

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：21401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14872

研究課題名（和文）非破壊劣化診断を活用した伝統木造建築の保存的補強法の確立

研究課題名（英文）Establishment of a Conservative Reinforcement Method for Traditional Wooden Buildings Utilizing Non-Destructive Degradation Diagnosis

研究代表者

大塚 亜希子 (Ohtsuka, Akiko)

秋田県立大学・システム科学技術学部・助教

研究者番号：00825101

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、劣化の程度や樹種の違いで適したポータブル劣化診断機器に違いがあることを発見した。また、診断機器の使い分けにより、より正確な劣化診断が可能であることを明らかにし、適正な計測方法と分析方法の提案を行った。さらに針葉樹3種類に対して強度推定のデータベースによる閾値の設定を行った。補強方法については、既往研究にて過去の文化財の修復に使われた樹脂の種類と使用方法を分類し、選択したエポキシ樹脂、ポリウレタン系による補修効果の検討を行い、力学的効果の検証を行い、セルロース繊維を混入したエポキシ樹脂を木材に注入する補修方法の検討を行い、健全材相当までの耐力回復が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

こちらの研究は文化遺産の保護から環境保全まで多岐にわたる社会的意義を持っている。文化財保護への貢献：木材の劣化診断と補修方法の向上は、文化財や歴史的建造物を長く維持することが可能となり、文化財保護への貢献が期待される。建築物の安全性向上：劣化木材は建築物の安全性に影響を与える可能性がある。適切な診断と補修により、建築物の耐久性や安定性向上への寄与が可能となる。環境保全：補修において使用されるエポキシ樹脂やポリウレタン系樹脂などの素材選定や混入したセルロース繊維の効果検証は、環境に配慮した補修方法の開発につながる。環境負荷の低い補修方法を提案することで、持続可能な文化促進が見込める。

研究成果の概要（英文）：In this study, we found that there are differences in the suitable portable deterioration diagnostic equipment depending on the degree of deterioration and the species of trees. And, it was clarified that more accurate deterioration diagnosis was possible by the selective use of diagnostic equipment, and the proper measurement method and analysis method were proposed. In addition, the threshold value by the database of strength estimation was set for 3 kinds of softwood. As for the reinforcement method, the type of resin used for the restoration of the cultural property in the past and the method of use were classified in the past research, the repair effect by the selected epoxy resin and polyurethane system was examined, the mechanical effect was verified, and the repair method by injecting epoxy resin mixed with cellulose fiber into the wood was examined, and the recovery of the bearing capacity to the sound material was confirmed.

研究分野：保守・保全

キーワード：非破壊診断 劣化調査 超音波試験 穿孔抵抗 文化財建築 木造 補修 エポキシ樹脂

### 1. 研究開始当初の背景

文化財建築物など貴重な木造建築においては、建物の永続的な維持のために、構造部材の現在強度の診断が重要となる。しかしながら、日本の文化財建築における木造部材の健全性の評価は目視調査が中心であり、適切な時期に適切な補修をするために定量的な診断手法の構築の必要性が謳われている。特に建築部材を壊さずに構造性能を検討可能な非破壊検査については、超音波や応力波、マイクロ波などを活用した研究が進められているが、現場レベルで非破壊試験を活用した判断事例はほとんどない。



写真1 彦根城の梁

文化財等の修理では建立時のもとの材料をできる限り再使用することが原則であり、劣化部分のみを健全部材へ部分的に取替える根継ぎや高性能繊維を被覆するSRF工法なども適用されている。一方で、写真1に示すような独特の形状の部材の場合、前述の補強法では文化財建築における文化的・意匠的価値の維持の観点から適用が困難なケースもある。このように現行補修手法では、部材の取り替えができない歴史・文化的に価値の高い部材・部位に劣化が生じた場合には対応できずその価値が失われるケースも起こりうることから、早急な対策を講じる必要性がある。

表面上では検出しにくい劣化木材内部の定量的評価法と現状を維持する補強方法を柱とした文化財建築の永続的維持手法の確立を目指している。強度劣化を伴う木材の劣化要因としては腐朽菌とシロアリによる蟻害が挙げられる。特に、シロアリによる蟻害では木材内部を主に食害していくため木材表面から目視により劣化の程度を判断することが難しいケースも多くある。しかし現状では、急激な強度劣化を引き起こす可能性が高い蟻害劣化についての劣化診断については確立されていない。また、表面からボロボロと剥がれ落ちることが多い腐朽による劣化に対し、蟻害劣化部材は劣化の程度によっては蟻道に強度向上を目的とした人工樹脂等を充填する事で部材を使用したまま表面に損傷を与えずに部材補強ができる可能性がある。以上のことから、本研究では“既存木造建築物の簡易的な建築部材を非・微破壊による内部劣化探索法および補強方法の確立の提案”を目的とし、超音波探査機器を活用した強度推定と樹脂充填による劣化材の補強効果について研究を進めてきた。

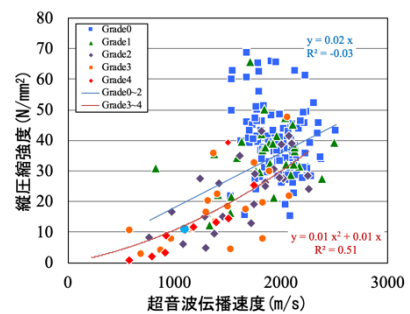


図1 縦圧縮強度—超音波伝播速度関係

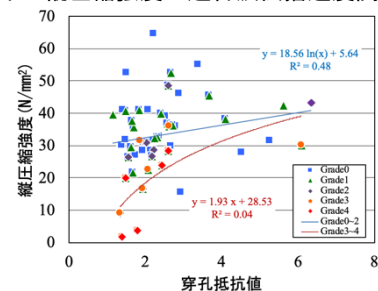


図2 縦圧縮強度—穿孔抵抗値関係

研究代表者は、ポータブルな機器での非破壊測定のみで得られる超音波伝播速度について、部材の圧縮強度との相関を見出そうとしている。既往の研究においては、非破壊や微破壊による調査方法は小試験体レベルでの実験は行なわれているが、現場での非破壊調査についての研究は、ほとんど行われていない。既報において研究代表者は、実建築より切り出した構造部材に対して非破壊試験および微破壊試験のデータを集積し、図1、図2に示すような縦圧縮強度との関係性より、劣化部については非破壊試験、健全部については微破壊試験による圧縮強度推定が有効であると示している。

また、樹脂充填について、欠陥探査と樹脂充填による補強方法については超音波試験による充填確認の有効性と、充填による質量上昇率と超音波伝播速度の上昇率との一定の相関を明らかにした<sup>7)</sup>。パテなどで穴やひびを埋めるために使用していた事例はあるが、材料強度の向上を目的としているものは少なく、実建築において充填後の強度向上の定量的な確認例はない。本研究では、ガンタイプのスタティックミキサーを用いて樹脂を効果的に深部まで注入させることで地震時の荷重保持が可能になるレベルまでの明らかな部材強度向上を目指している。

### 2. 研究の目的

本検討においては、実建築に対して、ポータブルな診断機器を用いた現場での内部劣化評価と、既存の部材を有効活用した補強の検証の補強について検討を行う。図3のように建て替えに至る前に簡易的な方法で判断し、効果的に修復を行い、効果的な建築の長寿命化の実現を目指す。

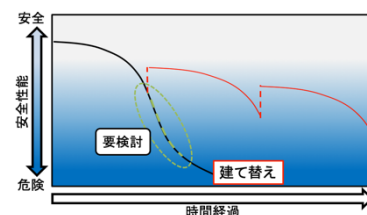


図3 建築の長寿命化

### 3. 研究の方法

本研究計画においては、非破壊劣化診断を活用した伝統木造物の保存的補強法の確立を目指してい

る。研究代表者が研究を進めている非・微破壊による内部劣化探査および補強方法について、模擬劣化させた部材や強制蟻害劣化させた部材については適応性を明らかにできた<sup>1)</sup>が、実建築部材に対しての検討は十分に進められていない。そこで、本研究では、実建築へ適用を段階的に進めることとする。対象樹種はスギ、アカマツ、ヒノキ、クリ等の建築部材に使用されているものとし、幅広くデータを収集するものとする。充填材については、既往の研究にて、過去の文化財の修復に使われた樹脂の種類と使用方法と使用頻度の収集結果より選択したエポキシ系樹脂、ポリウレタン系にて実験を行い、ポリアミン樹脂を配合したエポキシ系樹脂をとした。研究の流れは以下の通りである。

(1) 実建築部材（切り出し）に対する検討

実建築から取り出した構造部材に対し、劣化診断フローに基づき劣化部および健全部について、一次試験（目視）、二次試験（超音波伝播速度測定による非破壊試験、穿孔抵抗測定による微破壊試験）、三次試験（圧縮試験）を実施し、材料強度推定に関する提案式の精度の検証を行う。また、蟻害劣化と判断できる劣化部に対し樹脂充填を実施した試験体に対して同様の試験を行い、実建築部材に対する内部劣化診断→補強→回復状況の確認のフローの確立を目指す。

(2) 建物の実地調査および補強の検証

実建築の構造部材に対し、(1)と同様に一次試験（目視）、二次試験（超音波伝播速度測定による非破壊試験、穿孔抵抗測定による微破壊試験）を行う。

(3) 非破壊による劣化探査および補強方法確立に向けたデータ整理

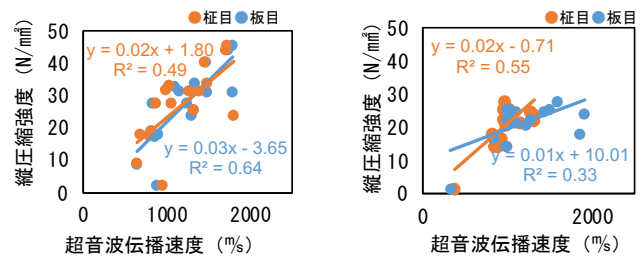
(1)および(2)で得られた非・破壊による内部劣化探査および補強方法提案に向けた検討結果より、データベースの構築を行い、非・微破壊による内部劣化探査および建物を壊さない補強方法の確立に向けた定量的な評価軸の提案を行う。

#### 4. 研究成果

##### (1) 樹種を考慮した劣化診断方法の提案

###### ① 広葉樹と針葉樹による違い

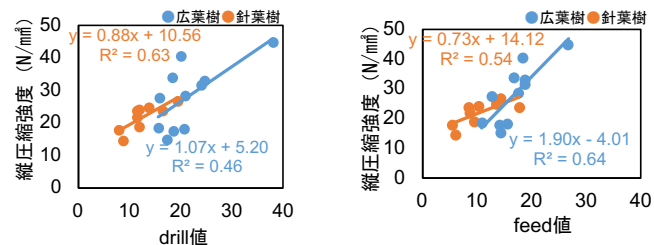
針葉樹と広葉樹別の縦圧縮強度と超音波伝播速度との関係を図4に示す。針葉樹は柎目方向の計測結果と縦圧縮強度は相関が高い一方で、板目方向の結果はばらつきが見られた。一方広葉樹は、縦圧縮強度との相関関係において繊維方向の影響は少ない結果となった。シロアリ被害は、針葉樹では辺材と心材の境界付近が喫食され、広葉樹は不規則に分散して喫食されるケースが多いと報告<sup>3)</sup>されている。よって針葉樹は、板目方向からの超音波計測により、欠損や生物劣化被害を検知し、より適切な材料性能の把握が可能となる。一方で、喫食がランダムな広葉樹は2方向からの計測が望ましい。縦圧縮強度と穿孔抵抗値の関係を図5に示す。針葉樹は細胞形成が規則的であり、穿早材・晩材間で抵抗の変化が著しいため、drill値が劣化診断に適している。一方で、広葉樹は細胞形成が複雑であり、早材・晩材間の挙動変化が少ないため、drill値による劣化の判断は難しい。しかし貫入速度の変化が顕著であることから、feed値が劣化の判断に適している。以上より、超音波測定においては、針葉樹は板目方向からの計測により、適切な材料性能の把握を可能とする。一方で、喫食がランダムな広葉樹は板目・柎目2方向からの計測が望ましい。穿孔抵抗値については、細胞形成が規則的な針葉樹はdrill値、細胞形成が複雑な広葉樹はfeed値を用いた診断が適切であることが明らかとなった。



(1) 広葉樹

(2) 針葉樹

図4 縦圧縮強度-超音波伝播速度関係



(1) Drill (回転抵抗)

(2) Feed (貫入抵抗)

図5 縦圧縮強度-穿孔抵抗値関係

針葉樹は細胞形成が規則的であり、穿早材・晩材間で抵抗の変化が著しいため、drill値が劣化診断に適している。一方で、広葉樹は細胞形成が複雑であり、早材・晩材間の挙動変化が少ないため、drill値による劣化の判断は難しい。しかし貫入速度の変化が顕著であることから、feed値が劣化の判断に適している。以上より、超音波測定においては、針葉樹は板目方向からの計測により、適切な材料性能の把握を可能とする。一方で、喫食がランダムな広葉樹は板目・柎目2方向からの計測が望ましい。穿孔抵抗値については、細胞形成が規則的な針葉樹はdrill値、細胞形成が複雑な広葉樹はfeed値を用いた診断が適切であることが明らかとなった。

###### ② 非/微破壊による材料の劣化診断と強度推定方法の提案

解体や改修の際に取り替え対象となった4物件の取り替え対象部材を対象として実験を行った。縦圧縮強度を図6に示す。縦圧縮強度と超音波伝播速度の相関関係について、サンプルの多いヒノキとアカマツを対象に、樹種による劣化診断の有用性に関する検討を行う。樹種別における縦圧縮強度と超音波伝播速度の関係について、表1に超音波伝播速度を1,000m/sより100ずつ分けた場合の相関係数を示す。ヒノキにおいては、有効範

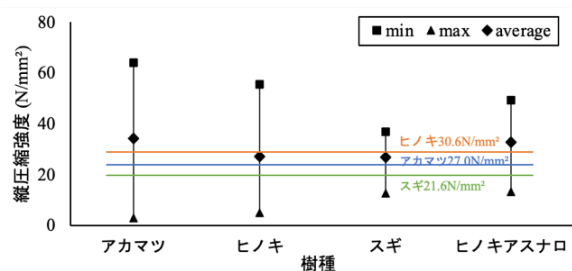


図6 縦圧縮強度

围の 1,400~1,600m/s の範囲では正の相関が高いことが確認できる。

また、超音波伝播速度の 1,000m/s の付近は縦圧縮強度のばらつきが見られた。さらに、1,600m/s 以上では強度が低くなった。よって、ヒノキの超音波伝播速度の有効範囲は 1,400~1,600m/s と限定的であると言える。一方で、アカマツに関しては 1600m/s までの範囲では、適切な診断が可能であるといえる。

樹種別における縦圧縮強度と穿孔抵抗値の相関について、ヒノキを図 7、とマツを図 8 に示す。また、縦圧縮強度と穿孔抵抗値の関係について、穿孔抵抗値の値を 10 ずつ区切った場合の相関係数を表 1 に示す。ヒノキは Drill 値、Feed 値ともに 10~30 の範囲において、穿孔抵抗値は値が一定の範囲に集中しているのに対し、縦圧縮強度に大きくばらつきが見られた。アカマツについては、Drill 値が 10 以上 30 未満では正の相関が見られたが、こちらもヒノキ同様、相関は低くなった。内部まで劣化が進行していない場合でも、表面劣化が影響してばらつきを生じていると考えられる。また、ヒノキとアカマツが同程度の抵抗値となったケースにおいて、ヒノキは縦圧縮強度のばらつきが大きい、ヒノキはアカマツよりも穿孔抵抗値の値が一定の範囲に集中する傾向があるなど、樹種による特徴が確認できた。

以上の検討結果より、樹種別の有効な診断方法とその範囲を表 2 に示す。ヒノキにおいては超音波伝播速度が 1400~1600m/s、穿孔抵抗値は 20 以上の範囲、アカマツにおける超音波伝播速度は 1600m/s までの範囲、穿孔抵抗値は 10 以上の範囲では診断を適切に行えることが明らかとなった。

## (2) 補修方法の提案

### ① 実大部材曲げ試験

試験体一覧を表 1 に示す。実大部材曲げ試験は JIS Z 2101 に準じて 3 点曲げ性能試験を行った。試験体寸法は 105×105×1000mm (ロードスパン 800mm) のベイマツとした。試験体については、2022 年 5 月末~12 月初旬の約 6 ヶ月間シロアリの生息する松林中で食害させた。掘り出しの様子を写真 2 に示す。補修はエポキシ樹脂にセルロース繊維を混入する。セルロース繊維の混入量はエポキシ樹脂に対して質量比 5% とし、食害率 30%、40%、50% の試験体各 1 体 (合計 3 体) の試験体に対して、型枠を作製し補修を行った。また、比較のために、健全試験体 2 体および食害率 20% を 1 体、40% を 2 体 (合計 3 体) の試験体を用意した。養生期間は 23℃ : 5 日間 + 60℃ : 3 日間の計 8 日間とした。補修後の試験体を写真 3 に、曲げ試験の様子を写真 4 に示す。

| 範囲   | -1000 | -1100 | -1200 | -1300 | -1400 | -1500 | -1600 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ヒノキ  | 0.07  | 0.31  | 0.19  | 0.34  | 0.64  | 0.60  | 0.59  |
| アカマツ | 0.61  | 0.65  | 0.59  | 0.64  | 0.72  | 0.56  | 0.57  |

表 1 樹種別の有効範囲での相関係数

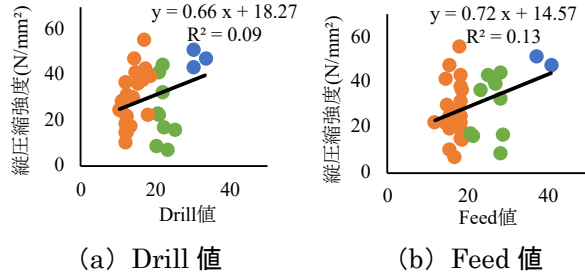


図 7 穿孔抵抗値と縦圧縮強度 (ヒノキ)

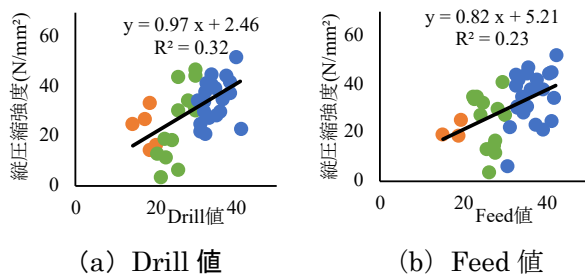


図 8 穿孔抵抗値と縦圧縮強度 (アカマツ)

表 2 有効な診断方法とその範囲

| 樹種   | 有効範囲      |             |
|------|-----------|-------------|
|      | 超音波(m/s)  | 穿孔抵抗(Drill) |
| ヒノキ  | 1400~1600 | 20-         |
| アカマツ | ~1600     | 10-         |

| 試験体名       | 欠損率(%) | 補修方法  |
|------------|--------|-------|
| BD0-N-1    | 0      | /     |
| BD0-N-2    | 0      |       |
| BD20-N-1   | 20     | 無     |
| BD40-N-2   | 40     | 無     |
| BD40-N-3   | 40     | 無     |
| BD30-CFA-1 | 30     | 繊維A5% |
| BD40-CFA-2 | 40     | 繊維A5% |
| BD50-CFA-3 | 50     | 繊維A5% |

表 3 試験体概要



写真 2 取り出しの様子



写真 3 実大部材曲げ試験体



写真 4 曲げ試験の様子

## ② 実大部材曲げ試験結果

実大部材の曲げ試験結果のうち、曲げ強度を図9に、ヤング係数を図10に示す。実験結果より、充填を施した試験体の曲げ強度は、充填なしの試験体との比較で平均3.3倍程度の曲げ強度を示し、ベイマツ（甲種3等級）の基準強度<sup>4)</sup>（17.4N/mm<sup>2</sup>）を概ね満たした。セルロース繊維を混入したエポキシ樹脂による補修方法は有効であると言える。また、食害率が高くなるにつれてヤング係数も高くなり、適切な補修を行うことで食害率が30%を超える横架材に対しても健全体近くまで耐力および剛性が回復できる可能性が示唆された。

### (3) まとめ

本研究では、劣化の程度や樹種の違いで適したポータブル劣化診断機器に違いがあることを発見した。また、診断機器の使い分けにより、より正確な劣化診断が可能であることを明らかにし、適正な計測方法と分析方法の提案を行った。さらに針葉樹3種類に対して強度推定のデータベースによる閾値の設定を行った。

補強方法については、既往研究にて過去の文化財の修復に使われた樹脂の種類と使用方法を分類し、選択したエポキシ系樹脂、ポリウレタン系による補修効果の検討を行い、力学的効果の検証を行い、セルロース繊維を混入したエポキシ樹脂を木材に注入する補修方法の検討を行い、補修方法の提案を行った。また実大部材を対象とした曲げ試験では、ベイマツ（甲種3等級）の基準強度<sup>4)</sup>（17.4N/mm<sup>2</sup>）を概ね満たし、適切な補修を行うことで食害率が高いケースにおいても耐力及び剛性の回復が可能であることを明らかにした。

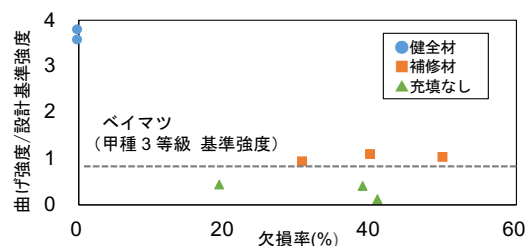


図9 曲げ強度

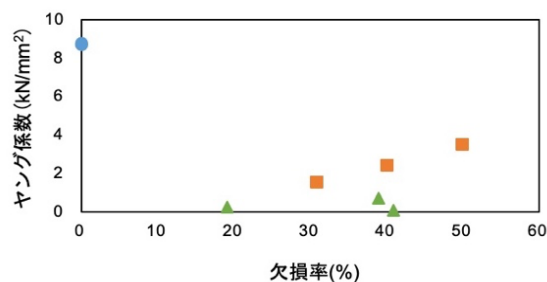


図10 ヤング係数

### 参考文献

- 1) 大塚亜希子、今本啓一、清原千鶴：蟻害により内部劣化した木造建築物の欠陥探査と樹脂充填による補強方法に向けた基礎的検討、日本建築学会構造系論文集、2019.3
- 2) 岩田隆太郎他：シロアリによる樹木の被害、環動昆、日本環境動物昆虫学会、18(2) .55-66.2007
- 3) 木質構造設計規準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法、日本建築学会、第4版、2006.12

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>大塚亜希子, 松浦志穂, 今本啓一                        |
| 2. 発表標題<br>木造建築の劣化部材を対象とした非/微破壊による材料の劣化診断と強度推定方法の提案 |
| 3. 学会等名<br>日本建築学会東北支部研究報告                           |
| 4. 発表年<br>2022年                                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>佐藤希, 大塚亜希子, 板垣直行, 箕浦るん, 寺崎慎一                   |
| 2. 発表標題<br>木部材の曲げ性能回復のためのセルローズ繊維を混入したエポキシ樹脂による補修に関する基礎的研究 |
| 3. 学会等名<br>日本建築学会東北支部研究報告                                 |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>佐藤希, 大塚亜希子, 板垣直行, 箕浦るん, 寺崎慎一                   |
| 2. 発表標題<br>イソシアネート系プレポリマーとエポキシ樹脂を複合的に用いた木部材の補修方法に関する基礎的検討 |
| 3. 学会等名<br>日本建築学会大会（北海道）学術講演会                             |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>富澤魁人, 大塚亜希子, 今本啓一                |
| 2. 発表標題<br>樹種を考慮した非/微破壊的手法による材料性能評価方法に関する検討 |
| 3. 学会等名<br>第73回日本木材学会大会                     |
| 4. 発表年<br>2023年                             |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>片桐琴音, 大塚亜希子, 佐藤希, 板垣直行, 境英一, 箕浦るん, 寺崎慎一, 池谷成海   |
| 2. 発表標題<br>セルローズ繊維を混入したエポキシ樹脂を用いた木部材の曲げ性能回復のための補修に関する実験的研究 |
| 3. 学会等名<br>第73回日本木材学会大会                                    |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>佐藤希, 大塚亜希子, 片桐琴音, 板垣直行                |
| 2. 発表標題<br>生物劣化を受けた木部材に対する合成樹脂を用いた複合的な補修方法の基礎的検討 |
| 3. 学会等名<br>第73回日本木材学会大会                          |
| 4. 発表年<br>2023年                                  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>大塚亜希子, 毛塚拓巳, 清原千鶴, 今本啓一                     |
| 2. 発表標題<br>非・微破壊の手法による重要文化財黄檗宗大本山「萬福寺」屋根材の材料性能評価に関する検討 |
| 3. 学会等名<br>日本建築学会東北支部研究報告                              |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>(2)佐藤希, 大塚亜希子, 板垣直行                      |
| 2. 発表標題<br>造重要文化財における補修部材を対象とした非破壊による部材性能調査方法に関する検討 |
| 3. 学会等名<br>日本建築学会東北支部研究報告                           |
| 4. 発表年<br>2021年                                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>佐藤希, 大塚亜希子, 板垣直行                   |
| 2. 発表標題<br>木造重要文化財の補修部材を対象とした部材性能調査方法に関する動向調査 |
| 3. 学会等名<br>日本建築学会大会(関東)学術講演会                  |
| 4. 発表年<br>2021年                               |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>松浦志穂, 大塚亜希子, 今本啓一                                       |
| 2. 発表標題<br>重要文化財法華宗真門流総本山「本隆寺」本堂の屋根材を対象とした非/微破壊的手法に夜材料性能評価方法に関する検討 |
| 3. 学会等名<br>第72回日本木材学会大会  |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>佐藤希, 大塚亜希子, 板垣直行            |
| 2. 発表標題<br>樹脂を複合的に用いた木部剤の補修方法に関する基礎的検討 |
| 3. 学会等名<br>日本建築学会大会(関東)学術講演会           |
| 4. 発表年<br>2021年                        |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>大塚 亜希子   |
| 2. 発表標題<br>重要文化財黄檗宗大本山「萬福寺」の屋根材を対象とした非/微破壊的手法による 材料性の評価に関する検討 |
| 3. 学会等名<br>日本建築学会東北支部   |
| 4. 発表年<br>2021年   |



|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Akiko Ohtsuka   |
| 2. 発表標題<br>Proposal of a strength estimation formula for evaluating the performance of materials in areas of strength deterioration in wooden buildings. |
| 3. 学会等名<br>World Conference of Timber Engineering 2020   |
| 4. 発表年<br>2020年～2021年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|
|         |         |