

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23244072

研究課題名(和文)フラストレーションの強い新規量子スピン系における量子多体効果の解明

研究課題名(英文)Exploring of quantum many-body effect in strongly frustrated spin systems

研究代表者

田中 秀数 (Hidekazu, Tanaka)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：80188325

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,800,000円、(間接経費) 11,040,000円

研究成果の概要(和文)：我々はフラストレーションの強いスピン系での顕著な量子効果を調べた。まず、我々はBa₃CoSb₂O₉の磁化過程を測定し、全磁場領域で磁化曲線が理論と一致することより、この物質が理想に近いスピン1/2三角格子反強磁性体であることを示した。続いて、スピン1/2籠目格子反強磁性体Cs₂Cu₃SnF₁₂の磁気励起を中性子非弾性散乱で測定し、励起エネルギーが通常とは逆に、スピン波理論で求めた値よりも大きく減少する負の量子再規格化現象を発見した。更に、新規ダイマー磁性体Ba₂CoSi₂O₆Cl₂を合成し、その強磁場磁化過程を測定することより、磁場中でマグノン結晶ができることを見出した。

研究成果の概要(英文)：We investigated remarkable quantum effects in strongly frustrated spin systems. We performed magnetization measurement on Ba₃CoSb₂O₉, and provide evidence that a spin-1/2 Heisenberg antiferromagnet on a regular triangular lattice is actually realized in Ba₃CoSb₂O₉. We found that the entire magnetization curve is in excellent quantitative agreement with the theoretical calculations. Magnetic excitations in the spin-1/2 kagome lattice antiferromagnet Cs₂Cu₃SnF₁₂ with an ordered ground state were studied using inelastic neutron scattering. Although the spin-wave dispersion can be qualitatively understood in terms of linear spin-wave theory (LSWT), the excitation energies are renormalized by a factor of approximately 0.6 from those calculated by LSWT. This result provides the first evidence of negative quantum renormalization. We determined the crystal structure of the spin dimer magnet Ba₂CoSi₂O₆Cl₂, and observed quantization of magnetization at half of the saturation magnetization.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：磁性 量子スピン系 フラストレーション 強磁場 量子多体効果 三角格子反強磁性体 籠目格子反強磁性体 スピンドイマー磁性体

1. 研究開始当初の背景

絶縁性の磁性体ではスピンの磁性原子に局在し、互いに交換相互作用を及ぼし合っている。このようなスピンの集団はスピン系と呼ばれ、長い研究の歴史をもっている。スピンは本来量子力学的物理量であるが、従来の多くの磁性体では、相互作用の3次元性による相転移が起こると、スピンを古典的なベクトル(古典スピン模型)のように考えても、その磁性の殆どを理解することが出来た。そして量子効果は古典スピン模型に対する補正の役割しかもたず、定性的な違いを生み出すことは少なかった。これに対して、量子効果が顕著で、古典スピン模型では磁性を定性的にさえも理解できないスピン系が量子スピン系である。量子多体効果はスピンの大きさが小さく、且つフラストレーションの強い場合などで顕著になる。

スピンの小さな籠目格子反強磁性体ではフラストレーションに基づく量子多体効果が特に顕著に現れることが多くの理論的研究で示されている。 $S=1/2$ の場合では、基底状態が無秩序状態になることが多くの理論で示されている。しかし、基底状態のスピン状態の理論的コンセンサスはなく、現在も活発な議論が展開されている。主なものとして、valence-bond-solid 状態や resonating valence-bond 状態が提唱されている。最近、 $S=1/2$ 籠目格子反強磁性体の基底状態に対する数値的研究に進展があり、磁化の量子化現象が予言されている。このように、スピンの小さな籠目格子反強磁性体は従来の磁性体とは異なる新奇な特徴をいくつも持ち、磁性研究のフロンティアである。しかし系統的な実験研究は殆どなく、 $S=1/2$ 籠目格子反強磁性体の極めてエキゾチックな性質は実験的に検証されていない。

また、顕著な量子多体効果は強磁場で発現することが多い。これはゼロ磁場では小さかった量子揺らぎの効果が磁場と共に増大し、古典的な基底状態や励起状態を一変させるためである。従来は古典スピン模型で理解されていた磁性体も強磁場で顕著な量子効果を示す場合もある。交換相互作用が等方的な Heisenberg 模型の三角格子反強磁性体では、スピンを古典的ベクトルのように考えると、磁場中の古典的基底状態には連続的な縮退が残る。また、飽和まで相転移は起こらず、磁化曲線は磁場に比例して単調に増加し、飽和に至るだけである。この連続的な縮退は量子揺らぎによって解け、ある特定のスピン状態が安定化される。特に象徴的な現象は、スピンの up-up-down 状態が有限の磁場範囲で安定化され、磁化曲線にプラトーが現れることである。このようにスピンの小さい三角格子反強磁性体では、磁場中で顕著な巨視的量子現象が現れる。一方、実験的にはモデル物質の探索が精力的に行われているが、磁化プラトーを示すモデル物質は殆どなく、良いモ

デル物質の開拓が望まれている。

2. 研究の目的

前節で述べた背景を踏まえて、本研究の目的を以下のように定めた。

- (1) スピン S の小さい三角格子反強磁性体のモデル物質を開拓し、量子磁化プラトーを含む磁化過程全体の検証を行うとともに、新たな磁場誘起量子相転移を発見し、その発現機構を解明する。
- (2) $S=1/2$ 籠目格子反強磁性体のモデル物質を開拓し、基底状態と励起状態に現れる量子効果を実験的に観測し、その機構を解明する。
- (3) フラストレーションの強いスピンドイマー系などの新規量子スピンを開拓し、種々の実験で新奇な量子多体効果を観測し、その発現機構を解明する。

3. 研究の方法

(1) $Ba_3CoSb_2O_9$ は有効スピン $1/2$ をもつ Co^{2+} が正規の三角格子を形成する反強磁性体である。我々は $Ba_3CoSb_2O_9$ の粉末試料と単結晶試料の強磁場磁化測定を行い、量子磁化プラトーを含む磁化過程全体の実験的検証を初めて行った。実験で得られた磁化曲線を厳密対角化や結合クラスター法による高精度の計算結果と比較した。また、単結晶を用いた高周波高磁場 ESR により、集団励起を調べた。また、類似の結晶構造を有する $Ba_3CoNb_2O_9$ について、粉末試料を用いた磁化及び比熱測定を行い、その磁性を詳細に研究した。

(2) $Cs_2Cu_3SnF_{12}$ は我々が開拓した $S=1/2$ 籠目格子反強磁性体である。この系は大きな Dzyaloshinsky-Moriya (DM) 相互作用のために秩序状態に $T_N=20$ K で相転移をする。しかし、磁気励起には大きな量子効果が期待される。我々は、まず秩序相での磁気構造を決定し、続いてこの系の磁気励起を単結晶を用いた中性子非弾性散乱で詳しく調べた。得られた磁気励起の分散関係をスピン波理論に基づいて解析した。 $Cs_2Cu_3SnF_{12}$ と類似の結晶構造を持つ $Rb_2Cu_3SnF_{12}$ では、基底状態が励起ギャップのある singlet 状態になる。本研究では両者の混晶 $(Rb_{1-x}Cs_x)_2Cu_3SnF_{12}$ を作成して、その基底状態の量子相転移を磁気測定で詳細に調べた。

(3) 新規スピンドイマー磁性体 $Ba_2CoSi_2O_6Cl_2$ を合成し、その結晶構造を X 線構造解析で決定した。また、この系の量子多体効果を詳しく調べる目的で、単結晶を用いた磁化率、強磁場磁化、及び比熱測定を行った。

4. 研究成果

(1) $S=1/2$ 三角格子反強磁性体の量子磁性

図 1(a) は 1.3 K で測定した $Ba_3CoSb_2O_9$ の粉末試料の磁化過程である。50 T までの磁場範囲で全磁化過程が観測される。有効スピンの

飽和は $H_s=31.9$ T で起こる。飽和磁場 H_s 以上で磁化曲線が有限の傾きをもつのは八面体配位の Co^{2+} に特徴的な大きい Van Vleck 常磁性のためである。飽和磁場以上の磁化をゼロ磁場に外挿した値が有効スピンの依る飽和磁化である。このようにして、飽和磁化 M_s と g 値は、それぞれ $M_s=1.91 \mu_B/\text{Co}^{2+}$, $g=3.82$ と求められる。また、交換相互作用 J と飽和磁場には $4.5J=g\mu_B H_s$ の関係があるので、交換相互作用の値は $J/k_B=18.2$ K と求められる。

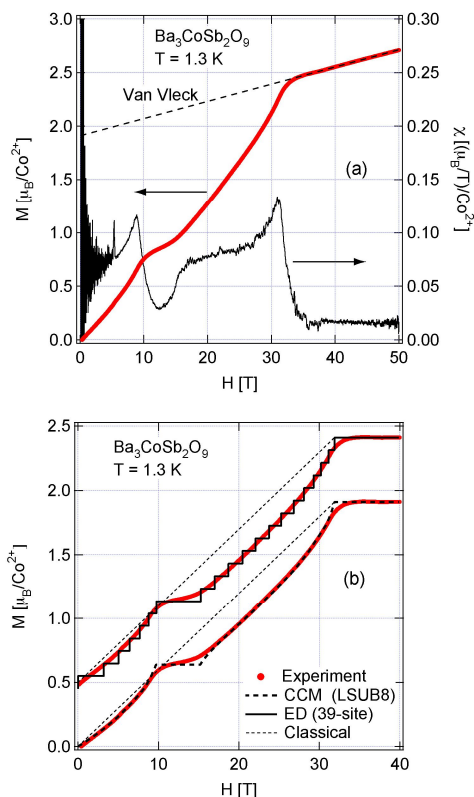


図 1: (a) は磁化と微分磁化率の生データ。(b) は Van Vleck 常磁性の補正後の磁化曲線。太い実線は 39 サイト厳密対角化の結果、太い破線は結合クラスター法による計算結果である。細い破線は古典スピンモデルの磁化曲線である。

図 1(b) は Van Vleck 常磁性の補正をした磁化曲線である。飽和磁場の 1/3 に明瞭な磁化プラトーが観測される。図の太い実線は 39 サイト厳密対角化による計算結果を、太い破線は高次の結合クラスター法による計算結果を示している。ここでは飽和磁場と飽和磁化の値を実験結果に合わせてある。粉末試料のために臨界磁場近傍での磁化の異常に少し鈍りが見られるが、実験結果と理論は定量的に一致していることが分かる。実験は粉末試料で行っているため、磁化曲線が磁場方向に依存して大きく異方的であると、磁化プラトーはこれほど明瞭には観測されない。これらの実験を通して、 $\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$ では、 Co^{2+} 化合物としては例外的に交換相互作用が Heisenberg 模型に近いこと、また、2次元性が良いことが実証された。

ESR に依る集団励起の測定から、 $\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$

は弱い容易面型磁気異方性をもつことが分かった。集団励起モードの解析から、弱い三角格子面間の交換相互作用と磁気異方性が、それぞれ面内の交換相互作用の大きさの 2.5%、5.7% であることが分かった。この解析結果からも 2次元性が良いことが示された。

(2) $S=1/2$ 籠目格子反強磁性体の量子磁性

$S=1/2$ 籠目格子反強磁性体 $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ は $T_N=20$ K で磁気相転移を起こす。今回の中性子弾性散乱実験で秩序相の磁気構造は $q=0$ 構造であることを確かめた。 $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ の中性子非弾性散乱は散乱面を $(0,0,1)$ 面にとって行った。図 2(a) は幾つかの Q における磁気励起スペクトル(constant- Q energy scan)である。測定温度は 3 K である。明瞭な 3 つの磁気励起が観測される。

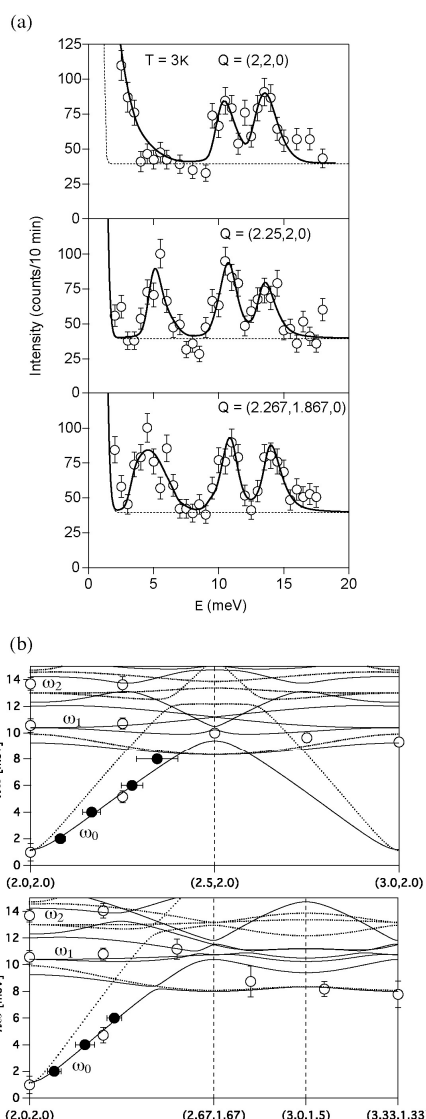


図 2: $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ の磁気励起スペクトルの例。散乱ベクトルは $Q=(h,k,0)$ にとってある。(b) $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ の磁気励起の分散関係。破線は磁化率のデータから見積もった交換相互作用 ($J_{\text{avg}}^{\text{mag}}=19.8$ meV) を用いた線形スピン波理論での計算結果で、実線はベストフィットで得られた $J_{\text{avg}}^{\text{sw}}=12.1$ meV を用いた計算結果。

図 2(b)の記号は測定で得られた磁気励起の分散関係である。実験結果から $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ の磁気励起はスピン波で基本的に理解することができることが分かった。分散関係の解析は、185 K 以下で構造相転移のために格子が ab 面内で 2×2 倍になっていることによって生ずる 4 種類の最近接交換相互作用、及び第 2 近接交換相互作用と DM 相互作用を考慮して行った。図 2(b)の実線はこの解析模型に基づく線形スピン波理論の計算結果である。詳細は後述の論文記してあるが、本解析から 4 種類の最近接交換相互作用、第 2 近接相互作用、DM 相互作用の値が全て求められる。最近接交換相互作用の平均値は $J_{\text{avg}}^{\text{sw}} = 12.1$ meV と求められた。 Γ 点における磁気励起の分裂が説明できないが、本解析で分散関係の全体は大体説明できる。

以上のように、一見、 $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ の磁気励起は線形スピン波理論でよく記述できるように見えるが、1 つ大きな問題が残る。それは交換相互作用の大きさである。 $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ の磁化率から得られた第 1 近接交換相互の大きさは $J_{\text{avg}}^{\text{mag}} = 19.8$ meV である。磁化率の解析は厳密対角化の結果を用いたものであるため、信頼性が高い。線形スピン波理論から得られた $J_{\text{avg}}^{\text{sw}} = 12.1$ の値はこの 61% でしかない。この 2 つの実験から得られた J の値の違いは、磁気励起のエネルギーが量子効果によって線形スピン波理論の結果より小さくなるように再規格化されたためだと考えられる。フラストレーションの無い反強磁性体では、 $S=1/2$ の 1 次元反強磁性体に代表されるように量子再規格化され励起エネルギーは線形スピン波理論の結果より大きくなる。三角格子反強磁性体では、このような磁気励起の“負の量子再規格化”が起こることが理論的に予言されているが、実験例はない。本研究結果は、負の量子再規格化現象を最初に観測したものである。

(3) 新規スピンドイマー系の量子磁化過程

我々はスピンドイマー磁性体 $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$ を初めて合成した。 $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$ は $S=1/2$ 三角格子 Heisenberg 反強磁性体である $\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$ の単結晶育成を試みているときに副産物として偶然に得られたものである。 $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$ は単斜晶系 ($P2_1/c$) である。図 3(a) は $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$ の結晶構造の全体図である。構造の特徴は、磁性イオン Co^{2+} が底面の中心に位置する CoO_4Cl ピラミッドが底面を向かい合わせて配置し、 SiO_4 四面体を介して連結していることである。底面を向かい合わせて配置する 2 つのピラミッドの Co^{2+} イオンが磁気的にもダイマーをなしていると容易に想像できる。 ab 面に平行なダイマー層内の結晶構造は擬 2 次元スピンドイマーとして知られている $\text{BaCuSi}_2\text{O}_6$ の構造と類似している。 $\text{BaCuSi}_2\text{O}_6$ では、ダイマー間の相互作用は ab 面内が支配的で ab 面間の相互作用は無視できる程小さい。したがって、 $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$ で

も事情は同じと考えられるので、本系における交換相互作用のネットワークは図 3(b) のように表されると考えられる。

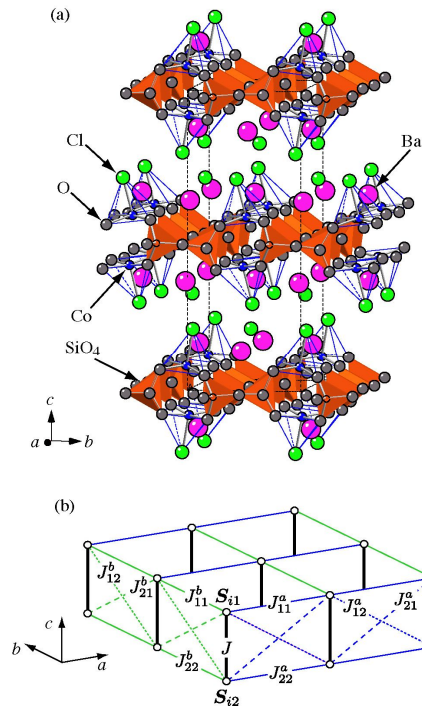


図 3: (a) は $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$ の結晶構造を表し、(b) は ab 面内の交換相互作用を表す。

温度に依存しない Van Vleck 常磁性を除いた Co^{2+} スピン ($S=1/2$) による磁化率は、温度を低下すると、50-80 K に広い山をもち、更に温度を下げる、ゼロになる。これは基底状態が singlet 状態であることを示している。図 4(a) は 1.3 K で測定した $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$ の磁化過程である。測定は東京大学国際強磁場科学研究施設で行った。測定は 70 T までのパルス磁場を用いて行った。磁化の絶対値は、 $H//ab$ では ESR で求めた singlet-triplet 励起の周波数と共鳴磁場の関係より得られる $g_{ab}=3.86$ を用いて規格化を行った。 $H//c$ の場合は、 g 値が得られていないので、磁化の絶対値は何度か測定した飽和磁化の平均値で規格化を行った。

図 4(a) を見て分かるように、70 T までの磁場範囲で全磁化過程が観測される。磁化の飽和は $H//ab$ の場合には、 $H_s=43$ T で、 $H//c$ の場合には $H_s=58$ T で起こる。 $H//ab$ の場合で見られる飽和磁場以上で磁化曲線が有限の傾きをもつのは Van Vleck 常磁性のためである。飽和磁場以上の磁化をゼロ磁場に外挿した値が有効スピンの依る飽和磁化で、その値は $H//ab$ のとき $M_s=1.93 \mu_B$ 、 $H//c$ のときには殆ど $2.0 \mu_B$ である。図 4(b) は Van Vleck 常磁性を差し引いた後の磁化過程である。図を見て分かるように、両磁場方向で飽和磁化の半分の位置にプラトーが明瞭に観測される。また、 $M=0$ と $1/2$ 磁化プラトーの間、および $1/2$ 磁化プラトーと飽和磁化の間の磁化のスロー領域が極めて小さく、磁化は階段状に変化する。

このような磁化過程は、ダイマー間交換相互作用のフラストレーションが殆ど完全に近い場合 ($J_{11}+J_{22}=J_{12}+J_{21}$) に起こる。この条件が成り立つ場合には、ダイマー上に生成されたマグノンが隣接するダイマー上に移ることはできなくなり、一箇所に完全に局在する。ダイマー間交換相互作用の磁場に平行な成分はマグノン間に斥力として作用する。したがって、磁場中の基底状態は、化学ポテンシャルである磁場とマグノン間の斥力のバランスで決まる。1/2 磁化プラトーの臨界磁場までの基底状態は、全てのダイマー上に singlet が配置した状態の直積で表される。臨界磁場で半数のダイマー上にマグノンが互いに隣接しないように生成される。これはマグノンの結晶化であり、マグノンのウィグナー格子の形成に対応する。磁化は粒子数に対応するので、このとき 1/2 磁化プラトーが生ずる。更に磁場を増加すると、次の臨界磁場である飽和磁場で、全てのダイマー上をマグノンが生ずる。このようなシナリオで、 $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$ の磁化過程は階段状になると考えられる。このような完全に近いダイマー間相互作用のフラストレーションは、直交ダイマー系である $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ を除けば、 $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$ が初めての実験例である。

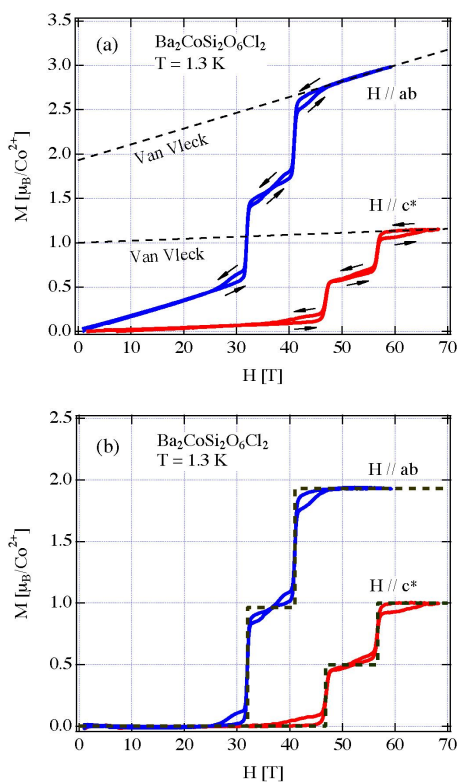


図 4: (a) は 1.3 K で測定した $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$ の磁化過程の生データで、(b) は Van Vleck 常磁性の補正後の磁化曲線である。(b) の破線はダイマー間交換相互作用のフラストレーションが完全な場合の磁化過程を表す。

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 20 件)

1. K. Matan, Y. Nambu, T. J. Sato, Y. Fukumoto, T. Ono, H. Tanaka, Y. Zhao, C. Broholm, A. Podlesnyak, and G. Ehlers: Ghost modes and continuum scattering in the dimerized distorted kagome lattice antiferromagnet $\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$; Phys. Rev. B **89** (2014) 024414 (1-7). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.89.024414
2. 田中秀数, 栗田伸之, 松尾晶, 金道浩一: スピンが 1/2 の三角格子反強磁性体の磁化過程と量子多体効果; 日本物理学会誌 **69** (2014) 24-28. 査読有
3. 薄 拓哉, 栗田伸之, 田中秀数, 野尻浩之: スピン 1/2 の正規三角格子反強磁性体 $\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$ の量子磁化過程と ESR; 電子スピンサイエンス **11** (2013) 86-91. 査読有
4. T. Susuki, N. Kurita, T. Tanaka, H. Nojiri, A. Matsuo, K. Kindo and H. Tanaka: Magnetization Process and Collective Excitations in the S=1/2 Triangular-Lattice Heisenberg Antiferromagnet $\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$; Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 267201 (1-5). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.267201
5. M. S. Grbić, S. Krämer, C. Berthier, F. Trouselet, O. Cépas, H. Tanaka, and M. Horvatić: Microscopic Properties of the “Pinwheel” Kagome Compound $\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$; Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 247203 (1-5). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.247203
6. J. Richter, O. Götze, R. Zinke, D. J. J. Farnell and H. Tanaka: The magnetization process of the spin-one triangular-lattice Heisenberg antiferromagnet; J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 015002 (1-2). 査読有
DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.82.015002>
7. S. Itoh, T. Yokoo, S. Yano, D. Kawana, H. Tanaka and Y. Endoh: Quantum renormalization effect in one-dimensional Heisenberg antiferromagnets; J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 084706 (1-7). 査読有
DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.81.084706>
8. T. Amemiya, I. Umegaki, H. Tanaka, T. Ono, A. Matsuo and K. Kindo: Ferromagnetism induced in the anisotropic stacked kagome lattice antiferromagnet $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{CeF}_{12}$; Phys. Rev. B **85** (2012) 144409 (1-9). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.85.144409
9. I. Umegaki, H. Tanaka, T. Ono, M. Oshikawa and K. Sakai: Thermodynamic

- properties of quantum sine-Gordon spin chain system KCuGaF_6 ; Phys. Rev. B **85** (2012) 144423 (1-9). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.85.144423
10. Y. Shirata, H. Tanaka, A. Matsuo and K. Kindo: Experimental Realization of Spin-1/2 Triangular-Lattice Heisenberg Antiferromagnet; Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 057205 (1-5). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.057205
 11. H. Kuroe, N. Takami, N. Niwa, T. Sekine, M. Matsumoto, F. Yamada, H. Tanaka and K. Takemura: Longitudinal magnetic excitation in KCuCl_3 studied by Raman scattering under hydrostatic pressures; J. Phys: Conf. Ser. **400** (2012) 032042 (1-4). 査読有
DOI:10.1088/1742-6596/400/3/032042
 12. Y. Shirata, H. Tanaka, T. Ono, A. Matsuo, K. Kindo and H. Nakano: Quantum Magnetization Plateau in Spin-1 Triangular-Lattice Antiferromagnet; J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 093702 (1-4). 査読有
DOI:http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.80.093702
 13. T. Suzuki, M. Yamada, Y. Ishii, I. Watanabe, T. Goto, H. Tanaka and K. Kubo: Change in magnetic ground states in nonmagnetic-impurity-doped spin-gap systems $\text{TlCu}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Cl}_3$ using muon spin relaxation; Phys. Rev. B **83** (2011) 174436 (1-5). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.83.174436
- ピンダイマー系 $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$ の強磁場磁化過程; 日本物理学会 2013 年秋季大会 (徳島大学常三島キャンパス, 2013 年 9 月 25-28 日).
6. H. Tanaka: Experimental Realization of Spin-1/2 Triangular-Lattice Heisenberg Antiferromagnets; Collaborative Conference on Material Research, June 24-28, 2013, Jeju Island South Korea.
 7. H. Tanaka: Ground States and Magnetic Excitations in $S=1/2$ Kagome-Lattice Antiferromagnets $\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ and $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$; JAEA Synchrotron Radiation Research Symposium "Magnetism in Quantum Beam Science", March 11-13, 2013, Harima Science Garden City, Hyogo, Japan.
 8. H. Tanaka: Ground states and magnetic excitations in a fluoride family of $S=1/2$ kagome-lattice antiferromagnet; International Conference on Highly Frustrated Magnetism, June 4-8, 2012, Hamilton, Canada.
 9. 田中秀数: Ordered Perovskite 型三角格子反強磁性体の量子磁性; 京都大学基礎物理学研究所研究会「量子スピン系の物理」(京都大学基礎物理学研究所, 2012 年 11 月 12-14 日).
 10. 田中秀数: フラストレーションの強いスピン系における量子多体効果の新展開; 日本物理学会 2011 年秋季大会(富山大学 五福キャンパス 2011 年 9 月 21-24 日).

〔その他〕

ホームページ:

<http://www.lee.phys.titech.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

田中 秀数 (TANAKA, Hidekazu)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 80188325

(2)研究分担者

小野 俊雄 (ONO, Toshio)

大阪府立大学・理学系研究科・准教授
研究者番号: 40332639

栗田 伸之 (KURITA, Nobuyuki)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 80566737

(3)連携研究者

佐藤 卓 (SATO, Taku)

東北大学・多元物質科学研究所・教授
研究者番号: 70354214

〔学会発表〕(計 36 件)

1. 古賀智之, 栗田伸之, 田中秀数: スピン 1/2 擬 2 次元正方格子反強磁性体 $\text{Sr}_2\text{CuTeO}_6$ におけるスピンプラストレーション効果; 日本物理学会 2014 年年次大会 (東海大学湘南キャンパス, 2014 年 3 月 27-30 日).
2. 田中秀数: $S=1/2$ スピンダイマー系 $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$ の強磁場磁化過程と量子多体効果; 東京大学物性研究所短期研究会「極限強磁場科学-場, 物質, プローブのリンクから融合へ」(東京大学物性研究所, 2013 年 10 月 30-11 月 1 日).
3. 田中秀数, 松尾晶, 金道浩一: $S=1$ 三角格子反強磁性体 $\text{Ba}_3\text{NiSb}_2\text{O}_9$ の強磁場磁化過程; 日本物理学会 2013 年秋季大会 (徳島大学常三島キャンパス, 2013 年 9 月 25-28 日).
4. 薄拓哉, 栗田伸之, 田中秀数, 野尻浩之, 田中卓也, 松尾晶, 金道浩一: $S=1/2$ 三角格子反強磁性体 $\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$ の磁場中量子相転移と磁気励起; 日本物理学会 2013 年秋季大会 (徳島大学常三島キャンパス, 2013 年 9 月 25-28 日).
5. 田中秀数, 松尾晶, 金道浩一: $S=1/2$ XY ス