

ジャイロイド金属有機構造体が拓く機能性と量子物性

鬼頭 俊介 (東京大学大学院新領域創成科学研究科 kitou@edu.k.u-tokyo.ac.jp)

石川 孟 (東京理科大学理学部第一部 hajimeishikawa@rs.tus.ac.jp)

固体の性質は系がもつ対称性によって支配されるため、固体中の原子や分子がもつ電子自由度の配列を制御することは、物性や機能を制御する最も効果的な方法である。特に、特徴的な幾何学格子の上で電子同士が強く相互作用する物質を創出することが未知の物性、機能の実現への鍵である。このことは二次元ハニカム格子をもつグラフェンが次世代エレクトロニクス材料として大きな注目を集めていることや、電子スピンを三角格子上に並べた磁気フラストレーション系が、準粒子や磁気エントロピーを利用した量子機能材料として盛んに研究されていることから知る事ができる。

様々な幾何学構造の中でも、1970年に数学的に定義された三次元の周期極小曲面である「**ジャイロイド**」は、多くの研究者を魅了してきた。自然科学分野では1960年代から認識され、これまでに生体、ポリマー、液晶、プラスチックなどの幅広い系においてジャイロイド構造が確認されており、力学的性質、光学的性質、イオン伝導性が研究されている。これらの系では、ナノメートルからマイクロメートル程度の様々なスケールのジャイロイド構造が実現しており、最近では3Dプリンターで作ったジャイロイドが高強度材料として注目を集めている。

最小のジャイロイド構造として、電荷やスピンといった電子がもつ自由度をジャイロイド構造に並べた系を考えることができる。これらは物性物理分野で理論研究の対象となっており、量子スピン液体やフラットバンドをもつ金属といった、基礎科学か

ら電子機能開拓まで幅広い興味を集める電子状態の実現が予測されている。また、ジャイロイド構造には**カイラリティ**があるため、非相反物性や、らせん型スピン構造と関連した興味深い現象の発現が期待される。しかしながら、構成単位の大きなポリマーや液晶物質においては、ジャイロイド構造に並んだ電子自由度間の相互作用が物性に現れた例は知られておらず、新たな物質系を開拓する必要があった。

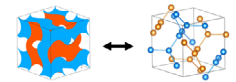
我々は、過去にプロトン伝導体として注目を集めた、シュウ酸配位子によって遷移金属イオンが架橋され三次元ネットワークを組む**金属有機構造体** (Metal-Organic Framework, MOF) において、スピンをもつ遷移金属イオンや電気双極子モーメントをもつ分子がジャイロイド構造を形成する点に着目した。遷移金属としてコバルトをもつ系において、物性研究が可能な高純度な結晶の作製に成功し、磁氣的・電氣的特性、結晶構造を低温まで精密に測定した。その結果、ジャイロイド構造に特有の幾何学とキタエフ相互作用が生み出す磁気フラストレーションにより、多彩な磁気相が競合する様子を観測した。さらに、ジャイロイド格子に配置された電気双極子モーメントの自由度に起因し、常誘電状態から**焦電性**をもたずに**圧電性**を示す新奇的な構造相転移を観測した。これらは、原子スケールのジャイロイド構造に特有な電子物性を世界に先駆けて発表した成果であるといえる。

ジャイロイド型 MOF は、幾何学、材料科学、量子物性物理学を結びつける新たな結晶舞台として、その可能性を大きく広げつつある。

用語解説

ジャイロイド:

1970年に数学的に定義された曲面(下図左)。ジャイロイド曲面は空間を二分し、それぞれの空間にジャイロイド格子と呼ばれる三次元ネットワークを形成することができる。単独でもジャイロイド格子と呼ばれるが、互いに逆向きのカイラリティをもつ2つのジャイロイド格子が入り子状に配置される場合、ダブルジャイロイドと呼ばれる。局所的には原子が3方向に120°の角度をもって結合しているため、三次元ハニカム格子とも呼ばれる。



ジャイロイド曲面 ジャイロイド格子

カイラリティ:

ある物体を鏡に映したときに、元の形と鏡像が重ね合わせることができない性質のことを指す。身近な例でいうと、右手と左手は鏡像の関係にあるけれど、右手をどう回しても左手と完全に一致することはない。

金属有機構造体:

金属イオンが有機分子によって配位され、ネットワーク構造を形成する物質。多孔性配位高分子とも呼ばれる。ガス吸蔵材料や触媒への応用へ向けた研究が盛んである。2025年にはMOFの先駆的な研究を行った研究者らに対してノーベル化学賞が与えられた。

圧電性、焦電性:

圧力を加えた時に電気分極が発生する性質を圧電性と呼ぶ。一方、圧力を加えなくとも自発的に電気分極を生じる性質を焦電性と呼ぶ。焦電性をもつ物質は圧電性も併せもつ。