

機関番号：14401

領域設定期間：平成27年度～令和元年度

領域番号：2702

研究領域名（和文） 高難度物質変換反応の開発を指向した精密制御反応場の創出

研究領域名（英文） Precise Formation of a Catalyst Having a Specified Field for Use in Extremely Difficult Substrate Conversion Reactions

領域代表者

真島 和志 (MASHIMA Kazushi)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：70159143

交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,234,101,341円

研究成果の概要

世界の最先端をリードする研究を推進する有機合成化学分野の研究者を中心として、錯体化学、超分子化学、生物化学、界面化学、理論化学等との分野横断的な連携により、触媒開発における融合とブレークスルーを誘発することで、高難度物質変換に有用な優れた触媒の開発に成功し、領域全体として期間中に1145件の学術論文を発表するに至った。これらの成果は、触媒の高活性化、予想外な反応特異性・選択性発現、新反応の発見において、今まで二次的役割として軽視されがちであった反応活性点近傍の立体構造・電子状態の重要性を解明することで達成されたものであり、多くの高難度かつ有用な物質変換反応を実現することができた。また、計画班員間のみならず、広く公募班員や国際支援班の研究者等との共同研究も活発に進み、直接議論することにより、アイデアの共有を促した結果、112件の共著論文（国内、国際共同研究を含む）に結実した。

研究分野：有機化学、錯体化学、触媒化学、高分子化学、無機化学、表面化学

キーワード：高難度物質変換、精密制御反応場、触媒反応、有機合成化学

1. 研究開始当初の背景

有機合成化学は、創薬科学、材料科学、高分子科学などの物質科学を支える基盤科学技術であり、社会に対して果たすべき重要な役割は、経済的にも見合うレベルで有用化合物を安定供給すること、そして新しい機能・生理活性を有する新規化合物を創製することである。現在の有機合成化学の力量をもってすれば、どのような複雑な化合物でも必要に応じて合成可能であると言っても過言ではないが、それに費やすエネルギー、時間、そして副生する廃棄物を最小限にすべき社会的要請に応える必要がある。これらの要請に応えるために、現在、有機合成化学者に要求されている最重要課題は、可能な限り入手容易で安価な炭化水素等を直接利用する合成反応、枯渇性資源に依存しないCO₂、O₂、N₂などを用いる物質変換反応、廃棄物ゼロの高原子効率反応や省エネルギー反応等の環境負荷の低い官能基変換反応、等の高難度有機合成反応の開発である。本領域の前身である新学術領域研究（分子活性化：H22～H26年度）での成果を踏まえ、上述の課題を達成し、高難度かつ有用な物質変換反応を開発するためには、反応活性点のみならず、反応活性点と反応に密接に関わるその周辺領域を合わせた『反応場』の検討が極めて重要であると考へ、遷移金属錯体反応場、生体反応場、固体表面反応場等を駆使した革新的な触媒の開発に向けて、多分野の研究者を結集して反応場構築に焦点をあてた研究を多面的かつ強力に推進した。

2. 研究の目的

本新学術領域研究の目的は、「新しい触媒反応場の創出」を基軸として、有機化学、錯体化学、生物化学、触媒化学、高分子化学、固体表面化学等の広い分野に波及し得る先端研究を推進することにある。具体的には、「新しい触媒反応場」として、金属錯体、生体分子、巨大分子を活用し、「これまで不可能、あるいは困難とされてきた高難度物質変換反応の実現による物質変換反応の刷新」を目指し、これにより有機合成化学（物質変換）の飛躍的發展に向け研究を推進した。その達成に向けて、触媒分子設計の指針の確立、大幅な触媒活性の向上、反応選択性・特異性の発現を見込むことができる新触媒の創出を図った。特に、反応活性点周辺領域に新たに設計した

反応性制御部位、基質活性化部位、選択性制御部位等を精密かつ自在に構築すること（例えば、酸・塩基、疎水場、キラル環境、極性官能基、基質結合サイト等の適切な配置）により、独創的な反応場（高機能・高活性・高選択性触媒）を開発し、新反応の発見や従来達成が困難とされてきた高難度かつ有用物質変換の実現を目指した。このような、従来の触媒機能をはるかに凌駕する触媒を新たに開発するにあたり、様々な分野の知見や学問の結集が不可欠であり、本学術領域の形成により、関連分野への波及効果も大きいと期待した。従って、本領域研究では、従来にない反応場に注目するとともに、日本国内でこれまでに培われた金属触媒反応に関する膨大な知見と組み合わせることで初めて可能となる、新しい切り口から高難度物質変換反応に果敢に挑戦し、合成ルートを一変するブレークスルーをもたらすべく研究を推進した。

3. 研究の方法

有機合成手法に革新的な進展をもたらし、斬新で独創的な「精密制御反応場」の創出により、物質変換反応を担う新たな学際領域の構築にむけて、反応活性点と反応活性点の周辺領域を合わせた『反応場』に焦点をあて、新現象・新反応を担う触媒開発を学問対象として取り上げた。反応活性点、ならびに反応に密接に関わる周辺領域の相乗作用により、優れた生成物の立体制御、基質選択性、反応加速（基質の活性化）、副反応の抑制、活性種の安定化等を実現するため、関連分野の触媒開発に取り組むトップレベルの専門家を「反応場」というキーワードのもとに結集し、領域内での活発な共同研究を通じて学際的融合を誘起し、「精密制御反応場」研究グループ形成を行った。まず、領域全体の研究を以下の4班（A01班 高難度有用物質変換反応の開発、A02班 精密制御金属錯体反応場の創出、A03班 精密制御生体分子反応場の創出、A04班 精密制御巨大分子反応場の創出）から構成することにより、強力に推進する体制を採用した。

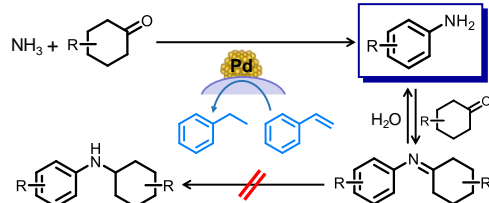
当該分野において、我が国がリーダーシップを発揮し、社会から求められる要請に応え続けるためには、新反応の開拓・新現象の発見に繋がる新触媒の開発は必須であり、従来の発想とは異なる新たな研究の方向性を示すことが求められている。本学術領域では、研究分野の融合による反応活性点と反応に密接に関わる周辺領域を含めた反応場（A02～A04班）に焦点を絞り、反応場の精密制御と高難度物質変換の達成（A01班）に取り組む研究に総力を挙げて取り組んだ。

4. 研究の成果

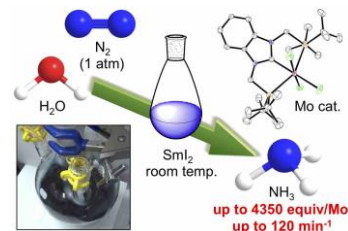
(1) 研究項目 A01 班 高難度有用物質変換反応の開発

A01班は、高難度かつ有用な物質変換反応の開発を担当し、他の3つの班の支援も受けつつ、本新領域研究の中心的役割を担った。共同研究を通じて、様々な反応場を駆使して、きわめて難しい反応の開発に対しても果敢に挑戦し、二酸化炭素を用いる還元的炭素-炭素結合形成、環状脂肪族化合物の脱水素芳香環形成反応、窒素の還元による低温超高効率アンモニア合成、逆マルコフニコフ選択的芳香族アルキル化反応、ニトロアレーンを求電子種源とするクロスカップリング反応といった、従来は達成困難であるとされてきた高難度反応の開発に成功した。また、二酸化炭素の水素化による選択的ギ酸合成（野崎・西林）、アンモニアを原料とするアニリン合成（野崎・水野）など、領域内共同研究の成果が得られた。以下に、A01班の代表的成果を示す。

①脱水素芳香環形成反応 A01班の計画班員である水野と野崎の共同研究により、脱水素芳香環形成反応に高活性を示す担持パラジウム系ナノ粒子触媒を設計し、シクロヘキサノールからのフェノール合成、シクロヘキサノンオキシムからのアニリン合成などの様々な脱水素芳香環形成反応を達成した。現在ファインケミカルズ合成で主流となっているハロゲンを用いるクロスカップリングの環境調和型代替法として注目されている。さらに、上記2名に長谷川（A03班の計画班員）も含めた共同研究により、シクロヘキサノンとアンモニアからのアニリン合成を達成、固体表面での水素の授受に関する触媒作用を明らかにした。ベンゼンのニトロ化、還元を経る古典的な手法を代替する成果である（*ACIE* 2019）。



②窒素の還元によるアンモニア合成 A01班の計画班員である西林は、常温常圧で窒素をアンモニアへと変換する触媒としてピンサー配位子を有する遷移金属錯体に着目し、様々な遷移金属錯体を用いた温和な条件での触媒的アンモニア生成反応を見出した。とりわけ触媒としてカルベンを有するPCP型ピンサー配位子を有するMo錯体、還元剤としてヨウ化サマリウム、プロトン源として水を用いたところ、常温常圧で触媒的アンモニア生成反応が速やかに進行し、世界最高の触媒回転数4350回を達成した。常温常圧での触媒的アンモニア合成として初めて水をプロトン源として用いることに成功したのみならず、窒素固定酵素ニトロゲナーゼに匹敵する触媒回転頻度と、ニトロゲナーゼを超える反応効率を実現した（*Nature* 2019）。

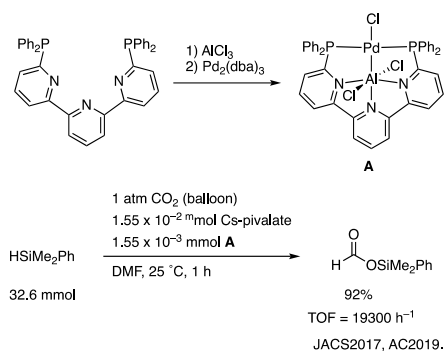


(2) 研究項目 A02 班 精密制御金属錯体反応場の創出

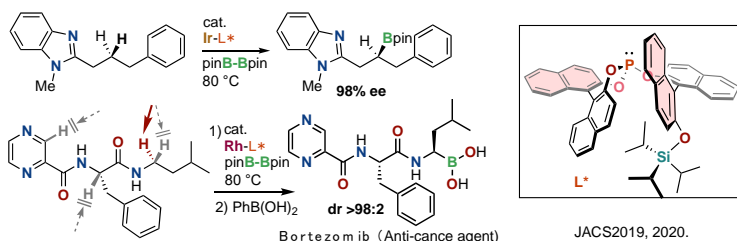
A02班は、これまで主として行われてきた、遷移金属錯体の金属中心に直接結合している配位子に加えて、さらに広範囲の金属に直接結合していない配位子部位の立体・電子的な効果を精密に制御することにより、新しい金属錯体反応場の構築を行い、これを活用してさまざまな高難度

物質変換反応の実現を目指して研究を推進した。その結果、二酸化炭素のヒドロシリル化反応において世界最高の TOF を可能とする異種二核金属錯体反応場、高エナンチオ選択的 C-H 活性化-ホウ素化反応や 1,4-付加反応が行える新しいキラル金属錯体反応場、動的挙動を示すユニークな金属錯体反応場、可視光エネルギーを利用したカルボキシル化反応を可能とする精密制御反応場などの構築に成功し、さまざまな高難度反応を達成した。以下に、A02 班の代表的成果を示す。

①金属-金属結合を含む多核金属錯体反応場の開発
A02 班の計画班員である岩澤は、6,6''-ビスホスフィノ-2,2':6',6''-ターピリジンを利用して各種の 13 族金属と 9 族、10 族の間に金属間結合を持つ二核錯体の合成に成功し、異種二核金属錯体反応場の汎用的かつ効率的な構築手法を確立した。また、一連の異種二核金属錯体の中で、Al-Pd 間に金属間結合を持つ二核錯体は二酸化炭素のヒドロシリル化反応によるシリルホルメートの合成反応に対して高活性を示し、その触媒回転効率には世界最高の 19300 h⁻¹ にまで到達することを見出した。得られるシリルホルメートは様々なカルボニル化合物へと変換可能であることから、二酸化炭素の固定化による物質変換の起点となる研究成果として注目されている。



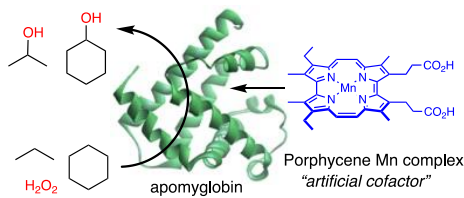
②キラル錯体反応場の構築による C-H 結合の不斉官能基化
A02 班の計画班員である澤村は、C-H 結合活性化反応として最も難易度の高い、C(sp³)-H 結合のエナンチオ選択的な修飾反応の開発に成功した (JACS 2019 および 2020)。新たに均一系キラルモノホスファイト配位子(L*)を設計し、得られるキラル錯体反応場を用いて、炭素-水素結合の不斉認識による不斉官能基化として、Ir 触媒による不活性 C(sp³)-H 結合の不斉ホウ素化反応や、Rh 触媒による窒素原子隣接位のメチレン C(sp³)-H をサイトおよびエナンチオ選択的にホウ素化する反応を実現した。さらに、本触媒系を応用することで、有用な生理活性化合物の短段階合成法の開発に成功した。



(3) 研究項目 A03 班 精密制御生体分子反応場の創出

A03 班では、タンパク質などの生体分子のキャビティーを反応場として利用し、水中かつ温和な条件下で酵素類似の反応、天然を凌駕する反応、あるいは天然には見られないような反応をつかさどる生体触媒の開発をめざし、タンパク質や抗体などの生体分子やそのモデル分子を新たな反応場として取り扱い、酵素を範とする高難度反応の開拓や、反応性や選択性の制御に関する研究を実施した。特に、タンパク質反応場に着目し、反応場への人工補因子の導入による不活性アルカンの水酸化、疑似基質の添加による高効率なベンゼンのフェノールへの変換、タンパク質アミノ酸側鎖を配位子に用いた金属酵素の構築とマイケル付加への応用など、新しい生体触媒の創製を達成した。以下に、A03 班の代表的成果を示す。

①タンパク質反応場を用いた新しい生体触媒の開発
A03 班の計画班員である林は、酸素貯蔵ヘムタンパク質であるミオグロビンに着目し、ミオグロビンの天然補因子ヘム (ポルフィリン鉄錯体) を除去したアポ体に、ポルフィセンマンガン錯体を挿入し、代表的なヘム酵素のシトクロム P450 に見られる活性を獲得した。具体的には、不活性 C(sp³)-H 結合の活性化を伴うアルカンの水酸化反応を実現し、反応活性種の検出と共に、プロパンやエタンなどの高難度水酸化反応も達成した。ヘムポケットのアミノ酸の変異を駆使することにより、エチルベンゼンの水酸化を 13%ee から約 80%ee まで向上させた (JACS 2017)。



②タンパク質の活性化を伴う生体触媒の開発
A03 班の計画班員である荘司は、長鎖脂肪酸の水酸化酵素のシトクロム P450BM3 (P450BM3) に基質類似分子 (デコイ分子) を取り込ませることによって、ベンゼンを毎分 259 回転 (総触媒回転数 4 万回転) で、フェノールに変換する反応系の構築に成功した。さらに、細胞膜透過性デコイ分子を、P450BM3 を過剰発現させた大腸菌に取り込ませることで、菌体内でのベンゼンのフェノール変換にも成功した。菌体内反応では、P450BM3 を単離精製することなしに簡便にベンゼンからフェノールの変換を収率 59% で達成した (ACIE 2020)。

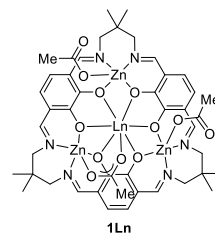


(4) 研究項目 A04 班 精密制御巨大分子反応場の創出

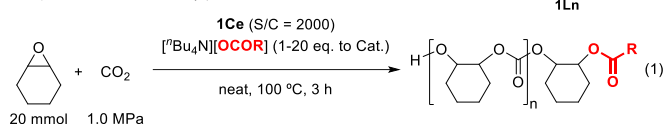
A04 班の目標は、「 dendrimer、金属クラスター、キラル高分子などの巨大分子の内孔や界

面を精密に制御し形成されるユニークな反応場を構築し、低分子触媒では得られない、反応性、選択性、あるいは新反応の発見を目指す」ことであり、低分子触媒では得られない、反応性、選択性、あるいは新反応の発見に取り組み、金属クラスター反応場による二酸化炭素とエポキシドの交互共重合反応による生分解性ポリマー合成、超分子反応場により不斉ルイス触媒反応を開発し、高分子反応場や自己組織化固定化反応場により不斉カップリング反応などの高難度反応を達成した。以下に、A04 班の代表的成果を示す。

①金属クラスター反応場の創出 A04 班の計画班員である真島は、1 つの希土類金属と 3 つの亜鉛を含有する異種金属多核錯体 **1Ln** を合成し、VT-NMR 測定を行うことで、**1Ln** が有するアセテート配位子が分子内外を問わず非常に速い速度で交換していることを見出した。また、多様な希土類錯体を合成し、活性を比較したところ中心にセリウムを有する異種金属多核錯体 **1Ce** が最も高い触媒活性を示した。この錯体を用いた二酸化炭素とエポキシドの交互共重合において、カルボン酸アンモニウム塩を添加剤として加えることで、連鎖移動反応が進行し、ポリカー

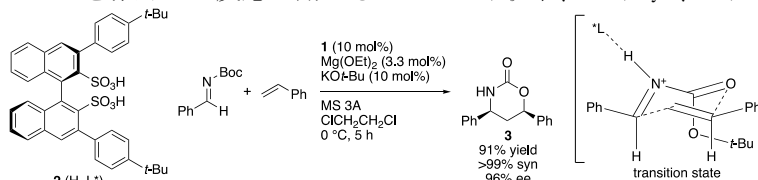


ボネートの末端に対応する官能基を選択的に導入できる新しい触媒系が達成された (式 1) (*ACIE* **2018**)。

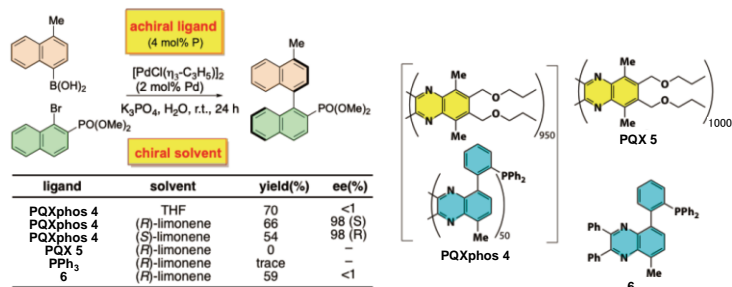


また、A01 班の計画班員である野崎との共同研究により、さらに触媒活性の高いコバルト—希土類触媒系の開発が行われた (*IC* **2020**)。

②超分子反応場の創出 A04 班の計画班員である石原は、3,3'-(4-*t*-BuC₆H₄)₂-BINSAs **2** に、3.3 mol%の Mg(OEt)₂ と 10 mol%の KO*t*-Bu を添加して反応に用いると **3** が 91%収率、>99%syn、96%ee で生成することがわかった (*JACS* **2017**)。予め分子設計した成分を幾つか混ぜ合わせるだけで生成する超分子が、高次機能触媒になり得ることを示した意義は大きい。



③高分子反応場の創出 A04 班の計画班員である杉野目は、安定かつ反転可能な片巻きらせん構造を有するポリ(キノキサリン-2,3-ジイル) (以下 PQX と略記) に触媒活性部位をペンダント



2017 および 2018)。

5. 主な発表論文等 (受賞等を含む)

A01 班 (計画班)

- “Nickel-Catalysed anti-Markovnikov Hydroarylation of Unactivated Alkenes with Unactivated Arenes Facilitated by Non-covalent Interactions” Saper, N. I.; Ohgi, A.; Small, D. W.; Semba, K.; Nakao, Y.; Hartwig, J. F. *Nat. Chem.*, **2020**, *12*, 276-283.
- “Ruthenium-Catalysed Oxidative Conversion of Ammonia into Dinitrogen” Nakajima K.; Toda H., *Sakata K.; Nishibayashi Y. *Nat. Chem.*, **2019**, *11*, 702-709.
- “Molybdenum-Catalysed Ammonia Production with Samarium Diiodide and Alcohols or Water” Ashida Y., Arashiba K., Nakajima K., Nishibayashi Y. *Nature*, **2019**, *568*, 536-540.
- “Synthesis of Polyethylene with in-chain α , β -Unsaturated Ketone and Isolated Ketone Units by Pd-catalyzed Ring-opening Copolymerization of Cyclopropanones with Ethylene” Wang, X.; Seidel, F. W.; Nozaki, K. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2019**, *58*, 12955-12959.
- “meta-Selective C-H Borylation of Benzamides and Pyridines by an Iridium-Lewis Acid Bifunctional Catalyst” Yang, L.; Uemura, N.; Nakao, Y. *J. Am. Chem. Soc.*, **2019**, *141*, 7972-7979.
- “Single-step Construction of the Anti-deoxypropionate Motif from Propylene: Formal Total Synthesis of the Cuticular Hydrocarbons Isolated from Antitrogonus Parvulus” Murayama, T.; Nozaki, K. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2018**, *57*, 11394-11398.
- “Site-Selective Linear Alkylation of Anilides by Cooperative Nickel/Aluminum Catalysis” Okumura, S.; Komine, T.; Shigeki, E.; Semba, K.; Nakao, Y. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2018**, *57*, 929-932.
- “Buchwald-Hartwig Amination of Nitroarenes” Inoue, F.; Kashihara, M.; Yadav, R. M.; Nakao, Y. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2017**, *56*, 13307-13309.

9. "Nickel- and Photoredox-Catalyzed Cross-Coupling Reactions of Aryl Halides with 4-Alkyl-1,4-dihydropyridines as Visible Light-Mediated Formal Nucleophilic Alkylation Reagents" Nakajima, K.; Nojima, S.; Nishibayashi, Y. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2016**, *55*, 14106-14110.
 10. "Anti-Markovnikov Hydroheteroarylation of Unactivated Alkenes with Indoles, Pyrroles, Benzofurans, and Furans Catalyzed by a Nickel-N-Heterocyclic Carbene System" Schramm, Y.; Takeuchi, M.; Semba, K.; Nakao, Y.; Hartwig, J. F. *J. Am. Chem. Soc.*, **2015**, *137*, 12215-12218.
- A02 班 (計画班)
11. "Asymmetric Synthesis of α -Aminoboronates via Rhodium-Catalyzed Enantioselective C(sp³)-H Borylation" Reyes, R. L.; Sato, M.; Iwai T.; Sawamura, M. *J. Am. Chem. Soc.*, **2020**, *142*, 589-597.
 12. "Iridium-catalyzed Asymmetric Borylation of Unactivated Methylene C(sp³)-H Bonds" Reyes, R. L.; Iwai, T.; Maeda, S.; Sawamura, M. *J. Am. Chem. Soc.*, **2019**, *141*, 6817-6821.
 13. "Palladium-Catalyzed Asymmetric C(sp³)-H Allylation of 2-Alkylpyridines" Murakami, R.; Sano, K.; Iwai, T.; Taniguchi, T.; Monde, K.; Sawamura, M. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2018**, *57*, 9465-9469.
 14. "Fluorinated Vinylsilanes from the Copper-Catalyzed Defluorosilylation of Fluoroalkene Feedstocks" Sakaguchi, H.; Ohashi, M.; Ogoshi, S. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2017**, *57*, 328-332.
 15. "Strategic Utilization of Multifunctional Carbene for Direct Synthesis of Carboxylic-Phosphinic Mixed Anhydride from CO₂" Hoshimoto, Y.; Asada, T.; Hazra, S.; Kinoshita, T.; Sombut, P.; Kumar, R.; Ohashi, M.; Ogoshi, S. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2016**, *55*, 16075-16079.
 16. "Catalytic Asymmetric Iterative/Domino Aldehyde Cross-Aldol Reactions for the Rapid and Flexible Synthesis of 1,3-Polyols" Lin, L.; Yamamoto, K.; Mitsunuma, H.; Kanzaki, Y.; Matsunaga, S.; Kanai, M. *J. Am. Chem. Soc.*, **2015**, *137*, 15418-15421.
- A03 班 (計画班)
17. "Thermoresponsive Micellar Assembly Constructed from a Hexameric Hemoprotein Modified with Poly(*N*-isopropylacrylamide) toward an Artificial Light-Harvesting System" Hirayama, S.; Oohora, K.; Uchihashi, T.; Hayashi, T. *J. Am. Chem. Soc.*, **2020**, *142*, 1822-1831.
 18. "Myoglobin Reconstituted with Ni Tetrahydrocorrin as a Methane Generating Model of Methyl-coenzyme M Reductase" Oohora, K.; Miyazaki, Y.; Hayashi, T. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2019**, *58*, 13813-13817.
 19. "Supramolecular Hemoprotein Assembly with a Periodic Structure Showing Heme-Heme Exciton Coupling" Oohora, K.; Fujimaki, N.; Kajihara, R.; Watanabe, H.; Uchihashi, T.; Hayashi, T. *J. Am. Chem. Soc.*, **2018**, *140*, 10145-10148.
 20. "Catalytic Cyclopropanation by Myoglobin Reconstituted with Iron Porphycene: Acceleration of Catalysis due to Rapid Formation of the Carbene Species" Oohora, K.; Meichin, H.; Zhao, L.; Wolf, M.; Nakayama, A.; Hasegawa, J.; Lehnert, N.; Hayashi, T. *J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, *139*, 17265-17268.
- A04 班 (計画班)
21. "Chemoselective oxidative generation of ortho-quinone methides and tandem transformations" Uyanik M.; Nishioka K.; Kondo R.; Tshihara K. *Nat. Chem.*, **2020**, *12*, 353-362.
 22. "Cerium(IV) Carboxylate Photocatalyst for Catalytic Radical Formation from Carboxylic Acids: Decarboxylative Oxygenation of Aliphatic Carboxylic Acids and Lactonization of Aromatic Carboxylic Acids" Shirase, S.; Tamaki, S.; Shinohara, K.; Hirosawa, K.; Tsurugi, H.; Satoh, T.; Mashima, K. *J. Am. Chem. Soc.*, **2020**, *142*, 5668-5675.
 23. "Cobalt-Catalyzed E-Selective Cross-Dimerization of Terminal Alkynes: A Mechanism Involving Cobalt(0/II) Redox Cycles" Ueda, Y.; Tsurugi, H.; Mashima, K. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2020**, *59*, 1552-1556.
 24. "Chiral Supramolecular U-shaped Catalysts Induce the Multiselective Diels-Alder Reaction of Propargyl Aldehyde" Hatano, M.; Sakamoto, T.; Mizuno, T.; Goto, Y.; Ishihara, K. *J. Am. Chem. Soc.*, **2018**, *140*, 16253-16263.
 25. "Asymmetric Cycloisomerization of *o*-Alkenyl-N-methylanilines to Indolines through Iridium-Catalyzed C(sp³)-H Addition to Carbon-Carbon Double Bonds" Torigoe, T.; Ohmura, T.; Suginome, M. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2017**, *56*, 14272-14276.
 26. "Low Temperature Activation of Supported Metathesis Catalysts by Organosilicon Reducing Agents" Mougél V.; Chan K.-W.; Siddiqi G.; Kawakita K.; Nagae H.; Tsurugi H.; Mashima K.; Safonova O.; Coperet C. *ACS Cent. Sci.*, **2016**, *2*, 569-576.
 27. "Majority-Rule-Type Poly(quinaxaline-2,3-diyl)s as Highly Efficient Chiral Amplification System for Asymmetric Catalysis" Ke, Y.-Z.; Nagata, Y.; Yamada, T.; Suginome, M. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2015**, *54*, 9333-9337.

ホームページ等

<http://precisely-designed-catalyst.jp/>