

オールファイバビーム品質調整力を持つ ファイバレーザ

ダーフ・A.V. クライナ、ロジャー・L. ファロー、ブライアン・ビクター

新開発のファイバレーザは、オールファイバ機構を利用してレーザ出力ファイバから直接ビーム特性をリアルタイム調整する。

レーザは、材料加工、製造、センシング、防衛、科学的アプリケーションに不可欠のツールになっている。この成功は、いくつかの領域でレーザの性能が向上したからである。平均パワーやピークパワー、波長集束、時間的な多様性（パルス幅と周波数、精巧な波形）、効率、出力安定性、長期信頼性、保守要件、運用コストの改善である。

ファイバレーザは、これらの進歩のいくつかを可能にする点で特に重要であり、現在、大量生産を必要とする産

業、微細加工アプリケーションの多くで優位を占めている。その持ち前の効率と信頼性に加えて、ファイバレーザは、当然、加工ヘッドへのファイバデリバリが可能であり、レーザや工作機械のフリースペースオプティクススの負荷を最小化する。

上のレーザ特性と対照的に、従来レーザのビーム空間特性は、相対的に最適化されておらず、柔軟ではない。アプリケーションによっては、回折限界ビーム品質（ガウシアン空間プロファイ

ルに近い $M^2 \approx 1$) を必要とするものがある。一方、より低いビーム品質や異なるビーム形状（近視野空間プロファイル）、発散プロファイル、伝搬特性を必要とするものもある。

ビーム品質調整が必要とされる理由

例えば、金属切断（最大の産業アプリケーション）では、相対的に高ビーム品質のスポットが薄い材料では最高速度となるが、最大厚は、結果的に小切断カーフの制約を受けることになる。それが溶融物の放出を阻害するからである。より大きくて分散が大きなビーム（ビーム品質低下）により、厚板の切断が可能になるが、薄板にはスピードペナルティが付随する。溶接では、厚い接続の場合、高ビーム品質によって深い溶け込み「キーホール」溶接となり、生産性が最大化する。それに対して、より大きくて低ビーム品質のスポットは、薄い部品で滑らかな溶接のための浅い伝導溶接となる。さらに、特殊なビーム形状は、ワークピースの熱溶着と温度勾配に影響を与える。ガウシアンビームと違い、フラットトップビームは、均一照射により加工の過不足を防ぎ、円環形、つまりドーナツ形状のビームは、アプリケーションによっては加工品質を改善することが知られている。

ほとんどのレーザは、固定ビーム特性である。ビームは、屈折、反射、回折光学系により異なるフォーマットに変更可能である。固定ビームシステムのレー

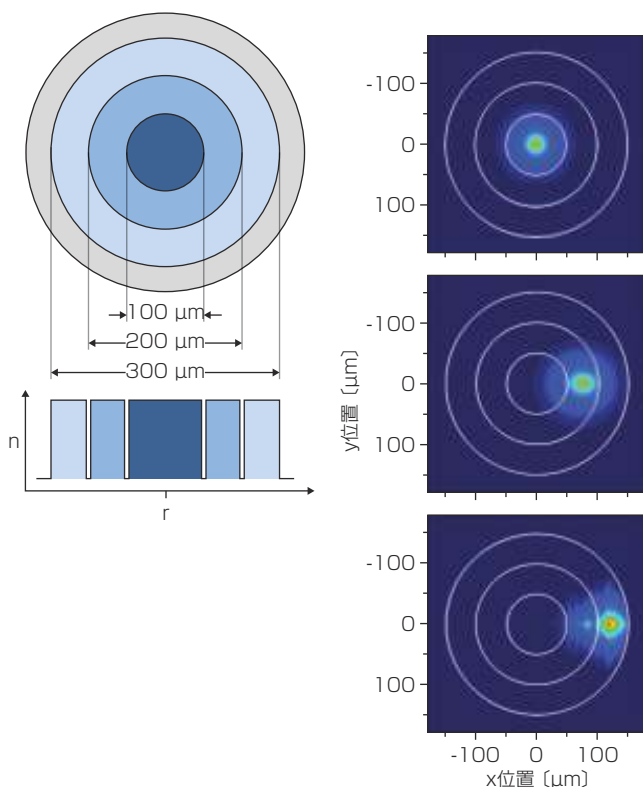


図1 3つのガイド領域を持つ供給ファイバで、左はファイバ横断面(上部)と屈折率プロファイル(下)が示されている。シミュレーション(右)は、ビームプロファイルを示しており、これは異なる摂動条件でガイド領域に結合されている。ビームは、ファイバを伝搬するに従い、方位角に均一化している。

ザベースの加工装置は、限られた範囲の加工、材料にしか対処できないので、妥協の性能、つまり制限的なジョブミックスとなる。例えば、小ビームの金属切断装置は、厚板を切断することはできない、それに対して、大きなビームの加工装置は薄板の切断では、経済的ではない。

ビーム特性の変異性は、プロセス最適化と装置の多様性を実現するには、極めて望ましい。一定レベルのビーム調整ができるさまざまなアプローチが開発されている。ズームレンズ、取替可能な回折光学素子、デフォーダブルミラー、ビームコンバイナ、(ファイバデリバリレーザ用)ファイバとファイバのカプラや、電動オプティクスを持つスイッチなどである。これらのフリースペース光学アプローチには、いくつかの欠点がある。

- ・ミスアラインメント、汚染、環境条件(温度、振動)の影響を受けやすい。
- ・システムコストと複雑性の増大。
- ・光損失。
- ・ハイパワーアプリケーションでは熱レンズが、ビーム品質や焦点位置に、パワーに依存した変化を起こす。
- ・ズームレンズの場合、加工ヘッドのサイズと重量が増加する。

フリースペースオプティクスに固有の問題に対処するために、ファイバベースのビームコンバイナを利用して、限定的なビームチューナビリティが実現されている。こうしたシステムでは、フィーディングファイバが一般に、センターコアおよび環状コアで構成されており、溶融ファイバコンバイナにより、これら2つのコアに異なるレーザが入力される。このアプローチは、フリースペースオプティクスを除去するという利点はあるが、他の欠点が出る。

- ・ビーム設定の1つを除いて、すべてに

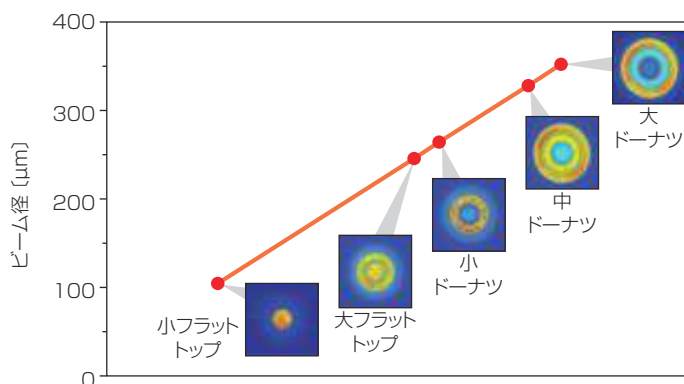


図2 これらは、シートメタル切断ツールで用いられる一般的なCoronaビーム設定である。二次モーメントビーム径は、y軸で与えられ、画像は、4kWで記録された近視野空間プロファイルを示している。

において全レーザ出力を利用できないので、大幅なコスト増を招く。すなわち、エンドユーザーは、そのプロセスで一般的に利用するよりも多くのレーザパワーを購入せざるを得ない。

- ・領域間でパワーを分割すると「融通が利かず」、異なるプロセス、材料に対応するために変更できず、したがって加工装置の多様性が制限される。
- ・利用できるビーム形状は限られている。例えば、このアプローチでは、1つの円環ビームサイズと形状しか利用できない。違う円環ビームを利用するには、ズームレンズ、もしくは他のオプティクスの追加が必要になり、ビーム統合技術の当初の利点を台無しにすることになる。

ビーム調整のために利用できるオプションは、加工装置の複雑さ、コスト、性能、多様性、信頼性で大きな妥協を必要とするので、ほとんどのレーザベース加工装置は、依然として固定ビームを利用している。

オールファイバ可変ビーム品質

米エヌライト社(nLIGHT)は先頃、Coronaという新しいファイバレーザを発売した。これは、マルチキロワットレベルで素早くビーム品質を可変できる。

このファイバレーザは、新しいオールファイバ技術を利用して、レーザ出力ファイバから直接に、幅広いビーム形状とサイズを供給する。いくつかのCorona対応金属切断装置を、大手の工作機械インテグレーターが発表している。Coronaファイバレーザは現在、出力3~4kWが利用可能であり、14kWまでが実証されている。

Coronaファイバレーザは、オールファイバ機構によりビーム品質を調整できる。これには、以下のコンポーネントが含まれる。

1. 供給ファイバは、マルチガイド領域に区分されている。例えば、図1(左)に示した代表的な設計は、3ゾーンの供給ファイバを使う。これは100μm径の中央コア、200μm外形の環状コア、さらに300μm外形のもう1つの環状コアで構成されている。ビーム形状は、これらの領域間でレーザパワー区分を変えることで調整される。
2. ファイバ長は、摂動の適用により、半径方向へのビームシフトを可能にしている。これにより、図1(右)のシミュレーションに見られるとおり、ガイド領域でビーム区分が可能になる。
3. 摂動メカニズムはビームをシフト、つまり調整する。いくつかの効果的な

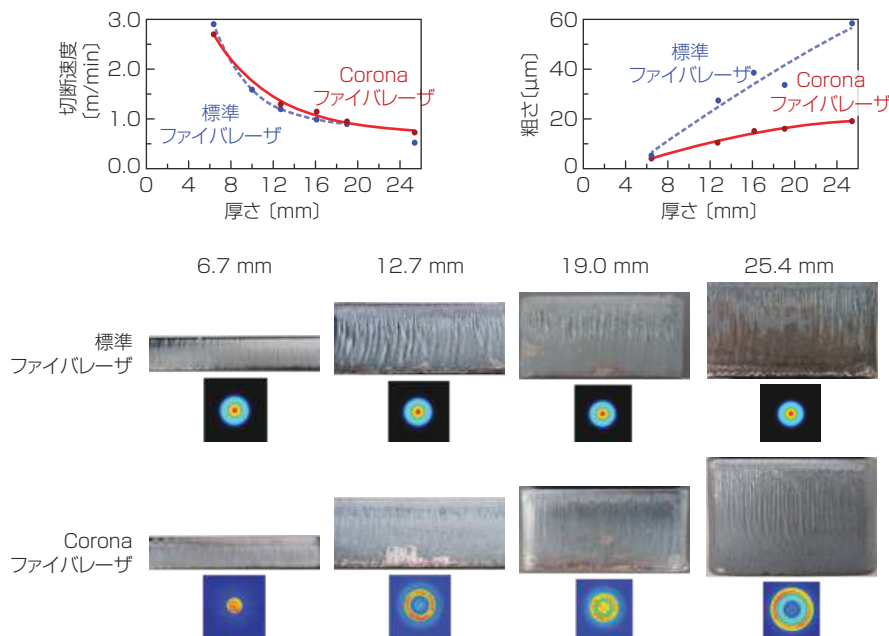


図3 切断速度と計測されたエッジ粗さを軟鋼の酸素切断の厚さに対してプロット(上段と中央)。切断画像は、対応する近視野ビームプロファイルとともにグラフ下の写真で示している。

振動メカニズムが確認されている。マイクロベンディング、マクロベンディング、伸長、音響および電気光学振動、熱振動などが含まれる。Coronaファイバレーザは、独自のメカニズムを使用する。これは、下記のように、高安定と信頼性の両方を示している。

このメカニズムは、ビーム特性の連続チューニングを可能にし、各ビーム設定に対してレーザの全出力を利用できる。各製品に一定数のあらかじめ定義されたビーム(“Index”設定として知られる)が、プロセス最適化とツール安定性にとって連続チューニングより好ましいことが分かった。産業用レーザは、電気的ノイズ環境で導入されることがよくある。その場合、アナログ制御信号がさまざまなタイムスケールで不安定になり得る。固定ビーム設定とすることでエンドユーザーは、そのレーザパフォーマンスが何年も安定的であると確信している。

図2は、シートメタル切断ツールで、一般的なCoronaビーム設定の利用を示している。ビーム径は、約100 μ m～

350 μ m(二次モーメント定義)の間でプログラム可能である。5個の選択されたビーム形状が対応しているのは、100 μ mフラットトップ(外側径)、200 μ mフラットトップ、200 μ mドーナツ、300 μ m厚肉ドーナツ、それに300 μ m薄肉ドーナツである。図2で明白なビームサイズと形状における広いダイナミックレンジは、他のどんな実用技術でも達成できない。

スイッチング時間は、全範囲のビームサイズで30ms以下、またレーザは切替え中に全出力動作を維持しており、ブランキングは不要である。ビーム特性のこの迅速な調整により、加工装置の即座の調整と最適化が可能になる。これは異なる材料や厚さに対してだけでなく、異なる工程段階に対しても可能である(例えば、穴開けvs.切断、あるいは直線切断vs.角つけ)。

Coronaは、ファイバレーザの比類のない安定性と信頼性を維持している。加速寿命試験が行われ、そこでCoronaファイバレーザは、そのインデックス設定の間で周期的に繰り返され、各設定

に留まるのは100msだった。試験時間は、1340万回のインデックス変更で、これは1日に1000インデックス変更の加工装置で36年以上の稼働に相当する。試験を通じて、すべてのインデックス設定でビーム径は、 $\pm 3\%$ 以内(計測不確定性考慮)に安定していた。ドリフトも劣化も生じなかった。

金属切断結果

Coronaファイバレーザは、エヌライト社のアプリケーション研究所でテストされ、世界の複数の主要工作機械インテグレーターによりシートメタル切断装置に組み込まれている。結果は、以下の通りである。

1. 予想通り、インデックス0の切断速度とエッジ品質は、100 μ m供給ファイバの従来型ファイバレーザと同等である。この設定は一般に、切断速度を最大化するために薄板で用いられる。
2. N_2 アシストガスを利用するステンレススチールやアルミニウムの切断では、インデックス1と2が、速度ペナリティが小さく、エッジ品質がより

表

特長	利点	ズームレンズ	ビーム形状切替 オプティクス	電動ファイバ カブラ	電動ファイバ スイッチ	ファイバビーム 組合せ	Corona
非フリースペース オプティクス	信頼性	×	×	×	×	✓	✓
標準光加工ヘッド適合	費用、性能/ パフォーマンス、	×	×	✓	✓	✓	✓
レーザへの組込み(外部 デバイスなし、プロセス ファイバなし)	費用、信頼性	×	×	×	×	✓	✓
すべてのビーム形状で フルパワー利用可能	費用、性能/ パフォーマンス	✓	✓	✓	✓	×	✓
最適出力分布(フラット トップ、ドーナツ)	性能/ パフォーマンス、多様性	×	×	✓	×	×	✓
速度の高速切替	性能/ パフォーマンス、多様性	✓	×	✓	×	✓	✓

優れている。エッジ品質は、より高出力の従来型ファイバレーザよりもさらに優れている。

3.O₂アシストガスで軟鋼(MS)を切断する場合、インデックス3と4が所定のレーザ出力で最大厚さとプロセスウインドウを拡大。Coronaでは、従来のファイバレーザ(出力レベルがもっと高くても)で達成できるよりも著しくエッジ品質が優れており、CO₂レーザに匹敵する。

3番目の所見は特に重要である。MSの酸素切断は、ハイパワー産業用レーザの最大のアプリケーションである。ファイバレーザが現在、市場で優位を占めているとはいえ、厚板(約10mm以上)の切断ではCO₂レーザは依然として優先されている。理由は、CO₂レーザを用いるほうがエッジ品質が優れているからである(粗さ低減、優れた直線性と垂直性)。ファイバレーザで対処できる最大厚は増加している。主により高出力のレーザを利用することによるものである。しかし、このアプローチは、前払いコストと運用コストの増加となる。

切断ヘッドに突きつけられる要求は大きいですが、それでもなおCO₂レーザのエッジ品質を達成することはない。CO₂のようなエッジ品質を達成し、厚いMSを切断するために必要なファイバレーザ出力を抑えることでCoronaファイバレーザは、金属切断でCO₂レーザの最後の加工優位性を取り除く。

図3は、6.7mm～25.4mmの間のMS板のO₂切断で、4kW従来型とCoronaファイバレーザとの切断パフォーマンス比較を示している。切断速度は両方のレーザで同じであるが、エッジ粗さは、Coronaのほうが一般に2～3倍低く、厚さ依存は著しく低い。この高いエッジ品質は、高価で時間がかかる後処理の必要性を減らす、または不要にする。工作機械インテグレーターは、4kW Coronaのエッジ品質とプロセスウイン

ドウが、6kW標準ファイバレーザのものよりも優れていることを確認した。さらに、高信頼に切断(クリーンな部品落下)できる最大厚は、Coronaファイバレーザでは30%増となる。

表は、ビーム品質が調整できる理想的なレーザ光源の望ましい特徴を挙げており、利用できるオプションを採点している。ビーム品質を素早く調整できる実用的なオールファイバ高信頼レーザが、材料加工に新たな局面を開いた。また、ハイパワーレーザの最大市場である金属切断で、大きな価値を持つことがすでに証明されている。ワークピースへの熱分布をリアルタイムで精密制御し変化させられることが、幅広いアプリケーションに向けた非常に高性能で、用途の広い加工装置の開発を可能にする。

謝辞
nLIGHTはエヌライト社の登録商標、Coronaはエヌライト社の商標。

著者紹介

ダーフ・A.V.クライナは、ファイバレーザ技術担当副社長。ロジャー・L. ファローは、シニア・ファイバレーザエンジニア。ブライアン・ビクターは産業用アプリケーション担当ディレクター。全員エヌライト社所属。e-mail: dahv.kliner@nlight.net www.nlight.net