2026 年 9 月 14 日
NIMS（国立研究開発法人物質・材料研究機構）／
豊田工業高等専門学校／国立大学法人佐賀大学／国立大学法人 奈良国立大学機構 奈良女子大学

超分子技術で量子マテリアルを構築

― 有機分子を用いてトポロジカルエッジ状態を直接観測 ―

NIMS は、豊田高専、佐賀大学、奈良女子大学、ドイツ・キール大学などとの共同研究により、ハニカム格子とカゴメ格子の両方の性質をもつ２次元構造を有機分子で作製し、トポロジカル物質に特有のエッジ状態（内部とは異なる「端」にのみ存在する状態）が現れることを発見しました。有機分子は構造を柔軟に設計できる一方、分子同士を電子的に強く結びつけることが難しく、これまでトポロジカル物質の合成は無機材料が中心でした。今回、有機分子の集積体（超分子）で特殊な電子状態を実現したことは、有機分子を使った新たな量子マテリアルの設計につながります。この研究成果は、９月２日に Nano Letters 誌にて掲載されました。

研究成果の概要

■従来の課題

量子技術は社会を根本から変えていくことが期待される革新的な技術ですが、今後の一層の発展のためにはその基盤となる量子マテリアルの開発が不可欠です。しかし、これまでに知られている量子マテリアルはそのほとんどが無機材料からできており、設計と合成の柔軟性に大きな問題がありました。一方で、有機分子が集まって形成される超分子構造には、柔軟な設計が可能であるという特徴があります。しかし、超分子は一般的に構成要素間の電子的な結合が弱く、量子マテリアルとして利用するには適していませんでした。そのため、有機分子をベースにした量子マテリアルの新たな設計方法の開発が望まれていました。

■成果のポイント

今回、研究チームは、トリプチセン分子を拡張した有機分子（トリプチセン誘導体、図１左を参照）を構成単位として組み上げることで、ハニカム格子とカゴメ格子の両方の性質をもつ２次元構造（２原子カゴメ格子）を作ることに成功しました。ハニカム格子はグラフェン（グラファイトの一層分）の持つ、その名の通り蜂の巣（ハニカム）のような構造の格子であり、カゴメ格子は日本の伝統工芸の籠目に似た構造をもつ格子で、それらの特異な電子状態のために、近年、極めて盛んに研究が行われています。それらのハイブリッドとも言える２原子カゴメ格子を実際の物質でつくったのは、これまでにほとんど例がありません。

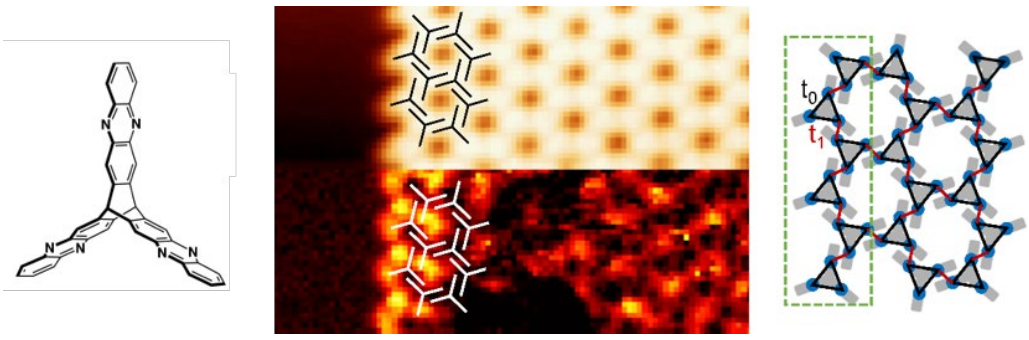

図１：（左）今回使用したトリプチセン誘導体の分子構造。（中央）トリプチセン誘導体を集積して作製した超分子の形状（上）およびその端に存在するトポロジカルエッジ状態（下）を示す走査トンネル顕微鏡像。（右）トリプチセン誘導体からできた超分子の模式図。プロペラ状のグレーの領域がトリプチセン誘導体を表す。

さらに、研究チームが作製した試料を走査トンネル顕微鏡で観測したところ、有機分子の２次元構造とその外部との境界（エッジ）の領域にのみ存在する特殊な電子状態を発見しました。詳細な理論解析を行ったところ、この状態は数学的な構造（トポロジー）に由来する、トポロジカルエッジ状態であることがわかりました。これは、この試料の量子マテリアルとしての性質を明瞭に示しています。また、有機分子からできているにも関わらずこのような状態をもつのは、有機分子同士が強く結合しているためであり、これはトリプチセン誘導体を構成する３つの平面がプロペラ型に立体的に配置され、隣どうしで互いに接触することに由来しています（図 1 右の t_1）。このようなユニークな分子構造を設計・合成して実際に超分子として集積化できたことが、本研究成果が得られた要因です。

■将来展望

今後は今回の成果をもとにして、量子技術の応用に向けたマテリアルの開発を加速していきます。たとえば、このようなユニークな格子構造を利用することで、高移動度の半導体的な状態と超伝導状態との切り替えや、超高速・超低消費電力の光スイッチング、さらには室温での無損失エネルギー輸送が可能になるかも知れません。また、有機分子のもつ設計の柔軟性を活かして、さまざまな量子マテリアルを実現していきます。

■その他

- 本研究は、NIMS ナノアーキテクトニクス材料研究センターの内橋隆副センター長、荒船竜一主幹研究員、若林克法グループリーダー、豊田高専の阿波賀邦夫校長、佐賀大学の水津理恵准教授、奈良女子大学の土射津昌久准教授、ドイツ・キール大学の Richard Berndt 教授などからなる研究チームによって、JSPS 科研費(課題番号 25H00867, 25K01670, 20H05621, 20H02707, 23K03322, 25K01609, 22H05473)、JST さきがけ（課題番号 JPMJPR21A9)、文部科学省トップレベル研究拠点プログラム（WPI）の一環として行われました。
- 本研究成果は、2026 年 9 月 2 日に米国化学会発行の Nano Letters オンライン版にて掲載されました。

研究の背景

量子技術は社会を根本から変えていくことが期待される革新的な技術であり、政府の国家戦略技術領域に指定されている重要な研究分野です。今後の一層の発展のためにはその基盤となる量子マテリアル[1]の開発が不可欠であり、世界中で熾烈な競争が繰り広げられています。量子マテリアルとして特に注目されている材料として、例えば、トポロジカル物質の一種であるトポロジカル絶縁体があげられます。トポロジカル絶縁体にはトポロジー[2]という数学的な構造によって、エッジ状態と呼ばれる特殊な電子状態がその物質と外部との境界（エッジ）で現れます。そこではエネルギーを消費しないスピン流(磁性の起源であるスピンの流れ)が流れるため、スピントロニクスへの応用が期待されています。また、２次元材料として非常に有名なグラフェン（グラファイトの一層分）も量子マテリアルの一種であり、別の形のエッジ状態が現れるとともに、非常に高い電子移動度をもつことから、電子デバイスへの応用が期待されてきました。

これまでに知られている量子マテリアルは、そのほとんどが無機材料からできており、構成要素である原子が直接つながってその骨格であるネットワーク構造（格子）をつくっています。このため、その構造を設計し、実際に試料を合成する際の自由度が低く、制御が難しいという問題がありました。この問題を解決するための一つの方法として、構成要素として有機分子を使うことが考えられます。有機分子は化学的な手法によって、さまざまな形や大きさ、性質のものを作りだすことが可能であり、さらにそれを集積化することによって、巨大なネットワーク構造（超分子[3]）をつくることができます。このネットワークは分子の形や性質によって決まるため、非常に柔軟な構造設計が可能です。たとえば、昨年のノーベル賞の対象となった金属有機構造体（MOF）もそのような超分子の一種であり、現在さまざまな実用化が進められています。しかし、超分子は一般的に構成要素間の電子的な結

合が弱く、量子マテリアルとしての機能を発揮させるのには適していませんでした。そのため、有機分子をベースにした量子マテリアルの新たな設計方法の開発が望まれていました。

研究内容と成果

今回、NIMS および豊田高専、佐賀大学、奈良女子大学、ドイツ・キール大学などからなる研究チームは、トリプチセン分子を拡張した有機分子（トリプチセン誘導体）を構成単位として組み上げることで、ハニカム格子とカゴメ格子 [4] の両方の性質をもつ２次元構造（２原子カゴメ格子：図２を参照）を作ることに成功しました。ハニカム格子はグラフェン（グラファイトの一層分）の持つ構造であり、単純な構造ながらも、その中で動く電子の質量がゼロになる（電子の運動が停止できない）などの特殊な性質をもっています。一方で、カゴメ格子は日本の伝統工芸の籠目に似た構造をもつ格子であり、逆に電子の質量が無限大になる（電子が動くことができない）などの特別な状態を生み出します。このために、カゴメ格子では電子どうしの相互作用によって、異常な集団的な振る舞いが起こります。近年、ねじれ積層させたグラフェンにおける超伝導が発見され、世界中で爆発的に研究が行われていますが、超伝導が起こる原因もこれに似た特殊な電子状態にあると考えられています。このようなハニカム格子とカゴメ格子の両方の性質をもつ格子は、有機分子のネットワークからなる超分子を利用することによって、実現が可能になりました。

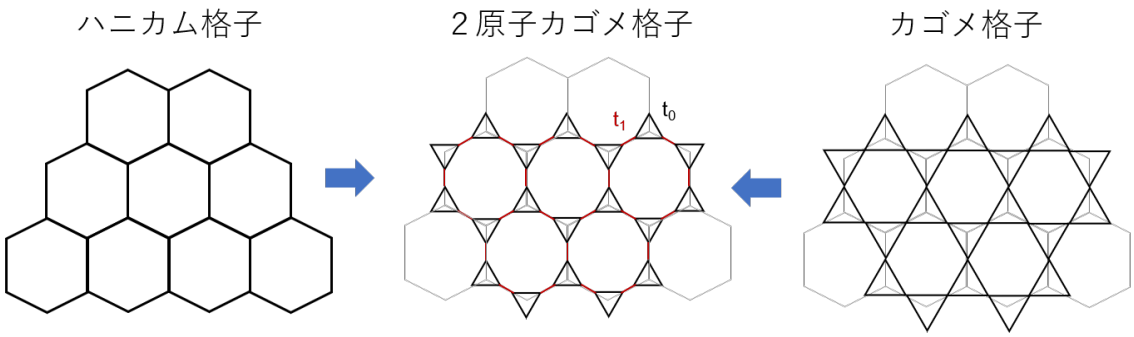

図２：ハニカム格子（左）、カゴメ格子（右）、今回新しく作製した２原子カゴメ格子（中央）の模式図

研究チームが作製した試料を走査トンネル顕微鏡 [5] で観測したところ、その境界（エッジ）の領域にのみ存在する特殊な電子状態があることを発見しました。図１の中央上の像は分子ネットワークの形状を反映しており、右に模式的に示したように分子が互いに接近して格子を形成していることがわかります。この構造は、図２中央の２原子カゴメ格子と同等なものです。一方、図１の中央下の像は、電子状態を反映しており、エッジ付近の分子のみが明るく見えています。これは、この領域には高い密度の電子が存在できることを示しています。

さらに研究チームは詳細な理論解析によって、この状態は試料のトポロジカルな状態に由来する、トポロジカルエッジ状態であることを明らかにしました。この状態は外乱に対して強く、数学的な構造（トポロジー）のために必ずエッジに存在します。例えば、ドーナッツには穴が一つありますが、これをいくら変形しても、ドーナッツをナイフで切ってしまわない限り、穴の数は一つのままです。それと同じように、連続的に（電子状態を）変形してもエッジ状態が消えることはありません。ただし、通常の超分子では、構成単位の分子どうしの結合が弱いため、実質的に独立した分子の集合として振る舞い、このようなことは起こりません。今回作製した試料では、有機分子同士が比較的強く結合しているために、上に述べたようなトポロジカルな性質が現れ、量子マテリアルとして機能します。有機分子同士が強く結合するのは、トリプチセン誘導体を構成する３つの平面がプロペラ型に立体的に配置され、隣どうしで互いに接触しているためです。このようなユニークな分子構造を設計・合成して実際に超分子として集積化できたことが、本研究成果が得られた要因です。

今後の展開

今後は今回の成果をもとにして、量子技術の応用に向けたマテリアルの開発を加速していきます。今回作製した超分子には、質量がゼロと無限大の２種類の電子が共存しており、電子密度を調整することで、非常に電子移動度の高い半導体的な状態と超伝導状態とを切り替えることが可能になるかも知れません。この分子のネットワークには、高密度の穴が存在しており、そのために必要なキャリアドーピングをすることも十分に可能です。

また、理論的には、このようなユニークな格子構造がエキシトン絶縁体（半導体中の電子とホールが対になって凝縮した状態）などの特殊な量子状態をもたらすことが予想されています。このような状態を作り出すことができれば、超高速・超低消費電力の光スイッチングや、室温での無損失エネルギー輸送を実現できるかも知れません。さらに、有機分子の設計を工夫することによって、全く異なる形のネットワーク構造を作ることも可能です。有機分子のもつ設計の柔軟性を活かして、今後はさまざまな量子マテリアルを実現していきます。

■掲載論文

題目	Direct Observation of the Zigzag Edge States of a Supramolecular Diatomic Kagome Lattice
著者	Ryohei Nemoto, Xiangzhi Meng, Behzad Mortezapour, Alexander Weismann, Saya Nakano, Masahisa Tsuchiizu, Ryuichi Arafune, Noriaki Takagi, Sho Nakamura, Katsunori Wakabayashi, Rie Suizu, Richard Berndt, Takashi Uchihashi, and Kunio Awaga
雑誌	Nano Letters
DOI	10.1021/acs.nanolett.6c03195
掲載日	2026 年 9 月 2 日

■用語解説

[1] 量子マテリアル：電子やスピンなどの量子状態を人為的に制御することで、従来の半導体やエレクトロニクスでは不可能な、新たな量子力学的機能を発現する物質・材料の総称。具体的には、トポロジカル絶縁体や、グラフェンなどの２次元材料がその代表例としてあげられる。

[2] トポロジー：図形を切ったり貼ったりせずに、引き伸ばしたり縮めたり（連続的に変形）しても変わらない性質を研究する数学の分野であり、位相幾何学とも呼ばれる。トポロジーの世界では、コーヒーカップとドーナツ（トーラス構造）は穴が一つ空いているという共通の性質をもっているため、同じ形とみなされる。トポロジーとしての性質をもつことを、トポロジカルという。物質中の電子状態はある種のトポロジカルな性質を持つことがあり、その場合は物質の境界（エッジ）に特殊な状態が現れる。これをトポロジカルエッジ状態と呼ぶ。トポロジカル絶縁体やグラフェンのエッジ状態は、トポロジカルエッジ状態である。

[3] 超分子：複数の分子が共有結合（原子同士が電子を共有する強い結合）ではなく、水素結合や静電気的な引力などの弱い結合によって自発的に集まり（自己組織化）、１つのまとまった高次な機能を持つようになった分子の集合体のこと。

[4] ハニカム格子とカゴメ格子：ハニカム格子は、正六角形を隙間なく敷き詰めた、いわゆる蜂の巣（ハニカム）状の幾何学構造。グラフェンは炭素原子のハニカム格子からできており、この構造のために、電子は質量がゼロの粒子として振る舞う。カゴメ格子は日本伝統の竹編み細工である籠目（かごめ）の模様に由来する幾何学構造。この構造のために、電子が動くことができなくなり、電子どうしの相互作用によって強磁性や超伝導などが現れると考えられている。

[5] 走査トンネル顕微鏡：個々の原子を識別できるほどの超高分解能を持つ顕微鏡であり、非常に鋭い針（探針）で試料の表面をなぞる（走査する）ことで観察を行う。探針と試料の間にはトンネル効果による電流が流れ、それを解析することで物質の電子状態に関する情報を得ることもできる。

本件に関するお問い合わせ先

研究内容について	**NIMS ナノアーキテクトニクス材料研究センター（MANA） 副センター長** **内橋 隆** E-mail: UCHIHASHI.Takashi@nims.go.jp TEL: 029-860-4150 URL: https://samurai.nims.go.jp/profiles/uchihashi_takashi
	豊田工業高等専門学校 校長 **阿波賀 邦夫** E-mail: awaga@toyota-ct.ac.jp TEL: 0565-32-8811
	佐賀大学 シンクロトロン光応用研究センター 准教授 **水津 理恵** E-mail: rsuizu@cc.saga-u.ac.jp TEL: 0952-28-8854 URL: http://www.slc.saga-u.ac.jp
	奈良女子大学 研究院自然科学系 准教授 **土射津 昌久** E-mail: tsuchiiz@cc.nara-wu.ac.jp TEL: 0742-20-3987 URL: https://cmtp.phys.nara-wu.ac.jp
報道・広報について	**NIMS 国際・広報部門 広報室** 〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1 E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017
	佐賀大学 広報企画 広報室 〒840-8502 佐賀市本庄町 1 E-mail: sagakoho@mail.admin.saga-u.ac.jp TEL: 0952-28-8407、8154
	奈良女子大学 総務課 広報・基金係 〒630-8506 奈良県奈良市北魚屋東町 E-mail: somu02@jimu.nara-wu.ac.jp TEL: 0742-20-3220

NIMS とは？

NIMS（ニムス）は、物質・材料科学の研究に特化した国立研究開発法人です。
エネルギー、環境、医療、インフラ、モビリティ――私たちの暮らしを支えるあらゆる技術は「物質」と「材料」で成り立っています。
NIMS はそれらの基礎・基盤研究だけでなく、成果の普及とその活用の促進まで総合的に行っています。
社会の発展は常に物質・材料科学の進歩とともにあり、いま、地球規模の環境・資源問題の解決に向けたカギとして、その重要性はいっそう高まっています。
NIMS は「材料で、世界を変える」というビジョンのもと、持続可能で豊かな社会の実現を目指して、世界最先端の研究を続けています。

【NIMS を掴む参考ページ】

NIMS はこんな研究所！　https://www.nims.go.jp/nims/introduction.html
NIMS ビジョン　https://www.nims.go.jp/nims/profile.html#vision