

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400341

研究課題名(和文) 強磁場下における電子スピン緩和時間測定法の確立とスピネマチック相の観測

研究課題名(英文) Development of measuring method of electron spin-lattice relaxation time under high magnetic field and observation of nematic phase

研究代表者

櫻井 敬博 (Sakurai, Takahiro)

神戸大学・研究基盤センター・助教

研究者番号：60379477

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：電子スピンのダイナミクスを記述する重要なパラメーター、スピン-格子緩和時間 T_1 を、ESR共鳴に伴う縦磁化と横磁化の変化の比が T_1 に比例することを利用して評価する手法を開発した。縦磁化の変化はSQUID磁束計のサンプルロッドをライトパイプに置き換えて共鳴時の磁化の変化を観測する事により、また横磁化のそれは試料を透過した電磁波をライトパイプの最底部に設置したミラーによって取り出し、共鳴時の電磁波の吸収を見る事により観測する。そして従来手法では測定が困難な量子スピン系への応用の可能性を調べた。また一次元フラストレート磁性体のスピネマチック相について調べた。

研究成果の概要(英文)：We have developed an evaluating method of spin-lattice relaxation time T_1 under high magnetic field, which is an important parameter to study the electron spin dynamics, by using the fact that the ratio of the change of the longitudinal magnetization to that of the transverse one in electron spin resonance is proportional to T_1 . For the ESR due to the change of the longitudinal magnetization, the sample rod of the SQUID magnetometer is used as the light pipe and the change of the magnetization at resonance is observed. For the ESR due to the change of the transverse magnetization, the transmitted electromagnetic wave through sample by mirror set at bottom of the light pipe is observed. We succeeded in observing ESR by newly developed light pipe and this shows potential that these two ESR signals are observed simultaneously. We have also studied the spin nematic phase of one dimensional frustrated magnet.

研究分野：電子スピン共鳴

キーワード：ESR SQUID 縦磁化検出 $\text{Cu}(\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2)(\text{NO}_3)_2$

1. 研究開始当初の背景

電子スピンのスピン-格子緩和時間 T_1 は、古くからパルスESR等を利用して測定されて来たが、対象をスピン間に強い相互作用が働く量子スピン系に限るとその例はほとんどない。これは T_1 を得る最も一般的なX-band ($\nu \sim 10$ GHz、共鳴条件 $h\nu = g\mu_B H$ より $g = 2$ として $H \sim 0.36$ T)でのパルスESR法において、その測定限界が100ナノ秒程度であることによる。即ち、同手法は典型的な T_1 がマイクロ秒のオーダーである孤立スピン系に対しては有効であるが、量子スピン系のそれは少なくともナノ秒以下のオーダーであり、測定が不可能なのである。これらに対してHervéとPesciaらによる手法は、パルス法で不可欠な高出力の電磁波源を必要とせず、また不感時間も無かつ極短い T_1 の測定が可能であるという特徴を有する[1]。これは共鳴条件下にあるスピンの運動を現象論的に示したBlochの式において、縦磁化と横磁化の変化の比が T_1 に比例することを用いたもので、実験的にはこれら二つによるESRを同時に測定する。共鳴時における縦磁化の変化を如何に感度良く検出するかがポイントであるが、量子スピン系が非常に興味深い現象を示す強磁場下においては、その方法は十分には開発されていなかった。一方我々は、これまでに超伝導量子干渉素子(SQUID)を備えた市販磁束計を用いて、強磁場・高周波数下での高感度な縦磁化検出型ESR測定手法を開発してきた[2、本稿5の⑩、⑪]。本技術に改良を加え、横磁化によるESRを同時計測可能にする事で、強磁場・高周波数下においても T_1 が測定出来る可能性がある。本研究では、量子スピン系において現在注目されている、最近接スピン間に強磁性相互作用 J_1 、次近接スピン間に反強磁性相互作用 J_2 が働く $S = 1/2$ 次元フラストレート磁性鎖に適用する。本系は、その飽和磁場直下でスピネマチック相と呼ばれる新奇な相を示す可能性があり、非常に注目が集まっている[3]。スピネマチック相とは、スピンの向きが定まる従来型の秩序はフラストレーションによって抑制されているが、スピン間のボンド上で定義される秩序変数をボンド上の液晶と捉えた時、それが反強的に(準)長距離秩序する相である。この全く新奇な相は、その実証が急務の課題となっている。これを踏まえ本研究では、上記手法を本系に適用し、スピネマチック相における電子スピンの緩和時間を測定することにより、そのダイナミクスの観点から相の存在を明らかにする事が可能ではないかと考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、電子スピンのそのダイナミクスを記述する上で基本的かつ重要なパラメーターである T_1 を、従来の手法では測定が困難な量子スピン系に対し、特に強磁場下において測定可能な手法を開発することである。本研究ではESR共鳴に伴う縦磁化と横磁化の

変化の比が T_1 に比例することを利用する。即ち、我々が開発したSQUID磁束計を用いた縦磁化検出型ESRを利用して、横磁化のESRが同時観測出来るよう改良することで、強磁場下、ナノ秒以下の緩和時間まで測定できる手法を開発する。そして本手法を一次元フラストレート磁性体に応用し、現在その実証が急務の課題となっているスピネマチック相をスピンドイナミクスの観点から明らかにする。

3. 研究の方法

ESRの共鳴における縦磁化と横磁化の変化の比は磁気共鳴の現象論に基づいたBlochの式によれば、 T_1 に比例する量を与える。そこで、縦磁化と横磁化の変化を、前者はSQUID磁束計のサンプルロッドをライトパイプに置き換えて共鳴時の磁化の変化を観測する事により、また後者は試料を透過した電磁波をライトパイプの最底部に設置したミラーによって取り出し、共鳴時の電磁波の吸収を見る事により、同時に観測する。そして一次元フラストレート磁性体のスピネマチック相等に焦点を当て、特異なスピンドイナミクスの有無等を調べる。

4. 研究成果

我々はこれまで SQUID を備える高感度な市販磁化測定装置を利用して、強磁場下における縦磁化検出型のESR装置を開発してきた。磁化検出装置としては、Quantum Design社製の最大磁場5TのMPMSを用いている。照射電磁波の周波数としては70GHzから315GHzまでの範囲でESR測定に成功している。いずれもX-bandの磁場、周波数に比べ非常に大きい。本研究では、まず縦磁化検出型ESRの更なる高感度を行った。具体的には、ライトパイプの径をMPMSに適用可能な最大径(8.4φ)として、電磁波の減衰を可能な限り低減させた。その結果、スピン感度として 10^{12} spins/Gを達成した。また T_1 を測定するためには、同装置に横磁化によるESRを検出可能とする機能を新たに備えさせる必要が有る。

上記の縦磁化検出型ESRでは、試料に電磁波を照射し、共鳴条件下でのスピンの遷移に伴う磁化の変化を検出している。従って電磁波は試料に照射さえされておれば良い。一方で横磁化によるESRは、共鳴条件下での電磁波の透過度の変化に比例する。従って、上記縦磁化検出型ESR装置装置に横磁化

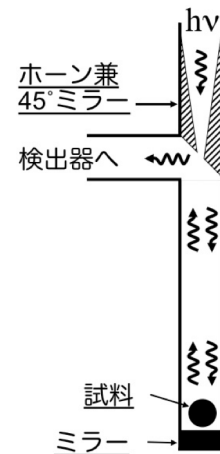


図1. 縦磁化及び横磁化同時検出用ライトパイプ。

による ESR を観測する機能を付すには、試料からの電磁波の透過度を同時に測定出来る様にする必要が有る。試料は磁場中にあるため、そのすぐ下側に検出器を置くとすれば、磁場の影響を受けないものである必要が有るが、100 GHz 程度の電磁波に対して最も高感度な検出器である InSb は磁場中では利用できない。そこで図 1 に示すようなライトパイプを作製した。即ち、電磁波入射口に、図に示す様なホーンと 45 度ミラーを兼ねるものを設置し、試料を透過した電磁波はライトパイプ底部に取り付けたミラーにより反射させ、再び試料を透過させて 45 度ミラーにより電磁波を真横に取り出す。ポイントはホーン兼ミラーの穴の径である。大きくすれば電磁波入射の際の減衰は抑えられるが、ミラーとしての反射面積が小さくなる。小さくすればその逆が生ずる。本研究では、使用する電磁波の最小周波数が 100 GHz 程度であることを考慮し、導波管としての遮断波長である 3 mm を穴の径とした。またホーンの角度は 2 度とした。テスト試料として $S=1/2$ のラジカル化合物である DPPH を使い、同ライトパイプにより ESR 測定を行った結果、同様の透過タイプにおける測定感度と遜色ない感度で測定できることを確認した。即ち、同ライトパイプを MPMS に挿入すれば、縦磁化による ESR (強度 I_L) 測定が出来、また同時に横磁化による ESR (強度 I_T) も測定可能である。そして比 $I_L/I_T=cT_1$ の装置定数 c を T_1 既知物質で決定できれば、強磁場、高周波数下での T_1 測定が可能である。この様に本研究では、これまでにない強磁場、高周波数下での T_1 測定への可能性を開いた。上記ライトパイプの現状の問題点としては、入射口から出射口への電磁波の直接の回り込み成分が、出射口で検出する電磁波強度の大部分を占めるといふ点である。これはライトパイプの工作精度を向上させることである程度は低減できると考えている。また電磁波の反射、減衰等を詳細に検討し、ホーンの角度、穴径等を更に最適化する必要が有る。

縦磁化検出による ESR 測定の感度向上の成功を受け、テスト的に典型的な量子スピン系物質である $S=1/2$ の一次元 Heisenberg 型反強磁性体 $\text{Cu}(\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2)(\text{NO}_3)_2$ (以後 CuPzN と略) 測定を行った。試料は粉末試料を用いた。磁化率の温度依存性は一次元反強磁性体に特徴的な緩やかなピークを示しピーク温度は 7 K である。縦磁化検出による ESR のスペクトルの温度依存性を図 2 に示す。粉末試料を用いているため、共鳴線は g 主値を両端とするシングルピークの総和から成る。非常に特徴的である点は、磁化率のブロードピークより少し低い温度から低温側で、磁化が増大するスペクトルが得られている点である。磁化検出の ESR では、共鳴条件下におけるスピンの遷移に伴う磁化の変化 ($\Delta M = -Ng\mu_B\Delta S$) を観測しており、本物質は $S=1/2$ であるためその遷移は $S_z = -1/2$ から $1/2$ への遷移 ($\Delta S = 1$) で、共鳴に伴う磁化の変化は負 ($\Delta M < 0$) である。

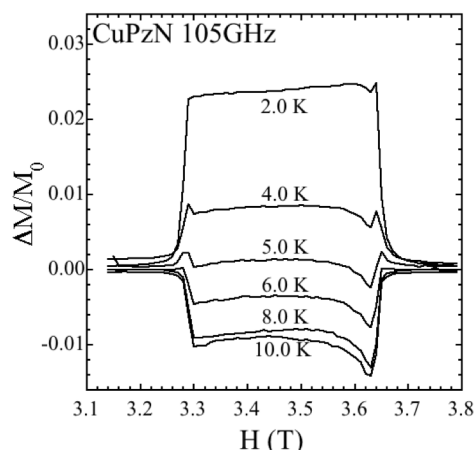


図 2. SQUID 磁束計を用いた縦磁化検出による $S = 1/2$ 一次元 Heisenberg 反強磁性体 CuPzN の ESR スペクトルの温度依存性.

それは磁化率の温度依存性がブロードピークを示す温度より下であっても変わらないと考えられる。このことは横磁化による多周波数の ESR を行うことにより確認した。即ち、ピークを示す温度より低温において、多周波数での ESR 測定により得られる周波数と共鳴磁場の関係は正の傾きを有していた ($h\nu = g\mu_B H$)。これは遷移の符号が正であること ($\Delta S = 1 > 0$) と対応する。現時点では、図の様なスペクトルの温度依存性が得られた原因については、以下の様に考えている。即ち、磁化率がブロードなピークを示す温度より低温ではスピン間に短距離の相関が発達し、その励起状態にはエネルギーと波数の間に分散関係を有する様になる。ESR では波数 0 における遷移を観測するが、波数 0 においてのみ励起状態が存在することは熱力学的に不安定な状態であり、その不安定な状態を解消するため他の波数成分において励起状態の再配列を行うのではないかと考えた。その際、ESR で励起されたスピンの緩和の放出エネルギーが、直接あるいは間接に用いられる。結果的に、ESR の共鳴条件下で、熱浴、あるいは格子系とは異なる、元の温度よりも高い適当なスピン温度で系は平衡状態に到達する。磁化率のブロードピークより低温ではスピン温度の上昇はマクロな磁化の増加を伴う。以上から図 2 に示した様なスペクトルの温度依存性が観測されたと考えた。上記の非常に興味深い結果は文献⑩等にまとめられた。一方でこの考察は、開発した T_1 測定法を量子スピン系等に適用する際には、系は常磁性状態である必要が有るといふ条件を導き出すことにもつながった。

J_1 - J_2 のフラストレート一次元鎖についてはその有力な候補物質である $\text{NaCuMoO}_4(\text{OH})$ について研究を行った。粉末試料に対して常磁性状態における g 値の決定を行った (⑪)。また低温において詳細な磁気異方性を調べるため、磁場配向試料を作成した。その結果、あ

る程度結晶軸に沿った試料を作成することに成功した。これらの試料を用いて低温で、ネマチック相を示すと予測されている飽和磁場直下での ESR 測定を行った。これまでのところ、 g 値や吸収線幅の磁場依存性には特に異常は観測されていないが、観測点が非常に限られており、今後更なる研究が必要である。

(参考文献)

[1] J. Hervé and J. Pescia, C. R. Acad. Sci. (Paris) **251** (1960) 665.

[2] T. Sakurai *et al.*, J Magn. Reson. **223** (2012) 41.

[3] T. Hikihara *et al.*, Phys. Rev. B **78** (2008) 144404.

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 18 件)

①S. Ikeda, S. Hara, T. Sakurai, S. Okubo, H. Ohta, H. Sakurai, High-field ESR Measurements of YCrO_3 , Appl. Mag. Res. **46** (2015) 1053-1058. DOI: 10.1007/s00723-015-0663-6

②K. Kawasaki, T. Sakurai, E. Ohmichi, S. Okubo, H. Ohta, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, Development of High-Pressure ESR System Using Micro-coil, Appl. Mag. Reson. **46** (2015) 987-992. DOI: 10.1007/s00723-015-0650-y

③T. Sakurai, R. Matsui, K. Kawasaki, S. Okubo, H. Ohta, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, K. Kudo, Y. Koike, Development of High-Pressure and Multi-Frequency ESR System and Its Application to Quantum Spin System, Appl. Mag. Res. **46** (2015) 1007-1012. DOI: 10.1007/s00723-015-0660-9

④P. Gnutek, C. Rudowicz, H. Ohta, T. Sakurai, Modeling spectroscopic properties of $\text{NiSnCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ as a probe for pressure calibration in high-magnetic field and high-frequency EMR measurements, Polyhedron **102** (2015) 261-266. DOI: 10.1016/j.poly.2015.09.060

⑤T. Shimokawa, Y. Fukuoka, M. Fujisawa, W. Zhang, S. Okubo, T. Sakurai, H. Ohta, R. Vidyasagar, H. Yoshitomi, S. Kitayama, and T. Kita, Microscopic properties of degradation-free capped GdN thin films studied by electron spin resonance, J. Appl. Phys. **117** (2015) 043909/1-6. DOI: 10.1063/1.4906436

⑥H. Ohta, T. Sakurai, R. Matsui, K. Kawasaki, Y. Hirao, S. Okubo, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, K. Kudo, and Y. Koike, Frequency Extension to THz Range in High Pressure ESR System and Its Application to Shastry-Sutherland Model Compound $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$, J. Phys. Chem. B **119** (2015) 13755-13761. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b03664

⑦T. Sakurai, K. Fujimoto, R. Matsui, K. Kawasaki, S. Okubo, H. Ohta, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, H. Tanaka, Development of multi-frequency ESR system for high-pressure measurements up to 2.5 GPa, Journal of Magnetic Resonance, **259** (2015)

108-113. DOI: 10.1016/j.jmr.2015.08.005

⑧T. Uchino, Y. Uenaka, H. Soma, T. Sakurai, and H. Ohta, Magnetic hysteresis behavior and magnetic pinning in a d^0 ferromagnet/superconductor nanostructure, J. Appl. Phys. **115** (2014) 063910/1-8. DOI: 10.1063/1.4865876

⑨T. Mochida, Y. Funasako, K. Takahashi, M. Inokuchi, T. Sakurai, S. Ikeda, H. Ohta, H. Mori and M. Uruichi, A biferrocenium salt containing paramagnetic tetracyanoquinodimethane hexamers: charge disproportionation via donor-acceptor interactions, Chem. Commun. **50** (2014) 13370-13372. DOI: 10.1039/C4CC06888B

⑩R. Vidyasagar, T. Kita, T. Sakurai and H. Ohta, Electronic transitions in GdN band Structure, J. Appl. Phys. **115** (2014) 203717/1-5. DOI: 10.1063/1.4880398

⑪K. Nawa, Y. Okamoto, A. Matsuo, K. Kindo, Y. Kitahara, S. Yoshida, S. Ikeda, S. Hara, T. Sakurai, S. Okubo, H. Ohta, and Z. Hiroi, $\text{NaCuMoO}_4(\text{OH})$ as a Candidate Frustrated J_1 - J_2 Chain Quantum Magnet, J. Phys. Soc. Jpn. **83** (2014) 103702/1-5. DOI: 10.7566/JPSJ.83.103702

⑫K. Fujimoto, T. Sakurai, S. Okubo, H. Ohta, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, K. Kudo, Y. Koike, Development of Hybrid-type pressure cell for high-pressure and high-field ESR measurement, Appl. Magn. Reson. **44** (2013) 893-898. DOI: 10.1007/s00723-013-0441-2

⑬H. 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. DOI: 10.1007/s10909-012-0683-7

⑭C. Yokoyama, E. Matsuoka, H. Sugawara, T. Sakurai, W. Zhang, S. Okubo, H. Ohta and H. Kikuchi, Nonmagnetic Impurity Effect of the $S = 1/2$ Spin Ladder System $(\text{pipdH})_2\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Br}_4$, J. Korean Phys. Soc. **62** (2013) 2041-2045.

⑮T. Sakurai, K. Fujimoto, S. Okubo, H. Ohta and Y. Uwatoko, Development of High-Field ESR System Using SQUID Magnetometer and its Application to Measurement under High Pressure, J. Magnetism **18** (2013) 168-172. DOI: 10.4283/JMAG.2013.18.2.168

⑯Vidyasagar, R.; Kitayama, S.; Yoshitomi, H.; Kita, T.; Sakurai, T.; Ohta, H., Tuning optical and ferromagnetic properties of thin GdN films by nitrogen-vacancy centers, Euro. Phys. J. **86** (2013) 52/1-4. DOI: 10.1140/epjb/e2012-30566-3

⑰Vidyasagar, R.; Kita, T.; Sakurai, T.; Ohta, H., Giant optical splitting in the spin-states assisting a sharp magnetic switching in GdN thin films, Appl. Phys. Lett. **102** (2013) 222408. DOI: 10.1063/1.4809758

⑱T. Sakurai, K. Fujimoto, S. Okubo and H. Ohta, Development of millimeter wave ESR system using SQUID magnetometer, J. Jpn. Soc. Infrared Science & Technology **23** (2013) 121-126 (in

Japanese).

[学会発表] (計 18 件)

- ① 櫻井敬博、高圧下強磁場 THz ESR の開発とその応用、第二回西日本強磁場科学研究会、2015/11/24-25、神戸大学 (兵庫県)
- ② 櫻井敬博、二次元直交ダイマー系 SrCu₂(BO₃)₂ のテラヘルツ領域における圧力下 ESR、東大物性研短期研究会「スピン系物理の深化と最前線」、2015/11/16-18、東大物性研究所 (千葉県)
- ③ 櫻井敬博、平尾祐樹、肘井敬吾、大久保晋、太田仁、松林和幸、上床美也、工藤一貴、小池洋二、二次元直交ダイマー系 SrCu₂(BO₃)₂ の圧力下強磁場 ESR、第 56 会高圧討論会、2015/11/10-12、JMS アステールプラザ (広島県)
- ④ 櫻井敬博、平尾祐樹、肘井敬吾、大久保晋、太田仁、松林和幸、上床美也、工藤一貴、小池洋二、SrCu₂(BO₃)₂ の圧力下強磁場 ESR、第 54 回電子スピンサイエンス学会年会、2015/11/2-4、朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター (新潟県)
- ⑤ T. Sakurai, Development and application of high field and high pressure ESR system in the THz region, Kobe mini-symposium on “Application of THz Spectroscopy on Condensed Phases”, 2015/9/29, 神戸大学 (兵庫県)
- ⑥ 櫻井敬博、平尾祐樹、大久保晋、太田仁、松林和幸、上床美也、圧力下強磁場多周波数 ESR 装置の高感度化と応用 III、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015/9/16/19、関西大学千里山キャンパス (大阪府)
- ⑦ 櫻井敬博、松井亮輔、川崎航平、大久保晋、太田仁、松林和幸、上床美也、圧力下強磁場多周波数 ESR 装置の高感度化と応用 II、日本物理学会第 70 回年次大会、2015/3/21-24、早稲田大学早稲田キャンパス (東京都)
- ⑧ 櫻井敬博、高圧下テラヘルツ強磁場 ESR の開発と KOFUC ネットワークへの展開、強磁場科学研究会「強磁場が切り拓く物質科学のフロンティア」、2014/12/4-5、大阪大学豊中キャンパス (大阪府)
- ⑨ 櫻井敬博、SQUID 磁束計を用いた ESR 測定技術の開発と圧力下測定への展開、日本分光学会関西支部平成 26 年度最近の分光学の進歩に関する講演会-最新デバイスを用いた分光法の進展-、2014/11/28、大阪電気通信大学駅前キャンパス (大阪府)
- ⑩ 櫻井敬博、松井亮輔、川崎航平、大久保晋、太田仁、松林和幸、上床美也、圧力下強磁場高周波数 ESR 装置の高感度化とその応用、第 55 回高圧討論会、2014/11/22-24、徳島大学常三島キャンパス (徳島県)
- ⑪ T. Sakurai, Development of High Pressure and Multi-frequency ESR System and Its Application to Quantum Spin System, Joint Conference of 9th Asia-Pacific EPR/ESR Society Symposium 1st International EPR (ESR) Society Symposium 53rd SEST Annual Meeting, 2014/11/12-16, 東大

寺総合文化センター (奈良県)

- ⑫ 櫻井敬博、松井亮輔、大久保晋、太田仁、松林和幸、上床美也、圧力下強磁場多周波数 ESR 装置の高感度化と応用、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014/9/7-10、中部大学春日井キャンパス (愛知県)
- ⑬ T. Sakurai, High-pressure ESR measurement of spin gap system and future prospects for Higgs mode research, Higgs modes in condensed matter and quantum gases, 2014/6/23-25, 京都大学 (京都府)
- ⑭ 櫻井敬博、圧力下強磁場 ESR の現状と展望、第一回西日本強磁場科学研究会、2014/5/19、大阪大学豊中キャンパス (大阪府)
- ⑮ 櫻井敬博、松井亮輔、大久保晋、太田仁、松林和幸、上床美也、圧力下強磁場高周波数 ESR 装置の高感度化、日本物理学会第 69 回年次大会、2014/3/27-3/30 東海大学湘南キャンパス (神奈川県)
- ⑯ 櫻井敬博、松井亮輔、大久保晋、太田仁、松林和幸、上床美也、圧力下多周波数 ESR 測定のための電磁波透過型圧力セルの開発、第 54 回高圧討論会、2013/11/14-16、朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター (新潟県)
- ⑰ 櫻井敬博、松井亮輔、大道英二、大久保晋、太田仁、ミニコイルを用いた圧力下 ESR 測定技術の開発、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013/9/25-28、徳島大学常三島キャンパス (徳島県)
- ⑱ 櫻井敬博、藤本皓大、大久保晋、太田仁、松林和幸、上床美也、ハイブリッド型圧力セルを用いた高圧下強磁場 ESR 装置の開発と応用、日本物理学会第 68 回年次大会、2013/3/26-29、広島大学東広島キャンパス (広島県)

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
櫻井 敬博 (SAKURAI TAKAHIRO)
神戸大学・研究基盤センター・助教
研究者番号 : 60379477
- (2) 研究分担者
なし
- (3) 連携研究者
なし