

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H06441

研究課題名(和文)分子合成オンデマンドを実現するハイブリッド触媒系の創製

研究課題名(英文)Hybrid Catalysis for Enabling Molecular Synthesis on Demand

研究代表者

金井 求(Kanai, Motomu)

東京大学・大学院薬学系研究科(薬学部)・教授

研究者番号：20243264

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 53,300,000円

研究成果の概要(和文)：人類の健康維持や豊かな社会生活に不可欠な物質の多くは、有機分子から成り立っている。これらを創り出し、安定供給するための唯一の方法が有機合成化学である。有機合成化学は発展を遂げてきているものの、現在の力量では必要な有機分子を必要な量、供給することは困難である。この課題の解決に向けて本領域では、複数の触媒の働きを重奏的に活かしたハイブリッド触媒系を創製し、実現すれば大きなインパクトを持つものの従来は不可能であった、極めて効率の高い有機合成反応を開拓してきた。その結果、構造が単純で入手容易な原料から付加価値の高い複雑な有機分子を、要求に応じて迅速に組み上げる分子合成オンデマンドを実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

個別に発展してきた有機触媒、金属錯体触媒、不斉触媒、光触媒、固体触媒といった触媒化学分野に加えて、物理化学、理論科学、高分子化学、天然物合成化学に携わる多分野の研究者を結集し、ハイブリッド触媒系の創製に焦点を絞った研究を複合的かつ強力に推進した点で学術的意義がある。これにより本領域は、今後発展が大きく期待される有機合成化学分野の研究を、国内外を問わず先導し、新たな潮流を創り出してきた。また、単純で入手容易な有機分子から高付加価値の有機分子を、環境負荷を低減しながら地球規模で供給する触媒システムの創製を実現してきたところに社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：Many of the substances indispensable for the enrichment of human health and culture are composed of organic molecules. Synthetic organic chemistry is the only way to create and stably supply these substances. Although synthetic organic chemistry has made progress, it is still difficult to supply the necessary organic molecules in the required quantities with the current capabilities. To solve this problem, we have created hybrid catalyst systems that utilize the function of multiple catalysts in a concerted manner, and have pioneered extremely efficient organic synthetic reactions that, if realized, would have a great impact but were not possible in the past. As a result, we have realized a molecular synthesis-on-demand that rapidly assembles value-added, complex organic molecules from simple, readily available raw materials according to demand.

研究分野：触媒化学

キーワード：触媒 有機合成化学 ハイブリッド触媒 均一系触媒 固体触媒 高分子化学 天然物合成 ドミノ触媒

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

(1) 有機合成化学は、これまで永続的な発展を遂げてきているものの、未解決な重要問題も幾つか存在する。その最たるものは、フラスコ内では一つ二つの反応を行うことはできても、生体内のような複数の酵素(生体触媒)が関与する多触媒反応による有機分子の活性化や複雑な化合物の一挙合成になると、既存の触媒化学では全く歯が立たないということであろう。そのため現在の有機合成化学の力量では、必要な有機分子を必要な量、供給することは非常に困難である。この課題の解決には、有機分子の合成法の飛躍的な進歩と、それを牽引する革新的な触媒の創製が不可欠である。

(2) 有機合成化学が将来に渡って物質文明社会を支える基盤科学の一つであることに異論の余地はなく、今後も広く社会の要請に応じて行くことが求められる。そのために取り組むべき最優先課題は、入手容易な原料から、複雑な構造を持つ高付加価値の有機分子を、要求に応じて迅速に、必要十分な量を合成し社会に供給するための新たな学理と技術の構築である。しかし、現在の有機合成化学の力量では、この根本的な課題の解決は難しい。

(3) 最適な触媒を一つ一つ創り込むことが触媒化学研究のメインストリームであった。

(4) 触媒化学に関連する有機触媒、金属錯体触媒、不斉触媒、光触媒、固体触媒、物理化学、理論科学、高分子化学、天然物合成化学といった多岐な分野が個別に発展してきた。

2. 研究の目的

(1) 複数の触媒の働きを重奏的に活かしたハイブリッド触媒系を創製し、実現すれば大きなインパクトを持つものの従来は不可能であった、極めて効率の高い有機合成反応を開拓する。

(2) 構造が単純で入手容易な原料から優れた機能を持ち付加価値の高い複雑な有機分子を、要求に応じて迅速に組み上げる分子合成オンデマンドを実現する。

3. 研究の方法

(1) 本領域研究では、独創性の高い触媒を精密に創り込むだけでなく、これまで各論として研究されてきた複数の触媒の機能を重奏的に活かしたハイブリッド触媒系を合理的に設計・創製するというアプローチを取った(図1)。炭素資源のような入手容易な有機分子から多岐にわたる分野で求められる高付加価値な有機分子を、必要に応じて必要な量、合成できる触媒システム、およびこの触媒システムを創製するための学理を構築する。有機分子合成を触媒システムとしてとらえる領域研究を、三つの研究項目から複合的かつ相刺的に行ってきた(図1)。

- **A01** **分子活性種発生**：ハイブリッド触媒系による分子活性種発生法の創出(反応性の獲得)
- **A02** **高次反応制御**：ハイブリッド触媒系による位置・立体制御法の創出(選択性の獲得)
- **A03** **超効率分子合成**：ハイブリッド触媒系によるドミノ触媒反応の創出と有機分子合成(連続性の獲得)

触媒反応の本質である**反応性**と**選択性**の獲得のために、それぞれに挑む二つの項目 A01 と A02 を立てた。さらに、ハイブリッド触媒系を**連続的**に用いて高付加価値な有機分子の効率的合成を実現するために、項目 A03 を立てた。

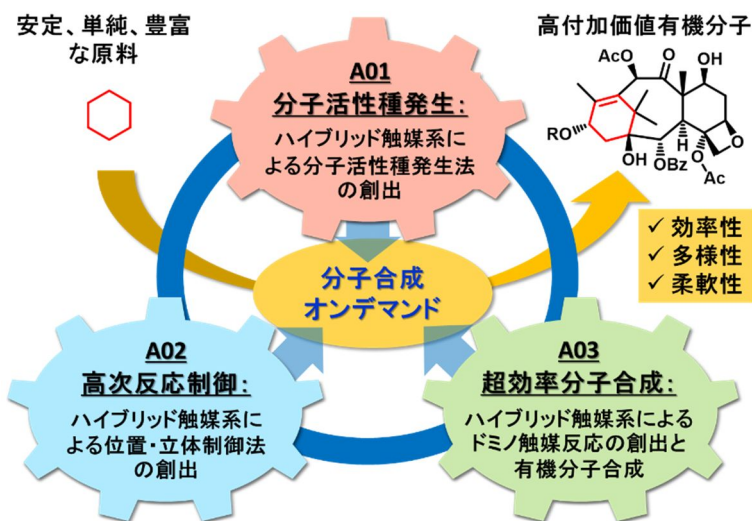


図1

A01 分子活性種発生では、例えば炭化水素のような、構造が単純で入手容易な有機分子を活性化し、分子活性種を発生するハイブリッド触媒系の創製を行う。ハイブリッド触媒系の特徴を活かした独創的な分子活性種発生法の創出を目指し、A01 班には、有機合成化学、固体・物理化学、光・電気化学、無機化学、理論・計算科学を専門とし、基礎から触媒を設計し創製できる班員を配置した。

A02 高次反応制御では、反応位置、官能基選択性、立体化学など、ハイブリッド触媒系を用いて有機分子を効率的・実用的にオンデマンド合成するために必須となる、多種類の因子の精密制御を実現する。目的に応じて柔軟に選択性を転換できる触媒系の創出を目指し、A02 班には、有機合成化学、有機分子触媒化学、不斉触媒化学、有機金属化学を専門とし、精緻な触媒を創り込む力量を有する班員を配置した。

A03 超効率分子合成では、原料から目的とする有機分子に向けて、構造の複雑性を迅速に向上させるドミノ触媒反応の創出と応用展開を行う。これにより、従来は不可能であった水準の効率性や多様性、柔軟性を兼ね備えた、高付加価値な有機分子の実用的合成を可能にする。A03 班には、有機合成化学、有機金属化学、高分子化学、天然物合成化学を専門とし、触媒開発から有機分子合成までを俯瞰できる班員を配置した。

三つの項目が相互循環・相剰することで、構造が単純で入手容易な原料から優れた機能を有する高付加価値の有機分子を迅速かつ大量にオンデマンド合成できるハイブリッド触媒系の創製に向け、分野融合の枠組みから領域研究を強力に推進してきた。

(2) 若手道場や短期留学支援をおこない、若手の育成にも力を入れてきた。本領域に関わる若手研究者を中心とした「若手道場(非公開)」を定期的開催してきた。例えば2019年の第2回若手道場は、三名の外国人アドバイザーを含めて、英語での発表・議論を行った。本セミナーは、同世代ならではのざっくばらんな議論と情報交換を行う中で、互いに交流を深め、本領域内外での連携の強化と共同研究を促進し、領域からひいては我が国全体の触媒化学の進展につなげることを趣旨としてきた。また、The Second Japanese-Spanish Symposium in Organic Synthesis (2018年)、化学フェスタ「ハイブリッド触媒」特別企画(2018年)、Young Researchers' Meeting with Professor Nicolaou(2018年)、日本化学会年会:化学会特別企画「システム志向の触媒化学」(2019年)、第1回ハイブリッド触媒国際会議(2019年)などで若手研究者の成果発表の機会を数多く設け、ビジビリティの向上やネットワークの構築の一助としてきた。

4. 研究成果

【研究項目 A01: ハイブリッド触媒系による分子活性種発生法の創出】

A01 では、光励起状態や固体界面をハイブリッド触媒系に取り込むことで、従来法では不可能であった反応性を見出し、理論・計算科学により触媒機構の理解や新触媒の設計に展開した。炭素資源の高付加価値化や固体ハイブリッド触媒特有の反応性の発見等において、特筆すべき成果が挙げられた。

金井 求(計画研究): ラジカル-金属錯体ハイブリッド触媒系によるアルカンからの有機金属活性種発生

安定な炭素-水素結合をラジカル的に活性化するチオリン酸触媒を開発し、これをハイブリッド触媒系に組み込むことで、アルコールの脱水素反応(*J. Am. Chem. Soc.* 2022: A01 東との共同研究, *J. Am. Chem. Soc.* 2020)、N-ヘテロ環のヒドロキシアルキル化反応(*Chem. Sci.* 2020: A01 正岡との共同研究)、アルデヒドのアリル化反応(*J. Am. Chem. Soc.* 2021)等を開発した。機械学習を用いて、ハイブリッド触媒系が促進する複雑な不斉触媒反応を迅速に最適化し、目的の分子をオンデマンドで合成する方法を確立した(*Cell Rep. Phys. Sci.* 2021: A02 山口、A03 清水との共同研究)。低原子価チタン触媒と塩素ラジカル触媒の組み合わせにより、アルカンとケトンの付加反応を世界で初めて達成した(*Org. Lett.* 2022)。

夙戸 哲也(計画研究): 合金クラスター-無機固体ハイブリッド触媒系による高選択的分子変換

合金ナノ粒子と無機固体のハイブリッドにより、アレンのヒドロシリル化(*Eur. J. Org. Chem.* 2018)、塩化アリールとヒドロシランからのアリールシラン合成(*Adv. Synth. Catal.* 2020)、アルキンの[2+2+2]付加環化反応(*Angew. Chem. Int. Ed.* 2018)、水素貯蔵反応(炭酸水素アンモニウム/ギ酸アンモニウム等の相互変換)(*ACS Sustainable Chem. Eng.* 2019など)を開発し、反応機構について解析した(*Organometallics* 2020)。また、合金、金属、金属リン化合物、金属酸化物、金属リン酸塩を組み合わせ協奏触媒作用を有するハイブリッド触媒系を構築した(*ACS Catal.* 2021, *ChemCatChem* 2021, *Catal. Sci. Technol.* 2021, *Catal. Sci. Technol.* 2022など)。さらにA01 金との共同研究を実施し、C-O結合の選択的加水素分解反応に有効なメタリン酸アルミニウム担持白金触媒を開発した(*Nat. Catal.* 2021: A01 金との共同研究)。

正岡 重行(計画研究): 光化学的・電気化学的刺激による金属錯体触媒のオンデマンド活性化

電荷伝達サイトを触媒活性中心近傍に配置したハイブリッドポリマー型触媒材料を開発し、電気化学的・光化学的刺激を駆動力とする水の酸化による酸素発生反応の効率を飛躍的に向上させた(*Angew. Chem. Int. Ed.* 2021)。隣接活性サイト・疎水性反応場を有するハイブリッドフレームワーク型の触媒材料を創出し、電気化学的・光化学的二酸化炭素還元反応を水中で高効率で達成した(*Small*

2021)。有機色素と金属錯体活性中心を併せ持つ分子性触媒モジュールの自己集積によってフレームワーク触媒を構築し、この材料が高安定・高再利用性を有する不均一系光水素発生触媒として機能することを見出した (*Inorg. Chem.* 2021)。1分子中に光捕集能と反応活性中心とを併せ持つハイブリッド触媒分子を開発し、世界最高の触媒回転頻度での光二酸化炭素還元反応を達成した (*Chem. Commun.* 2022)。

畑中 美穂(計画研究):自動反応経路探索を用いるハイブリッド触媒系の機構解明と反応性決定因子の抽出

計算化学による反応経路自動探索手法の一つである人工力誘起反応(AFIR)法を駆使し、様々な触媒反応の機構を調べた。銅触媒を用いるアレンの不斉合成 (*Chem* 2019: A01 金井との共同研究)、相間移動触媒を用いる不斉アミノ化 (*ACS Catal.* 2019: A03 丸岡との共同研究)、アルコールのリン酸化 (*ACS Cent. Sci.* 2020: A01 金井との共同研究)、カリウム錯体を触媒とする不斉マンニヒ反応 (*J. Am. Chem. Soc.* 2021: A02 山下との共同研究)などの領域内で開発された触媒反応以外にも、不斉希土類触媒を用いるマイケル付加 (*ChemCatChem* 2020)など、様々な反応の機構を明らかにした。これに対し、複雑なハイブリッド触媒系(A02 大井の不斉環開付加とA03 丸岡の不斉アルキル化)は、AFIR法を用いる従来の計算手順(反応座標に沿って原子を押し付ける方法)では機構解明に至らなかった。そこで、AFIR法を用いる遷移状態構造のサンプル方法を再検証したところ、入り組んだ構造の遷移状態の高効率なサンプルが可能になり、複数の触媒がどのように協働するか明らかにできた。

【研究項目 A02:ハイブリッド触媒系による位置・立体制御法の創出】

A02では、独立した触媒により立体化学や位置を精密に制御して結合形成を行うハイブリッド触媒系の創製を行った。イオン対の双方に機能を持たせた触媒系や機械学習を用いて迅速に立体選択性を向上させる方法の創出等において、特筆すべき成果が挙げられた。

大井 貴史(計画研究):ハイブリッド触媒系による立体分岐型不斉合成

ハイブリッド触媒系による分子変換の実現に資するキラルイオン性分子触媒を拡充し、位置分岐型不斉 Michael 付加反応 (*Angew. Chem. Int. Ed.* 2018)、エンジオラートの付加反応 (*J. Am. Chem. Soc.* 2018)、分子内エン反応 (*Angew. Chem. Int. Ed.* 2020)、アルケンのシアノアルキル化 (*J. Am. Chem. Soc.* 2021)を開発した。光増感剤とのハイブリッド触媒系にも展開し、ラジカルカチオンを介する環化反応のキラルアニオンによる制御 (*J. Am. Chem. Soc.* 2020)、シリルエノールエーテルのアリル位アルキル化 (*Nat. Commun.* 2019)、脱水素型クロスカップリング反応に成功した (*ACS Catal.* 2020, 2022)。この過程で、イミンの光触媒機能を初めて明らかにした (*Angew. Chem. Int. Ed.* 2020: A01 正岡との共同研究)。また、4つの触媒を連動させ、アミノエステルの立体反転・エナンチオ収束反応を実現した (*Asian J. Org. Chem.* 2020: A02 寺田との共同研究)。

寺田 眞浩(計画研究):「金属錯体/キラルプレステッド酸」ハイブリッド触媒による効率的物質変換系の開拓

アリルボロン酸とプロパルギルアルデヒドのエナンチオ選択的アリル化反応において、独自のキラルリン酸に銅触媒を加えたハイブリッド触媒系を用いてエナンチオ選択性の向上に成功した (*Org. Lett.* 2021)。また、プレステッド酸触媒により発生させたベンゾピリリウムイオンを光励起し一電子酸化剤とすることで、トルエンなどの汎用化学種を活性化するハイブリッド触媒系の開発に成功した (*Org. Chem. Front.* 2021)。ビニルエーテルとアズラクトンとのアルドール型反応の解析を行い、キラルリン酸アニオンが結合形成に直接関与せず両基質を捕捉するテンプレートとして機能し高選択性を実現していることを明らかにした (*Chem. Eur. J.* 2020: A02 山中との共同研究)。

山下 恭弘(計画研究):強塩基ハイブリッド触媒系の開発及び高立体選択的分子骨格構築反応への展開

強塩基触媒と金属触媒や有機触媒からなるハイブリッド触媒系を開発し、低酸性化合物であるプロピオンアミドを用いる触媒的不斉 Mannich 反応 (*J. Am. Chem. Soc.* 2021: A01 畑中との共同研究)、トルエン等のアルキルアレン (*Commun. Chem.* 2021)やプロピレン (*Chem. Commun.* 2022)のイミンに対する触媒的不斉付加反応を実現した。塩基触媒と有機光触媒とのハイブリッド触媒系を構築することにより、塩基触媒のみでは反応しないスチレン類とマロン酸エステルとの反応を開発した (*ACS Catal.* 2020)。固体塩基触媒として $K/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ を開発し、フロー反応系でのプロピオンアミドの触媒的 1,4 付加反応を実現した (*Adv. Synth. Catal.* 2019)。

大宮 寛久(計画研究):有機触媒と金属触媒のハイブリッドに基づく高次反応制御法の開発

含窒素複素環カルベン触媒とパラジウム触媒が協働的に機能するハイブリッド触媒系を設計し、これを用いることでアルデヒドからケトンを一段階で合成することに成功した (*Angew. Chem. Int. Ed.* 2018)。このハイブリッド触媒系をアルデヒドとアリルアルコールの脱水型アリル化反応に適用した (*Chem. Eur. J.* 2019)。また、銅触媒 - パラジウム触媒のハイブリッド触媒系を新たに構築し、アルデヒドとハロゲン化アールの反応によりキラルアルコールを不斉合成する手法を開発した (*J. Am. Chem. Soc.* 2019)。このハイブリッド触媒系におけるエナンチオ選択性を向上させるために、遷移状態と機械学習を併用しながら不斉銅触媒を設計することに成功した (*Bull. Chem. Soc. Jpn.* 2022: A02 山口との共同研究)。

【研究項目 A03:ハイブリッド触媒系によるドミノ触媒反応の創出と有機分子合成】

A03では、原料から目的とする有機分子に向けて、構造の複雑性を迅速に向上させるドミノ触媒反応の創出と応用展開を行ない、従来は不可能であった水準の効率性や迅速性、柔軟性を兼ね

備えた高付加価値を有する有機分子の実用的合成を行った。触媒が酸化度を変化させながら複数の結合形成を促進するドミノ反応や光触媒とチオエステルを組み合わせた新しい重合法の創製等で特筆すべき成果を得た。

丸岡 啓二 (計画研究): 高性能ハイブリッド触媒系を活用する高選択的ドミノ反応の開発

キラル相間移動触媒・遷移金属触媒のハイブリッド触媒系を用いるイサチンの不斉アルキニル化反応 (*ACS Catal.* 2019)、二官能性キラル相間移動触媒によるオキシインドール類の不斉アミノ化反応 (*ACS Catal.* 2019: A01 畑中との共同研究)、光学活性スルホキシイミン類の不斉合成 (*J. Am. Chem. Soc.* 2019)、臭化銅・Selectfluor のハイブリッド触媒系による第三級アミド類の選択的開裂反応 (*Chem. Sci.* 2020)、光学活性ハイブリッド配位子を活用するドミノ型不斉三成分連結反応 (*J. Am. Chem. Soc.* 2020: A03 加納との共同研究)、有機ラジカル触媒・Selectfluor 触媒系による直截的 C-H 官能基化反応 (*Chem. Sci.* 2020: A01 畑中との共同研究)、DABCO 型の HAT 触媒と光触媒のハイブリッド系による選択的な水素引き抜き反応 (*ACS Catal.* 2021) の開発を行なった。

侯 召民 (計画研究): 精密有機合成と重合を融合したドミノ触媒系の開発

独自の希土類触媒を用い、極性オレフィンとエチレンとの精密共重合を初めて達成し、優れた自己修復性能や形状記憶性能を示す機能性ポリマーの創成に成功した (*J. Am. Chem. Soc.* 2019; *Angew. Chem. Int. Ed.* 2021)。また、希土類触媒の特徴を活かして、アルジミン類の C-H 結合活性化を伴うアルケン類との立体選択的[3+2]環化反応を実現した (*J. Am. Chem. Soc.* 2020; *Angew. Chem. Int. Ed.* 2022)。さらに、新規光学活性スカンジウム触媒を開発し、それらを用いて、イミダゾール類の C-H 結合の活性化による全炭素置換不斉四級炭素の構築 (*J. Am. Chem. Soc.* 2020) や、フェロセン類の C-H 結合のアルキンへの不斉付加反応 (*J. Am. Chem. Soc.* 2021)、さらにキノリン類とアルキン類の脱芳香族的な不斉スピロ環化反応 (*J. Am. Chem. Soc.* 2021: A02 山口との共同研究)などを世界で初めて達成した。

井上 将行 (計画研究): ハイブリッド触媒系による多成分連結型連続反応の開発と全合成への展開

Ni/Pd ハイブリッド触媒系を用いるクロスカップリング (*Org. Lett.* 2018)、二・三成分ラジカル反応、ラジカル二量化反応、光レドックス触媒によるラジカル環化反応および TiO₂ を光触媒として用いる二成分ラジカル反応 (*J. Org. Chem.* 2022) によって、温和な条件下立体障害が高い C-C 結合を形成した。さらに、これらの新収束的合成戦略の応用によって、合成過程における官能基変換を最小化し、アシミシン (*Chem. Eur. J.* 2018)、5-エピオイデスム-4(15)-エン-1β,6β-ジオール (*Org. Lett.* 2019)、ヒキジマイシン (*J. Am. Chem. Soc.* 2020)、オイオニミノールオクタセテート (*J. Am. Chem. Soc.* 2021)、レジニフェラトキシ (*Org. Lett.* 2022)、1-ヒドロキシタキシニン (*Angew. Chem. Int. Ed.* 2019) およびタキソール (未発表) の短工程かつ効率的な全合成を達成した。

大内 誠 (計画研究): ハイブリッド触媒による高分子配列科学の新展開

重合後に変換できる結合を組み込んだかさ高いモノマーやジビニルモノマーを用い、その(共)重合においてかさ高さや環化成長によって配列を制御し、重合の後にワンポット側鎖変換反応を連続して行うことで、汎用モノマーから成る配列制御高分子の合成に成功した。一つの重合から様々な側鎖置換基を有する配列制御高分子をシリーズ合成できる点に大きな特徴がある。これまで合成例のなかった汎用モノマーをベースとする配列制御共重合体が合成可能であり、組成比が同じである非配列制御共重合体と比較することで、配列特異的なガラス転移温度 (*ACS Polym. Au* 2021) や温度応答性 (*Angew. Chem. Int. Ed.* 2018)、さらに液晶特性 (*Angew. Chem. Int. Ed.* 2020) を明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 金井求
2. 発表標題 旗艦たる触媒化学の創造を求めて
3. 学会等名 第1回「ハイブリッド触媒」若手道場（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 金井求
2. 発表標題 開会挨拶
3. 学会等名 化学フェスタ、文科省科研費新学術領域研究「ハイブリッド触媒」特別企画：「1 + 1は3？」ハイブリッド触媒が紡ぎ出す新反応化学
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 金井求
2. 発表標題 開会挨拶
3. 学会等名 第2回「ハイブリッド触媒」公開シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 金井求
2. 発表標題 opening remarks
3. 学会等名 日本化学会年会、甲南大：化学会特別企画「システム志向の触媒化学」（略称：触媒システム化学）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ハイブリッド触媒領域ホームページ http://hybridcatalysis.jp/ ハイブリッド触媒領域ホームページ http://hybridcatalysis.jp/ ハイブリッド触媒領域ホームページ http://hybridcatalysis.jp/ 分子合成オンデマンドを実現するハイブリッド触媒系の創製「ハイブリッド触媒」 http://hybridcatalysis.jp/

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
連携研究者	大井 貴史 (Ooi Takashi) (80271708)	名古屋大学・工学研究科(WPI)・教授 (13901)	
連携研究者	丸岡 啓二 (Maruoka Keiji) (20135304)	京都大学・薬学研究科・教授 (14301)	
連携研究者	侯 召民 (Hou Zaomin) (10261158)	理化学研究所・侯有機金属化学教室・主任研究員 (82401)	
連携研究者	井上 将行 (Inoue Masayuki) (70322998)	東京大学・大学院薬学系研究科・教授 (12601)	
連携研究者	宍戸 哲也 (Shishido Tetsuya) (80294536)	東京都立大学・都市環境科学研究科・教授 (22604)	

6. 研究組織（つづき）

	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
連携研究者	寺田 眞浩 (Terada Masahiro) (50217428)	東北大学・理学研究科・教授 (11301)	
連携研究者	大宮 寛久 (Ohmiya Hirohisa) (40508876)	京都大学・化学研究所・教授 (14301)	
連携研究者	正岡 重行 (Masaoka Shigeyuki) (20404048)	大阪大学・工学研究科・教授 (14401)	
連携研究者	大内 誠 (Ouchi Makoto) (90394874)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	
連携研究者	畑中 美穂 (Hatanaka Miho) (80616011)	慶應義塾大学・理工学部・准教授 (32612)	
連携研究者	山下 恭弘 (Yamashita Yasuhiro) (90334341)	東京大学・理学系研究科・准教授 (12601)	

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9件

国際研究集会 第2回ハイブリッド触媒国際シンポジウム	開催年 2021年～2021年
国際研究集会 第1回ハイブリッド触媒国際会議	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 Japanese-Spanish Pre-Symposium in Organic Synthesis in Sendai	開催年 2018年～2018年

国際研究集会 The Second Japanese-Spanish Symposium in Organic Synthesis	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 Japanese-Spanish Post-Symposium in Organic Synthesis in Nagoya	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 Japanese-Spanish Post-Symposium in Organic Synthesis in Tokyo	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 第6回日英不斉触媒シンポジウム	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 International Symposium on Catalysis and Fine Chemicals	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 Young Researchers' Meeting with Professor Nicolaou	開催年 2018年～2018年

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