

CO₂ レーザによる樹脂シートの薄膜加工技術に関する研究

岐阜大学 電気電子・情報工学科

助教 亀山 展和

(2021 年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2021243-C2)

キーワード: CO₂ レーザ, レーザ加工, ポリプロピレン, ポリエチレンテレフタレート

1. 研究の目的と背景

CO₂ レーザは比較的安価に大出力を得られるため、様々な材料の切断などの加工に使用されている。特に樹脂素材は CO₂ レーザの波長帯の吸収率が高く、高速な加工が可能でランニングコストが低いため、樹脂製品の加工に CO₂ レーザが広く使用されている。

近年マイクロプラスチックやプラスチックごみが問題となっている。そのため、プラスチック使用量の削減の一環として、プラスチックの効率的な利用を可能にする加工方法が求められている。

筆者らは CO₂ レーザを用いて厚さ数百 μm 程度の樹脂シートを部分的に薄膜にする新たな加工方法を開発した¹⁾。樹脂の裏面に銅板を当てた状態でレーザ加工することで 50 μm 程度の薄膜部を形成することができる。フェムト秒レーザのような短パルスレーザを使用すれば精度よく同様の加工を行えるが、加工に時間がかかる。一方、この加工方法では高速な加工が可能、既存の装置への導入が容易、動的な制御が不要なため、安価な樹脂素材の加工に適している。また、プラスチック容器を部分的に薄くすることによるフレキシブルな構造の実現などへの応用が期待される。この加工方法を応用していくために膜形成のメカニズムを明らかにすることが不可欠である。

本論文では、樹脂シートの材質、厚さとの関連性と熱的解析から薄膜形成メカニズムの検討を行った。

2. 実験方法

図 1 に、実験配置図を示す。穴の開いた銅板の上に樹脂シートを置き、銅板に空いた穴から真空ポンプを用いて負圧にし樹脂シートと銅板を密着させ、大気雰囲気下、室温で CO₂ レーザを照射する。CO₂ レーザはガルバノ式で波長 10.6 μm、出力 30 W、焦点距離 150 mm、集光径約 300 μm、走査速度 1~500 mm/s で走査する。

使用する樹脂シートはポリプロピレン (PP)、ポリエチ

レンテレフタレート (PET)、ポリスチレン (PS)、ポリテトラフルオロエチレン (PTFE) で、それぞれの各種物性を表 1 に示す。

3. 実験・考察

3・1 PP, PET, PS, PTFE の薄膜加工

それぞれ厚さ 300 μm の PP, PET, PS, PTFE のシートを用いて銅板がある場合とない場合で実験を行い、各樹脂シートの銅板による効果の検証を行った。図 2 にレーザ条件 167 J/cm² での PP の薄膜加工例を示す。加工部の底の膜厚の厚さと加工前の表面の高さでの溝幅を計測する。

図 3 に各樹脂シートの加工後の膜厚を示す。銅板を使用しない場合、レーザのフルエンスを増加させるとどの樹脂シートも薄膜が残ることなく貫通した。銅板を使用した場合、PP ではフルエンスが約 170 J/cm² で膜厚の減少が止まり、膜厚は約 70 μm となった。PET では約 130 J/cm² で 50

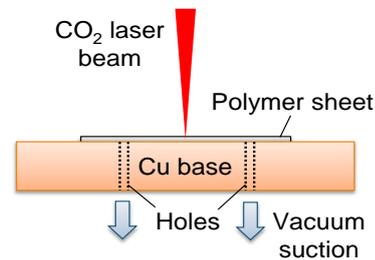


図 1 実験配置図

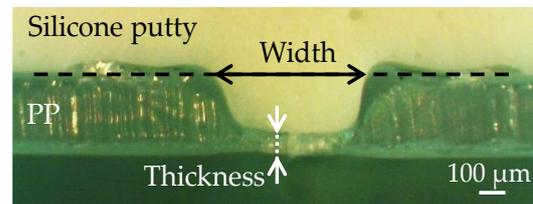


図 2 PP の加工断面図

表 1 各樹脂シートの各種物性.

	潜熱 (25°C) [J/g·°C]	熱伝導率 [W/m·K] ²⁾	融点 [°C]	分解温度 [°C]	吸収係数 (10.6 μm) [cm ⁻¹]	熔融粘度 [Pa·s]
PP	1.46	0.12	164	459	30	10 ³ (290 °C)
PET	1.37	0.15	250	420	110	10 ² (280 °C)
PS	1.51	0.14	–	413	93	10 ³ (270 °C)
PTFE	1.05 ²⁾	0.25	327 ²⁾	540 ²⁾	50	10 ¹⁰ (380 °C) ²⁾

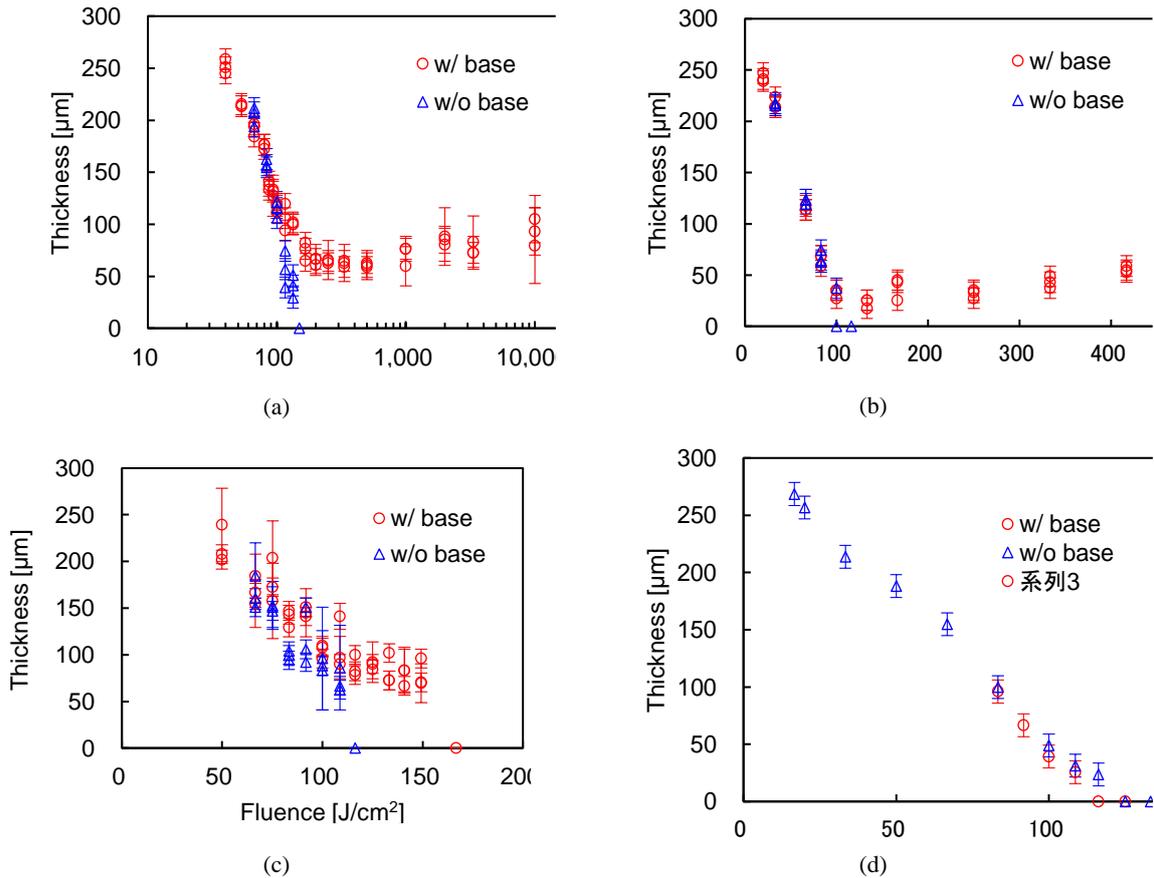


図3 銅板有り, 無しによる加工後の膜厚, (a) PP, (b) PET, (c) PS, (d) PTFE

μm 程度の薄膜が形成され、500 J/cm² で部分的な貫通が見られた。PP, PET どちらもフルエンスの増加に伴い、膜厚がやや増加する傾向が見られる。また、PS でも銅板の効果は見られたが、薄膜が形成されるフルエンスの領域は狭く、膜厚は約 100 J/cm² であった。PTFE では銅板の影響は見られず、ほぼ同じフルエンスで貫通した。

まず、銅板による冷却効果を考える。銅の熱伝導率は約 400 W/m·K と樹脂の千倍以上であり、銅の CO₂ レーザ吸収率は 1% 以下とレーザによる加熱もほぼ無いため、効果的に樹脂を冷却していると考えられる。樹脂の熱伝導率は表 1 に示すように素材により大きな差はないため、薄膜加工が実現しなかった PTFE にも他の樹脂と同様の冷却効果があると考えられる。また、銅板の代わりに鉄板を使用した場合、鉄はレーザ吸収率が約 10% あるにもかかわらず銅板を使用した時と同じ膜厚が残ることが分かっている¹⁾。仮に、樹脂と銅板との間で熱平衡になり薄膜が形成されている場合、膜厚は板の温度に依存して変化するため、レーザ吸収率の高い鉄の場合、銅板の温度が上昇し膜厚が薄くなると推察される。よって薄膜の形成には熱の影響が小さいと考えられる。

次に、熔融粘度に注目すると、薄膜加工が実現しなかった PTFE のみ熔融粘度が桁違いに大きい。このことから薄膜の形成には熔融状態にある樹脂の流動性が影響していることが考えられる。図 4 にレオメータで測定した PP,

PET, PS の熔融粘度の温度特性を示す。PP, PET では熱分解直前の温度で熔融粘度が 10 Pa·s 以下まで減少しており、PS では 100 Pa·s 程度となっている。以下では高い流動性を示す PP, PET について検証を行う。

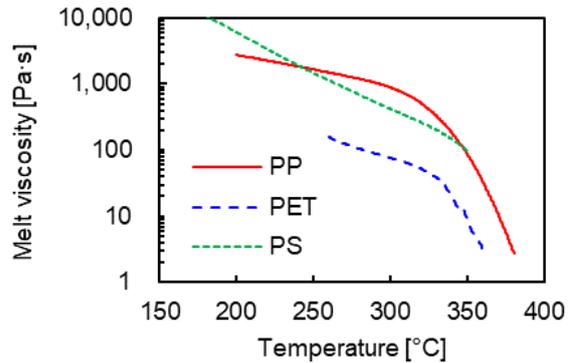


図4 PP, PET, PS の熔融粘度

3・2 樹脂シートの厚さと薄膜厚さ

樹脂シートの厚さが形成される薄膜の厚さに与える影響について検証するため、厚さ 0.24 mm, 0.50 mm の PP, 厚さ 0.20 mm, 0.54 mm の PET を使用して、3・1 と同様の条件で実験を行った。

図 5 に PP の、図 6 に PET の薄膜加工の膜厚と溝幅を示す。PP, PET どちらも厚いサンプルの方で形成される膜

厚の方が厚くなり、溝幅はサンプル厚さに依存しない結果となっている。

3・1, 3・2 の実験結果より、薄膜形成メカニズムは以下のように考えられる。レーザー照射により分解温度以上に加熱された部分は蒸散し、その周辺の流動性を示す溶融部が溝の底に流れ込み膜を形成する。厚いサンプルの方が溶融部の体積が多くなり、溝幅は同程度のため、厚いサンプルの方が厚い膜が形成されると考えられる。PP でフルエンスの上昇に従い膜厚が厚くなるのは、フルエンスが大きいとレーザーの走査速度が遅くなり、熱伝導により溶融部の体積が増加した結果と考えられる。

3・3 熱モデルと疑似流体モデルによる薄膜加工シミュレーション

PP, PET に対して 2D の熱モデルによるレーザー薄膜加工のシミュレーションと熱モデルに疑似的な流動を考慮した疑似流体モデルによるシミュレーションを行う。厚さ 300 μm の樹脂の表面は 20 $^{\circ}\text{C}$ の空気と接しており、裏面は 20 $^{\circ}\text{C}$ の銅板と隙間なく密着している。x 軸は水平方向、z 軸は深さ方向、レーザー光は半径 150 μm の 2D ガウシアンビームで y 方向に走査する。樹脂によるレーザー光の吸収はランバート・ベールの法則に従い、樹脂を透過したレーザー

光は銅板表面で反射され、反射光も同様に吸収される。樹脂表面でのレーザー光反射と銅板による吸収は無視する。熱伝導は x-z 平面の樹脂内のみ考慮し、x 軸長さは半径の 5 倍で左右の境界では片方は対称面、もう片方は 20 $^{\circ}\text{C}$ 一定となっている。樹脂の液相は考慮せずに溶融の潜熱は、分解温度までの総熱量が同一になるように比熱に組み込まれている。分解温度まで加熱され分解の潜熱以上のエネルギーを得た部分は大気に置き換えられて、レーザー光に対して透明になる。樹脂表面と空気の熱伝達係数は 5 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、樹脂裏面と銅板の熱伝達係数は 1500 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})^3$ であり、分解後に置き換えられた空気との熱伝達は考慮しない。表 1 以外の物性値は PP, PET それぞれ比熱 2.77 $\text{J}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$, 2.00 $\text{J}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$ 、密度 0.90 g/cm^3 , 1.37 g/cm^3 , 分解の潜熱 378 J/g , 184 J/g である。疑似流体モデルでは熱モデル計算後、溶融粘度が 100 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以下の部分を底に均すことで樹脂の流動を模擬している。

図 7 に 167 J/cm^2 での PP, PET の熱モデルによるシミュレーション結果を示す。どちらもほぼ膜が残らない結果となっている。図 8 にフルエンスと膜厚の関係を示す。熱モデルでは PP, PET ともにフルエンスの増加に伴い膜厚が急速に減少しほとんど残らないが、疑似流体モデルでは PP, PET ともに貫通することなく膜が形成され、定性的

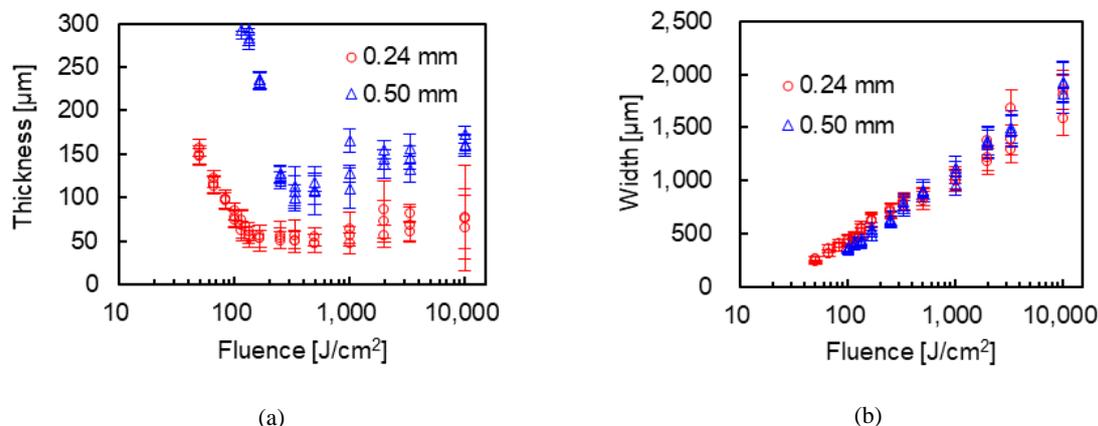


図 5 厚さ 0.24 mm(a)と 0.50 mm(b)の PP の膜厚と溝幅

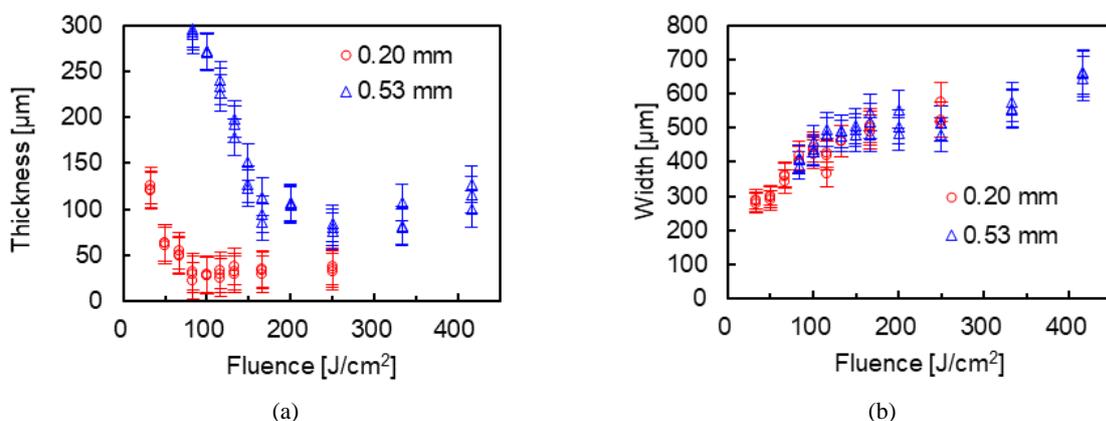


図 6 厚さ 0.20 mm(a)と 0.53 mm(b)の PET の膜厚と溝幅

ではあるが実験結果の膜厚の傾向を再現できている。シミュレーションの結果からも薄膜形成のメカニズムとして熱的影響より樹脂の流動性が主な要因であることが示唆される。

4. 結論

本研究では CO₂ レーザによる樹脂シートの薄膜加工のメカニズムについて熱的影響と流体的影響から検証を行った。

実験結果とシミュレーション結果より薄膜形成において熱的影響は小さく、流体的影響が支配的であることが分かった。薄膜形成のメカニズムとして、レーザ照射により分解せず加熱のみされて熔融し流動性を示す部分が加工部の溝の底に流れ込むことで薄膜が形成されていることを明らかにした。

以上の本研究の成果は国際論文誌「Polymers」に「The effect on thin-film formation of the polymer sheets by the CO₂

laser with the copper base」というタイトルで掲載された。

謝 辞

本研究の遂行にあたりご支援いただきました公益財団法人天田財団に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) N. Kameyama, H. Yoshida, H. Fukagawa, K. Yamada, M. Fukuda: *Polymers* **13** (2021) 1448.
- 2) H.F. Mark: *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, 2nd ed.; Wiley: New York, NY, USA, 1985.
- 3) A. Bendada, A. Derdouri, M. Lamontagne, Y. Simard: *Appl. Therm. Eng.* **24** (2004) 2029.
- 4) J.I. Kroschwitz: *Concise Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*; John Wiley & Sons: New York, NY, USA 1990.

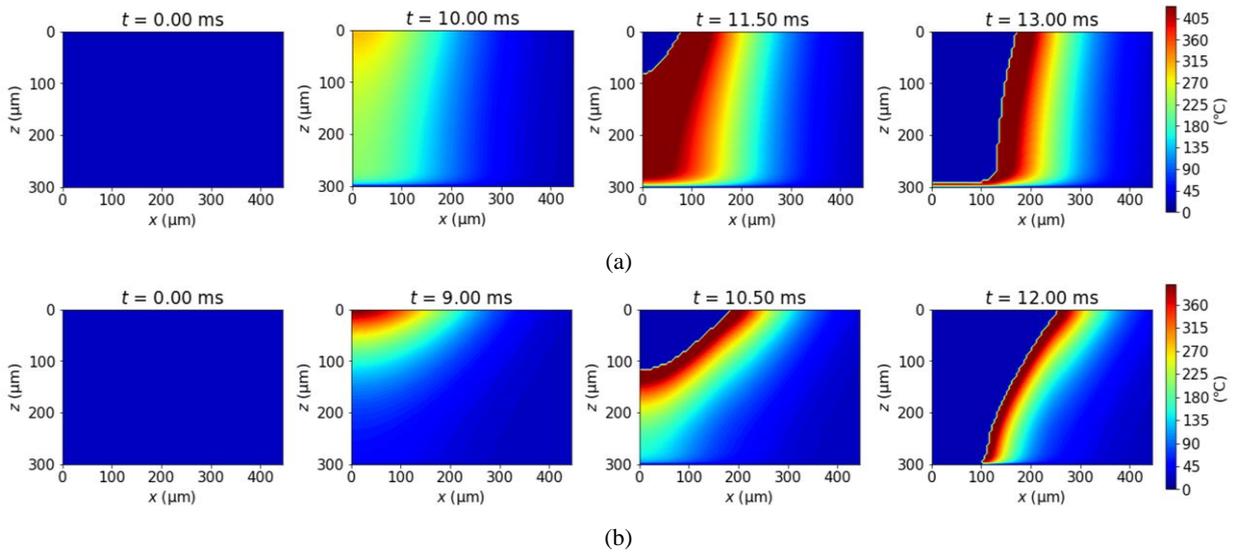


図7 167 J/cm²での熱モデルによる計算結果。(a) PP, (b) PET.
t = 0 の時、レーザの中心は x-z 面から 750 μm 離れている。

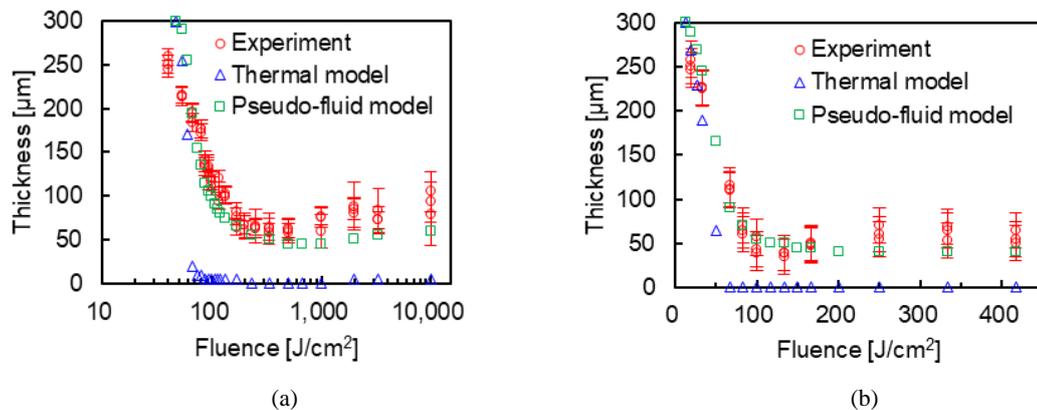


図8 実験結果と熱モデル、疑似流体モデルの比較。(a) PP, (b) PET.