

# 論文審査の結果の要旨

氏名 紙屋佳知

古典スピン系は、統計力学の最も基本的な模型の一つとして長年研究され、相転移や臨界現象など多くの重要な概念の形成に重要な役割を果たした。しかし、全ての相互作用エネルギーを同時に最小にすることができない、すなわちフラストレーションがある模型については、多くの基本的な問題が未解明のままである。また、近年の物質開発の進展によって、興味深い古典スピン系の問題が提起されることも数々ある。本論文は、このような背景のもと、フラストレーションのある連続スピン系における相転移と臨界現象を数値的および解析的手法によって理論的に研究したものであり、6章からなる。

第1章では、研究の動機として、臨界現象の理論的研究と、フラストレーションのある磁性体の実験的研究を簡単に紹介している。第2章では、連続対称性を持つ2次元反強磁性スピン系が積層した3次元系で、面間の結合にフラストレーションがある場合について議論している。この系の臨界現象を記述する有効的な場の理論は、以前に別の問題についてAharonyによって導かれた場の理論と同一であり、その際に与えられたくりこみ群の解析が本論文の対象にも適用できることを指摘している。

第3章では、第2章で議論した系の具体例として、面間の結合にフラストレーションがある積層正方格子反強磁性古典XY模型を論じている。これは、最近注目されているスピンドイマー系 $\text{BaCuSi}_2\text{O}_6$ の磁場誘起相転移を記述する模型として導入されている。面内ではフラストレーションがないため、この模型の基底状態は各面内のネール秩序状態で与えられる。このとき、面間相互作用は完全にキャンセルするため、ネール秩序の向きは面ごとに自由である。しかし、有限温度では、ゆらぎの効果により、各面は2つおきに同じネール秩序を持ち、隣り合う面のネール秩序は平行または反平行のどちらかに揃う傾向がある。これが全体に波及すれば、イジング的な対称性の自発的破れを伴う相になる。このイジング秩序と、ネール秩序は異なる温度で発現する可能性があり、興味をもたれる。しかし、本章では、モンテカルロシミュレーションによって、誤差の範囲内でこの2つの転移温度が一致することを示した。また、臨界指数は3次元XY模型のものと一致し、偶数番目の面と奇数番目の相が独立にXY転移すると言う描像を支持する結果となった。第2章のくりこみ群の議論によれば、このような臨界現象はくりこみ群の不安定な固定点に対応し実際の系では観測されないはずであり、本章の結論と一見矛盾する。これについて著者は、シミュレーションが可能な系のサイズでは、有限サイズ効果のために不安定な固定点の効果が観測されると言う解釈を与えている。

第4章では、第3章で問題となった不安定な固定点に対応する臨界現象について、より詳しく調べている。原理的には、十分大きなサイズの系のシミュレーションを行えば、不安定な固定点から離れて真の臨界現象を観測できるはずである。しかし、元のフラストレートしたスピン系の直接シミュレーションでは、計算可能な系のサイズが限られており検証が困難である。そこで、著者は、元の模型に代えて、臨界現象を記述する有効的な場の理論のモンテカルロシミュレーションを格子上で行った。モンテカルロくりこみ群の解

析により、系が実際に不安定な固定点から離れる様子が確認され、熱力学的極限では非常に弱い1次転移を示すことが示唆された。

第5章では、鉄ニクタイト物質に関連して議論されているフラストレートした古典ハイゼンベルグ模型の有効模型として、イジングスピンとハイゼンベルグスピンが結合した擬2次元古典スピン系を導入している。2次元XY模型と異なり、2次元ハイゼンベルグ模型は、温度が正である限り相関関数が指数関数的に減衰すると考えられている。これを反映して、面間相互作用が弱い極限では、イジング転移が有限の温度で起きる一方、ハイゼンベルグスピンの秩序化の転移温度はゼロに漸近する。すなわち、面間相互作用が十分弱ければ、イジングスピンとハイゼンベルグスピンの秩序化は異なる温度で起こり、イジングスピンのみ秩序化した中間相が存在することが予想される。著者は、大規模なモンテカルロシミュレーションにより、面間相互作用が面内相互作用の約2%以下では実際に中間相が存在することを示す結果を得た。

第6章では全体のまとめと考察を行なっている。

以上のように、本論文では、フラストレーションのある古典スピン系で有効的にイジング自由度が出現する場合について、解析的な理論とモンテカルロシミュレーションを組み合わせることによって詳細に調べている。特に、元の模型の直接シミュレーションでは調べることが困難な現象について、有効模型を導出してその大規模なシミュレーションを行い、また理論的な知見と組み合わせることによって深い理解を得ることに成功している。本論文で展開された手法は、本論文で取り扱った模型のみならず、広い範囲のフラストレーション系の研究にも有効であることが期待できる。

なお、本論文は、指導教員である川島直輝教授他との共同研究に基づいているが、本人の寄与は主体的で十分であると認められる。

よって、論文審査委員会は全員一致で博士（理学）の学位授与が適当であると認めた。