

令和元年6月22日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18760

研究課題名（和文）テラヘルツ領域磁気共鳴測定の感度を飛躍的に向上させるゼロ検出法の開発

研究課題名（英文）Development of the null detection method for spectacularly improvement of sensitivity of magnetic resonance measurements in terahertz region

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・准教授

研究者番号：80283901

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：テラヘルツ光電子スピン共鳴（ESR）の測定では入射電磁波の共鳴吸収を透過光量の変化として検出するが、信号以外の背景透過光も透過し増幅されてしまう。本研究では偏光を用いて、吸収分だけ電磁波が透過するゼロ検出と呼ぶ新しいESR検出法の開発を行った。原理検証のため大口径無冷媒超伝導磁石を用いて室温空間でゼロ検出法によるESR検出に成功した。これを踏まえて時間変動する磁場中でも使用可能な偏光素子の探索を行い、テラヘルツ光に対応するパルス強磁場磁石と組み合わせた装置開発に成功した。吸収に対応する透過光が得られるため、磁気共鳴の信号のみ増幅が可能となりテラヘルツ領域磁気共鳴測定の感度向上への道が開かれた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子スピン共鳴（ESR）は物性の担い手である電子スピンをマイクロな探針として、電子の置かれた環境を観測する強力な手法である。特にテラヘルツ光を用いるテラヘルツESRでは、g値分解能が飛躍的に向上するため固体物性だけでなく化学・生体物質のダイナミクスをとらえることができる。これらの計測に供するためには検出感度の向上が課題であった。本研究ではこれまでテラヘルツESRでは用いられていなかった偏光を用いた、ゼロ検出法をテラヘルツ光パルス強磁場ESRシステムの開発の成功した。

研究成果の概要（英文）：In terahertz electron spin resonance (ESR), the resonance absorption was detected as a variation of transmission intensity. However, background transmission light is also amplified. In this research project, we developed new detection method for the terahertz ESR, as call as the null detection method, which is detected proportional the transmitted light to the resonance absorption using polarization. First of all, we succeed in a verification of the null detection for ESR using a large-bore cryofree superconducting magnet in room temperature. In the second step, we search wire grid polarizer, which can work in pulsed high magnetic field and terahertz region. And we succeed in development of the null detection ESR system for the pulsed high magnetic field and terahertz region. It is successfully that high sensitive terahertz ESR detection, because it can amplify only signal of the magnetic resonance due to obtain only proportional transmission light to absorption.

研究分野：強磁場物性

キーワード：新しいESR検出法 ゼロ検出法 テラヘルツ光 偏光

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

磁気共鳴法の電子スピン共鳴 (ESR) は、電子スピンをマイクロな探針として局所的な電子状態を調べるのに強力な手法である。その応用は、スピンラベル法を用いた距離計測によるタンパク質の分子運動の動的解明から、スピントロニクス材料の電子スピンの配置に至るまで極めて幅広い空間スケールの計測に用いられている。しかし、現在の ESR の測定法では生体分子の機能発現の直接的な観測、またその機構の解明は、分解能・計測時間の点で困難で、より精密な g 値の分解能、ならびに高感度化が要求されている。ESR で求められる g 値の分解能は、用いる電磁波の周波数に依存しており、高周波数-強磁場で分解能が向上する。従って、現在 g 値の高分解能化を目指して ESR 測定的光源周波数はテラヘルツ領域 (0.1 THz~10 THz) へと向かっている。テラヘルツ領域は、電波 (~0.01 THz) と光 (100 THz~) の中間に位置し、光の直進性と電波の透過性の特性を備え、光と分子が相互作用する領域で、広帯域の電磁波の発振が可能な光源、また高感度な検出器が存在しないのが最大の問題である。このようなテラヘルツ光の特性に加えて、これまでの ESR 検出法の特有な問題もある。広く用いられている ESR 装置では電波の領域である X-band (0.01THz) 光源と電磁石 (~1 T) を組み合わせたもので、磁気共鳴のゼーマンエネルギー差が小さく、そのままでは吸収強度が小さいため、信号増幅のため空洞共振器と磁場変調を用いて高感度化を図っている。共振器を用いると周波数を固定化するだけでなく、高周波数では波長が短くなり高精度な共振器を物理的に作る事が困難であるため 0.1 THz 以下でしか実用化されていない。また、テラヘルツ領域では ESR の共鳴磁場が 35T を越えるため、実験室レベルでは定常強磁場を用いることができない。そのため、時間的に磁場が変動するパルス強磁場を用いる必要がある。パルス磁石では磁場空間が狭く、なおかつ時間変動する磁場により誘導起電力が発生するためバルクな金属を磁場空間に持ち込むことができない。これらから高感度化のために空洞共振器法やファブリーペロ共振器などの共振器を使うことはできない。また、磁場発生時間が 10msec と短時間なのでロックイン増幅器なども計測時間が短すぎて使うことができない。これらのことから、テラヘルツ ESR の高感度化には、使用可能な光源周波数が広帯域でかつ、バルク金属を使わない新しいタイプの高感度化手法が必要とされている。

2. 研究の目的

テラヘルツ領域の電子スピン共鳴では、使用する電磁波の波長が 3mm~30 μ m と短いため空洞共振器などの製作が困難で、共振器として実用化されているのはファブリーペロ共振器など比較的製作が容易なものである。また、近年ではカンチレバーなど高感度力学検出法などを用いた検出方法やレーザーを用いた光学干渉による高感度検出が模索されている。しかしながら、パルス強磁場中での検出法には使用する材料に対する大きな制約があり、これらの手法が使えない。テラヘルツ領域では、共鳴磁場が 35T を越える強磁場となるため、瞬間的に大電流を流すパルス強磁場を用いる必要がある。その磁場発生時間が 10msec と短時間で、なおかつ磁場が大きく変化するため、磁場空間に導入された空洞共振器などのバルク金属には誘導起電力によるうず電流が発生し、マクスウェル応力のため振動が発生し使用することができない。また力学検出法にはパルス強磁場発生に伴う振動の問題がある。そのため本研究では、パルス強磁場中では使えないテラヘルツ領域の磁気共鳴を高感度化する新手法の開発を目的に試料を透過した電磁波を検出器で検出する既存の透過検出法の感度を向上させる手法として、偏光を用いたゼロ検出法の開発を行った。

3. 研究の方法

透過光の測定は、可視・赤外分光と類似して試料を透過した光を検出器で検出する。しかしながら ESR は磁気双極子遷移による吸収なので、遷移確率は小さく共鳴条件を満たさず状態でもほとんどの光は吸収されずに試料を透過する。通常、ESR の共鳴では数%程度の光しか吸収されず、光源から出射したほとんどの光が検出器で検出される。従って、高感度な検出器があったとしても、背景光によって飽和してしまい、吸収した光の検出は困難である。よって信号増幅の点からも吸収した光だけを検出する方法が必要となっている。ESR が磁場中の磁気モーメントのラーモア歳差による電磁波のエネルギーの吸収であることから、光の偏光の回転方向 (円偏光) によってカップリング度合いが依存し、円偏光の回転方向によって吸収の大きさが異なる (図 1)。この点に着目して、右回りと左回りの円偏光を等しく足し合わせた直線偏光の電磁波を試料に透過させて、吸収が起きた場合には透過光には円偏光の回転方向によって透過光強度に偏りが生じるため、楕円偏光となって透過してくる。入射電磁波の直線偏光に直交する向きに偏光素子を配置しておけば (クロスニコル配置) 試料による吸収がおこらないときには検出器には電磁波が検出されず、ESR による右回

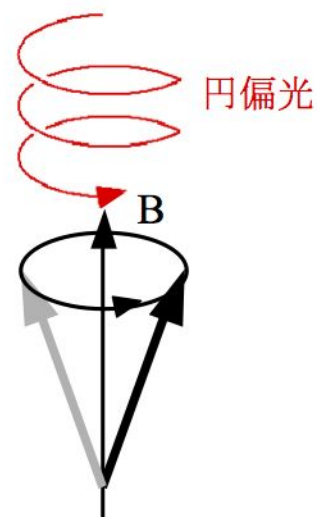


図 1 スピンのラーモア回転と円偏光の吸収

り偏光の電磁波の吸収がおこれば、偏光角が回転した分の電磁波成分が検出される(図2)。テラヘルツ領域の光において代表的な偏光素子としてはワイヤーグリッド偏光素子がある。これは 50 μm 程度の金属ワイヤーを 50 μm 程度の間隔に均等に配置した素子だが、市販されている素子は金属製の枠にワイヤーを張っており、10mm 程度のパルス磁場での狭い磁場空間に導入することができないので、研究の始めに原理検証実験として無冷媒超伝導磁石を用いた装置を組み立てて実験を行った。図3に無冷媒超伝導磁石を使った実験配置図を示す。Gunn 発振器から出た 0.105THz の光をテフロンレンズでコリメートし、50 μm のワイヤーグリッド偏光素子(WGP)で直線偏光にする。光は自由空間を通過して超伝導磁石の磁場中心に置かれたサンプル(DPPH)を透過し、直交したWGPを通りショットキーダイオードで検出される。テラヘルツ光では波長が長いので長い距離自由空間を伝送すると偏光がくずれる可能性がある。それらを考慮に入れて、1)偏光度が保たれているか、偏光素子の角度依存性測定、2)ゼロ検出でESRが検出されるか、測定を行う。この2つによりゼロ検出法の原理検証となる。

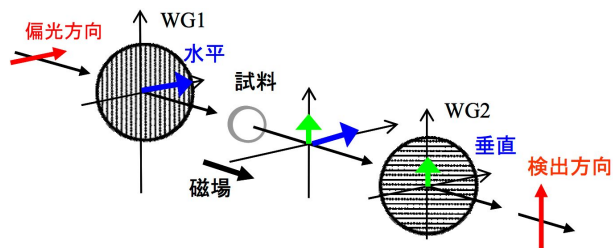


図2 直線偏光と偏光素子を用いたクロスニコル測定

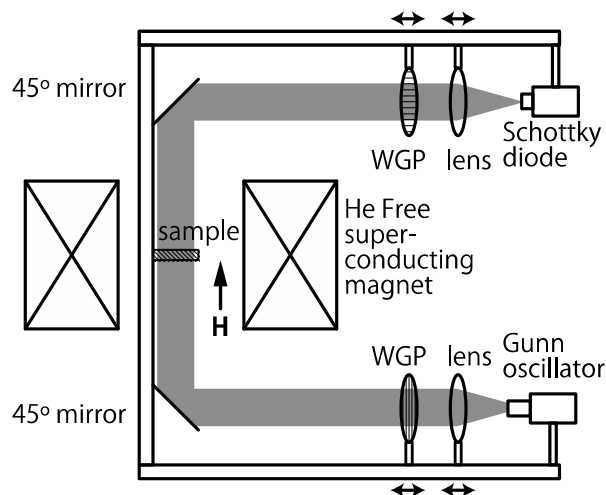


図3 無冷媒超伝導磁石を使ったゼロ検出実験配置

パルス強磁場 ESR への展開には大きさや材料の点で、この WFP は使用できない。代替の偏光素子として考えたのは、素子そのものでワイヤーを保持できるマイクロ素子である。フォトリソグラフィーで製作された半導体の偏光素子であれば、狭い空間のパルス磁場中でも使用することが可能である。申請時には特注のフォトリソグラフィーのワイヤーグリッド偏光素子の取扱いをしていたメーカーがあったが、現在取扱いが無くなったため、新たにパルス磁場中に導入できるワイヤーグリッド偏光素子の調査とテストを行った。その結果、可視光用の偏光素子としてフィルム状の製品がテラヘルツ領域でも十分使用可能であることがわかった。さらに図4に示すようなパルス強磁場 ESR 用のゼロ検出装置を作成し、パルス磁場中でのゼロ検出の検証を行った。パルス磁場の空間は狭く、光がライトパイプ中を伝搬するに従い直線偏光の偏光角度が変化したり、元々のモードから変化することが多い。そこで、試料間で直線偏光素子を透過させて直線偏光のまま試料に照射する必要がある。また、試料を透過すると偏光方向が回転することもあるので、試料の後段の偏光素子も回転させることができるようにする必要がある。さらに、2枚の偏光素子の間で多重反射などの可能性もあるので、距離を可変できるように設計する必要がある。このように空間的制約があるパルス強磁場 ESR 測定装置に可動部分を導入するのは難しさがある。それらを実現するために図4に示すようにパイプを同軸に配置してそれぞれに0リングで真空止めにし、検出器側に可動調整のマイクロメーターヘッドをつけることで解決した。これにより2つの回転自由度と位置自由度を確保した。

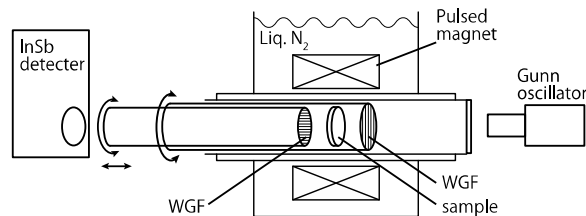


図4 パルス強磁場 ESR 用ゼロ検出実験装置図

4. 研究成果

無冷媒超伝導磁石(図3)によるWGPを用いたクロスニコル計測の検証結果を図5に示す。検出器側(ショットキーダイオード)の偏光素子の角度 θ_1 を0度(クロス)から90度

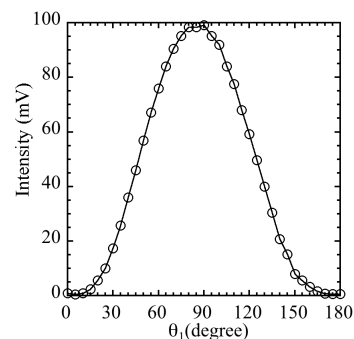


図5 図3配置のクロスニコル計測での透過高強度の偏光角度依存性

(平行)に回転していくと透過光強度が sin 関数的に増加していくことがわかる。これにより、図3に示すような長距離(約5m)の自由空間でも0.105THzのテラヘルツ波が偏光度を失わずに伝搬していくことがわかった。次に、この0度の状態で磁場を印加して、ESRのゼロ検出を試みた結果を図6に示す。試料はフリーラジカルであるESRの標準物質DPPHをペレット状にして、試料フォルダーにポリエチレンシートを使用して測定を行った。測定温度は室温で、検出信号増幅にはロックインアンプを用いた。3.64T付近で透過光強度が共鳴的に強く観測され、ゼロ検出法によるESRの共鳴が観測されたことがわかる。S/N比は23であるが、バックグラウンドの背景光が0.04mV残っている。これはおそらく、発振器から検出器まで5mの距離があるのと、無冷媒超伝導磁石の内筒を反射した光により偏光度が乱れた成分が届いているものと考えられる。偏光角度依存性の測定では、ポリエチレン試料フォルダーとDPPH試料の有無が異なるので単純には比較できないが、背景光はWGPの平行配置と比べ 4×10^{-4} 程度まで減少していると考えられる。磁場空間が大口径100mmの無冷媒超伝導磁石ではこの程度の偏光度の乱れであるが、10mmのパルス強磁場磁石では内筒との反射が多くなるため偏光素子から遠く離れば偏光度がより低くなると予想される。そのためパルス強磁場用の装置では図4に示すように光源側と検出器側の偏光素子を試料の近くに配置し、偏光度が大きく変化しないクロスニコル計測が実現するようになる必要がある。また時間変化する強磁場中で用いるため、バルク金属製でなくフィルム状になっている偏光素子を探した。その結果、樹脂フィルムをベースとして100nmピッチにAlのワイヤーグリッドをパターン形成した旭化成製のワイヤーグリッド偏光素子(WGF)が使えることがわかった。WGFは可視光を目的として製造されていて、前出のWGPと比べグリッドピッチが狭くなっているが、長波長のテラヘルツ領域でも2枚のWGFによって消光することが確認できた(図7に0.09THz、0.13THzにおける透過度の結果を示す)。このように0.09THzでもパーセント以下のオーダーで消光できていることがわかった。

パルス強磁場用ゼロ検出実験結果を図8に示す。測定試料は1mm厚のDPPHペレット、測定温度は265Kで行った。光源周波数は0.105THz、検出器はQMC社製のInSb検出器にAC増幅器を接続して行った。磁場印加前にWGFの角度と検出器側WGFの位置を調整し透過光強度が最小になる条件を探したところ垂直にはならず、100°の角度となった。これはライトパイプ中で2枚目のWGFまでに偏光角度が回っていることを示している。また、0°と示しているのはWGFの偏光が平行の配置の測定である。なお、見やすくするために平行配置のスペクトルは-50のオフセットをしている。ゼロ検出となる100°のスペクトルは共鳴磁場以外の吸収が無いところでは透過光がゼロとなっていて、共鳴が起こると透過光が現れていることがわかる。しかし、ゼロ検出では吸収波形の裾野がやや乱れている。これは、多重反射が起こっているか、試料による分散が混じっているものと考えられる。これらはWGFの位置や試料にウェッジをつけるなど最適化を行うことで解消される。このような吸収の乱れを解消すれば、吸収強度はより強くなるものと考えられる。一方、平行配置の場合、共鳴磁場以外のところで20程度オフセットしていて、光が透過してきていることがわかる。共鳴の吸収の強度はゼロ検出に比べると3.2倍も強く観測された。

本研究によって、磁気共鳴法であるESRにおいて、ゼロ検出法は超伝導磁石を使った定常強磁場においても、パルス強磁場を用いた測定においても、いずれの場合にも可能であることが示された。パルス強磁場との組み合わせではWGF間の距離、角度に多少の調整が必要であることが明らかになった。また現時点で使用しているInSb検出器では通常の透過測定に比べて感度的に優位ではないが、今後調整によっては優勢になる可能性があると考えている。

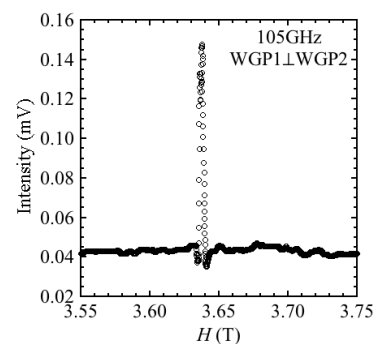


図6 試料DPPHの室温におけるESRのゼロ検出

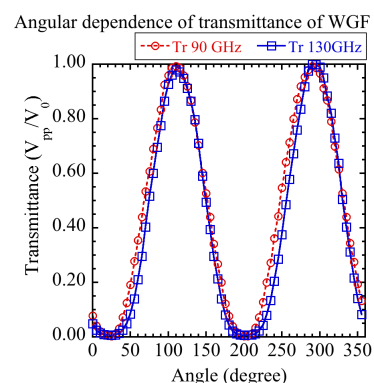


図7 WGFの透過度の角度依存性

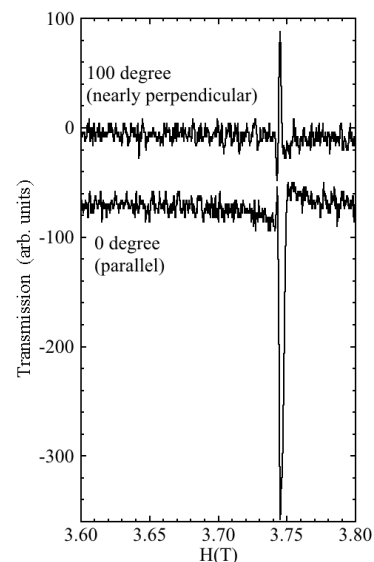


図8 パルス強磁場用ゼロ検出装置によるWGF平行(0°)と垂直(100°)のスペクトル

[雑誌論文](計 0 件)

[学会発表](計 29 件)

1. S. Okubo, S. Kubota, Y. Kitahara, S. Hara, T. Sakurai, H. Ohta, D. Yoshizawa, M. Hagiwara, F. Kimura, T. Kimura, K. Nawa, Y. Okamoto, Z. Hiroi, "High-field ESR study of $S=1/2$ frustrated J_1 - J_2 chain $\text{NaCuMoO}_4(\text{OH})$ as candidate substance for spin nematic", 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28, Gothenburg, Sweden) (2017.8.9-16) (ポスター)
2. 下城世那, 高橋昭彦, 吉田翔太, K. Benzid, 齋藤佑, 原茂生, 櫻井敬博, 大久保晋, 太田仁, 佐藤博彦, "Co 正方格子反強磁性体の強磁場 ESR 測定", 第 4 回西日本強磁場科学研究会 (2017.9.25 大阪大学)(ポスター)
3. 久保田創, 原茂生, 櫻井敬博, 大久保晋, 太田仁, 那波和宏, 矢島健, 岡本佳比古, 廣井善二, " $S=1/2$ 反強磁性鎖 $\text{KCuMoO}_4(\text{OH})$ 配向試料を用いた ESR 測定", 第 4 回西日本強磁場科学研究会 (2017.9.25 大阪大学)(ポスター)
4. 宮崎大輔, Khalif Benzid, 大久保晋, 原茂生, 櫻井敬博, 太田仁, 藤田渉, " $S = 1/2$ 歪んだダイヤモンド鎖化合物 $(\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2(\text{H}_2\text{O})_x\text{Y}_y)$ の強磁場 ESR 測定", 第 4 回西日本強磁場科学研究会 (2017.9.25 大阪大学)(ポスター)
5. 大久保晋, 宮崎大輔, Khalif Benzid, 原茂生, 櫻井敬博, 太田仁, 松岡英一, 菅原仁, 藤田渉, " $S = 1/2$ 歪んだダイヤモンド鎖化合物 $(\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2(\text{H}_2\text{O})_x\text{Y}_y)$ のサブミリ波 ESR 測定", 日本物理学会 2017 年 秋季大会 (2017.9.21-24 岩手大学) (口頭発表)
6. 大久保晋, 池田将平, 吉田翔太, 太田仁, 笹川崇男, "トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 のサイクロトロン共鳴", 日本物理学会 2017 年 秋季大会 (2017.9.21-24 岩手大学) (ポスター)
7. 下城世那, 高橋昭彦, 吉田翔太, K. Benzid, 齋藤佑, 原茂生, 櫻井敬博, 大久保晋, 太田仁, 佐藤博彦, "Co 正方格子の ESR 測定", 日本物理学会 2017 年 秋季大会 (2017.9.21-24 岩手大学) (ポスター)
8. 久保田創, 原茂生, 櫻井敬博, 大久保晋, 太田仁, 那波和宏, 矢島健, 岡本佳比古, 廣井善二, " $S=1/2$ 反強磁性鎖 $\text{KCuMoO}_4(\text{OH})$ 配向試料を用いた高周波 ESR 測定", 第 27 回日本赤外線学会研究発表会 (2017.10.26 大阪市立大学)(ポスター)
9. 下城世那, 高橋昭彦, 吉田翔太, K. Benzid, 齋藤佑, 原茂生, 櫻井敬博, 大久保晋, 太田仁, 佐藤博彦, "Co 正方格子反強磁性体の THz ESR 測定", 第 27 回日本赤外線学会研究発表会 (2017.10.26 大阪市立大学)(ポスター)
10. 齋藤佑, 岡本翔, 大木瑛登, 櫻井敬博, 原茂夫, 大道英二, 大久保晋, 太田仁, "圧力下ヘミンの THz 領域における多周波数強磁場 ESR", 第 56 回電子スピンサイエンス学会年会 (2017.11.2-4 東京工業大学) (口頭発表)
11. 大久保晋, 久保田創, 北原遥子, 原茂生, 櫻井敬博, 太田仁, 吉澤大智, 萩原政幸, 木村史子, 木村恒久, 那波和宏, 岡本佳比古, 廣井善二, "スピンネマチック候補物質 $S=1/2$ 擬 1 次元 J_1 - J_2 フラストレート磁性体 $\text{NaCuMoO}_4(\text{OH})$ の磁場中配向試料による強磁場 ESR 測定", 「強磁場コラボラトリーが拓く未踏計測領域への挑戦と物質・材料科学の最先端」(2017.11.29-30, 物質・材料研究機構)(ポスター)
12. 太田仁, 大久保晋, 大道英二, 櫻井敬博, 高橋英幸, "分子フォトサイエンス研究センターの多重極限 THz ESR の開発と共同利用", 「強磁場コラボラトリーが拓く未踏計測領域への挑戦と物質・材料科学の最先端」(2017.11.29-30, 物質・材料研究機構)(ポスター)
13. 大久保晋, 久保田創, 北原遥子, 原茂生, 櫻井敬博, 太田仁, 吉澤大智, 萩原政幸, 木村史子, 木村恒久, 那波和宏, 岡本佳比古, 廣井善二, " $S=1/2$ 1 次元量子スピン鎖 $\text{MCuMoO}_4(\text{OH})$ ($M=\text{K}, \text{Na}$) の強磁場 ESR 測定", 第 12 回量子スピン系研究会 (2017.12.4-5 みのお山荘 風の杜) (口頭発表)
14. 大久保晋, 久保田創, 原茂生, 櫻井敬博, 太田仁, 那波和宏, 矢島健, 岡本佳比古, 廣井善二, " $S=1/2$ 反強磁性鎖 $\text{KCuMoO}_4(\text{OH})$ の高周波 ESR 測定 II", 日本物理学会 第 73 回年次大会 (2018.3.22-25 東京理科大)(口頭発表)
15. 原茂生, 佐藤博彦, 櫻井敬博, 大久保晋, 太田仁, "新規 2 次元酸化物磁性体の X-band ESR 測定", 日本物理学会 第 73 回年次大会 (2018.3.22-25 東京理科大)(ポスター)
16. 下城世那, 大久保晋, 齋藤佑, 原茂生, 櫻井敬博, 太田仁, 大熊隆太郎, 廣井善二, "幾何学的スピン構造をもつ反強磁性体の強磁場 ESR による研究", 日本物理学会 第 73 回年次大会 (2018.3.22-25 東京理科大)(ポスター)
17. 大久保晋, 高橋昭彦, 原茂生, 櫻井敬博, 太田仁, 辻本吉廣, Su Yu, 山浦一成, "2 次元正方格子磁性体 $\text{Sr}_2\text{MnO}_2\text{Cl}_2$ の強磁場 ESR 測定 II", 第 5 回西日本強磁場科学研究会 (2018.9.6 神戸大学)(ポスター)
18. Paul Bruand, Benjamin Lassagne, Teppei Suzuki, Susumu Okubo, Yu Saito, Shigeo Hara, Takahiro Sakurai, Hitoshi Ohta, "Development of High-field ESR system using the null detection", 第 5 回西日本強磁場科学研究会(神戸大学)(The 5th meeting on high magnetic field science in western Japan, Kobe Univ.), (2018.9.6)(Poster)
19. 鈴木哲平, 齋藤佑, 原茂生, 櫻井敬博, 大久保晋, 太田仁, 赤木暢, 鳴海康雄, 萩原政

- 幸, 吉田紘行, "S=1/2 カゴメ格子反強磁性体 Ca-kapellasite の圧力下の磁性", 日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018.9.9-12 同志社大学)(ポスター)
20. 大島健太郎, 齋藤佑, 原茂生, 櫻井敬博, 大久保晋, 太田仁, 山本樹, 東正樹, "ペロブスカイト型化合物 PbMnO_3 の高周波 ESR 測定", 日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018.9.9-12 同志社大学)(ポスター)
 21. 原茂生, 佐藤博彦, 櫻井敬博, 大久保晋, 太田仁, "Rb-Mn-Ge-O 系新規物質の探索", 日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018.9.9-12 同志社大学)(ポスター)
 22. 下城世那, 大久保晋, 齋藤佑, 原茂生, 櫻井敬博, 岡本翔, 高橋英幸, 大道英二, 太田仁, 大熊隆太郎, 廣井善二, "幾何学的スピン構造をもつ反強磁性体の強磁場 ESR による研究 II", 日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018.9.9-12 同志社大学)(口頭発表)
 23. 大久保晋, 宮崎大輔, Khalif Benzid, 齋藤佑, 原茂生, 櫻井敬博, 太田仁, 入澤明典, 藤田渉, "S=1/2 歪んだダイヤモンド鎖化合物 $(\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2(\text{H}_2\text{O})_x\text{X}_y)$ のサブミリ波 ESR 測定 III", 日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018.9.9-12 同志社大学)(口頭発表)
 24. Hitoshi Ohta, Susumu Okubo, Eiji Ohmichi, Takahiro Sakurai, Hideyuki Takahashi, Shigeo Hara, "Recent Developments and Applications of Multi-Extreme THz ESR", 43rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz2018) (2018.9.9-14, Nagoya)(Poster)
 25. 大久保晋, 宮崎大輔, 岡本翔, 高橋英幸, 大道英二, 齋藤佑, 原茂生, 櫻井敬博, 太田仁, 入澤明典, 藤田渉, "S = 1/2 歪んだダイヤモンド鎖化合物 $(\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2(\text{H}_2\text{O})_x\text{X}_y)$ の ESR 測定 II", 第 5 7 回電子スピンサイエンス学会年会 (2018.11.1-3 北海道大学)(口頭発表)
 26. 齋藤佑, 岡本翔, 大道英二, 櫻井敬博, 原茂夫, 大久保晋, 太田仁, "高スピン金属イオン型ヘキサアクア錯塩の高磁場 ESR 研究: 高圧 ESR の圧力標準物質としてのタットン塩の評価", 第 5 7 回電子スピンサイエンス学会年会 (2018.11.1-3 北海道大学)(口頭発表)
 27. 大久保晋, 下城世那, 齋藤佑, 原茂生, 櫻井敬博, 岡本翔, 高橋英幸, 大道英二, 太田仁, 大熊隆太郎, 廣井善二, "幾何学的スピン構造をもつ反強磁性体の強磁場 ESR による研究 III", 日本物理学会 第 74 回年次大会 (2019.3.14-17 九州大学)(口頭発表)
 28. 大久保晋, 鈴木哲平, Paul Brunde, Benjamin Lassagne, 齋藤佑, 原茂生, 櫻井敬博, 太田仁, "ヌル検出法によるテラヘルツ電子スピン共鳴測定", 強磁場コラボラトリにおける物性研究の現状と展望(東北大学金属材料研究所), (2018.11.26-28)(ポスター)
 29. 大久保晋, "多重極限強磁場 THz ESR の進展", 日本分光学会 関西支部第二回講演会(神戸大学), (2018.11.30)(招待講演)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

原 茂生 (HARA, Shigeo)

神戸大学・研究基盤センター・特命技術員

研究者番号: 60520012

(2)研究分担者

齋藤 佑 (SAITO, Yu)

神戸大学・分子フォトサイエンス研究センター・研究機関研究員

研究者番号: 60772142

(3)研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。