

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25年 5月17日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540348

研究課題名（和文） 量子カゴメ格子反強磁性体の圧力下測定による
量子相転移近傍のスピン液体の研究

研究課題名（英文） Investigation of spin liquid state near the quantum critical point
by high-pressure measurements of quantum kagome lattice antiferromagnets

研究代表者

大久保 晋（OKUBO SUSUMU）

神戸大学・分子フォトサイエンス研究センター・助教

研究者番号：80283901

研究成果の概要（和文）：

量子スピнкаゴメ格子反強磁性体の圧力下の帯磁率測定から Dzyaloshinski-Moriya (DM) 相互作用に対するスピン液体状態の安定性を調べた。ZnCu₃(OH)₆Cl₂, Cu₃V₂O₇(OH)₂·2H₂O の2つについて圧力下の帯磁率測定を最大圧力 7.9Kbar、最低温度 1.8K までの範囲で行ったが、スピン液体状態から Néel 秩序状態への転移は観測されなかった。一方、カゴメ類似格子の Cu₂O(SO₄)、古典スピнкаゴメ格子の KCr₃(SO₄)₂(OH)₆、基底状態がスピン液体状態と考えられる Bi₃Mn₄O₁₂(NO₃) について、ESR を用いて DM 相互作用の大きさを決定した。

研究成果の概要（英文）：

To investigate spin-liquid state stability for Dzyaloshinski-Moriya (DM) interaction (antisymmetric exchange interaction), magnetic susceptibility measurements of quantum kagome antiferromagnets ZnCu₃(OH)₆Cl₂ (Herbertsmithite) and Cu₃V₂O₇(OH)₂·2H₂O (Volborthite) have been performed under high-pressure at low temperature. Quantum transition from spin-liquid state to Néel state in these systems cannot be observed in high-pressure up to 7.9 kbar at low temperature down to 1.8 K. On the other hand, D terms of DM interaction in quantum-spin kagome like antiferromagnet Cu₂O(SO₄) (Dolerophanite), classical-spin kagome lattice antiferromagnet KCr₃(SO₄)₂(OH)₆ (Cr-jarosite) and spin-liquid ground state honeycomb lattice antiferromagnet Bi₃Mn₄O₁₂(NO₃) have been estimated using high-frequency ESR measurements.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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

1. 研究開始当初の背景

近年急速にスピンプラストレーションの概念が注目を集めている。特に2次元スピン

フラストレーション系の問題として S=1/2 カゴメ格子反強磁性体におけるスピン液体の問題は理論、実験ともに議論がつかない。ス

ピン液体状態では通常の反強磁性体に現れるスピンの静的な秩序化 (Néel 秩序) と異なり、スピン間に強い相関が働くにも拘らず、幾何学的フラストレーションのためにスピンは時間的空間的に揺らぐスピン液体状態になっている。理論的研究では、単純なハイゼンベルグ型量子スピнкаゴメ格子反強磁性体の取り扱いの範囲で、基底状態は励起ギャップをもつシングレット状態のスピン液体であるという提案と、励起ギャップのないスピン液体状態であるという提案の相反する提案がなされている。この理由として、量子カゴメ格子反強磁性体の理論計算では、厳密対角化計算や量子モンテカルロ計算が行なわれているが、基本格子点が多いことにより厳密対角化では小さいサイズの計算しかできず有限サイズ問題を生じることやモンテカルロ計算ではカゴメ格子特有の不符号の問題などがあり理論計算では未だに決定的な結論はだされていない。一方で、実験的研究ではこれまで $S=1/2$ カゴメ格子反強磁性体のモデル物質と考えられている $\text{ZnCu}_3(\text{OH})_6\text{Cl}_2$ (Herbertsmithite), $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Volborthite), $\text{BaCu}_3\text{V}_2\text{O}_8(\text{OH})_2$ (Vesignieite) のいずれも基底状態は、ギャップレスのスピン液体状態であることを示している。このことは理論計算が単純なモデルに立脚しているのに対して、現実物質にはより現実的なモデルの取り扱いが必要であることを示している。カゴメ格子反強磁性体では、その対称性から本質的にスピン間に Dzyaloshinski-Moriya (DM) 相互作用 (反対称交換相互作用) が存在する。Cépas らは、理論的研究から DM 相互作用と交換相互作用の競合により DM 相互作用がスピン液体状態を安定化させると提案している。見積もりによれば、Herbertsmithite はこの量子相転移点近傍のスピン液体状態にあり、わずかな DM 相互作用の変化により Néel 状態へと転移する可能性がある。DM 相互作用を導入した直接的な基底状態の計算は大規模計算になり、現在のスーパーコンピュータの能力を有しても十分な理解に及ばない。このような背景から、フラストレーションに関係するスピン液体状態の理解のために DM 相互作用を変化させ基底状態の変化を観測する実験的研究により、理論計算の一助となる情報を与えることが急務である。このような背景から、本研究が緊急に取り組むべき課題であると着想した。

2. 研究の目的

量子カゴメ格子反強磁性体のモデル物質 Herbertsmithite, Volborthite, Vesignieite の基底状態は申請者の強磁場

ESR 測定により、ギャップレスのスピン液体状態であることが明らかになっている。これらの中で特に Herbertsmithite は結晶構造からスピン間の相互作用や電子軌道の状態が均一でシンプルなモデルの適用が可能な量子カゴメ反強磁性体のモデル物質となっている。Cépas らの理論予想においても Herbertsmithite が量子臨界点に近いと予想されており、この系の DM 相互作用を変化させることができれば、スピン液体-Néel 状態の量子相転移を観測することができものと考えた。申請者は圧力下高周波数 ESR 測定を推進しているグループに属しており、圧力下磁気測定として磁化率、ESR が可能な環境にいる。そのような背景により、本研究では、圧力下の帯磁率測定で低温における帯磁率の振る舞いがギャップレススピン液体から反強磁性的ギャップを持つ Néel 秩序状態へと変わることを観測することを目的とした。さらに、圧力下磁化測定により反強磁性ギャップ大きさの見積もることや、圧力下 ESR 測定により反強磁性状態の磁気異方性に関する情報を得ることを創案した。

3. 研究の方法

本研究では、DM 相互作用の大きさを変化させ帯磁率、磁化、ESR といった磁気測定を行ない、量子カゴメ反強磁性体の量子相転移近傍のスピン液体状態からの変化を観測することを試みた。DM 相互作用の D ベクトルは、磁性イオン回りの結晶の対称性によって方向が制約される。静水圧印加では等方的に圧力をかけることになるが、一般に結晶の硬さは等方的ではないので、静水圧印加は結晶格子間隔を異方的に変化させ、磁性イオンとハロゲンイオンの結合角を変化させることになる。これにより、DM 相互作用の D ベクトルの方向を変化させることができ、量子カゴメ格子反強磁性体の量子相転移近傍のスピン液体状態から Néel 状態への転移を観測できるものと考えた。これによって Cépas らの予想している交換相互作用と DM 相互作用の競合によるスピン液体状態の安定化を圧力パラメータによって明らかにできる。量子カゴメ反強磁性体のモデル物質である Herbertsmithite, Volborthite, Vesignieite は低温においても有限な磁化を持つギャップレススピン液体状態が基底状態であることが明らかなので、圧力下で Néel 状態が出現するとすれば帯磁率の温度依存性に異常が観測される。さらに圧力下磁化測定により反強磁性ギャップの大きさを見積もることが出来る。また、圧力下高周波数 ESR 測定によって粉末試料ながら磁気異方性の情報を引き出すことができる。

4. 研究成果

本研究によって得られた主な成果は、1) 量子カゴメ反強磁性体の圧力による基底状態の変化、2) DM相互作用のDベクトルの精密決定、3) 量子カゴメ反強磁性体の基底状態、の3つである。以下にそれぞれの結果について述べる。

(1) 量子カゴメ反強磁性体の圧力による基底状態の変化

量子カゴメ反強磁性体である Herbertsmithite、Volborthite の圧力下における帯磁率測定を行った。試料はいずれも水熱合成のため粉末試料である。

図1に Herbertsmithite の 1 bar, 3.60 kbar, 7.93 kbar の圧力下における帯磁率の温度依存性を示す。測定温度範囲は 300K-2.0K である。低温になるに従い Curie 的な振る舞いを示すのは、これまで報告されている大気圧下の測定と同様で、この系が基底状態でギャップレスのスピ液体状態であることを示している。圧力下測定では、低温において 1 bar の帯磁率よりも圧力下の帯磁率の方が僅かに Curie 成分が大きく現れているように観測された。また、その圧力依存性は 3.60 kbar, 7.93 kbar と加える圧力を増大させるに従い、帯磁率の Curie 成分が増大する傾向が見られた。このような Curie 成分の増大は、他の物質の圧力下帯磁率測定においてもしばしば観測される効果で、本質的な変化かどうか判断することは難しい。圧力を印加することで結晶性が低下していることも考えられるため、試料に圧力印加したのちに 1 bar に戻したものの測定も行ったが、初めの 1 bar の帯磁率温度依存性を再現するため、結晶試料は圧力印加で可逆的に変化しているため、圧力印加による Curie 成分の増加は本質的であると考えられる。Sepas らの理論的計算では圧力下で Néel 秩序化すると予想されていることから、帯磁率は低温で減少すると予想されるが、測定結果の振る舞いには Néel 秩序化の兆候は現れなかった。この原因として、7.93 kbar の圧力では Néel 秩序を起こすほどには結晶構造は変化しない、測定の最低到達温度 2.0 K では Néel 状態に到達していない、などの可能性が考えられる。

そこで同じ量子カゴメ反強磁性体である Volborthite についても測定を試みたが、Herbertsmithite と同様に低温における Curie 成分の僅かな増大が観測されるだけで、帯磁率の減少は観測されなかった。Herbertsmithite と同様に測定範囲内では量子相転移が起こっていないものと考えられる。より高圧、低温の測定については、装置開発を含めて今後の課題である。

以上をふまえて、様々な系における DM 相互作用の D ベクトルの精密測定を試み、今後の測定の準備とした。

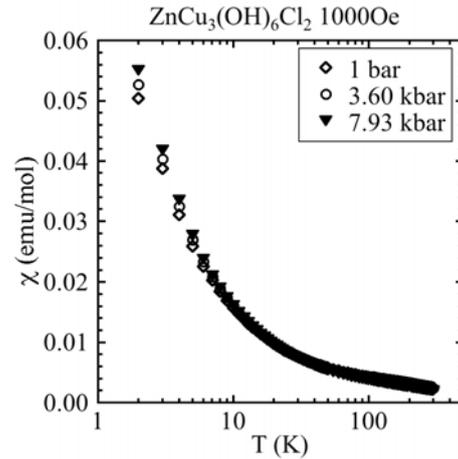


図1 Herbertsmithite の圧力下帯磁率

(2) DM相互作用のDベクトルの精密決定

DM相互作用のDベクトルの方向は、結晶の対称性から制限される。実験的にDベクトルの方向を決定するには、帯磁率の角度依存性、ESRの常磁性共鳴(EPR)の線幅の角度依存性、ESRの反強磁性共鳴(AFMR)の角度依存性、量子スピン系で見られるESRの直接遷移の吸収強度とRF磁場の角度依存性などがあるが、いずれの場合も単結晶試料が必要である。本研究の推進のために、カゴメ格子反強磁性体、ならびに関係物質に対するDM相互作用のDベクトルの決定を行った。

(a) ギャップレススピ液体状態が基底状態であると考えられている $S=3/2$ ハニカム格子反強磁性体の $\text{Bi}_2\text{Mn}_4\text{O}_{12}(\text{NO}_3)$ について結晶の対称性の議論からDベクトルの方向を決定し、AFMR測定からDベクトルの大きさを決定した(文献3)。

(b) $S=3/2$ の古典スピカゴメ格子反強磁性体 $\text{KCr}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ 、ならびにカゴメ格子様反強磁性体 $\text{Cu}_2\text{O}(\text{SO}_4)$ の AFMR 測定から D ベクトルの大きさを見積もった(学会発表3、4、6、文献5)。

(3) 量子カゴメ反強磁性体の基底状態

量子カゴメ反強磁性体の Volborthite、Visignietite に関して、粉末試料の ESR 測定から、その基底状態がギャップレススピ液体状態である報告を行った(文献7、8、9)。

さらに基底状態がスピ液体である $S=3/2$ ハニカム格子反強磁性体 $\text{Bi}_2\text{Mn}_4\text{O}_{12}(\text{NO}_3)$ と関連して、 $S=1/2$ ハニカム格子反強磁性体 $\text{InCu}_{2/3}\text{V}_{1/3}\text{O}_3$ の ESR 測定を行い、Néel 秩序化したあともスピ揺らぎの残る特異なダイナミクスを持つことを報告した(文献6)。

DM相互作用は磁性ではよく見られる相互作用であるが、その大きさの決定は容易ではない。本研究では量子カゴメ反強磁性体の基底状態に現れるスピ液体状態と関係してDM相互作用の影響を調べることを目的としていたが、装置的な問題として到達圧力と低温が十分でないため、当初の研究予定通りに

は達成出来なかった。しかしながら、DM 相互作用の D ベクトルの大きさなど精密に測定が可能になってきたことにより、適切な量子カゴメ反強磁性体の試料を見つけることでスピン液体状態に対する DM 相互作用の働きを明らかにできる準備はできた。

また、DM 相互作用はラセン磁性の重要な相互作用であるので、今後マルチフェロイック等の新奇磁性の研究推進に D ベクトルの精密測定が活用できるものと期待される。

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)

- ① M. Rani, H. Sakurai, S. Okubo, K. Takamoto, R. Nakata, T. Sakurai, H. Ohta, A. Matsuo, Y. Kohama, K. Kindo, J. Ahmad, "Antiferromagnetic ordering in Sr_2CrO_4 ", J. Phys.: Cond. Mat. 25, 2013, 226001-5, 査読有
DOI:10.1088/0953-8984/25/22/226001
- ② H. Ohta, S. Okubo, E. Ohmichi, T. Sakurai, W.-M. Zhang, T. Shimokawa, "Developments of Multi-extreme High Field ESR in Kobe", J. Low Temp. Phys., 170, 2013, 511-519, 査読無し
DOI 10.1007/s10909-012-0683-7
- ③ S. Okubo, T. Ueda, H. Ohta, W. Zhang, T. Sakurai, N. Onishi, M. Azuma, Y. Shimakawa, H. Nakano, T. Sakai, "Dzyaloshinsky-Moriya interaction and field-induced magnetic order in an antiferromagnetic honeycomb lattice compound $\text{Bi}_3\text{Mn}_4\text{O}_{12}(\text{NO}_3)$ studied by high-field electron spin resonance", Phys. Rev. B 86, 2012, 140401(R)-4, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.86.140401
- ④ T. Yamasaki, S. Okubo, H. Ohta, T. Sakurai, S. Ikeda, H. Oshima, M. Takahashi, S. Hara, K. Tomiyasu, T. Watanabe, "Possible new temperature phase observed in GeCo_2O_4 spinel by high-field ESR", J. Phys.: Conf. Serie. 400, 2012, 032119-4, 査読無し
DOI:10.1088/1742-6596/400/3/032119
- ⑤ N. Takahashi, S. Okubo, H. Ohta, T. Sakurai, M. Fujisawa, H. Kikuchi, "Dzyaloshinsky-Moriya Interaction Estimated by AFMR of Kagome Like Substance $\text{Cu}_2\text{O}(\text{SO}_4)$ ", J. Phys.: Conf. Serie. 400, 2012, 032097-4, 査読無し
DOI:10.1088/1742-6596/400/3/032097
- ⑥ S. Okubo, H. Wada, H. Ohta, T. Tomita, M. Fujisawa, T. Sakurai, E. Ohmichi, H.

Kikuchi, "Anomalous Spin Dynamics Observed by High-Frequency ESR in Honeycomb Lattice Antiferromagnet $\text{InCu}_{2/3}\text{V}_{1/3}\text{O}_3$ ", J. Phys. Soc. Jpn. 80, 2011, 023705-4, 査読有

DOI: 10.1143/JPSJ.80.023705

- ⑦ H. Ohta, W. Zhang, S. Okubo, M. Fujisawa, T. Sakurai, Y. Okamoto, H. Yoshida, Z. Hiroi, "Spin dynamics of S=1/2 kagome lattice antiferromagnets observed by high-field ESR", Phys. Status Solidi B 247, 2010, 679-681, 査読有
DOI 10.1002/pssb.200983033
- ⑧ W. Zhang, H. Ohta, S. Okubo, M. Fujisawa, T. Sakurai, Y. Okamoto, H. Yoshida, Z. Hiroi, "High-Field ESR Measurements of S=1/2 Kagome Lattice Antiferromagnet $\text{BaCu}_3\text{V}_2\text{O}_8(\text{OH})_2$ ", J. Phys. Soc. Jpn, 79, 2010, 023708-4, 査読有
DOI: 10.1143/JPSJ.79.023708
- ⑨ H. Ohta, N. Matsumi, S. Okubo, M. Fujisawa, T. Sakurai, H. Kikuchi, T. Nakamura, "Spin-Gap Observation in the Triangular Lattice Antiferromagnet InMnO_3 by High-Field ESR", J. Phys.: Conf. Serie. 200, 2010, 022041-4, 査読無し
DOI: 10.1088/1742-6596/200/2/022041

[学会発表] (計 19 件)

- ① 大久保晋, 和田秀雄, 張衛民, 櫻井敬博, 太田仁, 富田崇弘, 藤澤真士, 菊池彦光, "蜂の巣格子反強磁性体のテラヘルツ光 ESR 測定", 兵庫県立大学大学院物質理学研究科「フロンティア機能物質創製センター」シンポジウム, 2012. 12. 22, フロンティア機能物質創製センター (招待)
- ② 大久保晋, "ハニカム格子反強磁性体の秩序の特異性", 基研研究会「量子スピン系の物理」, 2012. 11. 12-14, 京都大学基礎物理学研究所パナソニック国際交流ホール (招待)
- ③ 大久保晋, 中田亮平, 高橋直己, 下川統久朗, 櫻井敬博, 張衛民, 太田仁, 奥田浩司, 原茂生, 佐藤博彦, "S=3/2 カゴメ格子反強磁性体 $\text{KCr}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ のテラヘルツ ESR 測定", 第 22 回日本赤外線学会研究発表会, 2012. 11. 1-2., 関西大学千里山キャンパス 100 周年記念会館ホール
- ④ 中田亮平, 高橋直己, 櫻井敬博, 張衛民, 大久保晋, 太田仁, 奥田浩司, 原茂生, 佐藤博彦, "Cr-Jarosite の ESR 測定 II", 日本物理学会年次大会, 2012. 9. 18-21., 横浜国立大学常盤台キャンパス
- ⑤ 大久保晋, 植田友成, 太田仁, 張衛民, 櫻井敬博, 大西希, 東正樹, 島川祐一, 中野博生, 坂井徹, "強磁場 ESR 測定によ

- る $S=3/2$ ハニカム格子反強磁性体 $\text{Bi}_3\text{Mn}_4\text{O}_{12}(\text{NO}_3)$ の DM 相互作用の研究” 日本物理学会年次大会, 2012. 9. 18–21., 横浜国立大学常盤台キャンパス
- ⑥ R. Nakata, N. Takahashi, W. Zhang, S. Okubo, H. Ohta, T. Sakurai, K. Okuda, S. Hara, H. Sato, “ESR Measurement of $S=3/2$ Kagome Antiferromagnet Cr-Jarosite”, 8th Asia-Pacific EPR/ESR Symposium (APES 2012), 2012. 10. 11–15., Beijing, China
- ⑦ S. Okubo, T. Ueda, W. Zhang, T. Sakurai, M. Fujisawa, H. Ohta, M. Ohnishi, M. Azuma, Y. Shimakawa, N. Kumada, “Origin of Field Induced Magnetic Ordering in Frustrated Honeycomb Lattice Antiferromagnet”, 19th International Conference on Magnetism, 2012. 7. 8–13., Busan, Korea
- ⑧ 中田亮平, 高橋直己, 張衛民, 大久保晋, 太田仁, 奥田浩司, 原茂生, 佐藤博彦, “Cr Jarosite の ESR 測定” 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012. 3. 24–27., 兵庫県西宮市 関西学院大学
- ⑨ 大久保晋, 和田秀雄, 太田仁, 富田崇弘, 藤澤真士, 櫻井敬博, 大道英二, 菊池彦光, “多周波数 ESR 測定によるハニカム格子反強磁性体 $\text{InCu}_{2/3}\text{V}_{1/3}\text{O}_3$ の特異なスピンドイナミクス の観測”, 第 50 回電子スピンスイエンス学会年会 (SEST2011) 2011. 11. 16–18., 仙台市仙台国際センター
- ⑩ S. Okubo, “Development of High-Frequency High Field ESR system and Its Application to Spin Frustration System”, 29th National Physics Congress, 2011. 10. 23–25., College of Science, University of the Philippines Diliman, Philippines (plenary)
- ⑪ 大久保晋, 高橋直己, 張衛民, 櫻井敬博, 太田仁, 藤澤真士, 菊池彦光, “フラストレートスピン系 Dolerophanite ($\text{Cu}_{20}(\text{SO}_4)$) の強磁場 ESR”, 日本物理学会年次大会 2011 年秋季大会, 2011. 9. 21–24., 富山大学五福キャンパス
- ⑫ N. Takahashi, M. Tomoo, S. Okubo, T. Sakurai, M. Fujisawa, H. Kikuchi, H. Ohta, “Dzyaloshinsky-Moriya Interaction Estimated by AFMR of Kagome Like Substance $\text{Cu}_2\text{O}(\text{SO}_4)$ Observed at 1.8K” 26th International Conference on Low Temperature Physics, 2011. 8. 10–18., Beijing International Convention Center, China (poster)
- ⑬ W. Zhang, M. Tomoo, S. Okubo, T. Sakurai, H. Ohta, H. Kikuchi, H. Yoshida, Y. Okamoto, and Z. Hiroi, “Low-Temperature Multi-frequency ESR Study of Spin 1/2 Kagome lattice Antiferromagnetic Materials”, 26th International Conference on Low Temperature Physics, 2011. 8. 10–18., Beijing International Convention Center, China (poster)
- ⑭ S. Okubo, Y. Yu, W. Zhang, T. Sakurai, M. Fujisawa, H. Ohta, H. Kikuchi, N. Ohnishi, M. Azuma, Y. Shimakawa, and N. Kumada, “Spin Dynamics of Frustrated Honeycomb Lattice Antiferromagnet” 26th International Conference on Low Temperature Physics, 2011. 8. 10–18., Beijing International Convention Center, China (invite)
- ⑮ S. Okubo, “Multi-Frequency ESR measurements of Frustrated Honeycomb Lattice Antiferromagnets” A joint meeting between the MEXT Japanese Network on “Novel State of Matter Induced by Frustration” and the Quantum Materials Program of the Canadian Institute for Advanced Research, 2011. 5. 18–6. 1, Vancouver, Canada (poster)
- ⑯ 張衛民, 大久保晋, 友尾水樹, 櫻井敬博, 太田仁, 岡本佳比古, 吉田紘行, 広井善二, “カゴメ格子磁性体 $\text{BaCu}_3\text{V}_2\text{O}_8(\text{OH})_2$ のテラヘルツ光 ESR” 第 20 回 (平成 22 年度) 日本赤外線学会, 2010. 11. 4–5., 立命館大学びわこくさつキャンパス (ポスター)
- ⑰ 張衛民, 大久保晋, 太田仁, 友尾水樹, 櫻井敬博, 岡本佳比古, 広井善二, 吉田紘行, “カゴメ格子磁性体 $\text{BaCu}_3\text{V}_2\text{O}_8(\text{OH})_2$ のサブミリ波 ESR III” 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010. 9. 23–26., 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス (ポスター)
- ⑱ M. Tomoo, S. Okubo, M. Fujisawa, T. Sakurai, H. Ohta, M. Hagihara, X.-G. Zheng, “Possible kagome ice state in $\text{Co}_2(\text{OH})_3\text{Br}$ studied by high field ESR” The 5th International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2010, 2010. 8. 1–8., John Hopkins University, Baltimore, USA (poster)
- ⑲ S. Okubo, Y. Yu, W. Zhang, M. Fujisawa, T. Sakurai, H. Ohta, N. Ohishi, M. Azuma, Y. Shimakawa, N. Kumada, “Multi frequency ESR measurements of $S=3/2$ honeycomb lattice antiferromagnet $\text{Bi}_3\text{Mn}_4\text{O}_{12}(\text{NO}_3)$ ”, The 5th International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2010, 2010. 8. 1–8., John

Hopkins University, Baltimore, USA
(poster)

〔図書〕 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://extreme.phys.sci.kobe-u.ac.jp/extreme/staffs/okubo/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大久保 晋 (SUSUMU OKUBO)

神戸大学・分子フォトサイエンス研究センター・助教

研究者番号 : 80283901

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし