

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24245019

研究課題名(和文) 実用化を指向した二酸化炭素固定化反応の高度化

研究課題名(英文) Exploration of Efficient Carbon Dioxide Fixations

研究代表者

岩澤 伸治 (Iwasawa, Nobuharu)

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：40168563

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、二酸化炭素を炭素源として用い炭素-炭素結合を生成しつつカルボン酸誘導体を合成する反応に関し、これまでの研究成果を基盤として、これを有用かつ実用的な反応へと大きく展開、また新たな反応を開発することを目指し研究を行った。その結果、ヒドロカルボキシル化反応、単純芳香族化合物のC-H結合活性化-カルボキシル化反応、ギ酸塩を用いる還元手法、可視光エネルギーを利用する還元手法、新しいカルボキシル化反応の開発等、革新的な研究成果を挙げる事ができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, development of carbon dioxide fixation reactions with carbon-carbon bond formation was extensively studied based on the results obtained in our laboratory. Development of hydrocarboxylation reactions of styrene and electron deficient alkenes, direct C-H bond carboxylation of simple arenes, use of formate salt as a reductant in the hydrocarboxylation reaction, utilization of visible light for the reduction of carboxylate salt to metal hydride or low valent metal for catalytic hydrocarboxylation reaction and caboxylation of aryl halides were achieved by this study. These results would afford new possibilities in carbon dioxide fixation chemistry.

研究分野：有機合成化学

キーワード：二酸化炭素固定化

1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素を遷移金属触媒を用いて固定化する研究は比較的早くから行われてきているが、その多くは野依ら、また最近では野崎らの研究に代表されるように、二酸化炭素を水素を用いて還元しギ酸を得る反応や、田中(晃)らや石谷らの研究に代表されるように電気化学的エネルギーや光エネルギーを利用して金属錯体を活性化しこれを用いて一酸化炭素やメタノールに還元する反応が主要なものであった。これに対し遷移金属触媒を用いて二酸化炭素を有機化合物と反応させ、炭素-炭素結合生成を伴いつつ固定化する反応の開発は比較的少なく、古くはパラジウム触媒を用いるジエンと二酸化炭素との反応によるラクトン合成や、ニッケル(0)錯体の還元力を利用してアルキンやジエンと二酸化炭素との反応によりメタラサイクルを形成し、これと有機金属反応剤との反応により低原子価錯体を再生する反応などに限られており、求核的なカルボキシル化反応を触媒化した例はほとんどなかった。

一方申請者は最近、遷移金属触媒を用いる求核的カルボキシル化反応の開発を行っており、いくつかの新しい形式の反応の開発に成功している。すなわち、ロジウム(I)及び銅(I)触媒を用いるアリール及びアルケニルボロン酸エステルのカルボキシル化反応、新たに設計・合成した *PSiP* ピンサーパラジウム錯体を触媒とするアレン及び1,3-ジエンのヒドロカルボキシル化反応、及びアリールピリジン誘導体の炭素-水素結合の直接カルボキシル化反応である。これらはいずれも遷移金属錯体を触媒として用い、二酸化炭素を炭素-炭素結合生成を伴いつつ固定化した新しい形式の反応として大きな注目を集めた成果である。しかしこれらの反応においては、例えば配位性官能基が必要であるなど、反応基質の適用範囲に制限があり、また触媒再生に化学量論量の金属反応剤が必要で、触媒効率も必ずしも高いものではないなど、多くの問題が未解決のまま残されている。従って、さらにこれら反応を基盤として多様な二酸化炭素固定化反応を開発し、真に優れた実用的な反応を確立することが強く望まれている。また、実際に有用化合物の合成に利用可能な反応へと展開する必要性も大きい。

2. 研究の目的

このような背景を踏まえ本研究では、申請者が最近精力的に行っている、二酸化炭素を炭素源として用い炭素-炭素結合を生成しつつカルボン酸誘導体を合成する反応に関し、これまでに得られた知見を基盤として、これを有用かつ実用的な反応へと大きく展開・確立することを目指し、ヒドロカルボキシル化反応の展開、単純芳香族化合物のC-H結合活性化-カルボキシル化反応の開発、新しい還元手法の開発、新しいカルボキシル化反応の開発等、革新的な研究を多面的に遂行するこ

とを目的とする。

3. 研究の方法

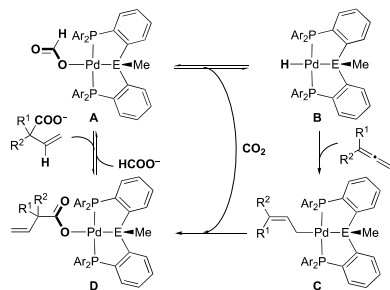
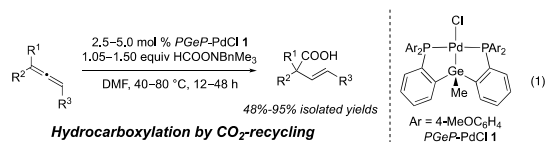
本研究では、1) 入手容易なアルケン、アルキン等の炭化水素類のヒドロカルボキシル化反応、及びその関連反応、ならびにその際に必要となる安価な還元剤の実現、2) 配位性官能基を持たない単純芳香族炭化水素やアルケンの sp^2 炭素-水素結合の直接カルボキシル化反応、3) sp^3 炭素-水素結合の直接カルボキシル化反応、4) 光エネルギーを利用する二酸化炭素固定化反応の実現、等を目指す。そのためのアプローチとして、新たにさまざまな機能性遷移金属錯体を設計・合成し、これを用いて卓越した触媒反応の開発を目指す。

4. 研究成果

1) 入手容易なアルケン、アルキン等の炭化水素類のヒドロカルボキシル化反応、及びその関連反応、ならびにその際に必要となる安価な還元剤の実現：*PSiP*-ピンサーパラジウム錯体を触媒とする不飽和炭化水素のヒドロカルボキシル化反応を基盤として、まず基質の適用範囲の拡大の検討を行った。ピンサー型配位子の中心元素としてケイ素に代わりゲルマニウム、及びスズを持つ配位子、並びにリン原子上に各種アリール基及びアルキル基を持つ配位子、14族元素上の置換基としてメチル基に加えフェニル基を持つものなど、多数の配位子を合成し、そのパラジウム錯体を用いてアルキン、アルケン類を基質とするヒドロカルボキシル化反応の検討を行った。その結果、リン上置換基としてメチル基あるいはエチル基を持つ *PGeP* ピンサー型錯体を用いた場合に、アルキンを基質とするヒドロカルボキシル化が中程度の触媒回転数で進行することを見いだした。また、シクロヘキシル基を持つ *PGeP* ピンサー型錯体を用いると、スチレン誘導体のヒドロカルボキシル化反応が進行することも明らかとなった。

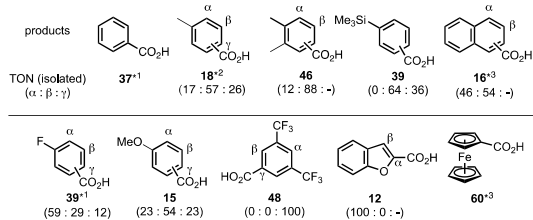
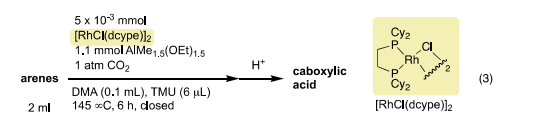
さらにトリエチルアルミニウムに代わる還元剤について広く検討を行った結果、*PGeP*-ピンサー型パラジウム錯体を用いることにより、ギ酸塩をヒドリド源、かつ二酸化炭素源として利用するアレン、およびスチレン誘導体のヒドロカルボキシル化反応の開発に成功した。

すなわち、リン原子上に4-メトキシフェニル基を持つ *PGeP*-ピンサー型パラジウム錯体 **1** に対し、小過剰量 (1.05-1.50 モル量) のギ酸ベンジルトリメチルアンモニウムを添加し DMF 中 40~80 °C で反応を行うことにより、高収率でアレンのヒドロカルボキシル化反応が進行することを見出した (式1)。また、基質としてスチレンを用いる反応についても、リン原子上の置換基としてシクロヘキシル基、あるいはエチル基を持つ錯体を用いることにより、良好な収率で α -フェニル



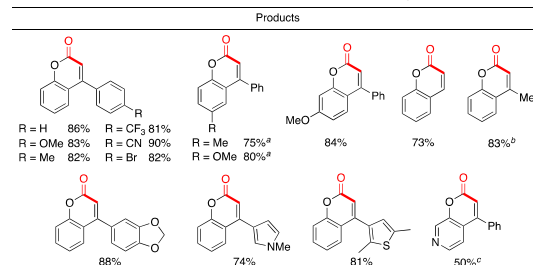
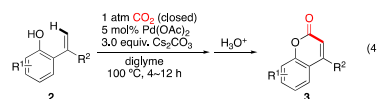
プロピオン酸を得ることに成功した(式2)。この反応では、ギ酸塩からヒドリドパラジウム種が生成するとともに二酸化炭素が放出され、これに対しヒドロメタル化により生成したアリルパラジウム種がカルボキシル化を起こしており、反応系中で触媒量生成する二酸化炭素が効率よく捕捉される優れた反応である。また、本反応はギ酸塩をヒドリド源としてのみならず CO₂ 源としても利用した初めての例である。

2) 配位性官能基を持たない単純芳香族炭化水素やアルケンの sp² 炭素-水素結合の直接カルボキシル化反応: フェニルピリジン誘導体の o 位炭素-水素結合の直接カルボキシル化反応の成果を踏まえ、配向性官能基を持たない単純芳香族化合物を基質として検討を行った。その結果、リン原子上にシクロヘキシル基の置換した二座配位子を持つ [RhCl(dcype)]₂ 錯体 (dcype: (1,2-(ジシクロヘキシルホスフィノ)エタン)) をあらかじめ調製し、二酸化炭素雰囲気下、Me_{1.5}Al(OEt)_{1.5} (NMR により組成を決定) をメチル化剤として用いてジメチルアセトアミド (DMA) 溶媒中、加熱することにより、ベンゼンやトルエンなどの単純芳香族化合物の sp² 炭素-水素結合の直接カルボキシル化反応が良好な触媒回転数で進行することを見いだした。基質としては、さまざまな電子供与性基、求引性基の置換した芳香族化合物、ヘテロ芳香族化合物、さらにはフェロセンなども良好な触媒回転数でカルボキシル化できる(式3)。また、本反応の反応機構に関し詳細な検討を行い、律速段階が炭素-水素結合活性化段階であり、反応溶液中の二酸化炭素濃度が触媒回転数に大きな影響を与えること、また、炭素-水素結合活性化、ならびに二酸化炭素への求核付加の段階の反応活性種は一価ロジウムの三配位 16 電子錯体であることを明らかにした。本反応は、芳香族化合物の不活性な sp² 炭素-水素結合を遷移金属触媒を用いて直接的にカルボキシル化した初めての例であ



る。

また、アルケンの炭素-水素結合を活性化し二酸化炭素と反応させる検討を行った。その結果 2-ヒドロキシシスチレン誘導体を基質とすることにより、アルケン部位の炭素-水素結合を直接カルボキシル化し、有用な合成中間体であるクマリンを得ることに成功した。すなわち基質として 2-ヒドロキシシスチレン 2 を用い、これに対し 1 気圧の二酸化炭素雰囲気下、5 mol% の酢酸パラジウムと塩基として炭酸セシウムを加えジグリム中 100 °C で反応を行った結果、アルケン部位の炭素-水素結合のカルボキシル化に続くラクトン化が進行し、クマリン誘導体 3 が良好な収率で得られることを見出した(式4)。本反応はさまざまな基質に適応可能であり、有用な合成中間体であるさまざまなクマリン誘導体を簡便に得ることができる。



^a7.5 mol% of Pd(OAc)₂ was employed. ^bCyclooctane was used as solvent. ^c10 mol% of Pd(OAc)₂ was employed.

この反応は、遷移金属触媒を用いてアルケン炭素-水素結合の直接的カルボキシル化反応を実現した初めての例である。また、本反応では 2 価のパラジウム錯体を用いることで中心金属の酸化・還元を経ない触媒サイクルを構築しており、高活性な還元的な有機金属反応を用いず、塩基を用いるだけで効率良く反応が進行する。

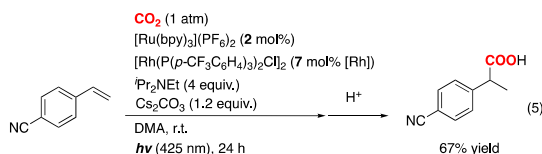
3) sp³ 炭素-水素結合の直接カルボキシル化反応: 2) での成果を受け、配向性官能基を持つメチル基、アルキル基の炭素-水素結合の直接カルボキシル化反応について、さまざまな検討を行ったが、ロジウム触媒-アルミニウム反応剤を組み合わせる反応系で良い結果を得ることができなかった。現在、他の金属の組み合わせについて検討を続けている。

4) 光エネルギーを利用する二酸化炭素固定化反応の実現：フォトドックス触媒と犠牲還元剤としてアミン存在下、Rh(PPh_3)₂(OBz) に対し光照射を行うとヒドリド錯体 RhL(PPh_3)₂(H) が生成することを見いだした。この結果は、実際にロジウム(1)カルボキシラート錯体が多段階の光酸化還元触媒作用によりアミンから二電子・二プロトンを受容してヒドリドロジウム(1)錯体へと変換され得ることを示しており、これを活性種とする新たな光触媒サイクルの構築が可能であることを示す重要な成果である。そこで、基質として4-シアノスチレンを用い、カルボキシル化触媒として[Rh(cod)(OCOPh)₂]₂ 及びトリフェニルホスフィン、光酸化還元触媒として[Ru(bpy)₃](PF₆)₂、犠牲電子供与剤としてジイソプロピルエチルアミンを加え、二酸化炭素雰囲気下、室温で可視光照射すると、低収率ながらヒドロカルボキシル化生成物が水素化物と共に得られることを見出した。そこでこの結果をもとにさまざまな条件下、触媒反応の検討を行った結果、ロジウム上の配位子としてトリフェニルホスフィンに代えトリス(*p*-トリフルオロメチルフェニル)ホスフィンを用い、さらに炭酸セシウムを添加して反応を行うと還元体ならびに重合体の生成が抑えられ収率が大幅に向上することを見出した。現在最適条件として、ロジウム触媒として 3.5 mol% の [RhCl{P(*p*-CF₃C₆H₄)₃}₃]₂ (Rh 金属として 7 mol%)、光酸化還元触媒として 2 mol% [Ru(bpy)₃](PF₆)₂、4 倍モル量のジイソプロピルエチルアミンを電子供与剤として炭酸セシウムを添加して 425 nm の可視光照射を 24 時間行うことで、基質は 70% 転換され、単離収率 67% で目的のヒドロカルボキシル化体を得ることに成功した(式 5)。

基質一般性に関しては、電子求引性基の置換したスチレン誘導体や、電子不足アルケンに対して適用可能であるが、反応の進行が全般に遅く、必ずしも良い収率を得ることに成功していない。今後さらなる効率の向上、各種のアルケン、アルキン等、基質一般性の拡大を目指して検討を行いたい。

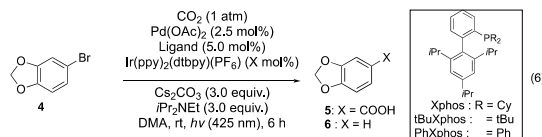
続いて我々は、光酸化還元触媒を用いた還元過程を利用した更なるカルボキシル化反応への展開を考え、Pd 触媒によるハロゲン化アリールのカルボキシル化反応について研究を行った。

臭化アリール 4 に対し、1 気圧の二酸化炭

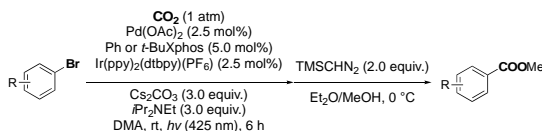


素雰囲気下、2.5 mol% の酢酸パラジウム、Xphos 型の様々な配位子および光酸化還元触媒として 1 mol% の Ir 錯体を用い、*i*Pr₂NEt 存在下、LED ランプを用いて 425 nm の可視光を

照射し反応を試みた結果、配位子に Xphos を用いたところ、目的のカルボン酸 5 を収率 48% で得ることができたが、同時に基質の還元反応が進行した水素化体 6 も 45% 得られることがわかった。続いて添加剤の検討を行った結果、炭酸セシウムを添加することで水素化体の生成が抑制され、リン上の置換基にフェニル基を有する PhXphos を用いることで収率が向上し、さらに Ir 触媒の量を 2.5 mol% まで増やしたところ、カルボン酸 5 を 88% の好収率で得ることに成功した。



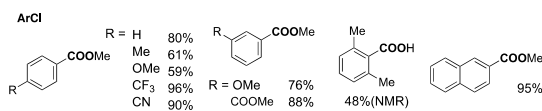
本反応は、アルキル、アルコキシ、ハロゲン、ニトリル、アルキン、アルケンを有する臭化アリール誘導体や、インドール、チオフェンなどのヘテロ芳香環を持つ臭化物を用いても、良好な収率でカルボキシル化体を得ることができる。また、*o*-位に非常にかさ高いイソプロピル基を持つ基質においても 76% 収率でカルボキシル化体が得られた。これは還元過程である電子移動過程が立体障害の影響をほとんど受けずに反応が進行したためと考えている。



R = Alkyl, Alkoxy, Halide	Alkene, Alkyne	EWG (<i>t</i> BuXphos)
H: 85%	TIPS: 85%	CO ₂ Me: 76%
Me: 88%		CN: 76%
OMe: 91%		NHBoc: 77%
CF ₃ : 83%		
F: 96%		
Cl: 90%		

91%
 80%
 67% (*t*BuXphos)
 76%
 R = Boc: 72%
 H: 45%
 72%

続いて、塩化アリール誘導体のカルボキシル化反応について検討を行った。以前、Martin らが報告した Pd 触媒及び還元剤にジエチル亜鉛を用いた反応では、塩化アリールのカルボキシル化反応は進行しなかった。一方、光酸化還元触媒を用いたカルボキシル化反応条件では、反応に用いる配位子を PhXphos から *t*BuXphos へと代えることで様々な官能基を有する塩化アリール誘導体においても収率よくカルボキシル化反応が進行することを見出した。



本反応は従来のハロゲン化アリールのカルボキシル化反応に必須であった化学量論量以上の金属還元剤に代わり、二種の触媒量

の遷移金属錯体、電子供与剤としてアミンを用いて可視光照射するだけでカルボキシル化反応を行うことのできる優れた反応である。

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11件)

1. Kota Sasano, Jun Takaya, Nobuharu Iwasawa, “Palladium(II)-Catalyzed Direct Carboxylation of Alkenyl C-H Bonds with CO₂”, 査読有, *J. Am. Chem. Soc.*, 135(30), 10954-10957 (2013). (DOI:10.1021/ja405503y)
2. Jun Takaya, Nobuharu Iwasawa, Silyl Ligand “Mediated Reversible η^2 -Hydrogen Elimination and Hydrometalation at Palladium”, 査読有, *Chem. Eur. J.*, 20(37), 11812-11819 (2014). (10.1002/chem.201403220)
3. Takuya Suga, Hajime Mizuno, Jun Takaya, Nobuharu Iwasawa, “Direct Carboxylation of Simple Arenes with CO₂ through a Rhodium-Catalyzed C-H Bond Activation”, 査読有, *Chem. Commun.*, 50(92), 14360-14363 (2014). (DOI:10.1039/C4CC06188H)
4. Chuan Zhu, Jun Takaya, Nobuharu Iwasawa, “Use of Formate Salts as a Hydride and a CO₂ Source in PGeP-Palladium Complex-Catalyzed Hydrocarboxylation of Allenes”, 査読有, *Org. Lett.*, 17(7), 1814-1817 (2015). (DOI:10.1021/acs.orglett.5b00692)
5. Takuya Suga, Takanobu Saitou, Jun Takaya, Nobuharu Iwasawa, “Mechanistic Study of the Rhodium-Catalyzed Carboxylation of Simple Aromatic Compounds with Carbon Dioxide”, 査読有, *Chem. Sci.*, 8(2), 1454-1462 (2017). (DOI: 10.1039/c6sc03838g)
6. Kei Murata, Nobutugu Numasawa, Katsuya Shimomaki, Jun Takaya, Nobuharu Iwasawa, “Construction of a Visible Light-Driven Hydrocarboxylation Cycle of Alkenes by the Combined Use of Rh(I) and Photoredox Catalysts”, 査読有, *Chem. Commun.*, 53(21), 3098-3101 (2017). (DOI: 10.1039/C7CC00678K)
7. Chuan Zhu, Ko Miyama, Jun Takaya, Nobuharu Iwasawa, “Metallic Reductant-Free Synthesis of α -Substituted Propionic Acid Derivatives through Hydrocarboxylation of Alkenes with Formate Salt”, 査読有, *Chem. Commun.*, 53(28), 3982-3985 (2017). (DOI: 10.1039/C7CC01377A)
8. Katsuya Shimomaki, Kei Murata, Ruben

Martin, Nobuharu Iwasawa, “Visible Light-Driven Carboxylation of Aryl Halides by the Combined Use of Palladium and Photoredox Catalysts”, 査読有, *J. Am. Chem. Soc.*, 139(28), 9467-9470 (2017). (DOI: 10.1021/jacs.7b04838)

他3編

[学会発表](計53件)

1. Nobuharu Iwasawa, Hajime Mizuno, Takuya Suga, Jun Takaya, “Rhodium Catalyzed Direct Carboxylation Reaction of sp² C-H Bond”, The 16th International Symposium on Relations between Homogeneous and Heterogeneous Catalysis, Sapporo, 2013.8.4-9.
2. Nobuharu Iwasawa, “Rhodium- and Palladium-Catalyzed Direct Carboxylation Reaction of sp² C-H Bond”, The 16th Korea-Japan Seminar on Organic Chemistry, Sendai, 2013.9.27-30.
3. Nobuharu Iwasawa, “Transition Metal-Catalyzed Direct Carboxylation of sp² C-H Bonds”, The 18th IUPAC International Symposium on Organometallic Chemistry Directed Towards Organic Synthesis, Sitges-Barcelona, 2015.6.28-7.2.
4. Nobuharu Iwasawa, “Reductants for Hydrocarboxylation Reactions”, 9th Asian-European Symposium on Metal-Mediated Efficient Organic Synthesis, Stockholm, Sweden, 2016.9.4-7.
5. Nobuharu Iwasawa, “Visible-light Driven Carboxylation Reactions”, 1st Singapore Japan Germany Trilateral Symposium on Precision Synthesis & Catalysis, NTU, Singapore, 2017.11.20-22.
6. 岩澤伸治, 「遷移金属触媒を用いる sp² 炭素-水素結合の直接カルボキシル化反応」, 第26回万有札幌シンポジウム, 札幌, 2014.7.5.
7. 岩澤伸治, 「遷移金属触媒を用いるカルボキシル化反応の開発」, 第11回触媒相模セミナー, 2014.11.13.
8. 岩澤伸治, 「遷移金属触媒を用いるカルボキシル化反応の開発」, 第42回有機金属化学セミナー, 京都, 2015.6.12
9. 岩澤伸治, 「遷移金属錯体触媒を用いた sp² 炭素-水素結合のカルボキシル化反応の開発」, 第48回有機金属若手の会夏の学校、滋賀, 2015.7.13
10. 岩澤伸治, 「CO₂を用いる炭素-水素結合の直接カルボキシル化反応」, 日本化学会第96春季年会特別企画「生命化学研究から見たCO₂資源化：光合成研究と人工光合成の融合を目指して」, 京都, 2016.3.24
11. 岩澤伸治, 「新しい反応活性種創製法の開発」, 有機金属の大潮流, 岡崎, 2016.9.2-3
12. 岩澤伸治, 「遷移金属触媒を用いるカルボキシル化反応の開発」, 有機合成化学ミニ

シンポジウム、千葉、2016.11.14
13. 岩澤伸治、「二酸化炭素固定化反応における還元手法の開発」、日本化学会第97春季年会 特別企画、横浜、2017.3.19
14. 岩澤伸治、「遷移金属触媒を用いた二酸化炭素との炭素-炭素結合形成反応の開発」、第119回触媒討論会 特別シンポジウム、東京、2017.3.22
15. 岩澤伸治、「遷移金属錯体触媒を用いるカルボキシル化反応の開発」、第28回グリーンケミストリーフォーラム、大阪、2017.6.9
16. 岩澤伸治、「PSiP-ピンサー型パラジウム錯体を用いる有機合成反応の開発」、第21回ケイ素化学協会シンポジウム、宮城、2017.10.28
17. 岩澤伸治、「可視光エネルギーを利用するカルボキシル化反応」、日本化学会第98春季年会アドバンスト・テクノロジー・プログラム(ATP)「人工光合成分野における触媒化学的アプローチ」、千葉、2018.3.20
他36件

〔図書〕(計 7件)

1. 鷹谷 絢、岩澤伸治、「遷移金属触媒を用いる二酸化炭素固定化反応」、月刊ファインケミカル、42巻、pp 11-17 (2013).
2. 鷹谷 絢、岩澤伸治、「シリルピンサー型パラジウム錯体を利用する触媒反応開発」、有機合成化学協会誌、Vol. 71, pp 417-424 (2014).
3. Jun Takaya, Nobuharu Iwasawa, "Addition of Carbon Dioxide to Alkenes and Other Unsaturated Hydrocarbons", "Science of Synthesis, C-1 Building Blocks in Organic Synthesis 1", Ed by P. W. N. M. van Leeuwen, pp 281-307 (2014).
4. Jun Takaya, Nobuharu Iwasawa, "Carboxylation of Organometallic Reagents", "Science of Synthesis, C-1 Building Blocks in Organic Synthesis 2", Ed by P. W. N. M. van Leeuwen, pp 263-288 (2014).
5. Jun Takaya, Nobuharu Iwasawa, "Heavier Group 14 Elements-Based Pincer Complexes in Catalytic Synthetic Transformations of Unsaturated Hydrocarbons", in "Pincer and Pincer-Type Complexes: Applications in Organic Synthesis and Catalysis", ed by K. J. Szabo and O. F. Wendt, Chapter 9, pp 229-248 (2014).
6. 岩澤伸治、「遷移金属触媒によるCO₂固定」、化学と工業、Vol. 69, No. 11, pp.951-953 (2016).
7. 岩澤伸治、鷹谷 絢、「遷移金属触媒を用いるカルボキシル化反応の開発」、技術情報協会、「CO₂削減、省エネに関する新技術、採用事例、規制対応」中の1節、pp168-178 (2017).

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

<http://www.chemistry.titech.ac.jp/~iwasawa/index.html>

6. 研究組織

- (1)研究代表者
岩澤 伸治 (IWASAWA, Nobuharu)
東京工業大学・理学院・教授
研究者番号：40168563
- (2)研究分担者
なし
- (3)連携研究者
なし
- (4)研究協力者
なし