

令和 5 年 5 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02685

研究課題名(和文)素粒子ミュオンによる高エネルギー開殻分子構造の創出と新規スピン機能ユニットの開拓

研究課題名(英文) Developing open-shell molecular structures of high-energy and novel spin-functional unit by use of elementary particle muons

研究代表者

伊藤 繁和 (Ito, Shigekazu)

東京工業大学・物質理工学院・准教授

研究者番号：00312538

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、プロトン加速器から得られるミュオンが電子を捕獲して生成するミュオニウム(Mu)を活用して、通常の化学的手法では得られない常磁性種の創成を目的とした。まず、リン複素環一重項ピラジカルにMuが付加して対応するラジカルが生成することを明確に観測し、その位置選択性がピラジカルの電子状態や結晶構造に依存することを明らかにした。次に、アントラセンのリン類縁体への位置選択的Mu付加を見出し、ミュオンの軽同位体効果によって準安定な共役電子系が形成されることを突き止めた。一方で、Mu付加によるイミドイルラジカル生成を初めて観測し、さらに高周期カルボニルから特異な開殻パイ共役系構造をつくり出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、有機合成化学とミュオンをうまく組み合わせることによって前例のない開殻分子構造を創り出せることを明確に証明した。ミュオンの高エネルギー状態は、通常では不安定で生成できない開殻共役系分子構造などを与えるだけでなく、分子の物性に強く関連した情報も得られる。空間的にも時間的にも分子創成の可能性を飛躍的に向上させることが可能となり、前衛的な物質科学の展開がこれから大いに期待される。

研究成果の概要(英文)：In this project, we attempted generating unusual paramagnetic species by utilizing muoniums which were formed from muon and electron. Muons are produced by proton accelerators, and the muonium can provide novel molecular structures that cannot be prepared by usual chemical methods. At first, we confirmed addition of muonium to the phosphorus heterocycles of singlet biradicals suggesting that the regioselectivity would remarkably correlate with the electronic properties and the crystal structures. Next, we characterized the regioselective muonation to the phosphorus analog of anthracene together with the unprecedented quasi-stable conjugated system which was induced by the muon isotope effect. In addition, we succeeded in observing an imidoyl radical by using muonium first time, and produced particular paramagnetic pi-conjugated structures from the heavier carbonyl compounds.

研究分野：有機化学

キーワード：ラジカル 素粒子 ミュオン ミュオニウム 有機合成化学 複素環

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、シクロブタン-1,3-ジイルのリン類縁体のひとつである 1,3-ジホスファシクロブタン-2,4-ジイルの開殻一重項状態が示す半導体特性などの機能性の起源を詳細に知るための検討を行っていた。その過程で、プロトン加速器が供する高エネルギープロトンビームから得られる素粒子ミュオンに着目した。ミュオンは有機化合物のなかで電子を捕獲して軽い水素元素に相当するミュオニウムとなる。このミュオニウムの高い反応性を利用すれば、通常の化学的手法では不可能であった、1,3-ジホスファシクロブタン-2,4-ジイルのラジカル反応解析が可能になると考えた。実際に、p 型半導体特性と大気中極めて高い安定性を示す誘導体を用いてミュオン準位交差共鳴 (mu-LCR) 実験を行うと、4 員環骨格の電気陽性のリン原子にミュオニウムが付加し、リンイリド構造をもつ高エネルギーの常磁性分子が生成することを明らかにした。この知見を踏まえて研究代表者は、ミュオンを使うことによって通常の化学的手法では生成させることのできない常磁性分子をつくり出すことができると確信した。またさらに、生成した常磁性分子の構造をもとにすれば、様々な機能性を示すラジカル分子の設計開発にも展開可能と考えた。研究開始当初には、多種類の 1,3-ジホスファシクロブタン-2,4-ジイル誘導体だけでなく、アントラセンのリン類縁体やジフルオロメチル置換環状ホウ素化合物などの興味深い複素環化合物を所有していたことから、これらをミュオンスピン回転・共鳴 (muSR) 実験に持ち込んで、ミュオニウム付加による新たな常磁性分子をつくり出す試みに着手することとした。

2. 研究の目的

本研究では、軽いプロトンに相当するミュオンが電子を捕獲して生成するミュオニウムを水素原子の軽同位体として活用し、リン複素環ピラジカルである 1,3-ジホスファシクロブタン-2,4-ジイルのラジカル反応に関する解析の完了を達成しつつ、アントラセンのような縮環芳香族化合物の高周期類縁体やジフルオロメチル置換環状ホウ素化合物を主な研究対象としてそのミュオニウム付加体の観測を muSR によって行い、生成する常磁性化学種の構造同定を目的とした。さらに、常磁性のミュオニウム付加体について得られた情報をもとに、機能性を示す物質開発を志向した試みに展開することを目指した。

3. 研究の方法

まず、大気中で極めて安定で、高い電子供与性を示す 1,3-ジホスファシクロブタン-2,4-ジイルの muLCR を実施し、さらに、電子求引性の大きな窒素複素環置換基を直接連結することでバンドギャップを小さくした 1,3-ジホスファシクロブタン-2,4-ジイル誘導体を用いて横磁場ミュオンスピン回転 (TF-muSR) 実験を試み、観測されたミュオン超微細結合定数 (hfc) をもとに生成する常磁性ミュオニウム付加体の同定を、DFT 計算を活用して行った。続いて、アントラセンの 9 位 sp^2 炭素をリンで置き換えた 9-ホスファアントラセンの溶液試料を用いて TF-muSR と muLCR 測定実験を行い、ミュオン hfc のほかに核スピンの hfc も観測し、DFT 計算を活用して生成するミュオニウム付加体の同定を試みた。なお、ジフルオロメチル置換ホウ素化合物についても muSR を試みたが、結果的にミュオニウム付加体の観測は困難であった。muSR 実験では TRIUMF サイクロトロン施設の直流状 (DC) ビームを利用し、TF-muSR と muLCR 測定が可能な Helios 分光計を用いたが、そのほかに LAMPF スペクトロメーターも活用した。

また、本研究では、新たな常磁性有機ラジカル構造の創成を志向して、ラジカル反応性のたかいチオカルボニル化合物のミュオニウム付加反応に着目した検討に新たに着手した。まず、新規なチオホルムアミドを合成して構造同定を行ったのちに TF-muSR と muLCR 測定実験を行った。また、比較的ミュオン hfc が小さいと予想されたチオケトンについても検討を試みた。この場合には、J-PARC シンクロトロン施設の高エネルギーパルス状ビームをも活用した。

4. 研究成果

- i) 半導体特性を示す電子供与性 1,3-ジホスファシクロブタン-2,4-ジイルの固体を用いた muLCR では、ミュオニウムが電気陽性のリン原子に位置選択的に付加して、分子内にリンイリド構造を含む常磁性複素環分子が生成する。この反応過程は速度論的支配で、活性化エネルギーの小さい経路が優先されることが示唆された。これに対して、電子供与性ではあるが半導体特性を示さない 1,3-ジホスファシクロブタン-2,4-ジイルの固体では、ミュオニウム付加は観測されなかった。先に示した半導体特性を示す誘導体の場合とは結晶構造が明らかに異なっていることから、ミュオニウム付加の効率と結晶構造に相関がある可能性を見出した。
- ii) 電子求引性の大きな窒素複素環置換基を直接導入したタイプの 1,3-ジホスファシクロブタン-2,4-ジイルを用いて TF-muSR を実施したところ、先に示したリン上へのミュオニウム付加体

ではなく、熱力学的に安定な構造である、ラジカル炭素中心とミュオニウムがカップリングした複素環ラジカルが二種類の立体異性体として生成することを確認した。この位置選択性の変化は、電子求引性置換基によってバンドギャップが小さくなり、一重項基底状態と三重項状態のエネルギー差が縮小していることと相関していることが予想される。

iii) 9-ホスファントラセンの溶液試料を用いた TF-muSR と muLCR 測定で決定したミュオン hfc とリン 31 核 hfc は、9-ホスファントラセンのミュオニウム付加体が一種類生成していることを示した。本質的に反応性の高い P=C 不飽和結合をも考慮して、分子内のリン原子に選択的にミュオニウムが付加していることを定性的に決定した。その一方で、DFT 計算によって得られた最安定構造が示す hfc パラメーターは実験値と著しく異なっていた。これは、ミュオンの軽い質量に由来する大きなゼロ点エネルギーを反映しているが、従来行われていた構造補正では全く説明できなかったため、新たな軽同位体効果による構造変化を考慮する必要が生じた。そこで数多くの DFT 計算を実施しながら試行錯誤を繰り返し、最終的に、9-ホスファントラセンの平面性が保持されたままの準安定構造が形成されていることを突き止めた。

iv) かさ高いアリアル基を導入して新規に合成したチオホルムアミドの TF-muSR と muLCR 測定を実施した。以前のチオアミドの muSR 研究では、実験で大きなミュオン hfc が観測されたことから、ミュオニウムが C=S チオカルボニルの炭素に付加して硫黄中心ラジカルが生成していると直観的に帰属されていたが、その後の理論計算では C=S の硫黄にミュオニウムが付加して炭素中心ラジカルであるはずと報告されており、実験と理論で食い違いが生じていた。今回の実験および DFT 計算を活用した muSR 研究では、ミュオニウムがチオアミドの硫黄に付加したラジカルであることを強く示す結果が得られた。一方で、溶液状態と固体状態では生成するミュオニウム付加体の構造が顕著に変化している可能性が示唆されたことから、前例のないミュオン同位体効果の可能性が考えられる。また、ラジカル重合に有用と期待されるチオケトンの muSR を行ったところ、C=S の硫黄にミュオニウムが付加した構造が分子内のヘテロ原子の効果によってその構造が大きく変化することを明らかにした。この構造変化については精密な非経験的量子化学計算によってミュオン同位体効果の解析を試み、定性的ではあるが同位体効果を非経験的に解析することが可能であることを見出した。

以上述べたように、本研究では、研究代表者がこれまで創出してきた開殻一重項リン複素環分子や縮環芳香族分子のリン類縁体を用いた muSR によって、ミュオンの軽同位体効果が前例のない開殻分子構造をつくり出せることを見出した。また、チオカルボニル化合物の新規な muSR 研究に着手し、ミュオン同位体効果がもたらす新たな分子構造変化を明らかにした。ミュオンを用いることで、通常の化学的手法ではつくり出すことのできない様々な準安定状態の開殻分子を得ることができる。これは、ミュオンによって新たな機能性を生み出せることにつながることを示唆していると言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kato Miki, Ueta Yasuhiro, Ito Shigekazu	4. 巻 27
2. 論文標題 Gold(I) Complexation of Phosphanoxy Substituted Phosphaalkenes for Activation Free LAuCl Catalysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemistry - A European Journal	6. 最初と最後の頁 2469 ~ 2475
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.202004281	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hara Shunya, Ito Shigekazu	4. 巻 10
2. 論文標題 TiCl4 Mediated [2+2] Cycloaddition for Synthesis of Isolable CF3 Substituted 2 Azetines	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Asian Journal of Organic Chemistry	6. 最初と最後の頁 788 ~ 792
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ajoc.202100082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Koshino Kota, Kojima Kenji M., McKenzie Iain, Ito Shigekazu	4. 巻 60
2. 論文標題 Muonium Addition to a peri Trifluoromethylated 9 Phosphaanthracene Producing a High Energy Paramagnetic Conjugated Fused Heterocycle	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 24034 ~ 24038
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202109784	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ito Shigekazu, Akama Hikaru, Ueta Yasuhiro, McKenzie Iain, Kojima Kenji M.	4. 巻 94
2. 論文標題 Muonium Addition to the Radicalic Carbon in 1,3-Diphosphacyclobutane-2,4-diyl	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bulletin of the Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 2970 ~ 2972
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20210352	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Ohtsuki, H. T. G. Walsgrove, Y. Hayashi, S. Kawachi, B. O. Patrick, D. P. Gates, S. Ito	4. 巻 56
2. 論文標題 Diels-Alder reactions of 1-phosphabutadienes: a highly selective route to P=C-substituted phosphacyclohexenes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chem. Commun.	6. 最初と最後の頁 774-777
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9CC08997G	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Ueta, S. Ito	4. 巻 85
2. 論文標題 Scalable Orbital Tuning of the 1,3-Diphosphacyclobutane-2,4-diyl Unit of Singlet Biradicaloid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Org. Chem.	6. 最初と最後の頁 14384-14390
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.joc.0c00512	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A. Yokawa, S. Ito	4. 巻 15
2. 論文標題 Convenient Preparation and Structure Determination of Air- and Moisture-Tolerant Difluoromethylborates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chem. Asian J.	6. 最初と最後の頁 3432-3436
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asia.202000854	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 伊藤繁和	4. 巻 77
2. 論文標題 素粒子を用いる有機分子の反応解析：開殻一重項複素環化合物のミュオンスピン分光研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 有機合成化学協会誌	6. 最初と最後の頁 800-812
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5059/yukigoseikyokaisi.77.800	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomokazu Shinozaki, Alfredo Rosas Sanchez, Daisuke Hashizume, Shigekazu Ito	4. 巻 84
2. 論文標題 Incomplete Electrocyclization of a Sterically Hindered 1,4 Diphosphabutadiene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ChemPlusChem	6. 最初と最後の頁 1761-1766
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cplu.201900632	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shigekazu Ito, Naoto Kato, Yasuhiro Ueta, Koichi Mikami, Kenji M. Kojima	4. 巻 194
2. 論文標題 Muon spin rotation (muSR) study of a sterically encumbered thioaldehyde	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phosphorus, Sulfur, and Silicon, and the Related Elements	6. 最初と最後の頁 735-738
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/10426507.2019.1603719	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kohei Fujii, Shigekazu Ito, Koichi Mikami	4. 巻 84
2. 論文標題 Synthetic Methodologies for Perfluoroaryl-Substituted (Diaryl)methylphosphonates, -Phosphinates via SNAr Reaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Org. Chem.	6. 最初と最後の頁 12281-12291
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.joc.9b01402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kohei Fujii, Haruki Todani, Shigekazu Ito, Koichi Mikami	4. 巻 21
2. 論文標題 Design of Phosphinic Acid Catalysts with the Closest Stereogenicity at the -Position: Synthesis and Application of -Stereogenic Perfluoroalkyl Phosphinic Acid Catalysts	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Org. Lett.	6. 最初と最後の頁 3387-3391
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.orglett.9b01131	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Soichiro Ono, Yuki Yokota, Shigekazu Ito, Koichi Mikami	4. 巻 21
2. 論文標題 Regiocontrolled Heptafluoroisopropylation of Aromatic Halides by Copper(I) Carboxylates with Heptafluoroisopropyl-Zinc Reagents	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Org. Lett.	6. 最初と最後の頁 1093-1097
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.orglett.8b04147	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sekine Keisuke, Akaishi Dai, Konagaya Kakeru, Ito Shigekazu	4. 巻 28
2. 論文標題 Copper Catalyzed Enantioselective Hydrosilylation of <i>gem</i> -Difluorocyclopropenes Leading to a Stereochemical Study of the Silylated <i>gem</i> -Difluorocyclopropanes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemistry - A European Journal	6. 最初と最後の頁 e202200657
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.202200657	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ito Shigekazu	4. 巻 28
2. 論文標題 Muon Spin Rotation/Resonance (μ SR) for Studying Radical Reactivity of Unsaturated Organophosphorus Compounds	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemistry - A European Journal	6. 最初と最後の頁 e202200843
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.202200843	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 伊藤繁和	4. 巻 54
2. 論文標題 リン複素環分子の素粒子ラジカル反応	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 月刊「細胞」	6. 最初と最後の頁 518-522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 伊藤 繁和
2. 発表標題 有機化学とミュオン分光を組み合わせた物質科学研究
3. 学会等名 大つくば物理化学セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤間 ひかる、小嶋 健児、 Iain McKenzie、伊藤 繁和
2. 発表標題 素粒子ミュオンを用いたMes*チオホルムアミドのラジカル反応解析
3. 学会等名 第81回有機合成化学協会関東支部シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 繁和、越野 皓太、小嶋 健児、 Iain McKenzie
2. 発表標題 素粒子を用いたフルオロアルキル置換9-ホスファントラセンのラジカル反応解析
3. 学会等名 第31回基礎有機化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小長谷 翔、伊藤 繁和
2. 発表標題 CF ₂ Hポレートを用いる鈴木-宮浦反応の 開発研究
3. 学会等名 第790回有機合成化学協会関東支部シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 繁和、植田 恭弘、赤間ひかる、小嶋 健児、Iain McKenzie
2. 発表標題 P-アリアル置換リン複素環ピラジカルのミュオンスピン分光解析
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 余川晃崇、伊藤繁和
2. 発表標題 シリカート中間体を經由するジフルオロメチルポレート合成と誘導化
3. 学会等名 第47回有機典型元素化学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 余川晃崇、伊藤繁和
2. 発表標題 ボロン酸エステルを用いるジフルオロメチルホウ素導入剤の開発
3. 学会等名 日本化学会第100春季年会（新型コロナウイルスのため中止）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大月一晃、伊藤繁和
2. 発表標題 SNArによるペルフルオロアリアル基を導入したホスファアルケンの合成
3. 学会等名 日本化学会第100春季年会（新型コロナウイルスのため中止）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤 繁和
2. 発表標題 ジフオスファシクロブタンピラジカルへのミュオニウム付加反応の解明
3. 学会等名 日本中間子科学会 総会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小野 総一郎、横田 有生、伊藤 繁和、三上 幸一
2. 発表標題 銅触媒を用いる芳香族ヘプタフルオロイソプロピル化反応の開発と 電子機能性物質の創製研究
3. 学会等名 第115回有機合成シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shigekazu Ito, Yasuhiro Ueta, Kota Koshino, Koichi Mikami, Kenji M. Kojima, Iain McKenzie
2. 発表標題 Muon Spin Spectroscopy for Chemistry of the P-Heterocyclic Singlet Biradicals
3. 学会等名 The 13th International Conference on Heteroatom Chemistry (ICHAC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 繁和
2. 発表標題 ミュオンスピン分光法による開殻一重項複素環分子の反応解析
3. 学会等名 有機化学コロキウム2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大月一晃、林慶浩、川内進、伊藤繁和
2. 発表標題 ハロゲンを有する1-ホスファブタジエンの触媒的合成と新規[4+2]二量化反応の解析
3. 学会等名 第46回有機典型元素化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桑畑 和明、伊藤 繁和、立川 仁典
2. 発表標題 ミューオニウム化キサンテンチオンのHFCCに対する量子効果
3. 学会等名 日本コンピュータ化学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ITO Shigekazu, KATO Miki, ISHIHARA Keisuke, UETA Yasuhiro
2. 発表標題 Study on LAuCl catalysis using the P-ligand bearing pseudo-coordinative P=C
3. 学会等名 Gold2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桑畑 和明、伊藤 繁和、立川 仁典
2. 発表標題 経路積分分子動力学法を用いたミューオニウム化キサンテンチオンの理論研究
3. 学会等名 第16回分子科学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 繁和、赤間ひかる、中村 淳平、西村昇一郎、幸田 章宏
2. 発表標題 muLCRによるチオジベンゾスベレノンのMuラジカル反応解析
3. 学会等名 第32回基礎有機化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小長谷翔、伊藤繁和
2. 発表標題 CF ₂ Hボレートの酸化を経由する新規ジフルオロメチル化反応の開拓
3. 学会等名 第121回有機合成シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤石大、関根圭亮、小長谷翔、伊藤繁和
2. 発表標題 シリル置換gem-ジフルオロシクロプロパンの触媒的不斉合成と脱シリル化における立体化学の変化
3. 学会等名 第121回有機合成シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石原啓介、伊藤繁和
2. 発表標題 P=Cホスフィンの遠隔効果を利用した 不斉金触媒反応の開発
3. 学会等名 第83回有機合成化学協会関東支部シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 繁和
2. 発表標題 リン複素環化合物の素粒子ラジカル反応
3. 学会等名 第49回有機典型元素化学討論会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shigekazu Ito
2. 発表標題 Radical Reactions of Phosphorus Heterocycles with Muonium
3. 学会等名 11th Singapore International Chemistry Conference (SICC-11) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 繁和, 小長谷 翔, Reuben Parchment-Morrison, 小嶋 健児, Iain McKenzie
2. 発表標題 イソニトリルへのミュオニウム付加: イミドイルラジカル生成のmuSR観測
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 桑畑 和明、伊藤 繁和、立川 仁典
2. 発表標題 経路積分分子動力学法を用いたミュオニウム化キサンテンチオンの同族元素効果
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

素粒子ミュオンを用いた高エネルギー複素環ラジカルの創成
<https://www.titech.ac.jp/news/2021/061725>
It's Elementary:
<https://www.titech.ac.jp/english/news/2021/061737>
<http://www.apc.titech.ac.jp/~sito/index-e.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
カナダ	TRIUMF	University of British Columbia	