

令和 4 年 9 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01057

研究課題名（和文）固体表面における高感度スピン検出法の開発と遷移金属酸化物への応用

研究課題名（英文）Development of sensitive spin probe at solid surfaces and application to transition metal oxides

研究代表者

福谷 克之（Fukutani, Katsuyuki）

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：10228900

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、スピン偏極水素原子・水素分子線の開発を行い、固体表面での吸着・散乱にともなうスピン状態変化をレーザー分光法を用いて観測する新たな実験手法の開発を行った。これを用いて、固体表面での化学吸着状態における水素分子の核スピン転換速度を求め、スピン転換と回転緩和機構の解明を行った。遷移金属酸化物表面における水素誘起電子状態を調べ、水素-表面間の電荷移動に起因する局在状態と非局在状態が存在することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体表面は、新規電子・磁気デバイスや触媒機能発現の場として重要な役割を担う。デバイスや化学的機能性は、表面における吸着分子や表面の電子・スピン状態に大きく左右される。しかし固体表面のスピン状態やスピンドYNAMICSを観測できる手法が限られているため未解明の点が多い。本研究では、表面のスピン状態を高感度に測定するためのスピン偏極水素原子・分子線の開発を行い、水素のスピンドYNAMICSと種々の機能性を有する遷移金属酸化物表面の電子・スピン状態を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In the present research, we have developed spin-polarized atomic hydrogen and molecular hydrogen beams, and investigated the spin-state change in adsorption/scattering on solid surfaces in combination with laser spectroscopy. By using this apparatus, we have precisely measured the nuclear-spin conversion time in the chemisorbed state on solid surfaces. On the basis of the experimental data, we have clarified the spin conversion and rotational-energy dissipation mechanisms. We have also studied the hydrogen-induced electronic states on metal-oxide surfaces, where presence of localized and delocalized states was clearly identified.

研究分野：表面界面物性

キーワード：固体表面 スピン 水素 電子状態

1. 研究開始当初の背景

固体表面における吸着分子や表面欠陥のスピンの状態は、新規電子物性と化学反応性に関連し表面科学において重要な研究対象である。分子内の電子や表面にドープされた電子は、電子-格子相互作用と電子相関の強さに依存し、そのスピン状態が変化する。しかし、微量の表面スピンを検出する実験手法が未開拓のため、これらのスピン状態の詳細は未解明の問題として残されていた。

申請者のグループでは、これまで水素分子の核スピン転換に関する研究を行ってきた。水素分子には核スピン(I)が I=1 のオルト水素と I=0 のパラ水素があり、固体表面との相互作用によりオルソからパラへ核スピン転換する。近年、水素分子が表面に分子状化学吸着すると早い核スピン転換が生じることが示唆されたが、転換時間の定量的な評価はなされていなかった。また、水素の関与する表面反応や表面電子状態について、水素の電子スピンと水素誘起電子・スピン状態が注目されているが、スピンを観測する実験手法が限られているため、未解明の点が多かった。

2. 研究の目的

本研究では、パルス水素原子・分子線と、レーザー脱離/共鳴イオン化ポンププローブ分光およびシュテルンゲルラッハ磁石によるスピン偏極度測定を組み合わせた実験装置を新たに開発し、これにより、固体表面におけるスピンダイナミクスとスピン状態観測を目的として研究を行った。特に、観測が困難とされてきた分子状化学吸着状態における水素分子の核スピン 3 重項-1 重項転換速度の決定を行った。またチタン系遷移金属酸化物と酸化鉄表面における水素誘起電子状態・スピン状態を明らかにすることを目的として研究を行った。

3. 研究の方法

水素原子および水素分子と表面の相互作用を調べるために、新たに水素原子・分子ビームの開発を行った。図 1(a),(b)に開発した水素分子線および水素原子線装置の模式図を示す。

図 1(a)は、分子の表面吸着時間を制御するパルス分子線と光誘起脱離(PSD)および多光子共鳴イオン化(REMPI)法を組み合わせたものである。パルスバルブからパルス状の H₂ ガスが噴出されスキマーで中心軸成分を濾しとることで分子線パルスが形成される。H₂ パルスは試料に入射角 70 度で入射し、H₂ が表面に吸着する。その後、指定した時間後に試料に PSD レーザー(波長 532 nm)を照射し吸着 H₂ を光脱離させ、REMPI 法により回転状態を弁別してイオン化して検出する。図 1(a)右にパルス動作の時系列が示されている。分子線パルスと PSD レーザー照射の時間間隔は H₂ の表面吸着時間に対応するため、これを精密に制御することで転換時間を精密に測定することが可能となった。

図 1(b)に示すスピン偏極水素原子装置は、水素原子を生成するマイクロ波キャビティ、パルス化のためのチョッパー、スピン状態選別のための 6 極磁石、スピン状態測定のためのシュテルンゲルラッハ磁石、検出のための REMPI レーザーからなる。4 つのスピン状態のうち、電子スピンのアップの状態のみ 6 極磁石で選別し試料に照射することが可能である。また散乱原子のスピン状態をシュテルンゲルラッハ磁石後のビーム位置を REMPI レーザーで測定することで測定可能である。図 1(b)中の表に、開発した装置の真空ポンプと典型的な圧力を示す。試料として、単結晶の Pd(210), SrTiO₃ (001), Fe₃O₄ (111), ルチル型 TiO₂(110), アナター

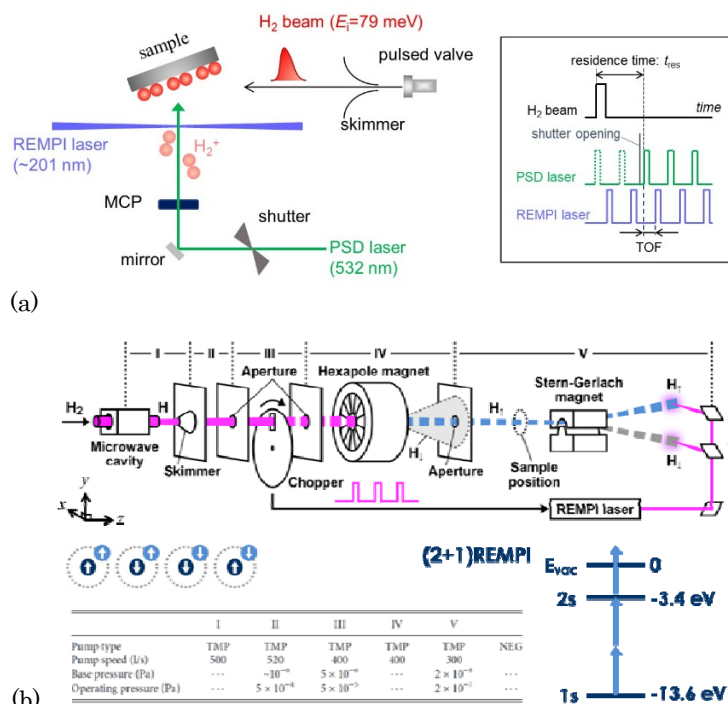


図 1(a)開発した分子線装置の模式図, (b)原子線装置の模式図。

れ $\text{TiO}_2(101)$ について、いずれも超高真空中で清浄な表面を準備し実験を行った。開発した装置に加え光電子分光による電子状態計測を行った。

4. 研究成果

(1) スピン偏極水素原子ビーム装置の評価と表面吸着

図 1(a) に示すチョッパーと REMPI レーザーの時間差を変化させることで水素原子の飛行時間スペクトルを測定したところ、最速速度は 2750 m/s であることがわかった。図 2(a) は、検出 REMPI レーザーを空間的に掃引することで原子線の速度ごとにビーム形状を測定した結果である。この時のビーム幅を速度に対してプロットしたのが図 2(b) である。この測定位置では、速度が 1500 m/s のときビームサイズが最小となっていることがわかる。これは、6 極磁石によりアップスピン状態の水素原子が収束していることを示している。図 3 は、このビームをシュテルンゲルラッハ磁石に入射し、REMPI レーザーの位置を掃引したときのビームプロファイルの測定結果である。(a) と (b) は速度が異なるビームの結果であり、赤、青 2 つのプロファイルは磁石を互いに 180 度回転させたときの結果である。ビーム位置が中心から 1 mm 程度シフトしており、これはスピン偏極していることを示す。(a) と (b) を比較すると (b) ではブロードに裾を引いており、ダウンスピン成分が存在することを示唆する。ビームプロファイルを解析しスピン偏極率を求めた結果を図 4 に示す。スピン偏極率は速度が 2000 m/s で 95% であり、速度が早くなると偏極率が低下することがわかった。これは 6 極磁石によるスピン選別が低下するためである。

(2) 水素分子ビーム装置を用いた核スピン転換と散乱

図 2 に示す水素分子線装置を用いて、Pd(210) 表面における水素分子の核スピン転換の実験を行った。図 5 (a) は、Pd(210) 表面の構造を示したものである。側面図に示すように、ステップテラスの周期的な構造をしていることがわかる。この表面に水素分子を吸着させると、ステップ位置に水素分子が分子状に化学吸着することが知られている。図 5 (b) は熱脱離スペクトルであり、分子状化学吸着分子に対応する脱離ピークが 80 K に見られる。実線と点

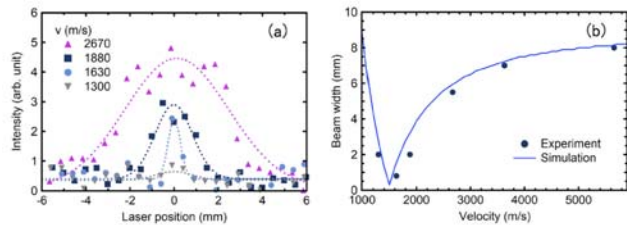


図 2 (a)異なる速度を持つ水素原子ビームの空間プロファイル、(b)ビーム幅の速度依存性。

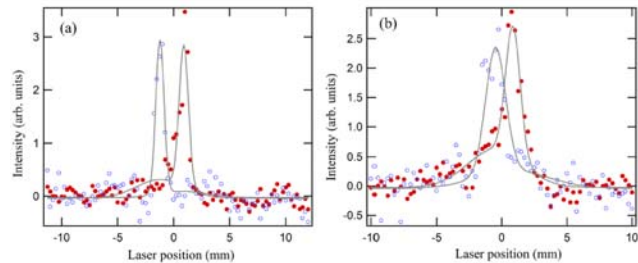


図 3 速度の異なる水素原子ビームのシュテルンゲルラッハ磁石後のビームプロファイル。

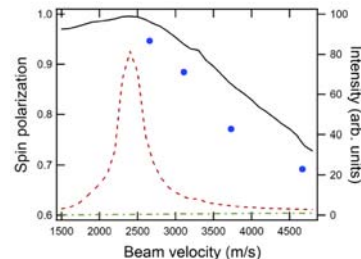


図 4 水素原子スピン偏極率の速度依存性。実線はシミュレーション結果。

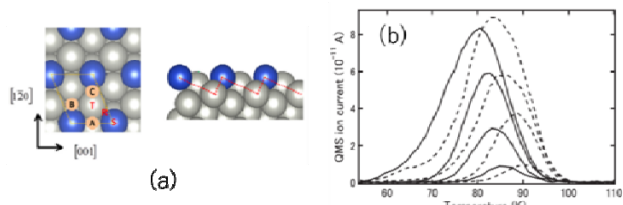


図 5 (a)Pd(210)表面の模式図、(b)H₂ と D₂ の熱脱離スペクトル。

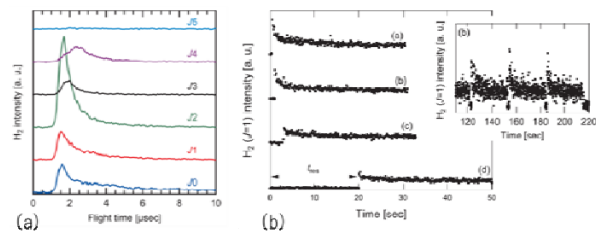


図 6 (a)回転状態ごとの飛行時間スペクトル、(b)滞在時間を変化させたときの脱離強度。

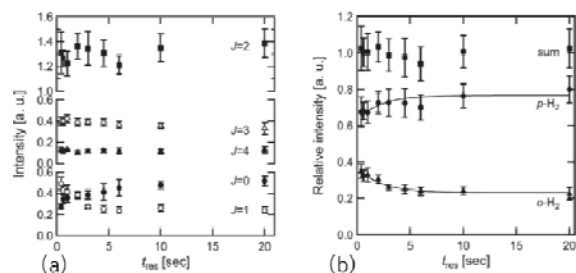


図 7 (a)回転状態ごとの脱離強度の滞在時間依存性、(b)オルト水素とパラ水素の滞在時間依存性。

線は H_2 と D_2 による実験結果で、 D_2 の方が高温で脱離することがわかる。これは量子的零点振動の効果で D_2 の吸着エネルギーが大きくなるからである。図 6(a) に光脱離水素分子の飛行時間スペクトルを回転状態ごとに測定した結果を示す。いずれも $2\mu s$ 付近に極大を持つが、回転量子数 (J) によって飛行時間スペクトルが異なることがわかる。飛行時間スペクトルのピークに REMPI レーザーのタイミングを固定し、分子線との時間差を変化させて光脱離信号強度を測定した結果が図 6(b) である。この時間差は分子の滞在時間に相当し、滞在時間が長くなるにつれて脱離強度が変化することがわかる。図 7(a) は、滞在時間に対する脱離強度の変化をプロットした結果である。時間とともに $J=1$ の強度が減少し $J=0$ の強度が増加することがわかる。 J が偶数のパラ水素と J が奇数のオルト水素の強度をプロットしたのが図 7(b) である。この強度変化の時定数から、核スピン転換時間が $2.2s$ であることがわかった。従来物理吸着系での転換時間は $1000s$ 程度であることが知られており、それに比べると 2-3 桁短いことが明らかとなった。転換のメカニズムを 2 次摂動のモデルに基づき考察し、化学吸着系では電子交換確率が大いいため転換速度が早くなると結論した。

さらに転換速度の基板温度依存性と、パラ-オルト逆転換速度の測定を行った。基板温度を上昇させると転換速度が早くなることを見出した。さらに逆転換速度は、オルト-パラ転換速度の $1/10$ 程度であることがわかった。これらの結果を、回転エネルギー散逸の観点から考察した。

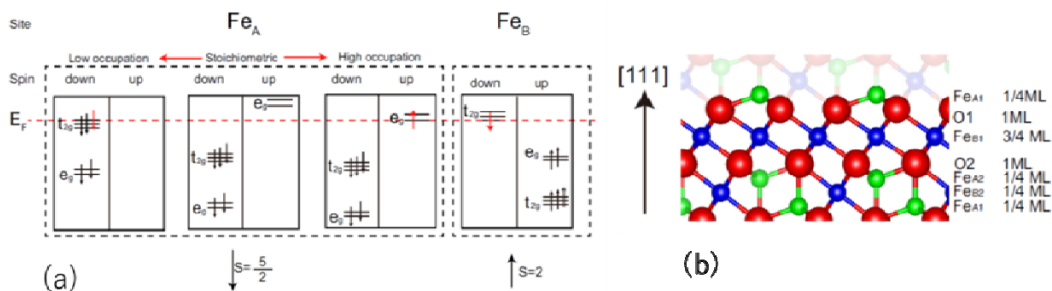


図 8 (a) Fe_3O_4 の電子状態の模式図、(b) $Fe_3O_4(111)$ 面の構造の模式図。

(3) $Fe_3O_4(111)$ 表面の電子状態

Fe_3O_4 は逆スピネル型の構造を持ち、Fe に A, B 2 つのサイトが存在する。図 8 (a) は電子状態の模式図である。バルクでは FeA サイトは交換相互作用によるエネルギーギャップを持つのに対して、FeB サイトは金属的なダウンスピンバンドを持つことからハーフメタルの性質を持つ。本研究では、この表面の電子状態と水素吸着効果を光電子分光で調べた。

$Fe_3O_4(111)$ 表面は、図 8(b) に示すように、複数の終端構造が存在する。図 9 は、FeA 終端面と酸素終端面に対して水素原子を吸着させたときの光電子スペクトルの測定結果である。水素を吸着させると、どちらの表面でも 2 次電子カットオフのエネルギー位置が低エネルギー側にシフトする様子が観測された。このことは、水素吸着により仕事関数が低下したことを意味する。またフェルミ面近傍の状態密度に着目すると FeA 終端面では変化が見られないのに対して、酸素終端面では状態密度が増加していることが判明した。理論計算の結果と比較し、水素原子はいずれの表面においても酸素サイトに吸着すると考えられる。また電子状態解析を行ったところ、フェルミ面近傍では水素吸着により FeA のダウ

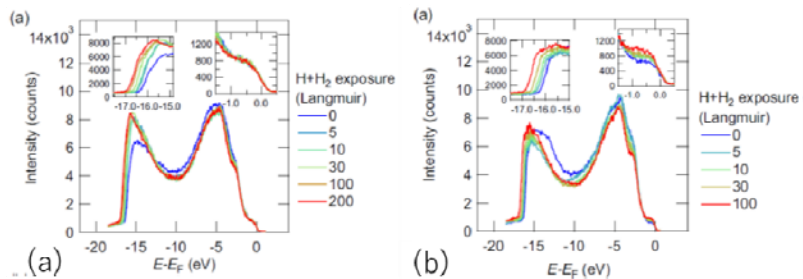


図 9 (a) FeA 終端面、(b) 酸素終端面に水素を吸着させたときの光電子スペクトル。

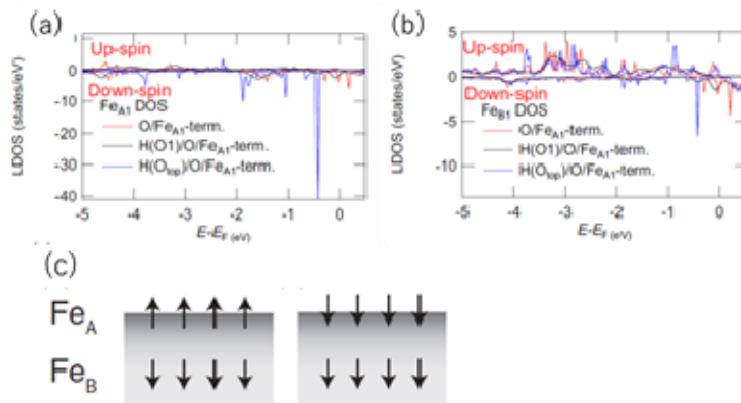


図 10 (a) FeA、(b) FeB の状態密度。(c) 理論計算によって得られた、FeA 終端と酸素終端面のスピンの状態の模式図。

ンスピンバンドに電荷移動が生じることがわかった(図 10(a)). このときのスピン構造の模式図を図 10(b)に示す. 水素吸着により, FeA 終端面ではサブサーフェス FeB と反強磁性的に結合したスピン状態となるのに対して, 酸素終端面では強磁性的に結合したスピン状態となっていると予想される.

(4) SrTiO₃(001)表面の構造と電子状態

SrTiO₃(001)表面に水素を吸着させると, 金属的な非局在状態が形成される報告がある一方, バンドギャップ中に局在状態の形成を示す報告もあり, 水素誘起の電子・スピン状態の詳細な理解が求められていた. 本研究では, SrTiO₃(001)の 2 種類の終端面を制御し, 水素吸着に伴う電子状態を光電子分光法により調べた.

図 11(a)と(b)は, それぞれ 1225 と 1275 で 72 時間加熱処理をした表面の LEED パターンと AFM 像, AFM のラインスキャンである. (a)では 1×1 構造を示すのに対して(b)では 2×2 構造を示す. オージェ電子分光の解析から, (a)は TiO₂ 終端, (b)は SrO 終端面であることがわかった. 第一原理計算の解析を併用し, (c)で示すように SrO が欠損した構造であると議論した. これら 2 種類の終端面に水素を吸着させたときの光電子スペクトルを図 12 に示す. (a)の SrO 終端面では価電子帯の下方シフトが見られることから, 水素吸着に伴い基板への電荷移動が生じていると考えられる. しかし, バンドギャップ中には局在準位は形成されない. これに対して TiO₂ 終端面では, SrO 終端面同様価電子帯の下方シフトとともに, ギャップ中に局在準位の形成が観測された. これらの結果から, SrTiO₃(001)表面ではドーパされた電子の一部は局在準位を形成してスピンを保持する一方, 電子相関の効果で非局在準位も形成されると考察した.

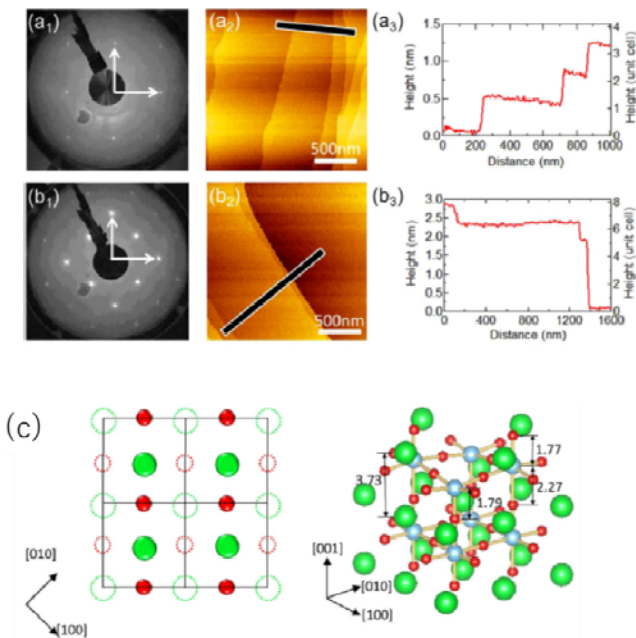


図 1 1 SrTiO₃(001)表面を, (a) 1225 , (b) 1275 で加熱処理したときの LEED パターンと AFM 像およびラインスキャン.

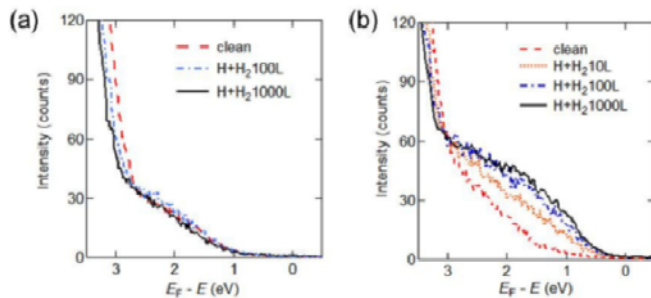


図 2 2 SrTiO₃(001)を, (a) 1225 , (b) 1275 で加熱処理した表面に水素を吸着させたときの光電子スペクトル.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y. Ohashi, N. Nagatsuka, S. Ogura, K. Fukutani	4. 巻 123
2. 論文標題 Hydrogen distribution and electronic structure of TiO ₂ (110) hydrogenated with low-energy hydrogen ion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Phys. Chem. C	6. 最初と最後の頁 1039
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.8b09434	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 W. Mao, L. Zhang, M. Wilde, S. Ogura, T. Chikada, K. Fukutani, H. Matsuzaki, T. Terai	4. 巻 144
2. 論文標題 Ab initio calculations for the H-decorated neutral and charged oxygen vacancy in erbium oxide	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fusion Eng. Design	6. 最初と最後の頁 188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2019.04.077	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Kawamura, K. Fukutani	4. 巻 688
2. 論文標題 Changes of RHEED intensity with hydrogen position on metal surface	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Surf. Sci.	6. 最初と最後の頁 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.susc.2019.05.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Ozawa, R. Shimizu, S. Ogura, T. Hitosugi, K. Fukutani	4. 巻 62
2. 論文標題 Fabrication of nm-thick palladium hydride and observation of its relaxation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Vac. Surf. Sci.	6. 最初と最後の頁 492
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1116/1.5108983	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 N. Nagatsuka, M. Wilde, K. Fukutani	4. 巻 152
2. 論文標題 Hydrogenation and hydrogen diffusion at the anatase TiO ₂ (101) surface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Chem. Phys.	6. 最初と最後の頁 74708
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5142776	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Yamakawa, K. Fukutani	4. 巻 89
2. 論文標題 Nuclear Spin Conversion of H ₂ , H ₂ O, and CH ₄ Interacting with Diamagnetic Insulators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 51016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.051016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mao Wei, Wilde Markus, Ogura Shohei, Chen Jikun, Fukutani Katsuyuki, Matsuzaki Hiroyuki, Terai Takayuki	4. 巻 122
2. 論文標題 Hydrogen-Accelerated Phase Transition and Diffusion in TiO ₂ Thin Films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 23026 ~ 23033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.8b06893	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Namba Kazuhiro, Ogura Shohei, Ohno Satoshi, Di Wen, Kato Koichi, Wilde Markus, Pletikosi Ivo, Pervan Petar, Milun Milorad, Fukutani Katsuyuki	4. 巻 115
2. 論文標題 Acceleration of hydrogen absorption by palladium through surface alloying with gold	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 7896 ~ 7900
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.1800412115	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Asakawa Kanta, Miura Yoshio, Nagatsuka Naoki, Takeyasu Kotaro, Matsumoto Masuaki, Fukutani Katsuyuki	4. 巻 99
2. 論文標題 Electronic and spin structure of O- and H-adsorbed Fe3O4(111) surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 85442
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.085442	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 福谷克之, 小倉正平	4. 巻 53
2. 論文標題 表面吸着水素の物理	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 661-671
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ogura Shohei, Fukutani Katsuyuki	4. 巻 121
2. 論文標題 Dynamic Blocking by CO of Hydrogen Transport across Pd70Au30(110) Surfaces	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 3373 ~ 3380
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.6b10965	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Asakawa Kanta, Kawauchi Taizo, Zhang Xiao Wei, Fukutani Katsuyuki	4. 巻 86
2. 論文標題 Non-collinear Magnetic Structure on the Fe3O4(111) Surface	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 074601 ~ 074601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.074601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shimizu Koji, Dino Wilson Agerico, Nakanishi Hiroshi, Kasai Hideaki, Fukutani Katsuyuki, Yajima Ayako	4. 巻 86
2. 論文標題 Molecular Adsorption, Hindered Rotation, and Species Separation of H ₂ /SrTiO ₃ (001)	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 073601 ~ 073601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.073601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ogawa Shohei, Kato Koichi, Nagatsuka Naoki, Ogura Shohei, Fukutani Katsuyuki	4. 巻 96
2. 論文標題 2×2R45 reconstruction and electron doping at the SrO-terminated SrTiO ₃ (001) surface	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 85303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.085303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawauchi Taizo, Asakawa Kanta, Fukutani Katsuyuki	4. 巻 238
2. 論文標題 Sealed-off helium-filled proportional counter for the conversion electron Mossbauer spectroscopy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Hyperfine Interactions	6. 最初と最後の頁 52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10751-017-1451-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Werner Kristin, Weng Xuefei, Calaza Florencia, Sterrer Martin, Kropp Thomas, Paier Joachim, Sauer Joachim, Wilde Markus, Fukutani Katsuyuki, Shaikhtudinov Shamil, Freund Hans-Joachim	4. 巻 139
2. 論文標題 Toward an Understanding of Selective Alkyne Hydrogenation on Ceria: On the Impact of O Vacancies on H ₂ Interaction with CeO ₂ (111)	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 17608 ~ 17616
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.7b10021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sugimoto Toshiki, Kunisada Yuji, Fukutani Katsuyuki	4. 巻 96
2. 論文標題 Inelastic electron tunneling mediated by a molecular quantum rotator	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 241409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.241409	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ohno S., Ivanov D., Ogura S., Wilde M., Arguelles E. F., Dino W. A., Kasai H., Fukutani K.	4. 巻 97
2. 論文標題 Rotational state modification and fast ortho-para conversion of H2 trapped within the highly anisotropic potential of Pd(210)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 85436
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.085436	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ueta H., Sasakawa Y., Ivanov D., Ohno S., Ogura S., Fukutani K.	4. 巻 102
2. 論文標題 Direct measurement of fast ortho-para conversion of molecularly chemisorbed H2 on Pd(210)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 121407(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.121407	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計61件 (うち招待講演 23件 / うち国際学会 19件)

1. 発表者名 小澤孝拓
2. 発表標題 Pdナノ薄膜における電気伝導特性とプロトン-電子相互作用の水素量依存性
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長塚直樹
2. 発表標題 二酸化チタン表面における水素の吸着・拡散とポーラロン形成
3. 学会等名 ハイドロジェノミクス 第4回若手育成スクール(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤本将秀
2. 発表標題 Black TiO ₂ の水素分布と電子状態
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長塚直樹
2. 発表標題 水素化TiO ₂ 表面の水素分布と電子状態
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤本将秀
2. 発表標題 原子状水素暴露によるチタニアナノ粒子の構造変化
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Fukutani
2. 発表標題 Diffusion of hydrogen across the surface and inside the film of palladium
3. 学会等名 5th Computational Chemistry (CC) Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福谷克之
2. 発表標題 パラジウム表面での水素の吸放出制御
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福谷克之
2. 発表標題 チタン系酸化物表面における水素の定量と電子状態評価
3. 学会等名 第80回応用物理学会 秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Fukutani
2. 発表標題 Rotational dynamics of molecular hydrogen on surfaces and in scattering
3. 学会等名 4th International Workshop on Scattering of Atoms and Molecules from Surfaces (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Fukutani
2. 発表標題 Interdisciplinary Study with Quantum Beams
3. 学会等名 The 18th CNS International Summer School (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Fukutani
2. 発表標題 Rotational state and fast ortho-para conversion of hydrogen molecularly chemisorbed on a Pd surface
3. 学会等名 2019 NSFC-CAS-JSPS Symposium on Nuclear Spin Isomers of Molecules and Molecular Spectroscopy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Nagatsuka
2. 発表標題 Hydrogenation of Titanium Dioxide with Low-energy Hydrogen Ions and atomic Hydrogen
3. 学会等名 AVS 66th international symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福谷克之
2. 発表標題 固体表面における水素の動的過程
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福谷克之
2. 発表標題 Element-specific analysis of surfaces and interfaces with nuclear resonance techniques
3. 学会等名 TACT 2019 International Thin Films Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福谷克之
2. 発表標題 水素の拡散における量子効果と電子との相関効果
3. 学会等名 第13回 物性科学領域横断研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福谷克之
2. 発表標題 水素の拡散における量子効果と環境効果
3. 学会等名 日本表面真空学会・東北北海道支部学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S.Ogura,K.Namba,K.Kato,K.Fukutani
2. 発表標題 Kinetic enhancement of hydrogen absorption by Pd through surface modification with Au
3. 学会等名 MRM 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S.Ogura, K.Namba, K.Kato, K.Fukutani
2. 発表標題 Controlling hydrogen transport across Pd-Au alloy surfaces by surface modifications
3. 学会等名 5th Japan-Korea Joint Symposium on Hydrogen in Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小倉正平
2. 発表標題 金属表面における水素のサブサーフェス拡散・反応制御
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 植田寛和, 笹川裕矢, Ivanov Dmitry, 大野哲, 小倉正平, 福谷克之
2. 発表標題 Pd(210)表面における水素分子のオルト - パラ転換研究
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小澤孝拓, 笹原悠輝, 清水亮太, 小倉正平, 一杉太郎, 福谷克之
2. 発表標題 薄膜Pdの水素吸蔵による二つの抵抗異常の発現
3. 学会等名 日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H.Ueta, Y.Sasakawa, D.Ivanov, S.Ohno, K. Fukutani
2. 発表標題 Rotational state distribution of molecularly chemisorbed H ₂ on Pd(210)
3. 学会等名 21th International Vacuum Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H.Ueta, Y.Sasakawa, D.Ivanov, S.Ohno, S.Ogura, K. Fukutani
2. 発表標題 Rotational-state distribution and ortho-para conversion of molecularly chemisorbed H ₂ on Pd(210)
3. 学会等名 4th Workshop on Scattering of Atoms and Molecules from Surfaces (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 植田寛和, 笹川裕矢, Ivanov Dmitry, 大野哲, 小倉正平, 福谷克之
2. 発表標題 Pd(210)表面における水素分子のオルト - パラ転換研究
3. 学会等名 日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川村隆明, 福谷克之
2. 発表標題 金属上の水素位置に依存したRHEED強度変化
3. 学会等名 日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長塚直樹,加藤紘一,Markus Wilde,小倉正平,福谷克之
2. 発表標題 二酸化チタン表面における水素吸着・拡散とポーラロン形成
3. 学会等名 第2回ハイドロジェノミクス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長塚直樹,加藤紘一,Markus Wilde,小倉正平,福谷克之
2. 発表標題 二酸化チタン表面における水素吸着・拡散とポーラロン形成
3. 学会等名 日本物理学会2019年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤弘一,長塚直樹,福谷克之
2. 発表標題 光触媒TiO ₂ 表面近傍での水素・ポーラロン共拡散の理論解析
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤弘一,長塚直樹,福谷克之
2. 発表標題 光励起によるTiO ₂ 表面と水(H, OH)の結合エネルギー変化の理論解析
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福谷克之
2. 発表標題 固体表面におけるプロトンと電子のふるまい
3. 学会等名 磁性研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K.Fukutani
2. 発表標題 Adsorption and absorption of hydrogen in Titanium dioxide
3. 学会等名 The 9th Vacuum and Surface Science Conference of Asia and Australia (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K.Fukutani
2. 発表標題 Molecular-hydrogen generation and ortho-para conversion - Relation with astrophysics
3. 学会等名 The 138th ISAS Space Science Colloquium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K.Fukutani
2. 発表標題 Rotational dynamics of quantum rotor in the adsorption and photoexcitation within the highly anisotropic potential of Pd(210)
3. 学会等名 International symposium on spectroscopy and dynamics at surface and interface (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y.Ohashi, N.Nagatsuka, A.Sakurai, S.Ogura, S.Ashihara, K.Fukutani
2. 発表標題 One-photon and two-photon photoemission studies on hydrogenated TiO ₂ surfaces
3. 学会等名 15th European Vacuum Congress (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福谷克之
2. 発表標題 水素の表面科学－核反応法と光電子分光で見るプロトンと電子のダイナミクス
3. 学会等名 日本表面真空学会九州支部総会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福谷克之
2. 発表標題 イオンビームを用いた材料の精密解析
3. 学会等名 放射線科学ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武安光太郎, 清水康司, 小倉正平, W.A.Dino, 福谷克之
2. 発表標題 酸化物表面の散乱による分子の量子状態選択
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長塚直樹, 加藤弘一, ビルデマーカス, 小倉正平, 福谷克之
2. 発表標題 二酸化チタン表面での水素の吸着・拡散とポーラロン形成
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長屋勇輝, 小倉正平, 福谷克之
2. 発表標題 スピン偏極水素原子ビームの開発: 飛行時間計測法の開発とビーム速度分布の測定
3. 学会等名 日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長屋勇輝, 小倉正平, 福谷克之
2. 発表標題 スピン偏極水素原子ビームの開発: ビーム速度分布の測定
3. 学会等名 第1回ハイドロジェノミクス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.Kawauchi, K.Asakawa, K.Fukutani
2. 発表標題 Anomalous behavior of the magnetization at the surface of Fe ₃ O ₄ (100)
3. 学会等名 15th European Vacuum Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.Kawauchi, K.Asakawa, K.Fukutani
2. 発表標題 Anomalous behavior of the magnetization at the surface of Fe ₃ O ₄ (100)
3. 学会等名 The 9th Toyota RIKEN International Workshop (IWMS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.Kawauchi, K.Fukutani
2. 発表標題 Investigatuon of FeGe thin film with B20 structure epitaxially grown on Si(111) by means of Mossbauer spectroscopy
3. 学会等名 20th Sympojium of Japan Mossbauer Spectroscopy Forum
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笹川裕矢, Dmitry Ivanov, 大野哲, 福谷克之
2. 発表標題 光脱離を用いた水素分子のPd(210)表面における核スピン転換解析
3. 学会等名 第1回ハイドロジェノミクス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長塚直樹, 加藤弘一, ビルデマーカス, 小倉正平, 福谷克之
2. 発表標題 二酸化チタン表面での水素の吸着・拡散とポーラロン形成
3. 学会等名 第12回物性科学領域横断研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kanta Asakawa, Taizo Kawauchi, Yoshio Miura, Katsuyuki Fukutani
2. 発表標題 Non-collinear magnetic structure on the Fe ₃ O ₄ (111) surfaces
3. 学会等名 The 8th international symposium of surface science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Fukutani
2. 発表標題 Rotational state and ortho-para conversion of H ₂ on solid surfaces
3. 学会等名 2nd International Workshop on Nuclear-spin effects on Astrochemistry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Fukutani
2. 発表標題 Absorption and desorption of hydrogen in Pd and PdAu investigated by NRA combined with TDS
3. 学会等名 Gordon Research Conference on Metal-Hydrogen system (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤 弘一, 福谷 克之
2. 発表標題 強い水素間反発相互作用によるPd表面での水素吸着構造変化
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福谷克之
2. 発表標題 水素の表面ダイナミクス
3. 学会等名 POLANOサイエンスカフェ (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河内泰三, 浅川寛太, 福谷克之
2. 発表標題 内部転換電子メスパワー分光法における減圧式比例計数管の開発
3. 学会等名 2017年真空・表面科学合同講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河内泰三, 浅川寛太, 福谷克之
2. 発表標題 Observation of the Magnetic phase transition at the surface of Fe ₃ O ₄ (100) by means of Conversion Electron Mossbauer Spectroscopy
3. 学会等名 Japan Mossbauer Spectroscopy Forum
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長塚直樹, Markus Wilde, 福谷克之
2. 発表標題 アナターゼ型二酸化チタンにおける水素の拡散
3. 学会等名 日本表面科学会 第2回公演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長塚直樹, Markus Wilde, 福谷克之
2. 発表標題 アナターゼ型二酸化チタン(101)表面における水素の拡散
3. 学会等名 2017年真空・表面科学合同講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長塚直樹, 大橋由季, 櫻井敦教, 芦原聡, 福谷克之
2. 発表標題 二光子光電子分光によるアナターゼ型二酸化チタン(101)表面における欠陥誘起電子状態
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小澤孝拓, 大野哲, 河内泰三, 小倉正平, 福谷克之
2. 発表標題 低温パラジウムへの水素イオン照射による準安定状態の実現
3. 学会等名 表面科学会第2回関東支部講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大橋由季, 長塚直樹, 櫻井敦教, 森近一貴, 小倉正平, 芦原聡, 福谷克之
2. 発表標題 二光子光電子分光装置の開発
3. 学会等名 日本表面科学会第2回関東支部講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大橋由季, 長塚直樹, 浅川寛太, 櫻井敦教, 小倉正平, 芦原聡, 福谷克之
2. 発表標題 二光子光電子分光によるルチル型TiO2表面の電子励起状態観測
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大橋由季, 長塚直樹, 櫻井敦教, 小倉正平, 芦原聡, 福谷克之
2. 発表標題 二光子光電子分光を用いた水酸化TiO2表面の励起電子状態観測
3. 学会等名 日本物理学会春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笹川裕矢, Dmitry Ivanov, 大野哲, 福谷克之
2. 発表標題 Pd(210)表面における分子状化学吸着水素分子の核スピンおよび回転状態の転換
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福谷克之, 大野哲, D. Ivanov, E. Arguëlles, W.A. Dino, 笠井秀明
2. 発表標題 金属表面における水素分子の回転状態
3. 学会等名 水素量子アトムクス研究会
4. 発表年 2019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	Dino Wilson (Dino Wilson) (60379146)	大阪大学・工学研究科・准教授 (14401)	

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