

特集

量子物質の科学

量子物質科学の進展

東京理科大学 先進工学部 物理工学科 教授 とおやま たかみ 遠山 貴巳

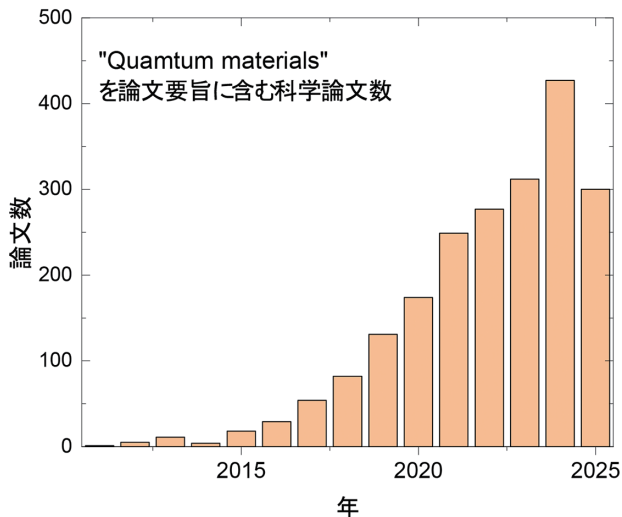
物質・材料は理科大においても重要なキーワードであり、様々な物質科学・材料科学の研究が精力的に行われている。物質科学では量子力学がその基礎となっている。シュレーディンガーやハイゼンベルク、ボルンといった歴史に名を残す物理学者たちが量子力学の基礎理論を構築したのが 100 年前だが、量子力学は今やミクロな世界の物質やエネルギーの振る舞いを記述する理論として、現代社会を支える技術の根幹となっている。例えば、半導体の動作原理や特性を理解する上で、量子力学が不可欠であることはよく知られている。

近年、古典力学・電磁気学や基礎的な量子力学からは本質的な物性を説明できない物質群を表す用語として、「量子物質」または「量子材料」（英語では Quantum materials）が使われ始めている。初めて耳にされる方も多いかもしれない。実際、この用語（Quantum materials）が頻繁に用いられるようになったのは

2020 年の少し前からである【図 1】。本特集では、物質の理解には量子力学が不可欠であり、その理解のもとではじめて材料として活用できるという観点から、Quantum materials を「量子物質」と呼ぶことにする。

量子物質という名前は、もともと、強相関電子系と呼ばれる物性物理学の一分野で研究されていた物質群を指す用語として導入されたようである。強相関電子系の共通の研究テーマは、これまでの固体物理の教科書の概念では理解できないような物性を持つ物質の理解と探索である。そのため、シリコンなどの伝統的な半導体物質は量子物質のカテゴリーには入らないと考えている研究者が多い。

強相関電子系では、電子間のクーロン力（強相関効果）により物質中の電子の間にもつれが生じることで複数の自由度（電子の持つ電荷、スピン、軌道）が出現する。それらの自由度が、格子振動を含む結晶のなかで組み合わせることで新しい電子状態、新しい量子現



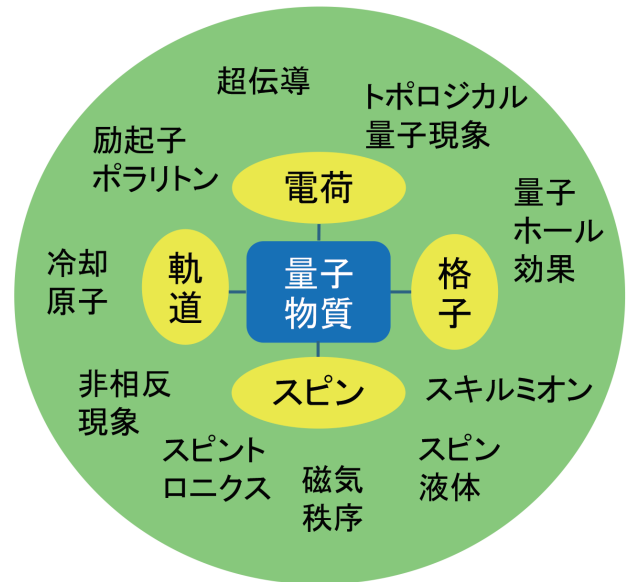
【図1】“Quantum materials”を用いた論文数の推移 (Web of Science, 2025年8月20日現在)

象が生み出される。これは、物性物理学における創発性 (Emergent), つまり多数の電子が集まることで個々の電子の特性からは予測できない協調的な特性の発現となっている。

しかし、創発性は強相関電子系だけの特徴ではない。2007年のトポロジカル絶縁体の発見が創発性の新たな転機となった。電子波動関数の幾何学的 (トポロジカル) 特性に起因してトポロジカルに保護された電子状態がトポロジカル絶縁体では実現している。同時期にはグラフェンにおける分数量子ホール効果の観測なども報告された。その結果、トポロジカルに保護された散逸のない輸送や、電気素量の整数倍ではない電荷 (分数電荷) とフェルミ粒子やボース粒子とも違う統計性 (分数統計) を持つ創発粒子など、トポロジカル秩序の特徴を生かした創発現象の理解が一気に進んだのである。創発性はもはや強相関電子系に限定されない現象となった。そのため、創発現象を生み出す舞台を提供する物質群が量子物質であるともいえる。

量子物質の例としては、超伝導や磁気秩序などの電子相関に起因する電子・スピン・電荷秩序を示す物質、逆に秩序を起こさない量子スピン液体のような物質、量子ホール系、トポロジカル絶縁体、グラフェンに代表されるディラック電子系のような波動関数に起因する量子効果が現れる物質などがあげられる【図2】。

さらに、冷却原子、励起子ポラリトンなど集団特性が量子的な挙動によって支配される物質群も量子物質とみなすこともできる。つまり、量子力学による粒子の波動関数が物質の特性を支配するような物質群を量子



【図2】量子物質の概念図

物質と広くとらえることができる。

量子物質は、基礎物理学的な興味だけでなく新しい機能性材料として社会に波及する可能性も秘めている。例えば、量子物質を用いた量子コンピュータの開発などが精力的に行われており、計算技術と情報技術を変革した20世紀の半導体と同様に、情報、センシング、エネルギー、および関連技術に量子物質は革命を起こす可能性がある。一方で、実用材料開発の直面する課題のなかにこれまで認識されなかった量子現象とその学理が埋もれていることもあり、それを発掘することが物質・材料科学の発展にとって必要不可欠である。量子物質から材料へという流れと合わせて、材料研究から創発現象を生み出す量子物質の学理へという流れを両輪とする物質・材料研究が求められている。

以上のような物質・材料科学研究を背景に、理科大発の量子物質科学の創出を目的として2024年度に量子物質科学懇談会を総合研究院に設立させていただいた。まずは理科大内での量子物質研究の交流を進めるために、これまでにミーティングを複数回開催してきている (詳細は <https://www.rs.tus.ac.jp/tohyama/QMS/QMS.html> を参照)。本特集では、理科大内で量子物質科学分野で活躍されている先生方にその研究内容について解説いただくことにした。この分野の現状に触れていただければ幸いである。