MDF のレーザ加工性[†]

秦 啓祐* 岡部 敏弘** 大塚 正久***

Characteristics of Laser Machinig of MDF

by

Keisuke HATA*, Toshihiro OKABE** and Masahisa OTSUKA***

As a part of study on the applicability of laser beam machining to woodceramics, the response of MDF to laser beam has been investigated under various irradiation conditions.

The results are summarized as follows :

- (1) Removal depth increases with increasing materials density.
- (2) The difference in the extent of burning, between upper and lower layer of machined surface, increases with increase in the energy density of laser beam.
- (3) The kerf on the machined surface contains taper. The amount of taper depends on both energy density and defocus distance of laser beam.
- (4) The kerf width increases with increase in beam power as well as in defocus distance.

Key words : CO₂ laser beam, Energy density, Kerf, Carbon content, MDF, Wood

1 緒 言

新規の材料を実用化する場合、それに所定の形状・寸法および表面粗さを付与できる経済的、高効率かつ高精度の加工法の開発が要求される。脆性的な性質を有する代表的な材料であるセラミックス材料の加工法として、切削、研削、ウオータージェット、レーザ、放電加工などが知られている。

多孔質炭素材料・ウッドセラミックスは木材あるいは木質材料に熱硬化性のフェノール樹脂を含浸させ、これを焼成することにより得られる材料である。^{1), 2)} ウッドセラミックスの製造上の特徴として、焼成工程の前でも後でも加工できることがあげられる。すなわち、原料である木質系材料を焼成する前に焼成後の収縮率を見越して加工することもできるし、あらかじめ焼成したものを加工することも可能である。

木質系材料の加工法に関する研究は、今日まで数多く行なわれている。切削や穴あけなどの加工が比較的容易であり、丸のこ盤・パネルソー・帯鋸盤などの木工機械が広く使用されている。しかし、これらの加工法には、粉塵を発生する、形状加工に不向きである、などの欠点がある。これに対し、近年多用され始めたレーザ加工法は、精密加工・形状加工が可能、粉塵発生が少ない、僅かな力で材料を固定できる、作業効率が高いなどの利点を有するため、金属・非金属を問わずあらゆる材料の加工に用いられている。

レーザの加工原理は、レーザビームの光エネルギーを熱エネルギーに変換させて、材料を瞬時に蒸発除去する

というものである。これまで異方性を有する木材のレーザ加工特性に関する研究^{3)~9)}や加工条件の最適化に関する研究^{10), 11)}はあるが、MDFを対象としたものは少ない。

ところで、木材のレーザ加工では、レーザ特有の素材に焼けが生じて美観を損なう、という問題があった。これに対しウッドセラミックスでは焼成処理後に黒色の炭素材料となるので、色感としての焼けの問題は回避される。

著者らはウッドセラミックスの加工特性に関する研究の一環として、これまで焼成前の材料について調査してきた。^{12)~14)}

本研究では、ウッドセラミックスの主原料であるMDFについて、レーザ加工精度および材料特性に及ぼすビームのエネルギー密度、焦点はずし距離およびアシストガス圧などの影響を検討した。また、溝深さに及ぼす密度の影響をMDFのみならず木材についても検討した。

2 実験方法

2.1 供試材

供試材は、しばしばウッドセラミックスの主原料に使われるMDF(中質繊維板, Medium Density Fiberboard, 密度: 0.57g/m³, 含水率: 8.5%, (株)住建産業製)である。MDFの試験片寸法は20×200×30mm(幅×長さ×厚さ)とした。比較用の木材には、密度の影響をみるため広葉樹のキリ(*Paulownia tomentosa*, 密度: 0.25g/m³), セン(*Kalopanax pictus*, 密度: 0.48g/m³), ケヤキ(*Zelkova serrata*, 密度: 0.81g/m³)を選定した。木材の試験片寸法は20×200×60mm(幅×長さ×

† 原稿受理 平成10年10月5日 Received Oct. 5, 1998

* 正会員 千葉職業能力開発短期大学校産業デザイン科 〒260-0025 千葉市中央区問屋町, Ind. Design Dept., Chiba Polytechnic College, Chuo-ku, Chiba, 260-0025

** 正会員 青森県工業試験場 〒036-8363 弘前市袋町, Ind. Res. Inst. of Aomori Pref., Fukuromachi, Hirosaki, 036-8363

*** 正会員 芝浦工業大学工学部材料工学科 〒108-8548 東京都港区芝浦, Dept. of Mater. Sci. and Eng., Shibaura Inst. of Tech., Minato-ku, Tokyo, 108-8548

Fig. 1. Irradiation direction of laser beam.

厚さ)で、幅方向が板目面、厚さ方向が柾目面となるように木取った。

2・2 加工方法

レーザ加工には市販の炭酸ガスレーザ加工機 (NIIGATA 製, NLF-404, 定格出力: 1.5kW, ピーク出力: 3kW, ビームモード: シングルモード) を使用し, 供試材の溝ほり加工を行った。MDF への照射方向は, MDF 成形時のプレス面に対して直角方向の面とした。木材への照射方向は, 板目面に対して垂直方向とした。(Fig. 1)

2・3 溝深さおよび切断面の炭素量

木材および MDF について, レーザビームのエネルギー密度と除去量 (以後, 溝深さと称す) の関係を求めた。すなわち, レーザビームを種々の加工条件で照射した後, 材料表面にできる溝の深さを光学顕微鏡 (オリンパス製, STM5-UM) により測定し, 溝深さとした。また, エネルギー分散型 X 線分析装置 (ミニカップ形 EDS 検出器搭載, 日本電子製, JSM-5200) を用いて切断面の各層 (Fig. 2) の炭素量を計測し, 焼けの度合いを定量的に評価した。

2・4 溝形状から見た加工状態の評価

レーザ加工した MDF 材のビーム入射面での切断溝幅を光学顕微鏡により測定した。レーザ加工部に形成される溝の横断面形状は樽形に近いが, 最深部では熱エネルギーが少ないためしりすぼみ形状を呈する。そこで加工条件と溝形状の関係からの加工状態を以下のように評価した。

レーザビームは集光後, 焦点を境に拡散する。レーザ加工溝には原理的にテーパ (横断面が垂直でなく, 傾斜をもつ) が形成される。さらに木材の加工では, レーザビームの材への吸収率が高く, 焦点を境に拡散する。拡散の程度は, レーザビームの集束角すなわち焦点距離の大きさで決まり, 焦点距離が増すほど大きくなる。材内

Fig. 2. Each layers of processed surface to laser beam irradiation.

Fig. 3. Shape parameters (a , b and h) for the kerf.

Fig. 4. Measure point of surface temperature.

ではビームの吸収率の高いことから熱が容易に溝壁へ供給されるため材は瞬時に蒸発除去される。その結果, 切断溝は樽状となる。そこで, Fig. 3 に示す溝幅 (カーフ幅) の形状因子 a (ビーム入射面の溝幅) および b (最大溝幅) と, ビーム出力, 焦点はずし距離などの加工条件との関係を調べた。

2・5 アシストガスの影響

加工時の材の表面温度に及ぼすアシストガスの影響について, 非接触型表面温度計 (ミノルタ製, TA-0510bF) を用いて調べた。測定方法は, ビーム照射点から 1.5mm 離れた材料端面の中央部分に温度計をセットし (Fig. 4), ビームが中央部分を通過する時の温度を測定して求めた。

3 実験結果および考察

3・1 パワー密度と溝深さの関係

木材の加工特性に及ぼす木材側の要因として, 含水率, 密度, 加工面, 樹種などが挙げられる。木材は金属材料と比べてレーザビームの吸収率が高く, 熱伝導率, 熱拡散率が低いので比較的容易に加工することができる。しかし, 加工性の良し悪しは樹種や密度に依存する。Fig. 5 は木材および MDF のビームエネルギー密度と溝深さの関係を示す。どの材料でもエネルギー密度の上昇と共に溝深さは深くなる。またエネルギー密度が一定の時, 密度が小さいほど溝深さは深い。以下これについて検討する。

Fig. 5. Relation between removal depth and laser power density for woods and MDF.

Notes ;

Output wave form : Continuous Wave, Assist gas : N_2 , Lens focus : 123mm, Assist gas pressure : 0.05Mpa, Defocus distance : +1mm, Laser power : 500W, Feed speed of workpiece : 1m/min.

Fig. 6. Relation between carbon content and energy density.

Notes ;

Output wave form : Continuous Wave, Assist gas : N_2 , Lens focus : 123mm, Assist gas pressure : 0.05MPa, Defocus distance : +1mm, Laser power : 500W, Nozzle diameter : 2.1mm.

木材の熱伝導率は材中の空隙量したがって密度に依存し、全乾木材の場合、次の MacLean の式¹⁵⁾で与えられる。

$$\lambda_{\perp} = 0.020 + 0.172\rho_0$$

ここで、 $\lambda_{\perp}$ は繊維に直角方向の熱伝導率 (kcal/mh°C)、 ρ_0 は全乾木材の密度である。また、含水材の $\lambda_{\perp}$ は次の Kollmann の式¹⁵⁾で与えられる。

$$\lambda_{\perp} = 0.022 + 0.168\rho_u$$

ここで、 ρ_u は含水率 $u\%$ の時の密度である。

一方、木材の熱拡散率は密度の大きさに依存せず、ほぼ一定 ($0.1\text{cm}^2/\text{min}$)を示す¹⁶⁾といわれており、木材のレーザ加工性は熱伝導率に依存するところが大きいといえる。したがって、木材の溝深さは密度に依存することになる。

以上から、材種(密度)と照射条件よりレーザ加工における溝深さを経験的に予測できることが分かる。

3・2 焼けに及ぼすエネルギー密度の影響

切断面の焼け程度を炭素濃度の大きさから評価した。

切断面を上層部、中層部、下層部の三層に分け、各層での焼けレベルとレーザビームのエネルギー密度との関係を示したものが Fig. 6 である。これより、各層ともエネルギー密度の増加とともに炭素濃度は増加するが、増加速度は上層部よりも中層部・下層部で大きいことが分かる。材に照射されたレーザビームは、焦点位置で最大に絞り込まれ、焦点を境にして拡散され材内に吸収される。

その際、アシストガスの加熱生成物除去能力は板厚の下ほど減少する。その結果、より多くの熱量が材に供給される。この傾向はエネルギー密度が大きいほど顕著に現れる。

3・3 加工状態の評価

3・3・1 スポット径とカーフ幅 ビーム入射面の溝幅の大きさについては、これまでに軟鋼板あるいはステン

Fig. 7. Relation between kerf width and defocus distance.

Notes ;

Output wave form : Continuous Wave, Laser power : 500W, Beam diameter : 24mm, Lens focus : 123mm, Assist gas : N_2 , Assist gas pressure : 0.05MPa, Defocus distance : $\pm 0\text{mm}$, Feed speed of workpiece : 5m/min.

レス鋼板を対象にビームの強度分布との関係から求めた例¹⁷⁾がある。Fig. 7 はビーム入射面の溝幅の大きさとビームの照射面からの焦点はずし距離の関係を示す。なお、材料表面から上方を+、材料表面から内部に向けて-とする。ビーム入射面の溝幅の大きさは焦点はずし距離0~1mmの時に最小となり、焦点位置が材表面から離れるにつれ大きくなる。これは、焦点位置でビーム径が最小となるからである。スポット径(ビームの焦点でのビーム径)がビーム入射面の溝幅の大きさと一致しない原

Fig. 8. Kerf width as a function of feed speed of workpiece and laser power.

Notes ;

Output wave form : Continuous Wave, Beam diameter : 24mm, Lens focus : 123mm, Assist gas : N_2 , Defocus distance : ± 0 mm, Assist gas pressure : 0.05MPa.

因について、以下のことが考えられる。本研究で用いたレーザ加工機におけるビームの分布状態はシングルタイプである。このタイプの強度分布は一般にガウス分布に近いと考えられている。ビームのスポット径はガウス分布の $1/e^2$ に等しいものとみなされ¹⁸⁾したがって、ビーム入射面の溝幅の大きさより小さくなる。ビーム入射面の溝幅の大きさを決める要因としては、スポット径以外に、材料表面でのレーザビーム径の大きさ、さらにはそのビーム径周辺部での低エネルギー密度のビームの影響が考えられる。

次に、種々のビーム出力における材料送り速度とビーム入射面の溝幅の大きさの関係を Fig. 8 に示す。図より、ビーム入射面の溝幅の大きさは出力が大きい程大きい、材料送り速度にはほとんど依存しないことが分かる。

3・3・2 エネルギー密度と溝形状

1) エネルギー密度と溝形状因子 a/b

Fig. 9 に照射面を焦点位置としたときの a/b 比に及ぼすエネルギー密度の影響を示す。これより、エネルギー密度が増すほど、 a/b 比は減少することが分かる。これは、エネルギー密度が高いほど材への熱供給量が増すことによって、今の場合、ビームの焦点が材の表面と一致しビームが拡散するため、入射方向と垂直な方向への散乱が起り、材内部で吸収を繰り返しながら材を蒸発除去するものと考えられる。

2) 焦点はずし距離と溝形状因子 a/b

Fig. 10 に溝形状因子に及ぼす焦点はずし距離と送り速度の影響を示す。なお、焦点はずし距離の範囲は、材への熱影響が比較的少ない材料表面から上方とした。これより、送り速度一定の時、ビームの焦点はずし距離が材表面から 2mm 以内では a/b 比はほぼ一定であるが、焦点はずし距離が 2mm 以上ずれると、ずれが増すほど a/b 比は 1 に近づく。また、加工速度が低い場合は、エネルギー密度が高いので、 a/b 比を 1 に近づけるために

Fig. 9. Effect of energy density on the sectional shape of kerf.

Notes ;

Output wave form : Continuous Wave, Assist gas : N_2 , Lens focus : 123mm, Assist gas pressure : 0.05MPa, Defocus distance : ± 0 mm, Laser power : 500W.

Fig. 10. Effect of defocus distance and feed speed on the sectional shape of kerf.

Notes ;

Output wave form : Continuous Wave, Laser power : 500W, Beam diameter : 24mm, Lens focus : 123mm, Assist gas : N_2 .

は焦点はずし距離を高めに設定しなければならない。 $a/b = 1$ の時、溝幅が最大の位置より下方ではしりすばみ状態となる。焦点はずし距離と a/b 値の関係より、 a/b が 1 に近いとき、焦点距離が長いほど、また加工速度が低いほど（すなわちエネルギー密度が高いほど） a/b 値を大きくとることができることがわかる。レンズの焦点距離が長いほど、スポット径は大きくなり、焦点深度が増す。

また同一焦点はずし距離において、ビームが焦点を境に拡散する際の集束角は焦点距離が増すほど減少するので、入射方向と垂直方向への散乱量も焦点距離が増すほど減少する。すなわち、焦点距離が長い程照射方向に対する垂直方向の材への熱影響は小さく、 a/b 比はより 1

Fig. 11. Removal depth as a function of defocus distance and feed speed.

Notes ;

Output wave form : Continuous Wave, Laser power : 500W, Beam diameter : 24mm, Lens focus : 123mm, Assist gas : N₂, Assist gas pressure : 0.05MPa.

に近づくものと考えられる。

3) 焦点はずし距離と溝深さ

Fig. 11 に溝深さに及ぼす焦点はずし距離および送り速度の影響を示す。ビームの焦点は Fig. 7 と同じである。図より、焦点はずし距離が材表面から遠ざかるほどエネルギー密度が減少するため、溝深さも僅かながら浅くなるのがわかる。また、加工速度が遅いほどビームのエネルギー密度は上昇し、その結果溝深さも増大する。

3・3・3 アシストガスの影響 アシストガスは切断面の焼け程度に大きな影響を及ぼすことが知られている。^{19), 20)}

Fig. 12 は、空気をアシストガスに用い、レーザビームの発振モードをパルスモードタイプに設定し、パルスモード発振におけるビーム照射時間と周期との比を照射時間比率 (pulse duty) と定義することにより、pulse duty : 100% および 50% と設定した場合のガス圧と切断部近傍の表面温度との関係を示す。なお、比較のため窒素をアシストガスとした場合 (アシストガス圧 : 0.05 MPa) の結果も併記した。ガス圧 0.05MPa における表面温度を比較すると、いずれの照射時間比率においても窒素ガスを用いた方が表面温度は低い。これは、窒素ガスの方が空気よりも高い冷却能を有することに起因するものと思われる。

次に、ガス圧の影響をみると、ガス圧が 0.1MPa から 0.5MPa へ上昇するにつれ、表面温度は単調に減少する傾向がある。また、0.1MPa の空気と 0.05MPa の窒素がほぼ同一の表面温度を与える。このことは、アシストガスとして空気を使用する場合でも、ガス圧を窒素ガスの 2 倍に上げるだけで窒素使用時とほぼ同じ断面性状を得ることができることを意味する。このようにガス圧の増加は、加工時に発生する生成物の除去や、さらには熱影響範囲の低減に効果があると考えられる。

4 結 言

ウッドセラミックスの加工性に関する研究の一環として、フェノール樹脂未含浸の MDF および木材のレーザ

Fig. 12. Surface temperature as a function of assist gas pressure.

Notes ;

Output wave form : Continuous Wave, Laser power : 500W, Defocus distance : ± 0 mm, Feed speed of workpiece : 1m/min, Lens focus : 123mm.

加工特性を調べ、以下の結論を得た。

(1) 木材のレーザ加工では、密度が大きいほど溝深さは浅くなる。

(2) 切断溝にはレーザ加工特有のテーパが形成される。このテーパはビームのエネルギー密度が大きいほど大きい。焦点はずし距離が一定の時、加工速度が低いほどテーパは増大する。また加工速度が一定の時、照射面から焦点位置が離れるほどテーパは減少する。

(3) カーフ幅は、ビーム出力が増すほど増大するが、材料送り速度には依存しない。また照射面から焦点位置が離れるほどカーフ幅は広がる。

(4) ビームのエネルギー密度が増すと切断面の上部と下層部との間に顕著な焼けの差が生じる。

以上のように、エネルギー密度が高くなるほど溝深さは増し、切断溝のテーパ度も大きくなる。したがって、よりテーパ度の小さい溝形状を得るための条件は、エネルギー密度を小さく設定する場合には、焦点位置を材面に近づけること、反対にエネルギー密度を高く設定する場合には、大きな溝幅が形成されることを踏まえた上で焦点位置を材面から遠ざけること、である。

参 考 文 献

- 岡部敏弘, 多孔質炭素材料・ウッドセラミックスに関する研究, p.51 (1995) 東京大学学位論文.
- 岡部敏弘監修, “木質系多孔質炭素材料・ウッドセラミックス” (1996) 内田老鶴圃.
- C. W. McMillin and J. E. Harry, Forest Products J., **21**, 10 (1971).
- M. J. Malachowski, Proc. ICALEO '84, **44**, 185 (1984).
- 新井武二, 川澄博道, 林 大九郎, 木材学会誌, **25**, 543 (1979).
- 新井武二, 川澄博道, 木材学会誌, **25**, 763 (1979).

- 7) T. Arai and H. Kawasumi, Mokuzai Gakkaishi, **26**, 773 (1980).
- 8) 新井武二, 林 大九郎, 木材学会誌, **38**, 350 (1992).
- 9) 新井武二, 林 大九郎, 木材学会誌, **40**, 497 (1994).
- 10) 新井武二, 川澄博道, 木下直治, 木材学会誌, **24**, 281 (1978).
- 11) 金岡 優, 村井 融, '96 日本 MRS シンポジウム D 研究発表要旨集, p.165 (1996).
- 12) K. Hata, T. Okabe, K. Saito and M. Otsuka, Transactions of the Materials Research Society of Japan., **20**, 68 (1996).
- 13) K. Hata, K. Shibata, T. Okabe, K. Saito and M. Otsuka, J. Porous Mater., **5**, 65 (1998).
- 14) K. Hata, K. Shibata, T. Okabe, K. Saito and M. Otsuka, J. Porous Mater (in print).
- 15) F. Kollmann and W. A. Cote, Jr., "Principles of Wood Science and Technology I Solid Wood", p.247 (1968) Springer-Verlag.
- 16) 満久崇磨, "木材工学", 梶田 茂編, p.257 (1961) 養賢堂.
- 17) 丸尾 大, 宮本 勇, 大家利彦, 溶接学会論文集, **10**, 138 (1992).
- 18) たとえば, "先端レーザテクノロジー", レーザ学会編, p.26 (1992) 日経技術図書.
- 19) 新井武二, 川澄博道, 林 大九郎, 木材学会誌, **23**, 317 (1975).
- 20) V. G. Barnekov, C. W. McMillin and H. A. Huber, Forest Products J., **36**, 55 (1986).

書 評

“材料強度の考え方”

木村 宏 (著)

(1998 年, アグネ技術センター発行, B5 判, 443 ページ, 価格 4500 円)

材料の強度について扱った著書は多数出版されている。とりわけ先進材料について扱った書物は、商用誌を含めれば膨大な量になっている。そして、それら書物やマスコミに刺激される形で多くの人たちが先進材料に大きな興味を示していることも事実である。それらの流れの中で、多くの人たちが往々にして、[先進材料を扱う学問] = [新しい学問], [先進材料を扱う学問] ≠ [旧来の材料を扱う学問] であり, [旧来の材料を扱う学問] = [旧来の学問] = [陳腐な学問] であると誤解していると感じるのは私だけであろうか。むしろ, 新しい材料を扱うからこそ, これまでの材料工学の成果が生み出された考え方や経緯, さらに, 既存材料が開発された手法等を盗み, それらを新しい材料の開発に結びつけていく姿勢が重要であろう。

そのような目的からこの本が執筆されたと思われ, 多くの歴史的事実ともに, 材料工学の考え方それ自体に焦点が当てられて執筆されている。内容は全部で 11 章から構成されており, 強度, 転位, 加工硬化, 回復, 強度, 破壊, 変形等の学問領域が幅広く網羅されている。

この本の第 1 の特徴は, 各章の冒頭にこれまでの研究の歩みが述べられ, 常に材料強度の考え方そのものに焦点が当てられて内容の展開がなされていることであろう。本書の第 8 章の 8.1 節を読めば, この特徴が如実に理解されるであろう。第 2 の特徴は, この本で出てくる大部分の図が, これまで広く出回っている文献中の図をそのまま引用して記述され, それらの出典が, もっと勉強したい人に役立つであろう文献と合わせて, 各章末に紹介されている点にある。

以上のような内容および特徴から, 大学生や大学院生はもちろんのこと, 例えば, 材料工学を自分で勉強したい人, さらに原点に帰って現在の研究の新展開を計ろうとしている人には, 本書は必携の一冊となり得るであろう。

(長岡技術科学大学 岡崎 正和)