

講演3

微粒子ペースト光造形による金属ならびにセラミック構造の作製



特集2

大阪大学 接合科学研究所 教授
桐原 聡 秀 氏

1. はじめに

任意形状の薄い2次元断面を積層しつつ接合すれば、従来の切削加工や鋳造成型では困難な3次元成型が可能になる。注目を浴びる3Dプリンタの基盤となる考え方であり、同種の積層造形プロセスを積極的に利用したパーツやデバイスの開発が国内外で急速に進められている。記憶容量や計算速度の着実な増加に裏打ちされた、コンピュータ制御の高度化がこの流れを後押しした。金属やセラミックス材料の成型法が数多く立案され、産業構造におけるプロセス領域の一翼を担いつつある。本稿で紹介する光造形法は、樹脂製の試作品を高速成型する手法として30年ほど前に本邦で考案された技術である。これを出発点として著者らの研究グループは、液体樹脂に金属やセラミックスの微粒子を分散しペースト化することを発案し、実用材料の造形技術として確立させた。その経緯を以下に紹介する。

2. 光造形法

プロセス概念を図1に示して工程を順に述べる。はじめに、紫外線照射により重合硬化する液体樹脂を容器に入れ、機械的に昇降する金属平板ステージを液中に沈める。ステージ上面と樹脂液面を一定距離に保ち、波長355 nmの紫外線レーザーを照射すると焦点部分が重合硬化する。つぎに、ビームを走査して任意の図形を描くとステージ上に薄い固体面が形成される。さらに、ステージを樹脂液中へさらに降下させて再び紫外線レーザー描画を行うと、前段の固体面上に新たな硬化層が形成されると同時に両者が接合される。ステージ降下と紫外線レーザー描画を繰り返せば、複雑形状の樹脂モデルを精密かつ高速に作製できる。成形手法としては1990年代後半にラピッド・プロトタイピングの名称で世に出た技術であり、近年ではアディティブ・マニュファクチャ

リングとして工業的に分類され、3Dプリンタの一種として汎用装置が出回り現在に至る [1-4]。

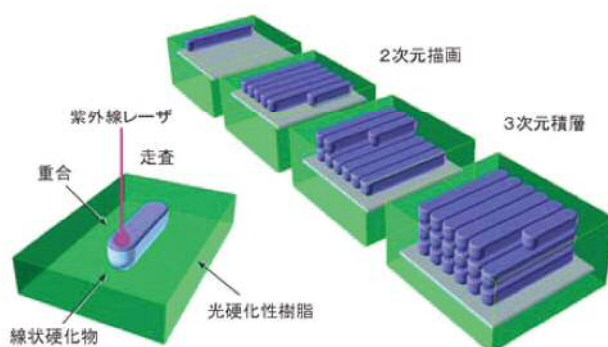


図1 光造形法の基本原理

3. 機能性粒子の分散

2000年頃には液体樹脂へ金属やセラミックス製の微粒子を混合することを発案し、図2のような機能性複合材料の創製システムを構築した。エポキシ樹脂へ酸化チタンなど誘電率の高いセラミック粉末を体積割合で10%分散し、マイクロ波を効率よく



講師 桐原 聡 秀 氏

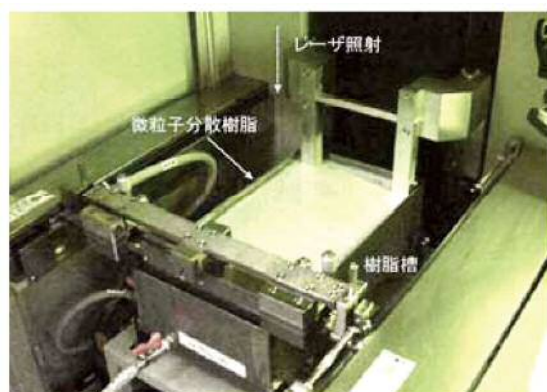


図2 液槽式の光造形装置

回折させる図3のフォトニック・クリスタルをはじめ、高い吸収率を示す図4のフォトニック・フラクタルに関する研究開発を進めた。両者は電磁波機能材料として応用物理の分野で理論が提唱され、シミュレーション上で優れた効果が示唆されていたが、工学的に実現性のある製造プロセスが見当たらず実用化の目算は立っていなかったが、光造形法を用いることで電磁気機能の実証実験に初めて成功した[5,6]。

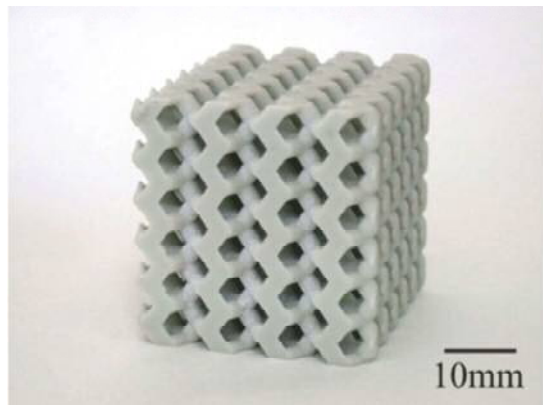


図3 誘電体フォトニック・クリスタル

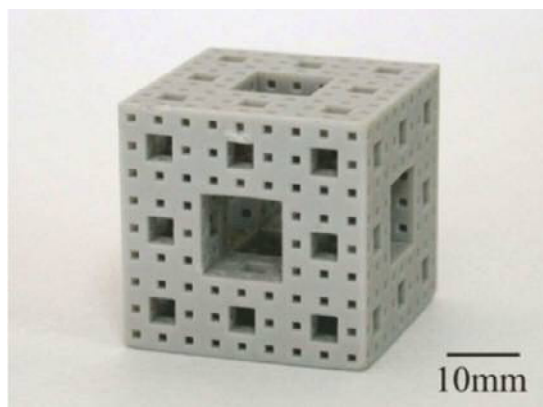


図4 誘電体フォトニック・フラクタル

4. 粉体焼成技術の併用

2005年頃からは更なるプロセス技術の改良を進めるとともに、金属ならびにセラミック部材の実用造形に着手した。紫外線硬化性の液体樹脂へ粒径200～500nmの金属やセラミック微粒子を体積割合40～60%で高濃度に分散し、ペースト状に調整した素材を用いる図5の造形システムを考案した。ガラスステージ上に微粒子ペーストを図6のように平滑塗布し、焦点径10～100 μm で強度200～1000mWの紫外線レーザー照射により任意形状を描画して2次元断面を形成した。塗布と走査速度5000mm/sの高速描画を繰り返して積み重ねることで厚さ10～100 μm の各層を接合し、複雑形状の3次元構造を精密に作製した。樹脂製の構造体に微粒子を高濃度に分散させることが可能になり、脱脂ならびに焼結処理を経て金属ならびにセラミック製の実用部材が得られるようになった[7,8]。

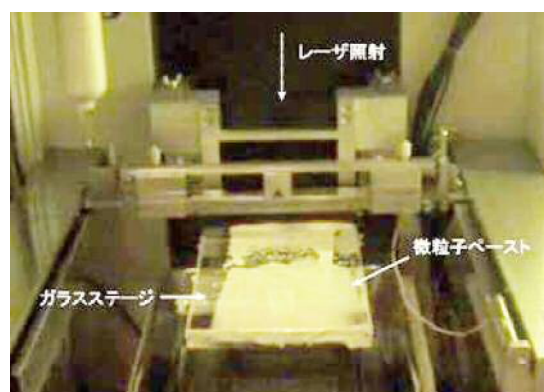


図5 微粒子ペースト供給式の光造形装置

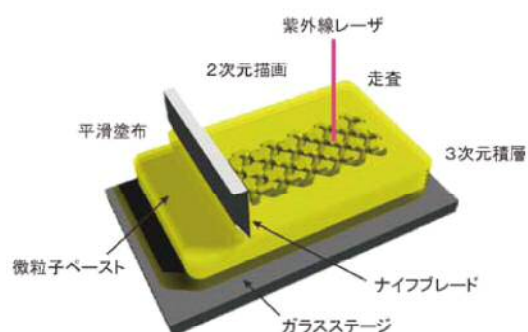


図6 微粒子ペースト光造形法の原理

誘電体セラミック製のマイクロ構造を造形することで、図7のように遠赤外領域の電磁波であるテラヘルツ波を制御するデバイスを開発するとともに、バイオセラミックスであるリン酸カルシウムの造形

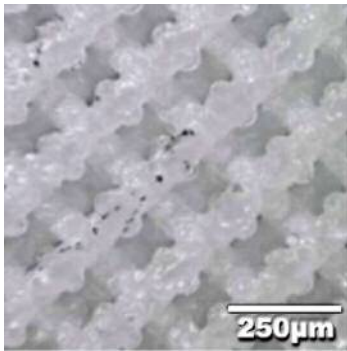


図7 遠赤外線マイクロ回折格子
(酸化アルミニウム)

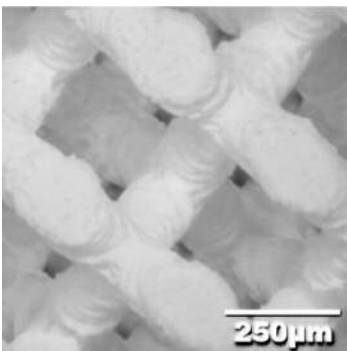


図8 人工骨インプラント
(リン酸カルシウム)

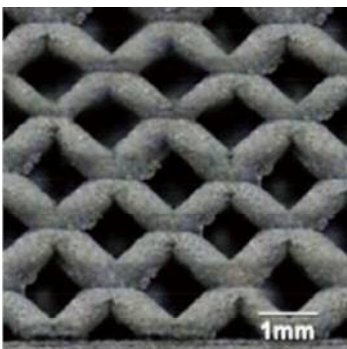


図9 軽量化規則ポーラス構造
(チタン合金)

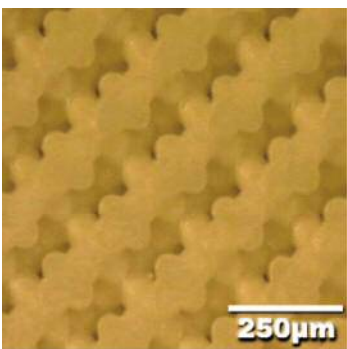


図10 固体電解質ポーラス電極
(酸化ジルコニウム)

にも成功し、図8のように体内環境における自然代謝により自家骨へと転換される人工骨の開発も進めた。マイクロ構造を内包する数十cmの構造体を得る目的で、実用合金の微粒子を用いた造形も実施しており、図9のように力学的シミュレーション結果をトレースした規則的なマイクロポーラス構造をチタン合金製部材へ導入するとともに、酸化ジルコニウムなどの固体電解質セラミックの造形にも成功し、図10のように固体酸化燃料電池の発電効率を向上させるポーラス電極部材の開発なども進めた。

5. 微粒子溶射技術の併用

2010年頃からは光造形法を用いた研究開発を進める傍らで、微粒子ペーストを溶射用素材として利用することを発案した。微粒子ペーストに圧搾ガスを吹き付けてマイクロミスト化しつつ高圧噴霧することで、高温高速のプラズマやガスフレームへの安定導入を果たした。緻密なセラミック層を高速成膜できる新たなコーティング手法として確立するとともに実用的な図11の溶射装置を開発した。ナノ微粒子を溶融させることなく高温状態で部材表面に吹き付けつつ焼結する手法であるため、固体素材の結晶構造を保ちながらの成膜が可能であり、生態親和性を示すリン酸カルシウムや光触媒性能を示す酸化チタンなどをを用いた機能性溶射が実現した [9,10]。



図11 微粒子ペースト溶射装置

液体樹脂にセラミック微粒子を分散させてペーストを作製すると、チクソ性と称される特殊なレオロジー特性が得られる。せん断力が加わる場合には流動するが、無荷重であれば与えられた形状を保つ効果である。微粒子ペーストをガス圧稼働のシリンジ

に入れ、先端をT字型管の一端に取り付けてキャリアガスを流入させる。高速高圧のガス流中へ垂直方向から微粒子ペーストを供給する方式である。T字管の結合部へ導入された微粒子ペーストには垂直方向から圧搾空気によりせん断力が加えられるため、流動化し噴霧されることで微小な液滴となり高速スプレーが実現する。同軸方向からガスフレームなどの溶射用熱源へ導入すればコーティングが達成される。

6. 直接造形法の開発

2015年頃には微粒子ペーストを用いた光造形プロセスを最適化する過程で、脱脂焼結などの熱処理を経ない金属やセラミック部材の直接成形法を考案した。微粒子ペーストを平板に薄く塗布し強度1~10ワットの紫外線レーザーを図12のように照射すると、樹脂が熱分解されるとともに加熱された微粒子が焼結することを見出した。紫外線レーザーの波長と粉体素材の粒径が同程度であることから、粒子間を導波



図12 微粒子ペースト直接光造形

路として光が伝搬し効率よく脱脂ならびに焼結処理が達成されると考えている。現在のところ焼結密度は9割程度であるがレーザー光源の高強度化を図れば更なる緻密性向上にも期待が持てると予想している。セラミック部材の直接造形は世界的に見ても実現されておらず、当該プロセスは現時点での有力候補である。金属造形プロセスとして考えた場合にも得られる部材表面が比較的滑らかであるため、電解研磨などを経れば平滑面の達成も容易であると考えている。

7. 次世代の光造形技術

紫外線光源として低価格で長寿命のダイオード素子を新たに採用しようと検討を進めている。波長355nmで紫外発光する寸法20 μ m程度のダイオード50,000個を長さ1mにわたり配列し、それぞれの素子を個別に発光させてパターン露光できるライン光源の開発が目前である。ライン光源導入した紫外線プリント造形を模式的に描き図13に示す。はじめに、ライン光源をガラスローラの中に入れ造形ヘッドとし右から左へ動作させる。つぎに、上部からペーストを供給してガラスローラで塗布し、ライン光源で連続的にパターン露光する。そして、未硬化の微粒子ペーストを真空吸引により取り除く。さらに、ヘッドの最後尾に装着されたランプ光源から、光硬化層へ高強度の紫外線を照射し、脱脂と焼成を連側的に達成する。固定テーブルに対して造形ヘッドを前後と上下に動かせば、メートル級のセラミック構造物も造形できる。

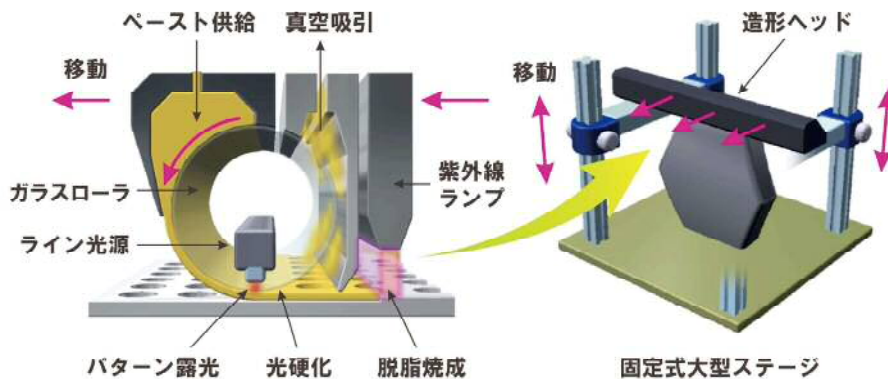


図13 ライン光源を用いたプリント方式の紫外線造形プロセス

造形された大型部材は積層造形を経ることから、必然的に積層厚さ分の段差が表面に現れる。製品の用途を鑑みて無視できない程度ならば後加工が必要になる。微粒子ペースト溶射を用いれば造形素材と同材を極薄かつ緻密にコーティングすれば滑らかな表面が得られるし、異なる材料をコーティングすることで表面に機能特性を付与することも可能である。微粒子溶射ガンの動作は産業用ロボットを用いて自動制御できるし、複雑形状を有する自由表面は造形データとして既知であるから、表面を効率的に高速コーティングできる。

8. おわりに

将来的に紫外線造形など作製可能な部材は最大で1メートル程度には達すると予想している。更なる大型建造物を構築するには光造形した部材同士を次々に組み合わせるか、既存工法を経て作られた構造体に造形部材を繋ぎ合わせるなど新しい施工方式の発

案が必要になる。大型部材同士を効率的に勘合・締結できるよう構造設計して光造形し、必要最小限の部分で溶接・接合するプロセスの構築が急がれる。図14に示すようなドローンなどを用いた新しい施工技術の進歩も期待される。部材の接触界面に強度面の信頼性を向上させる工夫を盛り込むことも可能であり、新しい工学プロセスがいかにして成熟した産業技術に浸透していけるか工夫のしどころである。

参考文献

- [1] 丸谷洋二：光造形法 —レーザーによる三次元プロッター，日刊工業新聞社，(1990)。
- [2] Y. Marutani, and T. Kamitani, J. Photopolymer Science and Technology, 10 (1997) 187.
- [3] C. Sun, X. Zhang, Sensors and Actuators, 101 (2002) 364.
- [4] J. Lee, I. Lee and D. Cho, Microelectric Eng., 83 (2006) 1253.
- [5] S. Kirihara, M. Takeda, K. Sakoda, Y. Miyamoto, Solid State Commun., 124 (2002) 135.
- [6] S. Kirihara, M. Takeda, K. Sakoda, K. Honda, Y. Miyamoto, J. Eur. Ceram. Soc., 26 (2006) 1861.
- [7] S. Kirihara, D. Sano and M. Kaneko: Tsinghua Sci. Tech., 14 (2009) 160.
- [8] S. Kirihara, T. Niki and M. Kaneko: Ferroelectrics, 387 (2009) 102.
- [9] S. Kirihara: Therm. Spray Technol., 30 (2010) 44-50.
- [10] S. Kirihara: J. Jap. Weld. Soc., 80 (2010) 6.



図14 大型造形物の積上施工におけるドローンの将来的な運用 (想定図)

