

# 研究終了報告書

## 「歪(ひずみ)フォトニック結晶科学の構築と新奇ビームレーザーへの展開」

研究期間:2020年11月~2024年3月

研究者:北村 恭子

### 1. 研究のねらい

トポロジカル光波は、ビーム断面内で、周回方向に偏光分布を有するベクトルビームや位相分布を有する光渦(ラゲール・ガウシアン, LG)ビームの総称である。ベクトルビームは、近軸波動方程式の円筒座標系における解である LG モードにおいて、円偏光を基底にとると、右回り円偏光と左回り円偏光の光渦ビームの重ね合わせで記述できる。このことから、偏光・位相の周回方向の回転数  $l$  を有する、高次 ( $l$  次) ポアンカレ球を用いて、図 1 のように表示することができる。

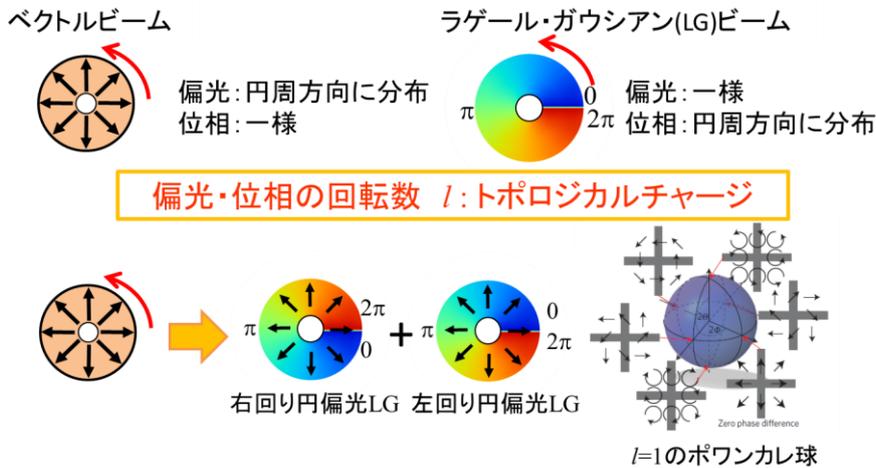


図1: トポロジカル光波と幾何学的位相。ベクトルビームと光渦(ラゲール・ガウシアン, LG)ビームは、 $l$  次のポアンカレ球面上に図示できる。

研究代表者らは、このようなトポロジカル光波を、フォトニック結晶レーザー(PCSEL)を用いて、フォトニック結晶(PC)の格子点配列制御により生成してきた。PCSELは、半導体レーザー構造の活性層の極近傍にPC層を内包した面発光型の半導体レーザーである。真円格子点からなるPCを用いると、単位格子点における電磁界分布は、中心対称な渦状態となり、それを反映したベクトルビームが、電流注入の包絡関数によって上方回折される。また、PCの格子点に対して、格子定数の10%程度で周期的な位置変位を与えた「変調PC」を用いると、単位格子点に与える局所的な格子点変位により、摂動周期に応じた方向にビームが回折され、その偏光は、変位を与える方向によって制御されるため、摂動を空間的に制御すると、任意の高次ポアンカレ球における赤道上のビームの生成が可能である。

以上のように、規則正しい周期配列のPCから、周期的な格子点位置変位を有する変調PCへと進化することで、半導体レーザーで任意のベクトルビームの発生を可能にしてきた。しかし、どちらも、単位格子点に取りまく電界の渦状態を上方にどのように取り出すか、というアプローチであり、

空間的な位相波面の制御は難しい。そこで、本研究では、光軌道を制御する新たな PC として「歪(ひずみ)PC」を提案し、その光軌道制御を明らかにする。これにより、周回軌道、すなわち、渦状態そのものを格子歪によって(1 格子点毎にではなく)空間的に広域に作り出し、空間的に位相波面を制御し、光渦ビームの生成を実現することをねらいとする。

## 2. 研究成果

### (1) 概要

本研究では、「歪フォトニック結晶(DPC):格子歪を有するフォトニック結晶(PC)」による、実空間における光の軌道(トポロジー)の制御を明らかにすること(研究テーマ A)、それを基に、光の周回軌道を空間的に形成し、上方回折させる格子歪構造を設計すること(研究テーマ B)を達成目標として研究を実施した。

研究テーマ A においては、正方格子配列を基準格子配列として、格子点の位置に対して格子歪を与えた、位置 DPC を出発点とし、光軌道の湾曲を時間領域差分(FDTD)法を用いた電磁界シミュレーションや、テラヘルツ波を用いた実験実証により明らかにした。次に、位置歪と形状歪の等価な操作であることを、実空間の誘電率分布の変化に対する波数空間の等周波数面の変化を定量化することによって明らかにした。さらに、その発展系として、楕円格子点回転形状 DPC を提案した。この DPC は、平均屈折率一定の操作のために生じる格子点間の連結を起こすことなく、原理的に無限の領域に DPC を形成可能である。これにより、光軌道が蛇行することが明らかとなった。さらに、歪を与える方向とその歪の依存方向とを直交させたすべり DPC を提案した。この場合、ある一つの空間上に 2 種類の単位格子構造変化を見出すことが出来、入射角に応じて、ビームスプリッタ様の効果や光の分岐が現れることを明らかにした。現在、これらを可視化することを目指している。

研究テーマ B においては、中心対称な歪構造を検討し、これにより中心力を得て湾曲する光軌道を FDTD 法による電磁界シミュレーションにより明らかにした。その結果、正方格子基準の位置 DPC に比べて 2 倍程度湾曲することが明らかとなったが、周回軌道には至らなかった。一方で、正方格子基準の位置 DPC であっても、第 2 バンド帯の高周波数の領域を用いると、放物線に近い大きな湾曲が得られることが明らかとなった。今後はこのような光の湾曲の複数構造の組み合わせを検討している。さらなる別のアプローチとして、高次ポアンカレ球に着想を得た、2 種類の光波モード混合構造を検討し、光渦ビーム生成に向けた重要な知見を得た。

### (2) 詳細

#### 研究テーマ A「DPC による実空間における光の軌道(トポロジー)の制御」

##### (1) 位置 DPC における光軌道

まず、我々は位置 DPC を図 2(b)に示すように、一軸方向に格子点の位置の二乗に比例するような微小変位を与えるものとして定義した。この時  $\beta$  を歪係数とし、基準格子定数  $a^{(0)}$  に対して十分小さな値 ( $\beta < 1$ ) を取るものとする。また格子歪の効果のみを確認するため、単位格子毎の平均屈折率を一定とするために、格子点の半径を歪に応じて補正する。通常の PC(同図(a))では、光が直進する低周波数の領域(同図(c))において、DPC では、光が湾曲することを明らかにした(同図(d))。この湾曲は、格子歪を計量テンソ

ルへと展開し、測地線方程式を解くことで得られる光軌道とよく一致することも明らかとなった(主な研究成果リスト 1)。すなわち、この光軌道の湾曲は格子歪によってもたらされた疑似的な重力効果とも言うことができる。

次に、DPC が、正方格子・長方格子 A・長方格子 B(長方格子 A よりも一辺の格子定数が大きい)の接続と捉えて、それぞれの単位格子を有する等周波数面を解析し、群速度ベクトルの向きの変化を界面の接続条件(図 2 の例では x 方向の波数が一定)を用いて求めると、このような光軌道の湾曲は、微小な屈折の連続によって生じていることを明らかにした。これにより、光軌道の湾曲度を定量化することが出来るようになったため、具体的なデバイス設計が可能となった。

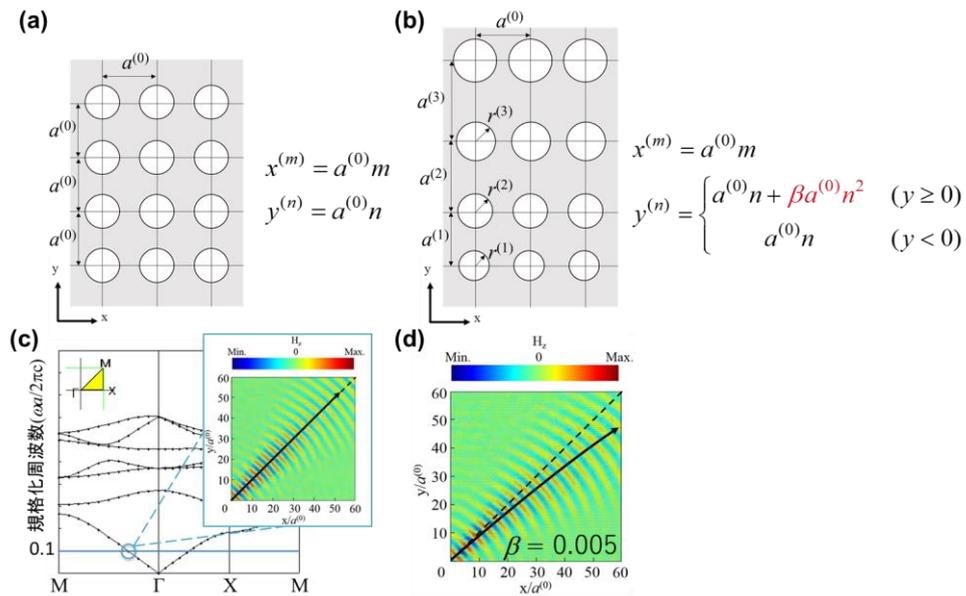


図 2: 格子点配列の模式図とその光伝搬 (a) フォトニック結晶(PC) (b) 位置歪フォトニック結晶(DPC) (c) PC の分散関係と光軌道 (d) DPC における光軌道

ナノメートルオーダーの作製精度を要する光領域に対して、テラヘルツ波では、作製精度をマイクロメートルオーダーにすることができる。PC におけるスケーリング則は、DPC においても不変であるため、テラヘルツ波を用いて電磁波軌道の湾曲を明らかにすることとした。テラヘルツ波領域における PC において先駆的な研究を実施している大阪大学富士田准教授のグループと共同し、図 3(a)に示すような 1 つの入力ポート(ポート A) に対して、入力ポートから水平な線に対して対称に 2 つの出力ポート(ポート B、C)を配置した PC および DPC サンプルを作製した。このような構造を用いると、電磁波の直進する PC では、ポート B、C に等価な出力強度が得られるのに対して、DPC では、同図(b)に示すように、電磁波の湾曲方向に優位な出力が得られるはずである。実験により、同図(c)に示すように、DPC では、周波数  $0.2 \sim 0.22 2\pi c/a^{(0)}$  の領域において、20 dB 程度の出力差が見られた。これは、同図(d)に示すように、同様の構造のシミュレーションのみならず、サンプルの作製誤差として観測された  $3^\circ$  程度の厚み方向のテーパ構造を反

映させたシミュレーションを行うと、H-E 偏波変換の結果、4 dB の損失が生じることを考慮すると、よく一致する出力差であり、DPC による光軌道の偏向を裏付ける結果を得た（主な研究成果リスト 2）。

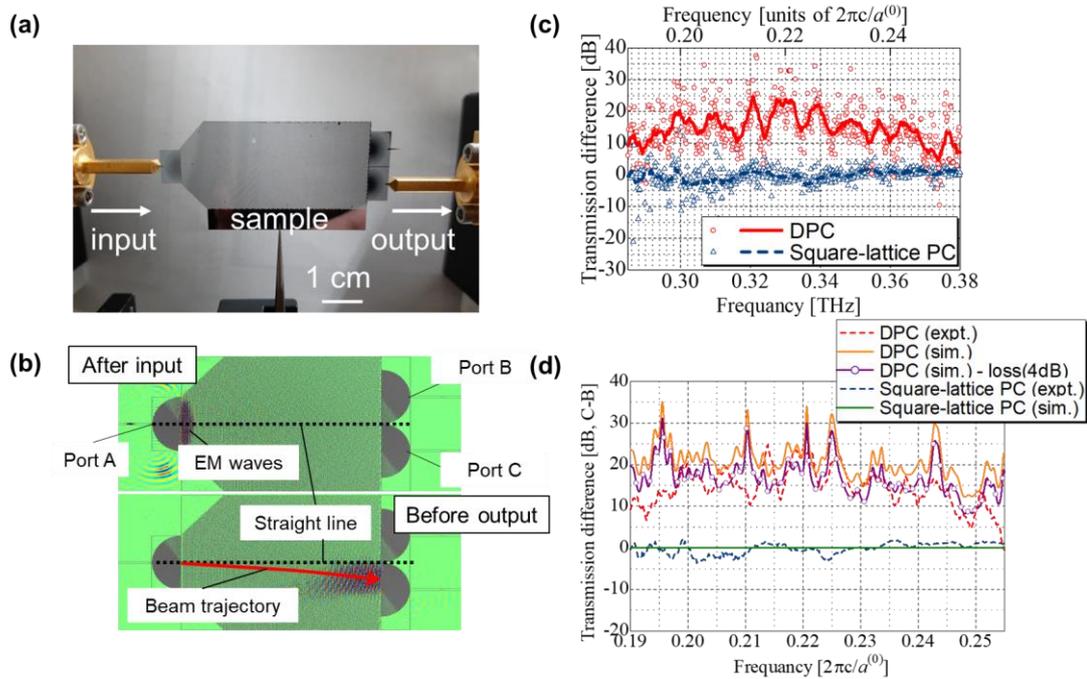


図 3: テラヘルツ波を用いた DPC における光軌道湾曲の実験実証 (a) 作製したサンプル構造と実験セットアップ (b) DPC における電磁波軌道の予測シミュレーション (c) 実験結果 (d) 実験結果と対応するシミュレーション結果、4dB の損失は、サンプル厚み方向のテーパ構造を反映した 3 次元 FDTD シミュレーションより算出した。

## (2) 楕円格子点回転形状 DPC への拡張 (主要な学会発表 6, 7)

位置 DPC における正方格子から長方格子への実空間の変化は、波数空間における真円上の等周波数面から楕円上の等周波数面への変化に対応し、その結果として群速度ベクトルの向きが変化する。すなわち、波数空間の異方性を引き出しており、このことが位置 DPC における光軌道の湾曲をもたらしている。同様の等周波数面の変化は、図 4(a)に示すように、実空間において、真円格子点から楕円格子点への変化で再現することができる。このような格子点の形状に対する DPC を形状 DPC と呼ぶ。実空間の格子または格子点の長短軸比( $b/a$  または  $B/A$ )の変化に対する波数空間の等周波数面の長短軸比( $\beta/\alpha$ )の変化を Softness (ソフトネス)と定義し、格子点の充填率に対してプロットすると、同図(b)に示すように、特に格子点の充填率が 40%程度のところで、位置に対する歪と形状に対する歪が等価になることを明らかにした。

さらに、楕円格子点を回転させることによっても、同様の効果を得ることができ、この場

合、単位格子毎の平均屈折率を一定とする条件の下でも格子点の連結が生じることなく、原理的に無限に格子歪構造を形成することが可能である。その結果、楕円格子点の回転周期によって光軌道を操舵することができ、光軌道の蛇行が得られることを明らかにした(図 5(a))。また、この構造は、光領域でのデバイス作製にも適しており、SOI 基板を用いた格子定数 220 nm 程度の構造でも作製可能となった (同図(b))。

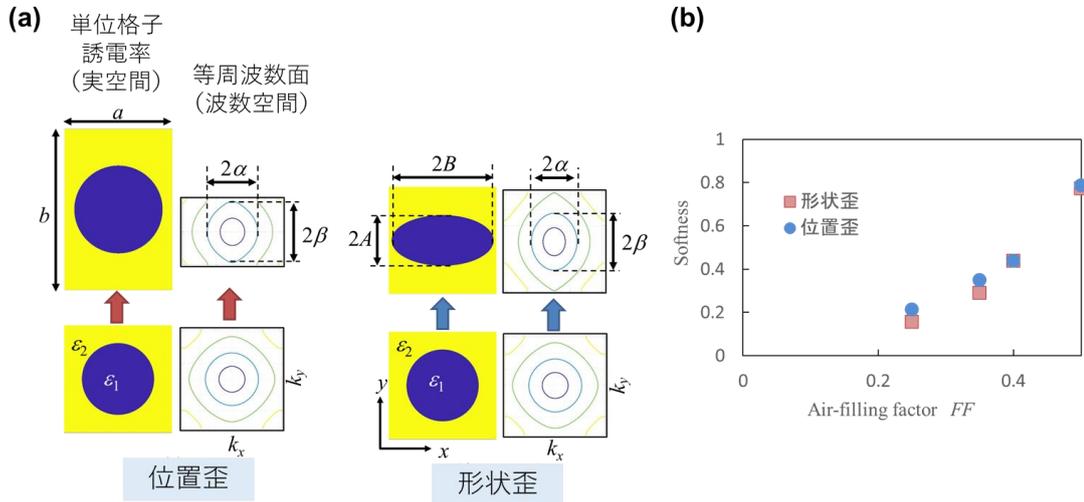


図 4: 位置 DPC と形状 DPC の操作の等価性 (a) 位置 DPC と形状 DPC における実空間の変化と波数空間の変化の対応 (b) 格子点の充填率に対する位置 DPC と形状 DPC の等価度を示すソフトネス

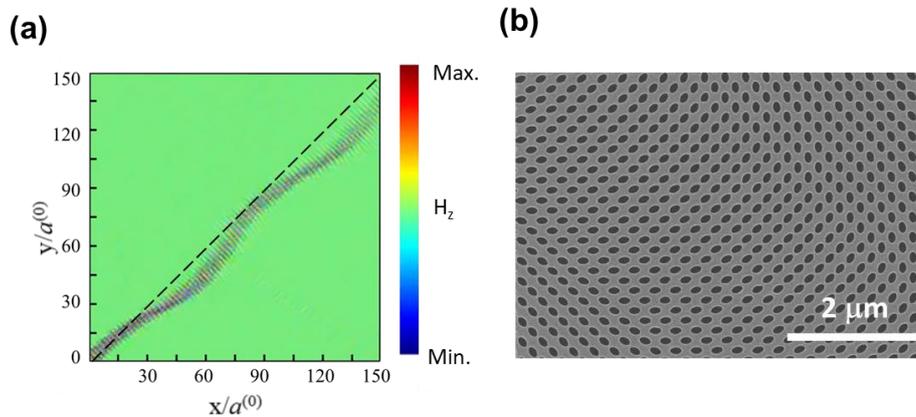


図 5: 楕円格子点回転形状 DPC (a) 光軌道の湾曲 (b) SOI 基板上に作製した光領域(格子定数 220 nm)の楕円格子点回転形状 DPC

(3) すべり DPC (受賞 4)

さて、上述までは、図 2(b)で例示したように、歪を与える方向と歪の依存方向を同一の方向としていた。これに対して、y 方向に与える歪を x 座標に依存させた歪を考える。定式化すると、 $(x^{(m)}, y^{(m, n)}) = (ma^{(0)}, na^{(0)} + \beta m^2 a^{(0)})$  のようなものである。これは図 6 に示すような模式図で表されるため、「すべり歪」と呼ぶこととする。この場合、同図に示すよう

に、正方格子から斜方格子の変化 (Lattice A) と、斜方格子から正方格子への変化 (Lattice B) と異なる 2 種類の単位格子の変化を同一の空間上に見ることが出来る。このときの光軌道は入射角に大きく依存する(図 7(a))。これは、単位格子毎に等周波数面を求め、構造を基に、y 方向の波数一定の条件で、群速度ベクトルの向きの変化を追跡すると、Lattice A と B でのバンドギャップ領域の違いによるビームスプリット(同図(b))や、群速度ベクトルの差が大きく開くことによるビームの分岐(同図(c))が、入射角に応じて現れた結果であると説明できる。

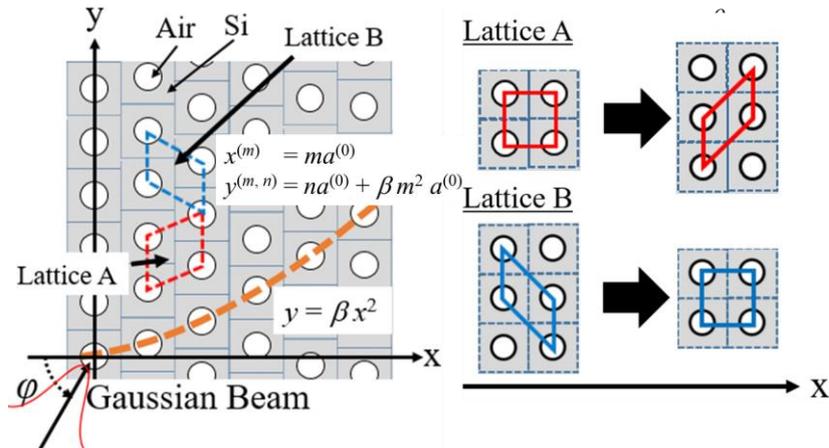


図 6: すべり DPC の模式図 y 方向に x 座標に依存した歪を与えるると、同一空間上に 2 種類の単位格子変化を見出すことが出来る

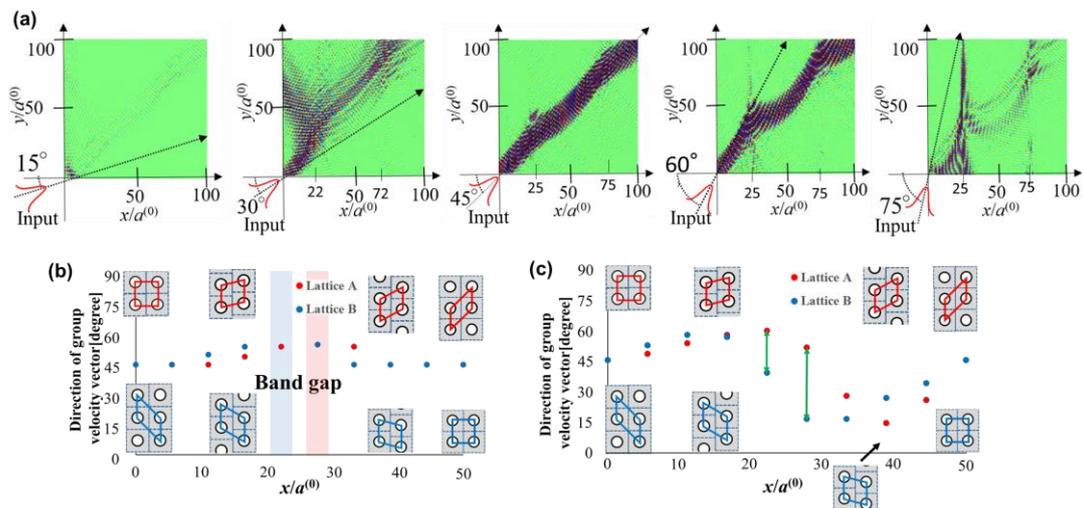


図 7: すべり DPC での光軌道 (a) 様々な入射角における光軌道 (b) 入射角 30° における x 座標に対する群速度ベクトルの変化 (c) 入射角 60° における x 座標に対する群速度ベクトルの変化

以上のように研究テーマ A においては、様々な DPC における光軌道を明らかにした。どのような DPC においても、実空間における単位格子の変化に対する波数空間の等周波数面の変化から、波数整合条件を考慮して群速度ベクトルの向きを追跡することで、その新奇な光軌道を説明できるという知見を得た。

### 研究テーマ B「光の周回軌道を空間的に形成し、上方回折させる格子歪構造の設計」

研究テーマ A で得られた DPC による光軌道の知見を基に、光の周回軌道を空間的に形成するため、中心対称な歪構造の検討を行った。位置 DPC における光軌道が歪方向と逆方向の力(疑似的な重力)を受けて光軌道を曲げることから、疑似的な中心力を与えることが周回軌道を形成すると予測したためである。位置 DPC を多角形的に中心対称に組み合わせた構造における光軌道をシミュレーションした結果、図 8 に示すように確かに構造の中心に向かって湾曲することが明らかとなった。ただし、実空間での構造において、格子間の連結が不可避な課題であることから、この構造そのもので、完全な周回軌道を形成することは難しい。一方で、中心対称構造ではなく、従来通りの位置 DPC 構造であるが、高周波数(第 2 バンド帯)に変化させると、放物線に近い大きく湾曲する軌道が得られることが明らかとなった。なお、この湾曲は、フォトニックバンドギャップ(PBG)による反射とは無関係であり、DPC の連続的変形による影響であることを明らかにしている。今後はこのような光の湾曲の複数構造の組み合わせを検討している。また、別のアプローチとして、高次ポアンカレ球に着想を得た、2種類の光波モード混合構造を検討し、光渦ビーム生成に向けた重要な知見を得た他、従来からの表面加工プロセスを利用した PCSEL においては、ワット級の高出力光渦ビーム生成に成功した(主な研究成果リスト 3)。

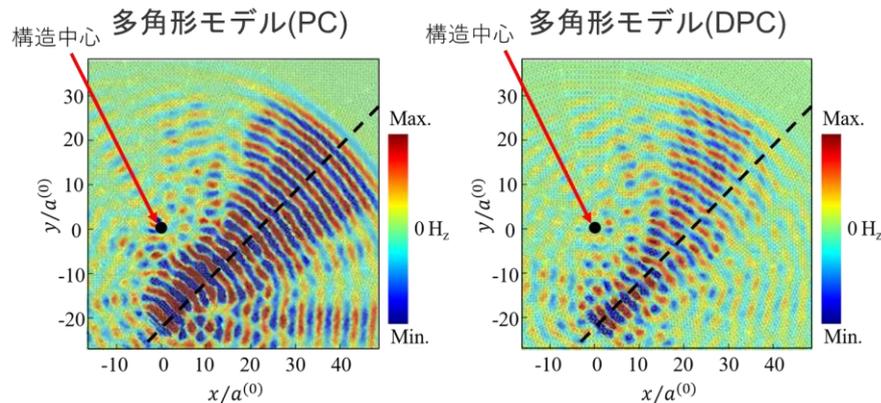


図 8: 中心対称な多角形 DPC 構造による光軌道

### 3. 今後の展開

本研究成果の今後の展開として、以下の学術的な展開および社会実装が展望できる。

- 本研究では、「歪フォトニック結晶(DPC)」という新たなフォトニック結晶(PC)により、実空間の光軌道制御を明らかにした。これは、従来のPCのバンド端を用いるスーパープリズム

や、屈折率変化を伴うグレーテッド PC とは異なり、格子歪を与えることで、PC の波数空間における等周波数面の形状変化(異方性)を引き出すにより、光軌道制御が可能であることを示した結果である。PC の形成するバンド構造の柔軟さ、あるいは歪を与えても PC には変わらないという堅牢さが明らかとなり、PC 学術分野に新たな展開をもたらす。

- DPC における光軌道は、微分幾何学的に格子歪を計量テンソルへと展開し、測地線方程式を解くことで得られる光軌道とよく一致することから、疑似的な重力効果による軌道制御とも説明することができる。そのため、将来的には、素粒子物理学分野の発展により、重力子の実験プラットフォームとして機能する可能性を秘めている。
- 本研究においては、バルクの「DPC」で生じるパッシブな特性を、アクティブな素子として取り出し、空間的な位相波面制御を可能にする新たなフォトニック結晶レーザー(PCSEL)を創製することを、最終目的として提案したものである。放物線に近い大きく湾曲する光軌道を見出したことから、今後、一方向周回導波路・上方回折構造との空間的な設計により、光渦ビームの生成に展開する。また、本研究を通して、高次ポアンカレ球に着想を得た、2種類の光波モード混合構造も光渦ビームの生成の実現に大変魅力的である。本報告段階においては、光渦ビームの位相回転方向の制御には至っていないが、光渦ビーム生成に向けた重要な知見を得ている。今後、このようなパッシブ+アクティブあるいはアクティブ+アクティブの組み合わせによる光渦ビーム生成の実現を目指す。
- テラヘルツ波の分野と共同した結果、DPC がテラヘルツ波デバイスの面内電磁波伝搬制御に有用であることも明らかとなった。テラヘルツ波は、6G 通信の基盤技術としても期待されていることから、今後、通信用途への展開も見込まれる。

#### 4. 自己評価

本研究の達成目標のうち、歪フォトニック結晶(DPC)科学の構築においては、理論・数値シミュレーション・実験という様々な観点から、光軌道制御を明らかにすることができ、概ね達成された。また、周回軌道そのものを格子歪によって(1 格子点毎にではなく)空間的に広域に作り出し、空間的に位相波面を制御し、光渦ビームの生成を実現することも狙いとしてきた。当初、一般相対論とのアナロジーでの発想でスタートし、かつ、明確なスーパープリズム構造との差別化のために、低周波数領域に検討を限ってきたが、第 2 バンド帯の高周波数領域に適応したところ、大きく放物線に近い軌道を得ることが出来たことから、今後、一方向周回導波路・上方回折構造との空間的な設計により、光渦ビームの生成に展開したいと考えている。

研究代表者の研究者個人としては、これまでの光学や応用物理・工学分野ではなく、物理学分野での論文を執筆することが出来たことは、自身の研究の幅を広げる契機となった。また、従来の GaAs 系での半導体プロセス技術のみならず、Si 系の半導体プロセスにも着手することができ、さらには、フォトニック結晶に必ずしも特化した環境でない共用設備によるプロセス環境でもデバイス作製の経験を積めたことは、研究の独立性の担保に繋がったと考えている。本研究の実施には、研究代表者が主宰する研究室の B4~M2 の学生のうち、7 名がこの研究に

携わった。本研究経費の間接経費のうち研究室に還元された経費を、学生陣のチームビルディング研修に用いたことで、モチベーションの維持に役立てた。加えて、学生陣の不断の努力の結果として、3 件の学生の受賞に繋がったことは、教育者としての経験値を高めることにも繋がった。本研究を通して、研究の独立性を担保・証明できたことと、教育者としての経験値を高めることができた結果として、教授に昇任出来たことも、本研究の大いなる成果である。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:3件

1. H. Kitagawa, K. Nanjyo, and K. Kitamura, “Effective field theory for distorted photonic crystals,” *Physical Review A* Vol.103, pp.063506 (2021).

概要:

本論文では、フォトニック結晶(PC)を構成する格子点に対して、1 軸または 2 軸方向に位置の 2 乗で比例するような位置変位(格子歪)を与えた歪 PC 構造について、微分幾何学の観点から考察した。2 次元正方格子系から局所斜交格子系への基底ベクトルの差分を歪テンソルと定義し、長波長近似の成り立つ低周波数領域において、測地線方程式より歪 PC 中の光の軌道を求めると、平均屈折率が一定の条件下であっても、湾曲した光軌道を示すことが明らかとなった。

2. K. Nanjyo, Y. Kawamoto, H. Kitagawa, D. Headland, M. Fujita, and K. Kitamura, “Deflection of electromagnetic waves by pseudogravity in distorted photonic crystals,” *Physical Review A* Vol. 108, pp. .033522 (2023).

概要:

本論文では、歪 PC により湾曲する光軌道をテラヘルツ波領域で実験実証した。1 つの入力ポートに対して、入力ポートの中心直線に対して対称な位置に 2 つの出力ポートを設置し、出力ポート間の強度差を正方格子 PC と歪 PC で比較することで、歪 PC の電磁波湾曲効果を検証した。その結果、歪 PC において、20dB 程度の明らかな出力差が見られ、サンプルの作製誤差も考慮したシミュレーション結果とも一致が見られたことから、歪 PC における電磁波の湾曲が証明された。

3. T. Tokushima, S. Noda, and K. Kitamura, “High-order optical vortex beam generation based on watt-class spatial phase plate-integrated photonic-crystal surface-emitting lasers,” *Optics Letters* Vol. 49, pp. 973-976 (2024).

概要:

本論文では、PCSEL の発光表面に擬螺旋状空間位相変調板の集積化を行うことで、ワット級の出力を有する光渦ビームの生成を実証した。位相回転数(トポロジカルチャージとも呼ぶ)  $l = 1, 2, 3$  のそれぞれにおいてビーム純度 85%, 78%, 72%の光渦ビームが 5W レベルまで維持でき、単一素子、高出力、高ビーム純度の光渦ビーム生成に成功した。

## (2) 特許出願

研究期間全出願件数:0 件(特許公開前のものは件数にのみ含む)

## (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

### 主要な学会発表(招待講演)

1. “フォトニック結晶レーザーによるトポロジカル光波の発生,” 研究会「光の軌道角運動量の発生機構と物質相互作用の理解」, 2021 年 3 月.
2. “フォトニック結晶レーザーを用いた 実空間の光のトポロジー制御,” 日本学術振興会光電相互変換第 125 委員会 第 257 回研究会「光とトポロジー」, 2021 年 12 月.
3. “格子点変位を有するフォトニック結晶の研究 -レーザービームの空間的形狀・偏光制御と光伝搬制御-,” レーザー学会学術講演会第 42 回年次大会, 2022 年 1 月.
4. “Spatially modulated photonic-crystal lasers for vector beams generation,” International Conference Laser Optics (ICLO) 2022, St. Petersburg (online), June, 2022.
5. “Control of Vector Beam Polarization Mode by Spatially Modulated Photonic-crystal Lasers,” The 15th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO Pacific Rim, CLEO-PR 2022), Sapporo, August, 2022.
6. “Distorted Photonic Crystal -novel approach of beam trajectory control-,” Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (PECS), PECS-XIII, Tokyo March, 2023.
7. “Beam Trajectory Steering by Distorted Photonic Crystals,” 13th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Paris, July, 2023.
8. “Study on beam trajectory in distorted photonic crystals,” International Conference on Nano-photonics and Nano-optoelectronics 2024, Yokohama, April, 2024.

### 受賞

1. 北村 恭子, “Generations of topological optical beams by photon-ic-crystal surface-emitting lasers,” JSST Workshop Outstanding Presentation Award, 2021 年 5 月.
2. 小寺 聖来 (受賞対象となる発表当時 B4 学生), “Generation of Vector beams by Modulated Photonic-crystal Lasers -Realization of initial phase control and higher-order topological charge-,” Student Presentation Award, JSST Workshop, 2021 年 5 月.
3. 河本 悠暉 (受賞対象となる発表当時 M1 学生), “歪フォトニック結晶を用いた光伝搬の制御に関する研究,” 優秀ポスター賞, 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 2022 年 6 月.
4. 河本 悠暉 (受賞対象となる発表当時 M1 学生), “すべり歪を有する歪フォトニック結晶中の新奇光伝搬,” 優秀ポスター賞, 応用物理学会 フォトニクス分科会 フォトニクスワークショップ, 2022 年 11 月.

### プレスリリース

1. 東北大学, 京都工芸繊維大学, 大阪大学, JST, “フォトニック結晶で一般相対性理論に基づく疑似重力効果を実現～次世代6G通信の電磁波制御用基盤技術として期待～,” 2023 年 9 月 29 日.