

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15319

研究課題名（和文）マルチスケール有限要素解析の活用による木材の材料特性推定および降伏条件式の提案

研究課題名（英文）Estimation of properties and yield criterion of wood by utilizing multi-scale finite element method

研究代表者

梶川 翔平（Kajikawa, Shohei）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：00772815

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：加工技術に関する研究開発においては、数値解析による変形シミュレーションの活用が有用であるものの、木材は複雑な構造を有するため、その変形挙動を高精度に再現可能な数値解析手法は確立されていない。本研究では、木材の変形挙動を再現するため、木材の構造を模擬したモデルを用いて、有限要素法（FEM）、均質化法、離散要素法（DEM）による数値解析を行う手法を提案した。実験結果と比較することによって、解析モデルの形状を適正化するとともに、適正化したモデルを用いた解析によって、木材の材料特性の予測や、変形挙動を再現できる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、木材の変形挙動を再現可能な数値解析手法を新しく提案し、提案手法によって、木材の材料特性予測や、変形挙動を再現できる可能性を示した。今後、この手法を発展させ、木材加工に関する研究開発に取り入れることによって、研究開発を加速化し、低環境負荷な循環型資源である木材の有効利用の促進が期待できる。さらに、木材の内部構造が変形挙動に及ぼす影響など、これまで明らかにならなかった学術的な知見も期待できる。

研究成果の概要（英文）：A numerical analysis method that can reproduce the deformation behavior of wood with high accuracy has not been developed due to the complex structure of wood although the use of deformation simulation by numerical analysis is useful in research and development of processing technology. In this study, a numerical analysis by the finite element method (FEM), homogenization method, and discrete element method (DEM) using a model that has the structure of wood was proposed in order to reproduce the deformation behavior of wood. By comparing the analysis results with experimental results, the analytical model was optimized, and the analysis using the optimized model showed the possibility of predicting the material properties and reproducing the deformation behavior of wood.

研究分野：材料加工

キーワード：木質系材料 木材 マルチスケール解析 大変形加工 仮想材料試験 有限要素法（FEM） 均質化法 離散要素法（DEM）

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

持続的発展が可能な循環型社会の構築のためには、カーボンニュートラルな特性をもつ木材などの循環型資源の積極的利用が重要である。しかしながら、現状では木材が有効活用できていると言えない。その原因の1つとして、「加工性の問題」が挙げられる。木材の加工性を高め、効率的に製品を生産するためには、新たな木材の生産加工技術の開発や、既存の加工法に対する加工条件の適正化が必要である。金属材料などにおいては、開発を促進するため、実験に加えて、有限要素法 (Finite Element Method: FEM) などの数値解析を用いることが多い。数値解析を用いた変形加工シミュレーションによって、適正な加工方法や条件を推測した上で、実験を行うことによって、開発時間の短縮化やコスト削減が期待できる。

しかしながら、金属材料に比べると、木材に対して数値解析が適用されることは少ない。この原因として、木材は複雑な階層構造を有することから、その構造による影響を受けた複雑な変形挙動を表現するための材料モデルが確立されていないことが挙げられる。一方、木材の階層構造は周期的であるため、ミクロスケールの代表的な構造をモデル化し、解析を行うことによって、材料全体の変形挙動を再現できる可能性がある。数値解析を用いて、高精度な木材の変形加工シミュレーションを実現することによって、木材加工に関する研究開発が加速し、工業材料としての木材利用の促進が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、木材や木粉を対象として、その変形挙動を高精度に再現するため、有限要素法 (FEM)、均質化法、離散要素法 (DEM) を組み合わせた数値解析手法を開発することを目的とする。木材の細胞や年輪、木粉の粒子などを模擬したモデルを構築し、提案した数値解析手法による仮想材料試験を行った。ミクロスケールおよびマクロスケールに分けて解析を実施し、ミクロスケールの解析においては均質化法、マクロスケールの解析においては離散要素法 (DEM) を FEM 解析と組み合わせた。実験結果と比較することによって、適切な解析モデルを検討した。さらに、木材の年輪や細胞形状、木粉粒子形状の違いが変形挙動に及ぼす影響を調査した。

3. 研究の方法

(1) 均質化法を用いた有限要素法 (FEM) 解析による木材の仮想材料試験

解析には、英国の Swansea 大学にて開発された有限要素解析プログラム "HYPLAS" を使用した。図 1 に、木材の木口面の顕微鏡観察像および解析モデルを示す。図 1(a) に示すように、木材は早材および晩材から構成される周期的な空隙構造を有している。解析では、観察結果に基づき、空隙構造を図 1(b) に示すような代表体積要素 (RVE) としてモデル化し、周期境界条件を設定することによって、RVE が上下左右方向に連続していると仮定した。細胞壁は、完全弾塑性体とした。RVE に様々な方向のマクロひずみを与え、その際のマクロ応力 σ -マクロひずみ ϵ 線図 (SS 線図) や SS 線図から得られる特性値 (ヤング率 E 、降伏点など) を評価した。パラメータとして、早材・晩材部の細胞形状や早材体積率 ζ などを変化させて解析を行い、その影響を調査することによって、モデル形状の検討を行った。また、解析結果の妥当性を検証するため、実際に木材の圧縮試験などの材料試験を行い、解析結果と比較した。

(2) 離散要素法 (DEM) を用いた有限要素法 (FEM) 解析による木材・木粉の変形挙動の再現

解析には、英国の Rockfield Software 社製の有限要素解析ソフトウェア "ELFEN" を使用した。図 2 に、解析モデルを示す。二次元平面ひずみ状態として解析を行った。工具は弾性体、材料は完全弾塑性体とし、工具・材料間、および材料同士の接触を考慮した。木材ブロックの変形挙動の再現にあたっては、図 2 に示すように、早材および晩材から構成される年輪構造を簡易的な格子にて模したモデルを用いた。木粉の変形挙動の再現にあたっては、図 2(b) に示すような木材粒子を再現したモデルを用いた。格子や粒子の形状やサイズが変形挙動に及ぼす影響を調査し、

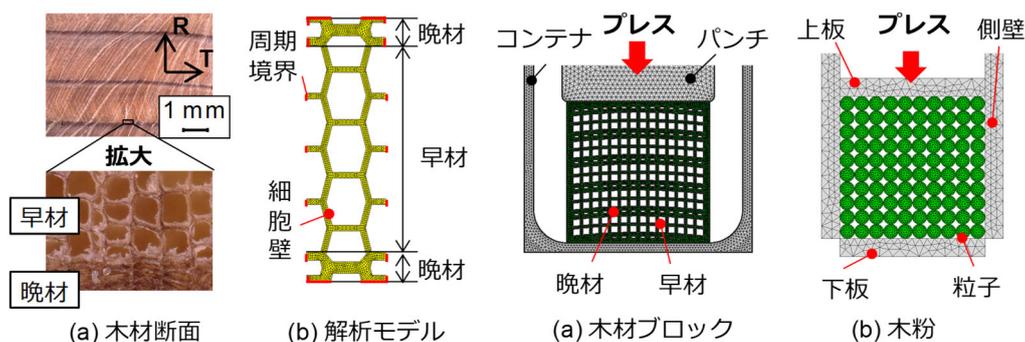


図 1 均質化法を用いた FEM 解析における代表体積要素 (RVE)

図 2 DEM を用いた FEM 解析におけるモデルの概略

適切なモデル形状を検討した。また、木材ブロックの鍛造加工や木粉の射出成形実験などの結果と比較することによって、解析モデルの妥当性を検証した。

4. 研究成果

(1) 均質化法を用いた有限要素法 (FEM) 解析による木材の仮想材料試験

図3に、圧縮試験において、圧縮方向に対する材料の年輪傾角 θ を変えた際の無次元化応力 σ/σ_p - ひずみ ε 線図を示す。なお、 σ_p は比例限度応力である。 θ によって、ヤング率 E や比例限度応力 σ_p は変化し、45, 0, 90°の順に大きくなる傾向を示した。図4に、解析にて、早材体積率 ζ_e がヤング率比 E/E_a に及ぼす影響を調査した結果を示す。なお、 E_a は3方向の E の平均値である。 ζ_e によって E は大きく変化した。解析における ζ_e を実験に用いた試験片の ζ_e に近づけることによって、解析と実験結果がおおよそ一致した。一方、比例限度以降の挙動は、図3に示すように、 $\theta=0$ および 90° の場合において、実験と解析が一致せず、実験のほうが低い応力となる傾向を示した。これは、解析において細胞壁にあたる部分の座屈が考慮されていないことが原因として考えられる。表1に、実験および解析における細胞の変形形状の比較を示す。細胞壁が厚い晩材部はあまり変形せず、早材部が主に変形した。 $\theta=0$ および 45° の場合、早材部の細胞壁のつなぎ目の部分に応力集中が生じていた。 $\theta=90^\circ$ の場合、圧縮方向に平行な細胞壁に応力が比較的均一に分布しており、力を細胞壁全体で支えていることがわかる。このため、 $\theta=90^\circ$ の場合は、他の θ と比べて変形が生じにくく、 E が最も大きくなったと考えられる。

図5に、(a) 早材のみ、(b) 晩材のみ、および (c) 早材・晩材から構成される RVE に、様々な方向のひずみ $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ を加え、それぞれの場合における降伏点から得た降伏面を示す。得られた降伏面に対して、Gibson らによって提案されているハニカムの降伏条件式 (Gibson et al., Int. J. Mech.

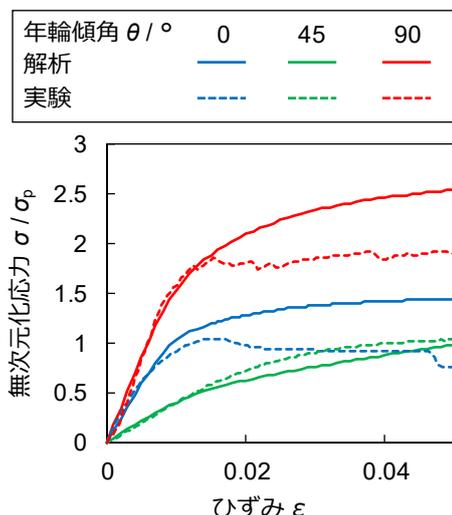


図3 無次元化応力 σ/σ_p - ひずみ ε 線図 (スギ, 解析の早材体積率 $\zeta_e=0.91$)

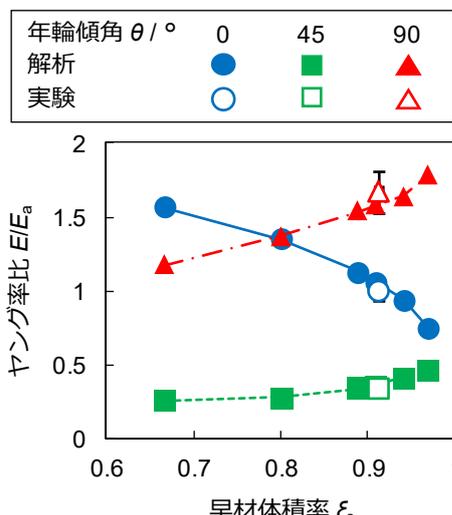


図4 早材体積率 ζ_e がヤング率比 E/E_a に及ぼす影響 (スギ)

表1 実験および解析における細胞の変形形状の比較 (スギ)

年輪傾角 $\theta / ^\circ$	0	45	90	
実験 (早材)				50 μm
実験 (晩材)				
解析 (早材体積率 $\zeta_e=0.91$)				

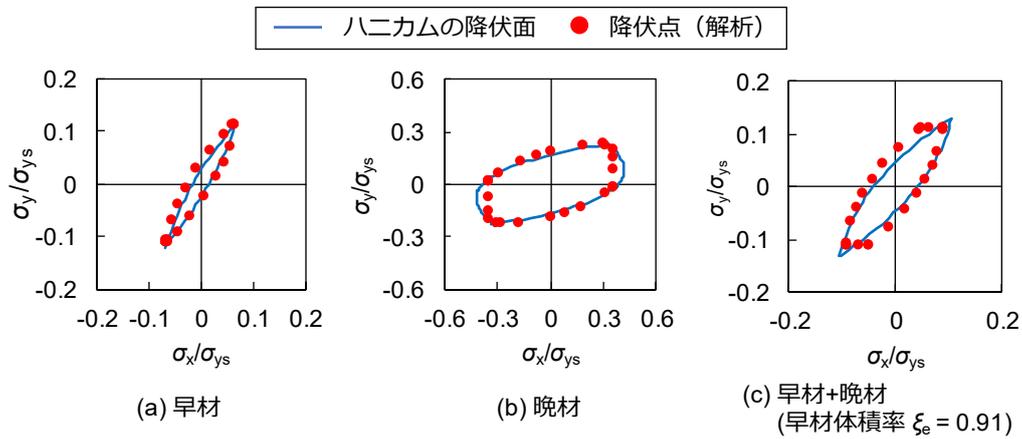


図5 均質化法を用いた FEM 解析にて求めた木材の降伏面

Sci., 31 (9), pp.635 - 663) を用いたフィッティングを行った. 早材のみの場合, 一般的なハニカム形状に最も近い場合, ハニカムの降伏条件式と FEM 解析結果は一致した. 晩材のみの場合, 細胞壁が厚く, 一般的なハニカム形状とは異なるため, フィッティング結果と FEM 解析結果に多少のズレが生じた. 早材体積率 ξ_e を実際の木材に近づけた早材 + 晩材モデルの場合, ξ_e が大きいため早材の影響が大きく, 降伏面は早材のみの場合と似た形状を示した. フィッティング結果と解析結果もおおよそ一致した.

(2) 離散要素法 (DEM) ・有限要素法 (FEM) の連成解析による木材・木粉の変形挙動の再現

①木材の変形挙動の再現

表2に圧縮時における木材ブロックの変形挙動を示す. 実験においては, 圧縮方向に対する年輪傾角 θ が異なると, 変形挙動は変化した. $\theta = 0^\circ$ の場合, 年輪が座屈し, 折れ曲がるように変形した. $\theta = 45^\circ$ の場合, 中央部が幅方向に膨らみながら圧縮された. $\theta = 90^\circ$ の場合, 幅方向に不規則に波打ちながら変形した. 年輪構造を格子にて簡易的に模したモデルを用いた解析においても, 実験にて見られた変形形状を再現できた. 細胞形状を厳密に再現せずとも, 実験における

表2 実験および解析における変形挙動の比較 (ヒノキ)

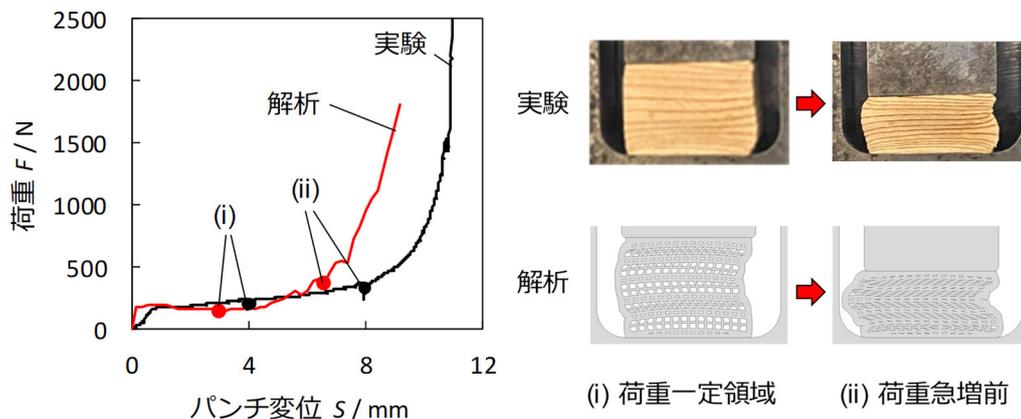
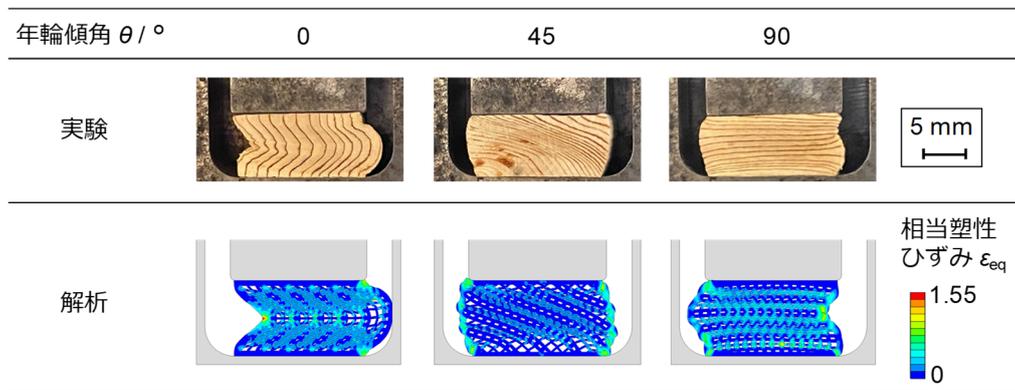


図6 荷重 F - ストローク S 線図および圧縮時における形状変化 (ヒノキ)

変形形状を再現できていることから、木材の変形には、年輪構造が支配的に影響していると推察できる。図6に、荷重 F - パンチ変位 S 線図、および変形にともなう外観の変化を示す。実験においては、材料内部の空隙が押しつぶされる圧密変形中に F がおよそ一定に推移し、材料内部の空隙が少なくなると、 F が急増する。解析においても、実験と同様に、材料内部の空隙が少なくなった時点で F が急増しており、実験で見られた変形挙動を良く再現できた。一方、荷重の急増が開始する S は、解析の方が小さい。実際の木材は、内部の空隙体積が材料全体の約 75% を占めるが、解析における材料の空隙体積は全体の約 50% と小さいため、解析の方が早期に圧密が完了したためと考えられる。より高精度に木材の変形を再現するためには、材料の空隙体積を実際の木材に近づけつつ、より緻密な空隙構造を再現する必要がある。

②木粉の変形挙動の再現

図7に、天然系バインダ（スクロースおよびクエン酸）を混合した木粉の射出成形において、木粉の粒子サイズ d が成形品外観に及ぼす影響を示す。粒子サイズが小さいと、金型端部まで材料が十分に充填せず、端部にて色ムラが生じた。キャピラリーを用いた流動試験にて、木粉流動時の平均流動圧力 P_a を調査した結果を図8に示す。粒子サイズ $d = 2 \text{ mm}$ 以上の場合、 d が流動圧力 P_a に及ぼす影響は小さい一方、 $d = 2 \text{ mm}$ 未満になると、流動圧力が高くなる、すなわち、流動性が低下する傾向を示した。

粒子サイズ d が木粉の流動性に及ぼす影響を検討するため、図9に示すように、木粉粒子を簡易的に円にて表現した FEM・DEM 解析を行った。解析では、上板に所定の荷重 F_p を加えた際に下板に加わる反力 F_r を評価した。図10に、 F_p 負荷時における F_r に及ぼす d の影響を示す。 $d = 1 \text{ mm}$ 以上の場合、 F_r は F_p とほぼ同じである一方、 $d = 1 \text{ mm}$ 未満の領域では、 F_r が低下する傾向を示した。これは、 d が小さくなると、粒子間の接触面積増加にともなう摩擦力が増加するためと考えられる。実際の木粉の射出成形においても、 d が小さい場合において、摩擦力の影響によって金型端部まで圧力が加わらず、成形品端部にて不良が生じたと考えられ、解析によって実験における現象を再現できたといえる。

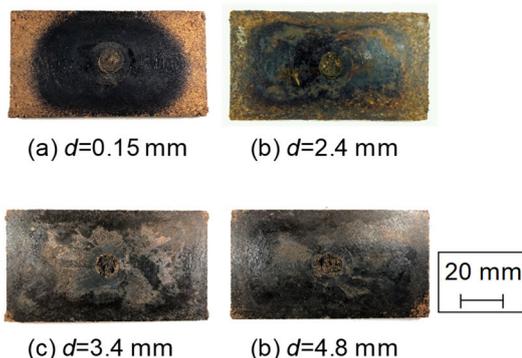


図7 木粉粒子サイズ d が射出成形性に及ぼす影響（スギ，バインダ含有率 $B = 30 \text{ wt}\%$ ，成形温度 $T = 180^\circ\text{C}$ ）

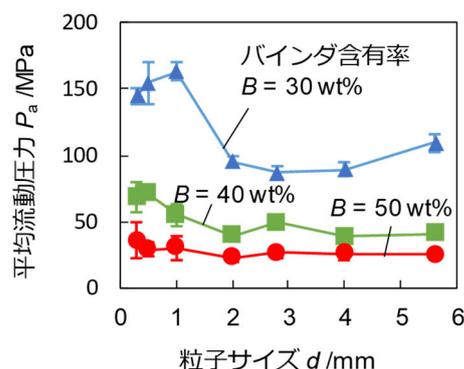


図8 木粉粒子サイズ d が流動圧力に及ぼす影響（スギ，試験温度 $T = 180^\circ\text{C}$ ，ノズル径 $d_n = 2 \text{ mm}$ ）

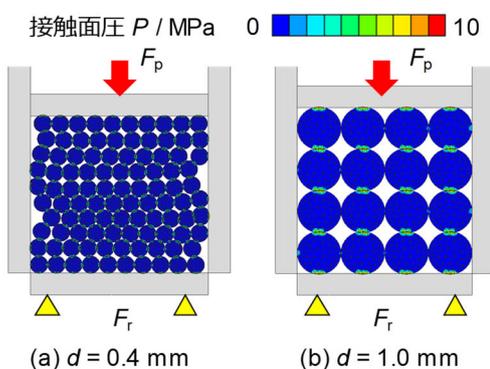


図9 接触面圧 P 分布に及ぼす粒子サイズ d の影響（側壁間距離 $l_w = 2 \text{ mm}$ ）

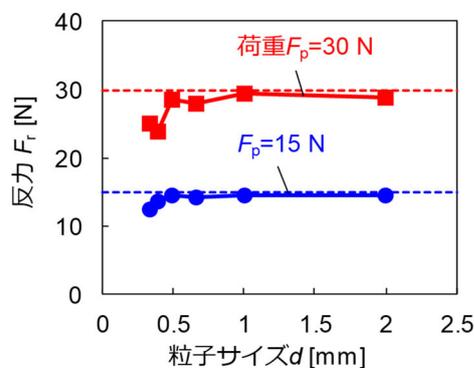


図10 粒子サイズ d が荷重 F_p 負荷時における反力 F_r に及ぼす影響（側壁間距離 $l_w = 2 \text{ mm}$ ）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 鈴木 雄也, 梶川 翔平, 久保木 孝	4. 巻 70
2. 論文標題 スクロースとクエン酸を混合した木材粉末の押出し加工による円管成形	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 912-917
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.70.912	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 梶川翔平, 曹基宇, 久保木孝, 田中聡一, 梅村研二, 金山公三	4. 巻 69
2. 論文標題 スクロースおよびクエン酸を混合したスギ粉末の熱流動に及ぼす粒子サイズの影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 440-445
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.69.440	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 Shohei Kajikawa, Masaya Horikoshi, Takashi Kuboki, Soichi Tanaka, Kenji Uemura, Kozo Kanayama	4. 巻 15
2. 論文標題 Fabrication of Naturally Derived Wood Products by Thermal Flow Molding of Wood Powder with Sucrose and Citric Acid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 BioResources	6. 最初と最後の頁 1702-1715
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15376/biores.15.1.1702-1715	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 小田 翔太, 久保木 孝, 阿部 充, 近藤 雅裕, 関 雅子, 三木 恒久, 梶川 翔平
2. 発表標題 セル構造を再現したマルチスケール有限要素解析による針葉樹材の圧縮特性の再現
3. 学会等名 第73回日本木材学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 織田 啓太郎, 久保木 孝, 田中 聡一, 三木 恒久, 梶川 翔平
2. 発表標題 有限要素解析による木材の圧縮変形シミュレーション
3. 学会等名 2023年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shohei Kajikawa, Shota Oda, Takashi Kuboki, Masahiro Kondo, Mitsuru Abe, Masako Seki, Tsunehisa Miki, Eduardo de Souza Neto
2. 発表標題 Virtual Compression Test by Multi-scale Approach with Wood Cell Model
3. 学会等名 COMPLAS 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shohei Kajikawa, Masaya Horikoshi, Takashi Kuboki, Soichi Tanaka, Kenji Umemura, Kozo Kanayama
2. 発表標題 Fluidity of Wood Composite Combined with Natural Binder on Injection Molding
3. 学会等名 13th International Conference of Technology Plasticity (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 雄也, 久保木 孝, 梶川 翔平
2. 発表標題 冷却ダイを用いた天然系バインダ混合木粉の押し出し加工による円管成形
3. 学会等名 第72回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梶川 翔平, 曹 基宇, 久保木 孝
2. 発表標題 粒子サイズの適正化によるスクロースおよびクエン酸混合木粉の射出成形品の高密度化
3. 学会等名 第72回日本木材学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小田 翔太, 梶川 翔平, 久保木 孝, 阿部 充, 関 雅子, 三木 恒久, Eduardo de Souza Neto
2. 発表標題 マルチスケール有限要素解析による木材の圧縮特性の再現
3. 学会等名 日本材料学会第71期学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植嶋 日奈子, 梶川 翔平, 久保木 孝
2. 発表標題 木材の鍛造加工においてパンチ形状が成形性に及ぼす影響
3. 学会等名 2022年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 雄也, 久保木 孝, 梶川 翔平
2. 発表標題 天然系バインダを混合した木粉の押し出し加工による円管製造の試み
3. 学会等名 第71回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤 めぐみ, 梶川 翔平, 久保木 孝
2. 発表標題 スクロースおよびクエン酸を混合した木質系粉末の流動性に及ぼす加熱温度および時間の影響
3. 学会等名 第71回日本木材学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 曹 基宇, 梶川 翔平, 久保木 孝
2. 発表標題 天然系バインダを混合した木質系粉末の流動挙動および成形性に及ぼす粒子サイズの影響
3. 学会等名 第70回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梶川 翔平, 堀越 将矢, 久保木 孝
2. 発表標題 スクロースおよびクエン酸を混合した木質系粉末の射出成形
3. 学会等名 2019年度塑性加工春季講演会講演論文集
4. 発表年 2019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
---------	---------