

令和 6 年 5 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：国際共同研究加速基金（帰国発展研究）

研究期間：2021～2023

課題番号：20K23375

研究課題名（和文）遷移金属・ルイス酸複合触媒の分子設計と複素環C-H官能基化のサイト自在制御

研究課題名（英文）Molecular Design of Transition Metal/Lewis Acid Combined Catalysts and Their Applications to Site-Selective Functionalization of Heterocycles

研究代表者

吉戒 直彦 (Yoshikai, Naohiko)

東北大学・薬学研究科・教授

研究者番号：50401170

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 43,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、精密に分子設計された遷移金属と典型金属ルイス酸の複合触媒系を用いた分子変換手法の創出に取り組んだ。特筆すべき主な成果は以下の通りである。1)ホスフィン・第二級ホスフィンオキシド(PSPPO)二官能性配位子によって支持されたコバルト・アルミニウムおよびコバルト・マグネシウム触媒系による、ピリジン、ピリドン、イミダゾピリジン等の複素環のサイト選択的C-H結合アルケニル化の開発に成功した。2)コバルト・亜鉛触媒系によるニトリル化合物の炭素-シアノ結合活性化を経るアルキンのカルボシアノ化およびヒドロシアノ化反応を見出し、立体配置の異なる置換アクリロニトリル類の作りわけにも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

単純で入手容易な有機分子の直接的かつ位置選択的な官能基化は、複雑分子の合成や医薬品のリード化合物探索を加速するうえで強力なアプローチである。本研究で見出した、遷移金属・ルイス酸複合触媒によるヘテロ環化合物や有機ニトリル化合物の結合活性化を伴う分子変換は、有機金属反応化学・触媒有機化学における重要な知見であるとともに、有用分子の迅速供給に資する新たな手法や設計指針を与えるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：This research project aimed at the precise molecular design of transition metal/main group Lewis acid combined catalysts for use in advanced molecular transformations involving the activation of inert chemical bonds. The major achievements of the project are as follows: 1) We successfully developed cobalt/aluminum and cobalt/magnesium catalysts supported by a phosphine/secondary phosphine oxide (PSPPO) bifunctional ligand for the site-selective C-H alkenylation of pyridines, pyridones, and imidazopyridines with alkynes. A reaction mechanism involving a ligand-to-ligand hydrogen transfer process was revealed by density functional theory calculations. 2) We developed a cobalt/zinc catalytic system for the carbo- and hydrocyanation reactions of alkynes using organonitriles via carbon-cyano bond activation. Furthermore, depending on the presence or absence of the zinc catalyst, a switching of the stereochemistry of the C=C bond of the acrylonitrile derivatives was achieved.

研究分野：有機化学

キーワード：有機合成 触媒 遷移金属 ルイス酸 結合活性化

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

有機分子内の特定の炭素-水素結合を触媒的に切断し、他の炭素-元素結合に変換する C-H 官能基化は、医薬品などの目的物質の合成工程を効率化する手法として、またある機能分子から多様な類縁体を迅速に供給する手法として理想的である。しかし、既存の C-H 官能基化手法の多くは、反応効率の向上と反応サイトの選択性獲得のため、配位性置換基(配向基)をもつ基質の利用に依存してきた。配向基の導入と除去に余分な工程数を要することに加え、この戦略では配向基の導入が困難な場合に対応できず、同一基質から複数の異性体を作り分けることができない。これらの問題は、創薬における重要な構造要素でもある含窒素複素環を基質とした際に特に顕著に現れる。すなわち、いくつかの例外を除き、含窒素複素環を配向基に依存せずサイト選択的に C-H 官能基化する手法の発展は遅れている。

2. 研究の目的

本研究では、精密に分子設計された遷移金属(コバルト)と典型金属ルイス酸の複合触媒を用い、医薬品分子において重要な部分構造をなす含窒素複素環について、高度の反応サイト制御を伴った C-H 官能基化手法を創出することを目的とした。本研究における触媒設計の要は、C-H 結合切断能をもつコバルトと、ルイス塩基部位を認識/活性化するルイス酸の空間配置と協働作用の制御であり、これを具現化する二官能性配位子の創製による複素環 C-H 結合のサイト選択的官能基化反応の開発を目指した。また、開発した触媒反応の高精度理論計算による反応機構の解明も目的とした。

3. 研究の方法

コバルトとルイス酸性典型金属(Al, Zn, Ti, Mg など)に同時に配位し、両者を空間的に一定の距離をもって(近接位あるいは遠隔位)に配置しうる二官能性(ハイブリッド)配位子の設計・合成を行い、得られた一連の配位子を用いて触媒反応の探索と評価を行った。触媒反応としては、主に含窒素芳香環化合物の C-H 結合の、不飽和炭化水素(アルキン、アルケン等)による官能基化を検討した。触媒活性と C-H 結合切断のサイト選択性を同時に評価し、設計指針の妥当性を確認した。また、コバルト・ルイス酸触媒系の有効性をさらに明らかにするため、C-C 結合の切断を伴う選択的分子変換の検討も行った。開発した一連の触媒反応について、理論計算による反応機構解析を行った。

4. 研究成果

(1) コバルト・アルミニウムおよびコバルト・マグネシウム触媒系による含窒素芳香環のサイト選択的 C-H アルケニル化

コバルトと典型金属ルイス酸を近接位に配置しうると考えられる配位子として、第三級ホスフィンと第二級ホスフィンオキシドを隣接して配置した二官能性配位子(PSPO)を設計し、合成した。ピリジン C-H 結合の内部アルキンによるアルケニル化をモデル触媒反応として評価を行った結果、Co(acac)₃, AlMe₃および PSPO 配位子からなる触媒系が、ピリジン 2 位の C-H アルケニル化反応を効率的に、かつ完璧なサイト選択性を伴って促進することを見出した。このサイト選択性は、独立したコバルト-二座ホスフィン触媒と AlMe₃触媒がピリジン 4 位を優先的に活性化すると対照的であり、PSPO 配位子がコバルトとアルミニウムに同時に配位した単一の触媒を形成したことを示唆した。また、AlMe₃の代わりに Me₃SiCH₂MgCl を用いた場合も 2 位選択的な反応が進行し、コバルト・マグネシウム複合触媒の生成も示唆された。

上で見出した、PSPO によって支持された Co/Al および Co/Mg 触媒系は、種々の含窒素芳香環のサイト選択的 C-H アルケニル化について適用可能であった(図 1)。すなわち、種々の置換ピリジンについて、置換基の位置によらず最も空いた窒素近傍位 C-H 結合でのアルケニル化が進行した。ピリドンについては、ルイス塩基性部位であるカルボニル酸素の近接位に相当する 3 位が完璧な選択性を伴ってアルケニル化された。これは、独立した Co/Al 触媒系がピリドンの 4 位および 6 位を活性化したのと対照的であった。さらに、イミダゾ[1,2-a]ピリジンの 2 位の完全にサイト選択的なアルケニル化も達成された。これは、独立した Co/Al 触媒系を用いた場合、サイト選択性の制御が効かず複雑な混合物が得られたのと対照的であった。加えて、本触媒系の様々な内部アルキンに対する適用性についても、イミダゾ[1,2-a]ピリジンやピリジンを基質に用いた反応によって明らかにすることができた。

開発した触媒系について、反応機構上の知見を得るべく実験を行った。重水素化されたピリジンを用いたクロスオーバー実験の結果、ピリジンとアルキンが 1 分子ずつ、他の基質分子との原子のスクランプリングを起こすことなく反応が進行していることが確認された。また、競争反応における速度論的同位体効果(KIE)は約 3 程度となり、不可逆的な C-H 結合の切断が反映されたものと示唆された。一方、独立した反応を比較した場合、興味深いことに初期条件の違いによって KIE の値が大きく変化することが分かった。すなわち、アルキンの濃度が高い場合は KIE がほぼ 1 となる一方、濃度が低い場合は KIE が 2 以上となり、アルキン濃度の違いによって律

速段階に変化が生じることが示唆された。

さらに、DFT 計算を用いて本 Co/Al 触媒系によるピリジンの C-H アルケニル化の反応経路を検討した。その結果、PSPO 配位子によって支持された Co/Al 触媒は、コバルト-アルキン間の配位とアルミニウム-ピリジン間の配位を介して両基質を捕捉し、そこから配位子間水素移動 (Ligand-to-Ligand Hydrogen Transfer; LLHT) とよばれる機構を経てピリジン 2 位の C-H 結合を選択的に活性化することが分かった。それによって生成したピリジル (アルケニル) コバルト種の還元的脱離によって、生成物が得られると同時に触媒サイクルが完結する。ピリジン、ピリドン、イミダゾピリジンいずれの場合も、アルミニウムがルイス塩基性部位を捕捉し、コバルト近傍に配置することで C-H 結合活性化のサイト選択性が完璧に制御されることが、遷移状態の解析により明らかとなった。

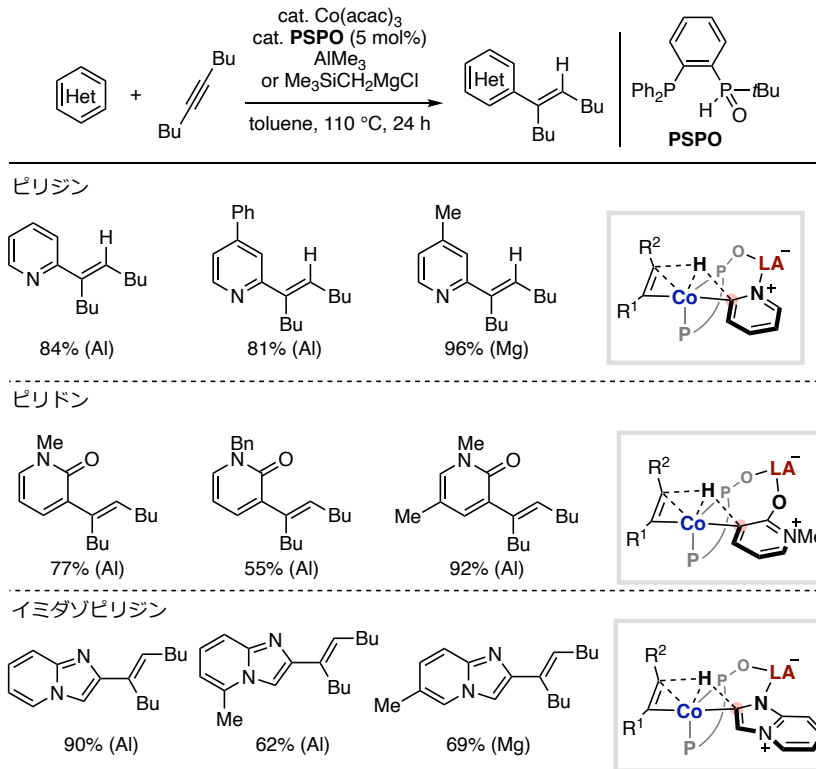


図1. PSPO配位コバルト・ルイス酸触媒による含窒素芳香環のC-Hアルケニル化

(2) コバルトおよびコバルト・亜鉛触媒によるアルキンのカルボシアノ化およびヒドロシアノ化
コバルト触媒による結合活性化反応の探索を行っている過程で、コバルト-二座ホスフィン触媒の存在下、ニトリル化合物の C-CN 結合の切断を伴う内部アルキンへの付加反応を見つけた。すなわち、CoCl₂, dppp, および還元剤である Zn の存在下生成する触媒が、ベンゾニトリルのジアルキルアセチレンへの付加を促進し、置換アクリロニトリル誘導体を与えた。本反応ではトランス付加体 (E 体) が優先して得られ、同じ傾向は種々の置換ベンゾニトリルについても見られた。本反応をさらに精査した結果、触媒量の Zn(OTf)₂ や Y(OTf)₃ などのルイス酸の添加により、本反応が大きく促進されることを見つけた。興味深いことに、ルイス酸触媒の共存下では、反応の立体選択性が逆転し、シス付加体 (Z 体) が主生成物となることが分かった。本反応も、種々の置換ベンゾニトリルに対して広い適用性を示した。

Co/Zn 触媒系は、アクリロニトリル誘導体を基質に用いたアルキンのアルケニルシアノ化反応にも有効であり、対応する 1,3-ジエン型のニトリル生成物を良好な収率で与えた。さらに、アルキルシアノ化合物としてブチロニトリルを出発物として用いた場合、アルキンの移動ヒドロシアノ化が進行し、アクリロニトリル誘導体を良好な収率で与えた。すなわち、比較的安価なニトリル化合物であるブチロニトリルを、毒性の高い HCN の代替原料としてヒドロシアノ化プロセスに利用可能であることが明らかとなった。

Co 触媒および Co/Zn 触媒系によるカルボシアノ化反応の機構および触媒種について知見を得るべく、種々の実験を行った。具体的には、収率および立体選択性の経時変化追跡、生成物の異性化試験、組成の明確な低原子価コバルト錯体を用いた対照実験、Hammett プロットなどを行った。その結果、いずれの触媒系も活性種の生成に一定の誘導時間を要する複雑な系であり、明確な活性種の同定は困難ながら、0 価のコバルト-二座ホスフィン種が関与していることが示唆された。

実験的には困難な反応機構上の知見を得るべく、さらに DFT 計算による検討を行った。その結果、いずれの触媒系も、コバルトへの C-CN 結合の酸化的付加、コバルト-アリアル結合へのアルキンの挿入、およびコバルト上でのアルケニルおよびシアノ配位子の還元的脱離を基本的な素過程として進行することが示唆された。また、Co/Zn 触媒系においては、亜鉛がシアノ基の窒素に配位することで、C-CN 結合の酸化的付加の活性化エネルギーが低下することも分かった。さらに、両触媒系の大きな違いは、アルキン挿入後に生成するアルケニルコバルト種のシス/トランス異性化の有無にあることが分かった。すなわち、Co 触媒のみ場合は直接的な還元的脱離に比べてシス/トランス異性化が容易に起こるためトランス体への経路が開かれるのに対して、Co/Zn 触媒系のもとでは、亜鉛の配位によって還元的脱離の活性化エネルギーも低下するため、異性化を経ずに生成物に至る経路が優先することが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kikuchi Jun, Nagata Toya, Ito Shingo, Yoshikai Naohiko	4. 巻 11
2. 論文標題 Three-component Friedel-Crafts-type difunctionalization of ynamides with (hetero)arenes and iodine(^{III}) electrophile	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Organic Chemistry Frontiers	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d4qo00489b	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 Kanemoto Kazuya, Yoshimura Ken, Ono Koki, Ding Wei, Ito Shingo, Yoshikai Naohiko	4. 巻 30
2. 論文標題 Amino and Alkoxybenziodoxoles: Facile Preparation and Use as Arynophiles	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Chemistry – A European Journal	6. 最初と最後の頁 e202400894
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.202400894	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 Arakawa Chisaki, Kanemoto Kazuya, Nakai Katsuya, Wang Chen, Morohashi Shunya, Kwon Eunsang, Ito Shingo, Yoshikai Naohiko	4. 巻 146
2. 論文標題 Carboiodanation of Arynes: Organoiodine(III) Compounds as Nucleophilic Organometalloids	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 3910 ~ 3919
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.3c11524	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 Sasaki Shuma, Kikuchi Jun, Ito Shingo, Yoshikai Naohiko	4. 巻 88
2. 論文標題 Stereoselective Approach to Multisubstituted Enolates from Unactivated Alkynes: Oxyalkylation of Alkynyl Ketone Enolates with Aldehydes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of Organic Chemistry	6. 最初と最後の頁 14096 ~ 14104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.joc.3c01615	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 該当する

1. 著者名 Tsukiji Kento, Hayakawa Takeru, Kanemoto Kazuya, Yoshikai Naohiko	4. 巻 12
2. 論文標題 Zinc Mediated Diastereoselective Annulation of Cyclopropanols with Alkylidenemalononitriles via Enolized Homoenate	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Asian Journal of Organic Chemistry	6. 最初と最後の頁 e202300114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ajoc.202300114	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 Saito Yuri, Kikuchi Jun, Wang Chen, Yoshikai Naohiko	4. 巻 62
2. 論文標題 Site Selective C-H Alkenylation of N Heteroarenes by Ligand Directed Co/Al and Co/Mg Cooperative Catalysis**	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 e202301006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202301006	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 該当する

1. 著者名 Tsukiji Kento, Sekiguchi Yoshiya, Kanemoto Kazuya, Yoshikai Naohiko	4. 巻 51
2. 論文標題 Diastereoselective Conversion of Cyclopropanols to Cyclopentane-1,3-diols via Aldol Dimerization of Zinc Homo-enolates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 1012 ~ 1014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.220311	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 該当する

1. 著者名 Kikuchi Jun, Maesaki Kaito, Sasaki Shuma, Wang Weifan, Ito Shingo, Yoshikai Naohiko	4. 巻 24
2. 論文標題 Stereoselective Synthesis of -Alkoxy- -amido Vinylbenziodoxoles via Iodo(III)etherification of Ynamides	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Organic Letters	6. 最初と最後の頁 6914 ~ 6918
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.orglett.2c02570	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 該当する

1. 著者名 Wang Chang-Sheng, Yu Yongqi, Sunada Yusuke, Wang Chen, Yoshikai Naohiko	4. 巻 12
2. 論文標題 Cobalt-Catalyzed Carbo- and Hydrocyanation of Alkynes via C≡CN Bond Activation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Catalysis	6. 最初と最後の頁 4054 ~ 4066
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.2c00181	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 該当する

1. 著者名 Sekiguchi Yoshiya, Yoshikai Naohiko	4. 巻 24
2. 論文標題 Zinc-Mediated Hydroxyallylation of Aldehydes with Cyclopropanols: Direct Access to Vicinal <i>anti</i> - <i>sec</i> -, <i>tert</i> -Diols via Enolized Homo-enolates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Organic Letters	6. 最初と最後の頁 960 ~ 965
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.orglett.1c04331	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 該当する

[学会発表] 計39件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 鷹見 優月, 浅沼 隼人, 金本 和也, 吉戒 直彦
2. 発表標題 ジチオ環化反応によるジスルフィドを置換基に持つ多彩なヘテロ環の構築
3. 学会等名 日本薬学会第144年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大槻 真也, 金本 和也, 吉戒 直彦
2. 発表標題 アラインのジアゾメチルヨウ素(III)化反応
3. 学会等名 日本薬学会第144年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 岩田 真輝, 吉戒 直彦, 金本 和也
2. 発表標題 位置選択的な1,3-双極子環化付加反応を介したキメラ型ペプチドのモジュラー合成
3. 学会等名 日本薬学会第144年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 諸橋 駿矢, 周 列錦, 金本 和也, 吉戒 直彦
2. 発表標題 ヘキサデヒドロDiels-Alder・アルキニルヨウ素(III)化カスケード反応
3. 学会等名 日本化学会第104春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 築地 健人, 金本 和也, 松本 有正, 吉戒 直彦
2. 発表標題 シクロプロパノールを用いたシクロプロペンの立体選択的ヒドロキシアリル化:NHCによるエノール化亜鉛ホモエノラートの反応制御
3. 学会等名 日本化学会第104春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 阿部将平, 菊池隼, 吉戒直彦
2. 発表標題 炭素-ヨウ素結合アトロプ異性体の合成
3. 学会等名 日本化学会第104春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kentou Tsukiji, Kazuya Kanemoto, Naohiko Yoshikai
2. 発表標題 Zinc-Mediated Stereoselective Hydroxyallylation of Cyclopropenes with Cyclopropanols
3. 学会等名 4th Bowei Research Conference (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Chisaki Arakawa, Kazuya Kanemoto, Katsuya Nakai, Chen Wang, Shunya Morohashi, Eunsang Kwon, Shingo Ito, Naohiko Yoshikai
2. 発表標題 Carboiodanation of Arynes: Organoiodine(III) Compounds as Nucleophilic Organometalloids
3. 学会等名 The 15th International Kyoto Conference on New Aspects of Organic Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鷹見 優月, 浅沼 隼人, 金本 和也, 吉戒 直彦
2. 発表標題 ジチオ環化反応を経由するヘテロ環含有ジスルフィド合成法の開発
3. 学会等名 第52回複素環化学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩田 真輝, 金本 和也, 吉戒 直彦
2. 発表標題 デヒドロアラニンのN末端選択的な双極子環化付加によるピロリジン環へのペプチド導入
3. 学会等名 第52回複素環化学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 築地 健人, 金本 和也, 吉戒 直彦
2. 発表標題 NHC触媒による亜鉛ホモエノラートの反応制御を介するシクロプロペンの立体選択的なヒドロキシアリル化
3. 学会等名 第52回複素環化学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 築地 健人, 金本 和也, 吉戒 直彦
2. 発表標題 Zinc-Mediated Stereoselective Hydroxyallylation of Cyclopropenes with Cyclopropanols
3. 学会等名 第69回有機金属化学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩田 真輝, 金本 和也, 吉戒 直彦
2. 発表標題 Silver-Catalyzed N-Terminal Selective [3+2] Cycloaddition of Peptides with Dehydroalanine Derivatives
3. 学会等名 第69回有機金属化学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masaki Iwata, Kazuya Kanemoto, Naohiko Yoshikai
2. 発表標題 N-Terminal Selective Peptide Coupling via [3+2] Cycloaddition Using Dehydroalanine Derivatives
3. 学会等名 International Symposium for the 80th Anniversary of the Tohoku Branch of the Chemical Society of Japan
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Roi Nakajima, Jun Kikuchi, Shingo Ito, Naohiko Yoshikai
2. 発表標題 Stereoselective synthesis of multisubstituted N-Vinylazoles via trans-Iodo(III)azolation of alkynes
3. 学会等名 International Symposium for the 80th Anniversary of the Tohoku Branch of the Chemical Society of Japan
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kento Tsukiji, Kazuya Kanemoto, Naohiko Yoshikai
2. 発表標題 Stereoselective Hydroxyallylation of Cyclopropenes via NHC Catalysis of Transient Organozinc Intermediates
3. 学会等名 International Symposium for the 80th Anniversary of the Tohoku Branch of the Chemical Society of Japan
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shuma Sasaki, Jun Kikuchi, Shingo Ito, Naohiko Yoshikai
2. 発表標題 Multisubstituted Enolates from Unactivated Alkynes: Oxyalkylidenation of Alkynyl Enolates
3. 学会等名 International Symposium for the 80th Anniversary of the Tohoku Branch of the Chemical Society of Japan
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toya Nagata, Jun Kikuchi, Shingo Ito, Naohiko Yoshikai
2. 発表標題 Iodine(III)-Mediated Three-Component Friedel-Crafts Alkenylation of (Hetero)arenes with Ynamides
3. 学会等名 International Symposium for the 80th Anniversary of the Tohoku Branch of the Chemical Society of Japan
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naohiko Yoshikai
2. 発表標題 Organiodanes Meet Electrophiles
3. 学会等名 7th International Conference on Hypervalent Iodine Chemistry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉戒 直彦
2. 発表標題 超原子価ヨウ素化合物の新しい合成と反応
3. 学会等名 第34回万有仙台シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshikai Naohiko
2. 発表標題 Cobalt/Lewis Acid Cooperative Catalysis for C-H and C-C Activations
3. 学会等名 The 6th International Symposium on C-H Activation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshikai Naohiko
2. 発表標題 Exploring New Reactions and Syntheses of Trivalent Iodine Compounds
3. 学会等名 Department Seminar, EPFL (スイス連邦工科大学ローザンヌ校) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshikai Naohiko
2. 発表標題 Exploring New Reactions and Syntheses of Trivalent Iodine Compounds
3. 学会等名 Department Seminar, Max-Planck-Institut für Kohlenforschung (マックスプランク石炭研究所) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉戒 直彦
2. 発表標題 3価ヨウ素化合物の新しい反応と合成の探求
3. 学会等名 名古屋大学工学研究科講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshikai Naohiko
2. 発表標題 Selective Transformations of Cyclopropanols Featuring Multifaceted Reactivity of Homoenolate
3. 学会等名 The 7th Japan-Taiwan Joint Symposium for Pharmaceutical Sciences (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤 友理, Wang Chen, 菊池 隼, 吉戒 直彦
2. 発表標題 Co/Al複合触媒による含窒素複素環のサイト選択的C-Hアルケニル化
3. 学会等名 令和4年度化学系学協会東北大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉戒 直彦
2. 発表標題 3価ヨウ素化合物の新しい反応と合成の探求
3. 学会等名 第38回有機合成化学セミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 築地 健人, 関口 義也, 金本 和也, 吉戒 直彦
2. 発表標題 亜鉛ホモエノラートの二量化によるジアステレオ選択的なシクロペンタン1,3-ジオールの合成
3. 学会等名 第38回有機合成化学セミナー
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 荒川 千紗貴, 中居 捷哉, 金本 和也, Wang Chen, 吉戒 直彦
2. 発表標題 アラインのカルボヨウ素(III)化
3. 学会等名 第49回有機典型元素化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉村 健, 小野 光紀, 金本 和也, 吉戒 直彦
2. 発表標題 環状アミノおよびアルコキシオーダンの合成と反応
3. 学会等名 第49回有機典型元素化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長田 透弥、菊池 隼、伊藤 慎庫、吉戒 直彦
2. 発表標題 イナミドのtrans-ヨード(III)アリール化反応
3. 学会等名 日本薬学会第143年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木 脩磨、菊池 隼、伊藤 慎庫、吉戒 直彦
2. 発表標題 アルキニルエノラートのオキシアルキリデン化による立体選択的エノン合成
3. 学会等名 日本薬学会第143年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩田 真輝、金本 和也、吉戒 直彦
2. 発表標題 銀触媒を用いるアゾメチンイリドとデヒドロアラニン誘導体の1,3-双極子環化付加反応
3. 学会等名 日本薬学会第143年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 荒川 千紗貴、中居 捷哉、伊藤 慎庫、Wang Chen、金本 和也、吉戒 直彦
2. 発表標題 アラインのカルボヨウ素(III)化
3. 学会等名 日本薬学会第143年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshikai Naohiko
2. 発表標題 Cobalt-Catalyzed Carbo- and Hydrocyanation via C-CN Activation
3. 学会等名 Pacifichem 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshikai Naohiko
2. 発表標題 Catalytic Cyclopropanol Transformation via Base Metal Homoenate
3. 学会等名 Pacifichem 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshikai Naohiko
2. 発表標題 Cobalt/Lewis Acid Cooperative Catalysis for Hydrocarbofunctionalization
3. 学会等名 Pacifichem 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉戒 直彦
2. 発表標題 ホモエノラート化学の新展開
3. 学会等名 近畿化学協会有機金属部会2021年度第4回例会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉戒 直彦
2. 発表標題 亜鉛ホモエノラート反応化学の新展開
3. 学会等名 日本薬学会第142回年会（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計4件

1. 著者名 Naohiko Yoshikai (Editor)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Thieme	5. 総ページ数 658
3. 書名 Science of Synthesis Base-Metal Catalysis 1	

1. 著者名 Yoshikai Naohiko	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Wiley	5. 総ページ数 640
3. 書名 The Chemistry of Organocobalt Compounds	

1. 著者名 Yoshikai Naohiko	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 9850
3. 書名 Comprehensive Organometallic Chemistry IV	

1. 著者名 Yoshikai Naohiko	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Wiley	5. 総ページ数 -
3. 書名 Handbook of CH-Functionalization	

〔産業財産権〕

〔その他〕

Yoshikai Group http://www.pharm.tohoku.ac.jp/~sekkei/

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
研究分担者	砂田 祐輔 (Yunada Yusuke) (70403988)	東京大学・生産技術研究所・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
---------	---------