

# バイポーラプレート製造のための 回折光学素子によるビームシェーピング

ティボー・パウツェ・シェルフ、ダニエル・ライテマイヤー、ナタン・カブラン

回折光学素子(Diffractive Optical Element : DOE)を使用すると、燃料電池自動車用のバイポーラプレートの経済的な量産が可能になる。

自動車メーカーは、電気自動車への非常に急速な市場移行に直面している。この移行には、新しいコンポーネントの搭載が必要で、革新的な製造技術が求められる。

電気自動車の主要コンポーネントは、エネルギーを貯蔵するバッテリーである。バッテリーに対する給電は、外部電源によって行うか、電気エネルギーを生成するデバイスを行うことができる。自動車そのものの中で電力を生成するための有望な手段が、燃料電池技術の利用である。燃料電池は、水素と酸素を使用して電流を生成するとともに、副産物として熱と水を生成する。各燃料電池は、数百枚ものバイポーラプレートで構成されている。バイポーラプレートは、膜電極接合体(Membrane Electrode Assembly:MEA)を分離し、冷却液用の流路を含む。バイポーラプレートそのものは、互いに溶接された2枚の金属板からなり、金属板の厚さはそれぞれ70~100 $\mu$ mである。

この溶接に対する要件は明らかであ

る。冷却液の流路は、ヘリウムが漏れ出さないほど密閉されている必要がある一方で、流れ場の接合部の電気抵抗は低くしなければならない。このような薄い材料を欠陥なく溶接するには、シングルモードレーザと適切な溶接光学系を使用して、非常に小さなレーザスポットを加工対象物に集光する必要がある。適切なプロセスパラメータはよく知られており、現行の用途に対しては何の問題も存在しない。しかし、将来のニーズに合わせるには、かなりの変更が必要になる。

1枚のバイポーラプレートのレーザ溶接シームは、1.5m以上にも及ぶ可能性がある。燃料電池に200枚のバイポーラプレートが含まれており、燃料電池の年間生産個数を100万個とすると、1つの生産ラインで生成しなければならないシームの長さは、年間30万kmにも及ぶことになる。この数値は、自動車業界における従来のレーザ溶接用途と比べて数ケタ大きく、バイポーラプレートの製造の主要な課題につながるものである。つまり、溶接速度を上

げて補助加工時間を短縮することによって、生産能力を最大化するという課題である。

## 溶接欠陥の解消

リモートレーザ溶接は、2Dまたは3D走査システムを使用して、所定の角度でレーザ光を回折するミラーに基づいている。毎分100mを大きく上回る処理速度が可能だが、溶接プロセスの安定性に関する問題が生じる。溶接速度が毎分45~50mを超えると、許容できない欠陥がシームに含まれるようになるため、走査光学系を動かしたり、レーザ出力を最大限に利用したりすることはできない。独ブラックバード・ロボタージェステーメ社(Blackbird Robotersysteme)と、その関連企業である独スキャンラボ社(Scanlab)及びイスラエルのHolo/Or社は、この既存の欠点を把握して、適切な解決策を考案することにした。

金属箔を高速で溶接する際の最も深刻な溶接欠陥は、ハンピングである。溶融材料が溶融池の後方に放出されて、溶接シームの凝固材料に当たる現象である。液相の材料は、表面に沿って均等に分布される代わりに、材料そ



図1 回折光学素子(DOE)プレートの互いに対する相対的な回転角度による、強度分布の変化。

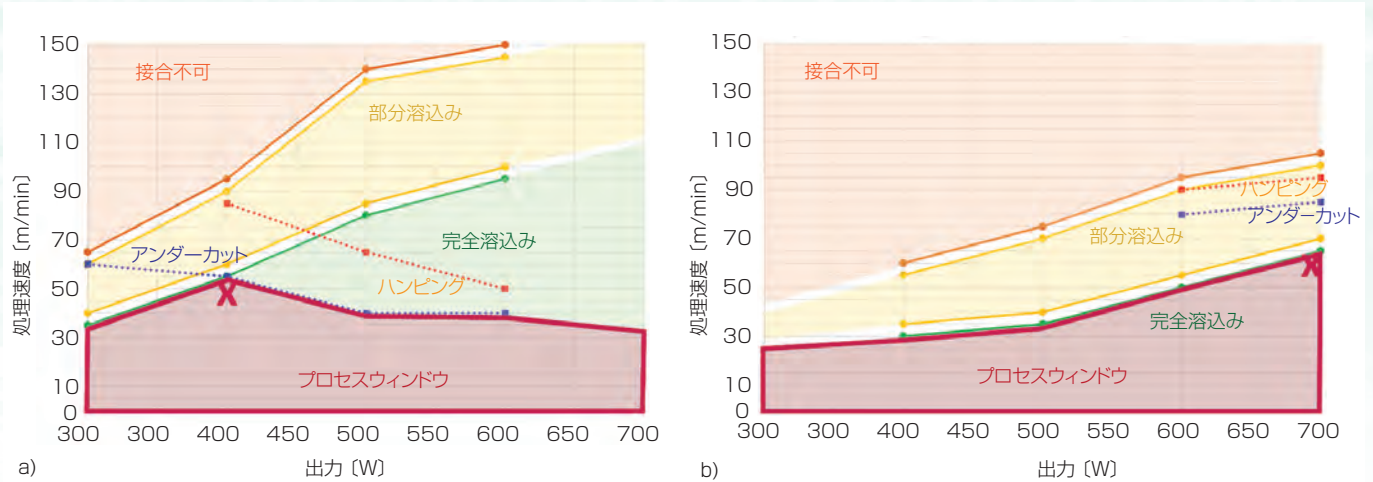


図2 (a)は、標準的なシングルモードのスポットによる処理に対する、経験則に基づくプロセスウィンドウと最大速度(毎分45m、赤色の×印)。(b)は、DOEを使用してビームシェーピングを適用する処理に対する、プロセスウィンドウと最大速度(毎分60m、赤色の×印)。

のものの表面張力によって球状に蓄積し、シームに沿って明らかなハンブ(こぶ)が形成される。表面が濡れない原因は、液体と固体母材の温度差にある。母材表面が一定の温度を上回ると、溶融材料で表面を濡らすことができ、ハンブの生成を防ぐことができる。

3社は、有限要素法(Finite Element Method: FEM)によってハンピングの発生と防止をシミュレーションする科学的手法を選択した。レーザー出力とビーム特性、加工対象物の特性、溶接速度と熱伝導特性など、さまざまなパラメータを入力した。まず、ハンピングの形成を確認した。続いて、溶融池の後方端の補助熱源に対して、さまざまなビーム特性を評価した。最終的に、ハンピングを完全に排除する温度領域につながるビームパラメータを検出した。注目すべきパラメータは、主要なレーザースポットまでの距離と、必要なレーザー出力であると特定された。

2020年に開発された「Holo/Or Flexishaper」には、レーザー光の中心スポットと同心リングを生成する2つの回折光学素子(DOE)が含まれている。2つのDOEの間の相対的な回転角度を

調整することにより、コアとリングの間の空間出力分布を自由に調整することができる(図1)。リング径などの属性は、DOEの設計によってあらかじめ定められる。

FEMと、走査ヘッドとDOEの両方を組み合わせた全体構成の光学シミュレーションによって得た専門知識を適用して、2つのDOEの仕様をプロセスに基づいて定義することにより、このプロセスをシミュレーション環境から実環境に移行した。DOEモジュールは、光学倍率1:1.93の2Dスキャナである「intelliSCAN FT」に搭載されている。米IPGフォトリクス社(IPG Photonics)のモード径14 $\mu$ mのシングルモードレーザーを使用し、中心レーザースポットは27 $\mu$ mとなった。厚さ0.1mmのステンレス鋼箔を、バイポーラプレートの代わりとなる経済的な加工対象物として使用し、ギャップなしの重ね合わせ接合を行った。

### システムの試行と結果

まずは、DOEの相対的な向きを調整して、すべての出力を中心スポットに集約することにより、通常の焦点スポ

ットで試行を行った。この試験は、通常プロセスの主要な限界を特定するために必要だった。完全溶込み、部分溶込み、溶接欠陥の発生が、適用するレーザー出力と処理速度の関数としてどのように変化するかを観測した。図2aは、その結果をグラフにまとめたものである。注目すべき点は2つで、1つめは、レーザー出力が高いほど、シーム欠陥であるアンダーカットとハンピングが発生する速度は低くなることである。

2つめは、最適なプロセスウィンドウは、レーザー出力と速度の組み合わせによって決まることである。速度は最大化が必要な値である。この試験環境では、400Wのレーザー出力における最適な速度は毎分45mであることがわかった。これらの値は、現行用途から既知の数値と適切に相関している。

2つめの試行では、DOEプレートの互いに対する相対的な向きを調整することによってリングを追加するという形で、ビームシェーピングを適用した。先ほどと同じレーザー出力と溶接速度の組み合わせで、試行を行った。2つの主な影響が観測できた。予想どおりに、ハンピングとアンダーカットが発生す



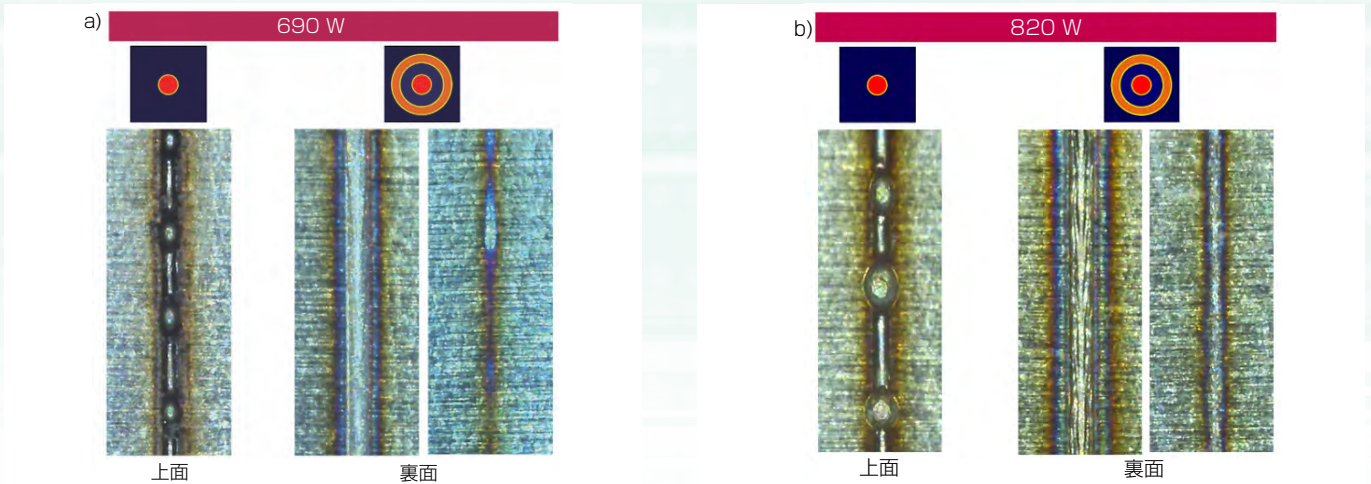


図3 (a)は、毎分70mの速度と690Wの出力で、リングモードのビームシェーピングを適用しない場合と適用する場合の溶接結果の比較。ビームシェーピングを適用すると、目に見えるハンピング欠陥は生じないが、貫通しない状態が発生するのは、ビームシェーピングを適用する場合のみである。(b)は、毎分70mの速度と820Wの出力で、同じ溶接結果を比較したものである。リングモードのビームシェーピングを適用する場合は、高いシーム品質が得られ、レーザー出力の増加によって安定した完全溶込みが得られた。

る溶接速度は、先ほどよりも高くなった。その一方で、溶込み深さは、同じレーザー出力と速度のDOEなしの溶接と比べて浅くなった。その理由は、中心スポットに集約されるレーザー出力が減少するためである。

図2に示すように、700Wで毎分60mの場合に、欠陥のない完全溶込み溶接が得られた。

その後、毎分70mの溶接速度で、顕著なハンピングのない溶接が得られることを実証するための追加試験を行った。図3aは、690WでのDOEを使用する場合と使用しない場合の初期結果を示したものである。標準スポットでは深刻なハンピングが生じるのに対し、ビームシェーピングを適用した場合は、滑らかなシーム表面が得られる。貫通しない状態が発生するのは、中心スポットに集約されるエネルギーが減少するためである。出力を820Wに上げると、完全溶込みによる安定した溶接が得られた(図3b)。全体的に、溶接速度はビームシェーピングなしの場合の最大速度よりも55%増加した。

加工対象物に吸収される合計エネルギー

ギーが高くなると、溶接シームはやや拡大する。図3aの標準プロセスでは、幅は約60 $\mu$ mであるのに対し、最適化されたシームの幅は100 $\mu$ mである。この幅の増加は、レーザービームを発振させるといハンピングを抑えるための他の方法と比べると小さい。

ある自動車OEM企業(社名は非公開)によって指定された材料と加工対象物を用いた、その後の試行により、DOEに基づくビームシェーピングの適用が、バイポーラプレート用の金属箔の高速溶接の改善につながる事が確認された。自動車メーカーに加えて、その供給業者、システムメーカー、研究機関が、燃料電池自動車市場の急速な成長に備える必要がある。バイポーラプレート製造技術の早期実装に向けた取り組みは、技術的な実行可能性、投資、スケーラビリティの初期評価の

ために不可欠である。

ビームシェーピングは、レーザーと材料の相互作用のあらゆる可能性を最大限に活用するための適切な技術である。ブラックバード社、スキャンラボ社、Holo/Or社による共同研究は、従来のシングルモードレーザーにプロセス固有のビームシェーピングを組み合わせることが可能で、それによってプロセス限界の溶接速度が引き上げられることを実証した。

バイポーラプレートのプロセス改善策は、ビームシェーピングだけではない。今後の取り組みとしては、さらに高い加工スループットを目指して、オンザフライ溶接や複数の重なり合った走査領域の実装が予定されている。レーザー溶接は、学際的なチームと、研究成果の継続的な進歩を必要とする、多面的な技術である。

#### 著者紹介

ティボー・バウツェ・シェルフ(THIBAUT BAUTZE-SCHERFF)は、独ブラックバード・ロボタージェステーム社(Blackbird Robotersysteme)のセールスマネージャー兼取締役、ダニエル・ライテマイヤー(DANIEL REITEMEYER)は、独スキャンラボ社(Scanlab)の事業開発部門所属、ナタン・カプラン(NATAN KAPLAN)は、イスラエルのHolo/Or社の最高技術責任者(CTO)兼R&D マネージャー。e-mail: t.bautze-scherff@blackbird-robotics.de