

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25248025

研究課題名(和文) 遷移金属触媒によるアルキル化を基盤とする物質変換反応の開発と応用

研究課題名(英文) Development of new transformations based on transition metal-catalyzed alkylation and its applications

研究代表者

神戸 宣明 (Kambe, Nobuaki)

大阪大学・工学研究科 ・教授

研究者番号：60144432

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,200,000円

研究成果の概要(和文)：遷移金属触媒によるアルキル化反応の開発と応用研究に取り組んだ。主な成果は以下のとおりである。1) アルキル-アルキルカップリング反応において触媒回転数100万回を達成した。2) 第三級アルキルグリニャール試薬をカップリングパートナーとする第四級炭素構築反応を開発した。3) 従来よりアルキル-アルキルカップリング反応の鍵活性種として提唱していたアニオン性ニッケル錯体の単離構造決定に成功した。4) ジエンの内部炭素選択的なアルキル化反応を達成した。5) 開発したカップリング反応を利用したリン脂質の全合成を達成した。さらに、炭素-フッ素、炭素-酸素、炭素-水素結合の切断を伴う触媒反応を多数開発した。

研究成果の概要(英文)：This project was focused on the developments and applications of catalytic alkylation reactions. The significant achievements are as follows. Alkyl-alkyl cross-coupling reactions using Fe, Co, Ni, and Cu along with unsaturated hydrocarbon additives were developed and examined in detail. The Cu catalyst shows quite high catalytic activity, achieving more than 1 million TON. The Co catalyst enables cross-coupling of tertiary alkyl Grignard reagents to construct quaternary carbon centers. Site-selective alkylation of 1,3-dienes at the internal carbon was achieved by Cu catalyst. Ni catalyst enables multicomponent coupling reactions of 1,3-butadiene. We succeeded in isolation of anionic Ni complexes, that have been proposed as the key catalytic intermediates in the cross-coupling reactions. Natural products containing a long alkyl chain were synthesized using Ni-catalysts. Another achievement includes development of chemical transformations of less reactive bonds such as C-F, C-O and C-H.

研究分野：合成化学

キーワード：クロスカップリング反応 多成分反応 アルキル化反応 遷移金属触媒

## 1. 研究開始当初の背景

炭素-炭素結合形成反応は、有機分子の基本骨格を構築する最も重要な反応であり、それらの中でも遷移金属触媒反応は、最も汎用性が高い炭素骨格構築手法の一つである。遷移金属触媒を用いた炭素-炭素結合形成反応は近年目覚ましい発展を遂げている。しかしながら、その多くが  $sp$  炭素や  $sp^2$  炭素等の不飽和炭素上での結合の組み替え反応に限られていた。遷移金属触媒を用いるアルキル化は、今世紀以降に大きく進展したものの、不飽和化合物の化学と比べてまだ大きく遅れていた。特に、様々な1、2および、3級のアルキル基の連結反応や、分岐構造および立体構造の制御を含めた複雑な炭素骨格の高效率かつ信頼性の高い新規構築反応の開発が強く求められていた。基幹工業原料である低分子不飽和炭化水素のアルキル基の導入を伴う多成分連結反応の開発も重要な課題であった。

このような背景の中で、研究代表者らは遷移金属触媒存在下でハロゲン化アルキルやアルキル金属試薬がアルキル化剤として機能することを明らかにし、多数のアルキル化反応を開発した。

## 2. 研究の目的

本研究では、これまでに開発したアルキル化反応の更なる深化と、より高難度な反応の実現に取り組んだ。特に、複数の結合を形成し、単純な有機分子より複雑な炭素骨格を一挙に構築可能な多成分連結反応の開発を目指した。また、これまでに開発した独自の触媒系において提唱していた鍵活性種の単離構造決定に取り組むとともに、その原理を拡張し、不活性結合の切断を伴う物質変換反応の開発へと展開する。さらに、開発したアルキル化反応を利活用することにより、アルキル化反応を基盤とする有用化合物の合成法の開発を目指した。

## 3. 研究の方法

本研究ではこれまでに明らかにした遷移金属触媒と電子的に柔軟な配位子系の組み合わせをさらに拡張し、中心金属の電子状態制御を行った。この手法により、不活性結合の切断反応の開発、および金属上の配位子の求核的活性化を達成した。金属中心のみならず配位子を求核種として利用する方法論を確立した。すなわち、不飽和炭化水素、遷移金属、有機金属試薬よりアート型錯体を生成させ、求核的に活性化された金属中心もしくは不飽和炭素配位子と求電子剤との反応を鍵過程とする物質変換反応の開発に主眼を置いて研究を推進した。研究推進に当たっては、鍵中間体であるアート型錯体の分子構造および化学的挙動の解明にも取り組み、各素反応の詳細を明らかにすることにより、多成分反応などの多段階の触媒反応設計を行った。

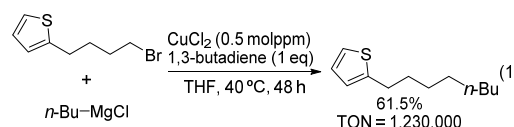
また、これまでに開発したアルキル化反応を真に有用な合成反応へと発展させることを目指し、生理活性分子などの有用化合物の合成研究を推進した。有用化合物の合成研究を通じて、独自の合成手法の問題点を明らかにし、反応開発研究へとフィードバックすることにより、実用的な反応開発を推進した。

## 4. 研究成果

## (1) 実践的アルキル アルキルクロスカップリング反応の開発

## 高活性銅触媒系の開発

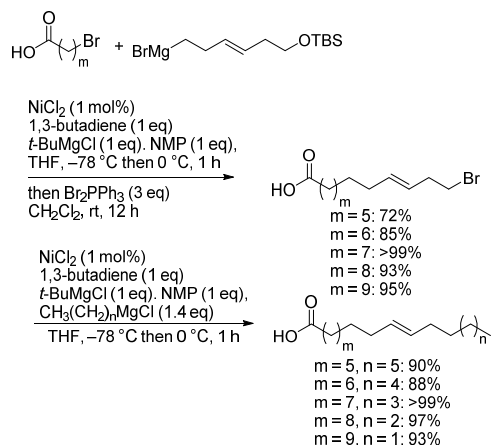
鈴木-宮浦カップリングや根岸カップリングに代表される有機ハロゲン化物と有機金属試薬とのクロスカップリング反応は現代有機化学の最も重要な反応のひとつであり、工業的にも広く利用され、芳香環どうしの連結においては100万回を超える触媒回転数が実現されている。一方、アルキル基どうしの連結反応においては、中間体として生じるアルキル金属中間体が不安定であるため、高い触媒回転数を実現することは困難と考えられていた。そこで、これまでに開発した遷移金属触媒と不飽和炭化水素添加剤を用いる独自の触媒系について触媒活性種の失活過程を含め詳細に検討を行った結果、銅触媒とブタジエンもしくは内部アルキンを組み合わせる触媒系が極めて高い触媒活性を示し、最高で123万回を超える触媒回転数を実現した(eq 1)。本触媒系の特徴は、ホスフィンなどの高価かつ分離が難しい添加剤を必要とせず、安価な銅塩と揮発性の不飽和炭化水素のみで円滑に反応が進行する点にある。そのため、反応後の簡便な精製操作により、高純度で目的のカップリング生成物が得られる。



## 様々な官能基を有するアルキル鎖の構築を基盤とする脂肪酸類の合成

脂肪酸や脂質に代表される生体分子は長鎖アルキル鎖を基本骨格として有しており、鎖中に不飽和結合などの官能基を有する。そのため、アルキル鎖長と官能基の数および位置により多くの類縁体が存在するため、このような脂肪酸類の選択的かつ量的供給を実現する手法の開発は重要である。しかしながら、これまでにアルキル基どうしの連結反応による脂肪酸類の合成研究はほとんどなされていない。そこで、独自の触媒系を利用した脂肪酸類の合成手法について検討を行った。その結果、プロモ基を有するカルボン酸とアルキルグリニャール試薬とのクロスカップリング反応がニッケル/ブタジエン触媒系により円滑に進行することを明らかにした。また、予め塩基により、カルボン酸の酸性プロトンに脱プロトン化することにより煩雑な保護・脱保護を必要としない実用的

なカップリング手法を開発した。さらに、脂肪酸類に特徴的な不飽和結合を導入する手法として、両端にクロスカップリング反応の反応点となる官能基を二つ有するビニル型ビルディングブロックを開発し、逐次的なアルキル基導入反応により、脂肪酸類を自在に合成する手法を開発した。すなわち、*trans*-オレフィンに有するビルディングブロックに対してアルキル基とカルボキシル基を有するアルキル基を逐次的に導入することにより、炭素数ならびに *trans*-オレフィンの位置を制御した脂肪酸類の合成法を開発した (Scheme 1)。



Scheme 1.

この合成手法を利用することにより、生理活性物質の合成研究にも取り組み、イノシトールリン脂質 (Chart 1) の全合成を達成した。

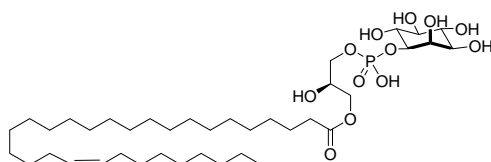


Chart 1

また、オレフィンの生物化学的等価体として創薬研究で重要なシクロプロパンの導入を実現するビルディングブロックを開発し、シクロプロパン含有脂肪酸の簡便な合成手法を開発した。

クロスカップリング反応による第4級炭素構築

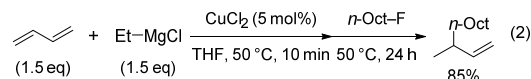
第4級炭素中心はその立体的込み合いのため構築は難しい。アルキル-アルキルクロスカップリング反応による第4級炭素中心の構築を目指した。その結果、コバルト触媒と1,3-ジエン添加剤を組み合わせることにより種々のアルキルハライドと第3級アルキルグリニヤール試薬とのクロスカップリング反応が円滑に進行し、対応する第4級炭素を含む飽和炭化水素骨格が構築できることを明らかにした。

(2) ジエンの内部炭素選択的なアルキル化反応

銅触媒によるジエンのアルキル化反応

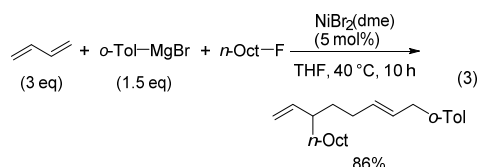
銅触媒の調製方法を工夫することにより、フッ化アルキルをアルキル化剤とする1,3-ジ

エンの内部炭素選択的なアルキル化反応が進行することを明らかにした。すなわち、塩化銅をアルキルグリニヤール試薬により処理し、フッ化アルキルおよび1,3-ジエンを加えることによりアルキルグリニヤール試薬由来の水素とフッ化アルキル由来のアルキル基が1,3-ジエンに1,2-付加することを明らかにした (eq 2)。本反応の位置選択性は、従来の遷移金属触媒を用いたハロゲン化アルキルによる1,3-ジエンのアルキル化反応が末端炭素選択的に起きることとは対照的である。



ニッケル触媒によるジエンの二量化を伴ったアルキル化反応

銅触媒にかえてニッケル触媒とアリールグリニヤール試薬を用いることにより、1,3-ブタジエンの二量化を伴ったアルキルアリール化が位置選択的に進行することを明らかにした。本反応ではブタジエンの二量化により生じる1,6-オクタジエンの3位にフッ化アルキル由来のアルキル基が、8位にアリールグリニヤール試薬由来のアリール基が位置選択的に導入される (eq 3)。



これまでもニッケルや同族のパラジウムを触媒とする1,3-ブタジエンの二量化反応、および二量化を伴った求核剤もしくはカルボニル求電子剤による官能基化反応が多数開発されているが、本手法は従来法では困難であったハロゲン化アルキルの求電子剤としての利用を初めて達成したものである。

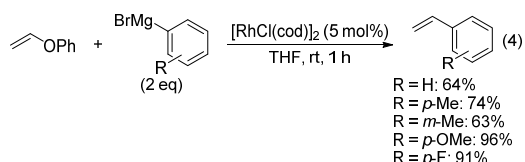
また、詳細な反応機構研究の結果、本触媒反応は従来の1,3-ブタジエンの二量化を伴った官能基化反応とは異なり、アート型アリールNi錯体の炭素への親電子剤の攻撃により進行することを明らかにした。これらの知見は、安価な炭素資源である1,3-ブタジエンの新たな物質変換手法の開発につながると期待できる。

(3) 不活性結合の切断を伴った炭素-炭素および炭素-ヘテロ原子結合形成反応

炭素-酸素結合の切断を伴うクロスカップリング反応

炭素-酸素結合は有機化合物中に遍在する結合であることより、炭素-酸素結合を切断し、新たな結合を形成する合成手法が近年注目を集めている。このような背景のもと炭素-酸素結合の切断を伴うクロスカップリング反応について検討を行った結果、ロジウム触媒を用いることにより、ビニルエーテルの炭素-酸素結合の切断を伴うアリールグリニヤール試薬とのクロスカップリング反

応を見出した(eq 4)。本反応の特徴は、炭素ハロゲン結合やスルホン酸エステルのようなより活性な脱離基共存下においてもビニルエーテルの炭素 酸素結合選択的にカップリング反応が進行する点にある。後述するように本触媒反応はロジウム触媒反応において重要な1価のアリールロジウム錯体ではなくアート型ジアリールロジウム錯体を鍵活性種として進行することを明らかにした。また、類似の反応がより安価な鉄触媒によっても進行することを明らかにした。



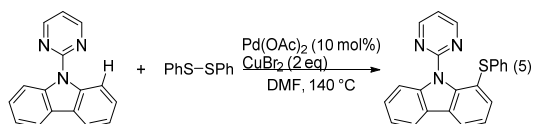
ポリフルオロアレン類の炭素 フッ素結合の切断を伴う多成分反応

ポリフルオロアレンは、ベンゼンの水素が強力な電子吸引性基であるフッ素によって置換された興味深い化合物群である。しかし、その特異な電子構造のため、従来型のクロスカップリング反応をそのまま適用することは難しく、ポリフルオロアレン類の変換反応は今なお十分に検討がなされていない。そこで、(2)項に示した触媒系をポリフルオロアレンへと応用したところ、ジエンとポリフルオロアレンとのカップリング反応が進行することを明らかにした。すなわち、ニッケル触媒存在下、1,3-ブタジエン、ポリフルオロアレンおよびアリールグリニャール試薬を反応させたところ、3位にポリフルオロアリール基、8位にアリール基を有する1,6-オクタジエンが位置選択的に得られた。本触媒反応は、ポリフルオロアレン類の多成分連結反応の初めての例である。

(4) 炭素 水素結合へのカルコゲン原子団導入反応

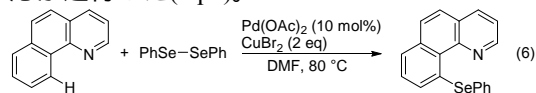
研究代表者らはこれまでに16族カルコゲン元素の反応性を利活用した合成反応を多数開発してきた。そこで、これらの知見をもとに炭素 水素結合のカルコゲン原子団による官能基化反応に取り組んだ。

ピリジンおよびピリミジンを配位性官能基として有する芳香族およびヘテロ芳香族化合物とジフェニルジスルフィドをパラジウム触媒と酸化剤により処理することにより、位置選択的な炭素 水素結合のサルフェニル化反応が進行し、対応する非対称ジアリールスルフィドが高収率で得られることを明らかにした(eq 5)。



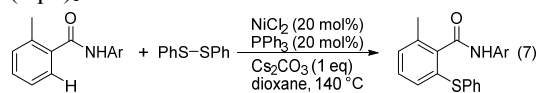
本反応では酢酸パラジウムと臭化銅の組み合わせが最適であり、他の銅および銀塩を酸化剤とした場合には、収率が顕著に低下し

た。最適条件下、芳香族化合物のみならずインドールやカルバゾールなどの含窒素複素芳香環のサルフェニル化反応も効率よく進行した。さらに、ジフェニルジスルフィドに代えてジセレニドを用いるとセレニル化反応が進行した(eq 6)。



反応条件に高温を要するものの、安価な酢酸銅のみで類似の反応が進行することも明らかにした。

一方、ニッケル触媒を用いることによりベンズアミドのオルト位選択的なサルフェニル化反応が進行することを見出した。本反応ではサルフェニル化剤であるジフェニルジスルフィドがニッケル触媒の再酸化剤として機能するため、酸化剤の添加が不要である(eq 7)。



反応基質として塩化サルフォニルを用いると、芳香環をサルフォニル化することも可能であった。

(5) 新規アート型錯体の構造と化学的挙動

(3)項で示したロジウム触媒反応の反応機構研究の過程で、ロジウム(I)種に対して2分子のグリニャール試薬が反応することにより生じるアート型ジアリールロジウム錯体が鍵活性種であることが明らかにした。そこで、種々検討を行った結果、有機リチウム試薬を用いることによりアート型ジアリールロジウム錯体の単離に成功した(eq 8)。また、X線結晶構造解析により錯体の分子構造の決定に成功した(Figure 1)。

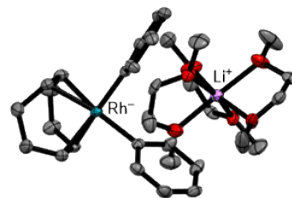
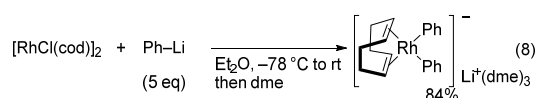


Figure 1.

さらに、アート型ジアリールロジウム錯体の反応性を検討したところ、ロジウム触媒によるアリール化反応の重要な中間体である中性のアリールロジウム錯体と全く異なる化学的挙動を示すことを明らかとした。

これまでに、研究代表者はニッケルとブタジエンを組み合わせた触媒系がアルキル基どうしのカップリング反応に有効であることを報告しており、鍵活性種としてアート型ニッケル錯体を提唱した。また、(2)項に

示した触媒反応においても類似の活性種を経るものと考えている。そこで、アート型ニッケル錯体の合成を検討し、その単離構造決定に成功した(Figure 2)。

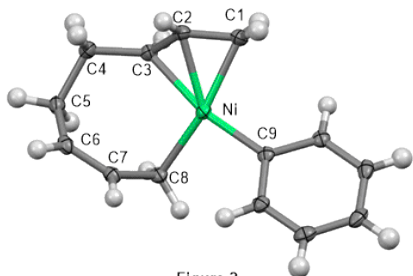


Figure 2.

得られた錯体の構造は、これまでに提唱した推定触媒機構を強く裏付けるものである。また、その反応性についても詳細に検討を行った。これらのアート型錯体の単離構造決定ならびにこれらが関与する触媒反応は、中性およびカチオン性錯体に比べその合成化学的有用性が十分に検討されていない遷移金属のアート型錯体が様々な高難度物質変換の有効な触媒として機能することを示すものである。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 17 件)

- (1) Takanori Iwasaki, Asuka Fukuoka, Xin Min, Wataru Yokoyama, Hitoshi Kuniyasu, and Nobuaki Kambe “Multicomponent Coupling Reaction of Perfluoroarenes with 1,3-Butadiene and Aryl Grignard Reagents Promoted by an Anionic Ni(II) Complex” *Org. Lett.* 2016, 18, 4868-4871. (査読有) DOI: 10.1021/acs.orglett.6b02343.
- (2) Takanori Iwasaki, Ryo Akimoto, Hitoshi Kuniyasu, and Nobuaki Kambe “Fe-Catalyzed Cross-Coupling Reaction of Vinylic Ethers with Aryl Grignard Reagents” *Chem. Asian J.* 2016, 11, 2834-2837. (査読有) DOI: 10.1002/asia.201600972.
- (3) Toshihiko Aiba, Masaki Sato, Daichi Umegaki, Takanori Iwasaki, Nobuaki Kambe, Koichi Fukase, and Yukari Fujimoto “Regioselective Phosphorylation of myo-Inositol with BINOL-Derived Phosphoramidites, and Its Application for Protozoan Lysophosphatidylinositol” *Org. Biomol. Chem.* 2016, 14, 6672-6675. (査読有) DOI: 10.1039/C6OB01062H.
- (4) Takanori Iwasaki, Xin Min, Asuka Fukuoka, Hitoshi Kuniyasu, and Nobuaki Kambe “Nickel-Catalyzed Dimerization and Alkylarylation of 1,3-Dienes with Alkyl Fluorides and Aryl Grignard Reagents” *Angew. Chem. Int. Ed.* 2016, 55, 5550-5554. (査読有) DOI: 10.1002/anie.201601126
- (5) Takanori Iwasaki, Ryohei Shimizu, Reiko Imanishi, Hitoshi Kuniyasu, and Nobuaki Kambe “Cu-Catalyzed Regioselective Hydroalkylation of 1,3-Dienes with Alkyl Fluorides and Grignard Reagents” *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015, 54, 9347-9350. (査読有) DOI: 10.1002/anie.201503288
- (6) Vutukuri Prakash Reddy, Renhua Qiu, Takanori Iwasaki, and Nobuaki Kambe “Nickel-catalyzed synthesis of diarylsulfides and sulfones via C-H bond functionalization of arylamides” *Org. Biomol. Chem.* 2015, 13, 6803-6813. (査読有) DOI: 10.1039/C5OB00149H.
- (7) Longzhi Zhu, Xin Cao, Renhua Qiu, Takanori Iwasaki, Vutukuri Prakash Reddy, Xinhua Xu, Shuang-Feng Yin, and Nobuaki Kambe “Copper-mediated thiolation of carbazole derivatives and related N-heterocycle compounds” *RSC Adv.* 2015, 5, 39358-39365. (査読有) (国際共著) DOI: 10.1039/C5RA04965B.
- (8) Daisuke Shiro, Shin-ichi Fujiwara, Susumu Tsuda, Takanori Iwasaki, Hitoshi Kuniyasu, and Nobuaki Kambe “AlCl<sub>3</sub>-Catalyzed Insertion of Isocyanides into Nitrogen-Sulfur Bonds of Sulfenamides” *Tetrahedron Lett.* 2015, 56, 1531-1534. (査読有) DOI: 10.1016/j.tetlet.2015.01.096.
- (9) Daisuke Shiro, Shin-ichi Fujiwara, Susumu Tsuda, Takanori Iwasaki, Hitoshi Kuniyasu, and Nobuaki Kambe “Palladium-Catalyzed Insertion Reactions of Isocyanides into Thiocarbamates and Selenocarbamates” *Chem. Lett.* 2015, 40, 465-467. (査読有) DOI: 10.1246/cl.141141.
- (10) Renhua Qiu, Vutukuri Prakash Reddy, Takanori Iwasaki, and Nobuaki Kambe “The Palladium-Catalyzed Intermolecular C-H Chalcogenation of Arenes” *J. Org. Chem.* 2015, 80, 367-374. (査読有) DOI: 10.1021/jo502402d.
- (11) Daisuke Shiro, Hiroyuki Nagai, Shin-ichi Fujiwara, Susumu Tsuda, Takanori Iwasaki, Hitoshi Kuniyasu, and Nobuaki Kambe “Palladium-Catalyzed N-Allenyl Seleno- and Tellurocarbamates” *Heteroatom Chem.* 2014, 25, 518-524. (査読有) DOI: 10.1002/hc.21217.
- (12) Takanori Iwasaki, Reiko Imanishi, Ryohei Shimizu, Hitoshi Kuniyasu, Jun Terao, and Nobuaki Kambe “Copper-Catalyzed Alkyl-Alkyl Cross-Coupling Reactions Using Hydrocarbon Additives: Efficiency of Catalyst and Roles of Additives” *J. Org. Chem.* 2014, 79, 8522-8532. (査読有) DOI: 10.1021/jo501006u.
- (13) Takanori Iwasaki, Yoshinori Miyata, Ryo Akimoto, Yuuki Fujii, Hitoshi Kuniyasu, and Nobuaki Kambe “Diarylrhodates as Promising Active Catalysts for the Arylation of Vinyl Ethers with Grignard Reagents” *J.*



- Am. Chem. Soc. 2014, 136, 9260-9263. (査読有) DOI: 10.1021/ja5043534.
- (14) Takanori Iwasaki, Hiroaki Takagawa, Kanako Okamoto, Surya Prakash Singh, Hitoshi Kuniyasu, and Nobuaki Kambe “The Co-Catalyzed Cross-Coupling Reaction of Alkyl Halides with Alkyl Grignard Reagents. A New Route to Constructing Quaternary Carbon Centers” *Synthesis* 2014, 46, 1583-1592. (査読有)(国際共著) DOI: 10.1055/s-0033-1341152.
- (15) Takanori Iwasaki, Hiroaki Takagawa, Surya Prakash Singh, Hitoshi Kuniyasu, and Nobuaki Kambe “Co-Catalyzed Cross-Coupling of Alkyl Halides with Tertiary Alkyl Grignard Reagents Using a 1,3-Butadiene Additive” *J. Am. Chem. Soc.* 2013, 135, 9604-9607. (査読有)(国際共著) DOI: 10.1021/ja404285b.

〔学会発表〕(計 110 件)

- (1) Nobuaki Kambe, “C-C Bond Formation Using Anionic Transition Metal Catalysts”, The 16th National Youth Conference on Catalysis (NYCC-16) (招待講演、国際会議), 2016 年 10 月 24 日, Changsha (China)
- (2) 神戸宣明, 「遷移金属触媒を用いる C-F 結合の C-C 結合への変換反応」, フッ素化学研究講演会 (招待講演), 2016 年 10 月 06 日, 愛知(名古屋大学)
- (3) Nobuaki Kambe, “Carbon-Carbon Bond Forming Reactions Catalyzed by Transition Metal Ate Complexes”, The 7th Spanish Portuguese Japanese Organic Chemistry Symposium (7th SPJ-OCS) (招待講演、国際会議), 2015 年 06 月 03 日~2015 年 06 月 06 日, Seville (Spain)
- (3) 神戸宣明, 「遷移金属触媒を用いる飽和炭素鎖およびヘテロ原子団の導入反応」, 石油学会第 65 回年会 (招待講演), 2016 年 05 月 23 日, 東京(タワーホテル船橋)
- (4) Nobuaki Kambe, “Syntheses and Reactions of Organo chalcogen Compounds Catalyzed by Transition Metals”, IXXth International Symposium on Selected Problems of Chemistry of Acyclic and Cyclic Heteroorganic Compounds (招待講演、国際会議), 2014 年 11 月 21 日, the CMMS PAS in Lodz (Poland)
- (6) Nobuaki Kambe, “Cleavage and Formation of Carbon-Fluorine Bonds”, International Symposium on Advances in the Chemistry of Heteroorganic Compounds (招待講演、国際会議), 2014 年 11 月 20 日, AJD University in Czeastochowa (Poland)
- (7) Nobuaki Kambe, “Carbon-Carbon Bond Forming Reactions Catalyzed by Transition Metals Having Unsaturated Carbon Ligands”, Vietnam Malaysia International Chemical Congress (VMICC) (招待講演、国際会議), 2014 年 11 月 07 日~2014 年 11 月 09 日, Hanoi (Vietnam)
- (8) 神戸宣明, “Transition Metal Catalyzed C-C Bond Forming Reactions Using Grignard Reagents”, 北興化学工業 (依頼講演), 2014 年 10 月 22 日, 東京(北興化学工業)
- (9) 神戸宣明, 「遷移金属触媒を用いるホスフィン配位子を使わない炭素骨格構築法」, 日本プロセス化学会 (招待講演), 2014 年 07 月 31 日, 東京 (船堀)
- (10) Nobuaki Kambe, “Carbon-Carbon Bond Forming Reactions Catalyzed by Rhodium Complexes”, The XXVI International Conference on Organometallic Chemistry (ICOMC 2014) (招待講演、国際会議), 2014 年 07 月 15 日, Hokkaido (Royton Sapporo)

〔図書〕(計 3 件)

- (1) 岩崎孝紀, 神戸宣明, 「クロスカップリング反応の新展開—sp<sup>3</sup>炭素上での結合形成反応」, 触媒年鑑 触媒技術の動向と展望 2017, 第一編, 26-36, 触媒学会.
- (2) Takanori Iwasaki, and Nobuaki Kambe, Ni-Catalyzed C-C Couplings Using Alkyl Electrophiles, *Top. Curr. Chem.* 2016, 374, article number 66.
- (3) Takanori Iwasaki, and Nobuaki Kambe, Coupling Reactions Between sp<sup>3</sup> Carbon Centers In *Comprehensive Organic Synthesis*, 2nd ed., eds. Gary A. Molander, Paul Knochel, Elsevier, 3, 337-391 (2014).

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)  
○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

- 受賞
- (1) 神戸宣明, 日本化学会第 68 回日本化学会賞
- (2) 神戸宣明, 平成 27 年度石油学会学会賞
- 新聞報道
- (1) 「新しい樹脂作る触媒」日経産業新聞 2015 年 7 月 1 日付朝刊 8 面
- (2) 「触媒の使い分けで有機分子の反応を制御」科学新聞 2016 年 4 月 15 日付 4 面
- HP:  
<http://www.chem.eng.osaka-u.ac.jp/~catsyn/index.html>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
神戸 宣明 (KAMBE, Nobuaki)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 60144432