

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2010～2014

課題番号：22104008

研究課題名（和文）プロトン・ミュオンで探る新物性と量子ダイナミクス

研究課題名（英文）New properties of materials probed by proton and muon, and their quantum dynamics

研究代表者

中西 寛 (Nakanishi, Hiroshi)

大阪大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：40237326

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 75,400,000 円

研究成果の概要（和文）：物質環境下におけるプロトン（水素原子の原子核）、ミュオン等の第一原理計算コード（Naniwa）を開発し、それら粒子の関わる新規物性を探査した。Naniwaにて、金属表面、グラフェン、酸化物結晶中のプロトン、ミュオンの量子状態を調査した結果、各種実験結果と良い一致を得て、その有効性を示した。更なる高精度化のため、電子相関をより高速に計算するアルゴリズムを開発した。また、高圧下金属水素化物における水素の特異性も評価した。開発した実験手法と計算手法を駆使してPd表面における水素の吸放出ダイナミクス、水素添加反応触媒機構を解明することができた。これら成果は、水素エネルギー技術開発にも貢献する。

研究成果の概要（英文）：We have been developing the first principles simulation methods and novel experimental methods for the hydrogen isotope nuclei (positive muon and proton) states in the materials, and investigating their behaviors and their induced new properties of materials. (1) We made the first principles simulation code "Naniwa", for the positive muon, proton and other small mass nuclei in the material environments, and applied it to real material systems. (2) We also developed a new algorithm for electron-electron correlation energy calculations for the next generation first principles simulation methods. (3) We explored the new physical properties of metallic hydrides under high pressure by the first principles simulation. (4) We investigated the hydrogen states on solid surfaces and in their subsurfaces, and revealed the mechanisms of the catalytic reaction, diffusion, and desorption dynamics of hydrogen on metal surfaces with a combination of our developed experimental and simulation methods.

研究分野：物性物理学

キーワード：計算物質科学 量子シミュレーション 水素 ミュオン（ミュオン） 表面反応 量子効果 物性実験 計算科学

1. 研究開始当初の背景

密度汎関数理論に基づく電子状態計算手法は一定の成功を収め、さらに原子間の相互作用にこの手法を援用した第一原理分子動力学法は、様々な物質の動的過程(化学反応を含む)に適用され成功を収めつつある。しかしながら軽い原子の振る舞いはトンネル効果、干渉効果、非局在効果等の量子力学的効果が顕著になり、分子動力学法の適応範囲外にある。これらは、緊急の社会的要請であるエネルギー・環境問題に関連するマテリアルである水素、リチウム等で特に重要となる。たとえば、固体高分子形燃料電池の実際の運転温度においても水素原子核(プロトン)の振る舞いに、またリチウムイオン二次電池内の電極グラフェン上での Li イオンの振る舞いにおいて、量子力学的効果が顕在化することが見出されており、原子の量子ダイナミクスの解明は学問的に興味深いだけでなく、社会・産業上の実問題の解決においても重要であることを示唆している。さらに、J-PARCにおいて超低速ミュオンビームが物性研究実験手段として本格的に提供され始めた。正ミュオン(μ^+)は、質量がプロトンの1/9の正電荷粒子で、物性においては軽水素原子核(プロトン)よりさらに質量の小さな水素同位体の核として振る舞い、ミュオンをプローブとした物性解析のためにも、その量子ダイナミクスの解明が重要となっている。

2. 研究の目的

物質環境下(固体内部、固体表面上、固体サブ表面内部)における水素原子の原子核(プロトン)・ミュオン等の量子シミュレーション手法を開発する。また、水素の実験観測手法を深化させ、現実物質の内部およびその表面での上記粒子の量子ダイナミクスを解析し、それら粒子の与える新規物性を探査する。

3. 研究の方法

物質環境下におけるプロトン、ミュオン等の粒子の振る舞いに関する理論的取り扱い方法、およびその第一原理計算コードを開発し、その量子ダイナミクスを探る。また、それら粒子の関わる新規物性を探査する。

シミュレーション計算手法の開発として

(1)物質環境下におけるプロトン・ミュオンの第一原理計算手法を、電子系に対しては現在活用可能な従来の第一原理計算を援用して、開発する。

(2)将来プロトン・ミュオン計算手法に供することが可能な、より簡便で高精度な電子状態計算手法を開発する。

新規物性の探査研究として、

(3)高圧下の金属水素化物における水素の特異な物性を、第一原理計算を用いて探査する。

(4)固体表面上における水素観測の実験手法

(共鳴核反応法、昇温脱離法、同位体識別子法)を組み合わせ、さらに深化させて、金属表面での水素吸収・放出ダイナミクス、および触媒反応性を調査する。実験結果と、シミュレーション結果とを照合して、その物理的実像に迫る。

4. 研究成果

(1)物質環境下におけるプロトン・ミュオンの第一原理計算手法の開発:

物質環境下における水素等の質量の小さな原子核や正ミュオン(μ^+)の運動に対して量子力学を適応する第一原理量子ダイナミクス計算コード(Naniwa)を開発した(特許)。様々な金属表面における、水素同位体の量子状態について調査してきた結果、振動励起エネルギーで、EELS等実験結果との差がフィッティングパラメータ無しに10%以内に収まることを確認した。さらに高効率化したNaniwaを用いて、 μ^+ を核として1s状態に電子を捕獲した中性水素原子様のミュオニウム(Mu)になると μ SR実験で報告されている酸化シリコン結晶中を調べた。従来の第一原理計算では、この中性原子状態は不安定とされていたが、今回安定な自己束縛の中性原子様の量子状態を見出すことができ、超微細相互作用も μ SR実験結果と良い一致が得られた。これにより、金属結合性・イオン結合性・共有結合性の結晶材料中、表面上、サブ表面中のプロトン、ミュオン等粒子の第一原理量子状態シミュレーションが可能となった。

グラフェン上の水素同位体原子の吸着状態は、炭素原子直上のTOPサイトにおいて、炭素原子がグラフェン平面より突き出ることにより、水素(同位体)原子側に向けた sp^3 様の混成軌道ができ、C-H間 σ 結合により形成される。吸着エネルギーは、Naniwaの計算結果では、軽水素で-0.58eV、正ミュオン(μ^+)で-0.22eVであった。昇温脱離実験によるグラフェン上の水素の吸着エネルギーは、-0.59eVないしは-0.65eVで軽水素においては実験と良い一致を示した。なお、従来の第一原理計算の同エネルギーは、-0.82eVである。吸着状態の μ^+ では、価電子寿命が短く電子スピンの消失したミュオニウムになっていると予想されるシミュレーション結果であった。超低速ミュオン顕微鏡による μ SR実験の実施が待たれる。本研究の一部は、新学術領域「超低速ミュオン顕微鏡が拓く物質・生命・素粒子科学のフロンティア」と本研究との共同研究の成果の一つとして、国際会議USM2013に共著で発表した。

③オレフィン等の水素添加反応触媒において、水素を供給する特異な水素状態が存在すると実験から分かったPd(110)(1x2)missing-row構造の表面における水素吸収反応過程について調べた。この再構成表面は、水素吸着により誘起されているが、水素吸収においては、既に吸着している水素ではなく

新たに気相から飛来する水素分子により促進されていることが分かった。その水素分子の解離反応は、trough(溝) siteよりは、ridge(畝) siteの水素が抜けた部分で活性化障壁が低く、起こりやすいことが分かった。水素吸収においては、この飛来する分子の分子解離過程が律速になっており、後の水素原子の表面層侵入自体は、non-activatedな過程で、この部分のみの逆反応であるオレフィン等の水素添加触媒反応は、実験から見出した通り起こりやすい表面構造となっていることが分かった。

水素同位体原子の金属表面での吸収・放出反応に対して量子ダイナミクス計算(Naniwa)を用いて解析を行なった。ここでは、軽水素(H)、重水素(D)、三重水素(T)、ミュオニウム(Mu)を考慮した。従来の第一原理電子状態計算によると、水素同位体原子の表面吸着状態からサブサーフェスへの吸収過程には比較的大きな活性化障壁が存在することが報告されている。このポテンシャルエネルギーをもとにした量子ダイナミクス計算の結果から、Muでは量子トンネル効果が顕著に表れるため、活性化障壁よりも小さな運動エネルギーにおいても反応が進行することが分かった。さらに、吸放出過程において表面格子が歪むことで活性化障壁が低く抑えられる表面格子振動の自由度の効果も考慮した量子ダイナミクス計算を行なった結果、H, D, T原子では表面格子振動に伴い吸放出反応において実質的に越えなければいけない活性化障壁が低くなるため、必要な運動エネルギーが低くなることがわかった。一方で、Muではその効果をほとんど受けないことを見出した。

プロトンの振る舞いが物質合成のキーとなる特徴的な例として生体物質合成を取り上げ調査した。生体色素ユーメラニンの化学組成は、前駆体分子ドーパクロムの反応によって変化する。この反応のメカニズムを、第一原理シミュレーションを用いて解析した。その結果、プロトンの結合・解離反応が分子内電子移動を伴い、引き続き新たな素過程を誘起していることを見出した。ドーパクロムはまず位で脱プロトン化反応を起こす。この反応により、分子内のキノイド部位に電子移動が起こり、キノイド部位へのプロトン化がエネルギー的に有利になる。この部位のプロトン化によりそこから比較的離れたカルボキシ基の脱離反応(脱炭酸)が劇的に促進される(活性化障壁が1.6 eV減少する)。この脱炭酸反応が起こるか否かによって、ドーパクロム変換の生成物は変化する。すなわち、ドーパクロムの反応における分岐機構が、プロトンの結合・解離反応にあることが分かった。

(2)プロトン・ミュオン計算手法に供する簡便で高精度な電子状態計算手法の開発:

厳密解を得ることが不可能なサイズの多体量子系について、完全配置間相互作用法

と同等の精度の解を得ることが可能な計算手法の開発を行った。共鳴ハートリー・フォック法などでその有効性が確認されている非直交スレーター行列式(SD)による基底セットを効率的に作成する方法を提案し、計算コードを作成するとともに分子系への適用試験と計算コスト削減を目的としたアルゴリズムの改良を行った。1電子波動関数に線形独立な修正関数を加え、その重み係数を変分原理に基づいて決定する操作を繰り返す。その際、1電子波動関数に規格・直交条件を課さないことで非直交基底関数系が生成される。波動関数の更新に従って滑らかに厳密解に向かって収束すること、実質的厳密解に必要なSD数は完全配置間相互作用(FCI)法に比較して劇的に少なく、系の大きさに対する増加率も極めて緩やかであることなどの特徴が明らかになった。また、ハミルトン行列要素の更新方法および修正関数の選択方法や与え方の改良を行った結果、計算コストを大幅に削減することに成功した。これにより、従来全電子FCI計算が不可能であったエチレン分子やベンゼン分子についても、FCIレベルの高精度電子状態計算が可能になった。

(3)高圧下の金属水素化物の物性探査:

ほとんどの物質は加圧すると金属化し、さらに加圧しても再び非金属になることはないが、Li系では高圧下で非金属相が理論予測され、その後実験で確認された。本研究では、AlH₃が高圧下で金属-非金属転移を起こすことを第一原理計算より示した。200GPa付近でバンドギャップが開くことを第一原理GW近似計算から確認した。なお、この現象は、AlをBやGaなどの同じ族の元素で置換した場合には起こらないことが分かった。すなわち、AlとHとの電気陰性度の程よい差とAlの3sと2sの直交性という電子構造に由来していたことを解明した。

(4)金属表面での水素吸収ダイナミクスと触媒反応性に関する実験:

水素雰囲気曝した金属表面での原子レベルでの水素輸送機構を解明することは、産業における水素添加触媒だけでなく、水素貯蔵、水素精製などの水素エネルギー技術を支えるマテリアルをデザインするうえで大変重要である。¹H(¹⁵N, ¹³C)共鳴反応法(NRA)による水素深さ分析、昇温脱離法(TDS)、同位元素標識法を深化、組み合わせ相補的データを得て、気相水素分子からPd(110)表面内水素原子状態への微視的な反応経路を解明した。表面下水素の形成には二つの異なる経路があり、それぞれ深さ分布の異なる水素の状態を形成する。一つは、表面欠陥から迅速に侵入し比較的浅い領域に分布するもの(1)、もう一つは、テラスから徐々に侵入しバルク領域まで拡がって水素化物を形成するもの(3)である。これらの侵入過程は表面構造に敏感であるため、この描像を用いることにより、他の表面構造におけ

る一般的な水素吸収特性の傾向を説明できることを示した。さらに、Pd(110)での水素吸収過程の活性化障壁は0.1eV以下と極めて小さいことが分かった。この事実は、表面吸着状態から内部への侵入過程に少なくとも0.3eV以上を要し、それが律速段階になると考えられていたことと矛盾する。水素が飽和吸着した表面では、水素分子解離吸着過程と、共吸着した水素原子との協調した運動がこの過程を支配していると考えられる。その詳細は、第一原理シミュレーションを用いることにより解明した。既吸着水素原子のサブ表面内部への侵入は、気相から飛来する水素が補助するため、律速とはならず、代わってその気相から飛来する水素分子の解離吸着過程が律速段階になること(1)-③)が分かり矛盾は解消した。

Pd表面におけるオレフィンの水素添加触媒反応における固溶水素の役割を調査した。これには二つの見解があり、永らく論争が続いていた。一つは直接的な反応シナリオで、固溶水素の内の表面吸着状態より比較的高いエネルギーの高い状態から、表面の遷移状態へ析出し水素添加の水素源となるものである。もう一つは間接的な反応シナリオで、反応の水素源はあくまで表面吸着水素であり、固溶水素は単に反応に好適な電子状態の形成に寄与するというものである。オレフィンの水素添加反応の典型例としてブテン(C₄H₈)からブタン(C₄H₁₀)への水素添加触媒反応を取り上げ、水素暴露温度により固溶水素量を制御して、反応時における水素の深さ分布、量、および反応量の変化を計測した。その結果、様々に初期固溶水素量を変えてもブテン水素添加反応の上限温度(218K)での水素の深さ分布は、表面での化学吸着水素のみの分布に近づいており、また、生成されるブタン総量は、初期の既固溶水素量に比例することが分かった。電子状態が変化するには膨大な固溶水素が必要とされることから、この結果は直接反応シナリオを強く示唆するものである。これによりオレフィンの水素添加触媒反応における固溶水素の役割が明白になったと考える。

③Pd表面において固溶した水素の脱離、触媒反応、拡散の特性を研究し、一酸化炭素(CO)の規則的な共吸着により表面再構成を誘起してPd固溶水素(H_{abs})の脱離を制御する可能性を探索した。水素暴露したPd(110)表面において、0.5MLのCO吸着は初期のH誘起(1×2) pairing-row (PR)再構成構造を、bulk-truncated (1×1)表面に戻し、0.3 - 1.0 MLのCO吸着で加熱するとmissing-row (MR)構造を誘起する。それぞれの表面構造において、昇温脱離スペクトルは特徴的なピーク構造(₁, ₂, ₃, ₁, ₂)をとる。特に ₁以外のピークはテラスからの脱離水素を由来とするものであり、それぞれの表面構造により特徴づけられる脱離プロセスを反映していることが分かった。これらは、COの共吸着に

より固溶水素H_{abs}の脱離温度を制御することが可能であることを示唆するものである。これまで報告されていた脱離温度シフトよりはるかに大きい極低温から室温以上への実に215Kものシフトを実現している。脱離温度は、会合脱離反応や水素添加触媒反応の重要な制御パラメータであるため、この脱離温度制御は、触媒反応のコンディションや触媒反応選択性を改善する可能性を秘めている。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計87件)

- “Desorption Temperature Control of Palladium-Dissolved Hydrogen through Surface Structural Manipulation”, S. Ohno, M. Wilde, K. Fukutani, Journal of Physical Chemistry C, 119, Article ASAP (in press, 7 pages), 査読:有, DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b02365 (2015).
- “Oxidation of NO on Pt/M (M = Pt, Co, Fe, Mn): a first-principles density functional theory study”, R. L. Arevalo, K. Oka, H. Nakanishi, H. Kasai, H. Maekawa, K. Osumi, N. Shimazaki, Catalysis Science & Technology, Vol.2, pp.882, (2015). 査読:有, DOI: 10.1039/C4CY00907J
- “First principles investigation of the initial stage of H-induced missing-row reconstruction of Pd(110) surface”, A. A. B. Padama, H. Kasai, Journal of Chemical Physics, Vol.140, pp.244707 (2014). 査読:有, DOI: 10.1063/1.4885143.
- “Interstitial impurity-induced magnetism in α -PbO surface”, E. Arguelles, S. Amino, S. M. Aspera, H. Nakanishi, H. Kasai, Journal of Physics: Condensed Matter, Vol.27(1), pp.16002, (2014). 査読:有, DOI: 10.1088/0953-8984/27/1/016002.
- “Hydrogen atom absorption in hydrogen-covered Pd(110)(1×2) missing-row surface”, A. A. B. Padama, B. Chantaramolee, H. Nakanishi, H. Kasai, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.32 (12), pp.6598, (2014). 査読:有, DOI: 10.1016/j.ijhydene
- “Adsorbed oxygen-induced cluster reconstruction on core-shell Ni@Pt and clusters”, F. Oemry, H. Nakanishi, H. Kasai, H. Maekawa, K. Osumi, K. Sato, Journal of Alloys and Compounds, Vol.594(1), pp.93, (2014). 査読:有, DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.01.084
- “Dynamics of Mu, H, D, and T absorption into Pd(111): Isotope effects”, K. Shimizu, W. A. Dino, H. Kasai, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.83, pp.13601, (2014). 査読:有, DOI:

10.7566/JPSJ.83.013601
“Hydrogen Detection near Surfaces and Shallow Interfaces with Resonant Nuclear Reaction Analysis”, M. Wilde, K. Fukutani, Surface Science Reports, 69, 196-295 (2014). 査読:有, DOI: 10.1016/j.surfrep.2014.08.002
“Pressure induced band gap opening of AlH_3 ”, M. Geshi and T. Fukazawa, Physica B 411 (2013) 154-160, (2013), DOI: 10.1016/j.physb.2012.11.041
“Essentially exact ground-state calculations by superpositions of nonorthogonal Slater determinants”, H. Goto, M. Kojo, A. Sasaki, K. Hirose, Nanoscale Research Letters, 8:200, (2013). 査読:有, DOI: 10.1186/1556-276X-8-200.
“Dihydride Structures of Deuterium on Germanium (001) Surfaces”, A. Sarhan, O. Y. Ching, H. Nakanishi, K. Fukutani, H. Kasai, Journal of Applied Physics, Vol.131, pp.23703, (2013). 査読:有, DOI: 10.1063/1.4774097
“First Principles Study of Ortho-Para H_2 Conversion on $\text{O}_2(0.25 \text{ ML}) / \text{Ag}(111)$ System”, Y. Kunisada, H. Nakanishi, W. A. Dino, H. Kasai, Current Applied Physics, Vol.12, pp.S115,(2012). 査読:有, DOI: 10.1016/j.cap.2012.04.017
“Electron-Vibron Interaction Effects on Scanning Tunneling Microscopy Current through Melamine Adsorbed on $\text{Cu}(100)$ ”, A. Sarhan, M. Sakaue, H. Nakanishi, H. Kasai, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.81, pp.104711, (2012). 査読:有, DOI: 10.1016/j.cap.2012.04.003
“Electron-electron correlation energy calculations by superposition of nonorthogonal Slater determinants”, A. Sasaki, K. Hirose, H. Goto, Curr. Appl. Phys., 12, S96-S99, (2012). 査読:有, DOI: 10.1016/j.cap.2012.04.003
“Current Understanding of the Transport Behavior of Hydrogen Species in MOS Stacks and Their Relation to Reliability Degradation”, Z. Liu, S. Fujieda, H. Ishigaki, M. Wilde, K. Fukutani, ECS Transactions 35(4), 55-72 (2011). 査読:有, DOI: 10.1149/1.3572275
“Real-space finite-difference approach for multi-body systems: path-integral renormalization group method and direct energy minimization method”, A. Sasaki, M. Kojo, K. Hirose, H. Goto, J. Phys.: Condens. Matter 23, 434001, (2011). 査読:有, DOI: 10.1088/0953-8984/23/43/434001

[学会発表](計127件)

中西 寛, 「プローブ量子・正ミュオンの第一原理計算」、日本物理学会第70回年次大会、シンポジウム：第一原理計算手法の現状と展望、2015年3月21-24日、早稲田大学 早稲田キャンパス、日本 Markus Wilde, “Linking the gas phase and the bulk: Dynamics of hydrogen absorption at palladium surfaces”, 10th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids (DSL-2014) (Paris, France, June 23-27, 2014)

中西 寛, Quantum states of impurity hydrogen isotopes in covalent crystals, the 10th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids -

DSL-2014 Paris, France, June 23-27, 2014

中西 寛, 「共有結合性結晶における不純物水素同位体の量子状態」、MSL ワークショップ：格子間水素同位体の位置と電子状態-酸化物を中心に、2014年3月19日、エポカルつくば、日本

M. Geshi, T. Fukazawa, “Pressure Induced Band Gap Opening of AlH_3 ”, International Workshop of Computational Nano-Materials Design on Green Energy (Joint Workshop of Interactive Materials Science Cadet Program(IMSC), Osaka University and S-1 JSPS Core-to-Core Program (A) Advanced Research Networks) (Awaji, Japan, June 16-19,2013)

Hiroshi Nakanishi, “Quantum adsorbed states of hydrogen isotope atoms on grapheme”, “International Workshop of Computational Nano-Materials Design on Green Energy”, JSPS Core-to-Core Program Workshop, June 16-19, 2013, Awaji Yumebutai International Conference Center, Awaji-city, Japan

Wilson Agerico Dino, “Surface as a Foundation for Materials and Process Design”, Core-to-Core Program

“Computational Materials Design on Green Energy” and Zernike Institute, University of Groningen, Joint International Symposium, November 18-21, 2012, Hampshire Hotel -Plaza Groningen, Groningen, The Netherlands

Hiroshi Nakanishi, “Quantum simulation for hydrogen atom motion on solid surfaces”, Workshop on Physics of Hydrogen in Materials, January 30-31, 2012, ISIR, Osaka University, Japan

中西 寛, 「ミュオンがみる固体表面・サブ表面」、シンポジウム：超低速ミュオン顕微鏡：その限りない可能性を探る、

日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 21 日-24 日、富山大学、日本
Markus Wilde, “Elucidating Hydrogen Absorption at Metal Surfaces and Nanocrystals by $^1\text{H}(^{15}\text{N}, \alpha\gamma)^{12}\text{C}$ Nuclear Reaction Analysis”, 第 12 回「イオンビームによる表面・界面解析」特別研究会, 日本応用物理学会, 日本表面科学学会, 2010 年 12 月 3-4 日, 名古屋, 日本

〔産業財産権〕

出願状況 (計 3 件)

名称: 不揮発性メモリセル、これを備える不揮発性メモリ装置および遷移金属酸化物の選定方法

発明者: 笠井秀明、中西寛、岸浩史

権利者: 笠井秀明、中西寛、岸浩史

種類: 特許

番号: 特開 2012 - 149759

出願年月日: 2012 年 1 月 18 日

国内外の別: 国内

名称: 物質中又は物質近傍の原子又は分子等の量子状態推定法、量子状態推定装置及びコンピュータプログラム

発明者: 笠井秀明、中西寛

権利者: 笠井秀明、中西寛

種類: 特許

番号: 特願 2012 - 16133

出願年月日: 2012 年 1 月 30 日

国内外の別: 国内

名称: 窒素酸化物浄化触媒

発明者: 笠井秀明、中西寛、岸浩史

権利者: 笠井秀明、中西寛、岸浩史

種類: 特許

番号: 特願 2012 - 82097

出願年月日: 2012 年 3 月 30 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

開発したシミュレーションコード “Naniwa” は、計算機マテリアルデザインワークショップ・アドバンスドコース、および Asia Computational Materials Design (CMD) Workshop で、実習コードとして公開中。

<http://www.dyn.ap.eng.osaka-u.ac.jp/>

<http://phoenix.mp.es.osaka-u.ac.jp/CMD/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中西 寛 (NAKANISHI, Hiroshi)

大阪大学大学院工学研究科 助教

研究者番号: 40237326

(2) 研究分担者

下司 雅章 (GESHI, Masaaki)

大阪大学ナノサイエンスデザイン教育研究センター 特任准教授

研究者番号: 70397660

後藤 英和 (GOTO, Hidekazu)
大阪大学大学院工学研究科 准教授
研究者番号: 80170463

Wilde Markus
東京大学生産技術研究所 准教授
研究者番号: 10301136

(3) 連携研究者

笠井 秀明 (KASAI, Hideaki)

大阪大学大学院工学研究科 教授

研究者番号: 00177354

Wilson Agerico Tan Dño
大阪大学大学院工学研究科 准教授
研究者番号: 60379146

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

(4) 研究協力者

広瀬 喜久治 (HIROSE, Kikuji)

大阪大学大学院工学研究科 特任教授

研究者番号: 10073892

加藤 毅 (KATO, Tsuyoshi)
東京大学大学院理学系研究科 准教授
研究者番号: 10321986