

令和 6 年 5 月 9 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02513

研究課題名（和文）活性種の時空間制御が可能なフロー電解反応を基軸とする多段階連続反応システムの創製

研究課題名（英文）Development of a multi-step continuous reaction system based on flow electro-synthesis with time control of active species by space

研究代表者

跡部 真人（Atobe, Mahito）

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：90291351

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）：本研究では、グリーン・サステナブルケミストリーの一翼を担うことが期待される有機電解プロセスの高効率化、高選択化、高度制御化を指向し、「有機電解反応」と「マイクロフロー技術」との融合を推し進めた。特に反応場が微小空間であるマイクロリアクターの特徴を最大限に利用し、電気化学的に発生させた高活性種あるいは不安定な基質や中間体を時間的・空間的に制御することで、従来法では決して実現できない全く新しい高効率・高選択的な多段階連続反応システムの創製を目指した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フロー技術の電解合成への応用研究は、この10年来、国内外を問わず急速な進展を遂げ、アカデミアはもとより化学産業界からも大きな注目を浴びるようになってきた。しかしながら、電解反応により発生させた高活性種あるいは不安定な基質や中間体をマイクロフロー技術により時間的・空間的に制御し、これを高効率・高選択的な多段階連続反応に積極的に活用するといった本研究課題の内容は、この分野でも先例のない未踏領域に挑戦するものであり、その成果による波及効果および学術的・社会的意義は極めて大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, we integrated “organic electrolysis reaction” and “flow micro technology” to achieve high efficiency, high selectivity, and reaction control in the organic electro-synthetic process, which is expected to play a role in promoting green sustainable chemistry. In particular, we aimed to develop a highly efficient and highly selective multi-step sequential reaction system that cannot be realized by conventional methods, by utilizing the characteristics of flow microreactors, where the reaction field is a micro-space, and by actively controlling electrochemically generated highly active species or unstable substrates and intermediates.

研究分野：有機電気化学、電解合成

キーワード：フロー電解 多段階連続反応 電解発生活性種 時空間制御

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

グリーンケミストリー概念の重要性が世界的に認知され、環境に調和した物質合成法が重要視されるようになってきた。有機電解反応は電極と有機基質間の直接的な電子移動に基づく酸化還元プロセスであることから、重金属などを含む酸化還元剤を必要としない環境調和型電子移動プロセスであると言える。このような原理的特長から有機電解プロセスがグリーンケミストリーの一翼を担うものとして脚光を浴び、特に今世紀に入るとさらに環境調和性を追求した電解プロセスや、選択性制御に関する新しい概念や方法論が申請者をはじめとする国内外の多くの研究グループにより生み出された(最近の総説:申請者ら、*触媒*, **2017**, *58*, 357. Baran ら、*Chem. Rev.* **2017**, *117*, 13230.)。

微小な流路内で化学反応を行うマイクロリアクターは、様々な分野で応用が期待されている反応デバイスであり、これを利用した研究は1990年代初頭から分析化学の分野で、また、最近では有機合成化学の分野でも盛んになり、大きな成果を挙げている。とくに大きな比表面積を有し、迅速な溶液混合が可能といった特長は、均一系反応よりもむしろ不均一系反応において発揮されることから、典型的な固-液界面での反応である電解反応において大変魅力的なデバイスと言える。また、マイクロリアクターは通常フロー型であり、リアクター内の電解液は常に流れているので、その小さな内容積から想像されるより変換量は多いものとなる。従って、このような特長・優位性を有するマイクロフロー技術を有用な化学品合成を指向した有機電解反応の開発に用いることができれば、従

来手法を凌ぐ全く新しい高効率・高選択的な電解合成反応や高度に制御可能な電解システムの創製に繋がる(図1)。事実、国内外を問わず物質合成を指向した電解合成への応用展開は、この数年で急速な進展を遂げ、アカデミアはもとより、化学産業界とりわけ製薬業界から大きな注目を浴びている。また、これらの研究の集大成は、この研究領域を世界的に先導してきた申請者らによって*Chem. Rev.*誌(申請者ら、*Chem. Rev.* **2018**, *118*, 4541.)にもまとめられた。

一方、マイクロリアクターを特徴付けるものに多段階連続反応への応用が挙げられる(吉田ら、*Science* **2016**, *352*, 691.)。マイクロフロー系での多段階連続反応では精製に要する時間、エネルギー、廃棄物、コスト、環境負荷の削減が期待できる上、反応を逐次的に進行させることから、活性種あるいは不安定な化学種を系中で発生させて速やかに後続の反応へと導くことが可能になる。このため、マイクロフロー系の利用はこれまで反応に用いることが難しかった化学種を制御、利用できる可能性を秘めており、これによる多段階連続反応システムの開発が昨今特に注目されている。しかし、活性な化学種を発生させる方法は厳しい条件であることが少なくなく、それが後続の反応に影響を与える可能性が否定できない。さらに未反応の試薬が後続過程での予期せぬ反応を誘発する可能性も考え得る。マイクロリアクターを用いた多段階連続反応をより幅広い基質や反応のタイプに対して適用可能にするためには、穏和な条件下でありながら、試薬を用いずに活性な化学種を発生させる必要がある。

では、このような要求に対してどのような方法が相応しいであろうか? この「問い」に対し、申請者は電解反応による活性種の発生と、その合成的利用が、まさにその「解」に相応しいものとして着想した。電解反応は電極と反応基質との電子移動に基づく試薬不要かつ穏和な条件下で実施可能な環境調和型反応プロセスである。また、電解反応においては基質を単純に酸化還元するのみならず、発生した活性種を用いて、求核反応、求電子反応、ラジカル反応等の多彩な反応を

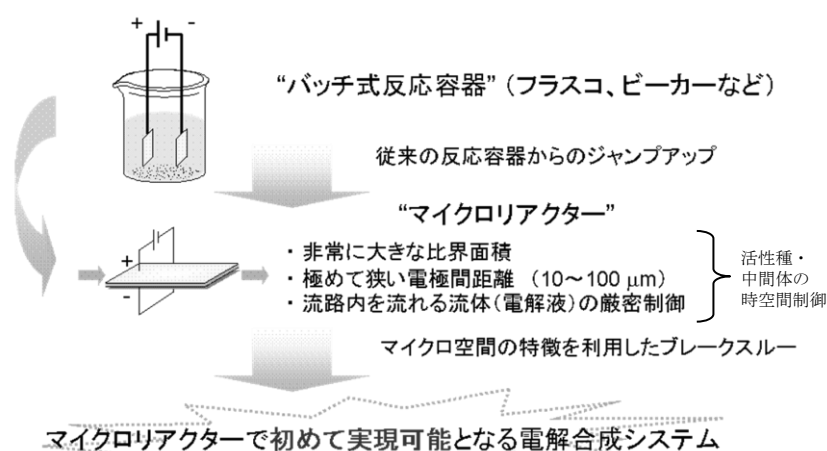


図1. マイクロリアクターによる電解合成反応のブレイクスルー

行うこともできる。しかし、マイクロリアクターを用いた電解反応の既往研究のほとんどは、基質を単純に酸化還元する単一反応プロセスであることから、電解発生活性種や不安定基質・中間体を活用する多段階フロー電解合成システムを創製することは、従来のフロー法による多段階連続反応システムやバッチ型電解法との差別化を図るだけでなく、「有機電解反応」と「マイクロフロー技術」との高度な技術的融合を推し進めることにも繋がると考えた。

2. 研究の目的

上述の学術的背景を踏まえ、本研究では、グリーン・サステイナブルケミストリーの一翼を担うことが期待される有機電解プロセスの高効率化、高選択化、高度制御化を指向し、「有機電解反応」と「マイクロフロー技術」との融合を推し進めた。特に反応場が微小空間であるマイクロリアクターの特徴を最大限に利用し、電気化学的に発生させた高活性種あるいは不安定な基質や中間体を時間的・空間的に制御することで、従来法では決して実現できない全く新しい高効率・高選択的な多段階連続反応システムの創製を目指した。

3. 研究の方法

電解反応をキーステップとする高効率・高選択的な多段階連続反応システムを構築するために下記の2つの反応タイプそれぞれについて検討を行った。

1) 反応活性種の電解発生と後続化学反応への利用

この反応タイプでは電解フローリアクターで発生した反応活性種が分解あるいは副反応を起こす前に速やかに所望の後続反応に導くことを目的としている(図2)。

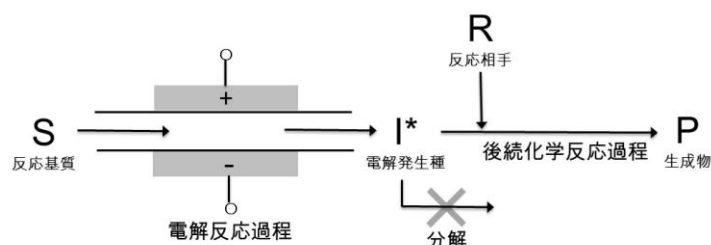


図2. 反応活性種の電解発生と後続化学反応への利用の概略図。

上記の着想に基づき本研究では、電解発生種を利用する高効率・高選択的な多段階合成手法の確立を指向し、適切なモデル反応における流速、電流密度、リアクター寸法(流路長、流路幅、電極間距離)の最適化を図るとともに後続過程における反応パートナーの適用範囲・一般性についても精査した。

2) プレ化学反応で発生させた不安定化学種を基質とするフロー電解反応

この反応タイプでは、プレ化学反応により発生させた不安定化学種を分解あるいは副反応を起こす前に速やかに所望の後続電解反応に導くことを目的としている(図3)。

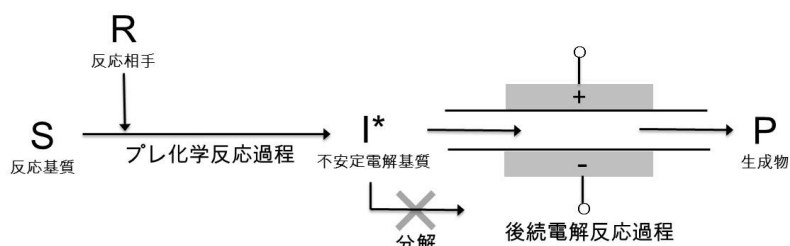


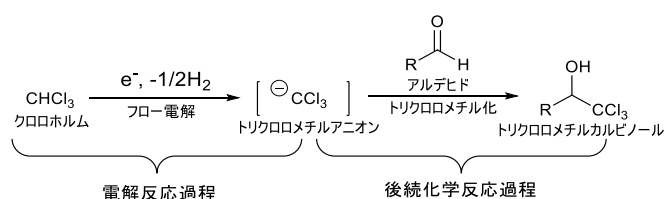
図3. プレ化学反応で発生させた不安定化学種を基質とするフロー電解反応の概略図。

従来のバッチ型電解法に供することの出来る基質は安定化学種に限定されるが、フロー法を適用すれば、これまでに実現できなかった不安定化学種を基質とする全く新しい電解反応が実施できることになる。

4. 研究成果

1) 反応活性種の電解発生と後続化学反応への利用

電解により発生できる活性種には、イオン種、ラジカルイオン種、ラジカル、カルベンなど様々なものがあるが、本研究ではクロロホルムの陰極還元によるトリクロロメチルア

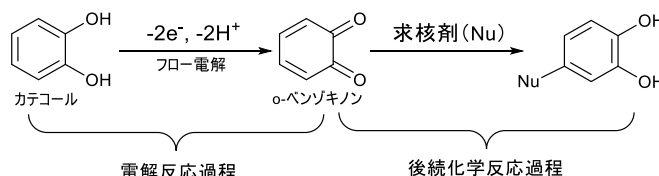


スキーム 1. トリクロロメチルアニオンの電解発生とアルデヒドとのトリクロロメチル化反応。

ニオンの発生を選定し、これを後続反応のアルデヒドのトリクロロメチル化に利用した(スキーム 1)。この一連の反応生成物として得られるトリクロロメチルカルビノール類は、重要な合成

中間体として知られている。トリクロロメチルアニオンは陰極還元によって発生可能なことが知られているが（庄野ら、*Chem. Lett.* **1983**, *12*, 1311.）、非常に不安定で容易にジクロロカルベンに変換されてしまうことから通常は低温、不活性雰囲気での取り扱いが求められるなど困難が伴う。これに対して、電解発生によるトリクロロメチルアニオンをマイクロフロー技術の援用により温和な条件下において即座に後続反応であるアルデヒドのトリクロロメチル化に利用したところ、目的とするトリクロロメチルカルビノール類を効率的に合成出来ることを見出した。

一方、*o*-ベンゾキノン¹は医薬品合成における非常に重要な原材料であり、対応するカテコールの酸化により発生させることができるが、容易に二量化やポリマー化してしまうために貯蔵が利かず、また市販もされていない（Durstら、*J. Org. Chem.* **1975**, *40*, 268.）。これに対し、電解フローマイクロリアクターを利用すれば、不安定な *o*-ベンゾキノン¹をリアクター内で電解酸化により発生させたのち、速やかに後続反応に供することができるものと考えられる。スキーム2には電解フローマイクロリアクターを利用した *o*-ベンゾキノンの電解発生と引き続き求核剤との後続反応による一連の連続反応スキームを示した。この反応において、カテコールの電解反応部分と求核剤の導入部分を空間的に分離することで、求核剤の電解酸化を競合させずにカテコール酸化のみを実施できることが示された。また、リアクター内部の流量を調整することで電解発生させた *o*-ベンゾキノンの二量化やポリマー化、さらには過酸化が抑制され、効率的に各種求核剤との後続反応が進行することが確認された。

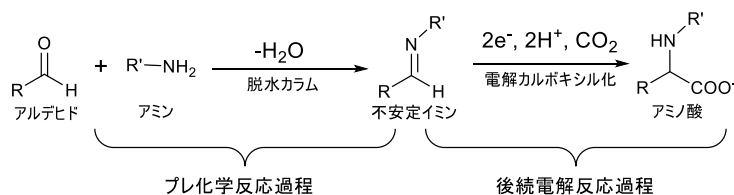


スキーム2. *o*-ベンゾキノンの電解発生と求核剤との後続化学反応。この反応において、カテコールの電解反応部分と求核剤の導入部分を空間的に分離することで、求核剤の電解酸化を競合させずにカテコール酸化のみを実施できることが示された。また、リアクター内部の流量を調整することで電解発生させた *o*-ベンゾキノンの二量化やポリマー化、さらには過酸化が抑制され、効率的に各種求核剤との後続反応が進行することが確認された。

2) プレ化学反応で発生させた不安定化学種を基質とするフロー電解反応

掲題の反応システムを実証するために本研究では任意のアルデヒドとアミンのプレ脱水反応による不安定イミンの発生とこれを利用する後続の電解カルボキシル化反応に挑戦した（スキーム3）。

この一連の反応による生成物はアミノ酸であり、この多段階連続反応プロセスが確立されれば、安価なアルデヒド、アミンならびに二酸化炭素を原料とする経済性に優れた画期的なアミノ酸合成法が創製される。また、有毒なシアン化物イオンを炭素源とする既往のストレッカーアミノ酸合成と比べ、二酸化炭素を炭素源としていることから環境に調和した大変意義深い反応プロセスに成り得る。



スキーム3. アルデヒドとアミンのプレ脱水反応による不安定イミンの発生と後続電解カルボキシル化反応への利用。

これらの着想に基づき本研究では、まず各種アルデヒドとアミンの効率的なプレ脱水反応過程を実現するフロー型脱水カラムシステムを開発した。具体的には、性状も含めた最適な脱水剤（モレキュラーシーブ、MgSO₄、Na₂SO₄など）の選定とカラム寸法（内径、カラム長）、流速などの最適化を図った。一方、後続カルボキシル化反応過程の開発では、流速、電流密度、リアクター寸法（流路長、流路幅、電極間距離）の最適化を図り、高効率・高選択的なアミノ酸合成プロセスを構築した。

これらの着想に基づき本研究では、まず各種アルデヒドとアミンの効率的なプレ脱水反応過程を実現するフロー型脱水カラムシステムを開発した。具体的には、性状も含めた最適な脱水剤（モレキュラーシーブ、MgSO₄、Na₂SO₄など）の選定とカラム寸法（内径、カラム長）、流速などの最適化を図った。一方、後続カルボキシル化反応過程の開発では、流速、電流密度、リアクター寸法（流路長、流路幅、電極間距離）の最適化を図り、高効率・高選択的なアミノ酸合成プロセスを構築した。

<引用文献>

- 1) Shida, N.; Nakamura, Y.; Atobe, M. *Chem. Rec.* **2021**, *21*, 2164–2177.
- 2) Naito, Y.; Nakamura, Y.; Shida, N.; Senboku, H.; Tanaka, K.; Atobe, M. *J. Org. Chem.* **2021**, *86*, 15953-15960.
- 3) Naito, Y.; Kondo, M.; Nakamura, Y.; Shida, N.; Ishikawa, K.; Washio, T.; Takizawa, S.; Atobe, M. *Chem. Commun.* **2022**, *58*, 3893-3896.
- 4) Naito, Y.; *Shida, N.; Atobe, M. *Beilstein J. Org. Chem.* **2022**, *18*, 350-359.
- 5) Yata, A.; Nakamura, Y.; Okamoto, K.; Shida, N.; Atobe, M. *Eur. J. Org. Chem.* **2022**, *45*, e202200980.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計30件（うち査読付論文 28件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 跡部真人	4. 巻 59
2. 論文標題 固体高分子電解質電解技術を活用した有機電解プロセス ~ 有機合成プロセスの「電化」に向けたキーテクノロジー ~	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ファルマシア	6. 最初と最後の頁 810 ~ 814
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 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 Atobe Mahito, Shida Naoki	4. 巻 44
2. 論文標題 Organic electrosynthetic processes using solid polymer electrolyte reactor	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Current Opinion in Electrochemistry	6. 最初と最後の頁 101440 ~ 101440
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.coelec.2024.101440	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 Okamoto Kazuhiro, Shida Naoki, Atobe Mahito	4. 巻 10
2. 論文標題 Electrochemical [3+2] Cycloaddition Proceeding at Low Electrolyte Concentration in Laminar Flow Microreactor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ChemElectroChem	6. 最初と最後の頁 e202300386
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/celec.202300386	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 YAMAGUCHI Airi, SHIDA Naoki, ATOBE Mahito, YAJIMA Tomoko	4. 巻 91
2. 論文標題 Voltammetric Studies on the Reduction Potentials of Perfluoroalkyl Halides and Their Analogous Compounds	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Electrochemistry	6. 最初と最後の頁 112016 ~ 112016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5796/electrochemistry.23-67111	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 OKAMOTO Kazuhiro, IMADA Yasushi, SHIDA Naoki, KITANO Yoshikazu, ATOBE Mahito, CHIBA Kazuhiro	4. 巻 91
2. 論文標題 C-C Bond Cleavage at the N- Position Enabled by the Low-potential Electrochemical Oxidation of the 2,7-Dimethoxynaphthyl Electroauxiliary	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Electrochemistry	6. 最初と最後の頁 112006 ~ 112006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5796/electrochemistry.23-67076	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 Izumiya Rumi, Atobe Mahito, Shida Naoki	4. 巻 96
2. 論文標題 Electrochemically Triggered Hole-Catalytic Benzylic Substitution Reaction at a Polymer Chain Containing -O-4 Linkage	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Bulletin of the Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 353 ~ 358
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20230019	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 IZUMIYA Rumi, ATOBE Mahito, SHIDA Naoki	4. 巻 91
2. 論文標題 -Scission by Direct Electrochemical Oxidation: Proton-coupled Electron Transfer Mechanism Dictated by Synthetic Study and Computations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Electrochemistry	6. 最初と最後の頁 112003 ~ 112003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5796/electrochemistry.23-67010	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 YOSHINAGA Shohei, ATOBE Mahito, SHIDA Naoki	4. 巻 91
2. 論文標題 Susceptibility of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Oxidative Voltammetry: Unveiling the Effect of Electrolyte-coordination	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Electrochemistry	6. 最初と最後の頁 112002 ~ 112002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5796/electrochemistry.23-67013	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 Shida Naoki, Atobe Mahito, Ido Yuto, Shimizu Yugo	4. 巻 55
2. 論文標題 Comparative Investigation of Electrocatalytic Oxidation of Cyclohexene by Proton-Exchange Membrane and Anion-Exchange Membrane Electrolyzers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Synthesis	6. 最初と最後の頁 2979 ~ 2984
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1055/a-2000-8231	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 Shimizu Yugo, Harada Juri, Fukazawa Atsushi, Suzuki Tomohiro, Kondo Junko N., Shida Naoki, Atobe Mahito	4. 巻 8
2. 論文標題 Diastereoselective Electrocatalytic Hydrogenation of Cyclic Ketones Using a Proton-Exchange Membrane Reactor: A Step toward the Electrification of Fine-Chemical Production	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Energy Letters	6. 最初と最後の頁 1010 ~ 1017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsenerylett.2c02573	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 Kondo Junko N., Ge Shuo, Suzuki Tomohiro, Osuga Ryota, Matsumoto Takeshi, Yokoi Toshiyuki, Shimizu Yugo, Fukazawa Atsushi, Shida Naoki, Atobe Mahito	4. 巻 126
2. 論文標題 Pd ²⁺ H Species on Electrode Stabilized by Solvent Co-Adsorption: Observation by Operando IR Spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 19376 ~ 19385
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.2c05127	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 Yata Ayano, Nakamura Yuto, Okamoto Kazuhiro, Shida Naoki, Atobe Mahito	4. 巻 2022
2. 論文標題 Designing Modular Assembly of Electrochemical Flow Microreactor as an Enabling Technology of Electrosynthesis in Laminar Flow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 European Journal of Organic Chemistry	6. 最初と最後の頁 e202200980
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ejoc.202200980	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 Nogami Shuji, Shida Naoki, Iguchi Shoji, Nagasawa Kensaku, Inoue Hideo, Yamanaka Ichiro, Mitsushima Shigenori, Atobe Mahito	4. 巻 12
2. 論文標題 Mechanistic Insights into the Electrocatalytic Hydrogenation of Alkynes on Pt?Pd Electrocatalysts in a Proton-Exchange Membrane Reactor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Catalysis	6. 最初と最後の頁 5430 ~ 5440
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.2c01594	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 跡部真人	4. 巻 77 (10)
2. 論文標題 カーボンニュートラル実現に向けたキーテクノロジー 固体高分子電解質電解技術を活用する有機電解プロセス	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 化学	6. 最初と最後の頁 66 ~ 67
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 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 Mikami Rio, Shida Naoki, Atobe Mahito	4. 巻 26
2. 論文標題 Integrated Flow Emulsion Electrosynthetic System by In Situ Generation of Emulsions, Subsequent Emulsion Electrolysis, and Final Phase Separation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Organic Process Research & Development	6. 最初と最後の頁 1268 ~ 1278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.oprd.2c00004	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 Naito Yuki, Shida Naoki, Atobe Mahito	4. 巻 18
2. 論文標題 Synthesis of piperidine and pyrrolidine derivatives by electroreductive cyclization of imine with terminal dihaloalkanes in a flow microreactor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Beilstein Journal of Organic Chemistry	6. 最初と最後の頁 350 ~ 359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3762/bjoc.18.39	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 Naito Yuki, Kondo Masaru, Nakamura Yuto, Shida Naoki, Ishikawa Kazunori, Washio Takashi, Takizawa Shinobu, Atobe Mahito	4. 巻 58
2. 論文標題 Bayesian optimization with constraint on passed charge for multiparameter screening of electrochemical reductive carboxylation in a flow microreactor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 3893 ~ 3896
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2CC00124A	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 Ashikari Yosuke, Tamaki Takashi, Takahashi Yusuke, Yao Yiyue, Atobe Mahito, Nagaki Aiichiro	4. 巻 3
2. 論文標題 Investigation of Parameter Control for Electrocatalytic Semihydrogenation in a Proton-Exchange Membrane Reactor Utilizing Bayesian Optimization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Chemical Engineering	6. 最初と最後の頁 819752 ~ 819752
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fceng.2021.819752	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 Ido Yuto, Fukazawa Atsushi, Furutani Yuka, Sato Yasushi, Shida Naoki, Atobe Mahito	4. 巻 14
2. 論文標題 Triple phase Boundary in Anion Exchange Membrane Reactor Enables Selective Electrosynthesis of Aldehyde from Primary Alcohol	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ChemSusChem	6. 最初と最後の頁 5405 ~ 5409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cssc.202102076	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 Mikami Rio, Nakamura Yuto, Shida Naoki, Atobe Mahito	4. 巻 6
2. 論文標題 Anodic substitution reaction of carbamates in a flow microreactor using a stable emulsion solution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Reaction Chemistry and Engineering	6. 最初と最後の頁 2024 ~ 2028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1RE00403D	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 Fukazawa Atsushi、Shimizu Yugo、Shida Naoki、Atobe Mahito	4. 巻 19
2. 論文標題 Electrocatalytic hydrogenation of benzoic acids in a proton-exchange membrane reactor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Organic and Biomolecular Chemistry	6. 最初と最後の頁 7363 ~ 7368
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D10B01197A	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 Naito Yuki、Nakamura Yuto、Shida Naoki、Senboku Hisanori、Tanaka Kenta、Atobe Mahito	4. 巻 86
2. 論文標題 Integrated Flow Synthesis of α -Amino Acids by <i>In Situ</i> Generation of Aldimines and Subsequent Electrochemical Carboxylation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Organic Chemistry	6. 最初と最後の頁 15953 ~ 15960
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.joc.1c00821	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 Mori Kanae、Kumasaki Mieko、Atobe Mahito	4. 巻 82
2. 論文標題 Electrolytic Oxidation of 1H-1,2,4-Triazole, 3-Amino-1,2,4-triazole, and 4-Amino-1,2,4-triazole for Energetic Material Synthesis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sci. Technol. Energ. Mater.	6. 最初と最後の頁 44 ~ 49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34571/stem.82.2_44	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 NAKAMURA Yuto、SATO Yasushi、SHIDA Naoki、ATOBE Mahito	4. 巻 89
2. 論文標題 Electrochemical Trimerization of Catechol to 2,3,6,7,10,11-Hexahydroxytriphenylene Using a Flow Microreactor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Electrochemistry	6. 最初と最後の頁 395 ~ 399
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5796/electrochemistry.21-00053	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 Shida Naoki, Nakamura Yuto, Atobe Mahito	4. 巻 21
2. 論文標題 Electrosynthesis in Laminar Flow Using a Flow Microreactor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Chemical Record	6. 最初と最後の頁 2164 ~ 2177
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tcr.202100016	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 Suga Tatsuya, Shida Naoki, Atobe Mahito	4. 巻 124
2. 論文標題 Au-catalyzed electrochemical oxidation of alcohols using an electrochemical column flow cell	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Electrochemistry Communications	6. 最初と最後の頁 106944 ~ 106944
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.elecom.2021.106944	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 Nogami Shuji, Nagasawa Kensaku, Fukazawa Atsushi, Tanaka Kenta, Mitsushima Shigenori, Atobe Mahito	4. 巻 167
2. 論文標題 Highly Selective and Efficient Electrocatalytic Semihydrogenation of Diphenylacetylene in a PEM Reactor with Pt/Pd Alloy Cathode Catalysts	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of The Electrochemical Society	6. 最初と最後の頁 155506 ~ 155506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/1945-7111/abaae7	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 NAKAMURA Yuto, TANAKA Kenta, MATSUMURA Yoshimasa, ATOBE Mahito	4. 巻 88
2. 論文標題 Flow Electrosynthesis and Molecular Weight Control of Polyphenylene Deriving from 1,4-Bis(trimethylsilyl)benzene: Effect of a Silyl Substituent on the Coupling Position	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Electrochemistry	6. 最初と最後の頁 336 ~ 339
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5796/electrochemistry.20-00060	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 Kaneda Chinami, Tanaka Kenta, Atobe Mahito	4. 巻 46
2. 論文標題 Electrochemical Synthesis of Porous Polypyrrole Materials Using Polyacrylonitrile Monolith Template	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 KAGAKU KOGAKU RONBUNSHU	6. 最初と最後の頁 129 ~ 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1252/kakoronbunshu.46.129	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 Fukazawa Atsushi, Tanaka Kenta, Hashimoto Yasushi, Sato Yasushi, Atobe Mahito	4. 巻 115
2. 論文標題 Electrocatalytic asymmetric hydrogenation of , -unsaturated acids in a PEM reactor with cinchona-modified palladium catalysts	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Electrochemistry Communications	6. 最初と最後の頁 106734 ~ 106734
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.elecom.2020.106734	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25件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 19件)

1. 発表者名 Mahito Atobe
2. 発表標題 Electrocatalytic Hydrogenation Reactions Using a Solid Polymer Electrolyte (SPE) Reactor
3. 学会等名 International Joint Symposium on Synthetic Organic Chemistry 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 跡部真人
2. 発表標題 固体高分子電解質電解技術が革新する新たな有機電解プロセス
3. 学会等名 第13回CSJ化学フェスタ (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 跡部真人
2. 発表標題 フローリアクターが革新する新たな有機電解プロセス
3. 学会等名 第7回FlowSTシンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 跡部真人
2. 発表標題 フローリアクターが革新する新たな有機電解合成プロセス
3. 学会等名 2022年度有機合成化学講習会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mahito Atobe
2. 発表標題 Organic Electrosyntheses Using a Proton Exchange Membrane (PEM) Reactor
3. 学会等名 International Symposium on Innovative Reactions through Controlling Electrons (ISIRCE)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mahito Atobe, Rio Mikami, Naoki Shida
2. 発表標題 Integrated Flow Emulsion Electrosynthetic System for Oxidation of Hydrophobic Amines
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Organic Reactions (ISOR-15)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoki Shida, Shohei Yoshinaga, Mahito Atobe
2. 発表標題 Electrochemical C-N Coupling Reaction Mediated by -Extended Iodoarene Catalyst
3. 学会等名 9th German-Japanese Symposium on Electrosynthesis (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuto Nakamura, Yuki Naito, Kazuhiro Okamoto, Naoki Shida, Mahito Atobe
2. 発表標題 Bayesian Optimization for Multiparameter Screening of Electrosynthetic Processes in a Flow Microreactor
3. 学会等名 9th German-Japanese Symposium on Electrosynthesis (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mahito Atobe, Rio Mikami, Naoki Shida
2. 発表標題 Development of Integrated Flow Emulsion Electrosynthetic System for Oxidation of Hydrophobic Amines
3. 学会等名 9th German-Japanese Symposium on Electrosynthesis (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mahito Atobe, Rio Mikami, Naoki Shida
2. 発表標題 Development of Integrated Flow Emulsion Electrosynthetic System
3. 学会等名 17th Meeting of the European Society of Sonochemistry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 跡部真人
2. 発表標題 固体高分子電解質 (SPE) 電解技術が革新する有機電解合成プロセス
3. 学会等名 第30回グリーンケミストリーフォーラム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Rio Mikami, Yuto Nakamura, Naoki Shida, Mahito Atobe
2. 発表標題 Anodic Substitution Reaction of Carbamates in a Flow Microreactor Using a Tandem Acoustic Emulsified Solution
3. 学会等名 ESS-JSS-AOSS 1st Joint Sonochemistry Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mahito Atobe, Atsushi Fukazawa, Naoki Shida
2. 発表標題 Organic Electrosynthetic Reactions Using a Proton-Exchange Membrane (PEM) Reactor
3. 学会等名 72nd ISE Annual Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mahito Atobe, Atsushi Fukazawa, Naoki Shida
2. 発表標題 Electrocatalytic Nuclear Hydrogenation of Benzoic Acids in a Proton Exchange Membrane Reactor
3. 学会等名 239th ECS Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 跡部真人
2. 発表標題 フローリアクターが革新する 有機電解合成プロセス
3. 学会等名 近畿化学協会第89回フロー・マイクロ研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 跡部真人
2. 発表標題 リアクターが革新する有機電解プロセス
3. 学会等名 第126回触媒討論会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuto Ido, Yutaro Shimizu, Juri Minoshima, Atsushi Fukazawa, Kenta Tanaka, Mahito Atobe
2. 発表標題 Comparative Investigation of Electrocatalytic Oxidation by Proton-Exchange-Membrane and Anion-Exchange-Membrane Electrolyses
3. 学会等名 PRiME 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Suga Tatsuya, Kenta Tanaka, Mahito Atobe
2. 発表標題 Highly Efficient Electrochemical Oxidation of Alcohols in a Flow Electrochemical Column Cell Modified with Au Nanoparticle Catalyst
3. 学会等名 PRiME 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuto Nakamura, Kenta Tanaka, Mahito Atobe
2. 発表標題 Anodic Trimerization of Catechol to Hexahydroxytriphenylene Using a Flow microreactor
3. 学会等名 PRiME 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shuji Nogami, Juri Minoshima, Atsushi Fukazawa, Kensaku Nagasawa, Shigenori Mitsushima, Mahito Atobe
2. 発表標題 Highly Selective and Efficient Electrocatalytic Semihydrogenation of Diphenylacetylene to Z-Stilbene Using Pt-Pd Alloy Cathode Catalyst
3. 学会等名 PRiME 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Naito, Kenta Tanaka, Mahito Atobe
2. 発表標題 Continuous Flow Synthesis of N-Phenylphenylglycine by Dehydration and Electrochemical Carboxylation
3. 学会等名 PRiME 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Rio Mikami, Yuto Nakamura, Mahito Atobe
2. 発表標題 Anodic Substitution Reaction of Cyclic Carbamates in Stable Nanoemulsion Solution Using a Flow Microreactor
3. 学会等名 PRiME 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Atsushi Fukazawa, Kenta Tanaka, Yasushi Hashimoto, Yoshihiro Kobori, Yasushi Sato, Mahito Atobe
2. 発表標題 Electrocatalytic Asymmetric Hydrogenation of , -Unsaturated Acids in a Proton Exchange Membrane Reactor with Palladium-cinchona Catalysts
3. 学会等名 PRiME 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Atsushi Fukazawa, Kenta Tanaka, Yasushi Hashimoto, Yoshihiro Kobori, Yasushi Sato, Mahito Atobe
2. 発表標題 Electrocatalytic Asymmetric Hydrogenation of , -Unsaturated Acids in a PEM Reactor using Palladium-cinchona Catalysts
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Organic Reactions (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuto Nakamura, Kenta Tanaka, Mahito Atobe
2. 発表標題 Synthesis and Molecular Weight Control of Well-defined Polyphenylene using Electrochemical Polymerization in a Flow Microreactor
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Organic Reactions (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 淵上寿雄、跡部真人、稲木信介	4. 発行年 2021年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 340
3. 書名 有機電解合成の新潮流	

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 環状アミンの製造装置及び環状アミンの製造方法	発明者 跡部真人、信田尚毅、清水勇吾	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-134327	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 環状アミンの製造装置及び環状アミンの製造方法	発明者 跡部真人、信田尚毅、清水勇吾	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2023/29644	出願年 2023年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

跡部研究室ホームページ http://www.atobe-lab.ynu.ac.jp
--

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
---------	---------