

戦略的創造研究推進事業
—さきがけ(個人型研究)—

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」

研究領域事後評価用資料

研究総括: 二宮 正士

2021年10月

目次

1. 研究領域の概要	1
(1) 戦略目標	1
(2) 研究領域の概要	1
(3) 研究総括	2
(4) 採択研究課題・研究費	3
2. 研究領域および研究総括の設定について	6
(1) 研究領域の設定について	6
(2) 研究総括設定について	7
3. 研究総括のねらい	7
4. 研究課題の選考について	8
(1) 研究課題の選考方針と選考基準	8
(2) 選考の方法と過程	9
(3) 選考結果	10
5. 領域アドバイザーについて	12
(1) 領域アドバイザー、領域運営アドバイザーの一覧	12
(2) 人選にあたっての考え方について	13
6. 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) 研究課題間、他の研究領域や研究機関、異分野との連携・協力の推進	17
(3) 研究費配分上の工夫	23
(4) 研究領域としての人材の輩出・成長の状況	24
(5) その他マネジメントに関する特記事項	25
7. 研究領域としての戦略目標の達成状況について	26
(1) 研究総括のねらいに対する研究成果の達成状況	26
(2) 研究領域全体として見た場合の特筆すべき研究成果	29
(3) 研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献	30
(4) 研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献	34
(5) 本研究領域に続く研究資金の獲得状況	35
(6) その他の特記事項	35
8. 総合所見	35
(1) 研究領域のマネジメント	35
(2) 研究領域としての戦略目標の達成状況	37
(3) 本領域を設定したことの意義	37

(4)	科学技術イノベーション創出にむけた、今後の期待、展望、課題.....	38
(5)	所感、その他.....	39

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

戦略目標 1：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

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学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。

本戦略目標では、植物体に関わるさまざま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。

戦略目標 2：社会における支配原理・法則が明確でない諸現象を数学的に記述・解明するモデルの構築

社会における諸現象のうち、現時点で支配原理・法則が明確でなく、数理モデル化ができれば社会に対して大きなインパクトが見込まれる現象について、数学・数理科学の研究者と応用分野の研究者などによる異分野協働などを通じて、数学がもつ抽象性・普遍性を活用し、諸現象に潜む複雑な構造の「本質」部分を数学的に見いだすことにより、以下の実現を目指す。

○現象を数学的に記述するモデルの導出

○導出された数理モデルの実証・検証及び評価のための数学的理論等の構築

(2) 研究領域の概要

「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」研究領域（2015年度発足）

本研究領域では、気候変動や環境負荷低減に向けた要求等、さまざまな制約の下でも高収量・高品質な農業生産を持続的に行うことを可能とする先進的な栽培手法の確立を目指す。このため、農学・植物科学と、先端計測やデータ駆動型科学等の情報科学との協働により、さまざまな環境に適応した植物栽培や生産品質に合わせた植物の生育制御を実現するための研究を異分野連携により推進していく。

具体的には、植物生体機能を非破壊で計測する技術、多様で大規模なデータから最適栽培に資する知識を抽出する技術、植物栽培の地域特異性を凌駕できる汎用生育モデルや不確

実性を考慮できる生育モデル、圃場生態系を記述する複雑系モデル、野外での生育を精度よく制御する技術等を対象とする。

研究推進にあたっては、情報科学研究者と農学・植物科学研究者との情報交換・議論・連携を重視する。さきがけ研究者がそれぞれの専門分野の強みを生かしながら連携することで、互いに触発しながらシナジー効果を得る体制を整え、将来の食料問題への解決に挑む。さらに、戦略目標を踏まえた成果を最大化すべく、必要に応じて同じ戦略目標 1 を共有する 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（植物頑健性）」、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（フィールド植物制御）」とも連携した運営を行っていく。

(3) 研究総括

二宮 正士 （東京大学 大学院農学生命科学研究科 特任教授）

(以下余白)

(4) 採択研究課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究者	所属・役職 上段：研究終了時 (下段：採択時)	研究課題	研究費*
2015 年度	伊勢 武史	京都大学 フィールド科学教育研究センター 准教授 (同上)	粒子フィルタを用いた森林植生モデルのデータ同化手法の確立と環境変動下の植生動態の将来予測	38
	杉浦 綾	農業・食品産業技術総合研究機構 農業情報研究センター 主任研究員 (同 北海道農業研究センター 主任研究員)	超高精細フィールドセンシングによる個体育育モニタリング	32
	野田口 理孝	名古屋大学 高等研究院 助教 (名古屋大学 大学院理学研究科 研究員)	農作物の早期診断技術の創出と栽培法の最適化	44
	福田 弘和	大阪府立大学 大学院工学研究科 教授 (同上 准教授)	精密環境オミクスデータに基づく植物生産不安定性の解明	45
	峰野 博史	静岡大学 学術院情報学領域 教授 (同上 准教授)	多様な環境に自律順応できる水分ストレス高精度予測基盤技術の確立	42
	矢部 志央理	農業・食品産業技術総合研究機構 次世代作物開発研究センター 基盤研究領域 任期付研究員 (同機構 中央農業総合研究センター 情報利用研究領域 契約研究員)	量的遺伝学に基づく環境応答型イネ選抜モデル開発	32
2016 年度	浅井 秀太	理化学研究所 環境資源科学研究センター 研究員 / 科学技術振興機構 さきがけ専任研究者	病原ゲノミクスによる土壌診断法の開発	35

		(同上 基礎科学特別研究員)		
	潮 雅之	京都大学 白眉センター 特定准教授 (龍谷大学 科学技術共同研究センター 博士研究員)	野外の生物群集ネットワークを利用した植物の動態予測	40
	辰己 賢一	東京農工大学 大学院農学研究院 准教授 (同上)	確率光合成モデルによる高汎化型イネ成長応答モデルの開発	49
	西内 俊策	名古屋大学 大学院生命農学研究科 助教 (同上)	レガシーデータに基づくイネの品質と生産性に関わる因果関係の解析と機械学習を用いたオンサイト生育診断技術の開発	41
	野下 浩司	九州大学 大学院理学研究院 助教 (東京大学 大学院農学生命科学研究科 特任研究員)	マルチスケールデータ融合による草姿・草型の超解像フェノタイピング技術の開発	45
	松井 秀俊	滋賀大学 データサイエンス学部 准教授 (滋賀大学 データサイエンス教育研究センター 准教授)	時系列生長データに基づく植物生長の統計的予測技術の開発	40
2017 年度	岩山 幸治	滋賀大学 データサイエンス学系 准教授 (同上 データサイエンス教育研究センター 助教)	不確実環境下における栽培条件のベイズ的最適化	40
	宇都 有昭	東京工業大学 情報理工学院 助教 (同上)	マルチモーダル・マルチテンポラル個葉スケール空撮画像のテンソル分解による作物の活性度推定法の開発	56

	大倉 史生	大阪大学 大学院情報科学研究科 准教授 (同上 産業科学研究所 助教)	緻密な生育管理を実現する「未来栽培」のための植物の三次元構造復元と植物ライフログの構築	31
	小野 圭介	農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター 上級研究員 (同上 主任研究員)	自然条件下で光合成誘導時間を連続的に推定する手法の開発	44
	戸田 陽介	名古屋大学 トランスフォーマティブ生命分子研究所 特任助教 / 科学技術振興機構 さきがけ専任研究者 (名古屋大学大学院理学研究科 博士研究員)	ディープラーニングを利用した植物表現型の定性的・定量的計測技術の開発	34
	四倉 聡妃 弥 研究期間: 2017.10~ 2018.10	京都大学 化学研究所 特定研究員 / 科学技術振興機構 さきがけ専任研究者 (同上)	アレルギー低減食品開発のためのデータ科学による作物育種	6
			総研究費	694

*各研究課題とも 3.5 年間の見込み総額

2. 研究領域および研究総括の設定について

(1) 研究領域の設定について

戦略目標 1 は、植物体に関わるさまざま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指すものである。

戦略目標 2 は、数理モデル化ができれば社会に対して大きなインパクトが見込まれる現象について、その現象を表現する数学的モデルの導出を目指すものである。

世界人口が依然として爆発的に増加している中、経済発展により、より豊かな食をより多くの人が享受する時代に変化しているため、農業生産には単純な生産性向上ばかりでなく品質向上も求められている。しかしながら、生物多様性や環境保全への配慮、水や耕作地の量的限界等の制約に加え、気候変動による栽培不適地拡大等のさまざまな影響が、このような農業生産の実現を阻むよう立ちはだかっている。上記課題の解決のためには、我が国のモデル植物研究で得られた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、植物科学研究の過程で得られる生体機能や環境条件等のデータについて、工学や情報科学等の異分野の技術も含めた新たな視点で収集・解析し、育種開発や栽培技術を高度化させることが期待されている。

本研究領域は、以上のような社会的ニーズに対し、栽培技術の高度化に向けた要素技術に関する研究を対象として、汎用性や不確実性に対応できる植物の生育モデルの構築など、持続的な農業生産のデザインに貢献できる研究開発を推進することとしており、戦略目標 1 の達成に資するものと期待される。

また、栽培技術の高度化のために重要であるフィールド環境下での植物生育の頑健なモデリング手法の実現に関して、本研究領域は、農学・植物科学や情報科学、数理科学など幅広い分野における先端研究者の参入によってその実現を図るように設定されており、戦略目標 2 が目指す現象の数理モデルの実現に資するものと見られる。

さらに、戦略目標 1 の下に別途設定することとしている CREST「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（以下、植物頑健性）」研究領域は、フィールド環境下での植物の環境応答メカニズムを解明する研究から、有用な遺伝子群を導入した植物の機能をフィールド実証試験で評価するに至るまでの包括的テーマを対象とし、また同じく戦略目標 1 の下に設定することとしているさきがけ「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（以下、フィールド植物制御）」研究領域は、植物の遺伝子群の挙動と表現型との関係を定量的に解析することで植物の環境応答の生命原理を明らかにする研究を対象としている。これら 2 つの研究領域に対して、本研究領域は植物の生体機能の革新的な計測技術に関する研究、及び環境応答機構の詳細は未解明であってもそのブラックボックス化を許容して植物の環境応答を精度よく表現する頑健なモデル・シミュレーション研究を対象とし、栽培技術に資する知見を得ることとしている。これ

ら3つの研究領域は異なるアプローチにより相補的に戦略目標に貢献するよう設定されている。

以上を総合すると、本研究領域は、戦略目標1及び2の達成に向けて適切に設定されている。

本研究領域の推進にあたっては、異分野連携が鍵を握るため、公募において個人で推進する研究に加え他の提案者との連携内容をあらかじめ提案することを可能とする「連携提案」の仕組みを導入することとしている。研究領域を農業・植物科学者のみならず情報科学者、数理科学者の参入を促す内容に設定していることに加え、こうした新たな公募提案の仕組みを導入することで、本研究領域の趣旨に合致する優れた研究提案が多数見込まれる。

(2) 研究総括設定について

二宮正士氏は、農業情報学、生物測定学、遺伝育種学を専門としており、農業情報システムの研究開発において優れた成果をあげてきた。具体的には、画像解析を利用した植物フェノミクスに関する先駆的な研究を1980年代に開始し数多くの関連論文を発表している。さらにICTの農業への応用に関する研究でも長きにわたり世界を先導するなど当該分野における長年の研究実績を有している。こうした研究を通じ、2004年にはネットワーク基盤を利用した農業情報システムの開発研究について農業情報学会賞を受賞し、2007年には日本育種学会論文賞を受賞しており、本研究領域について先見性及び洞察力を有していると認められる。

また、日本育種学会の編集委員や筆頭庶務幹事、本年より務める農業情報学会会長等、学会における要職を歴任するとともに、世界の農業工学研究を束ねるCIGRの執行委員会委員やアジアにおける情報科学の農業への活用を推進する団体である「アジア農業情報技術連盟」の会長の経験を有していることから、関連分野の研究者から信頼され、公平な評価を行いうると見られる。

さらに、国立研究開発法人農業食品産業技術研究機構中央農業研究センター研究管理監など、農業現場に直結した研究機関において研究推進のとりまとめ等を担う要職を歴任するとともに、農林水産省の委託研究プロジェクト「データベース・モデル協調システム(2001年～2006年)」など大型農業ITプロジェクトの推進リーダーを務めてきていることから、研究課題の効果的・効率的な推進を目指し、適切な研究マネジメントを行う経験、能力を有していると認められる。

以上より、同氏は本研究領域の研究総括として適任であると判断される。

3. 研究総括のねらい

本研究領域では、複雑な制約のもと問題解決を図りながら、高収量・高品質な農産物の持続的生産を支える栽培技術の実現に向けた研究、または目標とする生産量や品質に合わせ、

たとえ野外でも生育を制御可能とするための基礎的・基盤的研究を、情報科学と農学・植物科学との連携のもとで行う。これまでの情報科学と農学等を融合する試みはいくつかのすばらしい成果を示してきた。しかしながら、圃場環境や栽培条件との複雑な相互作用のもとに生育する植物を制御し、その能力を十分には引き出すには至っていない。そこで、高度な農学・植物科学の知見と、外的環境を考慮した植物の生体機能計測、先端的なデータ駆動型科学等の活用により、さまざまな環境下での植物の環境適応と生育制御を実現する基礎的・基盤的研究の飛躍的発展が必要と考えている。

4. 研究課題の選考について

(1) 研究課題の選考方針と選考基準

<選考方針>

生産性と高品質をめざす持続的農業生産を実現するための諸々の問題の中で、将来的に何をどこまで解決しようとしているのかの研究における長期的なシナリオ、次に、さきがけ研究における課題とその解決手段、研究終了時の達成目標、研究の出口の姿という観点から選考を行った。

なお、本研究領域では将来にわたり作物生産の中心となると思われる野外での栽培に資する研究を主な対象とするが、植物工場等の人工環境下での栽培に関する研究も対象とする、また、研究のスケールについては、植物個体や個体群レベルをターゲットと考えているが、生体内、農場、地域、全球等、その他のスケールの研究提案も可とした。

<連携提案について>

さきがけ研究は本来個人研究プログラムであるが、本研究領域では、農学・植物科学と情報科学が高いレベルで協働することが求められるため、通常の提案(個人研究者としての提案)に加え、さきがけ提案者同士の連携提案を可能とした。

提案する研究課題を応募者がひとりで取り組むことが難しい場合は、情報科学研究者と農学・植物科学研究者が事前に連携の可能性について打ち合わせたうえで、それぞれの役割及び期待されるシナジー効果を記載し、それぞれが本研究領域に個別に提案することができる(図1：連携提案を参照)。

なお、本研究領域の連携提案の評価にあたっては連携内容も評価対象に含める。連携の必然性として、「提案者自身にとって連携先研究者のアプローチは代えが利かないものであるか」「連携によって提案者の研究がさらに展開できるか」を重要な評価の観点とする。連携提案については、連携先に負うところが過大である連携や、データ解析のみを請負うような連携ではなく、異分野の研究者が互いの研究を深化させるために必要な連携を期待した。

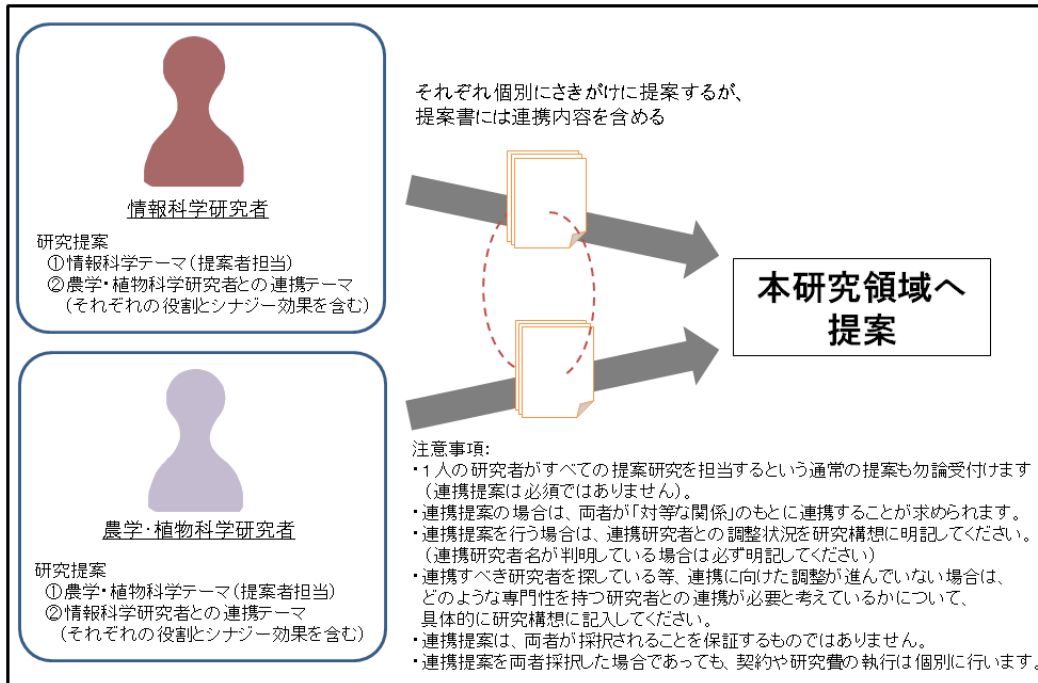


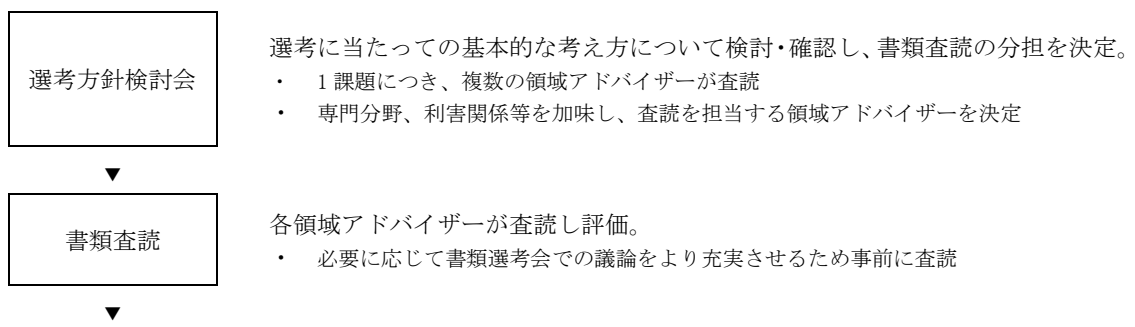
図1：連携提案

<選考基準>

選考は、本研究領域に設けた領域アドバイザー7名の協力を得て研究総括が行う。選考方法は、書類選考、面接選考及び総合選考とし、選考にあたっては、さががけ共通の選考基準である「戦略的創造研究推進事業における新規研究課題の決定について」を基本とした。

(2) 選考の方法と過程

応募課題については、領域アドバイザーが分担して書類審査を行い、その結果を基に書類選考会議において面接選考の対象者を選考した。続いて、面接選考および総合選考により、採択候補課題を選定した。(図2のフロー参照)



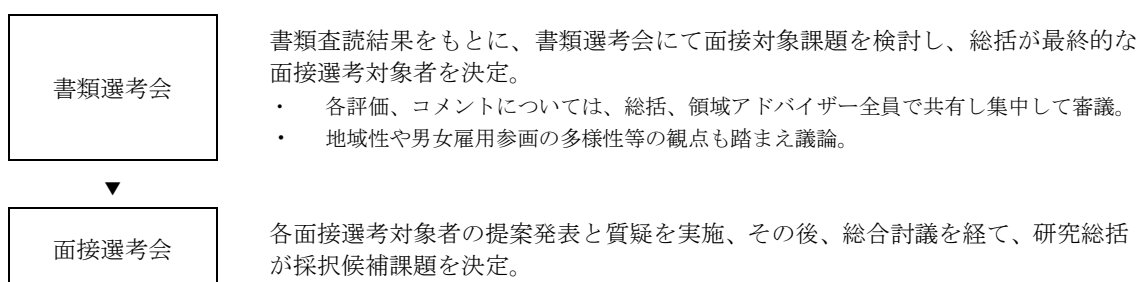


図2 選考過程

(3) 選考結果

① 公募・採択課題数の推移

2015年度から3年間において、下表に示すように、応募94件に対して面接対象として47件を選定し、最終的に18件を採択した。そのうち、女性研究者2名を含む。

表1： 応募・採択状況一覧

募集年度	応募数	面接数	採択数
2015年度 (第一期生)	36	17	6
2016年度 (第二期生)	29	16	6
2017年度 (第三期生)	29	14	6
合計	94	47	18

② 応募・採択課題概況

各応募課題においては、農学・植物科学分野の研究者は勿論のこと、情報科学分野から農業の課題解決にチャレンジする提案も多く見られた。研究手法も、作物モデル、圃場における生体センシング、3次元計測、画像解析等多岐にわたった。

採択課題については、

- ・ 提案する研究開発と、解決すべき栽培上の課題との関連性が明確となっている。
- ・ 数理・情報科学の活用の発想が優れている。
- ・ 従来の研究にとらわれない新たなアプローチがみられる。
- ・ 研究成果を領域内外に向けてアピールし、数理・情報科学と栽培に関わる科学を融合した新分野を創出し牽引する気概を有している。

など、いずれも斬新なアイデアとこれまでの実績を基礎とした明確な研究戦略を持った優れた提案を選定することができた。尚、各年度の特徴は下記の通りである。

●2015年度（公募初年度）

初年度は、本研究領域の募集に対して36件の応募があり、農学・植物科学分野の研究者は勿論のこと、情報科学分野から農業の課題解決にチャレンジする提案も多く見られた。研究手法も、作物モデル、圃場における生体センシング、3次元計測、画像解析等多岐にわたった。これらの提案に対して、8名の領域アドバイザーとともに厳正かつ公正な選考を行い、17件を面接選考対象とし、このうちとくに優れた6件を採択した。

なお、今年度は領域の初年度ということもあり、野外環境での栽培を当初から対象とした提案だけではなく、研究当初は人工環境下での栽培や、森林生態系を対象としている提案も含め幅広く採択した。これは、野外環境での栽培に距離があると思われる提案であっても、数理・情報科学的手法に優れた独創性がみられ、かつ提案研究の成果が野外圃場における作物栽培の革新に大きく寄与する可能性があるかと判断したためである。

●2016年度

本研究領域の募集に対して、前年度とほぼ同程度の29件の応募があり、農学・植物科学分野の研究者は勿論のこと、数理・情報科学分野から農業の課題解決にチャレンジする提案も多く見られた。今回は2回目の募集ということもあり、領域の目的をよく理解した提案が比較的多かった。研究テーマも、作物モデル、植物体の3次元再構築、農業従事者の暗黙知の形式化、圃場生態系モデル、農産物の品質計測等多岐にわたった。これらの提案に対して、8名の領域アドバイザーとともに選考を行い、16件を面接選考対象とし、このうちとくに優れた6件を採択した。

なお、今回の選考では、数理・情報科学的な解析手法の説明に具体性があること、データの取得・利用の道筋が具体的であること、提案する手法の有効性を評価するために具体的な検討がなされていることをとくに重視した。また、数理・情報科学的手法の説明にあたっては、単に解析手法名を列挙するだけではなく、その解析手法がなぜ最適と考えるか、提案する研究課題の遂行にどのように貢献するかを提案者自身の言葉で説明できているかも判断材料とした。

●2017年度（公募最終年度）

本研究領域の募集に対して、前年度と同数の29件の応募があり、農学・植物科学分野の研究者は勿論のこと、数理・情報科学分野から農業の課題解決にチャレンジする提案も多く見られた。

今年度は、応募者の現在の専門に配慮しながら「数理・情報科学型」「農学・植物科学型」「分野連携型」の3類型を設け、このうちいずれか一つを選択して応募するようにした。と

くに「数理・情報科学型」「農学・植物科学型」は、これまでの専門分野に基づいた独創的研究アプローチに加え、本研究領域に参加することで学ぶ異分野の知見も取り入れ、課題解決に貢献しようとする意欲にあふれた候補者も応募できるように配慮した結果である。

応募研究テーマも、作物環境応答モデル、土壌微生物の生態系を記述するモデル、農業従事者の暗黙知の形式化、農産物の品質計測等多岐にわたった。これらの提案に対して、7名の領域アドバイザーとともに選考を行い、14件を面接選考対象とし、このうちとくに優れた6件を採択した。

5. 領域アドバイザーについて

(1) 領域アドバイザー、領域運営アドバイザーの一覧

領域アドバイザー名 (専門分野)	終了時の所属	役職	任期
上田 修功 (情報学 機械学習)	理化学研究所 革新知能統合研究センター	副センター長	2015年8月～ 2021年3月
加々美 勉 (農学 作物育種)	(株) サカタのタネ	常務取締役/ 常務執行役員	2015年8月～ 2021年3月
亀岡 孝治 (農学 フェノミクス)	三重大学	名誉教授	2015年8月～ 2021年3月
後藤 英司 (農学 植物生体情報計測・施設園芸)	千葉大学 大学院 園芸学研究科	教授	2015年8月～ 2021年3月
中野 美由紀 (情報学 ビッグデータ解析)	津田塾大学 学芸学部	教授	2015年8月～ 2021年3月
堀江 武 (農学 作物モデル)	京都大学	名誉教授	2015年8月～ 2021年3月
松井 知子 (情報学 数理モデリング)	統計数理研究所 モデリング研究系	研究主幹・教授	2015年8月～ 2021年3月

領域運営アドバイザー名 (専門分野)	終了時の所属	役職	任期
磯部 祥子 (農学 形質測定)	(公財) かずさ DNA 研究所 先端研究部 植物ゲノム・遺伝 学研究室	室長	2015年8月～ 2021年3月
森川 博之 (情報学 センサネットワー ク)	東京大学 大学院 工学系研究科	教授	2015年8月～ 2021年3月 (2016年度まで領 域アドバイザー)

(2) 人選にあたっての考え方について

研究領域の概要(第1章)に記載の通り、本領域では、農学・植物科学と数理・情報科学との連携で問題解決を図っていくことを狙いとしている。このような観点から、アドバイザーの構成としては、農学・植物科学の分野と数理・情報科学の分野の専門家がバランスよく構成されていることを重視した。また、農学分野のアドバイザーは、栽培の現場について理解が深い方の参画をお願いした。

分野別の構成として、農学分野では、作物育種・品種改良、フェノミクス・形質計測・センシング、生体機能計測・施設園芸・植物工場、生育モデリング・栽培の幅広い分野の専門家、そして情報学分野では、機械学習・人工知能、情報処理・ビッグデータ処理、数理モデリングの分野の専門家に参画いただくことができた。さらに、領域運営に当たっては、フェノミクス・形質計測・センシング、センサネットワークのそれぞれの専門家に領域運営アドバイザーとして参画いただいた。

農学・植物科学と情報科学の融合分野は人材が極めて限定的であり、新たな分野を創出しようという気概を持った研究者の参画が必須である。研究の推進方法としては、農学・植物科学研究者は情報科学を、情報科学研究者は農学・植物科学を自ら積極的に学び、異分野の知見を取り入れつつ自身の研究を深化させることを重視した。幅広い分野の専門家からアドバイスを受けられることで、さまざまな分野の研究者が相互に影響し合い、異分野横断・融合的な視点で問題解決に取り組むことを、領域として推進する体制を構築することができた。

6. 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

本領域は、植物科学と情報科学にかかわる二つの戦略目標をもつ領域で、情報科学で作物栽培に大きな革新をもたらすための研究開発が目標となっている。もともと双方の領域を十分にカバーできている研究者は少ない。一方、2050年までに予想される多様な食料課題解決に向け、スマート農業と呼ばれるような情報科学に駆動される農業イノベーションへの期待はますます高くなっている。本領域は、そのようなイノベーションに貢献する革新的研究開発に加え、このような境界領域での研究開発で異分野連携を推進しながらリーダーシップをとれる人材育成を大きな目標としてきた。

本領域の参画研究者は、もともとの専門背景が大きく異なる情報・工学系と農学・植物科学系が混在しているところに特徴がある。全18名のうち情報・工学系は8名、農学・植物科学系が10名である。さらに、情報・工学系のうち、これまでの農学・植物科学に関わる研究開発を行って来た経験がある者が4名であった。一方、農学・植物科学系のうち十分に高度な情報科学的知識を持つ者は6名であった。このように本領域で求められる双方のスキルを当初から有さない者も、戦略の達成に貢献できると考えられる良い提案は採択し、研究期間中の指導で不足する知識や技術を学ばせるとともに、他の研究者との連携関係で相互補完シナジー効果を醸成することを、領域アドバイザーとともに想定した。なお、応募者の裾野を広げるために用意した前述の「連携提案」については、優れた提案がなく採択には至らなかった。

そのために、後述する領域会議やサイトビジットの場を最大限活用して、不足する知識や技術に関する指導や情報提供を領域アドバイザーとともに行った。その際、目標達成への道を、将来にわたり自らが切り開けるよう、とくに配慮した。ある情報系研究者は、非常に貧弱な農学的知識のもと篤農家を凌駕するAIシステムを提案し採択された。対象作物に関する基本知識や栽培方法について、適切な情報源を伝えることで極めて効率的に知識を習得し、研究に活かし成功に導けた。また、作物モデルに関する斬新な提案をしたが、実データの確保に困っていた別の情報系研究者に、より適切なデータを仲介することで研究を加速できた。一方、農学・生物系研究者も、最新のデータサイエンスを、自ら学びスキルを向上させた者も多く、中には深層学習に新アルゴリズムを提案し有力誌に掲載された例さえある。

さらに、領域内研究者の多様な背景を活用する目的で、領域会議に自由でオープンな討議ができる場を時間の余裕を持って提供するなど、領域内の研究者ネットワーク構築を促進する工夫も行った。深夜まで膝詰めで討議したことも珍しく無い。このような雰囲気の中、相互に学び相互に補完する体勢も自然と醸成された。また、同時に進行し戦略目標1を共有するCREST「植物頑健性」やさきがけ「フィールド植物制御」との研究者間ネットワーク構築により、領域の異なる研究者間も相互補完的に支援できる体制づくりにも力を入れた。こ

のように、領域内および関連3領域のバーチャル研究所としての機能も十分確立でき、領域終了後もそのネットワークは継続している。

以上のように本領域が、極めてヘテロな専門背景を持っていることを活かしながら、各自の力を引き出し、自主性も最大限尊重したことが領域運営の特徴でもある。また、比較的少人数の領域であったこともあり、分散しない非常に密な関係を研究者、領域アドバイザー、総括の間で構築できた。これが、良い研究成果ばかりでなく、後述する画期的な国際連携体制を構築することや、日本における新研究分野プラットフォーム構築の提案にもつながっている。

領域会議

年に2回、領域期間中合計11回の領域会議を開催した。各研究者の進捗状況の報告とそれに対する質問や討議、アドバイスをを行った。口頭発表とポスター発表の両方を実施した。オンライン開催の場合を除き、2日間開催としたため、相対的に少ない領域研究者数とも相まって、各研究者について十分な時間をかけて意見交換や指導ができたのは非常に良かった。領域研究者も積極的に討議に参加し、お互いよく知ることで議論も非常に深まった上、それぞれの研究の深化につながった例も少なくない。また、領域会議は、情報・工学系研究者と農学・生物系研究者が相補性を醸成する大切な場ともなった。CREST「植物頑健性」、さきがけ「フィールド植物制御」との合同領域会議を開催したこともあり、3領域一体となったバーチャル研究所としてのダイナミズムも体感したところである。



領域会議での議論風景。

さらに領域会議では、他領域からの発表に加え、領域アドバイザーによる研究動向にかかる特別講演も実施した。この他、夏季の領域会議では地方の農学研究機関（2016年：農研機構北海道農業研究センター、2017年：千葉大学植物工場、2018年：鳥取大学乾燥地研究センター、2019年：Happy Quality、サンファーム中山）の訪問を通じ、本領域で重視する栽培現場の研究者や先進農家との橋渡しも実施した。下記が領域会議の記録である。

- 第1回領域会議 (2016年1月22日、東京)
- 第2回領域会議 (2016年6月10日～11日、帯広市、芽室町)
- 第3回領域会議 (2016年11月26日～27日、柏市)
- 第4回領域会議 (2017年5月26日～27日、京都市、関連 CREST・さきがけ合同開催)
- 第5回領域会議 (2018年1月27日～28日、府中市)
- 第6回領域会議 (2018年8月30日～31日、鳥取市)
- 第7回領域会議 (2019年1月28日～29日、柏市)
- 第8回領域会議 (2019年8月29日～30日、浜松市)
- 第9回領域会議 (2020年2月3日～4日、千葉市)
- 第10回領域会議 (2020年7月2日、オンライン)
- 第11回領域会議 (2020年10月24日、オンライン)

研究総括による研究実施場所訪問 (サイトビジット)

研究者の半期の進捗報告・自己評価、ならびに領域会議での研究者及び総括・アドバイザーからのフィードバックをもとに、研究総括との個別議論の機会を設けた。とくに、情報学から参画したさきがけ研究者に対しては、農学を専門とする領域アドバイザーも同行し、農学観点からの研究計画の適切性について議論を実施した場合もある。また、各研究者の要望に応じ、領域アドバイザー等を通じて栽培試験場所の紹介を行ったほか、本領域の他の研究者に積極的にアドバイスを求めるよう、研究総括より指示を行った。

情報科学と農学や生物学を跨ぐ本領域で、両方の知識を十分に持った研究者は少なく、各研究者と、十分に時間をとって個別のやりとりを行い、具体的問題点や課題を見だし、解決策を議論しアドバイスを行った。このとりくみはとても有益であった。中途米国に1年間滞在した研究者1名と、コロナ禍の2020年度は、現地訪問ができず、オンライン会議で代替した。



サイトビジットと現地見学

以下の通り、具体的な実施回数は、オンライン7回を含み合計66回である。この回数には、研究者がJSTに来訪して行ったもの、採択に際して要件を付した者向けに、研究開始直

前に研究総括が個別に面談した事例も含む。研究者間で回数に大きな差があるのは、研究進捗や直面している課題の大きさによるが、研究者総数が比較的少ないため、手厚い対応ができ、成果にも結びついたと思われる。芽室町の1名と後に福岡市に異動した1名を除き、東京周辺、名古屋、関西に研究者が集中しているため、1日に3カ所程度訪問できる場合もあり、比較的効率的であった。

一期生

伊勢武史研究者 (3)、杉浦綾研究者 (3)、野田口理孝研究者 (5)
福田弘和研究者 (2)、峰野博史研究者 (3)、矢部志央理研究者 (7)

二期生

浅井秀太研究者 (4)、潮雅之研究者 (2)、辰己賢一研究者 (5)
西内俊策研究者 (6)、野下浩司研究者 (3)、松井秀俊研究者 (5)

三期生

岩山幸治研究者 (5)、宇都有昭研究者 (2)、大倉史生研究者 (2)
小野圭介研究者 (4)、戸田陽介研究者 (3)、四倉聡妃弥研究者 (2)

(2) 研究課題間、他の研究領域や研究機関、異分野との連携・協力の推進

融合分野領域である本領域にとって、分野横断型の連携や協力の推進は極めて重要であった。以下、本領域として実践した下記の活動内容についてまとめる。

- ① 領域内の連携
- ② 同じ戦略目標1に相補的に貢献するよう設定された植物科学3領域間の連携
- ③ 主に戦略目標2「社会における支配原理・法則が明確でない諸現象を数学的に記述・解明するモデルの構築」を共有する領域との連携
- ④ データ共有に関する調査研究
- ⑤ 公開セミナーやワークショップによるアウトリーチ活動
- ⑥ 国際ワークショップ主催による国際連携で日本のプレゼンスの強化
- ⑦ 国際シンポジウムへの領域チームとしての参加による世界情勢把握
- ⑧ 研究者コミュニティの醸成と学会の設立

① 領域内の連携

JSTの求める、バーチャル研究所としての領域は十分に確立され、終了課題とも連携は継続している。領域内の研究者ネットワークは領域開始直後から、それぞれの得意分野をもって相補性を発揮しながら、期を超えて自律的に確立されてきた。例えば、峰野研究者は福田

研究者の遺伝子発現解析技術を使って、トマト水分要求との関係を理解することで生育制御のさらなる高精度化を目指し、福田研究者は峰野研究者のオプティカルフローによる画像診断技術で、レタスの高精細生育モニタリングを実施している。また、西内研究者は松井研究者の関数データ解析手法を用いて、水稻の歴史的データから栽培条件と生育の関係の解明をめざし、松井研究者もそのデータを利用することで新たな関数データ解析手法にチャレンジしている。さらに、大倉研究者と戸田研究者は、深層学習による病害診断について共同研究を進め、その成果は一流国際誌 (Toda et al., Plant Phenomics, Article ID 9237136, 2019) に掲載された。この他にも、小野研究者と伊勢研究者の水稻穂の画像からの自動検出に関する共同研究、岩山研究者と矢部研究者の連携など数多くの連携関係が生まれている。

② 同じ戦略目標 1 に相補的に貢献するよう設定された植物科学 3 領域間の連携

本領域の戦略目標の一つである「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」を共有し、同じ年次に開始された、CREST 植物頑健性と、さきがけ「フィールド植物制御」とは、総括がお互いの領域会議等に参加することはもちろん、それぞれの研究者が、お互いの領域会議に参加して、全体の研究内容を把握するとともに、領域会議で数名ずつ相互に話題提供を行うことを積み重ねてきた。2017 年 5 月には 3 領域合同の領域会議も開催した。これら 3 つの研究領域は異なるアプローチにより相補的に戦略目標に貢献するよう設定されていることもあり、相互の情報交換は必須のことでもあった。

その結果、当該領域の若手研究者を主たる参加者とした自主的な合同研究会 (2018 年 10 月 18 日～19 日、沼津市) の開催に繋がった。2019 年 1 月にはフェノタイピング¹に関する CREST 植物頑健性ワークショップ (2019 年 1 月 31 日～2 月 1 日、宮崎市) に本研究領域研究者が 3 名招待講演するとともに、研究手法にかかる演習を担当するなど、フェノタイピングにかかる先導的な役割を本領域の研究者が担うようにもなるなど、実質的な交流が広がった。

さらに、研究内容の新規性が評価され、三期終了時点で一期生の 3 名、二期生の 1 名、三期生の 2 名が CREST 「植物頑健性」課題の正式の分担者となり、さきがけでの研究成果を発展させながら貢献している。また、分担者にならずとも、データ取得方法や解析方法などについて、「植物頑健性」課題へアドバイスをを行っている研究者も少なくないなど、領域間の積極的交流は相互の研究進展に大きく貢献している。CREST 「植物頑健性」はさらに 2 年間継続するため、さきがけ領域のさらなる貢献も期待できる。なお、7 章で述べるように、これらの領域間連携は新学会設立への動きにつながった。

¹ 植物フェノタイピング：細胞レベルから器官・個体・個体群までの各レベルでの植物のふるまいを明らかにするために、新たな計測・計算手法によりそれらの表現型データを得て、遺伝学・生理学との連携を通じて植物学・農業に有用な知見を得るアプローチ。研究分野としてはフェノミクスと呼称

③ 主に戦略目標2「社会における支配原理・法則が明確でない諸現象を数学的に記述・解明するモデルの構築」を共有する領域との連携

本領域には二つ目の戦略目標「社会における支配原理・法則が明確でない諸現象を数学的に記述・解明するモデルの構築」があり、さきがけ情報通信技術分野へ分類されている。このことから、情報学系の研究者との相互交流を強化する観点で、各領域の研究総括の了承を得て、さきがけ「社会と調和した情報基盤技術の構築」研究領域、ならびに、さきがけ「計測技術と高度情報処理の融合によるインテリジェント計測・解析手法の開発と応用」研究領域より、情報学を専門とするさきがけ研究者（延べ7名）が本領域の領域会議に参加した。そして、本領域の領域会議ポスターセッションへの参加などを通して、本領域研究者との討議が行われた。その結果、情報学研究者との新たな人脈が本領域研究者との間に形成され、データ分析法等についてアドバイスをうけた研究者もいる。

④ データ共有に関する調査研究

本領域も含む、多くの研究者が情報科学と農学の研究の発展に寄与する重要なデータを収集している。しかし、研究者が扱うデータ量は比級数的に増大しており、それらを集約するデータベースの維持・管理は、費用や保守の面で限界を迎えつつある。そこで、本領域では、生命科学・農学に関わる多様なデータの保全を目的として、ブロックチェーンなどの分散型管理を含むデータ管理手法の調査および、植物データの管理に最適な手法について検討するフィジビリティ研究を実施した。

具体的には、植物科学研究におけるデータベースの維持コストや信頼性、可用性、保守性、保全性などの観点から既存のデータ管理方法を整理した。対象となるデータセットの性質により最適なデータ管理手法は異なるものの、アノテーションデータ作成に対する報酬の設計や学術的なコミュニティに期待される性質（学術的価値が直接的に経済的価値に変換されにくい、参加者が限定的など）が重要であり、承認者の設定や参加者の限定（コンソシアム型）、「半」分散型データ共有の枠組みの可能性を示した。

⑤ 公開セミナーやワークショップによるアウトリーチ活動

領域の研究のねらいや成果を一般に周知するとともに、さらなる連携の可能性を広げる目的でさまざまなアウトリーチ活動を行った。2015年度に発足した植物科学分野のCREST・さきがけ3領域のねらいや概要を、広く一般にアウトリーチするために、植物科学シンポジウム（2015年12月2日、東京都）を開催した。さらに、先行していた植物科学関連CREST領域も加えて、植物4領域（CREST「植物頑健性」、CREST「CO2資化」、さきがけ「フィールド植物制御」、さきがけ「情報協働栽培」）の植物科学合同シンポジウム（2016年10月3日～4日、東京都）も開催した。また、領域の成果を広く広報する目的で領域の成果発表会（2021年2月4日、東京）を開催した。

この他、さきがけ新分野開拓セミナー（第一回2016年2月25日、第二回2017年2月20

日)を開催した。ICTとの協創に関するワークショップ、研究者の講演を通じた異分野研究者の連携の機会として実施したものである。本領域と、さきがけ「計測技術と高度情報処理の融合によるインテリジェント計測・解析手法の開発と応用(情報計測)」、さきがけ「理論・実験・計算科学とデータ科学が連携・融合した先進的マテリアルズインフォマティクスのための基盤技術の構築(マテリアルズインフォマティクス)」との共催で開催した。計測、材料科学、農学のそれぞれの若手研究者が発表し ICT を切り口に新時代の科学を議論した。ACT-I「情報と未来」研究者の参加もあり、本領域のビジョンや目標を伝える場としても機能したと考えられる。



さきがけ新分野開拓セミナー。

さらに、情報協働栽培領域ワークショップ(2017年2月10日)を開催した。ここでは、先端情報科学と農学の協働をテーマに、さきがけ「情報協働栽培」1期生・2期生の研究の取り組み、ならびにCREST「ビッグデータ応用」の農学分野の研究課題に関して講演を行い、本領域の目的や重視する点について来場者に広く周知する場とした。また、2018年度が最終年度の募集となることから、本領域への応募喚起の場としても本ワークショップを活用した。

この他、農水省主催のアグリビジネス創出フェア(2016年12月14日~16日、2017年10月4日~6日)に、領域が最終的にめざす農業への出口展開に向け、現場への応用を重視する研究課題についてポスター出展を行った。

⑥ 国際ワークショップ主催による国際連携で日本のプレゼンスの強化

本領域を構成している研究要素として重要なフェノミクスを中心に、さまざまな国際連携活動を展開し、我が国における当該分野のレベル向上に貢献したとともに、さきがけ研究の先進性を持って当該分野の我が国のプレゼンス向上にも貢献するなど大きな成果を上げた。

具体的には 2 回にわたり「栽培のための野外フェノタイピングとモデリング国際ワークショップ」を開催した、第 1 回国際ワークショップ (1st International Workshop on Field Phenotyping and Modeling for Cultivation、2017 年 12 月 8 日～9 日) は、本領域研究者と CREST「植物頑健性」研究者が主体となり、フェノタイピングやモデリングの最新の研究動向について情報交換し議論するために開催した。12 名の著名な研究者を海外から招聘して企画・開催したもので、参加者総数は、緊密な討議のために絞り込み 85 名であった。フェノタイピング研究投資で先行する欧・米・豪及び近年大規模投資を始めた中国から、それぞれ基調講演を依頼し、各国の包括的な取り組み等について情報提供を得た。さらに、本領域研究者と CREST「植物頑健性」研究者が中心となって、フェノタイピング及びモデリングに関連する 6 つの技術分野でセッションを企画し、領域研究者自身が講演を依頼したいトップ研究者を国内外から招聘する形で実施した。本領域からも 3 名がセッション議長を務めた。また、ワークショップ前後にも各研究者が独自のサテライトセミナーやワークショップを開催し、非常に活発な論議が生まれた。本ワークショップの結果、さきがけ研究者が海外招聘者の研究室に、最大数ヶ月程度滞在して共同研究を実施する等の交流も生まれている。第 1 回ワークショップへの内外の評価は高く、日本の植物フェノミクス研究のプレゼンス向上には一定の役割を果たした。



第 1 回国際ワークショップ (左) と第 2 回ワークショップ (右)。

第 1 回の成功を受け、植物フェノミクス研究に関する学術的な議論を、前回同様参加人数を限定することでより深くできる場として第 2 回のワークショップを、国際的なフェノミクス国際シンポである IPPS2019 と IPPS2021 の間の時期である 2020 年 4 月開催で企画した。招聘者なども確定していたが、直前になってコロナ禍で無期限延期とせざるを得なかった。その後、コロナ禍の改善を見通せないことから、完全オンラインでの開催に切り替え、第 2 回国際ワークショップ (2nd International Workshop on Field Phenotyping and Modeling for Cultivation、2020 年 12 月 8 日～9 日) を開催した。今回は本領域の研究者が中心になって企画し、第 1 回同様に各セッション議長が、海外からの 16 名を含む招聘者でプログラムを構成した。今回も参加者を制限したが、114 名が参加登録した。

参画者の時差を配慮して、1 日目は日本時間朝 9 時～12 時、2 日目は日本時間 18 時～21

時という変則かつ比較的短時間のワークショップとした。各招聘者の講演は事前に 30 分録画として事前にオンデマンド視聴可能とした上、当日は 10 分間のサマリー講演と 20 分の討議という形で進めた結果、内容的には非常に充実させることができた。参加者は事前に発表を視聴してることが条件となるが、繰り返し視聴できるなどより理解が深まり、議論にも余裕がでて深化できるなど、海外参加者からも非常に好評で、IPPN (International Plant Phenotyping Network、IPPN の主催者) が、頻繁に行っている Webinar にもこのやり方を導入することになった。録画された発表には全部英語字幕をつけたが、会議後、領域研究者が中心になって日本語字幕も付加して公開することとした。そのため、多くの日本人研究者にとっても、植物フェノタイピングの世界の最先端の状況についてより理解が進むことは確実である。このような、独自のワークショップの進め方も含め本領域研究者によって企画立案されたもので、かれらの積極性と視野の広さを高く評価したい。

⑦ 国際シンポジウムへの領域チームとしての参加による世界情勢把握

フェノタイピング研究としてもっとも重要な国際会議 IPPS2018 (International Plant Phenotyping Symposium (2018 年 10 月 2 日～5 日、豪州、アデレード) に、本領域から 7 名のメンバーと総括が参加した。本領域が主導して開催した上述の国際ワークショップに招聘した同分野の先端研究者の多くは、植物フェノタイピングの研究者団体 International Plant Phenotyping Network のメンバーでもある。本ネットワークが運営するシンポジウムである International Plant Phenotyping Symposium では、植物フェノタイピングだけではなく、農学への情報科学の活用やデータ管理などについても積極的に議論が行われている。このため、本領域研究者も本シンポジウムに積極的に参加し、海外の研究者と交流を深めた。自身の研究テーマの国際的な立ち位置について情報収集を行い、議論を行うとともに、ポスター発表、口頭発表を行った。ちなみに、本領域総括も本シンポジウムで基調講演を行っているが、本領域の活動が、国際的に周知されつつあることを示している。



IPPS2018 への領域チームの参加。

引き続き、IPPS 2019 (International Plant Phenotyping Symposium、2019 年 10 月 22 日～26 日、中国、南京) へも、本領域の研究者 3 名と総括が参加し、ポスター発表、口頭

発表を行った。発表件数・参加者数ともに、前年度開催された IPPS2018 と比較して大幅に増加した。このことは、国際的な、とりわけ中国における植物フェノタイピング研究への高い注目度を表している。また、いわゆるスマート農業の現場で使える中核技術として応用するための内容が多く発表されていたことが印象的であった。多くの発表を聴講する中で、本領域で行われているようなフェノタイピング関連研究が、基礎研究としては相当先進的で優位性があることを認識する一方、現場応用も含めた裾野の広がりという意味では、我が国は相当遅れており、本領域の成果を活かしながら、日本における分野の発展に寄与すべき責任を痛感した。

⑧ 研究者コミュニティの醸成と学会の設立

上述のように、本領域は領域を構成する重要な研究分野のひとつである植物フェノミクス研究を、日本で主導する立場になったが、そのための研究者プラットフォームが存在していなかった。そこで、日本における植物フェノタイピング研究の情報交換や情報発信を通じた研究進展を目指す研究者コミュニティの設立を、本領域研究者や総括ならびに磯部領域運営アドバイザーらが中心となり進め、2019年3月開催の日本育種学会第135回講演会において、日本植物フェノタイピングネットワーク（JPPN）を設立した。

また、関連のCREST「植物頑健性」、さきがけ「フィールド植物制御」と本領域の総括の共同提案で、全く新しい学会への発展を想定した研究会も2020年9月23日に設立された。これは、同じ戦略目標1を共有し3領域連携のもと培ってきた、農学・植物科学・情報科学にかかる研究者が一堂に結集した統合オミックス型の研究分野とそのための連携体制を発展させるためには、既存の諸学会では十分ではなく、新分野を支えるプラットフォームが必要であるという共通認識にたったものである。同研究会の設立幹事11名のうち、9名は3領域の研究者である。

さらに、本領域が中心となって開催した2回の国際ワークショップでの、世界の先端フェノミクス研究者との議論も引き金になって、アメリカ科学振興協会（AAAS）傘下の Science Partner Journal の一つとして、Plant Phenomics 誌 (<https://spj.sciencemag.org/journals/plantphenomics/>) が2019年1月に発刊されるに至っている。本領域の総括が初代編集長となるとともに、領域研究者1名も世界の一流研究者と並んで同誌のエディターに就任している。

(3) 研究費配分上の工夫

当初予算について、研究内容の縮小・絞り込みなど採択条件等に合わせて減額を実施した。期間中は年に2回程度、追加予算の要望調査を行った。その増額理由について説明求め、さらにサイトビジット等で具体的に協議した例もある。妥当なものについては原則承認したが、その際も領域全体でのバランスはもちろん、野外での栽培実験を伴う農学研究特有の課題への配慮が重要であった。例えば、高価なハイパースペクトルカメラなどまだ技術的に十

分にこなれていないセンサー類など、野外での安定利用にはまだリスクがある場合も多く、購入前の十分な検証を求めた。また、不順な天候等で野外実験を失敗するなど将来への不確実性へ配慮して裁量予算に余裕を持たせることも必要であった。例えば、2016年の北海道十勝地方の豪雨で、領域研究者は同年のデータ収集がほぼ出来なかったが、領域として野外での研究を求めている以上予算としてもそのような不確実性への備えも必要となった。

(4) 研究領域としての人材の輩出・成長の状況

生産性と持続性を両立できる農業の実現が迫られる中、いわゆるスマート農業への期待が高まっている。しかし、現状は相当に未熟で、それに貢献できるデータ科学、ロボティクス、IoTなどのさらなるイノベーションが求められている。本領域はそのような背景のもと設定されたともいえるが、そのようなイノベーションのためにもっとも求められているのは、情報科学と農学・生物学の双方を俯瞰し理解できるリーダー人材の育成であった。これまでも、情報系からの農学への挑戦はあったが、生物が持つ特有の複雑性への理解が足りないこともあり、一部のロボット開発などを除きあまりうまくいっていない。一方、農学系も情報科学を十分に理解し自らアルゴリズム開発できる人材は希である。本領域の開始当時、良い提案内容から採択された課題でも、双方が十分に揃った研究者はまれであった。しかし、例えば峰野研究員のように、農学的知識を全く持たない状況から、自ら農学的知識を蓄積し、従来基礎研究であった、篤農家なみにトマトを栽培できるAIシステムを実用段階まで実装し、その販売のために起業した者もいる。この他にも、大倉研究者、宇都研究者、戸田研究者など、従来の自分の専門枠を大きく飛び越えて、成長した研究者も少なくない。また、皆バーチャル研究所としてのさきがけ領域を良く理解し、非常にスムーズに相補的な連携体制を柔軟な発想で構築し、国際ワークショップの企画運営なども見事にこなせるようになった。

昇任

さきがけ研究期間に昇任した研究者は、18名中9名と半数であった。大学では、准教授から教授へ2名、助教から准教授2名、研究員から特定准教授1名、研究員から助教2名が、国研では、主任研究員から上級研究員1名、契約研究員から研究員1名が昇任した。以下、一部の昇任者について紹介する。

峰野研究員（静岡大学、准教授から教授）：新規機械学習アルゴリズムを用いて、画像からトマトの渇水状態を把握、最適な自動灌漑を実現して、篤農家並みに高品質トマト生産を実現できるシステムを開発。さらに社会実装まで展開した。

福田研究員（大阪府立大学、准教授から教授）：レタスの生理的な概日リズムをモデルに組み込み、完全人工光型植物工場での生産安定化を実現するための基礎的知見を見いだした。

大倉研究員（大阪大学、助教から准教授）：新規深層学習法をたくみに利用することで、作物の葉が付いた外側画像から内部の枝構造を推定する手法を発案した。

岩山研究員（滋賀大学、助教から准教授）：ベイズ最適化問題に、気象条件という不確実性を組み込み、作物の最適生育条件を不確実な気象条件下でも発見できる手法を提案した。

国際ワークショップマネジメント

別途記述したように、2回の国際ワークショップを開催したが、2020年12月に開催した第2回国際・栽培のためのフェノミクスとモデリングワークショップ（2nd International Workshop on Field Phenomics and Modeling for Cultivation）の企画・運営は本領域の3期生が中心になって企画・運営を行った。オンラインワークショップの開催方法も含めて、関連の国際コミュニティでも極めて好評で、今後の世界標準となるかもしれない。分担・連携などチームワークも非常に良く、バーチャル研究所員として成長した姿を見せた。

受賞等

浅井研究員が日本植物病理学会 学術奨励賞（日本植物病理学会）、潮研究員が第22回日本生態学会宮地賞（日本生態学会）、松井研究員が日本計算機統計学会2015年度論文賞（日本計算機統計学会）と応用統計学会奨励論文賞（応用統計学会）を、大倉研究者がバイオメトリクス研究会奨励賞（電子情報通信学会）、教育功労賞（電子情報通信学会）、MIRU 論文評価功労賞（MIRU2020 実行委員会・プログラム委員会）を受賞した。

国際会議での招待講演

合計48回の招待講演が行われ、そのうち7回は国際会議であった。内訳は潮研究員2回、辰己研究員1回、野下研究員2回、松井研究員が2回である。

(5) その他マネジメントに関する特記事項

三期生の四倉研究者は、前年応募時にJSTの2016年度特定課題調査経費に採択され、十分に下準備を行った上で採択された。環境とアレルギー関連遺伝子の発現データを解析し、低アレルギー作物を効率的に創出しようとする意欲的な提案であり、材料とするコムギ栽培について、国内関連研究者との連携体制を構築するとともに、本領域の研究者ともフェノタイピングやモデル構築について密接に共同研究体制を整え、データが出だしたところで、事情により領域での研究を中断せざるを得ない状況になった。バイタリティもあり、新規性の高い研究であっただけに領域としても非常に残念な事態であった。

7. 研究領域としての戦略目標の達成状況について

(1) 研究総括のねらいに対する研究成果の達成状況

本研究領域は、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」実現に向けた基礎的・基盤的研究開発を情報科学と農学・植物科学との連携のもとで行うことを目的としている。2050年にいたる食の安全保障への危惧を解決するための研究開発ともいえるが、極めて複雑な制約のもと、高収量・高品質な農産物生産の生産性と持続性の両立をめざす大きな挑戦である。しかも、対象は実験植物ではなく実際の実用植物（作物）に限定し、さらに実験がより困難な野外での研究をできる限り実施することを求めた。これは、多くの作物は野外で栽培され、これまでのような室内実験で得られた知見だけでは実際の作物の栽培制御は困難であるからである。

さらに、それらを実現するために必要なより具体的な研究開発例として、下記を提示して研究提案を求めた。

1. 野外における植物の生体機能の革新的な計測技術
2. 多様で大規模なデータから最適栽培に資する知識を抽出する技術
3. 植物栽培の地域特異性を凌駕できる汎用生育モデルや不確実性を考慮できる生育モデル
4. 圃場生態系を記述する複雑系モデル
5. 野外での生育を精度よく制御する技術

また、1～5の研究へ取り組むために重要と思われる技術キーワード例として、「ビッグデータの構築と利用」、「歴史的データ（レガシーデータ）の活用」、「時系列データの活用」、「環境と遺伝子型の相互作用の理解」、「栽培デザイン」、「暗黙知の定量化」、「ブラックボックス化の許容」も、応募に際して提示した。

以上の分類項目に従って、採択課題を整理したのが表1である。「野外における植物の生体機能の革新的な計測技術」や「多様で大規模なデータから最適栽培に資する知識を抽出する技術」が多く、「圃場生態系を記述する複雑系モデル」や「暗黙知の定量化」に該当する採択課題はやや少ない傾向があった。一方、要素技術として全ての課題が「栽培のデザイン」に貢献できるものであった。なお、当初に示した「ブラックボックスの許容」は、たとえ原理的に説明できなくてもモデル等が栽培イノベーションに役立てばよいというものである。通常原理からアプローチする植物科学の常識を越える事を期待したものであるが、プロジェクトの期間中、例えば深層学習のブラックボックスの中身を理解して、新知見を得るような研究も発展した。

以下、提示した研究開発分類ごとに、達成状況を検証したい。

表1 領域での設定課題例や重要技術キーワードと採択課題の関係（目標番号は本文参照）。

期	研究者	研究タイトル	目標番号					重要キーワード						
			1	2	3	4	5	ビッグデータ	時系列	レガシーデータ	ブラックボックス化	環境と遺伝子型の相互作用	栽培デザイン	暗黙知の定量化
I	伊勢武史	粒子フィルタを用いた森林植生モデルのデータ同化手法の確立と環境変動下の植生動態の将来予測			●			●	●				●	
I	杉浦綾	超高精細フィールドセンシングによる個体生育モニタリング	●		●			●	●				●	
I	野田口理孝	農作物の早期診断技術の創出と栽培法の最適化	●						●				●	
I	福田弘和	精密環境オミクスデータに基づく植物生産不安定性の解明	●	●	●			●	●			●	●	
I	峰野博史	多様な環境に自律順応できる水分ストレス高精度予測基盤技術の確立	●				●	●	●		●		●	●
I	矢部志央理	量的遺伝学に基づく環境応答型イネ選抜モデル開発			●					●	●	●	●	
II	浅井秀太	病原ゲノミクスによる土壌診断法の開発	●						●				●	
II	潮雅之	野外の生物群集ネットワークを利用した植物の動態予測		●	●	●	●	●	●			●	●	
II	辰己賢一	確率光合成モデルによる高汎化型イネ成長応答モデルの開発			●				●		●		●	
II	西内俊策	レガシーデータに基づくイネの品質と生産性に関わる因果関係の解析と機械学習を用いたオンサイト生育診断技術		●						●	●	●	●	●
II	野下浩司	マルチスケールデータ融合による草姿・草型の超解像フェノタイピング技術の開発	●										●	
II	松井秀俊	時系列生長データに基づく植物生長の統計的予測技術の開発		●	●				●	●			●	
III	岩山幸治	不確実環境下における栽培条件のベイズ的最適化		●	●		●	●	●	●			●	●
III	宇都有昭	マルチモーダル・マルチテンソラル個葉スケール空撮画像のテンソル分解による作物の活性度推定法の開発	●						●				●	
III	大倉史生	緻密な生育管理を実現する「未来栽培」のための植物の三次元構造復元と植物ライフログの構築	●						●		●		●	
III	小野圭介	自然条件下で光合成誘導時間を連続的に推定する手法の開発	●					●	●				●	
III	戸田陽介	ディープラーニングを利用した植物表現型の定性的・定量的計測技術の開発		●	●			●		●	●		●	
III	四倉聡妃弥	アレルゲン低減食品開発のためのデータ科学による作物育種	●	●								●	●	

1. 野外における植物の生体機能の革新的な計測技術

表にあるように多くの課題が関係しているが、ドローン画像から圃場にある膨大な個体数のひとつひとつの生育を評価できる技術、ドローン画像から圃場にある膨大な葉の角度を推定してその分布を得る技術、葉に隠れて見えない枝構造などを高精度に推定する技術、トマトの水ストレス状態を外観から推定する技術、作物個体群の三次元再構築を高精度化し個体群構造を分布として記述する技術、圃場開放系で圃場の光合成量の微細な変化をとらえる技術、師管液を簡便に採取しその内容を迅速に分析できる技術、フザリウム分化型の特異性をバイオマーカーで検出できる技術など、これまで存在しなかったさまざまな革新的な計測技術が開発された。いずれもいわゆるフェノタイピング技術であるが、その革新性はいずれも極めて高く、期待に応える研究開発がなされたと考える。

ジェノタイピングが次世代シーケンサの発展で急激に高速化するなか、対となるフェノタイピングは低速で手間がかかるなど、研究開発のボトルネックとなってきた事もあり、世界でも急速に伸びている研究分野ではある。その中で、日本の立ち後れが指摘されていたが、本領域は、他の二領域とも連携しながらその遅れを大幅に解消した。欧米のフェノタイピング研究開発はより簡単な屋内での利用を想定して発展してきたが、本領域での開発は、ほとんどが遙かに困難な野外での利用を想定したもので、その実用性から大きな優位性がある。また、活発な国際活動を通して、本分野における日本の存在感を示すこともできた。

2. 多様で大規模なデータから最適栽培に資する知識を抽出する技術

膨大なオミクスデータから植物の生育不安定性要因の発見とその検出のための技術、膨大な環境 DNA 情報から特定の生物種と水稻の生育の関連性があることの発見とそのための手法確立、農業試験場等に蓄積される膨大な歴史的データ（レガシーデータ）からイネ生育に関する原因と結果の探索、関数データ化により膨大な時系列データからムギやイネの生育特性の抽出、ベイズ最適化を利用した最適栽培条件の探索、ネット上の作物病徴画像を集合知として活用して品質の良い深層学習用学習データを効率的に構築する技術などの成果があった。いずれも、先進性が高く、総括が想定していたねらいに合致する。

通常、1年1作でビッグデータ蓄積が容易でない農業データにおいて、眠っている歴史的データの再利用は、種子等は保存されていて遺伝子型取得が可能なことも相まって、有望視されてきた。しかし、1980年以前はほぼ紙媒体のアナログデータしか無く大きな障害となっていた。上記の例では、1930年代にまでさかのぼってデジタル化を実現した点を高く評価したい。確立したさまざまなデジタル化プロトコールは、国内に死蔵されている膨大な農業データの再活用への貢献が期待できる。

3. 植物栽培の地域特異性を凌駕できる汎用生育モデルや不確実性を考慮できる生育モデル

植物生育フェノロジー予測モデルのパラメータをデータ同化で高精度化する手法開発と森林フェノロジーやブドウ生育に関する新知見の獲得、大規模圃場における地上部個体識別技術を応用したジャガイモ地下部生育予測モデルの構築、高精度オミクスに基づく生育不安定性の予測、環境と遺伝子の相互作用も考慮する水稻の収量構成要素予測モデル、不確実な変動が多い環境データ時系列を関数データ化した生育予測モデルの開発、光合成を確率過程と見なした光合成量予測モデル、ベイズ最適化への気象条件など不確実性の導入、環境 DNA の時系列変化から推定した生物種動態と水稻生育の関係のモデル化などの成果を上げた。

いずれも、本領域で主な対象とする野外栽培で大きな障害となる不確実性や複雑性などに果敢に挑戦したモデル開発となっている。野外での栽培制御の困難性を乗り越えることを大きな目標とした領域にとって大きな成果である。例えば、環境と遺伝子の相互作用を考慮する収量構成要素予測は、気候変動適応型品種育成の効率化に大きな貢献をすることが

期待できる。また、これまで未知であった圃場生態系と水稻生育の間の関係を記述したことは画期的発見である。

4. 圃場生態系を記述する複雑系モデル

水田水という準人工環境の環境 DNA の時系列変化から、付近に存在する数千種の生物種動態を推定しそれらの相互関係を、水稻生育も含めてモデルで記述したことは極めて画期的である。得られた知見や用いられた手法は、作物栽培研究に全く新しい道を開く可能性があり、本領域が求めた、情報科学により優れた先進性と応用可能性を両立させた革新的成果と言える。

5. 野外での生育を精度よく制御する技術

ベイズ最適化で最適栽培条件を効率的に発見する技術、非破壊で検出した作物の水ストレスから灌漑を最適に制御することで篤農家並みの高品質トマトを生産する技術、環境 DNA の変動から水稻生育への関連が見つかった生物種で水稻生育を制御できることの発見などの成果があった。高品質トマト栽培支援は、極めて基礎的で革新的な要素技術開発に始まり、3年間で革新的な実用技術としてほぼ確立できた大きな成果である。また、農業生態系を構成する特定の生物種の量を操作することでイネの生育が制御できることを、実際に実験で示せたことは極めて革新的である。まだ、基礎研究段階ではあるが、本領域が目指す、将来の環境保全型の全く新しい革新的栽培技術開発に向け大きな示唆を残す成果である。

以上のように、当初の目標は十分に達成したと考えるが、同時に、計測データやモデルを活用して、野外での作物生育を最適に制御する研究開発はまだ不十分で、戦略目標達成のために、今後さらに重点化すべき研究開発も明らかにすることができた。

(2) 研究領域全体として見た場合の特筆すべき研究成果

領域における研究開発は、これまでその把握が困難であった作物の状態を、高速非破壊に計測する手法開発や、これまで定量化が困難であった篤農家の暗黙知を独自の AI 技術で代替するなど、優れたものが多いが、その中でも、極めて新規性の高い特筆すべき成果として、3期生・宇都昭研究者による、陰影を利用した作物個体群の葉身角度分布推定を挙げたい。これにより単純なドローン画像から圃場全体の光受容効率が容易に推定でき、実際の栽培条件下で光合成能力の高い品種育成や栽培技術開発への大きな貢献が期待できる。個体群にある相互作用を評価できないこれまでの個体別の計測評価ではなしえない画期的貢献といえる。

3期生・大倉史生研究者による、作物外観画像から見えない枝構造の詳細な3次元構造を再構築する技術も挙げたい。これまでそのような葉群内部の作物構造を迅速・非破壊に推定する方法は全くなく画期的なものである。果樹やダイズの見えない果実数や鞘数の推定に

も応用可能であると期待できるなど、その応用性も非常に高い。

また、これまで全く知られていなかった圃場の生態環境と作物の生育応答野関係を、環境DNAの時系列動態から情報科学的に解明し、さらにその知見に基づき有機農業の優位性をも説明しようとした2期生・潮雅之研究者による研究開発も、将来の全く新しい持続的栽培技術を連想させるものとして特筆に値する。

さらに、外観画像と気象条件から深層学習等を利用してトマトの水ストレスを推定、自動最適灌漑で篤農家に匹敵する品質を実現した1期生・峰野博史研究者による研究開発も特筆に値する。その成果を活かして起業し、社会実装まで実現した点も賞賛に値する。

(3) 研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献

本領域の研究成果として、論文53報（うち国際誌46報）、特許出願17件（うち国際出願2件）、口頭発表286回（うち国際学会50回）があった。口頭発表のうち48件は招待講演で、そのうち7件は国際会議でのものである。領域の性格上、野外圃場でのデータ取得に依存する課題も多く、年1回の栽培実験しか実施できないことも普通である。中には、悪天候で1年間データ取得ができなかった場合もある。また、結果検証のために今後も数年栽培を続けてデータ蓄積が必要なことも考えられる。このように、野外栽培を伴う農学系の研究では、論文発表までのタイムラグがプロジェクト終了後数年間あることも珍しくないため、今後も本領域成果の論文等が相当数公表されることが期待できる。

以下、戦略目標の達成にとくに貢献できると考える代表的課題の成果を抜き出して紹介する。

杉浦綾研究者

「超高精細フィールドセンシングによる個体生育モニタリング」

自律飛行ドローンによる圃場モニタリング・パイプラインを構築し、機械学習による判別モデル等を駆使しながら、数万個体が栽培されている大型圃場でも時系列画像を用いて各個体を高精度に分割し、個体それぞれの生育評価を迅速にできるようにした。対象としたバレイショ地上部の草丈、植被率等の時系列にそった生育曲線やマルチスペクトル曲線の高速度・高精度取得にとどまらず、個体別の地下部収量の推定にもチャレンジし、バレイショ生育モデルの再構築を行ったことも評価できる。高速個体別評価の実現がもたらす品種開発やロボット等と組み合わせた超精密農業実現への貢献は限りなく広く、他の作物への応用も期待できる。

Ryo Sugiura et al., Field phenotyping system for the assessment of potato late blight resistance using RGB imagery from an unmanned aerial vehicle, *Biosystems Engineering*, 148: 1-10, 2016.

野田口理孝研究者

「農作物の早期診断技術の創出と栽培法の最適化」

植物の師管は植物の養分伝達路であり、同時にさまざまな情報物質が流れる血管のようなもので、師管液のモニタリングは植物の状態を直接・高精度に知るために重要である。これまで、それを簡便に計測診断する方法が存在しなかった。本研究は、師管液から mRNA やタンパク質などを、これまでに比べて遙かに短い 2 時間以内に検出可能とする画期的な診断デバイスの基盤技術を確立したもので、高く評価できる。また、偽陽性の発見や mRNA 移動性に関するカタログ化など、検出の高精度化や植物科学基礎研究への応用も開始して成果をあげつつあることも評価できる。今後は、基礎研究にとどまらず、簡便な師管液サンプリング手法の確立とともに、手法全体のパッケージ化やサービス化など、本基盤的成果を用いた作物診断現場への応用が期待できる。

Michitaka Notaguchi et al., Cell-cell adhesion in plant grafting is facilitated by β -1,4-glucanases. *Science*: 369, 698-702, 2020.

出願番号：特願 2018-081429 出願日：2018/4/20

発明の名称：植物物質検出用流路チップ

福田弘和研究者

「精密環境オミクスデータに基づく植物生産不安定性の解明」

概日リズムに駆動される非線形生理応答により生産不安定性が存在するとの仮説のもと、レタスの植物工場において詳細な生育・環境モニタリングする系を構築し、工場の利益を決定するパラメータの同定や利益モデルの提示を行った。また、遺伝子発現系から概日リズムの動態をモニタリングする系を構築し、リズムの位相応答を非線形応答関数でモデル化し、それに基づき求められたリズム破壊条件で生育変化を起こすことも実証した。これらの基礎的知見をもとに、栽培を制御することで生産不安定性を回避できるようになることが期待できる。

Yusuke Tanigaki, Hirokazu Fukuda et al., Simplification of circadian rhythm measurement using species-independent time-indicated genes. *Current Plant Biology*: 19, 100118(1-8), 2019.

出願番号：特願 2017-68474 出願日：2017/3/30

発明の名称：ストレス耐性植物の製造方法

峰野博史研究者

「多様な環境に自律順応できる水分ストレス高精度予測基盤技術の確立」

日本の温室トマトは篤農家の経験と勘に依存した水管理などにより、世界にもまれな高品質を実現している。本研究は、画像評価アルゴリズムやマルチモーダル深層学習アルゴリ

ズムなどを新規提案し、トマト葉のしおれ画像と環境情報からトマトの水分状態を非破壊・非接触に評価し、最適灌漑を自動化することに成功した。非線形で複雑な作物の生理状態を、比較的簡単に観察できる計測データで機械学習できることを示した画期的成果といえる。これにより、これまで超えるのが難しいと思われていた「少なくとも篤農家並」の能力をコンピュータに持たせることができることを実証したことも特筆に値する。今後、トマト以外の高付加価値施設系作物への応用も期待できる。

S. Shibata, R. Mizuno, 1 and H. Mineno, Semisupervised Deep State-Space Model for Plant Growth Modeling, Plant Phenomics, Volume 2020 |Article ID 4261965, 2020.

出願番号：特願 2019-032989 出願日：2019/2/26

発明の名称：灌水タイミング決定システム、灌水制御システム、灌水タイミング決定方法

潮雅之研究者

「野外の生物群集ネットワークを利用した植物の動態予測」

これまで、圃場の生物多様性と作物生産の関係は全く未知であったといっても良い。本研究は、環境 DNA を用いて、水田に生息する 1000 種以上の生物を網羅的に評価し、それらの時系列変化とイネの生育の関連解析を行うことで、イネ生育に関わる生物を数種特定できた。これは、生物学的にも農学的にも極めて新規性の高い発見といえる。また、それら生物とイネの遺伝子発現との関係を比較することで、それら生物の機能的関係性まで検証したことはとても意義が高く、作物栽培研究分野に全く新たな方向性を提起したとも言える。このような複雑系解析に非構造モデリング手法である EDM が十分に有効であることも示した。さらに、その成果を、3 年間の短期間にもかかわらず、実際の慣行栽培水田ならびに自然栽培水田を利用した実験に適用して実証しようとしたことも評価できる。今後、今回得られた知見や手法が、将来の持続的農業生産に大きく貢献できることが期待できる。

Masayuki Ushio et al., Demonstration of the potential of environmental DNA as a tool for the detection of avian species, Scientific Reports 8:4493, 2018.

出願番号：特願 2018-79640 出願日：2018/4/18

発明の名称：強く同期した周期性を持つ時系列データ間の因果関係を検出する解析手法

野下浩司研究者

「マルチスケールデータ融合による草姿・草型の超解像フェノタイピング技術の開発」

作物個体群構造は、個体群全体の光合成能力などを支配する農業生産上極めて重要な要因である。しかし、極めて物理的構造が複雑で、それを定量的に評価することは非常に困難であった。本研究は、そのような作物個体群ないしは個体の葉群構造を確率分布モデルで記述することを提案するもので高く評価できる。とくに、葉群の葉身角度分布推定の提案は、今後の作物個体群の光合成効率評価への利用など、育種や栽培技術の高度化に大きな展開が期待できる。野外圃場における超高精度 3 次元再構築プラットフォーム開発も、今後の高

精細作物構造評価に巾広い応用が期待できる。

宇都有昭研究者

「マルチモーダル・マルチテンポラル個葉スケール空撮画像のテンソル分解による作物の活性度推定法の開発」

農作物の生産性を高くするためには、効率よく太陽光を取り入れることのできる葉群構造である必要がある。作物生産ポテンシャルを知るために、個体ではなく圃場全体の葉群構造を把握する必要があるが、これまでそれを迅速に把握する手法は存在しなかった。本研究は、ドローンで計測した空撮画像を使って、作物群落の上部の葉群の角度の分布を計測するための技術開発を行ったもので、葉の陰影情報を使って葉の角度を推定する。日射条件、カメラ角度、空撮画像が得られれば、既知の制約条件のもと、葉の画素単位で法線方向を高精度で推定可能とする画期的成果である。本成果は、作物品種毎の圃場における葉群構造の迅速な把握、ひいては光合成能力の違いなどの比較にも使える画期的技術として期待できる。

大倉史生研究者

「緻密な生育管理を実現する「未来栽培」のための植物の三次元構造復元と植物ライフログの構築」

植物の三次元構造は、生産性、品質、作業性など作物生産を多方面から左右する極めて大きな要因である。これまで、複数の方向から撮影された画像群から物体の三次元形状を再現する、三次元復元技術が広く研究されてきたが、葉などによる複雑な遮蔽などにより正確な復元は困難であった。本研究は、深層学習および三次元復元技術を応用し、植物を複数方向から撮影した画像から、葉などに隠れた部分も含む植物の形状を、一本の枝、一枚の葉に至るまで正確に復元するための技術を開発した。本技術は、三次元空間中のどの部分で枝が分かれ、どこにどのような形の葉があるかを高精度に再現するもので、枝ごとに作物の成長を時系列に沿って自動的に追跡することや、ロボットによる作物の剪定・収穫など、未来の栽培技術への応用が期待できる優れた成果である。

Takuma Doi, Fumio Okura et al., Descriptor-free multi-view region matching for instance-wise 3D reconstruction”, Asian Conf. on Computer Vision (ACCV’20) 2020/11/30

小野圭介研究者

「自然条件下で光合成誘導時間を連続的に推定する手法の開発」

野外の作物は、自然環境の変化を直接受けて光合成している。日射量は、晴れた日でも雲の通過等によって大きく変動するが、その変動に対して作物がどのような速さで反応しているのかを理解することは、作物の光合成能力をより高めることや、作物体内の状況を詳しく把握するためにも重要である。そのためには、実際の農地で栽培されている作物の光合成

速度を、開放系で非接触に詳細に測定する技術が必要であるが、これまで存在しなかった。本研究は、渦相関法を同時並行的に用いることで、開放系での光合成速度の計測を 30 秒程度で完了することを実現し、自然条件下の日射変動に対する光合成速度の反応時間を評価することに成功した。本成果は、野外における作物の光合成の動的変動の高精度評価を実現し、より深い光合成機能の理解や環境への適応性が高くより生産力の高い作物の開発へ大きく貢献することが期待される。

戸田陽介研究者

「ディープラーニングを利用した植物表現型の定性的・定量的計測技術の開発」

深層学習の応用範囲は植物科学・農学にもひろがっている。しかし、教師データ収集コストの高さ、教師データのアノテーションコストの高さ、作成した深層学習モデルのブラックボックス性による解釈性や真正性の不透明さなどの課題が、本手法の本格的普及の足かせになっている。本研究は、集合知の利用によるアノテーション付き画像の自動大量取得とそのデータ品質の確保や、深層学習を用いる病害虫診断モデルがブラックボックス内で認識している特徴量を可視化することで診断性能の向上に成功した。また、平面上に一部重なりながら配置する多数の種子の認識・計数モデルを例に、シミュレーションで生成した人工画像を教師画像として用いることで、一切の人為的アノテーションが無くても、高い判別精度を実現することにも成功した。以上の成果は、深層学習の植物科学・農学への応用性を一気に上げるものとして高く評価できる。

Toda Y, Okura F et al, Training instance segmentation neural network with synthetic datasets for crop seed phenotyping, Nature Communications Biology, 2019: 3, 173.

(4) 研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

戦略目標で謳われている食の安定供給への懸念が、農業生産の現場にも急速に広がっている。2020 年になって、EU の「Farm to Fork 戦略 (https://ec.europa.eu/food/farm2fork_en)」、米国農務省の「農業イノベーションアジェンダ (<https://www.usda.gov/aia>)」、農水省の「みどりの食料システム戦略策定 (<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kanky/seisaku/midori/team1.html>)」がアナウンスされた。いずれも農業生産の生産性と持続性の両立を謳うもので、SDGs への農業生産からの貢献をめざす。その達成のために、AI や IoT を利用する、いわゆるスマート農業は必須とされ、我が国でも強力な施策が始まっているが、ロボット作業機などを除き、それを支える栽培技術の現状は全く物足りない。

本領域での研究開発は、そのようなスマート農業実現のために必要性は認識されながらも、これまで困難とされていた要素技術の実現に向けて果敢に挑戦したもので、将来の農業イノベーションへの大きな貢献が期待できる。本領域の多くの成果はまだ基礎研究であり、実際の社会実装にはさらなる研究開発が求められるが、暗黙知であった篤農家技術を凌

駕できる高質トマト生産栽培支援システムを開発したように、実用レベルまで達したものもある。

本領域発の特許について、これまでに一期生から 11 件、二期生 2 件、三期生から 2 件の合計 15 件が出願された。フェノタイピング技術に関わるもの 6 件、データ解析法に関わるもの 6 件、栽培最適化モデリングに関わるもの 3 件である。峰野研究員は高品質トマト生産システムを構成する予測や制御に関わる要素技術、野田口研究員は師管液サンプリング診断チップに関する技術、福田研究員は作物栽培制御に関わる技術、伊勢研究員は画像判別技術、潮研究員は時系列データから因果関係をマイニングする技術や環境 DNA をサンプリングするための技術、宇都研究員は作物個体群構造を効率的に評価するための技術で出願している。

また、本領域の研究成果を活かして、3 名の研究者が、研究期間中に起業した。峰野研究者は、研究開発した超高品質トマト生産支援システムの社会実装加速のために、また戸田研究者は、自ら開発した病害診断システム等の開発技術を活かした開発サービス会社を、野田口研究者は、師管液サンプリングにも関係する会社を設立した。

(5) 本研究領域に続く研究資金の獲得状況

領域終了後の研究資金獲得について一期生は 670 万円から 20,999 万円、二期生は 580 万円から 1,710 万円を獲得しているなど、大きな差がある状況である。この中には CREST「植物頑健性」の分担者になり、資金を得ているものも 6 名いる。

(6) その他の特記事項

随所で触れているが、本領域の研究成果ならびに国際活動によって、日本における植物フェノミクスの国際的地位は一気に向上した。領域開始当時、欧米に比べ 10 年は遅れていると思われていたが、研究レベル的には同格になったと言える。

8. 総合所見

(1) 研究領域のマネジメント

本領域は、植物科学と情報科学にかかわる二つの戦略目標をもつ領域で、情報科学で作物栽培に大きな革新をもたらすための研究開発が目標となっている。気候変動下の 21 世紀の食の安全保障実現に関わる課題解決に向けた研究開発に、情報科学を最大限利用して貢献しようとするものである。もともと双方の領域を十分にカバーできている研究者は少なく、本領域の研究マネジメント上の目標のひとつは、そのような融合分野を将来に渡りリーダーシップをとれる人材育成であった。

本領域の採択者の専門背景は多様で、本領域で求められる双方のスキルを当初から有さ

ない者も少なくなかったが、戦略の達成に貢献できると考えられる良い提案は採択した。研究期間中の指導や、異分野研究者間の補完的連携で不足する知識や技術を学ばせる方針で進めた。この方針は、採択者の目標達成のための積極性やそもそも優れた研究者として有する素質にも助けられて十分に成功したと思う。

採択者が比較的少なく領域の規模が小さいことを利点に考え、時間的余裕をもたせオープンな議論の深化や連携体制の確立に役立った領域会議や、研究者の実情に合わせて必要に応じて柔軟に多くの回数を実施することができたサイトビジットは、ともにそのような目標達成に大きく貢献した。ある情報系研究者は篤農家を凌駕する AI システムを提案し採択された。当初の農学的知識はかなり貧困であったが、自らを磨き農家に指導的発言をするまでに成長した例や、逆に農学系研究者が深層学習に新アルゴリズムを提案し有力誌に掲載された例さえある。

また、領域内の連携の推進に加え、同じ戦略目標を共有して併走している CREST「植物頑健性」やさきがけ「フィールド植物制御」との研究者間ネットワーク構築も促進し、さらに幅広い研究者間の相互補完関係を確立できた。本領域終了後も続く、CREST「植物頑健性」の分担者に、本領域からなった者も少なくなく、JST が強調するバーチャル研究所としての機能も十分確立できた。以上のように本領域は、研究員が極めてヘテロな専門背景を持っていることを最大限活かしながら、各自の力を引き出し自主性を最大限尊重する事で、多くの成果を引き出した。

分散しない非常に密な関係を研究者、領域アドバイザー、総括の間で構築できたことは、各自の良い研究成果ばかりでなく、研究者からの発案で始まったデータ共有に関する領域内のフィジビリティ調査研究や、国際連携への際だった貢献、国内の関連研究プラットフォーム構築など領域のレガシーにも発展した。

国際連携では、領域が主催者になって世界の著名な研究者を招聘し、フェノミクスとモデリングをテーマに 2 回の国際ワークショップを実施した。世界の関連研究の最先端の状況を知り、我が国における当該分野のレベル向上に貢献した。また、本領域での成果もあって、急速に力をつけている当該分野の我が国のプレゼンス向上にも成功した。また、同ワークショップの質の高さから世界でも評価は大変に高いものとなった。領域チームとして、関連国際会議に参加したことも、同様に我が国のプレゼンス向上に貢献した。このような領域としての活発な国際活動は、急速に進展するフェノミクス研究の受け皿として 2019 年に創刊された Plant Phenomics 誌 (アメリカ科学振興協会 (AAAS) Science Partner Journal) に、本領域関係者が中心的に編集に関わるきっかけともなっている。

冒頭に述べたように、本研究の大きな目標は求められる農業イノベーションのために、情報科学と農学・生物学の双方を俯瞰し理解できるリーダー人材の育成であった。参加研究者の多くがこの意識のもと研鑽し、当初の目的は十分に達成できたと考えている。また、そのような研究者に構成された連携ネットワークの今後の活躍も大いに期待したい。上記国際ワークショップの成功もこのネットワークによるチームワークが大いに役立った。研究期

間中に半数の研究者が昇任するなどキャリアアップを果たしたことも良かった

(2) 研究領域としての戦略目標の達成状況

本領域が関わるふたつの戦略目標のうち、戦略目標 1「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」は、危惧が広がる 21 世紀の食料安全保障実現に立ちほだかる課題を、異分野融合で解決することを求めるものである。ひたすら生産性の最大化を目指す農業生産のための技術開発で 20 世紀の食の安全保証は一定程度担保されたが、21 世紀は生態系や生物多様性への配慮、水、土地、エネルギーなど有限な資源、気候変動による影響などさまざまな制約要因のもと、生産性と持続性が両立する農業生産を実現し、食料安全保障をもたらすことが求められている。最大化から最適化へのパラダイムシフトともいえるもので、非常に複雑な問題解決である。

本領域は、原則として野外での生育栽培かつ実用植物を対象にする研究開発という厳しい制約の下で実施された。これは、理想的な実験環境ではなく、できる限り実際の作物生産に近い状態で研究を実施し、真の問題解決に挑戦して欲しいという考えからである。実際、本領域におけるほとんどの研究開発は野外での栽培条件下で行われたものである。大きなチャレンジであったが、いくつもの画期的成果を出せたことは、より現実的な形でこの戦略目標達成に貢献できるものである。作物生産のイノベーションには、大別して栽培技術の革新と育種技術の革新がある。本領域はそのタイトルから栽培技術のイノベーションを主たる目標としているが、多くの成果は育種技術のイノベーションにも間違いなく貢献できる。

繰り返しになるが、本領域は情報科学を最大限活用して課題解決をはかるものである。本領域での研究開発の制約条件とした野外栽培での作物生育には、観測できていない要因も含めて、数多くの要因が複雑に相互作用しながら影響している。そのため、生物学的知識の積み上げによるモデル化は困難であることから数多くの数理モデルが開発され、戦略目標 2「社会における支配原理・法則が明確でない諸現象を数学的に記述・解明するモデルの構築」にも自ずと貢献している。

2020 年になって、戦略目標で謳われている食の安定供給への懸念が、世界の農業施策にも大きな影響を与えだした。EU の「Farm to Fork 戦略」、米国の「農業イノベーションアジェンダ」、農水省の「みどりの食料システム戦略策定」などが、立て続けに公表されている。いずれも SDGs での課題解決を見据えながら農業生産の生産性と持続性の両立を謳うものであり、例外なく農業生産技術のイノベーションの必要性を強調している。本領域での、画期的な研究開発は、単に研究成果だけでなく、関連 3 領域で構築された研究ネットワークも含めて、求められる農業技術イノベーションに今後も貢献し続けると確信している。

(3) 本領域を設定したことの意義

遺伝情報解析技術等の急速な深化は、植物機能の極めて詳細な分析・解明を可能にし、さまざまな画期的な発見をもたらしてきた。一方、そのような先端研究の多くは、実験条件の

斉一性や安定性を求め、対象植物もイロイヌナズナやミヤコグサなどいわゆる実験植物を対象に、実験室内で行われるものが主流となってしまった。ただ、そこでの成果が、実際の農作物の野外での栽培に直接活かすことはかならずしも容易ではなく、欧米では、植物科学先端研究がより複雑な野外での作物の機能応答の理解とその制御にかかわるものへのシフトが始まっていた。本領域や関連2領域は、そのような背景のもと始まったと言える。本領域では、言ってみれば「ラボからフィールドへ」という研究の大きなシフトに対応する挑戦的研究を採択した。多くの領域研究者が十分にその期待に応えたと思うと同時に、より困難な研究を展開しようとする研究風土の醸成にも貢献できた点に大きな意義があった。

また、純粋な先端植物科学研究から、現場の農業イノベーションに貢献できる研究として進化し、今回の戦略目標のもと数々生まれてきたのは、多くの背景を持つ研究者が一堂に会して連携して進めてきたことが大きな理由である。本領域は、農学、植物科学、生態学に加え情報科学、データ科学、工学などの分野からの参画が大いに領域を盛り上げ、同時に強力な異分野研究者ネットワークが醸成された。既存の学会がそのようなネットワークの受け皿にはなりにくいという観点から、JPPN（日本植物フェノタイピングネットワーク）や、植物科学関連3領域合同で研究会（近い将来に学会としての発展を想定）の立ち上げができたことも、本領域や他の関連2領域が設定された大きな意義と言える。

さらに、本領域の中でも盛んに研究されたフェノタイピング関連研究について、領域開始当時に日本は欧米に比して10年遅れているとも言われていた。しかし、本領域や関連2領域の成果に加え、それに触発された国内関連研究の急速な進展で大幅にその差を縮めた。とくに、これまで困難と思われていた野外でのフェノタイピング技術では凌駕しているものも少なくない。また、世界の先端研究者も交えたレベルが非常に高い国際ワークショップを開催するなど活発な国際活動を通して、当該分野における日本の存在を強くアピールできた点でも領域設定の意義は極めて大きい。

(4) 科学技術イノベーション創出にむけた、今後の期待、展望、課題

21世紀型の食料安全保障に向け、欧米や日本で農業の生産性と持続性の両立を謳う強力な政策が、2020年になって打ち出されている。いずれも、政策目標達成のために農業技術の大幅な革新を求めている。今回の戦略目標とも一致するもので、今回設定された植物科学3領域はそのような政策目標にも大きく貢献できる。しかし、人類の生存や繁栄の基盤となる食の問題解決には、今回の領域の取り組みだけでは到底足りない。農林水産省の委託研究や農研機構のムーショット研究なども展開されているが、今回の植物3領域で行われているような挑戦的な基礎研究の充実があってこそ、それらの研究も加速される。そのためにも、今回のような食料安全保障を見据えた挑戦的な研究の枠組みの継続的充実が必要である。

SDGsと食の関係を考えると、多くの場合単純に「2：飢餓」や「13：気候変動対策」を思い浮かべるかも知れない。しかし、実際には経済成長にともなう豊かな食による「3：健康な生活」、安定生産による農民の「1：貧困解消」、節水栽培や化学物質の適正利用による

「6：安全な水の確保」、「14：海の生態系・生物多様性」、「15：陸の生態系・生物多様性」、「12：つくる責任・つかう責任」など、数多くの目標に密接に関係しており、そのためにも本領域のような研究開発の継続は必須である。

繰り返して述べているように、本領域の価値創造は、異分野の研究者ネットワーク構築の上に成立していた。バーチャル研究所を謳う JST の枠組みが非常によく機能していた。このようなネットワークは、固定的ではあってはならず、柔軟にかつフラットに成長することが重要で、それを促進できるようなプロジェクトの枠組みもさらに充実発展を期待する。選ばれたさきがけ研究者といえども、とくに常勤ポジションを持つものは、一方で日々の雑務に翻弄されている。優秀な研究者は、数年間研究サバティカルのような枠組みも必要かも知れない。さまざま制約があることは承知しているが、日本の科学イノベーション力を再復活させるためにも彼らが、本来の力を 100%出し切れるような研究プラットフォームの確立が望まれる。

(5) 所感、その他

比較的小さな領域として、さまざまな場面で時間的余裕があり、領域内の議論など非常に深くすることができ、相互の理解も十分に深まったことは非常によかった。優秀な研究者がフラットで柔軟な連携ができるバーチャル研究所の良さを体感できたといえる。また、サイトビジットも十分に行え、問題を抱える研究者にはかなり手厚く対応できたと思う。さきがけはまさに先魁であって欲しいという思いから、できる限り各研究者の発想を信じ尊重する立場を取ったが、中には大きな勘違いを研究者がしている場合もあり、時間をかけて指導する場合もあった。情報系研究者の農学ないしは作物生育の複雑性への理解の向上に、時間をかけることができたことは良かった。優秀な彼らはどんどん自分のものにしていったのが嬉しかった。

情報科学と農学・植物科学の境界領域に関わる大学の研究室は極めて少ないこともあり、人材も非常に少ない。一方、求められる農業イノベーションにはそのような境界分野でのリーダーを求めている中、本領域は非常によい良いタイミングで設定されたと思う。巣立った領域さきがけ研究者が、自信を持ってこの境界分野の裾野を広げてくれることを切に願っている。

最後に、総括として JST 戦略研究推進部のさまざまな手厚い支援に感謝したい。これまで研究リーダーや研究代表者などとして多くのプロジェクトに関係してきたが、研究者にできるだけ研究に専念し成果を発揮できるようなさまざまな支援、追加配分や国際強化支援経費等の柔軟な予算措置など、すばらしい体制と感じた。総括としても、事務作業や調整作業など多くのご支援をいただいた。優秀な若手を信じて彼らの潜在能力をさらに伸ばし、日本の科学に貢献してもらうためにも現在の体制を引き続き継続していただけることを願ってやまない。

(2021年10月7日追記)

新型コロナウイルス影響により、以下の5件の課題について6ヶ月の延長支援を行った。

それにより、各課題に以下のような追加の評価コメントを付した。

【岩山 幸治】

本課題は、新型コロナウイルスの影響を受け、6ヶ月間研究期間を延長し、閉鎖型環境及び野外環境における栽培試験を実施して、提案するベイズ最適化手法の検証を行った。

その結果、閉鎖系においても多様な外部要因でばらつきが生じる LED 光を用いたベビーリーフの栽培試験において、安定的に収量を確保しつつ、商品価値の高めるため着色率の高くなる光条件の探索に成功した。また、野外における最適化試験として、適切な栽培条件の確立されていない伝統野菜について安定的に収量を確保できる条件の探索を行った。これらの成果は、今後、作物栽培を安定化させるための基盤技術として発展することが期待できる。

【宇都 有昭】

本課題は、新型コロナウイルスの影響を受け、6ヶ月間研究期間を延長し、光学画像に基づくテンソル/行列分解による葉角度推定法の改良、および推定された葉角度と実測葉角度の精度検証を行った。6ヶ月の延長期間内に予定していた圃場観測はコロナ禍が継続したため実施できなかった。

その結果、提案手法で実際の比較的単純な植物画像から葉身の角度分布がある程度推定できることが確認できた。引き続きコロナ禍で予定した野外圃場での実証はかなわなかったが、全く新しい野外での葉群構造評価手法が確立できれば、個体群の光合成能評価などに大いに貢献できる成果である。

【戸田 陽介】

本課題は、新型コロナウイルスの影響を受け、6ヶ月間研究期間を延長し、画像収集とデータクレンジングで学習データの上積みをはかるとともに、研究現場において植物表現型定量技術の導入難易度が高いことを考慮して、一例として「導入平易な画像解析顕微鏡装置の開発」にも取り組んだ。

その結果、新型コロナウイルス感染症の影響を受け遅延した学習データ蓄積を強化できた。また、さきがけ期間中に蓄積した知見をもとに、JST CREST「植物頑健性」領域の清水健太郎研究グループらと共同で、「EC サイトですべてが調達可能な安価な部品で構成され」かつ「解析プログラムが利用平易」なリアルタイム画像解析機能を有する顕微鏡を開発した。本成果はさきがけでの研究開発を研究者に広く普及させる画期的成果である。

【小野 圭介】

本課題は、新型コロナウイルスの影響を受け、6ヶ月間研究期間を延長し、さらなるデータ

の蓄積を試み開発手法の検証を行った。同感染症の影響により野外圃場での計測は予定したものより期間短縮とせざるを得なかった。

その結果、年次反復データの蓄積を行い、計測ノイズは、計測機材のみならず、日射の強弱にともなう葉面反射過程の変化にも影響を受けることがわかった。それを回避するために、直達光を拡散させる大型の拡散板を用いてシステムの改良を進め、解析に適した条件の絞り込みを行い、計測精度向上を図った。本成果により、野外開放系群落での光合成量推定という画期的技術基盤確立に目処がたった。

【大倉 史生】

本課題は、新型コロナウイルスの影響を受け、6ヶ月間期間を延長し、収集データの整備および植物枝構造復元手法のさらなる実用性向上に取り組み、本研究課題において実装された手法群のツール化を進めた。

その一環として、本技術のライブラリ化に着手した。まずはとくに需要の高い2次元画像向けの手法について、簡単に学習データの付与や動作が可能となることを目指して開発中である。また、他のさきがけ研究者との共同で、データ蓄積・公開用リポジトリの整備を進めた。Dataverse (<https://dataverse.org>) をホストするサーバとして実装を進めており、準備が整い次第公開する。以上の成果は、開発技術の普及と分野の発展に大きく貢献するものとして期待できる。

以上