

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：34512

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02735

研究課題名(和文) マルチ選択的反応開発に有効な酸塩基協奏型キラル超分子触媒の精密設計

研究課題名(英文) Rational Design of Acid-Base Cooperative Chiral Supramolecular Catalysts to Control Multiselective Reactions

研究代表者

波多野 学 (Hatano, Manabu)

神戸薬科大学・薬学部・教授

研究者番号：20362270

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)：多彩な生体酵素の織りなす反応は、最高の分子制御テクノロジーの一つである。精密有機合成において、人工の分子性触媒が酵素に迫るマルチ選択性を発現するには、従来の画一的な触媒では限界がある。本研究では、酸・塩基複合化学に基づいて、鍵となる触媒の小分子パーツを精密分子設計し、酸・塩基の親和的相互作用を駆動源としてこれらの分子をフレキシブルにつなぎ、新しいキラル超分子触媒を創出した。酵素の鍵穴と触媒活性点に相当するキラルキャビティーをつくりだし、分子包接効果を発現させることにより、従来の触媒では制御できなかった特異な分子骨格形成反応やマルチ選択的反応が実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナノスケールの触媒を効率的に創製するための有力な手段となる酸・塩基複合化学は、酸と塩基の融合領域を開拓するものであり、酸または塩基単一では成し得ない優れた特長が現れる。これを土台として、特に本研究では、合成化学・触媒化学・超分子化学を横断する酸・塩基複合化学に立脚した独創的なナノスケールの触媒設計を行い、従来の単一分子触媒では制御が困難なマルチ選択的触媒反応を実現した。これは、次世代の有機合成化学が目指す技術革新の一步として意義付けられ、将来の有機合成化学が本格的に到達するであろう酵素機能に迫る機能を持った精密人工触媒の礎を築くものである。

研究成果の概要(英文)：Reactions proven by diverse enzymes are some of the most efficient molecular-controlling technologies. In order to control multiselectivity in fine organic synthesis, we have to develop new artificial enzymes to overcome the limit of the design of the conventional catalysts. In this research, based on acid-base cooperative chemistry, we precisely designed the small molecules of the key catalysts, flexibly connected these molecules by using the inherent attractive interactions between acids and bases, and consequently developed activated designers supramolecular catalysts in situ. By creating a chiral cavity corresponding to the enzyme-like keyhole and active site, we developed unique molecular formation reactions and multiselective reaction controls that could not be realized by conventional catalysts.

研究分野：有機合成化学

キーワード：有機合成化学 不斉触媒反応 マルチ選択性 酸・塩基複合化学 超分子触媒

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、様々な触媒反応を戦略的に実現するために、これまでに酸・塩基複合化学を基盤とする様々な分子性触媒を開発してきた。特に、複数の選択性を同時に制御する必要がある不斉触媒反応の開発を進めるために、キラル超分子触媒を重点的に創製してきた。キラル超分子触媒は、その成分となる複数の小分子を適切なモル比で混ぜ合わせて in situ で簡便に調製できる。従って、少分子のシンプルな精密設計にもとづいて多様なキラル超分子触媒が創製できるうえ、触媒スクリーニングも低コストかつ短時間で行うことができる。もちろん従来の単一分子触媒でも、有機反応と基質の種類によっては十分に高い触媒活性と高い選択性が発現する。しかし、基質適用範囲が広いとしても、特定の基質に対しての完璧な選択性や異常な選択性の発現は元来期待できない。選んだ反応・基質・反応剤に応じて、酵素の鍵穴と触媒活性点にあたるキラルキャビティをテーラーメイドに作り上げ、反応効率を極限まで引き上げることができれば、理論的には触媒が支配するマルチ選択性の制御は可能となる。こうした概念を実現するために、本研究では、従来の発想にとらわれずに、酸・塩基複合化学の視点から合成化学・触媒化学・超分子化学を横断し、革新的なテーラーメイド型のキラル超分子触媒を開発することにより、従来の単一分子触媒ではなし得なかったユニークな反応制御への取り組みをスタートした。

### 2. 研究の目的

本研究では、キラル超分子触媒を創製し、従来の単一分子触媒には不向きな分子包接効果によるマルチ選択的不斉触媒反応の制御を目的とする。基質を包接できるナノオーダーの比較的大きい分子触媒を創製するには、従来の単一分子触媒では具体的な分子設計と合成自体が困難である。それに対して、テーラーメイドに基質の状況に合わせて in situ で調製するキラル超分子触媒は最も有効な解決手段と成り得る。特に、キラル超分子触媒の組み立てには、酸・塩基の根源的な親和力(配位結合)を駆動源として用いる。ナノオーダーのフレキシブルな動的キラル超分子触媒は、酵素の配座柔軟性や誘導適合にも通じる本研究独自の革新的かつユニークな分子設計技術に基づくものである。

### 3. 研究の方法

本研究では、従来の単一分子触媒には期待できない基質および反応選択性、レジオ・サイト・立体選択性などを複数同時に発現するマルチ選択的触媒反応の制御を目指して、条件に合わせたテーラーメイドな酸・塩基協奏型キラル超分子触媒を開発する。酸・塩基(酸の共役塩基も含む)による結合形成は、分子を繋ぐ最も単純な手段である。しかし、酸・塩基複合化学の理念に基づいて、実用的な触媒設計手段として確立することは容易ではない。適切な手段や適切な触媒設計がなければ、酸と塩基は本来の中和反応を起こし、たちまち失活してしまう。そこで本申請研究では、(1)Brønsted 酸・Brønsted 塩基複合触媒、(2)Brønsted 酸・Lewis 酸複合触媒、(3)Brønsted 酸・Brønsted 酸複合触媒、(4)Lewis 酸・Lewis 酸複合触媒、に区分して、それぞれの触媒システムを追求し、それらを効率よく使い分け、目的とするマルチ選択的触媒反応の開発の実現を目指した。

### 4. 研究成果

#### (1)Brønsted 酸・Brønsted 塩基複合触媒

Brønsted 酸・Brønsted 塩基複合触媒は酸・塩基複合触媒としては最も単純な組み合わせだが、中和による触媒失活が最も起きやすい。そこで本項目では、酸性度の微調節がしやすい二塩基酸に着目し、加える塩基の量や種類の組合せの多様化を図った。立体効果に加えて活性点近傍の電子的制御を行い、プロトン・ネットワークによるキラルキャビティを精密設計した。

【連続的アザ-Friedel-Crafts 反応に有効な固体担持型キラルピナフチルジスルホン酸触媒の開発】生物活性を発現するキラル化合物を得る上で、触媒化学的な合成法の確立は重要である。なかでも、 $C_2$  対称性をもつシンプルなキラルピナフチル化合物は、金属イオンに対する配位子や有機分子触媒としてはたらくため、多くの不斉触媒反応で用いられている。一方、触媒における「酸」の強さは、金属イオン触媒における Lewis 酸性及び有機触媒における Brønsted 酸性の活性を特徴づける大きな要因となる。たとえば、キラルピナフチル骨格を有する Brønsted 酸では、ピナフトール、ピナフチルジカルボン酸、ピナフチルリン酸の順に酸性度が向上する。本研究では、これらよりもさらに酸性度が強く、高い触媒活性が期待できるキラルピナフチルジスルホン酸(BINSA)に着目した。(R)-BINSA とアキラルなシリカ担持型第 3 級脂肪族アミンから系中で調製した固体担持型キラル BINSA アンモニウム塩触媒を各種調製した。立体効果に加えて活性点近傍の電子的制御を行い、プロトン・ネットワークによるキラルキャビティを精密設計した。これらの触媒を用いて、アルジミンと *N*-ベンジルピロールとのエナンチオ選択的アザ-Friedel-Crafts 反応を検討した。検討の結果、非担持型のキラル BINSA アンモニウム塩触媒を用いた場合よりも、最適化した固体担持型キラル BINSA アンモニウム塩触媒の方が大幅に触媒活性が向上した。第 3 級脂肪族アミンの炭素鎖長の制御が極めて重要である。特に、触媒活性の増強が著しく、非担持型触媒では起こらなかった二重付加反応が優先して進行した。その結果、生成する

新規光学活性ピロールビスメタンアミン化合物のエナンチオ選択性は大幅に向上し、ほぼ光学的に純粋に高収率で得ることに成功した。さらに、固体触媒の利点である触媒回収・再利用も可能であり、触媒活性の低下を引き起こすことなく、グラム・スケールアップを伴って3回の使用を実現した。有機触媒の活性増強のノウハウの一つとして、酸・塩基複合触媒の固体触媒化が極めて有効であることを示すものである。

### (2) Brønsted 酸・Lewis 酸複合触媒

金属を含まない環境調和型の有機分子触媒の一つとして、水素結合供与源である Brønsted 酸を利用した触媒的不斉合成が挙げられる。秋山・寺田らが先導するキラル BINOL 誘導体にリン酸を導入したキラルリン酸触媒は、リン酸ジエステルに起因する高い Brønsted 酸性度を有しており、ホスホリル基 (P=O) が塩基として機能する酸・塩基複合型の優れた触媒である。したがって、リン酸のプロトンと基質の塩基性部位、リン酸のホスホリル塩基と反応剤のプロトンとがそれぞれ水素結合を形成し、基質と反応剤を同時に活性化できる。すなわち、リン酸の酸・塩基部位と基質および反応剤を分子間水素結合ネットワークによって結びつけることにより、キラルリン酸触媒は高い触媒活性と高いエナンチオ選択性を発現し、様々な不斉触媒反応で用いられている根拠となっている。本研究では、共役構造の P=O 部位が Lewis 塩基として機能するところを発展的に活用することにした。すなわち、リン酸触媒に新たに外部の Lewis 酸を作用させれば、Brønsted 酸 (H<sup>+</sup>) 周辺に嵩高い立体効果を与えるとともに共役構造を介して Brønsted 酸 (H<sup>+</sup>) を活性化できる。こうした触媒設計のもと、本研究では、下記の2つの反応開発を実現した。

【トリス(ペンタフルオロフェニル)ボラン-キラルリン酸複合触媒を用いるエナンチオ選択的カルボニル-エン環化反応の開発】：アキラルな嵩高いホウ素 Lewis 酸で活性化したキラルリン酸触媒を用いて、嵩高いキャビティー効果が促進しうるカルボニル-エン環化反応を設定した。カルボニル-エン環化反応はこれまでに幾つかの基質で報告があるが、いずれも Thorpe-Ingold 効果による環化の促進をうけるための置換基をアルキル側鎖に導入する必要があった。実際に、嵩高いキラルリン酸とトリス(ペンタフルオロフェニル)ボランから系中で調製したキラル超分子型リン酸触媒を用いて、カルボニル-エン環化反応を検討した。検討の結果、従来の触媒では反応が進行しづらい側鎖のない基質に対しても本触媒は円滑に反応を促進し、高ジアステレオかつ高エナンチオ選択的に生成物を得ることができた。さらに、基質とは別に過剰量の任意のアルデヒドを加えた条件で反応を行うと、基質によるカルボニル-エン環化反応にひきつづき、アセタール化反応が高ジアステレオかつ高エナンチオ選択的に進行した。アセタール合成には通常は不向きな  $\alpha$ ,  $\beta$ -不飽和アルデヒドも使用できるため、有機合成上有用な革新的なキラルアセタール合成法となった。

【ホウ素 Lewis 酸-キラルリン酸複合触媒による  $\alpha$ ,  $\beta$ -不飽和  $\alpha$ -アリーールアルデヒドのマルチ選択的 Diels-Alder 反応】： $\alpha$ ,  $\beta$ -不飽和  $\alpha$ -アリーールアルデヒドは、基質支配的に *s*-シス配座制御に有効である。一方で、三臭化ホウ素-キラルリン酸複合触媒を用いれば、酸塩基触媒作用による多点型配位に基づいて、 $\alpha$ ,  $\beta$ -不飽和  $\alpha$ -アリーールアルデヒドでさえも *s*-トランス配座に制御できると考えた。 $\alpha$ ,  $\beta$ -不飽和  $\alpha$ -アリーールアルデヒドを *s*-トランス配座に制御することができれば、これまで例のない新しい形式の Diels-Alder 反応が可能となる。一方で、生成物を選択的に得るためには、エナンチオ選択性に加え、反応選択性およびエンド/エキソ選択性を三次元的な「鍵穴」によって反応をマルチ制御することが必要不可欠である。 $\alpha$ ,  $\beta$ -不飽和  $\alpha$ -アリーールアルデヒドとシクロペンタジエンのマルチ選択的 Diels-Alder 反応を本触媒を用いて検討した結果、競合するヘテロ Diels-Alder 反応が抑制され、高エナンチオ選択的に目的とするエキソ Diels-Alder 付加体を得られた。さらに、理論計算科学(DFT 計算)によって反応中間体を考察した。その結果、基質と反応剤にとって鍵穴となる狭いキラルキャビティー内で望む反応が優れたマルチ制御のもとで進行することが裏付けられた。

### (3) Brønsted 酸・Brønsted 酸複合触媒

キラルジカルボン酸触媒、キラルジボロン酸触媒、キラルビスリン酸触媒、キラルジスルホン酸触媒を用い、アルカリ金属イオンや金属イオンでつなげることによって組織化して、クラスター型触媒の創製を計画した。触媒を混ぜるだけでありながら、プロトンネットワークを多様化させることができる。エナンチオ・ジアステレオ制御および過剰反応の防止を含むマルチ選択性制御が必要なオレフィンとイミンの新規・付加環化連鎖反応の開発に取り組んだ。残念ながら、キャビティー効果に基づいたクラスター型触媒独自の制御による特徴的な反応支配は本研究期間内に実現できなかった。狙い通りに自己組織化により触媒をクラスター化させるには、単量体触媒の程よい嵩高さが必要であり、嵩高すぎると全くクラスター化しないため望む機能が出ず、嵩が小さいとクラスターどうしがさらに会合して触媒活性を失う。期間中は同一種の混合調製を中心としたが、異種触媒の組合せによるヘテロ Brønsted 酸・Brønsted 酸複合触媒やアキラルな Brønsted 酸のシステムティックな導入を行えば、より効率的な立体効果をつけやすいため、引き続き予備検討を進めてさらなる研究展開を目指す。

### (4) Lewis 酸・Lewis 酸複合触媒

塩基部位を有するキラルホウ素ルイス酸触媒に嵩高いアキラルホウ素ルイス酸触媒を組み合わせ

せる複合触媒設計を行なった。嵩高いボランはそのホウ素原子(酸)とキラルホウ素ルイス酸本体の酸素原子(塩基)と間の動的な配位結合で保たれ、キラルなキャビティーに配座柔軟性を与える。同時に、ボランの強い電子求引性に基づいて、共役結合を介して中心酸部位の触媒活性を増大できる。嵩高いながらも、キャビティーに配座柔軟性を与えることが設計の鍵である。プロパルギルアルデヒド系とアクロレイン系の基質を中心に比較検討し、キャビティーサイズに見合った特異的反応の開発を行った。プロパルギルアルデヒド系の Diels-Alder 反応では、アセチレン末端の立体的要因でキャビティーを適切に認識できることが明らかとなった。さらにプロパルギルアルデヒド系は直鎖状の基質形態だが、アクロレイン系の基質は斜め直鎖状になっているため、キラルキャビティーの大きさよりはむしろ形状を認識することが明らかとなった。それぞれの最適化した条件では、多くの場合で >95% ee、>95% dr で反応が進行した。基質を混合した場合は、特定の基質だけが反応し、お互いに干渉することなく、マルチ選択性が問題なく発現した。さらに、複数の基質と複数の触媒を混合してワンポットで反応させると、マッチした基質と触媒の組み合わせで優先的に反応が進行し、お互いに干渉することなくそれぞれの望む生成物にマルチ選択性が発現した。有機反応としては非常にシンプルな系ではあるものの、生体酵素の行っている鍵と鍵穴制御に近い反応プロセスが実現できていることを意味しており、こうしたユニークな研究の切り口で予備検討を引き続き行い、次世代の有機合成に課せられたマルチ反応制御法の突破口となるよう、さらなる研究展開を目指す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7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 Kai Matsui, Kohei Toh, Manabu Hatano, Kazuaki Ishihara	4. 巻 24
2. 論文標題 Multiselective Diels-Alder Reaction of $\alpha$ -Arylacroleins Catalyzed by Boron Tribromide-Assisted Chiral Phosphoric Acids	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Org. Lett.	6. 最初と最後の頁 6483-6488
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.orglett.2c02747	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 Junpei Hirose, Takumi Wakikawa, Shun Satake, Masahiro Kojima, Manabu Hatano, Kazuaki Ishihara, Tatsuhiko Yoshino, Shigeki Matsunaga	4. 巻 11
2. 論文標題 Cp*RhIII/Chiral Disulfonate/CuOAc Catalyst System for the Enantioselective Intramolecular Oxyamination of Alkenes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Catal.	6. 最初と最後の頁 15187-15193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.1c04699	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 Hideyuki Ishihara, Jianhao Huang, Takuya Mochizuki, Manabu Hatano, Kazuaki Ishihara	4. 巻 11
2. 論文標題 Enantio- and Diastereoselective Carbonyl-Ene Cyclization-Acetalization Tandem Reaction Catalyzed by Tris(pentafluorophenyl)borane-Assisted Chiral Phosphoric Acids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Catal.	6. 最初と最後の頁 6121-6127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.1c01242	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 Hiroyuki Hayashi, Shotaro Yasukochi, Tatsuhiro Sakamoto, Manabu Hatano, Kazuaki Ishihara	4. 巻 86
2. 論文標題 Insight into the Mechanism of the Acylation of Alcohols with Acid Anhydrides Catalyzed by Phosphoric Acid Derivatives	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Org. Chem.	6. 最初と最後の頁 5197-5212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.joc.1c00102	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 Hatano Manabu, Zhao Xue, Mochizuki Takuya, Maeda Kyogo, Motokura Ken, Ishihara Kazuaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Reusable Silica-Supported Ammonium BINSate Catalysts for Enantio- and Diastereoselective Friedel-Crafts-Type Double Aminoalkylation of N-Alkylpyrroles with Aldimines	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Asian J. Org. Chem.	6. 最初と最後の頁 360-365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ajoc.202000603	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 Ng Jie Qi, Arima Hiro, Mochizuki Takuya, Toh Kohei, Matsui Kai, Ratanasak Manussada, Hasegawa Jun-Ya, Hatano Manabu, Ishihara Kazuaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Chemoselective Transesterification of Methyl (Meth)acrylates Catalyzed by Sodium(I) or Magnesium(II) Aryloxides	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Catal.	6. 最初と最後の頁 199-207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.0c04217	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 Manabu Hatano, Kohei Toh, Kazuaki Ishihara	4. 巻 22
2. 論文標題 Enantioselective Aza-Friedel-Crafts Reaction of Indoles and Pyrroles Catalyzed by Chiral C1-Symmetric Bis(phosphoric Acid)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Org. Lett.	6. 最初と最後の頁 9614-9620
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.orglett.0c03662	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20件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 椿 紗穂里、梅澤 美帆、吉川 武司、坂田 健、桑野 葵咲、飛鳥居 里穂、永吉 絢子、星原 遥花、平田 翼、波多野 学
2. 発表標題 塩化亜鉛触媒とグリニャール反応剤を用いるニトリルへのアルキル付加反応の理論的研究
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会2023(野田)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 波多野 学、桑野 葵咲、飛鳥居 里穂、永吉 絢子、星原 遥花、平田 翼、梅澤 美帆、椿 紗穂里、吉川 武司、坂田 健
2. 発表標題 塩化亜鉛触媒とグリニャール反応剤を用いるニトリルへのアルキル付加反応
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会2023(野田)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松井 開、波多野 学、石原 一彰
2. 発表標題 三臭化ホウ素-キラルリン酸複合触媒による $\alpha$ -アリーールアクロレイン類のマルチ選択的Diels-Alder反応
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会2023(野田)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 波多野 学
2. 発表標題 ホウ素Lewis酸-キラルリン酸複合触媒を用いるマルチ選択的Diels-Alder反応
3. 学会等名 第36回若手化学者のための化学道場(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 波多野 学、平田 翼、坂田 健、吉川 武司
2. 発表標題 Grignard反応剤を用いるニトリルへの触媒的アルキル付加反応
3. 学会等名 日本薬学会関西支部総会・大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 波多野 学
2. 発表標題 Grignard反応剤を用いるニトリルへの触媒的アルキル付加反応
3. 学会等名 第19回六甲有機合成研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松井 開、波多野 学、石原 一彰
2. 発表標題 ホウ素Lewis酸-キラルリン酸複合触媒による $\alpha$ -アリールアクロレイン類のマルチ選択的Diels-Alder反応
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jie Qi Ng、有馬 弘、望月 拓也、藤 浩平、松井 開、Manussada Ratanasak、長谷川 淳也、波多野 学、石原 一彰
2. 発表標題 ナトリウム(I)またはマグネシウム(II)アリールオキシド触媒によるメチル(メタ)アクリレートの化学選択的エステル交換反応
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会(2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jianhao Huang、望月 拓哉、波多野 学、石原 一彰
2. 発表標題 ボロンLewis酸複合型キラルリン酸触媒を用いるエナンチオ及びジアステレオ選択的カルボニル-エン環化-アセタール化タンデム反応
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会(2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松井 開、藤 浩平、波多野 学、石原 一彰
2. 発表標題 ホウ素Lewis酸-キラルリン酸複合触媒を用いるマルチ選択的Diels-Alder反応による多環式ノルボルネン誘導体の合成
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会(2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林 寛之、安河内 章太郎、阪本 竜浩、波多野 学、石原 一彰
2. 発表標題 リン酸系触媒と酸無水物を用いるアルコールのアシル化の反応機構解明
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会(2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 趙 雪、望月 拓哉、前田 恭吾、本倉 健、波多野 学、石原 一彰
2. 発表標題 N-ベンジルピロールとアルジミンのエナンチオおよびジアステレオ選択的Friedel-Crafts型二重アミノアルキル化反応に有効な再利用可能シリカ担持型アンモニウムBINSAs塩触媒
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会(2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣瀬 純平、佐竹 瞬、波多野 学、石原 一彰、小島 正寛、吉野 達彦、松永 茂樹
2. 発表標題 Cp*Rh/キラルアニオンハイブリッド触媒による不斉分子内オキシアミノ化反応の開発
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会(2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 波多野 学
2. 発表標題 リン酸触媒を用いるエステル合成法の開発
3. 学会等名 第17回六甲有機合成研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松井 開、波多野 学、石原 一彰
2. 発表標題 ホウ素Lewis酸-キラルリン酸複合触媒を用いるマルチ選択的Diels-Alder反応による多環式ノルボルネン誘導体の不斉合成
3. 学会等名 第37回有機合成化学セミナー
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Manussada Ratanasak, Jie Qi Ng, Hiro Arima, Takuya Mochizuki, Kohei Toh, Kai Matsui, Manabu Hatano, Kazuaki Ishihara, Jun-ya Hasegawa
2. 発表標題 DFT Study on the Chemoselective Transesterification of Methyl Acrylate with Benzyl Alcohol Catalyzed by Magnesium(II) Aryloxides
3. 学会等名 第15回分子科学討論会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松井 開、波多野 学、石原 一彰
2. 発表標題 ホウ素Lewis酸-キラルリン酸複合触媒を用いるマルチ選択的Diels-Alder反応による多環式ノルボルネン誘導体の不斉合成
3. 学会等名 第52回中部化学関係学協会支部連合秋季大会(静岡)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xue Zhao, Kyogo Maeda, Manabu Hatano, Ken Motokura, Kazuaki Ishihara
2. 発表標題 Development of Reusable Silica-Supported Ammonium BINsate Catalysts for Enantioselective Aza-Friedel-Crafts Reaction
3. 学会等名 第10回CSJ化学フェスタ2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jianhao Huang, Takuya Mochizuki, Manabu Hatano, Kazuaki Ishihara
2. 発表標題 Boron Lewis Acid-Assisted Chiral Phosphoric Acid Catalysts for Enantioselective Carbonyl-Ene Cyclization-Acetalization Tandem Reaction
3. 学会等名 第10回CSJ化学フェスタ2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松井 開、藤 浩平、波多野 学、石原 一彰
2. 発表標題 ホウ素Lewis酸-キラルリン酸複合触媒を用いるマルチ選択的Diels-Alder反応
3. 学会等名 第10回CSJ化学フェスタ2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 波多野 学、石原 一彰 (分担)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 東京化学同人	5. 総ページ数 212
3. 書名 有機合成のための新触媒反応101	

〔産業財産権〕

〔その他〕

波多野学のプロフィール(神戸薬科大学・薬学部・生命有機化学研究室(波多野研)のホームページ)  
<https://www.kobepharma-u.ac.jp/ocls/index.html>

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