

氏名	ふじ 藤 原 直 哉
学位(専攻分野)	博士(情報学)
学位記番号	情博第252号
学位授与の日付	平成19年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	情報学研究科複雑系科学専攻
学位論文題目	Dynamic Phase Transition and Pattern Dynamics in Periodic External Fields (周期的外力下における動的相転移とパターンダイナミクス)
論文調査委員	(主査) 教授 藤坂博一 教授 船越満明 教授 西村直志

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、周期的に変動する外力下の異方的 XY モデルにおける動的相転移とそれに関連して発生する空間構造の動的性質を、時間に依存したギンツブルグ・ランダウモデルを用いて非線形力学の観点から解析を行ったものである。

第1章は、動的相転移に関する実験的および数値実験の研究の歴史と現状および本論文で用いるモデルについて述べられている。

第2章では、1次元での直線偏向外力下のドメイン壁の動力学の解析結果が示されている。直線偏向した周期的外力下の運動として、SRO(対称性の保たれた振動)とSBO(対称性の破れた振動)が存在する。数値実験の結果、ネール壁とブロッホ壁の2種類のドメイン壁が存在することを見出した。外力パラメタの変化に対してドメイン壁の構造転移がおこることを確かめ、外力の強度と振動数の空間において4種のドメイン壁構造が存在する領域を明らかにした。転移が連続的である場合と不連続的である場合があることを見出した。転移が連続的であるとき、ブロッホ壁の強度のスケーリング則を明らかにし、理論的な説明を行っている。

さらに、二つのドメイン壁間の相互作用について調べた。ネール壁間の場合は引力的となるが、ブロッホ壁間では、異なるカイラリティ(キラリティ)を持つ場合は引力的となり、同じ場合は斥力的となることを見出した。ドメイン壁間の距離に対する実効的な発展方程式を導出し、その結果が数値実験と一致することを確認した。

第3章では、回転外力のもとでの動的相転移について調べた。直線偏向外力の場合より複雑な運動(外力の整数倍の周期の周期振動、準周期運動、カオスの振動)が観測されることを見出した。さらに、カオスの振動に対称性の異なるものが存在することを見出した。外力の強度を変化させると、二つの対称性の破れたカオス(SBC)アトラクタが融合して一つの対称的なカオス(SRC)アトラクタに転移する現象が観測された。動的相転移において、印加外力より長い周期をもつ周期運動や準周期運動およびカオス場の運動が観測されたのは本研究が初めてである。

第4章では、回転外力下における動的相転移に伴って発生する時空間動力学を解析した。空間一様解がSBO-1振動(外力と同じ周期をもつ振動)の場合、直線偏向外力下におけるものと類似したドメイン壁構造転移を観測した。空間一様解がSRO-3振動(外力の3倍の周期をもつ振動)を示す場合、位相の異なる状態を繋ぐドメイン壁ではドリフト運動が観測された。ドメイン壁のふるまいを記述する運動方程式が導かれている。この方程式をもとに、SBO-1相におけるドメイン壁の振動の対称性の破れやSRO-3相におけるドメイン壁のドリフト運動が説明できることを明らかにした。

また、空間一様解がカオスを示す場合、弱い非均質ノイズが印加されても観測される時空カオスの空間的ゆらぎは小さいことを見出した。二つのSBCを繋ぐドメイン壁の場合、最終的にゆらぎの大きな時空カオスが観測される。一方、SRCに弱い非均質ノイズが印加された場合、最終的に強い時空カオスが観測されることを見出した。

空間一様解が準周期振動を示すとき、弱い摂動が伝播していくスピン波が存在することを見出した。さらに、2次元系において一様解がSBO-1振動を示す場合、カイラリティをもったドメイン壁がスパイラル構造を示すことを見出した。また、

スパイラルが崩壊して時空カオスが発生するパラメタ領域が存在することを確かめた。

第5章では本論文の結果のまとめとそれに関連した議論がなされており、また、今後に残された課題について述べられている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、周期外力の下での異方的 XY モデルにおける動的相転移と、それに関連して発生する空間構造の動的性質を、時間に依存したギンツブルグ・ランダウモデルを用いて非線形動力学の観点から解析したものである。本論文では、直線偏向の下でのドメイン壁の動力学と、回転外力の下での動的相転移およびパターンダイナミクスについて明らかにしている。

直線偏向外力の下では、ネール壁とブロッホ壁の二種類の対称性の異なるドメイン壁が存在し、それらの間の構造転移が発生することを数値実験によって確認した。転移が連続的な場合と不連続な場合があることを見出した。外力の強度と振動数の空間においてこれらのドメイン壁構造が安定に存在する領域を数値実験および解析的な手法により得た。さらに、二つのドメイン壁の相互作用の特性を解析した。ネール壁の場合は引力的であるが、ブロッホ壁の場合相互作用の特性は壁のカイラリティ（キラリティ）に依存する。カイラリティが異なる場合、相互作用は引力的であるが、同じ場合には斥力的となることを見出した。いずれの場合にも、ドメイン壁の間の距離は時間に関して対数関数的に変化する。近似的解析により数値実験の結果を解析的に説明することに成功している。

回転外力下では、空間一様解は周期振動のほかに、準周期振動やカオス振動など、多様な振動状態を示すことを見出し、外力の強度と振動数の空間における相図は、異方性パラメタによって、4つのタイプに大別できることを明らかにした。直線外力の周期の整数倍の周期を持つ周期振動が観測された。周期振動から準周期振動への転移には、サドル-ノード分岐とホップ分岐の二つの道筋があることを明らかにした。また、カオスアトラクタには、ある対称性をもつものともたないものが存在することを確かめた。

回転外力の下では、空間一様解の種類に応じて多様な時空間パターンが観測された。2つの周期軌道が共存するパラメタ領域ではドメイン壁構造が観測された。対称性の異なる二種類のドメイン壁（アキラル壁とキラル壁）が存在することを確かめた。ドメイン壁のふるまいを記述する近似方程式を導き、二つのドメイン壁構造間の転移やドメイン壁のドリフトなどの性質を説明した。空間一様解が対称性の破れたカオス振動を示す場合、初期条件に応じて二種類の統計的に異なる時空カオスパターンが観測された。さらに、空間一様解が準周期振動を示す場合、非線形波が伝播することを確かめた。この結果は、強磁性体におけるスピン波とは異なる機構で波が伝播する可能性があることを示唆している。

以上の成果は、外力下の強磁性体を典型とする周期振動外力下の非線形力学場の基本的な応答特性に関する非線形振動およびカオスの観点からの研究に大きく貢献するものであると判断される。

よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成19年2月15日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。