

「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 領域活動・評価報告書

－2018年度終了研究課題－

研究総括 二宮 正士

1. 研究領域の概要

本研究領域では、気候変動や環境負荷に向けた要求等、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します。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きます。

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します。

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・連携を重視します。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みます。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 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」、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」とも連携した運営を行っていきます。

2. 事後評価対象の研究課題・研究者名

件数：6件

※研究課題名、研究者名は別紙一覧表参照

3. 事前評価の選考方針

選考の基本的な考えは下記の通り。

1) 選考は、「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」

領域に設けた選考委員8名の協力を得て、研究総括が行う。

2) 選考方法は、書類選考、面接選考及び総合選考とする。

3) 選考に当たっては、さきがけ共通の選考基準

<http://www.jst.go.jp/pr/info/info1150/index.html>の他、以下の点を重視した。

さきがけ「情報協働栽培」研究領域において重視する選考基準

b. 研究領域の趣旨に合致しているか

* 提案する手法と、解決すべき農業の課題との関連性が明確となっているか。

* 農業における研究成果の活用について触れられているか。

c. 独創的・挑戦的かつ国際的に高水準の発展が見込まれる基礎研究で、科学技術

イノベーションの源泉となる先駆的な成果が期待できるか

* 数理科学・情報科学の活用の発想が優れているか。

* 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か。

* 研究のための研究、もしくは従前の成果の実証に終始していないか。

d. 提案者は、提案研究の内容、研究姿勢や他の研究者との議論・相互触発を通じて、

当該領域の発展や関係研究分野の継続的な発展への貢献が期待できる存在か。

* 連携提案者については、異なるアプローチによる双方の知見の深化等、

双方のシナジー効果が期待できるか。単なるデータの提供・解析という関係に終始していないか。

* 提案者のアプローチが本領域のさきがけ研究者の研究の活性化に寄与しうるか

(特に、数理科学・情報科学を専門とする提案者についてはこの点を重視)。

* 提案者自身が、新たな研究アプローチ・研究成果を外部に向けてアピールする気概を有しているか。

* 連携提案の選考方針

「さきがけ」は個人研究の支援プログラムであるため、連携提案・連携予定提案であっても、提案は個人として実施する研究テーマを主とすることを大前提とする。連携提案の選考にあたっては、前述の選

考の観点のほか、連携研究テーマの独創性や挑戦性や、連携先研究者との連携の必然性を選考の観点に含める。連携予定提案についても同様に、連携予定テーマの独創性や挑戦性のほか、連携の実現可能性も選考の観点に含める。

4. 事前評価の選考の経緯

一応募課題につき領域アドバイザーの内5名～8名が書類審査し、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、採用候補課題を選定した。

選考	書類選考	面接選考	採択数
対象数	36件	17件	6件

5. 研究実施期間

2015年12月～2019年3月

6. 領域の活動状況

(1) 領域会議: 年に2回、合計7回をこれまでに実施。

領域アドバイザーによる研究動向にかかる特別講演のほか、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)の訪問を通じ、本領域で重視する栽培現場の研究者との橋渡しも実施した。

(2) 研究総括による研究実施場所訪問

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。特に、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にも同行いただき、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。

また、各研究者の要望に応じ、領域アドバイザー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。

具体的な実施回数は以下の通り、合計23回である。なお、この回数には、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。

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)

(3) セミナー・シンポジウムの開催

・植物科学シンポジウム(2015/12/2、2016/10/3-4):

2015年度に発足した植物科学分野のCREST・さきがけ概略を紹介。

・さきがけ新分野開拓セミナー(第一回2016/2/25、第二回2017/2/20):

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。ACT-「情報と未来」研究者や、後に、本領域のみならず、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」領域に採択された方も参加いただいたことから、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。

・情報協働栽培領域ワークショップ(2017/2/10)

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理解いただく場とした。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。

・アグリビジネス創出フェアへの出展(2016/12/14-12/16、2017/10/4-6) :

農学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。

(4) 国際連携強化

・国際ワークショップ(International Workshop on Field Phenotyping and Modeling for Cultivation)の実施(2017/12/8-9)

さきがけ「情報協働栽培」領域研究者・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議論する国際ワークショップを開催した。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。各国の取り組み等紹介いただいた。CREST 若手及びさきがけ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・実施。さきがけ研究者自身が講演を依頼したい研究者を国内外から招聘した。本領域からも 3 名がセッション議長を務めた。本ワークショップの結果、さきがけ研究者が招聘者の研究室に短期滞在して共同研究を実施する等の交流が生まれている。さらには、招待参加した海外研究者とフェノタイピングの学際研究としての重要性に共鳴し、Science のパートナージャーナルとして「Plant Phenomics」誌を立ち上げに参画した。

・IPPS(International Plant Phenotyping Symposium)への参加(2018/10/2-10/5)

上記国際ワークショップに招聘した研究者の多くは、植物フェノタイピングの研究者団体”International Plant Phenotyping Network”のメンバーである。彼らが運営するシンポジウム International Plant Phenotyping Symposium では、植物フェノタイピングだけではなく、農学への情報学の活用やデータ管理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るとともに、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った。本領域からは研究総括のほか、7 名のさきがけ研究者が当該シンポジウムに参加し、ポスター発表・口頭発表・研究者との議論に参画した。IPPS での研究トピックを踏まえて、次回に領域として開催する国際ワークショップの企画を進める予定である。

また、日本では本領域のビジョンに合致する研究分野がまだ存在せず、日本における植物フェノタイピング研究(注)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、二宮・磯部(領域運営アドバイザー)らが中心となり進めており、2019 年 3 月開催の日本育種学会第 135 回講演会において当該コミュニティ(JPPN)設立にかかる集会を開催した。

(注)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

(5) 他領域との連携

・他領域の領域会議への参加

同一の戦略目標下にて発足した 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」、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」については、相互の領域会議にそれぞれの領域の研究者が参加し、議論に参画する等、領域間の交流を特に重視した。本領域研究者が CREST チームに参画する、あるいは、CREST 研究チームのセミナーにて招待講演を実施するなど、交流が積極的に進められた。

このような動きは、当該領域の若手研究者を主たる参加者とした自主的な研究会(2018/10/18-19)の開催に繋がった。さらには、2019 年 1 月にはフェノタイピングに関する CREST ワークショップに本研究領域研究者が 3 名招待講演し、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なっている。

・他領域研究者の本領域 領域会議への参加

情報学系の研究者との相互交流を強化する観点から、これまでに、各領域の研究総括の御了承を得て、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、本領域研究者との研究議論に参画いただいた。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た。

7. 事後評価の手続き

研究者の研究報告書を基に、評価会(研究報告会、領域会議等)での発表・質疑応答、領域アドバイザーの意見などを参考に、下記の流れで研究総括が評価を行った。

(事後評価の流れ)

2019年1月中旬	研究者より提出された研究報告書の内容確認
2019年1月下旬	評価会開催
2019年2月	研究総括による事後評価
2019年2月	被評価者への結果通知

8. 事後評価項目

- (1) 研究課題等の研究目的の達成状況
- (2) 研究実施体制及び研究費執行状況
- (3) 研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果(今後の見込みを含む)
- (4) 自身がこれまで専門としていなかった分野の研究手法・研究動向・研究の立場等を理解・尊重し、双方の分野の橋渡しとなる研究者となるべく研究活動ができていたか。

また、「世界レベルの若手研究リーダーの輩出の観点から、本さがけ研究が、研究者としての飛躍につながったか(今後の期待を含む)」を加味して評価を行った。

9. 評価結果

本研究領域は、将来求められる持続可能な農業生産に向け、情報学と農学との連携を通じて、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推進するものである。特に、本研究領域では互いの分野を単なるツールとして取り扱うのではなく、それぞれの分野の考えを尊重し、新たな分野を切り開こうとする研究者の育成に力を入れている。2015年度の募集においては、データ同化による作物モデルパラメータの推定、ドローン撮像画像に基づく収量予測、作物の生育診断デバイスの開発、植物工場における生産不安定性の解明、作物の萎れ予測技術に基づく灌水制御、環境-遺伝子型モデルによるイネ形質の予測という独創的な6テーマを採択した。これら6テーマが本年度に終了し、下記にその概要、及び評価結果を記述する。これらのテーマの内、特に峰野研究者はマルチモーダル深層学習の枠組みにより、環境データ及び画像データを同時に入力し、作物の萎れ具合と作物の品質を予測する技術の基盤を確立し、さらにはこの技術に基づく灌水制御を複数の作物で実証した。農学と情報学の両方を深く理解し、双方の分野の橋渡しができる研究者として、当該分野での学術的発展に寄与すると期待される。

また、さがけという制度の目的に照らし合わせても、それぞれの研究者が異分野交流や成果展開を通じて研究者ネットワークを作り上げるなど、研究領域の活性化に貢献し、また新たな研究者ポストの獲得、学会賞の受賞を通じ、本研究期間中に研究者として成長したと考えられる。なお、以下6名の研究者全員が、研究成果にかかる特許の出願、または、研究開発成果であるソフトウェア・プログラムの公開のいずれかを行った。それぞれの研究目的に応じた産業界への橋渡し、または、研究のさらなる展開に向けた取り組みに精力的であったことは特筆に値する。

1. 伊勢 武史 研究者

「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」

粒子フィルタを用いて、衛星画像による LAI(葉面積指数)でデータ同化を行うことで、落葉や展葉という落葉広葉樹林の比較的単純なフェノロジーモデルのパラメータ最適化を行い成功した。その結果、日本列島南北で環境適応と思われるフェノロジーの違いを発見したことは高く評価できる。提案したデータ同化手法の作物生態への応用として、ブドウ落葉・展葉フェノロジーモデルを取り上げたのは良いが、森林生態に用いたアプローチの単純な適用に過ぎず、作物の生理生態を踏まえるなど十分な掘り下げがまだなされていないのが残念である。今後、より精緻で複雑な作物モデルの粒子フィルタによるデータ同化について、真値としてのより信頼性が高いドローン画像による計測値などを用いた共同研究への発展に期待したい。深層学習を用いた研究について、本課題の本来の目的との関連性をより明確にすべきであったと思われるが、良い応用例を幅

広く提示したことは良い。

2. 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」

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大型圃場でも精度高く数万個体の評価を可能にしたことは高く評価できる。バレイショ地上部の草丈、植被率等の時系列にそった個体別高速・高精度評価にとどまらず、地下部収量の推定にもチャレンジし、バレイショ作物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育種開発への貢献は限りなく広く、他の作物への応用も共同研究をとおして展開して欲しい。あらたな個体管理精密農業への期待も高まる。構築したパイプラインには撮影パラメータ設定などさまざまなノウハウが詰まっていると想像するが、是非その提供・普及にも努めて欲しい。

3. 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」

当初に提案した師管液から mRNA やタンパク質などを 2 時間以内という短時間で検出可能な画期的な診断デバイスの基盤技術を確立したことを高く評価する。また、偽陽性の発見や mRNA 移動性に関するカタログ化など高精度化や植物科学基礎研究への応用を開始し、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、本基盤成果を用いた作物診断現場応用への道を広げてほしい。

4. 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、まず利益をドライブするパラメータの同定や利益モデルの提示を行ったことは良い。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を実証できたことを評価する。この他、論文化できた多くの個別成果を上げたことも評価する。最終的に各個別成果を統合した全体像が明確化したことも良いが、本来の目的であった、「最終的にどのように制御し不安定性回避にまでつなげていくのか」など、成果の生産システムへの応用について研究を深化して欲しい。

5. 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」

画像評価アルゴリズムや深層学習アルゴリズムなどを工夫して改善しながら、トマト葉のしおれ画像などから水分状態を間接的に評価し、最適灌漑を自動的に実現することで、「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を高く評価する。他の高付加価値施設系作物への応用も考えて欲しい。もともと農学的知識がほぼ皆無の情報系研究者が、農業現場に最大限寄り添い、あるいは独学しながら、情報科学と農学の連携を実現し成果を出したことは、本領域の趣旨から言っても大いに歓迎したい。今後、両分野の橋渡しとして活躍することを願う。

6. 矢部 志央理 研究者 「量的遺伝学に基づく環境応答型イネ選抜モデル開発」

イネの収量を直接推定するのではなく、穂構造や粒重分布という収量構成要素についてゲノミックセレクションモデルを検証した上で、因子分析型モデルで環境と収量構成要素との相互作用をある程度説明できるまでになったことを評価したい。今後、さらなる収量構成要素の推定精度向上にチャレンジして欲しいが、それと併せて、育種・栽培の現場が必要とする農学形質に収量構成要素がどのように結びつくのかをさらに探求して欲しい。穂構造を定量的に評価する方法を提案したことも評価したい。また、最適交配組合せについて育種向け R パッケージを公開し、育種現場へのインパクトを与えていることも良い。

10. 評価者

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

領域アドバイザー(五十音順。所属、役職は2019年3月末現在)

上田 修功 理化学研究所 革新知能統合研究センター 副センター長
加々美 勉 (株)サカタのタネ 常務取締役/常務執行役員
亀岡 孝治 三重大学 大学院生物資源学研究科 教授
後藤 英司 千葉大学 大学院園芸学研究科 教授
中野 美由紀 産業技術大学院大学 情報アーキテクチャ専攻 教授
堀江 武 京都大学 名誉教授
松井 知子 情報・システム研究機構 統計数理研究所データ科学研究系 研究主幹・教授
森川 博之*1 東京大学 大学院工学系研究科 教授

*1 2015年12月~2017年3月まで領域アドバイザーとして参画。

それ以降は領域運営アドバイザーとして参画。このため、評価には関与しない。

(参考)

件数はいずれも、2019年3月末現在。

(1)外部発表件数

	国内	国際	計
論文	6	25	31
口頭	156	36	192
その他	22	7	29
合計	184	68	252

(2)特許出願件数

国内	国際	計
9	2	11

※国際出願2件は国内特許にかかるPCT出願案件

(3)受賞等

・伊勢 武史

・日本生態学会第64回全国大会、大会ポスター賞、植物生理生態部門、優秀賞(2017/3/18)

・野田口 理孝

・第28回 高遠・分子細胞生物学シンポジウム優秀賞(2016/8/26)

・UTEC Venture Partner Program 2016 最優秀賞(2016/11/13)

・第6回超異分野学会本大会 リバネス研究費 超異分野学会賞(2017/3/2)

・電気学会

第35回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム 優秀ポスター発表賞(2018/11/9)

・福田 弘和

・日本生物環境工学会 学術賞「植物工場における概日時計の計測と制御に関する基盤的研究」
(2018/9/19)

・峰野 博史

・DICOMO2016 ベストカンバーサント賞(2016/7/8)

・DICOMO2016 野口賞(第1位) (2016/7/8)

・IEEE GCCE2016 Excellent 5 Years TPC Service award(2016/10/13)

・ドコモ・モバイル・サイエンス賞 社会科学部門 奨励賞(2018/10/4)

・リバネステックグランプリ 竹中工務店賞・オムロン賞(2018/9/15)

・矢部 志央理

・日本育種学会第130回講演会 優秀発表賞(2016/12/12)

・日本作物学会第245回講演会 優秀発表賞(ポスター部門)(2018/4/23)

(4)招待講演
国際 13 件
国内 80 件

別紙

「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」領域
事後評価実施 研究課題名および研究者氏名

研究者氏名 (参加形態)	研究課題名 (研究実施場所)	現職(2019年3月末現在) (応募時所属)	研究費 (百万円)
伊勢 武史 (兼任)	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 (京都大学 フィールド科学教育研究センター)	京都大学 フィールド科学教育研究センター 准教授 (同上)	38
杉浦 綾 (兼任)	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 (農業・食品産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター)	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)	32
野田口 理孝 (兼任)	農作物の早期診断技術の創出と栽培法の最適化 (名古屋大学 大学院生命農学研究科)	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)	44
福田 弘和 (兼任)	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 (大阪府立大学 大学院工学研究科)	大阪府立大学 大学院工学研究科 教授 (同上 准教授)	45
峰野 博史 (兼任)	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 (静岡大学 情報学部)	静岡大学 学術院情報学領域 教授 (同上 准教授)	42
矢部 志央理 (兼任) ※2015.12-2016.3 専任	量的遺伝学に基づく環境応答型イネ選抜モデル開発 (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)	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 (農業・食品産業技術総合研究機構 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)	32

研究報告書

「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」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 27 年 12 月～平成 31 年 3 月

研究者: 伊勢 武史

1. 研究のねらい

本研究の目的は、ビッグデータを用いてシミュレーションモデルを改良する大規模データ同化によって森林植生モデルを最適化し、情報協働による資源管理技術の確立に貢献することである。本研究が目指す、粒子フィルタというデータ同化手法を応用した森林植生モデルの大規模データ同化は、成功すれば世界初の試みとなる。

地球温暖化などの環境変動下で持続可能で安定した森林資源管理を実現するには、植物の環境応答性を高精度で理解することと、それに基づく将来予測と適切なマネジメントが不可欠である。これまでも、森林の植物の環境応答性については種々の観測やフィールド研究が実施されてきたが、その知見を統合して将来予測に活用することは十分になされてこなかった。その原因は、観測データをシミュレーションに取り込むデータ同化手法が確立されていないことだと考えられる。

そこで本研究では、人工衛星観測などのビッグデータを活用し、データ同化によって問題解決のための情報を客観的・効率的に抽出するシステムをつくる。現実的な予測システムを構築するために、環境応答の不確実性・地表面の不均質性・応答のタイムラグを明示的に考慮できるシミュレーションモデルを構築し、それに適したデータ同化手法を用いる。本研究は森林植生を例とした研究を実施するが、その後の食料用植物への応用を見越し、多様な利用形態に対応する改変しやすいシステム開発を行う。

粒子フィルタを用いたデータ同化は、モデル選択・改良・将来予測という一連の作業に革新を起こす。この手法は、システムチェックにつくりだされる多数のモデルからの選択を繰り返すことにより、生育環境の不均質性・気候変動に由来する不確実性・観測誤差なども明示的に考慮し、モデルを最適化できる。植物科学と情報科学の融合分野は切実に必要とされており、この分野開拓のための先駆となる。研究交流を実施することによって、データ駆動型科学による持続可能な森林管理を実現するとともに、食料用植物の適切な栽培管理への応用も積極的に進める。

情報協働栽培の確立には、実験・観測の専門家と計算・理論の専門家の密接な協力が不可欠である。そのため、本研究の成果を理解してもらい、使ってもらうための具体的な仕組みを検討する。将来予測の結果を開示し、「未来のあるべき姿」について、研究機関・産業界などと広く考える機会を持つ。

2. 研究成果

(1) 概要

陸上生態系モデルに観測ビッグデータを同化することでシミュレーションを最適化し、展葉・落葉フェノロジー(季節性)のタイミングを広域で推定することができた。これにより、地球温暖化などの環境変化に対する植物の応答予測の精緻化が可能になった。さらに果樹への応用が実現し、生育環境条件に大きく左右される対象作物の気候応答を予測できるようになった。

まず、人工衛星観測によるビッグデータから、日本全国の落葉広葉樹林の季節変化を抽出した。次に、粒子フィルタというデータ同化手法の適用を可能とする陸上生態系モデルを構築し、光合成速度や有機物分配比率などのパラメタを包括的に最適化できるようにした。その結果、展葉・落葉のタイミングを正確に推定するモデルを構築することができ、従来は局所的な知見しか存在しなかったフェノロジー研究において、広範囲で成り立つ関係性を定式化することができた。加えて、植物が持つ環境適応という性質を客観的に定量化することもできた。

さらに、植生をディープラーニングにより自動検出する手法「chopped picture method」を開発することで、従来は取得に手間がかかり誤差も大きかった詳細な植生タイプや土地利用の把握を無償の航空観測データから得ることができるようになった。これはビッグデータそのものの拡大といえる。この手法により自動検出された山梨県甲府盆地におけるブドウ果樹栽培地において、空間分解能 30m の人工衛星データから推定された植物フェノロジーをデータ同化し、ブドウ果樹の展葉・落葉タイミングの定式化を実現することができた。ブドウのフェノロジーについては、従来はフランスでの研究結果を日本でも使うことが多かったが、気候・土壌・日照などの条件が異なるため、現実を反映できないことも多かった。本研究により、今後は人工衛星や航空機観測によるビッグデータから定量的なフェノロジー研究が可能であることが示された。

本研究で開発されたデータ同化およびディープラーニングに関する技術は情報協働栽培や環境管理に幅広く応用可能であるため、積極的な情報提供と利活用促進を行った。その結果、環境コンサルティング企業などの産業界や幅広い分野の研究者との交流を実施することができた。Chopped picture method のソースコードとユーザーマニュアルを整備し希望者に配布しているため、今後も多くの利活用が見込まれる。

(2) 詳細

研究テーマA 「ビッグデータ取得と整理」

本研究は陸上生態系のシミュレーションモデルおよび将来予測をビッグデータで改良することを目的としているため、人工衛星観測などのビッグデータを整備することが重要な基盤となる。本研究は 2 段階で実施した。第一段階は日本全国の落葉広葉樹林のフェノロジーモデルの最適化であり、そのために人工衛星観測データプロダクト「MOD15 葉面積指数(LAI)」の 8 日周期で観測された解像度 1km のデータを用い、研究対象地の植生の現況を年変動(成長・かく乱・死亡など)と季節性(展葉・落葉)の両面からパターンを整理した。その結果は、世界初の粒子フィルタを用いた非連続性を含む陸上生態系モデルの広域最適化として発表された(主な研究成果リスト(1)3)。

研究の第二段階は、前段階で開発された技術を作物に適用することである。複雑な地形の

なかに小規模の農地や市街地がモザイク状に分布している日本の農業で人工衛星観測ビッグデータを用いた情報協働栽培を達成するには、対象とする農地を正確に効率よく識別することが不可欠である。そのためにディープラーニングによる植生の自動識別技術を開発した。これは、従来のディープラーニングの典型であったオブジェクト単体の検出ではなく、植生のような不定形の物体をテキストで分類する技術であり、chopped picture method と命名した。この技術を arXiv でプレプリントとして公開(Ise et al. 2017)したのち、査読論文として発表した(主な研究成果リスト(1)2)。この技術は革新を呼ぶものとして MIT Technology Review (2017年8月)などの海外メディアに取り上げられ、世界的な注目を集めた。山梨県甲府盆地の果樹(ブドウ)を対象とした研究では、Google Earth の航空写真にディープラーニングを適用することで対象となる果樹栽培地をピンポイントで識別できるようになった。また、解像度 30m の LANDSAT データを用いたことで、前段階の研究(解像度 500m)では不可能だった、日本の典型的な農地-市街地モザイクのなかから対象農地を抽出することができた。特に甲府盆地は、市街地・果樹園・その他の農地が複雑なモザイク状の分布をなしている。このような場所で対象とする果樹だけを自動的に抜き出す技術が実用化されたことで、今後の情報協働栽培の前進に貢献できる。また、LANDSAT から得られる季節変化は、第一段階で用いた葉面積指数(LAI)ではなく植生指数(NDVI)であるため、物理的な落葉ではなく、黄葉(葉から葉緑素が抜けた状態)を推定する。これに対応するシミュレーションモデルの改造を実施した。

研究テーマB 「データ同化の実装とモデル選択」

データ同化は、観測ビッグデータを用いて客観的にシミュレーションモデルを最適化する技術である。不均質性・非連続性の高い陸上生態系におけるデータ同化の応用は遅れていたが、本研究では粒子フィルタというデータ同化技術を用いることでハードルを乗り越えた。粒子フィルタを包括的に適用できる生態系シミュレーションモデルを構築し、内部に存在するすべてのパラメタを同時に、総合的に最適化した。粒子フィルタは逐次型データ同化を実行するため、シミュレーション期間とともに推定精度が向上することが特徴である。本研究では合計 4 年間という比較的長期にわたり、30 分間隔でのシミュレーションおよび 8 日ごとのデータ同化を、日本列島をカバーする約 1 万グリッドの地点に対して実施した。その結果、落葉広葉樹林の普遍的な展葉・落葉フェノロジーのパターンを客観的に抽出でき、従来のフェノロジーモデルはカバーできていなかった植物の環境適応を定量化した世界初の研究となった(主な研究成果リスト(1)3)。すなわち、北方に生育する落葉広葉樹は、南方のものと比較して展葉基準温度が低く、比較的低温でも展葉を開始する(図 1)。また北方の落葉広葉樹はかなり低温になるまで落葉せず、こうして低温環境でも成長期間を長くしている。南方の落葉広葉樹は春は遅めに展葉・秋は早めに落葉することで、霜害などのリスクを小さくしている。言葉で書けば当たり前に感じられるこのような環境適応を広域で定量化したところが本研究の成果である。

データ同化のプログラム実装が本研究の心臓部であるため、計算効率・メモリ効率などの最適化をふくめて重点的に試験し、パフォーマンスを高めた。将来の発展性を考え、森林植生モデル部分をモジュール化し、将来の食料用植物モデルへの応用を視野に、他のモデルと置き換え可能にした。さまざまな地理条件・環境条件に対応し、さらに観測誤差(不確実性)を明示的に考慮したロバストなモデルの構築を実現した。

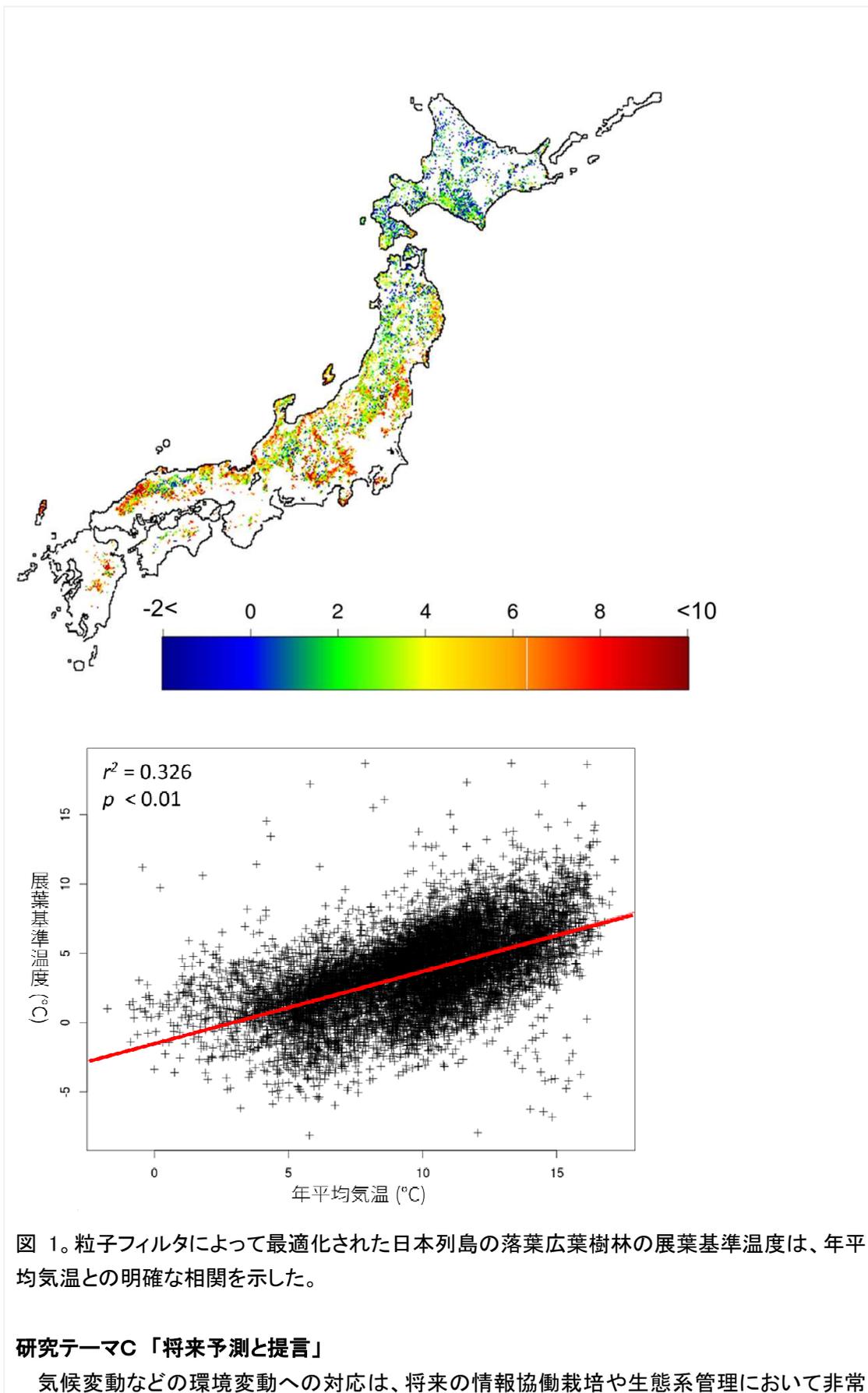


図 1。粒子フィルタによって最適化された日本列島の落葉広葉樹林の展葉基準温度は、年平均気温との明確な相関を示した。

研究テーマC 「将来予測と提言」

気候変動などの環境変動への対応は、将来の情報協働栽培や生態系管理において非常

に重要なミッションであり、今後の社会の安定にも深くかかわっている。気候変動による展葉・落葉時期の変化は、林業や農業の未来に深くかかわる。IPCC(気候変動に関する政府間パネル)第四次報告書のA1Bシナリオにもとづくと、21世紀中の日本の温度上昇は3.4℃と見積もられている(環境省 2009, 温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート)。

1996年から2005年の東京の平均気温は16.6℃(気象庁データベースより)であり、ここから3.4℃上昇すれば、屋久島と奄美大島の間位置する鹿児島県のトカラ列島と同程度となる。これは甚大な変化であり、植物への影響ははかりしれない。本研究の成果は、このような温暖化後の環境への生態系の反応を考えるうえで重要な知見となる。たとえば、従来のフェノロジー研究(展葉基準温度を5℃とした場合)では、2000年の東京の展葉開始日は3月26日となる。これは現在の状況をうまく表現しているといえるが、3.4℃温暖化した2100年の東京に適用すると、展葉開始日は2月4日となり、48日も早くなると見積もってしまう。本研究では、ビッグデータから客観的に推定された植物の環境適応を明示的に導入したため、2100年の展葉開始日は2000年と比較して15日早くなると推定され、従来の知見を大幅にアップデートしている。現在のところ、地球温暖化を予測する気候モデルの空間解像度は200km程度と非常に低いためこれがフェノロジー予測の限界を規定しているが、これがさらに精細なものになれば、地域ごとの詳細が分かるようになると期待される。

研究テーマD 「利活用促進と人材育成・交流」

本研究の最終目的は、開発された技術によって情報協働栽培を達成することである。開発されたデータ同化技術・ディープラーニング技術は農業・林業や環境管理に幅広く応用可能であるため、積極的な情報紹介と利活用促進を実施した。例として、アグリビジネス創出フェア(東京ビッグサイト:2017年10月)に出展しデータ同化の農業利用について紹介したこと、SciFos活動として住友林業株式会社およびアジア航測株式会社を訪問し環境コンサルティングへの応用について議論したことなどがある。さらに、ディープラーニングの具体例を紹介する学会集会を企画したところ(主な研究成果リスト(3)5)100名を越す参加者を集め、その後研究についての相談が相次いだ。国立研究開発法人水産研究・教育機構からは魚群の自動検出、国立環境研究所琵琶湖分室からは藻場の自動検出、中国科学院からはゴム農園におけるアリの巣の自動検出など、当初想定していなかったディープラーニングの応用について打診があり、いくつかは共同研究に発展している。京都市内では、無鄰菴や歴彩館でディープラーニングの利活用についての一般向けの講演を実施した。帰化植物セイタカアワダチソウの分布を市民ボランティアとともにデータベース化するプロジェクトについて、NHKのEテレ「高校講座(2018年11月放送)」にて全国放送された。

さらに、京都大学農学研究科・農学部の学生を中心に、即戦力としてのディープラーニング技術を身に着けた農業や環境管理の専門家という情報協働栽培領域が期待する次世代研究者の育成を行ってきた。彼らは本研究の成果であるchopped picture methodを駆使し、富有柿の品質不良・森林の樹木タイプ・コケの生物種・中国南部のゴム園におけるアリの巣・セイタカアワダチソウなどを自動識別することに成功している。

3. 今後の展開

本研究によって開発されたビッグデータ処理技術とデータ同化技術の利活用を推進するとともに、本研究の基礎理論がさまざまな栽培植物や植生に応用可能であることを実証するための研究も継続する。ディープラーニング手法である chopped picture method については、現在はコード・マニュアル・練習データを希望者に配布するという形式で利活用を進めているが、これを Github などのウェブシステム上で公開することで、世界的な利用者の獲得と、双方向性・カスタマイズ性を高めた開発を進めていく。データ同化に用いた陸上生態系モデル SSSEM についても同様の公開を進めていく。

本研究で開発された技術は、農業・林業・環境管理など多彩な分野で応用可能であるため、利用の実例を増やしていくように産学連携および社会連携を進めていく。たとえば、植生のタイプとサイズを自動識別し、ドローンなどの遠隔観測データによって植生動態を推定するという技術は、地形の複雑な山間部・丘陵地における農業や林業の IT 化に貢献できる。また外来生物を人工知能で自動識別するなどの研究テーマは、シチズンサイエンスとして市民と協働した社会事業に発展させることが可能である。

4. 自己評価

情報協働栽培は、深刻な環境変化の見込まれる将来の農作物の安定供給に資するという点で非常に重要な社会的意義を帯びている。本研究は(1)ビッグデータと(2)データ同化を用いることで植物動態の把握と定式化を目指した。

ビッグデータに関しては、日本全国をカバーする 500m メッシュの人工衛星データに加え、農地—市街地モザイクの多い日本の土地利用の把握に適した 30m メッシュの人工衛星データを用いることで、要求レベルに応じた空間スケールで解析が可能であることを実証した。さらに、ディープラーニングを用いた chopped picture method を開発し、植生を自動識別することが可能になった。これは、ディープラーニングで新たなビッグデータを創出するという点で革新的である。

陸上生態系のデータ同化については、不均質性・非連続性の高い陸上生態系に特化したシミュレーションモデルを開発し、粒子フィルタというデータ同化技術を用いることで可能にした。これには、多数の CPU を持つ並列計算機導入の効果が大きい。その結果、これまでは漠然とした把握しかなされていなかった広域での展葉・落葉フェノロジーを定量化できるようになった。

研究の進め方を工夫することで、本研究の目的の達成に資するようになった。研究実施体制の整備としては、研究補助者を雇用し、ビッグデータの取得と管理・データ同化実験の実行と管理という比較的単純な作業を責任をもって担当させることができた。研究費執行は、この研究補助者の人件費と上述の並列計算機、さらにはディープラーニングの実行のための GPGPU 計算機に重点を置いた。潤沢なさがけ研究費の恩恵で研究は効率よく進捗した。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果としては、陸上生態系モデルがデータ同化可能であること、並列計算機による大規模計算が新たな知見を生み出すこと、テクスチャ

にもとづく植生の自動識別を可能にしたことなど技術的・応用可能性についての貢献に加え、植物の環境適応など基礎的な生物学にも貢献することができた。本研究の最終ゴールは情報協働栽培の実現による社会・経済への貢献である。研究期間内に広域観測データによるブドウのフェノロジーの定式化を行うことができ、これは生育環境条件を厳しく選ぶ果樹の適地適作や、気候変動後の産地の推定などに利用可能である。

今後は、開発した技術を多彩な農作物に適用することで、実際に情報協働栽培が役に立つことを実証していく。リンゴ・モモなどブドウ以外の落葉性の果樹には本技術の応用がただちに可能であるため、積極的な産学連携を進める。さらに、そのほかの栽培植物にも応用可能な技術の汎用化に向けた開発にも引き続き取り組んでいく。本研究では、ニュースになることは多いものの、何に役立つのかイメージのわきにくい人工知能という技術が、どのように未来を豊かにするのかを示すことができた。農業・林業という第一次産業は人工知能という科学の最先端から遠いところにあるという誤解も多いが、実はこのような産業にこそ人工知能が恩恵をもたらすことを今後も実証していく。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Arakida H., T. Miyoshi, T. Ise, S.-I. Shima, S. Kotsuki. Non-Gaussian data assimilation of satellite-based leaf area index observations with an individual-based dynamic global vegetation model. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2017, 24, 553–567.
2. Ise T., S. Ikeda, IS. Watanabe, K. Ichii. Regional-scale data assimilation of a terrestrial ecosystem model: leaf phenology parameters are dependent on local climatic conditions. *Frontiers in Environmental Science*. 2018, 6:95, doi: 10.3389/fenvs.2018.00095.
3. Ise T., M. Minagawa, M. Onishi. Classifying 3 Moss Species by Deep Learning, Using the “Chopped Picture” Method. *Open Journal of Ecology*. 2018, 8, 166–173.
2. Ise T., M. Minagawa, M. Onishi. Classifying 3 Moss Species by Deep Learning, Using the “Chopped Picture” Method. *Open Journal of Ecology*. 2018, 8, 166–173.
3. Ise T., S. Ikeda, S. Watanabe, K. Ichii. Regional-scale data assimilation of a terrestrial ecosystem model: leaf phenology parameters are dependent on local climatic conditions. *Frontiers in Environmental Science*. 2018, 6:95, doi: 10.3389/fenvs.2018.00095.

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 1 件

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. MIT Technology Review. How Moss Helped Machine Vision Overcome an Achilles’ Heel. 2017/8/14. 日本語版タイトル「京都の「コケ」を識別する手法が深層学習の弱点を克服する」.
2. MIT Technology Review. An AI learns to spot tree species, with help from a drone.

2018/5/10. 日本語版タイトル「京大研究チーム、ドローン空撮から樹木の種類を AI で判別」.
3. Ise T., M. Minagawa, M. Onishi. Obtaining big data of vegetation using artificial neural network. American Geophysical Union Fall Meeting. 2017/12/15.
4. 伊勢武史. データ科学から考える、サイエンスと社会のかかわり. 日本育種学会第 131 回講演会. 2017/3/30.
5. Onishi M., T. Ise. Automatic classification of trees using a UAV onboard camera and deep learning. arXiv. 2018, arXiv:1708.01986.
6. Ise T., Y. Oba. Estimating mesoscale linkage between land-surface conditions and marine productions in Japan: a study using a sparse high-dimensional model. arXiv. 2018, arXiv:1809.07946.

研究報告書

「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」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 27 年 12 月～平成 31 年 3 月

研究者: 杉浦 綾

1. 研究のねらい

栽培研究の問題点

従来の栽培研究におけるフィールドデータの収集は手作業で行われるものが多く、中には研究者による目視評価によるものもある。しかし、生育シーズンを通じて野外圃場で作物個体を一つ一つ手作業で計測あるいは目視観察する作業は膨大な手間とコストがかかる。そのため、データ量が制限され、複雑な生長動態や特徴を分析するには不十分であることが多い。作物生育の詳細な解析を実現するには、時間的・空間的に高分解能のフィールドデータをいかに効率よく得るかにかかっている。

効率的な生育情報収集

本研究では、栽培研究で必要となる作物形質や生育の時系列データを UAV 空撮画像から高精細・高効率で個体レベルの情報として収集できるシステムの開発を目標とする。定期的に圃場空撮を行い、画像処理技術あるいは画像認識技術により、できるだけ多くの生育データを1個体毎の情報として自動抽出し、シーズン中の生長過程を追跡できるよう時系列データとして蓄積する。対象作物は北海道畑作地域の主要作物であるバレイショとする。

機械学習による収量推定

画像により生育情報の収集を行うが、最終的なねらいは、得られたデータから、生育情報、環境情報と収量を結ぶ関係の解明である。画像で収集した生育情報から、機械学習により、収量との関連を調べる。作物学においては、さまざまな作物において生長解析がなされており、生長プロセスを説明できる作物モデルの研究が従来からあるため、その知見も取り入れて、収量の推定を行う。

大規模圃場への展開

本研究では、高頻度、大面積を対象として収量推定を行うため、生育情報を空撮画像からいかに効率よく得るかが技術的課題となる。

草高、植被率、萌芽時期、枯凋期などの基本的な生育情報を画像から自動抽出するほか、従来のリモートセンシング手法も取り入れ、葉の反射スペクトルも個体レベルの情報として計測する。これらの計測を自動化することで、大面積にも適用できる技術とする。仮に通常様式で1ヘクタールのバレイショ栽培を行った場合、44000 株以上の生育変化が観測できることになる。これは手作業での計測では現実的に不可能であり、このようなデータ自体得られた事例は過去にない。大規模生産圃場での生育情報収集の可能性を検討する。

2. 研究成果

(1) 概要

作物個体の生育情報を収集するため、UAV にカメラを搭載し圃場の空撮を行った。2016 年

から3年間、バレイショ圃場約1500m²を準備し、5月下旬から9月上旬まで2~3日に1回の頻度で撮影を行った。一眼レフカメラとマルチスペクトルカメラを使用した。一眼レフカメラの画像からは、公開しているソフトウェア FieldReconst により、オルソ画像と3次元情報を生成し、主に植物体の大きさの計測に使用した。一方、マルチスペクトルカメラの画像からは、葉の反射率を計測した。シーズン中の画像データは、すべて同一の座標系で扱えるよう、絶対座標系に正確に変換し整理した。

本研究の内容は、主に、生育情報計測手法の開発と、機械学習による収量推定の2つに分けられる。

まず、生育情報抽出手法の開発では、画像から作物個体の位置を検出するプログラムを開発した。2016年に開発した方法を2017年と2018年にも適用し、安定した性能を持つことを確認した。一度、個体位置を検出できれば、その位置の画像データから生育情報を計測できる。被覆面積や草高などの個体生育を画像から計測し、その計測精度を評価した。画像から個体生育情報の計測まですべてを自動化したことで、大規模圃場でも個体の情報を得ることができた。

次に、機械学習による収量推定では、上記のとおり計測した個体の地上部生育情報と地下部塊茎質量との関連を調べた。いくつかの機械学習手法を試し、3年間のデータに対して、地上部生育と収量に相関があることを確認した。さらに、生長プロセスを理論的に説明できるよう、作物モデルを導入した。作物モデルにはいくつかの未知パラメータが含まれているが、画像による生育情報とのデータ同化により推定できる可能性がある。このデータ同化による収量推定方法について検討した。

(2) 詳細

「生育情報抽出手法の開発」

2016年5月から9月まで定期的に撮影したバレイショ圃場の画像から、すべての個体位置を自動検出できるプログラムを作成した。画像中の緑色部分を抜き出し、その領域の面積、外接矩形の縦横の長さ、円形度などを特徴量として、サポートベクターマシンにより個体の判別を行った。表1のとおり教師データ427個体の検出精度は、再現率99.8%(426/427)で、別圃場の1480個体でテストした場合、誤検出が4個体あったものの、再現率は100.0%であった。同様に2017年の465個体、2018年の427個体でテストした結果、再現率はそれぞれ98.9%と99.1%であり、安定して個体位置を検出できることを確認した。開発した方法により、約10アールの圃場で3,611個体、1ヘクタールの大規模圃場で28,168個体の生育情報を一斉に計測できることを確認した。

表1 個体位置検出の精度

	2016年教師用 (427個体)	2016年テスト用 (1480個体)	2017年テスト用 (465個体)	2018年テスト用 (431個体)
正検出個体数 (再現率)	426(99.8%)	1480(100%)	460(98.9%)	427(99.1%)

個体検出時に抽出した緑色部分が検出個体の領域であるため、そのサイズが被覆面積として計算できる。また、3次元再構成による高さ情報から、草高のほか植物体全体の体積が得られる。さらに、マルチスペクトル画像から得られた反射率のうち、青(475nm)、赤(668nm)、近赤外(717nm, 840nm)の4バンドを説明変数とした重回帰モデルで、葉身窒素含有率を推定した。草高について地上マニュアル計測したものと比較し精度評価を行った結果、図1(a)のように、RMS誤差3.85cm、最大誤差14.63cmであった。また、図1(b)のように植物体体積と乾物質量を比較すると、決定係数 $R^2=0.61$ の相関を得た。さらに、画像から推定した葉身窒素含有率は、元素分析によるものと比較した結果、 $R^2=0.88$ であった(図1(c))。いずれの項目も、作物生育を示す代表的なものであり、十分な精度で計測・推定できることを確認した。生長期間を通じて定期的に画像撮影しているため、このような生長量を時系列データとして得ることができた。したがって、画像による個体生育情報計測に関して、当初の目的を達成したといえる。また、空撮画像から、オルソ画像生成、3次元データ復元、個体検出、生長データの出力までをほぼ自動化したため、大規模圃場へも十分適用できる技術である。

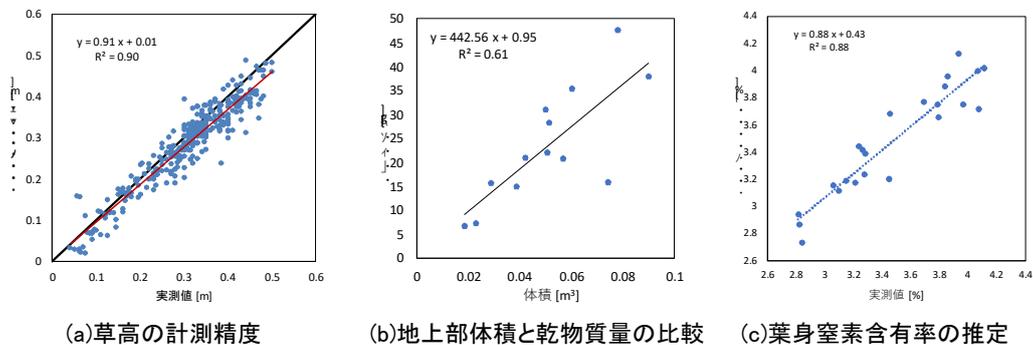


図1 個体生育情報の計測精度

「機械学習による収量推定」

生育期間中の個体生長量が画像から正確に得られたが、この地上部の生長データからさらに、地下部塊茎質量である収量の推定を試みた。方法として、線形単回帰や重回帰のほか、リッジ回帰やラッソ回帰、あるいは、主成分分析を組み合わせたものなど、いくつかの機械学習を試した。また、説明変数として、画像から計測した時系列生長データである被覆面積、草

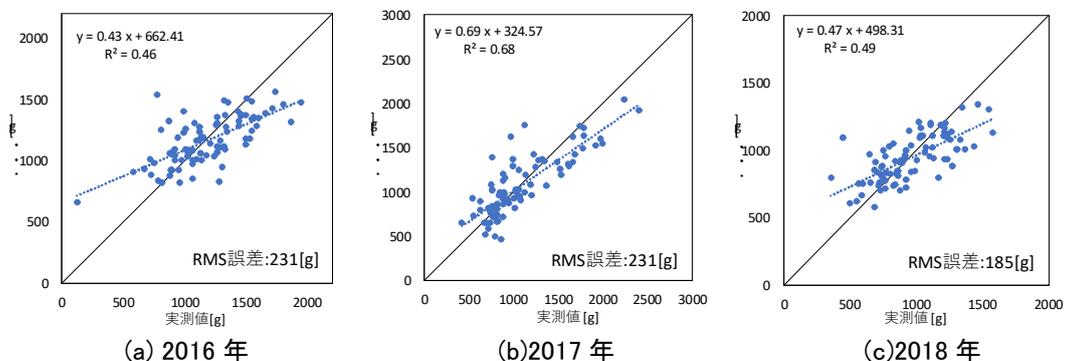


図2 SVRによる収量推定精度

高、体積、窒素含有率、反射率、NDVI を用意し、これらのうち一つあるいは複数を組み合わせて使用した。一例として、被覆面積と草高を説明変数としたサポートベクトル回帰(SVR)の結果を図2に示す。2016年から3年間、同様の試験を行い、各シーズン430個体程度の学習データを用意した。430個体のうち80%を教師データとし、残り20%をテストデータとした。図2は、テストデータによる予測精度である。各年の決定係数はそれぞれ、 $R^2=0.46, 0.68, 0.49$ であったため、地上部生長量と収量に強い関連があると判断できる。

ただし、この方法では、一度決定した推定モデルを次年度に適用できない。画像撮影時期や撮影回数が違うため、同じ説明変数を得ることができないためである。また、ブラックボックス的方法であるため、詳細な生長解析を行うことができない。そこで、生長過程を説明できる作物モデルを導入し、データ同化手法により収量推定を行う。気温や日射量などの環境情報を入力とし、時間発展により生長変化を記述するものであるが、これに観測した生長データを組み合わせることで個体ごとの生長と収量を推定する。現在、作物モデルの構造に検討を要しており、今後、収量の推定精度を明らかにする。

3. 今後の展開

農業分野では UAV による空撮は、効率的な圃場観測を実現するものとして、活用が期待されている。UAV 画像により作物個体の生育情報を計測できる技術を開発したが、その応用場面は栽培研究だけではなく、育種過程における個体選抜にも活用できる。これまで地上で人手を掛けて行っていた生育観測のいくつかを簡便化できる可能性があるため、品種改良の効率化をねらう。一般の生産現場では、圃場内の生育のばらつきを把握できるため、精密農業の実現に貢献できる。本研究では、より広域の画像を収集するため、固定翼 UAV を導入した。これにより、一度のフライトで 100 ヘクタールをカバーできるようになり、北海道の大規模畑作地帯でも UAV による空撮画像の利用が現実的なものとなりつつある。今後収量推定方法について検討を重ね、より広域に展開できる技術を開発する。

4. 自己評価(公開)

個体生育情報の計測に関しては、すべての処理を自動化し、大規模圃場にも適用できるものであることから当初の目的を達成できたが、収量推定については、十分な結果に至らず、方法について今後も検討が必要である。

研究実施体制は計画どおり適切なものであった。所属機関の畑作圃場を使用し、3年間の圃場試験を実施できた。また、年間約150回のUAVフライトを実施したが、期間中、機材のメンテナンスに十分な予算であったため、安定した実験体制を整備することができた。すべての研究費は本課題遂行に適切に執行した。

本研究で開発した技術は、育種作業の効率化に貢献できるほか、広域に展開できる可能性があるため、収量推定技術が確立すれば、北海道畑作地帯全体で収量のばらつきを詳細に評価することができる。精密農業の観点で、作物生産の最適化を実現するための基盤情報となりえる。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. R. Sugiura et al. (2016) Field phenotyping system for the assessment of potato late blight resistance using RGB imagery from an unmanned aerial vehicle. Biosystems Engineering 148, 1–10.

(2)特許出願

研究期間累積件数:0 件

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. Ryo Sugiura, Field Phenotyping System Using Imagery from Unmanned Aerial Vehicle. Field Phenomics with Big Data, 2016 年 2 月
2. Ryo Sugiura, High-performance crop monitoring by drone, The 9th GEOSS AP Symposium, 2017 年 1 月
3. 杉浦綾, 画像解析によるバレイシヨの生長計測, 日本育種学会・日本作物学会シンポジウム, 2017 年 12 月
4. 杉浦綾, 大規模圃場における作物個体の生育モニタリング, バイオインフォマティクス学会, 2018 年 9 月
5. 杉浦綾, ドローン画像による馬鈴薯の疫病とウィルス感染株検出の取り組み, 植物病理学会シンポジウム, 2018 年 10 月

研究報告書

「農作物の早期診断技術の創出と栽培法の最適化」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 27 年 12 月～平成 31 年 3 月

研究者: 野田口 理孝

1. 研究のねらい

人類活動による環境変動は、温暖化に伴う農作物の至適栽培エリアの北上や局所的な異常気象の頻度を上昇させ、従来の農業体系が通用しないケースが増えつつある。地球規模の持続可能な環境保全への取り組みには心血が注がれているものの、速やかな解決は難しく、今後も変動が続くとされる地球環境に随時対応できる農業技術の確立が求められている。本研究では、植物がいかなる生育状態にあるかを、見た目には評価できない初期の育成段階から、一枚の葉から得られる搾汁液により診断する技術を開発し、その後の育成に適正な栽培条件を予測する技術の提供を目指す。農作物の生育状態の判定や栽培法の選定は、農家の経験に頼るところが大きく、農業主の高齢化によりその経験は失われる危険性にある。見た目に症状が現れる前に生育状態を診断できる本技術は、現状のリスクを軽減できる。

個体全体の生育を記述する方法として、本研究では植物の篩管内の情報シグナルに着目した。篩管は、光合成によって得たエネルギーを全身に伝達する組織であるが、同時に個体発生を制御する情報シグナルを輸送していることが近年の研究で明らかとなってきている。そのため、篩管を解析すれば、入手困難であった個体レベルの生育状態を調べることができる。篩管中を輸送される生体情報分子としては、これまでに small RNA, mRNA, タンパク質、植物ホルモン等の多様な分子種が知られる。そこで本研究では第一に、これらの構成成分を圃場でその場診断することのできるデバイスを開発することを目的とした。第二に、生体診断の精度そのものを向上させる目的で、篩管中の生体情報分子のカタログ化を目指した。これにより、[1]フィールドにおける環境・栽培法といった農業形質を左右する外的要因と、[2]収穫量・作物品質等の最終の農業形質の2群の情報に対し、篩管成分を作物の生体情報を表す3群目の情報として照合し、特定の環境下で働く情報分子あるいは分子集団の傾向を検出することができる。

診断技術を用いて、対象農作物の圃場における課題を早期にその場診断することができれば、その後の栽培法を適正化し、環境負荷に負けずに農作物を栽培できる。また中長期的な新品種開発においても、早期診断技術は有効なスクリーニング法となりえる。篩管液による診断技術は、植物が普遍的に利用する情報伝達機構を基盤とするため、植物の種類によらず汎用的に利用可能であると期待される。

2. 研究成果

(1) 概要

本さきがけ研究に於いては、診断技術の要素開発(デバイス, 篩管液の情報整備)を目標に、植物の葉の搾汁液～20 μ L から、2 時間以内に、標的の RNA あるいはタンパク質を検出することのできる植物用診断デバイスの開発を達成した。はじめにマイクロ工学技術 MEMS により少量の植物試料を扱うことのできるマイクロ流体デバイスを作製し、次に植物検体を

扱うのに最適なプロトコルを構築した。検体試料としては、情報分子が集積している篩管液と、篩管液成分を含む葉の搾汁液を試験し、後者の篩管液成分が希釈された葉の搾汁液であっても、標的する情報分子の検出を行うことができた。RNA 分子は、土壌の主要肥料要素であるリンが欠乏した際に発現上昇して篩管液中に検出されるようになる miR399 を扱った。リン欠乏に晒した複数の農作物を用意して、それらの植物の葉の搾汁液から miR399 RNA を検出することができ、リン欠乏状態を簡便に診断することに成功した。肥料要求性の程度は農作物ごとに異なり、また同一の農作物でも成長ステージによって要求性は異なるため、土壌成分の計測だけではさらなる肥料の必要性を判断することは難しかったが、この汎用技術によって課題解消につながる。

次にタンパク質の検出として、植物に感染する植物ウイルス由来タンパク質を検出し、病理診断としての利用可能性を示した。様々な農作物に感染して被害をもたらすキュウリモザイクウイルス(CMV)を対象に実証した。診断デバイスは、RNA 検出の際に用いたものと同じである。見た目の症状から病気と生理障害を見分けることはしばしば困難であり、また病徴からいずれの病気であるかを調べることも容易でない。本技術によれば、こうした場面で簡便に短時間に症状の原因を診断することができる。

以上、様々な農作物を対象に、10 円玉程度の葉片から、短時間に簡便に生体診断を行える要素技術を開発した。

本研究ではさらに、将来的な技術展開のため、篩管液中の情報シグナルの分子同定を進めた。情報分子の中では特に RNA が技術的な利便性・拡張性・汎用性が高いことから、RNA を対象に解析パイプラインの構築と同定を行なった。農作物としてはモデル化の進むトマトを対象に研究を進め、篩管液中に含まれる RNA 分子の包括的なカタログ化を達成した。診断デバイスと組み合わせて使用すれば診断精度の向上につながり、本研究の一連の成果により植物の診断技術のプラットフォームを構築することができた。

(2) 詳細

研究テーマ A 「植物用生体診断デバイスの確立」

・デバイス作製

低ボリュームの検体試料を扱うため、MEMS 技術によりマイクロ流体デバイスを作製した(図 1A)。マイクロ流路の両端に、検体試料の導入部と送液操作のための吸入部を設け、流路内の一部に標的分子の検出領域として、プローブを固相化した領域を設けた。シグナル検出の有意性を評価するため、検体試料の導入部のすぐ先で流路が 5 岐路に分岐する構造とし、検出反応を 5 反復する形態とした。送液操作のため、外部装置としてシリンジポンプを設置し、実験ごとに吸引部に装着した。

・デバイスによる RNA 検出

リン酸欠乏時の情報伝達に働く miR399 を対象に研究を進め、miR399 を検出する蛍光標識付き DNA プローブを設計・合成して、診断デバイスの作動試験に用いた。はじめに人工合成した miRNA を用いて条件検討を行った。超純水で希釈系列を用意して調べたところ、1 nM の濃度までであれば標的 miRNA を再現性高く、有意に検出できることが分かった(図 1)。

次に、植物検体から標的 RNA 分子を検出することを念頭に、人工合成した miRNA を超純

水の代わりに葉の搾汁液に溶解して、検出実験を行った。真正双子葉類を二分するキク類とバラ類から、それぞれトマトとシロイヌナズナを試験対象として汎用性を確認した。いずれの植物の葉の搾汁液を用いた場合も、有意に標的 RNA 分子を検出できることが分かった。

そこで最終的に、植物体内で産生するの miRNA の検出を試みた。リン酸欠乏状態において植物個体と欠乏処理しない植物個体を用意し、検出試験を行った。RNA の発現量を定量評価する従来法である qPCR 法により、調整した植物が実際に miR399 をリン欠乏に応じて発現上昇させているかを確認し、同時に調整した試料を診断デバイス実験に用いた。その結果、診断デバイスでも葉の搾汁液から有意に miR399 の発現上昇を検出することに成功した。なお、篩管液を開始試料として調整した場合には、篩管液の凝固反応による操作の難しさが明らかとなり、葉の搾汁液を開始試料として用いることが好ましいことが分かった。

・デバイスによる植物由来のタンパク質の検出

デバイスによる植物由来のタンパク質の検出の試みについては、キュウリモザイクウイルスに感染した植物個体、及び、非感染個体と、キュウリモザイクウイルス由来性タンパク質を認識する特異的抗体とを用いて検討を行った。検討の結果、非感染個体からは認められない抗体反応によるシグナルが、感染個体からは有意に検出され、デバイスによる植物体内ウイルス性タンパク質の検出に成功した。

以上、植物の RNA あるいはタンパク質を、少量の葉片から検出することが可能な「診断デバイス」を開発し、第一の研究目標を達成した。

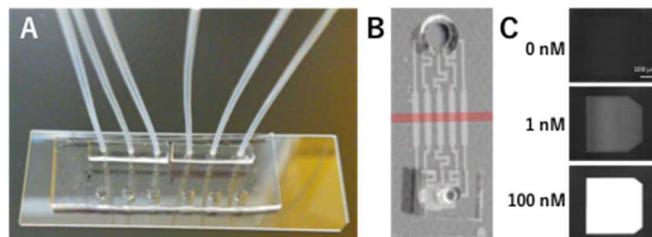


図 1. 診断デバイス

A 診断デバイスの全形. B サンプル用の検出ユニット (赤色：プローブ領域). C RNA の検出の様子.

研究テーマ B 「篩管中の生体情報分子のカタログ化」

・圃場試験の準備

特定の環境要因のもとで栽培した農作物の篩管液構成成分を解析する目的で、圃場で育成したトマトを材料とした。土壌肥料成分を欠乏した際の応答を調べることを予定していたため、肥料濃度を正しく調整するための水耕装置を内装したビニールハウスを設営した。

トマトの情報シグナルを同定するため、トマトに *Nicotiana benthamiana* を穂木として接木し、*N. benthamiana* 穂木をサンプリングして、そこからトマト由来の情報シグナル分子を同定することにした。この手法であれば、*N. benthamiana* 穂木に伝達したトマト由来のシグナル分子を、2種類の植物のゲノム情報の違いを指標にして網羅同定することができる。はじめに、圃場で栽培したトマトの適切な接木法を確認し、続く本実験を実施した。

・トマトのハウス栽培と試料調整

春作と秋作の二期の作付けを実施した。栄養リッチ区と主要栄養素 N, P, K をそれぞれ欠乏した区を用意し、試料調整を行った。栄養欠乏の処理は、播種後四ヶ月栽培した後から開始し、一週間連続して行った後にサンプリングを行った。サンプリングは、(i) 各処理区にお

けるトマトの応答を調べるためトマトの成熟葉と、(ii)移行性 RNA 検出の実験のためサンプリング一ヶ月前にトマト固定種 MoneyMaker 系統に接木した *N. benthamiana* 穂木と、(iii)元素分析用のトマト葉と、(iv)各処理区における肥料成分を調べるための排液について実施した。(i)–(iii)は、9 個体分を集めて 1 サンプルとしたものを 3 反復用意した。なお、ハウス栽培したトマトだけではなく、環境制御された室内で栽培したトマトについても試料を調整し、室内と野外のいずれでも共通する機構を調べられるようにした。

・篩管内移行性 RNA 同定のための RNA-Seq 解析

一連の接木試料について、illumina NEXTseq により、1 億リード/試料を目安として RNA-Seq 解析を行った。得られたリードは、トマト cDNA データベースにマッピングし、完全一致するものを抽出した。トマトに接木した *N. benthamiana* 穂木サンプルの対象区として、接木をしていない *N. benthamiana* サンプルのデータも並列して扱い、*N. benthamiana* 穂木のサンプルからだけ抽出されるリードを抽出し、次項の解析パイプラインに供試した。

・篩管内移行性 RNA 同定の解析パイプラインの構築

移行性 RNA を同定する有効な解析パイプラインがこれまでに存在せず、自前で構築した。公表されている手法では多量の偽陽性が得られることが明らかとなり、複数の SNP を指標とする厳しい評価基準を設けた解析パイプラインを用意した。この方法によると、偽陽性の検出は殆ど皆無で、移行性 RNA だけを同定できた。近日、データベースとして公開予定である。

・篩管内移行性 RNA の同定

構築した解析パイプラインで解析した結果、栄養リッチ区で 53 種類、N 欠乏区で 38 種類、P 欠乏区で 59 種類、K 欠乏区で 49 種類、重複を除いて計 244 種類の移行性 mRNA を同定することができた(図 2)。

以上より、診断技術の精度向上へ向けた基盤情報の整備として、篩管中の RNA シグナルの網羅的なリストを作成することができ、第二の研究目標を達成した。

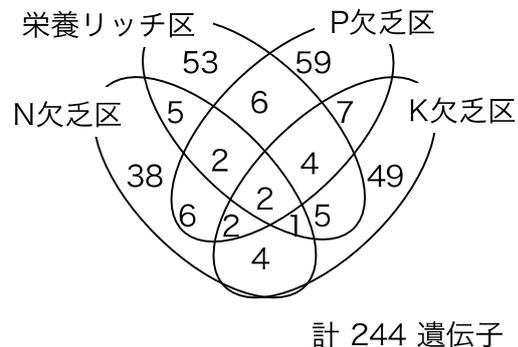


図 2. トマトの篩管内移行性 RNA

栄養リッチ区、N 欠乏区、P 欠乏区、K 欠乏区でそれぞれ同定された篩管内移行性 RNA の数をベン図で示す。

3. 今後の展開

・診断技術の実用化

診断技術のスループットをより向上させて実際の基礎科学研究の場面や実用場面で利用できるようにするため、周辺装置開発を含めた発展研究を実施する。開発項目は 3 点あり、送液操作を自動で行う小型装置の開発、検出用の光学系システムの開発、そしてそれら装置の仕様に適合する量産型の診断デバイス生産である。作成した診断デバイスが長期保存できるものであるかも実用性を考えると重要な開発項目である。当面は開発コストが大きくなったとしても、技術実証を重ねることに重点を置き開発方向性を探る。開発方針が定まった段階で、素材や装置パーツの低

コスト化を図り、最終的に社会受容可能な装置を開発する。必須ではないが、いくつかの技術レベルで装置が開発されることが多面的な技術活用には好ましく、安価でそれほど高精度でない装置から、それほど安価でなくとも高精度に診断可能な装置までがラインナップできると最善である。開発工程の中で、こちらも念頭にデータを取得する。

・新たな診断マーカーの開発による技術有効性の実証

既に生育診断の指標となる生体分子マーカーは知られるが、まだまだ限られたことしか診断することはできない。本診断技術は、大規模にデータ収集することを得意とし、そのような生体診断に有効なマーカー開発の際には有効である。この有効性を実証するため、いくつかの診断ニーズのある現象について技術を適用し、成果を得ることで技術の有効性を実証したい。安定した農作物の生産を実現するため、農業では本質的な問題となる病気や成長生理について標的したい。病気にかかりやすい状態でないか、生育不良の兆候がないかを、定期健康診断できて、農業生産者が収穫期まで確信を持って農作業するための技術へと発展させたい。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

本研究では、圃場生態系における農作物の生育状態を、篩管液の移動性分子を解析することで診断するための要素技術を確立することであった。植物の生体分子の検出技術はこれまで実験室環境で専門家が数日を要して行っており、簡便な検出技術が望まれていた。本研究では特殊な研究設備を必要とせず、植物試料から短時間で簡便に生体内の RNA、タンパク質を検出することのできる新たな診断技術を開発し、土壌肥料の欠乏状態の診断と病理診断に成功した。

くわえて本研究では、圃場環境での生育状態の診断にあたって有用な分子マーカー候補を同定すべく、篩管液の移動性分子をトマトを対象に同定し、基盤情報を整備することを目指した。期間を通して解析に必要な試料調整を行い、生体診断の際に指標となる篩管内のシグナル分子の同定のための解析パイプラインを新規に構築し、トマト篩管移行性 RNA のカタログ化とデータベース構築を達成した。

研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

第1年次は実験の実施全般に必要な超純水製造装置 300 万円を購入し、以後のデバイス実験、分子生物学実験において、十分に高精度な解析結果を得ることができた。第3年次は、水耕栽培設備と暖房装置を内装したビニールハウスを設営し、冬場を含む年間を通して移行性 mRNA の解析に必要な植物試料を調整することができた。研究実施期間全体を通して、デバイス開発用の部材費、試薬費、分子生物学実験用の試薬費が研究費の半分近くとなった。十分な開発費が利用できたことで、診断デバイスの技術確立と、篩管内移行性 mRNA の網羅同定を達成することができた。第2年次から第4年次までは、技術補佐員を 2~3 名雇用し、人件費として年間 600 万円を費やした。研究実施に必要な人的リソースを確保することができたため、圃場での栽培試験や試料調整、実験に使用する十分なデバイス作製を、研究実施期間を通して行うことができた。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果(今後の見込みを含む)

本研究が成功すれば、植物でははじめての生育状態の早期診断技術となる。植物に普遍的な情報伝達の機構を指標に診断する方法のため、汎用性が高く、圃場で育つ植物にもその場診断

が実現し、早期に診断することで今後の栽培法の修正にも役立つ。環境情報や作物情報を集積する技術との協働により、生体診断のための基盤情報が整備できれば、所望の形質を有する接木苗・品種の探索は迅速化し、将来の予測困難な気候変動にも対応が可能となる。植物科学の推進にも有効であり、研究者が個人のレベルであっても短期間でハイスループットにデータ取得することができ、研究の多様性が高まればと期待している。本技術は、農業の高度化を促進する利便性の高い農業技術となる可能性があり、安全な社会実現へ向けた国際的な貢献が期待される。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Hirokazu Toju, Koji Okayasu and Michitaka Notaguchi. Leaf-associated microbiomes of grafted tomato plants. *Scientific Reports*. In press.
2. Hiroki Tsutsui, Michitaka Notaguchi. The use of grafting to study systemic signaling in plants. *Plant Cell Physiology*. 2018, 58, 1291–1301.
3. Ryushiro D. Kasahara, Michitaka Notaguchi and Yujiro Honma. Discovery of POEM phenomenon, a new step of plant reproduction. *Communicative Integrative Biology*. 2018, 10, e1338989.
4. Ryushiro D. Kasahara[†], Michitaka Notaguchi[†], Shiori Nagahara, Takamasa Suzuki, Daichi Susaki, Yujiro Honma, Daisuke Maruyama, Tetsuya Higashiyama. Pollen tube contents initiate ovule enlargement and enhance seed coat development without fertilization. *Science Advances*. 2016, 2, e1600554. [†]Co-first.

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 1 件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

・学会発表

Ryo Okada, Naoki Yanagisawa and Michitaka Notaguchi. A fluidic micro-device to detect RNAs and proteins for early diagnosis in plants. The 5th International Plant Phenotyping Symposium. 2018.

・受賞

第 6 回超異分野学会本大会 超異分野学会賞

第 35 回電気学会 センサ・マイクロマシン部門 優秀ポスター発表賞

・著作物

Koji Okayasu and Michitaka Notaguchi. Efficient establishment of interfamily heterograft of *Nicotiana benthamiana* and *Arabidopsis thaliana*. Phloem: Methods and Protocols. Springer. In press.



野田口理孝. 異種間の接ぎ木技術の開発. アグリバイオ. 特集 植物の増殖技術と生産
(細胞培養や接ぎ木利用). 2018. 2, 1043-1047.

・新聞報道

朝日新聞(2018.7.1) 先端人「接ぎ木 食糧危機救う」

研究報告書

「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」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 27 年 12 月～平成 31 年 3 月

研究者: 福田 弘和

1. 研究のねらい

あらゆる食料生産において、「生産の安定性」は重要である。しかしながら、高い安定性を保証する基礎理論や技術(ノウハウ)は現在のところ十分に開発されているとは言えない。従来から「安定性を保証し、安定性を高める技術」については様々な農学研究や技術開発において広く議論されているが、安定性を崩壊させる「不安定性」の実態解明ならびにその体系的な研究は行われていない。生産安定性を高めるための根本的な基礎研究が必要である。

そこで本研究では、植物生産における『生産不安定性』の根本を解明することで、植物生産におけるリスクの回避または低減を目指す。本研究では、実用性、再現性、研究の効率性を重視し、人工光型植物工場(以下単に植物工場とする)において研究を実施する。植物工場も生産不安定性を引き起こす様々な要因に晒されており、植物体内の複雑・非線形な生理応答によって、生産不安定性が発生していると考えられる。またその要因や発生機構は植物工場に特有のものとなっていることがあり、フィールドとは異なる固有の基礎研究も必要となっている。

本研究では、現代的な研究手法である RNA-Seq 解析や画像処理技術、大規模データ解析を駆使して、「生産不安定性」の解明に挑戦する。精密な環境データとオミクスデータの時系列的な解析により、生理代謝を網羅的に解析し、最終的には遺伝子発現モデルによって不安定性を数理モデル化する。これにより、遺伝子発現モデルによって記述された生産不安定性の理論を整備し、その理論に基づいた「生産安定性」の設計の実現を目指す。

研究戦略として、次の 2 つのアプローチを同時に実施する。(1)データ駆動型アプローチ: 植物工場に特化したデータベースを構築し、環境データ・オミクスデータ・フェノムデータの統計解析を行う。これにより、生産不安定性の発見とその生物学的解明を行う。(2)不安定性理論アプローチ: 「コアダYNAMICS」である日周性(概日リズム)に着目し、生産不安定性を引き起こす生理応答の非線形性を数理モデル化することを行う。

本研究は最終的には、フィールドにおける栽培予測研究(頑健なモデル・シミュレーションの構築)、大規模施設園芸・太陽光利用植物工場・人工光型植物工場における栽培最適化研究など、各分野のビッグデータに含まれる「生産不安定性」の解析に貢献することを目指す。

2. 研究成果

(1)概要

本研究は、人工光型植物工場(大阪府立大学・植物工場研究センター量産実証棟(レタス日産 5,000 株))において研究を実施した。対象作物はレタス(リーフレタス)とした。

まず、研究テーマAとして「データ駆動型アプローチによる生産不安定性の発見と解明」を行

った。植物工場内の環境・オミクスのビッグデータを取得・解析することで、生産不安定性を引き起こす様々な要因を総合的に発見・解明する手法を開発した。栽培・生産管理の視点からは、①各栽培工程(緑化工程、育苗工程、栽培工程)におけるデータ取得(論文5)、②専用データベースの構築とデータ解析、③収益モデルの構築と支配パラメータの特定(論文4)、を行った。これにより、個々のパラメータがもたらす生産不安定性に対し体系的な取り扱いと定量的な比較が可能となり、さらに生産現場における支配パラメータの実測法ならびに収益向上アルゴリズムを提案することができた(特許2)。植物生理学の視点からは、④時系列トランスクリプトームを用いたレタスの概日リズムの基本特性の解析(論文1、3)、⑤1 時点サンプリングによる概日リズムの評価法の開発、⑥栽培の全工程における時系列トランスクリプトームデータの取得と解析、を行った。これにより、トランスクリプトームにおける概日リズムの診断による生育診断手法の基礎を構築することができた。

次に、研究テーマ B として「不安定性理論アプローチによる生産不安定性の数理モデル化」を行った。ここでは不安定性の解明の鍵として、生理代謝の非線形性に着目した。研究の切り口として、⑦概日リズムの非線形応答関数を精密に同定し(論文2)、⑧トランスクリプトーム統計モデルへの導入研究を行った。⑨得られた非線形応答関数に基づいて設計された概日リズムの破壊条件にて栽培試験を行い、有意に生育変化を引き起こすことを証明した。また、⑩概日リズムの破壊によるストレス付与法を新規に開発した(特許1)。

さらに、研究テーマ C として「生産不安定性の汎用的評価手法の開発」を行った。ここでは、⑪植物生産安定化フローチャートの作成ならびに⑫太陽光利用植物工場のトマト葉トランスクリプトームデータにおける概日リズム診断手法を開発し、概日リズムに関する潜在的な生産不安定性を発見・回避・低減するための汎用的な評価手法の基礎を構築した。

(2) 詳細

研究テーマ A「データ駆動型アプローチによる生産不安定性の発見と解明」

① データ取得： 生物データとして緑化室(クロロフィル蛍光画像 6000 株/日×611 日分)、育苗室(撮像領域 1224 株の時系列画像データ計 24 万枚(図 1))、栽培室(地上部生重量計 2000 株)、トランスクリプトームデータ(計 516 検体)を取得した。環境データとして、緑化室・育苗室・栽培室における温度・湿度・大気圧の時系列データ(3 年分)と、緑化室の照度分布(全空間)と育苗室における照度分布(1244 株分)を取得した。

② 専用データベースの構築と解析： 上記①で得られたデータを格納し相関解析を行うための専用データベースを構築した。また、データ解析の結果、育苗工程が生産不安定性の鍵となるステージであることが判明した。

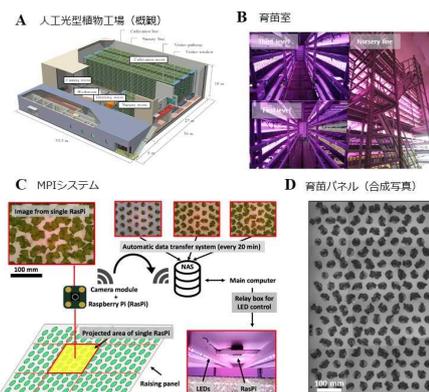


図 1 植物工場(育苗室)におけるデータ取得システム(論文 5)。

- ③ 収益モデルの構築と支配パラメータの特定：生産工程毎のコストと生重量分布の時間変化の実測値に基づき、最終的な収量ならびに標準的な売上値を算出する数理モデルを構築した。この数理モデルのパラメータ感度分析から、収益に影響を与えるパラメータ（支配パラメータ）の特定を行った。これにより、生産現場における支配パラメータの実測法ならびに収益向上アルゴリズムを提案した（論文4、特許2）。
- ④ 時系列トランスクリプトームを用いたレタスの概日リズムの基本特性の解析：本研究の基本コンセプトである「概日リズムの非線形性による生産不安定性」を生理学的に明らかにするために、計 516 検体からなるレタスの時系列トランスクリプトームデータの周期性解析を行い、251 個の遺伝子発現指標（contig）を得た。この 251 個の機能解析や、連続明条件ならびに明暗サイクル条件（12 時間明：12 時間暗）における標準的な動態を解析した。これらの解析によって、植物工場において栽培されるレタスの概日リズムを正確に分析する基盤を構築できた（論文1、3）。
- ⑤ 1 時点サンプリングによる概日リズムの評価法の開発：一般に、栽培条件や品種によってトランスクリプトームの数値やパターンが変化するため、1 時点だけのデータだけで概日リズムの位相（体内時計の内部時刻）を正確に推定することは困難である。これを克服するために、植物工場レタス（連続明、明暗サイクル）や、太陽光利用植物工場トマト（秋、冬、春）、そしてシロイヌナズナの複数の時系列トランスクリプトームデータを複合的に分析し、1 時点サンプリングによる概日リズムの評価法の開発を行った。これにより、最適なサンプリングを実現するための実験計画の指針（RNA-Seq 解析のための実験計画法）を開発できた。
- ⑥ 栽培の全工程における時系列トランスクリプトームデータの取得・解析：以上の④⑤の展開として、植物工場における全栽培工程（播種後 10 日目～収穫 38 日目）における 2 時間毎の RNA-Seq 解析（計 1323 株のサンプリング、計 384 の発現量データを取得）した。これにより、概日リズム不安定期の特定を実現するための、栽培の全工程における概日リズムの精密な解析を行った。

研究テーマ B「不安定性理論アプローチによる生産不安定性の数理モデル化」

- ⑦ 概日リズムの非線形応答関数の精密な同定：概日リズムは光などの環境パルス入力に応答するが、その応答は入力時の概日リズムの位相に依存する。この依存性は位相応答曲線（PRC）として計測され、概日リズムの基礎特性として知られる。既往研究では、生理代謝を管理する概日リズムの応答性、すなわち PRC がノイジーであり、しかも同定に時間がかかるため、研究の進展を妨げていた。特に、作物への応用は非常に困難な状況であった。本研究では、RPC を高速同定し、しかも高精度に同定する新規の手法を開発した（図 2、論文2）。この成果により、作物の PRC 同定のための重要な基礎を得ることができた。

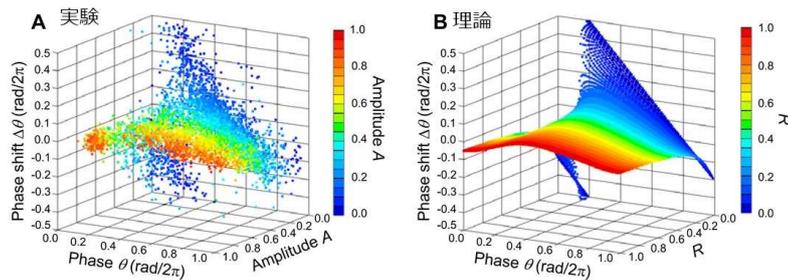


図 2 新規に開発した PRC 同定手法。個体リズムの振幅(細胞間同期率)が新たな変数として追加された(論文 2)。

- ⑧ トランスクリプトーム統計モデルへの導入研究： 先行研究(Nagano, et al. Cell 2012)のイネ・時系列トランスクリプトーム統計モデルにおいて、概日リズムの重要性が明らかにされていた。しかし、概日リズムの項は「周期 24 時間」と固定されており、概日リズムがもつ柔軟な環境応答性(位相応答)は議論できていなかった。本研究では、上記④⑤⑦により、概日リズム項の改良提案を行った。
- ⑨ 概日リズムの破壊条件における栽培試験： 得られた PRC に基づいて設計された概日リズムの破壊条件(24 時間周期で入力される極短時間暗期条件)にてレタスの栽培試験(計 996 株)を行った。これにより、概日リズムの破壊条件により生育不良が生じることを証明した。これは、植物工場における暗期の作業灯点灯などの軽微な光刺激であっても、生育不良を引き起こす可能性があることを示す結果であり、植物工場に特有の生産不安定性の一例として検討した。
- ⑩ 概日リズムの破壊によるストレス付与法の開発： 得られた PRC に基づいて概日リズムの破壊条件(細胞間の脱同期によるスパイラル波の発生条件)を設計する理論を構築し、レタスの水ストレスに対する応答を実証した(特許1)。

研究テーマ C「生産不安定性の汎用的評価手法の開発」

- ⑪ 植物生産安定化フローチャートの作成： 本フローチャートは、「植物生産システムの利益モデル」を始点とし、「パラメータの同定・分析」、「生産不安定性の評価」、「生産不安定性への対策」を経由し、「収量の安定化、利益の最大化・安定化」を終点とした。「生産不安定性への対策」において(i)最適運用技術、(ii)回避技術、(iii)利用技術を定義した。本フローチャートにより、生体計測(フェノタイピング)、個体差低減(苗診断)、育種の位置づけを整理した。
- ⑫ 太陽光利用植物工場のトマト葉トランスクリプトームデータにおける概日リズム診断手法の開発： 愛媛大学植物工場ならびに静岡大学栽培施設(峰野博士との共同研究)において、様々な季節(秋、冬、春)における時系列トランスクリプトームデータを取得し(計 197 検体)、生産施設ならびに季節、品種に依存せずに安定して概日リズムを示す 59 個の遺伝子を特定した。これにより、生産現場に利用可能な汎用的な概日リズム評価手法を構築した。⑪と合わせて、概日リズムに関する潜在的な生産不安定性を発見・回避・低減するための汎用的な評価手法の基礎を構築できた。

3. 今後の展開

- ・ フィールド・施設園芸における潜在的な生産不安定性を発見・回避・低減するための汎用的な評価手法の開発

まずは、環境ゆらぎ(気候変動に伴う長期トレンドと不規則変動の周波数・振幅)に対する概日リズムの非線形応答を解明し、フィールド・施設園芸における成長のばらつきを引き起こすメカニズムの数理モデル化を行う。次にその数理モデルに基づく、概日リズムの正常化の手法(環境調節、栽培計画の見直しなど)の理論を構築する。

- ・ 植物工場における AI ロボット技術の基礎研究

植物工場は2018年よりコンビニ等の業務用市場分野からの投資が相次いでおり、植物工場の技術は産業界で急速に発展するものと思われる。10年後には、AI搭載の作業ロボット(移植、定植、収穫の各作業ロボット)が導入され、AIについて一貫した情報処理を行う植物工場「AI コンシステンシー植物工場」の出現が予想される。一方で、植物工場分野における国際競争は激化しており、数年～10年後における国際競争力の維持は不透明である。このような背景の下、産学連携における基礎研究の推進が必要であり、特にAIロボットのアルゴリズムに関わる基礎研究が重要である。例えば、収益の最大化と安定化を実現するための生体診断・生体制御技術の基礎研究が重要であり、今後の研究として実施する。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Takanobu Higashi, Koh Aoki, Atsushi J. Nagano, Mie N. Honjo, Hirokazu Fukuda. Oscillatory analysis of the lettuce transcriptome under constant light and light-dark conditions. <i>Frontiers in Plant Science</i> , 2016, Vol.7, 1114(1-10).
2. Kosaku Masuda, Ryota Kitaoka, Kazuya Ukai, Isao T. Tokuda, Hirokazu Fukuda. Multicellularity enriches the entrainment of <i>Arabidopsis</i> circadian clock. <i>Science Advances</i> , 2017, Vol. 3, no. 10, e1700808.
3. Mari Takeoka, Takanobu Higashi, Atsushi J. Nagano, Hirokazu Fukuda. Estimation of the circadian phase by oscillatory analysis of transcriptome in plants. <i>Environmental Control in Biology</i> , 2018, 56(82), 67-72.
4. Shogo MORIYUKI, Hiroaki KANEDA, Yusaku MIYAGI, Nobuhiro SUGIMURA, Hirokazu FUKUDA. Profit Models Based on the Growth Dynamics of Lettuce Populations in a Plant Factory. <i>Environmental Control in Biology</i> , 2018, 56(4) 143-148.
5. Shogo Nagano, Shogo Moriyuki, Kazumasa Wakamori, Hiroshi Mineno, Hirokazu Fukuda. Leaf Movement Based Growth Prediction Model Using Optical Flow Analysis and Machine

Learning in Plant Factory. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10:227. doi: 10.3389/fpls.2019.00227.

(2)特許出願

研究期間累積件数:2件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

1.

発明者: 福田弘和、関直基、谷垣悠介、山川浩延

発明の名称: ストレス耐性植物の製造方法

出願人: 公立大学法人大阪府立大学

出願日: 2017/3/30

出願番号: 特願 2017-068474

2.

発明者: 福田弘和、守行正悟、山川浩延、糸賀和義

発明の名称: 植物の生産方法

出願人: 公立大学法人大阪府立大学

出願日: 2017/8/29

出願番号: 特願 2017-164480

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

発表

- Antony Dodd, Hirokazu Fukuda. How plants sense and respond to environmental cycles. 日本学術会議公開シンポジウム・2017 CIGR World Workshop symposium, 松山, 2017/9/2.

受賞

- 福田弘和, 日本生物環境工学会, 学術賞「植物工場における概日時計の計測と制御に関する基盤的研究」2018年9月19日

書籍

- Editors: MASAKAZU ANPO, HIROKAZU FUKUDA, TERUO WADA. PLANT FACTORY USING ARTIFICIAL LIGHT Adapting to Environmental Disruption and Clues to Agricultural Innovation. Elsevier, 2018/10/15.

報道・プレスリリース等

- 「解剖先端拠点 苗選び、空調「稼げる技術」」 福田弘和, 増田昇. 日経産業新聞 2017/2/21.
- 「植物体内時計の柔軟な環境適応能力を明らかに～植物栽培における体内時計の高度計測制御技術の開発に期待～」大阪府立大学・JST 共同プレスリリース, 2017/10/4.
- 「体内時計の機序解明」 福田弘和, 徳田功. 化学工業日報, 2017/10/12.

- ・ 「植物生産における概日時計のシステム科学」 福田弘和, 科研費 NEWS, 2018/3/19.

研究報告書

「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」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 27 年 12 月～平成 31 年 3 月

研究者: 峰野 博史

1. 研究のねらい

日本の環太平洋経済連携協定(TPP)の参加によって、日本市場への輸出拡大を期待する各国農業団体から歓迎の声が相次いでいるが、同時に日本の持つノウハウやICTを駆使して、高品質野菜類を同協定参加国へ輸出していくという攻めの準備に転じる良い契機が到来したともいえる。東海地方は、古くからその温暖な気候を活用した施設園芸が盛んに行われ、農芸品といわれる高品質な野菜類(高糖度トマト、温室メロン等)の供給に大きく寄与してきた。しかし、近年は気象変動による周年生産の不安定化によって収益性が低下し、労働の厳しさから後継者不足も深刻化している。

本研究では、果実の糖度を上げる栽培技術の一つである水分ストレスに焦点を絞り、野外や施設園芸環境だけでなく多種多様な生育環境に自律順応できる汎用的な水分ストレス高精度予測基盤技術の確立を目指した。環境データ、生育データ、農作業データといったデータに基づく制御環境要因の中でも、特に養水分制御が収量、品質を大きく左右する重要な要因となっている。基本的な仕組みは解明されつつあるが、多種多様な環境や植物の中で、環境変動と生育状況を考慮した適切な判断指標を構築することが課題であるといえる。これまで、環境情報や生育情報を得ることで、よりの確な判断を実現できる可能性は示唆されてきたが、「匠の技」を持たない生産者にとってはこれら情報を適切な管理判断に結び付けることが困難で、その効果は限定的であった。そこで、実世界の法則が明確でない複雑な諸現象でも、関連するデータを大量に収集し適切な特徴量を抽出できれば、データドリブンな機械学習によってモデル化でき、時間経過や季節変化に伴って特性が変化するだけでなく地域やハウスによって特性の異なる条件に対しても、高精度に水分ストレスを予測可能な基盤技術を確立できるのではないかと考えた。水分ストレスと果実の糖度を上げる栽培技術との因果関係解明も進めば、「匠の技」を持たない生産者でも果実の高糖度化による高品質化を容易に実現でき、適切な管理判断に結び付けられる基盤技術となりうる。

農学・植物生理学研究者らと連携しながら情報科学的アプローチで研究を進め、時間経過や季節変化に伴って特性の変化する複雑な植物成長を対象とした機械学習手法や情報協働栽培手法に関して、学術的にも価値ある新たな革新的な研究分野を切り拓く。

2. 研究成果

(1) 概要

果実の糖度を上げる栽培技術の一つである水分ストレスに焦点を絞り、まずは施設園芸環境でのトマト低段密植養液栽培で、多様な生育環境に自律順応できる汎用的な水分ストレス高精度予測基盤技術を確立し、果実糖度向上による高品質化を容易に実現できる基盤技術創成を目指した。特に、①水分ストレスの定量化、②自律順応できる高精度予測基盤の確

立、③様々な環境での実証、の3ステップで研究を進めた。

熟練農家が感じている水分ストレスの判断指標の一つである植物の『しおれ』が生じる要因を検討し、植物のしおれ具合で熟練農家の感じる水分ストレスを推定できると考えた。植物は、晴天時に葉の表面にある気孔によって水を蒸散させ、根から水や養分の取り込みを促進するが、取り込める水が少ないと植物体内の水分が蒸散によって失われ、蒸散過多で茎が徐々にしぼみ、葉の重さを耐えきれなくなって垂れ下がっていく現象が『しおれ』であると考えた。蒸散量に関係する気孔の開閉量は光量や温湿度で変化し、葉面積や群落繁茂度にも関係する。そのため、温湿度の計測に加え、植物群落の上部と下部の散乱光の比で蒸散量を把握し、また、蒸散の結果、視覚的に把握可能なしおれの度合いは、小型定点カメラを用いて周期的に撮影する草姿画像によって把握できると考えた。

具体的には、環境データ(温湿度、散乱光)と、時間的に連続する草姿画像から各画素が時間的にどの方向にどれだけ動いたかを示す Optical Flow を用いて生成したマスク画像へ CNN (Convolutional Neural Network) を用いて抽出したしおれ特徴量を重畳し、蒸発散量に関する茎径変位量に紐づけたマルチモーダル深層学習によって、非線形で複雑な植物生理状態を現実的な計測データと時間粒度で機械学習可能なことを示した。これにより、比較的計測容易な非破壊データである環境データ(温湿度、散乱光)と草姿画像のみを入力することで、蒸散過多に基づく茎径変位量をソフトウェア的に出力する『しおれ検知ソフトセンサ』の研究開発に成功した。その後、IoT (Internet of Things) や無線通信技術を駆使した多様かつ長期間のデータセット拡充に加え、機械学習手法の改良、本しおれ検知ソフトセンサを用いた AI (Artificial Intelligence) 灌水制御システムの構築、数百株規模での栽培実証実験の結果、中玉トマト低段密植養液栽培にて、収穫期間における可販果率を低下させることなく高糖度トマト(平均 Brix.8.87、最大 16.9、サンプル数 15,901)を機械的に低負担で大量生産可能なことを確認した。

(2) 詳細 (図1に研究開発の流れを示す)

① 水分ストレスの定量化

トマト低段密植養液栽培における環境データ(気温、湿度、光量)、生育データ(茎径、草姿画像)といった非破壊・非侵襲で比較的計測容易なデータを高信頼に計測し、農業従事者が経験や勘で推測している水分ストレスの定量化を目指した。時間的に連続する画像から、各画素が時間的にどの方向にどれだけ動いたかを示す Optical Flow を用いて特徴量の経時変位量



図1. 研究開発の流れ

を抽出し、角度毎の平均速度成分を要素とする多次元ベクトルでしおれ具合の定義を試みた。環境データ(気温、湿度、光量)と生育データ(茎径、草姿画像)の収集を行い、Optical Flow の角度をビン、速度を重みとしたヒストグラムである HOOF (Histograms of Oriented Optical Flow)を用いて草姿変位特徴量の定量化を行い、異なる複雑背景画像であっても植物の萎れ具合を表現可能なことを確認した[2]。

また、2016 年夏栽培期間のデータに対し、比較的計測の容易な草姿画像や温湿度・光量といった環境データを蒸発散量に關係する茎径と紐づけたマルチモーダル深層学習の詳細検討を行った。その結果、草姿画像から抽出可能な萎れ特徴量は茎径の局所的経時変化を学習でき、また環境データから得られる特徴量は茎径の大域的経時変化を学習できる見込みが得られた。また、通信品質の不安定な無線アップリンク通信を用いた IoT システムで遅延耐性のある多様なデータを効率よく収集するための優先度通信制御方式を実装した[5]。さらに、群落光合成量推定に群落上部下部の散乱光値が繁茂度を間接的に把握するため、これまでの運用や計測性能をもとに改良した 920MHz 帯無線散乱光センサノード(温湿度、散乱光)を現場投入し、長期運用時の安定稼働と計測値精度など性能評価を行い 2018 年冬栽培実験から本格運用を開始した。

② 自律順応できる高精度予測基盤の確立

微気象データのような経年変化のある時系列データに対して、適切な学習データを自動的に抽出し予測精度が向上するよう自律的に予測モデルを再構築し続けることのできる機械学習アルゴリズム Sliding Window-based Support Vector Regression (SW-SVR) の詳細評価を進めた[1]。

また、2016 年秋冬栽培期間に収集したデータと比べて、データ量も品質も向上させられた 2016 年春夏栽培期間のデータに対し、深層学習の一種であり画像認識分野で効果の出ている CNN (Convolutional Neural Network) を用いてしおれ特徴量を抽出し、草姿画像からでは抽出が困難と考えられる温湿度・散乱光といった環境データを適切に重畳することで、蒸散量に關係する茎径変位量(分解能 0.004mm のレーザー変位計で計測)と紐づけたマルチモーダルデータセットが、植物の成長期や発育期で影響を受ける環境条件や生育状況、経時情報は徐々に変化していることが分かってきた。そこで、Multi-modal SW-SVR[3, 特願 1]を研究開発し、各時点における多次元マルチモーダルデータをクラスタリングし、多次元空間において様々な特徴を

持ったサブデータセットで構築された多数の特化型サブモデルで加重アンサンブル学習を行うことで、非線形で複雑な植物生理情報を現実的な計測データと時間粒度で外挿し機械学習することに成功した(図 2)。

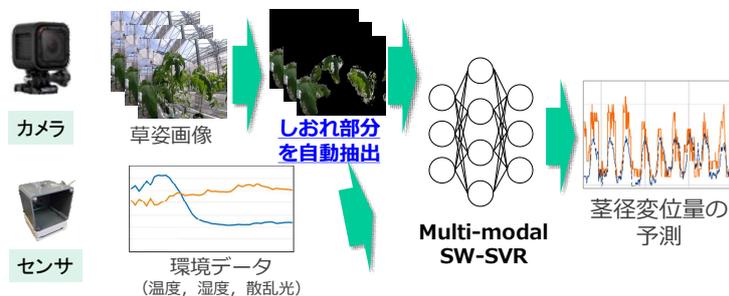


図 2. Multi-modal SW-SVR

さらに、一時的な風などの影響を抑えつつしおれに関する時間的変位情報を抽出する画像処理手法[特願 2]を考案しただけでなく、高層の深層学習では膨大な訓練データセットが必

要となるが、低層の深層学習かつ少量訓練データセットで数日から数週間といった中期的経時特性を学習可能なイベントマルチスケール特徴学習手法[4, 特願 3]によって、より少ないデータセットかつ現実的な時間で効率よく非線形かつ複雑な植物成長といった比較的長い粒度の経時特徴の機械学習に成功した。

③ 様々な環境での実証

本さがけ領域内外の農学や植物生理学研究者らからの知見に加え、静岡県農林技術研究所(磐田市)、静岡大学農学部(静岡市)、(株)Happy Quality&サンファーム中山(株)(袋井市)らの支援で、データ計測や仮説の検証を進め、比較的計測容易な非破壊データである環境データ(温湿度、散乱光)と草姿画像のみを入力することで、蒸散過多に基づく茎径変位量をソフトウェア的に出力する『しおれ検知ソフトセンサ』の研究開発に成功した。また、これまでの分析で、環境データのみ、草姿画像のみ、環境+草姿、環境+草姿+茎径、といった組み合わせや、茎径変位量の閾値を調整した灌水制御によって、収穫時トマトの糖度を調整できる可能性も得た。

図3に示すような、IoT (Internet of Things) や無線通信技術を駆使した多様かつ長期間のデータセット拡充に加え、機械学習手法の改良、本しおれ検知ソフトセンサを用いたAI (Artificial Intelligence) 灌水制御システムを構築し、蒸散と吸水のバランスで決まる『しおれ』という物理現象に基づき、ある意味、植物の顔色をうかがった適切なタイミングで自動灌水制御可能なシステムを開発した。様々な基礎評価と改良を経て、最終年度、茎径変位量に対し成長や状況に応じた動的閾値での灌水制御(A: 茎径(動的))、茎径変位量に対し固定閾値での灌水制御(B: 茎径(静的))、日射比例に基づく灌水制御(C: 日射比例)、農業 AI の茎径推定値による灌水制御(D: AI)、の比較処理区を設けた栽培実験(中玉トマト低段密植養液栽培、同一ハウス)を実施した。その結果、AI 灌水制御区で収穫期間における可販果率を低下させることなく、高糖度トマトを機械的に低



図 3. 実証実験の様子

負担で大量生産可能なこと(平均 Brix.8.87、最大 16.9、可販率 0.917、サンプル数 15,901)を確認でき、他処理区に比べ高糖度トマトを機械的かつ容易に大量生産可能な見込みを得た(表 1)。

表 1. 栽培実験の結果

処理区	労力負担	糖度 [brix]				サンプル数	平均果実重	10a収量 (t/10a)*	可販率
		Avg.	Max.	Min.	SD				
A: 茎径(動的)	中(設置)	8.75	16.9	3.00	0.900	14,089 (728株)	22.5	8.7	0.963
B: 茎径(静的)	中(設置)	8.10	16.9	4.80	0.717	17,885 (823株)	27.5	11.7	0.955
C: 日射比例	高(管理)	8.73	15.7	5.10	0.941	10,591 (604株)	22.8	9.5	0.826
D: AI	低	8.87	16.9	4.30	0.845	15,901 (822株)	20.8	8.6	0.917

3. 今後の展開

培地量や品種、養液濃度によらず、植物体の成長に応じた蒸散と吸水のバランスで決まる『しおれ』という物理現象に基づき、ある意味、『植物の顔色をうかがった』適切なタイミングで自動灌水制御可能なシステムを構築できれば、水の重要な環境だけでなく世界中の様々な

気候や地域へも展開できる可能性がある。また、栽培の基本である『光合成』の促進について、植物の成長や発育状況に応じて太陽光を最大限に有効活用できるよう、灌水だけでなく、CO2 施用、飽差も上手に制御し、時に厳しくとも優しい対話に基づく柔軟な栽培のできる農業 AI の実現を目指し、新規就農者や世代間をまたぐ農業の継承を支援していく。その上で、これまで研究開発してきた非線形かつ複雑な植物成長を考慮した植物の『時点』における状態推定技術から、より長い時間粒度での『経時的』な将来予測技術へ深化させていくことで、収量や品質予測の可能性を検証し、収穫物の機能性向上や計画生産技術の基盤技術としての確立を目指す。

4. 自己評価(公開)

果実の糖度を上げる栽培技術の一つである水分ストレスに焦点を絞り、多種多様な生育環境に自律順応できる汎用的な水分ストレス高精度予測基盤技術を確立し、果実糖度向上による高品質化を容易に実現できる基盤技術実現という当初目標達成の目処が立っている。

特筆すべきは異種データ群から相補的に生育状況に関する特徴を重畳するマルチモーダル深層学習によって、草姿画像や温度・湿度・明るさといった比較的計測容易なデータのみで、形式化困難だった植物水分ストレスを表現する茎径変位量の予測を世界に先駆けて実証した。経時画像から一時的な農作業や複雑背景の影響を抑えつつ時間的変位情報を学習しやすくする新技術や、経時特性変化に順応可能な適応型機械学習器 SW-SVR によって、蒸散と吸水のバランスで決まるしおれという物理現象に基づき植物の顔をうかがった自動灌水を可能とし、植物との対話による栽培へ新たな一歩を切り拓いた。ヒトと AI の協働によって奥深い農作業の分業や負担軽減が促進されるだけでなく、データ駆動型農業の延長線上には、植物と対話しながら高品質な野菜や果物を栽培できる革新的な農業の実現があると実感する。果菜類の品質制御や計画生産技術への展開に加え、水の貴重な環境での節水栽培への適用も期待でき社会的意義が高く、情報科学による植物との対話に基づく革新的農産物栽培手法創出における独創性とインパクトは極めて大きい。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. Yukimasa Kaneda, Hiroshi Mineno, “Sliding window-based support vector regression for predicting micrometeorological data,” Expert Systems with Applications (ESWA), Vol.59, pp.217-225 (15.Oct.2016). (2016IF:3.928, Q1)
2. 柴田瞬, 峰野博史, “Optical Flow を用いた複雑背景画像における草姿の変化検出,” 情報処理学会論文誌(トランザクション), コンシューマ・デバイス & システム (CDS), Vol.7, No.2, pp.97-105 (25.May.2017).
3. Yukimasa Kaneda, Shun Shibata, Hiroshi Mineno, “Multi-modal sliding window-based support vector regression for predicting plant water stress” Knowledge-based Systems (KNOSYS), pp. 135-148 (15.Oct.2017). (2016IF:4.529, Q1)
4. 若森和昌, 柴田 瞬, 澤村 武, 鈴木大地, 切岩祥和, 鈴木克己, 峰野博史, “ニューラルネットワークを用いた植物蒸発散量推定における時間的特徴重畳手法,” 電子情報通信

学会, パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU) (20.Feb.2018).
5. Takuma Tachibana, Eisuke Kasahara, Takamasa Yoshida, Hiroshi Mineno, "Evaluation of Priority Control Mechanism for Remote Monitoring IoT System in Greenhouses," 9th EAI Int'l Conf. on Mobile Computing, Applications and Services (MobiCASE) (28.Feb.2018).
6. Shogo Nagano, Shogo Moriyuki, Kazumasa Wakamori, Hiroshi Mineno, Hirokazu Fukuda, "Leaf-Movement-Based Growth Prediction Model Using Optical Flow Analysis and Machine Learning in Plant Factory," Frontiers in Plant Science (11.Feb.2019). (IF3.677)

(2)特許出願

研究期間累積件数: 7 件

(うち 2 件は国内特許の PCT 出願案件。公開前の出願件名については件数のみ記載)

1.

発 明 者: 峰野博史、兼田千雅、柴田瞬

発明の名称: 萎れ具合予測システム及び萎れ具合予測方法

出 願 人: 国立大学法人静岡大学

出 願 日: 2016/8/26

出 願 番 号: 特願 2016-166073

2.

発 明 者: 峰野博史、兼田千雅、柴田瞬、若森和昌

発明の名称: 画像データ加工装置及び画像データ加工方法

出 願 人: 国立大学法人静岡大学

出 願 日: 2017/6/20

出 願 番 号: 特願 2017-120665

※PCT/JP2018/023131 (2018/6/18)で PCT 出願、WO2018/235777 (2018/12/27)で公開

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- ・2017/7/26 プレスリリース「AI 技術による植物の萎れ具合の予測に成功」
- ・2017/10/15 日本農業新聞一面「高糖度トマト AIにお任せ」
- ・2018/5/16 農業情報学会 2018 年度年次大会 招待講演
「施設栽培における人工知能(AI)の新たな展開」
- ・2018/9/15 アグリテックグランプリ オムロン賞、竹中工務店賞 (W 受賞)
- ・2018/10/19 ドコモ・モバイル・サイエンス賞 社会科学部門 奨励賞
- ・2019/1/12 日経新聞「新技術・大規模経営で活路 経験値 AIで補う」
- ・2019/2/23 農耕と園芸 2019 年 春号(誠文堂新光社), 「スマート農業① 人工知能による灌水制御で糖度の高い高品質トマトを生産する」, pp.9-14, ISBN:07315-03.

研究報告書

「量的遺伝学に基づく環境応答型イネ選抜モデル開発」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 27 年 12 月～平成 31 年 3 月

研究者: 矢部 志央理

1. 研究のねらい

環境応答を考慮した上での優良品種の選定、高速育種を可能とする技術が求められている。本研究提案では、ゲノミック予測モデルに作物モデルの構造を組み込むことで、未試験環境における未試験系統の量的形質に関するパフォーマンス予測する。これにより、栽培地に適した品種の選定・育種を行う手法の基盤を開発することを目指す。具体的には、作物の環境応答を考慮したゲノミック予測モデル(G×E-GS モデル)の開発と、想定される環境における最適ゲノムデザインと最適交配組合せの予測手法の開発を行う。

本研究では、主要作物であるイネ(*Oryza sativa* L.)をターゲットとし、環境や生長過程に影響されやすい穂構造・登熟を標的形質とする。

具体的には、以下を通して、提案手法を開発・評価する。

- ・イネ穂構造を組み込んだ登熟についての作物生長モデル構造の推定
- ・イネ登熟についての環境応答を考慮したゲノミック予測モデル(G×E-GS モデル)開発
- ・想定される環境における最適ゲノムデザインおよび最適交配組合せの予測手法の開発
- ・G×E-GS モデルの評価

本研究では、遺伝子・気象要因がイネの登熟に働く仕組みのモデル化、穂構造と登熟の形質間の交互作用のモデル化により、イネの登熟の環境応答を詳細にモデル化する。各形質については、G×E を考慮したゲノムワイドアソシエーション解析により、各形質の環境応答を支配する遺伝子領域を検出する。これらの解析結果を用いて、未試験の系統についての仮想環境下での登熟を予測する G×E-GS モデルを構築する。これにより、仮想環境条件下での登熟能力を予測する手法を確立することができ、作物の環境応答を考慮した系統の能力の予測や選抜が登熟形質に対して可能になると考えられる。開発した G×E-GS モデルと育種シミュレーションを組み合わせることにより、想定される環境における最適ゲノムデザインおよび最適交配組合せを明らかにする。

今回開発するモデルは、イネの登熟にのみ適用可能である。しかし、他の作物や形質においても、同様のシステムや統計手法を用いることができると考えられる。また、本研究でモデル化する登熟は収量構成要素であり、本研究で得られた結果を基盤とし、収量性に向けた育種を進められる可能性がある。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、イネの収量構成要素の一つである登熟をターゲットとし、ゲノミック予測モデル

に作物モデルに用いられる生育プロセス記述の構造を組み込むことで、未試験環境における未試験系統の量的形質に関するパフォーマンスを予測した。イネの登熟能力には穂構造が効いていると考えられることから、穂構造が登熟に及ぼす効果を推定するとともに、穂に着いた籾への養分の分配を解析した。なお、モデル構築のために、日本水稻約 150 品種を用い、ゲノムワイドマーカーデータおよび10環境での栽培データを収集し、解析に供した。開発したモデルとゲノムシミュレーションを組み合わせることで、最適交配組合せの予測手法の開発を実施した。

・課題 A: イネの穂構造と粒重分布の記述法の開発

「穂構造」と「粒重分布」は、これまでも登熟関連形質として注目されていたが、数値化が難しいことから遺伝解析が十分に行われてこなかった。そのため、本研究では“直感的に理解が可能な形の”形質値として、これらの形質を表現できる記述法の開発を実施した。

・課題 B: 穂構造を組み込んだ登熟についての作物生長モデル構造の推定

登熟能力に関連する形質(出穂期・穂構造・粒重分布など)の間の関係性を明らかにするためのモデリングを実施した。

・課題 C: 登熟についての環境応答を考慮したゲノミック予測モデル(G×E-GS モデル)開発

遺伝子・気象要因が登熟関連形質に働く仕組みのモデル化により、登熟の環境応答をモデル化した。また、G×E を考慮したゲノムワイドアソシエーション解析により、各形質の環境応答を支配する遺伝子領域を検出した。これらの解析結果を用いて、未試験の系統についての仮想環境下での登熟を予測する G×E-GS モデルを構築することで、仮想環境条件下での登熟能力を予測する手法を確立した。

・課題 D: 最適ゲノムデザインおよび最適交配組合せの予測手法の開発

開発した G×E-GS モデルと育種シミュレーションを組み合わせることにより、想定される環境における最適交配組合せを明らかにするためのシステムを構築した。なお、開発した育種シミュレーション基盤は、公開した。

・課題 E: G×E-GS モデルの評価

品種集団や分離集団を用いて G×E-GS モデルの精度検証を実施できるよう、集団を構築し、データを整備した。

(2) 詳細

研究テーマ A「イネの穂構造と粒重分布の記述法の開発」

研究成果:

スプラインを用いた穂構造の記述法を開発した。これにより、穂の大きさに囚われない穂の形を記述することに成功した。また、主成分分析と組み合わせることで、統計手法に慣れていなくても直感的に理解できる形質の数値セット(籾の着生位置のバランス、など)への変換に

成功した。また、この記述法で算出された形質値を用いたゲノムワイドアソシエーション解析 (GWAS) を実施し、記述法の有効性を確認した。

混合ガンマ分布に基づく粒重分布の記述法を開発するとともに、理解しやすい形質値への変換を行った(下図: Figure1)。分布パラメーターの推定は、EM アルゴリズムを用いた。粒重分布の数値化に成功したことで、登熟能力に関与する粒重分布の特徴を明らかにするとともに、この数値に対してゲノミック予測を実施できることを示し、開発記述法の有効性を確認した(下図: Figure2)。

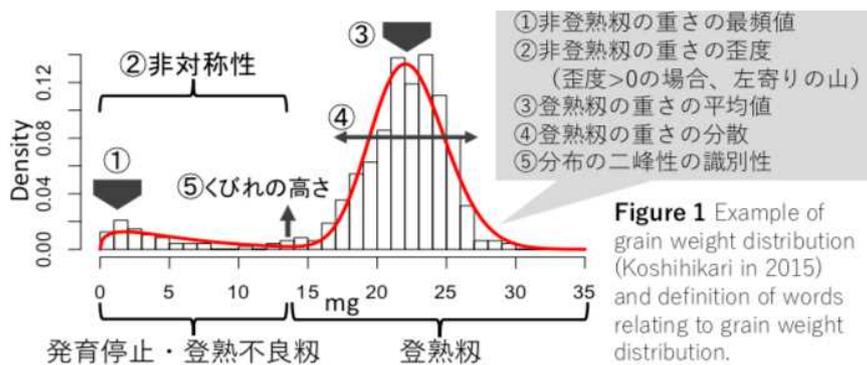


Figure 1 Example of grain weight distribution (Koshihikari in 2015) and definition of words relating to grain weight distribution.

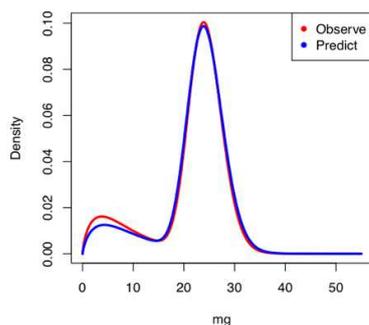


Figure 2. The observed and predicted grain weight distribution for the variety with highest prediction accuracy.

研究テーマ B「穂構造を組み込んだ登熟についての作物生長モデル構造の推定」

研究成果:

約 150 品種 8 環境の栽培データとゲノムワイドマーカーデータを用い、複数形質に対するゲノミック予測モデルを栽培環境ごとに実施し、そこから形質間の関係の有無の情報を抽出した。この手法を用いた理由は、遺伝相関に寄らない形質間相関を得るためである。その後、形質間の影響の方向性を推定し、形質間ネットワーク推定結果を環境ごとに得た。構造方程式モデルを用いて、それぞれの効果の大きさを推定している。

研究テーマ C「登熟についての環境応答を考慮したゲノミック予測モデル(G×E-GS モデル)開発」

研究成果:

約 150 品種 8 環境のデータ(茨城県つくばみらい市(2015 年 1 作期、2016 年 2 作期、2017 年 1 作期)、新潟県上越市(2017 年 1 作期)、兵庫県加西市(2017 年 1 作期)で圃場試験を行った。2016 年のつくばみらい市の試験においては、通常の栽培を行った対照区に対し、出穂日に止め葉を切除することで登熟期間のソース能を制限する処理区を設置した。)をトレーニング

グとし、形質ごとに factor analytic model を適用することで、各形質の GxE-GS モデルを構築した。具体的には、研究テーマ A で開発した形質値を従属変数とし、品種のリシーケンスデータから得た約 3 万マーカーを用いてモデリングを行った。なお、このモデルでは、環境の効果は表現型値から推定する。GxE 項の分散はマーカーによって推定された kinship-matrix と環境間の共分散のクロネッカー積で表現できるが、環境間の共分散部分を factor analysis で用いられるような形で表現することで、各環境の効果と genotype の効果を明示的に分けることができる。形質によっては、高精度(1品種抜き、または1環境抜きの cross-validation で、出穂まで日数において予測値と実測値の相関係数 0.9 以上)で予測を行うことができた。

また、各形質において GxE を考慮した GWAS を実施し、環境全体または特異的に QTL を検出した。

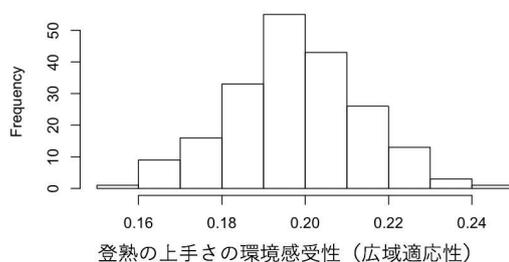
研究テーマ D「最適ゲノムデザインおよび最適交配組合せの予測手法の開発」

研究成果:

育種シミュレーション用基盤として、R パッケージ Breeding Scheme Language を開発、公開した。

このシミュレーション基盤と品種群のゲノムワイドマーカー情報を用い、トレーニングに用いた品種群の全組合せでの交配後代 (F_2) をシミュレートした。この際、マーカーの物理位置の情報のみでは交配シミュレーションは実行できないため、既存のイネ連鎖地図情報から物理距離と遺伝距離の関係を計算し、シミュレーションに用いた。シミュレートされた遺伝子型に対して開発した予測モデルを適用することで、分離予測が可能となった(下図)。

とある品種組合せから生まれた F_2 の結果



研究テーマ E「G×E-GS モデルの評価」

研究成果:

トレーニングに用いた品種群での cross-validation における GxE-GS モデルの精度評価を実施した。形質によっては高精度で予測が行えることがわかった一方、予測ができない形質もあり、モデルの改良が求められるだろう。

交配後代集団における精度検証を実施するために、 F_2 集団の栽培試験及びマーカージェノタイプングを実施し、シミュレーション結果との比較を行う基盤を作った。

まとめ

以上の研究により、GxE と形質間の関係を考慮した登熟についてのゲノミック予測モデルの構築および、シミュレーションによる最適育種工程の提案を実施した。

3. 今後の展開

本研究で開発した「穂構造を考慮した登熟の GxE-GS モデルは、「関係する各形質の GxE-GS モデル」と「形質間の関係」を別々に推定した後、組み立てていくものであった。これは、これまでの作物モデルの構造に則った形である。しかしながら、この構造を保ちながら、モデルに含まれる構造の全体を一連の流れの計算によって一度に形質予測を行うことが、今後求められるだろう。それが可能になれば、地域特異的な場合の最適ゲノムデザインの推定に寄与できるだろう。

また、現在、トレーニングに用いた品種集団から交配親を選び、2つの交配組合せパターン of F2 分離集団を作成している。今後、品種集団で構築した GxE-GS モデルを分離集団にも適用可能か検証する。

育種シミュレーションに関しては、今回開発・公開した育種シミュレーション用の R パッケージ Breeding Scheme Language は、GxE やコスト計算の実装を行なっている。また、他の研究機関からの注目も大きいため、多くの作物の育種に適したシミュレーション基盤として、さらなる発展をさせていく予定である。

4. 自己評価(公開)

【研究目的の達成状況】

穂構造を取り込んだ登熟についての予測モデル(GxE-GS モデル)の開発および、各形質における cross-validation による精度検証は実施することができた。また、開発したモデルと育種シミュレーションを組み合わせることで、分離集団の形質値予測に基づく最適交配組合せの予測も実施することができた。最適ゲノムデザインに関しては、広域適応性についての推定は実施可能であった。

しかしながら、開発したモデルの構造により、地域特異的な最適ゲノムデザインの推定には至らなかった。また、実際の F2 分離集団を用いた GxE-GS モデルの精度検証は、phenotyping の困難さにより達成できなかった。

【研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)】

常時 2~3 名の研究補助員(表現型計測やデータ入力、実験補助を担当)を雇用し、研究を遂行した。研究に必須となる表現型データの取得や、マーカージェノタイピングに必須となる DNA 抽出を効率的に実施できるよう努めた。

研究費は、主に研究補助員の雇用および水稻のマーカージェノタイピングのために使用した。品種群のマーカージェノタイピングに関しては、他の研究者との共同研究により、データを共有することで、リシークエンスする品種を節約できた。また、分離集団のジェノタイピングに関しては、最新のジェノタイピングシステムを検討することで、コストを抑えられるように試みた。

【研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果】

■ 育種シミュレーション基盤

開発した育種シミュレーション基盤は R パッケージ BreedingSchemeLanguage として公開されている。このパッケージは、柔軟性と簡便性を備えており、育種過程のシミュレーションを GxE やコストも含めてシミュレート可能である。また、本研究でターゲットとしたイネだけでなく、



様々な植物に適用可能である。このパッケージについては多くの研究者に興味を持っていただき、国外からの問い合わせもあり、この基盤を使用した研究も進められている。今後、この基盤を発展させ、作物の育種が進展すると期待している。

■形質の新たな記述法の提案と遺伝的知見

現在まで、「多収遺伝子」と呼ばれているような遺伝子はいくつか発見されているが、ほとんどの遺伝子は実際の育種では効果が認められなかった。理由としては、それらが籾数を制御する遺伝子であったが、登熟能力に問題がある穂上部位の籾を増やしてしまったことや、野外環境では養分や環境が十分ではなく全ての籾が実らなかったことが考えられる。今回の研究で、各遺伝子が穂上のどの位置の籾を増減させるか、粒重分布や登熟能力に効くのはどの遺伝子かということがわかるため、収量の選抜に直結できるのではいかと考えている。

■GxE のモデリング

現在までも、GxE のモデリングは多く試みられている。しかしながら、作物学的‘視点’を統計モデリングに取り入れる試みはあまりなく、今後の GxE 研究へのメッセージを残すことができればと考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. [Shiori Yabe](#), Hiroyoshi Iwata, Jean-Luc Jannink (2017) A simple package to script and simulate breeding schemes: the Breeding Scheme Language. *Crop Science* 57: 1347 – 1354.
2. [Shiori Yabe](#), Hiroe Yoshida, Hiromi Kajiya-Kanegae, Masanori Yamasaki, Hiroyoshi Iwata, Kaworu Ebana, Takeshi Hayashi, Hiroshi Nakagawa (2018) Description of grain weight distribution leading to genomic selection for grain-filling characteristics in rice. *PLoS One* 13(11): e0207627.

(2)特許出願

研究期間累積件数:0 件

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

【ソフトウェア】

R パッケージ: Breeding Scheme Language

<https://cran.r-project.org/web/packages/BreedingSchemeLanguage/index.html>

【国際学会】

○Shiori Yabe, Takeshi Hayashi. An issue for practical use in genomic prediction of trait segregation in a progeny population. *Plant and Animal Genome XXVI*. P0057. San Diego, United



States of America. January 2018.

○Shiori Yabe, Hiroe Yoshida, Hiromi Kajiya-Kanegae, Eiji Yamamoto, Erina Fushimi, Masanori Yamasaki, Hiroyoshi Iwata, Kaworu Ebana, Takeshi Hayashi, Hiroshi Nakagawa. Genome-Wide Association Study for Panicle Structure in Japanese Rice Varieties. Plant and Animal Genome XXVII. P00899. San Diego, United States of America. January 2019.

Jean-Luc Jannink, ○Shiori Yabe. The breeding scheme language: an R package to simulate breeding schemes from simple to complicated. Plant and Animal Genome XXVII. W964. San Diego, United States of America. January 2019.

(その他:筆頭 2 報、共著 3 報)

【国内学会】

筆頭 8 件、共著 3 件

【受賞】

○矢部志央理、「日本水稻品種群を用いた粒重分布の特徴記述と品種間差の解析」、『日本育種学会第 130 回講演会』、P081、鳥取大学・・・「第 130 回講演会日本育種学会優秀発表賞」、2016 年 12 月

○矢部志央理、「水稻品種における穂構造記述法の提案」、『日本作物学会第 245 回講演会』、P-28、宇都宮大学・・・「第 245 回講演会優秀発表賞」、2018 年 4 月

【シンポジウムにおける発表】

国際 3 件

国内 3 件

【本資料は公開】

さがけ「情報協働栽培」研究領域 研究総括：二宮 正士（東京大学 大学院農学生命科学研究科・教授）

AI で高糖度トマト栽培に成功

峰野 博史（静岡大学 学術院情報学領域・教授）

研究課題名：「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」

研究期間：2015.12～2019.03

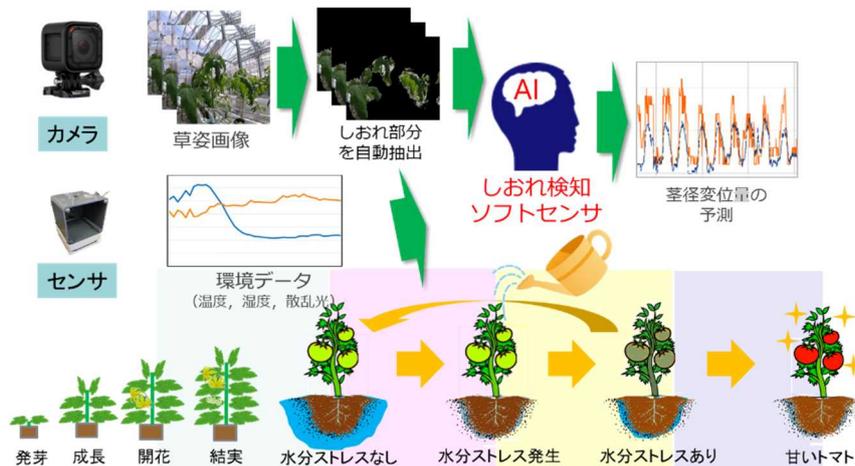


図1 植物のしおれ検知ソフトセンサ

AI(人工知能)による灌水制御で高糖度トマトを負担軽減で大量安定生産できる技術を研究開発しました。果実の糖度を上げる栽培技術の一つにストレス栽培があります。本研究では、時間的に連続する草姿画像から各画素が時間的にどの方向にどれだけ動いたかを示す Optical Flow を用いて生成したマスク画像へ CNN (Convolutional Neural Network) を適用することでしおれ特徴量を抽出し、環境データ(温度、湿度、散乱光)と重畳して、蒸発散量に関する茎径変位量に紐づけたマルチモーダル深層学習によって、非線形で複雑な植物生理状態を現実的な計測データと時間粒度で機械学習可能なことを示しました。これにより、比較的計測容易な非破壊データである草姿画像と環境データのみを入力とし、蒸散過多に基づく茎径変位量をソフトウェア的に出力する『しおれ検知ソフトセンサ』の研究開発に成功しました(図1)。

培地量や品種、養液濃度によらず、植物体の成長に応じた蒸散と吸水のアンバランスで決まる『しおれ』という物理現象に基づき、ある意味、『植物の顔色をうかがった』適切なタイミングで自動灌水制御可能なシステムを構築できます。数百株規模での栽培実験の結果、可販果率の低下を抑えつつ高糖度トマト(平均 Brix.8.87、最大 16.9、サンプル数 15901 個)を低負担で大量安定生産できることが確認できました。

論文 (6 件)

1. “Sliding window-based support vector regression for predicting micrometeorological data,” *ESWA*, 2016, 59, 217-225.
2. “Multi-modal sliding window-based support vector regression for predicting plant water stress” *KNOSYS*, 2017, 135-148. など

特許出願 (7 件、うち 2 件は PCT 出願)

1. 萎れ具合予測システム及び萎れ具合予測方法、2016-166073(2016)
2. 画像データ加工装置及び画像データ加工方法、2017-120665(2017)、PCT/JP2018/023131(2018)、など

受賞 (6 件)

1. 「アグリテックグランプリ オムロン賞、竹中工務店賞 (W 受賞)」(2018)
2. 「ドコモ・モバイル・サイエンス賞 社会科学部門 奨励賞」(2018)、など

プレスリリース (2 件)

1. 「AI 技術による植物の萎れ具合の予測に成功」(2017 年 7 月) https://www.shizuoka.ac.jp/p/ressrelease/pdf/2017/PressRelease_32.pdf
2. 「AI による灌水制御によって高糖度トマトを負担軽減で大量安定生産成功」(2019 年 1 月) http://www.shizuoka.ac.jp/pressrelease/pdf/2018/PressRelease_78.pdf