

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：52301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01933

研究課題名(和文) STMによる4fスピン検出法の確立と単一ランタノイド原子分子の磁気的性質の解明

研究課題名(英文) Exploration of 4f spin signals by STM and magnetic properties of Lanthanoid atoms and molecules by STM

研究代表者

塚原 規志 (Tsukahara, Noriyuki)

群馬工業高等専門学校・電子メディア工学科・助教

研究者番号：80535378

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ランタノイド原子分子の持つ4f電子由来のスピンをSTMで検出する方法を確立することを目的として研究を遂行した。超伝導を示すNbSe₂基板を用い、吸着分子としてダブルデッカー Tbフタロシアニン(TbPc₂)分子などを用いた。その結果、TbPc₂分子がNbSe₂基板上で解離、Tb原子に直接探針からトンネル電流を注入することでスピン励起シグナル及びYSR状態の検出に成功した。またこれらの結果を比較検討するにあたり、フタロシアニンで基板を覆い、その上に吸着した磁性原子分子がスピン励起を示すかどうか、またfに対してd電子が示すYSR状態を観測する研究も遂行した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ランタノイド元素は、d電子系と比較すると大きい磁気モーメント、及び結晶場による磁気異方性の予測が容易であることが特徴であり、磁性物質への応用という観点から重要な物質である。近年用いられているSmCo磁石やNd磁石などはその代表例であるが、重要なのはその結晶内での磁気的性質がどうなっているかである。また有機ランタノイド分子であるTb、DyPc₂分子は単分子磁石としての性質を示すことで着目されている。

これらの磁気的性質を単一分子レベルで検出、明らかにする方法はこれまで確立されていなかったが、本研究ではそれをクリアした一例となり、今後のSTMを用いた磁性研究への道が開けたと言える。

研究成果の概要(英文)：In this study, the detection of 4f-spin signals by STM was confirmed. Mainly, double-decker Tb phthalocyanine (TbPc₂) molecules are focused and adsorbed on superconducting the NbSe₂ surface. As a result, not only TbPc₂ molecules but dissociated species are found, and they clearly show spin signals. TbPc₂ molecules and one of the dissociated species shows YSR states, and another dissociated species shows spin-excitation signals.

To unveil the above results, we carried out experiments and DFT calculation for Mn phthalocyanine molecules which has d-spin on the superconducting two dimensional In layer on Si(111). As a result, YSR state could be observed. In addition, superconductivity of In layer are quenched by adsorption when covering the surface with about 7% of the In surface.

研究分野：表面科学

キーワード：走査トンネル顕微鏡 分子磁性 超伝導

1. 研究開始当初の背景

近年、走査トンネル顕微鏡による固体表面の計測技術が進歩し、超伝導や磁性に関する情報を抽出することが可能になっている。特に吸着分子に関して、磁性分子のスピンや磁気異方性といった情報を、STM を用いたスペクトル測定、STS や非弾性トンネル分光、STM-IETS を用いて得ることができる。しかし、d 電子系の原子分子であれば概ねこれらの手法で問題ないが、ランタノイドの 4f スピンに関しては STM を用いたスピンの検出は決して容易ではない。その理由は、4f 軌道が内殻に局在しており、STM においてトンネル電流が 4f 軌道を経由しないことが原因である。STM にてランタノイド原子分子の 4f スピンを検出する方法として考えられるのは、4f スピンによって変調された基板の電子状態を観測することである。そしてその方法として最も有力なのは、基板に超伝導体を採用することである。バルク超伝導体でも、磁性を持つランタノイド元素を混ぜることで超伝導が破壊される現象は数多く報告されている上、STM でも Gd 原子を Nb 基板に吸着させ、超伝導ギャップ中に現れる YSR 状態の観測を通して行った例が報告されている。

特に近年、一部の研究グループが Pb や NbSe₂ を基板として磁性原子分子によって生じる YSR 状態の観測が報告されるようになったため、計測手法として報告例が既に存在するため、4f 系に対しても d 電子系と同様に YSR 状態の検出が可能であると期待される。また実際の磁性材料としての応用では、単純なランタノイド原子よりも、Dy や Tb 原子からなるダブルデッカー-Dy、Tb フタロシアニン(DyPc₂、TbPc₂)分子は単分子磁石として振る舞うなど、4f 由来のスピンのみならず、磁気異方性における配位子の役割が重要となる。よって今回、TbPc₂ 分子に特に着目し、その 4f スピンを超伝導の変調を介して検出できないか、という問題を解決すべく本研究を開始した。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究では超伝導基板-ランタノイド原子分子という吸着系に着目し、主に走査トンネル顕微鏡(STM)による実験と密度汎関数理論(DFT)計算を組み合わせることで進めていく。特に着目する超伝導基板は、2H-NbSe₂、及び Si(111)表面上の In、Pb 薄膜といった、電子格子相互作用が起源となる超伝導体とする。

最初のターゲットは、分子中心に Tb 原子を持ち、2つのフタロシアニン配位子でサンドイッチされた構造を持つダブルデッカー-Tb フタロシアニン(TbPc₂)分子である。この分子は Tb 4f 由来の磁気モーメント $J = 6$ を持つことに加え、リガンドに $S = 1/2$ を持つ。これを NbSe₂ 表面に吸着させ、リガンド、あるいは 4f スピン由来の YSR 状態の検出を行う。吸着構造を検証した後、STS 測定を行って YSR 状態の検出を行う。そして STM から得られた吸着構造から DFT 計算にて詳細な構造及び基板まで含めた磁気的性質の計算を行っていく(この目的に対する研究成果は 4-1 に示した)。また TbPc₂ 分子における 4f スピン検出を検証する上で、2次元超伝導薄膜の表面、及び d 電子系磁性分子での YSR 状態の検出が必要となった。今回用いた NbSe₂ は多層の単結晶を用いたものの、超伝導の一部性質は 2次元的な振る舞いを示すため、2次元超伝導が吸着分子の磁性によってどのような影響を受けるかを、Mn フタロシアニン(MnPc)分子を超伝導 In 原子層薄膜に吸着させた系での STM 実験及び DFT 計算を通して検証した。こちらは以前より実験は遂行していたが、2次元超伝導基板上での磁性分子の振る舞いが 3次元的な超伝導体の表面での振る舞いとどう異なるかを明らかにすることを目的として、今回改めて DFT 計算を組み合わせることで実験・解析を進める(この目的に対する成果は 4-2 に示した)。また当初の研究目的の一つであったランタノイド原子吸着系であるが、液体 He で冷却した基板に原子を吸着させなければ原子同士が凝集してしまう。これを解決する方法として、当初計画していたランタノイド原子と有機分子の共吸着系で得られる有機金属構造体薄膜を表面で作製することでこの問題は解決できる。本研究の後半では、1,3,5-トリプロモベンゼン(TBB)及び 1,3,5-トリス(4-プロモフェニル)ベンゼン(TBpyB)分子を前駆体とする有機金属構造体の作製条件最適化を行った。特に有機金属構造体におけるスピン状態に加え、ランタノイド原子間の磁気的な結合や、あるいは(本研究目的とはやや異なる観点であるが)、ランタノイド系元素は質量が大きいためスピン軌道相互作用が強く現れることから、トポロジカルに非自明な有機金属構造体薄膜も期待できる。これらの検証を STM 及び DFT 計算を通して行う(これは現在も実験を進行中であるが、現状までの成果を 4-3 に示した)。

最後に、フタロシアニン配位子が基板に吸着すると、その上に吸着した磁性原子分子に対して基板との相互作用を低減させるという考察を 4-1 節にて行っている。それに対し、本研究の本題とは外れてしまう内容ではあるが、以前より進めていた Ag 基板に吸着した Fe フタロシアニン(FePc)分子の吸着系に対しても STM と DFT 計算を組み合わせる研究を遂行する(この目的に対する成果は 4-4 に示した)。

3. 研究の方法

上記の目的遂行のため、本研究では、研究拠点として東北大学多元物質科学研究所、群馬工業高等専門学校、及び東京大学物性研究所にて STM 実験を進めた。低温 STM 実験は東北大学多元物質科学研究所にて、DFT 計算は群馬工業高等専門学校にて、有機金属構造体及びナノポーラス有機薄膜の作製は東京大学物性研究所にて遂行した。

まず、走査トンネル顕微鏡を用いた NbSe₂ などの超伝導基板上へ展開されたランタノイドを含む吸着分子を観測、その磁氣的性質を超伝導ギャップの変調から検出するという方法は、当時の申請で提案した通りの方法で実験を実行した。NbSe₂ は約 7 K の転移温度を持つ超伝導体で、STS にて超伝導ギャップが明瞭に観測できる。当初の計画で述べたが、ギャップ領域に分子スピン由来の YSR 状態がピークとして観測することができるので、このピーク位置からどの程度のエネルギースケールで基板のクーパー対に影響を与えるかを検証できる。Si(111)表面上の In 薄膜に関しては、Si(111)表面に In を蒸着させることで容易に原子層薄膜が得られる。ここに TbPc₂ 分子や MnPc 分子を蒸着し、STM/STS 測定を行っていく。また研究の目的にて述べたが、2 年目で計画していたランタノイド原子を基板上で観測する計画であるが、孤立原子を安定に表面上に存在させるため、今回は有機金属構造体薄膜によってランタノイド原子の凝集を防ぐ方法の確立を行う。今回は八ニカム、あるいは三角格子の構造体薄膜を想定し、1,3,5-トリプロモベンゼン(TBB)及び 1,3,5-トリス(4-プロモフェニル)ベンゼン(TBpyB)分子を用いた。現状、TBB または TBpyB 分子を Si(111)表面上の Ag, Cu 薄膜に蒸着することで、Ag 及び Cu 原子と上記分子の間で構成される有機金属構造体を得られたところまで進んでいる。

さらに、今回得られた全ての実験結果を検証するため、固体や固体表面などで最もよく採用され信頼性も高い VASP パッケージ及び DFT 計算環境を導入し、研究成果に示した吸着系に関し、吸着分子の吸着構造とスピン状態の計算を行った。特に、構造緩和計算により吸着分子の STM 像と合うような分子の吸着構造を決定し、その後状態密度や STM 像のシミュレートを行い、さらに吸着分子スピンの計算を行った。

4. 研究成果

4-1. 低温 STM による、超伝導 NbSe₂ 基板上、及び Si(111) 上の超伝導 Pb 薄膜上に吸着した TbPc₂ 分子の吸着状態、及びスピン状態の解明

研究の目的でも述べたが、TbPc₂ 分子は中心に J = 6 を持つ Tb 原子がフタロシアニン配位子 2 つで挟まれた構造になっており、フタロシアニン全体に広がる軌道がラジカルスピン S = 1/2 を有する。

この分子を NbSe₂ 表面に吸着させると、高さ約 0.4 nm, 0.2 nm の吸着分子が観測され、それぞれ TbPc₂ 分子は高さ約 0.4 nm, 解離した TbPc または Pc 分子と帰属した。Au(111)表面の場合、ほぼ全ての分子が表面上で凝集、正方格子を形成しており、孤立分子はほぼ全て解離した分子である。一方 NbSe₂ 表面では、Au で見られたような凝集した分子は観測されず、ほぼ全ての分子が孤立した状態で吸着している。また Au(111) と比べると頻度は低いものの、解離した吸着種も観測することができた。これより、TbPc₂ 分子は NbSe₂ 基板上において分子が感じるポテンシャルの起伏が Au と比べて大きく、より孤立した状態で存在しやすいためと考えられる。また NbSe₂ 表面上で解離吸着種も確認できることから、Au と比べても同等の吸着エネルギーを持つことが予想される。NbSe₂ 表面での Fermi 電子は主に Se p_z 電子 (z は表面垂直方向) 由来であるが、その下の層には Nb の d 軌道が存在する。ポテンシャルの起伏が Au と比べて大きいことは、NbSe₂ の結晶構造を考慮すれば妥当である。また解離吸着種は概ね Au の方が頻りに観測されるが、Au の価電子が主に 6s, Se の価電子が主に 4p であることを考慮すれば、Au の方がより波動関数が広がっており、こちらも妥当であると言える。NbSe₂ 表面を STM で観測すると、測定条件にもよるが主に Se の p_z 軌道に由来する corrugation を観測することができ、最表面の Se 原子位置を容易に決めることが可能である。これより、TbPc₂ 分子の吸着構造の決定を行った。Se 由来の corrugation とすれば、TbPc₂ 分子はその配位子を corrugation に沿った方向となり、中心は 2 つの Se の間、ブリッジサイトに吸着していることがわかった。現在この吸着構造にて DFT 計算を進めているが、NbSe₂ 基板も含めスピン状態がかなり異様な計算結果になってしまい、計算条件を詳細に調整しながら進めているところである。

次に TbPc₂ 分子、及び表面で解離した分子に対して STS 測定を行った。吸着分子の STM 像を注意深く観測すると、解離した分子を含め、STM 像で 3 種類に分類することができることがわかった (スペクトル的に分類すると 4 種類になってしまう)。これらに関しては解離、及び Tb 原子の位置の違いで 3 つのモデルを想定している。解離した Pc 分子、TbPc 分子において Tb 原子が真空方向を向くもの、そして Tb 原子が基板と Pc 配位子の間にあるもの、である。吸着種ごとに異なるスペクトルを示し、解離種の一つはスピン励起、もう一つの解離種及び TbPc₂ 分子は YSR 状態を明瞭に観測することに成功した。

以上が得られた結果で、超伝導表面での分子の解離を利用することで、当初の目的であった YSR 状態の観測を利用した 4f スピン検出に成功した。本研究ではそれに加え、4f 由来のスピン励起、p 電子スピンによる YSR 状態の観測という、これまでにない系のスピン検出まで副産物として得ることに成功した。これらに関して現在 DFT 計算でその吸着構造を検証している段階であり、まとめ次第速やかに論文にて報告する予定である。

4-2. STM 及び DFT 計算による Si(111)上の超伝導 In 原子層薄膜へ吸着した MnPc 分子の吸着状態、及びスピン状態の解明

MnPc 分子はバルクで $S = 3/2$ を持つ分子であり、金属フタロシアニンの中では比較的大きい磁気モーメントを持つ。MnPc 分子を Si(111)表面上に展開した In 原子層へ吸着した MnPc 分子の吸着によって超伝導がどのように変調を受けるかを検証した。

Si(111)表面上に展開した In 原子層薄膜に MnPc 分子を吸着させて得られた STM 像に対し、過去に示された (7×3)-rect 構造にて DFT 計算を行った。LDOS が大きい位置はちょうど In 最表面原子の位置であり、注意深く STM 像と LDOS マップの対応関係を検証したところ、MnPc 分子は孤立でも凝集していても on-top サイトに吸着していることも明らかになった。この表面に MnPc 分子を吸着させると、分子吸着量に応じてギャップ幅が減少する様子が観測された。これは MnPc 分子がスピンを持ち、磁性不純物として働くためである。超伝導が消失するのに必要な吸着量は約 0.0035 ML で、表面の約 7%程度が分子で覆われた時、超伝導は消失してしまう。これは、In のコヒーレンス長が約 50 nm と長いことに加え、原子層薄膜、つまり 2 次元超伝導であるため、磁性不純物の影響がより遠くまで伝播するため、わずかな量の磁性不純物であっても超伝導は容易に破壊されてしまうことによる。吸着 MnPc 分子の中心での STS スペクトルには、試料電圧 0 を中心としてほぼ対称的な形状であるのに対し、分子中心では明らかに非対称になっている。超伝導ギャップの非対称性は時間反転対称性の破れに伴って生じるため、これは MnPc 分子のスピンが影響していることに由来する。YSR 状態はギャップ幅 Δ に対し約 0.7Δ に位置する。

MnPc 分子の吸着量を上げ、超伝導が消失した状態において MnPc 分子アイランド中の分子中心で測定したすると、近藤共鳴が観測された。つまり In 薄膜は MnPc 分子スピンによって超伝導が破壊され metallic な状態となる。DFT 計算の結果、In 薄膜は 2 次元的な自由電子状態が最表面に存在し、これが MnPc 分子スピンを近藤遮蔽している。またアイランドの端から中央に行くに従い、近藤共鳴が分裂する。これは周囲の分子との RKKY 相互作用によって生じる。また MnPc 分子の全スピンは In 薄膜上で $S = 3/2$ となることが過去の研究で示されており、d 軌道の中でどの電子スピンが近藤共鳴を示すのかに関しては、今後 DFT 計算によって詳細に検証していく予定である。

4-3. 金属表面を触媒とした、ナノサイズの孔を持つ有機金属薄膜の創成

ランタノイド元素を孤立した状態で表面に吸着させるため、TBB 分子及び TBpyB 分子を用い、表面でのウルマン反応を利用した有機金属構造体及び有機ナノポーラス薄膜の作製を試みた。基板には Si(111)表面上の Pb 薄膜、また作製条件を最適化させるにあたり、ウルマン反応が確実に生じる Ag と Cu 薄膜でも実験を行った。ちなみに Si(111)表面に Cu を展開すると、Si と Cu の化合物である Cu_2Si 薄膜となる。この物質は Dirac nodal line を示すため、トポロジカルな性質として近年着目を集めている他、(実験では観測されていないが)理論的に超伝導になりうるということが予言されているなど興味深い性質を有するため、あえて基板として採用した。

まず TBB 分子であるが、Pb 及び Ag 薄膜ではウルマン反応が生じるのに熱を加える必要があるため、基板温度を上げたところ、反応が生じず分子は脱離してしまった。一方 Cu 薄膜では、円型の(中央にくぼみのある)輝点が観測された。基板では特徴的な周期構造 (5.55×5.55) が観測されるが、これは Cu_2Si ドメインが周期的に配列することで生じる構造である。ここに TBB 分子を吸着させた時、特に興味深いのは、 Cu_2Si 超周期構造の単位格子内に閉じ込められるように輝点が観測された点である。TBB 分子のサイズを考えればこの輝点は単分子とは考えにくい。また一部の輝点は欠けを持つ。これより、有機構造体または Cu 原子を介した有機金属構造体になっていると考えられる。どちらになっているかは現時点では決定できておらず、今後 STS 測定と DFT 計算を行って決定していく予定である。

次に TBpyB 分子に関して、室温の Si(111) (3×3)-Ag 表面に吸着させた。STM 像では三方向に伸びる構造が周期的に配列する。この構造は TBpyB 分子の構造を反映したものである。測定時の温度は室温であるが、明瞭に分子を観測することに成功した。この基板を 250 ~ 300

に加熱したところ、STM 像における吸着分子の形状が大きく変化する様子が観測された。詳しく得られた構造を見てみると、特に明るく見える輝点の背後に孔の空いた薄膜が見られる。これまで TBpyB 分子を金属表面で有機薄膜化した研究例は複数存在するが、それらと比べても異なる構造である。これに関して LDOS マップを計算すると、概ね STM 像と近い LDOS となっている。STM で観測された輝点は Ag 原子に由来すると考えられるが、今後 Ag 基板を含めた計算も行っていく予定である。

TBB および TBpyB 分子を用いた研究は今後も進めていく予定であるが、特に TBpyB 分子は Si(111)表面上の Ag 薄膜において、これまでにみられない三角格子を示す結果となった。ウルマン反応によって得られる有機薄膜は、基板表面の構造によってその安定な構造が決まるのは当然と言えるが、どのような条件で三角格子になるかハニカム格子になるか、に関して特に着目していく。ランタノイド元素との共吸着によって、ランタノイド原子を介した有機金属構造体に関してハニカムと三角格子を作り分けることができれば、その磁氣的性質やトポロジカルな性質など興味深い性質を見出すことが期待される。

4-4. STM 及び DFT 計算による NbSe₂ 基板, Ag(110) 基板上に吸着した FePc 分子の吸着状態、及びスピン状態の解明

FePc 分子はバルクで分子スピン $S = 1$ 、分子面内方向に磁気異方性を持つ磁性分子である。この分子を Ag(110) 表面に吸着させ FePc 分子層(以降、1 層目とする)を形成、さらにそこに FePc 分子を吸着させたところ、1 層目の上に FePc 分子(以降、2 層目とする)が明瞭に観測され、その特徴的なスピン状態を低温 STM にて検出することに成功した。また DFT 計算にて STM 実験で得られた吸着構造及びスピン状態の計算を行った。

DFT 計算によれば、FePc 分子は Ag(110) 表面に吸着することで Fe 原子は Ag 方向に、フタロシアン配位子は真空方向に歪む。しかし配位子を構成する 4 つのイソインドールの歪み方に、基板の対称性の伴った差が生じている。つまり、1 層目 FePc 分子はその対称性が 4 回から 2 回に低下している。一見 STM 像では 1 層目 FePc 分子層は 4 回対称性を有しているように観測されるものの、実際は分子が歪み、2 回対称性に低下していることが明らかになった。2 層目 FePc 分子が 1 次元的なワイヤを形成するのは、この 1 層目 FePc 分子が基板の対称性を反映して歪み、それが 2 層目 FePc 分子に与えるポテンシャルの対称性にまで反映されているためである。1, 2 層目 FePc 分子の中心で測定した STS スペクトル及び 7 T の磁場を印加した際のスペクトルに関して、1 層目ではスピン励起や近藤共鳴などのスピンに関するシグナルは全く生じない。一方、2 層目分子では非弾性トンネル過程に特徴的な階段構造が観測された。3 つのうち 2 つの階段構造のステップ位置は外部磁場によって変化し、変化量は印加磁場方向に依存する。これより、2 つの非弾性トンネル信号はスピン励起であり、分子面内の特定方向に磁化容易軸があることがわかる。これらに関し、DFT 計算(DFT+U)にてスピン状態を計算、実験との比較を行った。まず 1 層目 FePc 分子は d 軌道にスピン偏極は生じず、全スピン $S = 0$ となり、STS スペクトルと整合する結果である(vdW 補正を入れない LDA+U 計算でも同様)。一方 2 層目 FePc 分子に関しては現状 LDA+U でのみ計算が完了しているが、Fe の磁気モーメントは約 $1.8\mu_B$ で、 dz^2 及び dxz/dyz 軌道にスピンが残り、 $S = 1$ となる。この結果は STS スペクトルにおける 2 つの非弾性トンネルによるステップ位置が変化したことと良い一致を示す。しかし、2 層目 FePc 分子が存在する時、1 層目 FePc 分子は約 $1.5\mu_B$ が生じる結果となった。実験では単純な $S = 1$ スピンに伴うスペクトルとなっており、この点で実験と計算の間に差が生じている。これは、2 層目に対する計算では vdW 補正を入れていないため、1, 2 層目 FePc 分子間距離が実際よりも小さく評価され、Fe 原子間の結合が大きくなり、1 層目 FePc 分子の Fe 原子は Ag 基板から離れてしまったと考えられる。今後、vdW 補正を入れた計算を行い、2 層目 FePc 分子がどの程度 1 層目から離れた位置にあるのかを検証した上で計算を進める予定である。

STM 実験から、スピン励起スペクトルの磁場に対する変化が磁場の印加方向に依存する。磁場が主軸に一致すると大きなシフトを生じ、FePc 分子はこの方向に磁化容易軸を持つ。この結果に対し、南谷らが考案したスピン軌道相互作用による磁気異方性を検証したモデルに基づいて解析した。FePc 分子の電子配置は 3E_g の基底状態に加え、スピン軌道相互作用によって第一励起状態である $^3B_{2g}$ 配置が混成した状態になり、この混成の大きさが磁気異方性が決まる。このモデルは 3E_g と $^3B_{2g}$ の混成と配位子場分裂の大きさ、及び歪みをパラメーターとして磁気異方性エネルギーを記述する。その結果、Cu(110) (2x1)-0 及び Au(111) 表面上の FePc 分子における磁気異方性と比べると、2 層目 FePc 分子はバルク状態に近いパラメーターを持ち、バルク状態に対して歪みを考慮することで磁気異方性が説明でき、STS スペクトルのステップ位置の磁場依存性も再現できることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔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 塚原規志、米田忠弘
2. 発表標題 2H-NbSe ₂ 表面上のTbフタロシアニン分子の吸着状態
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018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
研究分担者	米田 忠弘 (Komeda Tadahiro) (30312234)	東北大学・多元物質科学研究所・教授 (11301)	

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
---------	---------