

次世代レーザ溶接： イノベーションとトレンド

アントニオ・カステロ

光源やコンポーネントのイノベーションにより、レーザ溶接の効率は向上している。

レーザ溶接はこの10年の間に、レーザ光源、制御システム、自動化技術の急速な進歩に牽引されて、著しい進化を遂げた。かつては特殊な用途にしか適用されていなかったレーザ溶接が、今では自動車、航空宇宙、電子機器、医療機器に対する主流の製造技術となっている。このツールの利点は明白で、エネルギー入力が局所的であることと、幅広い種類の金属、材料厚さ、シーム形状を非接触で加工できることである。

いくつかの進歩がこの進化をけん引している。高輝度ファイバレーザと超高速レーザが微細溶接に導入されたことで、溶接品質、速度、精度が劇的に向上するとともに、熱歪みが低減され

て後処理の必要性は低下した。これらの光源、特にファイバレーザは現在、コストも著しく低下していることから、このレーザプロセスは幅広い業界でさらに利用しやすいものとなっている。また、さまざまな波長が今日利用可能で、少なくとも室温においては、特定の材料に対する放射の吸収を高めることができる。

レーザ溶接のその他のコンポーネントにも改良が加えられている。加工ヘッド、特にこれらのツールに組み込まれた光学系は、ますます信頼性と透過性が高まっている。レーザビーム溶接に一般的に適用される出力レベルでは、熱フォーカスシフトはもはや問題にはならない。その理由の1つは、光

学コーティングの品質が大幅に高くなったことである。これと並行して、ロボティクス、AI、デジタルツイン技術の統合により、さらにスマートで柔軟な生産ラインが実現可能となった。これらのイノベーションは、確実に溶接可能な材料と形状の範囲を拡大しただけでなく、コストを削減してプロセスの拡張性を高めた。これによってレーザ溶接は、現代の高性能製造の基盤技術となっている。

eモビリティに対する レーザ溶接戦略

eモビリティへの移行は、パワートレインのアセンブリやコンポーネントの設計を大きく変えた。興味深い事例



図1 電気モーターのヘアピン溶接(提供:トルンプ社)

の1つが、ヘアピンモーターである。これは、固定子の巻線を丸線ではなくヘアピンで行う電気モーターである。ヘアピンは長方形でワイヤに比べて大きく、その長方形の形状により充填率を高くできるため、銅巻線の効率が約20%向上する。この設計は、ほとんどの自動車メーカーやサプライヤーに採用されており、巻線の開放端をレーザー溶接する必要がある。

この用途に対し、一般的な溶接手順は、ピンを順番に溶融し、より大きな接続軌跡によってピンの先端に玉状の溶融部を生成するという、分割戦略を採用するものである。最終的な溶接品質を高めるために、独トルンプ社（TRUMPF）は「BrightLine Weld」技術を開発した（図1）。標準的なレーザー設計との違いは、ビーム伝送ファイバが中空リングファイバにコアファイバを挿入した構造をしており、重ね合わせられたビームプロファイルが加工対象物に供給されることである。ファイバ入射側に光学ビームウェッジを用いることで、各ファイバに対するレーザー出力の分配を自由に調整することができる。プロセス、特に銅接合に対するその効果として、スパッタの発生とポロシティの形成が著しく減少する。コア（40%）とリング（60%）の比率（両者は連動的に調整される）で、スパッタの発生とポロシティの形成を最小限に抑えることができる。これによって、溶接品質は最適化され、レーザー出力は最大公称出力レベルまで使用可能となる。一般的にヘアピン溶接では、マイクロ秒範囲の加工時間内に所定の溶融体積を得るために必要となる、深溶け込み溶接を可能にするために、6kWまたは8kWのディスクレーザーが使用される。加工時間は、使用されるワイヤの断面積に主に依存し、一般的な製品

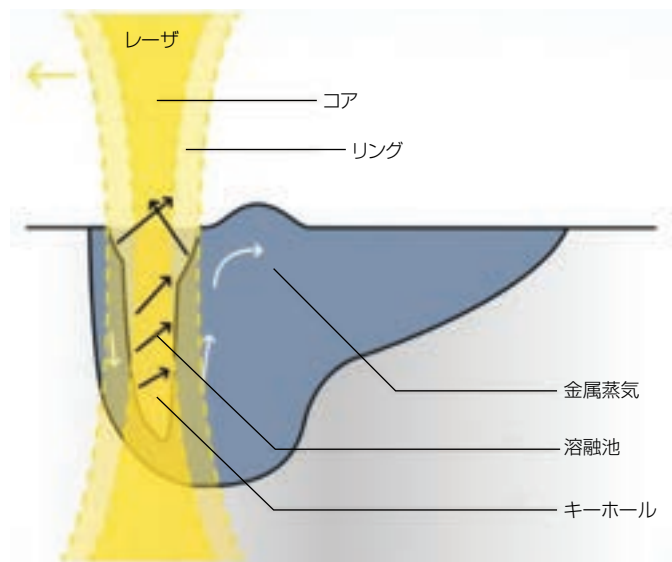


図2 BrightLine Weldの性能：追加のリングビームにより、キーホールの開口部が拡大されて金属蒸気をより簡単に逃がすことができる。表面方向に加速された溶融金属は、リングビームによって溶接池方向に導かれるため、スパッタは発生しない(提供:トルンプ社)

の単一のピンペアで25ms（ミリ秒）から最大で200msである（図2）。

ビーム整形のメリット

ビーム整形はまさに今、真に破壊的な変化をもたらしており、今後も変化をもたらす見込みである。ビーム整形により、レーザーエネルギーの空間的および時間的分布を特定の材料や接合要件に合わせて調整することが可能となる。特に複雑な形状、高反射性材料、異種金属の組み合わせを扱う場合は、従来のガウシアンビームによって、欠陥のない一貫した溶接を行うための理想的なエネルギープロファイルが常に提供されるとは限らない。

ビーム形状を変更することにより、スパッタが低減し、溶接速度が高まり、接合部材におけるエネルギー散逸がより適切に制御されて、キーホールが安定化するなどのメリットが得られる。将来的には、用途に特化した強度分布の品質を、分布の「鋭さ」、焦点深度、寸法精度、効率などの観点から正確に記述することが不可欠となる。ビーム

整形は間違いなく、レーザー材料加工の未来である。

レーザー溶接用のビーム整形を実現するためのいくつかのアプローチが存在する。仏ケイラブズ社（Cailabs）は、マルチプレーン光変換（multiplane light conversion: MPLC）ソリューションを提供している。同社のアプローチは、標準的なガウシアンビームをビーム品質や出力を損なうことなく、トップハット、リングモード、マルチスポットパターンなどの用途に特化した複雑なプロファイルに変換するというものである。高度なビーム制御により、特に溶接困難な材料に対して、溶接の一貫性が大幅に向上し、熱歪みが低減され、スパッタ、ポロシティ、亀裂などの欠陥が最小限に抑えられる。同社のビーム整形モジュールはコンパクトでパッシブ型であり、独プレシテック社（Precitec）のレーザーヘッドなど、産業用レーザーシステムと完全に互換性がある。ケイラブズ社の「CANUNDA」ビーム整形システムは、加工光学系のメーカーに関係なく、ますます拡大す

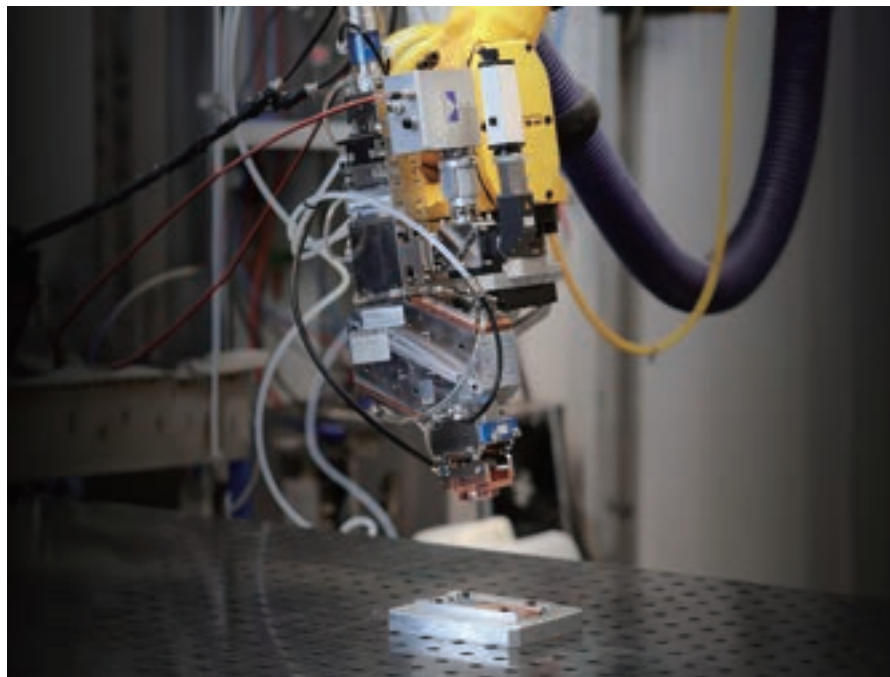


図3 ケイラプズ社のビーム整形技術が搭載されたプレシテック社のレーザービーム溶接ヘッド(提供:ケイラプズ社)

るeモビリティ市場を含む産業用レーザー分野の要件に対応する(図3)。

「Zwobbel」技術と呼ばれる独ロバストAO社(Robust AO)のソリューションは、最大2000Hzの周波数でのz方向内のビームウォブリングによる、動的なビーム整形が可能である。ビームウォブリングでは、メインの溶接経路に沿って移動するレーザービームが、制御された振動パターンで意図的に動かされる。この動きがレーザーの直線運動に重ね合わされて、材料と接合部の形状に合わせて精密に調整可能な、動的なエネルギー分布が生成される。これは90°の偏向ミラーとして使用され、作動時に動的に形状を変えることにより、走査面内で焦点を維持することができる。

Zwobbel技術による軸方向の動的ビームフォーミングによって、アルミニウム合金のレーザー溶接時のポロシティとスパッタの形成がどれだけ低減されるかを調べるための解析が行われている。

ビーム振動のない一連の基準試験(焦点位置が固定のプロセス)との比較により、特にルート領域内でポロシティが大幅に減少することが明らかになった。溶接深さの均一性も高まり、溶接深さの変動範囲は約45%減少した。その結果は、軸方向の動的ビーム整形プロセスによって、ルート領域内の強度ピークが抑えられるとともに、材料の蒸発が局所化されることを示している。また、一連の補助的な試験により、噴射挙動と、的を絞った影響を溶接シーム形状に与える可能性を調べたところ、振動周波数を高くするとスパッタの発生が大幅に低減することが判明した。これはキーホールの拡大を示唆している。断面解析では、溶融池内の変化と、それによる溶接シーム形状の次のような変化が示されている。振動ビームを使用しない溶接プロセスと比較して、溶接深さを維持しつつ、シーム幅はカバー層領域で25%増加し、ルート領域では最大34%増加した。これら

の試験によってロバストAO社は、軸方向の動的ビーム整形が溶接シームの品質向上に有効であることを示した(図4)。

プロセス監視のための新しいソリューション

レーザー加工の精度と効率に対する要求が高まる中で、メーカーは旧式の手法による品質保証の維持に苦戦している。手動検査や従来の監視システムは、高い誤り率、廃棄物の増加、生産のダウンタイム、非効率なワークフローにつながる場合が多い。一般的な生産課題としては、プロセスが不安定であること、不良率が高いこと、プロセスの逸脱が検出されないことや、トレーサビリティが欠如していることなどが挙げられる。自動化されたインテリジェントなリアルタイム監視システムが、プロセスの信頼性を高め、廃棄物を削減し、追跡可能な品質の高い生産を確保するために不可欠である。

フォトニクスに基づくプロセス監視センサの分野では、感度とサンプリングレートの上昇において目覚ましい進歩が見られている。例えば、独4Dフォトニクス社(4D Photonics)が開発した「4D.TWO」センサは、現場でのセットアップを最小限に抑えた、レーザープロセス監視のための非常に効率的でソフトウェア調整可能なソリューションである。このセンサは、可視域(VIS)と近赤外域(NIR)の全スペクトル範囲を、それぞれ16個のチャンネルと、VIS、NIR、後方反射用の3つの広帯域チャンネルを使用して捕捉する。これらを最大100kHzのサンプリングレートで記録することにより、レーザープロセスの詳細なリアルタイム解析と、亀裂、ボア(気孔)、スパッタなどの異常検出を可能にする。

4Dフォトリクス社の「ロスレス技術」は、2つの交互評価ユニットを使用したシームレスで連続的なデータ取得を実現する。この設計により、デッドタイムがなくなり、溶接速度が高い場合でも（バイポーラプレート溶接では1m/s以上）、監視の死角が生じないことが保証される。低いサンプリングレートで動作しているにもかかわらず、システムはわずかな逸脱さえも精密に検出して、精度を損なうことなくデータ量を大幅に削減する。4D.TWOセンサには、ロボットシステムの経路逸脱を検出するための9軸モーショントラッカーが搭載されており、温度、湿度、気圧も記録する。「4D watcher」ソフトウェアと併用すれば、ユーザーは異なる根本原因に関連付けられた複数の「コンピチャネル」を作成することによって、故障タイプを分類することができる。これにより、障害の特定が効率化され、生産上の問題が発生した後の復旧時間が短縮される。

サービスとしてのレーザー溶接

Manufacturing as a Service（サービスとしての製造：MaaS）の概念は、企業が高度な製造能力をオンデマンドで利用することを可能にする。MaaSプラットフォームは、クラウドベースのシステム、デジタルツイン、分散型生産ネットワークを活用して、柔軟性と拡張性に優れた、場所を選ばない製造ソリューションを提供する。レーザー溶接は、精度が高く、自動化と互換性があり、さまざまな材料に対応するため、このモデルにシームレスに適合する。サービスプロバイダーは、レーザー溶接処理のリモートプログラミング、リアルタイム監視、品質管理をデジタルインターフェースを介して提供できるため、複雑な接合プロセスを非常に効率

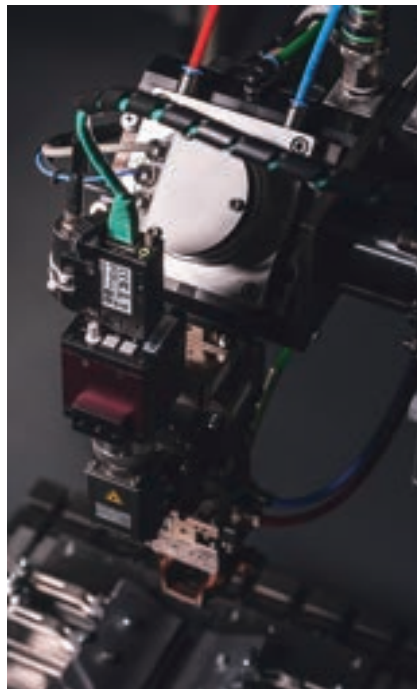


図4 ロバストAO社の「Zwobbel」が実装された溶接用レーザーヘッド(提供：ロバストAO社)

的な従量課金（pay per use）方式で導入することが可能となる。レーザー溶接のような最先端製造技術の利用の民主化は、ラビッドプロトタイピング、カスタマイズ、ジャストインタイム生産を支持するものであり、アジャイルな現代のサプライチェーンのニーズに完璧に適合する。

欧州連合（EU）の「Lasers4MaaS」（<https://lasers4maas.eu>）は、現代製造業の変革の最前線に立つプロジェクトである。その最先端デジタル製造プラットフォームは、動的レーザービーム整形とAI駆動型製造を活用することにより、オンデマンドで持続可能な費用対効果の高い生産を実現する。そのワークフローは、すべてのシステムが整合していることを保証するための、

デジタルプラットフォームを介した設計と生産データのシームレスな統合から始まる。データ交換が完了すると、動的ビーム整形技術によってレーザー動作がリアルタイムにカスタマイズされて、特定の用途に合わせた精密で効率的な材料加工が実現される。生産中は、AIが主要なパラメータを継続的に監視することによって、フィードバックを直ちに提供してプロセス性能を最適化し、デジタルツインと予測分析によって、製品が非常に厳しい品質基準を満たすことが保証される。また、ライフサイクルアセスメントによって環境への影響が評価される。生産データから得られたさまざまな知見がシステムにフィードバックされることにより、将来の動作に向けた継続的な改善と効率の向上が図られる。

Lasers4MaaSは、柔軟性と生産性がレーザー溶接のイノベーションを促進する自動車分野、高精度カスタム製造の恩恵を受ける航空宇宙分野、商品品質が最優先事項である食品包装分野、先進的なレーザーソリューションがさらにクリーンで環境に優しい未来への移行を支える水素や核融合エネルギーのような再生可能エネルギー分野など、さまざまな業界に革新をもたらす見込みである。Lasers4MaaSは、各業界固有の課題に対処することにより、スマートで持続可能な分散型の製造方法の導入を加速させるだろう。高度なレーザーシステムに対するオンデマンドのアクセスを提供するため、大規模な初期投資を必要とすることなく、柔軟性と拡張性に優れた製造ソリューションを実現することができる。

著者紹介

アントニオ・カステロ（Antonio Castelo）は、欧州フォトリクス産業コンソーシアム（European Photonics Industry Consortium：EPIC）のバイオメディカルおよびレーザー担当技術マネージャー。e-mail: antonio.castelo@epic-photonics.com URL: <https://epic-photonics.com>