

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360027

研究課題名（和文） ランダムネットワーク・フォトリック物質に関する研究

研究課題名（英文） Study on random network photonic materials

研究代表者

枝川 圭一（EDAGAWA KEIICHI）

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：20223654

研究成果の概要（和文）：

最近提案されたフォトリック・アモルファス・ダイヤモンド(PAD)とよばれる新しいタイプのフォトリック構造におけるフォトリックバンドギャップ(PBG)形成と光伝播特性を調べた。まず PAD が格子周期性を全くもたないにもかかわらず 3次元(3D)PBG を形成することを実験的に証明した。また、この 3D-PBG が中に局在状態などを含まない完全なものであることを示した。そのような完全な 3D-PBG が形成することは、PAD 内に強く光を閉じ込めることができることを示している。このことは実際に数値計算により示された。PAD における 3D-PBG は光の波数ベクトル、偏光ベクトルの方向に依存せず等方的である。これは通常のフォトリック結晶では実現不可能である。パスバンドにおいては、PAD は拡散伝播を示す。ここで散乱強度は周波数がバンド端に近づくにつれて顕著に大きくなる。バンド端では散乱強度が十分強く、光局在が実現する。以上の結果は、フォトリック物質における PBG 形成の物理的起源、光拡散、光局在などの問題に新たな知見を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：

Photonic band-gap (PBG) formation and light propagation properties of a recently-proposed new-type photonic structure “photonic amorphous diamond (PAD)” are studied. First, the formation of a full three-dimensional (3D) PBG has been demonstrated experimentally, in spite of complete absence of lattice periodicity. The 3D PBG in PAD has been shown to be clean with no trace of localized photonic states within it. The clean 3D PBG should enable strong light confinement in PAD, which has actually been demonstrated numerically. The 3D PBG in PAD is completely isotropic, regardless of the light wavevector orientation and polarization direction, which, in principle, cannot be realized in conventional photonic crystals. In passbands, the PAD exhibits diffusive light-propagation, where the scattering strength increases significantly as the frequency approaches the band edge. In frequency ranges near the band edge, the scattering strength is so high that light localization is realized. These findings provide new insights into the physical origin of PBGs and issues such as light diffusion and localization in photonic materials.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
2010年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2011年度	1,800,000	540,000	2,340,000
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：フォトニック結晶・フォトニックバンドギャップ

### 1. 研究開始当初の背景

誘電体が光の波長程度の周期性をもって配列した人工的な構造体である「フォトニック結晶」では、結晶構造をうまく設計することにより、特定の周波数領域の光の伝播を3次元のあらゆる方向で禁止する3次元フォトニックバンドギャップ(3D-PBG)が実現する。そのような3D-PBGをもつフォトニック結晶中に微小な空洞を導入することにより、その微小領域にギャップ内周波数の光を3次的に閉じ込めることができる。このような微小領域への光の閉じ込め効果を利用すれば、極小な光共振器、急峻な曲げに対してもロスのない光導波路、極小なレーザー等の従来実現不可能であった光制御素子が実現可能となり、さらにはそれらを高密度で集積した光集積回路の実現も視野に入れて研究が進められている。

従来、フォトニック結晶による3D-PBG形成はフォトニック結晶の周期構造に由来して現われるものと信じられており、周期構造は大前提で不可欠のものと思われていた。ところが最近(2008年)、我々は周期性を全くもたないランダムネットワーク構造でも大きな3D-PBGが形成し、強い3次元光閉じ込め効果が発現することを数値シミュレーションによって見出した。

### 2. 研究の目的

前項のような背景で、本研究ではそのようなランダムネットワーク構造を試作し、電磁波透過実験を行う。この実験は、(1)ランダムネットワーク構造における3D-PBG形成の実験的な証明と、(2)パスバンドにおける電磁波の透過基本特性の解明、を目的とする。またFDTD計算により、(3)ランダムネットワーク構造における3D-PBG形成機構の理論解明、(4)光閉じ込め強さの評価を行う。それらの結果に基づいてランダムネットワーク構造を用いた全く新しいタイプの光制御素子の開発をめざす。

### 3. 研究の方法

我々が2008年にFDTD法による数値計算によって3D-PBGが形成することを明らかにした構造は、局所的にダイヤモンド結晶構造の4配位で連結したランダムネットワーク構造であり、我々はこれを、フォトニック・アモルファス・ダイヤモンド(PAD)構造と名付けた。PAD構造のComputer Graphics像を図1に示す。まずこの構造をミリ波帯サイズで粉末焼結積層造形法により作製した。材料粉末

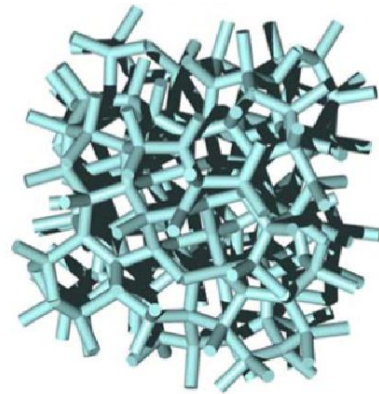


図1 PAD構造のComputer Graphics像

にはナイロン(PA12:平均粉径 $50\mu\text{m}$ )と二酸化チタン(平均粉径 $75-100\mu\text{m}$ )を用いた。二酸化チタン粉末は構造体の屈折率 $n$ を高めるために加えた。作製した構造体ロッド部の空孔率はおよそ40%であった。ロッド部の屈折率をさらに高めるため、作製した構造体を24時間水に浸し、2時間乾燥させた後、268Kまで冷却し、空孔部に適量の氷を形成した。氷は損失係数 $\kappa$ を高めることなく屈折率 $n$ を高めるのに適している。最終的に、ロッド部の屈折率 $n$ と損失係数 $\kappa$ は30GHzでそれぞれ3.0と0.03であった。ロッド長さは $d \approx 3\text{mm}$ 、ロッド半径は $r \approx 0.78\text{mm}$  ( $0.26d$ )であり、試料サイズは、およそ $x \times y \times z = 70 \times 70 \times 35 \text{mm}^3$ である。試料は方位の異なる3種類を作製した。

電磁波透過スペクトル測定は、ベクトルネットワークアナライザ(HP Model 8722D, Agilent Technologies)を用いた自由空間法で行った。測定周波数は18-35GHzとした。テフロンレンズのついた円錐型ホーンアンテナを試料の前後163mmの位置に配置した。直線偏光の電磁波を一つのアンテナから発射し、もう一つのアンテナによって透過波を測定した。このとき二つのアンテナの偏光方向を相対的に変えて入射偏光と平行な透過波の直線偏光成分と垂直な直線偏光成分の透過率 $T_p$ と $T_c$ を測定した。

光状態密度および光固有状態のモードプロファイルをFDTDスペクトラル法により計算した。ここでは $11.5d^3$ のサイズのスーパーセルの周期構造をもったPADに対し、ランダムな電磁場を初期場とし、電磁場の時間発展を計算した。フーリエ解析により光状態密度、光固有状態のモードプロファイルを求めた。

#### 4. 研究成果

図2に作製したPAD構造の例を示す。他の方位もあわせて、設計通りの構造作製ができたことを確認した。

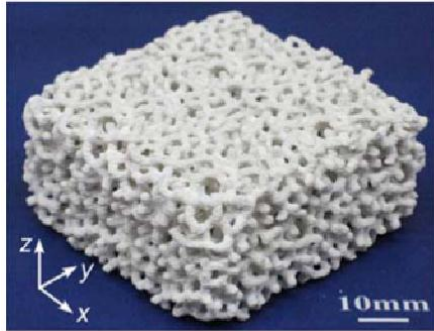


図2 作製したPAD構造の例

図3 (a) (b)に PAD の  $T_p$  と  $T_c$  の測定結果をそれぞれ示す。6本の曲線は異なる3つの方位を持つ試料について互いに直交する2つの偏光を持つミリ波を入射した結果である。光状態密度に対応する計算スペクトルを図3 (c)に示す。このスペクトルには3D-PBGに対応する大きな落ち込みがみられる。まず、図3 (b)の  $T_c$  の結果について述べる。このスペクトルには明確な落ち込みがみられ、その落ち込み周波数域は6つのスペクトルでよく一致している。また図3 (b)の6スペクトルの落ち込み周波数域は図3 (c)の3D-PBGの周波数域の計算結果とよく一致している。このことは観測された  $T_c$  の落ち込みが等方的な3D-PBGに対応していることを示唆している。一方、図3 (a)に示されたPADの  $T_p$  には一見特異な特徴が見られる。つまり  $T_p$  の減少は計算で示された3D-PBGの下端周波数よりずっと低周波数から始まっているし、上端より高周波数域においても  $T_p$  は  $10^{-3}$  程度の小さな値にとどまっている。このような  $T_p$  の特異なふるまいは、パスバンドにおける電磁波の拡散伝播に由来する。図4にバリスティック透過成分の減衰率から求めた拡散伝播における平均自由行程 ( $l$ ) の周波数依存性を示す。 $l$  はバンド端に向かって急激に減少し、バンド端で  $l \approx 5 \text{ mm} \approx 1.6d$  程度となっていることが分かった。この値は理論的に光局在が起こるとされる閾値に近く、実際に数値計算により、バンド端近傍の光が局在状態となることが示された。

以上のように、PADにおける等方的な3D-PBG形成を実験的に証明することができた。これは周期的結晶格子を持たない誘電体構造体における3D-PBGを実験的に観測した初めての例である。波数ベクトルや偏光方向によらない等方的な3D-PBG形成はPAD構造の等方性に起因しており、PAD特有のものである。一般的に、従来のフォトニック結晶で

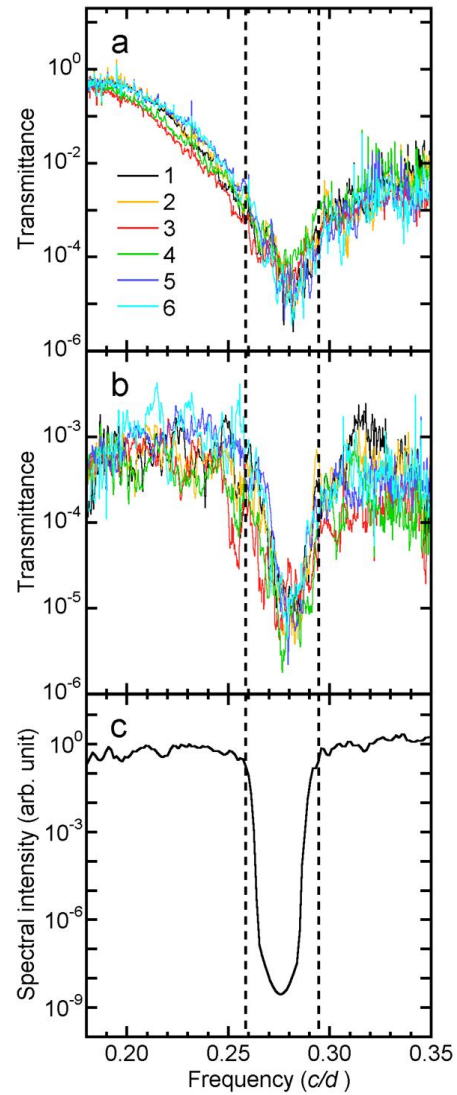


図3 PADの電磁波透過率  $T_p$ 、 $T_c$  の測定結果 (a, b) と光状態密度の計算結果 (c)

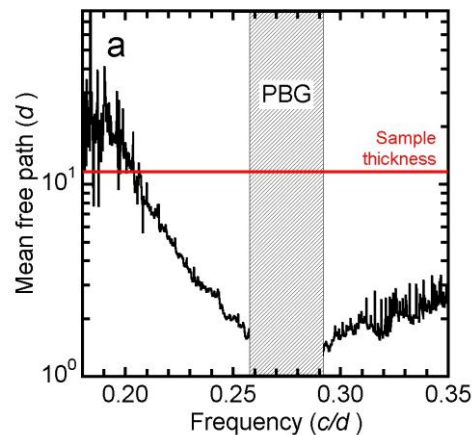


図4 バリスティック透過成分の減衰率から求めた拡散伝播における平均自由行程の周波数依存性



は、3D-PBG は非等方的である。フォトニック結晶は必ず構造異方性をもつからである。

図5に光固有状態の電場 $|\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2$ の空気領域への集中度

$$CF \equiv \left( \int_{V_{air}} |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r} / \int_{V_{tot}} |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r} \right)$$

の周波数依存性を示す。結果はPADと、結晶ダイヤモンドを誘電体ロッドで構成した構造(PCD)について示す。ここで、電場が空気領域、誘電体領域に均一に分布していれば、CFは空気の体積率(78%)と一致するはずである。PAD、PCDともに電場がPBG直下で誘電体領域に、PBG直上で空気領域に集中する傾向にあることがわかる。この結果は、通常、フォトニック結晶のPBG形成機構の説明として用いられる、誘電体バンド-空気バンドの描像がPADにも当てはまることを示している。電場はベクトル場なので、誘電体、空気領域に集中するためには誘電体、空気がそれぞれ連続したネットワーク構造をもつことが好ましい。なぜならそのような構造であれば電場ベクトルの流線をそれぞれの領域に納めることができるからである。PAD、PCDともにそのような構造をもっている。また、これらの構造は誘電体、空気のそれぞれのネットワークがある種の双対構造となっている。このことが3D-PBG形成に重要な役割を果たしている可能性がある。この点を明らかにするための数値計算を今後行う予定である。

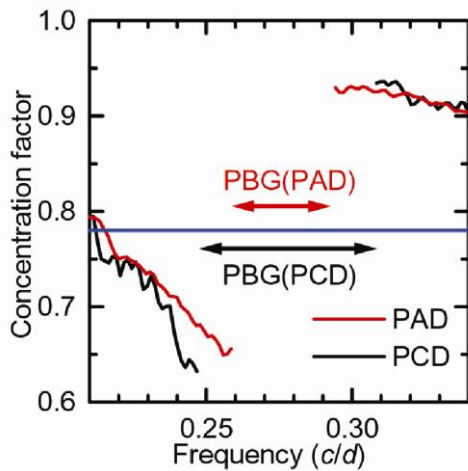


図5 電場集中度(CF)の周波数依存性

PAD構造が3D-PBGを形成することが明らかとなったが、この構造により従来のフォトニック結晶と同程度の強さで光閉じ込めができるかどうかは、それほど明らかではない。これを調べる目的でPAD構造中の点欠陥の光局在状態のQ値をFDTD法で計算し、PCDの点欠陥のQ値と比較した。Q値は光閉じ込め強さの指標となる値である。ここで、点欠陥は任意の一つの誘電体ロッドを取り除くこと

により導入した。図6にQ値の構造サイズ(R)依存性を示す。PAD、PCDともに、Q値は $Q = A \cdot \exp(B \cdot R)$ の形でRに依存している。このときAとBの値は両構造でほぼ等しく、 $R = 10d$ で $Q \geq 10^6$ である。これらの結果は、PADはPCDなどの従来のフォトニック結晶と同程度の強い光閉じ込めを可能とすることを示している。

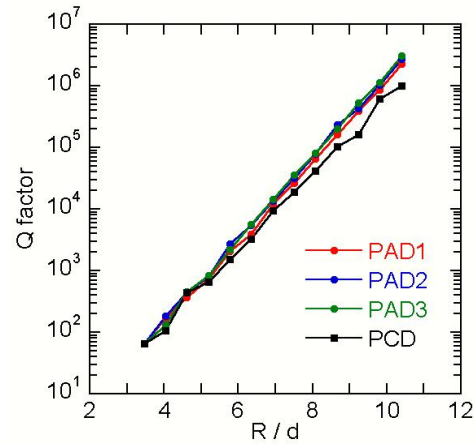


図6 Q値の構造サイズ依存性

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

①S. Imagawa, K. Edagawa, "Polarization conversion by a three-dimensional photonic crystal mirror with a diamond structure", *Photonics and Nanostructures*, vol. 10, 2012, pp. 281-286, 査読有, DOI: 10.1016/j.photonics.2011.05.005

②S. Imagawa, K. Edagawa and M. Notomi, "Strong light confinement in a photonic amorphous diamond structure", *Appl. Phys. Lett.*, vol.100, 2012, 151103, 査読有, DOI: 10.1063/1.4704182

③S. Imagawa, K. Edagawa and M. Notomi, "High-Q Resonant Cavities in a Photonic Amorphous Diamond", *AMTC Letters*, vol. 3, 2012, pp. 224-225, 査読有

④S. Imagawa, K. Edagawa, K. Morita, T. Niino, Y. Kagawa, M. Notomi, "Photonic band-gap formation, light diffusion, and localization in photonic amorphous diamond structures", *Phys. Rev. B*, vol. 82, 2010, 115116, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevB.82.115116

[学会発表] (計11件)

①枝川圭一, 今川成樹, 納富雅也, "誘電体

球で構成した PAD 構造における光禁制帯形成”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24 日, 関西学院大学

②野田盛雄, 今川成樹, 枝川圭一, 納富雅也, “フォトニック・アモルファス・ダイヤモンドにおける点欠陥共振器”, 日本金属学会 2011 年秋期講演大会, 2011 年 11 月 7 日, 沖繩コンベンションセンター

③枝川圭一, 今川成樹, 納富雅也, “フォトニック・アモルファス・ダイヤモンドにおける光禁制帯形成”, 日本機械学会第 24 回計算力学講演会, 2011 年 10 月 9 日, 岡山大学

④今川成樹, 守田圭祐, 新野俊樹, 香川豊, 納富雅也, 枝川圭一, “フォトニック・アモルファス・ダイヤモンドにおける光禁制帯形成と光局在”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 23 日, 富山大学

⑤今川成樹, 野田盛雄, 枝川圭一, 納富雅也, “フォトニック・アモルファス・ダイヤモンドにおける点欠陥共振器”, 第 72 回応用物理学会学術講演会, 2011 年 9 月 2 日, 山形大学

⑥ K. Edagawa, S. Imagawa, T. Nino, M. Notomi, “Photonic Bandgap Formation and Light- Propagation in Photonic Amorphous Diamond”, 9th Int. Conf. on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, 26-30 Sep. 2010, Granada, Spain

⑦今川成樹, 野田盛雄, 枝川圭一, 納富雅也, “誘電体球で構成した PAD 構造におけるフォトニックバンドギャップ形成機構”, 第 71 回応用物理学会学術講演会, 2010 年 9 月 17 日, 長崎大学

⑧枝川圭一, 今川成樹, 守田圭祐 新野俊樹, “ダイヤモンド型フォトニック結晶ミラーによる偏光変換”, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 2010 年 3 月 20 日, 東海大学

⑨今川成樹, 野田盛雄, 枝川圭一, 納富雅也, “誘電体球で構成した PAD 構造におけるフォトニックバンドギャップ形成”, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 2010 年 3 月 20 日, 東海大学

⑩今川成樹, 枝川圭一, 納富雅也, “フォトニック・アモルファス・ダイヤモンドにおける光局在 II”, 第 70 回応用物理学会学術講演会, 2009 年 9 月 8 日, 富山大学

⑪ K. Edagawa, S. Kanoko and S. Imagawa, “Photonic band gap formation in icosahedral quasicrystalline structures”, The 5th Asia International Workshop on Quasicrystals, 1-4 Jun. 2009, Tokyo

[図書] (計 2 件)

① K. Edagawa, M. Notomi, “Strong Light Confinement by Perturbed Photonic Crystals and Photonic Amorphous Structures”, Chap. 4.1 in ‘Optical Properties of Photonic Structures:

Interplay of Order and Disorder’, M. F. Limonov and R. M. De La Rue eds., 566 pages, Taylor & Francis, to be published in 2012/6

② K. Edagawa, “Photonic band-gap formation and light localization in photonic amorphous diamond”, in ‘Amorphous Nanophotonics’, C. Rockstuhl and T. Scharf eds., Springer, to be published in 2012

[その他]

新聞報道

①「東大 バンドギャップ 非周期構造で形成 光制御に新たな道」日刊工業新聞 2010 年 11 月 2 日朝刊

②「東大 新材料を発見 フォトニックアモルファスダイヤモンド構造体 光バンドギャップ形成」化学工業日報 2010 年 10 月 14 日朝刊

③「東大・NTT 光 LSI 向け新素材 特定周波数だけ反射」日経産業新聞 2010 年 10 月 14 日

ホームページ

<http://www.edalabo.iis.u-tokyo.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

枝川 圭一 (EDAGAWA KEIICHI)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：20223654