

領域略称名：植物構造オプト
領域番号：8005

令和5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

「植物の力学的最適化戦略に基づくサステナブル構造システム
の基盤創成」

領域設定期間

平成30年度～令和4年度

令和5年6月

領域代表者 奈良先端科学技術大学院大学・

デジタルグリーンイノベーションセンター・

教授・出村 拓

目 次

研究組織

1 総括班・総括班以外の計画研究	3
2 公募研究	5

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5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	18H05484 植物の力学的最適化戦略に基づく サステナブル構造システムの基盤 創成	平成30年度 ～ 令和4年度	出村 拓	奈良先端科学技術大 学院大学・デジタル グリーンイノベーシ ョンセンター・教授	3
A01 計	18H05485 木質材料の構造力学的最適化によ る環境応答戦略の理解	平成30年度 ～ 令和4年度	杉山 淳司	京都大学・大学院農 学研究科・教授	2
A01 計	18H05486 植物との力学的アナロジーに学ぶ 巨大建築構造システム設計	平成30年度 ～ 令和4年度	川口 健一	東京大学・生産技術 研究所・教授	2
A01 計	18H05487 植物構造システム形成における内 生・外生プログラムによる力学的 最適化	平成30年度 ～ 令和4年度	澤 進一郎	熊本大学・大学院先 端科学研究部・教授	2
A01 計	18H05488 重力情報の変換・出力機構を介し た植物の力学的最適化戦略の統合 的理解	平成30年度 ～ 令和4年度	森田 美代	自然科学研究機構 基礎生物学研究所・ 植物環境応答研究部 門・教授	2
A02 計	18H05489 細胞壁の特殊化から読み解く植物 の力学的最適化戦略	平成30年度 ～ 令和4年度	出村 拓	奈良先端科学技術大 学院大学・デジタル グリーンイノベーシ ョンセンター・教授	3
A02 計	18H05490 周囲環境応答としての植物成長特 性の力学的最適化の柔軟性	平成30年度 ～ 令和4年度	藤原 徹	東京大学・大学院農 学生命科学研究科・ 教授	2
A02 計	18H05491 張力センサーを用いた細胞壁-細 胞膜インターフェイスの構造力学的 研究	平成30年度 ～ 令和4年度	豊田 正嗣	埼玉大学・大学院理 工学研究科・准教授	1
A02 計	18H05492 葉の力学的最適化過程における細 胞平面充填の画像計測数理解析	平成30年度 ～ 令和4年度	桧垣 匠	熊本大学・国際先端 科学技術研究機構・ 教授	1
A03 計	18H05493 顕微技術を駆使した計測と制御に よる細胞構造のしなやかさの高精 度解析	平成30年度 ～ 令和4年度	細川 陽一郎	奈良先端科学技術大 学院大学・先端科学 技術研究科・教授	3
A03 計	18H05494 木質バイオマスの合成・分解プロ セスに学ぶ植物構造ユニットの力 学的最適化戦略	平成30年度 ～ 令和4年度	五十嵐 圭日子	東京大学・大学院農 学生命科学研究科 院・教授	1

A03 計	18H05495 植物体のしなやかさを生み出す非 セルロース性細胞壁成分の構造力 学的・化学的特性	平成 30 年度 ～ 令和 4 年度	小竹 敬久	埼玉大学・大学院理 工学研究科・教授	2
A03 計	18H05496 植物体の姿勢復元力を支配する力 学的最適化システム	平成 30 年度 ～ 令和 4 年度	上田 晴子	甲南大学・理工学部・ 准教授	2
総括班・総括班以外の計画研究 計 13 件（廃止を含む）					

[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	19H05359 タケの形態を範とする軽量・高強度・省部材型の最適円筒構造システム	令和元年度 ～ 令和2年度	島 弘幸	山科大学・大学院総合研究部・教授	1
A01 公	19H05360 湿熱回復現象から紐解く成長応力発生メカニズムの解明	令和元年度 ～ 令和2年度	松尾 美幸	名古屋大学・大学院生命農学研究科・講師	1
A01 公	19H05361 接木修復系における細胞壁修飾制御を介した個体／組織の構造構築の研究	令和元年度 ～ 令和2年度	野田口 理孝	名古屋大学・生物機能開発利用研究センター・准教授	1
A01 公	19H05365 葉の可逆的な構造変化を可能にさせる細胞・組織の力学バランスの解明	令和元年度 ～ 令和2年度	小野田 雄介	京都大学・大学院農学研究科・准教授	1
A01 公	19H05369 樹木の重力応答と生存戦略から学んだ巨大空間構造の最適設計法	令和元年度 ～ 令和2年度	張 景耀	京都大学・大学院工学研究科・准教授	1
A02 公	19H05356 植物の力学的最適化過程のセンシングのためのレーザー描画による機能性パターン形成	令和元年度 ～ 令和2年度	渡辺 明	東北大学・多元物質科学研究所・准教授	1
A02 公	19H05358 物理的圧力が花の形態構造に与える影響の解析	令和元年度 ～ 令和2年度	岩元 明敏	神奈川大学・理学部・教授	1
A02 公	19H05362 軽くて強くてしなやかな花粉エキシンの立体構造の構築機構とその力学的特性	令和元年度 ～ 令和2年度	石黒 澄衛	名古屋大学・大学院生命農学研究科・准教授	1
A02 公	19H05363 トライコーム依存的な植物免疫における力学的特性の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	野元 美佳	名古屋大学・遺伝子実験施設・助教	1
A02 公	19H05364 テンセグリティに調節される植物先端成長細胞の可塑的モノコック構造の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	佐藤 良勝	名古屋大学・WPI-ITbM・特任准教授	1
A02 公	19H05366 MRI を用いた新しい植物微細構造解析法の開発	令和元年度 ～ 令和2年度	中井 隆介	京都大学・こころの未来研究センター・特定講師	1

A03 公	19H05357 テンセグリティ構造体にはたらく細胞骨格メカノネットワークの力学的最適化原理の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	矢島 潤一郎	東京大学・大学院総合文化研究科・准教授	1
A03 公	19H05367 有殻アメーバの被殻建築から学ぶ卵型サステナブル構造システム	令和元年度 ～ 令和2年度	野村 真未	筑波大学・生命環境系・特任助教	1
A03 公	19H05368 細胞壁の(3+1)次元動力学	令和元年度 ～ 令和2年度	谷本 博一	横浜市立大学・理学部・准教授	1
A03 公	19H05371 (廃止) 植物細胞壁由来の高分子多糖用測定電気化学センサーの開発	令和元年度 ～ 令和元年度	菅野 康仁	信州大学・繊維学部・特任助教	1
A03 公	19H05373 イネの倒伏耐性機構から学ぶ植物の力学的最適化戦略	令和元年度 ～ 令和2年度	石川 和也	公益財団法人岩手生物工学研究センター・ゲノム育種研究部・研究員	1
A03 公	19H05372 (廃止) 細胞分化における細胞表層構造の力学的最適化	令和元年度 ～ 令和元年度	小田 祥久	国立遺伝学研究所・遺伝形質研究系・教授	1
A01 公	21H00358 植物の力学的最適化過程のセンシングのためのレーザー描画による機能性パターン形成	令和3年度 ～ 令和4年度	渡辺 明	東北大学・多元物質科学研究所・准教授	1
A01 公	21H00359 有殻アメーバの被殻建築から学ぶ卵型サステナブル構造システム	令和3年度 ～ 令和4年度	野村 真未	山形大学・理学部・助教	1
A01 公	21H00360 根の分岐構造に学ぶ土壌強靱化と新規複合材料の創生	令和3年度 ～ 令和4年度	山口 哲生	東京大学・農学生命・准教授	1
A01 公	21H00362 中空茎植物に潜む構造合理性の原理解明	令和3年度 ～ 令和4年度	島 弘幸	山科大学・大学院総合研究部・教授	1
A01 公	21H00369 引張あて材の力学的特性から学んだ新たな張力空間構造システムの創生	令和3年度 ～ 令和4年度	張 景耀	京都大学・大学院工学研究科・准教授	1
A01 公	21H00371 根圏の応力応答とその3次元ガラス転写	令和3年度 ～ 令和4年度	津守 不二夫	九州大学・工学系研・教授	1
A01 公	21H00373 竹の建築構造への実用化を目的とした、植生地域・物理的特性・力学的特性の関係の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	永井 拓生	滋賀県立大学・環境科学部・講師	1

A01 公	21H00378 イネの倒伏に対する力学的最適化 戦略の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	石川 和也	奈良先端科学技術大学院 大学・先端科学技術研究 科・研究員	1
A01 公	21H00377 根毛の自律的伸長機構にみる構造 システムの研究	令和3年度 ～ 令和4年度	四方 明格	基礎生物学研究所・助教	1
A02 公	21H00363 中空果実と「脳原基ドーム」発生の 比較建築学:引張材・圧縮材の動的 な壁内アセンブリ	令和3年度 ～ 令和4年度	宮田 卓樹	名古屋大学・医学系研・教 授	1
A02 公	21H00364 植物先端成長細胞に見られる可塑 的モノコック構造の力学的最適化 戦略の理解	令和3年度 ～ 令和4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	21H00365 遺伝子と自己組織化にもとづく花 粉エキシンの立体構造の構築機構 とその力学的特性	令和3年度 ～ 令和4年度	石黒 澄衛	名古屋大学・大学院生命 農学研究科・准教授	1
A02 公	21H00366 トライコーム依存的な植物免疫に おける力学的特性の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	野元 美佳	名古屋大学・遺伝子実験 施設・助教	1
A02 公	21H00367 細胞壁の力学的特性に注目したガ ス交換モジュールが構成するシス テム構造の最適化	令和3年度 ～ 令和4年度	水谷 未耶	名古屋大学・トランスフォ ーマティブ生命分子研究 所・研究員	1
A02 公	21H00372 光環境への適応により獲得した省 エネ葉構造による力学的最適化	令和3年度 ～ 令和4年度	後藤 栄治	九州大学・連合農学・助教	1
A02 公	21H00375 物理的圧力が花芽分裂組織に与え る影響の解析と建築構造物への応 用	令和3年度 ～ 令和4年度	岩元 明敏	神奈川大学・理学部・教授	1
A03 公	21H00368 接木修復系における細胞壁修飾制 御を介した個体/組織の構造構築	令和3年度 ～ 令和4年度	野田口 理孝	名古屋大学・生物機能開 発利用研究センター・准 教授	1
A03 公	21H00370 植物の姿勢を最適化する張力応答 のライブイメージングと分子機構 の解析	令和3年度 ～ 令和4年度	本瀬 宏康	岡山大学・自然科学研究 科・准教授	1
公募研究 計 35 件 (廃止を含む)					

[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

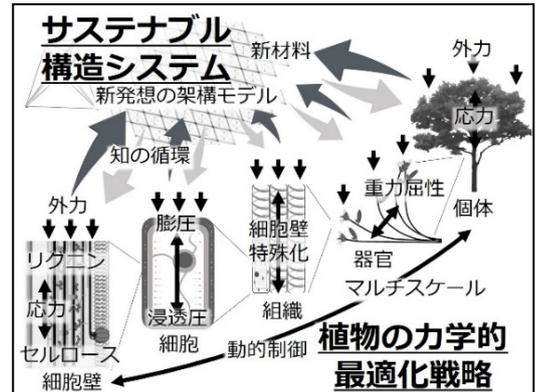
年度	合計	直接経費	間接経費
平成 30 年度	318,760,000 円	245,200,000 円	73,560,000 円
令和元年度	304,070,000 円	233,900,000 円	70,170,000 円
令和 2 年度	303,940,000 円	233,800,000 円	70,140,000 円
令和 3 年度	304,070,000 円	233,900,000 円	70,170,000 円
令和 4 年度	303,810,000 円	233,700,000 円	70,110,000 円
合計	1,534,650,000 円	1,180,500,000 円	354,150,000 円

4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

■本研究領域の研究目的

持続可能（サステナブル）な社会の構築が世界的に希求されている。その実現のためには、省エネ・省資源の構造システムの開発が必須の課題である。近年の植物科学研究の発展によって、植物は重力や栄養などの多様な環境因子に応答して植物独自の構造ユニットである細胞壁を動的に制御し、細胞・組織・器官スケールの形態を可塑的に変化させることで、自律的に力学的最適解を得る機能を備えた優れた構造システムであることが実証されつつある。そこで本研究領域では、植物科学と理工学（とくに建築構造学・空間構造工学）との融合を通して、構造力学的視点から、植物の自律的な力学的最適化戦略を多角的に読み解き、それをモデル化することで、未だ実現されていない、真にサステナブルな構造システムの基盤を創成することを目的とする。



■研究の学術的背景

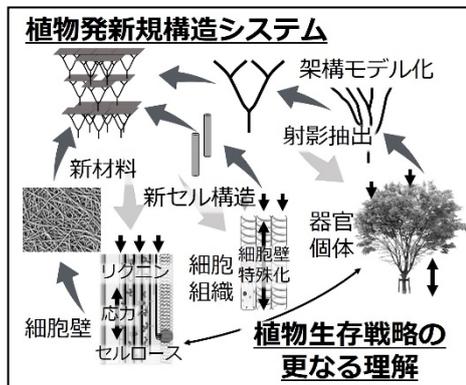
近年、全地球レベルでの環境問題や人口問題の深刻化から、サステナブルな社会の構築が世界的に重要な課題となってきた。その中でも、安全性と機能が保障され、周辺環境と調和したサステナブル生活空間の実現は最重要項目の一つであり、我が国においても、ものづくりや建築設計、まちづくりの現場などで、さまざまな角度からの模索が始まっている。例えば、持続可能な資源である木材をはじめとした植物由来材料の利用拡張に向けて、木材構造の文脈から地震国日本における安心かつ安全な木造住設計が提唱されている（計画班 杉山・五十田）。さらに、計画班 川口は、新しい軽量高剛性の建築構造設計として、立体的な構造システムであるテンセグリティ架構を用いた建築を成し遂げてきた。このように、領域発足時において、日本の風土に根ざしたサステナブル生活空間の実現に向けた、省エネ・省資源の次世代材料や建築構造設計の開発が加速していた。

木材は、生物学的には、樹木の木部細胞が作り出す、木質ポリマーが高度に集積した二次細胞壁によって構成されている。近年、植物細胞壁研究分野は、世界的に重要なブレイクスルーが相次いでいる非常にホットな研究分野である。日本の植物細胞壁研究はその一端を担っており、とくに**新学術領域研究「植物細胞壁の情報処理システム」**（平成24～28年度）（領域代表：西谷和彦 中間/事後評価ともにA+）の成功により、世界を牽引する存在となっている。本領域発足前には、本領域研究代表 出村の一連の研究によって、植物二次代謝産物であるリグニンの二次細胞壁への組込みが、細胞レベルの力学構造を変化させ、さらには個体レベルの**「力学的最適化戦略」**に影響し、陸上植物の巨大化や形態複雑化をもたらした、という全く新しい進化的解釈を与える重要な研究を成し遂げていた。また、計画班 澤による線虫等の外的侵入者との攻防における細胞壁構造の重要性の発見、計画班 藤原による土壤栄養に応じた植物細胞壁の最適構造の成長制御における重要性の発見、計画班 桧垣および計画班 小竹による、細胞壁構造の動的制御による植物形態形成制御の解明、などが相次いでいた。これに加えて、計画班 上田は、アクチン-ミオシン XI 系が、植物器官屈曲のメカノセンサーである可能性を見出し、植物の重力屈性研究の世界的第一人者である計画班 森田は、植物細胞は重力を「細胞骨格のテンセグリティ架構の破綻」として感知しているのではないかと、斬新かつ重要な仮説を打ち立てていた。以上は、**植物は内的・外的環境因子の変動に応答して、独自の構造ユニットである細胞壁を多様化させることで、「力学的最適化」を図っている**ことを強く示唆するものであった。

従来から、植物の体作りは、「ユニット（＝細胞壁・細胞骨格）が積み重なりモジュール（＝細胞・組織）を構成し、それらが高度に組み合わせられて全体システム（＝器官・個体）となる」、「細胞壁は鉄筋コンクリート様である（セルロース＝鉄筋、リグニン＝コンクリート）」等、建築構造物とのアナロジーで語られ解釈されてきた。前段で述べたとおり、さまざまな研究成果が**植物の環境適応・生存戦略としての「動的な力学的最適化」**の重要性を指し示す中で、植物から木材供給源として以上の知恵、すなわち、**自律的な構造システムとしての植物の在り方**を学ぶべきなのではないか、との計画班員の強い意識のもと、新しい角度から真に環境に調和したサステナブル構造システムの創成を目指し、本領域が発足した。

■本領域の全体構想

本領域の達成目標は、「植物が発生や環境応答における形態形成において発揮する力学的な最適化戦略を構造力学的視点から体系的に理解すること」、そして、その理解をもとにして「実建築に適用可能な新たなサステナブル構造システムのモデルを提出すること」にある。この目標達成のために、植物体制と建築との階層的アナロジーを考慮した3つの研究項目、A01「システム」、A02「モジュール」、A03「ユニット」を設定した。また、植物独自の力学的最適化戦略「重力屈性」をモデル研究として取り上げた。



A01「システム」器官～個体スケール：「重力屈性における姿勢制御や発生」「環境応答に伴う植物器官の形態形成」など

A02「モジュール」細胞～組織スケール：「細胞壁の部分的な強化による高い耐水圧機能」「植物細胞の規則正しい配置によって生じる力学的安定性」など

A03「ユニット」サブ細胞スケール：細胞の微細構成要素「細胞壁」、「液胞」、「細胞骨格」、「膜構造」における微小な力学的特性など以上の構造静定性や安定性を力学の観点から解き直しモデル化し、**建築における「システム（建築物全体）」～「モジュール（積層工法におけるブロック）」～「ユニット（建築部品や部材）」**の構造システム

にスケールを超えて投射し、**構造システム 3D モデル（バーチャル、実模型）**として提案することを目指した。

■本領域の革新性・創造性

持続可能な社会に向けた全世界的な取り組みの中で、サステナブル生活空間のためのさまざまな研究活動が活発化している。特に建築設計学では、従来の設計技術では不可能であった、**省部材で安定した構造の達成や新機能の付与**が模索されている。近年、**生体システムに学ぶ新技術開発の流れ（バイオミメティクス）**が加速しており、例えば動物の骨と筋肉の構造に基づいた構造設計などが試みられている。しかしながら、植物に着目した研究例は国内外ともに寡数であり、現状として未開拓な状態にある。本領域はこうした研究領域を、「**サステナブル構造システム学**」として、**世界に先駆けて切り拓く**ものであり、高い革新性と創造性を有する。さらに、本領域では、「植物は自律的に力学的最適解を得る優れた構造システムである」という発想のもと、植物種を超えた生存戦略としての「**力学的最適化戦略**」に着目するが、これは本領域成果の高い生物普遍性を意味している。生物がどのように力を生み、感じ、応答するのかを研究するメカノバイオロジーが生物学の一分野として市民権を得て久しいが、メカノバイオロジーは動物細胞を中心に解析が進んだため、その社会的出口は医工学的な側面が中心であった。本領域は動物と比べて圧倒的な巨大構造の生成と維持、および長寿を可能にしている植物の体制づくりから力学的特徴と生理を学ぶことで、**従来のメカノバイオロジーを補完し、生物学的にも新規の研究分野をもたらす**可能性も高いと考えた。

■研究期間終了後に期待される成果等

本領域の研究期間終了後に期待される最大の成果の一つは、**植物の力学的最適化戦略に基づいた新規の構造システムモデルの提出**である。また、植物細胞壁の可塑性と物性が生み出す構造力学的特徴の知見を、**次世代型材料モデルへと昇華させる**ことも期待される成果の一つである。さらには、**生物の生存戦略、特に内外環境と調和しながら自らを安定的に成長させるための基本動作原理の一つに「力学的最適化」を加えることとなり、生物学の基本原則を書き換える**ことも期待される。領域課題名が端的に示す通り、本領域がその先に見据えているのは**持続可能な社会構築に直接的に貢献しうる新たな科学分野の創成**である。本領域の学術的成果となる新規の建築構造システムモデルは、将来的には社会実装技術へとリレーし、特に日本という国土固有のさまざまな環境因子（地震や台風、四季の温度差など）に調和したサステナブル建築への展開が想定される。また、本領域の研究から得られる知見をもとに、植物の環境応答能のデザインや、植物の高機能化も可能となる。地球環境変動に耐える植物の創出やバイオマスの改良といった点からも、持続可能な低炭素社会の発展や食糧増産に寄与する次世代バイオ基盤技術の確立への貢献が期待される。

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。

(審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

【指摘事項1】植物科学と建築構造学という分野の異なる研究者間での実質的かつ密な連携を、いかに取るかについて、ストラテジーを明確にすることが望まれる。

【対応策と状況】

0) 領域班会議における戦略策定

領域発足直後の平成30年7月に、第1回領域班会議・領域総括班会議を開催し、計画研究班全メンバーが領域内における植物科学と建築構造学・空間構造工学の連携について議論し、異分野連携の具体的な戦略を策定した。また、各計画研究班の具体的な研究計画について討論するとともに、総括班の支援について具体的な計画を検討した。(後述の対応策1)～3))

さらに、分野の垣根を解消するため、建築構造関連研究者らを講師に迎えて「構造物の力学測定法」レクチャーを行い、植物構造の力学測定の方向性を議論した。この中で、本領域研究促進のためには、植物を構造として測定・解析するための新技術の開発が不可欠であるとの班員合意に至り、総括班を中心とした研究班間の協働による新規技術開発を促進することで、研究分野領域融合と領域研究推進を図るという領域運営戦略が策定された。この方針はうまく機能し、領域内の異分野研究分野間の連携が著しく促進され、異分野融合により得られた成果に係る雑誌論文が155件出版された。さらに、2020年12月号として国際誌 Plant Biotechnology 誌で本領域関連技術論文からなる特集号、2021年12月号として国際誌 Plant & Cell Physiology 誌で本領域関連論文からなる特集号を出版した。

対応策1) 植物科学と建築構造学の相互理解のための分科会開催

「植物科学と建築構造学の相互理解」を戦略的に進めるため、領域参画者を対象とする勉強会・研究集会を「分科会」としてスキーム化し、合計204回の大小さまざまな分科会を開催した。なかでも、総括班主催の大型分科会として「植物と建築におけるセンサーとアクチュエーター」、「植物の複雑な構造と動態の解析技術基盤」、「樹木形状の3D計測」を開催した。大型分科会では、領域外から積極的に講師を招くことで、「植物構造オプト」概念の各種研究分野への広報・普及に努めた。

対応策2) 総括班における植物科学と建築構造学の連携支援体制の強化

領域代表によるサイトビジットの実施(詳細は後述)、領域班会議開催、公開シンポジウム開催、若手研究会開催、学生ダブルメンタリング制度、サステナブル構造システム教育研究支援センター(SSSC)の設置(5つの研究支援部門を含む)、といった連携支援を実行した。これらに加えて、植物科学と建築構造学の実質的かつ密な連携の推進のために、両研究分野をつなぐ要となる数理解析プラットフォームを総括班に置いた。とくに、理論物理学で学位(博士)を取得し、その後、植物を材料とした数理生物学分野の研究経験を持つ若手人材(津川暁博士)を特任助教として総括班で雇用することで、植物科学と建築構造学の連携研究課題を総括班主導でアレンジすることが可能となり、領域内で多数の植物科学・建築構造学連携研究を推進した。

対応策3) 領域代表サイトビジットにおける工夫

領域代表によるサイトビジットには可能な限り、建築構造学・空間構造工学分野の班員(研究代表者、研究分担者、研究協力者)も領域代表に同行することとし、両分野連携のための具体的な議論を行った。

【指摘事項2】計画研究の構成メンバーのほとんどが植物科学者、特に草本植物であるシロイヌナズナの研究者に偏っており、建築構造関連の理工系研究者が少ない。このアンバランスを解消するために、研究体制を再考し、公募研究の構成などに反映させることが望まれる。

【対応策と状況】

対応策1) 建築構造関連の理工系研究者の領域研究への参画の推進

建築構造関連の理工系研究者の公募班への参画の推進のために、各関連学会(日本建築学会、日本機械学会、など)の年会での広報活動、関連メーリングリストでの公募情報の配信を行った。その結果、平成30年9月に開催したキックオフシンポジウムには多数の建築構造学関連の研究者の参加があり、多数の

建築構造関連の研究課題の公募班応募があり、審査の結果、**建築構造学や木材物理学を専門とする研究者を代表者とする課題（2件）や構造システム工学や環境設計学を専門とする研究者や一級建築士を研究協力者として有する課題（3件）**が公募班として追加参画することになった。さらに、計画研究班研究協力者として積極的な建築構造関連研究者を迎え入れ、領域全体として理工系研究者の増強を図った。

対応策2) 植物科学やシロイヌナズナ（草本植物）以外の研究者の参画推進

2019年度および2021年度に採択した公募班のべ34件のうち、シロイヌナズナを主要な研究材料とする研究課題は8件のみであり、さらに10件は植物科学とは異なる専門性をもった研究者が研究代表者を務める研究班となっている。具体的には、**応用物性、木質科学、生態・環境、建築構造・材料、高分子・繊維材料、歯科医用工学・再生歯学、生物物理学、多様性生物学、電気化学、材料力学、発生物学**、などを専門分野とする研究代表者であった。また、計画研究班の研究協力者には工学系、化学系、理論物理学系、の研究者も参画しており、領域全体として多様な研究分野の研究者の参画を推進し、狭い範囲での植物科学研究に陥らないよう碎身した。さらに従来シロイヌナズナ研究を行っていた計画研究班にも積極的な新規材料導入を薦め、その結果、ポプラやユーカリ、豆苗（エンドウマメ）といった、よりサイズの大きい建築構造学への展開に適した植物材料の研究を進めることができた。とくに、東京大学において、計画研究班の若手研究者を中心とした**新規に植樹したユーカリを用いた「生きた建築作り」プロジェクト**を展開し、領域全体として解析対象スケールを意識した研究を推進した。

（中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況）

中間評価結果はA（研究領域の設定目的に照らして、期待どおりの進展が認められる）で、以下の所見をいただいた。

- ・植物が多様な環境因子に応答して細胞レベルで構造を力学的に最適化しているという仮説の下、**植物の形態形成プロセスを力学的な観点から解明し、それを建築におけるサステナブル構造システムのモデル構築に展開しようとする独創的かつ意欲的な研究を展開している。**
- ・植物科学分野では**質・量ともに充実した成果**が認められる。
- ・領域代表者のリーダーシップの下、分野間の連携を促進させるための研究集会や勉強会が精力的に実施され、**植物科学分野に力学的視点が入り入れられた融合研究が推進**されていることも評価に値する。
- ・若手育成、国際活動、アウトリーチに関しても、国際的な研究ネットワークを駆使しつつ**領域内外の連携が推進**されるような工夫が成果を挙げており、また、サイエンスコミュニケーターを配置して一般社会へのアウトリーチ活動も精力的に行っている点も高く評価できる。

【指摘事項】植物科学分野の研究成果を建築学分野へ展開する融合研究については一層の進捗が望まれる。今後は、研究領域として目指すゴールに向けて、植物科学と建築構造学の有機的な連携による建築構造学分野の研究展開に期待したい。

【対応策】植物科学分野の研究成果を広く建築学分野の研究者に展開するべく、2020年度から日本建築学会学術講演会のオーガナイズドセッションに「植物構造オプト」を設置した。2020年度はCOVID-19感染拡大の影響で延期となったため、後日、日本建築学会シェル・空間構造セミナー「植物の力学的最適化戦略に基づく構造システムの探索：植物構造オプト」を開催したが、2021年度には正規の日本建築学会学術講演会のオーガナイズドセッションにて植物生理学研究者8名を含む計25題の発表をもとにした議論を行った。この結果、建築分野の参加者から「建築構造や建築部材などへの応用が期待される」「まったく新しい視座の構造設計の可能性が拓けた」との前向きな意見を多く得た。さらに2022年度には発表が計30題に増え、同セッションには、**植物科学とは関連のない建築学会会員の新規参加も増大**した。このセッションでの議論が元となって発展した融合研究も生まれ、これら建築学分野の研究者が本領域の研究協力者として新たに領域に加わることで、両研究分野の有機的な連携が深まった。このオーガナイズドセッションは領域が終了した翌年2023年度も継続して開催予定である。また、「審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応」で記載した植物科学と建築構造学の相互理解のための各種分科会を継続的に開催した。以上、植物科学分野と建築構造学分野が連携した融合研究の展開に注力し、**双方の学術分野における確かな異分野融合領域の萌芽形成を実現**した。

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

領域達成目標は「植物形態形成における力学的な最適化戦略を構造力学的視点から体系的に理解」し、「実建築に適用可能なサステナブル構造システムのモデルを提出」することにあつた。領域全体の統合的成果として、植物の力学的な最適化戦略の重要要素は、①力学的刺激の敏感かつ全身的な感受と応答、②細胞壁の構造力学的特性の異性化による屈性・運動・姿勢復元の実現であることを明らかにした。これらを元に、新たな継ぎ手構造、支保工なしのアーチ・ヴォールト・ドーム構造、植物メリステムからデザインしたオーゼティック構造、湿度に応答して開閉する傘構造、「人-植物の共創による建築空間」の提案など、実建築レベルのサステナブル構造システムモデル提出にも成功し、当初目標の達成が叶った。

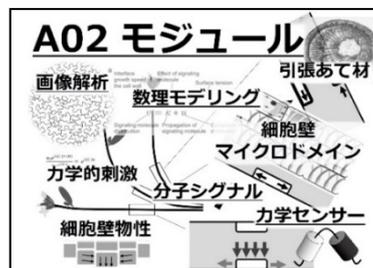
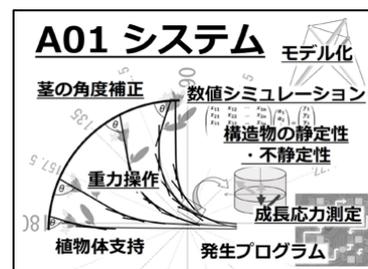
研究項目ごとの領域設定期間内の達成目標と達成状況

研究項目 A01「システム」: 器官～個体スケールでの「重力屈性における姿勢制御や発生」や「環境応答に伴う植物器官の形態形成」のしくみの解明を目標とした。複数研究班の連携により、伝統木造建築物や多種多様な樹木を対象とした木質材料の環境応答を解き明かした。また、領域メンバー間の共同研究によって、植物特有の構造を構造工学的解釈、とくには成長する構造モデルの数値シミュレーションと巨大建築構造設計への適用を進めた。さらに、根と茎について、線虫感染時の根粒形成や茎の発生過程、根の植物体支持機能を構造力学的に理解した。加えて、茎の重力感受細胞における平衡石(アミロプラスト)の移動の際におこる重力センシングのしくみを明らかにするとともに、茎の重力屈性現象を構造力学的に捉えることに成功した。

以上の成果から、これまで解析できなかった器官～個体の構造特性や運動特性の構造力学的解析が可能になり新たな研究基盤が生みだされ、当初の目標を十分に達成した。

研究項目 A02「モジュール」: 細胞～組織スケールで、「水輸送細胞における細胞壁の部分的な強化」や「植物細胞の規則正しい配置によって生じる力学的安定性」のしくみの解明を目標とした。第一に、木質細胞の細胞壁の部分的な成分特性の変化が及ぼす力学特性の挙動をシングルセルレベルで明らかにした。また、植物間共生における巻き付きや根の屈性といった植物の成長運動の環境シグナル依存的制御機構を明らかにし、外部機械刺激によって植物成長を増強できることを実証した。また、力学的刺激が生み出す張力・カルシウムシグナルを高感度かつ広視野で可視化するイメージング技術を開発し、これを用いて食虫植物の捕食運動や食害応答時の力学的刺激受容・フィードバック動態を細胞～組織レベルで捉えることに成功した。加えて、植物形態を高効率・高精度に処理する画像解析技術、数理モデリング技術や力学測定などの先端イメージング技術を組み合わせ、器官～細胞形態形成のバイオメカニクス解明に繋げた。以上から、植物の多彩な力学的現象を構造力学的視点で記述し直すことに成功した。とくにイメージング・バイオメカニクス解析に関しては大きな成功を収め、当初目標を達成しつつ、予想以上の成果があつた。

研究項目 A03「ユニット」: サブ細胞スケールにおける微小な力学的特性を、構造の静定性や安定性の観点から解き直し、モデル化することを目標とした。原子間力顕微鏡(AFM)による局所応力検出技術とフェムト秒レーザー(FSL)による細胞の局所操作技術とを駆使し、細胞の構造由来の材料特性を μm の精度で解析する技術基盤を確立し、植物細胞の弾性についての理論検証と数値シミュレーション～モデル化に成功した。また、植物や微生物が細胞壁合成・分解に用いる酵素群について、セルロースの生合成と分解のナノスケール可視化に成功し、接ぎ木の際の組織接着におけるグルカナーゼの重要性を明らかにした。さらに機械刺激である細胞のひずみが引金となって植物の姿勢復元力が発動されること、細胞壁糖鎖構造が秩序だった組織レベルの形態形成に不可欠であることを示した。以上の成果から、細胞

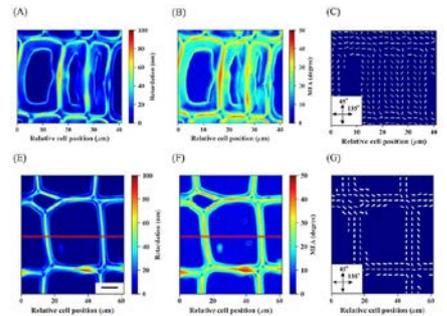


壁成分等のサブ細胞スケールの特性と器官～個体スケールの構造特性の関係が明らかとなり、当初の目標を達成できた。

(2) 本研究領域により得られた成果

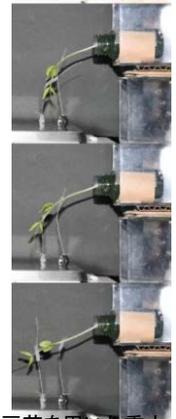
研究項目 A01 「システム」

■ 計画班 杉山班：カバノキ外樹皮コルク組織の構造物性を解析し、細胞壁中の水が応力伝達機能の一部を担っていることを明らかにした (Cellulose 2021)。また、仮道管の組織構造の年輪内変動について詳しく調べるために、木材の断面を光学顕微鏡で観察し、レーザードেশジョンという手法を用いてマイクロフィブリルの傾角を測定し、さらに、画像処理と1細胞認識技術(生成型AI)を組み合わせることで各細胞の形態とマイクロフィブリル傾角を同時に測定する方法を確立した (Holzforschung 2022)。また、伝統的な屋根の部材である隅木が曲がりやすい性質に着目し、柂目、板目、追柂目取りの木材の曲げ試験を比較検討した。この際に、変形途中の木材組織の動画を撮影し、1細胞認識技術を使用して、全細胞の変形挙動を解析し、針葉樹特有の組織構造と物性に関する考察を行った (PloS ONE 2022)。(松尾班・口班との共同研究)

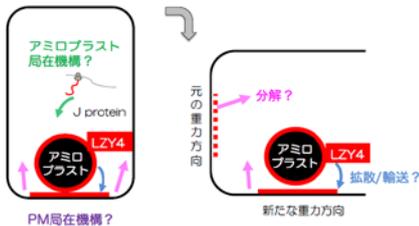


仮道管横断面のマイクロフィブリル傾角の同時測定(杉山班)

■ 計画班 川口班：植物が成長時および屈曲時に実際に発揮する力を測定するシステム(建築学会 2019)を開発し、実測データをもとに成長する構造モデルの数値シミュレーションと巨大建築構造設計への適用についての検討を行った(建築学会 2020)。また、藤原班との共同研究として、イネ根の栄養屈性の観察データに基づいて、植物成長アルゴリズム Parametric L-systems に栄養屈性アルゴリズムを実装し、その妥当性を示すことに成功した。さらに、樹木のもつ癒合と呑み込みの性質を利用して、異種工業材料と樹木木質の一体化実験を行い、将来の新規建築部材の開発に繋ぐための基礎情報を得た(建築学会 2022)。その他、領域メンバーとの共同研究として、植物特性の構造工学的解釈に貢献した(建築学会 2022, Sci Rep 2022) (出村班、細川班、渡辺班、野田口班との共同研究)。



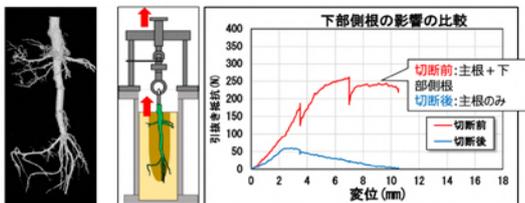
幼苗を用いた重力屈性計測システム(川口班)



重力感受に機能する LZY タンパク質の移動モデル(森田班)

■ 計画班 森田班：垂直ステージ顕微鏡を用いた主根における生細胞イメージングによって、重力屈性シグナリングに関わると予想される LZY タンパク質がアミロプラスト周縁部とアミロプラスト近傍の細胞膜に局在し、重力刺激に応答して細胞膜上を移動することを見出した。また、重力情報の出力としての側枝の伸長角度補正 (Anti-gravitropic offset) の実態を世界に先駆けて明らかにした (Plants 2020)。重力感受

細胞内でアミロプラストの位置変化をオーキシン輸送制御へと繋ぐ重力シグナリングにおいて機能する LZY タンパク質がアミロプラストから近傍の細胞膜に移動する可能性が高いことを示し、LZY が位置情報即ち重力方向を伝達する情報分子であることを提唱した (Nature Comm 2020, Plant Physiol 2021, New Phytol 2022)。(檜垣班、豊田班との共同研究)



X線CTスキャン+引張り試験による側根構造の解析(澤班)

■ 計画班 澤班：茎の表皮に亀裂が発生する *clv3 det3* 変異体を用いた解析によって、茎の形態形成において、表皮のタガとしての機能が、構造の力学的最適化において中心的な役割を果たしていることを示唆した (Front Plant Sci 2020)。さらに、この役割を担う遺伝子として新たに転写因子 IDD9 を同定した (Development 2023)。さらに、重力を含む機械刺激による根系形成について、X線CTス

キャンを用いて根の伸長に伴う地盤の動きをモニタリングできるシステムを開発した他、根の土壌への侵入における力学的パラメーターを簡潔な式にまとめることに成功した (Sci Rep 2023) (出村班との共同研究)。

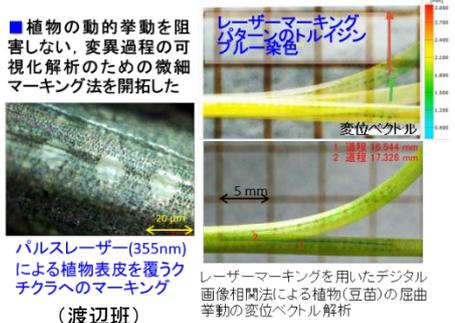
■ 公募班 松尾班：湿熱回復現象の解析から、コナラの引張あて材の収縮には有機溶媒で置換される非結晶性の水分が重要であることを示した (J Mater Sci 2019)。

■ 公募班 小野田班：マルチスペクトルレーザー同軸変位計を用いた μm 解像度の葉の形状変化測定システムを構築するとともに、葉の相対含水率低下に伴う曲げ



立木の成長応力計測(松尾班)

剛性の低下について調査したところ、曲げ剛性の低下には断面二次モーメントの低下とヤング率の低下の両方が関連することを明らかにした (New Phytol 2019)。



■公募班 渡辺班：植物表面へのレーザーマーキング技術を開発し、エンドウマメ幼植物体の重力屈性動態を解析した (Front Plant Sci 2021)。さらに植物細胞の水の状態をリアルタイムで解析できるマイクロ波帯アンテナ型センサーの開発を進めた (建築学会 2021)。

(川口班、出村班・檜垣班との共同研究)

■公募班 野村班：有殻アメーバ・ポーリネラの卵形被殻構造の構築過程の経時的観察法を開発した。これを用いて被殻の50枚の鱗片の挙動を4Dイメージングで正確に捉えることに成功した。

■公募班 島班：成長応力が引き起こす表面破断に起因するマスク

メロン表皮の網目模様について、破壊力学の視点から解析し、果皮断片の面積の確率分布がメロン個体の種類や大きさによらない普遍曲線に従うことを初めて明らかにした (J Phys Soc Jpn 2022)

■公募班 張班：3D スキャナで計測した小型植物の形態データから有限要素法を用いた応力分布、LiDARを用いた樹木の形状の点群データの取得 (建築学会 2022)、引張あて材の内部応力と樹形の力学的関係の解明、を進めた。

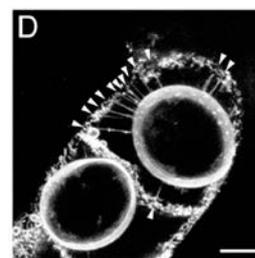
■公募班 津守班：植物の根の構造をガラス構造内に固定する手法開発を進め、透明度を向上させることに成功した (J Photopolymer Sci Technol 2022)。

■公募班 永井班：曲げを受ける丸竹稈の繊維直交方向応力を測定したところ、その実測値は節の拘束効果が小さい場合において、Brazier効果の理論定式化および有限要素解析の結果とよい整合を示すことを見出した (構造工学論文集 2023)。

■公募班 四方班：根毛細胞壁多糖の可視化の結果、根毛が伸長方向以外に上下・左右軸をもつことで機械的な強度を生みだしている可能性を見出した (小竹班との共同研究)。

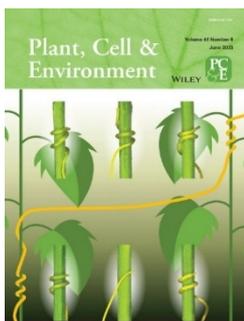
研究項目 A02「モジュール」

■計画班 出村班：フェムト秒レーザー (FSL) を用いることで、細胞壁と細胞膜をつなぐ構造体ヘクチアンストランドが cell wall integrity シグナルを担う可能性を示した (Plants 2020) (細川班との共同研究)。また、道管二次細胞壁のマイクロドメイン化過程では、セルロース→キシラン→リグニンという従来の順次沈着モデルでは説明できないことを新たに示した (Plant Cell 2018)。重力屈性に関しては、重力屈性における力学的特徴要素の定量的な抽出法を確立し (Plant Biotechnol



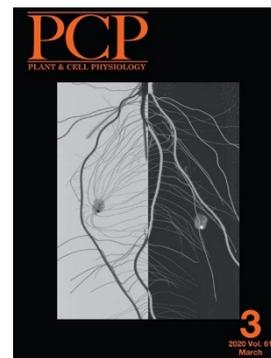
細胞壁と細胞膜を繋ぐヘクチアンストランドの可視化(出村班)

2020) (森田班との共同研究)、これをもとに細胞壁改変が重力屈性の動態に大きく影響することを示した。加えて、FEM等を用いて樹形を力学的観点で調べる手法を開発した (Sci Rep 2022)。また、マメ科植物の葉枕がもつ特徴的な細胞壁構造 (pluvinar slit) が反復的かつ可逆的な植物器官の力学的運動に関わることを見出した (Plant Physiol 2023)。器官新生時の力学的最適化に関しては、アメリカネナシカズラの *in vitro* 吸器誘導系を確立し、これを用いて、吸器の維管束新生制御に関わる細胞壁因子を見出すとともに (Front Plant Sci 2020)、アメリカネナシカズラの旋回運動と寄生における巻き付き運動は異なる環境シグナルによって制御されていることを明らかにした (Plant Cell Environ 2023) (渡辺班との共同研究)。



アメリカネナシカズラの旋回運動と巻き付き運動(出村班)

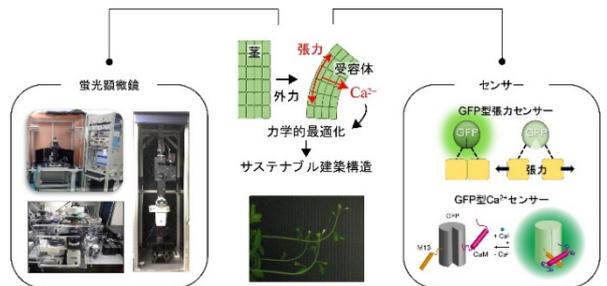
■計画班 藤原班：根の栄養・水分・重力屈性メカニズムの解析から、ごく小さい (0.2%程度) アンモニアの濃度差が栄養屈性を引き起こすこと、水分屈性が栄養屈性より優先することを明らかにし (Plant Cell Physiol 2020)、さらに、栄養屈性においてリン酸が活性化因子および脱感作因子として働くことを示した (Plants 2022)。また、幼ポプラ植物体に一日5分間の振動刺激を与えることで、根の太さや葉面積が増加することを示し、植物への機械刺激が植物の成長を増強することを実証し (Plant Biotechnol 2020) (出村班との共同研究)、圃場実験に発展させた。加えて、根の力学特性の測定法を確立し、細胞壁成分の分析や成長解析と合わせることで、細胞壁成分であるカロースの合成阻害が力学シグナル伝達物質カルシウムの欠乏に対する感受性を高めることを明



アンモニアによる栄養屈性 (藤原班)

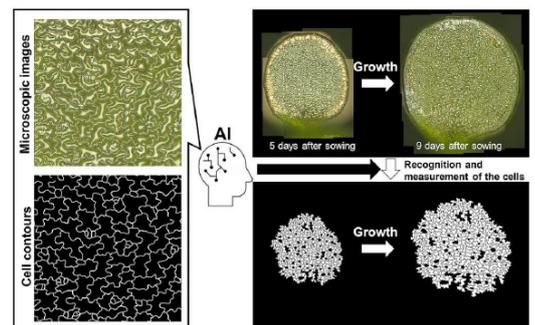
らかにした (Plant Physiol 2020) (澤班との共同研究)。

■計画班 豊田班：浜松フォトニクス社等と協力して、多波長・広視野・高感度蛍光顕微鏡 (2 波長の蛍光を 7 cm x 7 cm の視野で高速 (40 枚/秒) 撮影) を開発した (Science 2018)。さらに、光ピンセット (赤外レーザー) を用いたオルガネラの遠隔操作技術を開発し、植物が重力に応答する瞬間を捉えることに成功した (森田班との共同研究)。また、広視野・高感度蛍光イメージングシステムを用いて、オジギソウの素早い運動を引き起こす Ca^{2+} シグナルを可視化し、 Ca^{2+} シグナルと電気信号の高速な伝達によって、ハエトリソウは昆虫の攻撃から身を守っていることを解き明かした (Nature Commun 2022)。さらに、ハエトリソウの力学センサーである感覚毛の機械刺激感知の動態を多光子高速共焦点レーザー顕微鏡、ハイスピードカメラ、X 線 CT 画像で観察し、ハエトリソウのアクチュエータ作動の機構の解析を進めた (出村班との共同研究)。



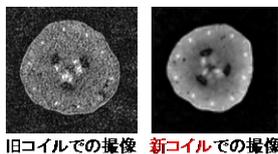
多波長・広視野・高感度蛍光顕微鏡とセンサーの開発 (豊田班)

■計画班 檜垣班：子葉表皮組織と水浸レンズを用いた連続光学切片像を四次元観察することによって、子葉表皮細胞の変形を定量的に評価する画像取得解析システムを開発した (Higaki and Mizuno 2020)。また、金属顕微鏡と AI (深層学習) を用いたシロイヌナズナ子葉表皮細胞の定量的な形態変化評価技術を開発した (Front Plant Sci 2021) (渡辺班との共同研究)。さらに、細胞壁の湾曲構造の木造建築における継ぎ手構造への応用 (川口班との共同研究)、支保工なしのアーチ・ヴォールト・ドーム構造の設計 (岩元班と共同研究)、といった新しい提案につなげた。また、視体積交差法に基づいて植物形態を立体再構築する画像取得解析フレームワークを開発した (Plant Cell Physiol 2021) (森田班・上田班との共同研究)。



金属顕微鏡と AI を用いた子葉表皮細胞の定量的解析 (檜垣班)

■公募班 中井班：小ボア径 MRI 信号受信コイルを利用して MRI の撮像環境を最適化し、小型植物の微細構造と重力屈性を非侵襲的に画像化することに成功した (磁気共鳴医学会誌 2019) (出村班との共同研究)。



■公募班 宮田班：発生早期マウス頭部の頭皮の弾性・収縮性が内に向けて脳原基を押し込むこと発見するとともに (Dev Dyn 2022)、頭皮収縮に対する外科的・薬理学的操作を施すと脳室圧が大きく下がることを見出した。

■公募班 佐藤班：植物の花粉管細胞などの先端成長細胞の力学的可塑性の理解に向けて、植物細胞に局所的な機械的刺激を与えることができるマイクロ流体デバイスを作製した。また、可視光の広い範囲に吸収を持つ長吸収 DNA マーカーとして、N-アリアル-PC 誘導体を開発した (Nat Commun 2021)。

■公募班 石黒班：植物花粉の軽量・高強度のドーム状の外殻構造エキシンの構築に、多糖モジュールの配置が重要であることを示した (J Biotechnol 2019)。

■公募班 野元班：葉の表面上に存在する毛状突起 (トライコーム) の力学的特性 (抗力) をガラスキャピラリー等への荷重負荷により測定する実験系の開発を進め、トライコームへの機械刺激によって生じる細胞内 Ca^{2+} ウェーブの可視化に成功した (Nat Commun 2022) (豊田班との共同研究)。

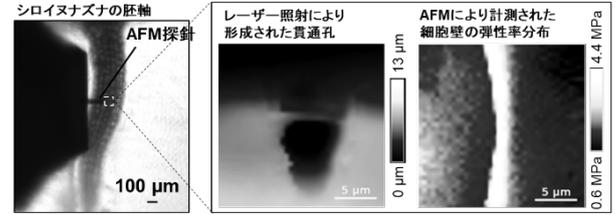
■公募班 水谷班：気孔開閉条件での応答と開口度、AFM をによる弾性率、HPLC による細胞壁成分の測定を行い、細胞壁成分の違いにより特に孔辺細胞のつなぎ目付近で弾性率が上がると、気孔が開閉条件で応答はしても、適切な開口度を保てないということを見出した (出村班との共同研究)。

■公募班 後藤班：植物葉の X 線 CT スキャン画像から柵状組織細胞の 3D モデルと模型を作成し、受光量を精査したところ、逆円錐形の柵状細胞がより効率的に光を受ける構造であることが見出された。

■公募班 岩元班：花芽分裂組織では物理的圧力によって剛性 (表皮細胞の張力) が不均一化することによって形態変化が生じていることを示唆した。これにヒントを得て、オーゼティックを応用して不均一な剛性分布を持つ 2.4m x 2.4m の二次元膜構造物 (金属板構造物) を作製した (22 頁「アウトリーチ」参照)。

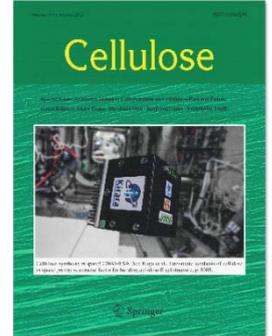
研究項目 A03 「ユニット」

■ **計画班 細川班**：フォースマッピング AFM 観察とフェムト秒レーザー (FSL) 照射を組み合わせた植物生細胞の力学特性計測システムを開発し(出村班との共同研究)、タマネギ鱗茎とシロイヌナズナ胚軸の表皮細胞を対象として細胞壁のフォースカーブを測定することで、FSL 照射によって細胞の弾性率が 10 MPa から 5 MPa まで低下することを示した。このデータをもとに植物細胞の弾性についての理論検証と数値シミュレーションを行い、細胞の弾性が主に細胞壁の張力に由来することを示すとともに、AFM 計測により得られる外力に対する細胞の力学特性の解析に、従来法(ヘルツの接触理論)とは異なる、膨圧と細胞壁のたわみを考慮した解析理論(シェル理論)を取り入れることで他の方法で推定が難しかった細胞壁の弾性率と膨圧を導くことができた (Sci Rep 2022) (出村班との共同研究)。また、FSL による植物細胞操作技術を開発した (Sci Rep, 2019, APL Photonics 2020) (出村班との共同研究)。

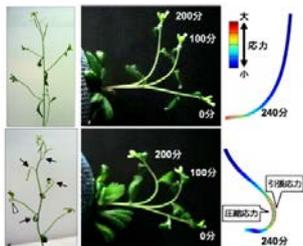


植物生細胞の力学特性計測システム(細川班)

■ **計画班 五十嵐班**：安定型セロデキストリンホスホリラーゼ酵素を作出し、これを用いた宇宙空間でのセルロース合成実験を有人宇宙システム株式会社と共同で実施した。その結果、世界で初めて宇宙空間におけるセルロース合成に成功した (Cellulose 2020)。また、木材腐朽菌のキシラナーゼは、アセチル基修飾が導入されたセルロース/キシランを (J Appl Glycosci 2020)、モモエキスパンシンは酢酸イオンなどの低分子酸が存在する環境下では修飾の無いセルロース/キシランを良好に切断することを明らかにした。さらに、木材腐朽菌由来の溶解性多糖モノオキシゲナーゼによるセルラーゼ活性の促進メカニズムを、生化学的解析、高速原子間力顕微鏡による生物物理学的解析、および分子動力的シミュレーションによる計算科学的解析によって明らかにし、酸化されたセルロース鎖周辺で結晶性セルロースの非晶化が起こることが、分解促進の機構であることを明らかにした (Science Adv 2023)。



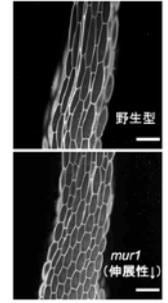
世界初宇宙空間におけるセルロース合成 (五十嵐班)



ミオシン XI 変異による姿勢復元の異常(上田班)

■ **計画班 上田班**：姿勢復元力の解析法を開発するとともに (Plant Cell Physiol 2019)、振動試験や圧縮試験によって姿勢復元能力と花茎剛性の関係性を明らかにした (Plant Biotechnol 2020) (出村班との共同研究)。さらに、重力屈性の力学的特性を明らかにするため、エンドウ実生の重力屈性時に発生する曲げモーメントを調査した (Plant Biotechnol 2020) (川口班との共同研究)。

■ **計画班 小竹班**：独自に開発した AG 糖鎖分解誘導系を用いて、AGP 糖鎖が秩序だった組織構造の形成(植物の力学特性)に不可欠であることを明らかにした (J Exp Bot 2020)。また、AGP



細胞壁の伸展性変化と細胞形態変化 (小竹班)

の機能には長いβ-1,6-ガラクトサン側鎖が重要であり、AGP がセルロース合成を介して細胞壁物性に寄与する可能性を示した (Front Plant Sci 2022)。さらに、植物細胞間接着に必須のペクチン成分に関して、RG-I の主鎖の合成酵素 RRT を世界に先駆けて発見した (Nat Plants 2018)。加えて、細胞壁成分変異体を用いた過重力環境下での植物成長解析から、「植物は省部材(細胞壁成分)で最大の成長を引き出すように最適化している」可能性を新たに見出した。

■ **公募班 矢島班**：細胞骨格ネットワークの力学特性をピコ N スケールで定量するため、FRET 張力バイオセンサーの開発を進め、各種センサータンパク質の作出と光ピンセットと 1 分子蛍光イメージングユニットを用いた計測系の確立に成功した (FEBS Lett 2019)。

■ **公募班 野田口班**：植物茎の接木修復過程でのジョイント部の力学的特性(接着力)を評価するための *in vitro* grafting (IVG) 法を確立した。また、細胞壁成分修飾酵素(グルカナーゼ)が接木修復に関わることを世界に先駆けて明らかにした (Science 2020)。さらに、接木研究に用いるベンサミアナタバコのゲノムを解読した (Plant Cell Physiol 2023)。

■ **公募班 本瀬班**：ゼニゴケの根粒成長について、植物を垂直プレート上で培養する新しい培養法を開発し、根粒が土中で水や養分を吸着するためには、安定した方向性のある成長が重要であることを見出した (Commun Integr Biol 2022)。

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5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。

【雑誌論文】 領域全体:論文総合計 **689本** (査読あり642本、国際論文602本) うち**融合研究論文155本** インパクトファクター(IF)>8.0 : **138本** (以下に一部抜粋)、IF>5.0 : **249本** / ジャーナル種類: **172種** [Nature 1] [Nature Plants 9] [Nature Commun 17] [Science 4] [Science Advances 9] [Proc Natl Acad Sci USA 10] [Energy Storage Materials 1] [Nucleic Acids Research 1] [ACS Nano 1] [Biosensors Bioelectronics 2] [New Phytologist 13] [Physical Review Letters 2] [Current Biology 11] [Developmental Cell 2] [Global Change Biology 1] [Plant Cell 9] [PLoS Biol 1] (IFは2023年6月現在の値)

【研究項目 A01】「システム」

■計画班 杉山班 (計31本)

1. Kita Y, Awano T, Yoshinaga A, *Sugiyama J (2022) Intra-annual fluctuation in morphology and microfibril angle of tracheids revealed by novel microscopy-based imaging. *PLoS ONE* 17: e0277616 (査読有)
2. Kiyoto S, *Sugiyama J (2021) Histochemical structure and tensile properties of birch cork cell walls. *Cellulose* 29: 2817-2827 (査読有)
3. Chen S, Awano T, Yoshinaga A, *Sugiyama J (2022) Flexural behavior of wood in the transverse direction investigated using novel computer vision and machine learning approach. *Holzforschung* 76: 875-885 (査読有)
4. Hwang S-W, Kobayashi K, *Sugiyama J (2020) Detection and visualization of encoded local features as anatomical predictors in cross-sectional images of Lauraceae. *J Wood Sci* 66: 16 (査読有)
5. *Kobayashi K, Kegasa T, Hwang S-W, *Sugiyama J (2019) Anatomical features of Fagaceae wood statistically extracted by computer vision approaches: Some relationships with evolution. *PLoS ONE* 14: 8 (査読有)
6. *Kobayashi K, Hwang S-W, *Sugiyama J (2019) Non-destructive method for wood identification using conventional X-ray computed tomography data. *J Cult Herit* 38: 88-93 (査読有)

■計画班 川口班 (計30本)

1. *川口健一, 中楚洋介, 張天昊, 出村拓 (2022) 植物の力学的最適化戦略に基づく構造システムの探索の基礎的考察 2 : 日本建築学会大会学術講演梗概集 (構造 I) : 757-760 (査読有)
2. *Nakaso Y, Arimoto S, Kawaguchi K, Muto T, Ueda H (2020) Mechanical measurement of gravitropic bending force in pea sprouts. *Plant Biotechnol* 37, 475-480 (査読有)
3. *川口健一, *出村拓 (2020) なぜ今、植物学と建築学が協働するのか? *建築雑誌* 135: 6
4. 有本清香, *川口健一, 中楚洋介, 出村拓 (2019) 植物の重力屈性挙動の観察と力学的特性に関する基礎的考察 その1 : 豆苗の重力屈性挙動の観察と測定. *日本建築学会大会学術講演梗概集 (構造 I)* : 969-970 (査読有)

■計画班 森田班 (計19本)

1. Furutani M, *Morita MT (2021) LAZY1-LIKE-mediated gravity signaling pathway in root gravitropic set-point angle control. *Plant Physiol* 187: 1087-1095 (査読有)
2. Kawamoto N, Kanbe Y, Nakamura M, Mori A, *Morita MT (2020) Gravity-sensing tissues for gravitropism are required for “anti-gravitropic” phenotypes of *lzy* multiple mutants in *Arabidopsis*. *Plants* 9: 615 (査読有)
3. Furutani M, Hirano Y, Nishimura T, Nakamura M, Taniguchi M, Suzuki K, Oshida R, Kondo C, Sun S, Kato K, Fukao Y, Hakoshima T, *Morita MT (2020) Polar recruitment of RLD by LAZY1-like protein during gravity signaling in root branch angle control. *Nat Commun.* 11: 76 (査読有)
4. Nakamura M, Nishimura T, *Morita MT (2019) Bridging the gap between amyloplasts and directional auxin transport in plant gravitropism. *Curr Opin Plant Biol* 52: 54-60 (査読有)

■計画班 澤班 (計94本)

1. Asaoka M, Sakamoto S, Gunji S, Mitsuda M, Tsukaya H, Sawa S, Hamant O, *Ferjani A (2023) Contribution of vasculature to stem integrity in *Arabidopsis thaliana*. *Development* 150: dev201156 (査読有)
2. Nakagami S, Notaguchi M, Kondo T, Okamoto S, Ida T, Sato Y, Higashiyama T, Tsai AY-L, Ishida T, *Sawa S (2023) Root-knot nematode modulates plant CLE3-CLV1 signaling as a long-distance signal for successful infection. *Science Adv* 9: eadf4803 (査読有)
3. Gunji S, Oda Y, Takigawa-Imamura H, Tsukaya H, *Ferjani A (2020) Excess pyrophosphate restrains pavement cell morphogenesis and alters organ flatness in *Arabidopsis thaliana*. *Front Plant Sci* 11: 31 (査読有)
4. Hirakawa Y, *Sawa S (2019) Diverse functions of plant peptide hormones in local signaling and development. *Curr Opin Plant Biol* 51: 81-87 (査読有)
5. Hirakawa Y, Uchida N, Yamaguchi YL, Tabata R, Ishida S, Ishizaki K, Nishihama R, Kohchi T, *Sawa S, *Bowman JL (2019) Control of haploid organ size by CLE peptide signaling in *Marchantia polymorpha*. *PLoS Genet* 15: e1007997 (査読有)



6. Furumizu C, Hirakawa Y, Bowman JL, *Sawa S (2018) 3D body evolution: adding a new dimension to colonize the land. *Curr Biol* 28: R838-840 (査読有)
- 前期・後期公募班 島班 (計 13 本)
1. Umeno Y, Sato M, Sato M, *Shima H (2019) Buckling-induced band-gap modulation in zigzag carbon nanotubes. *Physical Rev B* 100: 155116 (査読有)
- 前期公募班 松尾班 (計 2 本)
1. Chen S, Matsuo-Ueda M, Yoshida M, *Yamamoto H (2019) Changes in vibrational properties of compression wood in conifer due to hygrothermal treatment and their relationship with hygrothermal recovery strain. *J Mater Sci* 54: 3069-3081 (査読有)
- 前期公募班 小野田班 (計 9 本)
1. Kattge J et al. (Onoda Y 729 人中 481 人目) (2020) TRY plant trait database-enhanced coverage and open access. *Global Change Biol* 26: 119-188 (査読有)
- 公募班 津守班 (計 2 本)
1. Koga T, *Tsumori F (2022) Fabrication of glass microchannels using plant roots and nematodes. *J Photopolymer Sci Technol* 35: 219-223 (査読有)
- 後期公募班 永井班 (計 11 本)
1. *Nagai T (2023) Preliminary study on relationship between culm morphology and mechanical characteristics of Japanese bamboo. *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2023 in press* (査読有)
- 前期・後期公募班 野田口班 (計 22 本)(後期は A03 班に移動)
1. *Notaguchi M, Kurotani K, Sato Y, Tabata R, Kawakatsu Y, Okayasu K, Sawai Y, Okada R, Asahina M, Ichihashi Y, Shirasu K, Suzuki T, Niwa M, Higashiyama T (2020) Cell-cell adhesion in plant grafting is facilitated by β -1, 4-glucanases. *Science* 369: 698-702 (査読有)
- 前期・後期公募班 張班 (計 19 本)
1. Su Y, Ohsaki M, Wu Y, *Zhang JY (2019) A numerical method for form finding and shape optimization of reciprocal structures. *Eng Struct* 198: 109510 (査読有)
- 後期公募班 四方班 (計 1 本)
1. *Shikata H, *Denninger P (2022) Plant optogenetics: Applications and perspectives. *Curr Opin Plant Biol* 68: 102256 (査読有)
- [研究項目 A02]「モジュール」**
- 計画班 出村班 (計 111 本)
1. Yokoyama T, Watanabe A, Asaoka M, *Nishitani K (2023) Germinating seedlings and mature shoots of *Cuscuta campestris* respond differently to light stimuli during parasitism but not during circumnutation. *Plant Cell Environ* 46: 1774-1784 (査読有)
2. Takahara M, Tsugawa S, Sakamoto S, Demura T, *Nakata MT (2023) Pulvinar Slits: Cellulose-deficient and De-Methyl-Esterified Homogalacturonan-Rich Structures in a Legume Motor Cell. *Plant Physiol* 192: 857-870 (査読有)
3. *Tsugawa S, Teratsuji K, Okura F, Noshita K, Tateno M, Zhang J, Demura T (2022) Exploring the mechanical and morphological rationality of tree branch structure based on 3D point cloud analysis and the finite element method. *Sci Rep* 12: 4054 (査読有)
4. Yoneda A, Ohtani M, Katagiri D, Hosokawa Y, *Demura T (2020) Hechtian strands transmit cell wall integrity signals in plant cells. *Plants* 9: 604 (査読有)
5. Kaga Y, Yokoyama R, Sano R, Ohtani M, Demura T, Kuroha T, Shinohara N, *Nishitani K (2020) Interspecific signaling between the parasitic plant and the host plants regulate xylem vessel cell differentiation in haustoria of *Cuscuta campestris*. *Front Plant Sci* 22: 193 (査読有)
6. Ohtani M, *Demura T (2019) The quest for transcriptional hubs of lignin biosynthesis: beyond the NAC-MYB-gene regulatory network model. *Curr Opin Biotechnol* 56: 82-87 (査読有)
7. Takenaka Y, Watanabe Y, Schuetz M, Unda F, Hill Jr JL, Phookaew P, Yoneda A, Mansfield SD, Samuels L, *Ohtani M, *Demura T (2018) Patterned deposition of xylan and lignin is independent from that of the secondary wall cellulose of Arabidopsis xylem vessels. *Plant Cell* 30: 2663-2676 (査読有)
8. *Kuroha T, et al. (Nishitani K 27 人中 23 人目) (2018) An ethylene-gibberellin signaling underlies adaptation of rice to periodic flooding. *Science* 361: 181-186 (査読有)
- 計画班 藤原班 (計 35 本)
1. Yamazaki K, *Fujiwara T (2022) The Effect of Phosphate on the Activity and Sensitivity of Nutritropism toward Ammonium in Rice Roots. *Plants* 11, 733 (査読有)
2. Beier MP, Tsugawa S, Demura T, *Fujiwara T (2020) Root shape adaptation to mechanical stress derived from unidirectional vibrations in *Populus nigra*. *Plant Biotechnol* 37: 423-428 (査読有)
3. Shikanai Y, Yoshida R, Hirano T, Enomoto Y, Li B, Asada M, Yamagami M, Yamaguchi K, Shigenobu S, Tabata R, Sawa S, Okada H, Ohya Y, Kamiya T, *Fujiwara T (2020) Callose synthesis suppresses cell death induced by low-calcium conditions in leaves. *Plant Physiol* 182: 2199-2212 (査読有)
4. Yamazaki K, Ohmori Y, *Fujiwara T (2020) A Positive Tropism of Rice Roots toward a Nutrient Source. *Plant Cell Physiol* 61: 546-553 (査読有) (表紙に選出)
5. Fukuda M, Nishida S, Kakei Y, Shimada Y, *Fujiwara T (2019) Genome-wide analysis of long intergenic noncoding RNAs responding to low-nutrient conditions in Arabidopsis thaliana - possible involvement of trans-

- acting siRNA3 in response to low nitrogen. *Plant Cell Physiol* 60: 1961-1973 (査読有)
- Sakamoto T, Tsujimoto-Inui Y, Sotta N, Hirakawa T, Matsunaga TM, Fukao Y, Matsunaga S, *Fujiwara T (2018) Proteasomal degradation of BRAHMA promotes Boron tolerance in Arabidopsis. *Nat Commun* 9: 5285 (査読有)
- 計画班 豊田班 (計 38 本)
- Hagihara T, Mano H, Miura T, Hasebe M, *Toyota M (2022) Calcium-mediated rapid movements defend against herbivorous insects in *Mimosa pudica*. *Nat Commun* 13: 6412 (査読有)
 - Suda H, *Toyota M (2022) Integration of long-range signals in plants: A model for wound-induced Ca²⁺, electrical, ROS, and glutamate waves. *Cur Opin Plant Biol* 69: 102270 (査読有)
 - Hagihara T, *Toyota M (2020) Mechanical signaling in the sensitive plant *Mimosa pudica* L. *Plants* 9: 587 (査読有) (表紙に選出)
 - Kimura S, Hunter K, Vaahtera L, Tran HC, Citterico M, Vaattovaara A, Rokka A, Stolze SC, Harzen A, Meissner L, Wilkens MMT, Hamann T, Toyota M, Nakagami H, *Wrzaczek M (2020) CRK2 and c-terminal phosphorylation of NADPH oxidase RBOHD regulate reactive oxygen species production in Arabidopsis. *Plant Cell* 32: 1063-1080 (査読有)
 - Hunter K, Kimura S, Rokka A, Tran HC, Toyota M, Kukkonen JP, *Wrzaczek M (2019) CRK2 enhances salt tolerance by regulating callose deposition in connection with PLDalpha1. *Plant Physiol* 180: 2004-2021 (査読有)
 - *Toyota M, Spencer D, Sawai-Toyota S, Wang J, Zhang T, Koo AJ, Howe GA, *Gilroy S (2018) Glutamate triggers long-distance, calcium-based plant defense signaling. *Science* 361: 1112-1115 (査読有)
- 計画班 椋垣班 (計 51 本)
- Kikukawa K, Yoshimura K, Watanabe A, *Higaki T (2021) Metal-nano-ink coating for monitoring and quantification of cotyledon epidermal cell morphogenesis. *Front Plant Sci* 12: 745980 (査読有)
 - Kunita I, Morita MT, Toda M, *Higaki T (2021) A three-dimensional scanning system for digital archiving and quantitative evaluation of Arabidopsis plant architectures. *Plant Cell Physiol* 62: 1975-1982 (査読有)
 - Maeda K, Sasabe M, Hanamata S, Machida Y, Hasezawa S, *Higaki T (2020) Actin filament disruption alters phragmoplast microtubule dynamics during the initial phase of plant cytokinesis. *Plant Cell Physiol* 61: 445-456 (査読有)
 - *椋垣匠 (2020) バイオイメージングの近代史. *建築雑誌* 135: 11
 - Kimata Y, Kato T, Higaki T, Kurihara D, Yamada T, Segami S, Morita MT, Maeshima M, Hasezawa S, Higashiyama T, Tasaka M, *Ueda M (2019) Polar vacuolar distribution is essential for accurate asymmetric division of *Arabidopsis* zygotes. *Proc Natl Acad Sci USA* 116: 2338-2343 (査読有)
- 前期・後期公募班 渡辺班 (計 27 本)(後期は A01 班に移動)
- *Cai J, Lv C, Hu C, Luo J, Liu S, Song J, Shi Y, Chen C, Zhang Z, Ogawa S, Aoyagi E, *Watanabe A (2020) Laser Direct Writing of Heteroatom-Doped Porous Carbon for High-Performance Micro-Supercapacitors. *Energy Storage Mater* 25: 404-415 (査読有)
 - Gan L, Xu C, Yang J, Ma Y, *Cai J, Watanabe A (2019) Facile Preparation of Holey Carbon Nanotubes Assisted by Ag Nanoparticle Catalysts for High-performance Micro-supercapacitor. *Chem Lett* 48: 795-798 (査読有)
- 前期・後期公募班 岩元班 (計 16 本)
- Yonekura T, Iwamoto A, Fujita H, *Sugiyama M (2019) Mathematical model studies of the comprehensive generation of major and minor phyllotactic patterns in plants with a predominant focus on orixate phyllotaxis. *PLoS Comput Biol* 15: e1007044 (査読有)
- 前期・後期公募班 石黒班 (計 5 本)
- Sultana MM, Dutta AK, Tanaka Y, Aboulela M, Nishimura K, Sugiura S, Niwa T, Maeo K, Goto-Yamada S, Kimura T, Ishiguro S, Mano S, *Nakagawa T (2019) Gateway binary vectors with organelle-targeted fluorescent proteins for highly sensitive reporter assay in gene expression analysis of plants. *J Biotechnol* 297: 19-27 (査読有)
- 前期・後期公募班 野元班 (計 14 本)
- Matsumura M, *Nomoto M, Itaya T, Aratani Y, Iwamoto M, Matsumura T, Hayashi Y, Mori T, Skelly MJ, Yamamoto YY, Kinoshita T, Izumi CM, Suzuki T, Betsuyaku S, Spoel SH, Toyota M, *Tada Y. (2022) Mechanosensory trichome cells evoke a mechanical stimuli-induced immune response in *Arabidopsis thaliana*. *Nature Commun* 113: 1216. (査読有)
- 前期・後期公募班 佐藤班 (計 30 本)
- Wang C, *Taki M, Sato Y, Tamura Y, Yaginuma H, *Okada Y, *Yamaguchi S (2019) A photostable fluorescent marker for the super-resolution live imaging of the dynamic structure of the mitochondrial cristae. *Proc Natl Acad Sci USA* 116: 15817-15822 (査読有)
- [研究項目 A03]「ユニット」
- 計画班 細川班 (計 52 本)
- *Tsugawa S, Yamasaki Y, Horiguchi S, Zhang T, Muto T, Nakaso Y, Ito K, Takebayashi R, Okano K, Akita E, Yasukuni R, Demura T, Mimura T, Kawaguchi K, *Hosokawa Y (2022) Elastic shell theory for plant cell wall stiffness reveals contributions of cell wall elasticity and turgor pressure in AFM measurement. *Sci Rep* 12: 13044 (査読有)
 - Rukmana TI, Moran G, Méallet-Renault R, Clavier G, Kunieda T, Ohtani M, Demura T, *Yasukuni R, Hosokawa Y (2020) Photoinjection of Fluorescent Nanoparticles into Intact Plant Cells Using Femtosecond Laser Amplifier. *APL Photonics* 5: 066104 (査読有)
 - Rukmana TI, Moran G, Méallet-Renault R, Ohtani M, Demura T *Yasukuni R, Hosokawa Y (2019) Enzyme-

Assisted Photoinjection of Megadalton Molecules into Intact Plant Cells Using Femtosecond Laser Amplifier. *Sci Rep* 9: 17530 (査読有)

4. *Hosokawa Y (2019) Applications of femtosecond laser-induced impulse to cell research. *Jpn J Appl Phys* 58: 110102 (査読有)
5. Hong ZY, Okano K, Di Carlo D, Tanaka K, Yalikun Y, *Hosokawa Y (2019) High-speed micro-particle manipulation in a microfluidic chip by directional femtosecond laser Impulse. *Sensor Actuat A-Phys* 297: 111566 (査読有)
6. Toyokura K, Goh T, Shinohara H, Shinoda A, Kondo Y, Okamoto Y, Uehara T, Fujimoto K, Okushima Y, Ikeyama Y, Nakajima K, Mimura T, Tasaka M, Matsubayashi Y, *Fukaki H (2018) Lateral Inhibition by a Peptide Hormone-Receptor Cascade during Arabidopsis Lateral Root Founder Cell Formation. *Dev Cell* 48: 64-75 (査読有)

■計画班 五十嵐班 (計 44 本)

1. Uchiyama T, Uchihashi T, Ishida T, Nakamura A, Vermaas JV, Crowley MF, Samejima M, Beckham GT, *Igarashi K (2022) Lytic polysaccharide monooxygenase increases cellobiohydrolases activity by promoting decrystallization of cellulose surface. *Science Adv* 8: eade5155 (査読有)
2. *Igarashi K, Kaneko S, Kitaoka M, Samejima M (2020) Effect of C-6 Methylol Groups on Substrate Recognition of Glucose/Xylose Mixed Oligosaccharides by Cellobiose Dehydrogenase from the Basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*. *J Appl Glycosci* 67: 51 (査読有)
3. *Ruijter JC, Igarashi K, Penttila M (2020) The *Lipomyces Starkeyi* Gene Ls120451 Encodes a Cellobiose Transporter That Enables Cellobiose Fermentation in *Saccharomyces Cerevisiae*. *FEMS Yeast Res* 20: foaa019 (査読有)
4. Ezaki T, Nishinari K, Samejima M, *Igarashi K (2019) Bridging the Micro-Macro Gap Between Single-Molecular Behavior and Bulk Hydrolysis Properties of Cellulase. *Phys Rev Lett* 122: 98102 (査読有)
5. The CAZyedia Consortium (Igarashi K 101 人中 33 人目) (2018) Ten years of CAZyedia: a living encyclopedia of carbohydrate-active enzymes. *Glycobiol* 28: 3 (査読有)

■計画班 上田班 (計 44 本)

1. Oikawa, K., Goto-Yamada, S., Hayashi, Y., Takahashi, D, Kimori Y, Shibata M, Yoshimoto K, Takemiya A, Kondo M, Hikino K, Kato A, Shimoda K, Ueda H, Uemura M, Numata K, Ohsumi Y, Hara-Nishimura I, Mano S, Yamada K, Nishimura M (2022) Pexophagy suppresses ROS-induced damage in leaf cells under high-intensity light. *Nat Commun* 13, 7493 (査読有)
2. Iwabuchi K, Shimada TL, Yamada T, *Hara-Nishimura I (2020) A space-saving visual screening method, Glycine max FAST, for generating transgenic soybean. *Plant Signal Behav* 15: 1722911 (査読有)
3. Shimada TL, Shimada T, Okazaki Y, Higashi Y, Saito K, Kuwata K, Oyama K, Kato M, Ueda H, Nakano A, Ueda T, Takano Y, *Hara-Nishimura I (2019) HIGH STEROL ESTER 1 is a key factor in plant sterol homeostasis. *Nat Plants* 5: 1154-1166 (査読有)
4. Ueda H, *Hara-Nishimura I (2019) How to Investigate the Role of the Actin- Myosin Cytoskeleton in Organ Straightening. *Methods Mol Biol* 1924: 215-221 (査読有)
5. Ueda H, Ohta N, Kimori Y, Uchida T, Shimada T, Tamura K, *Hara-Nishimura I (2018) Endoplasmic reticulum (ER) membrane proteins (LUNAPARKS) are required for proper configuration of the cortical ER network in plant cells. *Plant Cell Physiol* 59: 1931-1941 (査読有)

■計画班 小竹班 (計 37 本)

1. Yoshimi Y, Hara K, Yoshimura M, Tanaka N, Higaki T, Tsumuraya Y, *Kotake T (2020) Expression of a fungal exo- β -1,3-galactanase in Arabidopsis reveals a role 'of' type II arabinogalactan in the regulation of cell shape. *J Exp Bot* 71: 5414-5424 (査読有)
2. Tsumuraya Y, Ozeki E, Ooki Y, Yoshimi Y, Hashizume K, *Kotake T (2019) Properties of arabinogalactan-proteins in European pear (*Pyrus communis* L.) fruits. *Carbohydr Res* 485: 1077816 (査読有)
3. Matsumoto N, Takenaka Y, Wachananawat B, Kajiura H, Imai T *Ishimizu T (2019) Rhamnogalacturonan I galactosyltransferase: Detection of enzyme activity and its hyperactivation. *Plant Physiol Biochem* 142: 173-178 (査読有)
4. Yu L, Lyczakowski JJ, Pereira CS, Kotake T, Yu X, Li A, Møgelvang S, Skaf MS, *Dupree P (2018) The patterned structure of galactoglucomannan synthesized by CSLA2 and MAGT1 suggests it may bind to cellulose. *Plant Physiol* 178: 1011-1026 (査読有)
5. Takenaka Y, Kato K, Ogawa-Ohnishi M, Tsuruhama K, Kajiura H, Yagyu K, Takeda A, Takeda Y, Kunieda T, Hara-Nishimura I, Kuroha T, Nishitani K, Matsubayashi Y, *Ishimizu T (2018) Pectin RG-I rhamnosyltransferases represent a novel plant-specific glycosyltransferase family. *Nat Plants* 4: 669-676 (査読有)

■前期公募班 中井班 (計 3 本)

1. *Nakai R, Azuma T (2019) Evaluation of MR imaging for microstructural analysis using a clinical MRI system. 第 47 回日本磁気共鳴医学会誌 2019 (39) suppl. 298 (査読有)

■前期公募班 矢島班 (計 3 本)

1. Matsuda K, Sugawa K, Yamagishi M, Kodera N, *Yajima J (2019) Visualizing dynamic actin cross - linking processes driven by the actin-binding protein anillin. *FEBS Lett* 594: 1237-1247 (査読有)

■前期・後期公募班 野村班 (計 5 本)

1. *Nakayama T, Nomura M, Takano Y, Tanifuji G, Shiba K, Inaba K, Inagaki Y, Kawata M (2019) Single-cell genomics unveiled a cryptic cyanobacterial lineage with a worldwide distribution hidden by a dinoflagellate host. *Proc Natl Acad Sci USA* 116: 15973-15978 (査読有)

■後期公募班 本瀬班 (計5本)

1. Mase H, Nakagami H, Okamoto T, Takahashi T, *Motose H (2022) Establishment and application of novel culture methods in *Marchantia polymorpha*: persistent tip growth is required for substrate penetration by rhizoids. *Commun Integr Biol* 15: 164-167 (査読有)

【招待講演】 領域全体: 合計 **355 件** (うち国際会議 122 件)

1. [A01 計画班 杉山班] 杉山淳司 “Time-laps visualization of enzymes in hydrolysis of sugarcane by selective fluorescence labeling.” In 13th Joint Seminar of China-Korea-Japan on Wood Quality and Utilization of Domestic Species. Nanjing, China 2018 年 10 月 25 日
2. [A01 計画班 森田班] 森田美代 “Gravity signaling mechanism modulating auxin flow in gravitropism.” In AUXIN2022. Cavtat, Croatia. 2022 年 10 月 2-7 日
3. [A02 計画班 出村班] 出村拓 “Evolutionary conservation of VNS-based transcriptional regulatory network for water-conducting and support cells in land plant species.” In International Conference of Arabidopsis Research 2022. Belfast, UK, 2022 年 6 月 20-24 日
4. [A02 計画班 豊田班] 豊田正嗣 “Calcium-based rapid defense movements in *Mimosa pudica*.” In 6th international conference on Plant Vascular Biology 2022. Berlin, Germany, 2022 年 7 月 21 日
5. [A03 計画班 五十嵐班] 五十嵐圭日子 “Lignobiotech for the realization of Circular Bioeconomy” In Lignobiotech2022. Vancouver, Canada, 2022 年 8 月 10-12 日

【特許申請】 領域全体: 合計 **9 件**

1. [A01 計画班 澤班] 石川勇人, 谷時雄, 澤進一郎, 石田喬志 「植物成長抑制剤、およびそれを用いた植物成長抑制方法」 熊本大学、日本曹達株式会社 PCT/JP2018/004094
2. [A03 計画班 五十嵐班] 小嶋由香, 砂川直輝, 吉田誠, 五十嵐圭日子 「新規セルロース結合性タンパク質」 東京大学 PCT/JP2018/027005
3. [A03 公募班 野田口班] 野田口理孝, 黒谷賢一, 川勝弥一, 田畑亮 「接木改善剤」 名古屋大学 JP2020/042379

【受賞】 領域全体: 合計 **97 件**

1. [A01 計画班 杉山班] 杉山淳司 **紫綬褒章** 内閣府 2020 年 4 月 28 日
2. [A01 計画班 杉山班] 五十田博 **2018 年度耐震改修優秀建築賞** 日本建築防災協会 2019 年 2 月 19 日
3. [A01 計画班 川口班] 川口健一 **Pioneers' Award** 英国サリー大学 2021 年 8 月 25 日
4. [A02 計画班 出村班] 西谷和彦 **日本植物学会学術賞** 日本植物学会 2019 年 9 月 16 日
5. [A02 計画班 出村班] 大谷美沙都 **日本植物生理学会奨励賞** 日本植物生理学会 2022 年 3 月 23 日
6. [A02 計画班 桧垣班] 桧垣匠 **日本植物生理学会奨励賞** 日本植物生理学会 2021 年 3 月 15 日
7. [A02 公募班 岩元班] 岩元真明 **日本空間デザイン賞金賞** 日本空間デザイン協会および日本商環境デザイン協会 2019 年 10 月 4 日
8. [A02 公募班 後藤班] 後藤栄治 **日本農学進歩賞** 公益財団法人農学会 2021 年 11 月 26 日
9. [A03 計画班 五十嵐班] 五十嵐圭日子 **日本木材学会賞** 日本木材学会 2022 年 3 月 17 日
10. [A03 公募班 野田口班] 野田口理孝 **日本学士院学術奨励賞** 日本学士院 2023 年 2 月 7 日

【主催・共催シンポジウム】 領域全体: 合計 **35 件** (うち主催国際会議 12 件)

1. [共催国際学会] **Plant Cell Wall Biology 2021 (第7回国際植物細胞壁生物学会議)** 小竹 (A03 計画班 代表者) ・大谷 (A02 計画班 分担者) ・山口 (A02 計画班 協力者) が Chair として、2021 年 6 月 27 日～7 月 1 日、オンライン国際学会を開催した。リモート参加国数: 29 か国、リモート外国人参加国数: 196 人、リモート国内参加者数: 78 人 (合計 274 人参加)。活発な議論と情報交換が行われ、コロナ禍の状況においても本領域のプレゼンスを海外に強く発信した。
2. [主催国際シンポジウム] **International symposium on "Plant-Structure-Optimization"** 2022 年 11 月 19～20 日の日程で奈良において開催。海外招待講演者 13 名および領域メンバーの講演者 12 名による計 25 題の口頭発表、および領域メンバーを中心とした 33 題のポスター発表と議論を行った。「植物構造オプト」に関する領域成果を海外関係研究者に広く発信するとともに、国内に向けて成果発表を行う重要な場となった。

【一般向けアウトリーチ】 領域全体: 合計 **235 件**

一般向け講演 48 件、公開イベント 64 件 (うち小中高生向け 50 件)、プレスリリース 64 件、メディア報道 132 件

1. [A01 計画班 杉山班] 一般向け講演 杉山淳司 「阿修羅像—人工知能による樹種特定にむけて—」 興福寺, 奈良 2018 年 12 月 7 日
2. [A01 計画班 川口班] 公開イベント 川口健一 「テンセグリティモニュメント「願いの木」の展示」 サイエンスアゴラ, 東京 2019 年 11 月 15 日-17 日
3. [A02 計画班 出村班] プレスリリース 出村拓, 大谷美沙都 Takenaka et al. (2018) *Plant Cell* 30: 2663-2676 の成果、2018 年 10 月 19 日: **5 件の関連メディア報道**
4. [A02 計画班 豊田班] プレスリリース 豊田正嗣 Toyota et al. (2018) *Science* 361:1112-1115 の成果に関するプレスリリース、2018 年 9 月 13 日: **57 件の関連メディア報道、取材、TV 番組作成・出演など**
5. [A02 公募班 岩元班] 雑誌 岩元明敏, 岩元真明, 荒木美香 「オーゼティック構造のパーゴラ」 展示 (九州大学) に関する記事 『新建築』 2023 年 6 月号
6. [A03 公募班 野田口班] プレスリリース 野田口理孝 Notaguchi et al. (2020) *Science* 369: 698-702 の成果に関するプレスリリース、2020 年 8 月 7 日: **15 件の関連メディア報道**



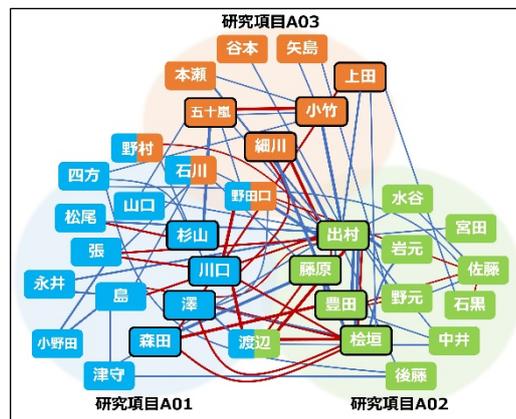
岩元班「オーゼティック構造のパーゴラ」は植物構造をベースに作られた

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。

■ 研究組織間連携体制構築の道筋

(1) 領域代表およびSSSCを通じた共同研究の橋渡し: 領域代表による全研究班に対するサイトビジットによって得た各研究班の情報を元に、サステナブル構造システム教育研究支援センター(SSSC)を基盤とした領域内連携・共同研究の橋渡しを進めた。SSSCでは解析技術・材料の提供を行い、総括班による数理シミュレーション技術、AFMやX線CTスキャンによる測定技術や、道管分化誘導系(出村班)、カルシウムセンサーGCaMP(豊田班)などの材料の提供を推進した。この際、共同研究開始後しばらくは総括班担当者が間に入り、解析方向性やスケジュールの調整を行うことで、無理のない連携体制の構築を行った。また、領域前半には、植物学と計測工学・数理学・空間構造学といった異分野研究者の共同作業を基盤に新規の植物構造計測技術を開発した。これら新開発技術は領域後半には積極的に多くの研究班と共有し、改良を進めるとともに、「サステナブル構造システム学」に資する新たな生命現象および構造情報のデータ取得に活用された。以上の結果、最終的にすべての研究代表者が一件以上の領域内共同研究を実施するなど、計画班・公募班を縦断した連携体制構築に至った(右上図)。



研究班間の共同研究実施状況。
青線は共同研究、赤線は成果が出た共同研究を示す。
また線の太さは共同研究数を反映している。
(黒枠線: 計画班、それ以外は公募班)

(2) 分科会・コミュニケーションツールによる共通言語の構築: 本領域には複合領域研究にふさわしく、専門分野の異なる多くの研究者が参画した。そこで「研究の共通言語」を構築するため、さまざまなテーマ別の勉強会・討論会を分科会と位置づけ、研究期間を通して開催した。テーマとしては「植物と建築におけるセンターとアクチュエーター」、「構造解析・数値シミュレーション」、「樹木形状3D計測」、「機械的刺激と形態形成」など、必ず複数の研究班にまたがった内容とし、領域全体として必要だと判断される内容の場合には総括班が主体となって、あるいは特定の研究班からの要望の場合には各計画班がホストとなった。必要に応じて領域外の専門家を講師として招きながら、最終的には合計204回の分科会が開催された。こうした分科会に加えて、発足直後からのメーリングリストやチャットアプリ(Slackなど)、テレビ会議システムポリコムやオンライン会議ツール(Zoomなど)の利用により、遠隔地でもスムーズなコミュニケーションを取る方式を整えた。こうした地道な双方向的な情報循環と意識共有の結果、空間構造学や建築学、計測工学といった工学系研究者が重力屈性の分子機構を考える、あるいは逆に植物学者が弾性力学・解析力学に基づいて植物構造を説明する、といった相互理解と共通言語の構築に至り、連携体制の構築に大きく寄与した。

(3) 「ダブルメンタリング制度」を通じた研究班間連携の充実化: さらに若手研究者育成活動の一環として行った大学院生・ポスドクへのダブルメンタリングが、予想以上に研究組織間の連携体制構築に効果をあげた。これは、研究の現場の担い手である大学院生・ポスドクが他の研究室/研究分野のシニア研究者とディスカッションすることによって、直接的に各研究班に異分野融合的な視点を取り込まれたためと考えられる。例えばメンタリング制度を通じて、学生を通じた新たな研究室間の技術交流(野田口班の接ぎ木技術、出村班の組織培養技術など)が進み、共同研究の促進が行われた。

■ 研究項目間・研究班間の連携成果

研究連携は当初の予想を遥かに上回る勢いで進み、195件の共同研究が実施され(右表)、その内123件が成果発表に至った(2023年6月時点)。領域前半で整備した研究項目間の連携・風通しの良さは、領域研究前期と後期で複数の公募班が積極的に研究項目を変更して参画したことにも表れており、これによってさらなる研究項目間の連携が進んだ。とくに領域代表(A02)が自ら研究項目の垣根を越えた共同研究を多く遂行したことで、異分野融合を必要とする本領域目標達成に向けた研究分野横断的な連携の道筋となった。

研究項目内と研究項目間の共同研究実施状況		
研究項目内 研究項目間	共同研究総数	成果の出た件数 (論文・学会発表)
A01内	8	4
A02内	30	20
A03内	22	11
A01-A02間	62	47
A01-A03間	18	13
A02-A03間	45	21
A01-A02-A03間	10	7
領域全体	195	123

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。

本研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用

主要な設備・装置（マイクロフォーカス X 線 CT システム、超高感度高解像共焦点レーザスキャン顕微鏡、原子間力顕微鏡など）は総括班で購入し、SSSC（奈良先端大）に設置した。いずれも 2019 年度中に共用のためのセッティングを終え、運用を開始した。2019 年度末に、公募班を含む領域全体を対象として共有機器の利用を促進するための SSSC 技術ワークショップを企画したものの、COVID-19 感染拡大の影響で延期せざるを得なかった。一方で、領域班会議等で技術ワークショップのオンライン開催による情報共有を行った。その後 COVID-19 感染症の沈静化後（2022 年 10 月～11 月）に、SSSC におけるオンラインのトレーニングを開催した。これにより、領域内での共用機器の効果的使用が推進された。また、領域内で開発した装置や技術、例えば、計画班 杉山の放射光実時間小角 X 線散乱、計画班 豊田の細胞壁-細胞膜インターフェイスにおけるバイオセンサーおよび多波長・広視野・高感度蛍光顕微鏡、計画班 桧垣の植物形態の立体再構築技術、計画班 細川のフォースマッピング AFM とフェムト秒レーザーの複合システム、公募班 渡辺のレーザー直接描画技術、公募班 中井の MRI 装置、等を領域メンバーが活用できるよう、総括班活動として情報共有および共同研究のアレンジを主導した。

SSSC（奈良先端科学技術大学院大学）に設置した高額機器

品名（型式）	価格（円）
マイクロフォーカス X 線 CT システム島津製作所社製（inspeXio SMX-100CT）	40,821,100
超高感度高解像共焦点レーザスキャン顕微鏡カルツァイミクロスコプ社製（LSM800）	34,890,102
原子間力顕微鏡 NanoWizard4 JPK Instruments AG 社製（NW4-100M）	20,561,040

■ オンライントレーニング（2022 年 10～11 月）参加者

・ X 線 CT（6 名）・共焦点レーザスキャン顕微鏡（4 名）・原子間力顕微鏡（8 名）

■ 主要な領域内利用・共同研究

- ・ X 線 CT（出村班、澤班、上田班、川口班、石川班）
- ・ 共焦点レーザスキャン顕微鏡（出村班、森田班）
- ・ 原子間力顕微鏡（出村班、細川班、野村班、本瀬班）

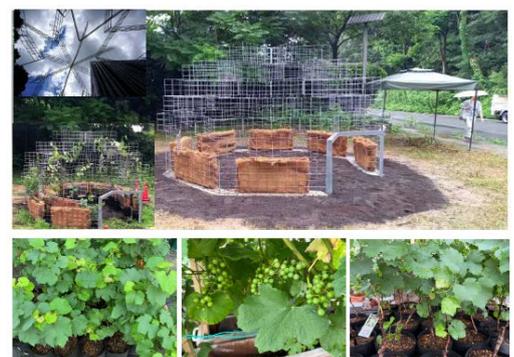
実験試料等の提供

共通の実験試料となり得る植物の作製（Ca²⁺シグナル可視化シロイヌナズナ、イネ、ポプラなど）については総括班がとりまとめ、SSSC が管理した上で提供をサポートしてきた。総括班のサポートのもと、計画班ではユーカリとポプラを用いた野外試験を行い（東大駒場、東大柏、東大弥生、奈良先端大）、関連する公募班にも共通試料として拡大させた。また、2019 年度に総括班主催の分科会として行った「樹木形状 3D 計測」の基本データを共用・提供し、共通したデータセットを領域内で多方面から解析することで、建築工学的スケールへの植物科学知見の応用の推進を図った。

研究費の使用状況

領域全体としては極めてバランスがとれた予算の使用状況であった。一部の研究課題では特定の項目に偏った使用があったものの、これらはいずれも当初の研究計画に基づいたものであり適切な使用の範疇と判断している。一方、COVID-19 のため 2019 年度後半～2021 年度前半期には対面研究打合せ・学会が停止したため、国内学会・国際学会出席といった旅費支出が減少した。こうした中で研究活動を低下させないように積極的なオンライン会議等での情報交換を行いつつ、領域として団結して研究を推進するよう総括班がサポートした。

領域として推進すべき「建築工学的スケールへの植物科学知見の応用の推進」活動として、野田口班と出村班（研究協力者・細見（構造工学研究所）ら）の連携で限



名古屋大学に設置した「人-植物共創空間」ユニット

建築事務所・隈太一氏他との共同研究として、「建築デザインへの植物構造物の取り込みの試み～人-植物の共創による建築空間」を行った。このための準備費用・設置費用等は総括班から支援した。また、植物細胞・組織構造から発想した継ぎ手構造、支保工なしのアーチ・ヴォールト・ドーム構造、オーゼティック構造、湿度に応答して開閉する傘構造、についても必要な研究支援・経費を総括班でサポートした。

国際シンポジウム・若手研究者海外派遣

COVID-19の影響で2020年6月に予定していた国際シンポジウムについては中止した。また、札幌開催予定であった**国際植物細胞壁生合成会議 Plant Cell Wall Biosynthesis**は当初予定から年度を変えて2021年にオンライン開催となったが、この国際会議のサテライトミー



International symposium on “Plant-Structure-Optimization” (2022年11月奈良)

ティングを開催し、コロナ禍での領域研究活動の国際的な隔絶を防ぎ、本領域活動を通じて、日本植物学分野がフランス、アメリカ、カナダに続いて植物バイオメカニクス研究の世界的拠点の1つとして大きく躍進しつつあることをアピールした。現地開催の国際シンポジウムに関しては、最終年度の2022年11月に規模を拡大して、奈良春日野国際フォーラム麓～I・RA・KA～において、**International symposium on “Plant-Structure-Optimization”**を開催した。海外からの招待講演者13名および領域メンバーの講演者12名による計25題の口頭発表ならびに領域メンバーを中心とした33題のポスター発表と議論を行った。この国際シンポジウム以外にも、国際活動として、計11回の国際イベントを主催または共催で開催した。また、領域期間中に12名の若手研究者を短期・中期で海外に派遣（5名のオンライン国際会議参加を含む）し、3名の若手研究者を短期・中期招へいた。

研究費の効果的使用の工夫

新たな機器購入や新技術の開発、さらにこれらの共有は領域全体にとって有用であり、研究費の効果的使用にもつながる。そこで共有可能な機器や技術に関しては、積極的に**領域班会議や若手ワークショップで情報交換を行った**。また、COVID-19の影響については**随時各研究班の研究計画への影響を領域代表が直接確認・コンサルティングを行い、翌年への繰越が妥当との判断ができる場合には、適切な額の繰越を行うよう指示した**。

領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究

■森田班：繰越額1,000千円/2022年度交付額7,700千円（直接）

2023年1月までに、形質転換体の確立、形質転換体と変異体の交配、種子採取①、F1個体育成、種子採取②、F2世代遺伝子型選抜及び育成を行い、2023年3月までに、顕微鏡画像データ取得を行う予定であったところ、当初の想定に反し、2023年1月、本研究のために構築した特殊な顕微鏡システムに不具合が発生したため、年度内に顕微鏡画像データを取得することができないことが判明した。研究遂行上、この特殊な顕微鏡システムにより画像データを取得することが不可欠なため、顕微鏡システムの点検及び修理を行い、顕微鏡画像データ取得を延期して実施する必要が生じたため繰越を申請した。

■藤原班：繰越額4,000千円/2022年度交付額13,200千円（直接）

当初の想定に反し、新規開発装置による異なる栄養条件での力学特性変化の解析をしたところ、当初想定した栄養条件では、解析に不具合が生じることが判明した。研究遂行上、既存の測定装置を用いた解析結果との比較には、新規開発装置による異なる栄養条件での解析が不可欠なため、再度植物の栽培条件の検討、新規開発装置による根の力学特性測定を行った上で、新規開発装置による異なる栄養条件での解析をやり直して実施する必要が生じたため、繰越を申請した。

■川口班：繰越額6,500千円/2022年度交付額12,870千円（直接）

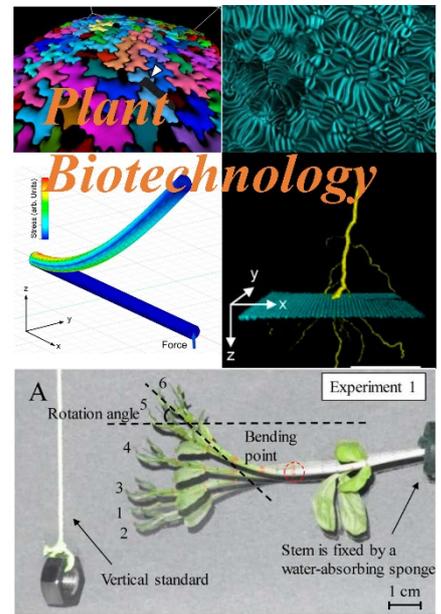
2022年8月までに、研究準備、数値シミュレーションを行い、2023年3月までに、数値シミュレーション及び植物を用いた実験を行う予定であった。当初の想定に反し、植物を用いた実験における樹木（ユーカリカマルドレンシス）の自己修復の観察の過程で、当初の予想とは異なる応答が生じていることが判明した。研究遂行上、この現象に関する詳細な観察と考察が不可欠であること、また、樹木の自己修復における応答を詳細に調べるため、計画を見直し、追加観察実験の準備、追加観察実験及びフィールド調査とその考察を追加して実施し、その結果を受けて数値シミュレーションを行う必要が生じたため、繰越を申請した。

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当該領域の各分野発展・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。

本領域では、植物の力学的最適化戦略に基づいた「新規の構造システムモデルの提出」を最大の達成目標と設定した。このために計画班・公募班の有機的・積極的連携によって精力的な研究を推進した。その成果は、植物科学関連学会や単独開催シンポジウム等で精力的に発表し、さらに、2020年12月号には国際誌 *Plant Biotechnology* 誌に本領域で開発した新規植物構造オプト技術論文の特集号を、2021年12月号には国際誌 *Plant & Cell Physiology* 誌に本領域で明らかにした植物構造オプト関連の新規知見に関する論文の特集号を、それぞれ出版し、国際的発信を行った。こうした植物科学関連学界への国内外への成果発表によって、日本植物科学分野でも力学的解析アプローチが拓かれた。その結果、総括班 SSSC に領域外研究者から力学的解析の協力依頼が複数寄せられるなど、関連学問分野における本研究領域のプレゼンスは強く、大きな学術的波及効果があったと考えている。また、植物の形態形成・成長・運動を力学的に理解しようとする潮流は「植物バイオメカニクス」の勃興として、本領域の発足前後のタイミングで世界的にも始まっていた。とくにフランスが世界をリードする植物バイオメカニクス拠点であるが、その中心研究者の一人である Olivier Hamant 博士 (INRA, RDP, ENS, Lyon、檜垣班・研究協力者) を主要海外拠点のコンタクトパーソンとし、Hamant 博士研究室への定期的な領域研究者滞在による技術交流を推進した。また出村領域代表を始め多くの領域メンバーが植物バイオメカニクス関連の国際会議で領域成果を発表し、世界の研究動向を把握しつつ本領域の研究活動の世界的な認知を深めるよう注力した。その結果として、関連分野に対して、本領域の成功によって日本が「植物バイオメカニクス」における国際的リーディング拠点の1つであるという重要なインパクトを与えることができた。

本領域は「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」を応募時に選択した。これは、植物科学と理工学（とくに建築構造学・空間構造工学）の融合によって、植物の基本動作原理の理解に工学的・力学的解釈を取り入れるとともに、得られた知見を建築におけるサステナブルな構造システムに落とし込むというシナリオが極めて独創的であり、これまでの学問領域とは一線を画するものと考えたためである。前述の通り、本領域は植物バイオメカニクス研究の世界的拠点の一つと認識されるに至ったが、その原動力になったのは理工学における力学的解析技術をもとにした融合研究であった。また、融合研究で得られた知見を建築分野の研究者に発信するための仕掛けとして、日本建築学会の学術講演会にオーガナイズドセッションとして「植物構造オプト」を設置した。これにより、領域メンバー間に留まらない新しい植物科学分野と建築学分野の研究交流が萌芽した。この流れは領域終了後も継続している。例えば、2023年度の日本建築学会学術講演会でもオーガナイズドセッション「植物構造オプト」の開催が決定している。また、野田口班と出村班（研究協力者・細見（構造工学研究所）ら）の連携で隈建築事務所・隈太一氏他とコラボしている「建築デザインへの植物構造物の取り込みの試み～人-植物の共創による建築空間」についても領域終了後も継続している。このように、本領域の活動は既存の学問分野を超えた真に新興の融合領域を創成したと確信している。



Plant Biotechnology 誌特集号
(2020年12月号)



隈太一氏他との共同研究「建築デザインへの植物構造物の取り込みの試み」
(左:名古屋大学に設置したユニット 右:神楽坂シェアハウス)

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5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。

本領域の研究参加者は158名（2023年3月終了時点）でその約4割の67名が39歳以下の若手研究者である。さらに12名の外国人研究者を含んでおり、多様性の高い人員構成となっている。生物学と理工学との真の融合と「植物構造オプト」の融合研究スピリットを継承する若手研究者の育成のため、本領域では以下の取組を行った。

■「若手ワークショップ」の開催と大学院生への「ダブルメンタリング」の実施：領域内における若手研究者の交流と研究活動促進のため、大学院生、ポスドク、助教による研究発表の場「若手ワークショップ」を2019年度から毎年秋に開催した

年度	開催形態	参加者	口頭発表	ポスター発表
2019	オンサイト	64	25	11
2020	オンライン	102	13	47
2021	オンライン	129	37	29
2022	オンサイト	107	36	28

（右上表）。またこのとき、シニア研究者が別の研究班に所属する大学院生に対して研究内容のメンタリングを行う「ダブルメンタリング」（左下写真）によって、大学院生の分野横断的な視点の育成と人的ネットワーク促進を行った。これは研究の方向性を拡大するという利点とともに、大学院生のメンタル教育という意味でも効果が大きく、また研究班間の連携体制の充実も進むなど、大きな効果があった。



若手ワークショップによるメンタリングの様子。

■「若手研究会」による独自融合研究テーマの立案・遂行：若手ワークショップにおける若手研究者間の交流活動を基盤として、本領域予算で

雇用されている若手研究者（ポスドク～助教～講師）をメンバーとした「若手研究会」を設立した。第一期（2020～2021年度）は9名の若手研究者が新たな融合研究テーマの策定活動を行った結果、「WG1: 樹形, 姿勢制御」「WG2: 細胞壁, 張力センサー」「WG3: ポプラ, 力学応答」の3つのワーキンググループが立ち上がった。全6回の会合や討論会（コロナ禍のため全てオンラインで開催, 右図）を経て提出された研究計画書をもとに、2022年度以降は「WG1: 樹形, 姿勢制御」[中楚博士（川口班）・川本博士（森田班）・吉田博士（澤班）が中心に活動]が活動を続け、総括班からの研究資金支援をもとに、具体的に研究を行った。その結果は、草本植物研究からの知見を木本植物の姿勢制御に応用し建築設計へ展開する研究「合成生物学的アプローチによる樹木の枝の伸長角度制御 植物発生・生理学からの Baubotanik への挑戦」として結実し、2022年度の日本建築学会において成果発表された（右）。以上、「若手研究会」は自分達で研究テーマを立案・遂行するという若手研究者育成の場として想定以上に機能し、とくに若手主体で新たな融合研究が生まれたことは大変大きな成果であった。



【オーガナイズドセッション】 植物構造オプト (3) (12:00～13:04)		司会：細川陽一郎・野村祐司
20389	植物茎の断面形状や膨ら下の細胞形状のいくつかの数学的考察 スーパー楕円と茎断面及び膨ら下の細胞とフニキュラージュや液滴形状の比較考察 ○堀口翔太（竹中工務店）・川口健一・張天昊・武藤宝	(797)
20390	合成生物学アプローチによる樹木の枝の伸長角度制御 植物発生・生理学からの Baubotanik への挑戦 ○川本望（基礎生物学研究所）・中楚洋介・吉田祐樹・國枝正・出村拓・澤進一郎・森田（寺尾）美代	(801)
20391	コンピュータビジョンおよび機械学習による木材細胞壁変形の解析 ○陳頌也（京都大）・杉山淳司	(805)
20392	X線CT解析から探るシロイヌナズナ葉の器官運動を支える立体構造変化 ○國枝正（奈良先端科学技術大学院大）・熊谷凌・春田牧人・出村拓	(809)

■若手研究者の海外派遣「海外武者修行」と海外若手研究者の招聘

：国際的に活躍できる若手研究者の育成のため、総括班が中心となって、若手研究者の海外研究活動を支援する海外派遣活動「海外武者修行」を行った。領域期間の途中2年間は、コロナ禍によって完全に海外渡航・招聘がほぼストップせざるを得なかったものの、最終的には12名の若手研究者への国際活動支援（うち、7名は海外渡航しそのうち4名は1ヶ月以上の海外派遣）を行った。さらに海外若手研究者1名の3ヶ月の中期招へい（豊田班）を行い、領域若手研究者に積極的に国際経験を積ませ、国際的に活躍できる人材を育成するという当初の目標は達成できたと考えている。

■若手研究者の受賞について

以上のような取組の結果として、2023年6月までに37件の若手研究者の学会・研究集会での発表賞、13件の大学院生・若手研究者への奨励賞の受賞があった。また、若手研究者の非常勤研究職への就職は11件、無期雇用常勤研究職への就職（領域活動開始時に39歳以下だったケースを含む）は18件あり、本領域は次世代研究者育成に十分な成果を果たした。

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。

秋田県立大学 理事長・学長 福田裕穂

本領域は植物科学と建築構造学というこれまで全く接点のなかった異分野に共通のコンセプトを見出し、これをもとに、新たな研究領域を創出しようとする、文字通り新学術領域研究（研究領域提案型）に相応しい研究であった。両分野の共同研究は言うまでもなく、総括班における植物科学と建築構造学の連携支援体制の強化、領域参画者を対象とした204回の分科会、領域代表者による連携推進を目的としたサイトビジット、建築系学会／植物系学会での連携研究のシンポジウムなどさまざまな努力を重ね、新たな分野の設立に成功したことを高く評価したい。領域内の個別の研究については、3つの研究項目、A01「システム」、A02「モジュール」、A03「ユニット」に、トップサイエンティストが集合し、論文総合計689編で、うち融合研究論文155編、インパクトファクター(IF)>8.0論文138編を発表するなど素晴らしい成果が上がっている。一方で、新領域として定着させるためには、継続的な努力が必要であり、そのような意味では、日本建築学会学術講演会のオーガナイズドセッション「植物構造オプト」の継続、また、野田口班、出村班と隈建築事務所・隈太一氏他との「建築デザインへの植物構造物の取り込みの試み～人-植物の共創による建築空間」のコラボが領域終了後も継続している点を評価したい。

自然科学研究機構 基礎生物学研究所・生物進化研究部門・教授 長谷部光泰

本学術領域では、植物科学と建築構造学と空間構造工学を主とする理工学分野の研究者が結集し、植物科学者は植物の自律的な力学的最適戦略を工学的視点と手法を導入して推進する、理工学研究者は、植物を参考に新しい発想でサステイナブルな構造システムを考案するための基盤を作ることを目的とした。近年、植物科学では力学的視点からの研究が求められており、理工学分野ではサステイナブルな構造探求が喫緊の課題であるが、個々の研究者が独自に異分野と連携することは難しい。本領域では、領域代表と理工学系の計画班員が強烈なリーダーシップを発揮し、204回にもおよぶ分科会をはじめ、総括班を効率的に運営することで、両分野の研究者の異分野に対する啓発と研究支援に成功したと評価できる。また、若手育成のため、若手研究会はもとより、ダブルメンタリング制度という独自の仕組みを構築することで、若手研究者の交流範囲を広げるとともに、新しい視点での研究を印象づけることに成功した。総括班で異分野間の共同研究を促進する数理解析プラットフォームを設置するとともに、公募班に理工系を中心に3割の植物科学以外の研究者を配置するという戦略が功を奏した。そして、日本建築学会シェル・空間構造セミナーを開催することで、建築学分野の研究者に広く本領域の意義と有用性をアピールするとともに、植物科学分野では、関連学会でのシンポジウムに加え、国際誌で植物バイオメカニクスに関する特集を行うなど、領域外研究者へのアウトリーチ活動は高く評価できる。全体を通して、当初目標を大きく上回る成果をあげること成功したと評価したい。

東京工業大学・名誉教授 和田章

(日本建築学会・名誉会員、日本建築構造技術者協会・名誉会員)

宇宙の無数の星のどこかに、美しい花々が咲き、緑に輝く木々が育ち、昆虫や動物が無数にいて、知性を持った動物も住むところはある。しかし、太陽からの程よい距離、大量の海水、北極・南極の大量の氷によって安定を保つ空気、水蒸気と水に囲まれた地球は、神が創造した唯一の至宝のように感じる。

動植物とは異なり、人間には安定した衣食住が必要である。ここで住に相当する建築、土木構造などは木材、コンクリート、鋼材を用いて構築される。これらの造形のために、植物の形状をモチーフすることは19世紀末にヨーロッパに開花したアールヌーボーに見られるが、この研究のように、植物の成長の仕組みを解明し、これを建築構造・土木構造・都市の発展に応用しようとする取り組みは行われていない。

植物や動物は地球上の自然循環、自然環境の中で多様性を保ちつつ、「部分は全体のために活動し、全体は部分のために活動するシステム」を持ち、「強く生きる、子孫を残す」などの意志を持って活動しているように見える。しかし、我々が人工的に構築する構造物は、このように長く生きようとする自発的な意思を持たず、新陳代謝の機能も、子孫を残す機能も持たない。カルシウムやタンパク質に比べ明らかに長寿命であるはずのコンクリートや鋼材を材料として作られる建築物や土木構造物は、地震などの自然の猛威に耐えられず、自然環境の変化に対応できず、人間活動の時代の変化に耐えられず、朽ちたり取り壊されてしまう。

ここで、人類より遥か昔から生きてきた植物の持つ「サステナブルかつレジリエンス」を理解し学び、このアナロジーを活用する研究を進めることは非常に重要である。このたびの研究が日本の中だけでなく、国際的にも大きく広がって進められてきたことも素晴らしい。この研究成果の輪がさらに続き大きく広がることを期待する。