

藤森科学技術振興財団
研究実施概要報告書

(西暦) 2026年 3月 20日

公益財団法人藤森科学技術振興財団
理事長 藤森 行彦 殿

藤森科学技術振興財団の助成金による研究が終了しましたので、下記のとおり報告をいたします。

所属機関 九州大学 大学院総合理工学研究院

職 名 准教授

氏 名 石田洋平



【提出書類】

- (1) 研究実施概要報告書 (本紙)
添付書類 (A4 版 3 枚以内) : 研究状況を示す写真等の資料
- (2) 収支報告書
添付書類 : 助成金を充当した経費の領収書
領収書を添付しない場合 : 支払一覧表と支払部門担当者記名捺印

(1) テーマ

太陽光エネルギーを化学固定する人工光合成システム

(2) 本研究の期間

(西暦) 2025年4月～2026年3月

(3) 本研究の目的

植物・光合成微生物が約 27 億年以上の時間をかけて地球上の CO₂ を光合成により固定してきた結果としての化石資源を人類は産業革命以降、極めて短期間に自身の活動の為のエネルギー源として、いわば「食いつぶし型」の消費を続けている。その結果、地球規模でのエネルギー危機と共に膨大な CO₂ の排出に起因するとされる気候変動など極めて深刻な地球環境への懸念を誘起している。CO₂ を排出しない新エネルギーの創出は、人類の存続を賭けた最優先課題と言っても過言ではない。地球に降り注ぐ太陽光エネルギーは現在の人類の消費エネルギーの約 1 万倍におよぶことから次世代エネルギーの本命であることには論を待たない。当面は太陽光エネルギーを直接電気エネルギーに変換する太陽電池の実用化の展開が急務であるが、電気エネルギーと共に化学エネルギー（物質）として貯蔵し、必要な時に必要な量のエネルギーを取り出せる新エネルギー系、人工光合成系を構築することが喫緊の課題となっている。

本研究では、申請者独自の静電的な化学反応場を利用した分子集合体の精密制御手法を基に、太陽光を用いて水と CO₂ を原料として石油に類似したエネルギー・化学原料資源となりうる化学物質を合成する人工光合成系の構築を最終目標とし、天然光合成のように水分子を酸化して得られた電子を CO₂ 還元等に利用し太陽光エネルギーを化学エネルギーとして保存する光エネルギー変換系を構築することを目的とした。

(4) 本研究の概要

天然植物の光合成は理想的な（光）化学反応の一つであり、極めて効率良く可視光を捕集し、二酸化炭素を原料とした光エネルギー変換反応を実現している。光合成細菌中では適切な性質を持ったクロロフィルなどの色素がタンパク質により適切に配列、配向されることで高効率な光エネルギー移動反応・電子移動反応を達成している。このような精密な分子集合体構造の制御がなければ光密度の薄い太陽光下では二酸化炭素還元や糖生成などが進行しない。生体内では柔軟性と規則性を併せ持つタンパク質が反応場として機能しており、人工合成系を実現するためには精緻な色素集合体構造と複雑な光化学反応過程を再現、組織化しなければならない。

本研究では、静電的な相互作用を与える無機ナノシート材料を用いることで、多重の静電相互作用によって柔軟性を有する分子集合構造を制御し、天然光合成のように水分子を酸化して得られた電子を CO₂ 還元等に利用し太陽光エネルギーを化学エネルギーとして保存する光エネルギー変換系を構築することを目的とした。従来の研究では光合成反応の素過程（例えば光捕集、電荷分離、物質変換反応など）の化学再現は進んだが、システムとして一連の流れを共役させることはできなかった。本研究により、生体内におけるタンパク質のように無機ナノシートが色素分子を配列させる反応場として機能することが明らかとなり、CO₂ 還元系に使用する分子性金属クラスターの合成に成功した。これらは、人工的に光合成反応のエッセンスを再現できたことを意味する。

(5) 本研究の内容及び成果

本研究では具体的に、① 水の酸化により分子状酸素や過酸化水素を生成し電子を取り出す半導体光触媒系（グラフェン状カーボンナイトライド：g-C₃N₄）、② 取り出した電子を高効率に運ぶと同時に多重静電相互作用により分子集合体構造を制御可能な半導体系（チタニアナノシート：Ti_{0.9}O_{2□0.1}^{-0.1}）、③ 水酸化系から電子を受け取る時間間隔との整合を保つ光捕集系、④ CO₂還元系（分子性金属クラスター）に分けて実施した。

まず、水酸化触媒として g-C₃N₄ を超分子前駆体法で合成し、構造・吸収特性の解析から可視光域での O₂ 生成活性を確認した。

次に、電子輸送と分子配列制御を担うチタニア系ナノシートを用い、高密度かつ規則的なポルフィリン集合体の形成に成功した。ADF-STEM 観察により Pt および Pd マーカーによる混合集合体の原子スケールでの均一分布を初めて実証した。

さらに、CO₂還元触媒として、部分的にカチオン化した Au₂₅クラスターを新規合成に成功した。このカチオン化クラスターは、CO₂還元系における電子受容体としての機能が期待され、他の光触媒成分との静電的・電子的相互作用による還元反応の促進に資することが示唆された。これらの結果は、光合成反応のエッセンスを再現できたことを意味している。分子設計とナノ構造制御を融合した統合的光触媒系の構築可能性を示すことができたのは本研究の大きな成果である。

(6) 本研究の考察

前項の①～④において人工光合成のエッセンスは再現することができたと考えられる。今後の課題は、各素子間の電子移動効率および CO₂還元選択性の向上であると考えられる。上記の研究成果を踏まえて①～④を連結させ、水の光酸化で得られた電子を運び二酸化炭素還元系に利用する人工光合成の全体系を構築する。その後、天然の光合成反応が有する量子効率（およそ 1%）を凌駕する性能を達成するべく各要素材料、それらの連結手法の最適化を行いたい。

(7) 共同研究者（所属機関名、役職、氏名）

該当しません。

(8) 本研究の成果の公表先

- 石田洋平「二次元静電場を利用した分子集合系の光機能」、第 46 回光化学若手の会、2025 年 6 月 14 日（招待講演）
- Yohei Ishida “Photochemistry of 2D Molecular Assemblies on Clay Mineral Nanosheets” 18th International Clay Conference (ICC) 2025 年 7 月 17 日（招待講演）
- Yohei Ishida “Photochemistry of Precise Molecular Assemblies on Two-dimensional Coulombic Fields”光化学討論会、2025 年 9 月 5 日（光化学協会若手研究者賞受賞講演）
- Yamaguchi, S.; **Ishida, Y.*** "Exploratory Imaging of Counter-Ions on Monolayer Clay via Atomic-Resolution Electron Microscopy" Clay Sci. 2025, in press. 【受賞論文：日本粘土学会奨励賞】

[注] この報告書を当財団のホームページ等に掲載します。予めご了承ください。