



研究項目 A02 : 公募研究

「電磁現象におけるトポロジカル相の理論的探索」

研究代表者 村上 修一 (東京工業大学)

A02 班公募研究「電磁現象におけるトポロジカル相の理論的探索」で参加しております東京工業大学の村上と申します。この度は参画の機会をいただき感謝しております。以下で研究内容など簡単に自己紹介をいたします。



私はベリー曲率と言われる量が出す物理現象について広く研究しております。ベリー曲率とは、ブロッホ波動関数

$|u_{n\vec{k}}\rangle$  に対し

$\vec{\Omega}_n(\vec{k}) = i \left\langle \frac{\partial u_{n\vec{k}}}{\partial \vec{k}} \left| \times \right| \frac{\partial u_{n\vec{k}}}{\partial \vec{k}} \right\rangle$  で定義される量で、このような抽象的な量が物理現象に顔

を出すのが興味深い点です。この量は波動に対して一般に定義されるため、電子のみならず光やスピン波など多種多様な波動現象に現れます。こうした物理現象は以下の2つに分類され、これらを研究しています。

(1) 種々のホール効果

ベリー曲率があると、速度に  $-\dot{\vec{k}} \times \vec{\Omega}_n(\vec{k})$  という項が現れます。 $\dot{\vec{k}}$  は粒子に及ぼされる力に相当するため、この項が現れるためには粒子に力を及ぼす必要があります。その代表例が(内因性)異常ホール効果(強磁性体中のホール効果)であり、電場により電子に力が及ぼされて、ベリー曲率により波束が横ずれを起こし、横向きの電流を生みます。私達はそれをスピンの拡張して、内因性スピンホール効果を理論的に予言しました<sup>[1,2]</sup>。これは非磁性の金属などに電場をかけると、横方向にスピンの流れが誘起されるものであり、これはベリー曲率がスピンに依存していることにより起こります。

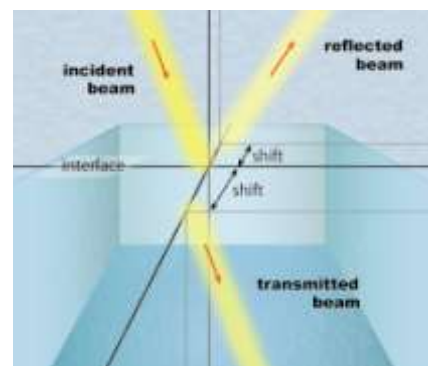


図1 : 光のスピンホール効果の模式図

さらにこれを光に応用することもできます。例

例えば異種媒質間の界面での屈折・反射の際にはこのベリー曲率が現れ、さらにベリー曲率を計算すると円偏光度に比例することから、円偏光の屈折・反射の際に光が横ずれを起こすことが予言されます(図1)<sup>[3]</sup>。これはいわば光のスピホール効果であり、実はこれは **Imbert** シフトとして知られているものです。つまり知られていた **Imbert** シフトは実は光のスピホール効果に相当することになります。さらに議論を推し進めると、ベリー曲率はバンド構造によって変化しますので、それを利用してバンド構造・ベリー曲率をデザインできます。例えばフォトニック結晶をうまくデザインすると、ベリー曲率がある波数の近傍で増大し、それによって **Imbert** シフトが数桁増大することを理論的に示しました<sup>[3]</sup>。

さらに強磁性体中のスピン波 (マグノン) も同様に波の性質を持つため、同様の枠組みを適用できます。ベリー曲率がゼロにならないためには、何らかのスピン軌道相互作用が必要であり、例えば

**Dyalooshinskii-Moriya** 相互作用や双極子相互作用がそれに当たります。私は双極子相互作用による静磁スピン波により図2のような熱ホール効果が起こることを理論的に見出しました<sup>[4,5,6]</sup>。すなわち、強磁性体に温度勾配を印加すると、(縦方向の熱流に加えて) 横方向にも有限の熱流が発生することになり、この値を計算しました。これはすなわち、温度勾配によってマグノンを駆動し、それがホール効果を起こしたことになります。

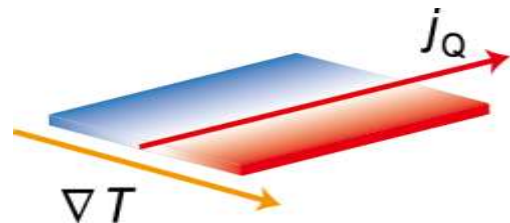


図2: マグノンの熱ホール効果の模式図

## (2) トポロジカルエッジモード

もしバンド構造にギャップがあると、このベリー曲率からトポロジカルナンバーが定義されます。さらに、その値が非自明な場合には、バンドギャップ中に系のエッジや表面に局在したモード (トポロジカルエッジモード) の存在が導かれます。例えば各

バンドに対して  $Ch_n = \int_{BZ} \frac{d^2k}{2\pi} \vec{\Omega}_n(\vec{k})$  で定義されるチャーン数は必ず整数となり、これがゼロでない場合

にはギャップ中のカイラル (一方通行) エッジモードの存在が理論的に導かれま

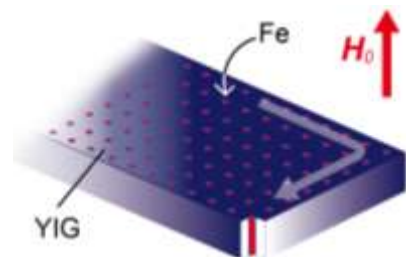
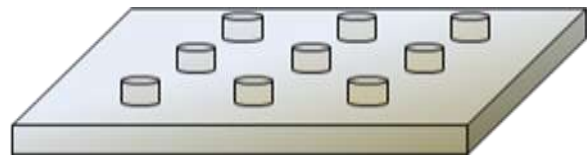


図3: トポロジカルマグノン結晶の模式図

す。その最も有名な例が整数量子ホール効果ですが、同様な例はフォトニック結晶についても実験で実証されています。私はこれをマグノンの場合に適用する研究を行い、強磁性体に人工的に周期性をうまく導入すると、マグノンのバンド構造にギャップが開き、さらにそれぞれのバンドのチャーン数がゼロでなく、ギャップ中にトポロジカルエッジモードが存在する場合があることを理論的に導きました (図3) <sup>[7,8]</sup>。このエッジモードはカイラル (一方通行) であるため、局所交流磁場を印加して波束を作り、その運動を追跡することで実証できると考えています。

最近はこのプラズモンに拡張する研究を行っています。上と同様に周期性を導入するとギャップが開きますが、それによりトポロジカルエッジモードがでるような場合を理論的に予言する試みをしており、実際三角格子状に金属表面に凹凸を設けてプラズモニック結晶を作

った場合、磁場等で時間反転対称性を破ることでチャーン数が+1 となりトポロジカルエッジモードが出ること



を示しました。現在論文は執筆中です。 図4：プラズモニック結晶の模式図

このように電子系と、マグノン、フォトン、プラズモンなどの電磁現象との間の数学的な類似点に着目し、主にトポロジーの観点から新しい物理現象を予言する試みを行っていて、この研究を通じ領域の研究に貢献したいと考えています。

## References

- [1] S. Murakami, N. Nagaosa and S. C. Zhang, *Science* 301, 1348 (2003).
- [2] スピン流とトポロジカル絶縁体--量子物性とスピントロニクス的发展--、齊藤英治、村上修一、共立出版(2014)
- [3] M. Onoda, S. Murakami, and N. Nagaosa, *Phys. Rev. Lett.* 93, 083901 (2004).
- [4] R. Matsumoto, S. Murakami, *Phys. Rev. Lett.* 106, 197202 (2011).
- [5] R. Matsumoto, S. Murakami, *Phys. Rev. B* 84, 184406 (2011).
- [6] R. Matsumoto, R. Shindou, and S. Murakami, *Phys. Rev. B* 89, 054420 (2014).
- [7] R. Shindou, R. Matsumoto, J. Ohe, S. Murakami, *Phys. Rev. B* 87,174427 (2013).
- [8] R. Shindou, J. Ohe, R. Matsumoto, S. Murakami, E. Saitoh, *Phys. Rev. B* 87, 174402 (2013).