

<p>機関番号：14603</p> <p>領域設定期間：平成30年度～令和4年度</p> <p>領域番号：8005</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>領域代表者</p> <p>出村 拓 (DEMURA Taku)</p> <p>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</p> <p>研究者番号：40272009</p> <p>交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,180,500,000円</p>

研究成果の概要

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「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」を目標として、その達成のために、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。

A01「システム」では、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。

A02「モジュール」では、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。

A03「ユニット」では、サブ細胞スケールにおける微小な力学的特性を、構造の静定性や安定性の観点から解き直し、モデル化することを目標とした。原子間力顕微鏡（AFM）による局所応力検出技術とフェムト秒レーザー（FSL）による細胞の局所操作技術とを駆使し、細胞の構造由来の材料特性を μm の精度で解析する技術基盤を確立し、植物細胞の弾性についての理論検証と数値シミュレーション～モデル化に成功した。また、植物や微生物が細胞壁合成・分解に用いる酵素群について、セルロースの生合成と分解のナノスケール可視化に成功し、接ぎ木の際の組織接着におけるグルカナ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。

研究分野：植物分子および生理科学、建築構造および材料、木質科学

キーワード：持続可能社会、重力屈性、形態形成、バイオメカニクス、数値シミュレーション

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、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 中間/事後評価ともにA+）の成功により、世界を牽引する存在となっている。本領域発足前には、本領域研究代表 出村の一連の研究によって、植物二次代謝産物であるリグニンの二次細胞壁への組込みが、細胞レベルの力学構造を変化させ、さらには個体レベルの「力学的最適化戦略」に影響し、陸上植物の巨大化や形態複雑化をもたらした、という全く新しい進化的解釈を与える重要な研究を成し遂げていた。また、計画班 澤による線虫等の外的侵入者との攻防における細胞壁構造の重要性の発見、計画班 藤原による土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応答して、独自の構造ユニットである細胞壁を多様化させることで、「力学的最適化」を図っていることを強く示唆するものであった。

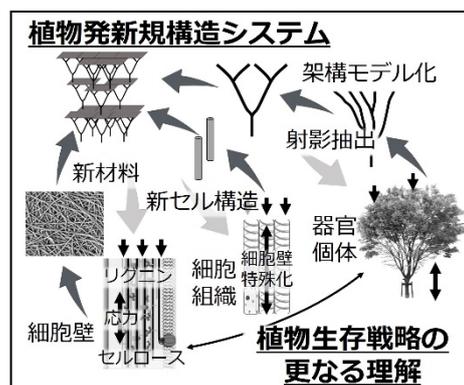
従来から、植物の体作りは、「ユニット（＝細胞壁・細胞骨格）が積み重なりモジュール（＝細胞・組織）を構成し、それらが高度に組み合わせられて全体システム（＝器官・個体）となる」、「細胞壁は鉄筋コンクリート様である（セルロース＝鉄筋、リグニン＝コンクリート）」等、建築構造物とのアナロジーで語られ解釈されてきた。前段で述べたとおり、さまざまな研究成果が植物の環境適応・生存戦略としての「動的な力学的最適化」の重要性を指し示す中で、植物から木材供給源として以上の知恵、すなわち、自律的な構造システムとしての植物の在り方を学ぶべきなのではないか、との計画班員の強い意識のもと、新しい角度から真に環境に調和した持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

2. 研究の目的

持続可能（持続可能な）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、真に持続可能な構造システムの基盤を創成することを目的とした。

3. 研究の方法

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持続可能な構造システムのモデルを提出すること」にある。この目標達成のために、植物体制と建築との階層的アナロジーを考慮した3つの研究項目、A01「システム」、A02「モジュール」、A03「ユニット」を設定した。また、植物独自の力学的最適化戦略「重力屈性」をモデル研究として取り上げた。A01「システム」器官～個体スケール：「重力屈性における姿勢制御や発生」「環境応答に伴う植物器官の形態形成」など、A02「モジュール」細胞～組織スケール：「細胞壁の部分的な強化による高い耐水圧機能」「植物細胞の規則正しい配置によって生じる力学的安定性」など、A03「ユニット」サブ細胞スケール：細胞の微細構成要素「細胞壁」、「液胞」、「細



胞の微細構成要素「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、を対象とした。以上の構造静定性や安定性を力学の観点から解き直しモデル化し、建築における「システム（建築物全体）」～「モジュール（積層工法におけるブロック）」～「ユニット（建築部品や部材）」の構造システムにスケールを超えて投射し、構造システム 3D モデル（バーチャル、実模型）として提案することを目指した。

4. 研究の成果

(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。

(2)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、数値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。

(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、モデル化することを目標とした。原子間力顕微鏡（AFM）による局所応力検出技術とフェムト秒レーザー（FSL）による細胞の局所操作技術とを駆使し、細胞の構造由来の材料特性を μm の精度で解析する技術基盤を確立し、植物細胞の弾性についての理論検証と数値シミュレーション～モデル化に成功した。また、植物や微生物が細胞壁合成・分解に用いる酵素群について、セルロースの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。

5. 主な発表論文等（受賞等を含む）

1. 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
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
3. 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

4. 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
5. 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
6. 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
7. 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
8. 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
9. 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*. *Nat Commun* 13: 1216.
10. Uchiyama T, Uchihashi T, Ishida T, Nakamura A, Vermaas JV, Crowley MF, Samejima M, Beckham GT, Igarashi K (2022) Lytic polysaccharide monooxygenase increases cellobiohydrolase activity by promoting decrystallization of cellulose surface. *Science Adv* 8: eade5155
11. 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
12. 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
13. 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
14. 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
15. Kiyoto S, Sugiyama J (2021) Histochemical structure and tensile properties of birch cork cell walls. *Cellulose* 29: 2817-2827
16. Furutani M, Morita MT (2021) LAZY1-LIKE-mediated gravity signaling pathway in root gravitropic set-point angle control. *Plant Physiol* 187: 1087-1095
17. 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
18. 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
19. 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
20. 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
21. 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
22. Yoneda A, Ohtani M, Katagiri D, Hosokawa Y, Demura T (2020) Hechtian strands transmit cell wall integrity signals in plant cells. *Plants* 9: 604
23. 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
24. 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
25. 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
26. Hirakawa Y, Sawa S (2019) Diverse functions of plant peptide hormones in local signaling and development. *Curr Opin Plant Biol* 51: 81-87
27. Umeno Y, Sato M, Sato M, Shima H (2019) Buckling-induced band-gap modulation in zigzag carbon nanotubes. *Physical Rev B* 100: 155116

28. 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
29. 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
30. 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
31. 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
32. 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
33. 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
34. 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
35. 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
36. 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
37. 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
38. 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
39. 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
40. 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
41. 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
42. 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
43. 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
44. 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
45. Takenaka Y, Kato K, Ogawa-Ohnishi M, Tsuruhama K, Kajiura H, Yagyū 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

受賞

杉山淳司 紫綬褒章 内閣府 2020年4月28日

川口健一 Pioneers' Award 英国サリー大学 2021年8月25日

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

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

桧垣匠 日本植物生理学会奨励賞 日本植物生理学会 2021年3月15日

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

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

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

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

ホームページ等

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