

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

研究区分 : 環境問題対応型研究（ミディアムファンディング枠）

研究実施期間 : 2022（令和4）年度～2024（令和6）年度

課題番号 : 1MF-2202

体系的番号 : JPMEERF20221M02

研究課題名 : 遮熱制御のための近赤外エレクトロクロミック材料の開発

Project Title : Development of Near-Infrared Electrochromic Materials for Heat-Shield Control

研究代表者 : 樋口 昌芳

研究代表機関 : 物質・材料研究機構

研究分担機関 : 産業技術総合研究所

キーワード : 遮熱、近赤外、エレクトロクロミック、酸化還元、メタロ超分子ポリマー

注: 研究機関等は研究実施期間中のものです。また、各機関の名称は本報告書作成時点のものです。

令和7（2025）年11月



## 目次

|  |           |
|--|-----------|
| 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書 .....              | 1         |
| 研究課題情報 .....                           | 3         |
| <基本情報> .....                           | 3         |
| <研究体制> .....                           | 3         |
| <研究経費の実績> .....                        | 4         |
| <研究の全体概要図> .....                       | 4         |
| <b>1. 研究成果 .....</b>                   | <b>5</b>  |
| 1. 1. 研究背景 .....                       | 5         |
| 1. 2. 研究目的 .....                       | 5         |
| 1. 3. 研究目標 .....                       | 5         |
| 1. 4. 研究内容・研究結果 .....                  | 6         |
| 1. 4. 1. 研究内容 .....                    | 6         |
| 1. 4. 2. 研究結果及び考察 .....                | 6         |
| 1. 5. 研究成果及び自己評価 .....                 | 8         |
| 1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献 .....    | 8         |
| 1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価 ..... | 8         |
| 1. 6. 研究成果発表状況の概要 .....                | 8         |
| 1. 6. 1. 研究成果発表の件数 .....               | 8         |
| 1. 6. 2. 主要な研究成果発表 .....               | 9         |
| 1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動 .....             | 10        |
| 1. 7. 國際共同研究等の状況 .....                 | 10        |
| 1. 8. 研究者略歴 .....                      | 10        |
| <b>2. 研究成果発表の一覧 .....</b>              | <b>11</b> |
| (1) 産業財産権 .....                        | 11        |
| (2) 論文 .....                           | 11        |
| (3) 著書 .....                           | 12        |
| (4) 口頭発表・ポスター発表 .....                  | 12        |
| (5) 「國民との科学・技術対話」の実施 .....             | 16        |
| (6) マスメディア等への公表・報道等 .....              | 16        |
| (7) 研究成果による受賞 .....                    | 16        |
| (8) その他の成果発表 .....                     | 17        |
| <b>権利表示・義務記載 .....</b>                 | <b>17</b> |

Abstract

## 研究課題情報

## &lt;基本情報&gt;

|         |                                  |
|---------|----------------------------------|
| 研究区分：   | 環境問題対応型研究（ミディアムファンディング枠）         |
| 研究実施期間： | 2022（令和4）年度～2024（令和6）年度          |
| 研究領域：   | 統合領域                             |
| 重点課題：   | 【重点課題4】環境問題の解決に資する新たな技術シーズの発掘・活用 |
| 行政ニーズ：  |                                  |
| 課題番号：   | IMF-2202                         |
| 体系的番号：  | JPMEERF20221M02                  |
| 研究課題名：  | 遮熱制御のための近赤外エレクトロクロミック材料の開発       |
| 研究代表者：  | 樋口 昌芳                            |
| 研究代表機関： | 物質・材料研究機構                        |
| 研究分担機関： | 産業技術総合研究所                        |
| 研究協力機関： |                                  |

注： 研究協力機関は公開の了承があった機関名のみ記載されます。

## &lt;研究体制&gt;

## サブテーマ1 「近赤外エレクトロクロミック材料及びデバイス開発」

## &lt;サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者&gt;

| 役割   | 機関名       | 部署名             | 役職名      | 氏名                  | 一時参画期間          |
|------|-----------|-----------------|----------|---------------------|-----------------|
| リーダー | 物質・材料研究機構 | 高分子・バイオ材料研究センター | グループリーダー | 樋口昌芳                |                 |
| 分担者  | 物質・材料研究機構 | 高分子・バイオ材料研究センター | 主任研究員    | 藤井和子                |                 |
| 分担者  | 物質・材料研究機構 | 高分子・バイオ材料研究センター | ポスドク研究員  | Banchhanidhi PRUSTI | 2023年7月～2025年3月 |
|      |           |                 |          |                     |                 |
|      |           |                 |          |                     |                 |

注： 研究協力者は公開の了承があった協力者名のみ記載されます。

## サブテーマ2 「近赤外エレクトロクロミック材料の超効率合成法開発」

&lt;サブテーママリーダー (STL)、研究分担者、及び研究協力者&gt;

| 役割   | 機関名       | 部署名        | 役職名   | 氏名   | 一時参画期間           |
|------|-----------|------------|-------|------|------------------|
| リーダー | 産業技術総合研究所 | 化学プロセス研究部門 | 主任研究員 | 長畠律子 |                  |
| 分担者  | 産業技術総合研究所 | 化学プロセス研究部門 | 主任研究員 | 中村考志 | 2023年10月～2025年3月 |
|      |           |            |       |      |                  |
|      |           |            |       |      |                  |

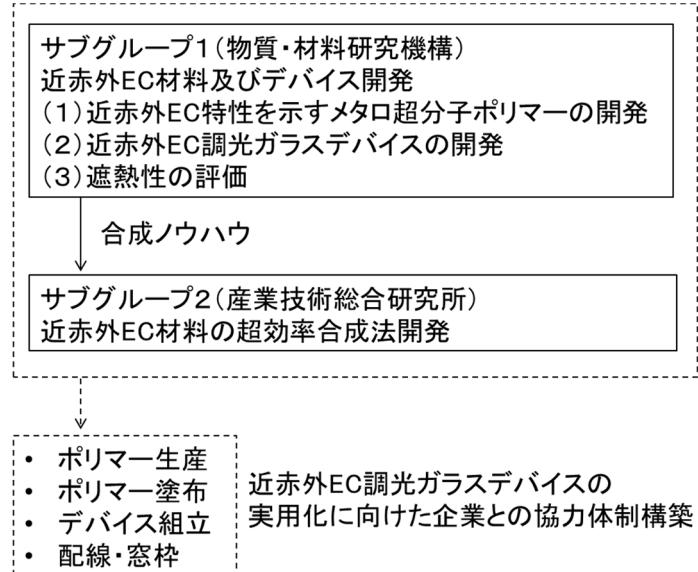
注： 研究協力者は公開の了承があった協力者名のみ記載されます。

&lt;研究経費の実績&gt;

| 年度    | 直接経費（円）    | 間接経費（円）   | 経費合計（円）    | 備考（自己充当等） |
|-------|------------|-----------|------------|-----------|
| 2022  | 10,250,000 | 3,075,000 | 13,325,000 |           |
| 2023  | 10,250,000 | 3,075,000 | 13,325,000 |           |
| 2024  | 10,250,000 | 3,075,000 | 13,325,000 |           |
| 全期間合計 | 30,750,000 | 9,225,000 | 39,975,000 |           |

注： 環境研究総合推進費の規定する研究経費の支援規模を超えた額は自己充当等によるものです。

&lt;研究の全体概要図&gt;



## 1. 研究成果

### 1. 1. 研究背景

低炭素社会の実現に向けた取り組みが世界で進み、政府も「2030年度までに温室効果ガス排出量を一定量削減する目標」を掲げている。二酸化炭素は温室効果ガスとして地球温暖化などの気候変動の原因とされており、低炭素社会の実現のためにはオフィスなどでの省エネ対策が一層求められている。一方、近年のオフィスビルの設計では開放性や風通しの良さなどがキーワードとなっており、採光と眺望のための大きな窓が設置されるようになってきた。つまり、オフィスビルでの省エネ対策において、窓からの採光と採熱の制御（夏季における太陽の可視光及び近赤外光の遮断、及び冬季における取り込み）が益々重要となっている。

エレクトロクロミック（EC）材料は電気化学的酸化還元により色が変わる材料であり、酸化タンゲステンやビオロゲンなどが知られている。従来から本材料を調光ガラスとして利用する試みがなされており、ボーイング787の窓や、車の防眩ミラーとして実用化されているが、一般の窓への普及は進んでいない。酸化タンゲステン等の無機材料は真空中で製膜されるため、調光ガラスの大型化には大規模な設備投資が必要で製造コストが高い。つまり、EC調光ガラスの普及には、塗布などにより安価に製膜できる材料の開発が重要である。また、効果的な遮熱制御のためには、可視領域（400～780 nm）だけでなく近赤外領域（780～2500 nm）でのEC特性が求められている。

これまで申請者は、金属錯体が繋がった構造を有するメタロ超分子ポリマーが優れたEC特性を有することを見出してきた。しかし、その色の起源である電荷移動吸収（MLCT吸収）は可視領域に現れるため、近赤外領域の吸収の発現は困難であった。本研究提案では、MLCTよりもエネルギーが小さい電荷移動として、原子価間電子移動（IVCT）に着目したポリマー設計により、近赤外吸収のEC制御を実現する。更に、開発したメタロ超分子ポリマーを用いた近赤外EC調光ガラスを開発し、その遮熱効果を実証実験により評価する。

### 1. 2. 研究目的

遮熱に関する近赤外領域（780～2500 nm）の吸収波長を自在制御するとともに、その吸収を電気化学的に出現/消失させること（近赤外エレクトロクロミック（EC）変化）が可能なメタロ超分子ポリマーを創製する。また、開発したメタロ超分子ポリマーを用いた近赤外EC調光ガラスを開発し、その遮熱効果を実証実験により検証する。

本研究の実施により、優れた遮熱効果を示す近赤外EC調光ガラスデバイスが開発できれば、オフィスビルなどの窓への導入することで、季節に応じた効率的な採熱／遮熱が実現される。本EC調光ガラスの普及は、室内空調の省エネ化と、電力源である化石燃料からの二酸化炭素排出量の削減に寄与するため、日本の環境政策への貢献が期待される。

### 1. 3. 研究目標

<全体の研究目標>

|       |  |
|-------|--|
| 研究課題名 | 遮熱制御のための近赤外エレクトロクロミック材料の開発   |
| 全体目標  | 近赤外領域（780～2500 nm）において、透過状態と遮光状態の間の透過率差が50%以上となる近赤外EC特性を示すメタロ超分子ポリマーを開発する。開発した近赤外EC材料を用いた調光ガラスデバイス（20×20 cm）を作製する。作製した調光ガラスデバイスの遮熱性能を、実際の太陽光下で実測・評価する。通常のガラスと比較して、遮光時において40%以上の遮熱率を目指す。更に、近赤外EC材料の早期の量産に向けて、マイクロ波加熱法を用いた短時間合成法（4分の1への時間短縮）を開発する。 |

<サブテーマ1の研究目標>

|         |                         |
|---------|-------------------------|
| サブテーマ1名 | 近赤外エレクトロクロミック材料及びデバイス開発 |
|---------|-------------------------|

| サブテーマ1実施機関 | サブテーマ代表機関   |
|------------|---|
| サブテーマ1目標   | 近赤外領域(780~2500 nm)において、透過状態と遮光状態の間の透過率差が50%以上となる近赤外EC特性を示すメタロ超分子ポリマーを開発する。開発した近赤外EC材料を用いた調光ガラスデバイス(20×20 cm)を作製する。作製した調光ガラスデバイスの遮熱性能を、実際の太陽光下で実測・評価する。通常のガラスと比較して、遮光時において40%以上の遮熱率を目指す。 |

## &lt;サブテーマ2の研究目標&gt;

|            |  |
|------------|--|
| サブテーマ2名    | 近赤外エレクトロクロミック材料の超効率合成法開発   |
| サブテーマ2実施機関 | サブテーマ分担機関  |
| サブテーマ2目標   | 近赤外EC材料の早期の量産に向けて、マイクロ波加熱法を用いた高効率合成法(収率90%超、4分の1への時間短縮)を開発する。最終年度までに、生産設備の概念設計を行う。 |

## 1. 4. 研究内容・研究結果

## 1. 4. 1. 研究内容

サブテーマ1と2で以下の6項目を実施した。

- ① 近赤外EC特性を示すメタロ超分子ポリマーとして、(A) IVCT吸収を有する構造、(B) トリフェニルアミンを有する構造、(C) その他の構造(未発表につき構造の詳細は省略)の検討
- ② 近赤外EC材料を用いた調光ガラスデバイス(20×20 cm)の作製と評価
- ③ 近赤外EC調光ガラスデバイスの遮熱性能評価(スペクトル使用)
- ④ 通常のガラスの比較(遮光時において40%以上の遮熱率を目指し)
- ⑤ マイクロ波加熱法を用いたメタロ超分子ポリマーの短時間合成法(4分の1への時間短縮)の検討
- ⑥ 生産設備の概念設計の検討

## 1. 4. 2. 研究結果及び考察

## ① 近赤外EC特性を示すメタロ超分子ポリマーの検討

(A) 当初の研究計画に従い、電気化学的酸化還元によって原子価間電荷移動(Intervalence Charge Transfer, IVCT)が発現するメタロ超分子ポリマーの設計・開発を行った。最初に、隣り合う2つの金属間において、酸化還元によりIVCT吸収が発現するメタロ超分子ポリマー構造を検討した。具体的には、IVCT吸収の発現が期待される複核の金属錯体構造をメタロ超分子ポリマー鎖内に導入した。得られたメタロ超分子ポリマーを透明電極(ITO)ガラス基板上にスプレイコート法により製膜し、電解質溶液中、ポリマー膜に酸化電位を印加したところ、新たに近赤外領域(最大吸収波長 900 nm)にIVCT吸収が発現した。また、このポリマー膜に還元電位を印加するとこのIVCT吸収が消失した。本研究の結果、近赤外領域におけるIVCT吸収の発現と消失を電気化学的に可逆制御できる新しい近赤外エレクトロクロミック(EC)メタロ超分子ポリマーを発見した。なお、本成果は未発表のため、本メタロ超分子ポリマーの構造等の詳細データは本項では割愛する。

(B) 前項の結果は錯体化学分野における学術的新規性が高い一方、得られたメタロ超分子ポリマー膜を電気化学的酸化することで発現したIVCT吸収は780~1400 nm程度までしか広がらなかつた。そこで次に、より長波長まで近赤外吸収を発現させるため、金属間IVCT以外のIVCT吸収を発現する化学構造の探索を行った。具体的には、メタロ超分子ポリマーを構成する有機配位子内に酸化還元部位を複数導入することで、有機配位子内でのIVCT吸収の発現を目指した。その結果、トリフェニルアミン構造を有機配位子に導入したメタロ超分子ポリマーにおいて、電気化学的酸化により近赤外(780nm~1600nm以上(装置の計測可能領域外まで))に幅広いIVCT吸収が発現す

ることを発見した（成果6）。

(C)前項で得られたメタロ超分子ポリマーは、近赤外領域I（750～1000 nm）から近赤外領域II（1000～1600 nm）にわたる広い領域でのEC変化を実現している点で学術的新規性が高い。しかし、かける電圧の違いによって近赤外領域の吸収スペクトルが変化するため、本研究の全体目標（及びサブテーマ1の目標）として掲げた「近赤外領域（780～2500 nm）において、透過状態と遮光状態の間の透過率差が50%以上となる近赤外EC特性」を示すことはできなかった。そこで、構造に関する更なる検討を重ね、最終的に目標として掲げた性能を有するメタロ超分子ポリマーの開発に成功した（未発表につき構造の詳細は本項では割愛する）。

② 近赤外EC材料を用いた調光ガラスデバイス（20×20 cm）の作製と評価

最初に、従来のメタロ超分子ポリマー（鉄イオンとビスター・ピリジンからなるメタロ超分子ポリマー）を用いて20×20 cmサイズの調光デバイスの作製を検討し、製膜方法やデバイスの接合方法等に関する最適化を行った。次に、前項①(c)で開発した近赤外EC特性を有するメタロ超分子ポリマーを用いて、10×10 cmの調光デバイスの作製を行い、EC駆動特性を明らかにした。以上の実験結果を参考にして、最終的に前項①(c)で開発した近赤外特性を有するメタロ超分子ポリマーを用いた20×20 cmの調光デバイスの作製とEC駆動に成功した。

③ 近赤外EC調光ガラスデバイスの遮熱性能評価（スペクトル使用）

研究計画では「作製した調光ガラスデバイスの遮熱性能を、実際の太陽光下で実測・評価する」としており、当初連携企業の協力のもと測定の準備を進めていたが、アドバイザーミーティングにおいてアドバイザーより、調光ガラスの調光性能評価において（季節や天候、測定時刻の違い、更に調光デバイスの設置場所や方角などにより測定結果が変わる実測よりも）吸収スペクトル及び反射スペクトルを使用した定量的な数値評価が重要との指摘を受け、前項①(c)で開発した近赤外EC材料を用いて作製したEC調光デバイスに関して、スペクトル測定により遮熱状態（吸収状態）と消色状態（透過状態）のそれぞれの日射熱取得率等の数値データを算出し、評価した（未発表につき日射熱取得率等の数値データは割愛する）。

④ 通常のガラスの比較（遮光時において40%以上の遮熱率を目指し）

研究計画では「通常のガラスと比較して、遮光時において40%以上の遮熱率を目指す」としていたが、本件もアドバイザーから、「通常のガラス」や「40%以上の遮熱率」などの定義があいまいであり、より定量性の高い比較が必要との指摘を受けた。そこで前項で算出した日射熱取得率等の数値データを使用してライフサイクルアセスメント計算を行い、一般のガラス（単層ガラス及び複層ガラス）との二酸化炭素排出量の比較を行った。まず、単層ガラス及び複層ガラスそれぞれにおける調達・製造・輸送・廃棄の過程で生じる二酸化炭素排出量を算出した。次に近赤外EC調光ガラスにおける調達・製造・輸送・廃棄の過程で生じる二酸化炭素排出量を算出した。更に、近赤外EC調光ガラスの透明状態及び遮熱状態のそれぞれにおけるオフィスビルの室内空調の省エネ効果（二酸化炭素削減量）を算出したところ、近赤外EC調光ガラスでは、二酸化炭素削減量が（調達・製造・輸送・廃棄の過程による）二酸化炭素排出量を上回ることが判明した。

⑤ マイクロ波加熱法を用いたメタロ超分子ポリマーの短時間合成法（4分の1への時間短縮）の検討

メタロ超分子ポリマーは有機配位子と金属イオンを錯形成させることで得られるが、200°C以上の高温を必要とする錯形成反応は、オイルバス等を使用する従来の合成方法では実施困難であった。オイルバス等を用いた通常の加熱方法は、反応溶液中の原料を間接的に加熱する。一方で、マイクロ波による加熱は、原料自体を直接加熱するため反応時間の大幅短縮や溶剤などの廃棄物の低減が期待される。しかし、以前にマイクロ波を用いてメタロ超分子ポリマーを合成した例はなかった。そこで、（近赤外ECメタロ超分子ポリマーを含む）種々の有機配位子と金属イオンからなるメタロ超分子ポリマーをマイクロ波加熱による合成の検討を行い、加熱条件等の検討の結果、合成時間を1/24に短縮することに成功した。また、オイルバスを使用して加熱合成したメタロ超分子ポリマーと比較して、マイクロ波加熱により合成したメタロ超分子ポリマーは優れたEC特性を示すことも見出された（成果5）。これはマイクロ波加熱の反応時間が短時間であるため、メタロ超分子ポリマーの合成における副反応が生じにくく、得られるメタロ超分子ポリマーの純度が高いためだと考えられる。

## ⑥ 生産設備の概念設計の検討

項目⑤において、マイクロ波加熱がメタロ超分子ポリマーの合成に極めて有効であることが示された。また、メタロ超分子ポリマーの合成では触媒を使用しないので、合成後に触媒などを取り除くプロセスも不要である。そこで、オイルバス等を用いる既存の加熱合成・精製プロセスに対する、マイクロ波を使用した合成・精製プロセスの有機溶剤系廃棄物の削減効果を試算した。また、量産化に向けて、プロセス連続フロー及び連続槽型反応でのメタロ超分子ポリマーの生産設備の概念を設計した。

### 1. 5. 研究成果及び自己評価

#### 1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

##### <得られた研究成果の学術的意義>

メタロ超分子ポリマーのマイクロ波合成法の確立（成果5）、及びトリフェニルアミン部位を導入したメタロ超分子ポリマーにおける近赤外エレクトロクロミック特性（成果6）は特に学術的意義が大きい。

##### <環境政策等へ既に貢献した研究成果>

特に記載する事項はない。

##### <環境政策等へ貢献することが見込まれる研究成果>

本研究の成果に基づいて、優れた遮熱効果を示す近赤外EC調光ガラスデバイスが開発できれば、オフィスビルなどの窓への導入することで、季節に応じた効率的な採熱／遮熱が実現される。本EC調光ガラスの普及は、室内空調の省エネ化と、電力源である化石燃料からの二酸化炭素排出量の削減に寄与するため、日本の環境政策への貢献が期待される。

#### 1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価

<全体達成状況の自己評価> · · · · · 2. 目標を上回る成果をあげた

<サブテーマ1達成状況の自己評価> · · · · · 2. 目標を上回る成果をあげた

<サブテーマ2達成状況の自己評価> · · · · · 2. 目標を上回る成果をあげた

### 1. 6. 研究成果発表状況の概要

#### 1. 6. 1. 研究成果発表の件数

| 成果発表の種別 | 件数 |
|---------|----|
| 産業財産権   | 1  |
| 査読付き論文  | 6  |
| 査読無し論文  | 0  |
| 著書      | 1  |

|                  |    |
|------------------|----|
| 「国民との科学・技術対話」の実施 | 4  |
| 口頭発表・ポスター発表      | 33 |
| マスコミ等への公表・報道等    | 0  |
| 成果による受賞          | 0  |
| その他の成果発表         | 0  |

## 1. 6. 2. 主要な研究成果発表

| 成果番号 | 主要な研究成果発表<br>(「研究成果発表の一覧」から10件まで抜粋)  |
|------|--|
| 2    | Electrochromic Ru-Based Metallo-Supramolecular Polymer with Layered Inorganic-Organic Hybrid Nanocomposite for Improved Electrochemical Properties<br>K. Fujii, D. C. Santra, M. K. Bera, T. Wakahara, R. Nagahata, M. Higuchi<br>ACS Appl. Polym. Mater., 5(11), 8808-8821 (2023).<br>(Selected to supplementary cover)<br>10.1021/acsapm.3c00837 |
| 3    | Highly Durable Electrochromic Devices for More than 100,000 Cycles with Fe(II)-Based Metallo-Supramolecular Polymer by Optimization of the Device Conditions<br>S. Mondal, S. Roy, Y. Fujii, M. Higuchi<br>ACS Appl. Electron. Mater., 5(12), 6677-6685 (2023).<br>(Selected to supplementary cover)<br>10.1021/acsaelm.3c01143                    |
| 4    | In Situ Film Growth of Metallosupramolecular Polymer via Electropolymerization and Its Application as Electrochromic Film<br>C-W. Hu, S. Jena, T. Sato, J. Zhang, S. Moriyama, M. Higuchi<br>ACS Appl. Polym. Mater., 6(1), 441-447 (2024).<br>(Selected to supplementary cover)<br>10.1021/acsapm.3c01937   |
| 5    | Microwave-Assisted Quick Synthesis of Ru(II)-Based Metallosupramolecular Polymer for Improved Electrochromic Properties<br>U. Rana, D. C. Santra, B. Prusti, C. Chakraborty, T. Ikeda, Y. Saito, K. Takeuchi, R. Nagahata, M. Higuchi<br>Macromol. Chem. Phys., 225(5), 2300381 (2024).<br>(Selected to cover)<br>10.1002/macp.202300381           |
| 6    | Triple-Band Electrochromic Switching among Visible (400-750 nm), NearIR-I (750-1000 nm), and NearIR-II (1000-1600 nm) Regions with Triple-Redox-Active Metallosupramolecular Polymers<br>D. C. Santra, S. Mondal, B. Prusti, M. Higuchi<br>ACS Appl. Opt. Mater., 2(6), 1117-1127 (2024).<br>10.1021/acsaom.4c00108                                |
| 7    | Construction of Heterometallic Coordination Nanosheets Comprising Both Inert and Labile Metal Ions Together via Metalloligand Approach<br>M. K. Bera, S. Sarmah, A. Maity, M. Higuchi,<br>Inorg. Chem., 64(18), 8837-8844 (2025)   |

|   |  |
|---|--|
|   | (Selected to cover)<br>10.1021/acs.inorgchem.5c00224   |
| 8 | Recent Progress on Metallo-Supramolecular Polymers and the Electrochromic Devices Fabrication<br>Masayoshi Higuchi<br>J. Synth. Org. Chem., Japan, 81(11), 1089-1095 (2023). |

注：この欄の成果番号は「研究成果発表の一覧」と共通です。

### 1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動

特に記載する事項はない。

### 1. 7. 国際共同研究等の状況

#### ＜国際共同研究の概要＞

メタロ超分子ポリマー及びエレクトロクロミック調光デバイスの基礎研究に関して共同研究を実施した。

#### ＜相手機関・国・地域名＞

| 機関名（正式名称） | (本部所在地等の) 国・地域名 |
|-----------|-----------------|
| 国立台湾大学    | 台湾              |

注：国・地域名は公的な表記に準じます。

### 1. 8. 研究者略歴

#### ＜研究者（研究代表者及びサブテーマリーダー）略歴＞

| 研究者氏名 | 略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）   |
|-------|--|
| 樋口昌芳  | 研究代表者及びサブテーマ1リーダー<br>大阪大学工学研究科博士後期課程修了<br>博士（工学）<br>慶應義塾大学専任講師を経て、<br>現在、物質・材料研究機構グループリーダー<br>大阪大学招へい教授<br>専門は高分子錯体化学、研究テーマはエレクトロクロミック材料 |
| 長畠律子  | サブテーマ2リーダー<br>山形大学博士課程修了<br>博士（工学）<br>現在、産業技術総合研究所主任研究員<br>専門はマイクロ波合成  |

## 2. 研究成果発表の一覧

注：この項目の成果番号は通し番号です。

### (1) 産業財産権

| 成果番号 | 出願年月日   | 発明者       | 出願者       | 名称                            | 出願以降の番号  |
|------|---------|-----------|-----------|-------------------------------|--|
| 1    | 2022年8月 | 樋口昌芳、藤井幸男 | 物質・材料研究機構 | 積層体、組成物、及びエレクトロクロミックデバイスの製造方法 | 特願2022-126022<br>PCT/2023/018874<br>(国際出願日：<br>2023年5月22日) |

### (2) 論文

<論文>

| 成果番号 | 発表年度 | 成果情報   | 主たるサブテーマ | 査読の有無 |
|------|------|--|----------|-------|
| 2    | 2023 | Electrochromic Ru-Based Metallo-Supramolecular Polymer with Layered Inorganic-Organic Hybrid Nanocomposite for Improved Electrochemical Properties<br>K. Fujii, D. C. Santra, M. K. Bera, T. Wakahara, R. Nagahata, M. Higuchi<br>ACS Appl. Polym. Mater., 5(11), 8808-8821 (2023).<br>(Selected to supplementary cover)<br>10.1021/acsapm.3c00837 | 2        | 有     |
| 3    | 2023 | Highly Durable Electrochromic Devices for More than 100,000 Cycles with Fe(II)-Based Metallo-Supramolecular Polymer by Optimization of the Device Conditions<br>S. Mondal, S. Roy, Y. Fujii, M. Higuchi<br>ACS Appl. Electron. Mater., 5(12), 6677-6685 (2023).<br>(Selected to supplementary cover)<br>10.1021/acsaelm.3c01143                    | 1        | 有     |
| 4    | 2023 | In Situ Film Growth of Metallosupramolecular Polymer via Electropolymerization and Its Application as Electrochromic Film<br>C-W. Hu, S. Jena, T. Sato, J. Zhang, S. Moriyama, M. Higuchi<br>ACS Appl. Polym. Mater., 6(1), 441-447 (2024).<br>(Selected to supplementary cover)<br>10.1021/acsapm.3c01937   | 1        | 有     |
| 5    | 2023 | Microwave-Assisted Quick Synthesis of Ru(II)-Based Metallosupramolecular Polymer for Improved Electrochromic Properties<br>U. Rana, D. C. Santra, B. Prusti, C. Chakraborty, T. Ikeda, Y. Saito, K. Takeuchi, R. Nagahata, M. Higuchi<br>Macromol. Chem. Phys., 225(5), 2300381 (2024).<br>(Selected to cover)<br>10.1002/macp.202300381           | 2        | 有     |
| 6    | 2024 | Triple-Band Electrochromic Switching among   | 1        | 有     |

|   |      |  |   |   |
|---|------|--|---|---|
|   |      | Visible (400-750 nm), NearIR-I (750-1000 nm), and NearIR-II (1000-1600 nm) Regions with Triple-Redox-Active Metallosupramolecular Polymers<br>D. C. Santra, S. Mondal, B. Prusti, M. Higuchi<br>ACS Appl. Opt. Mater., 2(6), 1117-1127 (2024).<br>10.1021/acsaom.4c00108               |   |   |
| 7 | 2024 | Construction of Heterometallic Coordination Nanosheets Comprising Both Inert and Labile Metal Ions Together via Metallocligand Approach<br>M. K. Bera, S. Sarmah, A. Maity, M. Higuchi, Inorg. Chem., 64(18), 8837-8844 (2025)<br>(Selected to cover)<br>10.1021/acs.inorgchem.5c00224 | 1 | 有 |

## (3) 著書

&lt;著書&gt;

| 成果番号 | 発表年度 | 成果情報   | 主たるサブテーマ |
|------|------|--|----------|
| 8    | 2023 | Recent Progress on Metallo-Supramolecular Polymers and the Electrochromic Devices Fabrication<br>Masayoshi Higuchi<br>J. Synth. Org. Chem., Japan, 81(11), 1089-1095 (2023). | 1        |

## (4) 口頭発表・ポスター発表

&lt;口頭発表・ポスター発表&gt;

| 成果番号 | 発表年度 | 成果情報   | 主たるサブテーマ | 査読の有無 |
|------|------|--|----------|-------|
| 9    | 2022 | XVII International Clay Conference, (オンライン, 2022年7月25~29日),<br>Electrochromic nanocomposites of Fe(II)-based Metallo-supramolecular polymer and a layered inorganic-organic hybrid. (Kazuko Fujii, Manas Kumar Bera Bera, Dines Chandra Santra, Masayoshi Higuchi) (口頭)  | 1        | 無     |
| 10   | 2022 | 第65回粘土科学討論会 (島根大学, 2022年9月7日~8日)<br>Ru(II)メタロ超分子ポリマーへの層状無機-イミダゾリン共有結合体の添加とエレクトロクロミック特性. (藤井 和子、Dines Chandra Santra、Manas Kumar Bera、若原 孝次、長畠 律子、樋口 昌芳) (口頭)   | 2        | 無     |
| 11   | 2022 | The 29th International Display Workshops, (Fukuoka, 2022年12月14日~16日)<br>Electrochromic Composites of Metallo-supramolecular Polymers and a Layered Inorganic-organic Covalently Bonded Hybrid. (Kazuko Fujii, Manas Kumar Bera Bera, Dines Chandra Santra, Takatsugu Wakahara, Ritsuko Nagahata, Masayoshi Higuchi) (口頭) | 1        | 有     |
| 12   | 2022 | 日本化学会第103春季年会 (東京理科大学、2023年3月23日~25日)<br>Ru(II)メタロ超分子ポリマーと層状無機-イミダゾ  | 2        | 無     |

|    |      |   |   |   |
|----|------|---|---|---|
|    |      | リン共有結合体との複合化によるエレクトロクロミック特性向上. (藤井 和子, Dines Chandra Santra, Manas Kumar Bera, 若原 孝次, 長畠 律子, 樋口 昌芳) (口頭)  |   |   |
| 13 | 2022 | 電気化学会第90回大会 (東北工業大学、2023年3月27日～29日)<br>メタロ超分子ポリマーを用いたエレクトロクロミック調光デバイスの開発. (樋口 昌芳) (口頭)  | 1 | 無 |
| 14 | 2023 | 第72回高分子学会年次大会 (2023年5月24日～26日)<br>Ru(II)メタロ超分子ポリマー／層状化合物複合体のエレクトロクロミック特性 (藤井 和子 サントラ ディネス チャンドラ ベラ マナス クマール 若原孝次 長畠律子 樋口 昌芳(NIMS, AIST)) (口頭)   | 2 | 無 |
| 15 | 2023 | 第72回高分子学会年次大会 (2023年5月24日～26日)<br>Design and Synthesis of Ru-Carbon Covalent Bonded Metallo-supramolecular Polymers for Electrochromic Application. (Banchhanidhi Prusti, Masayoshi Higuchi) (ポスター)   | 1 | 無 |
| 16 | 2023 | 第66回粘土科学討論会 (2023年9月12日～13日)<br>層状無機-イミダゾリン共有結合体／Ru(II)メタロ超分子ポリマー複合体のエレクトロクロミック特性評価. (藤井和子) (口頭)  | 2 | 無 |
| 17 | 2023 | 第72回高分子討論会 (2023年9月26日～28日)<br>Ru(II)メタロ超分子ポリマー／層状化合物複合体のエレクトロクロミック特性評価. (藤井 和子 サントラ ディネス チャンドラ ベラ マナス クマール 若原孝次 坂田和彦 長畠律子 樋口 昌芳 (NIMS, AIST)) (ポスター)   | 2 | 無 |
| 18 | 2023 | 第72回高分子討論会 (2023年9月26日～28日)<br>Ruthenium-Based Electrochromic Metallo-supramolecular Polymer: Design, Synthesis and Device Application (Banchhanidhi Prusti, Masayoshi Higuchi) (ポスター)  | 1 | 無 |
| 19 | 2023 | The 30th International Display Workshops(IDW 23), (Niigata, 2023年12月6日～8日)<br>Exploring Organometallic Bonding in Heterometallo-Supramolecular Polymers: A Path to NIR Electrochromism (Banchhanidhi Prusti, Takashi Sato, Chih-Wei Hu, Jian Zhang, Masayoshi Higuchi) (口頭)   | 1 | 有 |
| 20 | 2023 | The 30th International Display Workshops(IDW 23), (Niigata, 2023年12月6日～8日)<br>Ru(II)-based Metallo-supramolecular Polymer/Layered Inorganic-organic Covalently Bonded Hybrid Composites for Improved Electrochromic Properties (Kazuko Fujii, Dines Chandra Santra, Manas Kumar Bera, Takatsugu Wakahara, Kazuhiko Sakata, Ritsuko Nagahata, Masayoshi Higuchi) | 2 | 有 |
| 21 | 2023 | 日本化学会第104春季年会 (日本大学 2024年3月18日～21日)<br>Tailoring Electrochromic Properties through Ru-Carbon Covalent Bonds: Design and Synthesis   | 1 | 無 |

|    |      |  |   |   |
|----|------|--|---|---|
|    |      | of Metallocsupramolecular Polymers (Banchhanidhi Prusti, Takashi Sato, Ritsuko Nagahata, Masayoshi Higuchi) (口頭)   |   |   |
| 22 | 2023 | 日本化学会第104春季年会（日本大学 2024年3月18日～21日）<br>層状無機-イミダゾリン共有結合体添加による Ru(II)メタロ超分子ポリマーのエレクトロクロミック特性向上。（藤井 和子、Dines Chandra Santra、Manas Kumar Bera、坂田 和彦、若原 孝次、長畠 律子、樋口 昌芳）（ポスター）  | 2 | 無 |
| 23 | 2024 | 一般社団法人ニューガラスフォーラム 若手懇談会 第153回講演会（日本ガラス工業センター 2024年5月10日）<br>メタロ超分子ポリマーを用いたエレクトロクロミック調光ガラスの開発（樋口昌芳）（招待講演）   | 1 | 無 |
| 24 | 2024 | Display Week 2024 (サンノゼ 2024年5月12～5月17日)<br>Electrochromic Display Devices with Metallo-Supramolecular Polymers. (Masayoshi Higuchi) (口頭)  | 1 | 有 |
| 25 | 2024 | 第73回高分子学会年次大会（仙台 2024年6月5日～7日）<br>Electrochromic printing using metallocsupramolecular polymer 「メタロ超分子ポリマーを用いたエレクトロクロミック印刷」（樋口昌芳、Zhang Jian、Jena Ranjan）（口頭）   | 1 | 無 |
| 26 | 2024 | 第73回高分子学会年次大会（仙台 2024年6月5日～7日）<br>Quick Synthesis of Ru(II)-Based Metallocsupramolecular Polymer with Enhanced Electrochromic Properties Using Microwave Assistance (Banchhanidhi Prusti, Utpal Rana, Ritsuko Nagahata, Masayoshi Higuchi) (口頭)  | 2 | 無 |
| 27 | 2024 | 61st Annual Meeting of The Clay Minerals Society and 5th Asian Clay Conference (ハワイ大学、ホノルル 2024年6月3日～7日)<br>Layered Inorganic-Organic Covalently Bonded Hybrid/Ru-Based Metallo-Supramolecular Polymer Composite For Improved Electrochromic Properties (Kazuko Fujii, Dines Chandra Santra, Manas Kumar Bera, Takatsugu Wakahara, Ritsuko Nagahata, Masayoshi Higuchi) (口頭) | 2 | 無 |
| 28 | 2024 | 映像情報メディア学会 2024年年次大会（札幌 2024年8月28日～30日）<br>KIBME/ITE Joint Session<br>Electrochromic Display Devices with Metallocsupramolecular Polymers ( Masayoshi Higuchi) (招待講演)  | 1 | 無 |
| 29 | 2024 | 映像情報メディア学会 2024年年次大会（札幌 2024年8月28日～30日）<br>Electrochromic Rewritable Sheets with Metallocsupramolecular Polymer (樋口 昌芳, ZHANG Jian, JENA Satya Ranjan ) (口頭)   | 1 | 無 |

|     |      |  |   |   |
|-----|------|--|---|---|
| 3 0 | 2024 | 15th International Meeting on Electrochromism<br>(リスボン 2024年9月2日～6日)<br>Recent Progress on Electrochromic Devices with<br>Metallosupramolecular Polymers<br>(Masayoshi Higuchi) (口頭)   | 1 | 無 |
| 3 1 | 2024 | PRiME 2024 (ホノルル 2024年10月6日～11日)<br>Electrochromic Devices with<br>Metallosupramolecular Polymers (Masayoshi Higuchi) (招待講演)   | 1 | 無 |
| 3 2 | 2024 | PRiME 2024 (ホノルル 2024年10月6日～11日)<br>High Performance and Durable Electrochromic<br>Device of Fe(II)-Based Metallo-Supramolecular<br>Polymer for Smart Electrochromic Window<br>Application (Susmita Roy, Sanjoy Mandal,<br>Masayoshi Higuchi) (口頭)   | 1 | 無 |
| 3 3 | 2024 | The 31th International Display Workshops<br>(IDW' 24) (Sapporo 2024年12月4日～6日)<br>Developing a Novel Image Analytical Method for<br>Studying the Electrochromic Properties of<br>Metallo-Supramolecular Polymer-Based<br>Electrochromic Devices (Shifa Sarkar, Takefumi<br>Yoshida, Masayoshi Higuchi) (口頭) | 1 | 有 |
| 3 4 | 2024 | The 31th International Display Workshops<br>(IDW' 24) (Sapporo 2024年12月4日～6日)<br>Synthesis of Electrochromic Supramolecular<br>Polymers Driven by Data Science (Aiwei Zhao,<br>Dines Chandra Santra, Kenji Nagata, Junya<br>Sakurai, Masahiko Demura, Masayoshi Higuchi)<br>(口頭)                           | 1 | 有 |
| 3 5 | 2024 | The 12th Singapore International Chemistry<br>Conference (SICC-12) (Singapore 2024年12月9-<br>13日)<br>Electrochromic Metallo-Supramolecular<br>Polymers and the Smart Window Application<br>(Masayoshi Higuchi) (招待講演)   | 1 | 無 |
| 3 6 | 2024 | 電気化学会第92回大会 (東京農工大 2025年3月18<br>日～20日)<br>Development of a Novel 2D Image Analysis Method<br>for Quantitative Evaluation of Electrochromic<br>Device Properties (Shifa Sarkar, Takefumi<br>Yoshida, Masayoshi Higuchi) (口頭)  | 1 | 無 |
| 3 7 | 2024 | 電気化学会第92回大会 (東京農工大 2025年3月18<br>日～20日)<br>メタロ超分子ポリマーを用いたエレクトロクロミックデバイス (ZHAO Aiwei, SANTRA Dines<br>Chandra, 永田 賢二, 櫻井 慎也, 出村 雅彦, 樋口 昌芳) (口頭)  | 1 | 無 |
| 3 8 | 2024 | 電気化学会第92回大会 (東京農工大 2025年3月18<br>日～20日)<br>Synthesis of Ru-Zn based metallosupramolecular<br>polymer with electrochromic and<br>electrofluorochromic properties (Tingwei<br>Zhang, Satya Ranja Jena, Masayoshi Higuchi) (口<br>頭)  | 1 | 無 |

|    |      |   |   |   |
|----|------|---|---|---|
| 39 | 2024 | 日本化学会第105春季年会（関西大学 2025年3月26日～29日）<br>2-Dimensional Image Data Analysis of Color Dynamics in Electrochromic Display Devices (Shifa Sarkar, Takefumi Yoshida, Masayoshi Higuchi) (口頭)                                      | 1 | 無 |
| 40 | 2024 | 日本化学会第105春季年会（関西大学 2025年3月26日～29日）<br>Introduction of Data Science in the Development of Electrochromic Polymers (Aiwei Zhao, Dines Chandra Santra, Kenji Nagata, Junya Sakurai, Masahiko Demura, Masayoshi Higuchi) (口頭) | 1 | 無 |
| 41 | 2024 | 日本化学会第105春季年会（関西大学 2025年3月26日～29日）<br>Synthesis of Ru-Zn based metallosupramolecular polymer with electrochromic and electrofluorochromic properties (Tingwei Zhang, Satya Ranja Jena, Masayoshi Higuchi) (ポスター)          | 1 | 無 |

## (5) 「国民との科学・技術対話」の実施

| 成果番号 | 発表年度 | 成果情報   | 主たるサブテーマ |
|------|------|--|----------|
| 42   | 2022 | 映像情報メディア学会2022年年次大会（主催：一般社団法人映像情報メディア学会、2022年8月24日～8月26日、オンライン）、不揮発表示（電源を切っても表示が残る特性であり）デバイスの可能性と将来展望について紹介。     | 1        |
| 43   | 2022 | 第15回川崎国際環境技術展（主催：川崎国際環境技術展実行委員会、2022年11月17日～18日、カルツツかわさき）、電気で遮光状態を変えることができる窓（エレクトロクロミック調光ガラス）の開発の成果紹介。           | 1        |
| 44   | 2023 | NIMS公開2023（主催：国立研究開発法人物質材料研究機構、2023年8月8日、国立研究開発法人物質材料研究機構並木地区）、NIMSで開発したエレクトロクロミック材料を用いて調光ガラスデバイス作製の体験実験を行った。    | 1        |
| 45   | 2024 | NIMS一般公開2024（主催：国立研究開発法人物質材料研究機構、2024年5月26日、国立研究開発法人物質材料研究機構並木地区）、NIMSで開発したエレクトロクロミック材料を用いて調光ガラスデバイス作製の体験実験を行った。 | 1        |

## (6) マスメディア等への公表・報道等

| 成果番号 | 発表年度 | 成果情報         | 主たるサブテーマ |
|------|------|--------------|----------|
|      |      | 特に記載する事項はない。 |          |
|      |      |              |          |
|      |      |              |          |

## (7) 研究成果による受賞

| 成果番号 | 発表年度 | 成果情報         | 主たるサブテーマ |
|------|------|--------------|----------|
|      |      | 特に記載する事項はない。 |          |
|      |      |              |          |
|      |      |              |          |

## (8) その他の成果発表

| 成果番号 | 発表年度 | 成果情報         | 主たるサブテーマ |
|------|------|--------------|----------|
|      |      | 特に記載する事項はない。 |          |
|      |      |              |          |
|      |      |              |          |
|      |      |              |          |
|      |      |              |          |

## 権利表示・義務記載

特に記載する事項はない。

この研究成果報告書の文責は、研究課題に代表者又は分担者として参画した研究者にあります。  
 この研究成果報告書の著作権は、引用部分及び独立行政法人環境再生保全機構（ERCA）のロゴマークを除いて、原則的に著作者に属します。  
 ERCAは、この文書の複製及び公衆送信について許諾されています。

**Abstract****[Project Information]**

Project Title : Development of Near-Infrared Electrochromic Materials for Heat-Shield Control

Project Number : JPMEERF20221M02

Project Period (FY) : 2022-2024

Principal Investigator : Higuchi Masayoshi

(PI ORCID) : ORCID0000-0001-9877-1134

Principal Institution : National Institute for Materials Science

Tsukuba City, Ibaraki, JAPAN

Tel: +81298604744

E-mail: HIGUCHI.Masayoshi@nims.go.jp

Cooperated by : National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Keywords : Heat-shield, Near-infrared, Electrochromic, Redox, Metallosupramolecular polymer

**[Abstract]**

Two themes were carried out: development of near-infrared electrochromic materials and devices, and development of an ultra-efficient synthesis method for near-infrared electrochromic materials. Overall, we succeeded in developing a metallo-supramolecular polymer that exhibits near-infrared EC properties, with a transmittance difference of more than 50% between the transmitting and blocking states in the near-infrared region. In sub-theme 1, we succeeded in developing a metallo-supramolecular polymer with a two-dimensional nanosheet structure that exhibits multi-color electrochromic properties by precisely introducing two types of metal species. In sub-theme 2, we developed a new method for synthesizing metallo-supramolecular polymers in a short time by using microwaves.

**[References]**

Microwave-Assisted Quick Synthesis of Ru(II)-Based Metallosupramolecular Polymer for Improved Electrochromic Properties, U. Rana, D. C. Santra, B. Prusti, C. Chakraborty, T. Ikeda, Y. Saito, K. Takeuchi, R. Nagahata, M. Higuchi, *Macromol. Chem. Phys.*, 225(5), 2300381 (2024). (Selected to cover) 10.1002/macp.202300381

Triple-Band Electrochromic Switching among Visible (400-750 nm), NearIR-I (750-1000 nm), and NearIR-II (1000-1600 nm) Regions with Triple-Redox-Active Metallosupramolecular Polymers, D. C. Santra, S. Mondal, B. Prusti, M. Higuchi, *ACS Appl. Opt. Mater.*, 2(6), 1117-1127 (2024). 10.1021/acsao.4c00108

Construction of Heterometallic Coordination Nanosheets Comprising Both Inert and Labile Metal

Ions Together via Metalloligand Approach, M. K. Bera, S. Sarmah, A. Maity, M. Higuchi, Inorg. Chem., 64(18), 8837–8844 (2025). (Selected to cover) 10.1021/acs.inorgchem.5c00224

This study was supported by the Environment Research and Technology Development Fund of the ERCA (JPMEERF20221M02) funded by the Ministry of the Environment.