

戦略的創造研究推進事業  
—CREST(チーム型研究)—

研究領域「環境変動に対する植物の頑健  
性の解明と応用に向けた基盤技術の創  
出」

研究領域事後評価用資料

研究総括：田畑 哲之

2023年2月

## 目次

1. 研究領域の概要 .....	1
(1) 戦略目標 .....	1
(2) 研究領域 .....	5
(3) 研究総括 .....	5
(4) 採択研究課題・研究費.....	6
2. 研究総括のねらい.....	9
3. 研究課題の選考について.....	10
4. 領域アドバイザーについて.....	12
5. 研究領域のマネジメントについて.....	14
(1) 研究課題の進捗状況の把握と評価、それに基づく研究課題の指導.....	14
(2) 連携・協力の推進.....	16
(3) 研究費配分上の工夫.....	17
(4) 研究領域中間評価結果への対応.....	18
(5) その他マネジメントに関する特記事項.....	19
6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について.....	23
(1) 研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献.....	23
(2) 研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献.....	30
7. 総合所見 .....	35

## 1. 研究領域の概要

### (1) 戦略目標

#### ①戦略目標名

「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」

#### ②概要

気候変動等の環境変化に適応する農作物の開発・栽培技術の確立は、日本を含む世界的な食料問題の解決に不可欠である。これを実現するためには、我が国のモデル植物の研究で得られた基礎植物科学の知見を農作物の開発や栽培につなげることが重要であり、植物科学における生物的データを工学や情報科学等の異なる分野の技術も含めた新たな視点で収集・解析することで、育種開発や栽培技術の高度化につなげていくことが必要である。

そのため、本戦略目標では、植物科学で蓄積されたゲノム、トランスクリプトーム、メタボローム等のオミックスデータと、最先端の測定技術を活用して取得するフェノーム等の定量的データ、さらには数値化された環境要因等を情報科学的に統合解析することで、植物の生育・環境応答の予測モデルを構築し、さらに予測モデルをもとにした環境適応力が向上した植物体の作製と実環境における栽培実証を行い、「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」を構築する。

これにより、様々な環境条件下で生育可能な農作物の設計・作製及び栽培を可能とし、食料の安定確保の実現を目指す。

#### ③達成目標

本戦略目標では、植物体に関わる様々な要因と環境条件等の定量的データをもとに植物体の生育・環境応答を予測し、環境適応性が向上した植物の設計・作製及び栽培を可能とする「環境適応型植物設計システム」を構築することを目的とする。具体的には、以下の達成を目指す。

- ・ 植物の生育・生理状態・環境応答を詳細に把握可能な定量的計測技術の開発
- ・ 表現形質の変動に対応する対象植物ごとの生物的指標（バイオマーカー）の同定
- ・ 植物科学や工学等の異分野技術の融合を活用したバイオインフォマティクスによる「生育・環境応答予測モデル」の構築
- ・ 「生育・環境応答予測モデル」を基にした環境適応性を向上した植物体の設計・作製と実証

#### ④実現し得る将来の社会像

「達成目標」に記載した事項の達成を通じ、以下に挙げるような社会の実現に貢献する。

急激な気候変動により、現在の農作物の栽培好適地域が栽培不適地域となる懸念が高まる中、「生育・環境応答予測モデル」による予測をもとに開発されてきた作物・品種によって、現在の農作物では農耕不適地となる地域でも安定した食料生産量を確保できる社会。

我が国で開発された「生育・環境応答予測モデル」、作物改良技術、環境モニタリング技術、統合オミックス解析技術等を基盤とした「環境適応型植物設計システム」が総合的な農業技術パッケージとして海外へ技術移転され、国土の大半が現在の農作物では農耕不適地となっている国や気候変動の影響で収量が減少した国においても安定した農作物栽培が可能となり、人口増や環境悪化による食糧不足の解決に貢献している社会。

## ⑤具体的な研究例

以下に本戦略目標で推進する研究例を示す。

- ・ 植物の生育・生理状態・環境応答を詳細に把握可能な定量的計測技術の開発  
植物の表現型を定量的に把握可能なフェノーム解析技術の高度化を行う。また、植物の生理状態を精密に把握可能なセンシング技術及びイメージング技術の開発と農業現場展開に向けた高度化等を行う。
- ・ 表現形質の変動に対応する対象植物ごとの生物的指標（バイオマーカー）の同定  
表現形質の変動に対応するバイオマーカーの同定に関する研究を行う。また、野外及び制御環境など、様々な環境条件下における植物の表現形質とリンクした遺伝子発現及び代謝変動情報の蓄積に関する研究等を行う。
- ・ 植物科学や工学等の異分野技術の融合を活用したバイオインフォマティクスによる「植物の生育・環境応答予測モデル」の構築  
想定環境における植物の生育や開花等の表現形質の予測に係る研究を行う。また、環境ストレスに対する応答性の予測とストレス耐性を向上させる遺伝子及び関連形質の予測に係る研究等を行う。
- ・ 「生育・環境応答予測モデル」を基にした環境適応性を向上した植物体の設計・作製と実証  
「生育・環境応答予測モデル」を基に環境応答性を向上するように設計した植物体を作製するための植物体改変技術の開発と高度化を行う。また、「生育・環境応答予測モデル」を基に設計・作製された植物体の野外及び制御環境における栽培検証を行い、栽培期間における表現形質や生理状態変化のデータ化と「植物の生育・環境応答予測モデル」へのフィードバック等を行う。

## ⑥国内外の研究動向

(国内動向)

近年、日本の植物科学分野ではゲノム、トランスクリプトーム、代謝産物などのビッグデ

ータを基盤とした数理解析が進み、生態レベルでの個体差、気象変動なども取り込んだ発現解析などがトレンドとなっている（日本学術振興会 2013（平成 25）年度学術研究動向に関する調査研究 報告概要（生物学専門調査班））。一方で植物科学分野における日本の研究水準は極めて高く、イネゲノムプロジェクトの成果に見られるように、欧米に匹敵するものであるが、その応用としての技術開発水準、産業技術力の何れにおいても欧米に劣っていると報告されている（国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）ライフサイエンス分野 科学技術・研究開発の国際比較 2009 年版）。

#### （国外動向）

米国では Plant Genome Initiative のもとに、シロイヌナズナの遺伝子解析が進められてきたが、近年では実用作物に対する遺伝子解析研究も進んでいる。一方で、欧州ではシステムバイオロジーによる統合的な理解のある特定の系に基づいて行ってきたり、近年では Crop Performance and Improvement という形で実用作物を指向した研究開発を実施している（JST-CRDS ワークショップ報告書 2009「フィールドにおける植物の環境応答機構と育種技術」）。海外では DNA マーカー技術・遺伝子解析技術を独自開発できるバイオメジャーが中堅規模の種苗メーカーを吸収し、野菜の種苗開発へ進出する動きが目立つ。さらに次世代型シーケンサーの普及により、非モデル作物のゲノム解読が欧米及び中国で急速に進んでいる（JST-CRDS 研究開発の俯瞰報告書ライフサイエンス・臨床医学分野 2013 年版）。

### ⑦検討の経緯

「戦略的な基礎研究の在り方に関する検討会報告書」（2014（平成 26）年 6 月 27 日）に基づき、以下の通り検討を行った。

（サイエンスマップ及び科学研究費助成事業データベースを用いた国内外の研究動向に関する分析資料の作成）

「サイエンスマップ 2012&2010」（2014（平成 26）年 7 月 31 日科学技術・学術政策研究所（NISTEP））及び科学研究費助成事業データベースにおける情報を用いて、国内外の研究動向に関する分析資料を作成した。

（分析資料を用いた専門家へのアンケートの実施及び注目すべき研究動向の作成）

「JST-CRDS」や「NISTEP 科学技術動向研究センターの専門家ネットワークに参画している専門家」に対し、作成した分析資料を用いて今後注目すべき研究動向に関するアンケートを実施した。その後、アンケートの結果についての分析等を行い、注目すべき研究動向として「植物の生命現象解明を加速するインシリコ植物デザインシステムの開発」を特定した。

（ワークショップの開催及び戦略目標の作成）

注目すべき研究動向「植物の生命現象解明を加速するインシリコ植物デザインシステムの開発」に関する産学の有識者が一堂に会するワークショップを開催し、特に注目すべき国内外の動向、研究や技術開発の進展が社会的・経済的に与え得るインパクトやその結果実現し得る将来の社会像、研究期間中に達成すべき目標などについて議論を行い、ワークショップにおける議論等を踏まえ、戦略目標を作成した。

#### ⑧閣議決定文書等における関係記載

「第4期科学技術基本計画」(2011(平成23)年8月19日閣議決定)

##### 3. 2. (1) ii)

我が国の食料自給率の向上や食品の安全性向上、水の安定的確保に向けて、安全で高品質な食料や食品の生産、流通及び消費、更に食料や水の安定確保に関する研究開発を、遺伝子組換え生物(GMO)等の先端技術の活用や産業的な観点も取り入れつつ、推進する。

##### 3. 2. (5) i)

先端計測及び解析技術の発展につながるナノテクノロジーや光・量子科学技術、シミュレーションやe-サイエンス等の高度情報通信技術、数理科学、システム科学技術など、複数領域に横断的に活用することが可能な科学技術や融合領域の科学技術に関する研究開発を推進する。

「科学技術イノベーション総合戦略」(2014(平成26)年6月24日閣議決定)

##### 第2章第1節4. 3. (1) <1>

ターゲット市場や国際的な技術競争等を踏まえ、ゲノムや代謝産物等の解析、データベース構築等の情報基盤の整備、有用遺伝子の特定、DNAマーカーの開発、バイオインフォマティクスや工学技術、ゲノム編集技術の活用等において、基礎と実用化研究の双方向の連携を図りつつ、画期的な商品提供を実現する新たな育種技術の開発等を戦略的に推進する。

#### ⑨その他

本戦略目標においては、基礎植物科学以外の情報科学・工学・農学等の異分野の研究者が積極的に参入し、実質的に協働するための取り組みが不可欠である。特に、人材不足が指摘されるバイオインフォマティクス分野の人材の参画と養成が重要である。また、我が国におけるライフサイエンス分野の研究データ及び成果が効率的に活用されるためには、科学技術振興機構バイオサイエンスデータベースセンター(JST-NBDC)等を最大限に活用することが求められる。

実証を伴う課題設計のためには、農作物の実地的栽培環境と同等の条件で植物を栽培・管理する環境を備える機関の参画が期待される。また、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「次世代型農林水産業創造技術」等の出口戦略と有機的に連携し、本戦略目標の下で

行われる研究の成果が着実に展開されることが期待される。

(以上、文部科学省 HP より転載)

## (2) 研究領域

「環境変動に対する植物の頑健性の解明と応用に向けた基盤技術の創出」(2015 年度発足)

本研究領域では、フィールドにおける植物の環境応答機構の包括的な理解に基づき、実用植物を分子レベルから設計する技術の確立に資する研究を推進します。具体的には、環境変動にロバストに応答する植物の特性を定量的に把握し、生長や機能の人為的な制御を可能とする新技術の確立を目指します。また、出口戦略の観点から主として実用植物を対象とし、機能マーカーや DNA マーカーなどの生物指標の同定やそれらを活用した新しい植物の開発等を試みます。

具体的な研究開発は、分子レベルで得られた知見のフィールドまでの利用を念頭に置き、以下の 3 つを柱とします。

- 1) 植物の環境応答機構に関する高精度定量解析に関する研究
- 2) 植物の環境応答機構に関するモデルの構築
- 3) 遺伝子群の人為的再構築によって生じる植物の形質評価

研究領域の推進では、植物の多様な機能の定量的な把握、各種大規模データの解析やモデル化とその実証が求められることから、植物生理学に加え、育種学、生態学、統計学、情報科学、そして工学等の様々な分野の参画を促します。また、これらを含む研究領域の総合的な運営により異分野連携を進めていきます。さらに、戦略目標の達成に向けた成果を最大化すべく、さきがけ研究領域「フィールドにおける植物の生命現象の制御に向けた次世代基盤技術の創出」、および研究領域「情報科学との協働による革新的な農産物栽培手法を実現するための技術基盤の創出」とも連携した運営を行っていきます。

(CREST「植物頑健性」領域 HP より転載)

## (3) 研究総括

田畑 哲之 (公益財団法人かずさ DNA 研究所 所長・副理事長)

上記詳細は、以下 URL をご参照ください。

JST 公開資料「新規研究領域の事前評価」

<https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/index.html>

2015 (平成 27) 年度新規研究領域の事前評価

[https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/hyouka\\_h27.pdf](https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/hyouka_h27.pdf)

## (4) 採択研究課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究代表者	所属・役職 採択時 <sup>2</sup>	研究課題	研究費 <sup>1</sup>
2015 年度	工藤 洋	京都大学・生態学 研究センター・教授	フィールド・エピジェネティクス：環境変動下での頑健性の基盤	322 <sup>3,4</sup>
	永野 惇	龍谷大学・農学部・准教授 (龍谷大学・農学部・講師)	野外環境と超並列高度制御環境の統合モデリングによる頑健性限界の解明と応用	397 <sup>4</sup>
	三宅 親弘	神戸大学・大学院 農学研究科・教授 (神戸大学・大学院農学研究科・准教授)	活性酸素生成抑制システムの非破壊評価系の確立とフィールドへの応用～危機早期診断システムの構築～	428 <sup>4</sup>
	三宅 亮	東京大学・大学院 工学系研究科・教授	フィールド向け頑健計器と作物循環系流体回路モデルによる形質変化推定技術に関する研究	192
	柳澤 修一	東京大学・生物生産工学研究センター・教授 (東京大学・生物生産工学研究センター・准教授)	フィールド環境での栄養応答ネットワークによる生長制御モデルのプロトタイプ構築	288 <sup>4</sup>
2016 年度	明石 良	宮崎大学・農学部・教授	大規模画像データに基づくゲノムと環境の相互作用を考慮した成長予測モデルの構築	499
	岩田 洋佳	東京大学・大学院 農学生命科学研究科・准教授	植物環境応答のモデル化に基づく発展型ゲノミックセレクションシステムの開発	559 <sup>3</sup>
	清水 健太	横浜市立大学・木	倍数体マルチオミクス技術開発	292



	郎	原生物学研究所・客員教授	による環境頑健性付与モデルの構築	
	平山 隆志	岡山大学・資源植物科学研究所・教授	データ科学に基づく作物設計基盤技術の構築	422
2017 年度	宇賀 優作	農研機構・次世代作物開発研究センター・上級研究員	ROOTomics を利用した環境レジリエント作物の創出	437
	杉山 暁史	京都大学・生存圏研究所・准教授	根圏ケミカルワールドの解明と作物頑健性制御への応用	295
	中川 博視	農研機構・農業環境変動研究センター・ユニット長	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	246
			総研究費	4,376

<sup>1</sup>各研究課題とも研究期間の総額、進行中の課題は予定を含む(2022年12月現在)

<sup>2</sup>変更/異動のあった場合、下段に括弧つきで記載

<sup>3</sup>1年追加支援期間を含む

<sup>4</sup>コロナ延長期間を含む

本研究領域では、サイトビジット、領域会議、進捗報告会で把握した進捗状況によって、総括裁量経費を原資として予算の増減を行った。また、課題中間評価後には、課題中間評価の内容に基づいて精査・修正した最終目標に応じて、予算を大幅に増減(当初予算の50%~125%)した。さらに、新規技術の開発・導入や重点課題の加速を促すため、3種類の増額を行った(5-(3)参照)。

また、総括裁量経費による増額に加えて、CRESTの全体予算から研究加速等の目的で配賦される増額支援や、戦略的創造研究推進事業における「国際強化支援」制度を生かした国際共同研究促進、研究期間終了後の論文等の成果発表を支援する「終了課題支援」、さらに、JSTの「出産・子育て・介護支援制度」等を活用して、該当する研究課題に適時適切な増額支援を行ってきた。また、CRESTでは、課題事後評価結果に基づいて特に成果が期待される課題に対して、研究期間延長と当該延長期間に必要な研究費の追加支援を実施しており、該当する2チーム(工藤チーム、岩田チーム)に対して研究期間の1年追加と研究費(上限直接経費1000万円)の増額支援を行った。くわえて、戦略的創造研究推進事業では、大学閉鎖や自宅待機など新型コロナウイルス感染症による研究活動の停滞を踏まえ、2020年度終了課題のうち、研究進捗に影響を被った課題を対象に、最大半年間の研究期間延長が措置され

た。本研究領域においても、4チーム（工藤チーム、永野チーム、三宅 親弘チーム、柳澤チーム）に対して、2021年9月末まで6か月間の研究期間延長と、延長期間中の固定費補填の増額支援を行った。

※総括裁量経費：

領域総予算の中で10%程度を留保し、総括の裁量によって柔軟な執行が可能な予算としたもの。

※国際強化支援：

海外の研究機関や研究者等のポテンシャルを活用して、研究を加速・推進すること、また、研究成果を広く世界に発信することで、日本の戦略目標の達成に向けた取り組み状況の国際的認知度を高め、事業の推進に有益な海外研究者の協力を得やすい環境作りを行うことを目的として支援を行う制度。

※終了課題支援：

CREST 研究の期間終了後1年以内に研究代表者、主たる共同研究者によって発表される論文について、最大5件までの経費（論文投稿料、オープンアクセス費、英文校閲費）をJSTにおいて支援する制度。

※出産・子育て・介護支援制度：

JSTの研究費により雇用された研究員にライフイベントが発生した際に申請・審査を経て、月額25万円×支援月数を上限として支援する制度。

## 2. 研究総括のねらい

本戦略目標は、基礎から実学に至るさまざまな領域の植物研究者が社会に直接的に貢献できる分野としてかねてより着目されていたこともあり、分子生物学や生理学、各種オミックス技術や情報処理技術の急速な進歩を受けて本研究領域が設置されたのは、まさに時宜を得たものであった。しかし、一方でこれらオミックス技術は、感度や分析精度の点で植物内の分子動態を正確に把握するには未だ不十分であることも広く認識されていた。このような状況の下、本戦略目標設定時点での各種要素技術を高度化し、ゲノム生物学、植物分子遺伝学、統計学、情報学、農学、工学の各々がもつ技術や発想の協働によって、植物設計や栽培管理のための実用技術につながる知識を蓄積するとともに新規技術や技術シーズを構築することが、本研究領域に課せられた使命であると考えている。

具体的には、以下のような達成目標を設定し、本研究領域の推進にあたった。

- (1) 本研究領域で開発される高度オミックス解析技術や表現型解析技術により、これまで観察することができなかった植物の内的状態や外形的な表現型を高精度に把握する
- (2) 植物の環境適応機構に関するデータ解析やモデル化について、植物科学と情報科学の分野が協働して新しい手法を提案する
- (3) フィールドにおける実用植物の環境適応機構に関する新たな原理を提示し、植物科学の知見を新品種育成や農業現場における課題解決に貢献する
- (4) 本研究領域で開発された高精度オミックス解析技術、表現型解析技術や統計解析・モデル化手法を組み合わせることによって、品種開発に向けて環境要素を含めた新たな植物設計技術の開発を目指す
- (5) 本研究領域から複数のトップサイエンティストが輩出され、フェノミクスやモデリング研究における日本の国際競争力が強化される

これらの目標を達成するにあたっては、課題各々がもつ技術や発想の延長に留まることなく、課題内外の他分野の新たなパートナーと積極的に交流し、その相乗作用によって新規性、先進性に富んだ研究成果や新技術を生み出すこと、さらに優れた学術成果に終始せず本研究開発の延長上に社会実装の具体像を強く意識することを常に求めてきた。また、本研究領域で実施予定の技術開発のうち、各種オミックス解析技術の高度化、大規模データの統計解析法やモデリング手法の開発は、植物バイオテクや農業のみならず、バイオサイエンス一般、物質生産や創薬等のバイオインダストリーにも適用が可能なことから、他分野にも幅広い波及効果をもつ高度な技術開発を目指した。

### 3. 研究課題の選考について

本研究領域は、フィールドにおける植物の環境応答機構を分子レベルで包括的に理解し、これに基づいて環境変動への頑健性に優れた植物を設計する技術の確立に資する研究を推進することを目的としている。主として実用植物を対象として、環境変動にロバストに応答する植物の特性を定量的に把握し、生長や機能の人為的な制御を可能とする新技術の確立を目指しており、各種オミックス解析を含むゲノム生物学、植物分子遺伝学、統計学、情報学、農学、工学など幅広い学問分野や技術が対象となり得る。

募集にあたっては、以下の3本の柱を立てて、本研究領域の目標を達成するための道筋を明示した。

- (1) 植物の環境応答機構に関する高精度定量解析に関する研究
- (2) 植物の環境応答機構に関するモデルの構築
- (3) 遺伝子群の人為的再構築によって生じる植物の形質評価

また、先端的オミックス解析法、高精度大規模形質評価法、大規模オミックスデータと表現型データの連関解析技術の新規開発や独自性が高い改良、新たなモデリング技術の開発、ナス科、アブラナ科、マメ科やイネ科等の実用植物に重点を置いた提案や、幅広い植物種に適用可能な汎用性が高いモデル構築を含む挑戦的な提案を求めていることを周知した。その結果、2015年度から2017年度の3回の募集で、各56件、50件、39件、計145件の応募があった。

選考は特に以下の4点に留意しつつ実施した。

- (1) 「新規植物創出のための基盤技術の開発」に資する高度な基礎・基盤研究であること
- (2) 研究期間内あるいは研究期間後の実用技術化への意欲が読み取れること
- (3) データ収集法・解析法に新規性があること
- (4) 斬新な発想に基づく先端性が高い研究開発、世界に誇れるような革新的な技術開発や異分野融合による新たな研究領域など、挑戦性が高いこと

各年度に、本研究領域の10名(2017年度は9名)の領域アドバイザーと12名の外部専門家による書面審査及びヒアリングを行い、最終的に以下の12課題を採択した(採択率: 8.3%)。

本戦略目標は、急激な気象環境の変動によって人類が直面しつつある存続の危機に際して植物研究の重要性をアピールできる格好のテーマであることは言うまでもない。しかしながら、該当する研究開発の範囲（対象植物、形質、目的等）や内容（メカニズムの解明、要素技術の高度化や新規開発、機器開発等）が大きいことが懸念材料であった。選考にあたっては、目標設定の意図を汲んでできるだけ広めのポートフォリオを構築するよう努めたが、その一方で課題間の関連が薄く分散した感否めない。運営にあたっては、共通に利用する技術的側面を軸に、課題間の相互作用や連携を促してきた。

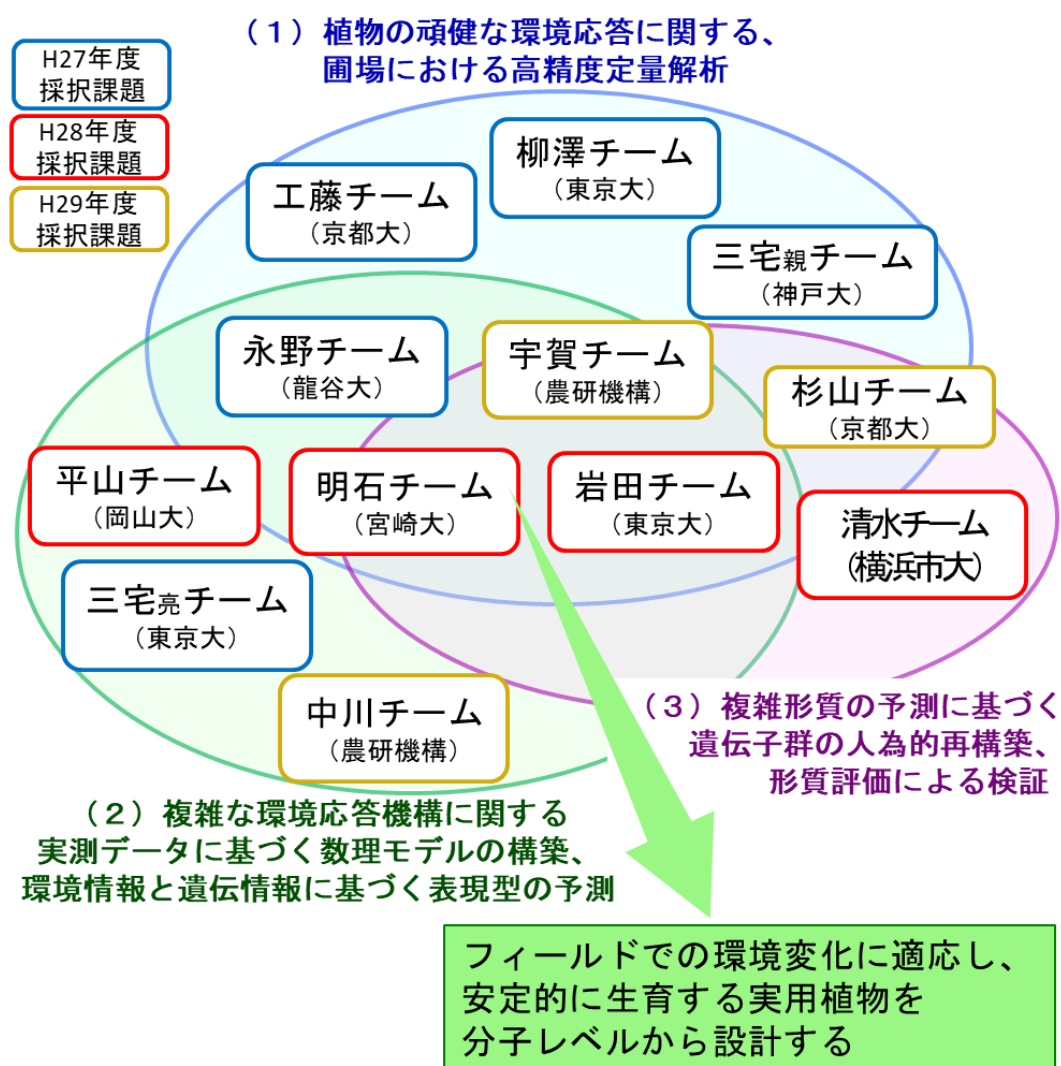


図1. 領域ポートフォリオ

#### 4. 領域アドバイザーについて

本研究領域では、フィールドで栽培される実用植物を対象に、最先端の各種オミックス解析や予測モデリング等様々な技術を使用する事が求められる。そこで、領域アドバイザーの選定にあたっては、植物分子生物学、育種学に加えて、ゲノム生物学、マルチオミックス解析、予測モデリング、画像解析、情報処理、データベース構築の分野で高い専門性を有していることを条件とした。また、技術面での先進性を考慮して、植物分野にこだわることなくヒトゲノミクス分野の専門家を多数加えた。さらに、社会実装につながる技術開発の観点から、バイオテクノロジー、育種関連の民間企業に所属する研究者を複数含めた。

領域アドバイザー名 (専門分野)	着任時の所属 <sup>1</sup>	役職	任期
芦莉 基行 (分子生物学、植物生理学)	名古屋大学生物機能開発利用研究センター	教授	2015年7月～現在
伊藤 隆司 (分子生物学、エピゲノミクス)	九州大学大学院医学研究院	教授	2015年8月～現在
太田 啓之 (分子生物学、生化学)	東京工業大学生命理工学院	教授	2015年8月～現在
金子 俊一 (画像情報処理)	北海道大学大学院情報科学研究科	教授 (名誉教授)	2015年8月～現在
木立 尚孝 (バイオインフォマティクス)	東京大学大学院新領域創成科学研究科	准教授	2015年8月～現在
酒井 隆子 (育種、社会実装)	みかど協和株式会社 (ヴィルモランみかど株式会社)	代表取締役副社長 (外部顧問)	2015年8月～現在
佐藤 和広 (育種、ゲノム)	岡山大学資源植物科学研究所	教授	2015年8月～現在
高木 利久 (情報システム学)	富山国際大学	学長	2015年8月～現在
田中 良和 (分子生物学、生化学)	サントリーグローバルイノベーションセンター株式会社	上席研究員	2015年8月～現在

福岡 浩之 (育種、フィールド)	タキイ種苗株式会社研 究農場	副農場長	2015年8月～現在
磯部 祥子 (ゲノム育種)	公益財団法人かずさ DNA 研究所	研究室長	2015年8月～2017年3 月

<sup>1</sup> 変更/異動のあった場合、下段に括弧つき記載

## 5. 研究領域のマネジメントについて

### (1) 研究課題の進捗状況の把握と評価、それに基づく研究課題の指導

#### ① 担当アドバイザーの選定

本研究領域の特徴は、関連する研究分野や技術が広範にわたることである。そのため、10名の領域アドバイザーの中から課題毎に専門分野が特に近い2～3名を担当領域アドバイザーとして選定し、担当課題の進捗状況の把握や指導・助言をお願いした（表1）。

表1. 担当領域アドバイザーリスト

採択年度	研究代表者名	担当アドバイザー名
2015年度	工藤 洋	伊藤 AD、太田 AD
	永野 惇	木立 AD、田中 AD、芦荻 AD
	三宅 親弘	酒井 AD、田中 AD
	三宅 亮	高木 AD、福岡 AD
2016年度	柳澤 修一	佐藤 AD、太田 AD、芦荻 AD
	清水 健太郎	伊藤 AD、佐藤 AD
	平山 隆志	木立 AD、福岡 AD
	岩田 洋佳	木立 AD、酒井 AD
2017年度	明石 良	佐藤 AD
	杉山 暁史	伊藤 AD、福岡 AD
	宇賀 優作	福岡 AD、芦荻 AD
	中川 博視	木立 AD、佐藤 AD、高木 AD

#### ② 進捗報告会、サイトビジット、領域会議の実施

進捗状況の確認は、主として進捗報告会、サイトビジット、領域会議の機会に行ってきた（表2）。進捗報告会は、総括と領域アドバイザー出席のもと、各課題1～2時間程度の進捗報告を受け非公開で密度が高い議論を行うための機会であり、2016年から毎年5～6月頃に開催した。サイトビジットは、特に研究期間前半（各課題2年目と3年目）の課題を中心に秋季に実施し、総括と複数の領域アドバイザーが研究現場の状況を確認するとともに、進捗状況について議論を行った。これらの機会に領域アドバイザーから出されたコメントは、取りまとめて研究代表者にフィードバックした。領域会議は、課題担当者間の情報交換を主たる目的として毎年秋季～冬季に実施した。全ての口頭発表とポスター発表に対して領域アドバイザーが評価を行い、その結果は研究代表者に送付するとともに、次年度の研究費追加配賦決定のための参考資料とした。



表 2. 研究課題のマネジメントに関する会議等

年度	月	実施内容
2015	11-12月	1期生（5課題）総括面談
	1月	第1回領域会議（市ヶ谷）
2016	通年	1期生サイトビジット（5課題）
	9-10月	2期生（4課題）総括面談
	9月	三宅親 T 進捗報告会
	1月	第2回領域会議（秋葉原）
2017	5-6月	1期生（工藤 T、三宅親 T、柳澤 T）進捗報告会
	5月	さきがけ合同領域会議（本研究領域の若手研究者参加）
	通年	2期生サイトビジット（4課題）
	9月	3期生（3課題）総括面談
	1月	第3回領域会議（中野）
2018	6月	1,2期生進捗報告会
2018	通年	3期生サイトビジット（3課題）
	1月	第4回領域会議（福岡）
	6月	1,2期生進捗報告会
2019	6月	進捗報告会
	通年	2,3期生サイトビジット（7課題）
	12月	第5回領域会議（両国）
2020	5-6月	進捗報告会
	12月	第6回領域会議（オンライン）
2021	6月	進捗報告会
	12月	第7回領域会議（オンライン）
2022	5-6月	進捗報告会
	9月	第8回領域会議（富山・オンライン）

### ③課題中間・事後評価

2022年12月現在、全研究課題の課題中間・事後評価を終えている。課題中間・事後評価時にも、評価結果及びコメント以外に、アドバイザーからのコメントを中心に纏めた総括フィードバックを行っている。

課題中間評価時には、報告内容や評価に基づいて今後の研究計画や最終目標を精査・修正するようにアドバイスを行い、修正後の研究計画に応じて予算を大幅に増減（当初予算の

50%~125%) した。課題中間評価後の進捗状況については、上記のとおり進捗報告会や領域会議の機会において確認を行った。

また、2015 年採択課題と 2016 年度採択課題については、最終年度に得られた成果の論文化・特許出願のためのデータ取得・試験・試作・プロトタイプ制作やソフトウェア開発などを行うために、1 年追加支援の申請を募集した。事後評価会での研究代表者の申請内容をもとに、推薦課題を選定し、2 チーム（工藤チーム、岩田チーム）に対して研究期間の 1 年追加と研究費（上限直接経費 1000 万円）の増額支援を行った。

## (2) 連携・協力の推進

新たな技術や発想を導入するために領域内外の研究者との連携が望ましい場合は、進捗状況確認の際のコメントに記載し、積極的に協働を促してきた。また、領域会議には、同じ戦略目標の下に立ち上がった 2 つのさきがけ（「フィールド植物制御」および「情報協働栽培」）の課題担当者を複数招聘し、情報の共有に努めた。さらに、総括裁量経費の使途として、CREST 領域内やさきがけ領域の課題と連携した提案を採択する「課題間連携促進費」を設け、連携・協力を促進した。この結果、43 件（領域内の連携は 1 件とカウント）の課題間・領域間連携が行われるとともに、さきがけ研究者のうち、表 3 のとおり 3 名がさきがけ終了後に CREST の主たる共同研究者として加わった。

課題間・領域間連携の代表的な事例は以下のとおり。

### 【代表的な事例】

#### ・永野チーム

本研究領域の岩田・杉山チームへの RNA-seq 解析支援、平山・宇賀チームへの RNA-seq 解析プロトコルの提供などを行った。

#### ・三宅親チーム-杉山チーム

ROS マーカーが植物根圏環境の健全さを反映することを仮説として取り組んでおり、生育不良をもたらす環境で、まさしく ROS マーカー増大が認められている。微生物の感染について、根を掘り返さなくとも ROS マーカー他で確認できるようになったことは、新しい知見であった。

#### ・明石チーム-岩田チーム-さきがけ大倉研究者-野下研究者

様々な栽培環境でも複数の小型ドローンを温室内で自動飛行させるためのドローン運用データの収集と、収集したデータを 4D パノラマデータ群として管理するシステムの構築を行った。東大・田無農場の温室で実際にトマトを栽培し、合計 61 回の飛行を行い、4D パノラマデータ群として管理するための三次元点群構築、点群上の関心領域の指定、2 次元画像上の対応領域の抜き出すコアアルゴリズムを開発し、パイプライン化した。

・岩田チーム-中川チーム

中川チームにおいてイネを対象に開発を進めたハイブリッド作物生育モデルをダイズに適用するため、遺伝子型情報からダイズの開花期の予測が可能となる遺伝子ベースダイズ開花期予測モデルの開発を進めた。

・岩田チーム-宇賀チーム

宇賀チームにおいて開発・改良を行った単子葉植物向け根系非破壊可視化技術を双子葉植物で利用できるように、ダイズをモデルに新たな計測プラットフォームの開発を試みた。岩田チームと連携することで、岩田チームがこれまでにダイズ根系の画像解析で培ったノウハウやデータを生かし、短期間に双子葉作物向けの根系非破壊可視化技術の構築に至った。

・宇賀チーム-杉山チーム

2022年11月に国際ワークショップを宇賀チーム、杉山チームが共同して実施。海外からの登壇者も招聘し、国内外へのアピール、情報交換を行った。根圏に関するこのような大規模な国際ワークショップ開催は今までになかったと考える。

表 3. 本領域に主たる共同研究者として参画したさきがけ研究者

さきがけ研究者名	さきがけ領域名	参画した CREST チーム名
福田 弘和	情報協働栽培	工藤チーム
野田口 理孝	情報協働栽培	永野チーム
野下 浩司	情報協働栽培	明石チーム

### (3) 研究費配分上の工夫

研究期間前半（課題中間評価前）については、サイトビジット、領域会議、進捗報告会での議論や領域アドバイザーの意見を参考にして、各課題の計画予算に対して±10%の範囲内で増減を行った。また、研究期間後半（中間評価の翌年以降）は、課題中間評価の内容に基づいて精査・修正した最終目標に応じて予算を大幅に増減（当初予算の 50%~125%）した。さらに、新規技術の開発・導入や分野間連携、重点課題の加速を促すため、総括裁量経費を原資として以下の3種類の増額を行った。

#### ①技術開発促進費

本研究領域で重視する先端性、新規性に優れた高精度オミックス解析・表現型評価技術や統計解析・モデリング技術等の開発に取り組む提案に対して研究費を追加配賦した。提案を募集し領域アドバイザーによる審査を経て決定した（上限 500 万円/件）。

表 4. 技術開発促進費の採択件数と配賦金額

年度	2017	2018	2019	2020	2021	2022	合計
件数	4	6	4	3	5	2	24
直接経費総計（千円）	17,050	27,600	15,500	14,000	15,000	5,500	94,650

## ②課題間連携促進費

本研究領域内や連携する二つのさきがけ領域プログラム（「フィールド植物制御」および「情報協働栽培」）の研究者との共同研究に取り組む提案に対して研究費を追加配賦した。提案を募集し領域アドバイザーによる審査を経て決定した。

表 5. 課題間連携促進費の採択件数と配賦金額

年度	2019	2020	2021	2022	合計
件数	4	6	5	1	16
（内訳）CREST-CREST	2	3	3	1	9
CREST-さ情報栽培	2	3	1	0	6
CREST-さフィールド植物	0	0	1	0	1
直接経費総計（千円）	45,000	65,000	48,000	11,300	169,300

## ③研究開発加速費

領域目標達成のため特に加速が期待される少数の課題に対して、研究総括の判断で研究費を追加配賦した。

表 6. 研究開発加速費の採択件数と配賦金額

年度	2019	2020	合計
件数	2	3	5
直接経費総計（千円）	45,000	34,500	79,500

## (4) 研究領域中間評価結果への対応

領域中間評価において主に、①研究期間の前半に蓄積した研究成果が、今後、速やかに発表されることを期待する、②研究後半は、実用や応用に向けた基盤技術のマイルストーンを示すなど道筋を描くことを期待する、③個々の研究成果を有機的に連携した領域全体のビジョンを示し、一般の方も理解できるような目に見える形での社会へのアピールも大切である、とするコメントをいただいた。

①については、CREST 実施中の研究成果が適切かつ効果的な方法で発表されるよう、研究課題への働きかけを行い、各研究課題の事後評価終了までに 339 報（国内 15 報、国際 324

報)の論文が発表された。さらに、研究チームへのアンケートでは、研究期間終了後(課題事後評価後)からの発表論文は45報、現在投稿済み・審査中の論文は20報、現在執筆中・投稿準備中の論文は51報となっており、現在までに合計で384報の論文が発表されている(2022年12月16日現在)。領域中間評価時点では115報(国内1報、国際114報)であった。引き続き、終了課題支援(CREST研究の期間終了後1年以内に研究代表者、主たる共同研究者によって発表される論文について、最大5件までの経費(論文投稿料、オープンアクセス費、英文校閲費)をJSTにおいて支援する制度)等の活用を促し、研究成果の公開に努めたい。②については、それぞれの研究チームでの検討に加え、領域最終年度には外部機関に委託し、成果を社会実装につなげるためのコンサルティングを実施した(5.(5)②にて後述)。これにより、第三者的な視点で研究成果や技術を整理するとともに、実用化までの課題や、競合技術・製品の有無や比較優位性等についても検討を行った。③については、2020年度より公開の成果報告会を開催し、広く社会へのアピールを行った(5.(5)③にて後述)。また、領域終了後にも本研究領域の成果を参照できるように、ウェブページを作成中である。各研究課題のイメージイラストや成果概要をまとめた動画を掲載予定であり、一般の方もご覧いただけるような内容とした。

## (5) その他マネジメントに関する特記事項

### ① 先端技術の共有

本研究領域では、各種オミックス解析や予測モデリングなど幅広い技術や手法を駆使することが求められており、最先端レベルの技術や手法に関する情報収集や共有が領域全体の成果を大きく左右する。そこで、トランスクリプトーム解析、画像データ収集・解析、予測モデリング手法等、個々の技術や手法に特化した「オミックス技術ワークショップ」を領域前半に年2回程度開催した(表7)。専門分野が近い研究代表者や総括が世話人となり、関連する課題から実務担当者による状況報告、領域アドバイザーや領域外の専門家からの情報提供をもとに、大学院学生を含む担当者間で先端技術情報の共有や議論が行われた。

表7. 先端技術の共有に関する会議等

年度	月	実施内容
2016	11月	農業気象勉強会
2016	1月	オミックス技術ワークショップ(画像取得・解析情報交換)
2017	7月	日豪フェノミックスワークショップ
2017	9月	オミックス技術ワークショップ(オミックス解析技術)
2017	9月	オミックス技術ワークショップ(統計解析技術)
2017	12月	国際フェノタイピングワークショップ

2018	11月	オミックス技術ワークショップ（統計解析法）
2018	1月	オミックス技術ワークショップ（画像データ収集・解析技術）
2018	3月	オミックス技術ワークショップ（環境計測技術）
2019	11月	オミックス技術ワークショップ（モデリング手法）
2019	11月	オミックス技術ワークショップ（画像データ解析法技術）

## ② 研究成果の社会実装にむけたコンサルティングの実施

本研究領域は、学術的な新しい知見の創出と実用技術開発の両方を目標にしてきた。実用技術開発の評価にあたっては、社会実装やその可能性は重要なファクターであるが、CRESTの場合、研究実施期間中に社会実装まで至るものはあまり多くない。そのため、実用化までの課題やマイルストーン、競合技術・製品の有無や比較優位性を整理することが重要と考えた。また、研究総括、領域アドバイザーによる定期的なアドバイスは進捗報告会、領域会議等の機会を通して行ってきたが、広く新しい技術の可能性についても探索したいことから、外部機関に委託し、8つの研究課題（学術的な成果に重きを置いているチームについては除外）に対して、表8のフローのように研究成果のコンサルティングを実施した。研究代表者からの調査票による情報収集、インタビューを行い、それらの結果をもとに社会実装に近い成果を洗い出し、実用化までの課題を整理し、社会実装に向けた今後の進め方を提案していただいた。コンサルティングの結果は、研究課題にフィードバックし、研究期間終了後の成果展開のために活用いただくこととした。

表8. コンサルティングのフロー

(1) 事前調査（助成金、論文、特許等の調査）
(2) 研究代表者からの調査票による情報収集
(3) 研究代表者へのインタビュー調査
(4) 社会実装に近い成果の洗い出し
(5) 実用化までの課題の整理 ・競合品・競合技術の調査 ・本研究課題の成果が社会実装された時の波及効果
(6) 社会実装に向けた今後の進め方の提案
(7) 研究チームへのフィードバック

## ③ 成果展開に向けた取り組み

各研究課題において創出された成果の広報やアカデミア、産業界への展開を図るため、2020年度よりオンラインで公開成果報告会を実施した（表9）。2020年度と2021年度は、技術的な成果の産業界への展開を主な目的としたもの、サイエンティフィックな成果の発

表を主な目的としたものという 2 つのテーマを設定し、それぞれ別日に報告会を開催した（図 2）。2022 年度には、最終年度ということもあり、広く本研究領域の成果を発信できるよう、すべての研究課題の成果を半日程度で聴講できるようなプログラムとした。成果報告会には、研究機関のみならず、農業・食品関係の企業、農業試験場等からも多数参加いただいた。また、領域終了後にも本研究領域の成果を参照できるよう、各研究課題の成果をまとめたウェブページを作成している。

表 9. 開催した成果報告会

年度	月	実施内容	実施形式	参加者
2020	12 月	第 1 回成果報告会 環境変動に対する頑健性のメカニズム解明に向けて	オンライン	230 名
2020	12 月	第 2 回成果報告会 栽培管理や育種に役立つオリジナル計測機器のご紹介	オンライン	179 名
2021	12 月	第 3 回成果報告会 栽培管理や育種に役立つオリジナル計測機器のご紹介	オンライン	214 名
2021	12 月	第 4 回成果報告会 環境変動に対する頑健性のメカニズム解明に向けて	オンライン	198 名
2022	12 月	第 5 回（最終）成果報告会 「植物頑健性」領域の研究開発 全成果まるわかり！	オンライン	177 名

CREST「植物頑健性」領域 第3回成果報告会  
「栽培管理や育種に役立つオリジナル計測技術のご紹介」

日時：令和3年12月9日（木）13:00～17:20  
開催形式：Zoom Webinar  
参加費：無料（事前登録制）  
参加申込：参加登録フォームよりお申し込みください  
[https://zoom.us/join/zoom/register/WN\\_pFCL5zYHQK9pRhNTMDYQQ](https://zoom.us/join/zoom/register/WN_pFCL5zYHQK9pRhNTMDYQQ)

CREST研究領域「環境変動に対する植物の頑健性の解明と応用に向けた基盤技術の創出」（平成27年度発足）は、フィールドにおける植物の環境応答機構を包括的に理解し、実用植物を分子レベルから設計する技術を開発することを目標としています。本成果報告会では、フィールドのさまざまな環境条件、植物細胞内の分子動態や植物の外的形質を精密に測定するため本領域で開発された各種オリジナル計測機器をご紹介します。

**プログラム**

13:00～13:10	開会の挨拶① 田畑 哲之 研究総括、かずさDNA研究所 開会の挨拶② 保田 睦子 JST戦略研究推進部
13:10～13:50	生理マーカー（P700+）を中心とした、植物酸化障害診断法の確立と植物栄養診断への展開 三宅 親弘 神戸大学大学院農学研究科
13:50～14:30	並列wifi制御インキュベータと迅速光合成測定装置、およびその活用例 永野 惇 能合大学/慶應義塾大学
14:30～15:10	根圏メタボローム解析による先端的農業用資材の探索 杉山 暁史 京都大学生存圏研究所
15:10～15:15	休憩5分
15:15～15:55	フィールド植物の高精度フェノタイプングシステム 岩田 洋佳 東京大学 大学院農学生命科学研究科
15:55～16:35	フィールド及び温室で活用できる多検体フェノタイプングシステムと環境計測技術 磯部 祥子 かずさDNA研究所 先端研究開発部 七ヶ 高也 かずさDNA研究所 先端研究開発部 明石 良 宮崎大学
16:35～17:15	X線CTを用いた作物根系の「見える化」技術の開発 宇賀 優作 農研機構 作物研究部門 作物デザイン開発グループ 七ヶ 高也 かずさDNA研究所 先端研究開発部
17:15～17:20	閉会の挨拶 田畑 哲之 研究総括、かずさDNA研究所

問い合わせ： 科学技術振興機構 戦略研究推進部 CREST「植物頑健性」領域担当  
Mail: crest-robust[at]jst.go.jp # [at]を@に置き換えてください

CREST「植物頑健性」領域 第4回成果報告会  
「環境変動に対する頑健性のメカニズム解明に向けて」

日時：令和3年12月10日（金）10:00～16:30  
開催形式：Zoom Webinar  
参加費：無料（事前登録制）  
参加申込：参加登録フォームよりお申し込みください  
[https://zoom.us/join/zoom/register/WN\\_Go54t5ZvQ6uatcuQ9YM65Q](https://zoom.us/join/zoom/register/WN_Go54t5ZvQ6uatcuQ9YM65Q)

CREST研究領域「環境変動に対する植物の頑健性の解明と応用に向けた基盤技術の創出」（平成27年度発足）は、フィールドにおける植物の環境応答機構を包括的に理解し、実用植物を分子レベルから設計する技術を開発することを目標としています。本成果報告会では、フィールドで得られた大規模オミックスデータの統合的解析から明らかになった環境変動に対する応答のメカニズムや大規模オミックスデータに基づく植物設計技術の開発について最新の成果をご紹介します。

**プログラム**

10:00～10:10	開会の挨拶① 田畑 哲之 研究総括、かずさDNA研究所 開会の挨拶② 保田 睦子 JST戦略研究推進部
10:10～10:50	フィールド・エビジェネティクス：環境変動下での頑健性の基盤 工藤 洋 京都大学生態学研究所
10:50～11:30	植物環境応答のモデル化に基づく発展型ゲノミックセレクションシステムの開発 岩田 洋佳 東京大学大学院農学生命科学研究科
11:30～12:10	データ科学に基づく作物設計基盤技術の構築 平山 隆志 岡山大学資源植物科学研究所
12:10～13:00	昼食休憩50分
13:00～13:40	大規模画像データに基づく成長予測モデルの構築とその応用 明石 良 宮崎大学 中谷 明弘 東京大学 大学院 新領域創成科学研究科
13:40～14:20	根圏ケミカルによる微生物圏形成能を活用した作物頑健性制御 杉山 暁史 京都大学生存圏研究所
14:20～15:00	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 中川 博視 農研機構 農業環境研究部門
15:00～15:05	休憩5分
15:05～15:45	倍數体マルチオミクス技術開発による環境頑健性付与とモデルの構築 清水健太郎 横浜市立大学 原生物学研究所・チューリッヒ大学理学部
15:45～16:25	ROOTomicsを利用した環境レジリエント・キー遺伝子の探索 川勝 泰二 農研機構 生物機能利用研究部門 作物環境適応機構グループ 宇賀 優作 農研機構 作物研究部門 作物デザイン開発グループ
16:25～16:30	閉会の挨拶 田畑 哲之 研究総括、かずさDNA研究所

問い合わせ： 科学技術振興機構 戦略研究推進部 CREST「植物頑健性」領域担当  
Mail: crest-robust[at]jst.go.jp # [at]を@に置き換えてください

図2. 第3回、第4回 成果報告会のフライヤー

#### ④新たな研究コミュニティの育成

本研究領域は、植物生理学、育種学、生態学、統計学、情報科学、工学等の様々な分野の専門家が参画し、異分野連携により新たな研究分野の生成を目指していることが特徴である。この新たな研究コミュニティを維持発展させるため、本研究領域と密に連携する二つのさきがけ研究領域「フィールドにおける植物の生命現象の制御に向けた次世代基盤技術の創出」および「情報科学との協働による革新的な農産物栽培手法を実現するための技術基盤の創出」のメンバーとともに、東京大学二宮正士博士を会長とする「超分野植物科学研究会」を2020年に設立した。メーリングリストの運営と研究集会を通じて、異分野研究者間の情報交換と研究コミュニティの育成に努めている。



## 6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について

本研究領域では、戦略目標の達成に向けて、研究開発期間の前半にオミックス解析技術の高度化や大規模データの取得条件の検討を行い、その後複数年にわたるデータ収集を経て、後半にデータに基づく知識の抽出や予測モデルの構築、実用に耐える技術の開発を行う戦略をとってきた。領域中間評価時点では、多くのチームでオミックスデータの収集が継続し、蓄積したデータの解析方法についてさまざまな試行が行われている段階にあった。そのため、論文の発表数がいささか少ない傾向にあったが、現時点での論文発表は384報(2022年12月16日現在)行っており、学術的に優れた研究成果が多数得られている。また、科学技術イノベーション創出への貢献という点では、新規技術や新たな知見を対象としてこれまでに18件の国内・国際特許出願がなされており、また、複数の各種計測機器は商品化に近い段階にある。

各研究課題の成果の詳細や技術の開発状況については、科学技術イノベーション創出への貢献という観点から、優れた研究や技術開発の成果について、その具体的な内容や今後の見通し等を以下に記載する。

### (1) 研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献

#### ① 工藤チーム

本研究課題では、野生植物が複雑な自然環境下で頑健な応答を達成するために持っているエピジェネティックな機構を明らかにし、それを植物の設計・改良をはじめとする様々な技術に利用することを目指した。

本研究期間中、シロイヌナズナ属ハクサンハタザオの自然集団を対象として、エピゲノム・トランスクリプトームデータを2週間に1回のペースで2年間にわたって取得した。その結果、動植物を通じて世界で初めてとなる全遺伝子の発現と全ゲノムをカバーする8種のエピゲノム修飾の季節動態データが得られた。エピゲノム動態は、遺伝子間領域を含むゲノム全体が対象となることや、抗体を利用とした免疫沈降が必要となるために野外で動態を捕捉することは困難であることから、本成果は他に類を見ないデータセットであり、関連分野に大きなインパクトを与えた。

また、これらのデータを解析することにより、植物の防御機構のうち特定の生合成経路の一群の遺伝子に、冬の間、抑制ヒストン修飾が蓄積することが明らかとなった。植物体が傷つけられると様々な防御機構が発動するが、その一部は食害昆虫の活性が低い冬の間シャットダウンされていることを示唆する結果であった。

さらに、1年追加支援では、自然条件下でのトランスクリプトームの季節時系列解析により、植物の温度応答の鍵となる候補遺伝子を特定することができた。また、ある特定の生理活性物質を植物に与えると、植物がより高い温度にあると誤認識すること、植物の温度応答

遺伝子の発現が変化することを明らかにした。

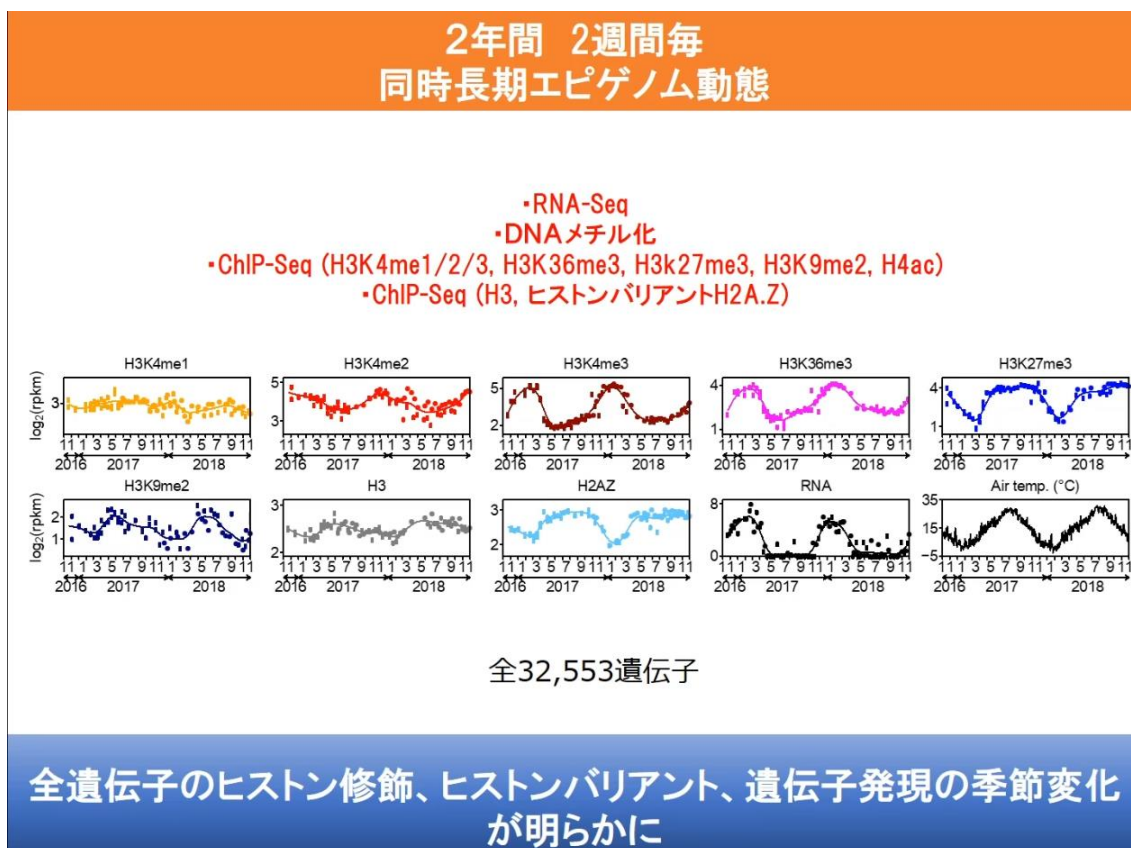


図3. 工藤チーム成果概要

## ②永野チーム

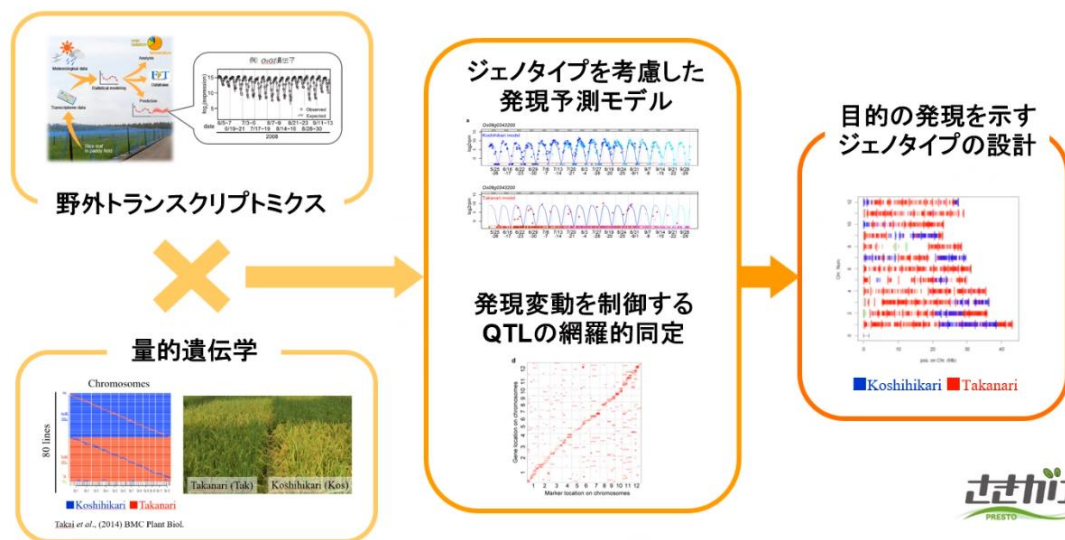
本研究課題は、トランスクリプトーム解析を効率化するためのさまざまな技術開発を通して、野外環境と人工制御環境における遺伝子発現の統合的理解とトランスクリプトームを介した形質予測のための基盤技術の確立を目指して実施された。

本研究で開発された Lasy-Seq 法は、バルクのトータル RNA に対してサンプルインデックスを持つプライマーで逆転写を行うことによって、容易に多検体の RNA-Seq ライブラリの作製を可能とする。このようなプレプール型プロトコルでは、PCR 中のテンプレートスイッチによってリードが由来するサンプルの誤判定率が高まることが指摘されているが、Lasy-Seq 法のプロトコルではポストプール型のライブラリと同等の誤判定率であることが確認された。また、NeSAGE (Negative-Binomial Sparse Additive Generative Model) 法では、RNA-Seq データに代表される次世代シーケンシングによるオミックスデータがもつ負の二項分布に従う誤差、スパース性などの統計的性質を織り込んだモデルを導入することによって、少ないリード数のデータからでも精度よく真のシグナルの値（例えば RNA-Seq の場合は発現量）を推定することが可能となった。

これらの手法の開発によって、数千検体のトランスクリプトームデータを安価、ルーティ

ンに取得することが可能になり、領域内外でのトランスクリプトームデータの取得に大きく貢献した。

## 量的遺伝学と組み合わせることで 野外トランスクリプトームの設計を可能にした



Kashima et al., (2021) PCPなど

図4. 永野チーム成果概要

### ③柳澤チーム

本研究課題では、植物が異なる栄養環境に頑健に適応して適切に栄養素を確保している仕組みを解明し、窒素栄養とリン栄養の獲得・利用能力の向上をもたらす遺伝的要素を明らかにすることを目指した。

まず、イネを材料として、植物の主要な窒素源である硝酸イオンがシグナル伝達物質として働き、最終的に様々な硝酸応答型遺伝子の発現を引き起こすことを明らかにした。そして、窒素栄養とリン栄養の獲得が互いに影響し合う分子メカニズムを解明するとともに、窒素飢餓応答を担う鍵転写因子群を複数同定することに成功し、注目度の高い論文を発表した。

また、シロイヌナズナの野生系統間におけるリン酸吸収能力の違いが赤色光受容体（フィトクロム B）遺伝子の多型に由来するケースを見出し、赤色光シグナル伝達がリン栄養獲得の制御に関わっていることを明らかにした。赤色光シグナルがフィトクロム B を介して 3 つの転写因子（PIF4、PIF5 および HY5）の活性を調節して、リン酸輸送体遺伝子の発現を促進すること、これによりリン酸イオンの吸収量が增大することを発見し、栄養条件以外の環境要因が栄養獲得を制御している分子メカニズムを解明した。これにより、植物工場など人

工的な環境で作物生産の向上を図るうえで、赤色光の光量の調節を行うことの重要性を示した。

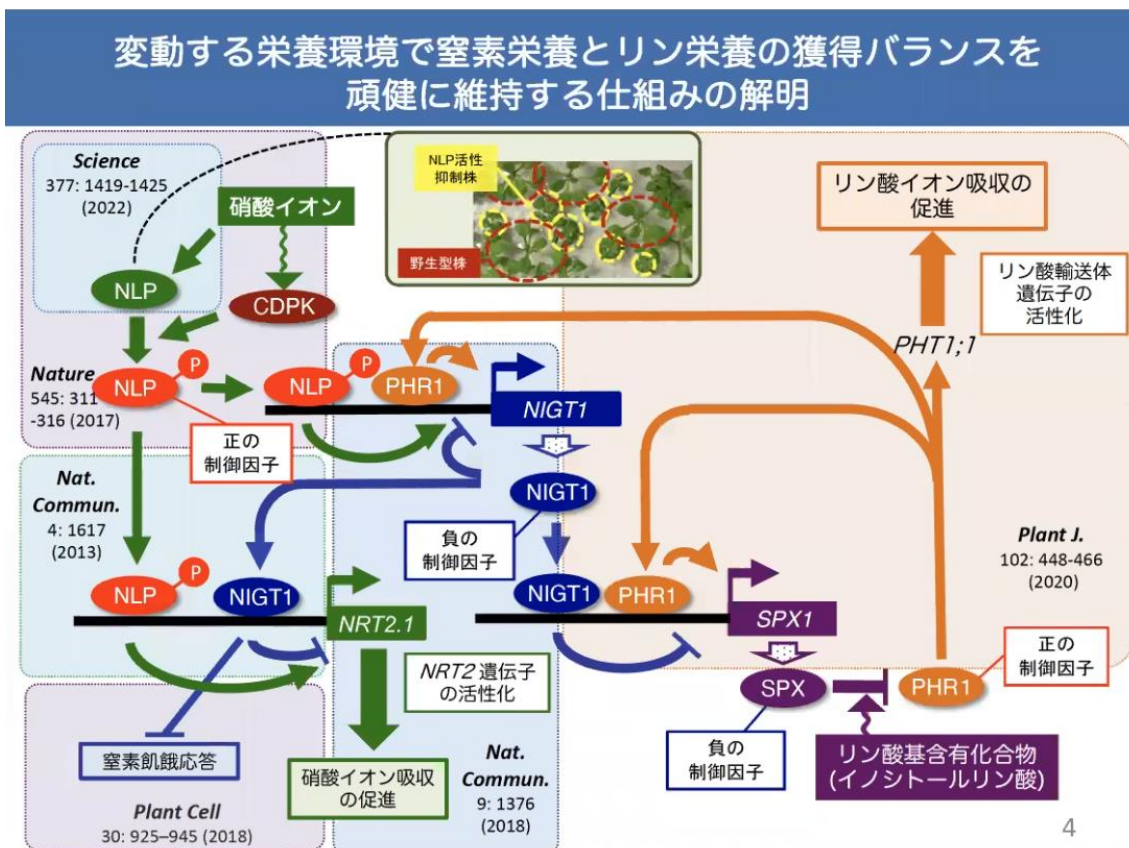


図 5. 柳澤チーム成果概要

#### ④岩田チーム

本研究課題は、ダイズの乾燥耐性向上を目標に、ダイズ植物体の干ばつ応答をゲノムと環境データから予測するモデルの開発と、それに基づく育種システムの構築を目指して実施された。本課題で実施される技術開発は育種プロセスの改良につながることから、種苗会社等の育種現場からの注目度が高く社会実装が期待される。

独自に開発した干ばつ再現圃場で収集された各種オミックス情報を用いて、干ばつ条件に応答して生長するダイズについてその生長パターンをゲノムや環境のデータから予測するための様々なモデル構築手法を構築した。そのうち生長と老化を考慮したモデルは、近似ベイズ計算法を用いることによって、初期生育のデータから後期の生育を精度よく予測することができた。さらに、ゲノムと環境データをもとに日々の生長を予測するモデルによって、成長段階によって干ばつへの応答パターンが異なることを明らかにした。

また、イオノーム情報をもとにした機械学習によって、ダイズの生長に関わる形質（開花期、バイオマス）の予測が可能であることを見出し、ダイズ生長の時系列予測にも適用できることを示した。さらに、ゲノム情報にイオノーム情報を加えることによって、ゲノム情報



のみのモデルよりも高い精度でバイオマスを予測することに成功した。イオノームは、土壌水分などの環境条件の違いを反映した情報をもつことが示唆された。

## ゲノムと環境から将来の成長を予測する

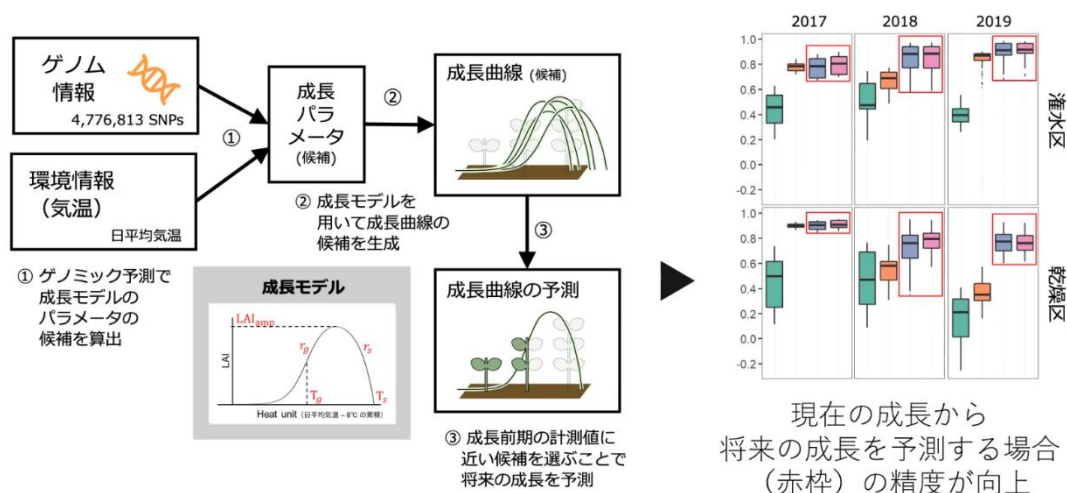


図 6. 岩田チーム成果概要

### ⑤清水チーム

本研究課題は、環境変動に対する頑健性が高いとされる高次倍数性植物に対するマルチオミックス解析技術を開発し、これを用いて頑健性の分子基盤を解明するとともに、頑健性付与モデルを構築してその妥当性を証明することを目的として実施された。

パンコムギは世界三大穀物の一つであるが、ゲノムが 6 倍体であるため育種の根幹であるゲノム多型解析が非常に遅れていた。本研究課題はパンコムギ 10+ゲノムプロジェクトに参画し、日本のパンコムギ品種農林 61 号のゲノムを解読して国際的共同研究によりデータ解析を行った。その結果、日本品種農林 61 号の配列は、他の欧米品種と大きく異なっており、日本の風土に適応した結果として出穂、品質や病原適応性などに関連した多数の既知・未知の機能変異が見いだされた。例えば、フロリゲン遺伝子 *FT1/VRN3* 同祖遺伝子に、機能欠損やコピー数変異の新規対立遺伝子が検出されたことは、異質倍数体の育種戦略として、コピー数増減によって形質を量的に制御できる可能性を示唆している。

本課題では、これまで高次倍数性植物では困難であった高精度なゲノム多型・エピゲノム解析技術や RNA-Seq 解析技術が開発された。実用植物の多くが高次倍数性であることから、本成果は実用植物を対象とする基礎研究や育種研究に大きく貢献することが期待される。

## 10 突然変異頑健性：出穂調節遺伝子の新規変異発見

2018年 日本の気候変動の影響への適応計画

” 暖冬による出穂時期の早期化・減収への対処が急務“

出穂調節の遺伝子（フロリゲン）*FT1*の新規変異を農林61号で発見

Dゲノム

一塩基欠失による遺伝子機能欠損

Chinese Spring T T C G G G C A G G A G G T G A T G T G C T A C G A G A G C C C T C G T C C G A C C A T G G G G A T C C A T C G C T T C  
 Norin 61 T T C G G G C A G G A G G T G A T G T G C T A C G A G A G C C C T C G T C C G A C C A T G G G G A T C C A T C G C T T C

Bゲノム

コピー数変異  
(2コピー)

倍数体で遺伝子数が多い

よりきめ細やかな  
出穂時期調整の可能性

Waklowski et al. Nature 2020, Shimizu et al. PCP 2021

温暖化による減収の回避に向けた育種利用

図7. 清水チーム成果概要

### ⑥平山チーム

本研究課題は、圃場作物の成長データから抽出した「状態形質」を利用して農業形質予測モデルを構築するとともに、本モデルに基づいて、将来国内外で予想される任意の環境において最適な生産性を担保するゲノム構成をデザインすることにより、植物に環境頑健性を付与する技術を提供することを目指した。

オオムギ出穂期の早晩を研究対象に、まず異なる環境での成長過程の画像データおよび実測による外観データ、葉身のマルチオミックス解析による生理状態データ、茎頂メリステムの形態データおよびトランスクリプトームデータを、ライフコースにわたり経時的に収集した。そして、これら大規模データの比較により、農業形質に影響する成長過程の変遷を「状態形質」と定義し、それに関わる遺伝要因や環境要因を抽出することで、これまでになかった遺伝要因や遺伝要因と環境要因の相互作用の探索方法が提案され、その有効性が実証された。この方法によって、集団構造などが原因でこれまでGWASが適用できなかった遺伝要因の探索も可能となった。本課題で開発された時系列データに基づく状態変遷のトラジェクトリ抽出方法やそれを利用した分析方法は、基礎生物学および農学、さらには医学分野への展開も可能と考えられる。

# 状態形質抽出方法：仮想時間軸の導入

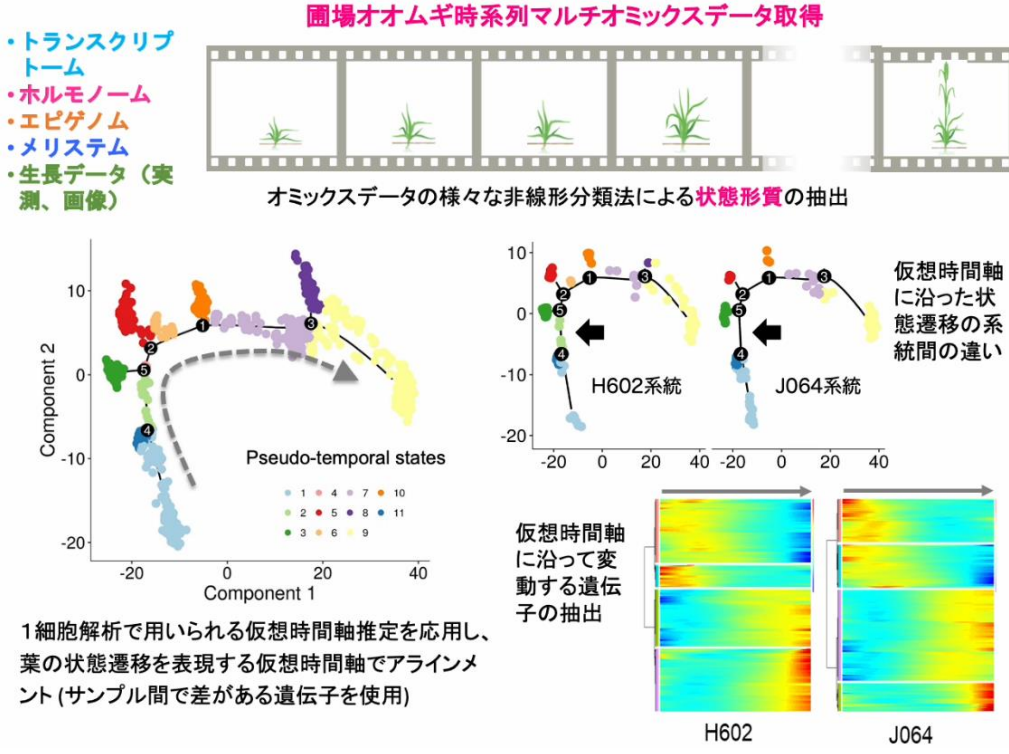


図 8. 平山チーム成果概要

## ⑦宇賀チーム

本研究課題は、X線CT装置を用いた根系非破壊計測技術を開発し、これを用いた植物全体の表現型解析、および遺伝子発現解析から取得したオミックスデータから、干ばつや高温の環境ストレスに頑健な根系モデルやストレスバイオマーカーを開発することを目的として実施された。

根系非破壊計測技術の開発については、計測条件や画像データ処理技術の最適化が順調に進んだ結果、計測技術全体として世界最先端のレベルに達することができた。そして、この技術を用いた根系非破壊3次元画像解析を行うことにより、地表面に根量が多いイネ系統は干ばつに対し可塑的に深根化するため、地上部の生育が抑制されるということを明らかにした。従来の破壊的観察から、干ばつに対して深根性が有利であると言われてきたが、本成果から干ばつに弱い植物は、浅根から深根への急激な可塑的変化をしないような根系分布への改良が重要であることがわかった。これらの知見は干ばつに頑健な作物をデザインするうえで貴重な情報となる。

## どのような根が干ばつに適しているのか、解明する

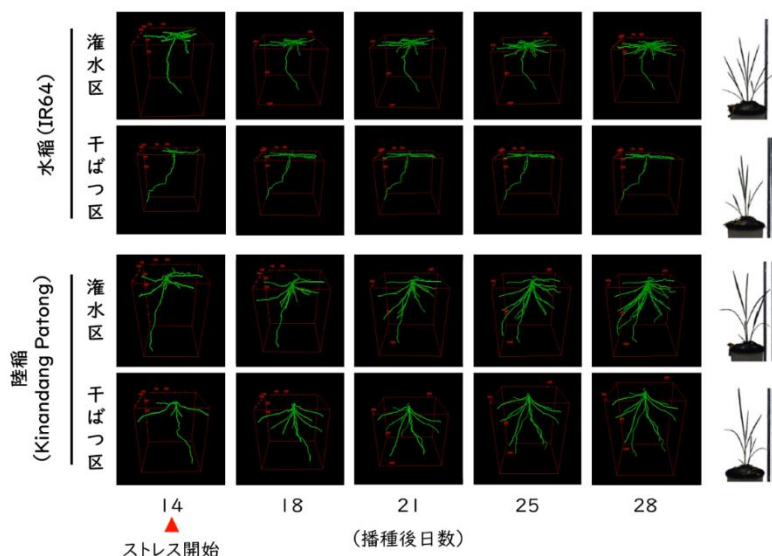


図 9. 宇賀チーム成果概要

## (2) 研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

### ①三宅 親弘チーム

本研究課題では、環境変動に伴うストレスで発生する活性酸素（ROS）による酸化障害の危機に一早く応答する生理マーカーとして、光合成能の低下に伴い誘導される光化学系 I（PSI）反応中心クロロフィル P700 の酸化型 P700+（ROS マーカーと命名）を提案し、その作動原理を学術的に解明してきた。

得られた知見をもとに、ROS マーカーと光合成活性を同時に計測する酸素濃度測定を搭載した評価機器を新たに開発した。これは小型でバッテリー駆動、無線通信によるタブレット端末アプリから操作可能で、屋外計測が容易であることから、本機器を用いることで圃場等の屋外現場でストレスの早期診断が可能になることが期待され、種苗会社等の圃場で性能試験が行われている。加えて、葉緑体チラコイド膜の PSI の中で ROS を内在的に生成させることができるパルス照射装置の試作器を開発した。この試作器は、野外で一度に 6 個体の作物の生葉に ROS を人為的に発生させることができるため、今後 ROS 耐性の診断や品種間差の探索などに利用できる新たなツールになることが期待される。



### 開発①ROS Filed Master (プロトタイプ3)

#### 特徴

- ROSの抑制能力Y(ND) の計測
- 植物の光合成能力計測  
呼吸による飽和CO<sub>2</sub>下  
酸素発生速度V(O<sub>2</sub>)計測による最大光合成能評価
- 環境ストレス評価診断

#### ■ デバイス仕様

- ・ Android 専用appによるBluetooth無線制御
- ・ 自動計測
- ・ 筐体サイズ 約W10×D19.5×H12.5cm
- ・ バッテリー駆動 (連続約7時間)

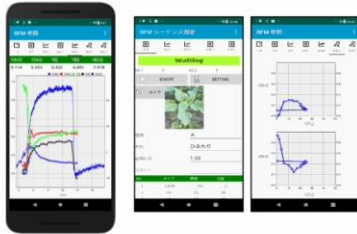
#### 特許出願

- ・ PCT JP/2021/41741
- ・ PCT JP/2021/41742

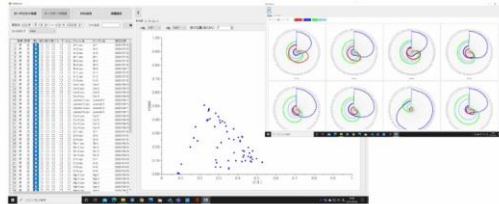


圃場測定の様子

#### ■ ユーザーインターフェース



#### ■ クラウドデータ分析ソフトウェア



### 開発②パルス照射機器 : ROS Generator

6サンプルを一度に照射させ、ROS発生が可能



図 10. 三宅 親弘チーム成果概要

## ②岩田チーム

本研究課題では、予測モデルの開発や育種システムの構築に加えて、屋外圃場で植物の生長や状態を高効率・高精度に計測するために、各種リモートセンシング技術の開発が行われた。

ドローンを用いた圃場のリモートセンシングでは、統計モデルや機械学習モデルを組合せることで、植物の生長を効率的に計測する技術を開発した。具体的には、統計モデルや機械学習モデルを用いて垂直方向の誤差を補正する手法、深層学習を用いて群落の色と3次元構造の情報をもとにバイオマスを推定する方法、統計モデルを用いて群落のマルチスペクトル情報をもとに将来のバイオマスを予測する方法などが挙げられる。これらは、育種プロセスの効率化のみならず作物の栽培管理の効率化にも利用できることが期待される。

また、様々な波長帯を計測できるようフィルタの交換が可能な4眼マルチスペクトルカメラを開発した。そして、このマルチスペクトルカメラを光量子センサーと組合せてドローンに搭載することにより、屋外の圃場でも安定してマルチスペクトル解析を行うことが可

能となり、その結果、栄養成長の早期にその後の生育を予測することに成功した。これらの技術は、直ちに育種現場での利用が検討できることから、育種に携わる公的研究機関や種苗会社等からの問い合わせも多い。

## リモートセンシングで植物を測る

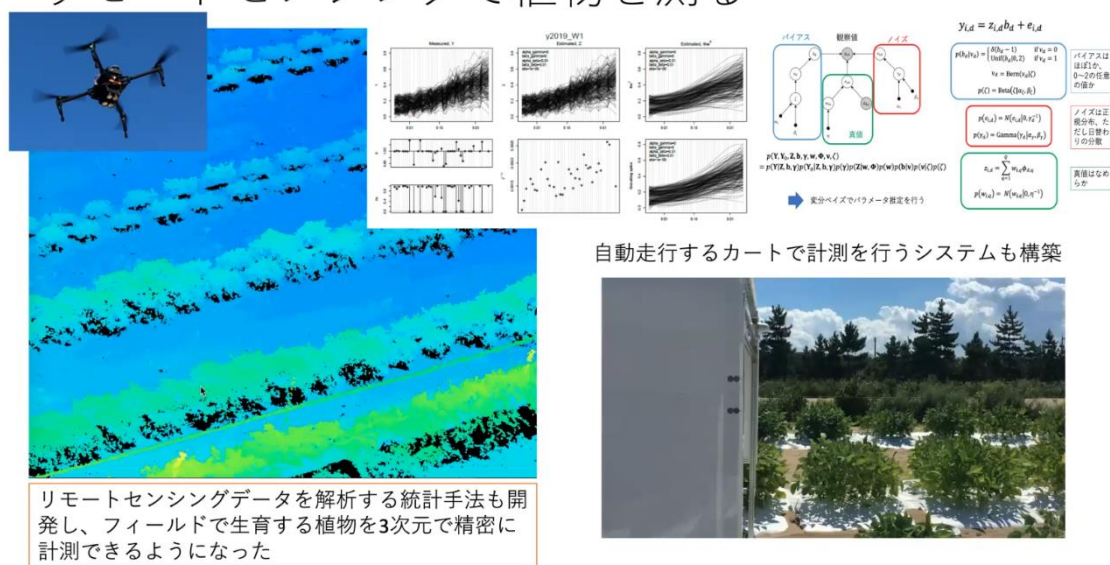


図 11. 岩田チーム成果概要

### ③明石チーム

本研究課題では、経時的に撮影した画像データから植物の成長変化を抽出し、全ゲノム配列データと関連付けることで、遺伝子型 (G) 値、表現型 (P) 値および環境要因 (E) 値間のすべての相互作用に基づくモデルを構築し、形質値を予測する一連のシステム開発を行うことを目的とした。特に、環境要因が植物の成長に及ぼす影響をより精密に計測するため、植物の成長過程における形質値と環境値を「植物個体ごと」かつ「経時的に」取得するための技術開発に力点を置き、温室内栽培ポット自動搬送装置や自動撮影システム、小型ドローンの室内自動制御システムや植物を取り巻く局所環境を評価する環境センサーの開発を行った。

ドローンについては、撮影ドローンを 2 つに分けて異なる役割を持たせて室内を撮影する手法について特許出願を行い、企業と農業従事者への普及を実現するための協議を実施中である。また、開発した装置一式を宮崎大学の大型温室に整備し、今後は植物フェノタイピング拠点として、機器のデモンストレーションや依頼に応じた受託計測を実施する。また、開発した技術のカスタマイズや普及を行う組織として、公益財団法人かずさ DNA 研究所内に「Kazusa Lab」を立ち上げた。さらに、日本植物フェノタイピングネットワーク (JPPN) の立ち上げや講習会の開催を行うなどして、植物フェノタイピングのコミュニティの醸成に貢献した。

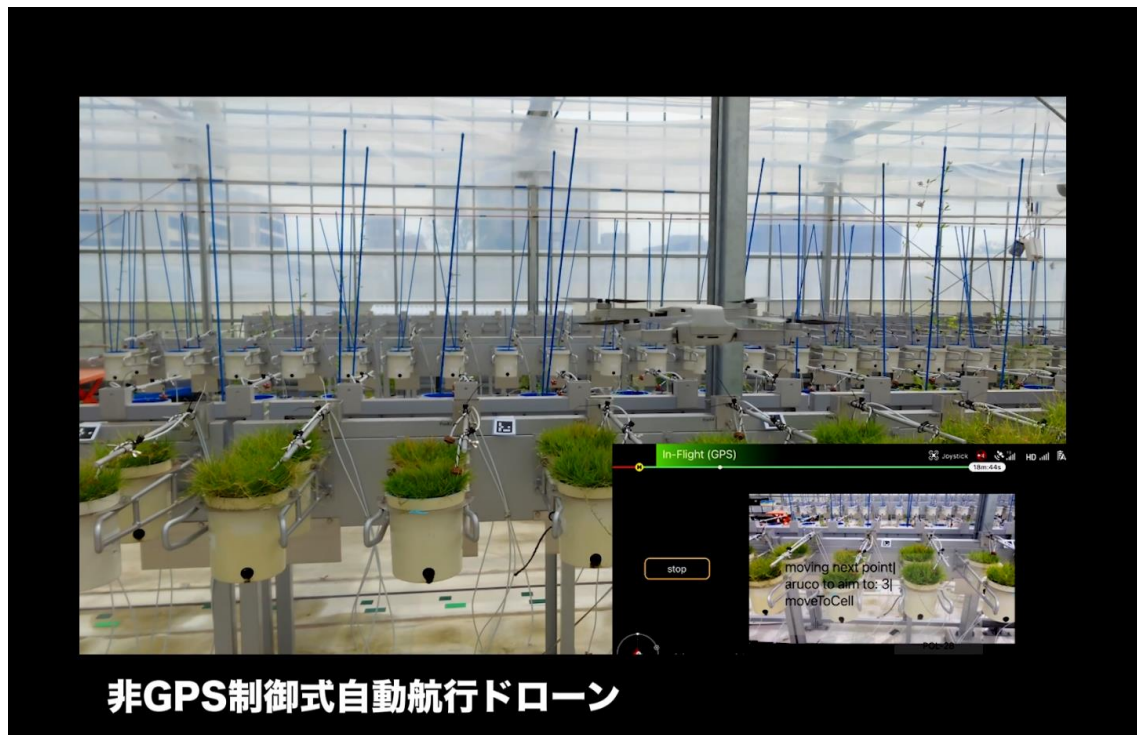


図 12. 明石チーム成果概要

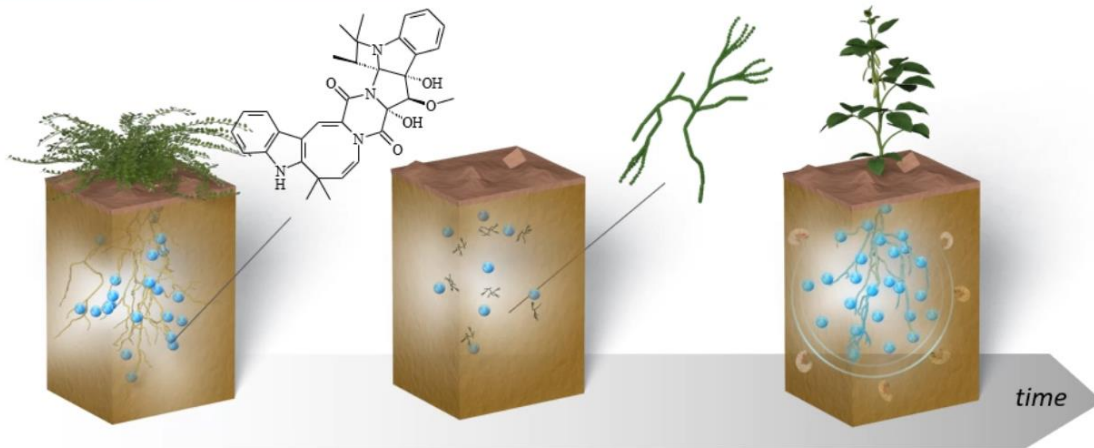
#### ④杉山チーム

本研究課題では、植物の成長に大きな影響を及ぼすとされる根圏（根の近傍の土壤環境）に焦点を当て、化学成分に着目した動態・機能解明および制御技術の開発により作物頑健性を向上させることを目指した。

異なる土壌サンプルのノンターゲットメタボローム解析により、ヘアリーベッチ根圏において自然界で初めてオカラミンを発見した。また、ヘアリーベッチの後作のダイズ根圏においてもオカラミンを検出し、オカラミン生合成能がヘアリーベッチからダイズに受け渡されることを発見した。オカラミンは、殺虫活性物質として 1980 年代に報告されていたが、自然界で発見されたのはこれが初めてであった。

そして、オカラミンを生合成するペニシリウム属菌（hvef18 株）をヘアリーベッチ根圏より分離し、圃場においても根への定着能が極めて高いこと、ダイズ、トマト等複数の作物に対して圃場頑健性を向上させることを明らかにした。この成果については、特許を出願し、企業との連携を通してこの菌を農業資材として販売する見込みである。

## オカラミン生合成能力が受け渡される



**Sakurai N, Mardani-Korrani H, Nakayasu M, Matsuda K, Ochiai K, Kobayashi M, Tahara Y, Onodera T, Aoki Y, Motobayashi T, Komatsuzaki M, Ihara M, Shibata D, Fujii Y, Sugiyama A** (2020) Metabolome Analysis Identified Okaramines in the Soybean Rhizosphere as a Legacy of Hairy Vetch. *Frontiers in Genetics*, 11, 114

※日本農業新聞に掲載（2020年3月10日）

図 13. 杉山チーム成果概要



## 7. 総合所見

### (1) 研究領域のマネジメント

本研究領域においては、領域全体の成果を最大化するため以下の点に特に留意して運営を行った。

- 1) 領域目標の達成に向けた研究内容の重点化
- 2) 最先端の分析技術の導入と情報共有
- 3) 研究課題間の連携による研究や技術開発の高度化

1)については、進捗報告会（毎年）、サイトビジット（不定期）、領域会議（毎年）を実施し、研究開発の進捗状況の把握に努めるとともに、領域アドバイザーのコメントのフィードバック、専門分野に近い2～3名の各課題担当領域アドバイザーによる細心かつ具体的な助言を通して、研究開発が拡散することなく領域目標の達成に最短距離で向かうよう指導した。また、中間評価以降、各課題の内容の絞り込みを行い予算も大幅に増減した。さらに、いくつかの重点課題を加速させるため、総括裁量経費から研究開発加速費を追加配賦した。

本研究領域では、大部分の課題でオミックス解析の技術の最適化や実データの収集が実施されることから、「2)最先端の分析技術の導入と情報共有」を行うことは成果を最大化するために重要であった。そこで、領域前半に毎年2回程度、個々の要素技術をテーマとするオミックス技術ワークショップを開催し、各種オミックス解析技術や分析手法に関する最新情報の提供や共有を図った。また、全期間にわたって総括裁量経費を原資とする技術開発促進費を競争的に配賦し、新規要素技術の開発や導入を促した。

本研究領域の特徴の一つは、対象とする植物種や形質、目的が多種多様であるため、カバーする範囲は広いものの課題間の関連が薄く分散気味なことである。そこで、領域内及び並行して動いている2つのさきがけ（「フィールド植物制御」および「情報協働栽培」）を対象として、「3)研究課題間の連携による研究や技術開発の高度化」による新規技術の開発、新研究分野の創出を促すため、総括裁量経費を原資とする課題間連携促進費を競争的に配賦した。

### (2) 研究領域としての戦略目標の達成状況

本研究領域では、採択した12課題の研究開発テーマが広範にわたっているため、各課題が設定した多彩な最終目標を達成することによって、戦略目標の達成に対してさまざまな方向から幅広い貢献ができたと考えている。

例えば、工藤チームと柳澤チームは、環境の季節変動と土壌中に栄養分という環境変動に対する頑健性を支える全く異なる現象について先端技術を駆使してそのメカニズムを解明し、ハイインパクトジャーナルに多数の論文を発表することによって戦略目標の達成に貢献した。一方、三宅亮チーム、永野チーム、清水チーム、平山チーム、明石チーム、岩田チーム、宇賀チームは、温度や湿度等さまざまな栽培環境の自動計測や、転写産物から形態ま

での各種オミックスデータを収集するための技術開発を行い、得られたデータを用いて成長、出穂、干ばつ耐性など環境変動に対する頑健性の予測モデルを構築し、環境適応型植物設計システムの構築への道を拓いた。また、永野チームが高度化したトランスクリプトーム解析技術、明石チームや岩田チームが構築した温室、圃場の形質評価システムは、領域を超えて民間企業を含む実用現場にまで提供され、技術の実用化や社会実装の側面から戦略目標の達成に貢献している。

本研究領域の多くのチームでは、まず大規模オミックス解析の技術開発や条件検討が行われ、その後大規模データの収集や解析、そして研究期間の後半に収集したデータに基づく知識の抽出や予測モデルの構築へと進められた。そのため、知財確保や論文発表が研究期間の後半や終了後にずれ込む傾向にあり、追跡調査の結果、領域終了後も多くの成果が公表されることがわかっている。また、多くの課題については、終了後他のプログラムからの支援の獲得に成功しており、今後の展開が期待されている。このように、本領域は、すでに報告された成果に加えて、将来戦略目標の達成に貢献するであろうさまざまなシーズも産出することができた。

### **(3) 本研究領域を設定したことの意義と妥当性(研究開始以前や中間評価時点と、終了時点の比較を念頭において)**

急速に進歩する各種オミックス分析技術や情報解析技術によって実用植物の生理動態を分子レベルで把握し、それをもとに急激な気候変動に対する頑健性をもつ植物の設計技術や栽培管理技術を開発しようとする本研究領域の目標は、極めて挑戦的ではあるものの、時宜を得たものであることは疑いない。一方、各種オミックス分析技術は、感度、精度の両面で改善すべき点が多いことは広く認められるところであるが、何をどこまで高度化すれば上記技術の開発に十分なレベルに達するかは現時点でも明らかではない。また、バイオ研究への機械学習等情報解析技術の活用は、本研究領域開始時より進んではいるものの、未だ試行錯誤の段階にあると言えよう。

このような状況のもと、本研究領域では、さまざまな実用植物を対象に、ゲノム、転写産物、代謝産物、植物ホルモン、エピゲノム、表現形質に関わるデータの大規模取得法や統計学、計算機科学によるデータ解析法の開発改良、さらには、得られた大量のデータの組み合わせによる実用技術や予測モデル構築が精力的に進められた。同時に、実用化を目指した技術開発や計測機器の製作も行われた。そして、これらの研究開発が、生理学、遺伝学、栽培学、工学、情報学など幅広い分野を専門とする研究者の協働によって行われたことが、本領域の大きな特徴でありその意義を示すものであろう。また、この協業がチーム内に留まらず、チーム間、さらに同時に設定された 2 つのさきがけ研究領域をも合わせて行われたことは特筆すべきであり、3 つの研究領域を中心に設立した「超分野植物科学研究会」は、この流れを将来につなぐ仕組みとして機能することを期待している。

植物が進化の過程で獲得してきた気候変動に対する頑健性のメカニズムは複雑かつ多様

であり、また環境適応型植物設計システムの構築はさらにその先にある難易度が高い技術開発である。本研究領域によって、モデル植物以外のさまざまな植物種について、これまでにない規模でゲノムや生理学的データ、環境データが収集、分析され、その結果、戦略目標の達成に貢献する優れた成果が多数挙げられたことは本資料に記載した通りである。本研究領域から発信した成果への注目度は高く、各種技術や計測機器に対する実用現場からの期待も大きいことは、本研究領域の設立が時代と社会の要請に沿った妥当なものであったことを示している。しかしながら、環境変動に対する頑健性のメカニズム解明や植物設計技術の開発は、本研究領域によってようやく知識や経験の集積が始まった段階であることから、これを足がかりに今後も知識の深化や技術の実用化を進めてゆくことが戦略目標の達成にとって重要である。

#### (4) 科学技術イノベーション創出に向けた、今後への期待、展望、課題

本領域では、高度化された各種オミックス分析技術、大規模オミックスデータの処理技術、マルチオミックスデータ解析技術、環境データを含めた予測モデリング手法、マルチカメラによる温室内フェノタイピング技術、3D 画像処理技術、ドローンによる圃場フェノタイピング技術、栽培環境ストレス検知機、各種環境計など、科学技術イノベーションの創出・発展につながる研究開発が多数実施された。これらについては、総括裁量経費を用いた領域内外の連携促進による拡大、知財確保や民間企業との協働の強化によって技術の醸成や社会への実装に向けた動きを促した結果、一定の効果が得られたと考えている。

上記成果の一部については、CREST プログラム終了後、別の研究支援プログラムのサポートによって、社会実装に向けた技術開発が継続されることになっており、将来の展開が期待できる。しかし、本研究領域に参画する研究者は基礎・基盤研究の専門家が多く、自身が開発した技術や機器の客観的な評価や社会実装するまでのプロセスに関する知識や経験が十分でないため、有望なシーズを取りこぼしたり開発方針を誤ったりするおそれがある。科学技術イノベーションの創出が期待される領域については、JST がトップダウンで関連技術の専門家や利用者をアドバイザーに加えるなどの方策が望まれる。

#### (5) 所感、その他

本研究領域では、各研究代表者が申請時点で実施していた研究開発の継続というよりは採択後の新たな技術開発の比重が大きい研究課題が多く、開始後計画通りに進捗するかどうか予測しにくいことが選考を難しくした。同様の状況が予想される領域については、スモールスタートによって一定期間 Feasibility をチェックできる仕組みがあれば、成果が期待できる課題の選択と予算の重点配分がやりやすくなる。

CREST プログラム終了後は、JST では A-step など、社会実装に近い研究開発をサポートする仕組みが準備されている。しかし、申請に求められる技術の波及効果や完成度等のハードルが高めの印象がある。そこまで至らないレベルの技術シーズの可能性を見極めるため、複

数の候補テーマに対して短期間、少額の延長サポートプログラムがあると、より多くの技術シーズを拾い上げられるのではないか。

以上