非鉄金属材料を対象としたレーザ溶接用レンズの開発と レーザ溶接技術の確立

福岡県工業技術センター　機械電子研究所　材料技術課
専門研究員　小川　俊文
（2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022235-B3）

キーワード：レーザ溶接，レーザエネルギー分布制御，スパッタ

１．研究の目的と背景

現在、様々な分野でレーザ加工が活用される様になってきている[1]。しかし、従来タイプのレーザは、波長が近赤外域であるため、銅やアルミニウムの溶接では吸収率の問題で安定入熱が出来ず、スパッタやブローホールが発生し、加工品質に問題があった。この問題を解決するために、安定入熱が可能な吸収率が大きいグリーンレーザやブルーレーザが開発されている（図 1）が、従来タイプのレーザに比べて高価で出力が小さいといった課題がある。

そこで、従来タイプのレーザをセンター部とリング部に分離させ、レーザのエネルギー分布を制御してリング形状やセンター有りリング形状にする（図 2）ことで、スパッタやブローホールの発生を抑制する技術が開発されている。

一方で令和 3 年度、福岡県工業技術センターは、九州地域のレーザ技術（溶接、熱処理、肉盛）の普及・発展を目指しレーザ加工機を導入し、鉄鋼材料を主体として精力的に取り組んでいる状況にある[2]。今後は、非鉄金属材料の高度なレーザ加工にも取り組み、更なる地域牽引を目指している。

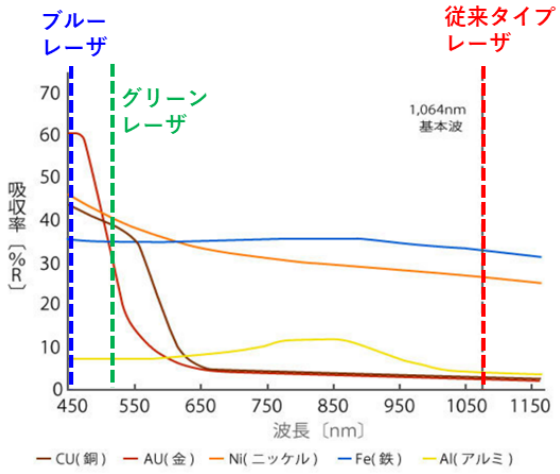


図 1　レーザ波長と吸収率の関係

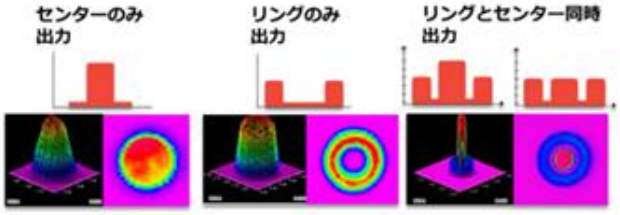


図 2　レーザのエネルギー分布制御
（株式会社ワイヤードの HP より）

そこで本研究では、近赤外域波長のレーザを用いた既存のファイバーレーザ溶接機でも、スパッタやブローホールの発生量を低減させた非鉄金属材料の高品位な溶接を可能にさせるため、加工ヘッド側でレーザのエネルギー分布をリング形状やセンター有りリング形状に制御するための後付け可能なレーザエネルギー分布制御機構を開発することを目的とした。本研究で開発したレーザエネルギー分布制御機構をベースに、国内の既存ファイバーレーザ溶接機にカスタマイズ展開することで、国内のファイバーレーザ溶接技術の高度化に寄与出来ると考えられる。

２．レーザエネルギー分布制御用レンズの開発

シングルコアから射出したレーザをリング状にするには円錐形状のアキシコンレンズを用いることがよく知られている。しかし、アキシコンレンズには頂点があり、高出力レーザのダメージを受けやすいと予想される。またアキシコンレンズを用いる場合、別途、集光レンズが必要である。そこで本研究では、アキシコンレンズと集光レンズを一体にした新アキシコンレンズの光学設計を試みた。光学設計には Zemax OpticStudio を用いた。コリメートレンズの焦点距離、集光レンズの焦点距離はともに 200mm で、光学倍率は 1 とした。図 3 にアキシコンレンズ、集光レンズと新アキシコンレンズのそれぞれの光路図とリングプロファイル、リングプロファイル断面形状を示す。

新アキシコンレンズにより得られるリングプロファイルとその断面形状は、アキシコンレンズと集光レンズの組

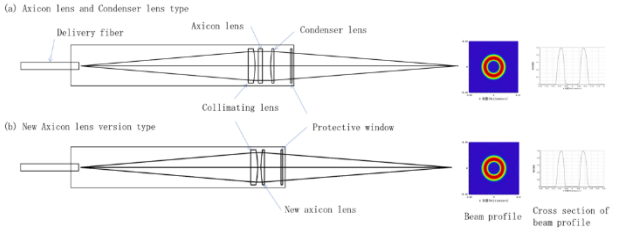


図 3　アキシコンレンズ、集光レンズと新アキシコンレンズのそれぞれの光路図とリングプロファイル、リングプロファイル断面形状

合せにより得られるそれらとほぼ同じになることが確認できた。

以下に、導出した新アキシコンレンズの非球面設計式を示す。なお基板は石英で平凸形状である。f(x)はサグ量、r は曲率、κ は円錐定数、A_2は 2 次項、A_4は 4 次項である。ここで円錐定数 κ とは、球面、楕円、放物面、双曲面を表現する定数である。

$$f(x)=\frac{x^2}{r\left(1+\sqrt{1-(1+\kappa)x^2/r^2}\right)}+A_2x^2+A_4x^4$$

r：200

κ：−400000

A_2：5×10^{-3}

A_4：7.5×10^{-8}

今回の新アキシコンレンズは、この円錐定数 κ に大きな値を用いることで頂点レス、アキシコンレンズと集光レンズの一体化に成功した。さらに、普段は用いない A_2 を用いた。κ で中心部を平らにしながら r と A_2 で焦点距離をコントロールしている。アキシコンレンズ同様、リング状のプロファイルにできている。一般的に円錐形状のアキシコンレンズの設計では κ や r と A_2，A_4 などを用いず、A_1 の 1 次の項のみを用いる。

円錐定数 κ に大きな値を用いることは、これまでに見られない設計思想であり、斬新的なものである。図 4 に球面レンズ、アキシコンレンズ、新アキシコンレンズの断面形状模式図を示す。新アキシコンレンズは饅頭型で球面レンズよりも張出しており、アキシコンレンズで見られる頂点が存在しないことが分かる。

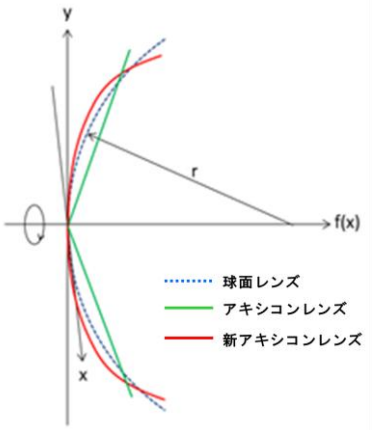


図 4　球面レンズ、アキシコンレンズ、新アキシコンレンズの断面形状模式図

３．調芯機構とプロファイラーの開発

現状の課題として、ファイバー端からの射出光には、場合によって 10mrad(=0.6°)以上の偏りが生じるため、アキシコンレンズなどを配置しても、リングプロファイに強度差が発生することがある。そこで、ファイバー端からの射出光の偏りを補正できる様に、射出端を中心にレンズがチルトされる機構を開発した。また、補正、つまり調芯状況がビジュアル的に分るプロファイラーとプロファイラーソフトを開発した。調芯作業が簡易、短時間で出来る様に、プロファイラーがレーザ加工ヘッドに着脱可能で装着できる機構にした。目標として、偏り補正 1mrad(=0.06°)以内、もしくは、リングプロファイルの強度偏り 10%以内、調芯時間 15 分以内とした。

図 5 に入射偏りとリング強度の偏りについての計算結果を示す。集光するだけの場合、入射光の偏りが 20mrad でも強度分布を示すカラーに偏りが見られない。一方新アキシコンレンズは、入射光が偏るにつれてリング強度に偏りが生じることが分かった。入射光が 1.25mrad 偏った場合でも、リング強度下側の赤色が薄くなっており偏りが生じていた。レーザ加工では、強度の偏りが加工品質に影響を及ぼすことから、強度の偏りを極力無くすことが重要である。

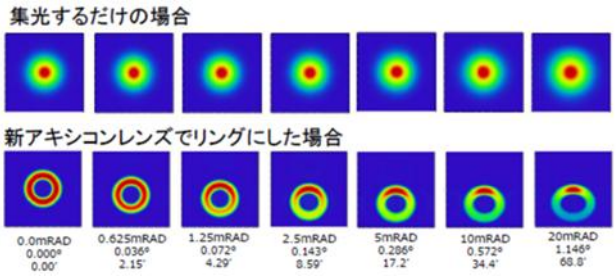


図 5　入射偏りとリング強度の偏りについての計算結果

開発したチルト機構の外観を図 6 に示す。開発した加工ヘッド上部にチルト機構がある（図 6 左赤線枠）。チルト機構はすり鉢状の擦り合わせ面になっており、調整ネジ 3 カ所（図 6 右の青色矢印）を緩めたり、締めたりすることで調整することが出来る仕様になっている。

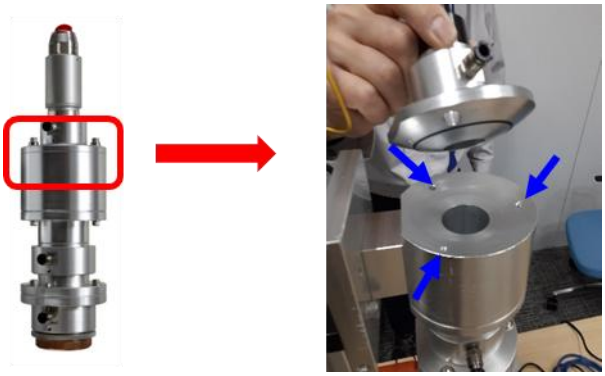


図 6　開発したチルト機構（左：新アキシコンレンズを搭載させた開発加工ヘッド、右：開発加工ヘッドのチルト機構部）

リング形状の偏り具合を確認できるよう、プロファイラーも開発した。レーザ加工ヘッド先端に脱着可能で、ビームスプリッター、ND フィルターを用いた減光機構になっ

ている。レーザ光が漏れないよう、安全面の配慮も行っている。リング偏りをモニターで確認しながら開発した加工ヘッドのチルト機構でデリバリーファイバーから射出されるレーザの偏りを調整することが出来る。弊所のファイバーレーザ溶接機（IPG Photonics 製、レーザ発振器：YLR-500 MM-AC）に、開発した新アキシコンレンズ搭載加工ヘッドとプロファイラーをセッティングして、レーザエネルギー分布を測定している状況を図 7 に示す。

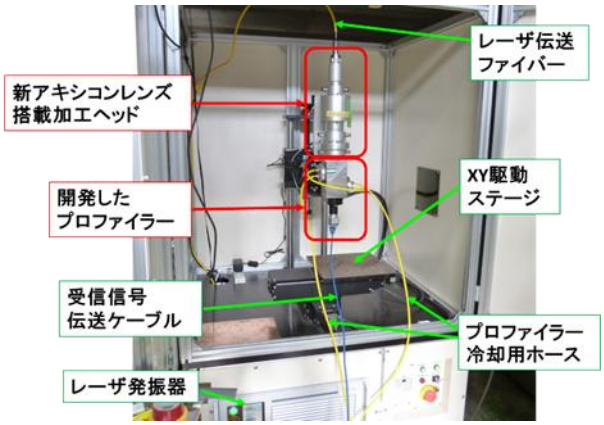


図 7　レーザエネルギー分布の測定状況

プロファイラーソフトの調芯前画面を図 8 に、調芯後画面を図 9 に示す。プロファイラー内部にセットされた 2 枚のスプリッターが、レーザエネルギーを減衰させ先端の CCD カメラでレーザエネルギー分布を撮影し、その撮影画像をプロファイラーソフトで表示する仕組みになっている。調芯前画面（図 8）の青色プロファイルを見ると 3 つのピークの両側ピークの高さが違っていることが確認できる。チルト機構で調芯後の画面（図 9）では、青色プロファイルの両側ピークの高さが揃っていることが確認できる。また、プロファイラーソフト画面の左下に白黒のリングプロファイルが表示されており、調芯前後でリングプロファイルの白黒濃淡の偏りが均一になっていることが確認できた。

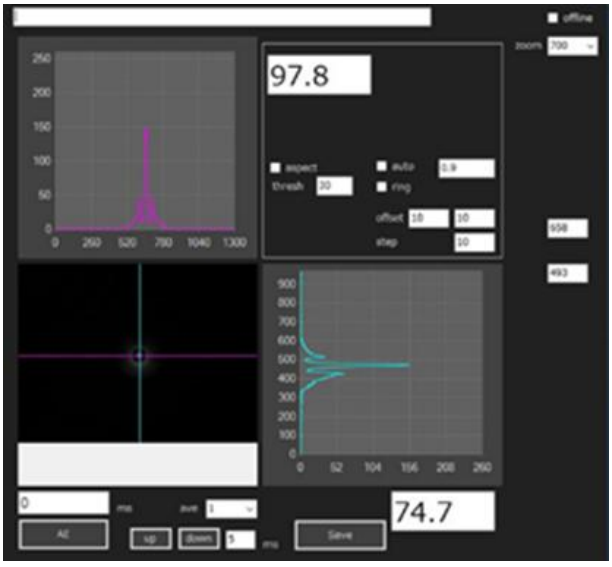


図 8　プロファイラーソフトの調芯前の画面

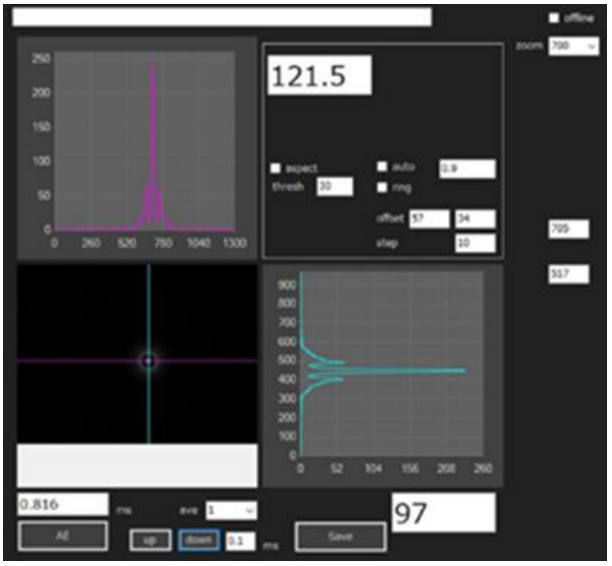


図 9　プロファイラーソフトの調芯後の画面

4．アルミニウム板のビードオン溶接によるスパッタの確認

レーザエネルギー分布がガウシアン型の加工ヘッド(IPG Photonics 製、FLW-D30 Vertical)とセンター有リング型の新アキシコンレンズを搭載した開発加工ヘッドに関して、供試材は板厚 0.8mm の純アルミニウム板材を用い、レーザ発振器 YLR-500MM-AC（IPG 製)、レーザ出力 500W、ステージ移動速度 9mm/sec にてスパッタ発生量を比較した。図 10 にガウシアン型の加工ヘッドの場合のスパッタ発生状況を示す。図 11 にセンター有リング型の新アキシコンレンズを搭載した開発加工ヘッドの場合のスパッタ発生状況を示す。ガウシアン型の場合と比較してセンター有リング型の方がスパッタ発生量は半分以下に低減しており、新アキシコンレンズによるレーザエネルギー分布制御機構の有効性を確認することが出来た。



図 10　ガウシアン型の加工ヘッドの場合のスパッタ発生状況

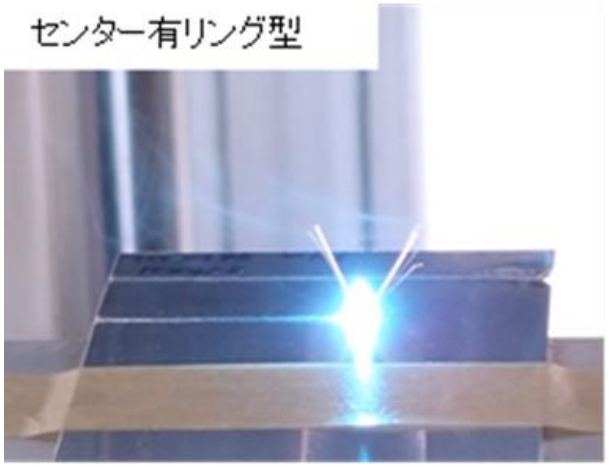


図 11　センター有リング型の新アキシコンレンズを搭載した開発加工ヘッドの場合のスパッタ発生状況

この時のガウシアン型の加工ヘッドの場合のレーザエネルギー分布プロファイルを図 12、センター有リング型の新アキシコンレンズを搭載した開発加工ヘッドの場合のレーザエネルギー分布プロファイルを図 13 に示す。ガウシアン型の方は、ピークパワー約 2,000kW/cm2 であったのに対し、センター有リング型の方は、ピークパワー約 5,000kW/cm2 であった。また、センターとリングのパワー比率は、理想とされる 7 対 3 に近いものになっていた。

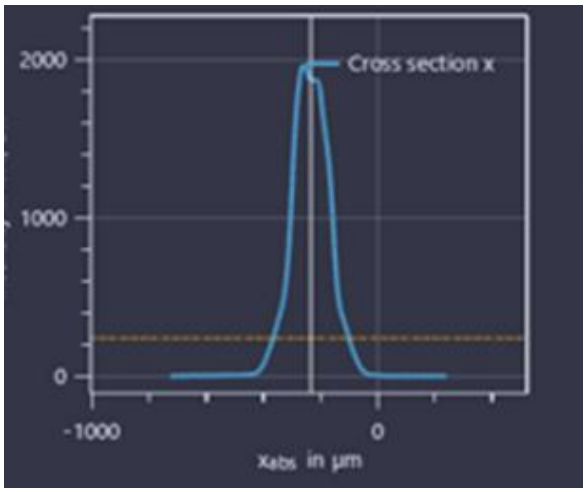


図 12　ガウシアン型の加工ヘッドの場合のレーザエネルギー分布プロファイル

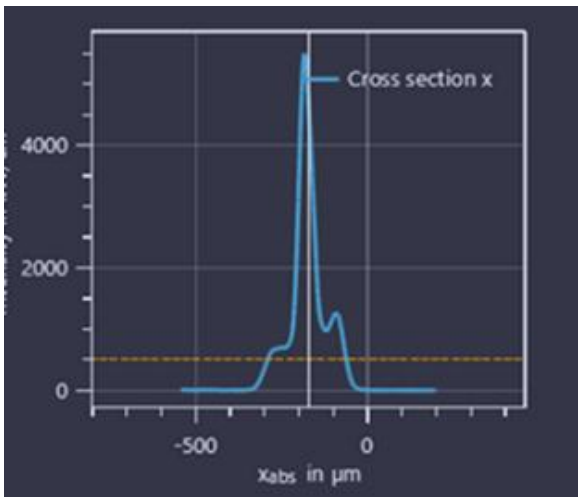


図 13　センター有リング型の新アキシコンレンズを搭載した開発加工ヘッドの場合のレーザエネルギー分布プロファイル

５．まとめ

近赤外域波長のレーザを用いた既存のファイバーレーザ溶接機でも、スパッタやブローホールの発生量を低減させた非鉄金属材料の高品位な溶接を可能にさせるため、加工ヘッド側でレーザのエネルギー分布をリング形状やセンター有りリング形状に制御するための後付け可能なレーザエネルギー分布制御機構の開発を行った。

開発した新アキシコンレンズを搭載した加工ヘッドは、レーザエネルギー分布をセンター有リング状に制御することが出来た。アルミニウム板のビードオン溶接によるスパッタ発生量を比較したところ、レーザエネルギー分布が、ガウシアン型の既存加工ヘッドの場合より、センター有リング型の新アキシコンレンズを搭載した開発加工ヘッドの場合の方が、スパッタ発生量を低減させることが出来ることを確認した。

謝　辞

本研究は、公益財団法人天田財団 2022 年度一般研究開発助成(AF-2022235-B5)により実施したものであり、ここに感謝の意を表します。本研究遂行にあたり、株式会社タムロンの小森一範氏と竹本昌紀氏から、多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1) 片山聖二:トコトンやさしいレーザ加工の本, 日刊工業新聞社(2019)
2) レーザ加工技術 Vol.7 pp.96-97(2023)