

京都大学	博士 ( 工 学)	氏名	ワ ン ユー WANG YU
論文題目	Theoretical study on dynamic behaviors of magnetic skyrmions from multi-physics phase-field simulations (マルチフィジックス・フェーズフィールドシミュレーションによる磁気スキルミオンの動的挙動に関する理論研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>This thesis focused on a nanoscale topological magnetic order (skyrmion) recently discovered in magnetic thin films, and the effects of external factors such as temperature and strain fields and interactions between skyrmions on their dynamic behavior are analyzed using a phase-field method, with the aim of clarifying the dynamic behavior of skyrmions.</p> <p>Chapter 1 is the introduction. The skyrmion is a nanoscale bubble-like magnetization structure with a topologically protected particle feature and excellent dynamic response with multi-physical external fields (such as magnetic, temperature, and mechanical fields). The fascinating controllable multi-physical skyrmion dynamic behaviors have been widely attracting attention due to their application potential in the next generation of advanced devices (such as memory, logical gate, microwave, and computing devices), which motivates this thesis. However, as a new face, the law of skyrmion dynamics is still unclear and controversial. Therefore, this thesis aims to build up skyrmion dynamic equations in multi-physical fields. Although the magnetic field effects on skyrmion dynamics are well studied, the temperature and mechanical nature of skyrmion dynamics in complex conditions are still unclear due to their mathematical modeling limitations, and thus becomes the gap that needs to be filled. Here, the limitations are broken by proposing a temperature- and mechanical-related phase-field simulation method based on a modified magnetization dynamic equation. Then, the gaps of skyrmion dynamics are filled and a unified multi-physical skyrmion dynamic law is proposed.</p> <p>Chapter 2 aims to break the limitation of the zero temperature and fixed magnetization magnitude of the classical magnetization dynamic equation, i.e., Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) equation, by developing an advanced simulation method for skyrmion dynamics in multi-physical external fields. Here, a modified LLG equation is proposed for simultaneously including precession, magnitude change of magnetizations in finite temperature and mechanical fields, and a real-space phase-field simulation is developed by numerically solving the modified LLG, mechanical equilibrium, and Maxwell's equations accordingly. It breaks the limitations and is anticipated to be a powerful tool for the study of multi-physical magnetic (skyrmion) dynamics.</p> <p>In Chapter 3, an isolated skyrmion motion in a temperature field is studied by the proposed phase-field simulation. The temperature gradient field is a driving force for the skyrmion motion, and the local temperature cooling can accelerate the motion. The energy analysis demonstrates that the mechanism of</p>			

京都大学	博士 ( 工 学)	氏名	ワン ユー WANG YU
------	-----------	----	------------------

driving force is the energy imbalance of the skyrmion in thermal gradient. According to the results, a skyrmion kinetic equation with temperature effects is proposed.

In Chapter 4, the mechanical effect on the isolated skyrmion motions is studied. The uniaxial tensile strain-induced skyrmion distortion along the thermal gradient direction can further accelerate the skyrmion thermal motion. Based on the result, the mechanical effect is included into the skyrmion kinetic equation.

In Chapter 5, two skyrmions' interaction is investigated. At first, the temperature effect on the repulsive skyrmion-skyrmion interaction is simulated. The decreased temperature can exponentially increase the skyrmion-skyrmion interaction by affecting the overlap areas, distortions, and magnetizations magnitude of skyrmions. Then, the temperature effect of skyrmion interaction-induced driving force is included into the skyrmion kinetic equation.

In Chapter 6, the mechanical effect on two skyrmions' interaction is investigated. The uniaxial strain can exponentially change the skyrmion-skyrmion interaction by controlling the deformation of skyrmions. Then, such a mechanical effect is included into the skyrmion kinetic equation.

In Chapter 7, the skyrmion dynamics in more complicated small damping systems, where the precession of magnetization is dominant, is studied. Here, the phase-field simulation showed the coupling between dynamic skyrmions and the emission of spin waves. The magnitude-fluctuated spin wave near the Curie temperature is found for the first time, and the coherence of such spin waves can create new skyrmions at the interference points near the ordering temperature. This result suggests a richer skyrmion dynamic behavior in small damping systems.

Chapter 8 is the conclusion, where all the results obtained in this thesis are summarized.

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、磁性体薄膜中で近年発見されたナノスケールのトポロジカルな磁気秩序(スキルミオン)に着目し、スキルミオンの動的挙動を明らかにすることを目的として、温度やひずみ場といった外的因子やスキルミオン間の相互作用がその動的挙動に与える影響を Phase-field 解析により研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 磁気モーメントの支配方程式である Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式を修正し、温度とひずみの影響を取り入れた修正 LLG 方程式を提案した。この修正 LLG 方程式と力学的平衡方程式・Maxwell 方程式を有限要素法によって解くことで、温度・ひずみ効果を取り入れた Phase-field 解析法を開発した。これにより、従来のマイクロマグネティクス法の欠点を克服し、外的環境下でのスキルミオンの動的挙動を研究する基盤ツールを提示した。

2. 構築した Phase-field 法を用いて、孤立したスキルミオンの運動に関する温度効果を解析した。その結果、温度勾配場がスキルミオン運動の駆動力となり、局所的な温度冷却がその運動を加速することを明らかにした。さらに、エネルギー解析からこの現象のメカニズムを明らかにし、これに基づいて温度効果を考慮したスキルミオン運動方程式を提案した。

3. 孤立スキルミオン運動に関するひずみ効果を解析した。その結果、一軸引張りひずみによるスキルミオンの変形が、その運動を加速させることを明らかにした。また、エネルギー解析から得られたメカニズムに基づき、ひずみ効果を考慮したスキルミオン運動方程式を提案した。

4. スキルミオン間の相互作用に関する温度の効果を解析した。その結果、温度低下にともない、スキルミオン間の相互作用ポテンシャルが指数関数的に増大することを明らかにした。この結果に基づき、温度に依存したスキルミオン間相互作用を定式化し、この駆動力を考慮したスキルミオン運動方程式を提案した。

5. スキルミオン間の相互作用に関するひずみの効果を解析した。その結果、一軸ひずみによってスキルミオン間の相互作用ポテンシャルを指数関数的に制御できることを明らかにした。さらに、このひずみに依存した相互作用を考慮し、スキルミオンの運動方程式を提案した。

6. スキルミオンとスピン波との相互作用について解析した。その結果、キュリー温度付近ではスピン波が振幅変動することを解析的に示した。さらに、そのようなスピン波のコヒーレンスによって新しいスキルミオンが生まれ得ることを明らかにした。

本論文は、温度・ひずみの影響を取り入れた磁気モーメントの解析方法を提案するとともに、こうした外的環境下での磁気スキルミオンの動的挙動を解明し、外的環境によってその挙動を制御できる可能性を示したものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年7月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。