

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13510

研究課題名（和文）電子自由度におけるガラス化・結晶化の普遍性の検証

研究課題名（英文）Validation of universality of glass in terms of electrons

研究代表者

佐藤 拓朗 (Sato, Takuro)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・特別研究員

研究者番号：60803749

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、有機強相関電子系において近年観測された電子自由度のガラス状態に着想を得て、無機系初の電子ガラス相を探索し、有機・無機の枠を超えた包括的な電子ガラス研究を目指した。具体的には、無機系電子ガラス相の候補物質マグネタイトを対象にし、バルク試料やデバイスを用いて急冷実験を行ったが、マグネタイトのガラス化は実現できなかった。しかし、本研究において立ち上げたノイズ測定系を磁気スキルミオン系に適用することで、電流駆動されたスキルミオンが示す狭帯域雑音と呼ばれる特徴的なノイズスペクトルを検出することに、世界で初めて成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題を通じて、電流駆動されたスキルミオンが、狭帯域雑音と呼ばれる特徴的なノイズスペクトルを発生することを、世界で初めて実証することに成功した。狭帯域雑音は、系が動的に結晶相を形成し、非平衡相転移したことを強く示唆しており、これによって、スキルミオン系と、電荷密度波のスライディングや第2種超伝導体におけるボルテックスフローといった分野との密接な関連が、明確に示されたと言える。当初の目的とは異なるが、本研究課題により、近年注目を集めているスキルミオンダイナミクスに関する理解を進展させることができた。デバイスへの応用という観点からも、大きな波及効果を及ぼす結果であると考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, motivated by recent experiments that report a emergence of charge glass state in organic compounds, we attempted to demonstrate a vitrification of electrons in inorganic system and to verify an universality of the charge glass state. We selected magnetite as a candidate of the charge glass state in inorganic system, but failed to observe a glass state in it. Instead of that, we applied the noise spectroscopy to magnetic skyrmion system. We finally succeeded in measuring a characteristic noise spectrum called narrow band noise that evidences the distinct dynamic phase transition in skyrmion phase.

研究分野：強相関電子系

キーワード：磁気スキルミオン 非平衡相転移 電流駆動ダイナミクス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

液体・固体・ガラスは物質の最も基本的な凝集形態であるが、類似した概念が物質中の電子集団に対しても成り立つ。例えば、強相関電子系における代表的な絶縁体である電荷秩序相は、電子が互いを避け合って周期的に局在する“電子結晶”としての側面を持ち、一方、電子が自由に動き回る金属相は、電子液体相とみなすことができる。近年、これらの電子液体相・電子結晶相に加えて、電子自由度の新奇ガラス状態(電子ガラス相)が有機強相関電子系において報告され、古典的な原子/分子の単純液体における「液体・固体・ガラス」の最も基本的な関係を、量子的な電子自由度で再現できることが確認された(図1)。一方で、広く認知されている古典的な構造ガラスとの類推から、電子ガラス相は、理論的には、急冷

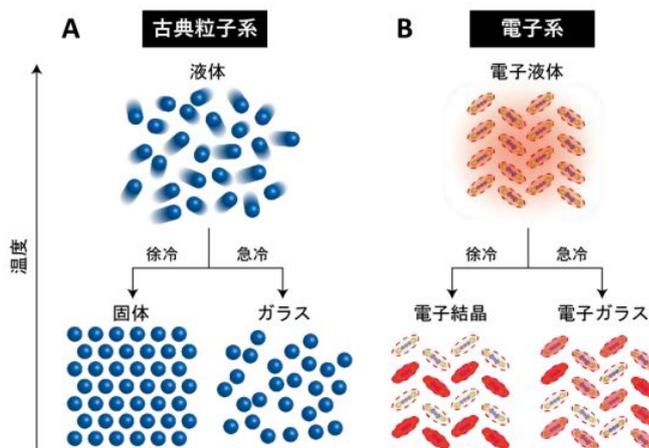


図1: (A) 古典粒子系と(B) 電子系におけるガラス転移の概念図

によって、電子結晶化を動的に避けさえすれば、あらゆる系で普遍的に発現すると考えられる。しかし現在のところ、電子ガラスは有機導体に限定されたトピックにすぎず、普遍的な新奇電子相としての地位を確立したとは言い難い。それどころか、同様に電荷秩序相を示す酸化物などでは、ガラスを念頭においた研究そのものが行われていない。この現状は、「電子のガラス化・結晶化は普遍的かどうか」という根本的な問いの実験的検証が全く行われていないことに端を発している。

そこで本研究の開始当初は、近年開発された超急冷法を駆使し、乱れ誘起ではない無機系初の電子ガラス相を探索することで、有機・無機の枠を超えた包括的な電子ガラス・電子結晶の研究を行うことを目指した。電気抵抗とそのノイズ測定を用いて、ガラス的な遅い揺らぎや結晶化現象を観測することで、電子ガラスの普遍性、及びその学術的基盤の構築が期待できる。

2. 研究の目的

以上を踏まえて本研究は、電子ガラス・電子結晶研究の舞台を無機系に展開し、以下を達成することを目的としている。

- (1) 乱れ誘起ではない無機系初の電子ガラス相を実現する
- (2) 有機系・無機系といった自由度によらない電子のガラス化・結晶化を実証することで、電子ガラス相の普遍性を確立する。

3. 研究の方法

これまでの一連の研究から、電子ガラス化に必要な臨界冷却速度は、“幾何学的フラストレーション”に強く依存することが明らかになっている。これは、系の相互作用に自己矛盾を作り、乱れや不純物の混入無しに特定の基底状態形成を阻害する効果である。そこで、本研究では、無機系の電子ガラス候補物質として、代表的な3次元フラストレート系であるスピネル物質、具体的には電荷秩序物質マグネタイト Fe_3O_4 に注目した。ジュール熱を利用した急冷法や、電気抵抗ノイズ測定を駆使し、電荷秩序化の抑制や、ガラス性を特徴づける極度に遅い電子揺らぎの観測を試みた。

4. 研究成果

- (1) マグネタイト Fe_3O_4 における電子ガラス相の検証

マグネタイト Fe_3O_4 は、120 K付近で Verwey 転移と呼ばれる金属-絶縁体転移を起こし、電荷秩序相を形成する。すなわち、急冷によって Verwey 転移を阻害することができれば、 Fe_3O_4 においてガラス相が発現することが期待される。そこでまず、様々な冷却速度のもとで電気抵抗および磁化測定を行い、ガラス的挙動の有無を調べた。しかし、 Fe_3O_4 バルク試料では、0.1-10 K/min の冷却速度範囲では、Verwey 転移を妨げることができなかった。次に、冷却効率を飛躍的に上昇させ、かつ結晶化の核形成頻度を下げてガラス化を実現しやすくすることを狙い、収束イオンビームを用いて、 Fe_3O_4 の微小デバイスを作成した。作成したデバイスを用いて、同様の実験を試みたが、デバイス加工の際に有意な乱れが混入してしまうためか、徐冷条件下において、バルク試料の輸送特性が再現されなかった。

(2) 磁気スキルミオンにおける電流駆動ダイナミクス

次に、対象物質を、 Fe_3O_4 から磁気スキルミオン系を切り替え、本研究課題において立ち上げたノイズ測定系をスキルミオン系に適用することを試みた。電流や熱勾配等を用いた磁気スキルミオンダイナミクスは、ベリー位相に起因する創発磁場の時間変化を引き起こし、特異な電磁気応答を生むことが指摘されている。しかし、これまで電気抵抗をプローブとしたスキルミオンダイナミクスの検出例は殆ど報告されていなかったため、ノイズ測定を用いて、スキルミオンの電流駆動によって生じ得るノイズスペクトルの変化を調べた。その結果、電流の増加に伴い、非線形なノイズ強度(図2)および特徴的なノイズスペクトル[広帯域雑音、狭帯域雑音(図3)]を観測することに成功した。一般に広帯域雑音は、対象としている構成要素が不純物によるピン止めから外れ、無秩序に運動を開始した際に生じる。一方、狭帯域雑音は、無秩序に運動していた構成要素の格子性が回復し、動的結晶相が形成されたことを意味する。すなわち、本研究の結果から、スキルミオン群が、電流の関数として、動的液体相から動的結晶相へと非平衡相転移したことを結論づけることができた。

また、狭帯域雑音の解析の結果、微小デバイス中のスキルミオン速度は、過去報告されたバルク試料中のスキルミオン速度より数桁も小さいことも明らかになった。デバイス中の遅いスキルミオン速度は、試料の微細化に伴いスキルミオンがより強くトポロジカルに保護されている可能性を示唆している。今回、電気抵抗を通じてスキルミオンの動的相転移を実験的に初めて検出できたことにより、スキルミオンダイナミクスを微視的に制御・検出する新たな方法を提示されたと言える。

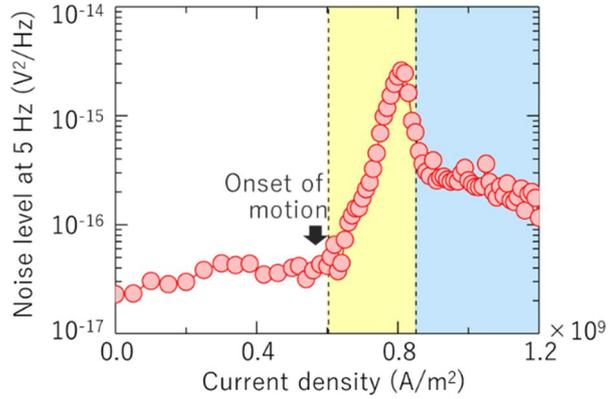


図2: スキルミオン相におけるノイズ強度の電流密度依存性

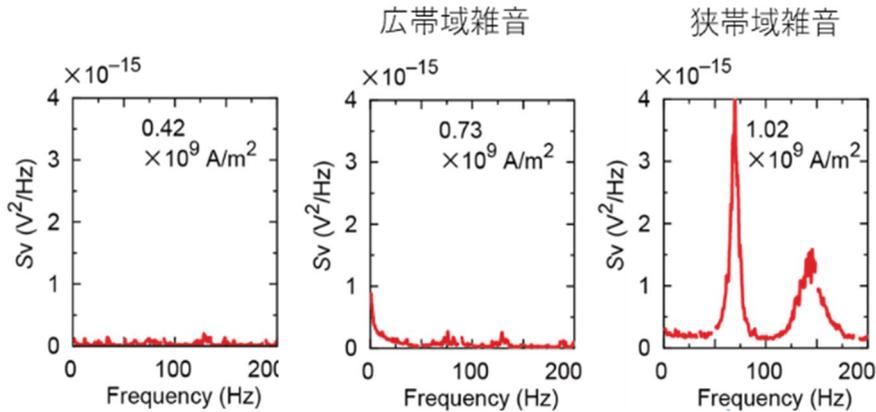


図3: スキルミオン相において観測された典型的なノイズスペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sato Takuro, Koshibae Wataru, Kikkawa Akiko, Yokouchi Tomoyuki, Oike Hiroshi, Taguchi Yasujiro, Nagaosa Naoto, Tokura Yoshinori, Kagawa Fumitaka	4. 巻 100
2. 論文標題 Slow steady flow of a skyrmion lattice in a confined geometry probed by narrow-band resistance noise	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.100.094410	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takuro Sato
2. 発表標題 Current-induced skyrmion dynamics probed by resistance noise spectroscopy
3. 学会等名 International Conference of Magnetism（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuro Sato
2. 発表標題 Sluggish steady flow of skyrmion lattice in a confined geometry
3. 学会等名 APS March meeting（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuro Sato
2. 発表標題 Dynamical phase transition in magnetic skyrmions probed by resistance noise spectroscopy
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems（国際学会）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	小椎八重 航 (Koshibae Wataru)		
研究協力者	吉川 明子 (Kikkawa Akiko)		
研究協力者	横内 智行 (Yokouchi Tomoyuki)		
研究協力者	大池 広志 (Oike Hiroshi)		
研究協力者	田口 康二郎 (Taguchi Yasujiro)		
研究協力者	永長 直人 (Nagaosa Naoto)		
研究協力者	十倉 好紀 (Tokura Yoshinori)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力 者	賀川 史敬 (Kagawa Fumitaka)		