金属堆積造形の積層技術に関する調査研究

平石　誠*　須藤　貴裕*　青野　賢司*　小林　泰則**　石川　淳*

A Report on Additive Manufacturing Utilizing Metal Deposition

HIRAISHI Makoto*, SUTOH Takahiro*, AONO Kenji*, KOBAYASHI Yasunori** and ISHIKAWA Atsushi*

1.　緒　　言

金属堆積造形技術は，金属製品の生産技術として広く使われている切削加工や塑性加工に並ぶ，次世代の加工技術になることが期待されている。少量生産に対する機動力，自由な造形性を背景とした部品点数の削減，それによる生産性の向上，ジェネレーティブデザインの適用による性能向上など，依然高いとされる加工コストのデメリットを補って余りあるような適用事例が出てきており，近い将来の金属加工業にとって大きな変革をもたらすと思われる。

金属堆積造形には様々な造形方式があり，それぞれ一長一短がある。現状では詳細形状や複雑形状の造形に有利であるとされるパウダーベッドフュージョン（PBF）方式が先行しているが，造形物の物性や造形速度では指向性エネルギー堆積（Directed Energy Deposition, DED）方式の方が優れているとされている。

当所では，実製品の製造には上記の特徴を持つ DED 方式が有利であると考え，令和 2 年 3 月に同方式の金属堆積造形装置 三菱重工工作機械（株）製 LAMDA200 を導入した（図 1）。DED 方式によれば，既存の金属製品や治工具等に，目的の機能に応じた材料を，レーザ光を用いた局所加熱によって付加造形することができる。さらに当該装置の特徴として同時に 2 種類の金属材料を供給することが可能であることから，当所では異種材造形の研究を進めているところである。

図 1　導入した金属堆積造形装置

しかし，局所加熱であるが故に造形物には溶接と同様に変形，残留応力，割れ，空孔などの欠陥が生じうる。本調査研究では，実験・試作を通じて金属堆積造形における課題を抽出し開発力の蓄積を図るとともに，迅速な課題対応を目的に金属堆積層の組織や変形を予測する解析技術についての調査を行った。

2.　調査活動

2.1　先行する機関の取組

大学，公設試験研究機関，造形機メーカ，造形サービスビューロを調査した。

2.1.1　研究開発

造形物の形状の安定化や品質保証への要請から，溶融池の挙動やプラズマ発光の変動を監視するインプロセスモニタリングの開発が行われている。これに基づく造形条件の制御は一部実用化されているが，機械学習を利用して異常を判定する技術開発も精力的に取り組まれている。

* 研究開発センター
** 研究開発センター
　　レーザー・ナノテク研究室

また，金属積層造形によって作られた材料は従来の製法によるものと異なる特性を示すことが多いため，機械学習による特性予測に基づき加工条件を推定する研究が行われている他，FEM 解析に基づいて異材種を積層したり，積層条件を制御して弾性率を調整したりして造形物の熱変形を抑える研究が進められている。

2.1.2 適用分野

DED 方式の造形装置を保有する機関では，堆積造形の利点として，既存品への形の付加，異種材料の付加（＝機能の付加），ニアネットシェイプによる後加工の削減などを挙げた。これらを活かした一つの適用例として金型の製作や改修，補修を挙げるところが多かった。

造形サービスビューロでは，自動車部品を中心に航空機や医療機器の部品試作を多く受託している。他の方法に比べて製作コストが高いため，積層造形ならではのメリット（ラティス構造やトポロジー最適化を適用した複雑形状，急熱急冷による優れた材料特性など）が活かせない用途では受託に繋がらないとのことであった。

2.2 市場動向

2.2.1 市場規模

2030 年の金属堆積造形品（造形装置や金属粉末材料は除く）の国内市場規模は 2 兆円程度の市場規模になることが予測されている [1)]。医療，航空・宇宙，発電などの部品単価の高い分野では既に実用化が進んでいる。金型工具や医療分野は中でも市場規模が大きく，それぞれの市場の約 1 割を造形品が占めるとされている。本県の金型産業は集積度が高く，金属堆積造形の導入効果が特に期待される分野である。

2.2.2 市場参入に向けた課題

今後，市場が拡大するための課題はコストと品質管理である。

金属堆積造形にかかるコストは従来加工法に比べて高く，要因として①装置が高い，②造形に時間がかかる，③材料が高い，④材料が限られている等が挙げられる。同じ製品・部品の製作方法として比較する限り，従来加工方法に比べて不利であると思われる。

なお， DED 方式と PBF 方式を比べたとき，上記の②，④については DED 方式の方が有利である。

金属堆積造形品の品質が従来加工法に比べて劣るわけではないが，溶融・凝固を繰り返しながら一層ずつ積層するため，個々の造形物に品質のばらつきや欠陥が生ずる懸念がある。造形物全体の非破壊検査は膨大な検査時間を要し困難であるため，造形中に検査も行うインプロセスモニタリング技術が検討されている。

金属堆積造形の導入を考えたとき，製品・部品の設計や構造はそのままに，造形方法だけを金属堆積造形に置き換えたのではメリットを出せない。金属堆積造形「ならではの設計」いわゆる DfAM（Design for Additive Manufacturing）への転換が重要である。具体的には，一体造形による部品点数の低減，金型レス化によるリードタイムの縮減，トポロジー最適化による軽量化，これらを組み合わせた工程全体としての低コスト化，併せて物理現象に最適化した形状造形による性能向上が取り組まれている [2)]。

2.3 技術動向

2.3.1 変形予測

金属堆積造形は，レーザなど熱源を用いて金属を溶融・凝固するプロセスであることから，熱応力などによる変形は避けられない。高精度な造形を実現するためには，変形を予測してモデルを補正する必要があり，変形予測は金属堆積造形技術の実用化に不可欠で，今後の動向が注目される分野である。金属堆積造形の変形予測分野では，PBF 方式の報告 [3)] が多くあるが，DED 方式についても汎用有限要素法解析ソフトウェアを用いて取り組んだ例が報告 [4),5)] されている。これらは，従来の肉盛溶接で用いられた手法によるもので，造形物全体の温度履歴を

非定常的に計算し，その温度履歴と温度に依存した物性値を用いて熱弾塑性解析を造形プロセスの全時刻で行う必要があることから，計算時間が膨大になることが知られている[6]。また，汎用ソフトウェアであるため，様々な設定ができる一方で，解析専任者でなければ取り扱いが難しい面がある。そうした中で，「次世代型産業用 3D プリンタの造形技術開発・実用化事業（NEDO）[6]」では，従来から大型構造物の溶接シミュレーションに使用されてきた固有ひずみ法を，3 次元積層造形に使用できるように拡張し，計算の高速化を実現している。このソフトウェアは，（株）金属積層造形サポートシステムがクラウドサービスとして提供しており，計算の高速化に加え，（株）C&G システムズの CAM システムと連携でき，造形形状や造形条件，パス情報を簡単に設定できることを特徴としている。そのほか，市販のソフトウェアでは，MSC Software 製 Simufact Welding などがパウダ DED 方式に対応しており，造形に使用する NC プログラムを使ってシミュレーションできるなど，ユーザインターフェースが簡略化され，解析専任者でなくとも比較的取り扱いやすくなっている。今後は，解析専任者でなくとも取り扱いやすいこのようなソフトウェアの開発がますます進むと考えられる。

2.3.2 組織予測

金属堆積造形物の機械的性質は金属組織の影響を受けるため，その予測・制御に関心が寄せられており，指標として凝固マップの活用が提案されている。

凝固マップは凝固組織の形態（柱状晶か等軸晶か）を固液界面での温度勾配（G）と固液界面の移動速度（凝固速度）（R）で整理したもので，概略は図 2[7]のようである。マップの左上では柱状晶が，右下では等軸晶が生ずる。また，右上に寄るほど結晶粒は微細に，左下に寄るほど粗大になる。柱状晶と等軸晶の境界の条件は合金によって異なる。

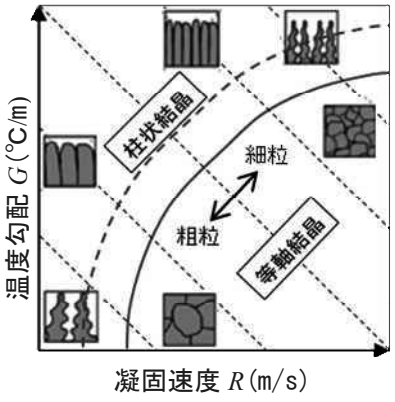

図 2　凝固マップ[7]

具体例として，Ti 合金を DED 方式で造形した場合，送り速度や粉末供給量を大きくしたり，あるいはレーザパワーを小さくしたりすると，温度勾配 G が減少し，結果，等軸晶が増えることが報告されている[8]。

G と R の制御や測定は現状では不可能であり，造形物の部位によっても異なるため，溶融池の内部についてシミュレーションを実行することが必要となる。ただし，組織形成の計算との連成（あるいは連携）解析は開発途上にあり[9]，現状では実験よりも高コストとなる可能性もあるため，単に目的とする組織を得るための最適条件を求めることが目的であれば，機械学習の利用を検討した方が有益となる可能性も文献[9]中で指摘されている。

2.3.3 溶融・凝固シミュレーション

DED に対応しうる溶融・凝固シミュレーションには，レーザを用いた溶接プロセスにおけるシミュレーション手法を用いたもの，それらの手法を発展させたものが存在している。

市販の溶接シミュレーションを転用したソフトには例えば前述の MSC Software 製 Simufact Welding などがあり，変形や残留応力の他，組織予測に関しては，組織変化や結晶粒サイズが計算可能なようである[10]。

‘SPLICE[11]’は，レーザ光を熱源とした材料加工などに対する数値解析的な評価手法の確立を目的として国の研究機関が中心となって開発し

たレーザ溶融・凝固計算シミュレーションコードであり，解析の原理や手法が公開されており，その妥当性も確認がとれていると思われる。

3. 実験

3.1 構造用材料

パウダ DED 方式において研究事例 [12]の多い Ni 基合金（Inconel718 相当）の粉体を使用し，幅 20mm×長さ 100mm×厚さ 10mm の SS400 製母材の上に長さ 50mm の直線状に造形した。造形条件は表 1 とし，各造形条件における堆積高さと堆積幅を測定した（図 3）。

図 4 に送り速度と堆積高さの関係を示す。図中左からレーザ出力 1000W，1500W，2000W となっており，単位時間当たりの粉体供給量ごとにプロットした。堆積高さは，送り速度の増加とともに低下し，送り速度が同一であれば，粉体供給量が多いほど高くなる傾向を示した。ただし，レーザ出力 1000W と 1500W の送り速度 500mm/min およびレーザ出力 1000W の送り速度 750mm/min の条件では，粉体供給量 20g/min と 25g/min でほぼ同じ高さとなった。これは，送り速度が小さいほど単位堆積長さ当たりに供給される粉体量が増加するため，25g/min では入熱量に対して粉体供給が過剰となり溶融できなかったものと推測される。2000W についても，さらに粉体供給量を増加させた場合には同様の現象が生じると考えられる。なお，その他の条件ではレーザ出力の違いによる顕著な違いはな

表 1　造形条件

粉体	PI718 (Inconel718相当品)
粉体粒径(μm)	45～150
母材	SS400
レーザスポット径(mm)	1.8
レーザ出力(W)	1000，1500，2000
送り速度(mm/min)	500，750，1000，2000
粉体供給量(g/min)	10，15，20，25

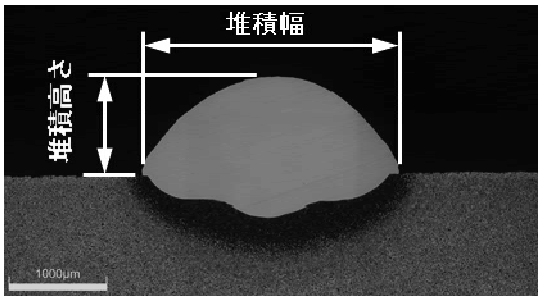

図 3　堆積高さと堆積幅の測定

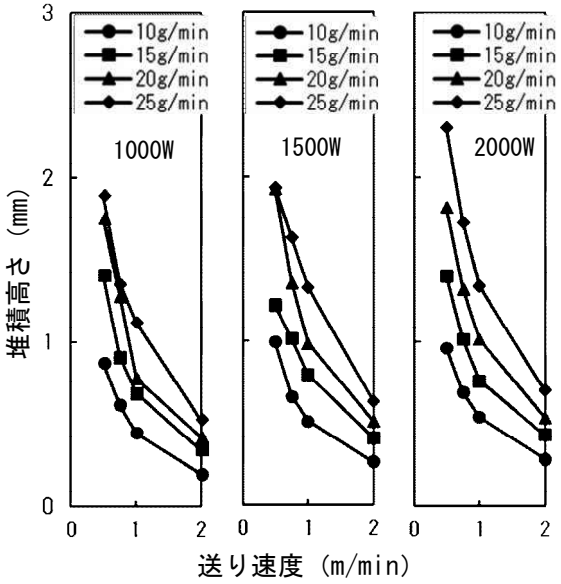

図 4　送り速度と堆積高さの関係

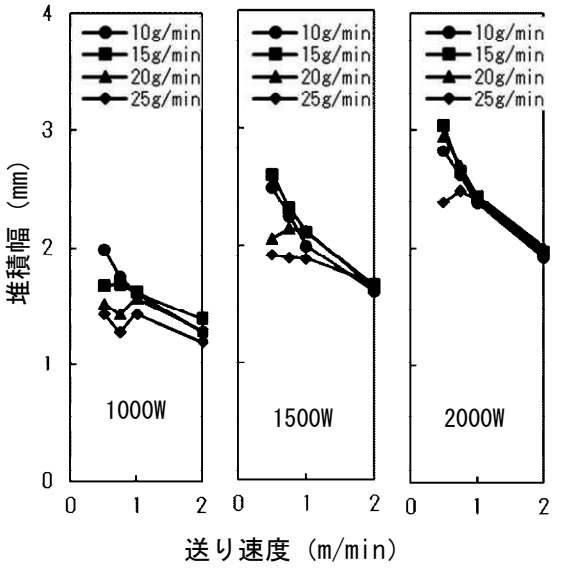

図 5　送り速度と堆積幅の関係

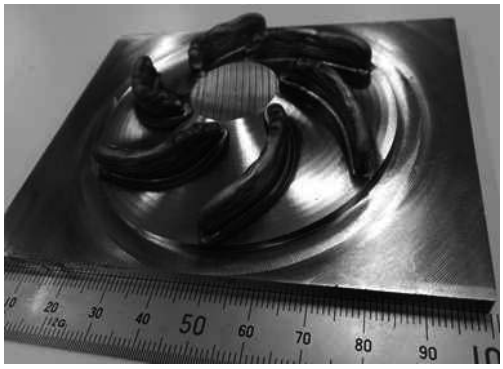

図 6　造形したインペラ形状

く，堆積高さは，単位時間当たりの粉体供給量と送り速度，すなわち，単位堆積長さ当たりの粉体供給量に依存することがわかった。図 5 には送り速度と堆積幅の関係を示す。堆積幅は，送り速度が速くなるほど小さくなり，レーザ出力が高いほど大きくなる傾向を示した。送り速度が遅い範囲では単位時間当たりの粉体供給量が多いほど小さくなる傾向を示す部分もあるが，全体的な傾向としては粉体供給量の影響は少ないと考えられる。

以上の基礎的実験の結果をもとに，インペラ形状の造形を試みた。造形後の写真を図 6 に示す。あらかじめ切削加工した直径 70mm の円すい台状の母材の上に 12 層を堆積し，翼 6 枚を造形した。造形後の寸法は翼高さ約 8mm，翼厚約 3mm であり，造形時間は翼 6 枚で約 8 分であった。

3.2　硬質材料

DED 方式による造形の適用分野の一つとして打ち抜き型が挙げられる。打ち抜き型は耐摩耗性などの点から刃先には高い硬さが要求される。ここでは，硬質材料として知られる Co 基合金を用いて，刃高 3mm，刃先硬さ 700HV 以上を目標とした打ち抜き型の造形を試みた。Co 基合金はその組成によって数種に分類されるが，多くの炭化物を生成して高い硬さが得られる材種は溶接割れが発生しやすく，多層肉盛が困難になる [13]。そこで，硬さの異なる 2 種類の Co 基合金を用い，堆積部の組成を傾斜させること

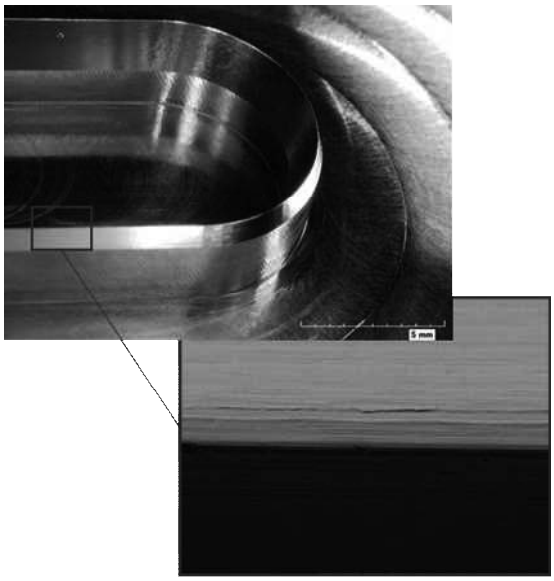

図 7　打ち抜き型モデル（切削加工後）

で，堆積部の割れを抑制しつつ，高い刃先硬さの達成を狙った。

図 7 に造形後切削加工した打ち抜き型モデルを示す。造形した刃部全体にわたって割れは確認できない。また，同一条件で造形した試験片断面を観察した結果から，刃元（高さ 2mm 程度まで）の硬さは 500HV 程度で，刃先に近づくにつれて硬くなり，刃先（高さ 3mm 付近）では 730HV 程度の硬さが得られており，狙いどおりに造形することができた。

4.　結　　言

(1) 技術動向 造形形状の安定化や品質保証への需要から，インプロセスモニタリングに基づく条件制御や機械学習を併用した異常判定技術の開発が行われている。この他，金属積層造形に特有の材料特性を発現する加工条件や造形物の熱変形を抑える加工条件の予測技術に関する研究が進められている。

(2) 市場動向 2030 年の造形品の国内市場規模は 2 兆円程度であり，金型工具や医療，航空・宇宙分野の市場規模が大きい。DED 方式は，付加造形やニアネットシェイプの造形といった特徴から，金型の製作や改修は適用先として期待される。

(3) 市場参入 金属堆積造形のコストは従来加工法に比べて高い。導入に当たっては，製造法の置き換えではなく，DfAM に基づいて部品点数の低減，金型レス化，軽量化を組み合わせた工程全体としての低コスト化，同時に性能向上が取り組まれている。

(4) 変形予測 溶接用シミュレーションを 3 次元積層造形向けに拡張し，計算の高速化を実現したものや，NC プログラムに対応し扱い易いソフトウェアが開発されている。

(5) 組織予測 凝固マップの活用や実験を通じた機械学習の利用が検討されている。市販のシミュレーションソフトにも組織変化や結晶粒サイズの予測が可能とするものがある。

(6) Ni 基合金粉末を用いて堆積実験を行った。堆積高さは単位堆積長さ当たりの粉体供給量に依存し，レーザ出力の影響は少なかった。一方，堆積幅は送り速度やレーザ出力に依存し，粉体供給量の影響は少なかった。

(7) Co 基合金を用いて打ち抜き型を試作した。高い硬さを示す Co 合金は割れを生じやすいが，硬さの異なる 2 種類の組成を傾斜させることで割れを抑制しつつ高い刃先硬さを有した型を造形することができた。

参考文献

1) 技術戦略研究センターレポート, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, vol.32(2019)

2) 欧米に対抗する日本の AM 技術の現状, （一社）日本溶接協会 3D 積層造形技術委員会オープンセミナー資料(2021).

3) 例えば，菱田貴一，古本達明ら，“積層造形物の変形抑止法に関する研究－熱構造連成解析による変形挙動の考察－”，2016 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，2016，pp.551-552.

4) Chenghong Duan, Junjing Zhou, Xiangpeng Luo, Minghuang Zhao, “Numerical Simulation of Temperature Field of 12crni2 by Laser Melting Deposition”, *2019 4th International Conference on Insulating Materials, Material Application and Electrical Engineering*, vol.677, no.2(2019)

5) Kamran Shah, “LASER DIRECT METAL DEPOSITION OF DISSIMILAR AND FUNCTIONALLY GRADED ALLOYS”, The University of Manchester, (2011)

6) 次世代型産業用 3D プリンタの造形技術開発実用化事業平成 29 年度～平成 30 年度成果報告書（報告書管理番号 20190000001139），国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構，2019，p.89.

7) （株）金属積層造形サポートシステム（MAMSS）ホームページ，https://mamss.co.jp/，2021 年 3 月 19 日閲覧

8) Adrita Dass, Atieh Moridi, “State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design”, *Coatings*, vol.9, no.7(2019)

9) 小泉雄一郎，“計算機シミュレーションを用いた Additive Manufacturing プロセス最適化予測”，スマートプロセス学会誌，8，4，2019，pp.132-138.

10) NTT データエンジニアリングシステムズホームページ, https://www.nttd- es.co.jp/ maga-zine/backnumber/no74/no74-sw.html，2021 年 3 月 19 日閲覧

11) 村松壽晴，“レーザー加工プロセス計算科学シミュレーションコード SPLICE の整備―令和元年度研究成果―”，日本原子力研究開発機構，2019.

12) 例えば, 栗谷龍彦ほか，“Inconel718 のレーザ金属積層造形における現象観察および空孔分析”，2016 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，2016，pp.313-314.

13) 加藤喜久ほか，“KV 粉末を用いた PPW 肉盛溶接金属の特性”，電気製鋼，72，3，2001，pp.195-200.