CRDS-FY2015-RR-08

調査報告書

グリーンバイオ分野における研究開発の重要課題と統合的推進

～イノベーション創出と持続可能な社会の形成へ向けて～

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

エグゼクティブサマリー

国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）（以下 JST-CRDS と表記）は、科学技術に関する網羅的な動向把握（俯瞰調査）、分析、提案を実施する公的シンクタンクの 1 つである。2014 年 7 月、CRDS メンバーを中心に JST 内で横断的に組織されたグリーンバイオ横断グループは、グリーンバイオ[注)] 分野の技術に関する科学研究の現状分析や、諸外国の橋渡し研究の現状調査をもとに、わが国の課題の抽出・分析を行なってきた。本調査報告書は、上記の調査結果をもとに、グリーンバイオ分野の研究開発の最先端の動向を見極め、わが国の強みのある分野および優先的に実施すべき研究開発項目の提示と、その実現のための具体的方策や今後の施策立案に対する示唆を取りまとめたものである。

地球規模では、人口の増大に伴う食料問題、地下資源の乱用、CO_2 排出増大に伴う環境変動、といった喫緊の課題が山積している。国内では少子高齢化で国内の食料需要は減るものの、就農人口の激減のため、食料自給率は依然として低迷を続けると予想される。つまり今後も長い期間にわたり、国内外の両方で食料生産を持続的に維持する基盤が必要である。農業関連以外でもグリーンバイオ分野は 21 世紀の持続可能な社会の確立に向けたニーズに対応する必要がある。一つには、化石資源の燃焼や大量消費による大気中 CO_2 の濃度上昇を抑えるため、非可食生物資源のより効率的な生産と利活用、すなわち既存のオイルリファイナリーからバイオリファイナリーへの転換が求められている。このバイオリファイナリーに供する生物資源は、食料生産と競合せず、温室効果ガスの排出などの点で環境への負荷が低く、エネルギーや地下資源由来物質の投入も低い必要もある。またさらにもう一つの重要な観点は、人間活動で失われ続けている生物多様性について、その全体像および価値を把握し保全を推進しつつ、その中から利用可能な資源や情報を抽出し利用していく取り組みである。

以上のように、グリーンバイオ分野が貢献しうる研究開発領域は、(1) 食料生産と安全保障、(2) 物質生産とバイオリファイナリー、(3) 生物多様性と環境リノベーション、と幅広い。それらを広く俯瞰し、重要な研究開発課題を抽出し深く掘り下げる形で本調査報告書は構成した。

これまでの調査で明らかとなった、社会的背景と科学技術の現状に関しては第 1 章で、調査を通じて抽出した重要研究開発課題 9 項目について、第 2 章で述べた。9 課題それぞれについて、「概要」「研究開発内容」「適時性」「研究成果によって期待される効果・将来性」について記述し、内容を端的に説明する概念図を 2 つずつ示した。第 3 章では、特に「食料生産と安全保障」の研究開発領域を例に、今後あるべき研究開発体制「アグリフードピア」について言及した。第 4 章では 2015 年度にグリーンバイオ分野が企画して開催した 2 つのワークショップの内容についてまとめた。

2 章で取り上げた重要研究開発課題 9 項目について以下に示す。それぞれ、(1)「食料生産と安全保障」関連は、①、②、③、④、(2)「物質生産とバイオリファイナリー」関連は、⑤、⑥、⑦、(3)「生物多様性と環境リノベーション」は⑧、⑨の項目に主に関係する（図1)。

(1)「食料生産と安全保障」関連
- ①　高生産・環境適応植物の設計と作出
- ②　植物−微生物相互作用を利用した低肥料・低農薬化技術
- ③　バイオマス生産植物の開発
- ④　ブランド化、高付加価値植物作出技術

(2)「物質生産とバイオリファイナリー」関連
- ⑤　人工酵素（合成生物学）や化学触媒を用いたバイオリファイナリー技術開発
- ⑥　複雑系解析による新たな微生物機能（マイクロバイオーム）制御技術の開発
- ⑦　植物、微生物を用いた無機物質（リン、レアメタルなど）回収技術

(3)「生物多様性と環境リノベーション」関連
- ⑧　生物多様性情報学の充実と生物模倣学への展開
- ⑨　グリーンインフラ・エコ防減災

抽出された 9 課題は、いずれも近年急速に進展したライフサイエンス系の要素技術に立脚した研究開発である。それぞれの 9 課題が、基礎、橋渡し、小規模実践、社会実装のどの段階に主に関与するかを、図 2 に示した。個々の最先端要素技術を伸ばし、課題解決に向け複数の開発領域を組み合わせ、成果の社会実装に向け技術的ボトルネックを解決することも重要である。今後、わが国のグリーンバイオ関連分野が広範囲で進展することを期待する。

また、3 章で例示する研究開発体制「アグリフードピア」は、「食料生産と安全保障」研究開発領域の研究開発課題を円滑かつ効率的に遂行するための構造である（図 2)。産学官で「空間共有型」の協働クラスターを編成し、複数のクラスターをネットワークで結ぶものである（図 3)。「アグリフードピア」戦略組織が全体を統括し、各協働クラスターは、各地域で強みのある作物種（または科)、あるいは技術体系（例えば農業 ICT、植物工場など）ごとに組織する。この研究開発体制を取ることにより、教育・人材育成、知の共有と集約、産官学間の共同研究が可能となる。その結果として、ニーズとシーズのマッチングによる社会実装や社会貢献、新品種や新技術の創出、アグリ産業の競争力強化が図れるものと期待される。

現在、先進国を中心に、地球温暖化、資源乱用、環境破壊などの課題解決に役立つ施策として、グリーンバイオ分野技術を駆使したイノベーションの創出を目指し、多くの大規模な研究開発が実施されている。このような流れの中で、地下資源に乏しい上、財源も限られるわが国では、強みと弱みを把握し、選択と集中を考慮しながら研究開発を進めていくことが強く求められる。以上をふまえ、当グリーンバイオ横断グループは、今後重要と考えられる研究開発課題およびあるべき研究体制の方向性を示す。具体的な施策立案に本

報告書が活用され、研究開発が推進されること、またその成果の社会実装が大きく展開することで、わが国そして地球規模での持続可能な社会が実現することを期待する。

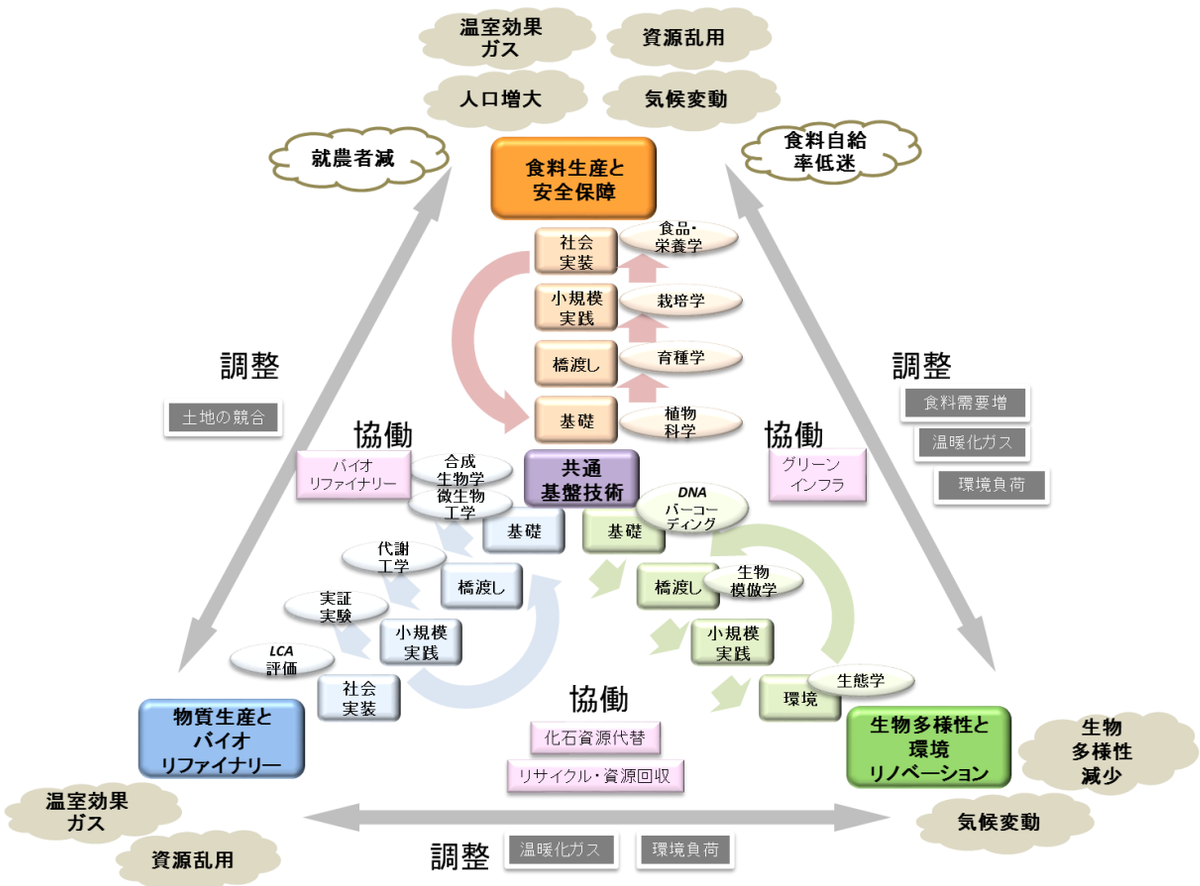


図１　グリーンバイオ分野の社会ニーズと研究開発のあるべき姿

グリーンバイオ分野社会ニーズと、3 つの研究開発領域についての模式図。社会ニーズは、人口増大や GHG（温室効果ガス）抑制など、一番外側に示した。世界規模のものは塗りつぶし、国内ニーズは白抜きで示した。それらの社会ニーズを受けて、「食料生産」、「物質生産」、「生物多様性・環境」の 3 つの研究開発領域が設定された。3 つの研究開発領域は相互作用し、協働により相乗効果や新規のイノベーションが期待できる部分もあれば（ピンク色の四角枠）、対立が生じる部分もある（グレー四角枠）。対立事項については、国の政策上の調整や、管轄省庁を超えた連携体制が必要であり、また国際間の連携も重要となる。3 つの社会ニーズに役立つ研究開発は、ライフサイエンスの共通の要素技術や共通基盤技術を持つ（中央、紫）。それぞれ基礎、橋渡し、小規模実践、社会実装のステップがあり、フィードバック機構を持った循環的な研究開発が望まれる。楕円枠でそれぞれの研究開発領域における学問分野を示した（例えば「食料生産と安全保障」の研究開発領域では、基礎の学問分野は植物科学、橋渡しが育種学、といった対応になる）。

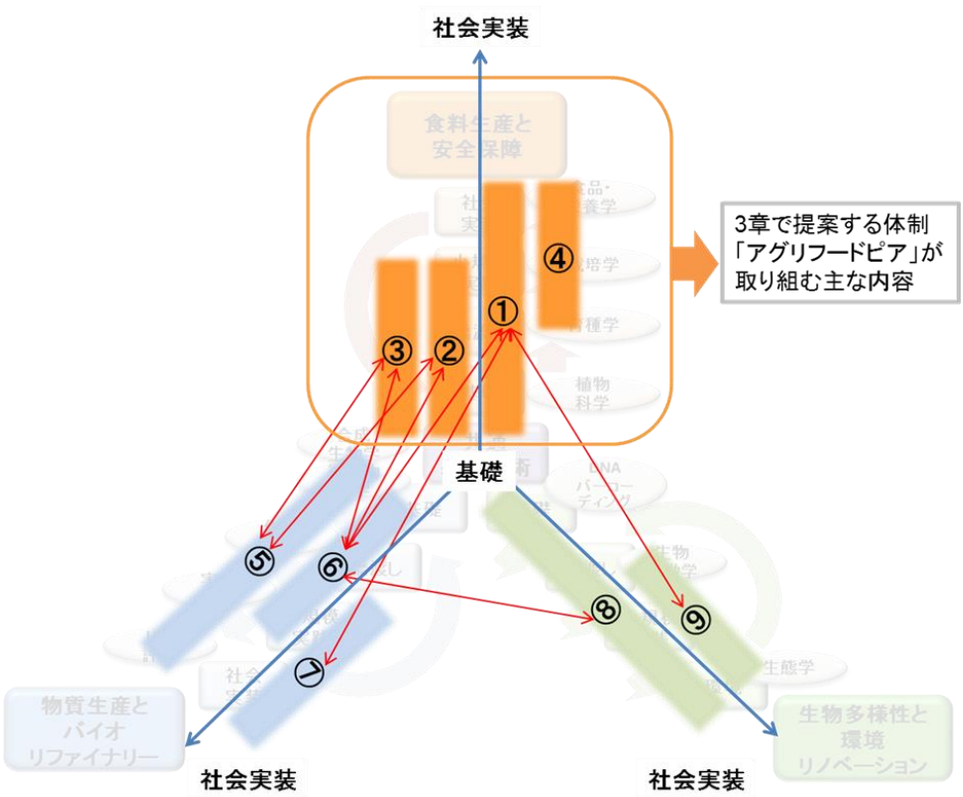


図 2　グリーンバイオ分野の重要研究開発課題　～各課題の位置づけと連関～

重要研究開発課題の位置づけを、基礎科学を中心に、橋渡し研究、小規模実践、社会実装と進むにつれ外側に位置するようにマップした。赤矢印は研究開発領域を越えて連携することで相乗効果が生じる可能性が高い課題。

※注：本報告書での「グリーンバイオ」の定義を以下に述べる。ライフサイエンス系の基礎的な学問分野から派生するバイオ技術のうち、「対象がヒト」、あるいは「応用展開がヒトの医療技術に資するもの」、以外をひろく取り扱うものとする。対象は植物、微生物および生態系である。バイオテクノロジーの分類では、”green biotechnology”は、農業関連技術に資するもののみを指すことが多いが、本報告書ではそれより広く、微生物発酵技術を利用した産業用バイオテクノロジー技術や、生態系を扱う基礎科学の学問分野から派生するものも包含する。

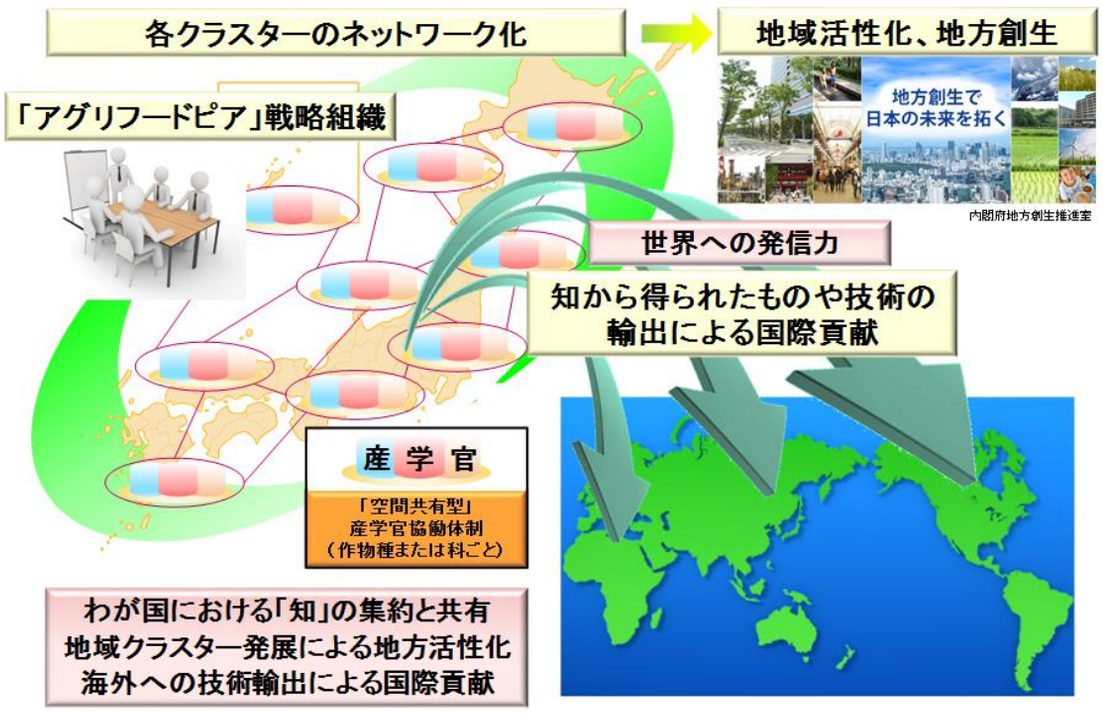


図 3　食と農の“空間共有型”産学官協働クラスター「アグリフードピア」

「アグリフードピア」は、産学官で「空間共有型」の協働クラスターを複数編成し、複数のクラスターをネットワークで結ぶ。各協働クラスターは、各地域で強みのある作物種（または科）、あるいは技術体系（例えば農業 ICT、植物工場など）ごとに組織する。「アグリフードピア」戦略組織が全体を統括し、シンクタンク機能、コーディネート機能、知財マネジメント機能、情報発信機能を併せ持つ。この体制により、教育・人材育成、知の共有と集約が可能となり、産官学間の共同研究が大幅に加速することが期待される。その結果として、ニーズとシーズのマッチングによる社会実装や社会貢献、新品種や新技術の創出、アグリ産業の競争力強化が効率的に行える。

目　次

エグゼクティブサマリー

1. 背景および概要　（現状認識および問題点） ····· 1

2. グリーンバイオ分野における重要研究開発課題 ····· 11
　2－1. 高生産・環境適応植物の設計システムの構築と生産現場への適応 ····· 11
　2－2. 植物-微生物相互作用を利用した低肥料・低農薬化技術 ····· 16
　2－3. バイオマス生産植物の開発 ····· 20
　2－4. ブランド化、高付加価値作物作出技術 ····· 25
　2－5. 人工酵素（合成生物学）や化学触媒を用いたバイオリファイナリー技術開発 30
　2－6. 複雑系解析による新たな微生物機能（マイクロバイオーム）制御技術の開発 34
　2－7. 植物、微生物を用いた無機物質（リン、レアメタルなど）回収技術 ····· 38
　2－8. 生物多様性情報学の充実と生物模倣学への展開 ····· 42
　2－9. グリーンインフラ・エコ防減災 ····· 45

3. グリーンバイオ分野の今後のあるべき研究体制 ····· 48
　3-1. 食料生産、農業現場をめぐる社会的背景 ····· 48
　3-2. 歴史的な俯瞰 ····· 49
　3-3. 産学官協働体制の必要性とその具体的な方策 ····· 51
　3-4. 研究開発課題 ····· 53
　3-5. わが国における産学官連携体制の現状 ····· 54
　3-6. 海外の産学官連携体制の詳細 ····· 56
　3-7. まとめ ····· 62

4.「グリーンバイオ分野」関連 ····· 73
　4-1. ワークショップの企画の経緯・意図・構成 ····· 73
　4-2. 各ワークショップ内容 ····· 74
　　4-2-1. グリーンバイオ分野ワークショップ（農業・食料生産関連） ····· 74
　　4-2-2. 俯瞰とスコープ抽出のための検討会」（エネルギーと生物） ····· 139
　　4-2-3. グリーンバイオ分野ワークショップ（微生物・生物多様性関連） ····· 140

付録 1. 検討の経緯 ····· 209
付録 2. 近年の我が国の戦略、基本計画との関連 ····· 211

謝辞 ····· 214

1. 背景および概要（現状認識および問題点）

【世界規模での背景】

地球レベルでの社会的背景としては、世界の人口の増加、大量生産・大量消費社会の爛熟による資源の乱用、化石エネルギー資源の大量燃焼による大気中二酸化炭素（CO_2）濃度の上昇とそれによって引き起こされる大気温・海水温上昇などの環境変動、乱開発と急激な気候変動が引き起こす生物多様性の減少など、喫緊の課題が山積している（図 1-1）。2050 年には世界人口は 90 億人を突破すると言われ、その食を支える農業についても、増産の必要があるのはもちろん、資源やエネルギーを大量投入する現状の形態を抜本的に見直す必要がある。食料以外でも、我々の身の回りの生活用品や耐久消費財の多くは、化石資源由来でありなおかつその製造過程には大量のエネルギーを必要とする。資源を乱用する社会のあり方からの脱却、二酸化炭素（CO_2）排出の削減、持続可能な社会への変換が求められている（図 1-2）。

地球上で大気中の CO_2 を固定して、炭水化物や炭化水素に変換することのできるのは、光合成を行う藻類および陸上植物である。この光合成のはたらきが、人類および地球上のあらゆる生命活動を支えている。人口増加や大気中の CO_2 濃度の上昇といった社会的課題が顕在化しつつある昨今、研究開発成果の出口を農業に見据えた植物科学の分野に、これまでになく期待と注目が集まっている。また、農業・食料以外の分野においても、私たちの生活を支えるエネルギーや化成品の原料を、石油由来のオイルリファイナリーによってではなく生物学的プロセスによる生産、すなわちバイオリファイナリーに置き換えるべく、基礎・基盤研究、応用・実証研究および産業化が世界中で同時多発的に勃興している。生物多様性は減少の一途をたどっており、その価値の全体像の把握を進める必要がある。また、多様な生物の中からどの範囲でどの程度の資源が利用可能なのか、またそれらに内包される価値ある情報やメカニズムを抽出していくための政策や学問を、国際連携や多様なステークホルダー間の議論をふまえながら推進していく必要がある。

【わが国の社会動向および背景】

わが国における社会的な背景としては、戦後の高度経済成長期において、第一次産業（その大多数が農林水産業）就業者が、第二次産業・第三次産業部門へ大規模かつ定常的に流入し、結果として現在の農業従事者の高齢化、農家の減少、耕作放棄地の増加へとつながった。加えて、1970 年代に始まった米の生産調整（いわゆる減反政策）が、農家の増産へのインセンティブをそぎ、本来ならば農業の中心かつ本流であるべき「作物増産」や「生産農業」技術の弱体化を招いた。また現在、就農人口の急激な高齢化と離農に伴い、10 年以内に農家数は半数以下に減ると予想される。この間、農家の大規模化・集約化、および TPP の影響でグローバル化も同時進行し、歴史的に見ても革命的な変化が訪れると考えられる。

農業以外のグリーンバイオ分野も含めた、わが国の特徴的な社会的背景としては、参入する民間企業が少ないことがまず第一に挙げられる。1980 年代後半には植物にもバイオテクノロジーが応用可能な時代を迎え、一躍植物バイオブームが訪れ注目を集めた。国内の大企業の基礎研究部門や、主要な食品メーカー、酒造メーカーにおいて、植物バイオおよびグリーンバイオ関連の研究が行われたものの、遺伝子組換え作物への嫌悪感から出口を

喪失し、また、バブル経済の崩壊と時期を一にして、主要企業が次々と植物バイオ部門から撤退した。企業での研究が衰退したことで、大学や研究機関での基礎研究が社会実装される経路が、ますます先細る結果となった。

今後、少子高齢化で国内マーケットは縮小するものの、世界的な人口の増大、とくにASEAN諸国での伸びが著しいと予想される。国内の需要が減ったとしても、前述した就農人口の急減の影響で、将来も食料自給率が50%を大きく超えることはないと予測される。つまり、国内で50%を確保し、海外からも50%を輸入するための生産基盤が必要である。

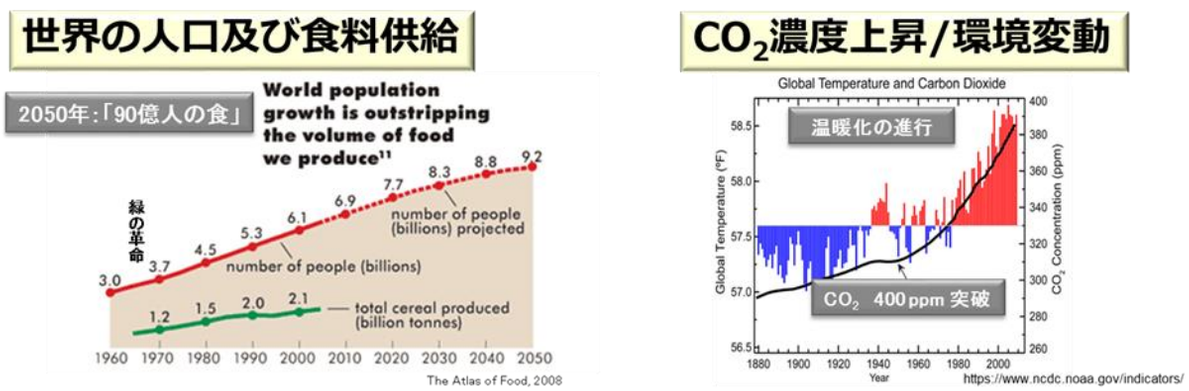


図 1-1　グリーンバイオ分野の社会的背景（世界規模）

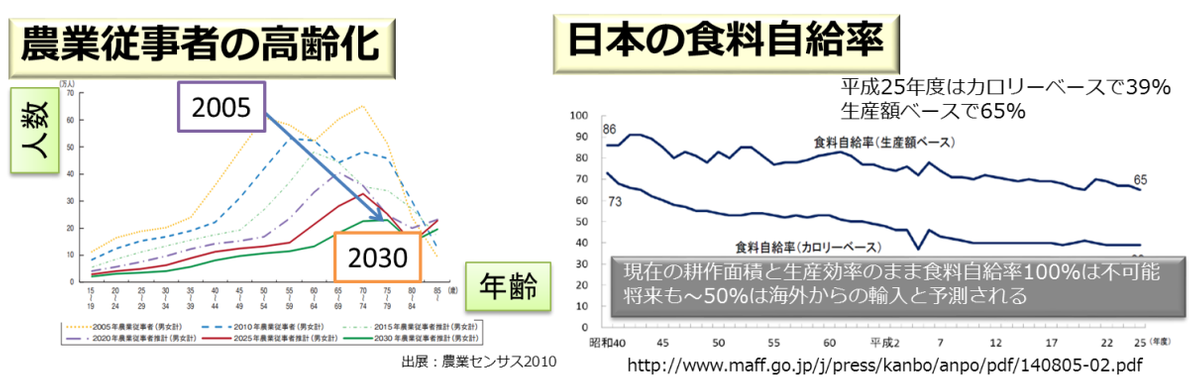


図 1-2　グリーンバイオ分野の社会的背景（国内動向）

【日本のこれまでの研究・技術動向】

一方でわが国は、基礎の植物科学分野で一定の強みを示している（図 1-2）。モデル植物シロイヌナズナおよびモデル作物イネでの研究を中心に、ゲノム解読国際プロジェクトへの貢献、花成誘導シグナル物質フロリゲンの分子実体の同定、木質形成に関与するマスター遺伝子の発見、枝分かれを制御する新規植物ホルモンストリゴラクトンの発見、花粉管誘引物質の発見、葉緑体分裂リングの発見と分子実体の同定など、マイルストーン的成果を次々と生み出した。しかしその多くが基礎研究にとどまっているのが現状である。一部それらの成果を活用することで、イネでは病害抵抗性や多収性、耐倒伏性などの形質が賦与

された優良品種が生み出されたものの、国民の米飯離れなどもあいまって、それらの研究成果の社会的評価や認知度は残念なことに必ずしも高くない。

【現状認識と課題のまとめ】

前述した多様な社会的・歴史的背景が、基礎の植物科学とその出口となりうる農学、工学との決定的な乖離をもたらし、産業へとつなぐ企業との接点をも喪失させた。社会構造の変化と農業政策、グリーンバイオ関連分野内での橋渡し研究努力の不足、分野や省庁間の縦割り構造なども複雑に影響した。結果として、基礎研究での成果や強みが、わが国の農業や他の産業分野の振興に、十分に生かされているとは言い難い、あるいはほとんど生かされていないという状況に陥っている。

【本調査報告書の扱う 3 つの研究開発領域】

地球規模でも国内レベルでもさまざまな社会的課題が山積しているなか、わが国のグリーンバイオ関連分野で得られた様々な知見や要素技術を駆使することで、その成果を社会へと還元すべきである。以上の社会的・歴史的背景と現状をふまえ、以下の 3 つの研究開発領域（1）「食料生産と安全保障」、（2）「物質生産とバイオリファイナリー」、（3）「生物多様性維持と環境リノベーション」を設定した。

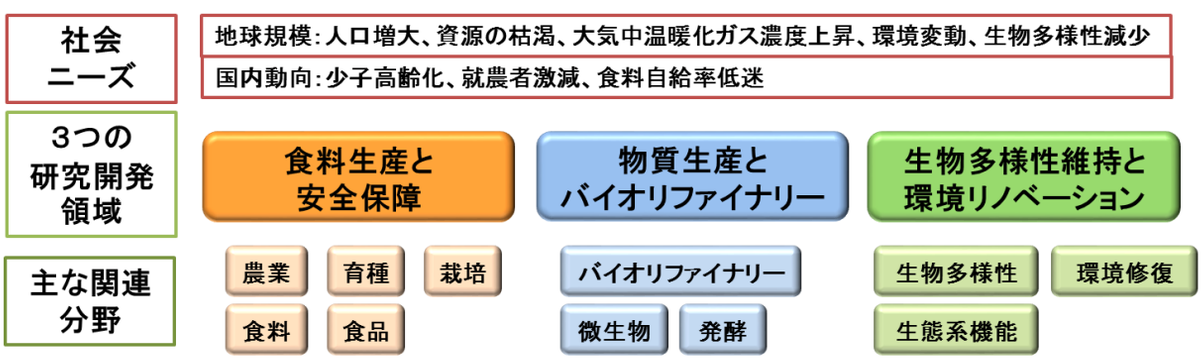
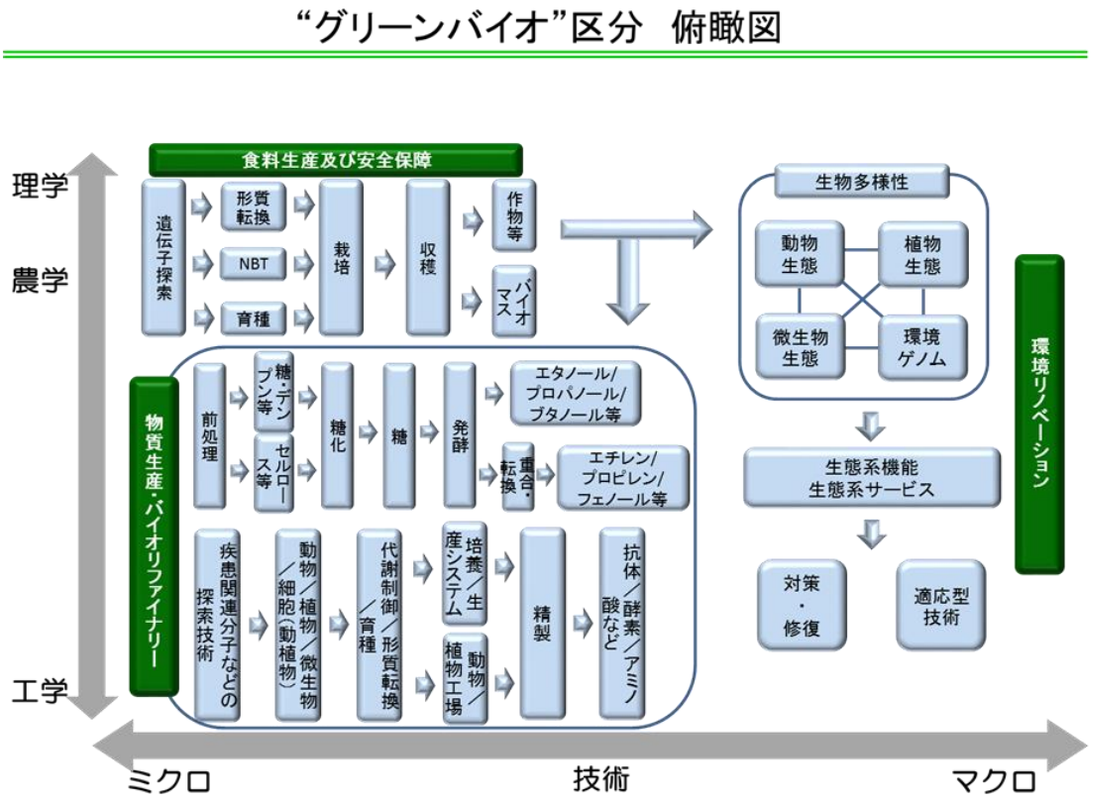


図 1-3　本報告書における 3 つの研究開発領域の設定と関連する領域

平成 26 年度、CRDS ライフサイエンス・臨床医学ユニットにて実施したグリーン区分の俯瞰調査の概観を図 1-4 に示す。同調査では、グリーン区分を「食料生産及び安全保障」、「物質生産・バイオリファイナリー」、「環境リノベーション」の 3 つのサブ区分に大別し、それぞれに含まれる研究開発領域の中から 11 領域を抽出し情報収集、分析を実施した。同調査結果については、「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」(http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/FR/CRDS-FY2015-FR-03.pdf)「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～」(http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/WR/CRDS-FY2014-WR-17.pdf) として取りまとめ、公開している。本調査報告書は、上記の俯瞰調査を通じて得られた様々な情報をベースとしつつ、社会ニーズなども十分に検討した上で今後推進すべき研究開発戦略および推進体制について取りまとめたものである。



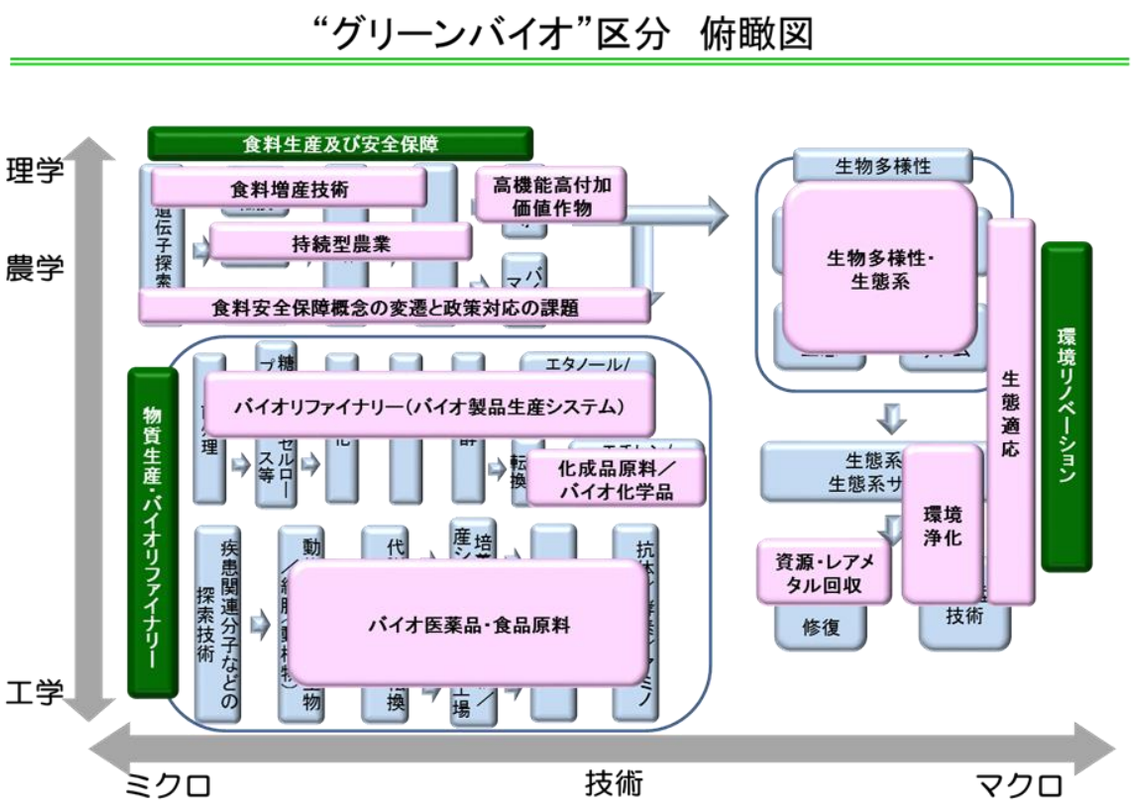


図 1-4　平成 26 年度俯瞰調査におけるグリーン区分の概観図、3 つのサブ区分の設定（上）と調査対象：11 領域（下）

それぞれ、今回の研究開発領域と俯瞰調査のサブ区分は、以下のように対応する。
「食料生産と安全保障」→「食料生産及び安全保障」
「物質生産・バイオリファイナリー」→「物質生産とバイオリファイナリー」
「生物多様性と環境修復」→「生物多様性維持と環境リノベーション」

冒頭に述べたように、グリーンバイオの分野は、現在我々が直面している様々な問題に直接的に関係し、当該分野が社会に貢献するべき領域が多岐にわたることを示している。また、それぞれの研究開発領域は深く関連しあっており、全体のバランスを取りながら進める必要がある（図 1-5)。さらに詳細にかつ焦点を絞ってそれぞれの研究開発領域の動向および社会的背景の概要を以下に述べる。

【「食料生産と安全保障」研究開発領域の情勢及び社会的位置づけ】

国際情勢としては、人口増加と中産階級の増加、およびそれに伴う食料危機が危惧されており、それに向けた政策も各国で開始されている。EU の Horizon2020 の Social Challenge 2 では、Sustainable Food Security として取り上げられ、2014-2015 は総額約 250 億ユーロ、2016-2017 は約 410 億ユーロと巨額の投資がなされ、しかも増額傾向にある。注目すべきは、EU 内だけでなく、アフリカや中国との積極的な連携を支援している点である。また、ビル＆メリンダ・ゲイツ財団は、飢餓と貧困を克服するために、農業開発への支援を行っており、2015 年だけでも 70 件、総額約 2 億 6000 万ドルにのぼる。その他にも、オランダ、フランス、ベルギー、韓国などにおいて、国を挙げて産学官協働体制を組織し、研究開発を推進している（詳細は 3 章、3-6　「海外の産学官連携体制の詳細」で述べる)。

国内情勢としては就農人口の高齢化と急激な減少が起き、両面から食料供給の不安定化をもたらすと考えられる。わが国の自給率は供給熱量ベースで 39%であり、先進国の中でも非常に低い水準にある（図 1-2)。地域経済は農林水産業が基盤となっている場合が多いが、その基盤の崩壊により地域経済の活力低下にもつながっている。国の政策において、地方創生、「攻めの農林水産業」との連動、TPP への対応などを考慮すると、この「食料生産と安全保障」の研究開発領域の貢献すべき事項は非常に大きい。3 章 3-1　「食料生産、農業現場をめぐる社会的背景」、3-2　「歴史的な俯瞰」でも詳述したので参照されたい。

【「物質生産とバイオリファイナリー」研究開発領域の情勢及び社会的位置づけ】

国際情勢としては、将来的なバイオエコノミーの実現、すなわち、革新的かつ効率的なバイオテクノロジー技術を用いて、再生可能な生物資源から、食料、飼料だけでなく、バイオ化成品、バイオ燃料などの生産をもたらす社会・経済へ向けて、国家規模での政策が始まっている。2012 年に発表されたオバマ政権の”National Bioeconomy Blueprint”（「国家的なバイオエコノミーへの青写真」)や、EU の Horizon2020 Social Challenge 2、の Bioeconomy[1)]や Bio-based innovation といった部分がそれにあたる。バイオエタノール生産は既に社会実装されているが、過去に穀物由来のエタノール生産が穀物価格の高騰などを招いた反省から、非可食バイオマスであるリグノセルロース系バイオマスへの転換期を迎えている。

国内情勢としては、1997 年の京都議定書締結後、バイオマス・ニッポン総合戦略のもと、2002 年から経済産業省、農林水産省、文部科学省などで複数の研究開発プログラムが進行したものの、2011 年 2 月に総務省からバイオマスの利活用に関する政策評価が出され、その有効性又は効率性の観点から重大な課題があるとの指摘を受けた。さらに政権交代や東日本大震災後の研究プログラムの再編の影響で、残念ながら現段階では成果を社会実装するまでの一貫した継続的支援とはなっていない。

【「生物多様性維持と環境リノベーション」研究開発領域の情勢及び社会的位置づけ】

国際情勢としては、人類の活動による環境破壊と、それがもたらす生物多様性の減少について、自国での対応だけではなく様々な国が協調して対応していく必要がある。特に懸念されている大気中 CO_2 濃度の上昇がもたらす環境変動は大きな脅威である。2015 年末に開催された COP21 で採択されたパリ協定では、できるだけ早い時期に世界の CO_2 など排出量の増加を止め、今世紀後半には実質的にゼロとすることを目指すとされるが、この間も生物多様性に与える影響をウォッチすること、また生物多様性維持や環境リノベーションに対する取り組みによってもたらされる大気中温室効果ガス（GHG）放出削減についても評価していく必要がある。また、93 年に発効した生物多様性条約の遵守に向け、モニタリングシステムとして 2014 年に名古屋議定書が発効し、ABS（Access and Benefit-Sharing アクセスと利益分配）クリアリングハウスが運営を開始した。事前の情報に基づく同意（PIC）と相互に合意する条件（MAT）が成立する証拠として ABS クリアリングハウスが許可証を発行する。2015 年 12 月現在、国際的に認知された遵守証明書をインドがはじめて発行したところである。生物資源の取り扱いについては、相手国の法律および生物多様性条約の遵守が今後さらに強く求められる。日本は名古屋議定書に署名し、現在は今後の批准に向けて、環境省の下に「名古屋議定書に係る国内措置のあり方検討会」が 2012 年に設置され、省庁間、産業界、NGO が協働しつつ準備が進められている。また、もう一つの本研究開発領域の注目すべき動向としては、Future Earth が挙げられる。これまで推進されてきた地球環境研究の国際プログラムが再編され、既存の国際研究計画やパートナーシップが全て統合する形で、Future Earth という枠組みとなった。2013 年より 10 年間のプログラムとして発足した。特徴としては、「学際」研究の重要性が指摘されるとともに、学術と社会の垣根を越える「超学際」がうたわれ、さまざまなステークホルダーの参加が促されている。具体的には科学部門の専門家とステークホルダーが協働して研究活動の設計および研究知見の創出を行うことが提案されている。わが国の取り組みとしては、Future Earth と連動する主要先進国の研究助成機関の連合体であるベルモントフォーラムには、文部科学省と科学技術振興機構が参加している。

【社会的背景、国際動向を踏まえたわが国の推進すべき方向性】

これらの社会的背景と国際動向、また、平成 26 年度に実施した俯瞰調査（グリーン区分）をベースとしつつ、平成 27 年度に実施した調査（有識者ヒアリング、文献調査）および複数回のワークショップにおける議論などをふまえ、わが国が今後取り組むべき重要研究開発課題を抽出し、その具体的な研究戦略を第 2 章の 9 項目にまとめた。

(1)「食料生産と安全保障」関連

① 高生産・環境適応植物の設計と作出
② 植物-微生物相互作用を利用した低肥料・低農薬化技術
③ バイオマス生産植物の開発
④ ブランド化、高付加価値植物作出技術

(2)「物質生産とバイオリファイナリー」関連

⑤ 人工酵素（合成生物学）や化学触媒を用いたバイオリファイナリー技術開発
⑥ 複雑系解析による新たな微生物機能（マイクロバイオーム）制御技術の開発
⑦ 植物、微生物を用いた無機物質（リン、レアメタルなど）回収技術

(3)「生物多様性と環境リノベーション」関連

⑧ 生物多様性情報学の充実と生物模倣学への展開
⑨ グリーンインフラ・エコ防減災

それぞれ、(1) 食料生産と安全保障は、①、②、③、④、(2) 物質生産とバイオリファイナリー関連は、⑤、⑥、⑦、(3) 生物多様性と環境リノベーションは⑧、⑨に主に関係する（図 1-5）。

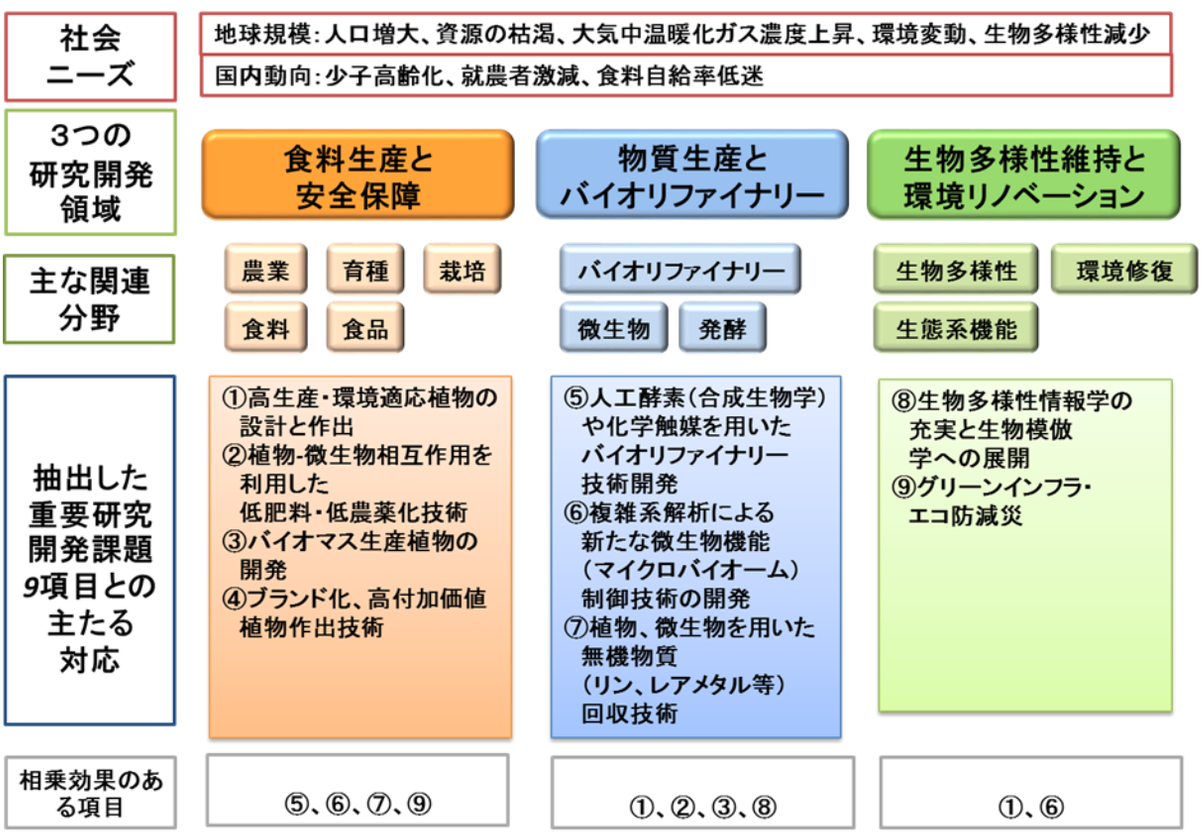


図 1-5　本報告書における 9 項目の重要研究開発課題と 3 つの研究開発領域との対応

以上に加え、第 3 章では、「食料生産と安全保障」研究開発領域を例に、今後あるべき研究開発体制「アグリフードピア」について示す。この体制は、日本全国数か所に、強みのある作物種（あるいは科）ごとに産学官のプレイヤーが「空間共有型」のプラットフォームを形成し、ネットワークで結ぶものである。「アグリフードピア」戦略組織が全体を統括

する。この研究開発体制を取ることにより、教育・人材育成、知の共有と集約、産官学間の共同研究が可能となる。その結果として、ニーズとシーズのマッチングによる社会実装や社会貢献、新品種や新技術の創出、アグリ産業の競争力強化が図れるものと期待される。

【当該分野の科学技術上のトレンド】

どのサブ区分ともに、次世代シーケンサーによる高速 DNA 配列決定技術、メタボロームによる網羅的な物質解析、ゲノム編集による精密な遺伝子改変技術が、今後も非常に重要かつ鍵となる技術となるだろう。それぞれの要素技術の詳細については、平成 26 年度研究開発の俯瞰報告書「ライフサイエンス・臨床医学分野」および、調査報告書「ゲノム編集技術」を参照されたい。

【ライフサイエンス・臨床医学ユニット共通コンセプトとの関連】

図 1-4 に、平成 26 年俯瞰報告書ライフサイエンス・臨床医学分野で述べた、今後のライフサイエンス・臨床医学ユニットの研究の方向性についての共通コンセプトを示す。従来は、基礎研究（メカニズムの解明）、橋渡し研究（理論から実用化へ）、小規模な実践（先進医療、特区における栽培など）、社会実装（社会（集団）における実践）と進むリニアな研究開発が主であった。しかし今後は、ビッグデータの解析をもとに、社会からの課題の抽出、データ解析からの仮説の設定により、再び基礎研究にフィードバックされる研究開発が可能となる。

前述のように、グリーンバイオ分野には、「食料生産と安全保障」、「物質生産とバイオリファイナリー」、「生物多様性維持と環境リノベーション」の 3 つの研究開発領域の背後にはそれぞれの社会的期待がある。それらの社会的期待に役立つ研究開発は、ライフサイエンスの要素技術や共通基盤技術を持ち、それぞれ、基礎、橋渡し、小規模実践、社会実装のステップがあり、フィードバック機構を持った循環的な研究開発が望まれる（図 1-5）。また、この 3 つの社会的期待はそれぞれ相互作用する。各研究開発領域間での協働により、相乗効果や新規のイノベーションが期待できる部分もあれば、社会実装の時点では対立が生じる場合もある。対立事項については、国の政策上での調整、管轄省庁を超えた連携体制が必要であり、また国際間の連携も重要である。

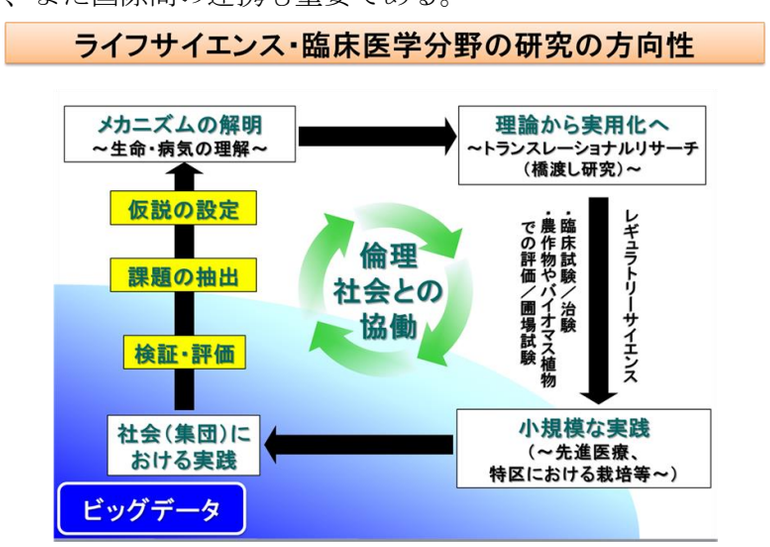


図 1-4　ライフサイエンス・臨床医学分野の研究の方向性（メディカル・グリーン共通）

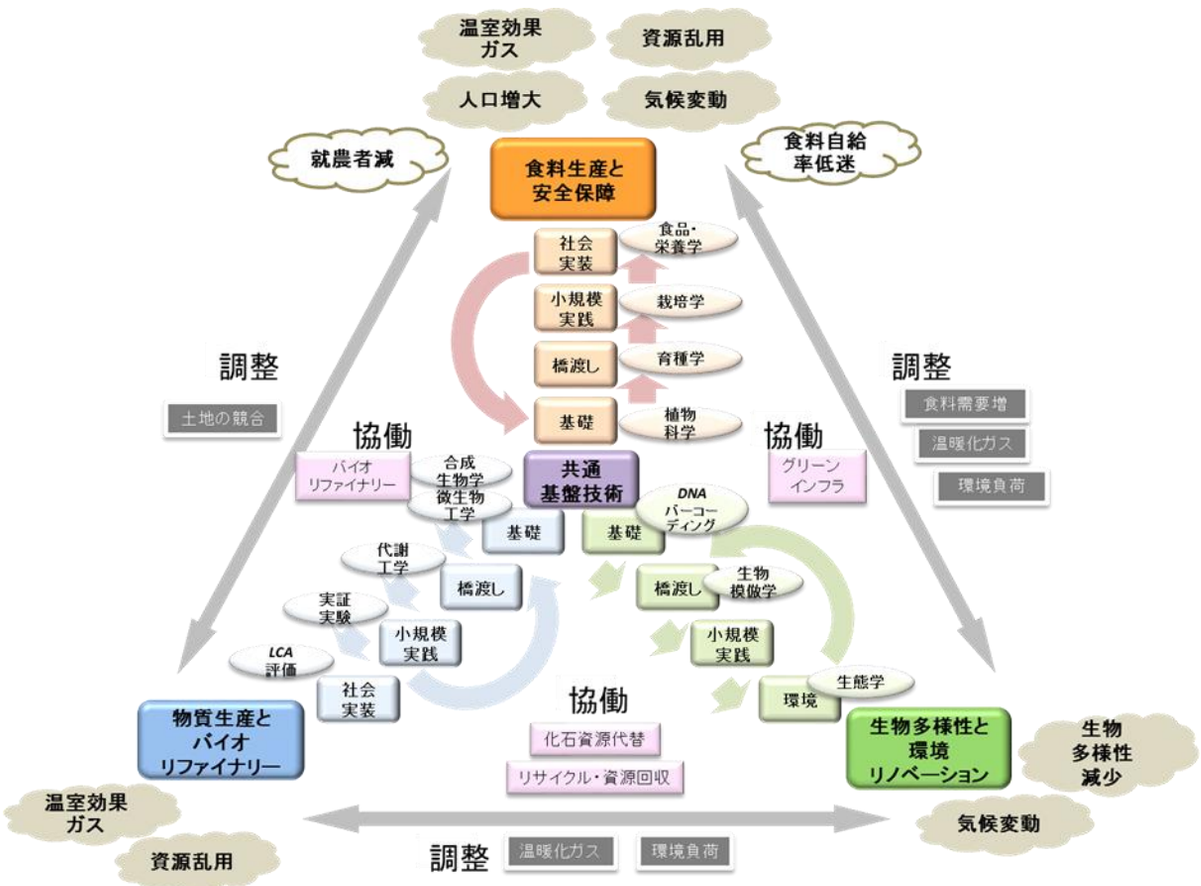


図 1-5　グリーンバイオ分野の社会的期待と研究開発のあるべき姿

グリーンバイオ分野の社会ニーズと、3 つの研究開発領域についての模式図。社会ニーズは、人口増大や GHG（温室効果ガス）抑制など、一番外側に示した。世界規模のものは塗りつぶし、国内ニーズは白抜きで示した。それらの社会ニーズを受けて、「食料生産と安全保障」、「物質生産とバイオリファイナリー」、「生物多様性と環境リノベーション」の 3 つの研究開発領域が設定される。3 つの研究開発領域は相互作用し、協働により相乗効果や新規のイノベーションが期待できる部分もあれば（ピンク色の四角枠）、対立が生じる部分もある（グレー四角枠）。対立事項については、国の政策上の調整や、管轄省庁を超えた連携体制が必要であり、また国際間の連携も重要となる。3 つの社会ニーズに役立つ研究開発は、ライフサイエンスの共通の要素技術や共通基盤技術を持つ（中央、紫）。それぞれ基礎、橋渡し、小規模実践、社会実装のステップがあり、フィードバック機構を持った循環的な研究開発が望まれる。楕円枠でそれぞれの研究開発領域における学問分野を示した（例えば「食料生産と安全保障」の研究開発領域では、基礎の学問分野は植物科学、橋渡しが育種学、といった対応になる）。

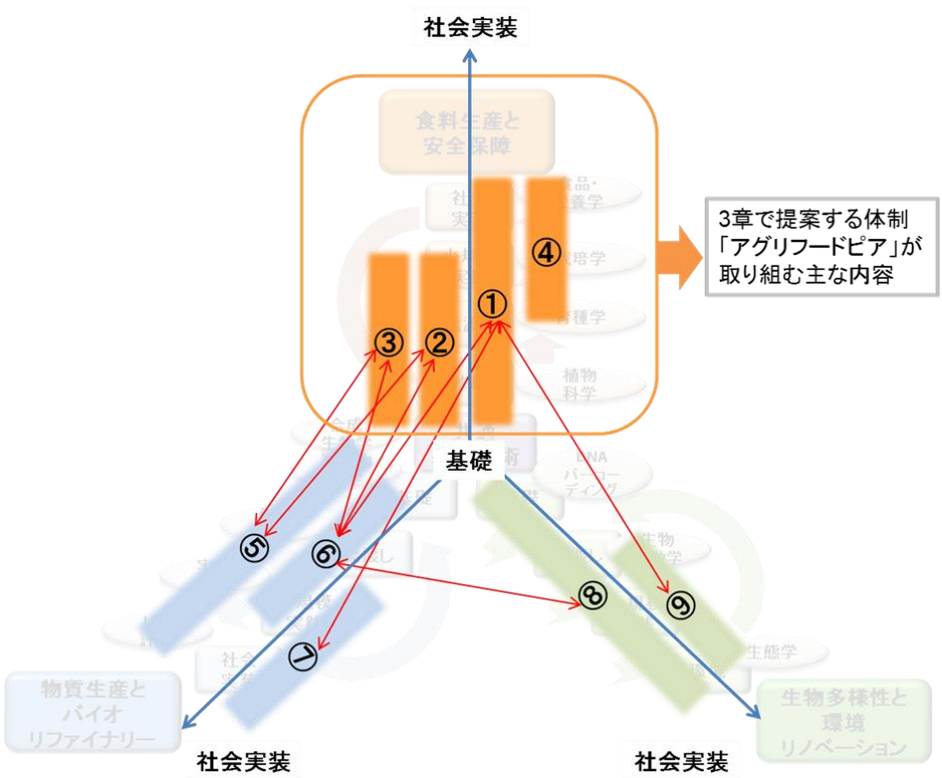


図 1-6　グリーンバイオ分野の重要研究開発課題　～各課題の位置づけと連関～

重要研究開発課題の位置づけを、基礎科学を中心に、橋渡し研究、小規模実践、社会実装と進むにつれ外側に位置するようにマップした。赤矢印は研究開発領域を越えて連携することで相乗効果が生じる可能性が高い課題。

引用文献

1)　What is the bioeconomy http://www.efibforum.com/about/what-is-the-bioeconomy

2. グリーンバイオ分野における重要研究開発課題

2－1. 高生産・環境適応植物の設計システムの構築と生産現場への適応

2-1-1. 概要

2050 年には世界人口が 90 億人を突破すると言われている[1)]。現在でも、世界では約 8 億人の人々が栄養不足[2)]で、食料がないという理由で毎日 2 万 5 千人が亡くなっている。人類へのカロリー供給を支える穀物の年増加率（1%）[3)]は人口増加率（1.2%）[4)]を下回っており、近い将来食糧問題が深刻化するのは必至と考えられる。加えて、地球温暖化による環境変動の影響で、収量の低下[5)]、干ばつや洪水、病害虫の蔓延などが起こり、既存の品種では対応できないような状況がこれまでよりも頻繁に起こることが危惧される。さらに、従来の資源多消費型農業は、農産物生産の高コスト化と農業活動による環境破壊を招き、農業の持続可能性そのものを脅かしている。

わが国の状況としては、戦後の GHQ による農地解放により大規模農業基盤が失われ、その後の高度成長期以降の農林水産業従事者の他の産業への継続的な流出が続き、加えて急激な少子高齢化の進行により、農業従事者の高齢化と担い手不足の問題が年々深刻化している。日本の国土のうち農地が占める割合は 12.6%だが、国内総生産（GDP）に占める農業の割合は 1%で、先進国最低水準である。しかも、これまでは米価維持を基本として生産量を増やしてこなかった。国内の人口の縮小により、必要な食料の量は減ると予想されているが、たとえ食料自給率を 50%に向上させたとしても、海外からの 50%をいかに調達してくるかは、特に東南アジアでの人口の急増と人々の生活水準の向上に伴う食生活の変化により、厳しい状態となることが危惧される。地球温暖化の影響による気温の上昇などの環境変化は、作物そのものの減収を招くだけでなく、これまで経験したことのない病害虫の蔓延、水資源の不足にもつながる可能性が高い。長期的に国民の生活を支える十分な食料を調達するためには、農林水産物生産の省資源・省力化、高生産の実現、そして環境変動に対して強い適応力を持つ品種開発など、革新的な技術開発を基盤とした農業施策が特に重要である。

わが国の植物科学の強みを活かし、これまで蓄積されてきた知見を橋渡し研究によって応用化、実用化へつなぎ、社会実装への道筋をつけるべきである。クラウド技術が世の中に普及し、ICT の活用による農作物の栽培条件の最適化や篤農家の技術・ノウハウをデータ化することで構築されるビッグデータを有効利用すること、またそのデータを用いて構築されたシステムを現場にて実証することが求められている。

2-1-2. 研究開発内容

・環境データと植物の生育状況や遺伝子型、表現型を高効率かつ高精度、網羅的に計測する技術開発。表現型解析（フェノーム）では特に、ドローンなどを用いたリモートモニタリング技術や画像解析技術開発。フィールドフェノミクス解析技術開発。
・気象データによる気象変化の推定と遺伝子発現予測モデル、収量性データを組み合わせることで、植物の不良環境適応機構を解明する。

・環境、有用作物の特質に着目し、生理・生育状況と形質の関係を把握する DNA マーカーやオミクス解析等の技術開発。こうしたデータをもとに省資源・省労力型作物品種開発基盤を構築する（低肥料性、早生性、病害抵抗性）。
・各種農業形質に関わる遺伝子発現や代謝産物を用いたバイオマーカーの開発。
・ゲノム解読とインフォマティクス解析によるゲノムワイドな多型検出の効率化と、一塩基多型（SNP）と形質の相関関係をもとにしたモデリングとその実証。連関解析によって見出された複数のゲノム領域を組み合わせる集積法やゲノム全体を選抜モデルに組み込むゲノミックセレクション。
・多型検出とモデリングにより重要ゲノム領域を明らかにした際に、その SNP などを導入する技術開発。ゲノム編集を含む新しい植物育種技術（NPBT, new plant breeding techniques）による遺伝子改変を簡便化することで、形質転換が困難な植物種においても遺伝子改変を可能とする技術を開発する。このことにより、優良品種に直接 SNP を導入できるなど、かけ合せにより、優良形質を失うことなく、迅速に環境に適応した植物をデザインすることが可能となる。

2-1-3. 適時性

TPP 交渉など食料の自由貿易化が進めば、今後ますます国際的な観点で日本国内での作物生産性の維持が必要であり、大規模化農業へのシフトが望まれる。また、日本の作物の高品質を維持し、安心・安全を担保できる生産体制が必須である。安倍政権が打ち出した経済政策の第 3 の矢である成長戦略においても、農業の成長産業化が求められている。強みのある農業を実現するためには、生産性があり、付加価値のある品種開発は重要な要素である。短期間に効率的に、品種改良を進める次世代育種技術が実用化できれば、成長戦略の具体的な取り組みに役立てることができる。農業は地域経済を支える重要な産業であり、農業の衰退はわが国の地方の衰退に結びつく。昨今の国内・国外情勢を鑑みると、農業経営に必要な資源（ヒト、モノ、カネ）の確保は今後益々難しくなることが予測される。本技術開発によりシステムを構築することで、省資源・省力型作物生産技術を可能にする、また温暖化が進んだ環境においても収量、品質を維持できる、次世代型育種が達成されるものと期待される。近年、作物のゲノム解読は大きく進み、イネだけではなく多くの作物においてゲノムワイドな SNP 解析基盤が整いつつある。SNP の育種への利用としてゲノム育種やゲノミックセレクションといった品種改良技術が進展してきた。また、トランスクリプトーム、プロテオーム、メタボロームといったオミクス分析技術が急速に発展し、多くの動植物や微生物の膨大な情報が得られている。ビッグデータ解析やリモートモニタリング技術、フェノミクス解析、植物工場関連と結びつけることで、異分野の研究が融合するイノベーティブな展開が期待できる。

2-1-4. 研究成果によって期待される効果・将来性

●科学技術上の効果

・主要作物のゲノムワイドなマーカー情報の充実とデータベースの整備。
・ゲノム情報を利用した形質予測モデル、品種選抜法、形質評価技術など、作物生産向上のための新たな技術開発やその実証。
・これまで効率的な選抜が難しかった収量やストレス耐性などの複雑形質をゲノミックセレクションなどを使って改良した品種開発。
・温暖化対策のため、生物的・非生物的ストレス下における作物の耐性メカニズムの解明と耐性関連遺伝子群の育種的利用。
・植物の表現型解析技術の開発による、イメージング技術、情報解析技術の発展。リモートモニタリング技術や ICT 技術の発展。
・ゲノム解析やメタボローム解析などのオミクス解析の発展。
・重要形質の導入のためのゲノム編集技術利用による作物開発。

●ライフサイエンス全体に与える影響、発展性

・農業生産という基礎研究から実用技術開発までの一連の研究・開発を産学官連携で行えるシステムの構築が図れる。
・イメージング、モニタリング技術やオミクス解析技術をライフサイエンス分野への適応と、それによってもたらされるライフサイエンス分野全体の発展。
・品種開発や栽培技術、農業システムに関する技術の発展。
・ゲノム研究やその情報を活用した植物研究で優位性がある日本において、実用的な面でもゲノム情報の有効活用を図ることで、アジアでの作物開発の先導性の確保。

●社会経済的効果

・成長戦略における農業革新を推し進めるために有効な新品種開発の基礎技術が開発されることにより、強みのある農産物の開発が加速される。
・新品種開発や低コスト・安定生産技術は、産地の収益力向上に寄与するだけではなく、農産物の多様化、高品質・低価格化により産地の戦略的な取り組みにつながる。
・大規模農業や高品質農業に役立つ栽培管理技術の提供。
・各環境において最適化することにより植物生産力の向上と、植生による CO_2 固定量の増加による CO_2 濃度上昇の緩和。
・日本農業の立て直しと、海外への展開による技術外交。
・温暖化対策による収量の維持。

引用文献

1) ナショナルジオグラフィック; http://natgeo.nikkeibp.co.jp/nng/sp/food/
2) FAO; http://www.fao.org/news/story/en/item/288229/icode/
3) Ray et al., (2013) Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. PLoS One 8, e66428.

4)　US Census Bureau, International Data Base;
https://www.census.gov/population/international/data/idb/worldgrgraph.php
Cline, (2008) 国際通貨基金(IMF)報告書：Global Warming and Agriculture (2008)
5)　埼玉県環境科学国際センター「温暖化が大気環境変化が植物に及ぼす影響やその予測に関する影響やその予測に関する研究」
https://www.pref.saitama.lg.jp/cess/torikumi/shokai/ondankag.html

高生産・環境適応型植物の設計システムの構築と生産現場への適応

【背景、現状】

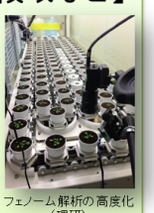
・食料自給率が先進国中最低であるとともに少子高齢化社会を迎える現状、省力型農業による生産性向上が求められている。
・クラウド技術やオミクス解析の普及により、ビッグデータから有用なデータを高速に抽出するアルゴリズムの開発が進んでいるが、その情報に基づいた育種や栽培技術開発への挑戦が求められている。
・画像解析技術の進歩により各種カメラを搭載した小型ヘリを用いて植物の形質をモニタリングする技術が開発されてきている。
・植物工場の開発が盛んであるが、栽培管理技術や栽培する作物の育種といった観点からは改善の余地がある。

【分野の概説】

○次世代シーケンサーやオミクス技術の発展により、大規模データが入手可能。
○こうした技術の発展によりバイオインフォマティシャンの養成が重要である。
○小型ヘリやカメラの性能の向上、画像解析技術の発展により、作物の農業形質をモニタリングする技術が開発されてきている。

**高生産・環境適応型植物の設計システム構築
システム利用による次世代型育種**

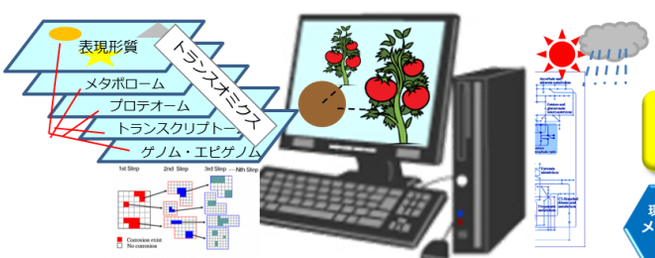
【国内外の先導的な研究事例・研究領域など】


フェノーム解析の高度化
（理研）

トランスクリプトームに基づく発現バイオマーカー開発（農業生物資源研）

・環境データと植物の生育状況や遺伝子型、表現型等を高効率かつ高精度、網羅的に計測する技術開発
・DNAマーカーや形質情報、計測データのデータベース化と、それに伴うデータの大規模処理技術
・環境、有用作物の特質に着目した生理状況や形質の関係を把握するDNAマーカーやオミクス解析等の技術開発
・遺伝子発現バイオマーカー開発
・遺伝子改変を迅速に行う技術開発

高生産・環境適応型植物の設計システム



ゲノム情報等比較と環境データから植物の
生育・環境応答を予測・最適解の計算

予測の実証とフィードバックによるシステムの高度化

情報科学、計測技術との融合

環境データとフェノーム解析による植物の生育状況や遺伝子型等の情報をもとにしたモデリング技術
農業形質に関わる遺伝子発現バイオマーカー開発（窒素動態、病害予知、開花、光合成能、収量、高機能性）
モデルをもとにした環境適応性を向上した植物体の設計・作製と実証

**環境適応能力を増強する
遺伝子情報＋改変技術**

・様々な植物に適応可能なシステム
・作物開発利用（品種育成の時間短縮）
・機能推定、新機能発見
・高付加価値作物の開発
・医薬工業用原材料の大規模生産

2－2. 植物-微生物相互作用を利用した低肥料・低農薬化技術

2-2-1. 概要

この 40 年間で世界人口は倍増し、それに伴って世界の食料生産は 2.5 倍に増加した。この間世界の耕地面積は拡大しておらず、肥料や農薬、機械化など資源投入の増加により単位面積当たりの収量を高めてきた。肥料代や燃料費の高騰は生産コストを圧迫する。さらに化学肥料はエネルギーの観点からも多くの問題がある。世界的に窒素肥料は化学合成に大部分を頼っており、このプロセスは全人類の年間消費エネルギー（石油換算 140 億トン[1)]）の約 1%を占めている[2) 3)]。例えば、世界的に施肥量を 10%削減させるだけでも、石油換算で 0.14 億トン（ちなみに日本の年間原油輸入量 2.1 億トン[4)] の 6%）に相当する。

特にわが国においては、リンおよびカリウム肥料は原料を海外に全面的に頼っている状況である。こうした化学肥料に依存する農業は土壌や水の富栄養化をもたらし、環境汚染につながるだけではなく、肥料資源の枯渇を加速する。こうした資源投入型農業を維持していくことは難しく、施肥量低減、省資源化は健全な農業運営にとって真剣に考慮されるべき案件である。今後の人口増に対応するため、作物生産を維持しながら持続可能な農業へ変換していくことが喫緊の課題である。そのため、低肥料、低農薬に耐えうる作物の開発や、化学肥料を低減しても収量を維持できるような栽培技術の開発が必要である。

共生微生物として窒素固定に関わるマメ科植物の根と根粒菌の共生機構、リン吸収に関与する宿主植物の根と菌根菌の共生機構が明らかになりつつある。興味深いことに根粒菌共生機構と菌根菌共生機構では共通共生経路（common symbiosis pathway）と呼ばれ、両共生に必須の因子が共通に働いていることが明らかにされ、根粒共生システムの解析により、菌根共生システムの解明に大きく貢献してきた。近年、次世代シーケンサーによるゲノム解析技術が進展したことにより、メタゲノム解析による微生物叢の総体的把握が可能となったと。それとともに、作物の生産性向上に寄与もしくは損なう主要微生物（共生菌、病原体）のリファレンスゲノムも解読された。しかしながら、自然環境におけるゲノム動態はダイナミックであり、生物間相互作用、気候変動あるいは農業環境によって大きく変動する。自然環境下における複雑な生物間相互作用、植物もしくは微生物の遺伝子群の発現解析、植物-微生物もしくは微生物-微生物相互作用に関わる低分子化合物のネットワークに関する解析はほとんどされていない。また、土壌微生物のほとんどは純粋培養が現時点ではできず、培養技術の開発とともに、複合微生物系の制御技術も求められている（2-7 項とも関連）。

2-2-2. 研究開発内容

- 土壌微生物、とりわけ菌根菌の遺伝要素や菌根菌定着に資する土壌環境を明らかにするため、メタゲノム解析による根圏微生物叢の総体的把握。
- 微生物ライブラリーの作製と各菌の全ゲノム解析。ゲノムが決定している菌を土壌に混ぜて、菌叢と植物に与える影響の解析。
- 植物-微生物相互作用（土壌微生物、エンドファイト、植物病原菌など）の分子レベルでの解明と相互作用を利用した低肥料栽培系の確立および病原菌抵抗性付与。
- 植物病原菌感染メカニズムの解明により、植物への抵抗性付与といった育種への適用。

・重要病害虫の全ゲノム解析とそれを用いたフィールドでの解析により、予防・予測技術への展開。
・荒廃地からの自然再生または人為的なレメディエーションが行われている場所を対象にしたメタゲノム解析による微生物叢の把握。
・農業生産、環境修復に有用な微生物の収集とスクリーニングおよび有用微生物叢再構築技術の開発。
・難培養性微生物の単離もしくは複合微生物系による大量培養技術の開発
・植物と微生物あるいは微生物同士の低分子化合物生物間ネットワーク解析。マメ科植物-根粒菌ではフラボノイドと NOD ファクター、植物-菌根菌ではストリゴラクトンと MYC ファクターの重要性が明らかにされている。これらの菌叢を維持、定着させるための低分子化合物ネットワークの解明。

2-2-3. 適時性

消費者が農業に求めているのは農作物が安定して生産されることである。また生産に関しては環境負荷を低減したシステムが望まれている。自然が本来備えている土壌微生物と植物の相互作用を利用した新たな戦略による農業は、生産コスト削減と未利用地の見直しをもたらし、国内だけではなく国際的にも大いに貢献する研究となり得る。

植物研究において、根系と土壌微生物との共生（共棲）の場は、土壌中に隠れてはいるが、地上部への栄養や水分の分配、植物の成長を支える重要な機能を発揮する。これまでは微生物叢の複雑性により手つかずであったが、近年のメタゲノム解析手法の進展により、根圏微生物叢という複合性微生物系の解析や特定微生物の動態解析が可能となってきた。新たな農業生産戦略や、生態系・生物多様性維持といった社会的ニーズの高まりを結びつけるために、この未開拓の研究分野に挑戦する機運が高まっている。農業およびその周辺の生態系を支える一次生産者の活動は、微生物によって支えられていることからも、メタゲノム解析技術や難培養性微生物培養技術が進歩してきた今なら解析可能である。

2-2-4. 研究成果によって期待される効果・将来性

●科学技術上の効果
・難培養性微生物の大量培養が可能になり、新たな生理活性物質の探索が行える。
・根粒菌以外の微生物と植物の共生（共棲）メカニズムが明らかになる。
・微生物が本来備える機能を利用した低環境負荷農業の実現。
・生物学的にも機能的にも興味深い微生物の発見とその微生物を利用した農業や生態系の再生。
・短期的には根系生物圏の構成要素が明らかになる。中期的には構成要素の機能が明らかになり、長期的にはその機能の農業的利用技術開発につながる。

●ライフサイエンス全体に与える影響、発展性
・個々の植物、微生物の研究にとどまらず、植物-微生物相互作用の分子レベルでのメカニズム解明が行われる。難培養性微生物の培養およびゲノム決定、微生物由来の相互

作用に関わる分子のメタボローム解析など、この相互作用メカニズム解析技法は医学系マイクロバイオーム（例えば腸内細菌叢）の解析にも適応可能と考えられる。
・メタゲノム、メタトランスクリプトーム、メタボロームなど、ビッグデータインフォマティクス技術の向上が期待でき、複雑系およびシステムバイオロジー的手法とともに、医学系マイクロバイオーム研究との連携も予想される。
・複合微生物系の理解を通して、これまで暗黙知とされてきたものが形式知化される。例えば、病原菌に対する拮抗菌の存在が、結果として病原菌の優先を防ぐといった展開が可能である。

●社会経済的効果
・従来培養が困難であった微生物由来の新たな生理活性物質を利用した創薬の可能性。
・化学合成肥料や海外に資源を依存する肥料の使用量の低減。
・消費者の生活の質（QOL）を高める農産物の安定した供給。
・生物圏の構成要素をもとに、商品化する企業の出現や、新規農業技術を利用した作物の生産性向上。
・農業への応用だけではなく、バイオレメディエーション、発酵食品、健康・長寿など、複合微生物系の積極的な利用についての理解が進む。また、新しい技術を提供する新学問領域の創成につながる。
・この課題の根底にあるのが、市場経済に直結しない農業の持続性、自然生態系・生物多様性の再生・保全にあるため、短期的な経済効果は望めない。ただ、長期的には人類社会の永続的な存続に関わる問題であり、検討すべきである。

引用文献

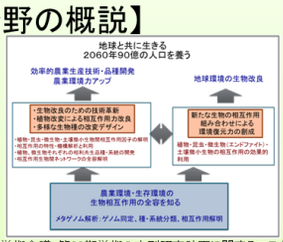
1) 電気事業連合会資料 http://www.fepc.or.jp/library/pamphlet/zumenshu/pdf/all.pdf
2) Our Nutrient World (2013), Global Partnership on Nutrient Management and International Nitrogen Initiative. http://www.initrogen.org/sites/default/files/documents/files/ONW.pdf
3) Wood & Cowie (2004) A review of greenhouse gas emission factors for fertiliser production. IEA Bioenergy Task 38
4) 経済産業省石油 http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/sekiyuka/pdf/se201412kakji.pdf

植物−微生物相互作用を利用した省資源化技術・生態系の保全

【背景、現状】

・メタゲノム解析により菌叢全体を解析可能となり、根圏微生物叢や植物内生菌叢の網羅的把握が可能となった。
・植物−微生物間相互作用の重要性は唱えられていたものの、難培養性微生物が多く、根粒菌、菌根菌以外の理解は進んでいない。
・わが国の農業生産に投じられている肥料代は農家一戸あたり年間20～80万円。窒素肥料は化学合成（世界消費エネルギーの1%以上）、リンおよびカリウム肥料は原料を海外に依存。
・病原菌により約3割の収量減となっている。
・生態系が破壊されることで微生物叢が失われ、そのことが植物の定着を阻害する要因となっている。

【分野の概説】

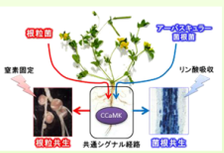


日本学術会議：第22期学術の大型研究計画に関するマスタープラン

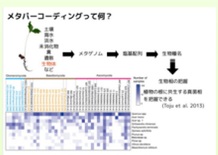
○根粒菌（窒素固定）、菌根菌（リン供給）により作物生産量が大幅に上昇。植物内生菌に関しては病害抵抗性をもたらすものも報告されている。
○難培養性微生物群の培養系の確立。
○植物細胞壁分解促進微生物の単離による分解促進と、バイオリファイナリー技術への適用。（現状分解酵素が高額）
○植物病原菌への抵抗性上昇

省資源、低農薬型農業生産の実現
セルロース系バイオリファイナリーの実現

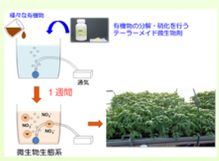
【国内外の先導的な研究事例・研究領域など】



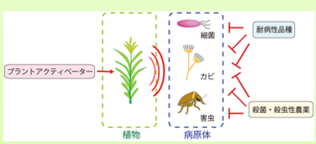
根粒共生と菌根共生の共通感染経路に関する知見（農業生物資源研）



メタバーコーディング（水産総合セ）



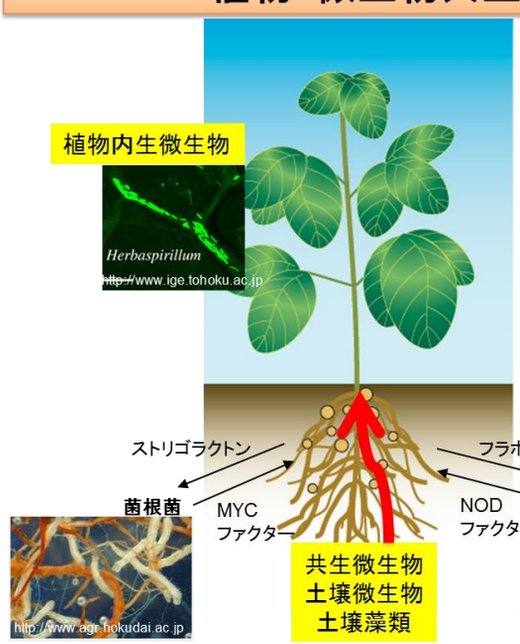
硝化細菌群による窒素同化（京都大）



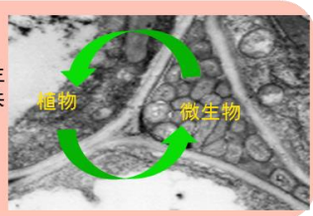
ケミカルスクリーニングによるアクティベーターの単離（理研）

・微生物メタゲノム解析分野
・植物-根圏微生物・植物内生菌相互作用研究
・病原菌感染メカニズムの解明と育種への適用、抵抗性付与
・植物-微生物、微生物-微生物の低分子化合物生物間ネットワーク解析
・難培養性微生物培養技術開発
・複合微生物バイオリアクターの最適制御（コンポスト制御等）

植物−微生物共生デザイン技術の構築



宿主、環境、食料生産にとって重要な共生微生物の遺伝子・機能の解明



温室効果ガスの削減
共生菌を利用した低肥料栽培系
内生微生物による耐病性

共生菌・藻類を利用した土壌改良

植物-微生物間共生ネットワーク・低分子化合物ネットワーク解明
メタゲノムによる共生微生物叢・土壌微生物叢・植物内生菌叢の総体的把握
複合微生物系の制御技術と難培養性微生物培養技術

2－3. バイオマス生産植物の開発

2-3-1. 概要

世界的な人口増加と中産階級比率の増加、さらに温暖化に伴う気候変動などで、将来の地球規模での食糧供給の危機が心配されている。一方、二酸化炭素排出量を将来的に大幅に削減する必要があることから、化石資源に原料を依存しないバイオエタノール、バイオマスプラスチックなど、バイオ化成品の生産も年々増加している。たとえ食料増産のためでもこれ以上の農地を拡大するわけにはいかない現在の状況を考慮すると[1)]、バイオマス生産植物は、単に生産量が多いだけでなく、以下の 3 つの点が強く求められる。①食料と競合しない土地（例えば海洋、陸地では、塩害などの不良土壌、半乾燥地、山地といった耕作不適地など）で生産可能なこと、②肥料やエネルギーのインプットが低い条件であっても多収であること、③生産コストやプロセスコストが低いこと。よってバイオマス生産植物の開発に関しては、バイオマス収量に関わる重要な形質とともに、環境耐性、病虫害抵抗性、ストレス耐性関連遺伝子群を効率よく同定し育種に利用すること、また最終的なバイオ製品生産に適したバイオマス源の種類と質（例えば、高糖度、熱や化学処理による易分解性・易解繊性など）を保証する育種が求められる。

バイオマス生産植物は、大きく分けて、木本系、草本系、藻類系がある。木本系・草本系バイオマスの主成分は、リグノセルロースである。リグノセルロースは、セルロース、ヘミセルロース、リグニンが強固に結合したもので、難分解であることが特徴である。木本系のメリットは、単位体積あたりの炭素貯留量の多さであり、デメリットは、前処理や分解が難しい点である。草本系のメリットは、リグノセルロース成分も多いものの、木本系よりは前処理や分解が容易であること、サトウキビ、スイートソルガム、キャッサバといった作物の場合、糖やデンプンといった発酵生産に適したバイオマスを得ることも可能なことである。一方デメリットは、単位体積あたりの炭素貯留量は木本系ほど多くないため、資源の大量調達のためには農耕地と競合することである。藻類のメリットは、農耕地と競合しないこと、単位面積当たりの光合成産物収量が多いことであり、デメリットは、多くの水分を含むため、分離・抽出にコストとエネルギーがかかることである。

バイオマス生産植物を考える上でもう一つ重要な観点は、どういった最終製品および副産物が生み出されるかを全般的に設計することである。栽培地と加工地の位置関係、一貫した生産プロセス設計、さらに、ライフサイクルアセスメント（LCA）による温室効果ガス排出抑制効果の生産プロセスへの評価、コストの評価が必須である。バイオマスの 6F、と言われるように、ファインケミカル（Fine chemical)、食料（Food)、繊維（Fabric)、飼料（Forage)、肥料（Fertilizer)、燃料（Fuel）の順で価格は下がる[2)]。ファインケミカル、食料、燃料のいずれの出発原料ともなりえる、糖を高生産するバイオマス植物育種およびそれらの低コスト栽培技術の開発は、高付加価値利用のスタートラインとして非常に有望であるとともに、低価格製品群への応用の裾野を広げる。また、糖などの重要な基幹物質を抽出した後も、残ったバイオマスのカスケード利用によって、繊維、飼料、肥料といった他の資源として最大限有効利用できるように、生産の一貫プロセスをデザインすること、またそのようなカスケード利用においてメリットを生じさせる（易分解性・易解繊性など）形質を育種で賦与することも有効であろう。例えば、リグニンの構造を改変する

ことで、より抽出と二次利用のしやすいものを生産させる試みなども、国内外で基礎研究が行われている。

一般にバイオリファイナリーによって得られる基幹物質や化成品は、石油由来に比べて生産コストが高く、競争力を維持するのは難しいのが現状である。セルロースナノファイバー（別称：ナノセルロース）などに代表されるように、バイオ由来でないと生み出せない新たな性能や価値を探索・追及することも留意すべきであり、バイオならではの性能・機能・質の増強、あるいはそれらのバイオ由来成分の抽出しやすさ、加工のしやすさを、育種開発および栽培技術開発によって支えることも重要であろう。

非可食のバイオマス植物資源については、遺伝子組換えの手法や、ゲノム編集を含む「新しい植物育種技術（NPBT）」法の適用について、食料となる農作物にくらべて社会受容が得られやすい可能性もある。そのような観点から、資源としてのバイオマス植物の研究開発については、NPBT などの新技術、遺伝子組換え技術などを、より一層積極的に適用し、多様な品種候補をあらかじめ用意するべきである。特に藻類バイオマスについては、ゲノム編集技術の早期の応用が期待される。また、開発された有力品種候補の迅速かつ定量的な評価、および収量や品質の増加に関わる重要因子の同定を、表現型解析（フェノーム解析）とオミクス解析とを統合したアプローチによって、生産性および質のさらなる向上につなげる努力も、短期間で育種成果を上げるためには必須である。

このような、植物や藻類由来バイオマスの研究開発には、一次生産者である植物および藻類の研究だけでなく、微生物生産を扱うバイオリファイナリー研究、一貫プロセスを評価・検証・課題抽出するシステム研究などの、異分野の研究者が同じゴールを見据えて取り組む体制と、産業界への橋渡しを円滑に行うための支援が必要である。

2-3-2. 研究開発内容

- バイオマス作物のゲノムワイドなマーカー情報の充実とデータベースの整備。
- ゲノム情報を利用した形質予測モデル、品種選抜法、形質評価技術など、バイオマス生産性向上のための新たな技術開発とその実証。表現型解析（フェノーム解析）の効率化・自動化（リモートモニタリング、ドローンによる計測と画像解析技術開発）。
- これまで効率的な選抜が難しかった一次生産能力の増強やストレス耐性などの複雑形質を、ゲノミックセレクションなどの手法を駆使して改良する品種開発。
- バイオマス資源（糖、デンプン、セルロース、脂質）含量の増加、収穫部の最大化を目指した育種。
- 悪環境耐性（乾燥耐性、不良土壌耐性、広範な温度許容性）や病虫害抵抗性の付与のための高速テーラーメイド育種（ゲノム育種、ゲノミックセレクション、ゲノム編集を含む NPBT などを駆使、適用する作物により育種技術は戦略的に選択）。
- ゲノムやトランスクリプトームなど、ビッグデータを効率的に処理し、有用なモデル作成に回帰する技術の開発、栽培環境と栽培条件の最適化。
- 加工特性に適したバイオマスの質の制御（高糖度、熱や化学処理による易分解性・易解繊性など）のための育種。
- 異分野融合研究体制による、バイオマス植物生産から最終生成物までの一貫プロセスの構築、および評価・課題抽出・フィードバックによる最適化。

2-3-3. 適時性

急激に進む大気中 CO_2 濃度の増加とそれに伴う地球環境の激変は、農業収量への悪影響だけでなく、災害の激甚化、水不足など、将来的に我々人類の存続そのものに大打撃を与える可能性がある。気温上昇「2℃」を突破すると地球温暖化はもはや引き返すことができない（ポイント・オブ・ノーリターン）[3)] と言われ、化石資源依存からの脱却、再生可能なエネルギーや資源の利用、温暖化ガス排出削減、およびそのための研究開発の重要性が世界中で叫ばれるようになって久しい。しかしながら、コストや食料との競合の問題などにより、再生可能なバイオマス資源由来製品が市場や社会へ広く浸透するには至っていない。2015 年末に開催された COP21 で採択されたパリ協定では、できるだけ早い時期に世界の CO_2 など排出量の増加を止め、今世紀後半には実質的にゼロとすることを目指す。日本は 2030 年までに 2013 年比で 26%削減を目標としており、5 年ごとにさらに難易度の高い目標を新たに設定することが求められる。これらの目標を達成するため、バイオマス植物への CO_2 吸収とその利活用は、重要な研究開発課題の一つであると位置づけられる。

食料用の作物ほど近代育種がこれまで適用されてこなかったバイオマス生産植物にも、ゲノム情報を駆使した高速テーラーメード育種の適応が可能になりつつある。それでもバイオマス生産植物の精密デザインのためには 5～10 年単位の時間がかかる。糖、脂質、セルロースなど、主要なバイオマス基幹原料を生産するバイオマス資源作物について、わが国の強みおよび温暖化ガス排出削減への寄与を評価しながら、まずはターゲットとする作物と想定栽培地（国内外問わず）を決定する。革新的な育種基盤を確立しより有望な品種を開発すれば、世界的に見てもリードできる可能性が十分にあり、日本発のバイオマス生産植物群の開発へとつながる可能性もある。特に、非可食のバイオマス資源生産が主な目的であることを考慮すると、近年急激に進展してきたきたゲノム編集を含む新しい植物育種技術（NPBT）、遺伝子組換え技術などの適用を、より一層積極的に考慮すべきである。

2-3-4. 研究成果によって期待される効果・将来性

●科学技術上の効果

・新しい植物育種技術（NPBT）、特にゲノム編集技術をバイオマス植物育種開発に積極的に推進することにより、植物をより精密にデザインする基盤技術を確立することが可能となる。2-1 項の「高生産・環境適応植物の設計システムの構築と生産現場への適応」、の研究内容と高い相乗効果があると期待される。
・ゲノミックセレクションの植物育種への適用に先鞭をつけ、広範囲での植物種への適用へつなげる。
・ドローン撮影と画像処理による表現型解析手法の開発と高度化、フィールドにおける表現系解析手法の汎用化へ貢献する。

●ライフサイエンス全体に与える影響、発展性

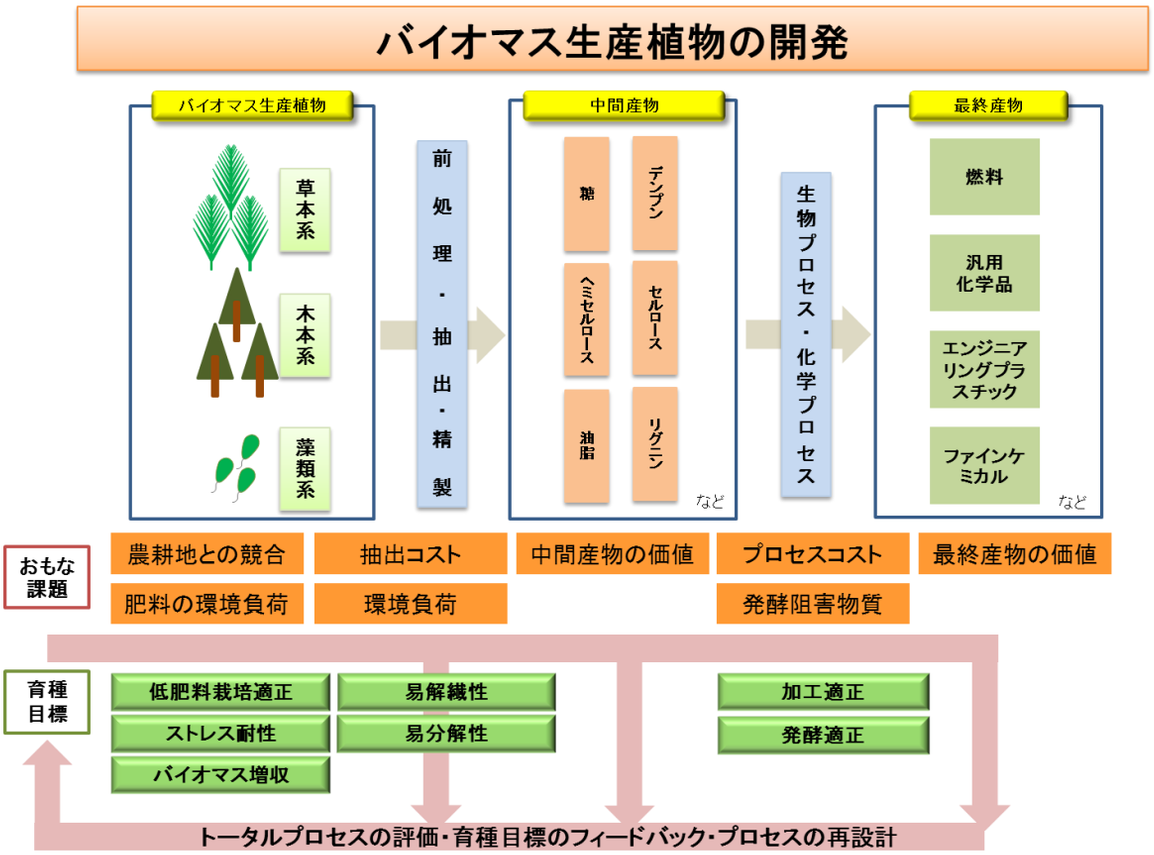
・理農工連携の融合学問領域が生み出され、府省連携による研究開発が深化する。
・バイオマス生産植物の育種開発に、ゲノム編集を含む NPBT 技術を早期に適用することで、ゲノム編集技術の応用に先鞭をつけるとともに、その応用の裾野を広げる。

・主要穀物や食料用の作物と比べると、バイオマス生産植物にはまだそれほど精密な近代育種が適用されたことがないため、テーラーメード育種によって用途に適した形質を引き出す余地が十分にある。さらに、ゲノム編集など NPBT の技術のバイオマス生産植物への適用は、これまでのモデル植物で得られた基礎的知見を実用作物で検証する機会を広げ、短期間での開発を加速すると期待される。

●社会経済的効果
・塩害、金属などによる土壌汚染、放射能汚染などに起因する、耕作放棄地の有効利用。
・バイオマス資源の供給による地域活性化、副産物由来から取り出すことが可能な、熱、電気、ガスなどの有効利用。
・将来的に、バイオマス由来の再生可能資源由来の化成品が普及すれば、石油化学製品の消費削減、ひいては CO_2 排出削減につながる（ただし、バイオマス栽培から製品製造まで温室効果ガスの吸収/排出量評価から、妥当であると判断される場合に限る）。
・現状、国内の市場経済に直結しないので短期的な経済効果は望めないが、長期的には人類社会の永続的・持続的存続に関わる問題である。国産の技術を海外の発展途上地域に移転することで、国際的な貢献も可能である。

引用文献

1) ナショナルジオグラフィック、2014 年 5 月号、p45
2) https://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/51_p99.pdf
3) http://lca-forum.org/seminar/pdf/20140701/1-yamamoto.pdf

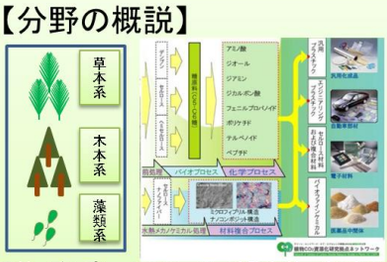


バイオマス生産植物の開発

【背景、現状】

・化石資源の大量消費による大気中への二酸化炭素の放出を削減するため、エネルギーや化成品原料をバイオベースに置き換えていく必要性がある。
・将来的な人口増加に伴う食糧増産の必要性を考慮すると、バイオベースの製品の原料を生産するバイオマス生産植物は、耕作不適地での栽培が前提となる。したがって、収量の多さだけでなく、水ストレスや不良土壌への耐性、低インプットでの栽培が可能なものが求められる。
・栽培から最終的な製品に至るまでの、コストおよび二酸化炭素排出削減への効果の評価が必須である（LCA評価）。

【分野の概説】

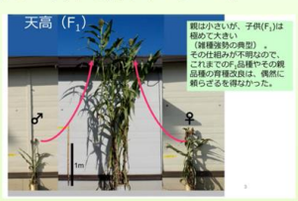


○糖、デンプン、セルロース、油脂など、バイオマス資源の収量や質に関わる重要な遺伝子を効率よく同定して育種に利用。
○食料供給と競合しない土地での栽培を念頭に入れた育種開発、栽培の最適化。
○バイオリファイナリーやプロセス設計および評価といった分野との融合研究・一貫研究体制がのぞましい。

安定かつ持続的なバイオベース製品の生産
石油資源依存からバイオエコノミーへの転換

【国内の先導的な研究事例・研究領域など】

耐冷性ユーカリ（NC-CARP、筑波大渡邊グループ）



スーパーソルガム開発（NC-CARP、名大佐塚グループ）

スーパーミドリムシ開発
（ImPACTプログラム、合田PM/ユーグレナ）

・バイオマス生産量の多いユーカリへの遺伝子組み換えによる耐冷性付与の試みと圃場試験
・高バイオマス性を示すソルガムF1品種における責任遺伝子座の同定とさらなる形質デザイン
・高い光合成活性と悪環境耐性を持つスーパーミドリムシの開発

2－4. ブランド化、高付加価値作物作出技術

2-4-1. 概要

本項目の研究開発の出口としては、大きく分けて、「食」と「医薬品」の二つの方向性がありうる。以下に個別に説明する。

「和食；日本人の伝統的な食文化」が 2013 年 12 月にユネスコ無形文化遺産に登録され[1)]、和食を構成する伝統的農作物も注目されている。また、政府が打ち出した「攻めの農林水産業」の実現に向け、地域の活力向上、6 次産業化、農林水産物の輸出戦略、農地集約化が挙げられた[2)]。このうち、輸出戦略においては、日本の農林水産物・食品が評価される環境を整備し、「日本の食文化・食産業の海外展開（Made by Japan）」、「日本の農林水産物・食品の輸出（Made in Japan）」、「世界の料理界で日本の食材の活用推進（Made from Japan）」の取り組みを推進することで 2020 年までに 1 兆円規模への拡大を目指している[2)]。

一方で 1958 年から 25 年間続いた 7 カ国コホート研究では、地中海食（一価不飽和脂肪酸と野菜、魚食）が健康維持に大きく寄与していることが証明され、世界の健康食として有名になった。日本食も健康に良いと言われながら、疫学研究での検証が遅れている。実際に、2013 年現在での論文数として、地中海食の栄養疫学研究成果は 2042 報である一方、日本食の研究成果は 130 報である[3)]（本調査報告書、4-2-1-1-3 も参照）。日本食文化および伝統的・地域農産物の輸出拡大において、日本食の長期コホート研究（栄養疫学研究）を推進する必要がある。SIP 次世代機能性食品開発プロジェクト、農林水産省異分野融合共同研究（医学・栄養学との連携による日本食の評価）といったヒト試験による健康機能性の実証は端緒についたところである。健康で活力のある超高齢社会（サクセスフルエイジング）の実現には、①栄養・健康機能成分を多く含む健康機能性農林水産物の栄養・健康機能性を検証、②食材の栄養・健康機能性を保持する加工・調理法の確立、③従来と同様においしく、健康を維持・増進させる、高度に安全性が確保された幼児・高齢者にも適した次世代型日本食を提唱する必要がある。

また、「食の有する健康増進機能の活用」として新たな 2015 年 4 月より機能性表示制度がスタートした[4)]。これは、企業の責任で行う、農林水産物（生鮮品も含む）食品表示制度である。わが国で既に進められている健康機能性食品としての認可制度としては、1991 年に世界に先駆けて創成された特定保健用食品制度があるが、認められる機能性表示範囲が限られていることや個別認可型であり開発コストも高かった。その点で、疾病リスク低減表示や構造機能表示を規格基準型で認めている欧州、米国、オーストラリア、ニュージーランド、カナダからは遅れをとっている状況であった。しかし、栄養・健康機能成分に富む農林水産物（生鮮品も含む）開発は海外では実施されておらず、品質管理を徹底した集約農業に強い日本にアドバンテージがある。

また、食に加え、漢方製剤や医薬品の開発も重要な課題となってきている。国民医療費の高騰を受け、医療現場における漢方製剤の需要が高まっているが、生薬の使用量は中国産約 80%、日本産 10%と安定確保には程遠い。中国においては需要量の増加と環境保全を目的として、甘草、麻黄について輸出制限が始まっている。日本や EU では遺伝子組換え生物反対の世論が政策決定に大きな影響を与えており、新規の遺伝子組換え作物の栽培承認に制約がかけられている。このような背景のもと、植物工場などの閉鎖系での作物栽培や、

植物培養細胞のタンク増殖により、診断薬や医薬品などの付加価値の高い機能性物質を生産する動きが盛んになっている。国内では 2013 年 10 月に遺伝子組換えイチゴ（改変イヌインターフェロンα4 発現）を用いた動物医薬品が認可された[5]。海外においてもイスラエル Protalix Biotherapeutics 社がニンジン培養細胞を用いてⅠ型ゴーシェ病の酵素補充療法に用いるグルコセレブロシダーゼを生産しており、アメリカ食品医薬品局(FDA)は 2012 年 5 月に承認した[6]。オランダ Pharming Group 社は遺伝性血管性浮腫の急性発作治療薬 C1-エステラーゼ阻害剤「Ruconest」をウサギの母乳で生産しており、2014 年 7 月にアメリカ食品医薬品局(FDA)によって承認された[7]。こうした農畜水産物を使ったタンパク質生産への企業の関心は高く、田辺三菱製薬が 2013 年 7 月に Philip Morris Investments 社と共同でカナダ Medicago 社の全株式を買収し、植物一過性発現系による VLP(virus-like particle)ワクチンの生産を行っている。

2-4-2. 研究開発内容

- 日本の農産物や日本食の長期コホート研究による、健康促進（生活習慣病や認知症予防）に関する科学的検証と、健康機能性成分に富む農林水産物の作出。
- 健常人、未病者のライフステージ別健康維持増進のため、バイオマーカーなどを用いて個人の健康状態、栄養状態をモニターしながら、その状態に適した健康機能性農林水産物を活用し、健康維持増進をはかる。
- 機能性農産物・食品のフードチェーン確立と貯蔵法、高精度評価手法の開発およびフードロス低減のための日持ち性向上技術開発。
- 薬用植物の生育、成分変化の解明と優良品種の系統保存、国内生産。
- 植物、微生物を用いたバイオ化成品、医薬品の開発。植物工場を利用した機能性成分増強植物の開発。
- 輸出を見据え、Global GAP（Good Agricultural Practice）対応のための ICT ツール開発および、おいしさ（味、風味）や栄養成分などを保持する冷凍・加工・保存技術。

2-4-3. 適時性

政府方針の「攻めの農林水産業」に関わり、「和食；日本人の伝統的な食文化」がユネスコ無形文化遺産に登録され、2020 年東京オリンピックに向けて輸出拡大を目指している。また「日本食は健康的」という漠然としたイメージだけが先行しているが、地中海食のような長期的なコホート研究による科学的な裏づけが非常に少ない。海外においては UCLA が日系人の健康について調査をしており、日系人はカリフォルニア州の他の人種系統より、関節炎と高血圧の発生率が高かったものの、15 の健康指標のうち 9 つについて低リスクであることが分かった[8,9]。国内では、生物系特定産業技術研究支援センターにより革新的技術創造促進事業(異分野融合共同研究)において「医学・栄養学との連携による日本食の評価」領域による研究が進められつつあり[10]、日本食の健康・長寿への効果の科学的なエビデンスの構築と発信が期待されている。全体的には日本の食生活は健康という評価を受けているものの、世代ごとには様々な課題があり社会的な問題の芽となりつつある。例えば、若年者層の栄養偏重、高齢者の低栄養、中高年の肥満増加などライフステージ別の食生活

から起こる健康長寿阻害、などである。これらに対し、日本食のエビデンスに基づいた、ライフステージ別 0 次予防の必要が高まっている。

また、様々な業種が植物工場へと参入したことにより、これに連携した高機能性付加価値作物の栽培に期待が高まっている。植物工場で栽培されたレタスなどは徐々にマーケットに出るようになってきつつある。今後、さらなる高付加価値付与のための育種、栽培条件の最適化などの研究開発が期待される。官民一体となったプロジェクトで開発された遺伝子組換えイチゴはイヌ歯周病治療薬インターフェロンを生産するものとして、動物用医薬品として世界で始めて認可された。カナダ Medicago 社ではタバコ葉を用いてインフルエンザやロタウイルスのワクチンを生産しており、2013 年に田辺三菱製薬が子会社化を行った [11]。

2-4-4. 研究成果によって期待される効果・将来性

●科学技術上の効果

・消費者ニーズや価値観も多様化している現状において、顧客の顕在化したニーズに応えるマーケットインの視点及び、顕在化していないニーズに応えるプロダクトアウトの視点からの生産実現と付加価値の向上へとつながる。
・従来の農業、食品、栄養、予防医学を包含した、フードチェーンに沿った新たな「栄養・健康機能学」の概念が創出される。
・薬用植物の複雑な天然化合物の生合成機構の解明につながる。

●ライフサイエンス全体に与える影響、発展性

・医農工連携の融合学問領域が生み出され、府省連携による研究開発が深化する。
・薬理学から農学、生物学的研究開発と工学的研究の融合といった多種の次元の融合が期待される。

●社会経済的効果

・日本食のコホートなど、栄養科学からの観点を考慮することにより、9 次連関モデル（6 次産業に「調達」、「調理」、「食事」、「片付け」、「残渣処理」、「リサイクル」を含める）への貢献につながり、日本食の食文化というパッケージとしての海外展開も可能である。またフードロスの減少に貢献する。
・健康寿命延伸による医療費の削減と労働人口の増加。
・生薬の国内生産、農家における新たな高付加価値作物生産への従事者の増加による農村の維持。漢方医薬への貢献とともに、国民医療費の削減へつながり、健康長寿に貢献へ期待される。

引用文献

1) http://www.maff.go.jp/j/keikaku/syokubunka/ich/index.html
2) http://www.kantei.go.jp/jp/headline/nourin_suisan2013.html
3) http://www.mhlw.go.jp/file.jsp?id=145680&name=2r985200000353cp_1.pdf
4) http://www.caa.go.jp/foods/index23.html#m04

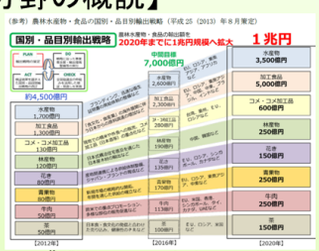
5) http://www.hokusan-kk.jp/info/
6) http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=101161&p=irol-newsArticle&ID=1690095
7) http://www.pharming.com/archives/1616
8) https://www.mededge.jp/b/heal/13037
9) http://newsroom.ucla.edu/releases/ucla-researchers-say-japanese-americans-healthier-golden-years-could-be-a-model-for-other-seniors
10) http://www.naro.affrc.go.jp/brain/ibunyakyodo/news/2014/053193.html
11) http://www.mt-pharma.co.jp/shared/show.php?url=../release/nr/2013/MTPC130712.html

ブランド化、高付加価値植物作出技術

【背景、現状】

・政府として、攻めの農業として2020年までに1兆円の農産物輸出を目指している。
・わが国の農林水産物の輸出額が約5千億円に対して、輸入額は約8兆円で、過剰な輸入超過である。
・「和食；日本人の伝統的な食文化」がユネスコ無形文化遺産に登録され、海外でも和食ブームである中、輸出戦略としての和食の食材、和食の科学的裏づけが必要である。但し、地中海食の栄養疫学研究に比較すると日本食の栄養疫学研究は1/15程度に留まっているのが現状である。
・機能性表示食品制度が始まり、食品市場の拡大が見込まれるが、科学的根拠の必要性や安全性への意識向上。

【分野の概説】

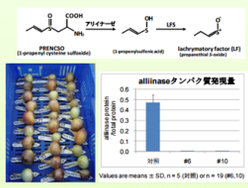


○攻めの農業として2020年までに1兆円を目指すが、1兆円まではブランディングで達成の可能性がある。その先の輸出拡大を目指した取り組みが必要。
○高機能性、高付加価値植物の作出、その評価技術の確立、コホートによる科学的裏づけ。
○植物を用いた医薬品、化粧品、化学物質生産。

輸出戦略としての日本食材市場拡大
医薬品等の植物での大規模生産

【国内外の先導的な研究事例・研究領域など】

ミラクリン高発現トマト
（筑波大、理研、インプランタイノベーションズ）

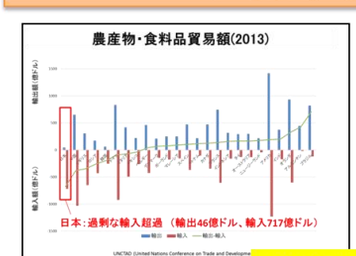


低アリイナーゼ活性たまねぎ
「涙の出ない、辛みのないたまねぎ」（ハウス食品）

イヌインターフェロンαを生産する組換えイチゴ（産総研）

・高機能性、高付加価値性につながる代謝産物の同定
・「和食」コホートによる生活習慣病や認知症への関連性と、その知見をもとにした栄養・健康機能性成分に富む農林水産物の育種
・植物・微生物を用いた医薬品・化粧品・化学品生産のシステム化
・日持ち性向上によるフードロスの低減

ブランド化、高付加価値植物作出技術



攻めの農林水産業
6次産業化

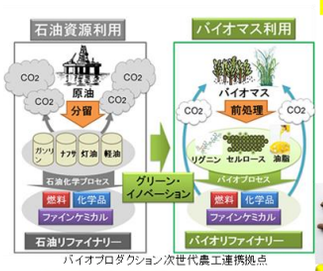
研究開発領域の抽出
医福食農連携

医福食農連携
食でつながるイノベーション

輸出拡大へ

日本食文化（無形文化遺産）

和食コホートによる科学的裏づけ
メタボローム解析による有用物質の同定と生産
高機能性、高付加価値作物の作出技術開発
バイオ医薬品、バイオ化成品の生産

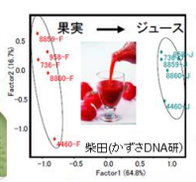


バイオプロダクション次世代農工連携拠点

バイオ化成品、医薬品生産

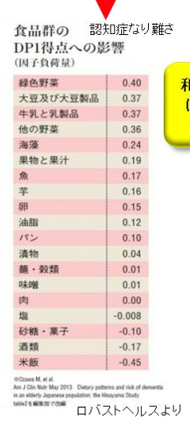
薬用植物

高機能性、高付加価値作物作出



メタボロームによる有用物質同定

GC-MS-QP2010 (Shimadzu)



和食コホートによる科学的裏づけ

ロバストヘルスより

2－5. 人工酵素（合成生物学）や化学触媒を用いたバイオリファイナリー技術開発

2-5-1. 概要

地球温暖化が人類に大きな影響を与えることが指摘され、国際的な枠組みの中で各国の取り組みが始まって既に四半世紀以上が経つ[1)]。化石資源の乱用や地球温暖化など、深刻化する地球環境問題に対処することは、持続可能な社会を形成するための喫緊の課題である。石油などの化石資源を主に利用してプラスチックや合成繊維が作られているが、これらの資源も有限である。わが国は先進国としての責任を果すため、2050 年までに二酸化炭素（CO_2）をはじめとする温室効果ガスの 80%削減を目指している[2)]。これを達成するには、革新的な省エネルギーとともに、再生可能エネルギーの徹底活用が重要となる。2015 年末に開催された COP21 で採択されたパリ協定では、できるだけ早い時期に世界の CO_2 など排出量の増加を止め、今世紀後半には実質的にゼロとすることを目指す。人類の未来に極めて重大かつ付加逆な脅威となる気候変動に対し、わが国は責任が重くかつその能力がある先進国として、真摯に立ち向かい、国際社会からの期待に応えるべきである。[3)]

CO_2 排出削減に向けた技術開発の方向性の一つとして、バイオリファイナリーが挙げられる。再生可能資源であるバイオマスを原料に、微生物発酵あるいは化学触媒を用いて物質生産および分離抽出を行い、化学品や燃料などを体系的に生産するシステムのことである。現在、産業用に利用されている 100 種ほどの化合物（全ての化学薬品の出発材料の 99%を占める）は全て、石油と天然ガスに由来する[4)]。これら 100 個の化合物から繊維やプラスチックなど多様な石油化学製品が生み出されているが、その約半数は再生可能な植物や藻類などのバイオマスから生産できる、すなわちバイオリファイナリーで生産可能であるとされる[4)]。

バイオリファイナリーに供する再生可能なバイオマス資源は、2-3 項でも述べたとおり、利用可能なバイオマスが多収であり、低インプットで栽培可能で、悪環境耐性を持ち、食料のための耕作地と競合しないことが必須である。その観点から、非可食バイオマス（木質、藻類、不良土壌や悪環境で生育が旺盛な草本、あるいは稲わらやコーンストーバーなど農業生産の副産物）を出発材料とすることが切望されている。これまでトウモロコシやサトウキビ由来のバイオエタノール生産により引き起こされた穀物や砂糖価格の高騰への反省、また、リグノセルロース系バイオマス（木質系あるいは非可食バイオマスの主成分、セルロース、ヘミセルロース、リグニンが強固に結合し難分解）由来のバイオエタノールの方が温室効果ガスの排出削減効果が高いからである。リグノセルロース系バイオマスの効率的な分解や利用を可能にする、化学触媒や微生物発酵技術および生成物分離技術の開発が必須である。

エタノール以外の基幹的な化学物質（例えば乳酸、アミノ酸、有機酸、ジアミンなどプラスチック原料になるもの、）だけでなく、より高付加価値の化成品についても、同様に技術体系の確立が期待されている。資源に乏しく国土面積が狭いわが国においては、現時点では国内産バイオマスから燃料を生産するのは即時の実効性はほとんどない見通しであるが、物質生産プロセスの技術開発と、栽培地での環境に適したバイオマス生産植物とのパッケージとすれば、海外への技術移転も視野に入れると十分取り組む価値がある。現時点で、リグノセルロース系バイオマスからのバイオエタノール生産について、最もボトルネック

となっているのが、バイオマスを分解する際の安価かつ環境負荷の少ない前処理法または化学触媒法、糖化酵素および反応プロセスの経済性である。さらに具体的には、リグノセルロース系バイオマスに多量に含まれる五単糖、および、発酵中に発生する阻害物質が主要因である。この問題を解決するには、ゲノミクス、メタボロミクス、代謝解析、フラックス解析などを用いて代謝経路改変および最適化などを行うシステムバイオロジー的手法および合成生物学的手法が有効である。また、この手法と細胞表層工学を組み合わせ、微生物をさらに高機能化して細胞工場を確立すれば（エタノール生産を例にすると、酵母の細胞表層に、バイオマス分解酵素を提示させる）、実際のバイオマスを出発材料として最終生成物の生産まで一つのタンクで連続で行うということも可能になると期待される。

もう一つのバイオマスの利用戦略としては、植物がわざわざエネルギーを使って合成したセルロースなどの高分子を、さらに人為的にエネルギーを使って糖に分解するのではなく、もともとバイオマス由来の素材に備わった物性を利用する道である。例えば、現在実用化段階に入りつつあるセルロースナノファイバー（別称：ナノセルロース）などは、その好例である。セルロースが持つ鋼鉄よりも軽量で強度が強いという特徴を活かし、新素材として注目されている。単なる石油化学製品の代替ではなく、バイオ製品ならではの新しい機能や付加価値を創出する方向性は、コスト高で普及しにくいバイオ製品の市場浸透と企業の参入にはずみをつける。セルロースナノファイバーの製造の低コスト化、低環境負荷を実現したのは、化学触媒を用いた TEMPO 酸化法であることを鑑みると、他にもさまざまなバイオマス資源について、化学触媒を用いた新規な有望素材生産法が見出される可能性がある。これまでは燃焼するほか利用法のなかったリグニン、糖化や発酵により阻害物質を生じるヘミセルロースについても同様に、バイオマス原料から変性させずに分離抽出する技術、および、化学触媒による画期的な変換法の開発が期待される。

2-5-2. 研究開発内容

- 様々なバイオスフェア（生物圏）からメタゲノム解析のアプローチでリグノセルロース系バイオマスを分解するための遺伝子をコレクションする。合成生物学的手法により、それぞれの発酵生産に必要な遺伝子の組み合わせをホストに導入して細胞工場を確立する。
- 化学触媒による変換系のバリエーションを増やす。
- 出発材料にブドウ糖あるいは実際のバイオマスを用い、より低コストで低環境負荷な前処理法、化学触媒法、発酵法、加工法により生産する一環プロセスを、多種多様な素材について行い、バリエーション化する。ここで言う素材は、バイオファインケミカルなどの高付加価値のものから、汎用的な化成品、バイオ燃料までを含む。
- 様々な基幹物質についての一貫生産を可能にする細胞工場の確立と、バリエーション化。
- バイオマス由来素材特有の有用な物性（高剛性、透明性、酸素バリア性など）を活かしながら、高機能な活用法を見つける。
- これまで燃焼するのが主だったリグニンから、芳香族化合物を選択的かつ効率的に抽出する方法（人工酵素によるバイオプロセス、または化学触媒）を開発する。

・糖から作るプラスチック母材とセルロースナノファイバーを混ぜ、成形加工することで、オールバイオマス由来の複合素材の創成を行う。
・様々な組み合わせで物性評価を行い、素材のバリエーションを増やすことで、現在日常的に用いられている多種多様な化成品のニーズに対応する。

2-5-3. 適時性

2015 年末に開催された COP21 で採択されたパリ協定では、できるだけ早い時期に世界の CO_2 など排出量の増加を止め、今世紀後半には実質的にゼロとすることを目指すとされている。急激に進む CO_2 濃度の増加とそれに伴う地球環境の激変については、2-3-3 でも述べたとおり、将来的に我々人類の存続そのものに大打撃を与える可能性がある。バイオリファイナリーにより生産された製品群によって形成されるバイオエコノミーの確立には、まだ遠い道のりがあるが、持続可能な地球の未来のために、研究開発への投資を早い段階から行っておくべきである。

2-5-4. 研究成果によって期待される効果・将来性

●科学技術上の効果
・糖やバイオマスを出発原料とした基幹物質生成のカタログ化が進み、バイオリファイナリー技術が体系化される。
・新規代謝経路の発見およびそれを担う酵素や微生物の機能の理解。

●ライフサイエンス全体に与える影響、発展性
・理農工連携の融合学問領域が生み出され、府省連携による研究開発が深化する。
・代謝経路改変および最適化、細胞表層提示などを駆使して作成した細胞工場の確立、および、細胞工場による発酵生産による物質生産の汎用化。

●社会経済的効果
・将来的に、バイオマス由来の再生可能資源由来の化成品が普及すれば、石油化学製品の消費削減、ひいては CO_2 排出削減につながる（ただし、バイオマス栽培から製品製造まで温室効果ガスの吸収/排出量評価から、妥当であると判断される場合に限る）。
・国内の市場経済に直結しないので短期的な経済効果は望めないが、長期的には人類社会の永続的・持続的存続に関わる問題である。国産の技術を海外の発展途上地域に移転することで、国際的な貢献も可能である。

引用文献

1) http://scienceportal.jst.go.jp/news/newsflash_review/review/2015/11/20151104_01.html
2) http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004000/pdf/039_02_01.pdf
3) 「COP21 をきっかけとしてゼロ炭素社会への方向転換を」京都大学名誉教授松下和夫 http://scienceportal.jst.go.jp/columns/opinion/20151127_01.html
4) EURO 版バイオテクノロジーの教科書
5) http://www.sankeibiz.jp/business/news/151012/bsc1510120500002-n1.htm

人工酵素（合成生物学）や化学触媒を用いたバイオリファイナリー技術開発

【背景、現状】

・化石資源の枯渇への対応や温室効果ガス排出削減のため、将来的に燃料や化成品原料をバイオベースに置き換えていく必要がある。
・現在産業用に利用されている100種ほどの化合物の半数は、バイオリファイナリーで生産できるとされる。
・前処理から製品回収にいたる工程が多いので、前処理およびバイオプロセスの最適化を行い、迅速かつ効率的な生産に向けた、全体プロセス設計が必要である。人工酵素および代謝経路の改変など、合成生物学的手法が駆使して、LCA評価が必要である。

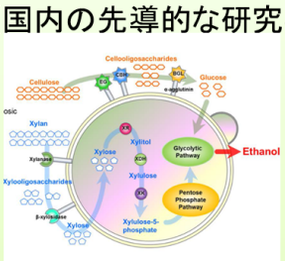
【分野の概説】

http://www.nipponpapergroup.com/research/organize/biomass/

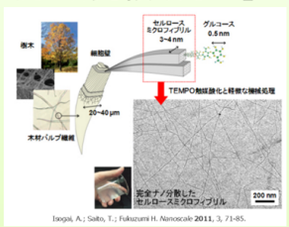
○革新的な化学触媒や微生物発酵技術により、非可食のリグノセルロース系バイオマスの効率的な分解と生成物分離技術の開発が必須である。
○単なる石油製品の代替ではなく、セルロースナノファイバーなど、バイオ製品ならではの新しい機能や付加価値を創出する方向性を模索する。

安定かつ持続的なバイオベース製品の生産
石油資源依存からバイオエコノミーへの転換

【国内の先導的な研究事例・研究領域など】



人工酵素を使った例:
Consolidated Bioprocessing (CBP)による、リグノセルロースからエタノール生産の模式図。CBP酵母は、セルラーゼ、ヘミセルラーゼを細胞表層に集積し、細胞表層で単糖を生成し、その後その糖を取り込んでエタノール発酵をする。
蓮沼ら、化学と生物 Vol. 53, No.10 2015より引用。

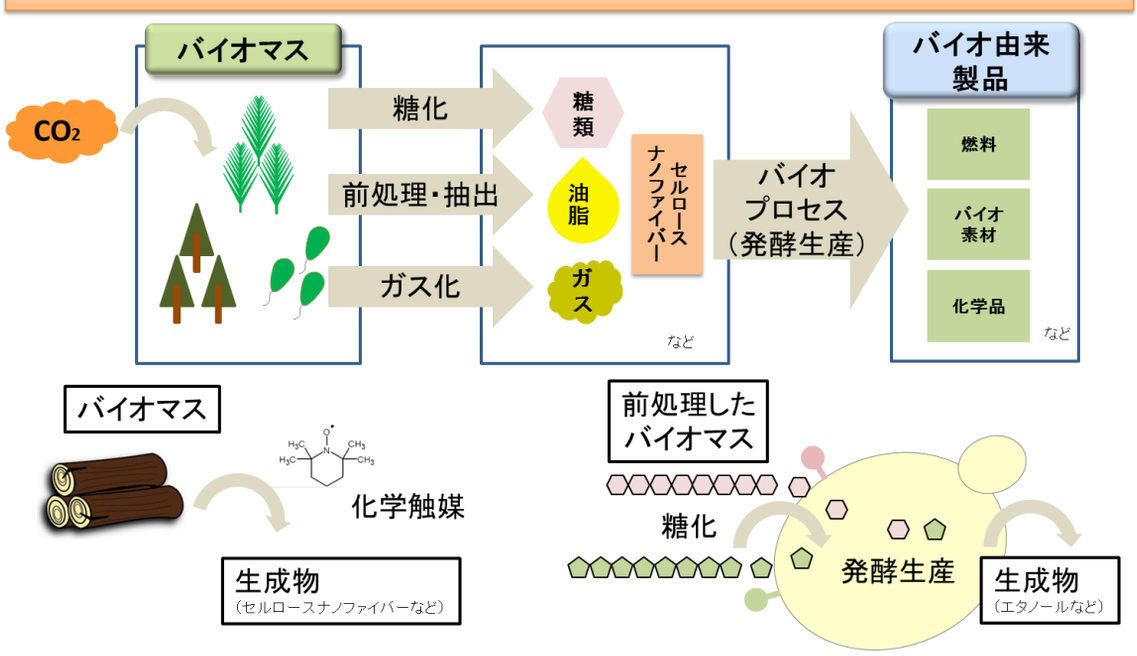


Isogai, A.; Saito, T.; Fukuzumi H. Nanoscale 2011, 3, 71-85.

化学触媒を使った例:
TEMPO酸化による、木質バイオマスからの常温・常圧下でのセルロースナノファイバー化。

・人工酵素と細胞表層工学技術により、酵素生産、糖化、発酵のバイオプロセスを全て統合した微生物を使ってリグノセルロースからエタノール生産を行った例。単一槽内でバイオマスをワンステップで最終生成物へと変換できる技術として期待されている。
・化学触媒であるTEMPOによる酸化により、常温・場圧下で、セルロースナノファイバーの生産が可能になった。

人工酵素（合成生物学）や化学触媒を用いたバイオリファイナリー技術開発



化学触媒でのバイオマス前処理・抽出
→高機能素材の、低コスト・低環境負荷抽出

バイオマスの糖化と発酵生産を
単一の微生物で→効率的な生産

2－6. 複雑系解析による新たな微生物機能（マイクロバイオーム）制御技術の開発

2-6-1. 概要

地球上のあらゆる生物は微生物との関わりを持っている。従来の微生物機能研究の多くは、単一の微生物、単一の宿主、単一の反応系、単一の分子を対象としたものが大部分であった。しかし実際の自然界においては、微生物は多数の種が共存したコミュニティとして存在し機能を発現している。実際、地球上の様々な環境に、細菌および真菌をはじめとする多様な微生物叢が存在することがわかっている。環境中の 99%以上の微生物は現在の一般的な培養技術では培養ができないか[1)]、培養のための最適化を試みられたことがない。すなわち現在私たちが使っている、産業用酵素、二次代謝産物、抗生物質などは、環境中の 1%未満の微生物から得られた成果であり、残りの 99%については未利用のままである。

近年、このような環境中の微生物の構成を全体的に捉え、その動態解析を可能にする技術、「メタゲノム解析」が飛躍的に発展している。「メタゲノム」という単語は、「さまざまな複合微生物ゲノムの集合体」を意味し[2)]、それを一躍有名にしたのが、2004 年、クレイグ・ベンターによるサルガッソー海の海洋細菌群集の 10 億塩基ものショットガンシーケンスの報告である[3)]。このアプローチは、難培養微生物群の全体構造や機能を探る新たな手法「メタゲノム解析」として注目を集めた。また、同時期に次世代シーケンサーの処理能力の飛躍的向上が起こったことで爆発的に広まり、新規遺伝子資源の発掘への期待が高まった。この概念を基盤として、米国の Human Microbiome Project、Earth Microbiome Project、EU の MeteHIT プロジェクトへとつながるとともに、環境メタゲノム、複合微生物といった学問分野が急速に勃興しつつある。

その後、メタゲノム解析の応用例は多様化し、現在ではさまざまな対象、例えば、土壌[2)]、深海底下[4)]、ニューヨークの地下鉄[5)]、コーヒーサーバー[6)]、チーズ[7)]、などにまで至っている。メタゲノム解析により、既知の培養可能な細菌門の数を大きく凌駕する細菌門の存在が示唆され[8)]、学問的な体系化の必要性とともに、それらの群集としての制御や有効利用に向けた技術革新が期待されている。

それらの技術革新に向けては、まず微生物生態系の動態を理解すること、すなわち微生物生態系の中に本来組み込まれている、特定の微生物種の優占を許さない仕組みを解明することが重要である。また、何らかの微生物資源を環境に投入したところで、それらが専従する微生物群と安定な群集構造を形成して定着できるとは限らない。微生物生態系では本来、特定の種が一時的に優勢になったとしても、その種を特異的に捕食あるいは駆逐する他の種が現れることで、安定性が保たれている。こうしたシステムの挙動に対して包括的理解するためには、メタゲノム・メタボローム解析により、複合的な菌叢解析と微生物間相互作用を解明する必要がある。膨大な微生物群集データをネットワーク理論の技法で処理することで、アプローチできると考えられる。

複合微生物系の応用範囲は広く、汚水処理、バイオレメディエーション、堆肥やコンポスト、水田・圃場環境制御、メタン発酵、複合系バイオプロセスの開発、などが挙げられる。

2-6-2. 研究開発内容

・複雑系微生物コミュニティの自然な存在状態や、異種生物体/宿主との共生関係における、時間的空間的な変化を詳細に解析する。また、メタゲノム・メタボローム解析により、生物間の相互作用に大きく寄与する微生物や化合物の特定を目指す。
・農地、森林などにおける、植物根圏と土壌微生物の共生関係の成立と維持についての理解。人為的撹乱、再生プロセスにおける微生物叢の動態解析と、得られた知見による制御の試み。
・コンポスト化や堆肥化、汚水処理過程に伴っておこる微生物叢の動態解析と、得られた知見からの制御法と品質管理方法の開発。
・汚水処理、廃棄物からのガスおよび熱エネルギー生産の最適制御、コンポストおよび堆肥の品質管理。

2-6-3. 適時性

近年のメタゲノム解析手法の進展により、複合微生物系の解析や特定微生物の動態解析が可能となり、爆発的に様々な分野に適用されている。また、メタゲノム、一細胞解析、メタボロームなどの技術が同時に進行し、これまで未利用だった 99%の遺伝子資源を活用可能な時代が到来しつつある。微生物と宿主生物、あるいは微生物同士の相互作用のための代謝物の発見やシステム、また、微生物叢動態解析の知見から、最適な制御方法の導出が可能になりつつある。

2-6-4. 研究成果によって期待される効果・将来性

●科学技術上の効果
・これまでのメタゲノム解析により、既知の培養可能な細菌門の数を大きく凌駕する細菌門が存在することが示唆されており、これまで認知されてこなかった細菌の生活環や機能に関する理解が進むとともに、細菌学・微生物学の学問体系が刷新される。
・メタゲノム、ゲノミクス、メタボロミクスなど、膨大な微生物群集データを、ネットワーク理論の技法で把握し、制御する技術を確立する。

●ライフサイエンス全体に与える影響、発展性
・理農工連携の融合学問領域が生み出され、府省連携による研究開発が深化する。
・個々の微生物の研究にとどまらず、宿主−微生物相互作用、あるいは、微生物−微生物の分子レベルでのメカニズム解明が行われる。

●社会経済的効果
・作物生産の向上、ファイトリメディエーション、新規バイオプロセス開発、水/廃棄物処理、コンポスト、メタン発酵制御、複雑系としての微生物集団が総体として発揮する機能に依存するあらゆる技術分野に影響する。
・従来培養が困難であった微生物由来の新たな生理活性物質発見の可能性。

・再生可能資源を出発材料にした物質生産および、未利用廃棄物のカスケード利用などについては、短期的な経済効果は望めないかもしれないが、長期的には人類社会の永続的な存続に影響する可能性もあり、検討すべきである。

引用文献

1) 「新規土壌微生物集積法の開発とメタゲノムスクリーニングの効率化」吉本拓矢、ほか。環境バイオテクノロジー学会誌　Vol.10, No.2, p91-95
2) Handelsman, J., M.R. Rondon, S.F. Brady, J. Clardy, and R.M.Goodman. 1998. Molecular biological access to the chemistry of unknown soil microbes: a new frontier for natural products. Chem. Biol. 5: 245–249. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26083755
3) J.C.Venter et.al., Environmental Genome Shotgun Sequencing of the Sargasso Sea. Science Vol.304 pp.66-74 (2004)
4) Inagaki, F., et.al., Exploring deep microbial life in coal-bearing sediments down to ~2.5km below the ocean floor. Science Vol.304 pp.66-74 (2015)
5) Afshinnekoo et al., Geospatial Resolution of Human and Bacterial Diversity with City-Scale Metagenomics, Cell Systems Vol.1 pp.72-87 (2015)
6) Vilanova et al. Scientific Reports DOI: 10.1038/srep17163
7) Wolfe et al., Cheese Rind Communities Provide Tractable Systems for In Situ and In Vitro Studies of Microbial Diversity. Cell Vol.158, pp422-433
8) Brown et al., Unusual biology across a group comprising more than 15% of domain Bacteria. Nature Vol/ 523, pp208-211 (2015)

複雑系解析による新たな微生物機能（マイクロバイオーム）制御技術の開発

【背景、現状】

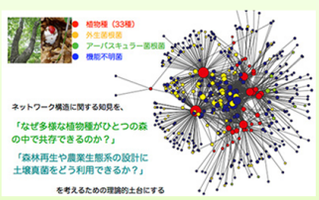
・次世代シーケンサーの普及に伴い、環境中の微生物の構成を全体的に捉えるメタゲノム解析が飛躍的に発展した。メタボローム解析の高度化により、生物間相互作用に関わる物質的な因子の動態も解析可能になった。
・メタゲノム解析の結果などより、環境中の99%以上の微生物は現在の一般的な培養技術では培養できないか、培養の最適化を試みられたことがなく、膨大な数の代謝経路や酵素が未利用のまま存在していると考えられる。
・それらの機能を抽出するとともに、微生物生態系の動態および安定性を保つシステムの包括的な理解ができれば、汚水処理、バイオリメディエーション、堆肥やコンポスト、水田・圃場などの現場において、微生物を群集として制御し、より好ましい方向へとプロセスを誘導する技術開発が可能となる。

【分野の概説】

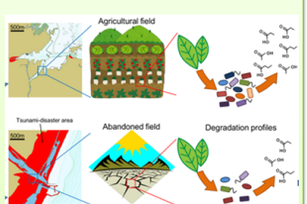
○環境中の微生物叢のメタゲノム解析、質量分析やNMRによる代謝物、といったデータを、網羅的、経時的に取得し、統合的な解析・相関ネットワーク解析を行い、介入や制御法を探る。

宿主-微生物相互作用の理解と制御
微生物動態を群集として制御し環境を改変・改善

【国内の先導的な研究事例・研究領域など】



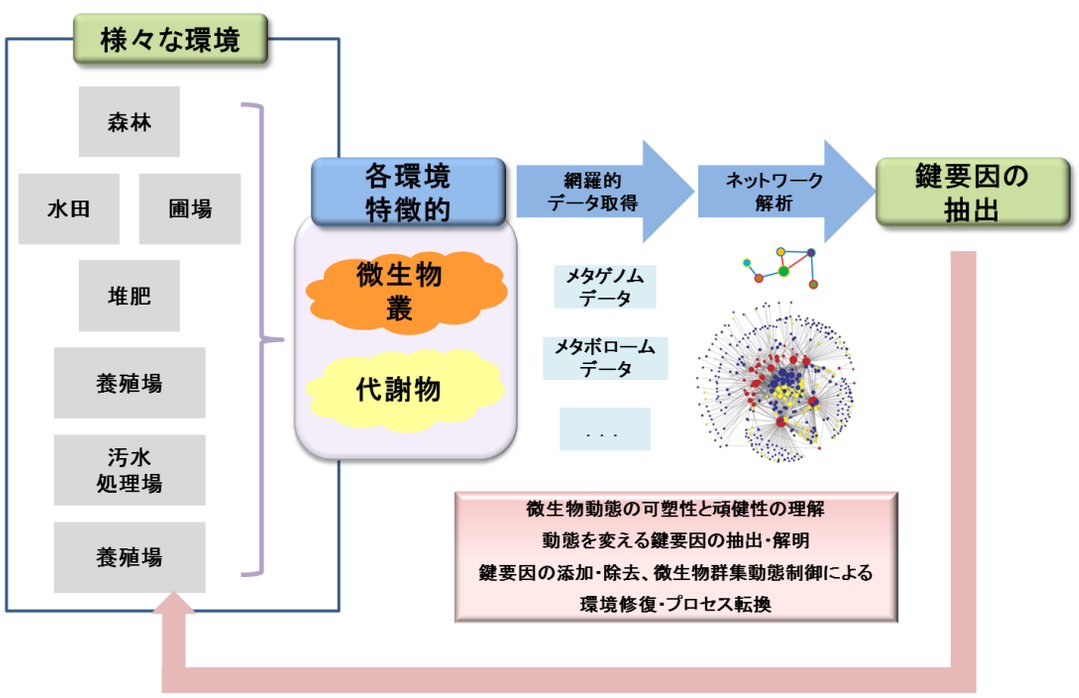
植物と共生真菌のネットワーク構造（京都大学、東樹宏和助教を中心とする国際協働研究チーム、Toju et al. 2014）



東北の津波被災地土壌の解析から、微生物群集の代謝活性好適化法を示唆。残渣バイオマスの添加により土壌代謝活性を増強
（理研環境資源科学研究センター　菊地淳グループ　Ogura et al. 2015）

・網羅的なデータ取得および複雑系解析によるデータ駆動型科学にもとづく、介入や制御法の開発
・微生物叢の動態や安定性を保つシステムの包括的な理解
・森林、水田、圃場、堆肥、養殖場、堆肥、コンポスト、汚水処理、バイオリメディエーションなど、多様な現場での応用の可能性
・環境修復や社会的な課題解決へ向けた展開

複雑系解析による新たな微生物機能（マイクロバイオーム）制御技術の開発



2－7. 植物、微生物を用いた無機物質(リン、レアメタルなど)回収技術

2-7-1. 概要

わが国は地下資源に乏しく、その多くを輸入に頼っている。国際競争力維持のために、先端産業に不可欠な希少金属（レアメタル）の安定供給を確保する必要がある。レアメタルとは、地球上の存在量が希であり、技術的・経済的な理由で抽出困難な金属で需要が高く、今後の技術革新に伴い新たな需要が予想されるなどの希少金属の総称である。経済産業省はこれらを 47 元素（31 種とレアアース 17 種）に定めている。こうしたレアメタルは自動車、液晶テレビ、携帯電話などに不可欠な原料である。ただし、レアメタルは偏在しており、資源の囲い込みからレアメタルの価格が高騰している。一方で国内には使用済み工業用品などのレアメタルが埋蔵されており、都市鉱山と呼ばれている。この都市鉱山の開発に関しては、現行リサイクル技術だけでは不十分であり、都市鉱山に存在する希薄な濃度のレアメタルなどを効率よく、経済的に回収できる実用化リサイクル技術が必要とされている。従来の化学的、物理的回収技術に比べて、低コスト・低エネルギーで高効率なレアメタル回収が期待できる技術としてバイオ利用リサイクル技術が注目されている。生物を金属との代謝作用を利用したメタルバイオテクノロジーによる廃水や廃棄物からの金属除去・回収、有用金属の自然界からの濃縮や回収、金属類の変換・加工や新規材料開発などの生産プロセスといった応用可能な技術が生まれつつある [1)]。

また、レアメタル、レアアースに限らず、作物の生育に不可欠な農業用肥料であるリン原料の全てを輸入に依存している [2)]。万が一、リンの輸入が制約された場合、わが国の食料問題は大打撃を受けることが予測される。一方で、下水道に流されるリンは年間 5.5 万 t と年間輸入量 55.5 万 t の約 10%にあたる [3)]。現状、工学的な HAP 法、MAP 法、灰アルカリ抽出法、部分還元溶融法などが実用化に近い技術として研究開発が行われている [3)]。一方で、ポリリン酸蓄積細菌を用いたリン資源の回収といったバイオテクノロジーの研究開発も行われている [4)]。

バイオテクノロジーを用いた物質回収技術として、バイオレメディエーションによる汚染対策も行われている。バイオレメディエーション工法は低コストかつ環境負荷が低い技術として、また現地における原位置浄化法が適用可能と、利用拡大が期待されている。最近の福島原発事故により汚染された土壌中の放射性セシウムを光合成細菌（*Rhodobacter sphaeroides*）による吸着除去法が開発され、20 万ベクレル/kg 土壌の浄化を実施して、放射線汚染規制値以下での野菜栽培も成功している [5)]。現在、土壌浄化に占めるバイオレメディエーション工法の比率は 10%以下である。ただ、バイオレメディエーション工法の浄化効果が認識され、コストも低下していることから、この工法は伸びつつある。

わが国にはブラウンフィールド（土壌汚染により利用価値が低下した土地）が約 2.8 万 ha あり、汚染浄化には 4.2 兆円が必要とされている。一方、都市鉱山から白金族金属を 100%回収できた場合、新規開拓できる市場規模は 3,600 億円と推定されている。わが国の製造業を支えるレアメタルは地金で 3 兆円、製品化により 150 兆円の産業を支えている。原発事故によってもたらされた放射性セシウムの回収も含め、レアメタル・金属の回収技術開発が重要であることを示している。

2-7-2. 研究開発内容

・微生物培養法およびメタゲノムスクリーニングによるレアメタル回収機能、重金属回収機能の優れた微生物や酵素の単離、遺伝子操作（アーミング技術）などによるレアメタル、重金属回収機能の向上。
・IC チップや工業触媒（燃料電池など）の化学溶解と、その溶解液からの貴金属（金、パラジウム)、白金族金属（白金、ロジウムなど）の回収技術改良。
・磁石の粉砕物からのレアアースのバイオ抽出とその抽出液からのレアアースのバイオ吸着・回収技術改良。
・各種廃液からのレアメタル・貴金属のバイオ還元・回収および重金属類の回収技術改良。
・バイオミネラリゼーションなどの微生物機能を活用した、微生物細胞を反応場・担体とする工業用触媒（燃料電池用白金系電極触媒、自動車用排出ガス浄化触媒）のバイオ調製技術の創出。
・原位置浄化法に即した微生物ハンドリングのための、微生物内包カプセルの開発、モバイル型レアメタル、重金属回収プラントの開発。

2-7-3. 適時性

環境汚染対策、資源の確保などの重要性は年々高まっているとともに、国際的な緊張も高まっている現状から、わが国として早急な技術確立が必要である。

環境汚染対策に関しては、平成 22 年に改正された土壌汚染対策法の施行により、掘削移動のランドファーミングよりも原位置浄化法が推奨され、今後の利用拡大が期待される。ランドファーミングよりも安価であるが、時間がかかるのがデメリットである。そこで、バイオ栄養剤や賦活剤の開発も進んでおり、時間短縮の技術開発も行われている。

わが国のものづくりに欠かせない原料として資源確保は国家レベルでの重要政策である。産業の持続性という意味でもレアメタル枯渇の問題は今後深刻さを増すことが想定され、リサイクル回収・浄化の技術的課題解決が急務である。

2-7-4. 研究成果によって期待される効果・将来性

●科学技術上の効果
・新規実用的微生物の探索による応用微生物学の推進。
・微生物ライブラリーや微生物データベース（遺伝子、生体分子を含む）の構築。
・メタル、重金属を代謝するための技術基盤の形成。

●ライフサイエンス全体に与える影響、発展性
・微生物内包カプセルの開発により、生体機能システム利用の安定性、持続性につながる可能性があり、安定した生体機能システム利用を用意に実用化できる可能性がある。
・様々な元素、物質を代謝できる生物、生体分子や代謝産物の発見、創製は、レアメタル回収や環境浄化だけではなく、微生物利用による化成品生産への展開も期待される。

●社会経済的効果

・土壌浄化による土地利用価値の上昇。
・経済発展に伴い顕在化し始めたアジアでの環境汚染へのわが国の浄化技術の輸出と国際貢献。
・都市鉱山に加えて、海底鉱物資源の開発へのバイオ回収技術の展開。
・無機元素のリサイクル産業への発展と、技術輸出による世界的貢献。
・医薬品原体の効率的合成などへの適応による経済効果。

引用文献

1) http://www.sbj.or.jp/division/division_metalbio.html
2) 財務省：貿易統計
3) 国土交通省都市・地域整備局下水道部「下水道におけるリン資源化手引き」
4) https://www.cgr.mlit.go.jp/ctc/tech_dev/kouryu/T-Space/ronbun/pdf/23_hirosima/23_hirosima_4-1.pdf
5) http://biohotlab.com/sasaken.html

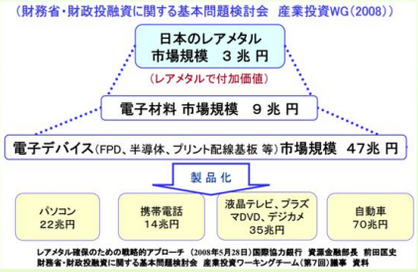
植物、微生物を用いた物質（リン、レアメタル等）回収技術

【背景、現状】

・国際競争力維持のため、先端産業に不可欠なレアメタル等の安定供給が必要であるが、国内の使用済み工業用品等からのリサイクル技術が不十分であり、希薄な濃度のレアメタル等を効率よく経済的に回収できる技術が必要。
・バイオテクノロジーを用いた物質回収技術は低コスト・低エネルギーで高効率な回収ができる技術として注目されているが、集積した微生物の回収方法等の問題で広まっていない。
・バイオテクノロジーを用いた物質回収としてバイオレメディエーション工法の浄化効果が認識され、コストも低下していることから、全体の比率としてはまだ低いが、近年この工法は伸びつつある。

【分野の概説】

（財務省・財政投融資に関する基本問題検討会　産業投資WG（2008））



レアメタル確保のための戦略的アプローチ（2008年5月28日）国際協力銀行　資源金融部長　前田匡史
財務省・財政投融資に関する基本問題検討会　産業投資ワーキングチーム（第7回）議事　資料

○レアメタルの高騰化とリサイクル率の低さから、3,600億円の廃棄に至っている。
○原発事故の影響でCs除去技術の開発による除染が喫緊の課題となっている。

バイオテクノロジー技術を用いた低コスト・高効率なレアメタル・金属等の回収技術が必要

【国内外の先導的な研究事例・研究領域など】

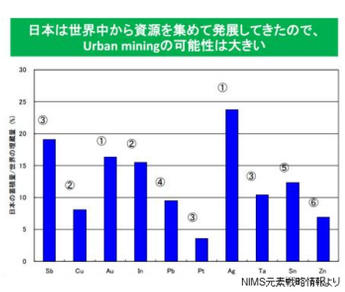
微生物カプセルと*Shewanella*属細菌による
パラジウム回収（大阪府大・森下仁丹）

光合成細菌による
セシウム除去
（広島国際大）

セシウム高吸収藻類
（筑波大）

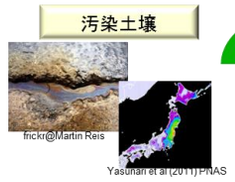
・微生物培養法およびメタゲノムスクリーニングによるレアメタル、重金属回収機能をもつ微生物や酵素の単離
・遺伝子操作等によるレアメタル、重金属回収機能の向上
・レアアースのバイオ抽出と吸着・回収技術の改良
・原位置浄化法に即した微生物ハンドリングのための微生物内包カプセルの開発、モバイル型レアメタル、重金属回収プラントの開発

植物、微生物を用いた物質（リン、レアメタル等）回収技術



NIMS元素戦略情報より

バイオソープション
バイオミネラリゼーション
バイオリーチング

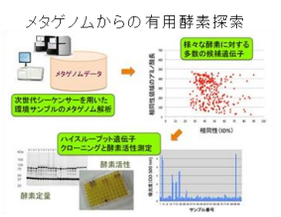


frickr@Martin Reis

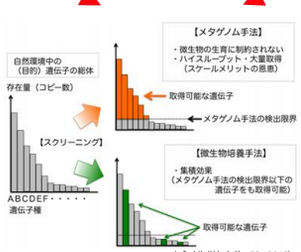
Yasuhara et al. (2011) PNAS

バイオレメディエーション
ファイトレメディエーション

http://www.toholab.co.jp/clinic/archive/6819/



長瀬（東北大生命科学研）



末永（化学と生物、53、2015）

双方のメリットを活かした
ハイスループットスクリーニングの確立

有用微生物、酵素の迅速な単離技術
バイオテクノロジーを用いた低コスト回収技術開発
微生物を利用した化成品生産への展開

2－8. 生物多様性情報学の充実と生物模倣学への展開

2-8-1. 概要

生物多様性情報学に関する研究開発は、地球環境問題の深刻化とともに、国際的に重要課題となり、これまでに個々の基本情報の集積は進んできた。しかし、種特性や遺伝情報、生物間相互作用など生物多様性を応用研究に利用するための情報の集積は十分でなく、これらの情報を統合して利用する枠組みは出来ていない。生物多様性情報は、ゲノムや遺伝子情報と異なり、多様なデータ形式（画像など）と緩やかな項目関係をもつため、従来型の統合データベースでは実現が難しい側面がある。そのため、Linked Data の技術を用いた統合化など、新しい情報技術を取り入れていく必要がある。こうしたデータベースの構築とともに、画像検索や発見的検索法などを取り入れて生物模倣技術・生物規範工学のシーズとして利用していく必要がある。

地球環境問題が深刻化するなか、その解決に向け、生物のもつ少ないエネルギーで効率的に機能する構造や、常温・常圧という低コスト環境下で機能するシステムに関する注目が集まっている。生物多様性の持続的利用へ向けての取り組みにおいて、地球環境に対して低負荷な技術開発が進められている。生物の仕組みを模倣することで、機能的上昇がみられる素材の例が示されつつある[1)]。こうした、生物模倣技術への関心は日本よりも欧米の方が高い。2010 年の”Global Biomimicry Efforts: An Economic Game Changer”（Fermanian Business and Economic Institute）では生物規範技術は 2025 年に年間 3000 億ドルの経済効果および 160 万人の雇用創出という経済予測がなされている[2)]。ドイツにおいては大規模な生物規範技術開発プロジェクトがはじまり、国際標準化を推進している。また、国際的な動向として、これまでの素材や生物機能の模倣に加えて、生物の行動や生態系、進化の模倣を取り入れた研究開発や応用が模索され始めている。こうした状況において、生物多様性情報は非常に重要であるとともに、その整備や確保が求められている。ABS（Access and Benefit-Sharing、遺伝資源の取得の機会及びその利用から生ずる利益の公正かつ公平な配分）に関する名古屋議定書が採択され、農林水産物だけではなく、生物模倣のもととなる遺伝資源の入手が困難になることが予測される。こうした中、生物多様性情報を充実させると共に、生物素材であるバイオリソースを充実させることが重要である。

2-8-2. 研究開発内容

- 地球環境への低負荷社会を実現するための情報基盤とする生物多様性情報の統合データベースシステムの開発。
- 生物多様性情報として、種名や分布情報のみでなく、関連応用分野で必要とされている種特性、遺伝情報、生物間相互作用といった情報の充実。
- 生物多様性分野の研究者以外でも容易に検索・使用可能な、生物多様性情報をもとに発想を支援するユーザーインターフェースの開発。
- 生物多様性保全とバイオリソース整備。

2-8-3. 適時性

地球環境の劣化にともない、生物多様性の保全と持続的利用、地球環境に対して低負荷な技術開発が求められている。生物多様性に関する情報基盤の構築と利用は、その保全と持続的利用に必要とされているだけでなく、環境に低負荷な社会実現に向けた技術開発のイノベーションシーズとしても重要である。生物模倣を行うとしても、その基になるのは生物のもつ様々な機能であることから、生物模倣学・生物規範工学にとって生物多様性保全は重要である。生物は常温、常圧という少ないエネルギーで効率的に機能する構造を進化の過程で獲得してきたことから、生物の技術体系は低環境負荷である。地球環境問題に対する上でも持続可能な技術体系の構築は喫緊の課題である。

2-8-4. 研究成果によって期待される効果・将来性

●科学技術上の効果

・生物多様性保全や生物多様性評価への発展に寄与する。また、低負荷技術の開発による、低コスト、高効率技術の工学への転用が促進される。
・自然史学・生物学と情報学・工学及び社会科学の連携による総合的な研究戦略基盤構築。

●ライフサイエンス全体に与える影響、発展性

・生物多様性の基盤が充実することで、ライフサイエンス全体への波及効果が期待できる。特に、ライフサイエンス情報統合データベースとの連携により相乗効果が期待できる。

●社会経済的効果

・エネルギー消費の少ない生産工程、効率的なエネルギー利用・変換、汎用元素の利用に寄与することで、環境低負荷社会へ向けての効果が見込まれる。

引用文献

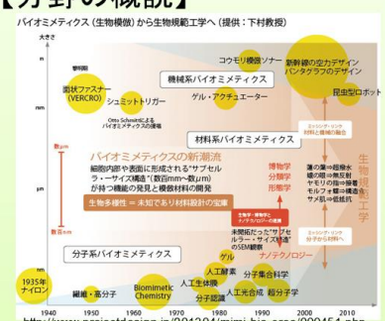
1)　http://techon.nikkeibp.co.jp/article/HONSHI/20120423/214531/
2)　http://www.sandiegozoo.org/images/uploads/BiomimicryEconomicImpactStudy.pdf

生物多様性情報の充実と生物規範工学への展開

【背景、現状】

・生物多様性の持続的利用のためには、生態系の現状をモニタリングするとともに、将来シナリオに基づいた予測が必要。特に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が必要。
・生物の形態や機能を規範とすることにより、これまで新素材や機能性の開発が行われてきた。
・生物の行動や生態系、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。
・生物模倣技術を進めるにあって、規範となる生物に関する情報（生物多様性情報）の基盤整備が必要。

【分野の概説】



http://www.projectdesign.jp/201304/mimi-bio-cree/000451.php

○米国レポートによると、生物規範技術は2025年に年間3000億ドルの経済が予測されている。
○愛知目標による生物多様性・生態系サービスの保持、持続可能な利用が求められている。

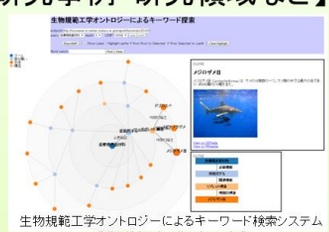
生物多様性のデータベース化の充実と生物規範工学への応用展開

【国内外の先導的な研究事例・研究領域など】

生物模倣技術の各社の主な取り組み

	日東電工	シャープ	トヨタ自動車
商品	粘着テープ	扇風機	掃除機	自動車部品
模した生物	ヤモリ	アサギマダラ	ネコ	キリギリス
模した構造	足裏に密集する微細な毛	羽のくびれとうねり	舌の表面のトゲ状突起	足裏のハチの巣形状

SankeiBizより


生物規範工学オントロジーによるキーワード検索システム
(http://biomimetics.hozo.jp/)

・地球環境への低負荷社会を実現するための情報基盤とする生物多様性情報の統合データベースシステム
・生物多様性情報の充実による生物資源の持続的利用（バイオリソース整備等）や生物模倣工学への展開
・生物多様性情報を活かした生物模倣データベースの構築による自然史学・生物学と工学の融合

生物多様性情報の充実と生物規範工学への展開

2－9. グリーンインフラ・エコ防減災

2-9-1. 概要

生態系サービス（人間社会において生態系から得られるさまざまな便益）として自然の有する防災や水質浄化などの力を利用するグリーンインフラストラクチャー（グリーンインフラ）の手法がヨーロッパを中心に積極的に利用され始めている。社会的に天災の脅威への備えが重要課題となってきており、「生態系を基盤とした災害リスクの低減（Eco-DRR: Ecosystem-based Disaster Risk Reduction）」を実現する手段としても、グリーンインフラ手法が重視されるようになった。わが国では工学分野における遊水地や総合治水に関する研究、生態学分野における生物多様性研究、応用生態工学分野における自然再生研究など、各分野によって関連する基礎的研究は行われてきたが、そうした成果をグリーンインフラとして統合的に活用する研究領域は未知である。その原因として様々な分野を統合する研究・教育が行われていないことによるものと考えられる。こうした中、既存の組織・分野を超えた有機的な融合による「日本山学アカデミア」が発足し、地球温暖化といった気候変動がもたらす影響を気候・水及び物質循環・炭素循環・生態系の観点から推測、生物多様性保全や防災への対応に取り組むプロジェクトが進行しつつある[1)]。また人材育成の観点からも、6 大学連携による山岳科学共同学位プログラムの開設準備が行われている[2)]。地球温暖化によるゲリラ豪雨、巨大台風の増加が予測されるなか、アジアモンスーン気候に適応したグリーンインフラ整備は、人口減少、超高齢化社会を迎えるわが国において、国土保全上、ますます重要になると考えられる。

わが国は急激な人口減少社会に突入しており、農地ばかりでなく、学校、道路などの社会資本を維持することも、ますます難しくなると予測される。そうした中、グレーインフラに頼る公共投資を続けるには、明らかに限界がある。そうした中、自然環境に応じて、生態系のもつ機能を最大限に活かし、維持管理費用も最小限におさえたインフラ整備が必要となってくる。

2-9-2. 研究開発内容

- 生態系サービス活用による管理コストを低減する技術開発及び生態系が持つ多機能性の一体的な評価システムの開発。
- 生態系による防災機能の評価システムの開発。災害時の防災機能を最も発揮できる生態系の構造に関する調査研究。
- 生態系を用いたインフラ整備の際に、竹林の繁茂や倒木など課題が多い場合に、その修復方法の検討方法の開発。
- 温暖化に伴う洪水氾濫地域の拡大、豪雨発生シミュレーションなど、災害ハザードマップの構築。

2-9-3. 適時性

人口減少に伴い、耕作放棄地の拡大や森林の荒廃が進んでいる。また、地球温暖化に伴い、豪雨頻度の上昇や東日本大震災のような地震・津波災害が危惧されている。そうした中、グレーインフラに頼る公共事業の限界が見えはじめており、こうしたグレーインフラ

の維持管理が問題となってきている。国土強靭化を考える上で、災害時における緩衝空間としてのグリーンインフラを整備・配置することで、平常時には生態系サービスを享受できるとともに、維持管理コストの低減にもつながると考えられる。

また、研究レベルにおいても、工学、生態学の基礎的知見、例えば、洪水や津波のシミュレーションモデル、生態系維持機構、自然再生技術などは、すでに相当レベルに積みあがっており、生態系サービスの高度な発揮を考える上でも重要な時期でもある。

2-9-4. 研究成果によって期待される効果・将来性

●科学技術上の効果

・地球温暖化により地域の自然の変化、および人口減少や土地利用放棄などの社会的なレジームが大きく変化している。そうした現状で、グリーンインフラの整備は短期的には災害ハザードと、生態系の推移予測技術の発展が期待される。中長期的にはグリーンインフラの構造と機能、その生態系の評価と多様性保全技術の確立、さらに国土計画における配置と効果について発展へとつながる。

・災害は人間にとって負の影響であるが、生態系においては攪乱であり、生態系の構造・機能という長期的な維持には欠かすことのできないプロセスである。グリーンインフラにおいて、こうしたプロセスを評価することで、生物多様性保全技術の確立につながる。

●ライフサイエンス全体に与える影響、発展性

・これまで、生態学、環境科学が国土計画に果たす役割は、ほとんど議論されてこなかった。生態学や工学で蓄積された技術を、地球温暖化と人口減少というレジームシフトに合わせてグリーンインフラとして結実させることで、生態学、工学、応用生態工学など、様々な分野において大きなインパクトにつながる。

●社会経済的効果

・グレーインフラからグリーンインフラの導入により、維持管理経費の削減につながる。人口減少における税収減少に対応可能な社会資本整備につながる。

・グリーンインフラの整備、配置により、地域によってコウノトリやタンチョウといった渡り鳥の経由地となることを秘めている。地域産業と結びつけることで経済的効果を生む可能性は十分にある。

引用文献

1)　http://jalps.suiri.tsukuba.ac.jp/
2)　https://www.tsukuba.ac.jp/wp-content/uploads/2015070212093.pdf

グリーンインフラ・エコ防減災

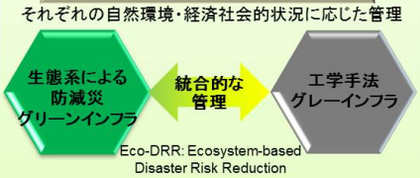
【背景、現状】

・人口減少に伴い、これまでの管理維持費のかかるグレーインフラからの転換が求められている。
・ヨーロッパを中心として、「生態系を基盤とした災害リスクの低減（Eco-DRR: Ecosystem-based Disaster Risk Reduction）」を実現する手段としてグリーンインフラ手法が重視され始めている。
・わが国の特徴として、工学分野の総合治水に関する研究、生態学分野における生物多様性研究、応用生態工学分野における自然再生研究など、各分野における研究は推進されているが、それらを統合的に活用する研究領域はない。

【分野の概説】

防災手法の費用対効果の判断

それぞれの自然環境・経済社会的状況に応じた管理



Eco-DRR: Ecosystem-based Disaster Risk Reduction

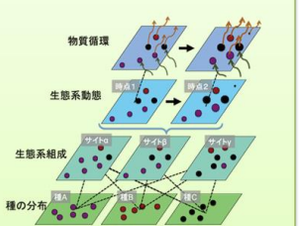
生態系を基盤とした災害リスクの低減：非即効性ではあるがその後の管理費減につながる

○生態系サービス活用による管理コスト低減および生態系のもつ多機能性の評価システム構築。
○防災機能を最大限に発揮できる生態系の構造の把握。
○グリーンインフラの課題とそれを補うグレーインフラの統合的な管理システムの構築。

グリーン・グレーの統合的管理による国土強靭化

【国内外の先導的な研究事例・研究領域など】

中部山岳地域における生物多様性ホットスポットの判別と植生タイプ識別（JALPS地球環境再生プログラム）

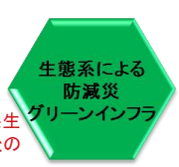


生物多様性情報の標準化 マッピングによる情報統合（グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス 環境情報分野）

・生態系サービスおよび生態系のもつ多機能性の一体的な評価システムの開発
・生態系による防災機能の評価システムの開発
・生態系構造と防災機能の関連性把握
・温暖化に伴う洪水氾濫、豪雨発生シミュレーション等、災害ハザードマップの構築

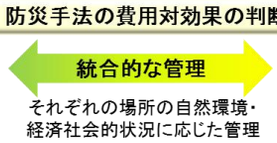
グリーンインフラ・エコ防減災

維持管理コスト・自然との共生
非即効性ではあるがその後の
管理費減

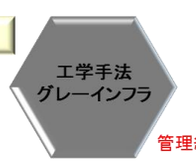


Eco-DRR: Ecosystem-based Disaster Risk Reduction

防災手法の費用対効果の判断

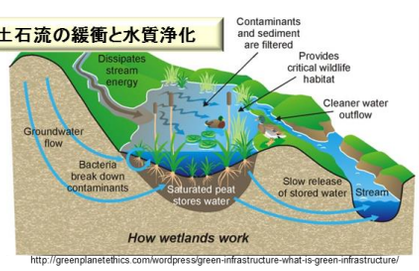


それぞれの場所の自然環境・
経済社会的状況に応じた管理



即効性
管理維持コスト高

土石流の緩衝と水質浄化

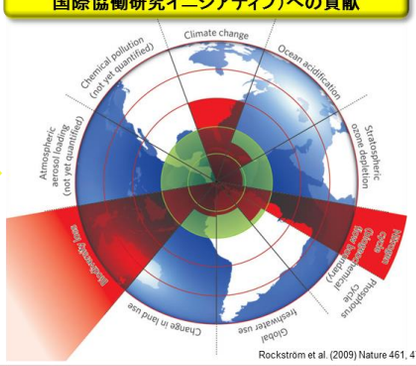


http://greenplanetethics.com/wordpress/green-infrastructure-what-is-green-infrastructure/

深根性樹木による防潮林と津波の減災

いのちを守る森の防波堤推進東北協議会

Future Earth（持続可能な地球環境についての国際協働研究イニシアティブ）への貢献



Rockström et al. (2009) Nature 461, 472-475

生態系サービス活用による管理コスト低減
生態系のもつ多機能性の評価システム構築
防災機能を最大限に発揮できる生態系の構造の把握
グリーンインフラの課題とそれを補うグレーインフラの統合的な管理システムの構築

3. グリーンバイオ分野の今後のあるべき研究体制

－食と農の“空間共有型”産学官協働クラスター「アグリフードピア」の提案－

本章では、本報告書で扱ったグリーンバイオ分野の 3 つの研究開発領域のうち、「食料生産と安全保障」の領域について特に注目し、今後あるべき研究開発体制について具体的な提案をする。グリーンバイオ分野の 3 つの研究開発領域のうち、「食料生産と安全保障」に特に焦点を絞り、最も喫緊かつ最優先の課題と認識した理由は、以下の 3 つである。

(1) 人間の生命活動に最も根源的に関わる

(2) 国全体としての経済効果は低いものの地域経済との関連が密接

(3) 政府方針「攻めの農業」や TPP への対応など、政策的な重要度の高さ

体制の名称、「アグリフードピア」は、“Agri（農)”+ “Food（食料)”＋“peer（同僚、同輩、仲間)”を意味し、「ユートピア」にも音が通じるものとして挙げた。

以下に、「食料生産、農業現場をめぐる社会的背景」、「歴史的な俯瞰」、「産学官協働体制の必要性とその具体的な方策」、「研究開発課題」、「わが国における産学官連携体制の現状」「海外の産学官連携体制の詳細」について述べる。

3-1 食料生産、農業現場をめぐる社会的背景

世界的な人口増加、二酸化炭素の排出、天然資源の乱用が続いており、このままの状態では 2030 年までに地球が 2 つ必要になるとの分析結果が、世界自然保護基金（World Wide Fund for Nature, WWF）の「生きている地球レポート 2012」で発表された[1)]。実際、世界人口は 2030 年には 80 億人、2050 年には 90 億人に達すると見られている（図 3-1、一部図 1-1 の再掲)。このような爆発的な増加にもかかわらず、食料生産は 1990 年で 20 億トン、2000 年に 21 億トンと一定の伸びしか示していない（図 3-1、一部図 1-1 の再掲)。このことは大規模な食料危機がおきる可能性を示しており、実際、現時点においても 8.4 億人（8 人に 1 人）が栄養不足状態である。

一方、国内に目を移すと、急激な高齢化に伴い就農人口の著しい減少が進行中である（図 3-1、3-2)。これは、今後わが国の農地を維持するためには、個別経営から大規模経営へと形態を大転換する必要があることを意味する。また、わが国の自給率はカロリーベースで 39%と非常に低い水準である（図 3-1)。こうした国内状況は、将来的な食料供給の不安定化や、食料安全保障への影響についても大きな懸念を生じさせる（図 3-2)。また、これまでわが国の 1 億人以上の人口を支えてきた農業は、資本や労働力の多量投下により単位面積あたりの収益を上げる「集約型農業」であり、大量の肥料や農薬、エネルギーの投入を前提として成立していた。窒素肥料や農薬の製造には膨大なエネルギーを必要とし、リン肥料はその原料として輸入リン鉱石に 100%依存している。リン資源は、今世紀中に枯渇すると予想される（図 3-1）ため、これまでの「集約型農業」のあり方を抜本的に改革する科学技術が必要である。わが国の地域経済は、主食であるコメだけでなく、野菜類、果樹類、雑穀類など、多様な農作物および食資源の生産および販売により成り立っている。野菜類の産出額 1.8 兆円は主食であるコメの産出額 1.5 兆円を超えており（図 3-3)、わが国の食資源の多様性と価値を表している。多様な食資源の生産基盤の確保は、食料安全保

障、すなわちフードセキュリティーの実現にも重要である。フードセキュリティーとは、「すべての人々が、あらゆるときに、活動的で健康な生活を送るのに必要な食事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」[2)]とされている。多様な食資源の確保は、栄養学的な視点、ひいては国民の健康な生活の維持にとって重要であるのは言うまでもない。

こうした国内外の背景と将来的な予想を総合的に考慮すると、将来的に著しい農業力の減少が起こった場合、産地経済の活力低下と衰退、食料生産基盤および食料安全保障の崩壊、栄養学的な観点からの国民の健康状態の低下、などが懸念される（図 3-2)。すなわち農業・食料生産の競争力強化、持続可能な農業への転換は、喫緊の課題であることは明白である。

3-2 歴史的な俯瞰

農業・食料生産技術に関して歴史的な俯瞰を、科学技術、世界情勢、国内情勢、国内農業食料関連の項目について行った（図 3-4)。以下、(1) 生産技術・科学技術と、(2) 社会・政治的動向に分けて、関連項目ごとに記述する。

(1) 生産技術・科学技術の歴史的な俯瞰

【ハーバー・ボッシュ法の開発と「緑の革命」】

19 世紀末にハーバー・ボッシュ法の開発により、化学肥料が開発された。1940 年代頃にイネやコムギでの半矮性品種の開発が行われ、そして 60 年代ににかけてこれらの品種と化学肥料の大量投入の組み合わせで、「緑の革命」が実現した。これにより、資源を大量に投入する形態ではあるが、単位面積あたりの生産性の向上が達成され、イネとコムギの増産により世界的な食糧危機がある程度回避されたとされる。

【食料増産達成後の国内外の技術的動向】

1960 年代以降、食料増産を達成した先進国では農産物の過剰在庫が問題となった。それでも欧米では農産物を輸出戦略品と位置づけ、更なる生産量の増加が達成されてきた。一方、わが国では 1970 年からコメの生産調整を行った結果、収量性増加に関する技術開発が進まなくなった。収量増加に向けた技術開発を続けたアメリカと、わが国について、それぞれ最も主要な農産物のコメとトウモロコシの生産量の推移を図 3-5 に示した。その差は歴然たるものである。

【遺伝子組換え技術の動向】

1950 年代の DNA 二重らせんモデルの提唱が、1970 年代の遺伝子組換え技術の爆発的な発展へとつながり、1980 年代後半以降には、植物でも遺伝子組換え体が作出できるようになった。その結果、トウモロコシ、ワタ、ナタネなどを中心に遺伝子組換え技術開発が進み、栽培面積は世界的に見ると増加の一途を辿っている（図 3-6)。これらの遺伝子組換え作物の多くは害虫抵抗性や除草剤抵抗性を賦与されたものである。

【ゲノム育種の動向】

2000 年代次世代シーケンサーが開発されて以降、様々な作物種においてゲノム解読が行われてきたことは、近年特に注目に値する（図 3-7)。このことは、ゲノム情報の充実とと

もに、遺伝子組換えとは全く別の技術である、マーカー選抜育種があらゆる農作物で自由自在に駆使できるようになることを意味する。この技術は、幼苗のうちに重要形質を示す遺伝子型を把握できることから、既に品種開発の期間短縮に多大な貢献をしており、今後も期待が大きい。

【新しい植物技術（NPBT）とゲノム編集の動向】

ゲノム情報の充実を背景として、狙った遺伝子に特異的に変異や置換を導入する技術として、ゲノム編集技術が台頭してきた。このゲノム編集技術は植物だけではなく、動物でも広く用いられている技術である[3)]。また、ゲノム編集技術を含めた「新しい植物育種技術（NPBT, new plant breeding techniques)」[4, 5)]の開発が海外を中心に進展している。これらの技術開発が進展している理由として、慣行の交雑育種法や突然変異育種法の効率を高めることができる、育種年限が短縮できる、といった点が挙げられる。加えて、これらの技術によって作出される作物には、外来遺伝子が存在せず、慣行の育種技術によって作出された作物との識別が困難になる場合が多い。現在、国内外で NPBT によって作出される作物・食品の安全性や環境評価にかかわる遺伝子組換え規制上の取扱いが議論されている。

(2) 社会・政治的動向

【フードセキュリティー（食料安全保障)】

前述の「緑の革命」にも関わらず、食料の分配や調達の課題が残ったことや、1972 年の世界同時不作が影響し、依然として飢餓は発展途上国を中心に世界的な問題として残った。1974 年の世界食糧会議で、“Food Security”という概念が提唱された。その後わが国では、農政審議会が 1980 年にこの“Food Security”に対し「食料安全保障」という訳をつけた。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。この基本事項は現在でも受け継がれている[6)]。近年、このフードセキュリティーという概念は、戦争やテロといった安全保障と同様に世界各国で国策として重要な位置を占めてきている。また、近年ではバイオ燃料と食料をめぐる動向に関連して、この問題が取り上げられることも多い。

【国内情勢と国内農業・食料関連事項の変遷】

国内情勢に目を向けてみると、戦後の地主制廃止や財閥解体など、農業においても産業においても競争力が著しく低下した（図 3-4)。また、高度成長期ともあいまって、都市への人口集中と農業人口の減少が続いた。食の欧米化とともにコメの消費が減少したこと、および肥料の投入や農業機械の導入などによって生産技術が向上したためコメの自給が達成された。その後過剰米の問題や米価維持の方針から、既に「食料増産達成後の国内外の技術的動向」の項で述べたように、1970 年に本格的な生産調整が開始された。このことは、本来の育種の第一目標であるべき収量性向上がその優先性を失うことを意味し、育種学はじめ関連技術の発展を妨げる結果となった。

【食料輸出入の動向】

90 年代後半以降に起こった様々な農産物の輸入自由化を含め、わが国の自給率は減少の一途をたどり、現在はカロリーベースで 39%である。政府は 2020 年度までに 50%に引き上げることを目標としている。アメリカを中心に農産物の関税撤廃および自由化がわが国に対し要求されてきた背景には、海外では生産過剰分を戦略物資として輸出し世界展開す

ることで、価格を維持しつつ生産調整を行わない農業政策・方針だったためである。つまり、農家へ補助金を直接支払いすることで、自国の農業を発展させつつ、輸出産業として確立させることに成功した。

直近の動向としては、TPP（環太平洋戦略的経済連携協定）の大筋合意を受け、農業分野への多大な影響が懸念される。わが国でも、第二次安倍内閣の成長戦略の中でうたわれている「攻めの農林水産業」を支える科学技術の発展とその橋渡しによる産業界の活性化が重要な課題となっている。農産物の輸出増加は、国内の生産量向上にもつながるとともに、自給率改善ももたらす。わが国の農産物は、輸出額が約 5000 億円に比べ、輸入額が約 8 兆円と過剰な輸入超過となっている（図 3-8）。この是正も含め、政府の成長戦略として 2020 年に農産物輸出額を 1 兆円に倍増する目標が立てられた。農産物輸出を行うにあたり、ユネスコ無形文化遺産「和食；日本人の伝統的な食文化」登録、ミラノ万博・日本館における日本食・食文化の発信が行われてきた。こうした情報発信および輸出拡大は重要であるが、2020 年の先を見据えた農林水産業自体の基盤強化が今後益々重要となる。

【企業の動向】

農業・食料・食品関連は、参入する民間企業が少なく、研究開発投資の規模および比率も小さい。1980 年代後半には植物にもバイオテクノロジーが応用可能な時代を迎え、一躍植物バイオブームが訪れ、国内の大企業でも、植物バイオおよびグリーンバイオ関連の研究が行われたものの、遺伝子組換え作物への忌避感・嫌悪感やバブル経済の崩壊などの影響で、主要企業が次々と植物バイオ部門から撤退した。企業での研究が衰退したことで、大学や研究機関での基礎研究が社会実装される経路が、ますます先細る結果となった。

3-3　産学官協働体制の必要性とその具体的な方策
－　産学官協働クラスター体制「アグリフードピア」－

【わが国における産学官協働体制の必要性】

以上の社会的背景、歴史的俯瞰をふまえると、産学官の乖離がこの分野の競争力の国際的な低下に決定的に影響していると考えられる。今後の農業・食料の研究開発の方向性としては、超スマートかつサプライチェーンも考慮した一貫的な研究開発と製品化が必要である。特に輸出競争力強化を狙うためには、ニーズオリエンテッドな育種開発・製品開発が必須である。それを迅速かつ一貫的に行うにあたり、近年、食料・農業関連で強みを発揮する海外の主な研究開発体制および動向を参考にし（図 3-9）、以下に、今後のわが国のあるべき研究開発の体制について述べる。国ごとの海外動向の詳細については、3-6 で述べるので参照されたい）。

【海外の関連する主な取り組み】

クラスターとは、Porter によると「ある特定の分野における相互に関連した企業や諸機関による地理的な集積」[7]とされる。シリコンバレーのような産業集積によるイノベーション促進がその狙いである。農業・食品分野においても、オランダ・フードバレー、デンマーク・フードクラスター、韓国・フードポリスのように異分野連携による産学官共同研究が積極的に進められ、イノベーション創出と産業競争力の強化が行われている（図 3-9）。

海外での取り組みで共通する場合が多く特に注目すべき点は、

①農業・食料・食品という特定の分野における大学、研究機関、企業、すなわち産学官が地理的に近い位置で集積している点
②コーディネーターを積極的に活用し、異業種連携および地域的連携につなげている点、およびコーディネーターの人材育成を行っている点（例：EU で行われている農村アニメーター、オランダ・フードバレーにおけるコーディネーター）
③競争力強化に向けたプラットフォーム（研究拠点）を形成している点（例：フランスの「競争力拠点」、オランダのフードバレーにおけるワーゲニンゲン大学のメタボローム解析拠点など）

以上をまとめると、地理的に近い位置に研究開発プラットフォームを集積し、それらの間でネットワークが構築され、異業種からの参入を促進し、そうした異分野を調整するコーディネーターの育成と活用により競争力強化を促進する、といったことが特に肝要である。わが国でもこうした取り組みを強化し、国内の生産性の維持と輸出力強化、食糧安全保障の確保を実現するため、以下に”空間共有型”産学官協働クラスター体制「アグリフードピア」について提案する。

【「アグリフードピア」の目標、機能、期待される成果】

わが国においては近年、民間企業での研究開発に要する費用増加や新製品の発表スパンの短期化のため、基礎研究の比率が下がり、実用化に近い応用研究開発に注力する傾向が強い[8)]。一方、大学においては論文偏重の評価が続いたため、基礎研究を重視する傾向が強い。今述べた二つのことは、農業・食品分野に限らず、医学など他のいくつかの分野においても見られる傾向である。また、農業・食品分野は、売上げに対する研究開発投資の割合、および、全体の規模も、他の産業分野に比べて少ないという特徴がある。アカデミアでは基礎、民間企業では実用化にごく近いところ、と住み分けがなされ中間を部分が大きく欠落している。研究開発による産業振興を行う構造がそもそも極めて脆弱であることを意味する。

これまでも、農業・食品分野をはじめ、各府省庁の施策により、異分野融合のグループ事業、コンソーシアム形式の研究体制が行われてきたが、本格的な産学官連携に至らないのは、Porter の定義による「地理的な」が十分でないことも原因の一つであろうと考えられる。

そこで本調査報告書では、「食料生産と安全保障」関連分野の今後のあるべき研究開発の体制として「アグリフードピア」を提案する（図 3-10）。この体制の目的は、産学官のもつ知の共有・集約による共同研究の発展や、産業界が得意とする社会実装に向けたシームレスな研究体制の構築だけではなく、大学側の機能として、こうした産学官連携人材の育成といった面も含まれる。こうした協働体制が目指す目標は、シーズと社会ニーズのマッチングによる社会貢献、新技術の創出、国際競争力強化や産業として競争力を農業・食品産業分野につけることである。

わが国は南北に長いことから、地域ごとに得意とする研究開発の分野や品種が存在する。その地域ごとに得意とする分野を活かせるクラスターを設置し、地域の活性化につなげる。特に農業は地域振興において重要な産業であり、農業の発展は地域の発展につながる。各クラスターをネットワーク化して、情報の共有を行い、世界への発信力を高めることも重要であり、海外への技術移転による国際貢献も重要な課題である（図 3-11）。

ヘッドクオーターとして、産学官戦略組織（「アグリフードピア」戦略組織）を設置し、情報共有を円滑に進めるとともに、各クラスター間の情報共有や要素技術のネットワーク内への普及やマッチングを行う。そのためには、情報収集・分析能力が必要である。また、その他にも、勉強会や交流会の設定、ニュースレターなどの活用、知財管理やベンチャー立ち上げ支援といったことが産学官戦略組織の役割である（図 3-12）。この組織には、いわゆるシンクタンク機能を持たせることで、クラスターネットワーク内の情報だけではなく、海外の情報を積極的にネットワーク内に紹介する。これにより、技術力の水準を上げ、国際的な動向をいち早くキャッチアップできると考えられる。また、シンクタンク機能により得られた情報から、産学官戦略組織内で精査を行い、新たな戦略を提案する機能をもたせる。このシンクタンクは様々な分野に精通する必要があり、それらを統合的に検討・実行する機能が求められる[9)]。シンクタンクはコーディネーターに情報を提供する。いわば科学技術顧問とそのためのシンクタンクといった関係を築き、コーディネーターの補佐を行う組織の構築が必要である。JST-CRDS 吉川弘之前センター長の言葉を借りると「科学技術イノベーションに必要な考えるべき事項は、①科学技術の状況を明らかにし、②社会的期待を知り、それを実現する③イノベーション能力を同定し組織すること」[9)]である。これは農と食の産学官戦略組織にも当てはまることで、これらを達成するためのシンクタンクの役割としては以下である。

① 農と食に関わる科学技術イノベーションの源である学術研究の状況を把握し、その状況から帰結されるイノベーションの可能性を明らかにする。
② 農と食に関して、現在の国民生活、経済、国際関係、地球環境などに根拠をもつ社会的期待を明らかにし、それを実現するための科学技術を対応させて科学技術イノベーション戦略を構成する。
③ イノベーションの担い手である産業の状況を把握して、科学技術イノベーション戦略に応えるイノベーション組織を構成する。

これらのシンクタンクからの提案に基づき、コーディネーターによる組織改変、統合などが必要となる。

3-4 研究開発課題

研究開発の具体的な課題の前に、まず研究開発の全体的な方向性に関して述べる。図 3-13 はライフサイエンス・臨床医学ユニットで 2014 年度に刊行した「研究開発の俯瞰報告書」[10)]の概要でも掲載した本分野のあるべき方向性を示すものである。従来のメカニズムの解明から橋渡し、社会実装といった一直線でなく、フィードバックを考慮する必要があることを示している。農と食の分野であれば植物や微生物、動物といった生命科学研究によるメカニズムの解明をもとに、農作物やバイオマス植物での評価および圃場試験などを行い、それらを通じて創出された技術は、小規模な集団での栽培などを通じて実践する。そうした実践を通じて得られる様々なデータに基づいて技術やシステムはさらに洗練される。こうした社会実装がなされるが、社会（集団）における実践によって生み出される多種多様なビッグデータを解析し、検証・評価を重ねることで次の新たな課題（テーマ）を抽出する。各段階で倫理面や社会における合意形成を常に意識する必要がある。こうした一連の

サイクルを循環させることで、農と食のイノベーション創出が加速、最適化され、社会に与えるインパクトが最大化するものと考えられる。このコンセプトをもとに農と食の産学官協働研究の例として図 3-14 に示す。具体的に抽出した研究課題については第 2 章の重要研究開発課題（2-1～2-4）に記載してあるので、そちらも参照されたい。

技術的な開発やプロトコルの確立は植物科学分野の開発で行われる。例えば、メタゲノムやオミクス解析による品質評価、SNP と形質との関連付けなどが重要な研究課題となろう。こうして見出された重要形質を様々な作物へと適応するとともに、ゲノミックセレクションや新しい育種技術（NPBT, new plant breeding techniques）により、迅速な育種品種作出へとつなげる。その際に遺伝子組換えや新しい育種技術の社会受容への検討も必要である。農作物の場合、いかに良い品種でも栽培方法によって収量がいかようにも変わってくるため、フィールドオミクスやモニタリング技術開発による栽培技術の充実が必要である。農場に関しては世界的に農産物を展開することも含め Global G.A.P.取得がますます重要となってくる。出来上がった農作物の評価を含め、メタボローム解析やコホートで得られる大規模情報の解析など、栄養科学の面からの技術開発も必要となってくる。こうした研究において重要なのは、各技術開発で得られた知見を俯瞰し、メカニズムの解析によりブレイクスルーとなりうるものを抽出する作業が重要である。こうした循環をもたらすことで、実際の課題に即した技術開発が促進され、イノベーションへとつながるものと考えられる。

現在の政府の方針では、農産物の海外輸出が挙げられている。例えば、海外市場のみを狙う研究開発もあり得る。流通会社やコンサルティング会社を含めた海外市場動向調査を行い、その市場のニーズに即した商品力向上に特化した研究開発という方向もある。技術的な基盤は共通なものも存在するが、応用的な研究となると、ニーズに即した研究開発も取り入れる必要がある。

3-5 わが国における産学官連携体制の現状

現在進行中の産学官連携として、コンソーシアム形式であるが、内閣府主導の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）が挙げられる。SIP では 11 課題が推進されており、農と食に関わる課題は「次世代農林水産業創造技術」[11]である（図 3-15）。この課題では「農業のスマート化を実現する革新的な生産システム」、「品質と収量を兼ね備えた農林水産物を提供する技術」、「新たな機能の開拓による未来需要創出技術」の 3 つの大課題のもとコンソーシアム形式により出口（実用化・事業化）を見据えた研究開発が行われている（図 3-16）。具体的には人工衛星やセンシングシステムからの情報解析をもとに生産工程を自動化、知能化する農業のスマート化、メタボローム解析などを用いた収量や品質をコントロールする栽培管理技術開発、ゲノム編集による多収性のコメ、単為結果性や糖度を上昇させたトマト、養殖適性を高めるクロマグロの作出、機能改善効果のある農林水産物・食品の開発が行われている[12]。

SIP「次世代農林水産業創造技術」では出口を見据えた研究が主体であるが、その手前の応用研究から橋渡しも含めた形で農林水産技術会議が主導で「知」の集積と活用の場の構築の検討が行われている。その検討会から提出された中間とりまとめ[13]の概要を図 3-17

に示す。「知」の集積と活用の場の全体構造としては、「基盤となるレイヤー（産学官連携協議会（仮称））：多様な「知」の集積」、「主体となるレイヤー（研究開発プラットフォーム）：新たな事業・商品の創出、研究開発プロジェクトの管理」、「研究開発プロジェクト（コンソーシアム）：研究開発の実施」の 3 層レイヤー構造による仕組みを想定している。2015 年 12 月には「知」の集積と活用の場「産学官連携協議会（準備会）」の設立会議が開催され、260 名の入会により設立された[14]。実際にどのような体制になるかは、今後の運営次第ではあるが、コンソーシアム形式から一歩踏み込んだ“空間共有型”産学官協働体制やプロデューサー的人材を補佐するシンクタンクの必要性を提案する。また、上記 SIP と「知」の集積と活用の場の連携は不可欠であるが、SIP で実行しているコンソーシアム体制よりも、“空間共有型”体制の方が実質的に産学官連携が促進されるものと考えられる。ただし、実行にはハードルがあるとは考えられるので、“空間共有型”とコンソーシアム形式を上手く折り合いをつけて運営していくのが現実的である。地方創生において、地域活性化の主な担い手は農林水産業者であることから、産学官連携体制もある特定の場所だけではなく、地方へと広めていく必要がある。

文部科学省関連の取り組みとしては、共同利用・共同研究拠点として岡山大学資源植物科学研究所[15]、筑波大学遺伝子実験センター[16]、鳥取大学乾燥地研究センター[17]が拠点認定を受けて、共同研究を実施している（図 3-18）。平成 22 年度以降の採択課題一覧によると、筑波大学遺伝子実験センターにおける拠点事業のみ、産業界や NPO との共同研究がみられる。これは国内最大規模の組換え体評価施設を有すること、組換え体のリスク管理だけではなく情報発信も拠点事業に含まれていることにもよる[18]。日本学術振興会においては学会と産業界、基礎研究と開発研究の相互協力の媒介役として、産学協力研究委員会を設置している[19]。現在活動中の 61 委員会において、植物に関わる委員会は「地球環境・食糧・資源のための植物バイオ第 160 委員会」[20]および「植物分子デザイン第 178 委員会」[21]の 2 委員会である。これらの委員会では研究集会などを通じて、産学の交流と共同研究や植物・作物研究の産業利用を加速する働きをしている（図 3-19）。また、本年から一般財団法人バイオインダストリー協会では植物バイオ研究会が発足した（図 3-20）。設立趣意としては、企業による植物バイオへの取り組みは 1980 年代をピークに減少してきたが、近年、植物の産業利用の可能性について再評価されつつあることが挙げられている[22]。これは政府が発表した「成長戦略」において、企業による農業生産法人への出資規制緩和[23]の影響や、植物研究も含め多くの研究開発に関わってくる「生物の多様性に関する条約の遺伝資源の取得の機会及びその利用から生ずる利益の公正かつ衡平な配分（ABS, Access and Benefit-Sharing）に関する名古屋議定書」[24]の批准も影響しているものと考えられる。このようなコンソーシアムや産学官連携体制が整備されつつあるが、コーディネーターによるガバナンスと研究者・開発者による協力体制が重要となり、「点」を「面」で捉える多角的な取り組みが必要である。

3-6 海外の産学官連携体制の詳細

3-6-1 オランダ（オランダ・フードバレー）

オランダにおいて、Wageningen University and Research Center （WUR）を中核として世界各国から 1,500 を超える食品、化学関連企業が集積した一大食品研究開発拠点、フードバレーを形成している（図 3-21）[25]。WUR はワーヘニンゲン農業大学と DLO 研究財団との統合により 1997 年に設立された共同機関（コンソーシアム）である。現在でこそ、世界的にも注目を集めているが、1990 年代では若者の農業離れが進み学生数の減少に苦しみ廃校の危機にあった。その頃、財政逼迫に悩む政府と、専門領域に閉じこもる弊害が表面化していた研究機関との危機感から、産学官が共同で組織再編を行い、1997 年に WUR が設立された[26]。基本方針として、研究者の意向よりも企業などの学外ニーズや要望に応じた研究を基本に据える組織に転換した。WUR は農業技術・食品化学、動物科学、環境科学、植物科学、社会科学の 5 グループにより組織され、ワーヘニンゲン大学の各学部と DLO 財団研究機関とから構成されている（図 3-21）。学生数約 10,000 人、教職員約 5,000 人（ワーヘニンゲン大学、DLO 研究機関）、WUR で約 6 億ユーロの予算規模となっている[27]。WUR の戦略として、「QOL 向上のため、自然のもつ潜在能力の探索」をミッションに掲げ、食料・水・生物多様性・気象・健康に関する専門的知識を与えて世界的に深刻な問題に対処すること、基礎と応用科学の教育を組み合わせることで相乗効果をもたらすことなどが挙げられている[28]。WUR では、試験・応用・開発研究を担っており、食品の品質検査や加工、保存に関する試験などの様々な研究サービスが提供されている[29]。食品関連企業にとっては最先端設備や研究領域にアクセスできることもフードバレーに参加する大きな要因となっている。特に、近年では食品分野におけるメタボローム解析が重視され、数学や統計学の授業数がワーヘニンゲン大学において増えていること[26]、様々なオーム解析の中でもオランダはメタボローム解析において論文数が多いことが挙げられる（図 3-22）。メタボローム解析では、高品質トマトにおける有用成分の同定や、珈琲豆の成分とロースト後の品質との相関、誘導されてくる揮発性成分により害虫の早期発見、菌類侵入によって誘導される代謝産物の決定といった成果や、メタボロームに関するツール開発やデータベースの構築が行われている（図 3-22）。大学、研究機関における様々なシーズがある一方、食品関連企業などでは多様なニーズが発生する。そのマッチングを促進する機能を担う機関として、2004 年にオランダ政府、地方自治体、食品業界数社によりフードバレー財団が設立された。フードバレー財団の主な活動は以下の通りである[30]。

① 企業と研究機関、企業同士を結びつけるネットワーク機能の発揮。
② 様々な革新的プロジェクトの支援。技術移転、スピンオフや起業を促し、その発展をサポート。
③ オランダから EU 全域にわたって、農産物・食品分野の「知」を集積する働きかけ。
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。連携を広げることで、新たな情報や知識を提供でき、会員に参画メリットを還元。
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。

フードバレーの強みは、需要主導、「企業にビジネス需要があったときが研究のスタート地点」[30]としている点で、産学官連携を重要視している点である。

オランダではトップセクター政策として農業・食品、施設園芸、流通、生命科学・健康、水、ハイテク材料、創造的新産業、エネルギー、化学品の 9 つの重点分野を設定して、産学官が一体となって取り組む指針を戦略として策定している。フードバレーではこうした国家戦略と連携を図り、中長期を見据えた取り組みを産学官連携で実施してきている。また、研究者が研究に専念できるよう、成果の移転については別部門が実行するという分業体制を構築している。オランダでは環境面での不利な点を克服すべく応用研究に多額の資金を投じ、高い収量を実現し、農業を工業化している。事実、オランダでは旧・農業省が経済省に統合され、経済・農業・イノベーション省として、農業は産業の 1 つとして取り扱われている。また選択と集中に基づき、特定品目に農業予算を重点配分し、大学の基礎研究と民間企業の技術・サービスを一貫させる政策を行っていることも、市場ニーズを汲み取り、技術サービスをマッチングさせるフードバレー財団や農業コンサルティング企業が活躍できる下地を醸成していることにつながっている。オランダもかつては農業大国ではなかった。EU の前身である EC に農業大国であるスペイン、ポルトガルの加盟が決まった際は、オランダにも安い農産物が大量に押し寄せた。海外に負けない競争力を身につける過程でスマートアグリという農業革命が農家主導で展開され、自由競争市場主義による競争力をつけていった。ただ、この際も ICT 化の波に乗れなかった多くの農家は淘汰されたのも事実である。こうした競争力を持ったスマートアグリ生産システムを海外へ輸出することで、農産物だけではなく技術輸出にも貢献している。例えば、韓国ではオランダの生産システムを輸入することで、パプリカ栽培においては輸出に転じている。生産システムを輸出した世界各国での栽培データをオランダに戻すことで、どのような環境において、どのような栽培が理想的なのかを最適化する研究開発が進められている。オランダでは農食品産業を成長の原動力としているが、その要因として以下の取り組みが見てとれる。

① 先端研究開発と技術教育
② 流通競争力とマーケティング
③ 鉄道・港湾・空港など効率的な農産物物流のインフラ

わが国にはコールドチェーンの確立のようにインフラは整備されつつある。これを海外向けにする取り組みは必要であるが、とりわけ、先端研究開発が農食品産業発展につながるような橋渡しが必要である。また、海外への輸出を考慮するには、海外向けに販売できるような研究開発や市場調査を行う必要がある。

3-6-2 フランス（ANR、CIFRE ほか）

フランスの高等教育・研究は長らく「基礎研究は強いが応用研究は弱い」という状態が続き、2000 年代始めには、各種高等教育・研究機関ランキングにおける世界トップ 100 に 3 機関程度しか入れないという状況にあった。2004 年には研究予算の凍結や常任研究員ポストの削減といった政府の施策に反発した研究者達の全国的な抗議運動が起き、学術・科学分野の改革の必要性が広く共有されるようになっていた。2000 年代後半から高等教育機関、公共研究機関における組織、法制、予算配分などあらゆる分野で見直しが行われ、その中で、「産業競争力の強化」を盛り込んだ科学技術・イノベーション政策が相次いで打ち出された（図 3-23）。それらの中心を担ったのは 2005 年に設立された ANR, OSÉO Innovation（現・公共投資銀行）といった研究資金分配機関である（図 3-24）。前者が主に基礎・応用

段階の研究に対して競争的に資金を配分するのに対し、後者は民間企業を対象に、応用・産業化段階のプロジェク助成を行っている。具体的な産学連携プログラムとして、カルノー機関と競争力拠点（Pôles de compétitivité）が挙げられる。前者は企業との共同研究を推進する公的研究機関に対し認証を与え（カルノーラベル研究機関）、研究資金を配分するプログラムである（図 3-24）。2006 年に導入され、現在、34 機関が認定されている。後者は民間企業を中心組織として公的研究機関や大学等で形成される産業研究クラスターである。2004 年に導入され、現在、71 機関が認定されている。拠点の管理組織は非営利団体として法人格を持ち、「将来への投資」政策に組み込まれた研究課題について公募型の共同研究プロジェクトを推進する。2012 年までに 17 の産業領域において 1,186 のプロジェクトが採択され、7,500 の企業が関わり、50 億€（内、政府配分額は 13 億€）以上が研究開発に費やされた。その他にも「将来への投資」政策の一環として、地域ごとに大学と公共研究機関が参画して技術移転促進組合（SATT）を設立し、基礎・応用研究の産業化促進に向けた取り組みを進めている[31, 32]。こうした知の集積の実例としてパリ・サクレーキャンパスが挙げられる（図 3-25）。

我が国にはない産学連携制度として“研究を通じた育成のための企業との協定（CIFRE）”が挙げられる。フランスでは研究室が博士課程学生に対して給与を支払うことが義務付けられており、国や地方政府、IDEX、ANR などの他、民間企業からの出資も重要な財源となっている。CIFRE は企業との共同研究に基づいて博士号取得を支援する制度であり、博士号取得者の企業への採用を促進する目的も併せ持っている。この制度は半官半民の研究技術全国協会（ANRT）により運営・管理されており、ANRT は CIFRE を実施する企業の学生雇用費の一部を補助する。企業は雇用学生だけでなく、学生が所属する高等教育機関の研究室にもアクセスすることができるという利点がある。また、これらについては研究費税額控除（CIR）が適応される。なお、博士課程学生の 3 年間の雇用費は約 95,000€（≒1,300 万円）である。

3-6-3 ベルギー（VIB ほか）

ベルギーはオランダ同様、国土面積は小さい国である。首都ブリュッセルを含むフランダース地域はヨーロッパ主要地域のほぼ中心に位置し、ヨーロッパの交易と文化の十字路として歴史的に栄えてきた地域である。現在も約 120 の国際機関が置かれ、外交官の数はニューヨークに次いで世界第 2 位という国際政治の主要拠点でもある。こうした歴史的、文化的背景のもと、柔軟性、多言語能力、ビジネスノウハウなどを磨き、蓄積してきた。フランダース政府が付加価値や知識集約度の高いバイオテクノロジー・ライフサイエンス産業を重視し、強力な育成策を推進している背景には、フランダースが何世紀にもわたって、科学・医療分野で多くの世界的な先駆者を輩出している歴史がある。植物科学に着目してもゲント大学の Marc Van Montagu 博士と Jozef Schell 博士によりアグロバクテリアの Ti プラスミドの発見から[33]、現在でも一般に用いられているアグロバクテリアによる植物細胞への形質転換法が開発された。こうした背景から、フランダース政府は 1996 年に VIB（Flanders Interuniversity Institute for Biotechnology、フランダースバイオテクノロジー研究機関）を設立した[34]。この VIB はフランダースにあるゲント大学、ルーベン大学、アントワープ大学、ブリュッセル自由大学におけるバイオ・ライフサイエンス分野

の研究活動に横串を入れたかたちで、あたかも 1 つの研究組織として運営する方法である。知識や情報を組織全体で共有し、利活用することで相乗効果をもたらしている。VIB では、下記の項目に重点をおき、運営が行われている[34]。

① 国際水準で高レベルの科学を遂行し、優れた研究者を育成すること
② 研究成果を企業や産業に活かすこと
③ 研究成果を広く知らしめること

そのため、技術移転も積極的に行っており、大学と VIB で取得した特許をもとに、ベンチャーとしてスピンオフ企業を設立したり、企業との提携を行ったりしている。2010 年における VIB としての技術移転収入は 1,350 万€（≒18 億円）に達している（図 3-26）。VIB ではスピンオフ企業の発展を促進するための様々な補完機構を設けている。例えば、スタートアップ企業を対象としたバイオインキュベータ施設や、急速な拡大を狙う企業向けのバイオアクセラレータ施設を設置している。また、財政的、経営上のサポートに加え、科学技術政策や人材開発、情報発信といった活動を通じてサポートを行っている。VIB では、それぞれの研究部門に 5 年毎の外部チェックにより評価が行われる。こうした運営方針のもと、数多くのベンチャーが VIB から輩出されただけではなく、多くの企業が研究、製造、販売拠点をフランダース地域におくようになり、1990 年後半からバイオ・ライフサイエンス分野の企業数が急増して、実質的なバイオクラスターとして一大拠点を形成するに至った[35]。

VIB において植物科学の研究が行われているのが Technologiepark にあるゲント大学植物システム生物学部門である（図 3-27）。ゲント大学分子生物学部門と同じ建物内で運営されており、両部門をあわせて、約 300 人の研究者、学生が研究に携わっている。そのうち、約 50 人がバイオインフォマティクスに関わっており、国際的に有名な人材を集める目的で、約 5 割がベルギー以外の国籍を持っている。VIB においても 5 年前までは、シロイヌナズナを用いた基礎研究が主流であったが、EU の政策がより応用科学へと移ってきたことを反映して、現在の VIB においてもトウモロコシ、コムギなどの実用作物を用いた研究が推進されている（図 3-28）。ただし、シロイヌナズナにおける研究も並行して続けており、基礎から応用へとバランスの良い研究体制が整備されている。特にバイオ・ライフサイエンス分野の学術的・産業的発展には基礎研究とイノベーションが不可欠であることからも、どちらかに偏重するのではなく、両輪として研究を推進することが重要である。また、いち早く ICT を駆使した自動測定装置を導入し（図 3-28）、バイオインフォマティシャンを数多く揃えるといった情報科学とライフサイエンスの連携を積極的に行っている。Technologiepark の特長は、VIB の研究機関だけではなく、VIB バイオインキュベータ、アクセラレータを設置し、スピンオフ企業を支援している（図 3-27）。例えば、CropDesign は 1998 年に VIB からスピンオフして設立され、2006 年には世界最大手の化学企業 BASF に買収され、植物バイオ部門の一員となっている[36]。また、大手企業である Syngenta や Bayer Crop Science（元々は Montagu 博士と Schell 博士により設立された Plant Genetic Systems 社）も研究所を構えており、グリーンバイテククラスターとして産学連携を積極的に推進している。VIB 分子生物学部門も存在することから、アブリンクスやイノジェネティクス（富士レビオの完全子会社）といった製薬会社や VIB バイオインキュベータにはヤクルト本社が研究拠点を設置し、腸内細菌を中心とした研究を行っている[37]。

フランダース地域をバイオクラスターの一大拠点に成長した理由として、大学と企業の間に人的な往来ができる柔軟な社会システムが存在することも挙げられる[35]。優れた研究成果と産業化への対応により、フランダースのバイオクラスターは成長を続けている。VIBが設立された当初は少ない商業協定の数（図 3-26）であったが、VIB のユニークな運営体制と積極的な研究成果の宣伝、活用が起爆剤となり、今や世界的に人材や企業を誘引する魅力を兼ね備え、クラスターが発展するという好循環が生み出されている。

3-6-4 EU（FP7、Horizon2020）

Horizon2020 は FP7 の後継フレームワークプログラムであり、2014 年～2020 年における EU の科学技術の方向性を規定するものである。これは 2010 年に発表された EU の中期成長戦略（EU2020：スマートな成長、持続可能な成長、包括的な成長という 3 つの成長の実現を目指した成長戦略）のうちイノベーションユニオンを推進するものである。構成として、卓越した科学、産業リーダーシップ、社会的課題への取り組みの 3 つの柱とその他の取り組みからなり、全体で約 770 億ユーロの予算規模である[38]。社会的な課題への取り組みでは 7 つの社会的課題（Social Challenge）が抽出され、その 2 番目の課題として、食料安全保障、持続可能な農業・林業、海洋・海事・陸水研究、バイオエコノミー（Food security, sustainable agriculture and forestry, marine and maritime and inland water research and the bioeconomy）が取り上げられている。社会的な課題への取り組みでは、そのプログラムの詳細は 2 年ごとに練られるが、2016 年からの 2 年間では予算が大幅に増額され、特に持続可能な食料安全保障、地方再生に大きく予算が措置されている[39]（図 3-29）。また、採択課題の中には自然科学だけではなく、社会科学、人文科学、公公連携なども含まれており、自然科学におけるイノベーションから社会科学による課題解決も見越したプログラムとなっていることが特徴である。

EU でも農村における条件不利性は 1970 年代から認識されており、補助金の直接支払いやインフラやサービスの水準を都市と均衡させる施策を講じてきたが、農業経済の脆弱性ゆえに、農業労働力の減少、保守的で伝統的な農村産業は崩壊しつつあるのが現状である[40]。そこで農村振興施策である LEADER 事業（農村地域における過疎化の進行、公共サービスの低下、地域経済の衰退といった事態に対処するための農村地域活性化事業）が行われている。地域資源を活用した農村イノベーションの誘発や 6 次産業化といった農村経済の多角化などを推進してきている。LEADER 事業ではいくつかの市町村をまたがる範囲でつくられる LAG （Local Action Group）という組織を通じて、地域内の団体が実施するプロジェクトに対して支援を行っている[41]。この LEADER 事業の成否を担っているのが「農村アニメーター」とよばれるコーディネーターの存在である。農村振興には学際的かつ実践的な能力を身につけた中核人材を育成することが重要で、2014 年 10 月から、「農村アニメーターのための欧州修士プログラム（EMRA, European Masters Programme For Rural Animators）」がスタートした。農村アニメーターの役割を以下に記す[40]。

① 地域コミュニティー活動のリーダー役
② ボトムアップアプローチの実践における官民の橋渡し役
③ 伝統的な農村社会におけるコーディネーター役
④ コミュニティーの相談役

こうした能力を養う目的で EMRA では「現場で実践する力」の能力振興を目的とし、農村振興に関する学際的な知識、多様な分野への精通、国際的な視野、現場での多様な取組みをマネジメントするスキルに重点がおかれている[40]。異業種、異分野、地域での連携が発展するには人材育成が重要であり、EMRA はその人材育成に重点をおいている。わが国において、人材育成が唱えられて久しいが、ハード的な面での充実に傾注している現状から、人材を含めてソフト面への施策に注力する必要がある。特にイノベーションを起こすのは人の力であることも考慮すべき事項である。

3-6-5　韓国(ゴールデンシードプロジェクト、フードポリス)

種苗に関しては、植物の新品種の保護に関する国際条約に基づき、国際機関である植物新品種保護国際同盟が設立されている。この条約の目的は植物の育成者権という知的財産権を保護することで、植物新品種の開発を促進し、公益に寄与することが目的である。契約によってロイヤリティが異なるが、ロイヤリティが栽培原価の 10%にのぼるケースもあり、消費者負担が大きくなっている。特に韓国では、1998 年の通貨危機の際に、自国の種苗会社は多国籍企業に買収・合併されたため、もともと韓国で作出された種子を現在では逆輸入している状況である。そうした中、世界最大の種子企業モンサントは世界種子市場の 27%を独占するなど、10 大多国籍企業の世界種子市場のシェアは 70%に迫る。種子戦争でリードされれば高いロイヤリティを支払う必要が出てくる。韓国政府は日本、アメリカ、ヨーロッパを比較しながら長所・短所をリストアップし、自国の民間種苗会社の育種開発力の底上げを目的として 2013 年～2023 年の 10 年間にわたる官民合同のゴールデンシードプロジェクトを推進している（図 3-30)。このプロジェクトは種子開発力の高い国家としてグローバルに飛躍するため、輸出戦略、種子開発および産業基盤を確立するための部・庁横断的 R&D（研究および事業開発）プロジェクトとしている。最終的に 20 品種を戦略的品種として絞込み、5 つの研究部門で開発が行われている（図 3-31）[42]。研究部門では DNA マーカーの開発や品種育成が行われている一方、種子を販売する国を明確に定め、それぞれの国に適合したマーカーの開発も実施されている。また、海外に法人を設立するなど販売ルートの確立を実施することで、種子輸出国家を目指している。種子ではないが、韓国ではパプリカの輸出へと舵を切っている。これはひとえに、オランダ製の ICT 技術を活用したガラス温室複合環境制御システムを導入するとともに、オランダから指導員を招聘し、オランダの種子でパプリカを生産しているおかげで、生産性が非常に高くなったことによる。いち早く、海外のシステムを導入したことで、農産物輸出に至った例である。

オランダのこうした設備だけではなく、システムそのものを取り入れようとしているのがフードポリスと呼ばれる大規模な食品産業団地であり、フードバレーを参考に機能性食品開発や食品安全性研究に重点をおいた研究・開発クラスターである。韓国では個別経営支援として農村振興庁による「農産物加工・企業支援事業」、地域レベルでは農林水産食品部による「地域戦略食品産業育成事業」により地域農業クラスターを育成している。海外輸出を目的として「国家食品クラスター事業」を展開しており、その中心をフードポリスが担う[43]。このように、韓国では積極的に農村イノベーションの促進に取り組んでいる。フードポリスの背景としては、世界での食品産業規模が 2020 年に 7 兆ドルに達すると予測され、アジア-太平洋地域は食品産業市場の 40%に達する食品産業の中心地になると予測さ

れている[44]。今後市場拡大が見込まれるのは機能性食品市場であり、機能性食品開発にはR&D技術が重要な要素である。そうした市場成長をにらみ、食品関連企業や研究所、関連機関などを集積させ、R&D中心のインフラを構築することで、韓国版フードバレーを造成する事業が国家主導で行われている（図3-32)。世界銀行ビジネス環境ランキング[45]で韓国が4位（日本は34位）に起業に適した国と選定されたように、フードポリスにおいても起業を促進する仕組みを導入している。ただ、現状、オランダと比較すると、韓国内での食品技術レベルはそれほど高くないため、フードポリスでは外国人居住タウンを造成するなど海外企業の誘致も行っている。国内外の技術を集結させ、食品産業の競争力の底上げを狙うことを目的としている。ビジネス支援をメインとした研究開発体制を整備し、その中心は食品機能性評価センター、食品品質安全センター、食品パッケージ支援センターを設置する（図3-33)。また、パイロットプラントやレンタルプラントを充実させるとともに戦略企画本部を設置し、また、海外への輸出に関するインフラも整備されつつあり、食品産業の一大拠点としての整備が行われている。

3-7 まとめ

モノづくりの経営思想[46]によれば、日本人は昔から、「戦略」ではなく「戦術」が得意な人たちが多い傾向がある。歴史的に島国に発達した文明ということや、民族同士が隣り合って相手を殲滅するまでの激しい生き残り競争をしたことがほとんどなかったことが理由として挙げられる。ただ、昔から知識が平均的に満遍なく広がっているので、基本的に頭も気質も比較的良い人たちが多いという長所に恵まれており、この長所が日本を「技術大国」に押し上げたことにつながっている。「戦術」が得意である故、発明や発見よりも「改善」において成果を発揮してきたという面が挙げられている。

それに対して、欧米人の思考ロジックは戦略的で論理的である。目標達成のための最短距離を戦略的にシステマティックに探索している。「戦略」を端的に表すと、情報を収集し、その情報をもとに評価・検討を行い、長期目標を立て、目標に沿った具体的な行動計画を立てることとされる。

この長期目標の設定が不得手であることを補うには、その前段階の情報収集や評価を適切に行うことが大事であろう。例えば、欧米の製薬会社ではビッグデータを取得して、数%の違いを統計的な有意差として求め、そのデータをもとに市場を席捲するということが戦略的に行われている。しかし上述のような日本人の特色・特徴のため、一足飛びに戦略をもって対処を行う組織やリーダーを求めるのは現実的には難しいと予想される。歴史的に、近代以降の日本を見てみると、西洋の戦略的な考え方を取り入れている時期は日本が上手くいっていることが多い。例えば明治維新以降の近代化や戦後における大々的な海外技術導入と模倣による経済復興などである。

海外動向でも記述したように、韓国では自国の農業、食品産業を立て直すため、オランダのシステムを導入している。例えば、オランダ製のICTを駆使した太陽光型温室を導入するとともに、オランダから指導員を招聘している。このオランダ製温室により、韓国産パプリカの生産が著しく向上し輸出に転じている。また、国家主導ではあるが、フードバレーのシステム・スタイルを模してフードポリスを遂行している。

わが国における方策として、まずは西洋の成功しているシステム、例えばフードバレーなどを模倣しわが国において組み立てると同時に、日本人が得意とする要素技術開発、改善を行うことでわが国のプレゼンスを高めていく。ある程度の形ができたところで、日本人気質に適合したシステムに合わせていく、その間にリーダー的人材を養成するといった段階をふむのが現実的であると考えられる。とかく、日本では、組織を作るとなると特定の分野で過去に一定の業績を挙げたシニアなメンバーで構成される傾向があるが、多角的視野をもった若手のリーダー的人材の養成が必要となる。ただ、重要なのは、成功した際も、慢心することなく、海外からの情報を逐一取り入れることを怠らないことである。もともと日本人の謙虚さと戦術の良さに、戦略を組み合わせることが肝要である。TPP の大筋合意を受け、日本市場に向けて海外の農林水産物が流入することが予測される。これはかつて、オランダが EC に加盟した際に、農業大国であるスペインやポルトガルからの農産物が大量にオランダに流入したことと類似する可能性がある。オランダでは多くの農家がこの影響で淘汰される中、スマートアグリという ICT を駆使した農業革命により、自由競争市場主義による競争力をつけ、今や世界第二位の農産物輸出国として発展している。WUR においては、未来レストランのように人の嗜好を調べつつ、付加価値をもたらすような研究を展開するなど、現場での実践から課題の抽出を行っていることが、研究開発及び社会実装の原動力となっている。わが国において産学官連携が唱えられて久しいが、なかなか進んでいない現状がある。明確なビジョンと産学官で相互理解が必要である。

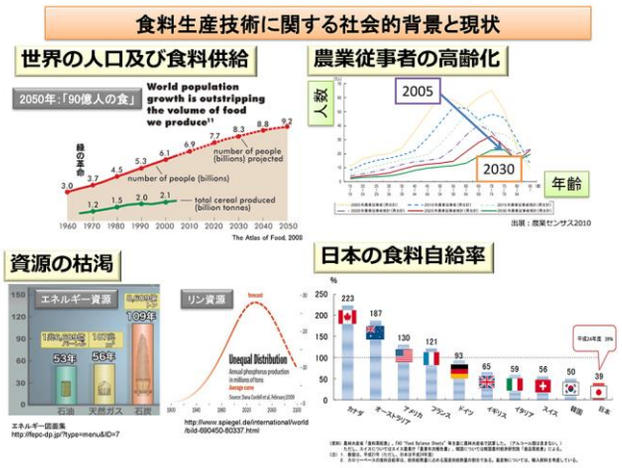


図 3-1

図 3-2

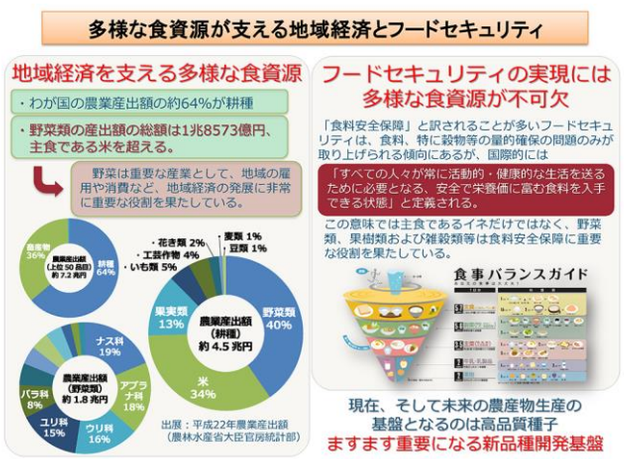


図 3-3

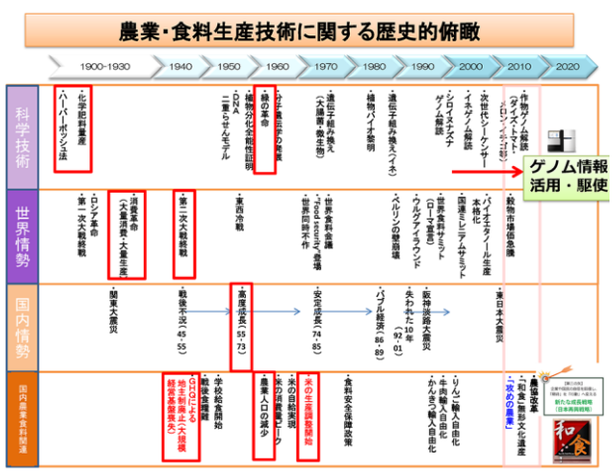


図 3-4

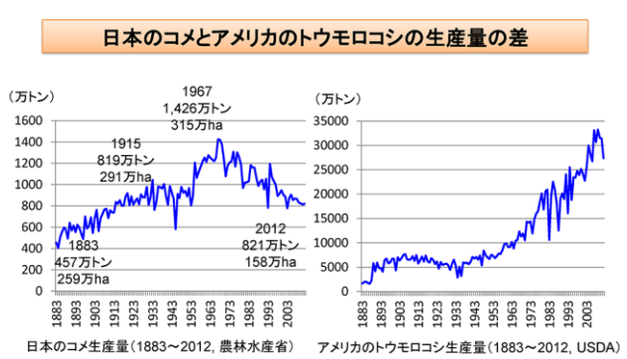


図 3-5

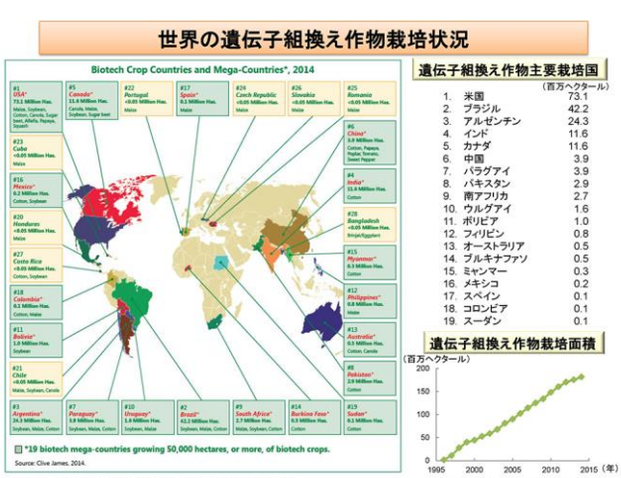


図 3-6

図 3-7

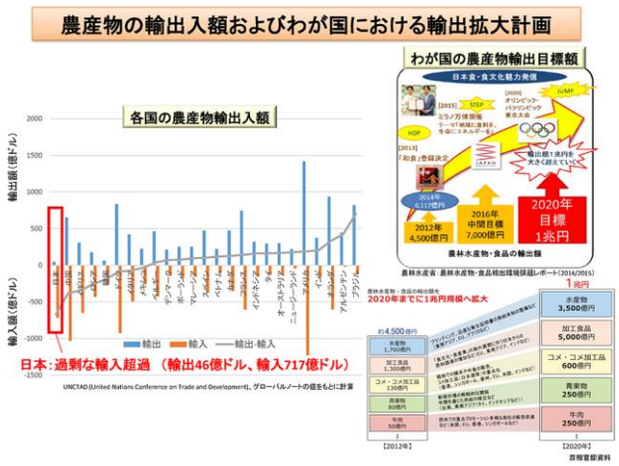


図 3-8

各国の農業・食品分野における産官学協働体制

国	産官学連携・コンソーシアム・分野横断予算等
日本	・内閣府/戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「次世代農林水産業創造技術」(2014～18) ・農林水産省/「知」の集積と活用の場　産学官連携協議会
米国	・NSF/ Innovations at the Nexus of Food, Energy, and Water Systems (INFEWS) ・USDA/ Agriculture and Food Research Initiative
欧州	・Horizon2020 Social Challenge 2/ Food security, sustainable agriculture and forestry, marine and maritime and inland water research and the bioeconomy
オランダ	・フードバレー財団：140以上の機関集結、国内外との大学・研究機関と民間企業との橋渡し
デンマーク	・フードクラスター：5大学を含む120以上の会員、食品セクターのイノベーション推進
韓国	・ゴールデンシードプロジェクト：官民主導で種苗会社の育種開発力の底上げ ・フードポリス：研究開発（機能性食品・食品安全性）を基にした政府主導の食品輸出産業クラスター

図 3-9

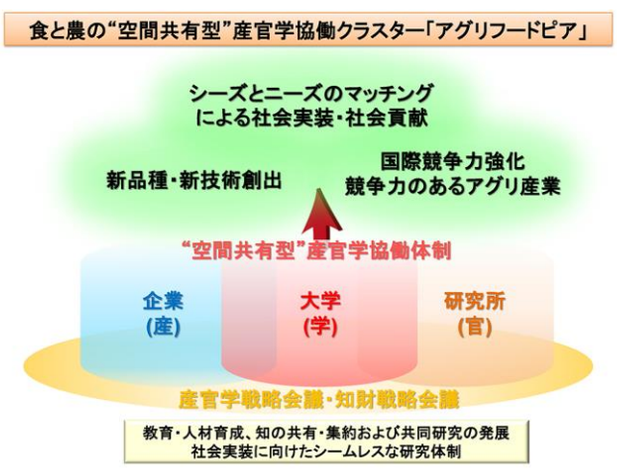


図 3-10

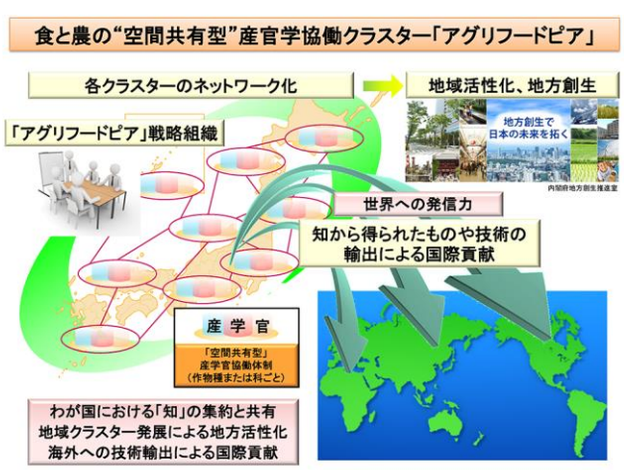


図 3-11

「アグリフードピア」戦略組織：クラスターネットワーク調整組織

戦略組織の役割

➡ 産官学協働クラスターからの情報収集・シンクタンク機能
- コーディネーターを補佐するシンクタンク機能
- 要素技術のネットワーク内への普及
- 共同研究の促進

➡ ニーズとシーズのマッチング
- ネットワーク内ニュースレター等でシーズやニーズの紹介
- サイトビジットの調整
- 勉強会や交流会の設定

➡ 知財管理
- 知財確保の支援
- ベンチャー立ち上げ支援

➡ 情報発信
- 専用Webによる成果報告、出版物、学会等の活用

➡ 外部組織との連携
- 公設試との連携による地域活性化

図 3-12

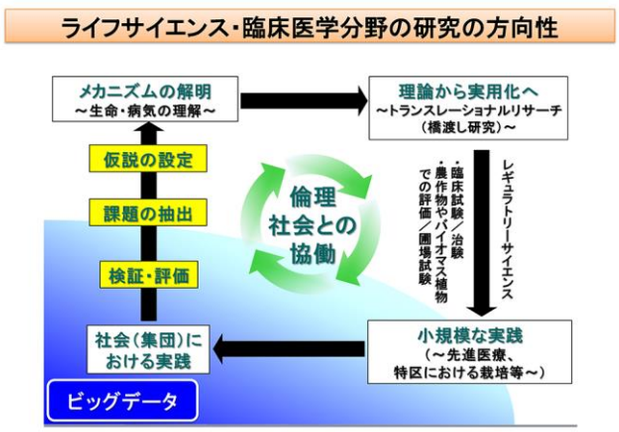


図 3-13

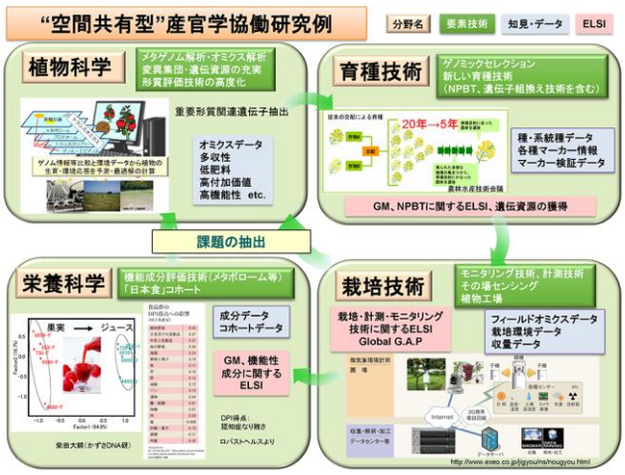


図 3-14

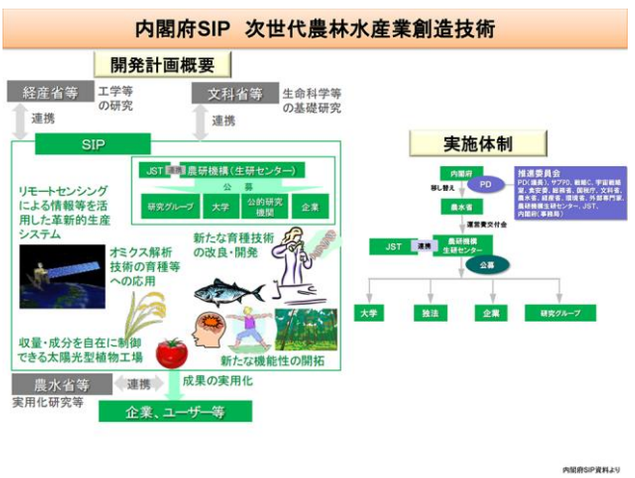


図 3-15

図 3-16

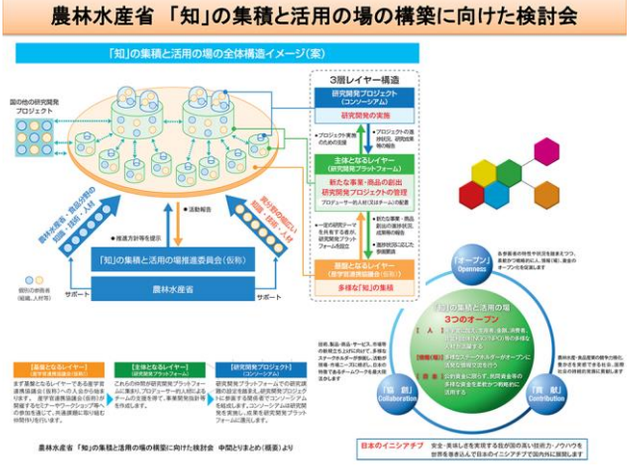


図 3-17

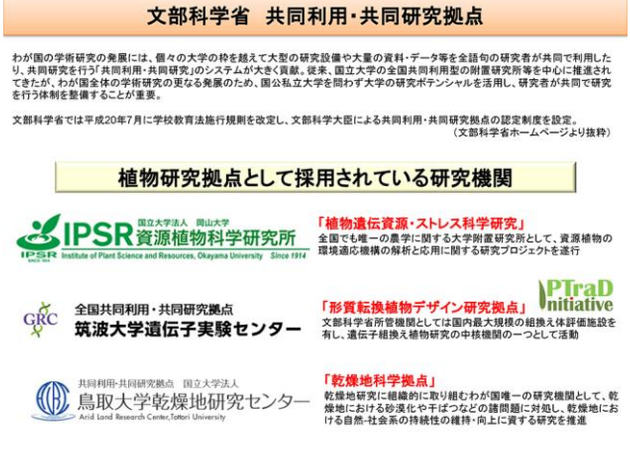


図 3-18

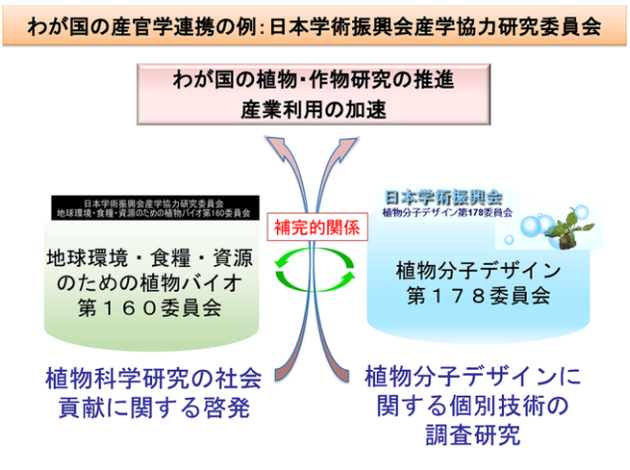


図 3-19

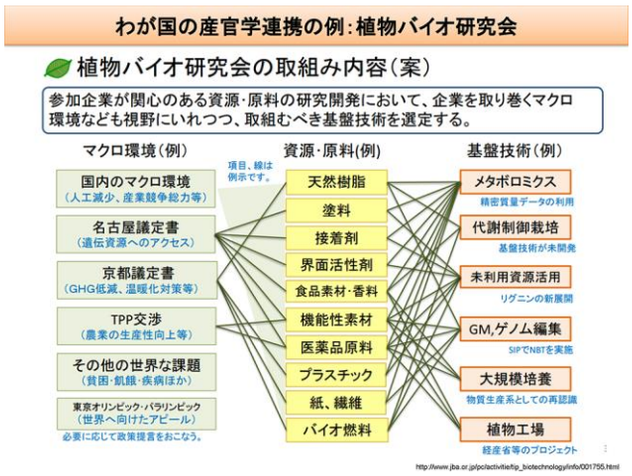


図 3-20

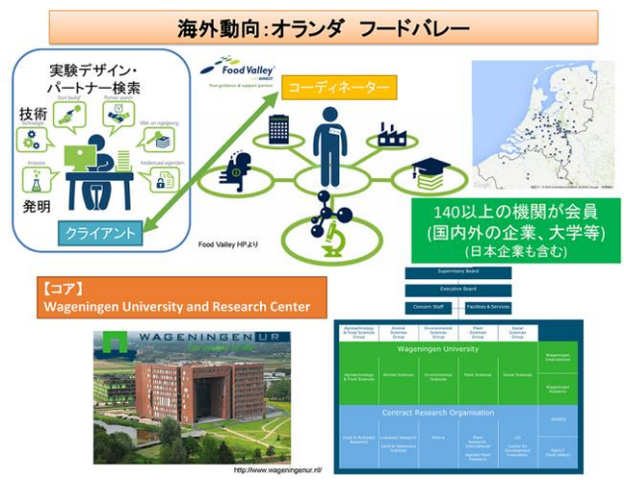


図 3-21

図 3-22

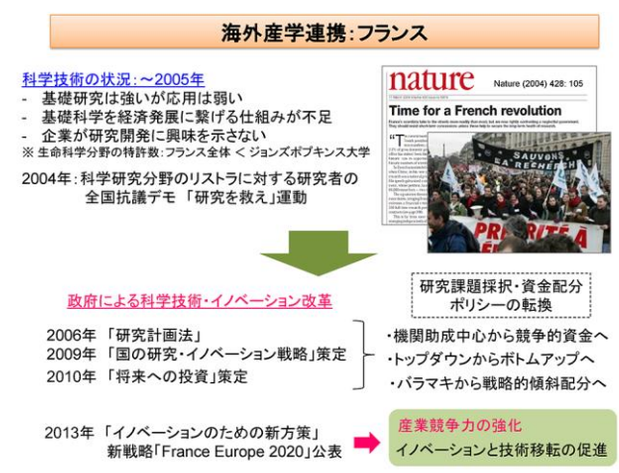


図 3-23

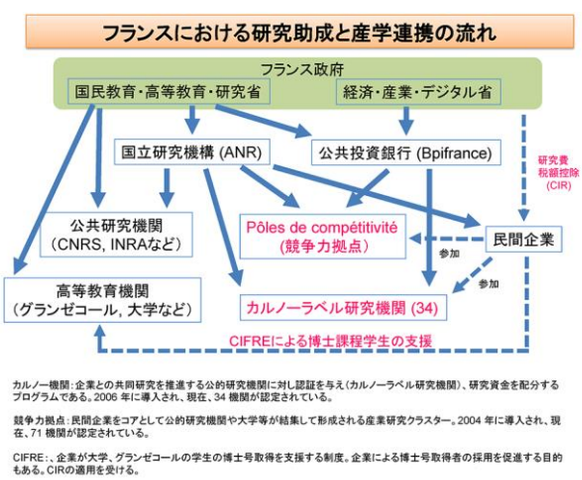


図 3-24

図 3-25

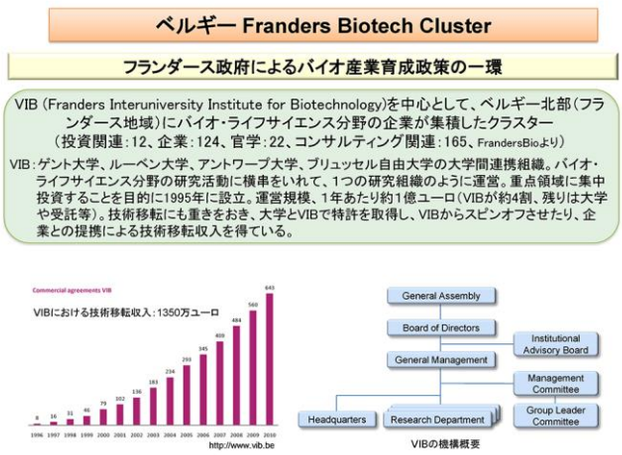


図 3-26

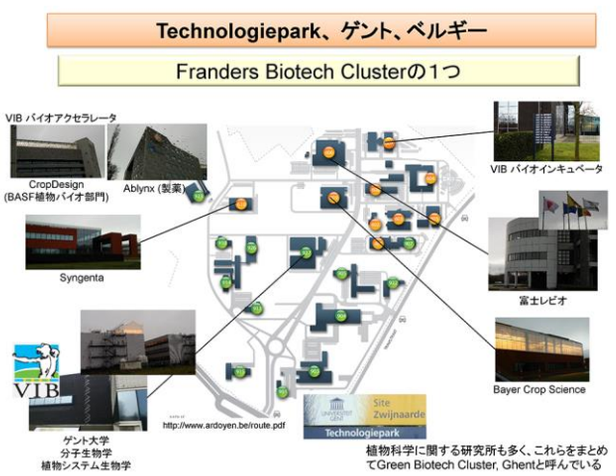


図 3-27

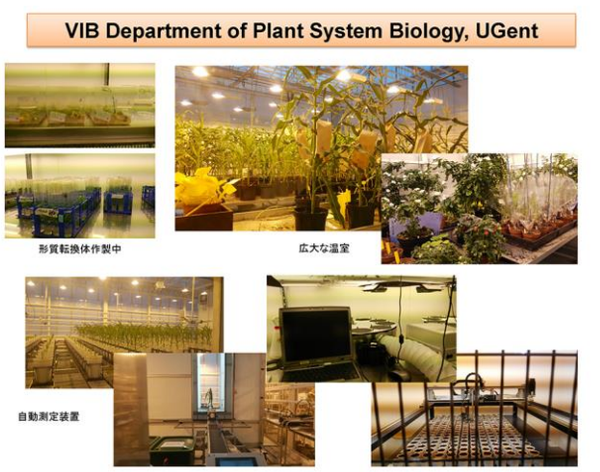


図 3-28

2014-2015	2014 (269)	2015 (200)
持続可能な食料安全保障	147	105
海洋関連	60	24
革新的・持続的・包括的バイオエコノミー	45	42
その他	14	26
2016-2017	**2016 (365)**	**2017 (410)**
持続可能な食料安全保障	180	234
海洋関連	39	29
地方再生	66	62
持続可能なモノとサービスのためのバイオベース革新技術	12	15
その他	5	28

図 3-29

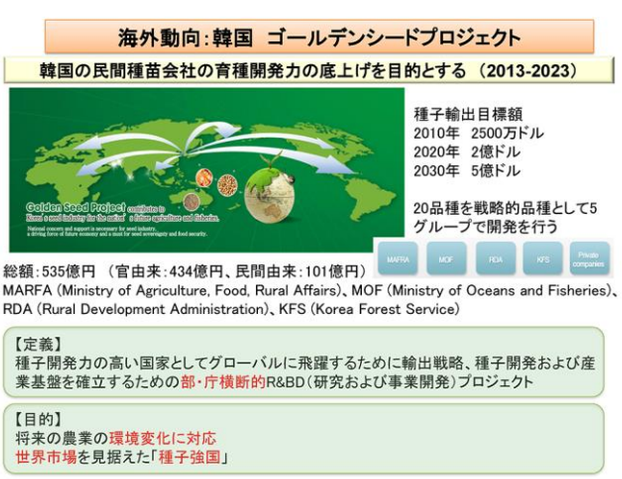


図 3-30

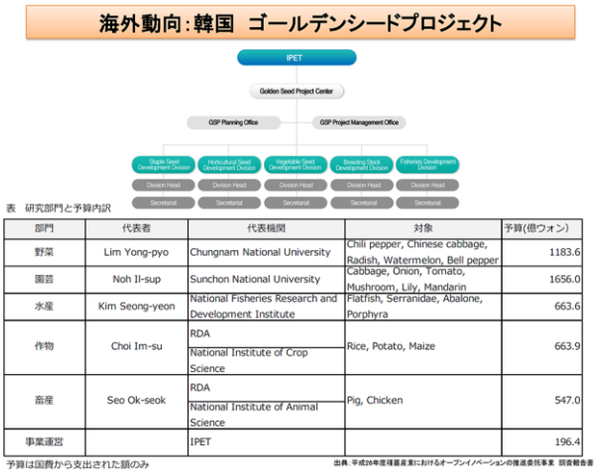


表　研究部門と予算内訳

部門	代表者	代表機関	対象	予算(億ウォン)
野菜	Lim Yong-pyo	Chungnam National University	Chili pepper, Chinese cabbage, Radish, Watermelon, Bell pepper	1183.6
園芸	Noh Il-sup	Sunchon National University	Cabbage, Onion, Tomato, Mushroom, Lily, Mandarin	1656.0
水産	Kim Seong-yeon	National Fisheries Research and Development Institute	Flatfish, Serranidae, Abalone, Porphyra	663.6
作物	Choi Im-su	RDA National Institute of Crop Science	Rice, Potato, Maize	663.9
畜産	Seo Ok-seok	RDA National Institute of Animal Science	Pig, Chicken	547.0
事業運営		IPET		196.4

予算は国費から支出された額のみ

出典：平成26年度種苗産業におけるオープンイノベーションの推進委託事業　調査報告書

図 3-31

図 3-32

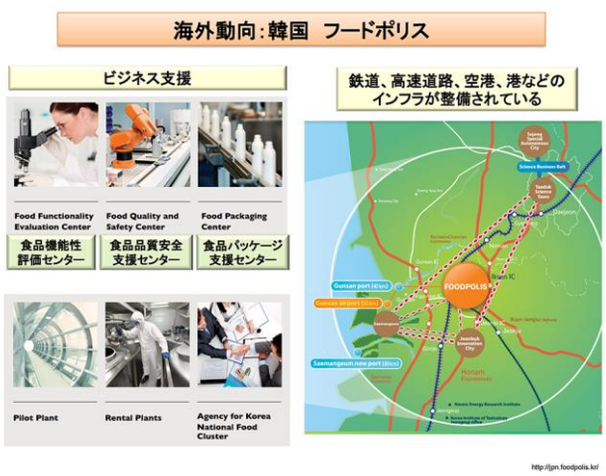


図 3-33

引用文献

1) http://www.wwf.or.jp/earth/

2) 世界食料サミット、1996 年

3) 独立行政法人科学技術振興機構　研究開発戦略センター　調査報告書「ゲノム編集技術」CRDS-FY2014-RR-06,
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/RR/CRDS-FY2014-RR-06.pdf

4) 日本学術会議　「植物における新育種技術（NPBT: New Plant Breeding Techniques）の現状と課題」http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-h140826.pdf

5) 農林水産技術会議　新たな育種技術（NPBT）研究会報告書「ゲノム編集技術等の新たな育種技術（NPBT）を用いた農産物の開発・実用化に向けて
http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/150911.htm

6) 農林水産省「総合的な食料安全保障の確立」
http://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/kikaku/bukai/H26/pdf/141007_02_01.pdf

7) Porter ME (1998) Cluster and the New Economics of Competition. Harvard Business Review より、原文”Clusters are geographic concentrations of interconnected companies and institutions in a particular field.”

8) 農林水産技術会議事務局　「知」の集積と活用の場の構築に向けた検討会　中間取りまとめ　平成 27 年 9 月

9) シンクタンクについては吉川弘之 JST-CRDS 前センター長の資料を参考のこと
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu22/siryo/__icsFiles/afieldfile/2014/08/08/1350746_1_1.pdf
http://www.jst.go.jp/crds/sympo/20121023/documents/01yoshikawa.pdf

10) 独立行政法人科学技術振興機構　研究開発戦略センター　「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）
http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/FR/CRDS-FY2015-FR-03.pdf

11) 内閣府　戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）
http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/index.html

12) 内閣府　SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）2015　～日本発の科学技術イノベーションが未来を拓く～、西尾健プログラムディレクター記事より
http://www8.cao.go.jp/cstp/panhu/sip2015/sip2015.html

13) 農林水産技術会議　「「知」の集積と活用の場の構築に向けた検討会　中間取りまとめ」
http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/150916.htm

14) 農林水産技術会議　「知」の集積と活用の場　産学官連携協議会（準備会）の設立会議の開催について
http://www.s.affrc.go.jp/docs/knowledge/knowledge/seturitukaigi01.htm

15) http://www.rib.okayama-u.ac.jp/index-j.html

16) http://www.gene.tsukuba.ac.jp/

17) http://www.alrc.tottori-u.ac.jp/

18) http://www.gene.tsukuba.ac.jp/joint/field.html

19) https://www.jsps.go.jp/j-soc/sangaku_index.html

20) http://www.jsps160c.lif.kyoto-u.ac.jp/

21) http://plantmdc.gene.tsukuba.ac.jp/

22) バイオインダストリー協会　植物バイオ研究会
http://www.jba.or.jp/pc/activitie/2015/sentan/150410_plant-bio.pdf

23) 首相官邸　「日本再興戦略」改訂 2014　―未来への挑戦―
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/honbun2JP.pdf

24) 外務省　http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/treaty/shomei_72.html

25) FoodValley NL　http://www.foodvalley.nl/eng/

26) 栗原ら　「オランダ農業高等教育における産学連携と学士・修士一貫教育システムの現状分析－新しい教育プログラム発足に向けたケーススタディー」　食と緑の科学　69 号 1-10 (2015)

27) “Annual report 2014”, Wageningen UR

28) “Strategic Plan 2015-2018”, Wageningen UR

29) 金間大介　「オランダ・フードバレーの取り組みとワーゲニンゲン大学の役割」　科学技術動向　2013 年 7 月

30) A・メンスィンク、アナマリ・ヌラ　「小国オランダが世界の食・農業をリードする」　農業経営者　2011 年 2 月

31) 独立行政法人科学技術振興機構　研究開発戦略センター　「科学技術・イノベーション動向　フランス編　～2014 年度版～」CRDS-FY2014-OR-04

32) 文部科学省　科学技術政策研究所　「平成 20 年度科学技術振興調整費調査研究報告書」2009 年 3 月

33) Zaenen N et al. (1974) Supercoiled circular DNA in crown-gall inducing *Agrobacterium* strains. J. Mol. Biol. 86, 109-116

34) http://www.vib.be/

35) 「化学工業日報」欧州バイオ産業取材班　「知の立国　ベルギー・フランダースの戦略　成長するバイオクラスター」　化学工業日報社

36) http://www.cropdesign.com/general.php

37) http://institute.yakult.co.jp/japanese/about/labo/

38) 独立行政法人科学技術振興機構　研究開発戦略センター　「Horizon 2020 の概要」2013 年 2 月 http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/FU/EU20140221.pdf

39)http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2016_2017/main/h2020-wp1617-food_en.pdf

40) 農林水産政策研究所　「海外における農村イノベーション政策と 6 次産業化」　サプライチェーンプロジェクト　研究資料　第 3 号
http://www.maff.go.jp/primaff/koho/seika/project/saPurai_3.html

41) MURC 政策研究レポート　「EU における農村振興施策の成功要因について　～人材育成を大切にした LEADER 事業の事例から～」　2010 年 8 月

42) 農林水産省　平成 26 年度種苗産業におけるオープンイノベーションの推進委託事業「調査報告書　（公益財団法人かずさ DNA 研究所）」
http://www.maff.go.jp/j/kanbo/tizai/brand/b_syokubut/pdf/houkoku.pdf

43）農林水産政策研究所　「海外における農村イノベーション政策と 6 次産業化」　サプライチェーンプロジェクト　研究資料　第 3 号
http://www.maff.go.jp/primaff/koho/seika/project/saPurai_3.html

44）フードポリス　http://jpn.foodpolis.kr/

45）A World Bank Group Flagship Report “Doing Business 2016. Measuring Regulatory Quality and Efficiency.”

46）木下幹彌　「モノづくりの経営思想―日本製造業が勝ち残る道」東洋経済新報社

4.「グリーンバイオ分野」関連　2015 年度開催ワークショップ報告

4-1. 本調査報告書取りまとめにあたり開催あるいは参考にした 2015 年度 JST-CRDS 開催のワークショップ概要

本調査報告を取りまとめるにあたり、JST-CRDS グリーンバイオ横断グループおよびライフサイエンス臨床医学ユニットは、2015 年度に、2 回のグリーンバイオ分野ワークショップを開催した。以下にその概要を記す。また、JST-CRDS 環境エネルギーユニット開催の検討会「エネルギーと生物（バイオ）」についても、調査報告書の 2 章の一部の項目に関連し参考としたので、以下にその概要を記す。

会合名：　「グリーンバイオ分野ワークショップ」
テーマ：　食料・食品生産を取り巻く国内外の現状、関連要素技術、将来展望
日時：　2015 年 9 月 26 日（土）　13:00-18:00 開催
場所：　国立研究開発法人　科学技術振興機構　東京本部別館 4 階会議室 E
調査報告書内で特に関連する部分：　2 章 2-1、2-2、2-3、2-4、3 章

会合名：　「俯瞰とスコープ抽出のための検討会」
テーマ：　エネルギーと生物（バイオ）
日時：　2015 年 10 月 15 日（木）　10：30～18：00 開催
場所：　TKP 市ヶ谷カンファレンスセンター　7 階 D
調査報告書内で特に関連する部分：　2 章 2-3、2-5
（詳細は環境エネルギーユニット発刊予定の報告書 CRDS-FY2015-WR-07 参照）

会合名：　「グリーンバイオ分野ワークショップ」
テーマ：　微生物、生物多様性、共生を理解する技術基盤の最前線と利用技術への展開
日時：　2015 年 11 月 7 日（土）13:00-18:00 開催
場所：　国立研究開発法人　科学技術振興機構　東京本部別館 2 階会議室 A-1
調査報告書内で特に関連する部分：2 章 2-2、2-5、2-6、2-8

各ワークショップの詳細については次項以下個別に述べる。

4-2. 各ワークショップ内容

4-2-1「グリーンバイオ分野ワークショップ
―食料・食品生産を取り巻く国内外の現状、関連要素技術、将来展望―

＜プログラムなど＞

日時：　平成 27 年 9 月 26 日（土）　13：00～18：00
場所：　科学技術振興機構　東京別館（五番町）4 階会議室Ｅ
出席者：　有識者（10 名）、府省など傍聴者（11 名）
プログラム（敬称略、所属・役職はワークショップ開催時点）
【開会挨拶】：永井　良三（JST-CRDS 上席フェロー）
【開会挨拶】：江面　浩（JST-CRDS 特任フェロー）
【趣旨説明】：齊藤　知恵子（JST-CRDS フェロー）
【セッション１　「食料・食品生産を取り巻く国内外の現状と将来展望」】
澁澤　　栄　（東京農工大　教授）
西尾　　健　（法政大　教授、SIP 次世代農林水産業 PD）
大谷　敏郎　（農研機構　食品総合研究所　所長）
西出　　香　（オランダ応用科学研究機構
Business Development　Manager）
【セッション２　「育種技術の動向」】
矢野　昌裕　（農研機構作物研究所　所長）
山本　正美　（タキイ種苗（株）　茨城研究農場　場長）
芦刈　基行　（名古屋大学生物機能開発利用研究センター　教授）
【セッション３　「栽培技術の動向」】
白須　　賢　（理化学研究所環境資源科学研究センター
グループディレクター）
島津　秀雄　（NEC ソリューションイノベータ（株）　執行役員）
【セッション４　「栄養科学・機能性成分の動向」】
加藤　久典　（東京大学総括プロジェクト機構　特任教授）
【総合討論】
【閉会挨拶】　江面　浩　（JST-CRDS 特任フェロー）

＜趣旨説明概要＞

JST-CRDS グリーンバイオ分野ワークショップの 2015 年度 1 回目のワークショップは、「食料・食品生産を取り巻く国内外の現状、関連要素技術、将来展望」というテーマで 2015 年 9 月 26 日に開催した。

JST のライフサイエンス分野では、昨年度より、グリーンバイオ分野についてどういった研究体制あるいは重点領域を取り上げるべきか議論し、調査および有識者との対話を行ってきた。また、JST-CRDS においても、昨年度よりグリーンバイオ横断グループをライフサイエンス臨床医学ユニットが中心となって組織し、他のユニットおよび JST 他部署の

協力も得ながら、調査活動を行ってきた。今回取り上げる、食料・食品生産関連の話題については、農業・食品分野の研究開発だけではなく、ライフサイエンスおよびメディカル領域にもインパクトを与える可能性が大いにある。JST としては、多様な領域をカバーしながら、新しい時代に向けて提案をしていきたい。

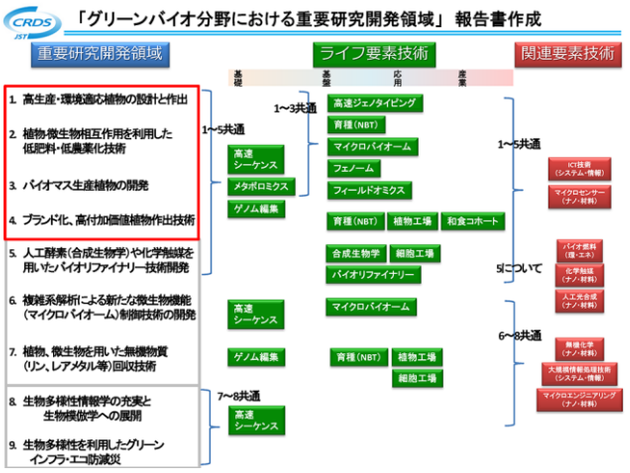
本ワークショップの趣旨を簡単に説明する。世界的な背景としては、急激な人口増加と食糧需要の増大、天然地下資源の乱用、CO_2 濃度の上昇とそれに伴う環境変動、など喫緊の課題が山積している。国内の背景としては、農業従事者の減少、国内マーケット縮小の一方で、アジアで人口の激増、このような中、国内自給率は最大限の努力をもってしても 50%は超えないと予測され、海外で少なくとも残りの 50%を生産してもらう必要がある。わが国の植物科学の基礎研究分野は強いものの、実用植物へと効率よく橋渡しされていないことが問題で、これをどのように解決していくかが今後の鍵になると考えられる。

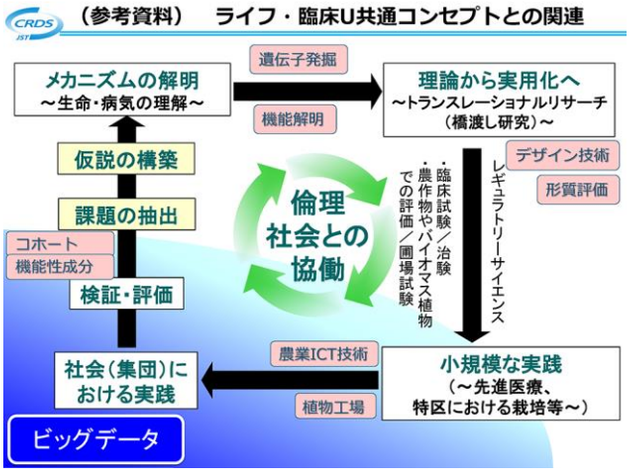
今回のワークショップでは、「食料・食品生産を取り巻く国内外の現状、関連要素技術、将来展望」というテーマについて、以下の観点を中心に、議論していただく。社会的期待と我が国農業の固有のコンセプトの両方を踏まえた戦略はどういったものか、それにふさわしい研究体制とはどのようなものか。以下具体的な背景について述べる。国内は、高齢化や就農人口の減少などから、省力化のニーズが大きい、その一方で消費者の好みは多様かつ高付加価値化に向かうだろう、海外、特にアジアやアフリカでの農業生産については、持続可能性、肥料やエネルギーのインプットを低くしても、生産性を維持する、あるいは向上するための要素技術が必要になるだろう。以上の社会的動向や背景を考慮すると、目標、要素技術開発、生産地のターゲットは、国内と国外で明確に分けたほうが良く、省労力省インプットで多収を達成する方向性と、高機能高付加価値化を追求する路線も、別々に戦略を立てる必要があると考える。

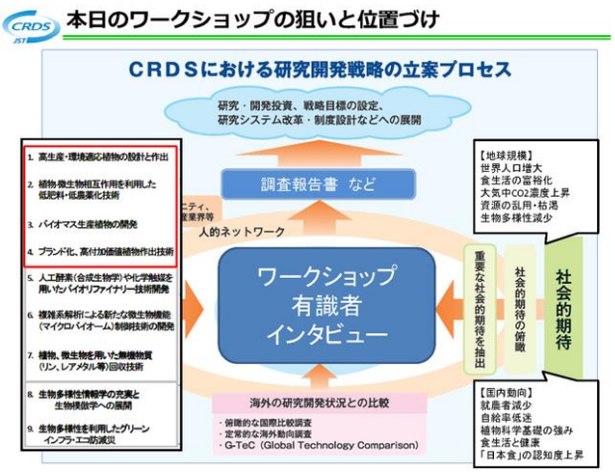
研究開発テーマについては、基礎科学、育種、栽培、栄養分野の企業ニーズが高く、アカデミアが貢献にできるような要素技術は何か、重要性が高まるところは何か、について議論をしていただく。食品は、健康な人が毎日食べるものということで、規制や社会受容については医薬品とは異なった背景や課題がある。国内・海外の認証制度についての動向、それに沿った生産を支える科学技術は何かといった話題も提供していただく。

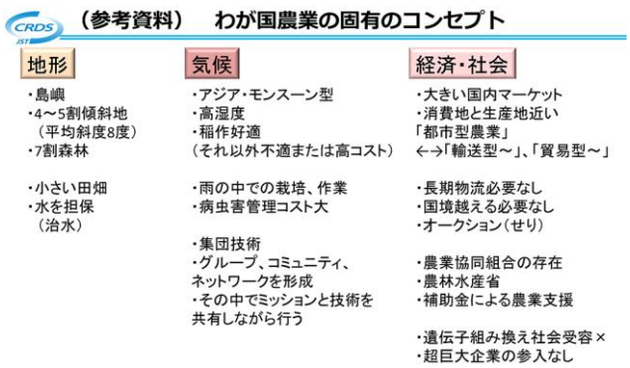
最後に、以上をふまえた上で、わが国の農業・食料・食品関連の研究推進体制について議論していただく。農業の分野は課題が非常に多様で、ともすれば総花的な支援になってしまうことに注意しつつ、どういった推進体制であれば進むのか、企業とアカデミアのプレコンペティティブな共同研究のあるべき姿は何か、持続性の高い人材育成の仕組みはどうあるべきか、などについてディスカッションしていただきたい。

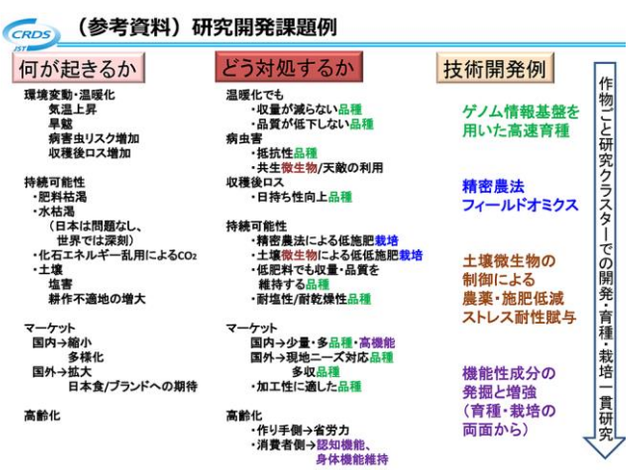
本ワークショップは、以上のことをふまえて、以下の 4 つのセッションで構成した。「食料・食品生産を取り巻く国内外の現状と将来展望」「育種技術の動向」「栽培技術の動向」「栄養科学・機能性成分の動向」について、有識者計 10 人から発表していただいた。


「グリーンバイオ分野における重要研究開発領域」報告書作成
重要研究開発領域
ライフ要素技術
関連要素技術
1. 高生産・環境適応植物の設計と作出
2. 植物-微生物相互作用を利用した低肥料・低農薬化技術
3. バイオマス生産植物の開発
4. ブランド化、高付加価値植物作出技術
5. 人工酵素（合成生物学）や化学触媒を用いたバイオリファイナリー技術開発
6. 複雑系解析による新たな微生物機能（マイクロバイオーム）制御技術の開発
7. 植物、微生物を用いた無機物質（リン、レアメタル等）回収技術
8. 生物多様性情報学の充実と生物模倣学への展開
9. 生物多様性を利用したグリーンインフラ・エコ防災減災
1~5共通
1~3共通
高速シーケンス
メタボロミクス
ゲノム編集
高速ジェノタイピング
育種（NBT）
マイクロバイオーム
フェノーム
フィールドオミクス
育種（NBT）
植物工場
和食コホート
合成生物学
細胞工場
バイオリファイナリー
マイクロバイオーム
育種（NBT）
植物工場
細胞工場
7~8共通
高速シーケンス
1~5共通
ICT技術（システム・情報）
マイクロセンサー（ナノ・材料）
について
バイオ燃料（環・エネ）
化学触媒（ナノ・材料）
人工光合成（ナノ・材料）
6~8共通
無機化学（ナノ・材料）
大規模情報処理技術（システム・情報）
マイクロエンジニアリング（ナノ・材料）


（参考資料）　ライフ・臨床U共通コンセプトとの関連
メカニズムの解明
～生命・病気の理解～
遺伝子発掘
機能解明
理論から実用化へ
～トランスレーショナルリサーチ（橋渡し研究）～
デザイン技術
形質評価
仮説の構築
課題の抽出
コホート
機能性成分
検証・評価
倫理
社会との
協働
・臨床試験／治験
・農作物やバイオマス植物での評価／圃場試験
レギュラトリーサイエンス
農業ICT技術
植物工場
社会（集団）における実践
小規模な実践
（～先進医療、特区における栽培等～）
ビッグデータ


本日のワークショップの狙いと位置づけ
CRDSにおける研究開発戦略の立案プロセス
研究・開発投資、戦略目標の設定、
研究システム改革・制度設計などへの展開
調査報告書　など
人的ネットワーク
ワークショップ
有識者
インタビュー
重要な社会的期待を抽出
社会的期待の俯瞰
社会的期待
【地球規模】
世界人口増大
食生活の富裕化
大気中CO2濃度上昇
資源の乱用・枯渇
生物多様性減少
【国内動向】
就農者減少
自給率低迷
植物科学基礎の強み
食生活と健康
「日本食」の認知度上昇
海外の研究開発状況との比較
・俯瞰的な国際比較調査
・定常的な海外動向調査
・G-TeC（Global Technology Comparison）


（参考資料）　わが国農業の固有のコンセプト
地形
・島嶼
・4～5割傾斜地
（平均斜度8度）
・7割森林
・小さい田畑
・水を担保
（治水）
気候
・アジア・モンスーン型
・高湿度
・稲作好適
（それ以外不適または高コスト）
・雨の中での栽培、作業
・病虫害管理コスト大
・集団技術
・グループ、コミュニティ、ネットワークを形成
・その中でミッションと技術を共有しながら行う
経済・社会
・大きい国内マーケット
・消費地と生産地近い
「都市型農業」
←→「輸送型～」、「貿易型～」
・長期物流必要なし
・国境越える必要なし
・オークション（せり）
・農業協同組合の存在
・農林水産省
・補助金による農業支援
・遺伝子組み換え社会受容×
・超巨大企業の参入なし
アジアの稲作文化圏にひろく適用可能　→　米・豪・ブラジル式は適用不可
小規模、集団、コミュニティの農法　→　90億人の食を支えうる農法たりうる
必要なカロリー、必要な栄養、（＋高品質、高付加価値）を
必要なときに必要な量必要な場所へ供給するシステム　ただし高コスト


（参考資料）研究開発課題例
何が起きるか
環境変動・温暖化
気温上昇
旱魃
病害虫リスク増加
収穫後ロス増加
持続可能性
・肥料枯渇
・水枯渇
（日本は問題なし、
世界では深刻）
・化石エネルギー乱用によるCO2
・土壌
塩害
耕作不適地の増大
マーケット
国内→縮小
多様化
国外→拡大
日本食/ブランドへの期待
高齢化
どう対処するか
温暖化でも
・収量が減らない品種
・品質が低下しない品種
病虫害
・抵抗性品種
・共生微生物/天敵の利用
収穫後ロス
・日持ち性向上品種
持続可能性
・精密農法による低施肥栽培
・土壌微生物による低施肥栽培
・低肥料でも収量・品質を
維持する品種
・耐塩性/耐乾燥性品種
マーケット
国内→少量・多品種・高機能
国外→現地ニーズ対応品種
多収品種
・加工性に適した品種
高齢化
・作り手側→省労力
・消費者側→認知機能、
身体機能維持
技術開発例
ゲノム情報基盤を用いた高速育種
精密農法
フィールドオミクス
土壌微生物の制御による農薬・施肥低減ストレス耐性賦与
機能性成分の発掘と増強（育種・栽培の両面から）
作物ごと研究クラスターでの開発・育種・栽培一貫研究

4-2-1-1　セッション 1「食料・食品生産を取り巻く国内外の現状と将来展望」

4-2-1-1-1　わが国の農業の歴史と現状、および将来展望
＜澁澤　栄：東京農工大　教授＞

わが国では毎年 10～ 20 万人が離農し、新規就農者は約 1 万人程度である。農業就業人口は現在 220 万人なので、約 10 年で農業就業人口の大半が消滅することになる。同時進行で、市場のグローバル化と ICT による生産技術体系の大変革がある。これは歴史的に見ても一つの農業革命が進行中と言える。この革命的な転換期に必要とされる技術と科学を推進すべきである。

将来的に食糧危機と水資源の危機が同時に来ると予想している。世界の穀物生産量増加は、耕作面積の増加ではなく単位面積当たりの増収によるもので、育種技術、作物管理資材、栽培技術がこれを支えている。日本の単位面積あたり穀物単収は 2005 年 FAO 統計で、世界第 14 位であり、世界的にみても、高単収技術の開発と普及の使命と期待がある。

農・食・健康市場ニーズの動向について、国内人口が毎年約 100 万人減少するのに伴い、統計上の類推だが，国内市場は約 6,000 億円の減少、一方、世界人口は毎年約 6,000 万人増加するのに伴い約 3 兆円の市場が増加している。今後の 10 年で大きな転換期を迎えることになり、日本の農業・農業生産物はグローバル市場での展開が必須となる。健康医療に対して食生活という観点から、医学分野との新しい連携もあり得る。

日本の農業の目指すべき姿は、まず非競争分野である農業安全保障の部分、すなわち GLOBAL G.A.P.などの世界標準を素直に受容すること、この部分は行政や科学技術が支援し、その上で連携あるいは競争分野として、地域ブランドや食品機能性も含めた付加価値をの課題がある。付加価値の部分だけ議論して農業安全保障の部分が欠落してはならない。GLOBAL G.A.P.は、国際認定機関が認定する農業セキュリティーのデファクトスタンダードで、輸出拡大にはこれへの対応が必須である。このあたりはレギュラトリーサイエンスの非常に重要な部分になるだろう。一方で、日本で普及している有機 JAS 認証は、有機栽培の環境への影響、安全や品質について、ほとんど科学的エビデンスがない。認証は県の行政担当者が行い、認証資格に対する第三者審査はできず、利益相反の認証審査が恒常化している状態にある。GLOBAL G.A.P.を受容することは、官民一体となった利益相反の仕組みと認証を受け入れる文化自体に変更を迫ることになる。

農業関係の研究費の特徴は、公的資金の割合が多く民間投資が非常に少ないこと。科学研究費も非常に少ない。英国の穀物の生産者協会の一つは、売り上げの 1%を研究基金として新しい技術開発に投資している。こういった研究資金調達の枠組みから、2000 年台前半には精密農業のための世界初のガイドラインが出され世界をリードしているという例もある。農業への研究資金の投資の仕組みは相当に改善すべきである。

国の科学技術イノベーション総合戦略でも、農林水産業の製造産業化を目指し、スマート・フードチェーン、スマート生産システムの 2 項目の中に位置づけている。情報については IT 戦略本部の中で、農業、関連産業、およびマーケティングが情報を共有し、一体で展開可能な仕組みを構築する構想がある。これが実現されれば、圃場から消費者までデータや情報が共有できる。これを例えば機能性食材に応用できれば、農業、医療、栄養士、

ビジネスが一つの輪の中で展開できる。既にアグロメディカルフーズ統合知の創成共有システムでプロジェクトが実行中で、ヒト介入試験あるいは疫学よるエビデンスの存在という方向を強化しつつ進んでいる。現在のところ、行政や学問の縦割りで分断されているのが懸念材料である。

今年から東京農工大遺伝子実験施設で検討を開始した、ゲノムグループ、圃場グループ、工学グループ連携の研究開発を紹介する。土壌センサーから得られる多パラメーターのデータ、作物地上部の高解像度のフェノタイピング、およびゲノム情報から、環境と遺伝子発現と個体の形質をモデル化する。さらに四季を再現可能な植物工場において、年 2 回、3 回ライフサイクルを回す。これらの連携で、研究成果をそのまま栽培技術へと転換可能なのではないか。アウトプットとしては、例えば機能性、アグロメディカルフーズ、耐塩、極地の農業のための作物と技術、あるいは超節水農業、こういうものの基礎基盤分野として提案可能だと考えている。

最後に、これを担う農業者像は、従来の農家や企業的な農業だけでなく、地産知商型、あるいは農業サービスのユーザーである耕す市民といったセクターも対象に含め、幅広い重層的な構造をもつ受け手群として考慮するべきである。

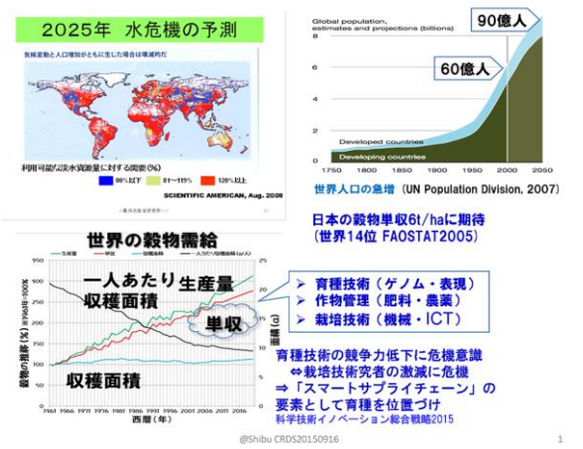
【質疑】

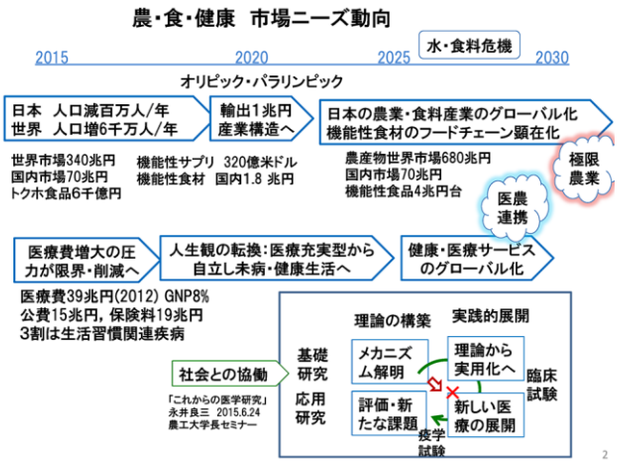
Q: 医学・医療と同じ道をたどっているという印象を持つ。Global G.A.P、Good Agricultural Practice ということは、すなわち規制の話。そこが特に顕著である。医学・医療についても、Good Clinical Practice や Good Manufactural Practice といったグローバルスタンダードができてしまい、日本は 10～30 年遅れてしまった。プレシジョンメディスンについても同じ。メティキュラス（細部に留意して）にやるべき。為政者が始めに統合し、その後研究を始める方式が望ましいのではないか。政策的に、政治のトップのイニシアティブがないと動かないのでは、官庁任せだと縦割りが深まるだけなのでは、と思う。

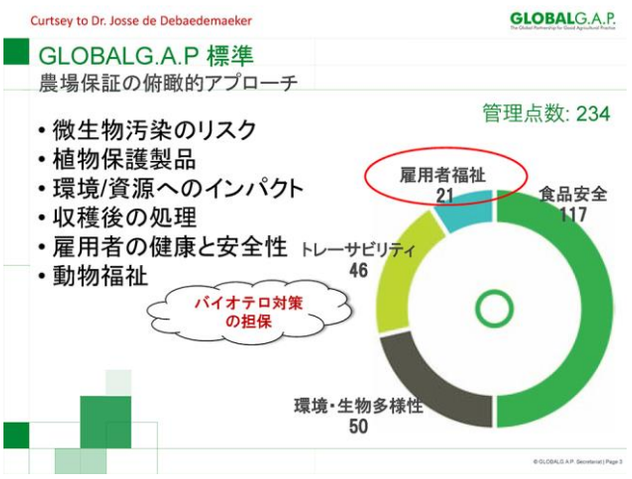
A: 全くその通り。（安全）規制の話は、80～90 年代に始まった。そのころは自分も国際会議や討論に参加しており、ヨーロッパもアメリカも同じ水準だった。精密農業(Precision Agriculture)のプレシジョンの意図するのは、コレクト・インフォメーション(correct information)、コレクト・タイム(correct timing)、コレクト・ディシジョン(correct decision)（正しい情報にもとづき、正しい時期に、正しい判断をする）といったもので、細かい(accurate)という意味ではない。90 年代にヨーロッパや米国で緻密にデータ（エビデンス）を取ってそれをベースとした管理方法を農業に導入し、精密農業が成立した。これに拍車をかけたのが、80 年代に国際モデルとなったトヨタの「かんばん方式」、すなわちジャスト・イン・タイム生産システムであり、精密農業の形が完成した。農場管理の途上で集めた情報をピックアップして、法律にあうかどうかチェックするリストが出た。これが G.A.P となった。97 年の第 1 回精密農業ヨーロッパ会議では、精密農業、EurepGAP(現在の GlobalG.A.P)、農業機械システムのデータ通信標準化に関する ISO 提案、この 3 つのセッションが他の学術セションと平行して開催されていた。標準化の取り組みはアメリカでもここから 10 年遅れた。省庁の壁のほか、学者の分野間の壁も越える必要がある。

Q: 研究資金循環について。民間投資が少なく、公的資金が多いとの意見だが、日本で研究資金がうまく回らない原因は何か。

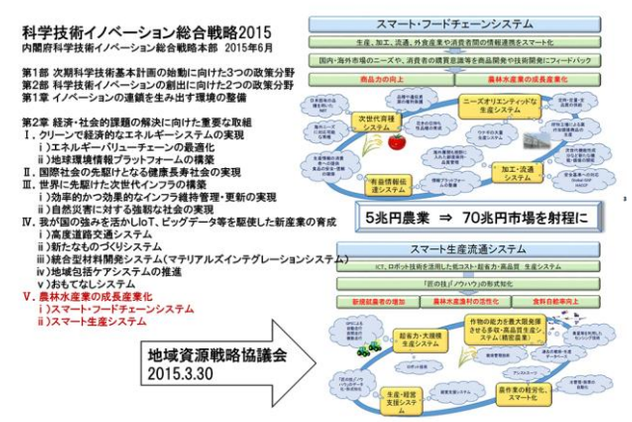
A: JA が貢献できる可能性あり。販売委託金 2%の半分をまわすだけで 1000 億円になる。英国だけではなくて、コロンビアでも、稲作組合で売り上げの 0.5%を基金として拠出し大学や企業に研究を委託している。これがその国の農業関係の研究をリードする。日本にはそういう研究がないので、農家視点のベクトルを見失いやすい。


2025年　水危機の予測
SCIENTIFIC AMERICAN, Aug. 2008
90億人
60億人
Developed countries
Developing countries
世界人口の急増　(UN Population Division, 2007)
日本の穀物単収6t/haに期待
(世界14位 FAOSTAT2005)
世界の穀物需給
一人あたり生産量
収穫面積
単収
収穫面積
育種技術（ゲノム・表現）
作物管理（肥料・農薬）
栽培技術（機械・ICT）
育種技術の競争力低下に危機意識
⇔栽培技術究者の激減に危機
⇒「スマートサプライチェーン」の
要素として育種を位置づけ
科学技術イノベーション総合戦略2015
@Shibu CRDS20150916
1


農・食・健康　市場ニーズ動向
2015
2020
2025
2030
水・食料危機
オリピック・パラリンピック
日本　人口減百万人/年
世界　人口増6千万人/年
輸出1兆円
産業構造へ
日本の農業・食料産業のグローバル化
機能性食材のフードチェーン顕在化
世界市場340兆円
国内市場70兆円
トクホ食品6千億円
機能性サプリ　320億米ドル
機能性食材　国内1.8 兆円
農産物世界市場680兆円
国内市場70兆円
機能性食品4兆円台
極限農業
医農連携
医療費増大の圧力が限界・削減へ
人生観の転換：医療充実型から自立し未病・健康生活へ
健康・医療サービスのグローバル化
医療費39兆円(2012) GNP8%
公費15兆円，保険料19兆円
3割は生活習慣関連疾病
理論の構築
実践的展開
基礎研究
応用研究
メカニズム解明
評価・新たな課題
理論から実用化へ
新しい医療の展開
臨床試験
疫学試験
社会との協働
「これからの医学研究」
永井良三　2015.6.24
農工大学長セミナー
2


Curtsey to Dr. Josse de Debaedemaeker
GLOBALG.A.P.
GLOBALG.A.P 標準
農場保証の俯瞰的アプローチ
管理点数: 234
・微生物汚染のリスク
・植物保護製品
・環境/資源へのインパクト
・収穫後の処理
・雇用者の健康と安全性
・動物福祉
雇用者福祉
21
食品安全
117
トレーサビリティ
46
バイオテロ対策
の担保
環境・生物多様性
50
© GLOBALG.A.P. Secretariat | Page 3

農業関係研究費の課題
・公的資金の割合が高い
⇒民間資本が弱い
・生産者の視点が弱い
⇒生産者による研究基金弱
・縦割りが強すぎる
⇒行政，研究分野
・産業力強化の視点が弱い
系別の配分額(直接経費)
配分額合計
636億円
農林水産省の研究費　1千億円／年
そのうち競争的資金50～100億円
イギリスの例
Home Grown Authority
穀物生産者協会
売上の1%を研究基金
5百万ポンド/5年
精密農業ガイドラインの作成
2000-2005
科研費　農学　37億円(H26)
4


科学技術イノベーション総合戦略2015
内閣府科学技術イノベーション総合戦略本部　2015年6月
第1部 次期科学技術基本計画の始動に向けた3つの政策分野
第2部 科学技術イノベーションの創出に向けた2つの政策分野
第1章 イノベーションの連鎖を生み出す環境の整備
第2章 経済・社会的課題の解決に向けた重要な取組
Ⅰ．クリーンで経済的なエネルギーシステムの実現
ⅰ)エネルギーバリューチェーンの最適化
ⅱ)地球環境情報プラットフォームの構築
Ⅱ．国際社会の先駆けとなる健康長寿社会の実現
Ⅲ．世界に先駆けた次世代インフラの構築
ⅰ)効率的かつ効果的なインフラ維持管理・更新の実現
ⅱ)自然災害に対する強靭な社会の実現
Ⅳ．我が国の強みを活かしIoT、ビッグデータ等を駆使した新産業の育成
ⅰ)高度道路交通システム
ⅱ)新たなものづくりシステム
ⅲ)統合型材料開発システム(マテリアルズインテグレーションシステム)
ⅳ)地域包括ケアシステムの推進
ⅴ)おもてなしシステム
Ⅴ．農林水産業の成長産業化
ⅰ)スマート・フードチェーンシステム
ⅱ)スマート生産システム
地域資源戦略協議会
2015.3.30
スマート・フードチェーンシステム
スマート生産流通システム
5兆円農業 ⇒ 70兆円市場を射程に
@Shibu CRDS20150916
5

おわりに
政府ＩＴ総合戦略本部　新戦略推進専門調査会農業分科会資料(H25.10.29)
地域資源（農業知財）を活用する日本農業の主な担い手
「耕す市民」農業
商品：自然と調和し対話する暮らし
・健康寿命の重視
・作業対価を払う
・数百万の市民農園
・文化と人格涵養
課題
・リテラシィ教育
・農園管理標準
・危害管理標準
「地産知商」農業
商品：生産と販売（直売）のしくみ
・生活の質を販売
・マーケットイン
・多角経営事業体
・数百万の都市農業
課題
・危害管理標準
・地域市場の再生
・次世代継承
「企業」農業
商品：価格と品質バランス農産物
・社会責任の自覚
・資金流動の管理
・数万の生産法人
・低コスト高効率化
課題
・国際競争力
・雇用管理
・資本蓄積
法令遵守・衛生管理（安全）と信頼・満足度（安心）の重視
地域コミュニティ維持・環境保全・生物多様性の重視
6

4-2-1-1-2 次世代農林水産業創造技術　～アグリイノベーション創出の道筋～
＜西尾　健氏：法政大教授、内閣府「次世代農林水産業創造技術」プログラムディレクター＞

内閣府主導の SIP での取り組み「次世代農林水産業創造技術」について紹介する。平成 25 年に科学技術イノベーション総合戦略で提案され実現した。プログラムディレクター（PD）を各分野に 10 人配置し、PD を責任者として研究を推進する。各省から関連予算を一度内閣府に集め再配分する方式で、既存の日本の研究プロジェクトにはない新しい形態である。

現在 10 分野（今度 1 分野増える予定）があり、総額約 500 億円で、大体一分野 30 数億円（多い分野で最大 60 億円規模）程度の予算規模で推進している。「エンジンを開発する」などコンパクトな目標設定の分野が多く、農業は目標が曖昧で、他分野に比べて立場は苦しい。他の分野は工学分野の PD および研究者が多く、プロジェクト研究、特にモノを作るということに慣れている。一方農業分野ではそういったプロジェクト経験が余りなく、相当に困難を感じる。日本の農業の姿を俯瞰すると圧倒的に水稲だが、では水稲 1 つだけに集中的に投資して、日本の農業が変わるか、単一の技術開発で日本の農林水産業を活性化することができるか、というとそれも難しいのが現状。複数のキーテクノロジーの開発が必要である。

各キーテクノロジーを紹介する。まず土地利用型農業、稲作について大規模化支援技術、これは、麦、大豆に波及する。次に、園芸農業、露地物より植物工場的なものの代表として、トマトを選んで集中的にやる。畜産も一部ある。次に育種については、ゲノムの研究が進み、従来型の交配育種だけではなく、ゲノム編集にも期待している。GMO（遺伝子組換作物）がなかなか社会に受け入れられなかった反省から、下地作りも行っている。植物保護の分野では、農薬に対する批判があるのでそれに頼らない方法の開発を行っている。高付加価値化の分野では、機能性食品に対する期待が非常に大きい。高齢化社会に向けて、認知症や要介護の人々、医療に頼らずに食べ物で対処、という方向性である。林業については、リグニン、セルロースといった部分、水産については、輸出障壁にもなっている貝毒対策などを開発している。藻類についても、もう 1 回チャレンジする、などなど、全国さまざまなところで振興している。

府省連携、分野の融合が叫ばれて久しいが、どれだけこの分野間の壁が厚く谷が深いか、やってみると痛感する。日本で長く続いているこの状況を打破するのが大きな目標である。日本の基礎研究分野は非常に強い、データベースも非常に良いが、応用のほうに入ってこない。なぜかと考えると、集める人は集めることだけに興味がある、個別技術はすばらしいがうまく融合しない、大学の中の理学部と農学部で学科の名前は少しずつ違っても同じようなことをやっているところが多く存在する、などが問題だろう。

土地利用型の米・麦・大豆の世界でのスマート農業について紹介する。トラクターを無人で複数台同時に走らせる。オペレーターが 1 人で今のところ最大 3 台だが、これを 5 台にするのが目標。大きな機械ではなく、小さめのもので。また、既存の比較的新しいタイプのトラクターに、ガイド機能を付与すれば自動化できるといった方向性もある。

新しい課題創出の方向性もある。リグニンを取った後に残るセルロースを、うまく改変するような形で肥料利用し、植物保護の分野に適用する、あるいは、魚の機能性成分であ

る DHA や EPA はそもそも藻類がつくったものを魚が食べてつくられるので、藻類プロジェクトと機能性成分プロジェクトの融合、など。

本研究プロジェクトは、ファンディングエージェンシーとして農研機構の生研センターがその機能を担う。今後 JST とも連携を深めたい。民間と大学の有識者にサブプロジェクトディレクター、あるいは戦略コーディネーターとなってもらい、評価を含め研究開発の方向性について意見をもらいながら進めている。

研究内容については内閣府のホームページに詳細があるので参照してほしい。自分の役目は向かうべきベクトルを合わせていくこと。現状、土地利用型農業の研究分野のスマート農業技術のところに、一番意見を述べている。何度も集まって論議を重ね、意思統一はされてきた感はあるものの、作業機に仕上げるまで 5 年しかないので、それまでに成果が出るところに集中的に研究投資をしている。

育種の話ではゲノム編集、GMO の反省から社会実装の方法に関する調査研究といった社会学的なアプローチも 1 つ行っている。機能性食品では阿部先生、時間生物学の柴田先生、ホメオスタシスの測定機器が得意な浜松フォトニクスが参加している。

スマート化については、労働時間半分、水管理労力半分を目指す。これらは今後増えると期待されている、数十ヘクタールから 100 ヘクタール規模の農家を支える。太陽光型温室ではは、現在捨てている液化天然ガスなど由来のマイナスの熱を使って夏場に冷やすというアイデアもある。ゲノム編集は、トマト、マグロなど。マグロは受精卵にゲノム編集ができるようになり、おとなしいマグロを開発することを目標にしている。養殖中の衝突死（3 割にのぼる）を防ぎたい。　植物保護と機能性食品については、個別に製品にする方向で。安全性の評価や、表示の問題など、ダイレクトに動くことを念頭に入れている。

出口、モノにするということを徹底し、研究のレベルで終わるものについては削減する方向で進めている。

【質疑】

Q: SIP、イノベーション創造プログラムというのは、どこが主導で、どういう団体、企業が集まってやっているのか。

A: 完璧に政治主導。府省の壁を超えたというのが売り。これまで農業研究というのは民間企業というのがそれほど関与してこなかった。工業系の分野の関連企業参入経験あるので積極的な参入がある。例えば機能性食品では食品会社、50 社協力企業が入っている。予算はつけていないが、知財の扱いなどは予算をつけた企業と同程度に扱う方向で。もう一つの例としてリグニン。これは石油製品を相手にしている。エレクトロニクス関連の企業や、プラスチックフィルム、三菱化学などが参加している。こういった企業は実用化や社会実装の段階に必要な機械類、例えばシートにする装置、ロール・トゥ・ロール技術、などを持っている。

Q: そういう企業がともに手を組んでやっているということか。

A: SIP も立ち上げ当初はもめた部分があったと聞く。一つの分野のリーダーがトヨタで、ほかの会社はどうするか、本当にそこで研究開発されたものが他の会社にも提供されるのか、トヨタの独占になるのではないか、などの懸念があったと聞く。知財の戦略

も突っ込んだ話をしたようだ。結局一応オールジャパンでいくことになった。外の企業と日本の企業で、ここは仕分けしようと。しかし海外企業からは時々批判がある。

Q: このSIPはもともと省庁横断で、タイトルに「次世代」を冠しているので、次の世代にというイメージでいたが、今のお話だと、すぐにモノ（成果物）を出せということなのか。随分趣旨が違うように思うが。

A: 確かに。しかし、例えばトラクターがモノになって、すぐ普及するかというとそうでもない。その間でも、何かしら使えるモノを出せという感じ。先ほど紹介があった最先端のシステムも、すぐにそこらの農家が皆使えるか、というとそうでもない。もう一つ、今後わが国の農業を少数人数で支える、100ヘクタール農家がどこまで使えるか、となってくる。ただしそれもどのくらいの軒数になるかと考えると、そう簡単にいかないが。そういういった意味で次世代という言葉を使っている。

日本の農林水産業の姿

・気候、土壌、地形が大きく異なる中、世界に類を見ない多様な農林水産業が展開。

販売農家数（戸）

水稲	1,160,030	畜産	96,794
麦	56,559	林業	906,805
豆類	127,204	養殖	
野菜	434,742	マグロ	92
花卉	66,889	ホタテ	2,950
果樹	242,344	カキ	2,977

単一の技術開発で日本の農林水産業を活性化することは不可能

複数のキーテクノロジーの開発が必要

5

日本の農林水産業を変えるキーテクノロジーとは何か？ ①

個別作物

・日本農業の大宗を占める「稲作」
→ 大規模化支援技術

波及効果
・麦作大豆作改善
・農業機械産業
・国土保全効果
・世界食料問題解決

・急激に発展を続ける園芸農業
→ 太陽光型植物工場支援技術（トマト）

波及効果
・他の野菜
・花
・果樹

・畜産
→ 受胎率向上、健康管理技術

波及効果
・畜産業のスマート化

基盤技術

・多様な品種群の確保
→ 新たな育種技術

波及効果
・種苗産業

・環境を保全する技術
→ 農薬に頼らない植物保護

波及効果
・生物多様性保全

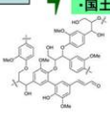
・農林水産物・加工食品の高付加価値化
→ 次世代機能性農林水産物・食品開発
波及効果
・農村漁家の所得向上
・超高齢化社会、国民生活の質の向上
・食品産業の収益向上

6

日本の農林水産業を変えるキーテクノロジーとは何か？ ②

林業

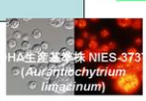
・国土の7割を占める森林の活用
→ 林地残材（地上最大の未利用資源リグニン）の利用


波及効果
・地域産業の育成
・新素材産業の創出
・国土保全効果

水産業

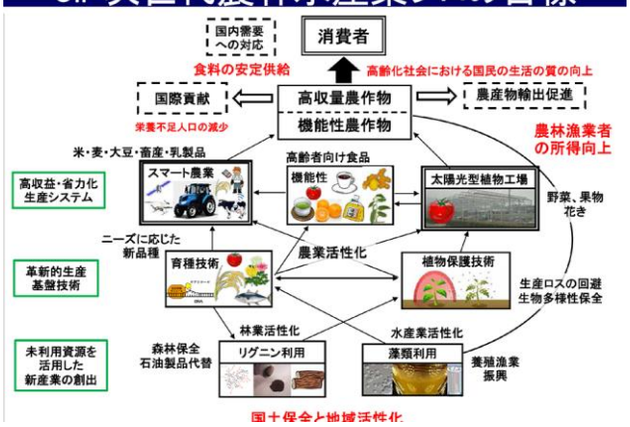
・次世代の養殖産業

→ 養殖生産物の検査の迅速化
波及効果
・漁村・漁家の所得向上
・地域産業の育成
・水産業の持続的発展
→ DHA等有用生産物、餌の生産（水産版植物工場）



7

SIP次世代農林水産業プロの目標



全体工程表（主なもの）

	2014	2015	2016	2017	2018
農業のスマート化		○リモセン利用等要素技術の開発 ○多数圃場の管理システム のプロトタイプ開発 ○オミクス解析による品質性・収量性に関わる因子の特定、栽培生理モデル構築			○効率的営農管理システムの開発 稲作の労働時間50%減、施肥量30%減 ○マイクロセンサによる牛の受胎率15%以上向上 ○トマトの収量、糖分等の制御技術開発 生産性50%以上向上、労働時間30%減
新たな育種・植物保護技術		○ゲノム編集等の最適利用条件確立 ○育種素材のゲノム編集の礎ねの完了 ○オミクス解析利用の基本設計、変異パターンのデータ整理 ○害虫行動制御のための照射装置デザイン、化合物、微生物の選定			○国内育種関係者が容易に利用できるゲノム編集技術の確立 ○育種素材作出（超多収性イネ、高機能性野菜、養殖適性の高いマグロ） ○果樹の世代間隔を1年以内に短縮 ○害虫行動制御のため照明装置の開発、新規農薬の合成デザインの提示、微生物活用の実証
新たな機能性の開拓		○食品の脳・身体ロコモーション機能改善の科学的エビデンスの獲得 ○林地残材からの改質リグニン製造コスト（200円/Kg以下） ○微細藻類のアスリート株選抜、低コスト培養技術の開発			○次世代機能性・農林水産物10品以上開発 ○ビジネスが成立し得る、リグニンからの高付加価値素材提供 ○微細藻類によるDHA等生産コストを1/2～1/5に低減、具毒標準品の生産・配布体制の確立

16

出口戦略

○農地等に係る構造改革と一体的な技術の現場展開

○企業との連携により、市場や消費者ニーズを踏まえた商品提供

○技術のユーザー視点に立った成果普及とビジネスモデルの確立

○知財管理等、グローバル視点での技術普及、制度改革、規制改革等と連動した取組み

22

4-2-1-1-3 農研機構における今後の食品研究
＜大谷 敏郎： 国立研究開発法人農業･食品産業技術総合研究機構（農研機構）理事、食品総合研究所所長 所長＞

今年 7 月の厚生労働省の発表では、日本は女性の寿命が世界一、男性も世界 3 位で、さに 8 月末に The Lancet 誌に出た記事では、健康寿命は男女共に世界一長く、要介護期間が他国の平均より短いと紹介されている。これらのデータから、日本人はなんとなく「日本食は健康に良いのではないか」、と皆漠然と信じているのではないかと想像するが、科学的に見るとエビデンスは少ない。例えば、PubMed で地中海食と日本食を比較すると、圧倒的に日本食の論文数が少ない。また 2010 年の食事に関する USDA の報告書では、日本食や沖縄の食事が良いらしいがエビデンスがないので報告書には載せられないとの記述もある。

私たちが直面している課題や問題をいくつか紹介する。一つは食料の廃棄率で、一日あたり供給カロリー2,473kcal に対し消費カロリー1,867 kcal、その差は 500 kcal 程度、これは米飯の供給熱量とほぼ同じカロリーを捨てていることを意味する。食と健康に関する問題としては、超高齢化社会が到来し、幸い世界で一番健康寿命が長いものの、平均寿命と健康寿命の差はまだ約 10 歳ある。また、生活習慣病の増大、若い女性のるい痩（やせすぎ、栄養失調のレベルと言われている）、高齢者や若い世代などの健康弱者についても課題がある。農業では、自給率の向上、量と質の確保、TPP 対応、国内農業と輸入のバランス、などが大きな課題である。

日本の農林水産業と食品産業を合わせた産業を食料産業あるいは食品関連産業と言うが、農林水産業と食品関連産業には生産額に約 7～8 倍の規模差がある。農林水産業は必ず食品産業とセットで考えなくてはならない、と言われて久しいが、両者は未だに分断傾向にあるのが問題。食品産業は中小企業の比率が多く，売上に占める研究費の比率は他産業に比べ 1/3 の約 1%と非常に少ない。

我が国の食品関係の研究体制について紹介する。研究者総数は約 17,000～18,000 人で、大半が企業に、大学とあとは地域の研究機関（都道府県）に 1800 人程度、残りの 400 人が国の研究機関、そのうちの約半分が農研機構、さらにその半分の約 100 名が食総研に所属するという構成である。

食品研究の位置づけについて説明する。まず、食料・農業・農村基本法には、我が国の食料の安定供給についての方針が書かれている。これに基づき、食料・農業・農村基本計画（基本計画）が概ね 5 年に一度作成される。基本計画は今年 3 月に最新のものが出たところで、食品産業全体や農業全体についての方向性がまとめられた。さらに、基本企画に沿って，農林水産研究基本計画（研究基本計画）がまとめられ、同じく今年 3 月に公表された。ここには今後オールジャパンで行うべき研究の方針が書かれている。研究基本計画の中には、ICT や異分野融合について記述があり、また重点目標として、機能性食品、機能性シルク、安全管理、次世代の機能性食品などの項目が挙げられている。これらを根拠にしながら我々は具体的な研究計画を作っている。

現在検討中の「『知』の集積と活用の場の構築」を紹介すると，既存の農林水産分野の人材と、今まで全く農林水産分野と関係ない人材が、基盤となるレイヤーに集まり、具体的な研究を組み立てるシステム，いわゆるオープンイノベーションを進める仕組みを作り始

めている。さらに，食品産業がどういう技術的な発展をすべきかというロードマップ集を、これも 5 年ごとに農林水産省でまとめており，安全や健康の維持、資源の効率化、廃棄物などについて記述がある。これらも参考にしながら我々は研究計画を立案する。日本の食品市場は年々縮小傾向にあるが、世界を見るとまだまだ伸びしろはあるので、グローバル・フードバリューチェーンにどう貢献するかという戦略も 2014 年に農林水産省で立てられており，展開のための準備が進んでいる。

このような背景の元，食品研究の概念はその両端が広がりつつあり、研究対象は育種から栽培、ポストハーベスト研究（食品研究)、ヒトの消化・吸収（健康増進)、ライフサイクルアセスメント（LCA）から廃棄物処理までと幅広くカバーすべきと考えている。

具体的な研究内容の決定については、研究期間と研究規模のマトリックスを作成し、俯瞰することが重要だろう。来年から実際の組織になる予定で，現在センター長を勤めているバーチャルな組織の「食農ビジネス研究センター」では、この方式のフィージビリティスタディを検討している。いきなり研究を始めるのではなく、まず「食の未来サロン」と称する会議を組織し、いろいろなステークホルダーが集まってニーズを確認しつつ、大きなマトリックスを議論し，それぞれの役割を整理した後，研究をはじめる仕組みを，試行的に運営している。食の未来サロンでのディスカッションテーマは、大小様々あるが、予め議論することにより、研究規模と期間、誰がいつどこで何をするかなどをある程度決めることが可能になる。今後，食品、技術別の大枠の研究戦略が必要なので、多様なステークホルダーによる討議の活発化は大変有効であろうと思われる。また同時に、我々の研究機関は税金を投入しているので、税金を投入すべき研究は何かということも留意すべき。マトリックスを作ると、重要点が明確化できる。

産学官連携について述べる。制度設計、法律、他省庁との折衝など、特に食衛法についての厚労省との折衝は農林水産省しかできない、そういうものは官すなわち農林水産省でやるべき。ほかのところ、実際の研究開発は，学と産でやるべきと考えている。学や産では省庁間の調整はできない.

機能性については、抜本的に見直すときに来ていると考えている。食品の機能性というのはそもそも 3 つ、1 次機能の栄養と、2 次機能の感覚・嗜好、3 次機能の生体調節、がある。最近は 3 次機能だけが注目されるが、1 次、2 次、3 次がそろっていないと食品・食材として使えない。このあたりを再考すべきと考える。食品機能性の研究は 30 年前からはじまったが、最初のうちは機能性成分の同定や細胞、動物試験を行い、現在は機能性の解明のためのヒト試験をやっている。現在私はプロジェクトで 12 の介入試験をやっている。RCT の介入試験だが、なかなかそう簡単にはきれいなデータが出てこないので、今後は，薬の場合とは異なった方法論自体の見直しも必要ではないか。

農研機構における食品研究は、機能性、加工流通プロセス、安全信頼と、3 つに分類して行っている。安全については特に、農林水産省のほうからリスク管理をする物質が決められており、それに対応すること、また将来的な危害要因に対応するのが我々のミッションになる。

来年以降、私たちのところでも 5 年の研究計画を見直すが、機能性研究については、3 つの機能を合わせた栄養・健康機能性研究、また，食品加工流通プロセスについては、最先端でなくても国産オンリーワンの流通加工技術の研究開発、この 2 つが非常に重要かと

思っている、さらに食品安全については、最先端の研究分析技術などをキャッチアップして、世界に発信できるような、国際標準となるような技術を開発するというのが大きなコンセプトになっている。

【質疑】

Q: 2つ質問したい。一つ目は、国の機関として、食品総合研究所がやる研究と、民間企業への受け渡しについてどう関与するか。2つ目は、機能性食品は、食品産業だけではなく農業の活性化にも目標があるのか。機能性の何を核にどんな戦略で農業活性化につなげていくかをお聞かせ願いたい。

A: まず、一つ目、今までは個別対応が多かった。つまり、研究者が学会で発表して、民間の方が来て、共同研究が始まる。結果的にこれだと非常に狭い分野になる。また、交付金や研究者数も毎年減るので昔のようにはいろいろなテーマを設定する訳には行かない。成果を出せと言われることが多いので、最初に戦略を作っておき、その中でどこをやるということを整理しておいて、例えば民間から個別の話が来たときにそこにはめるというような整理で、マトリックスを埋めていく。そうでないとバラバラ、個別具体的になってしまい、それ以上先に進めないという危機感がある。その他，民間との共同研究では、権利関係の調整に長い時間が必要なケースもあり、そういった点が難しい。

二つ目、機能性食品の話。機能性食品表示制度ができて、三次機能の機能関与成分は科学的なエビデンスがないと表示できないことになっている。プロジェクトで三次機能を持った素材を使い食事として介入試験をしようというときに、管理栄養士や栄養方面の人と話すと、三次機能がたくさんあっても、そもそも栄養、食品としてちゃんと成り立っていないと話にならないと言われる。一次、二次、三次機能が、三つともえで効果がなければ多分無理だろう。農産物から抽出濃縮してサプリにするといったところは企業の仕事で、私としてはこのような仕事は国の研究機関でやるべきではないと思う。丸ごとの食材や食品を評価していくというのが本道ではないか。我々のほうは農産物の丸ごとの評価をすること、例えば、ちょうど三ケ日ミカンというのが機能性表示食品に認められたところだが、そういったことで貢献できればと考えている。

Q: 今後、食品や農産物を輸出していかなくてはならない。例えば、日本酒とワイン、日本の漬物とチーズ、を比べてみると、ワインやチーズの方が認知度も高く世界中の人がおいしいと思っているだろう。ブランドを世界に広めていくというのは、国の研究所の一つの仕事ではないか。例えばワインでも、例えば格付けなどいろいろ認定がある。それがまたブランドをサポートしているのでは。それは民間企業ではできないと思うが、それ食品総合研究所がやることではないのか。

A: そこは非常に微妙な問題だと思う。格付の話になると、研究組合や研究コンソーシアムを作って、あるいは業界団体と組んで、民間に協力した形でやるのが筋と考える。今の話のうち、おいしさというのはどういうことかとか、各国はどういうおいしさの嗜好があるのかなど、といった研究要素の部分は我々国の研究機関の仕事と思う。

Q: 例えば世界の当たり前のブランドにしていこうという点についても、イニシアチブをとるのはやはり民間なのだろうか。

A: ブランド化ということに関しては、可能なのならば民間や研究サイドでは無く，官に期待している。

平均寿命と健康寿命の差(世界・女性)

国名	平均寿命	健康寿命	要介護期間
日本（女性）	86.39歳	75.56歳	10.83年
アメリカ	81.42歳	68.61歳	12.81年
イギリス	82.84歳	70.56歳	12.28年
ドイツ	83.14歳	70.31歳	12.83年
フランス	84.91歳	72.32歳	12.59年
中国	79.99歳	70.28歳	9.71年
イタリア	84.60歳	71.36歳	13.24年
スペイン	84.43歳	71.83歳	12.60年
ノルウェー	83.71歳	71.66歳	12.05年
キューバ	80.43歳	69.06歳	11.37年
オーストラリア	83.99歳	70.63歳	13.36年
カナダ	83.43歳	71.04歳	12.39年

平均12.29年

Lancet v386:2145-2191(August 27, 2015) をもとに再構成 :http://ac.els-cdn.com/S014067361561340X/1-s2.0-S0140673615613040X-main.pdf?_tid=23dd300c-bb43-11e5-b906-00000aab0f6c&acdnat=1452833454_8624b3e97bc83f7bbd6dd594dd30ac67

1

食料産業の規模

農林水産業
251万人（4.0 %）
11.3兆円（1.2 %）
農業　8.5兆円
林業　0.2兆円
漁業　1.4兆円
（輸入額 9.2兆円）
（輸出額 0.6兆円）

食品産業
789万人（12.4 %）
78.9兆円（ 8.7 %）
食品関連流通業　24.3兆円
外食産業　20.5兆円
食品製造業　36.9兆円

「農業・食料関連産業の経済計算（平成24年度）」、「農林水産基本データ集（平成27年4月1日版）収載、平成24-26年の値」、「総務省労働力調査（平成26年度）」

売上高に対する研究費の割合（H25）

全産業	3．3%
食品工業	1．1
製造業	3．9
医薬品工業	11．7

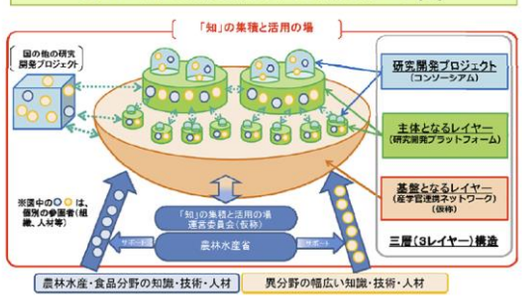
「総務省科学技術研究調査（平成26年度）」

4

「知」の集積と活用の場の構築に向けた検討会

平成27年5月27日～8月7日

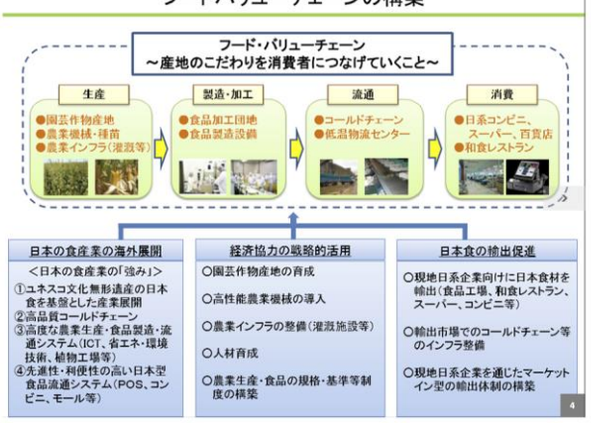
図２：「知」の集積と活用の場の全体構造イメージ(案)



「知」の集積と活用の場の構築に向けた検討会中間とりまとめ（案） 平成27年8月より

3

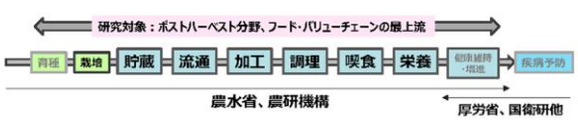
フードバリューチェーンの構築



農林水産省資料より引用　http://www.maff.go.jp/j/kokusai/kokkyo/food_value_chain/pdf/151103_stra.pdf

4

これからの食品研究のイメージ
―農研機構が食料研究の要となるべき―



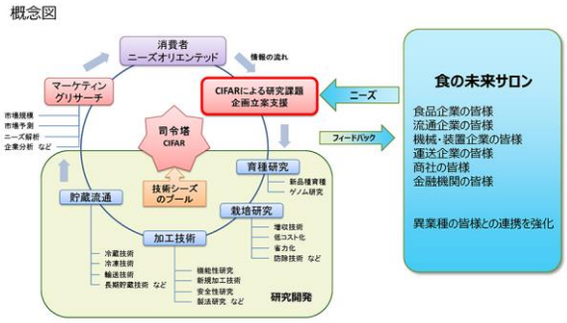
① 国民への食料安定供給確保のための食料研究の一環として研究戦略を構築。
② フード・バリューチェーン、ニーズオリエンティッド型アプローチによる研究戦略の構築。
③ 研究対象は、育種、栽培からポストハーベスト段階、ヒトの消化・吸収、ライフサイクルアセスメント、廃棄物処理まで。
④ 地域農林水産物の生産拡大や輸出を目指した攻めの農業に貢献。

5

食農ビジネス研究センター（CIFAR）

消費者視点に立ち、企業様のニーズに合致する技術開発を目指すニーズオリエンテッド研究を推進します。

概念図



6

4-2-1-1-4 オランダにおける共同研究開発
＜西出　香：オランダ応用科学研究機構＞

オランダという国では、共同研究開発時に、どういう形、体制で動いているかについて今日は述べる。TOPSECTOR とは、Mark Rutte 首相が第 1 期に、知識経済促進の目的で採択したもの。およそ 70 億ユーロを支出し、様々な産業分野・項目を含む。その中で一つの項目が、農業、アグリビジネスとなっている。TOPSECTOR の目標は 2020 年に知識経済で世界 5 位内、GDP の 2.5%をＲ＆Ｄへ、知識経済における官民学投資総額は今年だけで 5 億ユーロ、そのうち少なくとも 4 割を民間企業から支出するという、非常に野心的なもの。TOPSECTOR の中の一つの柱、フード・アンド・アグリの体制の中でどういった経済支援が行われているかこの先説明する。

オランダには農林水産省というのがなく、全て経済省の中に管轄している。官民共同体制（PPP、Private Public Partnership）の経済支援について、民間企業による大学や公的研究機関への投資額をもとに補助金を算出している。例えば 1 ユーロの民間投資につき 25 セントの補助金が出る。少額の場合は中小企業を対象でより高い補助金レートとなる。また中小企業では現物出資も可能であり、補助金は投資企業ではなくて TOPSECTOR に行く。そのうち大部分はスポンサーにプロジェクトとして還元される。

アイディアはあるがビジネスにつながるかわからないとき、プロジェクトの実現可能性について、調査プロジェクトというのを政府が設置し、経済的・技術的にどれだけ実現可能かを、費用の最大 5 割、最高 5 万ユーロを、経済省が資金として提供する。それで、申請団体は独自にそれぞれ大学あるいは一般の研究機関を選択し、そこで調査プロジェクトを行う形式である。

アイディアはあるがどう活かせばよいかわからないとき、つまり手法で困った場合には、コンソーシアムを組むような体制もある。自社、別の中小企業 1 団体、公的研究機関あるいは大学 1 団体とともに、アイデア発展、実用化のためのプロジェクトの立ち上げが可能となっている。費用も、35%から 45%、最高額 40 万ユーロを支援する。これは提案内容によって優先順位が決定される。

企業によっては知識が欲しい場合もある。中小企業とプロジェクト、コンソーシアムを組んで、応用研究、応用開発を実施する。DLO・TNO（TNO というのは演者が所属する半官半民の研究機関）、DLO というのはワーヘンニンゲン大学の中にある農研機構のような農業研究団体で、そこに経済省からプロジェクトの 5 割を出資するもの。民間から一般の提案書の提出は年 1 回、どれだけ TOPSECTOR の趣旨との合致するかが採択の判断要件となる。

基礎研究については、NWO という、またオランダの科学技術研究機関が毎年にいろいろなテーマを定めている中、食料生産分野においても幾つかテーマを挙げる。参加したいテーマがあれば、TOPSECTOR が中心的な役割を担って、プロジェクト開始へつなげる。

コンソーシアムは、多数の企業が集まって、複数年にわたる共同体制で行う。いろいろなテーマがあるが、2 つ具体例を挙げると、Top Institute Food & Nutrition と Carbohydrate Competence Center。どちらもおよそ 20～30 ぐらいの企業と大学研究機関からなるコンソーシアムである。オランダに本社を置く企業だけではなく、国際企業でオランダに籍を置い

ていれば自由に参加できる。前述の 2 つ以外にも、たんぱく質、食と認知・行動、に関連したシステム生物学的なアプローチも行われている。

国際連携促進については、INTERNATIONAL SEED MONEY PROJECT がある。オランダの中小企業が国外でビジネスを展開したいときに、オランダの国が支援する。民間と政府、研究機関が一体となって解決できる現地の問題、を設定する。優先国は中国、インドネシアなど。例えば中国で売りたいものがあるとき、現地の法規がない、インフラがないなどの場合、自社だけではなく、政府あるいは研究機関がともになって解決していくのが目的。主に中小企業向けで、年間 8 グループのプロジェクトに分けてそれぞれ 5 万ユーロの支援が行われている。この支援費用は WUR（ワーヘンニンゲン農業大学と DLO 研究財団が統合した共同機関,P56 参照）の、専門家の雇用費としてアドバイザリー業務として使われる。一応、日本もターゲットとなっている。

Top Institute Food & Nutrition は、これは一つの企業コンソーシアムに幾つかの研究機関、大学、医療機関が加わった形で行われており、食のイノベーションと経済効果を促進するための取り組みである。目的は特に、プレコンペティティブの中でもよりビジネスに近いところでの連携した活動をすること。研究分野の詳細や参加しているパートナーについてはホームページを参照してほしい。

今度は逆に、企業から見たオープンイノベーションの意義について述べる。企業はどういうメリットが得られるのかというところで、日本が学ぶべきところは多い。企業の売り上げの中で一部が研究開発費に充てられるが、それを全額、自社の研究のために費やすのではなく、一部は、共同研究によって、1 社では届かない目的を共同で達成したほうがいいというコンセプトである。レバレッジ効果と、1 社でできないことを達成するという目的、あとは経済効果から見たメリットが大きく、やはり他社と共同することによってネットワークが広がり、また新たなアイディアが生まれるというのも重要だろう。

オランダは情報交換や情報共有が上手で、なおかつ相乗効果を期待して積極的に行う。1 足す 1 は 2 になるのではなく、それ以上の効果が得られるということ。

日本での共同研究開発について考察したい。やはり知識の共有というところが重要と思う。終身雇用で、一生同じところで仕事をする人たちとの情報交流というのは難しいという事情や、メンタリティーの問題もあるかもしれないが、情報の交換はとにかく重要。そういった機会、情報交流・技術交流の機会、場を作ることも手助けとなるだろう。

最後に、アイディアやシーズを実用化させるノウハウ・方策について述べる。オランダ政府で行われているインフラを日本でそのままコピーするのも無理とは思うが、方策やステップを提供することによって、より民間がそこに参入しやすい体制は必要だろう。加えて発信力は非常に重要である。すばらしい業績あるいは知識があっても、それが外に広まらないと、誰にも理解してもらえないし、ビジネスにつながることもない。

【質疑】

Q: IT 分野だと、アメリカなどでは、ベンチャー企業の成功モデルは二つある。一つはアイディアをつくり成功してそのまま大きくなるケース、もう一つは成功したときに大きな会社に買収されるケース。後者の、成功したベンチャーのアイディアを大きい会

社が買収して取り込むというのも結構一般的である。オランダの農業関連ではベンチャー企業はたくさん出ているのか。

A: 自由な発想を持つ商人気質の国民性もあって、ベンチャーは多々ある。農業のベンチャーというのは、要するに農業従事者になるような人たちではなく、生産者の一部が特化している場合が多い。活動的かつバイタリティーのある人たちがビジネスと農業のアイディアというのをつなげている。彼らは本当にネットワーカーで、重要なところで大企業を相手に交渉などもできるような人たちが、成功している。

Q: そのまま大きくなるか、またどこか大きな会社にそれが買われるというのが一つの成功パターンか。

A: 買収されることももちろんあるが、意地を張ってでも大企業の支配下にされないような独自の形でやっている人たちが多い。

Q: 前の質問に関連して、人材の養成はどうしているのか。日本の教育機関は「たこつぼ」的で、学生もなるべく大きい会社に就職したいなど、島国的な安定志向がある。そういう新しいところに果敢に出ていくような人材の養成も一緒にやらないと、仕組みを作っても人材がいなければ動かないと思うのでお聞きしたい。どういった感じで教育されているのか。

A: それは大学の農学部で勉強することではない。幼少期からやっている人間関係構築の方法、といった話になるだろう。

Q: 大学レベルの人たちがアグリビジネスのほうの人材を育てているのでは。例えばワーヘンニンゲン、またそれ以外も。

A: 大学などの専門教育機関は重要である。だがアグリビジネスは農学部卒業者だけの職業ではない。他分野の専門を持ちながらハイテク農業や食品産業に携わる者も多く、知識の融合が効果的と思われる。

C: 日本の学生にも、留学に来ないかとヘッドハンティングに来ていたことがあった。

C: 製品開発するにせよ何にせよ、結局はそういった人材の養成も一緒にやらないと、オランダ的な輸出産業として農業を位置づけるのは難しいだろう。人材養成はどこかで担わないといけないと思う。

Q: オランダ人のように数カ国語駆使できるようになるにはどうすれば良いか。日本人がハングルと中国とタガログとロシアと、隣接している国の言葉を 5～6 カ国語を自在に駆使できたら、今のような日本ではない。オランダ人は高校時代から 4 カ国語を駆使できる。

A: その通り。オランダは隣国と地続きで EU 内人の行き来も自由であり、オランダ語だけでは生きていけないので、国際社会で生き残り競争のためにほかの言語の習得が必要。

Q: 政府からの補助の仕方、研究開発が進み、海外市場に行くときには何か調査プロジェクトのお金が出るという話。あの補助の期間というのはどのぐらいか。

A: 複数年と書かれてないところは全て 1 年。ただし、INTERNATIONAL SEED MONEY PROJECT などは複数年に及ぶことがある。

Q: INTERNATIONAL SEED MONEY PROJECT からコンタクトがあり、ある意味攻撃を受けたような経験がある。日本の政府機関の規制はおかしい、改変しろと言われた。

具体的には球根だったが。当時、農業分野のいろいろな制度の障壁のため、オランダのもの、具体的には球根が、日本に入ってきていなかった。当時、オランダから見ると、おそらく日本の球根が国内でそこそこ守られていたのだろう。それがターゲットになった。

A: オランダでは農家や中小企業一社で解決できない問題を一般から募集・採択するシステムがあり、輸出先の現地で解決しなければいけないインフラや規制の問題は国家レベルで取り組んでいる。日本の球根の例もそれに該当したのであろう。

Q: それはそれなりの判断、どこかでやはり経済支援や経済的メリットがあるということを見ている部署があるということか。ここをターゲットにしろ、といった示唆を与えるような。

A: 日本の市場規模はこうで、設定目標を達成できればオランダのシェアがこのぐらいになるはずだという想定と経済効果の評価は、経済戦略の基盤として行っているはずだ。

C: 表に出てこないシンクタンクなどが関与しているのではないか。

TOPSECTOR FOOD&AGRI

- Private Public Partnership (官民協働体制)の経済支援：
  民間企業による研究機関への投資額を基に補助金を算出
  - € 1 ユーロの民間投資につき€ 0.25の補助金
  - 最初の€ 20,000までは4割の補助金
  - 中小企業では現物出資も可能
  - 補助金は投資企業ではなくTopSectorが受けるが、うち
    大部分は官民協働体制に還元

複数年にわたる官民協働体制

- 戦略的に価値の高い課題における複数年の研究開発
- Top Institute Food & Nutrition：食と栄養、健康の関係、
  食の安全性、持続可能な食の流通
- Carbohydrate Competence Center ：炭水化物の研究
- タンパク質、食と認知・行動のテーマでも活動中

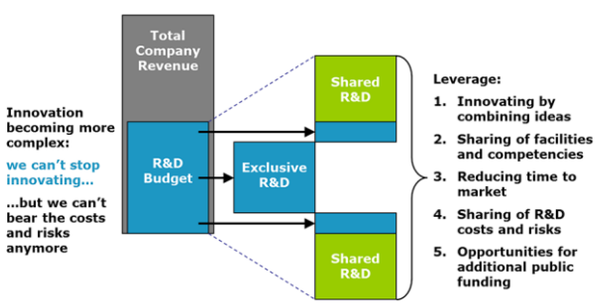
TI FOOD NUTRITION　CARBOHYDRATE COMPETENCE CENTER

TOP INSTITUTE FOOD & NUTRITION

- 食と栄養の分野の学際的研究を目指した官民パートナーシップ
- 多国籍食品メーカー、研究機関、大学、医療機関で構成
- 知識基盤を強化し食品業界のイノベーションと経済効果を促進

www.tifn.nl

企業から見たオープンイノベーションの意義

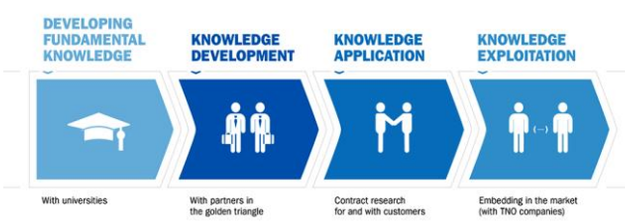


Model Holst Centre

日本での共同研究開発の活性化を図るには

- 前競争的知識の共有
- 情報交換・技術交流の機会
- アイデアやシーズを実用化させるノウハウ・方策

TNO：小さな発想を大きなイノベーションに



4-2-1-2 セッション 2「育種技術の動向」

4-2-2-1「ゲノム情報を活用した作物育種の現状と展望」
＜矢野　昌裕：国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）作物研究所所長＞

国内、とくに農研機構の中での仕事を中心に紹介する。まず、稲の品種開発と普及について。日本で栽培されたトップ 10 の稲品種をみると、一位のコシヒカリは、60 年近く前に開発された品種で、30 年以上トップ 10 に入り続けている。ほかの品種も、20～30 年という時間をかけ、ブランド化され生き残っている。トップ 10 の合計で 70～80%を占めるので、ビッグな品種はなかなか変わらない、というのが一つの特徴である。また、コシヒカリをもとに新たな品種が開発されるので、名前も収穫時期も違って別の品種に見えるが、ゲノム構成はほとんどコシヒカリということも多々ある。つまり、これらの品種はもとのコシヒカリの性質も併せ持ち、病害抵抗性、ストレス抵抗性、気候変動などで起こる環境変化には、頑強でない。稲だけでなく大豆でも同様の状況で、20～30 年前の品種がやはりブランド化され、農家が新しい品種の栽培や生産にトライできず、普及が進まない。こういった背景が、主要作物、稲・麦・大豆について、新しいゲノム技術を導入するときに、大きな障害になっている。

次に、品種改良、とくに交配育種について説明する。交配育種は品種開発に 10 年くらいかかる。さらに品種ができた後、普及や拡大にも時間がかかる。カンショ、バレイショなどのイモ類では、種芋増殖にまた 3－5 年。結局、10 数年前に交配したものがようやく普及する。マーカー支援選抜などのゲノム育種は、選抜のところが短縮可能なものの、全体としてみると、社会実装・社会貢献にはどうしても時間がかかる。

稲については農業生物資源研究所を中心にゲノム解読が進んだ。またそれ以外にも、ゲノム育種をやるための遺伝資源の整理、実験系統群の作出、ゲノム情報の整理などの基盤も整備した。その結果、現在、遺伝資源から遺伝子を見つけて実際に育種に利用する流れは完成している。稲に関しては、植物科学への貢献ももちろん大きいが、栽培時の問題を解決する遺伝子が多数見つかり、現在は実際にマーカー選抜育種で使われている。例えば、病害抵抗性、害虫抵抗性、収穫時期変更などの遺伝子である。幾つか育種の現場に入っていく実例が出てきた。現在は、さらなる社会実装を加速するために、モデル品種をさらに改良し県の代表品種にするといったところで迅速な育種を実践している。

ゲノムの解読には、かずさ DNA 研も含めて日本の研究組織の貢献が大きい。稲以外の他の作物にも拡大中である。海外はアメリカなどがかなり精力的に解読を進め、主要な農作物のゲノムが解読されている。それらの情報を使い、ゲノム育種が実践されており、ゲノム情報は有効活用されている。

ただし一つ強調したいのは、ゲノム育種が使えるのは非常に単純な形質に限定される点。1 つか 2 つの遺伝子が関与する形質を改良するときには、ゲノム育種は非常にパワフル。例えば、コシヒカリのような優良な品種に、野生種が持つ病害抵抗性の遺伝子を見つけ出して、限りなく野生種の病害抵抗性遺伝子以外のゲノムを排除しながら優良品種に入れて

いくといった、いわゆる「マーカー選抜育種」である。しかし多数の遺伝子が関与する形質、例えば、収量性、バイオマス、あるいはストレス耐性への適用は現実的でない。

その中で一つ注目されているのがゲノミックセレクションという方向性である。ゲノム全体について、ゲノム中のすべての領域がその形質に関与すると仮定し、ゲノム中の数千～数万の領域について、対象形質への寄与率、すなわち育種価を計算し、それが最大になるようなモデルに基づいて選抜する。どんな組み合わせが一番理想的かというモデルをつくり、そのモデルに近づいたゲノムの組み合わせの個体を探していく方法である。これだと、非常に複雑な形質でも、組み合わせを多様化して、その中から一番理想的な組み合わせを選抜することが可能。これは家畜の育種では既に実用化されており、これを作物に適用したい。ただし課題もある。ゲノムの組み合わせをたくさん作らないといけないので、もともと自殖性（めしべに同じ個体由来の花粉が受粉して次世代の種子が形成されること、2セットあるゲノムが全く同じになる）の作物（稲、麦、大豆）に適用しにくい。なので、通常のゲノミックセレクションを少し改変した方法を考えていかなくてはならない。これがチャレンジの一つの方向性になる。

もう一つの流れとして、フィールドオミクスを紹介する。これは生物資源研の仕事である。遺伝子の発現レベルを、実験室や温室の中ではなく、圃場でどう発現しているかゲノムワイドに調べることが可能になった、これをフィールドトランスクリプトームと言う。実際にモデル的な実験では、環境の要因がある程度決まると、多くの遺伝子発現について確実に予測ができるという結果が得られている。先ほどはマーカー育種選抜のところでは遺伝子の「組み合わせ」が重要、と言ったが、今度は遺伝子の「発現のレベル」の違いをメルクマールにした形質評価が可能になる。栽培技術においても、遺伝子の発現をモニタリングして栽培技術が最適化できる。今後は発現している多くの遺伝子の中から、特定の重要な形質に関係しそうな遺伝子を見出して、それをベースに発現レベルでの分子マーカーとして、栽培の予測や育種選抜の指標にすることが可能になると思う。これも非常に大きな挑戦になる。

強調したい点が一つある、表現型の評価は大規模化や高速化ができていないのが現状。育種を本当に効率化するには、ゲノム情報からのアプローチと、それから表現型の調査が車の両輪となって回らなければならない。今はどうしても後者が遅れている。例えば稲の場合最終的なターゲットは収量＝重さであるが、実際のところ、稲の収量を調べる際には、たくさんの系統を人海戦術で調べて、多収の品種が選抜されている。ここが今、根本的な問題になっているので改善や工夫が必要。

今後の展望について述べる。やはり交雑育種はなくならない、また、遺伝資源の探索などいわゆる継続的な探索も必要である。付加価値をつけるためには機能性関連の形質についてもより積極的に導入することも必要だろう。既に確立しているマーカー選抜育種の先に、ゲノミックセレクションや、遺伝子発現プロファイルによる選抜といった、改良法の開発が重要であえる。今日は詳細を述べなかったが、SIPなどでトライされているゲノム編集など新しい技術を使った改良も当然やるべきだ。

難しい点としては、基盤技術と情報が充実しても、現場への実装ができてないこと。それは冒頭に述べたように品種がなかなか置き換わらないという背景もある。もう一方では、いわゆる研究側がなかなか先ほどのゲノム情報の充実に追いついていないこと。特に育種

の現場と、ゲノム情報の進展、その間のギャップ。結局、ゲノム育種の社会実装には、フィールド調査や材料の作出、そのあたりが律速になるので、そこが一番問題である。短期的に予算を投入しても、なかなか5年単位では答えが出ないのが非常に苦しい。これからは、農研機構の中では事業育種を進めるグループと基盤研究のグループの連携強化が必要と考える。次年度、来年の4月からは農業生物資源研究所と農研機構は統合されて一つの大きな機構になる。そこでそういう連携を強化していきたい。

【質疑】

Q: 2つお聞きしたい。一つは、日本は米に関しては転作・減反政策時に、多収性の研究が停滞していたのか。中国や米国ではそういう制限はなかったと思うが、その関係でどういうことが起こったか、今現在どうなったか。もう一つは、こういった土地利用型の穀類、稲・麦、大豆での育種の現場での成功例を教えていただきたい。比較的最近のもので。

A: 最初の質問、一時期多収というテーマは政策的にも必要ないとされストップしていた。しかし日本の育種家は、実はちゃんとやっていた。最近、国内の多収性飼料稲で出てきているが、コンセプトは海外の多収稲と同じで、インディカの品種の形質を入れていた。育種には長い時間がかかるので、途中で本当にやめてしまうともう回復が難しい。今現在、多収は非常に重要なテーマになっているので加速中である。
品種のいわゆる改良で非常に大きな成功例は、病害抵抗性、とくにいもち病抵抗性。陸稲がいもち病に強いというのは昔からわかっていたが、かけあわせると陸稲の悪い形質がたくさん出てしまうので、水稲に導入できなかった。ゲノムがわかって遺伝子がとれて、約80年苦労していたことが成功した例。そういう積み上げで育種はできるということを実感した。しかし残念なことに、そういった品種が、冒頭述べたようになかなか置き換わらないので普及しない。そこが非常に悩んでいるところ。

Q: 北海道の小麦などで結構新しい品種があるが、これも過去の蓄積が今一斉にどっと出てきているのか。

A: 小麦に関しては、過去の蓄積というよりは、実は一番ゲノム情報が貢献している。たんぱく質組成を遺伝子型で調べて、超強力小麦を作るとか、あと栽培地などの適性を設計するとか。ゲノムの技術がもう既に実装されているというところ。

Q: ゲノム農業とゲノム医療と全く同じという印象。最終的に薬が患者さんにいいかどうかは、臨床現場で多数の症例を使わないとわからない、それはなかなか大変で、長期間かけてうまくいかないということはよくある。バイオマーカーで代理のスクリーニングという流れもある。最終的にはもちろん圃場だろうが、重さを予測するようなバイオマーカーの開発というのを同時にやらないといけないのでは。

A: 全くそのとおりで、一番最初にバイオマーカーとの、要するに一番関係のあるようなマーカーを、重さとか収量とかと関係づける仕事をきちんとデザインしないといけないと思う。ただ、農研機構では、品種育成が大きなミッションなので、長い目で見たチャレンジ（研究）はなかなか現場で実践するには厳しい。一方、基盤研究者がそれを実行しようとしても、今度は圃場を大規模に使用できないのが問題。現場と基盤の連携が重要。農研機構はこれをちゃんとアレンジしないといけないが、やはり農研機

構の研究の出口は品種だというところもある。バランスがこれまで悪かったので、そこを解消するような大きなプロジェクトを作っていかないといけない。

Q: バイオマーカーは、ゲノムをやっている人ではなく、圃場を持っている人がもっと早期に予測するものをフィールドの中で見つけていかないといけないのでは。

A: その通り。でも、フィールドの方が基盤側に入ってこない、基盤の方がフィールドになかなか行かないことが問題。

C: これは医療でも全く同じで、長い間分かれていた。

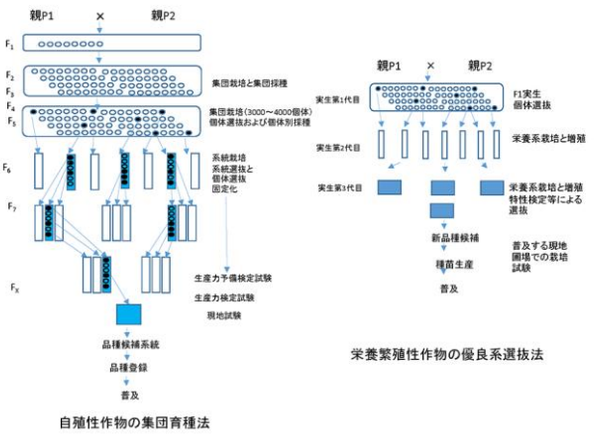
A: 何とか解決すべくやらないと、せっかく出てきたゲノム情報がもったいない。

Q: 冒頭で、国内はみんなだいたいコシヒカリという話があったが、おそらく主食はとても保守的なので変わらない。日本は品種を作る能力はとても高いはずなので、例えば最近食べ始めたような外国に持っていけば入るのかなと思う。国内はある程度、みんなコシヒカリを食べて幸せ、だが、外でもっと幸せな人をふやすという意味と、日本の農産物を輸出するといった戦略というのは、農林水産省からは出ないのか。

A: 日本の中でつくった品種を出すのは、現地でヒットするようなもの、あるいは付加価値がつくものはそのまま出ていくだろう。コシヒカリも然り。ただ、現地で適応するような品種改良を日本でするというのは難しい。同様な技術開発は中国や韓国でも進行中で、簡単に出せるかという点でも難しい。特に、アジア諸国は稲が主食なので、国を挙げて研究をしている。そういう仕組みがあればできるとは思うものの。農研機構は国内に目が向いているので、海外に目が向けられるような組織が出てくればチャレンジはできるかと思う。おっしゃっていることはとても重要。

C: オランダの園芸作物輸出を見ると、現地の会社を買ったりして、現地向けの品種をそこで育成してしまう。

A: オランダの仕組みは洗練されており見習わなければいけな部分は多々あるものの、やっぱり主要作物、いわゆる土地利用型の作物（米、ムギ、ダイズ）と園芸作物では状況が違う。



自殖性作物の集団育種法

栄養繁殖性作物の優良系選抜法

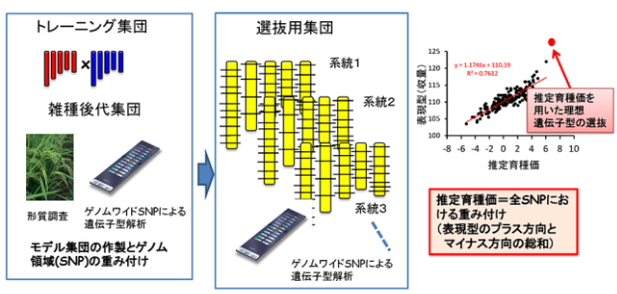
世界中で作物のゲノム配列解読が進んでいる！

ゲノム情報を用いたイネ品種育成の現状

農業上重要な形質の多くは
①多数の遺伝子による複雑な遺伝的支配を受ける
②環境の影響を受けやすい
ため、これまでのマーカー選抜育種法では改良が困難

新しい育種法が必要

ゲノミックセレクション（GS:ゲノム選抜）とは



予測モデル構築

予測モデルに基づいた望ましい個体の選抜

- 形質を計測せずに選抜できる
- 遺伝率の低い、ポリジーン（polygene, 微働遺伝子：効果の小さなQTL）支配の形質の選抜にも有効

表現型評価の高度化は不可欠

- 農業形質評価の可視化、高速化、高精度化
- 圃場での多様な現象の定量評価、形質評価のための解析技術
- 工学系との連携、海外の自動評価システムの検討

植物学の研究のための形質評価ではなく、
育種選抜のための形質評価

これからの品種開発

1. 病虫害抵抗性やストレス耐性はもとより、新規形質についての新規遺伝資源の探索
2. 従来の育種プロセス（有用遺伝資源との交雑と選抜）は継続しながら、マーカー選抜育種による単純な形質の改良
3. ゲノミックセレクションや発現プロファイルによる有望系統のモデル化と選抜による複雑形質の改良種法の検証
4. 新育種技術（ゲノム編集 ：標的変異や標的組換え、エピゲノム、早期開花遺伝子を利用した世代短縮）などを活用

解決すべき問題

1. 基盤技術や情報が充実しても、現場への実装が容易ではない。
2. 現場が品種開発を求められているので、新技術を開発する挑戦的な研究が立てにくい。
3. ゲノム育種に関しては、律速段階がフィールドでの調査や材料作出になっているので、短期的に単純に予算を投じても解決しない部分が多い。
4. 育種形質（収量や食味品質など）は形質評価が高速化できない。

事業育種を進めるグループと基盤研究グループの連携強化が必要

4-2-1-2-2 企業における園芸作物の育種開発　現状と展望
＜山本　正美：タキイ種苗　茨城研究農場　場長＞

世界の野菜の種子マーケットについて、野菜が 4,000～4,500 億円、花がそのうち 10%で 400 億円程度である（為替レートにより変動)。大手三社はモンサント、シンジェンタ、ビルモランの巨大企業で、それに次いで、エンザ、タキイ、サカタ、ペジョー、ライクズワンが続く。モンサントやシンジェンタ傘下の中核企業はオランダの会社なので、オランダ、フランス、日本の戦いである。

タキイ種苗の育種拠点を紹介する。日長、標高など、環境条件を考慮し、国内 7 カ所、海外は、オランダ、フランス、スペイン、韓国、タイ、インドネシア、ブラジル、アメリカにはカリフォルニアとアリゾナに 2 ヵ所に設置してあり、現地で育種開発を行っている。

主要作物であるトマト、タマネギ、キャベツの世界規模の栽培状況を紹介する。トマトは中国、アメリカ、インド、トルコの栽培面積が大きい。トマトの品種は、大きさ、色、形、に多くの変異があり多様である。栽培状況は、オランダやスペインなどを中心に、数千ヘクタール～1 万 5 千ヘクタールで大規模に施設栽培（温室、ハウス）が行われている。地場での消費のほか、4,000～5,000 キロの長距離輸送で市場に出る。トマト生産効率は、大規模な施設栽培をする国で高く、特にオランダの生産効率が高い（日本の約 6 倍)。世界ではトマトは加熱するのが主流で、生果のトマトが好まれるのは日本くらいである。

タマネギは中国、インド、アメリカが大きな生産地である。皮の硬い品種は高度に機械化され 1 戸の農家で 150 ヘクタールの栽培が可能とされる。緯度や日長により、また現地需要によって、短日および長日のタマネギ品種が作られている。

キャベツは、中国、インド、ロシアが大きな生産地（中国、韓国、日本はハクサイも含む)。アフリカ、アジア、中東など、広い範囲で様々な品種が栽培されている。標高が高いところや、斜面などでも栽培可能。中東では、タキイ種苗が開発した 60 年前の品種を今でも栽培している。

タキイ種苗は 1950 年代から野菜の F1 育種を始め、アブラナ科の野菜ではほぼすべて世界で最初に F1 品種を開発してきた。トマトのブランド品種、桃太郎は、1985 年に出た当初は 4 つの耐病性が賦与されていたが、2015 年の最新の品種には 9 つの耐病性がある。2000 年代はじめぐらいから遺伝子マーカーを使った耐病性育種を開始した。

ゲノム情報の育種への利用の現状について説明する。このタマネギの TTI-GG という研究機関は、さきほど西出さんの話にもあった、トップ・テクノロジー・インスティテュートの補助金ををもらい、タキイ種苗の現地法人、オランダの会社とフランスの会社が出資して、ゲノム情報を集めた。DNA マーカーを使うと、苗の段階で DNA を分析し、栽培できる本数の 10 倍程度の個体中から選抜できるのがメリット。

タキイのトマト全部の品種は全部で 55 あるが、この遺伝子マーカーを組み合わせることにより、全ての品種の識別できるようにし、収穫した種の検定にも適用している。

オランダにある Keygene（キージーン）という会社、タキイ種苗もシェアホルダーになっているが、そこでつくった選抜育種のモデルについて説明する。タキイ種苗の非常に優れたエリートラインに 4 つの耐病性を入れるための交雑をし、F1 をつくり直すためのマーカー選抜育種の模式図を示している。現在では大体 4 世代回せば 4 つの形質を 1 つの系統

にに入れられる。トマトの場合は、耐病性は単一遺伝子座が関与することが多いので非常に有効である。

今後の課題は、膨大なゲノム情報の中で、現状の育種と結びついていない部分をどう利用するか、いかに分析して実際の育種に使っていくかというところ。また、ニーズの変化にも対応が必要。生産者の高齢化に対応する省力化のニーズ、6 次化産業のための新しい品種も必要、さらに、加工業務用ニーズ、消費者ニーズなど、野菜に対するニーズの多様化は顕著。

過去には生産者ニーズにこたえる育種というのがメインであったが、現在は市場、小売、流通に対する品種育成ということが行われている。将来的にはやはり消費者を見た育種ということがより一層必要になると考えている。

そういった中で、主要野菜の栽培面積推移を見てみると、ダイコン、ハクサイ、ナス、キュウリというような漬物野菜が半分ぐらいに減っていることがわかる。それに加えて、ブロッコリー、レタス、カボチャといったような健康にいい野菜、もしくは料理が簡単な野菜というのは栽培面積が伸びている。

日本では、野菜の消費がかなり落ちており、アメリカよりもさらに少ない。一人当たり年間 80 kg 台になっている。消費形態も変化している。一次加工あるいは調理された野菜や青果を買うのが増え、生鮮食品の形で買う率がすでに 5 割を切っている。すなわち、業務加工用の、定価、定時、定量、定質といった品種が求められている。さらに、生産コスト低減のため、機械化で一貫して生産する、もしくは非常に長い間貯蔵する。そういう状況下でも品質低下の少ない品種が求められている。例えば、色が変わらないキャベツの品種など。

この 4 月から、機能性食品の表示制度というのが始まった。そういう点で消費者にアピールできる品種育成をしていきたい。そこで機能性成分が多い品種の育成を現在、一つの目標にしている。現在、15 品種ほどのラインナップがあり、リコピン、カロテン、ルテイン、ケルセチン、アントシアニンというような機能性成分が、従来品種の 2 倍ぐらい含んでいるものを、既存の育種技術で育成している。ただし、機能性表示はまだできない。科学的に効能があるというデータとともに、栽培された生産物に十分な量の機能性が含まれていることも併せて証明する必要があるため。今後タキイ種苗としては、こういった品種から機能性表示ができるようなものを作っていきたい。

最近の顕著な動向について。ホウレンソウのべと病など、病気の分化が非常に速くなってきた。1980 年までの 150 年で 3 レースしか出なかったものが、近年、2000 年代には 14 レースまで増えている。1 年に 1 つずつ新しいレースが増えるといった状況。これはアメリカ、カリフォルニアでベビーリーフというホウレンソウの栽培の仕方が始まったことがきっかけとなっているようだ。ベビーリーフは大体、種まきしてから 2 週間で収穫する。つまり年間 8 回も 9 回も同じ品種を作る。その過程で、新しいレースがどんどん出てきたらしい。レタスの場合は、べと病は 31 レースあるので、そういった病気の分化に対して、ブリーダーはなかなか攻撃的な育種ができない。TALENs、CRISPR といったゲノム編集の技術を使って、こういった耐病性や機能性の成分が多く含まれたような野菜の品種育成ができるように、アカデミアや国の研究機関での技術開発をお願いしたい。

【質疑】

Q: バイオインフォマティクスが鍵だということだが、企業の方はそういった人材を供給できているか。オランダだと、例えばキージーンなどのベンチャーがあって、そこが精力的にやると聞くが、日本の場合はまだそういった例があるとは聞かないが。

A: タキイ種苗もキージーンのシェアホルダーなので、私どもの人材をそこで教育してもらうとか、できれば日本でもそういったバイオインフォマティクスの技術を持った人を採用したいと思っている。実際は非常に難しい。

Q: そうすると、インフォマティクスが専門でない人を雇って、それをキージーンに送って教育してもらうという形か。

A: 今のところはそうなっている。

Q: データも向こうに全部渡して、向こうでやってもらう感じか。

A: バイオインフォマティクス関係のデータというのはキージーンでほとんど全部取っている。キージーンのデータをどうやって扱うか、そういった人材が非常に不足しているのは確か。

Q: やはり日本の大学がそういうことをかなり強くやっていく必要があるということか。

A: そう思う。タキイ種苗では今年の求人でもそういった人材を募集したがなかなかいない。

Q: トマトで多くの病害抵抗性因子を入れて、新しい品種を作ったときに、生産現場でどのように品種を更新しているのか。

A: 品種は入れ替えている。生産者は非常に大きな問題を抱えているので、それに対して、従来の品種と非常に近い形でこの新しい耐病性だけを付与しましたという形で、産地に普及を図っている。

Q: 入れ替えることによってブランド力にはそれほど影響ないのか。トマトの場合は桃太郎というブランド名があればそれで大丈夫なのか。

A: 味が落ちるとさすがにブランドに影響がある。

Q: では落ちないと絶対に保証してやるのか。

A: 非常に大変だが 95%ぐらいは桃太郎で新しい耐病性を付与したものをリリースする、ということで普及を図る。過去 30 年で 25 品種、桃太郎が出てきている。そういったニーズに合わせた品種育成をしている。このごろはさらに産地のニーズに合わせた形で、オーダーメード育種というのもやっている。産地の問題点を酌み上げた品種育成を一つの目標にしている。

Q: ゲノム編集した品種開発の場合、GM（遺伝子組換え）などを考えると、すぐ商品化できるのか。将来に備えて。

A: 現在のところだとまだ規制がはっきりしないので、リリースすることはできないが、技術が確立された場合には、我々が持っているエリートラインに、そういう形で NPBT(新しい植物育種技術）で新しい形質を付与する品種育成ができるようになるかもしれないと期待している。

C: ゲノム編集については、USDA が今年の夏にゲノム編集で 1 塩基欠いたものは GM とみなさないと発表した。一塩基置換だけで他のものが何も入っていないということで

あれば、これまでの今 EMS など化学薬品で変異誘発したものと全く変わりはないという認識のようだ。

Q: 日本はどうか。

C: 日本はまだそこまで行ってないと思う。しかし、アメリカがそう動き出すと、大分変わってくる可能性がある。

C: 日本は、ゲノム編集と GM とは違うという主張を様々な場で主張している最中。国内向けも国際的にも。

C: GM でも全然問題ないだろう。

C: ゲノム編集は GM ではないということ。

C: GM の農産物で、問題があるというエビデンスはどこにもない。

C: それはそうだが、ゲノム編集はまたそれとも別ものであるということ。

C: なぜ GM をやっている研究者や科学技術行政が、GM を受け入れない社会に対して切り込まないのか。努力を怠っているのではないか。

C: しかし、GM になると認可までの時間が長くなり、それだけの投資ができなくなる。でも、GM でないと言われれば、認可のスピードおよびかかるお金が違う。

A: その通り。安全性の試験が違えば、それに対するコストが全く違うので、現状では野菜の育種では、品種が売れる市場規模を考えると、GM は使えない。

C: ゲノム編集も GM も、技術の一つ。GM を踏み台にしてゲノム編集を動かすというのは、私は邪道と思う。GM は実はかなり世界中に広まっていて、それを一方で否定しつつ、GM じゃないから大丈夫、という売り方は、自分としては全体的に考えると非常によくないと思う。これは GM、これはゲノム編集と、ケース・バイ・ケースで使わないと、多分、開発している人たちの心が疑われてしまう。

C: ただこれは、社会との関係の問題。研究者がいくら何を考えても、社会が受け入れてくれないとどうしようもない。例えばオランダのワーヘンニンゲン大の取り組みでは、実力のある心理学者が多く参加しており、社会の中の意識を変えようとしている。そういった社会科学関連の動向とうまくリンクさせないと、育種側の研究者がいくら言っても、なかなかうまくいかない。

C: だから、日本もつくれない。

C: 現在、農林水産省もそういうチームを作ろうとしている。

Q: 消費者のニーズについて聞きたい。これまで、生産者のニーズはかなり反映された育種、品種開発がされてきて、耐病性は重要、などでやってきたが、これから消費者のニーズも入ながら迅速に育種をすることを考えている。体系的に消費者のニーズを捉える方法は考えられているのか。

C: 消費者ニーズとは何か、という雲をつかむような体系的方法。

Q: 消費者ニーズを反映させた品種の育成となると、どのぐらい売れるかとかなども考えないといけない。ただし、5～10 年先ぐらいのニーズを予測して逆算しながら育種するので、そのあたりをどうやって捉えていくか。やり方はあるか。

A: システマティックには難しいが、さまざまな情報収集はやっている。従来の品種育成でもやはり 5 年後のニーズを想定して仕事はしている。市場がどう動くかという予測

は非常に難しい。なので、ある程度幅を持って用意しておいて、その中から選ばれて出ていく形になる。一点突破主義ではなかなか難しいと思う。

Q: 加工や業務用が 5 割超したことは、大きな方向性として傾向は続くだろう。私のイメージだと、鮮魚は 1 匹でも売っているがこのごろは切り身が多い。全体も買えるけれども、切って包装してあるものがメインという方向になるのではないか。

A: おそらく業務加工用野菜の増加傾向は変わらないだろう。今回は、消費者をターゲットにした品種育成という形で、業務加工と消費者向けということでお話をした。

Q: 例えば消費者の中でも、カット野菜や 1 次加工したものの割合が増えるのは間違いないのでは。

Q: 現在、生鮮は、消費者は 2 割しか食べていない。8 割は 1 次、2 次、加工したもの。結局、消費者ニーズとは言いながら、加工業務ニーズの野菜にならざるを得ないのではないか。

Q: 価格の問題だが、カットしても生野菜と大して価格が変わらない。そうではなく、加工したら価値がそれぞれ上乗せされたもの、という概念を消費者なり流通業界に植え付けないと、このあとじり貧になると懸念するがどうか。

C: 加工して高くなるならまだしも、安くなってしまうと困る。

A: 日本国内だとその問題は非常にある。高齢化ということに加え、生産者も非常に少なくなってくる。日本のマーケットの中で勝ち残っていく品種が、グローバルな意味でもある程度シェアを取れるかもしれないという予想のもと、国内マーケットに対してどういうふうな新しいアプローチをするか、どういう提案をするか。そういった視点で、業務加工用品種に求められる形質や、消費者にアピールする形質について、育種目標を設定していると理解していただきたい。

C: 他の分野でもやっているように、日本の標準が世界標準になった場合、要するに標準化を多く取ったところが、海外にも出ていける場合がある。だから、日本で開発したものが標準というふうになると良いのだが。

A: そう思う。しかし、食品なので非常にコンサバティブなところがある。ローカルの部分とグローバルに使えるもの、両方準備する必要があると思う。

Q: もし法律が変わったら、それから制度が変わったら、米・麦・大豆などの穀物をタキイ種苗はやるか？

A: やりません。

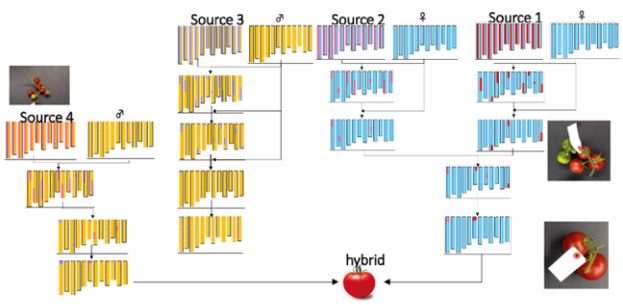
C: 日本の場合は種苗産業は穀物を扱っていないので、非常に国際的に弱い。例えばモンサントなどに比べて。このままいくと、穀物を出荷している組合自体ももう高齢化で人がいなくなるじり貧状態なので、何らかの形でこの 10 年ぐらいの間に、穀物の、つまり飼料産業を立て直さないといけない。既存のタキイ種苗はそこに手を出さないとなると、どうすればいいのか、とても深刻な問題ではないか。

C: 農研機構からベンチャー企業でスピンアウトして穀物メジャーになるとか。

C: そういったイメージ。だから、官民払い下げの民間を作らないといけない、となるのでは。

Scheme of MAS program

(M.A.S. マーカー アシスト セレクション)



育種における課題
ーゲノム研究成果に基づく新たなシーズー

＜現状＞
・国際ゲノムコンソーシアム（ナス科、ウリ科、アブラナ科など）、
　メタボロミクス（代謝産物）の分析技術の進歩により大量のデータが収集・蓄積
・次世代シークエンサー、バイオインフォマティクスなどの解析ツールが進歩
・種苗会社では従来の育種技術、ブリーダーにより有用な表現型情報などが蓄積されている

＜解決すべき課題＞
・育種に活用するためには、得られたデータを有機的に組み合わせ、効率的に解析する
　手法（効率的なアルゴリズムの開発）が不可欠
　⇒ゲノム解析受託サービスセンター、バイオインフォマティクス機能（技術、人材）の強化
・表現型情報のデジタル化⇒画像解析装置、ソフトの充実
・NBTに対するパブリックアクセプタンス＜解決手段＞
　⇒産学連携によるNBT認知度向上の取り組み

＜達成目標＞
・新しい育種技術（マーカー選抜、組み合わせの最適化予測、NBT等）による
　独創的な品種の開発

育種における課題
ー国内実需者、消費者ニーズー

＜現状＞
・温暖化など栽培環境の変化（病気、虫、高温、ゲリラ豪雨）
・生産者の高齢化
・6次産業化のための品種が必要（差別化品種）
・加工・業務用のニーズ増加（コスト削減→機械収穫、高収量）
・消費者ニーズの多様化（安心、安全、品質、機能性）

＜課題＞
・少量多品目の開発によるコスト増大⇒育種の効率化（的確な評価、選抜技術）
・有用素材の枯渇⇒遺伝資源の収集と情報の蓄積
　⇒変異集団の作成

＜達成目標＞
・耐病虫性、高収量、栽培安定性、機械収穫適性、加工適性のある品種開発、供給
・差別化・付加価値化（品質、機能性、安全）品種の開発、供給

業務・加工用野菜ニーズの増加

食の外部化が進展　高めあう関係　業務・加工用割合増加

更なる顕著化になるのでは

業務・加工用野菜品種育成

これらの特徴に着目した、品種を育成

4．ワークショップ報告

4-2-2-3 植物基礎科学の応用　～アジア・アフリカの食糧問題へのチャレンジ
＜芦刈　基行：名古屋大学　教授＞

私の話は植物基礎科学の応用、アジア・アフリカ食糧問題へのチャレンジ、というタイトルで、大学の一研究者が個人でやっている話をする。

これは国連の World Food Programme が出している世界ハンガーマップで、世界の食糧事情が厳しさを示す。東南アジア、南米、そして特にアフリカのサブサハラで、非常に深刻なのがわかる。グレーのところはデータがないだけで、おそらく同様に非常に深刻と予想される。

アフリカでのコメの消費量は堅調に伸びている。生産量も増加しているが、実際は作付面積の増加によるもので、単位面積あたりの収穫（単収）はほとんど伸びていない。食糧問題というのは、政治や宗教など複雑な問題が絡んでおり、一筋縄ではいかないのは周知の事実だが、ではそのまま手をこまねいていてよいのか。私は植物科学の研究者だが、植物科学の可能性を信じて、食糧問題や環境問題にチャレンジしたいとずっと思っていた。そこで新しい稲の品種を作出して世界に無償分譲するというプロジェクトを立ち上げた。矢野さんの話にもあったように、有用遺伝子を先に見つけて、育種する前からデザインをし作物を作る方法を用いる。

例えば日本晴と熱帯ジャポニカの ST12 と呼ばれる品種を比べると、収量が明らかに違う。種子の数を制御する遺伝子を見つけて、収量の多いほうの遺伝子を少ないほうへと移動させる。今日何度も出てきているマーカー選抜育種をやる。戻し交雑とマーカー選抜を組み合わせて新しい品種を作る。実際に日本晴にいろんな遺伝子を導入していきピラミディングしていくと、このように作物の形を変えることができる。種子のサイズについてもたった一つの遺伝子を入れると大きくできる。これらは、私の研究室だけでなく、日本の優秀な基礎科学をやっている研究者たちが、収量、耐病性、病害抵抗性などが遺伝子で制御されていることを明らかにしてきた成果である。個人では力が弱いが、日本の多くの研究者が見出した遺伝子を集めてきて、それを国際協力関係のもとで稲の品種に集積している。

チャレンジする場所は、アジアとアフリカと決めた。実際調査に行って検討してみると、アフリカは広大かつ環境の多様性も大きいことがわかった。乾燥しているイメージがありとても稲など育たないと思うかもしれないが、実際はそうでもない。ケニアのムエアでは、1 万ヘクタールの稲の圃場がある。ここは今、JICA がダムを建設中で来年、再来年にはさらに拡大する予定。天水田に頼っているところもある。例えばマリ共和国では、ニジェール川からの豊富な水により 10 万ヘクタールの水田が一ヵ所ある。研究機関のようなところで話を聞くと、ここには大きな育種開発需要はあるものの自分たちではできないとのこと。こういった現場が世界に実際にある。そこで、日本の技術と遺伝子情報と研究者が、現地のフードセキュリティーと健康を考えて、稲の開発をする。さらに、フードセキュリティーだけではなく、日本と諸外国の関係改善までも視野に入れることを目指している。

品種開発の方向性としては 3 つ、地域限定のもの、それからワイドレンジ、環境克服型の品種、に分けられる。例えば、ケニアとマリでは、嗜好性や気候が異なるので、求められる品種が違う。そこで、ケニアにはケニア向け、マリにはマリ向けに、品種を作る。も

う一つの路線は、国際イネ研究所と協力して、IR シリーズを改良している。IR64 というのは世界で最も栽培されているワイドレンジなメガ品種だが、まだまだ問題点があり、日本の技術でいろいろな遺伝子を導入する。さらにもう一つの路線は環境耐性。収量、耐病性、害虫耐性という遺伝子は、農林水産省を初めとする日本人研究者が発見しているが、乾燥、塩害、冷害に強い遺伝子はなかなか見つかっていない。しかし、ブータンには冷害に強い品種があり、また海岸に近いところでは塩害に強い稲というのがある。それらは収量が低く病気に弱いので、発想を逆転して、既にある耐塩性の稲に有用形質の遺伝子を入れていく作業をしている。耐冷性の品種についても同様。これまでに我々は、交配とマーカー支援選抜により品種を作って、ケニアに送ってテストを始めた。

アジアにもチャレンジしている。これは 5 年前に九州大学の吉村先生と JICA-JST の支援を受け、SATREPS というプロジェクトで採択してもらったもの。場所はベトナムを選んだ、理由は、南北に非常に長く標高もさまざまなので、1 つの国で多様な環境にチャレンジできるため。

まずは北部ベトナム対応の研究をした。ここで成功した事例は、このベトナム北部だけでなく、ラオスやカンボジア、その周辺国、ASEAN に普及できるだろう。ベトナム政府の要望により、KD18 という品種と IR24 というメガ品種、交配とマーカー支援選抜で必要な遺伝子を導入している。研究体制だが、JICA-JST のサポートにより、ハノイ農業大学にヘッドクオーターを置いた。ハノイ農業大学では研究者とディスカッションをしながら、DNA ワークなどを教えて、彼らが自分たちでできるようにした。JICA-JST のシステムで温室や圃場を準備してもらい、ここで植えて、交配して、テストするというシステムを作った。さらにベトナム政府が作ってくれたソクチャンの Breeding station に種子を送り、ここは緯度が 7 度、8 度なので、年 3 回、稲の世代を回すことができる。ここで交配をして、さらに彼らに交配技術を教えて、ラオカイやタイグエンで栽培評価することをやった。

5 年のスキームで、来年（平成 28 年）の 3 月で残念ながらもう終わってしまうが、結果がどこまで行ったかを説明する。例えば耐病性だが、IR24 への白葉枯れ病菌抵抗性の導入については、圃場での検定まで完了し、収量も耐性導入前と同程度を維持することを確認した。害虫抵抗性遺伝子は圃場での検証中。渇水耐性については、乾季到来前の収穫を実現するべく短期成育型の改良をした。親品種の KD18 よりも、秋作、春作の両方で、親品種より 10 日ほど早くなっていることを圃場で検証した。収量向上について、これは KD18 にいろいろな収量向上の遺伝子を育種で導入した。穂の形では実際に増えていたが、圃場テストでは収量が上がらなかった。しかしこのプロジェクトは、作物チームが施肥管理の検証をしてくれ、施肥のタイミングを変えればちゃんと種子量アップしたという結果が得られた。

遺伝子のピラミディングについてはほぼ終わり、これを現地国に移管するべく、成果の種子を保管する冷蔵庫を購入し、ラベルとバーコードで管理できる体制を整備し、データベース化も行った。ソクチャンからテスト用の種子が出て、もう実際に県の自治体での栽培が始まった。栽培テストや食味試験なども行い、地元もこれを応援してくれている。

種子増殖センターというところでも、栽培条件変更も含めテストが始まっており、我々が種子を渡した翌年にどんどん進めてものすごいスピードで進んでいる。今年の成果が良

ければ来年、これを国家品種に認定して、ほかの県にも渡していくという方向と聞く。マニュアル化や農家の研修も始め、180 農家規模での作付けテストの準備が進んでいる。

日本の研究成果がアジア・アフリカなどに広がってほしいと思っている。もちろん、これはプロジェクトだったので、JICA-JST の評価を受けている。今、ベトナムでやっているものは ASEAN 地域に広がっていければいいと思っている。この我々がつくった稲、日本がこれまで出した基礎研究の成果は、世界に目を向ければ、需要はたくさんある。そういうところへ貢献し、食糧危機の軽減や、日本と相手国の将来にわたる良好な関係を維持することにつながれば良いと思う。

【質疑】

C: 質問ではなく、コメントを一言、すばらしい仕事。

A: 実は私は矢野さんの弟子で、矢野さんがやってきたものを踏襲し師匠の教えを守って、海外でやっているだけ。

C: 私がやれなかったことをやっている。

Q: 非常に順調に進んでいるように見えるが、こうであればもっと良いのに、というような課題は逆にあるか。

A: こういうプロジェクトは誰もやっていなかったので、踏み出してみたら、何の道もなく、手探りでやっており、いろんな問題にぶつかる。例えば今、JICA からの出資を受けている。資金は名古屋に一端入る、それをほぼ全額フィリピンに送る。名古屋ではほとんどお金を使っていない。3 月になったら、余ったお金を名古屋大学は JICA に返さなくてはならない。JICA はフィリピンの余ったお金を返してくださいと言う。フィリピンに行って、使わなかった資金の返納を求めると、フィリピンではそんな文化はない、あなたたちは寄付したわけだからなぜ返す必要があるのかと言う。そのあたりから説明が必要で、それを研究者の私がやらないといけない。また、予算の締めの問題。日本は 3 月で向こうは 12 月。それでまた会計の問題が起こる。そういう交渉にも自分が行っている。大学のアドミニストレーションやサポートシステムが政府にあれば、そこに自分のエネルギーを注がなくて良いなら、研究そのものや研究者との議論などにもっと時間を割けるのだが。そういう、研究以外の問題解決的なところに注ぐエネルギーがあまりにも多いので、今になって、そういう支援があれば良いと思っている。

海外の研究資金も応募しようと思えばたくさんある。ビル＆メリンダゲイツ財団など。ただ、それを取ると大学のアドミニストレーションが混乱するし、お金のやりとりは全部英語。おそらく私がそういうお金をとると、それらの仕事で忙殺されてしまうだろう。研究資金を取ったことで損するのではという懸念もあり手出しができない。そういうアドミニストレーションがどこかにあれば、協力して推進していけると思っている。

Q: 最近の大きなプロジェクトでは、そういうコーディネーターみたいな人を、ポスドクでもない形で雇えるような仕組みができているが？

A: それはお金を取った後のこと。取る前の作業が大変。申請の準備や、相手国との折衝など。そういうところを政府で海外マッチングファンド対応部署のようなものがあれば良いのだが。

C: SATREPS は JICA と JST、2 つがあって、JST は国内で JICA は海外。仕分けはいいが、実際やるときは複雑で混乱する。ある部分はまとめて、現場に合わせて自由に使えるようにやればいいのだがそれができなくて困っている。JICA がそのままフィリピンに出せばよいはず。それをしないで、現場に縦割りを押すので困る。私たちもコロンビアでやっているが、非常に困っている。現場でマネジメントする人がしっかりとうまく運用できるようにするだけでも大分違う。

Q: 今はいろいろな肝いりで URA を大学に配置すると言い、数はそろったものの本当に機能しているのか。

C: URA の制度を機能するようにしないといけない。

C: 私も先生の活動はすばらしいと思う。例えば IT の分野では、善意のネットワークで始まるような、例えばオペレーティングシステムのリナックスの例がある。フリーなのだが、みんなで広めて、改善していき、また広がっていった。インターネットもそういう部分がある。先生の話はある意味で、大企業のビジネスドリブンで動いている世界と、ちょうどアンチの形で多分広がろうという感じがある。しかしそれはそれで、例えば IT の分野でいくと、リナックスのようにもともとはフリーだが、それをベースにいろいろな人がその上にビジネスを作っていき、新しいビジネスをクリエーションするインキュベーションの入れ物になっているような気もする。先生の活動がより世の中で影響力を持つには、そういう人たちが上で動けるような入れ物になれば、もっと大きくなるような気がすると思いながら聞いた。

A: 私もそう思う。ただ、私もまだ自信がない。自分で「やる」と言ってはじめて、今、5 年たって少し成果が出て、ようやく少し行けるかもしれないという感触。これにいきなり大きなお金や人を国からつけてもらったり、他分野の人が急に参入してきたら、多分耐えられない。やはりステップ・バイ・ステップで自信と可能性を少しずつつけたい。助けてもらえるなら、まだ今は育種の現場のところでの援助がほしい。もう少し、2，3 年経って、例えば経済コーディネーターや、国際関係のプロが入るとか、そうなってほしいとは思うが。

Q: 協力してくれる友達はいないのか。

A: いない。

C: ベンチャーが大きくなる、という成長モデルもある。例えばリナックスは、オープンソースのコミュニティーができていく話だが、お友達が何人かできて、コンソーシアムができて、広がっていくような、そんなイメージのほうが良いのでは。1 人でやると大変。

A: 私はさきほどの「友達」というのは、国連とかのレベルの人かと思った。そういう意味ではいない。それ以外のお友達については、このチームでもう既に友達がたくさんいる。私たちは、この Wish プロジェクトは、「部活」のようなもの、だと言っている。この Wish はやりたい人が手を挙げて入ってきて、好きだから、とか、自分の得意分野が役に立ちそうだから、参加する。だから、フィロソフィーであって、何か枠組みが

がちっと決まったプロジェクトではない。ある人が、それは部活動で、今までにない新しさだよと、他の人に指摘してもらったのが嬉しかった。
今参加しているのは本当の研究者だけ。私はたった二、三個の遺伝子しか取っていないが、「私は白葉枯れ抵抗性」、「私はいもち病抵抗性」、と、いろんな人の研究成果が入ってきた。そこに栽培の友達が入ってきたところ。これがもうちょっと自信を持って続けられれば、もしかしたら誰かがコンピューターが得意で、データベース構築の協力をしてくれる人が出てくるかもしれない。そういう人がどんどん入ってくるような部活動、このフィロソフィーというものを私はつくったつもり。だから、今までの既存のプロジェクトとは少し違う。

C: ソフトウェアの方の成長モデルで、ここにも何かつくれるかもしれないという予感がする。

C: これは、ICT ネットワークが非常に活躍できそうな分野だ。

A: 1 回技術を習得すると、誰でもできる。我々が材料を提供したら、それぞれの国でできる。私が今考えているのは、ベトナムでまず中心的にやって、そこが ASEAN で広がれば良い。今、日越（日本ーベトナム）植物センターというのをつくった。いろいろなファシリティを JICA のお金で入れてもらった。DNA の解析とか。そこに周辺国、例えば例えばラオスの人を呼んできても良い。そこで教育して、国に返して、我々のものも返すというモデルを作れば良い。ラオスでまた一から、ではなく。ベトナムで ASEAN 中心、ケニアでアフリカ、東アフリカ、マリで西アフリカ中心といった、そういうコアステーションを作ってしまえば、広がるんじゃないかと。全部無償なので。フィリピンの国際稲研究所とやっているので、メガバラエティーが自由に使えるというのがあるため。
もう一つ、私が考えた作戦としては、日本からケニアに物を出すのは、国と国の契約が厳しく手続きが煩雑。なので、種子は全部、フィリピンの国際稲研究所から出すようにしている。そうすると、煩わしい書類の手続きはやシッピングなど全部やってくれる。受け取り先も「国際稲研究所と日本がつくった」ということであれば、すぐ入れてくれる。そういう既存のファシリティをうまく使いながら、日本のつくった品種として日本を売って、今後、日本の応援団ができればいいと思っている。

Q: しかし、現在は無償、かつ規模が小さいさいからいいが、これが大きくなってある程度のマーケットをシェアしてくると、当然そこに対抗馬が登場してきて、そこでのマッチングなり国際抗争にならないか。中国あたりは危ないのではないか。

A: 少なくとも、モンサントとデュポンにはこれを取られたら困る。地域の、僕はアフリカの会社とかも回っているが、そういうところも無償でいいと思っている。現地の企業がこの Wish ラインを使ってくれて、雇用が生まれて、さらにそこがマーケットになり、日本の品種が回ってくれれば、それで良いと思っている。もちろん、ケニアでつくったものを隣に持っていく場合などは、ケニアで話が必要と思うが、そういった権利のことは今はほとんど考えていない。

C: それが危ない。

C: 今の、ボランティアとか部活動のレベルではいいけれども、これがちょっとひねればすぐパテントになる。そうすると、せっかく技術として普及していいなと思ったとき

には、ここで必ずそれをマーケットをとりたいというモチベーションが、モンサントだけじゃなくても出てくる。そういうところとのバッティングが近い将来起こりそうな感じなので、それのときにちゃんと地域の人たちと肩を組んでやっていけるような、例えばパテントを幾つかとか何かを用意するとか、ここらあたりをみんなで応援してあげないといけない。

A: ありがとうございます。

Q: FAO にはもうつながっているのか。

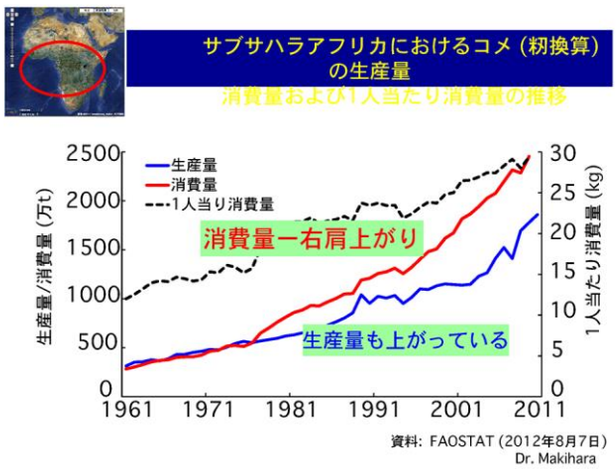
A: まだつながっていない。

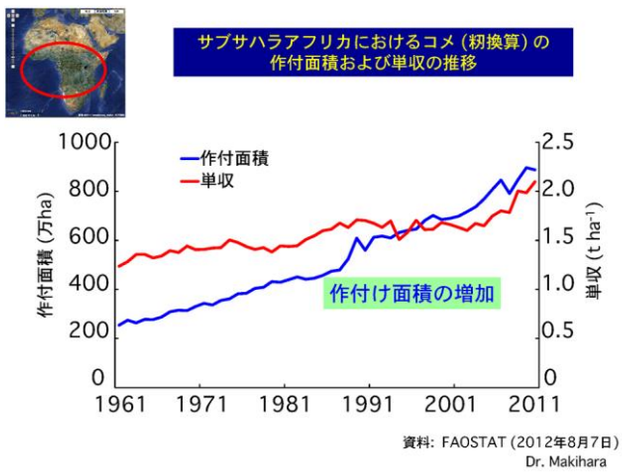
Q: アフリカライスは？

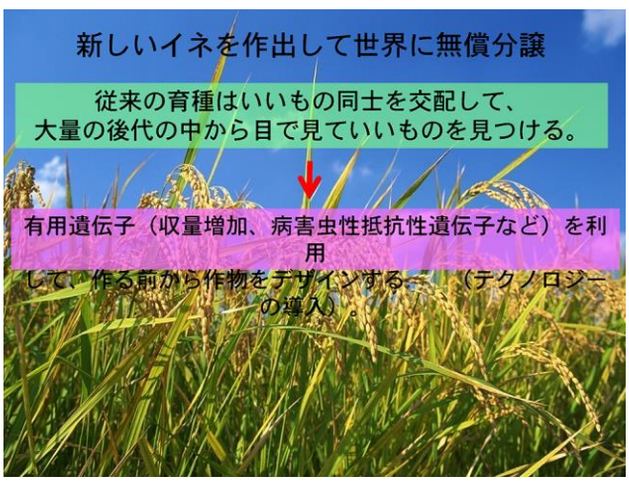
A: アフリカライスも視察には行った。まだ一緒にするという段階ではない。そこも、これも自信というか、どれだけ旗を振っていいかわからない。本当に少しずつ積み上げていかないと、いきなり大きい大会にはやはり出られない。地方大会にちょっとずつ出て実力をつけないと、自信が持てない。

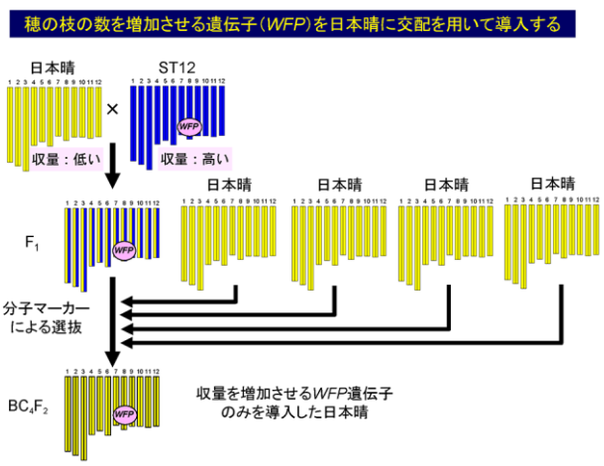
C: IRRI は国連の機関なので、知財戦略がちゃんとできるところ。

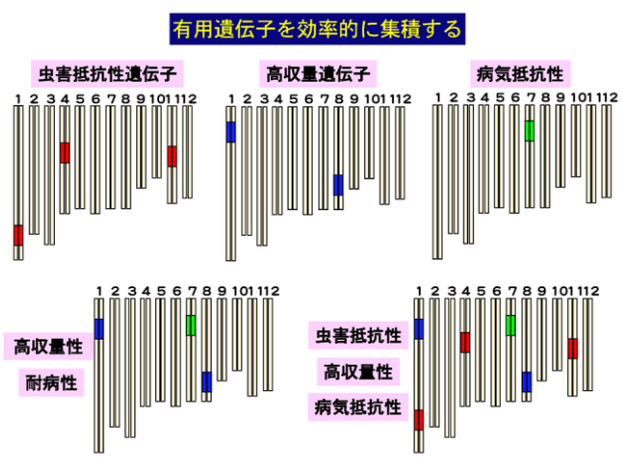
A: そうですね。そこは一緒にやればよいかもしれない。

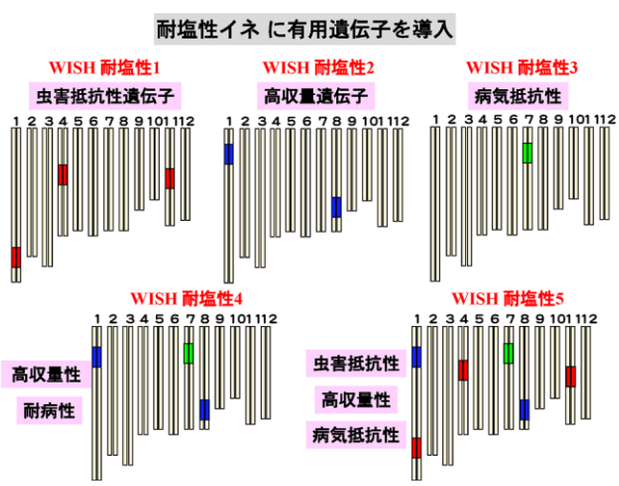

サブサハラアフリカにおけるコメ（籾換算）の生産量
消費量および1人当たり消費量の推移
生産量
消費量
1人当り消費量
消費量ー右肩上がり
生産量も上がっている
生産量/消費量（万t）
1人当たり消費量（kg）
資料：FAOSTAT（2012年8月7日）
Dr. Makihara

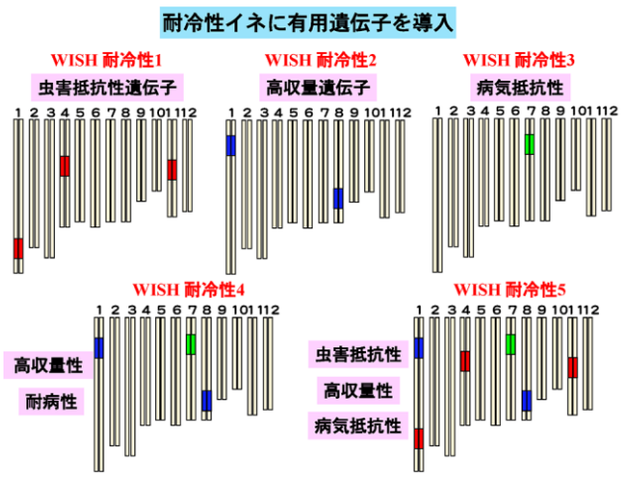

サブサハラアフリカにおけるコメ（籾換算）の
作付面積および単収の推移
作付面積
単収
作付け面積の増加
作付面積（万ha）
単収（t ha-1）
資料：FAOSTAT（2012年8月7日）
Dr. Makihara

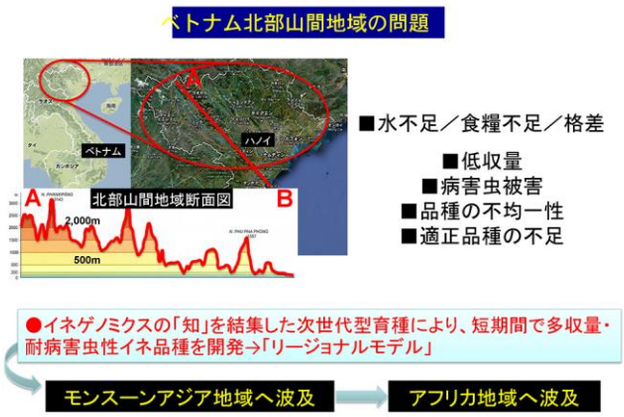

新しいイネを作出して世界に無償分譲
従来の育種はいいもの同士を交配して、
大量の後代の中から目で見ていいものを見つける。
有用遺伝子（収量増加、病害虫性抵抗性遺伝子など）を利用
して、作る前から作物をデザインする。（テクノロジーの導入）。

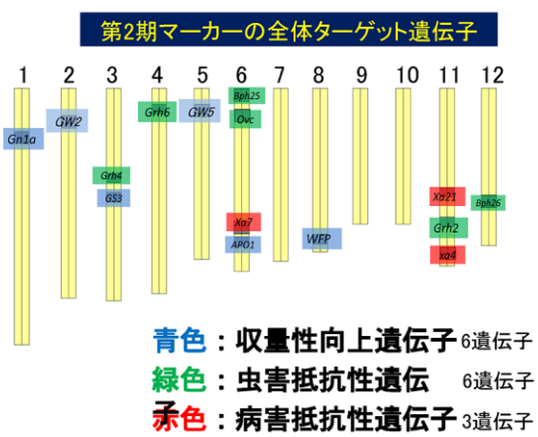

穂の枝の数を増加させる遺伝子（WFP）を日本晴に交配を用いて導入する
日本晴
ST12
収量：低い
収量：高い
日本晴
日本晴
日本晴
日本晴
F1
分子マーカーによる選抜
BC4F2
収量を増加させるWFP遺伝子のみを導入した日本晴


有用遺伝子を効率的に集積する
虫害抵抗性遺伝子
高収量遺伝子
病気抵抗性
高収量性
耐病性
虫害抵抗性
高収量性
病気抵抗性


耐塩性イネ に有用遺伝子を導入
WISH 耐塩性1
虫害抵抗性遺伝子
WISH 耐塩性2
高収量遺伝子
WISH 耐塩性3
病気抵抗性
WISH 耐塩性4
高収量性
耐病性
WISH 耐塩性5
虫害抵抗性
高収量性
病気抵抗性


耐冷性イネに有用遺伝子を導入
WISH 耐冷性1
虫害抵抗性遺伝子
WISH 耐冷性2
高収量遺伝子
WISH 耐冷性3
病気抵抗性
WISH 耐冷性4
高収量性
耐病性
WISH 耐冷性5
虫害抵抗性
高収量性
病気抵抗性


ベトナム北部山間地域の問題
ベトナム
ハノイ
北部山間地域断面図
A
B
2,000m
500m
■水不足／食糧不足／格差
■低収量
■病害虫被害
■品種の不均一性
■適正品種の不足
●イネゲノミクスの「知」を結集した次世代型育種により、短期間で多収量・耐病害虫性イネ品種を開発→「リージョナルモデル」
モンスーンアジア地域へ波及
アフリカ地域へ波及


第2期マーカーの全体ターゲット遺伝子
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
Gn1a
GW2
Grh4
GS3
Grh6
GW5
Bph25
iOvc
Xa7
APO1
WFP
Xa21
Grh2
xa4
Bph26
青色：収量性向上遺伝子 6遺伝子
緑色：虫害抵抗性遺伝子 6遺伝子
赤色：病害抵抗性遺伝子 3遺伝子

開発した品種の状況
1．病害虫抵抗性（白葉枯れ病抵抗性）：Xa gene
2．害虫抵抗性（トビイロウンカ）：BPH genes
3. 渇水耐性（短期生育性）：Hd genes
4. 高収量性：Gn1a and WFP genes

1．作出系統は白葉枯菌人工摂取で抵抗性を示した
Line
Lesion length (cm)
XA7
0.3～0.5 cm
XA21
6～14 cm
XA7 + XA21
0.2～0.5 cm
IR24 (Control)
16～18 cm
Hanoi (Xo 2)
IR24 (Susceptible)
IRBB7 (Xa7)
IRBB21 (Xa21)

種子のデータベースを作成
Seed Adjustment
Classification & Packing
Group Packing
Container Packing
Storage
Database Update
Pinpoint Positioning
Systematic Utilization of Materials

4-2-1-3 セッション 3「栽培技術の動向」

4-2-1-3-1
＜白須　賢：国立研究開発法人理化学研究所（理研） 環境資源科学研究センター＞

今日は、植物と微生物の話、さらに栽培技術への展開についての展望について話す。

まず、社会的に何が求められているか。消費者は安全な生産物が安定して生産されること、生産に関しては環境負荷を低減したい、生産者側はもちろん国際競争力を強化したい、それからブランド化による収入の安定化を図りたい。こういう背景で、研究者は何ができるか。微生物、特に有用菌あるいは病原菌と植物の複雑な相互作用の理解だと考える。植物は常に微生物と相互作用がある。その相互作用を理解した上で利用するような新たな農業戦略の方向性について述べる。

そういった学問をこれから作っていきたいが、タイトルとしては、Functional Microbiomics が、一番近いと考えている。研究内容は、根圏、根に微生物がたくさんいるが、その微生物叢、全体像を総体的に把握してやるべき。これはメタゲノム解析と言われていてそれほど新しいことではない。ただし、装置の進化などでここ数年の進歩が加速し、数段高いレベルで可能になった。

土壌環境のプロファイルを微生物で行う。これはすでにやられている。ここから新しいところだが、各菌のゲノムシークエンスを徹底的にやる。これまでは 16SrRNA の短いシークエンスでプロファイリングしてきたが、全ゲノムをシークエンスしていくというところがかなり違う。

それから、農業生産、環境修復に有用な微生物の収集とスクリーニングもこれまでやられている。スケールを大きくして、もっと産業レベルでやる。大事なところは、有用微生物叢の再構築技術を開発するところ。これまで色々な微生物が取られてきたが、土に戻すと数週間で消えてしまう。つまり、微生物叢があって、叢はある程度の頑健性が安定したフェーズを守っている。そのような安定的なフェーズができるのかを、基本的アイディアを使って再構築できる技術を開発する必要がある。また、微生物と植物あるいは微生物同士の低分子間の生命体同士のネットワーク、これはほとんど未知であり、基礎生物学的には非常におもしろい。

これらの理解や情報収集により、費用が少ない栽培形態、あるいは病原菌に対して非常に強いタイプの栽培系を作れるのではないかと考えている。私たちは主に病原菌感染メカニズムをやってきたが、ある特定の微生物を与えるあるいは特別な叢を作ることにより、病原菌に対応するシステムができないかと考えている。

もちろん、有用菌だけでなく病原菌もたくさんいる。これの分子疫学（生態学）的な解析というのが非常に大事である。一言で言えば、日本の病原菌は全てシークエンスすべきだと思う。病原菌なので一部でなく全部が必要。その部分は日本は海外に比べて非常に遅れている。一つの菌をモデルとして読めばよいというわけでもない。例えばイチゴ炭疽病菌は様々な変種があって刻々と変わっていく。それを常にシークエンスして、モニターしないといけない。その情報からマップのような、疫学予報のようなものを確立し、例えば千葉で今この菌が出てきたので、その菌はどういったもので、静岡に行かないようにする

にはどうするか、あるいは出てしまった場合どういう薬で対応する、または、植える品種は何にすべきか、といったことができるようにしたい。

微生物のほとんどは難培養性微生物で、管理できない。ある菌がいるときだけ存在できる菌というものがいるため。そういった菌どうしの関係性を全て理解しながら、今までまだとれてきてない微生物を使って、それを大量培養するなどして、新しい物質をとっていく。それにはこういう低分子間のネットワーク解析が非常に重要だろう。

適時性について述べる。根の微生物叢は非常に複雑な上、土を使った実験のため再現性に乏しく、これまで困難であった。近年次世代シークエンサーによる 16S プロファイリングという方法のレベルが急激に上がり菌叢の動態解析までは何とか可能になった。これを日本中の様々な場所を同じシステムでやるレベルにすべき。大規模の微生物単離法は、ロボットを用いた多穴プレートでの処理、安価なゲノムシーケンスによる全ゲノム解析などの点で期待できる。ゲノムベースの低分子化合物の研究もこれから発展するだろう。

科学技術上の効果は、短期的には生物圏の構成要素が解明され、新奇の興味深い微生物の発見や大量培養が可能になる。中期的には、微生物、植物の共生のメカニズムや原理が解明される。ヒトでも消化管などで同様の考えでマイクロバイオームの研究が進んでいるが、微生物の叢ができるメカニズムがどれくらい共通性があるかなど、根源的な問題も解決されるだろう。新しい生理活性物質の探索も進む。長期的には、それを実際に農業的に利用したい。これは微生物が本来備える機能を利用した低環境負荷農業の実現につながるだろう。微生物を利用した農業、生態系の再生、このあたりは既に実用化されている技術だが、科学的にバックグラウンドを備えたシステムとしての再生技術もある。繰り返しになるが、新規生理活性物質の製品化などもある。

ライフサイエンス全体に与える影響としては、複雑な相互作用のメカニズムの解明。これは植物だけではなく細菌叢の安定性など、基礎基盤の考え方が構築される。ビッグデータ・インフォマティクス技術の向上で、医学系のマイクロバイオーム研究との連携も大きく期待できる。複雑系を通して、病原菌防除や疫学的予防などの展開が可能になる。

社会実装について述べる。化学合成や海外資源依存の肥料の使用の低減。特にリンは微生物を通して入手しなくてはいけない時代になる。有機、こういう微生物を使ったもので、消費者のクオリティ・オブ・ライフを上げるようなものを提供する。構成要素をもとに商品化するような企業も出現するだろう。従来培養困難であった微生物由来の創薬やバイオレメディエーション。複雑系の積極的な利用が進んで、それが新しい学術の新しい領域になる。

アイディアをイメージ図で説明すると、2010 年の酵母の 6,000 個の遺伝子の相互作用のネットワーク図に例えて、この遺伝子の 1 点が、1 個ずつのマイクローブ（microbe、微生物）になるというイメージ。例えば 6,000 のマイクローブが根に存在しいろいろな機能を発揮しており、それが集約されてくるだろう。こういったネットワークの解析を使いながら、この微生物叢の全体的な理解というのが、今まで細胞の遺伝子の理解を行ったように可能になると考える。

課題については、インフォマティクスが一番大きな問題。微生物は今のところ 16SrRNA だけでプロファイリングしている。この方法では、微生物の属レベル程度の分類で、種レベルですらない。同じクレードに来たものでも、ゲノムとゲノムを比較しながら、ある菌

とある菌が同じかどうかを調べなくてはならず、非常に膨大な量のデータが出てくると予想される。つまり、ビッグデータ解析に非常に期待がかかっている。そういう技術が進んでくるのがこれからの学問になる。

微生物と化合物、ゲノムと化合物について述べる。微生物が持つ生合成の遺伝子は非常に多様性が高い。しかしその遺伝子が発現する条件はほとんど見つかっていない。全ゲノムが解読される微生物について見てみると、眠っていて発現していないような遺伝子がたくさんある。これは何を意味するかというと、ほとんどの低分子化合物は未知であるということ。これをどうやって見つけるか。いろんなケミカルスクリーニングして、誘導剤を見つける、あるいは、それを支配する転写因子を見つけて、それによって過剰発現させ、物質を強制的に作らせる。その後メタボローム技術でどういう物質か調べる。逆に、その物質を作る遺伝子を欠損させれば、それが叢においてどういう機能を果しているかがわかる。

今まで放線菌から発見された生理活性物質や抗生物質が多くある。しかしそういった菌がなぜその物質を作るかは、全く未解明。なぜそのような物質を作るのかは、叢の動態や機能がわからないから。

強化すべき基盤としては、インフォマティクスとケミカルバイオロジーのテクノロジーが鍵になってくる。研究の概念図を示す。植物、微生物、微生物どうしがネットワークを形成している。それぞれがいろいろな化合物を出していて、植物らにまた与える。これを全体的に理解すれば、新しい栽培技術ができるのではないか。

産業界の動向について述べる。海外では、モンサントはノボザイムと連携して、プラントマイクローブの BioAg という新しい会社を作った。ノボザイムは、微生物や酵素の会社。製品の一つを紹介する。Actinovate といって、放線菌でイチゴ炭疽病からイチゴを守るといった生物農薬的なもの。

ベンチャー企業も多い。例えばアメリカの AgBiome は、ビル・ゲイツ財団、モンサント、シンジェンタ、ノボザイムが投資してできたベンチャーだが、この数年で、2 万種以上の菌を取ってきて解析している。主に病原性や耐病性のものをターゲットにしている。

日本も微生物農薬というのは昔からあるが、ある程度決まった菌を使う。バイオ肥料もできている。ただしまだ認知度も利用度も低い。まだこのあたりの産業は伸びるすそ野がある。

【質疑】

Q: 海外と共同研究はしているか。

A: やっている。ドイツもアメリカも今、植物のマイクロバイオームに大きいお金がついている。ドイツのマックス・プランクの研究所のマイクロバイオームのリーダーと共同研究をしている。

Q: 日本単体ではネットワーク解析は難しいから海外と連携するという状況か。

A: その通り。彼らはノウハウがある。ただ、マイクロバイオームは場所によって違う。彼らはドイツの土でやっている。では日本の土はどうなっているのかについて彼らは興味がある。私たちは、日本の酸性度が高い土でやるとどうなるのか、など。

C: ゲノム解析に関しては、オランダ TNO でも主にヒト生体内の研究を EU プロジェクトの一部でやっている。

A: 今、ドイツでマイクロバイオームのゲノムの部分にトップダウンで巨額の研究投資があり、これから 5 年間で大きく進むと思う。

Q: 微生物を環境の中に戻して使うのは昔からやられているが、いつもいなくなってしまう。これまで何十年も試行錯誤してきたが限界で、なかなか定着しない。ある環境に定着させたいという場合、どういう研究をやれば良いか。

A: 逆の発想で、定着しない理由があって、それが研究されていない、と考えている。叢があって、ロバストネスを持っている。その本質は何かと。あるものが共存しているときはロバストネスが保たれていて、それが入れ替わると、保たれない。その全体像をまず理解する。

Q: *in situ* とか、その場でのリアルタイム観測という戦略はないか。

A: それがまさにやるべきこと。フィールドでとってきたものを解析する場合、菌のデータベースがあれば、すぐマッチングできる。新規の微生物をそこでとってきてやると難しい。まず土をとって、そこにいる菌の全部ゲノムがあるという状態があると仮定する。例えばトマトを植えたらこういった微生物叢のパターンがあるといった全ゲノムデータがあると仮定する。

C: そこで何が起こっているかを予想できれば、そうしたら、菌叢と植物と環境と、それを閉じ込めることができる。

A: イメージとしては、今まで遺伝子解析を細胞内でやったが、それは発現解析。これがマイクロバイオームの一つ一つのゲノムの量がどのくらい変わるかということで、同じような結果が出るのではないか。

C: これは負けるわけにはいかない。

C: この手のものは長い歴史があって、いろいろな人がやってきたものの、それほど普及していない。農家の人に聞くと、「キレが悪い」と言う。その「キレの悪さ」を克服するのは難しいだろう。農家よりも、県レベルならば上手く行くのではないか。高知県が、天敵の昆虫で農薬に代替しようとしてうまくいっている。あのときは県がかなり力を入れたはず。

C: トップダウン的な流れがあれば良いと？

C: 行政的な部分、農家よりも少し上流から、データをうまく示しながらアプローチすると、良いのではないか。

Q: 現段階では、今土壌にどういったプレイヤーがいるのか、明らかにする、それを世界中でやっている。どう見てもいつものことだが日本はスタートが遅れている。もし、日本もここをやるときに、どういう形で進めていったら、追いついたり追い越したりできるか。

A: リーダーシップと、それとインフォマティクスの人たちが入った形でコンソーシアムを作って進むべき。

Q: 奇襲作戦はないか。植物があってバイオスフェア（生物圏）があって、現段階では、そこから土を取ってきてラボで作業。そうではなく、例えば土の中に入れて、その場で DNA をつかまえるとか解析するとか。あるいは植物の側から何らかの形でセンサー

をつけて、どういったシグナルが来ているか、とか。先行している海外ではできないような新しいセンシング技術とデータを作って、そこでは初めて対等に立てるのではないか。今のままだと後追い感がある。

A: 一緒になったデータを常にとる、さらに経時的な変化を追えるようなデータがあれば、まだそこまでは海外も進んでいない。

C: 多分、物量でいくと、中国に負けるので、何かスタートで作戦を練らないと。

A: マイクロバイオームのおもしろさというのは結構ローカルな点。アメリカの土を日本へ全部持ってこられるわけではない。だから、日本のマイクロバイオームも、病原菌も、全部知らなくてはいけない。ローカルできちんとできたら比較できる。海外でやれば全部わかってしまうというわけではないと思う。なので、そこは日本としてやらなければいけない研究ではある。

Q: 気象条件や気候も随分違う

A: 土も違う。そういう意味ではこつこつやって、ちゃんと比較できるレベルにまで持っていくことも必要。

Q: それで適用できるレベルはアジア全体に。

A: 基本原理はわかるかもしれない。ただし、わかった上でもその土を持って応用できるわけではないので、予測できる技術というのが最後の部分だと思う。

C: そうですね。日本の土が世界の土のどのぐらいを代表しているのかという、そういうデータはない。きっと亜寒帯から亜熱帯まで、下から海抜 1,500 メートルぐらいまでと。かつ、火成岩性の土壌から堆積岩性の土壌まで、世界で最も多様な気象条件、土地条件を持っているとは言われているが、まだ定性的な記述に留まっている。これがどれくらいなものなのか、定量的にわかったら、日本の土でやったときには世界の何割を担保できると、こういうのがあると、もう少し今のこれはターゲットが見えると思う。

Functional Microbiomics 研究内容

- 根圏微生物叢の総体的把握
  - メタゲノム解析により土壌微生物、とりわけ根圏の菌層を明らかにするため。
  - 土壌環境のプロファイル
  - 各菌ゲノムシークエンスによる詳細解析
- 農業生産、環境修復に有用な微生物の収集とスクリーニング
- 有用微生物叢再構築技術の開発
- 植物と微生物あるいは微生物同士の低分子化合物生物間ネットワーク解析

⇩

- 低肥料栽培系の確立および病原菌抵抗性付与
  - 植物-微生物相互作用（土壌微生物、エンドファイト、植物病原菌等）の分子レベルでの解明と相互作用を利用。
  - 植物病原菌感染メカニズムの解明により、植物への抵抗性付与といった育種への適用
- 病原菌の分子疫学的（生態学）解析による病原菌マップと疫病予報
- 難培養性微生物の単離もしくは複合微生物系による大量培養技術の開発

1

科学技術上の効果

- 短期的効果　－　生物圏の構成要素が明らかに
  - 生物学的に興味深い微生物の発見
  - 難培養性微生物等の大量培養が可能
- 中期的効果　－　構成要素の機能が明らかに
  - 微生物と植物の共生メカニズムの解明
  - 新たな生理活性物質の探索と同定
- 長期的効果　－　機能の農業的利用技術開発へ
  - 微生物が本来備える機能を利用した低環境負荷農業の実現。
  - 微生物を利用した農業や生態系の再生。
  - 新規生理活性物質の製品化

2

ライフサイエンス全体に与える影響、発展性

- 個々の植物、微生物の研究にとどまらない、複雑な相互作用のメカニズム解明。この相互作用メカニズム解析技法は腸内細菌叢の解析にも適応可能と考えられる。
- ビッグデータインフォマティクス技術の向上が期待でき、医学系マイクロバイオーム研究との連携も予想される。
- 複合微生物系の理解をとおして、拮抗菌による病原菌の防除、疫学的予防などへ展開が可能である。

3

Appendix

ゲノムとメタボロームの融合へ

- 微生物がもつ生合成系遺伝子の多様性は非常に高い。
- ほとんどの遺伝子は発現する条件を見つけられていない。
- ほとんどの低分子化合物は未知。
- 発現条件（誘導剤）、あるいは鍵となる転写因子の同定。
- 強制発現による化合物生産と構造の同定。
- ゲノム改変等による化合物の叢における機能の解明。

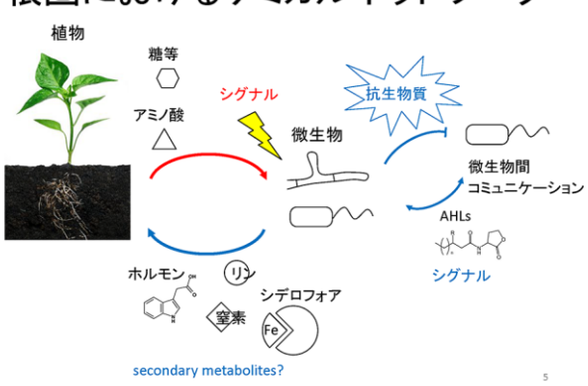
⇩

強化すべき基盤はインフォマティクスとケミカルバイオロジー

4

Appendix

根圏におけるケミカルネットワーク



5

Appendix

国内動向 例1：日本国内企業　微生物農薬

- 歴史は古い（微生物利用学、土壌微生物学、土壌生態学等）
- 43種類以上
- 例

適用病害名	利用微生物	取扱会社
馬鹿苗病	トリコデルマ	クミアイ化学
いもち病等	バチルス	出光興産、日本農薬
オオタバコガ等	バチルス（BT）	住友化学、北興化学、サンケイ化学、アグロ、カネショウ、協友アグリ、大塚化学、石原バイオ、明治製菓、バイエル、アリスタ
アザミウマ等	ボーベリア	アリスタ
ネコブセンチュウ	パスツーリア	サンケイ化学
線虫、ハスモンヨトウ等	スタイナーネマ	エスディーエス
軟腐病	エルビニア	出光興産、アリスタ、日産化学
炭疽病等	タラロマイセツ	出光興産

6

4-2-3-2　IT ベンダーから見た農業分野における ICT 活用の可能性とアカデミアへの期待
＜島津　秀雄：NEC ソリューションイノベータ（株）執行役員　兼　農林水産事業推進室長＞

IT ベンダーは農業分野に 2009 年頃から参入開始し、NEC もその後やや遅れて参入した。今年の 4 月に NEC グループの中で初めて、社内に農林水産業事業部門ができた。本日は、7 月 27 日に新規就農者支援のソフトウェアやサービスの提案として発表したものを中心に紹介する。

IT ベンダーの常套手段として、顧客にまず「見える化」を勧める。業務の中のムリ・ムダ・ムラを見つけ、それを数字にして、同様の尺度で理想型を規定する。理想形と現実のギャップを見つけて、IT で解消するのがビジネスの方向性である。

では何を「見える化」するか。農業では、気象、土壌、作業、生体という構成要素がある。土壌水分の計測器や水分ストレスの表示シート、クロロフィルの蛍光計測機、色をデジタル化する葉色板、果実の硬度計のシリコンボール、こういったものを指標に作業の標準化が行われている。今の農家は一戸一戸が中小企業のオーナーのようなもので、自分なりのやり方がある。500 人、1,000 人規模の農協はあるが、業務命令が出せるわけではない。その労務管理の中で無駄をみつけ、これを効率化することでお客様に貢献する。次に、理想形の想定について説明する。市場出荷はその日の値段で売り買いする。契約出荷は、半年～1 年前に、売値と買値と量と時期を契約しておく。契約出荷になれば市場出荷の買い取り価格は 2 割くらい増える。しかしそのためには、定時に数も量も質も用意しなくてはいけないので、生産者側から見るとリスクがある。定時・定量・定価が実現すればさらに品質を高めて、より高く契約ができるようブランドを高められる。さらに自分のやり方をのれん分けして規模を拡大するフランチャイズすることも可能、これに向かった成長を勧めている。

以下、労務管理についてミカンの例で説明する。出荷までの一貫した指標はなにかというと実はない。それをどう見つけるかが IT としてはとても重要。選果場でのプロセスを説明すると、トラックでミカン搬入、洗浄、外観・サイズ検査、糖酸度の検査、等級サイズごと箱詰め、ラベル印刷、倉庫へ自動的に搬送する。出荷時期の 11～12 月は、有田や愛媛や静岡のような大産地では、1 日に 1 つの選果場で 500 万個ぐらいのミカンが入り全数検査する。全ての一個一個の糖度・酸度が図れる。生産者には、選果場の評価結果が渡される。サイズ、糖度、外観がどういう割合だったか、個数と点数、価格も出る。価格には 10 キロあたり 1000 円から 10000 円まで開きがあり全部評価されている。これを見るとゴールが見えてくる。大学受験の模擬試験のようなもので、得意不得意がわかり、志望校への合否可能性の「成長予測」ができる、それらのデータをふまえてここを強化したらよいといった「差分解消」アドバイスがある。農家の方も、量と質のどちらで攻めるか個別の戦略があので、途中途中でこういった模擬試験的なものに入力し、現状から結果を予測して、アドバイスするというシステムをつくった。

選果場での実証実験の例を示す。糖度、酸度、サイズの実測地、また作業記録を入力してもらい、模擬試験に相当するものを 2 週間に 1 回くらい出して専門家による成長予測をする。その結果、実験参加者の評価点平均が、選果場全体の平均点に比べ、10 数%、常に

コンスタントに高いデータを出していた。途中で、自分のところがほかに比べてどうか、目標に比べてどうかが見えるだけで、最終ゴールの点を高くするということに効果があった。さらに、皆がデータを入れるようになれば、産地全体でどういう人がどのぐらいいるかも見えてくる。そ JA の指導員や県の普及員は 1 人で 200 人担当している。その中で今すぐ指導が必要な人をこれまで勘で抽出していたが、数値で常に見える化すると、実に 6 割の指導の必要な人を見過ごしていたことがわかった。産地全体の品質を下げないよう、指導が必要な農家を抽出してきちんと指導できる。

選果場では一個一個を計測するので、お店に出たときに大量に腐っているものがどの畑で作られたかの追跡は原理的に可能（今はやっていない）。この選果場をハブにして、前と後ろで一貫した流れでつなぎ、新しい情報基盤を今描いていきたい。

今後やっていきたいことに、またそれに関連してアカデミアへの期待について述べる。作業では一つのモデルができた。次に気になるのが気象と土壌。まず気象について述べる。過去 5 年で異常気象が頻発している。2010 年の夏、それから 2011 年の 6 月、2013 年の夏、2014 年、2015 年。今年は計測歴史上で最少の日照時間かつ最大の降水量だった。すなわち、今までのやり方ではだめなので、ここから積み立ていかなくてはいけない。IT 分野は何ができるか、考えているところ。次に土壌について述べる。これはミカン畑の地図だが、細かくメッシュで区切って土壌水分を調べるとかなりばらつきがある。おそらく地下水流などの影響。水分だけでなく微生物も分布は違うはず。さらに、作物の成長・発育・収量モデルについても実用的なモデルの出現を期待している。次に、病気・害虫について述べる。例えばがん探知犬のようなシステムで、病気の発生を予知してくれるもの、センサーでも良い。最後に、ポストハーベストついても大いに期待している。産地リレー、つまり、異なる産地でミカンを作りメイドインジャパンのブランドで輸出したいときに、品質を合わせるにはどうすれば良いか。しかもこれまでのように近距離の国内出荷ではなく、1 週間、2 週間の長距離輸送をした場合でも同じような品質、同じような色にするにはどうすれば良いか。このあたりも重要だが全然わかっていない。

今後何か一緒にやれることがあればと期待する分野を列挙した。現場で生産し、ものを売っている方々と、研究者とをつなぐ部分でも NEC は多くの貢献ができると考えている。

Q: センサー由来のデータでなく、作業予測のためのデータとしてはどういう条件を入れるのか。

A: 例えば受験で予備校が実際使っているアルゴリズムはわからないが、これに相当するものを作らないといけない。おそらく専門家による成長予測があって合格予想率に相当するものができる。県の試験場には過去のデータは品種ごとにたくさんあるらしい。糖度と酸度のグラフ、糖度が高水準のものの推移がわかる。つまり、12 月 1 日の糖度が 11 度のものは、9 月のころはこうだった、といったデータ。こういう先読みをするためにデータを利用したことはなかったそうだ。トマトは多段で採るのでこうはならないだろうが、果樹であれば他にも適用可能だろう。県のレベルで蓄積しているデータを、IT 企業が解釈して、成長予測に使うことができた。これこそが IT のミッションだと思っている。

C: 各県に栽培暦がある。少なくともエビデンスには基づくが従来は抽象的なものにとどまっていた。これを具体的なデータで書き直したら、さきほどのグラフが出る。そういう読み直しをすれば、可能性は十分ある。

Q: ICT 活用により、価格が全体的に上にずれて行くと、上の方に入ったものも 1 万円では売れなくなり下がってくる。平均すると 6000 円で同じになるとか、産地の競争になって一方の産地はもうかってもう一方はもうからないとか、足してみると日本国内全体としては変わらない、といったことは起こらないか。日本の農業を強くするということを考える場合は、均質になった分、全体的に品質を上に上げて、輸出の方にもって行く、そうするとポストハーベストが大事、となるのか。

A: その通り。日本人の胃袋の大きさは決まっている。品質を上げても日本国内だけで見ていたら下がってしまう。なので、ポストハーベストにとても興味がある。

C: 温州ミカンがあれだけ糖度が高いのは傾斜地だから。傾斜地で何万ヘクタール、何千ヘクタール担保できる土地はないので、一つ一つは 100 とか 200 ヘクタールとしてもこれが 10 個になって、例えば数千ヘクタールのミカンの産地が組んで輸出する、これは世界中どこもまねできない。一山のほんのわずかなところでしかできないとしても、このシステムだとそれがジャパンブランドになりえる。

A: そうなりたい。

C: 恐らく、できたら間違いなく勝てる。世界中で偽りの温州ミカンが世界中に出回っている。

Q: これはビジネスとしては成立するか。

A: ビジネスとしてスタートしてまだ半年しか経っていない。社長にも 3 年待ってと言っている。ソフトウェア業界は、どれだけユーザーが増えるかが鍵。広く薄くお金を集めないと成功にならない。現在は非常に安い値段で提供している。その値段で、全員がこれを使えるということにして、収集したデータをまた別な用途に使う、成功するためには、集まったデータからどういう価値をつくれるかが勝負。

C: 農家間や産地間で競争したら困る。

A: その通り。

Q: これはプレシジョン・アグリカルチャーという概念に入るか。

C: エビデンスに基づいたプレシジョン・アグリカルチャーそのもの。

Q: 林業、水あるいは畜産という分野もシェアに入っているか。

A: 弊社の経験では、ビッグデータで最も効果がでやすいのは、実は水産。例えば、養殖場をセンサー整備したが、魚の突然死について、おそらくこれが理由、というのを見つけることができた。それもずっとデータをとった結果、初めて顧客の問題を解決することができた一例。農業分野ではまだないが、今後そういう解析をしていきたい。

C: ヨーロッパでは水産でも畜産でもかなり進んでいる。水中、海中のセンサーなども。

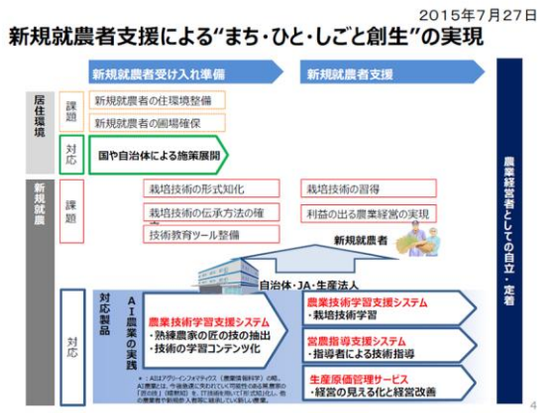
A: 私たちも、データを集めて、そこから何か見つけられないか日々解析している。

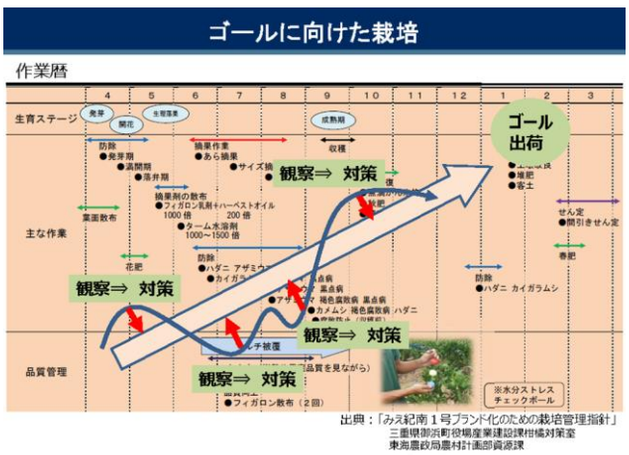
Q: つまり、データ集めに一番お金がかかるところ、ということか。そこを安いユーザーフィーでユーザーに大量にデータを作って入れてもらうところが重要。

A: その通り。

C: そこはビジネスモデルになる。どうやってコストを安くしてデータを集めるか。

A: 本当はセンサーなどで自動にデータが上がるようにしたい、品質を均質にするために。
Q: そこはファイナンスと公的な分野の活躍する場所では。
C: 最初にどれぐらい資金を入れて、データを安くとるかというところ。
C: イスラエルの酪農がその好例と思う。政府がそういうシステムを農家全体に導入し、コントロールできて世界一の収量を誇っている。そういうものが日本で実現できたらすばらしい。
A: JA も、あの成績表だとこのサイズでこの品質だったら価格はこう、と、一つの産地の中では公明正大にやっている。国レベルで、ガバナンスを持って決めているので、できるだけ高く評価されるようにやろうと生産者や JA も思っているのだろう。しかし産地内のとてもローカルな評価しかないのが現状。メイドインジャパンにしようと思ったらその部分も統合させていかないといけない。重要な課題の一つ。





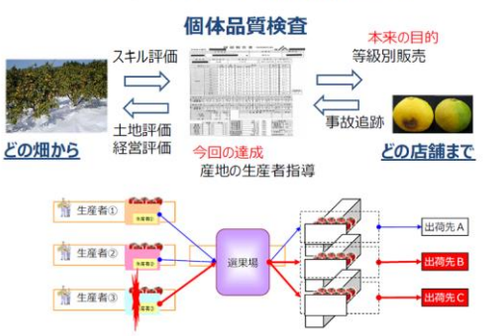
出典：「みえ紀南１号ブランド化のための栽培管理指針」
三重県御浜町役場産業建設課柑橘対策室
東海農政局農村計画部資源課

選果場

- 出荷時に、１つずつ品質検査、自動選別

13

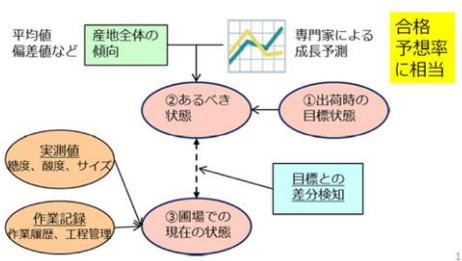
選果場をハブとした情報基盤



14

塾モデル

- 出荷時目標の明確化（糖酸度、ｻｲｽﾞ、外観）
- 目標と現状を常時「見える化」、差分解消



15

営農指導支援システム：イメージ

17

4-2-1-4 セッション 4「栄養科学・機能性成分の動向」

4-2-1-4-1「マルチオミクス解析を用いた食品の機能性研究」
＜加藤　久典　:東京大学総括プロジェクト機構　特任教授＞

栄養・食品分野でオミクス解析をするアプローチ、15 年ほど前からニュートリゲノミクスという単語で呼ばれ、今年出た本に定義が載ったところ。一般的には、何を食べたら体にどういう影響を及ぼすかをオミクスで解析することを指す。食品そのものの成分の網羅的解析も含めた大きな分野としてニュートリオミクスと言う場合もある。　ニュートリゲノミクスは食品を食べて遺伝子や転写産物にどう影響があるかの網羅的な解析から、食品の新しい機能性や機能性のメカニズムを明らかにする。ゲノム、トランスクリプトーム、プロテオーム、メタボロームを用いる。ゲノムは遺伝子多型で、食品の影響は人によって違う、テーラーメード栄養あるいはテーラーメードサプリメントなり機能性成分といった分野につながる。10 何年前からこういう考えはあったが、最近個人の大規模な遺伝子（SNP）解析が安く、特にビジネスベース行われるようになり、注目を集めている。

ニュートリゲノミクスでは最近、エピジェネティクスが食品の影響があることが注目されている。我々が何を食べるか、あるいは栄養状態全体に応じて、エピゲノムが変わるということが最近注目されている。例えば、胎児期の母体の栄養状態が、その後胎児が大人になってからの生活習慣病の発症のリスクを左右するといった話が注目されている。日本人の若い女性にるい痩が多く、低出生体重の新生児が増えている。それが生活習慣病の増加にかかわるのではないかといったことも注目されている。機能食品、あるいは栄養を考えるときに、胎児期あるいは生まれて初期のころに何を食べたか、食べるべきかを、また新しい視点から考える時代なりつつある。

さらに、トランスクリプトームでも近年はノンコーディング RNA についても栄養の観点から行われるようになってきた。機能性食品成分の作用という意味でも、腸内マイクロバイオームでも研究が活発になっている。

食品には一次機能、二次機能、三次機能がある。一次機能や三次機能に関してももちろん大事だが、食品としては二次機能がとても大事だと私自身は思う。おいしくて幸福感を与えないと、食品としては成り立たない。

さまざまなオーム解析により、食品の機能性をより深く明らかにできるようになった。幾つかのオームを組み合わせた解析を食品成分あるいは食品についてやってきた。そのうちコーヒーの関係を今日は紹介する。

コーヒーはいろいろな疫学的調査により、たくさん飲む人は肥満のリスクが低い、糖尿病のリスクが低いといった知見がある。メカニズム的なところを調べたという実験例を紹介する。マウスに、普通食、高脂肪食、高脂肪食に普通のコーヒーの粉、あるいはカフェインが入ってないデカフェのコーヒーの粉、あるいは、未焙煎コーヒーの抽出物粉末をくわえたものを与える。この 3 つを使ったのは、カフェインのありなし、クロロゲン酸の多寡、をみるため。未焙煎のコーヒーには通常のコーヒーの倍のクロロゲン酸が入っている。

しかしこの未焙煎のコーヒー、飲んでもおいしくない。二次機能がとてもよくない。このクロロゲン酸によるコーヒーの健康機能を狙って、数年前に大々的に宣伝して売り出し

たものの売れなかったということもある。最近また別の会社がクロロゲン酸だけを添加した、味はそんな変わらないものを出したところそれはそこそこ売れているとのこと。

マウスの体重は、高脂肪食では太るが、さらにコーヒーが入ると体重増加を抑制する。高脂肪食では、腹部の脂肪の増加、肝臓中への脂肪の蓄積があるが、さらに高脂肪食でコーヒー摂取するとそれが抑えられる。

マウスの肝臓で何が起こったか、3 つのオーム解析を行った。まず、トランスクリプトーム、mRNA のパターンについて、それぞれのネズミ個体ごとにクラスター解析を行うと、コーヒーを摂取している分は、1 匹だけあるが、高脂肪食群よりもむしろ通常食に遺伝子発現のパターンに近かった。遺伝子発現変化量で見ると、PPARγが特に大きく動いていた。これは転写因子で、その下流にある様々な酵素、特に脂肪蓄積に関与する酵素が高脂肪食で軒並み発現が上がっていた。コーヒーと高脂肪食の個体では、PPARγの下流は全部下がっていた。プロテオーム解析の結果は、TCA 回路、エネルギー産生関連回路の発現が上がっていた。

メタボローム解析の結果は、尿素回路の尿素代謝関連物質、アルギニン、オルチニン、シトルリン、尿素、これらは尿素回路を促進する物質だが、高脂肪食で全部減る。一方コーヒー摂取、特にこのクロロゲン酸の多い未焙煎コーヒーの摂取で、これらの物質は増える。

尿素回路をまとめた図で説明する、尿素回路の丸い緑の物質が高脂肪食で減ったが、さきほどのトランスクリプトームのデータをもう一度出してくると、この 2 つの酵素は遺伝子の発現が減っていた。あるいはコーヒーによってこの 2 つの遺伝子の発現が増えていた。さらに、TCA サイクルが活性化しているという結果と合わせると、これは両方一緒になって回る回路なので、両者が一貫して変化しているということがわかった。

このように組み合わせたオミクスで、肝臓で起きていることを見ると、脂肪をため込むような遺伝子の発現が抑制されている。では、高脂肪食を食べていたそのエネルギーはどこへ行くか。ATP をたくさん使う尿素回路というところで使われて、TCA 回路の活性化で補われる可能性があることがわかった。

その成分の中で、未焙煎コーヒーは特に効果が強かった。やはりクロロゲン酸という分子に効果があるだろう、ということで、さきほどは 9 週間連続した実験だったが、今度は 2 日間だけクロロゲン酸を食べさせる実験をした。それでも確かに TCA 回路の酵素の活性の上昇や、網羅性の高いプロテオームで変動したタンパク質を解析すると 100 幾つ検出され、この場合にも TCA サイクルやミトコンドリア関連のタンパク質が多く、TCA サイクルを回すための遺伝子やタンパク質がたくさん作られていることがわかった。

今日は食品分野でこういった網羅的解析によって初めて見えてくるという現象があることを紹介した。こういう分野が食品機能性を担保するところや、新しい機能性表示制度にも活用していけるのではと思っている。

【質疑】

Q: アジアの中で、日本人にもよくあるそうだが、見た目は太っていなくても内臓脂肪が高い人がいるそうだ。それが成人病のもとになり、少しずつ体調が悪くなる、病気が発症する前に体内ストレスが高まる状態がある。それを医薬品ではなく、食品によるアプローチによって健康状態を保つという研究はやっているか。

A: その分野は今盛んで、食品、例えば最後に示した、単に 2 日間だけ投与という実験をしたが、太ってくる前に、それを食べるだけで何が起こるのか、おそらく代謝を改善する方向に動いていることがわかる。あと食品の機能性の研究者は、食品はあくまでも食品で、医薬品ではないというスタンス。病気を早い時期に予防する、という観点から見ている人が多い。

C: ヨーロッパにもそういうコンソーシアム、ヨーロッパでもやっている。企業体と一緒にという形もある。

A: ヨーロッパ中心のニュートリゲノミクスでいうと、NuGO がある。最近あのアジア支部がやっとできて活動が始まったところ。

C: 健康な人を健康、未病な人を健康に、というのが食品の役割なので、そこの証明をしたい、その有力なツールになる。薬や、普通の栄養素であれば欠乏症があるので非常にわかりやすいが、食品の場合はそれがない。微妙なところを証明するのに、新しい手法の一つだろう。

C: 病気のバイオマーカーではなく、健康な人のバイオマーカーも今定義されつつある。

C: そこは微妙なところで今後見つけないといけない。もう一つ重要なのは長期のコホート。それが多くないので、長期的な医学系のコホートのアプローチと、全部が合わさってようやく何年後かにわかるようなもの。そういったものに一緒に乗せて、食品が体にいいことを証明する。

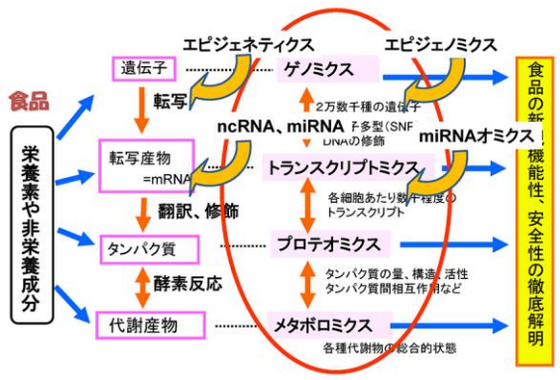
A: 網羅的に見ることにより、正常な状態から少し異常に傾きかけたところで何か検出できるものがあるだろう。

Q: 血液検査とか尿検査は既に健康診断で行われているが、同じ検体サンプルから、このようなデータを取って、今こういった状態なので、こういったものを食べたほうがいいですよ、といった指導につながったりするのか。

A: その通り。別のプロジェクトで、例えばある栄養素が多かったり少なかったりすると、血中のこういう分子が変動する、というのをメタボロームやプロテオームで明らかにすると、鋭敏な指標になるものを見つけつつある。ヒトでもそういうサンプルを使う方向につながることを期待している。

C: そのような前競争的な知識が企業に還元されて、新たな商品化につながるだろう。大学で得た知見をどう利用していくかが次の興味深いステップ。

ニュートリゲノミクスの概念とその広がり

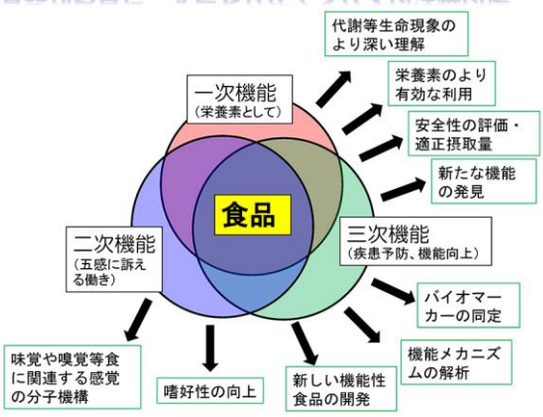


ニュートリゲノミクスで用いられる技術

Genomics	Next Generation Sequencing (NGS) Microarray
Epigenomics	Bisulfite Sequencing ChIP-Seq
Transcriptomics	Microarray (mRNA, miRNA) NGS (RNA-seq)
Proteomics	2D-Electrophoresis MS, LC-MS/MS, Stable Isotope Label
Metabolomics	LC-MS, GC-MS, CE-MS NMR

2

食品から見たニュートリゲノミクスの活躍の場



実験手法

【動物】

雄性　C57BL6Jマウス　8 週齢

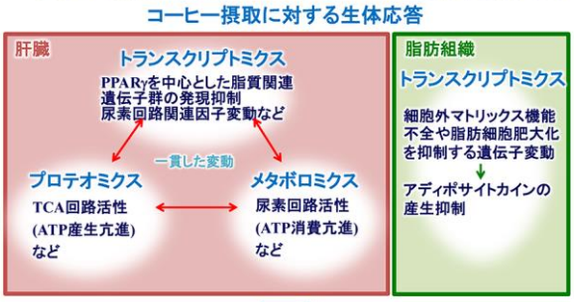
【給餌飼料】

- ND群　：普通食 (10 kcal% fat)
- HF群　：高脂肪食 (60 kcal% fat)
- HFCC群：高脂肪食＋2% Caffeinated Coffee(通常のコーヒー) 粉末
- HFDC群：高脂肪食＋2% Decaffeinated Coffee (カフェインレス)粉末
- HFGC群：高脂肪食＋2% Green unroasted Coffee (未焙煎)粉末

	CC	DC	GC
	roasted	roasted	unroasted
カフェイン	○	×	○
クロロゲン酸	○	○	◎

各オミクスから得られた知見のまとめ

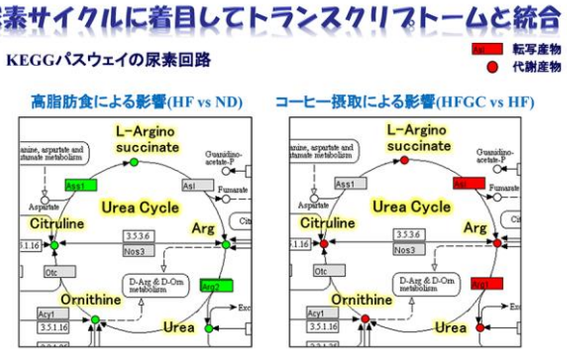
コーヒー摂取に対する生体応答



統合オミクス解析により食品の機能メカニズムの知見が得られた初の事例

尿素サイクルに着目してトランスクリプトームと統合

KEGGパスウェイの尿素回路



コーヒー摂取群特にHFGC群において尿素回路が活性化されている可能性が示された

【総合討論】

CRDS：総合討論の前に、議論のポイントについて説明する。世界的な背景は、人口増加と食糧供給、資源の枯渇、環境変動、CO_2の上昇などの問題がある。国内の背景としては、農業従事者の減少、国内マーケット縮小の一方でアジアでは激増、このような中、自給率はどう頑張っても50%は超えないので、国内で50をつくり、海外で50を作ってもらう必要がある。基礎研究は強いものの橋渡しされていないことが問題で、これを橋渡ししていくのが今後の鍵だろう。

適時性のある、キャッチーなスローガンもあると良い。キーワードがあれば挙げてもらいたい。議論のポイント、社会的期待と我が国農業の固有のコンセプト、両方を踏まえた戦略というのは何か、それを端的に言い表すスローガン的なものはありうるか。目標は国内と国外で分けたほうが良いかもしれない。国内は、高齢化や就農人口の減少などから省力化のニーズはあるものの、一方で消費者の好みは多様かつ高付加価値化に向かうだろう。海外、特にアジアやアフリカでの農業生産については、持続可能性、肥料やエネルギーのインプットを低くしても生産性を維持、あるいは向上する、それらがキーとなるか。研究開発テーマも、今日は基礎科学、育種、栽培、栄養分野の方からお話があったが、企業ニーズが高く、アカデミアが貢献にできるような要素技術は何か、重要性が高まるところは何か、について。規制の問題もある。認証制度は、またそれに合わせた生産を支える科学技術は何か。

研究推進体制についてもご意見を伺いたい。農業の分野は課題が非常に多様で、ともすれば総花的な支援になってしまうが、どういった推進体制であれば進むのか。企業とアカデミアのプレコンペティティブな共同研究のあるべき姿は。持続性の高い人材育成の仕組みなどについてディスカッションしていただきたい。総論として何かはじめに言っておきたいことがあればお願いしたい。

C: 食料はどう頑張っても国内の自給率は50%がせいぜい。この現実はきちんと見据えて、本来は農林水産省がやるべき。とは言え、半分以上は海外から来るので、アカデミアや、JSTにも意識してもらって、農業周辺の問題について提案・発信してもらいたい。メイドバイジャパンと農林水産省が言っているが、国内で開発した技術をもとに海外から輸入するなどの方法があり得る。量を確保することの重みは今後大きくなるのは間違いない。それを政府としてどこでやるか、また研究戦略としてはどう進めるか、そういう大前提があった上で、個々の研究をあてはめていくべきだと思っている。

C: 農業の研究と技術開発をやるとき、日本の人口である1億2,000万人のニーズに対応した，量、質ともに需要に応える生産・供給可能な体制を設計する必要がある。国境を越えたところでの生産にも協力し、逆輸入も含めて多様な輸出入の形をふまえて。日本農業の生産技術は、1億2,000万人を少なくとも飢えさせない体制を、責任を持って築き上げることが必要。いつまでも「4割自給率」ではまずい。今のところ誰も責任とらない。

C: 結局、日本が日本という看板を下げる以上、安全保障の問題。健康についても然り、食料についても然り。どこの担当の省庁でやるという話ではない。

C: その通り。

C: 食料安全保障については、私自身は農林水産省管轄と思うが、内閣府で全体を見てもらうことも考えるべきだろう。文部科学省、経済産業省などの他省庁も大手を振って入れる。少なくとも、国内産業と国内農業を維持していく方向で、40%を少なくとも守る方向で、研究をしたほうがいいと思う。

C: 国内で少なくとも 40%、多ければ 80%とか、とにかく作るとなったら、技術が当然必要、という共通認識をまず持つ必要ある。そうすると、どの技術開発を優先しないといけないか、外国から 50%持ってくるにせよ、今後その量を確保するのが激しくなると予想されるので、海外での生産の底上げに貢献する。そうすれば、おそらく 50%を持ってきやすくなる。つまり、いかに国内の 50%を作って、海外からの 50%を後ろ指指されずに安定的に持ってくるか、そういう仕組みづくりを考えていかないといけない。

C: 国際競争力は重要。国内の農家は企業体でないことが多く、競争力が低い。その基盤をもっと強めて、農業をビジネスとして変える。従来の手間隙をかけた工程をよしとする消費者向けの対応では日本の農業は国際社会では生き残れない、効率化がキーポイント。そのためには、食品産業の国内外の大企業が農家とサプライチェーン一体となって活動できるビジネスモデルを構築すれば、付加価値や競争力を高められるはず。

C: 既に農家はかなり分化している。例えば売り上げ 1 億円以上の農家は 2,500 戸ぐらい。5,000 万円以上は数万戸ある。このレベルは法人経営で、ビジネスライクで、欧米の農家レベルと十分やり合える。一方そうでない 8 割、9 割の人たちもいる。これを同じ技術開発なりビジネスモデルので扱うからおかしくなる。せいぜい二、三万戸の農業法人がいれば、市場ニーズに対応して十分にやっていけるわけで、そのためのビジネスをやれば、オランダと同じようなスキームが描けるだろう。日本の農業は競争力がないと良く言うが、平均値で一戸あたり 2 ヘクタールの場合であり、この規模の農家は農業をビジネスにする人たちではない。

C: 「業」として生計を立てるための技術開発なりをしっかりやるべきということ。

C: 研究者や大学の先生よりも、現場の農業法人の人たちのほうが進んでいる。自分たちで使えるものは海外から直接輸入する。恐らくトップ 10 やトップ 100 の農家を日本とアメリカで比べたら、恐らく日本の農家のレベルのほうが高いはずなのにそこに話が行かない。政策や技術開発になると、非常にレベルが低くて、農業は小規模で競争力がないという前提のもとに議論されるので、議論と現実にギャップがある。もう少し統計も含めたエビデンスをしっかり明示して、どのくらいのレベルの農家や農業生産法人が日本にいるかを把握した上で考えないといけない。

Q: 国家戦略的に、付加価値化なのか量産なのかが決まれば、何が重要かがわかり、手法も変わってくるはず。自給率がカロリーベースで 39%、価値ベースならばいくらになるか？

C: 7 割ぐらい。

C: 十分良いのでは、そんなにネガティブに考えなくてもいい。

C: それほど日本の農業は弱くない。畜産などにはウイークポイントがあるものの、全体としては弱くない。弱いことにしておけば予算がもらえる時代はもう終わりでは。

C: では、高付加価値路線が良いか。

C: それでも高付加価値は one of them だと思う。食料はそもそも、飢えさせない、安価での安定提供が基本。国際価格も含めて勝負できる農業が基本的に残る。ただし国際価格は、高度化した技術を利用するとコストはほぼ同じ。国際価格で安いのは恐らくセキュリティーのどこかがおかしい。

C: 国の補助金で逆に安くして売っているのもあるのではないか。

C: アメリカの例は、輸出補助金ではなく環境保全で補助金が回っているが実質的には補助金農政。

C: そういう補助金で補填しているので安く売れている。それはほかのところで儲けた分を食料の方に補助金で回して押さえるというのは、国として非常に重要な戦略なのだろう。

C: 単に技術やマーケティングだけの世界ではない。

C: 国全体の安全保障ということを考えてれば、食料を作って日本に輸出というのは多分、国全体の安全保障を考えたら、そういう方向性もありだということだろう。

C: 日本食がエビデンスが少ないという話があった。ということはエビデンスを見出せたら、ビジネスオポチュニティーができるはず。海外で売れる。

C: 「日本の健康寿命が一番長い、と The Lancet に出た」、それだけでもひょっとしたら十分なのかもしれない。しかし、本来的な、コホート研究や介入研究のデータが非常に少ない。平均寿命が飛びぬけているので、まずはいいような気もするが。

C: 平均寿命や健康寿命はというのは食材だけではない、医療システムもあるのでは。

C: その通り、だから、そういう意味では日本食だけとは言い切れない。

C: ただしその分、医療費を山のように使っている。39 兆円。それを差し引かなくてはいけない。

C: 2007 年ぐらいのデータで同様の計算をした場合、日本だけが平均寿命と健康寿命の間が長かった。他の国は、6～7 年と短かった。その当時は、日本は医療費をかけて無理やり平均寿命と健康寿命の差を伸ばしているのかと思ったが、今回の統計データでは、日本よりも他国が長くなっている。確かにコストはかかっているかもしれないが。

C: 医療費を無駄に使っているということ。

C: 他国も同様の傾向であるとは聞く。

C: サイエンスベースの取り組みで日本食が健康や長寿に良いというエビデンスを増やすと同時に、得られたエビデンスをキャッチフレーズにして、マーケティングする。二つの異なるアプローチを同時進行できる思う。

C: ただ、普通に食べている食事が体に良い、悪い、というのを証明するには、やはり長期のコホートが必須。何を食べたか、現時点ではアンケート方式である。これが毎日続けていられない。例えば、スマホで撮影すると大体カロリーが出るとか、これまでと違う新しいことをやらないといけない。1 食余計に作ったものを分析するときも、マスでぱっと分析するとか。手間がかからないようにしないと、長期のデータはとれない。

C: 小学校や中学校の給食はどうか。全部食べたかどうかはわからないが、一応メニューの記録がずっとある。何か追跡調査ができないか。

C: 実際に何を食べたかというデータを取らないといけないので、難しい。また、バイオマーカーの話でも、毎日採血は無理。別の簡便なバイオマーカーがないか、非接触とか、涙や尿でも良い。食品を研究すると、日本人は何となくうまく長生きしているものの、証明しようとしたとたんに、非常に微小な差を検出しないといけない。このあたりが、医学系のやり方とは違うことがようやくわかってきた。介入試験もやっているがとても大変だ。丁寧に丁寧にやっても、傾向は出るが、差がはっきり出ないギリギリのところだ。

C: 長期の記録をとると言っても、やはり人はうそをつく。悪いものを食べたこと、特に男性は飲酒を、女性は甘いものを過少報告するといったことがあり、正確なデータはとれない。

C: 家庭で何を食べているかというのを 1 週間なり 2 週間なり、毎食写真を撮ってもらい、それを解析するという本があった。それは、レンズつきフィルム写真（写ルンです）を渡して、偽装できないようにしたそうだ。なかなか単純ではない。5 年後、10 年後、15 年後に重要なのだが、今でも、方法論が完成していない。

C: 病気の人のデータかもしれないが、病院には多くのデータがあるのではないか。入院している病気と関係ない人たちも多くいるはず、そのデータを使えば、採血データなどもあり、傾向が見られるのでは。

C: 個人データなので難しい。

C: 法律を変えないといけない。

C: マイナンバーができて少し緩和したら、できるのかもしれない。

C: 入院中の人、老人ホームでは、朝昼晩、何を食べたか全てデータがあるはず。それを解析して、何を食べたらどうなるか、少しサイエンティフィックにエビデンスが出るのでは。

C: オランダでは実際にやっている。糖尿病患者が入院するクリニックのデータを集積し、それをもとに食のアドバイスをする。日本でもおそらくそういう大学あるのでは。

C: ワーヘンニンゲン大学の学生食堂は、天井にカメラがついていて、誰が何を食べたかモニターが可能と聞いている。

C: Restaurant of the Future でやっている。ただしそれは健康状態というよりも、嗜好の研究。空間の視覚的、嗅覚的、感覚的条件設定によって、消費者の食の選択がどのように影響されるかという目的。

Q: マーケットリサーチのためということか。

C: マーケットリサーチが消費者の選択につながる。日本にもあったら活用できるだろう。

C: 総論に戻る、出口として、高付加価値、おいしさ、健康もあるが、生産技術が一つのポイントになるのでは。日本の農地は大きな面積がとれないので、小さい農地が多数ある。それが一つ一つ管理され、家族経営が主体で、世界のトップクラスの生産高をおさめているのは実は驚異的。しかしこれがあと 10 年以内に、生産基盤自体が揺らいでしまう。10 分の 1 とか 20 分の 1 の人数で 5,000 万枚の田畑を維持しなくてはいけない、これまでそういうことを達成した国はないので、モデルもない。単純に規模が大きければ、大型機械や情報化したロボットが利用可能だが、現在のロボットは全然役に立たない。田畑の多くが斜面なので、畑の中のばらつきが出てきてしまう。こう

いう中でどうやって生産技術を維持するのか。10 分の 1、20 分の 1 の人数で、一人当たりが数百ヘクタールとか 1,000 ヘクタールを超えるものを管理する経営者、労働者、技術群は、本当に存在しない。世界でもフラットの農地ならあるが、細切れの土地ではそういった技術群は存在しない。おそらくスマート農業でやるのだろうが、出口はそこまで見えてこない。

C: それができるようになれば、さきほど話題になった、海外からの 50%をどうするかという話になる。これから日本に食料の 50%を持ってくる際、競合相手となる国はアジア・東南アジアの人口の多い場所で、日本のように小さい経営をする地域の人たち。そこに、日本型の小さい田畑の面積を積算して、安定して作るという技術が持ち込めれば、生産の安定化にもつながるだろう。自分たちのところが安定すれば、外から買う必然性や圧力が減る、結果、50%を安全に持ってくるサポートになる。多分、そういうところには、アメリカやブラジルやオーストラリアのような、平坦な土地での技術は、おそらく何の役にも立たない。

C: 近未来シナリオの一つである。食料問題の将来を調べていたら、中国、インドの人口と生産量を考慮するとあと 10 年か 20 年でクラッシュする可能性が見えた。中国では公的な食料自給率目標を 95%しかカウントしていないので、残りの 5%，人口にすれば 6 千万人が食料供給不足人口として想定される。インドの場合は緑の革命が成功しているので、人口が 13～14 億人になっても自国内でまかなえると聞いている。しかし、中国からあふれてくる数千万の「食料難民」の飢えをどこの国が、誰が担保するか。可能性があるのは、ロシアのアムール州と、1,000 万ヘクタールの水田があるミャンマー。年 2 回収穫して、現在の 1 ヘクタールあたり収量 4 トンを 8 トンにできれば 1 億人を養える。たとえ中国から「食料難民」があふれても、何とか食べられる技術は日本が提供できる。こういった仮想のストラテジーはありうるのではないか。

C: 就農人口がが毎年減って、20 年後には大分かなりなくなったときに、何の食べ物が、場所の効率化とか考えても、何か足りなくなるというのはもう予想が出ているか。

C: 一般的にはまだない。ただ、一番最初に困るのは水田のはず。

C: そこをはっきりさせるべき。何が足りなくなるのかをわかれば、どこの気候のどこの国とパートナーになって、そこから輸入するという戦略を考えられる。何が足りなくなるという数値と量と時間の観点ははっきりさせておけば、おのずと何の作物に、どこの国と、いつまでに、技術協力や、関係改善に対して、日本はエネルギーをかけるべきかという戦略がわかるはず。

C: 日本の人口は減るのと、食文化の傾向が今後どうなるかはわからない。そこがもう少し計算できれば、肉はここからこれぐらいとか、必要量と場所のパートナーと物というのが決まるような気がする。

C: 国は、国が国民に対して何をどれだけ保障するかのレベル、すなわち豊かな生活を保障するのか、最低を保障するのか、それをどういう割合でするか、最初にそこを決めるべきではないか。もう一つ重要なのは、今の自給率は、供給量に対する消費量なので、さっき言った廃棄物を減らすと、ぱっと上がる。それも考慮した上でどれだけ供給するかが問題。

C: 供給カロリー2,500 であれば 40%だが、実際必要とされる 2,000 カロリーだったら、自給率は計算上すぐ上がる。
C: ただし全部食べたらの話。
C: ことしの改定された基本計画で、食料自給力という数字を出している。強引な計算だが食料自給力は 100%あると言う。もちろん現実的ではないが。芋とかを中心にすれば 100 ぐらい行く。そういう安全保障の観点から言うと最悪は免れるという数字がある。
C: 本当に可能性があるのかは疑問が残る。
C: アフリカに行くと、既に、中国の圃場が多くある。
C: 内閣府は調整官庁なので、内閣が強いときは機能するが、弱いときは機能しにくい。できれば CRDS のようなシンクタンクで提案し、あとは原局で実際に現場と合わせながら積み上げる方が本当は良い。文部科学省だけではなく、いろんなところに一応提言をして、そこからプロジェクトが立ち上げられればいい。ここから出たプロジェクト内容が良いと評価してもらって、では省庁超えて一緒にやろうというように。
C: その通り。研究推進体制のところで、省庁の縦割りやアカデミアの分野間の壁のようなものを越えていかなくてはならないと痛感しており、調査報告書に項目を入れる予定。この点については、皆さん異論がないと認識している。こうすればうまくいくのではないかといったアイディアがあればお願いしたい。あと、やるべき課題が多様かつ広範。大きな課題、中規模な課題、小さい課題　また、長期・中期・短期といろいろある。大谷先生のマトリックス式で考えるのが重要だろう。そういう状況をふまえた上で、どういった研究推進体制について伺いたい。まずは、省庁間あるいはアカデミアの分野間の壁を越えること、産学官の連携が大事ということに対して確認したい。
CRDS：これまで JST、JSPS、NEDO で、いわゆるバーチャルの形で、異分野融合、産学連携の研究組織やプロジェクトは作ってきた。しかし結局、3～4 か月に一度会合がある程度だ。欧米でよく見られるように、空間共有型のプロジェクトをやるべきなのではないかと考える。5～10 年で、大きなプロジェクトを組んで、これが重要という目標を決めたら、同じ建物に集まって空間を共有しながらやる。評価はきちんとして、だめだったらやめる。そういう仕組みはどうか。JST の CREST は、バーチャル研究所だが、研究者は分散しているので、リーダーはひたすら研究会をやる。そうでなくて、そこに出勤したら全員いる、といった仕組みを研究体制はどうか。そこに企業の人たちもいるような、プレコンペティティブな研究体制。バーチャル式のはもう 15 年以上やってきて、それでいて日本の研究力は 10 年同じと言われている。「知」の拠点といったようなものを作るべき。
C: 平成 24 年度の補正予算で、27 年度までの機能性食品のプロジェクトが始まった。3 年間で成果を出せというもの。当初は 18 課題で、大学、企業、農水の研究所、大学でも医学部の先生、加藤先生のような分析の先生、いろいろな方が参加するプロジェクトをやっている。研究者を実際に一か所に集めて研究はできないので、2 か月に一回のミーティング、年間 5 回のミーティングを行っている。1 日，朝から晩までほかの人の発表も全部聞くとやはり違う。2 か月というのが短いからというのもあるが、お互いの顔を見て、他のグループの進捗状況を見て、頑張る。日本中から集まっていただくが、

頑張れば来られるし一泊すればなんとかなる。一番困るのがこれらの進捗マネジメント、今は食総研でやっているがとても大変。管理経費の 3 割の部分できちんと研究管理のできる人を雇い、知財管理や海外とのやりとりも含めて全部やってもらえれば、さらに随分進むはず。研究管理や連携のためのマネジメントができるよう、人とお金がつくことが望ましい。もう一つ提案したいのは、プロジェクトの趣旨などについて最初に丁寧に説明したつもりでも、途中でどうしても方向が合わないグループや、プロジェクト全体の趣旨を理解するのに時間がかかるグループがあった。次に同じようなプロジェクトをやるとしたら、「最初の一、二回のミーティングは参加者全員とプロジェクトリーダーが詳細に面接して、全部の方向性をそろえてからでないと研究に着手しない」、くらいでのイメージで管理が必要と思っている。島津さんのお話にあった農家の成績表のように、分析と管理の手法、昔の NASA の管理システムのようなものがあっても良い。個々の細かい課題設定まで目が届かないで、動き始めてから問題が出ることも多々ある。準備期間と途中の工程管理のサポートのある体制が望ましい。

C: 欧州の FP8 などのフレームワークプログラムのコンソーシアムでは、コーディネーターが通常 1 団体決められて、大学や研究機関がそれを引き受けることが多い。大枠のテーマは最初から設定しているが、それぞれ参加企業、参加パートナーの独自の目標は、持ち寄る形式。上から全て指示を受けて従う方式ではなく、それぞれの研究課題や目標を反映するので、参加団体間の調整や交渉が入る。また、どこまで知識を共有するかも最初に明確にしてからプロジェクトを開始する。こういった仕組みで、1 年後に誤解が判明することを防ぐ。

C: ヨーロッパやアメリカでの種苗業界ではどうか。

C: そういったコンソーシアムでは、どこにスタンダードがあるかが重要。キージーンにはオランダ 2 社、フランス 1 社、日本から 1 社入っているが、できたものにやはり違和感がある。輸入物のスーツの袖丈が合わないような感覚。

C: おそらく全部はぴったり行かない。

C: 昔であれば 1 つモデルを作って皆で同じものを、という流れだったが、このごろは、自分でオーダーメードする。例えるなら生地は一緒でもデザインは全部別々、といった仕事のやり方にしないと難しい。キージーンでは、参加する会社 4 社が全部一緒に仕事をするベースが当初はあったが、このごろは、全部で一緒にやるのはこの部分だけと決めて、あとはマルチラテラルやバイラテラルというのが多い。2 割ぐらいしか全体は見えない。

C: 全てを共有するというコンセプトでは、なかなか企業間でマッチングできない。日本の企業は最初から全ての開発工程を設定・コントロールできないとリスクが生じると考えることが多いが、この辺りは欧米的考え方を取り入れて、将来のビジネスチャンスをつかむ体勢が欲しい。

C: 会社によってベクトルも環境条件も随分違う。その中で本当に共有できる部分というのをどうするのか、セッティングが非常に難しい。

C: それでもそういった仕組みは有効なはず。日本はやはり個別感が強い。

C: 付き合いのいい人や企業とはすぐに取り組めるが、見ず知らずの他人には不要な先入観や意識をもってしまい商談も共同研究も進まないことがあれば、ビジネスチャンスとしては非常にもったいない。対人の許容範囲を広めるのも大切では。
C: 日本の企業は、変わるだろうか。
C: トップマネジメントに、協働の価値観、短期目標だけではなく長期目標への取り組みの重要性、そして多少のリスクを持っても勝負に出るバイタリティーを持ってもらいたい。
C: 共同研究は、中身は同じでも、海外は桁が 1 つ違う。共同研究のしくみがあっても、企業が乗ってこない場合もあるだろう。システムがきちんと動けば良いのだが。
C: 優秀なコーディネーターの人がいると違う。そういう仕組みづくりをしないと、今日も話題に挙がったように、研究者が自分でやったほうが早い、となってしまう。
C: ソフトウェアの業界でも、オープンソースのコミュニティーは、欧米だとすぐに会社を超えてネットワークができて、同じオペレーティングシステムを、マイクロソフトでもグーグルでも、という人が空き時間にお互いコントリビューションする形があるが、例えば NEC とか富士通とか日立のエンジニアで、そういうオープンソースコミュニティーを持ち上げていくというのはない。やはり会社第一で、定時後だとしても否定的。いろんな企業を移れば、会社だけという発想ではなくなるのだが。
C: そういった企業の現状をふまえて研究の仕組みを考えるべきなのか、それを変えるために研究の仕組みを考えるのか。
C: 少なくとも企業や今の労働者のメンタリティを変えよと言うのは簡単だが、そう簡単には変えられない。もう一つ、日本の農業の分野でも気になることがある。47 都道府県にはそれぞれ研究所や試験場がある。基本的に、指導員や研究員が県内でサポートするのは無料だが、県外には出せない。隣の県に講演に行くには、結構なステップが要る。構造的には江戸時代の幕藩体制がそのまま維持されている。そこももしかしたらもっと知財などと一緒に直せるところなのではないか。日本人のメンタリティーそのものを直すのは難しいだろうが。
C: 今朝の報道で見た話。現在、外国人観光客が増加しているものの、地方が呼び込めない。そこで、一つ一つのコンテンツをチェーンにしてまとめる、瀬戸内を一つのブロックにして 1 週間回る、というのが紹介されていた。県よりももう少し大きい単位でブロック化といったことができると良いのではないか。それは観光の話だったが。
C: 県の試験場も県の全てのボーダーをなくすのは無理かもしれないが、ミカンならミカン、リンゴならリンゴで、主要な産地の県同士では情報シェアをまず第一歩とすればどうか。
C: 県だと、お米でも相当なオリジナルの品種なり、ブランドを作らないといけない、そういうプレッシャーがある。それももうブロックでいいのでは。
C: 県の幹部レベルで意識統一できるか、意思決定の仕組みはどうするか。そのあたりも変わればよい。
C: 海外輸出を考えると、量が必要になる。そうなるともっと大きく、その県だけじゃなくて、その地域でもっとコマーシャルバリューが増えるというのがわかれば垣根を越

えられる。例えばリンゴが輸出で有望なら、全部同じ品種、同じシステムで作れば、得だとわかれば垣根が下がるのでは。

C: リンゴで青森と長野が組むとか、県の試験場同士が組むとか。

C: 空間共有型の共同研究について話を戻す。スタンフォードなどでよく聞く、空間をつくりあるテーマを決めて研究者がそこに集まる。それは、研究者が所属していた組織のくびきなりルールから開放されて、新しい自律的なルールの中で展開できる。日本の場合、ラボ、圃場、マーケティングまでが、一つの空間の中に集まるという形態がない。農林水産省にもたくさん研究機関があるが、これも全部縦割り。一つのところで、フューチャーファームのような、育種、栽培、製品、マーケティングまで、これを一つのサイトで見せるような研究機関があれば良い。

C: 次年度からの 5 カ年計画が始まるときに、農研機構の本部にそういう組織を今つくろうとしていて準備中。食農ビジネス連携センターというもの。

C: 遺伝資源についても、ABS、生物多様性の名古屋プロトコールがそろそろ批准される。そうすると、他国に対して遺伝資源にアクセスしにくくなる。特に民間は厳しい。国の機関も、国のカラーがついているので厳しい。海外、特にヨーロッパは、大学間同士が一つの協定を結びつつ、大学と国の機関も連携して、遺伝資源を供給する体制を取ろうとしている。日本の場合はそういう体制になっていない。国立の研究所が頑張っても、国の機関なので、やりにくいだろう。そういうセンターは、ある程度フリーな大学が窓口として良いのではないか。

国が管轄する、食農ビジネス研究センターのようなセンターとは別に、アカデミアで一つのセンターも必要ではないか。

C: 全国共同利用のような形で、特定の分野の研究、大学を指定し、拡充している動きも一方ある。その場合、様々なタイプの研究があり、例えば 10～20 年後を見据えてという目標設定であれば、従来までの、専門部署ごとにまとまる形で研究をするのが良いと思う。一方例えば、10 年ぐらいでここまで到達せよというプロジェクトであれば、逆に当然やらなくてはいけないことが決まってくる。ミッションごとに、10 年間集まって、終わったら解散でまたもとのところへ戻る。ヨーロッパの研究制度、UMR などはこの形。フランスやスペインでもそうだが、農林水産省系の研究所、民間の研究所、大学が、1 個の建物の中へ入って 8 年間やる。評価が 4 年後ぐらいにあって、だめだったら終わり。必要と判断されれば、また次の 8 年続けるといった仕組みがある。アメリカでも、大学の中に USDA の研究所の建物があって、そこで混ざり合って研究している感じがある。テーマも明確に決まっている。そういう仕組みがないと、日本だと大学も簡単に連携できない。

C: 閉鎖的なところが外国人にとって入りにくい。企業にとっても然り。研究者サイドでも、言葉の問題などの壁がある。独特な組織文化が苦痛と感じて優秀な人材が日本に入ってこないという状況もある。人的交流の風通しをよくすることで、確実に産業の活性化につながる。

C: これはやはり提言の中に入れると良いだろう。あとは、どの省庁がどう受け止めてくれるか。カルチャーを受容できるかは別問題。

C: 私たちの世代は、頑張れば伸びるという世代で育ってきた。しかしこれからは、頑張っても伸びない、あるいは頑張っても落ちるという状況になる、それでもいいものを作っていく必要があるので、今までとは違った仕組みを入れていくべき。今まで日本でやったことのないシステムをやってみたらいい。

C: あと重要なのは広報活動。できたことは片端から発表し、学会・業界で認知してもらう。人に知ってもらうのが日本人はあまり得意ではない。文献も日本語だけだと、海外の研究者が全く読めない。こんな貴重な研究を日本はやっていたんですねと何年も後になって言われることがある。日本語だけではなく英語でも文献を出していくことが重要。

CRDS:いろいろな御意見をいただき、非常に活発な議論をしていただいて、感謝申し上げる。

最終的に報告書としてまとめて、提言をしていくので、今後もご協力を願う。グリーンの分野は健康と並んでおそらく両輪。薬を打っても食べ物がなかったら死ぬ。非常に重要な分野である。また、少子高齢化が進むと、ますます恐らく重要になってくる分野である。今後とも JST-CRDS のこの活動に御理解と御支援をいただきたい。

4-2-2「俯瞰とスコープ抽出のための検討会」

＜プログラムなど＞

日時：　平成 27 年 10 月 15 日（木）　10：30～18：00
場所：　TKP 市ヶ谷カンファレンスセンター　7 階 D
出席者：　有識者（10 名）、府省など傍聴者（15 名）
プログラム（敬称略、所属・役職はワークショップ開催時点）
コーディネータ：関根　泰　（JST-CRDS フェロー）、
　齊藤　知恵子（JST-CRDS フェロー）
【趣旨説明】：島津　基博　（JST-CRDS フェロー）
【セッション】
　蓮沼　誠久　（神戸大学 大学院工学研究科　応用化学専攻　教授）
　花井　泰三　（九州大学 大学院農学研究院　生物機能科学部門　教授）
　梅津　光央　（東北大学 大学院工学研究科　バイオ工学専攻　教授）
　天尾　豊　（大阪市立大学 複合先端研究機構　教授）
　蒲池　利章　（東京工業大学 大学院生命理工学研究科　教授）
　金子　達雄　（北陸先端科学技術大学院大学
　マテリアルサイエンス研究科　准教授）
　森田　友岳　（産業技術総合研究所　機能化学研究部門
　バイオケミカルグループ　主任研究員）
　出村　拓　（奈良先端科学技術大学院大学
　バイオサイエンス研究科　教授）
　佐塚　隆志　（名古屋大学 生物機能開発利用研究センター　准教授）
　稲垣　史生　（海洋研究開発機構 高知コア研究所　所長代理）
【総合討論】

4-2-3「グリーンバイオ分野ワークショップ　　微生物、生物多様性、共生を理解する技術基盤の最前線と利用技術への展開」

＜プログラムなど＞

日時：　　平成 27 年 11 月 7 日（土）　13：00～18：00
場所：　　科学技術振興機構　東京別館（五番町）2 階会議室 A-1
出席者：　有識者（12 名）、府省など傍聴者（12 名）
プログラム（敬称略、所属・役職はワークショップ開催時点）
【開会挨拶】：永井　良三（JST-CRDS 上席フェロー）
【開会挨拶】：江面　浩（JST-CRDS 特任フェロー）
【趣旨説明】：江面　浩（JST-CRDS 特任フェロー）
【セッション 1　「環境中の微生物/微生物叢の機能解明、微生物との共生研究の動向」】
高谷　直樹　（筑波大学　生命環境科学研究科　教授）
妹尾　啓史　（東京大学大学院　農学生命科学研究科　教授）
新家　一男　（産業技術総合研究所　上級主任研究員）
南澤　　究　（東北大学大学院　生命科学研究科　教授）
竹山　春子　（早稲田大学　理工学術院　教授）
【セッション 2　「NGS、インフォマティクス、メタボローム、バイオリソースの最前線」】
岩崎　　渉　（東京大学大学院　理学系研究科　生物科学専攻　准教授）
菊地　　淳　（理化学研究所　環境資源科学研究センター　チームリーダー）
倉田　のり　（国立遺伝学研究所　教授　生物遺伝資源センター長）
【セッション 3「有用微生物/微生物叢を用いた技術の社会実装　現状と展望」】
谷坂　隆俊　（吉備国際大学　教授、株式会社シーティーシー顧問、株式会社オリザ顧問）
竹生　敏幸　（株式会社シーティーシー　環境事業部　技術部長/業務統括部長）
酒井　隆子　（みかど協和株式会社　代表取締役副社長）
橋本　信一　（協和発酵バイオ　技術開発部　部長）
【総合討論】
【閉会挨拶】：江面　浩（JST-CRDS 特任フェロー）

＜趣旨説明の概要＞

JST-CRDS グリーンバイオ分野ワークショップの 2015 年度 2 回目のワークショップは、「微生物、生物多様性、共生を理解する技術基盤の最前線と利用技術への展開」というタイトルで 2015 年 11 月 7 日に開催した。

JST のライフサイエンス分野では、昨年度より、グリーンバイオ分野についてどういった研究体制あるいは重点領域を取り上げるべきか議論し、調査および有識者との対話を行ってきた。また、JST-CRDS においても、昨年度よりグリーンバイオ横断グループをライフサイエンス臨床医学ユニットが中心となって組織し、他のユニットおよび JST 他部署の協力も得ながら、調査活動を行ってきた。今回取り上げる、バクテリアとの共生、ゲノム、インフォマティクスといった話題については、全てのライフサイエンスやメディカル領域

でも注目の話題であり、多様な領域をカバーしながら、JST としては、新しい時代に向けて提案をしていきたい。

本ワークショップの趣旨を以下に説明する。近年、環境中の微生物の集団から直接ゲノム DNA を解析をする「メタゲノム解析」という技術が発達し、DNA シーケンスコストの低下に伴って、欧米ではヒトの腸内および環境中の微生物叢を研究対象にした一大分野として確立しつつある。わが国においても、こうした微生物機能の包括的な理解と活用を促進するような研究体制を作っていく必要があるのではないかと考える。これまで難培養で環境中に埋没していた大多数の微生物由来の、未知の遺伝子の発見と機能解明を通じて、社会に貢献できる様々なリソースを生み出すことができるだろう。本ワークショップではこのような研究を加速していくために、どのようなことをやるべきか、専門家・有識者のご意見を伺って俯瞰と議論を行っていきたい。日本は微生物研究では多くの実績があるので、それをうまく活用するのが良いだろう。

微生物と他の生き物との関係をどこまで理解していけるかが、今後の研究の大きな動向となるだろう。まず微生物を語るには生物全体、そしてその多様性を把握・理解する必要がある。現在の地球上には、例えばバクテリアのような小さい生き物から、ゾウのように 10 トンもあるような生き物まで存在している。このような多様性を持ち得たのは、実は生物どうしの共生をうまく利用してきたのだと理解できる。共生とは、ある生き物の中に別の生き物が棲みつき、その中でシステムを作る。その結果、宿主とともにいろいろな環境で生きられるようになっていく。そうして多様性を広げてきた。例えば、シアノバクテリアが原始真核生物に細胞内共生し植物細胞が形成された。さらに二次共生、三次共生などが起こり、生物丸ごとが遺伝子とともに別の生物に水平伝播するといったことが何度も起こった。結果として、多種多様な生物が、現在の地球上に存在している。その中で微生物が非常に重要な役割を果たしてきたと言える。

共生研究を通して生物の多様性を理解することで、生物学的知見として非常に興味いことが発見・解明されてきた。それだけでなく、私たちの生活にとって有益になることも見出されてきた。例えば、トキソプラズマやマラリア原虫といった病原性を持つ寄生動物が、植物ホルモンを作ることがわかった。どうして一見植物とは遠く離れて見えるこういった生き物が植物ホルモンを作るのか、ということを調べたところ、これらの微生物には太古の昔、植物が共生し、進化の過程で葉緑体が退化して、もともと持っていた植物細胞の機能の一部が残っているということがわかった。そして、植物ホルモンの阻害剤を使うと、こういった病原性を持つ生き物を抑えることができることがわかった。もう一つの例、50℃を超える場所で生育するパニックグラスという植物について紹介する。普通、植物はそのような高温環境では生育不意可能だが、この植物は生育できていた。調べてみると実は根の表面にいろいろな微生物がおり、植物や微生物単独では高温耐性を持たないものの、両者を共生させたときにだけ高温耐性を発揮することがわかった。そこでその微生物群を分離し、イネやトウモロコシの種子にコーティングすると、乾燥耐性や耐塩性が賦与されることがわかった。このような製品が実際に開発され、市場に出つつある。微生物と植物の共生関係の研究から、社会実装されるという成果になった。

古くから日本人は、発酵と醸造という分野で、微生物を活用してきた。近代になって、微生物に科学のメスが入るようになってからも、日本の微生物学分野は、世界的にも高い

評価を得る成果を多く出してきた。京都大学の近くの曼殊院門跡には、菌塚というものまであるそうで、日本人は微生物や菌を大事に扱い利用してきたことが窺える。最近の例としては、大村智先生のノーベル賞も、微生物を単離してくるということを出発点に、エバーメクチンの開発と生産につなげ、人類に甚大な貢献をされたということが評価された結果である。Web of Science で分野別の論文件数を解析すると、微生物培養技術、難培養性微生物解析技術については一定の強みを持っている。また、代謝物を網羅的に解析するメタボローム分野では日本が強い。一方、動物と微生物、植物と微生物の相互作用の研究については立ち遅れており、メタゲノム解析は 5 年以上の遅れがある。既存の強い技術を組み合わせることによって活かし、宿主植物と微生物共生の相互の関係を理解する研究にも進出していけば、十分競争力のある分野が開拓できると考えている。

いくつかの要素技術の解説と、具体例について説明する。従来、環境中の微生物を研究する際には、まず最初に培養を行い、単一のものにしてから解析に着手するというのがオーソドックスなやり方だった。しかし実際は、培養可能な微生物は微生物全体の 1%未満という推計がある。これまでの微生物研究の成果は、もとのリソースの 100 分の 1 以下の集団を扱って得られたものであり、この残り 99%の「難培養性微生物」を理解し制御できるようになれば、さらに新しい世界が展開できるのではないかと期待されている。DNA 塩基配列決定技術、すなわち DNA シーケンス技術が発展したことで、環境中に存在している微生物の、ある DNA の部分だけを比較することにより、微生物全体の動態がわかるようになってきた。しかも、微生物を単離する必要がなく、混ざった状態で網羅的に見ることができる。解析コストもかなり下がってきたので汎用性も高い。このような「メタゲノム解析」技術を出発点にすることにより、残り 99%の理解が進むのではないかと考えられる。ここに、日本の強みのある培養技術や、難培養性微生物解析技術を合わせることで、微生物集団の理解、あるいは生物－微生物の共生の理解が進むだろう。既に、コンポストの中の微生物のメタゲノム解析を行い、熱安定性が高く pH 耐性に優れたポリエステル分解酵素を作る微生物の発見などにも繋がっている。

微生物と宿主の共生関係をいろいろな方面で利用しようという取り組みは、実は長年行われてきたものの、試験管やポットの中ではうまくいくが、環境中に投入すると定着しないという問題があった。これはおそらくさきほどの、培養可能な 1%の微生物だけを見ているのが理由ではないかと考えられる。つまり複数の微生物が相互作用しながら、維持されていることが、メタゲノム解析によってわかってきたという例もある。今後は、今までスクリーニングできていなかった部分も含めて、ハイスループットのスクリーニング系ができていくことが期待される。

そのようなところで日本がリードしていくにはどういった戦略をとれば良いか。少なくともメタゲノム解析単体の研究では、これまで日本では集中的あるいはシステマティックな研究投資はなされておらず、個別の研究に限られている。個別研究の中にも非常に光る研究が出てきているものの、体系的にはなされていない。一方、植物や動物の研究者も、微生物研究に非常に期待はしているが、動態が把握できないとか、思うように定着してくれないといった課題に直面している。それを乗り越えるには、やはりこういった微生物と他の生物との関係を理解する研究を包括的に行い、成果を出していく必要があるのではないか。それらから最終的には、食料の増産や環境修復や資源エネルギーの課題解決、ある

いは医療の発展や健康の増進などにも、広く貢献できるような成果が出るのではないかと思っている。

日本人は気が弱く技術開発はゆっくりこつこつという部分があるかもしれないが、昔、フォードの車を日本に輸入した時代もあったが、現在となっては世界一の車を大量に世界中にむけて売っている。大量の情報を駆使するバイオインフォマティクスの分野など、弱い点もあるが、日本人の勤勉性などを考慮すると、今やれば十分に追いついて世界をリードできるのではないか。そういうことをやっていくには、これから日本国内でどのようなことに集中して研究を推進していけばよいのかを、このワークショップでは皆さんにご議論いただき、その研究遂行を可能にする体制がつくれるように努力していきたい。

本ワークショップは、以上のことをふまえて、3 つのセッションから構成した。「環境中の微生物/微生物叢の機能解明、微生物と共生研究の動向」「NGS、インフォマティクス、メタボローム、バイオリソースの最前線」「有用微生物/微生物叢を用いた技術の社会実装　現状と展望」について、有識者計 12 人から発表していただいた。

本WSを通じて目指すべき目標

微生物機能の包括的な理解と活用を促進する研究体制

メタゲノム・メタボローム解析拠点

植物/動物-微生物共生

難培養微生物の培養化

微生物機能の活用を促進することで貢献できる領域

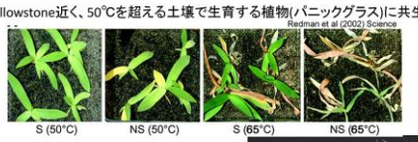
植物病害抵抗 低肥料作物生産 環境浄化	多糖分解酵素 有用酵素の発掘と 合成生物学手法	新規抗生物質 有用天然化合物の 発掘と合成
食料増産、環境修復	資源エネルギー	医療の発展、健康増進

共生の研究から明らかにされた例 （他：参考資料）

パニックグラス寄生菌類による乾燥耐性増強

Yellowstone近く、50℃を超える土壌で生育する植物(パニックグラス)に共生する菌類

Redman et al (2002) Science



S (50°C)　NS (50°C)　S (65°C)　NS (65°C)

これらの菌類混合物をイネ、トウモロコシ種子にコーティングすることにより**乾燥耐性、耐塩性付与**

ADAPTIVE SYMBIOTIC TECHNOLOGIES

3 week old greenhouse corn plants exposed to 8 days of drought. Untreated plants wilted after 4 days while BioEnsure™- Corn treated plants retained full turgor up to 8 days.

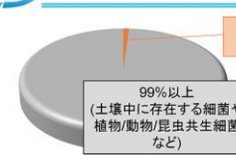
分野別論文件数 Web of Scienceより　検索範囲：2001～2015年

	動物病原菌		植物病原菌		メタゲノム解析		微生物培養技術		難培養微生物解析		メタボローム解析	
	国	件数	国	件数	国	件数	国	件数	国	件数	国	件数
1	USA	10028	USA	12402	USA	1581	USA	9766	USA	207	USA	517
2	GERMANY	2398	CHINA	4305	ENGLAND	231	CHINA	3241	CHINA	41	GERMANY	391
3	ENGLAND	2115	GERMANY	3874	CANADA	211	GERMANY	2646	GERMANY	37	JAPAN	269
4	FRANCE	1582	FRANCE	2875	GERMANY	200	ENGLAND	2117	JAPAN	35	CHINA	230
5	CHINA	1469	ENGLAND	2826	AUSTRALIA	167	SPAIN	2010	FRANCE	24	NETHERLANDS	216
6	CANADA	1362	INDIA	2505	CHINA	159	INDIA	1940	ENGLAND	24	ENGLAND	201
7	ITALY	1318	CANADA	2306	FRANCE	120	FRANCE	1915	SPAIN	19	FRANCE	162
8	AUSTRALIA	1098	SPAIN	2233	NETHERLANDS	113	JAPAN	1889	S. KOREA	18	SPAIN	137
9	SPAIN	1071	ITALY	2141	ITALY	96	ITALY	1726	CANADA	17	CANADA	112
10	BRAZIL	1056	JAPAN	2105	SPAIN	71	CANADA	1562	INDIA	15	ITALY	109

共生に関する研究は強くないが、微生物培養・難培養技術に関しては強みがある

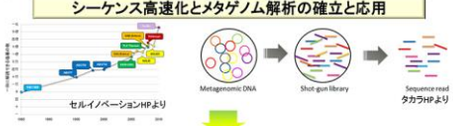
メタゲノムに関しては5年以上の遅れがある

難培養性微生物とメタゲノム解析



適時性

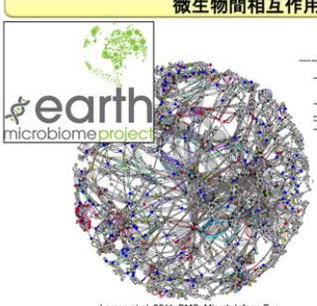
シーケンス高速化とメタゲノム解析の確立と応用

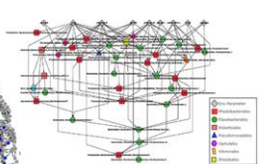


難培養性微生物の機能解析へメタゲノムの有効活用
共生を明らかにすることで、難培養性微生物の培養化・有効利用へ

メタゲノム解析による微生物相互作用

メタゲノム・メタボローム解析による菌叢解析、微生物間相互作用の解明





菌叢の安定化

応用として外来微生物の投与の際に必要な菌叢が明らかにできる

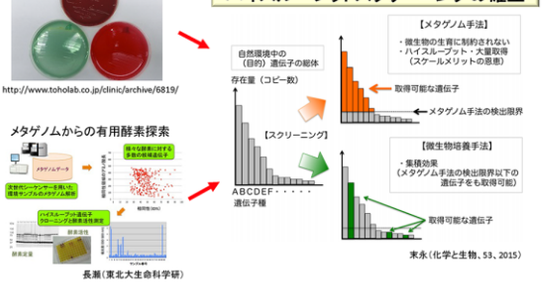
Larsen et al, 2011, BMC: Microb Inform Exp

今後の微生物研究について

微生物培養法を用いたスクリーニング

http://www.toholab.co.jp/clinic/archive/6819/

双方のメリットを活かしたハイスループットスクリーニングの確立



メタゲノムからの有用酵素探索

長瀬（東北大生命科学研）

末永（化学と生物、53、2015）

4-2-3-1　セッション 1「環境中の微生物/微生物叢の機能解明、微生物と共生研究の動向」

4-2-3-1-1「有用微生物の発掘と機能解明　研究の具体例と展望」
＜高谷　直樹:筑波大学　生命環境科学研究科　教授＞

メタゲノムや共生の話に加え、自分の考える微生物研究の今後のあり方について述べる。微生物利用は、醸造にはじまり、その後抗生物質やアミノ酸発酵などで発展し、21 世紀にはさらに多様な分野に拡大している。トウモロコシデンプンの分解やエタノール発酵に微生物が使われているのはもちろん、医薬品や農薬のシーズ化合物は、そのほとんどが微生物で生産されている。このように広い応用分野があるため、微生物研究者は多様な分野に散在して研究を行っているが、そこに横串を刺すような新しい取り組みがあっても良いのではないか。

微生物の有用性について説明する。大腸菌と納豆菌は顕微鏡下ではほとんど区別がつかない。動物と植物は外観上大きな差があるが、生命の系統樹上では、大腸菌と納豆菌の距離の方が大きい。微生物には、真核生物、真性細菌、アーキア（古細菌）が全て含まれる。「生命とは何か」という本質的な問いに対しては、ヒトを対象とする研究だけでは答えられない。全部の生物を網羅してアトラスを作るようなことが必要である。そういった意味で、微生物の研究は重要である。

生物の機能や生物資源を応用微生物学者が利用する際、微生物がこれだけ多様なのだから、自分の希望する機能を持つ微生物もきっといるだろうと期待する。実際に膨大な成果がこれまでに得られた。また、麹菌のゲノムが近年解読されたが、全遺伝子 1 万個うちアノテーションのつかない機能未知の遺伝子が 7 割ぐらいある。機能未知遺伝子の多さ、また微生物の多様性を考慮しても、今後も利用価値は十分にある。

最近の研究トピックを紹介する。大村先生のノーベル賞は言わずもがなだが、日本で創薬された微生物由来の有名な薬が多くある。また酵素の市場は数千億円あるが、これらの多くは微生物が作る。大量かつ安価に作ることが可能で、丈夫な酵素が多いため、産業上も役に立っている。ゲノム編集の CRISPR ももともと微生物が持つ外来 DNA への応答系として見つかってきた。合成生物学のプラットフォームも必ず微生物である。新しい微生物の代謝を発見すると、大抵「Nature」などの最上位雑誌に出る。アナモックス菌というアンモニアと亜硝酸を窒素と硝酸にする菌が 10 年くらい前に報告されたが、この新しい菌が排水処理や水処理の場にいることがわかり、新しい技術のシーズにもなっている。

ここまでまとめると、人間は醸造から始まって微生物を利用してきた、微生物や遺伝子資源の開拓は、有用な微生物や化合物を求めた地道な努力＝“スクリーニング”によって成し遂げられてきた、これまでの取り組みのスクリーニングは非常に重要である、ということを強調したい。

しかしそういった古典的な取り組みと併せて新しい技術革新、その 1 つがメタゲノムかもしれないが、が必要と考える。メタゲノム以外についても触れる。

微生物利用の方針について説明する。まずはスクリーニングすることが重要、スクリーニングの技術を高度化させることとあわせて、従来型のスクリーニングの裾野を拡大する

ことは非常に重要であり、これらを通して、目的のものを抽出すること、それによって微生物機能を利用することが大切である。スクリーニングの対象は化学物質や酵素・遺伝子、単独微生物または複合微生物などいずれでも良い。また、微生物のまとまりを制御して、例えば食料、農作物の開発につなげる、そういったアウトプットに向かう方向性もある。また、冒頭で述べた、「生命とは何か」という理解も進む。

新しい技術、例えばマイクロ流体デバイスを使ったハイスループットなスクリーニングや、メタゲノム解析の手法、複合生物系、など、これ以外にも様々な発現プラットフォームを工夫すること、新規のイメージング技術を取り入れることでスクリーニングをハイスループット化すると、幾つかの研究の方向性と達成目的が見えてくる。土の中には多様な微生物存在し、共生系・複合微生物系が存在する。これらを取り出して利用しようという方向性があるが、目的に合うものを拾う工夫さえすれば単独の微生物であってもまだまだ利用の可能性は大きいので、共生系・複合微生物系に偏重しなくても良い。

この 10 年やってきた研究例を説明する。例えば、キラルの水酸化触媒として工業利用できるかもしれない微生物や、バイオポリマーを作るような酵素などを見出している。すぐに産業化されているわけではないが、評価の高い論文にはなっており、基礎研究の成果としても伸びると期待している。

もう一つの例は、創薬や農薬用の二次代謝産物に関するもの。大体菌類は 150 万種くらい存在すると試算されており、1 つの菌には約 50 個程度の二次代謝系の遺伝子が生合成クラスターとして存在している。150 万かける 50 で膨大な二次代謝系の数になる。ところが、この 50 個のうちの 30～45 個が通常の培養条件では発現せずに休眠している。それを起こしてやれば代謝産物の数は非常に多くなるはず。幾つかの遺伝子クラスターはある共通のエピジェネティックな抑制を受けて発現しないことが判明してきた。とすれば、この抑制作用を抑制するような新しい化合物を見つけてきてやれば良い。こういった遺伝子機能の発見の工夫をすることで、菌類の種と二次代謝系の数を掛け算後の数字を増やせる。

また、新技術との融合でどういった展望があるかを説明したい。これは、微生物研究と、イメージング、デバイス技術との融合。赤いカビと緑のバクテリアの相互作用をマイクロ流体デバイスの中で可視化している。また、昨年ノーベル賞をとった超解像顕微鏡を組み合わせれば、バクテリアとカビがどういった分子や受容体を介して相互作用しているか、空間的な制御がわかり、感染や共生の理解に役立つだろう。

微生物はバイオフィルムをつくり集合体として生きている。集合体を形成したり離れたりするのがデバイス上で再現可能になりつつある。こういった新しい技術を取り入れてやることで、集合体の塊がどのように形成されどのように壊れていくのか、また、一部分の細胞が変化し新しい種がゆくゆくは分化していくが、そのメカニズムについてもモデルとして解析可能になるだろう。微生物集団の、水処理や食品汚染といったところでのふるまいの理解や制御に役立っていくだろう。

JST のプロジェクトで、世界で最も耐熱性が高く、透明で、バイオマス由来のプラスチックの開発に成功した。この代謝系は、バイオマス由来のものをこのモノマーに変換し、最後は化学重合して作る。どうしてもこの代謝系の酵素が律速になって、量産や起業化に結びつかない。例えば、マイクロデバイスを使ってハイスループットで微生物由来酵素を効率的にスクリーニングしてやればより良い酵素が見つかり、この材料を使うブレークス

ルーが達成できるかもしれない。これは私が見つけたプラスチックだけではなく、他の電子材料、機能性化合物などにも使えるだろうと期待している。

全体をまとめて今後の動向について述べる。微生物スクリーニングから、目的にかなう多様な微生物を抽出し、産業系プラントなど閉鎖系の場で利用する、あるいは、開放系の畑や水処理の場で利用する。食品、食料、いろいろな分野に波及していくだろう。

【質疑】

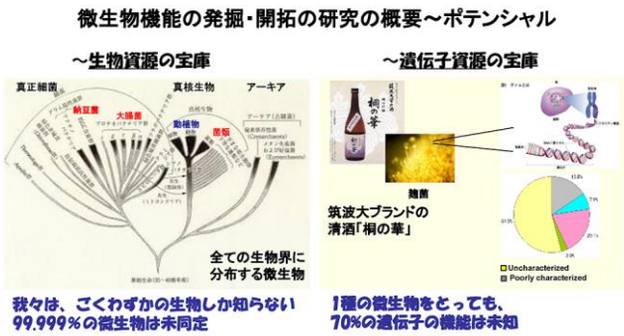
Q: 多様な微生物が混合している状態から微生物を釣り上げてきて、それをインフラスコで利用することに関しては十分期待できる。一方、オンサイトで再現していくところは、長年の努力の甲斐なく上手く行っていないという印象がある。先生から見て、オンサイトで利用できるようにするにはどういったことをすれば良いとお考えか。

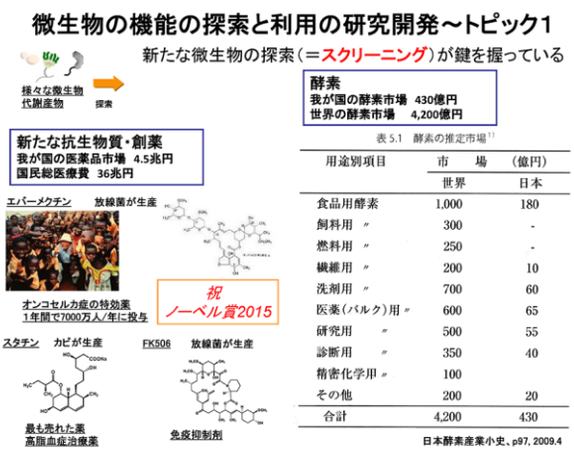
A: 現状難しいのは仰るとおり。スクリーニングが大事と言っているので、オンサイトで使えるようなものをスクリーニングしてくれば良いだろう。例えば植物で、何を例にすれば良いかはわからないが、100 カ所、1,000 カ所のオンサイトで、微生物を全部試すことができれば、効率は悪いけれどもいいものが必ず見つかるはず。しかし、1,000 カ所の畑を使って実験するわけにいかないので、それをハイスループット化すれば良い。例えば、直径 1 センチメートルのスケールで畑を再現する工夫ができれば非常に楽になる。そういう新しい発想を取り入れて新たなスクリーニング技術を開発すれば良いのではないか。具体的な内容までは詳しく提案できないが。

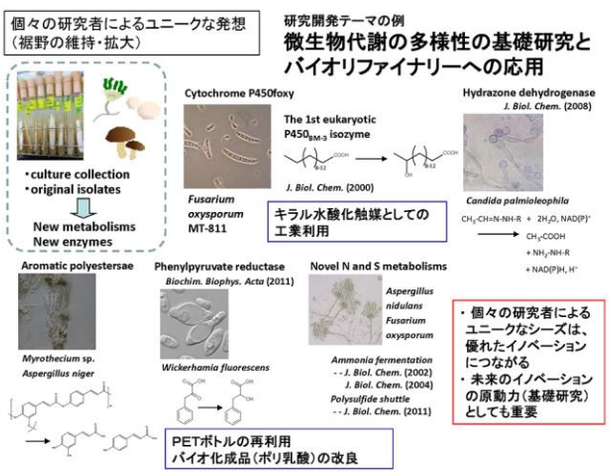
Q: いつも同じ研究者として苦しく思うのは、スクリーニングしてもその成果がなかなか市場に出ていかないこと。企業との橋渡しが必要。海外からいろいろな装置や試薬をたくさん買うが、日本の中から買えない。誰が悪いのかはよくわからないが。一生懸命スクリーニングした結果、おもしろい酵素が見つかって、これだけバリエーションがあって、と言っても、なかなかマーケットに出ていく橋渡しがうまく行っていないように思う。今のプラスチックの話についても、アウトプットのところを押さえていれば逆に良いが、研究費をつけて基礎研究側からだけ熱心にやっても、本当の市場のところまでたどり着かない現実があるような気がする。微生物の有用物質スクリーニングに関しては特にそう感じるがその点についてどうか。

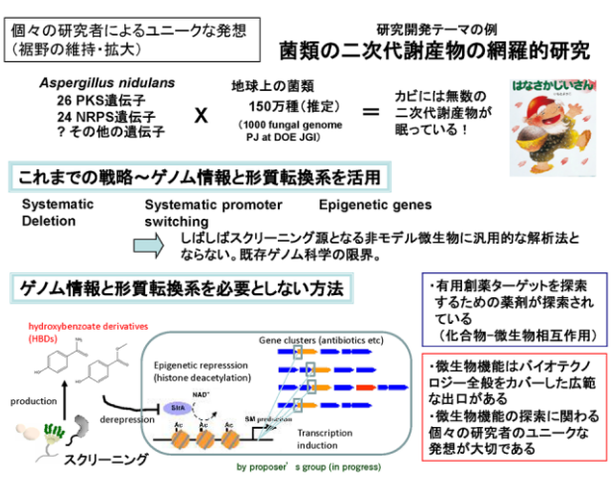
A: 現状はその通り。特に今紹介したプラスチックの場合は工学的あるいは化学的なところがアウトプットで、なおさら乖離は感じている。月並みではあるが本当に融合領域研究をしっかりとやらなくてはいけない。微生物が関わる酵素や材料などの分野が特に顕著かもしれないが、それだけ私たちの分野が、何もないところから新しいものを作る、そういうことが重要視されている分野である。例えば自動車とか薬を作ることについては、もう自動車の材料がある程度存在して、さらに改良するので、研究者側も企業のニーズがわかりやすい。薬も「こういう病気が治ったら嬉しい」というのは皆が考えるところ、それは狙っていきやすい。この分野は割と、余り企業がアイデアを出さない、アイデアを知りようがない、といったところが多い、だからなおさら融合してやることが重要と考えている。

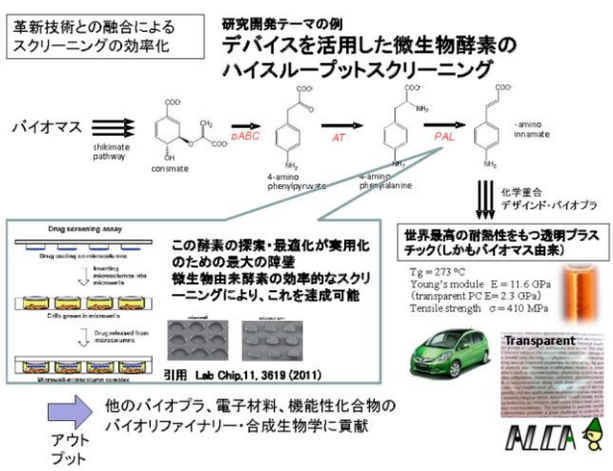
微生物機能の発掘・開拓の研究の概要～背景
現在
環境
食糧
生命
日本農芸化学会HP
エネルギー
生物資源
健 康
バイオテクノロジー
21世紀、微生物の機能を活用した技術が爆発！
2000
1900
1800
1600
紀元前
アミノ酸の発酵生産
抗生物質の発見
微生物の発見
酒造・醸造
世界最古のビール
遺伝子組換え
ゲノムの発展
青カビからペニシリンの発見
古代エジプトの壁画：ビール醸造
現状・問題点
・研究者の背景も扱う微生物も拡大
・個々の研究者の地道な努力に頼る面が大きい。
解決策
・微生物探索技術のブレイクスルー
・多様な微生物を俯瞰した学問・研究の取り組みによりイノベーションを


微生物機能の発掘・開拓の研究の概要～ポテンシャル
～生物資源の宝庫
～遺伝子資源の宝庫
真正細菌
真核生物
アーキア
納豆菌
大腸菌
動植物
酵母
全ての生物界に分布する微生物
筑波大ブランドの清酒「梅の華」
Uncharacterized
Poorly characterized
我々は、ごくわずかの生物しか知らない
99.999％の微生物は未同定
1種の微生物をとっても、
70%の遺伝子の機能は未知
モデル生物にとらわれない多様な生物を扱う
“微生物機能の発掘・開拓の研究”なしでは、人類による生命の「理解（バイオロジー）」と「利用（バイオテクノロジー）」は不可能！


微生物の機能の探索と利用の研究開発～トピック1
新たな微生物の探索（＝スクリーニング）が鍵を握っている
様々な微生物代謝産物
探索
新たな抗生物質・創薬
我が国の医薬品市場　4.5兆円
国民総医療費　36兆円
エバーメクチン
放線菌が生産
オンコセルカ症の特効薬
1年間で7000万人/年に投与
祝 ノーベル賞2015
スタチン
カビが生産
最も売れた薬
高脂血症治療薬
FK506
放線菌が生産
免疫抑制剤
酵素
我が国の酵素市場　430億円
世界の酵素市場　4,200億円
表 5.1　酵素の推定市場[1]
用途別項目　市場（億円）　世界　日本
食品用酵素　1,000　180
飼料用　〃　300　-
燃料用　〃　250　-
繊維用　〃　200　10
洗剤用　〃　700　60
医薬（バルク）用　〃　600　65
研究用　〃　500　55
診断用　〃　350　40
精密化学用　〃　100
その他　200　20
合計　4,200　430
日本酵素産業小史、p97, 2009.4


個々の研究者によるユニークな発想（裾野の維持・拡大）
研究開発テーマの例
微生物代謝の多様性の基礎研究とバイオリファイナリーへの応用
・culture collection
・original isolates
New metabolisms
New enzymes
Cytochrome P450foxy
The 1st eukaryotic P450BM-3 isozyme
J. Biol. Chem. (2000)
Fusarium oxysporum MT-811
キラル水酸化触媒としての工業利用
Hydrazone dehydrogenase
J. Biol. Chem. (2008)
Candida palmioleophila
Aromatic polyestersae
Myrothecium sp.
Aspergillus niger
Phenylpyruvate reductase
Biochim. Biophys. Acta (2011)
Wickerhamia fluorescens
Novel N and S metabolisms
Aspergillus nidulans
Fusarium oxysporum
Ammonia fermentation
- - J. Biol. Chem. (2002)
J. Biol. Chem. (2004)
Polysulfide shuttle
- - J. Biol. Chem. (2011)
PETボトルの再利用
バイオ化成品（ポリ乳酸）の改良
・個々の研究者によるユニークなシーズは、優れたイノベーションにつながる
・未来のイノベーションの原動力（基礎研究）としても重要


個々の研究者によるユニークな発想（裾野の維持・拡大）
研究開発テーマの例
菌類の二次代謝産物の網羅的研究
Aspergillus nidulans
26 PKS遺伝子
24 NRPS遺伝子
？その他の遺伝子
X
地球上の菌類
150万種（推定）
(1000 fungal genome PJ at DOE JGI)
＝
カビには無数の二次代謝産物が眠っている！
はなさかじいさん
これまでの戦略～ゲノム情報と形質転換系を活用
Systematic Deletion
Systematic promoter switching
Epigenetic genes
しばしばスクリーニング源となる非モデル微生物に汎用的な解析法とならない。既存ゲノム科学の限界。
ゲノム情報と形質転換系を必要としない方法
hydroxybenzoate derivatives (HBDs)
Epigenetic represssion (histone deacetylation)
Gene clusters (antibiotics etc)
production
derepression
Transcription induction
スクリーニング
by proposer' s group (in progress)
・有用創薬ターゲットを探索するための薬剤が探索されている（化合物−微生物相互作用）
・微生物機能はバイオテクノロジー全般をカバーした広範な出口がある
・微生物機能の探索に関わる個々の研究者のユニークな発想が大切である


革新技術との融合によるスクリーニングの効率化
研究開発テーマの例
デバイスを活用した微生物酵素のハイスループットスクリーニング
バイオマス
shikimate pathway
chorismate
pABC
AT
PAL
4-amino phenylpyruvate
4-amino phenylalanine
trans-4-amino cinnamate
化学重合
デザインド・バイオプラ
この酵素の探索・最適化が実用化のための最大の障壁
微生物由来酵素の効率的なスクリーニングにより、これを達成可能
引用 Lab Chip,11, 3619 (2011)
世界最高の耐熱性をもつ透明プラスチック（しかもバイオマス由来）
Tg = 273 ºC
Young's module E = 11.6 GPa
(transparent PC E= 2.3 GPa)
Tensile strength σ = 410 MPa
Transparent
アウトプット
他のバイオプラ、電子材料、機能性化合物のバイオリファイナリー・合成生物学に貢献

4-2-3-1-2「メタゲノムと分離・ゲノム解析から見えてきた土壌の窒素循環微生物の新たな姿と機能、その利用」
＜妹尾　啓史：東京大学大学院　農学生命科学研究科　教授＞

土壌微生物の解析と利用技術の例として、ここ数年進めてきた土壌の窒素循環微生物に関する研究内容－水田土壌の N_2O 消去微生物の特定・分離と、畑土壌からの N_2O 発生削減への応用－について紹介する。

水田土壌における N_2O 消去微生物の特定：N_2O（一酸化二窒素）ガスは、温室効果ガスの1つであり、オゾン層破壊作用も有する。日本の N_2O ガスの人為的な排出源の4分の1は農耕地土壌である。N_2O は農耕地に施用された肥料や作物の残渣に含まれる窒素が土壌微生物による形態変化を受ける過程で発生する。農耕地の中で、水田と畑では N_2O の発生の様子が全く違い、畑の方が多く発生する。例えばダイズ畑では開花・結実期に大量の N_2O 発生が観測されるが、水田からは年間を通じてほとんど発生が見られない。水田でも N_2O を生成する窒素変換反応は進行しているので、水田では N_2O を消去する微生物が活発と解釈できる。この、水田で N_2O を消去する微生物を、SIP 法、メタゲノムのアプローチで特定してきた。SIP 法では、^{13}C-炭素源を添加し、N_2O が N_2 に還元される活性を高める条件で土壌を培養した後、土壌 DNA を抽出して ^{13}C-DNA を解析した。すると *Herbaspirillum* 属や *Azospirillum* 属の脱窒細菌が N_2O を消去しているらしいことがわかった。この属は植物のエンドファイトとして、あるいは根圏で植物生育を促進する細菌としてよく見つかる分類群であった。

次に、水田土壌のメタゲノム解析を行ったところ、*Deltaproteobacteria* 綱という嫌気性細菌が含まれる微生物群グループが優占しており、その中で *Geobacter* 属や *Anaeromyxobacter* 属といった、鉄還元菌として有名な分類群が優占していることがわかった。N_2O は脱窒反応の中間産物として生成し、脱窒反応の最後のステップで N_2 ガスに還元消去される。そこで脱窒反応の各ステップの機能遺伝子をメタゲノムから抽出し、どのような微生物に由来しているのかを調べた。N_2O の生成には *Geobacter* 属、*Anaeromyxobacter* 属細菌が、N_2O の消去には、*Anaeromyxobacter* 属細菌が大きく関わっているらしいことが見えてきた。このうち *Anaeromyxobacter* は、脱窒の経路の上流は持たず、N_2O の生成や消去の酵素遺伝子だけ持っている「非典型的」脱窒菌であると報告されている。メタゲノム解析から *Anaeromyxobacter* が水田土壌で N_2O を N_2 に還元消去している可能性が高まったので、実際にこの菌を分離して直接的な証拠を得ることにした。*Anaeromyxobacter* 属の細菌を水田土壌から分離し、実験室の培養条件で N_2O を消費していることを証明した。

ところで、このメタゲノムデータに含まれる脱窒機能遺伝子の塩基配列に注目して見たところ、環境中の脱窒菌を検出するためにこれまでの世界中で使われてきた PCR プライマーでは検出できない配列が多いことに気がついた。そこで、ゲノムデータベースから脱窒の亜硝酸還元酵素の遺伝子配列を集めて改良プライマーを設計した。それを用いて、畑や水田、森林土壌、湖の底質について調べたところ、これまで考えられてきたよりもはるかに多様で多くの脱窒菌が存在していることがわかった。

水田土壌の脱窒菌の分離と畑土壌からの N_2O 発生削減への利用：上記の SIP 法で特定された、水田土壌で活発に機能している脱窒菌を分離し、N20 還元消去能力の高い菌株を探

索した。従来的な脱窒菌の分離方法で行うと、用いた培地で生育の早い菌が分離されるというバイアスがかかるので、新規なシングルセル（単一細胞）分離法を開発した。土壌に脱窒菌が利用する炭素源と硝酸、および細胞分裂阻害剤を添加して嫌気培養すると、脱窒菌は増殖するが分裂できずに伸長する。伸長細胞をマイクロマニピュレーターで１つずつ単離した。この方法により水田土壌で機能している多様な脱窒細菌を分離した。この中には *Herbaspirillum* 属や *Azospirillum* 属の脱窒細菌が多数含まれていた。

脱窒反応の最終産物は一般的に N_2O ガスと N_2 ガスの混合物であるが、分離菌株の解析から、菌株によって N_2O と N_2 の割合には大きな幅があることがわかった。N_2O 還元能力が高く、N_2 ガスのみを生成する菌株を使って、畑土壌からの N_2O 発生削減に応用できないかと考えた。現在、各種の成型有機質肥料が農業現場で多く使われているが、土壌に施用すると N_2O を発生する。成型有機質肥料に N_2O 還元能力の高い菌株を添加することで N_2O が削減できることを実験室レベルで示した。

上述のように、SIP 法により、水田土壌で N_2O を消去している微生物として *Azospirillum* 属、*Herbaspirillum* 属が見えてきた。また、シングルセル分離法によりこれらの属の脱窒細菌を分離した。*Azospirillum* 属や *Herbaspirillum* 属の細菌は植物生育促進微生物としてよく知られていることから、水田土壌からの分離菌株が植物生育促進作用を有するかどうかを調べた。その結果、いくつかの菌株はアカクローバーやチモシーの根に定着し植物の初期生育を促進することがわかった。さらに菌株の接種により植物生育促進と N_2O 発生削減の両方が実現できることをポット試験で確認した。根や根圏に定着した接種菌株が N_2O 消去にも機能していると考えられる。

一方、成型有機質からの N_2O 発生削減効果が高かった *Azoarcus* 属の菌株のゲノム解読から、脱窒菌として分離したこの菌株が、窒素固定遺伝子や植物根定着に必要なシグナル物質を合成する遺伝子も持っていることが分かった。実際、この菌株をイネの種子に接種して初期生育を調べると、確かに根に共生し生育促進していることが確認できた。微生物は土壌環境で様々な生活様式を行うための様々な機能を有しており、その発掘・利用は重要である。

現在、農林水産省のプロジェクトで、こうして見つけてきた優秀な菌株を用いて、作物生産性向上と N_2O 発生削減の両効果を有する微生物資材の実用化に向けた研究を進めているところである。

まとめ：土壌微生物は植物の機能を引き出し、植物は土壌微生物の機能を引き出す。メタゲノム解析は新規な機能微生物の候補を見出す出発点として強力であるが、候補となった微生物を分離・解析して「ウラを取る」ことが必須である。メタゲノム解析と一心同体であるデータベースの充実も重要であり、その意味でも分離解析は欠かせない。分離菌株を持っていることは、応用利用の観点からも強力である。

持続可能な農業を目指して、土壌微生物に由来する様々な現象のメカニズムを解明、診断、制御することが重要な課題である。日本には各都道府県に農業関係の試験研究機関があり、そこにはメカニズムを解明すると画期的な応用につながりそうな数多くの現象がある。例えば、窒素肥料を数十年間撒かないで作物を栽培してもある程度の収量をあげている圃場、数メートル範囲で野菜の土壌病害が出たり出なかったりする圃場などである。農

林水産省とはいろいろ壁があるのかもしれないが、連携してやっていければ日本の強みになるだろう。

【質疑】

Q: 土壌のメタゲノム解析は一時期とても流行したが、余りに多様性が高いので引いてしまったという側面もあるように思う。トレンドが去ったあとの動向はどうか。土壌のメタゲノム解析をしてわかること、研究を続けているグループ、課題などについて聞きたい。

A: データが膨大過ぎて、解析の部分が難しく論文もそれほど量産されない状況がある。シンプルでシャープなトピックを見つけて掘り下げることが大事である。メタゲノム解析は研究対象を見出す出発点としての意義が大きい。

Q: 畑と水田の N_2O の発生のグラフでそれぞれ 1 カ所ずつピークがあるが、どういうタイミングか。

A: ダイズは開花期から収穫期。水田は、田植え前の代掻き時 1 日だけ。

Q: 植物から共生菌に餌が提供されているとのことだが、コハク酸以外に何か餌になる化合物として想定されるものはあるか。

A: 炭素源利用プロファイルを調べていないので、はっきりわからないが、植物の根からは糖や有機酸、アミノ酸が放出されているのでそのうちの何かだろう。

Q: まさにその有機酸を知りたい。酢酸や酪酸を測定したことはあるか。

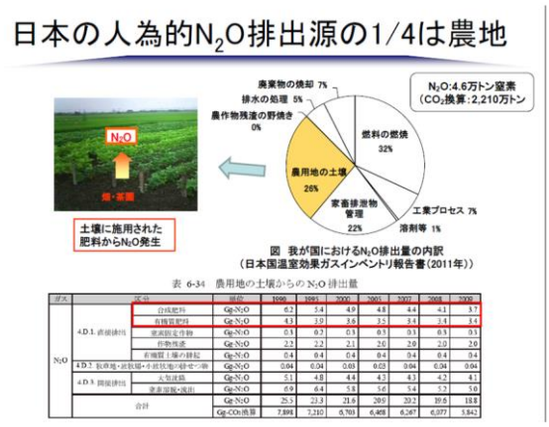
A: ない。

Q: データが多過ぎてなかなか解析し切れていないという状況は、日本独特のものか、それとも、世界的に環境メタゲノム全般で困っている問題なのか。

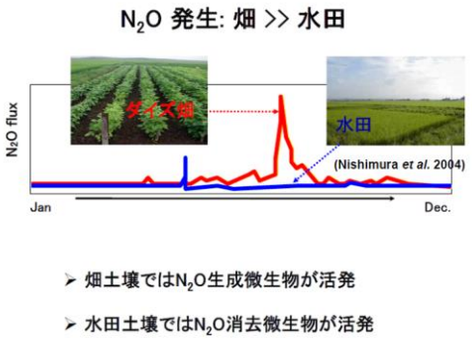
A: 世界的に共通だろう。

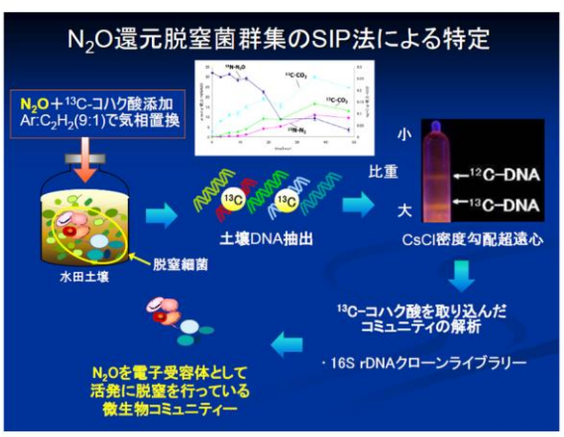
Q: 植物でもデータの解析がしきれないという話があり、日本ではインフォマティクスの部分が海外について行けていないという状況がある。データはあってもシャープな解析ができないというのが、ライフサイエンス全体の共通の問題なのかと思って聞いてみた。

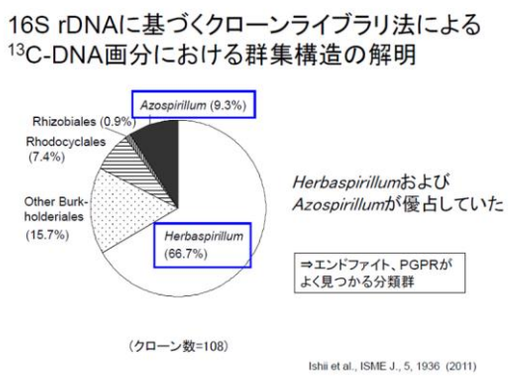
A: そういう意味では、多分共通だと思う。

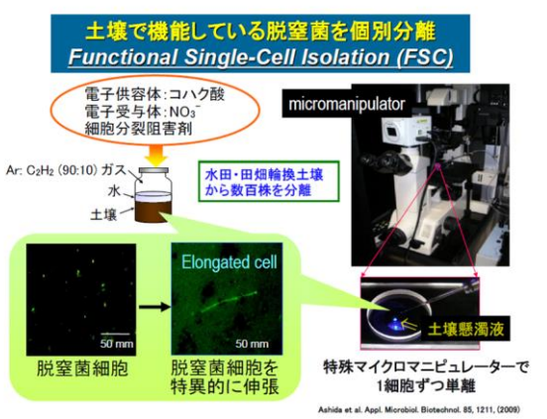


ガス	区分		単位	1990	1991	2000	2001	2007	2008	2009
N2O	4.D.1. 直接排出	合成肥料	Gg-N2O	6.2	5.4	4.9	4.8	4.4	4.1	3.7
		有機質肥料	Gg-N2O	4.3	3.9	3.6	3.5	3.4	3.4	3.4
		窒素固定作物	Gg-N2O	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
		作物残渣	Gg-N2O	2.2	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0
		有機質土壌の耕起	Gg-N2O	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	4.D.2. 放牧地・放牧場・小放牧地の排せつ物		Gg-N2O	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04
	4.D.3. 間接排出	大気沈降	Gg-N2O	5.1	4.8	4.4	4.3	4.3	4.2	4.1
		硝酸溶脱・流出	Gg-N2O	6.9	6.4	5.8	5.6	5.4	5.3	5.0
	合計		Gg-N2O	25.3	23.3	21.0	20.5	20.2	19.6	18.8
			Gg-CO2換算	7,894	7,210	6,703	6,488	6,347	6,077	5,842









4-2-2-1-3「微生物由来の次世代型有用天然化合物生産技術開発」
＜新家　一男：産業総合技術研究所　上級主任研究員＞

経済産業省（現在はAMEDに移管した）のプロジェクト、次世代化学研究組合の中で企業と連携し研究している。天然化合物の安定生産、および未利用生合成遺伝子クラスターを用いた新奇化合物の異種発現生産が最終目的である。これは5年間のプロジェクトで、これに先立ちNEDOで2年間、放線菌に限定して、40個程度の化合物について、異種発現生産をし、5 mg/L以上達成する目標のプロジェクトだった。実際には60個以上の化合物について検証した。今回の大村先生のノーベル賞受賞も放線菌由来の化合物である。

このプロジェクトによって洗い出された問題点について述べる。高いレベルでのゲノムの取り扱い技術の開発が重要で、今その解決に取り組んでいる。今、メタゲノムの話題があったが、私の話は微生物の二次代謝産物、しかも薬のような化合物に限定した話題であることに留意されたい。これは非常に重要なことで、いかにして有用遺伝子を探し出すかという点について特に強調したい。現状は、怪しい論文が非常に多く、報告されているプライマーを使って増幅しようとしても上手く行かない、全くヒットしない、ということがしばしばある。また、私たちは経済産業省系列の研究所なので実用化レベルでの技術である必要がある。生産性が高く、実際企業の現場で使える医薬品の原料生産のための異種ホスト発現系を確立しなくてはならない。

微生物の遺伝子を先にシーケンスで解読し、生合成遺伝子クラスタを単離して、ホスト（宿主生産菌）に入れて異種発現させる。ホストは、二次代謝産物の遺伝子だけを取り除いたエバメクチン生産菌を使う。ホストのみ培養して二次代謝産物を見てもピークはないが、遺伝子を導入すると化合物ピークが見える。このまま溶媒抽出すれば問題なくアッセイできる精製度で作れるシステムになっている。

先ほどの微生物のシーケンスにかかわる問題について、世界の動向について紹介する。これは2013年の論文で、活性汚泥で39日処理したものを使っている。2～4 Mbpの長さの遺伝子であればメタゲノムの解析でもつながるという報告だった。しかし私たちは大きい化合物をつくらなければいけない。化合物合成の遺伝子は、非常に相同性が高いモジュール、脂肪酸合成酵素と同様のものが何度も連続して現れる。これを単純にシーケンスすると、短い断片しか読めない場合は全く決まらない。つまり、先ほどの、2～4 Mbpの長さでは、私たちが目的とする医薬品を作るための二次代謝産物の遺伝子についてはほぼ解析不可能と解釈している。

実際に私たちもやってみたが、ゲノムサイズですら正確に出ない場合もある。これはある放線菌のゲノムの例だが、解析すると262個のスキャホールドに分かれる。エリスロマイシン（ポリケチド）などの化合物の生合成の遺伝子の領域を当てはめてみると、分断されている、つまり、遺伝子は全く読めていない。私たちは、MiseqとPacbioを使って、同じ放線菌のゲノムを決めたが、スキャホールド数2個で、ほぼ完全につなげることができた。ゲノムの決定をこのように念入りにやると、当初はスキャホールド数が多かったが、最近ではほぼ数個、10個以内で必ずおさまるようになった。ゲノムDNAの取得の実験操作が非常に重要なので、様々な菌株について条件を検討しなるべく断片化が起きないようにゲノムを調製する。

16SrRNA、単一の酵素の解析だけでは、二次代謝産物の遺伝子は明らかにできない。例えば石垣島と西表島で取れた新奇化合物が同一のもので、同じ菌由来かと予想したが遺伝子解析をすると全く違った。こういった例を見るとやはり微生物のフルシーケンスをするのは重要である。原核微生物の遺伝子発現はオペロンで制御されているので、私たちが扱うような化合物の遺伝子の大きさは、100～200 kbp になる。こういった長い単位で取らなくてはならない。オペロンの中で逆向きに入っていることもある。これを一つの制御系で動かさなくてはならないので、全体を一遍に取ってくる必要がある。これが、一つのプロモーター下に一つの遺伝子で動く真核生物や哺乳類とは違う点。私たちの研究室では、BAC ベクターを使って、200 kbp のライブラリーを作っている。いくつかの化合物生産の実績について紹介する、生産量が 100～400 μg/L を達成しているものもある。私たちが開発した工業生産株を使うと、アカデミアでは 1～4μg/L しか達成できない化合物で、40 mg/L 以上を達成している。それでも薬品になる量ではないのでさらに育種を必要とする。

ゲノムは非常にうまくとらなくてはいけない。群体ホヤのの共生微生物の例では、陸に上げるとほとんどゲノムが壊れている。BAC ライブラリーも短いインサートのものしか作れなかった。一応、目的とする化合物の狙いをつけて、クローニングし、プロモーターをつけて大腸菌に入れると一応作る。これをさらに放線菌で大量に作らせようとしている。例えば一つ上手く行った例を紹介するが、サンゴの遺伝子をコドン変換して放線菌をホストにして生産させると、200 mg/L 生産を達成し、改良を重ねて現在は 4 g/L 以上作ることができた。

ゲノムの分解について問題提起したい。土壌をいきなりゲルブロックに埋め込んで、ゲルの中で全部ゲノム単離などの操作をした。それを電気泳動にかけるとスメアな DNA がたくさん見える。しかしこれをもう一度分解して泳動するとほとんどいない。土壌そのものをサンプルにする場合、ほぼ全て死んでいるゲノム DNA ということになる。そこで、80 g の土壌からパーコールを使った遠心分離で菌だけ集めて BAC ライブラリを作った。この場合は、100、140 kb の長さのものができている。メタゲノムの中から微生物培養を介さず完全に未利用の遺伝子の確保に成功している。これを発現させるのはまだかなり難しいが、プロモーターを入れたりするなどして、順次生産できるか検証中である。

今、先ほどのキュアリングなどをすると、メタゲノムでも 200 キロ以上のものができるようになっています。

培養可能な微生物は完璧に読めるのでアノテーションも完璧にできる。メタゲノムのライブラリは、相同性の低い遺伝子の化合物をとってくるのはなかなか難しい。私たちは、BAC ライブラリーを作って、大腸菌に一回入れて集約する。もう一度これを混合培養し、BAC のミクスチャーを作ってシーケンスする。断片でもいいので完全に一致する配列がわかれば、それを使ってプライマーで遺伝子断片を取れる。今後、多種多様な化合物の遺伝子のスクリーニングができるのではないか。

【質疑】

Q: 土壌をブロックにして泳動をかけた件について、あの結果は、土壌は死菌や DNA が裸にある状態で、生きている菌は非常にわずかということか。

A: その通り。ただし、全部の菌が溶菌できているわけではないと考えられるので、これほど少ないとは完全に言い切れない。十分ゲノムがあるので、私たちはここからライブラリをつくろうとしたが全くできない。

Q: DNA や菌は、土壌粒子に結合するものやフリーでいるものがあるのでは。

A: 泳動で土壌からはがしている。
通常 1 グラムを使って微生物分離をやるが、土壌だと全く上手くいかなかった。そこで 80 g と大量の土壌を使って、BAC ライブラリが作れるくらいの微生物が収集できた。1 酵素で使うということであれば、短い断片で死菌由来でも使えるかもしれない。私たちの場合はどうしても大きい単位でとらなくてはいけないので、どうしても生菌の中にインタクトな状態のゲノムをとらなくてはいけない。

Q: 大変な労力とマンパワーがないと不可能な仕事と察する。最終的に BAC ライブラリーに入れられるので、二次代謝産物生合成の大きい遺伝子クラスターも使えるようになる。しかし、多くの研究室で BAC よりも短いものでしか作れない場合、遺伝子ソースが多様な生物由来なのでそれを切り貼りして、生産物がわかっていれば「多分そうだろう」と予想してパッチを組み合わせて行くのだが、問題点はないか。

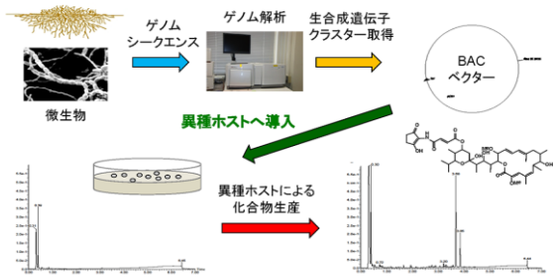
A: 当然、先ほどの type-Ⅱ PKS の場合は良いが、type-Ⅰ PKS の場合は非常に相同性が高いので、出芽酵母の相同組換えで結合させるというシステムは全く使えない。やはりまとめた単位で遺伝子をとらなくてはいけないという必要性から、BAC 技術を 4～5 年かけてここのレベルに上げてきた。

Q: 遺伝子合成技術も進歩しており、世界にさきがけて長い DNA が合成できるという日本人研究者がいるが、そういった技術を導入することはないのか。

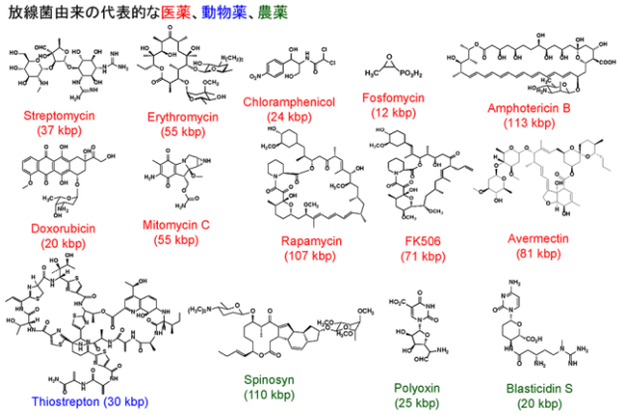
A: 放線菌、あるいは放線菌以外でも二次代謝の生合成遺伝子は GC 含量が高い。コドン変換で人工ゲノムの合成を頼んでも、保証されないレベルで、実際にエラーが出る、つなぎ合わせるのも難しい。保証しなくてもいいので合成を依頼するが、なかなか厳しい状況。4 つ程度の遺伝子ならば人工 DNA でできたこともあったが、type-Ⅰ PKS とか、遺伝子クラスターが大きくなるとやはり厳しい。

次世代型天然化合物ライブラリー生産技術

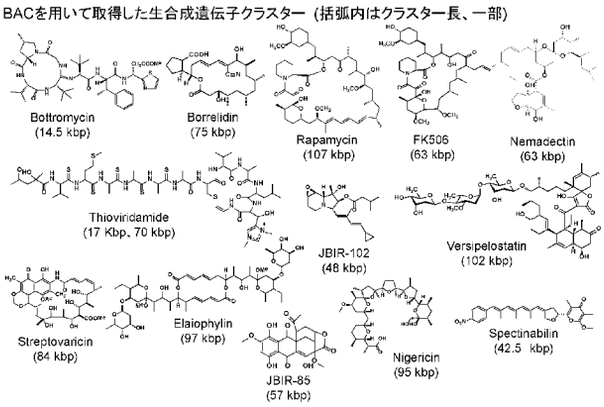
1. 生合成遺伝子を同定し取得する (メタゲノムの場合は、取得し同定する)
2. 生合成遺伝子クラスターの異種発現ホストへの導入
3. 生合成遺伝子クラスターの異種発現ホストでの発現誘導と物質生産
   (産業応用レベルでの生産)



放線菌由来の代表的な医薬、動物薬、農薬



BACを用いて取得した生合成遺伝子クラスター (括弧内はクラスター長、一部)



放線菌ゲノムの特徴

- GC含量が極めて高い (>70%)
  二次構造、三次構造を取りやすく、シークエンスなどが困難 (PCRすら走らない)
- 遺伝子の重複が多い (パラログ構造)
- 末端部分に有用物質生産に関与する生合成遺伝子クラスターが分布
  相同組み換えが頻繁、遺伝子が脱落しやすい反面、化合物の多様性を生んでいる

GCリッチ領域の増幅:
増幅させる目的の配列の中にGCリッチ領域があると、相補鎖が結合しやすくポリメラーゼが走りにくい

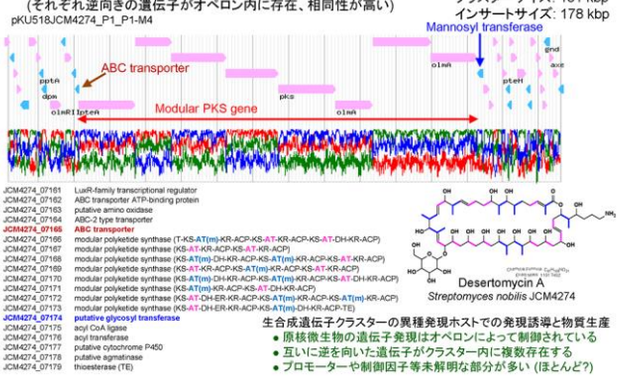
外注による放線菌ゲノム解析結果　　ゲノムサイズですら正確にならない

菌株名	#1	#2	#3	#4	#5	#6
総contig塩基数	7.5 Mbp	9.1 Mbp	7.0 Mbp	10.4 Mbp	15.9 Mbp	11.4 Mbp
最大contig長	43 kbp	40 kbp	39 kbp	890 kbp	443 kbp	362 kbp

一般的なシークエンス法では放線菌ゲノムの解析は極めて困難

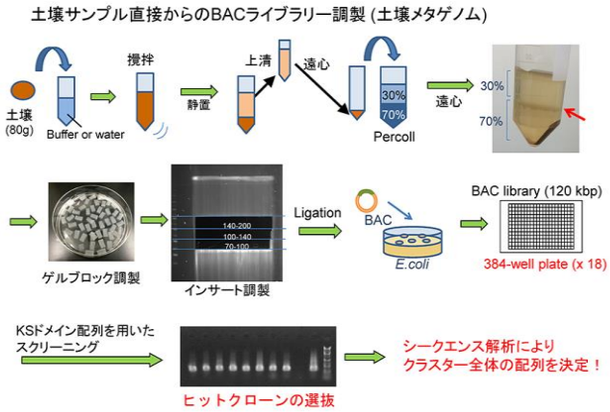
Type-I ポリケタイド生合成遺伝子はクラスターで取得しなければならない

Type-I ポリケタイド生合成経路によって生合成される化合物
(それぞれ逆向きの遺伝子がオペロン内に存在、相同性が高い)



生合成遺伝子クラスターの異種発現ホストでの発現誘導と物質生産
- 原核微生物の遺伝子発現はオペロンによって制御されている
- 互いに逆を向いた遺伝子がクラスター内に複数存在する
- プロモーターや制御因子等未解明な部分が多い (ほとんど?)

土壌サンプル直接からのBACライブラリー調製 (土壌メタゲノム)



4-2-3-1-4「植物共生細菌叢による物質循環の解明とその利用：ダイズ根粒菌とイネ根エンドファイト」
＜南澤　究：東北大学大学院　生命科学研究科　教授＞

農学という学問のイメージ図から紹介する。植物分野は盛んに研究がされているが、土壌微生物の関与はブラックボックスのままである。土壌微生物の変動法則を明らかにし、着目した形質の鍵となる微生物は何か、ひいてはそれらの人為的な制御を目指し、微生物に着目した農耕地生態系の理解から食料の持続的な生産などにつなげていきたい。

今日は2つの話題を紹介したい。1つ目は、イネのエンドファイト（内生菌）のメタゲノム解析についての話題である。窒素肥料量を変えてイネを栽培すると、マクロの外観上は差が大きくないが、通常施肥区と低窒素区の根の微生物叢が最も差が大きい。それについてメタゲノム解析をした。16SrRNA のクローンライブラリーの解析も行った。双方基本的に同じ結果で、低窒素条件のイネの根圏だけに特異的に増えてくる微生物集団の存在が示唆された。分類群的には、窒素固定やメタン酸化に関連する細菌群と予想された。

変動している微生物をピックアップしたところ、低窒素区では、メタンサイクルの酸化側が活性化され、メタン酸化細菌もメタン酸化遺伝子も多い。逆に通常施肥区では、メタン生成が多い。低窒素区では、微生物が作る植物ホルモン系の遺伝子も上がっていた。実験的にも確かに低窒素区ではメタン酸化活性が上昇しているという裏づけが取れた。

植物の根粒や菌根共生の植物側のシグナル伝達について概説する。共生のシグナルを受容してから共生を起こすまで CSP(Common Symbiosis Pathway)と言われる遺伝子群が働く。この CSP は、4 億年前から植物が進化させてきた微生物共生のための遺伝子で、この 10 年活発に研究されている。この中の鍵遺伝子 CCaMK はカルシウムオシレーションをデコードするタンパク質だが、その CCaMK の変異体を使って解析した。メタゲノム解析の結果からも低窒素条件で何か起こるという証拠を得たので、イネの CCaMK の遺伝子破壊変異体と野生型を比較した。両者で、通常区ではメタンの発生量に差はないが、低窒素区になると CCaMK 変異体ではメタン発生量が 2 倍上がった。2 年間同じ結果が出た。

水田でのメタン生成について概説する。メタン生成古細菌が土壌の有機物からメタンをつくり、できたメタンは植物の通気組織を通り、根と葉の間でメタン酸化菌によりメタン酸化を受ける。様々なファクターを比べて見た結果、根におけるメタン酸化が違うという結論になった。

低窒素環境でイネは窒素を必要としているからという仮説を立てた。^{15}N 自然存在比の測定および ^{15}N トレーサー実験を行ったところ、窒素固定をしている状況証拠が得られた。そこでイネの根から微生物細胞を単離し、メタゲノムデータを利用してメタプロテオーム解析を北大の先生と共同研究を行った。その結果、窒素固定酵素ニトロゲナーゼのタンパク質がメタン酸化菌の *Methylosinus* 属に出てきた。したがって、このメタン酸化菌がメタン酸化しながら窒素固定している可能性が出てきた。この菌は、イネ根の中心柱と表面に存在することが CARD-FISH 法で確認できた。

これまでをまとめると、低窒素条件では、イネの共生遺伝子依存的にメタン酸化と窒素固定がイネ根の共生細菌により行われる。細菌のコンソーシアムを形成していてメタン酸

化と窒素固定を役割分担しているのか、それとも単独の細菌が両方を担うのか、現在検証している。分離菌も取れつつある。

こういう研究がどう役に立つか、窒素投入量とイネ収量は比例するが、その直線の傾きは変えられない。メタン酸化窒素固定の活性は窒素をゼロにすると出て、窒素を与えると消える。窒素肥料を施用したときも、このメタン酸化窒素固定活性が出続けるようになれば、窒素施肥量と収量の傾きを変えられるかもしれない。

次は、ダイズ根粒菌の話をする。根粒菌の周りでは温室効果ガスの N_2O が出る。根粒菌の N_2O 還元酵素を活性化するとクリーンな N_2 を生成するので、根圏から出る N_2O が減らせる。メカニズムがある程度わかっているので、N_2O 還元酵素活性の高い根粒菌を、変異誘発プラスミドを使って作った。二成分制御系の遺伝子に関連する株が取れた、新奇の二成分制御系でメカニズムについても興味深いものである。農環研との共同研究で、圃場で検証したところ、収穫期あたりに N_2O のピークが 1 つ出る。この変異誘発プラスミドで作った nosZ++株を接種したところ、N_2O 発生が半減した。しかしこのときの根粒形成率は 30%ぐらい。70%は土着菌由来で、nosZ−、つまり、もっと接種率を高めればさらに発生する N_2O を減らすことができる。圃場での微生物の活用の際は、接種技術が非常に大事で、土着菌といかに戦うかが重要である。

一般的なメタゲノム解析を行うと情報の洪水になるので、自分が興味のあるゲノムに当てて知りたい情報だけを得る方法、つまり、土着菌と接種菌の迅速な識別法を開発中である。将来、農業試験場などでこういった評価ができるようになることを期待している。実際に N_2O 削減のために、現在北海道の農協と連携し、様々な圃場試験を展開中である。やはり土壌には土着の nosZ−根粒菌が多いので、nosZ++株を接種することにより N_2O を減らせるだろうと考えている。

難培養性の細菌をいかに培養するか、という点については粘り強く努力を続けている。いろいろ工夫すれば、培養できる場合もある。例えばダイズの茎で、根粒非着生ダイズ変異体では多く、根粒着生ダイズでは少ない菌を分離した。接種実験の結果、本菌はエンドファイトであることがわかった。しかしこの菌は継代中にときどき死ぬ。どういう性質を持っているかゲノムを調べたところ、リボソーム RNA 遺伝子が染色体になく、一番小さいプラスミドに存在していた。その後ダイズやイネでそういう菌がたくさんいることがわかり、これは植物の環境への適応の一つの形態ではないかと考えている。

最後に、学術的に未解明な部分について今後の展望を述べたい。微生物群集は、全体としてままだ十分に調べられてもおらず、アクセスもできない。オミックス解析は絶対に必要だが、機能未知の情報がそこから出てこないか、あるいは「培養するにはこうしたらいい」という情報が出てこないか。そういったことについて、自分のデータベースと大量のデータベースの間で迅速な比較がしたい。あとは、環境メタデータといろいろな場所でとったメタゲノムデータがどういう関係にあるかを大局的に見るネットワーク解析などの進捗を期待している。

【質疑】

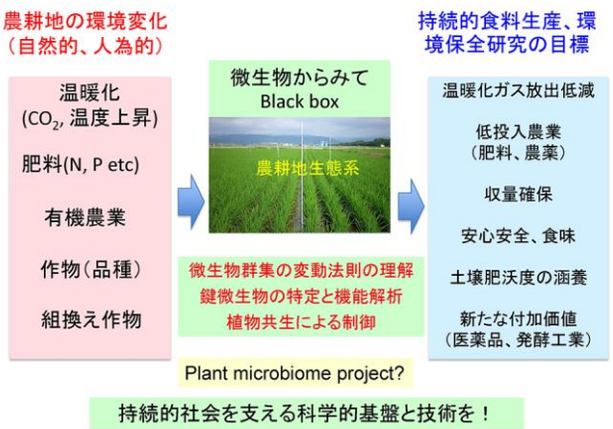
Q: プラスミド状態としてリボソーム RNA を持っているエンドファイトについて、それは植物にエンドファイトが接種されたときに、植物にプラスミド状態のものが移るといった現象は起こるのか。

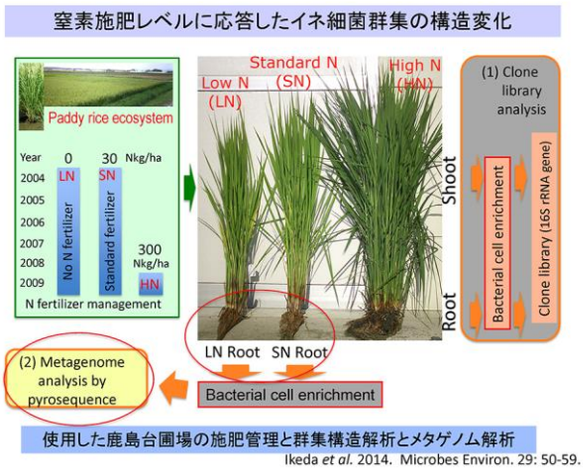
A: そういう観点で調べたことはないが、基本的にバクテリアのプラスミドなので、植物にそのまま移ることは考えにくい。染色体とプラスミド両方に rRNA 遺伝子があるバクテリアの存在については、これまでも報告があった。今回の発見の大事な点は、染色体に rRNA 遺伝子がないこと。染色体のように正確に分配されるところに、タンパク質合成装置の非常に重要な部分がない、というのが顕著な特徴で、それがたまたま入らない娘細胞ができたときには死滅する。しかし、プラスミドなので大量にコピー数を上げることができる。そのような生存戦略が植物体内という環境の中で生きる際には重要なのかもしれない。

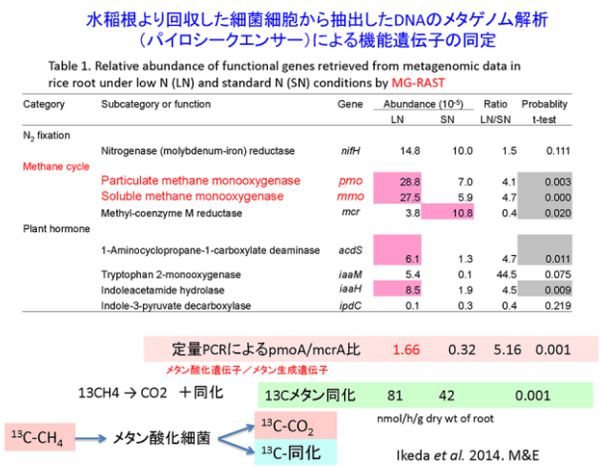
Q: いろいろなデータベースを解析するにはインフォマティクスの人材が必要とのことだが、現在、微生物を専門とするインフォマティシャンはなかなか増えてないのが実情である。私もいろいろなインフォマティシャンに微生物は非常に重要であり魅力的な対象と伝えてはいるが、なかなか伝わらない。どうやってインフォマティシャンを巻き込んでいくか、何かアイデアなどはあるか。

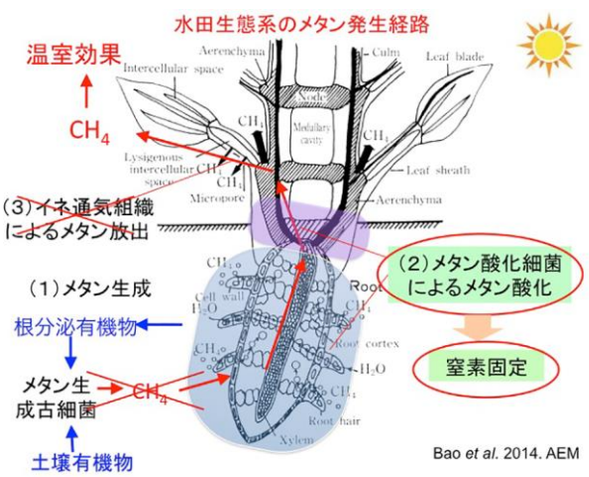
A: 「おもしろいから一緒にやろう」だけではうまくいかない、やはり、研究ポストや研究資金など先立つものがないといけないのだろう。何とかそういう人たちにも研究に参画してもらえるように、個人的にも努力するが、ネットワークのような組織として、動きがあると非常にありがたい。データはたくさんあるもののインフォマティクスの部分でお手上げの状況がある。おそらく、宝の持ち腐れで、例えば海外から「あなたの決めたゲノムの中にポリケタイドの非常におもしろい遺伝子がありますよ」と連絡が来るほど。分離菌があるのでそれでもう共同研究を始めている。植物と微生物、実は今まで研究成果は一つの大きなリソースである。しかし、それを私たちは本当にリソースとして生かせていないように思う。特にゲノムからどういう情報を抽出するかといったところが一番ネックになっている。

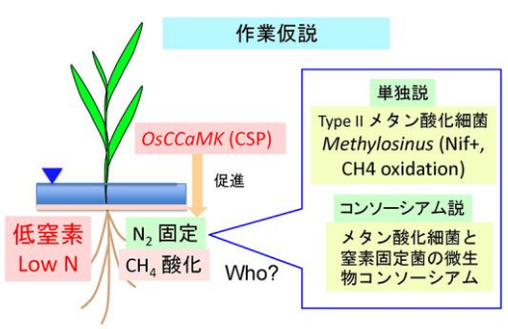
C: 今の件は非常に重要なことだと思う。バイオインフォマティクスのできる人材が日本には非常に少ない。中国やインドは非常に得意で、アメリカでもその 2 国の人たちが中心になってやっている。ということは、日本の大学自体にそういう研究室あるいは講座を作ることが一番大切なのではないか。もう一つ、各学会の中でそういう人を育てるという作業が必要と感じる。



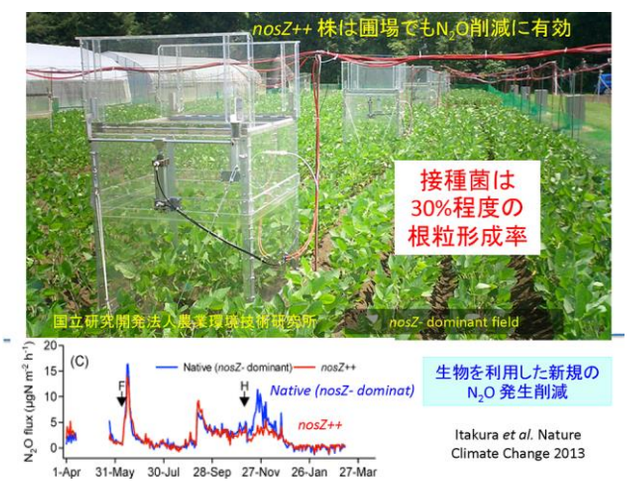








Question: 窒素固定を行っている細菌は誰か？



4-2-2-1-5「海洋生物の共生微生物　その発掘と応用展開：海洋環境からの有用資源のスクリーニングとそれをサポートする技術開発」
＜竹山　春子：早稲田大学　理工学術院　教授＞

研究対象は海洋だが、微生物を使うということに関しては海洋以外でも共通のトピックスとなりうる話題を紹介する。海洋自身は、日本が海洋国家であるところで海洋資源をどう使うか、その中に生物資源、いわゆる遺伝子資源をどう活用するかは長い間注目され研究開発も行われてきた。技術の発展とともに研究の方向性も変わる。海洋においては、難培養性微生物は全体の 99.9%と言われるので、ゲノムからのアプローチが進んでいる。次世代シーケンサー、遺伝子クローニング、遺伝子発現などなど、技術が進化すればするほど、5 年もしくは数年おきに手法やターゲットも変わりながら進んでいる。

海洋で特に注目されているのは、カイメンである。天然物化学、二次代謝産物のターゲットになっている。また、ヒトの腸内細菌も含め、魚、マウス、微生物、いろいろと研究を進めているが、脊椎動物と共生・共在している微生物の普遍性や差異などが見えてくることもある。無脊椎動物になると、自然免疫を持っており、微生物との密接な相互作用がある。現在では、カイメンが持っている二次代謝産物は微生物が作っていることが明らかになっている。

生合成クラスターの遺伝子の単離も盛んに行われている。カイメンの 40%は微生物なので絞れば微生物が濃縮した状態で取れる。また海水棲でなおかつ動物内にいるので、耐塩性など興味深い性質を持っている可能性が高い。カイメンは創薬のソースとしては王者と言われる。絞った液には必ず抗菌活性があるので、一時期カイメンを世界各地から採取してきて天然物アッセイをするといったアプローチも流行した。現在では新しいものが取れにくくなっており、さらにそれを改変、再度アレンジさせるなど、新しい方向になっている。現在サンゴもやっている。サンゴと褐虫藻との共生については白化現象などを通してよく知られているが、おそらく白化現象に微生物も関わり、ビタミンなどの低分子を供給していそうだ、という知見が出つつある。そのようにして、三者で相互作用があり遺伝子的に補完しながら生きている。

私たちの研究室でもメタゲノムをやってきたが苦労が多かった。精製後のライブラリー作成は困難、メタゲノムからは非常に興味深い配列が取れてくるものの、データを使ってくれる受け皿がない、といったことが苦しい。大腸菌内の発現による活性スクリーニングをし、シーケンスを読む機能ベースのアプローチも行っていた。工業的利用が期待される酵素の配列は、既知も新奇も両方出る。非常に大きな壁だったのは、明らかに有望な遺伝子配列があっても、大腸菌では発現しないことである。これはメタゲノムのせいか分子生物学的手法の問題かわからない。活性スクリーニングではその問題は回避されるが、メタゲノムのシーケンスだけをもとに実験を進めると発現しないというハードルがしばしばある。結局、多くの研究者がハイスループットのスクリーニングをやっているのが現状である。

メタゲノムは、コストが安くなってきたとは言え、それでも普通の研究室でやるには高い、またデータも膨大で解析が困難、といった理由から毎回はできない。さらに、難培養の微生物はどうしても培養できないことも多い。それで、興味ある遺伝子のクラスターが

一個の微生物に由来することを担保しながら実験できる系、つまり一細胞解析（シングルセル）へと移行した。

一細胞解析は、はじめはヒトの研究で始まったが、近年微生物でも論文数は増加の一途にある。ヨーロッパやアメリカ NIH で一細胞に関する大型プロジェクトが動き始めている。欧米のやり方は、まず技術を押さえ、その応用で様々な分野に展開する。なので、日本がその応用で出てきた装置を使うという構図になる。日本の場合、センターというものがなく、個々のラボレベルでやっている。それに比べ、各国にはセンターができており、例えばシングルセルの解析技術をやっている。その中で、一細胞解析の微生物版に関してはまだ勝算があり、勝負するなら今だと思う。

研究戦略として、超並列シングルセルゲノミクスを提案する。要するに 1 個ずつ精度良く決めて行く。そのためには超ハイスループットの解析技術が必要である。光を用いた非侵襲技術で、その微生物が何を作っているかをハイスループットで見えるようになっており、それは、一細胞レベルでも可能になりつつある。そこからどういう有用遺伝子クラスターあるか一個一個決めれば良い。

一細胞で全部配列を決めるので、データ量が膨大で、バイオインフォマティクスの力が必要になる。例えば 1,000 個の微生物について一細胞からゲノムやトランスクリプトームを決めたら膨大なデータ量になる。ビッグデータ解析とデータベースを作り、それらを基盤に、合成生物学に持っていけば良い。

海外とのコラボレーションで、二次代謝産物生産菌を一細胞解析レベルで同定した。糸状の形態をした微生物がカイメンの中にはたくさんいるが、二次代謝産物をどの菌が生産しているのかわからなかったのを、この方法で同定することができた。「Nature」に出て、「微生物ダークマターを知る」と紹介された。ラマン分光で、微生物を一細胞レベルで見ることができるようになってきたので、例えば糸状の微生物のうち、どれが生産しているかをラマン分光で調べた上で、1 個をピックアップして遺伝子解析するという自動化もできるようになった。ここで有望な技術としては、マイクロドロップレットである。ピコリットルレベルの小さなドロップレット（液滴）をつくり、その中に細胞を入れ、その中で DNA を増幅し、次世代シーケンサーで遺伝子配列を決める。コンタミネーションを減らせるのと、遺伝子のカバレッジが高い。ジャンクションを作って試薬を混ぜていくということもできる。嫌気性の微生物の培養などにも使っており、非常に有望である。

現在、超スループットをやろうと思ったら、ドロップレットの時代になっている。メタゲノムのスクリーニングに関しても可能である。現在は私たちの研究室が個別に無償で装置を貸しているが、将来的には産学連携体制の整備やセンター化などで、テクノロジーのボトムアップになることを期待している。

【質疑】

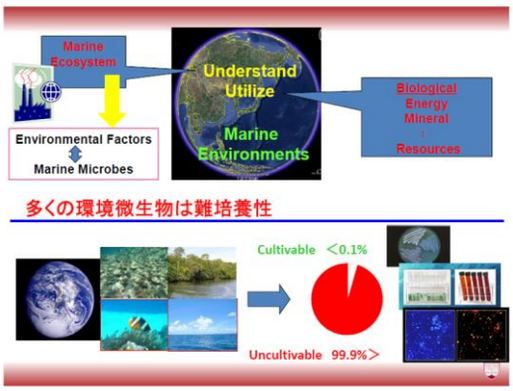
Q: データの共有について聞きたい。データが大量に出てくるが、微生物以外の分野だと、バイオリソースとして集約し、使える仕組みを整備する方向にある、メタボロームについても国際的にデータ集約をしてメタバンクを作っている、と聞く。微生物の環境データのようなものについては、ネットワークを作りデータを集約して、同じことを 2 回やらないですむような取り組みはないのか。

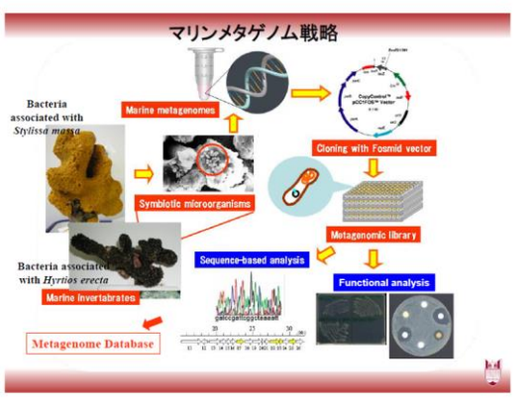
A: CREST で海洋が動いており、その中で珊瑚礁をやっているが、膨大な環境微生物データが出てくる。CREST 内で連携してデータベースをつくろうという動きはある。海洋、水圏だと土壌と少し違うので。ただ、CREST の成果といってそういうデータベースを作ったとしても、その後どうするか、誰が維持管理するのか、というところで話が止まっている。国ベースでどうするかと言う方針が必要。国内だけで維持し誰も使ってくれないとなると死蔵になるものの、海外までオープンにすると大事なところだけ持っていかれることも危惧されるので難しい。海洋微生物についてはやることは決まっているが、他の生物種とのリンケージをどうするかは、それこそ JST や国立遺伝研といった大きい機関と連携して、日本の生物データをどうしていくかは議論が必要。

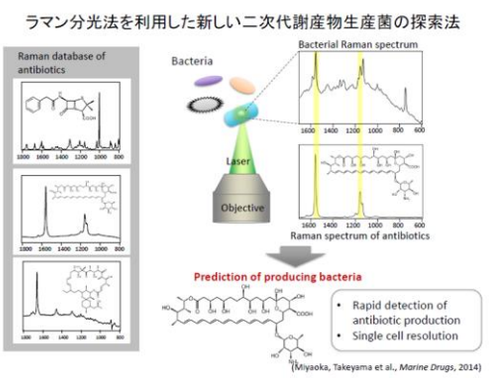
Q: その議論と合わせて、データベースを作る側は、データベースを作って一安心してしまうので、どうやって使うかまでケアする構造で最初のスタートのところだけも作ればよいのではないか。その後そこが中核になって広めていくようなシステムを作っていかなくてはいけないのだろう。

A: おそらくゲノムだけでなくカルチャーコレクションも同じことが起こっている。文部科学省の理化学研究所系と、経済産業省の産業総合研究所系、それぞれ別にカルチャーコレクションとがある。その中で、どうしたらカルチャーコレクションを有効活用してもらるか話し合ってはいるが、バクテリアの遺伝子まで読んでデータを作る、という話まで出ている。それはちょっとおかしいと思う。その轍を踏まないよう、遺伝子情報と生物のリソーシズを国策としてどう担保していくかを考えるべきである。
アメリカはやはり強く、微生物は各クラスターで代表種のゲノムを全部決めることを 10 数年前にやっている。中国も、次世代シーケンサーを大量導入してとにかく配列を決定している。質の良いものをどう出すか、どうやって使っていくかは、十分に議論した上で国としての方策を出す必要がある。

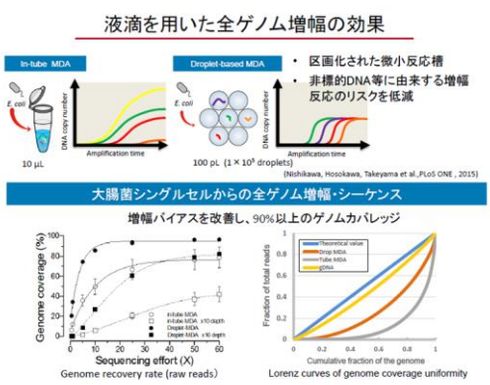
マリンバイオテクノロジー
Culture Collection
Compound
Gene
Protein
Symbiotic microbes
DHA/EPA
carotenoid
Polysaccharide
Bioactive substances
Bioenergy oil
etc
Stress- tolerance genes
Second metabolite
synthesis genes
Enzyme gene etc
Catalytic enzyme
etc
Food, Supplement
Medicine, Energy
Enzyme


Marine
Ecosystem
Understand
Utilize
Marine
Environments
Biological
Energy
Mineral
Resources
Environmental Factors
Marine Microbes
多くの環境微生物は難培養性
Cultivable ＜0.1%
Uncultivable 99.9%＞

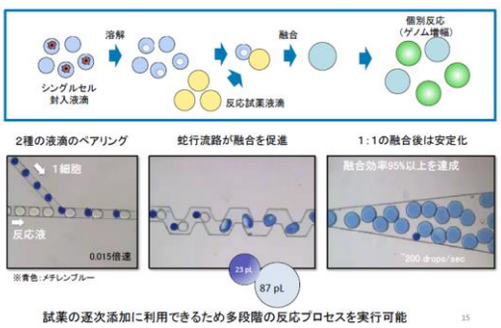

マリンメタゲノム戦略
Bacteria
associated with
Stylissa massa
Marine metagenomes
Cloning with Fosmid vector
Symbiotic microorganisms
Metagenomic library
Sequence-based analysis
Functional analysis
Bacteria associated
with Hyrtios erecta
Marine invertabrates
Metagenome Database


ラマン分光法を利用した新しい二次代謝産物生産菌の探索法
Raman database of
antibiotics
Bacteria
Bacterial Raman spectrum
Laser
Objective
Raman spectrum of antibiotics
Prediction of producing bacteria
Rapid detection of
antibiotic production
Single cell resolution
(Miyaoka, Takeyama et al., Marine Drugs, 2014)

シングルセル解析支援ツール
・分取 (1細胞単離)
・増感 (遺伝子増幅)
・計測 (シーケンシング)
ハイスループット解析に向けたツール
フローサイトメトリー
Fluidigm C1 システム
ラボオートメーション
(分注マシン)
NGS
分取
分取・増感
増感
計測
クリーンルーム

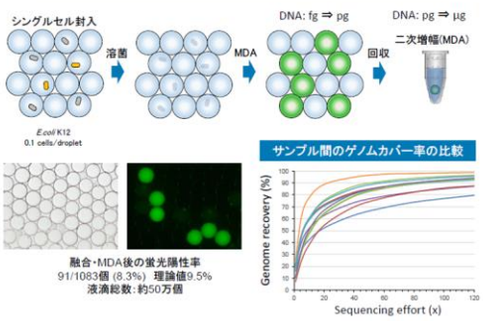

液滴を用いた全ゲノム増幅の効果
In-tube MDA
Droplet-based MDA
・区画化された微小反応槽
・非標的DNA等に由来する増幅
反応のリスクを低減
10 μL
100 pL (1 × 10⁵ droplets)
(Nishikawa, Hosokawa, Takeyama et al.,PLoS ONE , 2015)
大腸菌シングルセルからの全ゲノム増幅・シーケンス
増幅バイアスを改善し、90%以上のゲノムカバレッジ
Genome coverage (%)
Sequencing effort (X)
Genome recovery rate (raw reads)
Fraction of total reads
Cumulative fraction of the genome
Lorenz curves of genome coverage uniformity

液滴融合条件の最適化



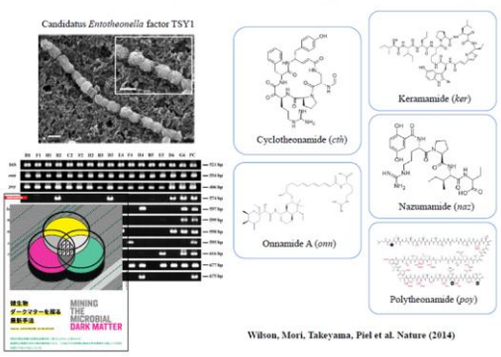
試薬の逐次添加に利用できるため多段階の反応プロセスを実行可能

液滴から得られたシングルセルゲノム増幅産物の評価



融合・MDA後の蛍光陽性率
91/1083個（8.3%）理論値9.5%
液滴総数：約50万個

シングルセル解析による二次代謝産物産生菌の同定



Wilson, Mori, Takeyama, Piel et al. Nature (2014)

4．ワークショップ報告

4-2-3-2 セッション 2「NGS、インフォマティクス、メタボローム、バイオリソースの最前線」

4-2-3-2-1「NGS とインフォマティクスの最前線と今後の課題」
＜岩崎　渉:東京大学大学院　理学系研究科　生物科学専攻　准教授＞

バイオインフォマティクスは、ゲノミクス分野に代表される網羅的なデータの増加に対応する形で生まれ、発展してきた分野である。様々な生物のゲノムが解読されると、例えばゲノム同士を比較することで、様々な代謝系がどのようにして獲得されてきたか、新たな微生物機能がどうやって生じたか、生命の基盤であるゲノムの進化の歴史を辿ることができる。一方、配列データに限らず、例えば画像や動画データといった生物データを解析する研究も広くバイオインフォマティクスに含まれる。

バイオインフォマティクスの研究例をいくつか紹介する。例えばこのソフトウェアは、メダカを水槽の上から撮った動画から、個体それぞれの動きをトラッキングできる。様々な変異体の行動異常が、スピードの変化によって生じているのか、それとも反応速度やコミュニケーションの変化によって生じているのか、といった細かい観点からも定量的に評価が可能になる。また例えば、生物多様性を理解するためのバイオインフォマティクスについては、こういった土壌の微生物のメタゲノム研究がある。最近では環境 DNA の研究も進み、環境サンプルに含まれる大型生物の DNA を解析することで、バケツ 1 杯の水からその水域に棲んでいる魚の種類がわかる、そういった技術が発達している。

バイオインフォマティクスでもう一つ重要なのは、データベースを構築して公開しそれを維持していくことである。今のライフサイエンス研究はデータベースなしでは全く進まない。私たちの研究室でも、魚のミトコンドリアゲノムのデータベースとメタゲノムのデータベースを構築して維持している。データは膨大に出るが、論文が出た後にそのデータが再利用されないケースは非常に多い。こういったデータの再利用性を高めるためには、例えば、データにきちんとしたアノテーションを付して提供していく必要がある。

現在バイオインフォマティクスが直面している最も大きな問題はデータの増大であり、中でも一番大きなデータの増加を示しているのがいわゆる NGS、次世代シーケンサーからのデータになる。今年度世話人をした、NGS 現場の会について紹介する。こちらはいわゆる学会ではないが、参加者が産学官から 707 名あり、学会並みの規模と言って良い。次世代シーケンサーはこれだけ注目が急速に集まっている技術である。

DNA シーケンサーの技術革新について述べる。各社様々な機種を発売しており、様々なタイプの研究に使われているが、全部輸入品である点は極めて残念である。この 15 年で、遺伝子シーケンスにかかるコストは大きく下落した。このスピードは、いわゆるムーアの法則で半導体の価格が下がるスピードを大幅に上回る。つまりデータの増える速度が速すぎて、コンピュータの進歩の速度が追いつかない状況にある。今後は、こういった状況に対応するための新しい解析用アルゴリズム研究が必要になってくる。

この急進の理由は、やはり市場からの強いニーズがあるからである。各病院にまで次世代シーケンサーが導入されようとしている。アカデミアのニーズとは別に、企業が猛烈な勢いで開発投資をするので伸びていく。この流れはしばらく継続するということを前提に、研究開発の戦略を立てていかなければならない。

情報技術についての最近のブレークスルーとしては、人工知能、機械学習と呼ばれる技術が挙げられる。例えば、電王戦でコンピュータがプロの棋士に勝った、米国のクイズ番組でコンピュータがクイズ王に勝った、といったニュースが最近あったが、これらは 20 年前には不可能だと予想されていたものである。20 年後を予測することがいかに難しいかという好例だが、そのような勢いで進歩している。またさらには、最近様々な産業分野で注目されているディープラーニングといった技術がある。これらの技術は、データ量の増加に伴い、量が質に転化されるという特徴を持つ。

ライフサイエンスの大量データを扱うバイオインフォマティクス領域が、国内外でどういう状況にあるかを説明する。書誌情報解析で国別比較を行うと、バイオインフォマティクスでは、世界のトップを走っているのは米国で、データの増大とバイオインフォマティクスの進歩に合わせ論文数が増えている。中国も同様である。この 2 国はバイオインフォマティクスへの研究投資も増えた。残念ながら我が国はヒトゲノム計画終了後の伸びが弱く大きな差をつけられており、なかなかキャッチアップできていない状況である。例えば米国だと各ラボに 1 人バイオインフォマティクスの人材がいるといった状況も珍しくなく、また、中国では、大量のバイオインフォマティクス研究者を擁する中心的な機関が存在しており、アジアの作物のゲノム解析などを精力的に進めている。JST のバイオサイエンスデータベースセンターからもバイオインフォマティクス人材の不足についての報告がある。

こういった状況で、今後何が起こるか、何が必要になってくるか。ゲノム、メタボローム、プロテオーム、といったオミックスデータが増加する。特に、今回のテーマである共生系についても今後多くのデータが出てくることは間違いない。それを見越して、どんな情報技術が必要か。どういう環境条件でどういう微生物がいるときに宿主（植物）がどうなるか、それらの関係を相関解析でひもといていくことになるだろう。例えば耕作不適地において農業生産を行うにはどのように微生物を制御すればよいか。あるいは植物の微生物に対する選択性や嗜好、病原微生物への対応、それらを大きなデータの中からマイニングしていくことが必要になる。

新しいタイプの代謝系をもった微生物がどういった状況で生まれてくるか、進化的な起源についても研究していくことが、中長期的に見たときに非常に大事になるだろう。私たちは、多様な生物がいかにして新しいシステムや機能を獲得するのかに非常に興味をもっており、根粒遺伝子がどのようにして生まれたかに関してゲノムデータを使って考察する研究を行っている。

バイオインフォマティクスが直面する課題を 2 つ挙げる。一つ目は、大量のデータから相関関係は確かにわかるが、因果関係がなかなかわからないことである。ビッグデータの中から相関関係を超えて因果関係にどう結びつけるかは、情報科学的にも困難がある大きな課題である。こういった技術をつくらなければ、複合系の非常に巨大なデータを微生物叢の制御に応用しようとしてもうまく機能しない。医療分野のオミックスでも同様であり、がんをどう制御するか、といった部分にこの因果関係をひもとくための情報技術が必要になるだろう。

もう一つバイオインフォマティクスの課題としては、機能未知遺伝子の多さである。現在、メタゲノムをやると半分以上は機能未知遺伝子で、そこで解析が終わることになり、

膨大な配列データが宝の持ち腐れになっている。この機能未知遺伝子の機能を推定するための情報技術が必要である。機能未知遺伝子の機能を知るには分離培養が必要になる。こういった膨大なデータを、いかにシステマティックな分離培養に応用するかが大事である。

データベースの開発と維持について説明する。例えば iPS 細胞は ES 細胞の発現のデータベースから因子が発見された。そのような応用が可能になるよう、データを取って論文を書いて終わりなのではなく、他の研究者が再利用できるような形で、データベースの開発と維持をするのが重要である。

さらに、新しい計測技術について説明する。一細胞解析もあるが、やはり複雑な系なのでパラメータは多数となり、それに合わせてデータはさらに大量に必要になる。これは統計学では「次元の呪い」と言われるが、解析コストは依然としてさらに安くしていく必要がある。また、表現型の定量については、画像解析も大事になるだろう。

今後の動向について述べる。計測技術と情報技術は、市場のニーズがあるので、どちらも伸びていくことは確実である。その中で、いかに技術を先回りして作っていくかが大事と考えている。

【質疑】

Q: 機能未知のものはそもそも難しいが、まず反応が見える系で、反応を担う遺伝子を知りたいときに、インフォマティクスが使えないか。遺伝子配列だけではなくタンパク質の形、構造予測なども可能と思うがそういった方向性はないか。生合成の研究では、例えば嫌気でないと反応しないとかいったことが多く起こる。いきなり遺伝子をとってきて、発現させて何かするというのは不可能に近いと思っている。例えば、産業利用の可能な、興味のある反応をまずターゲットにし、その責任遺伝子を探すというインフォマティクスの方向性はないか。

A: まさにある。ある反応を起こす遺伝子が存在するはずだが、どこにあってどの生物が担っているかわからない場合、ゲノムデータや、特に今後リード長が長くなることでメタゲノムデータからも、どの遺伝子とどの遺伝子が隣り合うか、クラスターを作っているかという情報がとれるようになる。いろいろな状況証拠をかき集めて、いかに素早く遺伝子の機能まで辿り着くか、そういったアプローチになると考えている。

Q: 恐らく現状可能なのは、P450 とか、そのあたりに限られるだろう。アカデミアは、今までにないような反応を持ち寄り、「どの遺伝子か」をやるのが面白いのではないか。

Q: バイオインフォマティクスの国際動向で、3 つの国の比較データに関連し、最近国大協のシンクタンクから出た日本の科学技術政策と大学の基礎研究についてのレポートを思い出したのでコメントしたい。ここ 10 年、中国やアメリカは伸びているが日本の科学技術は伸びていないという内容だった。しかし、総合科学技術政策を 5 年 1 期ごとにつくり、金額の投入目標 25 兆円、10 年 2 期で 50 兆円投資し、他分野に比べれば景気が悪い中でも手厚く支援があったはずなのに、その状況というのは深刻だ。そこで聞きたいのは、バイオインフォマティクスの分野も他の分野と同様に論文数が低迷しているのか、あるいはバイオインフォマティクスの分野が特に低迷しているのか。あるいはバイオインフォマティクスのところが追いついていないせいで、大量の情報を使いこなせず、それがボトルネックになって他の分野も全体として頭打ちでこの 10 年

全体的に伸びていないということなのか。それをふまえて、日本でどのような科学技術政策をやるか少し真面目に考える必要があるという印象を持った。

A: 確かに、分野を問わず全体的に日本からの論文数が頭打ちの傾向にあるということは聞いている。その時期とバイオインフォマティクスが盛り上がった時期がぶつかったのは不幸だったと言えるかもしれない。例えば高度経済成長期には様々な研究センターができたようだが、今の日本ではなかなか難しいのだろう。JST がバイオデータベースセンターを作っているが、そこにもテニュアのスタッフはほとんどいないと聞いている。一方アメリカは正規職員の数が 100 人を超える規模のデータベースセンターで運用しているので、かなり状況は厳しい。こういった弱さは、長い時間をかけてボディブローのように効いてくるのではないだろうか。バイオインフォマティクスは多様な分野で必要となるが、学生がバイオインフォマティクスに接する機会も少ない。この 10 年間、こういった負のスパイラルのようなことが起きてしまったが、これを止めることが必要となる。

Q: バイオインフォマティシャンがというよりは、情報系の分野は日本もそこそこ大きいが、情報系の多数ある分野の中で「”バイオ”インフォマティクス」に行かない。情報系の企業の方が就職が良いとか給料が良いということで、そちらに行く。ある意味、インフォマティクスをやれる人はいるはずなのに、「バイオ」とつくところにいかない。それはなぜだと思うか。

A: 私たちも今、全体の大きな流れに対しては微々たる影響しかないが、頑張って人材育成を行っている。確かに、バイオインフォマティクスを学んだ上でかならずしもバイオとは関係の無い企業に就職する学生もかなり多い。魅力的な待遇を提示する企業も少なくない。これは、バイオインフォマティクスの経験者が様々な場面で高く評価されているということでもあり、必ずしもバイオに限らずきちんと産業に役立つ人材を育てているという意味で、私たちとしてはポジティブに捉えている。それでもやはり、バイオ分野や大学から離れてしまうことは残念であり、そこには待遇の差も関わっているだろう。

Q: アカデミアだと評価の基準は論文になるが、インフォマティクスではアクセス数が基準になるという慣例や傾向はないか。

A: もちろん、そういう傾向もある。ただし、アクセス数などで評価しても日本が非常に厳しい状況であることに変わりはない。

バイオインフォマティクスの広がり

データベース開発・維持による研究基盤構築

- 魚類ミトゲノムDB MitoFish・メタゲノムDB MetaMetaDB
- 増大したデータの質の維持と整理
  - アノテーションを付して整理
  - 非典型的配列構造やメタデータ
- 国内外の研究機関や試験場等で活用
  - 年間3万件以上のアクセス

- Iwasaki, Fukunaga, Isagozawa, Yamada, Maeda, Satoh, Sado, Mabuchi, Takeshima, Miya, and Nishida. *Mol. Biol. Evol.* (2013)
- Yang and Iwasaki. PLOS ONE. (2014)

5

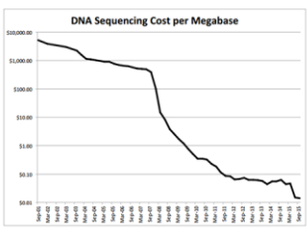
国内外の動向

DNAシーケンサの技術革新

1文字あたり1円

10年で
10万倍

10万文字あたり1円



ムーアの法則（コンピュータ業界）より速い伸び
市場からの強いニーズあり → 企業の研究開発投資続く

9

4-2-3-2-2「データ駆動型アプローチによる共生エコシステム反応場の評価」
＜菊地　淳:理化学研究所　環境資源化学研究センター　チームリーダー＞

(はじめに)

私からは、バイオというよりは、ケモメトリクスあるいはケモインフォマティクスの部分について紹介する。あくまでも個人的な印象だが、ケモメトリクスあるいはケモインフォマティクスに意欲的に取り組む学生はいる。どんどん勉強するので、むしろ私が知らないようなことを教えてくれる場合もある。もう一つ学生が意欲的に取り組む要因としては、分析機から出てくるデータを数値的に扱うので、バイオだけでなく医学系にも適応可能で、就職時に有利ということもあるかもしれない。

今日のテーマは、分析機から出てくるデータをデータドライビングサイエンスとして扱うところ。既存のサイエンスは、問題に対して仮説を構築し、それを検証していく仮説駆動型である。データドライビングサイエンスは、まずいきなりデータを取り、主成分分析などをやることで違いを特徴づけ、例えば病気のバイオマーカーを見つけていく、といったやり方である。また、その過程で新しい発見をして、さらに新しい課題を設定することもできる。例えばヒトの健康（すなわち宿主の状態）というのは食べ物などの影響で常に時系列で動いている。ヒトを植物に、食べ物を肥料あるいは共生微生物に置き換えても良い。ヒトの健康は、例えば暴飲暴食を繰り返していると生活習慣病になってしまう、その前に状態を検知して原因となるところを抑えれば良い。

これは作物や養殖魚などに関しても同様である。ホメオスタシスを評価しつつある程度宿主を健常な状態に保つことができれば良い。あるいは対象をさらに広げ、農場や環境についてもその状態を評価し、例えば人間が窒素を垂れ流すと汚れていくが、それに途中で検知することができれば対応も可能である。そういったことをデータドライビングサイエンスで行いたい、この状態を分析機から出てくるデータで評価したい、それが私が今日提供する話題である。

方法論として、とにかく何でも計測して、健常か異常かを特徴づけられれば良い。計測は、仮説駆動型とデータ駆動型でやり方が大きく違う。例えば、ビタミンやカロチノイドが健康に良さそうだとしてその成分だけに着目する分析法が、仮説駆動型である。一方で、データ駆動型の計測は、分析機から出てくる measurable なデータは全部取ってきて、これを多検体サンプルで扱い、データマトリックスにし、主成分分析などの手法で特徴づけていく。

データ駆動型の計測に要求される分析機の性能としては、試料調製が簡単なこと、多検体の処理が高速でできること、加えて計測にかかるランニングコストが安いこと。データの定量性は、相対的な定量性があれば後の解析の信頼性は十分担保される。ただしダイナミックレンジが広く網羅性があることが重要である。データベース上での比較ができるように、データの互換性がある分析機で取れればより望ましい。また構造の同定能があることも重要である。

遺伝子からさまざまな化合物あるいは高分子の物質に至る流れを考えてみる。次世代シーケンサーは、16SrRNA による微生物叢の全体像把握、RNAseq による転写量予測など、様々な要求を満たす。これまであまり話題に出てこなかった、元素、金属について述べる。

これは ICP-OES を使うと非常に安く、しかも大量に計測データを出すことができる。メタボロームという概念でもっとも汎用されているのが、GC-MS、LC-MS に対し、これは XC-MS と言われたりしている。核磁気共鳴装置（NMR）による分析は、低分子の代謝物だけでなく、バイオマスや高分子の物質が使えることも大きな特徴である。試料調製も簡単で多検体の処理ができる。ただ、最大の問題点は、感度が低いことである。これまで話題に出てきた二次代謝産物などは、かなり濃縮しないと見えない。こうした機器群から出るビッグデータを用いて、マルチオミックス的に環境を評価していくというスタンスで研究を行っている。

（環境微生物代謝機能のデータ駆動型評価）

最初に扱ったのが、腸内細菌の系である。幸いにして Nature の共著に入れてもらったが、腸内細菌から作る物質群を NMR で代謝プロファイリングしていった。例えば、よく効くビフィズス菌と効かない菌で、酢酸の量が大きく異なる。あるいは食物繊維を入れた場合と入れない場合とで、酪酸の量が大きく異なる。腸管内代謝物群集というマクロ環境ところを俯瞰的に解析したところ、実は酢酸や酪酸にというミクロな分子機能、生理機能があることを発見した。こういった考え方を、腸管ではなく、土壌や環境中のさまざまな生き物について展開すれば良いのではないかと考えた。

土壌に関しては、同様に有機酸をさまざまな微生物が作っている。こういう微生物の DNA 配列と物質の挙動との相関関係を調べることができた。また、環境中の海藻についても、やはり時系列のデータを多く集めてきて、ポリマーのアルギン酸と金属との相互作用について見出した。また、一つの分析法ではとれないような情報を、データの相関と、その相関を証明する構造方程式モデリングという因果関係の計算によって証明する方向性の研究も行った。あるいは泥中の富栄養化したタンパク質と硫酸還元菌との相互作用のネットワークを調べた。こういった論文をこれまで出してきた。

（生物多様性・機器開発・ソフト整備で我が国の強みを発揮）

今まではタンパク質を精製してその機能を調べる、あるいは一連の機能遺伝子クラスターを単離してシンセティックバイオロジー（合成生物学）的に新しい生き物を作るという路線で研究が進められてきた。これまでに説明してきた腸内微生物と同様、微生物そのもの、全てが様々な反応場を持っているので、有用微生物の組成やバランスあるいは反応場がわかることで、環境をつくり上げていくことができるのではないか、つまりシンセティックエコロジーということができるのではないか、ということを提案したいと思っている。ヒトの腸管などでプロバイオティクスを摂取することがシンセティックエコロジーの一例だろう。また同様のことが、農業土壌や水の浄化などでできるのではないかと考えられる。反応場としては、わが国には海というすばらしい資源もある。NMR では試料化の工夫で非侵襲的な計測および装置を小型化を行う。このように小さなマグネットに、半導体のシリコンチップを使うことで、プロトンとカーボンの相関シグナルをとるといったことができるようになりつつある。こういう個別のものづくりのプラットフォームは既にあると思うので、これを生き物と装置開発、そしてデータベースの整備などに使っていくと、さまざまなプロジェクトができるのではないか。

【質疑】

Q: 理解が追いついていないかもしれないが、微生物単離を前提としないで環境を改変する、例えば土壌の場合などを考えると、酢酸、プロピオン酸、酪酸、そういった有機酸が一つの評価の対象になる。そういったものを人工的にコントロールすることで土壌全体を制御する、そういった方向性か。

A: まさにお聞きしたかったのはその部分。血液や尿から代謝プロファイルをとって健康管理をするのと同様に、農場の土などからそのままプロファイルを取り、有機酸がどうなっているか。健常な土とはどういうものかの評価基準と、それが評価可能なハイスループット機器や、あるいはサンプリング法を整備していけばいいだろうと想定している。

Q: 有機酸に限らずほかの無機物だとか、低分子の物質とか、そういったものを総合的に解析・評価して「健常なときにはこんなプロファイルだ」と言える、そういったことか。

A: その通り。なので健常ということがわかっていることが大事である。人間のコホートと同じぐらいの勢いで農場のコホートのような研究ができるといいのではないかと思っている。

Q: 「健常」という言葉は、具体的にどういうイメージを持ったら良いか。

A: 例えば人間の健康も、ボーダーラインを引くのはなかなか難しいと思う。つまり多分かなり曖昧になるだろう。むしろ農作物を作る場合であれば、生産者がこのボーダーラインを引くのだろう。環境を浄化したい、例えば水をきれいにしたい、といった場合も、浄化する人がこのボーダーラインを作るのだろう。
ある状態と別の状態でプロファイルの違いがとられていることが大事だと思う。その場合には、時系列でサンプリングしていく必要がある。サンプリング後すぐに現場で評価できる機器があることがもう一つ重要なファクターになる。

Q: 変化することもあり得るということか。立場によって「健常」という中身が変わっていく可能性も当然ありそうだが。

A: 同じ対象でも「健常」という中身が変わるか、変わらないか、ということであれば、それはあり得るかもしれない。

Q: 例えば今、土のお話があったが、今の実際の日本の農地は健常なのかそうでないかと言えば、どちらとお考えか。

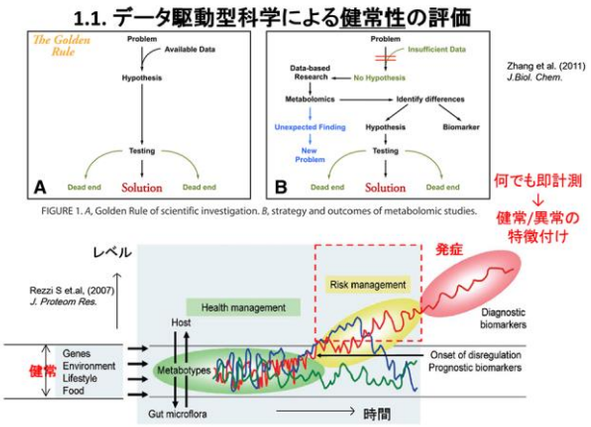
A: まさに今の状態がどうか、という判断基準によると思うが、先ほどの話題にもあったように、例えばメタン発生量や N_2O 発生量を見て初めて、健常かどうかのボーダーラインがわかるのではないか。

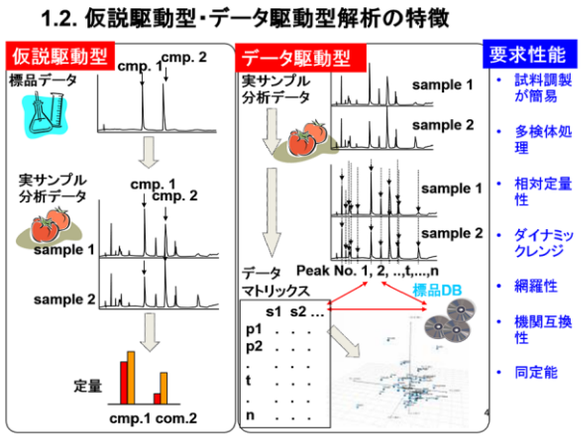
C: 以下コメントだが、例えばわかりやすい例としては連作障害が当てはまるのではないか。水田は連作障害が起こらないが畑はどんどん収量が落ちていく。なぜ落ちるかというの理由も、微生物という説や、土壌に蓄積する何らかの物質という説がある。何かアンバランスは起こしているもののその実態は余りよくわかっていない。そういうときには、収量といったデータを取っておけば、まさに今ここから耕作放棄になる、といった基準、何かそういうイメージになるのかと思って聞いていた。非常におもしろい。

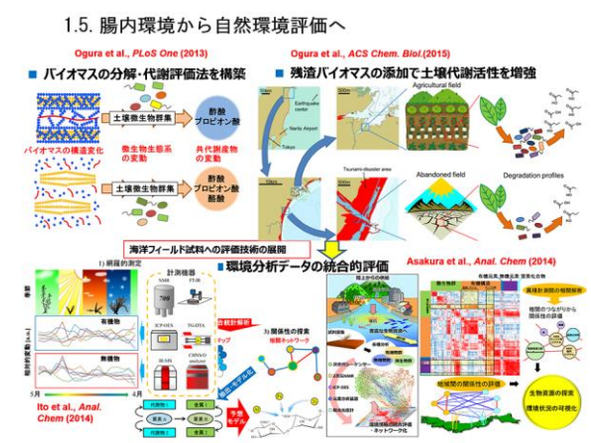
A: これからある研究者と組んで農場の土壌をやることになっている、長期的に有機農法をした農場などを調べたいと思っている。

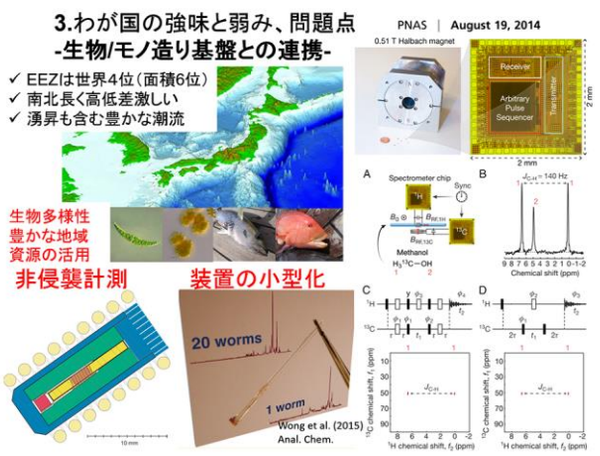
Q: 不明瞭な質問で申しわけないが、数理解析の先生と話したときに、あるステージからあるステージに移行する際、例えば健康から病気の発症に至る際、数理的にはその過程の遷移時には、ディスオーダーな値が出て、病気が悪くなったという状態であれば、逆に集約してくると言う。そのようなことは土壌の中でも見られることがあるか。

A: 長期間のデータのサンプリングはこれから取ろうとしているところで、今日紹介したのは方法論の確立にすぎない。これまでは農場でサンプリングしてきたものをさらに試験管で培養したものを使っていた。今後はよりオンサイトに近い実験をやりたいと思っている。


1.1. データ駆動型科学による健常性の評価
The Golden Rule
Problem
Available Data
Hypothesis
Testing
Solution
Dead end
A
Insufficient Data
Data-based Research
No Hypothesis
Metabolomics
Identify differences
Unexpected Finding
Hypothesis
Biomarker
New Problem
B
Zhang et al. (2011) J.Biol. Chem.
FIGURE 1. A, Golden Rule of scientific investigation. B, strategy and outcomes of metabolomic studies.
何でも即計測
↓
健常/異常の特徴付け
Rezzi S et.al. (2007) J. Proteom Res.
レベル
発症
Health management
Risk management
Host
Diagnostic biomarkers
Genes
Environment
Lifestyle
Food
健常
Metabotypes
Onset of disregulation
Prognostic biomarkers
Gut microflora
時間


1.2. 仮説駆動型・データ駆動型解析の特徴
仮説駆動型
標品データ
cmp. 1
cmp. 2
実サンプル分析データ
sample 1
sample 2
定量
cmp.1 com.2
データ駆動型
実サンプル分析データ
sample 1
sample 2
データマトリックス
Peak No. 1, 2, ..,t,...,n
標品DB
s1 s2 ...
p1
p2
t
n
要求性能
• 試料調製が簡易
• 多検体処理
• 相対定量性
• ダイナミックレンジ
• 網羅性
• 機関互換性
• 同定能


1.5. 腸内環境から自然環境評価へ
Ogura et al., PLoS One (2013)
■ バイオマスの分解・代謝評価法を構築
Ogura et al., ACS Chem. Biol.(2015)
■ 残渣バイオマスの添加で土壌代謝活性を増強
海洋フィールド試料への評価技術の展開
Asakura et al., Anal. Chem (2014)
■ 環境分析データの統合的評価
Ito et al., Anal. Chem (2014)


3.わが国の強味と弱み、問題点
-生物/モノ造り基盤との連携-
PNAS | August 19, 2014
✓ EEZは世界4位（面積6位）
✓ 南北長く高低差激しい
✓ 湧昇も含む豊かな潮流
生物多様性
豊かな地域
資源の活用
非侵襲計測
装置の小型化
20 worms
1 worm
Wong et al. (2015) Anal. Chem.

4. ワークショップ報告

4-2-3-2-3「野生イネバイオリソース・土壌微生物との相互作用」
＜倉田　のり：国立遺伝学研究所・系統生物研究センター＞

私の専門の、植物遺伝学、育種学、ゲノム生物学について全体的な俯瞰をしつつ、野生イネを使った微生物との相互作用解析についても紹介する。グリーンバイオの技術と研究基盤を考えた場合、微生物機能と生物多様性の利用を考慮しないと食料生産技術の高度化は困難である。育種学のアプローチは植物を品種改良して使うというスタンスでこれまでやってきたが、やはり植物と微生物との共生や寄生、土壌および植物表層における密接な相互作用を効率的に利用する必要がある。これにより植物や作物の改良だけでなく、環境の持続的維持も可能となる。微生物および土壌全体の小生物と植物の間の相互作用を考えることでその両方を達成できる可能性がある。

現代の栽培法の弊害については長い間指摘され続けており、その中で欠落、不足している技術・情報・知識も多くある。これらをどう効果的に開発し使っていくかが、今後の食料生産、品種開発、土壌の改良などに大きく影響を及ぼすだろう。

研究例として、野生イネのバイオリソースについて生物多様性の一例として紹介し、ごく最近初めた土壌微生物との相互作用についても触れる。

野生イネのバイオリソースについて、国内外の状況について述べる。FAO（国際連合食糧農業機関）下の機関であるインターナショナル・ライスリサーチ・インスティテュートには、約 1 万 5,000 のコレクションがある。日本では遺伝研に、約 1,700～2,000 の世界中から集めたコレクションがある。中国やインドにも野生イネのコレクション体制はあるようだが、一国内にグループが複数あるなど混沌としており、ジーンバンクとして正式に確立されているものはない。日本については、9 つのゲノムタイプで、21 の野生種がコレクションされており、特性データ、画像データ、ゲノムデータなどを整備して公開している。1958 年に収集されて以降、維持を続けている。

Oryza. rufipogon は私たちが今食べている栽培稲の直接の祖先種だが、アジア各地から収集してきた 446 種の系統種を使い、どういった系統進化を示すかを見たところ大きく 3 つのグループに分かれた。さらに 1,083 の栽培イネの系統種を加えて、系統樹をつくり、それぞれのグループの中でどういう遺伝的な多様性を示すかを調べたところ、野生イネの多様性は非常に大きいということがわかった。いわゆる栽培イネと野生イネを大きく一括りにし、両者でどういった栽培の選択圧がかかったかを検出すると、大体染色体 1 から 12 のゲノム上に 55 のクラスターが存在することがわかった。これらのクラスター領域には脱粒性や籾の大きさを決める遺伝子、栽培化にかかわる遺伝子のようなものが検出されている。これらも全てゲノム情報を整理し、OryzaGenome として公開を始めた。これとは別に栽培イネからかなり遺伝的に遠い他の野生種も含め、200 の系統種のゲノムの解析を進めている。栽培イネに近縁の野生イネゲノムを導入した染色体置換系統のシリーズの公開も同時にやっている。

次に野生イネと土壌微生物との相互作用についての話題を紹介する。*Oryza* 属の野生イネ、栽培種、在来種（栽培種ではあるが非常に古いもの）、で比較しながら、土壌メタゲノムの解析を行った。ポット栽培の第 4 葉期の土壌または根圏について解析したところ、土壌だけのものと根圏を比較すると、多様性はむしろ根圏の方が低い。同様に、栽培種より

も野生種の方が多様性が低い。土壌微生物と植物との相互作用は、野生種の方が強固な可能性もある。まだわからないが、それが野生の旺盛な生育力につながっているかもしれない。

微生物叢の種類を比較すると、幾つか野生種や栽培イネに特異的グループも検出されており、こういうものも時系列を含めて比べていき、どの微生物との相互作用が必須なのかといったことを調べる必要があるだろう。

野生イネのエンドファイト（共生微生物）はこれまで何種類も分離されている。例えばラオスの乾燥地の陸稲で、山間地の貧しい土壌でもたわわに実る陸稲が発見されていることもある。こういった現象には、エンドファイトや菌根菌がおそらく関わっているだろう。

もう一つ、小動物で非常に強固に植物と相互作用があるのは、線虫である。線虫は連作障害の要因の 1 つとして挙げられ、世界中の作物生産の 1 割以上が線虫被害で失われているとされている。土壌表土 1 メートル中に含まれる生物としては最も重い総重量を示す。菌根菌などは宿主特異性が低いが、線虫は 30 万の植物種にほとんど 1 対 1 で対応するような、非常に高い宿主特異性があると言われている。対抗作物による忌避効果、例えばネコブセンチュウにはギニアグラス、ネグサレセンチュウにはマリーゴールドやエン麦の野生種、といったことも知られている。線虫そのものが土壌中の細菌や微生物を餌にして増えている。土壌中で全体のバランスや平衡状態が保持されているのか、破綻が起こるのはどういったときか、といったことも含めた状態でメタゲノム解析はやられるべきと考える。

研究開発の時間軸としては、スタートから 5 年間でメタゲノム解析、個々の相互作用、微生物叢・小動物の分類、土壌の成分分析など、個々の要素を抽出しながら多方面の組み合わせへと展開するのが望ましい。スタートから 8 年間で相互作用を利用した品種群の開発や条件の至適化などの開発に向かえば良いだろう。

2030 年、15 年後には地球人口が 80 億人になると予想されている。新しい品種開発ができる、土壌の状態も良くなり、地球環境の改善にも寄与する、といったことにつながれば良いと考えている。

【質疑】

Q: 今後の研究開発の展望について聞きたい。表現型と遺伝子発現を合わせるために植物研究者が盛んにゲノムをやっているという状況がある。これもやはり同じで、宿主や微生物叢のゲノム情報なども統合した上で、「こういう環境であればこういう動きをする」というデータも一緒にとるという意味か。

A: 個々の要素は取りながら、全体のネットワークを描いていかないと、どういう選択をするべきか見えないだろう。

Q: こういう研究の進め方については、CREST などの従来の大型プロジェクトよりももう一工夫が必要ではないか。先ほどから、大量の情報はあるものの、それらをまとめてどういった意味のあることを導出し、単なる相関ではなく検証といいう方向も一緒にやらなくてはいけないとなると。

A: CREST、さきがけのように単独で横一列に並んだようなものはそぐわないかもしれない。大きなセンターがあり、マネジメント部門もそこにあって、そこに情報を集積

しながら、常に個々のグループとフィードバックを繰り返しつつ全体を進めていく方式が全体としてはうまくいくように思う。

Q: 例えば、今年度立ち上がったさきがけのように、情報系の研究者と生物研究者がペアで応募する仕組みが良いのではないか。やはり研究のデザインのところから、どれぐらいデータがあればどこまで言えるか最初に決めてから進められる。現在、バイオインフォマティクス分野では、データがあるのでそこから何とかおもしろいこと抽出して論文にしようとなったときに、必須なデータが欠けている、といったことがよくある。こういう研究費ベースでやる場合には、ペアでやるのは一つのうまいやり方と感じている。

A: 私もそれは賛成。最初からバイオインフォマティシャンにコミットしてもらわないとなかなか難しい。

Q: 線虫の話があったが、細菌補食性の線虫も土壌の中に多くいる。土壌からの N_2O 放出にも実は線虫が関わっているので大変重要。ただし、メタゲノムをやろうとすると、動物なので、細菌とはやり方が違うはず。

A: その通り。

Q: なので最初から実験デザインを考えておかないといけない。細菌やカビ程度まではメタゲノムで見るが、土壌生態系、あるいは農耕地生態系を見る場合には、線虫や小動物も入ってくる。そのあたりが大きな課題で、なかなかやり切らない部分ではないか。アメリカでは、昆虫と植物と微生物の共生ということを、アプローチが簡単な地上部でやりはじめている。しかし一番大事なのは根圏である。線虫の問題は非常に重要だ、一緒に考えさせてほしい。

A: その通り。どのようにふるいわけて効率よく解析するかがとても大事だと思う。

Q: 私が実際の経験で思ったのは、動物、例えば線虫であれば、ゲノムをやるよりは mRNA を追えば良い。宿主の植物も mRNA、トランスクリプトームで良い。細菌もできれば mRNA を追いたいが上手く行かないならば何が必要か、と考えれば良いのではないか。線虫は小さいとは思うがどのくらいのサイズか？

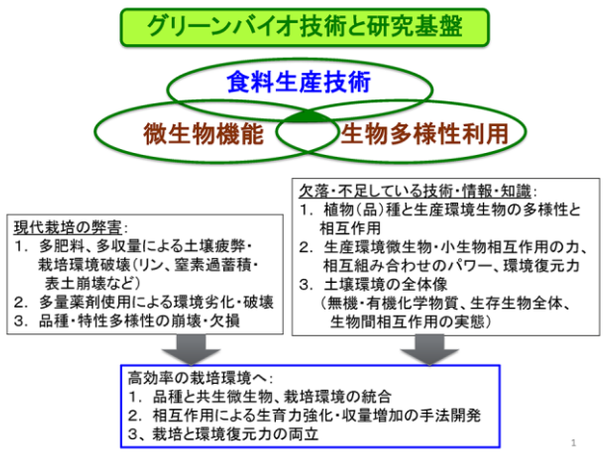
A: 1 ミリ以下。

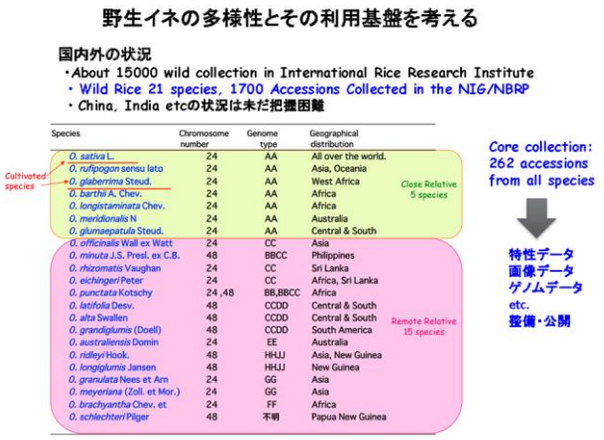
Q: 私たちの研究室では、動物細胞 1 個の mRNA もきれいに読み切れるぐらいの技術がある。線虫 1 個が小さくてもおそらく全然問題ない。そこにあるものをふるいにかけてたくさん取って確実にやるという手もある。

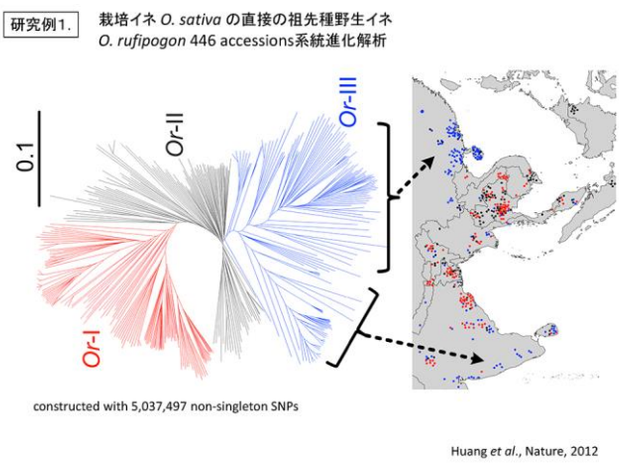
A: トランスクリプトームは一つの大きな方向性と思う。

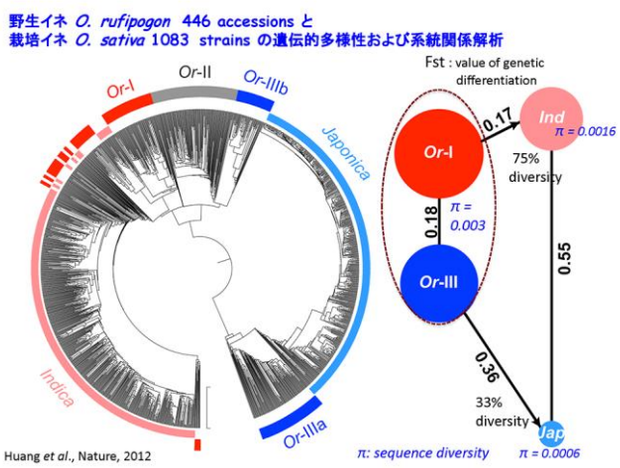
Q: 今は問題なく微量の解析もできる。あと、インフォマティクスとのカップリングについて、CREST がもう随分前から必ず「数理情報＋α」という公募をやっている。突然、数理情報と組んで、本当に上手く行っているのか懐疑的に思っている。必要なのはわかるが、相乗効果で本当にうまくいっているのか、これまでの先行事例からチェックする必要があると考えている。

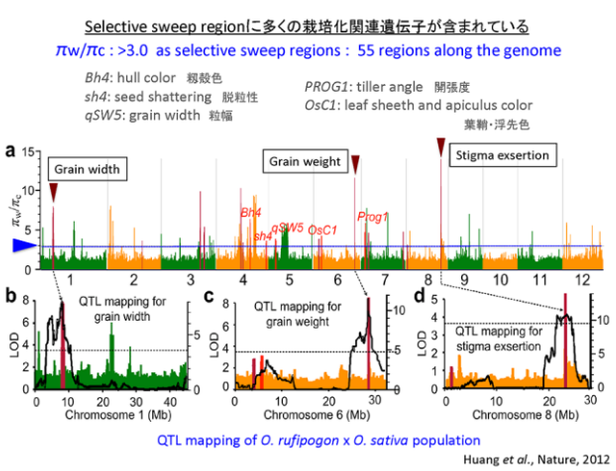
C: 数理情報やインフォマティクスとのカップリング課題の公募の仕方も、とってつけた形ではなくて、すでにある程度の関係や実績があってこそ公募課題に採用されるという仕組みを考える必要があるかもしれない。


グリーンバイオ技術と研究基盤
食料生産技術
微生物機能
生物多様性利用
現代栽培の弊害:
1. 多肥料、多収量による土壌疲弊・栽培環境破壊(リン、窒素過蓄積・表土崩壊など)
2. 多量薬剤使用による環境劣化・破壊
3. 品種・特性多様性の崩壊・欠損
欠落・不足している技術・情報・知識:
1. 植物(品)種と生産環境生物の多様性と相互作用
2. 生産環境微生物・小生物相互作用の力、相互組み合わせのパワー、環境復元力
3. 土壌環境の全体像
(無機・有機化学物質、生存生物全体、生物間相互作用の実態)
高効率の栽培環境へ:
1. 品種と共生微生物、栽培環境の統合
2. 相互作用による生育力強化・収量増加の手法開発
3、栽培と環境復元力の両立


野生イネの多様性とその利用基盤を考える
国内外の状況
・About 15000 wild collection in International Rice Research Institute
・Wild Rice 21 species, 1700 Accessions Collected in the NIG/NBRP
・China, India etcの状況は未だ把握困難
Species
Chromosome number
Genome type
Geographical distribution
Cultivated species
O. sativa L. 24 AA All over the world.
O. rufipogon sensu lato 24 AA Asia, Oceania
O. glaberrima Steud. 24 AA West Africa
O. barthii A. Chev. 24 AA Africa
O. longistaminata Chev. 24 AA Africa
O. meridionalis N 24 AA Australia
O. glumaepatula Steud. 24 AA Central & South
Close Relative 5 species
O. officinalis Wall ex Watt 24 CC Asia
O. minuta J.S. Presl. ex C.B. 48 BBCC Philippines
O. rhizomatis Vaughan 24 CC Sri Lanka
O. eichingeri Peter 24 CC Africa, Sri Lanka
O. punctata Kotschy 24 ,48 BB,BBCC Africa
O. latifolia Desv. 48 CCDD Central & South
O. alta Swallen 48 CCDD Central & South
O. grandiglumis (Doell) 48 CCDD South America
O. australiensis Domin 24 EE Australia
O. ridleyi Hook. 48 HHJJ Asia, New Guinea
O. longiglumis Jansen 48 HHJJ New Guinea
O. granulata Nees et Arn 24 GG Asia
O. meyeriana (Zoll. et Mor.) 24 GG Asia
O. brachyantha Chev. et 24 FF Africa
O. schlechteri Pilger 48 不明 Papua New Guinea
Remote Relative 15 species
Core collection: 262 accessions from all species
特性データ
画像データ
ゲノムデータ
etc.
整備・公開


研究例1.
栽培イネ O. sativa の直接の祖先種野生イネ
O. rufipogon 446 accessions系統進化解析
0.1
Or-II
Or-III
Or-I
constructed with 5,037,497 non-singleton SNPs
Huang et al., Nature, 2012


野生イネ O. rufipogon 446 accessions と
栽培イネ O. sativa 1083 strains の遺伝的多様性および系統関係解析
Or-I
Or-II
Or-IIIb
Japonica
Indica
Or-IIIa
Fst : value of genetic differentiation
Ind
π = 0.0016
0.17
75% diversity
Or-I
π = 0.003
0.18
Or-III
0.55
0.36
33% diversity
Jap
π = 0.0006
π: sequence diversity
Huang et al., Nature, 2012


Selective sweep regionに多くの栽培化関連遺伝子が含まれている
πw/πc : >3.0 as selective sweep regions : 55 regions along the genome
Bh4: hull color 籾殻色
sh4: seed shattering 脱粒性
qSW5: grain width 粒幅
PROG1: tiller angle 開張度
OsC1: leaf sheeth and apiculus color
葉鞘・浮先色
Grain width
Grain weight
Stigma exsertion
QTL mapping for grain width
QTL mapping for grain weight
QTL mapping for stigma exsertion
Chromosome 1 (Mb)
Chromosome 6 (Mb)
Chromosome 8 (Mb)
LOD
QTL mapping of O. rufipogon x O. sativa population
Huang et al., Nature, 2012

http://viewer.shigen.info/oryzagenome/mapview/Top.do
OryzaGenome
Sequence Information of Wild Oryza Species
Top Page
About OryzaGenome
SNP Viewer
Downloads
Contact us
Links
About OryzaGenome
We plan to provide genome sequences of all genome types and species in the genus Oryza.
SNP Viewer
You can see single nucleotide polymorphism (SNP) information on the locus/gene/sites of interest.
Downloads
SNP information is provided as VCF files. The detailed information on each accession is also available here.
What's New
Release 1.0
Genome information for 17 deep and 446 imputed sequences of O. rufipogon accessions is available.
Genome-wide SNP Viewer
Contact us
Links
NBRP
Oryza属ゲノム情報の公開
"OryzaGenome"
O. rufipogon
446 accessions
ゲノム全長の
SNP 情報を公開
2015.Aug
Oryza 属
200 accessions
ゲノム配列を
公開予定～2017

野生イネのエンドファイト

エンドファイト（endophyte):

- 植物中に共生する微生物一般を指し、糸状菌型と細菌型がある
- 相利共生により、植物に昆虫、病原菌、乾燥などの抵抗性を与える
- 共生菌は種子あるいは植物体等を介して次世代に伝搬される
- 糸状菌型の特性:
  - ・植物体内で隔離・伝搬されるため雑種（異質倍数体）が多い
  - ・このため、種や菌系により分泌2次代謝産物が大きく異なる場合が多い
  - ・休眠胞子ステージをもたないため、種子の長期保存で死滅することが多い
- 細菌型、窒素固定能を持つエンドファイト
  - ・多様な植物に内在が確認されている

● Sato et al.,1994 ラオス乾燥・急斜面・貧栄養地域でたわわに実る陸稲を発見
（こしひかりの1.5倍ほどの粒大x200-300粒／穂）➤エンドファイトの可能性の指摘
● Elbeltagy et al., 2001, Minamisawa et al., 2004.
➤ 数種類の野生イネからエンドファイトを同定

Oryzaイネ	*エンドファイト*
O. sativa	*Azospirillum, Ideonella*
O. rifipogon	*Herbaspirillum, Azospirillum*
O. barthii	*Herbaspirillum*
O. grandiglumis	*Azospirillum*
O. officinalis	*Herbaspirillum*

・栽培、野生イネの根、茎、葉鞘、葉身から単離されているが、栽培イネに比して野生のエンドファイトは、生重量あたりの菌数は多いものの、その種類は少ないことが知られている（Stoltzfus et al., 1997, Elbeltagy et al., 2001）

7

植物生育・生態系に不可欠な菌根菌

1、植物にとっての菌根菌は、人間にとっての大腸菌
- ほとんどの動物は、細菌が消化器に共生していないと、食物を分解できず生存も非常に困難である。
- 菌根菌は、栄養分が少ない土からでも植物が自分自身では十分にとれない栄養素や水を補給してくれる、植物にとっての重要な共生細菌である。

2、菌根菌は、90%以上の植物の根に内部または外部共生し、養分を植物に供給する
- 特に植物のリン酸吸収は、菌根菌の共生に依存して進化して来たため、菌根菌の貧弱な土壌では植物の生育は大きく低下する。
- 菌根菌は、富栄養下では、共生・増殖が大きくて低下し、効果が少ない。大量肥料投入により土壌微生物は激減している。

3、菌根菌は、自然界で最も大量の炭素固定を行っている生物
- 菌根菌は、植物に養分と水分を供給する代償として、植物から大量の炭素を受け取り増殖する。

4、菌根菌は植物の根を介して土壌中に巨大ネットワークを作る
- 菌根菌は、植物の根と共生・増殖して数センチから数メートルに及ぶ菌根を伸ばし、植物の根を介した巨大ネットワークを形成する。

5、植物共生とは独立に菌根菌の培養が可能に・・・
- 植物との共生状態でしか繁殖できなかった菌根菌の、単独培養が可能となって来た。
- アメリカでは、安価な大量培養が成功し、胞子の大量利用が可能になりつつある。
- 胞子の土中接種により、植物生育の劇的な改善が見られるものもある。

8

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いる。
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る。
ネコブセンチュウにはギニアグラス、クロタラリア、ネグサレセンチュウにはマリーゴールドやエン麦野生種など。

- 何をしている？
- 害効果のみか？
- 線虫を消化する植物！
- 相互作用特異性を利用できるか？

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開を確認。

写真：
農業・食品産業技術総合研究機構
中央農業総合センター
病害虫検出同定法研究チーム
相場聡　氏による

9

研究開発基盤コンセプト

生存に必須・効果的相互作用

共生・寄生・感染の多様性

農業環境圏
&
植物生存圏、森林圏

共生と寄生の相互作用
根系土壌ネットワーク
植物体エンドファイト・
常在細菌
植物
昆虫
土壌小動物
土壌細菌
ウイルス

ヒト、動物生存圏

腸内細菌
皮膚常在菌
ウイルス・細菌
免疫細胞

地球環境を支えるもの

研究開発戦略・テーマ

～5年軸　～8年軸

メタゲノム解析
相互作用解析
微・小生物分類
土壌成分分析

- 植物、微・小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
- 相互作用組み合わせ至適化
- 高度組合わせ栽培
- 低肥料多収と最小環境負荷の実現

10

地球と共に生きる

15年後、2030年　80億の地球人口と地球環境を支える柱となるために

効率的農業生産技術・品種開発
農業環境力アップ

地球環境の生物改良

・生物改良のための技術革新
・植物改変による相互作用力改良
・多様な生物種の改変デザイン

・植物・昆虫・微生物・土壌微小生物間相互作用因子の解明
・相互作用の特性・機構解析と利用
・植物、微生物それぞれの相利共生品種・系統の開発
・相互作用生物間ネットワークの全容解明

新たな生物の相互作用
組み合わせによる
環境復元力の創成

植物・昆虫・微生物（エンドファイト）・
土壌微小生物の相互作用の効果的利用

農業環境・生存環境の
生物相互作用の全容を知る

メタゲノム解析：ゲノム同定、種・系統分類、相互作用解明

11

4-2-3-3 セッション 3「有用微生物/微生物叢を用いた技術の社会実装　現状と展望」

4-2-3-3-1「土着微生物の活性化と作物栽培および湖沼浄化」
＜谷坂　隆俊：吉備国際大学教授、株式会社シーティーシー顧問、株式会社オリザ顧問＞

私の専門は植物育種学、植物遺伝学で、トランスポゾン科学を中心に研究を行ってきた。しかし、前任校の定年 7～8 年前に、農学部に所属する自分が農家に役立つ仕事をどれだけやってきたかと、ふと考えるときがあった。もっと農家サイドに立った研究ができないか、省労力、低コスト農業に関わる仕事ができないかと考えた。そんな折に、この後の講演者でもある、とても良いパートナーに出会ったことで、今日紹介する仕事を続けている。

コマツナとミズナの栽培例を示す。播種して 3 ヶ月後の写真で、片方が慣行栽培でもう一方はある処理を加えた栽培によるものである。今日はこの処理について説明する。基肥は一般農家レベルとし、追肥は一切施していない。その処理とは、「ルオール」という水溶液を与えること。一回 1 平米当たりたった 2cc 撒くことで、写真のようにコマツナ、ミズナの顕著な生育促進が見られようになる。

ルオールは、アミノ酸、ビタミンなどから成る水溶液である。詳細は企業秘密で言えないが、とても安全な液体である。これを与えることで、土壌中や土壌微生物の世界で、自然界の自浄能力や食物連鎖の仕組みが再生されると想定する。これが全てうまく循環すれば、土がとても豊かになり、水がきれいになる。

これは土壌微生物多様性・活性値を調べたものである。この評価法が最適かどうかはわからないが、96 種類の有機物がこのプレート上に並んでおり、土壌の水をこの上に乗せ、どの有機物が分解されるかを発色で見たもの。この方法によると日本の土壌の多くは、有機物を分解する能力がそれほど高くない。ところが、ルオール処理をすると有機物の分解能力が上がる。この方法は、完全ではないが土壌の豊かさを示す一つの指標になると考えている。この「ルオール」は、現在、株式会社シーティーシーから市販されている。

コマツナとミズナ、ニンジンについては、大手の種苗会社で栽培試験をしてもらった。ルオール区では、コマツナの茎葉重が 2.4 倍、根重が 1.4 倍、ミズナのほうも茎葉重が 2 倍になった。ニンジンでも非常にいい結果が出ている。隣の列に植えられていても顕著な差が出る。無処理区のほうは、この年にリゾクトニア菌に感染し、一次根へのダメージが出たが、ルオール処理区ではほとんど出なかった。おそらくこの処理は、土壌細菌や土壌感染性の障害を防ぐ効果があるだろうと考えている。

農家に実証実験を依頼した例を紹介する。10 年以上のハウス栽培で、トマトの連作障害が一切出ないことが確認されている。イネに関しては、秋田県大潟村で行っている。大潟村は日本で 2 番目に大きかった湖、八郎潟の 5 分の 4 を干拓してできた村であり、ここでの稲作は八郎湖の水を使っている。しかし、水田排水はすべて八郎湖（八郎潟の非干拓部分）に戻すという方式がとられているため、八郎湖の水は年々汚くなり、とても深刻な状況になっている。これまで大手の企業が八郎湖の浄化を試みてきたが、皆失敗してきた。本当は、ルオールを投入して八郎湖の水をきれいにしたいのだが、なかなか実行に移せないでいる。それはともかく、ルオールの稲作に及ぼす効果を説明すると、大潟村は日本海に面しているために、風がきつく、田植え直後に表層剥離といって泥が水面に上がってく

る現象がよく見られる。表層剥離が起こると活着前の苗が流され、再度田植えをしなくてはならなくなる。しかし、ルオールを投入すると、この表層剥離がほとんど見られなくなる。ルオールを投入した水田の水の色も全く違うようになる。また、イネ植物体が非常に頑健になる。今年のデータでは、‘あきたこまち’で 10 アールあたり 720 キロを達成した例がある。過去には、‘たつこもち’で 780 キロに達したこともある。常識では考えられない収量増である。大潟村は干拓地であり、なかなか水田から水がひかない。そのため秋起こしができなかったが、ルオールを投入すると秋起こしが可能になり、次の田植えもスムーズに行えるようになることが確認されている。

水質浄化に関してさらに述べる。大潟村には第 2 ラグーンというし尿を溜める池があり、本当に汚かったが、これが見事にきれいになった。1 立方メートル当たり 2cc というわずかな量のルオールの投与で、3～4 カ月すると水が浄化される。1 メートル以上のヘドロがあったが全て分解され、完全に底が見えるようになった。

同様に京都の宝ヶ池でも水質浄化を試みた。宝ヶ池は京都国際会館のすぐそばにあり、京都議定書をつくったところだが、その前の池が汚いのはよくないのではないかと京都市に進言したところ、すぐに浄化してくれとの依頼があった。折角だから近くの小学校のエコ学習の一環としてやってくれないかという要望に応じ、児童に撒いてもらった。水は数カ月で自然の美しさになった。

津波を被った宮城県山元町でルオールの塩害に対する効果を検証した。ルオール処理を撒くと、津波による塩害が全く発生しなかった。

淡路島の酪農協の事例を紹介する。淡路島は酪農が非常に盛んで、大量の牛糞が出る。これを堆肥として利用するが、冬の低温期にはどうしても発酵が進まない。ここにルオール撒くと、瞬時に発酵が進み、嵩が一気に減り、臭気も著しく低減された。

これらの事例から、ルオールは土着微生物の活性化を通じて低肥・低農薬農業の実践と湖沼の浄化に大きな効果を持つということが理解していただけたかと思う。ただし、まだ科学的なメスを入れているわけではない。おそらくルオールを投入すれば土壌中あるいは水中の微生物が活性化して、あるいは多様化して、そして自然の循環ができることにより、土が豊かになり、水がきれいになるのだろう、というのが私たちの仮説である。できればこの仮説をぜひ証明していただきたい。

【質疑】

Q: 最近なぜ先生が楽しそうなのか、よくわかりました。イネの収量について聞きたい。先ほどあきたこまちが 10 アールあたり 720 kg というのは、驚異的な収量と思うが、ルオール無処理ではどのくらいか。

A: 秋田県では大体 500 kg の後半。たつこもちというもち米では、肥料を入れないといけないが、780 kg まで行く。大潟村でごく普通の生産者でもそれぐらいとれる。

Q: 微生物がどういう動態であるのかなど、その辺はまだ全く解析が手付かずか。

A: いろいろな論文を読んで、おそらくこういうことだろうという仮説を立てた。ルオールはおそらくきっかけを与えるもので、エンジンをかけるときにポンとボタンを押す程度のこと、その後エンジンが回り出したら車が動くといったことかと思う。使用量としては少ない。

Q: コストはどうか。
A: コストも非常に安い。現段階では余り科学的ではないが、社会実装としては非常に面白い結果が出ている。
Q: 市販されているとのことだが売り上げなどについて聞いても差し支えないか。
A: 市販されてから日が短いのと、科学的実証が進んでいないので、1 億にいかない程度、数千万円は超えています。
A: 秋田県の大潟村には 500 戸の農家がある。大体その 1 割が既にこれを使ってくれている。彼らにとっても水汚染は深刻で、米の食味に影響が出るといったうわさも出かねないので、やはり水をきれいにしたい。しかし県はやってくれない。農家にとっては死活問題なので、自分たちの農地にルオールを投入し、そのきれいな水を八郎湖に入れていく。そして将来的には八郎湖にルオールを入れていこうという形。
Q: 伺いたいのは、科学的なメスをこれから入れるということだが、科学的なメスを入れたらさらに売り上げが上がるのでメスを入れるのか、それとも、科学的なメカニズムはわからないけれどもうまくいっていればそれで売れるものなのか。科学的なメスが必要というのは、どういう意味かを伺いたい。
A: 売り上げを増やそうとか、メスを入れてほしいとかいうことではない。何か微生物の世界でこういう現象があるので、何か考えてみたらどうか、という提案。全く売上には関係ない。もう実際に海外ではどんどん広がっている。
Q: 夢みたいな、良いこと尽くめのような話だが、何かちょっと悪い影響が出るような部分をこれまでに感じたことはないか。
A: 不思議だが、全くない。アミノ酸、ビタミンなどから成る非常に安全な資材である。ビタミン剤のような匂いはあるが、とても安全な資材。障害は今まで全然ない。安全性についてはメダカの実験（LD_{50}）を含めて確認している。

ルオール・無処理生育比較

コマツナの生育調査（10株平均）定植約1ヶ月後

コマツナ	草丈 cm	茎葉重 g	根重 g
無処理	24	59	16
ルオール	33	138	22
	約1．4倍	約2．4倍	約1．4倍

ミズナの生育調査（10株平均）定植約1ヶ月後

ミズナ	草丈 cm	茎葉重 g	根重 g
無処理	27	97	12
ルオール	37	200	12
	約1．4倍	約2．1倍	

1

ニンジンの収穫調査

ニンジン収穫調査（11月6日、10株平均、奇形根のぞく）

	草丈 cm	根長 cm	最大根径 cm	茎葉重 g	根重 g
無処理	32.8 ± 1.4	13.4 ± 1.3	3.6 ± 0.5	16 ± 3	75 ± 22
ルオール	36.5 ± 2.6	13.3 ± 2.3	4.2 ± 0.3	22 ± 8	104 ± 26
	約1．1倍		約1．2倍	約1．4倍	約1．4倍

- ✓ ルオール区の生育は根、茎葉とも旺盛であった。
- ✓ 無処理区では分岐根などの奇形根が多数見られたが、生育初期のリゾクトニア菌による一次根先端へのダメージに起因すると考えられた。

秋田県大潟村での実証実験

投入面積　約140ha（平成24年実績）
投入時期　代掻き時・(田植え時)
投入方法　水口より入水と共に投入

ルオール投入区　対照区
表層剥離が少なくなり、直ぐ崩れる為
苗が倒れる被害が無くなくなる

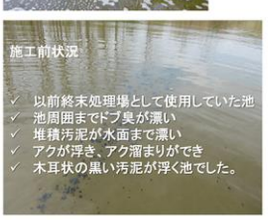
田んぼの水がきれい
排水浄化 → 八郎湖の浄化

ルオール投入　対照区

ルオールによる湖沼の浄化
秋田県大潟村第2ラグーン

投入前

施工後



4

国立京都国際会議場　宝ヶ池水質浄化の様子

投入前

(mg/l)

	施工前	7月16日
BOD	4.8	1.2
COD	15	5.4
SS	18	2.8
全リン	0.055	0.014
全窒素	0.96	0.28

投入後

5

ルオールによる堆肥工場臭気対策・処理能力改善
淡路酪農農業組合

施工後
アンモニア
9ppm→2ppm以下

臭気　1／3

堆肥乾燥促進
嵩－20cm

4-2-3-3-2「ルオールによる稲作・エビ養殖　フィリピン・ミンダナオ島における実例」
＜竹生　敏幸：株式会社シーティーシー　環境事業部　技術部長/業務統括部長＞

前の講演に引き続き、ルオールについて、フィリピンのミンダナオ島での稲作とエビの養殖の結果について紹介したい。

フィリピンは農業が主要産業で、国際イネ研究所（IRRI）がある。それにも関わらず、イネの単位面積あたりの収量は高くない。籾重で1ヘクタール当たりの平均収量は3.7トン、私たちが現在試験をしているミンダナオ島はこれよりさらに少なく、3トンを切る。現在ではフィリピンは世界で最大のコメ輸入国になっている。縁あって3年前からここのイネの増収に取り組んでいる。一般的にフィリピンのコメの収量が少ない原因としては、灌漑が未発達、害虫・病気の被害が多発することである。投入する窒素肥料を低減するあるいはゼロにすることで、罹病性の低減や害虫抵抗性が出るのではないかと考え、私たちの無農薬・無施肥の農法を展開している。フィリピンには、日本で現在使われているような最先端の農薬が全部あるが、それでもなかなか収量が上がらない。農薬の撒き方も指導の通りにちゃんとやっているものの、熱帯地域なので常に虫がいる状態である。私たちの農法では、殺虫剤は撒かず、苗箱に処理する程度に留めている。

2013年からミンダナオ島北部、人口約30万人のブトワン市の圃場、フィリピンのフィルライスという稲作研究所、地元の農業大学の試験圃場を使って実施している。フィルライスで行われているコンテストにも参加した。

窒素肥料、その他の肥料も一切使わず、無施肥で行っている。熱帯地域なので二期作が可能で、2013年から数えて今年の夏は5作目だが、一回も肥料は撒いていない。しかも現地は水管理もできない状況なので、簡単で、誰でもできる、就農してその日からできるような方法で指導している。

フィルライスのコンテストには、10社もしくは10団体が参加し、それぞれ2,000平米の農地を与えられ、そこで収量を競っている。コンテストでは、農薬、肥料、何を何回使っても構わない。他の団体の多くは高収穫を狙ったハイブリッド米で臨んでいる。私たちは、現地の固定型品種を用いて、7.8トンという収量を達成した。この値は、2014年段階でミンダナオのブトワン支部で歴代最高記録となっている。一昨日受けた現地からの報告によれば、農業大学、CSUとカラガ大学の圃場でも、平均収量10トン超えに成功した。

もう一つ、エビの養殖池について紹介する。フィリピンではエビの養殖池が大量の飼料や抗生物質などの使用により疲弊し、放棄されている。これは東南アジア全般で起こっていることとして報道されているのでご存知の方もいるだろう。その池を再生しエビの養殖産業を復興しようというテーマを、本年度JICA案件化調査で行った。

エビの養殖池の疲弊も基本的には農耕地と同じで、連作障害に似た状況と認識している。多収穫を得たいがために餌を多用する。その結果水質汚濁が発生し、病気が発生する。とりあえず投薬で対処する。投薬で一時は回復しても、また大量死が出る。最初はブラックタイガーだったのがブラックタイガーよりも耐病性のあるバナメイに切り替える。去年あたりからバナメイでも同様のことが起きて、やはり大量死が起きて放棄された養殖池が増えている。

今回の実験は、ルオールという農業資材の成果を見るために、ミンダナオ島の北部の放棄されたエビの養殖池 2 つで、条件を揃えた状態で行った。面積はほぼ同じ、1.2 ヘクタール、海からの導入路から海水も全く同じものが入る、隣り合った土地で放棄された期間も全く同じ。一方はルオール処理区、一方は無処理区とし、海水だけでブラックタイガーの養殖を行った。養殖密度は 1 ヘクタール当たり 1 万匹とし、両方とも餌を与えず水の交換もしなかった。

通常、養殖池は、池を乾燥させ、それから硫化水素などを撒き、貝などの競合種を殺すなどして排除する。薬や殺菌剤で生態の多様性をなくしてから水を張るという作業をする。今回はそれをせずにいきなり水を張った。

水張りと同時に一方の池にはルオールを、1 平米当たり 10cc、1 ヘクタール当たりで 100 リットルを散布した。散布は、カヌーに乗って現地の人が柄杓もしくは手で散布するという簡単な方法をとった。1 カ月後に稚エビを、1 袋 1,000 匹を 10 袋、計 1 万匹放流し、あとは 4 カ月間何もしないで収穫するという養殖法を取った。

通常こういった餌もやらず、水も交換せず、しかも海水で養殖すると、真っ黒なエビになり、平均サイズも 10 グラム程度となる。実際、今回の無処理区でも、このようなエビが収穫された。それに対してルオール処理区では、平均サイズ 60 グラム、このような透き通った大きなエビが収穫できた。これは地元の、実際にエビ養殖に携わった人たちも大変驚いており、餌を大量にやってもなかなかここまでは大きくならない、しかも大変品質が良いということで高い評価を受けた。背わたも普通は黒く出るが、全く出ていない。

体重ごとに何匹とれたかを見ると、ルオールのほうは約 80%が 40 ｇ以上、一方無処理区の池では、ほとんどが 40ｇに達していない。なぜ 40ｇで線を引いたかというと、ブラックタイガーの対抗品種であるバナメイエビが最大で 35 ｇ程度なので、市場性のあるのは 40 ｇ以上と考えられるからである。全体の収穫数量もルオール処理区で 59 kg に対し、未処理区は 31 kg、しかも一尾 40 ｇ以上に限定すると、ルオール処理区で 52 kg、未処理区で 1.5 kg という圧倒的な結果が出た。池の状態の写真で見ても、水の透明度が明らかに違う。養殖開始当初は池の様子は同様だったが、1 カ月半ほどで未処理区では藻の死骸などが浮いてくるなど差が見えてきた。そして 95 日後には水の透明度や色にも明瞭な差が出た。毎日水質検査を行い、pH や ORP、溶存酸素、COD やアンモニア性窒素を測定した。従来の池の水質で言われる COD やアンモニア性窒素では、それほど大きな差がないが、ルミテスターという計器を使って換算 ATP を測ると、両池には大きな差が出た。ルオールのほうは常に安定した低い数字で推移した。

それから、これは共同研究として現地の水産局――BFAR が行ってくれたものだが、ビブリオ菌、蛍光バクテリアを測定すると、ルオール処理区と未処理区では大きく差が出ていた。

ルオールを使ったエビの養殖で、従来では得られなかった圧倒的に品質のいいものや大きなものがとれたということで、現地でもかなり関心が高まっている。現地の州知事や市長も集まり、大変関心を示した結果に終わった。

【質疑】

Q: ルオールの投与の仕方について聞きたい。水の系は多分 1 回入れるだけだが、稲作では何回か入れるのか。

A: 大潟村は今年で 8 年目になるが、過去にいろいろな入れ方を実験した。とにかく農家さんに負担をかけない一番簡単な方法ということで、代掻き後、水を入れるときに水口からたらし込むだけで行っている。
大潟村は干拓地で水はけが大変悪く、秋起こしができないという課題があったが、それにチャレンジするため、収穫後の秋起こしの際、一緒にロータリーの前に点滴して撒くということもやっている。秋起こしに 1 回、春になったときに代掻きで 1 回なので最大 2 回という散布方法である。

Q: エビは平均で 5.4 倍になっているが、トータルとしては 2 倍弱、個体数は養殖中に減るのか。

A: 生存率は、無処理区が 30%で、1 万匹に対して 3,000 匹。処理区で 1 万匹に対して 1,000 匹。今後、実験を進めることにより、通常 10%ぐらいの生存率を、30%から 50%に伸ばすことは十分可能と考えている。

Q: これは餌を与えていないということだが、エビは何を食べているのか、食べられている生き物はどうなっているか、生態系全体としてはどうなのか。

A: エビの餌は、小さいエビのときには植物性プランクトン、その後成長とともに動物性プランクトンも食べるようになる、それから藻も食べる。そういったものは生えている。

Q: 生態学は素人なのでよくわからないのだが、水がきれいになることと富栄養化はどういう関係になっているのか。

A: 一般的に、河川で富栄養化と言われるのは窒素とリンが増えることであるが、この場合は藻が発生するので、当然光合成により有機物を合成する。そういった意味では藻のなかの窒素、リン、特に窒素は増えていると思うが、水に溶けている量では、どちらも変わらない結果が出ている。

Q: 一次生産が上がるとして、それを食べる生態系全体の量が増えているのか、それとも何かある生物が減っているのか。

A: まさしくそれが食物連鎖とか生物多様性というテーマだと思う。本来、エビによって食べられなかったもの、餌として判断されなかったものが、生物多様性が増えることにより食餌のほうに回っているのではと考えている。

Q: ルオールにはリン酸は入っていないのか。

A: 入っていない。

Q: ほぼ同じ質問だが、餌となる藻が光合成をするので炭素が増えるのは良いとして、窒素と微生物が増えているのはどう解釈するか。それがエビに食べられると、エビ以外の生態系全体としては窒素が減って、全部エビにいくということか。餌の藻が増えるとしても、光合成をすればプラスになるのかもしれないが、全体としてキログラム単位でプラスになるだろうか。非常に面白いが、そのあたりが不思議すぎるので聞きたい。

A: 大変いい質問で、よく同じ質問を受ける。これは農業のケースでもそうだが、さきほど谷坂先生から紹介のあった、大潟村のあきたこまちで 720 kg というところは、肥料を 3 分の 1 もしくは 5 分の 1 にした状態で増収が達成できている。窒素源だけが餌と考えると解釈は難しい。ただし、現実に大きなエビがとれた、コメも実際に減農薬やほとんど無肥料の状態でとれている。しかも連作でも可能、という部分について、私たちはこれから追及していきたい。

Q: 実験的に、エビを水槽で飼ったときに、このルオールを希釈して加えていくと、エビの大きさが変わるといった、定量的な実験はしたことがあるか。

A: ない。それは無意味だと思っている。自然界のいろいろな仕組みを利用しての栽培方法なので、これを日本で陸地にコンクリートの水槽を作ってエビの養殖に適用するのはムリなのではないかと思っている。コメなどの実験も同様に、コンクリートの中でやろうとは思わない。

Q: 水田でも池の場合でも、バイオマスエネルギーの流れと物質の流れが変わっているのは事実だと思う。コンクリート内でやらなくても、野外でいろいろなインデックスをとれば、一体どのあたりが動いてこういう結果が起きているのかというのはわかるのではないか。いきなり微生物にいくよりは、まずそこが非常に重要だろう。前出の、畑で撒いたときのお話で、土壌の炭素量がどうなっているのか化学分析をしてみると、例えばルオール処理区では炭素量が増えているということであれば、作物も増えて土壌有機物も増えているのかどうか、その点も疑問に思う。測定しようとすれば比較的簡単にできるので、野外の現場でも可能と思うがどうか。

A: 実は水田について、54 区画にわたり条件を振って実験を行ったが統計的な数字は出なかった。土は 1 センチ離れれば条件が違うので、サンプリングの仕方や、どういった状況が健全なのかを判断するのは大変難しい。土の中にある微生物すらほとんどわかっていないのが現状である。そこで炭素を測ったところでばらつきが出るだろう、現状ではこれぞという正解に到達できていない。

Q: ルオールの組成は、アミノ酸、ビタミン、有機酸など、いろいろ入っているということだが、この品質は長期間の保存に耐えるか。

A: 製品としては一応 1 年という期限を区切っている。現在までで最大 4 年経過段階の性能確認まではしているがそれより長期にわたる確認はこれから行う予定である。含有成分からすれば、当然外から菌が混入すれば変質する。閉鎖系であれば凍結もしくは温度が 60℃以上にならなければ変化しないと考えている。

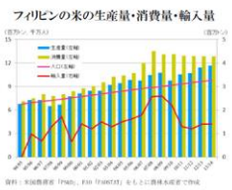
Q: ルオールは製品としては無菌か。

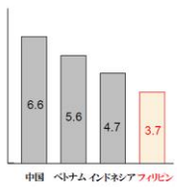
A: 基本的に無菌である。

フィリピンの稲作の現状

- フィリピンは就業人口の35%が農業に従事する農業国。
- 農業はGDPの12%を占める主要産業。
- 国内消費量の1～2割程度を輸入に頼っている。
- フィリピンの稲作の平均収量は3.7t/ha(籾重)。
- アジアの主要な米生産国に比べて単収が低い。

フィリピンの米の生産量・消費量・輸入量





2

フィリピンの稲作の課題

(1) 灌漑の未整備
灌漑整備の実施地区は49%
ミンダナオ島は37%と低い。(ルソン島55%)

(2) 過剰な施肥・農薬散布
収量増加のために施肥・農薬の散布
→土壌状態・食物連鎖の悪化
→収量が上がらない
→さらなる施肥・農薬の散布
という悪循環に陥っている。

肥料を使用すると、

①病気にかかりやすくなるから、農薬の使用量が増える。

②害虫がよってくるから殺虫剤を散布する。
益虫も殺し、害虫被害がより拡大する。

(3) 水管理技術の不備
圃場内の給排水設備が未整備
圃場内の水の管理ができない。
現地に適した水管理技術を
知らない。天候任せ。

3

フィリピン・ミンダナオにて ルオールを使った稲作

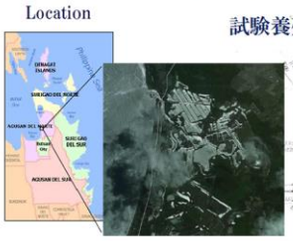
- 2013年から
ミンダナオ島ブトゥアン市内の試験圃場や
フィリピン稲作研究所、農業大学の圃場等
において実証試験を実施
- 無施肥・農薬も殆ど使わない
- すぐに実践できる簡単稲作、簡単な水管理
- フィリピン稲作研究所の収穫量を競うコンテストで肥料やハイブリット米を使用せず、7.8t/haの収穫に成功。
同箇所にて3回連続で無施肥による栽培を継続中。
(2014年末時点で支所内歴代最高記録を達成)

4

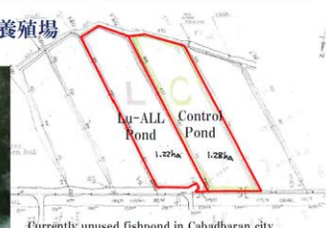
JICA案件化調査 実証試験ケース

ケース	ルオールの有無	養殖のタイプ	養殖密度(匹／ha)	給餌・水の効果
ルオール池	有り	海水によるブラックタイガーの単養(粗放)	10,000	無し
コントロール池	無し		10,000	無し

Location



試験養殖場



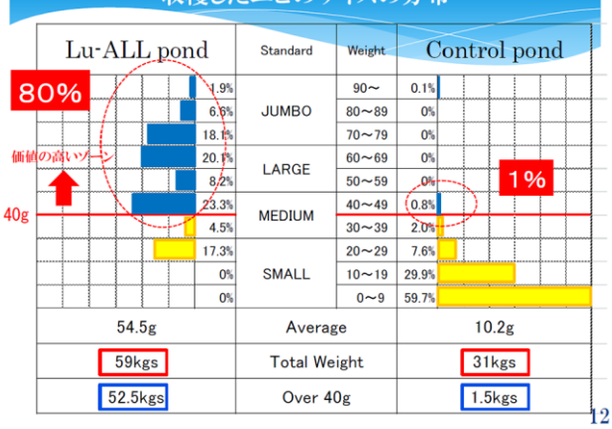
Currently unused fishpond in Cabadbaran city

7

ルオール池　コントロール池

11

収穫したエビのサイズの分布



12

4-2-3-3-3「微生物叢の研究　種苗会社の視点から」
＜酒井　隆子:みかど協和株式会社　代表取締役副社長＞

私からは種苗会社の視点で、会社の紹介と、業界の微生物叢研究―主に病原菌の研究―の実態を説明する。私たちみかど協和は野菜の種子を育種、生産、販売をしている。日本の種苗会社は、タキイ種苗やサカタのタネといった大手でも、経営主体はファミリービジネスがもとになっている。種苗産業の規模自体もそれほど大きくない。その中でも日本は非常に特殊な市場である。

世界の種苗業界の概要を説明する。売り上げ順に上位 10 社を並べると、みかど協和はこの中の 2 位のリマグランという会社のアジアのハブとして活動している。1 位はモンサント社で、遺伝子組換え作物で有名だが、ここで示すのは野菜の売り上げのみを抽出した金額である（つまり遺伝子組換え穀物などは含まれていない)。業界の特徴として、世界の総売り上げの規模でみても非常に小さい。フランス、日本、オランダの 3 国が種苗の開発のキーになっており、研究開発や技術開発レベルでもリードしている。

リマグランはフランスの農協主体の会社で、もともとはトウモロコシの種子の採種組合からスタートした、農家が株主の会社である。企業戦略として、世界の野菜種子市場の約50%を占める地域に育種拠点を置くということで、アメリカ、ヨーロッパ、イスラエル、そしてアジアでは日本に拠点を置いている。日本は農耕地が狭いものの種子の価格が高いので育種拠点になっている。リマグライングループ全体の研究拠点は世界中にあり、いろいろな地域の病原菌の情報を得ることが可能で、トライアルのネットワークも使える。私たちは主に、東アジア、日本、中国、韓国をターゲットにして育種研究を行っている。

植物との相互作用により病気を引き起こす微生物は、ウイロイド、ウイルス、細菌、カビなど広範である。種子病理は、種についている病原菌、微生物叢の研究であり、種苗会社では非常に経済効果の高い分野で重要視している。現在は、菌の分類、生態などの研究を行っており、今後は微生物叢の研究、菌の検出方法などが重要になってくるだろう。線虫も種苗業界では非常に重要な課題で、微生物分野には入らないので私たちも取り組みにくいが、種苗品種にとって線虫抵抗性は非常に大きな価値があり、この分野をどう開拓していくかも課題である。

種苗会社の植物病理の研究者は、植物病理や微生物学、植物の遺伝学や育種学や植物生理学、種子病理や種子生理もある程度知っていなくてはならず、全方向的な理解が必要である。業界全体のマーケットサイズが小さいので給与もそれほど高くなく、若い優秀な人を惹き付けることが難しいのが一つの課題である。

微生物研究は、有用微生物の研究と病原性微生物の研究に大きく分けられる。業界全体では、例えば生物防除ができる微生物を種に混ぜる、それから根圏微生物について土壌条件を変えるような資材を売るという業態もあるが、私たちの会社ではやはり病原性微生物研究が主体となる。病原性微生物の研究開発は、まず接種系の開発で、培養して植物に接種し病気を再現する。もう一つは、植物側の抵抗性遺伝子をメカニズムから研究していく。現場で出た病気の種類を同定する、いつどこでどういう病気が出たかマッピングとウォッチをする、また植物検疫への対応をする。

私たちが取り扱っている種苗の商品群は、カボチャ、ネギ、ダイコン、キュウリなど植物種として 12 種以上、多様な属の種苗を販売している。販売先の現地で種子に付着した病気が発生するなど、様々な問題が起こるので、ありとあらゆる種子に対する病理の知識が会社では求められる。世界の種苗会社のトップ 10 に入るようなタキイ種苗やサカタのタネはさておき、国内 3 番目以降の企業になると、規模が格段に下がって横並びになるという業界構造になっている。そういった企業では、病理の研究者を配置できても多くて 2 人、タキイ種苗やサカタのタネの規模の企業では 4～5 人配置できるかもしれないが、日本のトップ 10 の種苗会社にいる病理研究者を全て集めても 50 人いるかどうかという規模である。そういう状態になっているので、研究基盤は非常に弱い。

しかしながら、1970 年代ぐらいから過去 40 年の間に技術とビジネス環境は激変している。その変遷を俯瞰的にまとめてみると、技術で一番大きいのはゲノム情報の時代が野菜の業界にも到来したこと。ありとあらゆる作物で、ゲノム情報をどう利用するかという研究が世界中で今盛んに行われている。ビジネス環境で一番大きいのは、種苗会社の統合再編、特に化学会社への吸収合併が進んだことである。現在世界のトップ 10 の 4 番目くらいまではほぼ化学会社が本体あるいは化学が主要部門の会社になっている。そういったモンサントやシンジェンタといった巨大企業では研究が非常に高度化している。

もう一つ最近の懸念事項としては、地球温暖化、種子流通のグローバル化により、新しい病気の発生と国内への流入の問題が顕在化しつつことである。現在、日本の野菜の種の 95%は海外採種なので当然、海外から病気が入ってきやすい。それを水際でどう防ぐか、という点は種苗会社も非常に頭を悩ませている。

病気の判定や病原体の検出技術については、圃場で病気にかかったものから菌を単離培養し、接種実験をするという古典的な方法から、DNA マーカーと PCR を使った方法へと移行しつつある。しかし古いやり方が完全に廃れるわけではないので、技術が置き換わらず積みあがっていく。一つの種苗会社が、この高度な技術を使いこなして品種開発に生かさないと、開発競争に負けてしまう、そういったビジネス環境にある。

微生物研究の課題の現状認識について、まず商品種子における種子伝染性病の検査および除染法の開発について述べる。種子伝染病は、種子に付着している菌がその次世代で発病し、畑を汚染する。現在私たちは道義的にも無病の種、健全な種を供給する責任があるが、現在種子はほぼ 100%海外で採種している。種子についた病原菌をどの段階でどう検出するか、そして売る種、売れない種をどう選別するかが私たちのビジネスの中で非常に重要である。汚染被害が出た一例として、スイカ果実汚斑細菌病（BFB）について紹介する。ウリ科全般に知られる細菌性の種子伝染性病害で、タイ、インド、中国では既に畑にいる病気である。タイはウリ科野菜の世界的な生産地であり、種苗会社もタイで生産している。1989 年にタイからアメリカに伝搬しアメリカのスイカ栽培は壊滅状態にまで陥った。そのときからアメリカはこの病気に関して汚染国になった。日本ではこの BFB はまだ定着していないので、侵入警戒病害という植物防疫上の分類に入っており、発生した場合は根絶が義務づけられている。狂牛病や鳥インフルエンザレベルである。2000 年代に入ると 3 年に 1 回ぐらい、全国のどこかでこの BFB の問題が起きている。よって輸入の際には、栽培地検査、つまり実際に生産する現場で検査をすることが義務づけられており、その検査証がないと輸入できない。耐病性品種は今のところない。BFB は侵入警戒レベルが最高で、栽

培地検査のほか輸入前に検査ラボでの一定プロトコルでの検査を行うことも義務付けられている。現在この検査ができるのは、種苗管理センターという農林水産省の機関を含め2箇所だけなので、私たちも含め、ほとんどの種苗会社はアメリカの検査会社に検査を外注している。侵入警戒レベルが最高のものについては、植物防疫所による全量抜き取り検査も必要で、さらに自社で検査する場合もある。こういったBFBのような菌の場合は種子販売前に全てのプロセスの検査を経てから販売される。侵入警戒レベルの高さによって、栽培地検査や植物検査所だけで輸入可能なもの、さらに検査ラボに外注して全部検査すれば輸入可能なもの、といった輸入の前に必要な検査の段階が設定されている。種についている菌を迅速かつ正確に検査する手法の開発が、現在非常に求められている。

国際的な種子の病理検査システムについて説明する。ISF、ISTA、ISHIという機関がある。ISF（International Seed Federation）は、種子の輸出入、検査、研究全般に対して世界中の種苗会社と国が資金を拠出して作った非営利の業界団体である。ISTA（International Seed Test Association）は、種子の品質検査のガイドラインを作る、さらにISTAの下にISHI（International Seed Health Initiative）があり、ISTAに対してプロトコルを提案する機関である。三者がサイクルになって働き、ISTAに加盟している会社がISHIという機関に研究者を派遣し最新の種子伝染性病害の検出方法の開発や選定を行う、ISHIが選定したプロトコルをISTAで採用するかどうかを決め、それでISTAが各国に新しいプロトコルとして提案する。

ISHIは各国の種苗会社の研究者が主体である機関だが、彼らはそれぞれ自国の大学の先生たちとコミュニケーションをとって研究をしている。日本の場合は、そういったアカデミアのカウンターパートがいないので、種苗会社が独自でやっている。日本種苗協会（日種協）という業界団体は、タキイ種苗、サカタのタネのリーダーシップのもとに小さい会社も集まり、検査方法などの情報交換をしている。

日種協はISFという一番上の機関と情報交換しながら、政治的レベルの意思決定を行い、各社から研究者を出し合い、その中から代表者を出してISHIに意見を提出したりしている。一方、農林水産省では種苗管理センターの病理の担当者が、ISTAの理事として日本を代表して参加しているが、この分野の専門家の数が限られているため後任のめどがつかないと聞く。また、植物防疫所は独自に検査法を開発しており、このあたりの連携も全く個人的なレベルの域を出ない。また、日本の検査機関はここ一箇所だけなので、種苗会社は海外の認証検査会社に全部検査を依頼しており、時間もお金もかかっている。こういった危うい検査体制の中で、私たちは種子伝染性病害の研究をやらざるを得ない状況である。

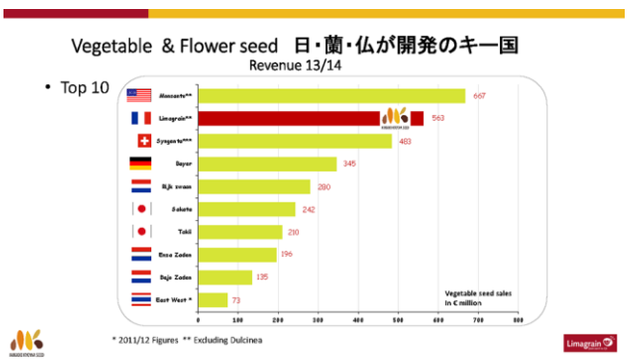
ここで大きな問題なのは、種子病理に関する新規技術の開発基盤が日本には全くないこと、また新規技術の応用基盤は民間会社主体になっており力も弱いこと、である。

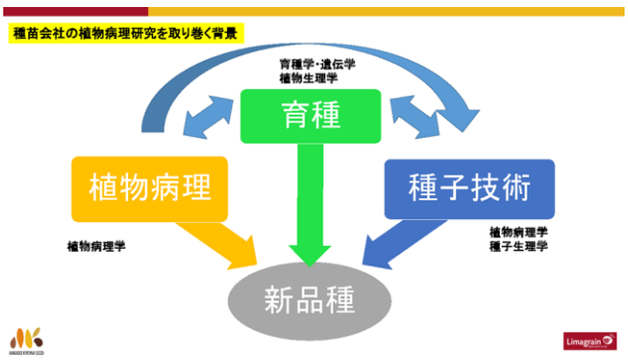
種子病理学、育種学、分子遺伝学の連携は少しずつ始まっているとは思うが、やはりアカデミアとのギャップがあり連携をとるのが難しい。ただ、様々な喫緊の課題が生まれている状況なので、実用研究の発展のためには私たちももっと意識的に双方向の情報交換、基盤整備をやっていくことが必要と考えている。

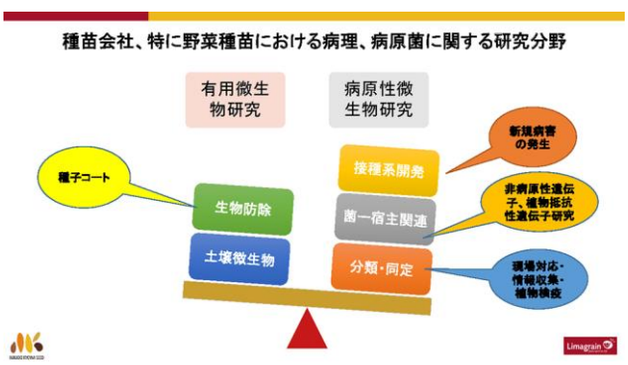
【質疑】

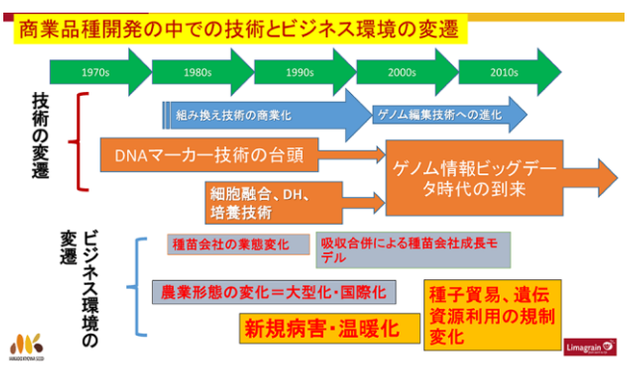
Q: 農研機構の野菜茶業試験所というのが三重県にあり、出口が求められている。おそらく今後民間企業とのきちんとした連携が求められてくる。病気の研究は民間企業ではなかなか難しいと思うので、その辺りの情報を共有できるコンソーシアムをぜひタキイ種苗、サカタのタネ、みかど協和が中心になってつくったらどうか。

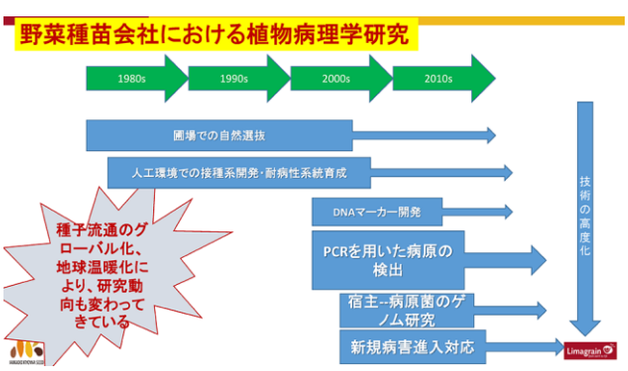
A: そのようなアプローチは必要だと考えている。

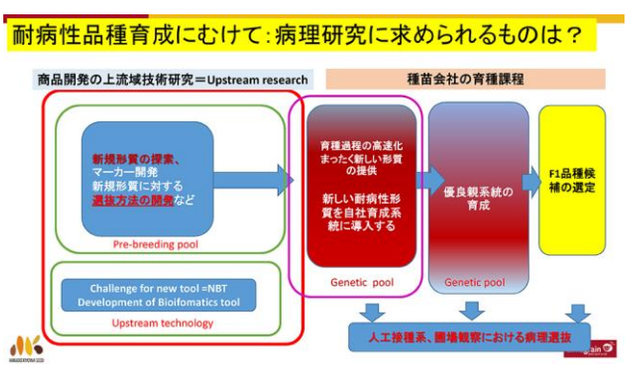

Vegetable & Flower seed 日・蘭・仏が開発のキー国
Revenue 13/14
• Top 10
667
563
483
345
280
242
210
196
135
73
Vegetable seed sales in € million
* 2011/12 Figures ** Excluding Dulcinea


種苗会社の植物病理研究を取り巻く背景
育種学・遺伝学
植物生理学
育種
植物病理
種子技術
植物病理学
植物病理学
種子生理学
新品種


種苗会社、特に野菜種苗における病理、病原菌に関する研究分野
有用微生物研究
病原性微生物研究
種子コート
生物防除
土壌微生物
接種系開発
菌ー宿主関連
分類・同定
新規病害の発生
非病原性遺伝子、植物抵抗性遺伝子研究
環境対応・情報収集・植物検疫


商業品種開発の中での技術とビジネス環境の変遷
1970s
1980s
1990s
2000s
2010s
技術の変遷
組み換え技術の商業化
ゲノム編集技術への進化
DNAマーカー技術の台頭
ゲノム情報ビッグデータ時代の到来
細胞融合、DH、培養技術
ビジネス環境の変遷
種苗会社の業態変化
吸収合併による種苗会社成長モデル
農業形態の変化＝大型化・国際化
種子貿易、遺伝資源利用の規制変化
新規病害・温暖化


野菜種苗会社における植物病理学研究
1980s
1990s
2000s
2010s
圃場での自然選抜
人工環境での接種系開発・耐病性系統育成
DNAマーカー開発
PCRを用いた病原の検出
宿主--病原菌のゲノム研究
新規病害進入対応
技術の高度化
種子流通のグローバル化、地球温暖化により、研究動向も変わってきている


耐病性品種育成にむけて：病理研究に求められるものは？
商品開発の上流域技術研究＝Upstream research
種苗会社の育種課程
新規形質の探索、マーカー開発
新規形質に対する選抜方法の開発など
Pre-breeding pool
育種過程の高速化
まったく新しい形質の提供
新しい耐病性形質を自社育成系統に導入する
Genetic pool
優良親系統の育成
Genetic pool
F1品種候補の選定
Challenge for new tool =NBT
Development of Bioifomatics tool
Upstream technology
人工接種系、圃場観察における病理選抜

4-2-3-3-4「微生物生産による素材･原料製品製造」
＜橋本　信一:協和発酵バイオ　技術開発部　部長＞

微生物を使って物質生産してきた長年の経験に基づきお話する。私たちの会社の紹介をすると、経営理念は「ライフサイエンスとテクノロジーの進歩を追求し、新しい価値の創造により、世界の人々の健康と豊かさに貢献します」で、経営理念に「テクノロジー」の文言があるくらい、非常に技術志向の強い会社である。2021 年に向けたビジョンは、発酵と合成の技術を使い、医療・医薬・ヘルスケアの領域で、何か新しい物を作っていくことである。協和発酵という会社は、以前は調味料や動物の餌の原料も作っていたが、現在は医療やヘルスケアのところに集中する方向で進んでいる。

協和発酵の歴史について紹介する。もともと発酵の会社として始まった。大きなブレークスルーは、1956 年のグルタミン酸生産菌の発見である。この発見に端を発して様々なアミノ酸について発酵生産が可能になり、現在では調味料用のグルタミン酸ナトリウムだけでも世界で年に約 300 万トンが生産されている。リジンやスレオニンなど飼料用のアミノ酸も、年に約 300～500 万トン生産されている。非常に大きな産業に急成長した。発酵生産が私たちの一つのバックボーンかつ生きる道と考えている。

協和発酵の時代からの、いわゆる微生物研究の流れを簡単に紹介する。私たちの会社の製品と、当時の応用微生物学的なトレンドや最先端の技術を並べてみると、例えば 1960 年代から 70 年代にかけては、変異育種や代謝制御発酵があり、これによって様々なアミノ酸や核酸が発酵生産できるようになった。1980 年代の半ばくらいから遺伝子組換え技術が可能になり、新しい製品ができた。2000 年頃からゲノム情報が入手可能になり、これを使ってまた今まで作れなかったようなものがようになった。その時代、その時代で、新しい技術を取り込みながら、いろいろな製品を作ってきた会社である。

複合微生物の利用について説明する。通常の発酵は 1 種の菌だけでやるが、2 つ以上の菌を使う物質生産も若干やっている。一番最初の原型は、菌を 1 つだけ使うものだが、いわゆる微生物の菌体反応というものを利用している。イノシン酸という調味料を発酵で作る際、イノシンをリン酸化する。リン酸化するには ATP が必要だが、ATP は非常に高価なので、これを外部から与えるとあまりに高コストになる。そこで微生物の中で ATP をつくらせ、それをイノシンのリン酸化に用いることで、生産していた。

私たちはこれを ATP 再生活性と呼んでいたが、これを応用してさらに複雑な反応にチャレンジしたのが、CDP コリンの生産反応である。*Corynebacterium ammoniagenes* という菌と組換え大腸菌と 2 種類の菌を混ぜて反応させる。*Corynebacterium ammoniagenes* はオロット酸から UTP を作る反応と、グルコース由来で ATP を作る反応をする。組換えの大腸菌は UTP や CTP を作り、最終的に CTP と P-choline が結合され、そして CDP-choline となる。この反応は多くの ATP を消費するが、必要な ATP は全てこの再生系でまかなう。反応図は複雑だが、実際に使う原料はオロット酸とコリンとグルコースで、非常に安い原料である。これは脳循環系の薬になるが、アメリカでは健康食品として売られており需要がある。複雑な反応だが実際の工場のオペレーションは簡単で、2 つの菌を培養してタンクで混ぜるだけである。多くの酵素が関与する反応ではあるが、酵素を単離する必要もないので、製造工程としてはシンプルである。

この生産システムを使って、次に高付加価値のもの、糖ヌクレオチドを作ることにチャレンジした。試薬としては非常に高価な化合物である。オロット酸から UTP をつくり、大腸菌側では、糖から糖ヌクレオチドを作る酵素系を組み合わせたものを作る。最終的に UDP-ガラクトースができる。使用原料はやはりオロット酸やグルコースやラクトースといった、安価なものなので、非常に簡単に安い原料から高価なものを生産する系である。残念ながら UDP-ガラクトースには大きな市場がなく、製法はできたものの、商売にはなっていない。

これをさらに発展させたのが 3 つ菌を使ういうシステムで、さらに糖転移酵素を発現させた大腸菌をもう一種混ぜる。糖ヌクレオチドが別の糖に転移して、多糖、すなわちオリゴ糖ができる。糖転移酵素や酵素を入れ替えてやれば多様なオリゴ糖を生産することが原理的には可能になった。残念ながら、このあたりのオリゴ糖も今のところ市場がないので、商売にはなっていない。

私たちはこれを複合微生物反応系と呼んでいるが、長所は、菌に機能分担して物質生産させることで非常に複雑な反応を進行させることができる。原料が非常に安く、工場のオペレーションは簡単である。一方短所も若干ある。1 つは、一個一個の菌が本当に何をやっているのか説明するのが難しい。欧米の科学者に説明すると、補酵素のやり取りは菌の間でどう行われているか、あるいは個々の菌のやっていることが明確ではないと言われる。それから、オペレーションは簡単だが、一度工場でうまくいかなくなると、原因の解析が非常に困難なこと、現場に導入するときに、安定した生産にこぎつけるまでに習熟が必要なこと、である。単純な菌を使った普通の発酵に比べると、簡単とは言いながらも難解な部分もあり、ターゲットにする生産品は、やはりある程度付加価値の高いもの、医薬品などを作るシステム向きだと考えている。

一方で、やはり医薬品となると規制が厳格になる。食品についても同じ傾向である。生産性にぶれがない、プロセスの化学的な説明を求められたりもする。規制をクリアするために必要な解析との兼ね合いも考慮する必要がある、これが今後の課題と思っている。

もう一つ、私たちの会社で複合微生物が最も活躍しているのは、活性汚泥による廃液処理である。これは 1970 年代頃から実用化され、ずっと使っているが、現在の工場にとってはなくてはならない工程である。たくさんの菌がここにいるのはわかっているものの、残念ながら個々の菌が実際に何をしているかは全くわからない。実際の管理は、温度、pH、汚泥の色やにおいなど、適当に判断しながら入れる廃液の量や通気量をコントロールする、勘と経験に頼ったやり方である。本当の複合生物系を扱おうとすると、最後はこんな形になるのではないかという印象を持つ。

発酵生産する立地として、日本の立ち位置を紹介しておきたい。はっきり言って、全然魅力的ではない。理由はまず、発酵原料の多くが糖だが、日本は非常に高い。もちろん人件費も高い。さらに水も電気も高い。これらを全部考慮すると、日本でやるよりアメリカのほうかはるかに良い。製品を出すにしても、日本では特に、過剰な安全や安心を要求される。組換えに対する社会受容のレベルが低いので、事実上、新しい組換えの製品を出すのは難しく、ほとんど不可能に近いと言える。こういった状況を考えると、新しいものを日本で作って出すのは企業としてはなかなか厳しいというのが正直なところである。

【質疑】

Q: ATP が大腸菌に移るのは厳しいような気がするが、そのあたりのメカニズムは知られているか。

A: 界面活性剤や溶媒を入れて細胞膜を破る処理をしているので、透過していると思う。実際見たことがあるわけではないが。でも、そう考えないと反応しないので、多分そうなっているのだと想像している。

Q: 抗生物質生産や ATP 生産では、補酵素、NADP などが結構問題になる。大腸菌は弱いのでこの方法で大量生産できるのか疑問に思った。

A: 膜処理は部分はノウハウで公開していない。

Q: 以前、メタゲノムをやっていたときの経験から、最終的に生産する際には組換えになってしまう。良いものを取ってきても、大腸菌などに作らせると言った時点で、まず食品関係の企業に拒絶され、他の企業もなるべく使いたくないという姿勢で、いつも終わっていた。最近になって多少は、バイオエタノールのようなものは組換えでも良い、となってきつつあるが、自然変異を蓄積させる形で何とかクリアしようというのが共通な動きだと思う。日本は魅力的な国ではないというイメージは私たちも持っているが、ただ、そういうことを言っているばかりでは、せっかくプログラムを作っても結局企業も要らない、となる。何かこれに対する解決策はないのか。

A: 規制当局もだんだん態度を変えてきているとは思うが、真の問題は、やはり消費者の嫌悪感・忌避感である。消費者が嫌がると食品企業が嫌がる。そうすると、私たち素材を作る方は別にどちらでも良いのだが、買ってくれなければどうしようもないので、結局だめになる。私たちとしては結局、組むのは欧米の会社で、まずアメリカで上市してみましょうという話になってしまう。あとはやはり、医薬品を狙う。薬は食品と違って、効果さえあればいいので、忌避感がなくなる。薬の原料や薬そのもの、そういったところに応用していくのは、日本でやっていく唯一の可能性ではないかと思っている。あとは国民の考えが変わってくれないと、いかんともしがたい。

Q: 発酵関係の大学の先生は、日本の発酵分野は国際的にも評価が高いと言っており、自分は門外漢なもので鵜呑みにしている。しかし研究分野ではリードしていても、やはり日本では難しいという話が最後に来ると、どういう戦略を考えていけば良いのか。本当に日本の発酵分野の研究がすごいのであれば、その力を産業界の力としていくにはどうすれば良いか、どういうことを考えていけば良いか。規制の話は別にして例えばマーケティングのところでも良い。もう少し日本人の気持ちを明るくするようなことはないか。日本人は狭いところに住んでいて外からの影響が少なく、できれば現状維持でじっとしていたいというメンタリティがあるのかもしれない。しかし前向きに考えたときに、どうすれば優れた技術、研究、能力を使い切れるか、それについてのアイディアはないか。

A: 発酵の技術は確か日本は優れており、まだ全然世界に負けてはいない。ただしアメリカやヨーロッパが猛追しており、中国も追い上げているので、それほど安閑とはしていられない。特にアミノ酸など、大量生産するようなものは、日本で作ってもペイしない。ただし、実際に製造するのは別の国になったとしても生産菌は日本で作るというのはあり得る。日本で本当に研究開発も生産もするとなったら、やはり医薬品のよ

うな高付加価値のものをやるしかないだろう。そこはまだいろいろな可能性があると思う。複雑な化学構造であっても、バイオの力を使い、化学合成ではなかなか難しいところをスキップするようなところはできるだろう。その部分で、メタゲノムからいろいろ新しい酵素を見つけてきて適用するという路線は大いにあり得る。

Q: 単価が上がらないようなものに関しては、日本の技術を海外に技術移転する形で、現地産業の活性化と日本への還元という路線、一方、高付加価値の医薬品ならば日本の技術で日本で生産、という二刀流で考えるべきか。おそらく、医薬品となったら社会受容されるだろうから、需要は十分あるということか。

A: 日本は研究の拠点としてはあり得るが、製造の拠点として考える場合は、相当作るものを考えなければいけない。

Q: 日本の企業が一層グローバル化を進める、今述べた二刀流のようなことをやっていく必要があるということか。

A: その通り。味の素も多分、もう日本国内でアミノ酸発酵はやっていないが、研究はもちろん日本でやっている。そういう二刀流の路線だろう。

協和発酵バイオ（株）（KHB）

経営理念

ライフサイエンスとテクノロジーの進歩を追求
より、世界の人々の

事業ビジョン（VISION2021）

発酵と合成の革新的技術を駆使し、
医薬・医療・ヘルスケア領域のニーズを満たす
高付加価値機能性素材を、
優れた品質のもとに提供し続ける、世界随一
のバイオケミカルメーカーとなる。

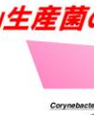
新しい価値の創造 ➡ 世界の人々の健康と豊かさに貢献

アミノ酸発酵酸業の生みの親

Glu生産菌の発見 1956

アミノ酸発酵産業

総合アミノ酸メーカーは世界で3社



栄養補助

>20,000T/Y

医療用途

飼料

>3,000,000T/Y

調味料

>3,000,000T/Y

KHBの製品開発と応用微生物学のトレンド

時代の最先端技術を反映した研究で製品を生み出す

	第一世代		第二世代		第三世代
アミノ酸発酵	各種L-アミノ酸	➡	D-アミノ酸（D-Pro，D-Serなど） 希少アミノ酸（ヒドロキシプロリン等） アミノ酸誘導体	➡	アミノ酸～ゲノム育種ジペプチド
核酸発酵	IMP/GMP ATP NAD/NADH FAD/FMN	➡	CDP-コリン Vit．C リン酸	➡	オリゴ糖・糖ヌクレオチド（シアル酸）（シアリルラクトース）（フコシルラクトース）（グロボトリオース）など
生理活性物質発酵	CoQ10 Vit K2 ヒアルロン酸など	➡	プラバスタチン		

代謝制御発酵 ➡ *遺伝子組換え* ➡ *ゲノム生物学*
ゲノム情報の利用
変異育種 ➡➡➡ *複合生物系の利用*

複合微生物反応の特徴

長所

1. 複雑な反応を機能分担
2. 安価原料からのプロセス
3. 比較的単純なオペレーシ

応用対象
より高付加価値化合物へ
（医薬品など）

規制の厳格化
（振れないプロセス
科学的な説明）

短所

1. 科学的解析・説明困難
2. 複合的不調原因は厄介
3. 安定プロセスまでに要習熟

複合生物系プロセス－廃液処理－

活性汚泥法による廃液処理

個々の菌の解析や管理なし

温度、pH、色などで診断→廃液量、通気量で制御

【総合討論】

CRDS: 今日のワークショップでは、微生物のスクリーニング、メタゲノム、植物微生物の相互作用、バイオインフォマティクス、産業界からの演者には微生物関連の話題について提供していただいた。まず全体を通して補足したいことなどあったらお願いしたい。

C: インフォマティクスとウェットの生物学者の協働があまりうまくいっていない例があるのではという問題提起について、補足でコメントしたい。審査・評価する側にインフォマティクスの人材が入っていることが必要と思う。審査の時点でインフォマティクス人材が入っていないケースはやはりうまくいっていない印象がある。もう一点は、そもそもインフォマティクスの人材が少ないというのが大問題で、1 人の先生が様々な分野を掛け持ちせざるを得ないため、きちんとした連携が進まない。負のスパイラルがある。そういう先生が忙しいので人材育成もできず、研究も効率的に進まず、結構いろいろなことが絡み合っている。

今年度さきがけであったような、ペアでの応募の仕組みは良いと評価している。バイオインフォマティクスは 1 つの独立の領域のように置いて一私の知る限りバイオインフォマティクスの重点領域というのはこれまで立ったことがないと思うが一、いったんバイオインフォマティクスでまとまりを作ってもらった方が良いのではないか。バイオインフォマティクス技術は DNA 解析や表現型解析という手法の違いもあれば、対象とする生物も違う、応用範囲も医療や農業や微生物工学など多様なので、一旦バイオインフォマティクスとしてまとまりを作るのが良いのではないか。その中で有望な技術ができれば、その後 JST の別のプロジェクトの間でマッチングをするような形もあり得るのでは、その方が上手く行くのではと感じている。

C: 現在いろいろな採択課題の中で、プロジェクト内での研究だけでなくバイオインフォマティクスの人材養成も行う仕組みを含むようにと募集要項の最後の方に書かれていることが多い。そういうものがないと採択されない、という強さで書いてある。そうすると、一番声のかけやすい知り合いに声をかけて、何となく申請するものの、結局採択されたあとは自分たちの好きな方向に流れてしまう。最後に良い論文が出ると OK で終わり、という話になりがちだ。ある程度戦略的に大きな予算を投入して研究をする場合には、そういうところを意識的に、入り口だけではなく最後まで、進行管理をきちんとやっていかなくてばいけないように思う。今日のワークショップの話題では、微生物を個別に扱う技術に関しては様々な技術が編み出されていて、すばらしい論文も出ているとは思うが、その途上で出てきた情報の中からまた確かなものを抽出していくといった、そういう研究手法もあり得るのではないか。つまり一度取った情報を何回も再利用することで、様々な角度からいろいろな人が眺めると別の解釈や発見がある可能性もあるだろう。自分の研究で情報を作るとそれで終わりという態度をただして、データをうまく統合し、多くの研究者が活用可能な状態にして、せっかく作ったデータを何度も有効に生かせる仕組みが必要かと思った。そのあたりについてはどう思うかご意見をお聞かせ願いたい

具体的に言うと、自分たちで一生懸命 NGS を回してデータをとって、自分たちが見たいものが終わると放置している。その後どこかで何かのシーケンスをすると聞いて、以前同じことをやったかも、と思い出すようなことや、あの場所を探せばそのデータはあるかもしれない、と思いつくことはしばしばある。それがもし知り合いであればデータのやり取りもできるけれど、システマティックにみんなが見られるような仕組みにするというのはどうか。現在日本の限られた予算の中で研究効率をあげていくにはそういった努力が必要と感じている。

C: 企業が入るのとそのあたりは難しい場合もある。1 つ私が先ほど提案させていただいたように、ゲノム情報の質などといった点で、1 つクライテリアがないと使えないというのが実情と考えている。複雑な構造を持つ二次代謝産物の場合は特に、世の中に出回っているデータではほとんど何もできない。なので、こういうプロジェクトを国でやるとしたら、全員がどのレベルのゲノムを扱うということを最初にきちんと決めてかつ一様にできるようにしてか初めてスタートするべきという気がしている。ばらばらなデータを大量に出されてもほとんど使い物にならないので、放置されるのも仕方ないのかなという気はする。

C: 各研究者でやりたいことがそれぞれ違うので、質を全部統一するというのは現実的ではないかもしれない。ただし、そのデータがどういう質を持っているのかというのとセットでデータを出していくことはできるだろう。つまり、自分はこういうデータが欲しいからこの質のものを使うというふうに選択できる。今はそういうものがないので効率的な再利用ができない状況なのだと思う。「このデータはこういう質でのものである」ということをつけるのは大事だろう。

C: 今、微生物のプロファイリングがかなりの勢いで世界的に行われており、もうかなりオープンに使える状況になっている。そういったデータをさっと見る分には問題ない。要は、私たちがバイオインフォマティクスへ期待する際、いろいろなレベルがあるのだと思う。例えば、植物と微生物の共生相互作用を見るためにこういった研究を進めるスタイルにしたい、と思いついた際、少しアドバイスをもらえばできるレベルもある。高度な場合には、例えば自然の生態系を見るためにはどうしても、その場の情報からこうすればその微生物の培養が可能になるだろうといった情報を抽出する、といったレベル。こういった場合は専門家集団を作ってやらなければいけないだろう。また、未知の機能をどうやって知ることができるか、これはバイオインフォマティクスと実際の微生物を扱える現場の人たちが組んでやらなければいけない。今述べた後者の 2 つはかなり大きな課題で、それは腰を据えてやらなければいけない。またプロジェクトが終わったら終わり、という危険があると思う。バイオインフォマティクスは確かに重要だが、この領域でどの部分が特に重要かという中身をブラッシュアップして、それに向けてどういうふうにするかという形の提案の仕方もあるのでは。例えば、ここで掲げているような微生物と植物の相互作用とか、いわゆる微生物集団の持っている意味を明らかにするということであれば、少しの支援があれば今の路線上でできることもある程度ある。それとバイオインフォマティクスの大課題自体をやる、という、二つの方向性があるように思う。

C: 最近、社会実装ということがすごく言われるようになって、私たちの業界にも興味を持ってくれること自体は嬉しく思うものの、はっきり言うと、特に農業分野などでは出口のマーケットサイズ、研究コスト、基盤研究のコスト、この差が大き過ぎて、余りにもリアリティがない場合がある。例えば、育種の現場でブリーダーや病理研究者が行う試験では、菌を培養して植物に接種して、1 から 9 までのスコアリングで耐病性か耐病性ではないかという判定をする。つまり、データポイントは 9 個でそれに×個体数といった程度。それに対して、例えばゲノム情報が 3,000 あったとしても、出口はもう 9 個×個体数のデータポイントに集約されていく。結局余り大した情報が得られないのが悩ましい。ではフェノタイプ側のデータ情報をもっと集積しようという話になってくると、結局私たちのコストになってくる。マーケティング的視点が必要となるがそうなるとアカデミアでやっていることと近づけるのが難しい。特に微生物というテーマになると、私たちの農業、種苗業界と、別の業界では、そもそもターゲットにしているマーケットのサイズが全然違うのではないかという気がする。それぞれに実装を意識するということであれば、やはりシンクタンクレベルでマーケティング調査をやったらどうなのか。社会実装の中で、日本として何をターゲットにするかという点は結構重要なのではないかと思う。

CRDS: 確かにマーケティング調査はは非常に大切だ。現在、国が出資する研究開発のプロジェクトの中で、科学研究費補助金（科研費）は比較的自由に使える研究資金として、おそらく全体の半分くらいが充てられている。そちらはかなり自由度が認められていて、おそらくそういったところから次の萌芽的な研究が生まれてくる。残り半分については、細分化せずに大きいままで、今後の日本社会や世界の状況を考えながら、戦略的に予算を配分する。国の研究資金は大別してこの 2 つの流れがある。戦略的な方に関しても、社会実装にごく近い課題から、5 年 10 年という時間をかけてつながっていくような課題まで様々、そういう仕組みになっている。

社会実装を強く期待されているようなものについてはマーケティング調査が非常に大切だが、その一歩手前やさらにもっと手前ぐらいであれば、ある程度コストのほうはさておき、ゲームチェンジングにつながるようなものであれば、コストは比較的かかるものだという認識でいる。最初のところはコスト計算は良いとして、そこをクリアしたものに関しては段々コストを切り詰めていくようなことをやるのだろうと思っている。最後の出口に近いものは恐らくマーケティング調査がどうにもならなくて、結局、研究は進んだけれども全然商売にならない、という、先ほどの発酵の話のようになってしまう。

あともう一つ、今日の話題は、微生物と生物の多様性、および共生を解明するということで、微生物を基盤にして他の生き物との相互作用をきちんと解析していくという内容だった。CRDS はライフサイエンスの分野で言うと全体を俯瞰し、日本の特徴や強み弱みを分析しつついろいろな提案をしていくのが仕事である。その枠組みの中で考えると、今日の話題で紹介されたように、微生物はやはり良いものをたくさん持っている。それを、日本の特徴を強めていくためには、微生物単体ではなくて微生物と他の生き物との関わりといった形で、基盤的な研究としてやらなければいけないのではないかと感じた。その場合、インフォマティクスの手薄さといっ

た問題がいろいろとあるが、そこは従来の形とは違った形で取り込めるようにやっていくのが良いのではないか。微生物、というテーマとしては重要であるということを感じたが、そのあたりについてお聞かせ願いたい。

C: その通りと思う。単体ではなく全体像を見なければいけないというのはもう絶対確かである。だからどういう見方をするか、どういう意味合いを引きずり出すかというところが、一番の戦略的なポイントだと思う。幾つか段階があって、非常に細かいレベルまで解析するのは無理かもしれない。しかし、本当の全体の枠組みを見て、例えば非常に優良な土壌から荒廃した土壌まで、そういう連続性もあるだろう、また別の連続性としては時間軸、あるいは植物の生育のステージとともに、といったことも多分理解しておかないと、出てきた知見についてどう利用が可能かといったこともわからないだろう。例えばルオールを撒いた後についてどうなるのかが知りたいとか、そういうところで、最初に戦略的に、優先順位を決めながら進めていく必要がある。それから、バイオインフォマティクスに関しては、やはりどこかの機関が責任を持ってきちんとしたデータベースを作り、相互に参照できて意味合いが取り出せるようなものを作る必要があると思う。ちょうど JST は DBCLS を持っているので、そういうところを核にするといったことも可能なのではないか。

CRDS: 今、データの拠点化の話が出た。おそらく大きなプロジェクトを立てるときに、一つの方法として、それぞれ普段は別のところにいてバーチャルな研究ネットワークを作って進める方法が一つある。もう一つは、空間共有型の戦略的なプログラムのようなものを作る手もある。海外に行くとよくあるのが、日本は一つの機関に一つの組織ということがほとんどだが、例えば産総研と理研と大学がみんな 1 カ所に集まっている空間共有型研究プログラムがある。予算の使い方は大変とは聞くが、そこを除けば割とうまく動いている。そういう新しいタイプの研究拠点のつくり方、大変だとは思うが中核になれるようなところがあって少し頑張ってもらうということになれば、今までの課題が一つでも克服されるのではないかと思った。研究拠点や研究体制のあり方などについてご意見伺いたい。

C: フィールド（圃場、現場）の共有、拠点化、ということも大事と思う。ある人はあるフィールドでメタゲノムをやる、ある人は別のフィールドで別のことをやる、といった形だと、CREST で立ちあがったとしても最後は結局まとまらない。例えば、土壌、植物、微生物を研究対象に、出口を農業生産や環境浄化とする場合には、幾つか解析すべきフィールドを決めて、そこに集中していろいろな分野の人がやる、そういう体制を作ることが大事ではないか。

もう一つ、最終的に農業生産とか環境浄化が出口だとすると、仕組みがわかった後にコントロールしないといけない。例えば先ほどのエビやイネの話も、何かが一つの引き金となって全体のコントロールが一斉に動き始めるのかもしれない。そういうところも加えてプログラムを作る必要がある。

C: 短く事実関係だけ補足したい。DBCLS は、特任（任期付）や兼務ではない人が 1 人しかいない（つまり任期なしテニュアポジションは 1 人だけ）。

C: 結局、最後にコントロールするためには何かを加えたり操作したりする。例えば趣旨説明の資料に BioAg、モンサントとノボザイムの例があるが、生物農薬としての

バクテリアを加えたり、あるいは土に酵素を撒いたり、結局、何かを加えるというところが入ってコントロールすると思うので、そういう開発ができる人も拠点に入った方が良い。

C: ターゲットを決めてやる場合、さきほどマーケティングの話が出たがそれに関連してコメントしたい。現状では経済効果は余りないが、社会自身がそういうものを望む方向に変わっていく可能性あると考えた上で、人類のためにこれは必要だからやるとか、それが将来価値を持つといった方向はあっても良いのではないか。特に農業関係だと、農産物価格がどんどん下がっているので、それに換算すると非常に額が少なくなる。しかし、実際には国土保全や食料生産は非常に大事なことである。出口という意味ではそういう方向性があっても良いと思う。接種資材を使うとか、酵素などの物質を撒くとか、植物の品種を変えるとか、そういう形で生態系をコントロールし良い方向へ持っていく、手法のところはかなり初期からシビアに議論したほうが良いと思う。

CRDS: この会は、やはり最終的には予算要求と関係がある。うまくいけば来年の概算要求をどう出そうかという話になる。その際、農林水産省でもいろいろなプロジェクトが動いている。農林水産省が支援しているものと同じ切り口では難しいだろう。ある程度文部科学省、あるいは経済産業省といった方面もありうるが、そちらに向けて物を言わないといけない。学術としてあるべき姿、あるいはグリーンバイオロジーとしてただあるべき姿だけではなくて、やはり切り口や優先順位といったひねり玉を出さないといけない。オーソドックスにいくと結局、何か違うとばっさりやられてしまう可能性があるだろう。そこは少し工夫する必要がある。

C: バイオインフォマティクスの話が何度も出ているが、非常に大事な点だと思う。もしプロジェクトか何かを立ち上げるとしたら、バイオインフォマティクスのオープンラボのようなものを作ることを考えてはどうか。おそらくプロジェクト内でいろいろな課題が出てくると思うので、各課題に義務づける形でバイオインフォマティクスを習得した若い人材を育成する形を取って欲しい。

現在、大学の入学者が減り、教員の定員もどんどん減らされ、新しくバイオインフォマティクスの研究室を作るというのはかなり難しい。かといって、状況は本当に深刻なので看過できない。中国が急伸しているのは、その部分が強いからだと思う。私自身にも苦い経験があって、結局外国に頼らざるを得なかったことがある。本当は日本人だけで論文を書きたかったが、共同研究者として入れざるを得ないということも経験している。これから中国とアメリカと対等にやるためには、バイオインフォマティクスは絶対必要だ。もし新しいプロジェクトが立つなら、とにかくバイオインフォマティシャンの養成部門を作ってほしい。

どこかバイオインフォマティクスが得意なところが中心になって、指導は大変だろうが、十分な研究資金はつけてもらって養成をやる。そうしないと、多分日本の科学技術はこれからどんどん厳しくなっていくのではないかと心配している。

C: CREST やさきがけとかなどのアドバイザーを幾つかやっておりその中で感じることについて述べる。バイオインフォマティクスができる人は、コンテンツを持っていない場合があるが、そういう人もとりあえず採択してしまうのはどうか。普通の

研究費だと、申請者がある内容で採択されたらそのあとの内容変更は難しい。
CREST やさきがけは、研究総括の力で、採択したあとで予算を半分にしたり、途中で打ち切ったり、あとで融合させたりできる。そういったことができるのが逆に良い。CREST やさきがけで人材養成というのは現存のやり方では難しいのが実情と思うが、採択の段階でそういうバイオインフォマティクスができる研究者を選んで、コンテンツのある人と融合させてしまうということをもう少しやってみてはどうか。その分、審査員やアドバイザーのところにも、バイオインフォマティクスがわかる人が入るという調整も必要になってくるだろうが。
今日は農業系の演者が多かった、私も海洋がもともと専門だが農業分野にも興味があり仲間に入りたい。農業、海洋、と余りにも領域を絞ってしまうと、実は日本の中に幅広くいる研究者を切ってしまう。だから研究の場を一緒にするということは、採択するときにどれだけたくさん来るか、その中で「この 3 つをつなげたらおもしろい話になるな」ということだろう。そのかわり間口を広げないといけない。例えば、キーになるコンセプト、「微生物との相互作用をベースにした」とし、すぐに企業に橋渡しができるもの、あるいは 10 年後に大化けするかもしれないもの、と研究テーマが多様になってもよい。新しい技術に駆動されるような、既存のやり方とは違う新しいエッセンスを入れるというのでも良い。ただし、キーワードとして「微生物との相互作用」、そこは動かさないでやってもらう。
CREST、さきがけとしてプロジェクトが立ったら、その中で募集と採択の仕方を工夫しつつ、 まだマチュアになっていない若い人たちがさきがけでトレーニングされて、コンテンツももらえて勉強できる、そういった配慮があれば人は育てられるのではないか。

CRDS: その通りだと思う。近年、医学・ライフ系の研究の様相が随分変わってきた。今までは、「脳科学」「免疫学」と言っていたのが、この 4～5 年横断的になってきた。例えば文部科学省の TR（Translational Research、「橋渡し」）拠点、かなり間口は広い。例えば CREST の動的恒常性は、基礎科学から臨床と、広い間口でやると、若い人たちもたくさん入り活力も生まれてくる。
本格的に研究資金を取りに行く話になったときには、いかにテーマを絞って、アトラクティブで、若い人を集められるか、というところが重要になってくる。オーソドックスにいくとなかなか難しい。実はこのグリーンの議論も 1 回 JST の中でやって、厳しい評価だった。どの省庁に向かって提案しているのか、誰に聞いてもらいたいのか、と。オーソドックスでは難しいので、ぜひそこを考えてほしい。

CRDS: 本日は企業の方にも来ていただいている。研究の着地点が、社会実装にいくのが 20 年後 30 年後だとしても、企画の段階から余りにも根も葉もない話であればどうにもならない。こういった研究開発をやるときに企業にどう関与してもらうかというのが、もう一つ考えなければいけない部分だが、そのあたりについて意見を伺いたい。

C: こういう企画の段階から発言させてもらうとすれば、企業側にはいろいろシーズはあるものの、それははっきり言って活用されていない。例えばさっき種に付着している菌の話をしたが、その研究は日本ではほとんどされていない。そのあたりは、

アカデミアの切り口で幾らでも追求してもらってよいと思う。おそらくパテントもとれる分野だろう。私たちも、特に種苗とか農業の分野で、微生物研究に関してそういったシーズがある、といったことを余り発信していない。特に文部科学省のほうの、サイエンス志向の人たちに対する発信はほとんどない。
土壌病害の問題地帯も日本にはたくさんあり、そのあたりの菌の相互作用などもすごく問題になっているところがある。そういった情報を私たちもキャッチできるような場所を、どこかで作ってもらう形をとった方がいいのではないか。

C: 企業では、例えば複雑な微生物系をどうやって扱うか、そのそもそもの方法論は思いつかない。私たちがアカデミアに期待するのは、基礎的なところでもいいのでそういう方法論をまず見つけてほしい。それがあれば私たちも応用例を考えられると思う。複雑な微生物を使うのであれば、トリガーはどうしたらいいのか、どういうものを添加すればいいのか、それは土壌でも腸内細菌でもいいかもしれない。そういった方法論がもし見つかるのであればすごくおもしろいだろう。
それから、例えばシングルセル技術や、バイオインフォマティクスもそうだが、個々の要素技術は、単独の企業ではなかなかそれは開発できない。例えばバイオインフォマティクスの拠点をつくり、そこをある程度オープン化して、企業も利用できるとか、一緒にやるとか、そういうことができると非常に有難い。

C: アウトプットのところについて触れたい。例えば CREST などの成果をどう発信して社会に還元していくかというところ。プロジェクトの開始当初から、あるいは途中からでも、企業が入っている場合でも、そのプロジェクトの中で新技術が出てきた場合に、そういう企業の方に使ってもらうような仕組みが実はない。結局研究者個人の単位で一生懸命やる。それではあまりに効率が悪いので、その橋渡しを途中から JST が介入してやっていくということも、もっと積極的にやればよい。例えば経済産業省の NEDO などは、すぐにでも企業に橋渡しするのがミッションなので、プロジェクトの途中でも企業とのコラボレーションは成立する。CREST の中でも、早く出てきそうな新技術については、そうやって企業に入ってもらえばよい。また、技術と言うのは本当に数年おきに新しいものができてくる。今まで 10 年やって 1 個取れるかどうかというのが、3 日で取れるかもしれない、そのくらいのスピードで革新がある場合もある。そういう良い事例、成果をうまく発信していけば、企業の人たちも興味を持って一緒にやっていけるのではないか。
今日は化学メーカーの人が少なかったが、本当は、合成のところでバイオプロセスを使っている化学メーカーはすごく多くて、大学にいるとそういうところと共同研究をいろいろやる。
そのときに、こういう酵素がほしい、こういったものが必要だ、とか、そういう企業側のニーズを聞かないといけないと思う。企業によっても介入するステージやタイミングは違うだろう。

CRDS: 次に、知的財産（知財）のことについて議論したい。企業との共同研究なり成果の活用という点では、おそらく最後は知財のことになる。今は日本でもバイドール法的な法律があるので、資金は国費であっても受託先が知財を管理する形になってい

る。受託先機関、主に大学や研究所になるが、機関によって知財マネジメント能力にかなりの差がある。それでも概ね企業よりは力がない。そうすると、JST がどういう形で知財に関わるか、新しい仕組みも含めて、考えていく必要があるのではないか。

C: 経済産業省の場合は相手が民間でも OK だが、JST でもそれが OK なのかどうか。経済産業省では、国民の税金を使った研究は国民に還元はしなくてはいけない、その場合に、たとえ 1 企業だけに利益が行っても良いと割り切っている。そこが儲かって税金を払ってくれれば良いという考え。ただし、完全にオープンにしたときに、極端な話、1 企業にあるいは複数かつ少数の、最初の参画企業だけに独占で知財を使わせる仕組みが JST にはあるか。そこが、企業が本気で研究にコミットするかどうかのポイントになる。つまり、自分たちがオープンにしないで守ってきた新しい技術や知見を出してくるか、ということ。

CRDS: 今までのプロジェクトでは、各大学や各研究機関によって、差が大きかったのだろう。企業も大学によって対応が随分違うと認識しているのではないか。JST のプロジェクトも当然、経済産業省とは対応が違うのだろう。同じ国の国費での研究開発なので、ある程度役所の中で意見統一をはかってもらうのも良いのではないか。

C: JST や文部科学省には、10 年とか 15 年とか長い目で見た研究開発、あとはいわゆる基礎研究をしっかりやることで、財務省を説得できるような材料を持っていけるような、そういったプロジェクトを作れば良いのでは。やはり、すぐに出口を求められるプロジェクトは、苦しい。それをアカデミアの先生にやらせることには私は賛成しない。グローバルにやってほしいと思う。

CRDS: キーワードを決めて、間口を広くというのが文部科学省や JST で組むようなプロジェクトの方向性なのではないか。しかしそれも 20 年ぐらい先のところをきちんと見据えていないといけない。20 年後、予想がつかない方向に行くこともあり得るだろうが、ある程度は狙いをつけてやる。ただし、学術研究をきちんとやることはやはり大事である。

C: 本当にその通り。ただ、研究費の審査をしていると、大体応募してくる先生たちが NEDO も CREST も両方通っていて、内容はどちらも大差なかったりする。NEDO は数値目標があって厳しいので CREST に、というのが本音ベースにあったりする。

JST は、文部科学省系列なので基礎研究かと思っていたら、基礎は科研費でやってください、CREST は基礎よりもっと上で出口をちゃんと見据えてくださいとのこと。申請時に、10 年後「これができればこうなる」と書いている先生がいるが、10 年間、全然出口に向かわないこともある。このごろはそれはもう許しませんよということで、ますます CREST と NEDO の違いがわからなくなっている。私の理解では、両者の大きな違いは数値目標があるかないかだけ。

財務省からも、「基礎研究」だけではもう CREST にはお金がつかない、そうすると、CREST の中でも「企業を入れなさい」「3 年以内に機械を作りなさい」そういうものもある。そこは思い切って経済産業省とは違う、もっと基礎寄りのこと CREST ではやってほしい。

C: 経済産業省プロジェクトのレベルだと、ポスドクを多数集めて一気にやる、それは大学の学生を集めてやるレベルでは無理だと思う。そういうプロジェクトは既に基礎研究ではなくなるので、そこは関係省庁や財務省をどう説得するか、頭を使わなくてはいけない。

C: それは難しいところだ。そういった研究がやれる大学、または研究室もあるし、大学の中も組織が多様化していて、研究室の構成員の内訳もバラバラである。学生もいるけれどポスドクや研究者も多いような組織があったり、大学の中に研究所があったり、大学と産総研が一緒にやっていたり。大学の中には、学生がほとんどいなくてポスドクばかりいるところすらある。大学の本分は何かよくわからない組織がたくさんあるので、それは何とも言えないのでは。

申請内容は申請者の力で見る、何をさせたいかは申請ベースで見れば良い。それよりも、CREST が求められているものは何かというところが非常に曖昧になっている。NEDO や科研費とオーバーラップしていて、だからこそビジョンをしっかりしないといけない。これは随分前からの状況だと思うので、領域としてどこにアウトプットを求めるか、そこで経済ベースだけではない、基礎も入りながら、出口についてはちゃんと見据えているというところが見えるようにしないと納得しない。ましてや JST の中でグリーンバイオというと評価がちょっと下だということになると、これを上に持ち上げるためにはどうにかしないといけないだろう。

CRDS: 多分その辺は、チームで工夫してもらうということだろう。科研費のようにかなり自由な研究ができる資金も、金額の大きいものまで揃っており、さらなる大型化の動きもあると聞く。その上でまた微生物の課題を立てるとすれば、既存の微生物の大型プロジェクトも幾つか既に走っているので、当然その辺との目的の違いをきちんと明確にしていかないといけない。今日の議論を報告書にまとめていく段階でも、またご意見などあればいただきたい。

付録 1. 検討の経緯

有識者インタビュー、ワークショップ参加有識者

芦刈　基行	名古屋大学生物機能開発利用研究センター
阿部　啓子	東京大学大学院農学生命科学研究科
阿部　光知	東京大学大学院理学系研究科
伊藤　剛	農業生物資源研究所
岩崎　渉	東京大学大学院理学系研究科
大谷　敏郎	農業・食品産業技術総合研究機構　食品総合研究所
江面　浩	筑波大学生命環境系/CRDS
加藤　久典	東京大学総括プロジェクト機構
川口正代司	自然科学研究機構基礎生物学研究所
菊池　淳	理化学研究所環境資源科学研究センター
倉田　のり	国立遺伝学研究所
斉藤　和季	理化学研究所環境資源科学研究センター
酒井　隆子	みかど協和株式会社
篠崎　一雄	理化学研究所環境資源科学研究センター
澁澤　栄	東京農工大学農学府
島津　久樹	農林水産省農林水産技術会議事務局筑波事務所
島津　秀雄	NEC ソリューションイノベータ株式会社
白須　賢	理化学研究所環境資源科学研究センター
新家　一男	産業技術総合研究所生命工学領域
妹尾　啓史	東京大学大学院農学生命科学研究科
高谷　直樹	筑波大学生命環境系
竹生　敏幸	株式会社シーティーシー環境事業部
竹山　春子	早稲田大学理工学術院
田中　健一	農林水産省農林水産技術会議事務局
谷坂　隆俊	吉備国際大学地域創成農学部、株式会社オリザ 株式会社シーティーシー
中村　丁次	神奈川県立保健福祉大学
西尾　健	法政大学生命科学部
西出　香	オランダ応用科学研究機構
二宮　正士	東京大学大学院農学生命科学研究科
橋本　信一	協和発酵バイオ技術開発部
東山　哲也	名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所
福田　裕穂	東京大学大学院理学系研究科
伏木　亨	龍谷大学農学部
藤原　徹	東京大学大学院農学生命科学研究科
松倉　千昭	筑波大学生命環境系

松山　旭	キッコーマン株式会社
南澤　究	東北大学大学院生命科学研究科
矢野　昌裕	農業・食品産業技術総合研究機構　作物研究所
山本　正美	タキイ種苗株式会社
若林　毅	富士通株式会社

付録 2. 近年の我が国の戦略、基本計画と本調査報告書との関連

本調査報告書に記載されている事項と、近年の戦略、基本計画、研究基本計画との関連を以下に記す。以下の（１）日本再生戦略（2012 年 7 月閣議決定)、（２）第 5 期科学技術基本計画（2016 年 1 月閣議決定)、（３）科学技術イノベーション総合戦略（2015 年 6 月閣議決定）について、それぞれ列挙する。

（１）日本再生戦略　Ⅳ. 日本再生のための具体策
1. 政策実行の枠組み
(1) 政策対象の明確化による背策のメリハリある実施
～日本再生の 4 大プロジェクトの優先実施～
③農林漁業－6 次産業化する農林漁業が支える地域活力倍増プロジェクトー
→2 章、2-1、2-2、2-4、3 章全体が関連。

2.「共創の国」への具体的な取組　～11 の成長戦略と 38 の重点背策～
(1) 更なる成長力強化のための取組
①環境の変化に対応した新産業・新市場の創出
「グリーン成長戦略」
（重点施策：グリーン部素材が支えるグリーン成長の実現）
→2 章、2-3、2-5 が関連。
（重点施策：グリーン・イノベーションによる海洋の戦略的開発・利用）
→2 章、2-3、2-5 が関連。
「科学技術イノベーション・情報通信戦略」
（重点施策：科学技術に係る人材育成の強化などによる国際競争力強化）
→3 章全体が関連。
（重点施策：基礎研究から実用化までのイノベーションの強化）
→3 章全体が関連。
②食と農林漁業の再生
「農林漁業再生戦略」
（重点施策：6 次産業課等夢のある農林漁業の実現）
→2 章、2-4、3 章全体が関連。
「アジア太平洋経済戦略」
（重点施策：農林水産物の輸出促進と國酒など我が国「食」の海外市場拡大）
→2 章、2-4、3 章全体が関連。

（２）第 5 期科学技術基本計画
第 1 章　基本的考え方
(3) 目指すべき国の姿
③地球規模課題への対応と世界の発展への貢献
→2 章 2-1、2-2、2-3、2-5、2-6、2-7、2-9、3 章全体が関連。

第 3 章　経済・社会的課題への対応
(1)持続的な成長と地域社会の自律的な発展
①エネルギー、資源、食料の安定的な確保
→2 章 2-1、2-2、2-3、2-5、2-6、2-7、2-8、3 章全体が関連。
(2)国及び国民の安全・安心の確保と豊かで質の高い生活の実現
②食品安全、生活環境、労働衛生等の確保
→2 章 2-1、2-2、2-3、2-4、2-6、2-7、3 章全体が関連。
(3)地球規模課題への対応と世界の発展への貢献
②生物多様性への対応
→2 章 2-8、2-9 が関連。

第 4 章　科学技術イノベーションの基盤的な力の強化
(1)人材力の強化
②人材の多様性確保と流動化の促進
ii)国際的な研究ネットワーク構築の強化
iii)分野、組織、セクター等の壁を越えた流動化の促進
(2)知の基盤の強化
①イノベーションの源泉としての学術研究と基礎研究の推進
ii)戦略的・陽性的な基礎研究の推進に向けた改革と強化
②研究開発活動を支える共通基盤技術、施設・設備、情報基盤の戦略的強化
ii)産学官が利用する研究施設・設備及び知的基盤の整備・共用、ネットワーク化
③オープンサイエンスの推進
→3 章全体が関連。

第 5 章　イノベーション創出に向けた人材、知、資金の好循環システムの構築
(1)オープンイノベーションを推進する仕組みの強化
①企業、大学、公的研究機関における推進体制の強化
②イノベーション創出に向けた人材の好循環の誘導
③人材、知、資金が結集する「場」の形成
→3 章全体が関連。

（３）科学技術イノベーション総合戦略 2015
第 2 部　科学技術イノベーションの創出に向けた２つの政策分野
第 2 章　経済・社会的課題の解決に向けた重要な取組
Ⅰ．クリーンで経済的なエネルギーシステムの実現
i)エネルギーバリューチェーンの最適化
3.重点的取組
バイオマス資源由来のバイオ燃料製造技術、化学品等生産技術などのバイオマス利活用技術の開発　【文部科学省、農林水産省、経済産業省、環境省】
→2 章 2-3、2-5 が関連。

ii)地球環境情報プラットフォームの構築

3.重点的取組

(2)社会実装に向けた主な取組【文部科学省、環境省】

「フューチャーアース」の枠組みの活用

→2 章 2-9 が関連。

V.　農林水産業の成長産業化

i)スマート・フードチェーンシステム

3.重点的取組

(1)次世代育種システム（ＳＩＰなどを含む）【内閣府、文部科学省、農林水産省】

・日本独自の技術となるＮＢＴ（New Plant Breeding Techniques）など次世代育種シス テム（ＳＩＰを含む）【内閣府、文部科学省、農林水産省】

・輸出国のニーズ把握を踏まえ、それに対応可能な育種・育苗システムの確立【農林水産省】

・国産花きの日持ち性品種の育成や品質保持期間延長技術の開発（大会プロジェクト⑨）【農林水産省】

→2 章、2-1、2-2、2-3、2-4

・植物共生系の解明などとそれを最大限に活用した農作物育種への応用【文部科学省】

→2 章、2-2、2-3、2-5、2-6

(2)ニーズオリエンティッドな生産システム（SIP を含む）【内閣府、文部科学省、農林水産省、経済産業省】

次世代機能性成分など新たな機能・価値の開拓（ＳＩＰを含む）

・閉鎖型（人工光）及び太陽光型植物工場、両者の併用型などの次世代施設園芸の導入 による高付加価値商品の生産・供給システムの開発（ＳＩＰを含む）

→2 章 2-1、2-4 が関連。

(5)社会実装に向けた主な取組

社会受容に向けたＮＢＴなど次世代育種技術の安全性評価と国民への情報提供方法の検討【内閣府、文部科学省、農林水産省】

→2 章 2-1、2-4、3 章全体が関連。

海外展開も視野に入れた知的財産の戦略的な活用と保護【文部科学省、農林水産省、経済産業省】

→3 章全体が関連。

ii)スマート生産システム

3.重点的取組

(1)栽培・生産・経営支援システム（SIP を含む）

多収、高品質、効率生産のための衛星などのセンサによる作物育成、土壌水分、収穫適 期など画像解析等センシング技術や過去の生産データの活用による「精密農業」の開 発（ＳＩＰを含む）【内閣府、総務省、農林水産省、経済産業省】

→2 章　2-1、2-2 が関連。

謝辞

本調査報告書作成にあたって、有識者インタビューやワークショップなどにおいて、各先生方に貴重なご意見並びに最新の研究動向などの情報提供を賜りました。心より感謝申し上げます。

■調査報告書作成メンバー■

永井　良三　　上席フェロー（ライフサイエンス・臨床医学ユニット）
齊藤　知恵子　フェロー（ライフサイエンス・臨床医学ユニット）
三浦　謙治　　フェロー（ライフサイエンス・臨床医学ユニット）
辻　　真博　　フェロー（ライフサイエンス・臨床医学ユニット）
尾山　宏次　　フェロー（環境・エネルギーユニット）
土井　直樹　　フェロー（システム・情報科学技術ユニット）
塩野　圭介　　（産学連携展開部　研究支援グループ）
川口　　哲　　ライフイノベーション担当　研究監補佐
（経営企画部・戦略研究推進部）
古市　喜義　　ライフイノベーション担当　研究監（経営企画部）
アドバイザー：
江面　浩　　特任フェロー（ライフサイエンス・臨床医学ユニット）
教授（筑波大学大学院　生命環境科学研究科）

お問い合せ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2015-RR-08

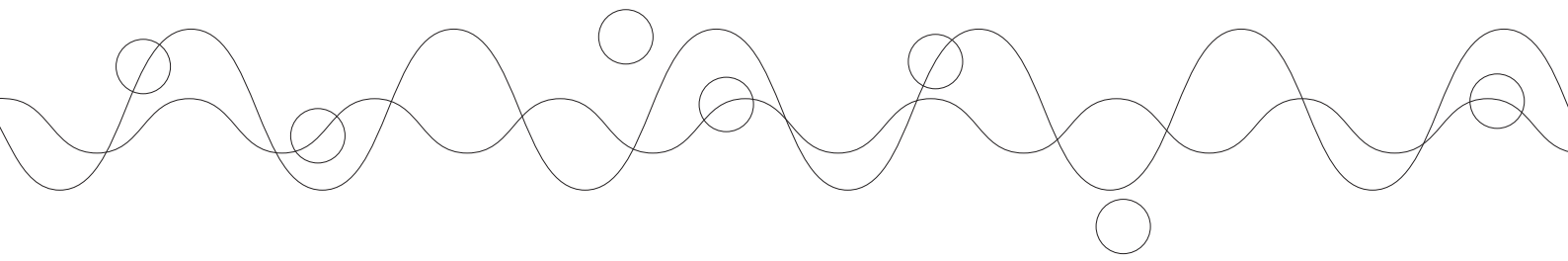
調査報告書

グリーンバイオ分野における研究開発の重要課題と統合的推進
～イノベーション創出と持続可能な社会の形成へ向けて～

平成 28 年 3 月　March 2016

国立研究開発法人　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
Life Science and 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/

© 2016 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

ISBN978-4-88890-494-0