

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 13 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K14057

研究課題名(和文) 環境調和型クロスカップリング反応の開拓に向けた高機能多核金属触媒の開発

研究課題名(英文) Development of high-performance multinuclear catalysts for environmentally-benign cross-coupling reactions

研究代表者

前野 禅 (Maeno, Zen)

北海道大学・触媒科学研究所・特任講師

研究者番号：30721154

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)：本研究では、カテコールと活性メチレン化合物のクロスカップリング反応を促進する固定化触媒の開発を行った。本反応は生物活性物質の全合成に有用な反応であるが、量論反応や酵素反応に限られており、O₂を酸化剤とする固体触媒反応の例はこれまでになかった。検討の結果、リン酸アルミニウム(AlPO₄)固定化金属触媒が、高選択的にクロスカップリング反応を促進することを明らかにした。開発した触媒系は、種々の生物活性物質の全合成に有用なカテコール誘導体の合成に適応可能であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

酸化的脱水素カップリング反応は、基質のC-H結合から新たな結合を直接形成でき、基質の予備官能基化を必要としない次世代型の分子変換反応である。特に、O₂を酸化剤(水素アクセプター)とするカップリング反応は、環境に負担のない水のみを副生成物とするため、シンプルかつクリーンな分子変換法となりうる。本成果は、環境調和型分子変換法及びそのための触媒設計指針の提示につながるため、有機化学と触媒化学の両方の発展に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed immobilized catalysts that promote the cross-coupling reaction of catechol with active methylene compounds. Although this reaction is useful for the total synthesis of biologically active compounds, it has been limited to stoichiometric and enzymatic reactions, and there have been no examples of heterogeneous catalyst systems using O₂ as an oxidant. As a result of our investigations, we found that aluminum phosphate (AlPO₄) immobilized metal catalysts can promote several cross-coupling reaction in a highly selective manner. The developed catalytic system was applicable to the synthesis of catechol derivatives, which are useful for the total synthesis of various bioactive substances.

研究分野：触媒化学

キーワード：クロスカップリング反応 リン酸アルミニウム 分子状酸素 カテコール 求核剤

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

環境調和型のモノづくりが強く望まれている現代社会において、廃棄物や副生成物の排出を抑制した効率的な物質変換とそのための触媒プロセスの開発は化学工業における最重要課題の一つである。特に、回収性・再使用性が高い固体触媒を用いた選択的物質変換は、生成物精製プロセスの簡略化やカラムリアクターによるフロー合成への適応が期待できるため、実用的な化学プロセスの構築につながる。

酸化的脱水素カップリング反応は、基質の C-H 結合から新たな結合を直接形成でき、基質の予備官能基化を必要としない次世代型の分子変換反応である。特に、 O_2 を酸化剤(水素アクセプター)とするカップリング反応は、環境に負担のない水のみを副生成物とするため、シンプルかつクリーンな分子変換法となりうる。しかしながら、複数の中から特定の C-H 結合を変換することや、異種化合物間の結合形成反応(クロスカップリング)においては、同じ基質どうしの反応(ホモカップリング)を抑制することが困難であり、選択的なカップリング反応を可能にする固体触媒プロセスの開発が望まれている。

本研究課題では、 O_2 を酸化剤とする脱水素クロスカップリングにより、フェノール類へ新たな結合を選択的に直接導入する反応とそのための高機能触媒の開発に取り組んだ。カテコールと求核剤のクロスカップリング反応は生物活性物質の全合成に有用な反応であるが、量論反応や酵素反応に限られており、 O_2 を酸化剤とする固体触媒反応の例はこれまでにない。 O_2 存在下でカテコールを触媒的に脱水素酸化できれば、水の副生を伴いながら、4 位に求電子性の高い炭素原子を有するオルトキノ中間体が生成する。この中間体に求核剤を付加させると位置選択的なクロスカップリング生成物が得られると考えられる。しかし、不安定なキノ中間体の逐次酸化分解やホモカップリングによる重合反応が容易に併発する。そこで、キノ中間体の副反応を促進せず求核剤を活性化できる反応場として機能する固体担体上に、カテコール・ O_2 活性化により脱水素を選択的に促進する多核金属種を設計した機能集積型触媒を開発すれば、上記クロスカップリング反応が達成できると考えた。本研究を通して、選択酸化能を有する多核金属種の創成や固体担体の選択的反応場としての機能探索を行い、さらにはこれらの選択性発現因子の解明に取り組む。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上記の環境調和型クロスカップリング反応を可能にする多機能集積触媒の開発である。本研究の達成は、環境調和型分子変換法及びそのための触媒設計指針の提示につながるため、有機化学と触媒化学の両方の発展に貢献できる。

3. 研究の方法

カテコールと活性メチレン化合物のクロスカップリング反応をモデルとし、カテコールの選択的脱水素酸化を促進する多核金属種の創成と選択的な求核剤の付加反応を促進する規則性固体担体の探索に取り組んだ。次に、得られた担体や金属種の知見に基づき、他の求核剤を用いたカップリング反応への拡張を目指した。

4. 研究成果

4.1. $AlPO_4$ 担持 Ru 触媒によるカテコールと活性メチレン化合物の C-C カップリング反応

カテコール類と活性メチレン化合物のクロスカップリング反応は、Powelline や Buphanidrin 生物活性物質の全合成に利用されるが、従来は過ヨウ素酸塩を酸化剤とする量論反応と酸化酵素による反応に限られており、目的生成物の逐次酸化が進行するなどの問題があった。本研究では、ルテニウム酸化物ナノ粒子をリン酸アルミニウムに固定化した触媒($Ru/AlPO_4$)が、 O_2 を酸化剤に用いたカテコール類と活性メチレン化合物のクロスカップリング反応を高選択的に促進することを見出した。本触媒反応系は、生成物の逐次酸化は進行せず、触媒の分離回収が簡便であり、さらには水を反応溶媒に用いることができるなど多くの利点を有する。

常圧 O_2 雰囲気下、種々の固定化金属触媒を用いて 3-methoxycatechol と methyl 2-oxocyclopentanecarboxylate の水溶媒中でのクロスカップリング反応を行った。 $Ru/AlPO_4$ 触媒は高選択的に反応を促進し、目的生成物を収率 85% で与えた。 $AlPO_4$ に Pd や Rh 種を固定化した触媒も反応を促進したが、Ru の場合と比べて低い収率であった。Pt 種を固定化した触媒では、生成物の逐次酸化が進行するため低収率であった。また、 $Mg_3(PO_4)_2$ 、 $AlOOH$ 及び SiO_2 に Ru 種を固定化した触媒を検討したが、それぞれ収率は 27、30 及び 8% に留まった。以上より Ru と $AlPO_4$ の組み合わせが本反応に最適であった。活性の低い Ru/SiO_2 に別途 $AlPO_4$ を加えると収率は 62% まで向上したことから、Ru 種と $AlPO_4$ は独立して機能し、選択的なクロスカップリング反応を促進している。

種々のカテコールと活性メチレンのクロスカップリング反応を検討したところ、電子供与基を有するカテコールを用いると良好な収率で対応する生成物が得られた。例えば、3-methoxycatechol と 1-(tert-butyl) 3-methyl 2-oxopyrrolidine-1,3-dicarboxylate との反応から、Powelline や Buphanidrine などの全合成に用いられる化合物を収率 90% で得ることができた。無置換カテ

コールや電子吸引基を有するカテコールを用いた反応でも、反応時間を延長することにより高収率で対応するカップリング生成物が得られる。また、Ru/AlPO₄ は反応後、ろ過により簡単に反応液から分離回収可能である。

種々の担体に Ru を固定化した触媒で 3,5-di-*tert*-butylcatechol の酸素酸化反応を検討したところ、Ru/AlPO₄ が最も高い活性と選択性を示した。また、キノン中間体である 3-methoxy-1,2-benzoquinone を低温条件下で合成し、methyl 2-oxocyclopentanecarboxylate と反応させる際に、AlPO₄ を添加すると求核付加反応が促進されることが分かった。さらに、ethyl cyanophenylacetate を AlPO₄ に吸着させ、FTIR 測定を行なったところ、脱プロトンかした吸着種が表面に観測された。以上のことより、Ru 種のカテコール脱水素酸化能と AlPO₄ 表面の活性メチレン化合物を活性化する機能により、Ru/AlPO₄ は選択的な触媒として作用していることが示唆された。

4. 2. AlPO₄ 担持 Rh 触媒によるカテコールとピロン誘導体の連続的結合形成反応

基質の適用範囲の拡大と更なる有用物質の生成を目的として、カテコール類とピロン誘導体のクロスカップリング反応を検討した。本反応で構築されるベンゾフラン骨格は、wedelolactone や flemichapparin C など天然の生物活性物質に含まれる重要な構造である。分子間で C-C 結合形成と分子内 C-O 結合形成が連続的に進行し、ベンゾフラン環が形成される。これまでに、量論反応、酵素反応、電気化学的反応を用いた手法が報告されている。しかしながら、量論反応では、有害な酸化剤を用いる必要があり、それに伴い金属塩が副生するため原子効率が低い。酵素反応および電気化学反応では、緩衝液を用いた反応液の pH 制御が必要であり、高希釈条件下で反応させるため実用的観点における問題点があった。

Pyrocatechol と 4-hydroxycoumarin を基質としたモデル反応において最適触媒を検討した結果、AlPO₄ に Rh を固定化した触媒(Rh/AlPO₄)が、酸素圧 3 atm において高い収率で目的生成物を与えた。他の金属種として Ir や Ru を AlPO₄ に担持した触媒を用いたが、活性は Rh/AlPO₄ と比較して低かった。Pt/AlPO₄ を反応に用いた際、目的生成物は全く得られず基質も完全転化していた。これはカテコールやカップリング生成物の逐次酸化反応に伴うそれらの重合や分解反応が進行したと考えられる。また AlPO₄ 以外の他の担体に Rh 種を担持して反応に用いたが、Rh/AlPO₄ の収率を超えることはできなかった。特に MgO を用いた時、目的生成物は全く得られなかった。本反応においても、脱水素酸化によって生成したキノン中間体が AlPO₄ 上で活性化されたピロン誘導体と反応することで、効率的な結合形成反応が進行したと考えられる。本触媒反応系は、flemichapparin C の全合成にも適応可能であった。

4. 3. 固定化 Pt ナノ粒子触媒によるアクセプターフリー結合形成反応系の開発

上述のような O₂ を水素アクセプターとする触媒反応系に加えて、担持 Pt 触媒によるアクセプターフリーな結合形成反応系の構築にも成功した。例えば、1 級アルコール、2 級アルコール及びアミジンを原料とするワンポットでのピリミジン合成や、メタノールをメチル化剤とするアミンの選択的 N メチル化反応を促進する触媒系を開発した。

以上、AlPO₄ 固定化金属触媒が、O₂ を酸化剤とする水中でのカテコールと活性メチレン化合物のクロスカップリング反応に有効であることを見出した。AlPO₄ は活性メチレン化合物を効率的に活性化することで、不安定なキノン中間体と速やかに結合を形成し、目的の生成物を高収率で与えることができる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19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 Jamil Md.A.R., Touchy Abeda S., Rashed Md. Nurnobi, Ting Kah Wei, Siddiki S.M.A. Hakim, Toyao Takashi, Maeno Zen, Shimizu Ken-ichi	4. 巻 371
2. 論文標題 N-Methylation of amines and nitroarenes with methanol using heterogeneous platinum catalysts	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Catalysis	6. 最初と最後の頁 47 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcat.2019.01.027	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 Maeno Zen, Yasumura Shunsaku, Liu Chong, Toyao Takashi, Kon Kenichi, Nakayama Akira, Hasegawa Jun-ya, Shimizu Ken-ichi	4. 巻 21
2. 論文標題 Experimental and theoretical study of multinuclear indium-oxo clusters in CHA zeolite for CH ₄ activation at room temperature	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 13415 ~ 13427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9CP01873E	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 Rashed Md. Nurnobi, Siddiki S. M. A. Hakim, Touchy Abeda Sultana, Jamil Md. A. R., Poly Sharmin Sultana, Toyao Takashi, Maeno Zen, Shimizu Ken ichi	4. 巻 25
2. 論文標題 Direct Phenolysis Reactions of Unactivated Amides into Phenolic Esters Promoted by a Heterogeneous CeO ₂ Catalyst	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemistry A European Journal	6. 最初と最後の頁 10594 ~ 10605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.201901446	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 Toyao Takashi, Kayamori Shingo, Maeno Zen, Siddiki S. M. A. Hakim, Shimizu Ken-ichi	4. 巻 9
2. 論文標題 Heterogeneous Pt and MoO _x Co-Loaded TiO ₂ Catalysts for Low-Temperature CO ₂ Hydrogenation To Form CH ₃ OH	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Catalysis	6. 最初と最後の頁 8187 ~ 8196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.9b01225	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 Poly Sharmin Sultana, Jamil Md.A.R., Touchy Abeda S., Yasumura Shunsaku, Siddiki S.M.A. Hakim, Toyao Takashi, Maeno Zen, Shimizu Ken-ichi	4. 巻 479
2. 論文標題 Acetalization of glycerol with ketones and aldehydes catalyzed by high silica H zeolite	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Molecular Catalysis	6. 最初と最後の頁 110608 ~ 110608
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mcat.2019.110608	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 Toyao Takashi, Ting Kah Wei, Siddiki S. M. A. Hakim, Touchy Abeda S., Onodera Wataru, Maeno Zen, Ariga-Miwa Hiroko, Kanda Yasuharu, Asakura Kiyotaka, Shimizu Ken-ichi	4. 巻 9
2. 論文標題 Mechanistic study of the selective hydrogenation of carboxylic acid derivatives over supported rhenium catalysts	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Catalysis Science & Technology	6. 最初と最後の頁 5413 ~ 5424
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9CY01404G	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 Suzuki Keisuke, Toyao Takashi, Maeno Zen, Takakusagi Satoru, Shimizu Ken ichi, Takigawa Ichigaku	4. 巻 11
2. 論文標題 Statistical Analysis and Discovery of Heterogeneous Catalysts Based on Machine Learning from Diverse Published Data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ChemCatChem	6. 最初と最後の頁 4537 ~ 4547
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cctc.201900971	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 Maeno Zen, Yamamoto Masanobu, Mitsudome Takato, Mizugaki Tomoo, Jitsukawa Koichiro	4. 巻 4
2. 論文標題 Efficient Synthesis of Benzofurans via Cross Coupling of Catechols with Hydroxycoumarins Using O ₂ as an Oxidant Catalyzed by AlPO ₄ Supported Rh Nanoparticle	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ChemistrySelect	6. 最初と最後の頁 11394 ~ 11397
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/slct.201903117	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 Jing Yuan, Cai Zhengxu, Liu Chong, Toyao Takashi, Maeno Zen, Asakura Hiroyuki, Hiwasa Satoru, Nagaoka Shuhei, Kondoh Hiroshi, Shimizu Ken-ichi	4. 巻 10
2. 論文標題 Promotional Effect of La in the Three-Way Catalysis of La-Loaded Al ₂ O ₃ -Supported Pd Catalysts (Pd/La/Al ₂ O ₃)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Catalysis	6. 最初と最後の頁 1010 ~ 1023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.9b03766	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 Yasumura Shunsaku, Huang Mengwen, Wu Xiaopeng, Liu Chong, Toyao Takashi, Maeno Zen, Shimizu Ken-ichi	4. 巻 352
2. 論文標題 A CHA zeolite supported Ga-oxo cluster for partial oxidation of CH ₄ at room temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Catalysis Today	6. 最初と最後の頁 118 ~ 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cattod.2019.10.035	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 Kubota Hiroe, Liu Chong, Toyao Takashi, Maeno Zen, Ogura Masaru, Nakazawa Naoto, Inagaki Satoshi, Kubota Yoshihiro, Shimizu Ken-ichi	4. 巻 10
2. 論文標題 Formation and Reactions of NH ₄ NO ₃ during Transient and Steady-State NH ₃ -SCR of NO _x over H-AFX Zeolites: Spectroscopic and Theoretical Studies	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Catalysis	6. 最初と最後の頁 2334 ~ 2344
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.9b05151	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 Ting Kah Wei, Kamakura Haruka, Poly Sharmin S., Toyao Takashi, Hakim Siddiki S. M. A., Maeno Zen, Matsushita Koichi, Shimizu Ken ichi	4. 巻 12
2. 論文標題 Catalytic Methylation of Aromatic Hydrocarbons using CO ₂ /H ₂ over Re/TiO ₂ and H MOR Catalysts	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ChemCatChem	6. 最初と最後の頁 2215 ~ 2220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cctc.202000036	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 Maeno Zen, Yasumura Shunsaku, Wu Xiaopeng, Huang Mengwen, Liu Chong, Toyao Takashi, Shimizu Ken-ichi	4. 巻 142
2. 論文標題 Isolated Indium Hydrides in CHA Zeolites: Speciation and Catalysis for Nonoxidative Dehydrogenation of Ethane	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 4820 ~ 4832
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.9b13865	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 Jamil Md.A.R., Touchy Abeda Sultana, Poly Sharmin Sultana, Rashed Md. Nurnobi, Siddiki S.M.A. Hakim, Toyao Takashi, Maeno Zen, Shimizu Ken-ichi	4. 巻 197
2. 論文標題 High-silica H zeolite catalyzed methanolysis of triglycerides to form fatty acid methyl esters (FAMES)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fuel Processing Technology	6. 最初と最後の頁 106204 ~ 106204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fuproc.2019.106204	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 Maeno Zen, Yamamoto Masanobu, Mitsudome Takato, Mizugaki Tomoo, Jitsukawa Koichiro	4. 巻 8
2. 論文標題 Oxidative cross-coupling reaction of catechols with active methylene compounds in an aqueous medium using an AlPO ₄ -supported Ru catalyst	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Catalysis Science & Technology	6. 最初と最後の頁 5401 ~ 5405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8CY01425F	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 Jamil Md.A.R., Touchy Abeda S., Rashed Md. Nurnobi, Ting Kah Wei, Siddiki S.M.A. Hakim, Toyao Takashi, Maeno Zen, Shimizu Ken-ichi	4. 巻 371
2. 論文標題 N-Methylation of amines and nitroarenes with methanol using heterogeneous platinum catalysts	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Catalysis	6. 最初と最後の頁 47 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcat.2019.01.027	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 Toyao Takashi, Nurnobi Rashed Md., Morita Yoshitsugu, Kamachi Takashi, Hakim Siddiki S. M. A., Ali Md. A., Touchy A. S., Kon Kenichi, Maeno Zen, Yoshizawa Kazunari, Shimizu Ken-ichi	4. 巻 11
2. 論文標題 Esterification of Tertiary Amides by Alcohols Through C-N Bond Cleavage over CeO ₂	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ChemCatChem	6. 最初と最後の頁 449 ~ 456
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cctc.201801098	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 Sultana Poly Sharmin, Siddiki S. M. A. Hakim, Touchy Abeda S., Ting Kah Wei, Toyao Takashi, Maeno Zen, Kanda Yasuharu, Shimizu Ken-ichi	4. 巻 8
2. 論文標題 Acceptorless Dehydrogenative Synthesis of Pyrimidines from Alcohols and Amidines Catalyzed by Supported Platinum Nanoparticles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Catalysis	6. 最初と最後の頁 11330 ~ 11341
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.8b02814	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 Sultana Poly Sharmin, Hakim Siddiki S.M.A., Touchy Abeda S., Yasumura Shunsaku, Toyao Takashi, Maeno Zen, Shimizu Ken-ichi	4. 巻 368
2. 論文標題 High-silica H zeolites for catalytic hydration of hydrophobic epoxides and alkynes in water	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Catalysis	6. 最初と最後の頁 145 ~ 154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcat.2018.10.004	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7件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Zen Maeno
2. 発表標題 Heterogeneously-catalyzed Dehydrogenative Coupling Reactions of Phenolic Compounds Using O ₂ as Green Oxidant
3. 学会等名 World Chemistry Forum 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前野禎、安村駿作、Liu Chong、鳥屋尾隆、今健一、中山哲、長谷川淳也、清水研一
2. 発表標題 ゼオライト固定化インジウム酸素クラスターの合成とメタン活性化能
3. 学会等名 第124回触媒討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前野禎、安村駿作、Wu Xiaopeng、Liu Chong、鳥屋尾隆、清水研一
2. 発表標題 インジウム交換CHAゼオライト内で生成するヒドリド種の構造と脱水素触媒作用
3. 学会等名 第125回触媒討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前野 禎
2. 発表標題 規則性有機・無機ナノ空間を反応場とする金属触媒開発と環境調和型反応
3. 学会等名 第56回触媒研究懇談会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前野 禎
2. 発表標題 環境調和型酸化的カップリング反応 を促進する固定化金属ナノ粒子触媒
3. 学会等名 ナノ構造触媒研究会青森講演会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Zen Maeno, Masanobu Yamamoto, Takato Mitsudome, Tomoo Mizugaki, Koichiro Jitsukawa
2. 発表標題 Aerobic Oxidative Cross-Coupling Reaction of Catechols and Active Methylene Compounds Using Supported Metal Catalysts
3. 学会等名 The 8th Tokyo Conference on Advanced Catalytic Science and Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Zen Maeno
2. 発表標題 Heterogeneously-catalyzed Dehydrogenative Coupling Reactions of Phenolic Compounds Using O ₂ as Green Oxidant
3. 学会等名 World Chemistry Forum 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>プレスリリース インジウムヒドライドの優れた脱水素触媒作用を発見 https://www.hokudai.ac.jp/news/200306_pr.pdf</p>
--

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

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