

永長 直人

東京大学大学院工学系研究科  
教授

### ナノスピン構造を用いた電子量子位相制御

#### § 1. 研究成果の概要

磁性体におけるナノスケールのスピン構造に由来する、量子力学的位相から生じる創発電磁場を用いて、ダイオード機能とインダクター機能を開拓することを最終目標に、その基礎学理と物質設計と基礎物性の解明を行った。具体的には、まず、らせんスピン構造における創発電場を用いたインダクター機能の基礎理論を構築して、インダクタンスの値が系のサイズ、らせん周期、磁気異方性、などにどのように依存するかを明らかにし、設計指針を与えた(図1)。この理論によるとインダクタンスは系の断面積に逆比例し、微小化すればするほど大きくなるという特長を持ち、現在の最高値を数桁小さい体積の試料で実現できることが示された。これは、インダクターの新原理として微小化への途を切り拓くものである。

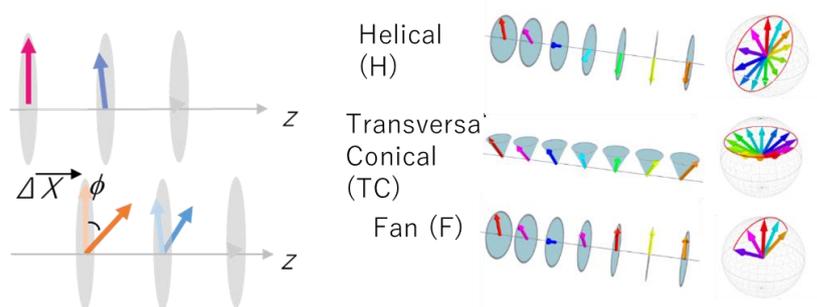


図1: 創発インダクターの機構。左:らせん磁気構造の運動は、併進運動 $\Delta X$ とスピンの回転面からの傾き角度 $\phi$ によって記述される。この2つの自由度はちょうど位置と運動量のようにカノニカル共役関係にある。右:さまざまならせん構造と関連する構造。どの構造もインダクター機能を示すが、Fan 構造ではその大きさは他に比べて小さい。

インダクターに向けた物質開発としては、反転対称性を持ち、フラストレーションも含まない正方格子構造を持つ  $\text{GdRu}_2\text{Si}_2$  に着目し、この物質で直径が 1.9nm のスキルミオンの正方格子状態が実現していることを見出した。これは、従来スキルミオンの安定化に必要であると考えられてきた空間反転対称性の破れや幾何学的フラストレーションなしでも超短周期のスキルミオン状態を実現できることを示し、物質の選択肢が大きく広がったことを意味する。また、短周期に伴う巨大な創発磁場がもたらす大きなトポロジカルホール効果の観測にも成功した。これは高効率のインダクターの基礎となる成果である。

一方のダイオード機能に関しては、スピンの非共線構造が揺らぎとして伝導電子を散乱する過程を詳細に検討し、それが磁場下で電気抵抗の非相反性—電場の 2 次に比例する電圧降下として観測にかかる—をもたらしことを理論的に明らかにした。これは、磁場によって方向がスイッチできるダイオード機構を与える可能性があり、実際この理論は以前に  $\text{MnSi}$  で観測されていた非相反電気抵抗の磁場・温度依存性を半定量的に説明することに成功した。

これらの機能開拓の基礎となる、ナノスピン構造の外場制御という観点からは、磁性体  $\text{Mn}_{1.4}\text{Pt}_{0.9}\text{Pd}_{0.1}\text{Sn}$  において微細加工法を駆使し、ジャロシンスキー・守谷相互作用と磁気双極子相互作用の競合を調整することで、スキルミオン、非トポロジカルバブル、アンチスキルミオンの間を面内磁場  $B_{\parallel}$  で相互に変換することに成功した(図2)。

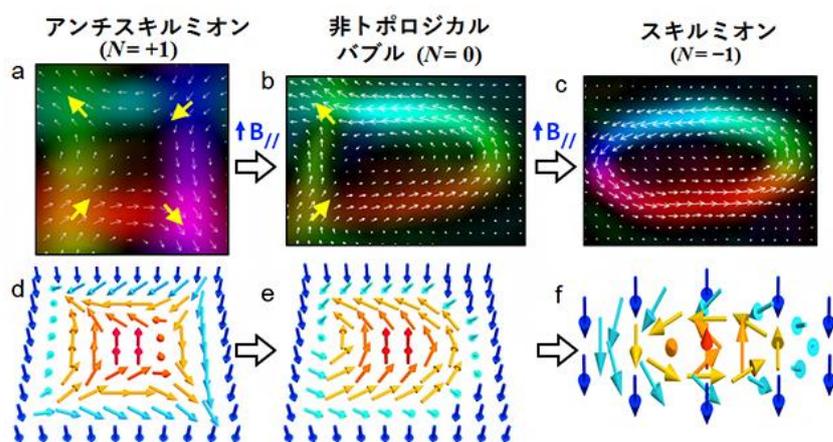


図2. (a-c) ローレンツ電子顕微鏡法で観測された  $\text{Mn}_{1.4}\text{Pt}_{0.9}\text{Pd}_{0.1}\text{Sn}$  における面内磁場によるアンチスキルミオンの変形過程と(d-e)対応する磁気構造の模式図。

#### 【代表的な原著論文】

1. Naoto Nagaosa, "Emergent inductor by spiral magnets", Japanese Journal of Applied Physics 58, 120909, 2019.
2. N. D. Khanh, T. Nakajima, X. Z. Yu, S. Gao, K. Shibata, M. Hirschberger, Y. Yamasaki, H. Sagayama, H. Nakao, L. C. Peng, K. Nakajima, R. Takagi, T. Arima, Y. Tokura, S. Seki,

“Nanometric square skyrmion lattice in a centrosymmetric tetragonal magnet”,  
Nat. Nanotechnol., advanced online publication.

3. Licong Peng, Rina Takagi, Wataru Koshibae, Kiyou Shibata, Kiyomi Nakajima, Taka-hisa Arima, Naoto Nagaosa, Shinichiro Seki, Xiuzhen Yu and Yoshinori Tokura, “Controlled transformation of skyrmions and antiskyrmions in a non-centrosymmetric magnet”,  
Nat. Nanotechnol. 15, 181, 2020.

## § 2. 研究実施体制

### (1) 永長グループ

- ① 研究代表者: 永長 直人 (東京大学工学系研究科 教授/  
理化学研究所創発物性科学研究センター 副センター長)
- ② 研究項目  
・ナノスピンの構造生成と電子位相制御の理論

### (2) 十倉グループ

- ① 主たる共同研究者: 十倉 好紀 (東京大学工学系研究科 教授/  
理化学研究所創発物性科学研究センター センター長)
- ② 研究項目  
・ナノスピンの構造物質創製と磁気構造観察

### (3) 賀川グループ

- ① 主たる共同研究者: 賀川 史敬 (東京大学工学系研究科 准教授)
- ② 研究項目  
・動的創発電磁場の検出とその機能開拓