

光造形法によるセラミックス/高分子系ダイヤモンド型フォトニック結晶の作製と構造制御

桐原 聡秀・宮本 欽生

1. フォトニック結晶とその作製法

誘電率の異なる2種類の媒質を3次元的に周期配列させた構造に対して、さまざまな周波数の電磁波を透過させるとき、媒質中の波長と結晶周期が同程度になる周波数帯では、3次元的な干渉作用により電磁波の進行が禁止されて完全反射が起こる。原子が3次元的に配列する半導体結晶において、周期的な結晶ポテンシャル分布が、電子波に対してバンドギャップを形成するのと同様の現象である。誘電体の3次元構造を人工的な結晶と考え、フォトニック結晶とよばれる。電磁波に対する禁制帯はフォトニックバンドギャップと称される¹⁾。結晶の周期構造をバンド計算に基づいて意図的に乱せば、禁制帯中に特定周波数の電磁波だけを透過させる許容帯(欠陥準位)の形成も可能である。

ナノメートルオーダーの屈折率周期構造により、電磁波として光を制御し、高効率レーザーや光回路などを開発する試みがなされている^{2,3)}。微細周期構造の作製には、光の波長オーダーで突起や穿孔が配列した薄い層を、積み重ねる手法が用いられてきた。突起の形成には半導体デバイス作製に用いられるリソグラフィや選択成長などが適用され、穿孔の形成には電気化学エッチングや電子またはイオンビーム照射などが試みられている。また誘電率の周期構造により電磁波を制御し、高指向性アンテナを作製する試みもなされている⁴⁾。誘電体に精密機械加工を施し、周期構造が作製された。しかしながらこれまでのフォトニック結晶の作製手法は、規則的な周期構造を定型的に作製するのに適しているが、バンド計算に則した形で結晶欠陥等を自由自在に導入したり、形状を任意に作製する作業には適さなかった。

筆者らはミリメートルオーダーの3次元誘電率周期構造からなるフォトニック結晶を設計し、高度情報通信用のマイクロ波やミリ波を制御しようと考えている。高誘電率のセラミック粒子を分散させたエポキシ系樹脂を用いて、3次元に展開する格子構造を作製し、格子とその間の空隙により誘電率の周期的な変化を実現している⁵⁾。フォトニック結晶の設計および作製には、ラピッドプロトタイピング技術の一種である光造形法を応用した。この手法は、薄い2次元断面を積み重ねることで、複雑形状の3次元構造を精度よく作製する技術である。光硬化性樹脂の液面を紫外線レーザーで走査し、微小な硬化領域を3次元的に接合することで構造体を得る⁶⁾。CAD/CAM (computer aided design/computer aided manufacturing) システムを用いて3次元構造を設計・作製するため、バンド計算の結果を反映させた周期構造の改良や周期欠陥の導入が、これまでのフォトニック結晶の作製手法と比較してはるかに容易に行える。

2. 光造形法による3次元造形

フォトニック結晶の作製に用いている光造形装置(ディーメック社製:SCS-300P)の構造概略を図1に示す。3次元構造体を形成する主原料としては、紫外線照射により重合する光硬化性樹脂の液相(ディーメック社製:SCR-730)を用いている。樹脂液相には高誘電率セラミックスの粉末として、平均粒径10 μ mのチタニア系粉末を混合した。

樹脂液面にスポット径100 μ mの紫外線レーザー(波長355nm)を出力110mWで照射し、直径120mmの球状硬化領域を形成した。レーザービームを速度90m/sで走査し、硬化領域を連続的に接合することで、厚さ120 μ mのセラミックス/エポキシ系誘電体層を形成する。金属製

大阪大学接合科学研究所(〒567-0047 茨木市美穂ヶ丘 11-1)
E-mail: kirihara@jwri.osaka-u.ac.jp

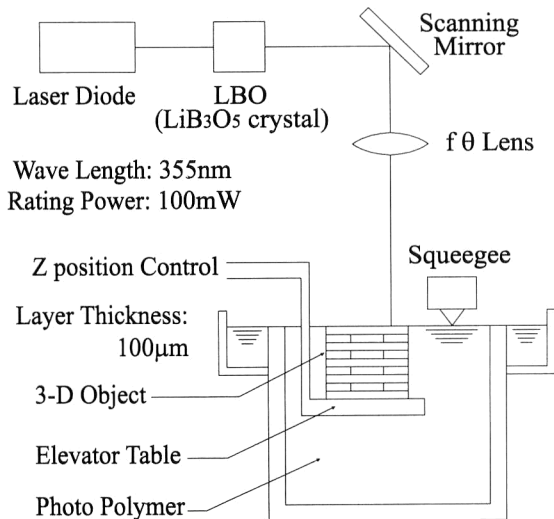


図1 光造形装置の構造概略。

の造形ステージを樹脂液面から $100\ \mu\text{m}$ 下げてレーザー描画を行い、ステージ上に第1層を形成する。ステージを液中に $100\ \mu\text{m}$ 降下させ、第1層の上に第2層を描画すると、上下の層は重合硬化により接合される。樹脂液相はポンプにより、タンク下部から上部へ絶えず循環させ、セラミックス粒子の沈降を防いだ。

フォトニック結晶の構造データは一般的な3次元CADソフトウェア（トヨタケーラム社製：Think Design Ver. 5.0）を用いて設計している。光造形法における標準データ形式は、自由曲面を三角形の集まりで多面体近似するSTL (stereolithography) フォーマットである。光造形装置に付属のスライスプログラム（ディーメック社製：SCR Slice-Software Ver. 2.0）によって、3次元構造データは2次元断面データの集合に変換される。光造形装置はデータにしたがって紫外線レーザーを走査し、造形ステージを移動させる。

3. フォトニック結晶の作製と構造制御

コンピューターグラフィックにより描画したダイヤモンド型フォトニック結晶の格子構造を図2(a)に示す。寸法 $\phi 2 \times 3\ \text{mm}$ の円柱を組み合わせ、外観寸法 $15 \times 34 \times 42\ \text{mm}$ の人工結晶とした。誘電率の周期的な変化を格子と空隙の配列により実現し、3次元的にバンドギャップを形成するダイヤモンド構造になるよう設計している⁷⁾。ダイヤモンド構造における $\langle 100 \rangle$ 方向の格子面間隔を $3.5\ \text{mm}$ とした。さらに図2(b)に示すように、結晶の $\langle 100 \rangle$ 方向に対して格子面間隔が段階的に傾斜したダイヤモンド型フォトニック結晶を設計した。結晶の格子間隔をA～E領域にわたって、それぞれ100～140%引き伸ば

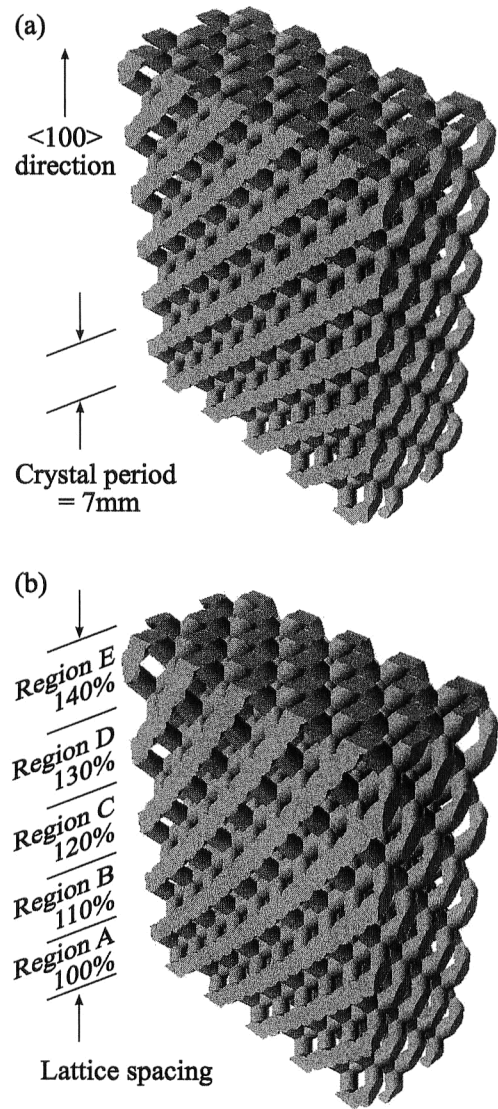


図2 ダイヤモンド格子構造を有するフォトニック結晶の3次元モデル。(a)は等方的な格子構造を示し、(b)は格子間隔が傾斜した構造を示す。

して傾斜構造を実現し、より幅の広い周波数帯域のバンドギャップ形成をねらっている。この場合も結晶全体の寸法は $15 \times 34 \times 42\ \text{mm}$ である。

光造形法により作製したダイヤモンド型フォトニック結晶の3次元構造を図3に示す。ミリメートルオーダーの等方的な格子構造と傾斜した格子構造が、それぞれCADデータに従い精密に実現されている。さらにダイヤモンド構造における (100) 、 (110) 、 (111) 結晶面の格子構造を図4に示す。光造形においては、レーザースポット周辺に形成される硬化領域の大きさや、積層する誘電体層の厚さなどが3次元構造体の寸法精度を決定する。形成された結晶構造の様子から設定した造形パラメーターが適切なものであったと考えられる。誘電体格子中の組織をSEM

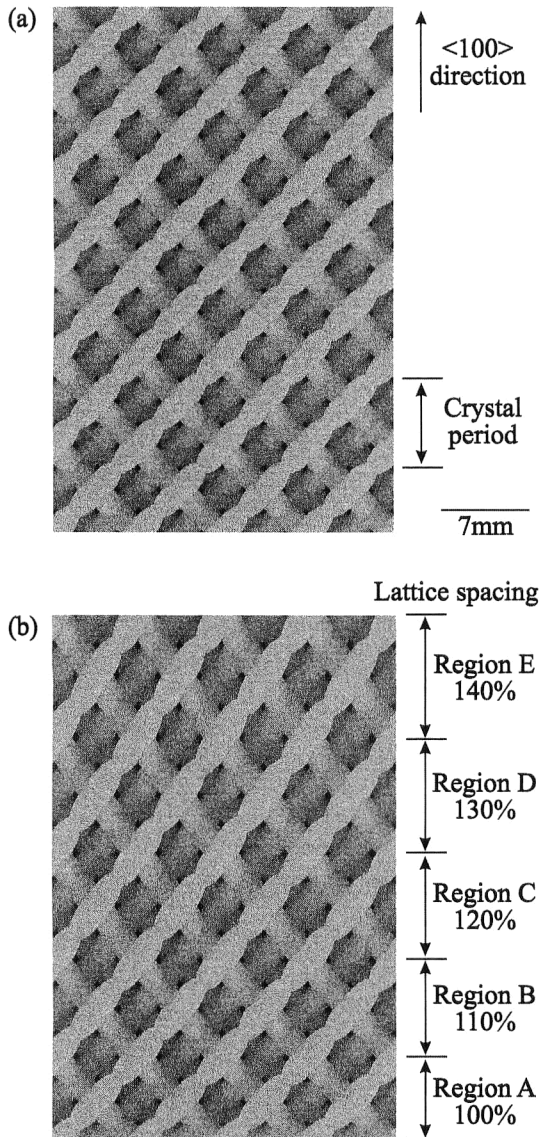


図3 光造形法により作製した3次元ダイヤモンド格子構造を有するフォトニック結晶。(a)は等方的な格子構造を示し、(b)は格子間隔が傾斜した構造を示す。

(scanning electron microscope) 観察したところ、平均粒径 $10\ \mu\text{m}$ 程度の球状チタニア系粒子がエポキシ樹脂の母相中に均一分散し、体積分率で 30 vol%程度を占めることが確認された。エポキシ樹脂およびチタニア系粒子の比誘電率は、それぞれ 2.8 および 67 程度であり、誘電体格子としてのマクロ的な比誘電率は 23 程度であると見積もられる。光硬化性樹脂に純チタニア粉末を混合した場合には、重合反応が起こらず樹脂は硬化しなかった。チタニア粒子の表面化学物性が、モノマーの重合反応を阻害する硬化を示していたと考えられる。

4. フォトニックバンドギャップの形成

フォトニック結晶に対する電磁波の透過特性をネットワ

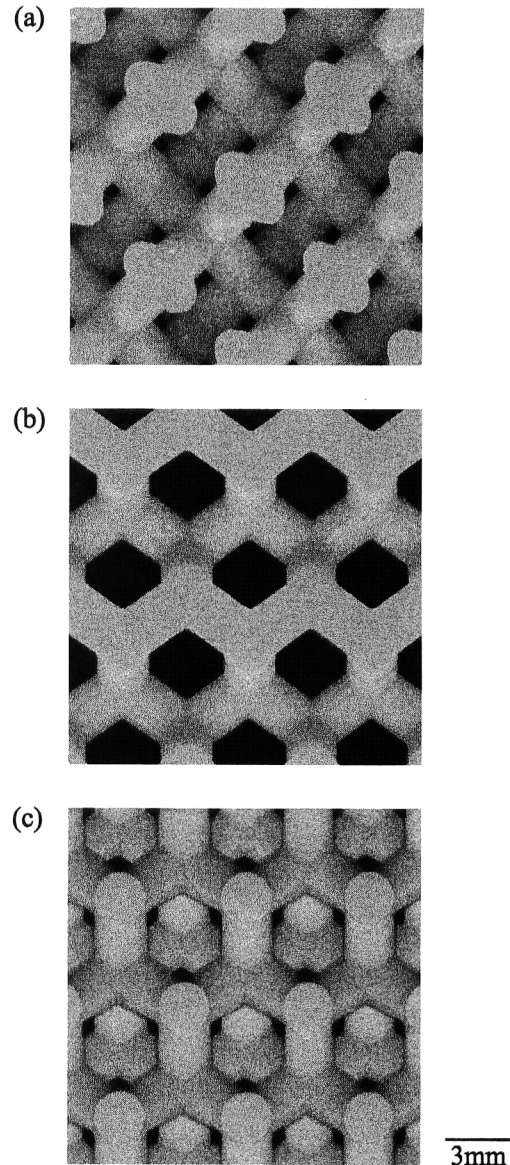


図4 誘電体ダイヤモンド格子構造における結晶面。(a)、(b) および (c) はそれぞれ (100)、(110)、および (111) 結晶面を示す。

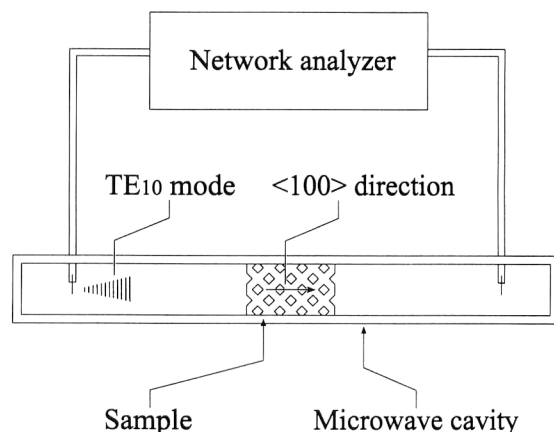


図5 フォトニック結晶に対する電磁波透過特性評価法の概略。

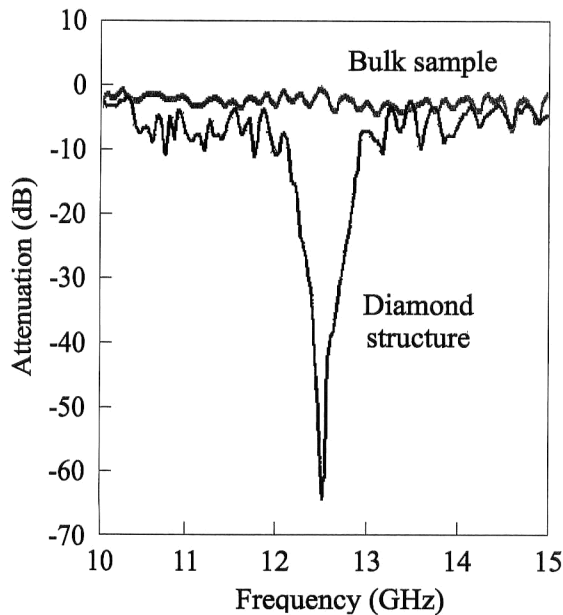


図6 ダイヤモンド型フォトニック結晶および誘電体バルク材に対する電磁波透過特性. 電磁波の入射方向は結晶の $\langle 100 \rangle$ 方向.

ークアナライザ（日本ヒューレットパッカード社製：HP-8720D）を用いて評価した。電磁波測定の概要を図5に示す。マイクロ波用の導波管にサンプルを挿入し、結晶の $\langle 100 \rangle$ 方向に対して TE_{10} モードの電磁波を透過させた。 $\langle 110 \rangle$ および $\langle 111 \rangle$ 方向に対する電磁波の透過特性も同様に評価した。フォトニック結晶と同じ材質で、同じ寸法の誘電体バルク材を作製し、電磁波透過特性を比較した。

ダイヤモンド型フォトニック結晶およびバルク材に対する電磁波の透過特性を図6に示す。測定周波数帯において、バルク材は電磁波を吸収することなく、ほぼ完全に透過していることがわかる。一方フォトニック結晶の場合は、周波数帯12.7 GHzを中心に深く鋭い透過率の減衰ピークがみられる。減衰率の最大値は -55 dBに達する。このような大きな透過率の減衰は、結晶の $\langle 110 \rangle$ および $\langle 111 \rangle$ 方向に対しても、異なる結晶格子面間隔を反映する形で同様の減衰ピークが観察され、3次元的なフォトニックバンドギャップの形成が確認された。

傾斜格子構造を有するダイヤモンド型フォトニック結晶の電磁波透過特性を図7に示す。周波数帯8.3~13.5 GHzにわたり幅広いバンドギャップが形成されている。傾斜構造を構成するA~E領域のそれぞれが形成する減衰帯が連なり、バンドギャップが効果的に拡大されたと考えられる。A~E領域それぞれの結晶構造は1周期分であり、バンドギャップは2層の格子面での電磁波回折により

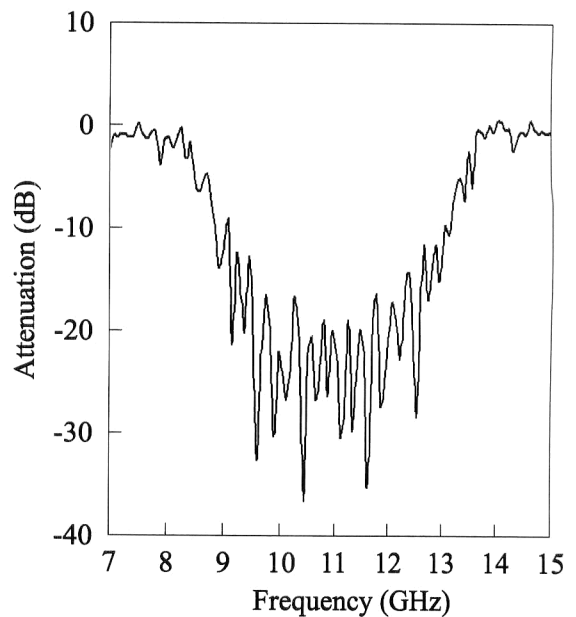


図7 傾斜格子構造を有するダイヤモンド型フォトニック結晶の電磁波透過特性.

形成される。そのため、減衰率の最大値が -25 dB程度にとどまっていると考えられる。作製した結晶中の傾斜格子構造は連続的なものではなく、一定の格子間隔を有する領域を組み合わせた段階的な傾斜構造である。バンドギャップ底部において、減衰曲線に振動がみられるのは、個々の領域が形成するフォトニックバンドギャップが不連続的に結合されているためであると考えられる。

5. CAD/CAMによる構造欠陥の導入

半導体のバンドギャップに対して、ドナーもしくはアクセプター準位を形成するのと同様に、フォトニックバンドギャップに対しても、許容エネルギー準位を作り出すことが可能である。これらのエネルギー準位は格子構造に対する空孔型もしくは侵入型欠陥の導入により形成できる。フォトニック結晶の実用化においてはこのような格子欠陥の導入が重要な要素となる。たとえば、フォトニック結晶中に線欠陥を導入すれば、光や電磁波の回路を形成できる。光造形法を用いれば、理論にしたがった複雑な格子欠陥の導入がきわめて容易になると考えられる。図2(b)に示したA~E領域で構成される傾斜構造の3次元モデルから、CADプログラムによってC領域を削除し、層状の欠陥を有するダイヤモンド型フォトニック結晶を設計した。この結晶に対する電磁波透過特性を図8に示す。周波数帯8.3~13.5 GHzに形成されたフォトニックバンドギャップ中において、10.7 GHzをピークとして束縛モードが観察された。欠陥となっているC領域に対応する周波数帯

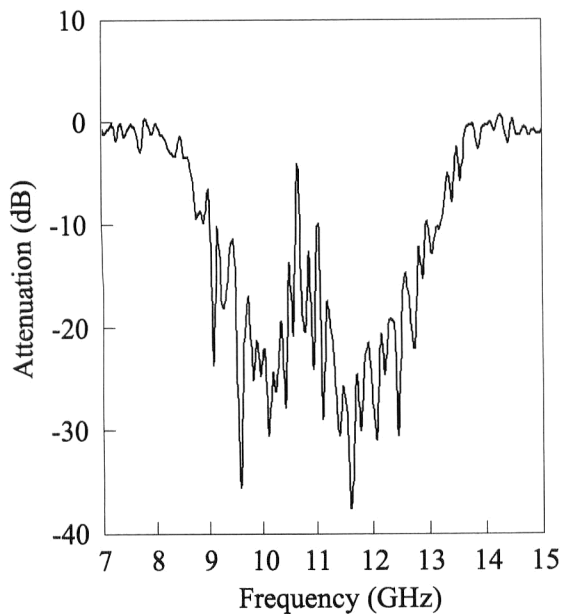


図8 傾斜格子構造に層状欠陥を有するダイヤモンド型フォトニック結晶の電磁波透過特性。

域に、許容エネルギー準位が形成されたと考えられる。

6. 光造形フォトニック結晶の応用

光造形法を用いたフォトニック結晶の作製では、誘電体格子構造の設計および作製を効率よく行うことができる。また完全結晶中における欠陥の導入も容易である。マイクロ波およびミリ波領域におけるフォトニック結晶の応用として基盤となるのは、図9に模式的に示すように、完全結晶を有する基盤中に意図的な点欠陥を周期的に導入し、これに共振するような電磁波を点欠陥の列にしたがって伝搬させる導波路である。共振モードを選べば電磁波フィルターにもなり、電磁波デバイスの集積回路を設計することもできる。1方向に電磁波を発振できるので、高指向性アンテナとしての応用も期待できる。高指向性のミリ波アンテナは、自動運転型の道路交通システムにおけるレーダーに応用できるし、大容量移動体通信用のアンテナとしても使用可能である。完全結晶のプレートを電磁波防壁として携帯電話などに装着すれば、人体に対する電磁波障害の解消にも期待がもてる。

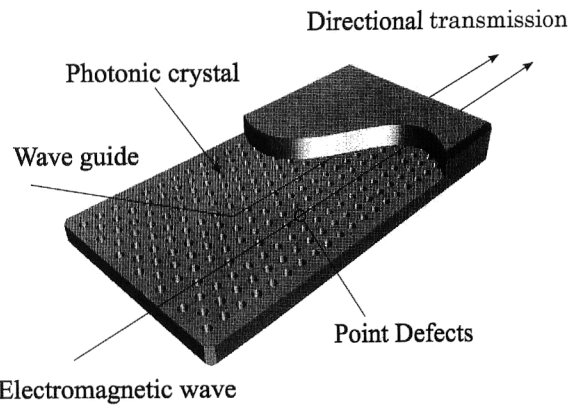


図9 フォトニック結晶を応用した電磁波デバイスの概念。

現在結晶の作製に用いている光造形装置を用いれば、最小で結晶周期が1 mmのダイヤモンド格子構造を形成することが可能である。実際にこの結晶は、テラヘルツ分光法によって、200 GHz付近におけるバンドギャップ形成が確認されている。したがって、ミリ波やマイクロ波領域で得られた結果をテラヘルツ波領域においても同様に実現可能であると考えられる。

文 献

- 1) E. Yablonovich: "Photonic crystals," *J. Mod. Opt.*, **41** (1994) 173-194.
- 2) 井上久遠: "光学部品を根底から変えるフォトニック結晶に注目集まる—メーカー巻き込み、用途意識した研究が加速", *日経エレクトロニクス*, 1998年11月16日号.
- 3) 吉野勝美: "フォトニック結晶光学", *生産と技術*, **50** (1998) 26-33.
- 4) E. R. Brown, C. D. Parker and E. Yablonovich: "Radiation properties of a planar antenna on a photonic-crystal substrate," *J. Opt. Soc. Am. B*, **10** (1993) 404-407.
- 5) 桐原聡秀, 宮本欽生, 梶山健二: "光造形法による高分子/セラミック系フォトニック結晶の試作", *粉体および粉末冶金*, **47** (1999) 239-243.
- 6) 丸谷洋二: 光造形法—レーザーによる3次元プロッター (日刊工業新聞社, 1990).
- 7) J. D. Joannopoulos, R. D. Mead and J. N. Winn: *Photonic Crystals—Modeling the Flow of Light* (Princeton Univ. Press, New Jersey, 1995).

(2001年4月9日受理)