

周期構造の対称性制御で近赤外光の閉込めに成功

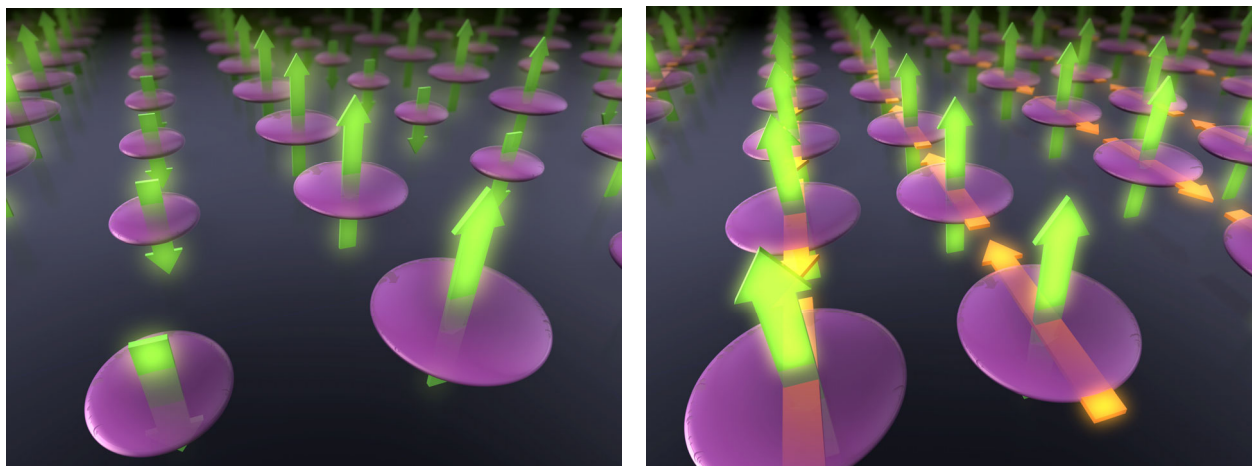
—ナノ粒子をずらして光の分布を操作し、レーザやセンサの発展に寄与—

概要

京都大学大学院工学研究科の村井俊介 助教、Libei Liu 同博士課程学生、田中勝久 同教授らはオランダ、スペインのグループらとの国際共同研究において、ガラス基板上に周期的に並べたナノ粒子内に近赤外光を閉込める技術を開発しました。ナノ粒子の位置やサイズをずらすことで構造の対称性を崩し、閉込め効率が非常に高い「連続スペクトル中の束縛状態 (Bound States in the Continuum, BIC)」^{*1}を制御できることを実験と計算の両面から示すことに成功しました。

ガラスなどの平面上に周期的にナノ粒子を並べると、その周期に応じた波長の光を平面内に閉込めることが可能です。本研究では、周期に加え構造の“対称性”を制御することで BIC と呼ばれる、さらに強い光閉込めを実現することを目的としました。そのために、サイズの異なる二種のシリコンナノ粒子を交互に並べた周期構造と、同じサイズのシリコンナノ粒子を、位置をずらして並べた周期構造を準備しました。両構造の周期は同じですが対称性が異なります。光の閉込めを調べたところ、両構造に起源の異なる BIC が生じることがわかりました。これらの実験結果はナノ粒子に生じる磁気および電気双極子^{*2}を考慮したモデルにより説明され、面内と面外、異なる振動方向の 2 種の双極子が BIC 発現に関わっていることが明らかになりました。本研究成果は、直感的かつ広範囲の周波数に拡張可能な BIC 調整手法を提供するものであり、光閉込めによるレーザやセンサ、非線形光学への応用が期待されます。

本研究成果は、2022 年 8 月 26 日（現地時刻）に国際学術誌「Laser & Photonics Reviews」にオンライン掲載されました。



ナノ粒子をずらすことで生じる BIC 状態のイメージ図。 (左) サイズの異なる二種のシリコンナノ粒子を交互に並べた周期構造による BIC モード。面外の磁気双極子（緑の矢印）が BIC となる。(右) 粒子の位置をずらして並べた周期構造による BIC モード。面外の磁気双極子と面内の電気双極子（黄色の矢印）が BIC となる。

1. 背景

誘電体ナノ粒子の周期構造はフォトニック結晶やナノアンテナと呼ばれ、次世代の光制御技術として研究が進んでいます。これらの構造は周期性に起因する光の強めあい/弱めあいの干渉により、特定の方向へ光を放ったり、特定の方向からの光を閉込めたりすることができます。近年周期構造系の研究トピックの一つに連続スペクトル中の束縛モード（Bound States in the Continuum, BIC）があります。BICは構造内に強く閉込められ、外部に漏れないモード（=光の分布状態）であり、その発生には構造の周期に加え対称性の制御が重要です（図1）。単位格子^{※3}に非等価な格子点を追加することは対称性を調整する簡単な方法ですが、そのような格子、つまり非ブラベ格子^{※4}において、対称性の崩しかたとBICの起源に関する詳細な検討はなされてきませんでした。

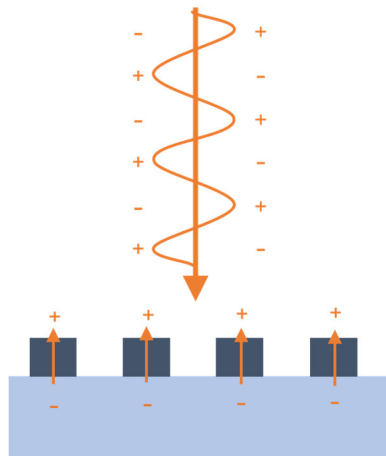


図1：対称性で保護されたBICの例。

対称性で保護されたBICは、構造に垂直な方向からの入射光と構造内のモードの対称性の不一致により起こる。面外方向に振動する双極子からなるBICは、面内振動成分のみ持ち、面外成分を持たない垂直入射光では起こせない。

2. 研究手法・成果

本研究では、シリコンナノ粒子の周期的な正方格子を起点として、単位格子内の第2格子点の位置と粒子のサイズを調整することにより、3つの非ブラベ格子を作製しました（図2）。

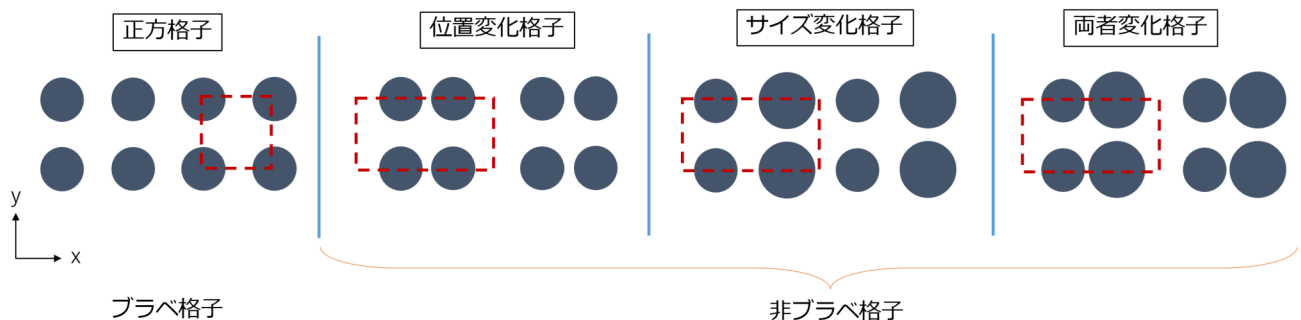


図2：本研究で使用した正方格子（ブラベ格子）と位置、サイズおよび両者変化格子（非ブラベ格子^{※4}）。

ガラス基板上にシリコンナノ粒子を並べこれらの格子を作製した。図中の点線は単位格子を表す。

これらの構造に光を入射すると、個々のナノ粒子に磁気および電気双極子が励起され、それらが構造周期由来の光回折^{※5}を介して共鳴する、2つの表面格子共鳴モード^{※6}を生成します。今回、2番目の粒子のサイズと位置のどちらか片方を調整することで2つの表面格子共鳴モードの片方がBICになることを見いだしました（図3）。

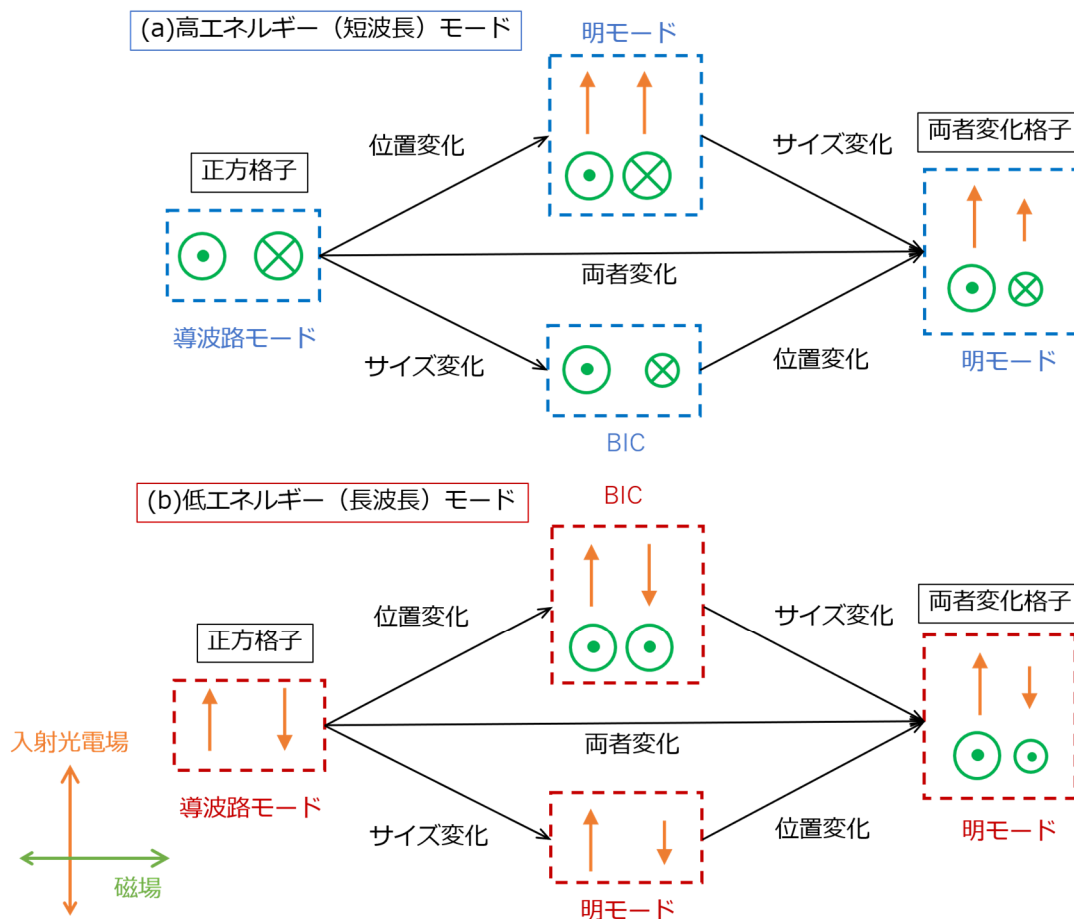


図 3： 正方格子の 2 つの導波路モードが格子の非ブラベ化に伴いどう変化するかのチャート図。

高エネルギー側の導波路は第 2 格子点の粒子サイズを変えることで面外の磁気双極子からなる BIC となり、低エネルギー側の導波路は第 2 格子点の粒子位置を変えることで面内の電気双極子と面外の磁気双極子からなる BIC となる。どちらの導波路も両者を変化させると明モード（外部に漏れ出るモード）になる。（●●/●●）互いに平行/反平行な面外の磁気双極子対、（↑↑/↓↓）互いに平行/反平行な面内の電気双極子対を表す。図は TE 偏光（b に入射光の電場と磁場の方向を示す）に対するチャートで、TM 偏光（磁場が y 方向に振動）では電気と磁気双極子が入れ替わり、2 つの導波路モード^{*}のエネルギーが入れ替わる。

またサイズと位置の両方が同時に変化すると BIC は消えます。これらの実験結果は、正方格子に存在する 2 つの導波路モードが、サイズあるいは位置の操作により BIC あるいは明モード（外部に漏れるモード）に変わるためであることが、結合電気磁気双極子（Coupled Electric and Magnetic Dipole, CEMD）モデル^{*8}により説明されました。これまでナノ粒子周期構造においては、面内のみ、あるいは面外振動の双極子のみ由来する BIC が報告されていましたが、本研究で見られた BIC は面内と面外振動双極子の同時励起が関わる初めての例となります。

3. 波及効果、今後の予定

今回の実験はシリコンナノ粒子を用いましたが、ナノアンテナ研究は金属ナノ粒子を用いたものが盛んです。金属ナノ粒子はシリコンと異なり電気双極子しか励起できませんが、電気双極子のみを考えることで今回の結果を適用出来ます。また今回の実験は近赤外光に対するものでしたが、非ブラベ格子の周期やナノ粒子の材質を適切に選択することで紫外光からミリ波まで、幅広い周波数範囲で同様の原理に基づく BIC 制御が可能です。今後は異なる対称性を持つ非ブラベ格子における BIC 制御や、これまでに報告のない紫外光に対する BIC の実現に向けた研究に取り組めます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究の一部は、日本学術振興会（JSPS） 科学研究費助成事業（21H04619, 22H01776）、JSPS二国間交流事業（JPJSBP120219920）、旭硝子財団の支援を受けて実施されました。また、ナノ加工の一部は京都大学ナノテクノロジーハブ拠点を利用して行われました。

<研究者のコメント>

ブラベ格子とはもともと結晶学において結晶構造を理解・整理するための概念ですが、BIC のオンオフの理解にも応用できることがこの概念の普遍性を示しています。2次元のブラベ格子は正方格子以外にも4種類ありますので（図4）、それらから得られる非ブラベ格子におけるBIC制御も研究していきます。（村井俊介）

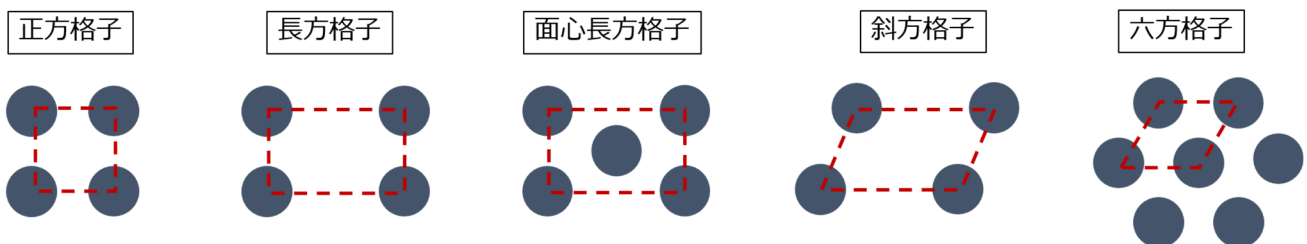


図4：5種類の2次元ブラベ格子。

<用語解説>

※1 **連続スペクトル中の束縛状態（Bound States in the Continuum, BIC）**：構造内に存在できる光の状態（モード）の中で、同じ波長と運動量を持つ外部入射光では励起できないモード。BICは外部に漏れないため、一度励起されれば理想的には永久に構造内に閉込められる。BICのうち、垂直入射条件において明らかな対称性の違いにより励起できないものを対称性で保護されたBICと呼ぶ。

※2 **電気双極子、磁気双極子**：ここでは、シリコンナノ粒子に光を当てたときに粒子内に生じる正電荷と負電荷の対（電気双極子）とN極とS極の対（磁気双極子）。

※3 **単位格子**：周期構造の最小の繰返し単位。

※4 **ブラベ格子、非ブラベ格子**：結晶は原子の周期配列構造からなるが、繰返しの単位構造（単位格子）は、対称性を考慮すると3次元格子では14種類、2次元格子では5種類に分類される。これらの基本構造はブラベ格子と呼ばれる。ブラベ格子の格子点（原子が存在する点）は等価であり、非等価な格子点を持つ格子は非ブラベ格子となる。本研究では、原子をシリコンナノ粒子に置き換えて考え、2次元のブラベ格子、非ブラベ格子を作製した。

※5 **光回折**：光が物体に当たって散乱され、強めあいの干渉が起こる特定の方向に進行する現象。例えばCDやDVD表面で見られる虹色はこの効果による。

※6 **表面格子共鳴モード**：ナノアンテナにおいて、各粒子に励起される磁気双極子や電気双極子などが光回折光を介して位相を揃えて振動する状態。個々の双極子がバラバラに振動する状態に比べ強い振動が生じる。

※7 **導波路モード**：ここでは、ナノ粒子が並んだ平面内に閉込められ面内を伝搬する光のモード。

※8 **結合電気磁気双極子（Coupled Electric and Magnetic Dipole, CEMD）モデル**：ナノ粒子をその粒子に励起される電気および磁気双極子に置き換え、表面格子共鳴モードなど周期構造で起こる協同モードを計算する手法。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Engineering bound states in the continuum at telecom wavelengths with non-Bravais lattices(非ブラベ格子による光通信波長域でのBIC制御)

著者：村井俊介、Diego R. Abujetas, Libei Liu, Gabriel W. Castellanos, Vincenzo Giannini, José A. Sánchez-Gil, 田中勝久, Jaime Gómez Rivas

掲載誌：Laser & Photonics Reviews DOI : 10.1002/lpor.202100661