

戦略プロポーザル

植物と微生物叢の相互作用の研究開発戦略

—理解の深化から農業/物質生産への展開—

STRATEGIC PROPOSAL

Promoting of the Research on Plant-Microbe
Interaction in New Era

-Development of Novel Control and Application Methods for
Agriculture/Biomaterial Production Based on Deeper Understanding-

研究開発戦略センター(CRDS)は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立って行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)に属しています。

CRDSは、科学技術分野全体像の把握(俯瞰)、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。

「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください。

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

エグゼクティブサマリー

本戦略プロポーザルは、植物個体の表面および内部に存在する微生物叢（細菌、菌類の集団）に着目し、わが国が世界レベルで強みを有する基礎研究および技術群を糾合して、植物と微生物叢との相互作用を包括的に理解することで、新たな概念に基づく農作物生産技術および物質生産技術を創出するための諸方策を提言するものである。

本戦略プロポーザルでは、植物と相互作用する微生物集団を、原核生物である細菌、真核生物である菌類の両方を含め、「微生物叢」として記述する。（図 E-1）

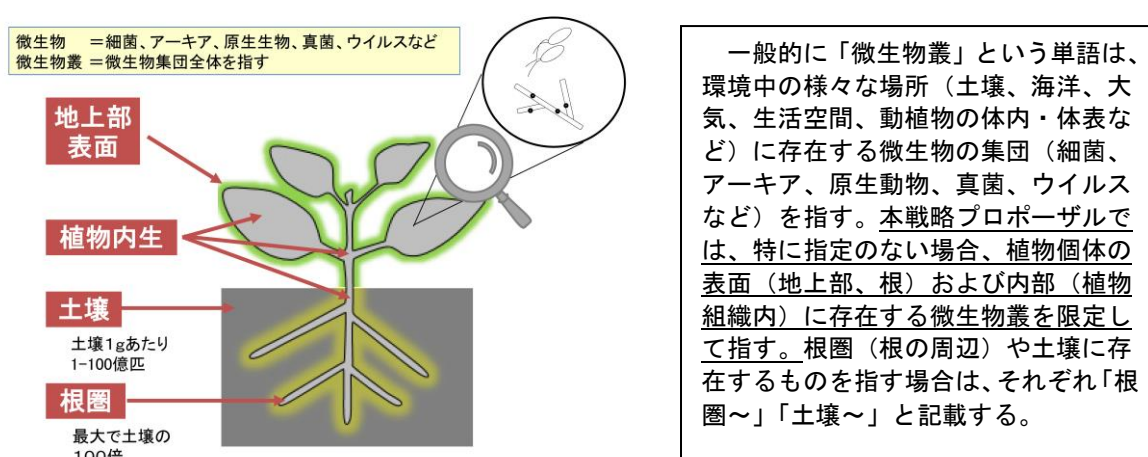


図 E-1 植物をとりまく微生物叢

世界の人口は増加し続け、2030年に80億人を超え¹⁾、その頃には主要農産物需要は40～50%増加（2010年比）すると予想されている²⁾。同時に、農業由来の窒素やリンが地球環境へ与える負荷は深刻化し、水不足や地球温暖化などの環境変動から農業が受ける影響も甚大であると予想されている³⁾。このような背景から、地球環境に対してこれ以上の負荷を与えない形で、環境変動に対応可能な農業の確立が世界的な課題となっている。加えて、わが国の状況を鑑みると、少子高齢化は急速に進行するとともに就農者人口は激減し、わが国の「食」を支える農業生産基盤は危機に瀕している。

世界の持続的な発展のためには、窒素・リン肥料・水を節減しつつ、苛烈な環境変動下においても、生産量の維持、増産が課題である。またわが国の農業生産基盤を維持するためには、それらに加えて省力・省コストで高い付加価値のある農産物の生産が求められている。これらを達成するにあたり科学技術に対する期待は大きく、革新的な栽培関連技術（生物農薬、バイオ肥料、作物保護など）の開発がこれからの大きな課題の一つとなっている。

従来、微生物叢は植物・動物の成長や病気などとの関係が予想されていたものの、あまりに複雑であり手付かずの研究領域であった。しかし、近年の次世代シーケンサーの爆発的な性能向上に伴い、微生物叢の全容解明と制御に向けた大きな動きがはじまりつつある。ヒトを宿主とした微生物叢研究が現在大きく進展し、新規健康・医療技術として展開しはじめている⁴⁾。植物を宿主とした微生物叢の研究も、現時点では基礎研究レベルの知見で

はあるが、近年活性化している。植物は、光合成反応により一次生産を行うことで、私たちの身近な暮らしを支えるだけでなく、地球上の全ての生命を支えている。農作物、資源作物、および樹木といった植物は、基本的に野外で栽培されるため、発芽から収穫までの過程で膨大な微生物叢と相互作用する。従来、根粒菌や菌根菌など、植物と相互作用して有益な効果をもたらす微生物の代表的な菌類については基礎・応用研究、そして社会実装が進んできた。しかしながら、次世代シーケンサーで存在が明らかにされた、それ以外の膨大な微生物叢との相互作用研究については、ほぼ未開拓のままであり、世界中が競争を開始しつつある研究領域である。

わが国は、当該研究領域の推進にあたってコアとなる研究分野（植物科学、微生物学、天然物有機化学など）に大きな強みを有する。それらを含めた戦略的な研究開発を推進することで、世界をリードする成果の創出が可能である。本戦略プロポーザルでは、植物と微生物叢の相互作用の包括的理解と制御基盤技術確立のための、具体的な研究開発課題として、次の4課題を提言する。

課題1：微生物叢の把握、分離、培養

課題2：植物-微生物叢相互作用因子の同定と機能解析

課題3：実圃場での計測に基づく評価と再設計

課題4：農業資材開発、作物生産・利活用への応用

「課題1」においては、作物生産に有効な機能を持つ微生物叢を迅速かつ効率的に選抜し、分離・培養して確保する。次に、「課題2」においては、これまでのわが国の基礎研究の強みを生かし、農作物生産に有効な機能を持つ微生物群（カクテル）の同定や、相互作用因子（化学物質）の発見を通して社会実装の礎をつくる。さらに、「課題3」では、植物と微生物叢の相互作用を、実際の農作物生産現場で制御するため、農作物栽培時に得られる多階層のデータを統合的に評価し、その場に最も適した生産法を再設計する基盤技術を開発する。「課題1～3」は基礎から応用へ進む一方向だけの研究開発ではなく、互いにフィードバックを行いながら循環的に推進する。さらに、「課題4」では、「課題1～3」を一気通貫するような先鋭的な研究開発を支援・拡大し、新たな農業資材開発や栽培マネジメント技術の創出など、新規の介入手法の開発と、社会実装の加速を目指す。これら研究開発の技術目標は、高収量、高ストレス耐性、耐病性・耐害虫性、高品質・高付加価値化、また低環境負荷、省コスト・省労力などである。本戦略プロポーザルの推進によって、これらの技術基盤が確立することで、わが国の持続的な農業生産基盤の構築（高収量と高品質・高付加価値化の両立）へ多大な貢献が可能である。また、世界の作物生産能力の維持・向上と低環境負荷を同時に実現でき、持続可能な食料生産およびバイオ由来の物質生産にも貢献可能である。

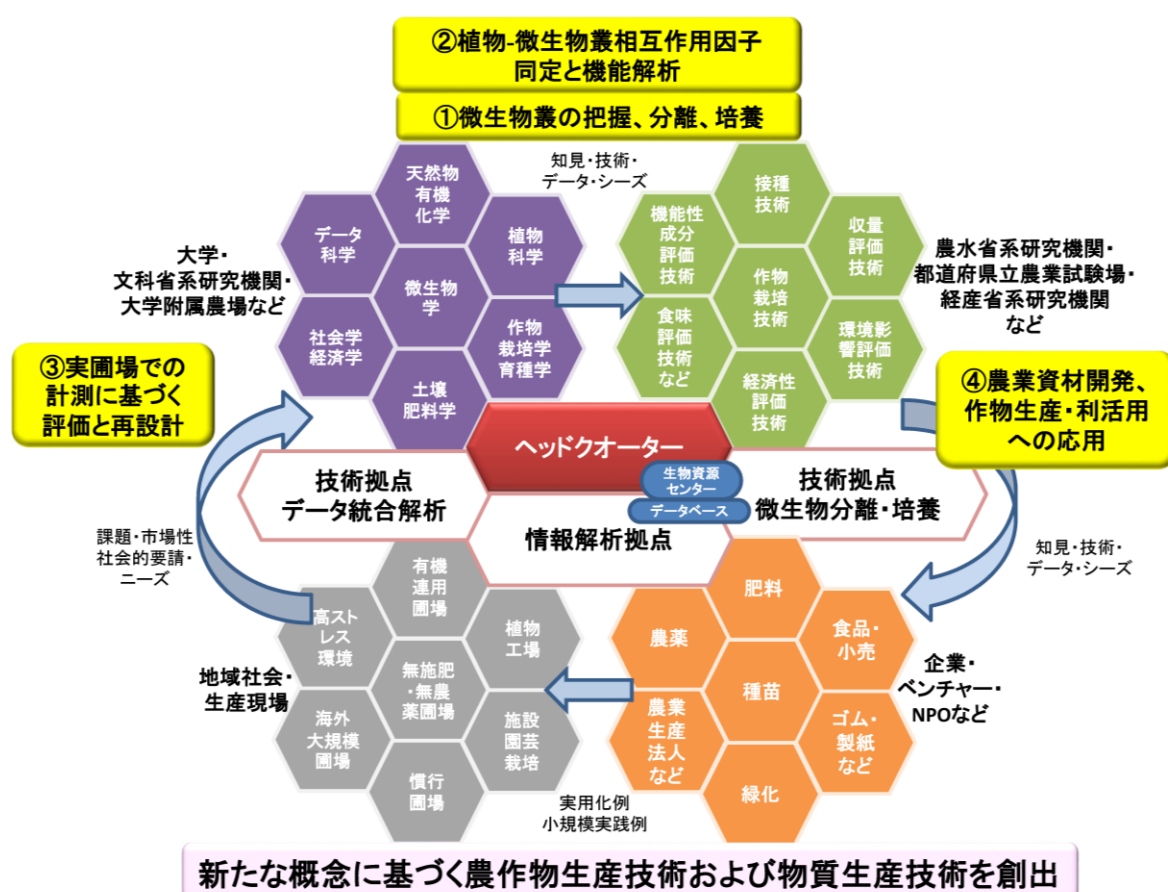


図 E-2 研究開発戦略の全体像

(引用文献)

- 1) Population Division, World Population Prospects 2015
<https://esa.un.org/unpd/wpp/>
- 2) 「農産物価格高騰や栄養低下 …世界の農業に異変」 マッキンゼー・エクセレンス
 2016 年 12 月
<http://business.nikkeibp.co.jp/atcl/report/15/262112/120400007/>
- 3) World Development Report 2010
<http://siteresources.worldbank.org/INTWDR2010/Resources/5287678-1226014527953/WDR10-Full-Text.pdf>
- 4) 戦略プロポーザル「微生物叢（マイクロバイオーーム）研究の統合的推進 ～生命、健康・医療の新展開～」
<https://www.jst.go.jp/crds/report/report01/CRDS-FY2015-SP-05.html>

Executive Summary

This strategic proposal focuses on the microbiota (bacterial and fungal community) that exists on the surface of and inside plants. It proposes various measures for the development of new technologies for agricultural and material production based on new concepts, through comprehensive understanding of the interactions between plants and microbiome and the combination of strengths of the Japanese basic research and technologies in related areas.

In this proposal, the microbial community interacting with plants are described as “microbiome” which encompasses both bacteria (prokaryotes) and fungi (eukaryotes).

The term “microbial flora” usually refers to groups of microbes (bacteria, archaea, protists, fungi, viruses, etc.) existing in a particular environment (soil, sea, ambient air, living space, inside/on the surface of animals and plants, etc.). Unless specified otherwise, this term in this proposal refers only to the microbial flora that exists on the surface of individual plants (above-ground parts and roots) and inside them (plant tissue). The microbial flora that exists in the rhizosphere (around the roots) or soil will be termed “rhizosphere ---” or “soil ---.”

The world population has been rapidly growing, and is anticipated to exceed 8 billion by the year 2030 [1] (by that time, the demand for major agricultural products will be 40-50% greater than the current level [2]). In addition, the burden on the environment due to nitrogen and phosphorus of agricultural origin will become more serious, along with a significantly greater influence of environmental changes (water shortage, global warming, etc.) on agriculture [3]. In these circumstances, it is imperative that we develop a form of agriculture, which can cope with environmental changes without increasing the load on the environment. Furthermore, we need to seriously consider solutions for the current situation in Japan, i.e., rapidly decreasing birth rates, accelerated aging society, and sharp decrease in the farming population, which has caused a crisis in the conventional Japanese agricultural base.

Thus, maintaining and increasing the agricultural production despite severe environmental changes, while saving nitrogen, phosphate fertilizers, and water, is a major challenge for global sustainable advancement. In addition to that, to maintain Japanese agricultural base, it is important to develop new methods of agricultural production, which are less-labor and more-cost effective while yielding higher added value products. There are great expectations for science and technology to help achieve these goals. The development of innovative cultivation-related technologies (biological pesticide, biological fertilizers, crop protection, etc.) is one of the major challenges.

The microbe/microbiota has traditionally been anticipated to have association with growth and diseases of plants and animals. Research in this field has been challenged high complexity of microbe. However, thanks to remarkable improvements in recent years in the performance of next-generation sequencers, a major movement towards the complete elucidation and control of microbiota is now beginning. Research on microbiota in humans has made significant advancements and the results have been

applied in new health/medical care technology [4]. Research on microbiota in plants is also activating recently, although it is still at the level of basic research. Plants support our daily lives, as well as all life on Earth, through photosynthesis-based primary production. Because agricultural crops, resource crops, and trees are mainly cultivated in the open air field, there are interactions with great amount of microbiota from germination to the harvesting stage. To date, basic and applied research, as well as application at the field/society level, has focused on fungi such as rhizobia and mycorrhizal fungi (which are representative microbes that provide benefits to their plant hosts through mutualistic interactions). However, there has been almost no research on interactions with the other huge amount of microbiota (revealed by next-generation sequencers). Today, great competition is beginning in this field of research across the world.

Japan has a competitive edge in terms of research in fields such as plant science, microbiology, and natural organic chemistry over other countries, which will serve as the major role for promoting research in the above-mentioned fields. If research and development including those are strategically promoted, it might be possible for us to produce world-leading outcomes. This strategic proposal pertains to the 4 tasks listed below. These R&D tasks will enable us to obtain a comprehensive understanding of plant-microbiota interactions and to establish basic control technology.

Task 1: Understanding, isolation, and culture of microbial flora

Task 2: Identification and functional analysis of factors involved in plant-microbial flora interactions

Task 3: Evaluation/Assessment and re-designing based on-field measurements

Task 4: Application for agricultural material development, crop production/protection, and effective utilization

“Tasks 1 and 2” pertain to obtaining a comprehensive understanding of the microbiota, which interacts with plants, but has not been sufficiently understood, and of the essential nature of this interaction. In “Task 1,” the microbes with beneficial functions for crop production will be selected rapidly and efficiently, and these microbes will be isolated and cultured. In “Task 2,” the groups of microbes (cocktail) with useful functions for crop production and chemical signaling molecules for plant-microbe interaction will be identified using the superior Japanese basic research techniques. The knowledge will be the basis for application at the field/society level. In “Task 3,” the multi-omics data collected from the cultivation of agricultural crops will be assessed in an integrated manner and the basic technology for re-designing optimum production process for a given situation will be developed. This will enable appropriate control of plant-microbiota interactions during practical agricultural production. “Tasks 1 through 3” are not unidirectional R&D activity (basic to applied), but should be promoted in a circular manner through repeated feedback each other. In “Task 4,” frontier R&D activity completely covering “Tasks 1 through 3” will be supported and

expanded, to develop new intervention techniques (development of new agricultural materials, creation of cultivation management technology, etc.) and to accelerate the application at the field/society level. The technological goals of these R&D activities include achieving high yield, high stress resistance, disease/pest resistance, high quality, high added value, low environmental load, cost saving, and labor saving. If such a fundamental technological base can be established through promotion of this proposal, it will contribute greatly to the maintenance of sustainable agricultural infrastructure in Japan (enabling high yield with high quality and high added value). In addition, it will enable to maintain or improve of global agricultural crop production capacities and the control of environmental load simultaneously, thus contributing to sustainable production of food and bio-based materials.

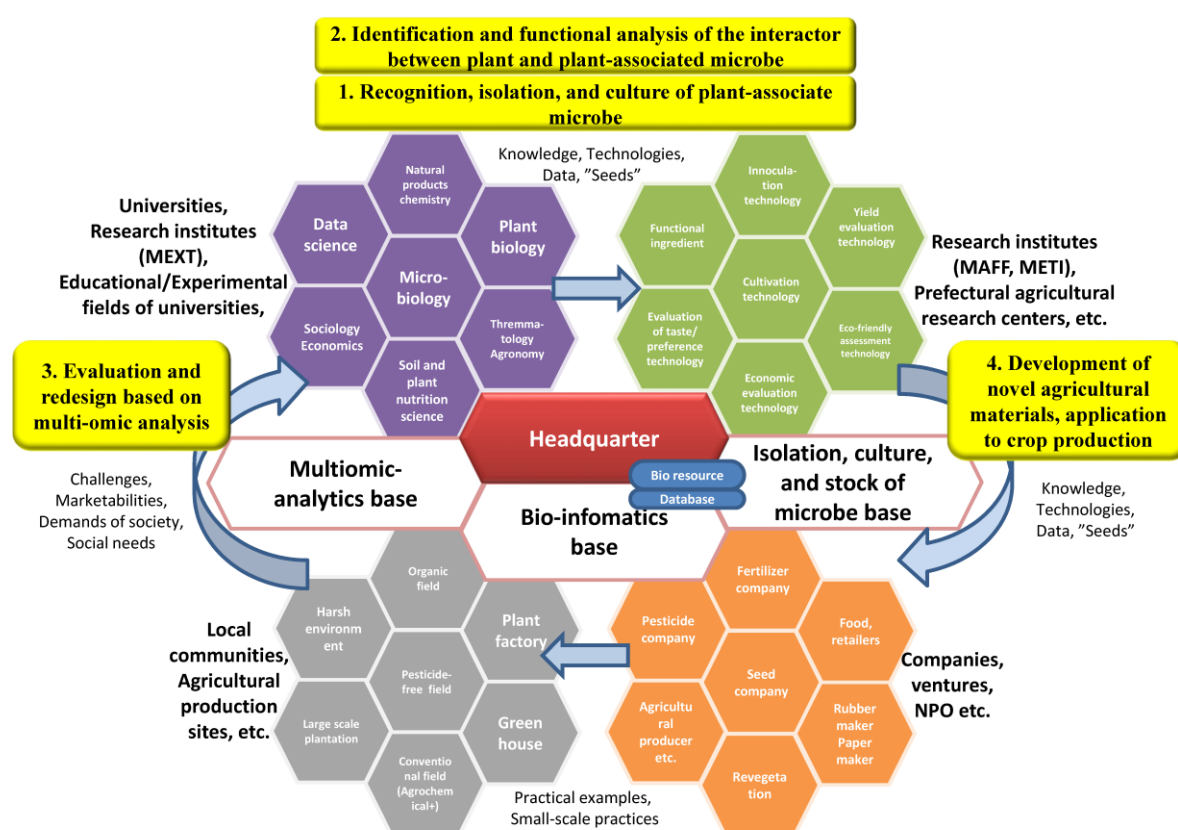


Fig. E-3 Entire view of research and development strategy

目 次

エグゼクティブサマリー

Executive Summary

1. 研究開発の内容	1
2. 研究開発を実施する意義	9
2-1. 現状認識および問題点	9
2-2. 社会・経済的効果	26
2-3. 科学技術上の効果	28
3. 具体的な研究開発課題	33
4. 研究開発の推進方法および時間軸	39
4-1. 推進方法	39
4-2. 時間軸	42
付録1. 検討の経緯	44
付録2. 国内外の状況	47
付録3. 専門用語説明	52
謝 辞	59

1. 研究開発の内容

本戦略プロポーザルは、植物個体の表面および内部に存在する微生物叢（細菌、菌類の集団）に着目し、わが国が世界トップレベルで強みを有する基礎研究および技術群を糾合して、植物と微生物叢との相互作用を包括的に理解することで、新たな概念に基づく農作物生産技術および物質生産技術を創出するための諸方策を提言するものである。

本戦略プロポーザルでは、植物を相互作用する微生物集団を、原核生物である細菌、真核生物である菌類の両方を含めて、「微生物叢」として記述する。

農作物、資源作物、および樹木は基本的に野外で栽培されるため、発芽から収穫までの過程で膨大な数の微生物叢と相互作用する。本戦略プロポーザルでは、植物（農作物、資源作物、樹木）と相互作用し有益な効果を与える微生物叢について、より深い理解を得ることを基礎とし、微生物の作物への接種、機能の評価、また栽培状態の全体的な把握を基盤に、農作物・資源作物の効率的・効果的な栽培技術を推進することを提言する。

具体的な研究開発課題は以下の4課題である。

課題1；微生物叢の把握、分離、培養

わが国独自の微生物単離・培養技術と、メタゲノム解析などを組み合わせ、微生物叢の包括的な把握とともに、鍵となる微生物を単離し、わが国の生物資源として確保する。

- (1) 微生物叢の把握：植物内生の微生物を生きたまま単離し、**培養・分離**する。また植物内生の微生物と土壌微生物叢、根圏微生物叢との相関データを取得し植物内外の微生物叢の全体像を**把握**する。
- (2) 中核微生物（群）の絞込み：微生物叢の群集構造解析およびネットワーク解析を行うことで、高収量や高ストレス耐性、耐病性・耐害虫性、高品質・高付加価値化など好適条件とリンクするような中核的な微生物（群）候補を効率的に**選抜**する。

課題2；植物－微生物叢相互作用因子の同定と機能解析

わが国が世界レベルの強みを有する植物科学および天然物有機化学研究により、植物と微生物叢の相互作用因子（化学物質）の同定と機能解析を推進する。

- (1) 中核微生物（群）の機能解析：中核的な微生物（群）候補のゲノム解析、トランスクリプトーム解析、作物への**接種**試験、植物の表現型解析を行い、**評価**する。
- (2) 相互作用因子の同定：メタボローム解析などを行って、中核微生物（群）と作物の相互作用因子候補を絞り込み、相互作用因子の実体を**同定**する。
- (3) 相互作用因子の**機能解析**：作物への相互作用因子候補の添加・投与後の作物の表現型解析を行い、相互作用因子の機能を明らかにする。

課題3；実圃場での計測に基づく評価と再設計

特徴的な圃場（例：無施肥・無農薬で高品質・高収量を達成しているような優良圃場）での計測に基づき、鍵となる因子を抽出し、新たな農業資材シーズ導出および圃場マネジメント法の設計を行う。

- (1) 特徴的な優良圃場と慣行圃場の比較：化学農薬や化学肥料に過度に依存せずとも高い生産性を発揮している圃場について、微生物叢と作物をゲノム、メタゲノム、メタボローム解析技術など、土壌をメタボローム解析技術などで**計測**し、マルチオミクスデータを取得する。

- (2) マルチオミクス解析および表現型情報などとの統合解析：マルチオミクスデータを統合解析し、高収量、高品質（栄養価、機能成分、良食味など）、耐病性、耐害虫性との相関をみる。
- (3) 鍵因子の特定、栽培システム全体の技術的評価と再設計：鍵因子を特定し、新規農業資材シーズを導出する。それら農業資材を活用し、より省労力・省コストで高いアウトプットを生じうる栽培マネジメント法を設計する。

課題4；農業資材開発、作物生産・利活用への応用

「課題1～3」の推進により、新規の農業用微生物資材シーズや植物成長調節候補物質が見出される。既に萌芽的な成果が出ている研究課題、上市に近づいている研究課題について、戦略的な研究支援・加速を行なうことで、成功事例、モデルケースを確立する。

- (1) 介入技術の開発（スーパー微生物（カクテル）、新規有用化学物質など）：中核微生物（群）候補からさらに絞込み、接種法の最適化など効率的かつ効果的な介入技術を開発する。相互作用因子を農業資材用シーズに改変する。
- (2) 診断・予測技術の開発：土壌や環境の統合的な評価結果から、収量、病害発生、品質、環境影響などについて診断・予測技術を開発する。
- (3) その他の介入技術の開発：光質（※波長の異なる光；例えば赤外光、赤色光、青色光、紫外光など）の利用による微生物叢の制御、安価かつ有用な土壌施用資材の利用、などの新たな介入技術を開発する。

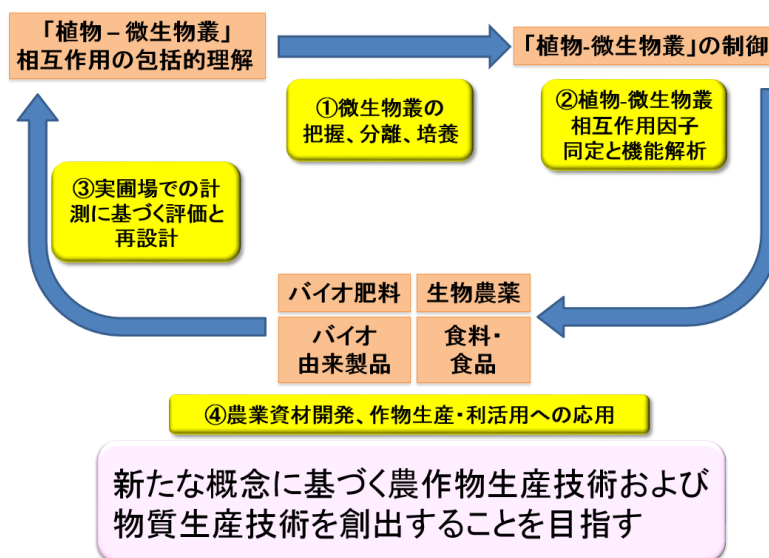


図 1-1 研究戦略の全体像：植物-微生物叢の相互作用の理解から応用研究への展開

推進体制の概要は次の通りである。大学、文科省・農水省・経産省の研究機関および、産業界（企業、ベンチャー）や生産現場などからの参加が可能な、研究開発コンソーシアムを形成する。ヘッドクォーターの統括のもと、技術拠点や情報解析拠点を共有し、プレコンペティティブな情報の共有、海外との連携や知財の確保および活用を行いつつ、研究開発を推進する。

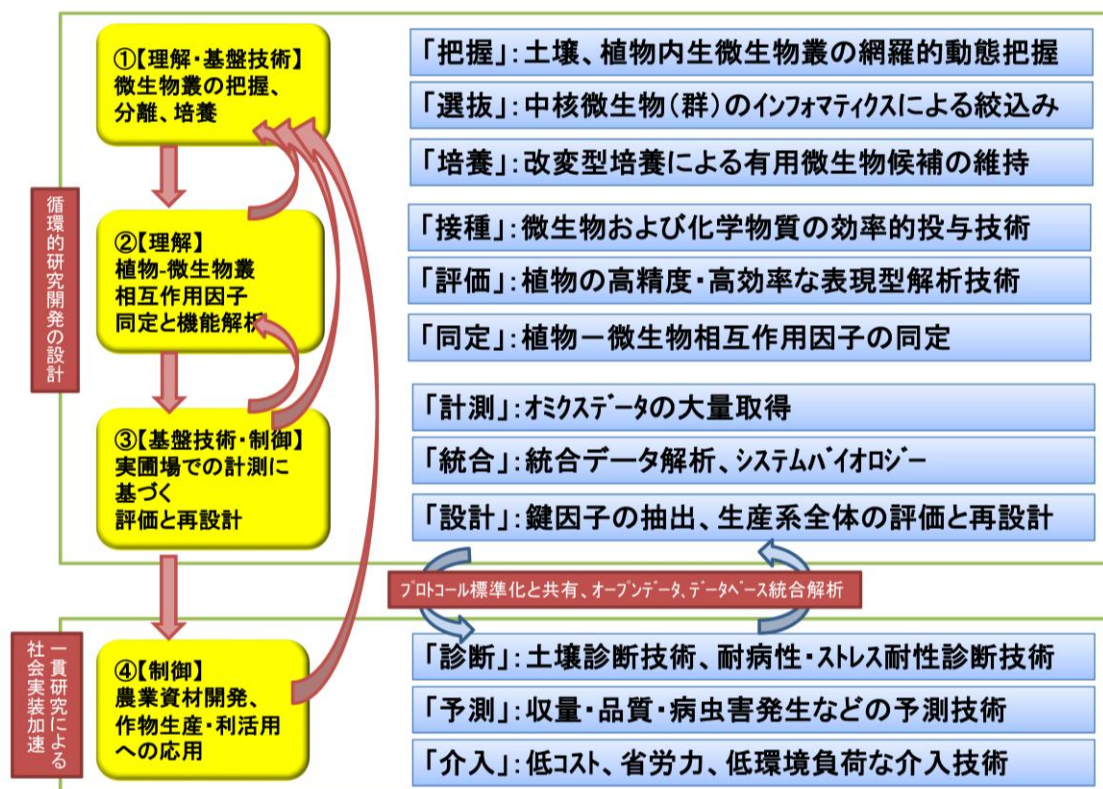


図 1-2 植物-微生物叢の相互作用研究の課題概要

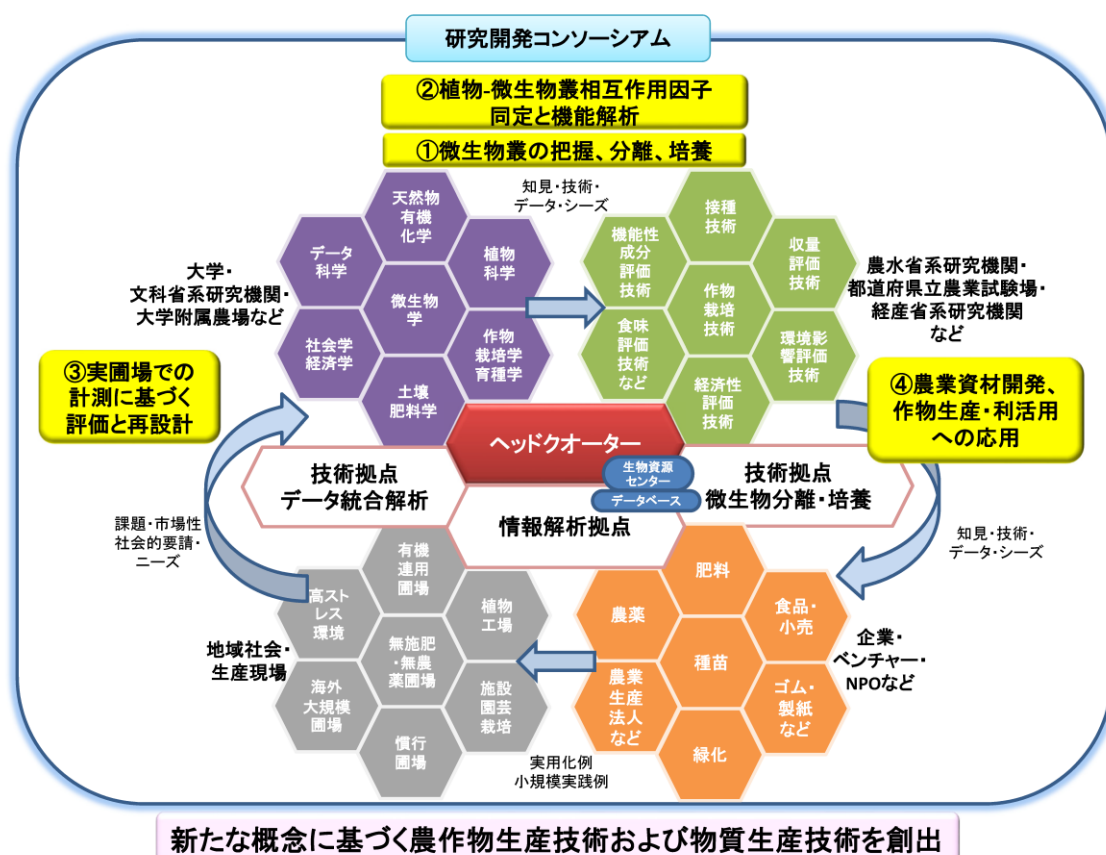


図 1-3 植物-微生物叢の相互作用研究の推進体制の概要

【コラム①】わが国発の新規研究技術

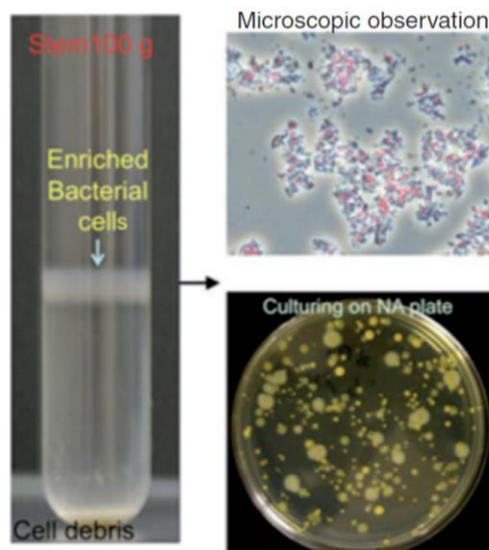
(A)

植物の組織から植物内生菌を濃縮して取り出すことに成功

分離できる植物内生菌の種類が劇的に増加

培養に持ち込める植物内生菌の数も増加

池田 成志 上級研究員
(北海道農業研究センター)



植物内生微生物を単離し培養する独自の方法を開発
(分離・培養が容易に、解析・利用可能な微生物資源が格段に増える)

(B)

特定の植物の根のサンプル(600個)からそれぞれ600種の菌類をメタゲノム解析で検出

独自の解析ツールによる自動化・高速化

ネットワーク解析により、鍵となる菌を簡便・迅速に可視化

東樹 宏和 助教
(京大)、
田辺 晶史 研究員
(中央水産研究所)

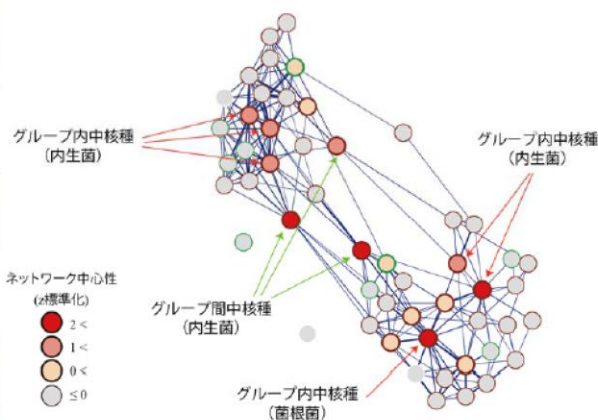


図5. ネットワーク内の「中心核」。

色の濃い種ほど、「中心核」としての役割が強いことが予想される。

植物の「善玉菌」の定着促進、「悪玉菌」排除の鍵となる可能性

図 1-4

わが国でも、ユニークかつオリジナリティの高い手法を用いて、植物に内生する微生物を取得する方法および、中核となる微生物（群）を絞り込むためのインフォマティクス技術開発が行われている。（A）植物組織内に存在する微生物集団を、生きたまま分離培養する方法が確立された。（B）大量のメタゲノムデータを超ハイスループットで解析処理可能にするツールの確立により、植物に内生する膨大な微生物の中から中核となる可能性の高い微生物候補を極めて効率的かつ迅速に見出すことができるようになった。写真・図の出典：科学技術未来戦略ワークショップ「植物と微生物叢の相互作用の研究開発戦略 ―理解・制御・応用に向けて―」池田先生発表資料、東樹先生発表資料より（原著 Ikeda et al., ISME J (2009), Ikeda et al., Plant Cell Physiology (2010), Toju et al., Journal of Royal Society Interface (2016)）

【コラム②】モデルケース1：ストリゴラクトンの新規機能解明と除草剤への応用

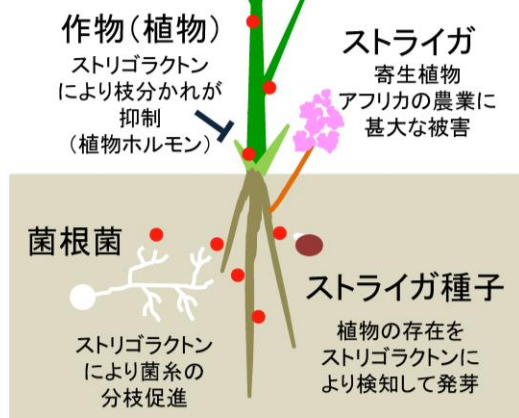
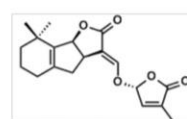
植物抽出物が菌根菌の分枝を促進することを実験的に証明。

植物抽出物から菌根菌分枝誘導物質を同定、寄生植物ストライガの発芽誘導物質であることが判明、新規の植物ホルモンであることもものに判明。

ストリゴラクトンのアナログを用いて、寄生植物ストライガの自殺発芽誘導法の開発、ストライガ防除微生物の探索など。

現地でのストライガ防除法開発、実証実験。

●：ストリゴラクトン



**わが国における植物-微生物叢相互作用関連研究を通じ、
生み出された革新的研究成果であり、社会実装も強く期待される**

図 1-5

植物と菌根菌の相互作用因子であるストリゴラクトンの同定は、新規植物ホルモンの発見という学術的成果に波及した。さらにアフリカで猛威をふるう「魔女の雑草」ストライガを防除する方法論の開発にも進展した。いずれにおいてもわが国の研究者が中心的な役割を果たした。本戦略プロポーザルで提言する4つの研究開発課題のうち3つ（課題2、3、4）に対応があり、先駆的なモデルケースの一つと位置づけられる。

【コラム③】モデルケース2：広い宿主範囲と安定した効果を持つ新規バイオ肥料の開発

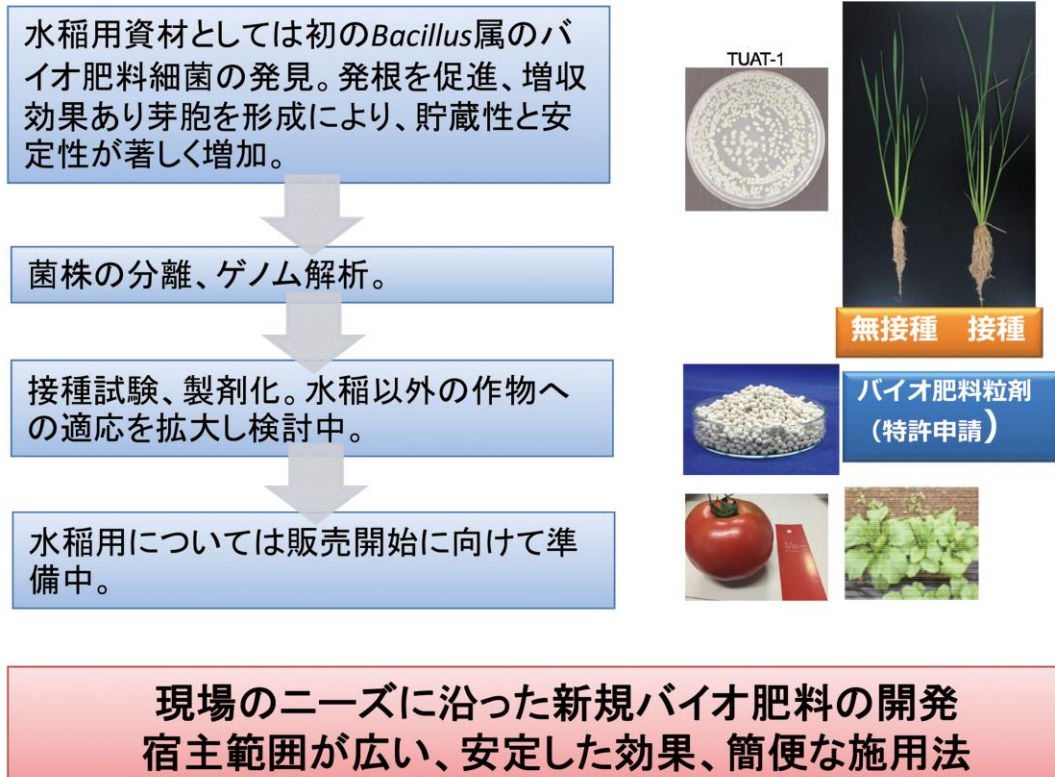


図 1-6

水稲圃場から単離された *Bacillus* 属 TUAT-1 株を利用したバイオ肥料は、発根を促進し増収効果がある。芽胞を形成するため効果の安定性が高く、宿主範囲も広い（イネだけでなく、葉物野菜、トマトなどにも有効な可能性があり、現在検討中）。本戦略プロポーザルで提言する4つの研究開発課題のうち2つ（課題1、4）に対応があり、先駆的なモデルケースの一つと位置づけられる。写真の出典：科学技術未来戦略ワークショップ「植物と微生物叢の相互作用の研究開発戦略 ―理解・制御・応用に向けて―」横山先生発表資料より。

【コラム④】モデルケース3：無農薬りんご栽培園地の解析から見てきた内生菌類の機能、革新的栽培マネジメント法の確立へ

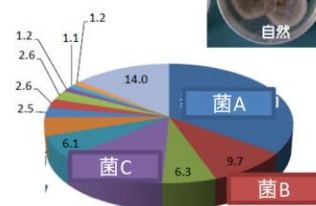
無農薬りんご栽培園地について、収穫に成功した園地と失敗した園地を比較。成功園地では、褐斑病感染による落葉被害が広がらず、収穫が可能。



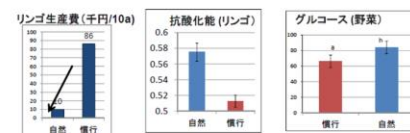
無農薬栽培園地で共通に、落葉を抑制する葉の内生真菌3種を同定。



葉の内生真菌を増やす栽培法の開発へ（システムの強化、環境の複雑化）。



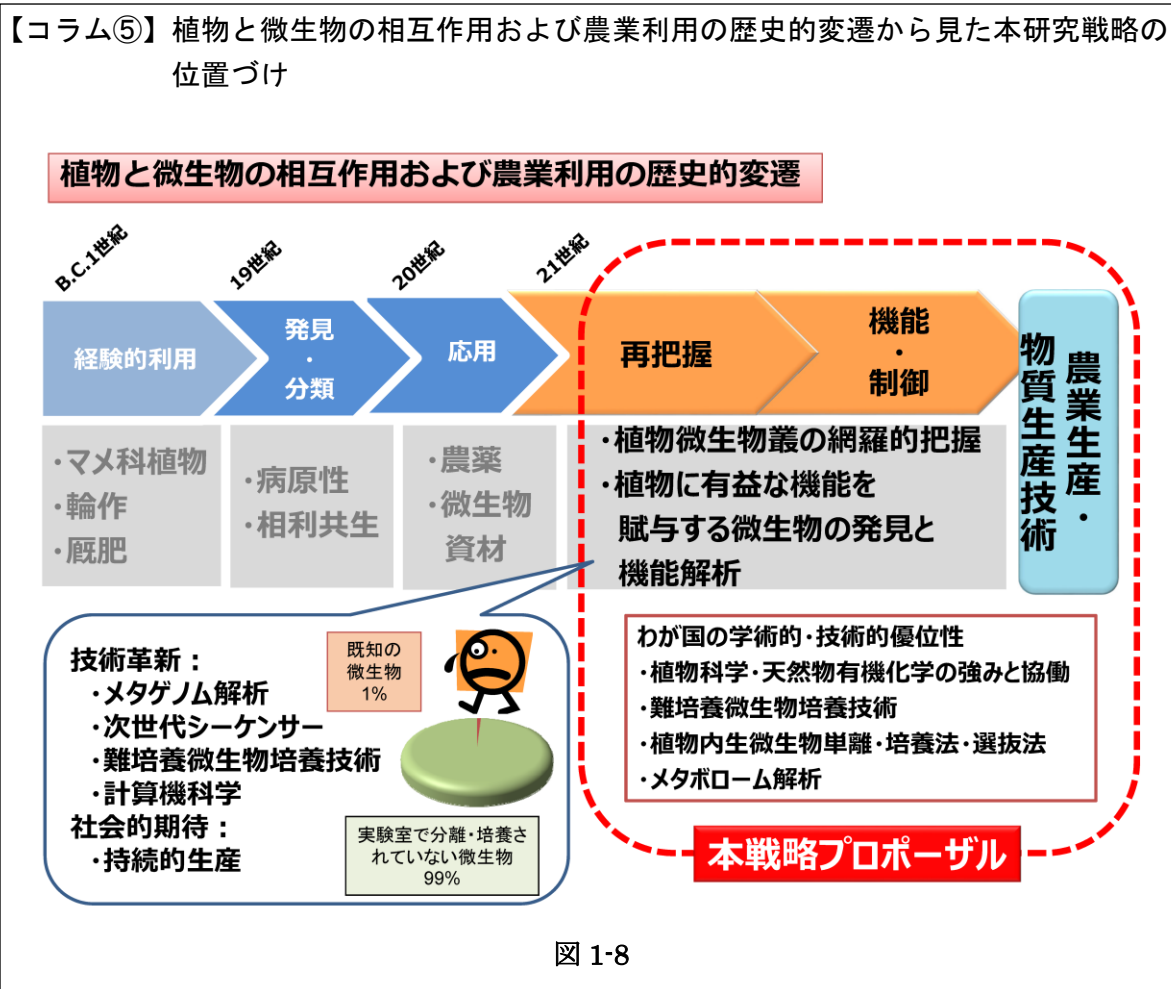
低い生産費で高付加価値（高糖度、抗酸化能大）の作物生産技術へ。



日本オリジナルの園地のマイクロバイオーム解析から、省労力・省資源・高付加価値作物栽培技術の確立へ

図 1-7

無農薬でのりんご栽培という特徴的な園地を対象に、収穫に成功している圃場と失敗している圃場の比較を行った。その結果、成功している圃場では、褐斑落葉病が拡大しないため収穫が可能になっていることが発見された。さらに、成功している圃場で共通に見られる葉の内生真菌3種を同定しており、現在はそれらを維持・増強するような栽培マネジメント法の導出を目指した開発が進んでいる。本戦略プロポーザルで提言する4つの研究開発課題のうち2つ（課題1、4）に対応があり、先駆的なモデルケースの一つと位置づけられる。写真・図の出典：科学技術未来戦略ワークショップ「植物と微生物叢の相互作用の研究開発戦略 ―理解・制御・応用に向けて―」杉山先生発表資料より。



2. 研究開発を実施する意義

2-1. 現状認識および問題点

研究開発を実施する意義、特に過去から現在までについて、以下の項目、「社会的背景」、「歴史的背景」、「現時点での問題点と関連する国内外の研究動向」、「国費を投入する意義」に沿って述べる。

2-1-1 社会的背景

- ①世界人口の増加とわが国の食料安全保障に関する動向
- ②食料生産が環境に与える影響の低減（緩和策）、環境から受ける影響への対応（適応策）
- ③再生可能な生物資源の利活用の推進、バイオエコノミーへの転換
- ④農薬・種苗関連企業の動向

2-1-2 歴史的背景

- ①科学技術的背景
- ②農業関連の微生物研究の歴史
- ③植物科学の近年の動向

2-1-3 現時点での問題点と関連する国内外の研究動向

- ①海外の研究動向
- ②わが国の研究動向
- ③問題点

2-1-4 国費を投入する意義

- ①技術的優位性
- ②独特な土壌生態系
- ③海外生産地でも適応可能な基盤技術の創出の必要性
- ④省労力・高付加価値化の両立

2-1-1 社会的背景

①世界人口の増加とわが国の食料安全保障に関する動向

世界人口が 2025 年には 80 億人、2050 年には 90 億人を突破すると予想される一方で¹⁾、世界の穀物増産速度²⁾は人口増加速度に満たないことから、将来的な食料不足が懸念されている（図 2-1）。さらには、特に人口増加が激しいアジア、アフリカ諸国での中間層人口の増加に伴う食パターンの変化（すなわち動物性タンパク質の需要の増加）によって、穀物需要の逼迫を誘発・加速すると危惧されている³⁾。一方で国内では、食料自給率は低迷し⁴⁾、さらに就農人口減少も歯止めがかからず⁵⁾、今後最大限の努力をしても食料自給率が 50%を大きく超えることはないと言想される。すなわち、「将来的にも約 50%程度は海外からの輸入に依存した状況が続く」「世界の食料需要が 2030 年までに 40~50%、2050 年には 70%も増加する」³⁾という見通しのなかで、わが国の生産基盤を維持しながら食料安全保障を達成することは長期的な課題でもあることはもちろん、今まさに着手しなくてはならない喫緊のテーマでもある。国連の“持続可能な開発目標（SDGs）”でも、17 の開発目標のうち 3 つは農作物生産と特に密接に関わるものであり、注目度の高さが見て取れる

(図 2-2、「目標 2：飢餓に終止符を打ち、食料の安定確保と栄養状態の改善を達成するとともに、持続可能な農業を推進する」「目標 13：気候変動とその影響に立ち向かうため、緊急対策を取る」「目標 15：陸上生態系の保護、回復および持続可能な利用の推進、森林の持続可能な管理、砂漠化への対処、土地劣化の阻止および逆転、ならびに生物多様性損失の阻止を図る」)⁶⁾。

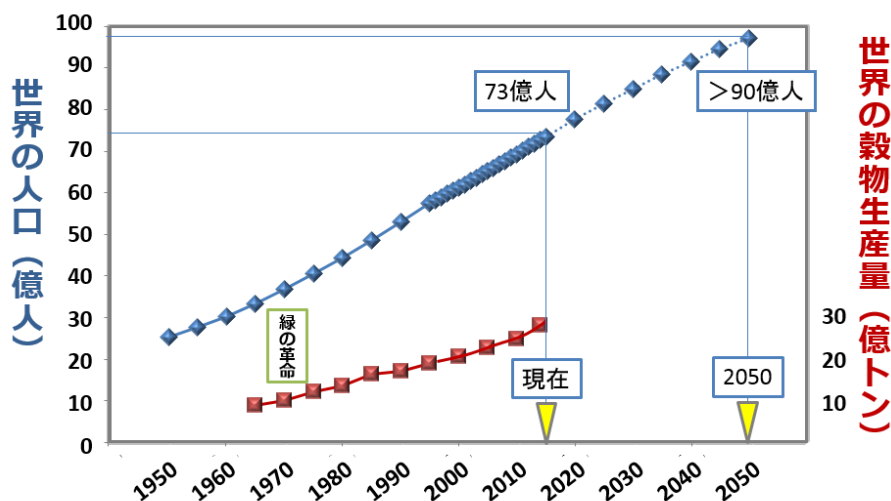


図 2-1 世界の人口増加速度は穀物生産増加速度を上回っている
世界人口は、2030 年には 80 億人、2050 年には 90 億人を超えると予想されている。
国際連合、世界銀行のデータを基に CRDS が作成。
<https://esa.un.org/unpd/wpp/>
<http://data.worldbank.org/indicator/AG.PRD.CREL.MT>



図 2-2 持続的な開発目標 (SDG's)
本戦略プロポーザルと最も関連が深いのは「目標 2：飢餓をゼロに」「目標 13：気候変動に具体的な対策を」「目標 15：陸の豊かさを守ろう」。次に関連が深いものは、「目標 7：エネルギーをみんなにそしてクリーンに」「目標 12：つくる責任つかう責任」。国際連合広報局資料より引用。

②食料生産が環境に与える影響の低減（緩和策）、環境から受ける影響への対応（適応策）

2015年に採択され2016年に発効されたパリ協定では、「産業革命以前と比較して気温上昇を2℃未満に抑える」ことが目標として掲げられた⁷⁸⁾。具体的なアクションとしては、緩和策として「森林等の吸収源の保全・強化、および途上国の森林減少・劣化由来の排出抑制の仕組みの促進」、適応策として「適応策に対する努力の強化」などが挙げられている⁷⁸⁾。緩和策としての森林保全の動きが進むことで、開発途上国でこれまで行われてきた森林破壊を伴う農地開拓は今後困難になる。さらに、気候変動の影響は、高温とそれに伴う水需要の増加、降雨量の変動、極端な気象現象（例えば同じ地域で短い期間内に旱魃と洪水が頻発するなど）により、世界中の農業生産に大きな影響を与えると予想され、それに対する適応策も必要である⁹⁾。すなわち、既に開拓済みで劣化も進む耕作地において、変動幅の大きい気象の影響を受ける、という複数のネガティブな要因に同時に対応しながら、農業生産を維持・増大していく必要がある（図2-3）。

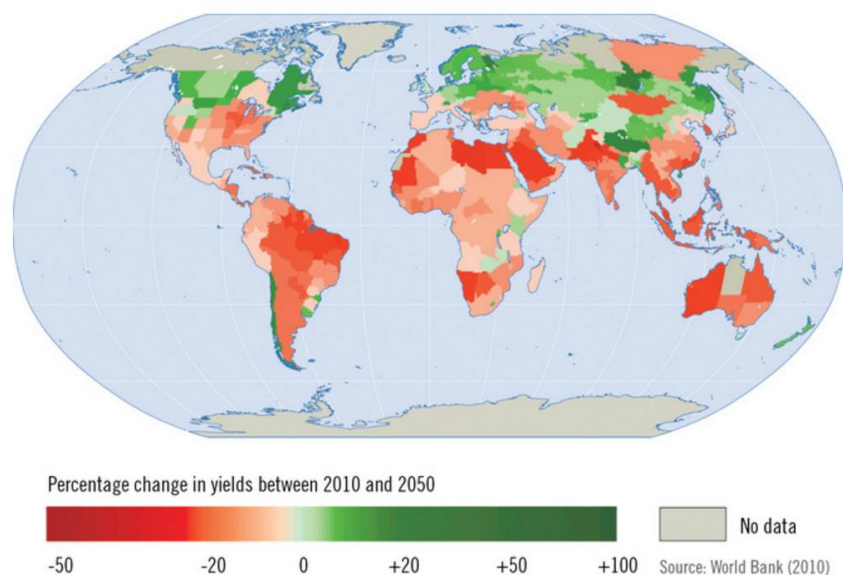


図2-3 温暖化が世界の耕作地に与える影響

主要な農作物の生産量について、2010年と2050年の間での変化量の予測。赤が減収、緑が増収を示す。赤で示される収穫量の減少地域には、多くの現段階での主要生産地が含まれる。

World Development Report 2010 Climate Change, World Bank より引用。

ところが、これまでの農薬や肥料の大量投入を前提とした農業生産を続けていくことも、以下の理由から難しい。Johan Rockströmらにより2009年に提唱され2015年に改訂版が出された「地球の限界：プラネタリーバウンダリー（Planetary Boundaries）」では、「窒素」「リン」の両方が既に地球の限界を超えている可能性が指摘された（図2-4）¹⁰⁾¹¹⁾。また、2009年以降、欧州の化学農薬規制が厳格になったことをきっかけに、世界中で減農薬の動きが進んでいる¹²⁾。すなわち、窒素とリンの農地への過度の投入、また農薬の大量施用による病虫害制御により支えられている現在の食料生産基盤は、今後抜本的な見直しと具体的な改善を迫られている。

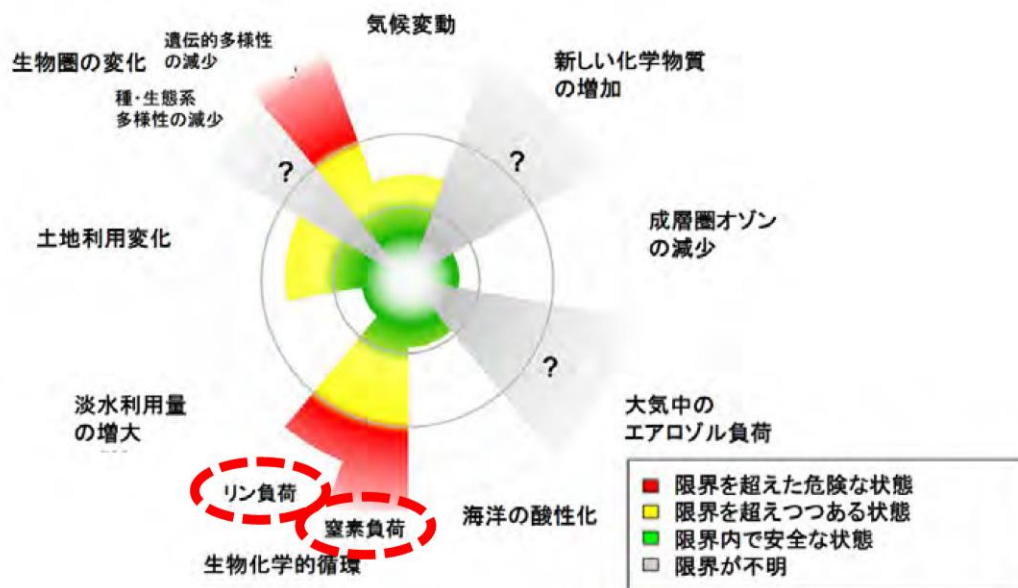


図 2-4 “地球の限界”を超えた窒素負荷とリン負荷

日本学術会議 フューチャー・アースの推進に関する委員会 資料より引用。

「持続可能な地球社会の実現をめざして

―Future Earth（フューチャー・アース）の 推進―」 平成 28 年 4 月 5 日

原出典：Steffen et. al, 16 January 2015, Science

<http://science.sciencemag.org/content/347/6223/1259855>

③再生可能な生物資源の利活用の推進、バイオエコノミーへの転換

天然ゴム、紙、繊維など、私たちの生活を支える非可食性のバイオマス資源についても、食料生産のための農耕地とは競合しない形で、今後も持続的に生産を続けなくてはならない。さらに、欧州や米国では、温室効果ガス排出削減のために、化石資源に頼らないバイオ由来の製品（バイオ燃料やバイオ化成品など）やサービスに基づく「バイオエコノミー」への転換が謳われ、国家レベルでの戦略提言が出されている^{13) 14) 15) 16) 17)}。国連の SDGs でもこれらの動向に強く関連するものが 2 つ掲げられており、国際的な注目度も高い（「目標 7：すべての人々に手ごろで信頼でき、持続可能かつ近代的なエネルギーへのアクセスを確保する」「目標 12：持続可能な消費と生産のパターンを確保する」が該当する）。わが国においても、ゴム・製紙・発酵生産関連企業の多くは、海外現地での大規模な原料作物生産を行っている。つまり、上記のようなバイオマス資源の開発方針はわが国にとって無関係ではなく、社会的貢献および商業的競争力の維持として非常に重要かつ優先度は高い。バイオ燃料原料を含め、これらのバイオマス資源生産は、農耕地との土地の競合を可能な限り抑えなくてはならない。このため、乾燥地や不良土壌（低栄養、高塩濃度）での安定的な生産を省労力・省コストで可能にする栽培マネジメント技術の開発が必要である。

④農薬・種苗関連企業の動向

前述した EU での化学農薬規制の影響に伴い、近年では新規化学農薬開発のために、膨大な費用と時間の投資が必要となってきた。開発コスト増加の要因としては、環境毒性面の規制強化が最も大きく影響している。2010 年以前は 5 万の候補化合物から 1 つの製

品が上市されていたのが、2010 年以降は 15 万の候補化合物から 1 つの製品が上市されるようになった¹⁸⁾。そのため、大手企業ですら 1 社で研究開発の全てを負担するのが困難となり、合併してリソースや知財を持ち合うという機運が高まっている。2015 年末以降、世界の農薬・種苗関連企業トップ 6 社間での合併・再編が相次いだのは、このような背景に裏打ちされている（図 2-5）。また化学農薬規制強化を背景に、従来の合成化学物質から、微生物・天敵昆虫・植物抽出物などの生物農薬や生物農業資材の開発および販売へのシフトが、民間の研究開発動向からも窺える（図 2-6）。また、2015 年末以降の世界の農薬・種苗企業トップ 6 社間のメガ合併・再編だけではなく、さらには、それらの大手企業による生物農薬・生物農業資材開発会社/ベンチャーなどとの提携や吸収合併も頻繁に行われている¹⁹⁾。国内でも、化学農薬・農業資材業界と微生物農業資材業界の溝が無くなりつつあり、資本参入や化学農薬メーカーと有機肥料や微生物農業資材に強みのある企業の合併などが行われている^{20) 21)}。

遺伝子組み換え作物は、前述した農薬・種苗関連企業大手においてほぼ寡占的に研究開発と販売が行われている。遺伝子組み換えは、一遺伝子の導入で形質を改変できるような、害虫耐性や除草剤耐性賦与には極めて有効な手段である。しかし、今後懸念されている、極端かつ振れ幅の大きい環境変動（旱魃と多雨、熱波や冷夏などが両方短期間に頻繁に起こりえる状態）に、一つの形質の変化だけで対応するのは困難である。また、一品種一形質ごとにそれぞれ規制を通過しなくてはならないため、作物種や品種が増えればそれだけ開発コストも増大する。それに対し、植物共生微生物利用によって、広い範囲の作物種に幅広い効果（増収性、耐病性、高温耐性、低温耐性、耐塩性など）を発揮することができれば、開発コストは劇的に抑えられ、インパクトが大きい。

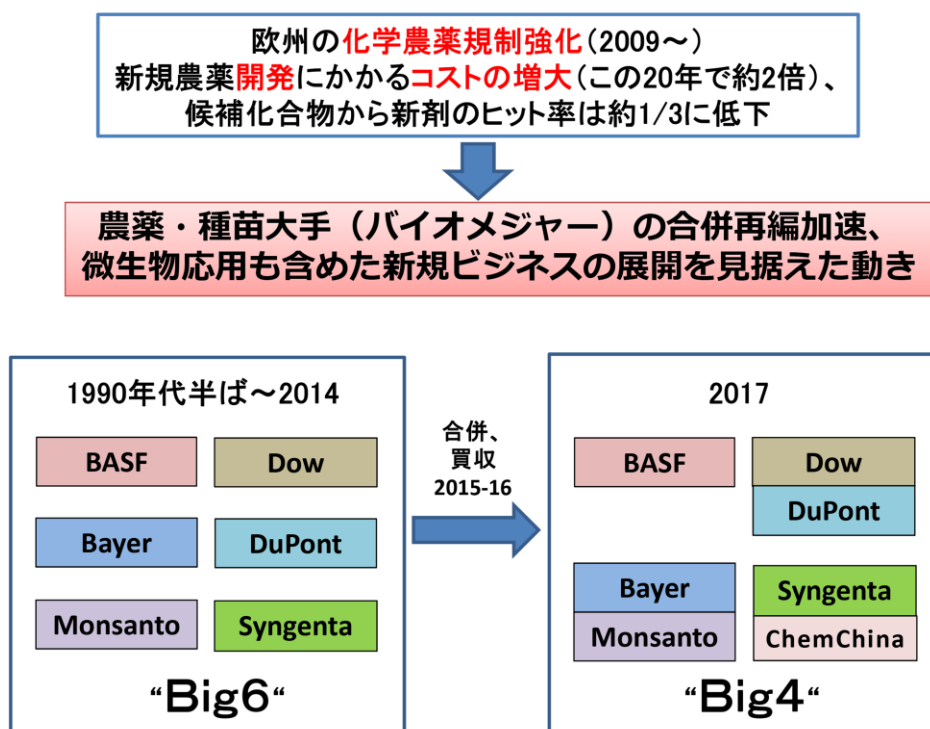


図 2-5 世界トップの農薬・種苗関連企業の動向

種苗・農業企業	連携あるいは子会社の微生物関連企業	概要
MONSANTO	Novozymes (デンマーク)	2013年よりBioAgAllianceで連携開始。モンサント社は3億ドル出資。今後10年で微生物を利用した技術の需要の伸びを見込む(2025年までに世界で1～2億ヘクタール単位を目指す)。微生物資材による作物の収量増加、農薬や肥料の補完・代替を狙う。(※2016年9月14日にBayerへの買収合意)
DuPont-Pioneer	Taxon Biosciences (米国)	害虫を抑制する微生物をターゲットに開発中。 (※Dowと合併再編予定)
住友化学	Valant BioSciences Corporation (米国、微生物農薬)、 Mycorrhizal Applications, LLC(米国、菌根菌)	2016年「プランテーション・ソリューション」事業として化学農薬と生物農薬の一体運営の強化・拡充。グローバル市場に対応。

図 2-6 民間の研究開発動向

2-1-2 歴史的背景

①科学技術的背景

農作物、資源作物および樹木は、野外あるいは施設での栽培の如何に関わらず、膨大な数の生物と相互作用しながら生育し収穫に至る。植物と微生物、あるいは微生物と微生物同士は、時には一方が他方を攻撃・排除し、あるいは相互に助け合う、といった、様々な相互作用のネットワークを形成しながら進化してきた。その間を仲介するのが相互作用因子（化学物質）である。

これまでも、植物と微生物の相互作用研究は、陸上植物と菌根菌、あるいはマメ科植物と根粒菌、などで基礎研究と応用が進められてきた。しかし、複数のボトルネックにより、これまでの科学的理解と応用の範囲は極めて限定的であったと言わざるを得ない。代表的な4つのボトルネックと近年の動向について以下に述べる（図 2-7）。

（1）微生物叢の全体像把握の難しさ：

近年の次世代シーケンサーによるメタゲノム解析の発展と普及により、培養法（希釈平板法）では微生物叢全体の1%程度しか把握・分離されていないことが明らかとなった。すなわち、これまで植物と相互作用する可能性のある微生物叢の種類・数とも、大幅に少なく見積もられていたことになる。つまり、これまで分離・培養を試みられていない微生物の中に、植物にとって有益な効果を発揮する未知の微生物が多数存在することを示唆している。

（2）微量かつ不安定な相互作用因子：

植物と微生物の相互作用を司る因子は微量で不安定なことが多く、解析が困難であった。根粒菌や菌根菌など、代表的な微生物と植物との相互作用については、モデル植物の活用や分析機器の高度化によって徐々に紐解かれつつあるが、その他の微生物と植物との相互作用因子についてはほぼ手付かずの状態である。またモデル植物以外の実際の

作物（農作物、資源作物、樹木）についての知見も乏しい。近年の分析技術の高度化により、極微量な分子でも解析可能になりつつある。

(3) 従来の微生物培養法（平板培養法、希釈平板法）を基盤とした微生物分離培養の限界：

メタゲノム解析により土壌や多細胞生物宿主の内部などに存在することが検出されても、その9割以上が、従来の平板培養法を代表とするコンベンショナルな培養法では培養できないか、培養の最適化を試みられていない。もともとその微生物が棲息していた環境と似た培地組成にする、または、培地の成分を滅菌後に混ぜるといった非常に軽微な改変で、培養可能になる場合もあれば、微生物集団を濃縮してから培養に持ち込む方法や、iChip など「その場で」培養するデバイスやマイクロドロプレット法など、難培養微生物の培養や分離、利用の研究開発も進みつつある。

(4) 計算機処理能力の限界：

これまで植物と相互作用する微生物について、根粒菌や菌根菌などいくつかの代表的な微生物について基礎・応用研究と社会実装が行われてきた。単一の植物と単一の微生物の相互作用を理解するというステージから、今後は、複数の微生物を取り扱い、宿主の植物（つまり作物種）も多様になる。そのためデータの量は膨大になり、データの種類も多くなる。20 世紀の計算機科学では到底扱いきれなかったが、近年の爆発的な計算機科学の進歩により、より複雑な系についてもアプローチが可能となってきている。

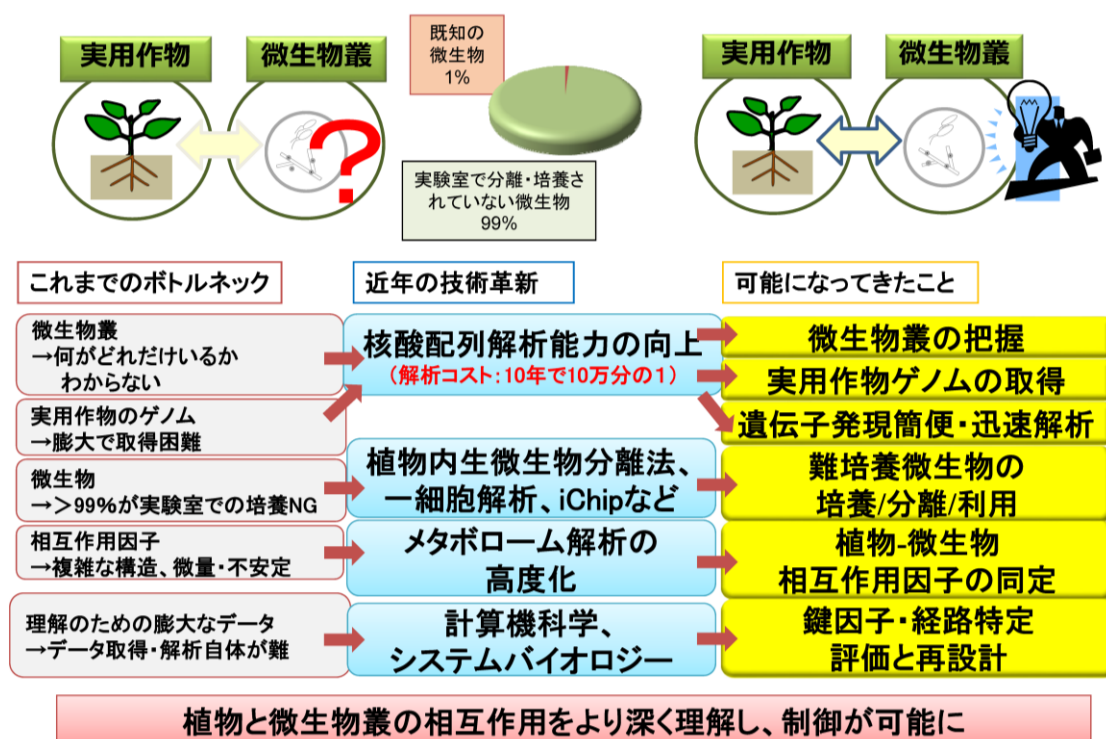


図 2-7 これまでのボトルネックと直近の技術革新

②農業関連の微生物研究の歴史

これまでも、農作物と微生物の相互作用に関する研究開発と社会実装は、長い間行われてきた²²⁾。農作物と微生物との関わりについては、19世紀半ばから植物病原菌研究を中心にはじまり、その後20世紀前半にかけては根粒菌や菌根菌に代表される植物に有用な微生物の基礎研究が行われた^{22) 23)}。その後、1950年代以降有用な微生物の研究は応用と社会実装が進み²⁴⁾、微生物を用いた生物農薬や肥料代替法（以下、微生物資材と略す）の上市・販売が行われた（図2-8）。しかし、それらの微生物資材は、「施用する土地や環境の違いによって効果に振れがある」、「品質保持が難しく効果が安定しない」「高コスト」といった問題があった（図2-9）。その後、特に先進国を中心とした土地利用型の大規模生産農業では、化学肥料・化学農薬・除草剤・遺伝子組み換え作物を組み合わせ、安定した効果を示し、安価かつ品質保持期間も長い種苗素材や農業資材を用いた生産体系が普及し、微生物資材は世界的に幅広く普及することはなかった。一方わが国では、米国や豪州のような大規模生産は地勢・地形的に不可能で、遺伝子組み換えに対する社会受容も進まず、安全・安心であることが重視された。そのため、微生物資材は高付加価値・ニッチ市場で小規模に普及し、基礎研究や要素技術は蓄積している状況にあった。その後21世紀以降、世界的に農業の持続性（窒素・リンの施用過多や気候変動）に対する懸念が顕在化し、さらに2010年頃からは化学農薬・遺伝子組み換え作物に対する開発や規制コストの増大も影響し、欧米でも微生物の農業応用研究を再加速する動きが出てきた²⁵⁾（図2-9）。

	17C	19C	1900～1950	1950～1980	1980～2000	2005	2010～2015	2016
科学技術	「微生物」の発見 (レーヴェンフック)	根粒共生の発見 菌根共生の発見	化学肥料 ハーバー・ボッシュ法 殺虫効果 <i>Bacillus thuringiensis</i> 菌根菌基礎研究開始	菌根菌による病害抑制効果の発見 「緑の革命」(化学肥料多用と短稈育種) 菌根菌研究ブーム	モデル植物のゲノム解析 遺伝子組み換え作物の開発	次世代シーケンサーの登場と普及		
						メタゲノム解析の普及		
						実用作物のゲノム解析・遺伝子発現解析高速化		
海外					遺伝子組み換え作物普及	ヒトマイクrobiオーム 大型プロジェクト開始 (欧州・米国)	ファイトバイオーム イニシアチブ(米国) モンサント・ノボザイム 農業微生物資材開発開始	ナショナルマイクロ バイオームイニシア チブ(米国)
日本			微生物による植物成長調節因子(ジベレリンなど)の発見 菌根菌基礎研究開始	放線菌由来の抗生物質カスガマイシン 抗生物質カスガマイシン	アカデミア、企業(電力・ガス・石油関連企業)において 菌根菌や微生物農業資材 研究開発と上市	植物による菌根菌活性化物質(ストリゴラクトン同定) ミヤコグサの根粒菌ゲノム解析	根粒菌・菌根菌共生の共通の分子機構発見 植物ホルモンであること を発見	農水eDNAプロジェクトによる生物学的土壌診断技術開発

図 2-8 農業分野の歴史的変遷と科学技術の関係

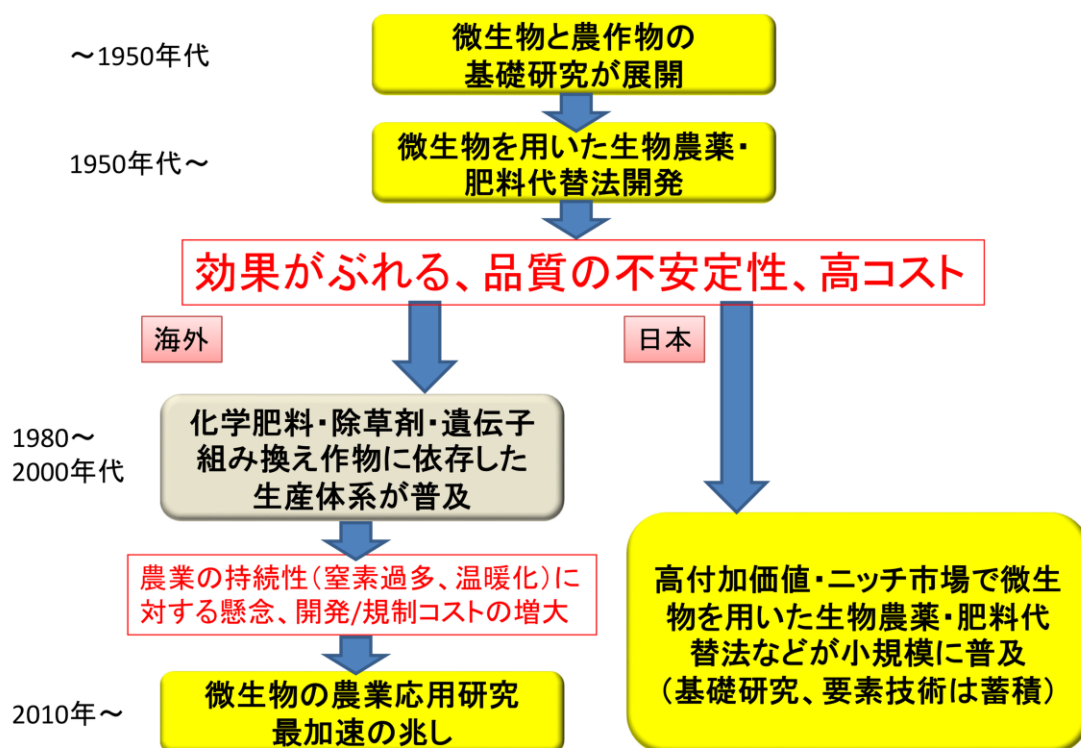


図 2-9 微生物の農業応用の歴史 海外（米国、豪州などの大規模生産）とわが国の比較

微生物資材の効果が土地や環境によって振れる主要な原因は、土壌の物理的・化学的・生物学的条件が多様であるためだと考えられる。特に生物学的条件（その土壌にどのような微生物がどれくらい存在しているのか）は微生物資材の奏功性に大きく影響を与える。近年の次世代シーケンサーの性能向上とメタゲノム解析の普及により、これまでブラックボックスであったこの生物学的条件を把握可能になったといえる。これにより、土壌の物理的・化学的・生物学的な条件を統合的に評価し、サブグループ化が可能となりつつある。今後の開発では、微生物資材の効果が安定して得られる土壌サブグループを特定し、微生物資材の奏功性に対する指針（使用条件など）を立てられるようになる。

③植物科学研究の近年の動向（図 2-10）

2000年に被子植物ではじめてシロイヌナズナ（*Arabidopsis thaliana*）のゲノムが解読されて以降、約10年間にわたり、米国・欧州・日本とも、モデル植物シロイヌナズナを使った研究が集中的に行われた。その結果、機能ゲノム学（Functional Genomics）が大きく進展し、遺伝子と機能、および遺伝子と形質の関連付けに威力を発揮した。わが国の植物科学コミュニティからも、花成ホルモンや枝分かれホルモンの同定など、マイルストーン的な成果が数多く挙げられた。

2010年ごろから、植物科学分野においても橋渡し研究推進の潮流が国際的に起こり、米国はエネルギー作物研究へ、欧州は農作物研究へのシフトが強化された。これらの実用作物への橋渡しの際には、実験室で厳密な環境制御下で栽培されるモデル植物と違い、それぞれの土地の性状や質を考慮する必要があり、土壌－作物－微生物叢の統合的な解析が求

められるようになった。また、モデル植物の単一の機能の理解と改変を経て、農作物に応用する、という既存の流れのほかに、複合生物系の全体の理解と改変へと移行しつつある。つまり、「作物をデザインする」から「栽培をデザインする」という方向性である。ここで重要になるのは多階層のデータをもとに鍵因子候補を見出し、評価と再設計を可能にする、データサイエンスである。

わが国の問題点としては、基礎研究で非常に重要な発見をしながらも、多くが応用へと橋渡しされないこと、また、世界に伍する先鋭的なデータサイエンスを展開している研究者はいるものの、欧米ほどの裾野の広がりがなく、人材の層が薄いことである。

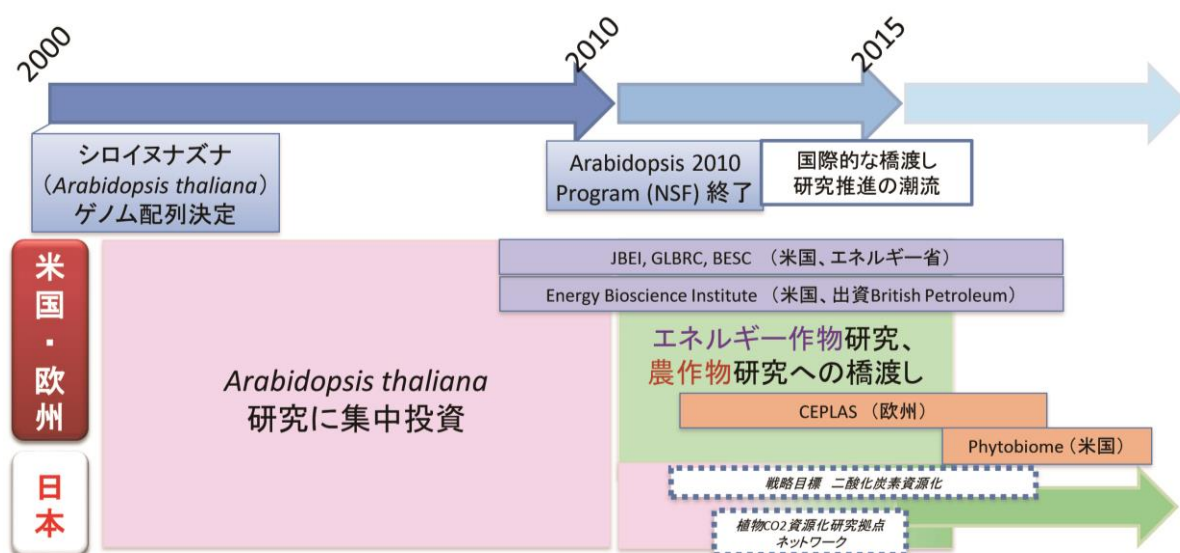


図 2-10 植物科学研究の近年の動向

モデル植物から実用作物へのシフト、基礎科学から橋渡し研究加速の潮流が 2010 年ごろから欧米で顕著になった。しかし日本では多くが基礎研究に留まっている。

2-1-3 国内外の研究動向と現時点での問題点

①海外の研究動向（図 2-11）

米国は、Human Microbiome Project によるヒトマイクロバイオーーム研究でも世界の先陣を切った²⁶⁾。その後、Earth Microbiome Project などで、ヒト以外の環境（おもに土壌）に棲息する微生物叢の研究プロジェクトが開始し²⁷⁾、さらに 2015 年以降、植物をとりまく微生物叢 (Phytobiomes) や、省庁横断的に微生物叢研究を推進する動き (The National Microbiome Initiative) があつた。これらの、ヒトマイクロバイオーーム以降に立ち上がった微生物叢の網羅的解析に基づく研究プロジェクトの問題点は、部分的シーケンス配列から存在が予想される微生物叢の網羅的な記録に大部分の力が注がれ、機能の解明に至った例はごく少数であることである。機能の解明に至らない主たるボトルネックは、膨大な微生物叢の中から、どの微生物が重要なのか選抜する方法論に乏しいこと、また、重要な機能を持つ微生物を分離・培養して確保することが困難なことである。また、このボトルネックが解消されなければ、植物と微生物叢の相互作用因子の解析にも進むことはできない。今後は、これらの分離・培養・選抜の課題を克服すること、また、膨大なバイオリソー

スをいかに効率的に管理し重要なものだけを確保するかといった方法論を確立すること、さらに、簡便で迅速かつ汎用的なプロトコールやツールを標準化することなどが求められる。

米国・欧州		日本
微生物叢	植物-微生物	植物-微生物
2008～2014	『Human Microbiome Project』(米国) (HMP@NIH、2008～) ・ヒト微生物叢の網羅的解析 『Earth Microbiome Project』(米国) (2010～) ・地球上の土壌微生物のカタログ化	・大型研究無し、小規模な研究中心 ・農水省eDNAプロジェクト(土壌DNA抽出プロトコールの大枠確立)
	【問題点】プロトコール標準化、技術開発、微生物叢の網羅的に注力、機能解明例はヒトマイクロバイオームプロジェクトのみ。	
2015～現在	『The National Microbiome Initiative』(2016～)(米国) ・USDA、DOE、NSF、NASA、などでも微生物叢研究を推進(総額\$1億)。 ・異分野融合研究プラットフォーム形成、人材育成。	『Phytobiome Initiative』(2015～)(米国) ・データ統合的・包括的な農業関連技術開発。 ・農業関連公的ファンディング年間\$1億の増加を目指す。
	【今後の課題】膨大なデータやバイオリソースの管理 機能解明に向けた方法論の確立(システムバイオロジー、相互作用因子の解明) 生物多様性条約名古屋議定書批准に向けて自国知財困い込みの動き	

図 2-11 公的研究開発動向

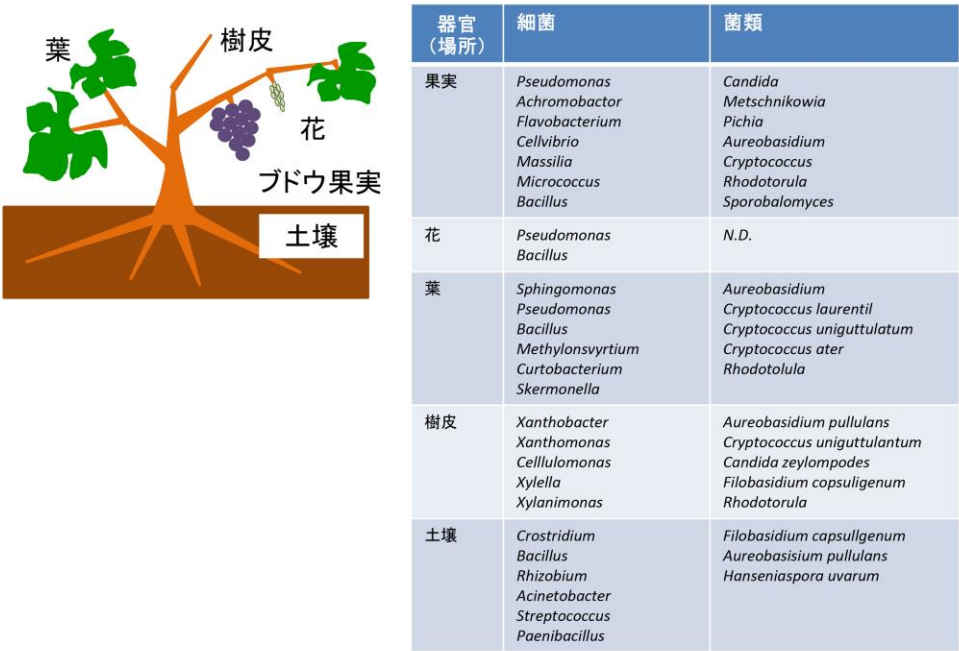
有効な機能を植物に付与する微生物の先導的な研究と応用例について、いくつか紹介する(図 2-12)。米国の火山地帯イエローストーンにおいて、50℃を越える土壌で生育する植物(*Dichanthelium lanuginosum*)に共生する新種の菌類(*Curvularia* sp.)が米国の研究グループによって発見され、この菌類を接種したときだけ植物が高温耐性を獲得することが見出された³⁰⁾。その後研究グループは、Adoptive Symbiotic Technology というベンチャー企業を立ち上げ、トウモロコシ、イネ、ダイズなどの種子に菌類をコートして販売を開始している³¹⁾。収量の増加、乾燥耐性、高温耐性、低温耐性、塩耐性、を賦与する幅広い効果があり、宿主範囲も広く、汎用性の高い微生物資材として注目を集めている。

遺伝子組み換えで乾燥耐性を作物に賦与するには、たとえ米国のように社会受容が進んだ国であっても、莫大な研究開発コストおよび規制コストがかかる。さらにそうした技術を用いて作出された乾燥に強い品種は、逆に降雨量が多い年には収量が下がるなどの難点もある。一方、こうしたスーパー共生菌を利用したアプローチの場合、一つあるいは少数の微生物の開発で環境変動に頑健になるなどの多くの機能を発揮させることができ、複数の作物種に広く適用可能であるという点が、研究開発および社会実装上の大きなアドバンテージとなり得る。



図 2-12 海外の先行研究例：高温土壌で生育する植物から分離された菌類の農業応用
 写真・図の出典：Adaptive Symbiotic Technologies, Redman, et al.,
 Thermotolerance Generated by Plant/Fungal Symbiosis (2002),
 Science v298, p1581

また、近年、ワイン用ブドウ、およびイチゴの微生物叢研究によって、ワインの「テロワール（個性）」にブドウの植物体表面の微生物叢が関わる可能性が示されたり³²⁾（図 2-13）、イチゴがもともと持つ芳香成分を特定の微生物（メチロバクテリウの一種）が変換し、より人間の嗜好性が高い芳香成分に変換するといった例も報告されている³³⁾（図 2-14）。つまり、農産物の収量やストレス耐性などのほかに、品質や付加価値を高めることに対しても、特定の微生物を利用することで制御可能であることを示唆している。



2. 研究開発を実施する意義

図 2-13 微生物叢の理解による、農作物の高品質・高付加価値化の可能性
ブドウの器官ごとに検出される微生物の種類の概要。土壌の性質、気候、ブドウの品種などにより、微生物のレパートリーが変わることで、ワインの品質や個性（テロワール）に影響を与える可能性が示唆されている。 Jack A. Gilbert et.al., Microbial terroir for wine grapes (2014), PNAS v111 p5-6 の図をもとに CRDS が再構成。

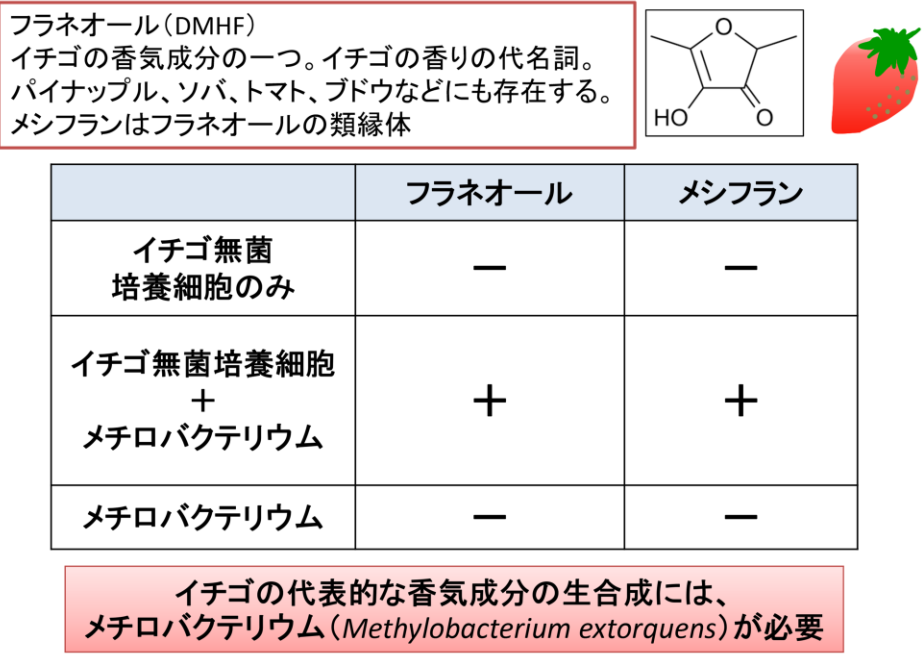


図 2-14 微生物叢の理解による、農作物の高品質・高付加価値化の可能性
イチゴの香りの代名詞とされる成分（フラネオール、メシフラン）は、微生物（メチロバクテリウム）により生成される。イチゴの無菌培養細胞のみからフラネオールもメシフランも検出されないが、あるメチロバクテリウム (*Methylobacterium extorquens*) と共培養すると検出されるようになる。メチロバクテリウムだけではフラネオールもメシフランも合成できない（出典：Zabetakis (1997) Plant Cell, Tissue and Organ Culture v45 p25-29 の結果をもとに CRDS が再構成）。

②わが国の研究動向

(1) 植物-微生物相互作用研究の歴史と動向

わが国では20世紀前半より植物-微生物相互作用研究をもとにいくつかの大きな発見と農業利用に至った例がある。例えば、イネ馬鹿苗病菌の研究から植物ホルモンジベレリンの発見、いもち病防除用抗生物質であるカスガマイシンの発見などがその代表例である(図2-8)。この際、天然物有機化学、微生物学、植物ホルモンなどの基礎研究の強みが発揮された。また、20世紀後半には、菌根菌を利用したバイオ肥料や農業資材が開発・上市され、現在も小規模ながら高付加価値・ニッチ市場で販売が続けられている。特に黄土高原の森林の回復、雲仙普賢岳の火砕流後の緑化などにおいて、菌根菌資材が大きな効果を挙げたことは特筆に価する^{34),35)}。

その後の植物-微生物相互作用研究は、大型研究の形で推進されることはなく、大型研究のごく一部分として推進されるか、小規模または研究者単位での研究が中心であった。農水省のeDNAプロジェクトでは、土壌DNAからの土壌診断の試みがなされ、土壌病害診断マニュアル(ヘソディム)として取りまとめられたが³⁶⁾、DGGE(付録3.専門用語説明 p56 参照)による概括的かつスループットの低い解析によるものであった。菌根菌の農業応用については、わが国でも、最先端ゲノム科学とフィールド栽培研究の連携の試みが行われている。ただし、対象は菌根菌の単一種に限定されている(図2-11)。

(2) ストリゴラクトン

21世紀に、植物が菌根菌の分枝を活性化させるシグナル分子としてストリゴラクトンが同定された。旧来は寄生植物ストライガの発芽誘導物質として知られており、菌根菌の分枝を活性化するというのは2つ目の機能として見出された。その後ストリゴラクトンは、植物の枝分かれを制御する新規の植物ホルモンであるという第3の機能も明らかとなった。現在、ストリゴラクトンを介する植物内のシグナル伝達系が解明されつつあり、応用という観点からも、アフリカで甚大な被害を生じている寄生植物ストライガに対する防除法の開発も進められている。基礎研究から応用研究への展開、さらに社会実装に向けた取り組みについて、わが国のプレゼンスが非常に高いテーマである(1章コラム② 図1-5 参照)。

③問題点

これまでも述べてきたように、微生物の農業応用の難しさは、「効果が不安定」「品質保持の難しさ」「高コスト」が主たる要因である。

「効果が不安定」なことは、生きた微生物そのものの機能を発揮させたい場合に、非常に問題になる。品質保持の難しさ、すなわち、製造から出荷を経て現場で利用されるまでの間、微生物が生きたまま保持されるか、といった「品質保持の難しさ」にも繋がる。また、土壌の物理的・化学的・生物学的条件の多様性によっても、効果のばらつきは引き起こされる。この中で最も影響が大きいと予想されるのが、生物学的条件、すなわち、その場にどういった(微)生物がどのくらいいるか、ということである。それらを把握せずに、効果的な施用法の指針をシステムティックに立てることは難しく、これまで勘と経験に頼ってきた、あるいは場当たりの施用を試みることを繰り返してきた。さらにもう一つの問題点、「高コスト」についてだが、安価な化学合成品により、もともとの天然物由来の製品

が市場を駆逐された例は多数ある。化学品に対して微生物由来の製品は、微生物そのものであっても、その相互作用物質を介しても、価格的な競争力は低い。いかに少量で効果的な影響を付与させることができるか、またこれまでの農業生産者の栽培プラクティスを変えずに製品に落とし込めるか、といった技術開発の課題がある。接種技術や、製剤技術、広い宿主範囲を持ち効能も多岐にわたるようなスーパー微生物の発見などが、これらの解決につながる。また、施用・接種する微生物の量がごく少なくても、同時に加える安価な農業資材（農林水産業の廃棄物由来の有機物）の添加によって、微生物の定着を促すといった方向性もあり得る。さらには、微生物をあえて接種しなくても、その場にいる土着の微生物で植物に有益な効果をもたらすものをいかに増やすか、という生態学的知見を活かした新たな介入法を導出できる可能性もある。これまで問題点・課題であった、「効果が不安定」「品質保持の難しさ」「高いコスト」に関しても、近年の技術革新と、わが国の強みを糾合することで、克服することが可能である。

2-1-4 国費を投入する意義

①技術的優位性

前述したように、わが国には、植物科学、微生物学、天然物有機化学の基礎研究の強みがあり、古くはジベレリンやカスガマイシン、最近ではストリゴラクトンの発見など、微生物と植物の相互作用研究で世界をリードする成果を上げてきた実績がある。

一方で、世界の潮流としては、1970年代以降海外では窒素肥料の多投入を前提とした緑の革命が成功をおさめ、さらに1990年代以降は、遺伝子組み換え作物・化学農薬の組み合わせへの大規模なシフトが起こった。これに対し、わが国では社会受容の問題もあり、遺伝子組換え作物についてはその大部分が基礎研究の範囲内に留まり、菌根菌や根粒菌などを使った農業資材の開発と上市が継続された。現在でも高付加価値・ニッチ市場で販売を続けており、基礎研究やノウハウの蓄積がある。

また、1章コラム②③④で例示した、わが国の先導的研究事例を、異分野融合の形で一貫的に研究が推進できれば、研究開発および社会実装の加速が期待できる。これまでの、ヒトマイクロバイオーーム研究以降に興った環境・植物微生物叢研究プロジェクトで未だ克服できていない問題点は、膨大な数の微生物叢から、どの微生物（一種またはグループ、以下微生物集団と記述する）が、植物に有効な機能を発揮するのか、微生物集団の機能の解明には至っていない点、また、機能解明に向けた方法論が未だ確立されていないことである。その最大の理由は、植物の表面、内部にいる微生物叢の大多数が未だ分離・培養できていないことによる。その点、バイオインフォマティクスによる超ハイスループットな候補微生物の選抜（1章コラム①参照）、難培養微生物培養（1章コラム①参照）、植物と微生物の相互作用研究（1章コラム②参照、植物科学、天然物有機化学、微生物学の連携）の強み、といったわが国の優位性を発揮することができれば、世界をリードする研究開発および社会実装が可能であると期待される。また、研究者個人単位あるいは小規模のグループ研究により、特徴ある圃場あるいは植物と相互作用する微生物に注目して、農業資材開発、作物生産・利活用への応用や社会実装に向けた取り組みを行っている先導的な例がある（1章コラム③、④参照）。これらの研究シーズについて、課題①～③の研究開発課題に沿った形で一貫通貫研究を推進すれば、バイオ肥料、生物農薬、バイオ由来製品の原料栽

培、食料・食品、といった分野への応用が加速し、より合理的な介入方法の設計と導出につながる可能性がある。

②独特な土壤生態系

日本は南北に長く、土壤の種類が多様で、標高差も大きいいため、世界でも独特な土壤生態系が形成・維持されていると予想される。他国にはないわが国独自の土壤生態系、つまりは微生物叢が形成されているといえ、これらについてはわが国自体が率先して独自にデータを収集・蓄積および解析を進める必要がある。また、有機肥料のみを長年に渡って連用している圃場、完全無施肥無農薬で高い生産性を上げている圃場など、世界的にも独特な農耕地生態系が確立している圃場が各地に点在している。

これまで、「土作り」は農家の経験と勘に基づく職人技と見られ、時に「有用微生物群」については科学的根拠の乏しい説明が横行し、微生物の農業応用全体に「非科学」「疑似科学」の烙印を押されることすらあった。こういった背景から、植物に内生する、あるいは土壤に存在する微生物の中に存在し、作物に対して真に有効な微生物叢の実体を、正当な科学的手法によって明らかにする必要がある。

上記に加え、これまで不十分な解析や非科学的な説明によって漠然と理解されてきた圃場から、有効な機能を持つ微生物が多数発見される可能性も高い。また、名古屋議定書の批准に向けて、有効な機能を持つ微生物菌株は、知財として確保する必要がある。

③海外生産地でも適応可能な基盤技術の創出の必要性

2-1-1 で述べた通り、国内で消費される食料は今後もその約 50%を海外から輸入し続けると予想される。わが国の食料安全保障を堅固にするためにも、海外でも利用可能な微生物農業資材開発と制御法、栽培現地の各場所で適応できるようなわが国独自の基盤技術の開発と保有が必要である。そのため、クロスライセンスや共同開発などを推進することが望ましく、特に東南アジア、アフリカとの連携が重要になる。一方で、海外現地での作物生産に関しては、食料の他にも重要な観点がある。1つ目は、野菜・花の種子である。わが国の2社（サカタのタネ、タキイ種苗）が野菜・花の種子業界の世界トップ10に入っており、フランス、オランダとともに品種開発の中心国と位置づけられている³⁸⁾。ただし、それらの国内企業においても、種子生産の約半分は、海外で生産されている。2つ目は、ゴム、製紙業界である。こちらもわが国の複数の企業がタイヤ業界、製紙業界で世界トップ10に入り、海外で大規模プランテーションを行って原材料（植物由来の資源）を調達している。3つ目はアミノ酸や調味料などの発酵関連企業であり、現地において原材料生産と製品製造事業を一体で運営しており、その土地に最適かつ低コスト・低環境負荷な栽培技術が求められている。本戦略プロポーザルで提言する研究開発がこれらの産業に与えるインパクトは大きい。

④省労力・高付加価値化の同時実現

消費者は、安全・安心な農作物を求めており、わが国は特にその傾向が強い。つまり、化学薬品の使用を低減してつくられた農産物に付加価値を見出している。また、漠然と「有機栽培（化学肥料低減あるいは不使用）の野菜は良食味」であるとして、こちらも高価格

でも需要がある。生産者は、農薬散布や施肥を減らすことができれば、労働力やコストの削減につながる。近年の就農者の激減に伴い、省労力・省コストのニーズはますます高まっている。もし農業生産に使う化学薬品の使用を減らしても、収量や品質を維持あるいは向上できるのであれば、消費者、生産者ともにメリットがある。さらに、わが国の農業生産物の安全・安心イメージの向上、ブランド化にも貢献可能で、食品・農産物の輸出拡大にも貢献しうる。

2-2. 社会・経済的效果

今後は、森林を農地に開墾することは人口増加速度の大きい途上国であっても厳しく制限され、既に利用している農耕地の劣化は進み、気候変動による農作物への悪影響も危惧される。今後の世界人口の増加に対応するための食料確保は、これらの様々な制約のもと実現しなくてはならない。食料ロス・食料廃棄（Food Loss and Waste）減少の努力とともに、将来にわたる持続的な農業生産基盤を維持するため、これまでの慣行的農業技術の抜本的な見直しを行い、化学農薬・化学肥料への過度の依存を避ける生産体系に資する技術基盤の構築が不可欠である。その過程で、現段階で最も顕著に技術革新が進行中で、様々な展開が期待できる研究開発の方向性は、植物と相互作用する微生物叢を理解し、利用し、制御することである。

以上をふまえ、本戦略プロポーザルが提言する研究開発の推進により、以下の効果が期待できる。

①作物保護市場の拡大：バイオ農薬、バイオ肥料、バイオスティミュラント(植物の免疫賦活化剤)などの開発

植物と相互作用する有効な機能を持つ微生物（カクテル）、および、相互作用因子の利用による、作物の病害、虫害、雑草対応技術が開発されると期待できる。世界の生物農薬産業市場は16億ドルであり、2019年までの年平均成長率は16%と試算されている¹⁹⁾。また、2014年時点での世界のバイオ肥料産業市場は、5億ドルであり、2020年までの年平均成長率は16%と試算されている³⁹⁾。両者とも、年平均成長率から計算すると5年で倍化する成長分野である。また、世界的な減農薬のトレンドにはあるものの、依然として化学農薬の世界市場は2500億ドルと巨大なので⁴⁰⁾、環境毒性が低くかつ有効性が高いといった極めて有望な農薬シーズが見出され上市に至れば、大きな経済効果をもたらす可能性はある。

②生産可能地域の拡大(環境対応)

有効な機能を持つ微生物の中には、米国火山地帯イエローストーンで見つかった *Curvularia* sp. のように、作物に様々な耐性を付与し増収も実現するという非常に有益な特性を持つものがある。四季の違いが明確で、火山帯や温泉などの高温環境も各地に点在し、高低差もあり、土壌の質も多様な日本においても、同様の微生物が存在する可能性がある。例えば、高い耐塩性を示す植物から分離した菌根菌を他の植物に接種することで耐塩性の向上につながったという研究例が国内でも報告されている⁴¹⁾。そういった有効な機能を持つスーパー微生物（カクテル）を分離・選抜・活用することで、乾燥耐性、塩害耐性、増収性、肥料の低要求性、などを作物に付与することができれば、乾燥地や荒廃地での作物・樹木栽培、低肥料栽培技術、バイオ肥料開発、緑化技術への応用が期待できる。特に、交配育種と選抜に非常に長い時間がかかる樹木においては、スーパー微生物（カクテル）によって乾燥耐性の形質を付与することができれば、早い段階で解決の道が得られるので特に期待される。

③有効な機能を持つ微生物を利用した高付加価値化

有機肥料で育てた農作物は高品質を謳われるが、科学的な裏付けがほとんどないのが現状である。しかし、近年海外での先行研究によって、植物表面、根圏、植物内生微生物叢が農産物の食味や品質に影響する可能性が示唆されつつある。例えば、ブドウの樹に共生する微生物叢がワインのテロワール（個性）に関わる可能性を示唆する研究³²⁾、イチゴの香りをさらに良いものにする微生物などが研究されている³³⁾。また、トマトのサルモネラ菌汚染を防ぐ植物共生微生物の発見と利用も報告されている⁴²⁾。減農薬・減肥料で良食味や栄養価の強化が実現できれば、省労力・省コストな農業生産が可能となるだけでなく、日本産の農産物のブランド力の向上につながり、輸出促進にも貢献できる。また、農産物安全性の向上や日持ち性の向上といった新たなブランド力の創出も期待できる。

2-3. 科学技術上の効果

○学問的效果

【複合生物系全体の理解による新機構の解明】

これまでの、分子生物学や分子遺伝学をベースにした学問的な潮流は、「単一生物の単一機構を理解」し、それを深化・精緻化させることであった。次世代シーケンサーの爆発的な性能向上に伴い、作物ゲノム、作物と共存する微生物叢ゲノム、土壌微生物叢ゲノムの全体像を把握することが可能になった。今後は、宿主-微生物のホログゲノム⁴³⁾を解析し全体像を理解することで、「複合生物系全体の理解」の潮流に向かうと考えられる。菌根菌や根粒菌、または病原菌など、これまで個別に研究されてきた植物と微生物の相互作用についても、新しい潮流からさらに理解が深化すると考えられる。

一方で、「複合生物系全体の理解」の中心的課題として、植物と微生物の共生機構および競合機構の解明が跳躍的に進むと考えられる。植物は「敵」である病原菌をいかに認識し排除するのか、病原菌は植物の排除機構をいかにすりぬけて侵入するのか、さらに植物にとって病原菌の増殖を抑えたり死滅させたりする微生物（すなわち植物にとっての「敵の敵」）については、植物はそれらをいかに選択的に受け入れ棲みつかせているのか、これら一連のメカニズムについても、植物と微生物間の相互作用因子が介在しているはずで、学術的に非常に意義深い。つまり、共生成立の機構、共生が成立せず植物が微生物を排除する機構（排除機構）、植物病原菌の感染（排除機構のすり抜け）、などが、どういった相互作用因子を介して、また植物と微生物それぞれの応答系でどのように情報処理されているか、といった点である。

【微生物分類学の拡充】

近年の次世代シーケンサーの爆発的な性能向上に伴い、1987年には12門とされていた細菌門は、2012年には70門あると予想されている⁴⁴⁾。最近ではさらにこれを大幅に上回る細菌門が存在するという報告もなされている⁴⁵⁾。しかしシーケンスレベルでの解析結果は単なる推定にすぎず、正確な分類学的記載には分離・培養・微生物の公的機関への寄託が必須であり、実際には分離・培養の難しさゆえに、大多数の細菌門が培養された微生物を含まない「未培養門」である。21世紀になってから細菌門として5門の公式な追記載があったが、3門がわが国の研究グループによる^{46) 47) 48)}。つまり、微生物の記載と利活用に必須な分離・培養といった本分野では依然として日本人のプレゼンスの高さが窺える。

○科学技術的效果

【効率的な分離技術、接種技術、評価技術の確立】

植物と相互作用する微生物叢の中から、極めて効率的に有効な機能を持つ微生物の候補を同定および分離することを可能にする技術基盤が確立できる。コラムに掲載した、植物組織から生きたまま微生物を取り出す手法と、超ハイスループットな群集構造解析により、全体の情報を把握しながらも、目的の微生物を確実に確保することが可能となる。培養を可能とすることで、メタゲノム解析のみで存在と機能が予想される微生物という域を脱し、はるかに研究の優位性は高くなる。また、効率的な植物への接種技術や評価技術の発展も期待できる。

【汎用的なバイオインフォマティクス理論とツールの確立】

第一に、プロトコルの標準化（サンプリング、DNA 抽出法、同時に取りべきメタデータなど）は非常に重要である。欧米で提案されているプロトコルで日本の土壌を用いて DNA を抽出しても成功しない例がある。これは、日本の土壌の質が他国と異なること、また多様であること（例えば DNA が吸着しやすい土壌の存在など）が原因と考えられる。得られたデータをわが国の多様な土壌の既存の情報と紐付けできれば、世界のあらゆる土壌の性状に適応可能な、非常に汎用性の高いサンプリングプロトコルが確立できるものと期待できる。

○人材育成の成果

- ・これまで、モデル植物を使って実験室のみで研究を主に行ってきた研究者像とは一線を画す、フィールドとラボの両方を行き来し研究活動を推進するような若手研究者のリーダー、また、Dry（計算機科学を駆使したインフォマティクス研究）と Wet（実験室での研究）の両方を遂行可能な若手研究者を育成することが可能である。
- ・上記のような植物と相互作用する微生物叢の研究開発の全体像を見渡せる若手研究者の育成により、ヒトマイクロバイオーーム研究や環境マイクロバイオーーム研究といった、異なる切り口のマイクロバイオーーム研究者層を厚くし、共有可能なインフォマティクスツールを協働で開発するなど研究の活性化や波及効果が見込める。

（引用文献）

- 1) Population Division, World Population Prospects 2015
<https://esa.un.org/unpd/wpp/>
- 2) The World Bank
<http://data.worldbank.org/indicator/AG.PRD.CREL.MT>
- 3) 「農産物価格高騰や栄養低下 …世界の農業に異変」 マッキンゼー・エクセレンス
2016 年 12 月
<http://business.nikkeibp.co.jp/atcl/report/15/262112/120400007/>
- 4) 「食料自給率とは」 農林水産省
http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/zikyu_ritu/011.html
- 5) 「農業労働力に関する統計」 農林水産省
<http://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/08.html>
- 6) "Sustainable Development Goals" 「持続可能な開発目標とは」 国際連合広報センター
http://www.un.org/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/
- 7) "Framework Convention on Climate Change" United Nations
<http://bigpicture.unfccc.int/#content-the-paris-agreement>
- 8) 「国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議（COP21）及び京都議定書第 11 回締約国会合（COP/MOP11）の結果について」 環境省
<http://www.env.go.jp/earth/cop/cop21/>

- 9) World Development Report 2010 Development and Climate Change, Map3.3
- 10) 日本学術会議 フューチャー・アースの推進に関する委員会 資料より引用
「持続可能な地球社会の実現をめざして
―Future Earth (フューチャー・アース) の 推進―」 平成28年4月5日
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-t226.pdf>
- 11) Steffen et. al, 16 January 2015, Science
<http://science.sciencemag.org/content/347/6223/1259855>
- 12) 農薬の持続可能な使用に向けて ―2009年 EU 農薬指令制定をめぐって―
<http://www.ndl.go.jp/jp/diet/publication/legis/pdf/02470001.pdf>
- 13) 「バイオテクノロジーが生み出す新たな潮流」スマートセルインダストリーの幕開け
中間報告書(案)、経済産業省 産業構造審議会 商務流通情報分科会 バイオ小委員会
http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/shojo/bio/pdf/007_03_00.pdf
- 14) National Bioeconomy Blueprint, The White House, 2012
https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/national_bioeconomy_blueprint_april_2012.pdf
- 15) Innovation for Sustainable Growth – A Bioeconomy for Europe, European Commission
http://ec.europa.eu/research/bioeconomy/pdf/official-strategy_en.pdf
- 16) Building a High Value Bioeconomy: Opportunities from Waste, Department for Business, Innovation & Skills, UK, 2015
https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/408940/BIS-15-146_Bioeconomy_report_-_opportunities_from_waste.pdf
- 17) National Research Strategy BioEconomy 2030 – Our route towards a biobased economy, Federal Ministry of Education and Research, Germany, 2011
- 18) The Cost of New Agrochemical Product Discovery, Development and Registration in 1995, 2000, 2005-8 and 2010 to 2014. R&D expenditure in 2014 and expectations for 2019, Phillips McDougall
http://191hmt1pr08amfq62276etw2.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2016/04/Phillips-McDougall-Final-Report_4.6.16.pdf
- 19) Biologicals 2016 (an analysis of corporate, product and regulatory news in 2015/2016), Agrow
- 20) 「ベーラント・バイオサイエンス社による微生物農業資材事業会社の買収について」住友化学 News Release、 2015年3月4日
<https://www.sumitomo-chem.co.jp/newsreleases/docs/20150304.pdf>
- 21) 「肥料2社、10月合併を発表 コープケミカルと片倉チッカリン」日本経済新聞 2015年2月17日
http://www.nikkei.com/article/DGXLASDZ17HOF_X10C15A2TJ1000/
- 22) 「植物病原細菌学」 加来久敏著 2016年 養賢堂
- 23) 「チョコレートを滅ぼしたカ・キノコの話」 ニコラス・マナー著 築地書館
- 24) 「作物と土をつなぐ共生微生物」 1987年 小川眞著 農文協
- 25) 「土と内臓 ―微生物がつくる世界―」 デイビッド・モントゴメリー、アン・ビクレー著 築地書館

- 26) 戦略プロポーザル「微生物叢（マイクロバイーム）研究の統合的推進 ～生命、健康・医療の新展開～」
<https://www.jst.go.jp/crds/report/report01/CRDS-FY2015-SP-05.html>
- 27) Earth Microbiome Project
<http://www.earthmicrobiome.org/>
- 28) Phytobiomes
<http://www.phytobiomes.org/Pages/default.aspx>
- 29) The National Microbiome Initiative
<https://www.whitehouse.gov/blog/2016/05/13/announcing-national-microbiome-initiative>
- 30) Redmann, R. S., Rodriguez, R. J., Sheehan, K. B., Stout, R. G. & Henson, J. M.. Thermotolerance Generated by Plant/Fungal Symbiosis. Science, 298, 1581, (2002)
- 31) Adaptive Symbiotic Technologies
<http://www.adaptivesymbioticttechnologies.com/>
- 32) Bochligh et al.(2013) PNAS Microbial biogeography of wine grapes is conditioned by cultivar, vintage, and climate
<http://www.pnas.org/content/111/1/E139.full.pdf>
- 33) Verginer, et al. FEMS Microbial Ecology, Monitoring the plant epiphyte *Methylobacterium extorquens* DSM 21961 by real-time PCR and its influence on the strawberry flavor
<http://femsec.oxfordjournals.org/content/74/1/136.long>
- 34) 「菌と世界の森林再生」 小川眞著
- 35) 「森林の早期回復に貢献する菌根形成・管理マニュアル」 森林総合研究所
<http://www.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/documents/2nd-chukiseika15.pdf>
- 36) 次世代土壌病害診断（ヘソディム） マニュアル
<http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/hesodim/#mokuji>
- 37) 「共生ネットワークの分子基盤とその応用展開」
http://www.jst.go.jp/kisoken/accel/research_project/ongoing/h26_04.html
- 38) 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」 JST-CRDS、2016年3月 p194
<https://www.jst.go.jp/crds/report/report04/CRDS-FY2015-RR-08.html>
- 39) <http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/biofertilizers-industry>
- 40) <http://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/agrochemical-market.asp>
- 41) Yamato, et al. Mycorrhiza Vol.18 pp241-249 (2008) Community of arbuscular mycorrhizal fungi in a coastal vegetation on Okinawa island and effect of the isolated fungi on growth of sorghum under salt-treated conditions.
- 42) 日経サイエンス 2013年12月号 p72
- 43) Theis, et al., mSystems, Getting the Hologenome Concept Right: an Eco-Evolutionary Framework for Hosts and Their Microbiomes
<http://msystems.asm.org/content/1/2/e00028-16>
- 44) 日経サイエンス 2012年10月号
- 45) Yarza P; et al. (2014). "Uniting the classification of cultured and uncultured bacteria

and archaea using 16S rRNA gene sequences". *Nature Reviews Microbiology*. 12: 635–645.

- 46) Zhang et al (2003). *Gemmatimonas aurantiaca* gen. nov., sp. nov., a Gram-negative, aerobic, polyphosphate-accumulating micro-organism, the first cultured representative of the new bacterial phylum Gemmatimonadetes phyl. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 53: 1155-1163.
- 47) Mori et al (2009). *Caldisericum exile* gen. nov., sp. nov., an anaerobic, thermophilic, filamentous bacterium of a novel bacterial phylum, *Caldiserica* phyl. nov., originally called the candidate phylum OP5, and description of *Caldiseriaceae* fam. nov., *Caldisericales* ord. nov. and *Caldisericia* classis nov.
- 48) Tamaki et al (2011). *Armatimonas rosea* gen. nov., sp. nov., of a novel bacterial phylum, *Armatimonadetes* phyl. nov., formally called the candidate phylum OP10. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 61:1442-1447.

3. 具体的な研究開発課題

本戦略プロポーザルは、植物個体の表面および内部に存在する微生物叢（細菌、菌類）に着目し、わが国が世界レベルで強みを有する基礎研究および技術群を糾合して、植物と相互作用する微生物叢の全体像や機能について理解を深め、新たな概念に基づく農作物生産技術を創出するための諸方策を提言するものである。

本戦略プロポーザルでは、植物と相互作用する微生物集団を、原核生物である細菌、真核生物である菌類も両方含めて、「微生物叢」として記述する（エグゼクティブサマリー、図 E-1 参照のこと）。

本戦略プロポーザルでは、植物（作物）と相互作用し有益な効果を与える微生物叢についてより深い理解を得ることを基礎とし、微生物の作物への接種、機能の評価、また栽培状態の全体的な把握を基盤に、農作物・資源作物の効率的かつスマートな利活用方法の導出を推進することを提言する。さらに将来的には、森林・水圏・土壌などの環境修復法にも資する基盤技術の確立を目指す。そのために、以下の4つの研究開発課題を提言する（図 3-1）。

課題1：微生物叢の把握、分離、培養

- (1) 微生物叢の把握
- (2) 中核微生物（群）の絞込み

課題2：植物-微生物叢相互作用因子の同定と機能解析

- (1) 中核微生物（群）の機能解析
- (2) 相互作用因子の同定
- (3) 相互作用因子の機能解析

課題3：実圃場での計測に基づく評価と再設計

- (1) 特徴的な優良圃場と慣行圃場の比較
- (2) マルチオミクス解析および表現型情報などとの統合解析
- (3) 鍵因子の特定、栽培システム全体の技術的評価と再設計

課題4：農業資材開発、作物生産・利活用への応用

- (1) 介入技術の開発（スーパー微生物（カクテル）、新規有用化学物質など）
- (2) 診断、予測技術の開発
- (3) その他の介入技術の開発

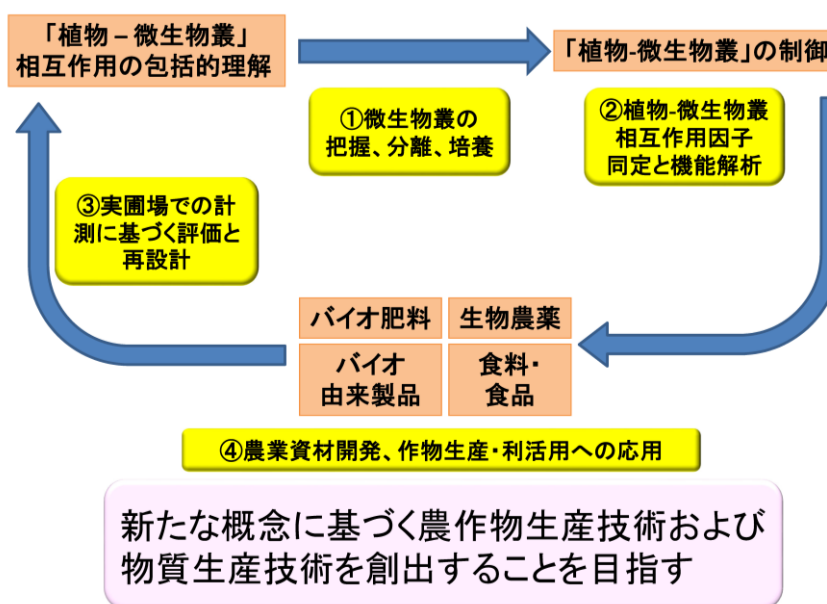


図 3-1 研究開発課題の概観 (図 1-1 を再掲)

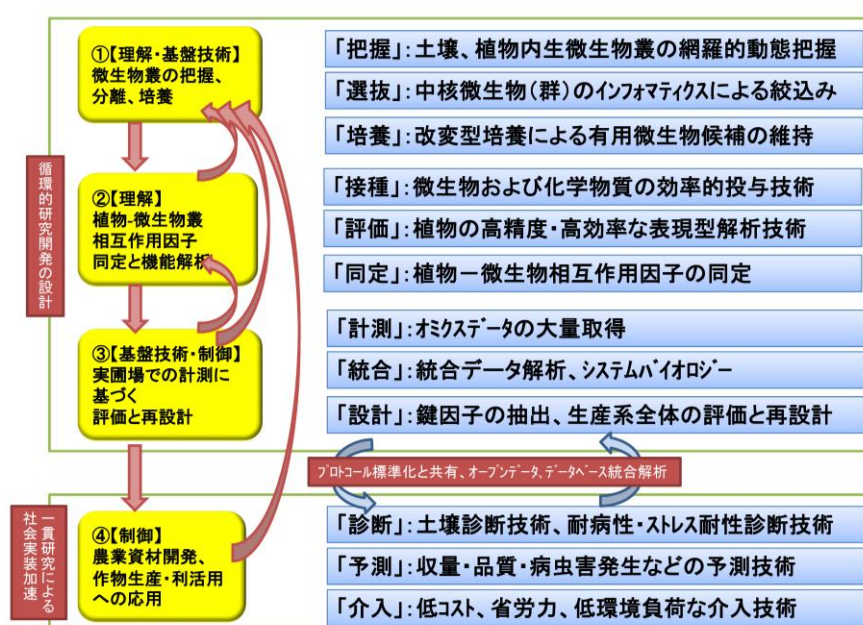


図 3-2 植物-微生物叢の相互作用の理解から応用研究への展開の概念図 (図 1-2 を再掲)

4つの研究開発課題について、さらに具体的に説明する。

課題1:微生物叢の把握、分離、培養(図 3-3)

長年の研究開発の蓄積がわが国の強みとなっている微生物に関する知的基盤、また最近になってわが国が独自に開発した微生物単離・培養法、さらに近年登場し普及・展開しつつあるメタゲノム解析などを組み合わせて、植物をとりまく微生物叢には、どのような種類が、どのくらいの量と構成で、どのような状態で存在しているか、包括的な理解を深める。そしてそれらの膨大な微生物叢の中から、鍵となる微生物あるいは少数の微生物群を効率的に抽出することにより、植物の生育において極めて有効に働く微生物(群)を単離し、わが国の生物資源として確保する。

(1) 微生物叢の把握：

これまでの平板培養法を介した方法では、植物個体の表面および内部に存在する微生物叢、および土壌の微生物の全体像の把握は難しかった。なぜなら、平板培養法を用いて分離可能な環境中の微生物は、微生物叢全体の約 1% に満たないことがメタゲノム解析などから明らかとなってきたからである。分離・培養されていない膨大な微生物叢の中には、植物の生育に有益な効果をもたらすものの、培養の最適化を試みられておらず分離に到っていない微生物が含まれている可能性がある。植物の内生微生物を生きたまま単離し、培養・分離を行ない、さらに土壌微生物叢、根圏微生物叢との相関データも取得することで、植物内外の微生物叢の全体像を把握するとともに、微生物の実体そのものを確保する。

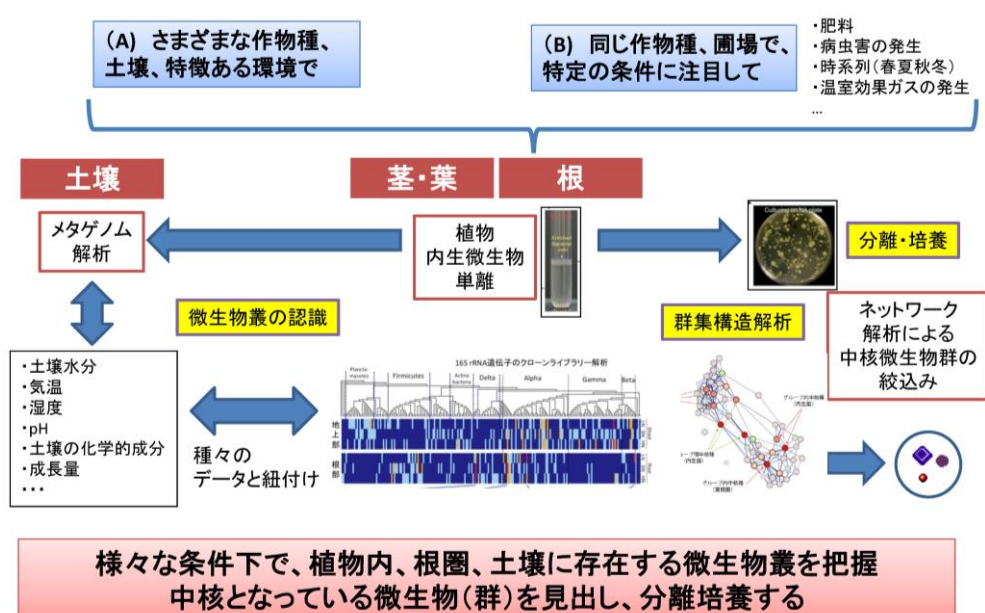


図 3-3 微生物叢の把握・分離・培養

写真・図の出典：科学技術未来戦略ワークショップ「植物と微生物叢の相互作用の研究開発戦略 ―理解・制御・応用に向けて―」池田先生発表資料、東樹先生発表資料より（原著 Ikeda et al., ISME J (2009), Ikeda et al., Plant Cell Physiology (2010), Toju et al., Journal of Royal Society Interface (2016)）

(2) 中核微生物（群）の絞込み：

膨大な数の微生物叢から、植物に有益な微生物（集団）を効率的に絞り込んでいくことは、その後の接種試験や評価のステップでかかる労力・時間・コストを劇的に減らすことができるため、極めて重要である。植物と相互作用する微生物叢には、原核生物も真核生物もあるため、群集構造解析およびネットワーク解析を行うには、複数のステップを踏む必要があった。また多数のサンプルを取り扱うので、別々に解析を行っていたのでは膨大なコストがかかる。それらの問題を解決する、インデックス配列を賦与して大量のサンプルを一気に次世代シーケンサーで解析する方法や、そこから出てくる膨大な情報を効率よく処理するインフォマティクスの技術が、わが国の研究者により独自に開発された¹⁾。（注：この方法を用いると、DNA 部分配列による群集構造解析のランニングコストは劇的に低下する。）この方法を土壌微生物叢、根圏微生物叢に適用し、並行してデータを取得し、植物内生微生物との相

関をみる。それらを統合解析することにより、高収量や耐病性など好適条件とリンクするような中核的な微生物（群）候補を効果的に絞り込む。

課題2：植物-微生物叢相互作用因子同定と機能解析(図 3-4)

わが国が世界レベルの強みを有する植物科学および天然物有機化学研究により、植物と微生物叢の相互作用因子の同定と機能解析を推進する。これまで、古くはイネ馬鹿苗病菌 (*Gibberella fujikuroi*) から発見された植物ホルモンのジベレリン、最近では菌根菌の活性化物質として再発見されたストリゴラクトンが後に新規植物ホルモンであることが見出されるなど、単一の菌と植物の相互作用研究についてはわが国の研究コミュニティは高いプレゼンスを示している。植物科学、天然物有機化学、および微生物学研究といった異分野の研究コミュニティ間の連携がうまくいったことがこれらのマイルストーン的成果に繋がっており、これらの分野の情報共有および連携を強化しながら推進する。

(1) 中核微生物（群）の機能解析：

中核的な微生物（群）候補のゲノム解析、トランスクリプトーム解析を行い、その微生物の本来の棲息状況とも併せてその機能を類推する。また、作物への接種試験と表現型解析を行って、生育促進効果、病害耐性、ストレス耐性などの有効性を評価する。

(2) 相互作用因子の同定：

メタボローム解析を行って、中核微生物（群）と作物の相互作用因子候補を絞り込む。ごく微量の相互作用因子を同定するために、マイクロドロップレット法や、顕微鏡下で観察しながら操作を可能にする MEMS デバイス、ナノスプレーチップなど、わが国独自に発展させてきた技術を応用することで、世界をリードする研究開発が可能であると期待できる。

(3) 相互作用因子の機能解析：

相互作用因子候補が絞り込めたら、さらに作物への投与試験と表現型解析を行って、生育促進効果、病害耐性、ストレス耐性などを評価することで、相互作用因子の機能を明らかにする。

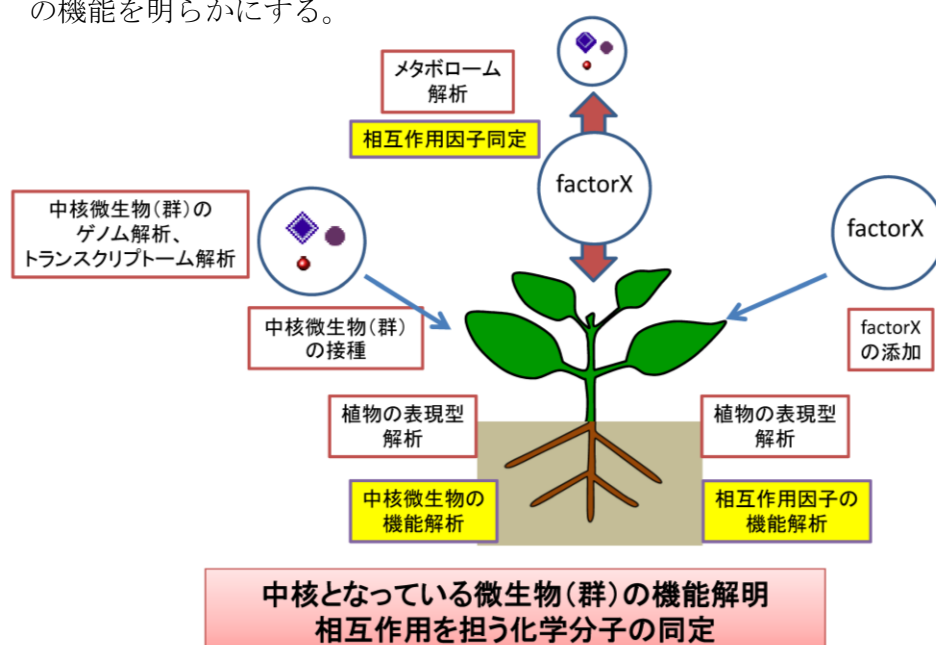


図 3-4 植物-微生物叢相互作用因子同定と機能解析

課題3:実圃場での計測に基づく評価と再設計(図 3-5)

特徴的な圃場など（例えば、無施肥・無農薬で高品質・高収量を達成しているような優良圃場および、高温・高塩濃度など特徴的な生態系）での、作物（植物）とそれを取りまく微生物叢の多階層の計測に基づき、鍵となる因子を抽出する。これにより、新たな農業資材のシーズの導出および新たな圃場マネジメント法の設計を行なう。

(1) 特徴的な優良圃場と慣行圃場の比較：

化学農薬や化学肥料に過度に依存せずとも高い生産性を発揮している圃場での微生物叢および作物について、また、高温・高塩濃度など特徴的な生態系に棲息する植物について、植物側のゲノム、植物内生微生物のメタゲノム、根圏メタゲノム、土壌メタゲノム、植物メタボローム解析などにより、多階層（マルチオミクス）計測を行う。

(2) マルチオミクス解析および表現型情報などとの統合解析：

得られたビッグデータを統合解析し、収量、品質（栄養価、機能成分、食味など）、病虫害耐性との相関から、鍵となる因子の候補を絞り込む。

(3) 鍵因子の特定、栽培システム全体の技術的評価と再設計：

鍵因子候補の有無で、システム全体がどう変わるかを、再び多階層計測と統合解析により評価し、鍵因子の特定およびシステムの再設計を試みる。このサイクルを繰り返すことで、新たな農業資材シーズの導出および、それら農業資材を活用した、より低コストで高いアウトプットを生じうる栽培マネジメント法を設計する。

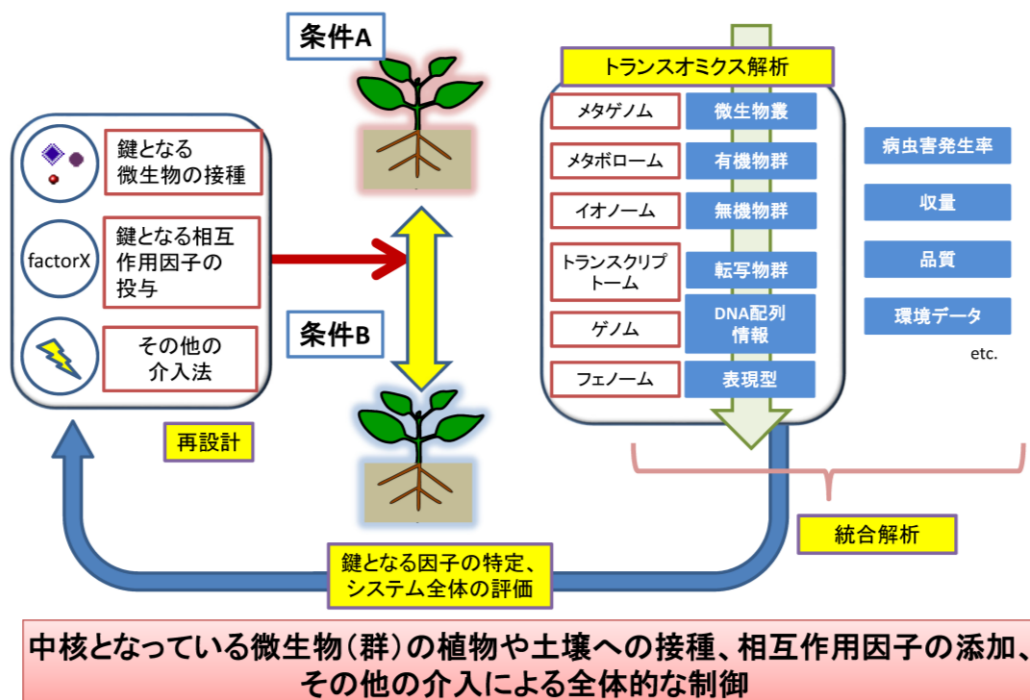


図 3-5 実圃場での計測に基づく評価と再設計

課題4: 農業資材開発、作物生産・利活用への応用(図 3-6)

微生物（叢）の理解を起点とした、先導的な研究（植物と菌根菌および寄生植物の相互作用因子ストリゴラクトン、安定した効果と広い宿主範囲を持つバイオ肥料、無施肥・無農薬栽培を可能にする農業生態系マネジメント技術など（1章コラム参照）については、前述した①～③の複数の研究課題にまたがる研究成果が既に得られつつあり、上市や社会実装に向けた取り組みも開始している。すでに研究の萌芽があるものについては、一貫的かつシームレスな研究開発推進と社会実装加速を進める。土壌や環境の統合的な評価にもとづき研究を基礎にフィードバックすることで、経済性、奏功性、合理性の評価に基づく最適な介入技術を開発する。

(1) 介入技術の開発（スーパー微生物（カクテル）、新規有用化学物質など）:

中核微生物候補からさらに絞込み、接種法の最適化など効率的に効果を発揮させる方法を導出する。相互作用因子を農業資材用シーズに改変する。相互作用因子をシーズに、改変を加えて新規の有用化学物質（アグロケミカル、農薬の候補化合物）を導出する。企業と連携して、効果を評価する。

(2) 診断、予測技術の開発:

土壌や環境の統合的な評価結果から、収量、病害発生、品質、環境影響などについて、予測技術および診断技術を開発する。

(3) その他の介入技術の開発:

特定の波長の光を利用した微生物叢の制御、安価かつ有用な土壌施用資材の利用、などの新たな介入法導出のための技術開発を行う。

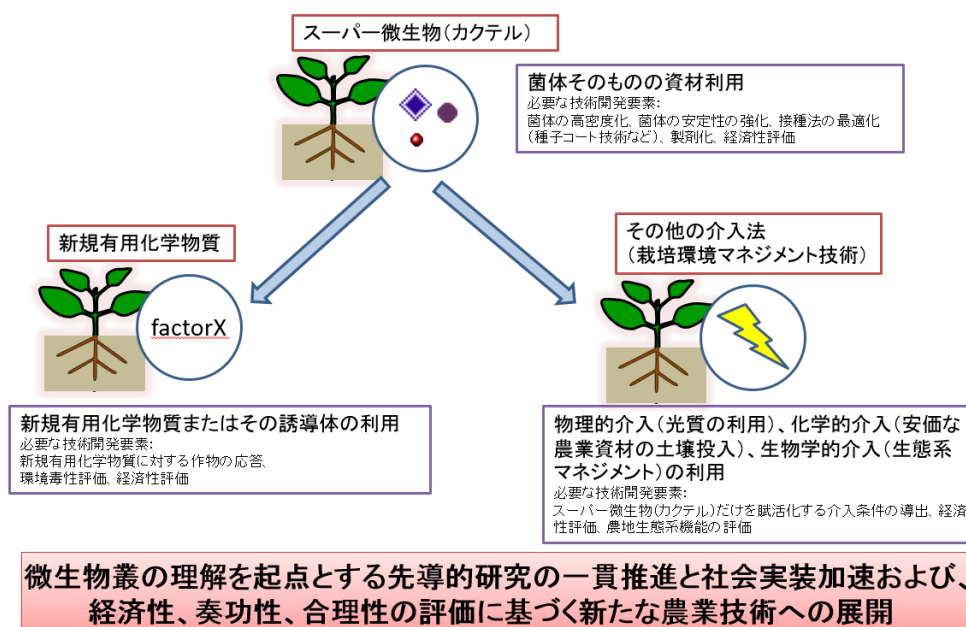


図 3-6 農業資材開発、作物生産・利活用への応用

(引用文献)

- 1) 東樹 宏和「DNA 情報で生態系を読み解く ―環境 DNA・大規模群集調査・生態ネットワーク―」

4. 研究開発の推進方法および時間軸

4-1. 推進方法

本戦略プロポーザルで提案する研究を進めるにあたり、あるべき推進方法を以下の6つの項目で述べる。

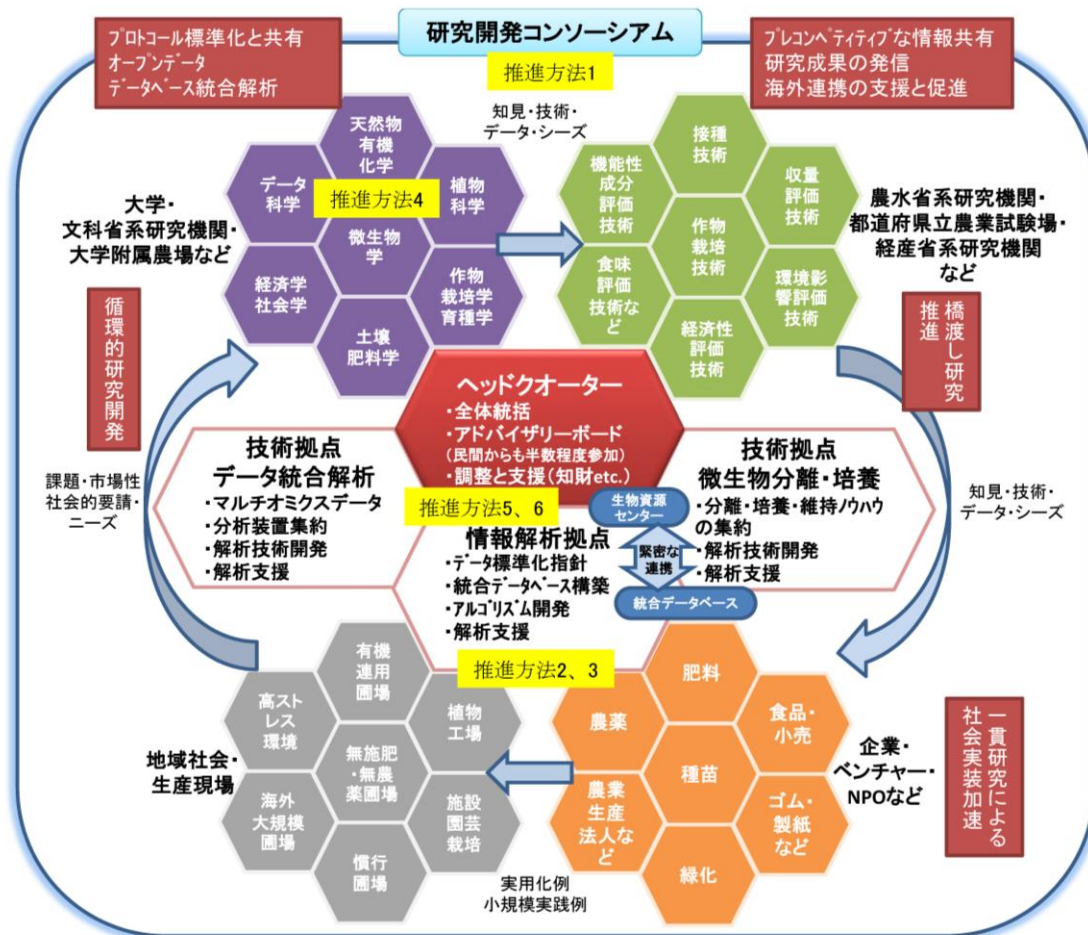


図 4-1 研究推進体制と推進方法

【推進方法1】産・官・学が参加可能な情報共有と研究開発のプラットフォーム構築

海外トップの農業関連企業は、種苗・農薬事業を一体化して取り扱う巨大企業体を形成している。一方で、わが国は、種苗企業と農薬・農業資材関連企業が独立に存在している。このため、産・官・学が一体となって、プレコンペティティブな情報を共有し、基礎的な知見をより効率的に産業応用につなげていかなくは国際的な競争力を維持することは難しい。また、アカデミア研究者（大学・文科省系研究機関など）に届きにくい、企業や生産現場でのニーズをよりの確に汲み取り、応えうる基礎研究の推進につなげる必要がある。そのために、様々なステークホルダーが参加可能な研究開発コンソーシアムを設立し、相互の情報共有の強化、研究成果の発信、海外との連携研究の支援と促進をはかる。大学の

セクターからは、人文社会科学分野の研究者も参加することがのぞましい。また、研究開発の技術基盤を支えるオープンな研究開発プラットフォームを構築する。これにより、分析装置、知識・知見、バイオリソース情報の集約により、一つの研究所あるいは一社単位ではとてもカバーしきれないような研究リソースが共有可能となり、研究開発が加速されると期待される。

【推進方法2】植物－微生物叢相互作用に関する基盤情報収集、微生物系統維持、解析体制の構築

研究開発の過程で得られる植物－微生物叢相互作用に関する基盤情報は可能な限り集約し、分散を避ける。オープンな解析プラットフォームを構築し、アカデミアも企業も利用しやすい解析体制を構築する。有効な機能を持つ微生物系統はわが国の貴重な生物資源として維持するために、生物資源センターを設置する。やみくもに維持系統を増やすのではなく、既存のバイオリソースセンターとも緊密に連携・協働し、厳選した有力候補のみを残す。あるいは、膨大な微生物サンプルを長期に渡って省力・省コストで維持可能な画期的な技術を確立することで、微生物維持にかかる全体的なコストの圧縮、さらには微生物サンプル維持技術自体の製品化および標準化を狙う。

【推進方法3】収集する情報の標準化、(標準化されていない)既存データの活用法の導出

研究開発開始以降に取得するデータについてはすべからく、統合解析する際に必要な情報をあらかじめ標準化し、徹底的に活用できる体制を構築しておく。また、標準化以前に取得した既存データの活用法（互換性の評価など）の導出も行う。

【推進方法4】人材確保、育成

大学を中心とするアカデミアのコミュニティの中から、フィールドとラボの両方を行き来し研究活動を推進するような若手研究者のリーダー、また、Dry（計算機科学を駆使したインフォマティクス研究）とWet（実験室での研究）の両方を遂行可能な若手研究者を育成する。データ統合解析の技術拠点、情報解析拠点との連携を密に行い、情報解析法の標準プロトコルの確立、様々な条件における対処方法など、情報共有および教育により、研究者層を厚くする。理学系から農学系の研究に、可能な限りシームレスに橋渡しができるように、研究環境（理学系研究者も圃場を使った研究が容易に行える仕組みの整備など）や研究ポストを確保する。また若手主体の研究会や勉強会に対するサポート、ベンチャー起業支援なども若手研究者の確保や養成のためには有効であろう。

【推進方法5】知財戦略

ヘッドクォーター部門に知財支援の枠組みを設け、アカデミアや公的研究機関が保持する知財についても、民間企業も参入しやすいような仕組みを準備する。例えば企業とアカデミア間で共同研究を行う際、ライセンスの使用料にある程度の予想がつけば、企業も参加しやすい。国内の既存の医薬品関連の産学協働体制でとられているような、企業の目的用途に応じ、いくつかの契約パターンをあらかじめ明示しておくのも一つの手段である。

また、微生物側だけでなく、作物（植物）側も種苗法や品種登録制度などを通して、知的財産保護意識の乏しい国による品種の模倣を防ぎ、国際競争力を強めるサポートをする。

【推進方法6】倫理的・法的・社会的課題(ELSI)

名古屋議定書の発効に伴い、自国の生物資源の囲い込みの機運が世界的に高まっている。わが国も批准に向けて準備中の段階であるが、批准に際し解決すべき問題点は以下の通りである²⁾。

- ・ 海外微生物資源へのアクセスが難しくなる
- ・ 国際共同研究が簡単にできない
- ・ 日本に留学中の学生ですら自国の微生物資源を研究材料にできない
- ・ 日本の機関が単独で利用することができない
- ・ 産業化に対する利益配分想定が不明確

これらの課題に対する解決の道として、最重要な基盤整備は、生物資源の国際移転を管理する拠点となる生物資源センターを設置することである。その生物資源センターが、資源管理の窓口となり、簡便かつ安心な手続きを支援することで、生物資源に安心してアクセスすることが可能となる。また、共同研究を通じて研究成果の共有と人材育成を行い、非金銭的な利益配分を実証する。また一方で、新たに研究開発された生物資源が、他国で有害な影響を及ぼす結果に至る可能性も否定できない。このようなリスクに対しても、生物資源センターが拠点および窓口となり、科学的な視点からの対策はもちろん、法的・社会的な枠組みにおいてもあらかじめ議論し備えておくのがのぞましい。

4-2. 時間軸

3章で述べた課題1の、「微生物叢の把握、分離、培養」は、その後の課題2「相互作用因子同定や機能解析」のステップに進む前に少なくとも1年は先行して開始する必要がある。課題3「実圃場での計測に基づく評価と再設計」については、既にいくつかの圃場で特徴的な先行研究例があるので、初年度から着手し、以降の研究開発に必要なデータセットの標準化の方針を確立するとともに、データ取得の効率化・簡便化などを図る。課題4の、「農業資材開発、作物生産・利活用への応用」は、既に先導的な研究例がいくつか進行中であるので、初年度から開始し、一貫研究推進と社会実装加速につなげる。研究開発のそれぞれの段階で得られた成果は、統合解析による評価によって基礎にフィードバックする。それによって、より現場の状況やニーズに対応可能な、経済性、奏功性、合理性をもった農業技術の創出につなげる。

課題1と課題2のマイルストーンは、作物に有益な効果をもたらすスーパー微生物（カクテル）を同定することである。宿主範囲が広いこと、幅広い効能を持ち奏功性が高いこと、品質保持性や効果の安定性が高いこと、可能な限り低コストで製造可能なこと、などが条件となる。課題2のもう一つのマイルストーンは、相互作用因子の同定から、新規有用化学物質を同定することである。生物同士のコミュニケーションおよび競合に用いられている化学物質は、これまでも農業応用へのインパクトおよび学術への波及効果が大きかった。世界の農薬規制が厳しくなりつつあり、新規剤開発が停滞する中、奏功性が高く環境影響が低い生物由来の化学物質シーズが発見されれば世界的にも注目度が高いものと予想される。課題3のマイルストーンは、スーパー微生物および新規有用化学物質の効果についての統合的評価基盤を作ることである。また、課題3は、既存の安価な農業介入技術（例えば安価な土壌改良資材投入による化学的介入、光質の制御（※波長の異なる光を利用すること）による物理的な介入）に関しても、微生物叢の動態の計測と、得られた収穫物の収量や品質と紐付けすることにより、統合的な評価を可能にする。課題4では、微生物叢の理解を起点とする先導的な研究の一貫推進と社会実装を加速するので、初年度から開始する。複数の研究開発課題に関連する研究開発と経済性、奏功性、合理性の評価を行って、最終的にはより生産現場に受け入れやすい形態（生産現場の状況に応じて、省労力、省コスト、環境毒性の低さ）の農業技術の導出を目指す。全体として、作物と微生物の相互作用を制御し、農業生産力を向上させる。

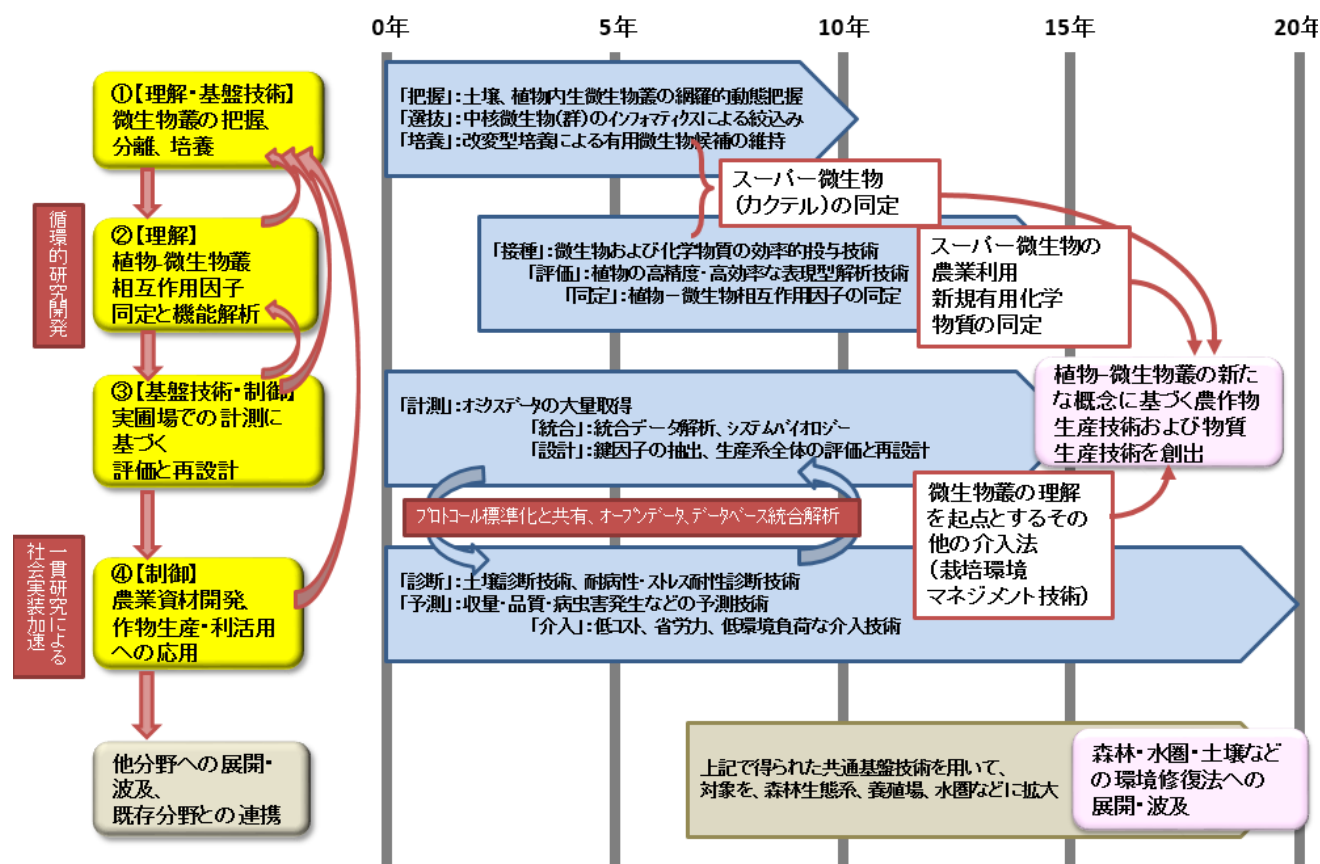


図 4-2 研究開発の時間軸

(引用文献)

- 1) ライセンスプログラム iPS アカデミアジャパン
<http://ips-cell.net/j/license/program.html>
- 2) 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 ～食料・バイオリファイナリー区分を中心に～ (2017 年度発行予定)「今後の微生物資源の利用 海外との連携について」東京農業大学 鈴木健一郎教授

付録1. 検討の経緯

(1) 有識者インタビュー

本戦略プロポーザルの作成に当たり、関連する研究領域に高い専門性を有する有識者へ個別にインタビューを実施し、研究内容や推進体制、研究シーズなどについて意見を伺った（平成 28 年 4 月～平成 28 年 11 月に実施）。

- 秋山 康紀（大阪府立大学 生命環境科学研究科 教授）
 池田 成志（農研機構 北海道農業研究センター 大規模畑作研究領域 上級研究員）
 池松 俊哉（株式会社ローソン 農業推進部 マーチャンダイザー）
 岩田 修（株式会社ユーグレナ 研究開発部 主任研究員）
 江澤 辰宏（北海道大学大学院農学院 准教授）
 江面 浩（筑波大学 生命環境系 教授）
 荻原 勲（東京農工大学大学院農学研究院 教授、農学研究院長）
 加来 久敏（株式会社サカタのタネ 技術顧問）
 笠井 美恵子（デュポン株式会社 バイオテクノロジー事業部長）
 河岡 明義（日本製紙株式会社 研究開発本部 アグリ・バイオ研究所所長）
 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（農研機構 理事）
 黒川 顕（国立遺伝学研究所 教授）
 黒田 章夫（広島大学大学院先端物質科学研究科 教授）
 小八重 善裕（農研機構 北海道農業研究センター 生産環境研究領域 特別研究員）
 近藤 彰宏（出光興産株式会社 アグリバイオ事業部 SCM 担当マネージャー）
 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）
 杉山 修一（弘前大学 農学生命科学部 教授）
 鈴木 健一郎（東京農業大学 応用生物科学部 教授）
 Dilworth、Machi（沖縄科学技術大学院大学 副学長）
 東樹 宏和（京都大学大学院 人間・環境学研究科 助教）
 野口 勝憲（片倉コープアグリ株式会社 生産技術本部 技術顧問）
 林 誠（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）
 平藤 雅之（農研機構 北海道農業研究センター 大規模畑作研究領域 領域長）
 牧 孝昭（株式会社松本微生物研究所 代表取締役社長）
 松岡 真二郎（出光興産株式会社 アグリバイオ事業部 次長）
 松村 賢司（住友化学株式会社 健康・農業関連事業業務室 チームリーダー）
 三浦 謙治（筑波大学 生命環境系 准教授）
 森田 浩一（株式会社ブリヂストン 執行役員）
 安井 強（出光興産株式会社 アグリバイオ事業部 課長）
 大和 政秀（千葉大学教育学部 准教授）
 （続く）

(続き)

山根 精一郎 (日本モンサント株式会社 代表取締役社長)

用貝 広幸 (住友化学株式会社 健康・農業関連事業研究所 上席研究員)

横山 正 (東京農工大大学院農学研究院 教授)

渡辺 訓江 (株式会社ブリヂストン 中央研究所 主幹フェロー)

※50 音順、敬称略。所属、役職はインタビュー実施当時。

(2) ワークショップ

本戦略プロポーザルの策定に当たり、開催したワークショップの開催日時と参加者を記す。

科学技術未来戦略ワークショップ

「植物と微生物叢の相互作用の研究開発戦略 ―理解・制御・応用に向けて―」

場所：科学技術振興機構 東京本部別館 (五番町)

日時：平成 28 年 12 月 4 日 (日) 14:00~18:30

プログラム：

1. 趣旨説明等

開会挨拶：永井 良三 上席フェロー (JST-CRDS)

篠崎 一雄 特任フェロー (JST-CRDS)

大西 康夫 特任フェロー (JST-CRDS)

趣旨説明：齊藤 知恵子 フェロー (JST-CRDS)

セッション1 「植物-微生物叢の相互作用 -これまでの実績と強み-

「菌根菌と植物の相互作用因子から：

新規植物ホルモン、共生寄生制御剤シーズとしてのストリゴラクトン」

秋山 康紀氏 (大阪府立大 生命環境科学研究科)

「植物-微生物共生成立機構の理解：応用に向けた展望」

林 誠氏 (理化学研究所 環境資源科学研究センター)

セッション2 「微生物叢の把握と分離培養 -近年のブレイクスルー-

「植物を取り巻く微生物叢から中核菌候補を抽出する」

東樹 宏和氏 (京都大学 人間・環境学研究科)

「植物共生微生物分析法の開発とその応用に向けて」

池田 成志氏 (農研機構 北海道農業研究センター)

セッション3 「システムバイオロジー -個の改変から全体の制御へ-

「データサイエンスによる土壌エコシステム反応場の評価」

菊地 淳氏 (理化学研究所 環境資源科学研究センター)

セッション4 「現場からのシーズ、現場への介入の最前線」

「広い宿主範囲と安定した効果 *Bacillus* バイオ肥料：開発の現状と展望」

横山 正氏 (東京農工大学)

「奇跡のリンゴのマイクロバイオーーム研究から見えてきたこと」

杉山 修一氏 (弘前大学 農学生命科学部)

総合討論

討論Ⅰ 「現在の課題、今後の期待 ―企業の視点から―」

(イントロ：齊藤 知恵子フェロー)

指定コメント 加来 久敏氏 (サカタのタネ)

「現在の課題、今後の期待 ～企業の視点から～」

指定コメント 森田 浩一氏 (ブリヂストン)

「ゴム・タイヤ業界からの期待」

指定コメント 南澤 究氏 (東北大学大学院)

「植物圏微生物叢の機能解明の意義：潜在的な企業ニーズ」

コメンテーター：用貝 広幸氏 (住友化学)

安井 強氏 (出光興産)

討論Ⅱ 「今後あるべき研究基盤と体制 ―共通基盤と出口への橋渡し―」

指定コメント 川口 正代司氏 (基礎生物学研究所)

「基礎から応用への橋渡しに必要な研究基盤・体制

―ACCEL 事業の経験から―」

指定コメント 白須 賢氏 (理化学研究所 環境資源科学研究センター)

「理研における今後の共生研究」

指定コメント 倉田 のり氏 (農研機構)

「学術会議からの研究提案、および農研機構での取り組み」

指定コメント 黒川 顕氏 (国立遺伝学研究所)

「情報基盤整備の重要性 ―オープンデータで世界の標準化を目指せ―」

総括と閉会挨拶 篠崎 一雄特任フェロー (JST-CRDS)

※※本ワークショップの詳細は、以下の報告書に掲載予定。

科学技術未来戦略ワークショップ報告書「植物と微生物叢の相互作用の研究開発戦略
―理解・制御・応用に向けて―」(2017年度発行予定)

付録2. 国内外の状況

本戦略プロポーザルに関連する分野の日本の研究開発の現状と、海外の状況を対比して記載する。

【海外の研究推進施策、イニシアチブ、およびファンディング】

(1) Phytobiome Initiative (米国)

環境データと作物を取り巻く生物叢データを統合的に理解し、農作物の生産性を向上させることを目標にしたイニシアチブである¹⁾。アメリカ植物病理学会を母体に2015年に本格的に立ち上がった。その後、イニシアチブによって“Phytobiomes Roadmap”が発表され、ビジョンとアクションプランが掲げられた。また、“Phytobiomes”というオープンアクセスジャーナルの創刊準備中で(2017年3月現在)、植物を取り巻くエコシステム全体にインパクトを与えるような学際的な研究を取り扱うとされている。さらに、“Phytobiomes Alliance”という産学連携アライアンスを立ち上げ、食料、飼料、繊維(food, feed, and fiber)の持続的な生産を加速する基盤を確立するとしている。公的な巨大ファンディングの開始には至っていないが、“Phytobiomes Alliance”内で、主に企業からの出資で産学連携研究が動き始めている²⁾。

(2) The National Microbiome Initiative (米国)

ヒト、植物、土壌、海洋、大気に棲む微生物集団(“マイクロバイオーーム”)の研究を推進するためのイニシアチブ。2016年5月に、アメリカ合衆国科学技術政策局(Office of Science and Technology Policy, OSTP)が、連邦政府期間および民間セクターと協調してホワイトハウスから発表した³⁾。マイクロバイオーームは、地球上のさまざまな生態系の健全な機能を維持し、ヒトの健康、気候変動、食料安全保障などに影響する。マイクロバイオーームの動態の理解を深め、健全なマイクロバイオーームの機能回復や機能不全予防の方法論の確立を目指す。

以下の3つの目標が掲げられている。

- ① 異分野融合研究を支援し、多様な生態系におけるマイクロバイオーームに関して、基本的・根源的な問題に解決を与える
 - ② 多様な生態系におけるマイクロバイオーームの知見を共有し、マイクロバイオーームデータへのアクセスを容易に行うための、プラットフォーム技術を開発する
 - ③ 市民科学や国民関与(パブリック・エンゲージメント)、および教育の機会を通して、マイクロバイオーーム研究に関わる人口を増やす
- 発表時点での予算額は以下の通りである。

National Microbiome Initiative の予算額 (単位: 百万ドル)

2016 年度	2017 年度
NASA : 12.5 NIH : 20	DOE : 10 NASA : 12.5 NIH : 20 NSF : 16 USDA : 15.9 ARS : 8
その他の外部機関によるマイクロバイオーームへの研究サポート Bill and Melinda Gates Foundation : 100 (4 年間) JDRF : 10 (5 年間) One Codex : (金額不明) The BioCollective, LLC (Health Ministries Network と協同) : 0.25 ミシガン大学 : 3.5	

(3) Earth Microbiome Project (米国)

地球上の微生物の分類学的・機能的多様性を明らかにしカタログ化するとともに、地球と人類への貢献を目指すプロジェクトである⁴⁾。2010年に設立され、500人以上の研究者ネットワークによるクラウドソースで、地球上の非常に多様な生態系における微生物サンプルの解析を行っている。地球上の微生物生態系のパターンの理解や、普遍的原則の探求を目指している。オープンサイエンスの包括的な好例であり、論文発表前のデータシェアや、データ解析のクラウドソースを支援している。これまで、200,000のサンプルの解析に着手し、アンプリコンシーケンシング、メタゲノミクス、メタボロミクスを行うことで、全地球的な遺伝子アトラスを作ることを目指している。Earth Microbiome Project 代表の Gilbert 教授は、ワインのテロワールに微生物叢が関与する説を提唱した(2章図 2-12 参照)。

(4) African Soil Microbiology Project (米国、アフリカ 7 カ国)

2016年10月に開始された、アフリカのサブサハラの7カ国が参加する3年間のプロジェクトである。米国国際開発庁(USAID)が出資する⁵⁾。10カ国から約1000の土壌サンプルを回収して解析予定である⁶⁾。気候変動に対して、エコシステムと作物を守るための農業慣行の改善を目指すとされる。2016年10月、プレトリア大学でコンソーシアム集会が行われた。サンプルは、南アフリカ、ナミビア、ボツワナ、ジンバブエ、モザンビーク、ザンビア、ケニア、エチオピア、コートジボアール、ナイジェリアから集められる。3年間で、土壌の化学的性質と微生物叢について解析が行われる予定である。サンプリング地点は、気候、地形、地質から判断し、最も高い多様性で微生物集団を把握できるように1000点を選抜すること。2014年にニューヨークのセントラルパークで行われた研究で、土壌の微生物叢のほとんどが新規微生物と予想されたことなどを受け、アフリカの土壌においてもこれまで知られていない膨大な微生物多様性が隠されていると期待されている。サンプリング数はまだ少ないともされるが、アフリカの多くの研究者がこのプロジェクトにより、土壌の生物学的性状の解析のためのトレーニングをされることも、成果の一つとして標榜されている。

【国内の研究推進施策、イニシアチブ、およびファンディング】

- (1) 農林水産省委託プロジェクト「土壌微生物相の解明による土壌生物性の解析技術の開発」(e-DNA プロジェクト) (2006 年～2010 年、5 年)

土壌から培養過程を経ずに得た DNA (eDNA) の解析を行い、微生物多様性を調査する手法などを開発し、土壌生物相の機能と構造を eDNA に基づき解析するとともに、作物の生産性と土壌生物相との関連性を解析した⁷⁾。農耕地 eDNA データベース (eDDASs) の構築と公開を行った (注: ただし、現在は公開を休止している)。農耕地の DNA サンプルを用い、PCR-DGGE という手法 (注: 現在一般的に行われている次世代シーケンサーによる解析とは異なる手法) により解析を行い、土壌細菌・糸状菌・線虫などの解析法が確立された。次世代土壌病害診断 (ヘソディム: HeSoDiM Health checkup based Soil-borne Disease Management) 技術マニュアルとしてまとめられた。⁸⁾

- (2) JST ACCEL 「共生ネットワークの分子基盤とその応用展開」(2014 年開始、5 年以内)

研究代表者: 川口 正代司 (自然科学研究機構 基礎生物学研究所 教授)

プログラムマネージャー: 齋藤 雅典 (科学技術振興機構)

CREST では、菌根菌や根粒菌との共生形成に共通なシグナル伝達経路に関わる宿主因子を同定し、また、植物から菌根菌への共生シグナルがストリゴラクトンであることを解明するなど、国際的に非常に評価の高い成果を得た。これらの知見と、圃場での栽培試験を融和し新たな研究展開を目指している。研究開発内容は、菌根菌ゲノムの解読による絶対共生の分子基盤の解明、全国各地の圃場における菌根菌接種試験によるリン肥料節減効果の評価、などである。これらの結果に基づき、菌根菌利用診断技術を開発することで、世界的な課題となっているリン肥料節減に資する、最適な菌根菌利用技術開発を目指す⁹⁾。

- (3) 農研機構 生物系特定産業技術研究支援センター 「イノベーション創出基礎的研究推進事業」(2012 年～2014 年、3 年間)

研究代表者: 妹尾 啓史 (国立大学法人東京大学大学院農学生命科学研究科)

温室効果ガスでオゾン層破壊作用も有する一酸化二窒素(N_2O)ガスの農耕地からの発生を削減すべく、土壌に施用した有機質ペレット肥料ならびにダイズ根粒根圏からの N_2O 発生を、微生物を利用して削減する技術を開発することを目的とする。そのために、各種有機質ペレット肥料に添加することにより N_2O 発生を削減できる N_2O 除去脱窒菌を選抜し、菌株による植物生育促進効果も明らかにする。また、 N_2O 還元能と窒素固定能が高いダイズ根粒菌や、 N_2O 還元能を持たない根粒菌が優占している黒ボク土壌に適応できる N_2O 還元能の高い根粒菌株を作出・選抜し、ダイズに接種して根圏からの N_2O 発生を削減する。これらの N_2O 除去微生物を圃場で利用するための微生物接種法を確立し、 N_2O 連続モニタリングにより圃場スケールでの N_2O 削減能力を正確に評価・実証して実用化技術の原型を完成する。¹⁰⁾

(4) 内閣府S I P (戦略的イノベーション創造プログラム) 次世代農林水産業創造技術 (2014 年開始、5 年予定)

研究開発項目:「持続可能な農業生産のための新たな植物保護技術の開発」¹¹⁾

(全 35 研究計画のうちの以下の 4 研究計画が部分的に関連) (2014 年 3.5 億円、2015 年 3.3 億円、2016 年 2.9 億円)

「持続可能な農業生産のための新たな総合的植物保護技術の開発」

「創農薬ケミカルバイオロジー研究基盤による新規標的の同定及び植物―病原菌相互作用制御技術の開発」

「作物に環境適応力を付与するエンドファイトの選抜とその利用技術の開発」

「薬剤耐性菌発生リスクの低減に向けた環境低負荷型の病害防除資材の開発」

研究代表機関: 農研機構中央農業総合研究センター、理化学研究所、茨城大学、岡山県農林水産総合センター生物化学研究所

(5) 農林水産省「委託プロジェクト研究」(平成 29 年度公募中)¹²⁾

- ・募集テーマは「AI を活用した土壌病害診断技術の開発」など、5 プロジェクト 9 テーマ
- ・支援額上限は 7100 万円～1.6 億円/年 (募集テーマにより異なる)

【その他参考となる事項】

(1) 科学技術イノベーション総合戦略 2016 p29

ii) スマート・フードチェーンシステム

[C] 重きを置くべき取組

1) 次世代育種システム (S I P 及び大会プロジェクト⑨を含む)

植物共生系の解明等とそれを最大限に活用した育種への応用 【文部科学省】

(2) 農林水産省「農林水産研究基本計画」(平成 27 年 3 月改定)¹³⁾

同「農林水産研究基本計画に基づく研究開発ロードマップ」(平成 28 年 9 月策定)¹⁴⁾

- ・基本計画の中の重点目標には、作物の高収量、生産の持続性 (気候変動への対応など)、省力化等の、本提案に関連する技術の開発が含まれている

(引用文献)

- 1) Phytobiome Initiative Prof. Jan E. Leach
<https://www.apsnet.org/members/outreach/ppb/phytobiomes/Documents/PhytobiomesInitiative.pdf>
- 2) Phytobiomes
<http://www.phytobiomes.org/Pages/default.aspx>
- 3) The White House For Immediate Release May 13, 2016
FACT SHEET: Announcing the National Microbiome Initiative
<https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2016/05/12/fact-sheet-annou>

ncing-national-microbiome-initiative

- 4) The Earth Microbiome Project
<http://www.earthmicrobiome.org/>
- 5) African Soil Microbiology project launched
http://www.up.ac.za/en/news/post_2370748-african-soil-microbiology-project-launched
- 6) Mapping Africa's soil microbiome Nature v539 p152
http://www.nature.com/polopoly_fs/1.20956!/menu/main/topColumns/topLeftColumn/pdf/539152a.pdf
- 7) 農林水産省委託プロジェクト 「土壌微生物相の解明による土壌生物性の解析技術の開発」 (e-DNA プロジェクト)
http://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/project/edna/edna_jp/
- 8) 健康診断の発想に基づく新しい土壌病害管理法「ヘソディム」の運用開始について
2015 年 3 月 4 日
<http://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/techdoc/press/150304/>
<http://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/techdoc/hesodim/>
- 9) 共生ネットワークの分子基盤とその応用展開
http://www.jst.go.jp/kisoken/accel/research_project/ongoing/h26_04.html
- 10) 微生物を利用した農耕地からの一酸化二窒素ガス発生削減技術の開発
https://www.naro.affrc.go.jp/brain/inv_up/theme/2012/043059.html
- 11) 戦略的イノベーション創造プログラム (S I P)
次世代農林水産業創造技術 (アグリイノベーション創出) 研究開発計画
p19 「持続可能な農業生産のための新たな植物保護技術の開発」
http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/9_nougyou.pdf
- 12) 農林水産省「委託プロジェクト研究」(平成 29 年度分公募中)
http://www.affrc.maff.go.jp/docs/project/2017/project_2017_1.htm
- 13) 農林水産省「農林水産研究基本計画」(平成 27 年 3 月改定)
http://www.affrc.maff.go.jp/docs/kihonkeikaku/new_keikaku.htm
- 14) 農林水産研究基本計画に基づく研究開発ロードマップ

付録3. 専門用語説明

用語	説明文章
iChip	(iChip)土壌などに含まれる難培養性の微生物を培養するための手のひらサイズのデバイス。多穴のウェルからなり、ウェル同士が混ざらないような設計や素材でできているが、ウェルが外界と接する一つの面だけ半透膜で作られていて、外界との低分子の行き来を可能にしている。個々のウェルに微生物 1 個を入れ、もともと採取した環境（土壌など）に直接挿入し、培養を行う。
一次生産	(primary production)光合成によって無機物から有機物を合成する生産およびその生産物。主として藻類および植物が行う。
インフォマティクス	(informatics)情報学・情報処理・情報システム・情報科学などの関連分野。本プロポーザルでは、生物系関連、バイオインフォマティクスを指す。遺伝子配列、タンパク質の構造、画像情報、など、生命現象に付随する「情報」を分析する学問分野。ゲノムプロジェクトなどで大量に生産された配列情報を解析する手法としてまずは発展した。これは、遺伝子情報が 4 種の塩基の並びというデジタル情報に近い性質を持っていたことによる。その後計算機科学や網羅的解析技術（オミクス）の発展とともに、多様かつ大量の情報をもとにした様々な手法が開発されるとともに、データベースなど研究基盤も整備され利用されている。
鍵因子	(key factor)本プロポーザルでは、ある系に対して生物学的解析とくに多階層データからの統合的な解析を行った時に見いだされる、系全体に最も大きく影響を及ぼす要因を指す。
カスガマイシン	(kasugamycin)放線菌由来の抗生物質の一つ。イネいもち病の防除に優れた効果を持ち、ヒトやその他の動植物への安全性は比較的高いとされ、農薬として使われてきた。1960年代に、梅沢浜夫らにより奈良県春日大社の土壌サンプル由来の放線菌から見いだしたのが名前の由来となっている。
芽胞	(spore)一部の細菌が増殖に適さない環境になったときに形成する細胞構造。非常に耐久性が高く、熱、薬剤、乾燥などに強い抵抗力を持つ。増殖に適した環境になると再び発芽して菌体に戻る。
緩和策	(mitigation)温室効果ガスの排出削減と吸収の対策。
希釈平板法	(dilution plate method)最も標準的かつ古典的な微生物の分離法の一つ。対象とする試料を無菌液で希釈し、寒天平板培地に拡げて培養するもの。一個の細胞由来のコロニー (single colony) が取得できるため、均一な細胞集団を得られ純粋培養が可能となる。コロニーの数を数えることで量的計測にも利用できる。
寄生植物	(parasitic plant)他の植物に寄生して生育する植物の総称。光合成を自身でも行うことができる半寄生植物と、光合成を行わない完全寄生植物に大別される。寄生根と呼ばれる特殊化した根で宿主の植物の組織と結合して栄養分を搾取する。
機能ゲノム学	(functional genomics)ゲノム、転写産物、変異体を用いた遺伝学などによって、遺伝子およびタンパク質の機能とその相互作用を記述する分子生物学の一分野。

菌根菌	(mycorrhizal fungi)植物と共生する菌類で、菌根と呼ばれる特有な構造を持った共生体を形成する。7つの主要なタイプがあり、関与する菌類、宿主となる植物、共生体である菌根の構造も異なる。陸上植物の大半は何らかの菌根菌と共生関係を結ぶとされる。植物の根よりも細い菌糸により、土壌中の栄養塩類や水分を吸収し、宿主へと供給する。また、土壌病害への抵抗性を付与するとされる。菌根菌から受け取る栄養塩類や水分のかわりに、植物は光合成産物の菌根菌に与えており、その量は全光合成量の2割に達するとの報告もある。
菌類	(fungi)キノコ・カビ・酵母などの生物の総称。細胞壁を持つが葉緑体を持たず、有機物を分解して利用する従属栄養生物である。単細胞のもの、菌糸と呼ばれる細胞列を形成するもの、多細胞のものなど、多様な形態を示す。菌根菌のように植物と共生関係を結ぶものや、植物に寄生するものもあり、農業上・食品産業上重要である。
クロスライセンス	(cross-licensing)相互ライセンスとも。2つまたはそれ以上の企業などが、自らが持つ特許権など知的財産権の行使をお互いに許諾すること、あるいはそのための契約を指す。
ゲノム解析	(genome analysis)ゲノムとは、生物が生命活動を営むために必要な遺伝情報の全体・総体を表す。ゲノム解析とは、ゲノム規模でのDNA配列を決定することである。広義にはさらに、DNAの構造変異、遺伝子発現と調節、機能要素の注釈付けなど、ゲノムの特徴の同定、測定、または比較などを含む。
原核生物	(prokaryote)明確な細胞核を細胞内に持たない生物。真核生物の染色体DNAは核膜に囲まれて明確な細胞核を持つのに対し、原核生物の染色体DNAは細胞内に存在する。原核生物は一般的に真核生物よりも遙かに小さく、細胞内構造も真核生物に比べて極めて単純である。歴史的には細菌（真正細菌）と同義語であったが、古細菌の発見に伴い範囲が拡大した。
根圏	(rhizosphere)植物の根から影響を受ける土壌の領域。根圏に属さない土壌はバルク土壌と呼ぶことも。根からの分泌物、脱落した細胞、および関連する土壌微生物が存在することにより、タンパク質および糖、細菌、原生動物、線虫などがバルク土壌よりも豊富である。一般的に、根の表面から数ミリ程度の範囲を指す。植物の栄養の獲得および病害抑制に最も大きく影響するのは根圏であると言われる。
根粒菌	(root-nodule bacteria/rhizobium)マメ科植物の根に根粒とよばれる瘤を形成し、その中で大気中の窒素を固定して宿主であるマメ科植物に供給する土壌微生物。マメ科植物からは光合成産物が供給され、共生関係が成立する。
細菌	(bacteria)（古細菌発見以降は）真正細菌とも。全生物界を三分するドメインは、古細菌ドメイン、真核生物ドメイン、真正細菌ドメインがあり、真正細菌はそのドメインの一つ。あるいは真正細菌ドメインに含まれる生物のこと。
作物保護	(crop protection)作物を、病気、害虫、雑草、などの被害から守ること。作物の病気を扱う植物病理学、昆虫の生態や防除に関する応用昆虫学、雑草の生態や防除に関する雑草学などが関連分野である。さらに、病害虫や雑草を防除するための薬剤に関する農薬学にも深く関連する。

サブグループ	(subgroup)下位グループ、下位群。全体の集団の中からある特徴をもとに抜き出された特定のグループ。
シーズ	(seeds)製品化の可能性がある物質、技術、ノウハウなど。
資源作物	(resource crop/biomass crop)エネルギー源や産業製品材料とすることを主な目的に栽培される植物。バイオエタノール用や工業製品用のトウモロコシ、バイオ油脂用のナタネやオイルパーム、ユーカリ、アカシア、ヤナギなどの樹木を指す。
システムバイオロジー	(system biology)生命現象をシステムとして理解することを目的とする学問分野。複雑な生命現象のシステムに対し計算および数学的なモデリングを行う。伝統的な要素還元主義だけでは系全体の振る舞いを理解できないという立場をとる。
次世代シーケンサー	(next generation sequencer)DNA や RNA を構成するヌクレオチドの結合順序（塩基配列）を決定する装置の類の一つで、その処理能力の大きさから、サンガー法による第一世代のシーケンサーと区別して次世代シーケンサーと呼ばれる。核酸配列決定のための原理は、ヌクレオチドが DNA に取り込まれるときに放出されるピロリン酸を ATP に変化させ、その時に出る発光反応を検出する、パイロシーケンス法を用いている。この技術と装置の普及によって、塩基配列決定にかかるコストが劇的に低下するとともに、膨大な塩基配列情報が産生されるようになった。ただし数十から 100 数十塩基程度しか決定できないというデメリットもある。近年、さらに別の方法（DNA ポリメラーゼを使ってリアルタイムに検出する一分子リアルタイムシーケンシング）を用いた装置（PacBio）も販売されている。こちらは平均 10,000 塩基と非常に長い配列を高精度で決定可能であるとされる。
ジベレリン	(gibberelin)細胞伸長の促進、種子の発芽促進、種子の休眠打破の促進、老化の抑制などに関わる植物ホルモンの一群の総称。イネの馬鹿苗病の病原菌（ <i>Gibberella fujikuroi</i> ）が産生する毒素として 1926 年に黒沢英一により発見され、1935 年に藪田貞治郎が <i>Gibberella fujikuroi</i> から単離しジベレリンと命名した。活性を有するジベレリン A が、複数の分子種の混合物であることが明らかとなり、現在はジベレリン A1 からジベレリン A136 まで 136 種の分子種が確認されている。農薬として用いられる場合には、ジベレリン A3 を指してジベレリンと称することもある。農薬としての利用は、種無しブドウの生産に用いられるのが有名。
植物成長調節物質	(plant growth regulator, PGR)植物の発生、成長、分化を制御する化学物質で、人工的に合成された植物ホルモンの類縁体やその拮抗化合物、また微生物などが産生するものを指す。
植物病原菌	(plant pathogen)植物に寄生して生育し、感染して発病させる微生物。
植物ホルモン	(plant hormone)植物自身の生理活性・情報伝達を低濃度で調節する機能を持ち、化学的本体と生理作用が明らかにされた物質のこと。動物におけるホルモンは分泌器官や標的器官がはっきりしているが、植物の場合は明確でなく、輸送機構も動物のそれと全く異なる。古典的には、オーキシシン、サイトカイニン、ジベレリン、アブジジン酸、エチレンの 5 種であったが、20 世紀末以降、ブラシノステロイド、ジャスモン酸、サリチル酸、ストリゴラクトンなども植物ホルモンとして認められている。近年、数個～数 10 個のアミノ酸残基からなる植物ペプチドホルモンの存在も次々と明らかになり、注目を集めている。

シロイヌナズナ	(<i>Arabidopsis thaliana</i>)アブラナ科シロイヌナズナ属の一年草。被子植物のモデル生物。2000 年 12 月に陸上植物としてははじめて全ゲノム解読が終了した。一世代の期間が約 2 ヶ月と短く、室内で省スペースで栽培可能であること、形質転換が容易であること、一つの花から多数の種子が取れること、ゲノムサイズが小さいことなどがモデル生物として利点があった。
真核生物	(eukaryote)細胞の中に、核膜で囲まれた細胞核と呼ばれる細胞小器官を有する生物。全生物界を三分する真核生物ドメインの一つ、あるいはそこに含まれる生物を指す。
ストライガ	(<i>Striga</i> 英名: witchweed)アフリカ、アジア、オーストラリアなどに自生する寄生植物の一族。いくつかの種はアフリカの半乾燥地域の農業に甚大な被害を及ぼす有害植物である。種子のサイズは 0.2-0.3mm ほどと非常に小さく、1 個体につき約 50 万の種子を生成し、埃のように風に舞う。種子の耐久性が高く、20-40 年土壤中にあって発芽能力を失わない。一度ストライガの種で汚染されてしまった土壌は、完全に駆除することは現在の技術では難しい。
ストリゴラクトン	(strigolactones)植物から得られる一群のラクトン構造を有するカロテノイド誘導体。1966 年に寄生植物のストライガ属の発芽誘導物質として、ワタの根の浸出液から Cook らにより発見されストリゴール(storigol)と命名された。その後、様々な植物から同様の化合物が同定され、総称としてストリゴラクトンと名付けられた。その後 2005 年になってアーバスキュラー菌根菌の菌糸の分岐を促進する物質として、秋山康紀により再発見された。さらに、2008 年に植物の分枝を抑制する機能を持つ植物ホルモンとして、日本の共同研究グループとヨーロッパの国際共同研究グループによって報告された。ストリゴラクトンの機能は現在以下のように解釈される。植物がリン酸欠乏の時には、植物体の枝分かれを抑制し、リン酸を供給してくれる菌根菌との共生を促進する。寄生植物のストライガはこの植物と菌根菌のコミュニケーション分子であるストリゴラクトンを、自らが寄生することのできる植物が近傍に存在することを感知することに利用している。
製剤技術	(formulation)本プロポーザルでは医薬品ではなく肥料や農薬に関する製剤技術を指す。有効成分を徐々に放出させる方法や、水とともに簡単に流出するのを防ぐ方法などを含む技術群。有用微生物を作物に効率的に接種するための、種子コーティング技術なども含む。
生物資源	(biological resources)人間の生活上必要な資源として利用される生物および生物由来の資源のこと。食料、繊維、薬品、エネルギー源などが主な用途。
生物農薬	(biopesticide)農薬として用いる、昆虫、線虫、菌類など生きた生物。また生物由来の物質(抗生物質、毒素など)を含んで指す場合もある(本プロポーザルでは後者も含めた広義)。
接種試験	(innoculation trial/innoculation test)本プロポーザルでは、植物に微生物を接種してその効果をみることを指す。
奏効性	(effective)効き目が現れること、効果をあげること。
相互作用	(interaction)本プロポーザルでは、生物学的な相互作用を指す。ある生物とある生物が、互いに影響を及ぼしあうこと。生物学的な相互作用を担う実体の大部分は、化学物質である。

耐害虫性	(pest resistance)農作物の、害虫に対する抵抗性。
耐病性	(disease resistance)農作物の、病害に対する抵抗性。
多階層	(multi-layer, multi-omic)本プロポーザルでは、複数の網羅的解析法により得られたデータ（マルチオミクスデータ）群を指す。
窒素肥料	(nitrogenous manure)窒素を主成分として含む肥料。本プロポーザルでは、化学的に合成された窒素肥料を指し、魚粉、油かす、堆肥などの場合は有機質窒素肥料として区別して表記する。硫酸（硫酸アンモニウム）、塩安（塩化アンモニウム）、尿素、などから成る。
DGGE	(denaturing gradient gel electrophoresis)変性剤濃度勾配ゲル電気泳動法とも。環境サンプルや土壌サンプルなどから、保存性の高い遺伝子配列領域をPCRで増幅して、得られた同じ長さの二本鎖DNA断片を取得し、その塩基配列の違いにもとづきゲル電気泳動で分離し、DNA多型として検出・解析する方法。次世代シーケンサーの登場以前には、微生物群集構造解析などに用いられた。
適応策	(adaptation)既に関わりつつある気候変動影響への防止・軽減のために備える、あるいは新しい気候条件の利用を行う方策
土地利用型	(land use type)農作物や農業の形態には、土地利用型と、労働集約型（施設園芸型とも）作物に大別できる。例えば、コメ、ムギ、ダイズといった作物を栽培するのが、典型的な土地利用型農業である。耕作面積あたりの収入は労働集約型よりも低いが大規模化は比較的容易である。
トランスクリプトーム解析	(transcriptome analysis)遺伝子転写産物（mRNA）全体・総体を、シーケンス解析やマイクロアレイ解析によって、生体内における遺伝子の発現状況を網羅的には把握すること。
内生菌	(endophyte)植物の組織内（多くの場合細胞と細胞の間）に入り込んで生育する微生物。中には病原性を示さず植物の生育に対してむしろ有益な機能を持つものもあるとされる。
難培養性微生物	(nonculturable microorganism)通常の希釈平板法などでは容易に純粋培養や集積培養が困難な微生物。
農業資材	(agricultural material)農業に用いる材料。本プロポーザルでは主に、農薬、肥料、土壌改良材（剤）を指す。
農作物	(crops)田畑につくる栽培植物全般を指す。
バイオエコノミー	(bioeconomy)化石燃料や化石資源を基盤とした経済と対比して、バイオ燃料やバイオ資源を基盤とした経済。
バイオ化成品	(bio-based chemical product)バイオマス由来の化成品。
バイオ燃料	(biofuel)バイオマスの持つエネルギーを利用したアルコール燃料、ディーゼル燃料、合成ガスのこと。
バイオ肥料	(biofertilizer)生きた微生物を含む物質で、植物の栄養素の共有や利用可能性を高めることによって成長を促進する農業資材。種子、植物の表面、土壌に添加し、植物の内部や根圏に定着させて効果を発揮させる。化学肥料や農薬の使用の低減を可能にするものとして期待されている。根粒菌に代表される <i>Rhizobium</i> や、 <i>Azotobacter</i> 、 <i>Azospirillum</i> 、など。
バイオマス資源	(biomass resource)再生可能な生物由来の有機性資源の総称。化石資源は除く。

橋渡し研究	(translational research)主に医学や生物学における基礎研究の成果から、応用研究、小規模実証試験へとつなげ、社会実装を視野に入れた研究開発。
パリ協定	(Paris Agreement)第 21 回気候変動枠組み条約締約国会議 (COP21) において 2015 年 12 月にパリで採択された、帰国変動抑制に関する多国間の国際的な協定。2016 年 4 月に署名が始まり、同年 11 月に発効した。発効時の批准国、団体数は、欧州連合を含めて 110。
非可食性	(non-edible)ヒトが食料として用いないバイオマスの修飾語として用いられる。
微生物単離・培養技術	(isolation and culturing microbes)水や土壌といった環境中に存在する生きた微生物の混合した集団の中から、関心のある微生物を同定するために、一個の細胞由来の遺伝的に均一な集団を獲得することを単離技術と言う。一般的には、寒天培地などを用いた平板培養法を用いて、単一のコロニーから取得する (single colony isolation)。近年、新規技術によって、微小な区画に一細胞を格納することが可能になりつつあり、広義にはこの技術も含む。各種解析に供するため、一個の細胞を増殖させてある程度の量を確保する必要があるが、微生物の増殖に適した条件で増やす操作を培養技術と言う。
表現型解析	(phenotypic analysis)ある生物の遺伝子型が形質として現れた状態を測定・分類・比較すること。形質の具体例としては、形態、構造、行動、生理的性質などがある。この場合、獲得形質は含まない。
肥料代替法	(alternatives to fertilizer)化学肥料代替法の場合は、有機肥料も含む。例えば、骨粉、魚かす、堆肥、緑肥など。その範疇にも入らないものとしては、土壌や根圏微生物の活性によって、土壌に吸着している植物が吸収できない肥料成分を植物が吸収できる形態に変換させる方法や、窒素固定微生物を利用して植物に窒素を供給する方法など。
プレコンペティティブ	(pre-competitive)製品開発および製品市場において企業間が競争前の段階にあること、または製品開発の初期段階で競合他社と共同で行われる基礎研究 (段階) を指す。
平板培養法	(surface plate method)微生物試料を寒天平板培地に拡げて培養する方法。(see also 希釈平板法)
ホログenom	(hologenome)個々の多細胞生物 (動物や植物など) 宿主と共生微生物全体を統合してとらえたホロビオン (holobiont) のゲノム。
マイクロドロップレット法	(microdroplet)微小流体力学 (マイクロフルイディクス) 技術の 1 種。お互いに混じり合わない (例えば水溶液とオイル) を直径数 10 マイクロメートルの微小流路の分岐構造に流すことにより、多数の微小液滴を作る技術。微生物研究で用いる場合は、オイル層の中に水溶液系の液滴を形成させる。一つ一つの液滴に微生物が 1 個から数個 (目的に応じて変える) ずつ格納されるように濃度を調整して用いる。
マイクロバイオーム解析	(microbiome analysis)環境中に存在する微生物叢を、ひとまとまりの集団として全体像として解析する手法。現在一般的に用いられるのが、リボゾーム RNA など保存性の高い遺伝子領域を PCR により増幅し、その塩基配列を次世代シーケンサーで決定し、比較および検出頻度によって捉えるやり方である。

マルチオミクス (データ)	(multi-omics)複数のオミクス解析を統合的に行うこと、またそのためのデータをマルチオミクスデータと呼ぶ。オミクス解析の種類としては、ゲノム (遺伝子)、トランスクリプトーム (転写産物)、プロテオーム (タンパク質)、メタボローム (代謝産物)、イオノーム (イオン)、フェノーム (表現型)、マイクロバイオーム (微生物叢) などがある。
緑の革命	(Green Revolution)1940～1960 年代にかけて、短稈品種 (背丈の短い半矮性品種) の育種開発と使用、加えて化学肥料の多投入により、穀物の生産性が向上し、大量増産が達成された農業革命。ノーマン・ボーローグにより主導され (のちにノーベル平和賞を受賞)、これにより 1960 年代中頃まで懸念されていたアジアの食糧危機は回避された。在来品種では一定以上の肥料を投入すると、倒伏が起こるため、収穫量が減るが、短稈品種を用いることで肥料の多投入条件でも倒伏せず、単位面積あたりの収量が増加した。
メタゲノム解析	(metagenomic analysis)微生物群集のゲノムを、培養に依存することなく網羅的に解析すること。環境中から得られた試料から、直接 DNA や RNA などの遺伝物質を回収・増幅し、解析に供する。解析コストが低い次世代シーケンサーの普及を受けて、一般化しつつある技術。古典的なゲノム解析では、微生物の多様性の大部分が培養の過程で見逃されていることが、メタゲノム解析の結果から明らかとなった。
メタボローム解析	(metabolome analysis)生物の代謝物質を総体として扱い、網羅的・統合的に調べる解析手法。生体内には核酸 (DNA)、タンパク質、脂質など高分子の物質のほかに、糖、有機酸、アミノ酸など多くの低分子が存在し、多くは酵素などの代謝活動によって作り出された代謝物質である。その種類は数千種に及ぶ。生体内のメタボロームは一次代謝産物と二次代謝産物に分類することができる。一次代謝産物は正常な成長、発達、複製に必要である。二次代謝産物は成長、発達、複製に直接必須ではないが、他の生物との相互作用や非生物学的な外部環境応答に重要な機能を持つことが多い (色素、抗生物質など)。

謝 辞

本戦略プロポーザル作成にあたって、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。

■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）
辻 真博 フェロー（ライフサイエンス・臨床医学ユニット）
矢倉 信之 フェロー（ライフサイエンス・臨床医学ユニット）
西野 恒代 フェロー（ライフサイエンス・臨床医学ユニット）
松本 麻奈美 フェロー（環境・エネルギーユニット）
箕口 滋 副調査役（RISTEX）
和田 久司 調査員（研究プロジェクト推進部）
特任フェロー 篠崎 一雄 特任フェロー（ライフサイエンス・臨床医学ユニット）
センター長（理化学研究所環境資源科学研究センター）

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2016-SP-01

戦略プロポーザル

植物と微生物叢の相互作用の研究開発戦略 —理解の深化から農業/物質生産への展開—

STRATEGIC PROPOSAL

Promoting of the Research on Plant -Microbe Interaction in New Era
- Development of Novel Control and Application Methods for Agriculture/Biomaterial
Production Based on Deeper Understanding -

平成 29 年 3 月 March 2017

ISBN 978-4-88890-543-5

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/>

©2017 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.

ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC

CT CTCGCC AATTAATA

TAA TAATC

TTGCAATTGGA CCCC

AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC

ATAAGA CTCTAACT CTCGCC

AA TAATC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT

CTCGCC AATTAATA

ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

CTCGCC AATTAATA

TTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

ATTAATC A AAGA C CT

GA C CTAAC T CTCAGACC

0011 1110 000

00 11 001010 1

0011 1110 000

0100 11100 11100 101010000111

001100 110010

0001 0011 11110 000101

ISBN978-4-88890-543-5

