

2026 年 7 月 24 日

国立大学法人東京大学

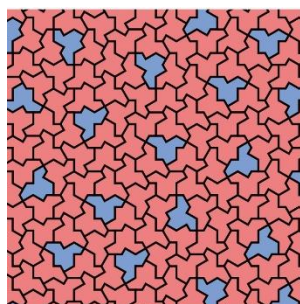
国立大学法人東京科学大学

NTT 株式会社

数学の未解決問題から生まれた「不思議なタイル」で 風車のような光の模様を観測 ——非周期モノタイルが拓く新しい光ナノ構造——

発表のポイント

- ◆長年未解決だった「アインシュタイン問題」から生まれた非周期モノタイルに基づく人工構造を用いて、その特異な光回折像の観測に世界で初めて成功しました。
- ◆モノタイル構造がもつ、カイラルな対称性を反映した風車状の光回折像、通常の準周期秩序にはない円偏光依存回折を発見しました。
- ◆本成果は、カイラルな対称性をもつ新しい準周期秩序の科学を拓き、ナノフォトンクスやメタサーフェスにおける新しい光機能による光制御への展開が期待されます。



左：モノタイル構造による非周期タイリング

右：白色レーザーを入射したときに観察されたカイラルな光回折像

概要

東京大学生産技術研究所の森竹勇斗准教授と、東京科学大学 理学院 物理学系 納富雅也教授（兼：NTT 株式会社物性科学基礎研究所フェロー）らによる研究グループは、非周期的にしか敷き詰めることができない「非周期モノタイル」（注 1）に基づく構造を作製し、その特異な対称性を反映した光回折現象を実験的に明らかにしました。「一種類のタイルで非周期的にしか敷き詰められないタイルはあるか？」という数学的な問題は「アインシュタイン問題」（注 2）と呼ばれ、長い間解決されていませんでした。しかし、2023 年にハット型モノタイル（図 1）という解が発見され、数学界に大きな衝撃を与えました。一方でこの特殊な非周期タイリングによって引き起こされる物理現象を実験的に明らかにした研究はありませんでした。本研究では、このモノタイルの配列をもつ人工ナノ構造を作製し、その光回折を測定することで、モノタイルの特別な構造に由来する風車状の回折パターンの観測に成功しました。さらに、左回り・右回りの円偏光（注 3）で回折強度が異なる、従来の鏡映対称な準周期構造（注 4）では見られない光応答を確認しました。本成果は、カイラル（注 5）な準周期秩序を持つ非周期構造を用いた、新しい光制御を拓くものです。

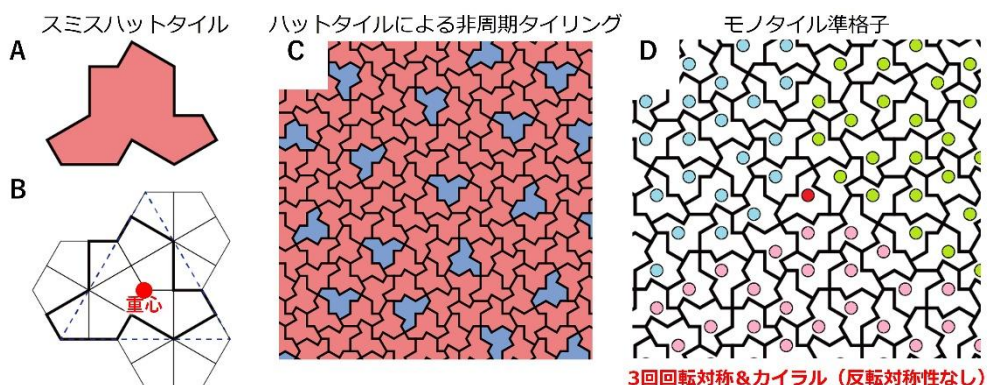
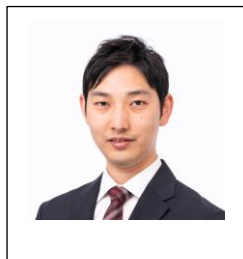


図 1：非周期モノタイルと準格子の構造

A アインシュタイン問題の解として初めて提案されたハット型モノタイル構造。形が帽子に似ていることから名前が付けられた。**B** ハット型モノタイルの重心の位置。一見、ハット型モノタイルの重心を定義するのは不可能に思えるが、数学的な観点から重心を定義することができる。**C** ハット型モノタイルの敷き詰めによる非周期的なタイリング。無限に広い平面を敷き詰められるが同じ繰り返しパターンは現れない。**D** 重心を用いて生成したモノタイル準格子。赤で示す点を中心に完全な 3 回回転対称性（1/3 回転しても同じ構造になる）をもつ。一方、鏡映対称性はない（左右をひっくり返しても一致しない）。

発表者コメント：森竹 勇斗 准教授の「もしかする未来」



この研究を始めたきっかけは、「ペンローズの幾何学」（荒木義明, 谷岡一郎 著）を読み、非周期モノタイルという数学界の発見に興味をもったことです。研究を進めると予想外の興味深い現象が多く見つかり、取り組んでいて本当に楽しい研究でした。歴史を見ても、数学における発見が物理に大きなインパクトをもたらしてきましたが、そのような仕事のできたことをうれしく思っています。今後は、この準周期構造をメタサーフェス・フォトリック結晶（注 6）に取り入れ、新しい光応用を探索していきます。

森竹 勇斗 准教授 研究者プロフィール

<https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/research/staff/yuto-moritake/>

発表内容

結晶のような周期構造は、物理・化学・材料科学の基礎として長く研究されてきました。一方、周期性を持たないにもかかわらず長距離秩序を持つ準周期構造や準結晶（注 4）は、通常の結晶にはない回転対称性や物性を示すため、重要な研究対象となっています。ペンローズタイルに代表される準周期構造の研究は、2011 年ノーベル化学賞「準結晶の発見」にもつながりました。

この流れの中で、数学では「一種類のタイルだけで平面を敷き詰められるが、その敷き詰めは必ず非周期になる形は存在するか」という問題が長年未解決でした。この問題は「アインシュタイン問題」と呼ばれ、2023 年に David Smith らによってハット型の非周期モノタイルが発見されたことで大きな注目を集めました。しかし、このモノタイルに由来する構造が、実際の物理実験においてどのような応答を示すかは明らかになっていませんでした。

本研究グループは、ハット型モノタイルの敷き詰め構造において各タイルの重心に点を置くことで、3 回回転対称性をもつ一方で鏡映対称性を持たない「モノタイル準格子」(注 7) を設計しました。さらに、この非周期構造の特性を実験的に調べるため、NTT の最先端の微細加工技術を用いて人工ナノ構造による大面積の非周期配列の作製に成功しました (図 2 A)。作製では、350 nm (ナノメートル=10 億分の 1 メートル) 厚の窒化シリコン薄膜上に、最先端の半導体集積回路の作製に用いられる電子線リソグラフィとドライエッチングによる微細加工技術を用いて、半径 100 nm の円孔の配列を精密に形成しました。測定では、この構造にレーザを照射して回折パターンを観測しました。

実験では、多数の明瞭なブラッグピーク (注 8) が観測され、さらに照射位置を変えてもピーク位置がほとんど変化しないことが確認されました (図 2 C)。これは、作製したモノタイル準格子が周期性を持たないにもかかわらず、準結晶的な長距離秩序を持つことを示す実験的証拠です。また、観測された回折パターンは鏡映対称性を欠いた風車状の形 (図 2 B、図 2 C) を示し、反転したモノタイル構造ではその向きが反転しました。この結果は、モノタイル構造のカイラルな対称性が、波数空間における光回折パターンとして直接現れたことを意味します。

さらに本研究では、左回り円偏光と右回り円偏光を入射した場合の回折強度の違いを測定しました。その結果、回折ピークの強度分布が円偏光のヘリシティ (注 3) に依存し、鏡像構造ではその分布が入れ替わることが分かりました (図 2 D)。このような円偏光依存の回折応答は、反転対称性や鏡映対称性を持つ従来型の準周期構造では現れにくいものであり、モノタイル準格子のカイラルな対称性に由来する新しい光学現象です。

本成果は、非周期モノタイルが単なる数学的構造にとどまらず、ナノ構造を用いることで、実験可能な物理系として新しい光応答を生み出すことを示しています。特に、カイラルな準周期秩序を設計原理として用いることで、人工非周期構造を用いた新しい光機能の開拓につながることを期待されます。

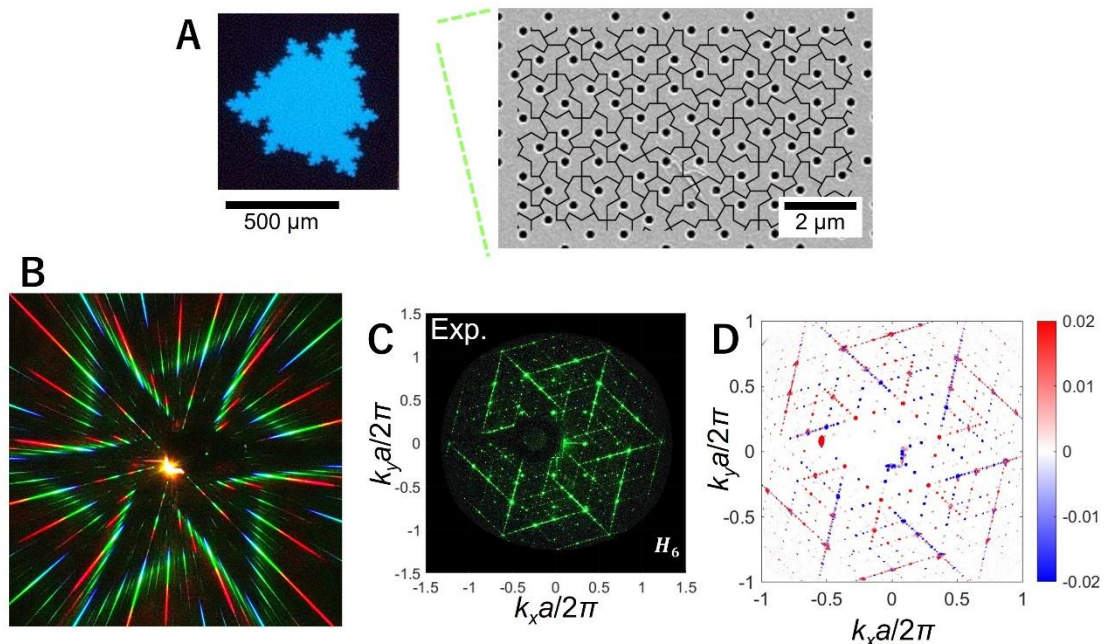


図 2：作製したモノタイル準格子をもつ人工構造と測定した光回折像

A 作製したモノタイル準格子構造の顕微鏡写真および電子顕微鏡写真。窒化シリコン膜に、準格子の位置に半径 100 nm の穴が開いている。**B** 白色レーザを照射したときに得られた回折像写真。構造の準周期性や対称性を反映して、風車のような特殊な回折像が観測される。**C** 単色光 (緑色レーザ) を照射したときに得られ

た回折像写真。準周期性に由来するブラッグピークが観測されている。D 右回りと左回り円偏光を照射したときの回折強度の差。赤い点は左回りが、青い点は右回りの円偏光入射でより強い強度の回折が得られることを示している。このような円偏光依存性は、カイラルなモノタイル準格子ならではの特徴。

○関連情報：

動画「白色レーザーを照射したときに得られた回折像」

URL：https://youtube.com/shorts/fWuLi_jlB6D0

発表者・研究者等情報

東京大学

生産技術研究所

森竹 勇斗 准教授

東京科学大学

理学院 物理学系

納富 雅也 教授

兼 NTT 株式会社物性科学基礎研究所 フェロー

兼 NTT ナノフォトンクスセンタ センタ長

論文情報

雑誌名：Nature Communications

題 名：Chiral Diffraction from Aperiodic Monotile Structure

著者名：Yuto Moritake*, Masato Takuguchi, Takuma Aihara, Masaya Notomi

DOI：10.1038/s41467-026-75023-7

URL：<https://www.doi.org/10.1038/s41467-026-75023-7>

注意事項（解禁情報）

日本時間 7 月 29 日 18 時（英国夏時間：29 日午前 10 時）以前の公表は禁じられています。

研究助成

本研究は、日本学術振興会（JSPS）科研費「動的再構成可能なトポロジカルナノフォトンクスの研究（課題番号：JP20H05641）」、「非エルミート光学を用いた新奇なプラズモニック光学素子の実現（課題番号：JP21K14551）」、「非エルミートプラズモニクスによる量子バイオセンシング（課題番号：24K01377）」、「ナノ構造における光角運動量の電子線による超分解能解析と制御（課題番号：JP24H00400）」、「キメラ準粒子のアーキテクチャー（課題番号：24H02232）」の支援により実施されました。

用語解説

（注 1）非周期モノタイル

一種類の形状だけで平面を隙間なく敷き詰めることができる一方、その敷き詰めが周期的にはならないタイルのことです。2023 年に発見されたハット型タイルは、その代表例です。

（注2）アインシュタイン問題

ここでの「Einstein」は物理学者のアインシュタインではなく、ドイツ語で「一つの石」を意味する “Ein Stein” に由来します。周期的には敷き詰めることができず、非周期的にのみ平面を敷き詰めることのできる、単一形状のタイルは存在するか、という長年の数学的問題です。

（注3）円偏光のヘリシティ

電場の向きが光の進行に伴って回転する光を円偏光と呼びます。左回り・右回りの違いをヘリシティと呼び、鏡映対称性が破れた構造では両者に対する応答が異なる場合があります。

（注4）準周期構造・準結晶

結晶のように同じ構造が一定間隔で繰り返される周期性はないものの、全体として規則的な並び方をもつ構造を準周期構造と呼びます。準結晶は、そのような秩序をもつ物質で、通常の結晶では許されない回転対称性や、明瞭な回折ピークを示すことがあります。

（注5）カイラル

鏡に映した形を回転や平行移動だけでは元の形と重ね合わせられない性質です。本研究では、二次元面内で鏡映対称性を持たないことをカイラルと呼んでいます。

（注6）メタサーフェス・フォトリック結晶

メタサーフェスは、光の波長よりも小さな人工構造を平面上に並べ、光の進む方向や偏光などを制御する薄型の光学素子です。フォトリック結晶は、屈折率の異なる材料を光の波長程度の周期で配列し、光の伝わり方を制御する人工構造です。

（注7）モノタイル準格子

本研究では、ハット型モノタイルの各タイルの重心に点を置いて得られる非周期的な点配列を指します。周期性はありませんが、長距離秩序を持つため、準周期構造として扱うことができます。

（注8）ブラッグピーク

秩序を持つ構造に光やX線などの波を照射したとき、特定の方向に強い回折が現れる現象です。明瞭なブラッグピークは、構造中に長距離秩序が存在することを示す重要な指標です。

問合せ先

〈研究内容について〉

東京大学 生産技術研究所

准教授 森竹 勇斗（もりたけ ゆうと）

Tel : 03-5452-6139 E-mail : moritake@iis.u-tokyo.ac.jp

〈機関窓口〉

東京大学 生産技術研究所 広報室

Tel : 03-5452-6738

E-mail : pro@iis.u-tokyo.ac.jp

東京科学大学 総務企画部 広報課

Tel : 03-5734-2975

E-mail : media@adm.isct.ac.jp

NTT 株式会社

先端技術総合研究所 広報担当

[お問い合わせフォームへ](#)