溶接も可能な ナノ秒パルスファイバレーザ

ジャック・ガブズディル、ダニエル・カポスタンニョ

レーザは、複数の材料加工に適用可能に

ナノ秒パルス赤外ファイバレーザは、産業分野のマーキングやエングレービング用レーザとして大多数の用途で選択されており、多用途に適用可能であることはよく知られている。一般的に、パルスエネルギーは数ミリジュール未満、平均出力は最大100Wであるこれらのレーザは、パルス繰り返し速度が高く、連続波（CW：Continuous Wave）モードと変調疑似CW（QCW：Quasi-CW）モードを備えており、その能力はかなり高い。より最近では、さまざまな種類の微細加工や表面テクスチャリング、さらにはリモート微細切断用にまで使用され始めている。これらの用途のほとんどにおいて、金属除去が行われる。この前提に立つと、このビーム源を材料結合に適用するというのは直感には反している。同じレーザ光源で、材料結合のほか、除去、アブレーション、エングレービング、切断、マーキングが可能というのはまったく素晴らしいとしか言いようがない（**図1**）。

図1　SPI社のコンパクトな水冷式100Wナノ秒ファイバレーザ

レーザの使用者にとって、そのメリットは非常に大きい。このレーザ光源は、複数の処理に対応可能であるとともに、一般的には空冷式のコンパクトなパッケージに収められており、シームレスな統合が可能である。溶接と結合には、高いパルスエネルギーによるミリ秒レベルの長パルスが必要というのが一般通念だが、明らかにそうではなさそうだ。材料結合に対するこの種類のレーザの能力はそれほどよくは知られていないが、薄い部分の材料を結合するその能力には目を見張るものがある。

世界的に、民生エレクトロニクス、エネルギー貯蔵、医療機器といった業界では、ますます多くの機能がさらに小さな体積の高密度パッケージに詰め込まれるようになりつつある。これに伴い、そのような製品を実現するための有効な製造技術を確立することの必要性がますます高まっている。この場合は、レーザ結合技術によってである。そこで、コスト（資本コストと保守コスト）が低いという最も重要な要件を満たし、市場の需要に対応する産業用（ナノ秒赤外ファイバ）レーザによって、求められる高い再現性、精度、生産性を提供する生産技術が存在する。

パルスYAGレーザ、ディスクレーザ、ファイバレーザ（CWとQCW）、さらにはダイオードレーザにいたるまで、さまざまな種類のすべてのレーザに対し、用途によってそれぞれ得意分野が存在する。ナノ秒パルスレーザの利用はこれまで、少数の先駆的な用途に限られていたが、その状況は変化しつつあり、最近の事例では、ナノ秒ファイバレーザが材料結合に適用可能であることが実証されている。

英SPI社は、MOPA（Master Oscillator Power Amplifier：マスター発振器パワーアンプ）ナノ秒ファイバレーザを他社に先駆けて発表した。用途の要件に応じてパルス特性を制御および調整可能であることから、非常に融通性の高いツールであるとみなされている。パルス持続時間とパルス周波数を変更する能力

図2　40WのHS-Hレーザを用いたプラスチック溶接が適用されたインスリンディスペンサ

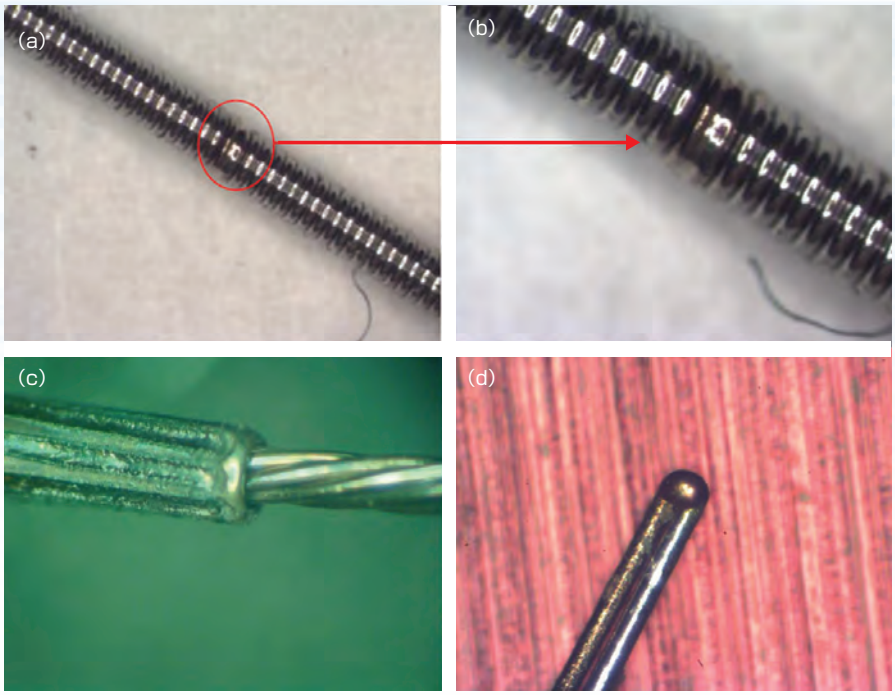

図3　250kHzで動作させた20WのEP-Zレーザによる50μmのワイヤ間溶接（aとb）、20WのEP-Sレーザによって溶接された熱電対（c）、40WのHS-Hレーザによるブレードとワイヤの溶接（d）。

によってこれが実現されており、中には3～500nsで動作可能なレーザ源もある。パルス動作と連続波動作の間の切り替えが可能であることも、重要な差別化要素となっている。また、一連の異なるビーム品質を持つレーザ源が用意されており、目の前の処理に適応可能なツールが提供できるようになっている。平均出力とピーク出力の範囲内において、このレーザはミリ秒レベルで変調可能で、低い平均出力のミリ秒パルスを必要とする用途に対応する。

プラスチック溶接

プラスチック溶接を例に挙げよう。微細流動装置など高い精度が求められる一部の用途では、ファイバレーザが他のレーザよりも有効である。対象箇所におけるエネルギープロファイルが、その違いを生む場合がある。例えば、複雑な医療機器において、透明ポリマーを黒色のポリマーに溶接することが求められるケースに対して、40W、M^2=3のレーザビームをCWモードで使用した（**図2**）。「必要とするスポットサイズ、エネルギー分布、被写界深度という点で、ビームを制御することができた」と、米オーケー・インダストリーズ社（Okay Industries）のレーザ技術担当ダイレクターを務めるジョー・ロヴォッティ氏（Joe Lovotti）はコメントしている。

ワイヤ溶接

金属溶接に関しては、医療機器業界では絶えず、最も優秀なアプリケーションエンジニアにとってさえも難題となる微細結合用途が出現する。細いワイヤの結合は、CWファイバレーザが多用される、そのような例の1つにすぎない。しかし、ワイヤがさらに小さくなるにつれて、熱入力に伴う問題はますます深刻化している。M^2<1.6の20Wレーザを使用すると、50μmのコイル状ワイヤに対する溶接焦点が適切に絞られ、優れた結果が得られることが明らかになった。課題は、レーザを高い繰返し速度で動作させることによって、パルスのピーク出力を抑え、250kHzを超える周波数で0.1mJ未満のパルスによってQCWに近い結果を生成することだった。つまり、必要なのはただ、短いバーストだけである。

一部の用途では、ワイヤに覆いとなるシースまたはブレードを結合することが求められる（**図3**）。ここでは、パルスに幅広いエネルギー分布を持たせれば、2つの部品の間により適切な湿潤構造が生成されることが明らかになった。この例では、40W、M^2=3のレーザを使用した。スポットを大きくして、パルスエネルギーを1.25mJ以上とやや高めにすることによって、ギャップを埋めることができた。

一方、M^2<1.3の20Wのシングルモードレーザを使用すると、非常に高い精度が達成可能であることが実証できる。例として挙げるのは、直径12μmの細い異種ワイヤの溶接で、適切に溶接して熱電対を形成することができた。このような用途では、ジギングおよびビジョンシステムが、望ましい結果を達成する上でレーザと同等に重要な役割

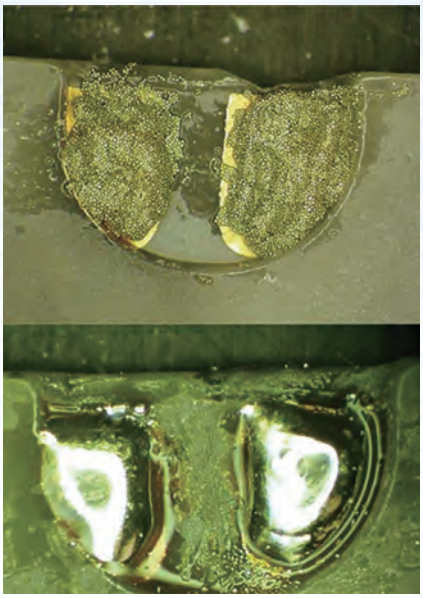

図4　500kHzで動作させた40WのHS-Hレーザによるはんだ付け。

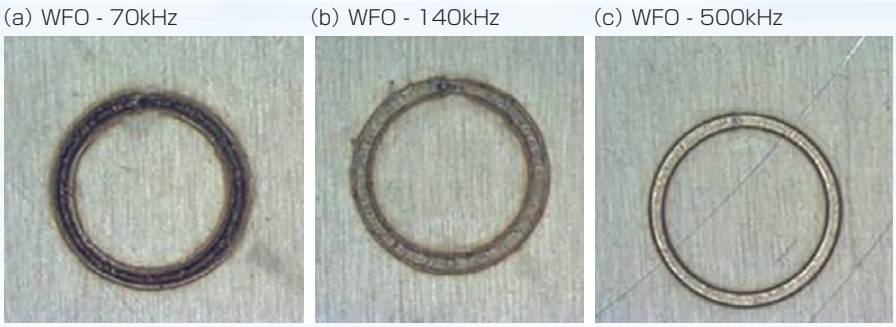

図5　250nsのパルスを異なる周波数で適用したビードオンプレート溶接。

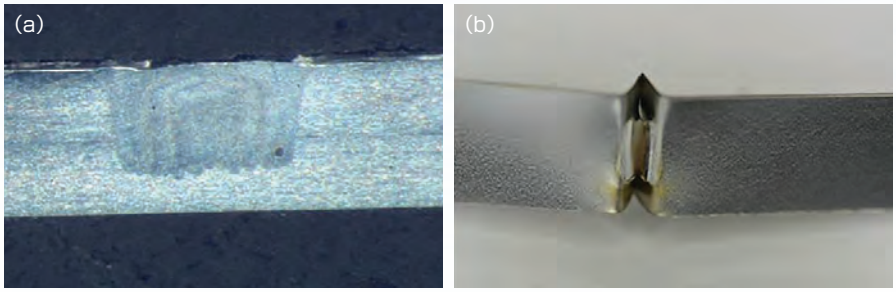

図6　70WのEP-Zレーザによるステンレス鋼シーム溶接部の顕微鏡写真(a)と、その剥離試験(b)。

を果たす。

はんだ付けの用途

はんだ付けについては、CWレーザまたは直接加工用半導体レーザが一般的に使用されるが、熱入力が重要となる用途ではパルスレーザの使用を検討することができる。高い繰返し速度で長いパルスを使用すれば、エネルギー利用効率が高くなり、熱損傷のリスクが軽減される。スキャナベースのビーム伝送システムを使用することにより、レーザエネルギーをより広いターゲット領域に照射することができる。例えば、図に示した金／すずのはんだプレートでは、照射箇所のみが溶融している(**図4**)。

金属溶接と結合

ナノ秒パルスレーザを金属溶接に使用する際には、実際に良好な結合を得るためにパルス条件とプロセス設定を慎重に調整する必要がある。結局のところ、この種のパルスの主要な用途は材料の除去であり、溶解して再凝固することではない。パルスは、最大ピーク出力とパルスエネルギーを達成するように最適化されているが、高周波数で使用することによってその特性を変更することができる。高周波での使用には、平均出力を維持しつつ、ピーク出力を抑え、出力をQCWのゲートパルスに近づける効果がある。

高周波において、材料に対するパルスの作用はアブレーションから溶解へと移行する。以下の例にも示されているように、その効果は顕著に現れる場合がある。以下では、70Wのレーザでステンレス鋼の薄板に直径6mmの「ビードオンプレート」のリングを形成している。70kHzで250ns、1mJのパルスを使用した場合、輪郭は極めて粗くかなり酸化している。すべてのパラメータを同じにしたままパルス周波数だけを上げると、著しい改善が得られる。周波数を2倍の140kHz にしてパルスエネルギーを半分の0.5mJにすると、粗さと酸化が緩和されるのが見てとれるが、周波数を500kHzまで上げてパルスエネルギーを0.15mJ未満まで下げると、シールドガスなしでもくっきりと明瞭な輪郭が得られる。この手法を用いて、250μmの重ね溶接が可能である(**図5**)。

溶接形状は、ウォブリングによってさらに改善することができる。ウォブリングを適用すると、溶接速度は低下するが、溶接の幅を広げて 溶込みを改善することができる。

ステンレス鋼同士を溶接した部分に対して試験を行った結果、0.5mmの重ね溶接における、2カ所の1mm溶接部のせん断強度は224ポンド(約100kg)以上だった。長さ5mm、幅1mmの直線溶接部に対して180度の剥離試験を行ったが、一方の溶接部は241ポンド(約110kg)の強度を示した(**図6**)。

実際のところ、この手法は、鋼鉄、アルミニウム、さらには銅など、幅広い種類の他の金属にも適用することができる。非常に反射性の高い材料の結

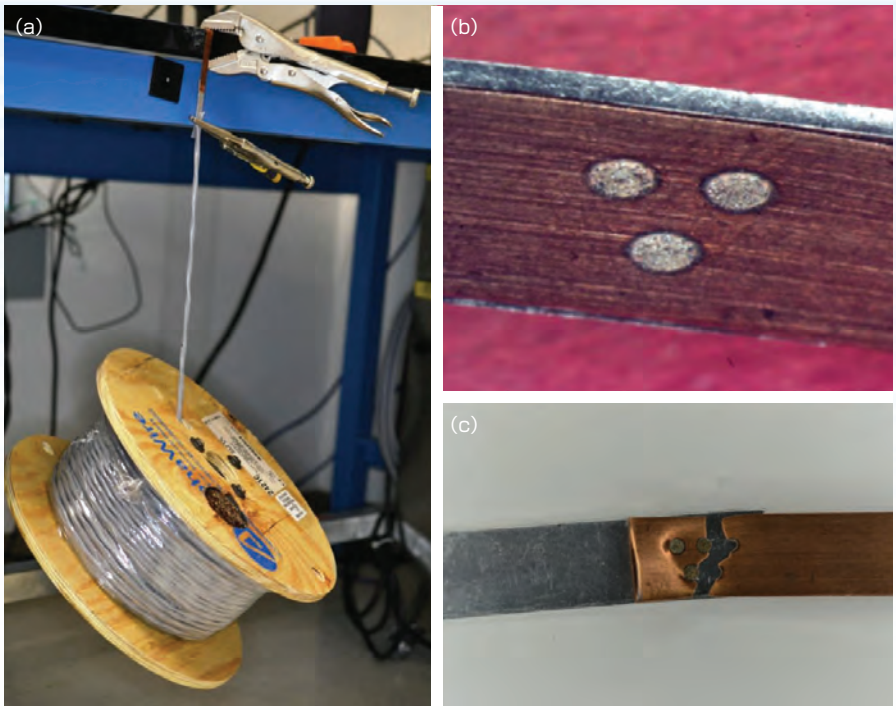

図7　銅とアルミのスポット溶接（a）、引張試験結果（b）、12ポンドの静的負荷（c）。

合にこの手法を適用する場合は、その材料に結合できるだけの十分に高いパルスエネルギーを出力するようにパルスを調整する必要がある。スパイラル状に照射することによって、任意の直径のスポット溶接が可能である。例えば、3つの1mmスポットを作成して厚さ150μmの銅箔を結合する処理を、70WのEP-Zレーザによって1秒をはるかに下回る時間で行うことができる。さて、残る課題は異種金属を結合できるかどうかである。

異種金属溶接

一般的な要件は、薄い銅箔をアルミニウムに結合することで、エレクトロニクスやバッテリの分野で最もよく見られる。この課題を与えられたSPI社のアプリケーションチームは、早速作業に取り掛かった。まもなく成功したという報告が届き、溶接部の強度を尋ねたところ、回答として12ポンド（約5.4kg）の静的負荷をかけた状態の溶接部分の写真が送られてきた（**図7**）。

実際、引張試験装置で最近実施した検証済み試験では、銅とアルミニウムの結合部分が26ポンド（約11.8kg）のせん断強度で切断し、90度の剥離試験で6ポンド（約2.7kg）という結果が得られている。溶接部に損傷は生じなかった。

実際の商用用途で用いられる、さらに難しい異種金属溶接も可能であることが実証されている（**図8**）。「20Wのシングルモードナノ秒パルスレーザを使用するだけで、熱入力と溶接形状に対するかなりの制御が可能である。これを、この図に示した0.1mmのステンレス鋼箔と0.25mmのチタン箔など、特に困難な微細溶接用に、競争力のあるコンパクトなパッケージで提供することができる」と、株式会社アマダミヤチの米国拠点であるアマダミヤチアメリカ社（Amada Miyachi America）のジェフ・シャノン博士（Geoff Shannon）は述べている。

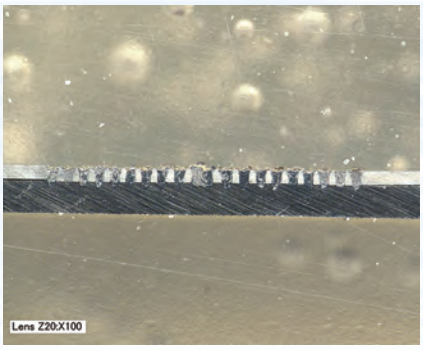

図8　20WのHS-Sレーザによる、ステンレス鋼とチタン箔の溶接

生産ラインの効率化に向けた複数の用途に対応するツールの導入が、例えば医療機器製造などの分野で加速している。「これらのファイバレーザは、革新的なツールの代表であり、ナノ秒パルスによるトリミング、エッチング、研磨と、数ミリ秒パルスによる溶接のすべてを、同一のレーザによって同一の生産工程で行うことができる」と、米レーザマークスカンパニー社（Laser Mark's Company）のマーク・ブロツキー氏（Mark Brodsky）はコメントしている。

まとめ

本稿では、プラスチック接合やはんだ付けから、金属薄板溶接やワイヤ結合にいたるまで、ナノ秒パルスファイバレーザが従来のミリ秒パルスYAGレーザや変調CWレーザ源に代わる優れた手段であることを示す、複数の用途を紹介した。このようなレーザ源が、複数のプロセスからなる製造で採用されていることが、その多用途性をさらに証明している。

著者紹介
ジャック・ガブズディルは、英SPIレーザーズ社のセールスおよびマーケティング担当副社長。
e-mail: jack.gabzdyl@spilasers.com
ダニエル・カポスタンニョは、SPIレーザーズ社南北米地区担当アプリケーションマネージャー。
URL: www.spilasers.com

ILSJ