

金属材料の積層造形における 加工現象評価

佐藤直子* 瀬渡直樹* 清水 透* 中野 禪*

1. はじめに

積層造形は、一層ずつ原料を積み上げる工程をとるため、製品形状や組成、組織を連続的あるいは段階的に変化させることにより、その部材の機械的特性や伝熱特性、生体親和性などを傾斜させた高付加価値製品の創出が期待されている⁽¹⁾⁽²⁾。

粉末床溶融結合型の積層造形の一つである選択的レーザー溶融法(SLM: Selective laser melting)は、金属の加工ができる積層造形法である。図1は、SLMの加工工程を示す。まず、金属粉末を一層分の厚さに敷き詰める(図1(a))。次に、レーザー照射により粉末を溶融凝固させる(図1(b))。その後、一層分ステージを下降させ(図1(c))、これらの工程を製品が完成するまで繰り返す。

SLMの製品品質は、レーザー照射による粉末の溶融凝固過程に生じる様々な現象が影響する。SLMにおける粉末の溶融凝固は、局所的な急加熱急冷が繰り返し生じ、また積層するに従い、先に造形された層の蓄熱など、レーザー照射点における温度が時々刻々と変化する(図2)。このような変化の過程において、スパッタや、ポーリング現象などの異常溶融が生じ、製品品質を低下させる原因となることが知られてい

る⁽³⁾。スパッタは、溶融金属や非金属物質が飛散した粒子である。スパッタが造形物に溶着すると、除去することが難しいため、表面粗度低下や、原料粉末を敷き詰めるローラやブレードに接触して装置が停止するなどの問題を生じさせる。また、スパッタが積層過程で造形物内部に取り込まれると、非金属介在物として強度低下に影響することが知られる。さらに、スパッタが造形物ではなく粉末層に飛散すれば、粉末の再利用の際に流動性低下や組成ずれなどに影響する⁽⁴⁾。ポーリング現象は、レーザー照射により溶融凝固した部分が球状かつ不連続に固化する現象を指す⁽⁵⁾。この現象は、材料やレ

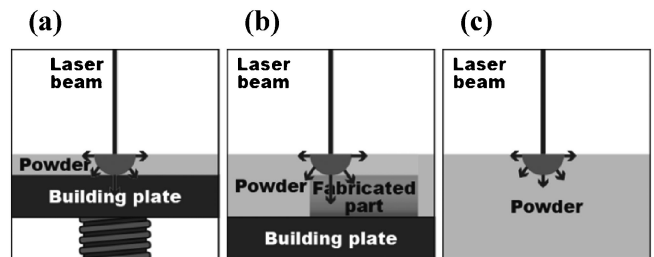


図2 レーザー照射部における様々な伝熱条件の模式図: (a) 造形開始点, (b) 下に既造形層がある場合, (c) 下に未溶融の粉末のみがある場合。

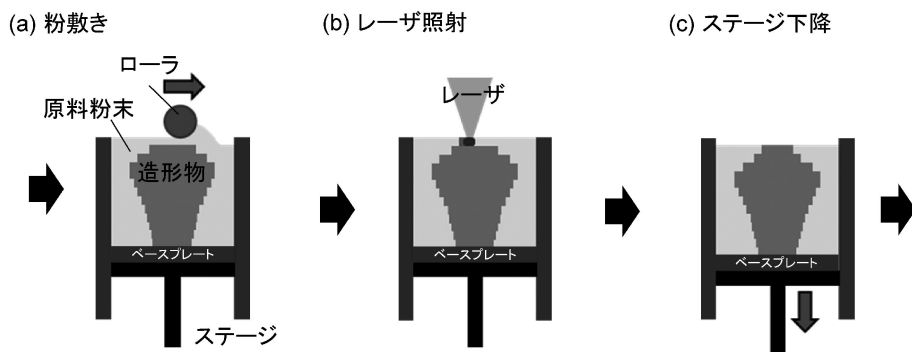


図1 SLMの加工工程。

* 国立研究開発法人産業技術総合研究所; 研究員(〒305-8564 つくば市並木1-2-1)
Real-time Observation of Melting Behavior in Selective Laser Melting of Metals; Naoko Sato, Naoki Seto, Toru Shimizu and Shizuka Nakano(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba)
Keywords: additive manufacturing, powder bed fusion, selective laser melting, X-ray transmission real-time observation, titanium-aluminum-vanadium alloy
2017年7月25日受理[doi:10.2320/materia.56.695]

レーザー照射条件により生じる。熱伝導や酸化皮膜などの影響により、すでに熔融凝固した部分との親和性が悪く、表面張力によって熔融状態で球状になり、そのまま凝固したと考えられている⁽³⁾。ポーリング現象が生じた場合、スパッタと同様に粗度や積層時の装置停止に影響するだけでなく、不連続に凝固するため密度低下につながる。スパッタの発生やポーリング現象はSLMにおいて生じる問題の現象として知られているが、現象発現機構はよくわかっていない。

SLMにおける複雑な現象は、シミュレーションによる解析が進められている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。Khairallahらは、熱拡散を流体力学に結び付け、温度に異存する材料物性や表面張力、粒子の分布について説明している。シミュレーション結果から、粉体層にレーザーを走査したときの連続的に熔融する場合と、不連続に熔融する場合の現象の違いについて考察し、また熔融部における蒸発の反跳圧力やマランゴニ対流が造形物中の気孔形成に及ぼす影響について考察し、それに基づき造形条件改善の指針を示している⁽⁶⁾⁽⁷⁾。一方で、熔融凝固過程における物理を理解するためには直接観察も必要である。我々は、SLMの加工中に生じる現象、たとえば粉敷時の粉面構造⁽⁸⁾や粉末の熔融現象⁽⁹⁾、加工中の温度⁽¹⁰⁾などの直接的な評価法を検討しており、本稿では熔融現象評価について紹介する。

2. X線透視観察のSLM評価への応用

X線透視観察は、溶接におけるキーホールやブローホール形成をその場観察することに用いられてきた技術であり⁽¹¹⁾、それをSLMに応用することを試みた。

(1) SLM 観察用 X線透視装置

SLMの熔融凝固を再現させるX線透視装置の機構を検討した。図3(a)は、X線透視装置の模式図である。装置の機構は、X線管球と結像装置、熱源であるレーザーは固定し、試料をX-Yステージで移動させることにより、熔融部を連続的に観察するものである。ステージの移動方向は、図3(a)では紙面方向となる。試料となる部分は、粉末床治具と、不活性ガスにより熔融金属と空気との接触を断つシールド機構を作製し、SLMの熔融凝固が生じる環境を整えた(図3(b), (c))。粉末床治具は、X線透過率の高い材質が求められる。一方で、透過厚さの制限のため一回のレーザー照射で治具が焼き付くなどして損傷する可能性があり、実験に十分な数の治具を用意することが望ましい。そこで、X線透過率が高く、かつ安価で加工性のよいアルミニウムを選択した。粉末床治具は、厚さ5mmのアルミニウム板に溝加工を施し、溝の中に厚さ3mmの粉末を充填する構造とした。シールド機構は、溶接のように熔融池付近に直接吹き付ける形では粉末が舞うため、粉末床治具を覆うことのできるアクリルの箱にガスの吸排気口を取付け、不活性ガスを流す機構とした。また、レーザー光が導入する天井部にはレーザー窓を設置した。

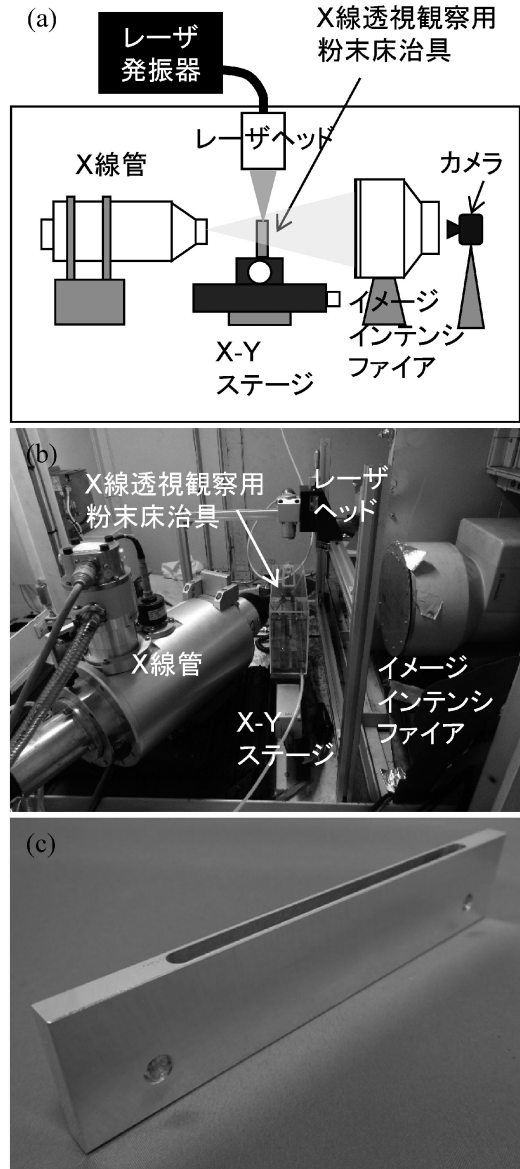


図3 X線透視装置：(a) 模式図、(b) 測定時の各部件の配置、(c) 粉末床治具。

(2) X線透視による粉末床の熔融凝固現象の評価可能性

溶接部のX線透視観察では、同じ材料を熔融凝固させる場合でも、キーホールやブローホールは、熔融池に対する密度差に起因してX線透過率に差が生じることで可視化される。SLMでは、粉末の見掛け密度が約60%であるのに対して、熔融凝固部は見掛け密度が約100%となるため、その差から熔融凝固挙動を評価できると考えた。供試材は、最大粒径45 μm のTi-6Al-4Vのガスアトマイズ粉末(TILOP64-45、大阪チタニウム社製)を用いた。本検討に用いた試料は、粉末床治具にTi-6Al-4V粉末を充填し、予めレーザーを線走査して熔融凝固させたものとした(図4(a))。観察条件は、X線透視画像において最も色の差異が明瞭になった、管電圧160kV、管電流90Aの条件とした。観察の際、縮尺として $\phi 1\text{mm}$ の白金線を粉末床治具の側面に付与した。

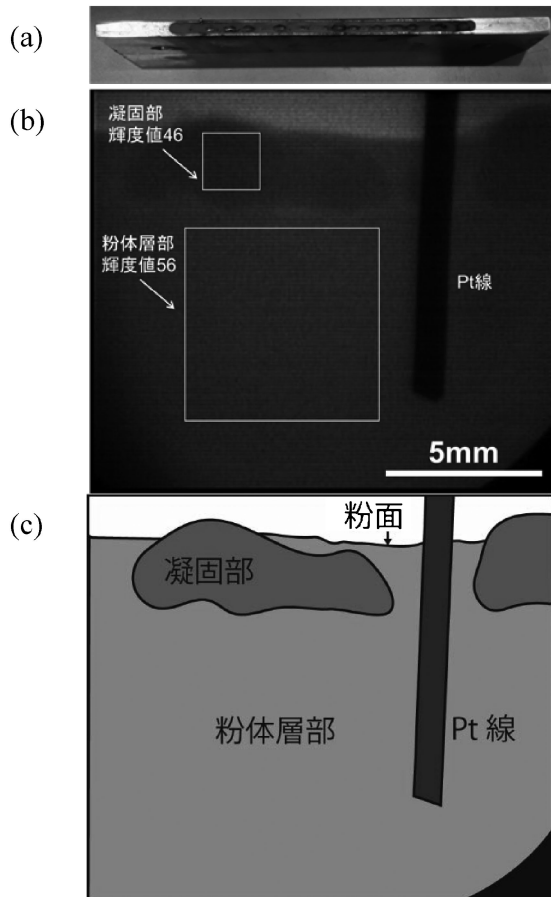


図4 凝固部と粉体層部の輝度値比較：(a) 透視試料外観，(b) X線透視像，(c) X線透視像の模式図。

得られた X 線透視像を図 4(b)に示す。試料は、図 4(a)よりボーリングした状態である。X 線透視像は、画像処理ソフトウェア ImageJ を用いて平均輝度を算出した結果、粉末層部の平均輝度値が56、凝固部では46であった。輝度値の差を基に透視像を模式図にすると、図 4(c)のようになる。このように、数ミリメートルの大きさの凝固部を形成させれば、粉体層部と凝固部の判別ができる。しかし、実際の SLM では、一層の厚さが約 $50 \mu\text{m}$ であり、その範囲における熔融凝固現象の観察はほぼ分解能に等しく難しい。したがって、現状で評価が可能な現象は、キーホールやスパッタ、ボーリング現象などが生じる異常熔融に限定される。

3. ボーリング現象のその場観察

単位面積当たりの平均投入エネルギーが等しくなるようにレーザー出力とステージの送り速度を変化させ、その時の熔融現象のその場観察を実施し、ボーリング現象について考察した。レーザー照射条件は、表 1 の 5 条件とした。レーザー照射後の熔融凝固部の外観を図 5 に示す。熔融凝固部の形状は、低出力かつ低走査速度の条件の方が連続した線状に固化する傾向が見られ、高出力かつ高走査速度になるにつれて球状に固化し不連続になるボーリング現象が見られた。このように

表 1 レーザ照射条件.

No.	出力/W	送り速度/ mms^{-1}	エネルギー密度/ Jmm^{-2}
1	100	20	50
2	125	25	50
3	150	30	50
4	200	40	50
5	250	50	50

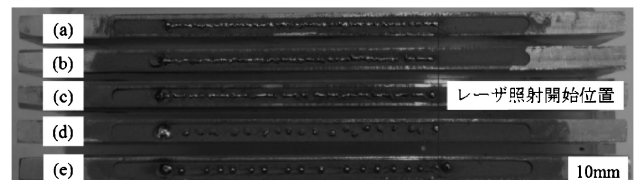


図 5 各試験片のレーザー照射後の熔融凝固部の比較：(a) 条件 1, (b) 条件 2, (c) 条件 3, (d) 条件 4, (e) 条件 5.

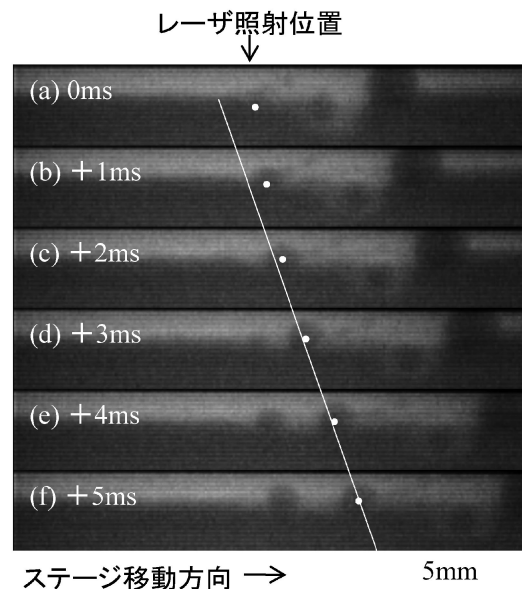


図 6 球状の熔融凝固部の形成過程：(a) 発生時，(b) 発生後 +1 ms, (c) 発生後 +2 ms, (d) 発生後 +3 ms, (e) 発生後 +4 ms, (f) 発生後 +5 ms.

同じ材料においてレーザー照射条件の違いにより熔融凝固部の形状が変化することは、表面張力とレーザー照射部周辺の温度つまり伝熱による物理現象が複雑に絡み合い、熔融凝固部の形状に影響したことを示唆している。図 6 は、最もボーリング現象が顕著であったレーザー照射条件 5 (表 1) のその場 X 線透視像であり、ある時点から 1 ms ごとに 5 ms 間のボーリングしている熔融凝固部の挙動を示している。レーザーは画像の上側から照射され、その位置は図 6 に示す通りである。中心に白い点を付与した球状の熔融部の挙動に注目すると、0 ms から +2 ms では、ステージが一定速度で移動しているにもかかわらず、球状の熔融部はレーザー照射位置に引きつけ

られる様子がみられた。また、その間は時間の経過に伴い球状の熔融部の径も拡大しており、球状の熔融部が転がりながら粉末を吸収したものと思われる。+3 ms以降は、ステーヂの送りにしたがって移動する様子がみられた。これは、ポーリング現象が表面張力や伝熱だけでなく、未熔融の粉末との摩擦にも影響されることを示唆している。このように、X線透視観察によって熔融池近傍に生じる物理現象を捉えることができた。このような現象は、レーザ照射条件、材料、加工雰囲気など様々な因子で変化すると考えられるが、その影響を解析することで、品質改善につなげていきたい。

4. おわりに

熔融凝固現象の直接観察の取り組みを紹介した。本稿で紹介したポーリング現象だけ見ても複雑であり、より具体的に理解するためには、直接観察、材料物性評価、および加工現象のシミュレーションの連携が必要である。複雑な材料の挙動の物理を理解することで、ポーリングなどの異常熔融による形状不良を抑制する最適なレーザ照射条件や積層造形用材料開発の指針を示したい。

ところで、本稿を書き終えた日に、放射光を用いた高分解能なX線透視観察についての論文の存在を知った⁽¹²⁾。その論文では、粉末粒子の1つ1つが熔融する様子を捉えている。今回用いたラボ用のX線よりも放射光のほうが空間および時間分解能が高いため、得られる情報が多いことは確かである。今後、それぞれの手法を比較し、本手法について特徴を見出せればと思う。

本研究は、TIA 連携プログラム探索事業「かけはし」の支援を受けたものであり、関係各位に感謝申し上げます。

文 献

- (1) I. Maskery, N. T. Aboulkhair, M. R. Corfield, C. Tuck, A. T. Clare, R. K. Leach, R. D. Wildman, I. A. Ashcroft and R. J. M. Hague: Mater. Sci. Eng. A, **670**(2016), 264–274.
- (2) W. Ge, F. Lin and X. Ma: Collected Abstracts of the APMA-2017, G04-0196.
- (3) K. Osakada, Y. Noshi, H. Abe and M. Shiomi: Japan Soc. Precis. Eng., **73**(2007), 901–905.
- (4) M. Simonelli, C. Tuck, N. T. Aboulkhair, I. Maskery, I. Ashcroft, R. D. Wildman and R. Hague: Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci., **46**(2015), 3842–3851.
- (5) R. Li, J. Liu, Y. Shi, L. Wang and W. Jiang: Int. J. Adv. Manuf. Technol., **59**(2012), 1025–1035.
- (6) S. A. Khairallah and A. Anderson: J. Mater. Process. Tech., **214**(2014), 2627–2636.
- (7) S. A. Khairallah, A. T. Anderson, A. Rubenchik and W. E. King: Acta Mater., **108**(2016), 36–45.
- (8) S. Nakano, N. Sato and T. Shimizu: Collected Abstracts of the JSME Annual Meeting (2016), No.S0440303 (DVD).
- (9) T. Hotta, N. Sato, N. Seto, T. Shimizu, S. Nakano and S. Nishino: Collected Abstracts of the JSME2016.
- (10) H. Azuma, S. Yamamoto, S. Kajino, T. Okane, N. Sato, S. Nakano, T. Shimizu and S. Suzuki: Collected Abstracts of the 2017 Spring Meeting of the Japan Inst. Metals (2017), No. P3 (DVD).
- (11) N. Seto, S. Katayama and A. Matsunawa: Q. J. Jpn. Weld. Soc., **18**(2000), 243–255.
- (12) C. Zhao, K. Fezzaa, R. W. Cunningham, H. Wen, F. De Carlo, L. Chen, A. D. Rollett and T. Sun: Sci. Rep., **7**(2017), 3602.

★★
 佐藤直子

2013年3月 九州大学大学院工学府材料物性工学専攻博士後期課程修了

2013年4月～ 現職

専門分野：積層造形、金属材料

◎金属の積層造形における加工現象評価および加工技術改良に関する研究に従事。

★★



佐藤直子

瀬渡直樹

清水 透

中野 禪