

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20350050

研究課題名（和文）

炭素-水素および炭素-炭素結合の選択的切断を基軸とするクロスカップリング

研究課題名（英文）

Cross-Coupling through Selective Cleavage of C-H and C-C Bonds

研究代表者

三浦 雅博 (MIURA MASAHIRO)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：20183626

研究成果の概要（和文）：適当な官能基をもつ芳香族およびヘテロ芳香族化合物を基質に用い、パラジウムあるいはロジウム触媒を用いてハロゲン化アリールやアルケンあるいはアルキンと反応させるとオルト位の炭素-水素結合切断を伴うカップリング反応が効率よく進行した。特にカルボン酸類の反応では、炭素-水素結合切断のみならず脱炭酸を伴う炭素-炭素結合切断を含むマルチカップリングが進行し、構造的に興味深いパイ共役化合物が得られることを明らかにした。さらに、銅ならびにニッケル触媒を用いるいくつかの芳香族炭素-水素結合変換反応を開発した。

研究成果の概要（英文）：The coupling reaction of suitably functionalized aromatic and heteroaromatic substrates with aryl halides, alkenes, and alkynes proceeded effectively in the presence of a palladium or rhodium catalyst. Especially, aromatic carboxylic acids was found to undergo multi-coupling via C-H and C-C bond cleavages to afford structurally interesting pi-conjugated compounds. Furthermore, a number of C-H transformation reactions of aromatic compounds by using copper and nickel catalysts have been developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2009年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2010年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
年度			
年度			
総計	15,300,000	4,590,000	19,890,000

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：合成化学、クロスカップリング、炭素結合、遷移金属触媒、パイ共役分子

## 1. 研究開始当初の背景

(1)近年、様々な機能性分子材料や生理活性物質の合成と相まって、効率のよい新規な結合形成反応の開発が、ますます重要な研究課題となっている。遷移金属触媒を用いる有機ハロゲン化物と有機金属反応剤とのクロスカップリングは、極めて有用な炭素結合形成反応として、これまで盛んに研究されてきた。一方、クロスカップリングの新手法として、

炭素-水素結合の切断を経る直接的カップリングや炭素-炭素結合の切断を経る炭素-炭素結合の再構築反応は、従来型のクロスカップリングを代替あるいは補完する、いわゆる“アトムエコノミー”ならびに“ステップエコノミー”に優れた結合形成法として、近年注目を集めている。これらは高難度な反応ではあるが、達成されれば、反応による副生成物を減らしつつ、より少ないステップ数で目

の化合物の合成を行うことから極めて有望である。従って、より一般性のある、炭素-水素結合ならびに炭素-炭素結合の切断を経るクロスカップリング反応の開発は、合成化学における挑戦的かつ重要課題の一つである。

(2)我々は、最近、カルボキシル基、アミド基、ヒドロキシメチル基などの官能基をもつ芳香族基質上での位置選択的な炭素-水素結合切断を伴う触媒的カップリング反応を見出している。また、これらの基質の炭素-炭素結合切断を経るイブソ位置換反応も達成している。これらの反応では、有機金属反応剤の調製とそれを使用する段階をスキップできる。また、後者の反応では、これまで基質として主に用いられてきた高ひずみ化合物ではなく、一般性の高い官能基をもつ化合物を基質として用いることができることが特徴である。

## 2. 研究の目的

(1)上述のように、最近我々は、適当な官能基をもつ芳香族およびヘテロ芳香族基質上での炭素-水素結合あるいは炭素-炭素結合の切断を経る新しい触媒的カップリング反応をいくつか見出している。本研究では、これらの反応を精査し、より効率のよい合成法へと発展させるとともに、得られる知見をもとに新規反応の開発を行う。

(2)一方で、開発した反応手法のバイ共役分子合成への応用を検討し、その合成手法としての有用性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1)反応基質の調製：一連のヒドロキシル基、カルボキシル基、アミド等の官能基を有する芳香族基質およびアルケン、アルキン類を調製（一部は市販品を購入）し、(3)の検討に用いた。

(2)配位子および金属錯体の調製：一連の単座および二座のホスフィン配位子および含窒素配位子を調製した（一部は市販品を購入）。これらの配位子を用いて一連の遷移金属錯体（金属：パラジウム、ロジウム、イリジウム、ルテニウム等）を調製した。

(3)触媒的結合形成反応：(1)および(2)で調製した基質および錯体触媒を用い、ハロゲン化物、アルケン、アルキンとの反応を系統的に行い、生成物の定性、定量分析を行った。これにより、炭素-水素結合および炭素-炭素結合切断の選択性を調べるとともに、カップリング反応に適した基質の組合せと触媒金属種と配位子の組合せをスクリーニングした（すでに見出している反応の高効率化とともに新反応の開拓を目指した調査を行った）。この際、塩基等の添加物、温度や溶媒の効果等を併せて精査した。

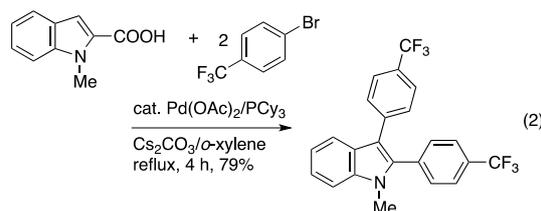
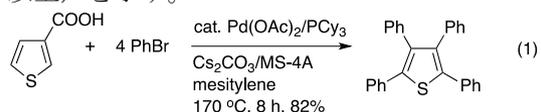
(4)開発した反応を用いて得られた生成物のうち、物性に興味を持たれるバイ共役分子について吸収・発光スペクトルを測定した。

## 4. 研究成果

上記の研究方法に従って研究を実施した。検討した反応のうち、ヘテロ芳香族環上でのカップリング反応を中心に以下に概要を報告する。

### (1)パラジウム触媒を用いるマルチアリール化反応

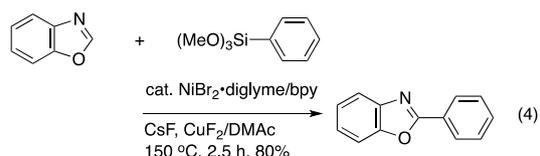
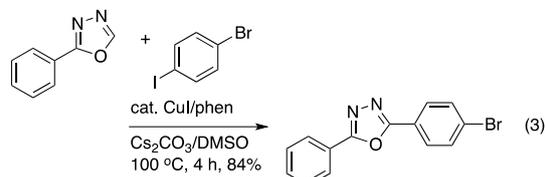
我々は、以前フェノール性水酸基のような配位性官能基をもつ芳香族基質をパラジウム触媒存在下で芳香族ハロゲン化物と処理すると、オルト位炭素-水素結合の切断を伴って効率よくクロスカップリングすることを見出した。これを契機として、様々な官能基をもつ芳香族基質を用いるアリール-アリールカップリングについて検討を行ってきた。その中で、第三級ベンジルアルコールや安息香酸類を基質に用いると炭素-炭素結合切断を経るイブソ位でのカップリングも起こることを見出した。本研究では、五員環ヘテロ芳香族化合物の2位や5位での直接的なアリール化反応が、これら二つのタイプの反応と同様の条件で起こることに着目し、材料合成の分野で有用な反応として、ヘテロ環上でのマルチアリール化反応を開発した(式1、2)。チオフェンおよびインドールカルボン酸の反応例を式1、2に示す。なお、これらの連続置換反応は、官能基がはじめに配向基として、ついで脱離基として働くことを利用したものである。興味深いことに式2の生成物は固体状態で強い青色蛍光（絶対量子収率 0.9以上）を示す。



### (2)銅およびニッケルを用いるアリール-アリールカップリング

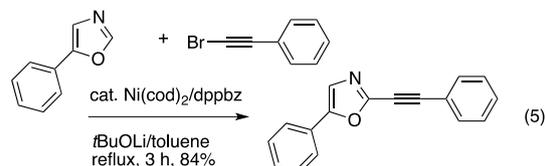
我々は、以前上記のパラジウム触媒を用いたヘテロ芳香族化合物のアリール化反応の研究中に、1 価の銅塩を添加すると反応が促進されること、および基質によっては銅単独で反応が進行することを見出している。そこで安価な銅やニッケルを用いる反応について、検討を行った。その結果、置換される水素の酸性度が比較的高いアゾール類が効果的にアリール化を受けることがわかった。電子輸送材料の骨格として有用なオキサジア

ゾールの反応例を式3に示す。銅を用いるアリール化では、使用できるハロゲン化物は主にヨウ化アリールに限られるが、ニッケル触媒の使用により臭化物も用いることができた。さらに、2価銅や酸素のような酸化剤を添加するとアリールケイ素試薬(式4)やホウ素試薬の使用が可能となった。

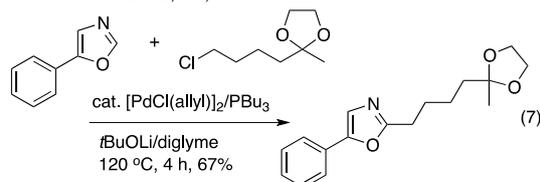


(3) アゾール類の直接アルキニル化、アルキル化、およびアミノ化

パラジウム/銅触媒を用いるハロゲン化アリールと末端アルキンとのカップリング(菌頭カップリング)は、アリールアセチレン類の合成法として現在広く用いられている。一方、ハロゲン化アルキニルを用いた芳香族化合物の直接アルキニル化が最近相次いで報告された。我々は上記のアゾール類の反応の展開として、アルキニル化を検討した。その結果、ニッケル、ニッケル/銅、銅の各触媒を使い分けることにより、種々のアゾール類が直接アルキニル化できることを見出した。一例を式5に示す。

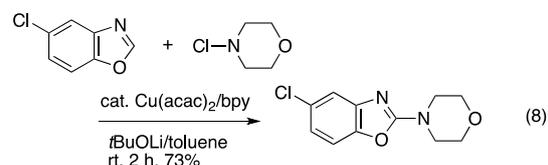


アゾール類のベンジル化やアルキル化ではパラジウム触媒が有効であった。ベンジル化ではカーボナートを、アルキル化では塩化物と臭化物を用いることができた(式6,7)。



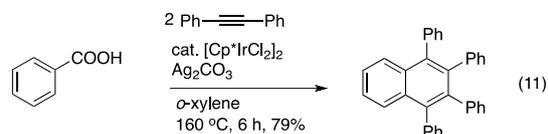
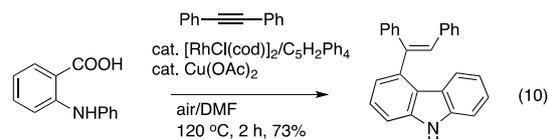
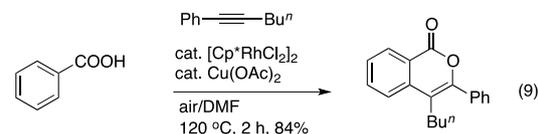
芳香族、炭素-窒素結合形成も重要な芳香族誘導体化反応の一つであり、これまでパラ

ジウムやニッケルを触媒として用いる反応が数多く報告されている。我々はクロロアミン類をアゾール類のアミノ化剤として用いると、銅触媒存下、室温で円滑に反応が進行することを見出した(式8)。

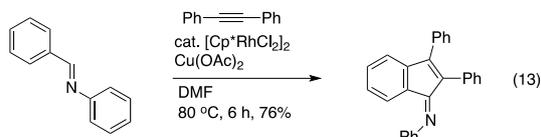
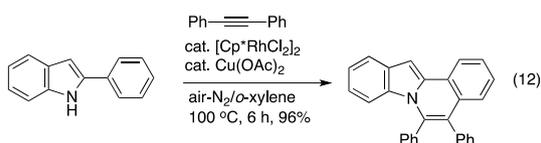


(4) アレーン-アルキン環化カップリング

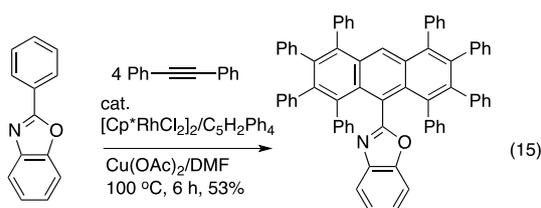
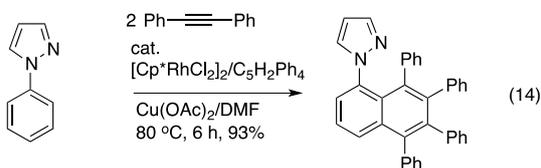
我々は、配位性官能基をもつ芳香族化合物が、2価の銅塩(+空気)のような適当な酸化剤存在下、パラジウム触媒を用いてアルケンやアルキンと処理するとオルト位での酸化的カップリングが選択的に起こることを以前に報告している。本研究では、パラジウムに代え、ロジウムを触媒に用いると効率よくアルキンとの環化カップリング反応が進行することを見出した。安息香酸と非対称内部アルキンとの反応では、レギオ選択的な環化カップリングによりイソクマリン誘導体が効率よく得られる(式9)。一方、*N*-フェニルアントラニル酸とジフェニルアセチレンとの反応では、式8と同様にイソクマリン体が得られるが、興味深いことに、溶媒と配位子の選択により脱炭酸と分子内環化を伴うカルバゾール環形成が観測された(式10)。また、イリジウム触媒を用いた反応では、1:2環化カップリングによるナフタレン環形成が選択的に進行した(式11)。



2-フェニルインドールや芳香族イミン類の反応でも、アルキンとの環化カップリングが観測された。前者では、炭素-炭素および炭素-窒素結合形成が、後者では二つの炭素-炭素結合形成が起こり、対応する縮環化合物を与えた(式12,13)。



また、1-フェニルピラゾールや2-フェニルベンゾオキサゾールとジフェニルアセチレンとの反応においては、二分子のアルキンの縮合による芳香環拡張が起こった(式14、15)。条件を適切に設定することにより、二つおよび四つの炭素-水素結合の切断を伴う1:2ならびに1:4カップリングが進行し、ナフタレンやアントラセン誘導体が選択的に生成した。興味深いことにこれらの生成物は強い固体蛍光を示した。



## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 44 件)

- Synthesis of Isochromene and Related Derivatives by Rhodium-Catalyzed Oxidative Coupling of Benzyl and Allyl Alcohols with Alkynes. Morimoto, K.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *J. Org. Chem.* **2011**, *76*, 9548-9551.
- Ruthenium-catalyzed Oxidative Alkenylation of Arenes via Regioselective C-H Bond Cleavage Directed by a Nitrogen-containing Group. Hashimoto, Y.; Ueyama, T.; Fukutani, T.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Chem. Lett.* **2011**, *40*, 1165-1166.
- Palladium-catalyzed Direct Monoarylation of Thiophene-, Benzothiophene-, and Indoleacetic Acids through Regioselective C-H Bond Cleavage. Takeda, D.; Yamashita, M.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Chem. Lett.* **2011**, *40*, 1015-1017.
- Copper-Catalyzed Oxidative Direct Cyclization of *N*-Methylanilines with Electron-Deficient Alkenes Using Molecular Oxygen. Nishino, M.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *J. Org. Chem.* **2011**, *76*, 6447-6451.
- Copper-Mediated Annulative Direct Coupling of *o*-Alkynylphenols with Oxadiazoles: A Dehydrogenative Cascade Construction of Biheteroaryls. Hachiya, H.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Org. Lett.* **2011**, *13*, 3076-3079.
- Rhodium-catalyzed Oxidative Coupling of Benzylamines with Alkynes through Dehydrogenation and Dehydrogenative Cyclization. Morimoto, K.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Chem. Lett.* **2011**, *40*, 600-602.
- Copper-Catalyzed Direct Amination of Electron-Deficient Arenes with Hydroxylamines. Matsuda, N.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Org. Lett.* **2011**, *13*, 2860-2863.
- Rhodium-Catalyzed Regioselective Olefination Directed by a Carboxylic Group, Mochida, S.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *J. Org. Chem.* **2011**, *76*, 3024-3033.
- Copper-Catalyzed Annulative Amination of *ortho*-Alkynylphenols with Hydroxylamines: Synthesis of 3-Aminobenzofurans by Umpolung Amination Strategy. Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Org. Lett.* **2011**, *13*, 2395-2397.
- Synthesis of Highly Substituted Acenes through Rhodium-Catalyzed Oxidative Coupling of Arylboron Reagents with Alkynes. Fukutani, T.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *J. Org. Chem.* **2011**, *76*, 2867-2874.
- Synthesis of 1,4-Diarylbuta-1,3-dienes through Palladium-Catalyzed Decarboxylative Coupling of Unsaturated Carboxylic Acids. Yamashita, M.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Adv. Synth. Catal.* **2011**, *353*, 631-636.
- Direct Carbon-Hydrogen Bond Functionalization of Heterocyclic Compounds. Hirano, K.; Miura, M. *Synlett* **2011**, 294-307.
- Copper-Mediated Intermolecular Direct Biaryl Coupling. Kitahara, M.; Umeda, N.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 2160-2162.
- Ruthenium-Catalyzed Oxidative Vinylation of Heteroarene Carboxylic Acids with

- Alkenes via Regioselective C-H Bond Cleavage. Ueyama, T.; Mochida, S.; Fukutani, T.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Org. Lett.* **2011**, *13*, 706-708.
15. Copper-Catalyzed Direct Sulfoximation of Azoles and Polyfluoroarenes under Ambient Conditions. Miyasaka, M.; Hirano, K.; Satoh, T.; Kowalczyk, R.; Bolm, C.; Miura, M. *Org. Lett.* **2011**, *13*, 359-361.
  16. Rhodium-Catalyzed Oxidative 1:1, 1:2, and 1:4 Coupling Reactions of Phenylazoles with Internal Alkynes through the Regioselective Cleavages of Multiple C-H Bonds. Umeda, N.; Hirano, K.; Satoh, T.; Shibata, N.; Sato, H.; Miura, M. *J. Org. Chem.* **2011**, *76*, 13-24 (Featured Article).
  17. Synthesis of Stilbene and Distyrylbenzene Derivatives through Rhodium-Catalyzed Ortho-Olefination and Decarboxylation of Benzoic Acids. Mochida, S.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Org. Lett.* **2010**, *12*, 5776-5779.
  18. Palladium- and Nickel-Catalyzed Direct Alkylation of Azoles with Unactivated Alkyl Bromides and Chlorides. Yao, T.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Chem. Eur. J.* **2010**, *16*, 12307-12311.
  19. Oxidative Coupling of Aromatic Substrates with Alkynes and Alkenes under Rhodium Catalysis. Satoh, T.; Miura, M. *Chem. Eur. J.* **2010**, *16*, 11212-11222.
  20. Oxidative Nickel-Air Catalysis in C-H Arylation: Direct Cross-Coupling of Azoles with Arylboronic Acids using Air as Sole Oxidant. Hachiya, H.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *ChemCatChem* **2010**, *2*, 1403-1406.
  21. Palladium-Catalyzed Direct Oxidative Alkenylation of Azoles. Miyasaka, M.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *J. Org. Chem.* **2010**, *75*, 5421-5424.
  22. Transition-Metal-Catalyzed Regioselective Arylation and Vinylation of Carboxylic Acids. Satoh, T.; Miura, M. *Synthesis* **2010**, *20*, 3395-3409.
  23. Rhodium-catalyzed Oxidative Coupling/Cyclization of Benzamides with Alkynes via C-H Bond Cleavage. Mochida, S.; Umeda, N.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Chem. Lett.* **2010**, *39*, 744-746.
  24. Nickel-Catalyzed Direct C-H Arylation and Alkenylation of Heteroarenes with Organosilicon Reagents. Hachiya, H.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2010**, *49*, 2202-2205.
  25. Copper-Mediated Direct Cross-Coupling of 1,3,4-Oxadiazoles and Oxazoles with Terminal Alkynes. Kitahara, M.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Chem. Eur. J.* **2010**, *16*, 1772-1775.
  26. Synthesis of  $\alpha,\omega$ -Diarylbutadienes and -Hexatrienes via Decarboxylative Coupling of Cinnamic Acids with Vinyl Bromides under Palladium Catalysis. Yamashita, M.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Org. Lett.* **2010**, *12*, 592-595.
  27. Synthesis of Substituted Stilbenes via Direct Decarboxylative Coupling of Cinnamic Acids with Arylboronic Acids under Palladium Catalysis. Yamashita, M.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Chem. Lett.* **2010**, *39*, 68-69.
  28. Rhodium/Phosphine/Amine-HBr Catalyst System for Highly Selective Cross-Cyclodimerization of Aryl- and Alkylalkynes: Efficient Access to Multisubstituted Naphthalene Derivatives. Sakabe, K.; Tsurugi, H.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Chem. Eur. J.* **2010**, *16*, 445-449.
  29. Synthesis of 2,3-Diarylbenzo[*b*]thiophenes via Nickel-Catalyzed Suzuki-Miyaura Cross-Coupling and Palladium-Catalyzed Decarboxylative Arylation. Miyasaka, M.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Adv. Synth. Catal.* **2009**, *351*, 2683-2688.
  30. Synthesis of Highly Substituted Naphthalene and Anthracene Derivatives by Rhodium-Catalyzed Oxidative Coupling of Arylboronic Acids with Alkynes. Fukutani, T.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Org. Lett.* **2009**, *11*, 5198-5201.
  31. Fused Ring Construction around Pyrrole, Indole, and Related Compounds via Palladium-Catalyzed Oxidative Coupling with Alkynes. Yamashita, M.; Horiguchi, H.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *J. Org. Chem.* **2009**, *74*, 7481-7488.
  32. Nickel-Catalyzed Direct Alkynylation of Azoles with Alkynyl Bromides. Matsuyama, M.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Org. Lett.* **2009**, *11*, 4156-4159.
  33. Rhodium-Catalyzed Mono- and Divinylation of 1-Phenylpyrazoles and Related Compounds via Regioselective C-H Bond Cleavage. Umeda, N.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *J. Org. Chem.* **2009**, *74*, 7094-7099.
  34. Rhodium-catalyzed oxidative coupling of aromatic imines with internal alkynes via regioselective C-H bond cleavage. Fukutani, T.; Umeda, M.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Chem. Commun.* **2009**, 5141-5143.

35. Nickel-Catalyzed C-H Alkenylation and Alkylation of 1,3,4-Oxadiazoles with Alkynes and Styrenes. Mukai, T.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *J. Org. Chem.* **2009**, *74*, 6410-6413.
36. Synthesis of Functionalized  $\alpha$ -Pyrone and Butenolide Derivatives by Rhodium-Catalyzed Oxidative Coupling of Substituted Acrylic Acids with Alkynes and Alkenes. Mochida, S.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *J. Org. Chem.* **2009**, *74*, 6295-6298.
37. Copper-Mediated Direct Arylation of 1,3,4-Oxadiazoles and 1,2,4-Triazoles with Aryl Iodides. Kawano, T.; Yoshizumi, T.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Org. Lett.* **2009**, *11*, 3072-3075.
38. Synthesis of Condensed Heteroaromatic Compounds by Palladium-Catalyzed Oxidative Coupling of Heteroarene Carboxylic Acids with Alkynes. Yamashita, M.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Org. Lett.* **2009**, *11*, 2337-2340.
39. Palladium-Catalyzed Three-Component 1:2:1 Coupling of Aryl Iodides, Alkynes, and Alkenes to Produce 1,3,5-Hexatriene Derivatives. Horiguchi, H.; Hirano, K.; Satoh, T.; Miura, M. *Adv. Synth. Catal.* **2009**, *351*, 1431-1436.
40. Fluorescent Diarylindoles by Palladium-Catalyzed Direct and Decarboxylative Arylations of Carboxyindoles. Miyasaka, M.; Fukushima, A.; Satoh, T.; Hirano, K.; Miura, M. *Chem. Eur. J.* **2009**, *15*, 3674-3677.
41. Synthesis of 2,5-Diaryloxazoles through van Leusen Reaction and Copper-Mediated Direct Arylation. Yosizumi, T.; Satoh, T.; Hirano, K.; Matsuo, D.; Orita, A.; Otera, J.; Miura, M. *Tetrahedron Lett.* **2009**, *50*, 3273-3276.
42. Rhodium-Catalyzed and Coordination-Assisted Regioselective Alkenylation of Aromatic C-H Bonds with Terminal Silylacetylenes. Katagiri, T.; Mukai, T.; Satoh, T.; Hirano, K.; Miura, M. *Chem. Lett.* **2009**, *38*, 118-119.
43. Rhodium-Catalyzed Regioselective Arylation of Phenylazoles and Related Compounds with Arylboron Reagents via C-H Bond Cleavage. Miyamura, S.; Tsurugi, H.; Satoh, T.; Miura, M. *J. Organomet. Chem.* **2008**, *693*, 2438-2422.
44. Ligand Controlled Cross-Dimerization and -Trimerization of Alkynes under Nickel Catalysis. Matsuyama, N.; Tsutugi, H.; Satoh, T.; Miura, M. *Adv. Synth. Catal.*

**2008**, *350*, 2274-2278.

[学会発表] (計 16 件)

1. Copper-Mediated Cross-Coupling via C-H Cleavage. Miura, M. Aachen-Osaka Joint Symposium: Biological and Chemical Approaches to Selective Processes, RWTH Aachen University, Germany, 2011.9.1-2 (口頭発表)
  2. 遷移金属触媒を用いる直接的芳香族カップリングの新展開. 三浦雅博, 第 38 回オルガノメタリックセミナー(触媒学会), 大阪大学, 2010.11.22 (招待講演)
  3. 炭素-水素結合切断を経る触媒的芳香族カップリング. 三浦雅博, 平成 22 年度後期有機合成化学講習会(有機合成化学協会), 東京(日本薬学会会長井記念館), 2010.11.17 (招待講演)
  4. Miura, M., "Catalytic Coupling Directed by Anionic Oxygen Functions via Cleavage of C-H and C-C Bonds", 5<sup>th</sup> Asian-European Symposium on Metal Mediated Efficient Organic Synthesis, Obernai, France, 2008.5.25-28 (招待講演)
- 他 12 件

[図書] (計 2 件)

- (1) sp<sup>2</sup>-炭素-水素結合のアリール化およびアルケニル化, 佐藤哲也, 三浦雅博 (不活性結合・不活性分子の活性化, 化学同人, 2011, pp 50-65).
- (2) Palladium-Catalyzed Direct Arylation Reactions, Miura, M.; Satoh, T. in *Modern Arylation Methods*, Ed. Ackermann, L.: Wiley-VCH, 2009, pp 335-361.

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
三浦 雅博 (MIURA MASAHIRO)  
大阪大学・工学研究科・教授  
研究者番号：20183626
- (2) 連携研究者  
佐藤 哲也 (SATO TETSUYA)  
大阪大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：40273586
- (3) 連携研究者  
平野 康次 (HIRANO KOJI)  
大阪大学・工学研究科・助教  
研究者番号：70532696