

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：32606

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00380

研究課題名(和文)キラルリン酸を用いた不斉触媒反応の新展開

研究課題名(英文)New Development of Asymmetric Catalytic Reactions Using Chiral Phosphoric Acid

研究代表者

秋山 隆彦(AKIYAMA, TAKAHIKO)

学習院大学・理学部・教授

研究者番号：60202553

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,000,000円

研究成果の概要(和文)：優れた不斉触媒反応の開発は、キラルな化合物を合成するための重要な方法論の一つであり、活発な研究が行われている。本研究においては、我々が見出したキラルリン酸を用いて、新規な不斉触媒反応の開発に取り組み、キラルリン酸を機ラルプレステッド酸として用いるのみならず、キラルリン酸金属塩を用いた反応、さらには、光反応と組み合わせることにより、光とリン酸の協働作用を利用した不斉触媒反応の開発にも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

医薬品においては、エナンチオマー間で異なった生理活性を有する場合があります。一方のエナンチオマーを選択的に合成する手法である、伏尾合成反応の開発は重要な研究課題の一つである。その中でも触媒的な不斉合成反応は、少量の不斉源からキラルな化合物を合成することができることから、効率的な手法の一つである。本研究においては、金属を用いない有機触媒を不斉触媒として用いて、新たな触媒反応の開発を行なった。一般に金属錯体は毒性等の問題点があり、安全性の面からも有機触媒を用いた不斉触媒反応の開発は、環境に優しい触媒反応として重要な研究である。

研究成果の概要(英文)：Development of efficient catalyzed enantioselective reactions continues to be an important research area in organic chemistry because of importance in terms of green chemistry. We have developed novel catalyzed reactions using chiral phosphoric acid, and its metal salts. Furthermore, we employed chiral phosphoric acid in the visible light mediated reactions successfully.

研究分野：有機合成化学

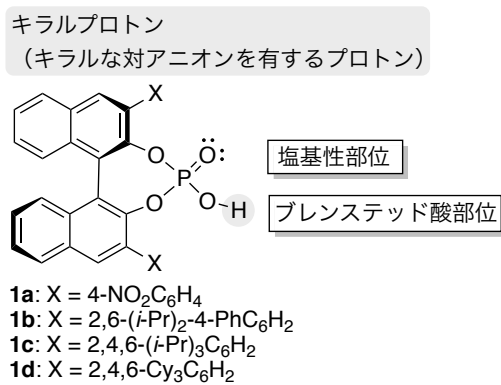
キーワード：不斉合成 キラルリン酸 触媒 光酸化還元触媒 エナンチオ選択性 キラリティー 光反応 キラルプレステッド酸

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

有機化合物にはエナンチオマー間で異なる生理活性を示す場合が数多くあることから、キラルな化合物を光学純度よく効率的に合成する手法の開発は、医薬品・農薬等の合成において不可欠であり、極めて活発な研究が行われている。近年、SDGsの観点からも、高い触媒活性を有する不斉触媒の開発が強く望まれており、触媒的な不斉合成反応の開発が、有機化学における重要な研究課題となっている。キラル金属錯体や生体触媒は早くから不斉触媒として注目され、これらを用いた不斉触媒反応は、1980年代以降目覚ましい発展を遂げている。一方、2000年以降、比較的分子量の高い有機化合物が高い不斉触媒能を有することが見出され、「有機分子触媒」として大きな注目を集めている。2021年のノーベル化学賞がMacMillan博士およびList博士の「有機分子触媒の開発研究」に対して与えられたことから、この分野の重要性は明らかであろう。金属触媒は、優れた触媒能を有するが、生成物に対する微量の金属の残留が大きな問題となっていること、ならびに、金属の高騰などもあり、有機分子触媒の重要性はこれまで以上に増している。

研究代表者は、(R)-BINOL由来のキラル環状リン酸ジエステル **1a** がキラルプレンステッド酸として優れた不斉触媒能を有する事を2004年に見出した。イミンとのMannich型反応が効率良く進行し、対応するβ-アミノ酸エステルが良好なジアステレオ選択性かつ高い光学純度で得られた<sup>1)</sup>。キラルリン酸は塩基性部位を有する二官能性のプレンステッド酸として作用することを明らかにした<sup>2)</sup>。すなわち、キラルリン酸は、キラルな対アニオンを有するプロトンすなわち、キラルプロトンとして機能していると考えられる。その後、研究代表者のグループでは、キラルリン酸をキラルプレンステッド酸触媒として用いたイミン、カルボニル基への求核付加反応、付加環化反応等の様々な不斉合成にも成功し、リン酸触媒による不斉触媒反応の開発研究を強力に推進している。我々および寺田らの報告の後<sup>3)</sup>、世界中でキラルリン酸およびその誘導体をキラル酸触媒として用いた不斉触媒反応の開発が極めて活発に行われ、キラルリン酸は幅広い種類の反応を効果的に触媒する事が明らかとなり、1000以上のリン酸触媒反応が報告されている<sup>4)</sup>。キラルリン酸は、有機分子触媒の分野において、最も用いられている触媒の一つとなっている。キラルリン酸自体に加えて、ルイス酸触媒としてキラルリン酸金属塩および、更に、キラルリン酸アニオンも不斉触媒反応に幅広く用いられている。しかし、キラルリン酸およびその誘導体が、汎用的な不斉触媒として用いられるようになるためには、さらに、多くの反応で用いることができることを明らかにし、さらに、より低触媒量で反応を促進できるような優れた触媒の開発など、未だ解決すべき問題点が数多く存在する。



## 2. 研究の目的

光学活性化合物の効率的な合成手法の開発は極めて重要な研究課題の一つである。研究代表者自らが開発した(R)-BINOL由来のキラルリン酸、さらにその誘導体のキラル酸触媒としての有用性を高め、アカデミアでの基礎研究における合成反応から、産業界での応用研究まで、幅広く実用的に用いることができるように、新たな不斉触媒反応を開発するとともに、より高性能のキラルプレンステッド酸触媒の開発も目指して強力に研究を推進する。さらに、キラルリン酸をキラルプレンステッド酸としてのみならず、リン酸金属塩としての機能の拡大を行う。また、近年大きく注目されている光反応にも着目し、光照射条件下でキラルリン酸を作用させることにより、光反応における不斉触媒反応の開発も目指す。

## 3. 研究の方法

本研究では、研究代表者のこれまでの研究成果を元に、キラルリン酸触媒反応の更なる有用性を明らかにし、新たな不斉触媒反応を開発し、キラルリン酸の有効性を明らかにすることを目指す。キラルリン酸触媒反応を益々発展させることを目的として、(1) 新たな触媒反応の開発、(2) 光反応への適用、(3) リン酸金属塩の利用を中心に研究を強力に推進した。

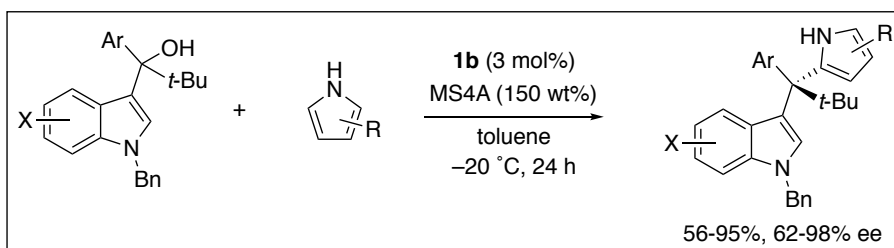
## 4. 研究成果

新たな不斉触媒反応の開発を行い、以下に示すように様々な不斉触媒反応を開発することができた。

(1) ピロールとインドリルメタノール誘導体とのFriedel-Craftsアルキル化反応による全炭素第

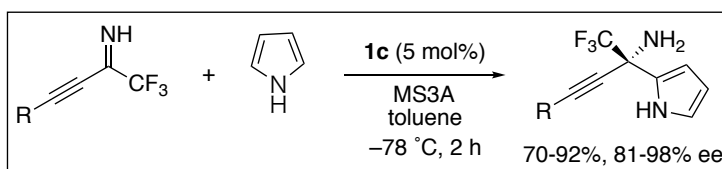
#### 四級炭素骨格の構築

我々は既にインドリルメタノール誘導体に対してキラルリン酸存在下、ベンゾチアゾリンを作用させると、脱ヒドロキシ水素化反応が進行し、第三級炭素骨格をエナンチオ選択的に構築できることを報告した<sup>5)</sup>。本研究においては、キラルリン酸 **1b** を用いて、ベンゾチアゾリンに代えてピロールを作用させると Friedel-Crafts アルキル化反応が効率よく進行し、全炭素第四級炭素骨格が高い光学純度で構築できることを見出した<sup>6)</sup>。



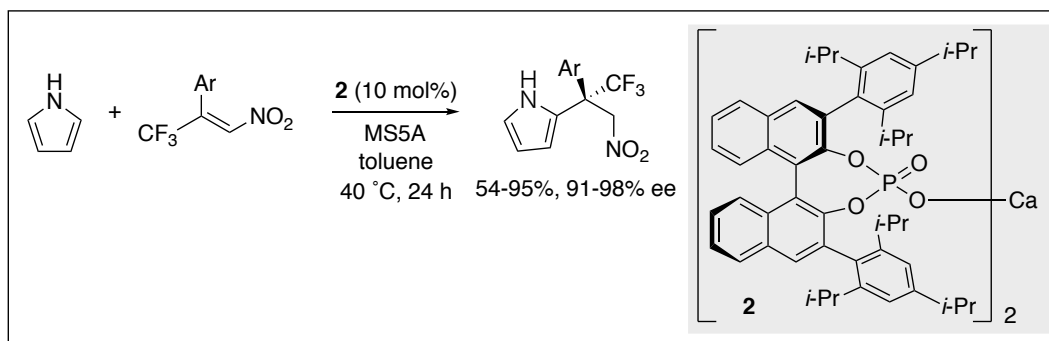
#### (2) 窒素上無置換のトリフルオロメチル置換ケトイミンに対するピロールの Friedel-Crafts アルキル化反応

一般に窒素上無置換のケトイミンは安定性が低い、トリフルオロメチル基の置換した窒素上無置換のケトイミンは、比較的安定である。既に炭素上にアリール基とトリフルオロメチル基置換した窒素上無置換のケトイミンに対するインドールやピロールの Friedel-Crafts アルキル化反応を報告している<sup>7)</sup>が、今回、炭素上にアルキニル基の置換したケトイミンに対する Friedel-Crafts アルキル化反応がキラルリン酸 **1c** を用いることにより、効率良く進行することを見出した<sup>8)</sup>。



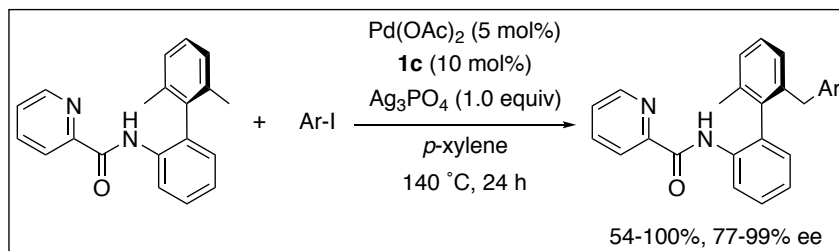
#### (3) ニトロアルケンに対する Friedel-Crafts アルキル化反応

トリフルオロメチル基の置換したニトロアルケンに対するインドールの Friedel-Crafts アルキル化反応をすでに報告している<sup>9)</sup>が、本研究においてピロールを求核剤として用いると、リン酸カルシウム塩 **2** を用いることにより、効率良く反応が進行し、対応する付加体が良好な収率かつ高い光学純度で得られた<sup>10)</sup>。



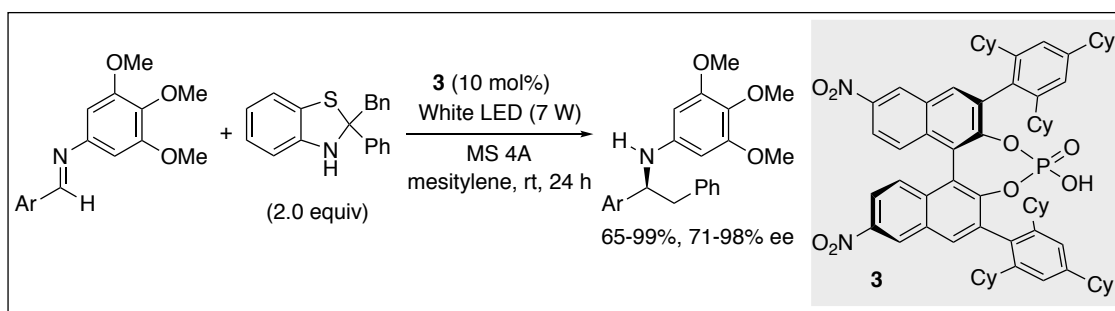
#### (4) リン酸およびパラジウム錯体を用いた C-H 活性化反応による軸不斉ビアリールの合成

軸不斉化合物の効率的な合成法の開発が現在大きな注目を集めている。我々は、すでに、キラルリン酸を用いたビアリール化合物の不斉合成を報告している<sup>11)</sup>。本研究においては、C(sp<sup>3</sup>)-H 結合の活性化反応を利用した軸不斉ビアリールの合成に取り組み、directing group としてピリジルカルボニル基を有するビアリールに対し、系中で生成したリン酸パラジウム錯体を用いることにより、140 °C という高温において非対称化反応が高いエナンチオ選択性で進行し、ビアリールが良好な収率かつ高い光学純度で得られた<sup>12)</sup>。理論化学計算および追加の実験により、本反応において、C-H 活性化段階が律速段階かつエナンチオ決定段階であることを明らかにした。



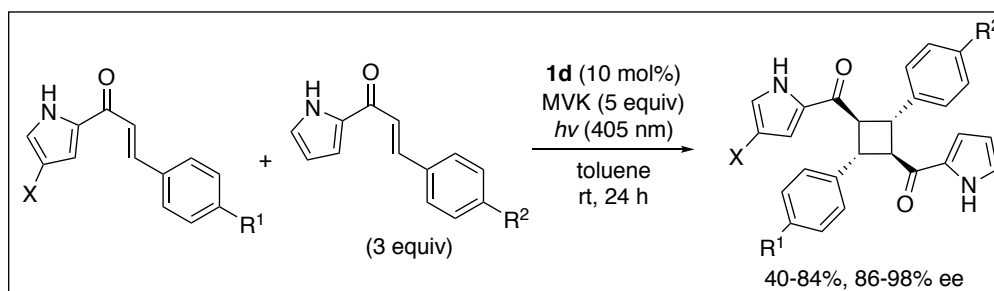
#### (5) 光反応を用いたベンジル基のイミンへの付加反応

我々は、ベンゾチアゾリンが水素供与体として機能し、イミンに対する水素移動型の還元反応がリン酸により効率良く進行し、アミン類が光学純度良く得られることを報告している<sup>13)</sup>。光反応を用いることにより、ベンゾチアゾリンがアルキル供与体として作用することも見出している。今回、ベンゾチアゾリンを用いて、イミンに対するエナンチオ選択的なアルキル移動反応について精査し、窒素上に3,4,5-トリメトキシフェニル基の置換したアルドイミンに対し、キラルリン酸存在下光照射することにより、光酸化還元触媒を加えることなく、ベンジル基の移動反応が効率良く進行し、アルキル付加体が高い光学純度で得られることを見出した<sup>14)</sup>。キラルリン酸**1d**の6,6'-位にニトロ基の置換したキラルリン酸**3**を用いると、最も良好な結果が得られた。キラルリン酸とイミンを混合するとUVスペクトルが、長波長に移動することが観測された。そのため、この錯体が可視光を吸収すると予想される。本反応は、イミンがキラルリン酸によりプロトン化され、その錯体が光照射により励起され、ベンゾチアゾリンへの一電子酸化により、ベンゾチアゾリンのラジカルカチオンが生成し、そこからベンジルラジカルの移動反応が進行すると考えられる。すなわち、一般的に求電子剤であるイミンが、リン酸と錯体を形成することにより、本光反応においては酸化剤として機能している。



#### (6) 光反応による[2+2]付加環化反応によるシクロブタン誘導体の不斉合成

キラルリン酸**1d**およびメチルビニルケトン存在下光照射することにより、アシルイミダゾール誘導体の分子間[2+2]付加環化反応が進行し、対応するシクロブタン誘導体が良好な収率かつ高い光学純度で得られた<sup>15)</sup>。キラルリン酸とアシルイミダゾール誘導体を混合すると深色効果が観測され可視光を吸収するようになるため、光触媒が不要であると考えられる。



以上、キラルリン酸およびその金属塩を用いた不斉触媒反応が効率よく進行することを見出した。さらに、光反応においても、キラルリン酸の有用性を明らかにすることができた。今後、キラルリン酸の化学は益々発展することが期待できる。

#### References

- 1) Akiyama, T.; Itoh, J.; Yokota, K.; Fuchibe, K. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2004**, *43*, 1566-1568.
- 2) Yamanaka, M.; Itoh, J.; Fuchibe, K.; Akiyama, T. *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 6756-6764.
- 3) Uraguchi, D.; Terada, M. *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, *126*, 5356-5357.
- 4) For reviews, see: Akiyama, T. *Chem. Rev.* **2007**, *107*, 5744-5758. Parmar, D.; Sugiono, E.; Raja, S.; Rueping, M. *Chem. Rev.* **2014**, *114*, 9047-9153. Parmar, D.; Sugiono, E.; Raja, S.; Rueping, M. *Chem.*

- Rev.* **2017**, *117*, 10608–10620. Akiyama, T.; Mori, K. *Chem. Rev.* **2015**, *115*, 9277–9306. Merad, J.; Lalli, C.; Bernadat, G.; Maury, J.; Masson, G. *Chem. Eur. J.* **2018**, *24*, 3925–2943. Woldegiorgis, A. G.; Han, Z.; Lin, X. *J. Mol. Stru.* **2024**, *1297, Part 1*, 136919. Tsogoeva, S. B. *Nat. Catal.* **2024**, *7*, 7–9. Please see also: 秋山隆彦 有機合成化学協会誌 **2017**, *75*, 410–420.
- 5) Osakabe, H.; Saito, S.; Miyagawa, M.; Suga, T.; Uchikura, T.; Akiyama, T. *Org. Lett.* **2020**, *22*, 2225–2229.
  - 6) Uchikura, T.; Sánchez-Sordo, I.; Yoshimura, T.; Makino, Y.; Osakabe, H.; Akiyama, T. *J. Org. Chem.* **2023**, *88*, 7774–7783.
  - 7) Miyagawa, M.; Yoshida, M.; Kiyota, Y.; Akiyama, T. *Chem. Eur. J.* **2019**, *25*, 5677–5681. Uchikura, T.; Suzuki, R.; Suda, Y.; Akiyama, T. *ChemCatChem* **2020**, *12*, 4784–4787.
  - 8) Uchikura, T.; Aruga, K.; Suzuki, R.; Akiyama, T. *Org. Lett.* **2022**, *24*, 4699–4703.
  - 9) Itoh, J.; Fuchibe, K.; Akiyama, T. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2008**, *47*, 4016–4018. Mori, K.; Wakazawa, M.; Akiyama, T. *Chem. Sci.* **2014**, *5*, 1799–1803. Ibáñez, I.; Kaneko, M.; Kamei, Y.; Tsutsumi, R.; Yamanaka, M.; Akiyama, T. *ACS Catal.* **2019**, *9*, 6903–6909.
  - 10) Uchikura, T.; Yokohama, S.; Murakami, M.; Akiyama, T. *Synthesis* **2022**, *54*, 3793–3800.
  - 11) Mori, K.; Ichikawa, Y.; Kobayashi, M.; Shibata, Y.; Yamanaka, M.; Akiyama, T. *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, *135*, 3964–3970. Mori, K.; Kobayashi, M.; Itakura, T.; Akiyama, T. *Adv. Synth. Catal.* **2015**, *357*, 35–40. Mori, K.; Itakura, T.; Akiyama, T. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2016**, *55*, 11642–11646.
  - 12) Uchikura, T.; Kato, S.; Makino, Y.; Fujikawa, M. J.; Yamanaka, M.; Akiyama, T. *J. Am. Chem. Soc.* **2023**, *145*, 15906–15911.
  - 13) Zhu, C.; Akiyama, T. *Org. Lett.* **2009**, *11*, 4180–4183. Zhu, C.; Saito, K.; Yamanaka, M.; Akiyama, T. *Acc. Chem. Res.* **2015**, *48*, 388–398.
  - 14) Uchikura, T.; Kamiyama, N.; Mouri, T.; Akiyama, T. *ACS Catal.* **2022**, *12*, 5209–5216.
  - 15) Uchikura, T.; Takahashi, K.; Oishi, T.; Akiyama, T. *Org. Biomol. Chem.* **2023**, *21*, 9138–9142.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9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 Uchikura Tatsuhiro, Fujii Tatsuya, Moriyama Kaworuko, Akiyama Takahiko	4. 巻 94
2. 論文標題 Visible-Light Driven, Metal-Free Hydroalkylation of Alkenes Mediated by Electron Donor-Acceptor Complex Using Benzothiazolines	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bulletin of the Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 2962 ~ 2966
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20210322	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 Uchikura Tatsuhiro, Hara Yurina, Tsubono Kazushi, Akiyama Takahiko	4. 巻 1
2. 論文標題 Visible-Light-Driven C-S Bond Formation Based on Electron Donor-Acceptor Excitation and Hydrogen Atom Transfer Combined System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Organic & Inorganic Au	6. 最初と最後の頁 23 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsginorgau.1c00007	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 Uchikura Tatsuhiro, Kamiyama Nanami, Mouri Toshiki, Akiyama Takahiko	4. 巻 12
2. 論文標題 Visible-Light-Driven Enantioselective Radical Addition to Imines Enabled by the Excitation of a Chiral Phosphoric Acid-Imine Complex	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Catalysis	6. 最初と最後の頁 5209 ~ 5216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.2c00993	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 Uchikura Tatsuhiro, Aruga Kureha, Suzuki Riku, Akiyama Takahiko	4. 巻 24
2. 論文標題 Enantioselective Friedel-Crafts Alkylation Reaction of Pyrroles with <i>N</i> -Unprotected Alkynyl Trifluoromethyl Ketimines	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Organic Letters	6. 最初と最後の頁 4699 ~ 4703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.orglett.2c01972	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 Akiyama Takahiko, Uchikura Tatsuhiro, Yokohama Sosuke, Murakami Mona	4. 巻 54
2. 論文標題 Chiral Calcium Phosphate Catalyzed Enantioselective Synthesis of All-Carbon Quaternary Center by Friedel-Crafts Alkylation Reaction of Pyrroles and Trifluoromethylated Nitrostyrenes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Synthesis	6. 最初と最後の頁 3793 ~ 3800
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1055/s-0040-1719879	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 Uchikura Tatsuhiro, Tsubono Kazushi, Hara Yurina, Akiyama Takahiko	4. 巻 87
2. 論文標題 Dual-Role Halogen-Bonding-Assisted EDA-SET/HAT Photoreaction System with Phenol Catalyst and Aryl Iodide: Visible-Light-Driven Carbon-Carbon Bond Formation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Organic Chemistry	6. 最初と最後の頁 15499 ~ 15510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.joc.2c02032	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 Uchikura Tatsuhiro, Suzuki Riku, Suda Yusuke, Akiyama Takahiko	4. 巻 12
2. 論文標題 Enantioselective Synthesis of 2-Substituted Indoles Bearing Trifluoromethyl Moiety by the Friedel-Crafts Alkylation Reaction of 4,7-Dihydroindole with <i>N</i> -Trifluoromethyl Ketimines	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ChemCatChem	6. 最初と最後の頁 4784 ~ 4787
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cctc.202000920	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 Uchikura Tatsuhiro, Toda Mitsuhiro, Mouri Toshiki, Fujii Tatsuya, Moriyama Kaworuko, Ibáñez Ignacio, Akiyama Takahiko	4. 巻 85
2. 論文標題 Radical Hydroalkylation and Hydroacylation of Alkenes by the Use of Benzothiazoline under Thermal Conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Organic Chemistry	6. 最初と最後の頁 12715 ~ 12723
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.joc.0c01872	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 Uchikura Tatsuhiro, Kamiyama Nanami, Ishikawa Taisuke, Akiyama Takahiko	4. 巻 16
2. 論文標題 Catalytic trifluoromethylation of iodoarenes by use of 2-trifluoromethylated benzimidazoline as trifluoromethylating reagent	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Beilstein Journal of Organic Chemistry	6. 最初と最後の頁 2442 ~ 2447
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3762/bjoc.16.198	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 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Takahiko Akiyama
2. 発表標題 Development New Reactions and Technologies Adaptable to Process Chemistry
3. 学会等名 Pacifichem2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahiko Akiyama
2. 発表標題 Enantioselective Reactions Catalyzed by Chiral Phosphoric Acid
3. 学会等名 Pacifichem2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋山隆彦
2. 発表標題 キラルリン酸と光触媒の協働作用を利用した不斉触媒反応
3. 学会等名 新学術領域研究「ハイブリッド触媒」第5回公開シンポジウム
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 秋山隆彦
2. 発表標題 キラルリン酸触媒の開発と新展開
3. 学会等名 2021年度前期(春季)有機合成化学講習会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahiko Akiyama
2. 発表標題 Enantioselective Reactions Catalyzed by Chiral Phosphoric Acid
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Organic Reactions 2022 (ISOR-15) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahiko Akiyama
2. 発表標題 Recent Progress in Chiral Phosphoric Acid Catalysis
3. 学会等名 The 5th NYCU Conference on Advanced Organic Synthesis (CAOS-5) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋山隆彦
2. 発表標題 キラルリン酸を用いた触媒反応の新展開
3. 学会等名 第32回万有福岡シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahiko Akiyama
2. 発表標題 Enantioselective Reactions Catalyzed by Chiral Phosphoric Acid
3. 学会等名 ACS 26th Winter Fluorine Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takahiko Akiyama
2. 発表標題 Enantioselective Reactions Catalyzed by Chiral Phosphoric Acid
3. 学会等名 International Symposium on Organic Reactions 2020 (ISOR 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahiko Akiyama
2. 発表標題 Enantioselective Reactions Catalyzed by Chiral Phosphoric Acid
3. 学会等名 2021 Chemical Society National Meeting of Taiwan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 Takahiko Akiyama	4. 発行年 2020年
2. 出版社 World Scientific	5. 総ページ数 40
3. 書名 Organocatalysis in Organofluorine Chemistry, in Frontiers of Organofluorine Chemistry,	

1. 著者名 Takahiko Akiyama	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Wiley	5. 総ページ数 52
3. 書名 Catalytic Asymmetric Synthesis, 4th Edition	

1. 著者名 Takahiko Akiyama	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Wiley-VCH	5. 総ページ数 22
3. 書名 Axially Chiral Compounds	

〔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
---------	---------