

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2008～2013

課題番号：20225004

研究課題名(和文) クロス及びマルチカップリング反応の高効率触媒系の構築と高度制御

研究課題名(英文) Development and Control of Highly Efficient Catalytic Systems for Cross-and Multicomponent-Coupling Reactions

研究代表者

神戸 宣明 (Kambe, Nobuaki)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60144432

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 122,700,000円、(間接経費) 36,810,000円

研究成果の概要(和文)：立体的に嵩高い2級および3級アルキル基の導入反応、ジエンやアルキン等の不飽和炭化水素を組み込む多成分カップリング反応、化学的に不活性なC-F、C-OおよびC-H結合の切断を伴ったクロスカップリング反応など、遷移金属触媒を活用した炭素-炭素結合生成の新技术を種々開発すると共に、アニオン性遷移金属錯体を鍵活性種とする触媒反応の新分野を開拓した。また、有機金属試薬、有機カルコゲンおよびハロゲン化物の付加反応を開発し、炭素骨格とヘテロ原子官能基を炭素-炭素不飽和結合に一挙に導入する触媒反応を開発した。さらに、電子的および構造的な柔軟性を有する遷移金属錯体を活用した新触媒反応を開発した。

研究成果の概要(英文)：A variety of methods for carbon-carbon bond formation have been developed by the aid of transition metal catalysts, which enabled introduction of congested secondary and tertiary alkyl groups into organic molecules, multi-component coupling incorporating unsaturated hydrocarbons such as alkynes and dienes, and cross coupling via cleavage of unreactive bonds such as C-F, C-O and C-H. These successful results demonstrated potent catalytic reactivities of anionic transition metal species as key intermediates in various synthetic reaction processes. Catalytic reactions for concomitant construct of carbon-carbon bonds and carbon-heteroatom bonds and those using electronically and/or structurally flexible metal complexes were also developed.

研究分野：化学

科研費の分科・細目：複合化学・合成化学

キーワード：クロスカップリング 多成分カップリング 遷移金属触媒反応 アート型錯体 アルキル化 グルニャール試薬 ジエン

1. 研究開始当初の背景

機能性材料や生理活性物質として、既に多くの有機化合物が利用され、豊かな社会の継続的発展に貢献している。有機化合物は、その構造の多様性の故に、更なる機能の高度化、ならびに新機能の開発に大きな期待が寄せられており、高効率な有機合成の新しい手法が求められている。2000年以降、不斉合成、メタセシス、クロスカップリング反応と、触媒反応の開発がノーベル化学賞の対象になったように、効率的合成法の開発に対する社会的ニーズは極めて高く、有機金属化学はそのニーズを満たす有力な方法論として精力的な研究が行われてきた。その結果、遷移金属触媒による有機合成反応は、過去数十年に渡り大きな発展を遂げてきたが、未だ未開拓の課題が残されている。その一つが、 sp^3 炭素を反応点とするクロスカップリング反応である。上に挙げた例の中で触媒的不斉合成とメタセシスはいずれも不飽和結合に対する反応である。クロスカップリング反応は、単結合の組み替え反応であるが、多くの場合はアルキン、オレフィン、或いは芳香族化合物の sp および sp^2 炭素上での反応であり、 sp^3 炭素とのクロスカップリング反応は困難と考えられていた。しかしながら、2000年頃より、研究代表者らを含む世界で幾つかのグループがアルキル基導入を目指すクロスカップリングの研究を開始し、本研究の開始時点では飽和炭素鎖の簡便な構築手法の確立に大きな期待が寄せられていた。

また、分子変換手法の更なる効率化と応用範囲の飛躍的拡大を目指して、炭素-水素結合や不活性結合の高効率・高選択的切断を伴う合成手法の開発が近年精力的に進められている。研究代表者らのグループは、有機合成を目指したヘテロ原子化学の研究に長年取り組んでおり、蓄積された多くの知見を基に、本研究では炭素-ヘテロ原子結合の切断と生成を効率的に達成する新触媒系を開発し、新規な直截的合成反応の創出を目指した。

有機金属による触媒反応では、金属の選択と配位子の設計が重要である。一般に、リンや窒素原子の非共有電子対による配位を受けた錯体が多用されるが、研究代表者らは、ヘテロ原子を含まないジエンやアルキン等の π -炭素系配位子の有用性を既に見いだし、新たな触媒系の開拓を目指して研究を進めていた。このような安価で安全な配位子と汎用的な第1遷移金属との組み合わせによる触媒反応の開発は、有機合成化学が目指すべき方向の一つである。

本研究では、このような社会的ニーズの高い命題に取り組むことを最重要課題として研究を進めた。

2. 研究の目的

本研究では、ハロゲン化アルキル、クロロシラン、有機カルコゲン化合物や種々のヘテロ原子化合物を、カップリング反応の一基質

として含む新しい触媒反応系を開発すると共に、二成分のクロスカップリング反応のみならず、不飽和化合物を組み込む多成分連結反応へと展開することにより、炭素-炭素結合および炭素-ヘテロ原子結合を連続的に生成させ、複雑な化合物群を一挙に構築する方法論の開発を目的とした。本研究を推進するにあたり、一般的な中性およびカチオン性錯体では無く、アニオン性錯体を活性種とする触媒反応系を開発、ならびに電子的および構造的に柔軟な配位子の開発を行い、有機金属化学の新方法論・新分野の開拓を目指した。配位子に関しては、ホスフィンやアミンなどの非共有電子対で配位する電子供与性のヘテロ原子配位子ではなく、ジエンやアルキンなどの電子の逆供与が可能な π -炭素系配位子を活用し、これらの電子的及び立体的特徴を最大限に活用する新しい触媒系の開拓を目指した。更に、シクロデキストリン(CD)と基質との超分子相互作用を活用する触媒反応も検討した。また、切断が困難な炭素-フッ素、炭素-硫黄、炭素-酸素等の結合や、炭素-水素結合の官能基化反応を目指した。

3. 研究の方法

本研究は、炭素-炭素結合または炭素-ヘテロ原子結合生成を伴う、クロスカップリングおよび多成分カップリングの新手法の創出を目指したものであり、下記の指針に沿って研究を推進した。

- 炭素-炭素結合生成においては、有機分子へのアルキル基導入の為に新しい触媒系の創出に主眼を置いた。アルキル基としては、ハロゲン化アルキルの様な親電子剤、或いはグリニャール試薬を主とする有機金属試薬を用いた。特に、 sp^3 炭素同士のクロスカップリングに重点を置き、アルキル鎖の新規構築手法の確立を目指した。また、研究の後半は、2級及び3級アルキル基の連結反応の開発に重点を置いて研究を進めた。用いる遷移金属としては、鉄、コバルト、ニッケル、銅等の汎用性の高い遷移金属触媒に限定し、これらのアニオン性錯体を触媒活性種とする触媒反応の構築に焦点を当てた。また、有機金属試薬としては、容易に入手可能なグリニャール試薬を用いた研究を推進した。

- 炭素-ヘテロ原子結合生成に関しては、これまで遷移金属触媒反応への利用が困難とされていたクロロシラン、高周期カルコゲン化合物や、アリルエーテルを用いる触媒反応を中心に検討を行った。

- π -炭素系配位子として、 η^1 および η^3 配位を取り得る構造的に柔軟なアリル配位子を有する金属錯体の特異な反応性を活用した合成反応の開拓を目指した。

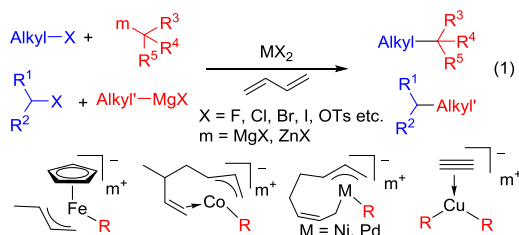
- 配向基を反応基質に導入する従来型の手法ではなく、配位子にシクロデキストリン(CD)を連結し、その包接機能により触媒金属近傍に基質を引き寄せる新規な機能性触媒の創出に取り組み、不斉空間を反応場とする不斉

反応へと展開した。

4. 研究成果

(1) ハロゲン化アルキル類と有機金属試薬とのクロスカップリング反応

我々は既に、アルキル基同士の連結反応がニッケルやパラジウム、銅触媒と不飽和炭化水素配位子を組み合わせるにより円滑に進行することを見出している。本研究ではこれらの知見を基に、1級アルキル基に加え、より難度の高い2級および3級アルキル基の連結反応の開発および応用研究に取り組んだ。その中で、新たに鉄やコバルト触媒を用いる触媒系を開発した(式1)。以下に主な成果を示す。



① ニッケルおよびパラジウム触媒

ニッケルおよびパラジウム触媒とブタジエンを組み合わせることによりハロゲン化アルキル類とグリニャール試薬とのクロスカップリング反応が低温下でも効率よく進行する事を明らかにした。この性質を利用し、エステルやケトンなどの反応性の高い官能基を有する基質を用いて、アルキル基の連結反応が効率よく進行することを示した。その応用として、様々な炭素鎖を有する天然型およびオレフィンの位置が異なる非天然型不飽和脂肪酸を合成した。また、これを糖に連結することにより、生理活性物質の合成研究へと展開した。

触媒前駆体としてニッケルまたはパラジウムを含むペロブスカイト(LaFe_xM_yO₃; M = Ni or Pd)を用いたクロスカップリング反応も検討し、本反応系が高い触媒回転数を有する高効率の触媒系であることを示した。

また、基質の構造と濃度、溶媒、温度等による反応速度の変化を詳細に検討し、高効率かつ選択的反応を行う為の知見を得た。これらの速度論的研究と反応の立体化学および量子化学計算を組み合わせることで本反応の詳細な機構を検討した。本反応は、グリニャール試薬によって還元された0価金属種とブタジエンとの酸化二量化反応により形成されるビスπアリル錯体がグリニャール試薬と反応する事によりアニオン性錯体が生成し、これがハロゲン化アルキル類とS_N2機構で反応する。律速段階は多くの場合、アート錯体とハロゲン化アルキルとの反応段階であるが、ヨウ化アルキルの場合には反応速度はヨウ化物の濃度に依存しない場合があることを示した。

② 銅触媒を用いるクロスカップリング反応

銅触媒を用いることにより、立体的に嵩高い2級ハロゲン化アルキル類のクロスカップリング反応の開発に成功した。さらに、2級アルキル基同士のカップリング反応が中程度の収率で進行し、連続した分岐炭素鎖を構築できることを明らかにした。

また、銅触媒は極めて高い触媒活性を示し、最大で触媒回転数 100 万回以上を達成した。アルキル基を基質とするクロスカップリング反応では、中間触媒活性種からのβ-水素脱離を引き金とする触媒の失活が問題となることから、既存の触媒系の触媒回転数は数百回に留まっていた。本触媒系はこれら既存の触媒系をはるかに凌駕するものである。さらに、π-炭素系配位子の役割について詳細な検討を加え、不安定中間体であるアルキル銅種のβ-水素脱離を抑制することにより、副反応を抑制するとともに触媒失活を防ぐことを示した。

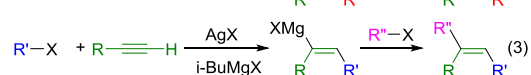
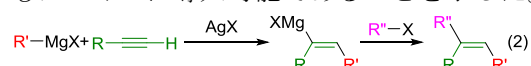
③ コバルト触媒によるカップリング反応

ブタジエンを配位子前駆体として利用することにより、コバルト触媒によるハロゲン化アルキル類と立体的に嵩高い3級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効率よく進行することを見出した。本反応は、様々な極性官能基を有するハロゲン化アルキル類に適用可能であり、それら官能基を損なうことなく4級炭素中心を構築することが可能であった。反応機構について詳細な検討を加え、アリルコバルト種とグリニャール試薬から生じるアニオン性コバルト錯体が鍵活性種であることを明らかにした。このアニオン性錯体が、S_N2機構でハロゲン化アルキルと反応することにより生成物を与える経路を提案した。

(2) 不飽和炭化水素化合物を反応基質とする多成分反応

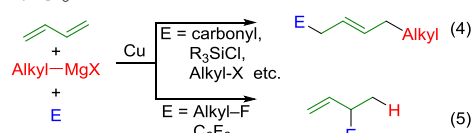
① 銀触媒によるアルキンのカルボマグネシウム化反応

銀触媒が立体的に嵩高い3級アルキルグリニャール試薬のアルキンに対する付加反応を触媒し、多置換ビニルグリニャール試薬を効率よく与えることを見出した(式2)。本手法は、有機合成化学的に利用価値の高いビニルグリニャール試薬の新規合成法であり、続く求電子剤との反応もしくはクロスカップリング反応により様々な炭素骨格を構築することが可能である。さらに、グリニャール試薬と3級ハロゲン化アルキルを併せて用いることにより、ハロゲン化アルキル由来の有機基を導入することも可能である(式3)。これらの反応は相補的な関係にあり、3級アルキル求電子剤と3級アルキル求核剤のいずれもアルキンに導入可能であることを示した。



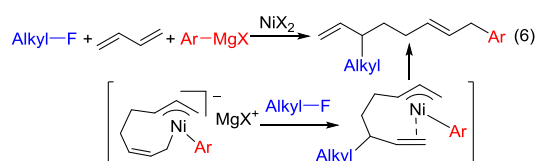
② 銅触媒を用いたブタジエンのアルキル化およびパーフルオロアリール化反応

触媒量の銅触媒存在下、グリニャール試薬とブタジエンを反応させることにより、ブタジエンに対する付加反応（カルボマグネシウム化反応）が進行し、対応するアリルグリニャール試薬が得られることを見いだした。生じるアリルグリニャール試薬は、カルボニル化合物やハロゲン化アルキル、クロロシラン等の種々の求電子剤で捕捉可能である（式4）。一方、予め銅触媒をブタジエン共存下、グリニャール試薬で処理する事により、系中でアリル銅活性種を発生さ、これを求電子剤と反応させることに成功した（式5）。本反応では、求電子剤としてフッ化アルキルやパーフルオロアレンが利用可能であり、それらの炭素—フッ素結合の切断を伴いアルキル基およびパーフルオロアリール基が導入可能である。

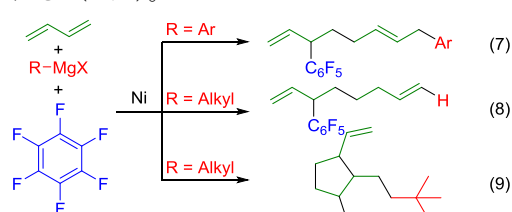


③ ニッケル触媒を用いたブタジエンの二量化を伴った多成分反応

ニッケル触媒存在下、ブタジエン、アリルグリニャール試薬およびフッ化アルキルを反応させると、ブタジエンの二量化反応を伴った多成分カップリング反応が進行し、1,6-オクタジエン骨格の3および8位にそれぞれアルキル基とアリール基が導入された生成物が得られることを見出した（式6）。この反応は、本来不活性な炭素—フッ素結合がマグネシウムカチオンの配位により活性化され、求核点として活性化されたアリール炭素と反応することにより進行すると考えられ、他のハロゲン化アルキルを用いると同様の反応は進行しない。

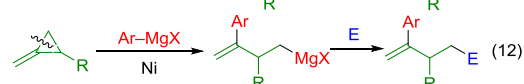
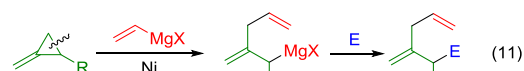
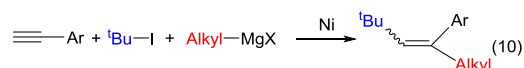


本反応は、フッ化アルキルに代えてパーフルオロアレンを求電子剤として用いても効率よく進行した（式7）。一方、β水素を有するアルキルグリニャール試薬を用いた場合には、8位炭素にβ水素が導入され（式8）、β水素を持たない場合には分子内環化を伴いアルキル基が導入された生成物が得られる（式9）。



④ ニッケル触媒による不飽和基質と有機金属試薬との反応

ニッケル触媒存在下、アルキンと有機金属試薬とハロゲン化アルキルを反応させると、炭素—炭素三重結合に有機金属試薬由来の有機基とハロゲン化アルキル由来のアルキル基が導入されたオレフィンが得られた（式10）。アルキンに代えてエンインを用いると類似の反応が進行し、3置換アレンが生成した。一方、メチレンシクロプロパンを不飽和基質として用いると、シクロプロパン環の開裂を伴った付加反応が進行した（式11, 12）。本反応では、用いるグリニャール試薬によってシクロプロパン環の開裂位置が異なる生成物が得られた。



⑤ 不飽和炭化水素に対するカルコゲン原子団の付加反応

含酸素化合物は有機合成反応の基質として広く利用させている。一方、酸素と同族の硫黄やセレンなどのカルコゲン元素の特性を活用した触媒反応の例は少ない。我々は後周期遷移金属を触媒として、炭素—カルコゲン結合の切断を伴ったアルキンおよびアレン類への付加反応を検討した。その結果、チオ、セレンおよびテルロエステルおよびカルバマートの炭素—カルコゲン結合の切断を伴って、炭素—炭素不飽和結合への付加反応が、パラジウムおよび白金触媒存在下、円滑に進行することを明らかにした。また、ビニルカルコゲニドの炭素—カルコゲン結合の切断を伴ったアルキンへの付加反応の開発に始めて成功した（式13）。量子化学計算により、アルキンへのセレンメタル化と続く還元的脱離による炭素—炭素結合形成反応を経る反応機構を提唱した。

また、アリルエーテルの炭素—酸素結合の切断を伴ったアルキン類への付加反応、および一酸化炭素の挿入を伴ったフェノール類とアルキンとの三成分カップリング反応がパラジウム触媒によって進行することを明らかにした。



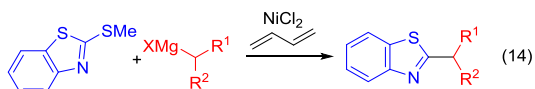
(3) 不活性結合の切断を伴ったクロスカップリング反応

上記の如く（式1, 5-9）、強固な炭素—フッ素結合の切断を伴ったクロスおよびマルチ

カップリング反応を開発すると共に、炭素—硫黄結合へのアルキンの挿入反応 (式 13) を開発した。そこで次に、炭素—酸素および炭素—硫黄結合の切断を伴ったクロスカップリング反応を検討した。加えて、炭素—水素結合の切断を経る炭素—炭素結合および炭素—ヘテロ原子結合形成反応による含ヘテロ原子化合物の合成手法の開発を行った。

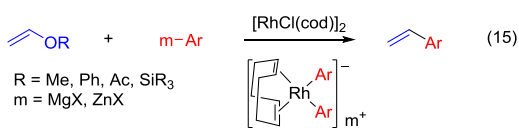
① 炭素—硫黄結合の切断を伴った複素環のアルキル化反応

2-メチルチオベンゾチアゾール類の炭素—硫黄結合の切断を伴った2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ニッケル触媒存在下、ブタジエンを添加することにより円滑に進行することを見出した (式 14)。量論反応等の検討から、本反応は触媒活性種としてアニオン性ニッケル錯体が生成し、これが炭素—窒素二重結合に付加する事により進行するものと考えている。



② 炭素—酸素結合の切断を伴ったクロスカップリング反応

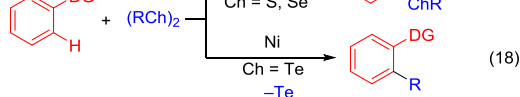
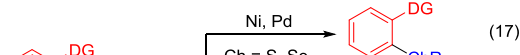
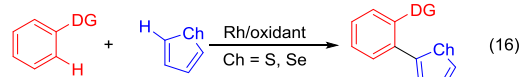
ロジウム触媒存在下、ビニルエーテル、エステルおよびシリルエノールエーテルとアリールグリニヤール試薬もしくはアリール亜鉛試薬との炭素—酸素結合の切断を経るクロスカップリング反応が、ビニル炭素選択的に進行することを見出した (式 15)。本反応は、アリールエーテルや炭素—酸素結合を有する基質存在下でもビニルエーテル選択的に進行する特徴を有している。反応機構研究の結果、アニオン性ジアリールロジウム種が触媒活性種であることを明らかにするとともに、その構造をX線結晶構造解析によって明らかにした。さらに、類似の反応がより安価な鉄触媒でも円滑に進行することを見出した。



③ 炭素—水素結合の切断を伴ったクロスカップリング反応

配向基 (ダイレクティンググループ: DG) を活用することにより、二つの炭素—水素結合の切断を伴うクロスカップリング反応を開発した。本触媒系は、適切な配位性官能基を有する芳香族化合物とチオフェンおよびセレンフェンとの分子間酸化的カップリング反応にも適用可能である (式 16)。また、ジスルフィド、ジセレニドを用いた芳香環上の炭素—水素結合のカルコゲン化反応がニッケルおよびパラジウム触媒存在下、円滑に進行することを見出した (式 17)。ニッケル触媒とジフェニルジテルリドを用いた場合には、対応するテルリドではなく、ビアリール化合物が得られた (式 18)。このことは、テルリド化合物がビアリールカップリング反

応の一基質として利用可能であることを示すものである。一方、銅触媒を用いると、 sp^3 炭素—水素結合の切断を伴ったカルコゲン化反応が進行した。

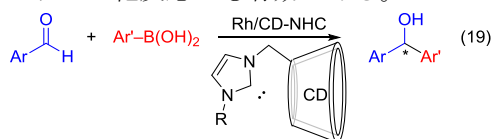


(4) 機能性配位子の創成と新規触媒反応の開発

式 1 で示した様に、ブタジエン添加剤と種々の遷移金属との組み合わせにより反応活性種として構造的柔軟性を有する π アリール配位子を有するアニオン性錯体が生じ、これがクロスカップリング反応等の鍵活性種であることを明らかにした。 π アリール配位子はその配位様式を σ アリールへと動的に変化することにより中心金属の電子状態と配位環境を適切に制御している。また、配向基は反応場を制御する事により、触媒反応点と基質の反応を促進させる。そこで、新しい展開として、基質との弱い超分子相互作用と構造的柔軟性を併せ持つ配位子の創成と新規触媒系の開発を行った。

① シクロデキストリン (CD) を反応場とする不斉反応

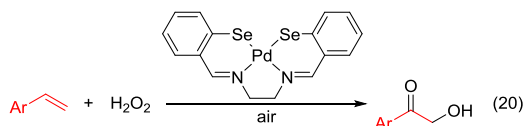
不斉触媒反応において高いエナンチオ選択性を達成するためには、不斉配位子と反応基質との立体反発を利用して一方の鏡像体を与える遷移状態の活性化エネルギーを上昇させる触媒設計が広く用いられている。一方、CD の疎水性内部不斉空間への基質取り込み能を反応の駆動力として利用できれば、新規な不斉触媒の手法となり得る。そこで、CD に *N*-ヘテロ環状カルベン配位子を導入した新規配位子を設計し、このロジウム錯体を用いてアルデヒドに対するアリールボロン酸の付加反応を検討したところ、最高 96% ee に対応する生成物が得られた (式 19)。本触媒系の特徴は、CD による基質の包接効果が不斉発現のみならず反応加速に寄与する点である。すなわち、包接能を持たない類似の配位子に比べて CD 連結錯体が約 30 倍の反応加速効果を示した。本触媒系はアルデヒドのみならずエノン類やイサチンに対する不斉アリール化反応にも有効である。



② 配位子上のカルコゲン原子の酸化状態変化を駆動力とする酸化反応

サレン配位子の酸素原子をセレンに置き

換えた新規セレンサレン配位子を設計し、そのパラジウム錯体を用いたスチレン類の過酸化水素による酸化反応を検討したところ、ヒドロキシケトンが主生成物として得られた(式 20)。本反応では、高酸化状態を取り得るセレン基が重要な役割を果たしていることが示唆された。



5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 57 件)

- ① T. Iwasaki, H. Takagawa, S. P. Singh, H. Kuniyasu, N. Kambe; Co-Catalyzed Cross-Coupling of Alkyl Halides with Tertiary Alkyl Grignard Reagents Using a 1,3-Butadiene Additive; *J. Am. Chem. Soc.*, **135** (26), 9604-9607 (2013). (査読有)
DOI: 10.1021/ja404285b.
- ② V. P. Reddy, R. Qiu, T. Iwasaki, N. Kambe; Rhodium-Catalyzed Intermolecular Oxidative Cross-Coupling of (Hetero)Arenes with Chalcogenophenes; *Org. Lett.*, **15** (6), 1290-1293 (2013). (査読有)
DOI: 10.1021/ol400230y.
- ③ R. Shen, T. Iwasaki, J. Terao, N. Kambe; Copper-Catalyzed Coupling Reaction of Unactivated Secondary Alkyl Iodides with Alkyl Grignard Reagents in the Presence of 1,3-Butadiene as an Effective Additive; *Chem. Commun.*, **48** (47), 9313-9615 (2012). (査読有)
DOI: 10.1039/C2CC34847K.
- ④ N. Kambe, Y. Moriwaki, Y. Fujii, T. Iwasaki, J. Terao; Silver-Catalyzed Regioselective Carbomagnesiation of Alkynes with Alkyl Halides and Grignard Reagents; *Org. Lett.*, **13** (17), 4656-4659 (2011). (査読有)
DOI: 10.1021/ol12018664.
- ⑤ J. Terao, M. Tomita, S. P. Singh, N. Kambe; Nickel-Catalyzed Regioselective Carbomagnesiation of Methylene cyclopropanes through a Site-Selective Carbon-Carbon Bond Cleavage; *Angew. Chem. Int. Ed.*, **49** (1), 144-147 (2010). (査読有)
DOI: 10.1002/anie.200904721.
- ⑥ M. Toyofuku, S.-i. Fujiwara, T. Shin-ike, H. Kuniyasu, N. Kambe; Platinum-Catalyzed Intramolecular Vinylchalcogenation of Alkynes with *b*-Phenylchalcogeno Conjugated Amides; *J. Am. Chem. Soc.*, **130** (32),

10504-10505 (2008). (査読有)

DOI: 10.1021/ja804121j.

[学会発表] (計 222 件)

222 件中 国際会議: 62 件、国内での招待講演: 9 件、海外での招待講演: 22 件

- ① N. Kambe, Transition Metal Catalyzed Alkylation Toward sp^3 -, sp^2 -, and sp -Carbons, International Symposium on Catalysis & Fine Chemicals 2011 (C&FC2011), 平成 23 年 12 月 4 日、奈良県
- ② N. Kambe, Alkyl Fluorides as Promising Alkylating Reagents, 2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2010), 平成 22 年 12 月 16 日、米国、ハワイ

[図書] (計 3 件)

- ① T. Iwasaki, N. Kambe, Elsevier, Coupling Reaction Between sp^3 -Carbon Centers, Comprehensive Organic Synthesis II (Second Edition) P. Knochel, G. A. Molander Eds, 2014, Vol. 3, pp 337-391.

[産業財産権]

○取得状況 (計 2 件)

名称: フルオレン誘導体の製造方法

発明者: 神戸宣明、寺尾 潤

権利者: ダイキン工業株式会社、国立大学法人大阪大学

種類: 特許

番号: 特許第 5283494 号

取得年月日: 平成 25 年 6 月 7 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<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

(3) 連携研究者

國安 均 (KUNIYASU, Hitoshi)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 00252594

岩崎 孝紀 (IWASAKI, Takanori)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 50550125

(平成 21 年度より連携研究者)