

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2005～2008

課題番号：17540360

研究課題名（和文） 低次元系に見られる量子相転移現象および多様な相構造の探求

研究課題名（英文） Phase Diagrams and Phase Transitions in Low-dimensional Systems

研究代表者

大塚 博巳(OTSUKA HIROMI)  
首都大学東京・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：10254145

研究成果の概要：

一次元電子系、量子スピン系、および二次元古典格子系など、極めて多彩な物理系が普遍的に示す臨界固定点として二次元ガウス型模型が注目を集めている。我々は本研究活動において、当固定点により支配された相転移現象を数多く、統一的手法を用いて解析すると共に数値計算法を併用することにより、高精度で系の相構造を解明することができた。また特殊な対称性を持つ多体相互作用スピン模型に対して、系の示す新奇な臨界固定点の性質の特定にも成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	1100,000	0	1100,000
2006年度	1000,000	0	1000,000
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	0	0	0
総計	3500,000	420,000	3920,000

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：相転移、臨界現象、有効的場の理論、朝永-ラッティンジャー液体、計算物理

## 1. 研究開始当初の背景

物性物理学において多体効果の研究は常にその中心的課題であり続けている。例えばその発見より既に20年以上経過している銅酸化物高温超伝導体においては、ドーパされたキャリアがCuO<sub>2</sub>面内に分布していることもあり、二次元強相関電子系に注目が集ま

ると共に活発な研究が現在でも継続して行われている。この事は反面、多くの超伝導物質に対して成功を納めてきたBCS理論が二次元的キャリアの性質をうまく記述できない為、高温超伝導発現のメカニズム解明に決着がつかない事を意味しており、揺らぎが重要となる現象に対する更なる研究の必要性を示している。一方で擬一次元電子系および

量子スピン系の研究は、上記高温超伝導研究により活性化された面もあるが、所謂朝永-ラッティンジャー流体論を基礎に数々の強力な解析的数値的アプローチを用いることで近年数多くの研究成果を収めている。これら二つの次元性の異なる研究課題を比較する時、多体効果の研究において重要なポイントは、系のもつ固定点およびその周辺の理解、更にはそれらを可能とする低エネルギー長距離での振る舞いを正確に記述する有効的場の理論の存在であると言える。本研究課題はこれらの背景を鑑み、特に低次元系に見られる多様な相転移および臨界現象について精密な知見を得ることを第一の目的として提案された。

## 2. 研究の目的

物質合成技術や観測装置の進歩により、新物質についての超強磁場超極低温といった極限環境下での実験が可能となっている。中でも擬一次元電子系やフラストレートした量子スピン系に関する研究が、新奇物質相や量子相転移現象との関連において盛んに行われるようになってきている。本研究の目的は、これら低次元系に見られる相転移や相構造を詳しく調べる事であった。具体的には擬一次元有機導体や銅酸化物の中に含まれる擬一次元系に対して、ハバード型の理論模型を構築し、その基底状態における性質を解析的数値的に明らかにする事である。また、フラストレーションの強い二次元古典系の基底状態も一次元量子系同様の臨界固定点により支配された相転移を示すことが古くから統計力学分野にて論じられている。従って、二次元古典系についても同様の解析を行う。

## 3. 研究の方法

一次元電子系の低エネルギー状態はスピン電

荷分離状態にあるが、その金属相の記述はガウス型固定点模型で与えられる。更に系の特徴を表わす様々な摂動項が加わることになるが、一般的にはサインゴルドン場の理論により記述される。そこに登場する主要な演算子の次元や演算子積展開係数などを求めることで、くりこみ群方程式など相転移を議論する上で必要となる理論的枠組みをまず明らかにする。次にレベルスペクトロスコピー法と呼ばれる数値的技法を用いる為、理論模型のハミルトニアン行列の固有値構造を励起の持つ離散的対称性に着目しつつ行う。これにより低次元系で頻繁に現われるBerezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) 型連続転移についても精密な議論が可能となる。

## 4. 研究成果

研究成果を以下の3つに分類し要約する(番号は雑誌論文番号を表わす)。

(1)一次元強相関電子系の相転移と相構造 ⑥ ⑫ ⑬: 有機導体の理論模型である所謂イオン性ハバード模型および遷移積分交替をもつ1/4 充填ハバード模型の相構造を調べた。これらの電荷部は共にイジング転移を示すことが期待されるが、上記手法を用い精密な相構造を得た。

(2)フラストレートした二次元古典格子模型の相構造 ④ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩ ⑪: 三角格子上反強磁性イジング模型など臨界的基底状態を持つ模型に次近接スピン間カップリングなどの摂動が加わった場合の相転移について一次元量子系の研究にて培った手法を用い定量的な研究を行った。

(3)新奇な臨界相を持つ三体相互作用模型の解析 ① ② ③ ⑤: 三角格子上三体相互作用模型はその対称性の為、新奇な臨界相(セントラルチャージ2)を持つ。我々は模型の有効理論としてベクトル双対サイゴルドン模型を提案し、それを用いて相転移や臨界現象

の議論を行った。

#### 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 13 件)

- ① 査読有, Hiromi Otsuka,  
A Numerical Study of the Phase Transition  
in a Triangular-Lattice Model with  
Three-Spin Interactions,  
J. Phys. : Conference Series 145 (2009)  
012043.
- ② 査読有, Hiromi Otsuka and Kiyohide  
Nomura,  
Critical Intermediate Phase and Phase  
Transitions in Triangular-Lattice  
Three-Spin Interaction Model:  
Level-Spectroscopy Approach,  
J. Phys. A: Math. Theor. 41 (2008) 375001.
- ③ 査読有, Hiromi Otsuka,  
Finite-Size-Scaling Ansatz for the Helicity  
Modulus of the Triangular-Lattice  
Three-Spin Interaction Model,  
Phys. Rev. E 77 (2008) 062101.
- ④ 査読有, Hiromi Otsuka and Yutaka Okabe,  
Crossover of Criticality in a Three-State  
Potts Antiferromagnets with a Staggered  
Polarization Field,  
J. Korean Phys. Soc. 53 (2008) 1280.
- ⑤ 査読有, Hiromi Otsuka,  
Effective Field Theory of Triangular-Lattice  
Three-Spin Interaction Model,  
J. Phys. Soc. Jpn. 76 (2007) 073002.
- ⑥ 査読有, Hiromi Otsuka and Masaaki  
Nakamura,  
Two-Dimensional Ising Transition in  
One-Dimensional Interacting Electrons,  
J. Mag. Mag. Matt. 310 (2007) 1119--1121.
- ⑦ 査読有, Hiromi Otsuka, Yutaka Okabe,  
and Kouichi Okunishi,  
Phase Diagram and String Density Plateau  
State of the Anisotropic Triangular  
Antiferromagnetic Ising Model,  
J. Phys.: Condens. Matter 19 (2007)  
145236.
- ⑧ 査読有, Yutaka Okabe and Hiromi Otsuka,  
Monte Carlo Study of the Antiferromagnetic  
Three-State Potts Model with Staggered  
Polarization Field on the Square Lattice,  
J. Phys. A: Math. Gen., 39 (2006)  
9093--9105.
- ⑨ 査読有, Hiromi Otsuka, Yutaka Okabe,  
and Kiyohide Nomura,  
Global Phase Diagram and Six-State Clock  
Universality Behavior in the Triangular  
Antiferromagnetic Ising Model with  
Anisotropic Next-Nearest-Neighbor  
Coupling: Level-Spectroscopy Approach,  
Phys. Rev. E 74 (2006) 011104.
- ⑩ 査読有, Hiromi Otsuka, Yutaka Okabe,  
and Kouichi Okunishi,  
Field-Induced  
Berezinskii-Kosterlitz-Thouless Transition  
and String-Density Plateau in Anisotropic  
Triangular Antiferromagnetic Ising Model,  
Phys. Rev. E 73 (2006) 035105(R).
- ⑪ 査読有, Hiromi Otsuka, Koutaro Mori,  
Yutaka Okabe, and Kiyohide Nomura,  
Level-Spectroscopy of the Square-Lattice  
Three-State Potts Model with  
Ferromagnetic Next-Nearest-Neighbor  
Coupling,  
Phys. Rev. E 72 (2005) 046103.
- ⑫ 査読有, Hiromi Otsuka and Masaaki  
Nakamura,  
Ground-state Phase Diagram of the

One-Dimensional Hubbard Model with Alternating Potential,  
Phys. Rev. B 71 (2005) 155105.

- ⑬ 査読有, Hiromi Otsuka and Masaaki Nakamura,  
Two-Dimensional Ising Criticality in Interacting Electron Systems,  
Physica B: Condensed Matter 359-361 (2005) 1430--1432.

[学会発表] (計 14 件)

- ① 大塚博巳、  
異方的相互作用を持つ正方格子上古典ダイマー模型の相構造、  
日本物理学会第 64 回年次大会、  
2009 年 3 月 28 日、  
立教大学
- ② 大塚博巳、  
三体相互作用を持つ三角格子 XY スピン模型の解析、  
日本物理学会 2008 年秋季大会、  
2008 年 9 月 22 日、  
岩手大学
- ③ Hiromi Otsuka、  
A Numerical Study of the Phase Transition in a Triangular-Lattice Model with Three-Spin Interactions,  
Highly Frustrated Magnetism 2008,  
Sept. 7, 2008,  
Braunschweig, Germany.
- ④ 大塚博巳 (代表)、  
三体相互作用を持つ三角格子 Zp スピン模型の解析 IV、  
日本物理学会 63 回年次大会、  
2008 年 3 月 23 日、  
近畿大学
- ⑤ 大塚博巳、  
三体相互作用をもつ三角格子 Zp スピン模型の解析 III、  
日本物理学会 62 回年次大会、  
2007 年 9 月、  
北海道大学
- ⑥ Hiromi Otsuka、  
Crossover of Criticality in a Three-State Potts Antiferromagnets with a Staggered Polarization Field,

The 10th Asia Pacific Physics Conference (APPC10),  
Aug. 20, 2007,  
Pohang, Korea.

- ⑦ Hiromi Otsuka、  
A New Transfer-Matrix Calculation Approach to Classical Spin Systems in Two Dimension,  
STATPHYS 23, the 23rd International Conference on Statistical Physics,  
Jul. 8, 2007,  
Genova, Italy.
- ⑧ 大塚博巳、  
三体相互作用をもつ三角格子 Zp スピン模型の解析 II、  
日本物理学会 2007 年春季大会、  
2007 年 3 月 19 日、  
鹿児島大学
- ⑨ 大塚博巳、  
三体相互作用をもつ三角格子 Z(N) スピン模型の解析、  
日本物理学会 2006 年秋季大会、  
2006 年 9 月 26 日、  
千葉大学
- ⑩ Hiromi Otsuka、  
Two-Dimensional Ising Transition in One-Dimensional Interacting Electrons,  
International Conference on Magnetism 2006,  
Kyoto, Japan,  
Aug. 27, 2006.
- ⑪ Hiromi Otsuka、  
Phase Diagram and String Density Plateau State of the Anisotropic Triangular Antiferromagnetic Ising Model,  
Highly Frustrated Magnetism 2006,  
Osaka, Japan,  
Aug. 15, 2006.
- ⑫ 大塚博巳 (代表)、  
Kitatani-Oguchi 模型の相構造と空間的異方性の効果 II、  
日本物理学会 61 回年次大会、  
2006 年 3 月 29 日、  
愛媛大学、松山大学
- ⑬ 大塚博巳 (代表)、  
Kitatani-Oguchi 模型の相構造と空間的異方性の効果、  
日本物理学会 2005 年秋季大会、  
2005 年 9 月 21 日、  
同志社大学

- ⑭ 大塚博巳 (代表)、  
三角格子上反強磁性 Ising 模型の磁場誘  
起相転移と string-density プラトーに  
ついて、  
日本物理学会 2005 年秋季大会、  
2005 年 9 月 19 日、  
同志社大学

[その他]

ホームページ

<http://royaume.phys.metro-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大塚 博巳 (OTSUKA HIROMI)  
首都大学東京・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：10254145