

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H04453

研究課題名(和文) 竹の特性を活かした建築構造の開発およびその構造設計手法、設計施工基準の確立

研究課題名(英文) Development of architectural structures utilizing the characteristics of bamboo and establishment of structural design methods and design and construction standards

研究代表者

陶器 浩一 (Toki, Hirokazu)

滋賀県立大学・環境科学部・教授

研究者番号：50363958

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：自然な竹を材料とした建築物の構造計算の実用に供するように以下の研究成果を得た。まず、自然な丸竹の材長に亘る断面寸法を定式化し、それを用いた解析の妥当性を実大長尺曲げ実験と比較することで検証し、次に材料強度およびそれを決定する要因について考察している。また、建設後7年半経過した実存竹建築(竹の会所)を解体し、材料特性および建築物の構造特性の経年変化を分析した。更に、工業的に加工した部材の材料試験を行い、加工および防腐防虫処理による材料特性の変化につき実験的に把握した。これらの成果に基づき、3つのタイプの構築物の設計および施工を行い、実現させている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

竹は無限の植物資源といわれるほど強い再生力を持ち、軽量で手作業による加工も容易なため、古くから生活の周りで多く用いられてきた。一方、近年は放置竹林による環境破壊が深刻な問題となっている。わが国では竹を主構造とした建築や材料特性に基づく構造計算をした例はほとんどない。本研究は、竹の材料特性の定式化を図るとともに実構築物の経年性状を確認し、竹構築物の構造設計および施工手法を確立しようとするものであり、これにより自然な竹の特性を活かした建築構築物を成立させることに貢献出来、竹の新たな価値が見出されれば竹材の需要が高まり環境問題にも貢献できる。

研究成果の概要(英文)：The following research results were obtained to provide a practical application of structural calculations for buildings made of natural bamboo. First, cross-sectional dimensions over the length of natural round bamboo timbers are formulated, and the validity of the analysis using these dimensions is verified by comparing it with full-scale long bending experiments. In addition, an existing bamboo building (bamboo meeting house), which was constructed 7.5 years ago, was dismantled to analyze the changes in material properties and structural properties of the building over time. Furthermore, material tests were conducted on industrially processed members to experimentally understand changes in material properties due to processing and preservative treatment. Based on these results, three types of structures have been designed, constructed, and realized.

研究分野：建築学

キーワード：構造設計 竹構造 定式化 材料特性 経年変化

1. 研究開始当初の背景

竹は無限の植物資源といわれるほど強い再生力を持ち、軽量で手作業による加工も容易なため、古くから生活の周りで多く用いられてきた。南アジアや中米では竹を主構造とした建築は古くからみられるが、我が国では竹を主構造とした建築や材料特性に基づく構造計算をした例はほとんどない。

一方、放置竹林による森林や地域の環境破壊は深刻な問題であり、竹の持続的な活用が求められている。竹は3～5年程度の短期間で建築用材として利用可能となり、竹を主構造とする建築が普及し竹の需要が高まれば、地域環境の改善のみならずSDGsにも貢献出来、また自然素材であるのでカーボンニュートラルにも貢献できる。

2. 研究の目的

研究代表者らはこれまでに竹材を建築の構造材として用いるための基礎的な研究を続けてきている。本研究は、竹を主構造とした建築構造物を一般化するための課題として下記のことを明らかにし、竹構造物の構造設計および施工手法を確立しようとするものである。

- (1) 形状寸法の定式化
- (2) 長尺曲げ試験及び幾何学的非線形解析
- (3) 引張試験
- (4) 引張性能の要因分析
- (5) 曲げ性能の確認
- (6) 試設計および施工

3. 研究の方法

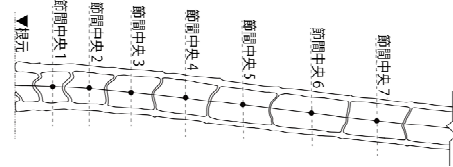
(1) 形状寸法の定式化

建築物の構造設計を行うにあたって、材の断面寸法を定めることは必要不可欠であるが、竹は全長にわたって直径および肉厚が変化し、設計に当たってそのすべてを計測することは現実的でない。ここでは、材長に亘る外径と肉厚の変化を測定することにより自然な長尺丸竹の断面寸法の定式化を図り、設計に供する資料とする。

宮城県および滋賀県で採取した竹を用いて形状測定を行う。形状計測を行う竹は、竹林より無作為に伐採した。

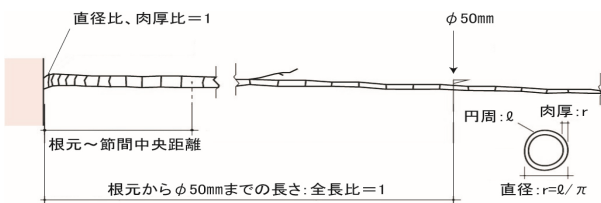


計測の様子

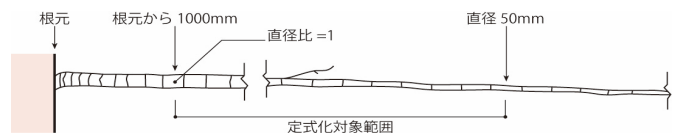


根元—節間距離

測定項目は、根元から節までの位置、根元から節間中央までの位置、節間長さ、節間中央の円周、直径、肉厚とする。長さについては根元から竹先端部直径50mmの位置までを有効とし、竹根元から直径50mmの位置までの長さを全長比1、肉厚比・直径比は竹根元の肉厚・直径を1とおいた比とする。円周 l は巻き尺により計測し、節間中央で計測した。肉厚はノギスにより計測し、最厚部と最薄部の平均値をとる。



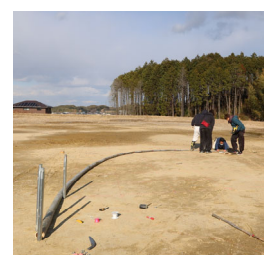
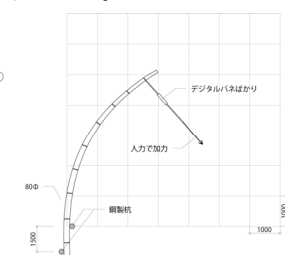
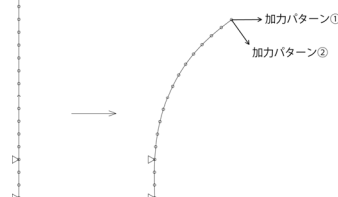
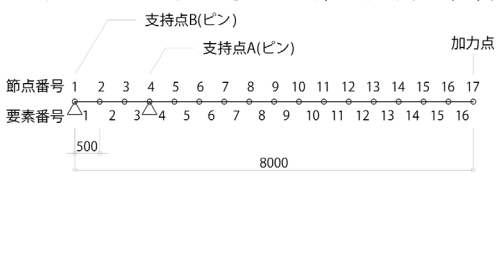
計測範囲と全長比



定式化対象範囲概念図

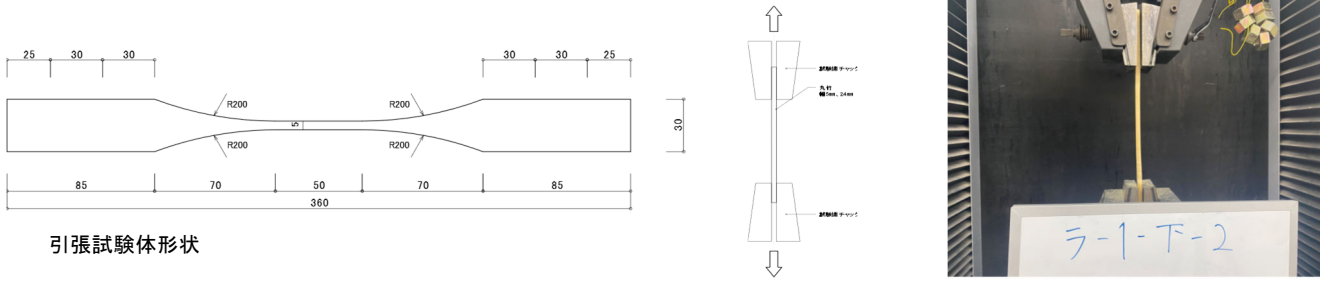
(2) 長尺曲げ試験及び幾何学的非線形解析

全長と直径、直径と肉厚の形状算出式を用いてモデル化した部材断面を用いて、幾何学的非線形解析により導いた曲げ形状と実大の曲げ試験による曲げ形状との比較を行う。解析モデルは、部材を要素分割した幾何学的非線形モデルで、支持点A,Bに境界条件としてピンを設ける。加力方向は①加力点における材軸に直交方向に加力(直交加力)、②変形後もX方向に加力(水平加力)の2パターンとする。実験は、試験体を地面に寝かせ、先端に結び付けたロープを人力で引っ張ることにより曲げる。地面上には1000mm間隔でグリッドを水糸で引き、各加力での変形後の座標を計測し、荷重はデジタルばねばかりで測定した。



(3) 引張試験

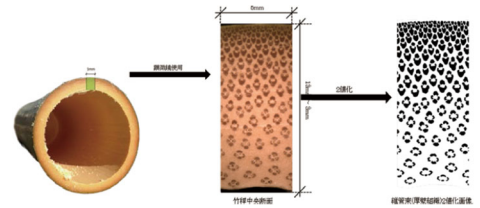
試験に際し、試験体は下図のようにしている。万能型試験機を用いた単調荷荷によって丸竹の材軸方向における最大引張耐力を確認した。試験は試験体が破損し、耐力の著しい低下が認められた時点で試験を終了とした。使用する竹は大阪府岸和田市の孟宗竹とし、曲げ試験体の破損していない部分から試験体を採集した。



引張試験体形状

(4) 引張性能の要因分析

竹材の引張の結果を分析し、引張強度と維管束密度の関係について分析を行う。維管束本数は竹程中央における断面 5mm 幅の片を顕微鏡により画像化し、その画像から目視で維管束本数を算出する。維管束密度は顕微鏡写真を白と黒に分けるため2値化し、維管束鞘内の厚壁組織の面積を計測する。さらに、算出した面積で引張強度を除した維管束引張応力度の算出を行う。



(5) 曲げ性能の確認

試験は、曲げ試験機を用いた4点荷荷によって丸竹の材軸方向における最大曲げ応力度を確認した。試験に際し、荷荷時の転倒、支圧破壊を防ぐため、下図の治具を取り付けた。荷荷点は試験体中央部の2点とし、試験体が破断して耐力が著しく低下する時点で試験を終了した。使用する竹は大阪府の孟宗竹とし、試験体中央部の直径を80φとして試験を行う。

(6) 試設計および施工

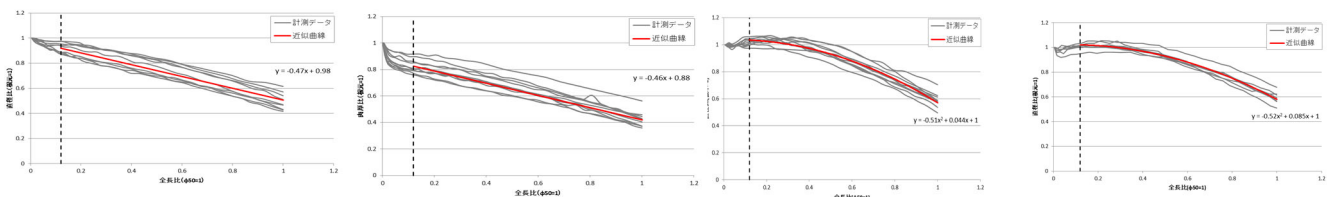
以上得られた知見に基づき、以下の3つのプロトタイプを設定し、実大構築物の設計及び施工を行った。

- ① 屋外ステージ ② 移動式ワーケーションスポット（東屋） ③ 日よけベンチ

4. 研究成果

(1) 形状寸法の定式化 ①全長比と直径比、肉厚比

節間中央の直径および肉厚の測定結果から定式化を行なった。その際、根元から全長比 0.12 (約 1000 mm) 付近まではばらつきおよび変化が大きいため、この部分は設計で用いないこととした。全長比と直径比の関係については、孟宗竹は1次式で、真竹は2次式に置換することができた。地域差については大きな違いはなかった。



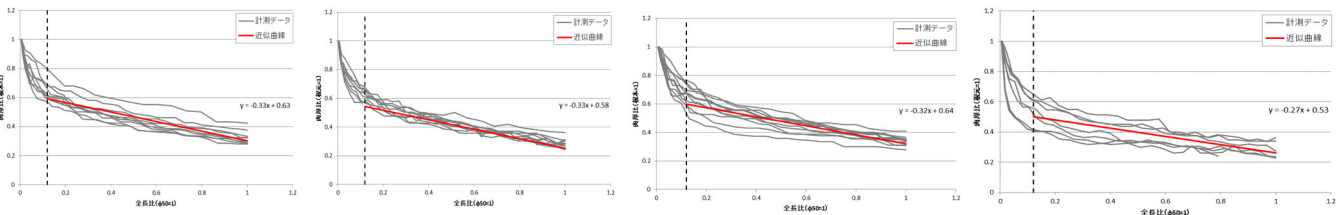
全長比と直径比の関係 (孟宗竹—宮城)

(孟宗竹—滋賀)

全長比と直径比の関係 (真竹—宮城)

(真竹—滋賀)

全長比と肉厚比についても根元から全長比 0.12 の範囲はばらつきが大きく、この部分を除くと孟宗竹・真竹共に一次式で近似ができた。地域差においては、孟宗竹、真竹とも、大きな違いはなかった。



全長比と肉厚比の関係 (孟宗竹—宮城)

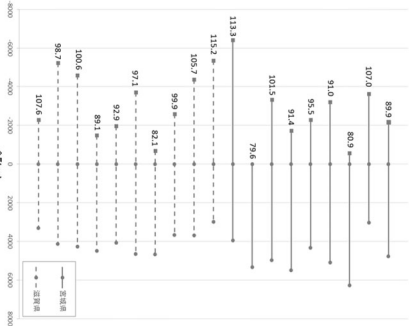
(孟宗竹—滋賀)

全長比と肉厚比の関係 (真竹—宮城)

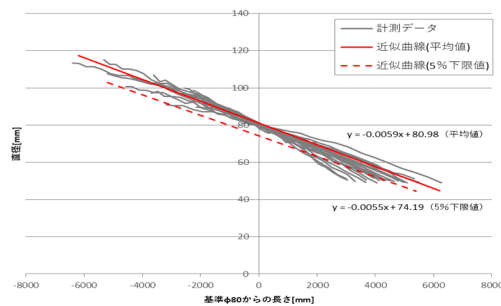
(真竹—滋賀)

① 80φを基準とした全長と直径（孟宗竹）

実際に建築構造の設計に適用する場合、元口の直径および材長さを決めることにより、その全長にわたる断面寸法が求められることが有効である。そこで根元から全長比 0.12（約 1000 mm）の位置から直径 50 mm の位置までを設計上有効なものとし、それぞれを直径 80 mm の位置を基準として整理した。



直径 80 mm を基準とした全長の分布

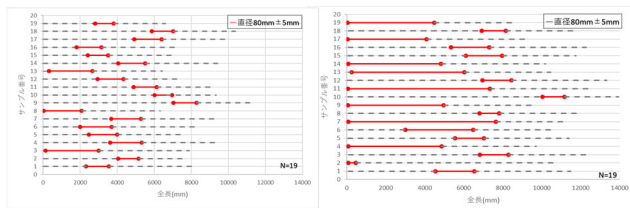


基準φ80からの長さとの関係

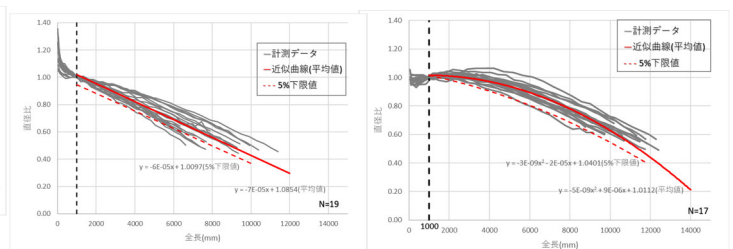
計測結果の平均値を算出し、定式化を行った結果を下表に示す。「信頼水準 75%における 95%下側許容限界値（以下、5%下限値とする）」により実際の構造設計に適用する場合における安全側での評価指標の1つとした。

② 全長と直径比（真竹・孟宗竹）

下図は、それぞれ真竹及び孟宗竹につき、計測に用いたサンプルの直径 80mm±5mm の範囲を示したものである。孟宗竹は 1 次式に近似できるためその位置を定めることができるが、真竹は二次式に近似されるため基準位置（例えば直径 80mm の位置）を設けることは困難であるため、「根元から 1000mm での直径を基準とした、長さ方向各位置での直径比（以下、直径比とする）」を用い、全長と直径比の関係を整理した。同様の方法で整理した孟宗竹、真竹の結果を下図に合わせて示す。



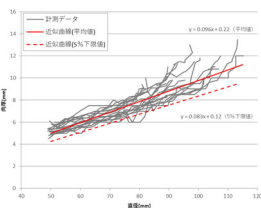
直径 80mm±5mm の範囲（孟宗竹）（真竹）



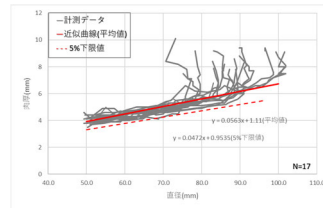
全長と直径比の関係（孟宗竹）（真竹）

③ 直径と肉厚（孟宗竹、真竹）

下図に根元から 1000 mm までを除外した孟宗竹と真竹の直径と肉厚の関係を示す。



直径と肉厚の関係（孟宗竹）



直径と肉厚の関係（真竹）

真竹は、肉厚がおおよそ 6mm 以上の範囲より根元側では直径が一定のまま肉厚が増してゆく。そのため、真竹では肉厚が 6mm 以下の範囲で平均値を採り近似式を得た。

以上の結果をまとめて下表に示す。各定式化において、例えば、初期形状決定段階では平均値から算出した式を用い、構造計算の段階では 5%下限度値から算出した式を用いることでより実際の形態に近く、また安全側の設計ができる。

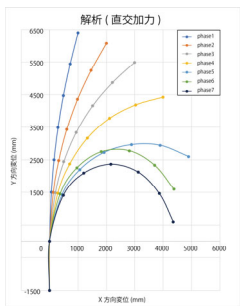
竹の形状算出式一覧（凡例）R:直径比（根元から 1000mm を基準）

- L:全長（根元からの距離）
- φ:直径 80mm からの距離
- r:直径
- d:肉厚

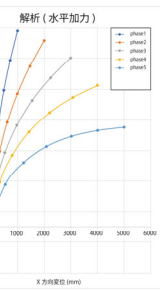
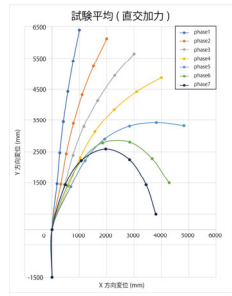
真竹	全長と直径比	平均値	$R = -5E-09L^2 + 9E-09L + 1.011$
		5%下限度値	$R = -3E-09L^2 - 2E-05L + 1.040$
孟宗竹	直径と肉厚	平均値	$d = 0.056r + 1.11$
		5%下限度値	$d = 0.047r + 0.95$
孟宗竹	全長と直径比	平均値	$R = -7E-05L + 1.0854$
		5%下限度値	$R = -6E-05L + 1.0097$
	直径と直径	平均値	$R = -0.0059φ + 80.98$
		5%下限度値	$R = -0.0055φ + 74.19$
直径と肉厚	平均値	$d = 0.096r + 0.22$	
	5%下限度値	$d = 0.083r + 0.12$	

(2) 長尺曲げ試験及び幾何学的非線形解析

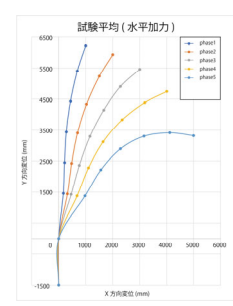
各加力段階で解析結果より得たデータと実大長尺曲げ試験の曲げ形状を表したグラフを下に示す。



解析結果と試験結果平均グラフ (①直交加力)



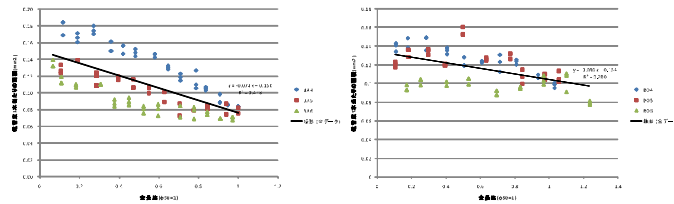
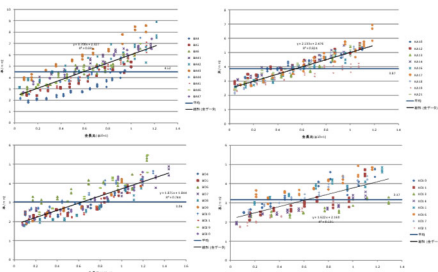
解析結果と試験結果平均グラフ (②水平加力)



形状算出式を用いて断面を与えた幾何学的非線形解析モデルによる解析形状は実大試験の形状をほぼ近似できていることから形状算出式の有効性を確認できた。設計段階において全長にわたる竹の直径や肉厚の測定や実大の曲げ試験を行わなくても、形状算出式を用いた解析により竹の曲げ形状の予測でき、これにより長尺竹を曲げて架構した建築物の初期形状を定めることができる。

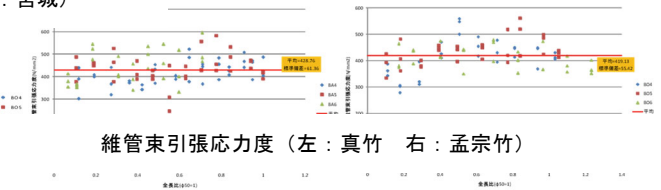
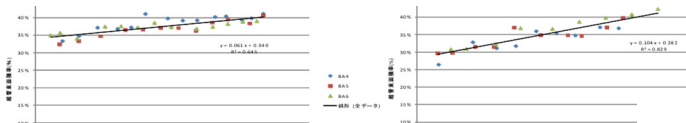
(4) 引張性能の要因

真竹および孟宗竹につき、横軸を全長比としたときの維管束面積率の変化を下図に示す。単位面積当たりの維管束本数は先端に行くにしたがって多くなり、維管束1本あたりの面積は先端に行くにしたがって小さくなる。



維管束一本あたりの面積 (左: 真竹 右: 孟宗竹)

単位面積あたり維管束本数 (上: 真竹 下: 孟宗竹 左: 滋賀 右: 宮城)



維管束引張応力度 (左: 真竹 右: 孟宗竹)

維管束面積率 根本-先端推移 (左: 真竹 右: 孟宗竹)

次に維管束面積率を算出すると先端に行くに従って大きくなり、引張応力度とほぼ比例になる。維管束引張応力度は長さ方向にはほぼ一定になる。従って竹の引張応力度は維管束断面積に比例することが分かった。

(6) 試設計および施工

以上得られた知見に基づき 3つのプロトタイプを設定し、実大構築物の設計及び施工を行った。尚、これらの構築物は暫くの間存置させ、経年変化を観察する予定である。

- ① 屋外ステージ：スパン約10~15m、平面積約150㎡である。元口100~130φの孟宗竹約300本を伐採し竹でトラス組をした基礎梁に束ね柱を緊結して軸組を組み立て、アーチ形状の屋根は丸竹をそのまま自然にしならせて相互を組合すことで成り立たせている。
- ② 移動式ワーケーションスポット (東屋)：ポストコロナで注目されているワーケーションスポットを移動可能な形式で構築したものである。元口80φ程度の孟宗竹60本を用いて根の太い幹は基礎、上部の幹は柱、枝は屋根を葺く材料にした。これからの生活様式のあり方と放置竹林問題という社会問題の二つの視点を組み合わせた竹と共に生きる社会に向けての提案にもなっている。
- ③ 日よけベンチ：直径40φ以上の主構造では使用しない部位を用いて構築した移動可能な日よけベンチであり、建築の構成として、基礎、柱、屋根の3つから構成される。柱は24本の細い丸竹を用いて双曲面構造をつくる。屋根は割竹を用いて、竹工芸のひとつである「六つめ編み」で構成する。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 陶器浩一, 佐藤允哉, 川上滝登, 村橋碧空, 成尾健治, 谷口雄飛	4. 巻 28
2. 論文標題 長尺丸竹の断面寸法の定式化ー竹の特徴を活かした建築構造の開発ー	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIJ Journal of Technology and Design	6. 最初と最後の頁 233 ~ 238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.28.233	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 Hirokazu Toki, Nariaki Hondayama, Takito Kawakami, Masaya Sato, Vincent Sebastian, Sora Murahashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Through Craftsmanship and Character to the Future and Architecture	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Conference on watershed Management and Coastal Conservation	6. 最初と最後の頁 70-82
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20件（うち招待講演 1件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 本田山成昭, 陶器浩一, 千葉駿太郎, 竹田明夫
2. 発表標題 竹集成材の構造材料としての材料特性に関する研究 その1 製造方法と竹集成角材の曲げ強度
3. 学会等名 日本建築学会大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千葉駿太郎, 陶器浩一, 本田山成昭, 竹田明夫
2. 発表標題 竹集成材の構造材料としての材料特性に関する研究 その2 竹集成板材の引張強度
3. 学会等名 日本建築学会大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山原康弘, 本田山成昭, 陶器浩一
2. 発表標題 竹の会所の歩み
3. 学会等名 日本建築学会大会建築デザイン発表会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirokazu TOKI, , Hondayama Nariaki, Kawakami Takito, Sato Masaya, Vincent Sebastian, Murahashi Sora
2. 発表標題 Through Craftsmanship and Character to the Future and Architecture
3. 学会等名 Green Initiative Week in the Philippines , Cebu, Philippines (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武政遼平、陶器浩一
2. 発表標題 竹構造材の経年変化後の構造特性に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本田山成昭、陶器浩一、成尾健治、千葉駿太郎
2. 発表標題 の形状の定式化および材料強度に関する研究(その1)竹の形状調査結果と定式化および材料強度試験結果
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 千葉駿太郎、陶器浩一、成尾健治、本田山成昭
2. 発表標題 竹の形状の定式化および材料強度に関する研究(その2)竹の引張強度およびせん断強度の決定因子の考察
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 寺本圭吾, 川上滝登, 村橋碧空, 陶器浩一
2. 発表標題 移動式ワーケーションスポット 竹象庵
3. 学会等名 日本建築学会大会建築デザイン発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川崎爽, 村橋碧空, 陶器浩一, 大石親良, 中田陸, 箱田里菜
2. 発表標題 竹双隣
3. 学会等名 日本建築学会大会建築デザイン発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村橋碧空, 陶器浩一, 宇都宮直樹, 大石親良, 川崎爽, 中田陸, 箱田里菜
2. 発表標題 竹湾殿 その1 計画・実験・設計
3. 学会等名 日本建築学会大会建築デザイン発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中田陸，村橋碧空，陶器浩一，宇都宮直樹，大石親良，川崎爽，箱田里菜
2. 発表標題 竹湾殿 その2 施工
3. 学会等名 日本建築学会大会建築デザイン発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤允哉，川上滝登，村橋碧空，陶器浩一
2. 発表標題 三灯小径
3. 学会等名 日本建築学会大会建築デザイン発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川上滝登，陶器浩一，佐藤允哉，村橋碧空，竹田明夫
2. 発表標題 竹集成材の構造材料としての材料特性に関する研究 その3 竹集成板材の引張強度と比重の相関関係
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Vincent Sebastian，村橋碧空，陶器浩一，川上滝登，佐藤允哉，竹田明夫
2. 発表標題 集成材の構造材料としての材料特性に関する研究 その4 木と竹を組み合わせたハイブリッド集成材の曲げ性能
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村橋碧空, 陶器浩一, 本田山成昭, 佐藤允哉, 川上滝登
2. 発表標題 竹を主構造とした建築物の経年変化後の構造性能に関する研究 その1 目視観察による調査結果
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本田山成昭, 陶器浩一, 村橋碧空, 佐藤允哉, 川上滝登
2. 発表標題 竹を主構造とした建築物の経年変化後の構造性能に関する研究 その2 経年変化による竹の曲げ強度への影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 牧田弥果, 津田和樹, 陶器浩一
2. 発表標題 東南アジアに植生する株立ち竹の形状の定式化及び材料強度に関する研究 その1 竹の形状調査結果と定式化
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 津田和樹, 牧田弥果, 陶器浩一
2. 発表標題 東南アジアに植生する株立ち竹の形状の定式化及び材料強度に関する研究 その2 材料強度試験とその結果
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 牧田弥果 , 川上滝登, 陶器浩一, 佐藤允哉
2. 発表標題 竹を用いた空間構成手法 その1 長尺丸竹を自然のまま用いたしなやかな空間
3. 学会等名 日本建築学会建築デザイン発表会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川上滝登, 津田和樹, 陶器浩一, 牧田弥果, 佐藤允哉, 村橋碧空, Vincent Sebastian
2. 発表標題 竹を用いた新たな空間構成手法 その2 竹集成材による新たな空間構成
3. 学会等名 日本建築学会建築デザイン発表会大会
4. 発表年 2020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

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