デポジション方式3次元金属積層造形装置の開発

Development of Metal-based Additive Manufacturing System with Direct Energy Deposition Technology

二井谷 春彦[*1] Haruhiko Niitani
藤田 善仁[*2] Yoshihito Fujita
石井 浩[*2] Koh Ishii
若名 智宏[*3] Tomohiro Wakana
小松 由尚[*4] Yoshinao Komatsu
藤谷 泰之[*5] Yasuyuki Fujiya

当社(三菱重工工作機械(株)), 三菱重工業(株)は2014年以来, 経済産業省が国家プロジェクトとして設置した技術研究組合次世代3D積層造形総合開発機構(TRAFAM)に参画してデポジション方式3次元金属積層造形装置を開発している。当社開発装置は積層造形機能と機械加工機能とを備えたハイブリッド型の装置であり, 造形中のプロセスモニタリング機能や, シールド性を高めた粉末供給ノズルを適用することで, 高能率, 高精度な積層造形が実現可能である。現在, 多方面の業界ユーザと共に実用に供する造形工法の開発を推進している。

1. はじめに

デポジション方式3次元金属積層造形技術は指向性エネルギー堆積法(Direct Energy Deposition, DED と略される)とも言われ, 金属材料を局所的に供給しながら適当な熱源を用いて基材と共に溶融, 凝固させることで造形を行う技術である。中でも, 当社が開発した金属積層造形装置はキャリアガスで噴射した金属粉末をレーザビームで溶融させる方式を採用している。デポジション方式の積層原理を図1に示す。

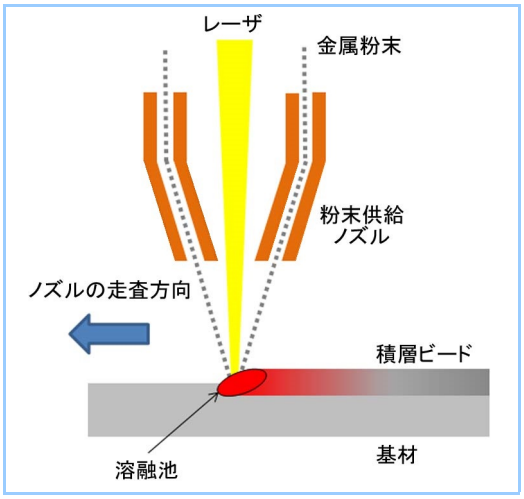

図1 デポジション方式3次元積層造形法

本方式の特徴として, 局所的に金属粉末を供給するため粉末の無駄が少ないことや, 造形物の大きさに合わせて装置の大型化が容易であることに加え, 基材とは異なる材料の積層造形が可能

*1 三菱重工工作機械(株) 技術本部 副本部長
*2 三菱重工工作機械(株) 技術本部先端生産システム研究センター 主席技師
*3 三菱重工工作機械(株) 技術本部
*4 総合研究所流体研究部 主席研究員 工博
*5 総合研究所製造研究部 主席研究員

であることが挙げられる。これらの特徴を有することから適用先として，航空・宇宙，原動機，自動車分野における高機能製品の製造や補修，機能向上が期待されている。一方，本技術の普及のためには生産性の向上のみならず，品質保証方法や積層造形工法の確立などの課題もある。本稿では，開発した金属積層造形装置の概要及びこれら課題に対する取り組みについて述べる。

2. デポジション方式3次元金属積層造形装置の概要

積層造形物の形状や造形工法の自由度を高めるため，本装置は積層造形機能と機械加工機能の両方を有し，NC（数値制御）による5軸制御が可能である。また積層造形物の量産に必要な機能性を持たせるため，汎用的な立型マシニングセンタの構造を採用している。図2に開発機内部の様子を示す。

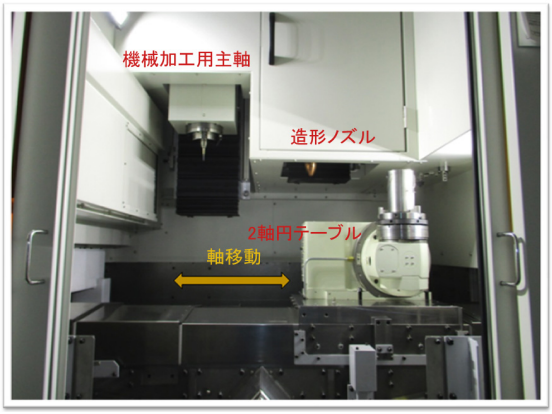

図2 積層造形装置の内部

積層造形機能を構成するユニットとして，積層造形レーザヘッド，レーザ発振器とチラー，粉末供給装置，粉末回収のための集塵機がある。レーザは最大出力6kW のファイバーレーザを採用しており，光ファイバーにより積層造形レーザヘッドへ伝送される。積層造形レーザヘッドにはレーザビームを集光する光学素子の他，金属粉末を噴射する粉末供給ノズルや，溶融池を観察するための各種センサが組み込まれている。粉末供給装置は配管を通じて粉末供給ノズルに接続され，積層造形部に安定的に金属粉末を送給する。粉末供給ホッパーは複数台設置可能である。

機械加工機能を構成するユニットとしてミーリングヘッド，工具の自動交換装置と収納マガジンが備わっている。補修時の造形前加工や造形後の表面仕上げ加工に適した高速主軸は，当社の超精密加工用主軸を応用したものであり，回転精度や信頼性に優れている。

積層造形機能と機械加工機能に共通の部分として，造形物と各ヘッドを所定の速度で移動して位置決めさせるための駆動装置，各ヘッド及び装置を制御するための制御装置と操作盤がある。また，安全性の観点から，レーザ遮光窓付き機体カバー，インターロック付き扉，自動消火装置，酸素濃度計を搭載している。

3. プロセスモニタリング技術の開発

目標とする積層造形速度と精度で高機能材を積層造形するためには，溶融池の形状や溶融池から発せられる光の情報を積層造形ヘッド内の各センサによりモニタリングしながら，取得した数値が材料に応じた閾値の範囲内となるように積層条件を制御する必要がある。

そこで，モニタリングによる積層造形プロセスの分析と，積層造形品質への影響を把握する要素試験を集中的に行うため，モニタリング検証試験に必要な機能を持つ小型の積層装置を製作した。本積層装置は，駆動テーブルと積層造形ヘッド，粉末供給装置，レーザ発振器，制御装置などから構成される。図3に装置外観を示す。

図4に開発したプロセスモニタリング画面を示す。溶融池温度分布のカラー画像表示が可能となり，合わせて各種取得波形のリアルタイム表示を実現した。

図3 プロセスモニタリング試験装置

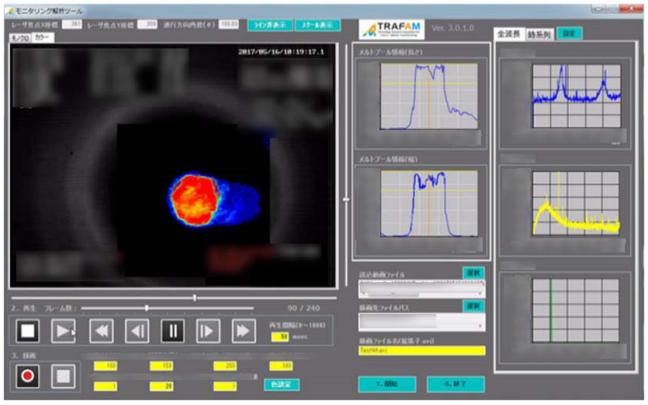

図4 プロセスモニタリング画面

図5に溶融池温度分布のカラー画像を表示した例を示す。溶融池の高輝度部分（赤い部分）はレーザ出力の増加に伴い，面積が大きくなっていることがわかる。本モニタリングデータは，装置の積層造形プログラムとリンクしており，積層造形品質とモニタリングデータの相関を推定することで品質トレーサビリティデータとして利用可能である。さらに，この機能は将来，造形品質の安定化にも利用可能で，造形最適化アルゴリズムの進化に合わせて造形装置の性能を向上させることができる。

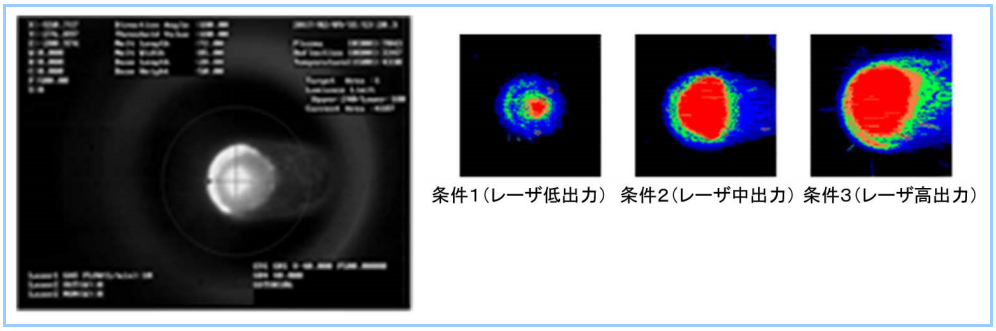

図5 溶融池の画像（レーザ出力の大小による溶融池サイズの変化と温度分布の様子）

4. 粉末供給ノズルの開発

積層造形装置内において雰囲気をガスで置換せず，大気雰囲気中で Al や Ti 合金等の活性な金属を用いた高品質の複層積層造形や，高速での造形技術を実用化するには，粉末供給ノズルにおける粉末の集束性を確保するとともに積層品質への影響が大きいシールド性の確保が重要である。そこで，造形物の形状や精度に応じてノズルを使い分けることを前提に，3ポートからの供給方式と全周からの供給方式の2タイプのノズルについて粉末の集束性確保とシールド性確保したノズルを製作した。また，外周シールド形状としては，移動の自由度を向上させるため，円環状の外周シールドガスのみ噴射するタイプの高シールド型ノズルを製作した。

図6に各ノズルの粉末の集束状況を示す。粉末の焦点位置は，いずれのノズルにおいても積層時のノズルのスタンドオフ設定位置付近に集束し，集束径については，積層ヘッドの光学系での集光スポット径程度に収まっている。

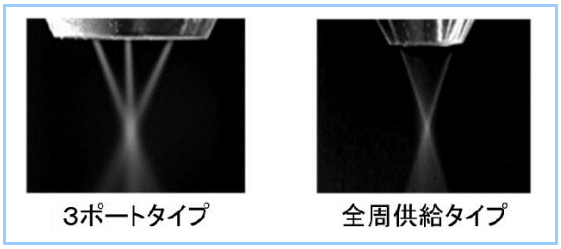

図6 各ノズルの粉末の収束状況

図7に外周シールドノズルとシールド状況の流体解析結果を示す。外周シールドを流した場合は，造形部への大気混入を抑制するとともに，シールド範囲を拡大できる。

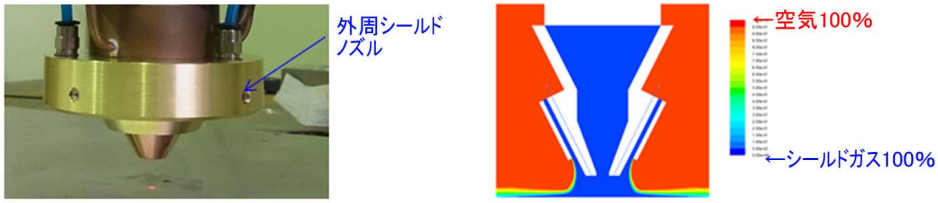

図7 外周シールドノズルと流体解析結果

5. 積層造形工法の開発

開発した装置を使い，多方面の業界ユーザと共に生産部品を試作して実用化を目指している。ここでは，翼形状部品，チタン合金製部品，異種金属による複層積層部品の試作について述べる。

5.1 翼形状部品の積層造形

実部品を模擬した翼形状部品を，本装置で積層造形した。図8に実際に造形した部品の形状を示す。円筒状の基材外周にステンレス鋼(SUS304)粉末を使って 10 翼の積層造形を行い，造形後に翼の強度(機械的特性)，形状精度，及び内部欠陥を評価した。内部欠陥の評価にはX線 CT スキャン装置を使用した。図9に，造形中の様子と完成品を示す。

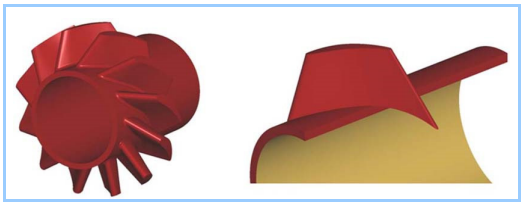

図8 翼形状の造形

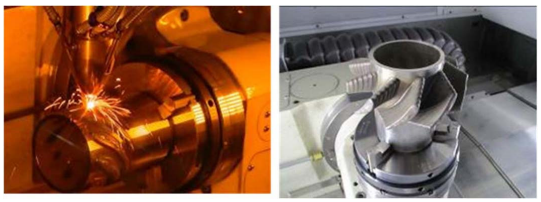

図9 翼形状の造形の様子(左)と完成品(右)

結果，機械的特性はヤング率，絞りが JIS 規格値に対し9%下回る以外は JIS 規格を満たした。形状誤差は，円筒基材の熱変形による影響が生じているが，後加工(切削)で修正可能なレベルである。内部欠陥については，0.05mm 程度の少数のボイドが見られたが大きな欠陥は検出されなかった。図 10 に形状精度測定結果を示す。

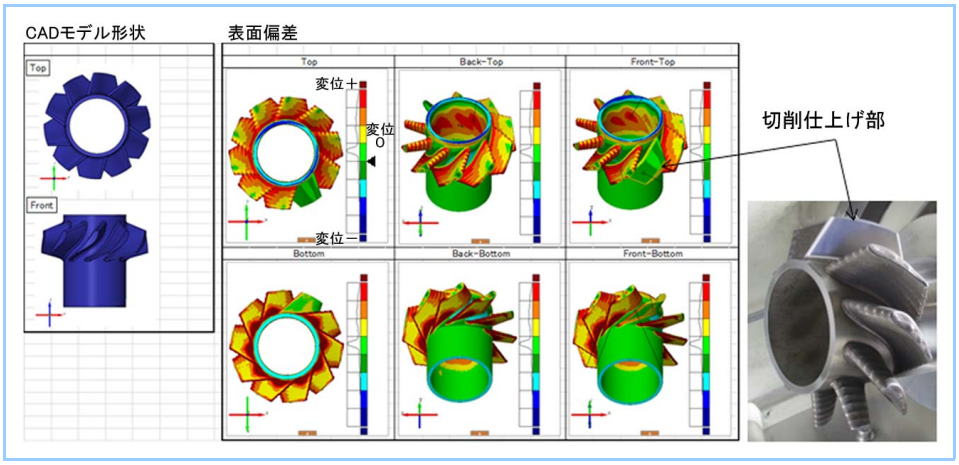

図 10 翼形状の造形評価(形状精度)

5.2 チタン合金製部品の積層造形

酸化が促進されやすいチタン合金の積層造形を大気雰囲気中で実用化するため，シールド性の高いノズルを開発し，試験片を製作して機械的特性の評価を行った。結果，引張強度，耐力は航空機用公共規格を満足した。0.05mm を超える欠陥は検出されず，化学組成も要求値内であった。また，疲労強度は，チタン鍛造材相当の強度が得られている。図 11 にチタン合金製の試験片を，図 12 に疲労強度測定結果を示す。

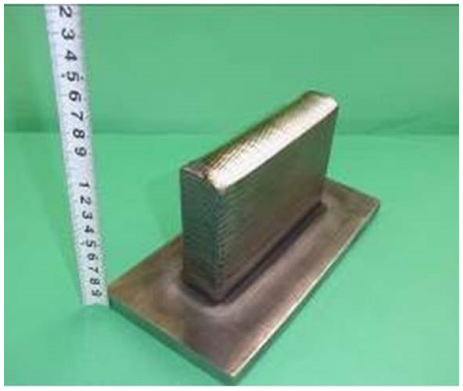

図 11 チタン合金の積層試験片

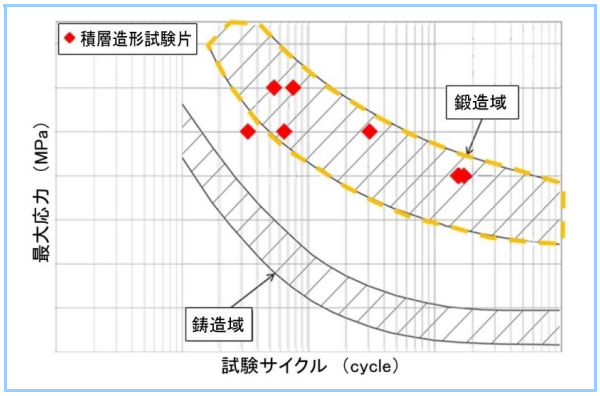

図 12 チタン合金の疲労強度測定結果

5.3 異種金属による複層積層部品の積層造形

複層積層部品の試作を行った材料の組み合わせを表1に示す。銅と鉄系金属の複層造形では，最小で均一な厚みの中間材を介して良好に接合されている。図 13 に銅と鉄系金属の複層積層造形結果を示す。

表1 複層積層材料の組み合わせ

基材	積層材
銅	マルエージング鋼
クロムモリブデン鋼	ステンレス鋼
ステンレス鋼	コバルト基合金

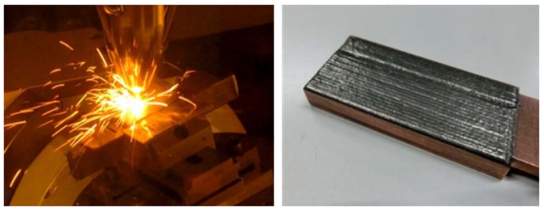

図 13 銅と鉄系金属の複層造形結果

6. まとめ

当社では，デポジション方式3次元金属積層造形装置の開発に取り組んでいる。本稿では，開発した積層造形装置の概要を示すとともに，基幹技術であるプロセスモニタリング，粉末供給ノズル，積層造形工法の開発について紹介した。今後，これら技術の更なる高度化を図り，実用化を進めていく。

本研究開発は，経済産業省の委託事業“三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム（次世代型産業用３Dプリンタ技術開発及び超精密三次元造形システム開発）”，及び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）の助成事業の成果を活用しています。

参考文献

(1) 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，第3回シンポジウム講演集，(2017)，p.47～52
(2) Titanium and Titanium Alloys, MIL-HDBK-697A, U.S. Department of Defence, 1974, p.45