

矩形モード型青色半導体レーザマルチビーム金属粉末堆積法を用いた飛行中金属粉末および基材への均一加熱による高品質な純銅コーティング膜形成

大阪大学 接合科学研究所

助教 竹中 啓輔

(2023年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2023235-C2)

キーワード：青色半導体レーザ、矩形モード、純銅

1. 研究の目的と背景

純銅は高い電気・熱伝導性、摺動性、高い抗菌・ウイルス不活化作用から様々な用途に使用されている。抗菌・ウイルス不活化作用に着目すると、純銅の表面では付着した様々な細菌・ウイルスが短時間で死滅・不活化することが知られている^{1,2)}。人の移動が多くかつ速い現代社会において感染症の拡大速度は速く、事前に感染症対策が万全な社会づくりをすることが次なる感染症の拡大防止のために必要である。特に不特定多数の人が触る箇所の接触感染防止策が重要である。純銅の抗菌・ウイルス不活化作用は高く、ステンレス表面では4時間活性を保つウイルスが純銅表面では数分で不活化することが知られている³⁾。しかしながら、純銅は強度が低く高価である⁴⁾。そのためステンレスで作られた部材の表面にのみ純銅コーティング膜を形成することで、強度を維持したまま表面に抗菌・ウイルス不活化作用を付与させることができると考えた。

純銅コーティング膜の形成方法として、純銅に対する光吸収率の高い青色半導体レーザを用いた金属粉末堆積法に着目した^{5,7)}。金属粉末堆積法は金属粉末を吹き付けながらレーザを照射することで金属皮膜を形成する方法である。中央から金属粉末を、周囲から複数のレーザを照射するマルチビーム金属粉末堆積法(図1(a, b))を用いることでレーザによる飛行中の金属粉末に対する入熱量が均一化され、基材の溶融を最低限にすることが可能である。しかしながら、マルチビーム金属粉末堆積法は金属粉末の付着効率(吹き付けた金属粉末量に対する基材への付着割合)が数%程度と低いという課題がある。また、基材への入熱量が不均一であるために基板に温度分布が発生し、皮膜と基板の混合層(希釈層)の制御が難しいという課題がある(図1(c))。そのため、少ない粉末使用量で希釈の小さい高効率高品質な純銅コーティング膜を形成する加工技術が必要であると考えた。

付着効率が低い原因として、ファイバ結合型青色半導体レーザは丸形であるために粉末及び基板への入熱量がスポットの中央と端で異なること(図1(b, c))、加工点における純銅粉末流の太さがレーザスポット径よりも大きいことが考えられる(図1(d))。上記課題解決のためには丸形のスポット径から形状を変える必要がある。先行研究に

おけるモデル⁷⁾を使用して飛行金属粉末の温度分布を数值計算した結果(図1(b, f))、粉末及び基板への均一な加熱のためには図1(e, f, g, h)に示すような矩形型のビームモードを使用することが有効だと考えた。そこで本研究では、2台の矩形モード型青色半導体レーザを搭載したマルチビーム金属粉末堆積法を用いてビームモードが純銅コーティング膜形成における純銅粉末の付着効率と純銅コーティング膜の希釈に与える影響を明らかにすることを目的とした。

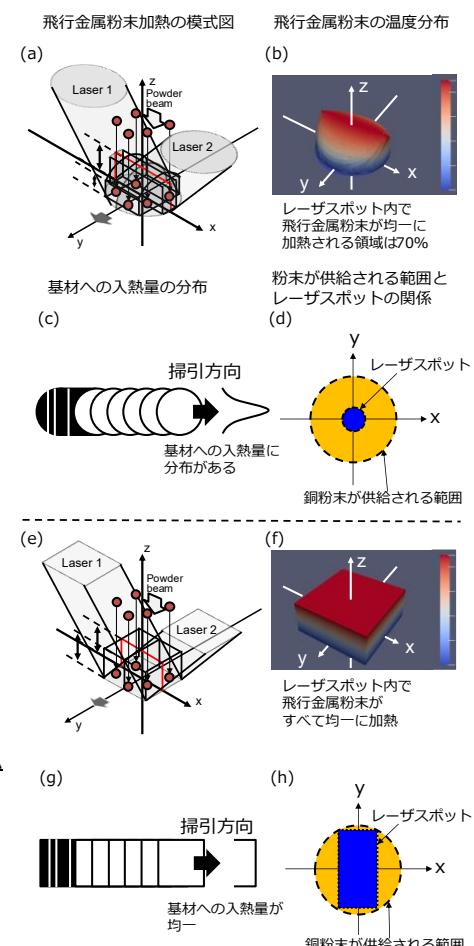


図1 飛行金属粉末温度分布および基材への入熱量のビームモードごとの比較

2. 実験方法

実験に用いたレーザの照射配置図と照射条件を図 2 および表 1 に示す。最大出力 200 W の島津製作所製青色半導体レーザ(Blue Impact)を 2 台搭載可能なマルチビーム照射加工システムを使用した。平均粒径が 34 μm の純銅粉末を 25, 50 mg/s の供給量で加工点に向けてアルゴンガスを用いて搬送した。基板にはステンレス(SS304)を使用した。レーザの掃引速度は 50 mm/s に固定し、レーザ出力を 90 W から 180 W まで変化させた。加工点でのビームプロファイルは、丸形を $\phi 260 \mu\text{m}$ (半値全幅), 矩形を 560 $\mu\text{m} \times 260 \mu\text{m}$ (半値全幅)とした。矩形ビームでは長手方向に掃引して純銅ビードを形成した。形成した皮膜は表面および断面を光学顕微鏡(VHX-5000, KEYENCE Co., Ltd.)を用いて解析し、断面の組成は SEM/EDX (VE-9800, KEYENCE Co., Ltd.)を用いて解析した。

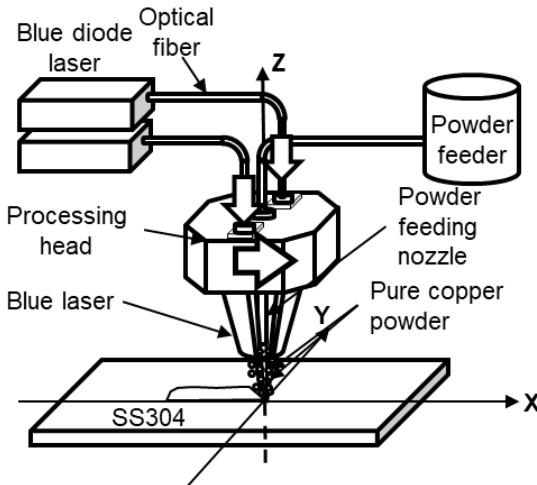


図 2 実験系のセットアップ

表 1 実験条件

項目	単位	丸形	矩形
基板の材質		SUS304	
基板サイズ	[mm]	50 x 50 x 3.0t	
レーザ波長	[nm]	450	
スポット径(半値幅)	[μm]	$\Phi 260$	560L \times 260W
スポット面積	[mm^2]	0.05	0.146
レーザ出力	[W]	90, 120, 150, 180	
粉末供給量	[mg/s]	25, 50	
レーザ照射角度	[°]	40	
ステージ掃引速度	[mm/s]	50	
シールド・収束ガス		Ar	
シールドガス流量	[L/min]	10	
収束ガス流量	[L/min]	3.5	

EDX を用いて計測した皮膜断面の組成から、皮膜と基板の混合層(希釈層)の計測を行った。基板および粉末が均一に加熱できている場合、希釈も皮膜内に均一となつていると予想される。そこで図 3 に示すように基板表面から深さ 1 μm の箇所を皮膜の幅方向に線分析を行い、以下の式 1 に示すように”希釈幅の割合”を定義した。希釈幅の割合が 0 に近づくほど、皮膜全域にわたって希釈の少ない高品質な皮膜であるという指標となる。

$$\text{希釈幅の割合} = \frac{\text{銅が } 20\text{wt\%} \text{ 以上希釈した幅}}{\text{皮膜幅}} \quad (\text{式 1})$$

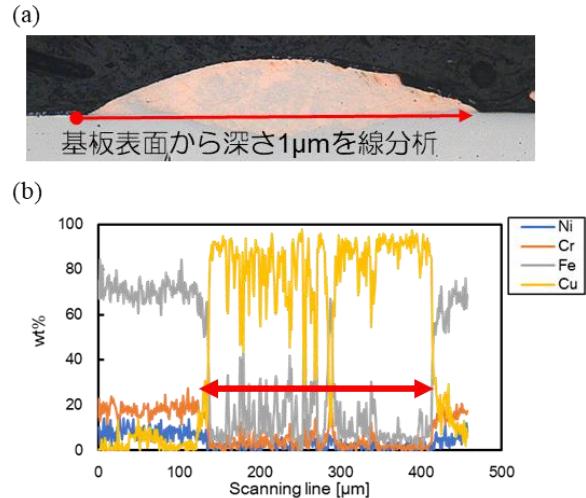


図 3 (a) EDX を用いた線分析を実施した箇所(赤線が計測箇所), (b) 線分析をした結果(赤線が希釈の幅)

3. 実験結果および考察

図 4 に形成した純銅皮膜の断面観察像を示す。丸形(図内左側)および矩形ビーム(図内右側)を用い、出力を 90, 120, 150 W に変化させて皮膜を形成した。粉末供給量は 50 mg/s と固定した。なお、出力 60 W では両ビームモードとともに皮膜は形成されなかった。丸形では 90 W の条件では基板と皮膜の混合層が少ないものの、120 W 以上の条件では基板と皮膜が混合する希釈が発生しており、断面の色の変化からも皮膜内に基板が溶け込んでいることがわかる。矩形ビームを用いた断面を観察すると 90 W および 120 W では目立った希釈が発生しておらず、150 W では基板内部に純銅が溶け込んでいる様子が観察された。丸形と比較して矩形ビームを使用することで基板と皮膜の希釈が少ない高品質な皮膜が形成されており、また皮膜体積も大きいコーティング膜ができていることがわかる。

皮膜の形成条件と、皮膜の断面積および付着効率を計算した結果を図 5 および図 6 に示す。粉末供給量は 25 mg/s(青色)および 50 mg/s(黄色)とし、丸形ビームを使用した結果を中実の丸で、矩形ビームを使用した結果を中

空の四角でプロットした。付着効率は粉体使用量のうち皮膜として形成された純銅の使用量を表したものである。図5から、すべてのレーザ出力において丸形と比較して矩形ビームを使用することで皮膜面積が増加する傾向にあることがわかった。また、粉末の供給量を変化させても皮膜面積は矩形の方が高い値であり、基板と粉末への加熱が均一であるために効率の良い成膜に繋がったと考えられる。続いて図6より、皮膜の付着効率が矩形ビームを使用することで向上していることがわかり、特に出力の低い領域において顕著な差があることがわかる。これは皮膜形成閾値近傍の照射条件であるために加熱量の均一/不均一差による影響がみられるためであると考えられる。

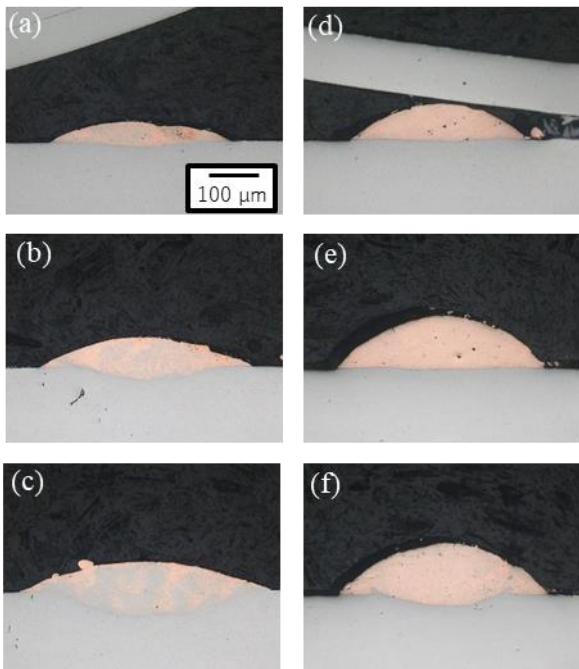


図4 純銅皮膜断面の光学顕微鏡観察像。丸形ビームを使用したレーザ出力(a)90 W, (b)120 W, (c)150 W の条件と矩形ビームを使用したレーザ出力(a)90 W, (b)120 W, (c)150 W の条件。

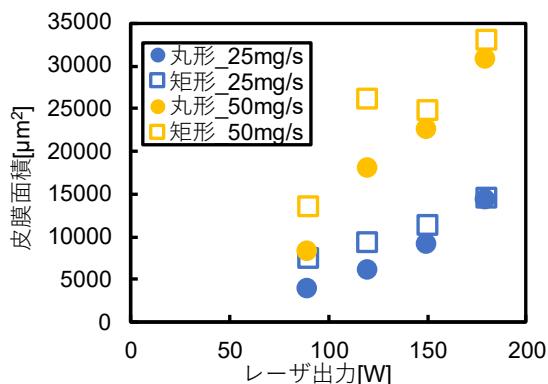


図5 ビーム形状ごとのレーザ出力と皮膜面積の関係

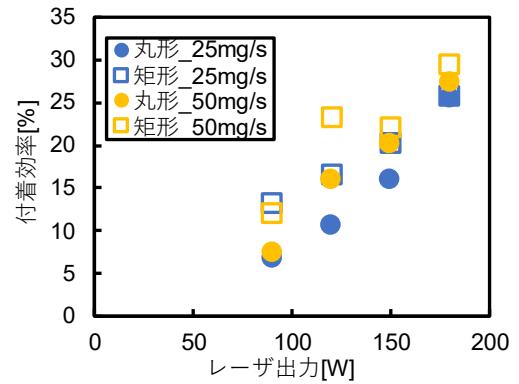


図6 ビーム形状ごとのレーザ出力と付着効率の関係

粉末供給量 50 mg/s の条件で希釈幅の割合を計測した結果を図7に示す。丸形についてはどのレーザ出力でも0.8程度で推移しており、皮膜幅に対して8割程度の幅で希釈が起こっていることがわかる。対して矩形ビームにおいては出力の増加に伴って希釈幅の割合が増加する傾向であり、90 W から 150 W の範囲では 0.4 から 0.5 程度であったのが出力 180 W においてほぼ 1.0 と急激に増加した結果となった。出力が低い条件では丸形ビームと比較すると矩形ビームを用いることで希釈幅の割合を約半分程度に軽減することができており、基板および粉末への均一な入熱により皮膜全体における希釈を低減させることができたと考えられる。また、矩形ビームを用いた際に出力 180 W では希釈幅の割合が極端に増加し、丸形ビームよりも希釈幅の割合が高い結果となった。これは矩形ビームの中央および端の両方において希釈が発生する過入熱な条件となったためだと考えられ、均一な加熱がゆえに変曲点が生まれたものだと考察される。

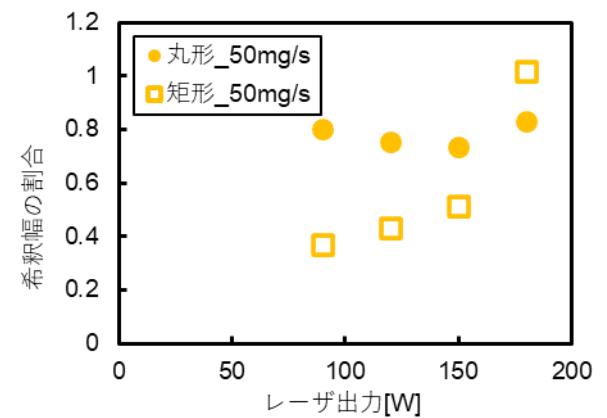


図7 レーザ出力と希釈幅の割合の関係

4.まとめ

矩形および丸形ビームを照射可能な2台の青色半導体レーザを搭載したマルチビーム金属粉末堆積法を用い、ビームモードが純銅コーティング膜形成における純銅粉末

の付着効率と純銅コーティング膜の希釈に与える影響を明らかにした。

矩形ビームを用いてステンレス基板に純銅皮膜を形成し、空間的な入熱分布の変化が皮膜の形成効率と希釈に与える影響を実験的に調査した。50 mg/s の粉末供給量で銅皮膜を形成したところ、形成される皮膜面積が矩形ビームを用いることで増加し、付着効率は最大で 2 倍に上昇した。EDX を用いて皮膜断面の組成解析を行ったところ、矩形ビームを用いることで全体的な希釈が低減されたことに加え、皮膜断面の中心と端での希釈量の差が小さくなることがわかった。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の 2023 年度 奨励研究助成（若手研究者枠）AF-2023235-C2 の多大なご支援により実施されたことをここに深謝する。

参考文献

- 1) G. Grass, C. Rensing, and M. Solioz, “Metallic copper as an antimicrobial surface,” *Appl. Environ. Microbiol.* 77, 1541–1547 (2011).
- 2) J. Konieczny and Z. Rdzawski, “Antibacterial properties of copper and its alloys,” *Arch. Mater. Sci Eng.* 56, 53–60 (2012).
- 3) 一般社団法人日本銅センター, “試験データ集：私たちの身近に潜む菌・ウイルスに関する試験”, <https://www.jcda.or.jp/speciality/koukin/contents01/index.html>, (参照 2025-05-31)
- 4) The Japan Institute of Metals and Materials, Metal Handbook (Maruzen, Tokyo, 2004).
- 5) K. Asano, M. Tsukamoto, Y. Sechi, Y. Sato, S. Masuno, R. Higashino, T. Hara, M. Sengoku, and M. Yoshida, “Laser metal deposition of pure copper on stainless steel with blue and IR diode laser,” *Opt. Laser Technol.* 107, 291–296 (2018).
- 6) K. Takenaka, Y. Sato, K. Ono, Y. Funada, and M. Tsukamoto, “Pure copper layer formation on stainless-steel and aluminum substrate with a multibeam laser metal deposition system with blue diode laser,” *J. Laser Appl.* 33, 042033 (2021).
- 7) K. Morimoto, Y. Sato, K. Takenaka, Y. Funada, Y. Hayashi, N. Abe, and M. Tsukamoto, “Effect of particle size distribution on pure copper layer formation in a multi-beam laser cladding system with pure copper powder and two blue diode lasers,” *Appl. Phys. A* 129, 12 (2023).