

ISSN 1344-896X

令和 7 年度

岐阜県生活技術研究所研究報告

REPORTS OF THE GIFU PREFECTURAL
RESEARCH INSTITUTE FOR HUMAN LIFE TECHNOLOGY

No.28

2026

岐阜県生活技術研究所

岐阜県生活技術研究所研究報告 目次

試験研究部 研究報告

伝統技法とCNC加工による新たな家具製造手法の確立（第5報） デジタル技術を活用した木製家具製造手法 成瀬哲哉	1
構造解析を用いた椅子設計による効率と自由度の向上に関する研究（第2報） 木製椅子の背もたれ衝撃時の接合部力学挙動の解析 森茂智彦，松井和己，山田貴博	6
木材の品質と意匠の両立を目指した選別自動化に関する研究 幅はぎ材における柄合わせ工程の最適化に向けた検討 小高大輝，藤巻吾朗	11
オーク突板化粧材の変色抑制技術の開発（第3報） コーティング処理による変色抑制 伊藤国億	16
超音波伝播法による木材の非破壊評価（第3報） 年輪形状と節の超音波検出 今西祐志	21
飛騨地域家具製造業向けの木材データベースの構築（第3報） 足立隆浩，沼澤洋子	25
曲げ木への影響因子の解明に関する研究 針葉樹の曲げ木加工性 石原智佳	30
簡易計測による脊柱わん曲の推定と製品評価への応用（第1報） 筋骨格モデルを用いた基盤技術の構築 藤巻吾朗，小高大輝	35

伝統技法とCNC加工による新たな家具製造手法の確立（第5報） デジタル技術を活用した木製家具製造手法

成瀬哲哉*

Integration of Traditional and Digital Technologies for Furniture Manufacturing (V) Manufacturing methods for wooden furniture utilizing digital technologies

NARUSE Tetsuya*

これまでの設計・製造手法では実現が困難であった新たな意匠や機能を有する木製家具・椅子を実現するため、伝統技術と最新のデジタル技術を融合した新たな家具設計手法の考案を試みている。本年度研究では、複雑な形状の肘・背もたれの製造と、5軸CNC加工機による捻じれ構造を有するホゾ構造の製造及び強度について検証した。

複雑な形状の肘・背もたれの製造においては、アナログ造形からリバースエンジニアリングによるデジタルデータの作成、5軸CNC加工機による部材製造を実現した。

また、捻じれ構造を有するホゾ構造については加工時間は角ホゾ構造に対して約3.75倍かかるものの、引張強度は平均値で約5倍となり、引っ張りに対する強度向上を示唆する結果を得ることが出来た。

1. 緒言

「飛騨・高山の家具®」は、高品質な木材、優れたデザイン、及び熟練職人による高度な加工技術によって高級木製家具として高い評価を受けており、飛騨地域は国内有数の「木製机・テーブル・椅子」の産地である。

しかし、飛騨地域の木製家具産業においても、高品質な製品を製造するために不可欠な熟練職人の確保が困難となっている。この課題に対応するため家具産業では、5軸CNC加工機のような高度な機械の導入が進められており、職人と機械の協働による製品品質の向上が期待されている。

本研究プロジェクトでは、伝統技法と先端的なCNC加工技術を融合し、従来手法では実現が困難であった革新的なデザインや機能を備えた「飛騨・高山の家具®」の創出を目指している¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。

本年度研究では、アーム式3DスキャナーやCNC加工機といったデジタル技術を活かした複雑な形状の肘・背もたれの製造と、5軸CNC加工機による捻じれ構造を有するホゾ構造の製造及び強度について検証したので報告する。

2. 木製家具製造におけるデジタル技術の活用

2.1 デジタル機器を活用した木製家具の設計

本研究プロジェクトでは、「新たな家具設計手法の提案」¹⁾において、デジタル機器を活用した家具の設計手法として、アーム式3Dスキャナーを用いてクレイモデルをスキャンし、リバースエンジニアリング技術によってCADデータ化して設計に活用する手法を提案している。

CADデータ化の際には、有機的で複雑なメッシュ形状の特徴を維持したままメッシュ形状を整えることで効率的なCNC加工を実現している。この手法を用いて、インダストリアルクレイを用いて造形した肘掛・背もたれ(左半分)をCADデータとして再設計した。図1にクレイモデルと形状測定の様子を、図2にリバースエンジニアリングによるCADデータ化を示す。



図1 クレイモデルと計測風景

* 試験研究部

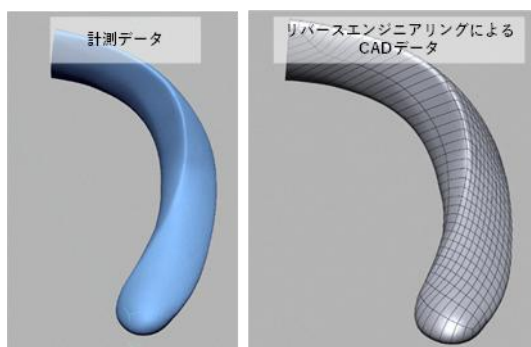


図2 計測データのCADデータ化

2.2 木製肘掛・背もたれの製造

2.2.1 CADデータ作成

前項で作製した肘掛・背もたれ(左半分)データを左右反転し、肘掛・背もたれ(右半分)として5軸CNC加工機を用いて切削加工を行った。

加工する木材のサイズはW400mm・D800mm・H120mmとし、表面、裏面の2回加工で製造することとした。

CADデータには部品を保持するための棧や枠を追加した。形状や取り付け位置は加工時に刃物・ヘッドの動きに干渉しないよう留意し、データ作成を行った。作成したCADデータを図3に示す。

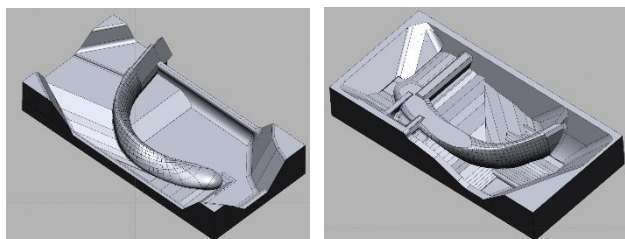


図3 作製したCADデータ(左：表面、右：裏面)

2.2.2 CAMデータ(加工パス)作成

作製したCADデータをCAMソフトウェア(ライコムシステムズ(株) AlphaCAM)を用いて加工パスを作成した。作成したCAMデータを図4に示す。

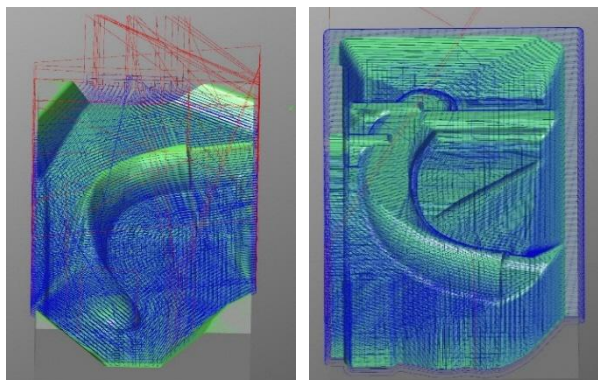


図4 作製したCAMデータ(左：表面、右：裏面)

2.2.3 5軸CNC加工機による部品加工

設計した肘掛・背もたれ(右側)を5軸CNC加工機(シンクス(株) 型番：ZXH-1313F)で加工した。

加工時間は表面が約7時間、裏面が約5時間となった。加工結果を図5に示す。



図5 加工結果(左：表面、右：裏面)

2.3 結果

5軸CNC加工機で加工した部品から、棧・枠等を取り除き、最初に製作した試作椅子の肘掛・背もたれ(右側)として取り付けた(図6)。

これにより、インダストリアルクレイによるアナログ造形からリバースエンジニアリングによるデジタル化、デジタルデータを用いた5軸CNC加工機による部材・製品製造を実現することが出来た。

今後、より効率的に製造するには、最終部材に近い形状からの加工や治具の作成といった段取りの改善が必要と考える。

また、保有する5軸CNC加工機の特長や可動限界を把握したうえでのCADソフトウェアによるデータ設計と、CAMソフトウェアによる適切な刃物の選択と効率的な加工パスの作成の習熟を踏まえ、加工機/CAD/CAMの連携が重要になると考える。



図6 試作椅子

3. 捻じれを有するホゾ構造

3.1 一般的なホゾ構造について

木製品におけるホゾ構造は、部材同士を強固に接合するための、最も基本的かつ伝統的な木工技

術の一つで、家具(椅子・テーブル)や建築(柱と梁の接合)など幅広い分野で使われている。

一般的にホゾ構造は、ホゾ(部材の端部に突き出して加工された凸部)とホゾ穴(もう一方の部材に設けた凹部)の2つの要素で構成されており、この凸部を凹部に差し込むことで接合する。

木工において最も強い接合の一つであり、接着面積の大きさと機械的な噛み合わせによる高い強度と耐久性が期待できる構造である。

また、通常、接着剤は使用するものの金物を使用しないことから、外部から金物が見えないため、意匠性に優れることから日本の伝統建築や木製家具において重視されている。

3.2 捻じれを有するホゾ構造について

通常のホゾ構造は、ホゾをホゾ穴に差し込むことで接合しているため、引き抜き方向へ強度を確保するためには接着が欠かせない。

本研究で提案する「捻じれホゾ構造」は、従来の直線的なホゾに対して意図的に幾何学的なねじれ(回転)を与えることで、力学性能や嵌合特性を向上させることを目的とした応用構造で、木製椅子のような複雑な荷重条件に対して効果を期待している。

通常のホゾは「まっすぐ挿入」「接触面が平面」であるが、捻じれホゾは「挿入時に回転を伴う」「接触面が三次元的に分布する」という点が大きく異なり、形状の複雑さにより、引き抜きへの複合抵抗(摩擦+形状)が向上すると考えられる。

図7に鉛直方向に引張を行った場合にホゾとホゾ穴が引っ掛かる部分(水色)を示す。

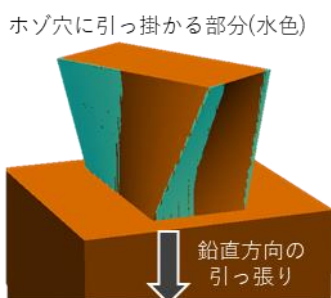


図7 捻じれホゾによる引っぱり時の効果

3.3 ホゾ構造の設計

捻じれを有するホゾ構造の強度を検証するため、従来のホゾ構造(角型)と捻じれホゾ構造と設計した。

角ホゾは高さ20mm×幅30mm×奥行15mm、捻じれホゾは高さ20mm×幅30mm×奥行15mmであるが高さ

方向に15°のねじれを持つ形状となっている。図7にホゾの形状を示す。

角ホゾ穴、捻じれホゾ穴はそれぞれの凸形状を反転した凹形状となっている。図8にホゾ穴の形状を示す。

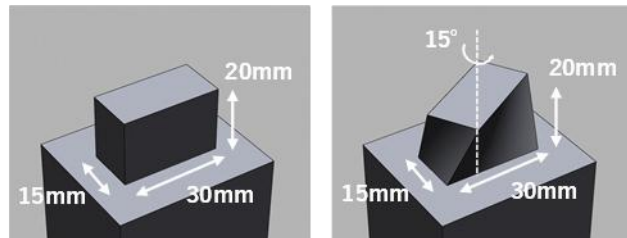


図7 ホゾの形状(左:角ホゾ、右:捻じれホゾ)

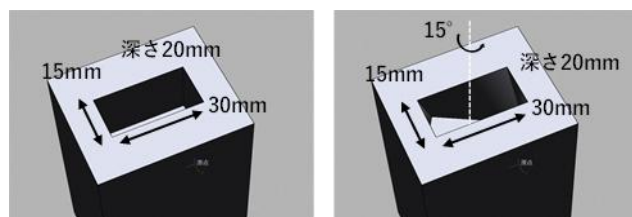


図8 ホゾ穴形状(左:角ホゾ穴、右:捻じれホゾ穴)

3.4 加工用データの作成

設計したホゾ構造を5軸CNC加工機(シンクス(株)型番:ZXH-1313F)加工する。

当所が保有している切削工具では前段で設計したホゾ形状のままでは加工できないことから、各形状のエッジ部分にR5mmのフレット処理を追加で施し実際に加工する形状とした。

従来のホゾ構造はホゾ、ホゾ穴の公差を0で製作し、木材の変形を利用して嵌め込む方法である。しかし、今回のホゾ構造を製作するにあたっては、当所が保有する5軸CNC加工機と切削工具ではホゾ穴の表面に工具跡が残ってしまうため公差0での製作では嵌め込むことが困難であるため、角ホゾ穴、捻じりホゾ穴ともに幅、奥行きをホゾと比較して2%大きくしている。

図9に角ホゾ形状を図10に捻じりホゾ形状を示す。

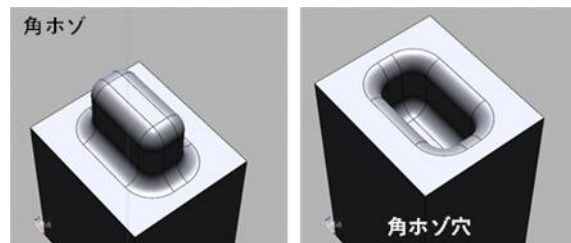


図9 実際に加工する角ホゾの形状

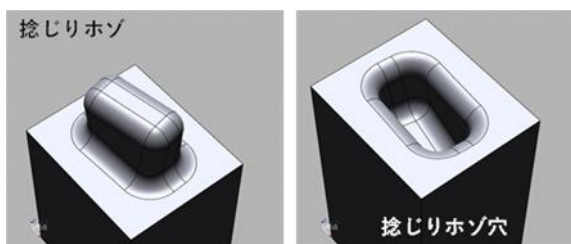


図10 実際に加工する捻じりホゾの形状

3.5 加工パス (CAMデータ) の作成

作製したホゾ構造3個連結CADデータをCAMソフト (ライコムシステムズ(株) AlphaCAM) を用いて加工パスを作成した。加工パスに用いたCADデータの例と加工パスの例として捻じりホゾのデータを図11に示す。

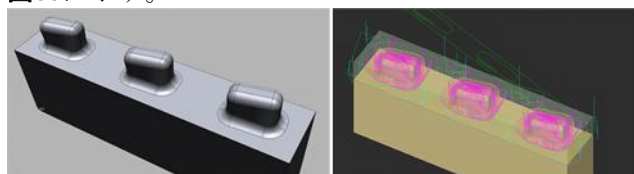


図11 加工に用いたCADデータと加工パス

表1にCAMソフトで算出した加工時間の比較を示す。なお、加工時間は図11に示したホゾ、ホゾ穴をそれぞれ3個連結して加工した時間である。

表1 加工時間比較

形状	角	捻じれ	加工時間の比 (捻じれ/角)
ホゾ	14m 19s	40m 43s	2.93
ホゾ穴	5m 56s	33m 53s	5.67
ホゾ穴+ホゾ穴	20m 15s	74m 36s	3.75

3.6 加工結果

加工結果を図12、図13に示す。

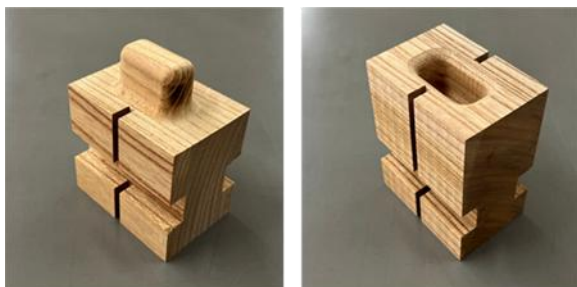


図12 角ホゾ構造の加工結果



図13 捻じりホゾ構造の加工結果

3.7 実験方法

接着剤を用いず嵌め合わせたホゾ構造を、万能試験機 (島津サイエンス UH-100kNXR) を用いて嵌め合わせた方向と平行・逆方向に引張試験を行い、最大値を比較することで嵌め合わせの評価を行った。引張速度は10mm/min、試験体数は、角ホゾ構造、捻じりホゾ構造それぞれ3体で実施した。

3.8 実験結果

図14に試験風景を表2に引張試験の試験結果を示す。なお、捻じりホゾ構造については引張試験で回転して抜けることを防ぐために3mm厚のアルミ板を引張方向に影響がない程度に溝に差し込んである。



図14 試験風景

表2 試験結果 (最大荷重 (N))

角ホゾ構造	最大荷重 (N)	捻じりホゾ構造	最大荷重 (N)
No. 1	157.4	No. 1	873.2
No. 2	246.7	No. 2	947.5
No. 3	144.3	No. 3	908.1
平均	182.8	平均	909.6

加工時間は角ホゾ構造に対して捻じりホゾ構造が約3.75倍かかるものの、引張強度は平均値で約5倍となり、捻じりホゾ構造の引っ張りに対する強度向上を示唆する結果を得ることが出来た。

4. 結言

本年度研究では、デジタル技術を活かした複雑な形状の肘・背もたれの製造と、5軸CNC加工機による捻じれ構造を有するホゾ構造の製造及び強度について検証した。

デジタル技術を活かした複雑な形状の肘・背もたれの製造においては、アナログ造形からリバースエンジニアリングによるデジタルデータの作成、5軸CNC加工機による部材製造を実現し、伝統技法と先進技術の融合を図ることが出来た。

また、5軸CNC加工機の特性を活用すべく、通常の加工方法では実現が難しい捻じれ構造を有するホゾ構造を提案し、加工時間及び強度について検証した。加工時間は角ホゾ構造に対して捻じりホゾ構造が約3.75倍かかるものの、引張強度は平均値で約5倍となり、捻じりホゾ構造の引っ張りに対する強度向上を示唆する結果を得ることが出来た。

今回はホゾ取り機、角ミノ盤、ボール盤といった一般的なホゾ構造の製造方法との加工時間・加工精度の比較は行っていないことから一概には言えないが、高級家具や一品物など、加工時間をかけることが出来る製品への捻じりホゾ構造の活用が期待できると考える。

参考文献

- 1) 成瀬,” 伝統技法と CNC 加工による新たな家具製造手法の確立(第1報)”, 岐阜県生活技術研究所第24号, pp.17-21, 2022.
- 2) 成瀬,” 伝統技法と CNC 加工による新たな家具製造手法の確立(第2報)”, 岐阜県生活技術研究所第25号, pp.5-9, 2023.
- 3) 成瀬,” 伝統技法と CNC 加工による新たな家具製造手法の確立(第3報)”, 岐阜県生活技術研究所第26号, pp.10-12, 2024.
- 4) 成瀬,” 伝統技法と CNC 加工による新たな家具製造手法の確立(第4報)”, 岐阜県生活技術研究所第27号, pp.6-9, 2025.

構造解析を用いた椅子設計による効率と自由度の向上に関する研究 (第2報)

木製椅子の背もたれ衝撃時の接合部力学挙動の解析

森茂智彦^{*1*2}, 松井和己^{*2}, 山田貴博^{*2}

Research on improving efficiency and freedom by chair design using structural analysis (II)
Analysis of Joint Mechanical Behavior in a Wooden Chair under Backrest Impact Loading

MORIMO Tomohiko^{*1*2}, MATSUI Kazumi^{*2}, YAMADA Takahiro^{*2}

本研究では、背もたれに作用する衝撃荷重を対象に、木製椅子の接合部周辺の変形挙動および荷重伝達を明らかにすることを目的とした構造解析を実施した。実験結果とのひずみの比較により、曲げ成分については解析結果と実験結果が良好に一致しており、本解析モデルによって衝撃時のフレーム全体の変形挙動を適切に再現できることを確認した。結果より、衝撃荷重は背から後脚および幕板周辺へ伝達され、前脚付近を支点とする回転を伴う変形が生じた。接合部周辺のひずみは接合部単体の剛性だけでなく、フレーム全体の変形および荷重伝達経路に強く依存することが示され、木製椅子の耐衝撃性の設計にはフレーム全体の挙動を考慮することが重要であることが明らかとなった。

1. 緒言

椅子は人が直接座る家具であり、着座中に破損した場合は怪我につながるおそれがある。このため、椅子の構造の信頼性を確保することが重要である。椅子の破損は接合部で生じることが多く、接合部の挙動は椅子の強度を考える上で重要な要素である。このような力学挙動を把握するためには、実験だけでなく構造解析による検討が有効であり、これまで椅子の強度に関する研究では、構造解析により静的荷重を対象とした検討が多く行われてきた¹⁻⁵⁾。一方、実際の使用環境では、着座動作や身体のもたれかかり、衝突などにより、椅子には瞬間的な衝撃荷重が作用する場合がある。しかし、このような衝撃荷重を対象とした研究は多くは報告されていない。特に背もたれに作用する衝撃荷重は、後脚や座面周辺の接合部に大きな負荷を与える荷重条件であると考えられるが、このような衝撃荷重が作用した際に、接合部周辺の部材がどのように変形し、どのように荷重を負担・伝達するのかについては、十分に明らかになっていない。

そこで本研究では、背もたれに作用する衝撃荷重を対象として、有限要素解析により接合部周辺の部材の変形および荷重伝達を明らかにすることを目的とする。解析モデルの妥当性を確認するために、実験により接合部周辺の変形挙動を観測し、解析結果との比較を行う。これにより、接合部の変形や荷重の挙動を精度よく把握し、椅子の設計に活用できる基礎的な知見を提供する。

2. 解析と実験の共通事項

2.1 椅子の形状

椅子の形状を図1に、寸法を図2に示す。できるだけシンプルな形状で検討するため、曲線を使用せず、角材のみで構成される構造とした。

2.2 試験内容

木製椅子に加える衝撃は、JIS S1203:1998 7.11に規定されている背もたれの耐衝撃性試験の方法で加える。ハンマの角度は規格の試験区分3相当とする。

- ・7.11 背もたれの耐衝撃性試験：背もたれ最上部の外側の中央を38°の角度から落下する衝撃ハンマによって、水平に打撃する⁶⁾。

^{*1} 試験研究部

^{*2} 横浜国立大学大学院 環境情報学府

2.3 ひずみの測定位置

解析の妥当性確認のため、解析結果と実験結果から図3に示す位置のひずみを取得する。なお、各測定箇所では、ひずみゲージを向かい合うように貼り付けており、式(1)、(2)を用いて、ひずみの曲げ成分 $\varepsilon_{\text{曲げ}}$ 、軸成分(引張・圧縮成分) $\varepsilon_{\text{軸}}$ を求めた。背もたれや脚では前側のひずみを ε_1 、後側のひずみを ε_2 とした。幕板では上側のひずみを ε_1 、下側のひずみを ε_2 とした。

$$\varepsilon_{\text{曲げ}} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) / 2 \quad \dots (1)$$

$$\varepsilon_{\text{軸}} = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2 \quad \dots (2)$$

3. 解析条件と実験条件

3.1 解析条件

解析ソフトはANSYS 2025R2を使用した。図1の椅子形状の部材同士は、剛結合とした。また、左右対称形状のため、片側半分のみの形状で解析を実施した。

図4に示すように、椅子を水平な床の上に設置し、前脚には高さ12mmのストッパを当てた。ハンマは、打撃部の先端中心が背もたれ最上部の外側の中央位置に接触する位置に設置した。JISでは、ハンマを角度38° から振り子式に自由落下させて打撃することが規定されている。これに基づき、着地点での理論角速度2.039rad/sをハンマの初期角速度と

して設定した。また、ハンマと椅子には床方向へ重力加速度9.8mm/s²を与えた。

ハンマの寸法はJISに記載の寸法とした。図5のようにハンマの腕の材質は金属であり、頭部はゴム・木材・金属の三層構造である。ハンマの回転軸は金属とし、位置を完全固定にしている。ハンマと椅子の背もたれ、椅子の脚と床およびストッパとの接触は摩擦なし接触とした。

設定した物性値を表1に示す。椅子とハンマの木材部分は直交異方性とし文献値を参照した⁷⁾。異方性の方向は図6に示すとおりとし、X軸を木材のL方向、Y軸をR方向、Z軸をT方向とした。ハンマの密度は、JISで定める重量(頭部:6.5kg、腕:2kg)相当になる値とした。

解法は動的陰解法を用いた。減衰なしとした。

表 1 物性値

椅子/ハンマの木材部分			ハンマのゴム部分	
ヤング率 [GPa]	L(X軸)	11.5	等方性	ゴム
	R(Y軸)	1.45	ヤング率[GPa]	0.01
	T(Z軸)	0.75	ポアソン比	0.49
ポアソン 比	LR(XY)	0.4	密度[kg/m ³]	1200
	RT(YZ)	0.6		
	TL(ZX)	0.6		
せん断 弾性係数 [GPa]	LR(XY)	0.95	ハンマの金属部分/床/ストッパ	
	RT(YZ)	0.15	等方性	軟鋼
	TL(ZX)	0.7	ヤング率[GPa]	200
密度[kg/m ³]		700	ポアソン比	0.3
			密度[kg/m ³]	7695

せん断弾性係数は自動計算された値を用いた

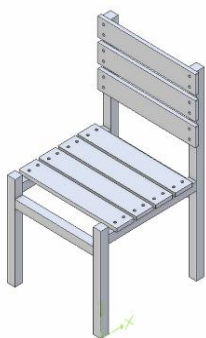


図1 椅子の形状

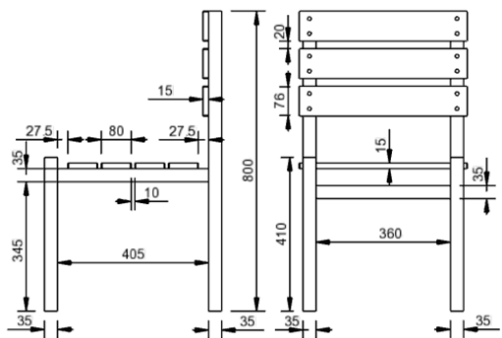


図2 椅子の寸法

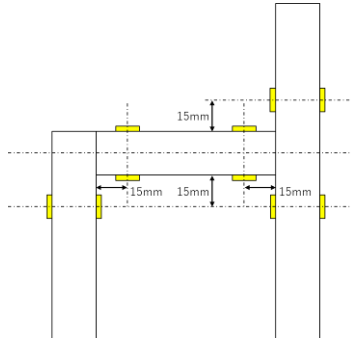


図3 測定位置



図4 解析モデル

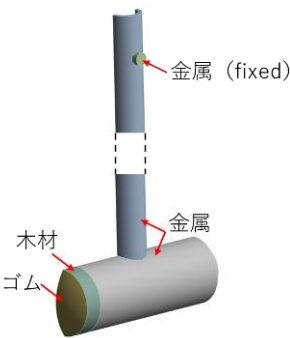


図5 ハンマ

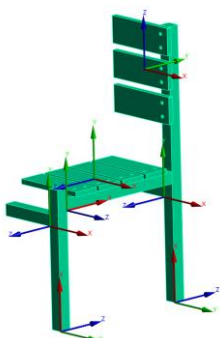


図6 椅子の異方性の設定

3.2 実験条件

図7に示すように、椅子を水平な床の上に設置し、前脚に高さ12mmのストッパを当てた。ハンマを背もたれ最上部の外側の中央位置に、角度38° から振り子式に自由落下させて打撃した。また、図3の測定位置に加えて、前脚上部の水平方向の変位をレーザー距離センサ(株式会社キーエンス・IL-S100)で測定した。後脚高さを求めるため、事前に前脚上部の変位と後脚高さとの対応関係を測定し、取得した変位を後脚高さに換算した。ひずみゲージは株式会社共和電業・KFGS-5-120-C1-11 L3M2R、測定にはグラフテック株式会社・GL7000-PSを用いた。サンプリング周期は5usとした。



図7 実験状況

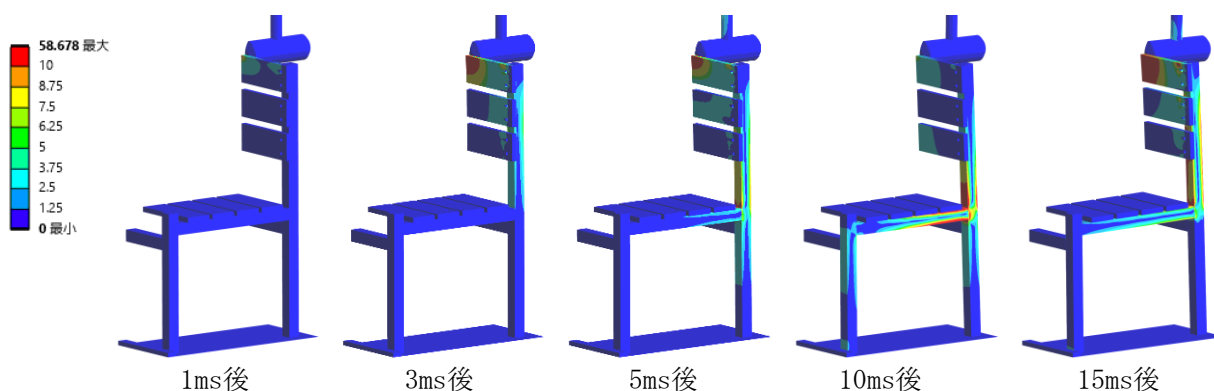


図8 解析結果 (ミーゼス応力)

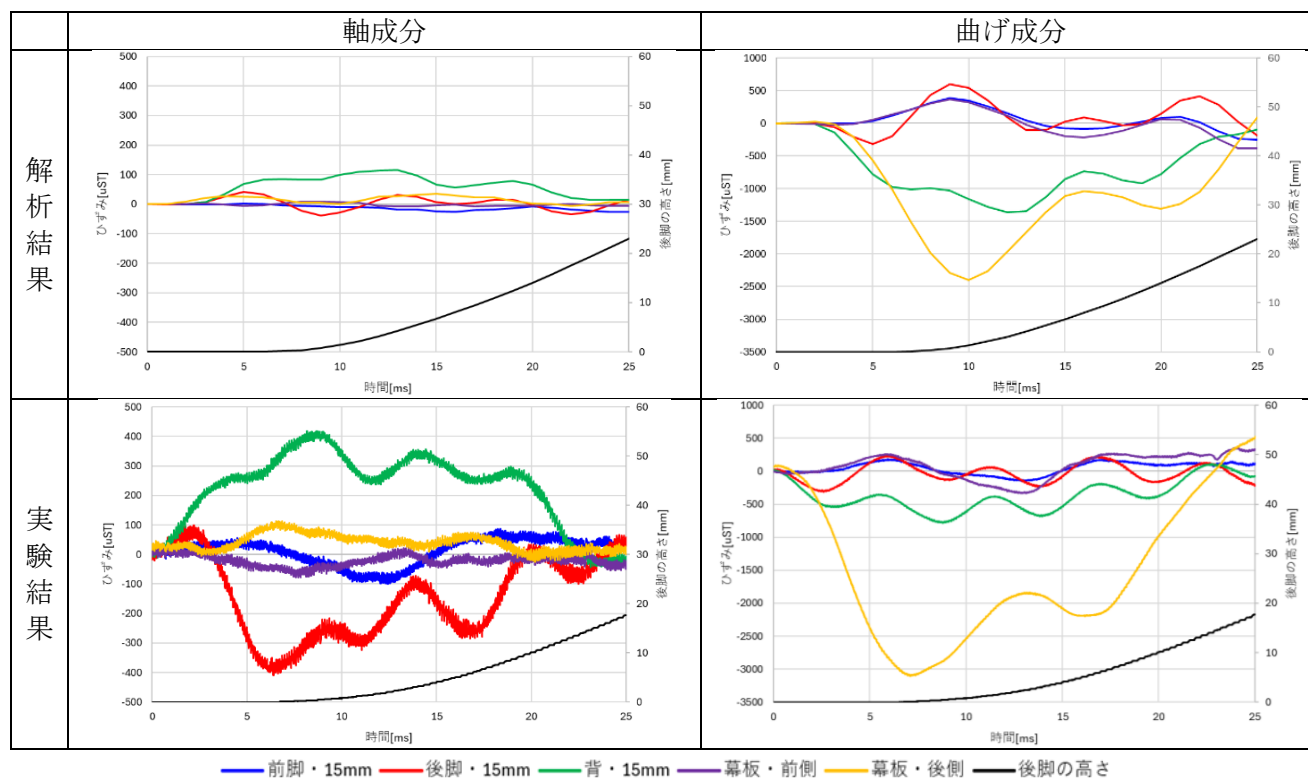


図9 ひずみの結果

4. 結果と考察

4.1 解析結果

図8にミーゼス応力の解析結果のコンター図を示す。衝撃直後は背もたれに高い応力が生じているが、時間の経過とともに、後脚と幕板の方に広がっている様子が確認された。

4.2 ひずみの結果の比較

図9に解析によるひずみの計算結果と実験によるひずみの測定結果を示す。

本研究では、接合部周辺の部材の変形挙動および荷重伝達経路の把握を目的としている。このため、材料特性や接合部剛性のばらつきの影響を受けやすいひずみの絶対値の一致ではなく、各部に生じるひずみの正負、大きさの相対的な順序、ピークが現れるタイミング、および後脚の浮き上がりに伴う変形の対応関係に着目して解析結果と実験結果を比較し、再現性を確認する。これらは構造全体の変形モードおよび荷重伝達経路によって決まる量であり、これらが一致していれば接合部周辺の力学挙動を適切に再現できていると判断できるためである。

まず後脚高さについて比較すると、解析結果および実験結果のいずれにおいても時間の経過に伴い単調に増加しており、衝撃後に後脚が浮き上がる過程は概ね一致している。このことから、全体の挙動は解析により適切に再現されていると考えられる。

軸成分について比較すると、衝撃後、背には引張方向のひずみが生じ、この傾向は解析と実験で共通して確認された。また、前脚および幕板付近では、いずれの場合も他のひずみと比較して小さい点で一致している。一方、後脚について実験では圧縮側のひずみが生じているが、解析では必ずしも圧縮側とはならず、差異が見られた。これは、解析において接合部の剛性を高く設定しすぎたことにより、接合部の変形が抑制され、フレーム全体が一体的に回転・移動する挙動を示したためと考えられる。その結果、衝撃後に脚底が移動しやすくなり、実構造に比べて軸力の伝達が抑制され、後脚に十分な圧縮軸力が発生しなかった可能性がある。

曲げ成分について比較すると、幕板後側において最も大きなひずみが生じ、後脚が浮き上がる付近で下向きにピークを示す挙動やその後の増減の動きは解析と実験でよく一致している。また、後脚が浮き上がる瞬間には、前脚、後脚および幕板前側が正側、背および幕板後側が負側となっており、フレーム全体が回転を伴って変形するモードとなっている点も共通している。

以上より、本解析は、後脚の軸成分を除き、ひずみの絶対値に差が見られるものの、大きさの順序、ピークの発生タイミングおよび後脚の浮き上がりに伴う変形挙動の関係は良好に再現されている。また、軸成分の絶対値は曲げ成分に比べて十分に小さいことから、本挙動は主として曲げ変形に支配されていると考えられる。したがって、曲げ成分の挙動を適切に再現できている本解析は、接合部周辺の部材の変形および荷重伝達を把握するという本研究の目的に対して、十分な再現性を有するといえる。

4.3 考察

本研究の解析結果および実験結果より、背もたれに衝撃荷重が加わった際の木製椅子の応答は、接合部単体の局所的な変形のみで決まるのではなく、フレーム全体の変形形状に支配される挙動であることが確認された。ミーゼス応力の分布では、衝撃直後に背部に高い応力が生じ、その後後脚および幕板へと広がっており、衝撃荷重がフレーム全体に伝達されていることが分かる。

ひずみの比較では、背に引張の軸成分が生じる関係や、幕板後側に曲げ成分が集中する挙動が解析と実験で一致していた。本研究で対象とした試験では前脚にストッパを当てているため、衝撃時には前脚付近を支点とした回転変形が生じる。この回転変形により背側に引張が生じるとともに、後脚と座枠を結ぶ幕板後側に曲げが集中する。このような軸力および曲げのひずみ分布が解析と実験で一致していることから、本構造の衝撃応答は接合部単体ではなく、フレーム全体の回転を伴う変形モードによって支配されていると考えられる。

一般に木製椅子の強度設計では接合部の強度向上に着目した検討が行われることが多いが、本研究の結果から、背もたれへの衝撃のようにフレーム全体に回転変形が生じる荷重条件では、接合部のみを強化してもフレーム全体の変形形状が変わらない限り、幕板や脚部など他の部材に曲げが集中する可能性があることが分かる。すなわち、接合部近傍に生じるひずみはフレーム全体の変形の影響を受けており、衝撃に対する耐性は接合部単体の強度だけでなく、部材配置およびフレーム全体の剛性分布によって決まる荷重伝達経路に強く依存する。

本研究の結果から、耐衝撃性は接合部の強度だけでなく、フレーム全体の剛性および荷重伝達経路によって決まる。以上より、木製椅子の衝撃強度設計には、接合部強度とフレーム剛性の両方を考慮することが重要である。

5. 結言

本研究では、背もたれに作用する衝撃荷重を対象として、接合部周辺の変形挙動および荷重伝達の把握を目的とした構造解析を実施した。解析結果と実験結果を比較したところ、曲げ成分については解析結果と実験結果が良好に一致しており、本解析モデルによって衝撃時のフレーム全体の変形挙動を適切に再現できることを確認した。結果より、背もたれに作用する衝撃荷重のようにフレーム全体に変形が及ぶ荷重条件では、接合部のみの強度や剛性だけでなく、フレーム全体の剛性および荷重伝達経路が、接合部周辺の挙動に大きく影響することが分かった。

以上より、木製椅子の耐衝撃性の設計には、接合部単体の強度だけでなく、フレーム全体の挙動を考慮することが重要である。

謝辞

本研究の一部は、一般財団法人越山科学技術振興財団研究助成金により実施した。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 関澤良太他、木製家具製作のための CAE 適用手法の開発、福島県ハイテクプラザ 令和 6 年度試験研究報告書、2026.
- 2) 船井孝、県産広葉樹活用技術の開発（Ⅰ）－試作ゼロに挑む！コンピュータシミュレーションが磨く設計力－、令和 7 年度第 72 回静岡県工業技術研究所研究発表会要旨集、p. 4、2026.
- 3) 室内聡子他、木質資源と高機能素材を活用した家具の設計、徳島県立工業技術センター研究報告、Vol. 31、pp. 11-17、2022.
- 4) 楠本幸裕他、CAE 応力解析による脚物家具の構造強度評価方法（第 1 報）－CAE 応力解析のための木材材料特性の設定－、福岡県工業技術センター研究報告、Vol. 30、pp. 17-20、2020.
- 5) 上野明也他、構造解析を利用したコンセプトデザイン、東京都立産業技術研究センター研究報告、Vol. 11、pp. 57-62、2016.
- 6) JIS S 1203:1998、家具－いす及びスツール－強度と耐久性の試験方法、日本規格協会、1998.
- 7) 農林省林業試験場、新版 木材工業ハンドブック、丸善出版、1973.

木材の品質と意匠の両立を目指した選別自動化に関する研究 幅はぎ材における柄合わせ工程の最適化に向けた検討

小高大輝*, 藤巻吾朗*

Automated Selection of Wood Materials for Both Quality and Aesthetic Design Optimization of Aesthetic Pattern Matching for Edge Glued Boards

KODAKA Daiki*, FUJIMAKI Goroh*

職人の目視と手作業によって行われている幅はぎ材の柄合わせ工程では、柄合わせを行う上で何らかの指標の確立し、工程を最適化することが望まれている。そこで、本報では、エレメント画像の平均輝度値が柄合わせの指標として有効かを検討するべく、Webアンケートによる幅はぎ天板画像の印象評価を実施した。結果、エレメントを平均輝度値の順に並べた条件に比べ、職人によって柄合わせがなされた条件の方が有意に高く評価される場合があった。柄合わせを行う上では、エレメント画像の平均輝度値だけでなく、エレメント内の色むらまでもを考慮できるような指標の必要性が示唆された。

1. 緒言

飛騨の家具が高いブランド力を誇る所以の一つは、熟練の匠による高い意匠性である。特に、テーブルの天板などに使用される幅はぎ材の作製においては、色味や木目の異なる一つ一つのエレメントを職人が目視と手作業によって違和感がないように組み合わせ、一枚の板にしていく。そのため、その仕上がりは作業者のスキルによるところが大きい。しかし、近年では、人手不足の問題から技術伝承が難しくなっていることに加え、業界全体の動向として、色むらや節を有する国産広葉樹材の利用が求められているという現状がある。以上のことから、幅はぎ材の柄合わせを行う上で何らかの指標の確立し、これらの工程を最適化、ないしは自動化することは、今後の木材産業にとって非常に重要である。

木材の組み合わせパターンの見た目の印象について、先行研究¹⁻³⁾では、色味が均一である方が好まれ、特にエレメント間のコントラストが重要であると報告されている。しかし、実際の製造現場での柄合わせ工程では、その時点で手元にある材の中から柄合わせを行う必要がある。よって、毎回、理想的な材だけがあるわけではなく、ある材の中

からその都度、適切な組み合わせを考えていかななくてはならない。もし、先行研究での報告の通り、エレメント間のコントラストが重要なのであれば、ある材の中でエレメントの明暗の情報を数値化し、グラデーションになるよう順に並べるだけで、ある程度の見た目を担保できるのではないかと考えた。そこで本報では、Webアンケートによる幅はぎ天板画像の印象評価を行い、職人による柄合わせと画像上での輝度値の順にグラデーションになるよう並べたものを比較することで、画像上の輝度値が柄合わせを行う上で指標になりうるかを検討した。

2. 方法

2.1 サンプル画像

本報では、前報⁴⁾で用いた天板のうち3枚を用いた。これらの画像をデジタルカメラ (Nikon D810) で撮影し、一つ一つのエレメントをトリミング後、天板内での配置を変化させることで全9種類のサンプル画像とした (図1)。樹種はレッドオーク (*Quercus rubra*) であり、サイズが長さ1200mm×幅800mmのものを900pixel×600pixelの画像として提示した。なお、Webアンケートでは、回答者によって回答端末が異なるため、回答者が実際に目にするサンプル画像は、各々で大きさが異なることが想定された。サンプルは、職人によって柄合わ

* 試験研究部

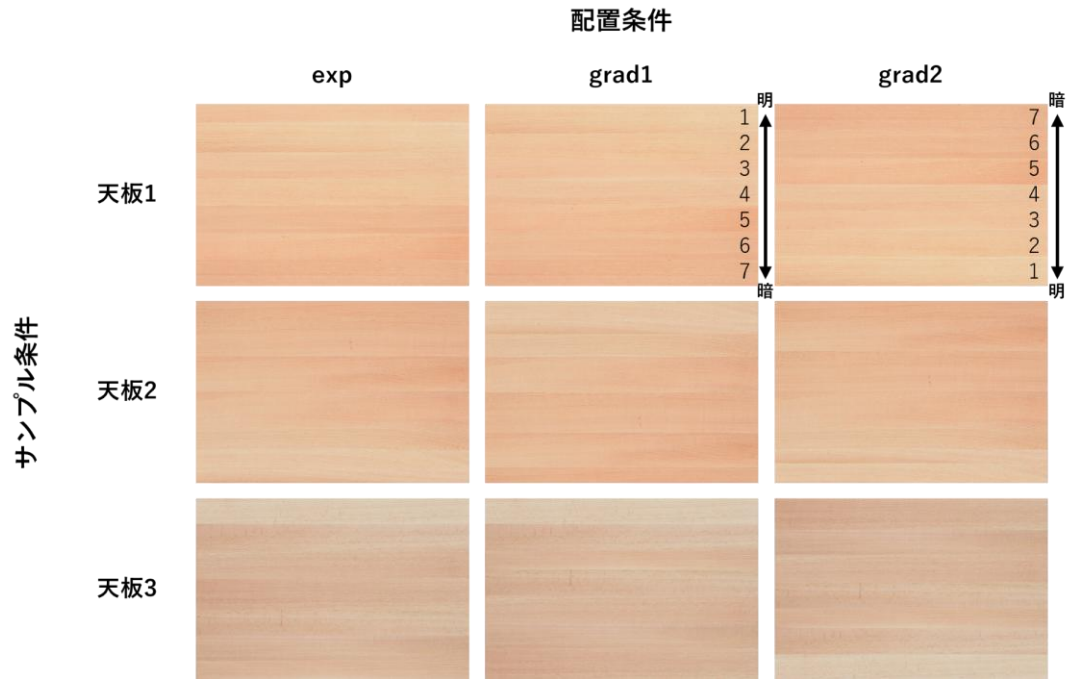


図1 サンプル画像

せがなされた職人条件と、各エレメント画像から平均輝度値を算出し、その大きさ順に並べたグラデーション条件とした。

2.1.1 職人条件

職人条件（以降、exp条件とする）は、エレメントとして準備されたレッドオークのまさ目材41本から、木工歴40年以上の経験を有する職人が、それぞれ以下の意図を持って柄合わせを行った。

天板1: 木目と色が最も均一に見えるように合わせる。

天板2: 木目は流れているエレメントも使用するが、色味は合わせる。

天板3: トラフが多いエレメントで色味を合わせる。

2.1.2 グラデーション条件

グラデーション条件（以降、grad条件とする）では、まず、一つ一つのエレメント画像の輝度値を、以下のNTSC輝度変換式⁵⁾によって算出した。

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

次に、exp条件の天板1～3それぞれで、用いられている各エレメントの全画素の平均輝度値が大きい順（grad1）、および小さい順（grad2）にエレメントを上から並び替え、サンプル画像とした。

このようにして、各サンプル条件で構成されるエレメントは同じであり、その中で配置のみを変化させることで全9種類のサンプル画像を用意した。

2.2 印象評価

本報では、Webアンケートによる印象評価を行った。アンケートの回答者は、20歳～69歳の男女200名（男性100名、女性100名）であった。評価用語は、前報⁶⁾を参考に8用語（均一な — 不均一な、きれいな — きたない、おもしろい — つまらない、一般的な — 個性的な、高級感のある — 安っぽい、調和のとれた — 違和感がある、自然な — 人工的な、好き — 嫌い）とし、官能検査にはSD (Semantic Differential) 法を用いた。評価は7段階（どちらでもない、やや、普通に、非常に）とし、データは、-3～+3に得点化して集計した。

集計したデータについて、各評価項目でサンプル条件（天板1、天板2、天板3）と配置条件（exp条件、grad1条件、grad2条件）を要因とした対応のある二元配置分散分析を実施した。

3. 結果と考察

3.1 分散分析

3.1.1 交互作用および主効果

各サンプル条件の評点の平均値を図2、二元配置分散分析の結果を表1に示す。分散分析の結果、「均一な — 不均一な」(F(4, 796)=3.43, p<.01)、「調和のとれた — 違和感がある」

(F(4, 794)=3.05, p<.05)の項目で交互作用が認められた。また、全評価項目でサンプル条件の主効果が認められ、「好き — 嫌い」

($F(2, 398)=5.27, p<.01$) の項目では、配置条件の主効果が認められた。

3.1.2 単純主効果の検定および多重比較

交互作用が認められた「均一な — 不均一な」、「調和のとれた — 違和感がある」の項目について、単純主効果の検定と多重比較 (Bonferroni法) を行った。また、配置条件で主効果が認められた「好き — 嫌い」の項目について、配置条件の水準間で多重比較 (Bonferroni法) を行った。結果を表2に示す。全体的にexp条件の評価が高い傾向であり、多重比較において、exp条件とgrad条件の間で有意な差が複数認められた。一方で、grad条件間においても差が生じる場合があった。使用するエレメントによっては、グラデーションになるよう並べても、exp条件ほどの評価を得られない場合があることが示唆された。職人は、画像上の平均輝度値だけでは表現しきれない特徴を踏まえ柄合わせを行っており、それらがより良い評価につながったと考えられる。

表1 二元配置分散分析の結果

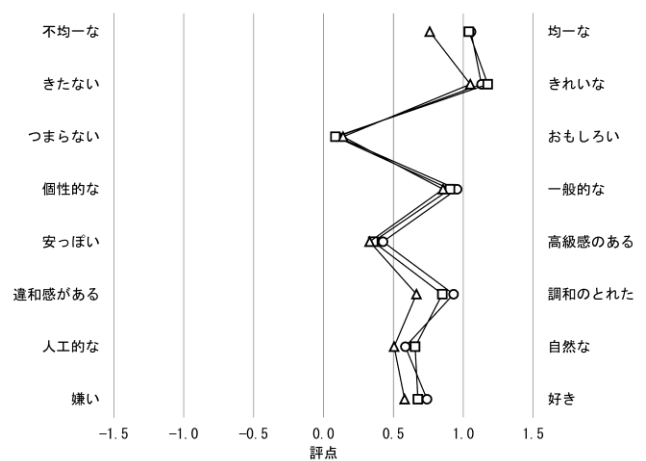
* : $p<0.05$ ** : $p<0.01$

評価用語	主効果		交互作用
	サンプル	配置	サンプル×配置
均一な — 不均一な	**	**	**
きれいな — きたない	**		
おもしろい — つまらない	**		
一般的な — 個性的な	**		
高級感のある — 安っぽい	**		
調和のとれた — 違和感がある	**		*
自然な — 人工的な	**		
好き — 嫌い	**	**	

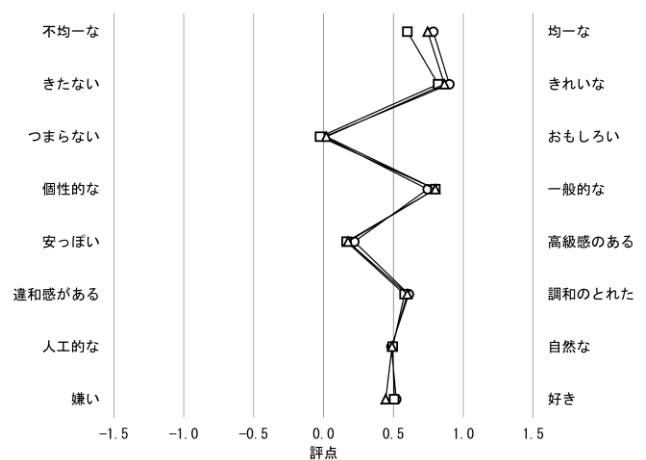
表2 単純主効果の検定および多重比較の結果

* : $p<0.05$ ** : $p<0.01$

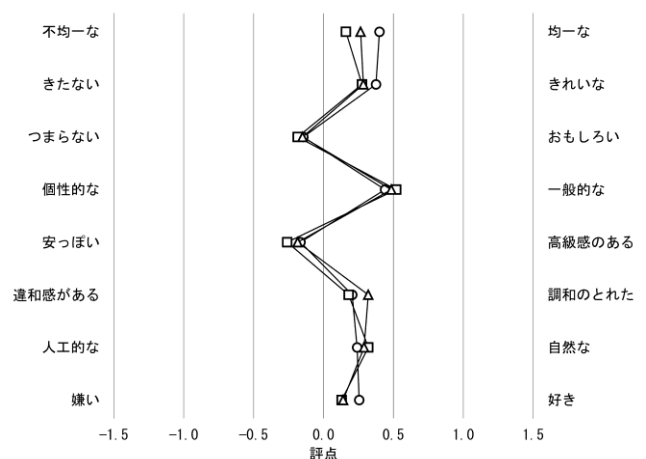
評価用語	サンプル	単純主効果	多重比較
均一な — 不均一な	天板1	**	exp > grad2**, grad1 > grad2**
	天板2		exp > grad1**, grad2 > grad1*
	天板3	*	exp > grad1**, exp > grad2*
調和のとれた — 違和感がある	天板1	**	exp > grad2**, grad1 > grad2**
	天板2		
	天板3		grad2 > grad1*
好き — 嫌い	—	—	exp > grad2**



天板1



天板2



天板3

○ exp □ grad1 △ grad2

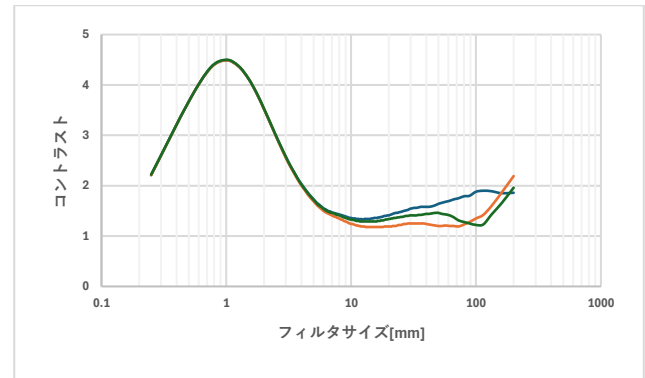
図2 印象評価の結果

3.2 多重解像度コントラスト解析

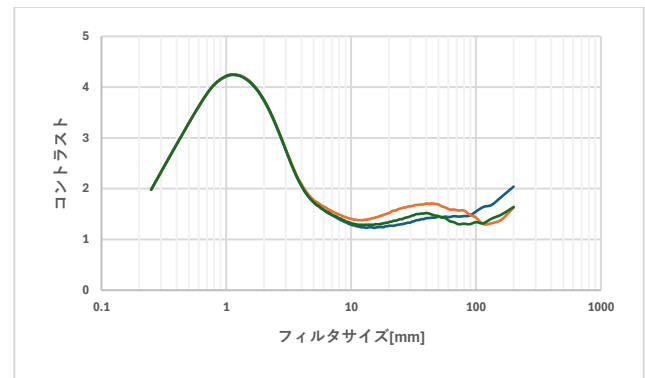
前述したように、一連の分析の結果、exp条件でより評価が高くなる傾向だった。そこで、各サンプル画像の特徴を調査するために、多重解像度コントラスト解析⁷⁾を実施した。なお、解析には、幅4800pixel×高さ3200pixel、解像度0.25mm/pixelの画像を用いた。結果を図3に示す。

フィルタサイズ5mm以降に着目すると、同一のサンプル条件であってもコントラストスペクトルは異なり、exp条件ではフィルタサイズ100mm付近にかけて緩やかに上昇していくが、grad条件ではフィルタサイズ100mm付近から急激に上昇する傾向が見られた。また、天板2、3のgrad条件においては、フィルタサイズ30mm～40mm付近にも緩やかなピークが見られた。天板1～3の元素幅の平均はそれぞれ、天板1:123mm、天板2:114mm、天板3:114mmであり、フィルタサイズ100mm以降では、元素間のコントラストが反映されていたと考えられる。天板2、3のgrad条件のフィルタサイズ30～40mm付近におけるピークについては、元素内の心材、辺材の境界などに起因する色のばらつきによるものだと考えられる。

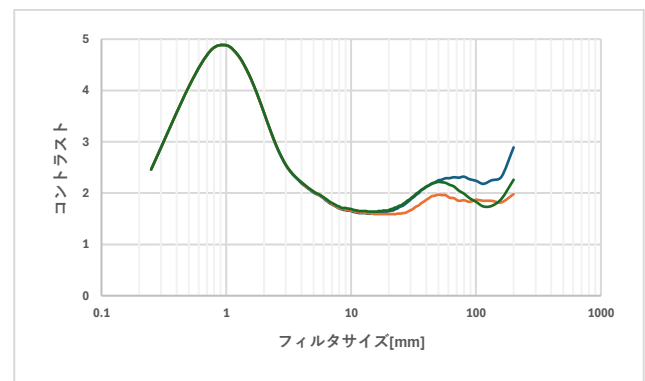
ここで注目したいのは、フィルタサイズ100mm以降のコントラストが、全体的にexp条件>grad条件だったことである。このような結果自体は、grad条件の特性、すなわち、元素の明暗をグラデーションになるよう輝度順に並べたことに起因すると考えられる。しかし、緒言でも述べたように、先行研究³⁾では、元素間のコントラストが大きいほど好まれない傾向が報告されていた一方で、本報では、元素間のコントラストが大きかったexp条件の方が、均一さや嗜好性の評価が高かった。つまり、フィルタサイズ5mm以降において、grad条件では、元素間のコントラストや元素内の色むらによるコントラストなど、特定の特徴のコントラストのみが目立っていたが、exp条件では、スケールの変化に伴うコントラストの変動が緩やかだったため、特定の特徴だけが悪目立ちすることなく、高い評価になったと考えられた。以上より、各元素の平均輝度値だけでなく、元素内の色むらなども考慮した柄合わせによって、均一さや嗜好性の評価をさらに高められることが示唆された。



天板1



天板2



天板3

— exp — grad1 — grad2

図3 多重解像度コントラスト解析の結果

4. まとめ

本報では、元素画像の平均輝度値が、幅はぎ天板の柄合わせをする上での指標になりうるかを調査することを目的に、Webアンケートによる印象評価を行った。結果、exp条件とgrad条件の評価に有意な差が生じる場合があり、exp条件の方が高く評価される傾向だった。

多重解像度コントラストの結果、grad条件では、隣り合うエレメント間コントラストなど、特定の特徴のコントラストが目立つ傾向だったが、exp条件では、エレメント内からエレメント間に至るまで、様々な特徴のコントラストが目立ち、特定の特徴のみが目立つことはなかった。職人は、エレメント内からエレメント間に至るまで、マルチスケールで色のばらつきを考慮しており、特定の特徴に起因するコントラストだけが過度に目立たないようにすることで、より優れた意匠を実現していたと考えられた。これらのことから、柄合わせを行う上では、エレメントの平均輝度値だけでなく、エレメント内のどの位置でどのように色味がばらついているのかまでもを評価できるような指標が必要であることが示唆された。

なお、人の視覚系のコントラスト感度は空間周波数に依存するため、同じ対象であっても、表示サイズによって受ける印象が異なる³⁾可能性がある。前述の通り、今回はWebアンケート調査であったため、回答者によって回答端末が異なり、それに伴い提示画像の表示サイズも統一されていなかった。この点を踏まえると、今回行った多重解像度コントラスト解析の結果は、コントラスト感度の観点から、あくまで参考程度の位置付けとなる。よって、今後は統一した観察条件のもと、実物大の画像、もしくは実物の天板を用いた印象評価を検討したい。

参考文献

- 1) Hodaka YAMAGUCHI et al, Analysis of Preferences for Wooden Panels with Different Visual Homogeneities — Examination by Implementation Classification according to Evaluation Tendency —, International Journal of Affective Engineering, Vol.22, No.1, pp.25-33, 2023.
- 2) 山口穂高他、加工に伴う見た目の変化を考慮した幅はぎ集成材の不均一さの予測、木材学会誌、Vol.67、No.1、pp.50-59、2021.
- 3) 今西真佑奈他、様々なコントラストを有する木質フロアパターンの視覚効果、木材学会誌、Vol.65、No.3、pp.138-147、2019.
- 4) 山口穂高他、ヒトの感性に基づいた幅はぎ集成材の設計指針の導出（第4報） 柄の異なる実大天板の評価、岐阜県生活技術研究所研究報告、No.22、pp.29-32、2020.
- 5) 日本色彩学会編、新編 色彩科学ハンドブック 第3版、東京大学出版会、2011.
- 6) 山口穂高他、ヒトの感性に基づいた幅はぎ集成材の設計指針の導出（第2報） 柄の異なる木製天板を評価する用語の調査、岐阜県生活技術研究所研究報告、No.21、pp.38-42、2019.
- 7) Masashi Nakamura et al, Multiresolution image analysis of wood and other materials, Journal of Wood Science, 45, pp.10-18, 1999.

オーク突板化粧材の変色抑制技術の開発（第3報） コーティング処理による変色抑制

伊藤国億*

Development of Technology to Suppress Discoloration of Oak Veneer Decorative Wood Discoloration Suppression by Coating Treatments

ITO Kuniyasu*

オーク突板化粧材に生じる変色の抑制を目的として、基材コーティング処理および化粧面塗装仕様の効果を検証した。*Eurotium amstelodami*を用いた変色再現試験の結果、基材コーティングはかびの発育を大幅に抑制し、化粧面の色差 ΔE^* を概ね3以下に維持した。化粧面塗装ではウレタン塗装が高い変色抑制効果を示し、化粧面からのかび侵入をほぼ完全に阻止した。一方、オイル塗装は単独では十分な抑制効果を示さなかった。製品モデル試験においても基材コーティングの有効性が確認された。以上より、オーク突板化粧材の変色防止には基材コーティング処理とウレタン塗装が有効であることが示された。

1. 緒言

木製棚・戸棚やテーブルには寸法安定性や軽量性、コスト面での利点に加え、高級感や美観に優れた突板化粧材がしばしば用いられる。なかでもオーク材を使用した突板化粧材は人気が高い。一方で、オーク化粧材が暗色化する事例が散見されている。変色の原因としては、使用環境においてかびなどの微生物が繁殖し、材のpHがアルカリ性に傾くことで、オーク突板に含まれるタンニン成分が暗色化するためと推定されている¹⁻²⁾。しかし、これまでに変色を再現できる試験方法は確立されておらず、抗菌仕様や防湿対策などによる変色防止効果についても十分に検証が行われていない。

そこで、我々は変色材から分離培養したかびを用い、変色を再現し得る環境条件を明らかにするとともに、変色再現性試験方法を確立した³⁾。さらに本方法を用いて、変色がMDFなどの基材におけるかびの増殖に起因すること⁴⁾、および尿素分解能（ウレアーゼ活性）を有するかびが基材に使用される尿素樹脂系接着剤を分解し、生成したアンモニアにより突板がアルカリ汚染される可能性を示した⁵⁾。

変色発現の初期段階は、かびと基材との接触に

より生じることから、両者の接触を遮断することで変色を抑制できる可能性がある。そこで本研究では、家具製造工程における塗装技術を応用し、化粧材にコーティング処理を施すことで、かびの発育および変色抑制効果を検証することとした。また、化粧面からのかびの侵入経路も想定されるため、化粧面の塗装仕様が変色抑制に及ぼす影響についても併せて評価することとした。

2. 実験方法

2.1 試験体の作成

試験体は、酢酸ビニル系接着剤を用いてMDF(Uタイプ、厚さ9mm)とホワイトオーク化粧シート(厚さ約0.3mm、裏面和紙貼り)を熱圧着し、30mm角に切断して作製した。さらに、化粧面のオイル塗装仕様を評価するため、化粧シートと基材の間にポリラミクラフト紙(75g/m²、厚さ0.1mm、以降防湿シートとする)を挿入した試験体も併せて作製した。

2.2 コーティング処理

試験体には、2液ウレタン塗料を用いてコーティング処理を行った(図1)。コーティング仕様は、シーラー、サンディングシーラー、シーラー+サンディングシーラーの3種類(いずれもスプレー塗装)とし、試験体の全露出面を処理した。以降、シーラー処理材を「処理材(下)」、サンディングシーラ

* 試験研究部

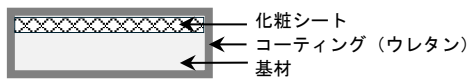


図1 コーティング処理した試験体の側断面図

一処理材を「処理材（中）」、両処理を行ったものを「処理材（下・中）」とする。

化粧面塗装仕様の評価に用いる試験体については、かびと基材の直接接触を防ぐため、基材露出面をエポキシ樹脂により全面コーティングした（図2）。以降、基材処理はNone（無処理）、Epoxy（エポキシコーティング）とする。

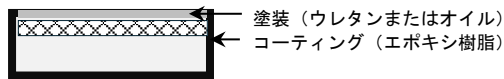


図2 化粧面塗装材の側断面図

2.3 化粧面の塗装

化粧面の塗装仕様は、ウレタン塗装またはオイル塗装とした。ウレタン塗装は、シーラー、サンディングシーラー、トップコート（ツヤ消し100%）の3工程とし、各工程間に研磨を行い、スプレー塗装によりセミオープン仕上げとした。オイル塗装は植物油系とし、刷毛塗り2回で仕上げた。いずれも塗料メーカー推奨の塗装工程に準じた。また、防湿シートを挿入した試験体についても同様にオイル塗装を施した。以降、化粧面塗装はNone（無塗装）、Urethane（ウレタン塗装）、Oil（オイル塗装）とする。

2.4 変色試験

2.4.1 コーティング処理試験体の変色試験

試験体をγ線照射（10kGy）した後、硫酸カリウム飽和塩を入れた滅菌済み培養瓶（100ml容）に密閉し、25℃下で養生して含水率を約20%に調整した。無処理材についても同条件で養生した。

養生後、基材面上に*Eurotium amstelodami* (NBRC 5721) の孢子懸濁液（約 10^6 個/ml）180μlを滴下した（写真1）。滴下後、25℃で21日間密閉静置した。静置後、顕微鏡観察によりかびの発育状況を評価した。また、化粧面の変色は分光測色計（SE7700：日本電色工業製）を用いて測色し、試験前後の色差 ΔE^* を算出した。測定条件は測定径30mm、D65光源、10°視野、L*a*b*表示系とした。

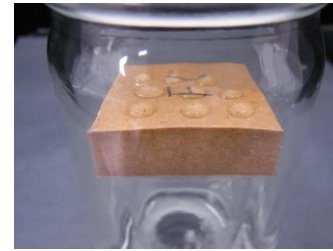


写真1 処理材への菌の接種

2.4.2 化粧面塗装材の変色試験

試験体は2.4.1と同様に養生した。Epoxy-Urethane材は含水率の上昇が小さかったため、含水率は約17%を目標とした。調整後、化粧面上に孢子懸濁液を滴下し、硫酸カリウムおよび塩化カリウム飽和塩を併用し、湿度を約90%に調整して49日間試験を行った。

オイル塗装仕様の評価に用いる試験体は硫酸カリウム飽和塩下で21、28、35日間の試験を行った。

2.5 製品モデルの環境微生物ばく露試験

実際の家具を模した製品モデルとして、スケール比 1:1.5 の2段デスクワゴン（引き出し無し）を製作した（表1）。製作は、部材カット、塗装、組み立ての順に行い、変色抑制仕様として、接着面および化粧面を除くすべての表面にシーラーによるコーティング処理を施した。

本試験では、製品モデル（無処理品および処理品）を恒温恒湿器（PR-2J：エスベック製）に設置し、

表1 2段デスクワゴンの仕様詳細

サイズ	W256×D256×H319（mm）
部材構成	
側板	オーク化粧シート、基材（MDF）
天板	オーク無垢材 （天板の下板：シナ合板）
底板	MDF
背板	オーク化粧シート、基材（ラワン）
縁貼	木口テープ（オーク）
接合	
接着	ビスケット 酢ビ接着 縁貼り ゴムのり接着
JCB	天板と下板
摺り棧	オーク端材、タッカー止め
レール	SUS、ねじ止め
塗装	ウレタン3回塗り （右側板のみオイル塗装）
変色抑制仕様	シーラー処理

人工的な微生物接種は行わず、自然発生した環境微生物に対するばく露条件を設定した。試験条件は 25℃・90%RH とし、製品モデル表面に変色が確認されるまでばく露を行った。

変色の評価は、目視観察（変色の有無および分布）を主判定とし、色差 ΔE^* は全面的な変色が認められた部材についてのみ、複数点測定の平均値を用いた。

3. 結果と考察

3.1 コーティング処理材の変色試験

無処理材および各処理材の滴下面におけるかびの発育状況を写真2に、化粧面の ΔE^* を表2に示す。無処理材では、接種部位のみならず試験体全面にかびの発育が認められた。一方、処理材では発育が大幅に抑制され、処理材（中）および処理材（下・中）では孢子懸濁液の滴下部位に限定して菌糸が認められ、処理材（下）では発育は確認されなかった。

処理材（中）および処理材（下・中）はいずれもサンディングシーラー処理を施しているため、同等の発育抑制効果を示したと考えられる。一方、シーラー処理のみを施した処理材（下）は親水性が異なるため、発育状況に差異が生じたと推察される。

ΔE^* は無処理材の18.8に対し、処理材はいずれも3前後と低く、変色はほとんど認められなかった。以上のことから、コーティング処理によってかび

表2 コーティング処理した試験体の色差 ΔE^*

試験体種類	無処理材	処理材		
		(下)	(中)	(下・中)
ΔE^*	18.8	2.7	3.6	2.9

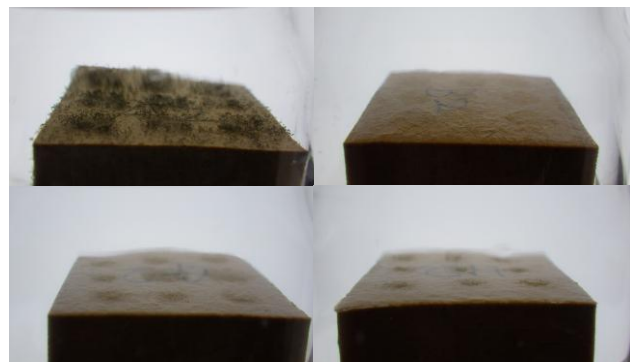


写真2 コーティング処理材のかび発育状況

左上：無処理材、右上：処理材（下）
左下：処理材（中）、右下：処理材（下・中）

とMDF基材との接触が阻止され、変色が効果的に抑制されたことが明らかとなった。

3.2 化粧面塗装材の変色試験

化粧面塗装材の ΔE^* を表3に、表面拭き取り後の外観を写真3に示す。None-None材の ΔE^* 18.8に対し、Epoxy-None材の ΔE^* は8.6と低く、変色は弱かった。これは基材部へのかびの侵入経路が化粧面に限定され、無塗装・無処理材よりも基材部への接触頻度が低下したためと考えられる。

Epoxy-Urethane材の ΔE^* は3.9と低く、変色はほとんど認められなかった。これは、ウレタン塗装がかびの発育を抑制し、化粧面からの侵入を阻止したためと推察される。

Epoxy-Oil材の ΔE^* は8.2であり、Epoxy-None材と同程度であった。しかし、写真3に示すように、Epoxy-Oil材では滴下部位のみが変色したのに対し、None-None材およびEpoxy-None材では化粧面全面が変色した。変色の発現様式が異なることから、

・オイル塗装面に液が浸透し、かびが基材部に達して変色を生じた可能性

・塗装自体がかび汚染により変色した可能性
のいずれかが考えられるが、本試験では変色要因を明確に特定できなかったため、防湿シートを用

表3 化粧面塗装材の色差 ΔE^*

基材面処理	None	Epoxy		
塗装仕様	None	None	Oil	Urethane
ΔE^*	18.9	8.6	8.2	3.9



写真3 化粧面塗装材の化粧面外観

左上：None-None材、右上：Epoxy-None材、
左下：Epoxy-Oil材、右下：Epoxy-Urethane材

表 4 防湿シート入りオイル塗装材の色差 ΔE^*

試験期間		21日目	28日目	35日目
防湿シート	無し	4.4	6.2	14.8
	有り	3.0	2.2	2.1



写真4 無処理製品のオイル塗装面側板
左: 試験前、右: 試験49日目



写真5 試験49日目の無処理製品の変色
左: 塗装面側板、右: 縁貼り 変色は矢印箇所

いた追試験を実施した。

防湿シートの有無によるオイル塗装材の ΔE^* を表4に示す。防湿シートを挿入していない試験体では色差が経時的に増加したのに対し、防湿シート入り試験体では色差の増加が認められなかった。このことから、オイル塗装では化粧面からのかび侵入を十分に防止できず、基材部への接触により変色が発現したと考えられる。

3.3 製品モデルの環境微生物ばく露試験

試験28日目には無処理製品、処理製品ともにオイル塗装面に菌糸が認められたが、明確な変色は確認されなかった。試験49日目には、両者ともにオイル塗装面が全面変色 (ΔE^*11) した(写真4)。ラボ試験と同様に、オイル塗装では化粧面からのかび侵入を防止できないためと考えられる。ただし、ラボ試験では滴下部位のみが変色したのに対し、製品モデルでは全面が変色しており、これは微



写真6 試験49日目の処理製品



写真7 試験63日目の処理製品
左: 天板、右: 縁貼り(拡大) 変色は矢印箇所

生物の接種方法の違いによるものと推察される。

無処理製品では、ウレタン塗装側板の一部および縁貼り端部1箇所にも変色が認められた(写真5)。一方、処理製品ではこれらの変色は認められず(写真6)、基材面のコーティング処理による変色抑制効果が確認された。

試験63日目には、両者ともに天板や縁貼りの他の端部、フィンガージョイント部に顕著な変色が認められた(写真7)。天板はオーク無垢材であるため、これまでの変色発現メカニズムとは異なる要因が関与していると考えられる。先の報告⁵⁾では、基材から放散したアンモニアガスがオーク突板を変色させることを示したが、本試験においても、塗装の密着性が低い道管やジョイント部にアンモニアガスが浸透し、変色を引き起こした可能性が示唆された。

4. 結言

本研究では、オーク突板化粧材におけるかび由来の変色発現機構を踏まえ、基材と化粧材の接触遮断を目的としたコーティング処理および化粧面塗装仕様の変色抑制効果を検証した。その結果、以下の知見が得られた。

- ・ MDF 基材へのコーティング処理は、かびの発育および変色を著しく抑制した。シーラーおよびサンディングシーラーによるコーティングは、かびと基材の直接接触を阻止し、化粧面の色差 ΔE^* を概ね3以下に抑えた。
- ・ 化粧面のウレタン塗装は、かびの侵入を効果的に防ぎ、変色を抑制した。ウレタン塗装・エポキシコーティング材では ΔE^* が4未満であり、化粧面からの侵入経路が遮断されたと考えられる。
- ・ オイル塗装は変色抑制効果が限定的であり、化粧面からのかび侵入を十分に防止できなかった。防湿シートを挿入した場合には変色が抑制されたことから、オイル塗装では化粧面のバリア性が不十分であることが示唆された。
- ・ 製品モデル試験においても、基材面のコーティング処理は変色抑制に有効であった。

一方で、無垢材天板などではアンモニアガスの浸透によると推察される変色が確認された。

以上より、変色抑制には基材面のコーティング処理および化粧面のウレタン塗装が極めて有効であることが示された。

参考文献

- 1) 平林 靖：ナラ突き板を用いた木質材料の変色およびその防止について， 林産試だより， 2011 年 7 月号.
- 2) 平林 靖：ミズナラ突き板単板化粧 MDF の変色-その原因と対策-， 林産試だより， 2015 年 3 月号.
- 3) 伊藤国億：オーク突板化粧材の変色条件の解明，越山科学振興財団研究助成，2022 年度.
- 4) 伊藤国億：オーク突板化粧材の変色抑制技術の開発(第 1 報)，岐阜県生活技術研究所研究報告，No. 26， pp. 35-38， 2024.
- 5) 伊藤国億：第 76 回日本木材学会大会要旨，2026

超音波伝播法による木材の非破壊評価（第3報） 年輪形状と節の超音波検出

今西祐志*

Nondestructive Evaluation of Wood by Ultrasonic Propagation Method (III) Ultrasonic Detection of Annual Ring Shapes and Knots

IMANISHI Hiroshi*

超音波を用いた木材内部の巨視的特徴の推定を目標として、木材の超音波伝播速度の分布と年輪傾斜角及び節との関連を検討した。超音波試験は板目面を挟んで相対する位置に発信・受信センサーを設置する対面法により行い、センサーは測定対象物との接触面積の小さい尖塔形のものをを用いた。無節材の伝播速度と年輪傾斜角は高い負の相関関係にあり、回帰式を用いて年輪形状を推定することができた。伝播速度の分布は、無節材の場合には概ね繊維方向の縞模様が見られ、有節材の場合には節の存在に対応する位置で伝播速度の小さい島状の分布が見られた。

1. 緒言

木材内部の年輪や節の情報を得るにはX線や γ 線のCT法の適用が有効であるが、放射線障害を防止する安全管理が行き届いた測定環境が必要で、対象物の大きさに制約がある。これに対して、超音波技術は安全性が高く、汎用性と簡便性を備えており、超音波CT法の適用により丸太内部の隠れ節の検出が行われた報告¹⁾もある。本報では、超音波を用いて広葉樹の製材品内部の情報を得るための基礎的検討として、年輪傾斜角と節が超音波伝播速度に及ぼす影響に関する実験的研究を扱う。測定には板目材を用い、板目面上の伝播速度の分布を測定した。また、片面にのみ節が確認できる材を対象に、伝播速度の分布の特徴を調査した。

2. 実験方法

2.1 供試材料

超音波試験には、家具用材としての利用が多い樹種から環孔材と散孔材の各1樹種を選定して、ナラ (*Quercus serrata*) とブナ (*Fagus crenata*) の気乾材を供した。試験体は温湿度一定に保たれた室内にて十分に養生されたもので、平均含水率は11.3%である。

2.1.1 無節材

節のない試験体として、100(L) × 100(T) × 30(R) mmの板目材を用意した。試験体数はナラとブナで各5である。板目面の中央70 × 70 mmの範囲に、10 mm間隔の格子状に標線を付けて49の測定点を設定した。また、この測定点に対応する木口面の位置に、年輪傾斜角を画像計測する点として厚さ方向に5 mm間隔の標線を付けた。

2.1.2 有節材

節のある試験体として、120(L) × 120(T) × 約30(R) mmの板目材を用意した。節は板目面の中央付近に位置する40 × 25 mmほどの楕円形の死節である。この節の存在は木裏側にのみ視認できる。試験体数はナラとブナで各2である。板目面の中央100 × 100 mmの範囲に、10 mm間隔の格子状に標線を付けて121の測定点を設定した。

2.2 超音波試験

超音波試験に使用したセンサーは尖塔形で、試験体と接触する部分は直径4 mmである。測定は図1のように、各試験体の板目面上の相対する測定点に発信と受信の各センサーの先端を試験体表面に接触させて行った。使用した測定機器は、振動数が54 kHzの超音波パルスを発信センサーから繰り返し周波数5 Hzで発信し、受信センサーで感知した波形を記録するものである。図2に受信波形の一例を

* 試験研究部

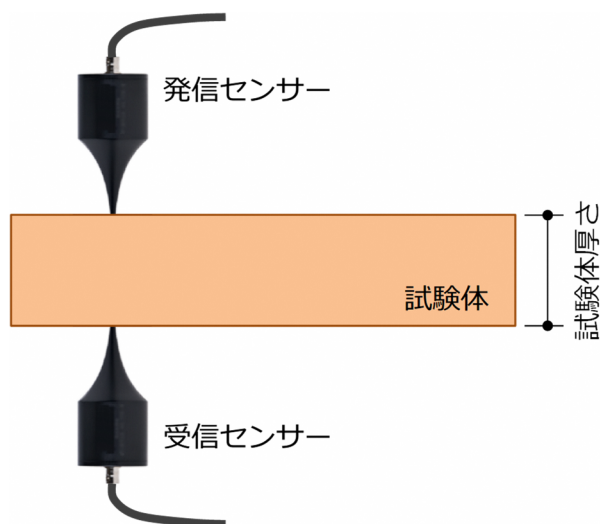


図1 超音波試験の方法（対面法）

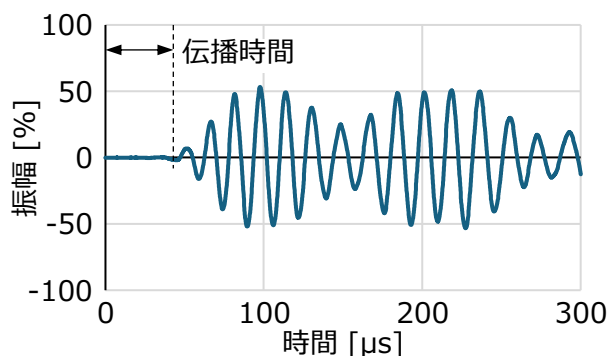


図2 受信波形の一例

示す。縦軸は最大値を基準とした百分率（％）で示してある。超音波パルス発信から振幅の大きさが1％超となるまでの時間を伝播時間とし、試験体厚さを伝播時間で除して伝播速度を算出した。

2.3 年輪傾斜角の測定

前述のように、無節材については年輪傾斜角を測定した。標線を付けた木口面の撮影画像に対して、図3に示すように、各測定点における幅方向からの年輪傾斜角 θ_{ij} の計測を行った。そして列ごとに θ_{ij} の平均値を算出し、試験体の各縁距離での平均年輪傾斜角を求めた。

3. 結果と考察

3.1 伝播速度と平均年輪傾斜角の関係

無節材について得られた伝播速度の分布の例を図4に示す。なお、測定点の間の値は、隣接するデ

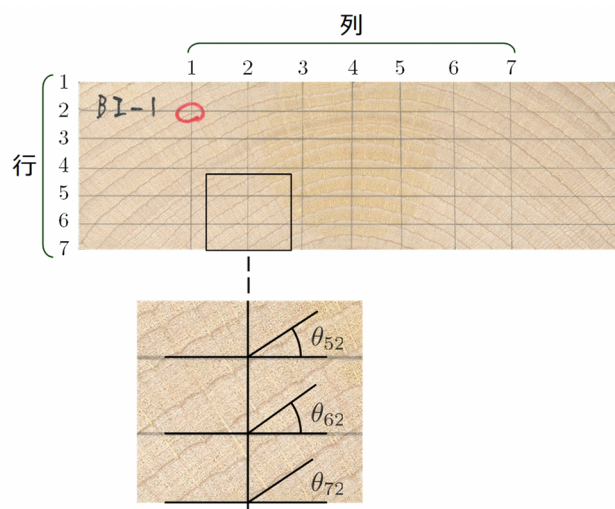


図3 年輪傾斜角の測定

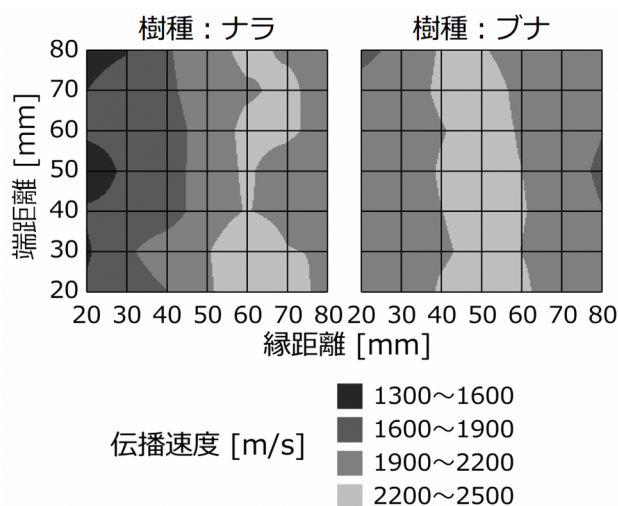


図4 伝播速度の分布（無節材）

ータの平均値で補完してある。分布は概ね繊維方向（上下方向）の縞模様となっており、伝播速度は中央付近が大きく、縁部に近いほど小さい。これらの縞模様は、伝播方向がR方向からT方向へと変化していることと対応している。図5に、縁距離ごとの平均伝播速度と平均年輪傾斜角の関係を示す。両樹種ともに伝播速度が大きいほど、平均年輪傾斜角は小さい。この傾向は、広葉樹における伝播速度に及ぼす年輪傾斜角の影響についての過去の報告²⁾と一致する。また、両樹種ともに伝播速度と年輪傾斜角は高い負の相関関係にあった（ナラ： $r = -0.872$ 、ブナ： $r = -0.907$ ）。回帰式は次の通りである。

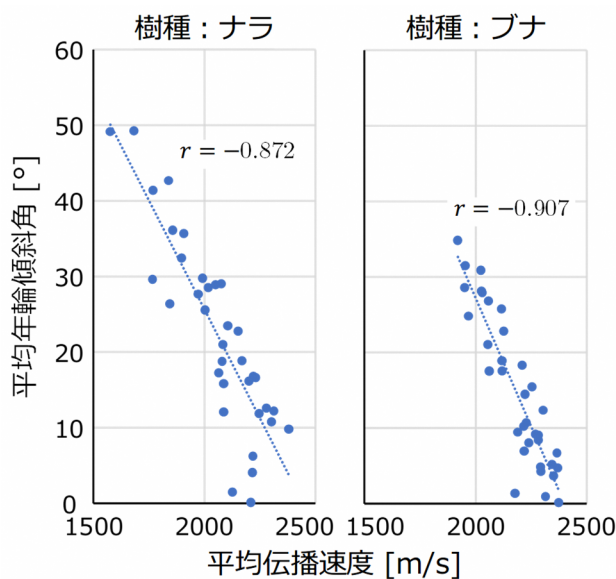


図5 平均伝播速度と平均年輪傾斜角の関係

$$\text{ナラ: } y = -0.0577x + 141 \quad (1)$$

$$\text{ブナ: } y = -0.0679x + 163 \quad (2)$$

無垢材の場合、含水率変化による反りや歪みなどの不具合がしばしば懸念される。それらは年輪形状との関連が強いことから、超音波試験により年輪形状を把握することができれば、不具合を回避するための有用な手段として活用できる。また、無垢材を幅はぎした場合の板の反りを予測する³⁾ための情報としても利用できる。そこで、式(1)、式(2)の回帰式を用いて伝播速度から年輪傾斜角を求め、年輪形状を推定することを試みた。図6のように、隣接する2点が同じ円弧上の点であれば、傾斜角 θ_n 、 θ_{n+1} と2点の横方向長さ L_n を用いて、2点の高さ方向長さ H_n は次式のようになる。

$$H_n = L_n \frac{\sin \theta_n + \sin \theta_{n+1}}{\cos \theta_n + \cos \theta_{n+1}} \quad (3)$$

図7は、式(1)～式(3)により隣接する2点の位置関係を求めて年輪形状を推定し、木口画像上に描画したものである。なお、これらは図4に示した伝播速度の分布と同じ試験体である。推定した年輪形状は木口画像の年輪とよく一致しており、板目面に対して超音波試験を行うことで年輪形状の推定が可能であることを示している。

3.2 年輪傾斜角と節の検出

有節材について得られた伝播速度の分布の一例を図8に示す。なお、測定点の間の値は、隣接するデータの平均値で補完してある。図4の無節材の分布とは異なり、図8では伝播速度の小さい部分が島

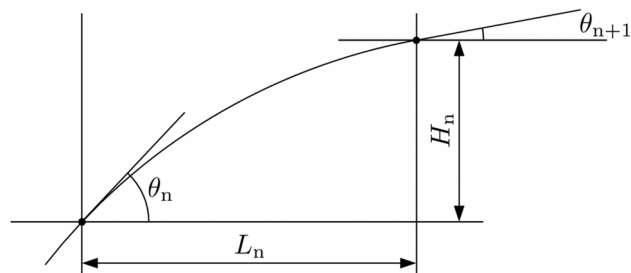


図6 同じ円弧上の2点の模式図

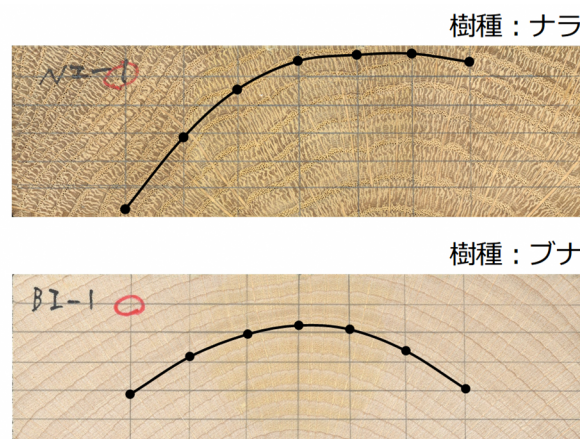


図7 伝播速度による年輪形状の推定

状に分布している様子が明瞭に確認でき、これは節の存在と対応している。この分布の特徴は全ての試験体で同様で、伝播速度の分布を調査することにより死節を検出できた。供試材の節は木裏側で視認できるものであるが、節が材の内部に完全に埋もれている場合でも、同様に伝播速度の分布から節の存在を推定できると考えられる。しかしながら、材の内部の節を精度良く検出するためには、分布に及ぼす材厚の影響や、節の種類（生節、死節、抜け節）や大きさ、角度の影響などをより広範に調査する必要がある。

4. 結言

本報では、超音波を用いて木材内部の巨視的特徴を推定するための基礎的知見を得ることを目標として、測定対象物への接触面積の小さい尖塔形の超音波センサーを用いた超音波試験を行い、木材の超音波伝播速度の分布と年輪傾斜角及び節との関連を検討した。計測は、木材の板目面上に設けた10mm間隔の格子状の測定点上で、板目面を挟んで相対する位置に発信・受信センサーを設置する対面法により行った。得られた結果を以下に示す。
・無節材の伝播速度の分布は概ね繊維方向の縞模

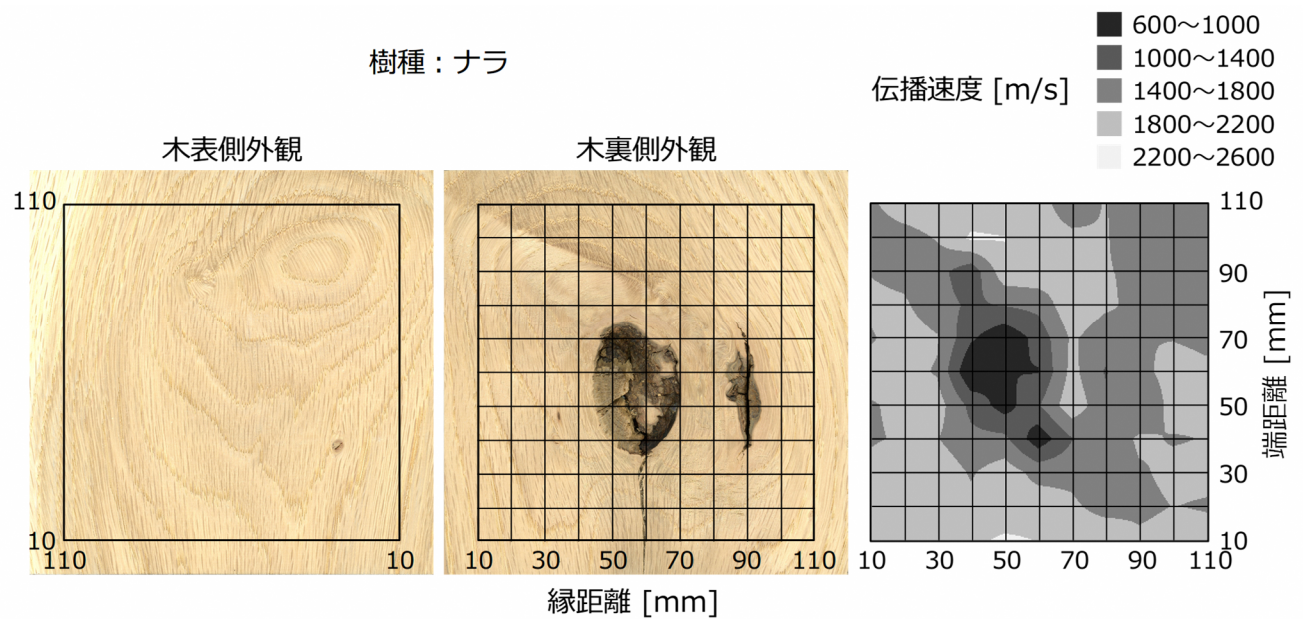


図8 伝播速度の分布（有節材）

様で、この縞模様は伝播方向がR方向からT方向へと変化していることとの対応が見られた。

- ・無節材の伝播速度と年輪傾斜角は高い負の相関関係にあった。その回帰式を用いて推定した年輪形状は、木口画像の年輪とよく一致した。
- ・有節材の伝播速度の分布は無節材のそれとは異なり、節の存在に対応する位置で、伝播速度が小さい部分が島状に分布している様子を明瞭に確認できた。

参考文献

- 1) 富川義朗、山田博章：超音波 TECHNO、2(2)、pp. 26-37、1990.
- 2) 三城昭義：木材中の超音波伝播速度に及ぼす木理角、年輪傾角の影響、木材学会誌、Vol. 42、No. 2、pp. 211-215、1996.
- 3) 今西祐志：幅はぎ板の構成の特徴と幅反り変形の関係、木材工業、Vol. 79、No. 8、pp. 296-301、2024.

飛騨地域家具製造業向けの木材データベースの構築（第3報）

足立隆浩*, 沼澤洋子*

Construction of wood database for the furniture industry in Hida (III)

ADACHI Takahiro* NUMAZAWA Yoko*

飛騨地域産広葉樹について、曲げ、縦圧縮、せん断強度の物性調査を行った。昨年度から今年度において、広葉樹材13樹種についてそれぞれ最大三個体について物性調査を行った。曲げ強度およびせん断強度については、概ね気乾密度が高い樹種のほど強度が高かった。一方概算の曲げヤング係数および縦圧縮強度については、気乾密度約0.60g/cm³を境目として、これ以上の密度である樹種群とこれ以下の密度である樹種群の間に一定の強度値の差が見られた。

1. 緒言

昨年度に引き続き¹⁾、飛騨地域産広葉樹の家具製造業における活用を促進するため、各種物性データの調査を行った。

飛騨地域においては、令和7年度に「飛騨地域広葉樹の活用促進に向けた現地検討会」が開催され、川上である伐採現場、川下である広葉樹製品の製造企業、およびこの二者をつなぐ役割となる川中の中間土場・製材企業のそれぞれの現場に広葉樹事業に携わる関係者が集い、情報交換を行った。このように飛騨地域には広葉樹を活用する一貫した体制が備わり、地域の事業者の意識も高まりつつある。しかし、国産広葉樹を活用しようという意識は確実に高まりつつあるものの、依然海外産の広葉樹材とくらべ過去の利用実績、ノウハウが少なく、物性データ等が不足しているのが実情である。

本報では、今年度を実施した広葉樹材の曲げ、縦圧縮、せん断の各強度物性データの調査結果を、昨年度に実施した分と併せて報告する。

2. 実験方法

2.1 試験材

飛騨地域産広葉樹について、伐採された丸太材より製材された板材を調達し、当所にて人工乾燥を行った。

これまで、2023年および2024年の冬季に伐採された、ナラ類、クリ、ブナ、ホオノキ等の広葉樹材

について調達を行った。調達は2023年材について1回8樹種、2024年材については2回、各12樹種について行った。各時期に調達した材を表1に示す。なおここでは、環孔材、散孔材の順に、概ねの密度が高い順にそれぞれを並べた。

原材は、元玉でない約2mの丸太材を調達した。これを飛騨市内の製材企業において、まず丸太の芯にて半割とし、これを樹皮側に向かって30mm厚ずつ切断して板材とした(図1)。この板材を当所において人工乾燥し、含水率が8~10%程度となるよう調整した。

表1 時期ごとに調達した広葉樹材

樹種	2023年材 ①	2024年材 ①	2024年材 ②
ミズナラ	○	○	○
コナラ	○	○	○
クリ	○	○	○
キハダ	-	○	○
アサダ	-	-	○
ミズメ	-	○	○
カエデ	-	○	-
ブナ	○	○	○
ウダイ	○	○	○
サクラ	-	○	○
ミズキ	○	○	○
トチノキ	○	○	○
ホオノキ	○	○	○

※ウダイ：ウダイカンバ

* 試験研究部



図1 調達した板材群の一例
丸太の中央で半割にしている

2.2 試験片の作製

乾燥した板材のうち、最も材芯に近い一枚から、曲げ試験片、縦圧縮試験片、せん断試験片を作製した。試験片は、各物性試験について各樹種の一枚板よりそれぞれ板幅に応じて15～26個を作製した。

試験片の取り方は、図2のように板材を500mmずつ三か所取り、これらについて図3のように材芯より樹皮側に向け20.5mm幅ずつ、可能な限り追い杭とならないように切断する形とした。これらの部材より、図4のように曲げ、縦圧縮、せん断試験片をそれぞれ作製した。なお、割れがある地点にあたるなどの明確な不良部位は除外したが、それ以外の部位に関しては木目によらず全て測定対象とした。

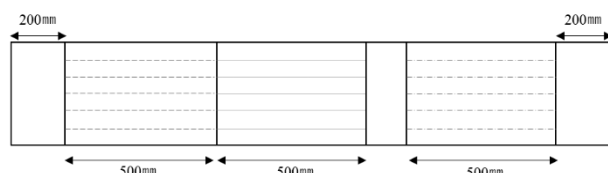


図2 試験片採取位置（板材の全体図）

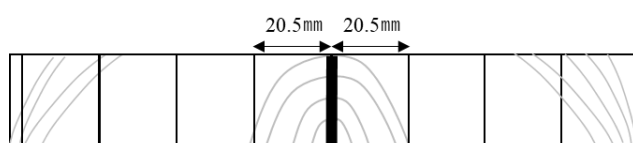


図3 試験片採取方法
材を木口側より見た図（太線部：材芯）

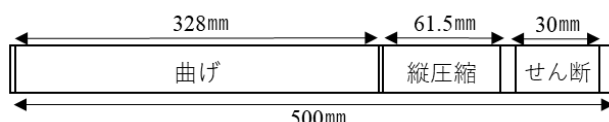


図4 試験片作製図

2.3 物性測定

2.2で作製した各種試験片について、物性測定を行った。試験はいずれも、株式会社島津製作所製

万能試験機UH-100KNC形を使用して行った。また、試験の前に各試験片の実寸を測定し、さらに試験前後の重量も測定した。

2.3.1 曲げ試験

曲げ試験片は、長手方向328mm、断面の一边が20.5mm角の直方体とした。試験においては支点間距離を287mmとし、試験速度を5mm/minとして、木表を荷重面とした。

試験後に各試験片について測定結果を分析し、3%以上荷重の減少があった点を破断点とした。この破断点と測定における最大荷重を記録した点とを比較し、早く事象が発生した点における荷重を用い、曲げ強度を算出した。

また、測定に際し、荷重0.5kNの点における曲げ圧子移動量と荷重1.0kNの点における曲げ圧子移動量を用い、概算の曲げヤング係数を算出した。

2.3.2 圧縮試験（縦圧縮試験）

縦圧縮試験片は、繊維方向長さ61.5mm、断面の一边が20.5mm角の直方体とした。試験においては圧縮速度を5mm/minとした。

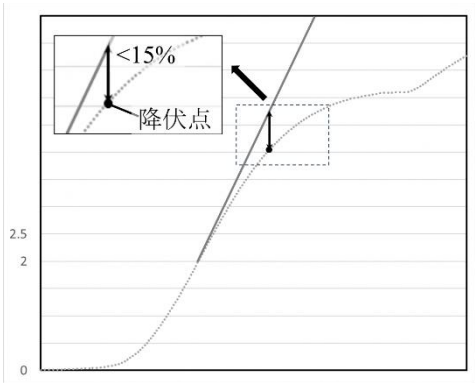
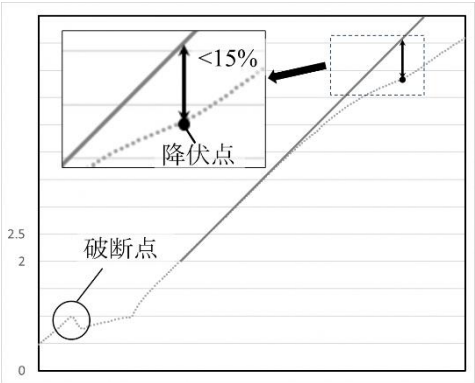
試験後に各試験片について測定結果を分析し、測定において記録された最大荷重を用いて縦圧縮強度を算出した。

2.3.3 せん断試験

せん断試験片は、繊維方向長さ30mm、断面の一边が20mm角の直方体をさらに加工し、せん断面長さおよびせん断面長さが20mm角となるようにした。試験においてはせん断圧縮速度を2mm/minとし、せん断面を年輪の直交方向とした。

試験後に各試験片について、図5、図6のように測定結果を分析した。まず各試験片における応力-ひずみ曲線上において、荷重2kNと2.5kNを示した二点の間で直線を引き、その直線の式を算出した。次に、算出した式を全ての測定範囲へ延長拡大し、実際に得られた応力-ひずみ曲線と比較した。そして、これらの荷重差が15%以上となる点を求めた。この点における応力-ひずみ曲線上の荷重を、圧縮試験における降伏点の荷重として扱うこととした。そして、この降伏荷重、および曲げ試験と同様の手法で求めた3%荷重減少荷重（破断荷重）、そして試験全体における最大荷重を比較し、これらのうち最も早く事象が発生した点における荷重を用い、その試験体のせん断強度を求めた。例えば、図5のような場合は試験中に破断点と降伏点がともに存在し、降伏よりも破断が先に生じたため、破断点の荷重によりせん断強度を求めた。一方図6のような破断点が存在せず、一方応力-ひずみ曲線の

傾きの変化は確認したような場合は、降伏点の荷重によりせん断荷重を求めた。



3. 結果

以下、表及び箱ひげ図を用いて各測定結果を示す。まず各表においては、各時期に調達した材の樹種ごとの物性測定結果を強度の順に並べた時に、真ん中に当たる値となる中央値を示す。また箱ひげ図は、今回測定した各樹種最大三個体分の物性値を樹種ごとに一つにまとめて作成した。なお箱ひげ図は、線の上端が外れ値を除く最大値、線の下端が同様の最小値、箱内部の横線が全体の中央値、×印が平均値、丸点が外れ値を示す。

3.1 気乾密度

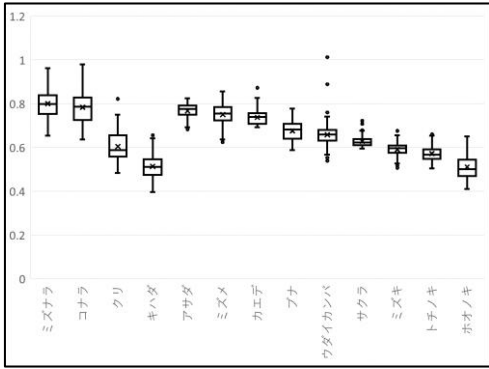
表2に気乾密度の個体ごとの中央値を示す。これは、各時期に調達した材から取った曲げ、圧縮、せん断の各試験片について、物性測定前の寸法及び重量測定の結果から密度(g/cm³)を気乾密度として算出したものである。

また、図7に気乾密度値の樹種ごとにまとめた箱ひげ図を示す。

表2 気乾密度 (各個体の中央値)

樹種	2023年材 ①	2024年材 ①	2024年材 ②
ミズナラ	0.81	0.76	0.83
コナラ	0.76	0.80	0.83
クリ	0.68	0.54	0.58
キハダ	-	0.48	0.53
アサダ	-	-	0.78
ミズメ	-	0.78	0.73
カエデ	-	0.74	-
ブナ	0.70	0.62	0.69
ウダイ	0.67	0.63	0.65
サクラ	-	0.61	0.64
ミズキ	0.58	0.60	0.60
トチノキ	0.58	0.55	0.58
ホオノキ	0.58	0.46	0.51

単位：g/cm³



単位：g/cm³

3.2 曲げ強度

表3に曲げ強度の個体ごとの中央値を示す。また、図8に曲げ強度値の樹種ごとにまとめた箱ひげ図を示す。さらに、表4に概算の曲げヤング係数の個体ごとの中央値を、図9に箱ひげ図を示す。

概ね、気乾密度が高い順に曲げ強度値が高い結果となったが、その中でもウダイカンバの曲げ強度値は気乾密度に比較してやや大きい結果となっている。またこの中ではミズナラ、コナラ、ブナが一個体中の試験片採取位置における物性値のばらつきが比較的小さく、クリ、キハダ・ミズメ・ウダイカンバのばらつきが比較的大きい結果となっている。

表3 曲げ強度（各個体の中央値）

樹種	2023年材 ①	2024年材 ①	2024年材 ②
ミズナラ	141	143	160
コナラ	133	143	146
クリ	124	95	115
キハダ	-	91	105
アサダ	-	-	179
ミズメ	-	133	151
カエデ	-	145	-
ブナ	129	120	144
ウダイ	141	133	147
サクラ	-	135	131
ミズキ	120	122	120
トチノキ	102	97	108
ホオノキ	119	96	109

単位：MPa

表4 概算の曲げヤング係数
（各個体の中央値）

樹種	2023年材 ①	2024年材 ①	2024年材 ②
ミズナラ	14	16	15
コナラ	14	16	16
クリ	14	9	12
キハダ	-	10	12
アサダ	-	-	17
ミズメ	-	13	14
カエデ	-	13	-
ブナ	12	12	13
ウダイ	14	13	15
サクラ	-	14	13
ミズキ	11	11	12
トチノキ	12	8	10
ホオノキ	12	9	11

単位：GPa

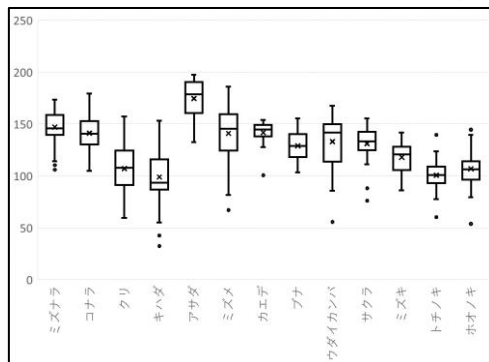


図8 曲げ強度（ここまで測定した個体すべて）

単位：MPa

表5 縦圧縮強度（各個体の中央値）

樹種	2023年材 ①	2024年材 ①	2024年材 ②
ミズナラ	59	70	71
コナラ	60	73	74
クリ	54	50	59
キハダ	-	47	55
アサダ	-	-	79
ミズメ	-	68	71
カエデ	-	64	-
ブナ	53	58	64
ウダイ	60	60	71
サクラ	-	68	69
ミズキ	48	54	59
トチノキ	49	45	52
ホオノキ	54	44	57

単位：MPa

表6 せん断強度（各個体の中央値）

樹種	2023年材 ①	2024年材 ①	2024年材 ②
ミズナラ	15	13	16
コナラ	15	13	15
クリ	13	9	11
キハダ	-	9	10
アサダ	-	-	17
ミズメ	-	15	13
カエデ	-	14	-
ブナ	11	11	12
ウダイ	12	13	13
サクラ	-	12	15
ミズキ	12	12	12
トチノキ	13	9	11
ホオノキ	11	8	9

単位：MPa

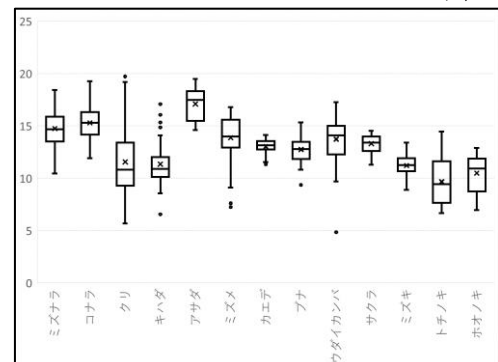


図9 概算の曲げヤング係数
（ここまで測定した個体すべて）

単位：GPa

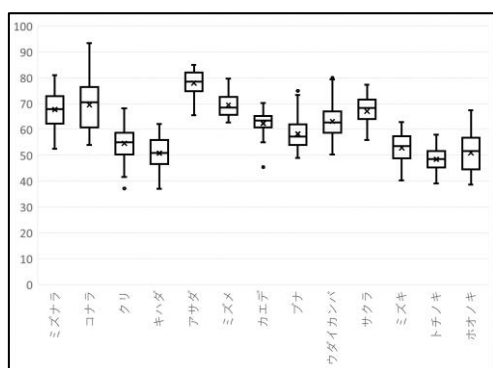


図10 縦圧縮強度
(ここまで測定した個体すべて)

単位：MPa

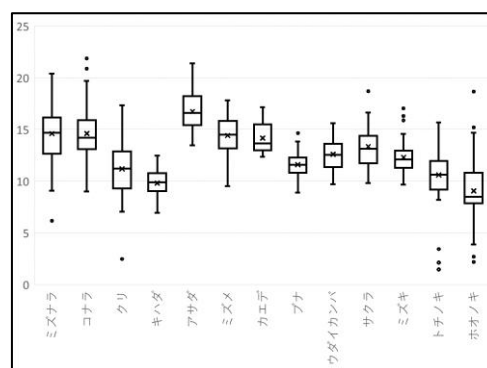


図11 せん断強度
(ここまで測定した個体すべて)

単位：MPa

一方、概算の曲げヤング係数については、気乾密度の大小だけでは順列が判断できにくい結果となったが、その気乾密度が約 $0.60\text{g}/\text{cm}^3$ より大きいものと小さいもので大まかにヤング係数の傾向が二分されているように思われる。またばらつきについてはブナが比較的小さいと思われる一方で、クリが非常に大きく、またキハダ、ミズメ、ウダイカンバも比較的ばらつきが大きい結果となっている。

3.3 縦圧縮強度

表5に縦圧縮強度の個体ごとの中央値を示す。また、図10に縦圧縮強度値の樹種ごとにまとめた箱ひげ図を示す。

縦圧縮強度については、気乾密度約 $0.60\text{g}/\text{cm}^3$ を基準として大小の群に分かれた傾向があったものの、気乾密度が比較的大きい側の群については密度と強度の明確な相関は見られないように思われる結果となっている。また値のばらつきは曲げ強度に比べると比較的小さいものの、クリ、キハダ、ウダイカンバにおいてややばらつきが大きい結果となっている。

3.4 せん断強度

表6にせん断強度の個体ごとの中央値を示す。また、図11にせん断強度値の樹種ごとにまとめた箱ひげ図を示す。

おおよそ、気乾密度が大きいほどせん断強度が大きい傾向となっている。一方で、トチノキやホオノキなど、降伏点より前に破断した試験体が比較的多いものもある。また、値のばらつきはキハダ、ブナについてやや小さい結果となっている。

4. 結言

昨年度に引き続き¹⁾、飛騨地域産広葉樹の各種物性を調査した。これまで、合計13樹種の広葉樹材について、人工乾燥の上で物性測定を行った。

これまで、各樹種の最大三個体について調査を行い、気乾密度に対する各種物性の傾向が判明しつつある樹種もある。しかし、今回全体的に物性が高かったアサダや、値のばらつきが比較的小さいと判断されたカエデについては、一個体のみの調査結果であるなど、家具製造等のための材の特徴を推測するにはさらなる個体数の調査が必要となる。今後も、関連業界の希望を継続的に聞き取りつつ、飛騨地域産広葉樹材について調査個体数を増やし、家具製造等に有用なデータの蓄積を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 足立隆浩他、飛騨地域家具製造業向けの木材データベースの構築（第2報）、岐阜県生活技術研究所研究報告、No. 27、pp. 36-39、2025.

曲げ木への影響因子の解明に関する研究 針葉樹の曲げ木加工性

石原智佳*

Research into the factors affecting bending wood
Bending ability of softwoods

ISHIHARA Chika*

本報告では、飛騨の家具で特徴的な曲げ木について、一般的に利用されている広葉樹を対象にした既往の研究に基づき、針葉樹であるヒノキとスギの加工性を検討した。広葉樹で通常行われる水蒸気による軟化処理では、針葉樹は蒸気乾燥に転じてしまい温度管理が必要であること、曲げ木加工では、引張側の割れ不良が起きやすく、これを防ぐ方法として厚みを増した帯鉄の利用が有効であることなどが明らかになった。

1. 緒言

岐阜県飛騨地域は木製家具の産地であり、部材の一部を伝統技術である「曲げ木」で製造する特徴がある。この曲げ木の工程は、木材に多くの水分を含ませて高温にする軟化処理、型に沿って曲げる加工処理、形状を固定する乾燥処理から成る。

樹種は従来、ブナ、ミズナラ、ビーチ、ホワイトオーク、ウォルナット等の広葉樹が主だったが、近年では、地域材の利用促進の流れでクリも利用されるようになり、早生樹であるセンダン・ハンノキ・ホオノキ等の利用に向けた研究も進められている¹⁾。また、資源量が豊富なスギ、ヒノキ等の針葉樹を曲げ木に用いる試みが広がってきている。

針葉樹の曲げ木加工は割れやすく難しいと言われており、製品化されているものはスギを数ミリ厚さにスライスした単板を重ね合わせで曲げる加工方法で仕上げられている。無垢材に関する研究報告は少なく、割れやすい原因など詳細が不明である。そこで本研究では、従来の広葉樹や早生樹に対する既往の研究で得られた知見を基に、ヒノキとスギの曲げ木への適応性を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材

ヒノキおよびスギの天然乾燥材を供試材とした。常温環境下で数年間保管し、気乾状態になった板材から軟化処理試験用、曲げ試験用、引張試験用、および曲げ木加工用の試験体を採取した。各試験用の試験体寸法は下記のとおりとした。

軟化処理および曲げ試験用の材は、繊維方向(L) 320mm×放射方向(R) 20mm×接線方向(T) 20mmとした。引張試験用材は、L 240mm×R 5mm (厚さ) ×T 20mm (幅) の板材から中心部の幅が5mm になるように半径約560mmの円状に両側面を削り出した。また、標線間距離は50mmとした。曲げ木加工用材は、L 260mmの板目材と柃目材の2種類で、厚みは10mmあるいは15mm、幅は30mmとした。

供試材の試験時における含水率は各試験終了後に行った全乾処理で得た全乾重量を基に算出した。

2.2 軟化処理試験

曲げ木加工の前処理として材の軟化が必要である。製造現場で行われる一般的な方法では、材を水蒸気で蒸して高温・高水分状態にする。本報告では蒸し処理のほか、煮沸による処理についても検討した。材の吸湿挙動を観察するために、重量測定を行った。測定法は、**図1**に示す木箱内を水蒸気で満たし、箱上部に設置した床下秤量型天びんから**図2**のとおり吊るした試験体の重量を測定し、データを自動収集した。なお、重量は含水率に変換した。

* 試験研究部

蒸し過程では、蒸気量を温度に換算し、温度変化に伴う含水率変化という観点からも検討した。天びんから吊るした試験体の近くにセットしたT型熱電対で温度を測定し、データを自動収集した。

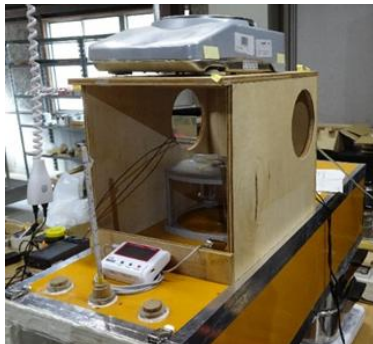


図1 軟化処理（蒸し箱）の様子



図2 蒸し過程における重量測定の様子

2.3 曲げ試験

気乾状態および軟化処理した材の曲げ試験を行い、曲げ強さおよび曲げヤング率を算出した。曲げ試験は三点曲げ方式で、荷重は板目側と柾目側から荷重速度 30 mm/min でそれぞれ加えた。また、支点間距離は280mmとした。

2.4 引張試験

既往の研究により、曲げ木加工の際に生じる引張側の割れ不良の要因が引張強さの低さであることが明らかになっている^{*2)}。そこで、スギとヒノキの引張強さを算出するために、引張試験を行った。荷重速度は3mm/minとした。

2.5 曲げ木加工実験

曲げ木加工は図3に示すように、治具に材を固定して行う。具体的には材の裏側を帯鉄と呼ばれる金属板に当て、材の伸びを抑えるために材の片側あるいは両端にスペーサーを挟んだ状態で加工する方法が一般的である。



図3 曲げ木加工用治具（帯鉄）

試験体は所定の含水率まで蒸すか煮沸する方法で軟化処理を行った。なお、煮沸については浸水後に蒸す場合よりも短時間で内部まで含水率を上げて軟化させるためである。その後、帯鉄に固定し、曲げ半径150mmの曲げ型に沿って曲げた。用いた帯鉄は厚さ1.5mmのSUS板で、枚数による効果の有無についても検討した。

3. 結果及び考察

3.1 軟化処理試験

ヒノキの吸湿挙動（含水率変化挙動）を蒸気の設定条件別に図4に示す。いずれの条件も水から加熱を始めたため、蒸気発生までの30分間はほぼ吸湿が進まない。条件1は一般的な広葉樹の軟化条件と同様に、勢いよく出続ける水蒸気に材が包まれる条件である。経過を観察したところ、沸騰後からは吸湿せずに乾燥していく様子が見られた。スギも同様であったことから、針葉樹の場合、蒸気が強すぎると乾燥してしまい、広葉樹とは蒸し方を変える必要性が判明した。

条件2では、蒸気乾燥が進んだのち（60分後）、蒸気量を減らすと、やや吸湿し、さらに少ない蒸気量にする（120分後）と、吸湿が順調に進む様子が見られた。

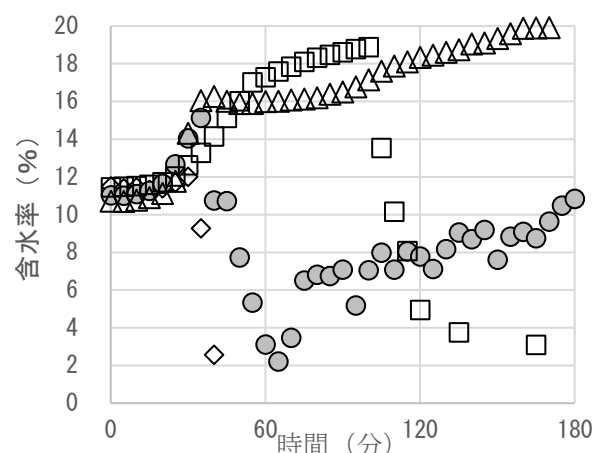


図4 ヒノキの吸湿挙動

◇：条件1、●：条件2、□：条件3、△：条件4

条件3では沸騰(30分経過時)後に蒸気量が少ない状態にすると吸湿が進み、停滞した頃(50分後)に蒸気量を増やすと吸湿が再開し、強いままでは乾燥に転じた(100分後)。条件4では沸騰(30分)後、蒸気を弱め吸湿が進んだのち(40分後)、蒸気量を増やし、また減らす(95分後)と吸湿が進む様子が見られた。

つぎに蒸気量の強弱を具体的に表すために、蒸し箱内の温度に伴う吸湿挙動を観察した。予備実験において、ヒノキの場合、沸騰後82~87℃の蒸気を維持することで吸湿が続くこと、スギの場合、沸騰後87℃付近で吸湿が停滞することが判明した。

具体的な温度を目安に、温度調節による蒸気量の変化に伴う含水率変化を観察した結果として、ヒノキを図5にスギを図6にそれぞれ示す。

ヒノキについて、沸騰後も強い蒸気を維持すると加熱開始約50分で87℃に至る。この温度より高温になると蒸気乾燥に転じてしまうため、蒸気量を減らし、温度を維持することとしたが、蒸気量が減った影響で120分過ぎから温度が下降し、これに伴い吸湿せずに乾燥し始め、165分からは含水率が停滞した。そこで200分時に蒸気量を増やすと、吸湿が再開し、230分時には87℃まで昇温し、吸湿が続くことも観察された。以上から、含水率は温度に追従して変化するといえる。

スギについて、加熱開始約40分で88℃に至る。蒸し初期はこの温度を下回ると吸湿が進まず、戻すにつれて含水率も増加に転じるが、90℃付近では吸湿と乾燥をさまよう傾向にある。いったん蒸気を少なくし、100分時からの温度低下に伴いやや吸湿したが、18%付近で停滞を続けた。240分時から蒸気を増やすと吸湿に一転した。以上から、スギの場合は、大量の蒸気では高温すぎるため、一旦60℃付近まで降温させ、再度昇温させることを繰り返して徐々に吸湿を進めることが効果的と考えられる。

蒸気による軟化処理については、広葉樹は強い蒸気で満たし続けることが必要であるが、ヒノキ・スギともに、87℃以上では吸湿できず乾燥してしまうこと、降温後に再度蒸気を当てる際に吸湿が進む性質を活かすべきであると考えられる。

3.2 曲げ試験

広葉樹の曲げ木加工では、軟化時に曲げヤング率がどの程度であれば適切な加工が可能であるかを調べ、必要な蒸し時間を設定した^{*3)}。そこで、本報告でも軟化処理後の曲げ強さと曲げヤング率を算出した。値は密度の影響を大きく受けるため、密度が近い材で比較できるように代表値とし、結果を表1に示す。

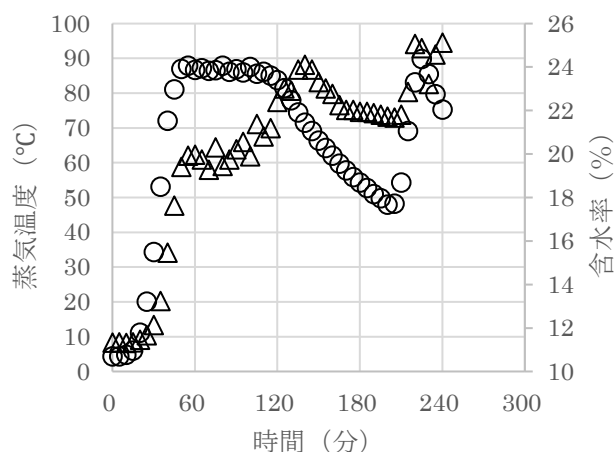


図5 ヒノキの蒸気温度と含水率変化の相関

○：蒸気温度、△：ヒノキ材の含水率

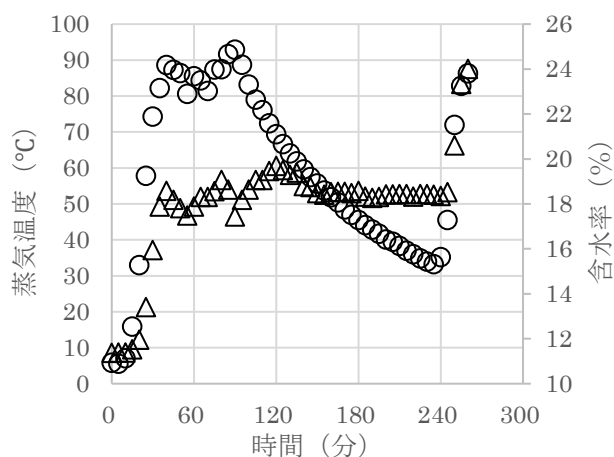


図6 スギの蒸気温度と含水率変化の相関

○：蒸気温度、△：スギ材の含水率

広葉樹の場合、ヤング係数を曲げ木の可否判定に活用でき、良好な曲げ木が可能になる目安として、蒸し処理後の値が気乾状態の4~5割の値にまで低下することであった。

ヒノキ・スギともに気乾状態のヤング係数が広葉樹に比べて低いということもあり、蒸し処理では6~7割にしか低下しなかった。そこで、さらに軟化させる目的で材を一晩浸水させた状態から蒸したところ、気乾状態の5~6割の値に至った。

3.3 引張試験

ヒノキとスギの気乾材及び蒸し処理材について引張試験を行った。それぞれ10試験体の平均結果を表2に示す。引張ひずみは曲げ木に適した広葉樹の5~6割であり低い傾向にある。

表1 曲げ試験の結果

	気乾状態		蒸し処理		浸水後 蒸し処理	
	板目	柁目	板目	柁目	板目	柁目
ヒノキ						
気乾 密度 (g/cm ³)	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
含水率 (%)	11	11	18	18	35	35
曲げ 強さ (MPa)	81	83	40	37	44	40
ヤング 係数 (GPa)	7.2	7.5	5.5	4.5	3.8	4.1
スギ						
気乾 密度 (g/cm ³)	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
含水率 (%)	11	11	20	20	30	30
曲げ 強さ (MPa)	61	83	46	49	42	41
ヤング 係数 (GPa)	6.5	9.4	6.5	6.6	5.2	4.8

表2 引張試験の結果

	気乾状態	蒸し処理
ヒノキ	板目	板目
含水率 (%)	12	20
引張ひずみ	0.010	0.013
スギ	板目	板目
含水率 (%)	12	20
引張ひずみ	0.010	0.012

3.4 曲げ木加工実験

表3に結果をまとめて示す。目的は曲げ木加工が可能な条件の見出しであり、曲げ木の可否を元に、各試験の結果と関連付けて考察する。また、板目・柁目材ともに同じ傾向であったため、詳細な数値表記は板目材のものとした。

水蒸気で蒸す軟化処理では、ヒノキ・スギ共に10mm厚さ材を含水率20%まで蒸して曲げ木加工した場合、引張側で割れ不良が起きた。既往の研究において、各種広葉樹は同様の条件で良好な加工が可能であった。ここで、さらに軟化させるために煮沸処理するとヒノキ・スギ共に10mm厚さ材で曲げ木加工が可能となった。したがって、ヒノキ・スギでは広葉樹よりも内部まで水分を浸透させる必要があると考えられる。

つぎに15mm厚さ材を煮沸処理して曲げ木加工した場合、1.5mm厚さの帯鉄ではヒノキ・スギ共に引張側で割れ不良が起きた。そこで、広葉樹で認められた帯鉄厚さによる引張側の割れ防止効果^{*4)}を活用し、同じSUS板を2枚重ねた3mm厚さの帯鉄を用いると、スギは引張割れが起きるが、ヒノキは曲げることができた。

また15mm厚さのスギ材については、3枚重ねの4.5mm厚さの帯鉄で良好に曲がった。水分を多く含んだスギのほうがヒノキよりも引張ひずみが小さい傾向が見られたことから、より厚い帯鉄が効果的であったと考えられる。なお、帯鉄厚さを4.5mmにして加工した際の含水率が同じ15mm厚さの加工時よりも高くなってしまったが、繊維飽和点以上の含水率であるため、強度特性には大きく影響していないと考えられる。

表3 曲げ木加工実験の結果

樹種	材厚 (mm)	軟化 方法	曲木時 含水率 (%)	帯鉄 厚さ (mm)	曲木 可否
ヒノキ(板目)	10	蒸し	20	1.5	× 引張割れ
	10	煮沸	35	1.5	○
	15	煮沸	40	1.5	× 引張割れ
	15	煮沸	40	3	○
	15	煮沸	50	4.5	○
スギ(板目)	10	蒸し	20	1.5	× 引張割れ
	10	煮沸	35	1.5	○
	15	煮沸	40	1.5	× 引張割れ
	15	煮沸	40	3	× 引張割れ
	15	煮沸	50	4.5	○

帯鉄は曲げ木にかかる圧縮応力を高めるため、スギではシワができてしまった。広葉樹では曲げた際の材伸びに起因する引張割れを防ぐために治具と材の隙間を埋めるスペーサーを必要とするが、厚い帯鉄でスギを曲げる際にはあえて隙間を空け、圧縮応力を小さくすることでシワを防ぐこともできた。曲がった状態のヒノキを図7にスギを図8に示す。



図7 ヒノキの曲げ木
(材15mm厚、帯2枚)



図8 スギの曲げ木
(材15mm厚、帯3枚 スペーサーを除けた状態)

4. 結言

本報告では曲げ木について、広葉樹を対象にした既往の研究に基づき、針葉樹であるヒノキとスギの加工性を検討した。水蒸気による軟化処理では、広葉樹と異なり、常に強い蒸気下での処理は不向きであり、温度の上限に注意を払った蒸気の当て方が必要であることが推察された。

曲げ木加工については、ヒノキ・スギともに、広葉樹で可能であった蒸し軟化処理では引張側の割れが生じてしまい、さらに軟化する蒸煮処理で曲げ木が可能になった。また材が厚くなると蒸煮処理のほか、厚い帯鉄を沿わせて引張割れを防ぐ方法が効果的であることが示された。

参考文献

- 1) 杉山真樹他、国産広葉樹材の用材利用拡大に向けた研究成果普及の取組、第76回日本木材学会大会要旨(R17-P2-07)、2026.
- 2) 石原智佳他、曲げ木に適した状態判定、岐阜県生活技術研究所研究報告、No. 23、pp. 1-5、2021.
- 3) 石原智佳他、許容曲げ半径の推定に関して、岐阜県生活技術研究所研究報告、No. 18、pp. 30-33、2016.
- 4) 石原智佳他、引張割れの防止、岐阜県生活技術研究所研究報告、No. 24、pp. 1-3、2022.

簡易計測による脊柱わん曲の推定と製品評価への応用（第1報） 筋骨格モデルを用いた基盤技術の構築

藤巻吾朗*, 小高大輝*

Estimation of Spinal Curvature Using Simplified Measurements and Its Application to Postural
Evaluation During Product Use (I)
Development of Fundamental Methods Using a Musculoskeletal Model

FUJIMAKI Goroh*, KODAKA Daiki*

簡易計測により、製品使用時の脊柱わん曲状態を可視化・評価するシステムの構築を目指し、その基盤技術となる筋骨格モデルを用いた姿勢推定手法を開発した。個人差を解消するためのキャリブレーション機能や自然な脊柱わん曲を再現するための独自のルールを用いることで、体表面での脊柱形状と骨格姿勢の再現性の両立に成功した。将来的には入力をIMUセンサやビデオ画像からの姿勢推定へ移行することで、背もたれなどに体が隠れた状態でも脊柱彎曲の推定が可能となり、体に負担の少ない製品開発や製品評価・PRへの貢献を目指す。

1. 緒言

近年、椅子やベッドをはじめとする生活関連製品において、単なる機能性や耐久性だけでなく、使用時の快適性が製品価値を左右する重要な要素として注目されている。こうした背景のもと、快適性を客観的なデータとして定量化し、製品開発に活かすとともに、その価値を一般消費者にわかりやすく伝えることの重要性が高まっている。製品が人体をどのように支持しているかは、体圧分布測定などの手法を用いることで比較的容易に可視化することが可能である。しかし、その支持の結果として生じる人の姿勢、とりわけ、身体の要となる脊柱のわん曲（以下、彎曲とする）を製品使用中に測定・評価することは、技術は進んでいるものの依然として困難である。使い心地の良い製品を人間工学的なエビデンスに基づいて設計し、その価値を効果的にPRするためには、着座中や就寝中の脊柱の状態を客観的な指標として測定・可視化する技術の確立が不可欠である。

姿勢測定の代表的な手法として、反射マーカを用いた光学式動作解析装置が挙げられる。この手法は、歩行解析をはじめとする運動バイオメカニ

クスの分野で広く普及している。しかし、カメラ設置スペースの確保や測定対象者へのマーカ貼付に時間を要する。また、製品評価の現場においては、椅子やベッドの使用時にはマーカが隠れてしまうことが多く、製品使用中の連続的な姿勢変化を測定することは難しい。

臨床検査の分野ではスパイナルマウス等の脊柱形状測定器が用いられるが、これらは主に静止立位や最大屈曲・伸展時といった特定の臨床状態を前提とした測定装置であり、日常生活におけるリラックスした製品使用状態を自然かつ動的に計測するには適さない。

一方、自動車シート等の分野ではシートトレーサーに代表される三次元形状測定装置が活用されている。しかし、これらの装置はどちらかと言えばシート側の沈み込みや形状変化の測定が主眼であり、人体側の脊柱の内部挙動を把握することを目的としていない。

このような背景から、より簡便かつ非拘束な測定手法が求められており、近年では、慣性センサ（IMU）を身体に直接貼付して姿勢を把握する試みや、機械学習によるビデオ映像からの姿勢推定技術も発展している。しかしながら、これらの手法であっても製品評価に重要な脊柱の彎曲状態の把握は依然として困難である。

* 試験研究部

そこで、本研究では椅子やベッドなどの製品使用時における脊柱彎曲の状態を、慣性センサ (IMU) やビデオ映像から推定する手法を開発することを目的とする。それにより、製品開発における形状検討や製品使用時の姿勢の評価、製品PRへの活用を目指す。

2. 推定手法の全体像と要素技術

2.1 姿勢評価における身体内部の情報

本研究では、簡易計測による脊柱彎曲の推定を目的としているが、単なる外見上の姿勢の可視化だけでは、姿勢の定量的な評価は難しい。そのため、身体内部の脊柱の骨格の状態の把握が重要となる。体表面での計測データから身体内部の解剖学的な状態を推定するための橋渡しとして、本研究では、人体骨格をデジタル上で再現・シミュレーション可能な筋骨格モデルを採用した。

2.2 推定手法の概要と運用パターン

本研究で開発する手法の概要を図1に示す。本システムは、入力データとして「IMUセンサによる角度計測」と「ビデオ画像からの姿勢推定」の2系統を備えており、対象製品の特性や測定環境に応じてこれらを単独利用する運用を想定する。

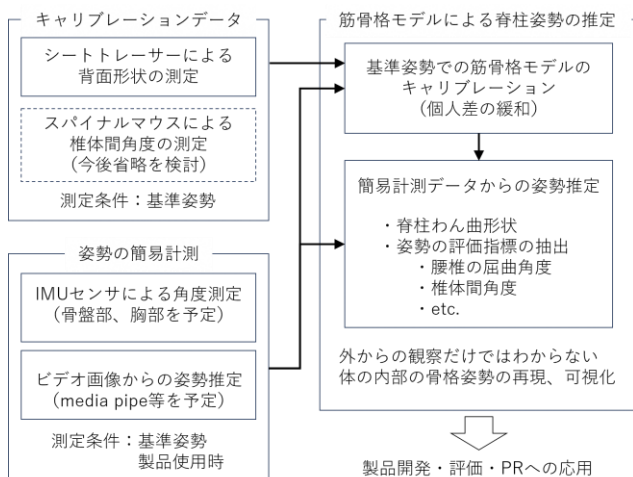


図1 推定手法の概要図

2.2.1 IMUセンサによる独立推定

骨盤部や胸部等に装着した慣性センサから、各分節の傾斜角を直接取得する。この手法は、椅子着座時のように背もたれによって身体の後面が遮蔽され、光学的な観測が困難な製品の評価に有効である。

2.2.2 ビデオ画像による独立推定

単一または複数のカメラの映像から、既存の学習済みモデル (MediaPipe, OpenPose等) を用いて身体の外形ラインや関節位置を抽出する。被験者にセンサを貼付する必要がないため、より自然な動作や非拘束性が求められる製品評価に適している。

2.3 筋骨格モデルによる解析フロー

いずれの運用パターンにおいても、以下のステップを経て最終的な評価指標を算出する。

- ①基準姿勢によるキャリブレーション：体表面での脊柱彎曲形状の測定データを用い、筋骨格モデルを個人の体格や姿勢に適合させ、個人差による影響を緩和する。
- ②製品使用時の姿勢推定：実測データをモデルへ反映し、外からは観察できない「脊柱彎曲形状」「腰椎屈曲角度」「椎体間角度」等を算出・可視化する。
- ③製品開発・PRへの応用：得られた内部骨格の定量的データをエビデンスとして、製品の形状検討や、一般消費者向けの機能訴求 (PR) へと活用する。

2.4 使用計測機器の概要

本研究におけるモデルの適合および精度検証のため、以下の計測機器を用いた。

2.4.1 シートトレーサー（株式会社テック技販）

IMUを20mm間隔で配置したテーブ状の三次元形状を測定する装置。柔軟な構造を持つため、椅子やベッドなどの軟らかい支持面と人体の間に挟まれた状態で、その接触界面の形状を三次元座標として取得できる。本研究では、基準姿勢（立位姿勢）および着座時における背面の三次元形状を取得し、筋骨格モデルのキャリブレーションの基準値および姿勢推定の精度確認用のデータとして使用した。

2.4.2 スパイナルマウス（インデックス有限会社）

脊柱に沿って背部表面をなぞることで、脊柱の各椎体間の角度を非侵襲的に測定する装置。腰椎前彎を過小評価する可能性があるが、X線画像より計測した結果と中程度～強い相関があると報告されている^{1)~2)}。本研究では、スパイナルマウスで取得した椎体の角度を真値と見なし、推定された椎体間角度の妥当性を検証するためのデータとして使用した。

2.5 実測データの取得

本研究では、過去の研究で構築した日本人男性の標準的なトルソー（胴体部）モデル3種類（表1）

3)を実寸大で3Dプリンタ出力し、その造形物を直接計測することで、手法の開発および検証に必要なデータを取得した(図2)。取得したデータは、背面の形状(脊柱ラインの三次元座標)と椎体間角度(隣り合う背骨同士のなす角度)の2種類とした。

表1 使用したトルソーモデルの概要

名称	説明
基準姿勢	ISO20685準拠の立位姿勢
スツール座位	背もたれのない椅子に座った姿勢
椅子座位	背面角100°の椅子に座った姿勢

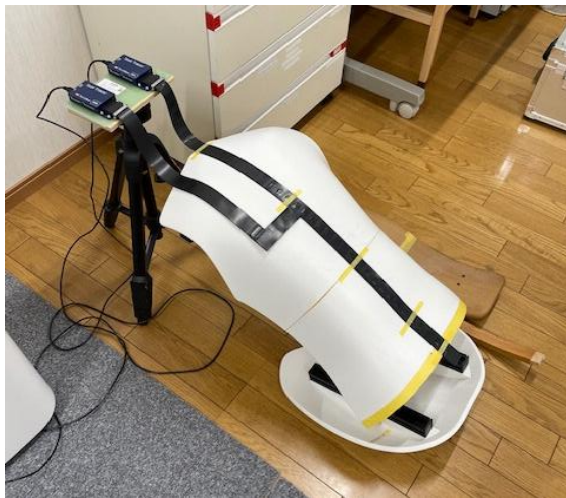


図2 実測データの取得

3. 脊柱彎曲推定モデルの構築と最適化

3.1 ベースモデルの選定と機能の拡張

本研究では、脊柱、特に腰椎部の解剖学的再現性に特化した筋骨格モデル⁴⁾をベースモデルとして採用した。このモデルは、腰椎部の可動を考慮したモデルで、第1腰椎(以下、L1)から第5腰椎(以下、L5)までの各椎体を独立したセグメントとして保持しており、椎体間の関節定義が詳細になされている。このモデルに対して、製品使用時の姿勢の再現・評価に必要と考えられる以下の機能を独自に拡張した(図3)。

3.1.1 棘突起マーカの追加

臨床現場で用いられるスパイナルマウス等の計測器は、脊柱の背面側にある棘突起(きょくとっき)の形状をなぞることで姿勢を把握する。一方、標準的な筋骨格モデルの関節中心は椎体内部(回転中心)に定義されている。この乖離を解消するため、各椎体セグメントの解剖学的な棘突起位置に対応する仮想マーカをモデル上に定義した。これによ

り、モデルから算出される背面のカーブと、スパイナルマウスやシートトレーサーによる実測外形データを同一の指標で直接比較することが可能となった。

3.1.2 可動部の追加と動作範囲の拡大

ベースモデルでは、可動部がL1からL5までの腰椎部のみであり、骨格の動きの制限が大きく、製品使用時の姿勢を再現するには不十分であるため、より柔軟な動きが必要となる。そのため、固定されていた第12胸椎(以下、Th12)とL1の椎体間(Th12-L1)の角度を可動部として解放し、さらに骨盤部の空間的な位置・角度に可動性を持たせることで、よりダイナミックな骨格の挙動を再現できるようにした。

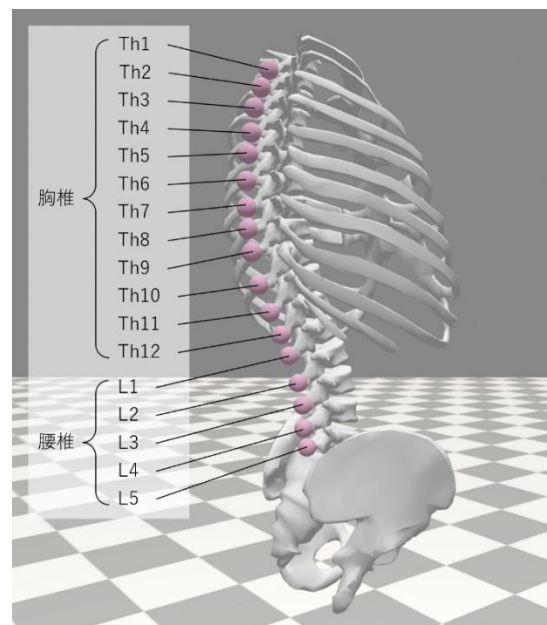


図3 筋骨格モデル(OpenSim GUIの表示画面)⁵⁾

3.2 キャリブレーション手法の開発

個人の体格に合わせたモデルを自動で構築するため、Pythonによるキャリブレーション・プログラムを開発した。従来の手動調整に比べ、処理の再現性と効率を大幅に向上させることができた。

キャリブレーションの基準データには、シートトレーサー(背骨の形状を計測する装置)によって得られた脊柱上の三次元座標データを用いる。モデルの構築にあたっては、「体格に合わせた骨格全体の寸法調整(スケーリング)」と「実際の姿勢を再現するための関節角度の調整(フィッティング)」という2つの処理が必要となる。しかしこの2つは独立して処理できない。なぜなら、以下に示す2つの理由から、一方を変えると他方も影響を受ける

ためである。

理由① 関節の動きが「背中の見かけの長さ」を変える：計測装置は身体の表面形状を測定するが、骨格モデルの関節は表面よりも体の内側（椎体の中央付近）に位置する。そのため、関節角度を変えると、関節から離れた背面の弧長（背骨に沿った曲線の長さ）が変化し、「背中の長さ」の見積もりに誤差が生じる。

理由② 姿勢によって各椎骨間の間隔の比率が変わる：背骨は複数の椎骨（背骨の一つひとつの骨）で構成されており、姿勢が変わると各椎骨間の距離の比率も変化する。したがって、計測データから各椎骨の位置を推定する際には、全体の長さだけでなく、椎骨ごとの間隔の比率も姿勢に応じて都度調整する必要がある。

これらの干渉を解消するため、図4に示した手順による計算処理を行った。

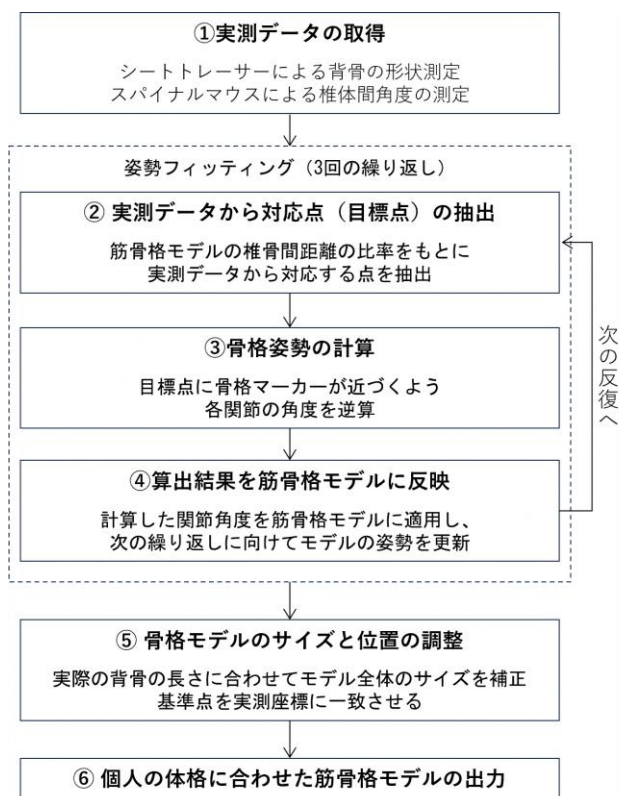


図4 キャリブレーション処理の概要

3.3 腰椎の連動比率の最適化（暫定設定）

ベースモデルには、腰椎全体の曲がり角度に対して各椎骨間が一定の割合で連動する仕組みが組み込まれている。3.2の手法で構築したモデルを用いてスツールおよび椅子への着座姿勢を再現し、実測値と比較した結果、この標準的な連動比率で

は、特に骨盤が傾いたときの腰椎下部（L4/L5付近）の動きを十分に再現できないことが明らかになった（詳細は4章を参照）。

そこで、座った姿勢における腰椎の動きをより正確に再現するため、実測データをもとに各椎骨間の連動比率を再定義した。具体的には、腰椎全体の曲がり角度に対して各椎骨間がどれだけ寄与するかの割合を、実測値に合うよう調整した。この最適化により、外形の形状が一致するだけでなく、姿勢が変化する際の骨格の動きも自然に再現できるようになった。

3.4 実測角度の同期と座標系の再定義

前節までの処理により、骨格の外形形状の一致と座位特有の連動比率の最適化が完了した。しかし、製品評価における負荷解析（椎間板にかかる圧力の算出など）を行うためには、モデルが内部に保持する関節角度の数値を、スパイナルマウスなどで計測した絶対角度と一致させる必要がある。

通常、筋骨格モデルの関節角度の数値を直接書き換えると、骨格の見た目の形状が崩れてしまう。そこで、調整済みの形状を一切変えることなく、内部の角度定義だけを実測値に自動的に上書きするPythonスクリプトを新たに作成した。これにより、個人の体格や姿勢を反映しながら、重力方向を基準とした絶対的な骨格配置に基づく解析が可能となる。

4. 推定精度の検証と考察

4.1 検証の目的と条件設定

本研究で開発した推定手法の妥当性を検証するため、以下の3つのモデルを条件として設定し、2.5節に従って取得した実測値との比較評価を行った。

- ・モデルA（標準スケーリングモデル）：ベースモデルに対し、シートトレーサーで取得したTh1-L5の間の距離に基づきスケーリング処理のみを適用したもの。
- ・モデルB（体格適合モデル）：3.2節の手法を用い、シートトレーサーの三次元点群データに対して反復計算による形状フィッティング（キャリブレーション）を行ったもの。
- ・モデルC（フル最適化モデル）：モデルBに対し、3.3節の腰椎連動比率の最適化および3.4節の絶対角度同期を適用したもの。

4.2 初期キャリブレーション精度の評価

基準姿勢において、各モデルの棘突起位置とシートトレーサーの実測点群（目標形状）とを比較評価した。評価に際しては、解剖学的に胸椎の後彎と

腰椎の前彎の間の反曲点となる第12胸椎（Th12）⁶⁾を基準点（原点）とした。実測点群（シートトレーサー）に対する各モデルの精度確認をした結果を図5に示す。

単純なスケーリング（モデルA）では脊柱の生理的彎曲（S字カーブ）を再現できず、20.71mmという大きなRMSEを生じた。これに対し、モデルBおよびモデルCでは実測値に対する誤差が4～5mm程度で、初期キャリブレーションとして高い精度を有していることが確認された。

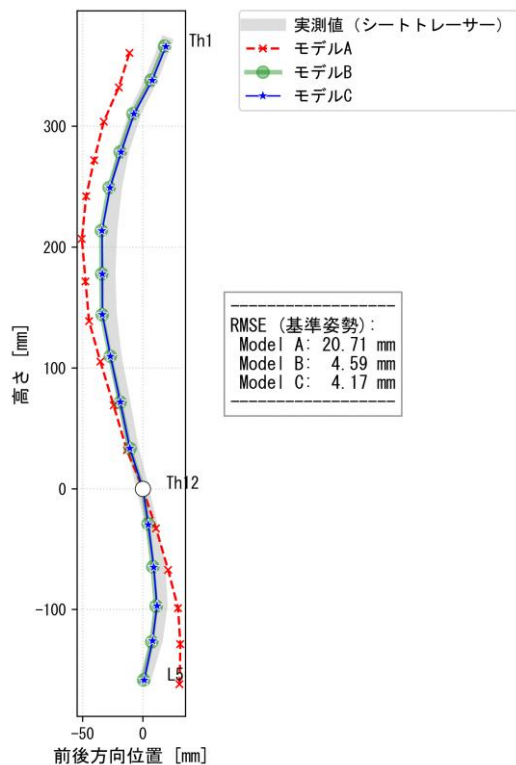


図5 初期キャリブレーションの形状精度確認

4.3 着座姿勢の推定精度の評価

各モデル条件において、胸部および骨盤部の角度を入力値とした際の推定形状の再現性を検証した。評価には、形状の近似度（RMSE）と、内部骨格の解剖学的妥当性（椎体間角度）の2つの指標を用いた。なお、入力角度はシートトレーサーから算出した暫定値（図6）を用い、将来的なIMUセンサ運用の代替とした。

4.3.1 脊柱彎曲形状の再現性

スツール座位および椅子座位におけるシートトレーサーで測定した形状の実測値とそれに対する各モデルの形状誤差（RMSE）を比較した結果を図7および図8に示す。

スツール座位、椅子座位の両条件において、モデルBとの差は小さいもののモデルCが最小の誤差を示した。標準的なスケーリングのみを施したモデルAと比較すると、いずれの条件でも誤差が大幅に低減しており、実測形状に対して高い再現性を有していることが確認された。

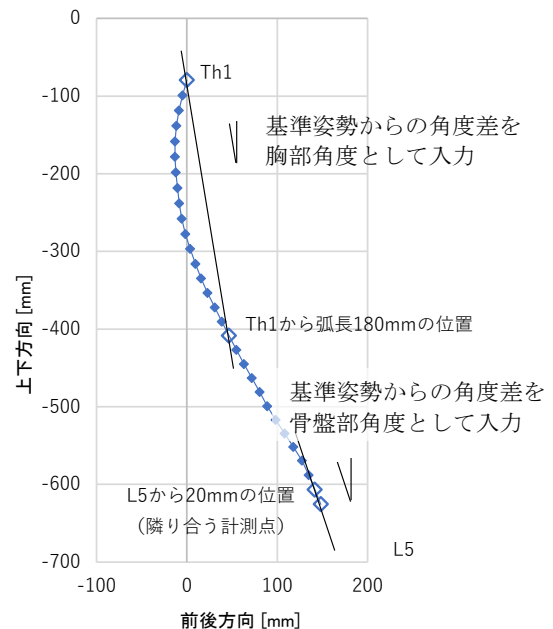


図6 入力角度の算出方法について

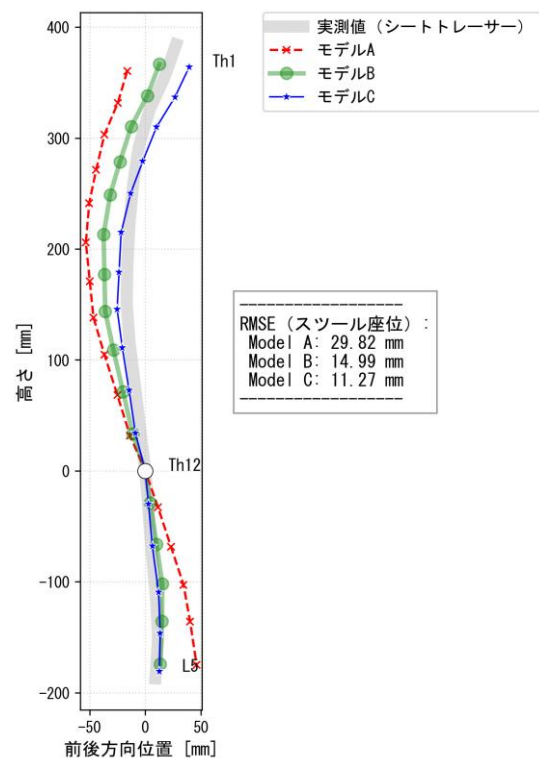


図7 スツール座位での姿勢の推定精度の確認

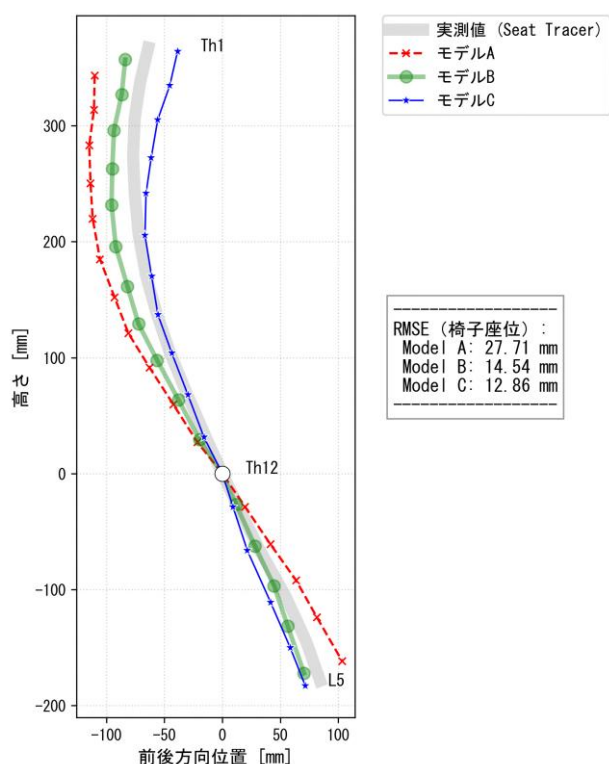


図8 椅子座位での姿勢の推定精度の確認

4.3.2 内部骨格動態の再現性

工学的な身体負担の解析を含む姿勢評価の観点からは、内部骨格動態が解剖学的に自然であることが重要である。そこで、スパイナルマウスによる実測値と筋骨格モデルの推定値との椎体間角度を比較した（図9～11）。

モデルAおよびモデルBは、全姿勢条件において正方向（前彎方向）への大きな誤差を示し、腰椎全体では 20° を超える乖離が生じた。これは、標準的な連動比率および絶対角度同期なしの状態では腰椎前彎が過大評価されることを示しており、姿勢の定量的評価への適用には精度上の課題がある。

モデルCは、着座姿勢においても全般的に誤差が小さく、3.3節の連動比率最適化と3.4節の絶対角度同期が有効に機能していることが確認された。なお、本検証で真値として用いたスパイナルマウスは、X線画像との比較において腰椎前彎角に中等度～強い相関が認められる一方、体表計測に由来する計測誤差を含むことが報告されている¹⁾²⁾。こうした計測器側の誤差を考慮すると、モデルCの着座条件における誤差はおおむね許容範囲内にあると考えられる。

以上より、モデルCは外形形状の適合と内部骨格動態の解剖学的整合性を両立しており、姿勢評価

への適用に向けた基盤技術として有効であると考察される。

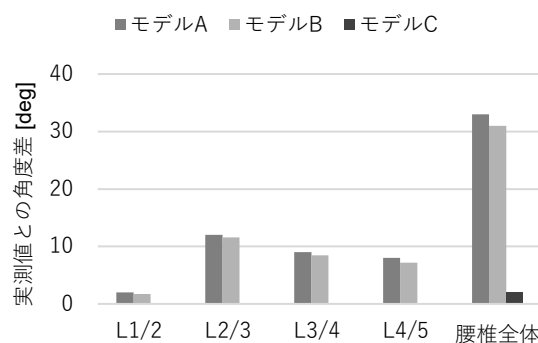


図9 基準姿勢での椎体間角度の誤差

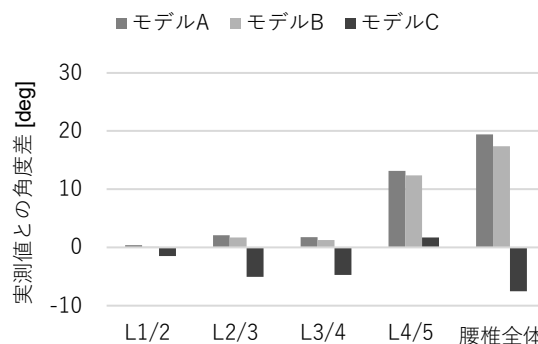


図10 スツール座位での椎体間角度の誤差

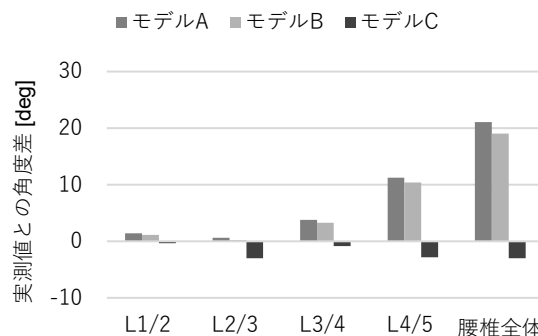


図11 椅子座位での椎体間角度の誤差

5. 結言

本研究では、椅子やベッドなどの製品評価において、非拘束かつ高精度に脊柱の彎曲状態を推定する手法の確立を目的とし、筋骨格モデルを用いた独自のキャリブレーションおよび姿勢推定手法を開発した。本手法の主要な成果は以下の通りである。

- ・シートトレーサーの表面形状測定をもとにした

キャリブレーション機能を開発した。これにより、基準姿勢におけるRMSEを4mm台まで低減させ、個人の体格を高精度に再現することが可能となった。

- 腰椎連動比率の調整および絶対角度の同期により、胸部、骨盤部の角度入力だけで形状再現性が高く、解剖学的な整合性も維持した姿勢推定が可能となった。

また、本研究では日本人男性の標準的な体格のモデル³⁾を活用し、妥当性を検証したが、実用化に向けては以下の課題が残されており、継続的な研究が必要である。

- 脊柱の初期形状や分節比率には個人差が存在するため、多様な体格・年齢層の被験者データを蓄積し、個別の特性が推定精度に及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。
- 椎体間角度の推定精度について、現状では実測値や先行研究をもとにパラメータを仮に設定した。実際の被験者データを取得し、パラメータの最適化を図る。また、将来的には体格や加齢、柔軟性に応じたパラメータの動的な調整を行うことでより高精度かつパーソナライズされた姿勢再現が可能になると期待される。
- 今後は入力をIMUセンサやビデオ画像からの姿勢推定等へ移行させ、椅子やベッドなどの製品使用時に非侵襲で脊柱の状態を可視化・評価が可能なシステムの構築を目指す。

参考文献

- 1) 杉野伸治他、矢状面レントゲン画像との比較によるスパイナルマウス の妥当性の検証、ヘルスプロモーション理学療法研究、Vol. 3、No. 3、pp. 123-127、2013.
- 2) 谷澤真他、成人脊柱変形症に対するスパイナルマウスを用いた脊柱矢状面アライメント評価の妥当性、理学療法—臨床・研究・教育、22、pp. 21-24、2015.
- 3) 藤巻吾朗、人間・生活者視点による人にやさしい製品開発 (第2報) 立位・座位姿勢での人体の3次元形状、岐阜県生活技術研究所研究報告、No. 10、pp. 8-10、2008.
- 4) Christophy M., et al., A Musculoskeletal model for the lumbar spine, Biomech Model Mechanobiol, 11, pp19-34, 2012.
- 5) Delp SL., et al., OpenSim: Open-source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 54, 11, pp. 1940-1950 2007.
- 6) Kapandji AI., 塩田悦仁 (訳) カラー版カパンジー機能解剖学 III. 脊柱・体幹・頭部、医歯薬出版株式会社、pp. 104-105、1986.