

学 位 論 文 題 名

CO₂ レーザによる切断精度に関する研究

学位論文内容の要旨

ここ数年来産業界の広範囲な分野で、材料の高精度・高品質・高能率加工手段を多品種少量生産のためのフレキシブルな生産システムの構築に採用することが重要な課題となっている。熱エネルギーを用いたいわゆる金属の熱切断方法は、材料加工技術としてフレキシブル加工に対応できる重要な位置付けとなることは言うまでもない。レーザ加工は、高密度の光エネルギーをガスジェットと併用する熱切断方法の一種であり、金属材料に照射するとこれを急速に溶融・蒸発する能力を持つ。この性質は従来の熱切断源にはなかった新しい性質であり、それ故に切断能率、精度においても従来の熱切断にはない能力が得られる。それは、①従来の熱切断法に比べて切断溝幅・熱影響部の狭い精度の高い高速切断が可能である、②通常の酸素切断で切断困難なステンレス鋼など合金鋼の切断が可能である、③酸化反応の有無、および金属・非金属の差異を問わず多様な材料に対する適用性が高い、等を挙げることができる。近年、レーザ加工には切断精度の重要性が益々高まり、加工対象も軟鋼やステンレス鋼の他にアルミニウム、アルミニウム合金、銅や黄銅など多岐にわたる。

レーザ切断に関するこれまでの多くの研究では、加工メカニズムに関するものや、加工特性および加工条件に関する報告がなされてきたが、切断精度の向上を目的とした研究は少ない。また、その中で扱われた材料は軟鋼やステンレス鋼など CO₂ レーザによる加工が比較的容易なものである。

そこで本研究では、CO₂ レーザの切断における各種材料の加工特性を解明し、加工精度を向上させるための制御因子の最適化を図るものである。加工特性に影響するレーザ光側の主な因子には、ビームの集光特性、偏光特性、パルス特性、アシストガス特性があり、加工対象や加工目的に応じてその最適化を検討した。

本論文は 8 章から構成されており、以下に各章毎の概要を述べる。

まず第 1 章は、序論である。レーザ切断に関するこれまでの研究を概説し、本研究の目的を述べた。

第 2 章では、レーザ加工の大きな特徴である加工位置でのビーム集光特性と加工品質との関係

を詳細に検討した。被加工物表面に照射したレーザビームの集光特性には、熱源になるビームスポット径とそこでのエネルギー密度、焦点位置の前後での等価なエネルギー範囲を示す焦点深度、さらにビームの集束角度があげられる。基本的な加工品質の調査結果をもとにして、各種の材料に対する集光特性の最適化を追求した。

レーザ加工はそのエネルギーで物質を加熱、溶融、蒸発させる過程をとるため、第3章では、被加工物の熱的な性質に依存した加工特性を示した。レーザ出力は、制御性の高いパルス発振が可能であり、加工熱源のパルス化によって被加工物への入熱量は正確に制御することができる。精密加工や複雑形状の加工には、このパルス切断によって被加工物の熱的加工特性を最適に制御することが必要不可欠である。従来のパルス切断に関する研究は、軸流形発振器によるものがほとんどであり、低周波数領域ではパルスピーク出力が低下し、加工特性を正確に表したものではない。本研究では三軸直交型発振器を用いて、とくに低周波数領域での矩形高ピークパルス波形による加工を扱った。パルス発振によるレーザ出力には多くのパラメータが存在するため、各パラメータと加工品質との関係を明らかにし、加工特性をさらに向上させるための方法の提案を行った。

板厚が9 mm以上の軟鋼のレーザ切断では、現状の発振器出力の制約から加工速度が2 m/min以下でしか加工できず、切断速度と酸化反応速度との相互作用による切断面粗れが起きる。また、薄板の高速切断では出力リップルによる切断面粗れが起きる。このような切断面粗れに対し、その改善を検討した研究は見あたらない。本論文では比較的短いパルス幅に設定されたレーザ出力を用いて、パルスパラメータと切断面品質との関係を定量的に検討した。さらに、パルスパラメータの制御から、切断面品質をより一層改良するための方法を提案した。

第4章では、レーザ加工における高精度化に重要な光学的性質による被加工物の加工特性について調べた。偏光と切断品質については、Olsen, F. O. の報告があり、その中では定性的な結論を導いている。本論文では反射率の異なる材料を用いて、円偏光度と切断精度との関係を定量的に示し、その最適設定について論じた。さらに、加工条件の各種パラメータと偏光の影響を受ける加工特性の関係を明らかにし、加工精度を向上させる最適パラメータ設定を示した。

第5章では、軟鋼の厚板切断におけるアシストガスの酸素濃度の影響とアルミニウム合金切断でのアシストガス条件の最適設定について示した。レーザ切断用のノズルはアシストガス噴出孔であると同時にレーザビームの出射孔でもあり、ビームとの干渉を避ける必要性から、その形状は流体力学的に理想的な形状とは言い難い。このようなノズルでは内圧をむやみに高くしても流速はほぼ音速で飽和し、出口では気流が急速に広がって乱流や衝撃波を発生し、空気の巻き込みや、溶融金属の波打を引き起こすことがある。その結果、切断能力や切断品質の劣化を招く。本

論文では、厚板の切断における空気の巻き込みを防止するノズルの提案とその加工品質を示した。さらに、ステンレス鋼の無酸化切断やアルミニウムの切断など、熔融金属がドロスとして被加工物裏面に付着しやすい加工での最適アシストガス条件を明らかにした。

切断溝幅を加工前に推定し、その情報を加工プログラムに反映させることは、切断精度の向上と加工の自動化にとって重要なことである。第6章ではレーザ光の照射面積を点熱源とした切断溝幅の広がりを検討した。レーザ光の照射スポット径を点熱源とした熱伝導理論は W. W. DULEY の研究があるが、まだ断片的な点が多く、さらに実加工での検証が行われていない。ここでは、アシストガスに酸素ガスとアルゴンガスを使用して薄板の軟鋼材料の切断実験を行い、熱伝導理論による結果との比較について検討した。その結果、酸化反応を伴わないアルゴンガスを用いた場合に、切断溝の実測値と計算値がほぼ一致した。

第7章では前章までの検討で得られた加工条件や切断精度と被加工物の物性値との関係を追究した。その結果、同一物性値であれば板厚、加工出力、加工速度には密接な関係があり、僅かな実験データから未実験の加工データを予測できることを示した。さらに、第4章で明らかにした偏光度と切断精度との関係を、被加工物のビーム反射率によって整理できることを明らかにした。

第8章は、本研究の総括である。本研究で得られた結論をまとめて示し、今後残された問題点について若干考察している。

学位論文審査の要旨

主査	教授	石川博将
副査	教授	鵜飼隆好
副査	教授	金内忠彦
副査	教授	池田正幸

本論文は、CO₂レーザの切断における各種材料の加工特性を解明し、加工精度を向上させるための制御因子の最適化を図ることを目的としたものである。

近年、レーザ加工には切断精度の重要性が益々高まり、加工対象も軟鋼やステンレス鋼の他にアルミニウム、アルミニウム合金、チタン合金、銅や黄銅など多岐にわたる。

レーザ切断に関するこれまでの多くの研究では、加工メカニズムに関するものや、加工特性および加工条件に関する報告がなされてきたが、切断精度の向上を目的とした研究は少ない。また、

その中で扱われた材料は軟鋼やステンレス鋼など CO₂ レーザによる加工が比較的容易なものである。

本研究では、加工特性に影響するレーザ光側の主な因子として、ビームの集光特性、偏光特性、パルス特性、アシストガス特性を考え、加工対象や加工目的に応じてその最適化を検討している。

本論文は 8 章から構成されており、得られた成果を要約すると以下の通りである。

まず第 1 章は序論である。レーザ切断に関するこれまでの研究を概説し、本研究の目的を記述している。

第 2 章では、レーザ加工の大きな特徴である加工位置でのビーム集光特性と加工品質との関係を詳細に検討している。レーザビームの集光特性には、熱源になるビームスポット径とそこでのエネルギー密度、焦点深度、さらにビームの集束角度があげられる。本章では、基本的な加工品質の調査結果をもとにして、各種の材料に対する集光特性の最適化を追求している。

第 3 章では、パルス特性の切断品質に及ぼす影響について論じている。レーザ出力は、制御性の高いパルス発振が可能であり、このパルス切断によって被加工物の熱的加工特性を最適に制御することが必要である。従来のパルス切断に関する研究は、軸流形発振器によるものがほとんどであり、低周波数領域ではパルスピーク出力が低下し、加工特性を正確に表したものではない。本研究では三軸直交型発振器を用いて、とくに低周波数領域での矩形高ピークパルス波形による加工を扱うことにより、加工特性をさらに向上させるための提案を行っている。

また、切断面粗れに対し、その改善とパルス特性との関係を検討した研究は見あたらないが、本論文では比較的短いパルス幅に設定されたレーザ出力を用いて、パルスパラメータと切断品質との関係を定量的に検討している。

第 4 章では、切断溝の傾斜を簡易的に測定できる方法を提案して、円偏光度と切断精度の関係について論じている。すなわち、反射率の異なる材料を用いて、円偏光度と切断精度との関係を定量的に示し、その最適設定について論じ、さらに、加工条件の各種パラメータと偏光の影響を受ける加工特性の関係を明らかにするとともに、加工精度を向上させる最適パラメータ設定を示している。

第 5 章では、金属材料の切断品質とアシストガスの関係について論じている。レーザ切断用のノズルはアシストガス噴出孔であると同時にレーザビームの出射孔でもあり、ビームと干渉を避ける必要性から、その形状は流体力学的に理想的な形状とは言い難い。このようなノズルでは乱流や衝撃波を発生し、空気の巻き込みや、熔融金属の波打を引き起こすことがある。その結果、切断能力や切断品質の劣化を招く。本論文では、厚板の切断における空気の巻き込みを防止するノズルの提案とその加工品質を示している。さらに、熔融金属がドロスとして被加工物裏面に付

着しやすい加工での最適アシストガス条件を明らかにしている。

第6章では、切断形状のプログラムに工具径補正を加える上で重要な切断溝幅の推定について検討している。アシストガスに酸素ガスとアルゴンガスを使用して薄板の軟鋼材料の切断実験を行い、熱伝導理論による結果との比較検討を行っている。その結果、酸化反応を伴わないアルゴンガスを用いた場合に、切断溝の実測値と計算値がほぼ一致することを示している。

第7章では前章までの検討で得られた加工条件や切断精度と被加工物の物性値との関係を追っている。その結果、同一物性値であれば板厚、加工出力、加工速度には密接な関係があり、僅かな実験データから未実験の加工データを予測できることを示している。さらに、第4章で明らかにした偏光度と切断精度との関係を、被加工物のビーム反射率によって整理できることを明らかにしている。

第8章は、本研究の総括である。本研究で得られた結論をまとめて示し、今後残された問題点について考察している。

これを要するに、著者は、CO₂レーザ切断精度に関する詳細な研究を展開し、材料加工技術として有益な新知見を得ており、機械製作学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。