

# 「3次元フォトニック結晶の作製、解析法、デバイス展開の総合研究」

(H11年度～H13年度、第I期)

研究代表者: 川上彰二郎(東北大学ほか7機関)

## 研究の目標

### 1. プロジェクトの目指すもの

3次元フォトニック結晶の持つ「異方性」「分散性」「フォトニック・バンドギャップ」という特異な光の伝搬特性を利用した、革新的な光デバイスの創出。

(第I期の目標: 開始当初から3年間)

- ・バルク3次元フォトニック結晶の利用技術
- ・フォトニック結晶の形状自由度の向上

(第I期後半～第II期の目標)

- ・形状自由度を活かした面内型革新光デバイスの開発(インライン共振器波長フィルタ, 分散マシナリ, 無損失分岐・曲りetc)
- ・フォトニック結晶を構成する材料の自由度向上

### 2. 目標達成のための技術的諸側面

- 1) 自由な形状、材料系のフォトニック結晶を実現するためのプロセス技術の研究。
- 2) 種々の構成材料や構造をもつフォトニック結晶及び応用デバイスの解析技術の研究。
- 3) フォトニック結晶を利用した面垂直型、および導波路型デバイスの創案、作製。

### 3. 本グループの特徴

「3次元フォトニック結晶は作製が困難で形状自由度が低い」と考えているグループが多い。本Pjでは自己クローニング法と呼ぶ独自の作製プロセスを確立し駆使することにより、実用的な応用デバイスへの展開を行なっている。

## State of Art (光波帯の実験的成果を主に)

本Pjが主導

本Pj以外の有力な諸グループ

(Pj開始時点)

- ・自己クローニング法
- ・偏光分離素子
- ・スーパープリズム

- ・3次元完全PBG (Layer-by-layer法)
- ・ピラー列導波・発光構造

(2001年秋)

- ・格子変調自己クローニング
- ・モード径が高NA光ファイバと同等な導波路(次世代PLC)
- ・スーパープリズム波長選択素子
- ・偏光分離素子(工業化へ移行)
- ・拡張自己クローニング法3次元完全BG

- ・SOI上のスラブ導波路 (次々世代PLC)

- ・電流注入2次元レーザ
- ・光励起によるスラブ上の点欠陥レーザ

<新領域への拡張(第II期への手がかり)>

- ・スミス・パーセル効果
- ・電磁界理論への寄与・解析ツールの開発
- ・世界最小級ピラー型レーザ

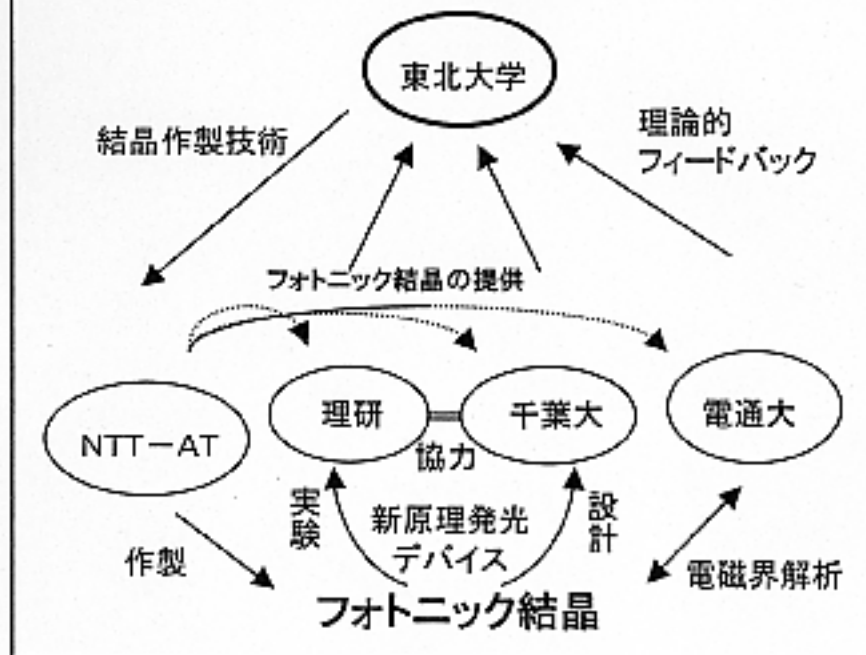
[ Pjの一貫性と柔軟性 ]

プロジェクト開始当初、フォトニック結晶の作製法は世界的にも確立されておらず、本命の技術も明らかでなかった。このような中、本Pjでは自己クローニング法を核とした結晶作製技術、及びそれに基づくデバイス技術の開発を最大の目標に定め、研究を開始した。

その後研究分野を取り巻く状況は大きく変化し続けているが、本Pjでは目標を順調に達成しているだけでなく、当初予想していなかった成果も生み出している。

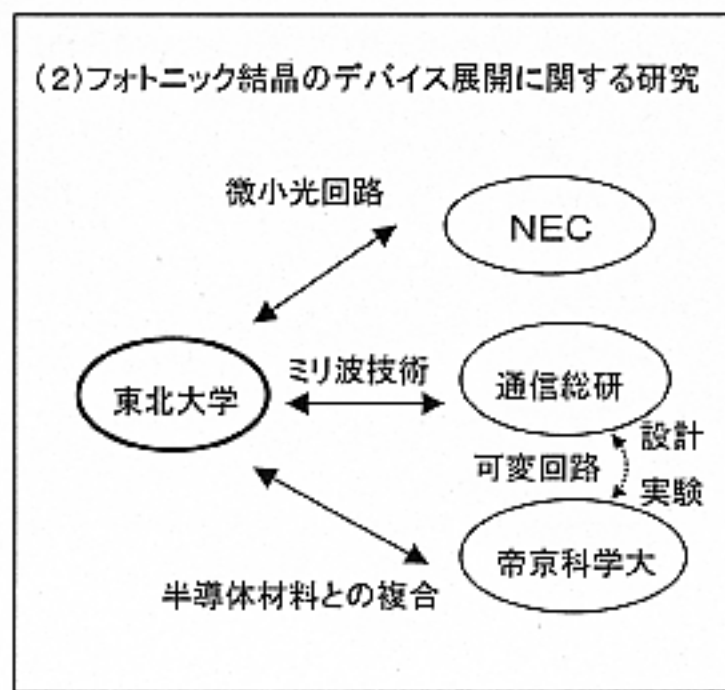
「3次元フォトニック結晶の作製、解析法、デバイス展開の総合研究」の研究体制

(1) フォトニック結晶の作製技術と数値解析技術に関する研究



作製技術へのフィードバック  
デバイス用結晶の作製仕様

(2) フォトニック結晶のデバイス展開に関する研究



フォトニック結晶の提供

フォトニック結晶による  
革新的デバイスの創出

3次元フォトニック結晶の作製、解析法、バイアス展開の総合研究 所要経費一覧

研究項目	担当機関	研究担当者	所要経費(千円)			
			H11	H12	H13	計
1. フォトニック結晶の作製技術と数値解析技術に関する研究						
(1) ベーイズベクトル法によるフォトニック結晶作製技術と完全バンドギャップに関する研究	東北大学 未来科学技術共同研究センター	川上 彰二郎	63,280	99,486	81,893	244,659
(2) 金属含有3次元フォトニック結晶作製技術とその薄膜偏光子へのデバイス展開に関する研究	NTTアドバンステクノロジー	金子 陸司	92,024	67,991	32,282	192,297
(3) フォトニック結晶の光学特性解析と超高速光技術に関する研究						
(イ) フォトニック結晶の光学特性解析と超高速光技術に関する研究	理研フォトデバイス研究センター	瀬川 勇三郎	16,375	5,940	27,558	49,873
(ロ) フォトニック結晶の群論を用いた理論的解析に関する研究	千葉大学 工学部	大高 一雄	3,968	2,726	3,972	10,666
(ハ) フォトニック結晶の精密なバンド計算に関する研究	電気通信大学	大淵 泰司	4,050	4,002	3,976	12,028
2. フォトニック結晶のデバイス展開に関する研究						0
(1) 機能性物質を含むフォトニック結晶の特性解明に関する研究						0
(イ) 機能性物質を含むフォトニック結晶の特性解明に関する研究	独立行政法人 通信総合研究所	井筒 雅之	15,630	9,450	7,578	32,658
(ロ) フォトニック結晶と機能性半導体材料等との複合化に関する研究	帝京科学大学	永沼 亮	4,858	8,285	8,875	22,018
(2) フォトニック結晶を用いた微小光回路の創成に関する研究	NEC光・無線デバイス研究所	宇治 俊男	47,153	81,894	52,143	181,190
(3) フォトニック結晶デバイス作製技術とデバイス機能に関する研究	東北大学 電気通信研究所	大寺 康夫	2,372	7,292	18,528	28,192
3. 研究推進	文部科学省 研究振興局		434	598	598	1,630
			250,144	287,664	237,403	775,211

## 研究目標の概要・成果の概要<課題全体>

課題名(研究代表者) : 3次元フォトニック結晶の作製, 解析法, デバイス展開の総合研究  
(川上彰二郎)

本課題のテーマである「フォトニック結晶」は極めて進展の速い, 注目度の高いテーマであって, 研究開始時点と現在では世界レベルで研究の重点が大きく流動している(「完全バンドギャップ特性」以外の比重の高まり, 従来法の3次元加工における困難性の認識の広まり+「2次元で代用」の拡がり, など)。

本プロジェクトにおいては, テーマの基本的なアイデンティティ(3次元フォトニック結晶, 自己クローニングによる作製, デバイス展開の重視)を重点的に推進し, それに関連する分野のより基礎的・長期的なテーマも取り入れるという方針を採った。大まかには, 東北大・NEC・NTT-ATがデバイスや応用を, 理研・千葉大・電通大・通総研・帝京科学大が基礎的テーマを担当している。

### 【研究目標の概要】

#### 発足当初の設定目標(第I期)

##### ■ フォトニック結晶作製技術の開発・数値解析技術の開発

東北大, NTT-ATが作製センターとなるよう, それぞれ作製装置を導入。

- (1) 形状自由度拡大: 従来の自己クローニング法に反応性エッチングを加えた複合プロセスにより, 周期構造の単位セルの形状制御性を向上。また自己クローニング法で格子の定数や方位に変調を導入できることを実証する(東北大)。
- (2) 完全バンドギャップ: 自己クローニングフォトニック結晶に穿孔加工を行なうことで, 完全バンドギャップを有するフォトニック結晶を実現する(NTT-AT, 東北大)。
- (3) 高品質成膜: ECRスパッタ法とマグネトロンスパッタ法の組み合わせプロセスを開発し, 高品質, 大面積のフォトニック結晶作製を目指す(NTT-AT)。
- (4) 可視紫外域透明材料の積層と発光物質の導入: 3種の材料を積層可能な装置により, 可視紫外域用フォトニック結晶の作製と発光物質の導入を目指す(理研)。
- (5) 解析ツール高効率化と作製へのフィードバック: (群論を用いた理論解析: 千葉大, FDTD法: 東北大, 平面波展開法: 電通大)

##### ■ デバイス展開

- (6) フォトニック結晶基板上に光導波路, 光合・分波器, 光遅延線路, 分散補償器などを実現し, 第II期でこれらを集積化した従来の1/1000の大きさの光回路を実現に繋げる(NEC)。
- (7) 異方性, 分散, バンドギャップ等の効果を利用する新機能デバイスの創案と試作(東北大)。
- (8) 光領域, ミリ波帯においてフォトニック結晶構造を作成し, 半導体や有機材料などからなるフォトニック結晶の基本的特性の解明を進める(CRL)。
- (9) 発光素子へ応用するため, 半導体材料とフォトニック結晶との複合化を試みる。また, 素子作製後に, フォトニック結晶をトリミングする技術に挑戦(帝京科学大)。



**研究遂行中に生じた新たな目標** 項目のみ記し、詳しくは【研究成果の概要】に譲る。

①基準フォトニック結晶中の電磁界の簡潔で厳密な理論

②スミスパーセル効果

### 【研究成果の概要】

当初目標は順調に進行しており一部は完了、工業化へ向かっている。推進中に見出された新たな目標に向かっても成果が得られている。他方、随伴的テーマのうち少数のものは、より長期的な取り組みの必要性が分かった。

### 当初目標に沿う進展（番号は設定目標の項と対応）

#### ◆ フォトニック結晶作製技術の開発・数値解析技術の開発

(1-a) 形状自由度の向上：導入したスパッタ・反応性エッチング複合装置により新たなプロセスを開発することで、膜厚変調構造（凹凸と同時に膜厚が周期的に変化する構造）を実現し、形状自由度の向上を実証した。面内伝搬型デバイスへの応用が広がった（東北大）。

(1-b) 格子変調技術：フォトニック結晶で格子の定数や方位を変化させることで等価屈折率を制御できること、自己クローニング法で作製ができることを実証した。約100周期という十分な厚さに渡って自己クローニング効果を持続させる安定な成膜技術を確立した（東北大）。

またSi/SiO<sub>2</sub>系の格子変調型結晶によるチャネル導波路を作製し、従来のフォトニック結晶導波路に比べて約1桁小さい伝搬損失4 dB/mmを得た。本導波路は従来のバンドギャップ閉じこめ型の導波路より、機能性付加、伝搬・結合損失の低減、などの長所を持ち、実用性が高い。現在までに、本技術を利用した面内伝搬型応用素子の試作、評価開始した。（東北大）。

(2) 3次元完全バンドギャップ構造：膜厚変調2次元フォトニック結晶に、面垂直方向に穿孔加工することで完全バンドギャップが形成されることを理論的に明らかにした。また、Si/SiO<sub>2</sub>多層膜を高アスペクト比でドライエッチングするプロセスを開発し、積層方向に4周期の完全バンドギャップ構造を初めて実現した。自己クローニング技術に基づく完全バンドギャップ応用光学素子の実現可能性を実証した。（東北大、NTT-AT）

(3) 高品質成膜：ECRスパッタ法とマグネトロンスパッタ法からなる自己クローニングプロセスを開発し、高品質、大面積のフォトニック結晶作製を可能とした（NTT-AT）。

(4) 可視光波長域にて低分散、低損失のTa<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>を用いて、自己クローニング法が可視光寸法まで拡張可能なこと、次世代光ピックアップ素子にフォトニック結晶が最適であることなどを実証した。また波長400nmは、現時点でフォトニック結晶としての世界最短波長である（東北大）。

(5) 高効率解析ツールの開発：

- ・ 群論を用いた理論解析（千葉大）：誘電体球からなるフォトニック結晶のバンド計算には、群論を適用することにより対称性に合致した基底関数系を作り、行列の次元を従来の1/10まで低減し、高効率化を達成した。
- ・ FDTD法（東北大、NEC）：FDTD法に基づきバンド構造、バルク結晶の伝搬特性、導波路の伝搬特性を計算できるツールを開発し、素子設計に活用した。
- ・ 平面波展開法（電通大）：逆行列法による平面波数の低減と、連立一次方程式の中乗法による解法により必要なメモリの低減を行ない、汎用性かつ高精度な計算手法を上げた。

#### ◆ デバイス展開

- (6-a) スーパープリズム効果を用いる波長フィルタや分波器を提案し、試作を進めた。波長フィルタとして、本Pjの3次元フォトニック結晶を用いて試作し、 $1.55\mu\text{m}$ 帯での波長フィルタリング動作を実証した。スーパープリズム効果による波長フィルタリング動作を実証したのは、これが初めてである。現在、本原理を用いたWDM分波器を、PLC基板技術と組み合わせて試作を進めている (NEC)。
- (6-b) 光短パルス伝搬実験を行い、相関測定によりフォトニック結晶内部での群速度分散の値を初めて測定した。その中で、フォトニック結晶による群速度の大幅な減少(真空中の光速度の5~6分の1)を観測し、フォトニック結晶による光パルス遅延回路や分散補償器実現に橋を架けた (NEC)。
- (6-c) SOI基板を用いたスラブ型2次元フォトニック結晶線欠陥光導波路の作製に成功し、さらに光の波長以下のサイズでの120度急峻曲がりを持つ光導波路を、Si/SiO<sub>2</sub> 2次元スラブ型フォトニック結晶内に形成し、曲がり部分を経由して光が伝搬することを世界で初めて実証した (NEC)。
- (7-a) Si/SiO<sub>2</sub>系 2次元フォトニック結晶による、近赤外波長用偏光分離素子の実証と高性能化を行った。本素子は実用化レベルの特性を達成したため、本プロジェクトを「卒業」し実用化研究に移行した(東北大)。
- (7-b) 格子変調型フォトニック結晶を用いて波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯用の波長選択フィルタを作製し、動作を実証した。本技術により、WDM用波長フィルタの多チャンネル一括集積が可能となる(東北大)。
- (8,9) 半導体 (GaAs/AlGaAs系) 2次元ピラー構造フォトニック結晶の光励起において、PL発光線幅の狭幅化を観測し、世界最小のレーザによる発振を確認した。また電子線照射によるフォトニック結晶の格子点制御にも成功した。(CRL、帝京科学大)

#### 新たな目標への成果

- ①(a) 固有モード基準解：今回新たに解析解が得られるフォトニック結晶系を発見し、波動現象の簡潔な理解を可能にした。導波路と共振器のいくつかの基本的な既成概念を修正する結果を発見した (東北大)。
- ①(b) 変分表現：無限周期結晶、及び導波路の固有周波数の変分表現式を発見し、FDTD法と組み合わせてバンド計算の高速化を実証した (東北大)。
- ② 荷電粒子とフォトニック結晶の相互作用：スミスパーセル放射は従来の回折格子よりもフォトニック結晶が有利であることを発見した。理研において検証実験を開始した (千葉大)。

#### 達成度が計画に及んでいない課題

- <1> 固体発光材料：SiO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>フォトニック結晶を作製するプロセスを開発した。理研は活性材料を取り巻くプロセスを開発中である (理研、東北大)。
- <2> 半導体材料とフォトニック結晶との複合化技術として複数の技術を探求し、困難性が大きいもの、有望なものを判断し得た (帝京科学大)。

研究成果公表等の状況<課題全体>

課題名(研究代表者): 3次元フォトニック結晶の作製、評価法、デバイス展開の総合研究(川上 彰二郎)

【研究成果発表等】

(括弧内は投稿中)

	原著論文による発表	左記以外の誌上発表	口頭発表	合計
国内	4 件	7 件	88 件	99 件
国外	21 (4) 件	0 件	37 (1) 件	58 (5) 件
合計	25 (4) 件	7 件	125 (1) 件	157 (5) 件

【特許出願等】 15 件 (国内 15 件、国外 0 件)

1. 「フォトニック結晶光共振器」、川上彰二郎 他、2001. 6. 8出願
2. 「3次元フォトニック結晶構造体の作製方法」、納富雅也、川上彰二郎他、1999. 8. 31出願
3. 「格子変調フォトニック結晶」川上彰二郎他、1999. 9. 25出願、特開2001-91701.
4. 「複屈折性周期構造体、位相板、回折格子型の偏光ビームスプリッタ及びそれらの作製方法」川上彰二郎他、2000. 6. 1出願、特開2001-51122
5. 「ポイント波長(周波数)かつポイントモードでのみハイブリッドモード伝搬する誘電体導波路」、堀 利和、川西哲也、井筒雅之、2001. 6. 4出願
6. 「信号変換素子」、中尾正史、奥哲、永沼充、2000. 8. 18出願、特願2000-248226
7. 「フォトニック結晶光導波路と方向性結合器」山田博仁 2000. 03. 29出願、特願2000-091781
8. 「フォトニック結晶多層基板およびその製造方法」山田博仁 2000. 07. 05出願、特願2000-204198
9. 「フォトニック結晶およびこれを用いた光パルス制御装置」白根昌之 2000. 09. 11出願、特願2000-274311 (他6件)

【受賞等】 7 件 (国内 7 件、国外 0 件)

1. 光産業技術振興協会 第16回櫻井健二郎氏記念賞、川上 彰二郎、2000年12月15日
2. 科学技術庁第59回注目発明、川上彰二郎 他2名、2000年4月17日
3. 電子情報通信学会 平成10年度功績賞、川上 彰二郎、1999年6月
4. 電子情報通信学会エレクトロニクスレター論文賞、花泉 修ほか、2000年3月.
5. 第14回安藤博記念学術奨励賞(「フォトニック結晶型応用光デバイスに関する研究」),大寺 康夫、2001年6月30日.
6. 日本物理学会第6回論文賞(K. Ohtaka and Y. Tanabe, "Photonic bands using vector spherical waves. 1. Various properties of Bloch electric fields and heavy photons", J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 65, No. 7, 2265~2275, 1996), 2001. 3. 29.
7. 電子情報通信学会 平成12年度学術奨励賞、「往復動作通倍光変調による高調波の発生」、川西哲也、佐々木雅英、下津臣一、及川 哲、井筒雅之、2001年9月19日.

【主要雑誌への研究成果発表】

雑誌名	Impact Factor	テーマ1	テーマ2	合計
Appl. Phys. Lett.	3.906	2	0	2
Phys. Rev. B	3.065	3	0	3
J. Appl. Phys.	2.180	2	0	2
IEEE J. Quantum Electron.	2.000	2	1	3
IEEE Photon. Technol. Lett.	1.877	1	0	1
Opt. Express	1.811	1	1	2
J. Vac. Sci. Technol. B	1.605	1	0	1
J. Lightwave Technol.	1.587	1	0	1
Jpn. J. Appl. Phys.	1.157	0	1	1
J. Lumin.	1.101	2	0	2
Electron. Lett.	0.931	0	1	1
Opt. Quantum Electron.	0.602	1	1	2
Opt. Spectroscopy	0.517	1	0	1
Mol. Cryst. Liq. Cryst.	0.422	2	0	2
IEICE Trans. Electron.	0.414	0	1	1
主要雑誌小計		19	6	25
発表論文合計		21	8	29