

令和元年5月8日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26248031

研究課題名(和文)ラジカル活性種の高次制御による革新的分子変換法の開発

研究課題名(英文) Highly Controlled Molecular Conversion by Radical Species

研究代表者

柳 日馨 (Ryu, Ilhyong)

大阪府立大学・研究推進機構・特認教授

研究者番号：80210821

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,300,000円

研究成果の概要(和文)：ラジカル活性種の高次制御により位置選択的な有機合成変換法の開発を行なった。様々な脂肪族基質において位置選択的C-H結合の開裂反応を検討した結果、臭素ラジカルによるメチン選択的なC-H/C-C変換法を開発した。各種の脂肪族カルボニル化合物を反応基質とし、光照射下、デカタングステート触媒による位置選択的C-H/C-C変換法を開発した。極性効果によって結合の弱いカルボニル基の位でのC-H結合開裂が抑制され、複雑な構造を持つ基質では、立体効果の発現を持って位置選択的な反応が生じた。さらに光照射下でのアルキル及びアリールラジカルの発生法を開発し、新しいC-C結合形成ならびに還元手法の開拓を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

C-H結合の開裂はラジカル種により生じるが、その位置選択的な制御は一般に困難とされてきた。実際Barton反応に代表されるエントロピー制御による分子内反応の研究が多く行われている。本研究ではデカタングステートイオンを光触媒とする反応系で、位置選択的なC-H結合開裂反応を見出した。その結果、新しいC-H/C-C変換反応が開発され、ラジカル反応の潜在力に世界の注目を集める契機を与えた。本研究ではラジカル種の発生に光照射や高温加熱系を積極的に活用し研究を進めた結果、ハロゲン化アルキルからのアルキルラジカルの発生やハロゲン化アリールからのアリールラジカルの発生に成功し新しい有機合成方法論を提出した。

研究成果の概要(英文)：Site-selective C(sp³-H) functionalization of was studied by radical reactions. Allylation of alkanes by allylic bromides proceeds site-selectivity at methine C-H bonds, in which bromine radical undergoes site-selective SH₂ reaction. When decatungstate anion was used as a photocatalyst, the synergistic control of the SH₂ transition states of hydrogen abstraction by polar and steric effects was effectively attained, providing a strategy in achieving site-selective C(sp³-H) functionalization. By using this approach, the C-H bonds of alkanes, alcohols, ethers, ketones, amides, esters, nitriles, and pyridylalkanes were functionalized site-selectively. Under photo irradiation conditions, alkyl radicals and aryl radicals were generated from the corresponding alkyl and aryl halides and thus generated radicals were subjected to C-C-bond forming reactions and reduction.

研究分野：有機合成化学

キーワード：位置選択的反応 C-H官能基化 光触媒 ラジカル極性効果 ラジカル立体効果 高熱反応 一電子移動 無触媒カルボニル化

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1993年の村井らによる Ru 触媒を用いた芳香族 C-H / オレフィンカップリングの発見を契機に、遷移金属触媒による芳香族化合物の C-H 結合活性化の化学は大きく進展したが、脂肪族化合物の位置選択的 C-H/C-C 結合変換は依然として困難な研究課題となっている。潜在的に C(sp³)-H 結合の開裂に供する事の出来るラジカル種は少なくないが、位置選択的な C-H/C-C 変換を達成した例は Barton 反応に代表されるエントロピー的に有利な分子内反応に限定されていた。そこで本研究では一般に困難とされてきた分子間反応による位置選択的 C(sp³)-H 結合の解裂とつづく C-C 結合への変換を達成させることを研究課題として設定した。一方、ハロゲン化アルキルやハロゲン化アリールを反応基質として、アルキルラジカルやアリールラジカルなどの炭素ラジカル種を発生させ、合成化学的に活用する手法はラジカル的な有機合成反応の基本となっている。しかし反応手法としては、ラジカル開始剤とラジカル連鎖試薬の併用といった古典的な手法で行われている。それらのラジカル種の効率発生を光照射や高温加熱条件下で簡潔な方法で達成することを検討課題に設定した。これらの挑戦が成就されればラジカル反応の有機合成化学的役割が格段に向上することになる。

2. 研究の目的

有機ラジカル種における基本反応パターンが明らかにされ、その合成化学的活用は大きく広がったが難度の高い課題解決が依然として残されている。位置選択的 C(sp³)-H/C-C 変換は反応活性種を問わず、長きに渡り困難とされて来た研究課題である。ラジカル種の潜在力によりメチル基、メチレン基、メチン基の水素に加え立体および電子環境の異なる水素の自在判別が可能となれば現代合成化学が求める直裁的な方法論に対するラジカル化学によるアプローチの有効性を示すこととなる。本研究の第一目的は、分子間での位置選択的な水素引き抜き反応の検討とそれに基盤を置く C(sp³)-H/C-C 変換反応の達成である。一方、従来より炭素ラジカル種の発生には前駆体としてハロゲン化アルキルやハロゲン化アリールが頻繁に用いられてきたが、ラジカル開始剤に加えてラジカル連鎖反応剤を併用する反応系が一般的である。そこで、これら開始剤や連鎖反応剤の使用を排し、光照射や高温加熱条件下での炭素ラジカルの発生法を詳細に検討し、新たなラジカル反応の基盤を作ることを第二目的とした。

3. 研究の方法

本研究では以下の4項目を検討する。

(1) 臭素ラジカルを基軸とする位置選択的な脂肪族 C-H/C-C 変換法の開発

ハロゲンラジカルによるアルカンからの水素引き抜きは古典的な反応であるが、フッ素ラジカルや塩素ラジカルでは位置選択性は見られない。しかし臭素ラジカルによる C-H からの水素引き抜きは late transition state により、生成ラジカル種の安定性を反映できる。よって位置選択性の発現を伴った C-H/C-C 変換法へと導けるものと期待した。メチル、メチレン、メチン基を併せ持つ様々な脂肪族基質において臭素ラジカルによる位置選択的 C-H 開裂とつづく C-C 結合形成を詳細に検討する。従来、必ずしも明確ではなかった位置選択性の適用範囲を多様な反応基質を試すことで明確化させる。

(2) 光励起されたデカタングステートを触媒とする位置選択的な脂肪族 C-H/C-C 変換法の開発

光照射下に励起され、水素引き抜き能力を持つことが知られているデカタングステートを触媒として用い、極性効果が発現する脂肪族ケトンモデルとし、位置選択的 C-H/C-C 変換過程を達成させる。シアノ基やピリジル基など、他の極性官能基における位置選択性の発現へと研究を展開し反応の一般性を確立する。さらに複数のメチレン基やメチン基の存在する反応基質を用い、立体効果による相乗効果を検証する。

(3) 光/Pd系でのアルキルハロゲン化物による C-C 結合形成反応の開発

Pd-Pd 二核錯体を光照射することで発生させた Pd ラジカル種を発生させ、アルキルハロゲン化物からのハロゲン引き抜きを経るアルキルラジカルの発生を検討する。水素化試薬として Hantzsch エステルを共存させ、Giese 型のラジカル付加反応を達成する。またアルキルハロゲン化物のアルケニル化反応やアリル化反応への展開を行う。

(4) 光照射下、アミン共存系でのアリールハロゲン化物のラジカル反応

アミンを共存させ、光照射下にアリールヨードやブロミドの還元反応を検討する。この反応で中間体と想定しているアリールラジカルの発生を確認する。光照射下ならびに高温加熱下で一酸化炭素とのカルボニル化反応を検討する。これらの反応をアルケニルハロゲン化物についても適用する。フォトレドックス触媒を用いたシリケートのラジカルカルボニル化反応を検討する。

4. 研究成果

(1) 臭素ラジカルを基軸とする C-H 結合の位置選択的官能基化反応

臭素ラジカルによる水素引き抜き反応における位置選択性が発現する反応系の探索とともに、C-H 結合開裂を即座に C-C 結合形成に組み込む反応を検討した。イソオクタンと 2 位にエトキシカルボニル基を有する臭化アリールとのラジカル反応では 5 種類の C-H 結合の内 メチン C-H

での位置選択的なアリル化反応が生じた。2-メチルシクロヘキサンの反応でもメチン C-H でのアリル化が優先したが、メチレン鎖でのアリル化体も一部副生した。臭化アリルの 2 位の置換基をベンゼンスルフォニル基やニトリル基とした場合にも対応するアリル化反応は良好に進行した。一方、臭化ビニルを用いたジオキソランや N-アシルピロリジンの 位選択的な C-H アルケニル化も達成した。

(2) デカタングステートイオンを光触媒とする C-H 結合の位置選択的官能基化反応

デカタングステートアニオンは光励起によって酸素中心ラジカルとして機能する事からこの光触媒系において位置選択的 C-H/C-C 変換反応を試みた。基質としてシクロペンタノンを用いる場合にはカルボニル基の 位は水素引き抜き過程で想定した極性遷移状態においては不利になると予想したが、反応は期待通り 位での位置選択的 C-H 結合開裂を経て C-C 結合形成反応が生じた。3 位のメチル置換シクロペンタノンにおいては、 位にして結合の弱いメチン部位からの選択的水素引き抜き反応が進行し、第 4 級炭素の構築が達成された。さらに位置選択的 C-H/C-C 変換を脂肪族ニトリルにも拡張する事に成功した。研究の進行とともに C-H 結合の開裂における立体化学的要因の重要性が次第に明らかとなったことから複数のメチレン基が存在する中でのメチン基の C-H 結合の位置選択的な炭素-炭素結合形成に加えて、複数のメチン基が存在する系においても一方のメチン基における位置選択的な炭素-炭素結合形成に成功した。また複数のメチレン基が存在する系でも立体効果を発現させることで、一方のみのメチレン基における位置選択的官能基化にも成功した。さらに脂肪族エステル、アミド、カルボン酸についての検討を行い、位置選択的な C-H/C-C 変換反応の創出に成功した。アルキル側鎖を有するピリジン誘導体について検討した結果、アルキル側鎖を有するピリジン誘導体について検討した結果、2-ピリジルアルカンの場合には窒素-炭素ヘテロ結合に基づく極性効果により、ベンジル位での水素引き抜きが回避されることを新たに見出した。3 および 4-ピリジルアルカンを用いた場合にも、アルキル置換基の 位での C-H 結合の開裂は起こらず、遷移状態における極性効果の発現を強く示唆するものとなった。これらの結果は本手法がアルキル側鎖を持つピリジン化合物において側鎖部分の位置選択的な官能基化に有効な手法となることを強く示唆している。また、アルカンと含窒素芳香環との結合を果たす Minisci 反応についても光触媒存在下で検討し、位置選択的な C-H 結合の開裂を伴った反応を見出した。さらに過硫酸カリウムの熱分解条件でもマイクロウエーブ照射により反応が進行する知見も得られた。

(3) 光照射下での Pd 触媒を用いるアルキルヨウ化物のラジカル付加反応

Pd / 光照射系による反応システムを活用し、アルキルヨウ素化合物から一電子移動を経てアルキルラジカル種を発生させ、これに続く炭素-炭素結合形成について検討した。その結果、Pd / 光系で Giese 型反応が、Hantzsch エステルを水素化試薬として用いると良好に進行した。また Pd 錯体の光照射によるホモリシスを経る光制御型反応についてアルキルヨウ素化合物と臭素化アルケニルによるアルケニル化反応に取り組んだが、この場合には Hantzsch エステルをアミンと共に用いることで良好に達成することができた。また、カルボニル化を伴った溝呂木 Heck 型反応も進行し、アルキルアルケニルケトンが良好に得られた。後者では塩基の選択が鍵であり、DBU(ジアザビシクロウンデセン)を用いる条件が最適であった。また Pd 錯体の光照射によるアクリル酸エステルの重合の検討では光照射による重合のスウィッチング挙動を確認した。光照射過程による Pd 錯体を用いたラジカル的な触媒反応プロセスはアルキルヨウ素化合物のアルケニル化とアリル化に共に有効であることを確かめたが、特にアリルスルフォンを用いた反応では、Hantzsch エステルが不要となり、反応系が著しく簡素化できた。さらに、フォトドックス反応系についても検討しジフルオロメチル基の導入方法の開発に成功した。

(4) 光照射下及び高温加熱下でのラジカル発生によるアリールヨウ素化合物による合成反応

アリールヨウ素化合物のアミノカルボニル化反応は Pd 触媒存在下、アリールヨウ素化合物とアミンと一酸化炭素を反応させると進行することが、Heck らにより見出されているが、遷移金属触媒なしでも、光照射下条件を用いれば、アミノカルボニル化反応が良好に生起することを見出した。分子内に水酸基やアミノ基を有する基質を用いてカルボニル化反応を行うと、期待通りにラクトンとラクタムがそれぞれ良好な収率で得られた。また、 α -不飽和型のアルケニルヨウ化物を用いるラジカル反応を高温加熱下で、アミンと一酸化炭素の存在下で行い、 α -不飽和カルボン酸アミドの合成法の開発に成功した。アルキル基を有するシリケート化合物を出発基質とするラジカルカルボニル化をフォトドックス触媒の共存下で初めて達成した。さらに光照射下で発生させたアリールラジカルの水素引き抜き能力に基盤を置いた反応開発として、各種のアミン共存下に芳香族ヨウ化物を光照射下にさらすことで、ホモリシスを生起させ、生成したアリールラジカルの高効率還元成功した。この光還元反応は芳香族プロミド、アルケニルヨウ化物やプロミドにも適用できる。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 28 件)

- (1) Carbonylation of Alkyl Radicals Derived from Organosilicates through Visible-Light Photoredox Catalysis, Cartier, A.; Levernier, E.; Corce, V.; Fukuyama, T.; Dhimane, A.-L.; Ollivier, C.; Ryu, I.; Fensterbank, L. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2019**, 58, 1789-1793. 10.1002/anie.201811858

- (2) Electron Transfer-Induced Reduction of Organic Halides with Amines, Fukuyama, T.; Fujita, Y.; Miyoshi, H.; Ryu, I. Kao, S. -C.; Wu, Y. -K. *Chem. Commun.* **2018**, 5582-5585. 10.1039/C8CC02445F
- (3) Electron-Transfer-Induced Intramolecular Heck Carbonylation Reactions Leading to Benzolactones and Benzolactams, Fukuyama, T.; Bando, T.; Ryu, I. *Synthesis*, **2018**, 3015-3021. 10.1055/s-0037-1609964
- (4) Applications of Radical Carbonylation and Amine Addition Chemistry: 1,4-Hydrogen Transfer of 1-Hydroxylallyl Radicals, Matsubara, H.; Kawamoto, T.; Fukuyama, T.; Ryu, I. *Acc. Chem. Res.* **2018**, *51*, 2023-2035. 10.1021/acs.accounts.8b00278
- (5) A Theoretical Study on Radical-based Aminocarbonylation of Aryl Iodides Kawamoto, T.; Matsubara, H.; Fukuyama, T.; Ryu, I., *Chem. Lett.* **2018**, 1169-1171. 10.1246/cl.180599
- (6) Site-Selective C-H Functionalization by Decatungstate Anion Photocatalysis: Synergistic Control by Polar and Steric Effects Expands the Reaction Scope, Ravelli, D.; Fagnoni, M.; Fukuyama, T. ; Nishikawa, T.; Ryu, I. *ACS Catal.*, **2018**, *8*, 701-713. 10.1021/acscatal.7b03354
- (7) Palladium/Light Induced Radical Alkenylation and Allylation of Alkyl Iodides Using Alkenyl and Allylic Sulfones, Sumino, S.; Uno, M.; Huang, H.-J.; Wu, Y. -K.; Ryu, I. *Org. Lett.* **2018**, *20*, 1078-1081. 10.1021/acs.orglett.7b04050
- (8) Photocatalyzed Site-Selective C(sp³)-H Functionalization of Alkylpyridines at Non-Benzyllic Positions, Fukuyama, T.; Nishikawa, T.; Yamada, K.; Ravelli, D.; Fagnoni, M.; Ryu, I. *Org. Lett.* **2017**, *19*, 6436-6439. 10.1021/acs.orglett.7b03339
- (9) Bromoallylation of Alkenes Leading to 4-Alkenyl Bromides Based on Trapping of β -Bromoalkyl Radicals, Kippo, T.; Hamaoka, K.; Ueda, M.; Fukuyama, T.; Ryu, I. *Org. Lett.* **2017**, *19*, 5198-5200. 10.1021/acs.orglett.7b02471
- (10) Bromine-Radical-Mediated Synthesis of β -Functionalized β,γ - and δ,ϵ -Unsaturated Ketones via C-H Functionalization of Aldehydes, Kippo, T.; Kimura, Y.; Ueda, M.; Fukuyama, T.; Ryu, I. *Synlett.* **2017**, *28*, 1733-1737. 10.1055/s-0036-1588494
- (11) Cooperative Polar/Steric Strategy in Achieving Site-Selective Photocatalyzed C(sp³)-H Functionalization, Yamada, K.; Fukuyama, T.; Fujii, S.; Ravelli, D.; Fagnoni, M.; Ryu, I. *Chem. Eur. J.* **2017**, *23*, 8615-8618. 10.1002/chem.201701865
- (12) Photoredox-Catalyzed Hydrodifluoroalkylation of Alkenes Using Difluorohaloalkyl Compounds and a Hantzsch Ester, Sumino, S.; Uno, M.; Fukuyama, T.; Ryu, I.; Matsuura, M.; Yamamoto, A.; Kishikawa, Y. *J. Org. Chem.* **2017**, *82*, 5469-5474. 10.1021/acs.joc.7b00609
- (13) Versatile Cross-Dehydrogenative Coupling of Heteroaromatics and Hydrogen Donors via Decatungstate Photocatalysis, Quattrini, M. C., Fujii, S., Yamada, K., Fukuyama, T., Ravelli, D., Fagnoni, M., Ryu, I. *Chem. Commun.* **2017**, *53*, 2335-2338. 10.1039/C6CC09725A
- (14) A Palladium/Light System Combined with Hantzsch Ester: Radical Vinylation of Alkyl Iodides with Vinyl Bromides, Sumino, S.; Ryu, I. *Asian J. Org. Chem.*, **2017**, *6*, 410-413. 10.1002/ajoc.201600547
- (15) Flow Update for a Cossy Photocyclization, Fukuyama, T., Fujita, Y., Rashid, M. A., Ryu, I. *Org. Lett.* **2016**, *18*, 5444-5446. 10.1021/acs.orglett.6b02727
- (16) Synthesis of 2,3-Disubstituted Indenones by Cobalt-Catalyzed [3+2] Annulation of *o*-Methoxycarbonylphenylboronic Acid with Alkynes, Ueda, M.; Ueno, T.; Suyama, Y.; Ryu, I. *Chem. Commun.* **2016**, *52*, 13237-13240. 10.1039/C6CC08032D
- (17) Radical Bromoallylation of Alkynes Leading to 1-Bromo-1,4-dienes, Kippo, T., Hamaoka, K., Ueda, M., Fukuyama, T., Ryu, I. *Tetrahedron*, **2016**, *72*, 7866-7874. 10.1016/j.tet.2016.05.084
- (18) Carbonylative Mizoroki-Heck Reaction of Alkyl Iodides with Arylalkenes Using a Pd/Photoirradiation System, Sumino, S.; Ui, T.; Hamada, Y.; Fukuyama, T.; Ryu, I. *Org. Lett.* **2015**, *17*, 4952-4955. 10.1021/acs.orglett.5b02302
- (19) Hydroalkylation of Alkenes Using Alkyl Iodides and Hantzsch Ester under Palladium/Light System, Sumino, S.; Ryu, I. *Org. Lett.* **2015**, *17*, 52-55. 10.1021/acs.orglett.5b03238
- (20) Palladium-Catalyzed Carbonylative Couplings of Vinylogous Enolates: Application to Statin Structures, Makarov, I. S.; Kuwahara, T.; Jusseau, X.; Ryu, I.; Lindhardt, A. T.; Skrydstrup, T. *J. Am. Chem. Soc.*, **2015**, *137*, 14043-14046. 10.1021/jacs.5b09342
- (21) Coupling-Reagent-Free Synthesis of Dipeptides and Tripeptide Using Amino Acid Ionic Liquids, Furukawa, S.; Fukuyama, T.; Matsui, A.; Kuratsu, M.; Nakaya, R.; Ineyama, T.; Ueda, H.; Ryu, I. *Chem. Eur. J.* **2015**, *21*, 11980-11983. 10.1002/chem.201501783

- (22) Photocatalyzed Site-Selective C-H to C-C Conversion of Aliphatic Nitriles Yamada, K.; Okada, M.; Fukuyama, T.; Ravelli, D.; Fagnoni, M.; Ryu, I., *Org. Lett.* **2015**, *17*, 1292-1295. 10.1021/acs.orglett.5b00282
- (23) Sunlight Photocatalyzed Regioselective β -Alkylation and Acylation of Cyclopentanones, Okada, M.; Fukuyama, T.; Yamada, K.; Ryu, I.; Ravelli, D.; Fagnoni, M. *Chem. Sci.* **2014**, *5*, 2893-2898. 10.1039/C4SC01072H
- (24) Revisiting the Bromination of C-H Bonds with Molecular Bromine by Using a Photo-Microflow System, Manabe, Y.; Kitawaki, Y.; Nagasaki, M.; Fukase, K.; Matsubara, H.; Hino, Y.; Fukuyama, T.; Ryu, I. *Chem. Eur. J.* **2014**, *20*, 12750-12753. 10.1002/chem.201402303
- (25) Radical Vinylation of Dioxolanes and N-Acylpyrrolidines Using Vinyl Bromides, Kippo, T.; Kimura, Y.; Maeda, A.; Matsubara, H.; Fukuyama, T.; Ryu, I., *Org. Chem. Front.* **2014**, *1*, 755-758. 10.1039/C4QO00138A
- (26) Radical Reactions of Borohydrides, Kawamoto, T.; Ryu, I. *Org. Biomol. Chem.* **2014**, *12*, 9733-9842. 10.1039/C4OB01784F
- (27) Cyanoborohydride-Promoted Radical Arylation of Benzene, Kawamoto, T.; Sato, A.; Ryu, I. *Org. Lett.* **2014**, *16*, 2111-2113. 10.1021/ol500614q
- (28) A Bromine-Radical Mediated Three-Component Reaction Comprising Allenes, Electron-Deficient Alkenes and Allyl Bromides: Facile Synthesis of 2-Bromo-1,7-Dienes, Kippo, T.; Ryu, I. *Chem. Commun.* **2014**, *50*, 5993-5996. 10.1039/C4CC01597E

〔学会発表〕(計 28 件)

- 1) 上川 和也, ペルオキシ二硫酸塩を用いた環状ケトンの位置選択的 C-H ビニル化反応, 日本化学会第 99 春季年会, 2019 年, 甲南大学
- 2) 板東 孝信, 遷移金属触媒非存在下におけるビニルヨウ素化物のアミノカルボニル化反応, 日本化学会第 99 春季年会, 2019 年, 甲南大学
- 3) 嶽肩 亜季, フロー系でのアルキンの光ラジカルプロモアリル化反応, 日本化学会第 99 春季年会, 2019 年, 甲南大学
- 4) 柳 日馨, Recent Advances in Site-Selective C-H Functionalization by Radical, 三井化学触媒科学セミナー, 日本化学会 Festa, 2018 年, 東京
- 5) 柳 日馨, Recent Advances in Radical-Based Site-Selective C(sp³)-H Functionalization, The 13th International Symposium on Organic Reactions (ISOR-13), 2018 年, 新竹、台湾
- 6) 柳 日馨, Recent Advances in Site-Selective C(sp³)-H Functionalization by Radicals, EUACHEM Conference on Radical Reaction, 2018 年, Marseille, France
- 7) 柳 日馨, 3rd International Symposium on Organic Chemistry GDUT, 2018 年, Guangzhou, China
- 8) 森崎雄大, 原子移動型ラジカル反応を利用した極性官能基含有第二級アルキルホウ素化合物の合成, 日本化学会第 98 春季年会, 2018 年, 日本大学
- 9) 坂本夏蓮, Decatungstate 光触媒を用いたエステル類の位置選択的 C-H アルキル化反応, 日本化学会第 98 春季年会, 2018 年, 日本大学
- 10) 柳 日馨, Synergistic Polar/Steric Strategy in Achieving Site-Selective C(sp³)-H Functionalization of Cyclic Ketones and Lactones by Radicals, 8th Pacific Symposium on Radical Chemistry, 2017 年, Brisbane, Australia
- 11) 柳 日馨, A Synergistic Polar/Steric Strategy in Achieving Site-selective C(sp³)-H Functionalization by Radicals, The 1st National Symposium on Radical Chemistry, Soochow University, 2017 年, 蘇州, 中国
- 12) 柳 日馨, Cooperative Radical/Polar Annulation Approach to Nitrogen-Heterocycles ISHC-26, 2017 年, Regensburg, Germany
- 13) 西川智大, Non-Benzyl C(sp³)-H Functionalization of Alkylpyridines Using TBADT as Photocatalyst, The 11th International Symposium on Integrated Synthesis, 2017 年, 淡路
- 14) 西川智大, TBADT 光触媒存在下、ピリジールアルカンの電子欠損オレフィンによる位置選択的な C-H アルキル化反応, 日本化学会第 97 春季年会, 神奈川
- 15) 柳 日馨, Aryl Radical Carbonylation Induced by Photo-irradiation The 12th International Symposium on Organic Reactions (ISOR-12), 2016 年, 京都
- 16) 柳 日馨, Recent Advances in Flow Catalysis 14th International Conference on Micro Reaction Technology (IMRET14), 2016 年, 北京
- 17) 柳 日馨, Palladium/Light Induced Vinylation of Iodoalkanes, The 12th International Symposium on Organic Free Radicals (ISOFR12), 2016 年, 上海

- 18) 柳 日馨, Site-selective Conversion of sp³ C-H Bond to C-C Bond by Photo-catalyst, The 10th International Symposium on Integrated Synthesis (ISONIS-10), 2016 年, 淡路
- 19) 山田圭一, 極性効果と立体効果によって制御する位置選択的ラジカル C-H/C-C 変換反応, 日本化学会, 第 96 春季年会, 2016 年, 同志社大学
- 20) 藤井 沙紀, Photocatalyzed C-H Arylation of Alkanes with Heterocycles, 日本化学会 第 96 春季年会, 2016 年, 同志社大学
- 21) 隅野周平, Palladium/Light Combined System for Cross-coupling Reaction of Alkyl Iodides with Vinyl and Allyl Sulfones, 日本化学会第 96 春季年会, 2016 年, 同志社大
- 22) 福山高英, Rhodium-Catalyzed Intermolecular Reaction of 1-Naphtoeic Acids with Internal Alkynes Leading to Perinaphthenones, OMCOS, 2015 年, Barcelona, Spain
- 23) 柳 日馨, Free Radical-Based Site-Selective C-H to C-C Conversion, Pacificchem 2015, 2015 年, Honolulu, USA
- 24) 柳 日馨, The Use of Gas-Permeable PTFE Tube for Flow Carbonylation with ex-situ Generated Carbon Monoxide, 21st ISFC & ISOFT ' 15, 2015 年, Como, Italy
- 25) 柳 日馨, Novel C-C Bond Forming Reactions Induced by Photo-Irradiation, 7th Pacific Symposium on Radical Chemistry (PSRC-7), 2015 年, Singapore
- 26) 柳 日馨, ラジカル活性種の反応特性を基盤とする多成分系連結反応の開発, 平成 26 年度有機合成化学協会賞受賞講演会, 2015 年, 東京
- 27) 柳 日馨, Recent Advances in Radical Carbonylations, Max Malacria Symposium, 2014 年, Paris, France
- 28) 柳 日馨, Multicomponent Radical Reactions, EUCHEM Conference on Organic Free Radicals, 2014 年, Prague, Czech Republic

〔図書〕(計 1 件)

柳 日馨, 丸善出版, 有機ラジカル反応の基礎-その理解と考え方, 2015 年, 149 ページ
ISBN978-4-621-08923-1

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.c.s.osakafu-u.ac.jp/~ryu/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 福山高英

ローマ字氏名: Fukuyama Takahide

所属研究機関名: 大阪府立大学

部局名: 理学系研究科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 60332962

研究分担者氏名: 植田光洋

ローマ字氏名: Ueda Mitsuhiro

所属研究機関名: 大阪府立大学

部局名: 理学系研究科

職名: 講師

研究者番号(8桁): 60566298

(2) 研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。