してきた。環境の影響も受けるので1年だけではできず、1つの品種をつくるのに5-10年かかった。一方、ゲノム情報は安く早くとれるようになってきた。DNA マーカー側から原因遺伝子がどうなっていて、収量などの予測モデルを行って、それに基づいて選抜を行う。このような動きは2001年に乳牛での例が発表され、実用化に至っている。作物でも **genotyping** コストが下がっているので積極的に使う方向に動いている。今後、ストレス環境で省資源で栽培できる品種を作ろうとすると、過酷な環境でもある一定の収量を確保できる品種をつくる必要があり、過酷な環境に適応してきた遺伝資源を活用することが重要である。在来種は有用な遺伝子を多くもつが、そういった遺伝子を高速にかき集めるのにゲノミックセレクションは1つの解決方法。方法としては、ストレス耐性をもっている遺伝資源を不良環境において圃場試験を行い、それにゲノムや遺伝子発現情報を加えてモデルを構築する。そのモデルをもとに、最適交配組合せの選定、優良個体の選抜、有用遺伝子の高速集積を行う(図5-3-7-2)。このようなことを行おうとすると、不良環境における栽培試験、フィールドでのフェノミクスが重要となる。あとは不良環境をシミュレートする環境を大学などに作るのも1つの方策。フィールドでのフェノミクスのために、ラジコンを用いたりリモートセンシングにより、植物の生長を時系列データとして収集している。また環境側の情報を得るため、フィールドサーバーを設置。不良環境における植物の生長をモデル化する際に、植物の内的状態を計測するため、トランスクリプトームやメタボロームの情報もモデルに含めていく必要がある(図5-3-7-3)。

モデル構築に関して。例えばイネがいつ出穂して収量はどのくらいになるか、肥料を少し減らすとどのくらいの収量になるかをシミュレートする作物モデルがあり、このモデルとゲノミックセレクションを融合させたところに次のステップになるようなモデルがあると考えている。昔のモデリングが上手くいかなかったのは、積み上げ型でボトムアップで作ろうとしたところに問題があったと思われる。非常に複雑な現象なので、トップダウン的、現象が見えているものを使えるブラックボックスを用いてモデリングすべき。そのような意味でも機械学習は極めて有効。中でも興味をもっているのは能動学習といって、次にどの表現型を見ないといけないかをゲノムデータ側から考えて推測する方法。機能的情報はかなり重要。機能的情報を導入したファンクショナルなゲノミックセレクションによりブラックボックスからの脱却も図れるのではないかと。モデリングできるのであればシミュレートも出来るので、どのような形で育種をすれば良いか、集団サイズ、選抜強度を設定して、何と何を交配すればこれくらいの効果が得られるというのを全部シミュレーターの中で行う **crop breeding simulator** が可能となるのではないかと(図5-3-7-4)。これまでの中で完全に抜けているのは、育種への実装ということ。それを考えると、世代を速く回すことも重要。世代を急速に進め

るためのシステムの構築が必要。現在イネでは年間4世代回るが、果樹だとどうか。そういうことも考えないといけない。また、交配を楽にする方法も必要。例えば雄性不稔の導入。この方法とゲノミックセレクションを組み合わせることで、雄性不稔が導入されていない品種を栽培へ回すというモデルが組める（図5-3-7-5）。

人材育成について。情報科学と生物科学のコラボレーションでは、真ん中に立って両方の話が分かる人が重要となる。ポスドクなどがそのような真ん中に立つような人として育つのが良い。そのような人材を育てる必要がある。

質疑応答

Q:人材について、両方が分かる人というのは難しい。片方が専門家でもう一方を分かる人というのが重要。境界領域の難しさがある。

A:農業は実践で、農学は実学で真ん中ぐらいである。そのような人材を育てられないということはない。どちらかに偏っていない人というのが重要。

5-3-8. モデリングを通した有用植物の人為的デザイン

＜矢野健太郎 准教授：明治大学農学部＞

最初にすべき課題としてはビッグデータをどうやって扱うか。やるべきこととしては実験の生データ（一次情報）、NGSのリード、マイクロアレイのデータ、マスのデータをきっちり揃えること。精度にバラツキがあるが、ここはインフォマティシヤンの仕事で、何とかしていききたい。次に一次情報をどうやって二次情報に持っていくか。解析するツールであるが従来方法では無理。トランスオミクス解析のためのツールを作らないといけない。時空間的な解析がまだ出来ない。例えば、ゲノム、トランスクリプトームの情報だけ見ても、代謝経路やシグナル伝達経路のような作用の方向性が分からない。このようなことを明らかにするツールが必要。いくつかの優れたツールがあるが、実際に解析するのはwetの人なので、その人たちが使いやすいGUI・Webツール、それらを可視化するグラフィカル・ビューワーを開発しないと進展しない。遺伝子やタンパク質、その相互作用に対して、いかにその知識情報を集約できるかが非常に大事なところ。今までの遺伝子機能予測は低精度で、GOもほぼ機械予測。知識情報は論文にあるので、これら論文をデータベース化できれば良いが、恐らくそれは無理なので、コンピュータの力を借りる必要あり。コンピュータでのテキストマイニングする技術は不完全なので、マニュアルキュレーションを併用する必要がある。論文に書かれている遺伝子名とイネだとOs01gといった遺伝子IDとの紐付けができない。これは研究者コミュニティへ遺伝子ID登録の推奨が必要（図5-3-8-1）。

国内外の動向に関して。オミクスマップを見ても分かるように世界中でゲノム情報が集まってきている。それらをOMAPやSOL-100のようなプロジェクトでさらにゲノム情報を集めたり、EnsemblPlantsなどが情報を集めている。これら一次情報があってもツールが出来ないと困るし、人材育成が全く出来ていない（図5-3-8-2）。応用例としてはビッグデータをいかに応用するか、今後のゲノム編集、ゲノミックセレクション、GWASなどの解析が出来るようなツールが必要（図5-3-8-3）。

課題例としては、まずは一次情報を整備してデータウェアハウス化すること。ゲノムを全ての種でアセンブルする必要はなく、標的遺伝子の配列、場所が分かれば十分。ツールを開発して、一般ラボで使えるようなソフトウェアの開発。人為的デザインに資するようなゲノ

ム情報配列基盤整備。そのため、配列特異的なモチーフや多型を高精度に同定するツールが必要。知識情報の集約、そこからフィージビリティへつなげていければ良い(図 5-3-8-4)。オミクス情報は未解析データが急増している状況である。これは新規知見の宝庫であることから、ビッグデータを取り扱うことで社会的・経済的に与えるインパクトは大きい(図 5-3-8-5)。

質疑応答

Q:ツールの開発ということでどのようなツールが必要になってくるか。

A:スパコンを使っても数か月かかるものもあるので、それをワークステーションレベルでもできるものへの開発が必要と考えている。

Q:共発現データは役に立った。次世代シーケンサーでアソシエーション解析などを行う際に、どのようなデータをとれば良いとか、どのような計算をすれば良いというのはあるか。

A:NGS で RNAseq のデータをネットワーク化するにはかなりのスパコンと時間が必要。まずマッピングして遺伝子発現プロファイルをデジタルで得るところで、どれぐらいの精度で得るかということにも関わる。従来のピアソン解析で評価するとすごく時間がかかる。そこで多変量解析を使って高速化している。従来のマイクロアレイのようなサンプリングで良いかと思っている。

5-3-9. ゲノムから植物デザインへ

<伊藤剛 ユニット長：農業生物資源研究所ゲノムインフォマティクスユニット>

NGS により配列が高速、高精度で安価に読めるようになってきた。だからこそしっかりシーケンシングすることが大事である。コムギのような 17Gbp あるようなゲノムでもシーケンスが可能となった時代である。シーケンサーの応用範囲は広く、トランスクリプトームやメチロームも可能。大規模フェノタイピングやメタボロームとどのように組み合わせるか。データを活用するにはどうすれば良いか。大量の配列データを解析できる体制をつくるのが大切。データを可視化するというところが現在問題となっている(図 5-3-9-1)。シーケンサーの現状として、PacBio と Illumina が主流となっている。特に PacBio が進んでおり、平均リードで 10kb 以上、しかも値段が 1Gb で外注で 100 万円、試薬代だけだと 10 万円で読める。ショートリードでも HiSeq だと 1 レーンあたり 25Gb、MiSeq でも 1 ランあたり 8Gb ほど読める。さらに 5-10 年後には Nanopore やその後継でより容易に高精度に解読できるようになると考えられる(図 5-3-9-2)。ゲノムシーケンスも、イネ参照ゲノムを作るのに数百億円かかったが、今 PacBio で同じようなことをすれば約数千万円。今後は数百万円できるようになると思われる。今まで NGS で読んでアセンブルして 10kb ぐらいの N40 の精度で Nature 系の論文に出すことは可能であるが、それが使い物になるかということ。今こそ、リファレンスクラスのゲノムを安価にシーケンス出来る時代なので、精度の高いものをつくるべき。

遺伝子を見つけてそれを組み合わせてというピラミッティングみたいなゲノム育種、マーカー育種や GWAS、GS という作物自体を良くしようという 1 つの道がある。もう 1 つは栽培環境が違えば同じ品種でも収量に差がでるように、栽培環境を大規模に改善するという道もある。

最後に大量ゲノム情報の可視化ということで、ゲノムブラウザを発表している。今でも 100

程度であればゲノム間の SNP の違いを見ることが出来る。それを数千ゲノムとかを可視化することが大きなテーマとなる。

質疑応答

Q:大量のデータ解析において解読グループはどのような体制が良いのか。BGI みたいに一か所にどこかに集めるのが良いのか、または民間に任せるのか。

A:イメージとしては集めてしまうよりもそれぞれの課題ごとに解析できるのが良い。遠隔地からだと非常に大変。人が育たないというのも色々理由あるかと思うが、単純にポストがないというのが理由ではないか。そこでポストがあって仕事があってということが分かれば若い人もその道に進むのではないかな。パーマネントにつながるようなポストが必要。

5-3-10. データ主導型イノベーションにむけて～ヘルスケアから農作物の育種へ～ ＜桜田一洋 シニアリサーチャー：(株) ソニーコンピュータサイエンス研究所＞

実世界のデータに基づいた植物研究は非常に重要である。バイオメディカル研究では、近年基礎研究の成果が実世界の問題解決に役立っていないことが指摘されている。そこで、仮説主導型研究からデータ主導型研究への転換が求められており、同様の問題は植物科学においても起こり得ると考えるからだ。神戸 COI ではライフコース・データに基づく健康医療情報プラットフォームの構築と、膨大な個人のデータに基づき予測と予防を可能とする新しいパブリックヘルスの実現を目指して研究を行っている。本テーマは挑戦的なものであり簡単には実現できないが目指さなければならない方向であることは明確である。

国が主導したトップダウンの研究開発を成功させるためには解決すべき問題をまず明確にすべきである。植物工場のようなものを目指すのであれば今日の私の議論は必要ない。私が考える解決すべき問題は持続可能な社会と環境の創出である。そこから持続可能な農業という問題が発生する。自給自足、多様な環境への適応、自然環境への共生などを農業の問題と考え、農業の健全性や農作物の健康は一義的に定義できない。それは前提条件によって求められる特性が異なるからだ。従って持続可能な社会と環境を創出する新しい技術を開発するには構成要素の因果関係に基づく *in silico* シミュレーションとフィールドのデータに基づくビックデータシミュレーションの同化によって問題解決を行う研究が必要である。(図 5-3-10-1)。

生命は、相互作用する中で状態を変えるという共通の特性を有している。そのため前提条件が違っていると、そのシステムの構成要素の機能は変化する。つまり生命システムでは普遍的/不変的な機能は定義できないことになる。その意味で、これからのシミュレーションは従来の分子生物学的推論では行ってこなかったことを推論しないといけない。システムバイオロジーはロバストネス、安定性で推論を行ってきたが、安定性では未来の予測は出来ない。安定性に変わる変化の原理に基づく推論が必要である (図 5-3-10-2)。

一方で生命現象を機械のアナロジーで論じる誤謬を克服する必要がある。例えば半導体は非常に複雑な部品であるが、エンジニアによって設計されたものであり、最終的に形成される秩序は最初から決まっている。しかし生物の秩序は、このような外部観測者視点を取ることが出来ない。生物では設計ではなく発見的 (ヒューリスティック) に秩序を形成する。そのことを踏まえて推論を行う必要がある。すなわち発見的なシステムを機械のアナロジーでシミュレーションした瞬間にどこかで齟齬が生じることを常に意識しておくことが必要であ

る（図 5-3-10-3）。

発見的に秩序形成するシステムに特徴的なのは獲得形質に代表される累積性の問題である。ここでの獲得形質とは **epigenetics** だけでなく、体細胞適応の問題も含まれる。獲得形質を推論に組み込むということは、遺伝と環境要因という説明変数の結果生じた形質という目的変数が次の説明変数になることを意味する。つまり累積性の問題を考慮すると生命の因果は線形にはならない。従って生命現象の予測と制御の問題は定常変化のモデルでは解くことはできない。それは変化に環境変化という外部性が存在するからだ。従来の生物学が扱ってきた再現性のある問題はうまくシミュレーションできるが、外部要因の累積によって時間発展する問題は定常変化モデルでは推論出来ない（図 5-3-10-4）。

このようなシステムを理解するには演繹と帰納を同化する必要がある。**Trillion Sensors universe** の構想に代表されるようにセンサーの発達から実世界のデータを大量に取得できるようになったことで、演繹に偏った科学を適切なバランスに戻すことができるようになってきた。（図 5-3-10-5）。

因果モデル、微分方程式を用いた数学モデルは機械モデルをベースにしているため、ダイナミズムとして累積性の問題が含まれていない。しかし累積性の問題は実世界の時系列のデータを状態空間モデルによって離散化することで定常領域に分割して示すことができる。従ってオブジェクトの属性に基づく推論を全面的に排除する必要はない（図 5-3-10-6）。

一方でオブジェクトの属性とは異なる観点でデータを解析する必要がある。それが文脈に基づく推論である。文脈は前提条件と言い換えることも可能である。現在のビックデータ解析は文脈に基づき行われているわけではない。従って文脈の相似性に基づく推論を使ってビックデータを解析する方法を新たに開発する必要がある。具体的にはオブジェクトを時間変化する自律分散システムとして定義し、システムの状態変化を **Descriptor** によって表現することである。同様にシステムの局所環境の変化も **Descriptor** によって表現する。大量の **Descriptor** を集めて機械学習によって解析することで似たような状態変化を示すシステムを層別化し、環境変化と組み合わせることで因果関係を推論することが可能になる。同じようにフィールド中の植物を **Descriptor** として表すことが出来れば、植物の変化を予測することが可能になるだろう（図 5-3-10-7）。

Descriptor というのは、ある時点での生物の状態、環境状態をベクトルとして表現し、時系列変化を行列式として表わすので、推論においては **Descriptor** の行列式を分析することになる。似ている状態・変化を示すものを比較するだけでなく、この中から生物の構造・機能モデルに依存しない形で因果関係を類推する（図 5-3-10-8）。

データ同化とはモデルと実測値の同化を意味する。生物学の場合も同様に、フィールドの実測値と生物モデルを合わせることである。その鍵となるのは離散化である。離散化によって、入出力モデル、統計モデル、実データに基づくパターン分けの関係を明らかにすることである。そのことで、フィールド型ビックデータと構造機能モデルが上手く統合される。この生物学的データ同化を成功させるには **Descriptor** をどう定義して、何を測るかを見定める必要がある。その際、できるだけ仮説に基づくバイアスが生じない工夫が必要である。研究において、あることに興味がある人は、特定の変数に偏向する傾向がある。一方ですべてを計測すると膨大な費用がかかる。日本が求める農業のポテンシャルを定義して、ある程度枠をはめて、計測と推論を進めるなかで植物に対する理解が深まり、バリエーション豊かで実

世界の問題解決につながるサイエンスが創出されるだろう。

5-3-11. 植物デザインシステム：ベンチャー企業の視点から

<高根健一 代表取締役社長：(株)インプラントイノベーションズ>

インプラントイノベーションズは国内唯一の植物専門受託サービス事業を行っている会社であり、農業関連サービスも始めている。会社の理念としては、「植」文化の創造を目指し、植物のもつ機能をバイオ技術を用いて高めることで社会に貢献するということである。植物を作っていく中で、日本国内では遺伝子組換え技術を用いて商品化するところが、一番ハードルが高い。遺伝子組換えの技術に対応したサービスも行っているが、国内の企業が受託してきた大半は食よりも薬用成分、機能性タンパク質、バイオエタノール、紙、花卉に関する開発である。

使う側から見た場合に考えられる研究開発としては、「サブウェイ」方式による高機能植物開発システムの構築と活用実証のようなものがあると良い。日本国内には様々なデータが揃いつつある。その中で論文となったものの集積が案外少ない。特に「食」以外のデータはあまり揃っていない。そこを支えるデータがあると日本の企業に利益がある。コンサルティング会社と話をすると、食料以外のものを生産するにあたって栽培国をどこにするか、その栽培地の気候はどうか、病害虫への対策、遺伝子組換えが良いかという問題も含めて、総合的に判断して出口から開発を進めていく企業もある。そういった形でできるサブウェイ方式ということもあるのではないかな。また出口から考えると、国民からテーマを募集して植物を創造するというのも良いのではないかな（図 5-3-11-1）。

5-3-12. 野菜種子市場

<酒井隆子 代表取締役副社長：みかど協和株式会社>

みかど協和株式会社は Vilmorin and Cie（仏）の連携のもと、日本で初めて合併した種苗会社である。野菜種子の育種・生産・販売を行っており、リマグラングループとしては世界 2 位である。世界の野菜種子市場としては多国籍（モンサント、リマグラン、シンジェンタ）、オランダ（リュックズアン、エンザザーデン、ベジョ）、日本（サカタ、タキイ）といった 3 つの大きなグループで構成されている（図 5-3-12-1）。リマグラングループは農協母体のグループ。総売り上げの 30% を研究投資しており、上流域研究への関心も高い。地域に拠点をもっており、地域に根差した研究開発を行っている。日本における野菜種子会社の売り上げはそれほど大きくない（図 5-3-12-2）ので、研究規模は小さい。例えば遺伝子組換え体などは社会的受容がないこともあるが、コストに合わないということも要因である。

種苗会社の開発過程のイメージとしては、課題探索、遺伝資源探索、系統育成で 5-15 年かかる（図 5-3-12-3）。最近では DNA マーカーを用いて時間の短縮を図っている。現場も変遷していて、種に対する要求度は非常に上がってきている。野菜種子業界における研究トレンドとして、ここ 10 年で大きく変わったのは DNA マーカーの開発。ただ、形質とデータをどう連動させるかは出来ていない。各国で遺伝資源に対する投資が減っており、遺伝資源自体が減っている。販売種子に対する技術開発を行っている。NBT に関しては non-GM であればパラダイムシフトになると考えられる。そのためには様々な品目に対する培養技術や全能性誘導技術を開発する必要がある（図 5-3-12-4）。

5-3-13. 植物デザインシステム：育種企業からの視点

＜山根精一郎 代表取締役社長：日本モンサント株式会社＞

育種支援の植物デザインシステムの開発は、植物を扱っているものにとっては究極の目標の1つではないかと思う。簡単かというとは非常に問題が多いのではないかと。本当にやるとすると20-30年の投資と期間が必要。日本が先端になるのだという覚悟が必要。問題点の1つはオミクスデータが出ているが、そのデータはある時点のある組織のデータ。時間軸でデータを取り、それをコンピュータで解析するという流れがないと難しい。発芽してから収穫までの期間にトランスクリプトームやメタボロームがどう変わるのか、それをつかまなければ難しい。転写因子を動かしてストレス耐性があがったとか、収量があがったとしても、何が原因でそのようなアウトプットが出てきたかというのは、今のオミクス技術では分からない。そこに環境が変わると全部変わってしまう。時間軸、組織、環境、これをどう統合したデータベースを作れるのか。もしこのようなデータベースが作れたら、非常に早く育種が出来る。そのため、究極の目標と考えている。

実際には、入りやすい簡単な部分と難しい部分があるのではないかと。簡単な例としては、特定の物質生産をさせるとかは、ある程度代謝系が見えてくれば、出来ると考えられる。また、1つの遺伝子、1つの機能が分かれば結果が出るというような味とか匂いは6年ぐらいでモデル化が可能になるのではないかと。しかし、収量とかストレス耐性のように複数の遺伝子がからむ場合はデータが集まってこないと難しい。問題点として、トランスクリプトームで変動するものに関して遺伝子機能が分かっているものが多い。遺伝子側の情報がかなり欠けているので、遺伝子側の研究も進める必要がある。具体的な例としては、6年ぐらいでは特定の物質生産を目指す植物デザインは可能性が高いのではないかと。それを何にするのか、医薬品にするのか、オイルにするのかの議論は必要。長期の目標としては、従来育種では出来ないとされる高効率の光合成経路に向けての植物デザイン、データが集まってこないと難しいが、これが出来ると世界は大きく変わるのではないかと。思われる。

質疑応答

Q:商業栽培の場合、広いところで行うが、遺伝子組換えは生産しやすいところを狙っているのか。

A:今までは生産効率というところでGMを用いている。生産効率の中に3つの敵（雑草、害虫、病気）があり、これらによって収量が減る部分に戻すことで、収量が上がることにつながる。企業の理念としては持続可能な農業を達成すること。持続可能な農業とは、生産性の向上、資源の有効利用、この2つを目指して行っている。収量を上げるというところでは、3つの敵への対処、乾燥耐性植物の開発。人の健康によいものもターゲットにしている。例えばオメガ3生産植物、EPA前駆体をつくるダイズの開発。

Q:農業をする場合、資源をいかに少なく投入して効率を上げるかが重要。資源の中の水利用率効率を上げるのが良いのか、乾燥耐性の方が良いのか。

A:乾燥耐性を改善すれば、水利用率も良くなるのでは。乾燥耐性トウモロコシは水利用率が高くなっている。機能としてはRNAシャペロンなので、乾燥時でもmRNAが働くような仕組みだと考えられるが、実際の細かい作用機序に関しては解析していない。

5-4. 総合討論

CRDS:全体としてハードルは高くチャレンジングではある。10-30 年を見据えた場合に必要
な技術であり、無謀でなければ行いうべきではないか。ただやり方をきっちりと考える必要
がある。デザインの部分では細かいところから作り上げる必要があり、一方フィールドで
のデータをきっちりと大量にとる必要がある。

C:コンセプトとして長い目でみれば長期間のデータを取る必要があるが、実証できることを
示すためには、短期間で実証できるような研究テーマを挙げる必要がある。そうなればヘ
ルスケアの情報と生命の融合と一緒に植物デザインもやっていけるのではないか。ヘルス
ケアの方でも発達障害など 2 歳ぐらいで出るものをどれだけ予測出来るかという短期的テ
ーマを行っている。

CRDS:短期である程度成果を出せる部分と、長期の研究が必要なもののロードマップを示
す必要がある。具体的に何が短期で何が長期かということを示す必要がある。

C:目標として物を作り出すのか、デザインが出来るということを示すのか。モデル植物でも
良いのでデザイン出来ることを示せば良いのか、それとも社会に役立つものが出ないと
いけないのか。

CRDS:短期的にはデザイン出来るものが 1 つでも出れば実証となる。社会へ出る部分は他の
施策として、そのシーズを作ることが大事ではないか。

C:植物データの自立をする方向という説明の仕方がある。エレクトロニクス分野ではバリュ
ーチェーンといって上流から下流へのスマイルカーブをとる。上流はセンサーやシーケン
スの機械を販売するビジネスの市場がある。真ん中にビッグデータの部分があってデータ
をどうやって統合するか。その後にソリューションがある。ソリューションは多様。例え
ば、東南アジアの農業から日本の農業など、下流で最も大きな市場である。ここで、真ん
中のビッグデータをしっかり作っておかないとソリューションビジネスにいかない。そう
すると、ソリューションに適用する際にも、ビッグデータの骨格をきっちりと日本独自の
ものをつくる必要がある。ビッグデータのところは三層構造で、NoSQL データモデルと
いうベースのモデルがあり、その上にリンカーモデル、最後にユーザーインターフェイス
という使う人がどう使うかという三層構造の骨格をきっちりと研究者の中でデザインし、
オールジャパンで統一すればそれは色々な企業も使っていける。データの部分はエレクト
ロニクスでいうと製造部門。製造は儲からない。ソリューションが社会の役に立つところ。
だが、ソリューションは簡単にいかない。そのため、真ん中のデータのところを投資すれ
ば国際競争力がつく。それはデータの標準化、ISO 取得に至るようなプラットフォームを
構築すれば、短期的に競争力がつく。それで自立して、民間資金が入って研究が継続する
というイメージが描けるのではないか。そのようなイメージ図がないと 30 年税金を投入
する根拠が出てこない。フォーマットを標準化して、予測できる形で格納すべき。

C:フィールド側が共通のプラットフォームがない。フィールドのデータをどのように標準化
して使えるようにするのか、何を計測するかを議論する必要がある。トランスクリプト
ームを測って因果から類推しようとする、分からない遺伝子があるとそこで破綻してしま
う。医学の場合は、単にマーカーとして現象を分ける調節可能なツールとして使うのであ
れば十分使えるので、因果でなくマーカーとして使うという方法もあるのでは。そうすれ

ば全部測らなくても良くなるのでコストダウンにつながる。

C:野外での変動環境でオミクスデータを取る際、条件を統一する必要がある。

CRDS:どのような研究体制が良いか。データの取り方も含めて。

C:ポスドクを雇ってもドライ初心者なので、1年間教育をしている。そのような教育のための予算が必要。

C:学生の教育という点で、東大理学部では生物情報科学科が設立された。研究者は研究指向が強くて人材育成に本気で取り組まない。なので、学科や専攻を作るのが難しい状況である。このような状況を変えて、キャリアパスまで含めた設計をしないと人材育成は難しい。

C:エレクトロニクスが農業をやっている所も増えているので人材の需要がある。論文にする場合再現性がないといけませんが、再現性でシミュレーションを用いると辻褃合わせになる。フィールドで予測は、再現する予測とははるかに難しい。現場でやる人たちのキャリアパスが必要。このような研究費が増えれば、境界領域の人材も増えるので、最初から高いゴールを設定するのでなく、融合研究が重要だとの旗揚げをして、そこからポジションを取っていく人が増えれば良いのでは。

C:日本でバイオインフォマティクスというとシーケンスよりになってしまう。フィールドワークができるバイオインフォマティクシオンを育てないといけない。その際に目的指向型にしないと、境界領域の発展にはつながらない。

CRDS:長年、バイオインフォマティクス人材が足りないと言われて、なかなか解決に至っていないが、このような研究を継続することによって人材を育成する仕組みになれば人材が増える考える。

C:民間においても不足している部分なので、人材が育っていけば民間も採用すると思われる。

C:日本でバイオインフォマティクスというとデータベース寄りになっているので、分析や統計の人も入れる形にするのが良いのでは。

C:作物のブリーダーを育成する必要もあり。リアルなワークとデータ取りの部分は違う。ブリーダーを育てる形でデータをとれば良いと思われる。

C:企業は桁違いにデータを取って、クレームに対応出来るようにしている。研究者が見ている変数とは違う変数も見ている。

CRDS:どのようなチームが必要か。どのような能力をもつ人が必要か。

C:制御された環境でデータを取りデザインを目指すチーム、トランスクリプトームを見るチームなど、部分部分に担当するようなチーム構成が良いのでは。違うタイプの人を集める際にも、違う分野も分かろうとする人が重要。基礎寄りだが、フィールドへ展開しようとする人。

C:いきなりフィールドでのオミクス解析で分かるのか。まずは制御環境下で組み立てるのが必要ではないか。そこで再現性が出せる、デザインするということが短期的には必要かと思われる。

C:今の安定した農業条件だと変動が少なすぎて分からないことも多い。例えば、肥料を完全に抜くなどのダイナミックな条件変動が分かった時に変化のルールも分かるし、場合によってはバイオマーカーの開発につながる。

CRDS:短期的には実証可能ということを証明しなければいけないし、中長期的にはフィールドでのモデルを立てていく方向かと思われる。その際に、フィールドでのデータ収集方法

やそれを用いたバイオインフォマティクスの部分をどう扱うかという方向性があれば良いと思われる。



図 5-2-1-1

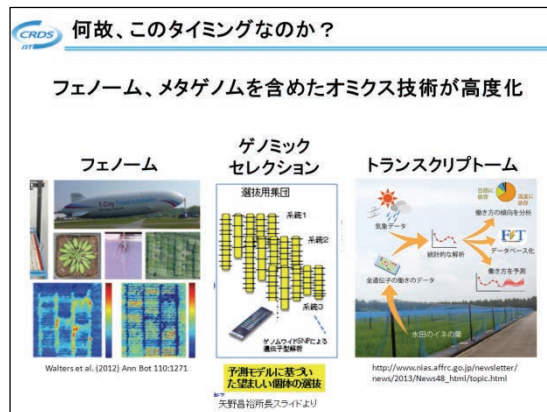


図 5-2-1-2



図 5-2-1-3

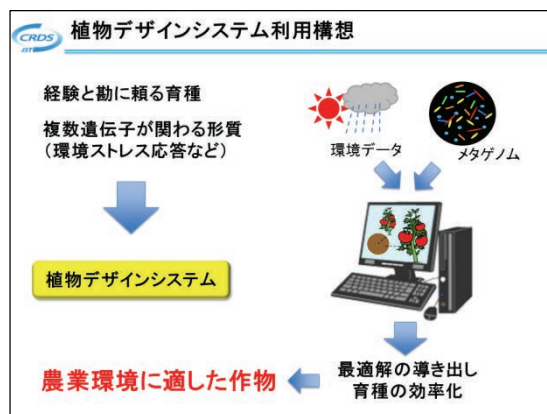


図 5-2-1-4

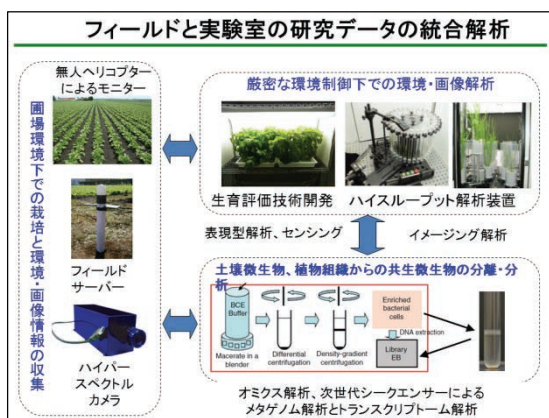


図 5-3-1-1

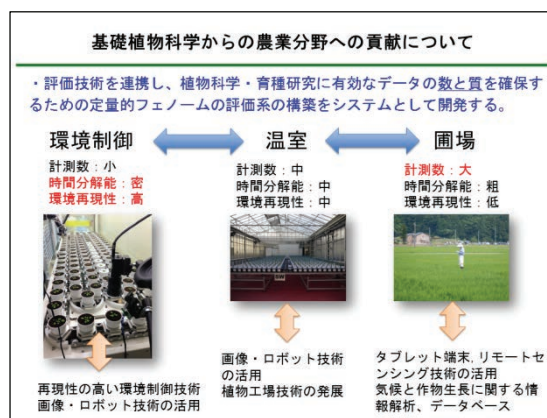


図 5-3-1-2



図 5-3-1-3

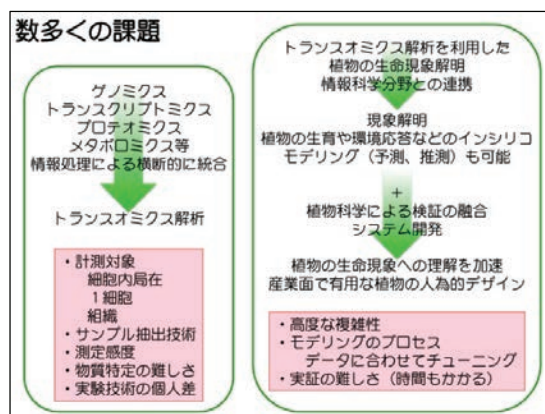


図 5-3-2-1

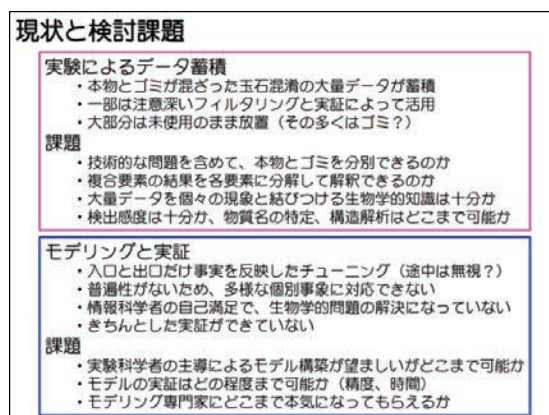


図 5-3-2-2

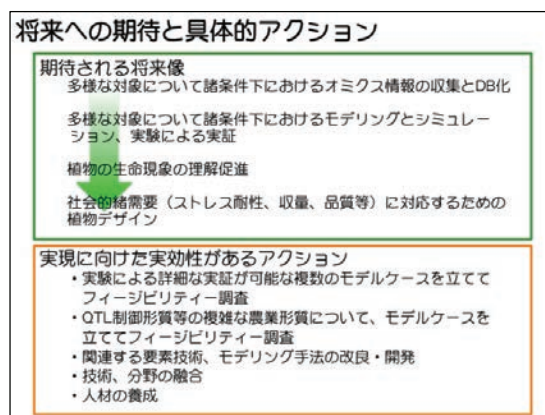


図 5-3-2-3

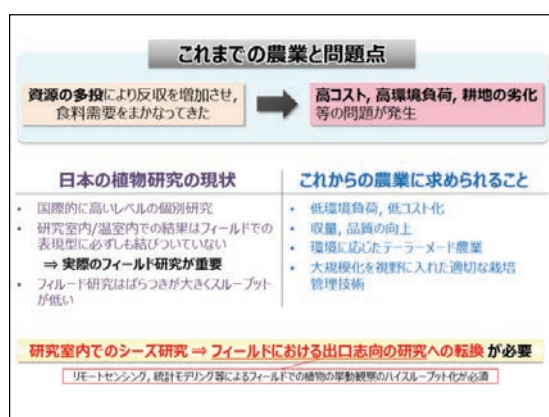


図 5-3-3-1



図 5-3-3-2



図 5-3-3-3

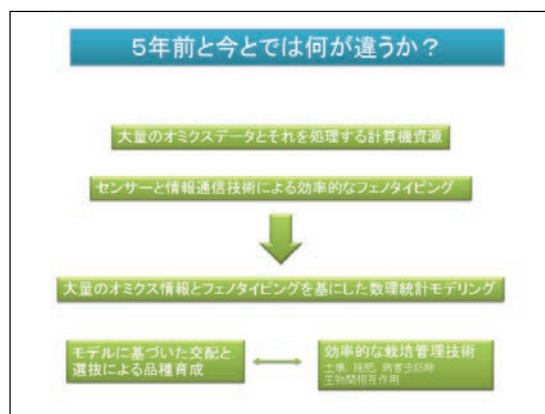


図 5-3-3-4

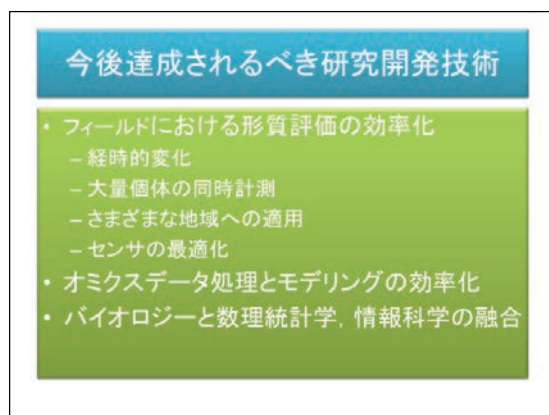


図 5-3-3-5

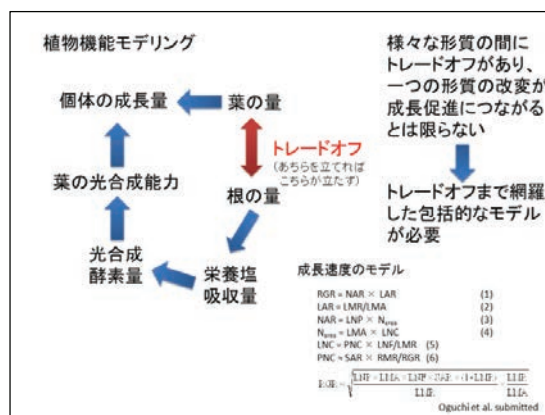


図 5-3-4-1

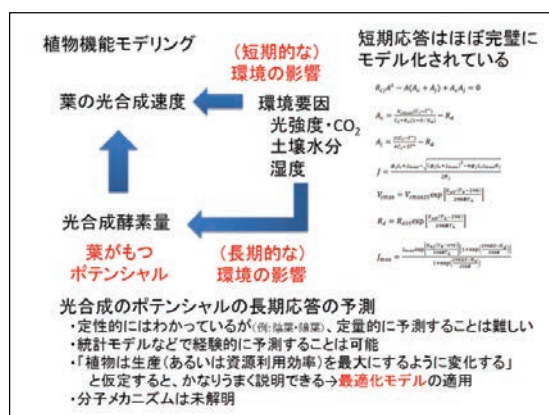


図 5-3-4-2

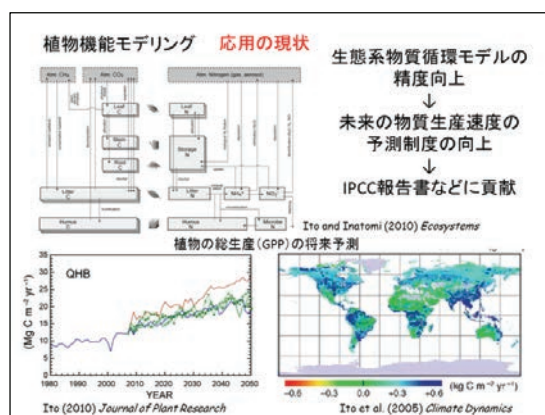


図 5-3-4-3



図 5-3-4-4

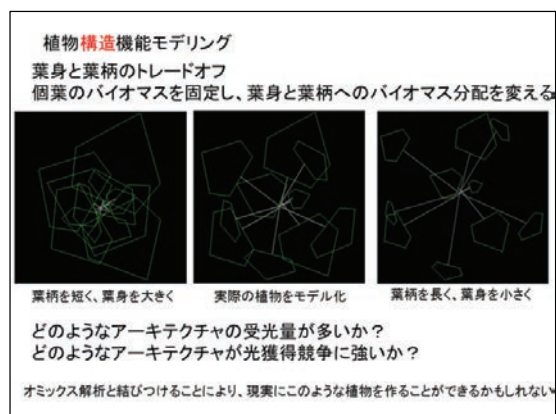


図 5-3-4-5

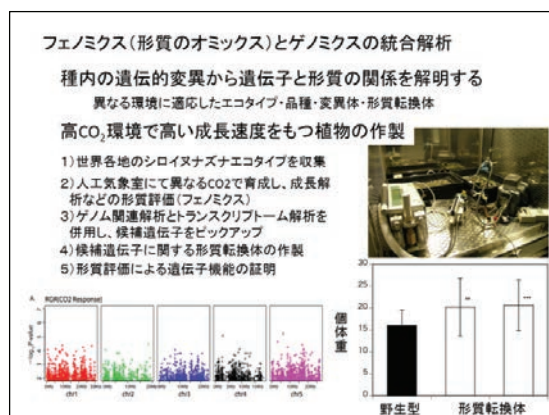


図 5-3-4-6

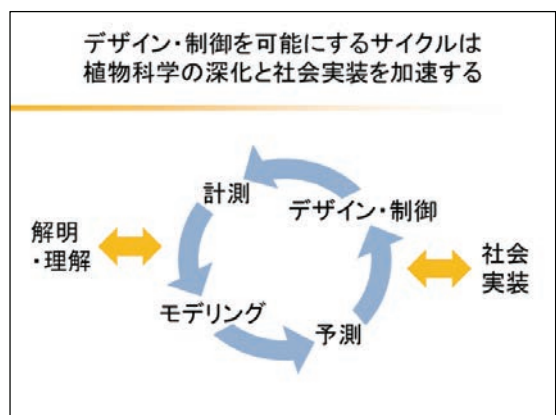


図 5-3-5-1

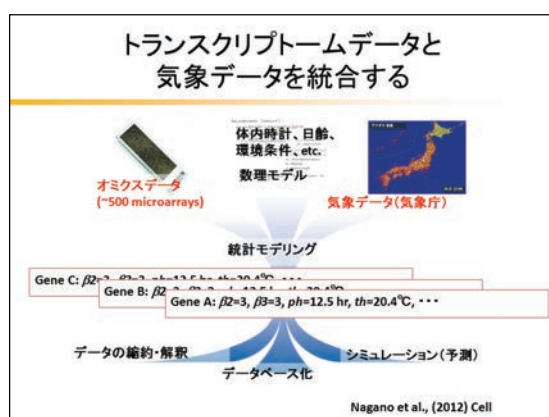


図 5-3-5-2

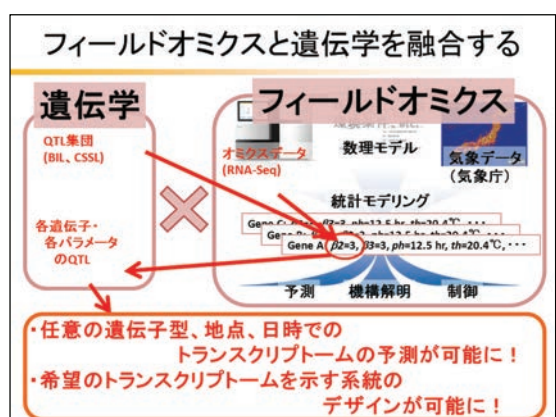


図 5-3-5-3

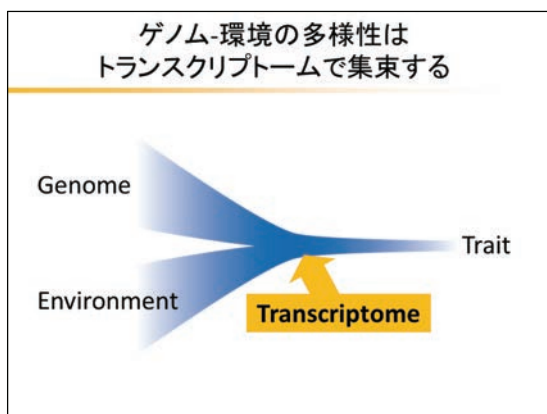


図 5-3-5-4

それを支える技術開発・導入が重要

- 計測
 - 多検体・高感度オミクス
 - ラボ・フィールドレベルでの高速フェノタイピング
- モデリング・予測
 - ヘテロな超多変量時系列データからの知識抽出・予測
 - (ベイズ)統計・機械学習
- デザイン・制御
 - ゲノミックセレクション
 - ゲノム編集
 - 高時空間分解能な発現制御技術

図 5-3-5-5

代謝工学

- 研究者による根本原理の追及
 - 生物の持つ代謝制御メカニズムの理解
 - 代謝の理解→発生、成長の理解(動物、植物)
- 社会的・経済的な価値の創造
 - 有用物質生産

図 5-3-6-1

植物の代謝モデリング (on-going study)

- まずは シロイヌナズナのカルス液体培養系で
- 代謝攪乱後の時系列メタボロームデータ
- メタボロームデータから連立微分方程式(モデル)を作る
 - 同定された~300代謝産物

図 5-3-6-2

ただちに直面した困難

- 要素技術不足からくるもの
 - 代謝産物データの空間解像度の低さ
 - オルガネラごとのデータが必要
- 生物学データのためのインフォマティクスの不足

図 5-3-6-3

生物学のデータ

メタボローム時系列データの例

- インフォマティクスの視点
 - データが汚い
 - errorが大きい
 - noiseが大きい
 - 「1点の真の値が存在する」という感覚
- 本質的なfluctuationがある

図 5-3-6-4

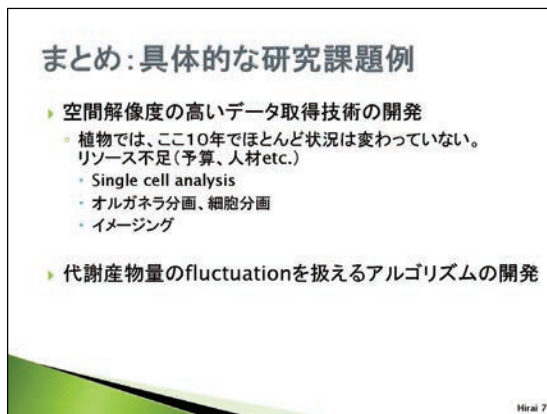


図 5-3-6-5

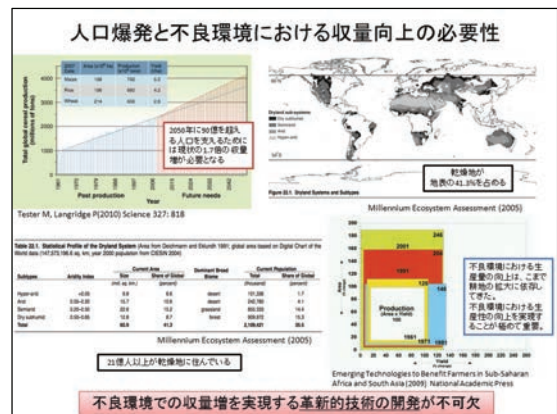


図 5-3-7-1

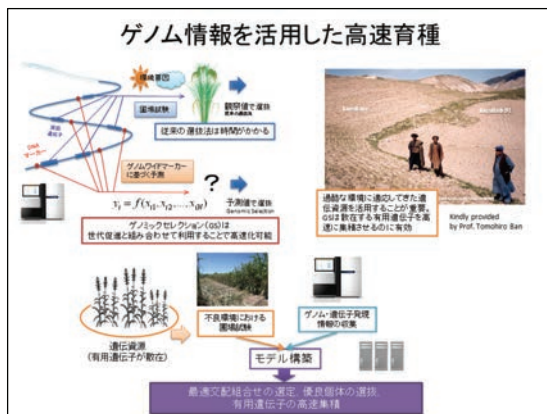


図 5-3-7-2

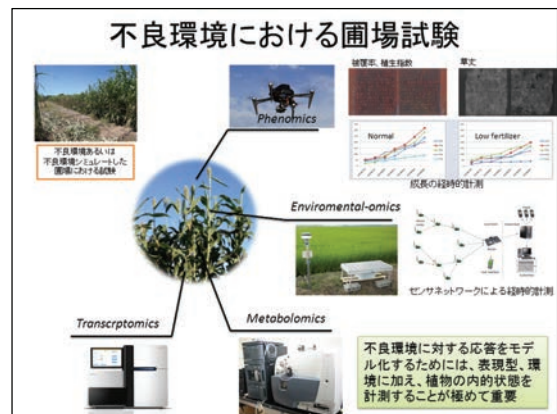


図 5-3-7-3

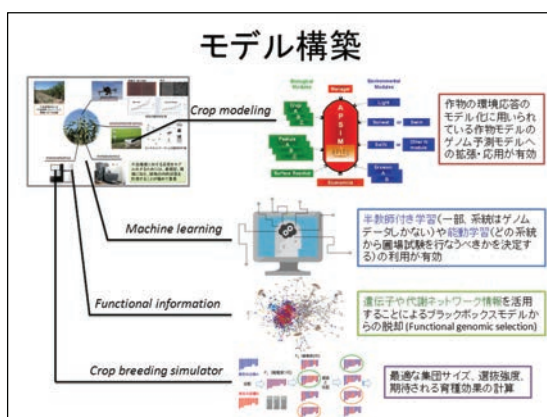


図 5-3-7-4

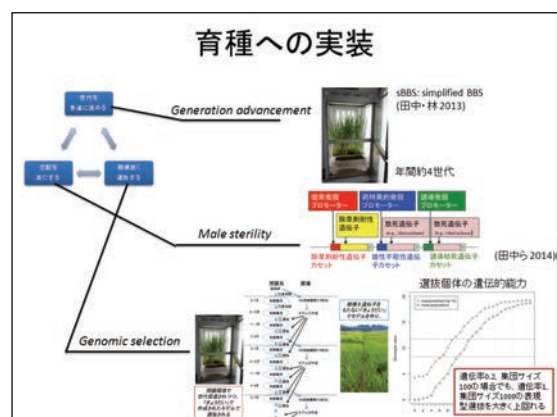


図 5-3-7-5

研究目標

- トランスオミクス情報(一次情報)の基盤整備
- 簡便・迅速・低コストなトランス・オミクス連関解析手法の確立
→ ゲノム編集やゲノミックセレクションを高精度化する知見獲得
* 重要農業形質の多くは遺伝率の低い量的形質
個体の表現型値 $P =$ 遺伝子型値 $G +$ 誤差 E
- 植物体のオミクス時空間・環境作用解析手法の確立
複数サンプル(実験条件)を用いた代謝パスウェイの解明
→ トランスクリプトーム解析; 遺伝子産物間の作用方向が不明
- トランスオミクス解析のGUI・Webツールとデータベース開発
結果を容易に解釈するためのグラフィカル・ビューワー開発
- 知識情報の集約; 機械予測は低精度。GOも大半が機械予測。
テキストマイニング法確立、マニュアルキュレーション基盤整備
遺伝子・タンパク質名のデータベース基盤整備。
→ 研究者コミュニティへの登録を推奨。

「論文等で公表された新たな「知」(科学的知見)はイノベーションの核」

図 5-3-8-1

オミックス・ビッグデータの積極的活用 ～ 国内外の動向 ～

<基盤整備>

- リファレンス・オミックス情報

ビッグデータ・トランスオミクス解析による
植物科学研究の牽引への期待
大規模オミックス情報2 急増する解析データ
新規知見の宝庫

The Oryza Map Alignment Project (OMAP)
The SOL-100 sequencing project
EnsemblPlants

Annotation of Image Segments with Ontologies

- * 同一サンプルの各オミクス層での解析が必要
- ツール: ビッグデータ解析を実現するアプローチ
- * アルゴリズム、ソフト、ハードウェア、データベース
- 人材育成
- * 特に、バイオインフォマティクスの研究者・技術者

図 5-3-8-2

オミックス・ビッグデータの積極的活用 ～ 国内外の動向 ～

<活用・応用>

- ビッグデータを活用したバイオインフォマティクス研究
例) 有用植物種の横断的なトランスオミクス解析
新規遺伝子発見、機能解析など

●より効率的・網羅的アプローチの導入
ゲノム編集技術
ゲノミック・セレクション
ゲノムワイド・アソシエーション・スタディー (GWAS)

図 5-3-8-3

具体的な研究課題例

- トランスオミクス情報(一次情報)の基盤整備
モデル農作物オミクス情報の収集、データウェアハウスへの蓄積
*ゲノム解読(アセンブル)は不完全で良い。
* 遺伝子の配列、場所が分かれば十分。
- トランスオミクス・アソシエーション解析手法の整備
表現型予測モデルの確立
一般ラボで迅速・容易・低コスト・ハイスループットに実施可
- 植物の人為的デザインに資するゲノム配列解析手法の整備
DNA配列情報とトランスクリプトーム情報から
遺伝子構造、配列モチーフや多型を高精度に同定する
- 知識情報の集約
テキストマイニング法確立、マニュアルキュレーション基盤整備
- 新規有用品種育成へのフィージビリティ

図 5-3-8-4

社会的・経済的に与え得るインパクト

<研究や開発の進展>

- ・トランスオミクス解析による新規有用遺伝子(産物)や遺伝資源を探索できる
- ・個々の環境(気候、環境浄化対象を含む)・目的に適した遺伝子型・システムをモデリングによって予測できる。

<インパクトの例>

- ・品種育成に要する年数の短縮化
- ・高付加価値農産物の開発
(アレルギー、栄養、食味、日持ち性、ポストハーベスト)
- ・医薬工業用原材料の大規模生産(低コスト化・ハイスループット化)
- ・植物工場、環境浄化、バイオ燃料、二酸化炭素削減、温暖化に適した有用植物開発
- ・世界規模では、世界人口の大半の主食であるイネの収量増加(病害抵抗性・分けつ数など)

図 5-3-8-5

植物オミクス研究の要点

- ・配列が高速、高精度、安価に読めるようになった
→ 今こそしっかりとシーケンシングする
A chromosome-based draft sequence of the hexaploid bread wheat (*Triticum aestivum*) genome
- ・シーケンサーの応用範囲は広い
→ トランスクリプトーム、メチロームなど
- ・大規模フェノタイピングやメタボローム等との組み合わせ
- ・データをどう活用するか、そのためにはどうすればよいか
→ 大量配列解析の研究開発、しっかりした体制づくり
データを人間が理解するための可視化

図 5-3-9-1

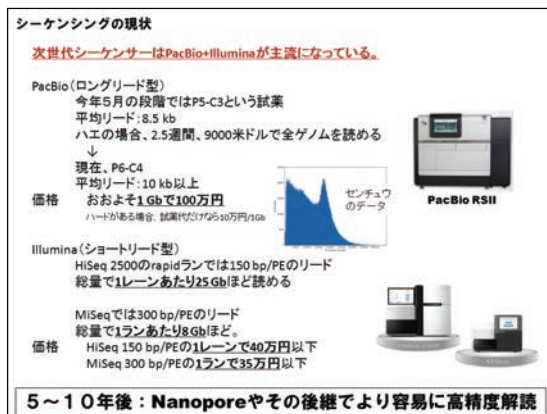


図 5-3-9-2

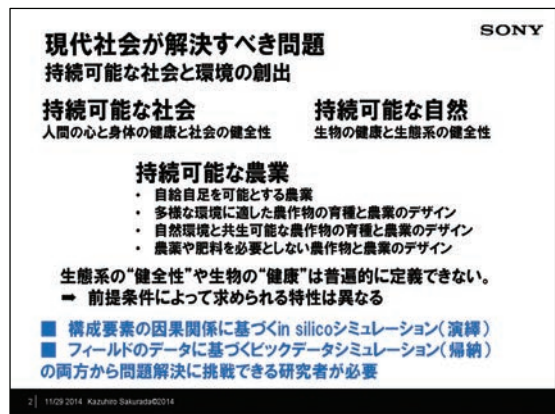


図 5-3-10-1

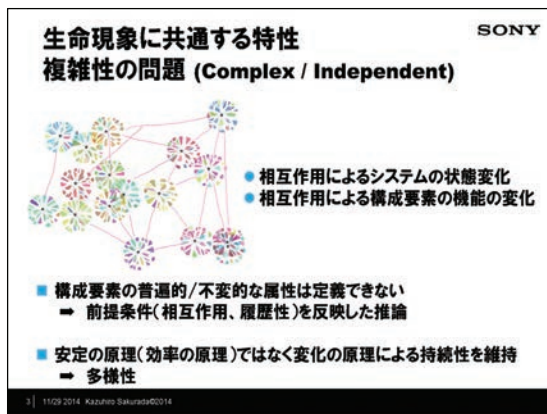


図 5-3-10-2

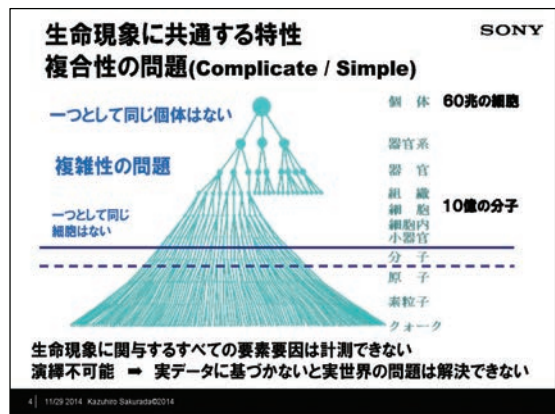


図 5-3-10-3

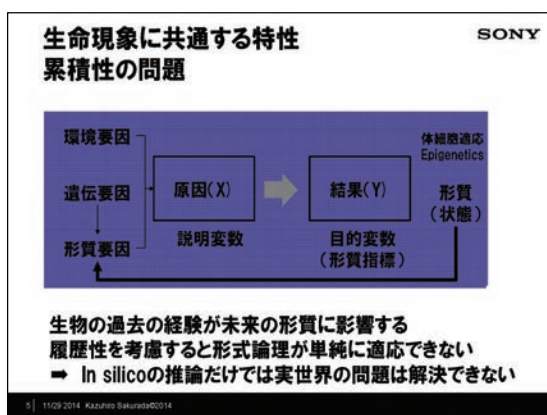


図 5-3-10-4

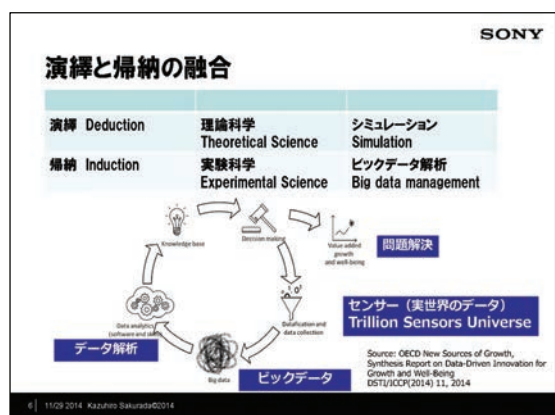


図 5-3-10-5

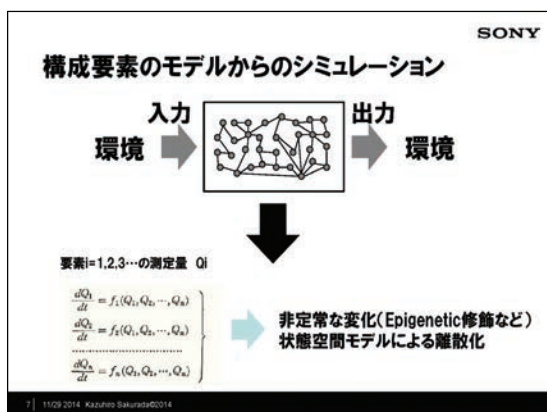


図 5-3-10-6



図 5-3-10-7

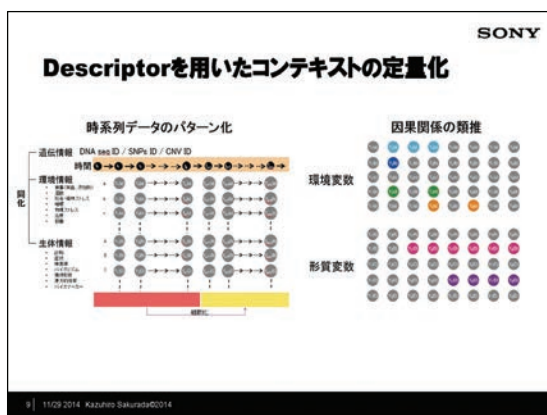


図 5-3-10-8

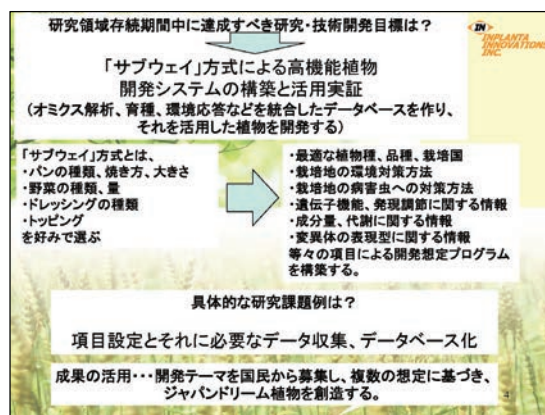


図 5-3-11-1



図 5-3-12-1

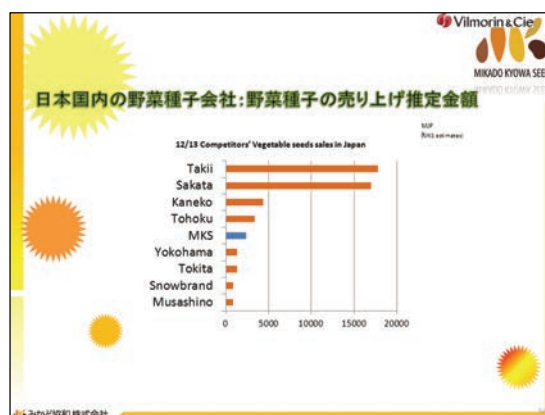


図 5-3-12-2

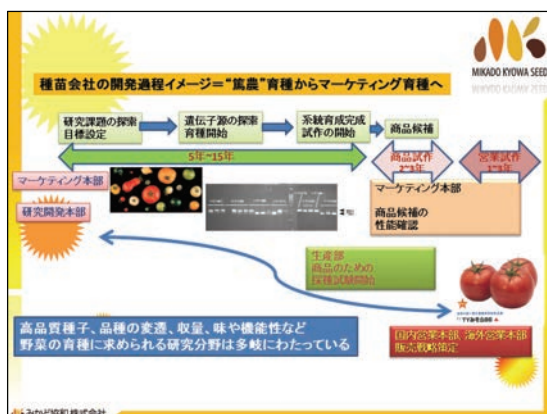


図 5-3-12-3

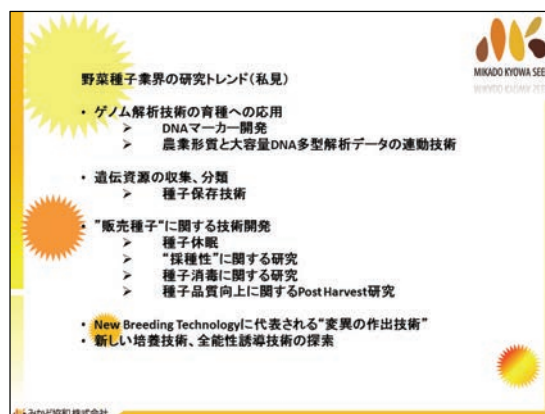


図 5-3-12-4

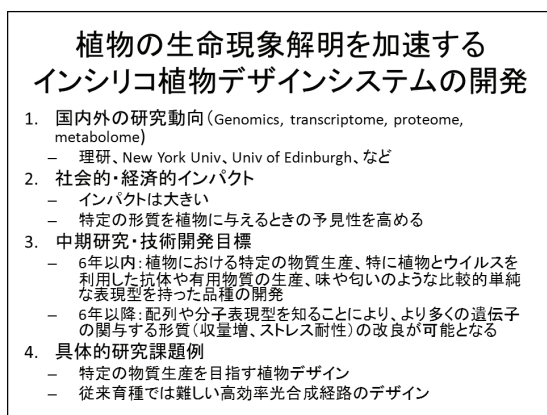


図 5-3-13-1

第6章 グリーンバイオ分野俯瞰活動のまとめと考察

6-1. 要点整理

本区分に含まれる領域は多岐にわたるが、それら全体を俯瞰した調査(図 1-2-1-1)、重要領域アンケート調査(図 1-2-1-2) およびワークショップによる議論などを通じ、重要と考えられる方向性が各サブ区分でそれぞれ見出された(図 6-1-1-1)。

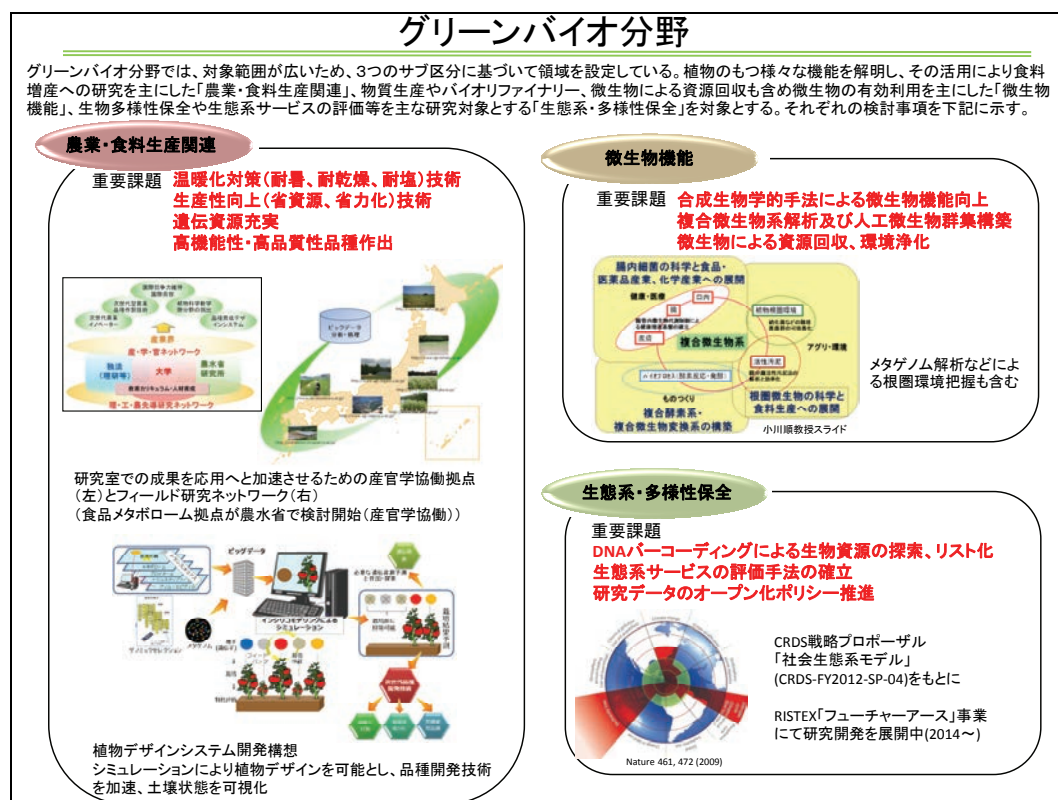


図 6-1-1-1

6-1-1. 農業・食料生産関連分野の要点

農業・食料生産関連として、下記4点が挙げられる(図 6-1-1-1)。

1. 温暖化対策(耐暑、耐乾燥、耐塩)技術
2. 生産性向上(省資源、省力化)技術開発
3. 遺伝資源の充実
4. 高機能性・高品質性品種の作出

地球規模での動向を考えると温暖化、人口増加が進行しつつある。これまでは、資源の大量消費による生産性向上が達成されてきたが、そうした農業は長くは続かないことは20年以上前から唱えられていた。また、国家間の遺伝資源のやりとりが難しくなる中、遺伝資源を充実させることは、新品種を作出する上でも不可欠となってくる。こうした持続的な農業を目指す方向の一方で、わが国の農業振興のため、「攻めの農業」に対応する品種の開発が必

要である。わが国の強みである高機能性・高品質性をシステムティックに生産することが重要となってくる。新品種開発としては、オミクス解析等をもとにシミュレーションを行う「植物デザインシステム」の構築が挙げられる。これは地域に即した品種を開発する際に、まずコンピュータ上でモデリングを行い、実際の品種作出へつなげるようにすることで、経験と勘に頼った育種をより効率的にする仕組みである。また、こうして得られた品種が実際の圃場で適応するかを大規模にハイスループットで計測する技術が必要となる。これらは産官学協働拠点を構築することや研究室内での成果を応用化するためのフィールド研究ネットワークを設計することで、より研究の加速化につながるものと考えられる。

6-1-2. 微生物機能関連分野の要点

微生物を用いたバイオ技術として、下記の3点が挙げられる（図 6-1-1-1）。

1. 合成生物学的手法による微生物機能の向上
2. 複合微生物系解析及び人工微生物群集構築
3. 微生物による資源回収、環境浄化

化学合成のみでは作製できなかった化合物を人工酵素等を用いて作出するという流れは、欧米を中心に進んでいる。一時期はバイオ燃料という流れであったが、石油由来の化成品、工業原料をバイオ技術により作製することで市場ニーズにそった化学品合成が可能となる。また微生物を利用する際、微生物を単離培養することが主流であったが、難培養性の微生物も多く存在する。そうした微生物を複合的に取り扱い、人工的に制御することにより、微生物の利用範囲が大幅に広がる。例えば根圏微生物叢や腸内細菌叢といった作物の成長や人の健康に重要な役割を果たす複合微生物系の制御方法が解明されれば、食料増産や健康医療に貢献する可能性が大いに考えられる。こうした微生物機能の向上は資源回収といった工学的な領域へと貢献する可能性があり、しかも濃度が非常に希薄でも微生物により回収できるとなると、大型設備が不必要となり、現場における回収が可能となると考えられる。

6-1-3. 生態系・多様性関連分野の要点

環境・多様性保全関連として以下の3点が挙げられる（図 6-1-1-1）。

1. DNA バーコーディングによる生物資源探索およびリスト化
2. 生態系サービスの評価手法の確立
3. 研究データのオープン化ポリシー推進

愛知目標でも言及されている、生物多様性への圧力を減少させること、生態系サービスから得られる恩恵の強化にあたり、上記課題は必要不可欠である。まず、生物多様性を保全するにも、そのリスト化などの整備が不十分なため、組織的な活用に至っていない。例えば国から予算を得た場合、データをオープンにするなどを行い、研究者でとどまっているデータを集めることでも、多くの生物多様性データが得られる。そうした基盤があつて、生態系サービスを測定することが可能となる。現状、どのように生態系サービスを評価するかが定まっておらず、その評価方法も含め、客観的な基準が必要となる。

6-2. 植物デザインシステムと次世代育種基盤技術構築のための産官学協働体制

今回、グリーンバイオ全体俯瞰ワークショップのほかに、植物デザイン分科会として別途ワークショップを開催した。この植物デザインシステムは次世代型育種技術開発において重要なシステムと考えている。こうしたオミクス解析の高度利用や形質評価技術の高度化といった、ビッグデータを活用した知の創出においては、情報科学、計測技術など異分野融合が必須となってくる。また、育種の効率を上げ、栽培条件に適した作物を作出するためには遺伝子操作技術開発、新規遺伝資源の探索、重要形質関連遺伝子の機能解明は重要となってくるテーマである。こうした基盤技術を確立させて、わが国の農業を発展させるためには、異分野融合のほかに、企業、大学、独立行政法人研究機関による産官学連携が不可欠である。

産官学の取り組みとして参考すべき組織としてオランダフードバレーが挙げられる（図 6-2-1）。オランダの農地面積は日本（456 万 ha）の半分以下であるにも関わらず、世界第 2 位の農業輸出国である。ただ、オランダの場合花卉類、牛乳などの原材料を輸入して付加価値をつけて輸出するという加工貿易モデルに近い形態をとっている。ドイツという市場が近くにあるオランダと日本を単純に比較することは出来ないが、オランダフードバレーで構築されているシステムは日本でも参照すべきと考えられる。フードバレー財団がコーディネーターを努め、食品関連企業、化学企業や大学、オランダ政府が会員として加盟しているフードクラスターとよばれる組織を構築している。その拠点は「知」の中心であるワーヘニンゲン大学に置かれている。コーディネーターの活動として下記の 5 つの目的が挙げられる。

1. 企業と研究機関、企業同士を結びつけること
2. 革新的プロジェクトの支援。技術移転、スピンオフや起業の支援。
3. オランダから EU 全域にわたり、農産物・食品分野の「知」の集積。
4. 他の農産物・食品クラスターとの国際的な提携関係の構築。連携による会員への参画メリットの還元。
5. 国際会議や展示会でフードバレーやその成果を紹介する普及活動。

こうしたコーディネーターの働きにより、非常に連携が密なフードクラスターを形成している。その中でもワーヘニンゲン大学を中心として、メタボローム解析に重きが置かれている。論文による解析を行っても、オランダ自体は全体で 12 位前後ではあるが、植物、食品に関するメタボローム解析は飛びぬけて論文数が多い（図 6-2-3）。こうしたメタボローム解析拠点では、有用成分の同定や薬用成分のスクリーニングなど科学的知見とともに企業ニーズに答える形での解析が進められている（図 6-2-4）。

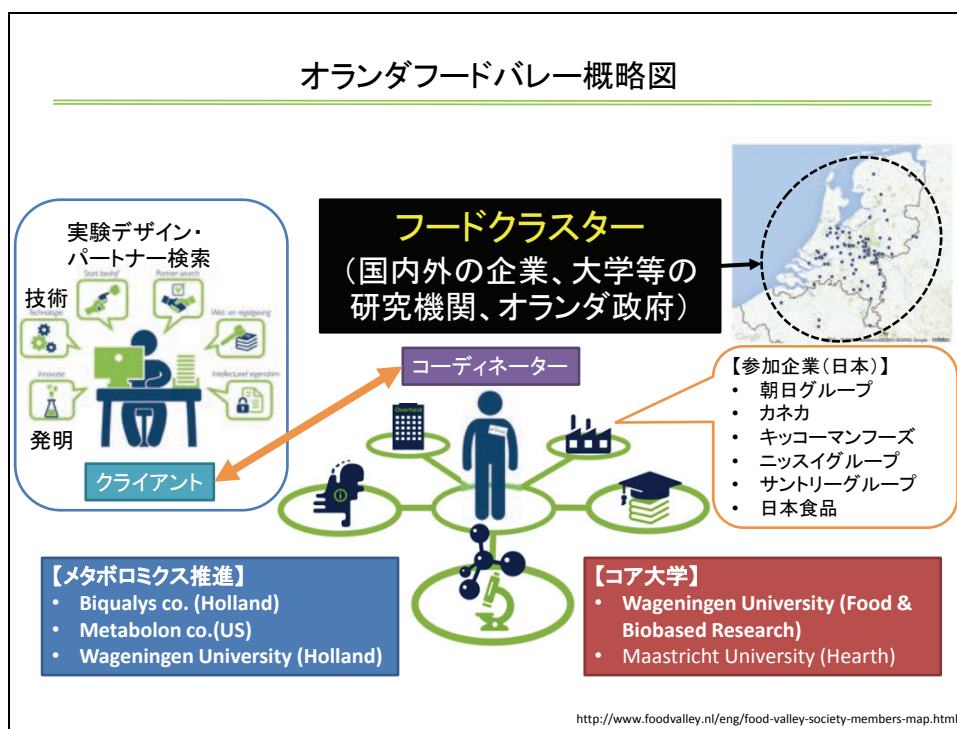


図 6-2-1

植物科学、作物科学においてオランダではメタボローム解析に力を入れている
WoSより(2014年12月5日現在)

国	件数	国	件数	国	件数	国	件数	論文全体
USA	15684	USA	1678	USA	1326	USA	422	8.7
CHINA	6520	CHINA	870	CHINA	815	GERMANY	337	2.4
GERMANY	4446	GERMANY	680	GERMANY	664	JAPAN	233	2.2
JAPAN	4093	FRANCE	542	FRANCE	528	NETHERLANDS	183	2.1
FRANCE	4021	ENGLAND	405	JAPAN	427	ENGLAND	178	2
ENGLAND	3237	JAPAN	387	ENGLAND	349	CHINA	166	1.5
CANADA	2322	CANADA	300	ITALY	303	FRANCE	128	1.3
INDIA	2079	SPAIN	279	SPAIN	295	SPAIN	103	1.2
AUSTRALIA	2026	AUSTRALIA	236	AUSTRALIA	287	CANADA	91	0.9
SPAIN	2026	INDIA	233	CANADA	242	ITALY	89	0.9
ITALY	1722	ITALY	232	SOUTH KOREA	238	AUSTRALIA	85	0.7
SOUTH KOREA	1539	NETHERLANDS	183	INDIA	210	SOUTH KOREA	60	0.7
NETHERLANDS	1405	SOUTH KOREA	155	BRAZIL	155	INDIA	50	0.7
BRAZIL	1192	SWITZERLAND	120	DENMARK	129	SWITZERLAND	49	0.6
SWITZERLAND	975	SCOTLAND	108	NETHERLANDS	127	ISRAEL	47	0.5

検索式: ゲノム (plant* or crop*) AND (genom*) AND (1995-2014)
 トランスクリプトーム (plant* or crop*) AND (transcriptom*) AND (1995-2014)
 プロテオーム (plant* or crop*) AND (proteom*) AND (1995-2014)
 メタボローム (plant* or crop*) AND (metabolom*) AND (1995-2014)
 論文全体 1995-2014

図 6-2-3



図 6-2-4

わが国が「攻めの農業」として農産物の輸出拡大を目指すならば、フードバレーのような産官学ネットワークを構築し、研究開発力を強化する必要があると考えられる(図 6-2-5)。また、大学等のシーズを企業へと受け渡し、逆に企業ニーズを大学等への研究開発につなげるコーディネーターが必要であろう。平成 26 年度第 1 次補正予算により、農林水産省農林水産技術会議事務局において、メタボローム解析研究を推進する「技術革新を加速化する最先端分析技術の応用研究支援事業」が開始された(<http://www.maff.go.jp/j/supply/hozyo/gikai/150114.html>)。この事業ではプラットフォームの構築と国際的なネットワークハブとの連携体制を構築することが求められている。こうしたプロジェクト内で、コーディネーターの養成も行い、メタボローム解析拠点にとどまらないフードバレーとしてのシステムを構築すべきかと考える。

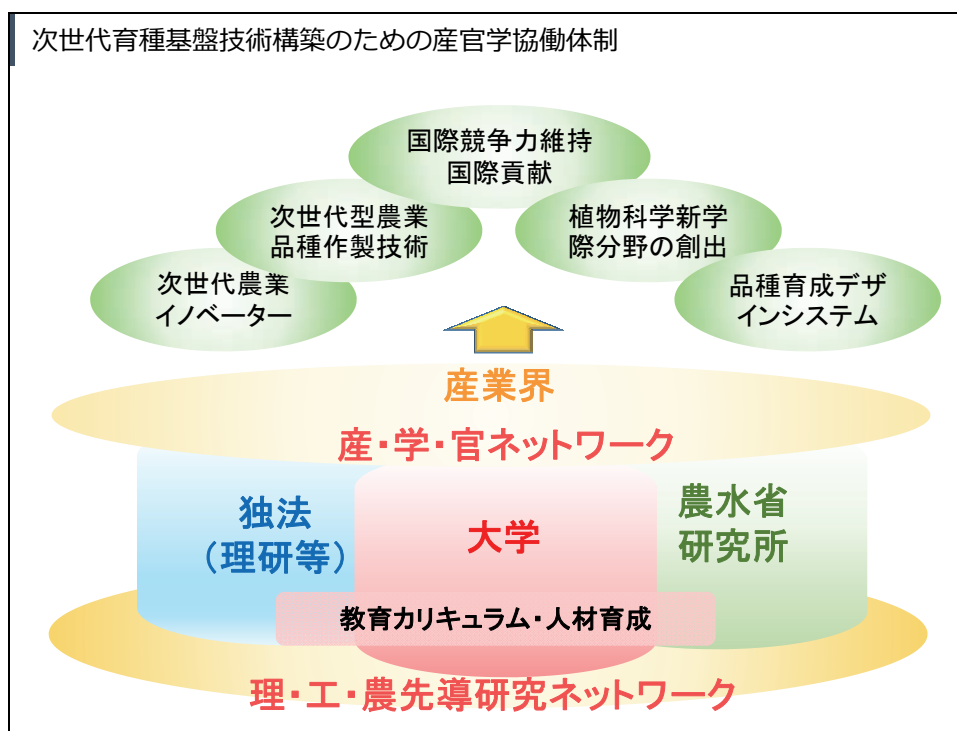


図 6-2-5

第7章 おわりに

本ワークショップ、分科会では、グリーンバイオ分野に関する俯瞰的な検討を行うことで、社会的な課題解決につながる研究開発戦略の抽出を行った。本報告書では植物・作物研究を中心としたグリーンバイオテクノロジー分野とともに微生物を用いたホワイトバイオテクノロジー分野や環境保全や生態系に関するテクノロジーも包含する形となっている。農業分野のみならず様々な分野で本分野が貢献できる可能性が見出された。具体的な研究課題の検討、期待される研究成果、国際競争力等の分析を加えた上で、更なる検討を行い、研究開発戦略の提案へとつなげる予定である。

付録

付録 ワークショップ参加有識者 (五十音順)

伊藤 剛	農業生物資源研究所ゲノムインフォマティクスユニット
伊藤 元己	東京大学大学院総合文化研究科
岩田 洋佳	東京大学大学院農学生命科学研究科
江面 浩	筑波大学生命環境系/CRDS
井澤 毅	農業生物資源研究所植物科学研究領域
今井 真介	ハウス食品グループ本社株式会社中央研究所
小川 順	京都大学大学院農学研究科
木下 俊則	名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所
倉田 のり	国立遺伝学研究所系統生物研究センター
小西 康裕	大阪府立大学大学院工学研究科
小鞠 敏彦	日本たばこ産業株式会社経営企画部
近藤 昭彦	神戸大学大学院工学研究科
坂本 亘	岡山大学資源植物科学研究所
斉藤 和季	千葉大学大学院薬学研究院
酒井 隆子	みかど協和株式会社
桜田 一洋	株式会社 ソニーコンピュータサイエンス研究所
篠崎 一雄	理化学研究所環境資源科学研究センター
柴田 明夫	株式会社 資源・食糧問題研究所
高根 健一	株式会社 インプラントイノベーションズ
田畑 哲之	かずさDNA研究所
堤 伸浩	東京大学大学院農学生命科学研究科
津村 義彦	森林総合研究所 森林遺伝研究領域 (現：筑波大学生命環境系)
永野 惇	京都大学生態学研究センター
西澤 直子	石川県立大学生物資源工学研究所
橋本 隆	奈良先端科学技術大学院大学バイオサイエンス研究科
彦坂 幸毅	東北大学大学院生命科学研究科
平井 優美	理化学研究所環境資源科学研究センター
福田 裕穂	東京大学大学院理学系研究科
藤原 徹	東京大学大学院農学生命科学研究科
古木 利彦	株式会社 サカタのタネ
松本 隆	農業生物資源研究所 農業生物先端ゲノム研究センター
矢野 健太郎	明治大学農学部
矢野 昌裕	農業・食品産業技術総合研究機構 作物研究所
山口 裕文	東京農業大学農学部
山根 精一郎	日本モンサント株式会社
渡部 靖夫	法政大学生命科学部

■報告書作成メンバー■

浅島 誠	上席フェロー
三浦 謙治	フェロー
辻 真博	フェロー
児山 圭	フェロー
飛田 浩之	フェロー
峯畑 昌道	フェロー
矢倉 信之	フェロー

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2014-WR-17

俯瞰ワークショップ報告書

ライフサイエンス・臨床医学分野 ～主にグリーンバイオ分野を中心に～

平成 27 年 3 月 March 2015

ISBN978-4-88890-430-8

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・臨床医学ユニット

(※2015 年 4 月から法人名称が国立研究開発法人科学技術振興機構に変更となります)

Life Science/Clinical Research Unit, Center for Research and Development Strategy

Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 番地

電 話 03-5214-7481

ファックス 03-5214-7385

<http://www.jst.go.jp/crds>

©2015 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.

