

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23350045

研究課題名(和文)複合型活性種の高度制御による新規カルボニル化法の創製

研究課題名(英文) Novel Approaches for Carbonylation by the Cooperative Control of Radical and Metal Species

研究代表者

柳 日馨 (Ryu, Ilhyong)

大阪府立大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80210821

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：活性種複合化による新規カルボニル化法をめざす本研究では以下に示す成果を達成した。光照射下でのパラジウム種とラジカル種が協同する反応系を活用し、 α -ヨード酢酸エステルとオレフィンと一酸化炭素とアルコールからなる4成分連結反応を開発した。さらに、 α -ヨード酢酸エステルとアミンと一酸化炭素との三成分反応により、 β -ケトアミドの合成法を開発した。さらに、ヨウ化アルキル、一酸化炭素、アリールボロン酸の三成分反応によるアルキルアリールケトンの合成法の開発にも成功した。また光照射を用いるポリオキソタングステートによる光C-Hカルボニル化反応やフロー系での有機リチウムのカルボニル化反応の成功例をそれぞれ見出した。

研究成果の概要(英文)：Carbon monoxide is among important feedstock. In this study we have developed new carbonylation methods, which are based on the power of the strategy employing controlled dual species, such as radical and palladium species to achieve new carbonylation methods. Diesters were obtained in good yields by four-component coupling reactions comprising α -iodo esters, alkenes, CO, and alcohols under photo-irradiation conditions in the presence of Pd as a catalyst. Similarly the three-component reaction comprising α -iodo esters, CO, and amines gave good yields of β -keto amides with incorporation of CO. Unsymmetrical ketones, such as alkyl aryl ketones, were synthesized from iodoalkanes, CO and arylboronic acids in good yields. Polyoxodecatungstate anion was used as a photocatalyst to achieve a new type of C-H carbonylation reaction. Flow carbonylation was also examined successfully to affect high-yield trapping of CO by organolithium compounds.

研究分野：有機化学

キーワード：ラジカル カルボニル化 非対称ケトン アシルリチウム C-Hカルボニル化 光照射 パラジウム

1. 研究開始当初の背景

石油資源の枯渇化は昨今の原油価格の高騰につながり、化学製造における炭素資源としての石油供給問題は依然として継続している。一方、一酸化炭素はナフサのみならず潜在的に豊富な石炭を原料にすることが可能な基幹原料であり、これより有機化合物を得るカルボニル化法は工業的な成功例も少なくない。たとえば一酸化炭素と水素からなる合成ガスは工業的にオキソ法において利用されており、またメタノールと一酸化炭素からの触媒的な酢酸合成は、ロジウムやイリジウム触媒による工業化が達成されている。これらはいずれも20世紀における触媒的合成化学の大きな成果といえる。一方、ラジカル種によるカルボニル化反応は30年以上の長きにわたって困難視されていたが、申請者らはその潜在力を洞察するとともに、これを基盤としこれまでに様々なカルボニル化反応の開発を行ってきた。これらの成果には、原子移動型カルボニル化法、極性支配型カルボニル化法などアシラジカルの反応特性を活用した手法が含まれる。一酸化炭素を有機化合物に容易に取り込むことのできる力量あるカルボニル化法の開発は学術的にも工業的にもインパクトが大きいが、カルボニル化法には依然課題が多く残されている。例えば、複数の一酸化炭素の取込反応を効率良く果たした例は多くはなく、マルチ・カルボニル化は、依然として合成化学が挑戦すべき課題となっている。またアルキルハロゲン化物の遷移金属触媒によるカルボニル化には β -脱離や活性種の異性化などの問題があり、その効率的な反応例は大きく限定されている。またアルカンのC-H結合を直接カルボニル化する方法も成功例が限られており、斬新な手法の開発が求められている。本研究ではこのような背景のもと、これまでの研究実績を基盤としつつ、特に異なる活性種が相乗的に協同作用するカルボニル化の反応系に着目しつつ、高効率かつ高選択的な一酸化炭素導入反応を検討し、カルボニル化の化学に関連する、これらの問題解決にあたることとした。また、本研究の推進により、世界を先導する影響力のある研究成果を達成し、C1 化学発展の基盤構築に貢献することを視野に入れることとした。

2. 研究の目的

一酸化炭素は石炭を潜在的な原料にできるC1原料であり、これを有機化合物に力量あるカルボニル化法の開発は学術的にも工業的にもインパクトが大きい。申請者らはこれまで一酸化炭素の有機分子への取り込みを行うカルボニル化法の開発においてラジカル種の活用を中心として先駆的な研究実績を上げてきたが、本研究ではこれまでの一酸化炭素の合成化学における実績を基礎に、特に活性種を限定することなく、最適活性種あるいは融合活性種を用いるという柔軟な戦略により斬新かつ優れたカルボニル化反

応の開発へと導くものとした。とりわけ、ラジカル種と遷移金属種の共同作用系を追求し、これまでになく高効率かつ高選択的な一酸化炭素導入反応を達成することとした。またアニオン種によるカルボニル化反応にも焦点を当て、効率的な反応開発を行なうこととした。さらに、光触媒を用いたC-Hカルボニル化の反応開発も検討課題とした。本研究を推進することで、カルボニル化の化学の刷新が起れば、国際的に影響力のある研究となり、C1 化学発展の基盤構築に資するものとなる。

3. 研究の方法

本研究で成否の鍵を握る点は目的とするカルボニル化変換過程のための活性種を選択と正しい制御手法との組合せの探索研究にある。すなわちラジカル型、遷移金属型、イオン型といった潜在力を有する活性種を単独で扱うのではなく、複数活性種を活用する融合型反応系の検討を行なうことにより、多分子連結型のカルボニル化反応の実現を指向した。また、反応デバイスとしては、ガラス製フラスコやオートクレーブを用いた加圧のバッチ型反応装置と光照射を可能とする石英ガラス窓を有するオートクレーブに加え、拡散効率が格段に優れたマイクロリアクターを活用したマイクロフロー型反応装置での検討も行い効率的かつ迅速な反応系の探索、反応機構の確定を行なうこととした。

パラジウム触媒による芳香族ハロゲン化物のカルボニル化反応においては二分子の一酸化炭素の取込によるジカルボン酸誘導体が主生成物として合成できることが知られてきたが、アルキルハロゲン化物への適用に関しては、パラジウム触媒と光照射を併用することで脂肪族ハロゲン化物のダブルカルボニル化が進行することをこれまでに見出しており^{1,2}、多成分連結型のカルボニル化法や複数の一酸化炭素取込のためのハイブリッド系型戦略の成果獲得のためにこれらの基盤的知見を積極的に活用して行くこととした。すなわちラジカル種と背に金属種による活性種複合系を基軸とした柔軟な戦略を追求することで、高効率な反応系を見出すこととした。

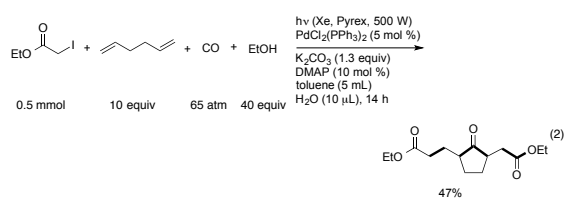
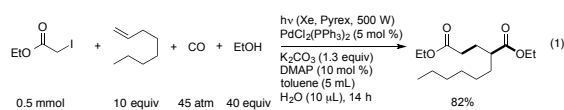
また、これまで有機リチウムに代表されるカルバニオン種と一酸化炭素との反応は古くから知られているが、多くの場合、反応の選択性は担保されない。本研究では、バッチ反応の反応条件の検討を終えた後に、熱効率と拡散効率に格段に優れ、かつ安全性においても優れたマイクロフロー型反応装置を用いての反応検討に移行し、効率的な合成反応への展開を意図した。カルボニル化反応のデバイスによる効果についてはこれまでその重要性はほとんど無視されてきたが、われわれはパラジウム触媒による芳香族ハロゲン化物のダブルカルボニル反応をマイクロ空

間を用いて行ったところ数十気圧に及ぶ顕著な一酸化炭素圧力の低減効果を見出している³。このことから、より理想的な反応空間として、マイクロ空間を用いた反応検討も併せて行う。

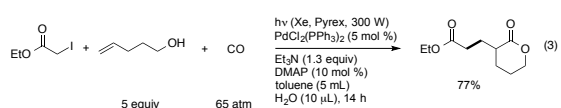
一方で、飽和アルカンを原料とするカルボニル化反応は、工業的な潜在力を含めて極めてインパクトの大きな研究課題である。これまで、われわれは飽和アルコールの一電子酸化条件におけるカルボニル化反応⁴やトリフルオロメチルラジカルの水素引き抜き能力に着目した研究を展開してきたが⁵、これら二つのC-Hカルボニル化反応の問題点は、化学量論量の試薬を用いる点にあった。光照射下においてポリオキソタンゲストート($W_{10}O_{32}^{4-}$)はC-H結合より水素を引き抜く光触媒としてはたらくことが明らかにされており⁶、これを触媒とするケトンの位置選択的なカルボニル化についても検討する。

4. 研究成果

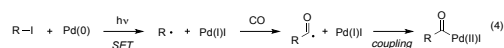
パラジウム触媒とラジカル種が混在するカルボニル化反応系として α -ヨード酢酸エステルとオレフィンと一酸化炭素とアルコールからなる4成分連結反応の検討を行った結果、ジエステル類の簡便合成に成功した。例えば、ヨード酢酸エチル、1-オクテン、エタノール及び一酸化炭素の4成分に対し、 $PdCl_2(PPh_3)_2$ 触媒存在下、キセノンランプ(500 W)による光照射を行ったところ、所望の4成分カップリング生成物が良好な収率で得られることを見出した(式1)。また、1-オクテンに代えて1,5-ヘキサジエンを用いた場合、2分子の一酸化炭素取り込みを経た5成分連結反応が進行した(式2)。別途に調製したパラジウムダイマー錯体の光分解を活用してパラジウムラジカルを発生させて一酸化炭素との反応に供したが、実際に期待したカルボニル化反応が良好に生起する事実を見いだすことが出来た。



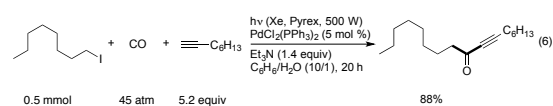
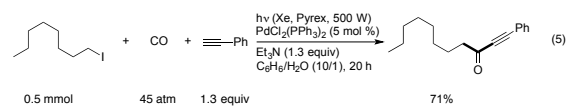
つづいて1-オクテン、エタノールに代えてアルケニルアルコールを用いた反応を検討したが、この場合、分子内環化反応が円滑に進行し、対応するラクトン誘導体が得られることを見出した(式3)。



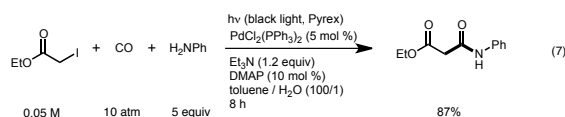
本反応の反応機構に関する知見を得るため種々検討を行った。その結果、(1)アルキルヨウ化物からのアルキルラジカルの(2)アシルラジカルを経たアシルパラジウム中間体の形成を強く示唆する結果を得た(式4)。一方、過去に渡部らにより報告されたPdおよび白金触媒を用いたアルキルヨウ化物のカルボニル化反応においてもラジカル機構の介在が提案されていたが、どの段階でラジカルが関与しているか詳細については確認されていなかった。そこでこれらの反応についても検討を行った結果、同様の反応機構で進行していることが示唆された。発生、



ヨウ化アルキルを用いた遷移金属触媒によるカルボニル化は一般に β -脱離が起るため、効率の良い成功例は稀である。ヨウ化アルキル、一酸化炭素、末端アセチレンを用い、Pd/光照射条件において反応を行った結果、期待した3成分連結反応が進行し、アルキルアルキニルケトンが良好な収率で得られることを見出した(式5)。また末端アセチレンに脂肪族アセチレンを用いた場合においても、その当量を増やすことにより円滑に反応が進行し、高収率で目的物を与えることを見出した(式6)。本反応においてもアルキルラジカルを経由して形成されるアシルパラジウム中間体を経て反応が進行しているものと考えられる。

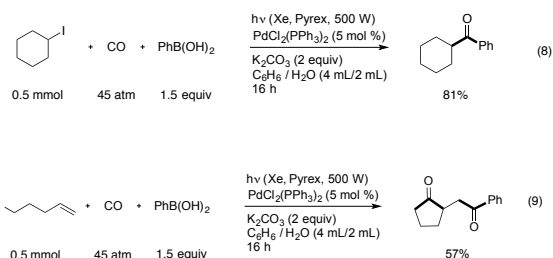


さらに α 位に電子求引性基を有するアルキルヨウ化物、一酸化炭素、アミンを用い、Pd/光照射条件における反応を検討した結果、カルバモイルアセテート誘導体が得られることを見出した(式7)。一般的にアミンとアルキルヨウ化物が存在する場合、アミンの求核攻撃による直接的な置換反応が進行するが、Pd/光照射条件を用いることでこのような副反応の生起を抑制し、所望の3成分連結を円滑に進行させることに成功した。この反応は酢酸エステルラジカルから対応するパラジウム種が得られた後、カルバモイルパラジウム錯体を経て反応が生起したのと考えられる。

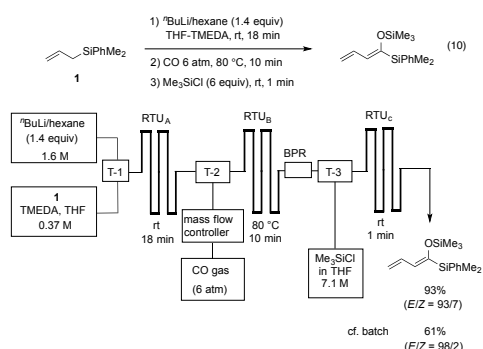


以上のように、容易に調製できるアルキルヨウ化物を出発物質として Pd 触媒と光照射を組み合わせることで、①オレフィンの官能基化を伴う4成分連結によるカルボン酸エステル合成反応や3成分連結によるラクトン環構築反応、②アルキルアルキニルケトン合成反応、③カルバモイルアセテート合成反応といった一酸化炭素を C1 源として用いた多成分連結反応が円滑に進行することを見出した。これらの反応は、ラジカル反応に特徴的な広い官能基許容性を有しているだけではなく、ラジカル連鎖反応を利用することで複数の炭素-炭素（ヘテロ原子）結合形成を効率的に構築することができるため、広範な有機化学的应用が期待できる。

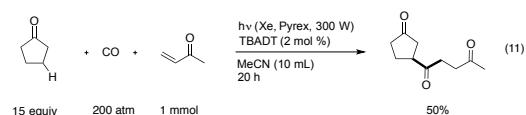
パラジウム/光照射系を用いてヨウ化アルキルとアリールボロン酸を一酸化炭素の共存系で反応させた。その結果、非対称ケトンであるアルキルアリールケトンが良好な収率で得られる事を見出した (式8)。また4-ペンテニルヨードを用いて反応を行なったところ、2位にベンゾイルメチル基を持ったシクロペンタノンが一段で合成可能となった (式9)。この反応では二分子の一酸化炭素がジケトンの二つのカルボニル基として導入された。また反応機構の検討も行なった結果からは、この酸性分反応においても、アシルラジカル種の介在を経て最終鍵活性種となるアシルパラジウム種へと至る経路に合理性があることが示された。



有機リチウム試薬のカルボニル化反応を検討したが、熱効率の良いマイクロリアクターを用いて実験を行なった。 α -シリルアリルリチウムと一酸化炭素との反応は対応するアシルリチウムを第一中間体として与える反応であるが、 α -シリルアリルリチウムが安定なため、一酸化炭素との反応は緩慢である。この反応をマイクロフロー系を用い、加圧 (8 atm)、加熱下 (80°C) で行なったところ、反応は迅速にかつ良好に進行することを見出した (式10)。



さらに本研究ではポリオキソタングステートを光触媒とする C-H カルボニル化を検討した。シクロペンタノンを基質とし検討したところ、中間体として生成するアシルラジカルの捕捉種として電子不足アルケンとともにアゾジエステルが良好に働く事を見いだした。この系を用いてカルボン酸アミドの効率合成法を開発した。またシクロペンタノンをモデルに β 位での位置選択的な C-H 結合の形成にはじめて成功した。これをカルボニル化条件で実施し、 β -アシル化反応の開発を検討した。たとえばシクロペンタノンとメチルビニルケトンを触媒量のテトラブチルアンモニウムを対カチオンとするポリオキソタングステートの存在化に一酸化炭素を加圧し、光照射を行なうと、1,4,7-トリケトンが合成できた (式11)。また β 位での選択性の発現はラジカル極性効果に基づくものであることを考察した。



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 11 件)
すべて査読有り

- (1) Carbonylation in Microflow : Close Encounters of CO and Reactive Species, Fukuyama, T.; Totoki, T.; Ryu, I. *Green Chemistry* 2014, 16, 2042-2050.
DOI : 10.1039/c3gc41789a
- (2) One-pot synthesis of cyanohydrin derivatives from alkyl bromides via incorporation of two one-carbon components by consecutive radical/ionic reactions, Smino, S.; Fusano, A.; Okai, H.; Fukuyama, T.; Ryu, I. *Beilstein J. Org. Chem.* 2014, 10, 150-154.
DOI: 10.3762/bjoc.10.12
- (3) Synthesis of Alkyl Aryl Ketones by Pd/Light Induced Carbonylative Cross-Coupling of Alkyl Iodides and Arylboronic Acids, Sumino, S.; Ui, T.; Ryu, I. *Org. Lett.* 2013, 15, 3142-3145.
(DOI: 10.1021/ol401363t)
- (4) Modernized Low Pressure Carbonylation Methods in Batch and Flow Employing Common Acids as a CO Source, Brancour, C.; Fukuyama, T.; Mukai, Y.; Skrydstrup, T.; Ryu, I. *Org. Lett.* 2013, 15, 2794-2797.
DOI: 10.1021/ol401092a
- (5) Efficient C-H/C-N and C-H/C-CO-N Conversion via Decatungstate-

- Photoinduced Alkylation of Diisopropyl Azodicarboxylate, Ryu, I.; Tani, A.; Fukuyama, T.; Ravelli, D.; Montanaro, S.; Fagnoni, M. *Org. Lett.* **2013**, *15*, 2554-2557.
DOI: 10.1021/ol401061v
- (6) Free-Radical-Mediated [2+2+1] Cycloaddition of Acetylenes, and CO Leading to Five-Membered a,b-Unsaturated Lactams, Fukuyama, T.; Nakashima, N.; Okada, T.; Ryu, I. *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, *135*, 1006-1009.
DOI: 10.1021/ja312654q
- (7) Synthesis of Carbamoylacetate from a-Iodoacetate, CO, and Amines under Pd/Light Combined Conditions, Sumino, S.; Fusano, A.; Fukuyama, T.; Ryu, I. *Synlett* **2012**, *23*, 1331-1334.
DOI: 10.1055/s-0031-1290690
- (8) Pd/Light-Accelerated Atom-Transfer Carbonylation of Alkyl Iodides: Application in Multicomponent Coupling Processes Leading to Functionalized Carboxylic Acid Derivatives, Fusano, A.; Sumino, S.; Nishitani, S.; Inoue, T.; Morimoto, K.; Fukuyama, T.; Ryu, I. *Chem. Eur. J.* **2012**, *18*, 9415-9422.
DOI: 10.1002/chem.201200752
- (9) Rh-Catalyzed [5+1] and [4+1] Cycloaddition Reaction of 1,4-Enyne Esters with CO. Shortcut to Functionalized Resorcinols and Cyclopentenones, Fukuyama, T.; Ohta, Y.; Brancour, C.; Miyagawa, K.; Ryu, I.; Dhimane, A.; Fensterbank, L.; Malacria, M. *Chem. -Eur. J.* **2012**, *18*, 7243-7247.
DOI: 10.1002/chem.201200045
- (10) Synthesis of Carbamoylacetate from a-Iodoacetate, CO, and Amines under Pd/Light Combined Conditions Sumino, S.; Fusano, A.; Fukuyama, T.; Ryu, I. *Synlett* **2012**, *23*, 1331-1334.
DOI: 10.1055/s-0031-1290690
- (11) Iron-catalyzed Decarbonylation Reaction of Aliphatic Carboxylic Acids Leading to α -Olefins, Maetani, S.; Fukuyama, T.; Suzuki, N.; Ishihara, D.; Ryu, I. *Chem. Commun.* **2012**, *48*, 2552- 2554.
DOI: 10.1039/C2CC18093F
- たラジカルカスケード反応」隅野修平・福山高英・笹野美香・柳 日馨・JACQUET Antoine・ROBERT Frédéric・LANDAIS Yannick, 日本化学会第 94 春季年会, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市), 2014.3.27-30 (口頭発表) .
- (2) 「Pd 触媒存在下、 α -ヨードエステル、一酸化炭素、アリールボロン酸からの β -ケトエステル合成」隅野修平・宇井隆人・柳 日馨, 日本化学会第 94 春季年会, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市), 2014.3.27-30 (口頭発表) .
- (3) 「光触媒によるラジカルの C-H/C-C 変換反応における位置選択性」岡田めぐみ・福山高英・柳 日馨, 日本化学会第 94 春季年会, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市), 2014.3.27-30 (口頭発表) .
- (4) 「2-リチオビフェニルのカルボニル化によるフルオレノール合成」福山高英・十時丈典・柳 日馨, 日本化学会第 94 春季年会, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市), 2014.3.27-30 (口頭発表) .
- (5) A Novel Synthesis of Alkyl Aryl Ketones from Alkyl Iodides, CO, and Arylboronic Acids, Shuhei Sumino, Takahito Ui, and Ilhyong Ryu, The 8th International Symposium on Integrated Synthesis (ISIS-8), 東大寺総合文化センター (奈良県・奈良市), 2013.11.29-12.1 (ポスター発表)
- (6) Synthesis of N-Heterocycles by Radical Annulation Approaches, Ilhyong Ryu, The 11th International Symposium on Organic Reactions (ISOR-11), Howard Civil Service International House (Taiwan・Taipei) 2013.11.22 (特別招待講演) .
- (7) Generation and Carbonylation of α -Silyl-Substituted arbanions Using a Continuous Microflow System, Takahide Fukuyama, Takenori Totoki, and Ilhyong Ryu, 10th International Symposium on Carbanion Chemistry (ISCC-10), 同志社大学 (京都府・京都市) 2013.9.23-26 (ポスター発表) .
- (8) Synthesis of Alkyl Aryl Ketones from Alkyl Iodides, Arylboronic Acids and Carbon Monoxide under Pd/Light Conditions, Shuhei Sumino, Takahito Ui, and Ilhyong Ryu, 60th Symposium on Organometallic Chemistry, 学習院大学 (東京都・豊島区), 2013.9.12-14 (ポスター発表) .
- (9) Generation and Carbonylation of Silyl-Substituted Carbanions Using a Flow Microreactor, Takahide Fukuyama, Takenori Totoki, Ilhyong Ryu, 3rd Asia-Pacific Chemical and Biological Microfluidics Conferences,

[学会発表] (計 21 件)

- (1) 「一酸化炭素およびスルホニルオキシムエーテルをダブル C-1 ユニットとし

- COEX (Korea · Seoul), 2013.8.19-22 (ポスター発表) .
- (10) Radical Hydroxymethylation of Alkyl and Aryl Iodides Using NHC-BH₃ and CO, Takuji Kawamoto, Takuma Okada, Dennis P. Curran, Ilhyong Ryu, The 6th Pacific Symposium on Radical Chemistry (PSRC-6), University of British Columbia (Canada · Vancouver), 2013. 6.16-20 (ポスター発表)
- (11) 「アルキリデンシクロプロパンと一酸化炭素と臭化アリルによる三成分連結型ラジカル反応」 吉方孝至・柳 日馨, 日本化学会第93春季年会, 立命館大学 (滋賀県・草津市), 2013.3.22-25 (口頭発表) .
- (12) 「デカタングステート触媒によるケトンとオレフィンの位置選択的 C-C 結合形成反応」 岡田めぐみ・柳 日馨, 日本化学会第93春季年会, 立命館大学 (滋賀県・草津市), 2013.3.22-25 (ポスター発表) .
- (13) 「連続フローマイクロ系によるシリルアリルリチウムの発生とカルボニル化」 福山高英・十時丈典・柳 日馨, 日本化学会第93春季年会, 立命館大学 (滋賀県・草津市), 2013.3.22-25 (口頭発表)
- (14) 「アルキルヨウ素化物と一酸化炭素とアリールボロン酸からのケトン合成」 隅野修平・宇井隆人・柳 日馨, 日本化学会第93春季年会, 立命館大学 (滋賀県・草津市), 2013.3.22-25 (口頭発表) .
- (15) Under Photoirradiation, the Palladium Dimer Complex Having Pd-Pd Bond Mediated Radical Bond Forming Reactions, Shuhei Sumino, Takahide Fukuyama, and Ilhyong Ryu, 59th Symposium on Organometallic Chemistry, 大阪大学(大阪府・吹田市), 2012.9.13-15 (ポスター発表) .
- (16) Multi-Component Coupling Reaction Processes by Pd/Light Accelerated Atom Transfer Carbonylation of Alkyl Iodides, Ilhyong Ryu, 95th Canadian Chemistry Conference and Exhibition, (Canada · Calgary), 2012.05.26-30 (招待講演)
- (17) 「パラジウム/光系におけるアルキルヨウ素化物のカルボニル化反応の機構的考察」, 房野暁・隅野修平・岡田めぐみ・福山高英・柳 日馨, 日本化学会第92春季年会, 慶應義塾大学 (神奈川県・横浜市) , 2012.3.25-28 (口頭発表) .
- (18) Pd/Light Induced Four-Component Coupling Reactions Leading to Functionalized Esters via Vicinal C-Functionalization of Alkenes, Akira Fusano, Shuhei Sumino, Takahide Fukuyama, and Ilhyong Ryu, 5th Pacific Symposium on Radical Chemistry(PSRC-5), Hotel Seamore (Wakayama · Nishimuro-gun), 2011.9.25-28 (ポスター発表) .
- (19) Annulative Three-Component Coupling Reaction Based on Pd/Light-Induced Atom Transfer Carbonylation, Shuhei Sumino, Akira Fusano, Takahide Fukuyama, and Ilhyong Ryu, 5th Pacific Symposium on Radical Chemistry(PSRC-5), Hotel Seamore (Wakayama · Nishimuro-gun), 2011.9.25-28 (ポスター発表) .
- (20) Atom-Economical Synthesis of Unsymmetrical Ketones via Photocatalyzed C-H Activation of Electrophilic Alkenes, Ilhyong Ryu, Akihiro Tani, Takahide Fukuyama, Davide Ravelli, Maurizio Fagnoni, and Angelo Albini, 5th Pacific Symposium on Radical Chemistry(PSRC-5), Hotel Seamore (Wakayama · Nishimuro-gun), 2011.9.25-28 (ポスター発表) .
- (21) Free Radical Mediated Three-Coupling Reaction Comprising Alkynes, Imines, and CO Leading to Five-Membered Unsaturated Lactams, Takuma Okada, Takahide Fukuyama, and Ilhyong Ryu, 5th Pacific Symposium on Radical Chemistry(PSRC-5), Hotel Seamore (Wakayama · Nishimuro-gun), 2011.9.25-28 (ポスター発表) .

6. 研究組織

(1)研究代表者

柳 日馨 (RYU, Ilhyong)

大阪府立大学・理学系研究科・教授

研究者番号：80210821

(2)研究分担者

福山 高英 (FUKUYAMA, Takahide)

大阪府立大学・理学系研究科・准教授

研究者番号：60332962

(3)研究分担者

植田 光洋 (UEDA, Mitsuhiro)

大阪府立大学・理学系研究科・助教

研究者番号：60566298