
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

領域番号：8005

平成30年度～令和4年度
科学研究費補助事業（科学研究費補助金）
（新学術領域研究（研究領域提案型））
研究成果報告書

令和6年6月

領域代表者 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

はしがき

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、持続可能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持続可能な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である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が成し遂げてきた。このように、領域発足時において、日本の風土に根ざした持続可能な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)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み込みが、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や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、細胞壁構造の動的制御による植物形態形成制御などが相次いで解明された。これに加えて、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を見出し、植物の重力屈性研究として、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が打ち立てられた。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の役割以上の知恵、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持続可能な構造システムの創成を目指し、本領域が発足した。

研究組織

計画研究

領域代表者

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)

(総括班)

研究代表者

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)

研究分担者

澤 進一郎 (熊本大学・大学院先端科学研究部(理)・教授)

研究分担者

大谷 美沙都 (東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授)

(計画班)

A01 杉山班

研究代表者

杉山 淳司 (京都大学・大学院農学研究科・教授)

研究分担者

五十田 博 (京都大学・生存圏研究所・教授)

A01 川口班

研究代表者

川口 健一 (東京大学・生産技術研究所・教授)

研究分担者

張 天昊 (東京大学・生産技術研究所・助教)

研究分担者

中楚 洋介 (東京大学・生産技術研究所・特任講師)

A01 澤班

研究代表者

澤 進一郎 (熊本大学・大学院先端科学研究部(理)・教授)

研究分担者

Ferjani Ali (東京学芸大学・教育学部・准教授)

A01 森田班

研究代表者

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)

A02 出村班

研究代表者

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)

研究分担者

西谷 和彦 (神奈川大学・理学部・教授)

研究分担者

大谷 美沙都 (東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授)

A02 藤原班

研究代表者

藤原 徹 (東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授)

研究分担者

三輪 京子 (北海道大学・地球環境科学研究科・准教授)

A02 豊田班

研究代表者

豊田 正嗣 (埼玉大学・大学院理工学研究科・教授)

A02 檜垣班

研究代表者

檜垣 匠 (熊本大学・大学院先端科学研究部(理)・教授)

研究分担者

加藤 壮英 (奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教)

研究分担者

國田 樹 (琉球大学・工学部・准教授)

A03 細川班

研究代表者

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)

研究分担者

安國 良平 (奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教)

研究分担者

三村 徹郎 (東京大学・大学院農学生命科学研究科・特任研究員)

A03 五十嵐班

研究代表者

五十嵐 圭日子 (東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授)

A03 小竹班

研究代表者

小竹 敬久 (埼玉大学・大学院理工学研究科・教授)

研究分担者 石水 毅 (立命館大学・生命科学部・教授)

A03 上田班
研究代表者 上田 晴子 (甲南大学・理工学部・准教授)
研究分担者 岩渕 功誠 (大阪医科薬科大学・医学部・助教)

公募研究

前期

研究代表者 島 弘幸 (山梨大学・大学院総合研究部・教授)
研究代表者 松尾 美幸 (名古屋大学・大学院生命農学研究科・講師)
研究代表者 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)

研究代表者 小野田 雄介 (京都大学・大学院農学研究科・准教授)
研究代表者 張 景耀 (京都大学・大学院工学研究科・准教授)
研究代表者 渡辺 明 (東北大学・多元物質科学研究所・准教授)
研究代表者 岩元 明敏 (神奈川大学・理学部・教授)
研究代表者 石黒 澄衛 (名古屋大学・大学院生命農学研究科・准教授)
研究代表者 野元 美佳 (名古屋大学・遺伝子実験施設・助教)
研究代表者 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)

研究代表者 中井 隆介 (京都大学・こころの未来研究センター・特定講師)
研究代表者 矢島 潤一郎 (東京大学・大学院総合文化研究科・准教授)
研究代表者 野村 真未 (筑波大学・生命環境系・特任助教)
研究代表者 谷本 博一 (横浜市立大学・理学部・准教授)
研究代表者 菅野 康仁 (信州大学・繊維学部・特任助教)
研究代表者 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)

研究代表者 小田 祥久 (国立遺伝学研究所・遺伝形質研究系・教授)

後期

研究代表者 渡辺 明 (東北大学・多元物質科学研究所・准教授)
研究代表者 野村 真未 (山形大学・理学部・助教)
研究代表者 山口 哲生 (東京大学・大学院農学生命科学研究科・准教授)
研究代表者 島 弘幸 (山梨大学・大学院総合研究部・教授)
研究代表者 張 景耀 (京都大学・大学院工学研究科・准教授)
研究代表者 津守 不二夫 (九州大学・工学研究院・教授)
研究代表者 永井 拓生 (滋賀県立大学・環境科学部・講師)
研究代表者 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)

研究代表者 四方 明格 (基礎生物学研究所・植物環境応答研究部門・助教)
研究代表者 宮田 卓樹 (名古屋大学・大学院医学系研究科・教授)
研究代表者 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)

研究代表者 石黒 澄衛 (名古屋大学・大学院生命農学研究科・准教授)
研究代表者 野元 美佳 (名古屋大学・遺伝子実験施設・助教)
研究代表者 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)

研究代表者 後藤 栄治 (九州大学・農学研究院・准教授)
研究代表者 岩元 明敏 (神奈川大学・理学部・教授)
研究代表者 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)

研究代表者 本瀬 宏康 (岡山大学・自然科学学域・准教授)

交付決定額(配分額)

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

研究発表

[雑誌論文]

領域全体: 論文総合計 **689 本** (うち査読あり 642 本、国際論文 602 本、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)

■後期公募班 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)
6. 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)

1. 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)
2. Suda H, *Toyota M (2022) Integration of long-range signals in plants: A model for wound-induced Ca^{2+} , electrical, ROS, and glutamate waves. *Cur Opin Plant Biol* 69: 102270 (査読有)
3. 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)
4. 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)
5. 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 α 1. *Plant Physiol* 180: 2004-2021 (査読有)
6. *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 檜垣班 (計 51 本)

1. 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)
2. 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)
3. 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)
4. *檜垣匠 (2020) バイオイメージングの近代史. *建築雑誌* 135: 11
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)

■前期・後期公募班 渡辺班 (計 27 本) (後期は A01 班に移動)

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)

■前期・後期公募班 岩元班 (計 16 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)

■前期・後期公募班 石黒班 (計 5 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)

■前期・後期公募班 野元班 (計 14 本)

1. 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)

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 52 本)

1. *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)
2. 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)
3. 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 CAZyPedia Consortium (Igarashi K 101 人中 33 人目) (2018) Ten years of CAZyPedia: 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 STEROLESTER 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

産業財産権

【出願】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

その他

【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 檜垣班] 檜垣匠 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 308 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ラゴラ」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**

研究成果

■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ตอบสนอง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った。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した。

■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、安全性と機能性が保障され、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 檜垣および計画班 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、などが相次いだ。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た。以上は、**植物は内的・外的環境因子の変動にตอบสนอง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の役割以上の知恵、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」にあった。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（パッチャル、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（バイオメティックス）**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、これは本領域の成果である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**可能性が高いと考えた。

■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**であった。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った。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、生物学の基本原理を書き換えることも期待された。**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が可能となる。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。

(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」することであった。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った。

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の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、レーザーシェーディング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、川口班との共同研究)
- 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)。
- 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)
- 計画班 澤班：茎の表皮に亀裂が発生する *chl3 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新たな過程を示した (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 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)。
- 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、植物が重力に反応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）。

■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繋げた。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）。

■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を発見するとともに（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製作した。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 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するが、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 $2.4\text{m} \times 2.4\text{m}$ の二次元膜構造物（金属板構造物）を作製した。

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）。

■**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/キシランを切断すること（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）。

■**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（JExp Bot 2020）。また、AGP 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）。