

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2010

課題番号：19540397

研究課題名(和文) 非平衡緩和法とゲージ理論による量子多体系を中心とした動力学的解析

研究課題名(英文) Dynamical analysis for quantum many body systems and relating ones in terms of the nonequilibrium relaxation method and the gauge theory

研究代表者

尾関 之康(OZEKI YUKIYASU)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：70214137

研究成果の概要(和文)：非平衡緩和法を、スピングラス系や Kostelitz-Thouless(KT)系に拡張し、動的臨界現象を含む臨界普遍性を中心に解析した。ランダムネスの臨界普遍性への影響は、強磁性転移では静的指数で成立し動的指数では現れないが、KT系では逆に動的指数で成立し静的指数で現れないことが確認され、これまで不十分だったこの分野の研究の端緒を開いた。またスピングラス系の解析によって、相図全体での普遍性構造の議論が可能になった。

研究成果の概要(英文)：The nonequilibrium relaxation method is extended to the spin glass and the Kostelitz-Thouless (KT) systems. The critical universality including the dynamical one is mainly analyzed. The universality in random system is observed for the static exponents while no universality appears for the dynamical one in the ferromagnetic transitions. On the other hand, it does not appear for the static exponents but for the dynamical one in the KT phase. This result leads us to subjects which have not been investigated much. As for the analysis of the spin glass system, the present study makes us possible to discuss the structure of universalities whole in the phase diagram.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、数理物理・物性基礎

キーワード：統計物理学

1. 研究開始当初の背景

(1) マクロな量子現象の重要性は、ボーズ凝縮、高温超伝導、量子情報理論等、近年の物理学における新展開でも顕著だが、これら量子多体系の解析手段は未だに平均場的な近似理論や小数系の数値解析が主で、相関の強い系や相転移点近傍では不十分な結果になる場合が多い。量子系の汎用な数値解析法としては量子モンテ

カルロ法が挙げられるが、負符号問題の困難や、量子化方向の自由度による計算量の増加があり、古典系ほど自由な運用は期待できない。一方、古典多体系では平衡シミュレーション法が様々に展開されているが、スピングラス・フラストレーション磁性体・Kosterlitz-Thouless転移に代表される緩和の遅い系では、しばしば混乱を来す。

(2) 非平衡緩和法はこのような系の困難を克服した強力な汎用数値解析法であり、平衡相転移一般について、広い適用範囲や解析の簡便さ・信頼性を誇り、他に類を見ない方法であることが近年の進展で実証されて来たこの方法の有効性は様々な体系で調べられており、量子系、フラストレーション系、多粒子系、一次相転移系も例外ではないが、適用例が少なく、未解決の問題も多い。これらの問題に取組み、方法の有効性を広く実証することは、今後の統計物理研究にとって重要と考える。

(3) ゲージ理論は複雑なランダム系の性質を厳密に解明する希有な理論である。申請者は、最近の研究でこれを量子ゲージグラスに拡張し、様々な性質を導いた。本研究において、これら非自明な厳密関係式は、数値計算の試金石として重要な役割を果たすことが期待される。

2. 研究の目的

(1) 非平衡緩和法の諸問題を解決し、より汎用な数値解析法を確立する。特に動的臨界現象の研究を容易にする。一次相転移系のために開発された Mixed Phase Initialization の有効性を検証する。

(2) 量子非平衡緩和法を一般化し、量子相転移現象、量子 KT 転移を非平衡緩和の視点で理解する。

(3) スピングラス系のスケーリング解析を系統化し、相図全体の理解を可能にする。

(4) Kosterlitz-Thouless 転移系の臨界指数の計算を系統化し、普遍性の議論を可能にする。

(5) 強磁性臨界普遍性を系統的に解析し、統一的な理解を進める。

3. 研究の方法

(1) 非平衡緩和法は、申請者の研究グループによって発展させられた新しい方法で国内外でその価値が認識され、普及しつつある。対象範囲も一次相転移、KT 転移、カイラル転移等、殆どの相転移に及び、臨界現象も扱うことが可能である。平衡状態を緩和現象から解析する新たな試みで、複雑な系も系統的かつ効率的に扱うことが可能である。特に、平衡シミュレーションにおいて最も難しく誤りを犯し

やすい「系の平衡化」の作業を省くことができ、その困難に影響されない。本研究におけるフラストレーション磁性体やランダム系のような難問も例外ではなく、扱われる系の大きさや得られる評価の精度が飛躍的に向上する。これは、計算物理学において画期的な進歩である。また、フラストレーション磁性体や液晶系に現れる一次相転移については、Mixed Phase Initialization 法を開発し、他のシミュレーションでは難しかった転移温度の決定が可能である。緩和を実時間方向ではなく、量子モンテカルロ法による確率論的緩和現象で捉えれば、量子多体系でもこの発想は踏襲できる。さらに、準局所ダイナミクスの導入によって、汎用で実用的な解析法が確立される。

(2) ランダム系のゲージ理論は、初めスピングラス模型で展開され、後に申請者によって一般の系へ拡張され、さらに動力学への拡張がなされた。磁場中のセラミクス超伝導体（ゲージグラス）やスピングラス等のランダム系に有効な理論で、ゲージ対称性を利用して様々相関関係式を厳密に導き、相転移や緩和過程の重要な性質を明らかにした。量子ゲージグラスは、ゲージ理論が適用可能な初めての量子模型であり、異方的ランダム磁性体を量子論的に記述する。ゲージ理論で得られる相転移や緩和現象の性質は、非平衡緩和法の試金石として、また物理的な興味としても重要になる。本研究における量子多体系、特に量子 KT 転移への非平衡緩和法の計算の検証として活用され、量子ダイナミクスや量子アニーリングの研究にもつながる。

4. 研究成果

(1) **強磁性臨界普遍性へのランダムネスの影響**：Harris の基準（規則系の比熱の臨界指数の符号）によって区別される 3 種類のランダム系の臨界普遍性を静的、動的の両現象について数値的に解析した。静的指数については Harris の基準の正しさが確認された。一方、動的指数については、普遍性を示さないことが観測され、この分野に新しい議論の視点を与えることができた。

(2) **Kosterlitz-Thouless 相転移系の臨界普遍性へのランダムネスの影響**：KT 転移系のランダム模型の臨界現象の系統的解析を可能にし、特に KT 相内の指数の計算も可能になった。ゲージグラス模型につい

て、強磁性とは逆に動的指数は相内も含めて普遍的で、静的指数が普遍性を示さないことを見出した。また、他のランダム模型についても同様の解析を行い、動的指数について同様の振る舞いを観測した。これらの結果は、これまで放置されていた KT 系の臨界現象に新たな視点を与える。

- (3) **非平衡緩和法によるスピングラス系のスケーリング解析の拡張と臨界普遍性の統一描像**：スピングラス転移のスケーリング解析を系統化し、3次元 Ising スピングラス模型の相図全体について、転移点と臨界指数を計算した。スピングラス転移の普遍性を確認すると共に、相図全体において、強磁性指数も含めた繰り込みの流れ（普遍性）の構造が初めて確認された。また、この解析法を3次元ゲージグラス模型に拡張することにも成功し、XY系で同様の議論をすることにも道を開いた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7件)

- 1) Y. Ozeki and T. Sakai: Nonequilibrium Relaxation Analysis for Universality in Kosterlitz-Thouless transitions in Disordered Systems, ISSP Supercomputer Center Activity Report 2009, 185 - 186 (2010)、査読無し
- 2) Y. Ozeki and S. Yotsuyanagi, Nonequilibrium Relaxation Studies for Frustrated Spin Systems with Kosterlitz-Thouless Transitions, Int. J. Mod. Phys. C **20**, 1367 -- 1376 (2009)、査読有り
- 3) S. Yotsuyanagi, Y. Suemitsu and Y. Ozeki, "Effects of dsicreteness on gauge glass models in two and three dimensions", Phys. Rev. E79J., 041138 (2009)、査読有り
- 4) Y. Ozeki, T. Sugaya and A. Hagiwara: Nonequilibrium Relaxation Study on Spin Glass Transition and Universality for the $\pm J$ Ising Model, ISSP Supercomputer Center Activity Report 2008, 173 - 174 (2009)、査読無し
- 5) Y. Ozeki and S. Yotsuyanagi, Nonequilibrium Relaxation Analysis for Universality in Disordered Systems, ISSP Supercomputer Center Activity Report 2007, 194 (2008)、査読無し
- 6) Y. Ozeki and N. Ito, "Nonequilibrium relaxation method", J. Phys. A:Math and Theor., 40, R149-R203 (2007)、査読有り
- 7) 尾関之康: 「非平衡緩和法による離散ゲージグラス模型の解析」, 物性研だより (東京大学物性研究所) **47**(1), 37 (2007)、査読無し

[学会発表] (計 11件)

- 1) Y. Ozeki and T. Sakai, "Effects of randomness on critical exponents of Kosterlitz-Thouless transition in disordered XX models", in *STATPHYS-24*, 2010年7月19日、ケアンズ (オーストラリア)
- 2) Y. Ozeki, T. Sugaya and A. Hagiwara, "Nonequilibrium relaxation analysis for the spin glass transition in the $\pm J$ Ising model in 3D", in *STATPHYS-24*, 2010年7月19日、ケアンズ (オーストラリア)
- 3) 酒井拓也、尾関之康: 「2次元ランダム XX 模型のKT相における臨界指数の非平衡緩和解析」、日本物理学会第65回年次大会、2010年3月23日、岡山大学
- 4) 萩原敦、尾関之康: 「3次元ゲージグラス模型におけるスピングラス転移の非平衡緩和解析」、日本物理学会2009年秋季大会、2009年9月27日、熊本大学
- 5) 菅谷太一・萩原敦・尾関之康、「Ising スピングラス模型におけるスピングラス相と臨界普遍性の非平衡緩和解析」、日本物理学会第64回年次大会、2009年3月27日、立教大学
- 6) 尾関之康、酒井拓也: 「2次元ゲージグラス模型のKT相内における臨界指数の非平衡緩和解析」、日本物理学会第64回年次大会、2009年3月27日、立教大学

- 7) Y. Ozeki, "Phase diagrams and critical properties for the $\pm J$ Ising model in two and three dimensions", in Multicritical Behavior of Spin Glasses and Quantum Error Correcting Codes, 2008年11月18日、東京工業大学
- 8) 尾関之康、四柳智司、菅谷太一: 「ランダム系の臨界普遍性の非平衡緩和解析 II」、日本物理学会第63回年次大会、2008年3月26日、近畿大学
- 9) 尾関之康: 「ランダム系の臨界普遍性の非平衡緩和解析」、物性研短期研究会「計算物性物理学の進展」、2007年11月11日、東京大学物性研究所
- 10) 尾関之康、四柳智司、菅谷太一: 「3次元ゲージグラス模型の臨界普遍性 I」、日本物理学会2007年秋季大会、2007年9月23日、北海道大学札幌キャンパス
- 11) Y. Ozeki, "Nonequilibrium relaxation study for universality classes and random fixed points in some disordered systems", in STATPHYS-23, 2007年7月12日、ジェノバ (イタリア)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾関 之康 (OZEKI YUKIYASU)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科

研究者番号: 70214137