

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2013

課題番号：21225001

研究課題名(和文)プローブ顕微鏡を用いた単分子スペクトロスコピー

研究課題名(英文)Single Molecule Spectroscopy using Probe Microscope

研究代表者

川合 真紀(Kawai, Maki)

東京大学・新領域創成科学研究科・特任教授

研究者番号：70177640

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 159,000,000円、(間接経費) 47,700,000円

研究成果の概要(和文)：走査トンネル顕微鏡は、原子分解能で固体表面の構造を観察する顕微鏡としてだけでなく、その探針から打出されるトンネル電子が、高い空間選択性とエネルギー分解能を有することから物質変換に有用な電子照射源としても利用できる。本研究では、探針から打出されるトンネル電子によって引き起こされる単分子の反応を解析するアクションスペクトロスコピーについて、高度にデザインされた実験と理論解析により、その基礎概念を確立した。

研究成果の概要(英文)：Scanning Tunneling Microscopy (STM) is not only a microscope to observe surface structure in atomic scale but also a point source of electrons of both high spatial and energy resolutions. Action spectroscopy with STM (STM-AS) is to analyze the reactions of a single molecule excited by electrons emitted from a sharp STM tip. We have successfully established the mechanism on inelastic excitation processes by tunneling electrons and the subsequent dynamics of a single molecule by using well-designed experiments and theoretical model calculations.

研究分野：化学

科研費の分科・細目：基礎化学・物理化学

キーワード：表面・界面 単分子操作 走査プローブ 分子分光

## 1. 研究開始当初の背景

発明当初(1981年)から、走査トンネル顕微鏡(STM)は、原子分解能を有する顕微鏡としてだけでなく、局所電子源としての有効性が謳われてきた。発明以来、STMを用いたスペクトロスコピーの開発には目を見張るものがある。トンネル電流の弾性成分を分光することで、試料表面の局所電子状態を可視化できること、表面電子の定在波パターンから電子の波動性を可視化した実験など、様々な測定が行われてきた。1998年には、トンネル電流の非弾性成分を検出することで一分子の振動スペクトルを測定できることが示され、その後、スピンのゼーマン分裂も測定できることが示されてきた。同じ頃、我々の研究グループも、トンネル電子により振動励起を介した分子運動の観察(アクションスペクトル)を通して振動スペクトルが取得できる可能性を見だし、また、磁性分子のスピンのスペクトルの取得に成功したところであった。

## 2. 研究の目的

走査トンネル顕微鏡(STM)の二つの特性、即ち、(1)サブÅの空間分解能を有すること、及び、(2)高い分解能を有する優れた局所電子源であること、という特色を最大限に生かして、走査トンネル顕微分光(STS)特に、非弾性トンネル電子を利用した分光法のポテンシャルを最大限に引き出し、その背後にある分子科学の基礎学理を確立する。

## 3. 研究の方法

非弾性トンネル過程を利用した単分子スペクトロスコピーの可能性を更に探索すべく、STMアクションスペクトロスコピー

振動励起とそれに伴う分子反応のメカニズムをさらに詳しく調べアクションスペクトルの一般的な解析法を確立する。

### STM単一スピン分光

非弾性トンネル分光により検出されるスピン状態を手がかりに、分子スピンと吸着場である表面との相互作用を明らかにする。

### STM接合におけるアンドレーフ反射分光

超伝導・磁性体界面におけるアンドレーフ反射を利用した磁性材料のスピン分極率の定量的評価が行われているが、この方法のプロブエリアをナノスケールにまで発展させ単原子、単一分子や磁性元素からなる少数多体系を介して流れるスピン分極した電流の検出を試みる。

### STM単一分子発光

トンネル電子の注入による単一分子の振動励起状態が緩和する際、輻射によるエネルギー散逸過程を介して放射される光子(THzあるいは赤外領域)を検出し、非弾性電子トンネル分光(IETS)との組み合わせによる新しい単一分子振動分光法を探索する。

## 4. 研究成果

## STMアクションスペクトロスコピー

(1)アクションスペクトルを記述する一般的な解析法の確立と様々な系への適用[文献1-3,5,6,10,12,14,15,20,24]

STMの探針から流れるトンネル電流に誘起される、表面に吸着した分子の運動及び反応の確率(速度)の、一般的な定式化に成功した。この式を用いた、STMにより測定した分子の反応確率の電圧依存性(Action spectroscopy with STM: STM-AS)の解析が、反応の引金となる分子振動の正確なエネルギー、反応に必要な電子の数などの様々な情報を与えることを明らかにした。この方法を応用し、遷移金属表面上の水分子ダイマーの詳細な構造解析及び、Cu(111)表面上の(CH<sub>3</sub>S)<sub>2</sub>の解離反応のメカニズム解明に成功した。また、トンネル電子によるエチレン分子の回転と脱離、CO分子のホッピング現象にも適用した。これらを通じて、トンネル電子による振動励起と非調和カップリングによるエネルギー移動と分子の応答に関する基礎学理を確立した。また、STM-ASを新たな振動分光手法として確立し、さらに、STM-ASが単一分子の吸着構造解析及び反応メカニズム解析に多大な力を発揮することを示した。

(2)酸化物超薄膜による単分子励起状態の長寿命化と選択的化学反应の制御[文献18,21,25]

STMと密度汎関数理論(DFT)に基づく電子状態計算を用いて、Ag(100)表面上のMgO超薄膜における水分子の励起状態の寿命を長くすることにより、トンネル電子による水分子の解離反応における反応経路を選択的に制御できることを示した。また水分子の解離反応がMgO超薄膜の厚さに依存することを明らかにした。この結果はMgO超薄膜と金属基板間の接合状態が化学反応性に強く影響していることを示している。そこで接合状態の影響をより詳細に探るため、モデル系としてMgO/Ag(100)界面における酸素欠陥等の欠陥が水分子の解離反応に与える影響をDFT計算により調査した。その結果、欠陥が存在し、酸化物-金属界面に乱れが生じることによってMgO/Ag(100)表面上での解離反応性が向上することが判明した。この反応性の変化は、酸化物-金属界面の電子状態の変化に由来している。我々の研究結果は、酸化物超薄膜の化学反応性をコントロールし、触媒として応用する新たな方法に繋がるものである。

(3)振動励起による巨大コンダクタンス変化[文献7]

トンネル電子の非弾性トンネル過程における分子振動励起とその結果引き起こされるトンネルコンダクタンスの変化は、一般的に数%と非常に小さいことが知られている。これが、精度の良い検出を妨げ、単一分子の振動スペクトルを得る上で大きな障害となっている。Ag(111)表面に層状成長した2層

目鉄フタロシアニン (FePc) 分子のトンネルスペクトルにおいて、分子振動の励起による50%にのぼる巨大なコンダクタンス変化を観測した。2層目分子は、一層目の分子により基板電子系から電子的に孤立しているため、トンネル電子による負イオン状態の寿命が長くなり巨大なコンダクタンス変化が生じたと考えられる。

#### STM 単一スピン分光

(1) 分子スピンが作る近藤効果と近藤格子 [文献 13, 17, 22, 23]

Au(111)表面に FePc 分子を吸着させると、分子スピンが不純物スピンとして基板の電子と交換相互作用して近藤状態が生じることを見いだした。対称性の異なる吸着サイトに吸着した2種類の分子(オントップ種とブリッジ種)では、近藤スペクトルの形状が大きく異なる。STS による精密なスペクトル測定と DFT 計算から、オントップでは対称性が高いため軌道自由度とスピン自由度双方が関与する SU(4)近藤効果が起きていることが明らかとなった。一方、ブリッジ種では、対称性の低下により軌道自由度が消失するため、通常見られる SU(2)近藤効果が起きていることもわかった。近藤効果のような多体相関に局所対称性が有効に働いていることを見いだした。SU(4)近藤効果は、これまで、カーボンナノチューブによる量子ドットでしか報告例がなく、近藤物理に大きなインパクトを与える成果である。

また、単一不純物領域から2次元超格子が形成するまでの濃度領域で個々の FePc 分子の STS 測定を行い、近藤共鳴状態のスペクトル発展を調べた。分子が格子を作り始めると、隣接する分子間に反強磁性的 RKKY 相互作用 (Rudermann-Kittel-Kasuya-Yosida) が働き、分子スピンサイトでの近藤効果と反強磁性 RKKY 相互作用との競合によりスペクトル発展が生じることを世界で初めて実験的に実証した。

(2) 分子の磁気異方性 [文献 23]

FePc 分子の磁気異方性を STM 単一分子スピン分光および X 線磁気円二色性 (XMCD) により調べた。鉄スピンのゼロ磁場分裂による微細エネルギースペクトルと試料面に加えた外部磁場とのゼーマン効果によるスペクトル変化を、有効スピンハミルトニアンで解析し、ゼロ磁場分裂定数と Lande の g テンソル成分を決定した。Cu(110)(2x1)-0 表面では、既に面直方向に磁化容易化軸があることを報告したが、平行磁場による測定から、面内の g テンソル成分を決定し、対向する二組の芳香族環のうち一つの組に沿った方向が磁化困難軸であることを明らかにした。Ag(110)表面では、基板と直接結合している第1層目の分子ではスピンが消失する。その上に吸着した2層目分子では、分子の3重項スピンの生き残り、面内方向に磁気異方性を示すことが

わかった。ゼロ磁場分裂定数が  $|D| = 10\text{meV}$  とバルクの値より大きくなることがわかった。これらの実験結果は、分子-基板界面の相互作用を調節することで、異方性の方向、異方性エネルギーを制御できることを示している。

#### STM 接合におけるアンドレーフ反射分光

Nb の STM 探針、Pb(111)基板、 $C_{60}$  分子からなる超伝導体電極に挟まれた単一分子接合を構築した。400mK で測定したトンネルスペクトルには、超伝導ギャップ内に多重アンドレーフ反射によるサブギャップ構造が観測された。分子を介して多重アンドレーフ反射の観測に成功した。スペクトルの解析から、 $C_{60}$  分子の非占有軌道に由来する3つの伝導チャンネルが電気伝導に寄与することが分かった。同時に、各チャンネルの透過係数を決定した。分子配向の異なる  $C_{60}$  分子では、チャンネル数は同じであるが、透過係数の大きさに違いがあることがわかった。理論計算から、分子と電極が幾何構造的/電子構造的にどのように接続しているかが、伝導特性を決めるキーになると言われてきた。得られた成果は、理論の予測を実験的に実証した数少ない例であり、単分子エレクトロニクスデバイスの開発に欠かせない重要なものである。

#### STM 単一分子発光

(1) GaAs(110)表面におけるエネルギー散逸表面や界面でのエネルギー散逸は、各種デバイス (FET や太陽電池など) の発熱問題や動作効率に直結する重要な現象である。原子分解能をもつ発光測定手法である STM 発光分光を用いて、p-type GaAs(110)表面に電子を注入した際の発光を測定した。STM 測定と同時測定した発光強度像には、原子レベルの細かな発光の強弱 (最大 48% の強度差) が観測された。GaAs(110)表面の C3 表面状態に電子を注入すると発光が弱くなることから、C3 状態に注入された電子は、48% 以上の確率で非発光性再結合を起こし表面上でエネルギーを失うことを実験的に明らかにした。また、表面近くに存在するドーパント Zn による電子捕獲も高い確率で起こり、その確率は、印加電圧と Zn の位置する深さに強く依存することがわかった。

(2) フタロシアニン単分子の STM 発光

$H_2Pc$  とトンネル電子による単分子化学反応を利用して2つの水素原子を引き抜いて合成した  $H_0Pc$  という2種類の分子について、Au(111)基板上に作製した NaCl 超薄膜上に吸着した際の光学的性質を、STM 発光分光を用いて評価した。 $H_2Pc$  の発光スペクトルは、LUMO の振動基底状態から、HOMO の振動基底・励起状態への電子遷移によるものとして説明できる。一方、 $H_0Pc$  のスペクトルには、1.3eV に燐光によるものと考えられるピークが現れ、また振動励起によるピークも  $H_2Pc$  のそれ

とは異なるエネルギーを持つことが確認された。STM 発光の結果から、 $H_0Pc$  が  $H_2Pc$  とは大きく異なる光学的・電子的特性を持つことが明らかになった。

### (3) THz 光子検出 STM の建設

東大の小宮山らにより開発された超高感度の単一 THz 光子検出器[An et al., Phys. Rev. B75, 85417 (2007).]を、極低温 STM に組み込むため STM ステージの開発を行った。THz 検出器は 15K 以下に冷却する必要があるため、4.7K の STM 測定室内に THz 光検出器ステージを設けた。THz 領域の極微弱光の検出には、ノイズに強いシールドされたケーブルを検出器ステージへ通す必要があり、そのために特殊な STM ステージを作製した。また、このステージは、単一分子をあらゆる基板の上に展開するために低温状態の基板に分子を蒸着する機構を備えている。完成した THz-STM は動作チェックを終え、STM として問題なく動作する事が確認された。また、STM 組込型のカセット式 THz 光検出器の設計は完了し、実際の THz 光検出器ステージに合わせ微調整を行っている。

## 5. 主な論文発表等

[雑誌論文](計 25 件)

(1) "Dissociation pathways of a single dimethyl disulfide on Cu(111): reaction induced by simultaneous excitation of two vibrational modes", K. Motobayashi, Y. Kim, R. Arafune, M. Ohara, H. Ueba, M. Kawai, J. Chem. Phys. 140 (2014) 194705(1-8). (査読有)

(2) "Theory of action spectroscopy for single-molecule reactions induced by vibrational excitations with STM", T. Frederiksen, M. Paulsson, H. Ueba, Phys. Rev. B 89, (2014) 035427. (査読有)

(3) "Isotope effect in acetylene  $C_2H_2$  and  $C_2D_2$  rotations on Cu(001)", Y. E. Shchadilova, S. G. Tikhodeev, M. Paulsson, H. Ueba, Phys. Rev. B 89, (2014) 165418. (査読有)

(4) "Direct observation of adsorption geometry for the van der Waals adsorption of a single  $\pi$ -conjugated hydrocarbon molecule on Au(111)", J.-H. Kim, J. Jung, K. Tahara, Y. Tobe, Y. Kim, M. Kawai, J. Chem. Phys. 140 (2014) 074709(1-5). (査読有)

(5) "Lateral hopping and desorption of a single CO molecule on a Cu(110) surface induced by femtosecond laser pulses", H. Ueba, Y. Ootsuka, Phys. Rev. B 87, (2013) 205403. (査読有)

(6) "Rotation of a Single Acetylene Molecule on Cu(001) by Tunneling Electrons in STM", Y. E. Shchadilova, S. G. Tikhodeev, M. Paulsson, H. Ueba, Phys. Rev. Lett. 111, (2013) 186102. (査読有)

(7) "Enhancement of inelastic Electron Tunneling Conductance caused by Electronic Decoupling in Iron Phthalocyanine Bilayer on Ag(111)", N. Ohta, R. Arafune, N. Tsukahara, M. Kawai, N. Takagi, J. Phys. Chem. C 117 (2013) 21832-21837. (査読有)

(8) "STM investigation of CO ordering on Pt(111): From an isolated molecule to high-coverage superstructure", H. J. Yang, T. Minato, M. Kawai, Y. Kim, J. Phys. Chem. C 117 (2013) 16429-16437. (査読有)

(9) "Tailoring electronic states of a single molecule using adamantane-based molecular tripods", S. Katano, Y. Kim, T. Kitagawa, M. Kawai, Phys. Chem. Chem. Phys. 15 (2013) 14229-14233. (査読有)

(10) "Orbital-selective single molecule reactions on a metal surface studied by low-temperature scanning tunneling microscopy", S. Katano, Y. Kim, M. Trenary, M. Kawai, Chem. Commun. 49 (2013) 4679-4681. (査読有)

(11) "Substrate-induced symmetry breaking in silicene", C.-L. Lin, R. Arafune, K. Kawahara, M. Kanno, N. Tsukahara, E. Minamitani, Y. Kim, M. Kawai, N. Takagi, Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 076801(1-5). (査読有)

(12) "Spectral fitting of action spectra for motions and reactions of single molecules on metal surfaces", K. Motobayashi, S. Katano, Y. Kim, M. Kawai, Bull. Chem. Soc. Jpn. 86 (2013) 75-79. (査読有)

(13) "分子骨格と吸着構造が生み出す新奇的な近藤効果"(最近の研究から) 南谷英美、塚原規志、金有洙、高木紀明、日本物理学会誌 68, 162-166 (2013). (査読有)

(14) "Identification at the Single Molecule Level of  $C_2H_x$  Moieties Derived from Acetylene on the Pt(111) Surface", T. Okada, Y. Kim, M. Trenary, M. Kawai, J. Phys. Chem. C 116 (2012) 18372-18381. (査読有)

(15) "Combined scanning tunneling

microscopy and high-resolution electron energy loss spectroscopy study on the adsorption state of CO on Ag(001), R. Arafune, H.-J. Shin, J. Jung, E. Minamitani, N. Takagi, Y. Kim, M. Kawai, Langmuir 28 (2012) 13249-13252. (査読有)

(16) "Ordering of molecules with  $\pi$ -conjugated triangular core by switching hydrogen bonding and van der Waals interactions", J.-H. Kim, K. Tahara, J. Jung, S. De Feyter, Y. Tobe, Y. Kim, M. Kawai, J. Phys. Chem. C 116 (2012) 17082-17088. (査読有)

(17) "Symmetry-driven novel Kondo effect in a molecule", E. Minamitani, N. Tsukahara, D. Matsunaka, Y. Kim, N. Takagi, M. Kawai, Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 086602(1-5). (査読有)

(18) "Ligand field effect at oxide-metal interface on the chemical reactivity of ultrathin oxide film surface", J. Jung, H.-J. Shin, Y. Kim, M. Kawai, J. Am. Chem. Soc. 134 (2012) 10554-10561. (査読有)

(19) Two dimensional superstructure formation of fluorinated fullerene on Au(111): A scanning tunneling microscopy study", T. K. Shimizu, J. Jung, T. Otani, Y.-K. Han, M. Kawai, Y. Kim, ACS Nano 6, 2679-2685 (2012). (査読有)

(20) "STMを用いた表面吸着分子のアクションスペクトル 定量解析から得られる新発見", 本林健太, 金有洙, 上羽弘, 川合真紀, 表面科学, 32, 597-602, (2011)(査読有)

(21) "Activation of ultrathin oxide films for chemical reaction by interface defects", J. Jung, H.-J. Shin, Y. Kim, and M. Kawai, J. Am. Chem. Soc. 133, 6142-6145 (2011). (査読有)

(22) "Evolution of Kondo resonance from a single impurity molecule to the two-dimensional lattice", N. Tsukahara, S. Shiraki, S. Itou, N. Ohta, N. Takagi, M. Kawai, Phys. Rev. Lett. 106, 187401(4pages) (2011). (査読有)

(23) "表面に吸着した鉄(II)フタロシアニンの磁性スピン、磁気異方性、近藤効果ー" 高木紀明、塚原規志、川合真紀、表面科学 32,629-634 (2011).(査読有)

(24) "Insights into action spectroscopy for single molecule motion and reactions through inelastic electron tunneling", K.

Motobayashi, Y. Kim, H. Ueba, M. Kawai, Phys. Rev. Lett. 105, 076101 (2010). (査読有)

(25) "State-selective dissociation of a single water molecule on an ultrathin MgO film", H.-J. Shin, J. Jung, K. Motobayashi, S. Yanagisawa, Y. Morikawa, Y. Kim, M. Kawai, Nat. Mater. 9, 442-447 (2010). (査読有)

[学会発表](計 339件)

国際会議発表: 203件(招待講演: 55件)  
国内会議発表: 136件(招待講演: 9件)

・主な国際会議招待講演

(1) M. Kawai, Y. Kim, N. Takagi, "Single molecule chemistry with a STM and reactions at surfaces", AVS 60th International Symposium and Exhibition, Long beach, California U.S.A., 31st Oct. (2013).

(2) Y. Kim, "Electronic property control of 2-D molecular systems", 2013 International Symposium on Additive Manufacturing and Printed Electronics, Jeju, Korea, 29th Nov. (2013).

(3) Y. Kim, "Single molecule chemistry", 3rd Asia-Korea Conference on Science and Technology 2013 (AKC 2013), Singapore, 23th Nov. (2013).

(4) M. Kawai "Single Molecule Spectroscopy at Surfaces", 19th International Vacuum Congress(IVC-19), Paris, France, 10th Sep. (2013)

(5) N. Tsukahara, N. Takagi, M. Kawai, E. Minamitani, Y. Kim, "Local Symmetry Rules Spin Ground State: FePc on Au(111)", Controlled atomic dynamics on solid surfaces: Atom and Molecular Manipulation, San Sebastian, Spain, 15th May (2013).

(6) M. Kawai, "Single molecule spectroscopy of spin state at surfaces", American Chemical Society 245th National Meeting & Exposition, New Orleans, U.S.A., 8th Apr.(2013).

(7) M. Kawai, "Single molecule spectroscopy of Spins on Metals", The 13th International Conference on Desorption and Dynamics Induced by Electronic Transitions(DIET13), Stratford-upon-Avon, UK, 4th July (2012).

(8) N. Takagi, "Evolution of Kondo

Resonance from a Single Impurity Molecule to the Two-Dimensional Kondo Lattice”, APS March Meeting (Invited Session: “Spin Coupling and Kondo Screening Individual Magnetic Spins”), Boston, USA, Feb. 27 - Mar. 2 (2012).

(9) M. Kawai, “Single Molecular Spectroscopy at Surfaces using STM”, 39th Conference on the Physics and Chemistry of Surfaces and Interfaces (PCSI-39), Santa Fe, U.S.A. Jan. 22-26 (2012)

(10) M. Kawai, “Listen to the action of individual molecules-Single molecular spectroscopy at surfaces”, Marie Curie Symposium in the course of the Science forum of the German Chemical Society, Bremen, Germany, Sept. 5 (2011).

(11) N. Takagi, “Molecular magnetism at surfaces explored by single molecule spectroscopy”, 28th European Conference on Surface Science (ECOSS 28), Wroclaw, Poland, Aug. 28 - Sep. 2 (2011).

(12) M. Kawai, “Lesson from the action of individual molecules-Single molecular spectroscopy at surfaces-”, The Fundamentals of Photocatalysis Symposium, Hefei, China, July 11 (2011).

(13) M. Kawai, “From local to single molecular spectroscopy at heterogeneous surfaces - Scanning tunneling spectroscopy -”, International Max Planck Research School for Complex Surfaces in Materials Science, Schloss Ringberg, Germany, Feb. 21-25 (2011).

(14) Y. Kim, “Mode-selective and state-selective chemistry of a single molecule with STM”, XIII International Conference on Vibrations at Surfaces (VAS13), Orlando, USA, Mar. 2 (2010).

・主な国内会議招待講演

(1) 白木 將, “XMCDによる3d遷移金属ナノ構造の磁性研究”, 「放射光を用いたナノ・ミクロの表面・バルク解析」～ソフト・ハードX線による極限評価～、仙台、1月27日(2014)

(2) 川合 真紀, 上羽 弘, 金 有洙, “STMを用いた単分子分光”, 第33回表面科学学術講演会、茨城県つくば市、11月26日(2013)

(3) 川合 真紀, “表面界面の単分子分光”, CREST「ナノ界面技術の基盤構築」研究領域第2回シンポジウム、市ヶ谷、2月10日(2013)

(4) 川合 真紀, “分子の声を聞く”, 第21回向井賞記念科学講演会、川崎市、6月5日(2012)

(5) 高木 紀明, “有機金属界面のスピン状態” 日本化学会講演会「有機金属界面と電気伝導」、東京11月1日(2010)

〔図書〕(計 2 件)

(1) 白木 將, 「問題と解説で学ぶ表面科学」(共立出版) 92-92、(2013).

(2) 白木 將, 「マイクロビームアナリシス・ハンドブック」(オーム社) 303-308、407-410、(2014).

〔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

<http://www.surfchem.k.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川合 真紀 (KAWAI MAKI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任教授

研究者番号: 70177640

(2) 研究分担者

金 有洙 (KIM YOUSOO)

独立行政法人理化学研究所・Kim表面界面研究室・准主任研究員

研究者番号: 50373296

高木 紀明 (TAKAGI NORIAKI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号: 50252416

上羽 弘 (UEBA HIROMU)

富山大学・理工学研究部(工学)・教授

研究者番号: 70019214

(H25 H25: 研究協力者)

白木 將 (SHIRAKI SUSUMU)

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・講師

研究者番号: 80342799

(3) 連携研究者

なし