

ISSN 1344-896X

令和3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.24

2022

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

家具用曲げ木の製造現場におけるスマート化（第5報） 引張割れの防止 石原智佳・三井勝也	1
木材の質感を伝達する製品提案手法の開発と家具製品への応用（第2報） 3Dスキャンとリバーズエンジニアリングによる実製品の3DCG作成の事例研究 山口穂高・藤巻吾朗	4
木材の質感を伝達する製品提案手法の開発と家具製品への応用（第3報） 3Dモデルの粗雑さと視覚的な違和感の関係 山口穂高・藤巻吾朗	10
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） 新たな家具設計手法の提案 成瀬哲哉	17
介護ニーズに基づくポジショニング用品の開発（第3報） 寝返り動作時におけるマットレス沈み込み量の計測 山口穂高・藤巻吾朗・関範雄・宮川成門・吉田宏昭	22
介護ニーズに基づくポジショニング用品の開発（第4報） 関範雄・宮川成門・藤巻吾朗・山口穂高	26
木材乾燥における芳香蒸留水の有用成分利用（第2報） ヒノキ芳香蒸留水抽出物の抗かび活性 伊藤国億	32
木材の触覚特性の数値化と手触り感に関する指針の提案（第3報） 木材の触感評価に関する物理指標の検討 藤巻吾朗・山口穂高・吉田宏昭	38
木材の触覚特性の数値化と手触り感に関する指針の提案（第4報） 視覚情報が木材の触感および印象評価に与える影響 藤巻吾朗・山口穂高・山崎直樹・吉田宏昭	43

家具製造現場におけるトレーサビリティ基盤技術の開発（第3報） 棚卸支援Webアプリケーションへの機械学習による画像認識の適用 森茂智彦・生駒晃大・山口穂高・藤巻吾朗	・・・・・・・・ 49
国産早生樹種の用材利用に向けた材質・加工特性の解明（第3報） 国産早生樹種の利用用途の提案 村田明宏・長谷川良一・沼澤洋子・清家麻奈未	・・・・・・・・ 55
超撥水処理による木材の耐水性向上（第2報） シランカップリング処理木材の耐候性 三井勝也	・・・・・・・・ 61
幅接ぎ板の反り変形抑制技術の開発に関する研究（第2報） 年輪に着目した幅はぎ構成手法の妥当性確認 今西祐志・沼澤洋子・清家麻奈未	・・・・・・・・ 65
 試験研究部 技術レポート	
家具製造現場におけるトレーサビリティ基盤技術の開発（第4報） Excel VBAを用いた生産現場の改善事例 森茂智彦	・・・・・・・・ 69

家具用曲げ木の製造現場におけるスマート化（第5報） 引張割れの防止

石原智佳*, 三井勝也*

Approaches to making smart of the wood bending process (V) Prevention of tensile failure during bending of wood

ISHIHARA Chika*, MITSUI Katsuya*

曲げ木の製造現場において利用が可能になった「曲げ木の可否判定プログラム」は、主として曲げ木の外周部に生じやすい引張割れを防止するために、部材厚さ、曲げ半径、帯鉄条件の相互関係の設定を簡易にする。本プログラムで重要な材条件が、蒸煮処理直後の静的曲げヤング率である。非破壊式でかつ短時間で測定可能な値であり、静的曲げヤング率と相関性がある動的ヤング率は、プログラムへの利用が期待される。動的振動試験の種類別に得られる各種動的ヤング率から、本プログラムに適するものを検討した。

1. 緒言

岐阜県飛騨地域は木製家具の産地であり、「曲げ木」と呼ばれる、無垢材を曲げ加工した部材を用いる特徴がある。曲げ木は1920年頃に飛騨地域に伝わった伝統技術である。木材は水分を多く含んだ高温の状態になると、軟化して曲がりやすくなる性質を持ち、この特性を活かした加工法である。軟化処理としては、水蒸気で蒸す蒸煮法が一般的である。蒸煮後、帯鉄と呼ばれる金属型にはめて曲げ、乾燥により形状を固定する。

樹種により、割れ・折れ・しわといった不良現象が生じるなど、曲げ木への適性が異なる。そこで一連の研究¹⁾⁻⁴⁾において、曲げ性能を比較するなど、加工精度向上に向けた検討を行ってきた。

明らかになったこととして、曲げ木の外周側が元の長さより伸びることが挙げられる。帯鉄を沿わせて曲げることで、木材には圧縮応力のみが作用し、伸びないと思われていた。そこで、伸びを引張限界以下に抑制できれば成功率が高まることを見出し、引張割れによる不良を低減できる「曲げ木の可否判定プログラム」³⁾を作成した。

本プログラムでは、木材の軟化程度、引張限界、帯鉄に用いる金属の特性といった情報が必要である。木材の軟化の程度は温度及び含水率と相関性

が高い静的曲げ弾性率を指標に、引張限界は破壊ひずみを指標にした。

昨年度から行っている、非破壊式振動試験による木材の動的ヤング率の算出についても引き続き検討し、可否判定プログラムでの利用を目指した。

2. 曲げ木の可否判定プログラム

木材に帯鉄を沿わせて曲げる際、一体化させることが重要であるが、両者の間に隙間ができてしまうこともある。木材の引張限界ひずみを ε_t 、曲げヤング率を E_1 、厚さを h_1 とし、帯鉄の金属のヤング率を E_2 、厚さを h_2 、幅はいずれも等しいとすると、式(1)が成り立つ条件で、引張割れの発生頻度が減少することが確認された。

$$(1 - \varepsilon_t)E_1h_1^2 - (1 + \varepsilon_t)E_2h_2^2 - 2\varepsilon_t(rE_1h_1 + rE_2h_2 + E_2h_2h_1) < 0 \quad (1)$$

また、3層の場合は、各層のヤング率と厚さ及び木材の ε_t を用い、式(2)が成り立つ必要がある。

$$(1 - \varepsilon_t)E_1h_1^2 - (1 + \varepsilon_t)E_2h_2^2 - (1 + \varepsilon_t)E_3h_3^2 - 2(1 + \varepsilon_t)E_3h_3h_2 - 2\varepsilon_t \left(\begin{matrix} rE_1h_1 + rE_2h_2 + rE_3h_3 \\ + E_2h_2h_1 + E_3h_3h_1 \end{matrix} \right) < 0 \quad (2)$$

* 試験研究部

3. 木材の曲げヤング率

3.1 動的振動試験

これまでの研究では、曲げ試験により、静的曲げヤング率 E_b を算出していたが、破壊試験であるため、曲げ木の可否判定プログラムの式に代入する値が代表値であることを懸念していた。そこで、静的値 E_b と相関性がある動的ヤング率への置換を検討してきた⁴⁾。昨年度は、縦振動法から得られる動的縦ヤング率 E_l と E_b との相関性の検討を行った。 E_l は E_b よりも5~10%程度大きな値を示すと既往の報告⁵⁾であったが、蒸煮処理した材ではさらに大きな差が見られた。これには、材内で生じる水分傾斜が影響していると考えられる。

動的ヤング率にはもう一つ、曲げたわみ振動試験から得られる見かけの動的曲げヤング率 E_g がある。材内が均質であれば、二つの動的ヤング率 E_l と E_g は等しくなることが想定される。外崎ら⁶⁾によると、スギ正角心持ち材(11×11×304cm)の気乾材では両値の比(E_g/E_l)が1.1を超えないこと、また未乾燥材で内層が含水率20%を超える場合、上述の比が1.1を超えることが報告されている。

縦振動は断面全体がほぼ同じ歪みで振動し、断面内の平均的性質がヤング率に現れ、また、縦方向のヤング率であるため、梁せい方向のヤング率より高くなる。一方、曲げたわみ振動では振動面の上下で大きく歪み、中立軸付近で歪みが小さいために試験体の上下部分の性質が影響するといわれており、せん断変形の影響を含み、静的曲げヤング率値に、本質的に近い数値であると考えられている⁶⁾。

3.2 曲げたわみ振動法

曲げたわみ振動試験の様子を図1に示す。試験体は、たわみ1次の節となる試験体の両端から長さの0.224倍の位置にて糸で支持する両端自由ばりとした。試験体中央の下部にマイクロホン(1/2インチエレクトレットマイクロホン UC-59 リオン製)を置き、上部を小型の木製バチで軽く打撃する。マイクロホンで収集した音をFFTアナライザ(多機能計測システムSA-A1 リオン製)で計測し、共振周波数を特定した。動的曲げヤング率 E_g は式(3)により算出する。

$$E_g = \frac{48\pi^2 l^4 \rho f_0^2}{m_n^4 h^2 \times 10^9} \quad [\text{GPa}] \quad \dots (3)$$

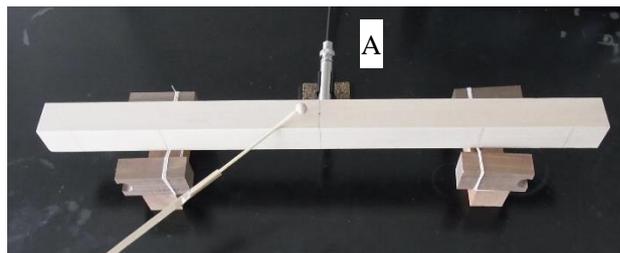


図1 曲げたわみ振動試験の様子
A: マイクロホン

表1 FFTアナライザの設定条件

測定設定	
入力レンジ	0.1V
周波数レンジ	1kHz
分析点数	2048
窓関数	レクタンギュラ
トリガ設定	
ソース	時間波形
スロープ	+
ポジション	150
波形レベル	6.1%

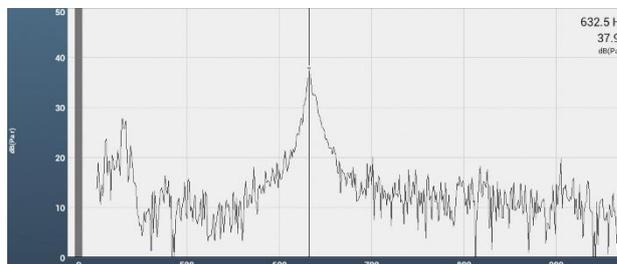


図2 曲げたわみ振動試験から得られるパワースペクトルの一例

ここで、 l は試験体長さ(mm)、 ρ は試験体密度(g/mm^3)、 f_0 は共振周波数(Hz)、 m_n はnモードの m 値であり、両端自由1次振動では4.730となる。また、 h は材の厚さである。

また、曲げたわみ振動試験時のFFTアナライザの設定条件を表1に示す。得られるパワースペクトルの一例を図2に示す。最もピーク値が高い周波数を共振周波数とする。

4. 結果

4.1 振動試験結果の比較

ブナ材において、木目方向と試験体形状が曲げ

たわみ及び縦振動試験に及ぼす影響を検討した。打撃面を柎目面と板目面とし、試験体の幅と厚さは15mmと30mmから組み合わせ、長さはいずれも260mmとした。結果を表2に示す。動的曲げヤング率 E_g に関しては、幅と厚さが異なる寸法の場合、木目に因らず、幅が短い材のほうが低い値を示す。また、縦振動ヤング率 E_l では、いずれも同じ値を示した。正角材の場合は、柎目面を打撃する場合に、やや低い値を示した。本研究では、二種類の動的ヤング率値がやや異なり、 E_l 値のほうが高くなる傾向にあった。上述の研究6)では、供試材が乾燥過程にある木材であり、表層ほど低含水率となっている材料に関する測定値であったのに対し、本研究では蒸すことを想定した吸水処理により、表層ほど高含水率となっている材料であったため、両ヤング率の大小の関係が逆になったことが考えられる。両者の動的ヤング率の特性を活かして、水分傾斜の程度とヤング率比の関係を明らかにすることで、曲げ性の評価での利用を目指す。

次に、曲げたわみ振動法による動的曲げヤング率に及ぼす含水率と温度の影響について検討した。結果を表3に示す。なお、試験体の樹種はブナ、寸

表2 ブナ 振動試験結果

気乾状態・打撃面別 (長さ260mm)

密度 (g/cm ³)	幅×厚 (mm)	打撃面	動的曲げ ヤング率 (GPa)	縦振動 ヤング率 (GPa)
0.62	30×15	柎目	12.5	13.9
	15×30	板目	11.6	13.9
0.60	15×30	柎目	9.9	13.4
	30×15	板目	11.6	13.4
0.77	30×30	柎目	13.3	18.0
		板目	14.0	18.0

表3 動的曲げヤング率と含水率・温度の関係

ブナ材：30×30×480mm (繊維方向)

含水率 (%)	動的曲げヤング率 (GPa)	温度
10	11.7	常温
14	11.1	常温
20	10.6	常温
20	8.7	90℃

法は30×30×480mm (繊維方向)、木目は追柎材とした。常温では含水率10~20%範囲では、約1GPa変化する。このことは既往の研究7)の報告と一致する。この20%含水率の試験体を、水分が変化しないようにアルミホイルで包み、100℃のオーブン内に置き、材温を95℃程度に上げたところ、ヤング率が低下したことから、高含水率・高温状態では、動的曲げヤング率も静的曲げヤング率同様に低下するといえる。

5. まとめ

木材の曲げ木加工において多くの不良率を占める引張割れについては、引張側の伸び変形を引張限界以下に抑制することで大幅に抑制できることが判明した。曲げ半径に応じた引張ひずみを低減させる役割が帯鉄にあり、その最適な条件も含め、相互の関係を数値的に導くための「曲げ木の可否判定プログラム」を提案した。

本プログラムにおいて、木材の曲げ性能を指標化できる静的曲げヤング率が重要な因子である。この数値と相関があり、かつ簡易的に測定できる動的ヤング率をプログラムの数値として利用を目指す。

参考文献

- 1) 石原智佳他：家具用曲げ木の製造現場におけるスマート化, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 20, pp. 9-11, 2018.
- 2) 石原智佳他：家具用曲げ木の製造現場におけるスマート化, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 21, pp. 9-11, 2019.
- 3) 石原智佳他：家具用曲げ木の製造現場におけるスマート化, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 22, pp. 8-11, 2020.
- 4) 石原智佳他：家具用曲げ木の製造現場におけるスマート化, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 23, pp. 1-5, 2021.
- 5) 久保島吉貴他：IV. 動的弾性係数の非破壊測定方法, 構造用木材の強度試験マニュアル, (公財)日本住宅・木材技術センター, 2011, pp. 59-63
- 6) 外崎真理雄他：縦およびたわみ振動試験による材内不均質性の評価 (第1報), 木材学会誌, 46 (1), pp. 20-24, 2000.
- 7) 古田裕三：第3章木材の力学的性質 第3節動的粘弾性, 木材科学講座3 木材の物理, 石丸優ら編, 海青社, 2017, p. 121.

木材の質感を伝達する製品提案手法の開発と家具製品への応用（第2報） 3Dスキャンとリバースエンジニアリングによる 実製品の3DCG作成の事例研究

山口穂高*, 藤巻吾朗*

Development of Communication Method Presenting Wooden Visual Textures
and Application for Furniture (II)
Case Study for Creating 3DCGs from Actual Products via 3D Scanning and Reverse Engineering

YAMAGUCHI Hodaka*, FUJIMAKI Goroh*

近年は家具製品のオンライン販売が盛んになっており、製品の質感を適切に伝達する手法の開発が望まれている。ここでは、製品の形状を分かりやすく伝える手段として、木製ダイニングチェアの3Dスキャンとリバースエンジニアリングから3DCGを得る工程を検討した。3Dモデルは、フレーム部に実際の木目模様を貼り付けたモデルとフレーム部を木材の繊維方向ごとに分割したモデルの2種類を作成し、クッション部の色違い品と木部の樹種違い品を仮想した3DCGを描画した。また、全天球カメラによって撮影した風景画像を光源とした写実的な3DCGとより見栄えを意識してイメージスタイルを適用した3DCGの作例を確認した。

1. 緒言

近年は木製家具製品分野においてもインターネット販売に代表されるECへの対応が必須であるが、その販売プロセスにおいては実製品を直接確認することがないので、製品の「イメージ」を消費者に適切に伝達することが求められる。その「イメージ」をデジタル情報で伝達する手段は、旧来は文字、写真、動画が用いられてきたが、近年は製品の3Dモデルを活用した三次元コンピューターグラフィックス（3DCG）が用いられる機会も増えている。3DCGを用いるメリットの一つは、実物が存在しなくてもその見た目を仮想できる点である。これにより、例えば、実際には試作していない色違い品を仮想する、仮想室内に自由に家具を配置してそのコーディネートを確認する、細部や内部を見せる等の視覚的な訴求資料を作成することが可能となる。また、本研究で着目している木製品の質感伝達においても、製品の形状を分かりやすく伝えるという面で、3DCGの活用は有効だと考えられる。

このような3DCGのメリットを享受するためには、その元となる3Dモデルが必要であり、通常は3DCADソフトやモデリングソフトを用いて作成しなければならない。しかし、木製家具の形状には職人が直接手で削り出した有機的な形状が含まれていることが多く、このような形状を忠実にモデリングするには相当なスキルが求められる。

そこで本研究では、実物形状を三次元座標データとして測定する3Dスキャナとそのスキャンデータから汎用3Dモデルを得るリバースエンジニアリングの技術を活用して、実際の木製家具製品から3DCG用のモデルを取得して、その3DCGを描画する工程を検討したので報告する。

2. ワークフローの概要

本研究では、木部とクッション部からなる肘付きダイニングチェア（株式会社シラカワ、Raptアームチェア、W590×D560×H890mm、布張地）をサンプルとした。まず、この製品の3Dスキャンとリバースエンジニアリングを行い、できるだけ実物の形状を維持したまま、必要な修正を加えた3Dモデルを

* 試験研究部

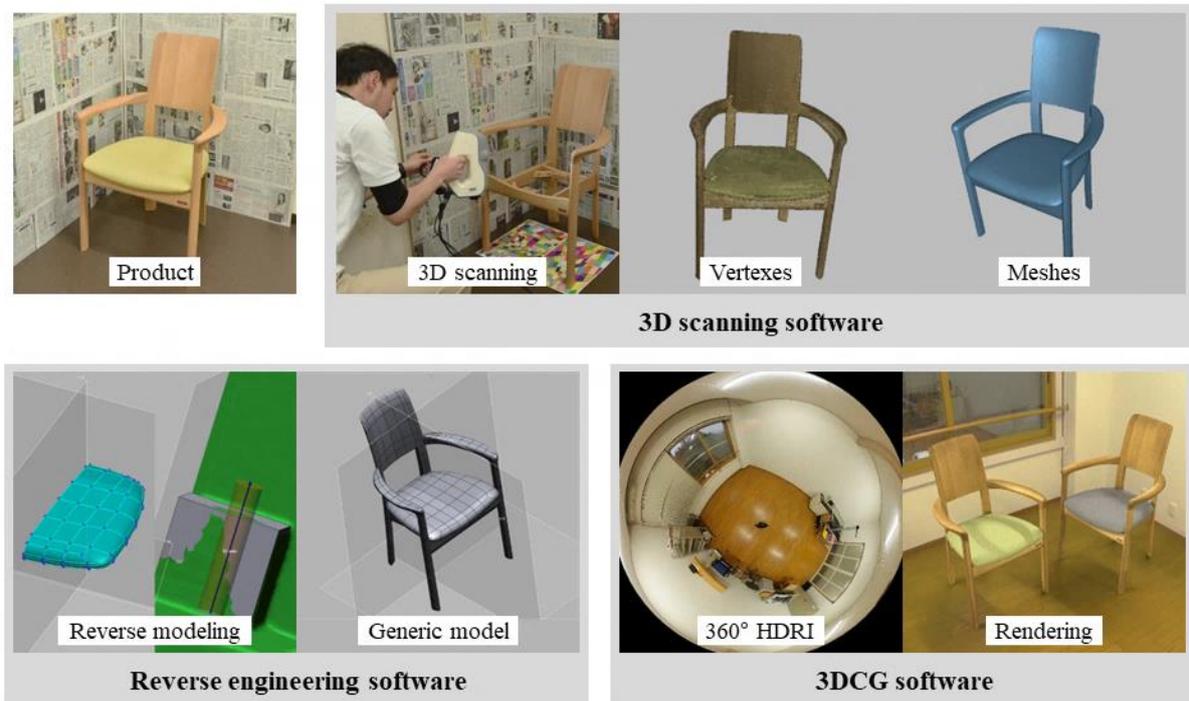


図1 ワークフローの概要

作成した。その後、3DCGソフト内で得られたモデルと光源を設定することで3DCGを描画した。その際、実室内環境を仮想できるように全天球カメラによって撮影したハイダイナミックレンジ画像 (HDRI) を用いたImage Based Lighting (IBL) を行った¹⁾。本研究のワークフローの概要を図1に、用いた機材とその主な仕様を表1に示す。

本研究ではリバースエンジニアリングによって以下2種類のモデルを得た。一つは、クッション部とフレーム部を分割し、フレーム部には実物の木目模様のテクスチャを適用したモデル (以下、re-Meshモデル) である。このモデルでは、クッション部の色違い品の確認とIBLおよびスタイル調整を適用した3DCGの見栄えの確認を行った。もう一方は、フレーム部が木材の繊維方向ごとに分割されたモデル (以下、re-CADモデル) である。Re-CADモデルでは、実際の木目のテクスチャは適用せず、3DCGソフト上で異なるマテリアルを適用することで、樹種違い品の仮想を確認した。

表1 使用機材と主な仕様

	Equipment	Spec.
3Dscanner	Artec Eva	3D resolution: 0.2mm
Modeler	Geomagic Design X 2020	Reverse modeling software
Renderer	Keyshot 10	Photon mapping method
360 camera	Ricoh Theta Z1	Resolution: 6720×3360
Image editor	Adobe Photoshop CC	HDR rendering

3. 3Dモデルの作成

3.1 3Dスキャンの方法

ハンディタイプのカメラ式3Dスキャナによって、フルカラーテクスチャイメージとともに三次元座標を取得した。スキャンはデータの欠損を抑えるために表裏四方から数回に分けて行った。その後、対象物とともに写り込んだ壁や床などの不要な点を削除し、複数のスキャンデータ同士を統合して単一のメッシュ形状を得た。得られたメッシュデータにはスムージングとメッシュの間引きを施し、テクスチャイメージを貼り付けたOBJ形式 (以下、scan-Meshモデル) に変換した。scan-Meshモデルのポリゴン数は約60万個、ポリゴンの平均辺長は1.97mmであった。また、テクスチャイメージはJPGファイル形式で8,192×8,192 pxの解像度を有した。

3.2 リバースエンジニアリングの方法

3Dスキャンによって得られたメッシュデータは対象物を一塊として表現するモデルである。したがって、フレーム部、クッション部といった部材の判別情報は保持しておらず、スキャン後のメッシュデータそのままでは部材ごとに異なるマテリアルを適用することはできない。また、カメラ式の3Dスキャナの特長上、構成要素の影になる部分は撮影できず、メッシュデータに欠損が生じたままと

なる。加えて、直線、真円、平面などといった幾何情報も保持していない。そこで、以下の方針に従ってリバースエンジニアリングを行い、より汎用性の高いモデルの構築を試みた。

- (1) メッシュデータを読み込み、座標を定める
- (2) 中心面で左右に分割する（基準：左半身）
- (3) フレーム部とクッション部など、モデルを部材ごとに分割する
- (4) 幾何的な部材は数値制御によってソリッドデータとしてモデリングする
- (5) 有機的な部材はメッシュデータの形状を自由曲面要素にフィットさせてソリッドデータとしてモデリングする
- (6) 中心面でミラーリングを行う
 - フレーム部を繊維方向ごとに分割し、IGES形式で書き出す（re-CADモデル）
- (7) フレーム部一式とクッション部をそれぞれメッシュデータへ変換する
- (8) フレーム部に元メッシュデータのテクスチャイメージを貼り付ける
 - OBJ形式で書き出す（re-Meshモデル）

上記により、椅子を構成する各部材が分離され、左右対称な3Dモデルが作成された。re-Meshモデルにおけるフレーム部のポリゴン数は約24万個、平均辺長は3.20mmとなり、クッション部のポリゴン数は約20万個、平均辺長は2.51mmとなった。

3.3 形状再現度の確認

形状の再現度は2つの3Dモデルの偏差によって評価することができる。図2にscan-Meshモデルとre-CADモデルの法線方向の偏差を示す。偏差の全体的な程度を表すRMSの値は0.619mmであった。以下に局所的な曲面形状と大局的な形態に分けて形状再現度を確認する。

まず、椅子の左半身に着目して局所的な曲面の形状再現度を考察する。図2の左半身の背もたれおよびアームにおいては、偏差は0.2mmほど（水色～黄色の範囲内）であり、本研究で作成したモデルは各部材の有機的な曲面を忠実に表現できていると言える。これは、メッシュデータの形状に自由曲面をフィットさせる手法（3.2手順(5)）を多用したためであり、実物に忠実な曲面を本手法によって簡易に得ることが可能であることが示された。

一方で、大局的な形態の形状再現度に着目すると、図2のモデルの右半身において、脚やアームの先端、背もたれの先端などの位置において偏差が大きいことが確認される。この偏差は、3.2手順(6)のミラーリングによって生じたと考えられ、初期

座標の定義の精度に依存すると言える。この偏差を抑えるためには、3.2手順(1)の座標の定義をより厳密に行うことが有効であるが、リバースエンジニアリングにおける座標の定義は、製品に含まれる幾何的な形状要素を推測しながら進めるため、製品の形状が有機的になるほど困難となる。そのため、形状の対称性を求めない場合にはミラーリングや周期的な複製によるモデリングを行わない方がより原形に忠実なモデルが得られることが示唆される。その一方で、クッション表面の曲線や木製椅子の脚先端は多少の外力や温湿度などの環境的要因で変形する可能性があり、設計時に幾何形状が意図されている形状であっても、実際には歪んだ状態でスキャンされてしまうことも想定される。このような場合は、ミラーリングなどの数値的および幾何的なモデリング手法を用いる方が本来意図した形状に近いモデルを作ることができる。

以上より、形状再現度は対象物の形状的特徴とモデリングの手法の組み合わせによって異なることが示唆された。まず、幾何形状要素を本来意図した形状で再現するにはミラーリングなどの数値的なモデリング手法を活用する方がよい。反対に有機的な形状要素の場合には、自由曲面をフィットさせる手法が簡易かつ有効である。ただし、自由曲面を豊富に含むモデルは容量が大きくなるというデメリットも存在する。したがって、モデリングの際には、対称形状の特徴とモデルの使用目的に応じて求める形状再現度を柔軟に見直し、適切な手

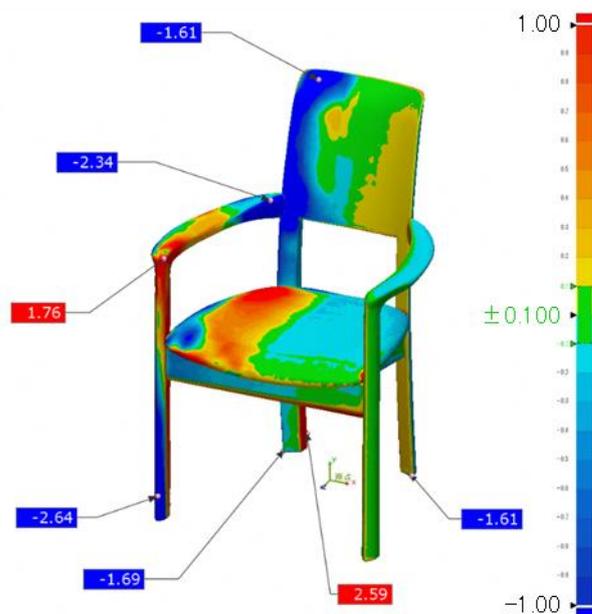


図2 scan-Meshモデルとre-CADモデルの形状比較（法線方向の偏差(mm)をカラーマップで表示）

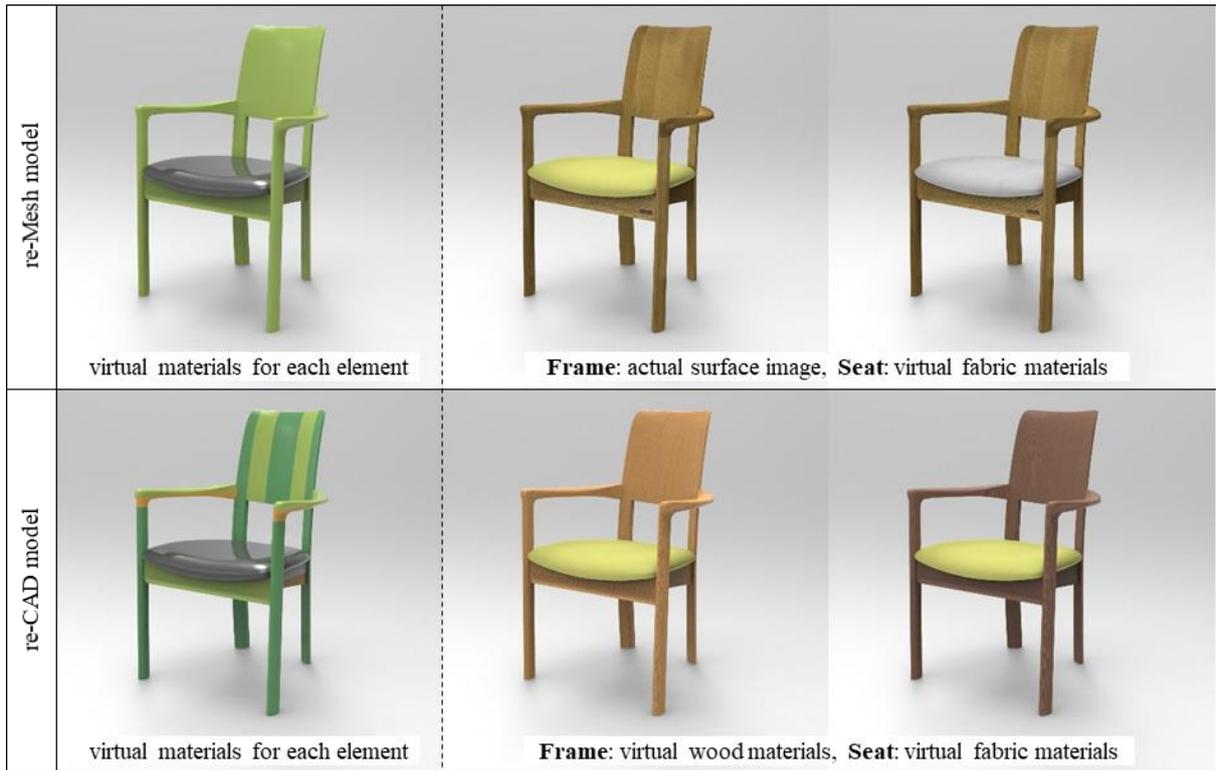


図3 汎用照明環境で出力された3DCG
 (上：実際の木目パターンを適用したre-Meshモデル、下：木材マテリアルを仮想したre-CADモデル)



図4 IBLを用いた3DCG
 (3Dモデルは図3におけるre-Meshモデル)

法を選択する必要があると言える。本研究では、形状の対称性を重視してミラーリングを行ったモデルを後の3DCGの描画に用いた。

4. ライティング環境用HDRIの撮影

近年の3DCGソフトでは、実環境の写真をCG上のライティングとして使用することができるIBLの機能が備わっている。この機能により、3Dモデルの表面に周辺環境が写り込んだCGが描画されるように、より現実世界に近いライティングが可能となる。なお、その際はより広いダイナミックレンジを持つHDRIが用いられることが一般的である。

本研究では、全天球カメラのブラケット撮影機能を用いて実環境の撮影をし、得られた露出の異なる複数枚の画像を画像編集ソフトにてHDR合成を行うことで、IBL用のHDRIを得た²⁾。

5. 3DCGの描画

5.1 色違い品および樹種違い品の描画

3DCGソフト内の汎用照明環境に得られた2種類のモデルを読み込み、それぞれにマテリアルを適用することでクッション部の色違い品や樹種違い品の見た目を確認した。図3に出力された3DCGを示す。色違い品の描画にはre-Meshモデルを用い、フレーム部には3Dスキャンで得られた実際の木目のテクスチャイメージ、クッション部には3DCGソフト内の織物マテリアル³⁾をそれぞれ適用した。樹種違い品の描画にはre-CADモデルを用い、3DCGソフト内の木材マテリアル³⁾を各部材に適用した。この際、仮想される木目の繊維方向が実際の各部材の繊維方向と合うように方向を調整した。以上一連の処理により、図3の通り、色違い品と樹種違い品の描画は可能であることが確認された。

ここで、木製家具の見た目の質感においては木目模様の表現が重要であるために、得られた3DCGの木目模様の妥当性について述べる。実物よりスキャンされたテクスチャを用いる場合（図3上段）では、その木目模様は現実のものであるが、画像の精細さが3DCGの仕上がりに直接影響する。また、樹種違い品を描画することはできない。一方で、仮想の木材マテリアルを適用する場合（図3下段）はその色や模様を自由に設定できるというメリットがある。しかし、木目模様を仮想する技術⁴⁻⁶⁾においては、その表現力は使用する手法と3DCGソフトに依存する。また、図3のフレーム部は、木取りの方向は部材ごとに調整したにもかかわらず、色味は

全ての部材で同値を用いてしまったために、全体に単色な見た目に仕上がっている。よりリアルな3DCGを得るには、部材ごとの色柄のバラつきまでを考慮する必要があると言える。以上より、実際の木目画像を流用する場合と木材マテリアルを仮想する場合とではそれぞれ長所短所があることが示唆され、これらの適切な選択が求められる。

なお、得られた3DCGの見た目が観察者に対してどの程度のリアルさや妥当な感じを与えるのはここでは検討できていないため、今後の課題である。

5.2 実周辺環境の仮想

より写実的な画像の仕上がりを確認するために、4.で作成したIBL用のHDRIを読み込み、配置を適宜調整したうえで、レンダリングを行った。得られた3DCGを図4に示す。比較として、HDRIの撮影に用いた同じカメラで実写した実物の写真と同様のアングルで作成した3DCGを示す。

これらの比較より、ライティング環境の違いによって製品の見え方が異なる現象をある程度再現できていることが確認される。一方で、実写とCGの比較から、特に室内環境において床面への影の落ち方に差異が見られた。これを改善するためには、IBLを適用するHDRIと製品のサイズ関係やパース関係を厳密に調整する必要があり、今後の検討課題である。

5.3 カタログ写真の仮想

カタログなどのプロモーション用途への活用を見据え、より見栄えを意識した3DCGの仕上がりを確認した。椅子のフォトリアルなCG作成法⁷⁾を参考にライティングやイメージスタイルを適宜調整し



図5 イメージスタイルを調整した3DCGの作例

た画像の作例を図5に示す。なお、モデルは図3におけるre-Meshモデルを用いた。

6. まとめ

本研究では、木製ダイニングチェアの3Dスキャンから3DCGを作成するワークフローの事例研究を行い、以下を確認した。

- (1) 実物の3Dスキャンとリバースエンジニアリングをおこない、フレーム部の各部材とクッション部を分離した3Dモデルを得た。
- (2) モデルの形状再現度の結果から、有機的な曲面の再現は容易な一方で、座標の定義とデータ容量の削減には課題があることが分かった。
- (3) 得られた3Dモデルからクッション部の色違いとフレーム部の樹種違いを仮想した3DCGの描画が可能であることを確認した。
- (4) 実際の木目模様をそのまま3DCGに用いる場合には樹種違いの仮想が、木目模様を仮想する場合には個々の木材の色柄のバラつきがそれぞれ課題となることが分かった。
- (5) 実際の環境を撮影した全天球を光源に用いた写実的な3DCGを描画し、その見た目の違いを仮想した。
- (6) より見栄えを意識してライティングやイメージスタイルを調整した3DCGを描画した。

参考文献

- 1) 豊田敏裕：照明シミュレーションのための屋外光環境データ化技術（第1報），静岡県工業技術研究所研究報告，12，pp. 43-44，2019.
- 2) CGWORLD.jp: コスパ最高！ RICOH THETA Z1 を利用した ACES 対応 HDRI 制作フロー<1>撮影編，<https://cgworld.jp/feature/202006-cgw262t1-tips01.html>，2021年12月参照
- 3) Keyshot 10 Manual: Textures，<https://manual.keyshot.com/manual/textures/>，2021年12月参照
- 4) 桃井貞美，高寺政行：CG ソリッドテクスチャリングへの年輪形状ゆらぎ発生モデル導入によるリアリティの改善効果，日本感性工学会論文誌，14 (3)，pp. 351-359，2015.
- 5) 河合直樹：樹木内部の繊維配向性モデルと木目テクスチャ生成における質感表現，情報処理学会論文誌，41 (3)，pp. 586-593，2000.
- 6) 柴崎慧：デジタルスタイルデザインに関する研究，精密工学会誌，76 (11)，pp. 1293-1298，2010.
- 7) Sam Does Design: Keyshot Interior Realistic HDRI Lighting Tutorial，<https://www.youtube.com/watch?v=B7VCDH6Fpmc>，2021年12月参照

木材の質感を伝達する製品提案手法の開発と家具製品への応用（第3報） 3Dモデルの粗雑さと視覚的な違和感の関係

山口穂高*, 藤巻吾朗*

Development of Communication Method Presenting Wooden Visual Textures and Application for Furniture (III) Relationship between 3D model's Roughness and Visual Strangeness

YAMAGUCHI Hodaka*, FUJIMAKI Goroh*

近年は家具製品のオンライン販売が盛んになっており、木製品の質感を適切に伝達する手法の開発が望まれている。ここでは、木製品の見た目の質感のうち、3Dモデルを活用した製品形状の正確な伝達に着目し、3Dモデルの粗雑さと視覚的な違和感の関係を調査した。まず、家具の脚部材を想定した丸棒モデルと背もたれ部材を想定した曲面モデルを異なるポリゴン数で表現し、その表面のディスプレイ上でのなめらかさを被験者に評価させた。続いて、実際のダイニングチェアの3Dモデルを異なるポリゴン数とスムージング強度で作成し、その見た目の違和感を実物の写真と比較するウェブアンケートによって調査した。これらの実験結果より、表現したい形状に応じた3Dモデルのポリゴン辺長を算出した。

1. 緒言

製品の3Dモデルは、設計、製造の各プロセスだけでなく、製品提案プロセスにおいてもその利用価値は高い。3Dモデルは対象物の全体の形状情報を保有しているために、例えば、バーチャルリアリティ (VR) 空間にモデルを読み込んで共有することで、観察者が自由な視点から対象物を確認できるようになる。

なお、3DCGやVRに用いられる3Dモデルは、三次元座標を持つ各点を辺で結んで表現するメッシュデータが用いられることが一般的であることから、以降3Dモデルとはメッシュデータのことを指し、メッシュデータを構成するひとつひとつの三角形をポリゴンと表記する。

これまで、木製家具の製造工程の実情から、実木製家具の3Dスキャンデータより3Dモデルを取得する手法を検討しているが、得られたモデルをVR等の他ソフトウェアに読み込む際には、そのデータ容量がしばしば課題となる。3Dモデルのデータ容量は形状を表現するポリゴン数と比例関係にあるため、より軽量なモデルを得るためには、基本的に

はポリゴン数を削減すればよい^{1,2)}。一方で、モデルのポリゴン数が少ないと反対にポリゴンの辺長は長くなり、複数の直線で曲線を近似するように、表現する形状が粗雑になる。そのため、3Dモデルの作成者は形状をどの程度まで粗雑にしてよいのかを判断する必要がある。

3Dモデルを製品提案プロセスのようなビジュアル用途で用いる場合は、その粗雑さの適値評価、すなわちコントラストの判断は人の知覚に基づくべきである。人のコントラスト感度は空間周波数によって異なることが知られており³⁾、領域間のコントラストはその明暗の差が小さいほど、また、同じ明暗差でも領域のサイズが小さいほど知覚できなくなっていく。この特性を利用して、Hoppe⁴⁾は仮想空間内で遠くに配置される対象ほどメッシュを粗くする手法を提案し、Naderら⁵⁾はコントラスト感度曲線に応じたメッシュの適応的分割手法を提案している。

上記を踏まえ、我々は木製家具の3Dモデルのデータ容量の削減に際し、ポリゴン間のコントラストと視覚的な違和感の関係性に着目した。なお、コントラスト感度を支配する2変数のうち、明暗の差は様々なレンダリング条件に影響を受けてコント

* 試験研究部

ロールが困難なため、ここでは特にポリゴンの辺長を変数として扱った。

本研究の目的は、木製家具の3Dモデルにおいて、表現したい形状の表現力を保った軽量なモデルを得るために、そのポリゴン辺長の目安を算出することである。本研究は以下の2つの実験より3Dモデルの粗雑さと視覚的な違和感の関係を段階的に検討した。一方は、単純形状を用いたなめらかさの評価であり、曲面を再現する形状を数値的に制御した。もう一方は、実際の椅子形状を用いた違和感の評価であり、3Dスキャンによって得た椅子形状のポリゴン数とスムージング強度を制御した。

2. 単純形状を用いた表面のなめらかさの評価

2.1 概要

刺激の数値的な制御が可能な単純形状を対象として、ポリゴンの粗雑さが見た目の印象に与える影響を微視的に検討した。その際、形状には木製品の部材を想定した丸棒と曲面の2種類を採用し、主観評価の対象は曲面のなめらかさとした。

2.2 サンプル形状の作成

丸棒形状は木製家具の脚部材や面取り形状を想定して、底面の半径の異なる3種類を作成し、サンプル名をその半径に応じてR5、R10、R30とした。なお、棒の長さはいずれも200mmとした。曲面形状は、横長の背板部材を想定して、W500×H200mmの面を単一半径で曲げた形状とした。サンプル名は長辺方向に凹R250で曲げた形状をconcave250、短辺方向に凸R750で曲げた形状をconvex750、両者の複合形状をcomplexとした。これらの形状において、ポリゴン辺長をそれぞれ以下の手順で変更した。

丸棒形状においては、底面の円に内接する正多角形を3DCADソフト (Autodesk、Fusion360) によって複数製図し (15段階)、高さ200mmの多角柱を作成した。この際長さ方向には面を分割しなかったため、真円柱を意図している丸棒要素を内接する正多角柱で近似したこととなる。この丸棒形状におけるポリゴン辺長とは、底面の多角形の1辺の長さとして定義した。丸棒形状の各寸法を表1に示す。

曲面形状においては、3DCADソフトによって作成したサーフェース要素をターゲットポリゴン辺長0.5mmでメッシュ化したものを最も精細なモデルとし、その後、頂点の間引きコマンドを段階的に実施することでポリゴン数の異なる形状を取得した (8段階)。曲面形状におけるポリゴン辺長は含

表1 丸棒形状における近似多角形の寸法

Number of edges	Central angle	Edge length (mm)		
		R5	R10	R30
360	1/180 π	0.087	0.175	0.524
180	1/90 π	0.175	0.349	1.047
144	1/72 π	0.218	0.436	1.309
108	1/54 π	0.291	0.582	1.745
72	1/36 π	0.436	0.872	2.617
60	1/30 π	0.523	1.047	3.140
48	1/24 π	0.654	1.308	3.924
36	1/18 π	0.872	1.743	5.229
24	1/12 π	1.305	2.611	7.832
20	1/10 π	1.564	3.129	9.386
18	1/9 π	1.736	3.473	10.419
12	1/6 π	2.588	5.176	15.529
10	1/5 π	3.090	6.180	18.541
8	1/4 π	3.827	7.654	22.961
6	1/3 π	5.000	10.000	30.000

表2 曲面形状におけるポリゴン数と平均辺長

concave250		convex750		complex	
polygons	mean length (mm)	polygons	mean length (mm)	polygons	mean length (mm)
894,016	0.509	910,806	0.504	874,512	0.510
89,308	1.683	90,978	1.688	87,317	1.690
44,666	2.387	45,492	2.393	43,667	2.392
8,925	5.351	9,102	5.340	8,734	5.365
4,463	7.578	4,544	7.571	4,371	7.584
888	16.900	909	17.013	872	16.977
444	24.206	451	24.092	432	24.512
88	55.254	91	54.239	86	55.701

まれる全ポリゴンの平均辺長と定義した。表2に曲面形状のポリゴン数と平均辺長を示す。

2.3 刺激画像の作成

得られたモデルを3DCGソフト (Luxion、keyshot10) 内の同一照明環境に読み込み、仮想プラスチックマテリアル (屈折率1.5、単灰色) を適用した状態でレンダリングを行った。サンプルは画角の中央に横向きに設置し、向かって右側が若干拡大されるようにパースを付けた。サンプルのサイズは、後述するディスプレイでの表示において画像の中心部で実寸大となるように調整を行った。得られた画像の解像度は3,840×2,160 pxであった。得られた刺激画像を図1に例示する。

2.4 刺激画像の評価方法

ポリゴン辺長の閾値を算出するために、往復を許可した調整法6)によって各サンプルの曲面のなめらかさを実験参加者に評価させた。3.2より得ら

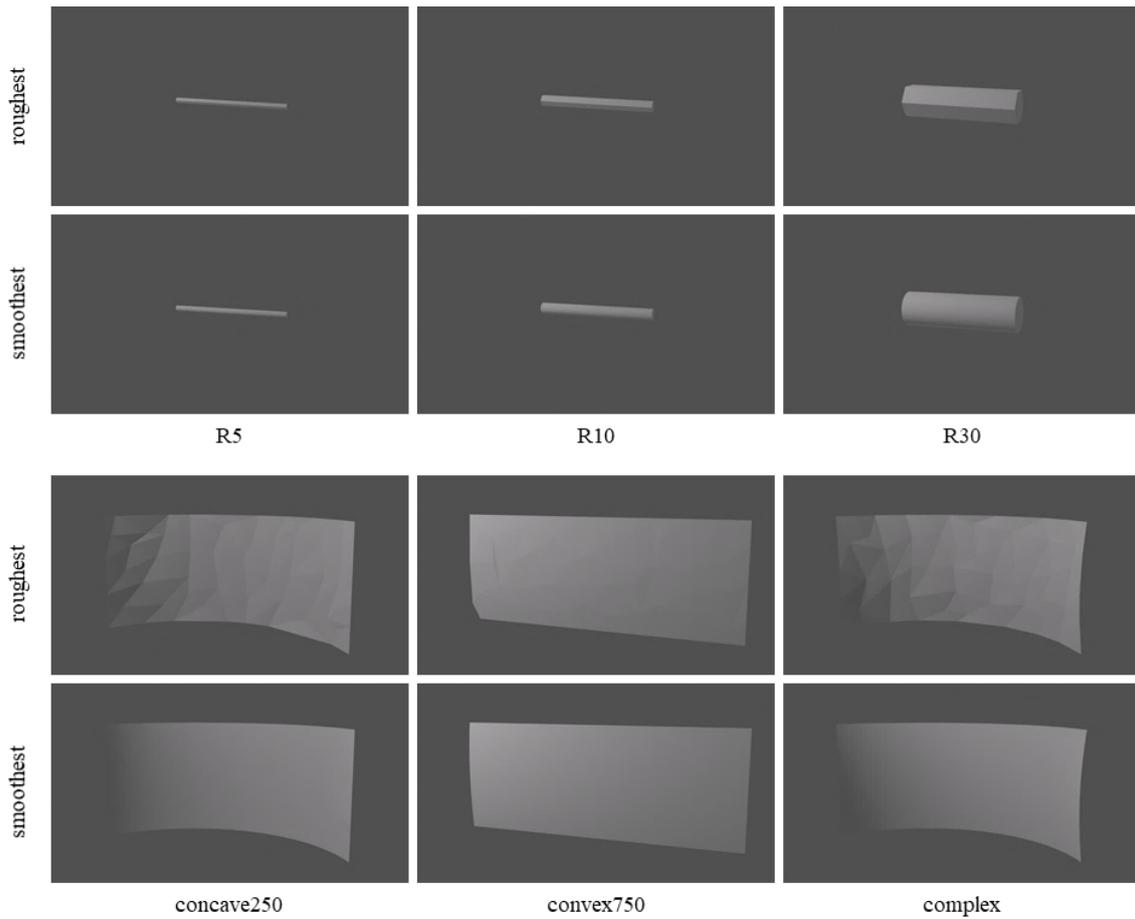


図1 単純形状で用いた刺激画像の例
 (上：丸棒形状、下：曲面形状、それぞれ最も粗い画像と最もなめらかな画像を例示)

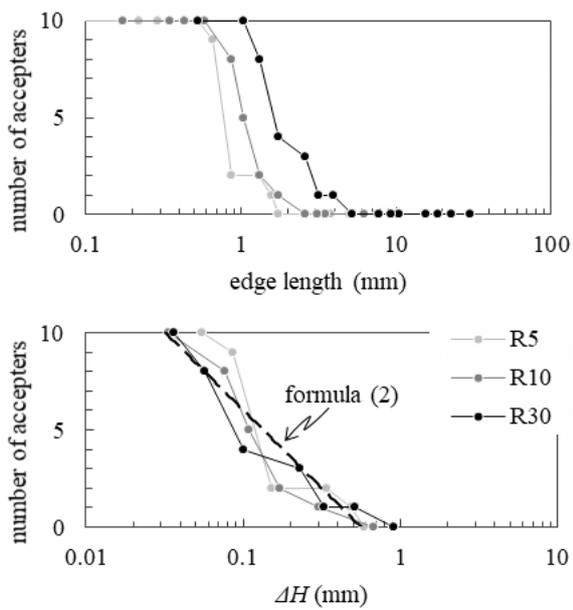


図2 丸棒形状の結果
 (下段の近似式は式(2)による)

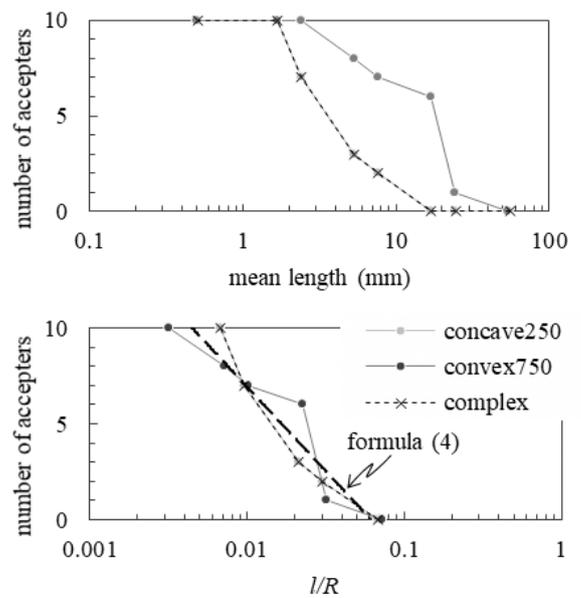


図3 曲面形状の結果
 (下段の近似式は式(4)による)

れた段階的な粗雑さを有する画像セットのうちの最も精細なものをディスプレイにフルスクリーン表示し、キーボード操作によって異なる粗雑さの画像へ自由に遷移できるようにした。参加者には、形状の表面のなめらかさが損なわれない限界の画像を探索するように教示し、参加者より申請された画像名を結果として記録した。ディスプレイには4K解像度を有する27インチ画面（I-O DATA、LCD-M4K271XDB）を用い、あご台によって回答者の額からディスプレイの中心間の距離を500mmに固定した。サンプルの評価はR30、R10、R5、convex、concave、complexの順に行った。参加者は0.7以上の視力（矯正視力含む）を有する成人10名であった。

2.5 結果に基づいたポリゴン辺長算出式の導出

丸棒形状について、なめらかさの許容者数の結果を図2に示す。この図の横軸には表1におけるポリゴン辺長と式(1)より算出された隣り合う頂点の高低差（ ΔH ）を示す。

$$\Delta H = l \sin(\theta) \quad (1)$$

l : edge length, θ : external angle = central angle

この結果より、ポリゴン辺長が長くなるほど、つまり、円柱を辺の数が少ない多角形で近似するほど、なめらかさの許容者数は低下する傾向が確認された。また、ポリゴン辺長となめらかさの関係は丸棒の半径によって異なっており、半径が小さな丸棒ほどなめらかさの判断は厳しくなった。一方で、 ΔH を用いることで丸棒の半径によるばらつきを小さくできることが確認されたことから、丸棒形状の判断は多角形の隣り合う頂点の高低差に着目して行われることが示唆される。

そこで ΔH に着目し、3種類の丸棒の結果のうち、それぞれで許容者数が最後に10となった結果から最初に0となった結果までを用いて対数関数による回帰分析を行った。

$$y = -3.49 \ln(\Delta H) - 2.00, R^2 = .876 \quad (2)$$

この式により、必要ななめらかさの許容度（0～10）に必要なディスプレイ上の見かけの ΔH を算出することが可能である。 ΔH が定まれば、表現したい丸棒の半径（適用推奨域：R5～R30）を式(1)に代入することで、3Dモデルに必要なポリゴン辺長の目安を算出することができる。実験では500mm離れた位置のディスプレイに実寸相当でサンプルを表示したが、表示倍率が違う場合は式(2)の ΔH を見

かけの値として扱い、見かけの ΔH を表示倍率（実寸比）で除することでモデル寸法における ΔH へ換算することができる。例えば、式(1)(2)を用いて半径20mmの丸棒を実寸比25%で表示する場合に、なめらかさの許容度が10（最大）必要であるとする、ポリゴン辺長の目安は2.268mmと計算され、この程度の辺長が満たされるポリゴン数まではモデルを軽量化してよいことと見積もれる。ディスプレイサイズと観察距離が異なる場合は、 ΔH を長さから視角に換算することで式(2)の適用が可能となるが、実用上はディスプレイサイズと観察距離を一意に定めることは困難である。本研究の実験条件（ディスプレイ幅約600mm、観察距離500mm）では水平方向の視角は約62°となることから、この範囲での実寸大よりも拡大して表示されることが想定されない限り、式(2)より算出されるポリゴン辺長は安全な見積もり量として扱ってよいと言える。

同様に、曲面形状の結果を図3に示す。この図の横軸には表2におけるポリゴン辺長と式(3)より算出されたポリゴン辺長と曲げ半径の比（ l/R ）を示す。

$$l/R = l_{\text{mean}} / BR \quad (3)$$

l_{mean} : mean length, BR : bending radius

この結果より、丸棒形状と同様に、ポリゴン辺長が長くなるほど、なめらかさの許容者数が低下することが確認できる。また、その関係は曲面の曲げ方によって異なっており、convex750よりもconcave250の方がなめらかさの判断が厳しい結果となった。曲げの方向が異なるサンプル間の比較ではあるが、丸棒の考察と同様に、曲率が小さいほど曲面のなめらかさの判断が敏感になることが示唆される。また、complexの結果はconcave250と重なっており、複数の曲率が含まれる曲面形状においては最も小さな曲率の表現がなめらかさの評価に支配的であることが示唆される。よって、complexにおける BR には250を用いて l/R を算出した。図3より、 l/R を用いることで曲げ半径による結果のバラつきが小さくなることが確認され、曲面形状におけるなめらかさはポリゴン辺長と曲げ半径の比に着目して判断されたことが示唆される。よって、 l/R を説明変数として、丸棒形状のそれと同様に回帰式を算出した。

$$y = -3.83 \ln(l/R) - 10.68, R^2 = .918 \quad (4)$$

この式によって所望のなめらかさの許容度に必要な l/R が算出でき、これはディスプレイサイズと

観察距離に寄らずに定まる。さらに式(3)に表現したい曲げ半径(適用推奨域: R250~R750)を代入することで必要なポリゴン辺長の平均値 I_{mean} が算出できる。また、表示倍率の違いは算出された I_{mean} に加味すればよい。例えば、式(3)(4)を用いて曲げ半径300mmの曲面形状を実寸比25%で表示して、必要ななめらかさの許容度を10(最大)とすると、辺長の目安は5.404mmと計算される。

丸棒形状と面形状の判断基準に対する違いは、丸棒形状において正多角柱の側面をポリゴンに分割していないためだと考えられる。表現したい3Dモデルに丸棒形状と面形状の両者が含まれる場合は、式(2)(4)より必要なポリゴン辺長をそれぞれ算出し、小さい方を必要なポリゴン辺長の目安とすることがより安全側の判断になると言える。

3. 実際の椅子の形状を用いた違和感の評価

3.1 概要

2章においては、単純形状において3Dモデルの粗雑さを微視的に評価したが、より実際的な形状を対象とした巨視的な評価も必要である。この章では、実際の木製ダイニングチェアの3Dスキャンデータを用いて、その形状の粗雑さを段階的に検討した。ここでは、3Dスキャンによって得たデータ処理の実状を考慮して、頂点の数を削減する単純化処理と測定ノイズを除去するために表面をなめらかにするスムージング処理の2つの強度を実験変数とした。主観評価の対象は、表面のなめらかさよりも高次な感覚であると仮定される全体的な違和感とし、ウェブアンケートを用いて実写画像と3DCG画像の比較実験を行った。

3.2 サンプルモデルの作成

肘付き木製ダイニングチェア(株式会社シラカワ、Raptアームチェア、W590×D560×H890mm、布張地)を3Dスキャナ(Artec 3D、EVAおよびArtec Studio 15)によって計測したメッシュデータをサンプルとし、ポリゴン数約13Mのオリジナルのモデル(13M(init.))に単純化処理とスムージング処理をそれぞれ段階的に施した。

頂点の間引きを行う処理(コマンド名:高速単純化⁷⁾)6段階と形状の特徴に応じて合理的な頂点削減を行う処理(コマンド名:メッシュ単純化⁷⁾)1段階の計7種類の単純化処理を施したモデルを作成した。なお、ここでの合理的な頂点削減とは、平坦な領域の点を積極的に間引く処理のことを指す。

3Dスキャンによって得られたメッシュデータは測定された微細な凹凸やノイズをそのまま含むため、スムージング処理によって表面をなめらかにする場合があるが、過度なスムージングはマクロな凹凸形状まで歪める。そのため、3Dスキャンデータの実用では、ポリゴン数の削減とは別にスムージング強度の検討が必要となる。本研究で使用したソフトウェアでは、スムージング処理(コマンド名:スムージング⁷⁾)はその繰り返し回数を指定する方式であったため、処理回数を7段階に変化させたモデルを作成した。また、変化の程度を一般化するために、検査ソフトウェア(Geomagic、Control

表3 椅子形状モデルの詳細

	name	polygons	mean length(mm)	RMS
	13M(init.)	13,074,749	0.521	reference
simplifying	6M	5,999,999	0.714	n. c.
	600K	599,999	2.315	
	250K	249,999	3.562	
	100K	100,000	5.340	
	75K	74,999	5.421	
	50K	50,000	5.504	
	230K(opt.)	231,116	3.394	
smoothing	sm. 1		0.501	0.007
	sm. 5		0.481	0.031
	sm. 10		0.479	0.056
	sm. 25	13,074,749	0.477	0.119
	sm. 50		0.474	0.206
	sm. 100		0.471	0.346
	sm. 500		0.458	1.135

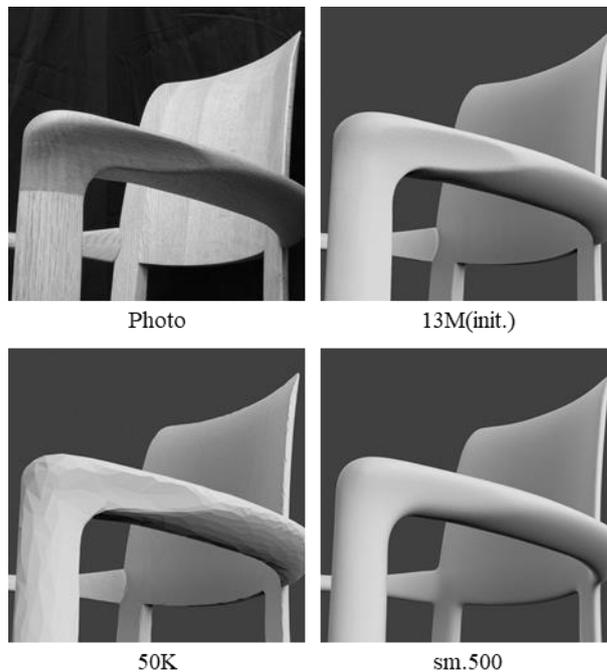


図4 椅子形状モデルのクローズアップ画像の例

X) を用いてそれぞれのモデルを13M(init.)と比較した形状変化量(RMS)を算出した。RMSは全頂点における法線方向の偏差の二乗平均平方根であり、法線方向の形状の違いを実寸単位で包括的に表す。以上より得られたモデルの詳細を表3に示す。

3.3 刺激画像の作成

デジタルカメラを用いて、サンプルの実物を撮影した。画角はサンプル右斜め上からの全景と左アーム部のクローズアップの2種類とした。また、色味の影響を除外するために、撮影された画像をモノクロ画像へ変換し、1,024×1,024の正方形にトリミングしたものを実写画像と定義した。

得られた3Dモデルを3DCGソフトウェア内に読み込み、実写と同様のアングルと明暗になるように画角とマテリアルを調整して2種類の画角のCG画像をモデルごとに描画した(解像度1,024×1,024px)。得られた画像を図4に例示する。

3.4 ウェブアンケートの方法

条件ごとに評価用の1ページには実写画像、3DCG、質問文の1セットを表示した。画像は、650×650の

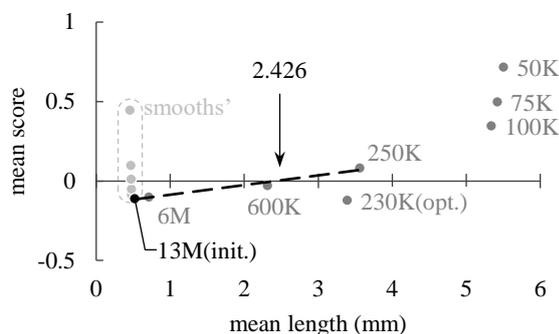


図5 平均ポリゴン辺長と平均評点の関係

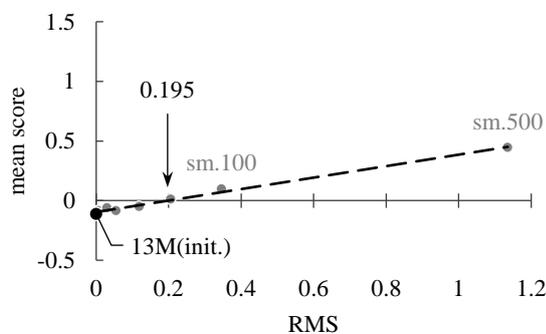


図6 RMSと平均評点の関係

サイズに縮小して、実写画像、3DCGの順に上下に並べて表示した。評価は、3DCGを実写画像と比較した際の「形状」の違和感のあり/なしとし、5段階尺度(-2:ない、-1:どちらかといえはない、0:どちらともいえない、1:どちらかといえはある、2:ある)で回答を収集した。解析の際は、尺度間を等間隔とみなして評価を-2から+2の評点に換算し、0点(どちらでもない)以下を違和感の許容範囲と定義した。

全30条件で作成した評価用のウェブページは、まず全景画像条件の15モデルをランダム順で呈示し、その後クローズアップ画像条件15モデルをランダム順で呈示した。

以上の設定を施したウェブアンケートは調査会社を介して2022年1月19日から21日の3日間に行った。回答は312名の成人より得られたが、全30条件で評点に差をつけなかった回答を除いた279件を有効回答として平均評点を算出した。なお、参加者が回答の際に用いたデバイスや画像の表示倍率は不明であり、ここではそれらの違いを考慮せずに包括的に求めた代表値による検討を行った。

3.5 結果と考察

全景写真においては、モデル間の評価の差が見られなかった。よって、本研究で用いたモデル粗雑さとスムージング強度の範囲は、一般消費者が画面で製品の全景を確認する際に形状の違和感を覚えるレベルまで達していなかったと言える。

クローズアップ写真において得られた平均評点とモデルのポリゴン辺長の関係を図5に示す。単純化処理を行ったサンプル群に着目すると、ポリゴン辺長が長くなるほど違和感が上昇している傾向があり、特に100Kより粗いモデルで違和感が急激に上昇した。そこで、これらと230K(opt.)を除いた13M(int.)から250Kの4点を用いて、直線回帰式から違和感の許容範囲を求めた結果、平均評点が0以下となる平均辺長の上限は2.426mmと計算された。よって、この値が実用を想定した際のポリゴン辺長の目安になると言える。また、合理的な頂点削減を行った230K(opt.)と単純な頂点削減を行った250Kを比べると、230K(opt.)の平均評点が低く、形状の特徴に基づいた頂点削減は効果的であった。一方で、合理的な頂点削減は頂点の間引きに比べて処理時間がかかる(本環境において13M(int.)から250Kは3分、13M(int.)から230K(opt.)は45分)ため、準備できるリソースとモデルの用途のバランスを考慮して手法を選択することが必要である。

スムージング処理を行ったモデル群の平均評点

とRMSの関係を図6に示す。この結果より、RMSが大きいほど違和感が線形に増加している傾向が観察される。オリジナルモデルを含む7点を直線回帰式にあてはめ、違和感の許容範囲を求めると、平均評点が0以下となるRMSの上限は0.195mmと計算された。以上の結果から、想定したモデルと刺激画像においては、モデルの法線方向の偏差が0.195mm程度以下となる範囲内であれば、スムージングを繰り返しても主観的な違和感は許容できるレベルに抑えられることが示唆される。なお、RMSとスムージング回数の関係はモデル形状に依存するため一意には定められないが、本条件では、表3より、RMS 0.195mmはスムージング回数50回程度と対応する。

4. まとめ

本研究では、木製家具製品を視覚的に表現する3Dモデルに最低限必要なポリゴン辺長の目安を算出することを目的として、3Dモデルの粗雑さと視覚的な違和感の関係を調査した。

丸棒と曲面の単純形状を用いた視認実験から、その表面のなめらかさを表現するのに最低限必要なポリゴン辺長を求めた。これにより、表現したい形状と想定する表示倍率が明確な場合に、必要ななめらかさを満たすポリゴン辺長の目安を算出することが可能となった。

次に、より実用場面を想定して、3Dスキャンによって得られた木製ダイニングチェアの3DCGと実写画像を比較した際の視覚的な違和感をウェブアンケートによって調査した。その結果、一般消費者が椅子形状をクローズアップして3DCGを観察する場合、違和感が出にくいポリゴン辺長の上限の目安は2.426mmであった。また、3Dスキャンデータのスムージングは、法線方向の偏差を0.195mm以内に抑えられる範囲で施されるべきであることが示され

た。

本研究で得られた結果は、特定のモデル形状と画像の呈示条件におけるものである。提案式は実験条件の範囲内に限って用いられることが望ましいことを申し添える。

参考文献

- 1) 仲林篤史：公開を目的とした3Dモデルのデータ量削減方法，デジタル技術による文化財の記録と利活用3，奈良文化財研究所研究報告，27，pp. 120-129，2021.
- 2) 金尚泰：リアルタイム 3DCG コンテンツ制作用ポリゴン削減ソフトウェアの開発，デザイン学研究作品集，21 (1)，pp. 32-37，2016.
- 3) 市原茂：空間周波数特性について，新編感覚・知覚心理学ハンドブック，大山正ら編，誠信書房，1994，pp. 560-561.
- 4) Hugues Hoppe: Smooth view-dependent level-of-detail control and its application to terrain rendering, IEEE Visualization 1998 Conference, pp. 35-42, 1998.
- 5) Georges Nader, et al.: Visual contrast sensitivity and discrimination for 3D meshes and their applications, Computer Graphics Forum, 35 (7), pp. 497-506, 2016.
- 6) 小谷津孝明：閾値の測定法，日科技連官能検査委員会編，新版官能検査ハンドブック，1973，pp. 395-397.
- 7) Artec 3D, Artec Studio 15 User's Guides, http://docs.artec-group.com/as/15/en/_downloads/25ad86ff3ec13dc8eae3208423c3eb81/Manual-15-EN.pdf, 2022年2月参照

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） 新たな家具設計手法の提案

成瀬哲哉*

Integration of Traditional and Digital Technologies for Furniture Manufacturing (I) New methods for furniture design

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た。

本年度研究では、他業界・他業種、特に自動車業界の製品設計・デザイン手法で実績のある「インダストリアルクレイによる形状試作」「3次元スキャナーによる形状測定・リバーエンジニアリング」といった手法を木製家具の製品設計・デザインに取り入れ、製品試作からCADデータ化までの一連の工程を効率化する手法を考案したので報告する。

1. 緒言

「飛騨・高山の家具®」は、良質な木材、優れたデザイン、熟練者による高い加工技術による高級木製家具として認知されており、平成14年以降、岐阜県は「木製机・テーブル・椅子」の出荷額は1位を堅持している。

しかし、近年は国内他産地の台頭や大手量産メーカーの品質の向上が著しく、市場競争が激しくなっており、市場競争力のある高付加価値製品の開発が求められている。

本研究では、熟練者の伝統技法とCNC加工のような高度な生産設備が融合した新たな設計・製造手法を考案し、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「飛騨・高山の家具®」を実現することを目標としている。

令和3年度の研究においては、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を考案したので報告する。

2. 木製家具の設計手法

2.1 従来の木製家具設計手法

一般的な木製家具の製作工程はメーカーによっ

て工程に多少の違いや前後はあるものの、基本的には次のような工程で家具を設計・製造している。

- (1) 家具デザイナーによるアイディアスケッチ・コンセプトデザイン(アナログ、デジタル)
- (2) 家具モデラーによる試作品製作(アナログ)
- (3) CADデータ化(アナログ、デジタル)
- (4) (1)～(3)の工程を繰り返し、製品デザインを決定
- (5) 製品製造(アナログ・デジタル(限定的))

木製家具が長年、このような工程で設計・製造されているのは、工芸品として意匠性の高さを実現するため、「木工職人の高度な手加工が必要」「木材の切削加工性が高く手加工に向く」「大量生産ではなく多品種少量生産」であることが要因と考えられる。

2.2 従来の木製家具設計手法の課題

従来の木製家具設計手法では意匠性の高さを実現するため、(1)デザイン、(2)試作、(3)図面化の工程をある程度繰り返す必要があるが、これらの工程の繰り返しは開発スピードの低下を招いている。これは、「家具デザイナーのコンセプトや感性を取り込んだ試作が難しい」「木材が切削加工に向く一方で削りすぎた場合は修正が困難」「最終試作の絶妙なデザインラインを反映した図面化が難し

* 試験研究部

い」といったことが要因と考えられる。

一方、近年は製品の納期が短くなる傾向にあり、生産速度の向上がもたれているが、アナログ的な手加工中心ではこれらの課題を克服することは難しく、生産速度の向上にはCNC加工機等のデジタル生産技術の導入が必要である。

しかし、金属加工業界とは異なり、木製家具メーカーへのCNC加工機等のデジタル生産技術の導入は遅れているのが現状である。デジタル生産技術導入の遅れは、木工職人の手加工技術の高さも一因と考えられるが、短納期・人材不足に対応すべくデジタル生産技術の導入は必要と考えられる。

2.3 新たな家具設計手法の検討

2.3.1 アナログ技術とデジタル技術の融合

前項で挙げた課題の克服と「飛騨・高山の家具[®]」の市場競争力の向上を実現するためには、デジタル技術で可能なことはデジタル技術で代替し、デザイナーや木工職人はデジタル技術では代替不可能な創造的で高度なアナログ技術により専念することで、製品の高付加価値化、品質向上、生産速度の向上を図る必要がある。

そのためには、他業界・他業種では製品設計に効果を上げている手法を木製家具の製品設計にとり入れ、アナログ的技術とデジタル技術の融合を促進する必要があると考える。

例えば、自動車業界では近年のデジタル全盛時代においてもカーデザイナーやカーモデラーの感性を取り込むため、次のようなデジタル技術とアナログ技術を取り入れた工程¹⁻³⁾を経て最終デザインを決定している。

- (1) デザイナーによるアイディアスケッチ・コンセプトデザイン(アナログ、デジタル)
- (2) CG・CADデザイン(デジタル)
- (3) 3D CADデータを用い、実大クレイモデル製作(デジタル)
- (4) 実大クレイモデルの微妙なラインの修正(アナログ)
- (5) 3Dスキャンによる形状測定(デジタル)
- (6) CG・CADデザインの修正(デジタル)

感性に訴える意匠形状の設計という観点から、自動車のデザイン設計と木製家具、特に木製椅子のデザイン設計は親和性が高いと思われる。

2.3.2 インダストリアルクレイの活用

インダストリアルクレイは、45～65℃で軟らか



図1 インダストリアルクレイ(加温前)

くなり25℃以下ではある程度の硬度を有する合成粘土で、輪切り状または棒状のインダストリアルクレイを定温乾燥機等で温めて軟化させ、造形を行うことができる(図1)。

盛り付け作業・切削作業に適しており形状変更が容易であることから、意匠性の必要な工業製品の立体造形や実大模型(モックアップ)等の製作に用いられている。また、切削クズは集めて加温することで再利用できるサステイナブルな造形素材である。

前項で記述したように自動車業界ではデザイナーの感性を取り込むためにインダストリアルクレイを活用している。木製家具においても家具デザイナー、家具モデラーのコンセプトや感性を取り込むため、製品試作の段階でインダストリアルクレイを活用することは有用と考えられる。

2.3.3 3次元スキャナーの活用

3次元スキャナーは、測定対象物にレーザーやパターン光を照射し、反射時間や照射角度から測定対象物表面の3次元座標データを解析し高精度に取得する装置である。現在は製品形状の測定やCADデータとの誤差検査等、自動車業界をはじめとする製造業全般、建築業界、文化・芸術分野で広く用いられている⁴⁾。

前述したように、従来の木製家具設計手法ではコンセプトやアイディアスケッチを反映した試作や図面化が難しいといった点が課題となっているが、これは「試作」と「図面化・CADデータ化」を繰り返すうえで、手作業・手加工が多いことに起因する。

例えば、2D・3D CADから試作品を製作する際には、CNC加工機が無い場合は設計図面から外形のゲージや断面図の型紙を作製し、それを基にして木材を切削加工する必要がある。また、試作品をCADデータ化する際には、試作品の形状・寸法を自在定規やノギスを用いて手作業で測定し、CADデータ化する



図2 3次元スキャナー

る必要がある。

特にデザイン的な3次元曲面のある試作品の形状・寸法を手作業で正確に測定し、CADデータ化するのには非常に難しく手間のかかる作業である。

これらの課題を解決するためには、3次元スキャナーを活用し、インダストリアルクレイや木材で製作された試作品の形状を効率的かつ高精度に計測し、CADデータ化することが有用であると考えられる。

本研究ではデジタル技術を活用した新たな家具設計手法を開発すべく、ファロージャパン(株)製3次元スキャナー「FARO Prizm+Quantum E V2 2.5m 7軸+8-Axisシステム」(図2)を導入し、3次元形状測定に用いている。

2.4 新たな家具設計手法による試作とCADデータ化

2.4.1 インダストリアルクレイによる形状試作

インダストリアルクレイを用いて木製椅子(背もたれ・肘かけ部分)の試作を行った。

今回の試作では(株)トゥールズインターナショナル製インダストリアルクレイNS45E(45℃タイプ)を用いた。

デザインコンセプトは、木材では切削加工が難しい3次元的な捻れとエッジの組み合わせた形状としている。作業手順を以下に示す。

- (1) 骨組みの製作(図3左)
- (2) 背もたれ・肘かけ部分のアイディアスケッチ(図3右)
- (3) インダストリアルクレイ盛り付け(図4左)
- (4) スクレイパーやクレイ鉋による切削加工(図4右)

インダストリアルクレイを用いて製作した木製椅子(背もたれ・肘かけ部分)の試作品を図5に示す。数度の盛り付け・切削作業・微修正を行い、およそ1日程度で製作している。



図3 骨組み(左)、アイディアスケッチ(右)



図4 盛り付け(左)、切削加工(右)



図5 背もたれ・肘かけ部分試作

インダストリアルクレイは木材と比較して柔らかく、且つ木目が無い等方性の素材であることから切削が容易である。また、クレイ鉋や粗目やすり等の切削工具を使えることから、木工での手加工技術を応用することが容易である。このインダストリアルクレイの加工性の高さにより、試作品は木材では加工が難しい3次元的形状の滑らかな面と有機的なエッジで構成することが出来た。

このことから、インダストリアルクレイによる



図6 3次元スキャナーによる形状測定



図7 スキャンニングした試作椅子

試作は木製家具・木製椅子のデザイン・形状検討に適していると考えられる。

2.4.2 3次元スキャナーによる形状測定

前項で試作した木製椅子をファロージャパン(株)製3次元スキャナー、ソフトウェアは(株)スリーディー・システムズ・ジャパン製Geomagic Design Xを用いて計測した。

背もたれ・肘掛け部分の計測時間はおよそ20分程度であった。計測風景を図6に、スキャンニングした試作椅子を図7に示す。

2.4.3 リバースエンジニアリング(CADデータ化)

リバースエンジニアリングとは、コンセプトデザインを基にしたクレイモデルや、2D・3D CADが存在しない製品などの形状データを3次元スキャナーで測定し、解析結果を基にCADデータ化することである。

前項で3次元スキャナーを用いて測定した木製椅子の3次元座標データを(株)スリーディー・システムズ・ジャパン製Geomagic Design X及び

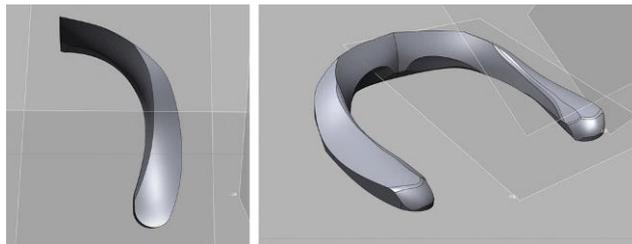


図8 背もたれ・肘掛けのCADデータ



図9 座ぐり座面の形状試作

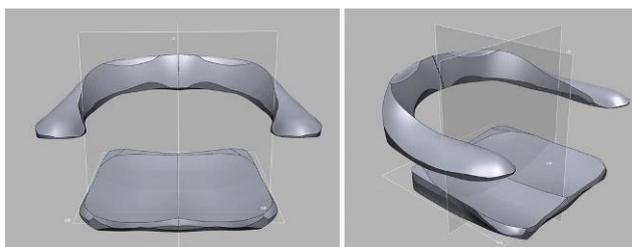


図10 背もたれ・肘掛・座面形状の検討

Geomagic Controll Xを用いてCADデータ化を行った。図8に背もたれ・肘掛けのCADデータを示す。リバースエンジニアリングにかかった時間はおよそ8時間程度であるが、スキャンニング作業、ソフトウェアの習熟を進めることでより短時間でCADデータ化が実現できると考えられる。

2.4.4 座ぐり座面の形状試作

座ぐり座面は木製椅子の板座において主に座り心地の向上を目的に臀部形状を模した凹面形状に加工した座面のことである。その形状は座り心地だけでなく意匠性もあることから、形状や彫りの深さなどデザイン決定までに検討が繰り返される部分である。

インダストリアルクレイは盛り・削りが容易な素材であることから、座ぐり座面の形状試作とリバースエンジニアリングを試行した(図9)。

また、前述の背もたれ・肘掛けのデータとあわせ、デザイン検討を行っている(図10)



図11 座面、背もたれ形状の変更検討

2.4.5 座面、背もたれ形状の変更検討

設計図が無い椅子のCADデータ化と形状検討のため座面と背もたれ(背板・背柱・笠木)の試作とリバースエンジニアリングを試行した(図11)。

2.4.6 新たな家具設計手法の有用性

新たな意匠や機能を有する木製家具・椅子を実現すべく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するため、自動車業界の製品設計・デザイン手法で実績のある「インダストリアルクレイによる形状試作」「3次元スキャナーによる形状測定・リバースエンジニアリング」といった手法を木製家具の製品設計・デザインに取り入れた。

「インダストリアルクレイによる形状試作」は、インダストリアルクレイの加工性の高さと木工の手加工技術の応用により、試作品製作のスピード向上に寄与すると考えられる。

また、「3次元スキャナーによる形状測定・リバースエンジニアリング」は、インダストリアルクレイでデザインコンセプトを実現した試作品の形状測定とCADデータ化を実施した。

これにより、製品試作からCADデータ化までの一

連の工程を効率化出来ると考えられる。

3. まとめ

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た。

本年度研究では、他業界・他業種、特に自動車業界の製品設計・デザイン手法で実績のある「インダストリアルクレイによる形状試作」「3次元スキャナーによる形状測定・リバースエンジニアリング」といった手法を木製家具の製品設計・デザインにとり入れることで、製品試作からCADデータ化までの一連の工程を効率化する手法を考案することが出来た。

参考文献

- 1) Ford News Europe: Inside Ford's Clay Modeling Studio, <https://www.youtube.com/watch?v=APNgS33HT3Y>, 2021年9月参照
- 2) 稲垣宗彦: デジタル全盛時代でも車の設計に粘土を使う理由: トレンド・ウォッチ from 日経トレンディ, 日経ビジネス, <https://business.nikkei.com/atcl/report/16/030800018/112900428/>, 2021年9月参照
- 3) グーネットマガジン編集部: クルマの美しいラインは、精巧なクレイモデルから生まれる, <https://www.goo-net.com/magazine/cartopic/entertainment/38279/>, 2021年10月参照
- 4) 一般財団法人三次元スキャンテクノロジー協会: 3D スキャンにまつわるコラム 第1回3D スキャンとは, <https://3dst.org/column/1-2>, 2022年1月参照

介護ニーズに基づくポジショニング用品の開発（第3報） 寝返り動作時におけるマットレス沈み込み量の計測

山口穂高^{*1}, 藤巻吾朗^{*1}, 関範雄^{*1}, 宮川成門^{*2}, 吉田宏昭^{*3}

Development of Positioning Cushion Based on Nursing Care Needs (III) Measuring of Sinking Amount during Rolling Over Movement

YAMAGUCHI Hodaka^{*1}, FUJIMAKI Goroh^{*1}, SEKI Norio^{*1}, MIYAGAWA Naruto^{*2}, YOSHIDA Hiroaki^{*3}

寝返り動作におけるマットレスの沈み込みを経時的に計測し、その平均形状、および繰り返した寝返りの沈み込み軌跡を検討した。その結果、体格の個人差による定性的な平均形状の違い、寝返り動作時のマットレスへの典型的な沈み込み形状が見出され、寝返りに重要な腰部と臀部の平均形状の定量的算出が可能になった。算出された形状は、臥位や寝返り動作をサポートするポジショニング用品設計への応用が期待される。

1. 緒言

人は、運動時を除いた静的な状態においては、臥位、座位、立位のいずれかの姿勢で過ごすこととなる。これらの中で臥位は最も休息度の高い姿勢であり、臥位姿勢が快適であることはQOL(quality of life)の向上には欠かせない。そのため、臥位を快適に過ごすためのさまざまな寝具やポジショニング用品が上市されている。しかし、臥位の快適性には、温熱的な快適性、触覚的な快適性、姿勢の保持性など様々な側面があり、これらの全てを同時に満足させることは困難である。例えば、ポジショニング用品に限局しても、柔らかい製品は好みの姿勢を長時間維持することが困難であり、硬い製品は姿勢を保持させやすいが体圧分散性に劣る。

そこで本研究では、姿勢の保持性と体圧分散性を同時に満足させるポジショニング用品の設計に着目した。

「姿勢の保持性」と「体圧分散性」、この相反するとも考えらえる課題の解決には人の体形に沿った形状を製品に付与することが有効だと推察される。人の体形に支持具の形状を合わせる研究事例としては、椅子に関する研究が報告されている¹⁻⁴⁾。そこでは着座時の最適な座面形状は、表層のクッ

ション材が薄い場合でも体圧分散性が高く、また、姿勢の保持性が高いことが報告されている。

臥位の場合は、一定の姿勢を保ち続けることは運動機能の低下や褥瘡リスクの観点から避けるべきであり、自力での寝返り動作や介助による体位交換が行いやすいことが求められる。これらの結果を製品に応用するには、仰臥位、側臥位など静的な姿勢のみの計測では不十分であり、理想的には寝返り動作を含めた連続的な状態を把握する必要がある。

本報では、寝返りの繰り返し動作時の沈み込みを経時的に計測し、ポジショニング用品への利用を想定した腰回りの形状を検討した。

2. 方法

2.1 計測

マットレス型の沈み込み計測装置(N-wave、Cagr-4motion)を用いて寝返り時の沈み込み量を連続で記録した。この装置は、10 mm間隔で配置されたプローブに加わった荷重を下部の圧力センサーによって記録する装置であり、測定された荷重と既知のプローブのバネ定数(1本あたり約27.3 N/m)の関係から沈み込み量を算出することができる³⁾。測定範囲は、2400×600 mmであり、沈み込み量の有効測定長は40 mmである。また、本装置は万能試験機(島津製作所、AG-50KNIS)を用いた試験

*1 試験研究部

*2 岐阜県産業技術総合センター 産学連携部

*3 信州大学繊維学部

によってプローブの変位と圧力センサーの出力値の関係があらかじめ調べられており、沈み込み量の算出の際には試験結果に基づいた補正を行った。寝返り動作測定時のサンプリングレートは100 fpsとした。

2.2 寝返り動作

仰臥位から左側の完全側臥位への動作、続く側臥位から仰臥位へと戻る一連の往復動作を寝返り動作とした。被験者は普段通りの自然な寝返り動作を3回連続して行った(図1)。この時、枕は使用しなかった。

寝返りの正中線を各被験者の第一フレーム(仰臥位)の沈み込み量から左右方向のモーメント中心を行ごとに算出し、それらの平均値が通る線と定義した。寝返りの沈み込み量は、フレーム間の最大値を被験者ごとに時系列に統合した。

正中線に対して左右を反転させたデータを求め、さらにオリジナルデータと最大値によって統合することで、左右対称と仮定した寝返り動作時の沈み込みとした(付録)。なお、各被験者の頭頂に相当する位置と各被験者に定義された正中線の位置を原点として被験者ごとの沈み込みの位置を揃えた。

2.3 被験者

被験者は実験参加への同意が得られた成人13名(男性7名、女性6名)とした。被験者の身長および体重の平均±標準偏差は、それぞれ、167.0±10.4 cmおよび57.2±9.0 kgであった。

3. 結果と考察

3.1 寝返り動作時の沈み込み量の算出

13名の測定結果を図2に示す。いずれも臀部の沈み込みが他の領域に比べて大きいことが分かる。マットレスの沈み込みと寝心地の関係を調査したAoiら^{5, 6)}の研究では、仰臥位姿勢で最も沈み込む部位は臀部であることが確認されており、本結果も同様の結果を示した。また、肩部の沈み込みも大きいのが、被験者ごとに肩部の沈み込みが大きい領域の位置や範囲が異なった。さらに、脚部の沈み込みの現れ方は被験者によって異なる。

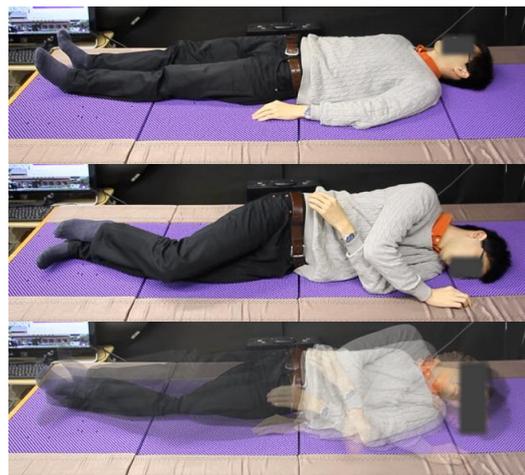


図1 寝返り動作(上:仰臥位、中:左側臥位、下:寝返り動作の軌跡画像)

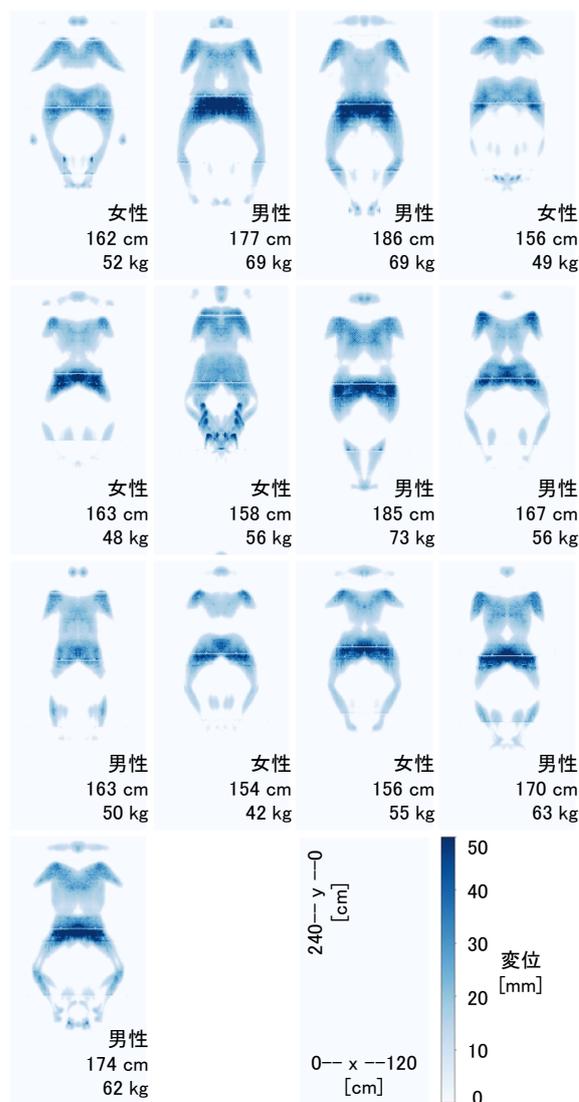


図2 被験者ごとの沈み込み形状

これは、先行研究⁷⁻¹⁰⁾が示したように、寝返り動作には個人差があることと対応する。

以上のことから製品開発では、①特徴の類似した使用者のクラスターを対象とする製品②使用者全体を代表する平均値を対象とする製品、どちらをデザインするかを選択する必要がある。本研究では、寝返り動作時の沈み込み量をポジショニング用品のデザインに利用するための初期段階として、全被験者の平均的な形状を扱うこととした。

3.2 寝返り動作時の沈み込み形状の定性的検討

被験者ごとの沈み込み形状をそれぞれの体型で基準化し、被験者間の平均から、沈み込み形状を定性的に検討した。

被験者の身長の違いを基準化するために、図2の結果のx方向とy方向を被験者ごとの身長で除した。また、沈み込み量には被験者ごとの体重の違いが影響すると考えられるため、沈み込み量は被験者の体重で除して基準化した。

図3に、上記の処理によって得られた基準化済み沈み込み量を被験者間で平均した結果を示す。この結果は寝返り時の典型的な沈み込み形状を示した。x方向の中央付近、すなわち、仰臥位時の正中線付近では、臀部の沈み込みが最も大きく、次いで肩甲骨付近と頭部で沈み込みが大きかった。xが40および60の付近、つまり、仰臥位から寝返り動作が進行した領域では、仰臥位時の臀部の沈み込みは大腿部に沿うような沈み込みに連続している。また、側臥位時には大腿部の沈み込みと同程度の沈み込みが肩部に観察される。一方で、脚部の膝より下の領域の沈み込みは広範囲に低値であり、脚部の寝返り動作は個人差が大きい。

以上より、寝返り動作に沿ったポジショニング用品の形状とは、沈み込みが少ない腰部を持ち上げるように支持し、仰臥位時の臀部から側臥位時の大腿部に連続する沈み込み、および、側臥位時の肩部の沈み込みを逃がす形状である。

3.3 腰部・臀部を保持する形状の定量的検討

沈み込み量の計測結果をポジショニング用品の設計に利用するため、沈み込み形状の定量的な検討を行った。

寝返り動作時の形状に影響が大きい腰部および臀部の形状を次の手順で算出した。最初に、被験者ごとに臀部領域の最大沈み込み位置のy座標を基準として、被験者間で上下方向の位置を合わせた。次に、被験者ごとに各セルの沈み込み量か

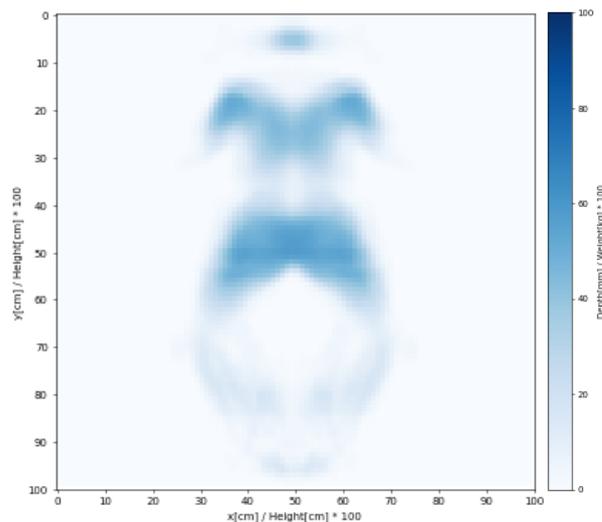


図3 体型で基準化した沈み込みの平均形状

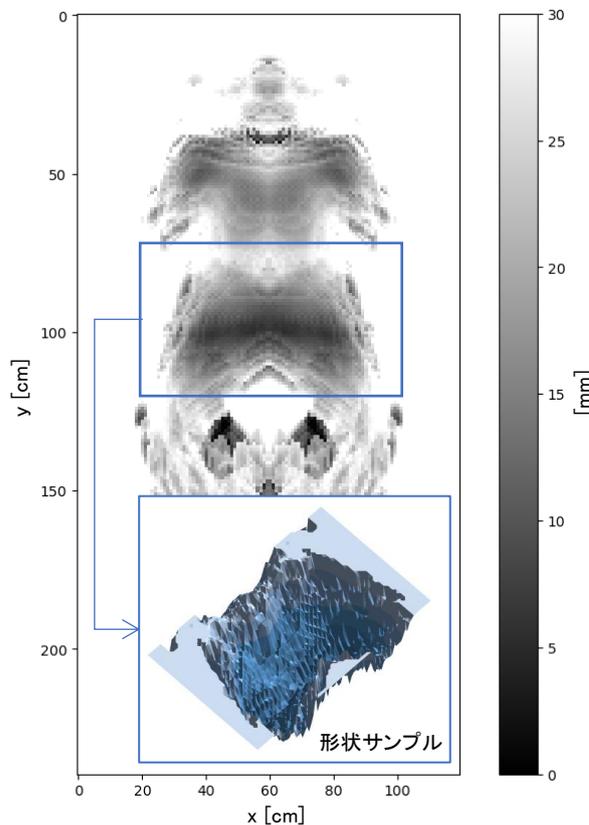


図4 臀部の最大荷重位置で位置合わせをした平均形状

ら最大沈み込み量を引き、さらに符号を反転させた。これにより被験者ごとの体重の違いによって生じる沈み込み量の違いを、最大沈み込み位置を原点として、示すことができる。最後に、得られた結果から被験者間平均を求めた (図4)。

以上のように、被験者ごとの最も沈み込んだ位置を基準とすることにより、寝返り動作時の腰部から臀部にかけて平均的かつ定量的な形状が得られた。

4. まとめ

マットレス型の計測器を用いた寝返り動作の経時的な沈み込み計測から、寝返り動作には個人差があり、特に脚部や肩部の沈み込み形状は被験者間のばらつきが大きいことが明らかになった。

寝返りにおいて個人差の少ない動作領域である腰部から臀部領域の沈み込み形状の平均的かつ定量的な算出方法を見出した。この方法によって人の寝返り時における臀部及び腰回り平均形状が定量的に捉えられるようになった。

以上の成果はポジショニング用品デザインへ応用することができる。具体的には、寝返り動作に沿った形状とは、腰部を持ち上げるように支持し、仰臥位時の臀部から側臥位時の大腿部に連続する沈み込んだ形状であると考えられる。

謝辞

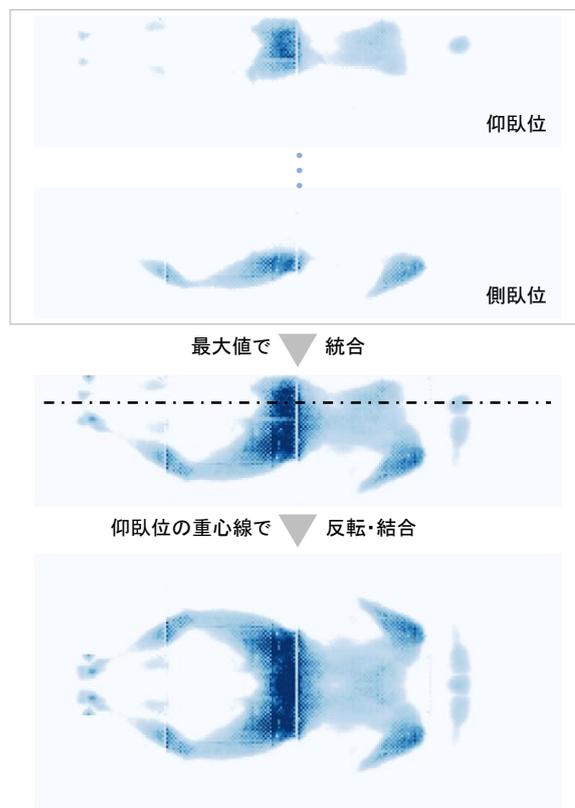
研究の遂行に多大な協力をいただいたも元信州大学大学院日高亜美氏および実験に参加していただいた被験者の皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 藤巻吾朗, 今井隆矢, 西澤義嗣, 吉田宏昭: 座位姿勢における臀部形状の分析と座面形状の提案, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 15, pp. 19-23, 2013.
- 2) 藤巻吾朗, 森茂智彦, 稲垣能嗣, 日比聖: 自動車シートの座面形状の提案, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 16, pp. 13-16, 2014.
- 3) 宮川成門, 藤巻吾朗, 稲垣能嗣: 座位姿勢を支えるダイニングチェアのデザイン (第2報) 臀部形状シートの利用, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 17, pp. 10-14, 2015.
- 4) 宮川成門, 藤巻吾朗, 山口穂高, 稲垣能嗣: 臀部形状シートを用いた体圧分散クッションの開発, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 20, pp. 1-4, 2018.
- 5) Masataka AOI, Masayoshi KAMIJO, Hiroaki YOSHIDA: Evaluation of Sleeping Comfort of Bed Mattresses using Physiological and Psychological Response Measurements,

Kansei Engineering International Journal, 11 (3), pp. 163-169, 2012.

- 6) Masataka AOI, Kazuma HASHIMOTO, Mayumi UEMAE, Hiroaki YOSHIDA, Masayoshi KAMIJO: Evaluation of Sleeping Comfort of Bed Mattresses with Different Elastic Moduli for Each Body Region, International Journal of Affective Engineering, 14 (2), pp. 111-118, 2015.
- 7) Richter R: Description of adult rolling movement and hypothesis of developmental sequences. Phys Ther, 69 (1), pp. 63-71, 1989.
- 8) 角 博行, 米村一幸, 多々納善広, 上田正樹, 渡部訓久: 健康成人の寝返り動作における検討, 理学療法学, 22 (2), p.455, 1995.
- 9) 野崎真奈美: 高齢者における寝返り動作の分類と身体特性による推奨パターンの予測, 早稲田大学博士論文, 2005.
- 10) 新井清代, 芳野 純, 宮澤 満, 丸山仁司: 寝返り動作の体幹パターンに関連する因子の検討, 理学療法科学, 26 (6), pp. 769-772, 2011.



付録 個人ごとのデータ処理手順の概要

介護ニーズに基づくポジショニング用品の開発（第4報）

関範雄*1, 宮川成門*2, 藤巻吾朗*1, 山口穂高*1

Development of Positioning Cushion Based on Nursing Care Needs (IV)

SEKI Norio*1, MIYAGAWA Naruto*2, FUJIMAKI Goroh*1, YAMAGUCHI Hodaka*1

臀部の保持・支持機能を有するベースクッションと圧力分散・除圧機能を有する表層クッションから構成されるポジショニング用品が設計、開発された。これは膝関節屈曲拘縮の仰臥位ポジショニングをサポートし、クッションを使用しない仰臥位と比較して、臀部に掛かる接触面積は約1.3倍以上拡大、平均圧は40%低下し、圧迫されていた仙骨部のピーク圧力は72%低下した。クッションには仰臥位の圧力が加えられた状況においても通気性および熱拡散性の高い素材が使われ、ポジショニングで皮膚とクッションとの間に発生する蒸れを低減する。蒸れ低減機能はポジショニング介助におけるマイクロクライメイト管理に有効であり、身体支持や除圧機能と相乗して褥瘡予防が期待される。

1. 緒言

人は同じ姿勢を長時間続けることで、身体への悪影響が引き起こされ、人の毛細血管は32mmHg以上の圧力が加わると閉塞状態になり皮膚組織に血液が通わなくなる¹⁾。褥瘡予防では皮膚表面加わる圧力をこれ以下に保持することが理想であるとされているが、現実にはこれをクリアすることは困難である。一般に70～100mmHgの圧力が2時間以上加わると圧迫部位に虚血性変化が起きる²⁾といわれ、骨突出部にこのような圧迫が加わることが褥瘡発生の原因となることから、最近の臨床介護の研究では40～50mmHgの圧力が安全の目安とされている。

褥瘡の発生原因には、①皮膚への持続的な圧迫（静的外圧）の他に、②皮膚への摩擦やズレ（動的外圧）、③身体の不潔や皮膚の乾燥、湿潤の繰り返し（汚れ、蒸れ）、④栄養状態の低下（血行障害、皮膚や皮下脂肪の退化など）の要因があるといわれる。褥瘡予防・管理ガイドライン³⁾によれば、褥瘡を予防するため、介護現場の介助行動によって介入が可能な要因は、圧力分散、摩擦・ズレであるとされ、近年ではマイクロクライメイト（皮膚局所の温度・湿度）の重要性が国際的にも提唱されている⁴⁾。

介護現場では、被介助者に加えられる外圧や蒸れを緩和するため、より安楽な姿勢へと体位変換する仰臥位・側臥位のポジショニング介助が頻繁に行われる。高齢者は臀部の接触面積が小さく、骨突出部、例えば臀部では仙骨部に加わる圧力が高くなり、介護用マットレス使用においてもポジショニングの必要性が報告された⁵⁾。下肢屈曲拘縮のある人の仰臥位ポジショニングでは、ピローなどの用品を使用して、マットレスと身体の間を埋め、仰臥位の圧力分散が図られる。同時に身体は支持され、心地よい姿勢が保持される。一方、従来のポジショニング用品には、身体の形状、硬さや軟らかさの不具合、用品使用による加温、発汗・蒸れの促進、体組織圧迫への耐性低下、さらにはポジショニングの介助技術依存などの課題が指摘されている。

このような介護現場やポジショニング介助の課題を解決するため、仰臥位ポジショニング用品の開発が進められた。その一環として介護老人福祉施設入居者の身体形状や仰臥位姿勢の調査⁵⁾を通し、身体形状データ^{6), 7)}から高い密着性で身体をサポートするポジショニング用品コンセプトが提案された⁸⁾。また素材のクッション性（支持性（硬さ）や圧力分散性（軟らかさ））が検討され、ポジショニングで使用する素材のクッション性バランスの重要性が報告されている。

本報では、ポジショニング用品の重要な機能、褥瘡発生原因の一つである蒸れ因子にかかる特

*1 試験研究部

*2 岐阜県産業技術総合センター 産学連携部

性を検討した。また蒸れ低減機能と既報^{5), 8)}の知見に基づき身体保持・支持および圧力分散・除圧機能を有する下肢屈曲拘縮の仰臥位ポジショニング用品を試作したので、その特徴を報告する。

2. 実験

2.1 蒸れにくいクッションデザイン

褥瘡予防において、皮膚と接触する支持面との間に発生する蒸れは、マイクロクライメイトに影響する可能性が指摘されている⁴⁾。褥瘡ケアを目的としたポジショニング用品には、蒸れにくさ機能の付与が重要である。

ポジショニング用品の仰臥位使用かつ骨突出などの局部に高い圧力が加えられた状況を想定して、指標となる通気性や熱伝導・拡散性からポジショニングクッションの蒸れ性を検討した。

2.1.1 材料

一般に入手可能な次の5種類のクッション素材を用いた。エラストマーパイプビーズ（長さ：6.5mm、直径：5mm）、発泡ポリスチレンビーズ（直径：約1mm）、ポリエステル粒わた（直径：約10～20mm）低反発ポリウレタンフォームチップ（直径：約5～20mm）、スラブポリウレタンフォーム（比重：0.021g/cm³）。

通気性の測定には、スパンデックスクッション製伸縮性カバー（厚さ：362μm、素材構成：ナイロン82%、ポリウレタン18%）を比較として用いた。

2.1.2 通気性

中心部に通気口（直径：25mm、六角（1辺：1.5mm）格子状）を持つ上下蓋から成る嵌め合せ管状容器（測定有効容積：φ25×11mm）を用い、閉蓋時の内部が70mmHgの圧力になるように力を加えながら、容器内にクッション素材を封入した。これを通気性測定の試験体とした。

通気性測定には貫通細孔分布測定装置（PMI社製 CFP-1200AXL）を用いた。試験体に圧力調整した圧縮乾燥空気を流通させ、試験体に流入出する空気の差圧ΔP（kPa）と通気量Q（ml/min/cm²）を計測し、通気度V（ml/kPa/min/cm²）および通気性K（ml・cm/kPa/min/cm²）を算出した。

$$\text{通気度 } V = Q / \Delta P$$

$$\text{通気性 } K = V \times t$$

t：試験体の有効厚さ（cm）、0.11cm

2.1.3 熱伝導性

クッション素材をPET/EVA樹脂複層フィルム（厚さ：0.1mm）容器（底面積：150×150mm）の内部に圧力35mmHg、厚さ30mmになるように力を加えながら、封入した。素材が封入されたフィルム容器の辺を熱圧着して、熱伝導率測定用クッション（150×150×30mm）を調製した。調整したクッションを、中央部に空洞（150×150mm）を有するフェノールフォームから成る保温フレーム（200×200×30mm）に組み込み、これを熱伝導率測定の試験体とした。

熱伝導率測定には熱伝導率測定装置（英弘精機株式会社製 HC-074/200）を用い、JIS A 1412 - Part2⁹⁾に準拠する熱流計による熱伝導率測定法によって測定した。平均温度25℃、温度差20K（プレート温度：上15℃、下35℃）の温度条件にて、測定1ブロックの測定点数を512として、定常状態後の3ブロックの値から平均値を算出し、試験体の見かけ熱伝導率λ（W/m・K）を求めた。

2.2 ポジショニング用品の試作および評価

臀部の保持・支持の役割を目的としたベースクッションと圧力分散・除圧の役割を担う表層クッションから成るポジショニング用品を試作し、膝屈曲仰臥位の身体支持・圧力分散性などポジショニング用品使用時の特徴を評価した。

2.2.1 試作

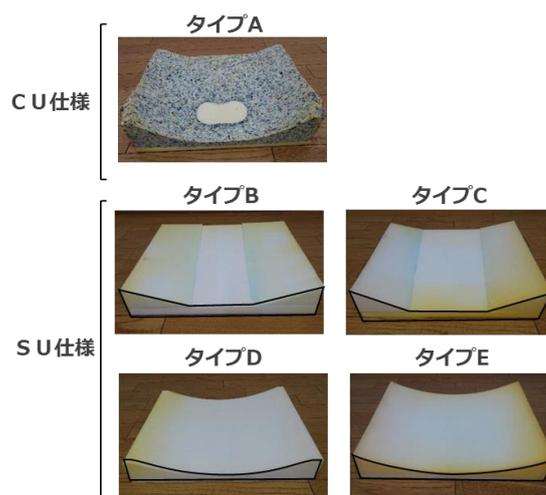


図1 ベースクッション
(試作ポジショニング用品)



図2 表層クッション
(試作ポジショニング用品)



図3 膝屈曲仰臥位の臀部圧力測定

ベースクッションは、身体形状データ^{6), 7)}の臀部形状に合わせて、クッション素材を3次元成形し、形状の異なるAからEの5タイプを作製した(図1)。クッション素材にはチップポリウレタンフォーム、スラブポリウレタンフォームの2種類を用い、それぞれCU仕様、SU仕様とした。

表層クッションは、エラストマーパイプビーズ(長さ: 6.5mm、直径: 5mm) 1kgをスパンデックスクッション製カバー(370 × 470mm)に封入し、作製した(図2)。

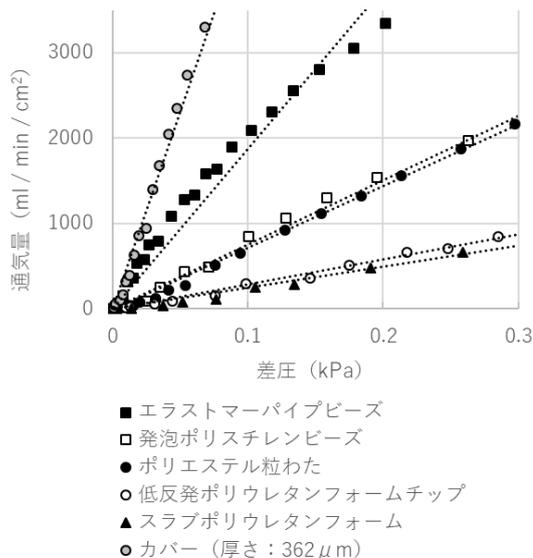
2.1.2 身体支持・圧力分散性

圧力分布測定にはシート圧力分布測定装置(XSENSOR Technology Corporation製 X3、測定範囲: 10~200mmHg)を用いた。フローリングに敷いたウレタンフォーム製マットレス(西川産業株式会社製 STRETCH、厚さ: 36mm)上に股関節角度調節台と試作ポジショニング用品を配置した。表層クッション上面に圧力センサシートを敷き、この上に臀部を下して、股関節角度50度の膝関節屈曲の仰臥位を保持した(図3)。この時、薄手着衣、64kg男性を対象として、臀部の圧力分布を測定した。圧力分布データから接触面積、ピーク圧力、平均圧力、圧力30mmHg超の接触面積を算出した。

3. 結果と考察

3.1 蒸れにくいクッションデザイン

3.1.1 クッションの通気デザイン



測定条件: 測定径: Φ25mm、測定厚さ: 11mm、通気ガス: 乾燥空気
素材への圧力: 70mmHg

図4 加圧時クッションに流れる空気の
差圧-通気量の関係

表1 加圧時クッションの通気特性

クッション素材	通気度 (ml / kPa / min / cm ²)	通気性 (ml · cm / kPa / min / cm ²)
エラストマーパイプビーズ	18,110	19,930
発泡ポリスチレンビーズ	7,540	8,290
ポリエステル粒わた	7,520	8,270
低反発ポリウレタンフォームチップ	3,010	3,310
スラブポリウレタンフォーム	2,680	2,950
カバー (厚さ: 362μm)	32,360	1,170

測定条件: 測定径: Φ25mm、測定厚さ: 11mm、通気ガス: 乾燥空気
クッション材詰め込み圧力: 70mmHg

介護老人福祉施設入居者の仰臥位姿勢の調査⁵⁾から得られた臀部におけるピーク圧力は70mmHgであった。この圧力を加えた試験体に空気を流通させ、空気の差圧と通気量の関係を検討した。その結果、これらは正比例の関係にあり、その傾きが大きくなるにつれて見かけの通気量は高くなった(図4)。この関係から加圧クッションの見かけ通気量を示す通気度と通気性能を示す通気性を算出した(表1)。エラストマーパイプビーズクッションが通気度および通気性ともに最も高く、ポリウレタン系素材のクッションと比較して、それぞれ約6倍の通気特性を示した。

クッションに力が加わると、クッションは圧縮され、内部に封入された素材や素材間にある空隙は潰れる。結果として、クッションの通気特性は

低下する。加圧クッション内を流れる空気がハーゲン・ポアズイユの法則に従うと仮定し、加圧クッション内の空隙の総和を一つの空隙ととらえると、カバーの総和空隙の直径を1とした場合、パイプビーズが2、ポリスチレンビーズ、粒わたが1.6、ポリウレタンチップ、スラブウレタンが1.3であった。クッションが加圧された場合にあってもパイプビーズクッションの総和空隙直径はカバーの2倍であり、その空隙率の高さからもパイプビーズクッションは通気性が高いことがわかる。

一方、クッションカバーは、通気性が低く空隙直径が小さいが、通気度は高い。これは通気量がカバーの厚さに反比例するためである。例えばカバー厚が10倍の3.6mmの場合、通気度は1/10になる。クッションカバーは通気性が低いため、その厚さがクッション全体の通気を規制することを示している。

以上の結果から、通気性の高いクッションの作製には、クッション使用時の圧力を把握し、その圧力下でカバーを含むクッション素材の通気度およびカバー厚さの設計が重要となる。

3.1.2 クッションの熱伝導デザイン

クッションに圧力35mmHgが加えられたとき、加圧クッションの見かけの熱伝導率は、エラストマーパイプビーズが他素材のそれに比べて2倍以上あり、最も高い(図5)。加圧された発泡ポリスチレンビーズクッションの熱伝導率は、断熱建材のそれに匹敵し、いわゆる断熱性を示した。この値は一般に知られる発泡ポリスチレン固有の熱伝導率と同様であり、クッション内でビーズが加圧され密に寄り集まった状況下では発泡ポリスチレンが寄与する熱伝導率が支配的であることがわかる。また加圧時のエラストマーパイプビーズクッションの内部の貫通空隙は他の素材に比べ

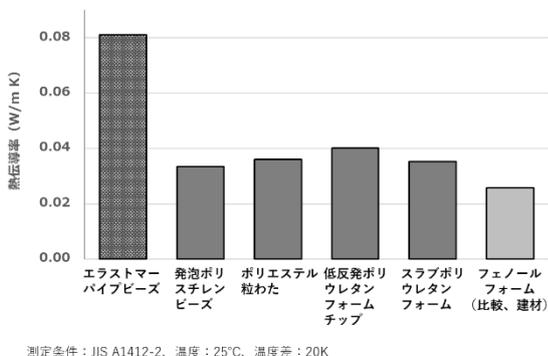


図5 加圧時クッションの見かけの熱伝導率

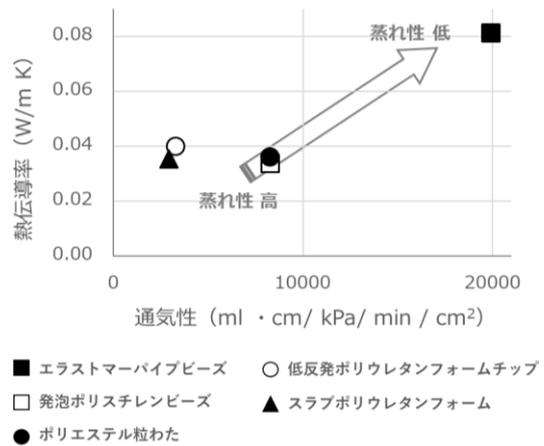


図6 加圧時クッションの蒸れ性

大きく、その熱伝導は空気やふく射の伝熱要素に影響されることが予想された。

以上の結果から、熱がこもらない、熱を逃がすことの温熱性能を特徴とするクッションの作製には、その使用圧力下でより大きな空隙が保たれる素材、かつ固有の熱伝導率の高い素材を選択することが重要である。

3.1.3 クッションの蒸れにくさデザイン

蒸れとは熱気や湿気がこもることであり、通気性と熱伝導の悪さがその原因となる。つまり蒸れにくさを求めるクッションデザインには、通気性や熱伝導を指標として、それぞれが高い素材を用いることが重要である。

そのため使用時に皮膚に接触する表層クッションには、5種類の素材の中から、通気性と熱伝導率の高いエラストマーパイプビーズ(図6)を用いた。これにより、クッション使用の際に、皮膚との間に発生しやすい蒸れが軽減される。

3.2 開発したポジショニング用品の評価

試作ポジショニング用品は、臀部から大腿部、股関節が屈曲する仰臥位ポジショニングにおいて、被験者の仰臥位臀部に使用した結果、使用による臀部の蒸れは感じられなかった。

仰臥位臀部の圧力分布は、試作ポジショニング用品使用の有無で明確に異なった(図7)。試作用品を使用していない場合に発生する仙骨部の局部圧力は、その使用によって消失した。仰臥位臀部のピーク圧力(図8)は、試作タイプにかかわらず、その使用前で176mmHgから50mmHg程度に低

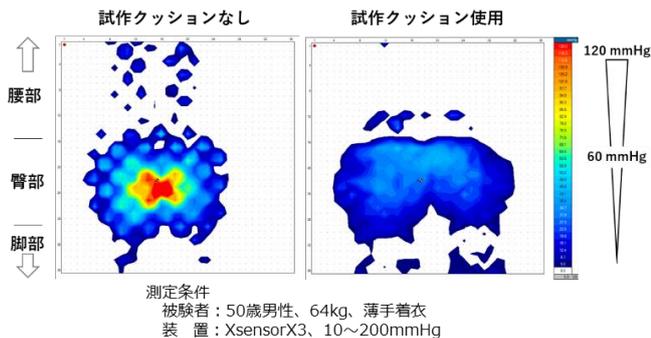


図7 膝関節屈曲仰臥位における臀部圧力分布図

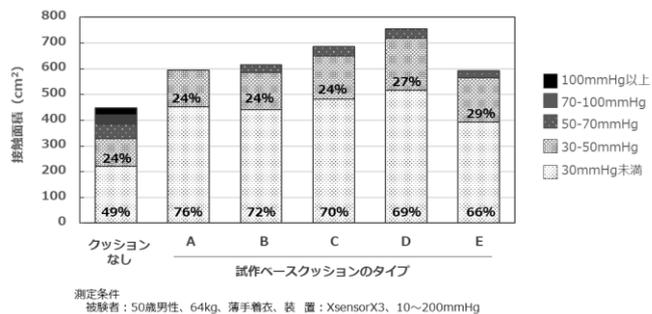


図9 膝関節屈曲仰臥位の臀部圧力と接触面積

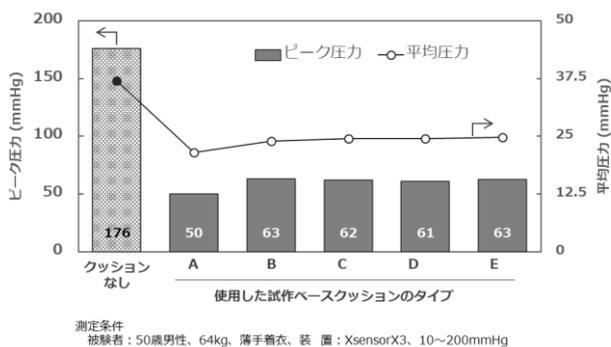


図8 膝関節屈曲仰臥位の臀部ピーク圧力および平均圧力

下し、平均圧力は約40%低下した。これらの結果は、試作用品の使用が臀部の除圧に効果的であったことを示した。

試作ポジショニング用品を使用した場合の臀部接触面積および圧力区別の面積割合を図9に示す。試作用品の使用によって臀部接触面積は1.3～1.7倍に拡大した。50mmHg未満の接触面積割合は、試作用品を使用していない場合が73%、試作用品を使用した場合には、ベースクッションタイプの違いによらず、94%以上であった。特にCU仕様タイプAの使用では接触面積のすべての領域が50mmHg未満の圧力範囲であった。これらの結果は、試作ポジショニング用品の3次元形状に成形されたベースクッションによる高い臀部支持性と表層クッションと臀部との高い密着性、これらの相乗による接触面積拡大が、圧力分散・除圧に効果的であったことを示した。

試作ポジショニング用品のタイプ別にその使用時の特徴を比較した。ベースクッションにスラブポリウレタンフォームを用いたSU仕様を使用した時の接触面積は、ポリウレタンチップフォームのCU仕様と比べて、より広範囲であった。またピーク圧力や平均圧力および圧力50mmHg以上の接触面積の割合が高いことがわかる。これ

らの結果は、SU仕様とCU仕様のクッション性、柔らかさの違いに起因する。つまり、SU仕様はCU仕様と比べて柔らかいことから、臀部の支持性が低く、臀部の沈み込みが深くなり、結果としてSU仕様使用時の接触面積は広がる。一方で、沈み込み深さは臀部の底付を発生させ、圧力を高めたといえる。

以上の結果から、ポジショニング用品の身体支持性と圧力分散性は相反関係にあり、クッション素材の硬軟性が大きく影響する。またクッション素材の硬軟性は、素材の空隙の大きさに関係することから、クッションの通気性や熱伝導に影響を及ぼす。ポジショニング用品の設計には、使用するクッション素材の特性バランスとその選択が重要である。

4. まとめ

関節拘縮の緩和、褥瘡予防を目的に膝関節屈曲拘縮の仰臥位をサポートするポジショニング用品をデザインし、開発した。

開発したポジショニング用品は、ベースクッションと表層クッションから構成される。ベースクッションは、身体計測データに基づき3次元成形した硬軟バランスの良いポリウレタン系の素材を用い、主に仰臥位の臀部支持・保持機能を担った。また、表層クッションは仰臥位臀部との密着性を高める機能を担った。

開発したポジショニング用品を使用した場合、使用していない場合に比べて、仰臥位臀部の接触面積は1.3～1.7倍広く、接触の平均圧力は40%低くなり、接触面積の95%以上が50mmHg未満の圧力領域であった。また、強く圧迫される仙骨部のピーク圧力は72%の低下を確認した。特に、ポリウレタンチップフォームを3次元加工して作製したベースクッションのタイプでは、臀部が接触するす

すべての領域において、50mmHg未満の圧力で臀部が支持および保持され、褥瘡ケアにおける体圧管理の安全目安とされる40～50mmHgを容易に実現することができた。表層クッションは皮膚と接触する支持面と密着性を高めるだけでなく、通気性と熱伝導率の高い素材が用いられることにより、接触面での蒸れは緩和される。

開発したポジショニング用品は、介護現場の褥瘡ケアにおける①介助者のポジショニング技術に依存する圧力分散・除圧、姿勢保持行為にかかる体圧管理、および②接触面の温湿度調整にかかるマイクロクライメイト管理を比較的容易に実現する有用用具として活用が期待される。

参考文献

- 1) Landis E. M.: Micro-injection studies of capillary blood pressure in human skin, *Heart*, 15, pp. 209-228, 1930.
- 2) Kosiak M.: Etiology of decubitus ulcers, *Arch Phys Med Rehabil*, 42, pp. 19-29, 1961.
- 3) 日本褥瘡学会教育委員会ガイドライン改訂委員会: 褥瘡予防・管理ガイド(第4版), 褥瘡会誌, 17 (4), pp. 487-557, 2015.
- 4) Clark, M. et al.: Microclimate in context, “International review: pressure ulcer prevention: pressure, shear, friction and microclimate in context. A consensus document”, MacGregor, L ed., London, Wounds International, 2010, pp. 19-25.
- 5) 宮川成門ほか: 介護ニーズに基づくポジショニング用品の開発 特別養護老人ホーム入居者の仰臥位調査, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 22, pp. 15-18, 2020.
- 6) 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3次元形状, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 10, pp. 8-10, 2008.
- 7) 藤巻吾朗ほか: 自動車シートの座面形状の提案, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 16, pp. 13-16, 2014.
- 8) 宮川成門ほか: 介護ニーズに基づくポジショニング用品の開発(第2報)クッションの試作と材料の選択, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 23, pp. 13-17, 2021.
- 9) JIS A 1412-2: 熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法 第2部 熱流計法(HFM法), 日本工業規格, 1999.

木材乾燥における芳香蒸留水の有用成分利用（第2報）

ヒノキ芳香蒸留水抽出物の抗かび活性

伊藤国億*

Effective Use of Aromatic Distilled Water by Drying Wood (II) Antifungal Activity of Hinoki-Aromatic Distilled Water Extracts

Ito Kuniyasu*

ヒノキ材乾燥時に回収した芳香蒸留水(FW)抽出物の抗かび活性を評価するため、抽出物の成分割合が異なる4種類のFW抽出物を用い、クロカビおよび白癬菌に対してMIC試験等を行った。これらのFW抽出物のMIC値は*C. sphaerospermum*に対して156~823 μ g/ml、*T. rubrum*、*T. mentagrophytes*に対して39~521 μ g/mlであり、抗かび活性が認められた。試験菌に対するFW抽出物成分の抗かび活性はモノテルペンアルコールよりもセスキテルペンアルコールが高いと考えられた。また、寒天拡散法ではモノテルペンアルコールよりも放散強度の小さいセスキテルペンアルコール等の揮発成分が抗かび活性に大きく寄与したと考えられた。

1. 緒言

スギ、ヒノキなどの住宅用材は材内の含水量を減らすため乾燥処理されて市場に供給されているが、その乾燥過程で材内の水分が排出蒸気となって多量に生じている。この排出蒸気には木材由来の精油等が含まれているが、排出蒸気を回収して精油を利用することはほとんどない。我々は、未利用資源かつ副生産物である排出蒸気中の精油を回収するため、木材乾燥をラボスケールから実大スケールまで行い、その成分や収量を検証¹⁻³⁾した。こうしたなか、精油回収の際に精油よりも多く回収される芳香蒸留水（以降、FWとする。）に着目した。一般的にFWとは植物の枝葉から水蒸気蒸留により精油抽出と共に滞留して得られる水（ハーブウォーターとも言われる。）であり、抽出時に素材から水に溶け込んだ成分が含まれるため、その機能性を活用して古くから芳香剤や化粧水として利用されている⁴⁾。これと同じ原理で木材乾燥から得られるFWにも機能性成分が含まれていると考えられることから、ヒノキ材乾燥時に回収したFWの抽出成分を調査した⁵⁾。このFWには α -テルピネオールやテルペン-4-オールなどのモノテルペンアルコールや α -カジノールや ϵ -ムウロロールなどの

セスキテルペンアルコールが含まれていた。 α -カジノールや ϵ -ムウロロールは木材を腐朽させる担子菌に対する抗菌活性を有することが認められている⁶⁻⁷⁾。また、テルペン-4-オールはティートリーオイルの主成分であり、様々な抗菌活性が知られている⁸⁾。

そこで、ヒノキ材乾燥時に回収したFWから有用成分を抽出し、FWの機能性の一つとして抗かび活性を評価することにした。

2. 実験方法

2.1 FW抽出物の調製

FWは既報⁵⁾の実験方法と同様に、ヒノキ材の乾燥過程で排出される蒸気を冷却して回収した。FW中の精油成分間の比が大きく相違する乾燥温度max. 90 $^{\circ}$ C前期分とmax. 75 $^{\circ}$ C後期分及び高温セット乾燥のセット直後分を用いた。また、水蒸気蒸留において蒸留10時間経過後から回収したFWも用いた。各FWは固相抽出カートリッジ（GLサイエンス社製、Inert Sep RP-1）を用いてアセトン抽出し、エバポレーターで濃縮後、窒素雰囲気下でアセトンを除去して抽出物を調製した。以降、乾燥温度max. 90 $^{\circ}$ C前期分のFW抽出物を「wd90_fw_ext.」、乾燥温度max. 75 $^{\circ}$ C後期分のFW抽出物を「wd75_fw_ext.」、高温セット乾燥のセット直後分のFW抽出物を

* 試験研究部

「wd120_fw_ext.」、水蒸気蒸留抽出物を「ws_fw_ext.」とする。これら抽出物はアセトンで1%濃度に希釈して既報⁵⁾と同様にGCMS分析に供し、成分分析を行った。

2.2 FW抽出物の抗かび活性試験

2.2.1 供試材料

2.2.1.1 試験液

2.1で得た各抽出物40mgを2ml容メスフラスコにそれぞれ加えて5% Tween 80水溶液で定容(2% (w/v) 濃度)し、最小発育阻止濃度MIC(Minimum Inhibitory Concentration)試験に用いた。また、各抽出物50mgを1ml容メスフラスコにそれぞれ加えてアセトンで定容(5% (w/v) 濃度)し、ペーパーディスク法による阻止円の測定に用いた。なお、対照材料として α -テルピネオール(>95.0% GC、東京化成工業社製)を用い、他の試験液と同様に調製した。

2.2.1.2 供試菌株

クロカビとして*Cladosporium sphaerospermum* (NBRC 6348)、白癬菌として*Trichophyton rubrum*(NBRC 5647)、*Trichophyton mentagrophytes* (NBRC 32409)を用いた。培地はMIC試験に*C. sphaerospermum*にはポテト・デキストロースブロス、*T. rubrum*、*T. mentagrophytes*にはサブロー・デキストロースブロス、ペーパーディスク法に*C. sphaerospermum*にはPDA培地を、*T. rubrum*、*T. mentagrophytes*にはSDA培地を用いた。各菌株は試験直前に各寒天培地を用いて28℃にて1週間の前培養を行った。前培養した菌株から孢子を約 10^6 個/mlとなるようにとり、スルホコハク酸ジオクチルナトリウム水溶液に加え、単一孢子懸濁液を調製した。

2.2.2 MIC試験

予めオートクレーブ滅菌(121℃、15分)したブロス3.5mlの入った試験管に2.2.1.1で調整した各2% (w/v) 試験液0.5mlを加えて攪拌した。攪拌後、2ml分取してブロス2mlの入った別の試験管に加えて攪拌し、この操作を繰り返して2倍希釈系列で試験液濃度0.002~0.25% (20~2,500 $\mu\text{g}/\text{ml}$)とする培地を調製した。なお、予めオートクレーブ滅菌前のブロスにクロラムフェニコール濃度が0.005%になるように添加した。

各試験液濃度に調製した培地に各孢子懸濁液100 μl をそれぞれ接種し、タッチミキサーにて攪拌した後、28℃にて1週間培養した。培養後、菌糸の発育の有無を目視にて評価し、菌糸の発育が認められない濃度を求めた。また、FW抽出物を含まない5% Tween 80水溶液で調製した培地も先述と同様に培養し、菌糸の発育を確認した。なお、この試験は3回繰り返し行い、MICの平均値を算出した。

2.2.3 ペーパーディスク法による阻止円の測定

ペーパーディスク法において、寒天拡散法および寒天気体防止法を用いて各抽出物の抗かび活性を評価した。

2.2.3.1 寒天拡散法

予め調製した寒天培地(ガラスシャーレの内径89mm、内寸高さ20mm、クロラムフェニコール0.005%含有)に2.2.1.2にて調製した各孢子懸濁液0.3mlをそれぞれ塗抹した。この寒天培地に2.2.1.1にて調製した5% (w/v) 試験液30 μl を添加した滅菌済み濾紙(ϕ 8mm、厚手、アドバンテック社製)を培地中央に置き、シャーレを粘着テープで密閉し、28℃にて3日間培養した。なお、試験液中のアセトンは濾紙に添加後、予め安全キャビネット内で5分以上静置して除去した。

培養後、シャーレの裏に直行する線を引き、形成された菌糸の発育阻止円の直径2点をノギスで計測して平均値を算出した。また、アセトンを添加して5分以上静置した濾紙を置いた培地も先述と同様に培養し、菌糸の発育を確認した。なお、この試験は3回繰り返し行い、阻止円の平均値を算出した。

2.2.3.2 寒天気体防止法

2.2.3.1と同様に、接種した培地中央に試験液を添加した滅菌済み濾紙を置いた。これに濾紙を囲むようにシリコンリング(ϕ 20mm)を重ねて、その上にカバーガラス(24×25mm)を被せ、シャーレを粘着テープで密閉して培養した。この試験も3回繰り返し、阻止円を算出した。

2.2.3.3 気体寄与率の算出⁹⁾

各試験液の気体の寄与を評価するため、以下の式のとおり気体寄与率(δ)を算出した。

$$\delta = \{1 - (b - 20) / (a - 20)\} \times 100 \dots \dots (式)$$

a:寒天拡散法の阻止円

b:寒天气体防止法の阻止円

なお、阻止円直径が20mm以上の場合に限り算出

2.3 FW抽出物の放散成分分析

2.2.1.1にて調製した5% (w/v) 試験液30μlを抗かび活性試験に用いた濾紙に添加し、5分以上室内で静置してアセトン除去した。これをサンプリングバッグ(テドラバッグ、10L容)に入れて脱気し、次いで清浄空気を6.2L充填して28℃下で24時間静置した。なお、試験液量に対するサンプリングバッグ体積の比は2.2.3に用いたシャーレ(体積0.124L)の約50倍希釈とした。

静置後、Tenax TA吸着管を用いてサンプリングバッグの空気を0.5L捕集した。捕集した吸着管は加熱脱着-GCMS分析に供し、表1に示す分析条件で測定した。各FW抽出物の放散成分はn-アルカン(林純薬工業社製 C7-C33)を同様に測定してリテンションインデックス(RI)を作成し、精油のマススペクトル・データベースのGCリテンションインデックスおよびNISTライブラリより成分を定性した。また、内部標準試料自動添加装置によりトルエンd8を内部標準とし、トータルイオンクロマトグラム(TIC)の各ピーク面積と内部標準の面積の比を算出し、各FW抽出物の放散成分の強度を比較した。なお、この試験は3回繰り返し行い、各成分の平均強度を算出した。

表1 加熱脱着-GCMS分析条件

熱脱着装置	Perkinelmer Turbo Matrix 650
ページ	1 min
脱着流量	60 ml/min
温度及び時間	280 °C、3 min
スプリット	入口 40 ml/min 出口 60 ml/min、注入率 1%
トラップ	Tenax TA/ Carboxen 1000
トラップ加熱	-20 °C - (40°C/s) - 280 °C (15min)
トランスファーライン	280 °C
GC/MS	Shimadzu GCMS - QP2020NX
測定モード	SCAN
キャリアガス	He、1 ml/min
オープン	50 °C - (10 °C/min) - 280 °C
カラム	DB-5 (30 m × 0.25 mm i. d. × 0.25 μm)
MS温度	230 °C
検出器	0.7 kV

3. 結果と考察

3.1 FW抽出物の抗かび活性

各FW抽出物の各試験菌に対するMICを表2に示す。また、FW抽出物のTICを図1に示す。表2に示すようにFW抽出物のMIC値はクロカビ(*C. sphaerospermum*)に対して156~823μg/ml、白癬菌(*T. rubrum*、*T. mentagrophytes*)に対して39~521μg/mlであり、クロカビよりも低かったことから、抗かび活性はクロカビよりも白癬菌に対して総体的に高かった。エッセンシャルオイルなどのテルペン類からなる精油の抗かび活性は白癬菌に

表2 各試験菌に対するMIC

[単位: μg/ml]

試験液	試験菌		
	<i>C. sphaerospermum</i>	<i>T. rubrum</i>	<i>T. mentagrophytes</i>
wd120_fw_ext.	833	261	521
wd90_fw_ext.	625	313	521
wd75_fw_ext.	417	156	313
ws_fw_ext.	156	39	104
α-Terpineol	625	625	417

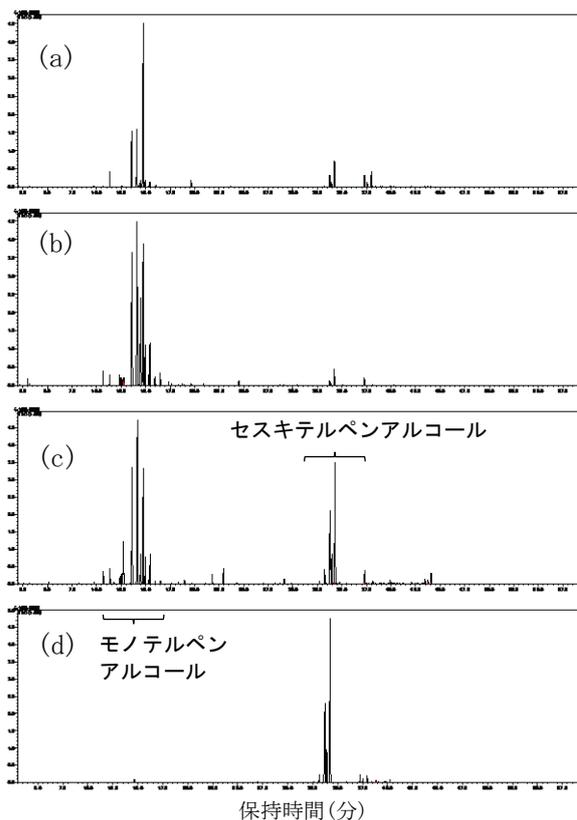


図1 FW抽出物のTIC

(a) wd120_fw_ext. (b) wd90_fw_ext.
(c) wd75_fw_ext. (d) ws_fw_ext.

より高いことが知られているが、本試験のモノテルペンアルコールやセスキテルペンアルコールから構成されるFW抽出物も精油と同様な活性傾向を示した。FW抽出物間においてMIC値はws_fw_ext.、wd75_fw_ext.、次いでwd90_fw_ext. またはwd120_fw_ext. の順に低かった。図1に示すようにTICチャートの保持時間14分前後のピークはボルネオールやテルペン-4-オール、 α -テルピネオールなどのモノテルペンアルコール、保持時間34分前後のピークは ϵ -ムウロロールや α -ムウロロール、 α -カジノールなどのセスキテルペンアルコールであり、各FW抽出物のセスキテルペンアルコールの成分割合はws_fw_ext.、wd75_fw_ext.、wd120_fw_ext.、wd90_fw_ext. の順に大きいことから、これら試験菌の抗かび活性はセスキテルペンアルコールの寄与が大きいと考えられる。また、wd120_fw_ext. に最も多く含まれる α -テルピネオール単体のMIC値はFW抽出物よりも総体的に高かったことから、FW抽出物の成分のうち α -テルピネオール以外の成分で、特にセスキテルペンアルコールが抗かび活性により寄与したと思われる。

寒天拡散法においてwd120_fw_ext.、wd75_fw_ext.、ws_fw_ext. を用いた各試験菌に対する阻止円を図2に示す。全てのFW抽出物に*C. sphaerospermum* よりも *T. rubrum* および *T. mentagrophytes* に大きい阻止円が形成され、MIC試験と同様な抗かび活性の傾向を示した。FW抽出物

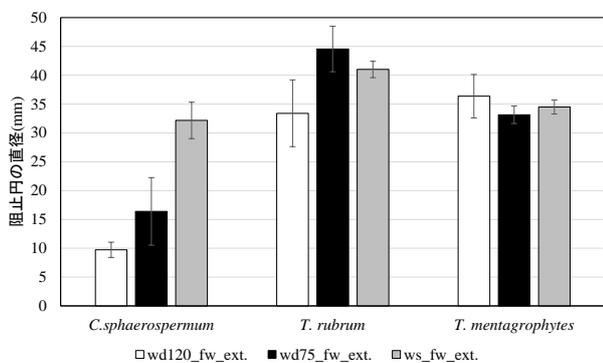


図2 寒天拡散法のFW抽出物による阻止円

表3 FW抽出物の気体寄与率

[単位：%]

試験液	試験菌		
	<i>C. sphaerospermum</i>	<i>T. rubrum</i>	<i>T. mentagrophytes</i>
wd120_fw_ext.	-	57	47
wd75_fw_ext.	-	83	99
ws_fw_ext.	87	48	79

-: 寒天拡散法において阻止円20mm以下

間では*C. sphaerospermum*に対してws_fw_ext.、wd75_fw_ext.、wd120_fw_ext. の順に阻止円が大きく、抗かび活性はMIC試験と同様な抽出物間の傾向を示した。一方、*T. rubrum*および*T. mentagrophytes*に対して抽出物間の阻止円の大きさは余り変わらず、MIC試験と異なる傾向を示した。

精油の抗菌性試験においてMIC試験と寒天拡散法では異なる活性傾向を示すことが報告されている⁹⁾。寒天拡散法では揮発する精油成分の活性が影響するため、本実験においてもシャーレ内で揮発した成分が影響した可能性が高い。そこで寒天気体防止法を用い、揮発成分を抑制したときの阻止円を測定し、気体寄与率を算出した(表3)。

*C. sphaerospermum*に対するFW抽出物の気体寄与率はwd120_fw_ext. およびwd75_fw_ext. において算出できなかった。これは寒天気体防止法のリング直径に満たない大きさの阻止円であり、抽出物濃度が足りなかった可能性があるため、濃度を上げた追試を行う必要がある。*C. sphaerospermum*に対するws_fw_ext. の気体寄与率は87%と高く、揮発成分の抗かび活性への寄与が大きかった。*T. rubrum*および*T. mentagrophytes*に対するFW抽出物の気体寄与率は各FW抽出物において50%弱～100%弱であったことから、揮発成分も抗かび活性に寄与したことを示唆した。FW抽出物間では*T. rubrum*および*T. mentagrophytes* に対してwd75_fw_ext.、ws_fw_ext.、wd120_fw_ext. の順に気体寄与率が高い傾向にあった。これはMIC試験におけるFW抽出物間の抗かび活性(ws_fw_ext.、wd75_fw_ext.、wd120_fw_ext. の順に高い)と異なった。つまり、MIC試験で液体寒天に分散したFW抽出物の成分比と寒天拡散法における揮発成分比、揮発分量が異なることで抗かび活性が相違したと考えられる。

FW抽出物の放散成分のTICを図3に示す。各FW抽出物において図1に示す抽出成分比に比べ、図3に示す放散成分比は相違し、総体的にモノテルペンアルコールが増加、セスキテルペンアルコールが低下し、両者の成分比の差が大きくなった。特にws_fw_ext. においてモノテルペンアルコールの主要な成分であったボルネオールやテルペン-4-オール、 α -テルピネオールの放散成分割合は60%を占め、抽出物中に5%未満であった成分割合が10倍以上に増加した。また、抽出物中の割合が1%未満であった酢酸ボルニルや酢酸テルピニルは、放散成分では1～3%に割合が増加した。

内部標準物質のトルエンd8に対する放散成分の相対強度(全てのピーク/トルエンd8)はwd120_fw_ext. は380、wd75_fw_ext. は451、

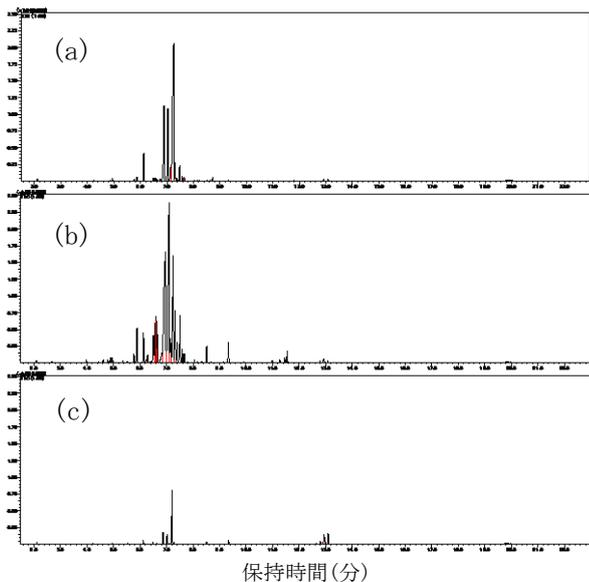


図3 FW抽出物の放散成分のTIC

(a)wd120_fw_ext. (b)wd75_fw_ext.
(c)ws_fw_ext.

ws_fw_ext. は 59 であった。wd120_fw_ext. と wd75_fw_ext. の放散量の差は10%程度と小さいにも係わらず、気体寄与率は相違し、wd120_fw_ext. よりもwd75_fw_ext. の方が高かった。つまり、全ての揮発成分の総量ではなく、各成分の抗かび活性に差があり、かつこれら成分量の差が気体寄与率に影響したと考えられる。

成分毎の放散強度のうち、FW抽出物の主要な成分と wd120_fw_ext. に対して wd75_fw_ext. および ws_fw_ext. の放散強度比が5倍以上となる成分を表4に示す。α-テルピネオール放散強度は wd120_fw_ext. が最も大きかったが、気体寄与率が低く、抗かび活性への気体寄与は他成分に比べて低いと考えられる。また、ボルネオールおよびテルペン-4-オールの放散強度は気体寄与率が高い wd75_fw_ext. が最も大きかったが、ws_fw_ext. では放散強度が5、4と少なく、wd75_fw_ext. の20分の1以下であった。放散強度が小さいにも関わらず、寒天拡散法におけるws_fw_ext. の阻止円は他のFW抽出物と余り変わらない大きさであった。ゆえに他の揮発成分か、或いは寒天拡散した成分が阻止円の形成に寄与したと推察されるが、ws_fw_ext. の気体寄与率が高い傾向にあったことから、他の揮発成分の寄与が大きいと考えられる。従って、ボルネオールおよびテルペン-4-オールの抗かび活性への気体寄与は他成分に比べて低いと考えられる。

表4 FW抽出物の放散成分強度

RT (min)	成分名	ピーク強度/Td8			放散強度比	
		wd120_fw_ext.	wd75_fw_ext.	ws_fw_ext.	(75/120)_fw_ext.	(ws/120)_fw_ext.
5.73	unknown	2	13	N.D.	5.1	
5.99	Fenchol<endo->	16	9	2	0.6	0.1
6.14	unknown	1	3	N.D.	5.4	
6.35	Pinocarveol<t->	2	13	1	6.0	0.4
6.42	Camphor/Verbenol<t->	3	21	N.D.	7.1	
6.48	Camphene hydrate	1	12	0	8.7	0.3
6.60	Isoborneol	1	6	N.D.	4.5	
6.77	Borneol	60	98	5	1.6	0.1
6.92	Terpinen-4-ol	51	113	4	2.2	0.1
7.16	Terpineol<α->	165	53	26	0.3	0.2
7.20	Myrtenol	8	17	1	2.1	0.1
7.36	Verbenone	8	17	N.D.	2.1	
8.36	Bornyl acetate	1	5	1	9.4	1.9
9.19	Terpinyl acetate<α->	0	6	2	13.7	3.7
12.79	Murrolol<epi-α->	1	3	7	2.7	6.2
12.84	Murolol<α->	N.D.	0	1		
12.94	Cadinol<α->	1	1	5	1.8	7.0

太字：FW抽出物の主要成分、N.D.：未検出

wd75_fw_ext. および ws_fw_ext. に共通して wd120_fw_ext. よりも放散強度比の高い成分は酢酸ボルニルと酢酸テルピニル、α-カジノールなどのセスキテルペンアルコールであった。これら成分は放散強度がモノテルペンアルコールに比べて小さいものの、寒天拡散法において気体状態で抗かび活性の寄与が他成分に比べて大きかったと考えられる。

一方、*T. rubrum*に対するws_fw_ext. の気体寄与率は48%であり、他の試験菌との差は不明であり、原因を究明したい。

4. まとめ

ヒノキ材乾燥時に回収した芳香蒸留水(FW)の抽出物の抗かび活性を評価するため、抽出成分の成分割合が異なる4種類のFW抽出物を用い、各試験菌(クロカビ:*C. sphaerospermum*、白癬菌:*T. rubrum*、*T. mentagrophytes*)に対してMIC試験およびペーパードイスク法(寒天拡散法、寒天氣体防止法)による阻止円の測定を行った。

FW抽出物のMIC値は*C. sphaerospermum*に対して156~823μg/ml、*T. rubrum*、*T. mentagrophytes*に対して39~521μg/mlであり、抗かび活性が認められた。4種類のFW抽出物は成分割合が異なることから、成分の抗かび活性について考察した。FW抽出物のMIC値は標準試薬のα-テルピネオールよりも低く、セスキテルペンアルコールの成分割合が大きいほど低かった。従って、これら試験菌に対するFW抽出物成分の抗かび活性はモノテルペンアルコールよりもセスキテルペンアルコールが高かったと考えられる。

寒天拡散法および気体拡散防止法を用いた阻止円の測定から、FW抽出物の揮発成分による抗かび活性について評価した。MIC試験と寒天拡散法では異なる活性傾向を示した。各試験菌に対するFW抽出物の気体寄与率は50%弱～100%弱であり、寒天拡散法において揮発成分は抗かび活性に大きく寄与したと考えられる。

寒天拡散法における揮発成分を調べるため、サンプリングバッグ法により放散成分とその強度を測定した。α-テルピネオールなどの主要なモノテルペンアルコールの放散強度と気体寄与率は相関せず、放散強度の小さいFW抽出物においても気体寄与率が高かったことから、各揮発成分の抗かび活性に差があると推察された。気体寄与率が高いFW抽出物は酢酸ボルニルや酢酸テルピニル、セスキテルペンアルコールの放散強度が大きかった。従ってモノテルペンアルコールに比べてこれらの成分は放散強度が小さいものの、気体状態でも抗かび活性の寄与が大きかったと考えられる。

謝辞

本研究にあたり芳香蒸留水サンプルをご提供いただきました交告製材(株)様に感謝の意を表します。

参考文献

1) 伊藤国億ほか：香りでやすらぐ木工製品の開発 木材乾燥における排出蒸気中の精油成分につい

て、岐阜県生活技術研究所研究報告, 18, pp. 5-9, 2016.

- 2) 伊藤国億ほか：香りでやすらぐ木工製品の開発 (第3報) 木材乾燥における排出蒸気中の精油回収について, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 20, pp. 6-9, 2018.
- 3) 伊藤国億ほか：香りでやすらぐ木工製品の開発 (第5報) 木材乾燥による精油回収実証試験について, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 22, pp. 1-4, 2020.
- 4) 小木曾 加奈：信州産ハーブの芳香蒸留水-その特性と機能性-, 長野県短期大学紀要, 64, pp. 49-59, 2009.
- 5) 伊藤国億ほか：木材乾燥における芳香蒸留水の有用成分利用 (第1報) 芳香蒸留水の精油量について, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 23, pp. 18-22, 2021.
- 6) 近藤隆一郎ら：ヒノキ心材の耐朽成分、木材学会誌, 32(3), pp. 213-217, 1986.
- 7) 金城和彦ら：担子菌栽培培地に関する研究(第4報)ヒノキの阻害活性, 木材学会誌, 32(8), pp. 632-636, 1986.
- 8) 井上重治ら：精油の抗菌活性の詳細, 抗菌アロマセラピーへの招待, 井上重治ら, フレグランスジャーナル社, 2011, pp. 42-106.
- 9) Inouye S., Uchida K., Maruyama N. et al.: A novel method to estimate the contribution of the vapor activity of essential oils in agar diffusion assay., Jap J Med Mycol, 47, pp. 91-98, 2006.

木材の触覚特性の数値化と手触り感に関する指針の提案（第3報） 木材の触感評価に関する物理指標の検討

藤巻吾朗*¹, 山口穂高*¹, 吉田宏昭*²

Digitalization of Tactile Characteristics of Wood and Proposal of Guidelines for Tactile Sensation(III) Investigation of Physical Indices for Tactile Evaluation of Wood

FUJIMAKI Goroh*¹, YAMAGUCHI Hodaka*¹, YOSHIDA Hiroaki*²

本報告では、木材の温冷感、硬軟感、粗滑感、乾湿感と物理特性との関連性を明らかにすることで、客観的な指標による触感の予測式を提案した。硬軟感については、木材サンプルの中での違いを判断すること自体が難しく、温冷感を手掛かりに評価しており、他の触感と比較して推定精度が低かった。また、今回の木材サンプルでは、 Pm 値と Rs 値の相関が高く、布の触感について調査した先行研究とは異なる結果となった。実用化のためには新たなサンプルを使つての検証や振動測定の実験性の確認が必要となるが、昨年度報告した木材の触感と印象評価に関するパス解析の研究結果と合わせることで、客観的な指標をもとに木材の触感および印象評価を推測することが可能となった。

1. 緒言

前報¹⁾では、木材の触感とそれに伴う木材の印象評価の全体的な因果関係を把握するため、触感を構成する5種類の次元²⁾のうち凹凸感（マクロな粗さ）を除く、粗滑感、硬軟感、温冷感、摩擦感（乾湿感）について、これらの因子と高次の印象評価である自然感、高級感、快適感との関係を調査した。パス解析を行った結果、モデルの当てはまりは良好であったが、触感を構成する4つの次元である粗滑感、硬軟感、温冷感、乾湿感と関連性の高い物理特性値の選定には課題が残った。

本報告では、粗滑感、硬軟感、温冷感、乾湿感の4つの触感について、木材を評価する際に関連性の高い物理指標を検討し、木材の触感評価との関係を明らかにする。

2. 実験方法

触感評価と関連性が高いと考えられる物理特性について計測を行い、過去に実施した木材の触感

に関するアンケート調査³⁾のデータをもとに各評価項目との関連性を調査した。

2.1 アンケート調査

37名の大学生（男性19名、女性18名）を対象に8種類の木材サンプルについて触感に関するアンケート調査を行った。アンケート項目は全部で8項目あり、温冷感として「つめたいーあたたかい」、硬軟感として「かたいーやわらかい」、粗滑感として「ざらざらしたーつるつるした」、乾湿感として「からっとしたーしっとりした」、自然感として「人工的なー自然な」、高級感として「安そうなー高そうな」、快適感として「心地の悪いー心地の良い」、嗜好性として「嫌いー好き」とした。SD法による7段階評価で、集計の際は、各評価用語の右側に配置した項目をプラスとして-3~+3の値を割り当てた。アンケート調査は3日に分けて行い、サンプルを触らずに見た場合（視覚条件）、見ないで触った場合（以下、触覚条件）、見て触った場合（以下、視触覚条件）の3つの条件で行った。本報告では視覚の影響をなくするため、触覚条件のデータを用いて、粗滑感、硬軟感、温冷感、乾湿感の4つの触感に関するアンケート項目と後述する物理指標との関連性を調査した。

*¹ 試験研究部

*² 信州大学繊維学部

表1 アンケート調査に使用した木材サンプル

サンプル記号	樹種	塗装	外観(例)
BO	ブナ	オイル	
BU		ウレタン	
CO	スギ	オイル	
CU		ウレタン	
OO	ナラ	オイル	
OU		ウレタン	
WO	ブラック	オイル	
WU	ウォールナット	ウレタン	

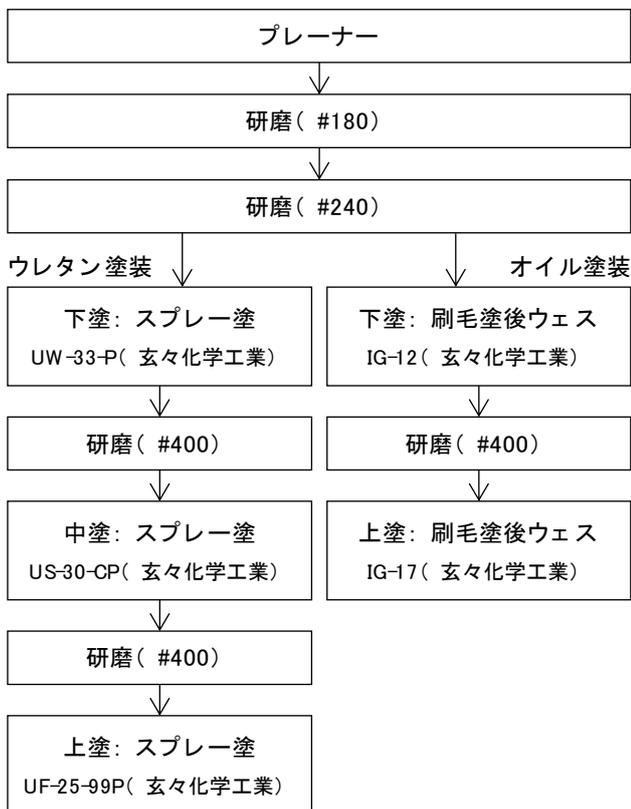


図1 木材サンプルの塗装工程

2.2 アンケート調査に使用した木材サンプル

木材サンプルには、ブナ、スギ、ナラ、ブラックウォールナットの柁目材を使用し、それぞれオイル塗装、ウレタン塗装を施した計8種類をサンプルとして提示した(表1)。木材サンプルは70×

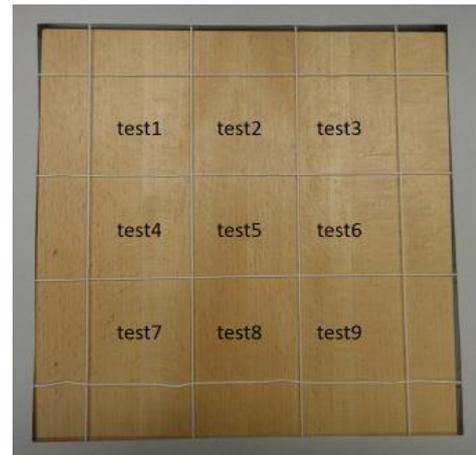


図2 q-max値の測定箇所

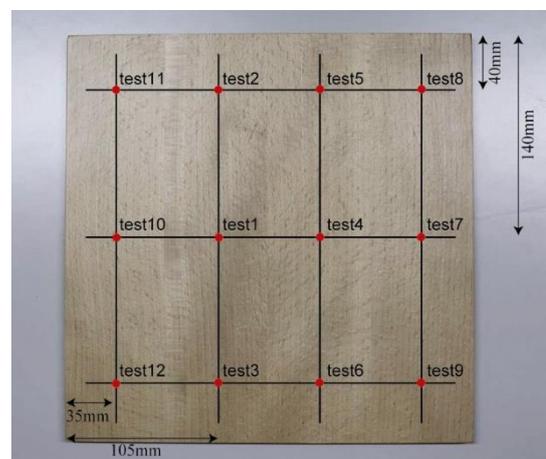


図3 ブリネル硬さの測定箇所

280×10mmを4枚幅接ぎした280×280×10mmのものを使用した。オイル塗装、ウレタン塗装の塗装工程については、図1に示す。

2.3 木材サンプルの物理特性

2.3.1 q-max値の測定

サーモラボ(株式会社カトーテック、KES-F7)を用いて最大熱吸収速度($q-max$)の測定を行った³⁾。測定にはアンケート調査に使用した木材サンプルと同一のものを使用し、計測開始後約60秒間で最大値に達するまで測定し、最大値で安定したものを1試料につき9箇所の測定を行い(図2)、平均値を算出した。

2.3.2 ブリネル硬さの測定

オートグラフ(株式会社島津製作所、AG-IS)を用いてブリネル硬さの測定を行った⁴⁾。測定にはア

アンケート調査に使用した木材サンプルの共木（ともぎ）で作成した試料（280×280×10mm）を使用し、1試料につき12箇所での測定を行い（図3）、平均値を算出した。

2.3.3 摩擦特性および振動特性の測定

静・動摩擦測定機（株式会社トリニティラボ、TL201Tt）に振動測定を行うため、ゆびレコーダー（株式会社テック技販、FVR-10A、FVS-A）を固定し静摩擦、動摩擦の測定および接触子に伝わる振動の測定を行った⁵⁾（図4）。接触子には人の指紋パターンを模した触覚接触子を使用した⁶⁾。測定時の接触子にかかる垂直荷重は100gfで水平方向に10mm/sの速さで移動させた。測定にはアンケートに使用した木材サンプルと同じ工程で塗装を施した80×80×8mmの試料を用意し、1試料につき図5に示した6箇所での測定を行い、平均値を算出した。摩擦特性については、静・動摩擦測定機の測定結

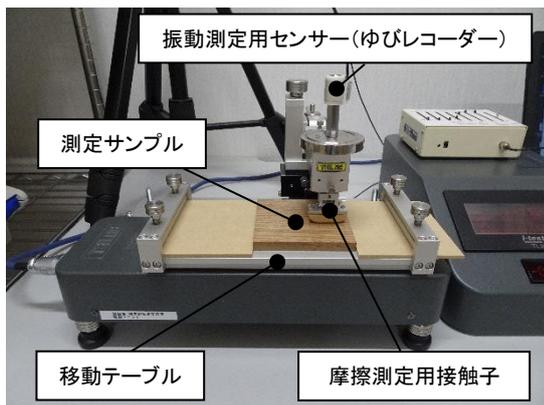


図4 摩擦・振動特性の測定

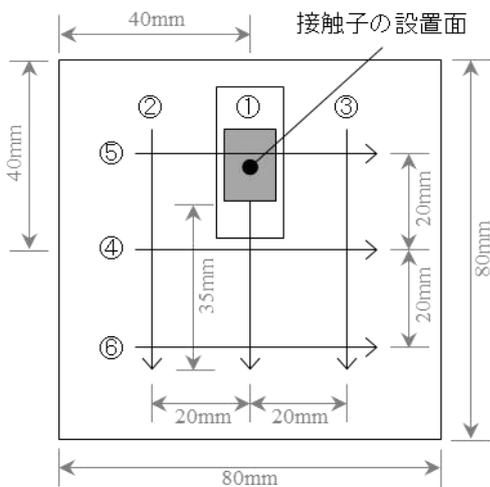


図5 摩擦・振動特性の測定箇所

果から、水平方向の最大荷重を垂直荷重で除した静摩擦係数 (μ_s)、測定開始地点から10mm～30mmでの水平方向の荷重の平均を垂直荷重で除した動摩擦係数 (μ_k) を計算した（図6）。

振動特性については、ゆびレコーダーの測定結果をもとにWelch法による5Hz毎のパワースペクトル密度（以下、PSD）の推定を行った。先行研究⁷⁾を参考にヒトの皮膚の振動感覚の受容器であるマイスナー小体およびパチニ小体の特性を考慮した特徴量の算出を行った。マイスナー小体に関連する指標として、推定されたPSDから20～100HzのPSD総和 (P_m)、パチニ小体に関連する指標として100～500HzのPSD総和 (P_p) および100～2000Hzの総和に対する100～500HzのPSD総和の割合 (R_s) を求めた（図7）。

3. 結果と考察

3.1 温冷感

温冷感については、q-max値と強い相関を示した（図8）。先行研究³⁾では、事前に主成分分析を行い、複数の物理特性値を縮約した指標を用いてから触

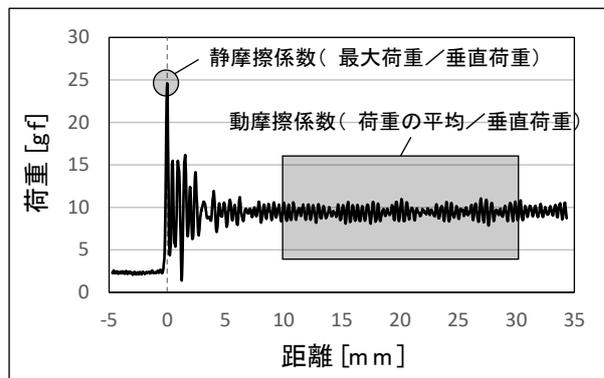


図6 摩擦特性データの算出方法

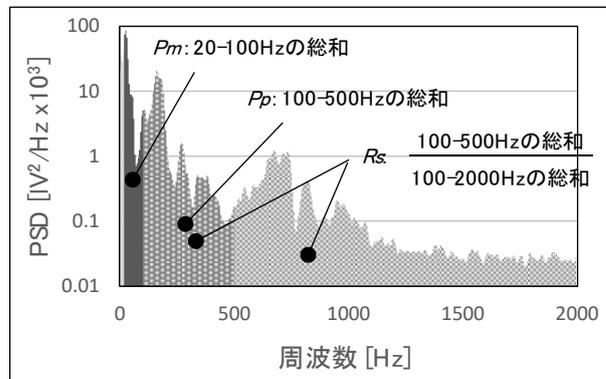


図7 振動特性データの算出方法

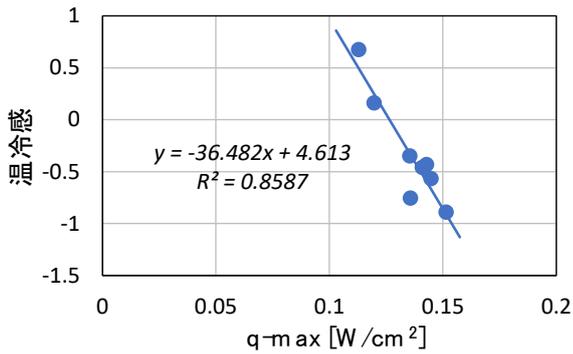


図8 温冷感とq-max値

感との関連性を調べたが、本研究では、q-max値を指標とすることで視覚情報のない条件での温冷感が高い精度で予測可能であることが示唆された ($R^2=0.86$)。

3.2 硬軟感

硬軟感については、ブリネル硬さとの相関は確認されず、q-max値との相関関係が確認された(図9)。このことから木材の硬軟感は木材に触れた時の熱移動を手掛かりに密度を推定して評価していることが推察される。硬軟感について、一元配置の分散分析を行った結果、主効果は認められたものの ($p<0.05$)、多重比較の結果、有意差が認められたのはBUとCUの一組のみ (BU>CU) であった。このことから、今回用意した木製品に使われることの多い木材サンプルについては、サンプル間の硬軟感の評価に明確な差が見られないため、物性値との対応関係を調べるのが困難であったと考えられる。また、硬軟感の予測のため、目的変数を硬軟感の平均得点、説明変数をPm値、Pp値、Rs値、 μs 値、 μk 値、q-max値として、ステップワイズ法(増減法)による重回帰分析を行った結果、q-max値以外の変数は除外された。そのため、精度は低いものの

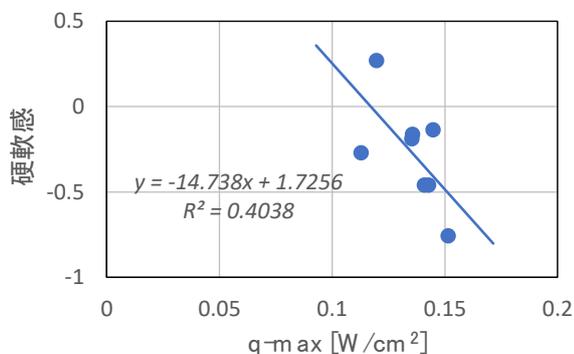


図9 硬軟感とq-max値

硬軟感は図9に示した回帰式により推定できると考えられた ($R^2=0.40$)。

3.3 粗滑感

粗滑感については、Pm値、Pp値、Rs値、との間にそれぞれ相関関係が見られた。先行研究⁷⁾と同様に最も強い相関があったのはRs値であった(図10)。

図10に示した回帰式でも比較的高い精度で粗滑感を推定できると考えられるが ($R^2=0.67$)、予測精度向上のため、目的変数を粗滑感の平均得点、説明変数をPm値、Pp値、Rs値、 μs 値、 μk 値、q-max値としたステップワイズ法(増減法)による重回帰分析を行った。その結果、粗滑感はRs値、 μk 値により(1)式で高い精度で予測可能となることが示唆された ($R^2=0.93$ 、修正 $R^2=0.90$)。

$$\text{粗滑感} = -12.86Rs + 16.8\mu k + 6.70 \quad \dots (1)$$

*Rs: Rs値

* μk : 動摩擦係数

3.4 乾湿感

乾湿感については、Pm値、Pp値、Rs値、との間にそれぞれ強い相関関係が見られた。最も強い相関があったのは、粗滑感と同様にRs値であった(図11)。先行研究⁷⁾では、Pm値はしっとり感との間に強い負の相関関係があったが、今回の実験では、Pm値とRs値の相関が強く、Rs値の方がしっとり感との相関は強かった。実験に使用したサンプルが布ではなく木材であり、布に比べてサンプル間の表面テクスチャの差があまりなかったことが理由一つとして考えられる。

図11に示した回帰式でも比較的高い精度で乾湿感を推定できると考えられるが ($R^2=0.72$)、予測精度向上のため、目的変数を乾湿感の平均得点、説

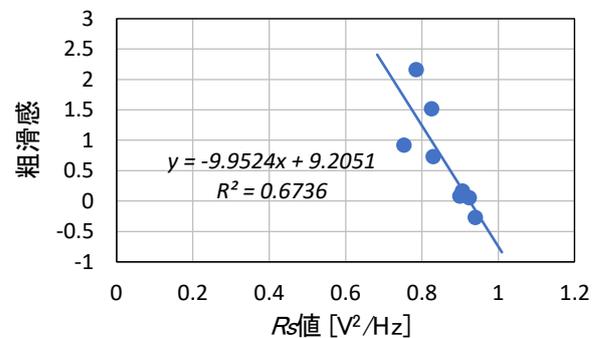


図10 粗滑感とRs値

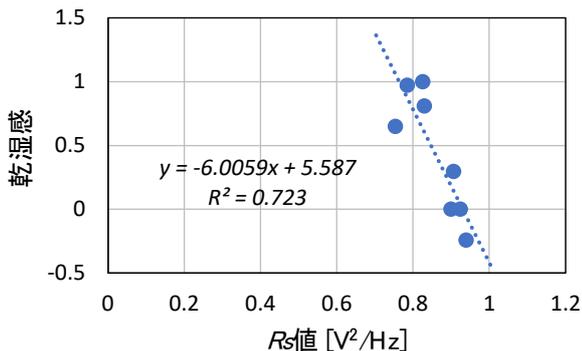


図11 乾湿感とRs値

明変数を Pm 値、 Pp 値、 Rs 値、 μs 値、 μk 値、 $q-max$ 値としたステップワイズ法 (増減法) による重回帰分析を行った。その結果、乾湿感は Rs 値、 μs 値、 μk 値により (2) 式で高い精度で予測可能となることが示唆された ($R^2=0.93$ 、修正 $R^2=0.87$)。

$$\text{乾湿感} = -9.86Rs + 3.11\mu s + 5.34\mu k + 4.99 \quad \dots (2)$$

- * Rs : Rs 値
- * μs : 静摩擦係数
- * μk : 動摩擦係数

しかしながら、先行研究を考慮すると Pm 値を基準としたモデルの方がより汎用性が高いことも推察され、 Pm 値と相関の高い Rs 値を省いてステップワイズ法 (増減法) による重回帰分析を行った結果、乾湿感は Pm 値、 μs 値により (3) 式で予測可能であると考えられた ($R^2=0.78$ 、修正 $R^2=0.70$)。

Pm 値と Rs 値のどちらを基準としたモデルが妥当であるかについては検討の余地が残るが、現時点では木材の触感評価については Rs 値を基準とした (2) 式のモデルを採択することが望ましいと考えられる。

$$\text{乾湿感} = -1.08Pm - 2.02\mu s + 2.62 \quad \dots (3)$$

- * Pm : Pm 値
- * μs : 静摩擦係数

4. まとめ

先行研究¹⁾³⁾で課題となっていた木材の温冷感、硬軟感、粗滑感、乾湿感と物理特性との関連性を明らかにすることで、客観的な指標による触感の予測式を提案した。しかし、硬軟感については、木材サンプルの中での違いを判断すること自体が難しく、温冷感を手掛かりに評価しており、他の触感と比較して推定精度が低いと考えられた。また、本報告での摩擦特性や振動特性は特定条件での測定結果であり、得られた予測式の実用化のためには新たなサンプルを使っての検証や測定結果の再現性の確認が必要となる。

本報告で得られた成果と昨年度報告した木材の触感と印象評価に関するパス解析の研究成果を合わせることで、客観的な指標をもとに木材の触感および印象評価を推測することが可能となった。

参考文献

- 1) 藤巻吾朗ほか: 木材の触覚特性の数値化と手触り感に関する指針の提案—木材の触感と印象評価に関するパス解析, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 23, pp. 26-30, 2021.
- 2) 永野光, 岡本正吾, 山田陽滋: 触覚的テクスチャの材質感次元構成に関する研究動向, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, 16 (3), pp. 343-353, 2011.
- 3) 設楽稔那子ほか: 木材評価時における視触覚の印象形成, 木材学会誌, 63 (4), pp. 149-161, 2017.
- 4) JIS Z2101: 木材硬さの試験方法, 日本規格協会, 2009.
- 5) 藤巻吾朗ほか: 木材の触覚特性の数値化と手触り感に関する指針の提案—接触時の力と速度が摩擦および振動特性に与える影響, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 22, pp. 41-45, 2020.
- 6) 野村俊夫: 指紋模擬加工した検知子を使った摩擦測定装置, 表面技術, 70 (3), pp. 147-150, 2019.
- 7) 田中由浩, 田中真美, 長南征二: 手触り感計測用センサシステムを用いた触覚感性計測, 日本機械学会論文集 C 編, 73 (727), pp. 169-176, 2007.

木材の触覚特性の数値化と手触り感に関する指針の提案（第4報） 視覚情報が木材の触感および印象評価に与える影響

藤巻吾朗*¹, 山口穂高*¹, 山崎直樹*², 吉田宏昭*²

Digitalization of Tactile Characteristics of Wood and Proposal of Guidelines for Tactile Sensation (IV) Effect of Visual Information on Tactile and Impression Evaluation of Wood

FUJIMAKI Goroh*¹, YAMAGUCHI Hodaka*¹, YAMAZAKI Naoki*², YOSHIDA Hiroaki*²

視覚情報や触覚情報の有無が木材の触感や印象評価に与える影響を調査した結果、触覚が影響を与える接触感の評価項目は、粗滑感、凹凸感、硬軟感、温冷感であり、視覚情報が影響を与える評価項目は、粗滑感、温冷感であった。感性評価項目については、視覚情報が自然感に影響を与え、高級感、快適感、嗜好性については、被験者群により評価傾向が異なった。木工関係者群は視覚情報や触覚情報の有無の影響はほとんどなかったが、一般消費者群は触覚を伴うことで高級感、快適感、嗜好性をポジティブに評価する傾向があった。また、木材の色味や道管の深さが触感に与える影響を調査した結果、一般消費者群は粗滑感、凹凸感、温冷感の評価への色味の影響が大きく、高級感、快適感への道管の深さの影響が大きいことが考察された。木工関係者群については、粗滑感、凹凸感への道管の深さの影響が大きく、全般的に色味の影響は小さいと考えられた。

1. 緒言

近年、製品の触感が重要視される傾向があり、皮や木材などの生体由来の素材は触感が好まれると言われている。また、これまでの研究により、木材を見て触った場合と見ないで触った場合にその触感や印象評価には違いがあることが明らかになっている^{1), 2)}。また、木製家具に使用されることの多い広葉樹には、道管が存在するため、加工した際に材料表面に凹凸ができる。ウレタンなどの塗膜を作る塗装は一般的には道管を埋める塗装方法であり、オイル塗装は一般的にはオイルを含浸させ、道管を埋めない塗装方法である。塗装方法による触感の違いについても先行研究¹⁾で報告されているが、道管の深さが触感に与える影響については不明な点が多い。

本報告では、視覚情報や触覚情報の有無が木材の触感や印象評価に与える影響を調査し、さらには、木材の特徴のひとつである道管の深さや視覚情報の代表的なものとして色味が触感に与える影

響を明らかにすることを目的とする。

2. 調査内容

2.1 アンケート調査

木材の触感に関するアンケート調査を行った。アンケート項目は先行研究³⁾を参考に接触感評価に関する5用語と感性評価に関する4用語の計9用語の形容詞対を用い(表1)、SD法による7段階の評価を行った。集計の際は表1に示した各用語の右側に配置した用語を正の値として-3~+3の値を割り当てた。アンケート調査は連続する3日間で実施した。呈示条件は、1日目は視覚条件(視覚情報のみで触らずに評価)、2日目は触覚条件(衝立を置き、サンプルが見えない状態で触って評価)、3日目は視触覚条件(サンプルを見ながら触って評価)とした。

被験者は一般消費者群として、日常的に木材に触れることの少ない大学生16名、木工関係者群として、日常的に木材に触れる機会の多い生活技術研究所の職員6名とした。

*1 試験研究部

*2 信州大学繊維学部

表1 アンケート項目

		評価用語
接触感評価	粗滑感	つるつるした-ざらざらした
	凹凸感	でこぼこした-たいらな
	硬軟感	かたい-やわらかい
	温冷感	つめたい-あたたかい
	乾湿感	からっとした-しっとりした
感性評価	自然感	自然な-人工的な
	高級感	安そうな-高そうな
	快適感	心地の悪い-心地のよい
	嗜好性	嫌い-好き

	漂白処理	無処理	アンモニア処理
オイル塗装 	WO	NO	AO
オイル研ぎ① 	WOF1	NOF1	AOF1
オイル研ぎ② 	WOF2	NOF2	AOF2

図1 木材サンプルの概要

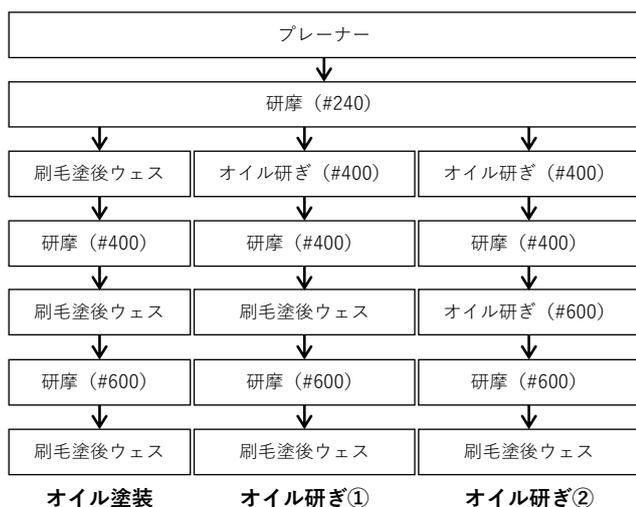


図2 塗装工程

2.2 木材サンプル

マサ目のレッドオーク280×70×10mm（長さ×幅×厚み）を4枚幅接ぎし、280×280×10mm（長さ×幅×厚み）の板材を作成した。作成した板材をもとに、色味と道管の深さを変えた計9条件（色味3条件、道管の深さ3条件）の木材サンプルを作成した（図1）。

色味は無処理、漂白処理、アンモニア処理の3つの処理方法で変化させた。漂白処理については、過酸化水素水（濃度28.0～30.0mass%）、アンモニア水（濃度30.0～35.5mass%）、水を質量1:1:4の割合で混ぜた液体を刷毛で塗布した。アンモニア処理については、ビニール袋に木材サンプルとシャーレに入れたアンモニア水（濃度30.0～35.5mass%）を一緒に入れ、48時間放置した。

道管の深さについては、図2に示した工程で道管を埋めないオープンポア（以下、OP）、道管を半分程度埋めたセミオープンポア（以下、SOP）、道管を9～10割程度埋めたクローズポア（以下、CP）を無処理、漂白処理、アンモニア処理を行った板材それぞれに対して作成した。

2.2.1 木材サンプルの物性値

木材サンプルの色味と道管の深さの測定を行った。いずれも測定は図3に示した9箇所とした。

(1) 色味の測定

ハンディー色差計（日本電色工業株式会社、NR-3000）を用いて色味の測定を行った。測定した9箇所の平均値、標準偏差を表2に示す。無処理のサンプルは赤味が強い（a*が高い）傾向、漂白処理を行ったサンプルは明るさが強く（L*が高く）、赤味が弱い（a*が低い）傾向、アンモニア処理を行ったサンプルは黄味が強い（b*が高い）傾向があった。

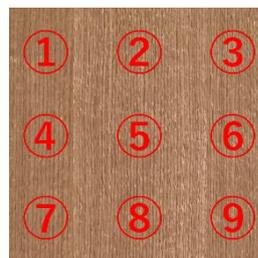


図3 測定箇所

表2 サンプルごとの色味

サンプル 記号	平均値			標準偏差		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
NO	64.1	20.7	28.5	0.98	4.26	2.85
NOF1	63.5	21.1	27.1	1.30	4.08	2.09
NOF2	66.2	19.3	26.7	1.30	2.96	3.01
WO	74.4	7.8	29.0	2.77	2.99	1.59
WOF1	72.0	12.0	30.1	1.42	3.72	1.97
WOF2	73.1	12.4	29.1	0.54	1.64	1.35
AO	63.0	18.0	35.4	3.26	3.37	2.77
AOF1	62.0	17.8	33.1	1.35	2.41	3.09
AOF2	63.4	18.8	30.5	1.43	4.01	3.89

表3 サンプルごとの道管の深さ

サンプル 記号	道管部分の深さ (9箇所測定)			
	平均	標準偏差	最小	最大
NO	0.23	0.034	0.16	0.28
NOF1	0.12	0.054	0.07	0.23
NOF2	0.05	0.012	0.03	0.07
WO	0.23	0.057	0.13	0.3
WOF1	0.16	0.031	0.11	0.21
WOF2	0.05	0.009	0.04	0.06
AO	0.26	0.054	0.17	0.34
AOF1	0.15	0.033	0.1	0.21
AOF2	0.04	0.009	0.03	0.05

*単位はmm

表4 分散分析結果 (被験者群と呈示条件)

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

評価用語	主効果		交互作用	多重比較	
	被験者群	呈示条件	被験者群×呈示条件	被験者群	呈示条件
つるつるした-ざらざらした	*	***		一般<木工	触覚<視触覚<視覚
でこぼこした-たいらな	**	***		木工<一般	視覚<触覚、視触覚
かたい-やわらかい		*			触覚、視触覚<視覚
つめたい-あたたかい		***			触覚<視触覚<視覚
からっとした-しっとりした					
自然な-人工的な		*			視覚、視触覚<触覚
安そうな-高そうな		**	**		一般：視覚<触覚、視触覚 木工：有意差なし
心地の悪い-心地のよい		***	***		一般：視覚<触覚、視触覚 木工：有意差なし
嫌い-好き		***	***		一般：視覚<視触覚<触覚 木工：有意差なし

(2) 道管の深さの測定

デジタルマイクロスコープ (株式会社キーエンス、VHX-7000) を用いて道管の深さを測定した。図3に示したそれぞれの測定箇所について、その付近に存在する道管1つを選択し、道管の深さの測定を行った。測定結果をもとに算出した9箇所の平均値、標準偏差、最小値、最大値を表3に示す。道管の深さの平均値を見るとOPは0.2mm以上、SOPは0.1~0.2mm程度、CPは0.1mm未満であった。

3. 結果と考察

3.1 被験者群と呈示条件による触感の違い

触感評価が被験者群や呈示条件によりどのように変化するかを調べるため、アンケート結果をもとに被験者群 (一般消費者群、木工関係者群)、呈示条件 (視覚条件、触覚条件、視触覚条件) を要因とした二元配置の分散分析を行った。分析結果を表4に示す。

接触感評価については、粗滑感、凹凸感で被験者群と呈示条件に主効果が認められ、一般消費者群は木工関係者群と比較して、また、触覚条件と視触覚条件が視覚条件に比べて「つるつるした」「たいらな」と評価する傾向がみられた。評価結果をみると、視覚条件では評点が0点付近に集中しており、視覚情報だけでは粗滑感、凹凸感の判断がつかず、触覚を伴う条件との差が出たと考えられる。また、粗滑感については、視触覚条件と触覚条件との間にも有意差が確認された。先行研究²⁾で示されているように木目を見ることによって「ざらざらした」と感じる傾向があったと考えられる。硬軟感、温冷感については呈示条件に主効果が認められ、視覚条件が触覚条件、視触覚条件に比べて「やわらかい」「あたたかい」と評価される傾向があった。温冷感については、触覚条件と視触覚条件との間にも有意差があり、視覚的なバイアスが温冷感についても働くことが示唆された。

感性評価について、自然感では呈示条件に主効果が認められ、触覚条件が他の条件に比べて「人工的な」と評価される傾向があった。木材の自然感は視覚情報の影響が強いことが考えられる。高級感、快適感、嗜好性については、呈示条件に主効果および交互作用が認められ、一般消費者群と木工関係者群で評価傾向が異なることが確認された。一般消費者群は視覚条件に比べて触覚を伴う条件では「高そうな」「心地よい」「好き」と評価される傾向があったが、木工関係者群は呈示条件による有意差はみられなかった。一般消費者に関しては、木材に実際に触れることで感性評価が高くなる傾向があった。

触覚の有無が影響を与える評価項目は、視覚条件と触覚条件、視触覚条件との間に有意差があったものだと考えられ、一般消費者群、木工関係者群ともに粗滑感、凹凸感、硬軟感、温冷感であり、一般消費者群については、高級感、快適感、嗜好性にも影響があると考えられた。触覚を伴う条件では視覚のみの条件と比べて「つるつるした」「たいらな」「かたい」「つめたい」と評価される傾向があり、一般消費者群はそれに加えて、触覚を伴う条件では視覚のみの条件と比べて「高そうな」「心地のよい」「好き」と評価される傾向があった。主効果や交互作用が見られなかった乾湿感については、人により評価傾向が様々で、手指の湿潤状態などにより、評価の個人差が大きい項目であると考えられる。

視覚情報が触覚に影響を与える評価項目は、視触覚条件と触覚条件に有意差があったものだと考えられ、粗滑感、温冷感、自然感で、一般消費者群

については嗜好性も影響すると考えられた。視覚を伴う条件では触覚のみの条件と比べて「ざらざらした」「あたたかい」「自然な」と評価される傾向があり、一般消費者群はそれに加えて「好き」と評価する傾向があった。これらの項目については視覚的なバイアスが働くと考えられる。

3.2 色味と道管の深さが触感に与える影響

色味や道管の深さが触感に与える影響を調べるため、視触覚条件のデータを使用し、色味（無処理、漂白処理、アンモニア処理）と道管の深さ（OP、SOP、CP）を要因とした二元配置の分散分析を一般消費者群と木工関係者群に分けて行った。一般消費者群と木工関係者群の分析結果をそれぞれ表5、表6に示す。

一般消費者群について、粗滑感では色味と道管の深さで主効果および交互作用が認められ、OP条件では無処理に比べてアンモニアが「つるつるした」と評価される傾向があり、SOPの条件では無処理に比べて漂白処理、アンモニア処理が「つるつるした」と評価される傾向があった。今回は細かな色味の測定を行っていないため目視による推測となるが、これは孔圏（大径道管が帯状に並んだ部分）とその他の部分とのコントラストが影響したものと考えられ、孔圏のコントラストが大きいものほど視覚的なバイアスが働き「ざらざらした」と評価される傾向があったと推察される。また、凹凸感については、色味と道管の深さに主効果が認められ、無処理と比べて漂白処理、アンモニア処理は「たいらな」と評価される傾向があり、前述の孔圏のコントラストが関連していると推察される。また、OP、SOPと比べてCPは「たいらな」と評価される傾向があり、0.12～0.26mm程度の範囲の深さの違いは判断が難しいことが考えられた。温冷感については、色味に主効果が認められ、漂白処理は無処理、アンモニア処理と比べて「つめたい」と評価される傾向があったが、これは、漂白処理が他と比べて暖色である赤み（ a^* ）の値が低かったことに起因すると考えられる。

一般消費者群の感性評価用語については、自然感では色味に主効果および交互作用が認められ、OP条件では無処理、アンモニア処理が漂白処理と比べて、SOP条件では無処理が漂白処理と比べて「自然な」と評価される傾向があった。漂白処理が他の条件に比べて「人工的な」と評価される傾向があり、赤み（ a^* ）の少ない材は違和感が発生し、自然感に影響を与えたと考えられる。また、CPでは有意差はなく、道管を埋めたことで視覚的な印象と

表5 一般消費者群の分散分析結果（色味と道管の深さ）

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

評価用語	主効果		交互作用	多重比較	
	色味	道管		色味	道管
つるつるした-ざらざらした	***	***	*	OP：アンモニア<無処理 SOP：漂白、アンモニア<無処理	無処理：CP<OP、SOP 漂白処理：CP<OP、SOP
でこぼこした-たいらな	***	**		無処理<漂白、アンモニア	OP、SOP<CP
かたい-やわらかい					
つめたい-あたたかい	**			漂白<無処理、アンモニア	
からっとした-しっとりした					
自然な-人工的な	**		**	OP：無処理、アンモニア<漂白 SOP：無処理<漂白	
安そうな-高そうな		*			SOP<CP
心地の悪い-心地のよい		**			SOP<CP
嫌い-好き			*	有意差なし	有意差なし

表6 木工関係者群の分散分析結果（色味と道管の深さ）

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

評価用語	主効果		交互作用	多重比較	
	色味	道管		色味	道管
つるつるした-ざらざらした	*	*		アンモニア<無処理、漂白	CP<OP、SOP
でこぼこした-たいらな		*			OP、SOP<CP
かたい-やわらかい			*	OP：無処理、アンモニア<漂白 SOP：アンモニア<無処理	有意差なし
つめたい-あたたかい					
からっとした-しっとりした					
自然な-人工的な					
安そうな-高そうな					
心地の悪い-心地のよい					
嫌い-好き					

触覚的な印象のギャップが生じ、色味に関係なく不自然だと感じたと考えられる。また、高級感と快適感では道管の深さに主効果が認められ、CPはSOPと比べて「高そうな」「心地のよい」と評価される傾向があった。CPとOPとの有意差は認められず、OPとSOPについては他の評価項目では有意差がなかったことから、今回の評価項目とは別の要因が働いていることも考えられ、現状ではその原因を考察することができなかった。嗜好性については、交互作用のみが認められ、各要因に対して水準ごとの多重比較を行ったが、有意差はなく、評価の個人

差や他の要因が影響していることが考えられる。木工関係者群について、粗滑感では色味と道管の深さの主効果が認められ、アンモニア処理は無処理や漂白処理と比較して、CPがOP、SOPと比較して「つるつるした」と評価される傾向があった。一般消費者群は特にアンモニア処理が他の条件と比べて評価傾向が異なり、交互作用が出たと考えられるが、木工関係者群は、アンモニア処理も他の条件と同様の傾向で評価していた。このことから、木工関係者群は色味の影響をあまり受けずに評価していたと考えられる。凹凸感については、道管の深

さに主効果が認められ、CPがOP、SOPと比較して「たいらな」と評価される傾向があった。

一般消費者と同様に道管の深さについては0.12～0.26mm程度の範囲の深さの違いは判断が難しいことが考えられた。硬軟感については、交互作用のみが認められ、各要因に対して水準ごとの多重比較を行ったが、木目など他の要因の影響があると考えられ、今回の実験ではその傾向を把握することはできなかった。

一般消費者群と木工関係者群を比較すると、一般消費者群は主効果の認められた項目が多かった。また、木工関係者群は粗滑感で色味の主効果が認められたが、一般消費者群で評価傾向の異なったアンモニア処理について評価傾向の違いはなく、触感の評価への視覚的な影響は少ないと考えられた。また、木工関係者群は感性評価項目については主効果が認められず、すべてが同じレッドオーク材であることを認識していたため、感性価値に関わる項目については評価にほとんど差が出なかったと考えられる。一般消費者群は接触感評価に色味の主効果が多くみられ、視覚情報が粗滑感や凹凸感、温冷感の評価に影響を与えることが示唆された。また、感性評価用語である高級感や快適感については、道管の深さのみ主効果が認められ、一般消費者群は色味に代表される見た目（視覚情報）の影響よりも手触り（触覚情報）が高級感や快適感の評価に重要となることが推察された。

4. まとめ

全体的な傾向で見ると、触覚の有無が影響を与える評価項目は、粗滑感、凹凸感、硬軟感、温冷感であり、一般消費者群については、それに加えて高級感、快適感、嗜好性に影響があると考えられた。乾湿感については、人により評価傾向が異なっていたため、手指の湿潤状態などにより、評価の個人差が大きい項目であると考えられる。視覚情報の

有無が触覚に影響を与える評価項目は、粗滑感、温冷感、自然感で、一般消費者群については嗜好性も影響すると考えられた。感性評価項目である高級感、快適感、嗜好性については、被験者群により評価傾向が異なり、木工関係者群は視覚情報や触覚情報の有無の影響はほとんどなかったが、一般消費者群は触覚を伴うことで、「高そうな」「心地のよい」「好き」とポジティブに評価する傾向があった。

また、木材の色味や道管の深さが触感に与える影響を調査した。一般消費者群は接触感評価に色味の主効果が多くみられ、視覚情報が粗滑感や凹凸感、温冷感の評価に影響を与えることが示唆された。高級感や快適感については、道管の深さに主効果があり、一般消費者群については色味に代表される見た目（触覚情報）の影響よりも手触り（触覚情報）が重要となることが推察された。木工関係者群については、粗滑感で色味の主効果が認められたが、一般消費者群で評価傾向の異なったアンモニア処理でも他の条件と比べて評価傾向の違いはなく、触感の評価への視覚的な影響は少ないと考えられた。また、木工関係者群は感性評価項目については主効果が認められず、すべてが同じレッドオーク材であることを認識していたため、感性価値に関わる項目については評価にほとんど差が出なかったと考えられる。

参考文献

- 1) 設楽稔那子ほか：木材評価時における視触覚の印象形成，木材学会誌，63（4），pp. 149-161，2017.
- 2) 堀田修吾ほか：塗装木材の粗滑感に及ぼす視覚の影響，材料，66（10），pp. 719-724，2017.
- 3) 仲村匡司：木材と感性，木材保存，23（3），pp. 102-110，1997.

家具製造現場におけるトレーサビリティ基盤技術の開発（第3報） 棚卸支援Webアプリケーションへの機械学習による画像認識の適用

森茂智彦*1, 生駒晃大*2, 山口穂高*1, 藤巻吾朗*1

Basic Technology Development of Traceability in the Furniture Manufacturing Field (III) Applying Machine Learning to Inventory Support Web Application

MORIMO Tomohiko*1, IKOMA Akihiro*2, YAMAGUCHI Hodaka*1, FUJIMAKI Goroh*1

昨年度開発した木製家具製造業における部材の在庫数のカウントを支援するWebアプリケーションに、機械学習による画像認識機能を追加した。部材は製造現場の中で比較的数の多い丸棒とし、学習モデルにYOLOv5を用いて物体検出モデルを作成した。機能をアプリケーションに実装し、実際の木製家具製造現場での丸棒部材の画像を用いて評価した結果、十分な認識精度が得られたため棚卸の効率化が期待できた。

1. 緒言

棚卸は企業の正確な利益の把握や在庫管理に必要な作業である。木製家具製造業において、丸棒のような部材は図1のように棚の中に規則的に並んでいるとは限らないため、数えている最中に数え終えたものとまだ数えていないものの区別が分からなくなったり、丸棒が転がり配置が変わることでやり直しとなったりすることがあるため、効率良く在庫数をカウントできることが求められている。

この課題に対して、前報では図2に示す棚卸支援Webアプリケーションを開発した¹⁾。部材棚の画像を撮影し、画像上の全ての部材をタップし印を付けることで、その印の数を部材の数とするものである。また、部材の数が多く場合にタップの労力を低減するため、画像認識により検出した丸棒に自動で印を付ける機能を実装した。作業者は目視により、未検出の部材へ印の追記と誤検出した印の消去のみ行えば良いため効率化を図れる。前報では画像認識にOpenCV.jsによるHough変換を用いたところ、部材によっては認識率が低く、修正するほうが労力のかかる場合があった。

そこで本報告では、画像認識精度を高め修正作業の負担を軽減することを目的として、機械学習

による画像認識を検討したので結果を報告する。



図1 丸棒部材の例



図2 アプリケーション画面

*1 試験研究部

*2 岐阜県産業技術総合センター 情報技術部

2. 物体検出モデルの作成

2.1 学習

学習モデルにはYOLOv5を用いた²⁾。YOLOv5は物体検出において定評のあるYOLO (You Look Only Once) のバージョン5に相当する。

学習データには、実際に木製家具メーカーの部材棚に格納されていた丸棒の画像を用いた。まず画像をグレースケール画像に変換した。グレースケール画像への変換式は式 (1) を用いた³⁾。

$$V=0.2126*R+0.7152*G+0.0722*B \quad \dots (1)$$

その後、グレースケール画像内の1,022個の丸棒にアノテーションを行い、さらにデータ拡張処理を行うことで5,702枚の画像データセットを作成した。画像データセットはランダムに学習用4,037枚、検証用1,168枚、テスト用497枚に振り分けた。

学習パラメータは認識解像度640×640、バッチサイズ8、Epoch数1,000とした。パラメータファイルは、スマートフォンやタブレットでの使用を考慮し、最も軽量のYOLOv5s.yamlを用いた。

2.2 評価

学習を行った結果を図3に示す。

<各項目の説明>

- Box : 検出位置 (ボックス) の正確さ

- Objectness : 検出範囲内の物体の有無の信頼度
- Classification : クラス分類の信頼度、今回は丸棒1種類のみを検出するため空欄
- Precision : 検出結果の中で正しく検出できた割合
- Recall : 正解の総数に対し正しく検出できた割合
- mAP@0.5 : 正解位置とのIOU (ボックス同士の重なり比率) が0.5以上の検出結果を正解とした場合の全クラスに対するAP (物体検出の精度) の平均、今回は1クラスのためAP@0.5と同義
- mAP@0.5:0.95 : IOUを0.5~0.95の範囲で0.05刻みに変化した時のAPの平均から全クラスに対する平均を求めたもの、今回はAP@0.5:0.95と同義

Box、Objectnessは損失関数で計算された正解値と予測値の誤差で与えられ、学習が進むにつれて減少しているため、精度を高めながら学習できていることがわかる。また、検出用データに対する損失 (val Box、val Objectness) もほぼ収束しているため過学習は見られなかった。

学習終了時の検証用データに対するPrecision、Recall、mAP@0.5は0.993、0.992、0.996となり、十分な学習を行っていると判断した。

テスト用データに対して、検出結果同士の重なりを抑制するためのIOUによるしきい値を0.3として評価を行った結果を表1に示す。Precision、Recall、mAP@0.5は0.996、0.998、0.997であり、問題なく検出できていることを確認した。

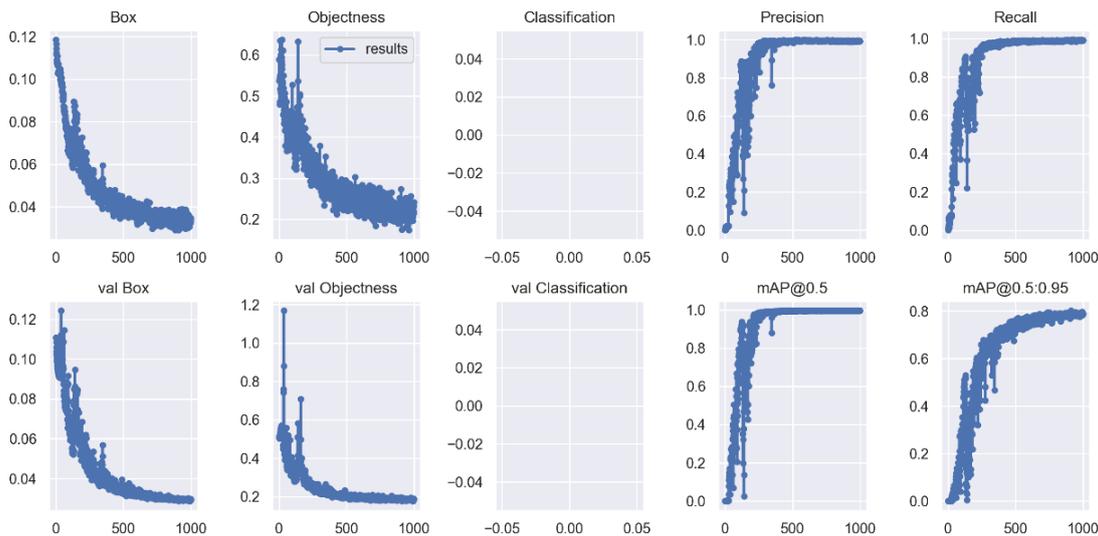


図3 学習結果

表1 テスト結果

項目	Precision	Recall	F値	mAP@0.5	mAP@0.5:0.95
結果	0.996	0.998	0.997	0.997	0.831

3. 画像認識機能の実装と評価

3.1 機能の実装

棚卸支援Webアプリケーションに機械学習による画像認識機能を実装した。Webアプリケーションをローカル上でも動作させることを見据えて、機械学習のライブラリにはTensor Flow.js⁴⁾を用いた。オープンソースの機械学習ライブラリTensor FlowのJavaScript版である。バージョンは3.0.0を用いた。

作成した物体検出モデルはPyTorchで記述されているため、モデルをTensor Flow.jsに対応した形式に変換した。変換順序はPyTorch → onnx → Tensor Flow → Tensor Flow.jsであった。

端末で撮影した丸棒の画像を式(1)によりグレースケール画像へ変換した後、Tensor Flow.jsにて物体検出を行う。認識後のバウンディングボックスは、しきい値(検出スコア*検出の確かさ)が0.5以上、IOU(ボックス同士の重なり比率)が0.3以下のものを最終的な認識結果とした。端末の処理時間短縮のため、IOUは低くし、重なる場合は積極的に除外するようにした。

3.2 評価

実装した機械学習による画像認識機能の評価するため、実際に木製家具メーカーの部材棚に格納されていた学習データとして不使用の丸棒の画像6

枚を認識させた。また、同じ画像を用いてHough変換による画像認識を行い、機械学習による結果と比較した。Hough変換は前報と同条件で行った¹⁾。

認識結果を表3に示す。検出した部材に白色の丸印を付した。また、検出した数の内訳を表2に示す。未検出数は検出されていない部材の数であり、誤検出数は丸棒がないところを誤検出した印の数である。

機械学習による結果は、全体を通して未検出数と誤検出数は少なく、部材に1個ずつ印を付ける場合に比べて、少しの修正作業でカウントできる。特にNo. 1, 2, 3のように本数が多い部材を高精度に認識できたため、本アプリケーションを用いることで棚卸の効率化につながると考える。また、撮影した画像をグレースケール化して認識させているため、No. 4, 5のように木口面を着色している部材でも問題なく認識できた。No. 6のように木口面に穴が空いている部材は学習用の画像データセットには用いていないが、認識させたところ正しく認識することができた。

Hough変換による結果は、機械学習での結果と比較すると未検出数と誤検出数ともに多い。特に、No. 3では70%以上の部材が未検出であった。

以上より、機械学習による画像認識を用いることで、前報でのHough変換による方法に比べて修正箇所を減らせるため、画像認識結果に対する修正作業の労力の低減を図ることができる。

表2 検出数の内訳

No	部材本数	機械学習				Hough変換			
		検出総数	正解数	未検出数	誤検出数	検出総数	正解数	未検出数	誤検出数
1	60	60	60	0	0	44	41	19	3
2	86	86	86	0	0	70	70	16	0
3	262	262	261	1	1	75	75	187	0
4	10	10	10	0	0	13	10	0	3
5	22	23	22	0	1	24	21	1	3
6	44	44	44	0	0	58	40	4	18

表3 画像認識結果

No	機械学習	Hough変換
1		
2		



4. まとめ

木製家具製造業における在庫数のカウントを支援するWebアプリケーションに、機械学習による画像認識機能を実装した。部材は製造現場の中で比較的数の多い丸棒とし、学習モデルにYOLOv5を用いて物体検出モデルを作成した。作成したモデルのmAP@0.5は0.997となり、十分な性能を得ることができた。このモデルを用いて部材の画像を認識させた結果、高精度に認識することができた。従来のHough変換による結果と比べて各段に認識精度を向上させることができたため、本アプリケーションを用いることで棚卸の効率化が期待できる。

ただし、高精度に認識できた理由として、丸棒の木口面が単純な形状であり、部材によって大きな違いがなかったためであると考えている。今後、学習させた部材に比べて形状が大きく異なる丸棒を認識させる場合、認識率が下がる可能性がある。その場合には、都度認識させたい丸棒の形状を学習させる必要がある。

今後は、開発したWebアプリケーションを木製家具製造現場の棚卸に活用していきたい。また、画像認識機能以外にも付録に示すようなアプリケーションの改善点が挙げられるため、より使いやすくなるよう努めていきたい。

謝辞

研究のきっかけを作っていただき、木製家具製造現場の写真撮影にご協力いただきました関係者の方々、実験に参加していただいた方々にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 森茂智彦ら：家具製造現場におけるトレーサビリティ基盤技術の開発（第2報）OpenCV.jsを用いた画像認識による棚卸支援Webアプリケーションの開発，岐阜県生活技術研究所研究報告，23，pp. 31-36，2021.
- 2) Ultralytics, yolo v5, <https://github.com/ultralytics/yolov5>, 2022年1月27日参照
- 3) ITU-R Rec BT. 709, <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.709/en>, 2022年3月18日参照
- 4) Tensor Flow.js, <https://www.tensorflow.org/js>, 2022年1月27日参照

付録 アプリケーションの今後の課題

機械学習機能を実装した棚卸支援Webアプリケーションを実験参加者に使用させて意見を聞いた。実験参加者は12名（男性6名、女性6名）であった。

主な意見を下記に示す。意見を元にアプリケーションの改良を行っていききたい。

○操作性に関する内容

- ・消したい印をタップしたいが、印をタップしても、指の微妙なずれで印が増えてしまう
- ・径が小さい部材が密集しているとタップしたいところに印を付けられない

○追加の機能に関する内容

- ・消去モード（印を選択すると、その印が消えていくモード）があると良い
- ・範囲選択以外にも印の複数選択ができると良い
- ・拡大鏡のような画像の拡大機能があるとよい
- ・印をはねると消える、または枠外に出すと消える、という機能があると良い

○印に関するもの

- ・丸棒に丸印のため、丸棒の径の大きさによっては、見にくいものがあった
- ・丸棒の径が大きい時は、印も大きいほうがよい
- ・白い部材に白い印だと見にくいことがあった（印と部材の色合いが似ているとき）
- ・木口面の色を黒と白で塗っているものは、印が見えにくかった
- ・木口面に黒色や赤色に塗ってあると、判定しづらい

国産早生樹種の用材利用に向けた材質・加工特性の解明（第3報）

国産早生樹種の利用用途の提案

村田明宏*, 長谷川良一*, 沼澤洋子*, 清家麻奈未*

Elucidation of material and processing characteristics
for use of domestic fast-growing tree species (III)
Proposal of application of domestic fast-growing tree species Woods

MURATA Akihiro*, HASEGAWA Ryoichi*, NUMAZAWA Youko*, SEIKE Mamami*

国産早生樹種木材の家具および内装材としての利用用途の提案として、実際に商品化する場合の早生樹材の適正について、センダンの一般市場流通材の実証試験を実施し、やや強度は低下するものの利用可能であることを確認した。また、軟質であるコウヨウザン、ユリノキの早生樹材表面の硬度向上を試みた。塗装だけでは十分な硬度向上が図れなかったため、表面へのPETフィルム貼りと塗装により実用硬度を確保できることを確認した。さらに、製品化による問題点の洗い出しでは、センダン、ハンノキの曲木椅子の試作により早生樹材でも曲げ条件を適正に設定するにより曲げ加工が可能であることを確認した。試作した椅子の耐久性試験を試みたところ、強度に不安があることから既存の椅子デザインでなく構造強度を向上するように、部材を厚くする、幅広くするなど早生樹材の利用に向けたデザイン（設計）変更や材種に適したデザイン提案が必要であることがわかった。さらに、早生樹材によるPETフィルム貼りスタッキングテーブルの試作、漆塗装による付加価値向上などを試みた。

1. 緒言

今後の主伐・再造林に向けた植栽可能樹種のニーズの多様化、ウッドショックなど輸入広葉樹の供給不安などを背景に、国産早生樹種の生産・利用への期待が高まっている。早生樹種は10～25年生程度の短伐期で収穫できることから、近年のSDGsへの対応、人工林資源の循環利用の促進や林業の収益性改善の点から期待されている。このため、地域性を踏まえた生産（植林・造成）と、木材産業において利用可能なデータ集の整備、その用途別の利用適性を示すプロジェクト研究を国立研究開発法人森林総合研究所が核となって実施している。

本研究所はプロジェクトの分担課題として「用途別の利用適性の確認とその評価」を担当し、今年度は研究対象とした各樹種についてその利用適性を確認するため、早生樹材の付加価値向上のための塗装方法の提案とその評価をするとともに、市場流通の早生樹材による家具・内装材の製品提案

を試み、その利用適性と問題点の抽出を図った。

2. 実験方法

2.1 供試材料

早生樹材についてはまだ市場で流通している木材が少なく、現在の木材市場流通ルートで入手可能なセンダン (*Melia azedarach*) とハンノキ (ヤマハンノキ *Alnus hirsuta*) を入手した。市場流通材の実証試験として曲げ試験と含水率試験をセンダンで実施し、また、家具・内装材の製品提案として、センダン、ハンノキを用い、曲木椅子とフローリング部材・壁材を試作した。

塗装による付加価値（表面硬度）向上には、森林総合研究所のプロジェクトチームから入手した静岡県産のユリノキ (*Liriodendron tulipifera*)、コウヨウザン (*Cunninghamia lanceolata*) を試験木材として用いた。このユリノキ、コウヨウザンは製品提案としてスタッキングテーブルの試作にも用いた。

* 試験研究部

2.2 実証試験

木材の試験方法JIS Z 2101に従い、曲げ試験は万能試験機 (UH-100KNC島津製作所) の3点曲げで、含水率、全乾比重は105℃の定温送風乾燥機で恒量に達するまで乾燥し寸法計測により求めた。また、県内家具企業が木材市場で入手したセンダン材についても板目、柾目、追柾、特殊な木理での曲げ試験と含水率 (比重) 試験を実施した。

2.3 表面硬度向上のための塗装の提案

2.3.1 塗装方法

前報¹⁾のとおり、通常用いられている木工用塗料4種を早生樹に塗装、評価した結果、表面が柔らかいことが利用上の課題であることがわかった。このため、木材表面の硬度を向上する可能性のある塗料3種により、表面硬度向上を図った。

①無機・有機ハイブリッド塗料 (オルガノポリシロキサン系塗料)、②無機・有機複合塗料 (超微粒子ファインセラミック複合高架橋ポリウレタン塗料)、③高浸透型ポリウレタン塗料 (高浸透型ポリマー処理+ポリウレタン塗料) を用い、P240で木地研磨処理したのちに各塗料の標準仕様に従って塗装し、20℃以上で乾燥後、定常状態 (23℃、50RH) で1ヶ月以上養生して試験に供した。

2.3.2 塗装した早生樹材表面の評価

塗膜の一般的試験環境 (23±1℃、50±3%RH) において、前年度の適正評価方法¹⁾と同様にJIS K 5600-5-4 引っかかり硬度試験 (鉛筆法) : 鉛筆引っかかり試験機 (手動機械式、日本塗料検査協会検定鉛筆使用) を実施した。評価は、凝集破壊 (塗膜の割れ・剥がれ)、塑性変形 (凹み傷) の確認をするとともに、6B、HB、2Hで引っ掻いた後の凹み量をレーザー顕微鏡 (KEYENCE VX-X1000 対物レンズ×5) の形状測定機能により測定した。

2.3.3 PETフィルム貼り加工による硬度の向上

新たな表面硬度向上対策として最近注目されているPETフィルム貼り加工による実用強度向上を試みた。これは、1mm厚のPETフィルムを貼ることで軟質な針葉樹の欠点を補う加工である (図3参照)。PETフィルム貼り加工を行うと光沢のある表面となるため、自然な木材表面と見えるように艶消しのポリウレタン塗装を行い、フィルム及び塗装表面の引っかかり硬度試験 (鉛筆法)

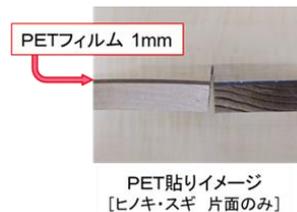


図3 PETフィルム貼りの加工例

を実施した。さらに、学習机天板として用いることができるように、傷が付きにくいという特殊塗料により塗装しその引っかかり硬度試験も実施した。

2.4 早生樹材による利用用途の新たな提案

早生樹材の新たな用途開発をするうえで、実際の製品化においての問題点を抽出するため以下の試作を行った。

2.4.1 スタッキングテーブル天板の提案

早生樹材をテーブル天板として利用するため、前述のPETフィルム貼り加工 (加工: 加子母森林組合) をユリノキとコウヨウザンに施し、スタッキング可能な金属製の脚部に取り付けた。

各早生樹材は含水率を8%に調整した後、幅はぎ接着集成し、1mm厚のPETフィルムを、表面にはバージンPETフィルムを裏面にはリサイクルPETフィルムを接着した。また、そのままでは艶がありすぎて印刷のような質感となるため、表面は艶消しのポリウレタン塗装を施し木質感を表現した。

2.4.2 フローリング・壁材の提案

サネ加工 (加工: 株式会社カネモク) し、パネルを作成した。塗装は前述の無機・有機複合ポリウレタン塗料を塗装した。

2.4.3 曲木椅子の提案

県内企業 (飛騨産業株式会社) に加工依頼し、節がある既存のデザインでの曲木椅子 (森のことば: ダイニングチェアSN210型) を試作した。

また、試作した曲木椅子に早生樹材を用いる上での問題点がないか強度試験を実施した。試験方法はJIS S 1203 家具-いす及びスツール-強度と耐久性の試験方法に従い、ハンノキとセンダンの曲木椅子、それぞれ一脚を用い、座面と背もたれの

静的強度試験、座面及び背もたれの耐久試験を行った。

2.4.4 曲木椅子等試作品への塗装提案

無塗装の曲木椅子（ハンノキ・センダン）について、塗装面での問題点がないかを検証した。

用いた塗料は4種で、生漆による摺漆仕上げ、オイル調加工ポリウレタン塗装仕上げ（塗料を塗布後乾く前に研磨して刷り込み拭き取る仕上げ方法）、小さな表面割れ防止と変色防止のためのCNFシーラー下地ポリウレタン塗装仕上げ、前述の高浸透ポリウレタン塗装仕上げである。

また、前年度の工芸的利用で試作したセンダンの我谷盆、銘々皿についても漆塗装による付加価値向上の試みをした。

3. 結果と考察

3.1 実証試験

表1に示すとおり、曲げ強さは平均値で見れば大きな問題はないように感じるが、ばらつきは大きく最低値は28Mpa、最大値は93Mpaであり、平均年輪幅も最小2.8mm、最大24.0mmと強度と同様にばらつきが大きい。

また、県内企業が入手したセンダンについては企業からの依頼であり具体的な数値は示さないが、写真1に示すように、目切れや黒染み、長手方向に垂直な木目（複雑な木理）など現在は市場で入手可能なセンダン材は均一で良質な材料を入手できる状況ではないようである。また、強度の最低値も研

表1 市場流通材の強度試験結果（センダン）

	最大荷重 (N)	弾性率 (kN/mm ²)	曲げ強さ (Mpa)	平均年輪幅 (mm)	全乾比重
平均	2,831	8.97	66.05	7.2	0.52
最大	3,980	11.60	92.87	24.0	0.63
最少	1,190	4.59	27.77	2.8	0.36

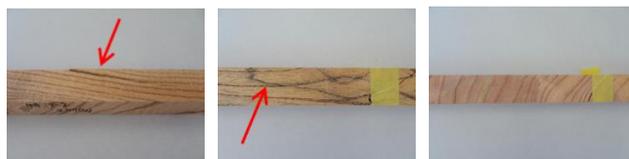


写真1 県内企業が入手したセンダン材
(左から目切れ、黒染み、長手方向に垂直の木目)

究所入手材より低い値を示す部材もあり、目視判別では低い数値が予測できない試験体もいくつか含まれていた。

3.2 付加価値向上に向けた塗装方法の提案

評価結果を表2に示す。また、傷の画像と凹凸の三次元画像（赤色：上部表面⇄青色：深さ方向）を、図1（コウヨウザン）、図2（ユリノキ）に示す。

表2 早生樹2樹種に塗装した試験体の各濃度記号における凹み量

塗料\樹種	コウヨウザン 鉛筆濃度記号			ユリノキ 鉛筆濃度記号		
	6B	HB	2H	6B	HB	2H
無塗装	134	172	174	34	130	63
有機/無機ハイブリッド	112	157	191	24	46	61
FC複合ポリウレタン	72	86	154	44	61	76
高浸透型ポリウレタン	56	144	145	28	34	41

※FC：ファインセラミック [単位：μm]

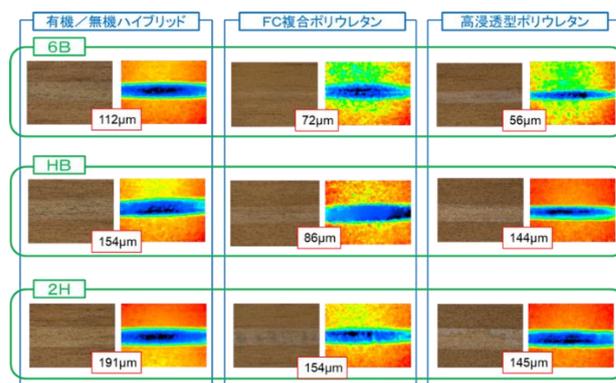


図1 各濃度記号の鉛筆引傷の表面画像と三次元画像（コウヨウザン）

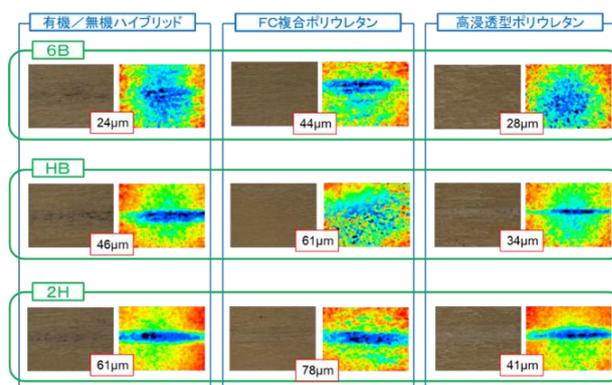


図2 各濃度記号の鉛筆引傷の表面画像と三次元画像（ユリノキ）

表3 P E Tへの塗装による表面硬度向上

P E T表面塗装	鉛筆濃度記号
無塗装	H B
ポリウレタン塗装	H
自己修復塗装	9 H



写真2 P E T貼り加工を施したコウヨウザン (左) とユリノキ (右) の天板

表2のデータは、深さ方向は3つの傷痕のプロファイルから無作為に各3測定し、9点計測したもののだが、木材の早晚材部など測定部位によりかなり値がばらついた。特に早材部分では変形量が大きかった。コウヨウザンについては、微粒子ファインセラミックスを複合したポリウレタン塗料で、ユリノキは無機有機ハイブリッド塗料、高浸透型ポリウレタン塗料で変形量の低下がみられた。

家具・内装材として利用する上では早生樹種によって塗装を変える必要があり、塗料の吸込みが多いセンダン・ユリノキは含浸タイプの塗料が適しており、あまり吸込みが多くないコウヨウザンやハンノキについては、塗料自体が硬いものが適していることが示された。

家具、特にテーブルに使用する場合には、机上で筆記具を使用することが想定され、より硬い表面性能が要求される。今回用いた3種の塗料塗膜では脚部などは良いとしてもテーブルトップとして木材表面の変形を十分抑えられない(変形は6B以下で発生)ことがわかった。そこで新たな表面硬度向上対策としてP E Tフィルム貼り加工を試み、さらにポリウレタ塗装してその硬度を調べた。

その結果、凹みなどの変形は見られないものの擦り傷がついた。表3に示すように、フィルムのみの場合には引っかき硬度H B、ウレタン塗装面はHの濃度記号となった。このため、学習机天板などで求められる2H以上の硬度を目指し、自己修復型のポリウレタン塗料を塗装し再度評価試験を行っ



写真3 試作したスタッキングテーブル

た。その結果、表面硬度9HとなりP E Tフィルム貼り加工と特殊塗料を用いることにより学習机天板として耐えられる早生樹家具が作成できることを確認した。

3.3 早生樹材による利用用途の新たな提案

3.3.1 スタッキングテーブル天板の提案

写真3に作成したスタッキングテーブルを示す。ミーティングデスク(W1800×D450×H720mm)はユリノキで、ショートテーブル(W750×D450×H720mm)はユリノキとコウヨウザンを用いて試作した。

スタッキングテーブルを作成する上で特に問題はなかった。木材専門家の評価として、ユリノキの天板が良い評価を得た一方、コウヨウザンの天板については休眠芽(小節のような外観)があり、意見が分かれた。今後、経時変化による天板の変形などの観察を行っていく予定である。

3.3.2 フローリング・壁材への利用

サネ加工について特に問題なく、塗装もセンダン材の塗料の吸込みが多かったものの特に問題なく仕上がった。試作したパネルを写真4に示す。試作したハンノキパネルは市場にあるフローリング



写真4 試作した早生樹パネル (ハンノキ左側とセンダン右側)



写真5 試作した曲木椅子



写真6 強度試験の状況

や壁材と同様の見た目であるが、センダンパネルはその木目が独特であり、数名の木材専門家の評価でも好き嫌いが別れる評価となった。

3.3.3 曲木椅子への利用

曲木椅子を試作するにあたっては、曲げの曲率は大きいものの早生樹材がうまく曲がるのかというところから始め、曲げ木判別プログラム³⁾などを活用しながら条件出しをして、圧縮側に皺が寄らず引張側に切れのない条件を見出し曲げることができた。この曲げ木加工材は、座面と背に使用されている。この曲木椅子は、センダン材については委託企業においてポリウレタン塗装のものを4脚試作、さらに、センダン材とハンノキ材で無塗装のもの各4脚試作し、前述の4種類の塗装を施した(写真5)。

試作に当たって木材加工面では特に問題がなく、塗装では吸込みが多いものの下地処理などで対応可能だった。

曲木椅子の性能試験では、座面の静的強度試験は座面に1300Nの荷重を10秒10サイクル(試験区分3:家庭用)実施し、更に1600N(試験区分4:オフィス用)でも実施し問題のないことを確認した。

また、背もたれの静的強度試験では座面に1300Nと背もたれに560Nの荷重を同時に10秒10サイクル(試験区分3)実施した。更に同様に座面に1600Nと背もたれに760Nの荷重を加える試験区分4でも実施し問題のないことを確認した。

次に、耐久試験として座面に950N、背もたれに330Nの荷重を同時に50,000回加える試験を(試験区分3)実施した。耐久試験結果として、どちらの椅子も壊れることなく試験は終了したが、センダン材の曲木椅子については前脚台輪接合部で接着切れと疑われるすき間がありこのデザイン形状での椅子については不安が残った。写真6に耐久試験の状況を示す。

3.3.4 試作品への各種塗装による問題点の抽出

塗装をする上では、これまで記載したとおりセンダン材椅子の塗料の吸込みが多いことが気になったが、問題なく塗装できた。

見た目の評価として、摺漆塗装については高級感のある仕上げが、オイル調加工ポリウレタン塗装仕上げはしっとりとして濡れ感のある仕上げが、CNFシーラー下地の椅子はやや白く仕上がった。

これらの椅子は当研究所内に展示するほか、展示会などで一般の方にも見て評価いただき、今後の経時変化なども観察していく予定にしている。写真7にそれぞれの椅子を示す。

我谷盆、銘々皿の漆塗装の評価については趣味的な嗜好もあり木材専門家の中でも賛否双方の意見があった。(写真8)

4. まとめ

今年度は、利用用途の提案として実際の製品化試作で不具合が出るかどうかを中心に検証した。

家具の試作では、早生樹種の曲木加工は条件設定により可能であり、曲木椅子の製造ができることがわかった。しかし、耐久試験の強度面で不安が残ることから、単純にオーク材やクリ材で製作している既存の椅子のデザインをそのまま流用するのではなく、早生樹材の強度や特徴ある木目などに配慮したデザイン開発をすることにより椅子などの家具に応用できることがわかった。また、テーブル天板としてオフィスや学童用などに利用する場合は表面硬度が必要であり、PETフィルム貼り加工や塗装により、傷のつきにくい高硬度の天板を作成することが可能であることが検証できた。

フローリング・壁材については加工・塗装とも特に大きな問題はないが、木目など早生樹材それぞれに特徴があり、これまでの樹種に加えて、早生樹種の好き嫌いにより消費者が選択できる幅が広がるものと思われる。



摺漆塗装

オイル調加工PU樹脂塗装



浸透性ポリマー下地PU樹脂塗装 CNF下地PU樹脂塗装

写真7 曲木椅子等への各種塗装
(センダン左側とハンノキ右側)



写真8 摺漆加工した我谷盆と角型銘々皿

今回はいろいろな製品を試作したが、今後展示会などによりご意見や評価をお聞きするとともに、試作品の反り狂いなど経時変化を確認する予定である。

謝辞

本研究は、令和3年度国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所交付金プロジェクトの委託研究により実施したものである。主査の森林総合研究所木材研究部門杉山真樹様をはじめご助言いただきましたプロジェクト参加メンバーの皆さまに深く感謝いたします。

また、製品試作に際しご協力いただいた飛騨産業株式会社、加子母森林組合、株式会社カネモクに感謝いたします。

参考文献

- 1) 村田明宏, 長谷川良一, 沼澤洋子, 森 順子: 国産早生樹種の用材利用に向けた材質・加工特性の解明 (第2報), 岐阜県生活技術研究所研究報告, 23, pp. 37-42, 2021.
- 2) 村田明宏, 長谷川良一, 河合真樹: 国産早生樹種の用材利用に向けた材質・加工特性の解明 (第1報), 岐阜県生活技術研究所研究報告, 22, pp. 50-54, 2020.
- 3) 石原智佳ほか: 家具用曲木の現場におけるスマート化 (第3報), 岐阜県生活技術研究所研究報告, 22, pp. 8-11, 2020.

超撥水処理による木材の耐水性向上（第2報）

シランカップリング処理木材の耐候性

三井勝也*

Improvement of Water Resistance of Wood by Superhydrophobic Treatment (II) Weathering of Wood Treated with Silane Coupling Agent

MITSUI Katsuya*

本研究ではブナ材に10種のシランカップリング剤を反応させ、その撥水性を確認するとともに、耐候性について検討した。シランカップリング剤の側鎖の炭素数の増加とともに、接触角は大きくなった。水噴射を伴う耐候試験を行った結果、接触角が変化しないものと減少するものの両方が観察されたが、いずれも無処理材に比べ接触角は大きかった。材色については、無処理材、処理材ともに、白色化する傾向が見られた。

1. 緒言

近年、木材の良さが再認識され、木材の屋外利用が盛んになっている。木材を屋外で利用するには、耐候性や耐水性などを向上させる必要がある。これまでに、当研究所ではエステル化¹⁻³⁾や日本の伝統的素材である柿渋やベンガラなど⁴⁻⁶⁾による耐水性向上を図ってきた。しかし、それぞれの手法にはメリット・デメリットが存在する。木材のエステル化の代表的なものとして、アセチル化がある。木材をアセチル化すると寸法安定性が向上すること⁷⁾や、処理による材色変化が小さいこと⁸⁾、また、その後の光照射によっても黄変がしないこと⁹⁾などの利点がある一方、処理の設備や廃液処理などにコストがかかること、処理後に、反応が適切に進んだかどうかを簡単に確認することが出来ないなどのデメリットがある。柿渋やベンガラについては、従来から塗料として利用されているため、取り扱いなどは化学修飾に比べて容易ではあるが、木材そのものの材色は消してしまうという欠点がある。これらの欠点を解消する方法として、シランカップリング剤による処理法を採用した。昨年度は、12種のシランカップリング剤をセルロースろ紙に適用し、接触角測定を行い、その撥水性を評価した¹⁰⁾。

今年度は昨年度の結果から効果の高かった10種のシランカップリング剤を木材に適用し、耐候試

験による撥水性の変化等を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材料

本研究にはブナ(*Fagus crenata*)を用いた。試験片サイズは10mm(T)×1mm(R)×50mm(L)とし、処理前にエタノールを用いてソックスレー抽出を行った後、デシケーター内で保管した。

2.2 シランカップリング

シランカップリング剤は表1に示す10種類を準備した。

なお、前報¹⁰⁾では、トリエトキシフルオロシラン($\text{FSi}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$)とオクタデシルトリエトキシシラン($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{17}\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$)も用いたが、トリエトキシフルオロシランについては側鎖が短いことから、接触角が小さかったこと、一方、オクタデシルトリエトキシシランについては、側鎖が長く、反応阻害を引き起こしていることが考えられることから、本研究では除外した。なお、すべて東京化成工業株式会社製である。

木材試験片3本にシランカップリング剤を約0.5g添着させ、風乾させたのち、105°C24時間乾燥させた。乾燥後、恒温恒湿室(23°C50%RH)に静置した。

* 試験研究部

表1 シランカップリング剤

1)	トリエトキシエチルシラン $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$
2)	ブチルトリエトキシシラン $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$
3)	ヘキシルトリエトキシシラン $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$
4)	デシルトリエトキシシラン $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_9\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$
5)	ドデシルトリエトキシシラン $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$
6)	トリエトキシ-(1H,1H,2H,2H-ノナフルオロヘキシル)シラン $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_3\text{CH}_2\text{CH}_2(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$
7)	トリエトキシ-(1H,1H,2H,2H-ヘプタデカフルオロデシル)シラン $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_7\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$
8)	トリメトキシ(1H,1H,2H,2H-ノナフルオロヘキシル)シラン $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$
9)	トリメトキシ(1H,1H,2H,2H-パーフルオロ-n-オクチル)シラン $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_5\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$
10)	トリメトキシ(1H,1H,2H,2H-ヘプタデカフルオロデシル)シラン $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_7\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$

2.3 材色測定

材色測定には色差計 (SE-2000: 日本電色工業株式会社製) を用いた。測定直径6mm、D₆₅光源、10°視野、L*a*b*表色系を適用した。

2.4 IR測定

FT-IR分光光度計 (FT/IR-4200: 日本分光株式会社製) を用い、拡散反射ユニット (DR-81: 日本分光株式会社製) を用い、拡散反射スペクトルを測定した。分解能4cm⁻¹、積算回数32回とした。

2.5 接触角測定

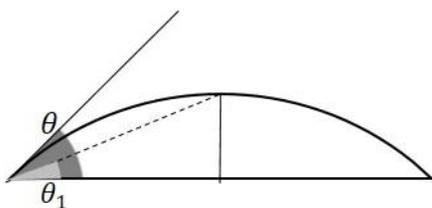


図1 θ/2法による接触角測定

接触角測定には、自動接触角計 (DMs-200: 協和界面科学株式会社) を用いた。試験体表面に蒸留水 2.0 μL を滴下し、θ/2法で測定した (図1)。測定はそれぞれ、ランダムに5か所行った。

2.6 耐候性試験

スーパーキセノンウェザーメータ (SX-75: スガ試験機株式会社製) を用いて、JIS K 7350-2 に準拠し実施した。120分間を1サイクルとし、102分間は光照射 (300-400nm において 60W/m², ブラックパネル温度 63°C) のみを行い、その後の18分間は光照射と同時に水噴霧を行う。最大150サイクル (300時間) とし、50サイクル (100時間) ごとに、材色測定、IR測定、および接触角測定を行った。

3. 結果と考察

3.1 シランカップリング剤の側鎖炭素数の影響

図2に滴下直後の接触角に及ぼすシランカップリング剤の側鎖炭素数の影響を示す。フルオロ系エトキシシラン (■) においては、明確な差が見られなかったが、フルオロ系メトキシシラン (▲) においては側鎖の炭素数が大きくなると接触角が大きくなる傾向を示した。アルキル系エトキシシラン (●) については、C4以上では明確な差は見られなかったが、C2に比べ大きな接触角を示した。

これは、前報¹⁰⁾のセルロースろ紙へのシランカップリングと同様の結果であったが、セルロース

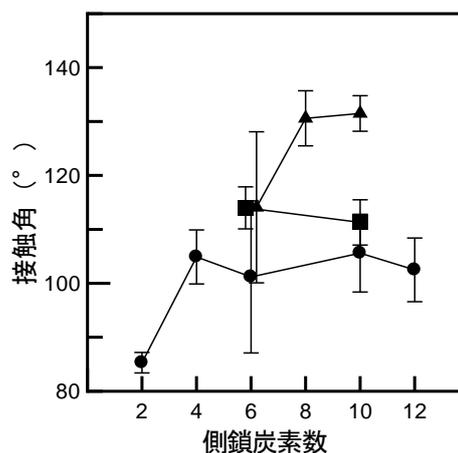


図2. 接触角に及ぼす側鎖炭素数の影響

- : アルキル系エトキシシラン
- : フルオロ系エトキシシラン
- ▲ : フルオロ系メトキシシラン
- エラーバー : 標準偏差

る紙に比べ接触角が小さいのは、リグニンなどの疎水性成分の存在が、反応を阻害しているためであると考えられる。

3.2 耐候試験による接触角の変化

図3に無処理材 (○) およびシランカップリング処理材 (ブチルトリエトキシシラン (■) およびトリメトキシ(1*H*,1*H*,2*H*,2*H*-パーフルオロ-*n*-オクチル)シラン (▲)) の耐候試験による接触角の変化を示す。無処理材は、耐候試験が進行するとともに、接触角は小さくなった。ブチルトリエトキシシラン処理材 (■) は150サイクルの耐候試験を行った後も、その接触角に変化は見られなかった。一方、トリメトキシ(1*H*,1*H*,2*H*,2*H*-パーフルオロ-*n*-オクチル)シラン処理材 (▲) は無処理材同様、耐候試験の進行とともに接触角は小さくなったが、無処理材と比較した場合、撥水性が残存していることが明らかとなった。他のシランカップリング剤については、トリエトキシエチルシラン、デシルトリエトキシシラン、ドデシルトリエトキシシラン、およびトリエトキシ-1*H*,1*H*,2*H*,2*H*-ヘプタデカフルオロデシルシランではブチルトリエトキシシランと同様、耐候試験による接触角の変化は見られず、ヘキシルトリエトキシシラン、トリエトキシ(1*H*,1*H*,2*H*,2*H*-ノナフルオロヘキシル)シラン、ト

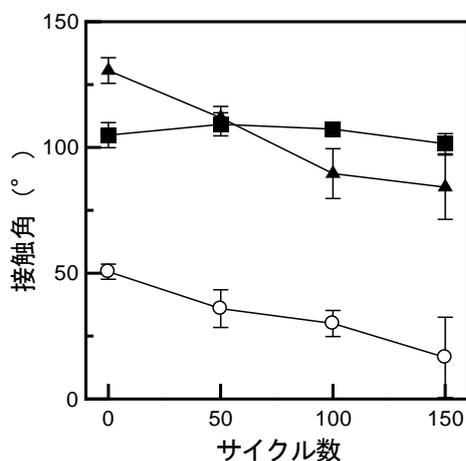


図3 無処理材およびシランカップリング処理材の耐候試験による接触角の変化

○ : 無処理材、■ : ブチルトリエトキシシラン ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$)、▲ : トリメトキシ(1*H*,1*H*,2*H*,2*H*-パーフルオロ-*n*-オクチル)シラン ($\text{CF}_3(\text{CF}_2)_5\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$)

エラーバー : 標準偏差

リメトキシ(1*H*,1*H*,2*H*,2*H*-ノナフルオロヘキシル)シラン、およびトリメトキシ(1*H*,1*H*,2*H*,2*H*-ヘプタデカフルオロデシル)シランでは、トリメトキシ(1*H*,1*H*,2*H*,2*H*-パーフルオロ-*n*-オクチル)シラン同様、耐候試験の進行とともに接触角は小さくなった。耐候試験による接触角の低下はシランカップリング剤の紫外線による結合の切断によるものであると思われるが、一定の傾向が見られなかったことから、今後も検討する必要がある。

3.3 耐候試験による材色変化とIRスペクトル変化

図4に耐候試験による無処理材 (○, □, △) とブチルトリエトキシシラン処理材 (●, ■, ▲) の材色変化を示す。いずれもL*は耐候試験の進行とともに上昇し、a*およびb*は低下した。これらのことから、耐候試験によって木材表面が白色化したことが明らかである。他9種のシランカップリング剤で処理した木材についても、同様の結果が得られており、耐候試験により無処理と同様、白色化が進行した。

図5に無処理材およびドデシルトリエトキシシラン処理材の耐候試験による拡散反射スペクトルの変化を示す。いずれの場合も、1,510 cm^{-1} のピークが示すリグニンに由来する芳香骨格が耐候試験により消失していることから、リグニンは分解しているものと考えられる。

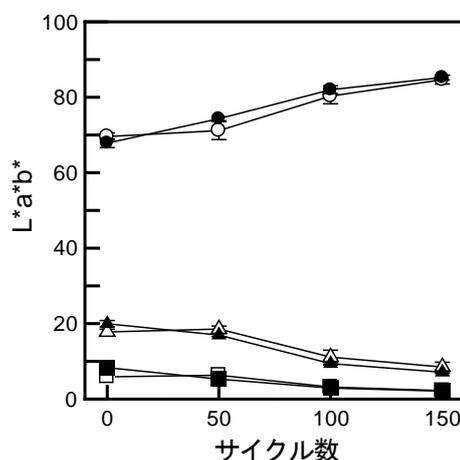


図4. 耐候試験による材色変化

○, ● : L*, □, ■ : a*, △, ▲ : b*

白 : 無処理材、黒 : ブチルトリエトキシシラン ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$)

参考文献

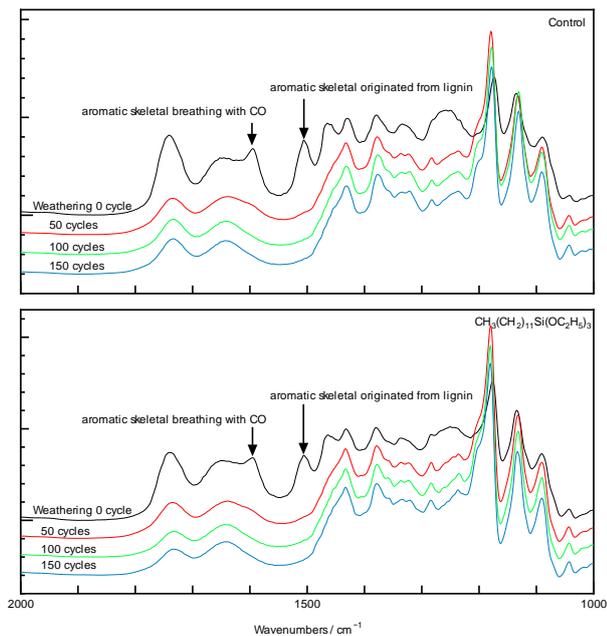


図5 耐候試験による拡散反射スペクトルの変化

一般に、木材の水噴霧ありの耐候試験において、最初の光照射でリグニンが分解され、続く水噴霧により、分解されたリグニンが洗い流される。この工程が繰り返されるが、セルロースはスーパーキセノンウェザーメータで照射される紫外線領域（290nm～）では分解は起こらない。そのため、木材表面にはセルロースが残存し、白色化が引き起こされる¹¹⁾。木材のシランカップリングは主にセルロースの水酸基に反応しているため、耐候試験後も白色化が起こっても撥水性は保持されていると考えられる。

4. まとめ

本研究では10種のシランカップリング剤をブナ材に反応させ、耐候試験を適用することによって以下の知見を得た。

- 1) シランカップリング剤の側鎖炭素数によって接触角が異なり、炭素数が大きいほど、接触角が大きくなる傾向が見られた。
- 2) 水噴霧ありの耐候試験後も接触角は無処理材より大きく、撥水性は残存している。
- 3) IR測定により、リグニンが分解していることが確認できた。シランカップリング剤は主にセルロースに反応していることから、耐候試験によっても撥水性が低下しなかったと考えられる。

- 1) 三井勝也, 伊藤国億, 石原智佳: 気相エステル化による木製エクステリア家具の開発, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 17, pp. 20-22, 2015.
- 2) 三井勝也, 伊藤国億, 石原智佳: 気相エステル化による木製エクステリア家具の開発 (第2報) レッドオーク材のアセチル化, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 18, pp. 14-16, 2016.
- 3) 三井勝也, 伊藤国億, 石原智佳, 稲垣哲也, 土川覚: 気相エステル化による木製エクステリア家具の開発 (第3報) 近赤外ハイパースペクトラルイメージング法によるアセチル化度の可視化, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 19, pp. 9-11, 2017.
- 4) 三井勝也, 伊藤国億: 日本の伝統的素材を用いた木材の耐久性向上技術の開発 (第1報) 柿渋とベンガラとの混合比と接触角の関係, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 20, pp. 31-33, 2018.
- 5) 三井勝也, 伊藤国億: 日本の伝統的素材を用いた木材の耐久性向上技術の開発 (第2報) 圧縮回復を利用した柿渋の含浸, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 21, pp. 23-25, 2019.
- 6) 三井勝也, 伊藤国億: 日本の伝統的素材を用いた木材の耐久性向上技術の開発 (第3報) 圧縮回復量の予測, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 22, pp. 19-20, 2020.
- 7) Hill, C.A.S., Jones, D.: The dimensional stabilization of Corsican pine sapwood by reaction with carboxylic acid anhydrides. *Holzforschung*, 50 (5), pp. 457-462, 1996.
- 8) Ohkoshi, M: FTIR-PAS study of light-induced changes in the surface of acetylated or polyethylene glycol-impregnated wood, *Journal of Wood Science*, 48 (5), pp. 394-401, 2002.
- 9) Mitsui, K.: Acetylation of wood causes photobleaching. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 101, pp. 210-214, 2010.
- 10) 三井勝也, 伊藤国億: 超撥水処理による木材の耐水性向上 (第1報) シランカップリングによるセルロースの撥水処理, 岐阜県生活技術研究所研究報告, 23, pp. 43-45, 2021.
- 11) Hon, D.N.S: *Weathering and Photochemistry of Wood*. "Wood and cellulosic chemistry second edition, revised and expanded". Hon, D.N.S ed., Marcel Dekker, Inc. New York, Basel, 2001, pp. 513-546.

幅はぎ板の反り変形抑制技術の開発に関する研究（第2報） 年輪に着目した幅はぎ構成手法の妥当性確認

今西祐志*, 沼澤洋子*, 清家麻奈未*

Study on Development of Technology to Prevent Warpage of Edge Glued Boards (II)
Validation of the Method to Consider the Composition of Edge Glue Joints Focusing on Annual Rings

IMANISHI Hiroshi*, NUMAZAWA Yoko*, SEIKE Manami*

幅はぎ板の含水率変化による反りを小さく抑える技術を開発するため、幅はぎ板の各板材の変形を年輪構造から予測し、それらの総和として幅はぎ板の反りを推定する手法を考案した。幅はぎ板に温湿度負荷を与える環境試験で確認された反りの測定値と計算値とを比較したところ、両者の全体的な傾向はよく一致し、反り率についても両者の高い関係性が示され、計算手法が妥当であることが確認できた。

1. 緒言

一般的な無垢材のテーブル天板は、板材を幅方向に接着（幅はぎ）して1枚の板に加工したものである。それぞれの板材は含水率変化によって反りや歪みといった個別の変形を生じて、幅はぎ板はそれに伴って反りや波打ちなどの変形を生じる。幅はぎ板の反り量が大きくなるようにするため、多くの場合、板材は木表と木裏が交互に並ぶように配置されるが、幅はぎ板の反り不良の問題は十分に解決されていない。また、テーブル天板では色調や木目といった見た目の印象の良さを求められることも多く、必ずしも板材の木表と木裏が交互に並べられていない配置もよく見られる。

本研究では、幅はぎ板の含水率変化による反りを小さく抑える技術を開発することを目的として、板材の年輪構造に着目した反り変形予測に着手した。前報¹⁾では、幅はぎ板の各材の変形の総和として幅はぎ板の反りを推定する手法を示し、いくつかの配置構成と変形予測の結果から、木表側と木裏側を交互に並べた配置でも過大な反りが発生しうることや、木表側と木裏側を揃えた配置でも反りを小さく抑えられる可能性があることを示した。本報では、その変形予測の計算手法の妥当性について、幅はぎ板に温湿度負荷を与える環境試験の結果と比較して確認した。

2. 実験方法

2.1 供試材及び幅はぎ板試験体の作製

板材は、家具用途での利用が多いブナの気乾材を用いた。長さ500mm、幅75~125mm、厚さ30mmの板材55枚を調製した。これらの中から9枚ずつを幅はぎ接着して、幅950mm程度の幅はぎ板を4枚作製した。接合は突付はぎ（2材の平面を突き合わせて接合する方法）とした。接着剤（（株）オーシカ製、水性高分子イソシアネート系接着剤、鹿印ピーア

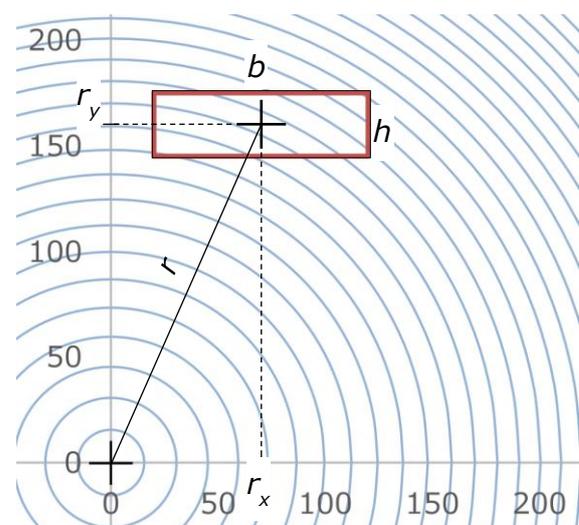


図1 板材木口の情報の説明

* 試験研究部

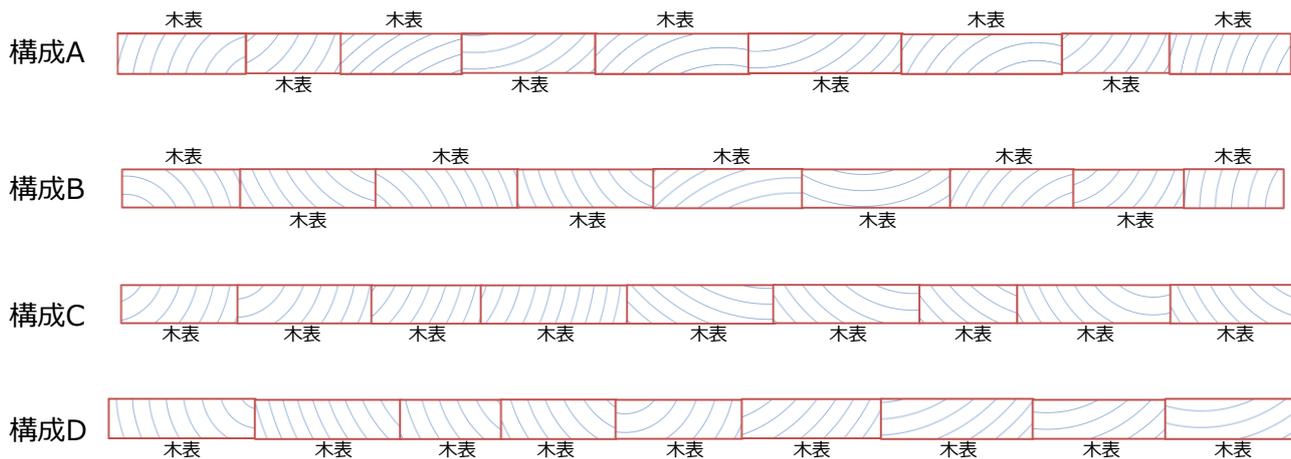


図2 幅接ぎ構成

イボンド TP-111（主剤：TP-111、架橋剤：H-3M）を両面塗布して接着面を合わせ、パークランプで挟んで2日程度圧縮した。圧縮後、2週間ほど養生してから各幅はぎ板を長さ方向で半分に鋸断し、1枚は乾燥条件、もう1枚は湿潤条件の環境試験に供した。

2.2 幅はぎ構成の検討

幅はぎ構成を考える際、前報¹⁾で示した手法により、次の4通りの特徴を持たせることとした。

- 構成A：木表と木裏が交互で推定変形が小さい。
- 構成B：木表と木裏が交互で推定変形が大きい。
- 構成C：木表と木裏が揃っていて推定変形が小さい。
- 構成D：木表と木裏が揃っていて推定変形が大きい。

これらの構成を検討するために必要な情報として、図1に示すように、幅 (b) と厚さ (h)、木口の中心と樹心との位置関係 (r_x 、 r_y) を求めた。情報は各板材の両木口について画像計測により求め、両木口の数値を平均化した。 r_x 及び r_y の数値をもとに、板材9枚ずつの4グループを作成した。この時、 r_x 及び r_y のグループ内での平均値及びばらつきが、グループ間で極端な差が生じないように配慮した。4グループそれぞれの幅はぎ構成の検討結果を図2に示す。

2.3 環境試験

一定の温湿度環境に各板材を置き、乾燥 (30℃・35%RH) または湿潤 (10℃・80%RH) の温湿度負

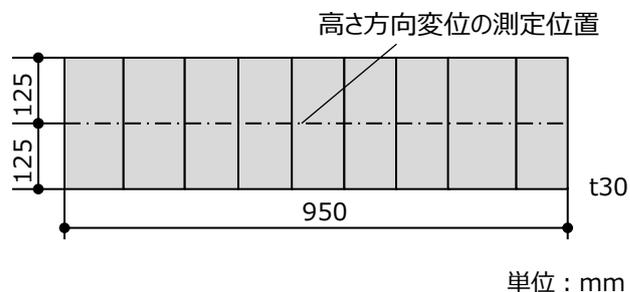


図3 高さ方向変位の測定位置

荷を与えた。環境試験開始から継続して試験体重量の変化を追跡し、24hあたりの重量変化率が0.01%程度になったところで恒量とみなして試験体の変形量を測定した。図3に、試験体の高さ方向変位の測定位置を示す。高さ方向変位は、試験体両端を結ぶ直線と各幅はぎ部との距離を触針式距離計（株）ミツトヨ製、ID-U1025）により測定した。

3. 結果と考察

試験体の含水率は、環境試験前の11.4%から、乾燥条件で7.6%まで減少、湿潤条件で14.3%まで増加した。これらの含水率変化と前出の木口情報、さらに含水率1%あたりの長さ変化率（半径方向0.18%/％、接線方向0.41%/％²⁾）を用いて、幅はぎ板の高さ方向変位を計算し、測定値との比較を行った。図4と図5に、環境試験で得られた高さ方向変位の測定値と、変形の計算値との比較を示す。図4は乾燥条件での高さ方向変位で、測定値と計算値とは数カ所の相違点があるものの、変形の向きや形状といった全体的な傾向はよく一致している。

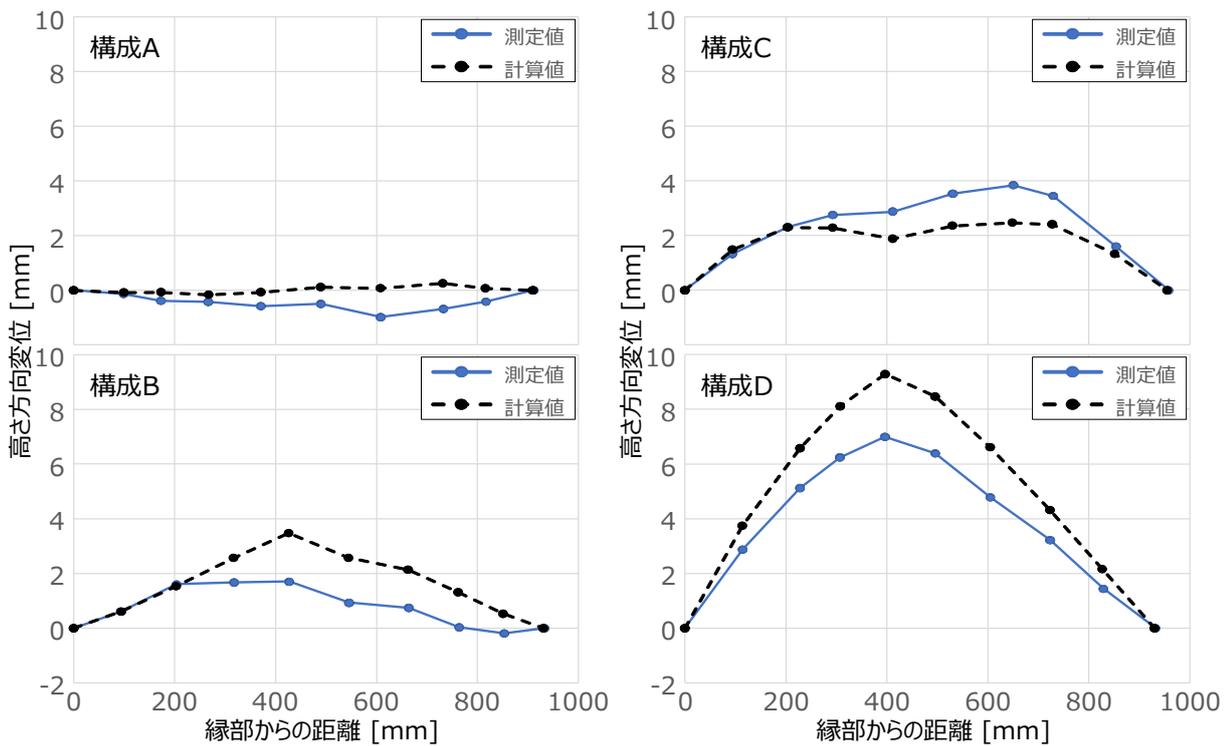


図4 幅接ぎ板の高さ方向変位（乾燥条件）

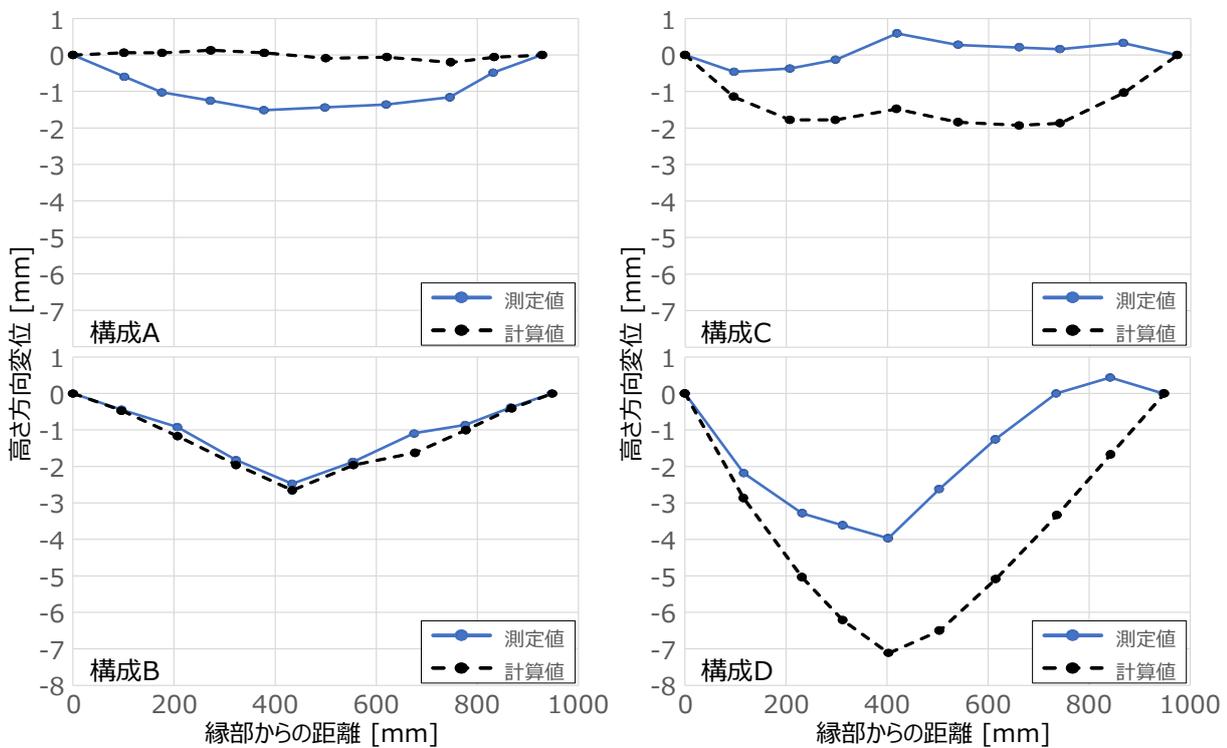


図5 幅接ぎ板の高さ方向変位（湿潤条件）

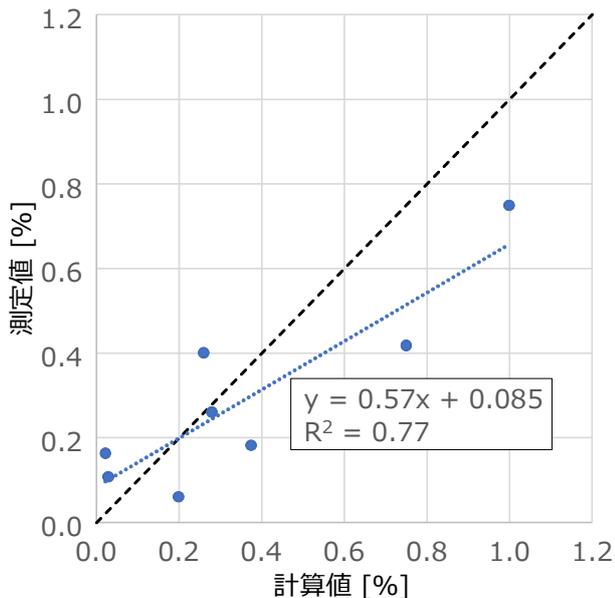


図6 反り率の測定値と計算値の比較

図5の湿潤条件での高さ方向変位についても同様で、両者の全体的な傾向はよく一致しており、特に構成Bのように、全幅に渡って両者が非常に良い一致を示した例も見られた。

図6は、各試験体の反り率（高さ方向変位の最大値の幅に対する比率）を測定値と計算値とで比較したものである。直線回帰における決定係数は0.77で、本研究で提案した計算手法により幅はぎ板の反り率が予測できる可能性があることを示している。回帰係数は1より小さく0.57で、全体的に計算値が測定値より大きい傾向にあった。計算値が測定値より小さかった結果について見ると、その差は最大で0.14%であった。例えば、反り率を0.3%まで許容する場合、計算によって0.16%までの反り率で幅はぎ構成を考えれば反り不良の発生を抑えることができると考えられる。今後、同様な検討を重ねてデータを蓄積することにより、反り不良を回避する指標の正確度を高める必要がある。

4. 結言

幅はぎ板の含水率変化による反り変形を小さく抑える技術を開発することを目的として、板材の年輪構造に着目した反り変形予測の手法を提案し、その妥当性確認を行った。幅はぎ板に温湿度負荷を与える環境試験で確認された反り変形と計算値とを比較したところ、両者の全体的な傾向はよく一致し、計算手法が妥当であることを確認できた。しかしながら、反り不良を回避する目的で本手法を活用するためには、同様の検討によるデータの蓄積を行って正確度を向上させることが必要である。

また、本報で示した木口情報の取得作業は、そのほとんどを手作業で行っており、実際の製作現場の板材で同様の作業を行うことは現実的ではなく、木口年輪の自動認識等の技術の導入が必要である。さらに、木口情報をもとにした幅はぎ構成で、本報で示した推定変形が小さい構成（構成A、構成C）は試行錯誤を繰り返して決定したもので、変形が最小になる最適構成かどうかは不明である。木口情報をもとに様々な幅はぎ構成で反り変形を自動で計算し、反り率が最小になるような構成を見つけ出す計算手法の確立が必要である。

参考文献

- 1) 今西祐志：幅接ぎ板の反り変形抑制技術の開発に関する研究（第1報）年輪に着目した幅接ぎ構成手法の提案，岐阜県生活技術研究所研究報告，23，pp. 46-49，2021.
- 2) 農林水産省林業試験場 監修：木材工業ハンドブック 改訂3版，丸善，1982，p187.

家具製造現場におけるトレーサビリティ基盤技術の開発（第4報）

Excel VBAを用いた生産現場の改善事例

森茂智彦*

Basic Technology Development of Traceability in the Furniture Manufacturing Field (IV) Examples of Production Site Improvements Using Excel VBA

MORIMO Tomohiko*

Microsoft Excelは、生産現場でも多く使用されている。VBAを用いることで、より高度な動作をさせることが可能となる。しかし、どんなことができるのか想像が湧かないという声も多く聞く。そこで本報では、VBAを用いて生産現場の改善に取り組んだ事例を3つ紹介する。

1. 緒言

Microsoft Excelは、企業活動の様々なところで使われており、当然ながら生産現場でも多く用いられている。

Excelに標準で搭載されているマクロ機能を用いることで、操作を自動化し効率的に業務を進めることができる。マクロは、「マクロの記録」機能で作成できる他、プログラミング言語であるVBA(Visual Basic for Applications)を用いたプログラミングによりさらに高度な動作を実装することもできる。しかし、プログラミングという観点から難しそうという意見や、どんなことができるのか想像が湧かないという声も多く聞く。そこで本報ではVBAを用いて生産現場の改善に取り組んだ事例を紹介する。なお、各事例で紹介する画面は、説明のため実際の改善に用いたものを編集し簡略化している。

2. 事例1 フォームによる貸出台帳

2.1 概要

生産現場では、多くの人が同時に作業を行っており、また工具や刃物、治具、測定器など使用する物品の数は多い。また、物品を製造委託先へ貸し出すこともあり、物品の貸出状況を簡単に把握できることが求められていた。そこで、物品の貸出状況

を管理するための貸出台帳を作成した。考慮した点として、Excelのシート画面を表示させず、フォーム画面のみ表示させた¹⁾。これにより、台帳から対象物品を探す手間を短縮でき、作業性が向上すると考えた。

2.2 使い方

図1に画面遷移図を示す。ファイルを開くと最初にトップページが表示される。使用するにはまず「物品登録フォーム」画面にて物品の登録を行う。登録時には物品の所持数も入力する。登録した内容は、「物品リスト閲覧・編集フォーム」画面にて確認や編集を行うことができる。編集は「物品編集フォーム」にて行う。

貸出は「貸出フォーム」画面で行う。貸出物品は「物品登録フォーム」から登録した物品の中から選択する。検索ボタンを押すことで、「物品検索フォーム」が表示され、その中のリストから物品を選択する。数量に未貸出中の数量（物品リストに登録した所持数から既に貸出中の数量を引いた数）を超える数を入力するとエラーとなり、貸出情報の登録はできない。

返却は「返却フォーム」画面で行う。返却したい物品の貸出情報をリストから選択し、返却ボタンを押せば返却される。返却した貸出情報はリストから消去される。

貸出状況を確認するには、「貸出台帳閲覧フォーム」画面で行う。リストには現在貸出中の内容に加

* 試験研究部

え、既に返却した内容も履歴として残している。「返却フォーム」画面にて誤って返却した場合は、この画面から返却取消を行うことができる。また、不要となった貸出履歴は、リストから選択して削除するか、1年前までの履歴をまとめて削除することができる。

「物品検索フォーム」、「物品リスト閲覧・編集

フォーム」、「返却フォーム」、「貸出台帳閲覧フォーム」では、画面上部のテキストボックスに物品情報の一部を入力し、エンターキーを押すことで、リストの中から該当するものを絞り込むことができる。検索ボタンがある画面では、一部の情報入力後、検索ボタンを押しても検索できる。

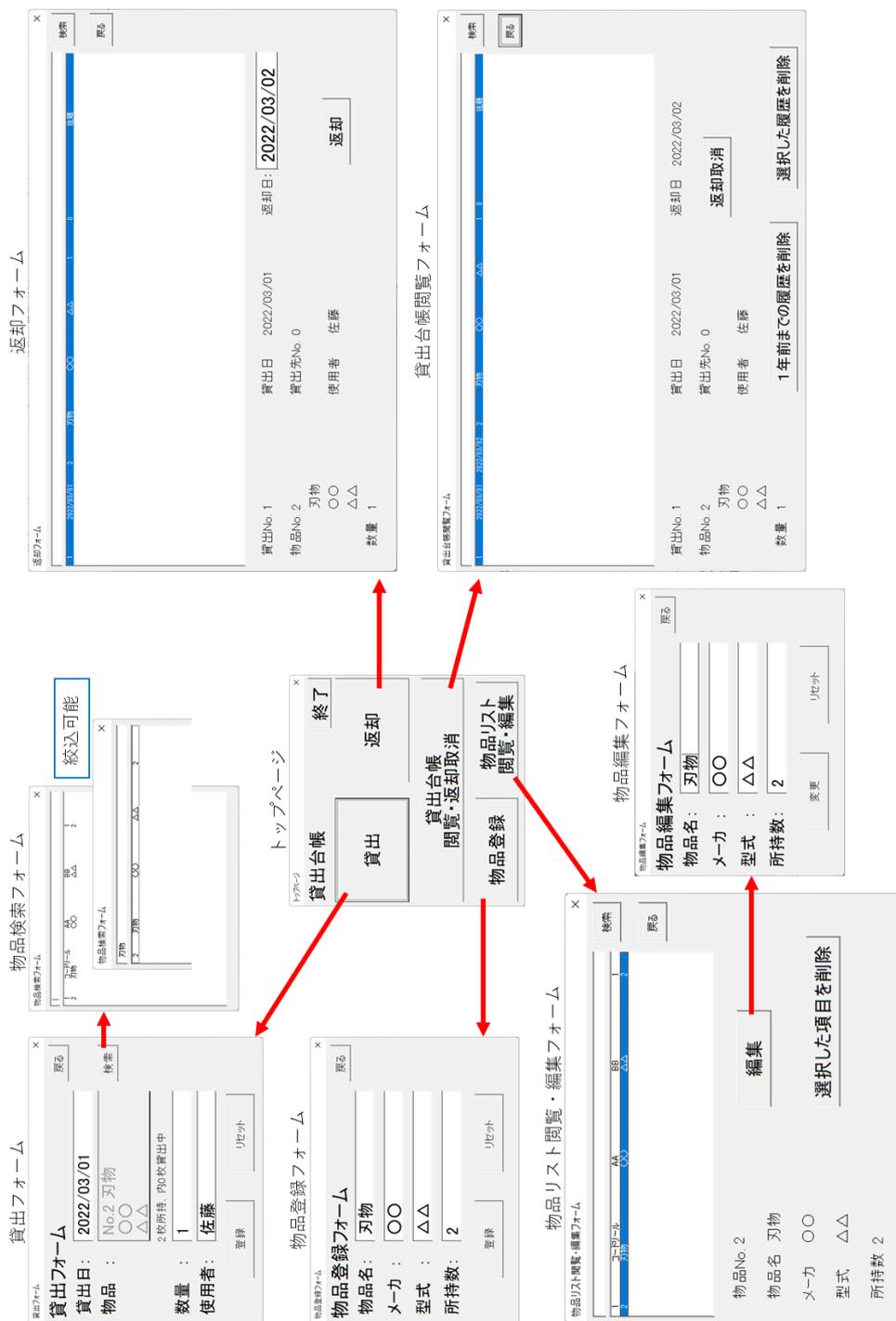


図1 貸出台帳の画面遷移図

3. 事例2 シートへの入力支援

3.1 概要

Excelを台帳として使用し、多数の情報を入力する場合、効率的にデータを入力できることが求められる。そこで、製品の試作時や製造時、修理時などに使用した部品の記録台帳を例に、作成した入力支援機能を紹介する。この台帳は、使用した部品の数量と購入価格を積算するために記録する台帳である。図2に記録台帳の画面を示す。台帳として、「管理台帳シート」、「部署台帳シート」、「部品台帳シート」がある。「部署台帳シート」と「部品台帳シート」には、予め情報を登録しておく。「管理台帳シート」には、使用した部品の情報や部品を使用した部署の情報を入力する。

3.2 入力支援機能

図2に示す画面を元に、実装した「管理台帳シート」への入力支援機能を説明する。入力を支援する項目は、「部署」と「型式」である。なお、「型式」を入力すると、自動で「部品台帳シート」を参照し、該当する「品名」、「メーカー」、「購入価格」が入力されるが、この機能はVBAを使用しておらず、VLOOKUP関数のみで実現できる。

3.2.1 部署の入力

部署欄は、「部署台帳シート」のリストに該当するNoの値のみで入力できるようにした。例えば、「ドライブ課」と入力したい場合、「3」を入力すれば自動で「ドライブ課」と変換される。VLOOKUP関数と異なり、入力したセルの値が変更される。

直接「ドライブ課」と打ち込んだ場合やリストに

ない番号を入力した場合は、変換されず入力した値が表示される。「製造1課」や「製造2課」のような数値が含まれる部署名に該当するリストのNoを「1」や「2」としておくと、部署名とNoの対応が分かりやすくなる。また、リストのNoを数値ではなく、文字にしても良い。「ユニット開発課」に該当するNoを「ゆ」とした場合、「管理台帳シート」へは「ゆ」と入力するだけで「ユニット開発課」と表示される。

3.2.2 型式の入力

型式欄は、「部品台帳シート」に記載のある型式の一部の文字を入力しエンターキーを押すと、自動的にその文字が含まれる型式名に変換されるようにした²⁾。例えば、「A」と入力した場合、「A」が含まれる型式は「AA-1」のみであるため、「AA-1」に変換される。「AA」の場合も同様である。また、「D」と入力した場合は該当する型式が3項目あるため、この場合は、一番上の行にある「DD-1-100」に変換される。「DD-1-1」と入力した場合、上の行にある「DD-1-100」に変換されてしまうため、対策として「部品台帳シート」への登録と「管理台帳シート」への入力時には、型式名の後ろに半角スペースを入れて「DD-1-1 」と入力することとした。なお、改善を行った際、このようなパターンは少なかったため、全体としては本支援機能による改善効果は得られた。また、リストにない型式を入力した場合は、変換されず入力したまま表示される。さらに、メッセージボックスにより、「登録されていません。登録しますか?」と質問される。ここで、「はい」を選択すると「部品台帳シート」の行末に入力した型式が自動で追記される。「部品台帳シート」に「品名」などその他の情報を記載すれば、その内容が管理台帳に反映される。

管理台帳シート

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	使用日	部署	型式	品名	メーカー	購入価格	数量	価格計	備考
2	3月1日	製造1課	AA-1	ベアリング	A社	1000	1	1000	
3	3月1日	製造1課	BB-2	ベルト	B社	2000	2	4000	
4	3月2日	ドライブ課	D-1-100	電線	D社	200	5	1000	

↓

部署台帳シート

	A	B
1	No	部署名
2	0	サービス課
3	1	製造1課
4	2	製造2課
5	3	ドライブ課
6	4	モータ・センサ課
7	ゆ	ユニット開発課

↓

部品台帳シート

	A	B	C	D
1	型式	品名	メーカー	購入価格
2	AA-1	ベアリング	A社	1000
3	BB-2	ベルト	B社	2000
4	CC-3	ローラー	C社	1500
5	D-1-100	電線	D社	200
6	D-1-1	電線	D社	400
7	D-2-200	電線	D社	600

図2 記録台帳の画面

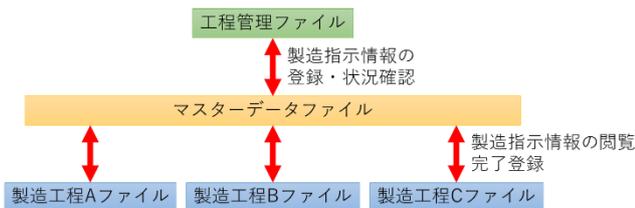


図3 生産管理システムの概要

4. 事例3 生産管理システム

4.1 概要

木製家具製造業のように、部材(部品)によって製造工程が異なり、さらに多品種少量生産の業種の場合、工程の流れが複雑になるため、手入力での管理では次工程への連絡の遅れや漏れ、工程順序の誤りなどが生じる可能性がある。そこで、この課題を解決する生産管理システムを開発した。

システムの概要を図3に示す。工程管理ファイル、マスターデータファイル、製造工程A～Cファイルはすべて個別のExcelファイルである。工程管理ファイルは、工程管理者が操作するファイルである。部品の製造指示情報の登録と製造中の部品の進捗状況の閲覧を行う。

製造工程A～Cファイルは、各製造工程の製造者が操作するファイルである。登録されている製造指示情報の中から自身の工程に関する情報のみを抽出し閲覧することができる。また、自身の工程で製造を完了した部品の完了登録を行うことで、次の工程の製造工程ファイルにその部品の製造指示情報が表示される。製造工程を増やしたい場合には、製造工程ファイルを複製し、VBAのコードに記述している工程名のみ変更すれば良い。

マスターデータファイルは、データベースとして使用しており、製造指示情報や状況を記録している。工程管理ファイルや製造工程A～Cファイルから自動でアクセスされるため、基本的に人がマスターデータファイルを開くことはない。

4.2 使い方

図4に示す画面を元に、使い方を説明する。

4.2.1 工程管理ファイルの操作

(1) 事前準備

事前準備として、部品リストシート内の部品リストに、部品名とその部品を製造するための工程を記載する。工程は、カンマ区切りで工程順に入力

する。

(2) 製造指示情報の登録

製造指示情報登録シートから登録を行う。納期、ロットNo、部品名、数量、(必要に応じて)備考を入力し、「登録」を押すと、マスターデータファイルにその情報が登録される。製造指示情報が複数ある場合は、複数行に記載する。また、登録時に(1)項で記載した部品リストの中から部品名に該当する工程を参照し、マスターデータファイルに登録する。部品リストに記載がない場合は、エラーとなり製造指示情報を登録することはできない。なお、マスターデータファイルの項目にあるIDは、登録時に自動で割り振られる数値である。

(3) 製造状況の閲覧

製造状況閲覧シートから製造状況の閲覧を行う。「表示を更新」ボタンを押すと、マスターデータファイルから製造指示情報を読み取り、表示を行う。(2)項で登録した情報の他に、現在の工程と残りの工程が表示される。現在の工程は、現在製造中の部品の製造工程名であり、残りの工程は、現在の工程完了後に実施される残りの製造工程名である。残りの工程が複数ある場合は、順にカンマ区切りで表示される。また、全ての工程が終了した部品については、現在の工程欄に完了と表示される。完了した部品の情報は、「完了分を削除」ボタンを押すと、まとめて削除される。なお、登録された製造指示情報を変更する機能も実装したが説明は省略する。

4.2.2 製造工程ファイルの操作

(1) 製造指示情報の閲覧

製造指示情報閲覧シートから製造指示情報の閲覧を行う。「表示を更新」ボタンを押すと、マスターデータファイルから製造指示情報を読み取り、自身の製造工程に関係する情報の表示を行う。表示内容は、4.2.1(2)項で登録した情報である。また、背景色が白色の行は、自身の工程で製造中の部品の情報であり、灰色の行は、他の工程で製造中であるが、他の工程完了後、自身の工程で製造する部品の情報である。

自身の工程の製造完了後、該当する部品の完了欄をダブルクリックすると完了と表示され、背景色が水色になる。その状態で「完了反映」ボタンを押すと、マスターデータファイルに完了情報が反映される。完了欄に完了と表示された状態で、再度完了欄をダブルクリックすると、完了欄の表示は消えて、背景色が白色に戻る。

工程管理ファイル

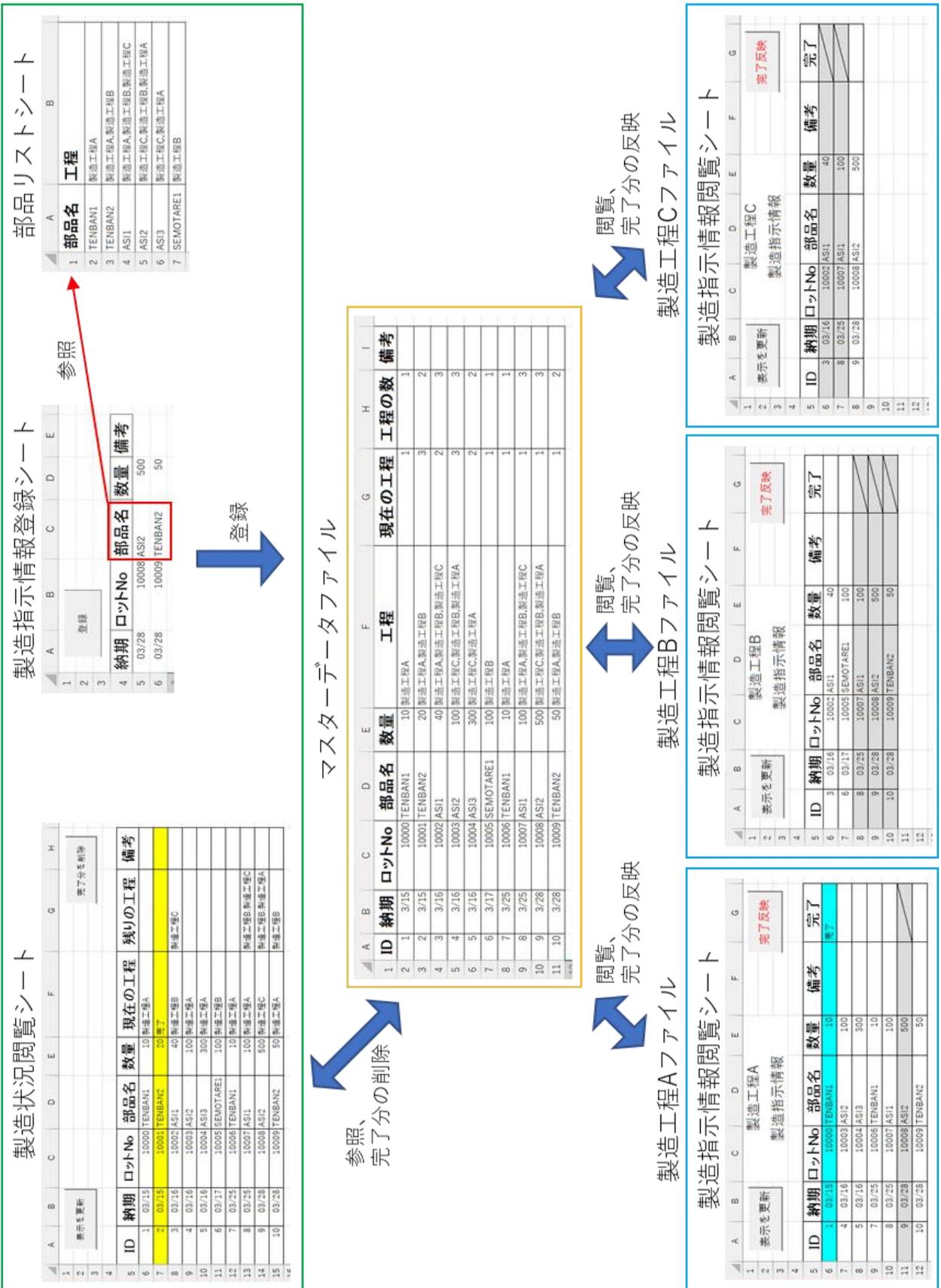


図4 生産管理システムの画面

4.3 マスターデータファイルでの記録内容

マスターデータファイルには、4.2.1(2)項で登録した情報に加え、現在の工程と工程の数の情報を記録している。現在の工程は、工程欄に記載している部品の全工程の中から、現在何番目の工程にあるかを数値で表している。工程の数は、工程欄に記載している工程の総数である。

製造状況や製造指示情報の閲覧時には、工程欄の内容と現在の工程欄に記載の数値から、現在の工程名を得ている。

工程管理ファイルから製造指示情報の登録を行う際には、現在の工程欄は「1」と記載される。製造工程ファイルからその工程の完了登録を行う際には、現在の工程欄の数値に「+1」を加算している。また、(現在の工程欄の数値) > (工程の数欄の数値)である場合、工程管理ファイルでは全ての工程が完了していると判断している。

4.4 考慮した点

4.4.1 同時アクセスへの対応

Excelは複数人が同時に同じファイルにアクセスすることができない。そこで、データ記録用のファイルとしてマスターデータファイルを設け、情報の登録や閲覧時のみマスターデータファイルを開き、情報の書き込みと読み取りを行った後、すぐに閉じる仕様とした。マスターデータファイルへのアクセス時間は、1回の処理で約1秒程度であり、もしそのタイミングで他の人がマスターデータファイルにアクセスしても、1秒待てばアクセスできるため、業務に支障が出る可能性は低い。

4.4.2 項目の増減への対応

登録や表示を行う項目の追加や削除を行う場合における、VBAのコードの修正箇所を減らす方法について検討した。

VBAにてシート上のセルを指定する場合、Cells(行数,列数)と記述する。例えばB列の5行目のセルならCells(5,2)である(Range("B5")という記述もできる)。そのため、例えばシートのA列目とB列目の間に列を挿入し、新しく登録する情報を追加した場合、これまでB列目にあった情報はC列目に、C列目にあった情報はD列目にと順に移動する

ため、セルを指定している箇所は追加前の列から追加後の列に全て変更しなければならない。

そこで、Cells内の列数を、Dictionaryオブジェクトを用いて指定することとした³⁾。Dictionaryオブジェクトによりシート内の項目名と列数を対応させることで、項目名でセルを指定することが可能となる。列数に変更が生じて項目名で指定しているため、この部分のコードを修正する必要はない。例として、Dictionaryオブジェクトをdic、B列の項目名を部品名とした場合、先の例においてB列の5行目のセルを指定する場合は、Cells(5,dic("部品名"))と記述できる。また、列数の変更に対応するため、登録や更新の処理の最初に、都度、各シート内の項目名とその項目の列数を取得し、Dictionaryオブジェクトに格納している。

Dictionaryオブジェクトを用いることで、登録項目の追加や削除が生じた際の修正時間を大幅に短縮することができた。

5. まとめ

本報では、VBAにより現場の改善を行った事例として、フォームによる貸出台帳、シートへの入力支援、生産管理システムについて紹介した。今回紹介した事例が業務改善の一助になれば幸いである。

謝辞

改善のためのニーズを提供していただいた関係者の方々にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 横山達大: アプリ作成で学ぶ ExcelVBA プログラミングユーザーフォーム&コントロール, 秀和システム, 2012, pp. 440-441.
- 2) エクセル VBA nge イベントと EnableEvents プロパティで部分一致検索をする方法, <https://tonari-it.com/excel-vba-event-change-enableevents/#toc2>, 2022年3月2日参照
- 3) VBA 入門 ictionary オブジェクト(連想配列)の使い方 侍エンジニアブログ, <https://www.sejuku.net/blog/29736>, 2022年3月10日参照

令和3年度 岐阜県生活技術研究所研究報告

No. 24 2022

令和4年8月発行

編集・発行者 岐阜県生活技術研究所

〒506-0058

岐阜県高山市山田町1554番地

TEL 〈0577〉 33-5252

FAX 〈0577〉 33-0747

印刷 有限会社 大六印刷