

# 電子機能性浸透ネットワークを用いた チューナブル・フォトニック結晶

— 設計, 創製およびデバイス応用 —

特集 プロジェクト研究

吉野勝美\*

Tunable Photonic Crystals from Interpenetrating Electroactive Network :  
Design, Synthesis and Devices

Key Words : Photonic Crystal, Photonic Band Gap, Opal, Interpenetrating Net Work,

## 1. はじめに

光の波長程度の周期構造を持った物質はフォトニック結晶 (photonic crystal) と呼ばれ, その周期に対応するある波長範囲の光の存在が禁止される光に対する禁止帯, いわゆるフォトニックバンドギャップ (photonic band gap) が現れ, 光を自由自在に制御することができる。これは, 電子を自由に制御することにより現在のエレクトロニクスを成り立たせている半導体に対応するものであり, 新概念のフォトニックデバイスへの道を開く可能性を有している。特に, フォトニックバンドギャップの位置や範囲を外場, 外的因子などにより任意に制御することが出来れば, 全く新しい概念の電子・光素子, デバイスを実現することが期待できる。例えば, 電子活性な材料, 分子, 高分子でフォトニック結晶を構成したり, これらの材料とフォトニック結晶とを複合して, 新しいフォトニック結晶を構築することが可能となれば, その光学的性質は電界・光などの外部からの刺激に対して能動的に応答することが期待され, 画期的な新概念の機能を有するフォトニック結晶が可能となる。

一方, 導電性高分子は, 高分子が絶縁体であるという従来の概念を打ち破り, ドーピングによる絶縁体—金属転移を始め種々の極めて特徴的な電子・光物性を示すことから, 基礎科学的に注目されるとともに, 電界発光素子, クロミック素子等の画期的な電子・光機能材料として極めて活発に研究されてきた。特に近年, 導電性高分子とフラーレン C<sub>60</sub> の複合体および導電性高分子ドナー (D)—アクセプター (A) の浸透ネットワーク界面を利用した高効率太陽電池実現の可能性が示された。しかしながら, このようなネットワークは, これまで可溶性導電性高分子によってのみ実現されており, その応用の可能性を著しく制限してきた。即ち, 電子機能性浸透ネットワークは単に高効率太陽電池への応用のみに限らず極めて多様な分野への応用の可能性を秘めている非常に発展性のあるものである。

そこで, 我々はこのフォトニック結晶と電子機能性浸透ネットワークの何れも画期的な性質, 機能を併せ持ったものとしてチューナブルフォトニック結晶を提案し, 平成9年度から NEDO 国際共同研究として支援を受けることとなり, 具体的な研究活動を開始した。

筆者, 吉野勝美が研究代表者であり, チームメンバーとして, S. John, R.H. Baughman, A.A. Zakhidov, Z.V. Vardeny, R.D. McCullough らが名を連ねているが, このうち S. John はフォトニック結晶そのものの最初の提唱者である。

このチューナブルフォトニック結晶というのは, フォトニック結晶の構造周期, 結晶構造, 次元性, 充填率, 屈折率等の動的な制御により, フォトニックバンドギャップをダイナミックに制御, スイッチしようとするもので, これにより, 多様で, 高度な種々



\*Katsumi YOSHINO  
1941年12月10日生  
昭和39年大阪大学工学部電気工学科卒業  
現在, 大阪大学大学院工学研究科電子工学専攻, 教授, 工学博士, 電子工学, 電子物性, 電気電子材料, 電子・光デバイス, フォトニック結晶, 液晶  
TEL 06-6879-7757  
FAX 06-6877-3542  
E-Mail yoshino@ele.eng.osaka-u.ac.jp

の新しい応用の可能性が生まれてくる。

本研究では、導電性高分子微粒子、機能色素・分子および  $\text{SiO}_2$  合成オパール等からなる電子的・光学的活性を有するチューナブル・フォトニック結晶を提案し、設計・創製する。チューナブルフォトニック結晶においては導電性高分子、機能色素分子の動的機能制御が可能であることから、通常のフォトニック結晶には見られないフォトニックバンドギャップ等光学的性質の動的制御が可能(チューナブル)であり、同時に浸透ネットワーク界面を導入することが可能であるため、従来の常識を打ち破る新しい光・電子機能性が期待される。すなわち、本研究では合成オパールおよび導電性高分子などからなるチューナブル・フォトニック結晶の理論的設計、創製およびその性質の能動的制御と新規概念のデバイスの開拓を目標とする。

## 2. フォトニック結晶とその作製及び応用

フォトニック結晶は光の波長程度の長さの周期構造を有しており、その中ではある波長範囲の光の存在が許されないフォトニックバンドギャップ、フォトニック禁止帯が現れる。このフォトニックバンドギャップの起源は固体結晶中での電子に対するバンドギャップ、禁止帯、即ち、特定のエネルギー範囲の電子の存在が許されないバンドギャップの起源と同じ様に説明する事ができる。

即ち、固体結晶で原子がある周期で規則正しく配列している時、電子に対する禁止帯が現れるのは、電子を波と見た場合の、即ち、ドブロイ波としてみた波長が丁度原子間隔程度の大きさであるからである。波の波長  $\lambda$  と周期構造の周期長  $L$  が同じ程度である場合、例えば  $\lambda = 2L$  の場合、波はブラッグ反射により反射されるが、反射により逆方向に進もうとした波はまた反射を受け、結局、前にも後ろにも進めないことになる。従って、一次元的な周期構造である場合は前にも後ろにも進めない事になるが、三次元的に周期構造である場合は前後、左右、上下、即ち、 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  軸いずれの方向にも波は進めない事になり、これはもはや波として存在不可能であることを意味する。その結果が禁止帯をもたらしていると解釈される。

実際には真にフォトニックバンドギャップが現れるためには屈折率  $n_1$ 、 $n_2$  の二つの物質が周期構造を形成している時、 $n_1/n_2 > 2$  が必要となる。また、

占有率、即ち周期  $L$  と一方の物質の占める長さ  $a$  の比  $a/L$  にも真のフォトニックバンドギャップが現れるためには条件がつく。

これらの条件が完全に満たされず真のフォトニックバンドギャップが現れない場合でも、特定の方向にある波長範囲の光の伝搬が不可能となるストップバンドなどが現れて興味深い性質が発現する。

更に、興味深いのは完全な周期構造をとっているフォトニック結晶に欠陥が導入された場合である。即ち、フォトニック結晶の場合も欠陥の導入によりバンド端がフォトニックバンドギャップ中に裾をひき、バンド端近傍、バンド内に局在状態が出現する。従って、電子が局在状態に捕獲、トラップされるのと同様、光が局在状態にトラップされることとなる。これは光が局在してある所に留まる事を意味する。従って、どの様な欠陥を、どれだけ、どの様な形態で導入するかによってフォトニック結晶に様々な可能性をもたらすことができることがわかる。即ち、フォトニック結晶実現のためには、まず第一ステップとして規則的な周期構造を形成する方法を確立し、ついで制御された欠陥を導入する技術を開発することである。

三次元的周期構造のフォトニック結晶を作成する方法としては、半導体素子、デバイス作製のため開発された微細加工技術、積層技術など様々な方法があるが、このうちいくつかを概念的に説明する。

- (a) まず平板上に屈折率  $n_1$  の突起を光の波長程度の周期で形成する。ついで屈折率  $n_2$  の物質を積層してコーティングし、その表面を平面状に成型する。再びその上に屈折率  $n_1$  の物質の突起を形成し、それをまた  $n_2$  の物質でコーティングするという過程を繰り返す方法である。
- (b) 平板上に屈折率  $n_1$  の突起を周期的に形成し、その上にやはり光の波長程度の厚さで屈折率  $n_2$  の物質を積層する。この場合、堆積条件をうまく設定すれば下の形状をそのまま保った形で次の層が形成される。これを繰り返せば三次元周期構造が形成される。
- (c) 基板を、電気化学的或いは化学的、または光、電子或いはイオンビーム照射などにより局所的に穿孔し、この穿孔されたピットが周期構造をなすようにする。この穿孔部を第二の物質で埋め平坦な表面とした後再び次層を積層し、その新しい積層に周期的に穿孔を繰り返すという方

法である。

(d) 光の波長程度の大きさの粒子を構造単位として、これを積み上げる方法である。この粒子の大きさと形状、積み上げ方、また単一の種類の粒子とするか複数の種類の粒子とするかによって様々なタイプのフォトニック結晶が可能である。また、複数の種類の粒子とする場合、その配列の仕方によって、制御されたフォトニック結晶への欠陥の導入も可能である。

(e) 例えば、(d)の方法などで空隙を有するフォトニック結晶を作製し、この空隙に第二の物質を挿入する、或いは更に元の物質をエッチングなどにより取り去る方法がある。この場合、最初のものレプリカが得られたことになり、これもフォトニック結晶となる。

ここで、筆者ら自身が主に取り扱っているのはこの内(d)及び(e)の方法である。

フォトニック結晶中では光は単に通過する存在ではなく、局所に閉じこめること、導波することが可能となり、その結果光と粒子、原子、分子との相互作用に全く新しい側面が現れ、従来の常識を越えた多様な機能発現が可能となると考えられる。また、フォトニック結晶のうち粒子を積み重ねる形で形成された場合、逆にナノスケールの規則的に配列された空隙が存在することから、フォトニック結晶としての特徴の応用のみならずナノスケール空間を生かした新しい応用も可能となる。

さて、多様な応用の中からいくつかだけを選んでもう少しだけ詳しく述べる。

#### (a) 無しきい値レーザー

フォトニック結晶中に発光に関与する原子、分子が導入されている場合、励起状態からの自然放出による発光が、フォトニックバンドギャップ内の波長に相当する光であれば、その様な光の存在は許されない。結果的に自然放出が出来なくなり励起状態の寿命は極めて長くなる。従って、どんなに弱い励起であってもどんどん励起状態が蓄積されるため、容易に逆転分布が生じレーザー発振が無しきい値で起こる事になる。

#### (b) 高効率太陽電池

フォトニック結晶中のナノスペースに光電変換材料を導入する、或いは光電変換材料そのものでフォトニック結晶を作製した場合、光により生成された励起子の寿命は、それからの発光波長がフォトニッ

クバンドギャップ内にある場合、極めて長くなり、結果的に励起子は効率よく P/N 接合部或いは D/A 界面まで到達し効果的に分離して電荷分離が起こり、太陽電池としての効率が大幅に向上する可能性がある。

#### (c) 非線形光学効果

非線形光学効果の諸過程には基底状態—励起状態間の遷移等が深く関わっている。励起状態からの自然放出の確率の変化は非線形光学効果に強く影響を与える。従って、フォトニック結晶の場においては種々の非線形光学効果に基づく現象が顕著となり、弱い光においても非線形光学現象の利用が可能となる。

#### (d) 光トランジスター

フォトニック結晶の場では自然放出の確率がコントロールできることから、ある条件を選べば、例えば、励起強度と逆転分布の関係があるしきい値でパッシブからアクティブの状態へ転移するので、これを利用する光トランジスターが可能となる。

#### (e) 光回路

フォトニック結晶に制御された欠陥を導入すれば、光を局在化させることもまた欠陥に沿って光を導波する事も可能となるので、光の波長程度の曲率で方向を変えることも可能な様々な光回路が作製できる。

#### (f) 光記録、光記憶

フォトニック結晶の場では光を局在化させることができるので、様々なタイプの光記録、光記憶素子が可能となる。

このほか、多様なフォトニック結晶の応用が期待されるが、特に、ナノスケールの微細空隙の存在は、ナノスペースサイエンス、ナノスペーステクノロジーと呼ぶにふさわしい新しい分野の創生をももたらす。

### 3. 研究成果

当国際共同研究を始めてまだ1年余りであるが、既に種々の興味深い成果を得始めている。この国際共同研究として既述の6名の研究者グループでこれ迄に得ている主な成果の一部を簡単に紹介する。

特に初年度は、人工オパールを基本として、可視域あるいは近赤外域で完全な三次元フォトニックバンドギャップを形成するような材料、チューナブルフォトニック結晶を実現するのに適した材料の創製、新しいフォトニック結晶創製方法の確立を目指して実験研究を行うと共に、理論的な検討も行った。さ

らに、これら新しいフォトニック結晶に特徴的な電子的、光学的、磁氣的性質の解明とそれらを用いたエレクトロニクス、オプトエレクトロニクスへの全く新しい応用の可能性を探求した。

(1) 2シリカ  $\text{SiO}_2$  のナノスケールの微粒子を重力などにより積み上げていきコロイド状に結晶を形成し、これを熱処理することなどによって粒子間を接着或いは融着させた。次に、更に高温で熱処理をすることによって機械的に強固なものとした。図1は、

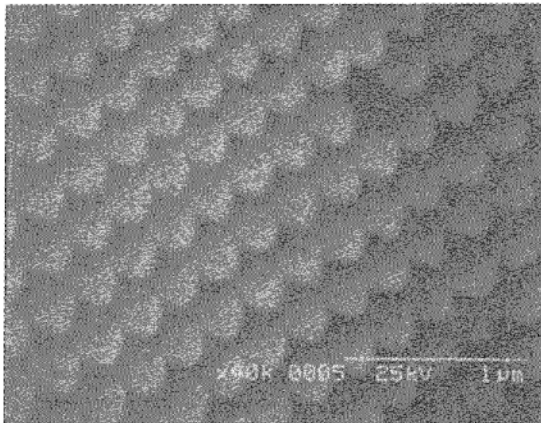


図1 直径250nmの $\text{SiO}_2$ シリカ球から作製した人工オパール走査電子顕微鏡写真

このようにして作製された径250nmの $\text{SiO}_2$ 微粒子から形成された結晶の例であるが、規則的な周期構造が形成されていることがわかる。この様な周期構造の結果、この結晶は角度によって色が微妙に変化する非常に美しい虹色を呈することになる。その為、

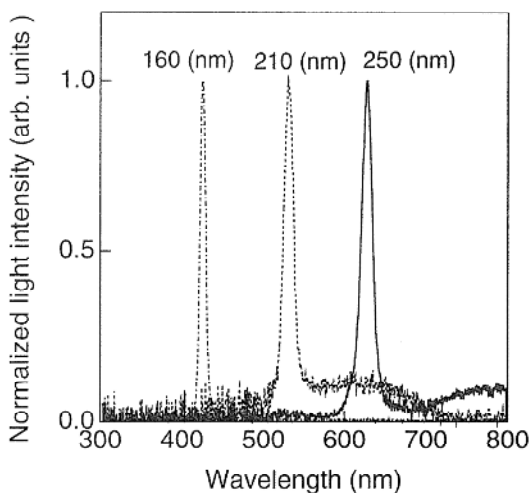


図2 種々の直径のシリカ球から作製した人工オパールの反射スペクトル

これは人工オパールとも呼ばれ得る。また、この規則正しい周期性を反映して、図2に示すように反射スペクトルにシャープな回折ピークが現れる。この回折ピークの波長から評価した周期を用いて逆算した粒子径は走査電子顕微鏡での実測値と極めて良い一致を示す。

図2には半径160nm及び210nmの $\text{SiO}_2$ を用いて同様な手法で作製された試料の回折ピークも示してあるが、やはり走査電子顕微鏡から得られる周期構造と極めて良好な対応を示す。その他様々な径の粒子から結晶を作製した。尚、250nm、210nm、160nmの粒子から作成された試料は、その色合いから赤色オパール、緑色オパール、紫色オパールと呼ぶこともできる。また、プラスチック小球を積み重ねることによっても同様に結晶を作製した。

(2) フォトニックバンドギャップの制御を目指して、人工オパールの周期性を制御する方法の一つとして熱処理法を提案し、その処理温度、時間、圧力等による周期構造の変化を反射スペクトルの解析や直接的な走査電子顕微鏡観察により明らかにした。また、様々な媒質を浸透した際の反射スペクトルの変化も調べた。

図3は熱処理時間による反射スペクトルの変化である。900℃以上の熱処理では、反射スペクトルは熱処理時間に依存し、時間の増加にともなってブロード反射ピークの位置は短波長側にシフトしており、人工オパールの周期構造の長さが熱処理とともに減少したことが確認された。この事は、走査電子顕微

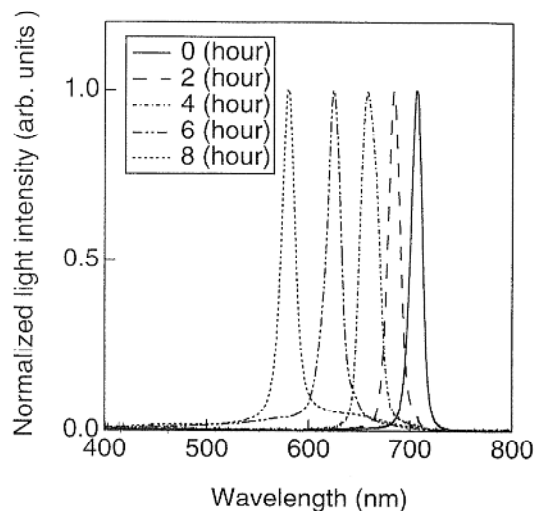


図3 人工オパールの反射スペクトルの熱処理時間依存性。熱処理温度：1,000℃

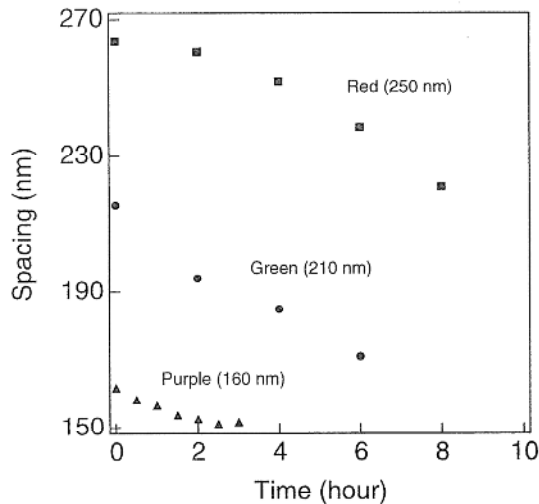


図4 熱処理人工オパールの実効的格子周期の熱処理時間依存性

鏡による直接観察によっても確認された。このことから、フォトニック結晶の実効的な格子周期が熱処理によって制御可能であり、図4に示すように150 nm~260nmの広い範囲で任意の値を設定することが可能であることが明らかとなった。更に、熱処理によってオパール空隙の大きさも制御可能であり、このことは、他の物質の浸透の程度が制御可能であることを示している。

(3) 種々のサイズのSiO<sub>2</sub>から作製した人工オパールを出発物質として、それらに種々の物質を浸透させるなどの手法により、種々の周期構造、レプリカ等を利用する新しいフォトニック結晶作製法が開発された。すなわち、SiO<sub>2</sub>等のナノサイズ球を規則的に配列させた人工オパールを作製し、その中に二次物質を溶融法、化学的、電気化学的手法、気相法等の方法により浸透させる。その後SiO<sub>2</sub>を取り除くことにより、任意の二次物質からなるフォトニック結晶がオパールのレプリカとして容易に作製可能となる。勿論、このレプリカ自体様々な興味深い特性を示し、種々の用途に利用可能であるが、更に、このレプリカから同様の手法を用いることにより第二、第三のレプリカを作ることが可能である。この手法は、本研究ではじめて提案された全く新しいフォトニック結晶の創製方法である。

即ち、チューナブルフォトニック結晶を実現する上で最適な、人工オパールを基にした材料の探索を行った結果、人工オパールのレプリカを作製する鋳型法を提案した。これにより、ポリスチレン、ポリメチルメタクリレート、フェノール樹脂といった様々

な高分子や、カーボン系物質等からオパールレプリカを作製することに成功している。勿論、無機半導体や金属のオパールレプリカの作成も可能である。例えば、ダイヤモンド、グラファイト、グラッシーカーボン等のカーボン系物質をポリプロピレン(C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>)を用い、chemical vapor法により人工オパールナノサイズ空隙中に浸透させ(chemical vapor infiltration (CVI)法)、その後SiO<sub>2</sub>を取り除くことにより、グラファイト系の金属フォトニック結晶、ダイヤモンドオパール、カーボンナノフォームオパール等の、全く新しいカーボンレプリカを作製することに成功している。このカーボンレプリカは、元々の人工オパールのSiO<sub>2</sub>部分を空隙に置き換えた形の“空隙型”フォトニック結晶であり、フォトニックバンドギャップ形成に最も好都合な形態である。また、電気伝導の測定から100-120mΩ・cmの低い抵抗を示すことも明らかとなり、いわゆる金属フォトニック結晶が得られた。この金属フォトニック結晶は、光学的な応用以外にも、様々な物質を電気化学的に浸透させるための多孔質マトリックスとしての応用も期待できる。

一方、液相浸透法でポリ(p-フェニレンビニレン)レプリカ、フェノール樹脂レプリカ等も作製されている。更に、このフェノールレプリカを熱処理することにより、その対称性を損なうことなく全体を30%以上収縮させることが可能であり、またそのとき同時にグラファイト化も進行することを見出した。これによりブラッグ反射波長を赤から青まで制御することが可能となり、フォトニック結晶の優れた熱制御性が示されたことになる。

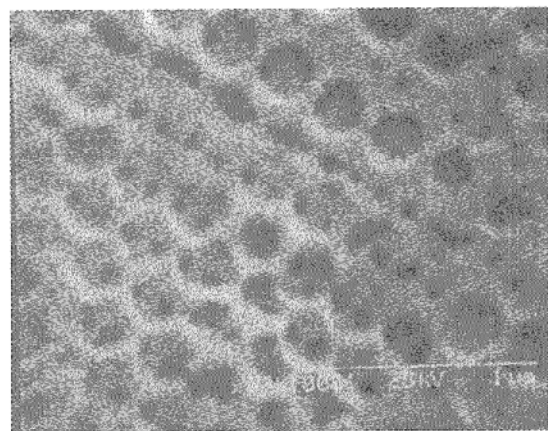


図5 フェノール樹脂を人工オパールに浸透させることにより作製したレプリカを熱処理して得られたカーボンフォトニック結晶の走査電子顕微鏡写真

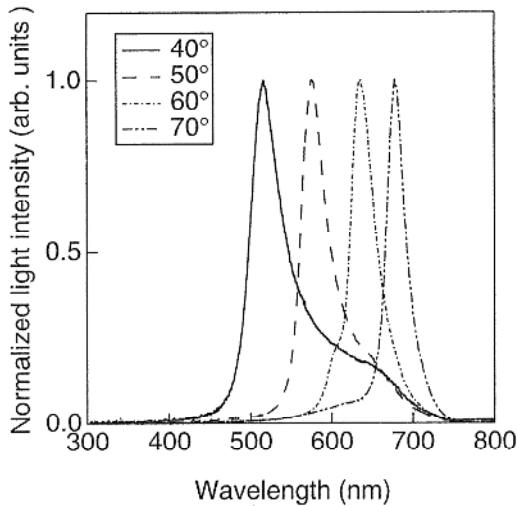
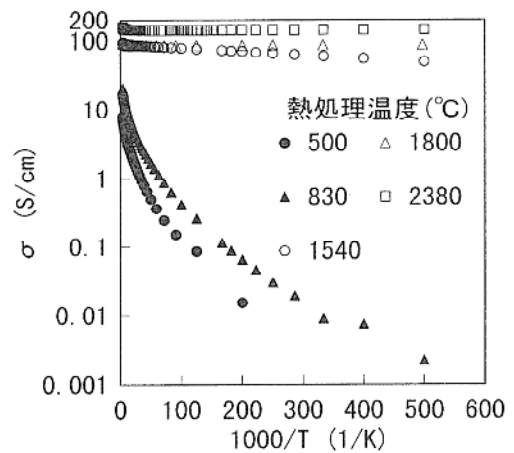


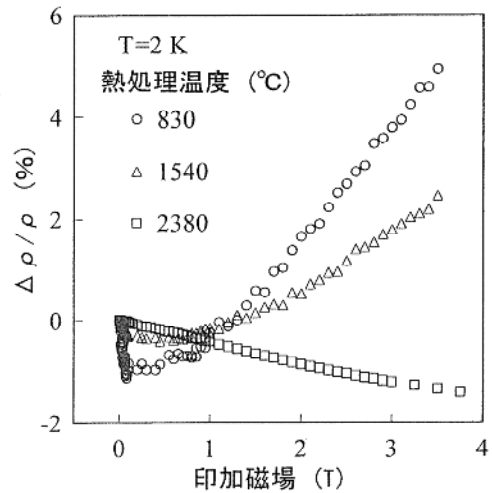
図6 フェノールオパールレプリカの熱処理により作製したカーボンフォトニック結晶の各入射角における反射スペクトル

図5はフェノール樹脂を浸透させて後SiO<sub>2</sub>をフッ酸で除去するという方法で得たレプリカを熱処理することによって得たカーボンフォトニック結晶である。図6は反射スペクトルであり、明瞭なピークが見られ、これに応じて特徴的な色を呈する。この色は浸透させる物質の屈折率によって変化し、一種のソルバトクロミズムを呈する。また、図7はその電気伝導の温度依存性と磁気抵抗であり周期的な多孔性構造を反映した特徴的な特性が得られている。

(4) 一方これと平行して理論的な検討も進めた。即ち、フォトニック結晶とその禁止帯幅の構成物質の種類や周期等に対する依存性を解明するために、plane wave expansion法を用いてバンド計算を行った。また、バンドエッジにおける超放射やレーザー発振挙動を明らかにするために、二準位モデル(Dicke model)を採用した。更に、非線形光学ギャップソリトンの存在を調べるために、Maxwell-Blochモデルを採用した。SiやGe等の高屈折率物質を人工オパール内に浸透させて作製したオパールレプリカにおいて完全な三次元フォトニックバンドギャップが実現可能であることが、詳細な理論解析により示された。また、このバンド計算によって、SiやGeを浸透させる前にオパールを熱処理することにより、隣り合うSiO<sub>2</sub>球間が融着して部分的に結合することによりフォトニックバンドギャップの大きさが1.5倍も増大することが明らかとなっている。更に、SiやGeの不完全な浸透、すなわち、オパー



(a)

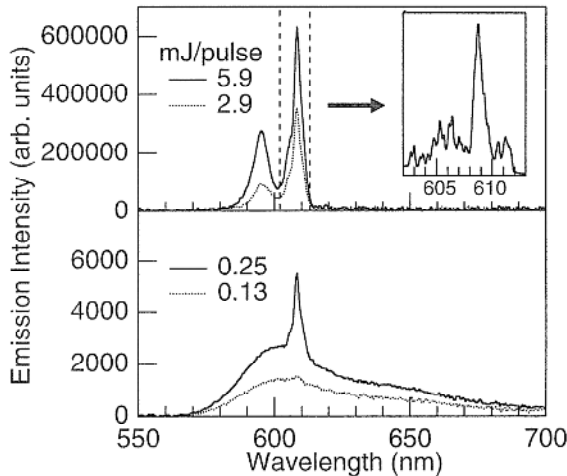


(b)

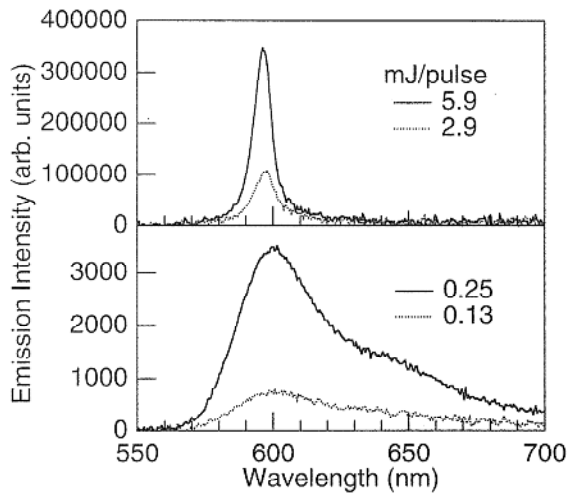
図7 フェノールオパールレプリカの熱処理により作製したカーボンフォトニック結晶の(a)電気伝導度の温度依存性と(b)磁気抵抗

ル内の空隙の約8%が高屈折率物質で満たされた場合に、フォトニックバンドギャップの大きさが2倍になることも示された。この事は、一般に、オパール内に完全に浸透させることが困難であることを考えると、極めて実用的に重要な知見である。

一方、フォトニックバンド端近傍で共鳴光学遷移を起こす二準位原子系からの協同発光に関する理論的解析から、バンド端近傍で極めて低いしきい値のレーザー発振や超放射が発現することが明らかとなった。これは、輻射遷移が非マルコフ過程によることに由来しており、たとえ共振器構造が存在しなくても、原子から出た光はその原子の近傍に局在するた



(a)



(b)

図8 MDDOPPVを浸透した人工オパールの蛍光スペクトルの励起光強度依存性. 媒質の屈折率 $n=1.50$ の場合にはレーザー発振が観測されるが(a),  $n=1.45$ の場合には発振は観測されない(b).

め、長時間のメモリー効果が発現する。この事は、直接的な光と原子との結合状態の実現を意味することで興味深い。

(5) 人工オパールに種々の有機分子、高分子を浸透させ、その反射スペクトル、吸収スペクトル、蛍光スペクトル、誘電率、電気光学効果等を測定した。具体的には、フォトクロミック色素、蛍光色素、導電性高分子、液晶などを浸透させた。特に、高強度光励起時の発光スペクトルを測定するために、ナノ秒あるいはピコ秒のNd-YAGレーザーの二倍高調波、三倍高調波を採用し、高分解能CCDマルチチャンネル測光システムで観測を行った。

特にレーザーの研究にはOOPPV (poly (2,5-dioctyloxy - p-phenylenevinylene)), MDDOPPV (poly (2-methoxy-5-dodecyloxy - p-phenylenevinylene))やローダミン6Gを浸透した人工オパールが用いられた。この導電性高分子や蛍光色素の浸透によって反射スペクトルの回折ピーク的位置は変化せず、これに幅広い蛍光ピーク重量することが明らかとなった。このことは、OOPPV, MDDOPPVやローダミン6Gが人工オパールの空隙によく浸透していることを示している。

MDDOPPVを浸透したオパールにレーザー光を照射した時の発光スペクトルの測定を行った。照射レーザー光の強度を増大させていった場合、図8に示すようにはじめは、元々の蛍光スペクトルのピーク強度が増大しスペクトルの狭鋭化が観測された。更に、励起光強度を増やしていくと、より長波長側の610nm付近に新しい鋭いピークが現れ、ある励起光強度においては、鋭いピークからなる微細構造スペクトルが観測された。これらの結果は、オパール内である種のフィードバック効果が働き、レーザー発振を起こしていることを示している。また、この発光スペクトルは、MDDOPPVをオパール内に浸透させる際に用いている溶媒の屈折率に依存しており、図に示しているように屈折率がSiO<sub>2</sub>の屈折率と同じ時はレーザー発振は抑制される。同様な現象は、ローダミンを浸透させたオパールにおいても観測された。さらに、強励起時の鋭いスペクトルはオパールのSiO<sub>2</sub>球の径、すなわち周期に依存することが明らかとなった。即ち、緑黄色蛍光を発するMDDOPPVはグリーンオパールで、赤色蛍光を発するNK-3483はレッドオパールで鋭いレーザー発振が見られた。これらの事からも、フォトニック結晶の周期構造がフィードバックに重要な役割を果たしていることが示唆される。尚、オパール内でのランダム散乱が浸透オパールにおけるレーザー発振に寄与している可能性も考えられる。

レーザー発振に関しては、ピコ秒レーザーによりローダミン色素、導電性高分子であるRO-PPV等を用いてさらに詳細に研究が進められ、極めて低い光励起でまず、ASE(amplified spontaneous emission; 増幅自然放出)が起こり、続いて鋭いレーザー発振が生ずることを見出している。また、この場合も、レーザー発振スペクトルに多くの鋭いピークからなる微細構造スペクトルを見出し、その励起光強

度依存性等からフォトニック結晶中でのコヒーレンな散乱過程による一種の分布帰還光回路が形成されているものとして説明している。この事は、完全なフォトニックバンドギャップが実現されていない場合でもフォトニック結晶中では極めて低いしきい値のレーザー発振が可能であることを示すものである。また、高分子レプリカを用いてもロードミン6Gや導電性高分子を浸透させ inhibited spontaneous emission(自然放出の抑制)、レーザー発振を実証している。

我々は、異方性フォトニック結晶なる概念も提案した。これを実現する一つの方法は、光学的に異方性を持つ材料を浸透させることである。その具体的な例として、我々は、人工オパール内への液晶分子の浸透を提案し、また理論的解析も進めている。オパール内に浸透された液晶は、従来のサンドイッチ素子とは、誘電的性質、光学的性質、電気光学応答等において特異な挙動が観測された。例えば、人工オパールのナノサイズ空隙に浸透されたネマチック液晶の誘電分散周波数は、バルクにおける値に比べて約一桁高くなった。このことは、液晶分子とナノスケール空隙の界面との強い相互作用に起因するものであると考えられる。

尚、液晶中に分散した  $\text{SiO}_2$  微粒子を三次元的に自己集積させる事によるフォトニック結晶、液晶-フォトニック結晶の作製も行っている。

## 5. ま と め

真の三次元フォトニックバンドギャップを発現させるために、実験・理論の両面から種々の検討を行うとともに、フォトニックバンドギャップを有し、更にそれが制御可能なチューナブルフォトニック結晶実現のための手法として、人工オパールを鋳型として用いたレプリカオパール法を提案して、種々の高分子オパールやカーボンオパールを実現した。また、オパールの周期構造を制御するために熱処理が極めて効果的であることを示し、熱制御チューナブル

フォトニック結晶の可能性も示唆した。一方、浸透させる液体の屈折率を変える事によりオパールの色が大きく変化する事を見だし、化学制御チューナブルフォトニック結晶の可能性を示した。更に、人工オパールのような機能性分子、高分子を浸透させることにより、低しきい値レーザー発振や異方性フォトニック結晶といった極めて特徴的な現象を見出した。

今後、より屈折率の大きな物質で三次元周期構造を作製し新しいフォトニック結晶を開発すると共に、特に厚さ数ミクロン、数十ミクロンの薄膜結晶を作製し、電圧によるドーピング、分子配向の変化などによる電界制御フォトニック結晶の実現とそのデバイス化を進める。

## 謝 辞

本研究はNEDOの支援のもと国際共同研究として進められているものであり、その成果の一部をここに述べたが、共同研究者である Dr. A. A. Zakhidov, Dr. R. H. Baughman, Prof. S. John, Prof. Z. V. Vardeny, 更に国内共同研究者、大阪大学尾崎雅則助教授、藤井彰彦助手、Dr. S. Lee, 大阪大学大学院学生梶井博武氏、立原聡氏、川岸義明氏らに謝意を表したい。

## 参 考 文 献

- 1) S. John : Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 2486.
- 2) E. Yablonovitch : Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 2059.
- 3) K. Yoshino *et al.* : Jpn. J. Appl. Phys. 36 (1997) L714.
- 4) 吉野勝美 : 生産と技術 50 (1998) 26.
- 5) A. A. Zakhidov *et al.* : Science to be published.
- 6) K. Yoshino *et al.* : Jpn. J. Appl. Phys. 37 (1998) L1187.