

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 18 日現在

機関番号： 32601

研究種目： 若手研究(B)

研究期間： 2009～2011

課題番号： 21740295

研究課題名（和文）磁気多極子秩序相及びスピ液体相の理論的特徴付けと実験検出方法の提案

研究課題名（英文）Methods of characterizing magnetic multi-polar and spin-liquid phases

研究代表者

佐藤 正寛 (SATO MASAHIRO)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号： 90425570

研究成果の概要（和文）：研究課題の目標は「多極子秩序のような複数演算子の積で定義される秩序やスピ液体などの検出しにくい多体状態をいかに特徴付けするか」「このような検出しにくい新しい状態がどのような系で実現するか」という問いに解答を与えることであった。研究代表者は、磁性体と冷却原子系を対象として、この問いについて理論研究を遂行した。特に磁気フラストレーションをもつ J1-J2 スピン 1/2 鎖模型についての成果が中心的結果である。この模型に現れるベクトルカイラル秩序、ダイマー秩序などの多様な相構造を明らかにし、また磁場中で実現する磁気多極子液体相を特徴づける現実的実験手段として、核磁気共鳴の緩和率の温度磁場依存性と中性子散乱スペクトルのピーク位置の磁場依存性の測定が有効であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this project is to theoretically solve the following two questions: What are the effective ways of characterizing magnetic multi-polar ordered states and disordered states such as spin liquids? And what kinds of systems are suitable for the realization of these novel states? To this end, I have focused on realistic models for magnets and cold atom systems. In particular, the result for frustrated spin-1/2 J1-J2 chains is most important in this project. We have accurately determined the rich ground-state phase diagram of the J1-J2 chain with vector-chiral and new Haldane-dimer phases. We have also shown that the temperature and field dependence of the NMR relaxation rate and the field dependence of the peak position of the neutron scattering spectrum can be effectively used to characterize the multi-polar liquid phases induced by external magnetic field in the J1-J2 chains.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数理系科学

科研費の分科・細目：物理学 数理物理・物性基礎

キーワード：物性基礎論

1. 研究開始当初の背景

複数のスピンの積で定義される磁気多極子秩序の中で、2 スピンの外積で定義されるベクトルスピカイリティ秩序は 1980 年代ころから少なくとも理論的にはよく知られていた。2003 年以降、ベクトルカイリティをもつスパイラル磁気秩序の発現により比較的大きな自発電気分極が誘導される一連のマルチフェロイック物質(強誘電磁性体)が精力的に研究されて、カイリティ秩序が改めて注目されるようになった。

一方、カイリティとは逆に、空間反転操作に対して符号を変えない磁気多極子秩序(スピンネマティックとも呼ばれる)の理論・実験は最近まで発展途上にあつた。しかし、今世紀初め頃から幾つかの低次元格子上のフラストレート磁性体模型におけるスピンネマティック秩序の発現が主に大規模数値計算により明らかにされてきた。特に強磁性近接相互作用 J_1 と反強磁性次近接相互作用 J_2 をもつフラストレート J_1 - J_2 スピン $1/2$ 鎖模型に磁場を加えると 3 種類の磁気多極子液体状態が発生することが 2005 年ころから徐々に理論的に示され、また J_1 - J_2 スピン鎖模型で記述できると考えられる一連の擬 1 次元銅酸化物磁性体 (LiCuVO_4 や $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$ など)が存在することが認識されつつあつた。

冷却原子系の世界では、今世紀に入る頃から、スピン自由度を持つボーズガスなどの内部自由度をもつ多体系における磁気多極子を含む新しい秩序状態が考察されつつある状況であつた。

2. 研究の目的

1 の研究背景で述べたように、研究開始当初、磁性体や冷却原子系において、複数の演算子の積で定義される新しい秩序の研究がまさに活性化しようとしていた。しかし、その微視的理論やそれらが実現した際の観測・検出の方法については未開拓の状況であつた。そこで、研究成果欄にも書いたように、「多極子秩序のような複数演算子の積で定義される秩序状態やスピン液体のような無秩序状態に代表される検出しにくい多体状態をいかに特徴付けするか」「このような検出しにくい新しい多体状態がどのような系で実現するか」という問題に理論的に答えることを本研究課題の目標とした。これを果たすために、具体的かつ現実的な磁性体や冷却原子系の模型を対象として理論研究を遂行した。

3. 研究の方法

理論解析は、主に、(1)ボソン化法などの場の理論や(2)form factor 法などの可積分系の方法論に基づく解析的手段を用いて実行した。

また(3)Mathematica などの数値計算ソフトウェアや(4)プログラム言語による数値解析法も有効に利用した。研究代表者の能力を超える大規模な数値解析が必要な場合は、適切な研究者の協力を介して研究を効果的に推進させた。

4. 研究成果

3 年間の研究内容を以下のように 9 つのテーマに分類することができる。特に(1), (2), (3), (5)が本研究課題の中心的成果である。以下各々について簡単にまとめる。

(1)擬 1 次元マルチフェロイック磁性体 LiCu_2O_2 の電磁場応答理論

多くのマルチフェロイック物質は非整合スパイラル磁気秩序をとり、これらの物質の強誘電性や誘電率スペクトルは古典スピンの描像で理解できることが知られていた。一方、 J_1 - J_2 スピン $1/2$ 鎖で近似的に記述できると考えられている一連の擬 1 次元銅酸化物磁性体の中の幾つかも極低温で強誘電性を示すことが理解されつつあつた。これらの系では、その結晶構造の低次元性から、物性に量子性が強く現れる可能性が考えられる。そこで我々は上記銅酸化物の中で精力的に実験研究がなされている LiCu_2O_2 を対象として、場の理論に基づく量子論とスピン波理論に基づく半古典論により、電磁場に対する応答スペクトルの理論を構築した。その結果、磁気秩序構造、観測された光吸収スペクトルや核磁気共鳴スペクトルなどを系統的に半定量的レベルで説明することに成功し、また 1 次元マルチフェロイック物質に対する幾つかの予言も与えた。

(2)スピンパイエルス不安定性をもつモット絶縁体の光学応答理論

スピンパイエルス転移に伴い強誘電性を発現する機構が理論的に提案され、また TTF-CA などの擬 1 次元有機物質がその機構の候補物質であることが認識され、光学実験も実施されていた。一方、1 次元のモット絶縁体はしばしば sine-Gordon 模型のような励起ギャップを持つ可積分模型で記述可能であり、さらに form factor 法と呼ばれる非摂動論的方法を用いることで、系の動的相関関数が精密に計算可能であることが知られていた。そこで我々は場の理論と form factor 法を効果的に利用して、スピンパイエルス系の光学伝導度を精密に評価した。パイエルス転移前と後で光学伝導度の振動数依存性は劇的に変化し、スピノン対やソリトンなどの 1 次元特有の励起が観測可能であることを予言した。

(3) フラストレート J1-J2 スピン鎖模型の基底状態相図の解析

J1-J2 スピン 1/2 鎖模型は、(1)で述べたように、一連の銅酸化物のミニマル模型として非常に注目が集まっている。またこの模型に磁場を加えると3種類の磁気多極子液体相を含む多様な相が現れることが理論的に明らかにされていた。そこで我々は J1-J2 スピン 1/2 鎖模型に XXZ 型磁気異方性 Δ を加えた模型において、2 パラメータ ($J1/J2, \Delta$) で張られる広範な領域の基底状態相図を、場の理論と $iTEBD$ と呼ばれる数値計算方法を効果的に融合させることで完成させた。とくに、異方性が弱い領域でギャップの非常に小さいハルデンダイマー相と呼ばれる新しい秩序状態が実現していること、 $J1$ が反強磁性の場合に比べて $J1$ が強磁性ではベクトルカイラル秩序相が非常に広く存在すること、を明らかにした。

(4) 1次元2成分ボーズ・フェルミガスの強磁性液体状態の理論

冷却原子系の1つの特徴は、固体電子系とは異なり、系の次元性、結合定数、内部自由度などの様々な微視的パラメータをある程度自由に制御できる点である。特に内部自由度は(電子スピンのように)系に多様性をもたらすことが期待できる。そこで我々はもっとも簡単な内部自由度を持つ系である1次元2成分原子ガスをモデル化し、異成分間ホッピングと相互作用を変化させて生じる相構造を、場の理論と $iTEBD$ を用いて解析した。その結果、異成分間結合無しで実現する各成分の朝永ラッティンジャー液体(TLL)状態が簡単な性質を満たしていれば、十分大きな異成分間斥力を導入することで標準的 TLL から強磁性(異成分間密度差が有限の)TLL 状態への量子相転移が起こることを示し、相図を完成させた。またその相転移の普遍クラスが異成分間ホッピングの有無によって、2次転移のイジングクラスから1次転移クラスに変化することを初めて明らかにした。

(5) フラストレート J1-J2 スピン鎖の磁場中磁気多極子液体相における核磁気共鳴の理論

(1)(3) で述べたように、J1-J2 スピン 1/2 鎖模型は一連の擬1次元銅酸化物のミニマル模型として非常に注目が集まっている。特に磁場を加えたとき、3種の磁気多極子相(4,8,16極子朝永ラッティンジャー液体相)が現れることが理論的に示され、上記銅酸化物の磁場中実験が活発化しようとしていた。しかし、多極子相が実現した際のその観測方法やその特徴の現れ方についての理論考察はほぼ皆無であった。一般に多極子秩序を観測することは非常に困難である為、J1-J2 鎖を含めて

多極子相の観測方法を考案することは磁性研究の重要課題の1つといえる。そこで我々は J1-J2 鎖を具体的に取り上げて、その多極子液体相としての特徴が、核磁気緩和率の温度磁場依存性と中性子散乱スペクトルのピークの磁場依存性に現れることを定量的に予言した。他の系の多極子相でも類似の傾向が予想される。この予言は現在擬1次元銅酸化物($LiCuVO_4$ や $PbCuSO_4(OH)_2$ など)の核磁気共鳴や中性子散乱実験により検証されつつあり、実際予言の有効性が実験的に証明されつつある。

(6) 1次元量子 XXZ 模型の局所的演算子に対するボソン化公式の定量評価方法の提案とその応用

1次元スピン 1/2 XXZ 模型は、1次元磁性体または相互作用する1次元ボソン系に対する典型的な可積分模型の1つである。その静的動的性質は、他の相関多体模型のそれらに比べて、非常によく理解されている。 XXZ 模型の局所的演算子と場の理論を結ぶボソン化公式が知られているが、そこには一般に解析的には決定することが困難な係数が含まれている。この係数を決定することで、模型の各種相関関数の定量的評価が可能となり、その結果 XXZ 模型そのものを含む関連する系に対して高精度の予言を与えることができることが知られている。実際、密度行列繰り込み群法(DMRG)と呼ばれる強力な数値計算方法で直接 XXZ 模型の幾つかの相関関数を見積もり、そこから係数を決めるという方法が既に確立している。そこで我々は、より簡便な数値計算方法である数値対角化法を用いて、 XXZ 模型をわざわざ変形させてその励起ギャップを見積もることでボソン化公式の係数を決定する新しい方法を提案し、実際にそれがうまく機能することを示した。さらに得られた係数を利用して、スピンドラゲやスピン鎖の光学応答スペクトルの定量的計算を行った。

(7) 3本鎖スピンチューブ模型の磁化プラトー領域における量子相転移と新しいカイラリティ液体相の理論

3本の反強磁性鎖が結合したスピンチューブ模型は(J1-J2 スピン鎖と同じように)最も単純なフラストレート磁性体模型の1つといえる。最近 $CsCrF_4$ や $KCrF_4$ などの3本鎖チューブ型の磁性体が合成され実験的にも注目されつつある。このチューブ模型に磁場を加えると飽和磁化の1/3の磁化の値で磁化プラトー状態が現れることが前世紀から知られていた。しかし我々はこのプラトー状態の理論が不十分であると認識していた。そこで、鎖間結合が強い極限からの強結合展開や DMRG などの数値解析を組み合わせるプラ

トー状態の低エネルギー物性を解析した。その結果、鎖間結合を弱めていくと、プラトール(すなわちスピギャップ)を保ちながら、ベクトルカイラリティ液体、インバランス磁化相、強ベクトルカイラル秩序相と3つの相が現れ2回の量子相転移が生じていることを明らかにした。特に、カイラリティ液体相ではスピンではなく、ベクトルカイラリティ自由度がギャップレスの素励起を担っている新しい相である。これらの相が実現すれば、ベクトルカイラリティと電気分極の結合を介して新しい光学応答も期待できることを予言した。

(8)1次元量子磁性体におけるラマン散乱の理論

磁氣的ラマン散乱実験は前世紀中ごろから研究され、特に標準的な反強磁性磁気秩序相では2マグノン励起の連続スペクトルがラマン散乱で観測されることが知られていた。一方、1次元系では強い量子揺らぎの効果で秩序状態はしばしば現れず、その結果低エネルギー励起はマグノンではなくスピノンやソリトンなどの1次元特有の準粒子で支配されることも知られていた。ところがその1次元系のラマン散乱の理論が未開拓の状態のままであった。そこで我々は、場の理論やform factor法と呼ばれる可積分系の方法を用いて1次元スピン1/2反強磁性体に対する磁氣的ラマン散乱の一般的理論の構築を試みた。その結果、1次元磁性体の典型的な出発点であるスピン1/2ハイゼンベルグ模型に加える摂動の種類に応じてラマンスペクトルの形が劇的な変化することを予言し、逆にラマンスペクトルが摂動項の性質を決めるために利用できることを提案した。

(9)磁場中の三角格子古典ハイゼンベルグ模型における空間異方性と4スピン相互作用の効果

三角格子反強磁性体は典型的なフラストレート系の1つであり、対応する実際の磁性体も多数存在する。フラストレート系では一般に多くの微視的状态がエネルギー的に拮抗している為、微小な摂動により新しい状態へ遷移する可能性が高い。特に磁場中の三角格子模型では、いわゆるorder-by-disorder機構により低磁場側からY字相、up-up-down相、V字相の3つの相が現れることが知られているが、これらは摂動に対して非常に弱いと予想される。そこで我々は、古典スピン三角格子模型に対する現実的摂動として、空間異方性と4スピン相互作用を取り上げて、これらを加えた模型の磁場温度相図を定量的に完成させた。その結果、空間異方性を加えた系では、ファン相やスパイラル相など新しい非整合秩序相があらわれ、一方、4スピン

相互作用を加えた系では、ベクトル及びスカラーカイラル秩序相やネマティック相などの整合な多極子相が誘導されることを明らかにした。また新しい相を導くために必要な摂動の強さも比較的弱いことも示した。したがって、これらの新しい相が実際の磁性体で実現する可能性は十分考えられる。

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9件) 全て査読付き

(1) Kouichi Okunishi, Masahiro Sato, Toru Sakai, Kiyomi Okamoto, and Chigak Itoi, **Spin-chirality separation and S3-symmetry breakings in the magnetization plateau of the quantum spin tube**, Phys. Rev. B 85, 054416 (2012).

DOI: 10.1103/PhysRevB.85.054416

(2) Masahiro Sato, Shunsuke Furukawa, Shigeki Onoda, and Akira Furusaki, **Competing phases in spin-1/2 J_1 - J_2 chain with easy-plane anisotropy**, Mod. Phys. Lett. B 25, 901 (2011).

DOI: 10.1142/S0217984911026607

(3) Shunsuke Furukawa, Masahiro Sato, and Shigeki Onoda, **Chiral Order and Electromagnetic Dynamics in One-Dimensional Multiferroic Cuprates**, Phys. Rev. Lett. 105, 257205 (2010).

DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.257205

(4) Masahiro Sato, Toshiya Hikiyama, and Tsutomu Momoi, **Field and temperature dependence of the NMR relaxation rate in the magnetic quadrupolar liquid phase of spin-1/2 frustrated ferromagnetic chains**, Phys. Rev. B 83, 064405 (2010).

DOI: 10.1103/PhysRevB.83.064405

(5) Shintaro Takayoshi and Masahiro Sato, **Coefficients of bosonized dimer operators in spin-1/2 XXZ chains and their applications**, Phys. Rev. B 82, 214420 (2010).

DOI: 10.1103/PhysRevB.82.214420

(6) Toru Sakai, Masahiro Sato, Kouichi Okunishi, Kiyomi Okamoto, Chigak Itoi, **Quantum spin nanotubes - frustration, competing orders and criticalities**, J. Phys.: Condens. Matter 22, 403201 (2010).

DOI: 10.1088/0953-8984/22/40/403201

(7) Shunsuke Furukawa, Masahiro Sato, and Akira Furusaki, **Unconventional Neel and dimer orders in a spin-1/2 frustrated ferromagnetic chain with easy-plane anisotropy**, Phys. Rev. B 81, 094430 (2010).

DOI: 10.1103/PhysRevB.81.094430

(8) Shintaro Takayoshi, Masahiro Sato, and Shunsuke Furukawa, **Spontaneous population**

imbalance in two-component Bose and Fermigases, Phys. Rev. A 81, 053606 (2010).

DOI: 10.1103/PhysRevA.81.053606

(9) Hosho Katsura, Masahiro Sato, Takashi Furuta, Naoto Nagaosa, **Theory of the Optical Conductivity of Spin Liquid States in One-Dimensional Mott Insulators**, Phys. Rev. Lett. 103, 177402 (2009).

DOI: 10.1103/PhysRevLett.103.177402

[学会発表] (計 27 件)

(1) Takafumi Suzuki and Masahiro Sato, **Edge state and its stability of 2D antiferromagnetic quantum spin systems**, APS March Meeting, Boston Convention Center, Boston, USA, 2月29日 (2012).

(2) Masahiro Sato, Toshiya Hikihara and Tsutomu Momoi, **Competition between Spin Nematic and Spin Density Wave Orders in Spatially Anisotropic Frustrated Magnets in Magnetic Fields**, APS March Meeting, Boston Convention Center, Boston, USA, 2月28日 (2012).

(3) Shintaro Takayoshi and Masahiro Sato, **New phases induced by four-spin interaction in stacked triangular-lattice antiferromagnets in magnetic field**, Novel Quantum States in Condensed Matter 2011 (NQS2011), Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, 11月14日 (2011).

(4) Takafumi Suzuki and Masahiro Sato, **Edge states and their stability of 2D antiferromagnets**, Novel Quantum States in Condensed Matter 2011 (NQS2011), Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, 11月14日 (2011).

(5) Masahiro Sato, **Theory for Raman scattering in 1D spin-1/2 antiferromagnets: Effects of frustration and perturbations on the Heisenberg model**, Novel Quantum States in Condensed Matter 2011 (NQS2011), Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, 11月14日 (2011).

(6) Shintaro Takayoshi and Masahiro Sato, **Effect of Four-Spin Interactions on Phase Diagram of Classical Heisenberg Antiferromagnets on Stacked Triangular Lattice Under Magnetic Field**, SCES2011, University of Cambridge, Cambridge, UK, 8月2日 (2011).

(7) Masahiro Sato, Hosho Katsura and Naoto Nagaosa, **Theory of Raman Scattering Spectrum for One-Dimensional Quantum Magnets**, SCES2011, University of Cambridge, Cambridge, UK, 8月2日 (2011).

(8) Shintaro Takayoshi and Masahiro Sato, **Phase Diagram of Classical Heisenberg Antiferromagnets with Four-Spin**

Interactions on Stacked Triangular Lattice under Magnetic field, APS March Meeting, Dallas, USA, 3月23日 (2011).

(9) Masahiro Sato, Hosho Katsura, and Naoto Nagaosa, **Theory of Raman Scattering in One-dimensional Quantum Magnets**, APS March Meeting, Dallas, USA, 3月21日 (2011).

(10) Masahiro Sato, Toshiya Hikihara, and Tsutomu Momoi, **Spin Dynamics in field-induced quadrupolar and octupolar liquid states in spin-1/2 frustrated chains**, International Conference on Frustration in Condensed Matter (ICFCM), Sendai, 1月11日 (2011).

(11) Masahiro Sato, Shunsuke Furukawa, Shigeki Onoda and Akira Furusaki, **Seven competing phases in the spin-1/2 frustrated J1-J2 chain with easy-plane anisotropy**, International Conference on Frustration in Condensed Matter (ICFCM), Sendai, 1月11日 (2011).

(12) Masahiro Sato, Shintaro Takayoshi and Shunsuke Furukawa, **Ferromagnetic transition in one-dimensional spin-1/2 Bose and Fermi gases**, Quantum Matter in Low Dimensions: Opportunities and Challenges, Albanova University Center, Stockholm, Sweden, 9月7日 (2010).

(13) Masahiro Sato, Toshiya Hikihara, Tsutomu Momoi and Akira Furusaki, **Spin dynamics in multipolar phases of one-dimensional quantum frustrated ferromagnet**, Quantum Matter in Low Dimensions: Opportunities and Challenges, Albanova University Center, Stockholm, Sweden, 9月6日 (2010).

(14) Masahiro Sato, Shunsuke Furukawa and Akira Furusaki, **Successive Neel and dimer orderings in spin-1/2 ferromagnetic frustrated chain with easy-plane anisotropy**, Highly Frustrated Magnetism 2010, Johns-Hopkins Univ. Baltimore, USA, 8月3-5日 (2010).

(15) Masahiro Sato, Toshiya Hikihara, Tsutomu Momoi and Akira Furusaki, **NMR relaxation rate and dynamical structure factors in field-induced magnetic multi-polar phases of spin-1/2 frustrated ferromagnetic chains**, Highly Frustrated Magnetism 2010, Johns-Hopkins Univ. Baltimore, USA, 8月3-5日 (2010).

(16) Masahiro Sato and Norikazu Todoroki, **Stability of collinear and coplanar phases in stacked spatially anisotropic triangular antiferromagnets under a magnetic field**, Highly Frustrated Magnetism 2010, Johns-Hopkins Univ. Baltimore, USA, 8月3-5日 (2010).

(17) Masahiro Sato and Norikazu Todoroki, **Phase diagram and competing orders of stacked spatially anisotropic triangular**

Heisenberg antiferromagnets in magnetic field, The International Conference on Frustrated Spin Systems, Cold Atoms, Nanomaterials: Satellite Conference of StatPhys24, Hanoi, Vietnam, 7月15日 (2010).

(18) Shintaro Takayoshi and Masahiro Sato, **Determination of coefficients of bosonized dimer operators in spin-1/2 antiferromagnetic chains and their application**, The International Conference on Frustrated Spin Systems, Cold Atoms, Nanomaterials: Satellite Conference of StatPhys24, Hanoi, Vietnam, 7月15日 (2010).

(19) Masahiro Sato, Shunsuke Furukawa and Akira Furusaki, **Successive transitions between Neel and dimer phases in spin-1/2 ferromagnetic frustrated chain with easy-plane anisotropy**, The International Conference on Frustrated Spin Systems, Cold Atoms, Nanomaterials: Satellite Conference of StatPhys24, Hanoi, Vietnam, 7月15日 (2010).

(20) Shintaro Takayoshi, Masahiro Sato and Shunsuke Furukawa, **Ferromagnetism in spin-1/2 Bose and Fermi gases confined by elongated potential**, APS March meeting, Portland, USA, 3月19日 (2010).

(21) Toru Sakai, Masahiro Sato, Kouichi Okunishi, Kiyomi Okamoto, Chigak Itoi, **Field-induced quantum phase transitions of the asymmetric three-leg spin tube**, APS March meeting, Portland, USA, 3月16日 (2010).

(22) Masahiro Sato, Toshiya Hikihara, Tsutomu Momoi, Akira Furusaki, **Characterization of multipolar liquid phases in frustrated spin chains from NMR relaxation rate**, APS March meeting, Portland, USA, 3月16日 (2010).

(23) Shintaro Takayoshi, Masahiro Sato and Shunsuke Furukawa, **Ferromagnetic state and correlation functions in spin-1/2 Fermi and Bose gases**, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2010), Yokohama, Kanagawa, 3月1日 (2010).

(24) Masahiro Sato, Toshiya Hikihara, Tsutomu Momoi, and Akira Furusaki, **How to detect magnetic multipolar liquid phases in spin-1/2 frustrated ferromagnetic chains**, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2010), Yokohama, Kanagawa, 3月1日 (2010).

(25) Masahiro Sato, **Field and temperature dependence of NMR relaxation rate for multi-polar liquid phases in frustrated spin chains**, Magnetic resonance in highly frustrated magnetic systems (HFMR2010), Kranjska Gora, Slovenia, 2月1日 (2010).

(26) Masahiro Sato, Shunsuke Furukawa and Shigeki Onoda, **Chiral order and novel electromagnetic excitations in quasi one-dimensional spin-1/2 multiferroics**, RIKEN Workshop on "Emergent Phenomena of Correlated Materials", RIKEN, Wako, Saitama, 12月3日 (2009).

(27) Masahiro Sato, Shintaro Takayoshi and Shunsuke Furukawa, **Quantum phase transition to ferromagnetic liquid in spinful Bose and Fermi gases**, RIKEN Workshop on "Emergent Phenomena of Correlated Materials", RIKEN, Wako, Saitama, 12月3日 (2009).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 正寛 (SATO MASAHIRO)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：90425570