

# 杉板材のレーザー彫刻加工に関する基礎的研究

## A Basic Study on Laser Engraving of Japanese Cedar

○東郷 拓真\*<sup>1</sup>, 安江 玲於\*<sup>2</sup>, 満田 衛資\*<sup>3</sup>  
Takuma TOGO\*<sup>1</sup>, Reo YASUE\*<sup>2</sup> and Eisuke MITSUDA\*<sup>3</sup>

\*1 京都工芸繊維大学大学院 博士後期課程 修士 (工学)

Doctoral Programs, Kyoto Institute of Technology, M. Eng.

\*2 京都工芸繊維大学大学院 博士前期課程

Graduate Student, Kyoto Institute of Technology

\*3 京都工芸繊維大学 教授 博士 (工学)

Prof., Kyoto Institute of Technology, Dr. Eng.

キーワード：木質材料; 炭酸ガスレーザー; デジタルファブリケーション

Keywords: Wood-based material; CO2 laser; Digital fabrication.

### 1. はじめに

京都工芸繊維大学では、武田五一設計の和楽庵を学内に移築し新たな保存再生の手法を探る学域横断型プロジェクトが進行している。移築前の和楽庵の外装にはヘリンボーン柄のなぐり板（木板に手斧による彫刻を施したもの）が使用されていたが、寸法が移築後の形状に合わないものや劣化の酷いものがあり、一部を再製作する必要があることが分かった。このヘリンボーン柄は立体的な凹凸で表現されており、当時の加工方法についても資料が見つからない。専用の治具を用いていたと推測されるが、その治具も含めて再現すると費用や手間が増大する。この問題を解決するため、本論では、なぐり板のように立体的な形状を持つ外装材をレーザー彫刻により製作する手法を提案する。

### 2. レーザー彫刻による木板の加工実験

旧来、レーザー加工技術は金属の分野で盛んで、木材や

プラスチックでの利用も進んでいる<sup>1),2)</sup>が、図1のように出力により深度をコントロールするレーザー彫刻は事例が少ない。また、建築の外装材の彫刻に用いた例は現時点では見つからない。今回は、製造業などで一般的に用いられる炭酸ガスレーザー機器を使用し、建材として流通している杉板材に彫刻を施す。木材の比重が軽いほど炭酸ガスレーザーによる加工性が良い<sup>2)</sup>ことと、建築材料としての経済性を考慮すると、日本国内においては杉板材が適していると考えた。

なぐり板の立体的な意匠を図2のようにグレースケールの画像で表現し、機器に入力することで彫刻する。黒が深く掘る部分で、レーザーの出力が大きいことを示す。使用機材は京都工芸繊維大学が所有する NOVA14-P13 とした。この場合、1100mm×190mm の大きさの板を1枚あたり1時間ほどで加工できた。これと同様のなぐり板を手作業で加工したところ、ルータ用の治具を製作した上で事前に練習を重ねれば、1枚あたり20分ほどで加工できることが分

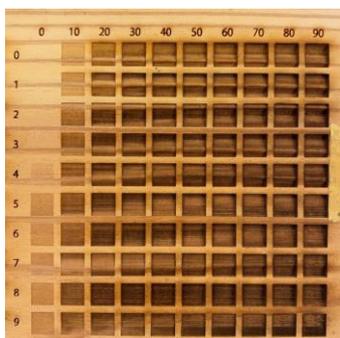


図1 杉板のレーザー加工実験  
(出力を0%~99%まで変化)

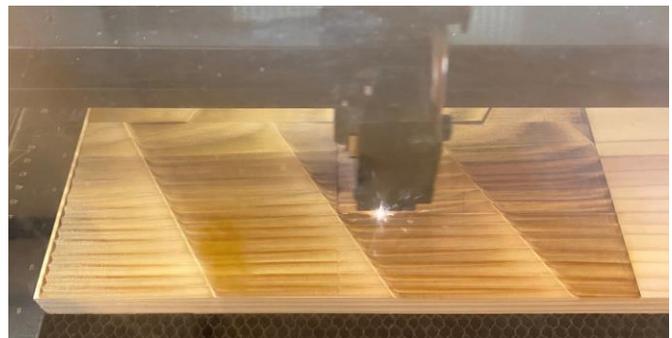


図2 レーザー加工によるヘリンボーン柄の彫刻  
(左:入力する画像データ、右:加工中の様子)

かった。加工時間は手作業の方が短時間で済むものの、形状に応じた治具の製作が必要であることと、仕上がりの精度が作業者に依存することを考慮すると、レーザー彫刻の方が汎用性は高いと考えられる。

この他に、手加工との差異として以下の4点が確認できた。1) 繊維の固い部分(晩材)が残留するため、木材特有の木目が目立つ。2) レーザーの加熱によって表層が炭化し、古材の色合いに近いものになる。3) 機器の設定(後述)により炭化の程度をコントロールできる。4) 加工データを保存しておけば、将来にわたり同様の形状の再現が可能となる。

### 3. 耐久性試験

#### 3.1. 試験体について

一般に、外装材には耐久性、防火性、施工性など様々な性能が要求される。今回製作するなぐり板も外気に曝される箇所であるため、京都大学生存圏研究所の吉村剛教授の協力のもと、防腐性能および防蟻性能についての実験を実施した。

本試験では、レーザーにより加熱処理を施した木材の耐久性を、非加熱処理材および焼杉と比較する。焼杉は、同じく木板を炭化させた外装材であり、その耐久性・防火性に関する研究が複数存在する<sup>3),4)</sup>。また、既往の研究によるとレーザーによる炭化の程度は主にレーザー照射口の走査速度に依存するため<sup>2)</sup>、走査速度を変数とした試験体を用意し、耐久性との関係を調べる。

試験体の一覧を表1および図3に示す。建材として流通している材と比較するため、人工乾燥をかけた杉板から試験体を製作した。Cは一切加熱処理を施さない試験体である。

表1 試験体一覧

試験体	材質	人工乾燥	加熱加工	エポキシ樹脂による保護
C	杉	済	無	有
Y	杉	済	バーナー	有
L2	杉	済	レーザー(強)	有
L4	杉	済	レーザー(中)	有
L8	杉	済	レーザー(弱)	有



図4 防蟻性能試験

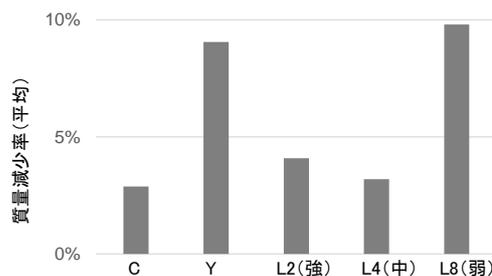


図5 防蟻性能試験結果

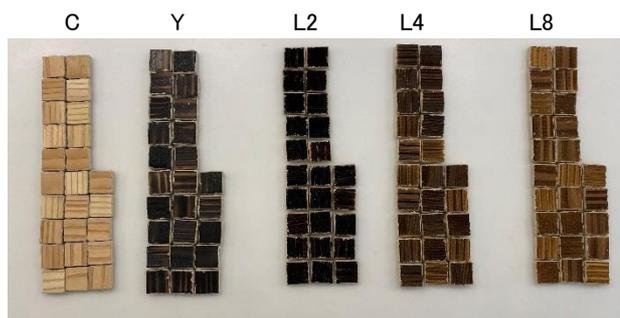


図3 試験体の写真(実験前)



図6 杉の抽出成分の一例

る。レーザーで加熱処理した試験体は3種類とし、それぞれ走査速度を200、400、800 (mm/s)と変化させた(L2、L4、L8)。スピードが遅いとより多くの熱量が入射するため、炭化の程度も大きくなる。Yは、焼杉の製作経験をもつ工務店が、バーナー(火炎約1400度、約20分加熱)により焼杉を模して加工した試験体である。

#### 3.2. 防蟻性能試験

試験方法はJIS K1571に準拠し、京都大学生存圏研究所で育成した白蟻を使用した。試験数を3とし、それぞれに職蟻150匹と兵蟻15匹を入れ、適切に温湿度管理された部屋に21日静置した(図4)。試験前と後にそれぞれ48時間乾燥させた時の質量を計測し、その減少率により防蟻性を評価する。

計測した質量減少率の一覧を図5に示す。各試験体の質量減少率を比較すると、C・L2・L4は平均で3~4%しか質量が減少しなかったのに対し、Yでは平均で9%、最大で15%の減少が確認できた。また、L8では平均で10%、最大で15%の減少が確認できた。死虫率(職蟻の総数に対する死亡数の割合)の平均は、全ての試験グループにおいて18~22%と、各試験グループ間で大きな差は見られなかった。殺蟻成分を含む材料の防蟻性能試験では、死虫率が50~100%となることが多いことから、各試験体に目立った殺蟻性の効果は確認できないといえる。

以上より、YおよびL8で食害が大きくなった一方で、死虫率に顕著な差は見られなかった。既往の研究により、檜のような高耐久の樹種の抽出成分には殺蟻成分が含まれ、比較的耐久性が低いとされる杉には図6に示すような摂食阻害物質(テルペンやノルリグナン)が含まれることが明らかにされている<sup>5)</sup>。このことから、今回の試験では

加熱量・手法による木材由来の摂食阻害物質の増減が結果に影響したと推測できる。

### 3.3. 防腐性能試験

JIS K1571 に準拠し、防腐性能試験を実施した。腐朽菌は、事前に培養したカワラタケ（白色腐朽菌、以後 COV）とオオウズラタケ（褐色腐朽菌、以後 TYP）の 2 種類とした。滅菌処理をした試験片をシャーレに 3 個ずつ置き、温湿度管理されている部屋で 42 日静置した（図 7）。

期間後に取り出したところ、ほぼ全ての試験体で COV・TYP とともに質量減少率が 0% となった。本試験体はエポキシ樹脂で一面以外保護しており木口が露出していないため、腐朽菌が繁殖しにくい環境だったと考えられる。

次に、試験時の状況を再現し、各試験体の含水率を測定した（図 8）。C 以外の試験体は含水率が 30% 未満に留まっており、中でも L2 の含水率が最も低いことが分かる。含水率が繊維飽和点を超えると繊維内に自由水が増え始めるため、腐朽菌が木材内部まで繁殖する条件は含水率 25% 以上とされている。今回の結果では L2 のみ含水率が 25% を下回っていることが確認できた。以上から、実験では腐朽による質量減少は確認されなかったが、より長期間静置することで、加工方法・走査速度により腐朽菌の繁殖

に差が出ると考えられる。

## 4. 主要成分の変化の考察

### 4.1. 表層の炭化

顕微鏡により未使用の試験体表面を拡大した写真を図 9 に示す。最も強くレーザー加工した L2 では幅 200 $\mu$ m 以上の縞状の緻密な炭化（黒色の部分）が確認できる一方で、L4 や L8 では炭化の範囲が減少していることが分かる。Y（工務店によるバーナー加工）では面状の炭化が確認できたものの、場所によって薄茶色・白色の部分の確認でき、炭化の程度にばらつきが見られる。

一般に、レーザー加工には表 2 に示すように熱加工と非熱加工（アブレーション）の 2 種類が含まれる。熱加工では加工面が熱により融解・気化するのに対し、非熱加工ではレーザーのエネルギーにより加工面の原子間結合が切れて物質が飛散する。熱加工と非熱加工の比率は、レーザーのパルス幅の設定により調整することができる。木材の場合、熱加工により炭化が進み、非熱加工により結合の切れやすい成分が除去され彫刻加工が実現できていると考えられる。

図 10 に、焼杉およびレーザー加工した木材の断面モデル



図 7 シャーレ内での菌の繁殖

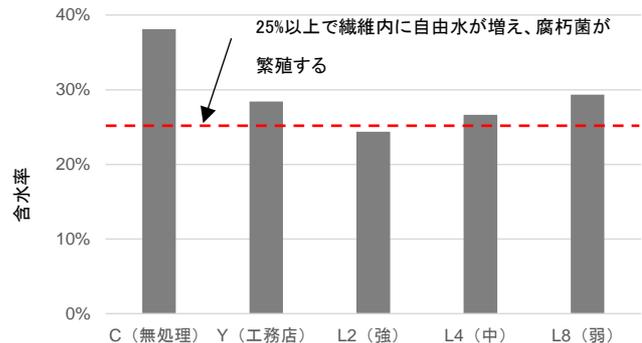


図 8 腐朽試験時の含水率

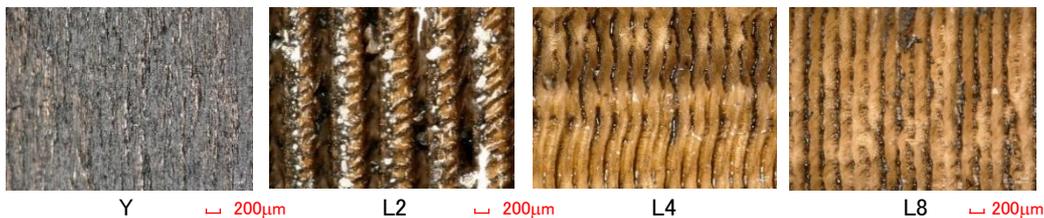


図 9 試験体の拡大写真

表 2 レーザー加工の熱加工と非熱加工

	レーザー波長	パルス幅	照射箇所周辺への熱影響
熱加工	主に赤外線	長い	大きい
非熱加工	材料の吸収特性による	短い	小さい

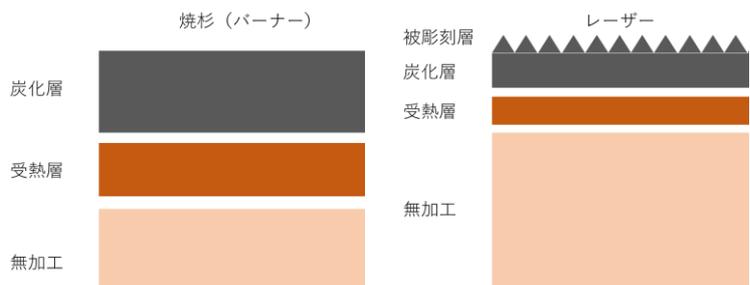


図 10 加工方法による断面方向の熱変化の違い(仮説)

ル(想定)を示す。焼杉については、文献4)に示されている三層モデルを参照した。文献では、焼杉の炭化層の下に、主要成分の熱分解が開始した受熱層があると仮定している。レーザー加工が周辺への熱影響の少ない非熱加工も含んでいることを考慮すると、図10右側に示すように、レーザー加工した木材では焼杉に比べ受熱層の範囲が狭いと考えられる。現在、レーザー彫刻加工を施した材の断面を観察し、各層の厚さの調査を進めている。

#### 4.2. 抽出成分

図9のL2やL4では表面に光沢が確認できる。炭化した木繊維はこのような反射率を持たないことから、これは木材の抽出成分による反射と考えられる。杉材の抽出成分には、テルペンやノルリグナンといった生体成分が含まれており、防蟻性や、先述のような白蟻への摂食阻害性が確認されている<sup>5,6)</sup>。

また、これらの一部は図6のように親水性のヒドロキシ基を多く含んでおり、乾燥や熱による量的変動に関する報告も複数存在する<sup>7)</sup>。今回用いた炭酸ガスレーザーは赤外線領域の周波数を持ち、水分と特に反応しやすいことから、テルペンあるいはノルリグナンの移動や増減が今回の試験結果にも影響を与えたと推測できる。

今後の研究で、FTIRやXPSなどによる木材表面の成分分析を進めていくことで、レーザー加工を施した木材の材質の変化を更に解明していく。

#### 5. まとめ

- ・ 和楽庵の外壁の再生にあたり、レーザー加工機の彫刻機能を用いて、立体的な凹凸を持つなぐり板を製作し、その造形における特徴を示した。
- ・ 防蟻性試験の結果から、市販の杉板は一定の防蟻性能を有しており、加熱によって一度は性能が落ちるが、更に加熱を続けるとまた防蟻性能が復活することが分かった。死虫率から、杉に含まれる摂食阻害物質の量的変動が影響したと考えられる。

- ・ 実験では加熱処理による防蟻性能の差は確認できなかったが、その含水率を計測したところ最も強くレーザー加工した試験体のみ腐朽菌の繁殖の基準である25%を下回った。

- ・ 今後はレーザー加工による炭化の深さや、抽出成分(テルペンやノルリグナン)の増減に着目し、FTIRやXPSにより考察を進める。

なお、本論で述べたレーザー加工によるなぐり板は、和楽庵移築工事において一部の外壁に実装された(図11)。実験的な取り組みとして、塗料や防腐剤の散布なしで施工しており、竣工後は外気に曝すことによる経年変化を観察する。

#### [参考文献]

- 1) Barbara A. Fogarty, Kathleen E. Hepper, Theodore J. Cory, Kalonie R. Hulbutta, R. Scott Martin and Susan M. Lunte: Rapid fabrication of poly(dimethylsiloxane)-based microchip capillary electrophoresis devices using CO2 laser ablation, The Royal Society of Chemistry, vol.130, pp.924-930, 2005.
- 2) 北田良二: 炭酸ガスレーザーを用いた木材の加工特性評価ー各種木材のレーザー切断およびレーザー彫刻ー, 崇城大学紀要 vol.43, pp.199-214, 2018.03.
- 3) 秋月通孝, 長谷見雄二, 大西卓: 伝統的木質系材料の燃焼発熱性状(防火), 日本建築学会研究報告集I, pp.309-312, 2001.
- 4) 岡村健太郎, 安井昇, 加來千紘, 腰原幹雄, 今本啓一, 大島耕平: 焼杉に関する研究ー性能評価と普及に向けたフィジビリティスタディー, 住総研研究論文集・実践研究報告集 No.44, pp.13-24, 2017.
- 5) 澁谷栄, 小幡谷英一, 花田健介, 土居修一: 高温乾燥によるスギ材心材抽出成分の量的変動, 木材保存, 32巻, 5号, pp.196-202, 2006.
- 6) 今井貴規: 心材形成の化学, 木材学会誌, 58巻, 1号, pp.11-22, 2012.
- 7) 奥田拓, 中川敏法, 村野朋哉, 三好悠, 亀井裕人, 佐々木隆雄, 三枝康弘, 和田善行, 湊俊司, 阪井彰一, 千里泰三, 藤本登留, 清水邦義: 乾燥処理がスギ板材の抽出成分に与える影響, 木材学会誌, 63巻, 5号, pp.204-213, 2017.



図11 レーザー彫刻加工によるなぐり板の実装