

機関番号：14603
領域設定期間：2018～2022
領域番号：8005
研究領域名（和文） 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
研究領域名（英文） Elucidation of the strategies of mechanical optimization in plants toward the establishment of the bases for sustainable structure system
領域代表者
出村 拓（DEMURA Taku）
奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授
研究者番号：40272009
交付決定（予定）額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,180,500,000円

研究の概要

本領域では、植物の営む諸現象に潜む「力学的最適化戦略」に立脚した、新たな建築構造システム原理の基盤を創成する。このために A01 から A03 の三つの研究項目を設定する。研究項目 A01「システム」では、器官から個体スケールでの力学現象の理解、及び、そこからの新たな「建築システム」の提案を、研究項目 A02「モジュール」では、細胞から組織スケールの力学現象の理解、及び、建築における「モジュール（積層工法におけるブロックなど）」の新規デザインを、研究項目 A03「ユニット」では、サブ細胞スケール（「細胞壁」、「細胞骨格」など）の力学的特性の解析、及び、建築における「ユニット（建築部品や部材など）」の開発を、それぞれ行う。

研究分野：植物分子および生理科学関連、建築構造および材料関連、木質科学関連

キーワード：力学的最適化、サステナブル構造システム、植物科学、建築構造学、空間構造工学

1. 研究開始当初の背景

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。さらに、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も成し遂げられてきた。このように、研究開始当初において、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。本研究の開始までに、領域代表 出村らの研究によって、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が成し遂げられた。また、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、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、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。これらに加えて、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が見いだされ、植物の重力屈性においては、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も打ち立てられていた。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。前述のとおり、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、との本領域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すこととなった。

2. 研究の目的

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。

3. 研究の方法

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てモデル化し、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モデルとして提案する。

4. 研究の進展状況及び成果

(1) 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」のしくみを解明する。

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） ■圧縮あて材の解析によって、木質材料の含水率が物性変化に深く関与すること、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） ■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。さらに、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） ■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スキャンを用いて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） ■総括班の支援の下で、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。

(2) 研究項目 A02「モジュール」

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に強化するしくみ」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」を解明する。

① 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の解明（出村班） ■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 栄養環境による細胞壁の物理的性質の変化を介した根の成長制御メカニズムの解明（藤原班） ■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いだした。

③ 生きた植物の構造力学的パラメーターを取得し、力学的最適化を可能にする植物の原理を抽出（豊田班） ■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） ■ 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。また、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き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の開発に至った。

(3) 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。

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） ■ 計画班 出村との協働で開発した細胞レベル力学測定システムを用いて、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に成功した。

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） ■ 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だし、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） ■ 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明らかにした。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） ■ 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。

5. 今後の研究計画

上記の研究成果を受けて、領域目標の達成にむけて、以下の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。

- (1) 重力屈曲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
- (2) 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
- (3) 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
- (4) 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
- (5) 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
- (6) 植物細胞壁の力学特性を模倣して環境に応答する建築部材

6. 主な発表論文等（受賞等を含む）

- (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) Notaguchi M, et al. (2020) Cell-cell adhesion in plant grafting is facilitated by β -1,4-glucanases. *Science* in press
- (3) Furutani M, et al. (2020) Polar recruitment of RLD by LAZY1-like protein during gravity signaling in root branch angle control. *Nature Communications* 11: 76
- (4) Cai J, et al. (2020) Laser Direct Writing of Heteroatom-Doped Porous Carbon for High-Performance Micro-Supercapacitors. *Energy Storage Materials* 25: 404-415
- (5) Rukmana TI, et al. (2019) Enzyme-Assisted Photoinjection of Megadalton Molecules into Intact Plant Cells Using Femtosecond Laser Amplifier. *Scientific Reports* 9: 17530
- (6) Ezaki T, et al. (2019) Bridging the Micro-Macro Gap Between Single-Molecular Behavior and Bulk Hydrolysis Properties of Cellulase. *Physical Review Letters* 122: 98102
- (7) Sasaki T, et al. (2019) A Novel Katanin-Tethering Machinery Accelerates Cytokinesis. *Current Biology* 29: 4060-4070
- (8) Furumizu C, et al. (2018) 3D body evolution: adding a new dimension to colonize the land. *Current Biology* 28: R838-840
- (9) Takenaka Y, et al. (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
- (10) Toyota M, et al. (2018) Glutamate triggers long-distance, calcium-based plant defense signaling. *Science* 361: 1112-1115
- (11) Takenaka Y, et al. (2018) Pectin RG-I rhamnosyltransferases represent a novel plant-specific glycosyltransferase family. *Nature Plants* 4: 669-676
- (12) 杉山淳司 紫綬褒章 内閣府 2020年4月28日
- (13) 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
- (14) 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
- (15) 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
- (16) 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

ホームページ等

<https://www.plant-structure-opt.org/>