

機関番号： 1 4 4 0 1

研究種目： 若手研究(B)

研究期間： 2009 ~ 2010

課題番号： 21740251

研究課題名(和文) コバルト酸化物熱電体の電荷・スピン・軌道の仕組みの解明と制御

研究課題名(英文)

Clarification of the mechanism of charge, spin, and orbital and their control in thermoelectric cobalt oxides

研究代表者

高見 剛 (TAKAMI TSUYOSHI)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号： 40402549

研究成果の概要(和文)：核磁気共鳴(NMR)は電子の内部自由度である電荷・スピン・軌道の情報を直接知ることのできる極めて有効な手法である。そこで、熱電材料として注目されている Co 酸化物において、 ^{59}Co 核種の NMR 測定を行うことにより 3 つの自由度の情報を引き出し、熱電特性に与えるこれらの寄与の解明を行う。さらに、得られた知見をもとにして、これらの自由度を価数、スピン状態、系の次元性により制御し、熱電材料の設計指針を得る。

研究成果の概要(英文)：Nuclear magnetic resonance (NMR) is a quite useful prove for directly obtaining information on charge, spin, and orbital, which are the internal degree of freedom of electron. This study is motivated by the desire to derive the information by performing ^{59}Co NMR measurements of thermoelectric cobalt oxides; the contribution of these effects on the thermoelectric properties is clarified. Furthermore, a guiding principle would be obtained by controlling these freedoms in the viewpoint of valence, spin, and dimensionality on the basis of the obtained knowledge.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

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、強相関電子系、物性実験、環境材料、排熱利用

1. 研究開始当初の背景

遷移金属酸化物に代表される強相関電子系では、電荷・スピンの自由度に加え軌道が第 3 の自由度として働き、これらが密接に絡み合い高温超伝導や巨大磁気抵抗などの特異な複合現象を示すことがある。近年、 NaCo_2O_4 において巨大熱電能が発見され、これをきっかけに Co 酸化物が熱電特性を中心に熱電材料として注目を集めている。理論的側面から Co 酸化物の大きな熱電能に対して、

Co 3d 電子のスピンと軌道の縮退度の重要性が指摘されている。大きな熱電能を実現させるためには、 Co^{3+} の縮退度を下げ、 Co^{4+} の縮退度を上げる必要がある。これまで申請者が行ってきた熱電特性の研究により、現実の系においてもこれらの描像が成り立つことを実験的に実証しており、さらに熱電特性を良くするためには軌道の自由度を有効に熱電能に反映させる必要があることがわかってきたが、軌道の自由度に関する知見を得ること

は容易ではない。

2. 研究の目的

核磁気共鳴(NMR)は電荷・スピン・軌道の情報を直接知ることのできる極めて有効な手法である。そこで、 ^{59}Co 核種のNMR測定から3つの自由度の情報を引き出し、混合原子価であるCo酸化物の次元および組成によりこれらの自由度を制御することを本研究の目的とする。一般的に、Coは2-4価のいずれの価数も取り、そのもとで様々なスピン状態を取り得る。スピンと軌道の縮退度はスピン状態に依存し、系の次元や原子価が電荷の自由度に反映される場合がある。本研究では1-3次元構造を有する以下の3つの系を扱うが、組成を変えることにより、3つの自由度を独立に制御でき、それらを最適化することが可能である。

(1) 1次元系 Co 酸化物

温度の減少とともに磁性は常磁性(Para)、1次元鎖内の短距離強磁性(SR 1D-FM)、1次元鎖間の短距離/長距離反強磁性(SR/LR AF)と変化し、低温ではLR AFとなりスピンの自由度が凍結する。しかし、幾何学的フラストレーション効果に起因するそれぞれの磁気相の性質はまだ明白ではない。一方、申請者は $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ を含む $A_{n-2}\text{Co}_{n-1}\text{O}_{3n-3}$ (A : アルカリ土類金属)は1300 K以上の高温で比較的良好な熱電材料の候補であることを見出してきた。しかし、いずれの n でも電気抵抗が半導体的な振る舞いを示すため、熱電材料としての性能は層状Co酸化物に及ばない。この系のスピン状態については巨視的手法により明らかにしてきたが、半導体的振る舞いに起因すると思われる電荷と軌道の情報および動的な磁気相関をNMR測定により明らかにする。

(2) 2次元層状 Co 酸化物

NaCo_2O_4 と同様の2次元構造を有する $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ においても高い熱電特性が見出された。この物質は、 NaCo_2O_4 に比べ、より高温(≈ 1200 K)まで安定であり、熱電材料の有望な候補と考えられている。この系は、2次元 CoO_2 層と Ca_2CoO_3 岩塩層が c 軸方向に交互に重なった層状構造を有している。また、スピン密度波(SDW)などの様々な磁気相およびスピン転移が報告されている。しかし、複数のCoサイトのうち、特に伝導を担う CoO_2 層のCoがどのような磁氣的性質、スピン状態になっており、これらの磁性が発現し、さらに、熱電特性に寄与するかは明確に理解されていない。そこで、複数のCoの微視的磁性を分離し、伝導を担う CoO_2 層の局所的な電子構造を明らかにする。

(3) 単純ペロブスカイト系 Co 酸化物

スピンと軌道の自由度について議論する

ためには、スピン転移を示す典型的な物質群でNMR測定を行うことが本質であると考えられる。申請者は、これまでスピン転移系 $R_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ (R : 希土類元素)において、スピン転移後のIS(Intermediate Spin)状態やHS(High Spin)状態がJahn-Teller歪みを起こすことに着目し、放射光を用いた精密結晶構造解析によりスピン転移に伴う歪みを観測した。しかし、このスピン転移についてはLS(Low Spin)状態からIS状態へのスピン転移か、HS状態へのスピン転移かについては明確な結論は得られていない。さらに、 R イオンが磁気モーメントを有する場合のスピン転移については様々な議論がされているものの、スピン転移の有無やスピン転移温度の R 依存性については決着していない。そこで、まず非磁性 La^{3+} を含む LaCoO_3 のスピン転移に関して、単結晶試料を用いることにより、LS \rightarrow IS、LS \rightarrow HSかを決着させる。さらに、 LaCoO_3 で観測されるスピン転移の R 依存性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 1次元系 Co 酸化物

試料合成においてまず、ボールミル装置を用いて原料粉を細かくかつ均一によく混合する。この混合物を用いて固相反応法により多結晶試料を合成し、この良質な粉末試料からフラックス法により単結晶を育成する。 $A_{n-2}\text{Co}_{n-1}\text{O}_{3n-3}$ の n を変化させた一連の系を合成することにより、系統的な研究が可能となる。これら一連の系は1次元構造を有しており、 c 軸方向の1次元鎖内にFM相互作用、 ab 面内に相当する1次元鎖間にAF相互作用が働いている。これらの2つの磁気相関の発達の様子を明らかにするために、単結晶試料を用いて、軸回転しながらNMR測定を行う。特に、NMR周波数スペクトルと核スピン-格子緩和率(T_1)の温度依存性を測定し、各温度での軌道の情報と磁気相関の発達の振る舞いを議論する。また、 $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ ($n=1$)では温度のみならず、磁場により磁性が変化することが報告されている。磁性の変化に伴うスピンドYNAMIXの影響を調べるために、 n を系統的に変えた試料を用いて様々な磁場中でNMR周波数スペクトルと T_1 を測定する。本測定と我々が提案してきた相図と比べることで、この同族シリーズの様々な磁性の発現機構の解明とともにイジングスピン系の物理に貢献できる。

(2) 2次元層状 Co 酸化物

単結晶試料はフラックス法により育成する。多結晶試料は固相反応法で合成するが、この物質は酸素量を幅広く変化した組成領域で単相が得られる。酸素量の変化により、結晶構造を大きく変化させることなく岩塩

層、 CoO_2 層の電子状態を変えることが可能であり、これが磁性に反映されると予想される。そこで、窒素、酸素雰囲気中で熱処理あるいは急冷を行うことにより、酸素量を制御した一連の試料を用いた系統的な研究を行う。NMR測定は、X線回折などに比べ不純物に敏感であり、不純物のない良質な試料を合成するために、ボールミルや超硬ダイスを用いる工夫をする。酸素量は、ヨードメトリーを用いた酸化還元滴定実験により化学的に決定する。低温のフェリ磁性では、自発磁化により内部磁場がCo原子核位置にできるため、零磁場でもNMR信号を検知できる。これまでの我々の粉末試料を用いた零磁場NMR測定から、 $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ のフェリ秩序相では内部磁場の大きい反強磁性的な3つのスペクトルと、常磁性的なスペクトルと強磁性的な内部磁場を持つスペクトルが1つずつ観測された。局所構造との対応により、前者の3つは岩塩層に属するCoサイトに対応し、後者の2つは CoO_2 層のCoサイトに対応する可能性が考えられる。これを検証するために、これらのスペクトルに対応する磁気相互作用を調べる必要がある。これらの磁気相互作用を、結晶軸に対してある方向に外部磁場(H)を印加し、共鳴周波数(f)の H 依存性を測定することにより、磁気相互作用を明らかにするとともに内部磁場の大きさや方向を決める。さらに、 $H \approx 6$ T下で内部磁場の小さなシグナルのNMR周波数スペクトルの温度依存性を調べる。既に報告されている相図とNMR測定により得られるナイトシフトや線幅の温度依存性の比較を行い、各磁気サイトの微視的磁性を明らかにする。また、酸素欠損つまり、キャリア量の減少によりスピンドensity波(SDW)が強められると報告されている。酸素欠損を有する試料のNMR測定を行うことにより、SDWに起因するスペクトル強度が強められると予測され、詳細な解析によりSDWの発現機構を明らかにできると考えている。さらに、 CoO_2 層のCoの電子状態が反映されるNMRスペクトルから、高い熱電特性の発現機構についても言及する。

(3) 単純ペロブスカイト系Co酸化物

フローティングゾーン(FZ)法により、 $R = \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ の単結晶育成を行う。これまでの報告例から判断して、希土類サイトのイオン半径が小さくなるにつれ結晶が歪むことなどから、良質な単結晶の育成は困難であり、いくつかのドメインの入り込みや酸素欠損が生じることが予想される。これらの問題を克服するために、原料棒の作製時に徐冷や酸素雰囲気中で長時間熱処理を行うことに

より、予め結晶の歪みや酸素欠損を極力取り除く。さらに、単結晶育成時の雰囲気、圧力、育成速度を最適化することにより、ドメインの入り込みや酸素欠損を抑えることができると考えている。炉は順調に稼動しており雰囲気制御の準備も既に整っており、最大10気圧まで圧力制御が可能なFZ炉が準備できている。育成した試料は、ラウエ反射とX線回折により評価する。 $R\text{CoO}_3$ の一連の系は単純ペロブスカイト構造を有するため、他の低次元系Co酸化物と比べ、異方性が小さい。そのため、壁開性に乏しくホイールソーを用いて単結晶を切り出す予定である。 $R\text{CoO}_3$ (R :希土類元素)のスピントランスについて、主に ^{59}Co 核種のNMRスペクトルの温度依存性から評価したナイトシフトから議論する。 $R\text{CoO}_3$ では一般的に帯磁率や輸送特性の温度依存性によりLS状態からIS状態へのスピントランス温度が R のイオン半径の減少とともに増加すると報告されているが、NMR測定では $R = \text{La}$ 以外の系でスピントランスに伴うナイトシフトの明瞭な変化は報告されていなかった。Coの電子状態を直接観測できる ^{59}Co NMR測定により、 $R = \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ で LaCoO_3 のようなスピントランスが観測されないのは、他の測定結果と整合しない。そのため、スピントランスと主張されている温度で何が起きているかを明らかにする必要がある。特に、NMRスペクトルの非対称パラメータ η 、四重極周波数 ν_Q の温度依存性を詳細に調べる。また、単結晶を用いて、ナイトシフトの異方性、 η 、 ν_Q をさらに精密に決定する。LS状態からIS状態へのスピントランスと軌道秩序との相関が指摘されているため、 LaCoO_3 のスピントランスについてNMR測定を行うことにより、軌道秩序の観点からスピントランスの本質に迫る。これを他の $R\text{CoO}_3$ に拡張することにより、スピントランスと軌道秩序について普遍性のある議論が展開できるものと期待している。

4. 研究成果

(1) 1次元系Co酸化物

ボールミル装置を用いて原料粉を細かくかつ均一によく混合した混合物を用いて固相反応法により多結晶試料を合成し、この良質な粉末試料からフラックス法により単結晶の育成に成功した。まず $n = 1$ の $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ の ^{59}Co 核種のNMR測定を行った。1次元の結晶構造を反映して動的・静的スピントランスも異方的であった。1次元鎖内のFM相関が300 K付近で既に発達し始め、鎖間のAF相関が120 K付近で発達することがわかった。また、角度回転NMRにより低温のフェリ磁性に関する詳細な知見が得られた。さらに n が増加し

た試料では、スピン量子数の増加に伴う緩和時間の減少により、NMR 信号を検知することができなかった。一方、熱電特性に関しては、これまで、ナノ構造化による性能の向上に関する理論的な提案がなされているが、酸化物において、フィルムを除くナノ結晶性形状での研究はほとんど行われていない。今回、ボールミルを施すことにより、粒径の激的な減少が X 線回折スペクトルの半値幅の増大に反映されていることがわかった。また、SEM 測定により、ナノサイズの結晶の存在を確認した。興味深いことに、 $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ ($n = 1$) の電気抵抗率 (ρ) は粒径とともに減少した。熱電能 (S) は、ナノ粒子化にともない、正の大きな値から比較的大きな負の値に変化した。熱伝導率 (κ) はフォノン散乱の増加により減少した。一方、 $\text{Sr}_6\text{Co}_5\text{O}_{15}$ ($n = 4$) の ρ , S は粒径の減少とともに増加し、 κ は予測通り減少した。 $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ と $\text{Sr}_6\text{Co}_5\text{O}_{15}$ のコバルト形式価数はそれぞれ 3 価と 3.6 価であり、ボールミルによる酸素欠損の導入による形式価数および粒径の減少により S , ρ , κ の粒径依存性が理解できた。本研究により、①ナノ粒子化による熱伝導率の減少、②粒径と酸素量の同時制御による電気伝導の改善と熱伝導率の減少、さらに③ $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ における比較的大きな負の熱電能を見出した。

(2) 2次元層状 Co 酸化物

$\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ では、フェリ磁性である 4.2 K において、零磁場で 5 つの NMR スペクトル (S1-S5) が観測された。共鳴周波数の磁場依存性から、高周波数側の 3 つのスペクトル (S3-S5) が FM 的な内部磁場を有するのに対して、低周波数側の 2 つのスペクトル (S1, S2) は常磁性的なスペクトルと AF 的なスペクトルであることがわかった。各層の価数分布やミスフィットによる格子変調を考慮すると、前者が岩塩層、後者が CoO_2 層中の Co からの寄与であると考えられる。 CoO_2 層には結晶学的には等価な 1 つの Co サイトであるにもかかわらず、遍歴電子と局在電子の 2 種類が存在することを意味し、遍歴電子が低温の熱電能に、局在電子が高温の熱電能に起因するものと結論付けた。また、低周波数側の 2 つのスペクトル (S1, S2) の磁場中での温度依存性は、 $\mu^+\text{SR}$ 測定などから提案されている相図と良い一致を示し、SDW が CoO_2 層の酸素量に依存し、FM と共存していることがわかった。

(3) 単純ペロブスカイト系 Co 酸化物

FZ 法により、 $R = \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ の単結晶育成を行った。希土類サイトのイオン半径が小さくなるにつれ結晶が歪むことなどから良質な単結晶の育成は困難であり、いつくかのドメインの入り込みや酸素欠損が生じた。これらの問題を克服するために、原料棒の作製時に徐冷や酸素雰囲気中で長時間熱

処理を行うことにより、予め結晶の歪みや酸素欠損を極力取り除く工夫、さらに、単結晶育成時の雰囲気、圧力、育成速度を最適化することに時間を要し、現時点で LaCoO_3 , PrCoO_3 の単結晶試料を得た。そのため、NMR 測定は現在進行中だが、以下の知見が得られた。結晶軸の 3 軸の回りで NMR スペクトルの温度依存性を測定した結果、電気四重極テンソルが CoO_6 八面体の歪による結晶場で大まかに決定されることがわかった。ナイトシフトテンソルは LS 状態では等方的であったが、温度の増加、すなわち LS 状態からスピン状態が変化するにつれて異方的になった。

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 8 件)

- ① “Effects of structural disorder and charge carriers on the magnetic and transport properties of $\text{Sr}_{0.7}\text{R}_{0.3}\text{CoO}_{3-\delta}$ ($R = \text{Y}$ or $\text{Dy}_{0.45}\text{Er}_{0.55}$)”
T. Takami and J.-G. Cheng
Jpn. J. Appl. Phys. **50**, 013002-1~5 (2011) [査読有].
- ② “Magnetic and transport properties of $\text{Ba}_2\text{Co}_9\text{O}_{14}$ and $\text{Ba}_{1.9}\text{A}_{0.1}\text{Co}_9\text{O}_{14}$ ($A = \text{La}$ or Na)”
T. Takami, S. Saiki, J.-G. Cheng, and J. B. Goodenough
J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 114713-1~5 (2010) [査読有].
- ③ “Valences and spin states of Ni and Pt ions in the quasi-one-dimensional compounds $(\text{Sr},\text{A})_3\text{NiPtO}_6$ ($A = \text{La}$ and Na)”
T. Takami, H. Igarashi, and M. Itoh
J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 044715-1~5 (2010) [査読有].
- ④ “Controlling independently the electric and thermal properties by shrinking the particle size down to nanosize in quasi-one-dimensional $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ and $\text{Sr}_6\text{Co}_5\text{O}_{15}$ ”
T. Takami, M. Horibe, M. Itoh, and J.-G. Cheng
Phys. Rev. B **82**, 085110-1~6 (2010) [査読有].
- ⑤ “Anisotropic spin dynamics in the frustrated chain $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ detected by single-crystal ^{59}Co NMR”
Y. Shimizu, M. Horibe, H. Nanba, **T. Takami**, and M. Itoh
Phys. Rev. B **82**, 094430-1~8 (2010) [査読有].
- ⑥ “Low-energy excitations proved by ^{51}V NMR in the multiferroic $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$ ”
T. Esaki, Y. Shimizu, **T. Takami**, M. Itoh, Z. He, and Y. Ueda

- J. Phys.: Conference Series **200**, 012070-1~4 (2010) [査読有].
- ⑦ “Phase separation in the CoO₂ layer observed in thermoelectric layered cobalt dioxides”
T. Takami, H. Nanba, Y. Umeshima, M. Itoh, H. Nozaki, H. Itahara, and J. Sugiyama
Phys. Rev. B **81**, 014401-1~12 (2010) [査読有].
- ⑧ “⁵⁹Co NMR study on local magnetic properties of Ca_{1-x}Na_xCo₂O₄”
T. Takami, M. Itoh, M. Isobe, M. Arai, T. Kawashima, and E. Takayama-Muromachi
J. Phys.: Conference Series **200**, 012197-1~4 (2010) [査読有].

[学会発表] (計 12 件)

- ① 2011 年 3 月 25 日-28 日 日本物理学会
新潟大学 五十嵐キャンパス[25aED-6]
Ba₂Co₉O₁₄ および Ba_{1.9}A_{0.1}Co₉O₁₄ (A = La or Na)の磁性と輸送特性
高見剛, 齊木俊介, Jinguang Cheng, John B. Goodenough
- ② 2011 年 3 月 25 日-28 日 日本物理学会
新潟大学 五十嵐キャンパス[25pTJ-6]
ゼオライト LSX 中の配列した Na クラスターの絶縁体金属転移
尼子裕作, 川野涼子, **高見剛**, 中野岳仁, 野末泰夫
- ③ 2011 年 1 月 6 日-8 日 特定領域研究「配列ナノ空間を利用した新物質科学 ユビキタス元素戦略」第 7 回領域会議 大阪大学 豊中キャンパス [P-3]
ゼオライト中のアルカリ金属クラスターにおける絶縁体・金属転移と電子格子相互作用
尼子裕作, 川野涼子, 久保洋輔, 土橋和成, **高見剛**, 中野岳仁, 野末泰夫
- ④ 2010 年 12 月 17 日-18 日 第 5 回 KEK 連携研究会
「熱電変換材料と新規機能材料」招待講演
筑波大学 筑波キャンパス
1-3 次元構造を有する様々なコバルト酸化物の大きな熱電能の発現機構
高見剛
- ⑤ 2010 年 11 月 14 日-18 日 3rd International Congress on Ceramics (ICC3)
[S9C-009] Oral
Grand Cube Osaka, Japan
Local Magnetic Properties in the CoO₂ Layer in Layered Thermoelectric Cobalt Dioxides
T. Takami, M. Itoh, H. Nozaki, H. Itahara, and J. Sugiyama
- ⑥ 2010 年 11 月 14 日-18 日 3rd International Congress on Ceramics (ICC3) [S9C-P023]
Grand Cube Osaka, Japan

- Controlling Independently the Electric and Thermal Properties by Shrinking the Particle Size down to Nanosize
T. Takami, M. Horibe, M. Itoh, J.-G. Cheng, J.-S. Zhou, and J. B. Goodenough
- ⑦ 2010 年 9 月 23 日-26 日 日本物理学会
大阪府立大学 中百舌鳥キャンパス [24aPS-20]
擬一次元系 Ba₃Co₂O₆(CO₃)_{0.7} の輸送特性
五十嵐広和, 里見恵梨佳, 清水康弘, 小林義明, **高見剛**, 伊藤正行
- ⑧ 2010 年 9 月 23 日-26 日 日本物理学会
大阪府立大学 中百舌鳥キャンパス [23aRL-6]
カリウムを吸蔵させたゼオライト A の電気伝導度特性
久保洋輔, Nguyen Hoang Nam, **高見剛**, 荒木新吾, 中野岳仁, 野末泰夫
- ⑨ 2010 年 9 月 14 日-17 日 応用物理学会
長崎大学 文教キャンパス[15p-P7-3]
ナノ粒子化による電気・熱特性の独立制御
高見剛, 堀部宗尚, J.-G. Cheng, J.-S. Zhou, J. B. Goodenough
- ⑩ 2010 年 8 月 19 日-20 日 第 7 回日本熱電学会学術講演会 東京大学弥生講堂 [S7-2]
1 次元コバルト酸化物のナノ粒子化による電気・熱特性の独立制御
高見剛, 堀部宗尚, J.-G. Cheng, J.-S. Zhou, J. B. Goodenough
- ⑪ 2010 年 5 月 28 日-30 日 特定領域研究「配列ナノ空間を利用した新物質科学 ユビキタス元素戦略」第 6 回領域会議 名古屋栄東急イン&名古屋大学 [P2 A01]
コバルト酸化物熱電体の熱電能と電子の内部自由度の関係
高見剛
- ⑫ 2010 年 4 月 20 日-25 日 International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2010) [S-I008]
Invited Talk
Antalya, Turkey
Study of the onset of superconductivity in underdoped La_{2-x}Sr_xCuO₄
T. Takami, J.-S. Zhou, J.-G. Cheng, J. B. Goodenough, K. Matsubayashi, and Y. Uwatoko

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高見 剛 (TAKAMI TSUYOSHI)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：40402549

(2) 研究分担者 ()

研究者番号：

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：