

Additive Manufacturing技術の最新動向

(レーザパウダーベッド造形における欠陥発生メカニズムと 溶融凝固シミュレーションを中心に)

京極 秀樹^{*1}, 池庄司 敏孝^{*2}

The Recent Trend on Additive Manufacturing Technology: A Review ~Mechanism of defects formation and simulation of melting and solidification phenomena in laser powder bed fusion~

Hideki KYOGOKU^{*1}, Toshi-Taka IKESHOJI^{*2}

Additive manufacturing (AM) technology has been dramatically attracting attention as a breakthrough technology in advanced manufacturing. The recent trend of the development of metal 3D printers and the recent research activities are introduced. Especially, the analysis of melting and solidification phenomena and the mechanism of the occurrence of defects were introduced. And also, the analysis of melting and solidification phenomena using the numerical simulation in laser powder bed fusion (LPBF) process was introduced including the current state of the research development in the national (TRAFAM) project and the activities in the Advanced Additive Manufacturing Center.

Keywords: Additive Manufacturing, 3D Printer, Laser, Powder Bed Fusion, Defect, Melting Phenomenon, Simulation, TRAFAM Project

1. はじめに

アディティブマニファクチャリング (Additive Manufacturing, 以下 AM と記述する) 技術の最近の発展は目覚ましく, 装置開発やソフトウェアの開発が活発に行われている。Wohler Report 2018^①によれば, ここ数年の 3D プリンタの販売台数ならびに関連分野の生産額は急速に伸びてきており, 2017 年の世界におけるパーソナルな樹脂用も含めた販売台数は約 53 万台, このうち産業用 3D プリンタは約 14 万 7 千台, 金属 3D プリンタは約 1800 台と報告されている。しかしながら, 我が国における割合は, わずか 3% と非常に低い状況にあり, 欧米や中国に比べて後れを取っていることは否めない。海外においては, 2013 年のアメリカ・オバマ前大統領の一般教書演説の後, アメリカの America Makes, EU の HORIZON2020, 中国の Made in China 2025 をはじめ,

多くのプロジェクトが動いており, 着々と成果が出てきているとともに, 大学や研究機関における研究開発の拠点化が進んできている。我が国においても, 2014 年度より開始された技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構 (以後, TRAFAM と記す) を設置して開始された経済産業省「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム—次世代産業用 3D プリンタ技術開発—」^{②④}が, 5 年を迎えて終了し, 5 種類の金属 3D プリンタが開発され, 販売が開始され始めた。これについては, 後述する。

国内においては, 日本国際工作機械見本市 (JIMTOF 2018) や 3D プリンティン展など, 多くの展示会も開催され, 従来に比べて, 金属 3D プリンタ, 粉末, ソフトウェアおよび関連の展示も多くなり, 多くの情報が得られるようになってきた。金属 3D プリンタについてみる

原稿受付 2019 年 4 月 13 日

^{*1} 近畿大学 次世代基盤技術研究所 特任教授 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺 1 番)

^{*2} 近畿大学 次世代基盤技術研究所 客員准教授

E-mail: kyogoku@hiro.kindai.ac.jp

と、パウダーベッド（粉末床）方式では、DMG MORI 社が新たに粉末をせり上がり方式で自動供給できる装置開発するなど、注目を集めている。海外メーカーでは、SLM Solutions 社などが大型装置を開発するなど積極的に動いている。ハイブリッド方式ではあるが、ソディック社が変形防止対策を施し、マルテンサイト系ステンレス鋼による金型造形が可能な機構を有する装置開発を行っている。デポジション方式に関しては、三菱電機（株）が、新たな造形方式の装置を発売し、三菱重工工作機械（株）は TRAFAM で開発した廉価版の装置の販売を開始した。また、YAMAZAKI MAZAK 社がブルーレーザを利用した装置を開発している。溶接の分野においては、高出力のブルーレーザも開発されてきており、レーザの波長帯域が広がっていることが伺える。

金属 3D プリンタの性能については、図 1 に示すように、高速化・大型化さらには製品の高精度化が求められる。高速化・大型化に対しては、レーザの高出力化やマルチ化により対応されてきている。製品の高精度化については、装置の改良はもちろんのこと、粉末の改良やソフトウェアの改良により対応されてきており、高品質の製品が造形できるようになってきている。

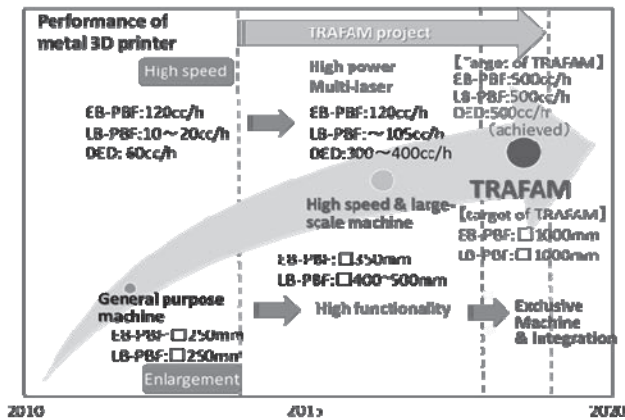


図 1 金属 3D プリンタ性能の変遷

一方、学協会における研究発表も非常に多くなされている。AM に関する国際会議としては最も古くからテキサス大学オースティン校で開催されている SFF シンポジウム 2018 においては、2017 年の 500 件を超えて約 550 件の発表が行われ、この分野における研究の活性度が非常に高いことが伺える。2018 年の特徴的な研究発表は、次のとおりである。

- ①テストベンチを利用した in-situ モニタリング技術開発、特に高速 X 線画像処理を利用した溶融凝固現象、粉末のリコート現象の解明に関する研究
- ②モニタリングデータ処理技術に関する研究

③物理モデルによるシミュレーション技術に関する研究

④トポロジー最適化、ラティス構造に関する研究

⑤ハイブリッド AM 技術に関する研究

⑥バインダージェットングに関する研究

これらをまとめると、

(1) 特に、①及び②に関しては、昨年度までの高速度カメラとサーモビューワによる溶融凝固現象の解析から、ローレンスリバモア研究所（以後、LLNL と記す）、アルゴンヌ研究所を中心として高出力 X 線画像の高速処理による溶融凝固現象を解析した報告が多くなされた。レーザ積層造形による欠陥の発生やスパッタリングの発生状況を可視化して三次元的に正確に把握できるようになったことは、今後の品質保証のためのモニタリング技術の開発並びにシミュレーション精度の向上に非常に有益であるといえる。これに関しては、後述する。

(2) 最適な造形条件導出のために、溶融凝固現象から組織予測さらには熱変形の現象を解析するために機械学習が利用されて始めてきており、AM 用の “Digital Twin” へ向けての概念も提案されてきており、昨年度と比べて新たなステージに入ってきたことが伺える。

本稿では、最近のレーザパウダーベッド造形における欠陥発生メカニズムと溶融凝固シミュレーションの研究開発状況を、国家プロジェクトなどを実施している当研究所・3D 造形技術研究センターの研究開発成果も加えて紹介する。

2. レーザパウダーベッド方式における欠陥発生メカニズム

溶融凝固現象の解明は、高品質の造形体を作製するために解決すべき重要な課題である。とりわけ、航空・宇宙分野においては品質保証が非常に重要な課題となっていることから、モニタリング技術とシミュレーション技術の両面から開発が進められている。これら 2 つの課題を解決するためには、溶融凝固現象を解明して、欠陥の発生メカニズムを明らかにしておくことが重要である。このため、アメリカ国立標準技術研究所 (NIST) ⑤や LLNL⑥⑨などが、テストベンチを開発して、高速度カメラやサーモビューワにより溶融池（メルトプール）の観察を詳細に行うとともに、溶融凝固シミュレーションと組合せて、欠陥の発生状況等を明らかにしてきている。

TRAFAM においても、高速度カメラとサーモビューワを搭載したテストベンチを開発して、溶融凝固現象について解明している。著者らによる高速度カメラによる溶融凝固現象の例を、図 2 に示す。

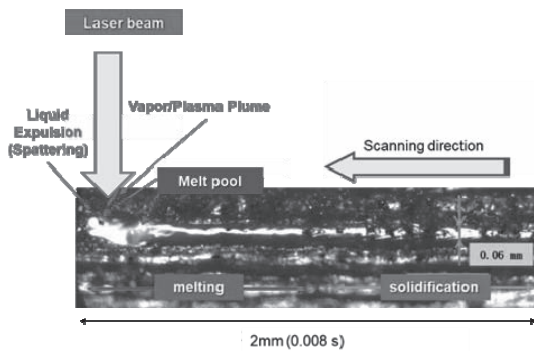


図2 高速度カメラによる溶融凝固現象

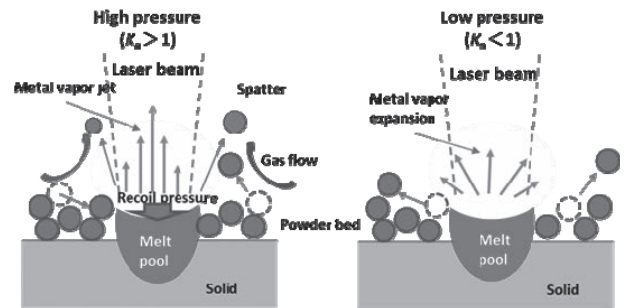
Mathews ら⁽⁸⁾は、高速度カメラを用いて、レーザー照射とパウダーベッド間の現象をシミュレーションと併せて実験的に検証している。図3に示すように、レーザー積層造形ではガス雰囲気での造形を行うことから、レーザー照射による蒸気ジェットの影響によりパウダーベッドの粉末だけでなくスパッタも飛散することを明らかにしている。図3(a)に示すように、レーザーが照射されると急速に加熱されることから、金属蒸気であるプルームあるいはヒュームが発生する⁽⁷⁾。一方、レーザーを吸収した粉末は溶融して溶融池（メルトプール）を形成し、発生した金属蒸気による反跳力を受ける。プルームは高速で発生することから、メルトプールの溶融金属を吹き飛ばしてスパッタを発生させるとともに、ガス流を発生させてトラック周辺の粉末を吹き飛ばしてはぎ取ってしまう⁽⁸⁾。

Bidare ら⁽¹⁰⁾は、高速度カメラとシュリーレンカメラを有するテストベンチを使用して、プルームならびにスパッタ発生現象をとらえており、造形条件によってプルームの発生する方向が異なることから、スパッタの方向が異なる現象や粉末のはぎ取られ方が異なることがわかる。また、レーザー照射条件によっては、メルトプールにおいてキーホールが発生し、マランゴニ対流が起きる。King ら⁽⁶⁾は、実験的にキーホールポアの発生を観察し、これはレーザー照射により沸点に近い表面温度となるために反跳力を駆動力として発生したものと述べている。

メルトプールにおいては、マランゴニ対流が表面張力の差により発生し、メルトプールを攪拌する。このような高速でのメルトプールの動きにより、凝固組織は铸造組織と大きく異なり、微細な結晶粒となり、造形条件によっては等軸晶になりやすい。

さらに、メルトプールの内部の状況を明らかにするため、Zhao ら⁽¹¹⁾は、シンクロトロンによる溶融凝固現象をモニタリングするために装置を作製し、リアルタイムにTi-6Al-4V粉末の溶融現象を観察している。図4に示すように高速シンクロトロンX線画像および回折を利用してメルトプール内部の溶融凝固現象を観察し、レーザー照

射時のキーホールの発生状況ならびに空隙やスパッタの発生状況をとらえている。



(a) 大気圧に近い場合 (b) 真空に近い場合

図3 レーザ照射における溶融現象（出典: Matthews et al., 2016 を参考に著者作成）

3. 溶融凝固シミュレーション

製品の高品質化が求められる中で、溶融凝固シミュレーションは最適造形条件を予測するために重要である。加えて、金属AM技術において造形時の課題となっている熱変形シミュレーション技術の開発はユーザーから強く要望されており、市販のソフトウェア開発が行われているものの、解析には多くの実験データが必要であることから、現状ではユーザーの要望を十分に満たしているとは言えない状況にある。シミュレーションソフトウェア開発の変遷について、図5に示す。

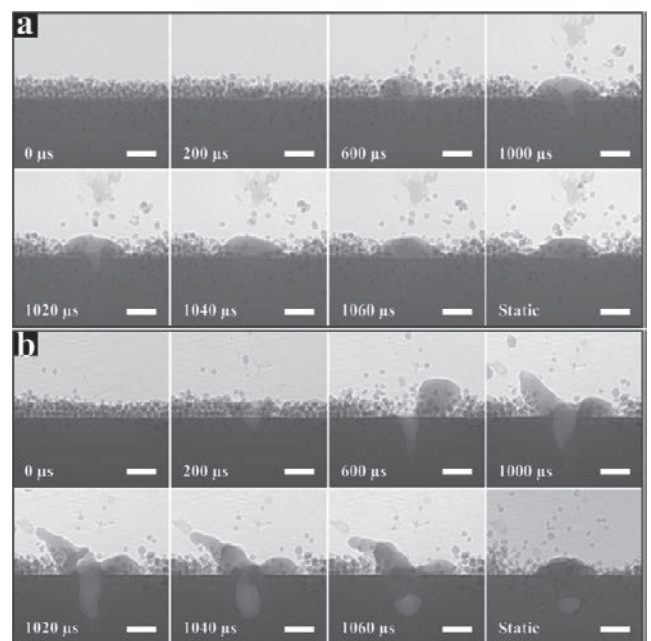


図4 高速シンクロトロンX線画像によるレーザー照射における溶融現象。(a)240 W (伝熱モード), (b)520 W (キーホールモード) (出典: Zhao et al, 2017)

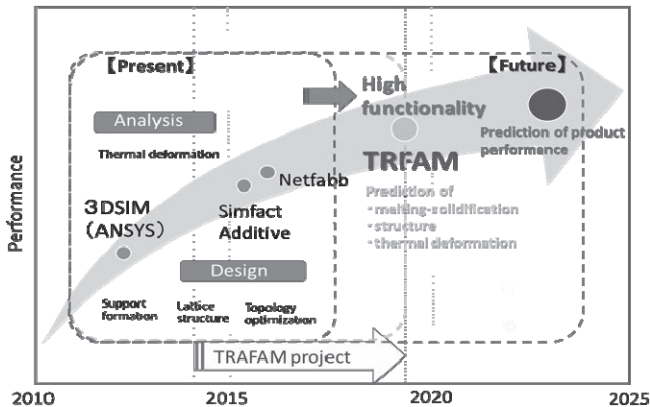
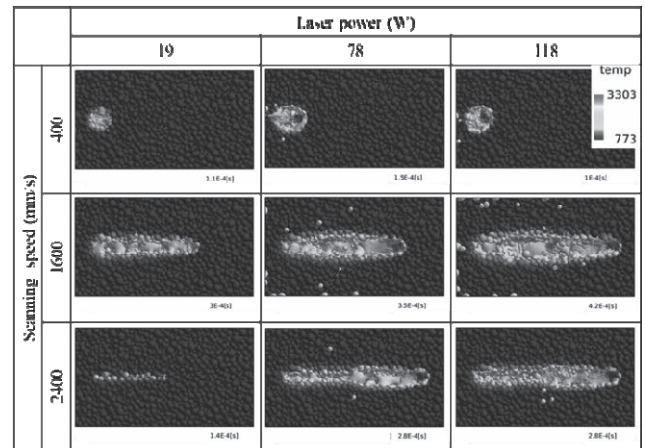


図5 AMにおけるシミュレーションソフトウェア開発の変遷

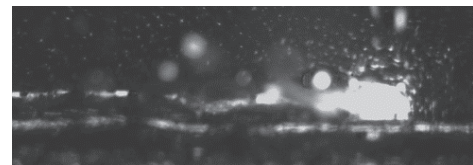
3.1 ミクロ溶融凝固シミュレーション

溶融凝固シミュレーションに関しては、粉体を考慮したマイクロシミュレーションとメルトプールを扱うマクロシミュレーションに分けられる。マイクロシミュレーションについては、Flow-3Dを用いた報告なども行われているが、Kingら⁽¹²⁾およびKhairallahら⁽⁷⁾は、一流体モデルによるメルトプールの溶融凝固シミュレーションソフトウェアを開発し、メルトプールにおけるキーホール、空隙やスパッタの発生状況を明らかにするとともに、空隙はトラックの端部やメルトプールの底で発生しやすいことなどをシミュレーション結果から見出している。このシミュレーション結果から、メルトプールの溶融凝固現象は次のようであると述べている。(a)レーザー照射時に反跳力によりくぼみ（キーホール）が発生して、(b)レーザー照射が終わるとくぼみが崩壊していき、(c)空隙がトラップされ、最終的に(d)空隙として残留する。この現象は、溶接におけるキーホールポアの発生現象によく似ている。この結果は、図4に示したZhaoら⁽¹¹⁾の実験結果とよく一致している。

これに対して、TRAFAMプロジェクトにおいては、三菱重工（株）を中心に二流体モデル（気体と液体）によるマイクロ溶融凝固シミュレーション技術を開発しており、LLNLのシミュレーションでは解析できないスパッタの飛散状況についても解析している。Watariら⁽¹³⁾は、図6に示すように、パウダーベッドにおけるキーホール、ブルームおよびスパッタの発生を予測できることを、実験との両面で明らかにしている。このモデルでは、図6に示すようにスパッタの発生状況も再現でき、テストベンチによる高速度カメラでの結果とほぼ一致している。



(a) シミュレーション



(b) 高速度カメラによる画像

図6 二流体モデルによるInconel 718のマイクロ溶融凝固シミュレーション結果（出典：Watari et al., 2018）及び高速度カメラによる画像

3.2 マクロ溶融凝固シミュレーション

マクロ溶融凝固シミュレーションにおいては、メルトプールの形状をできるだけ正確に再現できるかが、欠陥のない造形体を作製できるかどうかの予測精度を左右する。これについては、汎用シミュレーションソフトウェアを利用して多くの機関で実施されているが、その精度については、解析モデルと材料特性データ、さらにはメルトプールの形状に関する実験データの精度に依存する。

TRAFAMプロジェクトでは、近畿大学が実施しており、Ikeshojiら⁽¹⁴⁾が新たに提案したモデルにより、図7に示すように純銅のメルトプールの形状を再現し、サーモビューワによるメルトプールの温度分布とよく一致することを明らかにしている。図8に、メルトプールの長さ、幅および深さを予測した結果を示す。これにより、メルトプールの形状がよく予測できていることがわかる。純銅においては、特に熱伝導率が大いことから、図9に模式的に示すように、メルトプールとハッチピッチの関係を予測できる。このように、マクロシミュレーションの精度がよくなれば、レーザー出力、走査速度、ハッチピッチおよび積層厚さといった造形条件の最適化に有効なツールとなる。

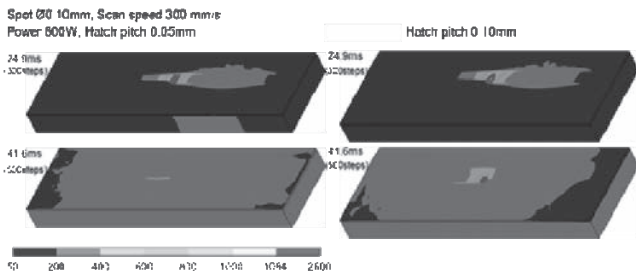


図7 純銅のマクロ溶融凝固シミュレーション結果 (出典: Ikeshoji et al., 2018)

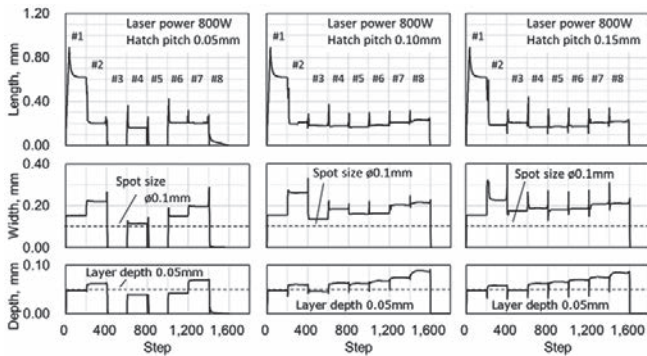


図8 メルトプール形状とハッチピッチの関係 (出典: Ikeshoji et al., 2018)

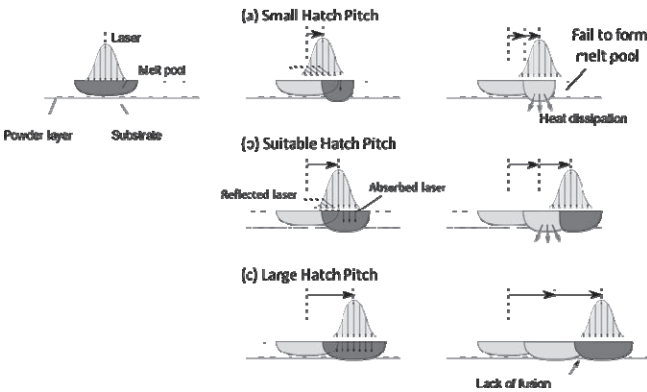
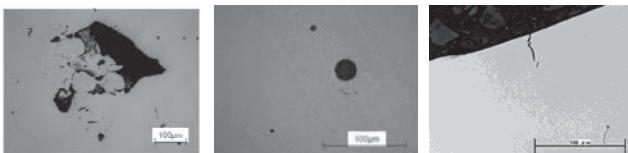


図9 ハッチピッチと溶融池の形成状況



(a) 溶融不良 (b) ポア (空隙) (c) クラック

図10 レーザパウダーベッド方式における典型的な欠陥

3.3 欠陥の種類と欠陥の発生メカニズム

レーザパウダーベッド方式のプロセスにおける代表的な欠陥は、図10に示すように、(a)未溶融欠陥、(b)ガスポアおよび(c)割れである。エネルギー密度を変化させた場合の高速カメラによる溶融凝固現象を図11に示す。

図11(a)に示すエネルギー密度が低い場合には、溶融不良でいわゆるポーリング現象を起こすため、図10(a)に示すような、かなり大きな異形状の融合不良が発生する。図11(b)に示す適切なエネルギー密度においては、スパッタも少なく安定した溶接のビードに似た溶融凝固トラックを生成する。これに対して、図11(c)に示すエネルギー密度が高い場合には、キーホールが発生するとともに、メルトプールにおいて Marangoni 対流が発生して大きく揺動し、凝固時にガスを巻き込むことから、図10(b)に示すようなガス欠陥あるいはキーホール欠陥が発生する。加えて、大きなスパッタが発生してパウダーベッド上に残りやすいため、リコート後にパウダーベッド上に空隙ができて溶融不良が生じやすい (図10(a))。

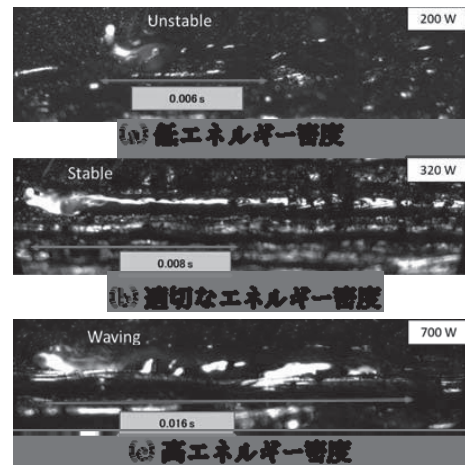


図11 エネルギー密度による溶融凝固現象の相違

4. おわりに

本稿では、最近のレーザパウダーベッド造形における欠陥発生メカニズムと溶融凝固シミュレーションの研究開発状況を紹介した。このところの研究成果により溶融凝固現象と欠陥の発生メカニズムが明らかになってきたことから、欠陥発生防止の予測精度も向上すると思われる。高品質の製品を製造するためには、シミュレーション技術も欠かせないツールであり、今後ますます重要となってくる。本稿では、その一端を紹介した。読者の皆様の参考となれば幸いである。

謝辞

なお、本報告の一部は、経済産業省並びに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) の助成事業の結果得られたものである。ここに、深謝の意を表す。また、本稿作成に当たりご協力頂いた近畿大学次世代基盤技術研究所・3D造形技術研究センター関

係者各位ならびに研究室の院生諸君に謝意を表する。

参考文献

- (1) Wohlers Report 2018, Wohlers Associates, 2018.
- (2) 技術研究組合次世代3D 積層造形技術総合開発機構, “ひらめきを形に！ 設計が変わる新しいモノづくり” シンポジウム講演集, (2017).
- (3) 京極秀樹, 千葉晶彦, 橋谷道明, 君島孝尚, 岡本繁樹, 松田均, レーザ加工学会誌, **25**, (2018), pp.6-11.
- (4) 技術研究組合次世代3D 積層造形技術総合開発機構, “ひらめきを形に！ 設計が変わる新しいモノづくり” シンポジウム講演集, (2018).
- (5) B. Lane, S. Mekhontsev, S. Grantham, L. Vlasea, J. Whiting, H. Yeung, J. Fox, C. Zarobila, J. Neira, M. McGlaufflin, L. Hanssen, S. Moylan, A. Donmez, J. Rice, Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX(2016), pp.1145-1160.
- (6) W.E. King, H.D. Barth, V.M. Castillo, G.F. Gallegos, J.W. Gibbs, D.E. Hahn, C. Kamath, A.M. Rubenchik, J. Materials Processing Technology, **214**(2014), pp.2915-2925.
- (7) S.A. Khairallah, A.T. Anderson, A. Rubenchik, W.E. King, Acta Materialia, **108**(2016), pp.36-45.
- (8) M.J. Matthews, G. Guss, S.A. Khairallah, A.M. Rubenchik, P.J. Depond, W.E. King, Acta Materialia, **114**(2016), pp.33-42.
- (9) S. Ly, A.M. Rubenchik, S.A. Khairallah, G. Guss, M.J. Matthews, Scientific Reports (2017) DOI: 10.1083/s4159801704237-z.
- (10) P. Bidare, I. Bitharas, R.M. Ward, M.M. Attallah, A.J. Moore, Acta materialia, **142**(2018), pp.107-120.
- (11) C. Zhao, K. Fezzaa, R.W. Cunningham, H. Wen, F. De Carlo, L. Chen, A.D. Rollett, T. Sun, Scientific Reports DOI: 10.1038/s41598-017-03761-2.
- (12) W.E. King, T. Anderson, R.M. Ferencz, N.E. Hodge, C. Kamath, S.A. Khairallah, Materials Science and Technology, DOI:10.1179/1743284714Y.0000000728.
- (13) N. Watari, Y. Ogura, N. Yamazaki, Y. Inoue, K. Kamitani, Y. Fujiya, M. Toyoda, S. Goya, T. Watanabe, J. Fluid Science and Technology, **13**, 2(2018).
- (14) T.-T. Ikeshoji, K. Nakamura, M. Yonehara, K. Imai, H. Kyogoku, Journal of Minerals, Metals and Materials Society, **70**, (2018), pp.396-400.