

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

本年度は科研費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静的加力実験を実施した（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、壁脚部接合部が破壊して、水平抵抗力がほぼ喪失するまで加力を行い、倒壊限界を確認した。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。

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。



図 1-1：試験体図

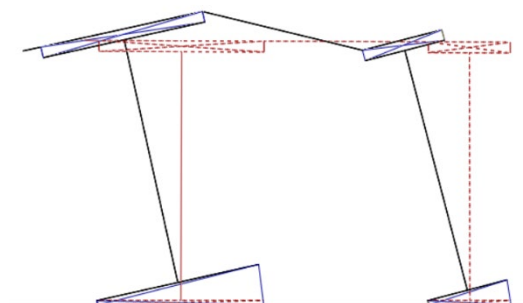


図 1-2：数値解析モデル

5. 付記

1) 原著論文 1 件

So Momose, Takafumi Nakagawa, Tokikatsu Namba, Hiroshi Isoda and Tatsuya Miyake, An Analytical Method to Reproduce Seismic Behavior of Two-Story Cross-Laminated Timber Building at Large Deformation, Journal of Structural Engineering, Printing, 2022.

2) 学会発表 1 件

百瀬奏、辻拓也、五十田博、中川貴文、中島昌一、荒木康弘「住宅用金物を用いた低層 CLT パネル工法建築物の静的倒壊実験」日本木材学会大会，福岡，2023 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）

2. 研究の背景と目的

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、木材に物理的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、湿潤状態での温度上昇によりリグニンの熱軟化が起きる前後で、細胞壁内部のナノ構造に起こる変化を小角 X 線散乱解析により明らかにした内容で論文発表を一件行うことができた。その結果、これまでは動的粘弾性測定の結果から導出されていた熱軟化時のナノ構造変化を矛盾なく、より詳しく分析することに成功し、小角 X 線散乱による構造解析が物性相関解析において重要な役割を果たすことを示すことができた (Fig. 2-1)。

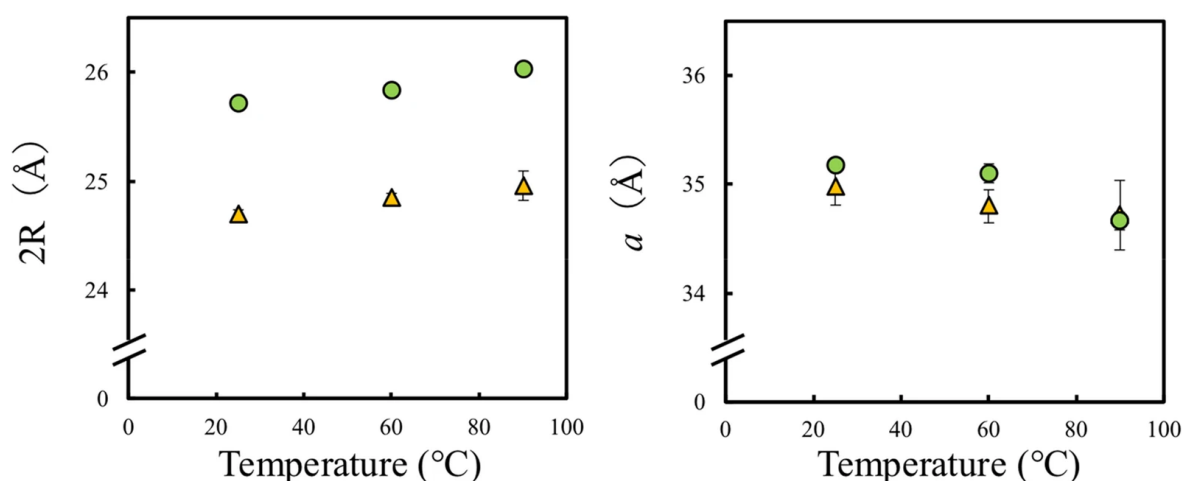


Fig. 2-1: The change of the structural parameters obtained from small angle X-ray scattering experiment and the following data analysis by WoodSAS model.

Plots of the CMF (cellulose microfibril) diameter (2R) and the interfibrillar distance (a) obtained by the fitting calculation with the WoodSAS model, as a function of temperature: orange filled triangles and green filled circles for earlywood (EW) and latewood (LW), respectively. Error bars indicate the standard deviations in the fitting calculation with SasView.

Horiyama et al., 2022, *Journal of Wood Science*, DOI:
<https://doi.org/10.1186/s10086-022-02058-x>

4. 今後の予定

他にも木材、竹材、イネなどの植物細胞壁試料や、脱成分した試料、異なる物理的揺動を与えた条件での測定を現在も継続して行っており、学会にて 5 件の発表を行った。

5. 付記

1) 原著論文 1 件

Hiroaki Horiyama, Keisuke Kojiro, Yoko Okahisa, Tomoya Imai, Takafumi Itoh, Yuzo Furuta (2022) Combined analysis of microstructures within an annual ring of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) by dynamic mechanical analysis and small angle X-ray scattering, *Journal of Wood Science* **68**, 52, DOI:
<https://doi.org/10.1186/s10086-022-02058-x>

2) 学会発表 5 件(細胞壁ネットワーク研究会 1 件、第 73 回日本木材学会年次大会 4 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）

共同研究者：山本浩之（名古屋大学 大学院生命農学研究科）

共同研究者：吉田正人（名古屋大学 大学院生命農学研究科）

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。

前年度までにおこなったスギとケヤキの残留応力分布の大規模測定の結果、ケヤキにはこれまで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。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、特異な残留応力分布パターンと関連すると考えられる。そこで本年度はケヤキの特異な残留応力分布ならびにその要因について精査し、ケヤキの残留応力発生メカニズムや材質分布を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の結果および考察

ケヤキの残留応力分布について、これまでに報告のない分布パターンであったため、従来の測定法（ひずみゲージを用いたまさ目板法）で正しく測定できるかどうかを確認した。具体的には、残留応力解放のための適切な切削位置や、必要な板の長さなどを改めて検討し、従来と同様の方法で正確に測定できることを確認した。

また、樹幹内残留応力の測定点（ひずみゲージの貼付箇所）に隣接する箇所から試験片を作成し、残留応力発現やあて材の形成と関係すると考えられる材質指標（容積密度、乾燥収縮率、圧縮弾性率）を測定した。これらの指標と残留応力解放ひずみの関係を調べたが、いずれの指標も残留応力解放ひずみの変動を説明できなかった。

さらに、ケヤキの残留応力分布の発生メカニズムを探るため、新たに 4 本の立木を準備し、立木形状から残留応力分布、組織構造・材質分布までを関連づける一連の調査を開始した。今年度は、立木形状の記録と表面成長応力の測定をおこなった（図 3-1）。



図 3-1：立木の表面成長応力測定の様子

4. 今後の展開

現在、あて材の存在をより直接的に示す指標（ミクロフィブリル傾角・木口顕微鏡断面におけるあて材の存在率）について測定中である。すでに測定した材質指標と合わせてケヤキの特徴を明らかにする。また、表面成長応力測定後の立木について、一連の測定を進めていく。

5. 付記

1) 原著論文 1 件

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

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（京都大学生存圏研究所）

共同研究者：畑 俊充（京都大学生存圏研究所）

2. 研究の背景と目的

安全で快適な人間の居住圏を創造し、維持し続けるための研究、すなわち、木質資源を適切に長く利用するための耐久性向上の研究、及びバイオマス由来新機能カーボン素材の開発研究を行う。

3. 研究の結果および考察

加熱時のバイオマスへの金属触媒の効果

今年度は、北海道産トドマツ (*Abies sachalinensis*) 材粉碎物、銅粉末和光純薬 75 μm 、99.9%、チタン粉末和光純薬 45 μm 、99.9%を原料とし、加熱時のバイオマスへの金属粉末による触媒効果について検討した。トドマツ木粉と銅粉末、およびチタン粉末のそれぞれを重量比 7:3 にしてメノウ乳鉢に入れ、混合により試料調製を行った。えられた 2 種類のサンプルをそれぞれ窒素気流下 (200ml/min), 昇温速度 10-40°C/min、500°C 到達後 3 分間保持し、自然放冷した。そして、熱処理に伴う重量減少、発熱・吸熱挙動、元素分析による熱分解残渣化学組成、FT-IR スペクトル、SEM 像による熱分解残渣化学構造と形態観察による検討を行った。熱分析、元素分析、FT-IR スペクトル、電子顕微鏡観察を行ったところ次の結果を得た。

熱分析を行ったところ、銅添加により、木粉のみの場合と比較し熱分解残渣を多く得られた。チタン添加により、重量減少率が増大する傾向が示された。熱分解残渣の採取を優先する場合は、銅添加が適しており、ガス・液化物採取を優先する場合は、チタン添加が適していると考えられた。元素分析の結果によると、トドマツ単体では、昇温速度の増加とともに炭素量がやや増加する傾向にあったが、Cu 添加により昇温速度の増加とともに炭素量が増加した。FT-IR スペクトルから、昇温速度の違い、銅やチタンの添加によるスペクトルの大きな変化は見られなかった。3,400 cm^{-1} 付近に水酸基由来と考えられる吸収が観察された。1,700 cm^{-1} 付近にカルボニル基の存在を示唆するショルダーが観察された。1,595 cm^{-1} 付近に芳香族 C=C 結合由来の伸縮振動と考えられる吸収が観察された。銅およびチタン添加熱分解残渣を走査電子顕微鏡により観察したところ、銅を添加した熱分解残渣の断面には、触媒反応後の痕跡が観察された。チタンを添加した熱分解残渣は、未処理の残渣よりも細かく、均一になっており、その結果、重量減少率が大きくなったものと思われた。

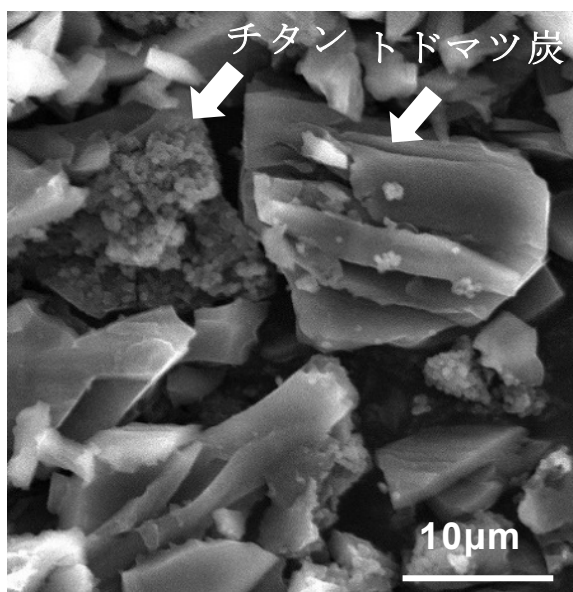


図 4-1：チタンと隣接するトドマツ炭。触媒によるサンプルの表面形態変化は見られなかった。

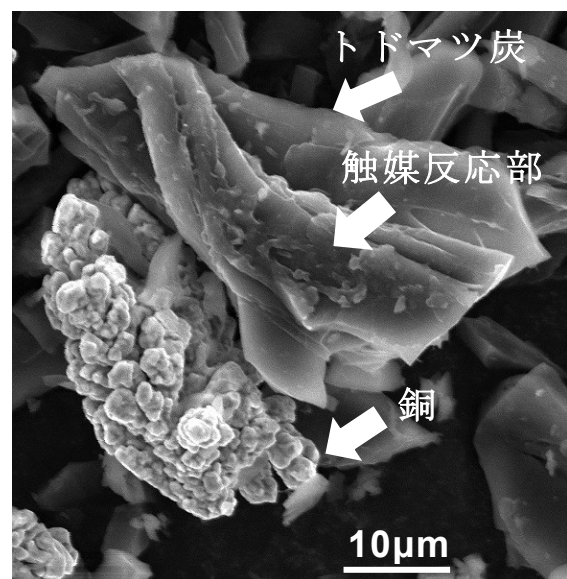


図 4-2：銅と隣接するトドマツ炭。触媒によるサンプル断面の形態変化が見られた。

4. 今後の展開

金属触媒反応の温度や時間などの条件を変化させることにより、環境問題の解決に役立つ新しい機能材料の開発を試みる。

4.5 木材の組織構造を活用した材料創成

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：阿部賢太郎（生存圏研究所 生物機能材料分野）

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

木材は樹木が主に樹体支持や水分通導のために生産した材料であり、緻密に構成された組織構造をもつ。近年、この組織構造を残したまま木材の高性能化や高機能化を図るための材料開発の研究が盛んになりつつある。本研究では、単に木材の高性能化・高機能化を図るのではなく、木材の組織構造に固有の材料物性発現を目指す。今年度は、透明木材に着目し、組織構造を活用した材料特性を発現させることを目的として研究を行った。透明木材は、木材に漂白や樹脂複合化などを施すことで、木材の組織構造や細胞壁を維持したまま可視光領域の全光線透過率を著しく向上させた材料である。しかし、木材の物性と光学特性の関係は明らかにされていない。それは、様々な樹種について体系的に光学特性が調べられていないためである。そこで、いくつかの針葉樹と広葉樹の透明木材を作製し、光学特性の測定を行った。

3. 研究の結果および考察

木材の密度と全光線透過率の関係は、木取りによって異なった（図 5-1）。木口板では、木材の密度が変化しても、全光線透過率は一定であった。一方で、板目板では、木材の密度が大きくなるにつれて、全光線透過率は低下した。これは、木材の密度が大きくなるほど、より多くの細胞壁を光が透過することになり、光散乱が起きやすいため、全光線透過率が低下すると推察される。

4. 今後の展開

透明木材において、組織構造を活用した特性を発現させるためには、特に散乱特性と組織構造の関係を明らかにすることが必要であると考えられる。今後は主にこの検討を中心に研究を進めていく予定である。また、偏光特性と組織構造の関係についても検討予定である。

5. 付記

1) 学会発表 2 件

- ・山碕悠真、矢野浩之、田中聡一「木材のホロセルロース骨格構造の光学特性に及ぼす含浸樹脂の影響」、セルロース学会第 29 回年次大会、2022 年 7 月
- ・山碕悠真、垣内田洋、関雅子、阿部充、三木恒久、矢野浩之、田中聡一、「透明木材の光学特性に及ぼす組織構造の影響」、第 73 回日本木材学会大会、2023 年 3 月

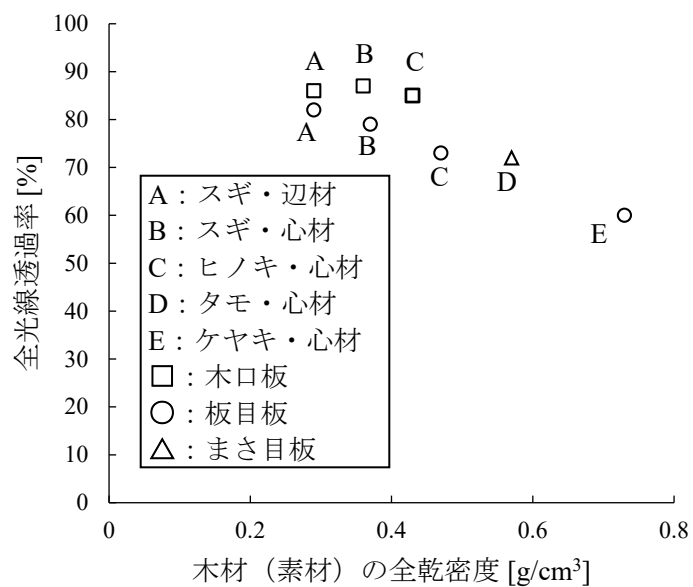


図 5-1：木材の全乾密度と全光線透過率の関係