

# 炭酸ガスレーザーを用いた木材の加工特性評価 —各種木材のレーザー切断およびレーザー彫刻—

北田 良二\*

Processing Characteristics of Wood using CO<sub>2</sub> Laser Machining  
— Laser Cutting and Engraving on Various Woods —

by  
Ryoji KITADA\*

## 要 旨

木材は様々な産業で使用されており、その用途は多岐にわたる。我々にとって最も身近な材料の一つであるといえる。その種類も非常に多くあり、それぞれの特徴を活かして使い分けられている。その一方で、従来の機械的な加工方法では、高密度・高硬度木材の加工が困難な場合があり、また、木材の微細形状加工においては限界がある。そこで、近年、炭酸ガスレーザーを用いて木材の切断加工や装飾品などの微細形状加工がおこなわれることがあり、レーザー発振器の普及に伴い機械加工に代わる新たな加工技術として注目されるようになってきた。しかしながら、木材に対するレーザー加工特性を評価した報告事例は多くなく、限定的なものとなっている。そこで、本研究報告では、比重および硬さの異なる木材を選定して、炭酸ガスレーザーによる切断および彫刻加工についてその加工性状を調査した。レーザー出力、レーザー走査速度、レーザーパルス数を制御することで、切断および彫刻に及ぼす加工性状の変化を観察した。また、比重の異なる木材としてバルサ、杉、ヒノキ、赤松の4種類を選定し、木材の種類の違いが加工性状に及ぼす影響を確認した。

**Key Words:** 炭酸ガスレーザー、木材、レーザー切断、レーザー彫刻、熱影響

## 1. はじめに

近年、レーザー発振器の高機能化、低コスト化が進み、様々な産業分野においてレーザー光を利用した技術が活用されている<sup>1)</sup>。材料加工においては、切断、彫刻、穴開けなどの加工をレーザー光により高効率に行うことができる。特に炭酸ガスレーザーは、波長10.6  $\mu\text{m}$  の赤外域の

レーザー光を発振して、プラスチック材料、木材、ガラスなどの加工に適している。また、発振器が低コストであり大出力にも対応できることから、幅広く産業で実用化できる利点もある。一方、赤外線レーザーであるため、レーザースポット径は直径0.1 mm程度であり微細加工が難しく、加工点において熱影響が大きく発生するといった課題もある。その課題に対して、加工条件やプロセスを工夫することで炭酸ガスレーザーを用いた微細加工技術の可能性を示した報告は幾つ

\*崇城大学工学部機械工学科准教授

かあるが<sup>2)</sup>、木材に対する加工特性を評価した研究事例は少ない<sup>3)-5)</sup>。

本研究は、炭酸ガスレーザーの低コスト、高効率加工である特徴を活かして、木材の高品位微細加工に取り組むものである。レーザー加工条件を最適化することで熱影響を抑制した微細加工を目指しており、そのために基礎的な加工データの収集を実施した。本研究報告では、比重および硬さの異なる木材として、バルサ、杉、ヒノキ、赤松の4種類を選定して、炭酸ガスレーザーによる切断および彫刻加工についてその加工性状を調査した。レーザー出力、レーザー走査速度、レーザーパルス数を制御して、切断および彫刻に及ぼす加工性状の変化を観察した。また、木材の種類の違いが加工性状に及ぼす影響を確認した。

## 2. 実験装置および実験方法

### 2.1 炭酸ガスレーザー加工機

本研究に使用した炭酸ガスレーザー加工機の外観を図1に、その主な仕様を表1に示す。本レーザー加工機は、平成28年度に新たに本学ものづくり創造センターへ導入された加工設備であ



図1 炭酸ガスレーザー加工機

表1 炭酸ガスレーザー加工機の主な仕様

名称	レーザー彫刻機
メーカー	Great Computer Corporation
型式	Spirit GLS
レーザー発振器	炭酸ガスレーザー
波長	10.6 $\mu\text{m}$
最大出力	100 W
最大速度	80 inch / second
彫刻エリア	860×610 mm
カットエリア	960×610 mm
本体寸法	1365×950×995 mm

る。パルス発振の炭酸ガスレーザー発振器を搭載しており、レーザーヘッドがXY方向に駆動することで、ステージ上に設置された加工対象物を切断、彫刻加工することができる。レーザー光の焦点位置は、ステージがZ方向に昇降することで調整することが可能であり、オートフォーカス機能を備えている。

本研究で使用したレンズの焦点距離は2インチであり、加工点におけるスポット径は0.102 mm (メーカー仕様値) である。レーザー出力、レーザー走査速度、レーザーパルス数をパラメータとして、レーザー切断加工および彫刻加工を実施した。レーザー出力およびレーザー走査速度は、表1における最大出力、最大速度に対するパーセントをそれぞれ設定して制御する。レーザーパルス数は、切断加工の場合はPPI (Pulse Per Inch)、彫刻加工の場合はDPI (Dot Per Inch) の値を設定してレーザーパルスの照射回数を制御する。PPIは切断長さ1インチあたりのパルス数を意味し、DPIは彫刻エリアにおける1インチ幅あたりのパルス数を意味する。

### 2.2 実験材料

木材のレーザー加工実験には、比重・密度が異なる木材として、バルサ、杉、ヒノキおよび赤松を選定した。これら各種木材の物性値を表2に示す<sup>6)</sup>。板厚については、全て15 mmに統一して実験を実施した。バルサと杉については一枚板、ヒノキと赤松については集成材を使用した。

炭酸ガスレーザーは熱的なレーザー加工である。したがって、各種木材の違いが切断および彫刻加工に及ぼす影響や、加工性状としてどのような熱影響の違いが発生するのかを調査した。

表2 実験に使用した各種木材の物性値

木材	全乾比重	気乾比重	熱伝導率 (kcal/m $\cdot$ h $\cdot$ °C)	着火点 (°C)	発火点 (°C)
バルサ	-	0.17	0.041	-	-
杉	0.35	0.38	0.075	240	435
ヒノキ	0.40	0.44	0.082	253	430
赤松	0.48	0.52	0.095	263	485

### 2.3 レーザ切断加工の方法

各種木材に対する切断特性を評価するために、レーザ出力、レーザパルス数 (PPI)、レーザ走査速度を実験パラメータとして変化させて切断実験を行った。各種木材に対して、レーザ出力、レーザパルス数 (PPI)、レーザ走査速度の標準条件を設定し、3つのパラメータのうち1つのパラメータのみを変化させて切断加工実験を実施した (1つのパラメータを変化させる場合、標準条件は必ず含まれるが、変化させるパラメータ毎に標準条件の実験をしているため、各種木材において標準条件の実験データは同一ではない)。

切断実験の様子を図2に示す。同一条件にて5本切断して、その切断性状を顕微鏡にて観察した。また、切断溝幅を顕微鏡で測定し、レーザ加工条件との相関を調査した。切断溝幅は、5本の切断溝を測定して、その平均、最大、最小を評価した。

なお、木目の目立つ杉、檜、赤松については、レーザ走査方向は木目と同じ方向 (平行) にして切断を行った。

### 2.4 レーザ彫刻加工の方法

レーザ照射のエネルギー密度を低くして加工対象物へレーザ光を照射することで彫刻加工が可能となる。各種木材のレーザ彫刻の特性を評価するために、レーザパルス数 (DPI) を変化させて、彫刻加工 (表面除去加工) の実験を行った。

図3に示す画像データを使用して、彫刻実験を実施し、レーザ出力とレーザ走査速度はそれぞれ20%と80%に固定した。各種木材についてレーザ彫刻の表面状態をデジタルカメラと顕微鏡にて観察することで評価した。

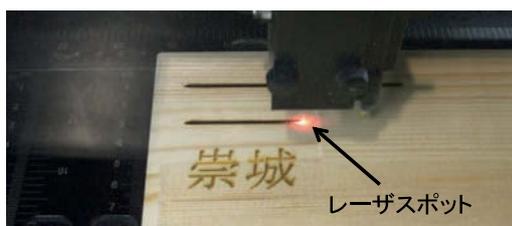


図2 レーザ切断加工の様子 (赤松)



図3 レーザ彫刻加工に用いた画像データ

## 3. レーザ切断加工の実験結果

### 3.1 バルサの切断結果

レーザ出力、レーザ走査速度、パルス数 (PPI) を変化させた場合のバルサのレーザ切断溝の状態を図4、図5、図6にそれぞれ示す。レーザ切断の標準条件としては、レーザ出力90%、レーザ走査速度2.0%、レーザパルス数500 PPIとした。図4より、レーザ出力が大きくなるに従って切断溝幅が大きくなる傾向であ

レーザ出力 (%)	レーザ入射側	レーザ出口側
30	切断方向 → ↓ 0.528 mm	← 切断方向 ↓ 0.262 mm
40	↓ 0.566 mm	↓ 0.194 mm
50	↓ 0.632 mm	↓ 0.232 mm
60	↓ 0.654 mm	↓ 0.246 mm
70	↓ 0.692 mm	↓ 0.326 mm
80	↓ 0.636 mm	↓ 0.506 mm
90	↓ 0.670 mm	↓ 0.570 mm

レーザ走査速度：2.0%，パルス数：500 PPI

図4 バルサのレーザ出力に対する切断溝の変化

走査速度(%)	レーザー入射側	レーザー出口側
1.0	切断方向 → ↑ 0.708 mm	← 切断方向 ↑ 0.882 mm
1.5	↑ 0.690 mm	↑ 0.664 mm
2.0	↑ 0.710 mm	↑ 0.436 mm
2.5	↑ 0.624 mm	↑ 0.280 mm
3.0	↑ 0.688 mm	↑ 0.250 mm
3.6	↑ 0.666 mm	↑ 0.414 mm
4.0	↑ 0.568 mm	↑ 0.258 mm

レーザー出力：90%，パルス数：500 PPI

図5 バルサのレーザー走査速度に対する切断溝の変化

パルス数(PPI)	レーザー入射側	レーザー出口側
200	切断方向 → ↑ 0.750 mm	← 切断方向 ↑ 0.374 mm
300	↑ 0.710 mm	↑ 0.544 mm
400	↑ 0.746 mm	↑ 0.452 mm
500	↑ 0.676 mm	↑ 0.338 mm
600	↑ 0.720 mm	↑ 0.396 mm
700	↑ 0.664 mm	↑ 0.362 mm
800	↑ 0.624 mm	↑ 0.644 mm

レーザー出力：90%，レーザー走査速度：2.0%

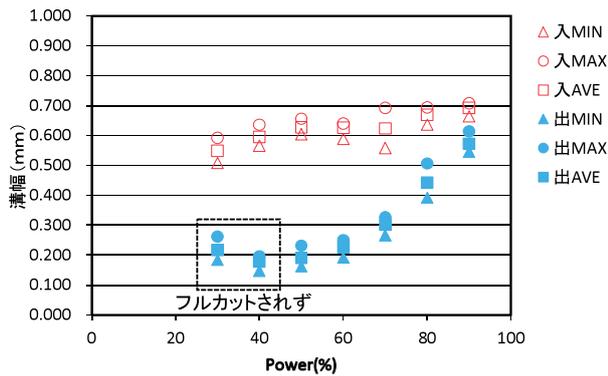
図6 バルサのレーザーパルス数に対する切断溝の変化

ることがわかる。図5より、レーザー走査速度が速くなるに従って切断溝幅は小さくなる傾向であることがわかる。図6からは、パルス数を変化させても切断溝幅はあまり変化していないことがわかる。また、全体的にレーザー入射側よりレーザー出口側の方が切断溝幅は小さく、テーパ形状に切断されていると推測される。さらに、レーザー出力が大きい場合、レーザー走査速度が遅い場合に、レーザー切断溝付近の焼け焦げが顕著に確認され、全体的にバルサの場合は、切断溝に沿って焼け焦げが確認された。

次にレーザー切断溝幅を測定した結果を、図7、図8、図9に示す。図7はレーザー出力を変化させた場合のレーザー切断溝幅の変化を示した結果である。図より、レーザー出力が大きくなるにしたがって、切断溝幅が広がる傾向であることがわかる。レーザー入射側は緩やかな増加傾向であるのに対して、レーザー出口側は大きく増加していく。その結果、レーザー出力が大きい場合には、レーザー入射側と出口側の切断溝幅の断差が小さくなり、ストレート断面になっていると推

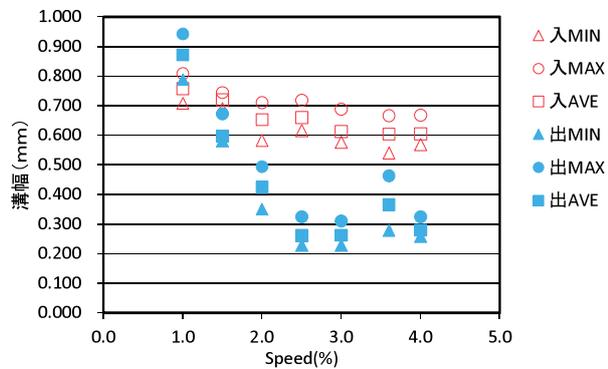
測される。図8はレーザー走査速度を変化させた場合のレーザー切断溝幅の変化を示した結果である。図より、レーザー走査速度を速くにしたがって切断溝幅は小さくなる傾向であり、レーザー出力を増加させた場合と逆の傾向にあることがわかる。レーザー走査速度が遅い場合には、切断溝幅の段差が小さくストレート断面になっていると推測される。つまり、レーザー出力が大きい場合、レーザー走査速度が遅い場合には、単位長さあたりのレーザー入熱量が増えるため、図7および図8のような傾向になったと考えられる。図9はレーザーパルス数を変化させた場合のレーザー切断溝幅の変化を示した結果であるが、図6の切断溝の状態と同様にパルス数を変化させても切断溝に大きな変化はない。ある一定のパルス数以上あれば、レーザー切断に必要なエネルギーは確保されており、単位長さあたりのレーザー入熱量を必要以上に与える必要はないものと考えられる。

更に、以上のバルサのレーザー切断溝の状態および切断溝幅の変化から、加工品質の改善を目



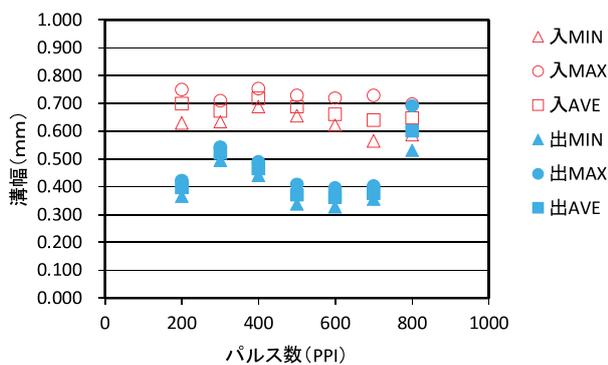
レーザー走査速度：2.0%，パルス数：500 PPI

図7 バルサのレーザー出力に対する切断溝幅の変化



レーザー出力：90%，パルス数：500 PPI

図8 バルサのレーザー走査速度に対する切断溝幅の変化



レーザー出力：90%，レーザー走査速度：2.0%

図9 バルサのレーザーパルス数に対する切断溝幅の変化

的として、レーザー切断溝に沿って発生する焼け焦げが少なく、レーザー入射側と出口側の切断溝幅の段差が小さいレーザー加工条件を検討した。レーザー加工条件の改善としては、レーザー出力、レーザー走査速度、レーザーパルス数を見直した。

レーザー加工条件	レーザー入射側	レーザー出口側
標準条件 出力: 90 (%) 速度: 2.0 (%) パルス数: 500 (PPI)	 切断方向 → 溝幅平均値 0.693 mm	 ← 切断方向 溝幅平均値 0.573 mm
改善条件 出力: 80 (%) 速度: 1.5 (%) パルス数: 300 (PPI)	 切断方向 → 溝幅平均値 0.672 mm	 ← 切断方向 溝幅平均値 0.498 mm

図10 バルサにおけるレーザー加工条件の改善結果—切断溝の状態—

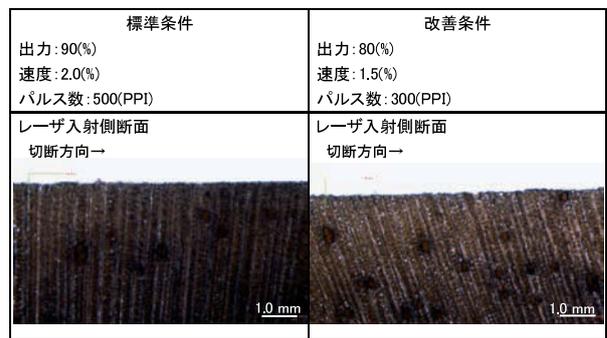


図11 バルサにおけるレーザー加工条件の改善結果—断面の状態—

その結果、改善条件として、レーザー出力80%、レーザー走査速度1.5%、レーザーパルス数300 PPIを選定した。図4～図9における標準条件と検討した改善条件のレーザー切断溝を比較した結果を、図10および図11に示す。図10のレーザー切断溝の結果より、レーザー入射側の切断溝に沿った焼け焦げの広がりが若干少なくなり改善された。レーザー切断溝幅については、レーザー入射側の溝幅はわずかに細くなり微細化されたが、レーザー出口側の切断溝幅は更に細くなり、結果的に入射側と出口側の段差は標準条件よりも大きくなってしまった。テーパ形状になっていると考えられる。一方、図11の切断面の状態をみると、標準条件と比較して改善条件の方が焼け焦げの程度が少なく、木材の繊維が比較的是っきりと確認される。結果的に熱影響は改善できたが、段差については改善することはできなかった。また、他の木材のレーザー加工条件と比較すると、比較的速い走査速度でも切断できることから、密度の低い（比重の小さな）木材であるバルサ

はレーザー切断しやすい材料であると考えられる。

### 3.2 杉の切断結果

レーザー出力、レーザー走査速度、パルス数 (PPI) を変化させた場合の杉のレーザー切断溝の状態を図12、図13、図14にそれぞれ示す。レーザー切断の標準条件としては、レーザー出力90%、レーザー走査速度0.5%、レーザーパルス数500 PPIとした。図12および図13から、レーザー出力が大きくなる、レーザー走査速度が遅くなるに従って切断溝幅が大きくなる傾向であることがわかる。図14からは、パルス数を変化させても切断溝幅はあまり変化していないことがわかる。また、全体的にレーザー入射側よりレーザー出口側の方が切断溝幅は小さく、テーパ形状に切断されていると考えられる。さらに、杉の場合は、全体的に切断溝に沿って焼け焦げが多く発生している。これらの結果はバルサの場合と類似している。

次にレーザー切断溝幅を測定した結果を、図15、図16、図17に示す。図15はレーザー出力を変化さ

レーザー出力 (%)	レーザー入射側	レーザー出口側
30	切断方向 → ↑ 0.512 mm	← 切断方向 ↑ 0.118 mm
40	↑ 0.598 mm	↑ 0.344 mm
50	↑ 0.674 mm	↑ 0.476 mm
60	↑ 0.640 mm	↑ 0.370 mm
70	↑ 0.786 mm	↑ 0.599 mm
80	↑ 0.764 mm	↑ 0.522 mm
90	↑ 0.820 mm	↑ 0.696 mm

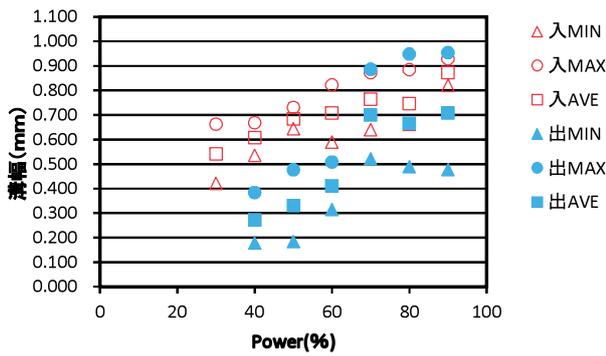
レーザー走査速度：0.5%，パルス数：500 PPI  
図12 杉のレーザー出力に対する切断溝の変化

走査速度 (%)	レーザー入射側	レーザー出口側
0.5	切断方向 → ↑ 0.746 mm	← 切断方向 ↑ 0.566 mm
0.6	↑ 0.716 mm	↑ 0.308 mm
0.8	↑ 0.558 mm	↑ 0.168 mm
1.0	↑ 0.580 mm	出口側へ貫通せず切断不可

レーザー出力：90%，パルス数：500 PPI  
図13 杉のレーザー走査速度に対する切断溝の変化

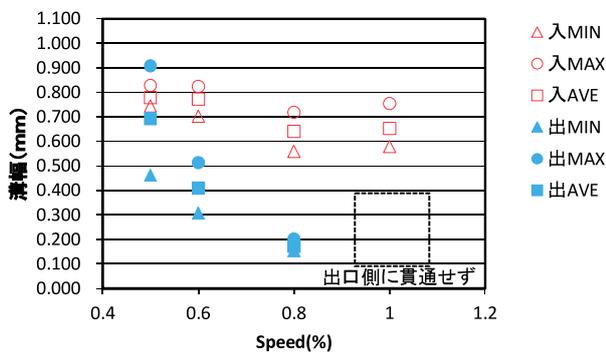
パルス数 (PPI)	レーザー入射側	レーザー出口側
200	切断方向 → ↑ 0.700 mm	← 切断方向 ↑ 0.696 mm
300	↑ 0.862 mm	↑ 0.662 mm
400	↑ 0.662 mm	↑ 0.782 mm
500	↑ 0.930 mm	↑ 0.534 mm
600	↑ 0.682 mm	↑ 0.702 mm
700	↑ 0.730 mm	↑ 0.594 mm
800	↑ 0.798 mm	↑ 0.620 mm

レーザー出力：90%，レーザー走査速度：0.5%  
図14 杉のレーザーパルス数に対する切断溝の変化



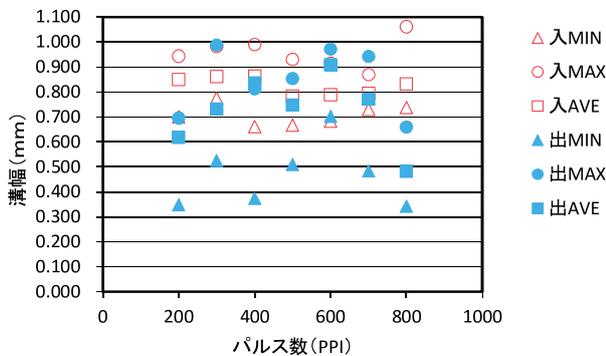
レーザー走査速度：0.5%，パルス数：500 PPI

図15 杉のレーザー出力に対する切断溝幅の変化



レーザー出力：90%，パルス数：500 PPI

図16 杉のレーザー走査速度に対する切断溝幅の変化



レーザー出力：90%，レーザー走査速度：0.5%

図17 杉のレーザーパルス数に対する切断溝幅の変化

せた場合のレーザー切断溝幅の変化を示した結果である。図より、レーザー出力が大きくなるにしたがって、レーザー入射側の切断溝幅は直線的に広がる傾向であることがわかる。また、入射側と出口側の切断溝幅の断差はレーザー出力が40～60%の間は0.2～0.3 mm程度で一定であり、出力が70%以上では0.1～0.2 mm程度と小さくなる。これらの断差は他の木材と比較すると

比較的大きく、また、切断溝幅のばらつきも比較的大きい。図16にレーザー走査速度を変化させた場合のレーザー切断溝幅の変化を示す。図より、レーザー走査速度を速くするにしたがって切断溝幅は小さくなる傾向であることがわかる。杉の場合は、完全切断できる速度範囲は狭く、高速側は0.8%まで、低速側は0.5%であった(0.5%よりも遅くすると発火するため切断できない)。また、レーザー走査速度が速くなるにしたがって、入射側と出口側の切断溝の差が大きくなり段差が発生しやすい。一方、0.5%の場合に0.1 mm程度の段差となり、ストレート断面に近づく。ただし、レーザー出力の場合と同様に、切断溝幅のばらつきは大きい。以上の結果から、ストレート断面を得るには、レーザー出力制御するのではなく、レーザー走査速度を遅くして単位長さあたりのレーザー入熱量を増やす必要があると考えられる。レーザーパルス数を変化させた場合のレーザー切断溝幅の変化を図17に示す。パルス数を変化させても切断溝幅に大きな変化はなく、段差は0.1～0.3 mm程度の範囲でばらついている。切断に必要な一定以上のパルス数の場合、レーザー切断に必要なエネルギー以上の単位長さあたりのレーザー入熱量を与えることになり、切断溝幅は変化しなかったものと考えられる。ただし、杉の場合は、レーザー切断溝幅の測定結果全体をみると、そのばらつきは他の木材と比較して大きい結果となった。木目などの材料の不均一さの影響を受けていると考えられる。

更に、パルサの場合と同様に、加工品質の改善を目的として、切断溝の焼け焦げが少なく切断溝幅の段差が小さいレーザー加工条件を検討した。レーザー出力、レーザー走査速度、レーザーパルス数を見直した結果、改善条件として、レーザー出力70%、レーザー走査速度0.5%、レーザーパルス数500 PPIを選定した。図12～図17における標準条件と検討した改善条件のレーザー切断溝を比較した結果を、図18および図19に示す。図18のレーザー切断溝の結果より、レーザー入射側および出口側の切断溝に沿った焼け焦げは少なくなり、ストレート切断となっており改善された。レーザー切断溝幅については、レーザー入射側およ

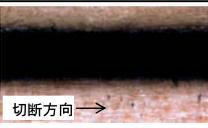
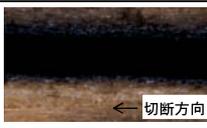
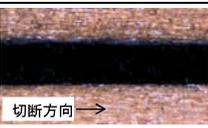
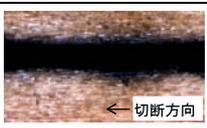
レーザ加工条件	レーザ入射側	レーザ出口側
標準条件 出力: 90% 速度: 0.5% パルス数: 500(PPI)	 切断方向 → 溝幅平均値 0.873 mm	 ← 切断方向 溝幅平均値 0.708 mm
改善条件 出力: 70% 速度: 0.5% パルス数: 500(PPI)	 切断方向 → 溝幅平均値 0.788 mm	 ← 切断方向 溝幅平均値 0.458 mm

図18 杉におけるレーザ加工条件の改善結果  
—切断溝の状態—

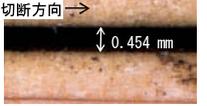
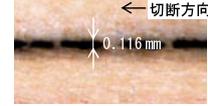
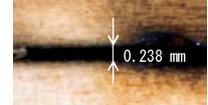
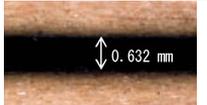
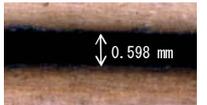
標準条件	改善条件
出力: 90% 速度: 0.5% パルス数: 500(PPI)	出力: 70% 速度: 0.5% パルス数: 500(PPI)
レーザ入射側断面 切断方向 →	レーザ入射側断面 切断方向 →
 1.0 mm	 1.0 mm

図19 杉におけるレーザ加工条件の改善結果  
—断面の状態—

び出口側ともに細くなり微細化されており、特に出口側は大幅に細線化されている。しかしながら、レーザ出口側の切断溝幅がより細くなった結果、入射側と出口側の段差は標準条件よりも大きくなってしまった。テーパ形状であると考えられる。これらの結果はバルサの場合と類似しており、レーザ出力を低くしたことによる入熱量減少の影響であると考えられる。一方、図19の切断面の状態をみると、標準条件および改善条件ともに顕著な焼け焦げが発生しており、熱影響は改善しなかった。杉の場合は、バルサの次に比重が小さく比較的燃えやすい材料であること、今回の改善条件が適切でなかったために断面の熱影響は改善できなかったものと推測される。

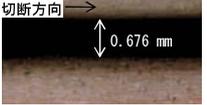
### 3.3 ヒノキの切断結果

レーザ出力、レーザ走査速度、パルス数 (PPI) を変化させた場合のヒノキのレーザ切断溝の状態を図20、図21、図22にそれぞれ示す。

レーザ出力 (%)	レーザ入射側	レーザ出口側
30	 切断方向 → ↓ 0.454 mm	 ← 切断方向 ↑ 0.116 mm
40	 ↓ 0.488 mm	 ↑ 0.238 mm
50	 ↓ 0.494 mm	 ↑ 0.234 mm
60	 ↓ 0.550 mm	 ↑ 0.520 mm
70	 ↓ 0.588 mm	 ↑ 0.494 mm
80	 ↓ 0.632 mm	 ↑ 0.518 mm
90	 ↓ 0.598 mm	 ↑ 0.482 mm

レーザ走査速度: 0.5 %, パルス数: 500 PPI

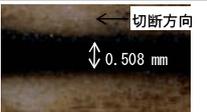
図20 ヒノキのレーザ出力に対する切断溝の変化

走査速度 (%)	レーザ入射側	レーザ出口側
0.5	 切断方向 → ↑ 0.676 mm	 ← 切断方向 ↓ 0.544 mm
0.6	 ↑ 0.594 mm	 ↓ 0.486 mm
0.8	 ↑ 0.548 mm	 ↑ 0.242 mm
1.0	 ↑ 0.438 mm	 ↑ 0.190 mm

レーザ出力: 90 %, パルス数: 500 PPI

図21 ヒノキのレーザ走査速度に対する切断溝の変化

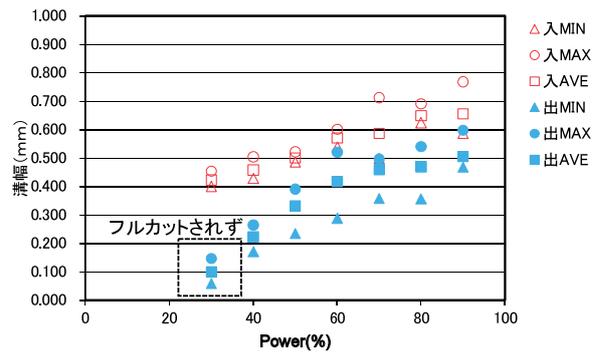
ヒノキのレーザ切断の標準条件としては、レーザ出力90%、レーザ走査速度0.5%、レーザパルス数500 PPIとした。図20および図21から、

パルス数(PPI)	レーザ入射側	レーザ出口側
200		
300		
400		
500		
600		
700		
800		

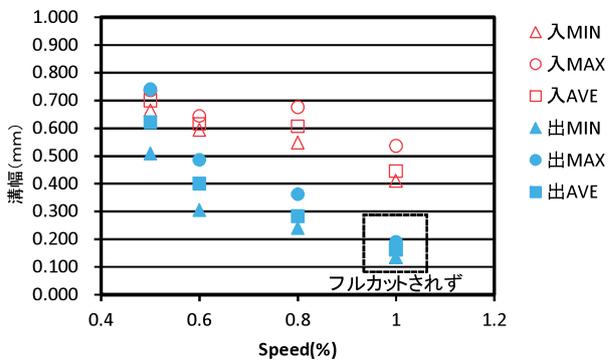
レーザ出力：90%，レーザ走査速度：0.5%  
 図22 ヒノキのレーザパルス数に対する切断溝の変化

レーザ出力が大きくなる、レーザ走査速度が遅くなるに従って切断溝幅が大きくなる傾向であることがわかる。図22からは、パルス数を変化させても切断溝幅はあまり変化していないことがわかる。また、全体的にレーザ入射側よりレーザ出口側の方が切断溝幅は小さく、テーパ形状に切断されていると考えられる。さらに、全体的にヒノキの場合は、杉と比較すると焼け焦げはそれほど大きく発生していなかった。

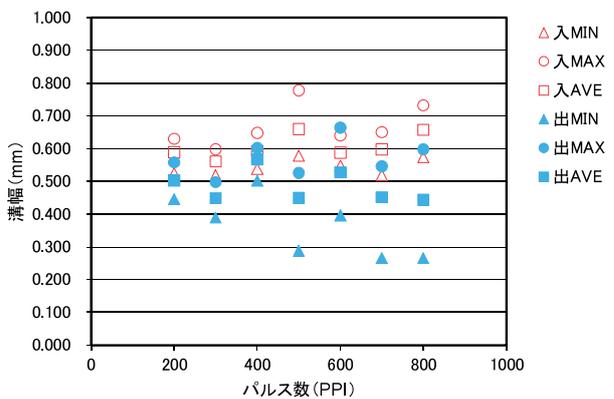
次にレーザ切断溝幅を測定した結果を、図23、図24、図25に示す。図23はレーザ出力を変化させた場合のレーザ切断溝幅の変化を示した結果である。図より、レーザ出力が大きくなるにしたがって、レーザ入射側と出口側の切断溝幅は直線的に広がる傾向であることがわかる。また、入射側と出口側の切断溝幅の断差は0.15～0.20 mm程度で一定であり、切断溝の段差はレーザ出力に関係なく一定であると考えられる。



レーザ走査速度：0.5%，パルス数：500 PPI  
 図23 ヒノキのレーザ出力に対する切断溝幅の変化



レーザ出力：90%，パルス数：500 PPI  
 図24 ヒノキのレーザ走査速度に対する切断溝幅の変化



レーザ出力：90%，レーザ走査速度：0.5%  
 図25 ヒノキのレーザパルス数に対する切断溝幅の変化

図24にレーザ走査速度を変化させた場合のレーザ切断溝幅の変化を示す。図より、レーザ走査速度を速くするにしたがって切断溝幅は小さくなる傾向であるが、ヒノキの場合、完全切断できる速度範囲は狭く、高速側は0.8%付近まで

しか切断できなかつた。また、0.5%より遅くすると発火するため低速側にも限界があった。レーザ走査速度が速くなるにしたがって、入射側と出口側の切断溝の差が大きくなり段差が発生しやすく、0.5%の場合に0.1 mm 以内の段差となりストレート断面を得ることができる。つまり、ストレート断面を得るには、レーザ出力を大きくするのではなく、レーザ走査速度を遅くして単位長さあたりのレーザ入熱量を増やす必要があると考えられる。レーザパルス数を変化させた場合のレーザ切断溝幅の変化を図25に示す。パルス数を変化させても切断溝幅に大きな変化はなく、一定の範囲でばらついている。ただし、パルス数が400 PPI以下の場合はそのばらつきは小さい。ある一定以上のパルス数になると、レーザ切断に必要なエネルギー以上の単位長さあたりのレーザ入熱量を与えることになり、切断溝幅のばらつきに影響したものと考えられる。

次に、ヒノキについても同様に、加工品質の改善として、切断溝の焼け焦げが少なく切断溝幅の段差が小さいレーザ加工条件を検討した。レーザ出力、レーザ走査速度、レーザパルス数を見直して、レーザ出力70%、レーザ走査速度0.6%、レーザパルス数400 PPI を改善条件とした。図20～図25における標準条件と検討した改善条件のレーザ切断溝を比較した結果を、図26および図27に示す。図26のレーザ切断溝の結果より、改善条件では、レーザ入射側および出口側の切断溝に沿った焼け焦げの範囲が狭くなり、ストレート切断となった。極わずかではあるが改善が確認された。一方、レーザ切断溝幅については、レーザ入射側については標準および改善ともに同程度であるが、出口側については改善条件では大幅に細くなっている。したがって、改善条件においては、入射側と出口側の段差は標準条件よりも大きくなり悪化した。また、図27の切断面の状態をみると、標準条件および改善条件ともに顕著な焼け焦げが発生しており、熱影響は改善していない。切断面についても切断溝と同様に顕著な改善効果はなかつた。ヒノキは杉の発火点に近く、杉と同様に燃えやすい木材であるために、切断面に大きな焼

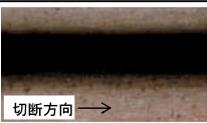
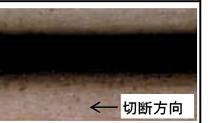
レーザ加工条件	レーザ入射側	レーザ出口側
標準条件 出力:90(%) 速度:0.5(%) パルス数:500(PPI)	 溝幅平均値 0.699 mm	 溝幅平均値 0.621 mm
改善条件 出力:70(%) 速度:0.6(%) パルス数:400(PPI)	 溝幅平均値 0.709 mm	 溝幅平均値 0.382 mm

図26 ヒノキにおけるレーザ加工条件の改善結果—切断溝の状態—

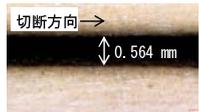
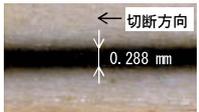
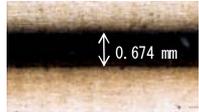
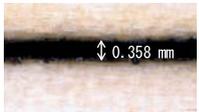
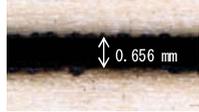
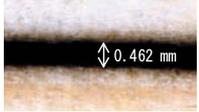
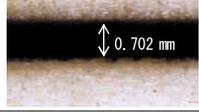
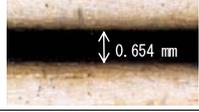
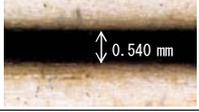
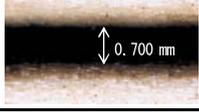
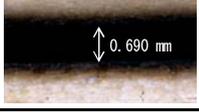
標準条件	改善条件
出力:90(%) 速度:0.5(%) パルス数:500(PPI)	出力:70(%) 速度:0.6(%) パルス数:400(PPI)
レーザ入射側断面 切断方向→ 	レーザ入射側断面 切断方向→ 

図27 ヒノキにおけるレーザ加工条件の改善結果—断面の状態—

け焦げ（熱影響）が発生したものと考えられる。また、今回の改善条件が適切でなかったことも要因の一つであると考えられる。レーザ入熱量を低くした結果、レーザ入射側の切断溝に若干の改善はみられたものの、全体的に熱影響と段差については改善効果が得られなかつた。

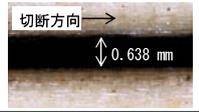
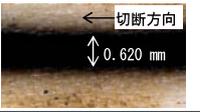
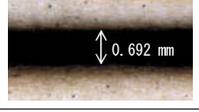
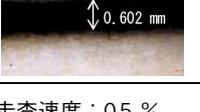
### 3.4 赤松の切断結果

レーザ出力、レーザ走査速度、パルス数（PPI）を変化させた場合の赤松のレーザ切断溝の状態を図28、図29、図30にそれぞれ示す。赤松のレーザ切断の標準条件としては、レーザ出力90%、レーザ走査速度0.5%、レーザパルス数500 PPI とした。図28および図29から、レーザ出力が大きくなる、レーザ走査速度が遅くなるに従って切断溝幅が大きくなる傾向であることがわかる。図30からは、パルス数を変化させても切断溝幅はあまり変化していないことがわかる。また、全体的にレーザ入射側よりレーザ出口側の方が切断溝幅は小さく、テーパ

レーザー出力 (%)	レーザー入射側	レーザー出口側
40		
50		
60		
70		
80		
90		

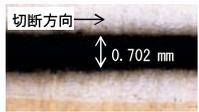
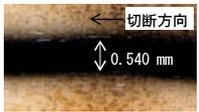
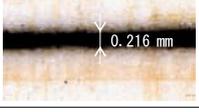
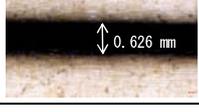
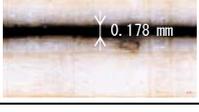
レーザー走査速度：0.5 %，パルス数：500 PPI

図28 赤松のレーザー出力に対する切断溝の変化

パルス数 (PPI)	レーザー入射側	レーザー出口側
200		
300		
400		
500		
600		
700		
800		

レーザー出力：90 %，レーザー走査速度：0.5 %

図30 赤松のレーザーパルス数に対する切断溝の変化

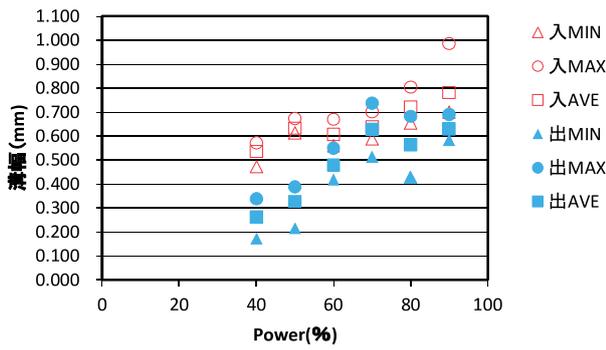
走査速度 (%)	レーザー入射側	レーザー出口側
0.5		
0.6		
0.8		
1.0		

レーザー出力：90 %，パルス数：500 PPI

図29 赤松のレーザー走査速度に対する切断溝の変化

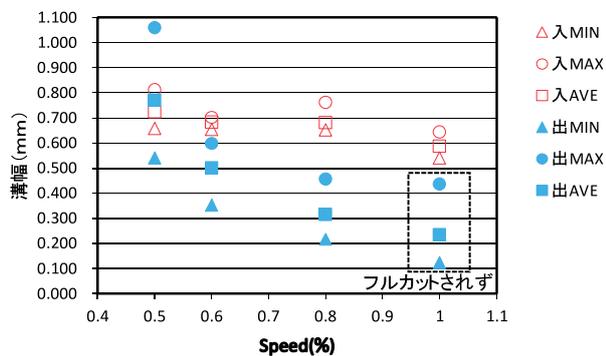
形状に切断されていると考えられる。これらの傾向は、ヒノキの場合と類似している。ただし、赤松の場合は、レーザー出力が大きい場合、レーザー走査速度が遅い場合、パルス数が大きい場合に、切断溝に沿って、焼け焦げが発生しやすい結果となった。

次にレーザー切断溝幅を測定した結果を、図31、図32、図33に示す。図31はレーザー出力を変化させた場合のレーザー切断溝幅の変化を示した結果である。レーザー出力が大きくなるにしたがって、レーザー入射側と出口側の切断溝幅は直線的に広がる傾向であり、入射側と出口側の切断溝幅の断差は0.15～0.25 mm程度で一定である。切断溝の段差はレーザー出力に関係なく一定であり、ヒノキ場合と類似している。図32にレーザー走査速度を変化させた場合のレーザー切断溝幅の変化を示す。レーザー走査速度を速くするにしたがって切断溝幅は小さくなる傾向であるが、ヒノキの場合と同様に、完全切断できる速度範囲は狭い（高速側は0.8 %付近までしか切断できず、0.5 %より遅くすると発火するため低速側にも限界がある）。レーザー走査速度が速くなるにしたがって、入射側と出口側の切断溝の差が大きくなり段差が発生しやすく、最も遅い0.5 %の場合に0.1 mm以内の段差となり、ス



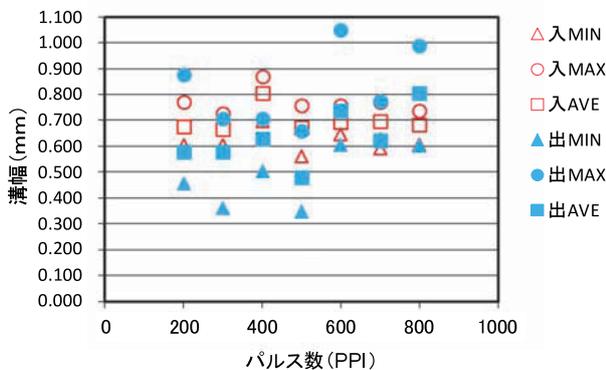
レーザ走査速度：0.5%，パルス数：500 PPI

図31 赤松のレーザ出力に対する切断溝幅の変化



レーザ出力：90%，パルス数：500 PPI

図32 赤松のレーザ走査速度に対する切断溝幅の変化



レーザ出力：90%，レーザ走査速度：0.5%

図33 赤松のレーザパルス数に対する切断溝幅の変化

トレート断面になると考えられる。ヒノキの場合と同様に、ストレート断面を得るには、レーザ出力を大きくするのではなく、レーザ走査速度を遅くして単位長さあたりのレーザ入熱量を増やす必要があると考えられる。レーザパルス数を変化させた場合のレーザ切断溝幅の変化を図33に示す。パルス数を変化させても切断溝幅

レーザ加工条件	レーザ入射側	レーザ出口側
標準条件 出力：90(%) 速度：0.5(%) パルス数：500(PPI)	 切断方向→ 溝幅平均値 0.723 mm	 ←切断方向 溝幅平均値 0.722 mm
改善条件 出力：80(%) 速度：0.6(%) パルス数：400(PPI)	 切断方向→ 溝幅平均値 0.765 mm	 ←切断方向 溝幅平均値 0.407 mm

図34 赤松におけるレーザ加工条件の改善結果—切断溝の状態—

標準条件	改善条件
出力：90(%) 速度：0.5(%) パルス数：500(PPI)	出力：80(%) 速度：0.6(%) パルス数：400(PPI)
レーザ入射側断面 切断方向→  1.0 mm	レーザ入射側断面 切断方向→  1.0 mm

図35 赤松におけるレーザ加工条件の改善結果—断面の状態—

に大きな変化はなく、一定の範囲でばらついてはいる。また、レーザ入射側と出口側の切断溝幅の断差は0.1 mm程度と比較的小さくなっており（入射側と出口側の平均値の差）、段差の少ないストレート断面が得られている。赤松の場合は、ある一定以上のパルス数であれば（レーザ切断に必要なエネルギー以上の単位長さあたりのレーザ入熱量を与えれば）、一定の切断傾向となりパルス数の影響は受けにくいものと考えられる。

以上のように、赤松の切断結果はヒノキの場合と類似する結果となったが、これは、表2から、赤松とヒノキは比重が大きく熱伝導率が高い木材であることが関係しているものと考えられる。

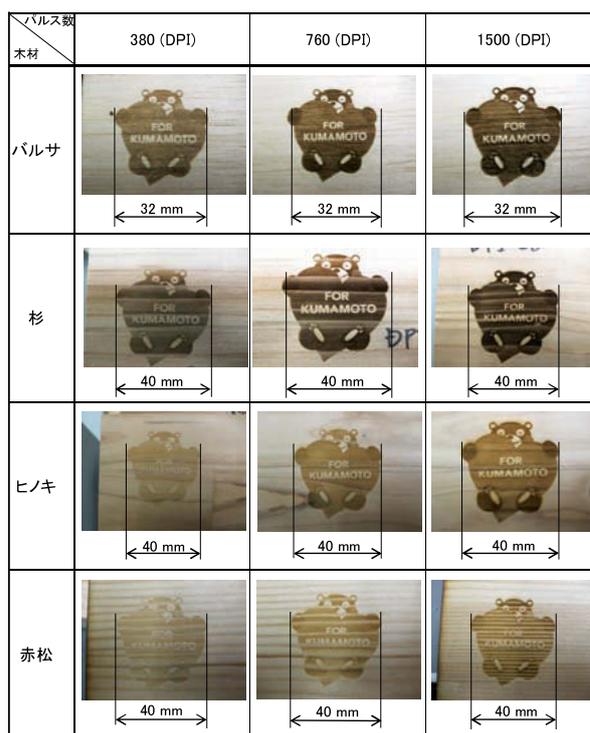
次に、赤松についても同様に、加工品質の改善として、切断溝の焼け焦げが少なく切断溝幅の段差が小さいレーザ加工条件を検討した。レーザ出力、レーザ走査速度、レーザパルス数を見直して、レーザ出力80%、レーザ走査速

度0.6%、レーザパルス数400 PPI を改善条件とした。図28～図33における標準条件と検討した改善条件のレーザ切断溝を比較した結果を、図34および図35に示す。図34のレーザ切断溝の結果より、改善条件では、レーザ入射側および出口側の切断溝に沿った焼け焦げが減少している。特に、出口側の焼け焦げは標準条件よりも大幅に少なくなり、熱影響が大きく改善した。一方、レーザ切断溝幅については、レーザ入射側および出口側ともに細くなっており細線化した。入射側と出口側の段差については、標準条件より大きくなり悪化してしまった。改善条件において入熱量が低くなり、その効果として、レーザ切断溝周辺の熱影響が低減し、切断溝幅が低くなったと考えられる。また、過度にエネルギーを与えることがなかったため、切断溝幅の低減にも繋がったと考えられる。さらに、図35の切断面の状態をみると、標準条件と比較して改善条件では、焼け焦げが大幅に少なくなっており、切断面に木目状態が確認できる。切断面についても切断溝と同様に、レーザ入熱量が低減した結果、熱影響を大幅に改善することができた。表2より、赤松は、他の木材（バルサ、杉、ヒノキ）と比較して最も比重の大きい木材であり、そのため、熱伝導度、着火点、発火点も高い。したがって、他の木材と比較すると燃えにくい材料であると考えられ、その結果、レーザ入熱量を低減した改善条件では熱影響を大幅に改善できたものと考えられる。また、改善条件が適切に選ばれた結果であるとも推測される。更には、密度の高い（比重の大きい）木材として、赤松はレーザ切断に適した材料であると考えられる。

#### 4. レーザ彫刻加工の実験結果

##### 4.1 各種木材の彫刻加工

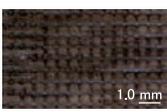
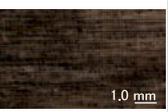
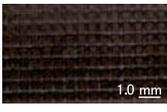
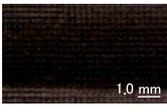
基礎的実験として、バルサ、杉、ヒノキ、赤松に対して、レーザパルス数（DPI）を変化させて図3の画像データのレーザ彫刻加工を行い、その加工性状の違いを観察した（レーザ出力とレーザ走査速度は、それぞれ20%と80%に固定）。



レーザ出力 20%,レーザ走査速度 80%

図36 各種木材におけるレーザ彫刻加工結果  
—彫刻表面全体写真—

図36に各種木材のレーザ彫刻実験資料を示す。彫刻試料の全体の様子をデジタルカメラにて撮影した。図36より、木材の種類およびパルス数によって彫刻の程度（色合い）が異なることがわかる。木材の種類については、バルサ、杉、ヒノキ、赤松の順番に色合いが薄くなっていく傾向がある。一方、パルス数については、パルス数が増えるに従って色合いが濃くなっている。木材の種類においては、比重が大きくなるにしたがって色合いが薄くなっていることから、内部気孔が多く着火点が低いほど強く彫刻加工されると考えられる。また、パルス数においては、パルス数が多いほど単位面積あたりのレーザ照射回数が増えることから強く彫刻することができる。これらの結果より、木材の彫刻加工については、木材の比重やパルス数によって、彫刻の強さ（深さ）や色合いを制御できると考えられる。さらに、図36の結果から、レーザ彫刻加工は木目の影響を受けていることが確認される。木目部分は木材の密度や表面状態がことなることから、これらの影響を受けた結果であると考え

パルス数 木材	380 (DPI)	760 (DPI)	1500 (DPI)
バルサ			
杉			
ヒノキ			
赤松			

レーザ出力 20 %, レーザ走査速度 80 %  
 図37 各種木材におけるレーザ彫刻加工結果  
 —彫刻表面拡大観察—

えられる。木目は木材の種類や木材の切り出し面によって不規則に発生するため、レーザ彫刻加工の際には考慮すべき事項となる。

次に、彫刻加工の表面状態をマイクロスコープにて拡大観察した結果を図37に示す。図36の全体像の結果と同様に、木材の種類およびパルス数に対して、彫刻加工の色合いが変化している。拡大観察することによってレーザパルス照射に対するドットパターンが形成されていることが確認される。パルス数が大きくなるにしたがって、ドットパターンが細かくなっており、パルス照射が正しく制御されていることがわかる。ドットパターンの形成から、パルス数によって彫刻加工の程度（色合い）のみでなく、表面の平滑性も制御できることがわかる。

本実験では、レーザパルス数（DPI）をパラメータとしたレーザ彫刻加工のみとなったが、各種レーザーパラメータを複合的に制御することで、様々な彫刻の状態が得られると考えられる。

## 5. 木材のレーザ加工性状の考察

比重のことなる木材4種類について、炭酸ガスレーザによる切断実験を行い、レーザーパラ

メータと加工性状の相関を調査した。木材としては、比重の小さな順から、バルサ、杉、ヒノキ、赤松を選定し、レーザーパラメータとしては、レーザ出力、レーザ走査速度、レーザパルス数（PPI）を制御した。

木材全体に共通した結果としては、熱影響を受けて、レーザ切断溝に沿って焼け焦げが発生している。レーザ入熱量を増やすとこの影響は顕著になる。つまり、炭酸ガスレーザ光は赤外線であり、木材は発火する材料であることから、燃焼することで切断していると考えられる。ただし、レーザ入熱量をレーザ出力やレーザ走査速度で下げて、切断可能な適切な条件とすれば、バルサや赤松のように熱影響を低減できることが明らかとなった。次に、木材のレーザ切断では、レーザ入射側とレーザ出口側の切断溝幅が異なり、段差が共通して発生している。レーザ入射側の切断溝幅の方が広く、出口側が狭い。これも燃焼による切断の影響であり、レーザ光のエネルギーを最初に受ける入射側で強く燃焼してしまう結果であると考えられる。したがって、レーザ入熱量が大きい高レーザ出力、低レーザ走査速度の条件においては、十分なレーザエネルギーを木材に与えることができるため、切断溝幅は広くなるが、入射側と出口側の段差はどの木材においても小さくできる。また、バルサを除いて、段差に影響を及ぼすものはレーザ出力ではなく、レーザ走査速度であった。単位長さ（時間）当たりの入熱量がレーザ切断に大きな影響を及ぼした結果であると考えられる。なお、バルサにおいては、レーザ出力の変化でも段差に影響を及ぼしたが、これは密度が他の木材と比べて極端に低く、内部気孔が多くあり、燃焼しやすい材料であったためであると推測される。つまり、バルサのような密度が低く、空気を多く含んだ木材はレーザ切断しやすい材料であるといえる。一方、レーザパルス数（PPI）はどの木材においてもレーザ切断には大きな影響を及ぼさなかった。おそらく、レーザ切断に必要なエネルギーを十分に与えられる範囲で実験を行った結果であり、パルス数の影響は顕著に表れなかったと考えられる。今後、パルス数の低い場合、高い場合での実験検証が

必要となる。

今回の実験から、レーザーパラメータと切断性状の基本特性が明らかとなった。切断性状とレーザー入熱量は相反するトレードオフの関係であることから、木材のレーザー切断では、切断特性と熱影響のバランスをとることが重要となる。今後、更なる実験を行い、最適条件と考えられるパラメータの組合せを調査する必要がある。また、今回の実験においては、木目や繊維方向の影響までは考慮していなかったが、レーザー切断の影響を受ける要因であることから、これらについても、影響を受けにくいレーザー切断条件を抽出する必要がある。評価としては、マイクロスコープによる表面状態の観察と溝幅の測定のみであったが、表面粗さなどの評価項目を増やすことで加工プロセスの考察を深めていく必要がある。更に、今回は固定したレーザー光学系で切断実験を実施したが、焦点距離の異なるレンズ、焦点位置の変更といった光学系をパラメータとした実験を行うことで、レーザー切断の制御性がより高まると考えられる。

次に、各種木材に対するレーザー彫刻加工の基礎実験を実施した。シンプルな画像データについて、各種木材に対してレーザー彫刻加工を行い、加工表面の状態を観察した。彫刻加工の強さ（程度）や色合いについて確認した結果、レーザーパルス数（DPI）が大きくなるほど、強く彫刻加工ができることがわかった。拡大観察することでパルス数に比例したドットパターンを確認することができた。木材のレーザー彫刻加工は、パルス数によってレーザー照射密度を制御することで、彫刻加工の強さ、色合いを調整することが可能となる。また、木材の種類に対しては、材料の比重（密度）と彫刻加工の強さ、色合いとの相関を確認することができた。比重が小さいほど強く彫刻され、色合いも濃くなる傾向であった。密度の低い木材は内部気孔が多く、レーザー照射によって酸化されやすいため、強く彫刻され色合いが濃くなるものと考えられる。木材のレーザー彫刻加工は、材料の比重や気孔率によって大きく影響を受けることが、今回の基礎実験から明らかとなった。

木材には木目があり、木目箇所は密度や表面

状態が異なることから、彫刻加工の状態が変化してしまう。レーザー彫刻加工によって木目調がクリアに発生することが明かとなり、レーザー彫刻加工する際には考慮すべき項目となる。マーキング・彫刻加工については、レーザー出力やレーザー走査速度に対してもレーザーパルス数（DPI）と同様に調査を行い、炭酸ガスレーザーによる木材のレーザー彫刻加工の加工性状を更に調査していく必要がある。

## 6. おわりに

炭酸ガスレーザーによる木材の高品位加工を目的として、レーザーパラメータと切断性状の相関関係を実験的に調査した。木材は、比重の異なるものを選定して、比重の小さな順に、バルサ、杉、ヒノキ、赤松をレーザー切断実験に使用した。レーザーパラメータとして、レーザー出力、レーザー走査速度、レーザーパルス数（PPI）を変化させて、切断溝の状態および切断溝幅を評価した。また、レーザー彫刻加工の基礎実験を各種木材に対して行い、レーザーパルス数（DPI）を変化させて彫刻加工の表面状態の変化を観察した。本実験により得られた結果を以下にまとめる。

- (1)炭酸ガスレーザーによる木材の切断加工は、燃焼加工であり、いずれの木材に対しても、切断溝に沿って熱影響が発生する。
- (2)レーザー入熱が大きくなる高レーザー出力、低レーザー走査速度の場合、全ての木材に対して切断溝に沿った熱影響が大きく発生する。また、切断溝幅は大きくなる傾向である。一方、レーザー入射側のみでなく、レーザー出口側にも切断に必要な熱量を伝達できるため、入射側と出口側の切断溝幅の差である段差は小さくなる。
- (3)バルサを除き、切断溝における段差はレーザー走査速度のみによって変化する。走査速度が速くなるにしたがって、レーザー出口側の溝幅は狭くなり段差は大きくなる傾向である。速い走査速度の場合は、出口側までレーザー熱量が十分に伝達しないことが原因と考えられる。
- (4)バルサを除き、切断溝における段差はレーザー

出力によって変化しない。レーザー切断に必要な入熱量は、レーザー出力ではなく、レーザー走査速度の方が支配的であると考えられる。

- (5) いずれの木材においても、レーザーパルス数 (PPI) は、レーザー切断溝幅に大きく影響しない。レーザー切断に必要なエネルギーが得られているパルス条件範囲で実験したためであると考えられる。
- (6) バルサは、レーザー走査速度のみでなく、レーザー出力でも切断溝幅は変化しており、また、他の木材と比べて弱いレーザー条件でも十分に切断することができる。バルサは、最も比重が小さい木材であり、内部に気孔を多く含むことから、燃焼しやすく、レーザー切断されやすい材料であると考えられる。
- (7) レーザーパラメータを制御することで、熱影響を比較的抑えたレーザー切断が可能となる。本実験では、バルサと赤松について、レーザー条件を弱くすることで、熱影響の少ないレーザー切断が可能となる。杉とヒノキについては、さらなる実験が必要である。
- (8) レーザー彫刻加工ではレーザーパルス数 (DPI) が高くなるにしたがって、強く彫刻されて色合いも濃くなった。パルス数によって彫刻の程度を制御することができる。一方、木材の種類については、比重 (密度) が小さい程、表面酸化されやすく強い彫刻となる。

今後、炭酸ガスレーザーによる木材の高品位加工、微細加工の可能性を調査するにあたり、光学系やアシストガスなどの周辺技術の最適化にも取り組む必要がある。

## 謝 辞

本研究報告は、平成28年度の卒業研究として実施した研究成果である。本研究テーマについて熱心に取り組み、多くの実験データを収集してくれた米井健太君、蛇嶋諒一君および上田拓未君に深く感謝する。

## 参考文献

- 1) 片山聖二：スマートプロセスの発展に向けて、スマートプロセス学会誌, Vol.1, No.1 (2012), pp. 8-19.
- 2) Barbara A. Fogarty, Kathleen E. Heppert, Theodore J. Cory, Kalonie R. Hulbutta, R. Scott Martind and Susan M. Lunte: Rapid fabrication of poly (dimethylsiloxane)-based microchip capillary electrophoresis devices using CO<sub>2</sub> laser ablation, The Royal Society of Chemistry 2005, Vol.130, (2005), pp. 924-930.
- 3) 秦啓祐, 岡部敏弘, 大塚正久: MDF のレーザー加工性, 日本材料学会誌, Vol. 48, No. 9 (1999), pp. 1059-1064.
- 4) 中村寿一, 澤崎ひとみ: 炭酸ガスレーザーによる木質円筒材の加工システムの開発, 鹿児島県工業技術センター研究報告, No. 16 (2002)
- 5) Nukman Yusoff, Saiful Rizal Ismail, Azuddin Mamat and Aznijar Ahmad-Yazid: Selected Malaysian Wood CO<sub>2</sub>-Laser Cutting Parameters And Cut Quality, American Journal of Applied Sciences, Vol. 5, No. 8 (2008), pp. 990-996.
- 6) 日本木材加工技術協会: 日本の木材, 西日本印刷株式会社, (1992), pp. 16, pp. 26, pp. 30