

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02515

研究課題名(和文) 固固界面制御と Operando 計測による新規触媒の創成

研究課題名(英文) Operando study for supported metal three-way catalysts design

研究代表者

田中 庸裕 (Tanaka, Tsunehiro)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：70201621

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では自動車排ガス浄化触媒の一種である三元触媒について、担持金属種、金属酸化物担体の関係、特に触媒の固固界面の動的挙動を明らかにすることで、高活性、高耐久性触媒の設計指針を得ることを目的として研究を実施した。その結果、Operando X線吸収スペクトル測定を駆使して、自動車排ガス浄化触媒の活性金属種が触媒反応を起こしている際の動きが酸素貯蔵材料にどのように影響されるかの直接観察、一定の条件で貴金属触媒に近い触媒活性を示す多元系卑金属触媒および希少金属フリーの酸素貯蔵材料の開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車生産量の増加および排ガス規制強化により、Rh、Pd、Ptの年間需要量の約半分以上が自動車排ガス浄化触媒の製造に用いられている。電気自動車の発展が著しいものの、内燃機関型の自動車は2050年における自動車生産量の半分以上を占めると推計されている。よって、貴金属元素使用量の低減あるいは貴金属からの脱却は喫緊の課題である。本研究では、自動車排ガス浄化触媒の活性金属種が触媒反応を起こしている際の動きが酸素貯蔵材料にどのように影響されるかの直接観察、一定の条件で貴金属触媒に近い触媒活性を示す多元系卑金属触媒および希少金属フリーの酸素貯蔵材料の開発に成功し、新規触媒の設計指針を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, various types of three-way catalysts such as conventional Pd catalysts with and without oxygen storage materials, multi elements non-precious metal catalysts and rare metal free oxygen storage materials were fabricated and analyzed by operando X-ray absorption spectroscopy in order to obtain an insight into development of highly active and robust catalysts. As a result, real time observation on the dynamic behavior of Pd species supported onto oxygen storage material and development of precious metal free three-way catalyst and oxygen storage materials.

研究分野：触媒化学

キーワード：Operando XAFS 自動車排ガス浄化触媒 三元触媒 酸素貯蔵材料

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

自動車排ガス中に含まれる炭化水素,一酸化炭素,窒素酸化物などの有害物質は貴金属触媒によって無害な CO<sub>2</sub> および N<sub>2</sub> へと変換,排出されている.世界における自動車生産量の増加および排ガス規制強化により,現在では Rh, Pd, Pt の年間需要量の約半分以上が自動車排ガス浄化触媒の製造に用いられている.電気自動車や燃料電池自動車などの発展が著しいものの,内燃機関型の自動車は 2050 年における自動車生産量の半分以上を占めると推計されている.自動車排ガス浄化触媒における貴金属元素使用量の低減あるいは貴金属からの脱却は喫緊の課題である.触媒設計という観点から,いくつかの貴金属を組み合わせて多層化することにより全体の浄化効率を向上させるアプローチや代表的な酸素貯蔵材料である CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 固溶体の構造や結晶性を制御することで酸素吸放出特性を制御し,頻繁に加減速が起こる実車条件でもトータルの浄化効率を上げるといったアプローチが展開されて成果を上げているものの,新材料による抜本的な貴金属元素使用量の低減あるいは貴金属からの脱却には至っていない.

そこで,申請者らは Mn 修飾 YbFeO<sub>3</sub> 担持 Pd 触媒 (*Catal. Sci. Technol.*, **2016**, 6, 7868; *Catal Today*, **2019**, 332, 183) や自己再生機能を有する Ni-Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金触媒 (*Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2019**, 21, 18816) などを提案してきた.これらの研究の過程において,貴金属元素使用量の低減あるいは貴金属元素への転換には,担持金属触媒の担持金属種と担体の相互作用,特に触媒反応条件下における相互作用の理解の重要性を改めて認識した.

このような背景を基に,本研究課題では,担持金属種,担体の固体同士の関係とその場 (Operando) 観察による新規触媒の設計指針を得ることを目的に検討を行った.

### 2. 研究の目的

本研究の目的は,自動車排ガス浄化触媒における貴金属元素使用量の低減あるいは貴金属からの脱却に資する新規触媒の設計指針を固固界面制御と Operando 計測により得ることである.この目標に対して,Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> および Pd/CeO<sub>2</sub> の三元触媒反応中の Pd 種の酸化還元挙動を追跡することで,酸素貯蔵材料の担体効果のその場観察を行うと共に,多元系貴金属触媒の開発を行った.また,その過程で見いだした希少元素フリーの酸素吸放出材料の開発を行った.

### 3. 研究の方法

#### (1) Pd 系担持金属触媒の合成と反応

$\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (JRC-ALO-7) および CeO<sub>2</sub> (JRC-CEO-2) に含浸法により Pd を担持することで,1 wt% Pd/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> および 1 wt% Pd/CeO<sub>2</sub> を調製し,三元触媒反応中の Pd 種の動的挙動を明らかにするために,SPring-8 BL01B1 にて三元触媒反応中の Operando XAS 測定を行った.試料を XAS 用加熱セルに詰め,He 気流下 400 °C で 30 分間前処理を行った後,400 °C を保ったまま,ガソリン自動車のモデル排ガス (NO: 1000 ppm, CO: 1000 ppm, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>: 250 ppm, O<sub>2</sub>: 912.5-1337.5 ppm, He balance) を 100 mL min<sup>-1</sup> で流通させた.出口ガスをマイクロ GC,四重極型質量分析計(Q-Mass),NO<sub>x</sub> メータにて分析した.

#### (2) 多元系貴金属触媒の合成と触媒反応

$\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (JRC-ALO-7) 担体に各種金属前駆体水溶液を用いて金属成分を含浸担持し,500°C で 3 時間焼成後,10 wt% Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10 wt% Cu<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10 wt% Cu<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> 5 wt% X/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (X=Mn, Fe, Co) を得た. He 流通下で室温から 900°C まで昇温した後,5% H<sub>2</sub>/He に切り替え 1 時間保持し,還元処理を行った.触媒反応は固定床流通型反応装置を用いて行った.化学量論量の反応ガス (NO: 1000ppm, CO: 1000ppm, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>: 250ppm, O<sub>2</sub>: 1125ppm, He: balance) を 100 mL min<sup>-1</sup> で触媒 (200 mg) に流通させ,373 K から 773 K まで 50 °C 毎 10 分間昇温,20 分間保持を繰り返し,出口ガスを Micro-GC により分析した.また,酸素濃度変化条件反応は He 流通下 773 K まで昇温後,反応ガス (NO: 1000ppm, CO: 1000ppm, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>: 250ppm, O<sub>2</sub>: 806-1444ppm, He: balance) を触媒に流通させ酸化雰囲気下 (lean 条件) と還元雰囲気下 (rich 条件) を 2.5 時間ずつ繰り返し,合計 12.5 時間反応を行った.

#### (3) Fe-Rh 系触媒の合成と触媒反応

$\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (JRC-ALO-7) 担体に各種前駆体(Rh(acac)<sub>3</sub>, Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O)を含浸担持し,500°C で焼成することで 0.6 wt% Rh-10 wt% Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> および 0.6 wt% Rh/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を得た.触媒の還元前処理として 1173 K で 5% H<sub>2</sub>/He を 1 h 流通させた.SPring-8 BL01B1 において加熱セルに触媒 100 mg を詰め,上述の還元前処理を施した後,触媒層温度 500°C で反応ガス (NO 1000 ppm, CO 1000 ppm, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 250 ppm, O<sub>2</sub> 700 or 1550ppm, He: balance) を流通させ,出口ガスをマイクロ GC により分析した.また,酸化条件後および還元条件後の 0.6 wt% Rh-10 wt% Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 触媒の <sup>57</sup>Fe メスバウアー測定を行った.

#### 4. 研究成果

##### (1) Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> および Pd/CeO<sub>2</sub> の三元触媒中の反応挙動観察

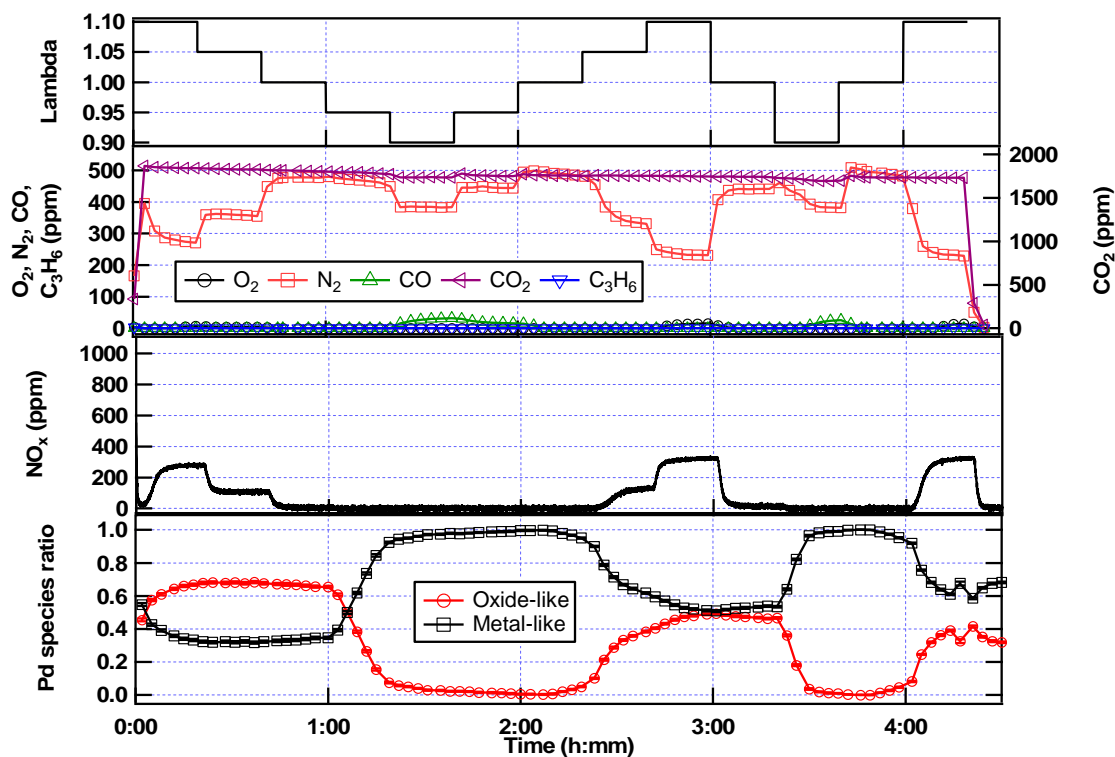


Figure 2 GC and NO<sub>x</sub> profiles of the eluent gases of three-way catalytic reaction over 1 wt% Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> during *operando* XAS measurement and  $\lambda$ , the O<sub>2</sub> concentration indicator. ( $\lambda = ([NO]_a + [CO]_a + [O_2]_a \times 2) / ([NO]_s + [CO]_s + [O_2]_s \times 2)$ , where  $[X]_y$  is the concentration of X at the actual (y=a) or stoichiometric (y=s) condition.)

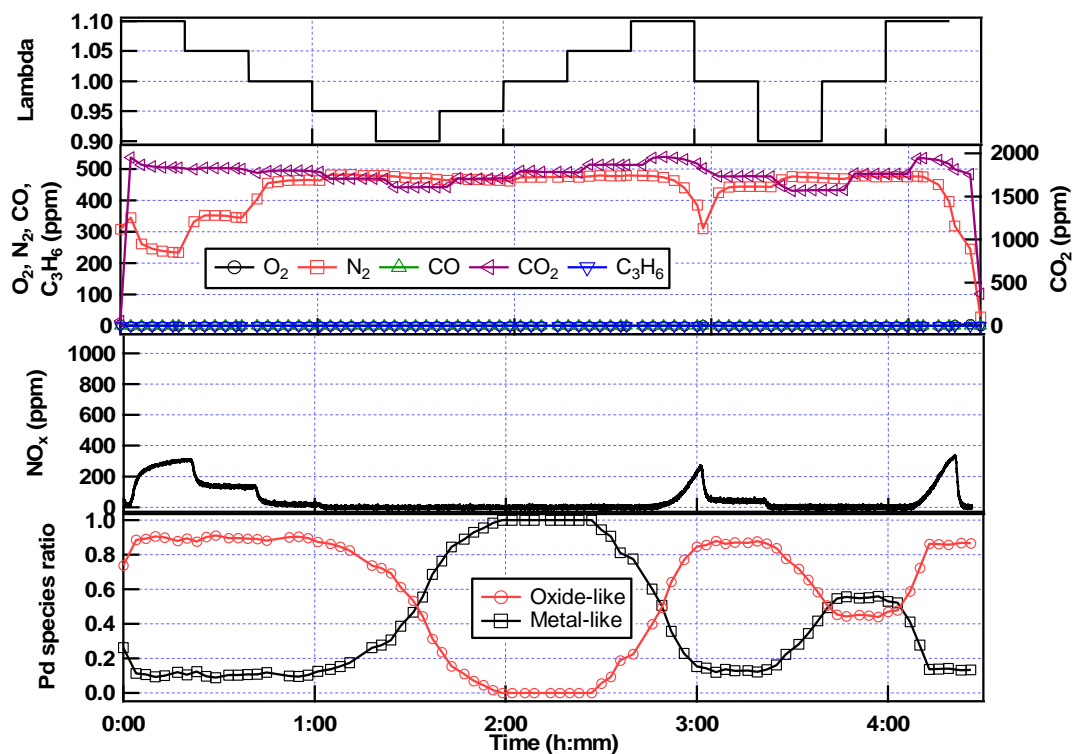


Figure 1 GC and NO<sub>x</sub> profiles of the eluent gases of three-way catalytic reaction over 1 wt% Pd/CeO<sub>2</sub> during *operando* XAS measurement and  $\lambda$ , the O<sub>2</sub> concentration indicator. ( $\lambda = ([NO]_a + [CO]_a + [O_2]_a \times 2) / ([NO]_s + [CO]_s + [O_2]_s \times 2)$ , where  $[X]_y$  is the concentration of X at the actual (y=a) or stoichiometric (y=s) condition.)

Figure 1 に *Operando* XAS 測定時のモデル排ガスの酸素濃度，マイクロ GC および NO<sub>x</sub> メータによる出口ガス分析結果および Pd K-edge XANES から求めた Pd 種の酸化還元状態の時間変化を示す．なお， $\lambda$  の定義は Figure 1, 2 のキャプションの通りである．酸化雰囲気( $\lambda=1.1$ )の反応開

始直後は  $N_2$  への転化率が 80%程度を示すが、60%程度まで徐々に低下した。XANES から前処理で還元状態にあった Pd 粒子表面が酸化されたことを示す。20 分ごとに酸素濃度を減らし、反応開始 40 分後に化学量論条件に至ると、 $N_2$  への転化率はほぼ 100%に達した。この過程で Pd 種はほぼ変化しなかった。反応開始 1 時間後、還元雰囲気中に切り替えると触媒活性に変化は見られなかったが、XANES スペクトルから Pd 種が徐々に還元され、EXAFS スペクトルにおいても Pd-Pd 結合の生成が確認された。反応開始 1 時間 20 分後に XAS スペクトルが変化しなくなると、 $CO_2$  生成量が減少し、 $CO$  が出口ガスで観測されるようになった。Q-Mass では  $H_2$  生成が確認され、水性ガスシフト反応が起こっていると予想される。また、Pd 種が酸化状態から還元される過程では、 $NO_x$  濃度が単純な指数関数的に変化するのに対し、還元状態から酸化される過程では、 $NO_x$  濃度が S 字カーブを描いて変化していった。この現象は、還元過程において表面がランダムに還元されているのに対して、酸化過程においては酸化部位を起点に自己触媒的な酸化が進行していることを示唆している。

Figure 2 に 1 wt% Pd/CeO<sub>2</sub> を触媒として用いたときの結果を示す。Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の場合と大まかな挙動に変わりはないが、以下の 3 点の特徴的な違いを示す。

1. 反応開始後 1 時間後から 2 時間後の還元雰囲気下において、ほぼ 100% の  $NO$  還元を示す。
2. 反応開始後 2 時間 20 分以降の酸化雰囲気下において、Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の場合は直ちに  $NO$  の還元活性が低下するのに対し、30 分間程度 100%の還元活性を維持する。
3. 還元雰囲気下において  $CO_2$  の生成量が 100% (1750 ppm)を下回るのに対し、酸化雰囲気下では、100%を上回る。

1. の過程では CeO<sub>2</sub> から酸素が放出されることで  $NO$  の還元が効率よく進行し、XANES スペクトルの変化が示すように Pd 種の還元も緩やかに進行したと考えられる。2. の過程では CeO<sub>2</sub> が酸素を吸蔵したため、 $NO$  の還元効率は引き続き 100% を維持したと考えられる。反応開始後 2 時間 45 分後頃から  $NO$  の還元効率が指数関数的に低下している。これは CeO<sub>2</sub> の酸素吸蔵量が限界に達し、 $NO$  還元を促進する Pd 種表面などの活性点が急激に減少したことを示していると考えられる。また、酸化還元を繰り返すにつれて、Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の Pd の酸化物の割合は減少していった。これは Pd の凝集により、酸化雰囲気下で Pd が内部まで酸化されなくなったためであると解釈できる。CeO<sub>2</sub> の酸素貯蔵能および粒径維持効果のその場観察に成功した。

## (2) 多元系卑金属触媒

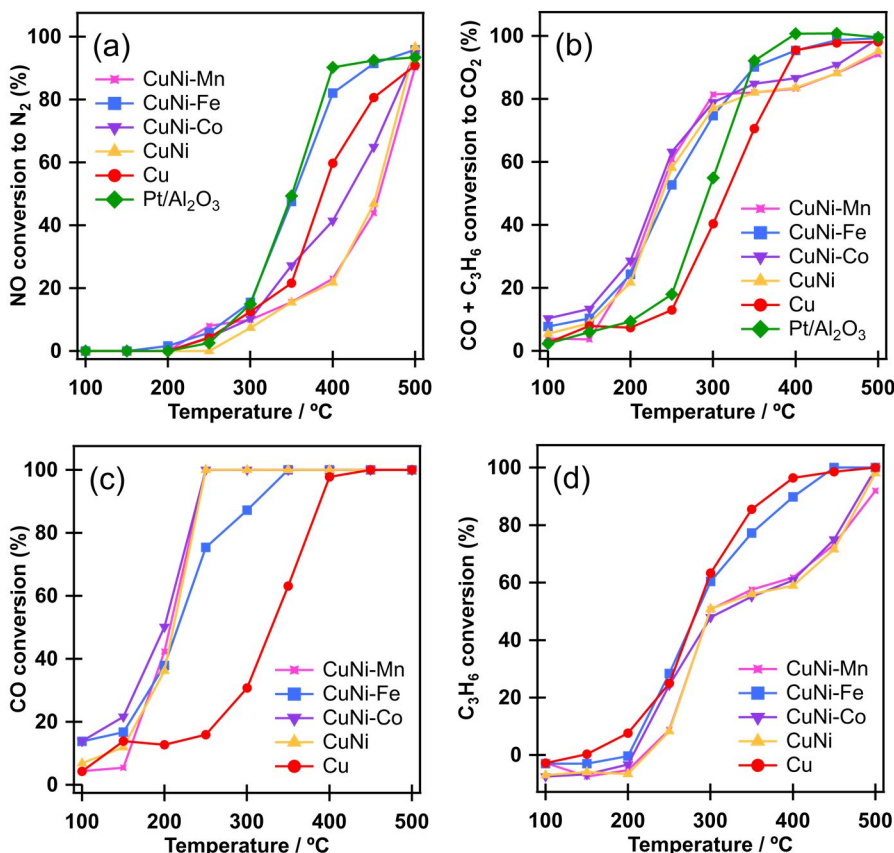


Figure 3. Catalytic activity of the CuNi-Z (X = Mn, Fe, or Co) catalysts and the CuNi and Cu catalysts during the  $NO-CO-C_3H_6-O_2$  TPR test: (a)  $NO$  conversion to  $N_2$ , (b)  $CO + C_3H_6$  conversion to  $CO_2$ , (c)  $CO$  conversion, and (d)  $C_3H_6$  conversion.

Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuNi/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> とこれに第三成分として Mn, Fe, Co を添加した触媒、更に 1 wt% Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> について、化学量論条件下で昇温反応を行った際の  $NO$  から  $N_2$  への転化率を Figure 3(a) に示す。CuNi/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は 500°C で  $NO$  の転化率が 100%を示すが、500°C より低い温度では  $NO$  の還元活性

が大幅に低下した。CuNi-Mn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> については CuNi/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と同等の活性を示した。一方, CuNi-Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> では低温における NO 還元活性が少し向上し, Cu のみの触媒も比較的活性が高かった。CuNi-Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は更に NO 還元活性が向上し, 同条件で処理した 1 wt% Pt 触媒と同程度の活性を示した。C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>-NO-O<sub>2</sub> 昇温反応や NO-CO-O<sub>2</sub> 昇温反応から, CuNi 触媒は C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> の燃焼活性が低いために, 低温での NO 還元活性が低いことが示唆されている。

Figure 3(b)において同触媒反応における C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> の転化率を示す。Co や Fe を加えることで 300°C を超えた温度領域での C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> の転化率が向上した。このため, 低温での NO 還元活性が向上したと考えられる。また, 昇温反応後の各触媒について粉末 X 線回折測定を行ったところ, CuNi 触媒や CuNi-Mn 触媒では Cu<sub>2</sub>O や NiO のピークが確認できたのに対し, CuNi-Fe 触媒では酸化物のピークが見られなかった。これは Fe が C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> を効率的に酸化させた結果 (Figure 3(d)), Cu や Ni の酸化の進行が抑制されたためと考えている。更に, CuNi-Fe 触媒について 500°C で酸素濃度変化条件反応を行ったところ, 酸化雰囲気下において高い耐久性を示した。すなわち, 第三成分である Fe を CuNi 触媒に添加することにより, 耐久性と低温で NO 還元活性を両立する卑金属系としては高い性能の触媒開発に成功した。

### (3) Rh-Fe 系触媒の合成と触媒反応

Rh-Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> について, 模擬排ガス中の酸素濃度を変化させた際の触媒活性を NO から N<sub>2</sub> への転化率によって評価した。Figure 4 は 1 時間ごとに酸素過剰および酸素不足条件にした際の結果を示している。酸素不足条件から酸素過剰状態に切り換えた後(2:00~), Rh-Fe 触媒は約 15 分間高活性を維持した (Figure 4 (A)) のに対し, Rh/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は直ちに活性が低下した (Figure 4 (B))。この反応中の Fe と Rh の酸化数の変化を *Operando* XAS 測定結果から検討すると, 酸素過剰条件において活性が維持している間 Rh に対し Fe が優先的に酸化されることが明らかとなった。これは, Fe が酸素過剰条件下で流通している酸素を吸蔵するため, Rh は還元状態を保ち高活性を維持するというを示唆している。

次に, 酸素吸蔵の前後で触媒がどのように変化しているのかを検討した。Figure 5 に酸素不足条件後の Rh-Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 触媒と FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> の Fe K-edge XANES スペクトルを示す。これらはよく似ており大部分の Fe は 2 価のイオンとして担体の  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中に入り込み, T<sub>d</sub> サイトに配位していると考えられる。酸素不足条件および酸素過剰条件後 Rh-Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 触媒の <sup>57</sup>Fe メスbauer測定の結果から, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> に帰属される 2 つのセクステットピークと, T<sub>d</sub> サイトに配位する Fe<sup>3+</sup> に帰属されるダブルレットピークが観測され, これらの Fe が触媒中に反応中にも微量存在しているものと思われる。酸素過剰条件後は  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に帰属される小さなセクステットピークと, T<sub>d</sub> サイトに配位する 3 価イオンに帰属されるダブルレットピークのみが観測された。以上より, 酸素不足条件で担体の T<sub>d</sub> サイトに配位していた Fe<sup>2+</sup> は T<sub>d</sub> に配位されたまま Fe<sup>3+</sup> に酸化され酸素吸放出を起こすと考えられる。

Rh-Fe 触媒は Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> にドーブされた Fe の酸化還元を利用して, 酸素吸蔵作用を実現しているものと思われる。この結果は多元系卑金属触媒の高活性要因を示唆しており, 現在このコンセプトに基づき, 新たな酸素貯蔵材料を開発している。

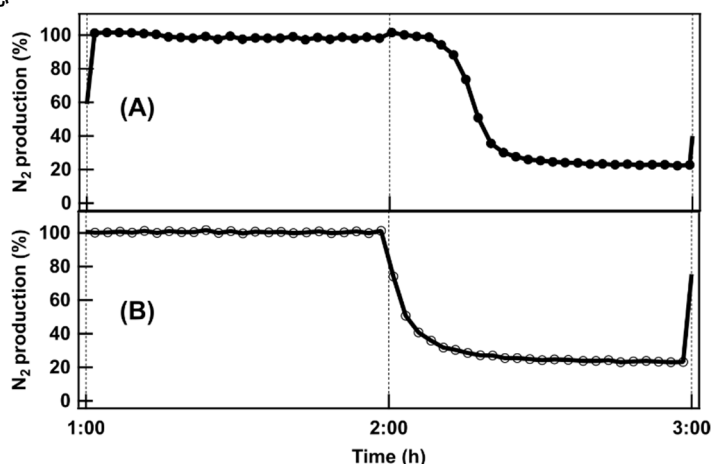


Figure 4 Conversion rate of NO to N<sub>2</sub> of lean-rich cycle test over (A) 0.6 wt% Rh-10 wt% Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or (B) 0.6 wt% Rh /Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

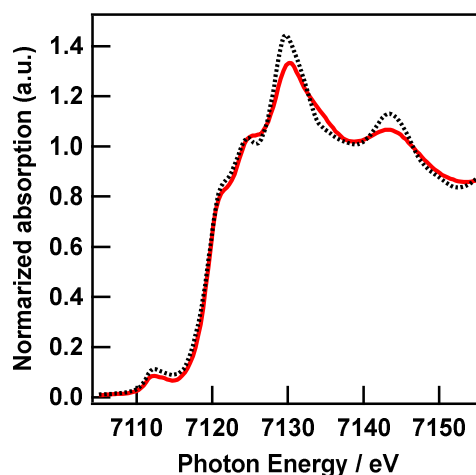


Figure 5 XANES spectra of Rh-Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> after rich condition (solid line) and FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> reference (dashed line);

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Asakura Hiroyuki, Onuki Tetsuo, Hosokawa Saburo, Teramura Kentaro, Tanaka Tsunehiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Self-Regeneration Process of Ni-Cu Alloy Catalysts during a Three-Way Catalytic Reaction?An Operando Study	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 55994 ~ 56003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.0c17256	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 Asakura Hiroyuki, Kirihiro Maho, Fujita Kyoko, Hosokawa Saburo, Kikkawa Soichi, Teramura Kentaro, Tanaka Tsunehiro	4. 巻 59
2. 論文標題 Fe-Modified CuNi Alloy Catalyst as a Nonprecious Metal Catalyst for Three-Way Catalysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Industrial & Engineering Chemistry Research	6. 最初と最後の頁 19907 ~ 19917
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.iecr.0c03389	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 Asakura Hiroyuki, Hosokawa Saburo, Beppu Kosuke, Tamai Kazuki, Ohyama Junya, Shishido Tetsuya, Kato Kazuo, Teramura Kentaro, Tanaka Tsunehiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Real-time observation of the effect of oxygen storage materials on Pd-based three-way catalysts under ideal automobile exhaust conditions: an operando study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Catalysis Science & Technology	6. 最初と最後の頁 6182 ~ 6190
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1CY00460C	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 Fujita Kyoko, Asakura Hiroyuki, Hosokawa Saburo, Teramura Kentaro, Kobayashi Masaki, Fujita Koji, Tanaka Tsunehiro	4. 巻 13
2. 論文標題 Oxygen Release and Storage Property of Fe-Al Spinel Compounds: A Three-Way Catalytic Reaction over a Supported Rh Catalyst	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 24615 ~ 24623
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.1c01486	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14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 切原麻帆, 朝倉博行, 細川三郎, 寺村謙太郎, 田中庸裕
2. 発表標題 易還元性卑金属合金触媒による三元触媒反応
3. 学会等名 第124回触媒討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤田京子, 朝倉博行, 細川三郎, 寺村謙太郎, 田中庸裕
2. 発表標題 Rh-Fe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 触媒中のRh-Feの酸化還元挙動と三元触媒活性の検討
3. 学会等名 第124回触媒討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤田京子, 朝倉博行, 細川三郎, 寺村謙太郎, 田中庸裕
2. 発表標題 Rh-Fe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 触媒の酸素濃度変動条件下における構造変化と三元触媒活性の検討
3. 学会等名 第125回触媒討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 朝倉博行, 細川三郎, 寺村謙太郎, 田中庸裕
2. 発表標題 自動車排ガス浄化触媒を志向したNi-Cu合金触媒の酸化還元挙動
3. 学会等名 第33回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kyoko Fujita, Hiroyuki Asakura, Saburo Hosokawa, Kentaro Teramura and Tsunehiro Tanaka
2. 発表標題 Structural change and three-way catalysis of Fe-Al spinel compounds
3. 学会等名 MRM2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 切原麻帆・朝倉博行・細川三郎・寺村謙太郎・田中庸裕
2. 発表標題 Ni-Cu合金三元触媒への第三元素添加効果
3. 学会等名 第29回キャラクタリゼーション講習会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木凜佑, 細川三郎, 朝倉博行, 寺村謙太郎, 田中庸裕
2. 発表標題 Three-way catalytic reaction over Pd catalyst supported on Mn-modified CeO <sub>2</sub>
3. 学会等名 Osaka-kansai International Symposium on Catalysis
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木凜佑, 細川三郎, 朝倉博行, 寺村謙太郎, 田中庸裕
2. 発表標題 自動車排ガス浄化反応におけるPd系触媒へのMn添加効果
3. 学会等名 第124回触媒討論会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 鈴木凜佑, 細川三郎, 朝倉博行, 寺村謙太郎, 田中庸裕
2. 発表標題 Pd/CeO <sub>2</sub> 系触媒を用いた自動車排ガス浄化
3. 学会等名 第126回触媒討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 遠藤高太, 細川三郎, 朝倉博行, 寺村謙太郎, 田中庸裕
2. 発表標題 Pd/YbMnO <sub>3</sub> 触媒による三元触媒反応
3. 学会等名 第126回触媒討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤田京子, 朝倉博行, 細川三郎, 寺村謙太郎, 吉川聡一, 田中庸裕
2. 発表標題 Rh-Fe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 触媒の酸素濃度変動条件下での三元触媒反応における構造変化
3. 学会等名 第126回触媒討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺坂和真, 朝倉博行, 細川三郎, 寺村謙太郎, 田中庸裕
2. 発表標題 Fe添加アルミナの酸素貯蔵能と熱耐久性
3. 学会等名 第128回触媒討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中庸裕
2. 発表標題 Excellent Catalytic Activity of a Pd-promoted MnOx Three Way Catalyst
3. 学会等名 18JKSC
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小山田 光耀, 朝倉 博行, 寺村 謙太郎, 田中 庸裕
2. 発表標題 Mg, FeドープAl2O3の酸素貯蔵能と熱耐久性
3. 学会等名 第129回触媒討論会
4. 発表年 2022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
研究協力者	朝倉 博行  (Asakura Hiroyuki)  (40631974)	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・特定講師   (14301)	
研究協力者	細川 三郎  (Hosokawa Saburo)  (90456806)	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・特定准教授   (14301)	

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