

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：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01977

研究課題名(和文) 典型金属の触媒化：元素読み替えに相当する性状制御手法の開発

研究課題名(英文) Catalytic Utilization of Main Group Metals: Development of Methods for Replacement of Elements

研究代表者

安田 誠 (Yasuda, Makoto)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：40273601

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：トリフェノキシ配位子を基盤とする有機配位子を用いて13族であるホウ素およびアルミニウムの錯体を多種類合成(カゴ型金属錯体)した。これは、極めて高いルイス酸触媒として作用し、1)芳香族選択的反応の達成、2)立体選択的グリコシル化触媒反応の実現、3)フッ化糖の触媒的グリコシル化反応の達成、4)機械学習による触媒設計と選択的反応の実現、5)光照射下での積極的な触媒活性向上系の確立、等を行なった。カゴ型金属錯体には多くの反応場制御因子を有しており、これらの多様な触媒デザインを可能にしたことから、今後の大きな展開が期待できる成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで典型金属触媒は、工業的には厳しい条件下でのバルクの反応に用いられてきた。これは、精密有機合成に活用される遷移金属触媒とは対照的であった。本研究では、制御因子を多く包含したカゴ型典型金属錯体を開発したことによって、精密な有機合成に典型元素を触媒として活用することに成功した。これは、安価な典型金属で高価な遷移金属を代替する、いわゆる「元素読み替え」に相当する画期的な成果を与えたと位置付けられる。本研究の触媒デザイン手法は、さらに展開を可能とするもので、今後の学術的および工業的な波及効果が強く期待される。

研究成果の概要(英文)：Triphenoxylbenzen-based ligands built metal complexes of group 13 elements, such as boron or aluminum (cage-shaped metal complexes). It acted as an effective catalytic reactions; 1) selective recognition of aromatic compounds over aliphatic ones, 2) stereoselective glycosylation, 3) catalytic glycosylation of fluorinated sugar, 4) machine-learning based design of catalyst for selective reactions, 5) activation of catalytic ability by irradiation of UV or visible light. The cage-shaped metal complexes were tuned by many factors for precise control of Lewis acidity and catalytic activity. These characteristic feature enabled the complex to be an effective catalyst and expected to be an other types of reaction systems.

研究分野：有機合成化学

キーワード：ルイス酸 ホウ素 アルミニウム 立体選択的反応 触媒 反応場 典型金属

1. 研究開始当初の背景

化学反応は触媒の性能に強く依存し、その開発は重要な課題である。工業化学において大規模に実施されている触媒反応のひとつは重質油の分解で、ゼオライト触媒が用いられている。すなわち、Si, Al の酸化物が触媒の主役である。この触媒の含有元素はクラーク数の上位3つで構成され、資源的に理想的な触媒である。つまり、資源的に豊富な元素で触媒が構成されているために、最大規模の触媒反応の工業化が実現したといえる。

一方で精密有機合成に目を向けた場合、状況は大きく異なる。たとえば薬品合成を俯瞰すると触媒反応は高価な遷移金属を用いたものが多く、アルミニウムをはじめとする典型元素は当モル過剰量試剤として用いられる場合がほとんどである。典型金属の触媒化が困難な原因を学術的に解決し、実用的な触媒反応設計の方法論の開発を本研究課題の対象として検討を行う。また、この触媒特有の精密有機合成の選択的触媒反応の実現をめざす。

Al に代表される典型金属が触媒となり難い原因を以下に述べる。遷移金属触媒反応の多くは酸化還元サイクルに駆動される。一方でアルミニウムに代表される典型金属は酸塩基型の反応が対象である。この際、金属中心と反応基質との親和性が高いことが鍵であるが、逆に金属種のターンオーバー（触媒回転）は全く期待できない。活性化能と触媒回転能が二律背反の関係にある。重質油の分解は、堅牢性の高いゼオライトを超高温条件下で行うことで成り立つ特殊事例であり、これを精密合成反応に適用することはできない。したがって、精密有機合成における典型元素の触媒化には新しい概念が必要である。これまで安価であるために、典型金属が当モル過剰量試剤であることに目を背けてきた歴史的経緯があるが、生成物との分離、大スケール化への障壁を考えると、触媒化に対する取り組みが急務である。

2. 研究の目的

典型金属の多くは基質の活性化能と触媒回転能の二律背反性が強く、精密有機合成の触媒利用が困難で、特に豊富に存在するアルミニウムの触媒化は大きな課題であり、同族の稀元素である In や Ga が触媒作用を示すこととは対照的である。本研究では、B や Al に特殊な有機骨格を付与し、金属性状を変質させ、活性化能と触媒回転能の両立した触媒を創出する。B や Al が希少金属の元素の読み替えとみなせる新概念を切り拓く課題である。

- (i) 単核の Al 錯体の合成：多核錯体形成を避けるため、有機骨格配位子に立体障害を付与する。
- (ii) 触媒活性向上：Al に対して labile な配位子を付与し、トータルの活性を上げる。有機骨格のサイズ、構造をチューニングして触媒活性の変化を探る。
- (iii) 芳香族選択性発現：カゴ型ホウ素錯体に芳香族を認識するアリアル部位を付し、そこにさまざまな置換基を導入した際の選択性の相関を検討する。これにより、新しい選択的反応の基軸を生み出すことを目指す。

3. 研究の方法

(1) 単核 Al 錯体の合成

ホウ素有機骨格で包含したカゴ型ホウ素錯体の研究を進めてきた。この錯体が容易に合成できる要因は、ホウ素の小さな原子半径と低い配位数を好む性質により単核錯体が安定なためである。一方、Al は多核錯体を形成しやすいことが Scott (OM 2002, 418) や我々の研究 (Polyhedron 2017, 130) から判明している。本課題では、単核のカゴ型 Al 錯体の合成を目指すために、多核構造を好む Al の性質をいかに抑制するかが鍵である。そこで立体的に大きな置換基 R を導入し、かつ基幹部 (XY 部位) がカゴ型の外に向くように、CH よりも嵩高い SiMe 等を用いて検討する。

(2) 触媒活性向上

カゴ型 Al 錯体において、外部配位子のピリジンは触媒を不活化する。高活性触媒をめざし、labile な配位子 (例えば THF 等) を有する Al 錯体を合成する。配位子交換法、もしくは低配位性のハロピリジンをを用い高活性 Al 錯体として単離する。また、オルト置換基を有さない、より単純かつ反応場の大きな錯体の合成を行う。このために、有機骨格の根元をさらに大きな Ge 等にした配位子を合成し、錯形成を検討する。

(3) 芳香族選択性

カゴ型ホウ素錯体に π ポケットを導入することで、芳香族化合物/脂肪族化合物の混合系から芳香族化合物を選択的に認識する反応を見出していた。そこで、この系の選択性発現の原因追求と、高い選択性実現を目指した検討を行う。多くの置換基を導入した錯体を合成し、相関関係の取得と考察を行う。

4. 研究成果

(1) 単核 Al 錯体の合成

トリフェノキシ配位子のオルト位に嵩高い置換基を導入することで、アルミニウムの単核錯体を合成することに成功した。とくに、アリール基および臭素の導入が効果的であった。立体障害による多核化の抑制が単核錯体合成の鍵であった。

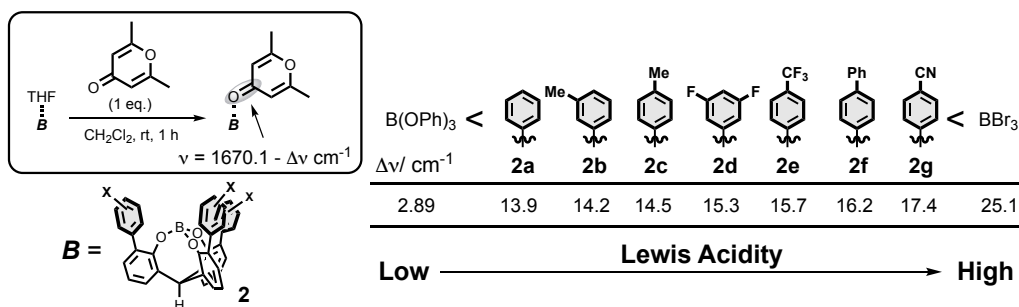
(2) カゴ型 Al 錯体の外部配位子による触媒活性向上

カゴ型 Al 錯体には外部配位子としてピリジン誘導体の付与が必須である。これらの外部配位子の選択により、ルイス酸性が顕著に変化することが判明した。ハロゲン置換したピリジンでは塩基性が低下するため、その結果として触媒のルイス酸性が向上する。またアルキルピリジンをを用いた場合は塩基性が向上するため、触媒のルイス酸性は低下する。ルイス酸触媒においてルイス酸性の微調整はきわめて重要で、これを外部配位子で調整する本手法は、きわめて簡便な方法で多様なルイス酸触媒を提供できる画期的な手法であると位置付けられる。

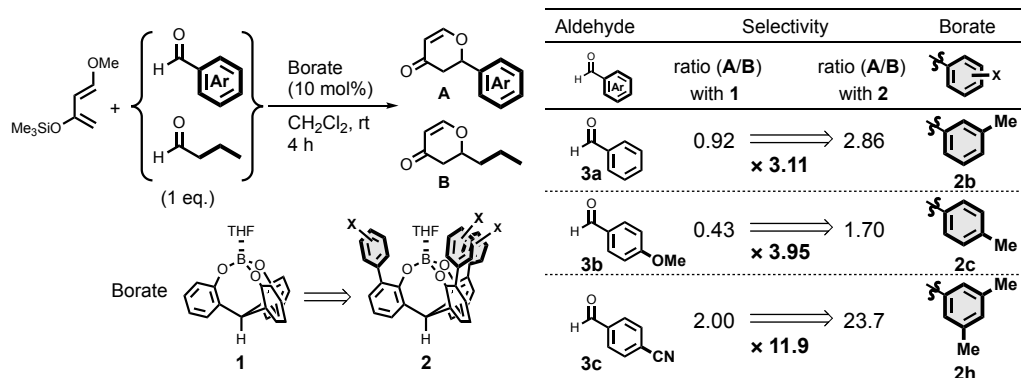
(3) 芳香族選択性発現

酵素などの生体分子は非常に高い精度で基質特異性を示す。この選択的な分子変換は水素結合や分散力といった中程度から弱い分子間相互作用を巧みに組み合わせることによって実現されている。分子間相互作用の特性の理解は、より高度な精密有機合成の展開へつながると期待される。金属触媒による基質選択性は異なるヘテロ原子間の相互作用に基づくことが多い。一方で基質の炭素骨格を認識した選択的反応は金属触媒との相互作用の差が生じにくいいため容易ではない。これまでに触媒の嵩高さ²⁾やドナー・アクセプター相互作用³⁾を利用した選択的反応の例が報告されているが、より一般的な炭素骨格の認識は未だ困難な課題となっている。また、分散力に代表される弱い分子間力を用いた基質の炭素骨格認識はこの課題の解決法として興味深い。当研究室ではカゴ型ホウ素錯体のホウ素周囲に芳香環を導入したが芳香族基質認識能を示すことを見出してきた。この芳香族基質を認識する反応場 (π -ポケット) と基質選択性との関係の理解は、分子間力を用いた触媒設計のために必要不可欠である。そこで基質選択性発現の要因究明のため、様々な電子・立体状態の π -ポケットを有する錯体を合成し、ホウ素周囲の置換基が触媒能に与える影響の解明を目指した。

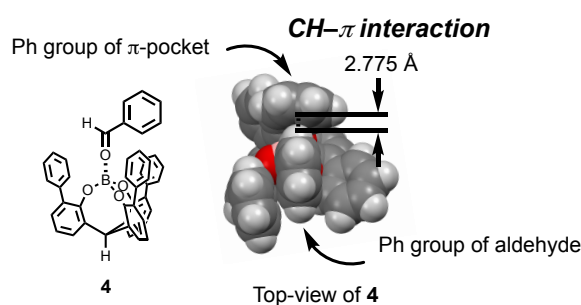
クロスカップリング法を用いて様々な置換基を有する芳香環を導入した錯体 **2** の合成を行った。錯体 **2** に対して γ -ピロンを添加し、カルボニル基の伸縮振動の変化値から錯体 **2** のルイス酸性を見積もった(下図)。ホウ素中心から離れた位置への置換基導入にもかかわらず錯体のルイス酸性調整に効果を示し、電子供与性(2b, c)/求引性置換基(2d, e, g)に加え、共役系の拡張(2f)によってもルイス酸性が制御可能であることが明らかとなった。



π -ポケットと基質選択性との相関を評価するため、ブタナールとベンズアルデヒド誘導体との競争的 hetero Diels-Alder 反応を行った。ベンズアルデヒド(3a)を用いた場合、電子供与性置換基を有する π -ポケット錯体(2b)が高い芳香族基質選択性を示した。電子供与(3b)または電子求引性置換基(3c)を有するベンズアルデヒドを用いた場合も電子供与性置換基を有する π -ポケット錯体(2c, h)がそれぞれ高い芳香族基質選択性を示した。これらの結果から基質認識における π -ポケットの電子状態の重要性が示唆された(下図)。



DFT 計算によりモデル錯体 4 の構造最適化を行った。π-ポケットを構成する芳香環とベンズアルデヒドの芳香環が T 字型に近接し、両者の間で CH-π 相互作用の存在が見積もられた(下図)。以上の結果から基質選択性の発現は π-ポケットの立体的な要因だけでなく、弱い分子間力である π-π/CH-π 相互作用といった電子的な要因も重要な役割を果たしていると考えられる。



(4) 立体選択的グリコシル化と光照射

カゴ型 A1 錯体を用いることで、S_N2 選択的なグリコシル化がイミデート糖に対して適用可能であることが判明した。さらに、フッ化糖に対しては、カゴ型ホウ素錯体が効果的であることがわかった。これらは、基質との立体的および電子的な相互作用が、中程度の効果で発揮され、基質の取り込みと吐き出しの両者を活性化し、触媒回転率が高くなったと考えられる。また、カゴ型ホウ素錯体のフェノキシ置換基のオルト位に、ピレンを導入した錯体を合成した。この化合物に光を照射すると、ピレンの相互作用によるエキシマが発生していることを示唆する物性データが得られた。この条件で触媒反応を行うと、触媒活性が格段に向上することがわかった。これは、エキシマ形成による立体的効果で生成物の解離を促進していると考えている。また、エキシマ形成時のルイス酸性の変化も触媒活性に影響を与えていると推察している。

(5) ルイス酸の特性を活かした各種反応開発

カゴ型金属錯体の検討を通して、ルイス酸性の調整が反応開発に重要であることが判明し、またそれぞれの反応を制御する相互作用に関する情報を多数得た。この知見を活用し、各種新反応開発を検討し、多くの反応系を見出した。

以上のようなカゴ型金属錯体の各種反応および触媒デザインの結果から、制御因子を多く有するカゴ型金属錯体の利点を発揮した触媒設計と新しい反応場構築を達成することができた。この結果は、今後の有機合成において新しい基軸を示すものと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Suzuki Kensuke, Nishimoto Yoshihiro, Yasuda Makoto	4. 巻 21
2. 論文標題 Geometrically Selective Synthesis of (E)-Enamides via Radical Allylation of Alkyl Halides with -Aminoallylic Stannanes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Organic Letters	6. 最初と最後の頁 6589 ~ 6592
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.orglett.9b01744	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 Nishimoto Yoshihiro, Nakao Shuichi, Machinaka Shota, Hidaka Fumiko, Yasuda Makoto	4. 巻 25
2. 論文標題 Synthesis and Characterization of Pheox- and Pheox-Aluminum Complexes: Application as Tunable Lewis Acid Catalysts in Organic Reactions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemistry A European Journal	6. 最初と最後の頁 10792 ~ 10796
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.201901791	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 Konishi Akihito, Horii Koki, Shiomi Daisuke, Sato Kazunobu, Takui Takeji, Yasuda Makoto	4. 巻 141
2. 論文標題 Open-Shell and Antiaromatic Character Induced by the Highly Symmetric Geometry of the Planar Heptalene Structure: Synthesis and Characterization of a Nonalternant Isomer of Bisanthene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 10165 ~ 10170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.9b04080	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 Konishi Akihito, Okada Yui, Kishi Ryohei, Nakano Masayoshi, Yasuda Makoto	4. 巻 141
2. 論文標題 Enhancement of Antiaromatic Character via Additional Benzoannulation into Dibenzo[a,f]pentalene: Syntheses and Properties of Benzo[a]naphtho[2,1-f]pentalene and Dinaphtho[2,1-a,f]pentalene	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 560 ~ 571
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.8b11530	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 Nishimoto Yoshihiro, Yi Junyi, Takata Tatsuaki, Baba Akio, Yasuda Makoto	4. 巻 23
2. 論文標題 Regio- and Stereoselective Allylindation of Alkynes Using InBr ₃ and Allylic Silanes: Synthesis, Characterization, and Application of 1,4-Dienylindiums toward Skipped Dienes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Molecules	6. 最初と最後の頁 1884 ~ 1884
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/molecules23081884	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Minami Yohei, Konishi Akihito, Yasuda Makoto	4. 巻 20
2. 論文標題 Stereocontrolled Synthesis of Triols Containing Four Asymmetric Centers: Application of C, ₀ -Chelated Gernyl Enolates to a Diastereoselective Aldol Reaction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Organic Letters	6. 最初と最後の頁 4148 ~ 4152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.orglett.8b01778	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 Kensuke, Nishimoto Yoshihiro, Yunoki Hiroshi, Tsuruwa Kensuke, Esumi Naoto, Yasuda Makoto	4. 巻 47
2. 論文標題 Regio- and Stereo-controlled Addition Reaction of Aminoallylic Stannanes to Aldehydes Mediated by Germanium Dichloride	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 821 ~ 824
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.180291	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 Konishi Akihito, Morinaga Atsushi, Yasuda Makoto	4. 巻 24
2. 論文標題 Construction of Polycyclic π -Conjugated Systems Incorporating an Azulene Unit Following the Oxidation of 1,8-Diphenyl-9,10-bis(phenylethynyl)phenanthrene	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemistry - A European Journal	6. 最初と最後の頁 8548 ~ 8552
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.201801915	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 Kita Yuji, Yata Tetsuji, Nishimoto Yoshihiro, Chiba Kouji, Yasuda Makoto	4. 巻 9
2. 論文標題 Selective oxymetalation of terminal alkynes via 6-endo cyclization: mechanistic investigation and application to the efficient synthesis of 4-substituted isocoumarins	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 6041 ~ 6052
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8SC01537F	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 Nishimoto Yoshihiro, Hirase Rina, Yasuda Makoto	4. 巻 20
2. 論文標題 Anti-Carboalumination of Alkynes Using Aluminum Trihalide and Silyl Ketene Imines: Stereo- and Regioselective Synthesis of Alkenylaluminum Compounds Bearing a Cyano Group	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Organic Letters	6. 最初と最後の頁 3651 ~ 3655
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.orglett.8b01371	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 Kang Kyoungmin, Nishimoto Yoshihiro, Yasuda Makoto	4. 巻 84
2. 論文標題 Regio- and Stereoselective Carboaddition of Internal Alkynyl Ethers with Organosilicon or -stannane Nucleophiles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Organic Chemistry	6. 最初と最後の頁 13345 ~ 13363
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.joc.9b01505	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 Yata Tetsuji, Kita Yuji, Nishimoto Yoshihiro, Yasuda Makoto	4. 巻 84
2. 論文標題 Regioselective Synthesis of 5-Metalated 2-Pyrones by Intramolecular Oxymetalation of Carbonyl-ene-yne Compounds Using Indium Trihalide	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Organic Chemistry	6. 最初と最後の頁 14330 ~ 14341
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.joc.9b02186	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 Tanaka Daiki, Kadonaga Yuichiro, Manabe Yoshiyuki, Fukase Koichi, Sasaya Shota, Maruyama Hikaru, Nishimura Sota, Yanagihara Mayu, Konishi Akihito, Yasuda Makoto	4. 巻 141
2. 論文標題 Synthesis of Cage-Shaped Aluminum Aryloxides: Efficient Lewis Acid Catalyst for Stereoselective Glycosylation Driven by Flexible Shift of Four- to Five-Coordination	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 17466 ~ 17471
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.9b08875	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 Minami Yohei, Konishi Akihito, Yasuda Makoto	4. 巻 21
2. 論文標題 Synthesis of α -Alkenyl β , γ -Unsaturated Ketones via Dehydrogermylation of Oxagermacycles with Regeneration of the Germanium(II) Species	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Organic Letters	6. 最初と最後の頁 9818 ~ 9823
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.orglett.9b03454	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 Kang Kyoungmin, Sakamoto Kosuke, Nishimoto Yoshihiro, Yasuda Makoto	4. 巻 26
2. 論文標題 Synthesis of (Z) β -(Carbonylamino)alkenylindium through Regioselective α anti Carboindation of Ynamides and Its Transformation to Multisubstituted Enamides	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry - A European Journal	6. 最初と最後の頁 4930 ~ 4934
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.201905175	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 Konishi Akihito, Satake Shoya, Yasuda Makoto	4. 巻 49
2. 論文標題 Catalytic Cycloisomerization of Conjugated Bisbutatrienes into Pentalene Skeletons: Synthesis and Properties of Bisbutatrienes with an Acenaphthene Backbone	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 589 ~ 592
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200121	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 Minami Yohei, Nishida Kento, Konishi Akihito, Yasuda Makoto	4. 巻 15
2. 論文標題 Characterization of Highly Coordinated Allylgermanes: Pivotal Players for Enhanced Nucleophilicity and Stereoselectivity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry ? An Asian Journal	6. 最初と最後の頁 1852 ~ 1857
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asia.202000392	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 Kang Kyoungmin, Sakamoto Kosuke, Nishimoto Yoshihiro, Yasuda Makoto	4. 巻 49
2. 論文標題 anti-Carbometalation of Alkynyl Sulfides Using Indium Tribromide and Ketene Silyl Acetals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 1136 ~ 1139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200400	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 Tanaka Daiki, Tsutsui Yuya, Konishi Akihito, Nakaoka Koichi, Nakajima Hideto, Baba Akio, Chiba Kouji, Yasuda Makoto	4. 巻 26
2. 論文標題 Selective Activation of Aromatic Aldehydes Promoted by Dispersion Interactions: Steric and Electronic Factors of a Pocket within Cage Shaped Borates for Molecular Recognition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry - A European Journal	6. 最初と最後の頁 15023 ~ 15034
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.202003594	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 Nakao Shuichi, Saikai Miki, Nishimoto Yoshihiro, Yasuda Makoto	4. 巻 2021
2. 論文標題 InBr ₃ Catalyzed Coupling Reaction between Electron Deficient Alkenyl Ethers with Silyl Enolates for Stereoselective Synthesis of 1,5-Dioxoalkenes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 European Journal of Organic Chemistry	6. 最初と最後の頁 77 ~ 81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ejoc.202001342	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 Kensuke, Nishimoto Yoshihiro, Yasuda Makoto	4. 巻 27
2. 論文標題 (o Phenylenediamino)borylstannanes: Efficient Reagents for Borylation of Various Alkyl Radical Precursors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry - A European Journal	6. 最初と最後の頁 3968 ~ 3973
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.202004692	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 Nakao Shuichi, Nishimoto Yoshihiro, Yasuda Makoto	4. 巻 50
2. 論文標題 Tuning of Lewis Acidity of Phebox-Al Complexes by Substituents on the Benzene Backbone and Unexpected Photocatalytic Activity for Hydrodebromination of Aryl Bromide	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 538 ~ 541
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200894	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 7件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Makoto Yasuda
2. 発表標題 Lewis Acidity of Borates Controlled by Their Cage-Structure
3. 学会等名 Strasbourg University -Osaka University, Joint Symposium on "Diverse Facets of Chemistry II" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安田 誠
2. 発表標題 典型金属の性状制御
3. 学会等名 第5回 新学術領域研究「反応集積化が導く中分子戦略：高次生物機能分子の創製」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Makoto Yasuda
2. 発表標題 Regio- and Stereoselective Synthesis of Functionalized Organic Compounds via Main Group Organometallic Compounds
3. 学会等名 The University of Hong Kong -Osaka University, 2nd Joint Symposium on Materials Research - Diverse Aspects of Future Chemistry - (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Makoto Yasuda
2. 発表標題 Cage-shaped Aluminum Aryloxides as a Lewis Acid Catalyst Makoto Yasuda
3. 学会等名 The 1st Symposium for the Distinguished Lectureship Awards on The International Cutting-Edge Organic Chemistry in Asia (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makoto Yasuda
2. 発表標題 Germyl Enolates: Characterizations, Structures and Reactivity of Stereoselective Aldol Reactions
3. 学会等名 International Conference on the Coordination and Organometallic Chemistry of Germanium, Tin and Lead (ICCOG-GTL-16) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makoto Yasuda
2. 発表標題 Cage-Shaped Aluminum Lewis Acid Catalyst for Selective Reactions
3. 学会等名 The 18th Asian Chemical Congress and the 20th General Assembly of the Federation of Asian Chemical Societies (ACC 2019)- Joint FACS/IUPAC ChemRAWN Symposium on Green Catalysis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安田 誠
2. 発表標題 有機典型金属反応剤の構造と選択性
3. 学会等名 日本化学会近畿支部北陸地区講演会と研究発表会（招待講演）
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

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