

領域略称名：植物構造オプト  
領域番号：8005

令和2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）」  
に係る中間評価報告書

「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2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・出村 拓

# 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           | 4 |

## **研究領域全体に係る事項**

- |    |                        |    |
|----|------------------------|----|
| 3  | 研究領域の目的及び概要            | 6  |
| 4  | 審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況 | 8  |
| 5  | 研究の進展状況及び主な成果          | 10 |
| 6  | 研究発表の状況                | 15 |
| 7  | 研究組織の連携体制              | 20 |
| 8  | 若手研究者の育成に関する取組状況       | 21 |
| 9  | 研究費の使用状況・計画            | 22 |
| 10 | 今後の研究領域の推進方策           | 23 |
| 11 | 総括班評価者による評価            | 25 |

**研究組織**

(令和2年6月末現在。ただし終了した研究課題は終了時現在、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<br>研究課題名                                 | 研究期間                 | 研究代表者<br>氏名 | 所属研究機関・部局・職                     | 人数<br>[2] |
|----------|---|----------------------|-------------|---------------------------------|-----------|
| X00<br>総 | 18H05484<br>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<br>～<br>令和4年度 | 出村 拓        | 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         |
| A01<br>計 | 18H05485<br>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<br>～<br>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<br>計 | 18H05486<br>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<br>～<br>令和4年度 | 川口 健一       | 東京大学・生産技術研究所・教授                 | 2         |
| A01<br>計 | 18H05487<br>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<br>～<br>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<br>計 | 18H05488<br>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<br>～<br>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<br>計 | 18H05489<br>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<br>～<br>令和4年度 | 出村 拓        | 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         |
| A02<br>計 | 18H05490<br>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<br>～<br>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<br>計 | 18H05491<br>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<br>～<br>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<br>計 | 18H05492<br>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<br>～<br>令和4年度 | 桧垣 匠        | 熊本大学・国際先端科学技術研究機構・准教授           | 1         |
| A03<br>計 | 18H05493<br>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<br>～<br>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<br>計                     | 18H05494<br>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<br>～<br>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・准教授 | 1 |
| A03<br>計                     | 18H05495<br>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<br>～<br>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<br>計                     | 18H05496<br>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<br>～<br>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、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<br>研究課題名                                       | 研究期間                | 研究代表者<br>氏名 | 所属研究機関・部局・職              | 人数<br>[2] |
|----------|---|---------------------|-------------|--------------------------|-----------|
| A01<br>公 | 19H05359<br>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<br>～<br>令和2年度 | 島 弘幸        | 山科大学・大学院総合研究部・教授         | 1         |
| A01<br>公 | 19H05360<br>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<br>～<br>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<br>公 | 19H05361<br>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<br>～<br>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<br>公 | 19H05365<br>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<br>～<br>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<br>公 | 19H05369<br>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<br>～<br>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<br>公 | 19H05356<br>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<br>～<br>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<br>公 | 19H05358<br>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<br>～<br>令和2年度 | 岩元 明敏       | 神奈川大学・理学部・教授             | 1         |
| A02<br>公 | 19H05362<br>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<br>～<br>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<br>公 | 19H05363<br>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<br>～<br>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<br>公 | 19H05364<br>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<br>～<br>令和2年度 | 佐藤 良勝       | 名古屋大学・WPI-ITbM・特任准教授     | 1         |
| A02<br>公 | 19H05366<br>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<br>～<br>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<br>公            | 19H05357<br>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<br>～<br>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<br>公            | 19H05367<br>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<br>～<br>令和2年度 | 野村 真未  | 筑波大学・生命環境系・特任助教                 | 1 |
| A03<br>公            | 19H05368<br>細胞壁の(3+1)次元動力学                           | 令和元年度<br>～<br>令和2年度 | 谷本 博一  | 横浜市立大学・理学部・准教授                  | 1 |
| A03<br>公            | 19H05371 (廃止)<br>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<br>～<br>令和元年度 | 菅野 康仁  | 信州大学・繊維学部・特任助教                  | 1 |
| A03<br>公            | 19H05373<br>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<br>～<br>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<br>公            | 19H05372 (廃止)<br>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<br>～<br>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 |
| 公募研究 計 17 件 (廃止を含む) |  |                     |        |                                 |   |

[1] 総：総括班、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。）

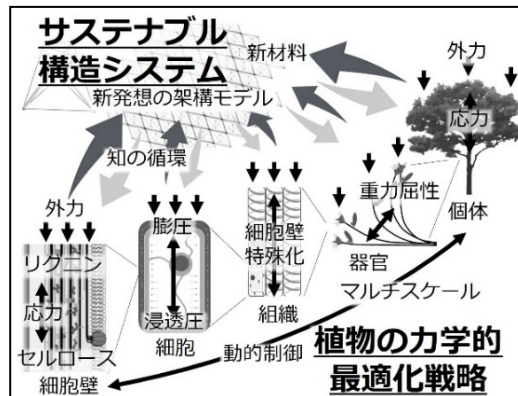
## 研究領域全体に係る事項

### 3 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应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。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+を獲得）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 藤原による土壌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いう、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应答して、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。

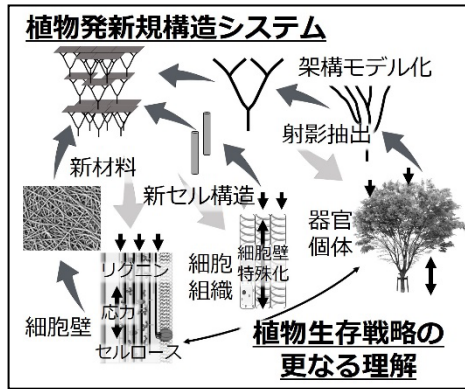
従来から、植物の体作りは、「ユニット（＝細胞壁・細胞骨格）が積み重なりモジュール（＝細胞・組織）を構成し、それらが高度に組み合わせられて全体システム（＝器官・個体）となる」、「細胞壁は鉄筋コンクリート様である（セルロース＝鉄筋、リグニン＝コンクリート）」等、建築構造物とのアナロジーで語られ解釈されてきた。前段で述べたとおり、さまざまな研究成果が植物の環境適応・生存戦略としての



「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」を設定する。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ている。



**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。

### ■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。

### ■研究期間終了後に期待される成果等

本領域の研究機関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う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。



## 4 審査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。

【指摘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。この方針は現状としてうまく機能しており、領域内の異分野研究分野間の連携が著しく促進された。その成果は、**異分野融合により得られた成果に係る雑誌論文が既に53件出版されている(2020年6月時点)**という点にもうかがわれ、この成功を受けて、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を出版予定である。

#### 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、総括班が開催する重要分科会として、植物科学と建築構造学の融合に不可欠な「構造解析と数値シミュレーション」に関する分科会を開催した。**とくに初年度には集中的に「構造解析と数値シミュレーション」関連の大型分科会を3回開催し、本領域の重点研究項目「植物の重力屈性」における構造解析と数値シミュレーションでの具体的な連携研究について議論した。

2020年度6月までに合計89回の大小さまざまな分科会が開かれており、総括班主催の大型分科会としては「**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」概念を各種研究分野への広報・普及に努めている。さらに関連する研究班への研究協力を仰ぐことで、両研究分野の相互理解の深化を進めた。

#### 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

領域内の異分野融合と連携研究の推進のため、**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)、といった連携支援策を当初から計画し、実行してきた。**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。**このために、領域発足2年目に、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した。これにより、**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13件の植物科学・建築構造学連携研究が進行中である。**

#### 対応策3) 領域代表サイトビジットにおける工夫

領域代表による参画研究班に対するサイトビジットは、領域代表と各研究班代表者が直接かつ個別に研究方針について議論することで、新たな連携研究、とくに異分野間研究のマッチングを推進するために企画したものであった。上記の所見での指摘を受けて、**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)も領域代表に同行して参加することとし、これによって、両分野連携のための具体的な議論を行った。**

【指摘2】計画研究の構成メンバーのほとんどが植物学者、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、公募研究班募集に先立って、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（チラシ）配布と、関連メーリングリストでの公募情報の配信を行った。こういった活動により、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った。この活動は功を奏して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（2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（2020年6月現在計6名）、領域全体として理工系研究者の増強を図っている。

#### 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年度に新規参入した公募班17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4件のみであり、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、生物物理学、電気化学**、などを専門分野とする研究代表者である。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ている。

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が開始されている。とくに、奈良先端科学技術大学院大学および東京大学において、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**を展開しており（「8. 若手研究者の育成に係る取組状況」において詳述）、領域全体として解析対象スケールを意識した研究の推進を試みている。

## 5 研究の進展状況及び主な成果

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までに何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにどこまで研究が進展しているのか、(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。

### 領域設定期間内及び中間評価実施時までの達成目標

本領域の領域設定期間内の達成目標は、「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の構造力学的視点からの体系的な理解」、そして、その理解をもとにした「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の提出」にある。中間評価実施時までの前半2年間に「植物の発生や環境応答における力学的最適化の研究項目の抽出」と「構造物に実装可能な植物最適化戦略の抽出」の2点の達成を目標と定め、研究を推進した。

| 申請時の研究推進計画        |   |
|-------------------|---|
|                   | 達成目標  |
| 前半2年間<br>(H30-R1) | <ul style="list-style-type: none"> <li>植物の発生や環境応答における力学的最適化の研究項目の抽出</li> <li>構造物に実装可能な植物最適化戦略の抽出</li> </ul>                                     |
| 後半3年間<br>(R2-R4)  | <ul style="list-style-type: none"> <li>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の構造力学的視点からの体系的な理解</li> <li>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の提出</li> </ul> |

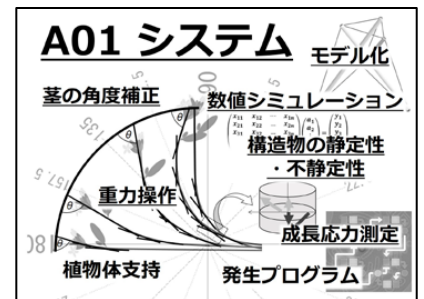
### (1) 研究項目ごとの領域設定期間内の達成目標と中間評価実施時までの研究進展状況

#### 研究項目 A01「システム」

【項目最終目標】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。

#### ①木質材料の環境に応答した力学的最適化メカニズムの解明(杉山班)：

化学分析、多変量解析、材料強度試験、数値シミュレーションにより、伝統木造建築物と多種多様な樹木を対象とした解析を行い、木質材料の環境応答を解き明かす。【中間評価時達成目標】木質材料の物性変化をもたらす要素の解明■圧縮あて材解析によって、木質材料の含水率が物性変化に深く関与することを明らかにした。また、樹皮の構造と引張特性がスベリン層と木化層の複合構造の水分変化による物性変化の違いに起因することを明らかにした。



②植物と建築構造の力学的アナロジーに着目した新たな構造システム設計理論(川口班)：植物構造をもとに、構造物の静定性、不静定性、形態安定性と不安定性について一般逆行列理論を用いた射影抽出法を適用し、限られた長さの部材のみで構成された架構から巨大なシステムを構成する最適ルールを求める。【中間評価時達成目標】植物の成長や重力屈性の際に発揮される実際の力を測定し、力学的アナロジーを検討する■新たな測定技術の開発によって、植物の成長や重力屈性における力の計測を成功させた。とくに植物の構造と成長データをもとに建築構造に適用可能な力学的アナロジーの抽出を開始した。

③植物構造システム形成の力学的最適化戦略の解明(澤班)：構造力学的解析から、線虫感染時の根粒形成と茎の発生過程、根の植物体支持機能を解き明かす。【中間評価時達成目標】草本植物の根や茎の力学的計測が可能な系を確立し実測を開始し、力学的最適化の観点から植物構造システムを再考する■原子間力顕微鏡(AFM)を用いた新規計測系を実装し、茎の発生過程に関する突然変異体候補の単離に成功した。さらに、根の植物体支持機能の構造力学解析に向けて、X線CTスキャンを用いた根系構造と地盤の動きを同時に可視化する技術を新たに開発した。

④重力刺激における植物の力学的最適化戦略の統合的理解(森田班)：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、テンセグリティ構造状のアクチン繊維が重力シグナリングに関わるとの仮説を検証する。【中間評価時達成目標】重力刺激感知を担うLZYタンパク質の細胞内局在変化を追跡する新規技術および側枝伸長角度の計測技術を開発し、重力刺激応答メカニズムを解析する■新規技術の開発に成功し、とくに総括班との連携によって、数理解析に基づいた重力応答プロセスの定量化に成功した。また、側枝の伸長角度補正の実態を捉えることに成功し、重力シグナリングのメカニズム解明に弾みをつけた。

#### 研究項目 A02「モジュール」

【項目最終目標】細胞～組織スケールの力学的現象である、「水輸送細胞である道管や仮道管が水を吸い





上げる際に生じる強い陰圧に耐えるために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。

①細胞壁の特殊化に着目した植物の力学的最適化戦略の解明（出村班）：細胞壁の特性が力学的性質を生み出すしくみ、細胞壁マイクロドメインの形成のしくみ、さらにこれらが植物細胞の増殖分化を制御するしくみを解き明かす。【中間評価時達成目標】二次細胞壁マイクロドメイン動態の解析手法および重力屈性動態の数理解析技術の

確立と、これらを用いた細胞壁マイクロドメインの形成と引張あて材形成のしくみの解明■計画班 細川と協働で、AFMによる二次細胞壁マイクロドメイン動態の解析手法を、計画班 森田と協働で、シロイヌナズナ花茎の重力屈性動態解析システムを開発し、花茎屈曲動態の定量的な構造力学的特徴因子の抽出に成功した。また、二次細胞壁マイクロドメイン化の解析を進め、従来の二次壁ポリマー沈着モデルを刷新した。

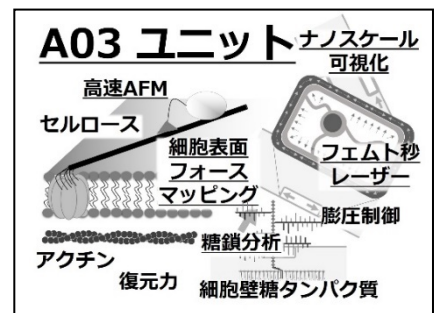
②栄養環境が制御する細胞壁の物理的性質を介した根の成長制御（藤原班）：新たな屈性現象として見出された栄養屈性を中心に、栄養状態に応じた力学的な根の成長制御や、栄養屈性過程での細胞壁の物理的性質の変化と役割を解明する。【中間評価時達成目標】栄養屈性の詳細を明らかにし、細胞壁物性との関わりを解き明かす■根の屈性動態の詳細観察から水分屈性が栄養屈性より優先すること、幼ポプラ植物体を用いた振動実験から一日5分間の振動刺激によって植物成長が増強されることを示した。また、細胞壁成分のひとつであるペクチンの量と質の変化が、シロイヌナズナ花茎の力学特性に大きく影響することを見出した。

③生きた植物の構造力学的パラメーターの取得、力学的最適化を可能にする植物の原理の抽出（豊田班）：力学的刺激によって発生する張力・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、これを用いて植物の力学的刺激受容・フィードバック機構を解明する。【中間評価時達成目標】細胞壁や細胞膜に張力やひずみを検知するバイオセンサーと多波長・広視野・高感度蛍光顕微鏡の開発■バイオセンサーの開発を進め、計画通り多波長・広視野・高感度蛍光顕微鏡のセットアップを完了した。さらに、計画班 森田との連携で、これらを用いて植物が重力に応答する瞬間を捉えることに成功した。

④先端イメージング技術による植物器官および細胞形態変化原理の解明（桧垣班）：器官および細胞形態を高効率・高精度に処理する画像解析技術、さらには、数理解析技術やAFMによる力学測定などの先端イメージング技術を開発し、植物器官および細胞形態変化を解き明かす。【中間評価時達成目標】子葉成長過程を網羅可能なイメージング手法の開発と実装■子葉成長に伴う形態変化に加えて、子葉表皮を構成するほぼ全ての表皮細胞の位置と形態の変化を計測する実験系を確立した。葉表皮細胞における細胞壁湾曲構造を構造力学的観点から検討する研究に着手した。加えて、視体積交差法に基づく植物形態の立体再構築する画像取得解析フレームワークのプロトタイプの開発に至った。

### 研究項目 A03「ユニット」

【項目最終目標】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。



①細胞形態を支える液胞による膨圧とその由来、細胞壁の弾性・塑性とその再生能力の解明（細川班）：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 $\mu\text{m}$ の精度で解析する。【中間評価時達成目標】フォースマッピングAFMとFSLを組み合わせた細胞レベルの力学測定システムを開発する■計画班 出村との協働で、細胞レベル力学測定システムを開発し、細胞壁の弾性特性の計測とそのデータの理論的な数値シミュレーション評価を成功させた。

②植物細胞壁の生合成・生分解プロセスの理解による環境に応答した力学的強度保持機構の解明（五十嵐班）：植物や微生物が細胞壁合成・分解に用いる酵素群の機能をナノスケールで可視化し、力学特性を定量化する。【中間評価時達成目標】植物細胞壁の主要成分であるセルロースを微小重力の宇宙空間で人工的に合成■宇宙空間でのセルロース合成に成功した。さらに細胞壁成分であるセルロース/キシランの新規切断酵素を見出し、その作用機序を解明した。

③非セルロース性細胞壁成分の構造力学的・化学的特性の解明（小竹班）：細胞外糖タンパク質である

アラビノガラクトタンパク質 (AGP) と、細胞壁最外層のペクチン・ラムノガラクトン RG-I の分子機能を解き明かす。【中間評価時達成目標】AGP 糖鎖の細胞壁力学特性における役割と RG-1 生合成機構の解明■AGP 糖鎖が細胞壁の力学特性を決定する重要因子であることが明らかになった。さらに RG-I 生合成に関わる新規酵素を同定し、植物の成長における細胞壁量の最適化の検証を進めた。

④植物の「器官屈曲力」と「復元力」のバランスの解明 (上田班) : 「器官屈曲により生じる細胞のひずみが機械刺激としてインプットされ、それが引金となって復元力が発動される」という仮説を検証する。【中間評価時達成目標】花茎屈曲と姿勢復元力のバランスを制御する分子実体の解明■植物ホルモンであるオーキシンが花茎屈曲と姿勢復元力のバランスを調節している可能性を新たに示した。また、計画班 出村との協働で姿勢復元力と花茎の剛性の関係についての解析に着手した。

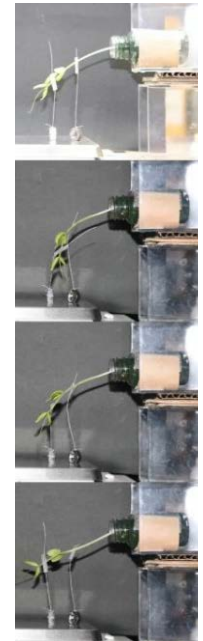
## (2) 本研究領域により得られた成果

### 研究項目 A01 「システム」

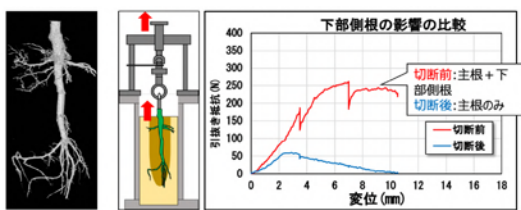
■計画班 杉山班 : カバノキ外樹皮コルク組織の構造物性を解析し、細胞壁中の水が応力伝達機能の一部を担っていることを明らかにした。また、樹木の重力応答時に形成される「あて材」の放射光実時間小角 X 線散乱解析により、水分量があて材の組織変形・応力発生に深く関わることを示した。さらに、伝統建築技術における樹種特性や加工特性を力学試験とレプリカ法による組織観察で定量的に解析し、木材特有の異方性・応力方向の知見を空間設計に利用できる可能性を示した。さらに、計画班 川口らとの連携で、樹木の構造にヒントを得た木構造の耐震性能を向上させるための「建築部材の部分的な破壊・離落する仕組み」の可能性について検討した。

■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 (有本他、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 (川口他、建築学会 2020)。また、計画班 藤原との協働で、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、その妥当性を示した。

■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 LZ1 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、重力刺激に反応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 (Kawamoto et al. 2020)。



豆苗を用いた重力屈性計測システム (川口班)



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 (Gunji et al. 2020)。また、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。

■公募班 島班 : 日本各地から採集した 5 種類のタケについて、節間隔などの形状データの数理解析を行い、種によらない形状ルールを新規に抽出した。

■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 (Chen et al. 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  $\mu\text{m}$  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 (He et al. 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 (Notaguchi et al. 2020)。



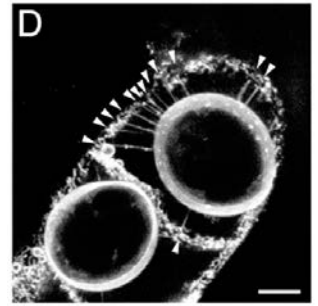
立木の成長応力計測 (松尾班)



■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解析を行った。LiDAR を用いた樹木の形状の点群データの取得に成功した。

研究項目 A02 「モジュール」

■計画班 出村班：植物表皮細胞の力学的特性を計測する AFM 解析技術を確立し、フェムト秒レーザー (FSL) による細胞膨圧の制御系と組み合わせることで新規の細胞壁構造モデルを構築した (細川班との協働)。さらに 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 (Yoneda and Ohtani et al. 2020 細川班との協働)。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 (Takenaka et al. 2018)。重力屈性に関しては、計画班 森田との協働により、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た。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。植物器官新生における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した (Kaga et al. 2020)。また、シロイヌナズナの器官再生系を確立し、細胞壁因子の器官再生への関与を示した (Chiam et al. 2019)。



D  
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)

■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た (Yamazaki et al. 2020)。また、計画班 出村との協働により、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た。さらに、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 (計画班 川口班との協働)、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らかにした (Shikanai et al. 2020)。



多波長・広視野・高感度蛍光顕微鏡の開発 (豊田班)

■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 (Toyota et al. 2018)。また、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、計画班 森田との協働で、植物が重力にตอบสนองする瞬間を捉えることに成功した。さらに根に機械的刺激を与えたときの  $Ca^{2+}$  シグナルを可視化することで、細胞 (膜材) と頑強な細胞壁 (突っ張り材) から成る植物は、圧縮されることよりも引っ張られること (張力) に強く反応することを示した。

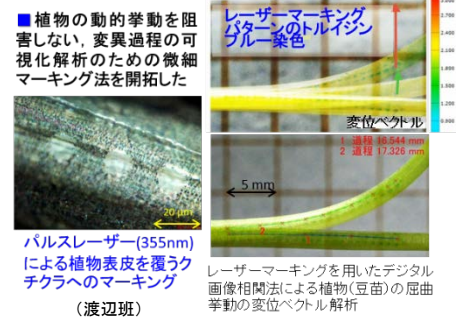
■計画班 桧垣班：公募班 渡辺との連携で、金属顕微鏡と AI (深層学習) を用いたシロイヌナズナ子葉表皮細胞の定量的な形態変化評価技術を開発した。さらに子葉表皮組織と水浸レンズを用いた連続光学切片像を四次元観察することによって、子葉表皮細胞の変形を定量的に評価する画像取得解析システムを開発した (Higaki and Mizuno 2020)。また、計画班 川口と協働で、細胞壁の湾曲構造を木造建築における継ぎ手構造への応用、公募班 岩元との連携で、支保工なしのアーチ・ヴォールト・ドーム構造の設計、といった新しい提案につなげた。さらに、計画班 森田・上田との協働で、視体積交差法に基づいて植物形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

■公募班 渡辺班：計画班 出村との協働で、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。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。

■公募班 岩元班：計画班 桧垣との協働で、微小な物理的圧力を花芽分裂組織に与える実験系を開発した。さらに花芽分裂組織の構造モデルを作成し、これを建築物に応用可能かの検討を始めた。

■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 (Sultana et al. 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、計画班 豊田との協働でトライコーム



■植物の動的挙動を阻害しない、変異過程の可視化解析のための微細マーキング法を開拓した

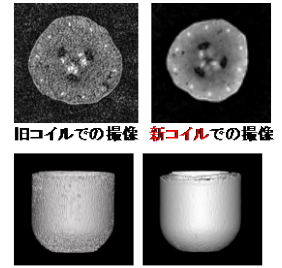
バルスレーザー (355nm) による植物表皮を覆うチクラへのマーキング (渡辺班)

レーザーマーキングを用いたデジタル画像相関法による植物 (豆苗) の屈曲挙動の変位ベクトル解析

への機械刺激によって生じる細胞内 Ca<sup>2+</sup>ウェーブの可視化に成功した。

■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製作した。

■公募班 中井班:計画班 出村・川口との協働で小ボア径 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(第 47 回日本磁気共鳴医学会誌 2019)。

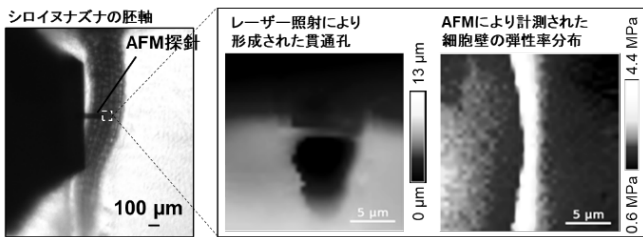


MRIデータから3D有限要素法モデルを構築、精度を検証し、解像度の限界等を探索。

(中井班)

### 研究項目 A03「ユニット」

■計画班 細川班:計画班 出村との協働により、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た。これを用いて、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したところ、FSL



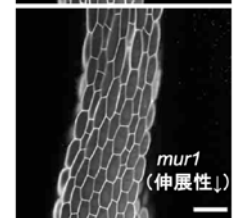
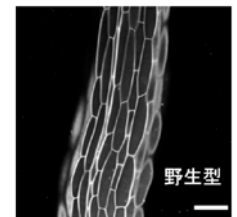
植物生細胞の力学特性計測システム(細川班)

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。さらに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唆した。また、計画班 出村との協働により、FSL による植物細胞操作技術を開発した(Rukmana et al. 2019, 2020)。

■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。また、モモの PpEXPA は、アセチル基修飾が導入されたセルロース/キシランを、また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(Igarashi et al. 2020)。

■計画班 上田班:シロイヌナズナのオーキシン関連因子の変異体で低下する姿勢復元力が繊維細胞におけるアクチン・ミオシン XI の機能不全に起因することを突き止め、オーキシンが屈曲と姿勢復元力のバランスを調節する可能性を示した。また、姿勢復元力の解析法を開発するとともに(Ueda et al. 2019)、計画班 出村との協働で振動試験や圧縮試験を行い、姿勢復元能力と花茎剛性の関係性を調べた。

■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(Yoshimi et al. 2020)。また、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(Takenaka et al. 2018)。さらに、細胞壁成分変異体を用いた荷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。



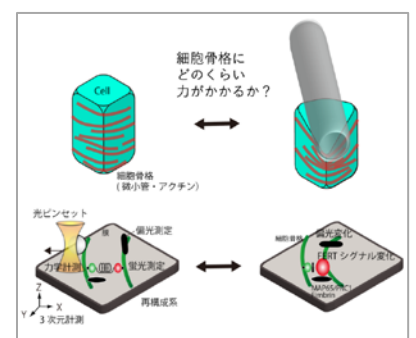
細胞壁の伸展性変化は細胞形態変化をもたらす(小竹班)

■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(Matsuda et al. 2019)。

■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 谷本班:花粉管の細胞壁をモデルとして、厚さ 100 nm 程度のシェル構造である細胞壁の変形と成長を 4D イメージングするために必要な細胞壁の染色技術の確立とマイクロ還流チャンバー作成に成功した。

■公募班 石川班:イネの倒伏耐性と稈(茎)の力学的特性の関係性を明らかにするためにイネ交配集団を用いた解析を行い、倒伏耐性に関与する量的形質遺伝子座を染色体 7、8、9 番に見出した。



FRET 張力バイオセンサーの開発(矢島班)



## 6 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、一般向けのアウトリーチ活動等の状況。令和2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 264本 (査読あり 237本、国際論文 227本) うち融合研究論文 55本**  
インパクトファクター(IF)>8.0: 40本 (以下に具体数記載)、>3.0: 148本/ジャーナル種類: 97種  
[Nature 1] [Science 4] [Energy Storage Materials 1] [Nature Plants 7] [Nature Commun 3] [Nucleic Acids Research 1] [Molecular Plant 2] [Proc Natl Acad Sci USA 6] [Chemical Science 1] [Physical Review Letters 1] [Current Biology 5] [Developmental Cell 1] [Global Change Biology 1] [Plant Cell 3] [Curr Opin Chem Biol 1] [PLoS Biol 1] [Curr Opin Biotechnol 1] (以上は2020年6月現在情報)

### [研究項目 A01]「システム」

#### ■計画班 杉山班 (計12本)

1. 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)
2. Nakajima T, Kobayashi K, \*Sugiyama J (2020) Anatomical traits of *Cryptomeria japonica* tree rings studied by wavelet convolutional neural network. *IOP Conf Series: Earth Environ Sci* 415: 012027 (査読有)
3. Huang Y, Meng S, Hwang S-W, Kobayashi K, Sugiyama J (2020) Neural network for classification of Chinese zither panel wood via near-infrared spectroscopy. *BioRes* 15: 130-141 (査読有)
4. \*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)
5. \*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11本)

1. 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
2. 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)
3. 細見亮太, 川口健一, 中楚洋介, 石塚広一, 外川文雄, 岡山信男, 有本清香, 出村拓 (2019) 植物の力学的最適化戦略に学ぶサステナブル建築構造システムにおける巨大建築設計手法の導出と数値解析 その1 研究概要. *日本建築学会大会学術講演梗概集 (構造 I)*: 971-972 (査読有)

#### ■計画班 森田班 (計9本)

1. 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)
2. \*Shindo M, Makigawa S, Matsumoto K, Iwata T, Wasano N, Kano A, Morita MT, Fujii Y (2020) Essential structural features of (2Z,4E)-5-phenylpenta-2,4-dienoic acid for inhibition of root gravitropism. *Phytochem* 172: 112287 (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)
5. Nakamura M, Nishimura T, \*Morita MT (2019) Gravity sensing and signal conversion in plant gravitropism. *J Exp Bot* 70: 3495-3506 (査読有)

#### ■計画班 澤班 (計32本)

1. Nakagami S, Saeki K, Toda K, Ishida T, \*Sawa S (2020) The atypical E2F transcription factor DEL1 modulates growth-defense tradeoffs of host plants during root-knot nematode infection. *Sci Rep* in press (査読有)
2. 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)
3. 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)
4. 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)
5. Tsai A Y-L, Higaki T, Nguyen C-N, Perfus-Barbeoch L, Favery B, \*Sawa S (2019) Regulation of root-knot nematode behavior by seed-coat mucilage-derived attractants. *Mol Plants* 12: 99-122 (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)  
 ■公募班 島班 (計 6 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)  
 ■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)  
 ■公募班 小野田班 (計 4 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)
2. He P, Wright IJ, Zhu S, Onoda Y, Liu H, Li R, Liu X, Hua L, Oyanoghafo OO, Ye Q (2019) Leaf mechanical strength and photosynthetic capacity vary independently across 57 subtropical forest species with contrasting light requirements. *New Phytol* 223: 607-618 (査読有)  
 ■公募班 野田口班 (計 8 本)
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  $\beta$ -1, 4-glucanases. *Science* in press (査読有)  
 ■公募班 張班 (計 6 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)

#### [研究項目 A02]「モジュール」

##### ■計画班 出村班 (計 45 本)

1. 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)
2. 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)
3. Tamura T, Endo H, Suzuki A, Sato Y, Kato K, Ohtani M, Yamaguchi M, \*Demura T (2019) Affinity-based high-resolution analysis of DNA binding by VASCULAR-RELATED NAC-DOMAIN7 via fluorescence correlation spectroscopy. *Plant J* 100: 298-313 (査読有)
4. 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)
5. 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)
6. \*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 19 本)

1. 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)
2. 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)
3. 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 transacting siRNA3 in response to low nitrogen. *Plant Cell Physiol* 60: 1961-1973 (査読有)
4. 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)
5. Tanaka N, Uruguchi S, Kajikawa M, Saito A, Ohmori Y, \*Fujiwara T (2018) A rice PHD-finger protein OsTITANIA, is a growth regulator that functions through elevating expression of transporter genes for multiple metals. *Plant J* 96: 997-1006 (査読有)

##### ■計画班 豊田班 (計 18 本)

1. 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)
2. 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)
3. 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 PLD $\alpha$ 1. *Plant Physiol* 180: 2004-2021 (査読有)

4. \*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)
5. Toyota M, Furuichi T, \*Iida H (2018) Molecular mechanisms of mechanosensing and mechanotransduction. *Plant Biomechanics In: Geitmann A., Gril J. (eds) 375-39* (査読有)

■計画班 檜垣班 (計 21 本)

1. Kwon SH, Wi T, Park YI, Kim MW, Lee G, Higaki T, Choi JH, \*Lee R (2020) Non-invasive early detection of calpain 2-enriched non-small cell lung cancer using a human serum albumin-bounded calpain 2 nanosensor. *Bioconjug Chem* 31: 803-812 (査読有)
2. 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)
3. 檜垣匠 (2020) バイオイメージングの近代史. *建築雑誌* 135: 11
4. Akita K, \*Higaki T (2019) An induction system for clustered stomata by sugar solution immersion treatment in *Arabidopsis thaliana* seedlings. *J Vis Exp* 144: e58951 (査読有)
5. 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)

■公募班 渡辺班 (計 7 本)

1. \*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)
2. 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)

■公募班 岩元班 (計 2 本)

1. 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)

■公募班 石黒班 (計 2 本)

1. 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)

■公募班 野元班 (計 5 本)

1. Hirakawa T, Kuwata K, Gallego ME, White CI, Nomoto M, Tada Y, \*Matsunaga S (2019) LSD1-LIKE1-mediated H3K4me2 demethylation is required for homologous recombination repair. *Plant Physiol* 181: 499-509 (査読有)

■公募班 佐藤班 (計 13 本)

1. 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 11 本)

1. 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* in press (査読有)
2. 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)
3. \*Hosokawa Y (2019) Applications of femtosecond laser-induced impulse to cell research. *Jpn J Appl Phys* 58: 110102 (査読有)
4. 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)
5. 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 18 本)

1. \*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)
- \*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)
  - 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)
  - \*五十嵐圭日子, 立岡美夏子 (2019) セルラーゼの中性子構造解析で明らかにするタンパク質における互変異の重要性. **放射光** 32: 59 (査読有)
  - 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 19 本)
- 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)
  - Iwabuchi K, Ohnishi H, Tamura K, Fukao Y, Furuya T, Hattori K, Tsukaya H, \*Hara-Nishimura I (2019) ANGUSTIFOLIA Regulates Actin Filament Alignment for Nuclear Positioning in Leaves. **Plant Physiol** 179: 233-247 (査読有)
  - 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)
  - 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)
  - 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 11 本)
- Yoshimi Y, Hara K, Yoshimura M, Tanaka N, Higaki T, Tsumuraya Y, \*Kotake T (2020) Expression of a fungal exo- $\beta$ -1,3-galactanase in Arabidopsis reveals a role 'of' type II arabinogalactan in the regulation of cell shape. **J Exp Bot** in press (査読有)
  - 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)
  - 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)
  - 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)
  - Takenaka Y, Kato K, Ogawa-Ohnishi M, Tsuruhama K, Kajiura H, Yagy 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)
- 公募班 中井班 (計 1 本)
- \*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)
- 公募班 矢島班 (計 1 本)
- 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)
- 公募班 野村班 (計 5 本)
- \*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)
- 公募班 谷本班 (計 1 本)
- Davi V, Chevalier L, Guo H, Tanimoto H, Barrett K, Couturier E, Etienn E, Boudaoud A, \*Minc N (2019) Systematic mapping of cell wall mechanics in the regulation of cell morphogenesis. **Proc Natl Acad Sci USA** 116: 13833-13838 (査読有)
- 公募班 小田班 (計 3 本)
- Sasaki T, Tsutsumi M, Otomo K, Murata T, Yagi N, Nakamura M, Nemoto T, Hasebe M, \*Oda Y (2019) A Novel Katanin-Tethering Machinery Accelerates Cytokinesis. **Curr Biol** 29: 4060-4070 (査読有)
- [招待講演] 領域全体(2020年6月現在): 合計 **162 件** (うち国際会議 54 件)
- [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
  - [A01 計画班 森田班] 森田美代 “Molecular mechanism of gravity signaling in gravitropism.” In 2018



International Conference of the Korean Society of Plant Biologist. Busan, Korea 2018年11月8-9日

- [A01 計画班 澤班] 澤進一郎 “Plant attractant and systemic-peptide signaling supporting nematode successful infection.” In International Symposium ‘Mechanisms of plant perception -from the endogenous to the exogenous-’. Lausanne, Switzerland 2019年9月11日
- [A02 計画班 出村班] 出村拓 “Functional Analysis of Polygalacturonases During Water-Conducting Cell Formation Required for Plant Adaptation to Land.” In Gordon Research Conference on Carbohydrate-Active Enzymes for Glycan Conversions. Proctor Academy (NH), USA 2019年7月20日
- [A02 計画班 豊田班] 豊田正嗣 “Glutamate is a wound signal triggering systemic calcium propagation.” In The 23rd International Conference on Plant Growth Substances. Paris, France 2019年6月27日
- [A02 計画班 桧垣班] 桧垣匠 “Plasma membrane delivery of H<sup>+</sup>-ATPase for stomatal response.” In International Symposium ‘Mechanisms of plant perception -from the endogenous to the exogenous-’. Lausanne, Switzerland 2019年9月19日
- [A03 計画班 五十嵐班] 五十嵐圭日子 “Molecular mechanisms of cellulase.” In 7th International Conference on Bio-based Polymers (ICBP2019). Thailand National Science and Technology Development Agency, Thailand 2019年11月10日

#### 【特許申請】領域全体(2020年6月現在): 合計5件

- [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
- [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

#### 【受賞】領域全体(2020年6月現在): 合計39件(うち若手研究者の受賞21件)

- [A01 計画班 杉山班] 杉山淳司 紫綬褒章 内閣府 2020年4月28日
- [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
- [A01 計画班 森田班] 西村岳志 2019年度NIBB若手研究者賞 基礎生物学研究所 2020年1月16日
- [A01 公募班 島班] 島弘幸 山梨科学アカデミー奨励賞 公益社団法人山梨科学アカデミー 2019年5月27日
- [A01 公募班 松尾班] 陳碩也 (D3), 松尾美幸, 吉田正人, 山本浩之 優秀発表賞 日本木材学会中部支部 2019年10月2日
- [A02 計画班 出村班] 西谷和彦 日本植物学会学術賞 公益社団法人日本植物学会 2019年9月16日
- [A02 計画班 豊田班] 豊田正嗣 NIKON JOICO AWARD 2019 最優秀賞 ”JOICO”賞 ニコンインステック 2020年2月19日
- [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
- [A03 計画班 五十嵐班] 山口空 (B4) 学部長賞 東京大学農学部 2019年3月17日
- [A03 計画班 上田班] 飯田秀利 AOSP Award Asia & Oceania Society for Photobiology 2019年9月22日

#### 【主催・共催シンポジウム】領域全体(2020年6月現在): 合計12件(うち主催国際会議5件)

- [主催国際シンポジウム] France-Japan Plant Cell Wall Workshop "Pectin Lovers Meeting" ゲストスピーカー: Jérôme Pelloux 博士 (Picardie 大学)・Fabien Sénéchal 博士 (Picardie 大学)・Josip Safran 氏 (Picardie 大学)・藤原徹博士 (東京大)・砂川直輝博士 (東京大)・竹中悠人博士 (立命館大)・國枝正博士 (奈良先端大). 東京大学弥生キャンパス, 東京 2019年10月1日 (参加者合計24名)
- [主催国際シンポジウム] “International symposium on strategies of mechanical optimization in plants” ゲストスピーカー: Olivier Hamant 博士 (ENS Lyon)・桧垣匠博士 (熊本大)・國田樹博士 (琉球大)・細川陽一郎博士 (奈良先端大)・友部遙氏 (京都大)・豊田正嗣博士 (埼玉大)・小野田雄介博士 (京都大)・Ali Ferjani 博士 (東京大). 熊本大学理学部1号館, 熊本 2019年12月5日 (参加者合計40名)

#### 【一般向けアウトリーチ】領域全体(2020年6月現在): 合計167件

一般向け講演27件、公開イベント43件(うち小中高生向け21件)、プレスリリース13件、メディア報道66件

- [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
- [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
- [A02 計画班 出村班] プレスリリース 出村拓, 大谷美沙都「持続可能資源である木質バイオマスの本体、リグノセルロースの生合成モデルを25年ぶりに刷新～産業利用の用途に即した質的改変技術の基盤開発へ～」奈良先端科学技術大学院大学 (Takenaka et al. (2018) Plant Cell の成果に関するプレスリリース) 2018年10月19日: 5件のメディア報道
- [A02 計画班 豊田班] プレスリリース 豊田正嗣「うま味が痛みを伝えている!?! ~植物が傷つけられたことを感じ、全身へ伝える仕組みを解明~」(Toyota et al. (2018) Science 361:1112-1115 の成果に関するプレスリリース) 埼玉大学/文部科学省記者クラブ 2018年9月13日: 24件のメディア報道
- [A03 計画班 五十嵐班] 小中高生向け 五十嵐圭日子 東京都立武蔵高等附属中学校 地球学特別講義「気候変動の現実を知る、きのこの酵素で木を利用する、バイオエコノミーを達成する」東京都立武蔵高等附属中学校 2019年1月8日



豊田班プレスリリース資料  
(2018年9月13日)より

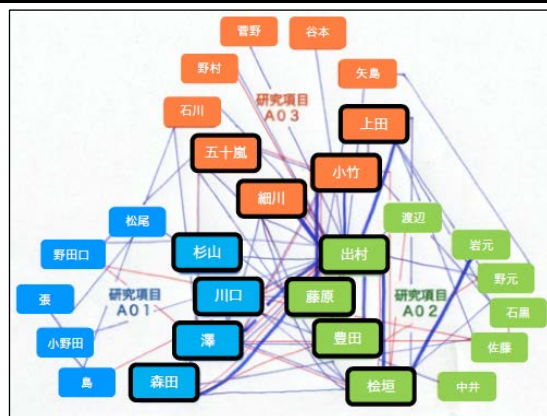
## 7 研究組織の連携体制

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。

### ■ 研究組織間の連携状況

#### (1) 領域代表者のサイトビジットによる共同研究の橋渡しの推進

領域代表が領域の全研究課題を正確に把握し、リーダーシップを発揮しながら領域を統括するために、2019年6月25日より全研究班の研究代表者研究室を訪問した。サイトビジットは1研究室あたり約2時間のスケジュールで行い、各班の研究課題について、その背景～進捗状況までを聴取、ディスカッションを行った。とくに個別聴取情報を元に、サステナブル構造システム教育研究支援センター（SSSC）の利用奨励や、領域内連携・共同研究の橋渡しを含めた、研究方向性の具体的なアドバイスをを行った。このサイトビジット活動が功を奏し、現在、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している（右上図）。結果として、当初からの目論見通りの研究項目横断的な共同研究を基軸とした研究体制ができあがっている。



研究班間の共同研究実施状況。  
青線は進行中、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の数に比例している。  
(黒枠線：計画班、それ以外は公募班)

#### (2) 分科会の開催の奨励

さまざまなテーマ別の勉強会・討論会を分科会として設定し、「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」など、研究班を超えた集会として開催した。分科会テーマは領域内の要請によって随時新規のものを取り入れ、2018・2019年度の合計で89回の分科会を開催した。分科会の開催と参加を通して、さまざまなバックグラウンドをもつ研究者間の実質的な繋がりが構築でき、とくに研究分野間の常識の違いを解消することに大いに役立っている。

#### (3) 多様なコミュニケーションツールの活用

上記の集合型会議である分科会に加えて、メーリングリストやコミュニケーション用チャットアプリ（Slack など）、テレビ会議システムポリコムや Skype の早期導入など、多様なコミュニケーションツールを活用してきた。COVID-19以降はオンライン会議ツールも積極的に導入している。以上を通じて、さまざまな研究グループ間の情報共有・交換を、リアルタイムで実施する情報網を構築した。この結果、2020年6月現在、遠隔地にいながらにしてオンタイムな連携が可能な領域研究体制が実働している。

#### (4) 「ダブルメンタリング制度」および「若手研究会」を通じた若手育成の充実化

若手研究者育成活動（ダブルメンタリング制度や若手研究会）を通して、若手連携を通じた研究班間の連携の促進を図っている。（若手研究者支援に関しては、次ページに詳述）

#### (5) 総括班による研究支援（サステナブル構造システム教育研究支援センター（SSSC））

領域参画者への研究支援コアセンターとして SSSC に「力学測定/顕微操作」、「イメージング」、「画像解析/数値シミュレーション」、「構造解析/オミクス」、「化学分析」の支援部門を設置し、各領域メンバーが得意とする研究手法の共有（例えば、出村班・総括班による数値シミュレーション技術の提供）や、研究試料の提供（豊田班が開発したカルシウムセンサー GCaMP の提供）を推進した。これによって領域内での研究材料・手法の共有が進み、連携研究の促進に大いに役立っている。

### ■ 研究項目間の共同研究推進

研究連携は当初の予想を遥かに上回る勢いで進んでいる。2020年6月現在、領域内で132件の共同研究が実施され（右表）、その内34件がすでに発表成果に至っている。中でも、班間の共同研究成果として既に11報の論文が出版された。現在、国際誌 Plant Biotechnology 誌において、本領域発信の新規解析技術に関する特集号を編纂中であり、8件の班間連携研究成果の報告が予定されている。この特集号によって「サステナブル構造システム学」の基盤となる技術が出そろふことになり、さらなる連携が期待できる。

| 研究項目内<br>研究項目間 | 共同研究<br>総数 | 進行中の<br>共同研究数 | 成果の出た<br>共同研究数 |
|----------------|------------|---------------|----------------|
| A01内           | 10         | 9             | 1              |
| A02内           | 25         | 17            | 8              |
| A03内           | 4          | 3             | 1              |
| A01-A02間       | 39         | 23            | 16             |
| A01-A03間       | 11         | 9             | 2              |
| A02-A03間       | 43         | 37            | 6              |
| 領域全体           | 132        | 98            | 34             |



## 8 若手研究者の育成に係る取組状況

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2年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポストドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

生物学と理工学との真の融合を目指すためには、従来の研究分野の枠や固定概念にとらわれない柔軟な発想をもった若手研究者の積極的参画が重要である。さらには本新学術領域で生まれた融合研究を受け継ぎ、さらなる発展を担う若手研究者の育成を目指し、本領域では以下の取組を行っている。

### ■本領域の人員構成状況

全研究参画者166名（2020年6月時点）の4割以上である72名が39歳以下の若手研究者である。さらに8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。

### ■「若手ワークショップ」の開催

領域内における若手研究者の交流と研究活動促進を目指して、大学院生、ポストドク、助教による研究発表の場である「若手ワークショップ」の毎年秋の開催を計画している。2019年度には11月10～11日の日程で合計64名が参加し、熱のこもった研究成果発表・討論が行われた。垣根のない議論が行われた結果、多くの新規共同研究の萌芽が生まれつつある。（その発展的活動については下記「若手研究会」の項参照）



### ■大学院生への「ダブルメンタリング」の実施

大学院生のさらなる研究力の底上げを図るべく、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」を実施し、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作り促進を目論んでいる。ダブルメンタリング活動では熱の入った討論がなされ、とくに参加大学院生から「視野が広がった」「研究への活力が生まれた」と好評を得た。今後も継続実施予定である。



ダブルメンタリングでは熱心な討論が行われた  
(2019年11月)

### ■「植物構造オプト若手研究会」による独自融合研究テーマの立案とサポート

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特任教員（助教～講師）および博士研究員合計9名（2020年6月時点）をコアメンバーとした「植物構造オプト若手研究会」を設立した。この若手研究会メンバーを対象に、新規融合プロジェクトを発案する研究コンペを開催中であり（2020年6月時点）、優れた研究計画には総括班から研究資金援助を行う予定である。こうした実践的な研究計画立案能力トレーニングと遂行能力の涵養を支援することによって、次世代研究者の育成、さらに本領域から生まれる新たな融合研究の促進を目指している。



東京大学柏キャンパスでのユウカリ植樹(2019年6月)

### ■若手研究者への分野横断的研究集会および共同研究の提供

本領域では分科会（前項参照）を積極的に開催しており、若手研究者が幅広い分野の最前線研究を学ぶ機会を多く設けている。また、建築学と植物学の融合共同研究として、領域内4研究室に所属する若手研究者を中心に、新規に植樹したユーカリを用いた「生きた建築作り」を展開している。これによって、若手研究者に、分野横断的共同研究の実地参画の場を提供している。

### ■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へい

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」、および海外の優秀な若手研究者の招へいも行っている。これまでに6名の若手研究者の派遣（うち、1ヶ月以上のドイツおよびカナダへの派遣1名ずつ、1週間以上のフランスおよびドイツへの派遣1名ずつ）、海外若手研究者1名の3ヶ月の招へい（豊田班）を行った。

### ■若手研究者の受賞について

以上のような取組の結果、これまでに20件の若手研究者の学会・研究集会での発表賞、3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、若手研究者の合計12件の無期雇用常勤研究職への就職があり、着実に次世代研究者育成の成果が出始めている。



## 9 研究費の使用状況・計画

研究領域全体を通じ、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、研究費の使用状況や今後の使用計画、研究費の効果的使用の工夫について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

### 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、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た 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ため、今後、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い、領域内での効果的使用を推進する予定である。また、領域内で開発中の装置や技術、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に、総括班活動として今後の技術ワークショップおよび技術共有アレンジを主導する。また、COVID-19 の対応として、遠隔での実験（現地の学生アルバイトを雇用する等）が可能かどうか検討する。

### 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（Ca<sup>2+</sup>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。すでに総括班のサポートのもとで、計画班では、ユーカリとポプラを用いた野外試験を開始しており（東大駒場、東大柏、東大弥生、奈良先端大）、これを関連する公募班にも拡大する予定である。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る。

### 研究費の使用状況や今後の使用計画

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（2019 年度で、物品費が約 30%、人件費が約 50%）となっている。一部の研究課題において、特定の項目に偏った使用が見られるが、いずれも当初の研究計画に基づいたものであり、問題はない。今後は、COVID-19 への対応で研究打合せや国内学会・国際学会出席などの旅費支出が減少することが予想されるが、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する。とくに、2021 年 6 月開催を予定（COVID-19 対応で 2020 年 6 月から延期済み）している本領域主催の国際シンポジウムが予定通りの規模で開催できない可能性も考えられる。この対応として、一部をオンライン化しての開催も検討中である。時差を考慮してセッションを設定することにより、外国（現地）からの参加者、とくに若手（学生や博士研究員）の参加者を募ることで、新しい形の国際シンポジウムのあり方を提案する。また、COVID-19 対応として遠隔での研究活動が可能かどうか検討し、旅費支出分を学生アルバイト等の人件費に充当することで大学院生の生活支援を行いつつ、その研究活動を推進させるなどの新しい研究体制を打ち立てる予定である。

### 研究費の効果的使用の工夫

新たな機器の購入や新しい研究技術の開発は領域全体にとって有用な情報であり、研究費の効果的使用にもつながる。そういった情報を逃さないように、令和 2 年度には領域代表・出村を中心に、オンラインでのサイトビジット（個別情報交換）を定期的に行うことを検討している。この際には、各研究班の研究計画への COVID-19 の影響を確認し、その上で、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導する。

## 10 今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「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2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、今後公募する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

### 「革新的・創造的な学術研究の発展」を促進する領域研究推進方策

本研究領域では、領域設定期間内の目標として「植物の力学的最適化戦略の体系的な理解」および「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の提出」を挙げている。このためには、生物学（植物科学）と理工学（空間構造工学、建築構造学計測工学、数理科学）の有機的連携が不可欠である。

中間評価実施時までの前半2年間の間に、前述のとおり、植物科学の研究者と理工学の研究者の密な連携によって、「サステナブル構造システム学」の基盤となる新規技術の開発を大いに進めることができた。さらに、これらの新規技術の利用によって、生物学側および理工学側の両方から、サステナブル構造システムモデル構築に向けた力学的最適化プロセスの抽出と検討がなされた。

#### 【前半2年間で確立した新規開発技術】

**A01 項目「システム」:** 放射光実時間小角 X 線散乱による木質材料構造解析技術、X 線 CT スキャンによる植物根系構造・地盤動態の可視化技術、植物形態の 3D 再構築技術、根の栄養屈曲誘導技術、マルチスペクトルレーザー同軸変位計による葉形状変化測定技術、植物表面へのレーザーマーキング技術、植物運動の力学的特徴要素の定量的な抽出技術

**A02 項目「モジュール」:** 重力屈性動態の定量的物理量抽出技術、多波長・広視野・高感度蛍光顕微鏡撮影技術、植物器官新生誘導技術、ガラスキャピラリーを用いた細胞への荷重負荷技術、細胞形態の高効率・高精度画像解析技術、金属顕微鏡と AI を用いた表皮細胞形態変化定量化技術

**A03 項目「ユニット」:** AFM と FSL による細胞壁の力学測定技術、FRET 張力バイオセンサーによる細胞骨格の力学特性測定技術、セルロース分子の人工合成技術、細胞壁多糖の分子構造加工技術、細胞壁構造 4D イメージング技術、MRI による植物形態定量化技術

#### 【前半2年間で抽出・検討した力学的最適化プロセス】

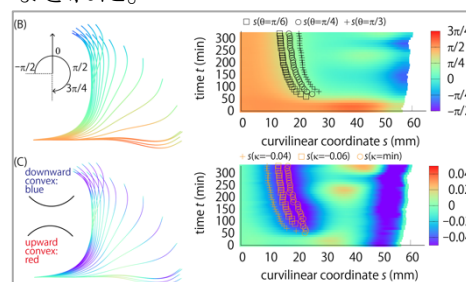
**植物科学側:** 重力屈性における植物細胞壁の力学的機能（計画班 出村 森田）、水分状態のリアルタイム計測（公募班 渡辺）、あて材や外樹皮、葉の構造物性と含水率の関連（計画班 杉山 公募班 小野田）、樹木形状の詳細点群データの取得（公募班 張）、振動刺激による植物生長の増強（計画班 藤原）、ジグソー様の子葉表皮細胞形態の定量化（計画班 桧垣）、植物細胞の強い弾性発生機構（計画班 細川）

**理工学側:** 木材特性を基盤とした空間構造設計（計画班 杉山 川口）、花芽分裂組織構造に基づく新規ドーム構造（公募班 岩元）、支保工なしの新規アーチ構造建築手法（計画班 桧垣 公募班 岩元）、細胞壁張力バランスに習った膜構造（計画班 川口 細川 出村）、樹木側枝の構造力学的特性に基づく筋交い形状（計画班 出村）

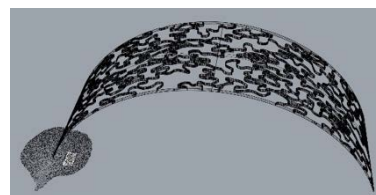
今後は、上記の開発技術を存分な活用を通して、冒頭で述べた領域最終目標達成にむけて、実空間に適用可能な植物のもつ力学的特性の本質要素を絞り込む。具体的には、以下の項目が整理されている。

- 重力屈性や根の力学を基盤とした微小な力でダイナミックな動きを達成する建築設計
- 葉や花の展開機構や構造特性をもとにした支保工なしのアーチ構造建築手法
- あて材・葉の構造特性に基づく省エネルギードーム構造設計
- 樹木・タケの構造に倣った省部材で高い剛性を達成するタワー構造
- 植物発生と癒傷（修復）のメカニズムを基盤とした新たな建築材ユニット
- 植物細胞壁の力学特性を模倣した環境に応答する建築部材材料

これらの具体的なゴールに向けて、空間構造工学研究者のさらなる参画が必須である。このため後半2年の公募班募集においては、当該分野の研究・技術開発の必要性を明確に記載し、さらなる補強を図る。ま



重力屈性動態の定量的物理量抽出技術（出村班）



葉の細胞構造に立脚した支保工なしのアーチ構造建築法の構想（桧垣班・岩元班）

た、この公募にあたっては、大きい研究予算を必要としない建築設計やデザイン、理論系の研究テーマも考えられることから、一部の公募班の予算上限を低くすることで採択課題を増やすことも計画している。この際、若手研究者・女性研究者を代表者とする公募班課題を増やすべく、多彩な宣伝活動を展開する。

計画班に関しても、後半の2年間で進めるべき自らの研究データの実建築への適用に向けて、研究協力者の追加や外部委託などの研究体制・戦略の強化を推奨する（必要に応じて、研究分担者の追加も有効）。領域代表のリーダーシップの元、重力屈性といった具体的解析対象への集約化と一層の分野間連携を進め、本領域の出口に位置づけている「植物の力学的最適化戦略の体系的な理解」および「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の提出」の達成にあたる。

### ポストコロナ時代を見据えた新たな研究連携体制の構築

COVID-19 感染拡大防止と研究活動の継続・発展を両立させることは、個々の研究者レベルでは容易ではなく、領域としての支援が極めて重要である。本領域は重要研究拠点が全国各地に散っているため、領域発足当初から多くの会合をオンライン（テレビ会議システムやスカイプなど）で開催してきた。また、2020年5月22～23日には全班が参加する領域班会議をオンライン（Webex を利用）で開催し、100名を超える参加者による研究発表と研究討論を行い、成功を収めている。こうした経験を生かして、オンライン会合の利点（参加者全員への発信に加えて、チャットツールなどでの個別コミュニケーションが可能であること、また、相当額の旅費支出が抑制できること）を最大限に生かした領域運営を行う。

本領域は実験を伴う研究活動がメインであることから、研究活動の完全オンライン化は不可能であるが、総括班・SSSC 活動の活発化や領域参画研究グループ間での解析分担アレンジを通じた、研究活動の積極的なリモート化を模索する予定である。このために、研究拠点に在籍する大学院生を RA として積極的に雇用し、拠点の共有設備・装置を用いたリモート実験を担当させる、などを想定している。これは COVID-19 後の学生経済支援策としても機能し、若手研究者育成にも一定以上の効果が期待できる。さらにリモート研究による新規共同研究のあり方については、前述の「若手研究会」発案の融合研究プロジェクト（参画若手研究者は、東京、愛知、奈良、熊本に居住している）で試行する。以上の方策は、生活圏に即した地域分けに基づく研究拠点整備を要求することから、他新学術研究領域や理化学研究所などの大型の研究機関、文部科学省が進めている「共同研究・共同研究拠点」整備事業との積極的連携を進め、ポストコロナ時代の新たな研究連携体制の構築を目指す。

### 国際的ネットワーク構築計画について

今後とも、従来から進めてきた海外5拠点（カナダ UBC、フィンランド VTT、米国 UGA、フランス ENS de Lyon、英国ケンブリッジ大）との深い連携を足がかりとして、国際的ネットワークのさらなる展開を行う。ポストコロナ時代を見据えた国際的ネットワーク深化の計画として、本領域では、オンラインベースの研究交流の積極化を予定している。海外5拠点との交流としては、欧州3拠点と北米2拠点に分けての定期的なシンポジウム開催（日本の夕方＝欧州の午前、日本の早朝＝北米の午後）を行うことで、日本の研究者が世界の研究の潮流から取り残されず、むしろ日本がリーダーシップを発揮できる国際的ネットワーク体制の構築を目指す。さらに、新たな国際連携先候補である、生きた植物を部材として利用する建築設計の第一人者であるドイツ Stuttgart 大・Jan Knippers 博士、Ferdinand Ludwig 博士などとの調整を開始した。今後、Stuttgart 大を6つ目の国際拠点とし、国際的ネットワークの拡大と深化を進める予定である。

さらに、国際的ネットワーク拡大のためには、領域代表 出村らが深く関わる「植物細胞壁研究コミュニティ」との関係強化が有効だと考えている。2021年6月には本研究領域主催の国際シンポジウムを国内にて実施予定であり、計画班 小竹が Chair を務める国際会議 Plant Cell Wall Biology 2021（2021年6月、札幌）と合わせて、本研究領域成果の世界的な普及に努め、国際的ネットワークの強化を図る。また、領域代表 出村が Scientific Committee、計画班 森田が International Advisory Committee として関わっている 10th International Plant Biomechanics Conference（2021年8月、リヨン）では、領域成果発表を集中的に行うことで、「Plant Biomechanics」分野での世界的プレゼンスを一気に高める計画である。

以上を通して、植物と建築が融合した「サステナブル構造システム学」活動の幅を世界に広げ、新たな研究潮流に育てたい。

## 11 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。

東京大学・理事・副学長 福田裕穂  
（東京大学未来ビジョン研究センター・特任教授）

本領域の特徴は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協創により、それぞれの分野にインパクトを与えると共に、新たな研究領域を創出することである。このため、本領域では「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」との達成目標を立てた。当然のことながら、この連携・融合は簡単ではない。これについては、審査結果の所見でも指摘されている。この対応策として本領域では、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、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、3)領域代表サイトビジットにおける工夫を行うことで、連携の促進を図った。私としては、この対応策が極めてうまくいっていると評価したい。たとえば、分科会は、若手を中心に2つの領域にまたがる「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」など、研究班を超えた集会を開催し、89回を数えている。実際、本年5月にWEBで開催された班会議では、2つの領域にまたがる多くの研究成果が報告されており、分野を超えての議論も盛んである。新たな融合領域が創出されつつあると判断している。

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

生物構造を工学に役立てるバイオミメティクスは長い歴史があり、多くの成果が生み出されてきた。しかし、多くの場合、工学研究者が生物構造を見て応用するという研究スタイルで、生物学者自身が工学的志向と思考を持って研究をする例は多くなかったように思う。本領域は、世界的に著名かつ現在も超一線で活躍する生物学者である領域代表が、前領域の成果から着想し企画した点が斬新である。従って、領域の多くのメンバーは生物学者であり、生物学者集団に工学の視点を加えた研究スタイルに新規性があり、新学術領域として相応しい。領域会議に参加し、領域代表の強力なリーダーシップのもと、計画班研究者が役者兼エンハンサーとなって、新しい領域へと挑戦しようという公募班を巻き込み、ポジティブフィードバックで大きな盛り上がりを見せていることがわかった。また、計画班を中心に、本領域の達成目標の一つである「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」についてすでに多くのインパクトある成果が出版されている。「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」については、領域会議、サイトビジットの中で、領域代表、計画班代表が逐一意識して討論を進め、領域全体で意識共有されている。残り期間でどのような進展が見られるか大きな期待をしたい。

東京大学・名誉教授 三浦公亮  
（文部科学省宇宙科学研究所・名誉教授、株式会社ミウラ折りラボ・名誉会長）

本研究領域では植物科学と空間構造工学という異なる領域の研究者が複合・融合して共同研究を進めており、極めて挑戦的な取組みである。この取組みについては、日本建築学会の機関誌である「建築雑誌」の6月号に特集記事として掲載されていることからわかるように、建築分野に大きなインパクトを与えるものとなっている。植物科学研究においても、植物の構造や力学特性を的確に捉えるために、これまでに植物科学では使われてこなかった技術や概念を取り込んでおり、飛躍的な研究の進展につながっていることがうかがえる。今後は植物と建築物の類似点に着目した研究の展開が期待できるが、類似しつつも異なるコンセプトを一つにしていくところにこういった異分野融合研究の面白さがあり、今後

待したい。また、異分野融合研究では、双方向からの要求をどのように叶えるかが重要であり、実際の研究の場で議論を交わすことが求められる。その意味で、本領域のアウトプットとして具体的な成果物（ハードウェア）を領域内の専門家の協働作業でつくり出す、といった取組みに期待したい。例えば、巨大なシダレザクラなどの構造イメージに、植物由来の構造システムや植物特有の葉の展開収納構造、しなやかな枝のフレキシブル構造、植物的な情報ネットワーク、を組み込んだ人工の樹（「植物構造オプトの樹」）が想定される。領域代表によると、領域発足当時から最終年度までにバーチャルの（コンピューター上の）植物特有の構造特性を取り込んだ構造物の作成を考えていた、との話だが、実際のハードウェアとして制作し、展示するもの良いだろう。今後の展開に期待している。

**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・南極の大量の水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ヴォーに見られるが、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。しかし、我々が構築する構造物自身はこのような機能を持たず、自然の猛威に耐えられず、環境の変化に対応できず、長い年月の時の流れにも耐えられず、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り、これまでに続くさらに大きな成果を期待する。