金属 AM 技術を支えるレーザ技術開発

Development of Laser Technology for Additive Manufacturing of Metal

塚本 雅裕*

Masahiro TSUKAMOTO

Key Words: Additive Manufacturing, Laser Cladding, Blue Diode Laser, Surface Modification

1. はじめに

現在、日本では様々なレーザ加工に関係する大型プロジェクトが進行している。そのうちのひとつが、我々が進めている内閣府革新的イノベーション創造プログラム (SIP) 革新的設計生産技術「高付加価値設計・製造を実現するレーザコーティング技術の研究開発 (2014 年度 - 2018 年度)」である。以下、次世代レーザコーティング PJ と略す。次世代レーザコーティング PJ においてキーワードとなるのは、IoT (Internet of Things) である。製造装置がインターネットにつながり、様々な高付加価値ものづくりを集中管理の下、加工条件・方法の最適化を自動的に実行する。工作機械においては、従来の切削加工だけでは不十分で、溶接などの付加加工および表面処理 (改質) 技術 (高機能金属材料のコーティング) や 3D プリティングなどの付加製造機能を搭載することが必須となる。付加製造の英語名は、Additive manufacturing (AM) である。レーザを用いた AM は、Laser Additive Manufacturing (LAM) と呼ばれ、LAM には、Fig.1 および Fig.2 に示したように Selective Laser Melting (SLM)

Fig.1 Laser additive manufacturing.

と Laser Metal Deposition (LMD) がある。次世代レーザコーティング PJ では、LMD のクラッディングを中心に研究開発を進めている。LMD の一つであるクラッディング (コーティング) では、Fig.2 (b) に示しているようにレーザ集光部に供給された粉末は熔融し、基板と溶接されるとともに凝固し、皮膜となる。実際には、レーザ照射部に熔融池が形成され、そこに粉末を供給している。一回の掃引で厚さ

Fig.2 Selective laser melting and laser metal deposition.

* 大阪大学 接合科学研究所 (〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1)
Joining and welding research Institute, Osaka University (11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047 Japan)

1 mm 以上の皮膜を形成するためには、たくさんの粉末を供給しなければならないので、最近では、供給する粉末流（ビーム）の本数を複数（たとえば3 ビーム）にする方式もある。高品質な皮膜を形成するためには、粉末を供給する際に安定に熔融池を保持できるかがキーとなる。これは、次世代レーザコーティング PJ でも取り組んでいる開発テーマの一つである。

一方、熔融池を形成せずに皮膜を形成するコーティング技術の開発にも取り組んできた。本方式では、**Fig.3** に示したように一本の粉末ビームを基板に対し垂直方向から照射し、周囲から複数のレーザを照射する。飛行する粉末をレーザによって直接加熱熔融させることができる。また、粉末に照射されず粉末ビームを通過したレーザは、基板を照射することになり、基板表面は、レーザによって加熱熔融することになる。粉末が基板に衝突する際には、粉末も基板表面も熔融状態であるので、効率的に溶接される。これによって熱影響部の小さく、希釈の少ない皮膜形成が期待される。

2. マルチビーム重畳

次世代レーザコーティング PJ では、**Fig.3** で示したコーティング法を **Fig.4 (a)** で示した「レーザの6 ビーム重畳」によって具現化した。使用したレーザは、波長 915 nm の半導体レーザである。1 ビームあたりの出力は、50 W であることから基板上で重畳された出力は 300 W となる。**Fig.4 (b)** からわかるように、それぞれのレーザ光は、6 本の光ファイバーによって6 ビーム重畳ヘッドに導光される。6 本の光ファイバーから出力されるレーザ光は、レンズによってそれぞれコリメートされた後、一枚のレンズによって集光・重畳される。本重畳ヘッドは、世界で初めて工作機械に搭載され、2016 年 11 月 17 日 (木) から 22 日 (火) まで東京ビッグサイト (東京国際展示場) で開催された第 28 回日本国際工作機械見本市 JIMTOF2016 にて公開・展示された。

3. 青色半導体レーザ搭載型コーティング装置の開発

上述したレーザクラディング法^{1),2)}は、入熱量を制御出来るので、母材への熱影響が小さく希釈の少ない緻密な皮膜を形成することが可能となる。現在、Ni 基合金や、Co 基合金などの耐摩耗性、耐熱性合金などの皮膜形成が行われている。しかしながら、銅などの高反射材料を用いた皮膜形成時には吸収率の点で課題が残る。

銅は、通常加工に使われている近赤外線レーザの波長領域 (900 nm 付近) では吸収率が 10 % と低く、90 % が反射してしまうことがわかる³⁾。一方 500 nm 以下になると吸収率が増加し、445 nm (青色半導体レーザ) では 60 % 程度と近赤外線レーザの約 6 倍の吸収率が得られる。青色半導体レーザを用いれば、近赤外線レーザに比べて皮膜形成等の材料加工が効率的に実現できると考える。また吸収率が高

Fig.3 Laser coating method with center powder feeding.

Fig.4 (a) Schematic diagram and (b) photograph of the multi-beam overlapping head.

い分、低出力のレーザ入熱で良いため、純銅の皮膜形成では基板がコーティング層に溶け込む希釈を低減し、高品質な加工が期待できる。そこで筆者らの研究グループでは波長 445 nm を有する青色半導体レーザ (日亜化学工業製) を用いたマルチビーム重畳型青色半導体レーザクラディング (コーティング) システムを開発した。

本システムでは、波長 445 nm の青色半導体レーザモジュールを 6 台用いて、加工点で一点に重畳 (6 ビーム重畳) する。**Fig.5** に本装置の外観写真を示す。上述したように 6 台のモジュールから構成されている。1 台のモジュールからの出力、つまり一本の光ファイバーからの出力は、20 W

Fig.5 Photograph of 100 W blue diode laser coating system.

Fig.6 Beam profiles at focal point of blue diode laser for (a) 1 beam and (b) overlapping of 6 beams.

であり、レーザコーティング等材料加工用として使用するには出力が不足しているため、本システムでは Fig.4 (a) で示したマルチビーム重畳方式によって 6 本のレーザを重畳する。

ビーム特性を測定するために、CCD カメラを用いたビームプロファイル計測光学系を構築し、1 本のビームおよび 6 ビーム重畳した際の焦点でのプロファイルをそれぞれ測定した。測定した青色半導体レーザの集光位置における 1 ビームおよび 6 ビーム重畳の場合のプロファイル測定結果を Fig.6 (a) および 6 (b) にそれぞれ示す。Fig.6 (b) から、6 ビーム重畳の場合のスポット径は、430 μm となることがわかった。

レーザコーティングの材料粉末の供給には、Fig.3 に示したように加工ヘッドの中心より材料粉末を供給する直噴型の方式を採用した。粉末材料には、平均粒径 30 μm の純銅粉末を使用し、純銅粉末はパウダーフィーダーを用いて加工ヘッドに搬送される。純銅粉末は供給ノズルでレーザ集光点にむけて供給し、同時に先述した重畳型青色半導体レーザを照射すると、純銅粉末が溶融し、基板上で凝固してコーティング膜（皮膜）が形成される。レーザ出力 50 W、レーザ掃引速度 0.5 mm/s に設定し、ステンレス基板上 (50

Fig.7 Surface and cross section images of pure copper coating film.

mm×50 mm×3 mm) に純銅コーティング実験を行った。このとき純銅粉末の供給量は 1.5 mg/s に設定し、酸化防止のためにシールドガスとして Ar ガスを使用した。形成した皮膜は、断面観察用に切断し、その後研磨して、光学顕微鏡を用い、観察した。Fig.7 (a) に皮膜表面写真、Fig.7 (b) に断面観察結果を示す。形成された皮膜の膜厚が 100 μm 、膜幅が 393 μm となった。またステンレス基板と皮膜間の境界部に溶け込みが少なく、皮膜に空孔などは現れず、緻密な皮膜が形成されている事が明らかになった。

4. ビームプロファイル制御技術

次世代レーザコーティング PJ では、LMD の一つであるレーザクラディングの基礎研究として皮膜形成のレーザの空間的ビームプロファイルへの依存性について調べた。実験では、Ni 基自溶性合金 (Ni-Cr-Si-B) 粉末をあらかじめ基板に供給してレーザ集光スポットの掃引を行った⁴⁾。本研究では、Fig.8 (a) および (b) に示したように集光スポットのビームプロファイルが従来型のガウシアン型のレーザ（ガウシアン型ビーム）を用いると、液滴が形成されてしまい皮膜特性が低下することが明らかとなった。希釈が小さく平滑な薄膜を形成するためには、液滴の形成を抑制することが重要となる。本研究では、Fig.8 (b) に示したフラットトップ型のビームプロファイルを得るためにレーザ光を導光した光ファイバーアレイを用いた。Fig.9 (a) に示したようにアレイは、6 本の光ファイバー（6 芯ファイバー）から構成される。ファイバーコアの中心から隣接するファイバーコアまでの距離は、250 μm である。

Fig.9 (a) に示したように 1 つのアレイ出力端を 2 枚のレンズを使用し、倍率 2 倍で像転送すると、6 つの集光スポットが形成される。6 つの集光スポットの間は、それぞれ 500 μm となる。つまり、Fig.9 (a) に示したように 6 つの集光スポットが 500 μm 間隔で並ぶ。本アレイを 4 つ用意し、Fig.9 (b) に示したように配置する。4 つのアレイとコリメートレンズおよび集光レンズで構成される。それぞれのアレイからの集光スポットが重なるように制御することで強度が一樣なフラットトップビームが形成される。1 つのアレイを像転送すると、集光点におけるレーザの強度分布図は Fig.9 (c) のようになる。ここで、残りの 3 つのアレイを像

Fig.8 Schematics of (a) film with droplets formed by laser irradiation for Gaussian-like beam profile and (b) film without droplets formed by laser irradiation for flat-top beam profile.

転送することで、**Fig.9** (d)、(e) および (f) に示すようにレーザ強度が合成され、フラットトップビームプロファイルが得られる。集光スポットの位置を制御することでラインビームに限らず様々な形状のパターンが自由に形成可能等の利点もある。

Ni 基自溶性合金 (Ni-Cr-Si-B) の皮膜形成実験に用いたレーザ光源は、ファイバカップル半導体レーザである。波長は 915 nm であり、一本の光ファイバーからの定格出力は 25 W である。ファイバーのコア径および NA はそれぞれ $105\text{ }\mu\text{m}$ および 0.15 である。フラットトップビームプロファイルの場合と比較するために従来のガウシアン型ビームプロファイルを有するファイバカップル半導体レーザシステムを用いた。集光点におけるビームサイズはそれぞれ $3.24\text{ mm} \times 0.52\text{ mm}$ および $2.6\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ となっている。薄膜材料として、既定のビッカース硬さが 820 HV の Ni 基自溶性合金粉末を使用した。粉末の平均粒径は $55\text{ }\mu\text{m}$ のものを使用した。基板材料は $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ の大きさの SUS304 ステンレス鋼基板を用いた。実験はあらかじめ材料粉末を基板の上に厚さ $200\text{ }\mu\text{m}$ で静置し、レーザスポットをビームの短軸方向に掃引させることで行った。成膜時の現象については、高速度カメラ (撮影速度 1000 fps) で観察を行った。

Fig.9 Schematics of (a) focusing unit for formation of six focal spots, (b) focusing unit for formation of flat-top beam profile, (c) laser intensity of Beam 1, (d) laser intensity of Beam 1+2, (e) laser intensity of Beam 1+2+3, (f) laser intensity of Beam 1+2+3+4.

レーザのパワー密度は $3.6 \times 10^4\text{ W/cm}^2$ で一定とし、XY ステージを掃引速度 15 mm/s で移動させることで皮膜を形成した。 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ の大きさの皮膜を形成するために、ビームをオーバーラップさせた。この時、オーバーラップ率は 60% で一定として実験を行い、皮膜の表面及び断面は光学顕微鏡により観察を行った。皮膜が基板に溶け込む希釈はビッカース硬さ試験により評価を行い、表面粗さはレーザ顕微鏡を用いて R_a を測定することで評価した。

高速度カメラを用いて粉末の溶融挙動を観察した結果を **Fig.10** に示す。従来型 (**Fig.10** (a)) およびフラットトップビーム (**Fig.10** (b)) を有する半導体レーザを用いた際の撮影結果をそれぞれ **Fig.10** (c) および (d) に示す。レーザは画像の中央部に照射されており、右から左に掃引されている。**Fig.10** (c) からわかるように、レーザの強度分布がフラットトップ型ではないビームを用いると、液滴の形成が生じるのに対して、**Fig.10** (d) が示すようにフラットトップビームプロファイルを有するレーザを用いることで、静置された粉末はレーザが通過後も液滴が形成されていないことが分かる。この結果から、レーザの強度分布を制御すること

Fig.10 Beam profiles of (a) Gaussian-like and (b) flat-top, high speed video camera images of cladding layer formation phenomena for (c) Gaussian-like and (d) flat-top beam profiles.

で液滴形成が抑制できることが分かる。これは、レーザの強度が低下していく領域が粉末の粒径に対して十分に小さいためであると考えられる。このことから、液滴の形成はレーザの強度が低下していく領域において生じることが明らかとなった。このような液滴の形成が生じると、レーザがオーバーラップした際に、基板に対して直接レーザが照射されてしまうため、希釈が増大すると考えられる。

フラットトップビームプロファイルを有する半導体レーザをオーバーラップ率 60 % で複数回掃引させることで皮膜を形成した。**Fig.11** (a) および (c) に形成された皮膜の表面および断面写真を示す。比較として従来型半導体レーザで得られた皮膜の表面及び断面写真を **Fig.11** (b) および (d) に示す。この結果から、形成された皮膜は、従来型半導体レーザで得られたものと比較して表面の凹凸が非常に小さいことが分かる。皮膜の Ra を計測すると、33.7 μm から 3.9 μm と約 10 分の 1 程度まで低下していることが分かった。また、皮膜のビッカース硬さを測定すると、681 HV から 910 HV まで増加していることが分かる。この値は、粉末の保証する値である 820 HV を上回るものである。粉末の保証するビッカース硬さは希釈が発生する PTA などにおける値であるため、希釈がより小さいレーザクラディングで形成した皮膜はその値を上回ったと考えられる。

5. おわりに

本稿では、6 ビーム重畳型の 100 W 級青色半導体レー

Fig.11 Optical images of the cladding layer surfaces formed with (a) a flat-top beam profile and (b) a Gaussian-like beam. Cross-sections of the cladding layers in (a) and (b) are shown in (c) and (d), respectively.

ザコーティング装置開発について紹介した。近い将来、kW 級の装置にするためには、一つの青色半導体レーザモジュール、つまり、一本の光ファイバーからの出力を数百 W にする必要がある。次にビームプロファイル制御による空間的な入熱制御技術の重要性について説明した。青色半導体レーザの高出力化およびビームプロファイル制御技術の高度化が達成されれば、レーザコーティングおよびクラディングだけではなく、難加工材料の溶接や 3D プリントングを可能とする次世代の溶接装置および 3D プリントの実用化が期待される。

引用文献

- 1) A. Gatto, E. Bassoli and M. Fornari, Plasma Transferred Arc deposition of powdered high performances alloys, *Surface & Coatings Technology*, **187** (2004) 265-271.
- 2) A. Rabiei, D.R. Mumm, J.W. Hutchinson, R. Schweinfest, M. Rühle and A.G. Evans, Microstructure, deformation and cracking characteristics of thermal spray ferrous coatings, *Materials Science and Engineering*, **A 269** (1999) 152-165.
- 3) レーザハンドブック p830
- 4) D. Tanigawa, N. Abe, M. Tsukamoto, Y. Hayashi, H. Yamazaki, Y. Tatsumi and M. Yoneyama, *Proc. of ICALEO2013*, Miami-Florida, USA, October, **6-10** (2013) 1.