



ムーンショット型研究開発事業
新たな目標検討のためのビジョン策定

「緑の革命 2.0 の実現に向けた調査研究」
調査研究報告書

令和3年7月

目標検討チーム「SACMOTs」

チームリーダー：石橋 勇志（九州大学大学院 農学研究院 准教授）

サブリーダー：田島 大地

チームメンバー：村上 真哉（三菱商事株）

有尾 誠介（双日九州株）

森山 泰智（伊藤忠商事株）

棚町 弘一郎（たなまち農園）

Suriyasak Chetphilin（九州大大学院 農学研究院 特任助教）

甲斐 恭平（福岡雙葉高等学校）

Contents (目次)

I. Concept (MS 目標案のコンセプト)

1. Proposed MS Goal (MS 目標案)
 - 1.1 Proposed MS Goal title (MS 目標案の名称)
 - 1.2 Vision for 2050 society (実現したい 2050 年の社会像)
2. Targets (当該 MS 目標の達成シーン。2050 年 (及び 2030 年) に何が実現しているか)
3. Background (当該 MS 目標を設定した理由及び、目標達成の社会的意義等)
 - 3.1 Why now? (当該 MS 目標の設定や目標達成に向けた取組みが、今必要である理由)
 - 3.2 Social significance (目標達成の社会的意義)
 - 3.3 Action outline (当該 MS 目標の達成に向けた社会全体の取組み概要)
4. Benefits for industry and society
(当該目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化)

II. Analysis (統計・俯瞰的分析)

1. Essential scientific/social components
(当該 MS 目標を達成するための課題 (科学技術的・社会的課題) や必要な取組)
2. Science and technology map
(当該 MS 目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰)
3. Japan's position in overseas trends
(当該目標に関連する研究開発の動向 (全体)、海外動向及び日本の強み)

III. Plan for Realization (社会像実現に向けたシナリオ)

1. Area and field of challenging R&D, research subject for realization of the Goals (挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題)
2. Direction of R&D for realization of Goals
(2030 年・2040 年・2050 年のそれぞれにおける、達成すべき目標 (マイルストーン)、マイルストーン達成に向けた研究開発、これによる波及効果)
3. International cooperation (目標達成に向けた国際連携の在り方)
4. Interdisciplinary cooperation
(目標達成に向けた分野・セクターを越えた連携の在り方)
5. ELSI (Ethical, Legal, Social Issues)
(目標達成に向けて取り組む上での倫理・法的・社会的課題及びその解決策)

IV. Conclusion (結論)

V. References (参考文献)

I. Concept (提案する MS 目標案のコンセプト)

1. Proposed MS Goal (MS 目標案)

1.1 Proposed MS Goal title (MS 目標案の名称)

「2050 年までに、日本に Green Valley を創出し、誰でも、いつでも、どこでも、何でも栽培出来る食料生産技術を確立し、世界中の人々が豊かな食生活を送り、自己実現を追求出来る世の中を実現する」

1.2 Vision for 2050 society (実現したい 2050 年の社会像)

① 地球環境変動があったとしても、いつでも、どこでも、増加する世界人口に対して、必要十分な食料生産及び食料供給を実現する。

(1) 日本に世界中から、食・農業・植物に関する人材、資金等が集まる Green Valley を創出し、次世代農業モデルによる革新的な生産技術を構築する。

→あらゆる環境条件下、様々な作物を、環境負荷を最小限に抑えた新しい技術体系の下、生産出来る様になる。

(2) (1) の技術を基に、世界各国が安定した食料政策を策定し、充実した社会保障体制を構築する。

➤ 上述 (1) の技術により、特定の国に依存した食料調達政策から解放され、今般の新型コロナウイルス蔓延時等の有事においても、安定的な食料調達を実現出来る。

➤ 余裕のある食料調達政策を発展させ、ベーシックインカムならぬ、ベーシックフードの様な、一定条件下で国民に必要な最低限の食料を供給する制度の検討等が進む。

→世界中の人々が、栄養豊富な食料を調達出来る世の中を実現する。

② 世界中の人々が、安心して生活を送り、誰もが自己実現を追求できる世の中を実現する。

➤ 日本では、「仕事≒食い扶持」という表現がある様に、仕事は「食料確保の為」といった側面がある。然し、2050 年には、上述の技術開発と政策により、誰もが自分のやりたいことを追求出来る世の中が到来する。

③ 農業起点で、その他多くの社会問題を解決する。

農産物の「食」以外の利用として、植物ビジネスの可能性も期待出来る。

(1) 農産物を「化学合成の場」として捉え、医薬原料、漢方、プラスチック等を植物由来で効率的に製造する。

(2) 植物栽培過程を利用してエネルギーを抽出する。

(3) その他、農業の機能として地域活性化や災害リスクの低減、再生エネルギーという側面から、副次的にこれら機能を強化する事につながる。

(4) 上記を空間、海上、宇宙など「いつでも、どこでも、誰でも」可能とする。

→緑(植物)に関わる新たな産業が創出されている。

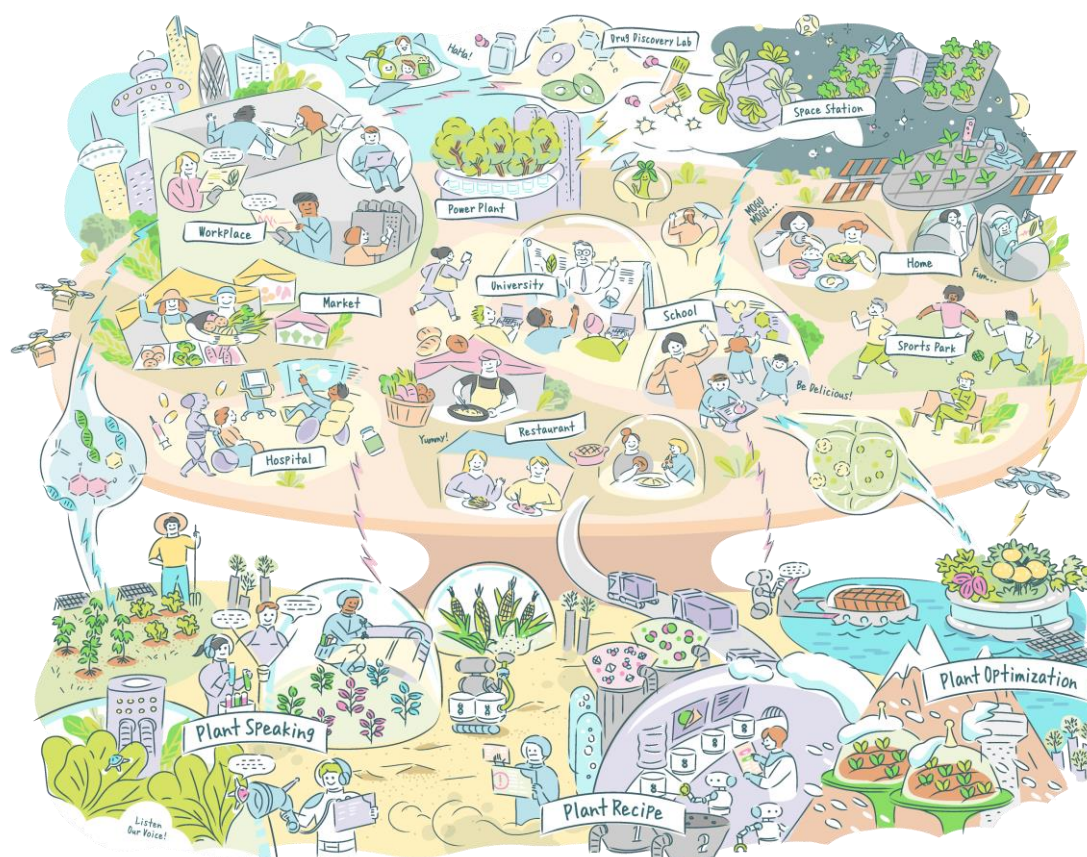


図. チーム SACMOTs が実現したい社会像の概念図

2. Targets (当該 MS 目標の達成シーン。2050 年 (及び 2030 年) に何が実現しているか)

① 2050 年迄に、農作物の栽培情報をフル活用し、従来とは全く異なる革新的な栽培方法で世界中の食料不足、栄養不足を解決する食料生産体制を構築する。

(1) 植物内部の情報、栽培環境情報の解析が飛躍的に進み、農作物生産に必要な新しい植物生理メカニズムが発見される。

➤ 植物内部の情報について、現在、半導体技術の進歩に支えられる形で、各センサーの小型化が進んでいる。30 年には単一機能の物理センサー (温度計や湿度計等) であれば、植物体内への導入が可能になっている。その後 2050 年に向けては分子センサー (遺伝子やたんぱく質を解析するセンサー) の開発、小型化、実用化が進む。

➤ 栽培環境情報について、30 年には、現在急速に普及が進むドローンを活用した画像診断データを中心に、必要な外部環境情報は比較的安価に収集出来る体制が整備される。

(2) (1) を基に、従来の化成肥料や化学農薬に代わる、より高次元な物質を植物に投与する新しい農作物の栽培技術が確立される。

➤ 2030 年には既に開発が進んでいる物質 (バイオ肥料やバイオ農薬、バイオスティミュラント資材等) の効率的な利用法が確立している。特にバイオスティミュラントについては、昨今その利用方法について枠組み形成がスタートしており、近い将来、適切なる

ールの下、運用が進むと考えられる。

- 2050年には、現在活用が進んでいないアミノ酸や遺伝子、タンパク質といったより高次元な物質を植物に投与する新しい栽培方法が確立され、普及している。
- (3) 栽培プロセスの殆どが自動化される。また、(2)で開発された技術をより精度高く実現する場として、植物工場も圧倒的に普及する。
- 既に、日本では稲作機械を中心にGPS搭載機械の開発、実用化が進んでいる。各社25年~30年頃の社会実装を見込んでいる。また農作業の大部分の時間を占めると言われる収穫作業の自動化について、既に国内でも数社のベンチャー企業を含め収穫ロボットの開発等に取り組んでおり、30年にはより多くの作物で自動化していると考えられる。
- 植物工場については、現在一定以上規模の栽培且つ、安定した販路確保を条件に、葉物野菜の一部で採算の合う栽培パッケージが確立しつつある。30年には、効率的な電気照射や安価なエネルギー源の確保等、ハード面からのアプローチを中心に技術革新が行われ、30年時点でも一部の品目で今迄以上に普及が進むと考えられる。
- 2050年には、上述新しい栽培方法に対応した各種自動化技術が開発され、従来に比べ圧倒的に効率的な農業生産が始まる。

② 2050年迄には①の技術により安定的に確保可能な食料を基に、新しい社会保障制度の設計等、新しい食料供給体制が敷かれ、世界中の人々が必要十分な食料を調達する事が出来る様になる。

③ 2050年までには農産物を使った化学品合成や再生エネルギーの活用促進、農産物自身を使った発電、或いは農地という場を利用した地域経済活性化や災害リスク対策が行われる。

④ 随時、①の技術に関する倫理的・法的、社会的(ELSI)な議論を並行的に進める事により、2050年迄にグローバルに普及させる。

3. Background (当該MS目標を設定した理由及び、目標達成の社会的意義等)

3.1 Why now? (当該MS目標の設定や目標達成に向けた取組みが今必要である理由)

① 社会における要請

(1) 人口増に伴う食料増産と環境負荷配慮の両立の必要性

2050年には世界人口は20%強増加し、100億人弱になると推測されているが¹⁾、昨年ユニセフの報告によれば2019年、世界の飢餓人口は6.9億人と既に食料は不足している²⁾。緑の革命以降、世界規模で見れば、順調に食料生産量を拡大してきた³⁾。それを支えてきたのは化成肥料や化学農薬である。然し、今般、環境負荷の観点から、当該資材の使用の在り

方が見直されている⁴⁾。また、地球規模の気候変動により、農産物の収穫不良が予測される等⁵⁾、将来、これまでのペースで食料増産を実現出来るか疑問視されている。

(2) コロナで見直される食料保障問題と、「食」に関する意識の変化

2019年12月に中国で確認された新型コロナウイルスは、21年6月現在、今尚、猛威を振るっている。今回のウイルス蔓延に伴い、ロシアやウクライナ等は小麦やトウモロコシ等の輸出を制限し、食料流通の一部で混乱が見られた⁶⁾。然し、コロナ以前から、世界の食料流通においては人口が多く、経済力を増した中国がその存在感を大きくしていた。元商社社員によれば、以前は日本へ直行していた食品のコンテナ船が、現在ではシンガポールや香港を経由する様になり、価格交渉の場でも足元を見られることが増えたという。未だ世界3位のGDP、世界10位前後の人口を誇る日本でもこの状況である。日本より経済力の弱い国や、日本より人口の少ない国では、食料を世界流通の中で確保するハードルは年々高くなっている。

また日本においては、新型コロナを機に消費者の「食」に関する意識の変化も見られた。自宅で料理する人が増え、より安心安全でおいしい農産物に注目が集まっている⁷⁾。産直サイトの利用者はコロナ以前の3倍を超える⁸⁾⁹⁾。全体数からいえば、まだ僅少であるが、それでも確実に消費者の「安心安全な食料」への意識は高まってきている。

(3) 人間らしいウェルビーイングな生き方が求められる時代

今般の新型コロナは、今迄人間が行っていた仕事の自動化スピードを加速させた。改めて人間らしさを考える時、そのヒントはマズローの5段階欲求説にあるかもしれない。欲求説によれば、最上位欲求は自己実現の欲求である。自己実現に至るまでには、様々なプロセスがあるが、根幹を成すのは生理的欲求、中でも「食」の欲求が満たされている事は必須条件である¹⁰⁾。機械が人間の仕事を代替する世の中だからこそ、世界中の人々が自己実現を目指す様に、食の安定生産、安定供給に資する課題に取り組む意義は大きい。

(4) 次世代を担う若者たちの声

高校生を対象に実施したワークショップにおいて、2050年の理想の社会像についてヒアリングした。その結果、今回ワークショップを実施したほぼ全学生が、日本の食料生産に課題を感じると回答した。また、理想の自給率は60%以上と回答した学生は97%にのぼった。更に70%の学生がゲノム編集に抵抗無と回答している。この事からも、科学技術をフル活用した新たな食料生産技術の確立及び安定した食料調達ルートの確保は今後を担う学生世代からの期待も大きい事が分かった。

(5) 地球温暖化の深刻化

脱石油、脱炭素へ向けた取り組みが急速に進んでいる。国内においてもビニール袋が原則有料化された事等は、一般消費者もその重要性を強く意識するきっかけになったのではないだろうか。昨年菅義偉首相は、50年までにカーボンニュートラル（温室効果ガス排出の実質ゼロ）を目指すと宣言し、今般各業界で脱炭素社会へ向けた取り組みが加速している¹¹⁾。

② 科学技術的要請

(1) 世界に誇れる日本の農業関連データとノウハウ

企業の時価総額ランキングや、特許出願数を見ると、日本は国際的地位を落としつつある。特に 2021 年現在、世界を席卷する所謂 GAFAM と呼ばれる米国発 IT 企業や、BATH と呼ばれる中国発 IT 企業の存在感は非常に大きい¹²⁾¹³⁾。こうした中、日本が未だ先行する技術やノウハウは何だろうか。複数の農薬メーカー関係者曰く、日本が保有する未上市農薬原体数は世界の 50%以上であり、植物の生理メカニズムに関する知見は世界トップクラスと言われている。こうした植物、農業に関する技術、ノウハウは、今後日本が世界をリード出来るポテンシャルを秘めている。

(2) 中長期的かつ、我が国の研究開発プログラムとして取り組むべき課題が多数含まれる農業分野の研究開発は、植物を実際に栽培しなければならず、それに伴い、天候リスク等と隣り合わせである為、中長期的な取組みが必須である。また、当レポートでは詳細の記述は控えるが、国内の農業生産の活性化の為には、以下の様な農業に直接的に関係のない技術開発も必須であり、我が国の研究開発プログラムとして取り組むべき内容も多い。

- ✓ 低コストでの再生エネルギー供給体制の整備
- ✓ GPS、画像解析等の精度向上
- ✓ 電池の小型化、長寿命化
- ✓ 通信速度の高速化

3.2 Social significance (目標達成の社会的意義)

① 世界中の人々の食料需要を満たし健康基盤を支える事と、地球環境配慮の両立

3.1 でも記載した通り、地球環境への負荷を最小限に抑えた形で、増える人口に対応した食料生産を可能にする。従来型の農業は、化成肥料や化学農薬の大量使用が前提となっている。当該資材は、温室効果ガスの発生、水質・土壌汚染の原因と指摘され、地球環境に対して、甚大な影響を与えてきた。新技術により、化成肥料や化学農薬の使用量を大幅に削減し、また単位面積当たりの収量を大幅に増やす事で、耕作面積を増やす事なく(森林等を伐採する事なく)、食料増産させる事が出来る。

(対象 SDGs 項目)

SDGs 目標 1：貧困をなくそう

SDGs 目標 2：飢餓をゼロに

SDGs 目標 3：すべての人に健康と福祉を

SDGs 目標 9：産業と技術革新の基盤をつくろう

SDGs 目標 12：つくる責任 つかう責任

SDGs 目標 13：気候変動に具体的な対策を

SDGs 目標 15：陸の豊かさを守ろう

SDGs 目標 17：パートナーシップで目標を達成しよう

② 人類の幸福度を向上させる

(1) 世界第3位のGDPを誇る日本だが、毎年国連が発表する世界幸福度ランキングによれば、日本の幸福度は56位である¹⁴⁾。様々な要素と相関があると言われる幸福度だが、相関の高い要素の1つとして、食料自給率がある(食料自給率が低いと高負担、高福祉が難しいとされる為)。上位の北欧諸国の食料自給率は、100%に到達していなくても50%程度以上である国々が多い¹⁵⁾¹⁶⁾。当技術開発は日本をはじめとした食料輸入国に食料自給のオプションをもたらし、国家間の不平等を一部是正する。

(2) 3.1でも記載した通り、AI、IoT等の発達により、今後益々多くの仕事が機械やロボットに取って代わられる。その様な世の中であって、自己実現の追求は人間が人間である意味として非常に重要になると考えられる。安定した食料生産体制、供給体制の構築は、その礎となり、非常に重要な役割を担う。

(対象 SDGs 項目)

SDGs 目標 8：働きがいも経済成長も

SDGs 目標 9：産業と技術革新の基盤をつくろう

SDGs 目標 10：人や国の不平等をなくそう

SDGs 目標 16：平和と公正をすべての人に

③ 他産業の技術革新や、「食」以外の重要課題解決をドライブする

(1) 農業は現在、都市部ではなく、地域で行われていることが多い。よって農業が活性化することは、まず地域活性化(地域に居住比率が高い高齢者の活用や、地域に増える耕作放棄地の解決)に直接的につながる。特に耕作放棄地問題を解決することは、荒れた土地を再生させる事であり、最終的には災害対策にもつながる。

(2) 農産物は今般エネルギー原料としても注目度が高い。ブラジルを始めとした欧米諸国ではバイオエタノール燃料の普及が進んでいる。当目標達成の暁には、植物体内部の栄養分構成を自在にコントロール可能になる事から、今よりも効率的にバイオ燃料を獲得する事も可能である。また植物の代謝メカニズムそのものに着目して新しい発電モデルを構築出来る可能性もある。

(3) バイオプラスチック、ビニール袋の削減等、今般脱石油化学に向かってあらゆる研究が行われている¹⁷⁾。植物も化学合成の場と見立てれば、そのポテンシャルを極限に引き上げる事によって、あらゆるものを植物体内で合成させる事も可能である。

(対象 SDGs 項目)

SDGs 目標 7：エネルギーをみんなにそしてクリーンに

SDGs 目標 9：産業と技術革新の基盤をつくろう

SDGs 目標 11：住み続けられるまちづくりを

SDGs 目標 12：つくる責任 つかう責任

SDGs 目標 17：パートナーシップで目標を達成しよう

④ 日本の国際的地位を向上させる

3.1 でも記載した通り、今般、日本の国際的地位は低下傾向にあるが、農業関連分野については、現在世界をリードするポジションにある。また今後の研究開発を考えても、日本は南北に長く、四季があり様々な環境条件がそろうため、比較的多くの植物種を栽培、研究出来る事から、当分野の研究開発は圧倒的に日本にアドバンテージがあり、今後もリードし続けられる余地が十分にある。また、和食がユネスコ無形文化遺産に登録され、日本食は世界に誇る文化であり、食に関する技術と文化により日本の「食」に関する国際的地位を向上させることができる。

3.3 Action outline（当該 MS 目標の達成に向けた社会全体の取組み概要）

① 企業：

(1) 農業法人、大規模農家：Green Valley で開発された技術を積極的に導入し、より効率の良い栽培方法を活用し、より品質の高い農産物の生産を目指して自ら強い産業を作っていく努力が必要である。

(2) 農業資材メーカー：各技術について、大きく以下の観点で積極的な研究開発が望まれる。

- 農業現場での活用をイメージしたコスト、UI/UX の開発
- 環境負荷を最小限に抑える資材開発
- 他産業で活用されるより高度な技術の積極的な農業転用

(3) 食品、小売、外食等、「食」と接点のある企業等：今まで以上にトレーサビリティの観点や、安定調達の観点等も鑑み、積極的に農業分野への参画(出資)を期待したい。

② 大学、研究機関：

(1) 基礎技術開発：農業資材メーカー等と連動して、農作物の最適栽培に資する植物生理学を中心とした基礎研究について出口イメージをもって進めたい。工学・医学といった異分野技術の融合研究の推進も必要不可欠である。

(2) 教育：今後益々、農業生産現場に人工的な手が加えられる。例えば遺伝子組み換え技術が消費者に受け入れられず、研究開発がスムーズに進まなかったような歴史をたどらないよう、大学や研究機関は科学技術の十分な情報発信を行う必要がある。

③ 行政、自治体：

(1) 法整備と情報整理・情報発信：大学や研究機関等と連動して、適切な情報整理、情報発信を行い、適切な世論形成を行った後、Green Valley で開発した技術が実装される様、適切な法整備等、実用化に向けた枠組み形成を行う必要がある。

(2) 社会保障制度の構築：Green Valley で開発した技術が、実装された暁には、安定した十分な食料生産をベースにした、充実した社会保障制度の在り方等の検討を行いたい。また

農福連携の可能性も積極的に模索し、農業をベースにした様々な社会保障制度の在り方を検討したい。

(3) 他産業間、他国間調整：

- Green Valley により、既存の農業業界だけでなく、他産業からも当該エコシステムへ参入がある様、税制コントロールを含めた枠組み形成を行う。
- Green Valley による技術開発により、各国の農産物を中心とした輸出入ポジションは大きく変動する可能性がある。その場合、過度な貿易摩擦問題に進展する事のない様、調整を行う。

4. Benefits for industry and society

(当該目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化)

① 農業生産の変化：

世界中で農業生産の在り方に革新が起きる。各国、地域において、導入する技術は其々の外部環境や栽培する作物によって異なるが、概して、高度なセンシング技術導入を前提として、以下が進む。

- (1) 自動化に伴う大規模化やリモート化
- (2) 従来の化学肥料や化学農薬に代わる環境負荷の低い物質の利用が進む。

② 食料供給、食料調達について：

(1) 各作物の栽培適地が、従来の適地から変わる可能性があり、各国の食料調達戦略、貿易戦略、ひいては各国のポジションに変化が生まれる可能性がある。

(2) 各国が安定的な食料調達をベースとして、現在より手厚い社会保障政策の検討を開始出来る。中には生活に最低限の食料供給を保障する、言わばベーシックフードの様な仕組みを検討する国が出てくるかもしれない。いずれにせよ、世界各国が安定的に自国民に対して食料供給を保障する事が出来る。それは最終的に全人類がより自分らしい生き方を追求する事につながる。ひいては、幸福度向上につながる。

③ その他産業等への影響について：

- (1) Green Valley 発の技術は、日本の新たな輸出産業となり日本の GDP 向上に貢献する。
- (2) 農業を起点として、地域経済、再生エネルギーの効率的な活用がドライブされる。
- (3) 化石エネルギー由来の化学品の多くが植物由来製造に切り替わる。かつて経済成長をけん引した石油化学産業から植物生産産業が次世代のモノづくりを担い、経済成長をけん引する。
- (4) 農業経営体の大規模化に伴い、農業生産者の採算性が圧倒的に改善する。その事は、農業生産者と小売/外食産業/卸との関係性を対等にし、副次的に在庫の適正化 (=フードロス削減)、トレーサビリティの強化等、食品産業全体の適正化に寄与する。

II. Analysis (統計・俯瞰的分析)

1. Essential scientific/social components

(当該 MS 目標を達成するための課題 (科学技術的・社会的課題) や必要な取組み)

① 科学技術的課題

(1) 高度なセンシング技術の開発

(2) 以降全ての技術開発の根幹を支えるのがセンシング技術である。機械の開発においても、新しい資材開発においても、植物体内及びその栽培環境のデータセンシング技術の精度向上が欠かせない。

(2) 植物体と圃場環境のバランスを最適化するアルゴリズム開発

(1) と連動して、土壌、作物、そして群落の微気象モデルを融合し、環境と耕地管理との相互作用を定量的に評価する手法を開発し、其々の栽培条件下、各作物を最も効率よく栽培する為のアルゴリズム開発が必要である。

(3) 新品種の開発

メンデルの法則の再発見以降、1910 年～20 年頃にかけて現在の育種技術の基礎が作られたと言われており、その後、遺伝子組み換え技術、ゲノム編集技術が導入された¹⁸⁾。科学的に植物へ直接アプローチする分野として最も注目を集めている分野である。

(4) 化学肥料、農薬に頼らない、環境負荷を最小限に抑えた栽培技術の開発

今般、次世代肥料、農薬として注目されるのは、バイオ肥料/農薬やバイオスティミュラント資材、更に光合成効率改善を目的とした RNAi 技術の開発等がある¹⁹⁾。また散布方法としては、上記センシング技術を活用したドローンによるピンポイント散布等が注目を集めている。

(5) 自動化技術の開発

各種技術がいくら発達しようとも、農業生産者が積極的に導入出来る様にする為には、農業生産者の所得向上が欠かせない。一方で、最終成果物 (農産物) は比較的安価に入手可能な状況でなければ、当 MS 目標の達成は難しい。その為には、完全自動化に近い状況を実現し、生産性を飛躍的に向上させる (コストを削減する) 事は不可欠である。

(6) 植物工場

上記技術を最大限の効率で活用する為には、外部環境の影響を最小限に抑える必要があり、複雑系環境制御に対応できる次世代型完全閉鎖型植物工場の開発が望まれる。

② 社会的課題：

(1) ①科学技術を普及する上での課題

(i) 農業生産者の大規模化、各種工程のデジタル化

各技術導入に当たっては、基本的に農業生産者自身が投資実行する必要がある。その為には、前提として生産規模を拡大し、新技術を最大限活用し、投資採算を確保出来る環境を整備す

る必要がある。例えば国内では、以下の様な取組みが必要になる。

- 農林水産省、JA、自治体：担い手農家が農地を拡大出来るように、情報整理、及び法整備を推進する。
- 食品メーカー、外食産業等：農業生産者が規模拡大を実現した際に直面する課題は、人材確保と販路確保である。食品メーカーや外食産業等、農産物を利用する大企業が積極的に農業生産者と連携して安定的な課題解決を図る事に期待したい。具体的には、大手メーカーからの農業生産現場への人材派遣、生産者から農産物の直接購入等の機会が増える事等があげられる。
- 農業生産者：生産者の中には、自給自足的な生活の延長で取組んでいる農家や、特に新しい取り組みに興味を示さず、惰性的に農業生産を行っているケースも多い。然し、今後、農家数が激減する事が予想される中、今一度、従来の固定概念にとらわれず、規模の拡大及び、効率化の追求を行って頂く必要がある。

(ii) 農業関連技術に関する規制緩和、及び普及後押し

加速する科学技術の進展をスムーズに社会実装出来る様、規制緩和及び消費者の新しい科学技術に対する心理的ハードルの低減は必須である。

(iii) 基礎から実用まで一貫した研究体制の構築

実際の生産現場における作物の生産性や物質循環を研究対象とする、農学の各分野（作物学や生態学、土壌肥科学、農業気象学 など）と資材開発、農業生産の連携促進が望まれる。

(iv) 人材育成

「圃場の物質循環」やそれを担う植物の生理生態を、フィールドスケールのマクロな視点から理解する生理生態学者やアグロノミスト人材が圧倒的に不足している。大学の生物学や農学系の学部や学科においても、分子生物学や植物生理学を志願する学生は多いが、作物学や生態学、農業気象学などのフィールド調査・計測に関わる研究分野に対する志願者が多くない現状がある。今後の人材育成を推進するために、これら分野の重要性と魅力を国内外に積極的にPRすると共に、作物学や植物生理学などの分野との連携に加え、社会的な関心が高い地球温暖化や気候変動対策に関わる分野との交流を強めていく必要がある。

③ 国際連携、分野・セクターを超えた連携、ELSI 等による取組み：

(1) 科学技術の連携：上述の通り、日本は国土が南北に長く、また栽培形態も多岐にわたる為、多くの栽培モデルを確立する事が出来るが、日本だけで全ての植物種、全ての栽培形態のモデルを構築するのは不可能である。各国の食料自給力向上に取り組む際には、各国の然るべき機関との連携により、ローカライズを図る必要がある。また、スマート農業関連技術も世界各国に存在する。言語・慣習の観点等からもサービスの全てを輸出するより、活用できる現地技術は積極的に導入していく方針とし、ローカライズさせる必要がある。

(2) 食農業界への技術導入時の消費者心理の改善：日本国内同様、消費者心理のコントロールは重要になる。当課題は文化的、宗教的背景も密接に関係する事もある事から、各国の

適切な関与が欠かせない。

(3) 食農業関連産業以外の産業との融合：コーンスターチの工業利用、バイオエタノールの利用等、これ迄も「食」以外の用途で農産物を利用する取組みは一部で行われてきているが、今後はより幅広い分野（医薬、各種材料等）との融合を促進するような場の設定が求められる。

(4) 貿易摩擦、関税問題の調整：上述の通り、各国の食料調達戦略が変われば、貿易バランスが崩れる為、大きな問題が発生する可能性がある。然し、当変化は本来あるべき姿に戻るものであると捉え、各国の理解ある協力と調整が望まれる。

2. Science and technology map

(当該 MS 目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰)

① 高度なセンシング技術の開発

所謂スマート農業の入口となる技術。既に気温や湿度等、植物の栽培環境に関するデータや、植物の状態を外部から画像分析する技術等、物理センサー技術は飛躍的に向上している。然し、本格的な農業現場での実用に向けては以下の課題がある。

(1) 実用性の向上（低消費電力化、堅牢・安定性の確保、精度向上）：実験室での使用には問題なかったとしても、圃場での使用を考えると、消費電力が大きく堅牢性の担保が十分に行えない、機器によっては安全性の担保が出来ない事が課題となっている。また精度担保の為に、使用前のキャリブレーションや表面洗浄が必要であるが、それらが出来ない、或いはコストがかかる等、課題になっている。

(2) 通信インフラの向上：画像や動画情報をリアルタイムに管理者に送信出来る事が理想だが、それを可能にする通信環境が整備されていない。今後所謂 5G 以降の、高速・大容量・低遅延の通信インフラの整備が求められる。

(3) ドローン技術の革新：ドローンの活用により、固定データだけでなく栽培範囲を移動しながらデータを取得する事が可能になりつつある。然し、電池の消費が早く、大農場で活用する為には予備バッテリーが必要、バッテリー交換には人手が必要等、課題がある。

(4) 新しいセンシング方法の確立：現在、基本的には植物の外部環境及び、植物の表面をセンシングする技術開発が行われているが、当該情報で得られるデータは植物の栽培状態を把握する上ではごく限られた情報である。医学においても外部からの診断や、MRI、レントゲン等による情報収集では真の病原を特定する事が難しいように、植物の分析においてもより精度の高い植物内部をセンシングする技術が求められている。2050 年に向けては分子センサー（目的に沿って検出する分子・物質と特異的に相互作用する認識分子（核酸、ペプチド、タンパク質、低分子化合物など）を電気化学デバイスや光素子のトランスデューサ上に付着しておき、分子・物質と認識分子との相互作用による電気信号や光信号の変化を検出するセンサー）の開発、実用化が本格化し²⁰⁾、植物体内部のより詳細なデータを把握し、以下を実現したい。植物体の状況をより迅速に把握し、よりの確な時期に、的確な場所に、的確な物質を処方

する事が出来る様になる。その為の課題は、基本的に上述物理センサーと同項目である。

② 植物体と圃場環境のバランスを最適化するアルゴリズム開発

1960年代から開発が本格化。1980年代からは作物生産と土壌の養水分動態のシミュレーションモデル等が開発された。1990年代には、作物生産と土壌からの温室効果ガスを含む微量ガスの放出を予測する生物地球化学モデル等が開発された。その後、生物地球化学モデルは、圃場レベルの予測から、より広域的な温室効果ガスの放出の推定にも用いられるようになった²¹⁾。アルゴリズム開発における科学技術的な課題は、専らオミクスデータ・フェノタイプデータなどの大規模複雑データを取り扱える量子コンピュータの開発が挙げられる。然し、当開発において最も律速になっているのは、長期的なデータの量、質、幅であり、複数の環境制御系で実験出来るフィールドがなかったり、フェノタイプの解析者とアルゴリズム開発者の連携がなかったり等、その長期的な研究体制にある。

③ 新品種の開発

従来、品種を作出するのは10~15年かかるものと言われてきた。それを今般のDNAマーカー育種や遺伝子組み換え、2012年に発表されたCRISPR/Cas9を用いたゲノム編集技術は劇的にその期間を短縮してきた。ゲノム編集技術の最大の特徴はCRISPR/Cas9などのヌクレアーゼによって、狙う確率が非常に正確になり、目指す形質・機能を持った作物育種が格段に正確、且つ短期間で実現できる点にあるが²²⁾、科学技術的課題は以下の通り。

(1) 确实且つドラスティックな品種特性の改変

遺伝子組換え技術やゲノム編集技術では一度に編集できる遺伝子数が少なく、植物に与える効果は限定的と言われている。また、抑々植物の遺伝子機能が十分に解明されておらず、どの遺伝子を編集すべきか未知なものが多い。

(2) 全く新しい新品種開発技術

遺伝子組み換え技術、ゲノム編集技術については、長年の研究者の研究の成果虚しく、一般消費者の理解を十分に得られていない。今後これら技術に代わる、ゲノムそのものに改変を加えず、出来る限り人工的な手段に頼らない新しい品種開発技術が必要となると考えられる。

④ 化学肥料、農薬に頼らない、環境負荷を最小限に抑えた栽培技術の開発

1909年にハーバー・ボッシュ法が完成して以降、化成肥料の普及が進んだ。更に緑の革命で肥料応答性の高い品種が作出された事は当該肥料のより一層の利用を後押しする事になる。化学農薬も1900年代から普及が進み、戦後の食糧難を期に一層の普及が進んだと言われている²³⁾。然しこれらはその製造工程において、大量の化石燃料を使用し、また化成肥料の過剰使用は水質汚染や土壌汚染、大気汚染物質の排出が懸念され、化学農薬の使用は生態系破壊問題が指摘されている²⁴⁾。これらに代わる資材開発は以下の通りである。

(1) バイオ肥料/農薬、バイオスティミュラントの効率的な利用方法の追求：当資材は、未だその効果が明確ではなく、普及スピードは緩やかである。抑々、既存の農薬代替にはならないという考え方もあり、既存農薬と併用するという位置づけになる可能性も高いが、当該資材の効率的な利用方法の追求は必要である。

(2) 化成肥料、化学農薬の投入量を削減する（効率化する）：散布する化学農薬を低減する為の技術開発として、ドローンの画像診断と組み合わせた部分散布等がある。然し、ドローンは上述電池の問題に加えて、貨物の積載重量に制限がある。その結果、効率的な肥料や農薬散布に十分な量の当該資材を積載する事が出来ない。

2050 年に向けては更にステップアップした資材（例えば、遺伝子、タンパク質、ペプチド等）を超効率的な導入方法を用いて、全く新しい栽培手法を確立する可能性がある。

⑤ 自動化技術の開発

古くからトラクターやコンバイン等、農作業の機械化が進められてきた。今般、GPS や画像解析といった新しい基礎技術に支えられ、播種、除草、収穫等、益々幅広い作業工程をロボットや機械が担える可能性が出てきている。課題は如何に実用に耐えうるものになるかという観点である。具体的には、以下がポイントになる。

- 特定作業に特化しており、周辺作業が出来ず無人化を目指した機械であっても実態として人が必要（例：収穫ロボットで、収穫の自動化は実現しているが、カゴの積み下ろしは人力等）。
- 各種センサー機能の精度が不十分で、作業むらが出る。
- バッテリーが十分でなく、無人化を目指した機械であっても実態としては人が必要。以上の様な課題を抱え、結局は人の数を十分に減らせず（ゼロには出来ない）、その事もあって十分な費用対効果を獲得できずにいる。
- 堅牢・安定性の確保。
- 各種データ連携体制の構築。

⑥ 植物工場

2005 年頃までには既にレタス類やハーブ類などの生育期間が短い作物において栽培方法が確立。2009 年に農水省・経産省による全国的な拠点整備事業が行われ、いわゆる植物工場の第 3 次ブームが始まった。ここでは、植物工場を 3 倍に拡大し、生産コストを 3 割削減する目標が設定され、販路拡大と栽培システムの見直しによる最適化・省エネ化が行われた。また、栽培光源を蛍光灯から LED 照明に変える取り組みが進められ、2016 年には、植物工場は 191 カ所にまで増加（2009 年時点では 50 カ所）。また、販路拡大と省エネ化が進むことで、日産 5,000 株を超える量産型植物工場も実現可能となった。しかしながら、「高コスト構造」という生産における根本課題により、植物工場の半数以上は赤字の状況にある²⁵⁾。2014 年頃から、コスト削減を目的に、植物工場の大規模化が進められている。課題は以下

の通りである。

(1) センシング技術の向上：数値化の精度は数%オーダーを目指す必要があり、従来生理学と比べ1桁高い精度が要求されると言われている。

(2) アルゴリズムの高度化：

- モデル植物（シロイヌナズナ）とは異なる時空間スケール（数十 cm～数 m、栽培期間が数週間～数ヶ月）への適用が不十分なアルゴリズムが多い。
- 植物工場は、植物の生育環境を「シーケンス制御」により最適化するシステムである。植物に与えられる様々な環境入力は、その順番とタイミングが大事であり、膨大な組み合わせの中から最適な環境入力パターン（アルゴリズム）を見出す必要がある。
- 現在、アルゴリズムが検討されているのは、葉物野菜等一部の品目に限られるが、今後はその横展開を行いたい²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾。

(3) その他各種最新技術との連動：作業機械/ロボットによる栽培・生産プロセスの自動化など、最新の工学技術との連動や、ゲノム編集作物などの栽培試験や生産など、作物育種との連動。

(4) 生産プロセスの定常状態の維持：植物の受光量や養液組成、ガス組成は、植物の生育・生理代謝や装置の経年変化（劣化）との相互作用により、一定に保つことは難しい。



図. MS 目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰図

3. Japan's position in overseas trends

(当該目標に関連する研究開発の動向（全体）、海外動向及び日本の強み)

現在、農業分野の商業レベルでの研究開発の中心は、大型 M&A や経営統合を進めた海外メジャー4 社(コルテバ・アグリサイエンス、バイエル、シンジェンタ、BASF)である。種子の総売上高は市場全体の 60%を占めており、その他資材の販売も充実している。農業は、各国異なる政府主導政策で市場環境が一定ではないが、同 4 社は各国に現地法人を置くなどして、各国の規制の範囲内で自社の強みを生かしたビジネスを展開し、盤石なポートフォリオを構築している²⁹⁾。然しながら、上述科学技術を全て垂直的に同時並行で研究開発を行っている企業は存在しない。本 MS 目標においては、幅広い科学技術の融合が欠かせない為、同メジャーといえども限界がある。

一方で、各国毎に、その研究開発動向を俯瞰してみても、全ての作物種、栽培方法に、上述技術を効率的に応用出来ている国は存在しない。然しながら、一部の国々では自国で中心的に栽培する作物種、栽培方法については積極的に研究開発を進めている。ここでは米国、中国の土地利用型作物に関する事例、米国、EU (オランダ)、イスラエルの施設園芸の事例を紹介し、最後にわが国の研究開発状況を記載する事で、全体的な研究動向及び、日本の強みを示したい。尚、国際 PJ 等については、便宜的に拠点のある国や、参画チームの多い国のパートで記述する。

①米国

(1) アカデミックレベル

- 米国 Phytobiome プロジェクト：アメリカ植物病理学会が主導し、植物（作物）を基軸にして、相互作用する関連生物の総体を取扱う研究が推進されており、植物の地上部と地下部の両方について解析が進められている。
- 地球温暖化による作物収量予測のためのモデリングや生理解析、大規模 FACE 実験が行われている。光合成効率向上のための大規模研究も世界に先駆けて推進中である³⁰⁾。
- ビル&メリнда・ゲイツ基金など 9 団体の支援を受ける光合成効率向上を目的とした国際共同研究グループ (Realizing Increased Photosynthetic Efficiency: RIPE) が、2019 年以来、立て続けに劇的な光合成効率の向上を可能にする技術を発表している³¹⁾。
- 2019 年、AgMIP はプロジェクトの一環として、14 種類の作物モデルによる 15 種類の作物の成長と収量をモデル化した大規模データセット (Global Gridded Crop Model Intercomparison: GGCM) を公開した。この大規模データは地球の全球を細かくグリッドで区切り、それぞれの地域における作物の成長と収量について、土壌窒素濃度や気象データ、大気 CO₂ 濃度などのパラメーターを用い、データセットで提供された各種作物モデルを用いてシミュレーションを行うことができるものである。全世界の研究者がこのデータセットを活用し、作物モデルの結果を多角的に比較検討することで、より正確な収量予測が可能になることが期待されている³²⁾。
- センサー技術 (ナノ材料技術) についても、研究者層が厚く、研究開発のスペクトルは広い。新しい発想は米国から出てくることが多く、有名大学 (Stanford 大学、

UCBerkeley/Davis/Irvine、ミシガン大学、Georgia Tech など)を中心に、応用を意識した基礎研究が進んでいる²⁰⁾。

(2) 商業レベル

- 同国では常に 30 機以上の測位衛星を管理しており、GPS ガイダンス技術については世界トップ。当技術は同国内で以下を可能にしている³³⁾。
- 衛星画像による農作物や土壌データの蓄積も進んでおり、同分野では FarmLogs 社が 2,200 万ドルを調達しサービス展開を先行しており、米国農家の 3 分の 1 が使用するなど集約化が進む³⁴⁾。
- 大規模栽培向けの大型農機を中心とした GPS 付き機械+センシング技術が先行し、自動化・省力化に関する研究開発が進む。
- ドローンによる農薬散布も進んでおり、2025 年までに 1 億 4,480 万米ドルの市場になるとの予想。米国ドローンの特徴は固定翼タイプで、約半数のシェアを占める。米国では滑走路の確保ができることから、飛行距離が長く搭載量も多い固定翼タイプが主流となっている。(1 時間以上飛行可能で、回転翼タイプの約 6 倍) 機能別では、作物噴霧セグメントが中心であり、Deere & Company 社を始め、取り組みが進んでいる。Deere & Company 社は AI×農機の Blue River Technology 社を買収し、画像認識技術を応用したトラクター一体型の除草システムを開発している³⁵⁾ (除草剤使用を 90%削減)。
- 同国では葉野菜の約 95%が西海岸で生産され全米に配送されており、フードマイレージが問題視される。また近年、異常気象が要因でレタスから大腸菌由来の食中毒が拡大するなど、フードセキュリティに対する社会意識も高い。同国企業に於いてもスタートアップを始め多くの企業が完全人工光型植物工場の展開を進めており、大手では Plenty や AeroFarms など独自の生育システム・センサー・AI 技術を活用した高効率な生産を可能としている (作物の収穫効率を従来比で最大 350 倍まで高められる作物もある)³⁶⁾。Traptic 社では、独自のビジョンシステムとロボットアーム技術を活用して、トラクター一体型のイチゴ収穫機を開発。1 ミリ単位での位置特定が可能で、これまで機械化が進まなかった繊細な果物や野菜の収穫を可能とし、今後はオレンジ、メロン、ピーマンといった多品目の野菜や果樹の収穫機の開発を進める²⁹⁾。

②中国

(1) アカデミックレベル：

- 中国科学院南京土壤研究所は、イネーコムギ FACE 実験で顕著な成果を挙げている。日本との研究連携も実施している。また、化学生態学、分子生態学等への政府の支援が充実している。
- 国科学院、南京農業大学などで圃場・地域・グローバルケースの作物モデル研究が展開されている。また、化学生態学、分子生態学等への政府の支援が充実している。
- 北京大学では、多種多様なナノ材料を用いた揮発性化合物センシングの研究を進める

(分子だけでなく呼気中のウィルス等の検出にも成功)²⁰⁾。

(2) 商業レベル：

- 中国では、ドローン技術を中心とした路地栽培の大規模・高効率化が進んでいる。同国の DJI 社や XAG 社は、農業用ドローンによる総散布面積で世界トップであり、中国国内で DJI 農業ドローンが使われている耕地面積は 2020 年に延べ 3,400 万 ha に達した。
(2019 年時点で日本国内でのドローンによる耕作面積が延べ 2.7 万 ha であったことから、規模の大きさが伺える) 特に RTK+AI 技術ノウハウを蓄積してお入り、中国国内ではほとんどのドローンが操縦者もコントローラーも必要とせず、AI で操縦可能である。(日本では航空法等の兼ね合いもあり、レベル 3 高度自動飛行に留まっている)。
- 2018 年には粒剤散布システムを発売し、肥料に加え 5mm 未満の穀類種子の播種作業まで自動対応が可能。ドローン技術を中心とした播種～栽培迄の大規模・高効率栽培モデルに取り組んでいる。(2019 年リリースの粒剤散布システム 2.0 では、手動での作業に比べ、70 倍の速さで作業をすることが可能になった)。
- XAG 社は高精度ナビゲーションのコア技術を基に自動作業可能な農業用ロボットを開発し、除草・搬送・パトロール等の自動化も実現。今後中国に於いては、両社のドローン及びロボティクス技術を活用し、露地品目生産の更なる大規模・省人化を進めていく事が予想される。両社は DJI が 06 年、XAG が 07 年創業、16 年には世界に先駆け自動飛行ドローンをリリースし技術蓄積が進んでおり、特に自動飛行の精度は世界的にも高い。これまでは、飛行時間の長さやカメラの精細さなどを高めてきており (19 年リリースの T20 は飛行可能時間 15 分、バッテリー効率 1,800mAh、重量 23kg、積載可能量 16L といずれも前モデル MG-1P の 1.5 倍)、2020 年 11 月には次世代モデル T30(積載可能量 30L、作業時間：16ha/h)を発表した。一方でこれらの技術革新は一服感が出つつあり、今後は低価格化や肥料・種子メーカー等と連携した動きを見せている。

③EU

(1) アカデミックレベル

- スイス・ベルン大学で行われる PRENEMA と題するプロジェクトでは、自然生態系と圃場生態系における 地下部の三者系を扱い、植物が被食者にさらされた際に放出する物質の化学プロファイリング等を推進している。
- HIPVs が関与する地下部三者系を農生態系に応用し、害虫防除に役立てようという試みに関しては、スイス、ニュシャテル大学の Turlings らのグループで基礎研究が進められている。彼らはイネ科作物(トウモロコシ) ー根を食害するハムシ科幼虫ー幼虫に寄生して殺す線虫の三者系において、線虫を誘引する成分 Caryophyllene を特定している³⁷⁾。
- 英国シェフィールド大学の Beerling らは、各種モデリングを駆使することで、農地に

ケイ素を含む岩石の粉碎物を撒くことで、土壌が改良し、大規模な大気中 CO₂の土壌への固定が可能であることを試算した。シミュレーションによると、大気 CO₂の土壌への固定は米国や中国といった CO₂の排出大国において、特にその効果が顕著に認められた³⁸⁾。

- 総合防除の視点からは、イギリスロザムステッド耕地作物研究所のグループが Push-Pullstrategies という手法を提唱している。彼らは、アフリカでその有効性の実証試験を行い、良好な結果を得ている。
- センシング技術については、フランス Leti、ドイツのフラウンホーファー研究機構（特に ISIT、IPMS、ENAS の各研究所）、フィンランドの VTT、スイスの CSMC 等を中心に積極的に研究開発が行われている²⁰⁾。

(2) 商業レベル（オランダ）

- 国土面積が九州程度であるオランダでは、国として生産品目を絞り、施設園芸による大規模・高収量に関する栽培技術・ノウハウを蓄積してきたことで、世界 2 位の農産物輸出国の地位を築いている（トマト、パプリカ、キュウリが同国施設園芸の 8 割を占める）。特に世界最高水準であるトマト栽培に着目すると、日本と比較して 5 倍の単収（蘭 70t/10a、日本 15t/10a）、農家一戸当たりの農地面積（*施設園芸）は約 10 倍（蘭 2.2ha、日本 0.2ha）と高収量・大規模栽培モデルを構築している³⁹⁾。オランダ施設園芸の技術優位性については、資材・ハードウェア・ソフトウェアの 3 要素に分けられる。
- 資材では、世界に先駆けたロックウールの養液栽培や炭酸ガス施用、設備に適した品種改良・整枝技術が確立。
- またハードウェアでは、大規模フェンロー型温室、水耕設備、大規模施設に適した自動化設備、等の技術普及により高い生産性を支えている（トマト生産における労働生産性は日本の 9 倍）。
- 更にソフトウェアでは、コンピュータによる複合的な環境制御技術が進展。同国大手 Hoogendoorn 社が 1974 年に世界初の園芸用コンピュータを市場導入して以来、同国 Priva 社・Hoogendoorn 社・Hortimax 社を中心として、植物の生殖成長に直接影響を与える複合的な指標（飽差、等）を設定する非線形制御など、高度な統合制御をいち早く実用化に成功した。
- 現在では、AI 機能を搭載した高度な温室制御も実用化されている。特に同分野に於いて、同国の技術優位性は高い。日本の環境制御装置導入設備が全体の 2.5%のみであるのに対し、同国では大半の設備に普及している事からも、ノウハウ蓄積の差が大きいことが分かる⁴⁰⁾。

④イスラエル：

- 同国は、周辺国との関係性もあり、歴史的にも食料の自給率向上に力を入れてきた。国

土の多くが砂漠に覆われているイスラエルでは、過酷環境下でも効率よく野菜を生産するため、先進的な農業技術の開発を行ってきた。Seedo Corp 社による家庭・産業用の全自動型植物工場の開発の他、Tevel Aerobotics Technologies 社におけるドローンを利用した自動収穫ロボット、A.A.A Taranis Visual 社のリモートセンシング技術・AI 画像解析技術で病害虫発見技術はいずれも世界的に注目されている⁴¹⁾。

日本の研究開発レベルを他国と比較すると、以下の様に整理される。

①高度なセンシング技術の開発

- 気温、湿度等のセンシング技術（物理センサー）は既に成熟した技術であるため、各国間に有意差はない。また画像解析についても、各国各社、日々その精度向上に努めている段階で、特に先行している企業があるとは言えない状況である。
- 日本のデバイス・モジュールメーカーの実力は高く、弾性波フィルタ、自動車用慣性センサー等に強みがあるが、デバイス化・製品化に向けた研究開発が低調。産学連携や個別での研究開発が進められているが、従来の日本式の研究開発では、世界の速度についていけない。また当該領域ではベンチャー起業は低調である。日本企業各社に強みがあるセンサーは以下の通り。
 - ・第一精工：強誘電体膜+感応膜の匂いセンサー
 - ・太陽誘電：MEMS+感応膜の匂いセンサー
 - ・パナソニック：多チャンネル+感応膜の集積化分子センサー
 - ・アロマビット：センサー+感応膜
 - ・コニカミノルタ：複数の金属酸化物センサーの組合せ

②自動化技術の開発

農業用ドローン技術は中国が最も優れている。一方、その他農機、ロボティクスにおいて、日本はクボタ・ヤンマー・井関等が稲向けの機械を中心として積極的に開発を行っており、世界トップレベルの技術を維持している。日本作物学会でのワークショップにおいても、日本の農機分野の自動運転分野では世界的にも優位性があり、先行していることが確認された。2023 年頃には完全無人化の農機（レベル 3）が登場、2028 年頃には中山間地域向けロボット農機（レベル 3）が登場、2030 年頃には野菜・畑作・果樹向けのロボット農機の登場が見込まれている。ロボット農機の普及により、地域毎の生育モデルを利用したデータ駆動型農業の実現を目指す。収穫ロボットについては、国内では Inaho 社、Agrist 社等スタートアップも参入し、研究開発が活発化している。

③新品種の開発

農業生産上の有用な形質に関与する遺伝子の塩基配列情報を特定し、それを目印(マーカー)

として有用な新品種を効率的に選抜する DNA マーカー選抜育種法が開発され、イネや野菜等の様々な農作物の育種に応用されており、野菜、花きを中心にタキイ種苗やサカタのタネといった日本の種苗会社の種子は世界各国で使用されている。近年注目されるゲノム編集技術については CRISPR/Cas9 等の基本特許が海外におさえられる中、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の枠組みの下、国内の大学・関連研究機関等の英知を結集し、関連する研究開発を戦略的に進めて、国産ゲノム編集技術や、農作物の特性に応じた最適ツール(応用技術)を開発・知財化し、国内の種苗産業等が本技術を利用しやすい環境を整備している。具体的には、エディットフォース社が設計自由度の高い RNA 結合タンパク質を用いた、国産かつ他の技術とは異なる DNA-PPR 技術という新しいゲノム編集技術を開発して、創薬分野等から実用化を目指している等、複数のチームや企業が新技術を開発中である。ゲノム編集の農産物への実用化という観点では既に農作物が有している機能性成分などを最大限に発揮させたり(高付加価値化)、栽培における不都合な形質をピンポイントで改良することが可能になっている(低コスト化)。筑波大学による GABA トマトや理化学研究所による天然の毒素を含まないジャガイモなど、野菜、果樹等をターゲットにその開発が進んでいる⁴²⁾。

④化学肥料、農薬に頼らない、環境負荷を最小限に抑えた栽培技術の開発

- 国内市場は基本的に海外市場に比べ盛り上がりには欠ける状況であり、その開発スピードは EU 企業に比べると見劣りする。然しそのような中でも、出光興産がグループ企業のエス・ディー・エスバイオテックと共に大型新規剤を共同開発しており、住友化学は生物農薬事業をグループ企業のベラント・バイオサイエンス社に移管し、研究開発から海外での販路開拓を含めた生物(バイオ)農薬事業を同社に統括することで体制を強化するなど、取組みが活発化している⁴³⁾。
- 国家プロジェクトとしては、JST ムーンショット目標 5 として「2050 年までに、未利用の生物機能等のフル活用により地球規模でムリ・ムダのない持続的な食料供給産業を創出」が立ち上がっている。当目標ではとりわけ、微生物の活用に重点が置かれており、今後国内においても研究スピードが加速すると考えられる⁴⁴⁾。

⑤作物の成長や収量と圃場環境のバランスを最適化する技術の開発

イネに関しては、遺伝学的材料や作物モデル、水田群落微気象モデルなどの研究蓄積があり、一定の優位性が認められるものの(下参照)、他国との差は縮小している。また実農業利用を念頭においたアルゴリズム開発としては、農業データ基盤(WAGRI)により、各メーカーの機械・データを連携させ生産・加工・流通・消費まで拡張した「スマートフードチェーン」の構築がメインストリームであるが、その普及には時間がかかりそうな状況である。

- 農林水産省委託プロジェクト「農林業に係る気候変動の影響評価(A-8)」(2013~2017年度) イネ FACE 実験などによる作物の高温・高 CO₂ 影響メカニズムの解明と、作

物モデルを用いた気候シナリオに基づく作物収量・品質の将来予測と適応技術の定量評価が実施された。

- 「温暖化の進行に適応する生産安定技術の開発 (A-11)」(2015～2019 年度) では、地力の変化と気温ならびに大気 CO₂ 濃度の上昇が、イネの生育・収量におよぼす相互影響に関する研究が実施されている。
- 文部科学省 SI-CAT (気候変動適応社会実装プログラム) (2015～2019 年度) 作物モデルを用いた最新の気候シナリオに基づくコメの収量・品質予測と適応策の評価に加え、それら結果を活用した地方自治体における気候変動適応計画の策定支援が実施された。現在、環境省主導の「気候変動影響予測・適応評価の総合的研究」におけるテーマ 2「農林水産業分野を対象とした気候変動影響予測と適応策の評価」において、最新の気候シナリオと高度化した作物モデルを用いた作物の気候変動影響予測と適応策の評価が、引き続き実施されている。JST・CREST「植物頑健性」(2015～2022 年度) において、この領域で取り組まれた研究開発の中には、フェノミクスに着目したものがあり、野外における作物の動態に関する理解が進んだ。ハイブリッドモデリングによる環境変動適応型品種設計法の開発や、光合成を中心とした作物の生理生態学的な応答の解析、トランスクリプトーム等オミクスを駆使した解析、作物と昆虫などの他生物との相互作用の評価、土壌微生物と作物との相互作用、などに着目した解析が挙げられる。
- JST・さきがけ「植物分子の機能と制御」(2020～2025 年度) における一部課題では、植物他生物間コミュニケーションについて科学生態学的な理解を目指している。
- ダイズ畑に周辺雑草 (セイタカアワダチソウ) の切断した匂いを漂わすことで、人為的な植物間コミュニケーションを作り出し、作物の害虫に対する抵抗性、収量を向上させることに成功した研究が報告されている。またこの研究でダイズ種子内のイソフラボンやサポニンの含有量が増えることも報告されている
- さらに近年は農研機構が中心に開発したモデルを用いて、気候予測シナリオに基づく日本全国におけるコメ収量と品質低下リスクの将来予測が実施されている¹¹⁾。これまでに開発されたモデルは、現在農業モデルの相互比較と改良のための国際プロジェクト¹²⁾ (Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project: AgMIP) の枠組みにおいて、不確実性要因の解析と予測精度の改良が進められている。

⑥ 植物工場

完全人工光型植物工場に関して、世界トップの知見を有し技術優位性を持つが (下述参照)、近年、他国との技術差は縮まっている。国内より海外での市場性が見込まれることから、今後も世界各地域と連携した技術輸出が進むことが予想される。

- 大規模生産の為にロボット技術と AI 技術については 2014 年年頃からその活用が積極的に行われている。具体的には 2014 年に、大学発ベンチャー ((株) みらい他) によ

る日産 1 万株植物工場における LED 照明が全面採用された。また、2014 年経済産業省イノベーション拠点立地推進事業（大阪府立大学他）によるレタス日産 5,000 株の植物工場における概日リズムに着目した苗選別と自動移植ロボット・栽培室の自動搬送装置・各栽培棚へのダイレクト送風システム・多色 LED 光源などの当時の最先端技術が導入された。

- 2017 年バイテック（株）他、2018 年セブンイレブン、2018 年三菱ケミカル、2019 年東京電力グループが日産数万株の大規模植物工場の建設を発表している。
- 植物の生育・環境応答予測モデルを基盤とする環境適応型植物設計システム（2015 年～）文部科学省 H27 年度戦略目標「気候変動時代の食料安定確保を実現する環境適応型植物設計システムの構築」に基づく、CREST「植物頑健性」領域（2015-2022 年度）、さきがけ「フィールド植物制御」（2015-2020 年度）、「情報協働栽培」領域（2015-2020 年度）では、植物工場またはその栽培技術が直接的な研究対象あるいは研究試験施設として利用された。
- 実用技術開発農水省委託事業としては、農林水産省の委託プロジェクト研究「人工知能未来農業創造プロジェクト」（2017-2021 年）において植物生体情報と AI による太陽光植物工場における農産物生産の最適化の研究開発が実施されている（AI を活用した栽培・労務管理の最適化技術の開発（愛媛大学中核 7 法人コンソーシアム））。
- 2017 年には、NEDO「次世代人工知能技術の社会実装を目指した先導研究」の一つとして「人工知能技術を用いた植物フェノミクスとその応用に関する先導研究（特定非営利活動法人植物工場研究会、産総研、鹿島建設（株）、千葉大学）」が採択され、レタスなどの園芸作物やその他植物の特性や成長量を定量的に把握し、生育に必要な環境因子の動的作用を解析する植物フェノタイピング技術を人工知能技術によって開発し、さらに植物フェノタイピング利活用基盤として整備し利用可能とすることで植物工場での生産活動や将来的には育種などにも適用し得る応用技術の実現を目的とした。

その他、上記全ての技術開発に共通して必要な植物生理に関する知見は、実は日本が一番進んでいるという証言が今回の調査で多く寄せられた。南北に長い気候特性を生かし、多様な栽培品目とそれに合わせた栽培方法が実現されている事によるところも大きい。その結果、上述の通り、日本の種苗メーカーは世界的にも存在感があり、また未商品化農薬原体数も世界 50%強を日本の農薬メーカーが保有しているという。

	日本	米国	EU	中国	イスラエル
① センシング	○	○	○	◎	○

② 自動化技術	○	○	○	○	○
③ 新品種の開発	△	◎	△	◎	△
⑤ 化学肥料、農薬	△	△	◎	△	△
⑥ 全体最適化の技術	△	○	○	○	○
⑦ 植物工場	○	○	◎	△	◎

III. Plan for Realization (社会像実現に向けたシナリオ)

1. Area and field of challenging R&D, research subject for realization of the Goals (挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題)

①挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域は以下の通り。

(1) PS (Plant Speaking) : 植物体内部から高次元な情報(植物ホルモン、代謝産物、遺伝子発現、タンパク質合成状況等)を取得し、リアルタイムに発信するセンシング技術の開発。

(2) PR (Plant Recipe) : (1) のセンシング情報をフル活用し、植物体内部の情報を可視化する事で、作物生育と外部環境間の高精度なアルゴリズムを開発。アウトプットとして、従来の化成肥料や化学農薬、現在開発中のバイオスティミュラント資材を超える高次元な植物処方箋を植物に導入する、従来とは全く違う植物の栽培体系を構築する。

(3) PO (Plant Optimization) : (1) や (2) の技術効果を最大化する実際の栽培場所として次世代型植物工場を開発し、世界中で気候変動の影響を受けずに、且つ、環境負荷を最小限に抑えた形で、多くの植物種を生産し、全人類に必要な食料と栄養を担保する。また可動式、海上生産、更には宇宙での生産可能なパッケージにすることで、気候変動の影響を受けずに誰もがいつでもどこでも何でも農作物を栽培出来る世の中が実現する。

②目標達成に当たっての研究課題

(1) PS (Plant Speaking) :

II-2-①高度なセンシング技術開発で課題を列挙したが、挑戦的研究分野としてとりあげたいのは植物体内用分子センサーの高度化である。具体的な研究課題の中ではいかに実用性を高めるかという観点での研究開発が重要になる。尚、当技術については、従来、センサーの小型化及び圃場環境における情報通信インフラの未整備で実用化が難しかった。然し、センサーについては長年の蓄積による半導体の小型化、情報インフラについても日々低遅延、大容量、多接続技術が開発され、既に5G技術が確立した。そういった状況を鑑み、ようやく農業利用も射程圏内に入ってきていると認識している。

- 精度の向上 : 使用前のキャリブレーションや表面洗浄を低コストで実現する。
- 耐久性の向上 : 消費電力を小さくし、物理的にも(ハードとしても)耐久性を向上させ、厳しい栽培環境でも機能する様、技術開発する必要がある。
- 小型化 : 現在、物理センサーであれば0.1mオーダーくらいまでの小型化は可能だが、下述葉面散布での導入を考えた時には、10 μ ~50 μ 程度の小型化が必要である。小型化の鍵

を握るのは半導体の多層化（微細化）である。所謂ムーアの法則で 1900 年代後半以降に飛躍的に性能向上が実現した。然し、未だ植物へのセンサー導入を考えた時、小型化が十分ではないため、当面は単一機能のセンサーを導入するのが精いっぱいであるが、小型化が進めば、複数機能を持つセンサーの導入や、センサー内で情報処理したものをアウトプットさせたりする事も可能になる⁴⁵⁾。

- 高次性および網羅性：代謝産物や遺伝子、タンパク質の単独情報の取得に加え、温度等の既存のセンシング情報等も合わせた網羅的情報を取得する必要がある。

(2) PR (Plant Recipes) :

II-2-④の通り従来の化成肥料や化学農薬の低減、或いは代替する手段が求められているが、今回のヒアリングを通して、バイオ肥料やバイオ農薬、バイオスティミュラントは、基本的にその完全代替は難しい事が判明した。そこで今回挑戦的開発分野として取り上げたいのは、高次元化合物を効率的に導入する技術である⁴⁶⁾。

慣行農業ではアンモニア由来の窒素肥料を施肥し、主に植物は硝酸体窒素の状態で窒素を 50%程度吸収し、適宜アミノ酸やタンパク質に変換する。従来、植物の生育過程では、特定の時期、特定の部位（葉や根等）で特定のたんぱく質が特定の受容体に結合するか否かで、花の数や、栄養成分含量がコントロールされたりしていることが分かっている。従来は植物体内の生理データをリアルタイムに取得する事が困難であったが、上述 PS 技術開発でこれらが可能になった時、比較的高価な物質をいつ導入すれば効率的か把握する事が出来るようになる。その情報を基に植物体内にピンポイント処方する事で、高価なアミノ酸やタンパク質を導入しても採算性を確保出来るようになる。PR の中で具体的課題として取り上げたいのは以下である。

- 多変量解析技術の効率化：フェノタイピング（植物の形状、色、温度、匂い、成分、葉の運動などの表現型）を計測し、特徴量を抽出し、植物栽培に最適なアルゴリズムを計算する次世代量子コンピュータの開発及び数理モデルの確立。
- 導入方法の確立：従来タンパク質やアミノ酸といった比較的大型の分子を植物体へ直接導入する方法がなかった。然し、今般金属ナノ粒子に結合して導入する方法等が複数の研究グループから相次いで報告されているが、持続的な食料生産のためには、少量多効果を実現する必要がある、効率的な導入に向けて資材の分散性が大きな課題となる⁴⁷⁾⁴⁸⁾。

(3) PO (Plant Optimization) :

上記 (1)、(2) により革新的な栽培方法が確立されても、慣行農業の様に外部環境下であると、常に環境変化に伴うエラーによりアルゴリズムがうまく機能しないリスクがある。それを解決する手段として完全閉鎖型の植物工場に期待したい。植物工場自体は国内でも 40 年以上前から研究が開始され、既に国内外多くのプレイヤーが参入している。然し、未だ採算

- が取れている工場は数パーセントと言われており、技術は未成熟と言わざるを得ない⁴⁹⁾。然しながら、(i) 分断される各技術は飛躍的に向上しており、それらを上手く統合する事、(ii) 植物工場での栽培を前提とした種子や資材開発を行う事で、従来よりも採算が取れる可能性が高まってきている。今後特に挑戦的開発課題として取り上げたいのは以下である。
- 立地多様化に資する技術開発：Forward Thinking Agriculture 社（スペイン）が開発した海上で運用可能な植物工場や、日栄インテックグループ（日本）やアグリウェーブ社（日本）、Alesca Life Technologies（香港）の様に都市部での活用を想定したコンテナ式の植物工場、また JAXA も提唱する月面農場としての植物工場等、現在でも多様な場所、空間で植物工場を設置する技術開発が行われている。今後はこうした取組みを加速させ、どの様な場所でも採算性の高い農業を行える環境を整備したい⁵⁰⁾⁵¹⁾⁵²⁾⁵³⁾⁵⁴⁾。
 - 各種技術の統合：PS、PR で開発した新しい栽培技術をフル活用する事に加え、作業機械/ロボットによる栽培・生産プロセスの自動化など、植物工場栽培を前提とした品種の選抜等を行い、植物工場での作物栽培の効率を極限まで高める。

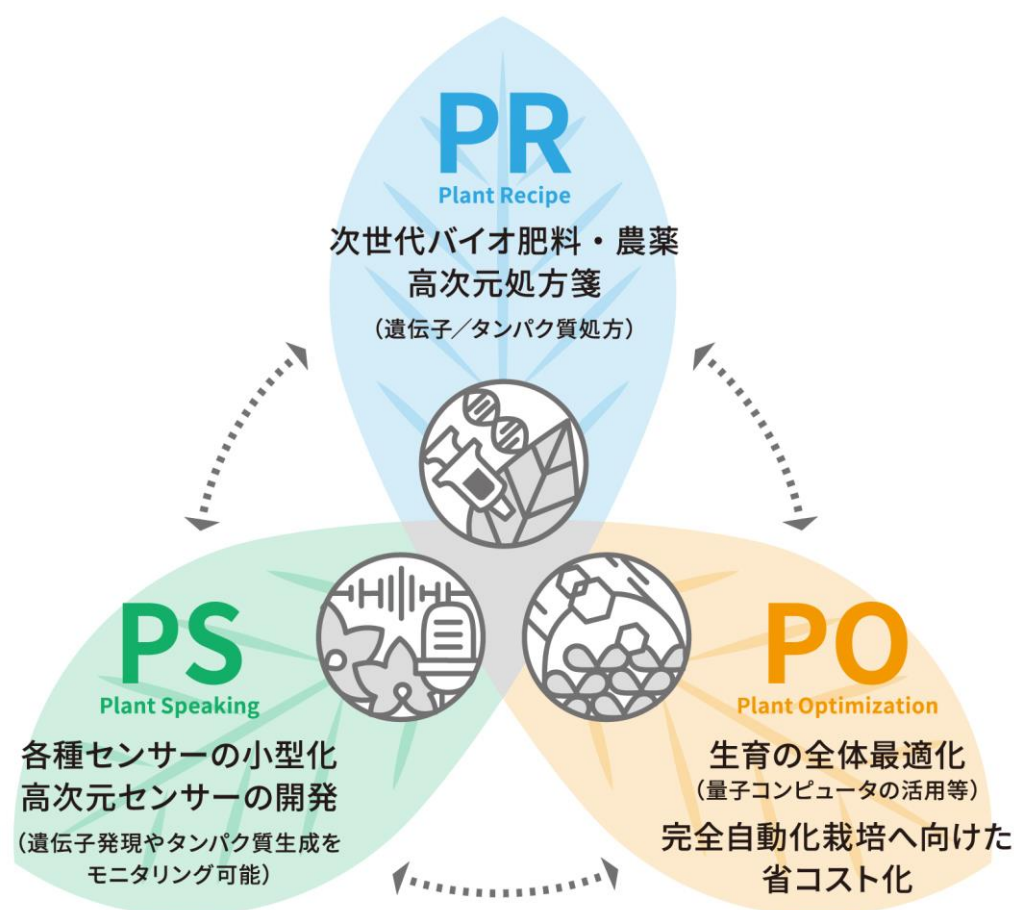


図. 挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題

2. Direction of R&D for realization of goals

(2030年・2040年・2050年のそれぞれにおける、達成すべき目標(マイルストーン)、マイルストーン達成に向けた研究開発、これによる波及効果)

① 2030年、2040年、2050年のそれぞれにおいて達成すべき且つ達成が見込める具体的な目標(マイルストーン)

2030年：新しい栽培方法の確立準備が完了。2040年：PS、PRの活用による新しい栽培方法の確立。2050年：POによる新しい栽培方法の実践と植物の食料以外の活用の普及。以上を推進すべき研究分野・領域を総合的に組み合わせた時のマイルストーン概略とする。以下、各分野・領域毎の30年、40年、50年の具体的なマイルストーンを設定する。

<PS>

(1) 2030年：超小型分子センサーが完成し、研究室レベルでは実際に植物への導入も可能になり、植物体温等の植物体内部の情報を獲得する環境が整う。

(2) 2040年：実際の農業現場にも分子センサーを導入する事が出来る様になり、植物体の代謝産物や遺伝子情報等による生育状況のモニタリングレベルが飛躍的に向上し、農作物の最適栽培に資する植物の新しい生理メカニズムが次々に報告される。

(3) 2050年：PS技術のコストが圧倒的に下がり全世界的な普及が進む。また、PS技術の食料、農業分野への応用が広がり、例えば植物体へ導入したセンサーを利用した発電技術が確立する。

<PR>

(1) 2030年：PSデータおよびフェノタイプデータを基にアルゴリズムが開発され、栽培方法への落とし込み迄の一連のプロセスが整備される。またフェノタイプデータの取得は、一度に複数の環境ファクターを人為的に操作可能な環境が整備され、アルゴリズム開発に必要な量子コンピュータの精度向上が実現している。高浸透性素材が選定される。

(2) 2040年：アミノ酸やタンパク質等の高次元物質を導入する技術が確立。PSの情報を基に新しい植物栽培方法を示すアルゴリズムが次々に開発される。

(3) 2050年：複数タンパク質の同時処方技術が確立。複雑な植物代謝メカニズムを制御出来る様になるほか、環境変動に合わせたリアルタイムなゲノム編集も可能になる。また植物を使って各種有用物質を抽出したり、食用以外の利用が始まる。

<PO>

(1) 2030年：既存技術の連動制が高められ、あらゆる環境下で現状より採算の合う形で植物工場を運営出来る技術が開発される。

(2) 2040年：PRで確立した新しい栽培方法(処理法など)を基にした栽培が始まる。

(3) 2050年：PRで確立した技術のフル活用により植物工場の採算性が劇的に改善。立地多様化に資する技術も確立し、世界的に植物工場の普及が進む。

②マイルストーンの達成に向けて取り組むべき具体的な研究開発テーマ

(2030年・2040年・2050年のマイルストーンのそれぞれについて記述)

<PS>

(1) 2030年：

- 精度の向上：使用前のキャリブレーションや表面洗浄を低コストで実現する。
- 小型化：現在、物理センサーであれば0.1mオーダーくらいまでの小型化可能だが、下葉面散布での導入を考えた時には、10 μ ～50 μ 程度の小型化を実現する。
- 高次化：現在のセンサーでは、温度やpHの情報等を取得することは可能であるが、代謝産物や遺伝子情報の取得へ向けた、特定の化合物や塩基のセンシング技術を開発する。

(2) 2040年：

- 耐久性の向上：消費電力を小さくし、物理的にも（ハードとしても）耐久性を向上させ、厳しい栽培環境でも機能する様、技術開発する必要がある。
- 高次化：センシングできる化合物の高度化及び遺伝子、ペプチドのセンシング技術の開発および網羅化。

(3) 2050年：

- 植物体へ導入したセンサーを利用した発電技術の確立：植物の栽培プロセスで発生する各種エネルギー（風による揺れ、代謝エネルギー、水圧エネルギー等）を電力等、人類が使いやすい形のエネルギーへ変換する技術を開発する⁵⁵⁾。

<PR>

(1) 2030年：

- 多変量解析技術の効率化：フェノタイピング（植物の形状、色、温度、匂い、成分、葉の運動などの表現型）を計測し、特徴量を抽出し、植物栽培に最適なアルゴリズムを計算する次世代量子コンピュータの開発及び数理モデルの確立。
- 高次元物質の植物への直接的導入技術の開発。

(2) 2040年：

- 導入方法の確立：植物体への遺伝子、タンパク質やアミノ酸導入をリードする物質の最適化。
- 導入後制御の確立：導入した遺伝子、タンパク質を標的部位へリードする方法の開発。
- 処方箋アルゴリズムの確立：PSの情報を基に、タンパク質やアミノ酸等、新しい資材を植物へ導入する新しい栽培方法を示すアルゴリズムが次々に開発される。

(3) 2050年：

- 処方箋の組合せ技術の確立：複数のアミノ酸やたんぱく質をカプセル状の粒子に格納して金属粒子に結合する技術開発を指す。例えばゲノム編集に必要なたんぱく質群及

び、導入遺伝子をパッケージ化したカプセルを作成し、導入すれば環境変化に合わせたリアルタイムなゲノム編集が可能になる。

- 食用以外の用途展開の検討：植物体へ導入する物質を農産物の効率的な成長等の目的以外で応用出来る可能性を追求する。例えば、植物を使って特定の化学物質（医薬品原料やプラスチック原料等）を大量生産させる事⁵⁶⁾⁵⁷⁾や、食用としてではなくバイオエタノール用植物としての最大限効率化を引き出す研究や植物の代謝エネルギーを利用したエネルギー開発の可能性等が該当する。

<PO>

(1) 2030年：

- 各種技術の統合：既存素材をフル活用する事に加え、作業機械/ロボットによる栽培・生産プロセスの自動化など、植物工場栽培を前提とした品種の選抜等を行い、植物工場での作物栽培の効率を極限まで高める。

(2) 2040年：

- 各種技術の統合（アップグレード）：PS、PR で開発した新しい栽培技術をフル活用する事に加え、作業機械/ロボットによる栽培・生産プロセスの自動化など、植物工場栽培を前提とした品種の選抜等を行い、植物工場での作物栽培の効率を極限まで高める。

(3) 2050年：

- 各種技術の統合（アップグレード）：2040年に引き続き、各種最新技術を植物工場で最適化された形で活用し、植物工場での作物栽培の効率を極限まで高める。
- 立地多様化に資する技術開発：海上で運用可能な植物工場や、都市部での活用を想定したコンテナ式の植物工場、月面農場としての植物工場等を本格的に実用化する為の研究開発を行う。

③ マイルストーンの達成が社会にもたらす効果

(2030年・2040年・2050年のマイルストーンのそれぞれについて記述)

<2030年>

- PS で開発する分子センサーの小型化技術は、農業だけでなく、畜産、漁業、或いは医療の世界などにも応用可能であり、あらゆる生物の生体メカニズム解明に寄与する。
- PR の進展は、既存の方法に存在しない新しい科学技術であることから、新しい産業が生まれる可能性が高い。産学官のスムーズな連携が必要不可欠であることから、当マイルストーンを達成する事で新たな研究開発がスタートする。
- PO の進展は、上述 PR と同様、研究機関の連携を後押しし、また多くの産業を巻き込む形で其々の技術革新を駆動する。
- 植物栽培全体としては、栽培における選択肢が増加する。とりわけ、地球環境に配慮した栽培方法の選択肢が増え、一部実用化も進む事で、従来に比べ環境負荷の低い農業生

産が実現し、地球環境変動を食い止める事等に一部貢献する。

<2040年>

- 各種技術を比較的安価に導入する事が可能になることから、それらをフル活用出来る農家は、今迄以上に少人数で大規模な農地を管理出来る体制が整う事になり、採算性を飛躍的に向上出来る農家が出始める。その結果として農業周辺の産業構造は大きく変わる可能性がある（小売や飲食と対等な関係で契約出来る農家が増える、日本の農産物の輸出量が増加する等）
- PRによる植物処方という新市場の確立、POによる植物工場の本格的なマーケット化が進む事は、裾野産業である、試薬メーカー、資材メーカー、機械メーカー、の発展に寄与する。植物工場は再生エネルギーの充電基地としての利用可能性も提言されている事から、再生エネルギー活用をドライブする技術としても捉える事が出来る。
- PSによる高度なセンシング技術により、農作物以外の植物内情報がリアルタイムに計測可能となることから、昨今の地球環境変動に伴う災害発生の予知として、植物のセンシングデータを利用し始める。

<2050年>

日本発の PS、PR 技術を PO というパッケージにのせて、海外への積極的な輸出等が行われ、誰でも、いつでも、どこでも、何でも栽培出来る世の中が実現する。

- 農業が各国で必要十分行える環境が整備される。その事が、ベーシックフードの様な社会保証プログラムの設定等の検討を促進し、人々が人間らしい生活を送れる基盤となる。
- フードマイレージの劇的な削減、脱炭素社会の実現に寄与する。
- PRの技術革新により、品種改良の概念が再定義される。
- あらゆる化学品を植物体由来の生産に置き換える事や、エネルギーを植物由来に置き換える事で、多方面から脱炭素社会を加速させる。無理無駄のない人類の発展的な生活を実現する。

挑戦的研究開発	2030年	2040年	2050年
“Plant Speaking (PS)” 植物体内情報を正確に把握する <ul style="list-style-type: none"> 生体内情報 (温度、pH、遺伝子、代謝物) センシング (小型化、高度化、イメージング) 	<目標> ✓ 植物体内温度、pHの計測 <研究開発> ✓ 小型化 <波及効果> ✓ 農業以外の分野において生体内情報が取得可能となる	<目標> ✓ 植物内代謝産物、核酸情報の計測 <研究開発> ✓ 高度化 ✓ 耐久性 <波及効果> ✓ 高度なセンシング技術により災害を予知	<目標> ✓ 低コスト技術となり農業以外の分野で利用される <研究開発> ✓ 農作物生産以外への応用展開 <波及効果> ✓ 植物自身がエネルギーを生み出す
“Plant Recipes (PR)” 植物体内情報に基づいた処方箋 <ul style="list-style-type: none"> 次世代バイオ肥料・農業 (高次元処方箋：遺伝子/タンパク質処方) アルゴリズムの最適化 	<目標> ✓ 有用なバイオ肥料等の選別 <研究開発> ✓ 超分散・浸透性資材の開発 ✓ 最適アルゴリズム開発 <波及効果> ✓ 肥料・農業に対する新規評価法及び新たな産業創出	<目標> ✓ 遺伝子/タンパク質肥料・農業などの次世代肥料・農業が開発される <研究開発> ✓ 遺伝子・アミノ酸・ペプチド直接導入技術の開発 <波及効果> ✓ 農作物の圧倒的生産性向上	<目標> ✓ 最適な処方箋を適時に利用できる <研究開発> ✓ リアルタイムゲノム編集技術の開発 <波及効果> ✓ 品種改良の概念の置き換え
“Plant Optimization (PO)” 植物のポテンシャルを最大限に引き出す作物栽培 <ul style="list-style-type: none"> 可動型 (低コスト) エネルギー循環 (水、光、電気) 全自動化 環境制御 (水、光、温度、CO₂) 	<目標> ✓ 既存技術利用による栽培効率の向上 <研究開発> ✓ 既存技術の自動化 ✓ 新たな資材開発 (木材など) <波及効果> ✓ 農業以外の分野における技術革新	<目標> ✓ PS, PR技術利用による栽培効率の向上 <研究開発> ✓ PS, PR技術の自動化 ✓ 新たな資材の低コスト化 <波及効果> ✓ 農業以外の分野における技術革新	<目標> ✓ 全農作物にとって最適な栽培環境をどこでも再現できる <研究開発> ✓ 低コスト化 ✓ 月面、海上、空間農業用技術開発 <波及効果> ✓ 宇宙農業、海上農業、空間農業

図. 2030年・2040年・2050年のそれぞれにおける、達成すべき目標（マイルストーン）、マイルストーン達成に向けた研究開発、これによる波及効果

3. International cooperation

(目標達成に向けた国際連携の在り方)

- PS、PRは、あらゆる植物種、あらゆる栽培環境で共通に利用出来る技術になる。上述の通り日本は比較的幅広い植物種、栽培環境に対応する形で基礎研究を実行出来ると考えているが、それでも最終的なローカライズは、各国の研究機関や企業等と行う事で、スムーズな技術移転が出来ると考えている。また各国の研究機関や企業と基礎研究レベルで連携する事は、各国の規制に合わせた開発を行うという観点からも重要であると考え。
- POについては、現状各国、主要栽培作物種、栽培環境が異なる為、基本的には連携が難しく、各国、自国の主要栽培作物の研究を進める事になる。然し、日本は現在、歴史的な材料開発技術等を駆使して世界のトップを走る1カ国である事は間違いない。その強みを生かし、自国の栽培品種のみならず、より多くの作物種についてデータを解析、アルゴリズムを開発する事で、世界の作物栽培データバンクとしての機能を担う事も期待される。

4. Interdisciplinary cooperation

(目標達成に向けた分野・セクターを越えた連携の在り方)

①政治、法律的な連携

詳細は下述、III-5ELSLに記載するが、当目標達成においては政治的、法律的なバックアッ

プが欠かせない。それは、過去から現在に至るまで、農業という産業が国によって守られ、それと引き換えに様々な規制の上に成り立っている産業だからである。50年に向けて、農業は上述の通り、生産性の高い産業として生まれ変わる。従い、補助金等を削減する事と引き換えに各種規制緩和、或いは新技術を柔軟に導入する様な枠組みを整えたい。

②地域コミュニティの連携

①と重なるところもあるが、農業は地域コミュニティの規制も非常に受けやすい産業である⁵⁸⁾。例えば、農薬散布一つとっても、自由に散布できなかつたり、若手新規就農者が自由に土地を借りたり、購入する事が出来ない⁵⁹⁾。一方で、地域内で他の農業生産者が何をどれくらい、どの様に作って、誰に販売しているかなどの情報は全く共有が進んでおらず、その結果、採算の取れない農産物を生産し続けたり、本来シェアする事も可能な農機具等を個別保有する等非効率が生じている。従い、2050年に向けては、例えば以下の様な取り組みが必要と考えられる。

(1) 適切な独立性の確保：各農業生産者が自身の事業計画にあった栽培計画を遂行する事を容認する。また、限られた農地をフル活用しなければ、日本の食料自給率向上はあり得ない前提に立ち、新規就農者の参入を容認する。

(2) 経済合理に基づく情報共有体制の構築：ビジネスである為、各生産者が全ての情報を共有する事はあり得ないが、例えば共同出荷、農機のリーススキームの構築等を目的とした情報共有は今まで以上に活発に行われる体制構築が望ましい。また、従来より新しい農業資材が増える事から、当該情報についても経済活動の許す範囲で情報共有を推進する事で、当該地域において、何をいつ投与するのが最適か等の情報が集積され、中長期的な収益最大化につながる。

③教育機関との連携

遺伝子組み換えやゲノム編集等においてみられるように、人々の食品へ科学技術を導入する事の拒否反応は大きい⁶⁰⁾。確かに研究サイドが十分な情報説明を行えていないケースもあるが、多分に感情的に反対している人々も多いように見受けられる。食に限らず、新しい技術を社会に導入した時の忌避反応はつきものであるが、科学技術の進展なくして現在の経済発展はあり得ない。新技術が出てきた時、当該技術をどの様に分析し、どの様に需要すべきなのか、その在り方を人々に教えられるのは教育機関に他ならない。今後益々科学技術の進展スピードが加速すると考えられる中、教育のより早い段階から科学技術との正しい接し方を教育する様な場が必要である。

④産学連携の強化

(1) とりわけ農業分野においては、アカデミックで研究される植物生理学、栽培学の知見が産業界と結びつかず、農業界に普及していない。PS等が実用化される事を前提に、農業

は今まで以上にサイエンスの力を活用する余地が生まれる。従い、今後はアカデミックで獲得した知見を積極的に資材化するような取り組みが必要である。

(2) あらゆるデータビジネス全般に言える事であるが、データを使用する立場（本件の場合、主に農業生産者）からいえば、データは出来るだけ一か所に集め、それらを相互的に解析出来る体制が望ましい。その為には、各企業、産業がデータを独占する事なく互換性の高い状態で保管し、利用者が自由にデータを活用出来る体制構築が望まれる。

5. ELSI (Ethical, Legal, Social Issues)

(目標達成に向けて取り組むうえでの倫理・法的・社会的課題及びその解決策)

(1) 科学技術の積極的な活用体制の構築：

農業関連技術に関する規制緩和、及び普及後押し：他産業にも共通で挙げられる課題だが、規制緩和は必須である。ゲノム編集については、一部、届け出及び公表だけで上市出来る事が定められたが、議論開始から長い年月が経過してしまった。その事もあり、日本の研究スピードはあがらず、結果、関連特許等の多くは米国や中国に集中する事態に陥っている⁶³⁾。また農薬の登録プロセスも非常に複雑であり、某農薬メーカーOBの話によれば、最低5年は登録作業にかかる。今後も、新しい製剤開発等が進むと予想されるが、都度検討に長期間を要する様であれば、今般のスピード感あるボーダレスなビジネス環境下、日本企業は競争優位性を確保し続けるのは難しくなる。農業関連技術は、「食」ひいては「人命」に関わる問題として取り上げられる為、慎重な判断が必要になる場面も多いが、農林水産省等、行政機関には、可能な限りスピード感をもって各技術の使用是非を判断出来る明快な基準の策定を期待したい。

(2) 輸出入バランスの調整：

日本をはじめ、従来、自国の食料の多くを輸入に依存していた国々が自国で一定数量、食料を確保出来る様になった場合、現在農産物を輸出して多額の利益を得ている米国やロシア、ブラジル等とは何等かの調整が必要になる可能性が高い。一部の有識者の方からは、食糧貿易のバランスを崩す事について大きな懸念を頂いたが、以下観点から基本的に推進すべきであると考えます。

- 抑々、国家の機能として、国民への食料安定供給は、第一義的に解決すべき課題であるにも関わらず、その多くを輸入に頼っている国々は、早急にその構造を見直すべきである。
- 食料輸送はフードマイレージという食品を輸送する量と距離を掛け算した数値を指標として利用される。日本の様に大量の食料を輸入する国は、食料自給率の高い国々に比べて圧倒的に大きな値を示す(=環境負荷を与えている)。

(3) 一般消費者の科学技術に対する心理的ハードルの低減

消費者は、とりわけ口に入る食品に、人為的な何等かの操作が加えられることにネガティブであることが多い。然し、農薬がなければ今般の世界人口を養う食料生産は不可能であるし、ゲノム編集で起こす変異も、一部を除いて自然にも起こりうる変異（通常育種でも起こりうる変異）である。こうした事実に基づく公表を、政府、大学、企業そしてマスコミは一体となって正しく消費者に訴求しなければならない。またこうした考え方の姿勢は、小さい頃からの教育が非常に重要になると考えられる事から、各教育機関の果たす役割も大きいと考えられる。

IV. Conclusion（結論）

当チームは、植物（農作物）に対して、いつ、どこに、何を投与すると収量増が見込めるか、栄養価を増大させられるかという知見を有する。当知見を如何に世の中に出していくか、当初、そうした観点で検証を進めた。検証にあたり、議論が難航したのは、誰が誰の為に食料増産を行う必要があるのかという点だ。既に国際貿易は複雑な政治社会情勢の均衡の中において成立しており、いたずらな食糧増産はその均衡を崩す可能性がある。然しそれでも、未だ世界に十分食料はいきわたっておらず、2050年を見据えれば尚更のことである。ここに我々は、抑々国家が国家らしく、人類が人類らしくあるべき姿はどのようなものなのか、議論を重ねた。その結果、国家が国家である為には、自国の食料調達は、やはり自立的に行われるべきであろうという結論に達した。また個人レベルで見れば、マズローが五段階生理的欲求を唱えてから、50年余りが経過しており、いつまでも一次欲求、二次欲求が満たされていない社会はその在り方自体が根本的に間違えているのではないかという結論に達し、最終的なMS目標の設定に至った。

目標達成に向けて必要な科学技術という観点では、センシング、次世代資材、自動化の3つの切り口で、国内外で活躍する幅広い分野の有識者の方からヒアリングを行った。その結果、自動化の主領域である所謂スマート農業分野の技術革新は当初我々が想定していた以上に進んでおり、基本的には実用化に向けたコスト低減、UI/UXの改善が主戦場となっていると判断した。その一方で、現在の食料生産技術は、植物体外の情報に起因する科学技術開発に留まっており、真に必要だと考えられる植物体の情報解明が十分でない事もあり、植物体内の情報を考慮した農業資材等の技術革新のスピードが遅く、技術革新余地が大きいと判断した。そこで、上述PS (Plant speaking)、PR (Plant recipe)、PO (Plant optimization)の3分野への集中的な科学技術開発により抜本的に農産物生産の効率を上げる事と、既に実用化が進む省力化、自動化を目指すハード技術の掛け合わせにより、当目標が達成されると結論づけた。

また今回の調査、ヒアリングを通して、植物或いは農地、農業生産行為の中には、実に多くの要素が含まれており、当目標にアプローチする事は、単純に食の問題を解決するという事だけでなく、より広範な社会問題にアプローチできる事を確信した。中でもエネルギー問題の解決～脱炭素社会の実現には非常に大きな役割を担う事を再認識した。そういった意

味からも、今後も食農業界に限らず、幅広い業界、業種の方々とのディスカッションを行い、当目標の解決及びその波及効果として副次的に多くの社会問題解決に貢献していきたい。

V. References (参考文献)

- 1)国際連合広報センター：https://www.unic.or.jp/news_press/info/33789/
- 2) unicef：<https://www.unicef.or.jp/news/2020/0173.html>
- 3)United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service：<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/home>
- 4)農林水産省 農業生産活動に伴う環境影響について（2004年）：https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/kikaku/bukai/10/pdf/h160514_03_siryu.pdf
- 5)農林水産省企画部会 地球温暖化の進展による農業生産等への影響（2014年）：<https://jsite.mhlw.go.jp/fukushima-roudoukyoku/content/contents/000622407.pdf>
- 6)農林水産省 我が国における穀物等の輸入の現状（2020年）：https://www.maff.go.jp/j/saigai/n_coronavirus/pdf/yunyu.pdf
- 7)cook pad コロナ禍前後での家庭の料理に関する実態調査（2021年）：http://workey.jp/comparison?id=28&comparison_type=2
- 8)POCKET MARCHE：<https://www.pocket-marche.com/news/202010291000690/>
- 9)食べチョク：<https://www.tabechoku.com/about>
- 10)野村総合研究所（NRI） マズローの欲求階層説：<https://www.nri.com/jp/knowledge/glossary/lst/ma/maslow>
- 11)環境省脱炭素ポータル：https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/
- 12)Rakuten 楽天証券：<https://www.rakuten-sec.co.jp/web/special/worldcaprank/>
- 13)JETRO 世界の特許出願件数増加を中国が牽引（2020）：<https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/2020/aa7990dd4a98275f.html>
- 14) John Helliwell, et al., World Happiness Report（2021）：<https://worldhappiness.report/ed/2021/>
- 15)農林水産省 食料自給率及び食料自給力の検証（2019）：https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/kikaku/bukai/attach/pdf/kikaku_1112-11.pdf
- 16)農林水産省 諸外国の食料自給率等（2017年）：https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/zikyu_ritu/attach/pdf/013-2.pdf
- 17)IBM 環境を守る新しいプラスチックを作る一原料は植物バイオマス。使用後は用途に応じて分解速度をコントロール（2020）：<https://www.ibm.com/blogs/think/jp-ja/mugendai-11672-interview-biodegradable-biomass-plastics/>
- 18)大澤 良 植物育種の歴史とゲノム編集技術への期待（2020）：https://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/carta/tetuduki/attach/pdf/201225_sympto-17.pdf
- 19)JST 俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野（2021）：

file:///C:/Users/shiny/OneDrive/%E3%83%89%E3%82%AD%E3%83%A5%E3%83%A1%E3%83%B3%E3%83%88/Sacmots/Moonshot/JST%E3%83%AC%E3%83%9D%E3%83%BC%E3%83%88/CRDS-FY2020-FR-04_20200.pdf

20) JST 俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野 (2021) : [CRDS-FY2020-FR-03.pdf](https://www.jst.go.jp/CRDS-FY2020-FR-03.pdf) ([jst.go.jp](https://www.jst.go.jp))

21) S. L. Gilhespy et al., “First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition) : Modelevolution”, *Ecol. Model* 292 (2014) : 51-62. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2014.09.004

22) 矢野経済 種苗ビジネスの市場実態と将来展望 ～食糧生産の根幹を形作る世界と日本の種苗マーケット (2021年)

23) 藤巻 宏 “緑の革命 とその後” 熱帯農業 44(3):206-212 (2000) :

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsta1957/44/3/44_3_206/_pdf

24) 農林水産省生産局環境保全型農業対策室 環境保全を重視した農法への転換を促進するための施策のあり方 (1) (2008) :

https://www.maff.go.jp/j/study/kankyo_hozen/07/pdf/data3.pdf

25) 経済産業省 平成 28 年度 地域経済産業活性化対策調査、植物工場産業の新たな事業展開と社会的・経済的意義に関する調査事業 報告書 (2016) :

https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H28FY/000810.pdf

26) 巖佐 庸 数理生物学入門—生物社会のダイナミクスを探る 東京：共立出版 (1998) <https://ci.nii.ac.jp/ncid/BN05344975>

27) A. Satake et al., “Forecasting flowering phenology under climate warming by modelling the regulatory dynamics of flowering-time genes”, *Nat. Commun.* 4, no. 1 (2013) : 2303. doi : 10.1038/ncomms3303

28) M. Seki et al., “Adjustment of the Arabidopsis circadian oscillator by sugar signalling dictates the regulation of starch metabolism”, *Sci Rep* 7, no. 1 (2017) : 8305. doi 10.1038/s41598-017-08325-y

29) 矢野経済 2020 年版 植物工場の市場実態と 将来展望 (2021)

30) J. Sun et al., “FACE-ing the global change: Opportunities for improvement in photosynthetic radiation use efficiency and crop yield”, *Plant. Sci.* 177, no. 6 (2009) : 511-522. doi:10.1016/j.plantsci.2009.08.003

31) P. F. South et al., “Synthetic glycolate metabolism pathways stimulate crop growth and productivity in the field”, *Science* 363, no. 6422 (2019) : eaat9077. doi: 10.1126/science.aat9077

32) C. Muller et al., “The global gridded crop model intercomparison phase 1 simulation dataset”, *Scientific Data* 6, no. 1 (2019) : e50. doi: 10.1038/s41597-019-0023-8

33) < 2020 年版 > スマート農業の現状と将来展望～省力化・高品質生産を実現する農業IoT・精密農業・農業ロボットの方向性～ (2021)

- 34) FarmLogs : <https://farmlogs.com/>
- 35) Deere and company : <https://www.deere.com/%20deere.com>
- 36) Jane Lanhee Lee U.S. vertical farms are racing against the sun (2019)
<https://www.reuters.com/article/us-vertical-farms-growth-idUSKCN1U010H>
- 37) S. Rasmann et al., “Recruitment of entomopathogenic nematodes by insect-damaged maize roots”, *Nature* 434 (2005) : 732-737. doi: 10.1038.nature03451
- 38) D. J. Beerling et al., “Potential for large-scale CO2 removal via enhanced rock weathering with croplands”, *Nature* 583, no. 7815 (2020) : 242-248. doi: 10.1038/s41586-020-2448-9
- 39) 農林水産省 施設園芸をめぐる情勢 (2021) :
<https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/attach/pdf/index-39.pdf>
- 40) 三輪 泰史 オランダ農業の競争力強化戦略を踏まえた日本農業の活性化策 JR I レビュ Vol.5, No.15 (2014) :
<https://www.jri.co.jp/MediaLibrary/file/report/jrireview/pdf/7372.pdf>
- 41) 佐藤 光泰, 石井 佑基 2030 年のフード&アグリテック ―農と食の未来を変える世界の先進ビジネス 70 (2020)
- 42) 矢野経済 苗ビジネスの市場実態と将来展望 ～食糧生産の根幹を形作る世界と日本の種苗マーケット～ <2020 年版> (2021)
- 43) 矢野経済 農薬産業白書<2020 年版> (2021)
- 44) 内閣府 ムーンショット型研究開発制度 ムーンショット目標 5 :
<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/sub5.html>
- 45) 大阪大学 大学院情報科学研究科 三浦研究室 : <http://www-ise3.ist.osaka-u.ac.jp/%E7%A0%94%E7%A9%B6%E5%86%85%E5%AE%B9/%E7%B2%89%E6%9C%AB%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%94%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%82%BF/>
- 46) Renato Grillo et al., “Foliage adhesion and interactions with particulate delivery systems for plant nanobionics and intelligent agriculture” *nanotoday* vol.37 (2021) :
<https://doi.org/10.1016/j.nantod.2021.101078>
- 47) Pramod Mahajan et al., “Effect of Nano-ZnO Particle Suspension on Growth of Mung (Vigna radiata) and Gram (Cicer arietinum) Seedlings Using Plant Agar Method” *Journal of nanotechnology* (2011) : <https://www.hindawi.com/journals/jnt/2011/696535/>
- 48) Kang Wang et al., “Uptake, translocation and biotransformation of selenium nanoparticles in rice seedlings (Oryza sativa L.)” Wang et al. *J Nanobiotechnol* (2020) :
<https://jnanobiotechnology.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s12951-020-00659-6.pdf>
- 49) 一般社団法人日本施設園芸協会 (2016) :
<https://www.alic.go.jp/content/000127162.pdf> 52) 植物工場・農業ビジネス online 海上に浮かぶ未来の植物工場・食料生産基地 (2015) : <http://innoplex.org/archives/28360>

- 50)日栄インテック（株）植物工場：<https://www.nichieiintec.jp/plants/1820.html>
- 51)アグリウェーブ（株）：<http://agri-wave.com/agw/index.php>
- 52) Alesca Life Technologies Limited：<https://www.alescalife.com/ja/>
- 53) 植物工場・農業ビジネス online JAXA 宇宙探査ハブ、日本の植物工場を活用した「月面農場」に関する報告書を公開（2019）：<http://innoplex.org/archives/47735>
- 54) Lingyi Lan et al., Breathable Nanogenerators for an On-Plant Self-Powered Sustainable Agriculture System (2021) ACS Nano：<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.0c10817>
- 55) 環境省「プラスチック資源循環戦略」の策定について（2019）
<https://www.env.go.jp/press/106866.html>
- 56)内閣府 バイオ戦略（2020）：<https://www8.cao.go.jp/cstp/bio/index.html>
- 57)農林水産省 第3章 地域社会の維持や地域の安全・活性化を目指した「地域政策」
（ 2013 ）：
https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/nousin/bukai/h25_4/pdf/siryou1_2_3_1.pdf
- 58) 一般社団法人全国農業会議所全国新規就農相談センター新規参入者の経営資源の確保に関する調査結果（2019）：<https://www.be-farmer.jp/uploads/statistics/RyxYJETfbUww65nf3VzZ202003171448.pdf>
- 59)毎日新聞 ゲノム編集食品「食べたくない」4割 東大調査 今夏にも解禁（2021）：
<https://mainichi.jp/articles/20190605/k00/00m/040/193000c>
- 60)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（2014）：<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/RR/CRDS-FY2014-RR-06.pdf>