

高出力ファイバレーザによる銅箔の高速切断

High Speed Cutting of Copper Foil by High Power Fiber Laser

電気電子情報通信工学専攻 植村 良輔

10N5100010D Ryosuke UEMURA

1. はじめに

近年、産業界では環境負荷の低減を目指した傾向が進んでいる。自動車・輸送車業界では、ハイブリッド電気自動車 (HEV) への採用が 2011 年度以降に本格化するとされており、ハイブリッド電気自動車用バッテリーのリチウムイオン二次電池の需要の増加が見込まれる。そのため、リチウムイオン電池の利用拡大に伴う生産能力の増強に対応する必要がある。リチウム電池には電解銅箔が使用されており、この電解銅箔の従来の刃物を用いた切断工程の調整には現場作業者の技術を要するため多大な労力と時間を費やしている。この工程の劇的な改善は電解銅箔の製造コストを下げることに伴い、リチウム電池のコスト削減にもつながると考えられる。この従来の切断工程の改善策の一つとして非接触切断が可能で、材料に対する力学的な負荷や汚染がない、切断される材料の熔融・切断幅および熱影響層がきわめて小さい、機械加工のような工具の摩耗、振動、騒音がない、などの利点を持つレーザ切断加工技術が挙げられる。

本研究では、低コスト、高品質な電解銅箔の供給を実現する精密切断装置の開発に関する基礎的な加工情報を得るために、ビーム品質が非常に高く、高出力、高効率・小型・軽量でありメンテナンスも不要という利点を持ち CO₂ レーザの独壇場であった切断市場に参入しつつあるファイバレーザを使用し加工方法の可能性を探る。切断実験から良好な切断面状態が得られる最適条件を探る。そして、切断後に生じる切断幅、盛り上がり高さなどの現象を温度分布解析、熱流体解析ソフトによるシミュレーションを用い理論的評価を試み、実用的な精密切断装置の開発に結び付く知見を得ることを目的とする。

2. 切断実験方法

実験には IPG 社製ファイバレーザ YLR-300-SM (波長 1070 nm、最大出力 300 W) を使用した。このレーザに使用された伝送ファイバのコア径は 9 μm である。光学系には Sill Optics 社製のコリメータレンズ $f_c = 50 \text{ mm}$ と f_0 レンズ $f_0 = 100 \text{ mm}$ (掃引範囲 70 mm 角)、切断速度 (送り速度) は高速のためガルバノスキャナー Scan Lab 社製

Hurry Scan 10 (最高速度 600 m/min) を使用した。切断実験の際、材料である板厚 8 μm (縦: 約 60 mm、横: 約 80 mm) の銅箔をアルミの台の上でスリットのついた SUS の薄板 2 枚で挟み固定した切断時にはガルバノスキャナーを用いることでステージを移動させずにレーザ光を材料に照射させた。銅箔 1 枚内に 1 回から 4 回切断を行った。

3. 切断実験

実験にはアシストガスを使用せず、切断速度を 100 m/min から 400 m/min まで 100 m/min 毎に、出力を 50 W から 300 W まで 50 W 毎に変化させて銅箔の切断を行った。レーザ切断後、レーザ熱源の通過によって生じる切断溝の観察を行った。測定には汎用三次元表面構造解析装置 (Zygo New View 7200) を使用した。測定倍率はともに 50 倍である。例として図 1 にレーザ出力 200 W、切断速度 200 m/min、図 2 にレーザ出力 300 W、切断速度 400 m/min の条件時の切断写真を示す。写真内中央の黒くなっている部分が切断溝である。

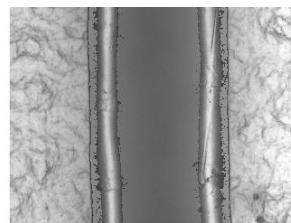


図 1 レーザ出力 200 W、
切断速度 200 m/min

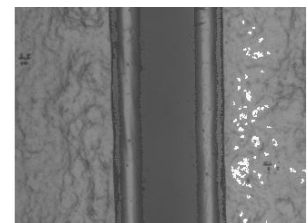


図 2 レーザ出力 300 W、
切断速度 400 m/min

図 3 にレーザ出力別の切断速度と切断幅の関係を示す。切断速度が速くなるにつれて全ての条件下で切断幅は狭くなっている。これは切断速度が速い方が材料のある一点に照射されるレーザ熱源の時間が短い材料表面への熱影響が抑えられていることを表わしている。よって、切断状態を良好にし、かつ切断幅を抑えるためには切断速度が速ければ速いほどより良好な切断が可能であることが分かる。

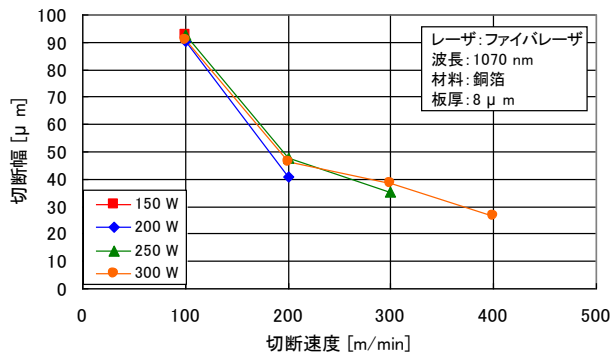


図3 切断速度と切断幅

4. 盛り測定

図1、図2から切断後に切断溝の両脇に盛りが生じることが確認できた。この盛り部分の確認をするために材料の切断面観測を行った。測定には走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope) を使用した。盛り写真の一例として図4にレーザー出力300 W、切断速度200 m/minの場合の切断面写真を示す。盛り部分の形状が球状になっていることが確認できた。

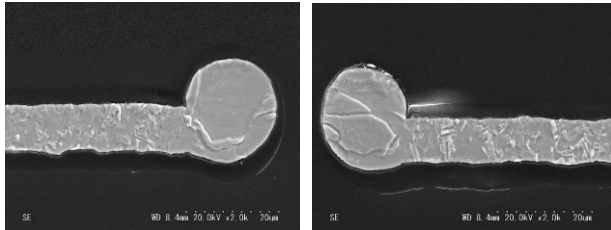


図4 レーザ出力300 W、切断速度200 m/min

5. 母材組織観察

切断時に熱影響が母材のどの部分まで及んでいるかを確認するため切断試料を切り出し、研磨し、エッチングを行ってから母材組織観察を行った。その際、測定には走査型電子顕微鏡を用いて行った。同一試料に対して三箇所測定を行った。この観察の概略図を図5に、観察写真を図6、図7に示す。測定倍率は2000倍と5000倍である。測定に使用した試料はレーザー出力が300 W、切断速度が200 m/minであり、アシストガスを使用しなかった時のものである。図6、図7の三箇所を比較してみると母材組織に変化は見られない。また図4と三箇所の母材組織を比較してみてもレーザー切断により丸くなった銅箔部分以外は母材組織に変化が見られないことが確認できる。

即ち、丸くなった溶融部分でのみ組織が変化している。これより熱影響が及んでいるのは先端部分のみであり根元部分は溶融もしておらず高温になった履歴もないものと考えられる。

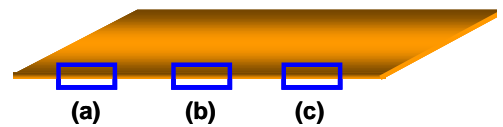


図5 観察部分

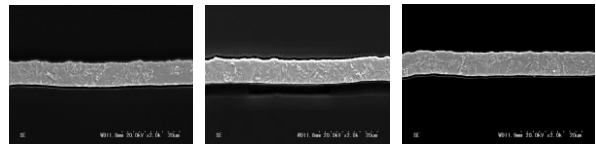


図6 レーザ出力200 W、切断速度200 m/min

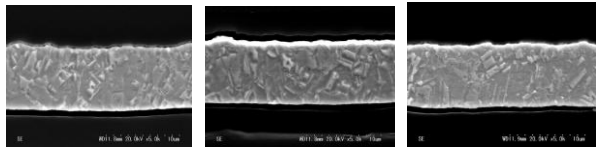


図7 レーザ出力200 W、切断速度200 m/min

6. 表面温度分布の計算

切断溝はアシストガスの運動エネルギーによって溶融部分の大半が強制的に除去されることにより形成される。移動線熱源の式を用いて銅箔表面の温度分布計算を行うことにより、この切断溝を計算値と実測値を比較する。移動線熱源の式は次の通りである。

$$\Theta = \frac{\epsilon W}{2\pi\lambda l} e^{-\frac{vx}{2\alpha}} K_0\left(\frac{vr}{2\alpha}\right) \quad (1)$$

ϵ は吸収率、 W はレーザー出力、 λ は熱伝導率、 l は板厚、 v は切断速度、 x は座標、 α は熱拡散率を表わしている。

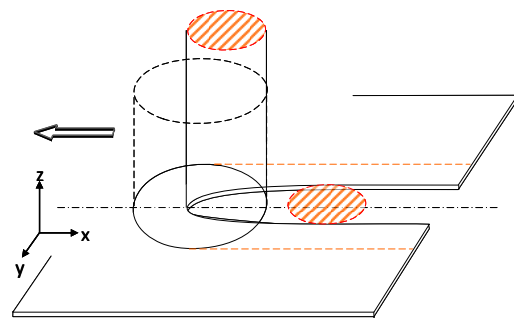


図7 熱源通過モデル図

計算では実測の集光スポット径の数値である $20\ \mu\text{m}$ を使用する。温度分布図は材料表面を熱源が x 軸のマイナス方向に進み通過したとき、熱源通過後の y 軸方向に熱がどのように伝わっているのかを等温線で表している。熱源通過中のモデル図を図 8 に示す。温度分布計算に熔融温度を $1000\ \text{C}$ 、蒸散温度を $2500\ \text{C}$ に設定している。図中の太い赤線は熔融幅、一番内側の太いオレンジ線は切断溝を表している。また、移動線熱源で熱伝導論的に計算された温度分布はガス噴流の影響は考慮されていない。計算結果の一例として図 9 にレーザー出力 $300\ \text{W}$ 、切断速度 $200\ \text{m/min}$ の場合の温度分布図を示す。

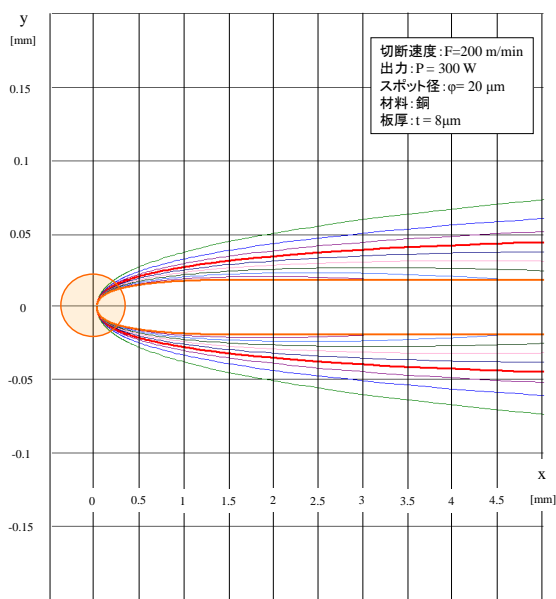


図 8 温度分布図 (レーザー出力 $300\ \text{W}$, 切断速度 $200\ \text{m/min}$)

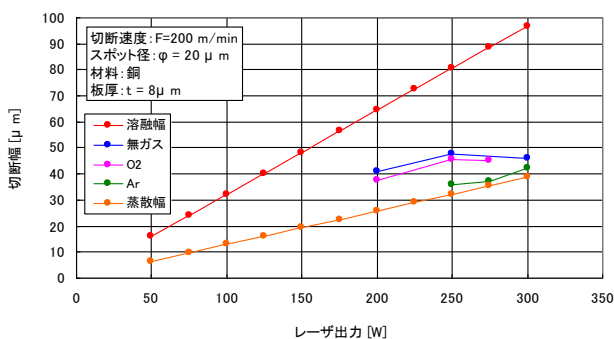


図 9 計算と実測値比較

温度分布計算から得られた熔融幅、蒸散幅と実測値の比較を行った。一例として切断速度 $200\ \text{m/min}$ の場合のレーザー出力と熔融幅、切断 (溝の部分) 幅の関係を図 9

に示す。レーザー出力が高くなるにつれ、熔融幅、切断溝との関係は線形的に増えている。実測値の値はすべて熔融幅と切断溝の範囲内となっておりレーザー光の熱源が通過し、銅箔材料は消失していることがわかるが蒸散幅よりも実測値は大きくなっている。これは熱源通過後に熔融部分が固まり、切断溝部分より切断幅が広がるか蒸発に加え飛散している可能性も考えられる。

7. シミュレーション

レーザービームの通過により起こる銅箔の切断面の挙動を確認するため、三次元汎用熱流体解析ソフト (CHAM PHOENICS) を用いてシミュレーションを行った。設定値は切断実験後の切断面状態が良好であったレーザー出力 $300\ \text{W}$ 、切断速度 $200\ \text{m/min}$ の場合を用いた。図 10 にシミュレーションから得られた銅箔の切断面の挙動結果、図 4 に銅箔の切断面写真を示す。図 10 の (1) から (5) まではビーム通過中の熔融断面の挙動を表わしており、図 10 の (6) から (8) まではビーム通過後の熔融断面が横方向に丸まっていく挙動を表わしている。

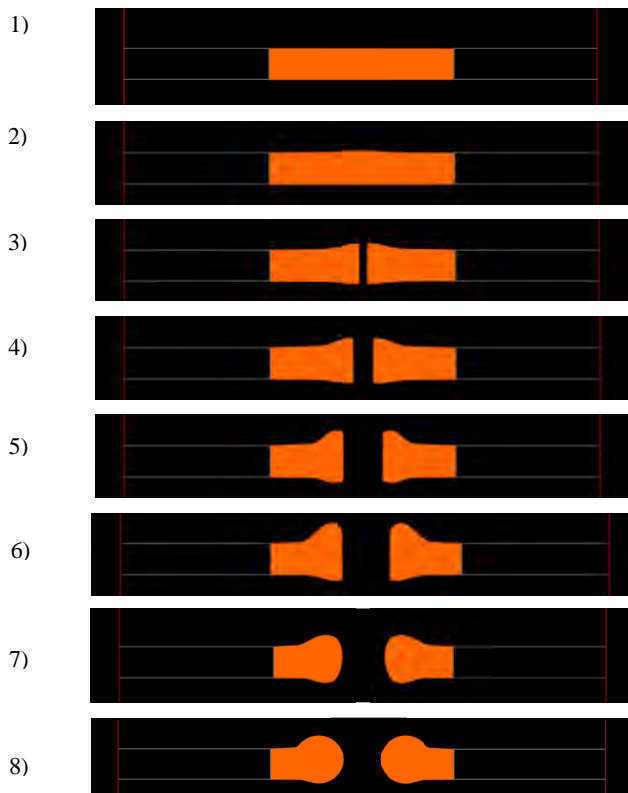


図 10 シミュレーション結果

ビーム通過から 14 μs 後から切断面は丸みを帯び始め最終的には図 4 の写真のように切断面は球状になり、実際の実験結果と切断面は同じような形状となった。図 11 はビーム通過後の断面部分の熔融金属のベクトルの流れを表わしたシミュレーション結果である。

切断面が丸くなる理由としては板厚が厚い材料に比べ 8 μm のような極薄い材料を切断する場合は厚み方向の熱伝導がほとんど無視でき熱の移動は二次元的（横方向）となる。その場合、急速に横方向に熱が広がる過程で材料表面に生じる表面張力の影響により熔融金属が端面で丸くなると考えられる。また同軸のアシストガスを用いる場合には、ガスの噴流の力学的エネルギーによって熔融部分の球状は下向きになることもある。

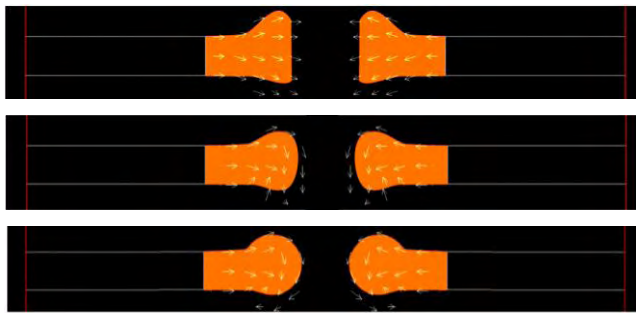


図 11 熔融金属のベクトルの流れ

8. 結論

切断速度が高速であり、かつレーザー出力が高くなるほど切断溝の幅は狭くなり、切断面は良好となることが確認できた。走査型電子顕微鏡を用いて切断後の切断面を観察することにより切断面の盛り部分が球状になっていることが確認できた。また、母材組織観察を行った結果、銅箔部分以外に母材組織の変化は見られず、球状の熔融部分のみ組織が変化していることが確認できた。

最終的な目標である盛りを抑える手法としては銅箔切断時のビームに 30°から 45°の角度を持たせて切断するというものがある。この場合はどちらか一方で盛りを低減できる。ビームの照射角度がどの程度で盛りに影響がでるか、盛りを最小に抑えることができるのはどの角度かを確認することが今後の課題と言える。

謝辞

本研究に取り組むにあたり、新井武二教授、庄司一郎教授、研究員の浅野哲崇さんより、多大なる御指導と御助言を戴いたことを心より深く感謝致します。また共に研究を進めてまいりました研究室の皆様には多くのご協力を

頂き、心より感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 久保田広：「光学」p 88, 岩波書店 (1975)
- [2] 川澄博通, 新井武二：レーザースポット径と焦点近傍におけるエネルギー分布, 昭和 54 年度精機学会秋季大会講演論文集, p 259 (1979)
- [3] 新井武二：レーザー加工光学系に関する研究, 第一報：全光学系を考慮した伝搬と切断特性, 砥粒加工学会誌, 50-7, pp.30-36 (2006)
- [4] Kogelnik, H. and Li, T. : Laser Beam and Resonators, Proceedings of IEEE, 54-10, p. 1312 (1966)
- [5] Dickson, L. D. : Characteristics of a Propagating Gaussian Beam, Appl. Optics, 9-8, p. 1854(1988)
- [6] H. S. Carslaw and J. G Jaeger: Conduction of heat in solids, Oxford Univ. Press (1959) p 267, p 490
- [7] W. W. Duley : CO2 Lasers, Effects and Applications, Academic Press. (1976) p 196
- [8] 新井武二：「レーザー加工の基礎工学」p328-329 丸善 (2007.1)
- [9] 竹生修己：「光エレクトロニクスとその応用」p232-237 オーム社 (2011.5)