

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03750

研究課題名(和文)核磁気共鳴法による励起子絶縁相の検証：コバルト酸化物を舞台として

研究課題名(英文)An NMR study on a possible excitonic insulator

研究代表者

加藤 治一 (KATO, Harukazu)

高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・准教授

研究者番号：60363272

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：Pr_{0.5}Ca_{0.5}Co_x (PCCO) は励起子絶縁体の候補物質の一つである。本研究では、PCCO およびその類縁物質である Pr_{0.5}Sr_{0.5}Co_x (PSCO) について、それぞれ試料合成、含有酸素量の評価、および核磁気共鳴(NMR)測定を行った。PCCOのNMRスペクトルは、強磁性相にあり磁気モーメントを持ったコバルト核に由来する部分と、非磁性核に由来する部分からなる。前者の部分は複雑な形状をしており、系に含まれる強磁性モーメントが一様な大きさを持っていないことを示している。酸素量の異なる試料およびPSCOとの比較を行い、結果を励起子相との関連の中で議論した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物性研究において、金属絶縁体転移の物理はながらく中心的な課題の一つであり、今なおそうである。絶縁体の機構のひとつとして、励起子絶縁体なる概念が半世紀以上前に理論的に予言されているものの、実験的な実証は十分でない。NMRは、原子核をプローブとすることで原子レベルでの局所電子環境を検出することを可能にする。本研究は、ローカルな存在である励起子およびその凝縮相についてヒントを得ようと、励起子絶縁体の候補物質についてNMR測定を行ったものである。本研究は主に強磁性状態にある電子の微視的実態について明らかにしたが、それらは励起子相の形成を考える上で一つの実験的な知見を与えるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Pr_{0.5}Ca_{0.5}Co_x (PCCO) is an example of an excitonic insulator. Sample preparation, evaluation of oxygen contents, and nuclear magnetic resonance (NMR) measurements have been done on PCCO, as well as a related compound Pr_{0.5}Sr_{0.5}Co_x(PSCO). The NMR spectrum of PCCO is consist of two regions; the one derived from Co nuclei with having on-site ferromagnetic moments, and the other from nonmagnetic ones. The former of the spectrum shows complicated shape, indicating that the ferromagnetic region involves non-uniform magnetic moment in magnitude. The results are compared with different-oxygen-content samples, and with PSCO. Relation with excitonic phase is discussed.

研究分野：固体物理

キーワード：励起子絶縁体

1. 研究開始当初の背景

物性研究において、金属絶縁体転移の物理はながらく中心的な課題の一つであり、今なおそうである。絶縁化の機構のひとつとして、励起子絶縁体なる概念が半世紀以上に理論的に予言されている。バンドの重なりが小さな半金属や、バンドギャップが小さな半導体においてはバンド内の電子および正孔が存在すると想定されるが、それら(電子-正孔)がクーロン引力で互いに束縛しあう時、量子対凝縮を起こして「励起子相」とでも呼ぶべき相へ相転移を起こしうる[1,2]というのがその骨子である。近年では、励起子が BEC 的に凝縮して運動量ゼロの状態から、いわゆる FFLO 状態に類似の、有限の運動量 q を残すような BCS 的な対凝縮状態まですら可能であることが理論的に示されている[3]。後述のように現実の系でこのような「励起子相」が存在しているかどうかは必ずしも定かではないものの、いくつかの候補物質は提案されており、しかも興味深いことに近年、その「励起子相」に近接して超伝導が現れることが発見されている(1T-TiSe₂[4]や Ta₂NiSe₅[5])。しかるに「励起子相」は、電子格子相互作用による種々の相転移(例えば CDW)との区別が難しいなどの理由から、現実の系でこれこそが「励起子相」の典型例であると確言できるにいたったものはない。実験的な証拠をより積み重ねていくことが重要である。

励起子相にはいくつかの候補物質があるが、その一つにコバルト酸化物 Pr_{0.5}Ca_{0.5}CoO_x(PCCO)がある。酸素定比($x=3$)の PCCO は ~90 K で 1 次の金属絶縁体転移を起こす[6,7]。転移温度前後で電気抵抗ははっきりと変化し格子定数も大幅に変化するが、結晶構造の対称性は斜方晶 Pnma のままである。この転移は当初は Co³⁺のスピンの状態転移という文脈で解されていた[7]が、2014 年に Kuneš らがより広く、低温の絶縁相が「励起子相」(原子程度の大きさのスピンの三重項的な励起子対の凝縮相)として捉えられるのではないかと提案した[8]。理論面では多極的な電子軌道秩序が予想されていたり[9]、進んでバンド全体のフィリング(電子数)を変化させた場合の局所対称性の異なる 2 種の凝縮相の存在と、その間の相転移の可能性が述べられていたりしている[10]。一方、実験的な検証はまだ十分に進んでいない。

2. 研究の目的

PCCO における転移は、他の候補物質とは異なり、結晶構造の対称性変化を伴わない[6]。これは、「励起子相」を実証しようとする時に付きまとう、電子格子相互作用による CDW, ネスティング効果等の混入があまりないことを示している。また本物質は、転移点前後で Pr が価数変化していることが示されており[11]、Pr バンド-Co バンド間の電子移動が起こること—Kuneš らによるとそれが「励起子相」形成に必然的であることが示されている。Co の電子状態を Pr のそれとは独立に検出することは非常に重要なことであろう。

本研究では PCCO を対象にして、ローカルな存在である励起子の対凝縮についてヒントが得られないか探るために、核磁気共鳴(NMR)法によって原子ごとの電子特性を独立に観測しようとした。NMR は、原子核をプローブとすることで原子レベルでの局所電子環境を検出することを可能にする。対形成により電子の波動関数が変化する[9]だろうことを鑑みると、電子の空間分布を反映する核四重極パラメーターについての情報は重要であろう。また NMR 信号の核スピン-格子緩和時間(T_1)も励起子の低エネルギー揺らぎを反映することから理論的な予測[12]に基づいて「励起子相」実証の有力な手がかりとなりうる。

「励起子相」形成においてバンド内の電子数は当然、重要なパラメーターである[10]。実際、PCCO に見られた金属絶縁体転移は、化学的操作による電子数の変化に応じて大きく影響を受け、僅かな酸素不定比性で転移が著しくばやける(マクロ物性に一次転移的な特徴が現れなくなる)ことが知られている[13]。本研究では、NMR に先立って試料合成を自らの手で行い、酸素量不定比性の異なるいくつかの試料を用意する。試料の含有酸素量の評価を進め、必要なら手法の改善も行う。

またコバルトに対する化学的圧力効果を見るために、Ca の代わりに等イオン価の Sr が入った Pr_{0.5}Sr_{0.5}CoO_x(PSCO) についても研究対象とし、PCCO と同様に試料合成・含有酸素量の定量および NMR 測定を行う。

3. 研究の方法

試料は通常の固相反応・ゾルゲル法で作成し、様々な焼成温度・焼成雰囲気を試した。これらの試料は酸に難溶であることから、よく知られており精度も高い手法の一つであるヨードメトリー法(試料とともに決まった量のヨウ素を溶かし、それらをチオ硫酸ナトリウムで還元してもとの試料に含まれるイオン量を推定する手法)をそのまま適用することは難しい。そのため本研究では、含有酸素量を評価するために、ヨードメトリー法の手続きを一部改良した。以下に詳述する。

~ 30 mg 程度の試料およびヨウ素を定量して、~ 40 ml の希酸(2N 硫酸)とともに内容量 50 ml のテフロン容器に入れ、アルゴンガスで満たしたグローブボックス中で密閉する。ここでア

ルゴン雰囲気下において作業を行うのは、容器内に酸素が残存し、後のヨードメトリー反応で意図しない酸化反応を起こさせないようにするためである。しかし依然、わずかにグローブボックス内に酸素気体が残存している可能性があり、また希酸にも大気中の酸素が溶け込んでいる可能性はある。このため reference として、試料を加えないながらもヨウ素・希酸は同量を内容物として含むような別のテフロン容器を用意し、上記の(試料を含む)テフロン容器と同じグローブボックス内で密閉しておく。これらの容器を密閉したままで $\sim 160^{\circ}\text{C}$ に温度をあげ、水熱反応を利用することで内容物の試料・ヨウ素を一旦溶かす。それらの溶液を各々通常大気下でチオ硫酸ナトリウムを用いて還元する。ここで、チオ硫酸ナトリウムで還元されるものは、ヨウ素($\text{I}_2 \rightarrow 2\text{I}^-$ となる)および試料に含まれる $\text{Co}^{3+}, \text{Co}^{4+}$ (ともに最終的に Co^{2+} になる)である。残留酸素の影響は reference から差し引く。 $\text{Co}^{3+}, \text{Co}^{4+}$ の量が求まれば、試料の中での電荷バランスから、試料の含有酸素量が決定される。以上のような操作を同じ試料に対し複数回行ったが、各測定回で決定される酸素量の“ぶれ”は、式量あたり 0.1 程度であった。以下で示す含有酸素量は、測定回ごとに得られた値の平均値をとっている。以上の方法が含有酸素量の決定に相当であることは、酸素量のわかっている市販の Co_3O_4 を試料として用いることで確かめた。(決定された酸素量は Co_3O_4 のそれに一致する。)なお、PCCO の試料中では Pr^{4+} が実際には存在しているかもしれない。ただし Pr^{4+} はヨードメトリー反応において $\text{Co}^{3+}, \text{Co}^{4+}$ と同じように還元されうる。ヨードメトリー反応で直接推定されうるのは還元を受けるイオンの総量であるから、上記の計算の中では、試料に含まれ還元を受ける陽イオンの役割をすべて $\text{Co}^{3+}, \text{Co}^{4+}$ に押し付けていることになる。もしそうであっても、試料に含まれる陽イオンの価数の総和 = 酸素イオンの価数の総和なので、最終的に得られる試料の含有酸素量に関する結論は変わらない。

NMR はスピンエコー法を用いて行った。測定はゼロ磁場中で行い、スピンエコー信号の積分強度を信号強度とした。周波数スペクトルは、rf 周波数を変化させた各点ごとに信号強度を測定して得た。本研究では測定周波数域がかなり広範囲にわたり、一つの測定プローブ・コイルの組み合わせで形成できる共振周波数の範囲を超えている。それぞれの共振周波数がわずかに重畳できるようにした、いくつかの測定プローブ・コイルを用意し、各々で得られた結果を重ね合わせて全体像を得た。なお、サンプル外に由来する extrinsic な NMR 信号を排除するために、プローブ・取り付け金具等はコバルトフリーな素材を選択した。本測定の前に、サンプルを取り付けずに NMR 測定を行い、extrinsic な信号の影響を補正した。こうして得られたスペクトルの強度については、ひとまず周波数補正、 T_2 補正を特に行わずに示す。結果に示すように、強磁性増強効果が大きいこと、 T_2 の値が測定域に渡ってほぼ同程度であったことによる。また動的な情報を得るために、ある特定の rf 周波数に固定して縦緩和(T_1)測定、横緩和(T_2)測定もそれぞれ行った。全測定を通じ、GM 冷凍機のコールドヘッド部分に取り付けたサンプルハウスに試料およびコイルを封じ、その中にヘリウムガスを導入して試料部分の温度の安定性を保った。使っている冷凍機の老朽化のため、到達温度は $\sim 12\text{ K}$ にとどまる。

4. 研究成果

PCCO は原料の混合物を酸素ガス気流中で固相反応させることで単相試料が得られた。PCCO について、焼成温度を 900°C にした試料では含有酸素量が 2.80、焼成温度を 1200°C にした試料では含有酸素量が 2.85 であった。後者の方が定比に近い酸素量を示している。実際、前者の試料においては、温度を下げていくと電気抵抗は緩やかに変化するのみであり、明確な金属絶縁体転移が見られない一方、酸素量が定比に近い後者の試料では、電気抵抗は $\sim 80\text{ K}$ 付近で kink を示し上昇する。ただし、文献[6]に示されたような、抵抗率が 1-2 桁程度変わる明確な一次転移ではなかった。酸素欠損は、依然試料に内包されているように思える。PSCO については、ゾルゲル処理を行った上で固相反応を行い含有酸素量が 2.93-2.97 程度の試料を得た。なお、PCCO、PSCO とともに 1200°C 付近以上に焼成温度を高くし、また焼成時間を長くするに従い、焼成終了後に試料混合物を収めた容器(アルミナポート)に青色の汚れが多く見られるようになる。焼成中に原料に含まれるコバルト(あるいはコバルト化合物)がペレット外部に飛び出すようだ。このようになった試料は、陽イオンの組成が意図したものと異なっていると考えられるため、以下の測定には使わない。

図 1 に含有酸素量が 2.80 である試料に対して測定した 12.5 K における PCCO の周波数スペクトルを示す。 $\sim 120\text{ MHz}$ を主ピークとして、上端は 145 MHz 、下端は 30 MHz まで広い範囲に渡っている。これらの信号は、エコーパルスの幅が短くても観測できる。強い強磁性増強効果を受けているようだ。PCCO の絶縁相では、金属絶縁体転移のさらに低温で、短距離強磁性秩序/スピングラス的な帯磁率の異常がみられ、 $\sim 0.3\ \mu_B/\text{f.u.}$ 程度の残留磁化が観測される[6]ことから、強磁性相あるいは強磁性に近い状態にある相を相当程度含んでいると考えられる。議論のために一旦、PCCO が強磁性相と非磁性相の 2 相からなると簡便化して考えてみる。図 1 で示したスペクトルは、強磁性相に含まれるコバルト核に由来するものと考えられる。スピン転移モデル[6,7]においては、PCCO は絶縁相において Co^{3+} が低スピン状態、 Co^{4+} が低スピン状態になっていると想定されている。ここでは、 $\text{Co}^{3+}(d^6)$ は非磁性状態である一方、磁気モーメントを持ちうるのは $\text{Co}^{4+}(d^7)$ となり、個々のスピン S の大きさは $S = 1/2$ となるはずである。スピンの単純な強磁性配列を仮定して、オンサイトの電子からくる超微細場 H_{int} を受けて共鳴が観測されている

とすると、共鳴周波数は、

$$\omega = \gamma H_{int} =$$

$\gamma(A_{hf}g\mu_B S) \dots$ と書かれる。 γ は対象核の核磁気回転比、 A_{hf} は超微細場係数、 g, S はオンサイト電子の g 因子、スピン量子数である。コバルト核 ($^{59}\gamma = 10.054 \text{ MHz}/\mu_B$) の A_{hf} に通常 3d 電子に関するものの値を流用すると共鳴周波数は $\sim 100 \text{ MHz}$ のオーダー程度と予想される(ここで $g \sim 2$ とした)。スペクトルの主成分は、強磁性相にある磁気モーメントをもつコバルト核に由来するとしてひとまずは良さそうである。ただし、実験的にえられたスペクトルはより広い範囲に渡っており、明らかな構造を持っている。スピンの大きさが分布していることを示唆

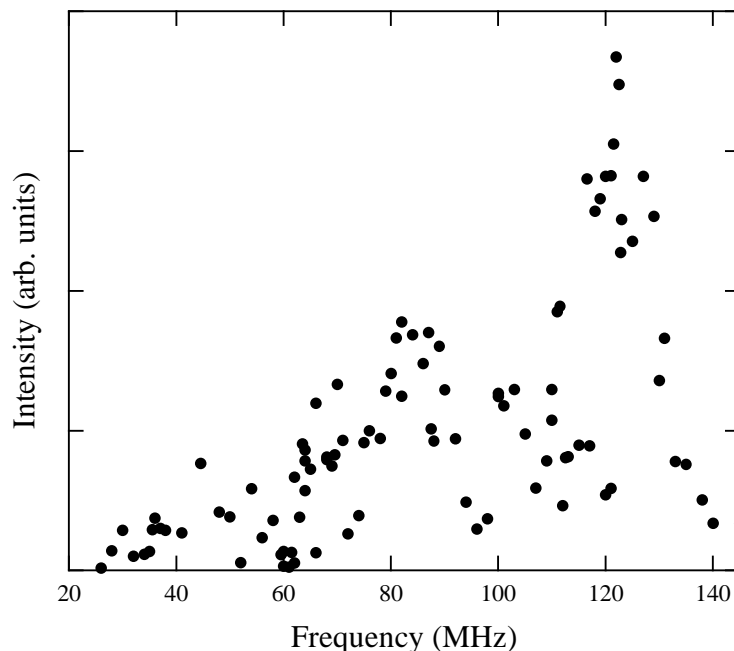


図1 PCCO (酸素量 2.80)のゼロ磁場 NMR スペクトル

しているかもしれない。三重項をもつ励起子絶縁体においては、モーメントの大きさが変調する励起モードが存在しうる可能性が言及されている[14]。PCCO のモーメント分布が実際にどのようになっているかは、今後研究を要する課題である。

含有酸素量がより大きい PCCO についても同様のスペクトルが得られる (not shown) が、同一周波数に対する信号強度は弱くなっている。強磁性相における Co モーメントの大きさ・分布は大きくは変化しないものの、その体積率は酸素欠損が減るとともに小さくなっているのかもしれない。実際、マクロ測定においても酸素欠損試料は大きな磁化を示し、その強磁性転移温度は金属絶縁体転移温度付近になる一方、酸素定比の試料の磁化は小さく、強磁性的な立ち上がりを見せ始めるのも $\sim 10 \text{ K}$ 程度以下となる[6,7,12]。強磁性相と非磁性絶縁相は近接して存在しており、含有酸素量(あるいはそれがもたらすバンド内電子数)によって制御しうることを示している。

いくつかの周波数で T_1, T_2 を測定した(現在も測定中である)。 T_2 の値は $\sim 20 \times 10^3 \text{ sec}^{-1}$ 程度と大きな値を示し、温度に対して一定である。強磁性絶縁相との見立てに合致する。またやや奇妙なことに、 T_1, T_2 の値は測定する周波数にあまり大きく依存しないように見える。大きさの違った磁気モーメントが独立に存在し、それぞれが独立に揺らいでいるならば、それらが NMR 信号に与える揺らぎの影響はモーメントの大きさによるはずである。もしそうならば、式の枠内で共鳴周波数は平均のモーメントの大きさに対応するため、 T_1, T_2 は測定周波数ごとに違っているはずである。そうっていないのは、coherent な励起モードが存在しているためかもしれない。ただ現在はデータ数が足りず、明確な議論ができない。さらなる研究が必要である。

本報告書を書く直前に、含有酸素量がより定比に近い試料において、以上の強磁性モーメントに由来する NMR 信号とは別に $\sim 5 \text{ MHz}$ 以下の低周波領域で信号が観測された。この信号の検出に必要なエコーパルス幅は、高周波の信号に対するものに比べて長く、強磁性増強をあまり受けていないように見える。非磁性相に含まれる核の信号だろうか。現在のところ $\sim 2 \text{ MHz}$ までの周波数域までしか測定を終えておらず、完全なスペクトルは得られていないため本稿に図は出さないが、 $\sim 3 \text{ MHz}$ が最も強度がつよく、それ以下の周波数では同程度の強度で幅広く tail をひく。現時点では、非磁性 Co 核に帰属できると考えている。一般に、核スピン I が 1 以上であれば非磁性核であっても周りのイオン・電子の電荷分布により四重極相互作用を受けて、NQR と呼ばれる共鳴信号が観測される。 ^{59}Co 核は核スピン $I = 7/2$ を持つので、1 サイトに対し 3 本の NQR 共鳴ラインを出す。観測した $\sim 3 \text{ MHz}$ の信号を、非磁性コバルト核が出すであろう最も高い周波数の NQR ラインに同定すると、四重極周波数 ν_Q は $\sim 1 \text{ MHz}$ のオーダーとなる(ここで、簡単のため asymmetry parameter η はゼロと仮定した)。他のコバルト酸化物、例えば PCCO に類似のペロブスカイト構造をとる $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ における Co 核の ν_Q は 0.59 MHz である[15]。まだ完全なスペクトルが得られておらず、確たることは言えないものの、PCCO の絶縁相における核の ν_Q は通常相におけるものに比べ増大している可能性がある。励起子生成に伴う電子の電荷分布の変化を直接反映しているかもしれない。実際、「励起子相」では多極子的な電子軌道の秩序が予想されている[9]。「励起子相」以外の相との比較が必要である。また、この $\sim 3 \text{ MHz}$ の信号は温度を上げるにつれ急速に強度を減ずる。その変化は、通常の NMR/NQR 信号に期待されるような、温度に逆比例する変化に比してかなり激しく、ある試行実験条件において $\sim 12 \text{ K}$ で S/N が 10 程度にはっきり見えていたものが、 $\sim 18 \text{ K}$ ではバックグラウンドノイズに隠れてほぼ

見えなくなる。温度上昇とともに励起子が壊れ、電場勾配におおきな変化が生じていくためかもしれない。いずれにせよ、これらの結果は測定途上であり、不明な点が大きすぎる。これからの研究が待たれる。

PSCO は転移温度を $T_C \sim 250\text{K}$ にもつ金属強磁性体である[16]。低温における PSCO の NMR スペクトルは 2 つの領域に区別され、(1) $\sim 250\text{MHz}$ を中心とした幅の狭いピークと、(2) $\sim 125\text{MHz}$ を最大として上端は 150MHz 、下端は 40MHz まで広い範囲に渡りかつ構造をもつ山の 2 つからなる (not shown)。試料全体が強磁性であることを反映して、信号強度は PCCO のそれに比べて大きい。これらの NMR 信号がオンサイト電子の内部磁場を受けたコバルト核によるものと考え、(1)のピークは $S=1$ のモーメントが PSCO に含まれていることを示唆している。PSCO では $\text{Co}^{3+}(d^6)$ が中間スピン状態になっているのだろうか。(2)の山は PCCO のスペクトルと似通った周波数領域に観測されることから、PSCO も PCCO にあると同程度の大きさの磁気モーメントを $S=1$ モーメントとは別に内包し、かつそれらは均一で collinear な強磁性配列となっていないことを伺わせる。PSCO においては T_C より下の $\sim 100\text{-}135\text{K}$ で 1 次の構造相転移が起こり[17]、格子の対称性が Imma から I4/mcm に変化することに付随してモーメントの方向の異なるドメインが存在する [18]。ドメインの存在が複雑な NMR スペクトルを生んでいる可能性を考慮中である。実際、強磁性の NMR 信号は、磁気ドメインの境界で強く増強される。

PSCO の信号強度が最も大きくなる箇所で T_1 、 T_2 を測定した。絶対値は PCCO のそれと大差ない。温度をあげていくと増大し、 $\sim 30\text{K}$ 付近を極大として再び減少に転ずる(not shown)。 $\sim 30\text{K}$ で帯磁率等のマクロ物性に特に異常は報告されていないが、なにかミクロな変化がこの温度付近で起こっている可能性がある。

以上、本研究では PCCO、PSCO について試料合成・含有酸素量の評価・NMR 測定を行った。含有酸素量の異なる PCCO 試料についてそれぞれ NMR スペクトルを測定し、2 相共存の枠組みのなかで、強磁性相に含まれる磁気モーメントを持つコバルトに由来する信号と、非磁性相に由来するであろう信号をそれぞれ独立に観測した。強磁性相は複雑な磁気構造をもつと予想され、また非磁性絶縁相と隣接して存在しているようだ。本研究 (研究機関: R1 \sim R3 年度) は、その遂行中にコロナ禍に見舞われ実験者が研究室に立ち入りできなかった期間があったこともあり、PSCO との定量的な比較や、PCCO、PSCO 両者における T_1 、 T_2 測定など多くの測定がまだ途上でありはするものの、その tentative なデータは興味深い結果を多く暗示している。結果をより拡張して、今後のさらなる研究を進めていきたい。

- [1] D. Jerome, et al., Phys. Rev. 158 (1967) 462
- [2] B. I. Halperin, and T. M. Rice, Rev. Mod. Phys., 40 (1968) 755
- [3] T. Yamada, et al., J. Phys. Soc. Jpn., 85 (2016) 053703
- [4] A. F. Kusmartseva, et al., Phys. Rev. Lett., 103 (2009) 236401
- [5] A. Nakao, et al., IUCrJ 5 (2018) 158-165
- [6] S. Tsubouchi, et al., Phys. Rev. B 66 (2002) 052418
- [7] S. Tsubouchi, et al., Phys. Rev. B 69 (2004) 144406
- [8] J. Kunes, and P. Augustinsky, Phys. Rev. B 90 (2014) 235112, and supplemental material
- [9] T. Yamaguchi, et al., J. Phys. Soc. Jpn., 86 (2017) 043701
- [10] J. Kunes, Phys. Rev. B 90 (2014) 235140
- [11] J. Hejtmanek, et al., Eur. Phys. J. B 86 (2013) 305
- [12] K. Sugimoto, Phys. Rev. B 93 (2016) 041105
- [13] P. Tong, et al., J. Phys. Soc. Jpn., 78 (2009) 034702
- [14] Mazzone, et al., Nature Comm. 13 (2022) 913
- [15] Itoh, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 64 (3) 970-975, 1995
- [16] H. W. Brinks, et al., J. Sol. Sta. Chem., 147 (1999) 464
- [17] R. Mahendiran, and P. Schifer, Phys. Rev. B 68 (2003) 024427
- [18] J. L. Garcia-Munoz, et al., Phys. Rev. B 94 (2016) 014411

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 加藤治一、尾浦翔梧	4. 巻 4
2. 論文標題 トンネル構造を有するマンガンホランダイト酸化物へのイオン導入	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 高知大学理工学部紀要	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Harukazu Kato, Shunsuke Kamada, Daiki Kuno, Hiroya Sakurai, Ting-Hui Kao, and Hung-Duen Yang	4. 巻 30
2. 論文標題 A Nuclear Quadrupole Resonance Spectrum in a Solid-Solution System CaCu ₃ Ti ₄ Ru _x O ₁₂ Showing a Metal-to-Insulator Transition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11076
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSCP.30.011076	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 加藤治一、濱松太一、西岡孝
2. 発表標題 ペロブスカイト型コバルト酸化物の核磁気共鳴測定
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------