

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18268

研究課題名(和文) 遷移金属の酸化還元挙動を利用した多段階排ガス浄化システムの研究

研究課題名(英文) Multistep purification system for automotive exhaust using redox behavior of transition metals

研究代表者

芳田 嘉志 (Yoshida, Hiroshi)

京都大学・実験と理論計算科学のインタープレイによる触媒・電池の元素戦略研究拠点ユニット・特定助教

研究者番号：40722426

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：自動車排ガスに含まれるNO、CO、HCの同時浄化を目的として、各素反応に有効な遷移金属触媒を開発して組み合わせることによりタンデム構造による三元触媒システムを開発した。前段ではCr-Cu/CeO<sub>2</sub>を用いたCO酸化によって排ガス中に含まれるCOおよびO<sub>2</sub>の濃度を低下させ、後段では低O<sub>2</sub>濃度条件においてPd/CeO<sub>2</sub>によるNO-C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>-O<sub>2</sub>反応を行いNOおよびHCの浄化に成功した。これにより次世代三元触媒の開発におけるタンデム構造の有用性が示された。

研究成果の概要(英文)：For the simultaneous purification of NO, CO and HC in automotive exhaust, a new three-way catalysis with a tandem structure was developed. In the former stage, CO oxidation was carried out over Cr-Cu/CeO<sub>2</sub>, resulting in the decrease of CO and O<sub>2</sub> concentration. The gas which contained stoichiometric NO, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> and O<sub>2</sub> was consecutively introduced to the latter stage and NO-C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>-O<sub>2</sub> reaction over Pd/CeO<sub>2</sub> was carried out for the simultaneous purification of NO and HC. The results demonstrated that the tandem structure is one of useful ways for the development of new three-way catalysis.

研究分野：触媒化学

キーワード：貴金属代替 汎用元素 自動車触媒 タンデム構造

## 1. 研究開始当初の背景

自動車に代表される内燃機関は世界で広く用いられており、途上国の発展や人口増加を考慮すると今後も増加が予想される。一方で排ガスに起因する環境汚染が深刻な社会問題となっており、現在は貴金属を多量に用いた三元触媒 (Rh, Pd, Pt) による浄化が最も実用的な解決策となっているが、これらの貴金属は需要増加に伴う価格高騰や敵対国家による輸入制限など政治的、経済的なリスクを常に抱えている。したがって自動車排ガス浄化触媒における貴金属低減・代替技術は我が国にとって最重要課題の一つであり、中でも貴金属不使用による排ガス浄化システムの開発は経済問題、環境問題を解決する上で大きな意義を持つ。

自動車排ガスには一酸化炭素(CO)、炭化水素(HC)、窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )が含まれており、CO、HC は酸化、 $\text{NO}_x$  は還元によってそれぞれ浄化され理想的には  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2$  として排出される。これらの同時浄化は多くの素反応を伴う複雑な反応系であり、また燃焼後の  $\text{O}_2$  濃度が変動するために安定した浄化システムの構築が困難である。したがって三元触媒を持ってしても同時浄化を実現できるのは空気と燃料が量論量となる理論空燃比 (ストイキ) 付近に限定され、 $\text{O}_2$  センサーや  $\text{O}_2$  吸蔵放能を有する CZ 材の使用により  $\text{O}_2$  濃度をストイキに近づけることで浄化性能を維持している。また遷移金属を用いた排ガス浄化触媒に関しては CO 酸化反応、 $\text{C}_3\text{H}_6$ -NO- $\text{O}_2$  反応といった素反応において有効な触媒が報告されているが、包括的に同時浄化を実現した例はない。

## 2. 研究の目的

遷移金属の複合化・合金化による排ガス浄化の素反応にそれぞれ高活性な触媒を開発し、タンデム構造に配置した多段階プロセスを設計することで高効率な排ガス浄化システムを構築する。また内燃機関の運転に伴う  $\text{O}_2$  濃度の連続変化を触媒の再分散に利用して失活を抑制し、 $\text{O}_2$  過剰、不足時にそれぞれ適した素反応を進行させることで空燃比に依存しない連続浄化を実現する。

内燃機関の構造上、自動車排ガスにおける  $\text{O}_2$  濃度を常に理論空燃比付近に制御することは不可能であり、稼働中における酸化雰囲気 (リーンバーン) と還元雰囲気 (リッチバーン) の連続変化は避けられない。これは高温に曝される担持金属触媒としては著しい失活を招く過酷な環境であるが、類似反応条件において PdZn 合金触媒を用いた HC の水蒸気改質反応では触媒活性点の再分散が起こり逆に活性が著しく増加する報告がされている (C. Fukuhara et al. *Appl. Catal. A Gen.* 330 (2007) 108.)。同様の再分散現象は申請者の所属するグループにおいて PdFe 複合酸化

物でも発現することを見出しており (S. Hinokuma et al. *Catal. Today* 201 (2013) 92.) 酸化還元雰囲気における複合金属材料の有用性が期待される。本研究ではこの合金の特異な性質を利用して HC の水蒸気改質反応により  $\text{H}_2$  を生成し、この生成した  $\text{H}_2$  による NO 選択還元を試みる。これにより HC と NO の同時浄化を実現し、 $\text{O}_2$  濃度に依存しない HC、NO、 $\text{H}_2\text{O}$  のみによる反応プロセスを提案する。なお  $\text{H}_2\text{O}$  は排ガス成分に含まれるため実環境における  $\text{H}_2\text{O}$  添加は不要であり、リッチバーンにおける HC、リーンバーンにおける NO の浄化率の向上が期待される。また申請者の最新所見から Cu-Cr をごく微量担持した  $\text{CeO}_2$  触媒が CO 酸化反応に対し極めて高い触媒性能を有し、さらに NO-CO 反応にも広い温度領域で活性を示すことを見出している。したがってリーンバーンで CO 酸化反応、リッチバーンで NO-CO 反応をそれぞれ進行することにより空燃比に依存しない高い CO 浄化性能を実現できる。

CO はその強い吸着力のために触媒表面を被覆し他の素反応を阻害することから、本触媒を用いて触媒層前段で排ガス中の CO を除去することにより後段で他成分の浄化反応を効率良く行うことができる。そこで本研究では CO 浄化触媒と HC 水蒸気改質触媒をタンデム構造に直列した新規排ガス浄化システムを構築し、包括的な三成分同時除去を可能とする触媒コンバーターを設計する。まず触媒層前段では申請者のグループが開発した  $\text{CuCrO}_x/\text{CeO}_2$  触媒を用いて前述した CO の完全除去を行う。次に後段において HC 水蒸気改質反応を進行し、生成する  $\text{H}_2$  を用いて NO- $\text{H}_2$  反応による NO 選択還元を行う。この際リーンバーンでは HC 酸化反応による部分酸化種が中間体として生成することが予想されるが、こうした中間体も NO の還元剤として本システムで機能することが期待される。最終的にはハニカム担体を用いて実条件での性能評価を行い、自動車排ガス浄化における貴金属代替技術を確立する。

## 3. 研究の方法

本研究では排ガス浄化プロセスを CO 浄化と HC-NO 同時浄化に大別する多段階浄化システムを目指して、各素反応に有効な遷移金属触媒を用いた多段階構成による触媒コンバーターの構築を目的とした。

## (1) HC-NO 同時浄化に有効な触媒の開発

アークプラズマ (AP) 法を用いて Pd と Zn を異なる金属カソードから同時照射して  $\text{Al}_2\text{O}_3$  担体上に複合酸化物ナノ粒子を形成し、 $\text{H}_2$  還元によって合金化してその  $\text{C}_3\text{H}_6$  水蒸気改質反応に対する触媒特性を評価した。

担体に NO 吸着能を有する  $\text{CeO}_2$  を用い、

反応ガスに NO を加えて C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>-NO 同時浄化に展開した。本反応系では PdZn 合金粒子と CeO<sub>2</sub> 担体の界面において H 種による NO 還元が行われるため、金属分散度が反応活性に与える影響を検討するとともに H 種のスピルオーバー、表面吸着種の FTIR 測定など物理化学的な解析を交えて触媒の最適構造とその調製法を検討した。

汎用元素による HC-NO 同時浄化の実現を目的として、NO の選択還元用に用いられる Cu を基軸とする担持金属触媒を含む法により調製した。種々の金属酸化物の担体効果を比較し、最も高活性を示した Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に対して第二金属を共浸させて複合効果を検討した。

## (2) タンデム構造による多段階浄化システムの検討

前段に CuCrO<sub>x</sub>/CeO<sub>2</sub> 触媒、後段に PdZn 合金担持触媒を固定した触媒層による三元反応特性を評価した。また比較として両触媒を物理混合した触媒の活性評価も行い、多段階浄化プロセスの有効性を検討するとともに最適反応条件を決定した。次に PdZn 合金に代わって CuZn 合金に代表される遷移金属合金を用いて貴金属を全く用いない遷移金属のみによる排ガス浄化システムについて検討した。CuZn/CeO<sub>2</sub> 触媒をアークプラズマ法によって調製したものを後段に用いて排ガス同時浄化を評価し、次いで異なる Zn 含有合金について同様の検討を行った。また反応に用いた触媒は詳細なキャラクタリゼーションを行った。

## 4. 研究成果

AP 法で調製した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 担持 Pd-Zn 触媒を水素還元したところ、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 担体表面に PdZn 合金が析出した。本触媒を用いて C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> の水蒸気改質反応を行なったところ、Pd 単一系に比べて触媒活性の向上が見られた。また長時間反応に伴う触媒表面の炭素析出が抑制されることがわかった。次に本触媒を後段とするタンデム構造の触媒層を用いて NO-CO-C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>-O<sub>2</sub> 反応を行なったところ、NO 還元反応は低温で開始した。これは前段の Cr-Cu/CeO<sub>2</sub> が模擬ガス中の CO を酸化除去することにより PdZn 表面での CO による吸着障害が抑制されたため低温から NO が優先的に吸着したこと、また CO 酸化による O<sub>2</sub> 分圧の低下が NO 還元を促進したと考えられる。

種々の担持 Cu 触媒を用いて NO-CO-C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>-O<sub>2</sub> 反応に対する触媒活性を検討し、担体に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いることで特に C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 酸化活性が高くなることがわかった。また異なる調製法により得られた CuZn 合金触媒の触媒性能を Cu 単一系と比較したが、合金化による顕著な活性向上は見られなかった。素

反応結果から Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の NO 還元挙動は NO-C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>-O<sub>2</sub> 反応に依存することがわかった。NO-CO-C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>-O<sub>2</sub> 反応において Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> では 200 °C 付近から NO 還元反応を開始し、460 °C 付近において NO 転化率は極小を示した。また 600 °C 到達時点で 65% だった NO 転化率は同温度での定常反応においては 100% に到達したことから、本触媒では反応雰囲気において Cu 活性点構造が変化すると考えられる。次に本触媒に同量の Ni を共担持したところ、460 °C 付近に見られた NO 転化率の減少が抑制され、高温域における NO 還元活性が向上した。NO-CO-C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>-O<sub>2</sub> 反応雰囲気下で処理した Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> および Ni-Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の Cu 2p XPS スペクトルを解析したところ、両触媒とも室温における Cu 種は Cu<sup>2+</sup> が支配的であり、XRD で認められる CuAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> の形成と対応した。反応中の Cu の電子状態を XPS および Auger により解析したところ、O<sub>2</sub> 過剰雰囲気では Cu<sup>2+</sup> であるのに対してストイキ条件では Cu<sup>+</sup> に部分還元されており、またそれに伴い NO 還元活性が向上することを見出した。したがって NO 還元特性の発現には低酸化状態の Cu を触媒表面に安定化させることが重要である。また Ni を共担持すると 600 °C における Cu<sup>+</sup> の割合が増加したことから、本触媒では反応中に CuAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> の一部が Cu<sub>2</sub>O 種に還元されることで NO 還元活性を発現しており、Ni 共担持によって表面 Cu 種の還元が促進される結果、さらに NO 還元活性が向上すると結論した。

前段 Cr-Cu/CeO<sub>2</sub>、後段 Pd/CeO<sub>2</sub> のタンデム触媒を用いて NO-CO-C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>-O<sub>2</sub> 反応に対する有用性を検討し、前段に CO 除去触媒を配置することで三成分の浄化活性が向上することを確認した。なお前後を逆転させた場合や物理混合した場合には本効果が発現されなかった。これにより Pd 使用量の節減が可能であることから、タンデム構造が次世代三元触媒の構築において有用であることがわかった。

Cr/Cu 比の異なる Cr-Cu/CeO<sub>2</sub> を用いて NO-CO 反応における触媒組成の影響を検討したところ、Cr/Cu 比を増加することで反応性は向上し、Cr/Cu = 3 において極大を示した。次に Cr/Cu 比の異なる触媒に NO、CO を逐次導入した際の表面吸着種を FT-IR を用いて観察したところ、100 °C において Cr/Cu 比の小さな触媒では 1200 cm<sup>-1</sup> から 1600 cm<sup>-1</sup> 付近に NO 由来の nitrate/nitrite が観察されたのに対して、Cr/Cu 比の増加に伴いそれらのスペクトルが減少し、代わって linear 型 CO が出現した。これは nitrate/nitrite による CO の吸着障害が Cr 担持量の増加によって抑制されることを示しており、低温から NO-CO 反応活性を発現する要因の一つと考えられる。一方反応が進行する 300 °C においては 2200 cm<sup>-1</sup> に isocyanate (NCO) が観測された。これは触媒表面における NO の解離吸着を示唆しており、Cr/Cu 比の大きな触媒上では吸着 NO の

活性化が促進されることが明らかになった。以上の結果から、Cr-Cu/CeO<sub>2</sub>を用いたCO酸化およびNO-CO反応の反応機構を推定した。

3d 遷移金属を用いて種々の担持金属触媒を調製し、さらに実用条件における熱安定性評価を目的として900 °C、25 hの熱処理を行なった。得られた触媒を用いてNO浄化反応の素反応であるNO-CO反応に対する触媒活性を比較したところ、Ni/CeO<sub>2</sub>がCr-Cu/CeO<sub>2</sub>よりも優れた触媒活性を示した。種々のキャラクタリゼーション結果から本触媒ではNiOナノ粒子がCeO<sub>2</sub>表面に存在しており、主な触媒活性点はNiOをCeO<sub>2</sub>の界面であることがわかった。また同位体交換実験により、本触媒では格子内酸素によるCO酸化、NCO反応中間体の形成、およびNCOとNOとの反応によってNO-CO反応が進行することが明らかになった。しかしながら本触媒はO<sub>2</sub>存在下においてCO酸化反応を優先するためにNO還元が進行せず、実際の三元触媒反応条件においてNO還元が行われなかった。そこでタンデム構造前段でCO、HCの酸化的除去に伴うO<sub>2</sub>分圧の低下を試み、後段を還元雰囲気にする事でNi/CeO<sub>2</sub>によるNO-CO反応によるNO還元を試みた。種々の触媒探索においてMn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が実用条件において優れた酸化性能を示したことから、タンデム構造における前段をMn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、後段をNi/CeO<sub>2</sub>に配置して三元触媒反応を行なったところ、反応温度600 °CにおいてNO浄化率90%を達成した。本活性は定常状態でも安定であり、また共に熱処理後の触媒であることから高い熱安定性を有することが示唆される。これにより触媒層における汎用元素の分布を制御することによって高価な白金族元素を用いることなく三元触媒反応が進行することが明らかになった。

#### 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6件)

- (1) H. P. Buwono, S. Takeshita, H. Yoshida, Y. Nagao, Y. Nakahara, M. Machida, "Lean NO<sub>x</sub> reduction over Rh/ZrP<sub>2</sub>O<sub>7</sub> catalyst under steady-state and perturbation conditions", *Catal. Today* **281** (2017) 583-589. 査読有
- (2) H. Yoshida, Y. Okabe, N. Yamashita, S. Hinokuma, M. Machida, "Catalytic CO-NO reaction over Cr-Cu embedded CeO<sub>2</sub> surface structure", *Catal. Today* **281** (2017) 590-595. 査読有
- (3) H. Yoshida, Y. Okabe, S. Misumi, H. Oyama, K. Tokusada, S. Hinokuma, M. Machida, "Structures and catalytic properties of Cr-Cu embedded CeO<sub>2</sub> surfaces with different Cr/Cu ratios", *J.*

*Phys. Chem. C* **120** (2016) 26852-26863. 査読有

- (4) S. Misumi, H. Yoshida, S. Hinokuma, T. Sato, M. Machida, "A nanometric Rh overlayer on a metal foil surface as a highly efficient three-way catalyst", *Sci. Rep.* **6** (2016) 29737. 査読有
- (5) H. Yoshida, N. Yamashita, S. Ijichi, Y. Okabe, S. Misumi, S. Hinokuma, M. Machida, "A thermally stable Cr-Cu nanostructure embedded in CeO<sub>2</sub> surface as a substitute for platinum-group metal catalysts", *ACS Catal.* **5** (2015) 6738-6747. 査読有
- (6) S. Hinokuma, S. Misumi, H. Yoshida, M. Machida, "Nanoparticle catalysts preparation using pulsed arc-plasma deposition", *Catal. Sci. Technol.* **5** (2015) 4249-4257. 査読有

[学会発表](計20件)

- (1) 芳田嘉志, 小山遥加, 日隈聡士, 町田正人, 「担持Cr-Cu系触媒の三元触媒特性」, 第119回触媒討論会, 首都大学東京(東京都), 2017年3月21日
- (2) 小山遥加, 芳田嘉志, 日隈聡士, 町田正人, 「担持Ni-Cu系触媒の三元触媒特性」, 第119回触媒討論会, 首都大学東京(東京都), 2017年3月21日
- (3) 小山遥加, 日隈聡士, 芳田嘉志, 町田正人, 「Ni-Cu系複合酸化物の構造と三元触媒特性」, 第55回セラミックス基礎科学討論会, 岡山コンベンションセンター(岡山県岡山市), 2017年1月12日
- (4) 徳貞香織, 日隈聡士, 芳田嘉志, 町田正人, 「Ni/CeO<sub>2</sub>のNO-CO反応特性と機構解析」, 第55回セラミックス基礎科学討論会, 岡山コンベンションセンター(岡山県岡山市), 2017年1月12日
- (5) 芳田嘉志, 岡部有里, 三角仁志, 日隈聡士, 町田正人, 「Cr-Cu/CeO<sub>2</sub>のCO-O<sub>2</sub>およびCO-NO反応に対する触媒特性(2)」, 第118回触媒討論会, 岩手大学(岩手県盛岡市), 2016年9月21日
- (6) 小山遥加, 日隈聡士, 芳田嘉志, 町田正人, 「三元触媒反応におけるCu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>触媒の活性点構造解析」, 第53回化学関連支部合同九州大会, 北九州国際会議場(福岡県北九州市), 2016年7月2日
- (7) 徳貞香織, 日隈聡士, 芳田嘉志, 町田正人, 「NO-CO反応におけるNi/CeO<sub>2</sub>の触媒特性」, 第53回化学関連支部合同九州大会, 北九州国際会議場(福岡県北九州市), 2016年7月2日
- (8) 小山遥加, 日隈聡士, 芳田嘉志, 町田正人, 「三元触媒反応におけるCu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のNO還元特性」, 第7回触媒科学研究発表会, 大分大学(大分県大分市), 2016年6月24日

- (9) 徳貞香織, 日隈聡士, 芳田嘉志, 町田正人, 「Ni/CeO<sub>2</sub>を用いた NO-CO 反応における反応機構解析」, 第 7 回触媒科学研究発表会, 大分大学 (大分県大分市), 2016 年 6 月 24 日
- (10) H. Yoshida, Y. Okabe, S. Hinokuma, M. Machida, “Cr-Cu embedded CeO<sub>2</sub> as an efficient catalyst for CO-NO reaction”, Rare Earths 2016, 5-10th June 2016, Sapporo, Japan
- (11) 小山遙加, 芳田嘉志, 伊地知翔太, 日隈聡士, 町田正人, 「Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 触媒を用いた NO-CO-C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>-O<sub>2</sub> 反応」, 第 117 回触媒討論会, 大阪府立大学 (大阪府), 2016 年 3 月 21 日
- (12) 徳貞香織, 芳田嘉志, 伊地知翔太, 日隈聡士, 町田正人, 「Ni 触媒を用いた NO-CO 反応における担体効果」, 第 117 回触媒討論会, 大阪府立大学 (大阪府), 2016 年 3 月 21 日
- (13) 伊地知翔太, 小山遙加, 徳貞香織, 日隈聡士, 芳田嘉志, 町田正人, 「Cr-Cu 系担持酸化物を用いた省貴金属触媒の開発」, 第 54 回セラミックス基礎科学討論会, アバンセ (佐賀県佐賀市), 2016 年 1 月 7 日
- (14) H. Yoshida, Y. Okabe, N. Yamashita, S. Hinokuma, M. Machida, “CO removal from automotive emission over thermally durable CeO<sub>2</sub>-supported Cr-Cu catalyst”, The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2015, 13-20th December 2015, Hawaii, USA
- (15) H. Yoshida, Y. Okabe, S. Ijichi, S. Hinokuma, M. Machida, “Thermally stable Cr-Cu surface nanostructures over CeO<sub>2</sub> as substitutes for PGM catalysts”, 7th China-Japan Workshop on Environmental Catalysis and Eco-Materials, 6-9th November 2015, Guangzhou, China
- (16) 芳田嘉志, 岡部有里, 伊地知翔太, 日隈聡士, 町田正人, 「Cr-Cu/CeO<sub>2</sub> の CO-O<sub>2</sub> および CO-NO 反応に対する触媒特性」, 第 116 回触媒討論会, 三重大学 (三重県津市), 2015 年 9 月 16 日
- (17) 岡部有里, 伊地知翔太, 日隈聡士, 芳田嘉志, 町田正人, 「含浸法で調製した Cr-Cu/CeO<sub>2</sub> の CO 酸化反応特性」, 第 116 回触媒討論会, 三重大学 (三重県津市), 2015 年 9 月 16 日
- (18) H. Yoshida, Y. Okabe, N. Yamashita, S. Hinokuma, M. Machida, “Highly active Cr-Cu/CeO<sub>2</sub> catalyst for CO-O<sub>2</sub> and CO-NO reactions”, 250th ACS National meeting, 15-20th August 2015, Boston, USA
- (19) 岡部有里, 日隈聡士, 芳田嘉志, 町田正人, 「微量の Cr-Cu 添加による CeO<sub>2</sub> の触媒活性発現」, 第 52 回化学関連支部合同九州大会, 北九州国際会議場 (福岡県北九州市), 2015 年 6 月 27 日

- (20) 岡部有里, 日隈聡士, 芳田嘉志, 町田正人, 「Cr および Cu を共含浸した CeO<sub>2</sub> の構造および触媒活性」, 第 32 回希土類討論会, かごしま県民交流センター (鹿児島県鹿児島市), 2015 年 5 月 21 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

芳田 嘉志 (YOSHIDA, Hiroshi)  
 京都大学  
 学際融合教育研究推進センター・特定助教  
 研究者番号: 40722426

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

なし