

フォトニックフラクタルの構造設計・制御技術の確立と 電磁波制御デバイス開発

Development of Design and Control for Photonic Fractals and
Application to Electromagnetic Devices

宮本 欽生 (Miyamoto Yoshinari)

大阪大学・接合科学研究所・教授



研究の概要

フォトニックフラクタルやクリスタルなど誘電体や金属の3次元構造をCAD/CAMプロセスの光造形法を用いてマクロからマイクロレベルで作製し、ミリ波やテラヘルツ波を高効率に制御する新しい機能材料の創製を目指している。コンピュータ支援の設計・製造・評価・解析プロセスを確立し新しい研究開発ループシステムの構築も視野に入れている。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工

キーワード：フォトニックフラクタル，フォトニック結晶，光造形法，CAD/CAM，DMD，誘電体，マイクロ波，ミリ波，テラヘルツ波，電磁波局在，散乱，ナノ粒子，脱脂・焼結処理，周期構造，自己相似構造，FDTD法，TLM法

1. 研究開始当初の背景・動機

(1) 基盤となる着想に至った経緯

・我々は2000年頃からCAD/CAMプロセスを駆使し、構造を3次元的に自在に設計・作製することで新しい電磁波制御材料を開発するコンセプトを提案し、ダイヤモンド構造を有する3次元フォトニック結晶のマイクロ波伝播研究を実施してきた。

・2003年にメンジャースポンジ型の自己相似構造を有する3次元誘電体フラクタル構造を作製し実験を行った結果、内部へマイクロ波が局在する現象を世界で初めて発見しフォトニックフラクタルと命名した。

(2) 他の研究や社会に対する意義

・3次元的なフラクタル構造に対する電磁波の伝播挙動の解明と制御は、学術的な新分野の開拓に繋がるものであり、応用的に見ても情報通信、エネルギー、医療分野等でデバイス開発が期待される。

・テラヘルツ波の制御については、皮膚癌や火薬・麻薬の検知、医薬品の同定等に有効であることが知られており、次世代の安全・安心社会の構築に寄与する技術として早期開発が待たれている。

2. 研究の目的

(1) 研究開発の具体的な対象

・マイクロ波からテラヘルツ波に至る広域の電磁波を局在させ伝播制御する誘電体・

金属・それらの複合材料で構成した新しい3次元フォトニックフラクタルおよび関連するフォトニック結晶を創製する。

・マクロからマイクロレベルに至る構造設計・自動精密作製技術を確立する。

(2) 最終的な目標の設定

・電磁波制御デバイスを効率的に開発するため、コンピュータ支援による設計・製造・評価・解析・シミュレーションを包含する研究開発ループシステムを確立する。

・3次元構造体の電磁波伝播や局在挙動を実験的および理論的に明らかにする。

3. 研究の方法

(1) マイクロ光造形装置の開発

・産学連携により数年にわたる研究開発を進め、世界初のマイクロ光造形装置を完成させて大阪大学に導入した。

・既存の光造形装置と合わせ100mm～100μmサイズの3次元構造を作製できる。

(2) 超広帯域電磁波測定システムの構築

・本予算により50～110GHzまでの電磁波測定が可能なネットワークアナライザを購入し大阪大学に設置した。ついで別予算により40GHz～2THzまでの測定域を有するテラヘルツ分光器を購入し、既存のマイクロ波用ネットワークアナライザと合わせ、MHz～GHz～THz帯の広範囲な電磁波測定システムを整備した。

4. 研究の主な成果

(1) 新分野の構築

・ フォトニックフラクタルやクリスタルの創製において、セラミックス、金属、樹脂、およびそれらの樹脂複合体によるマクロからマイクロサイズの構造設計・光造形・焼成技術、GHz~THz 帯の電磁波測定、FDTD 法や TLM 法による解析手法を確立し、設計・製造・評価・解析の統一システムが整備され、新分野構築の礎を築いた。

(2) 誘電体マイクロ構造の創製

・ 本研究で作製したサンプルは、メンジャースポンジ型フラクタル構造、その反転構造、変形構造、集積構造をはじめとして、ダイヤモンドがフォトニック結晶やその欠陥構造、およびフラクタルとクリスタルの複合構造など多岐におよぶ。

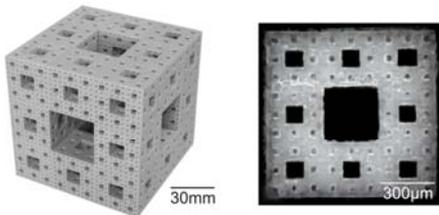


図1 光造形誘電体メンジャースポンジ型フォトニックフラクタル
(a) マイクロ波用 ($\text{SiO}_2\text{-TiO}_2/\text{Epoxy}$), (b) テラヘルツ波用 (Al_2O_3)

・ 図 1-(a) に示す 81mm のフラクタル構造は、透過率や反射率、散乱スペクトルおよび内部空洞の電場強度分布が測定できるため、主に局在挙動の実験的解析に用いた。また図 1-(b) に示す 810 μm の構造は、テラヘルツ領域の電磁波局在の研究に用いた。

・ セラミックスのナノ粒子を 40~50vol.% 分散した光造形体に脱脂・焼結処理を施し、 TiO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ などで相対密度 97%以上の構造が製造できる。誘電率が 2~100 程度、誘電損失も 0.1~1 程度で自在に選択可能となった。

・ 図 2 に示すフォトニックフラクタルとクリスタルのハイブリッド構造を作製し、テラヘルツ波の局在効果を確認した。

(3) 電磁波特性の評価と解析

・ 誘電体の 3次元メンジャースポンジ構造における電磁波局在の挙動を明らかにするため、FDTD 解析に群論を導入し、第 3 ステージのより複雑な構造に適用できる電磁波解析手法を世界で初めて開発した。

・ メンジャースポンジ構造における電磁波局在が普遍的な現象であることが判った。

・ 局在モードの固有周波数、電磁場分布、共振の Q 値を算出し、90° 度散乱の数値解析からモードの空間対称性を同定した。

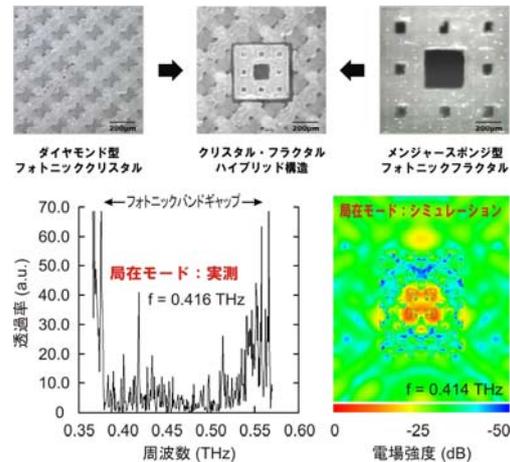


図2 フラクタル/クリスタルハイブリッド構造とテラヘルツ波の局在

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

・ フォトニックフラクタルによる電磁波の局在現象は、物理学、材料科学工学、通信工学、フラクタル科学などの様々な分野において、世界的に注目され大きなインパクトを与えている。米国セラミックス学会が主催する国際会議では、本研究で提唱している設計・製造・評価を計算機支援によりシステム化したスマートプロセスの概念を基盤として、2007年から国際シンポジウムが開催され、多くの研究者により活発な議論が展開された。また、日本のセラミックス協会秋季シンポジウムにおいても、2006年からスマートプロセスに関する特定セッションが開催され活況を呈した。

・ 電磁波局在の解析でも、米国ペンシルバニア州立大学や香港科学技術大学のグループが関心を持ち、2005年から共同研究を実施し成果が出ている。

・ また産学連携により開発したマイクロ光造形装置は半導体開発や医療研究、MEMS研究等で注目されており、既に3台納入されている。

6. 主な発表論文等

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

1. **K.Sakoda**, Phys. Rev. B72, 184201-7(2005)
2. **Y.Miyamoto**, S.Kirihara and M.W.Takeda, Chemistry Letters, 35-4, 342-347 (2006).
3. W.Chen, S.Kirihara and **Y.Miyamoto**, Appl. Phys. Lett., 91, 153507 (2007).
4. E.Semouchkina, **Y.Miyamoto**, S.Kirihara, G.Semouchkin, and M.Lanagan, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 55-6, 1305-1313(2007).
5. F.Miyamaru, Y.Saito, M.W.Takeda, B.Hou, L.Liu, W.Wen and P.Sheng, Phys. Rev. B77, 045124 (2008)