スパッタレスレーザー金属積層造形法の開発

佐藤 雄二, 塚本 雅裕

大阪大学 接合科学研究所 (〒565-0047 大阪府茨木市美穂が丘11-1)

Development of Sputter-Free Selective Laser Melting

Yuji SATO and Masahiro TSUKAMOTO

Joining and Welding Research Institute, Osaka University, 11-1 Mihogaoka Ibaraki-shi, Osaka 567-0047

(Received December 20, 2017)

An additive manufacturing (AM) method has been attracting interest due to its process in free-form fabrication. Selective laser melting (SLM), one AM technology that is useful for direct and complicated shape formation, forms a 3D material by building it layer by layer from a metal powder. This paper reviews the recent progress in selective laser melting, which is an additive manufacturing technology. We developed sputter-free fabrication for SLM in a vacuum to minimize the surface roughness to $0.40\ \mu\text{m}$ at a laser scanning speed of $10\ \text{mm/s}$.

Key Words: Additive manufacturing, Selective laser melting, Ti, Sputter-free

1. はじめに

金属の付加製造技術 (Additive Manufacturing: AM) の一つであるレーザー金属積層造形法 (Selective Laser Melting: SLM) またはレーザー粉末床溶融法 (Laser Powder Bed Fusion: L-PBF) は、3D-CADデータを元に金属粉末から3次元形状の製品を直接造形できる加工方法である。近年では金属の3Dプリンタと呼ばれている技術である。熱源には局所的・選択的に加熱できるレーザーが用いられ、一層毎に金属粉末を溶融・凝固して2D形状を作り、これを繰り返し積み上げて3D形状を形成する。従来の切削加工や塑性加工、鋳造加工では製造出来ない複雑形状の製品を作製できる。これらの特徴を生かして、金型や機械部品の試作・開発、小ロット部品の製造、航空宇宙分野のブラケットや燃料噴射装置、ケーシングなど、医療分野ではカスタムオーダーメイドが必要となる人工関節等の整形外科用インプラントや、歯科用ブリッジなどが応用例として挙げられている。造形可能な材料には、Ni系合金、インコネル、ハステロイ、ステンレス、チタン、チタン合金、アルミニウム合金など数多くの材料が報告されており、当該技術の研究開発および応用研究が世界各国で進められている¹⁻⁸⁾。SLMの装置メーカーとしては、EOS社、SLM Solutions社、Concept Laser社がリードしており、これらの企業は、すべてドイツ企業である。また、2016年にTRUMPF社、2017年2月にDMG Mori社がそれぞれSLM装置をリリースするなど、ドイツ企業の活躍が目立つ。一方、アメリカでは、

General Electric社が、SLM法の装置メーカーConcept Laser社と熱源に電子ビームを用いた造形装置を扱うARCAM社を買収し、新規プロセスの開発や技術開発、その応用開発に力を入れている。2017年2月に開催されたWorkshop on LAM 2017では、「パウダーベースで飛行機を作る夢を実現する」と講演で発表し、2017年11月には、ドイツ・フランクフルトで開催された展示会formnext 2017にて直径1 mの造形を可能とするGE Additive BETAマシンをお披露目するなどGE社の話題にこと欠かない。米国では、ローレンスリバモア国立研究所のグループが、SLM法における粉末の溶融凝固現象を、数値計算を駆使して詳細に解析し、レーザーが粉末に照射された時に発生するスパッタリングの発生機構を解明している^{9,10)}。さらにこれら数値計算結果を基にステンレス鋼316Lを造形した結果、通常のステンレス鋼 (SUS316L) の2-3倍の強度を有し、且つ従来のステンレス鋼の延性と同等の値を併せ持った造形に成功したと報告があった¹¹⁾。

2017年6月にミュンヘンで開催された国際会議Lasers in ManufacturingにてSLM Solutions社からHull & Coreでインコネル718を造形した結果、単結晶の造形に成功したと報告があった¹²⁾。会議ではプロジェクト進行中ということで、詳細な造形パラメータの開示が無かったが、これらの報告は、SLMプロセスにおいて材料組織まで精密に制御可能であることを意味する。

国内では、技術研究組合次世代3D 積層造形技術総合開発機構が国家プロジェクトとして立ち上がり次世代産

業用3Dプリンタの開発を産・官・学が連携して開発を進めている。このようにLAM分野の研究開発は、国内外で活発に進められている事がわかる。我々は、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ーコーティングプロジェクトを推進しており、この中で金属の溶融凝固現象の解明とスパッタレス金属溶融法の開発を進めている。一般に、金属粉末にレーザーが照射されると、粉末でレーザーが吸収されて溶融するが、同時にスパッタリングと呼ばれる粉末の飛散現象が発生する。スパッタリングは、積層造形プロセスにおいて造形効率を低くするだけでなく、造形内部に空孔が形成されてしまい、相対密度が小さくなってしまう等の問題の一因となる。そこで我々は、スパッタリングの発生を抑えたスパッタレスSLM法を開発した¹³⁻¹⁵⁾。次項にてスパッタレスSLM法について詳細を述べる。

2. SLM法による造形方法

SLM装置の概略図をFig. 1 に示す。レーザーには、高出力かつビーム品質が高く、しかも光ファイバでレーザー光を伝送できるYbファイバレーザーが最も多く採用されている。光ファイバから出射されたレーザー光は、2軸あるいは3軸のガルバノミラーに導光され、集光レンズを介してパウダーベッドに掃引照射される。Fig. 1 に示す様に、材料粉末は、ローラーを用いて造形面に任意の厚さに均一に敷き均し、その状態でレーザーを掃引照射して、材料粉末を溶融・凝固して2Dの造形物を形成させる。次に任意の積層厚だけ造形面を下降して、再びローラーで粉末を供給し、レーザーを照射する。これを繰り返して立体の造形物を形成する。積層厚さは各装置によって異なるが約50 μm –100 μm である。材料粉末はローラータイプあるいはスキージタイプのブレードで搬送するので、流動性の高いガスアトマイズで作製した球状の粒径30 μm 程度の粉末を用いている。

Fig. 1 Principle of SLM.

3. スパッタレスSLM法を用いたTiの造形

一般に、チタン合金(Ti-6Al-4V:Ti64)は、軽量、非磁性、耐食性等、優れた機械的特性や生体適合性を有するため、インプラントや人工骨などの高組織代替材料として臨床応用されている。しかし、チタン合金は難削材料であり、従来の切削加工では、生体由来のバイオニック構造などの複雑形状を模すことは難しい。そこでSLM法を用いてTi64の造形を試みた。Fig. 2 にTi64粉末のSEM像を示す。Ti64粉末は、(株)大阪チタニウムテクノロジー社製のTILOP64-45、前述したようにガスアトマイズ製である。粒度は、正規分布で、粒径の中心値26 μm 、標準偏差12 μm であった。

次に、スパッタレスSLM装置をFig. 3 に示す。本装置はレーザー発振器および伝送光学系、制御盤、真空チャンバーで構成されている。Fig. 3(a)に装置写真、(b)に装置の概略図を示す。レーザーには、波長1084 nm、最

Fig. 2 Ti64 Powder for SLM.

Fig. 3 Experimental step for selective laser melting in vacuum in (a) photo image and (b) schematic diagram of SLM in vacuum.

大出力300 Wのシングルモードファイバレーザー(FI-TEL, Furukawa Electric Co.)を採用した。出射したレーザーは、伝送光学系を用いて2軸制御型ガルバノミラー(CANNON, Inc)とF- θ レンズに導光し、真空チャンバー内の造形ステージに掃引照射する。このときレーザースポット径は $1/e^2$ で150 μm に調整した。大きな特徴としては、真空チャンバー内で造形することが出来るので、ガスのコンタミネーションや酸化性の高い粉末、たとえばチタンの造形などが出来ることである。原料粉末であるTi64粉末をパウダーフィーダーに設置し、真空チャンバーを 5.0×10^{-3} Paまで真空排気する。造形ステージであるベースプレートを積層ピッチ分下降させ、Ti64粉末をリコータで均し、任意の厚さの粉末をパウダーベッドに敷き均す(Fig. 3(b))。この状態でレーザーを照射する¹³⁾。レーザーの掃引方法は、Fig. 4に示すようにリニアラスタースキャン方式を採用し10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 0.1 mmの造形を行った¹⁴⁾。

3.1 高速度ビデオカメラによるTi6Al4V粉末の熔融挙動観察

Fig. 5にTi64粉末にレーザーを照射したときの熔融凝固過程を高速度ビデオカメラで撮影した像を示す。レーザー照射条件は、レーザー出力150 W、ハッチング距離50 μm 、掃引速度をFig. 5(a) 10 mm/s、(b) 25 mm/s、(c) 50 mm/s、(d) 100 mm/sとした。 $t = 80$ msでレーザーが照射されると、 $t = 80$ msでTi64粉末表面でレーザーが吸収され、 $t = 160$ msで熔融池が形成され、その後、 $t = 240$ msでは凝固が起こり、熱が拡散して自然冷却されている事がわかる。240 ms以降では、これらの様子が繰返し起こる様子が観察された。Fig. 5(c)、(d)のように掃引速度が50 mm/s以上になると、粉末にレーザーが照射されると、即座にスパッタリングが発生しているのが確認できる。一方、Fig. 5(b)の様に掃引速度が25 mm/s以下になるとスパッタリングの発生量は少なくなり、Fig. 5(a) 10 mm/sのときは、スパッタリングは殆ど観察されなかった。材料粉末の表面には、 H_2O 、 N_2 、 O_2 などが吸着しておりレーザーが照射されると、粉末が蒸発すると同時にこれらの吸着物質も同時に放出される¹⁶⁾。掃引速度が50 mm/s以上に速い時には、レーザーが照射されると粉末の蒸発と吸着物質の放出が同時に起こり、体積が膨張してスパッタリングが起こる。一方、掃引速度が遅い10 mm/sでは、レーザーのスポットはガウシア

Fig. 4 Schematic diagram of the laser scanning strategy.

Fig. 5 Melting and solidification processes captured with a high speed video camera at the laser scanning speed of (a) 10 mm/s, (b) 25 mm/s, (c) 50 mm/s and (d) 100 mm/s.

ンビームであるため、レーザー強度の低い部分で粉末が予備加熱され、最初に吸着物質の放出が起こる。その後、強度の高い部分が照射されて粉末の熔融および蒸発が起こる。このガウシアビームの予熱効果によって、局所的な体積膨張が小さくなり、スパッタリングが抑制されたものと考えられる。

3.2 造形したTi合金表面解析

触針式形状測定装置を用いて、造形サンプルの表面粗さを測定した。算術平均粗さ R_a は、式(1)に示す様に粗さ曲線 $f(x)$ からその平均線の方向に基準長さ l に対する平均線から測定曲線までの偏差の絶対値を合計し、平均値とした。

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l f(x) dx \quad (1)$$

Fig. 6にレーザー掃引速度に対する造形したTi64板表面の表面粗さ測定結果を示す。レーザー出力は、150 Wと固定し、レーザー掃引速度は、5-100 mm/sと変化させた。表面粗さ R_a は、レーザー掃引速度が速くなるにしたがって大きくなる事がわかる。これは前述したスパッタリングと相関しており、スパッタリングの発生量が増加すると表面粗さ R_a が大きくなることから、スパッタリング量に表面粗さが依存している事を示唆している。Fig. 7にレーザー掃引速度10 mm/sと50 mm/sのサンプル写真および断面観察の結果を示す。掃引速度が50 mm/sの時は、表面粗さ R_a は30 μm であったが、10 mm/sでは、表面粗さ R_a は、0.62 μm と最も小さくなった。さらに、

Fig. 6 Correlation between the laser scanning speed and surface roughness Ra of the fabricated Ti64 plate surface.

Fig. 7 Optical images of the Ti64 plate fabricated with a scanning speed of (a) 10 mm/s and (b) 50 mm/s.

これらのサンプルをレーザーの掃引方向に垂直に切断し、樹脂埋め研磨を行った。Fig. 8 に断面の顕微鏡観察

Fig. 8 Microscope images of cross section in (a) 10 mm/s and (b) 50 mm/s.¹⁴⁾

結果を示す。掃引速度50 mm/sのときには、基板とTi64層の間やTi層内にボイドが発生しているのがわかる。一方、レーザー掃引速度が10 mm/sの時では、ボイドや空孔は現れず、緻密な造形が出来ている事がわかった。

4. まとめ

本報では、レーザー金属積層造形法に焦点を当てて、最新の研究開発動向およびスパッタリングの発生を抑制したスパッタレスSLMの一部を紹介した。レーザー金属積層造形技術は、設計の自由度が高くなることに加え、造形物の材料組織が制御出来、しかも単結晶材料の造形が可能となれば、部位ごとに材料組織変えられるような真の意味のテーラーメイドものつくりを実現する技術となり得る。本報で紹介出来なかった技術や応用例も数多くあり、今後ますますレーザー金属積層造形技術の進展が期待される。本報がレーザー金属積層造形技術を使用するための一助になれば幸いである。

謝 辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業「戦略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ーコーティング技術の研究開発」の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) E. C. Santos, M. Shiomi, K. Osakada, and T. Laoui: *Int. J. Mach. Tools and Manufacture* **46** (2006) 1459.
- 2) B. Zhang, N. E. Feinech, H. L. Liao, and C. Coddet: *J. Mater. Sci. Technol.* **29** (2013) 757.
- 3) D. Gu, Y. Shen, and Z. Lu: *Mat. Lett.* **6** (2009) 1577.
- 4) Z. Wang, K. Guan, M. Gao, X. Li, X. Chen, and X. Zeng: *J. Alloy and Compounds* **513** (2012) 518.
- 5) Q. Jia and D. Gu: *J. Alloy and Compounds* **585** (2014) 713.
- 6) I. Yadroitsev, P. Krakhmalev, I. Yadroitsava, S. Johansson, and I. Smurov: *J. Mat. Processing Technol.* **213** (2013) 606.
- 7) J. Sun, Y. Yang, and D. Wang: *Materials and Design* **49** (2013) 545.
- 8) B. Zhang, H. Liao, and C. Coddet: *Vacuum* **95** (2013) 25.
- 9) M. J. Matthews, G. Guss, S. A. Khairallah, A. r M. Rubenchik, P. J. Depond, and W. E. King: *Acta Materialia* **114** (2016) 33.
- 10) S. Ly, A. M. Rubenchic, S. Khairallah, G. Guss, and M. J. Matthews: *Sci. Rep.* **7** **4085** (2017) 1.
- 11) Y. MorrisWang, Thomas Voisin, Joseph T. McKeown, Jianchao Ye, Nicholas P. Calta, Zan Li, Z. Zeng, Y. Zhang, W. Chen, T. T. Roehling, *et al.*: *Nature Materials* (2017) Advanced online publication, DOI: 10.1038/NMAT502.
- 12) J. Chen, D. Schwarze, and T. Niendorf: *Proc. Lasers in Manufacturing Conference* (2017).
- 13) Y. Sato, M. Tsukamoto, and Y. Yamashita: *Appl. Phys. B* **119** (2015) 545.
- 14) Y. Sato, M. Tsukamoto, S. Masuno, Y. Yamashita, D. Tanigawa, and N. Abe: *Appl. Phys. A* **122** (2016) 439.
- 15) Y. Sato, M. Tsukamoto, Y. Yamashita, S. Masuno, K. Yamashita, S. Yamagata, and R. Higashino: *IEEJ Trans. Fundamentals and Mat.* **135** (2017) 265.
- 16) S. Nakano, N. Sato, and T. Shimizu: *Gas Turbine Soc. Jpn.* **42** (2014) 433.