

ファイバレーザ溶接による 難しい金属接合

プライス・サムソン、トニー・ホルト、ムスタファ・コスクン

シングルモードとマルチモードの両方のファイバレーザに適用可能な手法

自動車から家電にいたるまでの日常的な製品に、より軽量で頑丈な材料を採用しようという動きにともない、特に量産製造環境において、そのような構造の溶接に多数の大きな課題が生じている。輸送業界における例としては、電気自動車インフラが挙げられる。そこではバッテリーを製造するために、アルミニウムと銅など、異種類の高反射性材料を接合しなければならない場合が多い。

高強度鋼材に加えて、車体を軽量化するためにアルミニウムやマグネシウムの複合材料を利用するケースが増えていることも、これに関連する例のひとつである。家電製品については、構

造の軽量化に加えて、熱特性や電気特性を用途に正確に合致させることが必要で、これによってさらに複雑な設計が絶えず求められる状況にある。薄箔を使用して、異種金属を接合しなければならない場合が多く、ここでも、アルミニウムと銅が材料として非常によく使われている。医療機器業界でも、特に異素材の小さな金属部品を接合する必要性が高まっている。

レーザ溶接は10年以上にわたって進化し続けている。この技術を早くから取り入れている自動車業界では、自動接合加工にファイバレーザ技術の本質的なメリットを組み合わせた効果が

いち早く現れている。しかし、多くの材料をレーザ溶接する場合の前述の課題はやはり大きく、それが一部の用途でレーザ溶接の普及がなかなか進まない理由かもしれない。

最近、コスト効率に優れ、組込みが容易な、ビームウォプニングに基づく新しい技術が発表された。これにより、銅やアルミニウムなどの材料を1μmの高輝度ファイバレーザで溶接することの難しさが一部克服されている。この手法は、一部の材料のレーザ溶接においてポロシティ（気孔、ポア）やホット割れの問題を解消しつつ、本稿に示したいくつかの例において、部品のフィットアップの許容誤差を3倍に緩和することができる。溶け込みの深さ、スポット速度、溶接速度、シーム幅の個別制御が可能なこの手法は、温度の影響を受けやすい（医療用部品の）小型アセンブリの溶接に適用できる。接合部がうまく一致していないためにレーザ溶接が難しいかもしれない部品に適用可能で、後処理の必要なく外観的に美しい溶接部が得られる。

ウォブルヘッド技術

図1に、2次元ダイナミックビームの動作、つまりウォブルヘッド技術の概念を示す。米IPGフォトニクス社（IPG Photonics）の「D30」といった業界標準の溶接ヘッドで利用可能な、4つの基本的なプログラブル形状が示されている。ガルボミラー・コントローラに

ウォブルモード	概略図	溶接サンプル
円 (CW & CCW)		
直線		
8の字		
無限大(∞)		

図1 商用提供されている溶接ウォブルヘッドによるウォブル形状の例。振幅の調整と、最大300Hzまでの周波数の制御をそれぞれ独立して行うことができる。

よって、発振の振幅と周波数が個別に制御可能で、多くの用途で用いられる最大300Hzの標準周波数で、溶接時のキーホールの安定化をさらに柔軟に行うことができる。商用のウォブル溶接ヘッドで現在、最大12kWの出力に対応する。

キーホールの安定性は、銅やアルミニウムといった難しい高反射性材料をレーザー溶接する場合の重要な要素である。スパッタが発生しやすいことや、一部のアルミ合金の場合は、熔融金属の粘度と表面張力に起因して高いレベルのポロシティが生成されることが、その原因として挙げられる。このことから、より従来型のレーザー溶接手法でこれらの材料を溶接するのは難しい。最近の研究^{(1)~(4)}では、ビームウォブル手法によってこのような問題が緩和または解消されることが明らかになっている。たとえば、自動車用アルミ合金に対しフィラーワイヤを使用する場合と使用しない場合の両方に対する体系的な研究を行った結果が最近発表さ



図2 ビームウォブル手法を用いた6061-T6アルミニウムの溶接例。

れている⁽²⁾。

全般的に、ウォブル手法では、任意の溶接箇所を近くをビームが複数回通過するために、部品の温度制御がしや

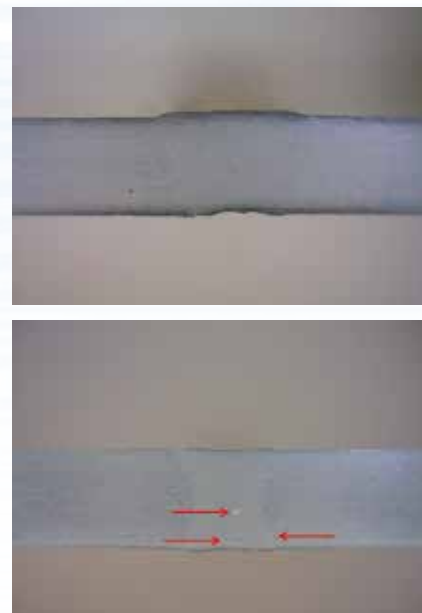
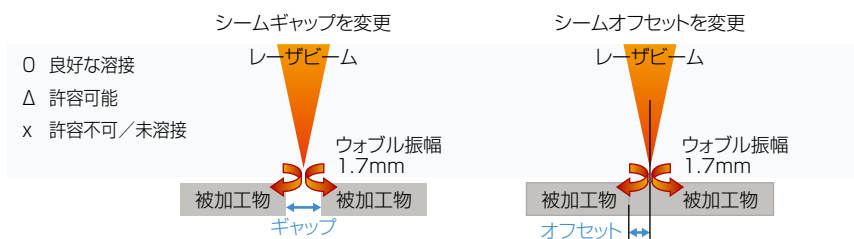


図3 6061アルミニウムのレーザー溶接断面の比較。ウォブルヘッド溶接を適用した場合(下)に、ポアがなくなっている様子が示されている。

すい。温度上昇と冷却の速度が従来のレーザー溶接よりも遅く、それが欠陥の排除とスパッタの制御につながる。またこの溶接手法は、アシストガスポートや同軸ノズルといった標準的な溶接アクセサリと互換性がある。プルームの抑制が可能で、スパッタの制御にもつながるこれらのアクセサリは、リモート溶接に用いられるスキャンヘッドとはそのままでは使用できない。

キーホールの安定化と、得られる溶接部におけるポロシティの低減に加えて、ビームウォブル手法には、レーザー溶接における部品のフィット要件を緩和するという貴重なメリットがあることが実証されている。その概要を表に示す。プログラマブル形状の1つ(ここでは無限大を選択)を使用して、発振の振幅と周波数を最適化することにより、許容シームギャップを従来のレーザー溶接の3倍に拡大することができる。

ビームウォブル手法を用いると、シームオフセットについても同様にプロ



		シームギャップを変更										シームオフセットを変更												
		レーザービーム										レーザービーム												
		ウォブル振幅 1.7mm										ウォブル振幅 1.7mm												
		被加工物										被加工物												
		ギャップ										オフセット												
	ギャップ[μm]	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	0	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
従来のレーザー溶接		○	○	△	△	x	x	x	x	x	x	x	○	○	○	○	△	x	x	x	x	x	x	x
ウォブルありのレーザー溶接		○	○	○	○	○	○	△	△	△	△	x	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△	△	x

表 シームギャップとオフセットのプロセスウィンドウに関するウォブルヘッド溶接の概要。両方のプロセスパラメータを、従来のレーザー溶接と比べて2~3倍増加させることができる。

セスウィンドウの改善が得られ、従来のレーザー溶接と比べてオフセットを2～3倍に拡大することができる。

溶接例

ウォブルヘッドによって得られる溶接の品質と一貫性の例として、6061-T6アルミニウムの溶接結果を図2に示す。従来のレーザー溶接では不可能なレベルの品質に仕上がっており、最終部品の外観を整えるための溶接の後処理を省くことができる。

さらに詳しく観察すると、ビームウォブリング手法によってポロシティが明らかに減少していることがわかる(図3)。従来のレーザー溶接による6061アルミニウムの溶接断面と比較すると、ウォブルヘッドを使用した場合はポアがないのを見てとれる。ウォブル手法を用いた場合のポロシティの改善は、他^{(2)、(4)}でも報告されており、ビームのウォブルによってキーホール回転時に溶融池が攪拌されるためとされ

ている。

ステンレス鋼と銅の溶接(図4a)など、異種金属のレーザー溶接も難しい加工のひとつだが、これに対してもウォブルヘッド技術は多大な潜在能力を発揮する。ウォブルヘッド手法によって金属間層の溶融と凝固が制御可能であることから、図4bのEDS画像に示すように、2つの異種金属間の溶接品質が大幅に向上する。この溶接では、前出の表の中の円状のウォブルパターンを使用した。

銅のウォブルヘッド溶接

1 μ mで動作するレーザーによる銅の溶接にとまなう問題はよく知られており、過去に取り上げたことがある⁽¹⁾。その研究では、シングルモードのファイバレーザを使用し、スポット径を小さくして、被加工物に対する作用力を高め、キーホールの安定化を図った。薄箔の微細溶接で、これを少し詳しく掘り下げた研究事例があるが⁽⁵⁾、この

手法はウォブルヘッド溶接に適用可能で、われわれはこのプロセスにおいて、スポット径を小さくしてキーホールの効率化を図っている。われわれの経験では、直線速度と総熱入力(レーザーからの出力)は、従来のレーザー溶接と同等であることが多い。一般的に、低速の場合は、銅は反射率が高く、粘度と表面張力が低いことから、レーザーのカップリング(結合)が不安定になり、キーホール内の溶融金属からのスパッタの排出が顕著になる。高速になると、シングルモードのファイバレーザの高い作用力と小さなスポット径によって、安定した溶接が可能になる。ただしそれと引き換えに、完成した溶接部の溶け込み深さは浅くなる。

ウォブルヘッド技術は、このような問題の解決に有効である(図5と図6)。ウォブルヘッド振幅機能を適用することにより、ウォブル周波数機能によってキーホールの安定化を図りつつ、上部ビード幅を体系的に大きくすること

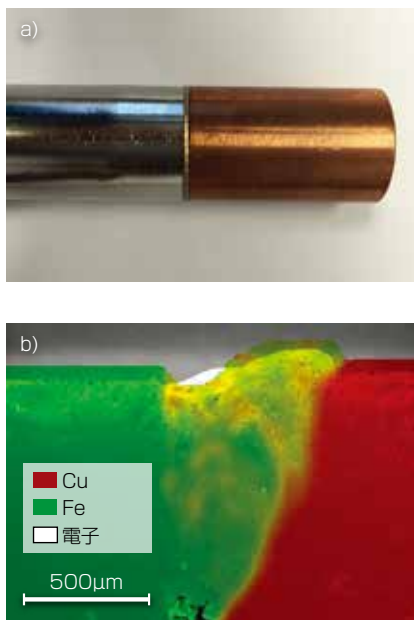


図4 ステンレス鋼と銅の溶接(a)。ウォブルヘッド手法によって2つの材料の間の金属間領域を制御することで、このような異種金属の溶接が可能となる(b)。

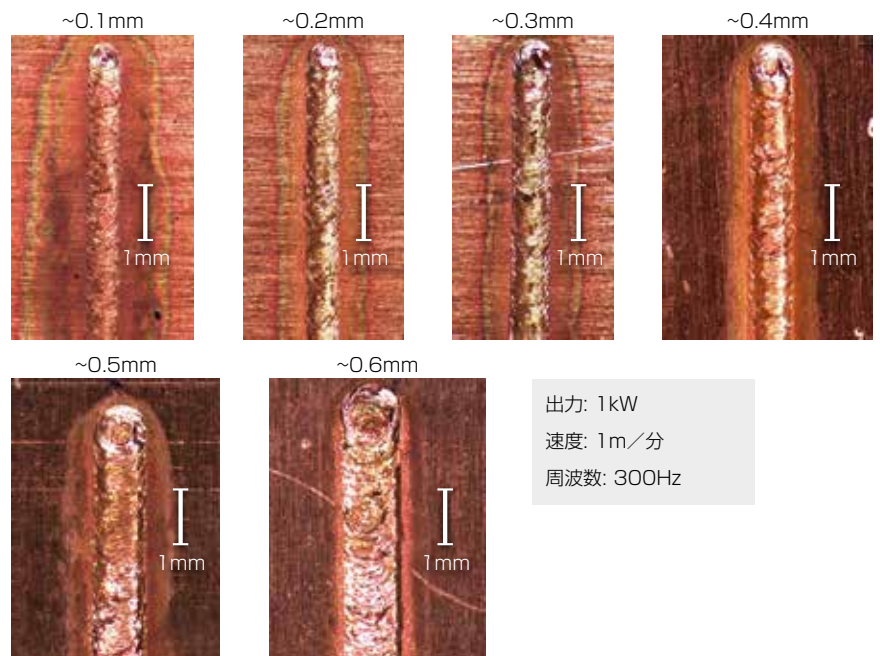


図5 シングルモードのファイバレーザを使用し、ウォブルヘッドの振幅と周波数を個別に制御して得た、銅の溶接結果。

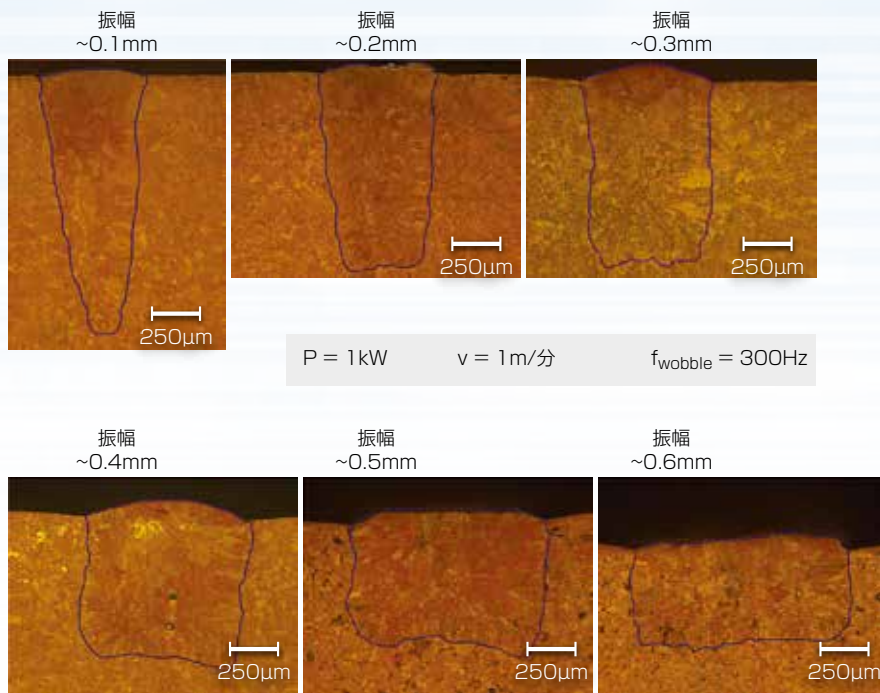


図6 ウォブルヘッド手法とシングルモードのファイバレーザを用いて溶接した銅の断面。

ができる。同等出力のシングルモードのファイバレーザを使用した結果、さまざまなパラメータにわたって直線溶接速度とレーザ出力が維持された。

ウォブルヘッド技術は、マルチモードのファイバレーザにも完全に対応する。われわれは、高出力(5kW)のファイバレーザをウォブルヘッドとともに使用して銅溶接の試験を行った⁽¹⁾。出力レベルが高い場合は、深い溶け込みが得られた(ここでは最大4mm)。また過去の研究と同様に、ウォブルヘッド技術によってプロセスの柔軟性が増すことを利用して、加工中のキーホールを制御し、溶接金属の安定化を図った。

本稿の最後の事例として、バッテリー業界用のアルミニウムと銅の重ね合わせ溶接を示す。ここでは溶け込み深さが、金属間層の形成を最小限(理想的には10μm未満)に抑えるための重要なパラメータで、従来のレーザ溶接では加工速度によってこれを制御することができる。これに対してウォブルヘッ

ド手法を適用する場合は、ウォブルヘッドの振幅と周波数によって溶接幅と溶け込みをさらに制御することができる。

われわれは、ウォブル振幅を増加させた場合(0.2~1.2mm)の影響を調べた。溶接幅は大きくなり、溶け込み深さは浅くなって、アルミニウム部品と銅部品間の溶接部の機械特性は改善された。

結論

アルミニウムや銅などの材料を1μmレーザで溶接する場合の問題は、高輝

度ファイバレーザに最新の2次元ウォブルヘッド技術を組み合わせることによってほぼ解消される。この技術によって、溶接時のキーホール内の溶融金属に対するさらなるビーム制御が可能である。これは、このような材料を従来の方法でレーザ溶接する場合に発生するポロシティとスパッタの低減につながる事が確認されている。ウォブルヘッド発振の振幅と周波数の個別制御によって自由度が増すため、これにファイバレーザの高い輝度と出力を組み合わせることにより、難しい材料のレーザ溶接で良好な品質を得るために必要なレベルの制御が可能となる。

本稿では、アルミニウムや銅といった難しい材料のレーザ溶接や、異種金属の溶接の例を示した。異種金属の溶接では、ウォブルヘッド技術によって金属の間の混合領域が制御できることを示した。また、ウォブルヘッド溶接を従来のレーザ溶接と比較し、この技術に、シームギャップとオフセットの許容誤差を緩和するという、部品のフィット要件に関する大きなメリットがあることを示した。この手法は、シングルモードとマルチモードの両方のファイバレーザに適用できることも明らかになっている。最後に、この技術は、アシストガス供給ポートや同軸ノズルといった標準的な溶接アクセサリとも互換性がある。

参考文献

- (1) T. Hoult et al., "Welding solutions for challenging metals with ytterbium fiber lasers," ICALEO 2016 presentation, San Diego, CA (Oct. 2016).
- (2) G. Barbieri et al., Mater. Sci. Forum, 879, 1057-1062 (2017).
- (3) O. Berend et al., "High frequency beam oscillation to increase the process stability during laser welding with high melt pool dynamics," Proc. ICALEO, 1041, 1032 (2005).
- (4) G. Barbieri et al., Procedia Eng., 109, 427-434 (2015).
- (5) I. Miyamoto et al., "Precision microwelding of thin metal foil with single-mode fiber laser," Proc. SPIE, 5063, 297-302 (2003).

著者紹介

ブライス・サムソン(BRYCE SAMSON)、トニー・ホルト(TONY HOULT)、ムスタファ・コスクン(MUSTAFA COSKUN)は、米IPGフォトニクス社(IPG Photonics)に所属。
email: bsamson@ipgphotonics.com URL: www.ipgphotonics.com