

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25287097

研究課題名(和文)トポロジカル欠陥の引き起こす相転移の大規模並列シミュレーションによる解明

研究課題名(英文)Computational study of phase transitions induced by topological defects

研究代表者

川島 直輝 (KAWASHIMA, Naoki)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号：30242093

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：第1に、三角格子上のハイゼンベルクモデルにおいてZ2渦のかい離を伴う2次転移がおこることをモンテカルロシミュレーションによって見出した。この転移は鏡像対称性の破れと同時に起こり2次元イジング普遍性クラスに属している。第2に、SU(N) JQモデルについて、渦のかい離転移を調べ、臨界現象を系統的に調べた。従来2次転移とされていたが、臨界指数の評価値がシステムサイズとともに系統的に変化する様子が観測された。第3に、量子的な渦のかい離転移現象を大規模計算で解明するための新しいアルゴリズムとして、並列化ワームアルゴリズムの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：Firstly, we found a second-order phase transition accompanied by the dissociation of Z2 vortex pairs in the Heisenberg model on the triangular lattice. This phase transition turned out to be in the universality class of the 2D Ising model. Secondly, we studied the vortex dissociation transition in the SU(N) JQ model and found that the estimate of the critical indices constantly drift as the system size increases. Thirdly, we developed new methods and codes for the vortex dissociation transitions in quantum many body systems, e.g., the parallelizable worm algorithm for quantum Monte Carlo.

研究分野：計算統計物理学

キーワード：計算物理学 量子モンテカルロ ボーズ凝縮 光格子 超流動 テンソルネットワーク

1. 研究開始当初の背景

渦、渦糸、境界壁などのトポロジカルな励起は、局所的な自由度の変更によっては変化しないという特性を持ち、系の熱力学的な性質や動的特性にしばしば本質的な影響をもたらす。近年は極低温原子系のボーズ凝縮体を実験的にも実現できるようになった。スピンを持った凝縮体においては、単なる渦や渦糸を超えた複雑なトポロジカル欠陥が存在でき、これが系のダイナミクスにどのような影響を持つかなどにも高い関心もたれている。一方トポロジカルな欠陥が熱平衡における系の性質に本質的な影響を持つ例としてもっとも典型的なものは、2次元古典 XY スピンモデルや、それに等価な2次元古典クーロンガスモデルにおけるコスタリッツ・サウレス転移であり、これは、正負のスピン渦欠陥の乖離転移と特徴づけられることは種々の統計力学の教科書に詳しい。しかし、単純な渦を超える欠陥が引き起こし、現実にも観測可能であるような熱平衡相転移については、ほとんど研究例がない。

一般に、ホモトピー群による数学的な議論から、秩序変数空間の多様体の構造と、欠陥の持ちうる対称性の間の関連が付けられており、古典 XY モデルのように秩序変数が多様体 S^1 の構造を持つ場合には、点欠陥は整数の群 Z の構造を持つことが分かる。これに対応して、古典 XY モデルの渦は整数値のトポロジカル数 (winding number) で特徴づけることができるが、とくに ± 1 の渦の対が乖離することによって生じる転移がコスタリッツ・サウレス転移であると一般に理解されている。一方、古典ハイゼンベルクモデルの場合には、秩序変数の多様体が S^2 であることに対応して、トポロジカル欠陥は群 Z_2 の対称性を持たなければならない。しかし、実際にそのような対称性をもつ Z_2 渦が Z 渦と同様の乖離転移を起こすかどうかの問題は未解決である。

1984年、川村と宮下は、三角格子上の反強磁性古典ハイゼンベルクモデルについてモンテカルロ法によるシミュレーションを行った。[JPSJ 53 p.4138 (1984)] 彼らは特に渦数の揺らぎの領域サイズ依存性に注目した。彼らは、渦数の対数が、低温では領域サイズの1乗に比例して減少するのに対して、高温では2乗に比例して減少する振る舞いを観測し、ここから、 Z_2 渦乖離転移の存在を主張した。しかし、スピン相関関数長が転移点でも有限に留まるという Z_2 転移特有の性質についての予測を確かめるには計算できた系のサイズが小さすぎる。このため、本当に平衡相転移として Z_2 渦乖離転移が存在するのかについては異説もあって議論が収束していない。

フラストレーションのある三角格子反強磁性古典ハイゼンベルクモデルでは、フラストレーション由来の遅い緩和のために系のサイズが厳しく制限されるが、この問題を解

消するために、1993年に川村と菊池は、三角格子反強磁性古典ハイゼンベルクと同じ対称性を持ち、 Z_2 相転移に関しては転移の有無も含めて同等の振る舞いをすると期待される有効モデルを提案した。[Phys. Rev. B 47 p.1134 (1993)] これは、各点に2つの直交するベクトルが定義されているモデルで、2点間の相互作用は対応するベクトル同士の内積の和で定義される。しかし、フラストレーションしたもとの系よりも計算が容易であるとはいえ、やはり系のサイズは最大で $L=64$ に留まり、1,000 を超えると予想される転移温度でのスピン相関長をカバーするには程遠いサイズであった。

2. 研究の目的

2次元古典 XY スピン系や2次元クーロン相互作用粒子系など、 $U(1)$ 対称性を持つ系で見られるコスタリッツ・サウレス相は、本質的に $1+1$ 次元量子系における朝永・ラッティンジャー液体相と等価であり、統計力学・物性論の多くの分野における理論的基礎であると同時に、無秩序相からこの擬長距離秩序状態への相転移は、通常の冪的な特異性とは異なる連続相転移の標準的クラスを成している。しかし、この転移の $O(3)$ 対称性版といえる Z_2 ボーテックス転移については、1984年に川村と宮下によってその存在が示唆されて以来、今だにその存在/不在、存在するとしてその臨界現象の特性などが誰もか納得する形では確立されていない。最近の計算によると転移点直上でのスピン相関関数は数千格子間隔程度と予想されている。本研究課題ではスピン相関関数の有限レンジ性が明らかになる程度に大きい数値計算によって、日本の研究者によって最初に提唱されたこの新しい臨界現象の存在と、存在する場合の特性とを検証することを目指す。本課題では更に、新しい計算手法の開発と、それを利用した量子的渦のかい離転移の解明、さらに量子的な位相自由度の作る渦が示す多彩な現象をも解明する。

3. 研究の方法

第一に、 $SO(3)$ 有効モデルのモンテカルロシミュレーションを行う。オリジナルの三角格子反強磁性ハイゼンベルクモデルでは、フラストレーションのために、効率的なクラスタアルゴリズムが存在しない。そこで、もとの問題と同じ $SO(3)$ 対称性をもつがフラストレーションを持たない有効モデルを考えて、これに関して臨界現象を議論する。

ここで用いるのは個々のスピンの反転・非反転を逐次的に行うシングルスピントリフリップ状態更新と Wolff によって古典 XY スピンモデルのために提案されたクラスタアルゴリズムのアイデアを $SO(3)$ モデルに応用したクラスタ更新とを交互に行うハイブリッド型のシミュレーション手法である。具体的には、スピン空間にランダムに鏡映面を設

定してこの鏡映面に関する反転写像を施したものを更新後のスピン変数の候補とする。ただし、実際にこの更新を行うかどうかは、クラスタルゴリズムの一般的な処方箋によって判定する。この操作を全ての隣接スピン対について行ったあと、連結されているスピクラスタを単位として、確率 $1/2$ で更新を行う、というものである。この方法は、古典 XY スピンモデルに対しては非常に有効であり、有効性も確かめられているが、今回のケースでも有効かどうかを単一計算ユニット上の計算を行って検証する。古典 XY スピンモデルの Wolff アルゴリズムの場合には、クラスタの境界が自然と渦の中心を通るために、2つのクラスタうち片方だけが反転することによって渦が消滅する。この結果全ての渦は一度のクラスタ更新によって高い確率で消滅することが分かる。しかし、今回のケースでは Z2 渦がクラスタ境界によって分割されるかどうかは、鏡像面の選ばれ方にも依存する可能性がある。予備的な計算では良い収束性を示しているが、より系統的な検証が必要である。また、これらの計算と平行して、Z2 渦間有効相互作用を計算し、これによって、Z2 渦を直接扱う有効モデルの構築をも検討する予定である。

さらに、並列化計算プログラムを開発する。単一計算ユニットでアルゴリズムが有効であることが確認された段階で、空間分割による並列計算のためのプログラムを開発する。このためには、シングルスピフリップの部分だけでなくクラスタ更新部分の並列化も必要になる。シングルスピフリップ部分の並列化については、分割境界をまたぐ相互作用について、計算ユニット間の通信が必要となるが、この部分については、比較的標準的な並列計算技法で対応可能である。また、乱数発生と並列化も必要であるが、これについては、メルセンヌ・ツイスター法による乱数発生サブルーチンを物性研究所共同利用サーバに並列化したルーチンが存在するので、これを利用する。もっとも技術的に困難なのは、クラスタ更新部分の並列化で、とくにどのスピがどのスピと同じクラスタに属しているかのテーブルを作る「クラスタ認識」部分の並列化である。これについては、申請者のグループで従来から行っているプログラム開発のノウハウを生かして新規に開発する予定である。この部分の作業には、既存スタッフとともに、本申請で雇用費を予算計上しているポスドクを充てる計画である。

第二に、新しい量子モンテカルロシミュレーションの開発とその応用を行う。本研究課題では、実験家や解析計算のグループとも協力し、ボーズ系における渦生成の様態の詳細を明らかにすることを目指す。このために、まず有限幅 1 次元周期境界条件のもとでのボーズハバードモデルの計算を行い、これに回転の効果を表す位相ひねりをいれ、ひねり

角の関数としての自由エネルギー計算を行う。さらに、実験で行われているように 1 次元方向のある特定の場所にポテンシャル障壁を設け、同様の計算を行うことで、実験との比較を行う。また、垂直方向に関しても、実験に対応する、現実的なトラップポテンシャルを導入した計算を実施する。

さらに極低温の原子気体を光格子中にトラップする技術が確立して以来、光格子における相転移・臨界現象の研究が盛んに行われている。近年はとくに、磁場を使わないトラップの実現によって、スピン自由度が生きている原子気体を凝縮させることができるようになってきた。このような系では、まず、スピン自由度の存在が、非自明な渦欠陥の存在を可能にする。例えば $S=5/2$ よりも大きなスピンをもつ気体においては、凝縮相において、非可換なトポロジカル数をもつ渦糸の存在が予言されており、この非可換性が系のダイナミクスに及ぼす影響などが議論されている。また、光格子系においては、交換相互作用が重要である通常の固体の場合と比較して、相対的に磁気双極子間に働く双極子・双極子相互作用が重要になる。双極子相互作用の長距離性と、異方性から、従来の固体物理では実現されにくかった相の実現が期待されている。長距離相互作用系の取り扱いを可能にする $O(N)$ 法を取り入れたワームアルゴリズムに基づいた量子モンテカルロ法プログラムの開発を行う。同時に現在効率的な並列化技法が知られていないワームアルゴリズムについて並列化を検討する。これを用いて、2次元系における新しい量子相とくにボーズ粒子が対を形成してから凝縮を起こすペア超流動相や super-counter-flow 相、更に超流動固体相など含む相図を完成し関連実験との比較を行う。

4. 研究成果

Z2 渦かい離転移が理論的に予言され、その有限次元モデルにおける実現の検証が課題となっている。我々は、格子ひずみによって 1 つの鏡像面しか持たないような三角格子上のハイゼンベルクモデルにおいて Z2 渦のかい離を伴う 2 次転移がおこることをモンテカルロシミュレーションによって見出した。[Tamura, Tanaka, Kawashima, Phys. Rev. B 87 214401 (2013)] この転移は鏡像対称性の破れと同時に起こり 2 次元イジング普遍性クラスに属し、Z2 渦のかい離をも相転移現象としては初めてのものである。

ボーズ系の数値計算のための計算法としては、ワームアルゴリズムによる量子モンテカルロ法が有力である。しかし、このアルゴリズムについて効果的な並列化手法が知られておらず、大規模計算によるボーズ系研究の障害となってきた。我々は、新たに並列化可能なワームアルゴリズムを考案し、これに基づいた計算プログラムを作成した。さらに、

これを用いて、一遍が 10,000 以上の正方格子上のボーズハバードモデルの平衡状態シミュレーションに成功した。[Masaki-Kato, et al, Phys. Rev. Letts. 112 140603 (2014)]

また、SU(N) JQ モデルについて、VBS 秩序変数を擬スピンとみなした場合の渦のかい離転移を調べ、臨界現象を系統的に調べた。このモデルは脱閉じ込め転移と呼ばれる、スピノン対のかい離に伴う転移の典型的な例になっているとされ、盛んに研究されてきているが、いまだに、その量子相転移が1次転移であるか2次転移であるか、2次転移だとするとどのようなタイプの転移であるか、など未解明な点の多いモデルである。最近は2次転移とする研究事例が支配的であったが、我々の計算では、臨界指数の評価値がシステムサイズとともに系統的に変化する様子が観測された。[Harada et al, Phys. Rev. B 88 220408 (2013)] これは、この転移が1次転移であるか、あるいは2次転移であるとしても非常に大きな補正項の影響のもとにあることを示唆しており、脱閉じ込め転移一般の議論にも大きなインパクトのある研究成果である。

SU(N)ハイゼンベルクモデルは、対称性の高い最もシンプルなモデルとして基礎的に重要であるだけでなく、脱閉じ込め転移などを研究するうえでの出発点となるモデルであるが、これまで、基本表現以外の場合には十分にその性質が調べられていなかった。とくに、基底状態の様相について、 $1/N$ 展開からの予想がなされていたが、それを裏付ける数値計算が存在していなかった。我々は基本表現だけでなく、ヤング図で箱2から4つで表現されるスピンの大きな SU(N) ハイゼンベルクモデルに関して、量子モンテカルロシミュレーションを行った。[Okubo et al PRB92 134404 (2015)] この結果、箱2つの場合には、 N を1から増加させていくと、磁気的秩序が消失すると同時にVBS秩序が出現することを見出した。一方箱3以上の場合には、磁気的秩序の消失後にVBS秩序が出現することを確認することはできなかった。ただし、 $1/N$ 展開に基づく議論を行い、期待されるVBS秩序が小さく、計算したシステムサイズでは観測されない可能性があることを指摘した。

また、SU(N) ハイゼンベルクモデルは基底状態において、格子の対称性を反映して正方格子では4回回転対称性がやぶれており、八木の巣格子では3回対称性が破れている。これにともなって、それぞれのケースで、高温から温度を下げたとき、4回対称性の破れや3回対称性の破れを伴う2次相転移が起こることが期待される。我々は、これを数値計算によって検証した。[Suzuki et al, Phys. Rev. B 91 094414 (2015)]

古典 XY モデルや、SU(N)JQ モデルなどにおいては、異方性が dangerously irrelevant であり、異方性項に関連した物理量のスケールリングが自明でない。とくに、異方性項の繰

り込み群フローを考えた場合、臨界点近傍で一旦減少したあと、再び増大し、観測可能な大きさに復活するという非単調なサイズ依存性を示すことが期待される。これに伴って、異方性項が観測可能な大きさに達する特徴的なサイズとして、通常の相関長の他にこれよりもはるかに大きなスケールを定義することが可能である。我々は、繰り込み群に基づく議論からこの相関長より大きな第2の相関長の従うべきスケールリング則を導き、これを古典 XY モデルなどのシミュレーションによって検証した。[Okubo et al, PRB91 174417 (2015)] この結果は、dangerously irrelevant な摂動が存在する臨界現象一般に適用可能なものであり、その意味で大きなインパクトを有する。

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 10 件)

Mitsuaki Kawamura, Kazuyoshi Yoshimi, Takahiro Misawa, Youhei Yamaji, Syngge Todo, and Naoki Kawashima

Quantum lattice model solver HPhi、査読有、Computer Physics Communications、Vol217、180-192、2017、DOI: 10.1016/j.cpc.2017.04.006

Youhei Yamaji, Takafumi Suzuki, Takuto Yamada, Sei-ichiro Suga, Naoki Kawashima, and Masatoshi Imada、

Clues and criteria for designing a Kitaev spin liquid revealed by thermal and spin excitations of the honeycomb iridate Na₂IrO₃、査読有、PHYSICAL REVIEW B、Vol93、174425(1-14)、2016、DOI: 10.1103/PhysRevB.93.174425

Tsuyoshi Okubo, Kenji Harada, Jie Lou, Naoki Kawashima、SU(N) Heisenberg model with multicolumn representations、査読有、PHYSICAL REVIEW B、Vol92、134404(1-5)、2015、DOI: 10.1103/PhysRevB.92.134404

Tsuyoshi Okubo, Kosei Oshikawa, Hiroshi Watanabe, Naoki Kawashima、Scaling relation for dangerously irrelevant symmetry-breaking fields、査読有、PHYSICAL REVIEW B、Vol 91、174417(1-4)、2015、DOI: 10.1103/PhysRevB.91.174417

Takafumi Suzuki, Kenji Harada, Haruhiko Matsuo, Syngge Todo and Naoki Kawashima、Thermal phase transitions to valence-bond-solid phase in the two dimensional; generalized SU(N) Heisenberg models、査読有、J. Phys.:Conf. Ser.、Vol 592、012114(1-8)、2015、DOI: 10.1088/1742-6596/592/1/012114

Takafumi Suzuki, Kenji Harada, Haruhiko Matsuo, Syngge Todo and Naoki Kawashima, Thermal phase transition of generalized Heisenberg models for SU(N) spins on square and honeycomb lattices, 査読有、PHYSICAL REVIEW B, Vol 91, 094414 (1-7), 2015, DOI: 10.1103/PhysRevB.91.094414

Akiko Masaki-Kato, Takafumi Suzuki, Kenji Harada, Syngge Todo, Naoki Kawashima, Parallelized Quantum Monte Carlo Algorithm with Nonlocal Worm Updates, 査読有、Physical Review Letters, Vol 112, 140603 (5 pages), 2014, DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.140603

Ryo Tamura, Shu Tanaka, and Naoki Kawashima, Phase Transitions with Discrete Symmetry Breaking in Antiferromagnetic Heisenberg Models on a Triangular Lattice, 査読有、JPS Conf. Proc. 012125 (5 pages), 2014, DOI: 10.7566/JSPC.1.012125

Kenji Harada, Takafumi Suzuki, Tsuyoshi Okubo, Haruhiko Matsuo, Jie Lou, Hiroshi Watanabe, Syngge Todo, Naoki Kawashima, Possibility of Deconfined Criticality in SU(N) Heisenberg Models at Small N, 査読有、PHYSICAL REVIEW B, Vol 88, 220408(R)(4 pages), 2013, DOI: 10.1103/PhysRevB.88.220408

Ryo Tamura, Shu Tanaka and Naoki Kawashima, Second-Order Phase Transition in Heisenberg Model on Triangular Lattice with Competing Interactions, 査読有、PHYSICAL REVIEW B, Vol 87, 214401(5pages), 2013, DOI: 10.1103/PhysRevB.87.214401

[学会発表](計 44 件)

Tsuyoshi Okubo, Naoki Kawashima, テンソルネットワーク法による $S=1/2$ カゴメ格子模型の磁化過程の研究, Conference on Unusual Physics in Kagome Lattice, 2017.2.28, 北海道大学(北海道・札幌市)

Naoki Kawashima, Introduction to Quantum Monte Carlo, Fourth Workshop on Tensor Network States: Algorithms and Applications, 2017.02.06-07, Benasque (Spain)

Naoki Kawashima, Optimization of Tensor Network Calculation and Its Applications, Fourth Workshop on Tensor Network States: Algorithms and Applications, 2016.12.15, Hsinchu, (Taiwan)

Naoki Kawashima, 量子力学の基礎と情報(エンタングルメント統御による極限精度への挑戦), 平成 28 年度ポスト京 2020

萌芽課題「基礎科学のフロンティア 極限への挑戦」キックオフミーティング, 2016.09.09, 東北大学(宮城県・仙台市)

Tsuyoshi Okubo, Naoki Kawashima, Magnetization process of kagome lattice Heisenberg antiferromagnets: 1/3 plateau state and effects of Dzyaloshinskii-Moriya interaction, International Workshop on Tensor Networks and Quantum Many-Body Problems (TNQMP2016), 2016.7.4, 東京大学(千葉県・柏市)

川島直輝, 機械に考えさせるといふこと, 物理科学の最前線, 2016.6.10, 東北大学(宮城県・仙台市)

Tsuyoshi Okubo, Naoki Kawashima, Tensor network study on magnetization process of the kagome lattice Heisenberg antiferromagnets, Trends in Theory of Correlated Materials 2016 (TTCM2016), 2016.5.22-25, Villigen (Switzerland)

Naoki Kawashima, Monte Carlo simulation of deconfined critical phenomena, CSP Workshop, 2016.2.22-26, University of Georgia, Athens (USA)

Tsuyoshi Okubo, Naoki Kawashima, Tensor Network Study of Frustrated Heisenberg Magnets, APW-CEMS joint workshop, 2016.1.26, 理化学研究所(埼玉県・和光市)

Tsuyoshi Okubo, Naoki Kawashima, Ground state properties of frustrated honeycomb and kagome lattice antiferromagnets, The 75th Okazaki Conference, 2016.1.11, 岡崎コンファレンスセンター(愛知県・岡崎市)

Naoki Kawashima, Quantum Monte Carlo Study of Deconfined Criticality, International USMM & CMSI Workshop: Frontiers of Materials and Correlated Electron Science -from Bulk to Thin Films and Interfaces, 2016.1.7, 東京大学(東京都・文京区)

川島直輝, Tensor Network --- New Language for Quantum Field Theory, ImPACT 未来テーマ開拓研究会, 2015.10.14, 休暇村支笏湖(北海道・千歳市)

Naoki Kawashima, Quest for Deconfined Criticality in Two-Dimensional Heisenberg Model, The 9th International Conference on Computational Physics (ICCP9), 2015.1.9, National University of Singapore (Singapore)

大久保毅, 川島直輝, PEPS テンソルネットワークを用いた量子スピン模型の基底状態計算, 量子多体系研究の新しい潮流 --テンソルネットワーク・繰り込み群・

エンタングルメント--", 2014.12.1、京都大学 (京都市・左京区)

Tsuyoshi Okubo, Naoki Kawashima, Ground state calculation of the generalized Kitaev-Heisenberg model using PEPS tensor network method、CMSI International Workshop 2014: Tensor Network Algorithms in Materials Science、2014.10.1、理化学研究所計算科学研究機構 (兵庫県・神戸市)

Naoki Kawashima, Numerical attempts to observe deconfined criticality、New Horizon of Strongly Correlated Physics (NHSCP2014)、2014.6.26、東京大学 (千葉県・柏市)

Tsuyoshi Okubo, Naoki Kawashima, Tensor network renormalization study of the distorted Kitaev-Heisenberg model、CMSI Kobe International Satellite Meeting 2013: Recent Progress in Tensor Network Algorithms、2013.10.16、CMSI 神戸 (兵庫県・神戸市)

Naoki Kawashima、Quantum Phase Transitions in SU(N) J-Q Heisenberg Model、Statistical Physics of Quantum Matter、2013.7.30、GIS NTU Convention Center、(Taipei)

正木晶子、鈴木隆史、原田健自、藤堂眞治、川島直輝、ワーム更新による並列化量子モンテカルロアルゴリズム、第8回 CMSI 若手技術交流会、2013.7.1、三島市 (静岡県・三島市)

〔図書〕(計 1 件)

J. E. Gubernatis, N. Kawashima and P. Werner, Quantum Monte Carlo methods --- Algorithms for Lattice Models、Cambridge University Press、2016、536

〔その他〕

ホームページ等

川島研究室ホームページ

<http://kawashima.issp.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川島直輝 (KAWASHIMA, Naoki)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号：30242093

(2) 研究分担者 ()

研究者番号：

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：

(4) 研究協力者

原田健自 (HARADA, Kenji)

京都大学・大学院情報学研究科・助教

渡辺宙志 (WATANABE, Hiroshi)

東京大学・物性研究所・助教

鈴木隆史 (SUZUKI, Takafumi)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授

大久保毅 (OKUBO, Tsuyoshi)

東京大学・物性研究所・特任研究員

正木晶子 (MASAKI, Akiko)

理化学研究所・特任研究員

押川公成 (OSHIKAWA, Kosei)

東京大学・理学系研究科・修士課程 (当時)

桐井智弘 (KIRII, Tomohiro)

東京大学・理学系研究科・博士課程 (当時)