

炭酸ガスレーザーによる木材の高品位切断加工 —レーザー加工条件の最適化—

北田 良二*

High-quality Wood Cutting using CO₂ Laser Machining — Optimization of Laser Processing Conditions —

by
Ryoji KITADA *

要 旨

高出力発振が可能であり、幅広い材料に適用されている炭酸ガスレーザーは、最も汎用的なレーザー発振器として様々な産業で活用されている。金属、樹脂、木材などに対して、切断、穴あけ、溶接といった種々の加工に応用されている。しかしながら、炭酸ガスレーザーは波長10.6 μm の赤外光であるため、加工部に発生する熱影響がしばしば問題となる。その熱影響を抑制した高品位加工を実現するためには、レーザー加工条件を最適化することが必要となるが、レーザー加工には多くのパラメータがあるため、全てのパラメータに対して実験を実施して加工条件を最適化することは困難である。そこで、品質工学の一種であるL18直交表を用いたパラメータ設計により、レーザー加工パラメータを最適化することを試みた。

木材（バルサ）のレーザー切断加工について、加工品位に大きな影響を及ぼすレーザー光およびアシストガスに関する8つのレーザー切断加工パラメータに対してパラメータ設計を実施した。その結果、木材のレーザー切断加工において、加工パラメータを最適化することで精密切断と熱影響層抑制の可能性を確認することができた。

Key Words : 炭酸ガスレーザー、レーザー切断、木材、パラメータ設計、最適条件

1. はじめに

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り、多くの日常生活用品に用いられている。また、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、一般的に木材には機械的な加工方法が適用されるため、高密度・高硬度木材

の加工が難しい場合がある。また、微細形状加工については、職人の手作業による彫刻加工のみであり、機械化はされていない。そこで、近年では、炭酸ガスレーザーを用いた木材の切断加工や装飾品などの精密彫刻加工が注目されている^{1), 2)}。

レーザー加工はパラメータが多岐にわたり、その条件によって加工品質は大きく左右される。例えば、レーザー出力などのレーザー光に関する条件やアシストガスなどの周辺環境に関する条件を最適化することが重要となる³⁾。しかしなが

*崇城大学工学部機械工学科准教授

ら、木材のレーザー加工について、レーザーパラメータの条件を検討した事例は少なく、レーザーパラメータと加工特性の関係を調査することは重要となる。

本研究では、木材に対して炭酸ガスレーザーの加工条件を最適化して、高品位なレーザー切断加工を試みる。品質工学の一種であり、パラメータを直交表にわりつけてSN比を求め、ばらつきが最小になる条件を求めるパラメータ設計⁴⁾により、木材に対するレーザー切断加工条件を最適化した。木材には、比重が低く炭酸ガスレーザーで容易に切断加工でき、切断溝の状態や熱影響を評価し易いバルサを用いた。

2. レーザ切断加工の方法

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主な仕様を表1に示す。パルス発振タイプ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、ステージ上に設置した加工対象物を切断することができる。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。

2.2 木材のレーザー切断加工

木材のレーザー切断加工は、熱的な加工による除去加工であるため、燃焼の程度により切断溝幅や熱影響の状態が大きく変化する。本研究では、木材のレーザー切断加工として比較的切断し易く、切断溝性状および熱影響が観察しやすいバルサに対して、レーザー切断加工条件の最適化を試みた。

実験試料であるバルサは、大きさ□80 mm、厚さ 15 ± 0.2 mmのものを使用した。バルサは1枚板であり、一定方向の木目が存在する。木

表1 炭酸ガスレーザー加工機の主な仕様

メーカー	Great Computer Corporation
機種名	Spirit GLS
レーザー発振器	炭酸ガスレーザー(パルス発振)
波長	10.6 μ m
最大レーザーパワー	100 W
最大レーザー光走査速度	80 inch / sec

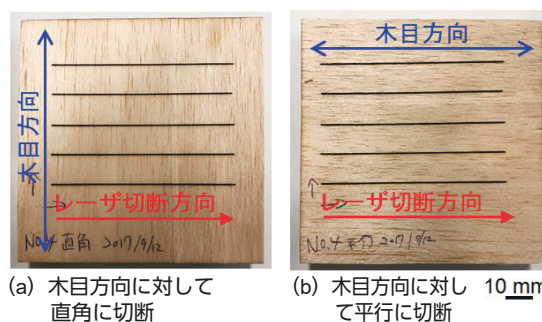


図1 バルサのレーザー切断試料（レーザー光入射側）

材のレーザー切断は、木目の影響を受けやすく加工性状が変化するため、木目方向に対してレーザー光を直角に走査して切断する場合、平行に走査して切断する場合のそれぞれについて切断実験を実施した。

レーザー切断加工は試料表面のレーザー光の吸収と発熱による熱加工であり、熱伝導と試料裏面へのレーザー光貫通によって切断される。したがって、レーザー光出口側の切断溝性状がその切断品位を決定する。そこで、本研究では、レーザー光を1回走査させてレーザー光が貫通することで切断した場合のレーザー光出口側の切断溝状態をマイクロ스코ープにより観察して評価した。レーザー切断加工の一つの条件に対して、5本の切断溝を形成し、レーザー光出口側の溝幅を1本当たり5点、計3本の溝幅を測定して、合計15点の測定結果の平均値をその加工条件の切断溝幅とした。

図1に木目方向に対してレーザー光を直角に走査して切断した場合、平行に走査して切断した場合のレーザー光入射側の切断溝の様子を示す。

3. レーザ切断加工の最適化

3.1 パラメータ設計の方法

炭酸ガスレーザーによるバルサの切断におけるレーザー加工パラメータの最適化として、L18直交表を用いたパラメータ設計を実施した。熱影響をできる限り抑制して細い切断溝幅が得られる条件を高品位レーザー切断加工であると定義して、パラメータ設計における静特性の望目特性に基づいて実験を実施した⁵⁾。

図2にパラメータ設計におけるレーザー切断加

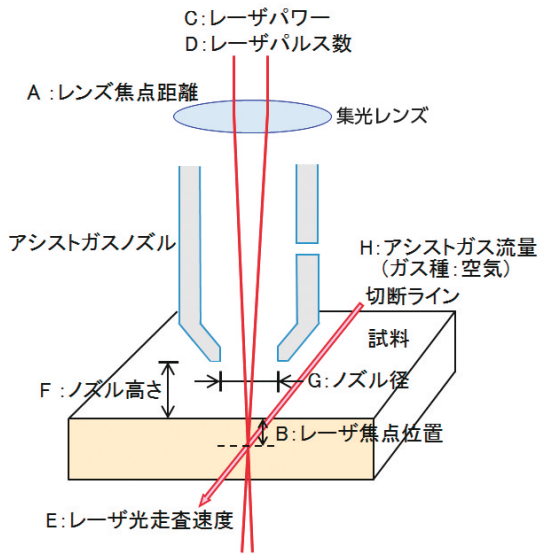
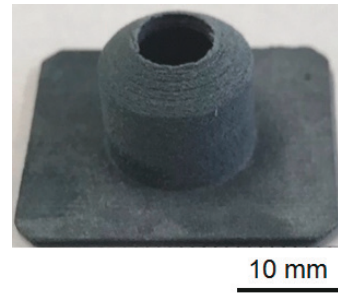


図2 レーザ切断加工パラメータ

表2 レーザ切断加工パラメータと水準

記号	パラメータ	水準1	水準2	水準3
A	レンズ焦点距離	1.5 inch	2.0 inch	—
B	レーザー焦点位置	0.0 mm	-1.0 mm	-2.0 mm
C	レーザーパワー	70 %	80 %	90 %
D	レーザーパルス数	300 PPI	1000 PPI	1500 PPI
E	レーザー光走査速度	1.0 %	1.5 %	2.0 %
F	ノズル高さ	4.3 mm	9.3 mm	16.3 mm
G	ノズル径	φ3 mm	φ5 mm	φ7 mm
H	アシストガス流量 (圧力)	25 L/min (0.06 MPa)	40 L/min (0.11 MPa)	55 L/min (0.17 MPa)

工パラメータを示す。これら8個のパラメータに対して、表2に示す水準に基づきパラメータ設計を実施した。レンズ焦点距離については、レンズを交換して実験を行った。焦点距離1.5 inchおよび2.0 inchにおけるレーザースポット径(理論値)は、焦点位置でそれぞれφ0.077 mm、φ0.102 mmである。レーザー焦点位置は試料表面を0.0 mmとして、試料内部に向かって-1.0 mm、-2.0 mmと変化させた。レーザーパワー、レーザーパルス数、レーザー光走査速度はレーザー加工機への入力値である。ここで、レーザーパワーは最大出力100Wに対する割合であり、レーザー走査速度は最大走査速度80 inch/secに対する割合となる。レーザーパルス数のPPIはPulse Per Inchを意味しており、切断長さ1 inch当たりのレーザーパルス数である。本研究に使用したレーザー加工機はレーザー加工熱の冷却および加工屑の除去のためにレーザー光と同軸方向にア



ノズル高さ：16.3 mm
ノズル径：φ7 mm

図3 石膏製アシストガスノズルの外観

表3 L18直交表 (溝幅の測定結果およびSN比と感度の計算)

No.	A	B	C	D	E	F	G	H	溝幅(μm)		SN比 η (db)	感度 S (db)
									直角N ₁	平行N ₂		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1262	1025	17	61
2	1	1	2	2	2	2	2	2	387	412	27	52
3	1	1	3	3	3	3	3	3	350	447	15	52
4	1	2	1	1	2	2	3	3	358	408	21	52
5	1	2	2	2	3	3	1	1	425	400	27	52
6	1	2	3	3	1	1	2	2	2432	1833	14	66
7	1	3	1	2	1	3	2	3	457	1717	0	59
8	1	3	2	3	2	1	3	1	392	669	8	54
9	1	3	3	1	3	2	1	2	376	398	28	52
10	2	1	1	3	3	2	2	2	361	346	30	51
11	2	1	2	1	1	3	3	2	709	1861	3	61
12	2	1	3	2	2	1	1	3	499	697	10	55
13	2	2	1	2	3	1	3	2	388	376	33	52
14	2	2	2	3	1	2	1	3	875	1803	6	62
15	2	2	3	1	2	3	2	1	1238	482	3	58
16	2	3	1	3	2	3	1	2	367	519	12	53
17	2	3	2	1	3	1	2	3	348	369	28	51
18	2	3	3	2	1	2	3	1	981	1591	9	62
									総平均		16	56

シストガスを噴射している。アシストガスの種類やノズル形状は、熱影響などのレーザー加工品位に影響を及ぼす。そこで、アシストガスノズルに関するパラメータであるノズル高さ、ノズル径については、3Dプリンタによって石膏製アシストガスノズルを製作して変化させた。図3に石膏製アシストガスノズルの一例を示す。アシストガスの種類は、汎用的に使用されている圧縮空気とした。アシストガス流量は、流量計により測定して、圧力を調整することで変化させた。なお、表2における赤枠で囲まれた水準がパラメータ設計前の現状条件となる。

3.2 パラメータ設計による加工条件の最適化

図2および表2に示すレーザー切断加工パラメータと水準について、表3に示すようにL18直交表へのわりつけを行い、No.1~No.18の18通りの切断実験を実施した。木材のレーザー切断は、木目の影響を受けやすく加工性状が変化することから誤差因子として取り上げて実験し

$$\text{全変動 } S_T = y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2 \quad (1)$$

$$\text{平均からの変動 } S_m = \frac{(y_1 + y_2 + \dots + y_n)^2}{n} \quad (2)$$

$$\text{誤差変動 } S_e = S_T - S_m \quad (3)$$

$$\text{誤差分散 } V_e = \frac{S_e}{n-1} \quad (4)$$

$$\text{SN比 } \eta = 10 \log \frac{\frac{1}{n} (S_m - V_e)}{V_e} \quad (\text{db}) \quad (5)$$

$$\text{感度 } S = 10 \log \left[\frac{1}{n} (S_m - V_e) \right] \quad (\text{db}) \quad (6)$$

た。

切断溝幅を測定した結果を表3の溝幅に示す。誤差因子である木目に対してレーザー光を直角に走査した場合の切断結果をN₁、平行に走査した場合の切断結果をN₂の列にそれぞれ記入している。表3に示すSN比ηおよび感度Sは、式(1)~(6)に基づいてそれぞれ計算した。ここで、yは特性値であり、表3における溝幅N₁およびN₂の測定値となる。また、nは特性値の個数であり、表3においては2個となる。

表3の結果より得られた要因効果図を図4に示す。また、抽出した最適条件を図中の赤丸で示す。最適条件の抽出は、誤算因子である木目の影響を受けにくく、切断溝幅が小さくなる条件として、SN比ηが大きく、感度Sが小さく

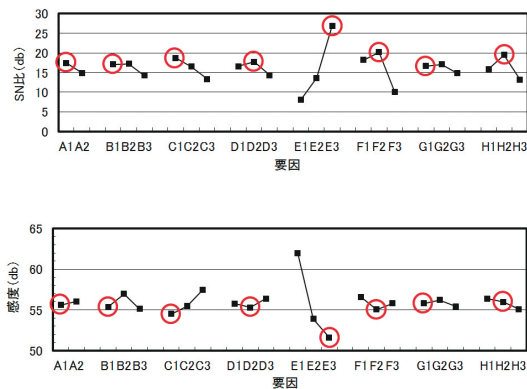


図4 SN比と感度の要因効果図

なる条件を選定した。図4の要因効果図から、各パラメータが切断加工に及ぼす影響が以下の通り明らかとなった。

- ・バルサのレーザー切断性状に影響が大きなパラメータは、レーザー光走査速度であることがわかった。レーザー光走査速度が速い程、高品位精密切断加工が可能となる。
- ・レーザー光学系であるレンズ焦点距離とレーザー焦点位置が、レーザー切断性状に及ぼす影響は、レーザー光走査速度と比較するとそれ程大きくない。
- ・レーザー光の入熱条件となるレーザーパワーは、レーザー光走査速度の次にレーザー切断性状に及ぼす影響が大きい。レーザーパルス数については、あまり影響を及ぼさない。
- ・アシストガス条件であるノズル高さはレーザー切断性状に影響を及ぼす。ノズル径とアシストガス流量も一定の影響を及ぼす。ノズル高さは低く、ノズル径は小さく、ガス流量は多い程、高品位精密切断に適すると考えられる。

3.3 最適条件の確認実験

現状条件およびパラメータ設計により抽出された最適条件を表4にまとめる。表4の条件に基づいて、レーザー切断加工の確認実験を実施した。図5にレーザー切断溝の状態を観察した結果を示す。同様に、図6はレーザー切断溝幅の測定結果である。これらの結果より、現状条件と比較して、最適条件では熱影響である焼け焦げが改善して、切断溝幅が細くなっていることがわかる。また、誤差因子である木目方向に対するレーザー切断においても、切断溝幅は同程度であり、ばらつきが大幅に改善している。更に、レーザー光入射側と出口側の切断溝幅の差を確認

表4 レーザ切断加工パラメータの最適条件

パラメータ	現状条件	最適条件
レンズ焦点距離	2.0 inch	1.5 inch
レーザー焦点位置	0.0 mm	0.0 mm
レーザーパワー	80 %	70 %
レーザーパルス数	300 PPI	1000 PPI
レーザー光走査速度	1.5 mm	2.0 mm
ノズル高さ	16.3 mm	9.3 mm
ノズル径	φ 7 mm	φ 3 mm
アシストガス流量(圧力)	55 L/min(0.17 MPa)	40 L/min(0.11 MPa)

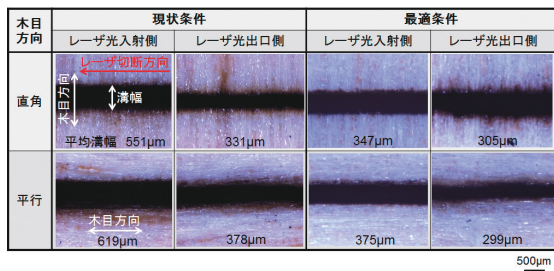


図5 最適条件におけるレーザー切断溝の状態

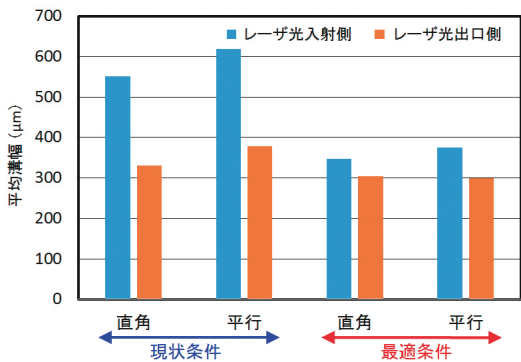


図6 最適条件におけるレーザー切断溝幅

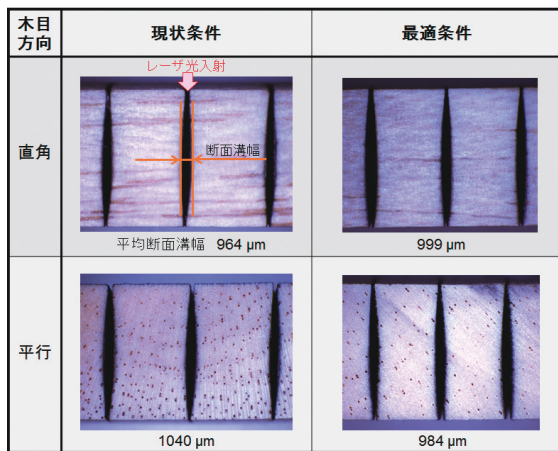


図7 最適条件におけるレーザー切断溝断面

すると、現状条件では200 μm以上あるのに対して最適条件では100 μm未満と小さくなりレーザー光入射側と出口側で同程度の切断溝幅が得られている。

次に、レーザー切断加工の内部状態を確認するために、レーザー切断溝に対して直角方向にダイサーで試料を切断してレーザー切断溝断面の状態を顕微鏡で観察した。現状条件と最適条件の切断溝断面の観察結果を図7に示す。バルサのレーザー切断加工では、試料中心部にお

いて断面の溝幅が大きくなり、現状条件と最適条件は同程度となっている。しかしながら、最適条件では木目方向によらず同程度の断面溝幅が得られている。したがって、最適条件では、木目の影響を受けにくい安定したレーザー切断加工が可能であると考えられる。

木材のレーザー切断加工は、燃焼を伴う切断加工であり、木目も存在することから、安定した高品位切断は難しいと考えられた。しかしながら、本研究のパラメータ設計の確認実験の結果から、レーザー切断加工条件を最適化することで切断品位を大幅に改善できることが明らかとなった。

4. おわりに

炭酸ガスレーザーによる木材の高品位切断加工の取り組みとしてパラメータ設計によるレーザー切断加工条件の最適化を試みた。その結果、バルサのレーザー切断加工において、木目方向の影響を受けずに熱影響を抑制したより小さな切断溝幅が得られ、切断加工性状を大きく改善することができた。本研究により得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 木目方向を誤差因子として、レーザー光出口側の溝幅が最小となるパラメータ設計を行うことで、レーザー切断加工性状が大幅に改善する最適条件を得ることができる。
- (2) 得られた最適条件では、現状条件と比較して切断溝幅は小さく、熱影響である焼け焦げも少ない。また、レーザー光入射側と出口側の溝幅の差も少なくなる。
- (3) 最適条件においては、木目方向の影響を受けにくい切断溝幅を得ることができる。
- (4) レーザー切断溝断面の状態より、最適条件では木目の影響を受けにくい安定したレーザー切断加工が可能であると考えられる。

今後は、更なる木材の高品位レーザー切断加工を目指して、本研究により得られた要因効果に基づき、レーザー切断加工品位に影響を及ぼすレーザー加工パラメータについて、実験的、理論

的にレーザー熱加工プロセスの解明と改善を実施していく。

謝 辞

本研究報告は、2017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、数多くの実験データを収集して評価してくれた小野慎之介君、戸田裕之君、桑田大地君に深く感謝する。

参考文献

- 1) Nukman Yusoff, Saiful Rizal Ismail, Azuddin Mamat and Aznizar Ahmad-Yazid: Selected Malaysian Wood CO₂-Laser Cutting Parameters and Cut Quality, American Journal of Applied Sciences, Vol. 5, No. 8 (2008), pp. 990-996.
- 2) 中村寿一, 寺尾剛, 恵原要, 藤田純一, 澤崎ひとみ, 山田淳人: 川辺仏壇の新設計・製造システムに関する研究(Ⅱ)―炭酸ガスレーザー加工機を利用した製造システムの開発―, 鹿児島県工業技術センター研究報告, 第14号(2000), pp. 7-12.
- 3) 宮崎俊行, 宮沢肇, 村川正夫, 吉岡俊朗: レーザ加工技術, 産業図書, (2000), pp. 22-23.
- 4) 矢野耕也: 品質工学の基礎とパラメータ設計, 精密工学会誌, Vol. 81, No. 11 (2015), pp. 1008-1012.
- 5) 井上清和, 中野恵司, 林裕人, 芝野広志, 大場章司: 入門パラメータ設計, 日科技連, (2014), pp. 105-143.