

戦略的創造研究推進事業
—チーム型研究(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」

研究領域中間評価用資料

研究総括：田畑 哲之

2020年1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.....	7
3. 研究課題の選考について.....	8
4. 領域アドバイザーについて.....	10
5. 研究領域のマネジメントについて.....	11
6. 研究領域としての戦略目標の達成に向けた状況について	14
7. 総合所見.....	21

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、環境適応性を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

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 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(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をある特定の系に基づいて行っており、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(科学技術振興機構研究開発戦略センター 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(科学技術振興機構研究開発戦略センター研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野 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」(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」(平成 26 年 7 月 31 日 科学技術・学術政策研究所)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)

「科学技術振興機構研究開発戦略センター」や「科学技術・学術政策研究所 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」に関係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」(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」(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)

(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 上段：中間評価時 下段：採択時	研究課題	研究費*
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	279
	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	359
	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～	408
	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	193
	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	276
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	463
	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	497
	清水 健太郎	横浜市立大学・木原生物学研究所・	倍数体マルチオミクス技術開発による環境頑健性付与モデ	288

		客員教授	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	415
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	401
	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	285
	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	285
			総研究費	4,149

*研究費：2019年度上期までの実績額に2019年度下期以降の計画額を加算した金額

課題中間評価前の課題については、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計画額に対して±10%の範囲内で増減を行っている。また、課題中間評価後は、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%）している。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種類の加速費による増額を行っている（5-(3)参照）。

※総括裁量経費：領域総予算の中から10%、前期課題当初予算から10%、後期課題増減配賦の差額を留保し、総括の裁量で執行する予算としたもの。

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、設置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ている。

- (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いる。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す。

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、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、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。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は否めない。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いる。

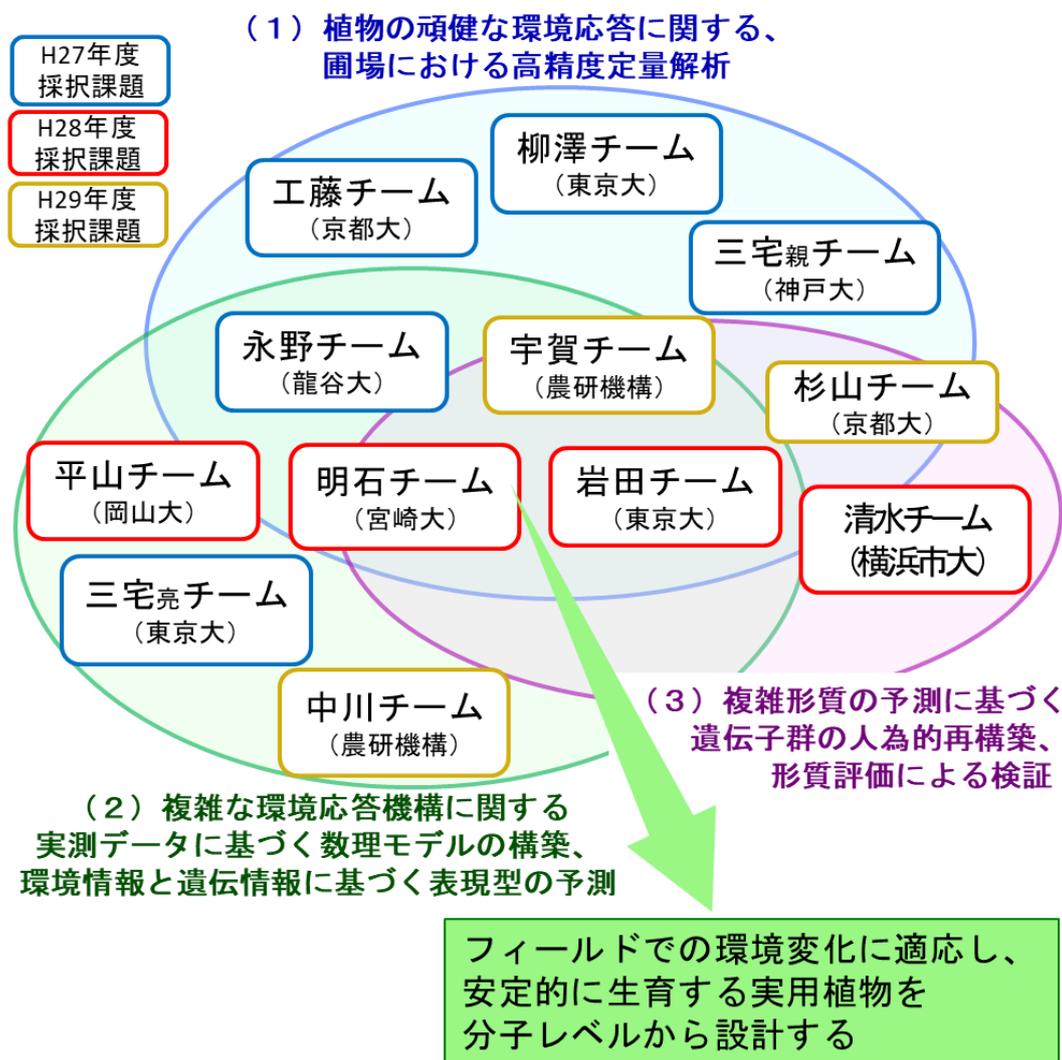


図1. 領域ポートフォリオ

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)	現在の所属	役職	任期
芦荊 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	2018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	副学院長	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	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	代表取締役副 社長	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

5. 研究領域のマネジメントについて

(1) 研究課題の進捗確認と指導・助言

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・助言をお願いしている。

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いる。進捗報告会は、総括と担当領域アドバイザー出席のもと各課題 1~2 時間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 6 月頃に開催している。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ている。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ている。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冬季に実施している。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されるとともに、次年度の研究費追加配賦決定のための資料としている。

また、これらに加えて、必要に応じて担当領域アドバイザーや他のアドバイザーが個別に指導・助言にあたっている。例えば、画像課題の研究担当者は金子アドバイザー、生理活性物質関連の研究担当者は芦荻アドバイザーと個別に面談を実施することで、大きな会議とは異なり細かなアドバイスを受けることができ、その後の研究推進に有益であった。

(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いる。また、領域会議には、同じ戦略目標の下に進行している二つのさきがけ（「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、情報の共有に努めている。さらに、予算の追加配賦を行う加速費の中に、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」を設けており、2019 年度は 4 提案を採択した。

(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ている。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%）している。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 種類の加速費による増額を行っている。

- ・ 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する。提案を募集し領域アドバイザーによる審査を経て決定する。（上限 500 万円、採択率：約 50%）

- ・ 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する。

提案を募集し領域アドバイザーによる審査を経て決定する。（上限 1,500 万円、採択率：約 60%）

- ・ 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、総括の判断で研究費を追加配賦する。（2019 年採択件数：2 件、総額 4,500 万円）

※総括裁量経費：領域総予算の中から 10%、前期課題当初予算から 10%、後期課題増減配賦の差額を留保し、総括の裁量で執行する予算としたもの。

(4) 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事が求められており、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」を年 2 回程度開催している（下表）。専門分野が近い研究代表者や総括が世話人となり、関連する課題からの状況報告、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、担当者間で先端技術情報の共有や議論が行われている。

（参考）領域イベント一覧

2015 年度	
11-12 月	1 期生総括面談
1 月	第一回領域会議（市ヶ谷）
2016 年度	
適宜	1 期生サイトビジット（5 課題）
9-10 月	2 期生総括面談
9 月	三宅親 T 進捗報告会
11 月	農業気象勉強会
1 月	第二回領域会議（秋葉原）
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 年度	
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）
適宜	2 期生サイトビジット（4 課題）

7月	日豪フェノミックスワークショップ
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）
9月	オミックス技術ワークショップ（統計解析技術）
9月	3期生総括面談
12月	国際フェノタイピングワークショップ
1月	第三回領域会議（中野）
3月	三宅亮Tシンポジウム（秋田）
2018年度	
6月	1,2期生進捗報告会
適宜	3期生サイトビジット
10月	植物若手合同研究会（CREST/さきがけ「CO2資源化」「フィールド植物制御」「情報協働栽培」領域）
11月	オミックス技術ワークショップ（統計解析法）
12月	1期生課題中間評価会
1月	第四回領域会議（福岡）
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）
3月	オミックス技術ワークショップ（環境計測技術）
6月	1,2期生進捗報告会
2019年度	
6月	進捗報告会
適宜	2,3期生サイトビジット
11月	オミックス技術ワークショップ（モデリング手法）
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）
11月	2期生課題中間評価会
12月	国際シンポジウム（さきがけ「フィールド植物制御」主催）
12月	第五回領域会議（両国）

6. 研究領域としての戦略目標の達成に向けた状況について

本研究領域の全ての課題では、戦略目標の達成に向けて、研究開発期間の前半に大規模オミックスデータの取得条件の検討と複数年にわたるデータ収集を行い、後半で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いる。そのため、課題中間評価時点では、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るが、すでに重要な知見が得られ始めたり新たな技術の開発や整備が進み、最終的な成果への期待が高まる課題も多い。

各チームの研究開発期間前半は、毎年の進捗報告に対する領域アドバイザーの助言に基づいて当初計画から軽微な修正が行われ、課題中間評価以降は大幅な予算額の増減とそれに伴う大規模な計画変更を指導した課題もある。

領域全体のこれまでの論文発表は 115 報(2019 年 3 月 31 日現在)であり、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)とのプレスリリースは 3 件行われた(2018 年:柳澤課題(柳澤グループ)、清水課題(清水グループ)2 件)。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、これまでに 5 件の国内・国際特許出願がなされている。

(1) 特に優れた研究成果を挙げた研究成果について

以下に、これまでに特に優れた研究成果について、成果の具体的な内容と今後の見通しを記載する。

①永野チーム

本研究課題は、野外環境と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いる。

これまでに、多検体 RNA-Seq の新規手法(Lasy-Seq)や発現定量のためのデータ解析手法(nesage)を確立し、数千検体のトランスクリプトームデータをルーティンに取得することが可能になった。対象であるイネのコシヒカリ/タカナリ染色体断片置換系統を大規模に圃場で栽培し、栽培期間を通じて毎週、2時間おき24時間の日周サンプリングを実施し、これまでの5シーズンで7500サンプルを取得した。これらを前述の手法で解析し、5000サンプル以上の野外トランスクリプトームデータを取得した。これらのデータと気象データから、独自に開発したライブラリ(FIT)によって気象-トランスクリプトーム間の回帰モデルを得て、さらにこのモデルによって、学習に用いていない時点、地点、遺伝子型のトランスクリプトームを予測することができることを示した。また、新規に開発した迅速光合成測定装置(MIC-100)を用い、13000データ点以上の測定値を得た。この光合成の測定値とFITによる予測トランスクリプトームデータから、時期、系統の違いによる光合成の違いを予測できることを示した。

今後、野外と制御環境下のトランスクリプトームデータを併用することでトランスクリプトームの予測精度の向上を進め、光合成をはじめとする形質をトランスクリプトームから予測する精度を高めることができれば、将来、遺伝的最適化、栽培管理の最適化の両方を同じスキームの上で行う実用技術へと発展していくことが期待される。

②岩田チーム

本研究課題では、ダイズの乾燥耐性向上を目標に、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構築を目指して研究を進めている。目標形質は収穫時のバイオマスであるが、マルチオミクスデータを中間形質として計測する技術を開発し、それらを介し

て収穫時バイオマスを予測するモデルを構築する手法の確立を目指している。

まず、防水マルチと点滴灌漑を用いた干ばつシミュレーターを作成して、大規模な干ばつ制御試験を可能にした。次に、ダイズ植物体のマルチオミックス（地上部・地下部のフェノーム、葉のイオノーム、メタボローム）データを高効率に収集するための各種手法を開発した。このようにして得られた各種データをゲノム塩基配列と関連付けることで、原因遺伝子の候補が明らかになりつつある。また、主目的である「収穫時バイオマスのマルチオミックスデータを介したモデル化」については、超多重カーネルモデリングを用いることで、異種データ間の複雑な相互作用を考慮した予測モデル構築に成功した。さらに、収穫時バイオマスを、ドローンリモートセンシングと深層学習を用いて非破壊で計測できる手法も構築できた。

今後は、「1. 静的モデルから動的モデルへの拡張」と「2. 組換え近交系を用いた干ばつ耐性システムの育成」に取り組む計画である。テーマ1で構築される動的モデルは、リモートセンシング・オミックス計測・環境センサーに基づく最適な灌水プログラムの策定などに展開する。テーマ2では、水分ストレス下で旺盛に生育するダイズのゲノムデザインを目指す。

③工藤チーム

自然生育地における野生植物の集団は、人間による播種・植え付け・施肥・病害虫管理を受けることなく継続的に維持されており、そこで見出される環境変動に対する頑健性は、「地球環境の変動にも対応できる持続的農業」が参考とすべき仕組みである。本研究課題では、ハクサンハタザオの自然集団を対象として、大規模野外トランスクリプトーム解析および野外エピゲノム動態捕捉を実施した。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、長期間安定的に野外で動態を捕捉することはこれまで非常に困難であった。これまでに野外の植物集団を対象に2年間50タイムポイントのエピゲノム動態が得られた。これは、環境とエピゲノム時系列データが統合的に得られた世界で初めての例である。データ解析の結果、①環境の長期傾向のみに従って変動するヒストン修飾の特定、②環境変動に対して一方向のみに応答するラチェット制御機構の発見、③変動環境の中でも安定した発現を保つ遺伝子のエピゲノム構造の特定に成功した。また、エピゲノム状態の制御につながる技術開発との関連では、配列特異的なDNAメチル化喪失を引き起こすタンパク質を見出すとともに、長期の環境変化に応答するヒストン修飾が介在するプロモーターを見出し、外来遺伝子に長期応答性を付与することができた。

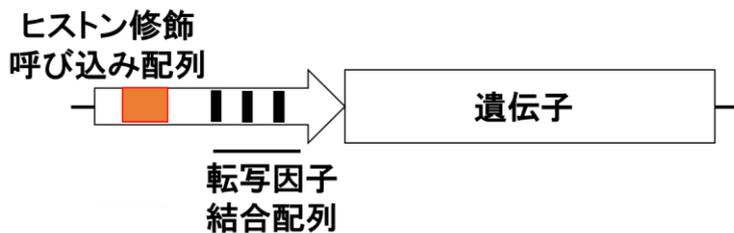
今後、エピゲノム動態の解析を継続し、頑健性を付与するためのロジックをカタログ化することで、エピゲノム制御による植物改良技術の新たな基盤が形成される。また、これまで得られた知見や技術シーズを、実用植物のエピゲノム解析や薬物野菜の鮮度管理に活用する試みも行われる予定である。



フィールド時系列データより 頑健な遺伝子調節の仕組みを抽出



ヒストン修飾介在型プロモーターの利用



頑健性の設計技術

工藤チーム

④三宅（親）チーム

自然フィールドにおいて、植物・作物の生産性低下をもたらす環境要因（ストレス）は、光合成代謝機能を低下させる。そして、光合成機能低下によりもたらされる光エネルギーが余る状況は、無差別な活性酸素（ROS）生成と酸化障害を生葉にもたらし、回復不可能な生産性低下にいたる。本研究課題の目標は、植物の生産性を低下させる状況を生葉を用いて非破壊的にいち早く察知できる方法論を確立し、その方法を具現化できる解析装置を完成させることにある。

これまでに、光化学系 I (PSI) 反応中心クロロフィル P700 の酸化が、光合成機能低下

および ROS 生成の危険性に鋭敏に反応することを明らかにし、酸化型 (P700⁺) を生産性低下の予兆をとらえるパラメータとして活用できることを実証して、これを ROS マーカーと命名した。また、ROS マーカーをフィールドで安定して検知観測できる解析装置の開発に取り組み、フィールドでの実用化のための検証を行い、プロトタイプを完成させた。

今後は、ROS マーカー誘導の分子メカニズムの解明や、ROS マーカー検知機器のモバイル化、フィールドでの大規模フェノタイピングへの ROS マーカー組み込みを可能にする機器開発等、栽培現場における ROS マーカー活用の方法論の開発を実施する。



三宅（親）チーム

⑤明石チーム

遺伝子型と環境要因の相互作用は、環境変動に対する頑健性の解明に欠かせない重要な要素であるが、その計測と計算の難しさもあって、未だ明らかではない。本研究課題では、個体の成長が栽培環境の影響を反映していることに着目し、センサー等で測定した環境値 (ME) では捉えきれない環境値を表現型値で代替する表現型環境値 (PE) を新たに提唱し、遺伝子型 (G)、表現型 (P) および環境値 (E) 間の全ての相互作用にもとづく形質値の予測システムを開発することを目的としている。

表現型と環境値を大規模に取得するためのフェノタイピングシステムとして、任意の経路で栽培エリアと撮影スタジオ間のポット移動を可能にする自動搬送システムや、温室内エリアの環境値を高密度に計測できる環境センサーを開発した。さらに、植物の 3D モデルを極めて高精度に構築する撮影法と画像処理時のマッチング法を開発し、植物の形質評価を新たな次元で実施するための基盤技術を確立した。また、日本を縦断する 3 地点 (仙台、木更津、宮崎) の圃場と温室でダイズ・ミヤコグサの成長を画像と気象観測により記録し、遺伝子型と環境値による形質値の予測モデルによって、開花日の予測において PE を環境値として用いる有効性を示した。さらに、植物フェノタイピングに関する研究を加速化する

ため、国内の関連する研究者の交流の場として日本植物フェノタイピングネットワークを設立した。

本研究によって、画像取得技術や取得した画像データから推定される PE の候補を環境値として用いて G x E に基づく生育予測モデルを改良することにより、G、P、E 間の全ての相互作用にもとづく形質値の予測システムを開発することが期待される。また、国内初の大規模フェノタイピングシステムを拡大し、利用者のネットワークを構築中である。

⑥清水チーム

異質倍数体の野生・栽培種の中には環境変動に対する頑健性を示す種が多いが、その分子基盤は未知であった。本課題では、まずシロイヌナズナ属の植物で実験的に異質倍数体種を人工合成し、異質倍数体化によって野外での環境頑健性を付与されることを初めて実証した。次に、六倍性コムギを材料としてフィールドの気象データや大規模時系列トランスクリプトームデータを取得し、機械学習によってモデル解析することで、温暖化に対する頑健性予測が可能であることを示した。さらに、農林 61 号の高精度ゲノムを解読・公開し、国際コムギコンソーシアムでの日本のプレゼンスを示した。技術面では、異質倍数体を含む異なる親種に由来するホメオログを区別できるバイオインフォマティクス技術を開発・公開した。また、中間層としてトランスクリプトームデータを用いる機械学習モデルを開発し知財化した。

収量に直結する形質としては他に初期成長や葉緑素量などが挙げられるが、出穂に比べ多数の遺伝子が関わるため、これまで遺伝子の同定が難しかった。今後、取得するデータ量を増やすことで、これらの形質の予測技術、および複数の重複遺伝子の組み合わせの設計・技術の確立を目指す。

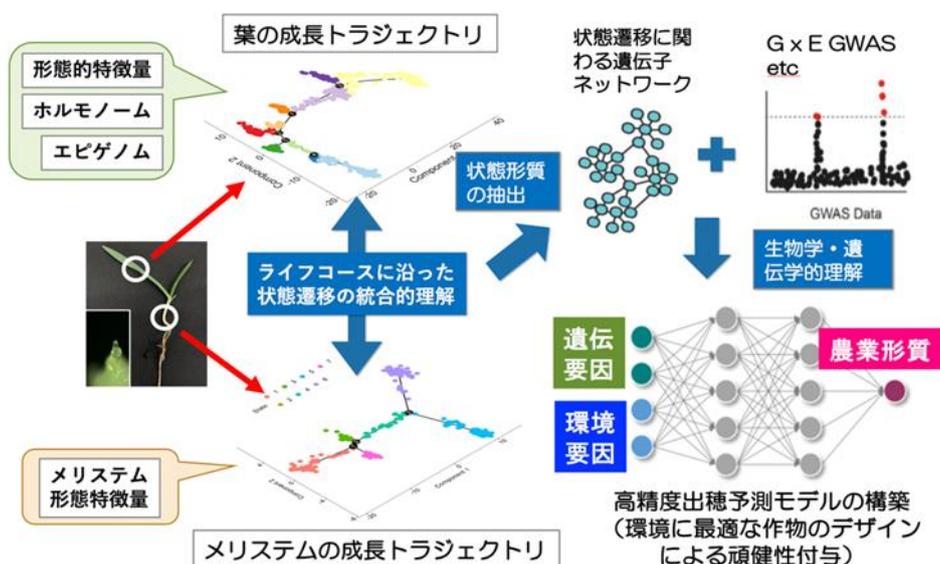
⑦平山チーム

作物の生産性は、生育ステージの特定の段階で顕在化する農業形質に依存するため、そこに至るまでの環境応答にともなう生理状態変化の履歴が大きく影響する。そこで、生長履歴に沿った遺伝子×環境の相互作用が理解できれば、任意の環境に対して農業形質を安定化することが可能になり、将来の環境変動に対して遺伝要因の最適な組み合わせを推定して生産リスクを先制的に回避することが期待できる。本課題の目的は、ムギ類の出穂時期の予測を対象として、作物の農業形質に関わる生理状態や遺伝子構成を生長履歴に沿って推定し、その最適化によって農業形質を頑健化する技術を開発することにある。

これまでに、圃場オオムギのトランスクリプトームやホルモノームなど多階層のライフコースオミックスデータを倉敷と横浜の 2 地点で複数年度取得した。そして、これらのデータの解析から、生長過程の生理状態の系統間や年次間の多様性（状態形質）を反映する要素を抽出し、その多型性情報が、過去のデータから構築した出穂予測の機械学習モデルの予測精度を向上させることを実証した。さらに、トランスクリプトームデータから推定

された pseudotime に沿った成長トラジェクトリを描出し、これに全階層のオミックスデータを統合することで効率よく状態形質となる要素を抽出するという、これまでにない作業工程を構築することに成功した。これにより、生物学的理解を伴う高い予測精度を持つモデルの構築技術が開発できた。

今後は、より多階層オミックスデータの統合によりオオムギ出穂予測モデルの予測精度の向上を図るとともに、多様な遺伝的背景を持つオオムギを用いてモデルの予測精度を検証する。また、出穂制御機構や遺伝子構成が類似するとされるコムギにモデルを適用し、出穂時期の予測精度を検証し、モデルの汎用化を行う。穀物生産に大きく影響する出穂期の高精度予測モデルを活用した生産性を頑健化することにより、変動環境下の食料供給の安定化が可能になることが期待される。



圃場オオムギライフコースデータに基づく出穂予測モデル構築

平山チーム

(2) 研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献

現在、バイオサイエンスやバイオテクノロジーのさまざまな分野で各種オミックス解析のデータ収集が大規模に行われているが、データの精度やデータ解析技術の問題から潜在的な可能性を十分に活かせていないのが現状である。本研究領域では、分子生物学、農学、工学、情報学等さまざまな分野の専門家が密に協働して、オミックス解析技術の高度化、大規模オミックスデータの収集と解析、さまざまな統計解析法による知識の抽出や先端的情報解析手法による新規な予測モデリング法の開発など幅広い研究開発や技術の改良が行われている。ここから得られた新技術、技術改良法や技術シーズは、植物バイオテクや農業に留まらず、医学や創薬、微生物をプラットフォームとする物質生産などにも利用可能であることから、幅広いバイオ研究やバイオ産業に波及的効果をもたらすと考えられる。

(3) 研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

急激な気候変動がもたらす様々な社会的、経済的影響は国内外を問わず大きな危機感と共に広く認知されつつある。中でも、環境適応性が高い実用植物の開発や気候の急速な変化に対応できる迅速な品種改良技術の開発は喫緊の課題であり、食糧安全保障や産業保護の観点から各国が鎬を削る最重要研究開発分野の一つと言える。

本研究領域は、品種改良技術の基礎となる植物設計法の開発に正面から取り組んでおり、そこには各種オミックス技術の高度化、各種圃場環境測定技術の改良、大規模オミックスデータの取得法やデータ分析法、そして大量データに基づく農業形質予測モデルの構築法など先進的かつ幅広い要素技術が含まれている。本研究領域から生み出されるこれらの要素技術やその集大成である植物設計法は、ゲノム生物学、植物分子遺伝学、統計学、情報学、農学、工学などの協働による研究開発の画期的な成果として日本の植物研究のプレゼンスを世界に示すレベルに達すると確信している。さらに、これらの研究開発は開始当初から実用技術の基盤を形成することを目指しており、知財の確保に加えて企業との共同開発や実証試験も視野に入れつつ実施されていることから、社会実装への距離も短いと考えている。

(4) その他特記事項

課題の募集にあたっては、「3. 研究課題の選考について」に記載の内容を周知し、これに沿った提案から 12 チームを採択した。しかし、本中間評価時点で、方向性、先進性や研究開発速度の点で開始当初の期待通りに進捗しない課題も複数存在する。このようなチームについては、それぞれがもつ優れた特性を活用するため、テーマの重点化や他チームとの共同研究による技術供与を促し、同時に研究費を減額することによって費用対効果の最適化を図っている。

本領域目標を真に達成するためには、数多くの解析技術の高度化や多分野協働による新技術の開発、さらに大規模な試行錯誤が必要であり、現行の 12 課題でその全域をカバーすることは難しい。しかしながら、植物科学の中にそのような取り組みの礎を築き、いくつかの先進的な成功例を示すことによってその流れを定着させることが本研究領域の大きな役割であると考えている。

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、各研究課題の研究開発を促進し、領域全体の成果を最大化するためのさまざまな取り組みを行ってきた。まず、毎年の進捗報告会、サイトビジット、領域会議での報告に対する領域アドバイザーのコメントを研究代表者にフィードバックするとともに、専門分野が近い 2~3 名の各課題担当領域アドバイザーを置いて、進捗状況の詳細な把握や適切な助言を行う体制を作っている。特に進捗報告会とサイトビジットには担

当領域アドバイザーが必ず参加し、共同研究者や実務担当者と密な議論や情報提供を行っている。また、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、日々進歩する関連分野の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てきた。一方、研究費の一部をプールした総括裁量経費を原資として、毎年の進捗状況に応じた研究費の追加配賦、課題中間評価の結果に応じた大規模な計画変更や予算の増減、3種類の加速費（技術開発促進費、課題間連携促進費、研究開発加速費、5-(3)参照）配賦によって、各課題の進捗状況を反映した研究資源の配分や新たな展開をサポートする仕組みを構築している。

これら総括裁量経費を有効に活用することで、単純なオミックス解析で終わってしまいそうな研究課題についても、オミックス解析後の活用方法について検討させ、研究の方向性を「戦略目標の達成」という本来の目的に誘導している。また、新たな技術開発や連携に追加配賦することで、予想外の成果についても支援しており、当初の目標にない成果も挙げられている。

(2) 研究領域としての戦略目標の達成に向けた状況

本研究領域に与えられた戦略目標を達成するためには研究開発分野を広めに設定することが必要であったことから、採択した12課題の研究開発テーマも広範にわたっている。また、個々の研究課題に求められる技術開発のレベルや期待される目標に達するための難易度もかなり高い。本研究領域の全ての課題では、まず大規模オミックスデータ取得の条件検討やデータ収集が行われ、後半にデータに基づく知識の抽出や予測モデルの構築が行われる。したがって、課題中間評価時点では大規模オミックスデータの収集が進行中であり、加えてデータの分析方法についての試行や予測モデリングの最適化に向けた調整等が行われている研究課題が多い。各研究課題が当初目標を達成できるかどうかは課題中間評価時に見極め、その後、領域全体の成果を最大化することを念頭に置いて、各研究課題へのサポートを調整している。これまでに第一期、第二期採択の9課題について課題中間評価が終了しており、進捗に優れた研究課題には研究費の増額を行い研究開発の加速とさらなる展開を期待し、そうでない研究課題については内容の絞り込みや目標設定の変更と予算の減額を行ってきた。

現時点において、すでにいくつかの研究課題で戦略目標の達成に大きな貢献を期待させる成果が得られつつある。永野チーム、清水チーム、平山チーム、明石チーム、岩田チームで、さまざまなオミックスデータを介することによってゲノム情報と環境情報から最終的な形質を予測する技術が開発されつつあることがその一例であろう。また、工藤チームでは、環境とエピゲノムの長期時系列データが世界で初めて得られ、今後両者の関係が明らかにされるに違いない。また、明石チームでは、大規模な植物フェノタイピングシステムが国内で初めて構築されつつあり、科学研究や実用現場での活用が期待される。このように、研究課題間で差異はあるものの、全体としては領域目標の達成に向けて順調に進捗

していると考えている。

(3) 本研究領域を設定したことの意義（研究開始以前と現時点との比較を念頭にして）

各種オミックス技術や情報解析技術の進歩によって、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、さまざまな観点から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明らかではない。また、社会のさまざまな局面で機械学習等の先端情報解析技術の有用性が示されつつあるが、バイオ研究への適用は緒についたばかりである。このように、本研究領域に課せられた使命は重要ではあるものの極めて挑戦的であると言えよう。

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、大規模解析法の開発改良、さらには、得られた大量のデータを実用技術や予測モデル構築に活用する試みが精力的に進められている。そして、この作業が、生理学、遺伝学、栽培学、工学、情報学等異なる分野を専門とする研究者の同一課題内の親密な協業によって行われていることが本研究領域の特徴で、植物研究の新たなスタイルの有効性を実証する役割を果たしていることは意義深い。また、ハイレベルな科学研究とともに、実用に耐える計測機器や各種技術の開発あるいはそこに至る POC を期待する成果として明確に位置づけたことは、基礎研究偏重といわれている我が国の植物研究に一石を投じる意味があると考えられる。

(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

各種オミックス解析については、分析機器の急速な開発・普及や関連する分析技術の進歩によってデータの取得が格段に容易になり、さまざまなデータが大量に蓄積されつつある。これらのデータを活用したバイオサイエンスやバイオテクノロジーの新たな展開に大きな期待がよせられているが、現時点ではその利用は限られており、これまでに得られた成果も満足いくものではない。データの精度やデータ解析技術に課題があると言われていたものの、未だ明確な解決策は示されていない。本研究領域は、多分野協働によってオミックス解析の技術的諸問題に対する解決策を模索し、最新の統計解析法や先端的情報解析手法を駆使して法則性の探索法や予測モデリング手法の開発、改良に努め、最終的に環境変動に頑健な植物の設計技術や栽培技術を開発するという、重要かつ挑戦的なミッションを負っている。本研究領域においては、直接的な出口として植物バイオテクや農業に対する貢献が想定されるが、ここで得られた諸知見や技術シーズは、創薬や物質生産などバイオインダストリーの幅広い分野にも波及効果をもたらすことが期待できる。

以上