CO₂ レーザによる紙の切断*

服 部 順 昭** 杉 原 彦 一*** 長 野 幸 隆****

Paper Cutting by CO₂ Laser

by

Nobuaki HATTORI, Hikoichi SUGIHARA

(Faculty of Agriculture, Kyoto University, Kyoto)

and Yukitaka NAGANO

(Manufacturing Engineering Laboratory, Tokyo Shibaura Electric Co. Ltd., Kawasaki)

Nonmetals, especially wooden materials are considered suitable for processing by CO₂ laser. In the present study, cutting experiments were carried out on kraft paper and filter paper made of cellulose fiber which is one of the main elements of wood. The experimental factors were the laser power, defocusing distance, flow rate of assistant gas and feed speed. The efficiency of CO₂ laser cutting was evaluated on the basis of external appearance of sections and measurements of kerf width.

The results are summarized as follows;

(1) It was observed that the pyrolysis-like residue adhered on the both cut edges as solid droplets. The color and quantity of the solid droplets varied largely with the condition of laser irradiation.

(2) The kerf width varied largely with the above factors as illustrated in Figs. 6-10.

(3) The minimum power needed to cut filter or kraft paper was about 2.5 W when the feed speed was 2 m/min.

(4) The laser energy required to destroy a unit volume of filter paper was about 0.23 J/mm³. The calculation showed that the net energy expended for the paper cutting was only 0.2-8.7% of the total irradiated energy of CO₂ laser.

(Received Nov. 20, 1978)

キー・ワード：切断，CO₂ レーザ，紙

1 緒 言

近年，我が国でも小出力から中出力の CO₂ レーザ（出力50～500W）が開発あるいは市販されるようになり，特殊な分野ではあるが産業用に利用されるようになってきた。小中出力の CO₂ レーザの用途として金属の穴あけ・切断・溶接・熱処理や非金属の穴あけ・切断などが考えられるが，CO₂ レーザ光の金属に対する反射率は相当高いため，素材の加工としては金属よりもむしろ非金属の方が吸収効率の点からは有利である。

本報では，小出力の CO₂ レーザによる加工に適していると考えられる非金属のうち，木質材料特にその主成分の一つであるセルロースで構成される紙（ろ紙と電気絶縁用クラフト紙）について切断加工実験を行

い，CO₂ レーザの照射条件によってどのように加工されるかを観察した。

紙の CO₂ レーザによる加工例は断片的ではあるが種々報告されており，そのうち Miller らは30種以上の紙を切断して切断面を観察し，切断条件を示している。また，セルロースの CO₂ レーザ光に対する挙動について Nordin らはコンデンサ紙とコットンリント紙に CO₂ レーザ光を照射し，結晶化度と赤外線スペクトルなどの結果から判断して，セルロースが溶融したと報告している。

2 実験方法

2・1 実験装置

実験に使用した CO₂ レーザ加工機は，(A) Photon Sources 社製 500 W CO₂ レーザ (Model 500 CW) と (B) Coherent Radiation社製 50W CO₂ レーザ (Model 42) で，いずれもガラス管内にレーザ媒体である CO₂，N₂，He の混合ガスを低圧低流速で流しているタイプで，レーザ光の波長は 10.6μm である。ビー

* 原稿受理 昭和53年11月20日

** 京都大学農学部 京都市左京区北白川追分町

*** 正 会 員 京都大学農学部 京都市左京区北白川追分町

**** 東京芝浦電気(株)生産技術研究所 川崎市幸区堀川町

μ集光に用いたレンズは, (A)には KCl 製焦点距離 $f=46$ mm, (B)には Ge 製焦点距離 $f=64$ mm である。レーザ光照射時に, 加工試料からの飛散物がレンズ表面に付着するのを防ぐためと, 加工試料の酸化・燃焼を防ぐために, N_2 ガスまたは Ar ガスをアシストガスとしてレーザ光軸と同軸のノズル〔ノズル直径は(A)が 3 mm, (B)が 4 mm〕から加工物へガスジェットとして吹きつけた。

レーザ光の出力測定は(A)の場合は専用パワーメータと Coherent Radiation 社製パワーメータ (Model 213) で, (B)の場合は Coherent Radiation 社製パワーメータ (Model 201) でそれぞれ行った。

実験装置の概略は Fig. 1 に示したとおりである。実験では, まず Fig. 1 の Z 軸テーブルに固定してある長窓 (300 mm×3 mm) を開けた 2 枚の亚克力板 (厚さ 3 mm) に試料をはさんで固定し, Z 軸でダイヤルゲージを用いて照射位置を調整した。つぎに Z 軸テーブルを固定した X-Y テーブルを X 軸方向に送りながらレーザ光の照射を行った。

Fig. 1. Schematic diagram of a CO₂ laser processing apparatus.

2・2 試料

試料は木材の主成分の一つであるセルロースで構成された(a)東洋汙紙(株)製化学定量分析用 No. 6 (厚さ 0.19 mm, 坪量 85 g/m²) とヘミセルロースヤリグニンも含んだ(b) Weyer Haeuser 社製電気絶縁用クラフト紙 (厚さ 0.11 mm, 坪量 73 g/m²), ニッポン高度紙工業(株)製電解コンデンサ紙 2 種 [(c)厚さ 0.08 mm, 坪量 41.6 g/m² と(d)厚さ 0.02 mm, 坪量 14.5 g/m²] の計 4 種で気乾状態のものを使用した。

2・3 測定方法

実験因子としてレーザ光の出力, 照射位置, 試料の送り速度, アシストガスの流量やレンズの焦点距離を選び, それらを変化させて照射した場合, これら因子の紙の切断面の性状や切断幅に及ぼす影響を測定し, その結果からレーザ加工に要するエネルギーの計算を行った。

2・3・1 切断面の観察 レーザ切断した試料の表面 (レーザ光を照射した面), 裏面および切断溝の側

面と断面の状態 (色や形状など) を光学顕微鏡で観察し, 切断部を写真撮影したフィルムを万能投影機で拡大し, 同時に撮影したスケールを基準として切断幅 (切断された溝の最も狭い部分の幅) を測定した。

2・3・2 焦点はずし距離とパワー密度 焦点はずし距離とはレンズの焦点位置と試料の照射位置間の距離のことで, 焦点位置からレンズ側を (−) その反対側を (+) で示すが, 本報で用いた条件は (+) のみである。焦点位置はレーザ光軸と垂直に置いた亚克力板に CO₂ レーザのパルス照射によって穴あけを行い, アクリル板表面の穴径が最小になるときの表面の位置とした。

本実験に用いたレーザはマルチモード (ビーム断面の強度分布すなわち横モードが単一のガウス分布をしていない) であり, パワー密度を求める際に必要なビーム径はスポット径ではなしに, レーザを連続発振させ, ろ紙をビームの両側から治具で徐々にビーム中心方向へ送り, ろ紙が加工され始めた位置で送りを止め, 両ろ紙間の距離を測定して求めた。さらに求めた径とはほぼ同等の径の穴を厚さ 0.5 mm の銅板にあけ, これをビームの中心に置き, その穴を通過したレーザ光をパワーメータで測定し, そのワット数を穴の面積で除した値をパワー密度とした。したがってこのパワー密度とレーザ光の照射時間との積はエネルギー密度を表すことになる。

2・3・3 臨界加工エネルギー密度 あるパワー密度のレーザ光を試料に照射し, 照射開始から加工され始めるまでの時間を測定すると, 加工に必要な最小のエネルギー密度すなわち臨界加工エネルギー密度を算定しうる。

実験ではろ紙の臨界加工エネルギー密度を求めるため, パルス状のレーザ光のパルス幅を Table I の条件で段階的に変化させてろ紙に照射した。

Table I. Radiant conditions for the measurement of the critical processing energy density.

Power (W)	85	170	
Defocus distance (mm)	20	20	30
Power density (W/mm ²)	3.80	6.46	3.04
Pulse duration (msec)	1, 2, 3, 4, 6		

ろ紙が加工されたか否かの判定は光学顕微鏡でレーザ光を照射した部分を観察し, 微小液滴状固形物の存否やセルロース繊維の部分的消失の有無によって行った。

なお, レーザビームは連続発振時とパルス発振時では横モードや出力強度の波形が若干異なるとは思われるが, エネルギー計算は, パルス幅全域に渡って連続発振時と

同じ状態で発振したと仮定し、連続発振時に求めたパワー密度の値を用いて行った。

3 結果と考察

3・1 切断面の観察

Fig. 2 にレーザで切断したろ紙(a)を3方向からみた写真を示す。Fig. 2 (a)ではセルロース繊維先端に微小液滴状溶融固形物の付着が認められ、(b)、(c)ではろ紙の裏面にそれらの固形物が気胞を含んだ状態で付着していることがわかる。この固形物は透明でやや黄味を帯びており、指触すると容易に欠け落ち、切断中は

0.1 mm

Fig. 2. Three sectional views of the solid droplets on a edge of a filter paper cut by the laser. (Laser: (B), Def. dis.: 0mm, Power: 50W, Assist gas: N₂ 75 l/min, Feed speed: 35mm/sec)

煙の発生とともに甘い匂いがした。この物質は水によく溶け、レーザ(A)で出力 170W, レンズ KCl $f=46$ mm, 焦点はずし距離 20 mm, アシストガス N₂ 20 l/min, 送り速度 40 mm/sec の場合、切断部両縁に付着した量は約 0.13 mg/cm であった。この条件での切断幅は 4.45 mm であったので、3.78 mg のろ紙がレーザ光により熱分解されて、そのうち約 3.4 % が固形物として残ったことになる。なお、この物質中にはかなりのレボグルコサンが含まれていることが確かめられ、レーザ光の照射によりセルロースは溶融したという結果と異なる。また、クラフト紙の切断部に付着する液滴状溶融固形物中にろ紙には認められなかった黒色状物質が点在している現象が認められた。溶融物の付着状態は、ろ紙では主に裏面に付着したのに対し、クラフト紙では表面と裏面に付着し、表面に多く付着する場合も認められた。この原因としては、ろ紙とクラフト紙の成分の差による生成溶融物の性質の差が考えられる。

上記切断部両縁に付着する液滴状固形物は、照射条件によってその着色の程度や付着量が大きく異なり、その変化を Fig. 3, 4 に3段階の相対表示で示した。

Fig. 3. Color of the solid droplets at various cutting conditions. (Power: 170 W)

Fig. 4. Quantity of the solid droplets at various cutting conditions. (Power: 170 W)

Fig. 3 は送り速度と焦点はずし距離によって固形物の着色の程度がどう変化するかを示したもので、送り速度が速く焦点はずし距離が短くなるにつれ、色が茶色→黄色→無色透明へと変化した。これらの固形物の代表的な色は JIS 標準色票で茶色が 5YR4~5, 4~6 で黄色が 2.5Y86 にほぼ相当する。Fig. 4 は送り速度と焦点はずし距離による固形物の付着量の変化を示したもので、送り速度が速く焦点はずし距離が短くなるほど付着量が少くなる。これは照射条件のこの傾向が強まるほど、ろ紙の照射熱分解される体積が少くなり（この結果切断幅は狭くなる）、その一部が熔融状態から固化して切断部両縁に残る量も少くなるためと考えられる。したがって、液滴状固形物の色が無色透明で

(a) Energy density 3.4 mJ/mm² Pulse duration 1 msec
(b) Energy density 6.8 mJ/mm² Pulse duration 2 msec
(c) Energy density 10.2 mJ/mm² Pulse duration 3 msec

Fig. 5. Surface micrographs of a filter paper exposed by CO₂ laser. (Power : 85W, Def. dis. : 20mm, Beam diameter : 5.64 mm, Power density : 3.4 W/mm²)

その付着量が少なくなるろ紙の良好な切断を行うには、Fig. 3, 4 の結果から、レンズの焦点位置で切断し、出力を一定にするならば切断可能な限り速い送り速度で切断するか、送り速度を一定にするならば切断可能な限りまで出力を下げて切断すればよい。この結果レーザー光のエネルギー効率（レーザーの照射エネルギーに対する加工量）もよくなる。

3・2 ろ紙の臨界加工エネルギー密度

レーザー光を照射したろ紙表面の顕微鏡写真の一例を Fig. 5 に示す。同図において(b)はパルス幅 2 msec, エネルギー密度 6.8 mJ/mm² の場合で、(a)（パルス幅 1 msec, エネルギー密度 3.4 mJ/mm²）では認められなかったセルロース繊維の一部消失が認められ、(c)ではその程度が大きくなっている。したがって、臨界加工エネルギー密度は 3.4 mJ/mm² と 6.8 mJ/mm² の間になるが、本実験の場合装置の都合で中間の値が取れないため、後者の値とした。同一ろ紙で他の 2 照射条件の場合もエネルギー密度がほぼ 6.6 mJ/mm² と 6.2 mJ/mm² になると加工され始めており、本実験の照射条件ではろ紙の臨界加工エネルギー密度は約 6.5 mJ/mm²（照射時間 2 msec）になる。

さらに、レーザー光を照射した部分がろ紙の厚さ (0.19 mm) だけ加工されて消失したときのエネルギー密度はそれぞれ 0.041 J/mm², 0.040 J/mm², 0.050 J/mm² であったので、単位体積のろ紙を消失させるのに要したレーザー光のエネルギーは 0.22 J/mm³, 0.21 J/mm³, 0.26 J/mm³ となり、平均すると 0.23 J/mm³ となる。この値はろ紙の冷却効果を伴うアシストガスを用いる切断時にはさらに大きくなる。

3・3 ろ紙の切断幅に及ぼす照射条件の影響

ろ紙の切断幅はレーザー光の出力、レンズの焦点距離、焦点はずし距離、アシストガスの種類と流量、送り速度などに影響される。

Fig. 6 に送り速度をパラメータとし、焦点はずし距離と切断幅の関係を示した。このグラフの形は、横軸を光軸として、レーザービームのろ紙の加工に有効な部分がレンズの焦点位置から広がって行くようすを表している。これより、次の 2 点の特徴がわかる。①完全な平行ビームを収差のないレンズで集光すれば、焦点でのビーム径は 0 となり、切断幅もその付近で 0 に近くなるはずであるが、実際には、ビームは平行でない等のために、この付近でビームウエストとよばれる円筒状の部分をもつことになる。②焦点はずし距離が増大するにつれ、切断幅はビームが加工に十分なパワー密度を保てるならば焦点から直線的に広がるが、さもないければ焦点はずし距離が増大した割には広がらないことになる。この図では前者の例が送り速度 20 mm/

Fig. 6. Kerf width versus defocus distance.
(Power : 170W, Assist gas : N₂ 10 l/min)

sec, 40 mm/sec の場合に, 後者の例が送り速度 100 mm/sec の場合に相当する。

Fig. 6 を焦点はずし距離をパラメータとし, 送り速度と切断幅の関係について示したのが Fig. 7 である。ただし, 送り速度 0 での切断幅は, パワー密度を求める際にろ紙で求めたビーム径を用いた。送り速度が増大するにつれ, 切断幅は, 焦点はずし距離が長い場合には曲線的に急激に狭くなり, 焦点はずし距離が短い場合にはやや狭くなるに過ぎない。これは, 焦点はずし距離が長くなるほどビーム中心強度のビーム直径に対する割合が小さくなり, パワー密度の低い領域がビーム周辺部から中心に向かって広がってくるためである。したがって, 切断位置を焦点位置に近付けるほど, 送り速度の変動による切断幅の変動が少なくなる。今, 送り速度の増大につれ, 切断幅が直線的に低下すると仮定するならば, 同図より切断の臨界送り速度を外挿で求めると, 焦点はずし距離 30 mm で 200 mm/sec, 焦点位置で 250 mm/sec になる。

Fig. 7. Kerf width versus feed speed for various defocus distance. (Power : 170 W, Assist gas : N₂ 10 l/min)

Fig. 8 は, 出力をパラメータとして送り速度と切断幅の関係を示したものである。切断はいずれもレンズの焦点位置で行ったもので, 出力が高い (パワー密度が高い) ほど送り速度の増大につれ切断幅が狭くなる度合 (曲線の接線の傾き) は小さくなる。これは, 焦点位置でのビームの横モードは中心部が高く周辺部へ行くほど末広がりになっているが, 出力が高いほどビーム周辺部のパワー密度の低い領域が少くなりその傾向が切断幅に現れているからである。

Fig. 8. Kerf width versus feed speed for various power. (Def. dis.: 0 mm, Assist gas : N₂ 10 l/min)

Fig. 9 は送り速度を 34.7 mm/sec にした場合, 切断できなくなるまで出力を段階的に低下させて切断し, 出力と切断幅の関係を求めた結果である。ろ紙, クラフト紙とも出力 2~2.5 W で切断不可能となり, 切断可能な最小出力での切断幅は約 0.15 mm であった。出力が 2.5 W 以上でろ紙よりもクラフト紙の切断幅が広がっているのは紙の厚さが異なる (ろ紙は 0.19 mm, クラフト紙は 0.11 mm) ことと CO₂ レーザ光のろ紙とクラフト紙に対する吸収率の差が影響していると思われる。

そこで, 厚さの異なるクラフト紙 (b), (c), (d) を同一照射条件で切断した結果が Fig. 10 である。(c) と (d) はコンデンサ紙で (b) に比べレーザー光の吸収率が若干異なることも考えられるが, いずれの切断条件でも紙厚の増大につれて切断幅が狭くなる傾向を示しており, Fig. 9 のクラフト紙 (厚さ 0.11 mm) よりろ紙 (厚さ 0.19 mm) の切断幅が狭くなる理由の一つになる。ここで

Fig. 9. Kerf width versus power. (Laser : (B), Def. dis.: 0 mm, Assist gas : N₂ 10 l/min, Feed speed : 34.7 mm/sec)

Fig. 10. Kerf width versus thickness of paper. (Laser : (B), Asist gas : N₂ 5 l/min, Feed speed : 33.0 mm/sec)

Fig. 9 のクラフト紙の切断幅と Fig. 10 のそれとが若干異っているが、ビームの横モードの変化などに起因する差と思われる。

一般に波長 λ (mm), ビーム径 D (mm) のレーザ光を焦点距離 f (mm) の収差のないレンズで集光した場合, その最小集光径 d (mm) は次式で与えられている。

$$d = f \cdot \theta = 2.44 \frac{f \cdot \lambda}{D}$$

ここで θ (rad) はレーザビームの開き角(全角表示)である。この式はレンズの焦点距離とレーザのビーム径によって最小集光径が決まることを意味し、Table II に出力が等しくレンズの焦点距離とビーム径 (いわゆるスポット径で表示) が異なる条件で紙を切断した結

果と最小集光径の計算値とを対比して示した。切断幅は計算した最小集光径のほぼ倍になっているが、最小集光径が大きくなると切断幅も広くなっており、レンズの焦点距離やビーム径の影響が現れている。

3・4 紙のレーザ切断におけるエネルギー効率

レーザによる切断加工をする場合、経験的に相当量のレーザ光が切断に費やされずに切断部を通過していることが知られている。そこで3種のクラフト紙とろ紙について出力を変えた場合、単位時間当たり除去された紙の体積と 3・2 項で述べたろ紙を単位体積当たり消失させるのに要する CO₂ レーザ光のエネルギーの結果をクラフト紙のそれと同じと仮定して、切断に費やされたエネルギーの照射したエネルギーに対する割合を求めると Table III のようになる。この結果は上述の仮定が含まれているためあくまで目安にすぎないが、照射したエネルギーの0.2~8.7%程度しか加工に費やされていないことになる。このことから紙の切断中にその下部でさらに加工が行えるほどレーザ光がむだに照射されている現象が説明できる。この原因は中心付近の強度が高く周辺部の強度が低い円形のビームを紙に照射すると、紙の加工(分解や蒸発)に要するエネルギー密度が低いため、ビーム周辺部に紙がくるやいなや加工されて消失し、ビーム中心付近のレーザ光は加工する対象物がなく、そのまま通過してしまうためである。

4 結 言

本実験で得られた結果をまとめると、次のようになる。

Table II. Comparison of kerf width and minimum spot diameter between the two laser processing conditions.

Laser	Lens & focal length (mm)	Power (W) & beam diameter (mm)	Feed speed (mm/sec)	Asist gas (l/min)	Kerf width (mm)	Minimum spot dia. calculated (mm)
(A)	KCl f=46	50	33.0	N ₂ 10	0.276	0.108
		6.3			0.250	
(B)	Ge f=64	50	34.7	Ar 10	0.464	0.263
		11.0			0.494	

Table III. Laser energy efficiency at paper cutting. (Defocus distance : 0 mm)

Material and thickness of paper : t (mm)	Power (W)	Feed speed (mm/sec)	Kerf width (mm)	Removed volume per second (mm ³ /sec)	Energy required for the removed volume (J)	Energy efficiency for the removal (%)
Condenser paper t=0.02	6	33.0	0.337	0.222	0.0511	0.85
	45	33.0	0.632	0.417	0.0959	0.21
Condenser paper t=0.08	6	33.0	0.253	0.668	0.154	2.6
	45	33.0	0.494	1.304	0.300	0.67
Kraft paper t=0.11	2.6	34.7	0.157	0.599	0.138	5.3
	6	33.0	0.191	0.693	0.159	2.7
	45	33.0	0.343	1.245	0.286	0.64
Filter paper t=0.19	2.3	34.7	0.132	0.870	0.200	8.7
	5.6	34.7	0.172	1.134	0.261	4.7
	37	34.7	0.429	2.828	0.650	1.8

(1) ろ紙の切断部両縁に液滴状固形物の付着現象が認められ、この物質は水溶性でセルロースの熱分解生成物が溶融固化したものと思われる。

(2) この固形物の色や付着量は切断条件によって大幅に変化し、焦点は少し距離を短く送り速度を速くするにつれ色が茶色→黄色→無色透明となり付着量も少くなる傾向が認められた。なお、ある条件下での固形物の付着量は消失したろ紙の重量の3.4%であった。

(3) 本実験の範囲内でろ紙の臨界加工エネルギー密度は約6.5 mJ/mm²、単位体積のろ紙を消失させるのに要したエネルギーは約0.23 J/mm³であった。

(4) ろ紙・クラフト紙とも送り速度34.7 mm/sec (約2 m/min) の場合、切断可能な最小出力は約2.5Wであった。

(5) レンズやレーザ加工機の違いによって切断幅が大きく左右され、切断幅は理論的に求めたビームの最小集光径の約2倍になった。

(6) レーザで紙を切断する場合、ビーム周辺部に紙が達するやいなや加工されて消失し、ビーム内側の大部分のレーザ光は切断仕事を行うことなく通過する。そのため、切断のエネルギー効率は極めて悪く、クラフ

ト紙とろ紙についての略算結果では0.2~8.7%に過ぎなかった。

本実験は筆者の一人服部が東芝に在職中に行ったものであり、これを遂行するにあたりご協力下さった東芝生産技術研究所レーザグループの皆さまに謝意を表します。

(昭和52年4月3日 第27回日本木材学会大会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 占部聡長, パッケージング, No.226, 102 (1976).
- 2) Miller, J. E., and J. A. Wineman, Metal Progress, **111**, 5, 38 (1977).
- 3) Sanders, B. A., and V. G. Gregson, Proc. Electro-Optical System Des. Conf., Nov., 24 (1973).
- 4) Miller, C. H., T. A. Osial, and A. Jagt, Pulp Paper Mag. Can., **71**, 16, 63 (1970).
- 5) Nordin, S. B., J. O. Nyren, and F. L. Back, Svensk Papperstidning, **16**, 609 (1973).
- 6) 戸根春子, 岡村圭造, 岡本 一, 服部順昭, 第27回日本木材学会大会要旨集, 53 (1977).
- 7) Gregson, V. G., and B. A. Sanders, Proc. Tech. Program Electro Opt. System Des. Conf., 237(1974).