

粉末射出成形(PIM)技術を応用した3D積層造形

3D積層造形は、付加製造技術(Additive Manufacturing)と呼ばれる3Dプリンターを用いて層の上に層を付け加えながら造形するという注目の工法である。使用される材料は、主体の熱可塑性樹脂から、金属、セラミックスおよび炭素繊維強化プラスチック(CFRP)などの高強度材料を用いることで試作品から実用品や最終製品を目的として利用されるケースが増えている。航空宇宙分野、医療分野、輸送機器分野を始め、さまざまな産業分野への応用が図られている。

金属3D積層造形の2030年市場規模は3Dプリンター本体が2017年比約5倍の6,500億円、金属粉末材料は2016年比約50倍の5,000~6,500億円、出力した造形品市場は2兆円にまで成長すると予想されている¹⁾。

当社では小型複雑形状の金属やセラミックス部品を製造する粉末射出成形(PIM)用の材料開発を長年にわたり進めている。これまで培ってきたPIM技術を3D積層造形に応用し、従来の技術では難しかった特殊形状の金属やセラミックス部品への展開を紹介する。

1. 3D積層造形

1.1 3D積層造形の特徴

3D積層造形は金型や切削加工を必要とせず、3次元CADデータがあれば複雑形状の部品を直接作製することができる。3次元CADデータを薄い層にスライスして分割し、断面形状の必要部分のみ材料を付加して積み重ね造形する。造形方式は、材料押出(熱溶解積層)や液槽光重合(光造形)などさまざまな方式があるが、それぞれにメリット、デメリットがあるため²⁾用途に合わせて使い分ける必要がある(表1)。

1.2 金属およびセラミックス材料の3D積層造形

一般的に実用化されている金属材料の3D積層造形方式は、レーザーや電子ビーム照射により粉末焼結させる粉末床熔融結合方式、レーザー照射した位置に粉末材料を吹き付ける指向性エネルギー堆積方式および金属粉末に液体結合剤などのバインダーを噴射して選択的に造形する結合剤噴射方式がある³⁾。航空宇宙部品などへの適用が進むが、装置が大掛かりであり、また材料の選択肢が少なく粉末は高価であることが課題である。セラミックス材料では、光硬化性樹脂とセラミックス粉末の混合材料を用いる液槽光重合方式があるが、造形速度や寸法制限などの課題がある。

表1 一般的な3D積層造形方式の比較

方式	材料	強度	精度	造形速度	外観	製造費用
材料押出(熱溶解積層)	樹脂、金属、セラミックス	○	×	△	×	○
液槽光重合(光造形)	樹脂、セラミックス	△	◎	△	○	×
材料噴射(マテリアルジェットイング)	樹脂、金属、セラミックス	△	○	△	○	△
結合剤噴射(バインダージェットイング)	石膏、樹脂、セラミックス	×	△	○	×	△
粉末床熔融結合(粉末焼結)	樹脂、金属、セラミックス	◎	○	×	×	×
シート積層	樹脂、紙、金属	×	△	△	○	○
指向性エネルギー堆積	金属	◎	○	△	×	△

(◎最適、○適、△可、×不適)

2. PIM技術を応用した3D積層造形

2.1 3D積層造形用コンパウンドの創製

一般的に小型複雑形状の金属やセラミックス部品を製造する方法としては、粉末射出成形(PIM)での製法が用いられる。当社の保有する粉末と樹脂の混練技術、バインダー設計技術を応用できる熱溶解積層(FDM)方式に着目し、3D積層造形での金属やセラミックス材料への展開について検討を進めた。FDM方式では一般的に棒状のフィラメント形状を押出熔融するが、PIM用コンパウンドはペレット形状であり、フィラメント形状にすることは困難である。そこで、FDM装置メーカーと共同で金属やセラミックスコンパウンドのペレット形状が使用できる3Dプリンターを開発し、それに適した3D積層造形用コンパウンド(図1)を創製した。



図1 3D積層造形用コンパウンド
ジルコニアコンパウンド(白色、青色)

次に、3D積層造形用コンパウンドに必要なPIM技術およびFDM方式の3D積層造形に必要なコンパウンド技術について紹介する。

2.2 PIM技術

PIM技術は、粉末と樹脂バインダーの混練品を射出成形し、精密で複雑な小型形状の金属やセラミックス製品を大量に製造するのに適した加工方法で、金属(MIM)とセラミックス(CIM)に量産適用されている。PIMの特徴は、高精度な金型を用いることで、複雑形状で最終形状に近いニアネットシェイプが可能なことである。製品寸法精度は±0.5%以下、相対密度は95%以上と、高精度・高密度な製品を大量に造ることができる^{4),5)}。PIMの製造プロセスでは、混練、造粒、射出成形、脱脂・焼結の工程がある(図2)。このPIM製法の樹脂バインダーを活用した造形、脱脂・焼結による金属やセラミックス部品を得る技術を3D積層造形に応用する。

2.3 3D積層造形用コンパウンド技術

PIM製法は、金属やセラミックス粉末を含んだ材料を加熱熔融後、冷却した金型に射出注入し、冷却固化して成形体を得る方法である。PIM用コンパウンドは、射出成形時の金型転写性を上げるための流動性、金型からの離型性、サイクル時間を短縮する冷却特性に加え、脱脂時の保形性、クラック、フクレの発生抑制などに対応した組成で設計されている。一方、FDM方式の3D積層造形の製法は、金属やセラミックス粉末を含んだ材料を加熱熔融し、ノズルから吐出、冷却固化し、1層ずつ積層することで成形体を得る方法である。3D積層造形用コンパウンドにおいては、加熱熔融押出における流動特性の制御、吐出された溶融物同士の融着・密着性、冷却に伴う収縮性と造形体強度を踏まえた材料設計、ノズル吐出口から移動する際の糸曳性制御などが必要となる。さらに、PIMと同様に脱脂時の変形やクラック抑制に対応する組成設計が必要

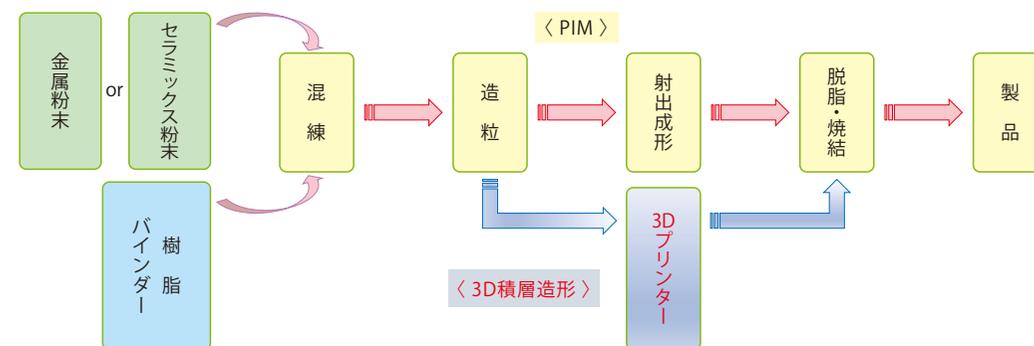


図2 PIMおよび3D積層造形の製造プロセス

である。同時に、3D積層造形の積層条件の影響も大きく、ノズル径、積層ピッチ、造形速度、造形温度などの設定条件を材料に合わせて込むことが重要である。

3D積層造形において溶融積層間の密着性および造形体強度が不足した場合は、積層形状が引張応力により亀裂が入り形状を保持できなくなる。密着性および造形体強度を向上させることで、連続した積層造形が可能となり、同時に冷却収縮や脱脂変形に対しても形状を保持することが可能となる(図3)。



改善前 改善後
図3 密着性の改善(ジルコニアの造形品)

また、糸曳性制御が悪い場合は、造形点と造形点の間が連なった糸曳状態となり、外観上大きな問題となる。糸曳性を抑えたバインダー設計および造形条件により、造形停止後の移動時に上手く切断されて糸曳を抑えた造形体を得ることが可能となる(図4)。



改善前



改善後

図4 糸曳性の改善(ジルコニアの造形品)

3D積層造形された造形体はPIMの成形体と同様に脱脂するが、ラティス構造で内部空間が広いことにより、脱脂で発生したガスの除去が容易で、大型形状にも対応が可能となる。焼結により、積層造形で造られ

た形状の金属やセラミックス部品が得られる。

2.4 3D積層造形の応用例

PIM技術を応用した3D積層造形例として、その狙いの機能を含め、モデル形状にて紹介する。

図5は、歯車形状の造形品で、内部ラティス構造の中空洞合いは設計上任意に変えることができる。これにより、外部形状は一定の強度を保持し、内部を空洞化することによる軽量化が可能となる。従来では、低比重樹脂への素材変更や発泡体などで対応していたものに対し、内部構造を自由に設計する軽量化手法となる。また、造形サイズのさらなる大型化の検討も進めている。

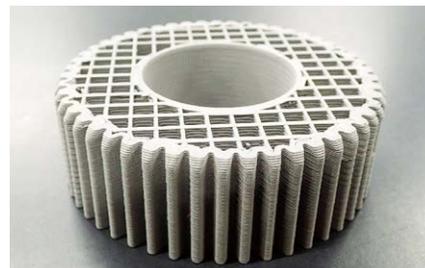


図5 3D積層造形例：歯車(SUS316Lの造形品)

図6は、魚の骨の連結部分に鎖状の可動域をもった一体造形品で、従来では材料の接合や変形によるはめ込みで対応せざるを得ない形状を、金属やセラミックス素材などの高硬度材料で作製することが可能となる。

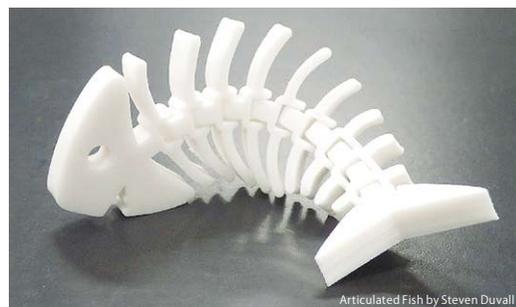


図6 3D積層造形例：魚(ジルコニアの焼成品)

図7は、2色のジルコニアを同時に積層したカップで、積層後に同時に焼結を行っている。さらに異種材料の混合比率を段階的に変えた積層を行うことにより、従来では困難であった傾斜機能をもつ造形が可能となる。

いずれの造形例もモデル的に想定される機能を表したもので、今後も新しいモノづくりの提案を進めていく。



図7 3D積層造形例：カップ(ジルコニア白色、青色の焼成品)

3. 今後の展開

一般的に3D積層造形に共通した課題としては、ハード面では、造形速度、精度、造形可能サイズ、表面粗さ、装置コストなどがあり、各種の方式で取り組みがされている。材料面では適用材質の少なさ、コストが課題となっている。3D積層造形は“何でもできる夢の装置”として注目された時期もあったが、試作品の作製のみといった限定的な使用から、実際に産業用部品、航空宇宙部品、医療部品への適用が進められてきている。高精度を求めると造形速度や大型化をめざす方式など、用途により使用される造形方式の細分化が進むと考える。

3D積層造形は実現できる形状の自由度が高いことから、以下のような展開が期待される。

- ① 少量生産での短納期や、サンプル試作における金型費用の削減
- ② ラティス構造により、軽量化、断熱効果、生体適合性などの機能を効果的に発現
- ③ 傾斜構造、異種材料積層により、複数の素材の組成が連続的に変化し組み合わせられた構造体
- ④ トポロジー(位相)最適化(部品の材料密度から形状の最適化)をすることにより、既成概念にとらわれない形状の造形

今回紹介したPIM技術を応用したFDM方式の3D積層造形では、従来の金属やセラミックスの3D積層造形に

比べ、造形可能サイズの制限を超えることができ、より幅広い製品への展開が図れると考えている。また、粉末と樹脂バインダーを混練したペレット形状の材料が使えることから、材料の自由度が高い。PIMで使用されるジルコニア、アルミナやステンレスのほか焼結に用いられる材料の窒化ケイ素、炭化ケイ素、タングステン、超硬合金などをはじめ、幅広く材料展開することで、さらなる用途拡大へとつなげることができる。また、軽量化や一体造形などの自由設計度の向上に加え、複数ノズルを用いた異種材料や任意の混合比率で積層することにより、異なる組成材料で傾斜機能をもつ一体構造化が可能となり、新たな機能付与につながると考えている。

4. おわりに

本稿では、当社がこれまで開発を行ってきたPIM技術を応用した3D積層造形用コンパウンドについて述べた。3D積層造形では、複雑形状、大型形状、軽量化だけでなく、これまでの切削技術やプレス成型では作製することができない複雑な形状を実現することができる。また、異種材料によるさまざまな機能の発現など、今後もさらなる用途拡大が期待される。

今後、さまざまな分野での用途開発に繋がるコンパウンド材料を提案し、新たな技術開発に貢献していく。

《参考文献》

- 1) 技術戦略研究レポート TSC Foresight Vol.32、NEDO技術戦略研究センター
- 2) 3Dプリンター活用技術検定 公式ガイドブック、一般社団法人コンピューター教育振興協会
- 3) 応用拡大する3Dプリンタ材料、工業材料、Vol.67、No.6 (2019)
- 4) 高精度かつ複雑形状部品を造るPIM用コンパウンド、セラミックス、Vol.53、No.1、p.26~29 (2018)
- 5) 第一工業製薬株式会社 社報 拓人、No.559、p.10~13 (2012)

《用語説明》

PIM：粉末射出成形 Powder Injection Molding
FDM：熱溶解積層方式 Fused Deposition Modeling
ラティス構造：枝状に分岐した格子が周期的に並んだ構造



和田 誠 わだ まこと

第一セラモ株式会社
営業部 専門課長
新規事業担当
0748-48-5377
ceramo2@dks-web.co.jp