

## ミッション 4 : 「循環材料・環境共生システム」

環境共生とバイオマテリアルの利活用を両立させるために、循環型生物資源の中でも、特に木質資源の持続的利用の実現が重要である。このための具体策として、生物本来の構造や機能を理解し、それらを最大限に引き出す多彩な機能性材料の創製、木質材料等を用いた安全・安心な建築技術の開発に取り組む。さらには、資源の供給源である生態系と、これを消費する人間活動との調和と発展の実現にむけて、樹木、植物、昆虫、微生物の管理・利用法の研究も実施する。基礎・応用の両面から研究に取り組み、豊かな文化にもとづく環境未来型の生活圏の在るべき姿を模索することで、森林環境の安定と保全をはかり、生活環境のさらなる向上を実現することを目的としている。木質資源を基盤に、自然と共存を継承・継続する技術、材料を開発するなど「創造」を意識しつつ、それらの成果を産官学連携などによって社会へ展開することによりイノベーションを推進するミッションとして、今年度は下記 5 テーマを実施した。

### 4.1 木質材料をもちいた建築物の設計に資する部材・構造の挙動解明

#### 1. 研究組織

代表者氏名： 五十田博（生存圏研究所 生活圏木質構造科学分野）  
共同研究者： 中川貴文（生存圏研究所 生活圏木質構造科学分野）  
森 拓郎（広島大学大学院 工学研究科）  
北守顕久（大阪産業大学 工学部）  
荒木康弘（国土交通省 国土技術政策総合研究所）  
中島昌一（国立研究開発法人 建築研究所）

#### 2. 研究の背景と目的

木質材料は軽量の割には強く、優れた建築構造材料として利用されている。ここでは超高層を可能にする直交集成板と木材の特性を活かした構造について検討する。

直交集成板（以下、CLT）は高強度、高剛性を維持したまま、これまで構造材料としての利用価値の低い、比較的低質な材料を内部に用いることが可能であり、構造的な利点ばかりではなく、森林資源の有効活用法のひとつとしても期待されている。我が国では、近年、日本農林規格（JAS）の施行、建築基準関連告示の施行、設計・施工マニュアルの作成など枠組みが整備されてきている。ここで、構造設計法に関連する事項の技術的背景を研究的に整備し、さらに適用範囲の拡大をめざして実施する一連の研究の基礎研究である。

### 3. 研究の結果および考察

本年度は林野庁補助事業プロジェクトに協力し、1層の住宅用の金物を用いた CLT パネル工法の試験体の振動台実験を実施した（図 1-1）。低層建築物に CLT パネルを耐力壁として用いた場合、鉛直荷重によるパネル自体の破壊は起こらず、ロッキング挙動が生じる。床等の脱落が生じないのであれば、倒壊の限界変形は壁幅程度となり、大地震による倒壊は起こりにくい。今回の実験では、地震動の入力方向の違い（1方向と2方向）が建物の応答に及ぼす影響を確認した。また数値解析モデルに（図 1-2）より、試験体仕様の条件検討のための事前解析、メカニズム把握のための事後解析を実施した。

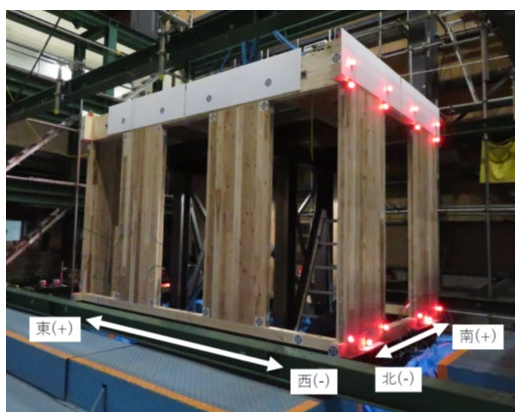


図 1-1：試験体図

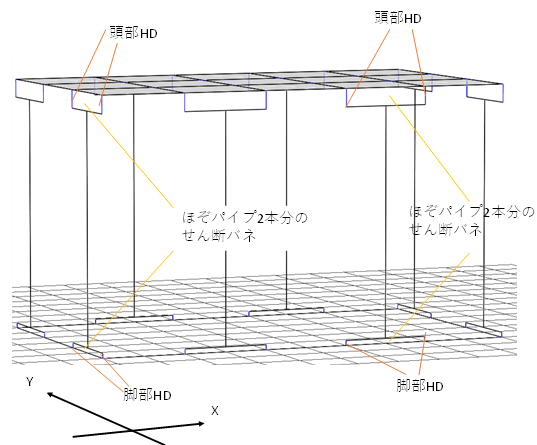


図 1-2：数値解析モデル

### 4. 今後の展開

CLT 建築物用の接合金物は従来の木造住宅用の接合金物よりも価格が高く、CLT 建築物の普及の阻害要因の一つとなっている。本実験により安価な住宅用金物による CLT パネル工法の実現が期待できる。今後は実験的検討を継続し、解析モデルによるパラメトリック・スタディにより研究を発展させ、本工法の構造設計法の確立に向けて検討を深める予定である。

### 5. 付記

学会発表 1 件

- 1) 百瀬奏、中川貴文辻拓也、五十田博「1層 CLT 耐力壁構造を対象とした 1次元と 3次元地震動応答のパラメトリックスタディ」日本木材学会大会，京都，2024年3月

## 4.2 小角 X 線散乱による木材の構造物性相関解析

### 1. 研究組織

代表者氏名：今井友也（生存圏研究所 マテリアルバイオロジー分野）  
共同研究者：岡久陽子（京都工芸繊維大学バイオベースマテリアル学専攻）  
神代圭輔（京都府立大学大学院生命環境科学研究科）  
田中聡一（生存圏研究所 生物機能材料分野）  
飛松裕基（生存圏研究所 森林圏代謝機能化学分野）  
堀川祥生（東京農工大学大学院 農学研究院）  
Paavo Penttilä (Aalto University, Finland)

### 2. 研究の背景と目的

昨年度に続いての継続課題である。材料一般にその物性は構造により決まる。従って構造-機能相関解析は材料研究において極めて重要な位置を占める。木材の細胞壁ナノ構造は、結晶性を持つセルロースについては、その理解はある程度進んでいるが、マトリクスの構造やそのセルロースとの界面など、物性に大きな影響を及ぼすと考えられる構造的特徴について、その理解は十分とは言えない。

そこで構造解析手法としてその場測定が得意な小角 X 線散乱解析を用い、木材に各種揺動を加えつつその場測定を行い、構造解析を行った。また化学処理および生物学的に成分を変調させた植物細胞壁についても通常の小角 X 線散乱解析を行い、構造解析を行った。

### 3. 研究の結果および考察

今年度は、特に曲げ試験同時 SAXS 測定を重点的に行った。またすでに取得済みの温度・含水率変化や竹の成熟に伴う構造変化についてデータ分析を進めつつある。さらに今年度は、フィンランドのアールト大学から Paavo Penttila 博士、フランスの CERMAV から西山義春博士、名古屋大学から山本浩之教授を招いて国際シンポジウム「Deepen and expand the wood structure-properties relationship (木材の構造-物性相関の深化)」を 2023 年 10 月 5 日に開催し、木材の構造-物性相関に関する議論と、日本とヨーロッパの関連研究者のネットワーキングを行った。

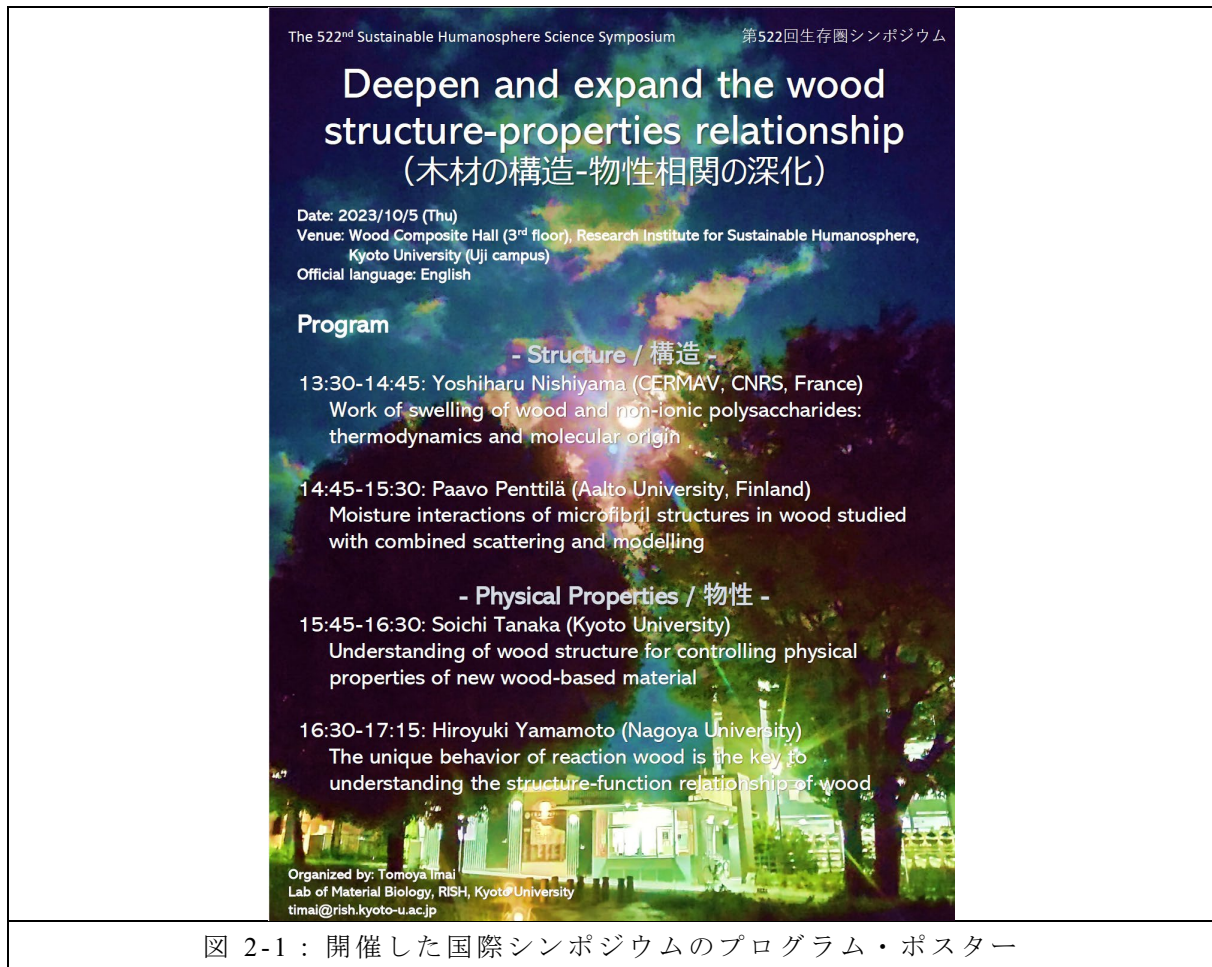


図 2-1 : 開催した国際シンポジウムのプログラム・ポスター

#### 4. 今後の予定

すでに撮影した木材、竹材、イネなどの植物細胞壁試料や、脱成分した試料の小角 X 線散乱パターンデータの解析を重点的に進めていく。また今年度来日した Penttilä 博士が、フィンランドアカデミーの研究グラントに採択され、木材の小角散乱データに基づく構造解析パイプラインの創設研究を 2024 年より行うことになった。本ミッション課題の参加研究者は、各自の小角 X 線散乱データおよびその測定試料に関する情報を Penttilä 博士に提供することで本研究グラントに協力予定であり、国際的にも連携して、小角散乱データ解析を物性に結び付ける研究を進めていく予定である。

#### 5. 付記

- 1) 原著論文 査読中 1 本、投稿準備中 2 本
- 2) 学会発表 3 件 (日本農芸化学会中部・関西支部合同大会 1 件、第 74 回日本木材学会年次大会 2 件)

## 4.3 樹木内部応力の理解とその応用

### 1. 研究組織

代表者氏名：松尾美幸（生存圏研究所 循環材料創成分野）

共同研究者：梅村研二（生存圏研究所 循環材料創成分野）

山本浩之（名古屋大学 大学院生命農学研究科）

吉田正人（名古屋大学 大学院生命農学研究科）

津川 暁（秋田県立大学 システム科学技術学部）

張 景耀（京都大学 大学院工学研究科）

### 2. 研究の背景と目的

樹木はその成長過程において、樹幹内に内部応力を発生させることで姿勢制御や外力からの樹体保護をおこなっている。この内部応力は残留応力と呼ばれ、樹木の生存戦略として重要である一方、製材時に木材の変形を引き起こして生産効率を下げることから、木材の有効利用を妨げる要因でもある。本課題では、特に製材変形が問題となり、かつ既往研究の少ない国産大径材丸太（直径 30 cm 以上）について、残留応力分布を把握するための大規模測定を進めている。これにより、学術的には樹木の残留応力発生メカニズム解明につなげるとともに、実用的には製材変形の予測や他の材質指標との関連解明を目指す。

これまでに、ケヤキには他の樹種で報告されたことのない特異な残留応力分布パターンが存在することが明らかになった 1)。ケヤキは、鉛直な幹でもあて材が散在することが経験的に知られており、成長過程における力学履歴と組織形成、そして特異な残留応力分布パターンが密接に関連すると考えられる。本年度はケヤキの特異な残留応力分布のより定量的な評価、ならびにその要因について樹形や樹木周辺環境の視点から調査した。

### 3. 研究の結果および考察

ケヤキの特異な残留応力分布を定量化する方法について検討した（図 3-1）。また、樹形の 3D 情報化への試みおよび周辺地形の測量をおこない、定量化された残留応力分布の特異性との関連を調べた。樹形の 3D 情報化には、ドローンと LiDAR を用いた 3D 計測や、多量の写真からの 3D 像構築を試みたが、いずれも葉や周辺樹木がノイズとなり解析に十分な 3D 情報が得られなかった。そのため、写真から人力で樹形を描画し、簡易な指標に落とし込むこととした。その結果、枝が樹幹に対して大きく、また偏って生えている樹ほど、その樹幹の残留応力は乱れる（局所的に強い応力の発生するポイントが多数現れる）ことが明らかになった。

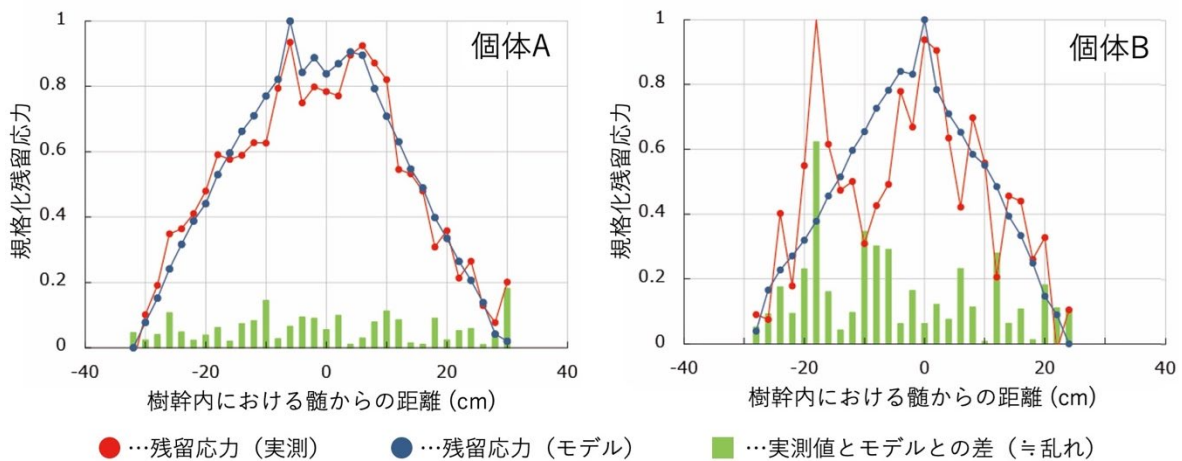


図 3-1：残留応力分布の乱れの可視化

#### 4. 今後の展開

今年度の成果を論文に取りまとめ中であり、国際誌に投稿予定である。また今後の展開として、樹木の組織構造や成長履歴の解析から、特異な残留応力分布の要因を明らかにしていく。

#### 5. 引用文献

1) Kameyama N, Matsuo-Ueda M, Chen S, Jiang Z, Ichiyanagi T, Yoshida M, Yamamoto H, Unique characteristics of residual stress distribution of large-diameter keyaki (*Zelkova serrata*) logs and examination of their measurement method, *Journal of Wood Science*, **69**, 16, 2023.

#### 6. 付記

学会発表 1 件

1) 亀山直央, 吉田正人, 山本浩之, 松尾美幸「ケヤキ大径材に局所的に発生する応力の定量的評価」第 74 回日本木材学会大会 (京都大会), 2024 年 3 月 13-15 日

### 4.4 未来型資源循環システムの構築

#### 1. 研究組織

代表者氏名：大村和香子 (生存圏研究所 居住圏環境共生分野)

共同研究者：畑 俊充 (生存圏研究所 居住圏環境共生分野)

共同研究者：岡村 慶 (高知大学海洋施設)

#### 2. 研究の背景と目的



本テーマでは安全で快適な人間の居住圏を創造し、維持し続けるため、木質資源を適切に長く利用するための耐久性向上に関する研究や、新たな機能を有するバイオマス由来の素材開発等について取り組んでいる。

今年度は木材の海中用途を念頭において、海中で木材を食害する海虫類（海生二枚貝類のフナクイムシ(*Teredo navalis*)と甲殻類のキクイムシ(*Limnoria lignorum*)が代表種)の木材の嗜好性（抵抗性）に係る諸要因を明らかにすることを目的として実験を進めた。具体的にはスギ心・辺材における抵抗性及び幼生の木材への着生、木材への穿孔、材内での成長という各成長段階別の木材の劣化状況の定量的評価を検討した。定量的評価には (1) 海中暴露後の試験体表面に存在する海虫の穿孔穴数 (2) 暴露後試験体の X 線 CT スキャナ撮像画像から得た体積欠損率(%) (3) 暴露による試験体の質量減少率(%) を使用した。

### 3. 研究の結果および考察

高知県宇佐市の宇佐湾(133°44' N, 33°45' E)の水深 2m の箇所で最長 4 カ月の海洋暴露を行った（図 4-1）ところ、スギ辺材は、心材外層・内層よりも有意に穿孔穴数が多く、また約 3 ヶ月暴露時点で心材外層が辺材よりも質量減少率や体積欠損率が有意に小さかった。このことから心材成分が幼生の定着ならびにフナクイムシの初期の食害を阻害することが示唆された。しかし、4 ヶ月暴露後には質量減少率や体積欠損率の辺材、心材外層、心材内層における差が短縮されたことから、心材成分の溶脱やフナクイムシの成長に伴う心材成分の代謝などによる抵抗性の減少が示唆された。なお、穿孔穴数、質量減少率、体積欠損率に関する繊維方向での有意差は認められなかった。



図 4-1：海中暴露約 4 カ月後の試験体の状況

### 4. 付記

学会発表 1 件

- 1) 高橋空吾, 大村和香子, 岡村慶「海虫類に対するスギ材の部位別抵抗性と蝕害の定量的評価の検討」日本木材学会大会, 京都, 2024 年 3 月

## 4.5 セルロースナノファイバーによる銀ナノ粒子の担持に関する研究

### 1. 研究組織

代表者氏名：矢野浩之（生存圏研究所 生物機能材料分野）

共同研究者：田中聡一（生存圏研究所 生物機能材料分野）

### 2. 研究の背景および目的

ナノ粒子は特異的な光学特性や電気特性を持ち<sup>1)</sup>、多くの用途に利用されている。一方で表面エネルギーが高いために凝集が起りやすく分散が困難で、利用には分散剤が必要となることが欠点である<sup>2)</sup>。そこでセルロースナノファイバー（CNF）の表面への銀ナノ粒子の担持について検討した。CNFは表面に多数の官能基が存在する化学修飾性に富んだ高弾性のナノ繊維である。この特徴を活かして、CNF表面のカルボキシ基を足場に銀ナノ粒子を繊維上に満遍なく担持させることで、安定して分散した銀ナノ粒子を得ることを目指した。本研究では図 5-1 の反応経路をベースに小さく均一な銀ナノ粒子を担持した CNF（Ag-CNF）の作製条件について検討し、その形態的特徴を明らかにした。

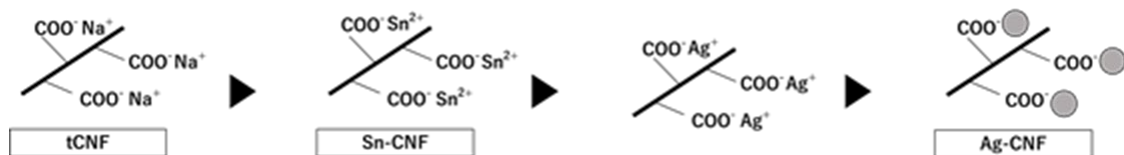


図 5-1：Ag-CNF 作製のための反応経路

### 3. 研究の結果および考察

CNFにはカルボキシ基に $\text{Na}^+$ がイオン結合したTEMPO酸化CNF（tCNF）を用い、2段階に分けてAg-CNFを作製した。まず、tCNF水分散液に $\text{SnCl}_2$ 水溶液を滴下し、tCNF表面の $\text{Na}^+$ を $\text{Sn}^{2+}$ に置換した。次に、Sn-CNF分散液に反応試薬を加え、 $\text{Sn}^{2+}$ を $\text{Ag}^+$ に置換したのち、Sn-CNF表面に銀鏡反応によって銀ナノ粒子を担持させた。得られたSn-CNFとAg-CNFについてTEM観察により形態を評価した。

Sn-CNFについてスズ粒子とネガティブ染色したCNFを観察したTEM像を図5-2に示す。スズがCNFネットワーク上に無数の小さな粒子として観察されたことからtCNF表面に一樣にスズが導入されたことが示された。Ag-CNFでは、銀ナノ粒子は、数珠上に連なって分布しており、そのネットワークは、Sn-CNFにおけるCNFのネットワークと同様であった。このことから、銀ナノ粒子はCNFに沿って存在していると考えられる。



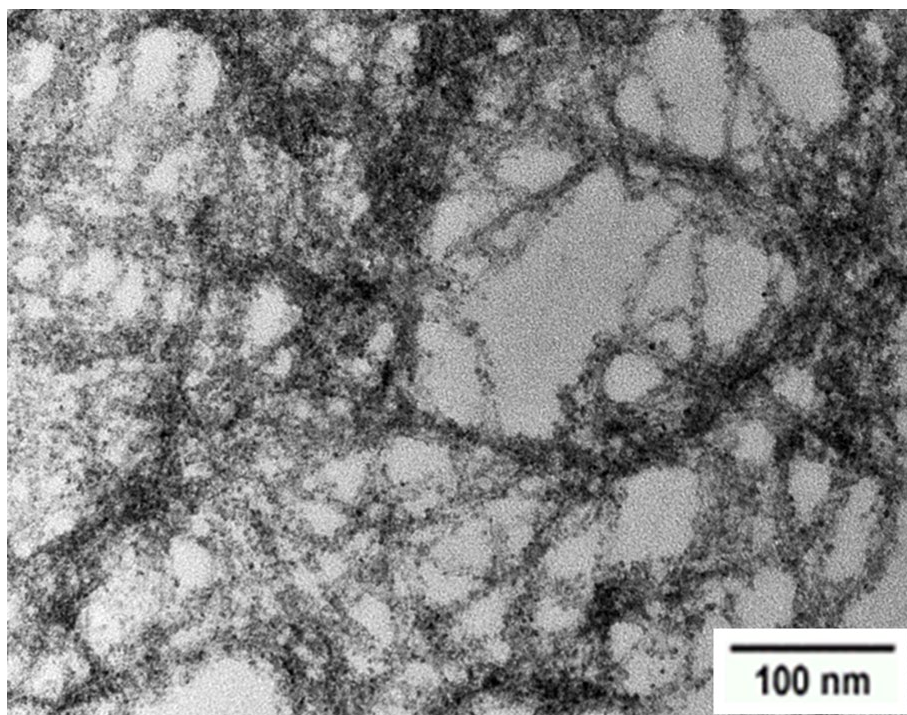


図 5-2 : Sn-CNF の TEM 像

#### 4. 今後の展開

今後は、Ag-CNF についてもネガティブ染色により、CNF と Ag 粒子の分布を同時に撮像すること、粒子の大きさ、頻度分布、および空間分布の数値化が課題である。また、Ag-CNF の光学特性や電気特性を調べ、新しい機能材料への展開についても検討を行う予定である。

#### 5. 参考文献

- 1) Alshehri et al., ACS Appl. Mater. Interfaces 2012, 4, 7007–7010
- 2) Ifuku et al., Biomacromolecules 2009, 10, 2714–2717

#### 6. 付記

学会発表 1 件

- 1) 篠崎美月、佐野博成、田中聡一、矢野浩之、「銀ナノ粒子を担持したセルロースナノファイバーの作製」、第 74 回日本木材学会大会、2024 年 3 月