

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25288108

研究課題名(和文) 遷移金属酸化物・窒化物の階層化複合ナノ構造の構築と機能設計

研究課題名(英文) Synthesis and functional design of hierarchical nano composite structure of transition metal oxides and nitrides

研究代表者

犬丸 啓 (INUMARU, Kei)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80270891

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：階層構造や複合構造の中の異なる階層同士が、その接合界面を介して、分子やイオンのような化学種、機械的力、電子や電荷をやり取りし、機能面で協奏し発現する機能を「階層機能」と定義する。本研究では、多孔体や結晶粒間の界面、結晶中に見出せる「すきま」など、種々の物質界面に着目し、階層機能の設計学理の構築を目指した。W03結晶子表面にTiO₂ナノ粒子を意図的に接触させた複合構造による光触媒の高活性化、複数種ナノ粒子をメソ多孔体で包含した複合体の合成と機能、メソ多孔酸化物にLi塩を充填した複合構造のLiイオン伝導の支配因子、結晶構造内で電荷をやり取りする無機結晶とその複合材の機能などの項目で成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：We defined “hierarchical function” as a function in which each level in a hierarchical structure interplays with each other by exchanging or passing chemical species (molecules or ions), charges (electrons and/or ions), or mechanical forces (compressing and tensile stress) etc. through the interfaces. In this study, we focused on such functions in inorganic crystals and nanostructured materials. Our study results include intentionally constructed W03 crystal-TiO₂ nanocrystals contacts, TiO₂ crystallites surrounded by mesoporous silica for enhanced photocatalysis, analysis of control factors of ionic conductivity in mesostructured composite of metal oxides and Li salts, and functions of intermetallic compound crystals in which one moiety passes charges to another moiety in the crystal structure.

研究分野：無機材料化学

キーワード：ナノ複合体 結晶 金属酸化物 金属窒化物 触媒 光触媒 超伝導

1. 研究開始当初の背景

ナノメートルレベルの複合構造をもつ材料は、機能材料の設計において重要な分野となっている。分子レベルからナノレベル、ナノレベルからそれ以上のスケールへ構造がつみ上がっていくように、小さいレベルから大きいレベルへ積み上げた構造を「階層構造」というが、階層構造を利用した機能開発が近年、より重要視されてきている。本研究では、系を特徴づける階層同士が機能面で絡み合い発現する機能を「階層機能」と定義する。「階層機能」では、階層構造や複合構造の中の異なる階層同士が、その接合界面を介して、分子やイオンのような化学種、機械的力、電子や電荷をやり取りし、機能面で協奏して材料全体として機能を発揮する。材料設計における階層構造の重要性が認識されるなかで、材料の機能をより自在に構築するために、階層機能というコンセプトは極めて重要であると考えた。

2. 研究の目的

本研究では、この階層機能のコンセプトに従い、階層構造やナノレベルの複合構造において、その系を特徴づける各階層や構造の構成要素の間で、電子やホール、分子、イオンなどをやり取りすることにより協奏的に機能を発現する複合材料の設計を行った。例えば、静電相互作用を利用して酸化半導体粒子間の複合化状態を制御し、その界面におけるホールの移動の効果により光触媒を高活性化することができた。直径が数ナノメートルの均質な細孔を有するメソポーラスシリカに Li 塩を充填した材料においては、充填した Li 塩と多孔体の細孔内壁の界面で Li イオンが移動すると考えられる。このようなナノ複合構造においては、ナノ細孔の直径やネットワーク形状が Li イオン伝導に大きな影響を及ぼす。多孔体と光触媒結晶ナノ粒子の複合構造では、分子がナノ細孔内に吸着濃縮される効果が光触媒機能を大幅に加速させた。無機結晶の中でも、構成要素間での電荷のやり取りによりその電子物性が決定される場合がある。これらの機能発現や物性発現の舞台となる特徴ある複合構造や階層構造、結晶構造を実現するため、水熱合成やゾルゲル法、超高压合成などの種々の特殊反応条件を活用できる。以上の検討により、階層構造、複合構造、結晶構造中の「界面」を介した機能協奏を実現し、階層機能の概念を確立することを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

複合構造や結晶構造の構築には、ゾルゲル法、水熱合成法、交互積層法、超高压高温合成法、封かん法などの方法を用いた。試料の解析や物性測定には、X 線回折法、透過型電子顕微鏡、走査型電子顕微鏡、窒素吸着測定、動的光散乱、交流インピーダンス法、可視-紫外吸収測定、赤外吸収スペクトル測定、赤外吸収スペク

トル測定、TG-DTA などを用いた。

4. 研究成果

(1) 酸化タングステン(WO_3)と二酸化チタン(TiO_2)の複合ナノ構造の設計

WO_3 結晶の表面に、予め合成された TiO_2 ナノ粒子を意図的に付着させた構造の構築を行い、その光触媒特性を調べた。ナノ構造をより明確にするために、 WO_3 としては数百 nm の大きさの直方体の粒子形状をもつ WO_3 を水熱合成して用いた。 TiO_2 ナノ粒子は、市販品の光触媒用チタニアゾル (粒径約 6 nm) を用いた。光触媒反応としては、気相アセトンの光触媒的分解活性を測定した。

ナノ構造の構築法として、交互積層法により表面電荷を制御し、静電相互作用によりナノ粒子を吸着させた。これには、PDDA = poly(diallyldimethylammonium chloride) と PSS = poly(sodium 4-styrenesulfonate) を WO_3 表面に交互に積層したのち、 TiO_2 ゾルと接触させ、静電的に TiO_2 粒子を WO_3 表面に付着させた。積層後、光触媒は 500°C で空气中焼成し、Pt を光電着した。TEM 測定の結果、角ばった WO_3 表面に TiO_2 粒子が付着していることが観測された。可視光照射下で光触媒作用による気相アセトンの分解反応活性を検討した。 TiO_2 を複合化していない Pt- WO_3 では、アセトンの減少速度が遅く、かつ、 CO_2 生成量がアセトンの減少量から期待される量よりかなり少なく、アセトンが CO_2 まで完全に酸化され得ないことが分かった。一方、複合体では、アセトン分解速度が大幅に向上するとともに、 CO_2 生成量もアセトン減少量と対応する量に近い値となった。交互積層法により生成した WO_3 と TiO_2 粒子が接触している構造が活性向上に重要であると結論した。これは、以下のように解釈できる。照射した可視光は WO_3 により吸収され、伝導帯に励起された電子は Pt 粒子へ移動し Pt 粒子表面で還元反応を起こす。一方、 WO_3 の価電子帯に生成したホールは、界面を介して TiO_2 へ移動し、 TiO_2 表面で酸化反応が起こる。意図的に生成した結晶間の接触を介してホールが移動することが活性向上の本質的な原因であると考えられる。

(2) 複数種ナノ粒子をメソポーラスシリカで包含した複合体の合成と機能

メソポーラスシリカ-粒子複合体の設計コンセプトをより発展させるため、複合化する粒子を二種類以上用いたナノ構造の構築を行った。具体的には、光触媒である酸化チタン微粒子と、磁性粒子である酸化鉄ナノ粒子を同時にメソポーラスシリカで包含した複合構造を構築した。磁性粒子間に相互作用があるせいか、従来の簡便な複合体合成法では磁性粒子がメソポーラスシリカの外部に凝集してしまっていたが、合成法を種々検討した結果、メソポーラスシリカが酸化鉄ナノ粒子をうまく包含した複合体の合成に成功した。さら

に、酸化チタン微粒子と磁性ナノ粒子を同時にメソポーラスシリカにより包含することに成功した。この複合体は、水中有機物の光触媒分解反応において、酸化チタン微粒子単体と比べて加速された光触媒活性を示し、さらに磁性粒子の効果により、磁場による回収が可能であった。このように異なる機能を持つ微粒子を同時にメソポーラスシリカで包含することにより、多様な機能を同時にメソポーラスシリカに付与した複合体を実現できることが示された。

(3) メソポーラス酸化物のナノ細孔に過塩素酸リチウムを充填した複合体の Li イオン伝導特性の支配因子の解明

メソポーラス酸化物と過塩素酸リチウムを複合させた材料について、リチウムイオン伝導特性を調べた。メソポーラス酸化物の細孔構造（2次元，3次元，細孔径）を反映して、リチウムイオン伝導の伝導度と活性化エネルギーが系統的に変化することを見出した。すなわち、メソポーラスシリカにおいては、MCM-41の2次元細孔とMCM-48の3次元細孔を比較すると3次元細孔の方が高いイオン伝導度を示し、複合体のナノ構造が大きく影響することがわかった。一方、メソポーラスアルミナ、メソポーラスジルコニア、メソポーラス酸化スズなど、種々のメソポーラス金属酸化物を用いた複合体を合成し Li イオン伝導特性を調べた。その結果、イオン伝導の活性化エネルギーが、酸化物の種類によらず、メソ細孔直径で決定されていると考えられる結果が得られた。細孔径が小さくなるに従い活性化エネルギーが小さくなった。過塩素酸リチウムのナノロッドをモデル化し DMol³により表面のLiイオンの安定性を計算したところ、定性的には上の結果を支持する結果が得られた。界面の曲率が表面 Li の安定性に影響を与え、それが活性化エネルギーの支配因子となっている可能性を考えている。

(4) TiO₂ 結晶粒子をメソポーラスシリカで包含した複合光触媒の活性支配因子の解明

TiO₂ 結晶粒子 - メソポーラスシリカ複合体の高活性要因の解明を試みた。水中の有機分子の吸着等温線を測定し、その吸着量の変化に対応して光触媒活性が増大することを見出し、メソポーラスシリカのナノ空間に分子が吸着濃縮されることにより反応が加速していることを明らかにした。吸着性の高い分子に吸着量の低い分子を高濃度で混合した反応条件では、メソポーラスシリカ存在により高吸着性分子の反応速度低下がおおきく抑制されることを確認した。このような反応挙動などを総合すると、メソポーラスシリカのナノ空間が反応場となり光触媒反応が加速されている。言い換えれば、TiO₂ 粒子の周りをメソポーラスシリカで覆ったこのナノ複合構造では、光触媒活性粒子の周囲にメソポーラスシリカが反応場を提供してい

ることになり、本研究のナノ複合構造の合理性をより明確に示す結果が得られた。

(5) 金属間化合物の電子構造制御と光触媒用助触媒としての機能開拓

金属間化合物はその結晶構造，組成の選択により電子構造を制御可能である。例えば、高い超伝導転移温度で知られる MgB₂ は、ホウ素のつくる共有結合性ネットワークに Mg が電子を供給してそのフェルミレベルが決定されている。このような化合物には、シリコンクラスレート Ba₈Si₄₆ など該当する。MgB₂ の Mg を Al で置換すると、ホウ素の共有結合ネットワークが受け取る電子が増えてフェルミレベルが上昇する。MgB₂ は金属であるがそのキャリアはホールのである。一方、MgB₂ の Mg を Al で置換した Mg_{1-x}Al_xB₂ では x が増加するに従いフェルミレベルが上昇して、キャリアは電子的に変化する。このように制御可能な電子構造を利用して、種々の機能を設計していくことは有望な戦略である。本研究では、光触媒の助触媒としての検討を行った。半導体光触媒に Mg_{1-x}Al_xB₂ を組み合わせると水の完全分解活性が大幅に向上した。これは金属間化合物を光触媒の助触媒として使用した初めての例と考えられる。本項目は今後継続すべき重要な研究課題である。

(6) 層状複水酸化物 (LDH) の新規な CO₂ 脱離特性の発見

LDH において、新規な CO₂ 脱離特性が発現することを見出した。LDH は古くから知られている化合物であるが、従来このような指摘は全くされていなかった。その機構も含めて、本項目は今後継続すべき重要な研究課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計9件)

1. T. Ohashi, Y. Miyoshi, K. Katagiri, K. Inumaru, Photocatalytic Reduction of Carbon Dioxide by Strontium Titanate Nanocube-Dispersed Mesoporous Silica, J. Asian Ceram. Soc., 査読有, 2017, 印刷中.

DOI: 10.1016/j.jascer.2017.04.008

2. K. Inumaru, Roles of Interfaces in Nanostructured Composites: Nanocatalysts, Sponge Crystals and Thin Films, J. Ceram. Soc. Jpn., 査読有, Vol. 124, 2016, pp. 1110-1115.

DOI: 10.2109/jcersj2.16112

3. T. Nishikawa, H. Fukuoka, K. Inumaru, High-Pressure Synthesis and Electronic Structure of a New Superconducting Strontium Germanide (SrGe₃) Containing Ge-2 Dumbbells, Inorg. Chem., 査読有, Vol. 54, 2015, pp. 7433-7437.

DOI: 10.1021/acs.inorgchem.5b00989

4. T. Ohashi, T. Sugimoto, K. Sako, S. Hayakawa, K. Katagiri, K. Inumaru, Enhanced photocatalytic activity of Pt/WO₃ photocatalyst combined with TiO₂ nanoparticles by polyelectrolyte-mediated electrostatic adsorption, *Catal. Sci. Technol.*, 査読有, Vol. 5, 2015, pp. 1163-1168.
DOI: 10.1039/c4cy01075b
5. H. Kawabata, Y. Koda, H. Sumida, M. Shigetsu, A. Tamai, K. Inumaru, High three-way catalytic activity of rhodium particles on a Y-stabilized La-containing ZrO₂ support: the effect of Y on the enhanced reducibility of rhodium and self-regeneration, *Catal. Sci. Technol.*, 査読有, Vol. 5, 2015, pp. 584-594.
DOI: 10.1039/c4cy01032a
6. H. Kawabata, Y. Koda, H. Sumida, M. Shigetsu, A. Tamai, K. Inumaru, Self-regeneration of three-way catalyst rhodium supported on La-containing ZrO₂ in an oxidative atmosphere, *Catal. Sci. Technol.*, 査読有, Vol. 4, 2014, 697-707.
DOI: 10.1039/c4cy01032a
7. K. Katagiri, R. Takabatake, K. Inumaru, Robust Infrared-Shielding Coating Films Prepared Using Perhydropolysilazane and Hydrophobized Indium Tin Oxide Nanoparticles with Tuned Surface Plasmon Resonance, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 査読有, Vol. 5, 2013, pp. 10240-10245.
8. K. Katagiri, Y. Miyoshi, K. Inumaru, Preparation and Photocatalytic Activity of Strontium Titanate Nanocube-Dispersed Mesoporous Silica, *J. Colloid. Interface Sci.*, 査読有, Vol. 407, 2013, pp. 282-286.
DOI: 10.1016/j.jcis.2013.06.057
9. H. Sakai, Y. Kubota, K. Yamaguchi, H. Fukuoka, K. Inumaru, Photocatalytic Decomposition of 2-Propanol and Acetone in Air by Nanocomposites of Pre-formed TiO₂ Particles and Mesoporous Silica, 査読有, Vol. 20, 2013, 693-699.
DOI: 10.1007/s10934-012-9643-5

〔学会発表〕(計 44 件)

- 飯尾奈々、徳留靖明、高橋雅英、片桐清文、犬丸啓、層状複水酸化物ナノ粒子のCO₂脱離挙動、日本セラミックス協会 2017 年年会、2017 年 3 月 17-19 日、日本大学(東京都千代田区)
- 阿久根隆之、片桐清文、犬丸啓、水熱合成 ZrO₂ ナノ粒子触媒による CO₂ からの炭酸ジメチル合成反応、日本セラミックス協会 2017 年年会、2017 年 3 月 17-19 日、日本大学(東京都千代田区)
- 長田祐希、犬丸啓、金属間化合物 Mg_{1-x}Al_xB₂ を助触媒とした光触媒による水の完全分解、日本セラミックス協会 2017 年年会、2017 年 3 月 17-19 日、日本大学(東京都千代田区)
- 國崎佑介、片桐清文、犬丸啓、TiO₂ 粒子-

- メソポーラスシリカ複合光触媒への分子吸着による反応加速効果、日本セラミックス協会 2017 年年会、2017 年 3 月 17-19 日、日本大学(東京都千代田区)
- 林優樹、片桐清文、犬丸啓、Zn-Ga 系層状複水酸化物と尿素を前駆体に用いた GaN:ZnO 固溶体の合成、日本化学会 第 97 春季年会、2017 年 3 月 16-19 日、慶応大学(神奈川県横浜市)
 - 池田光生、犬丸啓、¹³C NMR によるメソポーラスシリカナノ空間中の炭酸イオン種の挙動解析、第 6 回 CSJ 化学フェスタ、2016 年 11 月 14-16 日、タワーホール船堀(東京都江戸川区)
 - 木村憲児、福岡宏、犬丸啓、ガリウムを含む新規化合物の高圧合成と物性、第 6 回 CSJ 化学フェスタ、2016 年 11 月 14-16 日、タワーホール船堀(東京都江戸川区)
 - 犬丸啓、界面に注目した無機ナノ複合構造・薄膜の機能設計(招待講演)、日本セラミックス協会 2016 年年会、2016 年 3 月 14-16 日、早稲田大学(東京都新宿区)
 - 上村健祐、飯尾奈々、大橋智実、犬丸啓、CuO 担持 TiO₂ による酸素吸蔵-光照射下放出機能、日本セラミックス協会 2016 年年会、2016 年 3 月 14-16 日、早稲田大学(東京都新宿区)
 - 古市音央太、宇野智仁、犬丸啓、遷移金属窒化物薄膜の熱分解挙動と第一原理計算による解析、日本セラミックス協会 2016 年年会、2016 年 3 月 14-16 日、早稲田大学(東京都新宿区)
 - 白川真也、片桐清文、犬丸啓、BiVO₄ の水熱合成における結晶相および形態の制御、第 54 回セラミックス基礎科学討論会、2016 年 1 月 7-8 日、佐賀県立男女共同参画センター(佐賀県佐賀市)
 - 松下悟士、甲斐裕之、對尾良則、犬丸啓、メソポーラス酸化物の細孔にリチウム塩を充填したナノ複合体のイオン伝導特性、第 54 回セラミックス基礎科学討論会、2016 年 1 月 7-8 日、佐賀県立男女共同参画センター(佐賀県佐賀市)
 - 大橋智実、三好佑樹、池田光生、片桐清文、犬丸啓、メソポーラスシリカ-SrTiO₃ ナノキューブ複合光触媒による CO₂ 還元反応、第 54 回セラミックス基礎科学討論会、2016 年 1 月 7-8 日、佐賀県立男女共同参画センター(佐賀県佐賀市)
 - T. Nishikawa, H. Fukuoka, K. Inumaru, High-pressure synthesis and electrical properties of ternary electropositive metal germanides, PACIFICHEM(環太平洋国際化学会議)2015, 2015 年 12 月 15-20 日、ホノルル(米国)
 - S. Matsushita, H. Kai, Y. Tsushio, K. Inumaru, Ionic conductivity of nanocomposites formed with mesoporous metal oxides and LiClO₄, PACIFICHEM(環太平洋国際化学会議)2015, 2015 年 12 月 15-20 日、ホノルル(米国)
 - T. Ohashi, Y. Miyoshi, K. Katagiri, K.

Inumaru, Photocatalytic reduction of CO₂ over nanocomposites of mesoporous silica and SrTiO₃ nanocubes, PACIFICHEM(環太平洋国際化学会議)2015, 2015年12月15-20日、ホノルル(米国)

17. 犬丸啓、酸化ナノ複合構造を利用した触媒・光触媒・吸着材の機能設計(招待講演)、触媒学会つくば地区講演会、2015年12月10日、産業技術総合研究所(茨城県つくば市)

18. 西川拓弥、福岡宏、犬丸啓、NaPb₃型構造を持つ超伝導体(La_{1-x}Lu_x)Ge₃の物性および電子構造、第56回 高圧討論会、2015年11月10-12日、JMS アステールプラザ(広島県広島市)

19. 阿久根隆之、片桐清文、犬丸啓、TiO₂とFe₃O₄の複数種ナノ粒子をメソポーラスシリカで包含した複合体の合成と機能、日本セラミックス協会2015年年会、2015年3月18-20日、岡山大学(岡山県岡山市)

20. 大橋智実、三好佑樹、片桐清文、犬丸啓、メソポーラスシリカ-SrTiO₃ ナノキューブ複合光触媒の合成およびCO₂光還元反応、日本化学会第95春季年会、2015年3月18-20日、日本大学(千葉県船橋市)

21. 白川真也、西川拓弥、犬丸啓、細孔径の異なるメソポーラスシリカを用いたアミノ基修飾体のCO₂吸着特性、日本セラミックス協会2015年年会、2015年3月18-20日、岡山大学(岡山県岡山市)

22. 盛田祐輔、片桐清文、犬丸啓、ZrO₂系ナノ触媒の合成とCO₂からの炭酸ジメチル合成反応、第30回ゼオライト研究発表会、2014年11月26-27日、タワーホール船堀(東京都江戸川区)

23. 犬丸啓、メソ・ミクロ多孔体を利用した触媒・光触媒のナノ構造制御と機能設計(招待講演)、石油学会九州・沖縄支部第30回九州・沖縄支部講演会、2014年10月31日、北九州学術研究都市産学連携センター(福岡県北九州市)

24. 大橋智実、杉本高志、佐古香、片桐清文、犬丸啓、交互積層法によるWO₃-TiO₂複合体の合成および光触媒特性の評価、2014年3月17-19日、日本セラミックス協会2014年年会、慶応大学(神奈川県横浜市)

25. 松下悟士、甲斐裕之、對尾良則、犬丸啓、メソポーラスシリカ-LiClO₄複合体のイオン伝導特性、2014年3月17-19日、日本セラミックス協会2014年年会、慶応大学(神奈川県横浜市)

26. 谷口祐基、片桐清文、福岡宏、犬丸啓、ゾル-ゲル由来前駆体を用いたTiO₂高圧相の合成とその光触媒活性、2014年3月17-19日、日本セラミックス協会2014年年会、慶応大学(神奈川県横浜市)

27. K. Inumaru, Nanocomposites of pre-formed crystalline particles and mesoporous silica: synthesis and application as photocatalysts (Invited), Japan-Taiwan Joint Workshop on Nanospace Materials, March 11-12, 2014,

Fukuoka Institute of Technology (福岡県福岡市)

28. 犬丸啓、メソポーラスシリカをベースとしたナノ触媒・光触媒・吸着剤の設計(招待講演)、一般社団法人未踏科学技術協会 ナノ粒子・構造応用研究会 第8回公開講演会~新しいナノ粒子合成と構造およびその応用化への展開~、2014年3月4日、化学会館(東京都千代田区)

29. 三好佑樹、田中祐樹、片桐清文、犬丸啓、メソポーラスシリカ-SrTiO₃ ナノキューブ複合光触媒を用いたCO₂の光還元特性、第52回セラミックス基礎科学討論会、2014年1月9-10日、ウインクあいち(愛知県名古屋市)

30. 堀野豊・福岡宏・末國晃一郎・鬼丸孝博・犬丸啓、Ce(Sn,Ge)₃固溶系の高圧合成とCeの価数揺動状態の変化、第52回セラミックス基礎科学討論会、2014年1月9-10日、ウインクあいち(愛知県名古屋市)

31. 宇野智仁、西山文隆、犬丸啓、超高真空装置によるコバルト窒化物薄膜の合成と物性、第52回セラミックス基礎科学討論会、2014年1月9-10日、ウインクあいち(愛知県名古屋市)

32. 宇野智仁、西山文隆、犬丸啓、PLD法による配向性CoN薄膜の合成と評価、日本セラミックス協会第26回秋季シンポジウム、信州大学、2013年9月4-6日、信州大学(長野県長野市)

33. 犬丸啓、メソポーラスシリカをベースとしたナノ複合構造の設計と触媒・光触媒作用(招待講演)、日本ゾルゲル学会第11回討論会、2013年8月1-2日、広島大学(広島県東広島市)

34. K. Inumaru, Mesoporous Silica-based Nanocomposite Materials as Molecular Selective Adsorbents and Photocatalysts for Removal of Organic Compounds in Water (Invited), Seventh International Conference on Science and Technology of Advanced Ceramics (STAC-7), June 19-21, 2013, Mielparque-Yokohama (神奈川県横浜市)

〔図書〕(計1件)

犬丸啓、片桐清文(分担執筆) 出版社 NTS、ナノ空間材料ハンドブック、2016、pp. 61-69.

6. 研究組織

(1)研究代表者

犬丸 啓 (INUMARU Kei)

広島大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：80270891

(2)研究分担者

片桐 清文 (KATAGIRI Kiyofumi)

広島大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：30432248