



レーザー溶接品質向上のためのデュアルビーム化を実現する光学素子「アジャストシェイパ」

New Optical Element "Adjust-Shaper" for Achieving Dual Beam Generation to Improve Laser Welding Quality

佐藤 直樹*
Naoki Sato

楠 幸久
Yukihisa Kusunoki

布施 敬司
Keiji Fuse

レーザー溶接は様々な産業で利用され、特に自動車産業では車体の軽量化や電動化といった需要の高まりを受けて利用が拡大している。レーザー溶接ではセンタービームとリングビームを組み合わせたデュアルビームを金属材料に照射することでスパッタ低減等の加工品質向上が図れることが知られている。その実現方法としてはデュアルビームを出力可能な発振器を導入するかビーム分岐DOE^{*1}（回折型光学素子）を使う方法があるが、それぞれ導入コストが高い、デュアルビームの強度比を調整できないといった課題があった。そこで当社では既存のシングルビームシステムに後付けするだけでデュアルビーム化を実現でき、尚且つ任意の強度比に調整できるアジャストシェイパを開発した。本稿では製品の特長と実際のレーザー加工ヘッドに搭載した評価結果を紹介する。

Laser welding is increasingly used across various industries, especially in the automotive sector, due to rising demands for vehicle weight reduction and electrification. It is known that improvements in processing quality, such as reduced spatter, can be achieved by irradiating metal materials with a dual beam consisting of a center beam and a ring beam. While one method to achieve this involves introducing an oscillator capable of outputting dual beams, another method uses a beam-splitting diffractive optical element (DOE). The first approach faces the challenge of high implementation costs, while the second approach faces the challenge of the inability to adjust the intensity ratio of the dual beams, respectively. To address these challenges, Sumitomo Electric Hardmetal Corp. developed the Adjust-Shaper, which retrofits existing single beam systems to enable dual beam output and allows for flexible adjustment of the intensity ratio. This paper presents the product features and evaluation results from its implementation in a laser processing head.

キーワード：レーザー溶接、スパッタ低減、ビームシェイピング、リングビーム、DOE

1. 緒言

1990年代以降、レーザー溶接は自動車業界を中心に産業利用が拡大してきた。特に近年は車体の軽量化や電動化、スマートファクトリー化の要求が高まる中、車体やモータ平角線の溶接、リチウムイオン電池の封止やバスバー溶接等、様々な場面で使われている。これらの多種多様な材料や部品を高い品質で接合するためには、ビームの形状や強度分布を最適化するビームシェイピング技術が必要不可欠である⁽¹⁾。

ファイバレーザーやディスクレーザーを使ったレーザー溶接用光学系の概略を図1に示す。発振器から出力しデリバリファイバで伝送されたレーザービームはコリメートレンズで平行光にした後、集光レンズによって加工点で一点に集光する。ビームシェイピングしない場合、集光点近傍ではレーザービームが極めて高いエネルギー密度となることで金属材料がプラズマ化しキーホールを形成する（図2(a)）。その周辺では金属が液化し溶融池が形成されるが、キーホールからの金属蒸気の噴出によってスパッタが飛散したり、溶接ビードが荒れて外観品質を損なったり、内部にブローホール（空隙）が発生し接合部の強度低下を招くことが問題になる。そのため近年のレーザー溶接ではビームシェイピングの一種であるデュアルビーム化がデファクトスタンダードになっている。図2(b)に示すようにセンタービームの周りをリングビームで囲った強度分布にすると、キーホール

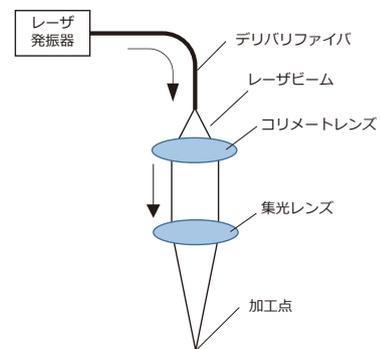


図1 レーザー溶接光学系

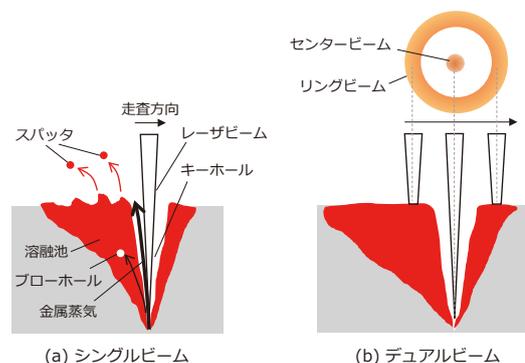


図2 レーザー溶接時の様子

と熔融池の幅が広がることで金属蒸気の噴出を抑制でき、スパッタ低減等で品質が向上することが知られている。

このようなデュアルビームを実現する方法としては主に以下に示す2つの方法がある。一つ目は二重コアファイバを使う方法^{(2),(3)}であるが、このとき発振器も二重コアファイバに対応したものに変更する必要があるため導入コストが高くなるというデメリットがある。二つ目の方法はビーム分岐 DOE を使って疑似的にリング状のビーム分岐をする方法である。この方法は既存のレーザ溶接機に DOE を後付けするだけで済むため導入コストは低いが、センタービームと疑似リングビームの強度比は DOE の設計で決まるため都度調整して最適化することができないというデメリットがある。

そこで当社では既存のレーザ溶接機に後付け可能で、尚且つセンタービームとリングビームの強度比を可変できるアジャストシェイパを開発した。

2. 特徴

2-1 動作原理

通常アジャストシェイパは集光レンズの手前で使用する(図3)。渦巻状の表面微細構造を有する2枚の DOE で構成され、その一方を光軸上で回転することでセンタービームとリングビームの強度比を可変することができる。

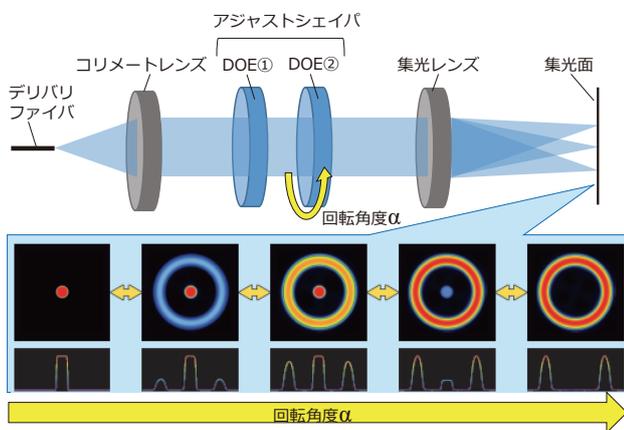


図3 アジャストシェイパの構成

2枚の DOE で強度比が可変できる原理を説明する前に、まずは単純な2段階の渦巻状の表面微細構造を持つ DOE 1枚と集光レンズでリングビームが生成される原理を説明する(図4(a))。DOE の表面微細構造は、その段差に応じてその箇所を透過するレーザビームに所望の位相変化をもたらすように設計されている。例えば波長λのレーザビームに対して1波長分、すなわち位相 2π の変化を加えるには、DOE の素材の屈折率がnで空気中(屈折率1)の伝播

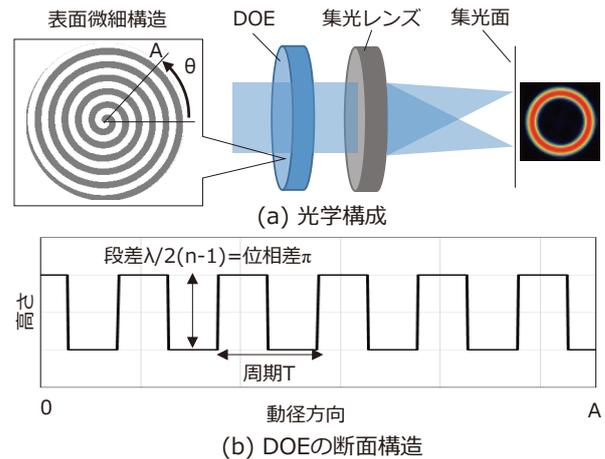


図4 DOE1枚と集光レンズでのリングビーム生成

を考える場合、段差は $\lambda/(n-1)$ とすればよい。同様に1/2波長分、すなわち位相 π の変化を加えるには段差は $\lambda/2(n-1)$ となる。渦巻状の表面微細構造(以後、位相分布と呼ぶ)を任意の方位角 θ において動径方向に切り取った断面は、図4(b)に示すように位相差 π に相当する段差 $\lambda/2(n-1)$ と周期Tを有する矩形格子になっている。DOE の位相分布 $\phi(x,y)$ と焦点距離fのレンズの集光面でのレーザビームの強度分布 $I(x',y')$ は複素振幅分布 $\exp\{i\phi(x,y)\}$ を用いて式(1)の関係がある⁽⁴⁾。

$$I(x',y') \propto |\mathcal{F}[\exp\{i\phi(x,y)\}]|^2 \dots\dots\dots (1)$$

(\mathcal{F} はフーリエ変換演算子)

上記1次元回折格子の位相分布の場合、中心から距離 $s \lambda f/T$ (次数 $s = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$)離れた位置に分岐光が発生する。各分岐光のエネルギー比は入射ビームを100%とする場合 $s = \pm 1$ が40.5%、 $s = \pm 3$ が4.5%、 $s = \pm 5$ が1.6%と続く(図5(a))。故に渦巻状の位相分布全体としては図5(a)の強度分布を原点を中心に回転させることに相当し、図5(b)のようなリング状の強度分布となる。なお各リ

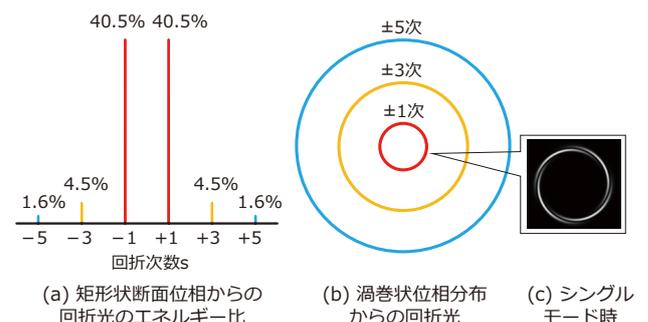


図5 各種条件での回折光

ングビームの強度比は上記エネルギー比より小さくなる。これはリングの円周の長さに反比例して強度が分散するからである。最内のリングは $s = \pm 1$ の次数に相当し、リング直径 D は式 (2) となる。

$$D = \frac{2\lambda f}{T} \dots\dots\dots (2)$$

なお入射ビームとして干渉性が高いシングルモードのレーザーを用いると図5(c)に示すようにリングの一部に尾引きや分裂が発生する。これは+1次光と-1次光の干渉によって生じる現象である⁽⁵⁾。レーザー溶接で一般的に用いられる高出力のマルチモードレーザーではこのような尾引きや分裂は発生しない。

次にDOE2枚で強度分布を可変する原理を説明する。以下では2枚のDOE間のビーム伝播で位相分布が変化しない、すなわち2枚のDOEが極めて近い距離に位置していると仮定する。DOEの段差や動径方向の周期は1枚の場合と同様である。初めに回転角度が0度の場合、2枚のDOEの位相分布は完全に一致する(図6)。このとき位相差 π の段差を2枚分通過することで位相差は 2π 、すなわち0に等しくなる。2枚のDOEの合成位相は等位相面になり、これは2枚のDOEがないのと等価である。よってこの時の集光面での強度分布はセンタースポットのみになる。次に一方のDOEが90度回転した場合、任意の方位角 θ における動径

方向の断面位相分布は図7のようになる。1枚目と2枚目のDOEの位相分布が動径方向に90度、つまり1/4周期だけシフトした状態になる。このとき2枚のDOEの合成位相は周期 $T' = T/2$ の渦巻位相になり、式(2)よりリング直径はDOE1枚の場合の2倍になる。このとき集光面での強度分布はリングのみになる。回転角度が0~90度の間ではこれが連続的に変化するため、センタービームとリングビームの強度比を可変することができる。

なお渦巻状の位相分布 ϕ を極座標表示で一般化すると式(3)のように書ける。

$$\phi(r, \theta) = g\left(\frac{2\pi}{T}r + m\theta\right) \dots\dots\dots (3)$$

g は周期関数であり、上述のDOE1枚の2段階位相では位相差 π 、動径方向の周期 T の矩形分布となる。 m はトポロジカルチャージと呼ばれる値で、渦巻の回転周期の逆数を表している。これまで $m = 1$ の場合のDOE位相を示していたが、例えば $m = 3$ とすると図8のような位相分布になり、回転周期が1/3になる。この場合、センタービームとリングビームの強度を可変する回転角度範囲は $m = 1$ の1/3の0~30度となる。所望の回転角度範囲で機能させたい場合に有効な設計パラメータである。

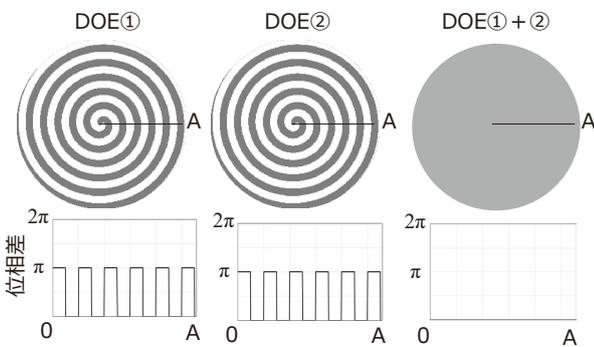


図6 DOE 2の回転角度0度における位相分布

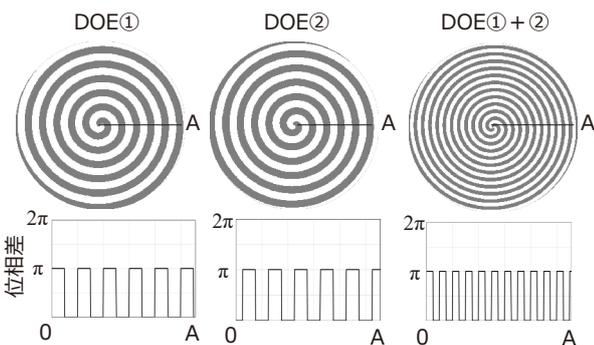


図7 DOE 2の回転角度90度における位相分布



図8 DOE位相分布 (m=3)

2-2 製造方法

DOEの製造は半導体の微細加工プロセスと同様のフォトリソグラフィを用いて行う。当社は光学材料として石英ガラスとセレン化亜鉛 (ZnSe) の微細加工プロセスラインを有しており、短波長から長波長 (266nm~10.6μm) まで幅広い波長のDOEの製造実績がある。アジャストシェイパにおいても基本的な製造方法は同じであり、様々な波長に対応できる。

またアジャストシェイパを正しく機能させるためには2枚のDOE間のアライメントをμmオーダーの精度で合わせる必要がある。当社ではFθレンズを代表とする組レンズでレンズ間の高精度な組立手法を確立しており、そのノウハウをアジャストシェイパにも横展開することで厳しいアライメント精度の組立が可能になった。次章では製作したアジャストシェイパの特性評価結果を示す。

3. 特性評価

3-1 強度分布測定

表1に試作したアジャストシェイパの仕様を示す。マウント形状は片方のDOEの回転機構を有しながらもレーザ加工ヘッドに容易に取り付け可能なコンパクトなサイズを実現した。図9は今回実験に使用したレーザ溶接機の光学系を示す。発振器は中心波長1070nmのマルチモードファイバレーザを出力2kWで使用した。各種条件から計算されるセンタースポット径は $\phi 200\mu\text{m}$ 、リング直径は $\phi 625\mu\text{m}$ となる。図10(a)~(d)にそれぞれ回転角度0, 65, 75, 90度の場合に集光面にビームプロファイラを設置して強度分布を測定した結果を示す。2-1節で述べた動作原理の通り、0度ではセンタービームのみに、90度ではリングビームのみに、それらの間では角度に応じてセンタービームとリングビームの強度比が変化していることが確認できる。また

表1 試作したアジャストシェイパの仕様

マウントサイズ	66×66×35mm
設計波長	1064nm
DOE素材	合成石英
DOE素子サイズ(有効径)	$\phi 50\text{mm}$ ($\phi 45\text{mm}$)
DOE位相段数	2段階
DOE動径方向周期T	1.7mm
トポロジカルチャージm	1
DOE回転角度範囲	0度 ~ 90度
強度比可変範囲(センター:リング)	1:0 ~ 0:1
DOEコーティング	低吸収ARコート

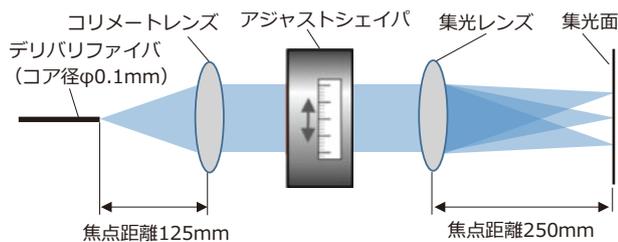


図9 評価用光学系

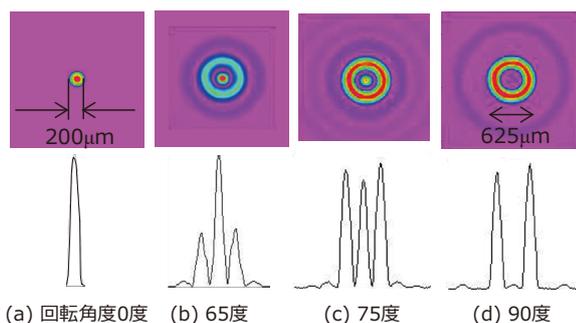


図10 集光面の強度分布

センタースポット径とリング直径が上述の計算値と一致していることが確認できる。

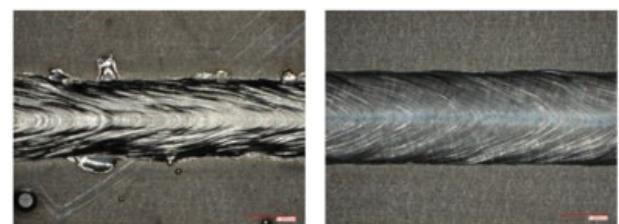
3-2 実装評価

次にレーザ溶接の基礎評価として、SUS板に照射するレーザを一定速度で一方向に掃引するメルトラン試験を実施した結果を示す。光学系は3-1節と同様であり、その他の試験条件は表2に示す。

表2 レーザ溶接条件

ワーク	SUS304板厚5mm
発振器出力	2kW
掃引速度	2m/min
アシストガス	窒素

図11(a)は回転角度0度、すなわちセンタービームのみをワークに照射した後の溶接部の外観写真であり、これはアジャストシェイパを使わない状態と見なせる(2-1節参照)。また図11(b)は回転角度65度の結果であり、センタービームとリングビームを組み合わせたデュアルビームを照射した結果である。後者の方が溶接ビードの波打ちが小さく、熔融金属の飛散物が少ない高品質の溶接が出来ていることが分かる。またレーザ照射中、前者の条件では多くのスパッタが発生し、後者の条件ではほとんどスパッタが発生しなかったことも確認され、アジャストシェイパがレーザ溶接時のスパッタを抑制し、溶接品質が向上することが実証された。



(a) 回転角度0度(センタービームのみ) (b) 回転角度65度(センター+リングビーム)

図11 溶接部の外観写真

4. 回折効率を高める新設計

ここまで紹介した2段階の渦巻位相のアジャストシェイパではリングビームのみの状態における回折効率 ± 1 次光(最内)のリングビームで81%、 ± 3 次光のリングビームを含めても90%であり、残り10%はさらに外側に生じる ± 4 次以降の回折光として発生しエネルギーロスに繋がる(2-1節参照)。このような高次の回折光が比較的多く

発生する原因としては DOE の位相分布が矩形形状の急峻な変化点を有するからである。このことは画像処理の知見を持つ技術者であれば式 (1) に示すフーリエ変換の関係から直感的に理解できる。

そこで位相分布を矩形とは異なる関数にすることで高次の回折光を抑制できる新たな設計を考案した。図 12 (a) は 2 枚の DOE の動径方向の断面を正弦波とした位相分布である。2 段階の場合と異なるのは、回転角度 0 度でリングビームのみ (図 12 (b))、180 度でセンタービームのみ (図 12 (c)) になる点と、各リングの回折効率である。表 3 に示すように、 ± 1 次～ ± 3 次を合計したリングビームの回折効率が 99% になる。

この新設計はリングビームの回折効率が高く、かつ 3 重のリングビームになるという特徴がある。つまりレーザー溶接時のエネルギーロスを減らすことができ、また広範囲の 3 重リングビーム照射によって溶融池の面積が拡大し、レーザー溶接のさらなる品質向上が期待される。この新設計の実装評価は今後進めていく。

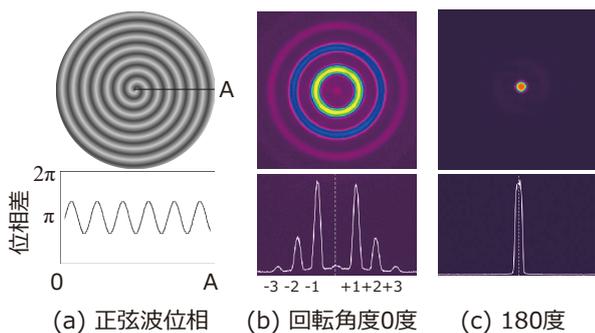


図 12 新設計の DOE 位相と集光面の強度分布

表 3 新設計品の各リングビームの回折効率

断面位相形状		正弦波	(参考) 矩形
回折効率	± 1 次 (第 1 リング)	53%	81%
	± 2 次 (第 2 リング)	38%	0%
	± 3 次 (第 3 リング)	8%	9%
	$\pm 1 \sim 3$ 次合計	99%	90%
	± 4 次以降合計	1%	10%

5. 結 言

レーザー溶接品質の向上を目的としたデュアルビーム化を実現できるアジャストシェイパを開発した。この製品を既存のレーザー溶接機に実装すれば、センタービームとリングビームの強度比を調整してプロセス条件を最適化することができる。今後は銅の溶接での利用拡大が見込まれるグリーンレーザーやブルーレーザーに対応したものや、回折効率が高い新設計等、製品ラインナップを拡大していく。

6. 謝 辞

本製品の開発にあたり試作品の実装評価にご協力いただきました(株)レーザーックス並びに UW JAPAN (株) に感謝の意を表します。

用語集

※1 DOE

Diffractive Optical Element の略で回折型光学素子の意。素子表面にコンピュータシミュレーションを使って設計した複雑な微細形状を付与することで、回折現象を利用した様々な光学機能を持たせることができる。代表的なものとしてはビーム分岐やビームシェイピングがある。

参 考 文 献

- (1) 山森浩人、稲垣陽輔、「レーザー溶接品質に及ぼすビームプロファイルの影響」、レーザー加工学会誌、Vol.27 No.2、pp. 13-17 (2020年)
- (2) コヒレント・ジャパン(株)、「アルミニウムや銅のレーザー溶接最適化テクニック」、2021年4月号、pp. 16-19
- (3) P. Haug, S.Weidgang, et al., Beam Shaping Brightline Weld – Latest Application Results, Laser in Manufacturing Conference 2019, pp. 1-9, Munich (July 24, 2019)
- (4) 栗巢賢一 他、「レーザー加工用回折型光学部品の開発」、SEIテクニカルレビュー第159号、pp.72-77 (2001)
- (5) M. M. Sanchez-Lopez and I. Moreno et al., Double-ring interference of binary diffractive axicons, OSA Continuum, Vol.3 No.6, pp. 1679-1690 (June 2020)

執 筆 者

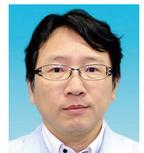
佐藤 直樹* : 住友電工ハードメタル(株) 主席



楠 幸久 : 住友電工ハードメタル(株) グループ長



布施 敬司 : 住友電工ハードメタル(株) 部長



*主執筆者