

## 狙ったナノ空間に光を閉じ込める人工構造の開発に成功

～トポロジーによる新しい光デバイスの開発に期待！～

### ポイント

- ・金ナノ粒子を並べた人工構造における光の伝播と局在を時間・空間分解光電子顕微鏡により観測。
- ・人工構造の端(エッジ)に光が集まるトポロジカルエッジ状態の発現を確認し、その生成機構を解明。
- ・トポロジカルエッジ状態により光の伝播や局在化を自在に制御可能な光デバイスへの応用に期待。

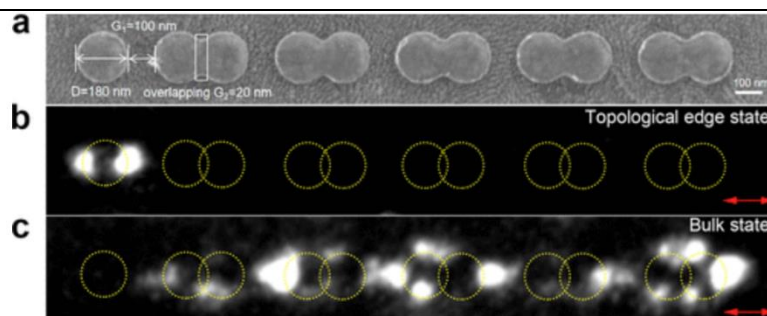
### 概要

北海道大学電子科学研究所の三澤弘明特任教授及び同創成研究機構の石 旭准教授らは、中国北京大学と共同で、金ナノ粒子のペアを一行に規則正しく配列した人工構造(バルク)の端(エッジ)にペアではない単一金ナノ粒子を配置して構造全体に光照射すると、エッジの単一粒子に近接場とよばれる光が局在化するトポロジカルエッジ状態が発現することを初めて明らかにしました。また、エッジ状態が消滅する位相緩和時間が、バルクの金ナノ粒子ペアの個数に依存して長くなり、ある個数以上で飽和することを見出し、エッジ状態がバルク状態とのエネルギー振動を経て形成することを検証しました。

今回、金の人工ナノ構造で観測された光のトポロジカルエッジ状態は、2016年のノーベル物理学賞の受賞で注目された「トポロジカル絶縁体\*1」とも関連が深く、物質内部は電気を流すことができない絶縁体でありながら、エッジ(表面や端)では電気を流せる金属と同じ性質を持つというトポロジカル絶縁体のとても不思議な特性を利用しています。この特性を金の人工ナノ構造に展開し、エッジに近接場が局在化する過程を1フェムト(100兆分の1)秒の時間分解能と数nm(1nmは1億分の1m)の空間分解能という極めて高い精度で可視化するとともに、シミュレーションによって局在化のメカニズムの検証にも成功しました。

光のトポロジー効果は、光の散乱損失や構造の乱れに耐性のある堅牢な光学構造を提供するため、光情報伝送や量子コンピュータなどの新しい光デバイスを実現するために有用と考えられています。現在、金のナノ構造を用いた光トポロジカルエッジ状態の研究は世界中で盛んに行われていますが、極めて早い時間で生成・消滅するため、時間領域における研究はほとんど進んでいませんでした。今回の時間領域の研究により、どのような人工構造を用いれば、近接場を効率良く狙ったナノ空間に速く局在化させるかなどの理解が深まり、新しい光デバイスの構築に繋がるものと期待されます。

なお、本研究結果は、2021年10月22日(金)公開のNano Letters誌にオンライン掲載されました。



- トポロジカルエッジ状態を示す金ナノ粒子からなる人工構造の電子顕微鏡画像。
- 左端の単一金ナノ粒子に近接場が局在化したトポロジカルエッジ状態の光電子顕微鏡画像。
- 横一列に並んだ金ナノペア全体に近接場が非局在化したバルク状態の光電子顕微鏡画像。

## 【背景】

物質内部は電気を流すことができない絶縁体でありながら、表面や端(エッジ)では電気を流せる金属と同じ性質を持つというトポロジカル絶縁体の不思議な現象は、光の研究領域においても注目されており、同様の概念により光の散乱損失や構造の乱れに耐性のある堅牢な光学構造を作製できることが確認されています。そのような特性を利用して、光情報伝送や量子コンピュータに必要な光の選択的伝播や局在化を行う新しいナノフォトニクスデバイスの開発に期待が寄せられていますが、そのメカニズムを理解するために重要となる光の空間分布の時間発展などの時間領域の研究はほとんど行われていませんでした。

## 【研究手法】

本研究では、導電性ガラス基板上に p.1 図 a に示す直径 180 nm の 2 個の金ナノディスクの端をそれぞれ 20 nm 重ね合わせたペア構造を 100 nm の間隔で一列に並べ、その列の片方の端に直径 180 nm の単一金ナノディスクを作製しました。また、このペア構造の個数を 1 個から 11 個まで変化させました。これらの構造に電場方向が構造の長手方向に沿った直線偏光を照射した際の近接場の空間分布や、その位相緩和時間について最先端の光電子顕微鏡を用いて計測しました。

光電子顕微鏡は光照射に伴う光電効果によって放出された光電子を観測する顕微鏡ですが、金の仕事関数よりもエネルギーの小さな可視・近赤外光レーザーを励起光源として用いることで、プラズモンの近接場で選択的に起こる多光子励起に由来する光電子を観察することができます。

## 【研究成果】

構造全体に直線偏光を照射すると、ペア構造の個数によらず近接場の空間分布は構造の端に存在する単一金ナノディスクに局在化することを見出しました。一方、単一金ナノディスク配置しないペア構造のみの場合には、近接場はペア構造全体に広がり、非局在化することがわかりました。また、単一金ナノディスクに局在化した近接場が消滅する時間 (= 位相緩和時間) を調べると、図 1 に示すようにペア構造の数が 4 個までは 4.5 フェムト秒程度で、ペア構造のない単一金ナノディスクの位相緩和時間 5.0 フェムト秒とほぼ同じですが、ペアの数が 5 個、6 個と増えると位相緩和時間は長くなり、ペアの個数が 6 個以上になると位相緩和時間は 6.5 フェムト秒程度でほぼ一定値となります。このことは、単一金ナノディスクに近接場が局在化するトポロジカルエッジ状態が生成する過程において、エッジ状態とペア構造に近接場が非局在化するバルク状態との間でエネルギー振動が生じていることを示しています。このエネルギー振動が存在することは図 2 に示すシミュレーションによっても再現されました。

## 【今後への期待】

本成果により、人工ナノ構造によって光を局在化するトポロジカルエッジ状態の生成メカニズムが明らかになりました。光の散乱損失や構造の乱れに耐性のある堅牢な光学構造を作製するための設計指針が明らかになりつつあり、本研究で示した 1 次元のトポロジカル構造を 2 次元、3 次元と発展させることによって新たな光デバイス作製への応用が期待されます。

## 【謝辞】

本研究は、科学研究費補助金（特別推進研究）JP18H05205、（若手研究）JP20K15113、北海道大学ナノテクノロジープラットフォーム事業、及び文部科学省ファイブスターアライアンス事業の助成を受けて行われました。

## 論文情報

論文名	Near-Field Imaging and Time-Domain Dynamics of Photonic Topological Edge States in Plasmonic Nanochains（プラズモニックナノチェーン構造におけるフォトニックトポロジカルエッジ状態の近接場イメージングと時間領域ダイナミクス）
著者名	Qiuchen Yan <sup>1,2</sup> , En Cao <sup>2</sup> , Quan Sun <sup>3</sup> , Yutian Ao <sup>1</sup> , Xiaoyong Hu <sup>1,3,4</sup> , Xu Shi <sup>5</sup> , Qihuang Gong <sup>1,3,4</sup> , Hiroaki Misawa <sup>2,6</sup> （ <sup>1</sup> State Key Laboratory for Mesoscopic Physics and Department of Physics, Collaborative Innovation Center of Quantum Matter and Frontiers Science Center for Nanooptoelectronics, Beijing Academy of Quantum Information Sciences, Peking University, <sup>2</sup> 北海道大学電子科学研究所, <sup>3</sup> Yangtze Delta Institute of Optoelectronics, Peking University, <sup>4</sup> Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, <sup>5</sup> 北海道大学創成研究機構, <sup>6</sup> 台湾国立陽明交通大学新世代功能性物質研究中心）
雑誌名	Nano Letters
DOI	10.1021/acs.nanolett.1c03324
公表日	2021年10月22日（金）（オンライン公開）

## お問い合わせ先

北海道大学電子科学研究所 特任教授 三澤弘明（みさわひろあき）

T E L 011-706-9358 F A X 011-706-9359 メール misawa@es.hokudai.ac.jp

U R L <http://misawa.es.hokudai.ac.jp/>

## 配信元

北海道大学総務企画部広報課（〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目）

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

### 【参考図】

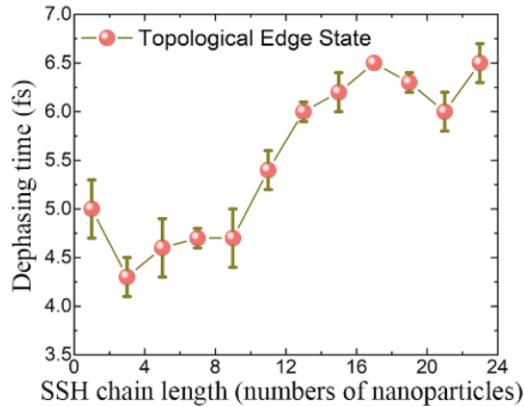


図 1. ペア構造の個数に対する位相緩和時間。横軸は、ペアの個数  $\times 2 + 1$  (単一金ナノディスク) を表している。

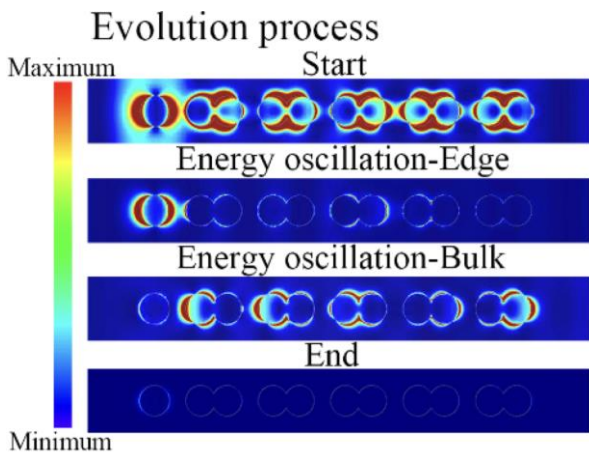


図 2. 左端に単一の金ナノディスク、またその右側にペア構造が 5 個配列された構造に対し、構造の長軸方向に電場が振動する直線偏光を照射した際の近接場強度の空間分布シミュレーションの結果。赤色は近接場強度が高く、青色は低いことを示している。1 段目は、光照射直後の近接場強度分布を示しており、単一金ナノディスクに近接場の局在化が起きるエッジ状態形成前の状態のため近接場強度の空間分布は広がっている。2 段目、3 段目は、エッジ状態と、ペア構造に近接場が非局在化しているバルク状態とでエネルギー振動が生じていることを示しています。下段は単一金ナノディスクに近接場が局在化したエッジ状態の位相緩和が進み、近接場がほぼ消滅した状態を示している。

### 【用語解説】

- \*1 トポロジカル絶縁体 … 物質の内部は絶縁体でありながら、表面では電気を流す金属的な性質。通常の絶縁体と区別するために分室中の電子状態を記述する数学的理論にトポロジーが導入されたことが名前の由来となっている。