

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：14201

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13857

研究課題名（和文）格子運動に伴うスピン系の磁気構造の変化および磁気摩擦の発生

研究課題名（英文）Change of the magnetic structure and the generation of the magnetic friction under the lattice motion

研究代表者

小松 尚登 (Komatsu, Hisato)

滋賀大学・データサイエンス学系・助教

研究者番号：50812963

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では大幅に簡略化した磁気摩擦の模型を用いて、有限サイズ系における磁気構造と物体の運動の関係や、その摩擦力への影響を調べた。数値シミュレーション及び理論的考察の結果、物体の運動の抵抗係数が小さい場合はstick状態とslip状態が別個な準安定状態のように分離することが確認された。一方、 μ が大きい場合はそうした分離が起こらず、格子の運動は熱活性化過程の一種として扱えることが確認された。この研究と並行して、統計力学模型の有限サイズ効果そのものに関する考察も行った。具体的には、長距離相互作用を持つIsing模型に関して、システムサイズが有限の場合の平均場近似からのずれを摂動論的に計算した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

stick状態とslip状態が準安定状態のように分離する例の存在や、有限サイズ系を考察することの重要性などの、この研究を通じて得られた知見は今後磁気摩擦に限らず摩擦という現象全般の微視的なメカニズムに関する研究を進める上で興味深いものとなる。また、有限サイズ効果そのものを理論的に考察する手法の構築は、将来摩擦に限らず様々な現象の考察に役立つことが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, the relationship between the magnetic structure and the motion of the object in a finite-size system and its effect on the value of the frictional force were investigated, using a largely simplified model of magnetic friction. As a result of numerical simulations and theoretical considerations, it was confirmed that when the resistance coefficient μ of the object motion was small, the stick and slip states were separated as if they had been two separate metastable states. When μ was large, on the other hand, such separation did not occur and the lattice motion can be treated as a kind of thermal activation process. In parallel with this study, the finite-size effect of the statistical mechanical model itself was also considered. Specifically, for the finite-sized Ising model with long-range interactions, deviation from the mean-field approximation was calculated using the perturbation theory.

研究分野：統計物理学

キーワード：磁気摩擦 平均場理論 有限サイズ効果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1). 研究開始時点において、磁気摩擦は摩擦の微視的メカニズムの解明のために研究され、様々な理論的モデルが提案されていた。しかし、これらのモデルは摩擦力の速度依存性などの重要な性質が互いに大きく異なっており、手探りで様々なモデルを考案し、それらにおける諸性質を調査することに研究の重点が置かれていた。

(2). 上述した磁気摩擦のモデルの振る舞いを理論的に理解することを目的として、磁気摩擦の平均場モデルに該当するものを私自身が先行研究として提案していた。しかし、このモデルはシステムサイズの増大と共に磁気構造の緩和時間が発散し、そのため熱力学極限と有限サイズ系では摩擦力の速度依存性などが異なって見えることが確認されていた。

2. 研究の目的

(1). 本研究は先行研究で提案されたモデルに対して、背景(1)で記述したモデルに対する依存性や背景(2)で記述した有限サイズ系の振る舞いなどを研究し、マクロな摩擦力の値を決定する微視的メカニズムをより深く理解することを目的としていた。

(2). (1)で記述した目的、特に有限サイズ系の振る舞いの理解のために、統計力学モデルの有限サイズ効果を理論的に考察する手法も並行して模索していた。

3. 研究の方法

主に所属機関や物性研究所のスーパーコンピュータ、及び科研費によって購入したワークステーション型計算機を用いた数値シミュレーションを用いたが、可能であれば平均場理論や摂動論などの理論的考察も併用して数値計算の結果と照合した。

4. 研究成果

(1). 磁気摩擦の平均場モデルにおける有限サイズ効果の研究

背景(2)で記述したように、磁気摩擦のモデルにおいて、有限サイズ系の振る舞いは熱力学極限に対する考察のみでは理解することが出来ないという問題があった。そこで、研究開始以前に提案していたモデルを更に簡略化したモデルを用いて、有限サイズ系における摩擦力の理論的な考察を試みた。

具体的には、無限レンジ Ising 模型とほぼ同じ形になっているが、物体のずれに該当する変数 x が存在し、結合定数 J がその x の周期関数として変化するようなモデルを取り扱った。尚、モデルの時間発展に関しては、スピンは Markov 連鎖モンテカルロ法的一种である Glauber dynamics によって更新し、物体の位置 x は overdamped Langevin 方程式によって動かした。このモデルは元の磁気摩擦のモデルから大幅に簡略化されているが、磁気構造が格子運動を妨げる実効的なポテンシャル障壁としてはたらくという本質的な要素は残したものである。このモデルに関して、物体の位置 x と磁化 m に関するヒストグラムを数値シミュレーションによって計算した。その計算結果の一例を図 1 に示す。この図のように、Langevin 方程式の抵抗係数 γ が小さい場合は物体が磁気構造の作り出したポテンシャル障壁にとらわれている stick 状態と、そこから抜け出して運動している slip 状態が二つの別個な準安定状態のように分離していることが確認されたが、一方で γ が大きい場合はそうした分離が起こらず、格子の運動は熱活性化過程の一種として扱えることが分かった。

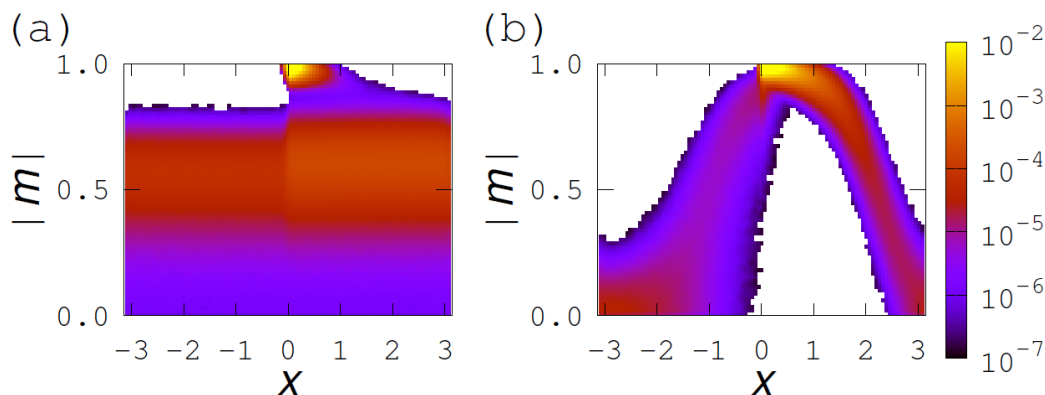


図 1. 物体の位置 x と磁化 m に関するヒストグラムの例(文献[1]より引用)、(a)は γ が小さい場合、(b)は γ が大きい場合の計算結果を表し、互いの形が定性的に異なることが分かる。

先行研究においては、摩擦の微視的なプロセスを熱活性化過程として取り扱うことで摩擦力の速度依存性を評価することが多かったが、この研究の γ が小さい場合のように stick と slip の両状態が分離する場合は、そうした手法で正しく速度を見積ることが出来ない。この結果を踏まえ、stick と slip の両状態が分離する場合の摩擦力の速度依存性について、物体の位置 x と磁化 m それぞれの変化の時間スケールが完全に分離できるという近似の下で、 m に関する実効自由エネルギーを書き下すことで考察をし、計算された物体の速度を数値シミュレーションと比較した。結果としては、抵抗係数 γ が 0 に近づくほど、つまり近似の前提となる時間スケールの分離が顕著になるほど、近似の精度が良くなることが確認された。

以上の結果は文献[1]にて発表した。尚、背景(1)にて記述したモデル依存性の問題に対する解答に関しては、本研究期間中に提示することは出来なかった。しかし、本研究が示した stick 状態と slip 状態が準安定状態のように分離する場合の存在や、有限サイズ系の考察の重要性といった知見は、磁気摩擦に限らず、摩擦という現象全般を考察する上で重要なものであり、今後上述のモデル依存性の問題に取り組む上でも役立つと考えられる。

(2). 長距離相互作用系における有限サイズ効果の摂動論的な記述

研究の目的(2)で記述したように、本研究では磁気摩擦の模型そのものの研究と並行して、統計力学模型の有限サイズ効果を理論的に取り扱う手法についても模索していた。一般にはそうした考察は困難であるが、一部の長距離相互作用系の場合、熱力学極限で平均場近似が厳密に正しい結果を与えることが知られているため、平均場近似を第零近似とした理論を展開することが可能であった。

具体的には、長距離の強磁性型相互作用を持った強磁性 Ising 模型が Glauber dynamics に従って時間発展する場合を例にとり、平均場近似が与える結果からのずれを摂動として取り扱った。長距離相互作用の形としては、初めに文献[2]で全てのスピン間の相互作用の結合定数が等しい場合、つまり無限レンジ模型を取り扱い、その後文献[3]で相互作用が距離の冪乗で減衰する場合に考察を一般化した。ただし、相互作用が冪減衰する場合に関しては、冪が十分小さく、熱力学極限で平均場近似が正しくなるという前提を崩さない場合のみを扱った。

摂動を実際に理論的に計算することで、秩序変数である磁化の平均場近似からのずれと、スピンの二体相関の時間発展を記述する常微分方程式を書き下せたので、その数値解と実際の数値シミュレーションの結果を比較した。結果としては、臨界現象や磁化反転などの大幅なずれが発生して摂動論の前提が破綻する場合などを除き、良い精度でシミュレーションの結果を近似できることが判明した。

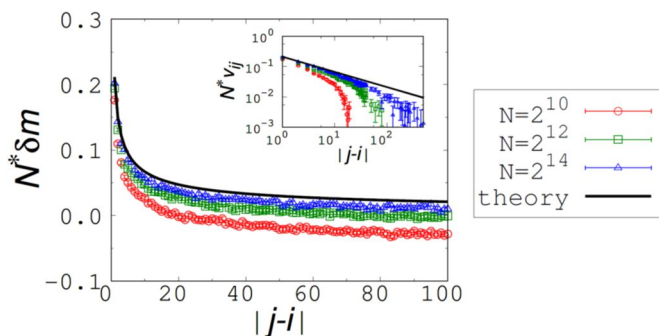


図2. スピンの二体相関の例：赤、緑、青の点は各々システムサイズ $N = 2^{10}, 2^{12}, 2^{14}$ の場合の数値シミュレーションの結果、黒い曲線は摂動論による予測を表す。小さい図は両対数プロットである。

この研究は現状では磁気摩擦と直接の関係は無いが、今後より発展させることによって、摩擦を含む様々な現象の考察に役立てることが出来ると期待される。

<引用文献>

- [1] H.Komatsu, "Transition between the stick and slip states in a simplified model of magnetic friction" *Phys. Rev. E* **108**, 034803 (2023)
- [2] H.Komatsu, "Analysis of finite-size effect of infinite-range Ising model under Glauber dynamics" *J. Stat. Mech.* 023202 (2022)
- [3] H.Komatsu, "Analysis of the finite-size effect of the long-range Ising model under Glauber dynamics" *J. Stat. Mech.* 033208 (2023)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Komatsu Hisato	4. 巻 108
2. 論文標題 Transition between the stick and slip states in a simplified model of magnetic friction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.108.034803	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hisato Komatsu	4. 巻 2023
2. 論文標題 Analysis of the finite-size effect of the long-range Ising model under Glauber dynamics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment	6. 最初と最後の頁 1-23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-5468/acc31f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hisato Komatsu	4. 巻 2022
2. 論文標題 Analysis of finite-size effect of infinite-range Ising model under Glauber dynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment	6. 最初と最後の頁 1-28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-5468/ac4984	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6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小松尚登
2. 発表標題 ばねで引かれる磁気摩擦のモデルにおけるstick-slip運動
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小松尚登
2. 発表標題 ばねで引かれる磁気摩擦の模型の運動のシステムサイズ依存性
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小松尚登
2. 発表標題 長距離相互作用をする有限サイズIsing模型における平均場近似からのずれ
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小松尚登
2. 発表標題 簡略化した磁気摩擦の模型における摩擦力と速度の関係
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小松尚登
2. 発表標題 磁気摩擦の統計力学模型における摩擦力の緩和
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小松尚登
2. 発表標題 磁気摩擦の統計力学模型における速度の急変後の緩和過程
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------