

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05486

研究課題名（和文）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

研究課題名（英文）Design strategy of large structures learning from analogy found in mechanics of plants

研究代表者

川口 健一（Kawaguchi, Ken'ichi）

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：40234041

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 47,600,000円

研究成果の概要（和文）：植物生理学者との共同研究により、生きた植物が自然界の様々な外力下で淘汰されてきた過程と、建築構造が長年にわたって自然外力に耐えていくために備えておくべき条件の間にアナロジーを観察し、これをヒントとして、より耐久性のある新しい着想による、大きな建築構造物の設計手法を開発することを目的として研究を行った。植物、特に木本植物は成長に時間がかかる為、研究成果を得るために時間がかかったが、同時に既存の樹木の観察などを行うことで研究を進めた。特に樹木の自己修復や呑み込み、癒合といった性質から、既存の建築構造物にない新しい建築構造のヒントを得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

植物生理学者と、我々建築構造分野の研究者が多くの時間を共有し、共通の研究目的に対して多くの議論を点で学際的な研究に大きな意義があったと考えている。分野によって、研究の進め方や、研究成果の発信の仕方などの違いが大きいことも学びとなった。研究成果としては、既存の建築構造には存在しない、生きた樹木による建築構造の構築という新しい分野の研究の端緒を見出すことができた点で、学術的、社会的意義は大きいと考えている。本研究では、生きた植物の成長過程を利用することで、樹木と人工的な材料を繊維を切断することなく融合させることが可能であり、新しい建築構造分野の構築につながるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Through joint research with plant physiologists, we tried to find an analogy between the process by which living plants have survived under various external forces in nature and the conditions that architectural structures must have in order to withstand natural external forces over many years. Based on this observation, we conducted research with the aim of developing a design method for large more durable architectural structures based on new ideas. Plants, especially woody plants, take time to grow, so it took time to obtain research results, but at the same time, he was able to advance this research by observing existing trees. In particular, we were able to obtain hints for new architectural structures not found in conventional architectural structures, especially from the properties of trees such as self-repair, swallowing, and fusion.

研究分野：空間構造工学

キーワード：植物構造オプト 生長 樹木 呑み込み現象 癒合 空間構造 建築構造 Baubotanik

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究は、出村拓(奈良先端科学技術大学院大学・教授)を中心とする植物生理学者のグループが、川口健一等の建築構造グループに共同研究を申し入れるところから始まっている。生きた植物を建築構造に活かしたい、という提案であり、当初は、植物の示す重力屈性などの性質が、外力に耐える建築構造の設計等に活かせるのではないかと、という建築構造力学に対する植物学者の漠然とした示唆を含んでいた。

これに対し、川口等は、建築構造と生物のアナロジーに着目した研究は、19世紀の D'Arcy Thompson の"On Growth and Form" にさかのぼるような既に長い歴史を持っており、新しい研究のポイントが見つかるかどうか難しいことを指摘した。また同時に、Bio-Mimetics のようなアプローチによる研究は既に 30 年近い歴史を持っていること、建築構造物を生物の様に見たてて、センサー、インテリジェンス、アクチュエータ、のように構築するスマート構造の研究も 20 年以上の歴史を持っていることを指摘した。その上で、スマート構造のような動物的な瞬時の反射的判断に着目するのではなく、植物の示す「成長」という時間的に長いプロセスに着目した研究は非常に少ないことを指摘した。

このようなディスカッションの過程を経て、植物の成長過程に着目した共同研究がスタートした。当初は、世界的にみても新しい研究分野であると考えて出発したが、植物の中でも、樹木(木本植物)の成長に着目した類似の研究は、ミュンヘン工科大学に約 10 年程先行する研究グループがあったことが判った。彼らはその研究分野を **Baubotanic** と名付けている。このグループとの交流を開始しようとし、出村領域代表等と北海道にて国際シンポジウムを企画したが、全世界的な新型コロナ禍が始まり、結局、コロナ禍の間隙について学生 2 名がミュンヘン工科大学へ訪れるという、わずかな人的交流が実現したのみであった。

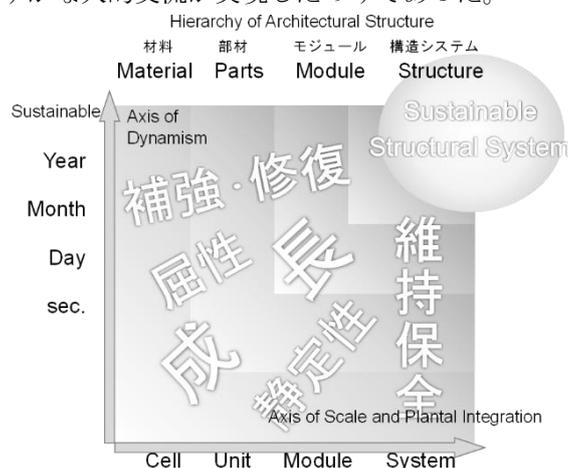


図1：時間的に長いプロセスに着目した研究のイメージ図

2. 研究の目的

本研究領域では、植物の力学的最適化の実際を、分子、細胞、組織、個体といったマルチスケールで理工学的に読み解くことを目的としています。さらには、植物の力学的最適化戦略を新規の省エネルギー・省部材の建築設計や新材料モデルに昇華させ、次世代型の真のサステナブル構造システムの基盤を創成することを目指した。特に、本計画研究では、領域内の植物科学研究者と協力し、機械的刺激に対する植物の応答戦略に学び、新しい知見を建築構造システムへ応用することに挑戦している。

3. 研究の方法

川口等の計画班において行った研究は、結果的に大きく分けて下記の 3 つのアプローチに大別できる。研究方法は力学的な測定や観察が多く、木本植物に関しては、研究開始直後より駒場と柏の 2 箇所のキャンパスに圃場を設け、生長の早いユーカリを中心に吞み込みや癒合現象、自己修復を調査する研究を開始した。植物生理学者との直接的な協働を行うのは、結果が出てからの観察によるフェーズが主であった。

- ・植物の観察から着想を得た研究
- ・植物が生長時に発揮する力に関する研究
- ・植物の自己修復や吞み込み現象に関する研究

センシングに関しては、東北大学の渡辺明教授の協力による植物内の水の移動に関する測定等が画期的な手法であった。

植物の観察から着想を得た研究では、植物やその細胞の挙動を力学的視点から解釈し、それを計算機上でシミュレートしてみるといった、計算力学的な方法を用いた。

植物が生長時に発揮する力に関する研究では、数時間から 1 日程度の短期に起きる成長過程

の力の観測であるため、草本植物や、木本植物の若い苗を用いた。電子天秤などを用いて極力微小な力を測定できるように心がけた。

植物の自己修復や呑み込み現象に関する研究では、実際の木本植物の詳細な観察が必要となるため、自己修復の研究では、CT や MRI を用いた画像による解析を行った。また、ガードパイプと樹木の力学的な相互作用の調査では、無線式加速度センサーを用いて振動モードなどを観測した。以上の様に、本研究における研究手法は、細胞レベルから建築レベルと言える樹木のサイズに至るまで、様々なスケールの測定技術を用いている。



図2：柏キャンパスの圃場の様子



図3：駒場キャンパスの圃場の様子

4. 研究成果

本研究は、特に植物生理学と建築構造学が共同で行うという学際的な共同研究を大きな特徴としている。川口等の計画班は、共同研究の発表の場として、日本建築学会においてオーガナイズドセッション(OS)を企画した(2020年~2023年)。本OSは「植物構造オプト」と題して企画した。2020年は新型コロナの感染流行により大会自体が最終的に中止となってしまったためOSにかわるオンラインセミナーを企画し、集まった論文をそれぞれの著者が発表し、質疑応答を行った。その後3年間はオンラインも含めて建築学会大会におけるOSとして開催した。これらの活動は建築学会における学際研究として大きなインパクトを与え、日本建築学会の会誌「建築雑誌」2020-6月号にて特集「建築と生物学の接点：多目的最適化をめざして」が組まれた。

本研究の本筋は、植物生理学者との共同研究により、生きた植物が自然界の様々な外力下で淘汰されてきた過程と、建築構造が長年にわたって自然外力に耐えていくために備えておくべき条件の間にアナロジーを観察し、これをヒントとして、より耐久性のある新しい着想による、大きな建築構造物の設計手法を開発することを目的とした研究である。植物、特に木本植物は成長に時間がかかる為、研究成果を得るために時間がかかったが、同時に既存の樹木の観察などを行うことで研究を進めた。特に樹木の自己修復や呑み込み、癒合といった性質から、既存の建築構造物にない新しい建築構造のヒントを得ることができた。

本報告書では5年間に行った計画班における研究を大きく3つの方向性に分けて整理している。

- ・植物の観察から着想を得た研究 (図4、図5)
- ・植物が生長時に発揮する力に関する研究 (図6、図7)
- ・植物の自己修復や呑み込み現象に関する研究 (図8、図9、図10)

これらの研究成果は、学術探求の道のりを考えると、それぞれがまだ端緒のレベルであり、今後も研究を続けていく必要があると考えている。また、前述のミュンヘン工科大学の研究グループとも研究交流を開始しており、今後交流を続けていく方針である。

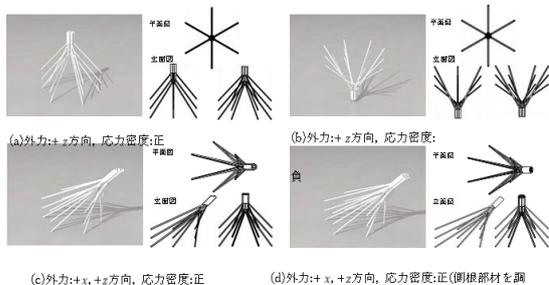


図4：応力密度法の根系形態への適用と支持構造物への応用に関する基礎的考察

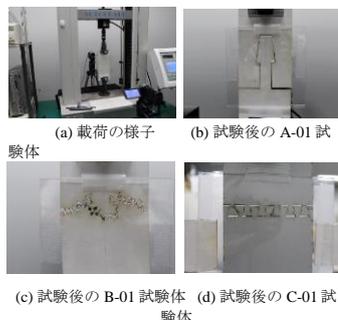


図5：物の葉細胞にみられるパターンの継ぎ手への直接的応用と在来継ぎ手との比較

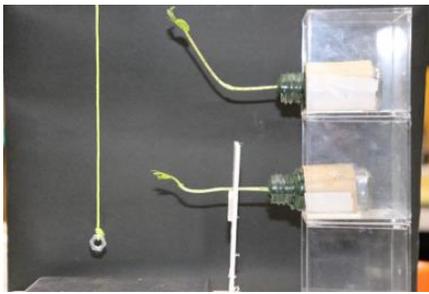


図6：植物の重力屈性挙動の観察と力学的特性に関する基礎的考察
(豆苗の重力屈性挙動における力学的特性)

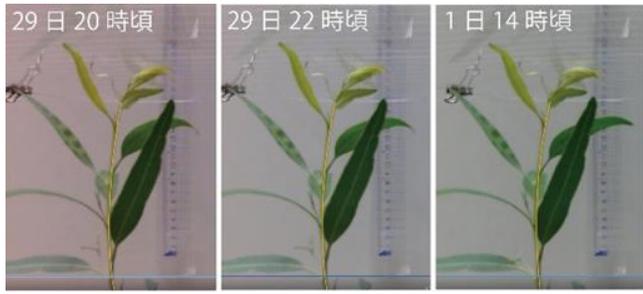


図7：ユーカリが伸長時に発揮する力の測定と建築構造への利用法の提案に関する基礎的研究

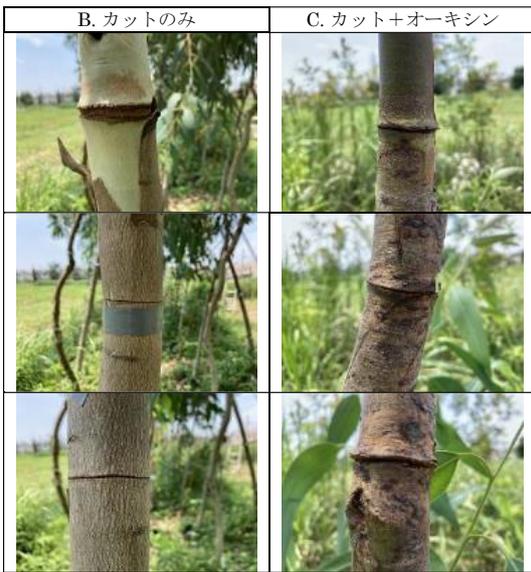


図8：切り傷に対するユーカリの自己治癒による組織変化の観察

表1 呑み込み現象の例

(a) ガードパイプ	(b) ブロック	(c) 木製支柱

図9：ガードパイプの呑み込みを有する街路樹の振動モード形状に関する基礎的考察

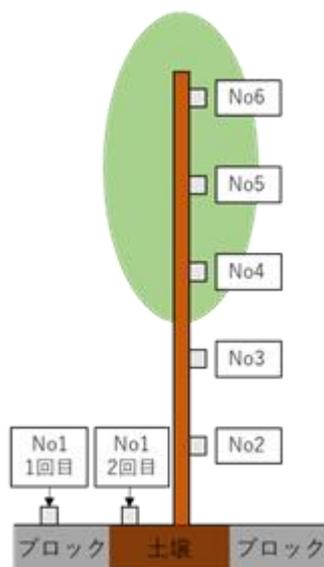


図10：ガードパイプの呑み込みを有する街路樹の常微動測定

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 川口 健一, 中楚 洋介, 張 天昊, 出村 拓	4. 巻 構造
2. 論文標題 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: 植物構造オプト	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 785 ~ 788
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中楚 洋介, 川口 健一	4. 巻 構造
2. 論文標題 Parametric L-systemを用いた樹木表面のポリゴンメッシュ生成に関する基礎的研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 825 ~ 828
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 武藤 宝, 川口 健一, 中楚 洋介, 張 天昊	4. 巻 構造
2. 論文標題 植物主茎伸長の力学的観察と成長原理に着目したエアチューブ構造に関する基礎的研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 877 ~ 880
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 堀口 翔太, 川口 健一, 張 天昊, 中楚 洋介, 津川 暁, 細川 陽一郎	4. 巻 構造
2. 論文標題 AFM(原子間力顕微鏡)探針で載荷された植物細胞の力学的応答と有限要素法による数値計算の比較に関する基礎的研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 853 ~ 856
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakaso Yosuke, Arimoto Sayaka, Kawaguchi Ken'ichi, Muto Takara, Ueda Haruko	4. 巻 37
2. 論文標題 Mechanical measurement of gravitropic bending force in pea sprouts	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plant Biotechnology	6. 最初と最後の頁 475 ~ 480
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5511/plantbiotechnology.20.1201b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakai Ryusuke, Azuma Takashi, Nakaso Yosuke, Sawa Shinichiro, Demura Taku	4. 巻 37
2. 論文標題 Development of a dynamic imaging method for gravitropism in pea sprouts using clinical magnetic resonance imaging system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plant Biotechnology	6. 最初と最後の頁 437 ~ 442
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5511/plantbiotechnology.20.1020a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 川口 健一, 中楚 洋介, 出村 拓	4. 巻 構造I
2. 論文標題 植物構造オプト: 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と力学的アナロジーに学ぶ巨大建築構造システム設計に関する基礎的考察	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 657 ~ 660
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 有本 清香, 川口 健一, 中楚 洋介, 出村 拓	4. 巻 構造I
2. 論文標題 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2: 豆苗の重力屈性挙動における力学的特性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 685~688
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小御門 真伍, 川口 健一, 中楚 洋介, 細見 亮太, 石塚 広一, 張 天昊, 出村 拓	4. 巻 構造I
2. 論文標題 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2 分裂する細胞とプリミティブな成長ルールが生成する成長パターンの簡単な解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 693-696
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中楚 洋介, 川口 健一, 藤原 徹, 山崎 清志, Marcel Beier	4. 巻 構造I
2. 論文標題 栄養屈性を利用した根系構造の形態創生に関する基礎的研究 その1:2次元におけるイネ根の栄養屈性挙動の観察と生長シミュレーション	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 701-704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 武藤 宝, 川口 健一, 中楚 洋介, 張 天昊	4. 巻 構造I
2. 論文標題 ユーカリが伸長時に発揮する力の測定と建築構造への利用法の提案に関する基礎的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 689-692
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 堀口 翔太, 川口 健一, 有本 清香, 中楚 洋介, 桧垣 匠, 出村 拓	4. 巻 構造I
2. 論文標題 植物の葉細胞にみられるジグソーパターンの継ぎ手への直接的応用と在来継ぎ手形状との比較	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 715-716
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 川口 健一
2. 発表標題 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：植物構造オプト
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中楚 洋介
2. 発表標題 Parametric L-systemを用いた樹木表面のポリゴンメッシュ生成に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武藤 宝
2. 発表標題 植物主茎伸長の力学的観察と成長原理に着目したエアチューブ構造に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀口 翔太
2. 発表標題 AFM(原子間力顕微鏡)探針で載荷された植物細胞の力学的応答と有限要素法による数値計算の比較に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川口 健一
2. 発表標題 植物構造オプト：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と力学的アナロジーに学ぶ巨大建築構造システム設計に関する基礎的考察
3. 学会等名 「シェル・空間構造」セミナー2020 『植物の力学的最適化戦略に基づく構造システムの探索：植物構造オプト』（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有本 清香
2. 発表標題 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2：豆苗の重力屈性挙動における力学的特性
3. 学会等名 「シェル・空間構造」セミナー2020 『植物の力学的最適化戦略に基づく構造システムの探索：植物構造オプト』（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小御門 真伍
2. 発表標題 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2 分裂する細胞とプリミティブな成長ルールが生成する成長パターンの簡単な解析
3. 学会等名 「シェル・空間構造」セミナー2020 『植物の力学的最適化戦略に基づく構造システムの探索：植物構造オプト』（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中楚 洋介
2. 発表標題 栄養屈性を利用した根系構造の形態創生に関する基礎的研究 その1：2次元におけるイネ根の栄養屈性挙動の観察と生長シミュレーション
3. 学会等名 「シェル・空間構造」セミナー2020 『植物の力学的最適化戦略に基づく構造システムの探索：植物構造オプト』（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武藤 宝
2. 発表標題 ユーカリが伸長時に発揮する力の測定と建築構造への利用法の提案に関する基礎的研究
3. 学会等名 「シェル・空間構造」セミナー2020 『植物の力学的最適化戦略に基づく構造システムの探索：植物構造オプト』（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀口 翔太
2. 発表標題 植物の葉細胞にみられるジグソーパターンの継ぎ手への直接的応用と在来継ぎ手形状との比較
3. 学会等名 日本建築学会(シェル・空間構造関連部門)発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有本清香, 川口健一, 中楚洋介, 出村拓
2. 発表標題 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
3. 学会等名 2019年度日本建築学会大会学術講演梗概集（構造I）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 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 .
3. 学会等名 2019年度日本建築学会大会学術講演梗概集（構造I）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中楚洋介
2. 発表標題 植物と建築構造の関わり
3. 学会等名 異分野融合ワークショップ「植物の複雑な構造とその形状や動態を解析するための技術基盤」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川口健一
2. 発表標題 植物生理学と構造工学
3. 学会等名 植物生理学会「植物構造オプト」シンポジウム「S04 植物の力学的最適化戦略をよみとく」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 有本 清香 , 川口 健一
2. 発表標題 応力密度法の根系形態への適用と支持構造物への応用に関する基礎的考察
3. 学会等名 2018年度日本建築学会大会学術講演梗概集(構造I)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川口健一
2. 発表標題 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
3. 学会等名 新学術領域「植物構造オプト」キックオフシンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	張 天昊 (Zhang Tianhao) (90845728)	東京大学・生産技術研究所・助教 (12601)	現在は名城大学准教授
研究 分担者	中楚 洋介 (Nakaso Yosuke) (70756361)	東京大学・生産技術研究所・特任講師 (12601)	現在は山田憲明構造設計事務所所員

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------