

産業用レーザー加工における インプロセス監視とアットプロセス監視

ジョン・マッコリー

どちらの産業用レーザー加工手法が、あなたのニーズに合っているだろうか。

エイブラハム・リンカーン (Abraham Lincoln) はかつて、「一部の人たちが常に、そしてすべての人たちを一時的にだますことはできるが、すべての人たちが常にだますことはできない」と述べた⁽¹⁾。システムに組み込まれたレーザーの性能を監視するという問題に取り組む場合も、同じことが言える。一部のシステムを常に、そしてすべてのシステムを一時的に監視することはできるが、すべてのシステムを常に監視することはできない。インダストリー 4.0 (Industry 4.0)、あるいはスマートマニュファクチャリングの時代において、その違いを理解することは重要である。

インダストリー 4.0 は、あらゆる業界の製造に変化をもたらしている。技術に支えられて製造業者は、より効率的に、より迅速に、そして全般的に、よりインテリジェントに部品を製造している。スマートマシンを適切に適用するには、データが必要である。最終的には、そのデータを解釈および選別して、プロセスを改善する必要がある。データが少なすぎるとプロセスの改善は妨げられるが、それと同時に、データが多すぎると逆効果になる恐れがある。

レーザープロセスを使用するシステムには、それぞれ独自の動作特性とそれに伴う問題がある。レーザーの性能に関するデータが少なすぎると、レーザーオペレーターはレーザーシステム内の変化を管理する方法を十分に理解できない。レーザーの性能に関するデータが多

すぎると、圧倒されて混乱し、最終的には逆効果になる。

レーザー性能を測定するタイミング

レーザーの性能特性の測定には、4つのアプローチが存在する。1つ目は、レーザーシステムの大半のオペレーターが好む傾向にある、定期保全 (periodic maintenance) である。この方法では、レーザーの計画的なダウンタイム (通常は四半期、半年、または1年に一回) に合わせてレーザーの性能が測定される。このタイミングで、レーザーの性能特性を測定し、前回の測定値と比較す

ることによって、レーザー挙動のトレンドを分析する。

2つ目のアプローチは、レーザーを使用するプロセスに何らかの障害が発生した時にレーザーの測定を行うものである。例えば、溶接レーザーはやがて溶接部の劣化を示すようになり、切断レーザーはやがて切れ味を失うか、全く切断できなくなってしまう。レーザー性能特性を測定することにより、レーザーシステムの動作パラメータを設計どおりの状態に復元する。

3つ目と4つ目のアプローチは、インプロセス監視とアットプロセス (at-



process)監視で、これが本稿で取り上げるテーマである。どちらのアプローチにも長所と短所があり、レーザーの加工状態を把握するのにどのような方法が最善であるかを判断しようという場合に、レーザーオペレーターはそれらを理解しておく必要がある。レーザーオペレーターは、レーザーのライフサイクルの製造段階において、レーザーシステムのどの測定値が重要になるかも理解しておかなければならない。

レーザーが材料を加工する方法

レーザーオペレーターは、レーザーがどのプロセスに適用されているかにかかわらず、高いレベルでレーザーが材料をどのように加工するかを理解しなければならない。例えば、ある種類のレーザーがどのように溶接を行うかと、そのレーザーが自動車のドアフレームをどのように溶接するかは異なり、前者は、プロセスに依存しない高いレベルである。これを理解するための最も簡単な方法は、レーザー出力密度である。

出力密度は、材料の単位面積に印加されるレーザー光の量として定義され

る。出力密度は W/cm^2 の単位で表されることが多い。“W”は、レーザーの連続波(CW)出力または平均出力(パルスレーザーの場合)の単位である「ワット」を表し、“ cm^2 ”は、レーザーの加工面におけるスポットサイズの面積を表す。例えば、100WのCW出力または平均出力で動作するレーザーを、 $100\mu m$ のスポットサイズに集光すると、出力密度は $2.6 \times 10^3 kW/cm^2$ となる。

レーザーの出力密度は、材料に印加されるレーザー光の量またはビームのサイズのいずれかの変化による影響を受ける可能性がある。適切なレーザープロセスを維持するには、両方の変数をレーザーオペレーターが測定し、分析し、理解することが重要である。

重要なレーザー挙動の測定

レーザー光の量は、パワーメーターとして一般的に知られるもので測定することができる。パワーメーターは、レーザー光を収集するセンサで、レーザー光を電気信号に変換し、これを外挿することによって、光が生成する電力またはエネルギーの量を求め、最後にその測定

値を、接続されているメーターまたはローカルPCに分析のために提供する。この処理に要する時間は、通常はわずか数秒だが、使用する技術によって異なる可能性がある。これらの測定値を収集して分析することが、レーザーのライフサイクルの特に製造段階において、重要である。それによって、レーザー性能がどのように変化し、その変化がプロセスへのレーザー適用にどのような影響を与えるかがわかるためである。

全体的なビーム径も測定する必要があり、さまざまな方法が使用できる。D4 σ 、ピークの13.5%、10/90ナイフエッジは、いずれもビーム径を計算するものだが、全く異なる結果が生成される可能性がある。そのすべてが、さまざまな業界において、さまざまな背景や経験を持つ人々によって使用されている。

ビーム径を計算する際には、ビームの丸み、すなわち楕円率を考察する必要がある。ビーム形状と、ビームプロファイルにおけるエネルギーの分布状態を、理解しなければならない。ビームは、ガウシアンビームか、フラット

レーザー測定アプローチ(インプロセスとアウトプロセス)の比較

アプローチ	長所	短所
in-situ測定 「インプロセス監視」	<ul style="list-style-type: none"> システムに組み込まれている 使用が簡単 レーザー出力が連続的にチェックされてシステムにフィードバックされる 	<ul style="list-style-type: none"> レーザーシステムの一部だけをチェックする プロセスに最も近い光学部品は熱影響を最も受けやすい 組み込み後の較正が難しい
オフライン測定 「アウトプロセス」	<ul style="list-style-type: none"> レーザーシステム全体(実世界)を完全に測定 システムに組み込み可能 	<ul style="list-style-type: none"> 測定のためにダウンタイムが必要 セットアップが難しい場合がある 必要な頻度では実行されない

加工時の出力密度を



理解するために
どちらが最良か

図1 レーザー測定アプローチ(インプロセスとアウトプロセス)の比較(画像提供: MKS オフィール社)

トップビームか。レーザがどのようにプロセスに適用されるかを理解しようとする際には、そうしたすべての測定とそれ以外の処理を行うために、業界標準のビームプロファイリングシステムを使用することが可能であり、使用するべきである。

ビーム品質も、レーザの選定、レーザを使用するアプリケーションの開発、システムへのレーザ光源の組み込みまたはコミッショニングのいずれの作業を行う場合にも、考察する必要がある。ほとんどの場合で、レーザがひとたび製造段階に入ると、ビーム品質分析が検討されることはまれであるため、この分析をレーザのライフサイクルのこの最終段階の前に検討することが重要である。

ビーム品質はM2値で表すことができ、完璧なレーザはこの値が1.0となる。ビームパラメータ積(BPP)とK値も、レーザ品質を表す値である。レーザ光源は、ビーム品質と、レーザ光を生成する効率という点で改良されており、レーザが使用されるさまざまなプロセスに対して、レーザ光源毎にそれぞれ独自の強みがある。

レーザのユーザーが、プロセスに対するレーザの作用を理解することが重要である。レーザ光の量とプロセスにおけるビームサイズを測定し、これら2つの重要な測定値の時間に伴う変化とその原因を把握することが、システム性能を完全に理解して、より一貫した長時間性能を確保するために不可欠である。

インプロセス監視と アットプロセス監視

今日では、できる限りリアルタイムに近いデータ入力求められる。そのために必要になるのが、「インプロセ

ス監視」と一般的に呼ばれる、レーザ加工中にレーザ性能の測定値を監視する手法である。積層造形の分野では、この手法は「*in situ*監視」として知られている。

理解しておくことが重要となるもう1つの手法が「アットプロセス監視」で、こちらは、個々の部品加工の合間に行われ、レーザ加工が行われている面におけるレーザ性能を測定する。どちらの手法にも重要な長所と短所がある(図1)。

インプロセス監視

インプロセス監視、または*in situ*監視では、レーザが稼働中で部品を製造している間に、レーザの性能をレーザシステムによってある程度測定することが可能である。システム内に戦略的に配置されたサブシステムが、レーザ光のごく一部を測定し、測定対象とするレーザ性能特性をリアルタイムに分析する。

このアプローチにはいくつかの利点がある。まず、サブシステムは全体的なシステムに組み込まれているため、両者は容易に通信できる。レーザ性能に関するリアルタイムのフィードバックが継続的に伝達されるため、必要に応じてシステム全体をその場で調整することができる。2つ目は、これらのサブシステムは通常、組み込まれるシステム向けに特別に設計されており、本質的にシンプルであることが多く、顧客が必要とするフィードバックだけを提供する。収集する情報は、レーザオペレーターが目にするHMI(ヒューマンマシンインタフェース)に簡単に表示できる。このデータは、システムとユーザーの安全確保や廃棄物削減を目的とした継続/中止を判断するために、保存、分析、使用することもできる。

このアプローチの主な欠点は、これらのサブシステムがレーザシステムの一部しか測定しないことである。レーザビームの小さなサンプルが、プロセスに到達する前に測定されて、プロセス中に分析される。残念ながら、加工中に生じる問題の多くが、プロセスに近いコンポーネントの劣化に起因し、レーザ測定のためのサンプルがビームパス上で取得された後に発生する。プロセス中にコンポーネントが劣化または故障する場合、レーザ測定に使用されるサンプルにはその劣化や故障が現れないため、誤ったフィードバックがシステムに伝達される可能性がある。

このアプローチのもう1つの欠点は、レーザ測定コンポーネントの較正が難しいことである。サブシステムは全体的なシステムに組み込まれているため、再較正のためにコンポーネントを取り外すのは、一般的に困難または不可能である。電力測定コンポーネントは、正確な測定結果を確保するために、頻繁に較正する必要がある(オフィール社は12カ月に一回を推奨している)。

これらのシステムの多くが、光の挙動の実測値とは独立してレーザの性能を表す、他のセンサフィードバックをシステムに提供する。例えば、プロセスの近くに配置されてレーザコンポーネントを保護するカバーガラスの温度モニターは、プロセスのデブリがあまりにも多くガラスに付着して、レーザ光の吸収による温度上昇を引き起こしていることを、レーザのユーザーに伝えることができる。また、これらのセンサは、貴重な情報をシステムとレーザユーザーに提供する。

アットプロセス監視

アットプロセス監視では通常、レーザ加工が行われている箇所測定を行

う、一連のスタンドアロン製品を使用して、レーザシステム全体を分析するこれらのシステムは、独立した電力／エネルギー測定製品とビームプロファイリング製品で構成するか、あるいは、電力／エネルギーとビームプロファイリングデータを同時に収集する製品(図2)で構成することができる。互いに依存する場合もあれば独立している場合もあるこれらのシステムは、全体的なシステムに組み込むか、あるいは、部品加工の合間にシステムの定期保全を行うために使用することができる。

in situ 監視と同様に、アットプロセス監視にも利点と欠点がある。最大の利点は、システム内のレーザ全体に対する、より完全な評価が行われることである。レーザ光の100%を収集して電力またはエネルギーが測定され、レーザの集光スポットで分析が行われるため、その時点でのレーザ性能の完全に包括的な分析結果が、レーザユーザーに適時に提供される。このデータは、全体的なシステムの中に保存、格納、記録することも可能であり、また、そうすべきである。そうしておけば、連続的なトレンド分析、トラブルシューティング中に行われる保守作業後のシステム効率の確保、または、大規模障害発生後のシステム復旧のために、このデータにアクセスすることができる。この手法を用いたデータの収集によって、レーザユーザーは最終的に、レーザ挙動を完全に理解することができるが、それにはいくらかの代償が伴う。

この手法を適用することの最も一般的な欠点は、製造のダウンタイムである。レーザ光の全量を測定するため、レーザを製造から取り外して測定を行う必要がある。レーザ測定システムが機械に組み込まれている場合、これは通常それほど大きな問題ではないが、



図2 MKS社の包括的な最新産業用ビームプロファイリングシステム「Ophir Beam Peek」(画像提供:MKSオフィール社)

それでも時は金なりである(ダウンタイムのコストは大きい)。また、レーザ測定システムが全体的なシステムに組み込まれていれば便利だが、それにはコストがかかる可能性があり、不要とみなされる場合もある。全体的なシステムに組み込まれていない場合、レーザ測定システムは保守ツールとして使用することができる。しかしその場合も、レーザを製造から取り外して測定を行う必要があり、レーザの保守担当者がレーザ測定ツールの操作に不慣れな場合は、測定に時間がかかる可能性がある。そのために、測定が必要な頻度で行われなかったり、全くおろそかになったりする恐れがある。

これ以外にも、プロセスの性能に関する情報をレーザユーザーに提供できる製品が存在する。例えば、さまざまな手法を適用して溶接プロセスのリアルタイム分析を行う製品が、複数の企業によって提供されている。これらのシステ

ムは、溶接の継続／中止や合格／不合格の限界条件を示して、システムに問題が潜んでいる可能性をユーザーに通知し、究極的には、より品質の高い部品の製造と廃棄物の削減を目指す。

レーザ性能の確保

レーザが使用期間を通して安定した性能を発揮することが、プロセスの一貫性と効率を最大化して維持し、レーザの寿命を引き延ばし、システムのROI(投資履歴率)を高めるために不可欠である。作業現場でレーザ特性を客観的に測定することによってのみ、レーザユーザーはレーザの挙動を確実に把握することができる。

出力密度が加工材料にどのような影響を与えるかを理解することは、プロセスの全体的な理解に不可欠である。また、レーザシステムの変化が、材料に適用される出力密度にどのような影響を与えるかを理解することは、レーザユーザーがシステムの保守作業の方法とタイミングを理解するために役立つ。

インプロセスまたはアットプロセスでレーザを測定することの両方に長所と短所があるが、どちらの手法によっても、レーザ加工に関する重要な情報が得られる。レーザ性能測定製品は絶えず進化しており、ますます使いやすくなるとともに、製造環境での使用に対する堅牢性が増している。これらの製品は、レーザがどのように作用するかを簡単に理解して、レーザの長期的な保守を行うために不可欠な情報を、レーザユーザーに提供する。

参考文献

(1) See <https://abrahamlincolnnassociation.org>.

著者紹介

ジョン・マッコリー(John McCauley)は、イスラエルのMKSオフィール社(MKS Ophir)のシニアビジネス開発マネージャーで、自動車と指向性エネルギーの分野を専門としている。