The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	純銅溶接時に発生する青色半導体レーザー誘起プルームの分光解析
Author(s)	竹中, 啓輔; 須藤, 真央; 藤尾, 駿平 他
Citation	銅と銅合金. 2024, 63(1), p. 171-175
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/98530
rights	© 2024 日本銅学会
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

［論 文］

純銅溶接時に発生する青色半導体レーザー誘起プルームの分光解析

大阪大学　接合科学研究所　竹中啓輔*
大阪大学大学院　工学研究科　大学院生　須藤真央
大阪大学大学院　工学研究科　大学院生　藤尾駿平
大阪大学　接合科学研究所　水谷正海
大阪大学　接合科学研究所　佐藤雄二
大阪大学　接合科学研究所　塚本雅裕

Spectroscopic Analysis of Blue Diode Laser Induced Plume Generated by Welding of Pure Copper

Joining and Welding Research Institute, Osaka University　Keisuke Takenaka
Graduate School of Engineering, Osaka University, Graduate Student　Mao Sudo
Graduate School of Engineering, Osaka University, Graduate Student　Shumpei Fujio
Joining and Welding Research Institute, Osaka University　Masami Mizutani
Joining and Welding Research Institute, Osaka University　Yuji Sato
Joining and Welding Research Institute, Osaka University　Masahiro Tsukamoto

（Received March 11, 2024 ; Accepted April 30, 2024）

Highly efficient and high quality pure copper welding with the blue diode laser, which has high optical absorption into pure copper, is expected to be realized. It is necessary to clarify the interaction between copper and laser beam when a blue diode laser is focused and irradiated on pure copper, and we focused on the blue diode laser-induced plume generated during copper welding. In this study, as a basic research to elucidate the interaction between the laser beam and the blue diode laser induced plume generated during welding of pure copper, spectroscopic analysis of the plume was performed to identify the plume constituent elements and their spatial distribution was experimentally clarified. The emission lines in the spectra were found to be Cu and CuO, indicating that the composition of the plume varies spatially.

Keywords: *laser induced plume, blue diode laser, pure copper, laser welding*

1. 緒言

純銅は電気伝導率と熱伝導率の高さからモーターコイルやバッテリー等に多く用いられており、純銅の接合加工技術の高度化は商品の性能向上のために必要不可欠である．そこで昨今注目されているのが青色半導体レーザーである．従来使用される近赤外線波長のレーザーは純銅への光吸収率が5～10％と低いため安定した効率の高い溶接が困難であったが、青色半導体レーザーは純銅への光吸収率が約60％と高いため入熱効率の高い溶接が可能である．そのため、カーボンニュートラル社会実現のために必要不可欠な溶接光源として青色半導体レーザーが注目されている[1]．

高出力な青色半導体レーザーの光源開発は近年世界中で取り組まれているが、高効率な純銅溶接を実現するための青色半導体レーザーを用いた溶接基礎物理に関する研究報告は少ない．レーザーが純銅表面において光エネルギーから熱エネルギーに変換される効率や溶融後の純銅の湯流れに関する研究については我々の研究チームをはじめ世界で数件行われているが[2)～4)]、純銅溶接時に加工点上方に発生するプルーム（加工点で金属蒸気がレーザー光によりさらに加熱されることで発生するプラズマ、金属蒸気が冷却されて微細な塵となったヒューム、飛散する溶融金属であるスパッタの総称）に着目し

＊〒567－0047　大阪府茨木市美穂ヶ丘11－1
Tel：06－6879－8654
E－mail：keisuke.takenaka.jwri@osaka-u.ac.jp

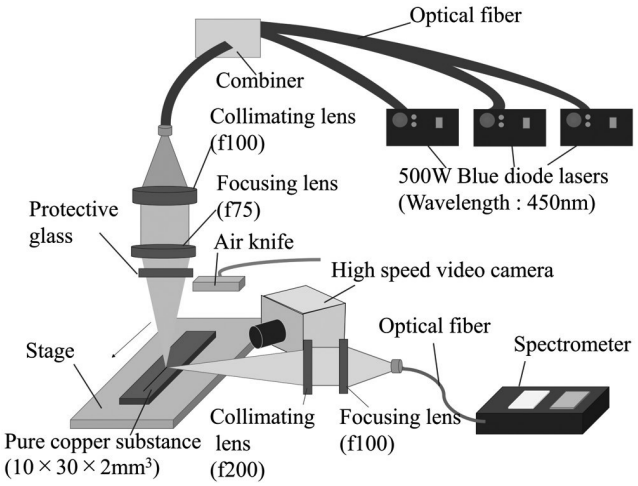

Fig. 1　Schematic diagram of experimental setup.

た研究については報告がされていない．

青色半導体レーザーを純銅板に集光照射して溶接する際に発生するプルームを「青色半導体レーザー誘起プルーム」と本研究では定義した．高出力な近赤外線ファイバーレーザーを用いたステンレス溶接に関する研究においては、プルームによってレーザーが拡散・吸収・屈折し加工点に到達するレーザーのエネルギー密度（加工点での単位面積当たりのエネルギー量）が低下するという報告がある[5]．青色半導体レーザーを用いた純銅溶接においても同様の現象が発生する可能性があり、高効率かつ安定した純銅溶接を阻害する因子となることが懸念される．そこで、純銅溶接時に発生する青色半導体レーザー誘起プルーム中の光と粒子の相互作用機構について明らかにすることができれば、より高効率かつ安定した純銅溶接の実現に繋がると考えられる．

本研究では相互作用機構解明の第一歩として、青色半導体レーザー誘起プルーム中のプラズマとヒュームに着目し、これらの分光測定を通じて組成を実験的に同定することを目的とした．分光測定を時間的空間的に分解して計測可能な検出光学系を設計製作しプルームの分光スペクトルを測定した．得られた輝線はターゲットである銅や酸化銅、雰囲気ガスが起因している可能性があるため、輝線の同定のために雰囲気ガスを変化させて分光測定をした．また、酸化銅については輝線のデータベースが少ないため、酸化銅粉末に青色半導体レーザーを照射して発生するプルームを実際に分光測定することで同定した．

2. 実験方法

Fig. 1に実験のセットアップを示す．光源には出力500 Wの青色半導体レーザー3台を空間結合させた最高出力1500 Wの青色半導体レーザー（島津製作所製）を使用した．レーザーの照射条件についてはTable 1に示すとおりである．ターゲットには無酸素銅を使用し、大気中でシールドガスノズルからArガスを吹き付けながらレーザーを照射した．加工中の様子はハイスピードカメラでプルームの自発光を撮影した．分光測定の観察条件をTable 2に示す．分光器（HR2000＋、オーシャンフォトニクス製）の測定視野がϕ100 μmとなるような検出系を構築し、加工点直上0.2 mmの位置から上方12 mmの高さまでそれぞれ分光測定を行った．レーザー照射後のサンプル表面および断面の観察にはマイクロスコープ（VHX-7000；キーエンス製）を使用した．

Table 1　Experimental conditions.

Output power	1400 [W]
Scanning speed	25 [mm/s]
Spot diameter	300 [μm]
Intensity	1.98×10^6 [W/cm^2]
Sample	Cu (30×10×2 [mm^3])
Shielding gas	Ar
Ar flow rate	40 [L/min]

Table 2　Spectral measurement conditions.

Integration time	2.5 [ms]
Fiber core diameter	50 [μm]
Field of view	Φ100 [μm]
Filter	Protective glass, 510 nm long pass filter, ND filter
Wavelength range	510-650 [nm]
Pixels	2048 [px]
Wavelength resolution	0.66 [nm]

3. 結果および考察

3.1　溶融部形状とプルーム発生の挙動

青色半導体レーザーを集光照射した純銅板の（a）表面および（b）断面写真、（c）ハイスピードカメラ観察像をFig. 2に示す．溶接幅は1.02 mm、深さは0.86 mmであった．溶融池表面は凹凸があり、スパッタの付着が見られた．また、断面の溶融部形状からキーホールモード溶接であることがわかる．ハイスピードカメラ観察より、加工点直上では強い発光が見られ、上部に移動するについて強度が下がる様子が観察された．また、スパッタが飛散する様子も観察された．分光測定の高さ位置はハイスピードカメラ観察像を重ね合わせて時間平均した画像に記載した．本研究では輝線の同定を目標としているため、次節以降に記載する分光スペクトルはレーザー照射中の880 msを時間平均したスペクトルである．

3.2　青色半導体レーザー誘起プルーム中の分光スペクトルの同定

青色半導体レーザー誘起プルームの構成元素を同定するため、シールドガスとしてAr、N_2、Air、O_2をそれぞれ使用して青色半導体レーザーを純銅板に照射し、波長510 nmから650 nmの範囲の分光スペクトルを加工点上方4 mmの位置にて測定した．使用したガスごとのスペクトルをFig. 3に示す．波長510.53、514.63、523.72、

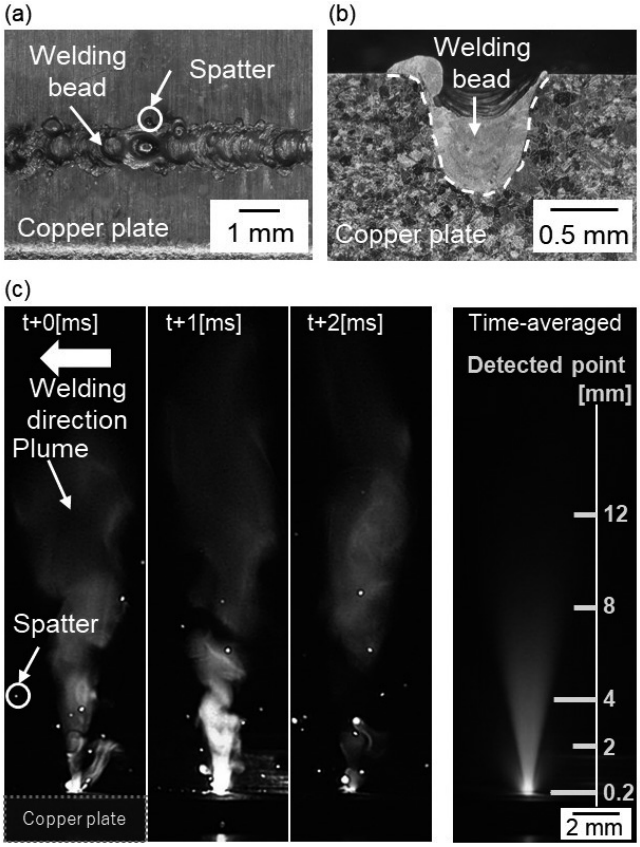

Fig. 2　Melting area shape and plume generation behavior. (a) Surface and (b) cross-sectional image of pure copper plate after blue diode laser welding and (c) high speed camera images of blue diode laser induced plum.

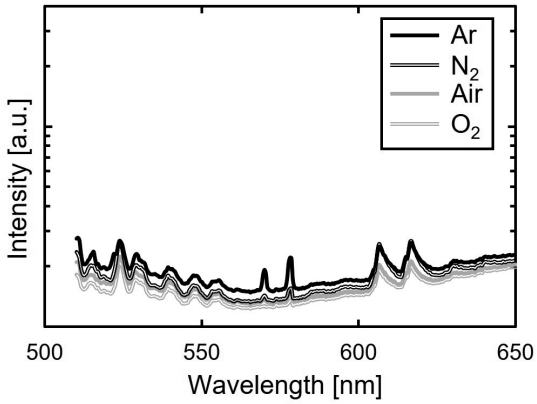

Fig. 3　Spectrum of laser induced plume of pure copper at the detected height of 4 mm when Ar, N_2, Air and O_2 gas was used as shielding gas.

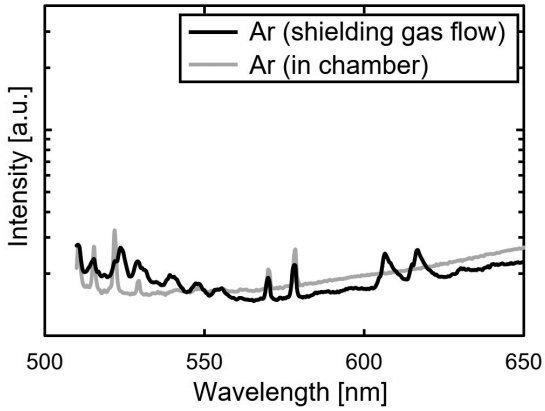

Fig. 4　Spectrum of laser induced plume of pure copper at the detected height of 4 mm when argon gas was flowed in the atmosphere using a shield gas nozzle (black line), and when the atmosphere in the chamber was replaced with argon gas (gray line).

528.72、539.17、547.33、555.48、569.96、578.09、606.48、616.37 nmにおいて輝線のピークが計測され、すべてのガスにおいて輝線スペクトルの波長に変化がなかった．したがって、雰囲気ガスの電離による輝線は発生していないことがわかった．

つづいて、CuとCuOに起因する輝線スペクトルの切り分けを行った結果を述べる．大気中でシールドガスノズルを使用した溶接では加工点および加工点上方における大気中の酸素を十分に遮断することが難しいため、Arガスで置換した簡易的なチャンバー内で青色半導体レーザーを照射し、輝線スペクトルを測定した．シールドガスノズルを使用した際とチャンバー内で測定した際の分光スペクトルをFig. 4に示す．酸素を遮断したArガス雰囲気中では波長510.53、515.54、521.91、529.63、569.96、578.09 nmで輝線が観測され、先行研究の結果[6)7)]と比較するとこれらスペクトルはCuの中性線であることがわかった．一方でシールドガスノズルを使用した際は、上記に加えて波長523.72、539.17、547.33、555.48、606.48、616.37 nmで輝線が観測された．波長606.48、616.37 nmは先行研究の結果[8)]から酸化銅由来のスペクトルであるが、その他のスペクトルについては実際にCuOにレーザー照射することで同定することとした．実際にArガスで置換したチャンバー内でCuO粉末に青色半導体レーザーを照射して計測した結果をFig. 5に示す．結果として波長510.53、515.54、523.72、529.63、539.62、545.06、548.24、553.22、555.48、569.96、578.09、589.37、606.48、616.37 nmの14の波長でピークが観測され、そのうち波長510.53、515.54、529.63、569.96、578.09 nmは純銅に照射した結果との比較からCuの中性線であり、波長523.72、539.62、545.06、548.24、553.22、555.48 nmの輝線は、Cu由来かつ、酸素の影響を受けて発生するCuではない輝線、つまりCuO由来の輝線であると同定された．

上記の実験より、純銅へ青色半導体レーザーを集光照射することによって発生したプルーム中の明瞭なスペクトルの輝線を全て同定することができ、それらは全てCuおよびCuOの中性線であることがわかった．また、本実験で用いたレーザー照射条件である出力1400 W、スポット径300 μmの条件においては輝線スペクトルは全てCuおよびCuOの中性線であることわかり、Cuおよび雰囲気ガスの電離は起こらず、金属蒸気へのレーザーによるプラズマ化は起こっていないことがわかった．

3.3　青色半導体レーザー誘起プルームの空間分布

純銅溶接時に発生する青色半導体レーザー誘起プルー

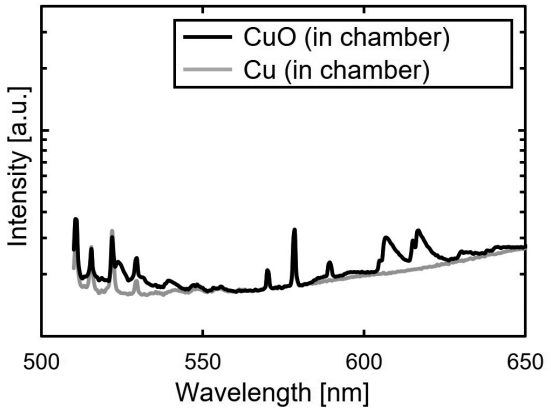

Fig. 5　Spectrum of laser induced plume of CuO (black line) and Cu (gray line) at the detected height of 4 mm when the atmosphere in the chamber was replaced with argon gas.

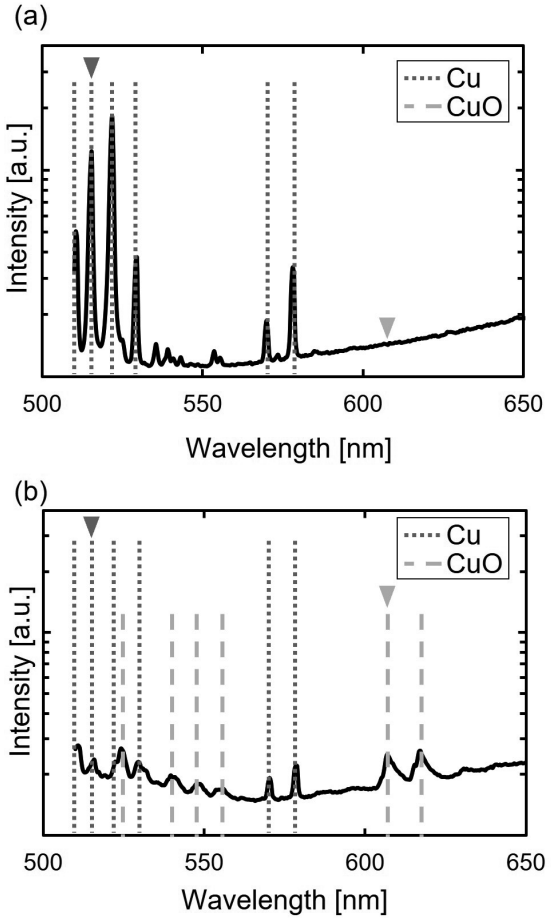

Fig. 6　Spectrum of laser induced plume of pure copper at the detected height of (a) 0.2 mm and (b) 4 mm. Gray dotted line was the spectrum of neutral Cu atom. Gray dashed line was the spectrum of CuO.

ムの上下方向の空間的な組成の分布を調べた結果をFig. 6に示す．(a) は加工点直上0.2 mmの位置で計測したスペクトルであり、(b) は加工点上方4 mmの位置で計測した結果である．先の実験より同定した輝線の波長から、点線はCuの中性線を、破線はCuOの輝線を示す．シールドガスにはArガスを使用し、シールドガスノズルを

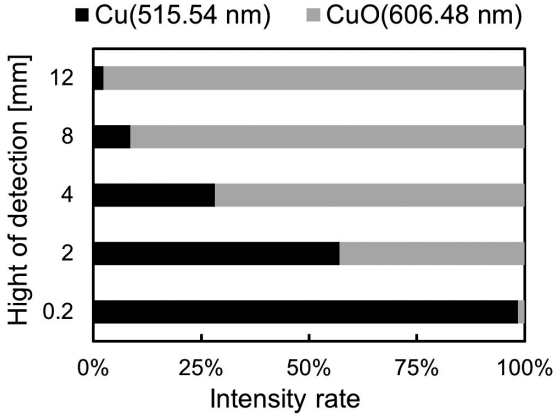

Fig. 7　Ratio of spectral intensity of Cu (515.54 nm) and CuO (606.48 nm) in the blue diode laser-induced plume.

用いて溶接を行った．加工点直上0.2 mmの高さではCuの中性線は観測されたものの、CuOについてはピークが見られなかった．また、加工点上方4 mmの位置ではCuの中性線に加えてCuOの輝線が観測された．つづいて、Fig. 7に分光計測した計測点の高さとCuの輝線である波長515.54 nmとCuOの輝線である波長606.48 nmの強度比の関係を示す．プルーム中のCuとCuOの強度比は一定でなく、加工点直上ではCuが98.5%と多く、上方に向かっていくにつれてCuOの割合が増加していく傾向にあることがわかった．高さ12 mmではCuOが97.6%を占めていた．これらのことから、プルーム中のCuOはレーザー照射点で発生したものではなく、発生したプルームが上方に移動するにしたがって雰囲気中の酸素と結びついて酸化したことが示唆された．

本研究から、純銅溶接時の青色半導体レーザー誘起プルーム中に含まれる元素を実験的に同定し、空間的な分布を明らかにすることができた．今後、青色半導体レーザー誘起プルームの時間的な強度変化と溶接結果との相関を調査することで、プルームとレーザーとの相互作用によるエネルギー損失について更なる議論が可能になると考えている．また、純銅に近赤外線レーザーを照射した際に発生するプルームについても同様に計測し、青色半導体レーザー照射結果と比較することでプルームを励起するレーザー波長による違いについても明らかになることが期待される．最後に、レーザーを用いて純銅を安定して溶接する技術の確立は産業界から強く求められている技術であり、プルームとレーザー光の相互作用の理解とそれらインプロセスモニタリングによるレーザーのフィードバック制御を実現することができれば青色半導体レーザーのさらなる普及促進に繋がると期待している．

4. まとめ

純銅溶接時に発生する青色半導体レーザー誘起プルームとレーザー光の相互作用解明にむけた基礎研究としてプルームの分光解析を行い、プルーム構成元素の同定と空間的な分布について実験的に明らかにした．

(1) 分光計測用の検出光学系を作成し計測した結果、溶

接時に発生するプルームにおける複数の波長で輝線のピークを観測することができた.

(2) 元素を同定するための比較実験を行い、雰囲気ガス由来の輝線は存在しないことが分かった.

(3) 酸化銅粉末にレーザーを照射して発生するプルームの分光測定より先行研究では報告がない輝線が酸化銅由来の輝線であることを明らかにした.

(4) 観測された輝線は全て中性線であり、今回の照射条件では銅の電離は見られないことがわかった.

謝辞

本研究はJSPS研究活動スタート支援JP23K19180を受けて行われました. 本研究を実施するにあたり日亜化学工業（株）にご協力いただきましたことに心より感謝いたします.

参考文献

1) The Laser Society of Japan（1982）LASER Handbook. Ohmsha, Tokyo

2) K. Takenaka, Y. Sato, S. Fujio, K. Nishida, R. Ito, E. Hori and M. Tsukamoto：Welding in the World, **67**（2023）, 99–107.

3) K. Takenaka, Y. Sato, S. Fujio and M. Tsukamoto：Journal of Laser Applications, **35**（2023）, 042012.

4) Y. Ishige, H. Hashimoto, N. Hayamizu, N. Matsumoto, F. Nishino, M. Kaneko and R. Konishi：Proceedings of SPIE, **11668**（2021）, 116680M.

5) Y. Kawahito, N. Matsumoto, M. Mizutani and S. Katayama：Science and Technology of Welding and Joining, **13**（2008）, 744–748.

6) M. Kock and J. Richter：EXPERIMENTAL TRANSITION PROBABILITIES AND THE SOLAR ABUNDANCE OF COPPER. Univ., Kiel.（1968）.

7) A. G. Shenstone：The first spectrum of copper（CuI）, Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. **A241**（1948）297–322.

8) G. Reyes：Copper Oxide Spectral Emission Detection in Chalcopyrite and Copper Concentrate Combustion Processes **9**（2021）, 188.