

物理学賞は、超伝導体や超流体、薄膜磁性体に関する理論研究において「トポロジカル相転移と物質のトポロジカル相の理論的発見」に貢献したことで、英国出身の3名の米国の理論物理学者が受賞しました。今回の授賞は理論物理学者と実験研究者が互いに刺激し合いながら研究を推進する、これからの物性物理学の方向性を示していると感じます。今後、新しい材料やデバイスを求めて「トポロジカル絶縁体」や「トポロジカル超伝導体」などのトポロジカル物質に関する研究が活発になると思いますので、佐藤勝昭先生と宮下哲氏にわかりやすく解説していただきました [和田]。

業績の概要と最近の研究展開

佐藤 勝昭, 宮下 哲

2016年ノーベル物理学賞は、米国ワシントン大学の David J. Thouless 教授、プリンストン大学の F. Duncan M. Haldane 教授、ブラウン大学の J. Michael Kosterlitz 教授の3名に授与されました。授賞理由は「トポロジカル相転移と物質のトポロジカル相の理論的発見」です。トポロジーというのは、穴が1つあるコーヒーカップはドーナツに変形できるのに対し、穴のないボールには決して変形できないという例 (図2) に象徴される「図形の不変な指標 (今の場合には穴の数)」に着目する数学の概念です。受賞者たちは、トポロジーという概念を物理学の世界に持ち込むことによって、物質の見方を変え、これによって新しい物理学の世界を拓きました。

研究は、1970年代にさかのぼります。KosterlitzとThoulessらは、それまで2次元系では起きないとされていた相転移が、低温領域で「渦の対」などの「トポロジカルな欠陥」があれば起きることを明らかにし、超流動体・超伝導体・磁性体薄膜における相転移現象を説明しました。「コスタリッツ・サウレス転移」として教科書にも載っているのです、ご存じの読者も多いと思います。

1980年代になると、Thoulessは甲元真人 (元・東京大学)らとともに、当時見いだされた量子ホール効果 (極低温において強磁界中の半導体2次元電子ガスの電気伝導率が e^2/h の整数倍に量子化される現象) が、電子系のトポロジカルな性質で記述できることを明らかにしました。一方、Haldaneは、Thoulessの理論を発展させ、2次元の六方対称系モデルにおいて、磁界がなくても量子ホール効果が出現すること (異常量子ホール効果) を理論予測しました。この理論は、2013年にCr添加 (Bi,Sb)₂Te₃ 薄膜の異常量子ホール効果の観測によって立証されました。Haldaneは、さらに、トポロジーの効果を取り込むことでスピンの大きさ (整数か半整数か) によって鎖状の磁性体の性質が異なることを予言しました (Haldane 予想)。この予言は実験的にも確認され、その後の磁性体研究の発展の礎となっています。

以上が2016年ノーベル物理学賞の主な授賞理由ですが、近年ではトポロジーの概念が3次元系にまで拡張され、トポロジカル絶縁体をはじめとするトポロジカル物質群が注目されています。トポロジカル絶縁体とは、内部は絶縁体であるが境界 (3次元系では表面、2次元系ではエッジ) が金属であるような性質をもつ物質です。2次元系の境界 (エッジ) を流れる電流は、逆向きスピンをもつ電子が互いに逆方向に回っているため、正味の電流値はゼロであるがスピン流は流れるという不思議な現象が起こります (量子スピンホール効果)。3次元系ではBi₂Se₃など重い金属の化合物で見られ、スピン軌道相互作用によって電子の流れとスピンの向きが強く結合しているため、スピントロニクスにおけるロバストなスピン源や、スピン流と電流の間の変換効率の高いスピンホール素子への応用が期待されています。

また、トポロジカルな磁気構造であるスキルミオンや誘電体における特殊なドメイン構造などの興味深い現象が次々と見いだされ、「トポロジーで保護された量子状態」を用いたロバストな「トポロニクスデバイス」の概念まで現れています。トポロジーの概念はエレクトロニクス分野にとどまらず、フォトニクス分野におけるフォトニック結晶のエッジを用いた方向性光導波路への

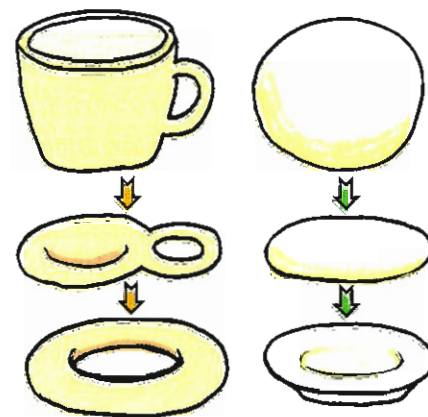


図2 コーヒーカップはドーナツに変形できるが、ボールはドーナツに変形できない。

応用も提案されています。さらに、トポロジカル超伝導体を用いることで、誤り訂正が極端に少ない量子コンピュータの実現も期待され、現在、国内外で精力的な研究がなされています。

以上述べたように、トポロジーが織り成す多彩な物理学の世界に先鞭をつけた、Thouless、Haldane、Kosterlitz 3氏のノーベル賞受賞は、応用物理学の観点からも大変意義深いものです。



プロフィール

佐藤 勝昭 (さとう かつあき)

1966年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。日本放送協会 (66~84年)、東京農工大学 (84~07年) を経て、07年から独立行政法人科学技術振興機構 (JST)。現在は、研究広報主監と研究開発戦略センター (CRDS) フェローを兼務。応用物理学会フェロー・功労会員。専門は、結晶工学、スピントロニクス。



宮下 哲 (みやした さとし)

2005年3月大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。大学共同利用機関法人自然科学研究機構分子科学研究所博士研究員を経て、11年独立行政法人科学技術振興機構 (JST) 入職。現在は、研究開発戦略センター (CRDS) にてナノテクノロジー・材料分野の研究開発立案を担当。専門は物性物理学。