

領域略称名：植物の周期と変調  
領域番号：7104

令和6年度科学研究費助成事業  
「新学術領域研究（研究領域提案型）」  
に係る研究成果報告書（研究領域）兼  
事後評価報告書

「細胞システムの自律周期とその変調が駆動する植物の発生」

領域設定期間

令和元年度～令和5年度

令和6年6月

領域代表者 奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・

教授・中島 敬二

# 目 次

## **研究組織**

1	総括班・総括班以外の計画研究	2
2	公募研究	3

## **研究領域全体に係る事項**

3	交付決定額	8
4	研究領域の目的及び概要	9
5	審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	11
6	研究目的の達成度及び主な成果	13
7	研究発表の状況	18
8	研究組織の連携体制	23
9	研究費の使用状況	24
10	当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況	26
11	若手研究者の育成に関する取組実績	27
12	総括班評価者による評価	28

**研究組織**

(令和6年3月末現在。ただし完了した研究課題は完了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

**1 総括班・総括班以外の計画研究**

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	19H05670 細胞システムの自律周期とその変調が駆動する植物の発生	令和元年度 ～ 令和5年度	中島 敬二	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授	11
A01 計	19H05671 細胞システムの自律周期とその変調が操る根の成長	令和元年度 ～ 令和5年度	中島 敬二	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授	2
A01 計	19H05672 細胞の動的挙動にもとづく葉の発生堅牢性とその多様化の機構	令和元年度 ～ 令和5年度	塚谷 裕一	東京大学・大学院理学系研究科・教授	2
A01 計	19H05673 側根新生の時空間的周期性及可塑性を実現する仕組みの解明	令和元年度 ～ 令和5年度	深城 英弘	神戸大学・大学院理学研究科・教授	2
A02 計	19H05674 細胞運命の決定過程における発生特異的周期性及概日時計の相互作用	令和元年度 ～ 令和5年度	遠藤 求	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授	1
A02 計	19H05675 ゼニゴケ油体をモデルとしたオルガネラ周期の証明と中心因子の同定	令和元年度 ～ 令和5年度	上田 貴志	基礎生物学研究所・細胞動態研究部門・教授	4
A02 計	19H05676 受精卵の周期的動態が非対称性及体軸を生み出す原理の解明	令和元年度 ～ 令和5年度	植田 美那子	東北大学・大学院生命科学研究所・教授	1
A02 計	19H05677 細胞膜ドメインの周期性とその変調が導出する植物の細胞壁パターン	令和元年度 ～ 令和5年度	小田 祥久	名古屋大学・大学院理学研究科・教授	1
A03 計	19H05678 生体分子ダイナミクスと細胞メカニクスの統合による植物周期動態の数理的解明	令和元年度 ～ 令和5年度	望月 敦史	京都大学・医生物学研究所・教授	1
<b>総括班・総括班以外の計画研究 計 9 件</b>					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	20H05403 植物の腋生メリステムの運命 を変調させる機構の研究	令和2年度 ～ 令和3年度	檜本 悟史	北海道大学・大学院理学 研究院・助教	1
A01 公	20H05404 植物の二次成長を制御する周 期と変調の分子基盤	令和2年度 ～ 令和3年度	伊藤 (大橋) 恭子	東京大学・大学院理学系 研究科・准教授	1
A01 公	20H05405 植物の細胞増殖・分化能を制御 するRNA代謝周期の解明	令和2年度 ～ 令和3年度	大谷 美沙都	東京大学・大学院新領域 創成科学研究科・准教授	1
A01 公	20H05406 イネ科植物における葉の周期的 分化と内部構造の変調機構 の解明	令和2年度 ～ 令和3年度	伊藤 純一	東京大学・大学院農学生 命科学研究科・准教授	1
A01 公	20H05408 植物の発生における細胞増殖 の周期と変調を司る転写制御 機構	令和2年度 ～ 令和3年度	伊藤 正樹	金沢大学・理工研究域・ 教授	1
A01 公	20H05409 周期的に起こる器官老化と個 体最後の変調である個体老化 の新タイミング制御経路の 開拓	令和2年度 ～ 令和3年度	打田 直行	名古屋大学・遺伝子実験 施設・教授	1
A01 公	20H05410 ゼニゴケ頂端部の周期的成長 を司るペプチドホルモンの機 能解明	令和2年度 ～ 令和3年度	篠原 秀文	福井県立大学・生物資源 学部・准教授	1
A01 公	20H05411 時計に依存する発生制御ネッ トワークアトラス	令和2年度 ～ 令和3年度	中道 範人	名古屋大学・大学院生命 農学研究科・教授	1
A01 公	20H05419 規則的葉序を作り出すための 頂端細胞の分裂面の規則的旋 回機構の研究	令和2年度 ～ 令和3年度	嶋村 正樹	広島大学・大学院統合生 命科学研究科・准教授	1
A01 公	20H05426 概日時計のリズム変動によっ てもたらされる側根発達の変 調メカニズム	令和2年度 ～ 令和3年度	塚越 啓央	名城大学・農学部・准教授	1
A01 公	20H05429 共生遺伝子の発現の振幅と根 粒形成	令和2年度 ～ 令和3年度	征矢野 敬	基礎生物学研究所・共生 システム研究部門・准教 授	1

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A02 公	20H05402 葉の発生に關与する核内分化因子の周期的動態変化を制御する分子基盤の解明	令和2年度 ～ 令和3年度	笹部 美知子	弘前大学・農学生命科学部・准教授	1
A02 公	20H05407 概日リズムの変調をもたらす発生異常のメカニズムの解析	令和2年度 ～ 令和3年度	近藤 侑貴	神戸大学・大学院理学研究科・准教授	1
A02 公	20H05412 曲率変動解析で理解する先端成長細胞の伸長と屈性	令和2年度 ～ 令和3年度	佐藤 良勝	名古屋大学・トランスフォーマティブ生命分子研究所・特任准教授	1
A02 公	20H05416 維管束ーミロシン細胞のワイヤリングの統合的理解	令和2年度 ～ 令和3年度	白川 一	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教	1
A02 公	20H05420 光シグナルと孔辺細胞特異的概日時計による周期的気孔開閉の制御とその意義	令和2年度 ～ 令和3年度	武宮 淳史	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授	1
A02 公	20H05422 (廃止) 花粉管のカロースプラグの周期形成を制御する機構の解析	令和2年度 ～ 令和2年度	丸山 大輔	横浜市立大学・木原生物学研究所・助教	1
A02 公	20H05425 再分化をもたらす変調を制御する遺伝子プライミングメカニズムの解明	令和2年度 ～ 令和3年度	坂本 卓也	東京理科大学・理工学部・講師	1
A02 公	20H05430 細胞運命転換の自律的周期性及その変調を導くオーキシン動態制御	令和2年度 ～ 令和3年度	石川 雅樹	基礎生物学研究所・生物進化研究部門・助教	1
A02 公	20H05431 器官再生系の1細胞RNA-seq解析から読み解く遺伝子発現ダイナミクス	令和2年度 ～ 令和3年度	池内 桃子	新潟大学・自然科学系・准教授	1
A03 公	20H05415 器官配置の周期を構成し変調するメリステム動態の理論生物学：コケと花	令和2年度 ～ 令和3年度	藤本 仰一	大阪大学・大学院理学研究科・准教授	1
A03 公	20H05421 葉縁における空間的自律周期の変調によってもたらされる葉形の多様性の理論的理解	令和2年度 ～ 令和3年度	中益 朗子	熊本大学・国際先端科学技術研究機構・特任助教	1
A03 公	20H05423 画像認識に基づく植物形態の空間的・時間的周期性の抽出と変調の検出	令和2年度 ～ 令和3年度	内海 ゆづ子	大阪府立大学, 大学院工学研究科・講師	1

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A03 公	20H05424 位相応答曲線の高速同定法による植物の環境応答と発生の時空間統合モデルの構築	令和2年度 ～ 令和3年度	福田 弘和	大阪府立大学・大学院工学研究科・教授	1
A03 公	20H05427 動画像中の周期と変調の検出と要因解析	令和2年度 ～ 令和3年度	堀田 一弘	名城大学・理工学部・教授	1
A03 公	20H05428 三次元深層学習を用いた動態顕微鏡画像における細胞分裂の自動検出法の開発	令和2年度 ～ 令和3年度	陳 延偉	立命館大学・情報理工学部・教授	1
A01 公	22H04710 イネ科植物における葉の周期的分化と内部構造の変調機構の解明	令和4年度 ～ 令和5年度	伊藤 純一	東京大学・大学院農学生命科学研究科・准教授	1
A01 公	22H04714 植物の発生における細胞増殖の周期と変調を司る転写制御機構	令和4年度 ～ 令和5年度	伊藤 正樹	金沢大学・理工研究域・教授	1
A01 公	22H04715 イネ側根原基形成の自律周期とその変調を基盤とした発生原理の解明	令和4年度 ～ 令和5年度	犬飼 義明	名古屋大学・農学国際教育研究センター・教授	1
A01 公	22H04716 時計転写ネットワークによる発生制御	令和4年度 ～ 令和5年度	中道 範人	名古屋大学・大学院生命農学研究科・教授	1
A01 公	22H04722 根の成長を制御する周期と変調の分子基盤の解明	令和4年度 ～ 令和5年度	高橋 直紀	明治大学・農学部・専任准教授	1
A01 公	22H04724 コケ植物の規則的葉序を生み出す細胞分裂面制御と細胞壁成長制御	令和4年度 ～ 令和5年度	嶋村 正樹	広島大学・大学院統合生命科学研究科・准教授	1
A01 公	22H04729 側生器官原基の形成周期と生長相転換にともなう変調	令和4年度 ～ 令和5年度	木下 温子	東京都立大学・理学研究科・助教	1
A01 公	22H04730 ゼニゴケ頂端細胞の運命変調を司るペプチドホルモン群の機能解析	令和4年度 ～ 令和5年度	篠原 秀文	福井県立大学・生物資源学部・准教授	1

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	22H04733 幹細胞増幅周期制御に関わる オーキシン応答性の区画化	令和4年度 ～ 令和5年度	西浜 竜一	東京理科大学・創域理工 学部・教授	1
A01 公	22H04737 共生遺伝子の発現振幅を生み 出す仕組み	令和4年度 ～ 令和5年度	征矢野 敬	基礎生物学研究所・共生 システム研究部門・准教 授	1
A02 公	22H04708 細胞極性の自律周期的形成と その変調が導出するオーキシ ン極性輸送システム	令和4年度 ～ 令和5年度	檜本 悟史	北海道大学・大学院理学 研究院・准教授	1
A02 公	22H04709 葉の発生に關与する核内分化 因子の周期的動態変化を制御 する分子基盤の解明	令和4年度 ～ 令和5年度	笹部 美知子	弘前大学・農学生命科学 部・准教授	1
A02 公	22H04713 多能性カルス細胞の周期を変 調させるマスター転写因子の 発現制御	令和4年度 ～ 令和5年度	池内 桃子	奈良先端科学技術大学院 大学・先端科学技術研究 科・特任准教授	1
A02 公	22H04717 微小管系輸送モーターの働き による周期的な分枝形成機構	令和4年度 ～ 令和5年度	五島 剛太	名古屋大学・大学院理学 研究科・教授	1
A02 公	22H04718 曲率変動解析を基軸とした先 端成長細胞の伸長と屈性の機 構解明	令和4年度 ～ 令和5年度	佐藤 良勝	名古屋大学・トランスフ ォーマティブ生命分子研 究所・特任准教授	1
A02 公	22H04720 概日リズムが生み出す糖代謝 周期による幹細胞運命制御機 構の解析	令和4年度 ～ 令和5年度	近藤 侑貴	大阪大学・大学院理学研 究科・教授	1
A02 公	22H04723 維管束ーミロシン細胞のワイ ヤリングにおけるオーキシ ンの作用機序	令和4年度 ～ 令和5年度	白川 一	奈良先端科学技術大学院 大学・先端科学技術研究 科・助教	1
A02 公	22H04726 光シグナルと概日時計による 周期的気孔開閉の制御とその 意義	令和4年度 ～ 令和5年度	武宮 淳史	山口大学・大学院創成科 学研究科・准教授	1
A02 公	22H04734 カルシウムシグナルの揺らぎ による植物の形態形成制御	令和4年度 ～ 令和5年度	朽津 和幸	東京理科大学・創域理工 学部・教授	1

研究 項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A02 公	22H04738 幹細胞の自律的周期性と変調 をもたらすオーキシン動態制 御	令和4年度 ～ 令和5年度	石川 雅樹	基礎生物学研究所・生物 進化研究部門・助教	1
A03 公	22H04712 根の伸長分裂周期の変調が齎 す特異な運動の解析	令和4年度 ～ 令和5年度	米倉 崇晃	東京大学・大学院理学系 研究科・助教	1
A03 公	22H04719 器官配置の周期を構成し変調 するメリステム動態の理論生 物学	令和4年度 ～ 令和5年度	藤本 仰一	広島大学・大学院統合生 命科学研究科・教授	1
A03 公	22H04727 植物器官の周期的出現パタン とその変調による個体の「かた ち」の多様性の統合的理解	令和4年度 ～ 令和5年度	野下 浩司	九州大学・大学院理学研 究院・助教	1
A03 公	22H04731 概日時計サイレンシング法を 用いた滞在性微弱シグナル環 境におけるリズム変調の解明	令和4年度 ～ 令和5年度	福田 弘和	大阪公立大学・大学院工 学研究科・教授	1
A03 公	22H04732 画像セグメンテーション技術 に基づく植物器官の周期と変 調の解明	令和4年度 ～ 令和5年度	内海 ゆづ子	大阪公立大学・大学院情 報学研究科・講師	1
A03 公	22H04735 ディープラーニングによる植 物画像認識の高精度化と時空 間の要因解析	令和4年度 ～ 令和5年度	堀田 一弘	名城大学・理工学部・教授	1
A03 公	22H04736 深層学習を用いた動態顕微鏡 における高精度な分裂細胞の 検出と追跡	令和4年度 ～ 令和5年度	陳 延偉	立命館大学・情報理工学 部・教授	1
<b>公募研究 合計 53 件（廃止を含む）</b>					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 研究領域全体に係る事項

### 3 交付決定額

年度	合計	直接経費	間接経費
令和元年度	308,230,000 円	237,100,000 円	71,130,000 円
令和2年度	306,540,000 円	235,800,000 円	70,740,000 円
令和3年度	296,987,000 円	228,680,000 円	68,307,000 円
令和4年度	304,200,000 円	234,000,000 円	70,200,000 円
令和5年度	297,570,000 円	228,900,000 円	68,670,000 円
合計	1,513,527,000 円	1,164,480,000 円	349,047,000 円



## 2. 本領域の全体構想

本領域では、細胞やオルガネラレベルの自律的な周期性が、植物に特有の周期形態を与える機構や、周期の変調が植物の形態に可塑性や多様性を与えるしくみを明らかにすることを目的とした。この目的を達成するため、植物分子遺伝学の基本的な研究手法に、①植物の内部や発生动態の周期性を可視化するライブイメージング技術、②画像データを定量化しデータに潜在する周期性とその変調に気づきを与える AI 技術と人間拡張技術、③周期動態と形態発現の関係をモデル化する数理生物学を連携させた学際融合研究の組織的な推進を構想した（右図）。



本領域の開始時点において、生物学や医学の研究で用いられている AI 技術の多くは画像データに含まれる情報を高速かつ自動的に選別することを目的としたものであった。一方で情報学としての AI 研究は、「選別する AI」から「特徴を提示する AI」や「生成する AI」の開発へとシフトしつつあった。本新学術領域ではこのような流れを捉え、AI による画像データの処理や定量化に加え、AI が生物学者の発見を支援する技術の構築と実践も目指すこととした。すなわち AI が提示した特徴や次元圧縮データから、生物学者が未知の発生动態に気づきを得たり、不定形な形態やその変化を定量的に解析する技術の開発を目指した。さらに本領域では AI 技術に加え、人間拡張工学を用いて植物発生研究を加速させることを目指した。人間拡張工学とは、人間が生得的にもつ知覚能力や運動能力を、計算機や機械の力を借りて適切に拡張する工学技術である。生物学者がもつ観察能力や実験手技を、バーチャルリアリティや機械的デバイスを用いて拡張することで生物学における発見を加速する新たな異分野融合研究の創造を目指した。

## 3. 領域設定期間終了後に期待された成果

本領域の終了後に期待された効果は大きく分けて2つある。1つ目は、植物の発生原理の理解そのものが生み出す学術的・応用的価値である。植物の周期形態を組織的に解明するコンソーシアム研究は、世界的に見ても本領域が初めてのものであった。植物発生制御機構の理解は、食糧やエネルギー源としての植物の利用に不可欠である。有史以来の作物の育種過程において、花序や葉序あるいは根の分岐構造といった繰り返し単位の増加や最適化が生産力の向上に中心的な貢献を果たして来たことが、近年の研究から明らかとなっている。本領域で得られる植物発生の制御系の理解は、持続可能な社会の実現に向けた応用研究に必要な基盤的知見を提供することが期待された。

期待された2つ目の効果は、新たな異分野融合研究による植物発生学や生物学研究の革新であった。本領域では、AI 技術を高精細なイメージングデータや時系列解析に応用することで、新たな生命現象を発見したり、発生現象を定量的に捉えるための技術を開発することを目指した。また人間拡張工学との連携により研究者がデータに潜在する学術的価値に気づきを得るための技術開発を目指した。情報学との学際融合で生物学の研究を支援する本領域の取り組みは、植物発生学の枠組みを超え、広く生物学一般に方法論の変革を促すことが期待された。

実際に本領域発足直後に文部科学省が決定した戦略目標「『バイオ DX』による科学的発見の追究」は、本領域が掲げる「生物学者の発見を支援するための情報学・人間拡張工学との融合」のコンセプトとほぼ完全に一致していた。領域終了後の現在においても、AI 技術を始めとした情報学と生物学の融合を志向した領域研究が産官学の連携で推進されていることは、本領域の構想の先進性を示すものと言える。

## 5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### ■ 審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応

指摘事項：計画研究代表者8名のうち情報科学研究者が1名であるため、植物科学と情報科学との更なる連携強化を可能とする研究者の参画が望まれる。

計画班代表者の望月敦史に加え、稲見昌彦（東大）と近藤洋平（生命創成探求センター）の2名の情報学者が総括班分担者として参画した。両名は領域全体の研究支援活動を進め、多くの共同研究を精力的に推進した。初年度には領域メンバーが稲見研究室に会して第1回「人間拡張道場」（後掲 p.23）を開催し、学際融合研究の推進に向けた議論と共同研究の立ち上げを行った（右写真）。また2年目から4年目には稲見研の柏野特任助教が研究協力者として参画し、人間拡張道場やVR技術を用いたツール開発に精力的に取り組んだ（右図）。稲見の発案により、情報処理学会の学会誌において「植物の情報処理」と題した特集号を刊行して8編の総説論文を発表した（後掲 p. 26）。人間拡張道場の一環として、若手メンバーによる融合研究コンペを2年目と4年目に開催した（後掲 p. 27）。

公募班代表者として、内海、堀田、陳、野下の4名の情報学者が参画し、領域内の植物学者と画像解析や機械学習を用いた共同研究を推進した。これに加えて植物学と情報数学の融合研究を展開する福田、藤本、中益、米倉の4名の公募班員が参画し、領域内の実験植物学者との共同研究を精力的に進めた。堀田、内海、藤本、米倉は、画像解析道場や数理解析道場を総括班メンバーと共同で企画・運営し、領域全体の融合研究の推進に積極的に協力した（右図）。また上記の情報処理学会誌の特集号に付随し、異分野融合研究を推進する上での課題を稲見や内海を含む領域メンバーが座談会形式で討論し、その模様を「ゴール設定の違いが難しさ『情報植物学』という新たな分野への挑戦」と題した記事として情報処理学会から配信した。以上の他にも、遠藤班の原口、中道班の戸田、佐藤班の加藤、石川班の藤田、藤本班の松下、北沢、藤原など、植物学にアフィニティーの高い多くの情報学者や数理生物学者が、研究協力者として本領域に参画した。

指摘事項：総括班評価者として、実験生物系の研究者だけではなく、情報科学や理論生物学の研究者も加える必要性について検討すべきである。

上記の指摘に対応するため、領域発足直後に本多久夫博士（数理生物学；神戸大学大学院医学研究科・客員教授）と、廣瀬通孝博士（情報学；東京大学・先端科学技術研究センター・名誉教授）の2名に新たに評価委員を依頼し快諾を得た。本多博士は、定例の領域会議に加えて若手ワークショップにもお越しいただき「形態形成の数理モデル」と題した1時間の講演を行って下さった。廣瀬博士には、情報学者の立場から植物発生研究におけるVR技術の利用などについて提案を受けた。



2019 人間拡張道場（稲見）



2020 人間拡張道場とVR技術を用いた研究支援（柏野）



2019-2023

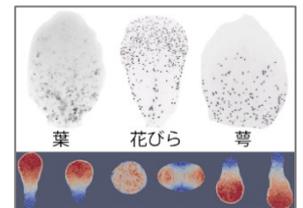
若手を対象に毎年度開催した数理生物学道場と画像解析道場 (Google Colab を利用し、オンラインでハンズオンセミナーを開催した)

■ 中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応

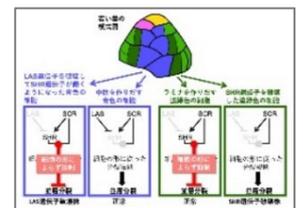
留意事項：振動子の分子実体や変調の制御機構について、現象記述や分子レベルでの理解のみならず、数理モデルとしての理解が実現され、それを通じてこれまでに無い植物発生の新たな学理構築が実現されることが望ましい。今後の研究推進にあたっては、どのような数理モデルを構築し発生原理の理解に結びつけるのか、個々の研究について解析の戦略を共同研究者間で明確化することが重要と思われる。

本領域は、オルガネラや細胞スケールの動態を基盤として植物の発生原理の再構築を行うことを目的としていることから、実験データと数理モデルと連携させる前提として、まず顕微鏡観察で得た画像データを定量化する手法、特にオルガネラ、細胞、器官スケールの不定形な形態や、一見ランダムに見える細胞動態を定量化する比較的難度の高い画像解析ツールの開発が必要であった。本領域の融合研究課題の多くは領域発足前後に開始されたため、中間評価の時点では研究チームの多くが画像データの取得や定量化技術を開発する段階にあった。中間評価で受けた本指摘は総括班メンバーで速やかに共有し、また領域メンバー全員に対しては、領域会議やワークショップ等の機会ごとに領域代表者が繰り返し伝達した。その結果、領域期間の後半において実験と数理モデルの連携が急速に進み、数理解析を用いた成果を43報の原著論文として公表した。発生現象の新たな学理や、従来の定説に修正を迫る多数の重要な成果が得られており、代表的な例をプレスリリースへのリンクとともに以下に示す。

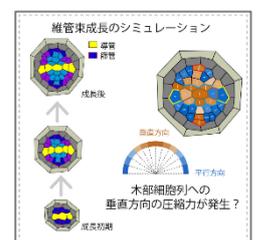
- 塚谷班（植物発生学）と望月班（数理生物学）の共同研究では、18世紀にゲーテが「Der Versuch die Metamorphose der Pflanzen zu erklären（植物変態論）」の中で共通の進化的起源をもつことを示した葉と花卉の形態が、葉原基内の分裂位置の変更により「変態」していることを明らかにした (Development 2022, 成果 6)。(<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/info/8175/>)



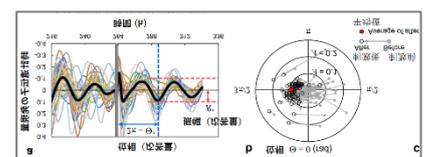
- 石川班（植物発生学）と藤本班（数理生物学）の共同研究では、ヒメツリガネゴケの細胞形態を精密に定量し数理モデル化することで、根の並層分裂を促進する制御系として長年にわたって認知されて来た SCR-SHR 制御系が、細胞形態の分裂面決定ルールを上書きする普遍的な制御系であることを示した (PNAS 2023, 成果 56)。(<https://www.nibb.ac.jp/press/2023/01/17.html>)



- 中島班（植物発生学）と藤本班（数理生物学）の共同研究では、根端の維管束の師部近傍において、サイトカニンの作用によって促進された細胞増殖が、周囲の細胞群を「寿司詰め」にすることで、一定方向の圧縮力を発生させることで組織の対称性を高めることを数理シミュレーションとレーザーを用いた細胞除去実験から実証した (Curr. Biol. 2023, 成果 4)。([https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2023/20230214\\_1](https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2023/20230214_1))



- A01 中道班（植物生理学）と A03 福田班（数理生物学）の共同研究では、リズムが消失した状態にある細胞集団の応答から、様々な外部刺激に対する概日リズムの位相応答を、迅速かつ高効率で得る手法を考案した。植物科学の基礎研究と植物工場等へ応用の両面で重要な成果である (Nat. Commun. 2021, 成果 80)。(<https://www.osakafu-u.ac.jp/press-release/pr20210209/>)

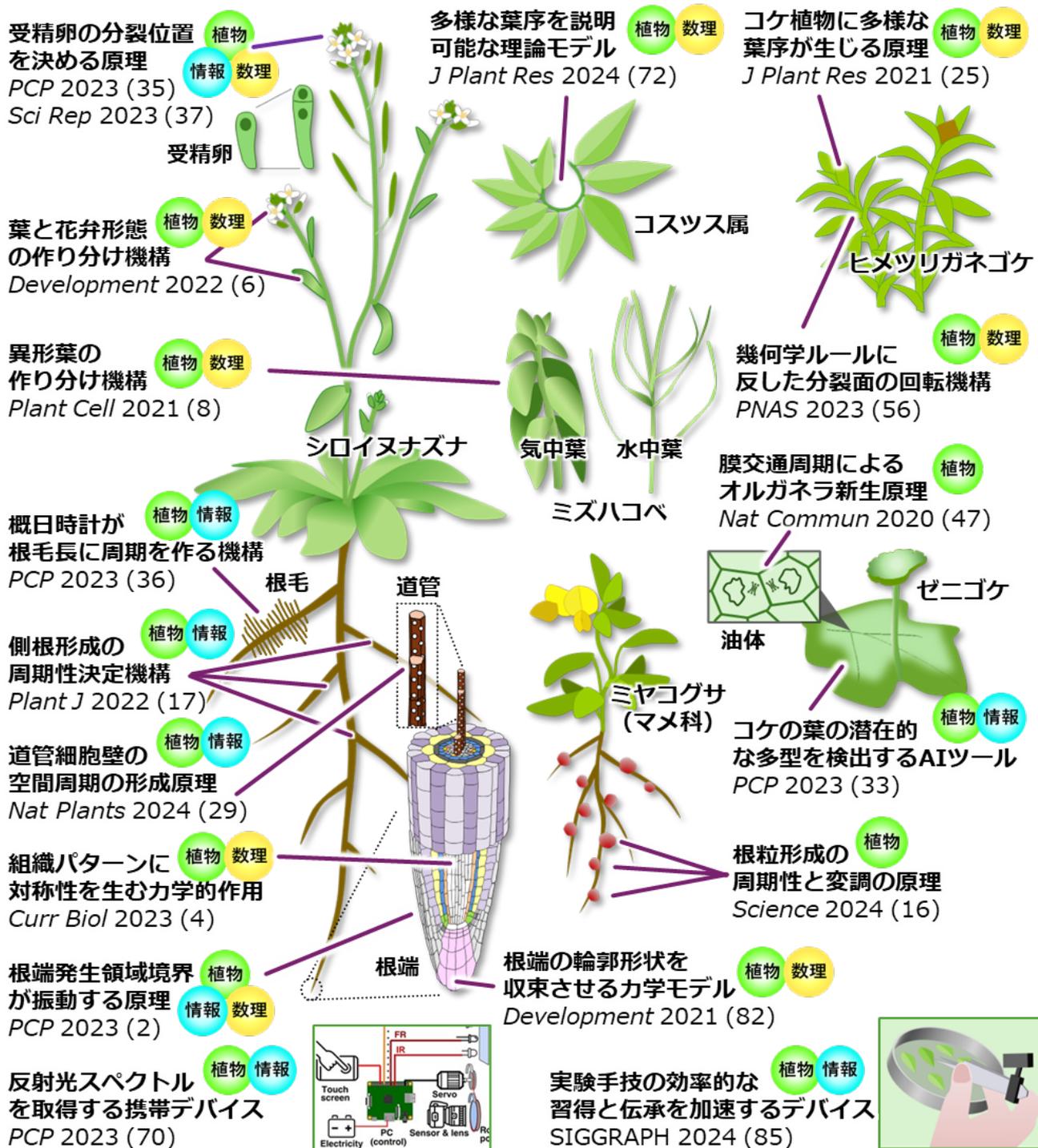


## 6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

### (1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか

本領域の第1の目標は、植物発生の基盤となる周期形態の発現と変調機構を分子・遺伝子レベルで明らかにし、「周期と変調」を基軸として植物の発生原理を再構築することであった。また、第2の目標は上記を達成する手段として、植物発生学・細胞生物学、情報学、数理生物学の学際融合スキームを確立することであった。上記に対応し、異分野融合研究の成果を中心に、植物発生の基盤的な原理を明らかにした主要な成果の全体像を以下の図に示す(カッコ内の数字はp.18-22の成果番号に対応する)。



**研究項目A01**では、本項目内やA03項目との緊密な共同研究を通じ、器官の形態や配置に周期性と変調が生じる原理について、トップジャーナルへの掲載を含む多くの重要な成果を得た。まず器官の形態については、分裂領域の空間的な変化が葉と花弁に特徴的な形態を作り分ける原理（A01塚谷班とA03望月班の共同研究<sup>5</sup>）や、複数のホルモンシグナルの協奏により水陸両用植物が水中葉と気中葉の形態を作り分ける「異形葉性」の原理（A01塚谷<sup>8</sup>）が解明された。また茎の周りに特定の周期で葉が形成される現象（葉序）について、種子植物とは異なるコケ植物の多様な葉序が細胞分裂面の旋回と葉原基の重心変化により形成される原理を明らかにした（A01嶋村班とA03藤本班の共同研究<sup>25</sup>）。根については、マメ科植物において根端部におけるサイトカニン応答や制御遺伝子の発現振動が根粒の空間周期を決定する機構（A01 征矢野班、中島班、深城班の共同研究<sup>16</sup>）や、側根形成の周期性が極長鎖脂肪酸や細胞骨格因子により変調することを明らかにした（A01深城班と中島班の共同研究<sup>12</sup>、A01塚越班とA03堀田班の共同研究<sup>17</sup>）。また、維管束の組織パターンの周期性や根端の輪郭形状が細胞間の力学的相互作用により形成される原理を明らかにした（A01中島班、深城班、A03藤本班の共同研究<sup>4,82</sup>）。さらに、イメージング、深層学習、数理生物学の協働により、従来定常的とみなしていた根端の発生領域境界が同調的な細胞分裂が作る細胞クラスタにより振動する原理を明らかにした（A01中島班、A03陳班、米倉班、総括班の共同研究<sup>2</sup>）。

**研究項目A02**では、オルガネラや細胞スケールの周期性や、細胞周期や概日時計といった内的振動の周期と変調が植物の形態や生理応答を生み出す機構について、定説の修正を含む多くの重要な成果を得た。まず細胞内膜交通の周期的な方向転換が新たなオルガネラを作り出す原理（A02上田班<sup>47</sup>）や、先端成長する受精卵の内部構造の偏在化が、非対称分裂の位置を決める原理を提示した（A02植田班<sup>35,43,46</sup>）。またコケ植物の葉原基の非対称分裂の解析から、根端幹細胞の並層分裂の制御系とみなされていたSHR-SCR制御系が、広く幾何学ルールに反して分裂面を回転させる保存された機構であることを示した（A02石川班、A03藤本班の共同研究<sup>56</sup>）。また、細胞周期や概日時計などの内的振動系の周期と変調に関して、時計の周期を変調させる新たな制御系を発見した他、植物体の地上部と地下部に存在する概日時計の相互作用が根毛や根系形態の周期性を生み出す機構を明らかにした（A02遠藤班、近藤班、中道班、武宮班、A01深城班、塚越班、A03堀田班の共同研究<sup>17,36,38</sup>）。

**研究項目A03**では、上記の成果の基盤となる情報学と数理生物学の手法を開発した。上記以外の特筆すべき成果として、器官原基の相互抑制を前提とした従来のモデルに促進的効果を追加することで、自然界に存在する広範な葉序の形成を説明可能なモデルを確立した研究（A03米倉班<sup>72</sup>）、新規な深層学習ネットワークや説明可能なAI技術の開発を基盤とした植物再生過程の細胞パターンの検出<sup>59</sup>、側根発生ステージの分類<sup>17</sup>、ゼニゴケ精子運動の「見えない」表現型の可視化<sup>33</sup>（A03堀田班、A01塚越班、A02池内班、上田班との共同研究）や、深層学習と幾何学アルゴリズムの組み合わせによる2次元画像からの3次元形態の定量化手法の開発（A03内海班、藤本班、野下班の個別または共同研究<sup>74,75,77</sup>）等が挙げられる。また人間拡張工学と協働した表現型の可視化や細胞分裂の同調性に気づきを与える細胞分裂の可聴化<sup>2</sup>、表面反射光のスペクトルデータを網羅的に取得する携帯型デバイスP-MIRUの開発<sup>70</sup>、ピンセットや指先により実験手技の効率的な習得と伝承を加速するデバイス（Magnifinger<sup>84</sup>, SkillPicker<sup>85</sup>）の開発など、有益かつユニークな多数の技術が開発・公表された（総括班、A03陳班、A01中島班、塚谷班、深城班らの共同研究）。

以上のように、植物が作る周期とその変調に関する新規な原理の提示や、定説を修正する成果を得たことから、「周期と変調」を基軸として植物の発生原理を再構築する本領域の第1の目標は十分に達成されたと考える。また、上記の多くが領域内の異分野融合研究の成果であり、領域期間終了後も多くの共同

研究が継続されていることから、学際融合スキームを確立する本領域の第2の目標も期待以上のレベルで達成されたと考える。指示に従い、以下の(2)に成果の具体的内容を研究項目ごとに簡潔に記す。

(2) 本研究領域により得られた成果 (右肩数字はp. 18-22の成果番号に対応する)

#### A01器官形態の表出原理の解明

##### ● 計画研究

中島班では、根端部における遺伝子、オルガネラ、細胞の動態が、組織や器官の形態に時空間的な周期性をもたらす機構を明らかにした。まず、根端の細胞動態が根端の輪郭形状をカテナリー曲線に収束させる原理や、細胞どうしの力学的相互作用が組織パターンに対称性を生み出す原理を実験と計算機シミュレーションにより明らかにした (*Development* 2021<sup>82</sup>, A01深城班、A03藤本班との共同研究; *Curr. Biol.* 2023<sup>4</sup>, A03藤本班との共同研究)。さらに、根端を伸長させる細胞群の分裂と伸長動態を4Dデータとして取得するイメージング技術、AIを用いた画像定量化技術、細胞分裂を音として提示する人間拡張技術、計算機シミュレーションを融合し、同調的な分裂が作る細胞クラスターが根端の発生ゾーン境界に周期的な摂動をもたらす原理を明らかにした (*Plant Cell Physiol.* 2023<sup>2</sup>, 総括班、A03陳班、A03米倉班との共同研究)。また分泌型細胞壁分解酵素やオートファジーの周期的な活性化が根冠細胞のターンオーバーと機能転換を促進する機構を明らかにした (*Development* 2022<sup>7</sup>, A01深城班との共同研究)。

深城班では、根の周期的な枝分かれ構造(根系構造)の形成と変調機構について、2つの転写因子の連続的な誘導が側根原基の形成に機能することを明らかにした (*New Phytol.* 2019<sup>11</sup>)。さらに領域内あるいは国際共同研究において、側根原基形成における細胞骨格系や極長鎖脂肪酸の機能を解明した (*Curr. Biol.* 2019<sup>12</sup>; *PNAS* 2019<sup>13</sup>)。

塚谷班では、細胞レベルの周期と変調が葉形の多様性や可塑性を生み出す原理を明らかにした。水陸両用植物が水中と気中で異なる形態の葉を作る「異形葉性」の原理を明らかにするとともに (*Plant Cell* 2021<sup>8</sup>)、互いに近縁な陸生種と両生種の葉における気孔形成パターンの違いが、2つのbHLH転写因子の発現タイミングの違いにより生み出される原理を明らかにした (*PNAS* 2021<sup>9</sup>)。また実験と数理モデリングの協働により、細胞分裂の位置の違いが花卉と葉に特徴的な形態を生み出す原理を明らかにした (*Development* 2022<sup>6</sup>, A03望月班との共同研究)。また、葉端に分裂組織を維持することで無限に小葉を作り続ける植物種や、葉の基部に茎頂様の分裂組織を作り出すことで単一の葉で生涯を終える植物種など、ユニークなボディプランが進化した原理を明らかにした (*Front. Plant Sci.* 2022<sup>5</sup>; *Sci. Rep.* 2024<sup>1</sup>)。

##### ● 公募研究

地上部器官の周期と変調に関し、伊藤純一班では、オオムギの茎頂における葉原基の時空間的形成パターンを決定する複数の遺伝的制御や、施肥に応答したイネの穂数制御におけるストリゴラクトンの機能を明らかにした (*PLoS Genet.* 2021<sup>23</sup>; *Nat. Commun.* 2023<sup>20</sup>)。打田班では、ゼニゴケ葉状体の周期的な二又分岐や、シロイヌナズナの胚珠形成の周期性におけるペプチドシグナリングの機能を明らかにした (*Curr. Biol.* 2020<sup>27</sup>; 2020<sup>28</sup>, A01西浜班との共同研究)。地下部器官の周期と変調に関しては、征矢野班が、マメ科植物の根端においてサイトカニンへの応答と制御遺伝子の発現が時間振動し、これが共生窒素固定器官である根粒の空間周期を決定することや、葉に由来するマイクロRNAが根粒の数を調節する機能を明らかにした (*Science* 2024<sup>16</sup>, A01中島班、深城班との共同研究; *Nat. Commun.* 2020<sup>26</sup>)。犬飼班によりイネの側根形態を時系列解析する回帰モデルの作成を通じてオーキシンが果たす役割が明らかにされた (*Plant Physiol.* 2024<sup>14</sup>)。塚越班では、根端の活性酸素種が細胞壁修飾酵素の発現制御を通じて根の細胞伸長を調節する新規な制御系を見出した (*PLoS One* 2023<sup>19</sup>)。伊藤(大橋)班では、HD-ZIPIII転写因子が、ブラシノステロイドの生合成を介して根の肥大成長を制御することを明らかにした (*PNAS* 2023<sup>18</sup>)。

篠原班では、植物のストレス応答と成長の切替を制御するペプチドホルモンシグナル系を発見した (*Science* 2022<sup>21</sup>)。伊藤正樹班では、細胞周期調節因子の発現制御を介して器官内の細胞サイズと細胞数を調節する新規制御因子を発見した (*Nat. Commun.* 2022<sup>22</sup>, A02植田班との共同研究)。

## A02細胞運命と細胞構造の表出原理の解明

### ● 計画研究

上田班では、苔類に特異的なオルガネラである油体が分泌経路の周期的な方向転換と分泌小胞の細胞内での融合により形成されることを示すとともに、油体形成のマスター制御因子を同定した (*Nat. Commun.* 2020<sup>47</sup>; *Curr. Biol.* 2020<sup>45</sup>)。また、細胞状態転換のモデルとして用いたゼニゴケの精子変態について、それぞれのオルガネラがオートファジーやエンドサイトーシスなど複数の分解機構の厳密な制御のもとに分解されることを明らかにした (*Development* 2022<sup>40</sup>; *Cell Rep.* 2022<sup>39</sup>; *Front. Plant Biol.* 2023<sup>32</sup>)。さらに、植物で独自の多様化を果たしたANTHタンパク質が特異的な細胞膜タンパク質のリサイクリングに関わることを明らかにするとともに (*PNAS* 2020<sup>49</sup>)、緑色植物の一部にのみ存在する特徴的なANTHタンパク質が精子の運動に寄与することを深層学習を援用した動画分類と判断根拠可視化により示した (*Plant Cell Physiol.* 2023<sup>33</sup>, A03堀田班との共同研究)。また、定量すべき特徴量の識別が難しい形質を、深層学習の援用により抽出する手法を提案した (*Plant Cell Physiol.* 2023<sup>34</sup>; A01西浜班との共同研究)。

小田班では、細胞骨格とその付随タンパク質群の動態が道管細胞の細胞壁に周期的なパターンを生み出す原理を明らかにした。まず小田らが発見したCORD4タンパク質が微小管切断因子であるKataninを微小管末端ヘリクルートし、これにより微小管の長さを調節していることを明らかにした (*Curr. Biol.* 2019<sup>51</sup>)。また液-液相分離による会合と解離を繰り返すMIDD1タンパク質が、細胞表層空間において細胞壁を沈着させないドメインを一定の間隔で形成させることを明らかにした (*Nat. Commun.* 2023<sup>31</sup>)。さらに領域内共同研究により深層学習を用いた細胞壁パターンの自動検出プログラムを作成し、これを用いて微小管付随タンパク質であるMAP70が微小管の曲率制御を介して細胞壁パターンの配向を調節する機構を明らかにした (*Nat. Plants* 2024<sup>29</sup>, 総括班との共同研究)。

植田班では、独自のライブイメージングを駆使し、受精卵内部の周期動態が植物の体軸を決定する原理を明らかにした。受精卵内部の様々なオルガネラや細胞骨格構造の分布を包括的に定量する画像解析ツールを開発し、これを用いて、受精直後に形成される内部構造の偏在化とその維持が受精卵の非対称分裂の位置を決める新規な作動モデルを提唱した (*Quant. Plant Biol.* 2020<sup>46</sup>; *Plant Cell Physiol.* 2021<sup>43</sup>; *Sci. Rep.* 2023<sup>37</sup>)。また、受精卵の成熟に伴う細胞の変形を精密に定量する画像解析手法を開発し、受精卵に特異的な先端成長の動態を明らかにした (*Plant Cell Physiol.* 2023<sup>35</sup>, A01中島班との共同研究)。受精の前後の過程を制御するメカニズムについても、雌性配偶体の運命決定や、受精時のヒストン修飾が胚パターン形成を制御する機構を明らかにした (*eLife* 2020<sup>50</sup>; *PLoS Biol.* 2021<sup>41</sup>, A02丸山班との共同研究)。

遠藤班では、概日リズムが植物の周期形態や細胞分化を制御する機構を画像解析や数理統計学との融合研究で明らかにした。シングルセルデータから実時間に沿った細胞分化過程や細胞周期を再構成する統計学的手法を開発し、時計タンパク質による細胞分化の制御系やオーキシンと関連遺伝子による細胞周期の制御を明らかにした (*Plant Cell Physiol.* 2020<sup>44</sup>; *Discrete Appl. Math.* 2020<sup>48</sup>)。また深層学習を用いた根毛長の定量ツールを開発し、地上部の時計因子が長距離輸送を介して根毛長の日周変動を調節していることを明らかにした (*Plant Cell Physiol.* 2023<sup>36</sup>, 総括班、A01深城班との共同研究)。また接ぎ木実験と数理モデルにより、イオンや糖を介した長距離シグナルが地上部と地下部の概日時計を連携させるモデルを示した (*Plant Cell Physiol.* 2023<sup>38</sup>, A02武宮班との共同研究)。

## ● 公募研究

五島班では、紡錘体の移動による細胞分裂面の決定がヒメツリガネゴケの非対称分裂を制御する新規な系や、植物特有のキネシンが細胞極性の形成に果たす機能を明らかにした (*Nat. Commun.* 2022<sup>58</sup>; *Nat. Plants* 2023<sup>54</sup>)。石川班では、SCR-SHR制御系が植物に保存された分裂方向のスイッチング機構であることを明らかにした (*PNAS* 2023<sup>56</sup>, A03藤本班との共同研究)。丸山班においては、花粉管内に周期的に形成される隔壁(カロースプラグ)やアクチンの動態制御が精核の位置を決定する機構を明らかにした (*Nat. Commun.* 2021<sup>61</sup>, *PNAS* 2020<sup>67</sup>)。檜本班では、オーキシン輸送体であるPINタンパク質の細胞内極性分布を決定する分子機構を明らかにした (*New Phytol.* 2021<sup>62</sup>; *Curr. Biol.* 2021<sup>64</sup>)。武宮班では、孔辺細胞の開閉を駆動するプロトンATPポンプが、細胞内のCO<sub>2</sub>濃度と青色光を感知して駆動するシグナル伝達系を明らかにした (*Plant Cell* 2021<sup>63</sup>; *Nat. Commun.* 2024<sup>53</sup>; A01西浜班、A02上田班との共同研究)。笹部班では、核小体におけるAS2の機能が葉形態の対称性を制御することを明らかにした (*Plants* 2023<sup>57</sup>)。池内班では、WUS様転写因子であるWOX13が細胞壁のリモデリングを通じて細胞の分化と脱分化を制御することを明らかにした (*Plant Physiol.* 2022<sup>59</sup>, A03堀田班との共同研究; *Sci. Adv.* 2023<sup>55</sup>)。近藤班では、維管束幹細胞の増殖と分化を制御する新規な制御系を明らかにした (*Plant Cell* 2021<sup>65</sup>)。佐藤班は、ライブイメージング技術の開発を通じて領域内外の多くの研究班と共同研究を行った (*Science* 2020<sup>66</sup>, A02植田班、A01塚越班との共同研究など)。

## A03数理情報解析とモデリング手法の開発

### ● 計画研究

望月班では、「生体分子ダイナミクス」と「細胞メカニクス」の2つの階層において数理生物学を用いた手法の開発を行った。生体分子ダイナミクスについては、望月が構築してきたLinkage logicを、代謝経路やタンパク質を介した制御ネットワークに適用するアルゴリズムを開発した (*Biochem. J.* 2022<sup>71</sup>; *Biophys. Physicobiol.* 2023<sup>69</sup>; *PNAS nexus* 2023<sup>68</sup>)。細胞メカニクスについては、画像解析から得られた細胞分裂方向の網羅的なデータとCell vertexモデルを組み合わせることで、種に特異的な葉の周縁部の曲率分布が生み出される機構を明らかにした (投稿準備中, A01塚谷班との共同研究)。

### ● 公募研究

藤本班では、中島班、深城班、石川班、嶋村班との多数の共同研究の成果 (*Development* 2021<sup>82</sup>, *J. Plant Res.* 2021<sup>25</sup>, *Curr. Biol.* 2023<sup>4</sup>, *PNAS* 2023<sup>56</sup>) を含め、動物発生も含めた組織パターン形成や細胞運動のモデリングで多くの成果を上げた (*Science Adv.* 2023<sup>76</sup>; *PLoS Comp. Biol.* 2024<sup>73</sup>など)。米倉班では、数理シミュレーションを用いて「真の謎」とされたコスツス属の特異な葉序の形成モデルを示した (*J. Plant Res.* 2024<sup>72</sup>)。福田班では、様々な刺激の入力に対する概日リズムの位相や振動応答を高効率に得る手法を開発した (*Nat. Commun.* 2021<sup>80</sup>; *Front. Plant Sci.* 2021<sup>83</sup>)。内海班では、花卉や茎の配置の解析や菌根菌の感染状態を定量する様々な画像解析アルゴリズムを開発した (*Front. Plant Sci.* 2022<sup>79</sup>; 2023<sup>78</sup>; 2024<sup>74</sup>, A03藤本班との共同研究)。陳班では4次元画像から根端の細胞動態を定量する深層学習ツールを開発した (*BMC Bioinfo.* 2021<sup>81</sup>; *Plant Cell Physiol.* 2023<sup>2</sup>; 総括班、A01中島班、A03米倉班との共同研究)。堀田班では、新規な深層学習ネットワークや説明可能なAI技術を開発し、細胞パターンや側根発生ステージの判別とゼニゴケ精子運動の定量を行った (*Plant Physiol.* 2022<sup>59</sup>; *Plant J.* 2023<sup>17</sup>; *Plant Cell Physiol.* 2023<sup>33</sup>, A01塚越班、A02池内班、上田班との共同研究)。野下班では、画像から葉の3次元形態や葉脈パターンを定量する深層学習と幾何学アルゴリズムの手法を開発した (*PLoS Comp. Biol.* 2023<sup>77</sup>, *Plant Phenomics* 2024<sup>75</sup>)。

## 7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和6年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に\*印を付すこと。

原著論文を国際誌に372編、国内誌に3編発表した（すべて査読有）。総説を国際誌に83編、国内誌に49編発表し、査読付学会発表を28件行った。特許出願は3件。アウトリーチ活動として、プレスリリース132件、小・中・高生向け授業36件、一般向け講演会・セミナー46件を行った。総括班の広報担当者が中心となり、テレビやラジオ、ネットメディアなどの幅広い媒体で植物科学・情報学の成果の宣伝普及に努めた。原著論文を中心に主な成果を以下に挙げる。研究項目をまたぐ成果は一方のみに記載した。

原著論文（主なもの、全て査読有国際誌）

### A01 計画研究

1. Moriyama, Y., Koga, H., and \*Tsukaya, H. (2024). Decoding the leaf apical meristem of *Guarea glabra* Vahl (Meliaceae): insight into the evolution of indeterminate pinnate leaves. *Sci Rep* 14, 5166.
2. Goh, T., Song, Y., Yonekura, T., Obushi, N., Den, Z., Imizu, K., Tomizawa, Y., Kondo, Y., Miyashima, S., Iwamoto, Y., \*Inami, M., \*Chen, Y.W., and \*Nakajima, K. (2023). In-Depth Quantification of Cell Division and Elongation Dynamics at the Tip of Growing Arabidopsis Roots Using 4D Microscopy, AI-Assisted Image Processing and Data Sonification. *Plant Cell Physiol* 64, 1262-1278.
3. Goto, C., Ikegami, A., Goh, T., Maruyama, K., Kasahara, H., Takebayashi, Y., Kamiya, Y., Toyokura, K., Kondo, Y., Ishizaki, K., Mimura, T., and \*Fukaki, H. (2023). Genetic Interaction between Arabidopsis SUR2/CYP83B1 and GNOM Indicates the Importance of Stabilizing Local Auxin Accumulation in Lateral Root Initiation. *Plant Cell Physiol* 64, 1178-1188.
4. Fujiwara, M., Imamura, M., Matsushita, K., Roszak, P., Yamashino, T., Hosokawa, Y., Nakajima, K., \*Fujimoto, K., and \*Miyashima, S. (2023). Patterned proliferation orients tissue-wide stress to control root vascular symmetry in Arabidopsis. *Curr Biol* 33, 886-898 e888.
5. Kinoshita, A., and \*Tsukaya, H. (2022). Auxin and cytokinin control fate determination of cotyledons in the one-leaf plant *Monophyllaea glabra*. *Front Plant Sci* 13, 980138.
6. Kinoshita, A., Naito, M., Wang, Z., Inoue, Y., Mochizuki, A., and \*Tsukaya, H. (2022). Position of meristems and the angles of the cell division plane regulate the uniqueness of lateral organ shape. *Development* 149, dev199773.
7. \*Goh, T., Sakamoto, K., Wang, P., Kozono, S., Ueno, K., Miyashima, S., Toyokura, K., Fukaki, H., Kang, B.H., and \*Nakajima, K. (2022). Autophagy promotes organelle clearance and organized cell separation of living root cap cells in *Arabidopsis thaliana*. *Development* 149, dev.200593.
8. Koga, H., Kojima, M., Takebayashi, Y., Sakakibara, H., and \*Tsukaya, H. (2021). Identification of the unique molecular framework of heterophylly in the amphibious plant *Callitriche palustris* L. *Plant Cell* 33, 3272-3292.
9. Doll, Y., Koga, H., and \*Tsukaya, H. (2021). The diversity of stomatal development regulation in *Callitriche* is related to the intrageneric diversity in lifestyles. *Proc Natl Acad Sci USA* 118, e2026351118.
10. Fujikura, U., Ezaki, K., Horiguchi, G., Seo, M., Kanno, Y., Kamiya, Y., Lenhard, M., and \*Tsukaya, H. (2020). Suppression of class I compensated cell enlargement by *xs2* mutation is mediated by salicylic acid signaling. *PLoS Genet* 16, e1008873.
11. Yamamoto, K., Takahashi, K., Caputi, L., Mizuno, H., Rodriguez-Lopez, C.E., Iwasaki, T., Ishizaki, K., Fukaki, H., Ohnishi, M., Yamazaki, M., Masujima, T., O'Connor, S.E., and \*Mimura, T. (2019). The complexity of intercellular localisation of alkaloids revealed by single-cell metabolomics. *New Phytol* 224, 848-859.
12. Vilches Barro, A., Stockle, D., Thellmann, M., Ruiz-Duarte, P., Bald, L., Louveaux, M., von Born, P., Denninger, P., Goh, T., Fukaki, H., Vermeer, J.E.M., and \*Maizel, A. (2019). Cytoskeleton Dynamics Are Necessary for Early Events of Lateral Root Initiation in Arabidopsis. *Curr Biol* 29, 2443-2454 e2445.
13. Trinh, D.C., Lavenus, J., Goh, T., Boutte, Y., Drogue, Q., Vaissayre, V., Tellier, F., Lucas, M., Voss, U., Gantet, P., Faure, J.D., Dussert, S., Fukaki, H., Bennett, M.J., Laplaze, L., and \*Guyomarc'h, S. (2019). PUCHI regulates very long chain fatty acid biosynthesis during lateral root and callus formation. *Proc Natl Acad Sci USA* 116, 14325-14330.

### A01 公募研究

14. Yamauchi, T., Tanaka, A., Nakazono, M., and \*Inukai, Y. (2024). Age-dependent analysis dissects the stepwise control of auxin-mediated lateral root development in rice. *Plant Physiol* 194, 819-831.

15. Kuhn, A., Roosjen, M., Mutte, S., Dubey, S.M., Carrillo Carrasco, V.P., Boeren, S., Monzer, A., Koehorst, J., Kohchi, T., Nishihama, R., Fendrych, M., Sprakel, J., Friml, J., and \*Weijers, D. (2024). RAF-like protein kinases mediate a deeply conserved, rapid auxin response. *Cell* 187, 130-148 e117.
16. \*Soyano, T., Akamatsu, A., Takeda, N., Watahiki, M. K., Goh, T., Okuma, N., Suganuma, N, Kojima, M., Takebayashi, Y., Sakakibara, H., Nakajima, K., and Kawaguchi, M. (2024). Periodic cytokinin responses in *Lotus japonicus* rhizobium infection and nodule development. *Science*, in press.
17. Uemura, Y., Kimura, S., Ohta, T., Suzuki, T., Mase, K., Kato, H., Sakaoka, S., Uefune, M., Komine, Y., Hotta, K., Shimizu, M., Morikami, A., and \*Tsukagoshi, H. (2023). A very long chain fatty acid responsive transcription factor, MYB93, regulates lateral root development in Arabidopsis. *Plant J* 115, 1408-1427.
18. \*Ohashi-Ito, K., Iwamoto, K., Yamagami, A., Nakano, T., and Fukuda, H. (2023). HD-ZIP III-dependent local promotion of brassinosteroid synthesis suppresses vascular cell division in Arabidopsis root apical meristem. *Proc Natl Acad Sci USA* 120, e2216632120.
19. Mase, K., Mizuno, H., Nakamichi, N., Suzuki, T., Kojima, T., Kamiya, S., Takeuchi, T., Kondo, C., Yamashita, H., Sakaoka, S., Morikami, A., and \*Tsukagoshi, H. (2023). AtMYB50 regulates root cell elongation by upregulating PECTIN METHYLESTERASE INHIBITOR 8 in *Arabidopsis thaliana*. *PLoS One* 18, e0285241.
20. Cui, J., Nishide, N., Mashiguchi, K., Kuroha, K., Miya, M., Sugimoto, K., Itoh, J.I., Yamaguchi, S., and \*Izawa, T. (2023). Fertilization controls tiller numbers via transcriptional regulation of a MAX1-like gene in rice cultivation. *Nat Commun* 14, 3191.
21. Ogawa-Ohnishi, M., Yamashita, T., Kakita, M., Nakayama, T., Ohkubo, Y., Hayashi, Y., Yamashita, Y., Nomura, T., Noda, S., Shinohara, H., and \*Matsubayashi, Y. (2022). Peptide ligand-mediated trade-off between plant growth and stress response. *Science* 378, 175-180.
22. Nomoto, Y., Takatsuka, H., Yamada, K., Suzuki, T., Suzuki, T., Huang, Y., Latrasse, D., An, J., Gombos, M., Breuer, C., Ishida, T., Maeo, K., Imamura, M., Yamashino, T., Sugimoto, K., Magyar, Z., Bogre, L., Raynaud, C., Benhamed, M., and \*Ito, M. (2022). A hierarchical transcriptional network activates specific CDK inhibitors that regulate G2 to control cell size and number in Arabidopsis. *Nat Commun* 13, 1660.
23. Hibara, K.I., Miya, M., Benvenuto, S.A., Hibara-Matsuo, N., Mimura, M., Yoshikawa, T., Suzuki, M., Kusaba, M., Taketa, S., and \*Itoh, J.I. (2021). Regulation of the plastochron by three many-noded dwarf genes in barley. *PLoS Genet* 17, e1009292.
24. Akiyoshi, N., Ihara, A., Matsumoto, T., Takebayashi, A., Hiroyama, R., Kikuchi, J., Demura, T., and \*Ohtani, M. (2021). Functional Analysis of Poplar Sombrero-Type NAC Transcription Factors Yields a Strategy to Modify Woody Cell Wall Properties. *Plant Cell Physiol* 62, 1963-1974.
25. Kamamoto, N., Tano, T., \*Fujimoto, K. and \*Shimamura, M. (2021). Rotation angle of stem cell division plane controls spiral phyllotaxis in mosses. *J Plant Res* 134, 457-473.
26. Okuma, N., Soyano, T., Suzaki, T., and \*Kawaguchi, M. (2020). MIR2111-5 locus and shoot-accumulated mature miR2111 systemically enhance nodulation depending on HAR1 in *Lotus japonicus*. *Nat Commun* 11, 5192.
27. Kawamoto, N., Del Carpio, D.P., Hofmann, A., Mizuta, Y., Kurihara, D., Higashiyama, T., Uchida, N., Torii, K.U., Colombo, L., Groth, G., and \*Simon, R. (2020). A Peptide Pair Coordinates Regular Ovule Initiation Patterns with Seed Number and Fruit Size. *Curr Biol* 30, 4352-4361 e4354.
28. Hirakawa, Y., Fujimoto, T., Ishida, S., Uchida, N., Sawa, S., Kiyosue, T., Ishizaki, K., Nishihama, R., Kohchi, T., and \*Bowman, J.L. (2020). Induction of Multichotomous Branching by CLAVATA Peptide in *Marchantia polymorpha*. *Curr Biol* 30, 3833-3840 e3834.

## A02 計画研究

29. Higa, T., Kijima, S.T., Sasaki, T., Takatani, S., Asano, R., Kondo, Y., Wakazaki, M., Sato, M., Toyooka, K., Demura, T., Fukuda, H., and \*Oda, Y. (2024). Microtubule-associated phase separation of MIDD1 tunes cell wall spacing in xylem vessels in *Arabidopsis thaliana*. *Nat Plants* 10, 100-117.
30. Takatani, S., Asano, R., Kondo, Y., Wakazaki, M., Sato, M., Toyooka, K., Demura, T., Fukuda, H., and \*Oda, Y. (2024). Microtubule-associated phase separation of MIDD1 tunes cell wall spacing in xylem vessels in *Arabidopsis thaliana*. *Nat Plants* 10, 100-117.
31. Sasaki, T., Saito, K., Inoue, D., Serk, H., Sugiyama, Y., Pesquet, E., Shimamoto, Y., and \*Oda, Y. (2023). Confined-microtubule assembly shapes three-dimensional cell wall structures in xylem vessels. *Nat Commun* 14, 6987.
32. Norizuki, T., Minamino, N., Sato, M., and \*Ueda, T. (2023). Autophagy regulates plastid reorganization during spermatogenesis in the liverwort *Marchantia polymorpha*. *Front Plant Sci* 14, 1101983.
33. Minamino, N., Fujii, H., Murata, H., Hachinoda, S., Kondo, Y., Hotta, K., and \*Ueda, T. (2023). Analysis of Plant-Specific ANTH Domain-Containing Protein in *Marchantia polymorpha*. *Plant Cell Physiol* 64, 1331-1342.
34. Tomizawa, Y., Minamino, N., Shimokawa, E., Kawamura, S., Komatsu, A., Hiwatashi, T., Nishihama, R., Ueda, T., Kohchi, T., and \*Kondo, Y. (2023). Harnessing Deep Learning to Analyze Cryptic Morphological Variability of *Marchantia polymorpha*. *Plant Cell Physiol* 64, 1343-1355.

35. Kang, Z., Matsumoto, H., Nonoyama, T., Nakagawa, S., Ishimoto, Y., Tsugawa, S., and \*Ueda, M. (2023). Coordinate Normalization of Live-Cell Imaging Data Reveals Growth Dynamics of the Arabidopsis Zygote. *Plant Cell Physiol* 64, 1279-1288.
36. Ikeda, H., Uchikawa, T., Kondo, Y., Takahashi, N., Shishikui, T., Watahiki, M.K., Kubota, A., and \*Endo, M. (2023). Circadian Clock Controls Root Hair Elongation through Long-Distance Communication. *Plant Cell Physiol* 64, 1289-1300.
37. Hiromoto, Y., Minamino, N., Kikuchi, S., Kimata, Y., Matsumoto, H., Nakagawa, S., Ueda, M., and \*Higaki, T. (2023). Comprehensive and quantitative analysis of intracellular structure polarization at the apical-basal axis in elongating Arabidopsis zygotes. *Sci Rep* 13, 22879.
38. Uemoto, K., Mori, F., Yamauchi, S., Kubota, A., Takahashi, N., Egashira, H., Kunimoto, Y., Araki, T., Takemiya, A., Ito, H., and \*Endo, M. (2023). Root PRR7 Improves the Accuracy of the Shoot Circadian Clock through Nutrient Transport. *Plant Cell Physiol* 64, 352-362.
39. Norizuki, T., Minamino, N., Sato, M., Tsukaya, H., and \*Ueda, T. (2022). Dynamic rearrangement and autophagic degradation of mitochondria during spermiogenesis in the liverwort *Marchantia polymorpha*. *Cell Rep* 39, 110975.
40. Minamino, N., Norizuki, T., Mano, S., Ebine, K., and \*Ueda, T. (2022). Remodeling of organelles and microtubules during spermiogenesis in the liverwort *Marchantia polymorpha*. *Development* 149, dev200951.
41. Susaki, D., Suzuki, T., Maruyama, D., Ueda, M., \*Higashiyama, T., and \*Kurihara, D. (2021). Dynamics of the cell fate specifications during female gametophyte development in Arabidopsis. *PLoS Biol* 19, e3001123.
42. Roszak, P., Heo, J.O., Blob, B., Toyokura, K., Sugiyama, Y., de Luis Balaguer, M.A., Lau, W.W.Y., Hamey, F., Cirrone, J., Madej, E., Bouatta, A.M., Wang, X., Guichard, M., Ursache, R., Tavares, H., Verstaen, K., Wendrich, J., Melnyk, C.W., Oda, Y., Shasha, D., Ahnert, S.E., Saeys, Y., De Rybel, B., Heidstra, R., Scheres, B., Grossmann, G., Mahonen, A.P., Denninger, P., Gottgens, B., \*Sozzani, R., \*Birnbaum, K.D., and \*Helariutta, Y. (2021). Cell-by-cell dissection of phloem development links a maturation gradient to cell specialization. *Science* 374, eaba5531.
43. Matsumoto, H., Kimata, Y., Higaki, T., Higashiyama, T., and \*Ueda, M. (2021). Dynamic Rearrangement and Directional Migration of Tubular Vacuoles are Required for the Asymmetric Division of the Arabidopsis Zygote. *Plant Cell Physiol* 62, 1280-1289.
44. Torii, K., Kubota, A., Araki, T., and \*Endo, M. (2020). Time-Series Single-Cell RNA-Seq Data Reveal Auxin Fluctuation during Endocycle. *Plant Cell Physiol* 61, 243-254.
45. Romani, F., Banic, E., Florent, S.N., Kanazawa, T., Goodger, J.Q.D., Mentink, R.A., Dierschke, T., Zachgo, S., Ueda, T., Bowman, J.L., Tsiantis, M., and \*Moreno, J.E. (2020). Oil Body Formation in *Marchantia polymorpha* Is Controlled by MpC1HDZ and Serves as a Defense against Arthropod Herbivores. *Curr Biol* 30, 2815-2828 e2818.
46. Kimata, Y., Higaki, T., Kurihara, D., Ando, N., Matsumoto, H., Higashiyama, T., and \*Ueda, M. (2020). Mitochondrial dynamics and segregation during the asymmetric division of Arabidopsis zygotes. *Quant Plant Biol* 1, e3.
47. Kanazawa, T., Morinaka, H., Ebine, K., Shimada, T.L., Ishida, S., Minamino, N., Yamaguchi, K., Shigenobu, S., Kohchi, T., Nakano, A., and \*Ueda, T. (2020). The liverwort oil body is formed by redirection of the secretory pathway. *Nat Commun* 11, 6152.
48. Haraguchi, K., Torii, K., and \*Endo, M. (2020). Maximum weighted matching with few edge crossings for 2-layered bipartite graph. *Discrete Appl Math* 287, 40-52.
49. Fujimoto, M., Ebine, K., Nishimura, K., Tsutsumi, N., and \*Ueda, T. (2020). Longin R-SNARE is retrieved from the plasma membrane by ANTH domain-containing proteins in Arabidopsis. *Proc Natl Acad Sci USA* 117, 25150-25158.
50. Antunez-Sanchez, J., Naish, M., Ramirez-Prado, J.S., Ohno, S., Huang, Y., Dawson, A., Opasathian, K., Manza-Mianza, D., Ariel, F., Raynaud, C., Wibowo, A., Daron, J., Ueda, M., Latrasse, D., Slotkin, R.K., Weigel, D., Benhamed, M., and \*Gutierrez-Marcos, J. (2020). A new role for histone demethylases in the maintenance of plant genome integrity. *eLife* 9, e58533.
51. Sasaki, T., Tsutsumi, M., Otomo, K., Murata, T., Yagi, N., Nakamura, M., Nemoto, T., Hasebe, M., and \*Oda, Y. (2019). A Novel Katanin-Tethering Machinery Accelerates Cytokinesis. *Curr Biol* 29, 4060-4070 e4063.

#### A02 公募研究

52. Watanabe, K., Hashimoto, K., Hasegawa, K., Shindo, H., Tsuruda, Y., Kupisz, K., Koselski, M., Wasko, P., Trebacz, K., and \*Kuchitsu, K. (2024). Rapid propagation of Ca<sup>2+</sup> waves and electrical signals in a liverwort *Marchantia polymorpha*. *Plant Cell Physiol* 65, 660-670.

53. Fuji, S., Yamauchi, S., Sugiyama, N., Kohchi, T., Nishihama, R., Shimazaki, K.I., and \*Takemiya, A. (2024). Light-induced stomatal opening requires phosphorylation of the C-terminal autoinhibitory domain of plasma membrane H(+)-ATPase. *Nat Commun* 15, 1195.
54. Yoshida, M.W., Hakozaiki, M., and \*Goshima, G. (2023). Armadillo repeat-containing kinesin represents the versatile plus-end-directed transporter in *Physcomitrella*. *Nat Plants* 9, 733-748.
55. Ogura, N., Sasagawa, Y., Ito, T., Tameshige, T., Kawai, S., Sano, M., Doll, Y., Iwase, A., Kawamura, A., Suzuki, T., Nikaido, I., Sugimoto, K., and \*Ikeuchi, M. (2023). WUSCHEL-RELATED HOMEBOX 13 suppresses de novo shoot regeneration via cell fate control of pluripotent callus. *Sci Adv* 9, eadg6983.
56. Ishikawa, M., Fujiwara, A., Kosetsu, K., Horiuchi, Y., Kamamoto, N., Umakawa, N., Tamada, Y., Zhang, L., Matsushita, K., Palfalvi, G., Nishiyama, T., Kitasaki, S., Masuda, Y., Shiroza, Y., Kitagawa, M., Nakamura, T., Cui, H., Hiwatashi, Y., Kabeya, Y., Shigenobu, S., Aoyama, T., Kato, K., Murata, T., Fujimoto, K., \*Benfey, P.N., Hasebe, M., and \*Kofuji, R. (2023). GRAS transcription factors regulate cell division planes in moss overriding the default rule. *Proc Natl Acad Sci USA* 120, e2210632120.
57. Ando, S., Nomoto, M., Iwakawa, H., Vial-Pradel, S., Luo, L., Sasabe, M., Ohbayashi, I., Yamamoto, K.T., Tada, Y., Sugiyama, M., Machida, Y., \*Kojima, S., and \*Machida, C. (2023). Arabidopsis ASYMMETRIC LEAVES2 and Nucleolar Factors Are Coordinately Involved in the Perinucleolar Patterning of AS2 Bodies and Leaf Development. *Plants (Basel)* 12, 3621.
58. Kozgunova, E., Yoshida, M.W., Reski, R., and \*Goshima, G. (2022). Spindle motility skews division site determination during asymmetric cell division in *Physcomitrella*. *Nat Commun* 13, 2488.
59. \*Ikeuchi, M., Iwase, A., Ito, T., Tanaka, H., Favero, D.S., Kawamura, A., Sakamoto, S., Wakazaki, M., Tameshige, T., Fujii, H., Hashimoto, N., Suzuki, T., Hotta, K., Toyooka, K., Mitsuda, N., and Sugimoto, K. (2022). Wound-inducible WUSCHEL-RELATED HOMEBOX 13 is required for callus growth and organ reconnection. *Plant Physiol* 188, 425-441.
60. \*Shirakawa, M., Morisaki, Y., Gan, E.S., Sato, A., and \*Ito, T. (2021). Identification of a Devernalization Inducer by Chemical Screening Approaches in *Arabidopsis thaliana*. *Front Plant Sci* 12, 634068.
61. Motomura, K., Takeuchi, H., Notaguchi, M., Tsuchi, H., Takeda, A., Kinoshita, T., Higashiyama, T., and \*Maruyama, D. (2021). Persistent directional growth capability in *Arabidopsis thaliana* pollen tubes after nuclear elimination from the apex. *Nat Commun* 12, 2331.
62. Li, H., von Wangenheim, D., Zhang, X., Tan, S., Darwish-Miranda, N., Naramoto, S., Wabnik, K., De Rycke, R., Kaufmann, W.A., Gutl, D., Tejos, R., Grones, P., Ke, M., Chen, X., Dettmer, J., and \*Friml, J. (2021). Cellular requirements for PIN polar cargo clustering in *Arabidopsis thaliana*. *New Phytol* 229, 351-369.
63. Hosotani, S., Yamauchi, S., Kobayashi, H., Fuji, S., Koya, S., Shimazaki, K.I., and \*Takemiya, A. (2021). A BLUS1 kinase signal and a decrease in intercellular CO<sub>2</sub> concentration are necessary for stomatal opening in response to blue light. *Plant Cell* 33, 1813-1827.
64. Glanc, M., Van Gelderen, K., Hoermayer, L., Tan, S., Naramoto, S., Zhang, X., Domjan, D., Vcelarova, L., Hauschild, R., Johnson, A., de Koning, E., van Dop, M., Rademacher, E., Janson, S., Wei, X., Molnar, G., Fendrych, M., De Rybel, B., Offringa, R., and \*Friml, J. (2021). AGC kinases and MAB4/MEL proteins maintain PIN polarity by limiting lateral diffusion in plant cells. *Curr Biol* 31, 1918-1930 e1915.
65. Furuya, T., Saito, M., Uchimura, H., Satake, A., Nosaki, S., Miyakawa, T., Shimadzu, S., Yamori, W., Tanokura, M., Fukuda, H., and \*Kondo, Y. (2021). Gene co-expression network analysis identifies BEH3 as a stabilizer of secondary vascular development in Arabidopsis. *Plant Cell* 33, 2618-2636.
66. \*Notaguchi, M., Kurotani, K.I., Sato, Y., Tabata, R., Kawakatsu, Y., Okayasu, K., Sawai, Y., Okada, R., Asahina, M., Ichihashi, Y., Shirasu, K., Suzuki, T., Niwa, M., and Higashiyama, T. (2020). Cell-cell adhesion in plant grafting is facilitated by beta-1,4-glucanases. *Science* 369, 698-702.
67. Ali, M.F., Fatema, U., Peng, X., Hacker, S.W., Maruyama, D., Sun, M.X., and \*Kawashima, T. (2020). ARP2/3-independent WAVE/SCAR pathway and class XI myosin control sperm nuclear migration in flowering plants. *Proc Natl Acad Sci USA* 117, 32757-32763.

#### A03 計画研究

68. Hishida, A., Okada, T., and \*Mochizuki, A. (2024). Patterns of change in regulatory modules of chemical reaction systems induced by network modification. *PNAS Nexus* 3, pgad441.
69. \*Mochizuki, A. (2023). Controlling complex dynamical systems based on the structure of the networks. *Biophys Physicobiol* 20, e200019.
70. Balandra A., Doll Y., Hirose S., Kajiwara T., Kashino Z., Inami M., Koshimizu, S., Fukaki, H., and Watahiki M.K. (2023). P-MIRU, a polarized multispectral imaging system, reveals reflection information on the biological surface. *Plant Cell Physiol* 64, 1311-1322.

71. \*Mochizuki, A. (2022). A structural approach to understanding enzymatic regulation of chemical reaction networks. *Biochem J* 479, 1265-1283.

#### A03 公募研究

72. \*Yonekura, T., and \*Sugiyama, M. (2024). A new mathematical model of phyllotaxis to solve the genuine puzzle spiromonostichy. *J Plant Res* 137, 143-155.
73. Sudo, M., and \*Fujimoto, K. (2024). Diffusive mediator feedbacks control the health-to-disease transition of skin inflammation. *PLoS Comp Biol* 20, e1011693.
74. Nakatani, T., \*Utsumi, Y., Fujimoto, K., Iwamura, M., and Kise, K. (2024). Image recognition-based petal arrangement estimation. *Front Plant Sci* 15, 1334362.
75. Murata, H., and \*Noshita, K. (2024). Three-Dimensional Leaf Edge Reconstruction Combining Two- and Three-Dimensional Approaches. *Plant Phenomics* 6, 0181.
76. \*Tsuboi, A., Fujimoto, K., and \*Kondo, T. (2023). Spatiotemporal remodeling of extracellular matrix orients epithelial sheet folding. *Sci Adv* 9, eadh2154.
77. Iwamasa, K., and \*Noshita, K. (2023). Network feature-based phenotyping of leaf venation robustly reconstructs the latent space. *PLoS Comput Biol* 19, e1010581.
78. Kinose, R., \*Utsumi, Y., Iwamura, M., and Kise, K. (2023). Tiller estimation method using deep neural networks. *Front Plant Sci* 13, 1016507.
79. Muta, K., Takata, S., \*Utsumi, Y., Matsumura, A., Iwamura, M., and Kise, K. (2022). TAIM: Tool for Analyzing Root Images to Calculate the Infection Rate of Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Front Plant Sci* 13, 881382.
80. Masuda, K., Tokuda, I.T., Nakamichi, N., and \*Fukuda, H. (2021). The singularity response reveals entrainment properties of the plant circadian clock. *Nat Commun* 12, 864.
81. Kitrungratsakul, T., Iwamoto, Y., Takemoto, S., Yokota, H., Ipponjima, S., Nemoto, T., Lin, L., Tong, R., Li, J., and \*Chen, Y.W. (2021). Accurate and fast mitotic detection using an anchor-free method based on full-scale connection with recurrent deep layer aggregation in 4D microscopy images. *BMC Bioinformatics* 22, 91.
82. Fujiwara, M., \*Goh, T., Tsugawa, S., Nakajima, K., Fukaki, H., and \*Fujimoto, K. (2021). Tissue growth constrains root organ outlines into an isometrically scalable shape. *Development* 148, dev196253.
83. Masuda, K., Yamada, T., Kagawa, Y., and \*Fukuda, H. (2020). Time Lag Between Light and Heat Diurnal Cycles Modulates CIRCADIAN CLOCK ASSOCIATION 1 Rhythm and Growth in *Arabidopsis thaliana*. *Front Plant Sci* 11, 614360.

#### 査読付学会発表（主なもの）

##### A03 計画研究（総括班による人間拡張工学技術の開発はA03項目とみなす）

84. \*Obushi, N., Wakisaka, S., Kasahara, S., Hiyama, A. and Inami, M. (2019). MagniFinger: magnified perception by a fingertip probe microscope. *SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies*, Los Angeles, USA
85. \*Obushi, N., \*Oshiro, S., Imai, Y., Matsudaira, C., Kijima, S., Kanazawa, T., Tsukaya, H. and Inami, M. (2024). SkillPicker: Tweezers for Recording and Training Dexterous Operations. *SIGGRAPH 2024 Emerging Technologies*, Denver, USA

#### A03 公募研究

86. Fujii, H. and \*Hotta, K. (2023). Adaptive Resolution Selection for Improving Segmentation Accuracy of Small Objects. *18th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISAPP2023)*, Lisbon, Portugal
87. Fukuda, H. (2022). A platform technology for analysis and control of the plant circadian clock under complex environments, *The XX CIGR World Congress 2022*, Kyoto, Japan
88. \*Matsushita, K., Yabunaka, S., Hashimura, H., Kuwayama, S. and Fujimoto, K. (2020). Leader-guiding collective cell rotation. *26th Symposium on Traffic Flow and Self-Driven Particles*, Virtual

#### 領域ホームページ

（日本語） <https://plant-periodicity.org/>

（英語） <https://plant-periodicity.org/en/>

#### 主催シンポジウム

- ・ 国際ウェビナーシリーズ “From Cellular Dynamics to Morphology” 2年目～4年目に計18回開催
- ・ 国際若手ワークショップ 2023 June 9-11, Chiba, Japan
- ・ International Conference on Arabidopsis Research での共催シンポジウムに続いて海外から10名の若手研究者を招聘し、領域内の若手研究者との討論を行った。

## 8 研究組織の連携体制

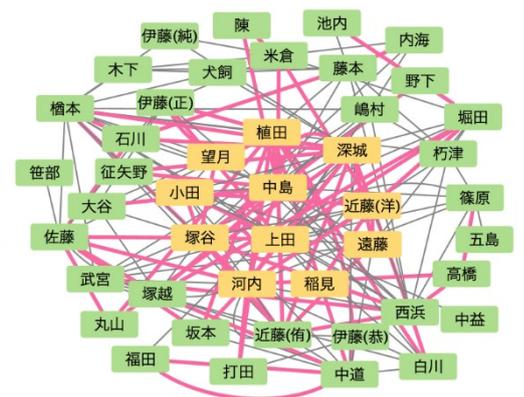
研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本領域の計画班および総括班メンバーは、領域の申請段階から発足後の共同研究の開始に向けた研究打ち合わせを定期的に行い、領域発足前後に多くの共同研究を開始した。年2回の総括班会議に加え、Slack等のチームコミュニケーションツールを活用して常時情報交換を行った。公募班については、第1期、第2期それぞれの採択直後に、専門性と領域代表者の精査によりそれぞれ6つのグループを編成し、**公募班グループミーティング**をオンラインで開催した(右写真)。各回には総括班メンバーを含む約30名が参加し、公募班の研究計画に対するアドバイスや共同研究のマッチングを行った。総括班のイニシアチブによるこれらの活動により、初対面の異分野研究者かつパンデミックの行動制限下においても多数の共同研究が新設された。



2020, 2022  
公募班オンラインミーティング

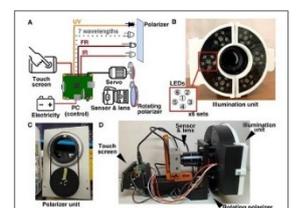
本領域の研究期間を通じた共同研究の相関図を右に示す。ここに見られるように、計画班、公募班を問わず、**すべての研究班が領域内で共同研究を実施している**。計画班は3-19の他班(平均9.8班)と共同研究を行っており、大きなノードを形成している。情報学者や数理生物学者で構成されるA03項目では、公募班を含めたすべての研究班がA01やA02の複数の植物学者と共同研究を行った。公募班員の研究課題を計画班員のライブイメージング技術で支援することでトップジャーナルでの論文掲載につなげた実績(*Science* 2024<sup>16</sup>)を含め、研究班を跨った約106報の論文と、120報を超える融合研究論文を発表した。



橙色は計画班・総括班、緑色は公募班。  
ピンクの線は論文公表済みの共同研究

上記の他にも異分野融合研究を推進するためにいくつかの具体的な方策を実施した。1つ目は「解析道場」と名付けた参加型ワークショップであり、「画像解析」「数理解析」「人間拡張」の3つの解析道場を年1回のペースで開催した(前述 p.11)。特に大学院生やポスドク研究者の参加をエンカレッジし、研究マッチング発表会や、ハンズオン形式の講習会、人間拡張工学のデモや要素技術のセミナーなど、多彩な活動を展開して領域内共同研究の推進と若手研究者の意識改革を促した。これによりウェット研究室の大学院生や研究員が、自ら画像解析ツールや数理シミュレーションを行って成果を得るケースが生じた。

さらに本領域を特徴づける活動として、人間拡張工学による研究支援技術の開発を推進した。総括班分担者の稲見の研究室の大学院生が植物発生学の研究室に滞在してツールの開発を行い(右上)、その成果を「**微視覚転移に基づく微細運動技能の拡張**」と題した博士論文にまとめて博士の学位を取得した。また p.27 に記す2回の「融合研究コンペ」において「**生物の反射光スペクトルを記録する携帯デバイス P-MIRU**」(右下)と「**感覚共有ピンセット SkillPicker**」の2つの人間拡張デバイスが提案され実装が進められた。また VR を用いた植物の内部観察技術の開発も進めた。得られた成果は、論文やトップカンファレンスで発表した他、総括班の広報担当者が東大小石川植物園で開催した企画展「**VR で見る植物園・植物 = メタバース植物学への誘い =**」で展示し広報活動にも活用した(後述 p.25)。



## 9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）がある場合は、その内容を記述すること。

### ■ 研究費の使用状況と効果的使用の工夫

期間内に交付された11.6億円の直接経費の使用内訳は、**総括班経費2.1億円(18%)、計画研究8班の研究経費6.5億円(56%)、公募研究班(第1期26班、第2期27班)の研究経費3.0億円(26%)**であった。計画班への研究費の配分額は、研究分担者数とプロジェクトの規模に応じて年度あたり710万円から2,700万円まで幅を持たせた。多くの計画班において比較的多額を研究員や技術補佐員等の人件費に当てた。公募研究課題は、第1期、第2期ともに、年度あたり400万円で18件の課題を募集したが、それぞれ99件、60件と多数の応募があり、内容も優れていたため、75%の充足率を目安としてそれぞれ25および27課題を採択した。領域2年目に公募班代表者1名が**学術変革(B)**の代表者に採択されたため廃止となり、新たに1課題を採択して補充した。2年あたりの採択額の平均は578万円であり、最高700万円、最低119万円であった。最低額が小さいのは申請金額自体が少額だったことによる。

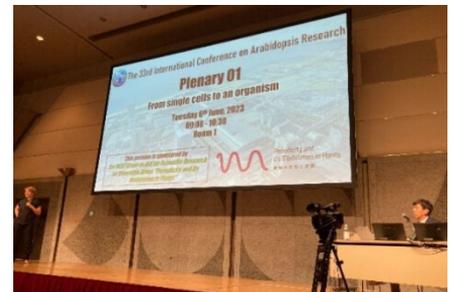
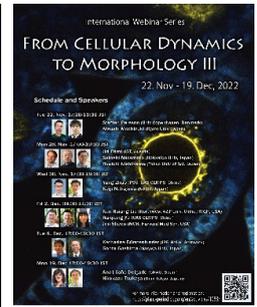
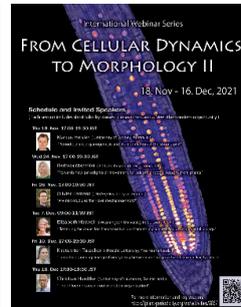
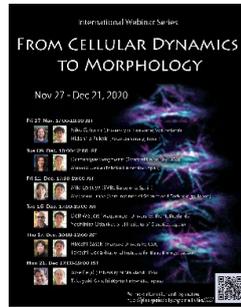
評価委員や学術調査官の会議出張の経費は、コロナ禍による行動制限とオンラインツールの活用により、55万円と低く抑えられた。領域会議の会場使用料や設備使用料についても、可能な限り大学や研究所の安価あるいは無料の施設を利用することで、期間全体で250万円と低額に抑えることが出来た。2名の職員（奈良先端大、基生研）の雇用経費に各年度約350万円を支出した。会議資料や広報資料は原則として電子媒体を用い、印刷や配布のコストを削減した。下記のウェビナーシリーズのポスターや機密保持が必要な領域会議の要旨集のみ印刷体としたが、いずれも領域代表者が自らデザインや組版を行い、ネットプリントに発注することで経費を大幅に削減した。

**研究支援**としては、顕微鏡と計算機の整備を初年度に行い、これに約9,700万円を支出した。大型機器の購入に際しては各研究機関のルールに従って入札を行った。また、総括班の研究分担者に対しては必要最低限を年度当初に配分し、必要に応じて追加配分した（研究支援の拡充のため、一部の総括班員に中型機器類、解析試薬、ソフトウェアの購入経費として合計約1,000万円を追加配分した）。計画班・公募班を問わず、各研究室で共用可能な**機器類のリスト**を提出させ、**領域HPのメンバー専用ページに掲載**した（右図）。下記の国際活動支援の制限により使用しなかった経費を有効活用するため、領域4年目から**シングルセル解析支援**と**論文掲載支援**を開始した。植物のシングルセル解析は国内での実施例がほぼ皆無であったため、情報収集と技術の導入を行うための研究員と技術補佐員を雇用した（経費約840万円）。また解析装置や試薬キットの購入、外部委託等に約1,230万円を支出した。技術的難度が高いため班員への支援募集開始が5年目となったが、計4件の支援を行うことが出来た（一部は繰越金により支援を継続している）。論文掲載支援については、インパクトや異分野融合性の観点を基に総括班員による審査を行い、6報の論文に対して計450万円の出版経費を支出した。

**国際活動支援**は、領域2-4年目のパンデミックを受けた海外渡航制限により大きな変更を余儀なくされた。2年目と4年目に開催予定だった国際シンポジウムはキャンセルせざるを得ず、これに代わる活動として「**国際ウェビナーシリーズ From Cellular Dynamics to Morphology**」を、2年目から4年目の



毎年秋に開催した。各年度とも6回(6日)に分けて開催し、海外の著名な研究者による講演と領域メンバーによる講演を組み合わせることで、国際的な研究動向の情報収集と、海外研究者とのネットワーク形成、および本領域の成果の可視化を行った(右図)。各年度23-34か国から500-600名の参加登録があり、各日の参加者数は100-250名程度であった。対面の国際シンポジウムで想定される参加者数や参加国の多様性を大きく上回っており、少ない経費で効率的な国際活動支援を行うことが出来た。5年目は国際シロイヌナズナ研究会(ICAR2023、右写真)で2つのシンポジウムを共催し、一部のスピーカーの渡航経費(計61万円)と、会場・施設使用料の一部(50万円)を支出した。



若手支援としては、若手ワークショップの開催と若手海外派遣支援を行った。若手ワークショップは合宿形式による人的ネットワークの形成支援を計画したが、2年目と3年目はコロナ禍によりオンライン開催を余儀なくされた。領域1,4,5年目はそれぞれ愛知(伊良湖)、静岡(御殿場)、千葉(一宮)において合宿形式で開催した。公営施設やセミナー施設を利用することで会場や設備の利用料を計68万円に抑えた。5年目は海外の若手研究者を招いて国際若手ワークショップを開催し、コロナ禍により制限されていた若手のネットワーク形成を支援した(右上写真)。若手海外派遣支援もコロナ禍により大きな影響を受けたが、領域1,4,5年目に合計17名を派遣し、計470万円の経費を支出した。



広報活動においては、ウェブサイトの作成やサーバー使用料に84万円を支出した。領域5年目に、東大小石川植物園において企画展「VRで見る植物園・植物=メタバース植物学への誘い=」を開催し、情報学を活用した植物学の研究活動を広く一般市民に広報した(右図)。領域期間終了後も会場を東大日光植物園に移して開催している。企画展でのワークショップでは総括班員の塚谷と稲見が講演を行い、専門技術を必要とする映像コンテンツの作成はベンチャー企業に発注することで必要経費を市価の数分の一の40万円に抑えた。領域代表者の中島が、異分野融合研究に関する講演を画像処理関連と植物関連の学会で各1回行い、その旅費の一部を総括班経費から支出した。



■ 領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究

- ・ 総括班 (85万円) : シングルセル解析支援を継続するための試薬キットと消耗品の購入経費
- ・ 中島班 (90万円) : シロイヌナズナ根端のシングルセル解析の追加実験に必要な経費
- ・ 小田班 (754万円) : 同定した新規遺伝子の機能を明らかにするため追加実験に必要な経費
- ・ 深城班 (390万円) : 側根パターン形成変異体の原因遺伝子の同定に必要な追加実験の経費
- ・ 遠藤班 (1,100万円) : フリーザーの故障によるサンプル再調製と論文改訂に必要な実験の経費
- ・ 上田班 (880万円) : ゼニゴケ単一油体核トランスクリプトームの解析の追加実験に必要な経費

## 10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の各段の発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

本領域は「②当該領域の各段の発展・飛躍的な展開を目指すもの」を選択した。植物の発生制御については、過去20年ほどの研究で基盤的な原理が明らかにされてきた。一方で、これまでに提唱された発生原理が、実は特定のモデル植物に固有であったり、本来の機能の一面を捉えたに過ぎない可能性も指摘されてきた。本領域では、従来の方法では困難であった発生プロセスや細胞内ダイナミクスの可視化を行い、これに画像解析による定量化や数理シミュレーションを融合することで発生原理の再構築を行った。例えば、シロイヌナズナの根端における非対称分裂を説明する美しいモデルとして植物発生学の教科書に広く掲載されている SHR-SCR 制御系は、本領域でのコケ植物のイメージングと数理モデル研究により、細胞形態に従った分裂ルールを上書きする進化的に保存された制御系として再定義された (*PNAS* 2023<sup>36</sup>)。また国際的な研究競争が激しい根端の発生領域境界の決定機構について、4D ライブイメージング、深層学習を用いた画像解析、数理モデリングの融合研究を行い、同調的な細胞分裂が生み出す細胞系譜のクラスタがこの発生境界を時間振動させることを明らかにした (*Plant Cell Physiol.* 2023<sup>2</sup>)。さらに、根端でのオーキシンホルモン応答の時間振動が根の分岐パターンを決定することがシロイヌナズナにおいて報告されていたが、別のホルモンの応答振動が、マメ科植物の根粒形成パターンの決定に関与していることをライブイメージング技術を駆使して明らかにした (*Science* 2024<sup>16</sup>)。

本領域では、上記の学術的目的を達するために植物科学、情報学、数理生物学の融合研究を推進したが、これを研究班レベルの共同研究にとどめることなく、学会レベルでの組織的な融合にも拡張した。まず、2021年に情報処理学会の学会誌「情報処理」に「植物と情報処理」と題した特集号を発行した。「植物の情報処理機能」と「植物学を加速する情報処理技術」の2つのカテゴリについて各4報の総説論文を掲載し反響



を呼んだ。同時に領域メンバーによる座談会を行い、その模様を「ゴール設定の違いが難しさ—『情報植物学』という新たな分野への挑戦」と題した記事として情報処理学会のサイトから発信した(右上図)。また電子情報通信学会において、領域代表者の中島が植物科学における画像解析技術の利用と課題について講演を行った。2023年には日本植物生理学会の英文ジャーナル *Plant and Cell Physiology* 誌において、「Human-Machine Collaboration in Plant Biology」と題した特集号を刊行し、人間と機械(計算機やデバイス)が協働した植物発生学の研究成果を報告する10報の論文(うち6報が本領域の成果)を掲載した(右上図)。領域代表者の中島らが執筆した本特集号の巻頭言は、米国植物学会 ASPB の広報サイトにおいて「This is an excellent article to wrap up this year and lead us into the future... This is an exciting article to share with your students」といった文章でハイライトされ、国際的な注目を集めた。さらに日本植物学会年会において「超人植物学：人機協働で解き明かす植物の発生」(2020年9月)及び、「超人植物学 リターンズ：人機共創がもたらす植物学の未来像」(2023年9月)と題した協賛シンポジウムを開催し、人間拡張工学や情報学と連携した植物科学研究の実例と将来展望について発表と討論を行った。本領域の発足以降、デジタル技術を活用した生命科学研究の転換(いわゆるバイオ DX)が国内外で新たな潮流となりつつある。このように本領域で提案した融合コンセプトは時代を先取りしたものであり、ここで得られた成果は生命科学の研究に革新を促すものとなった。

## 11 若手研究者の育成に関する取組実績

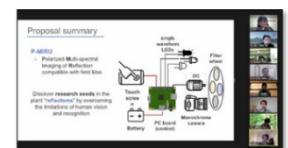
研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和6年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

若手支援の主要な取組みとして、**若手ワークショップ**を毎年1回開催した。2年目と3年目はコロナ禍による行動制限のためオンライン開催を余儀なくされたが、1,4,5年目はいずれも2泊3日の合宿形式で開催することが出来た。各回の開催地と参加者数は、愛知（54名）、静岡（55名）、千葉（27名）であった。千葉での開催回は**国際形式**としたため人数を制限した。参加者による口頭発表に加え、**画像解析道場**と**数理解析道場**を同時開催した。各道場においては総括班の支援担当者や公募班代表者による講演に加え、参加者が各自のPCを用いて課題を解く**ハンズオン講習会**を開催した。この取り組みによりウェット研究の若手研究者や学生が、自ら数理解析や画像解析を行って研究実績を挙げる例が生まれた。若手ワークショップにおいては、**キャリア支援セミナー**も開催した。ポスドクや若手教員向けには、**アカデミアポジションへの応募方法や採用を勝ち取るための戦略**や、**ワークライフバランスを保ちながら研究活動のレベルを維持する技術**、学生向けには、**ポスドク先の探し方と応募方法**や、**ポスドク体験談**について講演とディスカッションを行い、若手研究者のキャリア形成を支援した。

最終年度は渡航制限の解除を受け**国際若手ワークショップ**を開催した。ドイツ、スイス、オランダ、米国、台湾の有力研究室からポスドクや大学院生10名を招き、千葉で開催された**国際シロイヌナズナ研究会議(ICAR2024)**と連続する形で合宿形式のワークショップを開催した。参加者による研究発表や討論に加え、**仮想的な共同研究の課題提案に国際チームで取り組むリサーチアイデアソン**を開催し、優れた提案とプレゼンを表彰した（右写真）。これらの活動を通じ、若手研究者同士の国際的なネットワークが形成された。



また、若手向けの**融合研究コンペ**を2年目と4年目に開催した。異なる研究室に所属するポスドクと学生4-5名が6または4つのグループを作り、**自身の研究テーマとは異なる内容の融合研究の企画**を競った。各グループのプレゼンと質疑応答を基に全総括班員による採点と合議を経て優勝チームを決定した。優勝チームには所属する総括班分担者への追加配分により実装経費として各100万円を支給した。第1回コンペの優勝チームが提案した「Development of a New Imaging System for Understanding Plant "Reflectome"」の成果は、領域5年目に原著論文として国際誌に公表された（*Plant Cell Physiol.* 2023、成果70）。第2回コンペの優勝チームが提案した「感覚共有ピンセット SkillPicker」は、コンピュータグラフィクスとインタラクティブ技術に関する国際トップカンファレンスであるACM SIGGRAPH2024にて査読付き実演展示として採択された（成果85）。



2022優勝チームのプレゼン



2022優勝チームの開発経過報告(2024.1)

以上に記した取組みの成果として、本領域の研究遂行に参画する若手研究者のうち、のべ**75名がアカデミアへの就職やキャリアアップ**を果たしている。大阪大学教授に就任した近藤侑貴氏、東京大学教授にキャリアアップした大谷美沙都氏、神奈川大学准教授に就任した坂本卓也氏、大阪大学准教授に就任した古谷朋之氏、東北大学助教に就任した松本光梨氏、山形大学助教に就任した澁田未央氏、産総研研究員に就任した貴嶋紗久氏らをはじめとし、21名が常勤の研究職で就任・昇任するとともに、54名が博士研究員等の非常勤の研究職に就任した。

## 12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### ● 武田 洋幸（動物発生学、発生遺伝学；京都産業大学・生命科学部・教授）

生物の周期形態形成に関する研究では、脊椎動物の体節形成がよく知られている。植物の周期形態には遺伝的背景や環境因子に応じた高度な可塑性が見られることから、多様な原理や未知の機構の存在が想定されてきた。この課題に挑戦するため、本新学術領域では、総括班を中心に、イメージング、数理解析、画像解析等の研究支援を展開するとともに、公募班とのグループミーティングや解析道場を通じた組織的な共同研究が推進された。期間中に370を超える原著論文を国際誌に発表し、そのうち100報以上が研究班を跨った共同研究であること、また120報あまりが異分野融合研究であることは特筆に値する。オルガネラ周期の発見といった動物のモデルでは難しい課題を精密に解析した成果や、葉序という古典的な周期性に対して普遍性の高いモデルを提示した研究など、多くのユニークかつ重要な研究成果が得られた。国際活動においては、オンラインツールを活用したウェビナーシリーズと合宿形式の国際若手ワークショップを時宜に合わせて使い分けるなど、工夫を凝らした運営がなされた。また融合研究コンペでの若手研究者の提案を国際誌での論文発表やトップカンファレンスでの採択につなげるなど、若手研究者の意識改革が効果的に行われ、実際に多くの研究者がキャリアアップを果たしている点も高く評価される。全体として期待以上の成果が得られた領域であった。

### ● 内藤 哲（植物分子遺伝学；北海道大学・大学院農学研究院/大学院生命科学院・特任教授）

この領域の研究推進で特徴的であったのは、領域代表のリーダーシップが上滑りしていないことと言って良いのではないだろうか。どの領域でも領域代表者はリーダーシップを発揮すべく、あれこれ発信し、班員はそれに応えるべく努力するが、それらが十分に噛み合ったとは言い難いことが多いものである。この領域では、それらが十分に噛み合っており、字面の上だけでない、この研究領域があつてこそ発想し得て、かつ遂行できた、真に分野間の融合による研究成果が数多く見られることを高く評価したい。融合研究に対する領域代表の考えと、その実現に向けて領域代表を支える総括班メンバーの努力の賜物と思う。コロナ禍の下、領域活動の後半になってやっと対面での領域会議が可能になった中で、ウェビナーシリーズ等を含めてメンバー間のコミュニケーションを取るための工夫にも敬意を表したい。

### ● 中野 明彦（細胞生物学；理化学研究所・光量子工学研究センター・特別顧問/副センター長）

「植物の周期と変調」という、一見奇抜なキーワードで立ち上がった本領域は、オーソドックスな植物形態・発生学を基盤としながら、情報科学と数理生物学の方法論を大胆に取り入れ、新学術領域研究らしい異分野融合を推進することができた。積木細工に例えられる植物発生は、ライブイメージングによる解析に適し、さらに理論的、数理的な取り扱いを行うことによって、いろいろな斬新なコンセプトを打ち出すことができた。また本領域の目立った特徴として、人間拡張工学の導入があり、予想以上に植物研究者の意識改革に役立ったのではないかと思われる。私は細胞生物学が専門なので、植物の発生や形態形成が遺伝子発現のネットワークだけで説明されても、いまひとつわかった気がしないというたちであるが、細胞内のオルガネラや細胞骨格の知見にまで踏み込んで総合的な理解を目指す研究も少なからず進展し、今後のさらなる発展を期待させてくれている。コロナ禍でなかなか人的交流が難しかった時期、さまざまな工夫による活発な活動継続は見事なものであり、グループ研究の一つの理想型を示したと言ってもいいのではないかと思う。領域代表のリーダーシップを高く評価したい。

### ● 東山 哲也（植物発生学；東京大学・大学院理学系研究科・教授）

領域代表の強いリーダーシップが最後まで途切れず、むしろ加速し、領域が一丸となって、新しい生物学領域の開拓を推し進めることができた。実験と数理モデル/情報学の連携が飛躍的に進展し、数理解析を用いた40報を超える原著論文や、120報もの融合研究論文として公表できたことは、驚くべき成果である。これは中間評価でも言及したように、領域の際立った2つの特徴による。「稀に見るアクティビティの高さ」と「技術や機器の開発と共有化の強力な推進」である。若手ワークショップ、融合研究に向けた各道場、融合研究コンペ、班会議などについて、常に濃密にオーガナイズされ、学生を含む全メンバーが積極的に取り組んだ。領域代表みずからが構築した根の成長の自動追尾顕微鏡システムと周期的動態抽出や画像・数理解析統合のシステムが、見事に領域内共同研究によるScience誌の成果にもつながった。最終の班会議に参加した際に、人機協働の意識改革が深く浸透し、間もなく終わる

領域らしからず今後の長期的な共同研究や融合研究に盛り上がる様子には、深く感銘を受けた。本領域全体を通じ、情報科学による気づきを起点に、周期と変調が多くの発生現象を支えているという原理を、具体的な数理で示すことができた。コロナ禍にも世界を盛り上げたウェビナーシリーズや、特集号などにより、本領域が創出した学術分野のビジビリティは国際的に高い。人間拡張工学の概念や応用についても着実に植物科学分野に根付いた。若手を中心に、21名が常勤の研究職に就任・昇任できたことも将来につながる大きな成果である。大成功だった領域であると、極めて高く評価する。

#### ● 廣瀬 通孝（情報学；東京大学・先端科学技術研究センター・名誉教授）

今回、評価委員に選んでいただき、植物発生学なる自分にとっては未知の領域に触れることができた。最初は、情報科学と植物発生学とはかなり異質な領域であり、どう融合するかに危惧がなかったわけではない。しかしながら、結論から言えば、本領域で採用した領域融合戦略は、コロナ禍という障害にさらされたにもかかわらず、大きな成果を上げたと判断できる。

本領域では、「解析道場」などの新しい融合の仕組みを具体的に計画し、研究グループの情報科学的リテラシーの向上に取り組んでおり、定量的な効果測定は難しいものの、論文数などの観点からは大きな成果を上げたと言えるだろう。ある領域が情報科学との接点を持とうとすると、ともすれば独立した情報専門グループを作って安心してしまうことが多いが、この領域では、本流（ここでは植物発生学）の研究者自らが、情報技術、特にイメージング技術を使いこなすべく努力しており、情報グループは総括班として黒子に徹している。これは全く当を得た戦略であると評価でき、言うは簡単だがなかなか難しいことである。領域会議にも何度か参加させていただいたが、たとえば、コロナ禍の最中の領域会議において、遠隔会議システムなどのバーチャルコミュニケーション技術の活用など、研究活動の継続を試みていたのも不幸中の幸いだろう。また、展示会開催などの広報活動にVR技術を活用することも、常道とはいえ、押さえるべきところである。

研究の内容についても、情報技術を活用した新しい計測の方法論が育ってきており、例えばVRやイメージングによる可視化からの新しい作業仮説の創出などはその最たるもので、各班の発表のなかにその効果が随所に認められる。植物の科学には疎い自分であるが、領域会議における成果発表は聞いていて気持ちが良く、勉強になった。今後とも注視していきたい研究グループであることは間違いない。

最後に、これだけ研究グループが盛り上がっていること、若手が積極的に活動していることなどは、全体を統括する総括班の努力が大きいことを示している。その点も大いに評価したいと思う。

#### ● 福田 裕穂（植物発生学；秋田県立大学・理事長/学長）

本学術領域研究では、植物の持つ周期性とその周期性の破れを切り口に、新たな形態形成原理の発見とその仕組みの解明をめざした。このために、植物発生学、情報学、数理生物学のこれまでにない学際融合組織を構築した。この融合組織の下、既存の領域を超えた共同研究により、研究において素晴らしい成果を上げた。加えて、領域代表者や稲見氏などの分野融合推進に対する強いリーダーシップにより、分野融合の機運が高まり、モデルとリアルの両方を理解し活用できる若手人材育成においても成果を上げている。また、この領域は、コロナ禍で国際的な移動ができない中、新たな国際交流の場として、国際ウェビナーシリーズを確立した。その結果、実地開催以上に領域の活動と研究成果を国際的に広めることに成功している。本領域で目指した分野融合はまだ始まったばかりであり、今後さらに当該分野の融合が深まっていくことが期待される。

#### ● 本多 久夫（数理生物学；神戸大学大学院医学研究科・客員教授）

この領域研究の中では、数理モデルの植物形態学への寄与は3通りみられる。(1) 生物組織を物理的環境と読み代えることで数理的手法が使える。重力場で知られるカタナリー曲線が、根端組織で植物ホルモンがつくる先端-基部の方向性のある場でも、重力場と同じように示された(成果82)。根端断面で細胞が均等に詰め込まれていることから、この力学環境を仮定する事で対称的な維管束構造形成が説明できた(成果4)。(2) 数理モデルは微小な単位の性質に基づいて、単位の集合体であるマクロな形を説明することができる。花卉と葉の形態の違いをミクロな細胞分裂の頻度・方向の分布により数理モデルで説明し(成果6)、またナンキンハゼなどの葉縁に(外向きに)凹部ができる要因を細胞分裂の方向である事を示した。(3) 数理モデルは葉序形成の機構を、葉原器が逐次的に形成されるなかで、葉原器の形成を先行葉原器からの阻害効果を取り入れて説明してきた。ところがこの機構では説明できない開度の小さな螺旋葉序(一列斜生)がある。これを阻害効果とともに誘導効果を入れることで見事に説明した(成果72)。これらは植物形態学に数理的手法が日常的に使われる時代を先取りしている。