

博士（工 学）木 村 盛一郎

学 位 論 文 題 名

大出力 CO<sub>2</sub> レーザ溶接技術に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、大出力 CO<sub>2</sub> レーザ溶接技術の実用化は、レーザ発振器の出力増大および加工機の高性能化により徐々に推進されてきている。しかし、その実用化例は、レーザ切断技術と比較して極めて少ない。その主原因として、現状の大出力レーザ溶接技術では、無欠陥の溶接ビードの確保とその保証が困難であることがあげられる。そこで、この原因を解決するための具体的対策案を研究課題として取り上げて欠陥のない溶接ビードが常に得られる機器および手法を開発し、実証することを目的としている。

本研究では、まずレーザ光の伝送理論に基づき光学部品の熱変形と光伝送の関係を論じ、大出力レーザ光（出力 5kW および 10kW）を利用して加工点まで常に安定供給するための手法および機器を開発した。また、レーザ溶接の現象の可視化装置を開発している。これらの装置を用いて各種金属材料のレーザ溶接実験を行い、その結果をもとに溶込み深さおよび溶接ビード形状を求める実験式を導出している。そして欠陥のない溶接ビードを保証する手法について論じている。

本論文は、全 8 章で構成されており、その概要を以下に述べる。

まず第 1 章「緒論」では、本研究の背景と目的、従来の研究の概観と本研究の意義及び本論文の構成と概要について述べてある。

第 2 章「共振器とレーザビームの伝送特性」では、共振器内部及び集光光学系に利用されている光学部品の熱吸収にともなう熱変形がレーザ溶接ビード形状に与える影響について 1kW から 10kW 級発振器を用いて実験的および理論的に解明した内容について述べている。また、出力鏡やウインドの吸収率の管理幅などを提案し、加工点までの光伝送を安定させる手法を論じている。

第 3 章「レーザビーム伝送システムの開発」では、レーザ光の時間的変化などを測定するため、レーザ光の品質（強度分布、広がり角、パワーおよびビーム位置）を測定するセンサとビーム位置を  $\pm 1\text{mm}$  以内の精度で自動的に補正するシステムを開発し、レーザ溶接を安定させる 1 つの手法を実証した装置の内容と検証結果が述べてある。

第 4 章「レーザ溶接用溶接線倣い装置の開発」では、熱変形のない金属製放物面鏡型集光光学系の開発を行い、その集光性能および溶接品質を評価した結果が述べてある。また、この放物面鏡集光光学系とファジー推論を採用したオンライン溶接線倣い装置を開発することにより、位置決め精度  $\pm 0.1\text{mm}$  で突合せ溶接が 10 m/min の高速で突合せ溶接が行えることを実証している。

第 5 章「大出力レーザ溶接における基礎現象のモニタリング」では、第 2 章で論じた大出力レーザ溶接の現象を可視化し、良好な品質を得る条件を明らかにした。また、溶接の

良好な品質を保証する手段としてそれらの手法が利用できるかについても論じてある。具体的には、溶接中に発生するプラズマを高速度カメラや、プラズマ電圧により観測し、プラズマと照射条件の関係を示している。また、溶接中のレーザ光吸収率を実験的に求める手法や、N<sub>2</sub>レーザ光を溶融池に照射して溶融池を直接観測し、実験的に検証した結果が述べてある。

第6章「各種材料の溶接特性」では、各種材料の溶接条件の選定とその溶接部の強度および組織の評価結果を示してある。熱処理形アルミニウム合金（A2219）では、不活性ガスの溶接部に与える影響を述べ、溶接に必要な照射パワー密度が  $4.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$  以上であることを示している。無酸素銅の溶接では、溶接姿勢と溶接ビード形状との関係を述べ、溶接に必要な照射パワー密度が  $7 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$  以上であることを実験結果から明らかにしている。さらに、高温強度材料である Ni 基合金のレーザ溶接では、良好な溶接品質を得る条件とその溶接部の高温における材料強度試験の評価結果が述べてある。また、引張試験によれば、すべて溶接ビード中央の会合部から破断しており、その結果的に延性が失われていることを明示している。

次に、オーステナイト系ステンレス鋼のレーザ溶接に関して、リングモードとマルチモードによるそれぞれの集光性能がレーザ溶接形状に与える影響を内部ポロシティの発生量で比較した結果を述べるとともに、各種レーザ溶接用開先面の仕上げ方法と溶接部の材料強度との関係を実験的に明らかにしている。さらに、第5章で述べたプラズマの低減方法にパルスレーザ光によるレーザ溶接法を取り上げて、連続発振のレーザ光による溶込み形状および溶接条件を比較した結果が述べてある。その結果、パルス溶接は、表面に発生するプラズマの低減に効果があり、低速領域における溶接が可能であることを示している。

第7章「レーザ溶接特性のモデル化」では、第2章、第5章および第6章で得られた知見を基に、レーザ溶接ビード形状のモデリングについて論じてある。レーザ溶接の溶込み深さがレーザ出力、速度、および集光スポット径で求められるとの仮定の上で、種々の実験データを用いて実験式を導出し、実験結果と良い一致が認められた。第5章で得られた種々の知見を利用し、キーホールの直径を集光スポット径と同等と仮定し、そのキーホールの形状が円筒であり、そのキーホールの周辺に8本の線熱源があると仮定してそれぞれの移動熱源が一定速度で移動したときの温度分布から溶融形状を算出する溶込み形状モデルを提案している。これによりマルチモードおよびリングモードのレーザ光による溶接ビード形状の計算結果が実験結果と良い一致が認められている。また、この手法により表面の溶融池の形状も推測することが可能であることも述べてある。以上のことから、本解析手法の妥当性を検証している。

第8章「結論」では、本研究により得られた主要な研究成果および結論を総括すると共にレーザ溶接の研究に関する将来展望について述べてある。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 池田 正幸  
副査 教授 鶴銅 隆好  
副査 教授 岡田 亜紀良  
副査 教授 武笠 幸一

## 学位論文題名

### 大出力CO<sub>2</sub>レーザ溶接技術に関する研究

近年、大出力CO<sub>2</sub>レーザ溶接技術の実用化は、レーザ発振器の出力増大および加工機の高性能化により徐々に推進されてきている。しかし、その実用化例は、レーザ切断技術と比較して極めて少ない。その主な理由として、現状の大出力レーザ溶接では、無欠陥の溶接ビードの確保と信頼性の向上が困難であることがあげられる。そこで、本研究はこれらの問題を解決するための具体的な研究課題を取り上げて欠陥のない溶接ビードが常に得られる機器および手法を開発し、実証することを目的としている。

本研究では、まずレーザ光の伝送について光学部品の熱変形と光伝送特性変化の関係を論じ、大出力レーザ光（出力5kWおよび10kW）を利用して加工点まで常に安定供給するための機器を開発した。また、レーザ溶接の現象の可視化装置を開発している。これらの装置を用いて各種金属材料のレーザ溶接実験を行い、その結果をもとに溶込み深さおよび溶接ビード形状を求める実験式を導出している。そして欠陥のない溶接ビードを保証する手法を明らかにした。

「共振器とレーザビームの伝送特性」については、共振器内部及び集光光学系に利用されている光学部品がレーザ光の一部を吸収し、それによって生ずる熱吸収とともに熱変形がレーザ溶接ビード形状に与える影響について1kWから10kWの発振器を用いて実験的および理論的に解明している。また、出力鏡やウインドウの吸収率の管理幅などを提案し、加工点まで安定にレーザ光を伝送する方法を述べている。

「レーザビーム伝送システムの開発」では、レーザ光の時間的変化などを測定するために、レーザ光の品質（強度分布、広がり角、パワーおよびビーム位置）を測定するセンサとビーム位置を±1mm以内の精度で自動的に補正するシステムを開発し、レーザ溶接を安定させる1つの手法として有効であること検証した結果が述べてある。

「レーザ溶接用溶接線倣い装置の開発」においては、熱変形の少ない金属製の放物面鏡を用いた集光光学系の開発を行い、その集光性能および溶接特性を評価した結果が述べてある。また、この集光光学系に組込む光り切断法を応用し、ファジー推論で溶接線を検出するオンライン溶

接線倣い装置を開発することにより、位置決め精度 $\pm 0.1\text{mm}$ で突合せ溶接が $10\text{ m/min}$ の高速で行えることを実証している。

「大出力レーザ溶接における基礎現象のモニタリング」に関しては、大出力レーザ溶接の基礎現象を可視化し、良好な品質を得る条件を明らかにした。また、溶接の良好な品質を保証するin-situモニタリング手法として利用する可能性についても論じている。具体的には、溶接中に発生するプラズマを高速度カメラや、プラズマ電圧により観測し、プラズマと照射条件の関係を示している。また、溶接中のレーザ光吸収率を実験的に求める手法や、 $\text{N}_2$ レーザ光を用いて溶融池に照射して溶融池を直接観測し、実験的に検証した結果が述べてある。

各種材料の溶接実験と溶接部の強度および組織の評価結果を行っている。熱処理型アルミニウム合金(A2219)では、不活性ガスの溶接部に与える影響と溶接に必要な照射パワー密度が $4.5 \times 10^6\text{ W/cm}^2$ 以上であることを明らかにした。無酸素銅の溶接では、溶接姿勢と溶接ビード形状との関係と溶接に必要な照射パワー密度が $7 \times 10^6\text{ W/cm}^2$ 以上であることを示した。高温強度材料であるNi基合金のレーザ溶接では、良好な溶接品質を得る条件とその溶接部の高温における材料強度試験の評価結果が述べてある。また、引張試験によれば、すべて溶接ビード中央の会合部から破断しており、延性が失われていることが原因であるとした。オーステナイト系ステンレス鋼のレーザ溶接に関して、リングモードとマルチモードによるそれぞれの集光性能がレーザ溶接形状に与える影響と内部ポロシティの発生量について述べるとともに、各種レーザ溶接用開先面の仕上げ方法と溶接部の強度との関係を実験的に明らかにしている。さらに、パルス溶接は、表面に発生するプラズマの低減に効果があり、低速で溶接が可能であることを示している。

全章までに得られた知見を基に、レーザ溶接ビード形状の導出について論じている。実験結果からレーザ溶接の溶込み深さがレーザ出力、速度、および集光スポット径で与えられると仮定し、種々の実験データを用いて溶込み深さを求める実験式を導出し、一般の実験結果と良い一致が認められた。第5章の測定結果からキーホールの形状が円筒状で、直径を集光スポット径と同等と仮定した。キーホール内で吸収されるレーザエネルギーをそのキーホールの周辺に分布する8本の線熱源と仮定してそれぞれの移動熱源が一定速度で移動したときの温度分布から溶融形状を算出する溶込み形状モデルを提案し、マルチモードおよびリングモードのレーザ光による溶接ビード形状の計算結果が実験結果と良い一致が認められてた。また、この手法により表面の溶融池の形状も推測することが可能である。

最後に本研究により得られた主要な研究成果および結論を総括すると共にレーザ溶接の研究に関する将来展望について述べてある。

これを要するに、著者はレーザ溶接について多くの新知見を得たものであり、大出力レーザ溶接技術の実用化と普及に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。