



| | |
|--------------|---|
| Title | 純銅のレーザ溶接における溶接欠陥低減のための時空間ビームプロファイル制御に関する研究 |
| Author(s) | 藤尾, 駿平 |
| Citation | 大阪大学, 2025, 博士論文 |
| Version Type | |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/101641 |
| rights | |
| Note | やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。 |

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (藤 尾 駿 平)

論文題名

純銅のレーザ溶接における溶接欠陥低減のための時空間ビームプロファイル制御に関する研究

論文内容の要旨

電気自動車(EV)のモータコイルやバッテリーなどには、多量の純銅が使用される。近年、これらの製品における耐電流特性の向上を目的として、使用する銅材料の板厚を増加させる取り組みが進められている。これに伴い、母材に対して深溶込み溶接が可能で、レーザによる純銅のキーホール型溶接が求められている。しかしながら、純銅のキーホール型溶接では、第一に投入熱量に対する母材溶融に使用された熱量の比である溶融効率が低いこと、第二に溶込み深さが不安定となること、第三に熔融金属の飛散（スパッタ）や溶接部に形成される空隙（ボイド）といった溶接欠陥の発生が課題である。これらの課題を解決するため、本論文ではレーザの強度分布を時間的かつ空間的に制御する時空間ビームプロファイル制御を行い、純銅のキーホール型溶接における溶接欠陥形成因子を明らかにした。これを基軸に新たに青色レーザと近赤外ファイバーレーザを重畳照射するハイブリッドレーザシステムを開発し、高効率かつ安定で、しかもスパッタ・ボイドレスな純銅のキーホール型溶接が可能となることを明らかにした。本論文は全6章で構成されており、各章の詳細について述べる。

第1章では本研究の背景および目的を述べた。純銅のキーホール型溶接の高品質化を実現する上では、純銅の光吸収率の低さに加え、光吸収率の変動性、さらにはキーホールの変動性といった課題を解決する必要があることを指摘した。また、純銅レーザ溶接の高品質化を狙って、様々なレーザ照射法が検討されているものの、いずれの手法も実用化には至っていないことを明確にし、本論文の目的を示した。

第2章では、純銅に対して高い光吸収率を有する、青色レーザおよび緑色レーザによる波長入熱制御を用いて、溶融効率の向上と不安定性因子の解明を試みた。波長450 nmの青色半導体レーザ、波長515 nmのグリーンディスクレーザおよび波長1030 nmの近赤外ディスクレーザを用いて純銅のキーホール溶接を行い、レーザ波長が溶接挙動に与える影響を明らかにした。その結果、光吸収率に依存して溶融効率は高くなり、純銅の溶融効率は近赤外線波長のレーザに比べて、450nmおよび515nmの青色および緑色レーザでは3.76倍に増加することがわかった。これより、光吸収率の急激な変動が溶接挙動の不安定性を発現する因子であることを明らかにした。

第3章では、レーザのビームプロファイルを時間的に高速変化させることで、キーホールの周期的な変動とそれに伴う溶接欠陥の低減を試みた。使用したレーザは波長1064 nmのレーザ光をコヒーレント結合技術によって合波したものであり、各レーザの位相を電氣的に制御することでレーザスポットを高速掃引した。その結果、レーザ照射中に形成されるキーホール周縁部の温度勾配が小さくなることがわかった。この効果により、キーホール開口部が拡大し、スパッタは最大で69%減少し、ボイドが完全に排除されることを確認した。以上の結果から、キーホール周縁部における温度勾配がスパッタおよびボイド発生の主要因であることを明らかにした。

第4章では、温度勾配を制御する手法として新たに、近赤外線レーザと青色レーザを組み合わせた2波長重畳ハイブリッドレーザによる空間的ビームプロファイル制御を考案し、純銅のキーホール型溶接における溶融効率の向上と溶込み深さの安定化、溶接欠陥低減の両立を試みた。その結果、近赤外線レーザへ青色レーザを重畳することで、溶融効率は1.37倍に向上するとともに、溶接方向の溶込み深さが安定化することを明らかにした。このとき、キーホールの変動性が抑制されることで、ボイドは完全に抑制され、スパッタは最大で90%低減することを明らかにした。

第5章では、2波長重畳ハイブリッドレーザの産業応用先の拡大を狙い、本手法を、EV用モータコイルを模擬した純銅平角線の溶接へ適用した。実験より、2波長重畳ハイブリッドレーザを用いることで、EV用モータコイルの製造における純銅平角線溶接の高効率化、低入熱化、溶接欠陥低減が実現できる可能性を示した。

第6章は結言であり、2波長重畳ハイブリッドレーザを用いることで、高効率かつ、溶接欠陥のほとんどない純銅のキーホール型溶接を行える可能性を示した。本研究で得られた知見より、純銅溶接の高品質化に加え、次世代EVの開発、ひいては自動車の電動化が促進される。したがって、本成果はカーボンニュートラル実現に貢献する重要な成果であるとして本論文を結んだ。

論文審査の結果の要旨及び担当者

| | | | |
|-----------------|-----|-----|-------|
| 氏 名 (藤 尾 駿 平) | | | |
| 論文審査担当者 | (職) | 氏 名 | |
| | 主 査 | 教授 | 塚本 雅裕 |
| | 副 査 | 教授 | 赤松 史光 |
| | 副 査 | 教授 | 高谷 裕浩 |
| | 副 査 | 准教授 | 佐藤 雄二 |

論文審査の結果の要旨

本論文は、純銅のレーザ溶接において、照射するレーザのエネルギー分布を精密に制御することで、高効率かつ安定で、溶接欠陥の少ない純銅のレーザ溶接技術を開発することを目的としている。電気自動車(EV)のモータコイルやバッテリーなどには、多量の純銅が使用される。近年、これらの製品における耐電流特性の向上を目的として、使用する銅材料の板厚を増加させる取り組みが進められている。これに伴い、母材に対して深溶込み溶接が可能な、レーザによる純銅のキーホール型溶接が求められている。しかしながら、純銅のキーホール型溶接では、第一に投入熱量に対する母材溶融に使用された熱量の比である溶融効率が低いこと、第二に溶込み深さが不安定となること、第三に溶融金属の飛散(スパッタ)や溶接部に形成される空隙(ボイド)といった溶接欠陥が発生することが課題となっている。これらの課題を解決するため、本論文ではレーザの強度分布を時間的かつ空間的に制御する時空間ビームプロファイル制御を行い、純銅のキーホール型溶接における溶接挙動の不安定性因子および溶接欠陥形成因子を明らかにしている。これを基軸に新たに青色半導体レーザと近赤外線ファイバーレーザを組み合わせた2波長重畳ハイブリッドレーザを開発し、純銅のキーホール型溶接における高効率化、溶接挙動安定化、さらにスパッタ・ボイドの発生頻度の低減について述べている。

第1章は本研究の背景および目的であり、純銅のキーホール型溶接の高品質化を実現する上では、純銅の光吸収率の低さに加え、光吸収率の変動性、さらにはキーホールの変動性といった課題を解決する必要があることを述べている。

第2章では、純銅に対して高い光吸収率を有する、青色半導体レーザおよび緑色ディスクレーザによる波長入熱制御が純銅のレーザ溶接における溶融効率および溶接挙動の不安定性に与える影響について述べている。波長450 nmの青色半導体レーザ、波長515 nmの緑色ディスクレーザおよび波長1030 nmの近赤外線ディスクレーザを用いて純銅のキーホール型溶接を行った際の溶融効率および溶接挙動を比較し、照射するレーザに対する純銅の光吸収率に依存して溶融効率が向上することに加え、溶込み深さの不安定性が低減することを述べている。さらに、光吸収率の急激な変動が溶接挙動の不安定性を発現する因子であることを述べている。

第3章では、レーザの時間的ビームプロファイル制御によるレーザ照射スポットの高速掃引が、キーホールの周期的な変動と溶接欠陥生成に与える影響について述べている。使用したレーザは波長1064 nmのレーザ光をコヒーレント結合技術によって合波したものであり、各レーザの位相を電氣的に制御することでレーザスポットの高速掃引を実現している。レーザのスポットを高速掃引することで、レーザ照射中に形成されるキーホール周縁部の温度勾配が小さくなるとともに、この効果により、キーホール開口部が拡大し、スパッタおよびボイドの発生頻度が低減することを示している。また、得られた結果から、キーホール周縁部における温度勾配がスパッタおよびボイド発生の主要因である

ことを述べている。

第 4 章では、純銅のキーホール型溶接における光吸収率とキーホール周縁部における温度勾配を制御する手法として新たに、青色半導体レーザと近赤外線ファイバーレーザを組み合わせた 2 波長重畳ハイブリッドレーザによる空間的ビームプロファイル制御を提案し、各レーザを重畳照射するハイブリッドレーザ照射システムを構築している。2 波長重畳ハイブリッドレーザでは、近赤外線ファイバーレーザの照射スポットに対して青色半導体レーザの照射スポットを大きくして同心円状に重畳することで、レーザの掃引方向に対して先行加熱部を形成し、光吸収率の増加と近赤外線ファイバーレーザ照射点周辺の温度勾配の制御が試みられている。青色半導体レーザによる先行加熱部の状態が液体となるように青色半導体レーザのパワー密度を設定し、近赤外線ファイバーレーザと重畳することにより、近赤外線ファイバーレーザ単独照射の場合に比べて溶融効率の向上と溶込み深さの安定化が可能となると述べている。また、レーザ溶接中のキーホールの X 線透過観察より、青色半導体レーザを重畳することで、レーザ照射点に形成されるキーホールの開口部が拡大し、これにより、スパッタおよびボイドの発生頻度が低減すると述べている。これらの結果から、2 波長重畳ハイブリッドレーザを用いることで、純銅のキーホール型溶接における溶融効率の向上と溶込み深さの安定化、溶接欠陥の低減の両立が可能となることを示している。

第 5 章では、2 波長重畳ハイブリッドレーザを、EV 用モータコイルを模擬した純銅平角線の溶接へ適用したときの結果について述べている。EV 用モータコイルの製造で行われる純銅平角線の溶接では、加工時間の短縮化、低入熱化、溶接欠陥の低減が重要であることを述べている。そこで、2 波長重畳ハイブリッドレーザを用いることで、従来の近赤外線ファイバーレーザに比した溶融効率の向上と溶接欠陥の発生頻度の低減が試みられている。ハイスピードビデオカメラによるレーザ照射点の実時間観察およびレーザ照射後のサンプルの観察より、重畳する青色半導体レーザのパワー密度が増加するに伴って、先行加熱部の温度が増加していき、これにより、純銅平角線の溶融効率が増加するとともに、スパッタが低減していくことを実験的に明らかにしている。得られた結果より、2 波長重畳ハイブリッドレーザを用いることで、EV 用モータコイルの製造における純銅平角線溶接の高品質化が可能であることを示している。

第 6 章は結言であり、2 波長重畳ハイブリッドレーザを用いることで、高効率かつ安定で、溶接欠陥のほとんどない純銅のキーホール型溶接の実現が可能であることを述べている。また、本研究で得られた知見が純銅溶接の高品質化に加え、次世代 EV の開発、ひいては自動車の電動化促進につながると述べている。さらに、従来の近赤外線ファイバーレーザと同等のパワー密度を有する青色半導体レーザを開発することで、溶接欠陥を抑制した上で、純銅溶接の更なる高効率化が可能となることを示している。

以上のように、本論文では純銅のキーホール型溶接における課題の主要因が光吸収率の変動とキーホール周縁部の温度勾配にあることを実験的に明らかにしている。また、これらの主要因を同時に制御する手法として 2 波長重畳ハイブリッドレーザを開発し、本手法により、純銅のキーホール型溶接の高品質化が可能であることを示している。本研究で得られた知見により、純銅溶接の高品質化が実現され、次世代 EV の開発、ひいては自動車の電動化が促進されることが考えられることから、本成果は将来的なカーボンニュートラル社会実現に貢献することが期待される。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。