

セラミック構造体の光造形と 電磁波制御デバイスの創製

桐原 聡秀

1. はじめに

光造形法は、高分子製の複雑構造を高速に作製できる、アディティブ・マニュファクチャリング (AM: Additive Manufacturing) の一種である¹⁾。従来は、工業製品の試作モデルの成型に用いられたが、著者らの研究グループでは、液体樹脂に金属やセラミックスの微粒子を分散し、ペースト状の原料素材を用いることで、実用材料の自由な造形技術として確立した。

本稿では、デンドライト状のマイクロ構造を造形し、エネルギーならびに材料の流れ制御をめざした一連の研究から、電磁波としてテラヘルツ波を制御する、フォトニック結晶の開発事例を紹介する。分子振動と電磁波振動を同期させる、テラヘルツ共振器の試作についても詳細を述べる。

2. 光造形法の原理

光造形における一連のプロセスは、設計からはじまり造形を経て、その後の熱処理に至り完了する。

設計においてははじめに、各種ソフトウェアを用いて、所望のグラフィック (3Dモデルデータ) を作成する。つぎに、スライス処理と呼ばれる数値演算を施し、断面データの集合体 (出力用3Dデータ) へと変換する。コンピュータ上で構造体を輪切りにするイメージである。

実際の造形プロセスに際して、原料として用いられるのが光硬化性樹脂である。紫外線を照射することで開始剤が反応し、モノマー重合を経てポリマーが形成されて液体樹脂が固体へと変化する。アクリル系・ウレタン系・エポキ

シ系・イミド系など、さまざまな種類が市販されているが、重合硬化時の収縮率をはじめ、硬化物の強度や耐熱性などから、適切なものが選択される。

造形プロセスを模式的に表し図1に示す。光硬化性樹脂の液面に紫外線レーザーを照射すると、微小な硬化領域が形成される。レーザースポットを移動させると、軌跡に沿って線状の硬化物が形成される。レーザー走査による描画を進め、隣り合わせに線状硬化物を次々に形成すれば、任意形状の薄い2次元断面の硬化層が形成される。レーザー走査による描画パターンは前述のスライス演算で得られた、断面データをもとに作成される。

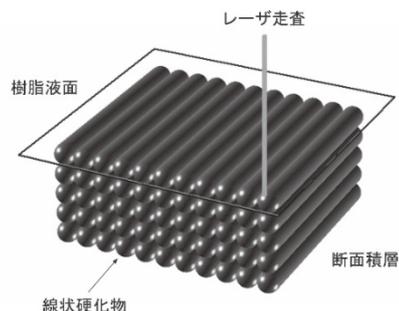


図1 光造形法の基本原理

ステージ上に第1層を形成した後にステージを一段下げ、第2層を形成すると同時に第1層と接合させる。このような積層工程を順次繰り返せば、高分子材料で構成される3次元構造が未硬化の液体樹脂中に形成される。構造体の寸法精度は、紫外線レーザーのビーム径や高分子層の積層間隔によって決定される。現在の光造形法では、波長が350 nm程度の紫外線レーザーを用いて、ビーム径を50~100 μm程度に絞り、積層間隔を50~100 μm程度に設定するのが一般的である。

普及当初の段階において光造形法は、電気製品などの試作品を高速成型し商品開発を効率化する目的で広く用いられてきた。しかしながら、光硬化性の液体樹脂に金属やセラミックスの粉体粒子を混合し、高分子ベースの複合材料を成型することで、実用的な製品を作製する動きも生まれた²⁾。最近では、液体樹脂に金属やセラミック粒子を分散し、複合材料部材の作製手法としても、広く用いられるようになった。



Stereolithographic Additive Manufacturing of Ceramic Components for Electromagnetic Wave Modulation
Soshu KIRIHARA
1999年 茨城大学大学院理工学研究科物質科学専攻博士後期課程修了 博士 (工学)
現在 大阪大学 接合科学研究所 教授
連絡先: 〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1
E-mail kirihara@jwri.osaka-u.ac.jp

2020年2月3日受理

樹脂に対する粉体粒子の分散性を向上させるために、粒子径や形状の最適化をはじめ界面活性剤の導入など、物理的および化学的なアプローチが数多くなされている。金属やセラミック粒子が分散した高分子部材の造形において、分散量を増加しようとする背景には、加熱処理により、樹脂成分を焼失させると同時に、粉体粒子の焼結を進め、フルメタルもしくはフルセラミックスの構造体を得たいという目標がある。しかしながら、粒子分散量が30 vol%を超えると、素材の流動性は極端に減少し、高い粘性を示すペースト状の混合液となるため、従来の光造形装置では取り扱いが困難になる。

著者らの研究グループでは、光硬化性樹脂へセラミック系のナノ微粒子を40 vol%以上分散させると、チクソ性と呼ばれる特殊な流体特性が現れることに注目した。このペースト素材は、外力がなく静止した状態では流動性が低下して固化するが、外部から力をかけると途端に滑らかな流動性を示しはじめる。

微粒子を高濃度に分散した樹脂ペーストへ、圧搾空気圧を印加してノズルから平板上に供給し、図2のごとく、流動性のある状態でナイフエッジにより平らに塗りならすと、その後は樹脂に外力が加わらないので、薄膜状に固化し流れ去ることはない。紫外線描画により硬化層を形成し、繰り返して積み重ねることで、金属ならびにセラミックス粒子が高濃度に分散した、高分子材料の構造体が得られる。これを前駆体として、大気中での脱脂および焼結処理を施せば、フルメタルならびにフルセラミック構造体へと転換できる³⁾。

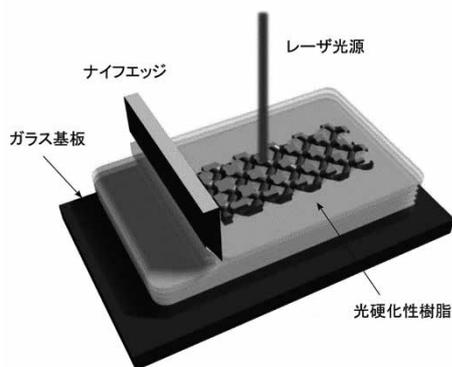


図2 微粒子ペースト光造形法の原理

3. フォトニック結晶

誘電体を周期的に配列した人工構造体は、擬似的な格子定数に見合った波長の電磁波をブラッグ回折し、透過スペクトルの特定帯域に反射領域としてバンドギャップを形成する⁴⁾。電磁波を本質的に制御し得る人工格子として、フォトニック結晶と呼ばれている。規則的な周期配列に意図的な構造欠陥を導入すれば、その空洞寸法に見合った電磁波長のみが共振し伝搬を許されるため、バンドギャップ中に

透過ピークを示す局在モードが形成される。電磁波の空間的な伝搬を自在に操り、同時に波長選択も可能にする、様々なデバイスの開発が実現できる。

近年では、テラヘルツ領域における電磁波の利用が盛んに叫ばれ、マイクロ構造を有するフォトニック結晶の開発が進められるようになった。テラヘルツ波はおよそ0.1～10 THzの周波数帯に分類される電磁波であり、電波と光の境界領域に位置している。糖類やタンパク質などの分子運動と同期することが知られており、飲料水や食物に混入した有害化合物の検出など、様々な物質の計測や分析への応用が期待されている⁵⁾。

フォトニック結晶を用いて、テラヘルツ波の波長選択や伝播制御を実現するためには、あらゆる方向から入射する波を、もらすことなく完全反射する必要がある。すなわち、全結晶方位にわたって、共通する周波数帯にバンドギャップが形成できる完全な結晶構造が求められる。これを実現する理想的なフォトニック結晶として提唱されているのが、図3に示すダイヤモンド格子構造である⁶⁾。

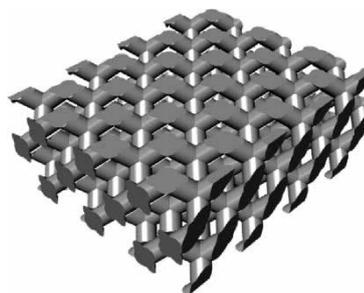


図3 ダイヤモンド型フォトニック結晶

著者らの研究グループでは、ダイヤモンド型フォトニック結晶の光造形を進めている⁷⁾。これまでに、ミリメートルからマイクロメートルオーダのダイヤモンド格子構造を形成することで、マイクロ波やテラヘルツ波に対するバンドギャップの形成を実現させてきた。前述のようにダイヤモンド構造は、誘電体格子の等方的な周期配列により、完全バンドギャップを形成するため、意図的な欠陥導入による電磁波の閉じ込めが可能になり、高い品質係数や低損失の微小共振器として利用できる。

これまでに、誘電体セラミックス製のダイヤモンド型フォトニック結晶を光造形し、意図的な欠陥導入による、テラヘルツ波の共振制御にも成功している。実際に、テラヘルツ波の制御デバイスとして完成させるには、格子構造へエネルギー共振器となる構造欠陥を導入し、電磁波との相互作用を期待する物質を空洞内部に注入しなければならない。

4. テラヘルツ共振器

マイクロ光造形法により作製した、アルミナ製ダイヤモンド

ンド型フォトニック結晶を図4に示す。誘電体ロッドによって微細格子が精密に実現されている。焼成後の格子定数は $375\ \mu\text{m}$ であり、直径と長さの比率であるアスペクト比は1.5である。アルミナ格子の焼結密度は97.5%であり、比誘電率は10であることが分かった。

光造形サンプルに脱脂および焼結処理を施すと寸法変化25%程度の収縮を示し、XYZ軸方向それぞれに対しても異方性が見られたが、これらの変形挙動を見込んで再設計することで、最終的にはアルミナ製ダイヤモンド構造における、ユニットセルの等方性が実現できた。

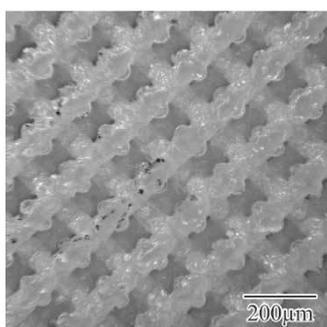


図4 光造形された誘電体フォトニック結晶

テラヘルツ波分光装置により、結晶方位 $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ 方向に対する電磁波の透過スペクトルを測定したところ、周波数 $0.375 \sim 0.525\ \text{THz}$ 付近において透過率の減衰が観察され、フォトニックバンドギャップの形成が確認された。理論計算によって得られた電磁バンド解析と比較したところ、実験値と理論値の良い一致が得られており、あらゆる結晶方位に共通な完全バンドギャップの形成も見られた。

テラヘルツ波と物質の効率的なミキシングを実現するために、構造欠陥を導入した図5に示すとして空洞共振器を設計しフォトニック結晶への導入を検討した。電磁波の透過方向に対して、幅 $200\ \mu\text{m}$ の空洞を厚さ $100\ \mu\text{m}$ の平板で挟み込む形で、アクリル系の光硬化性樹脂を素材とした

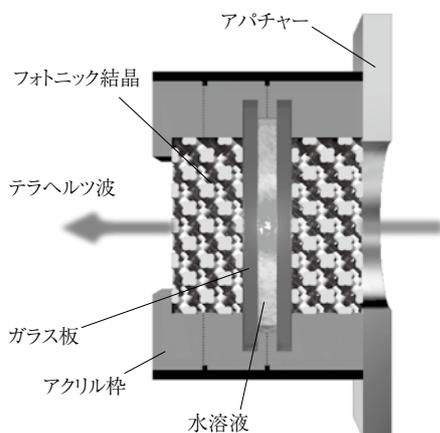


図5 テラヘルツ共振器の構造模式図

セル構造を光造形し、電磁波と物質をミキシングするテラヘルツ波デバイスを試作した。

テラヘルツ共振器の電磁波透過特性を図6に示す。周波数 $0.32 \sim 0.57\ \text{THz}$ の領域には、電磁波の禁止帯であるフォトニックバンドギャップの形成が確認できる。さらに、周波数 $0.41, 0.43\ \text{THz}$ に見られるモードA, Bの透過ピークは、それぞれ蒸留水ならびにエタノールが注入された溶液セルに対する、電磁波の共振と多重反射を経た、局在モードの形成を示している。これら局在ピークの発現位置は、電磁気シミュレーションとも良い一致を示した。

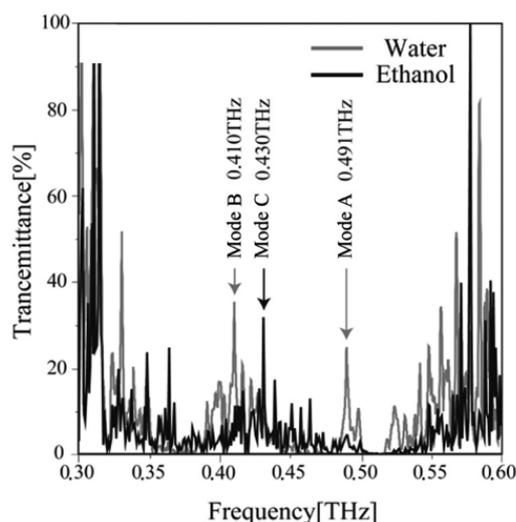


図6 フォトニックバンドギャップと局在モード

5. おわりに

光造形法の基礎的原理から応用的発展について解説するとともに、微粒子を分散した樹脂ペーストの活用を経た、実用材料の成型プロセスについて詳細を述べた。電磁波を回折させる人工格子として、誘電体セラミック製のフォトニック結晶を光造形する研究事例では、ブラッグ反射によるバンドギャップの形成と、意図的な欠陥導入による局在モードの形成について紹介した。

光造形法は計算機支援による自由成型技術であり、構造により機能を創出する新しいものづくりを実現させる。ナノ微粒子の種類を検討すれば、多様な素材を用いた造形が可能になるため、全く異なる新分野への貢献についても、大いに期待が持てると考えている。

参考文献

- 1) Marutani, Y. and T. Kamitani : *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **10**, 187-192 (1997)
- 2) Kirihara, S. et al. : *Solid State Commun.*, **124**, 135-139 (2002)
- 3) Kirihara, S., T. Niki and M. Kaneko : *Ferroelectrics*, **387**, 102-111 (2009)
- 4) Yablonovitch, E. : *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 2059-2062 (1987)
- 5) Hoshi, N. et al. : *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **46**, 834-838 (1998)
- 6) Shen, Y. : *Int. J. Pharm.*, **417**, 48-60 (2011)
- 7) Kirihara, S. and Y. Miyamoto : *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, **6**, 41-44 (2009)