

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 7 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05483

研究課題名(和文) 表面励起電子散乱過程と応用に関する第一原理電子論

研究課題名(英文) First-principles study on elementary processes of electron scattering by surfaces and their applications

研究代表者

渡辺 一之 (Watanabe, Kazuyuki)

東京理科大学・理学部第一部・教授

研究者番号：50221685

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：時間依存密度汎関数理論(TDDFT)を表面励起電子散乱に関係した種々の物理現象の解析に応用し各素過程を明らかにしたこと、限定した条件下で交換相関項を決定したことが研究成果である。具体的には、グラフェンと二層グラフェンの一次電子透過率と二次電子放出特性を明らかにしたこと、フェムト秒レーザー照射によるカーボンナノチューブからの電子放出特性とSi表面からの原子放出に対する熱効果を明らかにしたこと、多成分TDDFT法を定式化しレーザー照射下の陽電子とLiH分子のダイナミクスに応用したこと、電子と水素原子の1次元散乱過程における厳密な交換相関項を見出したことである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

TDDFT法を非平衡励起状態の解析に使うとき、交換相関項の断熱局所密度近似(ALDA)は現象を正しく記述しないとされてきたが、限定条件下であるが厳密な交換相関項を求めることによってこの問題を定量的に検証した本研究は学術的意義がある。また、本研究は表面励起電子散乱に関係した種々の物理現象のミクロ機構を時間依存第一原理計算によって明らかにすることで関連実験結果の物理解釈を与え、さらには表面分析技術の適用条件等の具体的な問題にも解を与えたことは、応用技術分野の発展に寄与すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We elucidated the elementary processes of various physical phenomena related to surface-excited electron scattering by using time-dependent density functional theory (TDDFT) simulations, and determined the exchange-correlation term under limited conditions. Specifically, the primary-electron transmittance and secondary-electron emission spectra of graphene and bilayer graphene were determined. The electron emission characteristics from a carbon nanotube under femtosecond laser irradiation and the thermal effect on atom evaporation from a Si surface were investigated. The correlated dynamics of a positron and a LiH molecule under laser irradiation was clarified by the multi-component TDDFT method formulated in the present study. Finally, we found an exact exchange-correlation term in the scattering process of an electron and H atom of one-dimensional system.

研究分野：計算物理学

キーワード：電子散乱 交換相関項 時間依存密度汎関数理論 レーザー刺激電界蒸発 多成分密度汎関数理論 多体摂動理論 エキシトン

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ナノ構造物質や固体表面の電子状態はその原子構造の対称性の低下によって非平衡状態になりやすく、実験条件によって光や電界に晒されることになるので電子系は多様な励起状態になる。本研究では、実験で観測し得る表面励起電子の実時間素過程を理論的に明らかにするために、時間依存密度汎関数理論 (TDDFT) シミュレーションによって、ナノメートルの空間スケール、フェムト秒の時間スケールの電子ダイナミクスを追跡することにした。表面素過程として重要な、表面電子散乱、レーザー刺激電子・原子放出、陽電子との散乱の3つの現象に焦点を当てた研究を行うことにした。これら電子散乱現象をより適切に記述するためには、TDDFT法に含まれる交換相関項の改良が要求されるので、並行して、実効的交換相関項を構築することも本研究の目的とした。

### 2. 研究の目的

上記研究背景を踏まえ、本研究では次の4つのテーマを設定した。

- (1) ナノ構造に電子を入射させたときの一次電子の透過・反射の素過程と二次電子放出(SEE)の微視的機構を明らかにするために、電子散乱を定量的に正しく記述する TDDFT 法のプログラム開発を行い、炭素系ナノ構造を散乱体を選んでシミュレートする。
- (2) フェムト秒レーザーがナノ構造に照射された時の電子放出と電子励起・原子放出の相関動力学を明らかにする目的で、TDDFT-MD プログラムを開発し、それをレーザー刺激アトムプローブトモグラフィー (LA-APT) 実験の理論検証に応用する。
- (3) 固体表面の電子と陽電子散乱機構の解明に向け、電子・陽電子相関ダイナミクスの第一原理計算を可能とする多成分 TDDFT 法を開発し、応用する。
- (4) 電子散乱効果や励起子効果を TDDFT 法により正確に記述するために必要な、交換相関項の性質を明らかにし、交換相関項の近似理論の改良へ応用する。

### 3. 研究の方法

(1) 電子散乱体としてグラフェンと二層グラフェンを選び、電子散乱係数の入射エネルギー依存性を求め、実験結果との比較を行う。特に、グラフェン層間の電子状態が散乱係数に与える影響を調べる。SEE エネルギースペクトルを Kohan-Sham 軌道占有数の時間発展から明らかにすることを検討する。多層グラフェンの SEE スペクトルを計算し、層数を無限に外挿することでダイヤモンドの SEE スペクトルと走査型電子顕微鏡(SEM)像を理論的に求める。

(2) フェムト秒レーザーをナノ構造に照射させたときの放出電流とレーザー電場による励起準位占有数の時間発展の相関を明らかにする。次に、TDDFT-MD プログラムを使って、フェムト秒レーザー刺激原子蒸発ダイナミクスを実時間で明らかにする。関連して、多層グラフェンのレーザー刺激剥離の可能性と、原子蒸発に与える熱効果についても調べる。

(3) 電子・陽電子相関系の多成分 TDDFT の理論開発のため、まず、電子・陽電子相関ダイナミクスを再現するような、相互作用のない多成分 Kohn-Sham 系の時間依存有効ポテンシャルが一意的に存在し、時間依存多成分 Kohn-Sham (TD-MCKS) 方程式が存在することを証明する。次いで、各瞬間の電子密度と陽電子密度を基底状態の電子・陽電子相関汎関数に代入する断熱局所密度近似を定式化する。以上の多成分 TDDFT の計算コードを開発し、レーザー場中にある陽電子吸着 LiH 分子の陽電子脱離ダイナミクス解析に適用し、電子・陽電子相関の重要性を調べる。

(4) まず、電子散乱を正確に記述するための交換相関項の性質を明らかにするために、厳密に多体の時間依存シュレディンガー方程式を解くことができる、1次元水素原子-電子散乱モデルを開発する。その時間依存シュレディンガー方程式の解から、電子散乱過程における厳密な交換相関ポテンシャルを計算し、ALDA や EXX 等の近似交換相関ポテンシャルと比較することで、電子散乱の記述に必要な交換相関項の性質を調べる。さらに、励起子効果を記述するための交換相関項の性質を明らかにするために、多体摂動論から導出される Bootstrap 交換相関カーネルを用いて二次元原子層物質の誘電関数を計算し、その精度を解析する。

### 4. 研究成果

(1) 波束形状の電子波動関数をグラフェンと二層グラフェンに入射させ、その一次電子の透過率を実時間 TDDFT 法で計算したところ、入射エネルギーが 60~600 eV の領域で低エネルギー点源電子顕微鏡 (LEEPS) を組み合わせた新しい実験手法で得られた結果 (入射エネルギー依存性) と定性的に良い一致が得られた。(実験グループとの共同研究) 二層グラフェンではいずれの入射エネルギーにおいても透過率は減少し、実験結果を再現した。面方向に一樣な波束形状電子波動関数を準備し、二層目のグラフェン位置を層方向でずらすことによって得られる二つのスタッキング構造 (いわゆる、AA スタッキングと AB スタッキング) の二層グラフェン構造に入射させると、その透過率のエネルギー依存性がスタッキングに依存して特徴的に異なることを見出した。電子回折強度が散乱体原子の幾何学的配置に依存するだけでなく透過側の観測位置にも強く依存することを考慮することで、計算結果の物理解釈が明瞭となった。

次に、グラフェンからの二次電子放出の TDDFT シミュレーションでは主に二つの結果を得た。

一つ目は、グラフェンの角度分解二次電子放出 (ARSEE) スペクトルの決定である。二次電子の ARSEE スペクトルは、時間に依存する放出二次電子の波動関数のフーリエ変換することで求めた。グラフェンのエネルギー状態密度からグラフェンに束縛される励起状態波数 ( $k$ ) 射影状態密度 (Pk-DOS) を調べた結果、ARSEE スペクトルピークは、グラフェンのエネルギーバンド構造の非占有軌道に対応することが明らかとなった。この解釈は実験的に予測されていたが、微視的に特に時間依存第一原理計算によって理論検証されたのは初めてである。二つ目は、多層グラフェンの SEE 強度の入射電子エネルギー依存性と層数依存性についてである。層数が増えると、いずれの入射エネルギーの場合でも、SEE 強度 (SEM 像の明暗に対応) は頭打ちになる。これは入射電子がグラフェンに衝突する際に生じる減衰効果によるものである。特に入射エネルギーが小さい ( $\sim 200$  eV) 時は 3 層で頭打ちになるが、800eV 程度になると、5 層でも頭打ちにならない。層数が無限となったときの SEE 強度を外挿法で求めると、このエネルギー領域で 0.1 $\sim$ 0.4 になった。実験結果と比較すると数分の 1 程度で過小評価しているが、バルクグラファイトの SEE 強度を理論的にはじめて決定したことの意義は大きい。最後に、入射電子波動関数の形状を波束型から平面波に変える“複素放出ポテンシャル法”のプログラム開発をおこない、定常的電子散乱シミュレーション (CIP) 法に成功した。二重スリットによる電子波干渉と Aharonov-Bohm 効果のシミュレーションによって、CIP 法の計算精度と電子放出・伝導などの現象への応用に向けてその有用性を確かめることができた。

(2) 有限長カーボンナノチューブ (CNT) からのプラズモン誘起電子放出を TDDFT 法によって明らかにした。光吸収スペクトルの低エネルギー領域では CNT 軸平行方向に偏光した光に対して強い吸収があることを確認し、実験結果を検証した。さらに、平行方向の近赤外領域に存在する強い吸収ピークが、プラズモン励起に対応していることも示した。対応する波長の共鳴レーザーを照射すると、プラズモンが励起されることで CNT の周りで強い電場増強が引き起こされ電子放出が促進され、さらに、放出電子の運動エネルギーのスペクトルにプラズモン励起による強い誘起電場が放出電子を加速させた結果が現れた。これらは実験結果を正しく説明している。

次に、シリコン表面を対象としてレーザー刺激電界原子蒸発に与える熱効果の影響を TDDFT-MD 法によって解析し、実験の理論検証をおこなった。電子に対しては電子温度を Fermi-Dirac 分布を使って導入し、原子に対しては原子温度を Maxwell-Boltzmann 分布を使って原子の初期速度に統計分布を与えることによって取り入れ、それぞれ独立したシミュレーションを行った。電子温度上昇による電子の熱励起はレーザー刺激電界原子蒸発を促進する効果は無いことが分かった。対照的に、原子温度の上昇は直接に原子運動を誘起し、熱的な蒸発の確率を上げることを明らかにした。さらに、表面平行方向での原子運動も原子温度の上昇とともに増加していくことを示した。La-APT の実験ではレーザー照射で試料の温度上昇をいかに防ぐかが、高分解能三次元構造イメージ、正確な元素分析を可能にするために重要であることを、第一原理シミュレーションによって理論的に初めて明らかにしたことになる。

(3) 原子核の座標を固定した座標系において電子と陽電子の密度と流れ密度を定義することで、電子・陽電子相関ダイナミクスを再現し、相互作用のない多成分 Kohn-Sham 系の時間依存有効ポテンシャルが一意的に存在することを証明した。この証明に基づき、電子・陽電子ダイナミクスを再現する TD-MCKS 方程式が存在することを証明した。次に、TDDFT における最小作用の原理を多成分 TDDFT へ拡張し、TD-MCKS 方程式中の有効ポテンシャルの厳密な表式を示した。さらに、時間依存電子・陽電子相関項に対して、各瞬間の電子密度と陽電子密度を基底状態の電子・陽電子相関汎関数に代入する断熱局所密度近似を定式化した。以上の多成分 TDDFT の計算コードを開発し、レーザー場中にある陽電子吸着 LiH 分子の陽電子脱離ダイナミクス解析に適用した。レーザーエネルギー等のパラメータを変えて計算結果を比較した結果、レーザー場中で電子と陽電子はお互いに相関した複雑な運動をすることが明らかになり、陽電子脱離に最適なレーザーパラメータを予測するために本多成分 TDDFT 法が有効であることを示した。また、レーザー場下で陽電子は電子の振動を抑制するように動き、その結果、共鳴電子励起が抑制されることを明らかにした。以上の結果より、本研究で開発された多成分 TDDFT 法を用いて、固体表面等における電子と陽電子の散乱ダイナミクスを解析することが可能であることを示した。

(4) 1 次元水素原子-電子散乱モデルの時間依存シュレディンガー方程式の解を用いて、電子散乱過程における厳密な交換相関ポテンシャルを計算した。その結果、電子散乱が起こる際には、厳密な交換相関ポテンシャルは複雑な peak 状の構造を示すことが明らかになった。この peak 構造の役割を調べるために、ALDA を含む様々な従来の近似交換相関項による結果との比較を行った。その結果を解析することで、従来の交換相関項は peak 構造を示さないために、正しく反射係数と透過係数を記述できないことを明らかにした。さらに、この peak 構造が、交換相関項中の「運動項」として定義される項に由来するものであることを明らかにした。また、電子散乱過程を正しく記述する交換相関項の開発に向けて、交換相関項の運動項以外の部分である「相互作用項」を近似した VxcS 汎関数の精度について調べた。本研究によって、TDDFT を用いて電子散乱を計算するために必要な交換相関項の性質が明らかになった。また、励起子効果を記述するために必要な交換相関項の性質を明らかにすることを目指し、多体摂動理論に近似を加えることで導出される Bootstrap 交換相関カーネルと、Tran-Blaha metaGGA 交換相関ポテンシャルを組

み合わせた TDDFT 法を用いて、2 層六方晶窒化ホウ素および単層遷移金属ダイカルコゲナイドの誘電関数計算を行った。得られた結果を多体摂動理論による結果と比較することで、本 TDDFT 法がそれぞれの励起子ピークの特徴を正しく記述できることを明らかにした。本研究から、Bootstrap 交換相関カーネルと Tran-Blaha metaGGA 交換相関ポテンシャルの組み合わせが、低次元物質の励起子効果の記述に必要な交換相関項の性質を部分的に取り込んでいることが明らかになった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 2件）

|   |                            |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名<br>Suzuki Yasumitsu, Watanabe Kazuyuki   | 4. 巻<br>22                 |
| 2. 論文標題<br>Excitons in two-dimensional atomic layer materials from time-dependent density functional theory: mono-layer and bi-layer hexagonal boron nitride and transition-metal dichalcogenides | 5. 発行年<br>2020年            |
| 3. 雑誌名<br>Physical Chemistry Chemical Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>2908, 2916   |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1039/C9CP06034K  | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>-                  |
| 1. 著者名<br>Uchida Kazuki, Suzuki Yasumitsu, Watanabe Kazuyuki  | 4. 巻<br>126                |
| 2. 論文標題<br>Thermal effects on laser-assisted field evaporation from a Si surface: A real-time first-principles study  | 5. 発行年<br>2019年            |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Applied Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>034302-1, -8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br><a href="https://doi.org/10.1063/1.5090949">https://doi.org/10.1063/1.5090949</a>   | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>-                  |
| 1. 著者名<br>Suzuki Yasumitsu, Hagiwara Satoshi, Watanabe Kazuyuki   | 4. 巻<br>121                |
| 2. 論文標題<br>Time-Dependent Multicomponent Density Functional Theory for Coupled Electron-Positron Dynamics   | 5. 発行年<br>2018年            |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>133001-1, -6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br><a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.133001">https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.133001</a>   | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>-                  |
| 1. 著者名<br>Ueda Yoshihiro, Suzuki Yasumitsu, Watanabe Kazuyuki   | 4. 巻<br>11                 |
| 2. 論文標題<br>Secondary-electron emission from multi-layer graphene: time-dependent first-principles study   | 5. 発行年<br>2018年            |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Express   | 6. 最初と最後の頁<br>105101-1, -4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br><a href="https://doi.org/10.7567/APEX.11.105101">https://doi.org/10.7567/APEX.11.105101</a>   | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>-                  |

|   |                            |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名<br>Yoshihiro Ueda, Yasumitsu Suzuki, and Kazuyuki Watanabe   | 4. 巻<br>97                 |
| 2. 論文標題<br>Time-dependent first-principles study of angle-resolved secondary electron emission from atomic sheets               | 5. 発行年<br>2018年            |
| 3. 雑誌名<br>PHYSICAL REVIEW B   | 6. 最初と最後の頁<br>075406-1, -7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br><a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.075406">https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.075406</a> | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>-                  |

|   |                            |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名<br>Yasumitsu Suzuki, Lionel Lacombe, Kazuyuki Watanabe, Neepea T. Maitra                 | 4. 巻<br>119                |
| 2. 論文標題<br>Exact Time-Dependent Exchange-Correlation Potential in Electron Scattering Processes | 5. 発行年<br>2017年            |
| 3. 雑誌名<br>PHYSICAL REVIEW LETTERS   | 6. 最初と最後の頁<br>263401-1, -6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevLett.119.263401                                      | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する               |

|   |                            |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名<br>Kazuki Uchida and Kazuyuki Watanabe   | 4. 巻<br>96                 |
| 2. 論文標題<br>Plasmon excitation and electron emission of a carbon nanotube under a linearly polarized laser: A real-time first-principles study | 5. 発行年<br>2017年            |
| 3. 雑誌名<br>PHYSICAL REVIEW B   | 6. 最初と最後の頁<br>125419-1, -7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.96.125419  | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>-                  |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Da Bo, Liu Jiangwei, Yamamoto Mahito, Ueda Yoshihiro, Watanabe Kazuyuki, Cuong Nguyen Thanh, Li Songlin, Tsukagoshi Kazuhito, Yoshikawa Hideki, Iwai Hideo, Tanuma Shigeo, Guo Hongxuan, Gao Zhaoshun, Sun Xia, Ding Zejun | 4. 巻<br>8                 |
| 2. 論文標題<br>Virtual substrate method for nanomaterials characterization   | 5. 発行年<br>2017年           |
| 3. 雑誌名<br>NATURE COMMUNICATIONS  | 6. 最初と最後の頁<br>15629-1, -9 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/ncomms15629  | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |

|  |                            |
|--|----------------------------|
| 1. 著者名<br>H. Miyauchi, Y. Ueda, Y. Suzuki, K. Watanabe   | 4. 巻<br>95                 |
| 2. 論文標題<br>Electron transmission through bilayer graphene: A time-dependent first-principles study | 5. 発行年<br>2017年            |
| 3. 雑誌名<br>PHYSICAL REVIEW B  | 6. 最初と最後の頁<br>125425-1, -5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.95.125425   | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>-                  |

[学会発表] 計46件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 21件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Kazuki Uchida, Yasumitsu Suzuki, and Kazuyuki Watanabe  |
| 2. 発表標題<br>Thermal effect on laser-assisted field evaporation from Si(110) surface: A time-dependent first-principles theory combined with molecular dynamics simulation |
| 3. 学会等名<br>21st International Vacuum Congress (IVC-21) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>鈴木康光、渡辺一之                 |
| 2. 発表標題<br>時間依存密度汎関数法による原子層物質の誘電関数計算 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会、第74回年次大会           |
| 4. 発表年<br>2019年                      |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>内田一樹、永長和己、秋元優紀、鈴木康光、渡辺一之  |
| 2. 発表標題<br>周期系物質の角度分解光電子分光の実時間第一原理計算 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会、第74回年次大会           |
| 4. 発表年<br>2019年                      |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>山口友和、内田一樹、鈴木康光、渡辺一之                    |
| 2. 発表標題<br>複素放出ポテンシャルを実装した時間依存密度汎関数法による定常的電子散乱の研究 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 第74回年次大会                        |
| 4. 発表年<br>2019年                                   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yoshihiro Ueda, Yasumitsu Suzuki, Kazuyuki Watanabe                                  |
| 2. 発表標題<br>Secondary Electron Emission from Multi-layer Graphene by TDDFT Simulations           |
| 3. 学会等名<br>The 21st Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Kazuki Uchida, Kazuyuki Watanabe   |
| 2. 発表標題<br>Plasmon excitation and electron emission by linearly polarized laser: a time-dependent first-principles simulation |
| 3. 学会等名<br>31th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC) (招待講演) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Suzuki, S. Hagiwara, K. Watanabe   |
| 2. 発表標題<br>Time-Dependent Multi-Component Density Functional Theory for Coupled Electron-Positron-Nuclear Dynamics |
| 3. 学会等名<br>APS March Meeting 2018 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Suzuki, L. Lacombe, K. Watanabe, N.T. Maitra                                       |
| 2. 発表標題<br>Exact time-dependent exchange-correlation potentials in electron scattering processes |
| 3. 学会等名<br>TSRC Workshop: Excited States: Electronic Structure and Dynamics (国際学会)               |
| 4. 発表年<br>2017年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

|   |
|---|
| <p>研究者情報データベース RIDAI<br/> <a href="https://www.tus.ac.jp/ridai/doc/ji/RIJIA01Detail.php?act=nam&amp;kin=ken&amp;diu=c5e">https://www.tus.ac.jp/ridai/doc/ji/RIJIA01Detail.php?act=nam&amp;kin=ken&amp;diu=c5e</a></p> |
|---|

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                         | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                       | 備考 |
|-------|---|---|----|
| 研究分担者 | 鈴木 康光<br><br>(SUZUKI Yasumitsu)<br><br>(50756301) | 東京理科大学・理学部第一部物理学科・講師<br><br><br><br>(32660) |    |