

領域略称名：人工光合成
領域番号：2406

平成29年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「人工光合成による太陽光エネルギーの物質変換：
実用化に向けての異分野融合」

(領域設定期間)

平成24年度～平成28年度

平成29年6月

領域代表者 (首都大学大学東京・都市環境科学研究科・特任教授・井上 晴夫)

目 次

1. 研究領域の目的及び概要	8
2. 研究領域の設定目的の達成度	10
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	13
4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況	14
5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	16
6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	19
7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況	24
8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	26
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	30
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	31
11. 総括班評価者による評価	32

研究組織

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00	24107001 人工光合成による太陽光エネルギーの物質変換：実用化に向けての異分野融合	平成24年度～ 平成28年度	井上 晴夫	首都大学東京・大学院 都市環境科学研究科・特任教授	5
A01 計	24107002 光捕集機能を有する人工光合成システム	平成24年度～ 平成28年度	民秋 均	立命館大学・生命科学部・教授	3
A02 計	24107003 水の酸化光触媒機能を有する人工光合成システム	平成24年度～ 平成28年度	井上 晴夫	首都大学東京・大学院 都市環境科学研究科・特任教授	5
A03 計	24107004 水素発生光触媒機能を有する人工光合成システム	平成24年度～ 平成28年度	工藤 昭彦	東京理科大学・理学部・教授	4
A04 計	24107005 二酸化炭素還元光触媒能を有する人工光合成システム	平成24年度～ 平成28年度	石谷 治	東京工業大学・理学院 化学系・教授	4
統括・支援・計画研究 計 5 件					
A01 公	25107506 チューブ状メソポーラスシリカを利用した光捕集複合体の配列制御	平成25年度～ 平成26年度	山口 央	茨城大学・理学部・准教授	1
A01 公	25107507 生体分子による新しい光電変換系の構築	平成25年度～ 平成26年度	山本 洋平	筑波大学・数理物質系・准教授	1
A01 公	25107510 単一指向性光伝達を可能とする光捕集錯体ナノシート・ナノワイヤ	平成25年度～ 平成26年度	坂本 良太	東京大学・理学(系)研究科(研究院)・助教	3
A01 公	25107511 プラズモニック光捕集アンテナ界面の構築	平成25年度～ 平成26年度	立間 徹	東京大学・生産技術研究所・教授	1
A01 公	25107513 配位高分子鎖を利用した光捕集系の構築	平成25年度～ 平成26年度	柘植 清志	富山大学・理工学研究部(理学)・教授	3
A01 公	25107514 多孔質ガラス導光型光化学反	平成25年度～ 平成26年度	宇佐美 久尚	信州大学・学術研究院 繊維学系・教授	1

	応器の開発研究				
A01 公	25107519 拡張ロードミンに基づく堅牢な光アンテナシステムの構築	平成 25 年度～ 平成 26 年度	荒谷 直樹	奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・准教授	1
A01 公	25107521 光物質変換系との連結を目指した新規ナノシート型光捕集系の構築	平成 25 年度～ 平成 26 年度	高木 慎介	首都大学東京・都市環境科学研究科・准教授	1
A01 公	25107525 光合成細菌の生合成反応を利用した天然型光捕集超分子の機能化	平成 25 年度～ 平成 26 年度	佐賀 佳央	近畿大学・理工学部・准教授	1
A01 公	25107529 ナノフォトニック構造を用いた人工光合成系の光捕集効率化と機能解明	平成 25 年度～ 平成 26 年度	梶 貴博	独立行政法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室・研究員	1
A02 公	25107501 可視・近赤外局在プラズモンによる水の完全分解システムの構築	平成 25 年度～ 平成 26 年度	三澤 弘明	北海道大学・電子科学研究所・教授	3
A02 公	25107512 金属酸化物ナノシートで創る反応場分離型水の酸化光触媒	平成 25 年度～ 平成 26 年度	前田 和彦	東京工業大学・理工学研究科・准教授	1
A02 公	25107517 水分解触媒部位の周辺環境から理解する光合成蛋白質における酸素発生反応	平成 25 年度～ 平成 26 年度	石北 央	東京大学・先端科学技術研究センター・教授	1
A02 公	25107520 高原子価典型元素ポルフィリン錯体による水分子の多電子酸化活性化反応系の開発	平成 25 年度～ 平成 26 年度	白上 努	宮崎大学・工学部・教授	1
A02 公	25107524 光合成酸素発生中心の仕組みを組み込んだ複核ルテニウム錯体による水の酸化反応	平成 25 年度～ 平成 26 年度	和田 亨	立教大学・理学部・准教授	1
A02 公	25107526 水の酸化の超高効率化を目指した超分子錯体触媒の創製	平成 25 年度～ 平成 26 年度	正岡 重行	分子科学研究所・生命・錯体分子科学研究領域・准教授	2
A03 公	25107502 元素活用型 3d 金属錯体水素発生光触媒の構築	平成 25 年度～ 平成 26 年度	加藤 昌子	北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・教授	3

A03 公	25107503 光触媒粒子へのビルトイン電 場導入による励起電子-正孔再 結合制御	平成 25 年度～ 平成 26 年度	大谷 文章	北海道大学・触媒化学 研究センター・教授	1
A03 公	25107505 有機 p/n 接合体を基盤とした水 素発生用光触媒デバイスの創 成研究	平成 25 年度～ 平成 26 年度	阿部 敏之	弘前大学・理工学研究 科・教授	1
A03 公	25107516 水素発生オリエンテッドエピ 構造 3C-SiC による高効率水素 発生光触媒の実現	平成 25 年度～ 平成 26 年度	加藤 正史	名古屋工業大学・工学 (系)研究科(研究院)・准 教授	1
A03 公	25107518 高光起電力を発生する化合半 導体へテロ接合光電極による 極低バイアス水分解	平成 25 年度～ 平成 26 年度	池田 茂 大	大阪大学・太陽エネル ギー化学研究センタ ー・准教授	1
A03 公	25107522 水素合成触媒としての応用を 視野に入れたヒドロゲナーゼ の構造・技術基盤の確立	平成 25 年度～ 平成 26 年度	庄村 康人	兵庫県立大学・生命理 学研究科・助教	1
A03 公	25107523 分光計測による光触媒反応効 率決定因子の解明	平成 25 年度～ 平成 26 年度	加藤 隆二	日本大学・工学部・教 授	1
A04 公	25107504 アリアルホウ素置換遷移金属 錯体による二酸化炭素の光還 元反応	平成 25 年度～ 平成 26 年度	喜多村 昇	北海道大学・理学(系) 研究科(研究院)・教授	2
A04 公	25107508 金属錯体及びポルフィリン超 分子を用いた CO ₂ 光還元触媒 系の構築	平成 25 年度～ 平成 26 年度	小島 隆彦	筑波大学・数理物質 系・教授	1
A04 公	25107509 超強磁場を用いた金属錯体の 電子状態の解明	平成 25 年度～ 平成 26 年度	若狭 雅信	埼玉大学・理工学研究 科・教授	3
A04 公	25107515 水を電子源とした二酸化炭素 の還元反応のための高品質微 結晶光触媒の開発	平成 25 年度～ 平成 26 年度	吉田 寿雄	京都大学・人間・環境 学研究科(研究院)・教 授	2
A04 公	25107527 フェムト秒分子動画撮影法に よる光機能性金属錯体の機構	平成 25 年度～ 平成 26 年度	野澤 俊介	大学共同利用機関法 人高エネルギー加速 器研究機構・物質構造	1

	解明			科学研究所・准教授	
A01 公	15H00860 共役炭素ナノ材料およびペプチド複合体による超広域光捕集系の構築	平成 27 年度～ 平成 28 年度	山本 洋平	筑波大学・数理物質系・准教授	3
A01 公	15H00862 光捕集ジピリン金属錯体ナノシート・ナノワイヤ：化学エネルギー変換系との融合	平成 27 年度～ 平成 28 年度	坂本 良太	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教	3
A01 公	15H00863 プラズモニック光捕集アンテナ界面による反応増強	平成 27 年度～ 平成 28 年度	西 弘泰	東京大学・生産技術研究所・助教	2
A01 公	15H00868 混晶形成を用いた混合型配位高分子合成による光捕集系の開発	平成 27 年度～ 平成 28 年度	柘植 清志	富山大学・大学院理工学研究部(理学)・教授	3
A01 公	15H00873 (重複制限の為廃止) ヘムタンパク質を用いた光エネルギー捕集系モデルの構築とエネルギー・物質変換	平成 27 年度～ 平成 28 年度	林 高史	大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授	2
A01 公	15H00876 電荷非局在型色素に基づく光捕集システムの構築	平成 27 年度～ 平成 28 年度	荒谷 直樹	奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・准教授	1
A01 公	15H00878 カロテノイドを光捕集系とするレチナルタンパク質の創出と展開	平成 27 年度～ 平成 28 年度	須藤 雄気	岡山大学・医歯薬学総合研究科・教授	2
A01 公	15H00881 光物質変換系との連結を目指したナノシート型光捕集系の構築	平成 27 年度～ 平成 28 年度	高木 慎介	首都大学東京・都市環境科学研究科・教授	2
A01 公	15H00887 緑色光合成細菌の光捕集アンテナ超分子のエネルギー受容膜面の機能化	平成 27 年度～ 平成 28 年度	佐賀 佳央	近畿大学・理工学部・准教授	1
A02 公	15H00856 可視・近赤外光による光アンテナ搭載完全水分解システム	平成 27 年度～ 平成 28 年度	三澤 弘明	北海道大学・電子科学研究所・教授	3
A02 公	15H00864 水分解触媒部位の周辺環境から理解する光合成蛋白質にお	平成 27 年度～ 平成 28 年度	石北 央	東京大学・先端科学技術研究センター・教授	2

	ける酸素発生反応				
A02 公	15H00874 籠型配位子を用いた酸素発生 中心のモデル構築	平成 27 年度～ 平成 28 年度	畑中 翼	大阪大学・理学研究 科・助教	1
A02 公	15H00880 高原子価典型元素ポルフィリ ン錯体による水分子の多電子 酸化活性化反応系の開発	平成 27 年度～ 平成 28 年度	白上 努	宮崎大学・工学部・教 授	1
A02 公	15H00884 光合成酸素発生中心の機能を 模倣した二核ルテニウム錯体 による水の酸化反応	平成 27 年度～ 平成 28 年度	和田 亨	立教大学・理学部・准 教授	1
A02 公	15H00889 鉄五核触媒の分子構造制御に 基づく低過電圧酸素発生	平成 27 年度～ 平成 28 年度	正岡 重行	分子科学研究所・生 命・錯体分子科学研究 領域・准教授	2
A03 公	15H00858 元素活用型ハイブリッド光水 素発生系の構築	平成 27 年度～ 平成 28 年度	加藤 昌子	北海道大学・理学(系) 研究科(研究院)・教授	3
A03 公	15H00870 ヘテロ接合量子ドット光触媒 を用いる高効率光触媒反応の 開発	平成 27 年度～ 平成 28 年度	鳥本 司	名古屋大学・工学研究 科・教授	1
A03 公	15H00872 単結晶評価を利用した半導体 光触媒の効率制限因子の解明	平成 27 年度～ 平成 28 年度	加藤 正史	名古屋工業大学・工学 (系)研究科(研究院)・准 教授	1
A03 公	15H00875 ワイドギャップ化したカルコ パイライト半導体光カソード による高効率水分解反応	平成 27 年度～ 平成 28 年度	池田 茂	甲南大学・理工学部・ 教授	2
A03 公	15H00877 多核金属錯体のボトムアップ 化による高効率水素発生の実 現と理論的なメカニズム解明	平成 27 年度～ 平成 28 年度	片岡 祐介	島根大学・総合理工学 研究科・助教	3
A03 公	15H00879 鉄系酸化物半導体を用いた人 工光合成システムの開発	平成 27 年度～ 平成 28 年度	伊田 進太	九州大学・工学研 究院・准教授	1
A03 公	15H00883 活性部位の原子レベル厳密組 成制御技術の駆使による水分 解光触媒材料の高活性化	平成 27 年度～ 平成 28 年度	根岸 雄一	東京理科大学・理学 部・准教授	1

A03 公	15H00886 高い水素発生活性を実現する [FeFe]型ヒドロゲナーゼの構 造デザイン	平成 27 年度～ 平成 28 年度	浅井 智広	立命館大学・生命科学 部・助教	2
A04 公	15H00861 遷移金属錯体及びポルフィリ ン超分子を用いた CO ₂ 光還元 系の開発	平成 27 年度～ 平成 28 年度	小島 隆彦	筑波大学・数理物質 系・教授	3
A04 公	15H00866 光近接場の最適デザインに基 づくエネルギー上方変換によ る二酸化炭素光触媒材料の開 発	平成 27 年度～ 平成 28 年度	八井 崇	東京大学・大学院工学 系研究科(工学部)・准 教授	2
A04 公	15H00871 光触媒表面反応に着目した人 工光合成システムの合理的設 計	平成 27 年度～ 平成 28 年度	吉田 朋子	大阪市立大学・複合先 端研究機構・教授	1
A04 公	15H00882 低温条件での光化学的 CO ₂ 多 電子還元反応と新規ルテニウ ム-ペプチド錯体の触媒作用	平成 27 年度～ 平成 28 年度	石田 斉	北里大学・理学部・准 教授	1
A04 公	15H00885 二酸化炭素捕捉機能を付与し た光触媒による二酸化炭素還 元反応の高効率化	平成 27 年度～ 平成 28 年度	森本 樹	東京工科大学・工学 部・講師	1
A04 公	15H00890 高効率な時間分解 XAFS 法を 用いた光反応中間体の詳細な 構造解析	平成 27 年度～ 平成 28 年度	野澤 俊介	大学共同利用機関法 人高エネルギー加速 器研究機構・物質構造 科学研究所・准教授	1
公募研究 計 57 件					

1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

① どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる新たな研究領域」であるか。

天然の光合成が27億年以上にわたって蓄積し続けてきた光合成活動産物である化石資源を、人類がこれまでその膨大な量を極めて短時間に自然採集に任せて消費を続けた結果、地球規模でのエネルギー危機と共に膨大な二酸化炭素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。このような状況で二酸化炭素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いわゆる太陽電池の実用化の一層の展開が急務である。しかしながら、太陽光エネルギーは希薄であり、地域、季節、一日の時間帯によってその強度は大きく変動する。蓄電技術に一層のブレークスルーが望まれる未来予測からも、太陽光エネルギーを電気エネルギーのみではなく、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必要な形(電気エネルギー、熱エネルギー、化学エネルギー)で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。人工光合成はかつて「人類の夢」であったが、今や必ず実現しなくてはならない「人類の存続を賭けた課題」となった。

太陽光エネルギーの有効利用、特に実質的にCO₂ゼロエミッションを実現しつつ、太陽光エネルギーから次世代型燃料を生成する人工光合成の極意は、天然の光合成の「学理」と光合成に「学び」、「模倣し」、「それを超える」ブレークスルー技術に集約される。人工光合成研究は、生物学、生化学、分子生物学、化学、材料科学、物理学、工学、計算化学などの多岐に渡っており、各々の分野で先鋭化された研究が進展している。特に我が国は、人工光合成の各領域、1) 光合成の学理、2) 有機系、錯体系の人工光合成、3) 半導体系の人工光合成において、世界を先導してきた実績を有しており、今こそ、卓越した研究者群を組織化し、分野横断的なオープン・イノベーションを図ることで目的を鮮明にした新学術領域研究をスタートすべき時である。

これまで、我が国における光エネルギーを利用したエネルギー創製システムに関する体系的な研究としては平成13～18年度の科学研究費補助金特定領域研究「光機能界面の学理と技術：研究代表者、藤嶋 昭」の成功例がある。本領域は、その中で指摘された最重要課題である「光合成反応の工学応用」をさらに学際的に発展させるものである。一方、当該分野の海外における国家レベルでの研究プロジェクト動向に言及すると、光合成の基礎と応用に関するプロジェクトは世界で数100億円規模の巨額を投じて行われている。これは、地球表面に降り注ぐ太陽光エネルギーが、世界エネルギー消費量の1万倍にも及ぶことや、植物の光合成を通じて還元型有機化合物の形で固定される光エネルギーだけでも世界エネルギー消費量の10倍に近いことに着目し、光合成機構に習った形でクリーンかつ無尽蔵な太陽光エネルギーを利用する道を拓こうとする研究が、世界各地で活発化しているからである。太陽光エネルギーを未来社会の基盤エネルギー源に据える発想のもとに、米国エネルギー省(DOE)や欧州科学財団(ESF)が、2050年時点を見据えた基礎研究に本格着手している。米国のHub構想によるJoint Center for Artificial Photosynthesis(JCAP)の設置と超大型予算の執行(約125億円)や韓国の人工光合成センター設置、ドイツ、オランダ、スウェーデン等の大型予算開始等、人工光合成研究への各国の支援体制が一挙に拡充してきている状況で、我が国のみが立ち後れることは許されない。

40年後には本格的に実用化普及を図ることを前提にすると、10年後には実用化への展望を含めて社会が、どの新エネルギー獲得方法を選択するかを科学的に健全な判断をなし得る「議論の土俵」に載せる

必要がある。いまこそ、人工光合成の各領域を真の意味で融合し、エネルギー・環境問題の解決という、世界・人類に課せられた究極の課題達成を実現するための研究推進と研究組織作りが必要である。ここに、目的指向型の新学術研究領域を発足する必然に到達した。

本新学術領域研究では日本国内のこの分野の研究者が異分野融合を通して光合成に「学び」、「模倣し」、「それを超える」ブレイクスルー技術を開発することにより人工光合成を実現することを目的とする。同時に関連する全領域、全日本の研究者（重複申請制限等で今回の計画班員には参加できない多くの研究者を班友に迎えることにより実質的な連携研究を推進する）を含めて本新学術領域研究を核に人工光合成の一大フォーラムを確立することにより、世界各国と切磋琢磨する強力な人工光合成研究のオープン・イノベーションを実現する。

② 研究の学術的背景

元来、化石燃料は光合成生物による産物であり、しかもその過程は、太陽光エネルギーを用いて空気中のCO₂を固定することにより成り立っている。したがって、光合成反応に学ぶ次世代型燃料生成は、実質的にCO₂ゼロエミッションを実現しながら、人類の要求を満足し得ることは明白である。これらの事柄は、喫緊のエネルギー・環境問題に対して、光合成反応を正しく理解し、直接あるいは高度に模倣し、さらには部分的機能だけでもそれを超える人工光合成系を構築し新エネルギー獲得方法として確立することこそが、もっとも明快な解決戦略を提示するであろうことを示している。植物の光合成反応は、太陽光エネルギーの捕捉からCO₂固定（バイオ燃料生成）などの還元末端に至る過程まで、約40段階のエネルギー・電子移動を経ながら総合量子収率は0.9~1.0になる。これは、各段階が平均効率0.997以上で進むことを意味する（例えば、人工的な1段階の光電荷分離で画期的とされる0.8の量子収率も、直列に40段階進めば、最終効率はわずか0.0001に落ちてしまう）。このように驚くべき効率は、光分子系に関わる物理・化学・生物学・工学・計算化学の分野で大きな関心を集め、活発な研究の対象となってきた。光合成系の応用には、素過程となる分子機構の解明が欠かせない。しかしながら、従来型のボトムアップ的研究では、光合成反応を構成する各モジュールの理解深化に邁進するあまり、実際に人為応用を可能とするために必須となるモジュール間の連結にまで英知が及んでいないのが実情である。このことは、光合成を専門とする国際会議においても、明確に指摘されている点であり、専門分野間の横断的融合を極めて困難にしている。光合成に学びながらも機能として光合成を超える人工光合成系はむしろ、我が国が世界を先導する半導体の光触媒領域や金属錯体の光触媒領域など互いに見かけ上、異分野に見える領域からのブレイクスルー技術の出現や、技術連携から達成される可能が極めて高い。そこで、光合成の学理、生体・有機・錯体分子を用いた人工光合成及び半導体光触媒を用いたソーラー燃料生成に関する研究を進める研究者が一堂に会する「人工光合成フォーラム」を形成し、目的指向型の新学術研究領域を発足する必然に到達した。研究推進には縦割りの個別領域ごとの班構成にするのではなく、目的別による班構成とし、従来は連携困難であった各領域を横串方式で共通の土俵に載せてイノベーションを図る。人工光合成を実現するために、まさに異分野融合による新学術領域を創生する。

2. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記述してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたのか。

本領域「人工光合成」では、1) 天然の光合成に「学び」、2) 「真似て」、3) 部分的な機能だけでも「超える」、の3つの視点で研究推進した。本領域の発足までは各領域、分野、個別研究グループで、独自に（あるいはバラバラの視点で）人工光合成に取り組んでいた。再生可能エネルギーの中でも最も有望な太陽光エネルギーをいかにして利用できるようにするかという社会的要請を鑑みると、太陽電池の一層の開発と共に、エネルギーを物質に蓄積して必要な時に必要な量だけ、必要な形（電気エネルギー、熱エネルギー、化学エネルギー）で取り出せる人工光合成を一日でも早く実現し社会に適用することは人類の夢であり、科学の使命でもあるが、個別領域の学術的視点のみの検討を重ねるだけでは、社会への適用という視点での展望を開くには必ずしも充分ではなかったと言える。例えば良くないかも知れないが、地面の下に潜む鉱脈を見つけようと、鋭い針（学術的に狭く深い視点）を何本突き刺しても、なかなか展望は開けない状況であったとも言える。1972年に報告された「ホンダーフジシマ効果（二酸化チタンを光触媒とする水の光分解）」から約40年が過ぎ、多くの興味深い研究報告がなされてきたにも関わらず人工光合成の実現には困難が続いていたのである。そのような状況で、本領域「人工光合成」では、1) 光合成の理解、2) 化学計測、3) 半導体光触媒、4) 分子触媒、のそれぞれの分野で世界を主導してきた実績を有する我が国の研究者を糾合して互いに「異分野」を理解し全体を俯瞰し得る視点を共有することを目指し「異分野融合」を掲げた。まずは、個別の研究グループ間での共同研究を積極的に奨励することで、多くの共同研究事例（研究開始時11件、研究終了時52件）を実現することができた。個別の研究成果を含め下記のように予想以上の成果を上げることができた。

研究推進の結果、得られた新しい三つの視点

「異分野融合」の視点で研究推進することにより、それまでは互いに議論することもなかった光合成領域と人工光合成領域で共通のプラットフォームを本新学術領域「人工光合成」は作り上げ、研究推進する中で新しい視点が浮かび上がってきた。その視点を三つ上げよう。

その一つは分子触媒領域から新しい視点としての「太陽光の光子束密度条件（光子の時間間隔）」の重要性についての指摘がなされた結果、天然の光合成では光捕集のダイナミクスとPSIIのKokサイクルの時間スケール、ダイナミクスが「光子—光子の時間間隔」のチューニングの視点から見ると光子束密度条件下で互いに整合していることが見えてきた。人工光合成で果たす光捕集の役割や課題が見えてきた。半導体光触媒上の助触媒が担う反応時間スケールにも多くの示唆がある。光子束密度条件をどのように解決しあるいは回避すべきかが鮮明になってきた。

その二つ目は、天然光合成のPSIIを取り巻くタンパク質環境の「保護効果」が重要であることやその保護効果を人工光合成でいかにして構築するか課題も見えてきた。半導体表面、分子触媒を取り巻く微小環境、反応場への視点が一層鮮明になってきた。

さらに、最も大事な三つ目の視点として、「静的視点」と「動的視点」の融合を挙げることができる。超複雑系である天然の光合成系ではこれまで、核心となる酵素の構造解明に最大の研究努力が傾注されてきた。我が国はその最先端を進んでいる。その構造解明は測定可能な安定静的構造を中心に解明が進んできたが、最も安定な状態のスナップショット1枚を取り出して光合成の一連の化学現象を理解することには未だ多くの障害がある。もちろん、貴重な1枚のスナップショットが人工光合成領域には極めて大きい示唆を与えてきたのだが。一方、人工光合成領域では、光合成反応中心に比較すれば格段にその複雑性は減じられ、分子や原子の視点で光吸収後の化学反応は充分、動的な化学計測が可能な状況であった。しかし、分子、原子周囲を取り巻く微小環境、反応場環境など光合成における超複雑系に対応する次元での設計、解析手法には多くの課題を残しているために、多くの個別共同研究事例がありながらも「総合設計」の視点で手本となる光合成のスナップショットが与えている指針を必ずしも充分には生かしていない。つまり、超複雑系を解明する光合成研究にはスナップショットをつなぐ「動的視点」を、分子・原子に注目する人工光合成研究には反応系を取り巻く微小環境、反応場の視点から時間軸を長くした「静的視点」も取り入れて両者の知見を互いにフィードバックして研究推進することが必要であるとの認識に至った。「静的視点」と「動的視点」を融合させた一層深い視点で今後の人工光合成に取り組むべきであるとの認識を共有するに至ったのである。

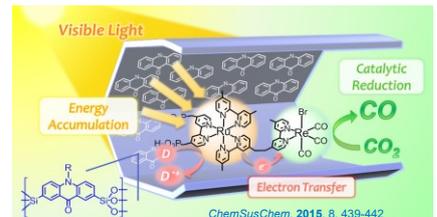
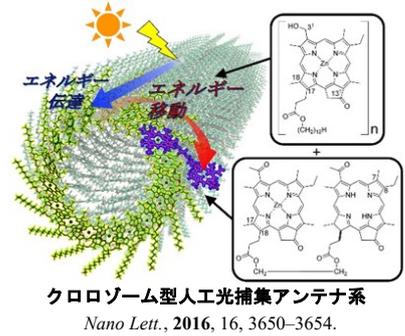
予想以上の研究進展

光合成反応、人工光合成の本質的な要素は、①太陽光エネルギーの捕捉（アンテナ機能）、②電荷分離（反応中心）と多電子移動による水の酸化活性化（水電子源）、③水から取り出した電子による水素発生

と④CO₂還元(燃料生成)である。本研究では、各々のモジュールに関する研究を深化・先鋭化し、最も本質的な部分のみを抽出することで、モジュールとして機能する粋を極める。そして、各モジュール間の連携を加速的に強化すること(オープン・イノベーションの実現)により、ソーラー燃料生成を行うための人工光合成デバイス開発を目指した結果、以下のような予想以上の研究進展を得ることができた。

研究項目 A01 「光捕集機能を有する人工光合成システム」では

- ・「自然に学ぶ」研究戦略として海洋性褐藻類の光捕集系についてそのエネルギー移動の詳細を明らかにできた。(橋本)
 - ・「自然をまねる」研究戦略では緑色光合成細菌の光合成アンテナ部の再構成に成功し、クロロゾーム型自己会合体による人工光捕集アンテナの構築に成功した。このような人工光合成アンテナ系は、ガラスなどの基板上でも構築することが可能であり、エネルギー変換系との有効な連結によって、光収穫系を有する人工光合成系の創製にいたると期待される。(民秋)
 - ・「自然を超える」研究戦略の視点では光捕集部をメソ孔内壁に埋め込んだ人工光合成反応場としての人工構造材料を新規に開発した。(稲垣)
- A04 班との共同研究として光捕集機能を有する二酸化炭素光還元触媒の開発にも成功した。(石谷、稲垣)



研究項目 A02 「水の酸化光触媒機能を有する人工光合成システム」では

- ・「自然を理解し、学ぶ」視点で藍藻の光合成中心 PSII (酸素発生中心) の構造解析に既に成功している。(Umena, Kawakami, Shen, Kamiya, *Nature*, 2011, 437, 55) その後、X線照射に伴う Mn 原子の還元により OEC の構造が「損傷」を受けていると指摘されることとなった。2015 年に岡山大学の研究グループは、パルス幅 10 fs の X 線を提供する自由電子レーザー (XFEL) を利用して「X 線損傷を受ける前の」構造を決定して報告した。しかしながらそれについてもなお、理論計算の研究グループからは OEC 内の原子間距離が X 線還元により変化している可能性があるとの指摘が続いた。本研究では、試料となる PSII 結晶の同型性を高めて多数の試料を準備し、従来からの SPring-8 のビームラインを利用して、XFEL 実験から得られたものより分解能と測定精度の高い回折強度データを収集し、X 線還元による結合距離の変化がない無損傷な OEC の構造を世界で初めて明らかにした。(神谷)

低X線ドーズにおける光化学系IIの水分解・酸素発生中心の構造

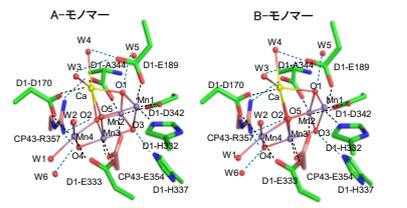


Fig. 1. 結晶を構成するA/Bモノマーの構造を決定し、0.12 MgのX線ドーズで得られた構造を高く、0.12 Mgの構造を深く表現した。

- ・光化学系 II の動的挙動について時間分解赤外分光法を用いて、光合成水分解反応の鍵となる S2→S3 中間状態遷移の反応を追跡し、電子、プロトン、水分子の移動の時間挙動を調べた。その結果、まず基質水分子が移動して Mn クラスターに挿入され、その後、プロトン放出を律速とするプロトン共役電子移動反応が起こることを見出した。(野口)
- ・「元素戦略」の視点からは人工ユビキタス金属錯体による水分子の 1 光子 2 電子酸化活性化が可能であることを見出した。人工光合成の実現には学術的には希薄な太陽光エネルギーの下で、分子触媒には間欠的に光が届く条件で、多電子の移動を段階的に進行させなければならないという光子束密度条件問題と呼ばれる困難性がある。本研究では、この光子束密度条件を回避し得る画期的な方法として水分子を従来の 4 電子酸化ではなく、1 電子酸化で誘起される 2 電子酸化の方法を世界で初めて開発した。地球上、最も豊富に存在する金属であるアルミニウムを中心元素とする新奇分子触媒アルミニウムポルフィリンが水分子の酸化的分解反応を非常に反応性高く (TOF ~ 2 x 10⁴ s⁻¹)、低い過電圧 (~97 mV) で進行させ、過酸化水素が生成することを見出した。(井上 (晴))

Oxidation of water to form H₂O₂

	Natural abundance
1 O	49.5
2 Si	25.8
3 Al	7.56

TOF = 2 x 10⁴ s⁻¹ 元素戦略の視点

ChemSusChem., 2017, 10, 1909-1915. (Front cover page.)

- ・合成錯体分子による水の酸化触媒として新規 Ru 二核錯体が高い水の酸化触媒活性を示すことを見出した。(八木)

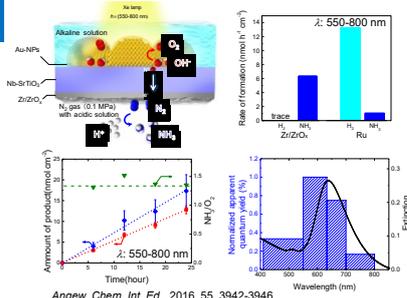
A02公報班 (H25.4~H27.3) 水の酸化の高効率化を目指した超分子錯体触媒の創製

Nature, 2016, 530, 465-468.

TOF = 1,900 s⁻¹

多核構造と隣接基質活性化サイトを有する鉄5核錯体の利用により高活性な酸素発生触媒の創製に成功した。

プラズモン光で誘起するアンモニア合成デバイス



研究項目A03「水素発生光触媒機能を有する人工光合成システム」

では、高効率の水素発生を目指す取り組みとして

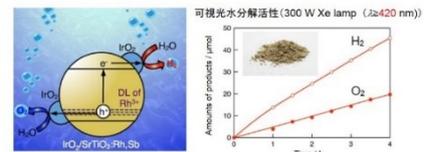
- ・無機半導体光触媒グループでは、独自に開発した光触媒ライブラリの知見を基礎に新たに520nmまでの可視光を利用できるドーピング金属酸化物光触媒の開発に成功した。さらに可視光応答性金属硫化水素生成光触媒 (CuGaS₂, (CuGa)_{1-x}Zn_{2x}S₂ など) と BiVO₄ 酸素生成光触媒、およびコバルト錯体や還元型酸化グラフェン (RG0) 電子伝達を組み合わせることで、Zスキーム型可視光水分解光触媒系の構築に成功し、水を電子源とした二酸化炭素の還元反応にも活性を示すことが明らかとなった。これは、可視光照射下において水を電子源とした二酸化炭素の還元活性を示す粉末系光触媒としては、初めての系である。(工藤)
- ・酸化化合物の窒素量を制御により可視光による触媒特性を制御できることを見出した。(加藤 (英))
- ・金属錯体光触媒グループでは、単核の Pt 錯体が分子触媒として水素発生機能を有することを見出した。(酒井)
- ・生物化学的システムグループでは、シアノバクテリアの窒素固定活性を抑制し、高い水素発生活性を示す改良株を作出した。いわば「生かさず、殺さず、水素を作り続けさせる」画期的な方法である。(井上 (和))

研究項目A04「二酸化炭素還元光触媒能を有する人工光合成システム」

では、高効率の二酸化炭素還元を目指す取り組みとして

- ・金属錯体光触媒グループでは、配位子間に弱い相互作用を導入することでレドックス光増感剤としての性質を大幅に向上させたリング状 Re(I)多核錯体の合成に成功した。この Re-リング光増感剤と、CO₂還元触媒として機能する Re(I), Ru(II)および Re(I)錯体を組み合わせて用いることにより、世界最高量子収率で CO₂を還元することに成功した。(石谷)
- ・固体光触媒グループでは、H₂Oを電子源とした CO₂の光還元を進行させる新規光触媒 (Ag/Zn-doped Ga₂O₃) を発見した。(田中)
- ・半導体光電気化学グループでは、水溶液中において、Agを導電性カーボン多孔体の表面にコートすることで電気化学的な CO₂⇒COの還元反応速度を向上させる事に成功した。(森川)
- ・酵素グループでは、ギ酸(FDH), アルデヒド(AldDH), アルコール脱水素酵素(ADH)からなる反応系に可視光照射することで CO₂をメタノールに分子変換できることを見出し高活性化を達成する人工補酵素の開発に成功した。(天尾)
- ・公募研究では、二酸化炭素還元を行う酵素と同様に、活性中心に硫黄原子が配位した Ni 錯体を含む機能モデル錯体として、硫黄原子を支持配位子に含む 3d 遷移金属錯体 (M = Mn, Fe, Co, Ni) を合成した。これらの錯体と光増感剤、還元剤を含む溶液に可視光を照射すると光触媒的 CO₂還元反応が進行し、特に Ni 錯体は、高効率・高選択的な光触媒特性を示すことが明らかになった。光触媒条件下における還元生成物の比 (CO/H₂) は 99%以上に達し、高選択的に CO 生成反応が進行することを見出した。また、CO 生成の触媒回転数 (TON) は 700 以上、量子収率は 1.42%と決定され、高効率な CO₂還元触媒系の構築に成功した。(小島)

可視光で働く新規金属酸化物水分解光触媒 (IrO₂/SrTiO₃/Rh,Sb) の開発 (A03班 工藤)



- ・独自のバンドエンジニアリングで開発した IrO₂/SrTiO₃/Rh,Sb 光触媒粒子を用いて可視光水分解に成功
- ・520nmまでの可視光を利用できるドーピング型金属酸化物光触媒

R. Nishino, S. Tanaka, and A. Kudo, "Hydrothermal-synthesized SrTiO₃ photocatalyst doped with rhodium and antimony with visible-light response for sacrificial H₂ and O₂ evolution and application to overall water splitting", *Appl. Catal. B: Environmental*, **2014**, 150-151, 187-196.

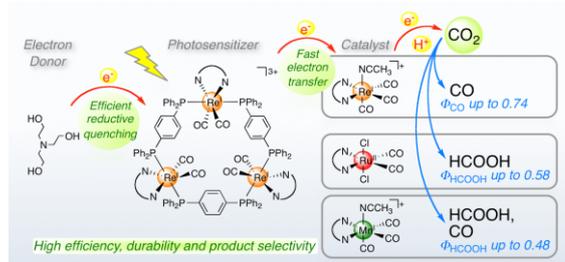
R. Asai, E. Nishino, Q. Jia, K. Saito, A. Iwase, and A. Kudo, "A visible light responsive rhodium and antimony-codoped SrTiO₃ powdered photocatalyst loaded with IrO₂ cocatalyst for solar water splitting", *Chem. Commun.*, **2014**, 56, 2543-2546.

一
型
物
触
劑
構
す

共同研究:水素バリアー性柔軟プラスチック材を用いた水素生産用バイオリアクターの開発
井上和仁(神楽川大)・酒井健(九州大)



水素に浮かぶバイオリアクター
人工実の開発



Dalton Trans. in press **2017**; *Chem. Sci.*, **2016**, *7*, 6728-6739; *Inorg. Chem.*, **2015**, *54*, 8769-8777; *Inorg. Chem.*, **2014**, *53*, 7170-7180; *J. Am. Chem. Soc.*, **2013**, *135*, 13266-13269.



J. Am. Chem. Soc. **2017**, *139*, 6538-6541

3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ以内）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

問題点1 申請時の計画班員が参加できなくなった。

研究項目 A01 では申請時、沈建仁教授（岡山大学）を計画班員の一人としていたが、平成24年採択時に沈教授の特別推進研究が同時に採択され、重複制限により本新学術領域研究の計画班員から外れることになった。

問題点1に対する対策

沈教授は光合成反応中心 PSII の構造解明での世界最先端研究者として、本新学術領域研究の推進には欠かせない研究者であるので、研究費配分は行わないものの、総括班に設けた“Leading Scientist”に就任して頂くことにより活発な研究討論、アドバイスを通じて実質的な研究推進を図ることができた。

問題点2 公募班員が参加できなくなった。

研究項目 A01 では平成27年度、第2期研究班員公募の際、林高史教授（大阪大学）が計画研究代表を務める新学術領域が平成27年度中に採択された為、それ以降は公募班員として参加できなくなった。

問題点2に対する対策

問題点1の場合と同様に、本新学術領域研究の推進には欠かせない研究者であるので、平成27年度中の研究計画廃止以降に研究費配分は行わないものの、A01 研究項目に設けた「協力班員」としての活発な研究討論、アドバイスを通じて実質的な研究推進を図ることができた。

問題点3 臨機応変の共同研究体制の構築

本新学術領域研究の目標の一つ「異分野融合」を達成するため、研究項目の設定、班構成について横軸に各研究者の専門領域、縦軸に各班が施行する目的を取り、各研究者がその交点に立ちながら、異分野融合に取り組むという、研究推進方法は成功したと考えている。一方で、班を超えて臨機応変の共同研究体制を如何にして構築するかの問題点があった。

問題点3に対する対策

平成24年度の研究開始時から「異分野融合」を目指し、全班員からの提案による共同研究申請を総括班が審査後に特別の研究費配分を行ない、合計52件の実質的異分野融合による共同研究を実施した。それまでは各領域、分野、個別研究グループで、独自に（あるいはバラバラの視点で）人工光合成に取り組んでいたが、異分野融合の視点を明確に提示することで全班員のベクトルが自然に揃う形で、異分野融合のプラットフォームを作ることができた。班を超えて臨機応変に共同研究体制を構築することについては、平成27年度から、それまでの領域全体の研究進捗状況、共同研究状況を見極めながら総括班によるトップダウンの指名制による共同研究を実施し成果を挙げることもできた。

組織変更は特には行っていない。

4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況（2ページ以内）

審査結果の所見及び中間評価において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

<審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況>

<審査結果の所見において指摘を受けた事項>

・・・各分野で顕著な業績を挙げている研究者が連携している。これまでも研究グループ内あるいはグループ間の連携により未解決の課題に対して、学理的な解明を目指して研究を行っており、十分な成果を期待しうる戦略を有すると評価できる。

①一方で、研究領域名にある「実用化」については、グループ構成を含む研究計画からは、実用性へのアプローチが不明瞭であるとの意見もあり、「学理の探求」を基本目的としながらも「実用化」の視点をどのように取り入れるかを明示することが望ましい。②また、若手研究者の育成プログラムに関して、具体的な運営方針を早い段階で計画するよう留意すべきである。

(1) 実用化の視点の導入について

本新学術領域が発足するまでは、各領域、分野、個別研究グループで、独自に（あるいはバラバラの視点で）人工光合成に取り組んでいた。再生可能エネルギーの中でも最も有望な太陽光エネルギーをいかにして利用できるかとするかという社会的要請を鑑みると、太陽電池の開発と共に、エネルギーを物質に蓄積して必要な時に必要な量だけ、必要な形（電気エネルギー、熱エネルギー、化学エネルギー）で取り出せる人工光合成を一日でも早く実現し社会に適用することは人類の夢であり、科学の使命でもあるが、個別領域の学術的視点のみの検討を重ねるだけでは、社会への適用という視点での展望を開くには必ずしも充分ではなかったと言える。これまでの経緯、現状、社会状況を鑑み、本新学術領域研究では人工光合成の実用化、社会への適用を2050年とする目標の下、30-35年計画の第1フェーズと位置付けている。まずは、実用化への視点の前提となる学理の探求における異分野の融合のためのプラットフォーム構築に全力を傾注した。横軸に各専門領域、縦軸に実用化への視点を醸成する具体目標を掲げ、各研究者がその交点に立って両軸を俯瞰しながら実質的な異分野融合の視点を共有し得る研究体制、班構成とした。実用化の視点を醸成するため、領域全体会議、公開シンポジウム、フォーラム人工光合成、化学会年会での特別シンポジウムなど機会ある毎に、実用化の視点での特別講演や招待講演を企画し、研究方向への意識醸成に努めた。特に研究期間後半には、前期に実施した全班員の相互提案による共同研究実績を基礎に、総括班主導の実用化視点によるトップダウン共同研究を実施した。

(2) 若手研究者の育成プログラムについて

審査結果所見に留意し、研究開始当初から若手研究者育成プログラムを企画、実施した。研究に参加した研究者総数（延べ521人/4年半）の中で39歳以下の若手研究者数(521人/4年半)は62%の比率に達しており、実質的に若手研究者による研究推進体制となっている。総括班では、若手研究者のみによる企画でのシンポジウム、研究会を合計8回支援、実施した。

<中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況>

<中間評価の所見において指摘を受けた事項>

評価結果：A（研究領域の設定目的に照らして、期待どおりの進展が認められる）

本研究領域は、太陽光エネルギーを利用し、人工光合成によって高効率で物質変換すること目的としている。「人工光合成」というキーワードそのものは古くから存在してきたものであるが、化石燃料資源の枯渇による地球規模のエネルギー危機の到来を見据えると、必ず実現しなければならない課題となっており、新たな学理の構築が求められる重要な研究領域である。本研究領域は、光合成の基礎的過程である「光捕集」、「水からの電子供給」、「水素発生」および「二酸化炭素の還元」を4つのモジュールとして捉え、モジュール毎に研究組織を構成し推進されている。光合成光化学系の水分解触媒サイトの構造解析などの優れた成果が得られるなど、全体としては研究領域の設定目的に照らして期待どおりの進展が認められる。一方、①研究項目間で発表論文数等の成果に格差が見られるほか、②現時点では異分野融合に基づく成果が期待を上回るものではないと見受けられる。今後、領域代表者のリーダーシップによって、さらなる異分野融合が促進されることを期待する。また、③国内で現在行われている他の人工光合成関連の研究プロジェクトと目的の違いが明確でない面もあり、新学術領域研究として本研究領域を推進する意義のさらなる明確化も望まれる。本研究領域の内容は国民的関心の高いものであることから、学術的な論文発表にとどまらず、テレビ放映、新聞記事掲載に加え、フォーラムの開催などを通じた社会に向けた情報発信が活発に行われていることは評価できる。

(1) 研究項目間で発表論文数等の成果の格差について

研究開始後2年経過した中間評価の時点での論文総数は286報でありその発表状況については着目点毎

の評価では高い評価を受けたが、研究項目 A04 二酸化炭素還元グループについて他の研究項目と比較しての論文数の指摘を受けた。本領域発足時には、二酸化炭素還元については研究者数が比較的限られていた状況であったが、それまで充分実績はありながらも二酸化炭素還元へ新規参入し意欲的な提案をした公募研究を採択した経緯がある。4年半領域終了の現時点で総論文数（査読有）は875報と加速度的に成果が発信できていると自負する。

(2) 異分野融合に基づく成果について

中間評価（領域発足後2年半）の時点で異分野融合の成果が期待を上回るものではないとの指摘を受けたが、領域研究推進の柱である「横軸と縦軸」方針（横軸に専門領域、縦軸に具体目標を取り各研究者が両軸の交点に立って異分野融合を進める。）の結果、研究終了時の総論文875報の内異分野融合論文は227報を数えるに至っている。個別の研究グループ間での共同研究を積極的に奨励することで、多くの領域内共同研究事例（研究開始時11件、研究終了時52件、共同研究論文数90報）を実現することができた。上記**2. 研究領域の設定目的の達成度**で述べたように、異分野融合のプラットフォームを形成し議論を進めた結果、それまでは殆ど研究交流のなかった光合成分野と人工光合成分野の相互討論、フィードバック議論が可能になりその結果1) 太陽光の光子束密度条件の視点、2) 反応場としての微小環境による「保護効果」の視点、3) 「静的視点」と「動的視点」の融合、の三つの新しい視点を全領域で共有する状況に至ったことは異分野融合の最大の成果と考える。

(3) 国内で行われている他の人工光合成関連の研究プロジェクトとの目的の違いについて

本領域研究の研究開始時に人工光合成に関する研究プロジェクトは他の二つが進行していた。一つは、科学技術振興機構さきがけ「光エネルギーと物質変換」（研究総括：井上晴夫）、もう一つはNEDO「人工光合成」（代表：瀬戸山亨）である。前者のさきがけはプロジェクトの事後評価は最高評価を得ているが、全体としての目的志向型ではなく純粋基礎研究についての個人研究プロジェクトであり、後者は半導体光触媒による水からの水素生産に的を絞った、実用化プロジェクトであるのに対し、本領域研究は、2050年を目標とする30-35年計画の第1フェーズとしての学理の探求を基礎にその展開方向を大きく意識共有すべく、異分野融合プラットフォーム形成を第一目的に置いている。国全体としてみると本領域研究は、さきがけの純粋基礎研究と実用化に的を絞ったNEDOプロジェクトの両者を繋ぎ補完し、将来の人材輩出の基盤を形成する役割を果たすと期待されるものであり、結果的には国家戦略として調和の取れた施策となっていると考えられる。

5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

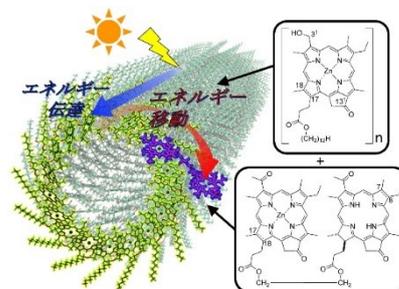
(3 ページ以内)

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、**本研究課題により得られたものに厳に限る**こととします。

研究項目 A01 「光捕集機能を有する人工光合成システム」

A01 計画（橋本）紅色細菌のアンテナ系におけるエネルギー移動系の解明

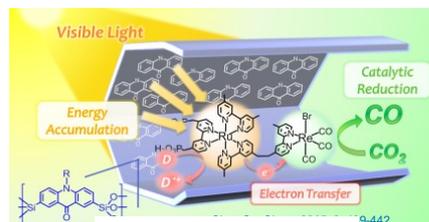
紅色光合成細菌由来の光収穫型アンテナである LH1 に、海洋藻類由来のフコキサンチンを再構成することに世界で初めて成功した。フェムト秒時間分解分光測定を行うことにより、再構成した LH1 内のエネルギー伝達の解明に成功した (*Faraday Discuss.*, **2017**, 198, 59–71)。



クロロゾーム型人工光捕集アンテナ系

A01 計画（民秋）クロロゾーム型自己会合体による人工光捕集アンテナの構築

緑色光合成細菌の光合成アンテナ部の再構成に成功し、クロロゾーム型自己会合体による人工光捕集アンテナの構築に成功した。このような人工光合成アンテナ系は、ガラスなどの基板上でも構築することが可能であり、エネルギー変換系との有効な連結によって光収穫系を有する人工光合成系の創製にいたると期待される (*Nano Lett.*, **2016**, 16, 3650–3654)。



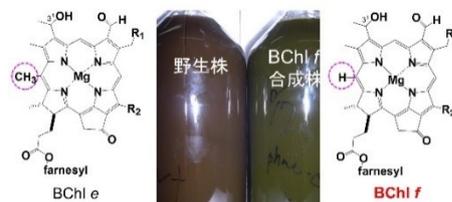
PMO 中での CO₂ 光還元

A01 計画（稲垣）光捕集アンテナと連動した CO₂ 還元光触媒系の構築 [A04 計画（石谷）との共同研究]

光捕集部をメソ孔内壁に埋め込んだ新しい人工光合成反応場としての人工構造材料を新規に開発し、光捕集機能を有する二酸化炭素光還元触媒の開発にも成功した (*ChemSusChem*, **2015**, 8, 439–442)。

A01 計画（民秋）7 番目の細菌型クロロフィルの発見

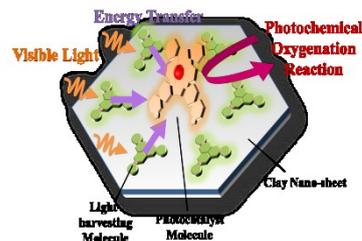
これまでその所在が不明であった 7 番目の細菌型クロロフィル（葉緑素）を、生体から発見した。この新種のクロロフィルは、その分子構造が約 40 年前に予想されて、BChl *f* という名前が予約されていたが、これまで生体からは見つかっていなかった。これは、BChl *g* 以来約 30 年ぶりの発見であり、これで BChl *a* から *g* までの全ての細菌型クロロフィル 7 種類が全て発見されたことになる。今回の発見は、光合成に関わる色素分子の分子進化を考える上で大変重要であり、天然の光合成の機能を分子のレベルで明らかにするばかりでなく、人工光合成システムの開発にも弾みがつくものになる。特に、BChl *f* は *Chlorobaculum limnaeum* の野生株がもつ BChl *e* よりも短波長側に吸収ピークをもち、これは太陽光で光子量が最も多い波長に大きく差し掛かることから、より高効率な人工アンテナ系の開発に有用であると考えられる (*Sci. Rep.*, **2012**, 2, 671)。



BChl *e* と *f* の分子構造式とそれらを生産する緑色光合成細菌の培養体

A01 公募（高木）ナノシート上における光捕集色素による光集光型エポキシ化反応系の創製

カチオン性フルオロン型色素分子とアニオン性無機ナノシートからなる光捕集系の構築に成功し、収穫した光エネルギーを Ru ポルフィリンへと伝達することで、高い効率・選択性で、水とシクロヘキセンを基質とした光エポキシ化反応を行うことに成功した (*J. Phys. Chem. C*, **2017**, 121, 2052–2058)。



ナノシート上での光エポキシ化反応

研究項目 A02 「水の酸化光触媒機能を有する人工光合成システム」

A02 計画（神谷）光化学系 II (PSII) の構造解明

藍藻の光合成中心 PSII（酸素発生中心）の構造解析に既に成功していた (*Nature*, **2011**, 437, 55)。その後、X線照射に伴う Mn 原子の還元により OEC の構造が「損傷」を受けていると指摘されることとなった。2015 年に岡山大学の研究グループは、パルス幅 10 fs の X 線を提供する自由電子レーザー (XFEL) を利用して「X 線損傷を受ける前の」構造を決定して報告した。しかしながらそれについてもなお、理論計算の研究グループからは OEC 内の原子間距離が X 線還元により変化している可能性があるとの指摘が続いた。本研究では、試料となる PSII 結晶の同型性を高めて多数の試料を準備し、従来からの SPring-8 のビームラ

低 X 線ドーズにおける光化学系 II の水分解・酸素発生中心の構造

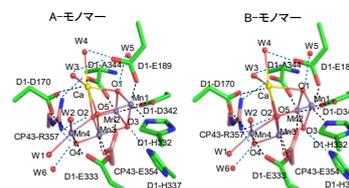
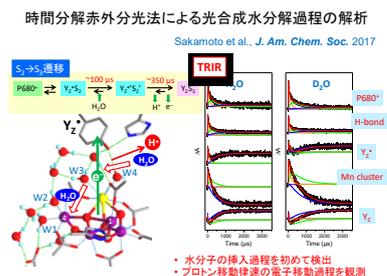


Fig. 1 結晶を構成する 2 個のモノマーの OEC 構造の重ね合わせ。0.03 MgY の X 線ドーズで得られた構造を濃く、0.12 MgY の構造を薄く表現した。

インを利用して、XFEL 実験から得られたものより分解能と測定精度の高い回折強度データを収集し、X 線還元による結合距離の変化がない無損傷な OEC の構造を世界で初めて明らかにした (*J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, 139, 1718-1721)。

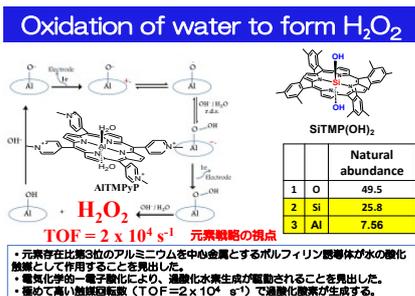
A02 計画 (野口) 光化学系 II の動的挙動の解明

時間分解赤外分光法を用いて、光合成水分解反応の鍵となる S2→S3 中間状態遷移の反応を追跡し、電子、プロトン、水分子の移動の時間挙動を調べた。その結果、まず基質水分子が移動して Mn クラスターに挿入され、その後、プロトン放出を律速とするプロトン共役電子移動反応が起こることを明らかにした (*J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, 139, 2022–2029)。



A02 計画 (井上 (晴)) 人工ユビキタス金属錯体による水分子の 1 光子 2 電子酸化

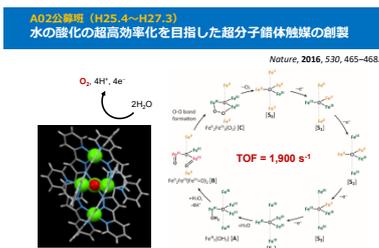
人工光合成の実現には学術的には希薄な太陽光エネルギーの下で、分子触媒には間欠的に光が届く条件下で、多電子の移動を段階的に進行させなければならないという光子束密度条件問題と呼ばれる困難性がある。本研究では、この光子束密度条件を回避し得る画期的な方法として水分子を従来の 4 電子酸化ではなく、1 電子酸化で誘起される 2 電子酸化の方法を世界で初めて開発した。地球上、最も豊富に存在する金属であるアルミニウムを中心元素とする新奇分子触媒アルミニウムポルフィリンが水分子の酸化的分解反応を非常に反応性高く (TOF ~ 2 x 10⁴ s⁻¹)、低い過電圧 (~97 mV) で進行させ、過酸化水素が生成することを見出した (*ChemSusChem*, **2017**, 10, 1909-1915; Front cover page)。



A02 計画 (八木) 新奇分子触媒の開発: Ru 錯体触媒

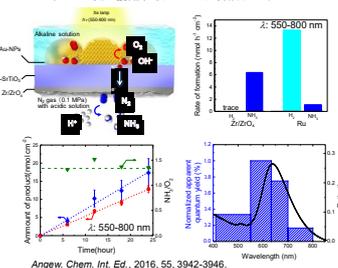
合成錯体分子による水の酸化触媒として新規 Ru 二核錯体が高い水の酸化触媒活性を示すことを見出した (*Inorg. Chem.*, **2015**, 54, 7627-7635)。

A02 公募 (正岡) 水を分解する新奇鉄 5 核錯体の発見 (Nature, 2016, 530, 465-468)



A02 公募 (三澤) 空中窒素を光で固定してアンモニア生成系を新規に発見 (Angew. Chem. Int. Ed., 2016, 55, 3942-3946)

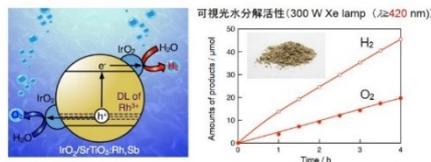
プラズモン光で誘起するアンモニア合成デバイス



研究項目 A03 「水素発生光触媒機能を有する人工光合成システム」

A03 計画 (酒井) 単核の Ni 錯体が分子触媒として水素発生機能を有することを見出した (Angew. Chem. Int. Ed. 2017, 56, 4247-4251)。

可視光で働く新規金属硫化物水分解光触媒 (IrO2/SrTiO3/Rh,Sb) の開発 (A03 班 工藤)



A03 計画 (工藤) 可視光による Z スキーム水分解光触媒系の構築

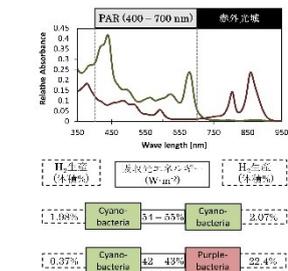
独自に開発した光触媒ライブラリーの知見を基礎に新たに 520nm までの可視光を利用できるドーピング型金属硫化物光触媒の開発に成功した。さらに可視光応答性金属硫化物水素生成光触媒 (CuGaS₂, (CuGa)_{1-x}Zn_{2x}S₂ など) と BiVO₄ 酸素生成光触媒, およびコバルト錯体や還元型酸化グラフェン (RGO) 電子伝達剤を組み合わせることにより, Z スキーム型可視光水分解光触媒系の構築に成功し、水を電子源とした二酸化炭素の還元反応にも活性を示すことが明らかとなった。これは、可視光照射下において水を電子源とした二酸化炭素の還元に活性を示す粉末系光触媒としては、初めての系である (*J. Am. Chem. Soc.*, **2016**, 138, 10260-10264; *Chem. Commun.*, **2014**, 50, 2543-2546)。

• 独自のバンドエンジニアリングで開発した IrO₂/SrTiO₃/Rh,Sb 光触媒粒子を用いて可視光水分解に成功
• 520nm までの可視光を利用できるドーピング型金属硫化物光触媒

© Nishino, S., Tanaka, and A. Kudo. "Visible-light-responsive SrTiO₃ photocatalyst outperforms with thiolene and nitroxy with visible-light response for medicinal H₂ and O₂ evolution and application to overall water splitting." *Appl. Catal. B: Environmental*, 2014, 150-151, 187-194.
© Aoki, H., Nishino, S., Tanaka, A., Iwano, A., and A. Kudo. "A visible light responsive thiolene and nitroxy-coupled SrTiO₃ powered photocatalyst loaded with IrO₂ cocatalyst for solar water splitting." *Chem. Commun.*, 2014, 50, 2543-2546.

A03 計画 (井上 (和)) 生物学的水素製造システムの高性能化

ヘテロシスト形成型シアノバクテリアを用いて、培地交換なしで長期に水素生産を実現した。この間、細胞はほとんど増殖せずに生命機能を最小限に維持し、水素生産を持続した。バイオリアクターを二層化し、上層にシアノバクテリア、下層に紅色細菌を培養することで、水素性生産に利用出来る太陽光スペクトルを近赤外光にまで拡大できることを実証した。いわば「生かさず、殺さず、水素を作り続けさせる」画期的な方法である (The 36th Annual Meeting of the HESS, Japan, Nov., 28-29, 2016 (Tokyo, Japan))。



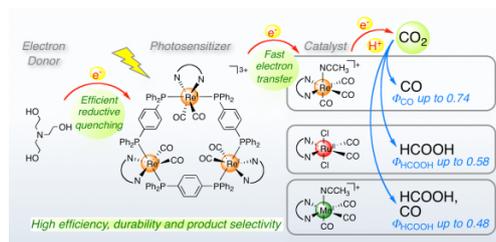
紅色光合成細菌を利用した太陽光の有効波長領域の拡大と水素生成の向上

A03 計画 (加藤 (英)) Cu(I)含有酸化物光触媒による安定的な水素生成が可能であることを初めて実証した (*J. Mater. Chem. A*, **2015**, 3, 14239-14244)。

研究項目 A04 「二酸化炭素還元光触媒能を有する人工光合成システム」

A04 計画 (石谷) 二酸化炭素光還元で世界最高の量子収率を達成

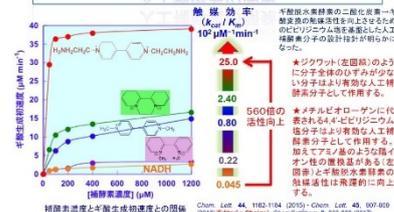
配位子間に弱い相互作用を導入することでレドックス光増感剤としての性質を大幅に向上させたリング状 Re(I)多核錯体の合成に成功した。この Re-リング光増感剤と、CO₂還元触媒として機能する Re(I), Ru(II)および Re(I)錯体を組み合わせて用いることにより、世界最高量子収率で CO₂を還元することに成功した (*Dalton Trans.*, **2017**, in press; *Chem. Sci.*, **2016**, 7, 6728-6739; *Inorg. Chem.*, **2015**, 54, 8769-8777; *Inorg. Chem.*, **2014**, 53, 7170-7180; *J. Am. Chem. Soc.*, **2013**, 135, 13266-13269)。



A04 計画 (天尾) CO₂還元酵素の活性化

ギ酸(FDH), アルデヒド(AldDH), アルコール脱水素酵素(ADH)からなる反応系に可視光照射することでCO₂をメタノールに分子変換できることを見出し高活性化を達成する人工補酵素の開発に成功した (*ChemCatChem.*, **2017**, 9, 833-838)。

二酸化炭素還元能を有する酵素を活性化する人工補酵素の開発



A04 計画 (森川) 電解化学的 CO₂還元の高効率化

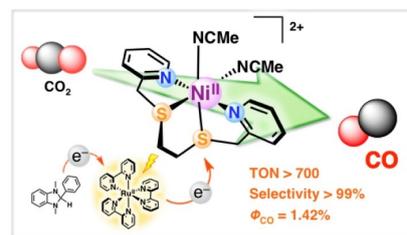
水溶液中において、Agを導電性カーボン多孔体の表面にコートすることで電気化学的な CO₂⇒COの還元反応速度を向上させる事に成功した (*Chem. Lett.*, **2016**, 45, 1362-1364)。

A04 計画 (田中) H₂Oを電子源としたCO₂の光還元を進行させる新規光触媒の発見

Agを修飾した種々の金属酸化物が光触媒として機能し、CO₂の転化率およびCOへの選択率を示すことを新たに発見した。特に Ag/ZnGa₂O₄/Ga₂O₃と Ag/ZnGa₂O₄は非常に高いCOの生成速度を示した。濃度へと換算すると、2000ppmを超えるCOが定常的に生成していることを意味しており、これまでの報告の中で、最も高い濃度のCOを生成することに成功した (*J. Mater. Chem. A*, **2015**, 3, 11313-11319)。

A04 公募 (小島) 新奇 CO₂還元触媒の開発

活性中心に硫黄原子が配位したNi錯体を含む機能モデル錯体として、硫黄原子を支持配位子を含む3d遷移金属錯体 (M = Mn, Fe, Co, Ni)を合成した。特にNi錯体は、高効率・高選択的な光触媒特性を示すことを明らかにした (*J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, 139, 6538-6541)。



J. Am. Chem. Soc. **2017**, 139, 6538-6541

6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したのものについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください。）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

*発表論文

領域全体の総原著論文数 965 報（平成24年度—28年度）、その中で領域内共同研究の論文数 90 報
領域全体の実質総原著論文数 875 報（965 報から 90 報の重複を除く）

主な原著論文（全て査読有）を下記に記す

研究項目 A01 「光捕集機能を有する人工光合成システム」総論文数 363 報

計画研究

- 1) ▲H. Watanabe, Y. Kamatani, *H. Tamiaki, Coordination-driven dimerization of zinc chlorophyll derivatives possessing a dialkylamino group, *Chem. Asian J.*, **2017**, 12, 759–767. [Back cover of issue number 7]
- 2) ◎▲T. Mizoguchi, Y. Kinoshita, J. Harada, *H. Tamiaki, Organo-gelation of natural bacteriochlorophyll-*c* in carbon tetrachloride: dependence upon the stereochemistry at the 3¹-position and the alkyl substituents at the 8-position, *ChemPlusChem.*, **2017**, 82, 595-597.
- 3) ◎▲*D. Kosumi, T. Kajikawa, K. Sakaguchi, S. Katsumura, *H. Hashimoto, Excited state properties of β-carotene analogs incorporating a lactone ring, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2017**, 19, 3000-3009.
- 4) ▲Y. Kuramochi, M. Sekine, K. Kitamura, Y. Maegawa, Y. Goto, S. Shirai, *S. Inagaki, *Hitoshi Ishida, Photocatalytic CO₂ Reduction by Periodic Mesoporous Organosilica (PMO) Containing Two Different Ruthenium Complexes as Photosensitizing and Catalytic Sites, *Chem. Eur. J.*, **2017**, 23, in press.
- 5) ◎▲*D. Kosumi, T. Horibe, M. Sugisaki, R.J. Cogdell, *H. Hashimoto, Photoprotection Mechanism of Light-Harvesting Antenna Complex from Purple Bacteria, *J. Phys. Chem. B*, **2016**, 120, 951-956.
- 6) ▲X. Liu, Y. Maegawa, Y. Goto, K. Hara, *S. Inagaki, Heterogeneous Catalysis of Water Oxidation by an Iridium Complex Immobilized on Bipyridine-Periodic Mesoporous Organosilica, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2016**, 55, 7943–7947.

公募研究

- 7) ▲T. Tsukamoto, K. Takada, *R. Sakamoto, R. Matsuoka, R. Toyoda, H. Maeda, T. Yagi, M. Nishikawa, N. Shinjo, S. Amano, T. Iokawa, N. Ishibashi, T. Oi, K. Kanayama, R. Kinugawa, Y. Koda, T. Komura, S. Nakajima, R. Fukuyama, N. Fuse, M. Mizui, M. Miyasaki, Y. Yamashita, K. Yamada, W. Zhang, R. Han, W. Liu, T. Tsubomura, *Hiroshi Nishihara, Coordination Nanosheets Based on Terpyridine-zinc(II) complexes: As Photoactive Host Materials, *J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, 139, 5359-5366.
- 8) ◎▲Y. Ohtani, S. Kawaguchi, T. Shimada, *S. Takagi, Energy Transfer among Three Dye Components in a Nanosheet-Dye Complex: An Approach To Evaluating the Performance of a Light-Harvesting System, *J. Phys. Chem. C*, **2017**, 121, 2052-2058.
- 9) ▲*R. Sakamoto, T. Iwashima, J. F. Kögel, S. Kusaka, M. Tsuchiya, Y. Kitagawa, *H. Nishihara, Dissymmetric Bis(dipyrrinato)zinc(II) Complexes: Rich Variety and Bright Red to Near-Infrared Luminescence with a Large Pseudo Stokes Shift, *J. Am. Chem. Soc.*, **2016**, 138, 5666–5677.
- 10) ▲H. Nishi, *T. Tatsuma, Oxidation Ability of Plasmon-Induced Charge Separation Evaluated on the Basis of Surface Hydroxylation of Gold Nanoparticles, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2016**, 55, 10771-10775.
- 11) ◎▲Y. Ohtani, T. Shimada, *S. Takagi, The artificial light harvesting system with energy migration functionality in the cationic dyes / inorganic nano-sheet complex, *J. Phys. Chem. C*, **2015**, 119, 18896–18902.
- 12) ◎▲A. Matsumoto, M. Suzuki, D. Kuzuhara, H. Hayashi, *N. Aratani, *H. Yamada, Tetrabenzoperipentacene: Stable Five-Electron Donating Ability and a Discrete Triple-Layered β-Graphite Form in the Solid State, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2015**, 54, 8175-8178.

他 351 報

研究項目 A02 「水の酸化光触媒機能を有する人工光合成システム」総論文数 226 報

計画研究

- 1) ▲F. Kuttassery, S. Mathew, S. Sagawa, S. N. Remello, A. Thomas, D. Yamamoto, S. Onuki, Y. Nabetani, H. Tachibana, *H. Inoue, One Electron-Initiated Two-Electron Oxidation of Water by Aluminum Porphyrins with Earth's Most Abundant Metal, *ChemSusChem*, **2017**, 10, 1909-1915. [Front cover page of issue number 9]
- 2) ▲A. Tanaka, Y. Fukushima, *N. Kamiya, Two different structures of the oxygen-evolving complex in the same polypeptide frameworks of photosystem II, *J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, 139, 1718-1721.
- 3) ▲S. Uto, K. Kawakami, Y. Umena, M. Iwai, M. Ikeuchi, J.-R. Shen, *N. Kamiya, Mutual relationships between structural and functional changes in a PsbM-deletion mutant of photosystem II, *Faraday Discuss.*, **2017**, 198, 107-128.
- 4) ◎▲M. Hirahara, *M. Yagi, Photoisomerization of ruthenium(II) aquo complexes: mechanistic insight and application development, *Dalton Trans.*, **2017**, 46, 3787-3799.
- 5) ◎▲K. Aiso, R. Takeuchi, T. Masaki, D. Chandra, K. Saito, T. Yui, *M. Yagi, Carbonate ions induce highly performed electrocatalytic water oxidation by cobalt oxyhydroxide nanoparticles, *ChemSusChem*, **2017**, 10, 687-692.
- 6) ▲*Y. Kato, R. Ishii, *T. Noguchi, Comparative analysis of the interaction of the primary quinone QA in intact and Mn-depleted photosystem II membranes using light-induced ATR-FTIR spectroscopy, *Biochemistry*, **2016**, 55, 6355-6358.
- 7) ▲S. Nakamura, *T. Noguchi, Quantum mechanics/molecular mechanics simulation of the ligand vibrations of the water-oxidizing Mn₄CaO₅ cluster in photosystem II, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **2016**, 113, 12727-12732.
- 8) ▲S. N. Remello, F. K., T. Hirano, Y. Nabetani, D. Yamamoto, S. Onuki, H. Tachibana, and *H. Inoue, Synthesis of Water-soluble Silicon-porphyrin: Protolytic behaviour of axially coordinated hydroxy groups, *Dalton Transactions*, **2015**, 44, 20011-20020.

公募研究

- 9) ▲H. C. Watanabe, Y. Yamashita, *Hiroshi Ishikita, Electron transfer pathways in a multi-heme cytochrome MtrF, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **2017**, 114, 2916-2921.
- 10) ▲T. Oshikiri, K. Ueno, *H. Misawa, Selective dinitrogen conversion to ammonia using water and visible light via plasmon-induced charge separation, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2016**, 55, 3942-3946.
- 11) ▲M. Okamura, M. Kondo, R. Kuga, Y. Kurashige, T. Yanai, S. Hayami, V. K. K. Praneeth, M. Yoshida, K. Yoneda, S. Kawata, *S. Masaoka, A pentanuclear iron catalyst designed for water oxidation, *Nature*, **2016**, 530, 465-468.
- 12) ▲*T. Shiragami, H. Nakamura, J. Matsumoto, M. Yasuda, Y. Suzuri, H. Tachibana and H. Inoue, Two-electron oxidation of water to form hydrogen peroxide sensitized by di(hydroxo)porphyrin Ge^{IV} complex under visible-light irradiation, *J. Photochem. Photobiol. A, Chem.*, **2015**, 313, 131-136.

他 214 報

研究項目 A03 「水素発生光触媒機能を有する人工光合成システム」 総論文数 229 報

計画研究

- 1) ▲K. Koshiba, *K. Yamauchi, *K. Sakai, A Nickel Dithiolate Water Reduction Catalyst Providing Ligand-based Proton-coupled Electron Transfer Pathways, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2017**, 56, 4247-4251.
- 2) ▲*T. Sato, K. Inoue, H. Sakurai, K. V. P. Nagashima, Effects of the deletion of hup genes encoding the uptake hydrogenase on the activity of hydrogen production in the purple photosynthetic bacterium *Rubrivivax gelatinosus* IL144, *J. Gen. Appl. Microbiol.*, **2017**, 63, in press.
- 3) ▲*H. Masukawa, H. Sakurai, R. P. Hausinger, K. Inoue, Increased heterocyst frequency by patN disruption in *Anabaena* leads to enhanced photobiological hydrogen production at high light intensity and high cell density, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **2017**, 101, 2177-2188.
- 4) ▲A. Iwase, S. Yoshino, T. Takayama, Y. H. Ng, R. Amal, *A. Kudo, Water Splitting and CO₂ Reduction under Visible Light Irradiation Using Z-Scheme Systems Consisting of Metal Sulfides, CoOx-Loaded BiVO₄, and a Reduced Graphene Oxide Electron Mediator, *J. Am. Chem. Soc.*, **2016**, 138, 10260-10264.
- 5) ▲K. Iwashina, A. Iwase, Y. Hau Ng, R. Amal, *A. Kudo, Z-Schematic Water Splitting into H₂ and O₂ Using Metal Sulfide as a Hydrogen-Evolving Photocatalyst and Reduced Graphene Oxide as a Solid-State Electron Mediator, *J. Am. Chem. Soc.*, **2015**, 137, 604-607.
- 6) ▲C. S. Quintans, *H. Kato, M. Kobayashi, H. Kaga, A. Iwase, A. Kudo, M. Kakihana, Improvement of hydrogen evolution under visible light over Zn_{1-2x}(CuGa)_xGa₂S₄ photocatalysts by synthesis utilizing a polymerizable complex method, *J. Mater. Chem. A*, **2015**, 3, 14239-14244.
- 7) ▲K. Yamamoto, K. Kitamoto, *K. Yamauchi, *K. Sakai, Pt(II)-Catalyzed Photosynthesis for H₂ Evolution Cycling Between Singly and Triply Reduced Species, *Chem. Commun.*, **2015**, 51, 14516-14519.
- 8) ▲K. Ueda, *H. Kato, M. Kobayashi, M. Hara, M. Kakihana, Control of valence band potential and photocatalytic properties of Na_xLa_{1-x}TaO_{1+2x}N_{2-2x} oxynitride solid solutions, *J. Mater. Chem. A*, **2013**, 1, 3667-3674.

公募研究

- 9) ▲S. Hossain, W. Kurashige, S. Wakayama, B. Kumar, L. V. Nair, Y. Niihori, *Y. Negishi, Ligand Exchange Reactions in Thiolate-Protected Au₂₅ Nanoclusters with Selenolates or Tellurolates: Preferential Exchange Sites and Effects on Electronic Structure, *J. Phys. Chem. C*, **2016**, 120, 25861.
- 10) ◎▲*T. Abe, K. Fukui, Y. Kawai, K. Nagai, H. Kato, A water splitting system using organo-photocathode and titanium dioxide photoanode capable of bias-free H₂ and O₂ evolution, *Chem. Commun.*, **2016**, 52, 7735-7737.

- 11) ©▲F. J. Gunawan, *T. Harada, Y. Kuang, T. Minegishi, K. Domen, *S. Ikeda, A Pt/In₂S₃/CdS/Cu₂ZnSnS₄ Thin Film as an Efficient and Stable Photocathode for Water Reduction under Sunlight Radiation, *J. Am. Chem. Soc.*, **2015**, 137, 13691-13697.
- 12) T. Matsumoto, *H.-C. Chang, M. Wakizaka, S. Ueno, A. Kobayashi, A. Nakayama, T. Taketsugu, *M. Kato, Non precious-metal-assisted Photochemical Hydrogen Production from *ortho*-Phenylenediamine, *J. Am. Chem. Soc.*, **2013**, 135, 8646-8654. [Front cover]

他 217 報

研究項目 A04 「二酸化炭素還元光触媒能を有する人工光合成システム」 総論文数 147 報

計画研究

- 1) ▲R. Kuriki, K. Higuchi, Y. Yamamoto, M. Akatsuka, D. Lu, S. Yagi, T. Yoshida, *O. Ishitani, *K. Maeda, Robust Binding between Carbon Nitride Nanosheets and a Binuclear Ruthenium(II) Complex Enabling Durable, Selective CO₂ Reduction under Visible Light in Aqueous Solution, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2017**, 56, 4867-4871.
- 2) ▲*T. M. Suzuki, T. Nonaka, A. Suda, N. Suzuki, Y. Matsuoka, T. Arai, S. Sato, *T. Morikawa, Highly crystalline β-FeOOH(Cl) nanorod catalysts doped with transition metals for efficient water oxidation, *Sus. Energy Fuels*, **2017**, 1, 636-643.
- 3) ▲*T. M. Suzuki, S. Saeki, K. Sekizawa, K. Kitazumi, N. Takahashi, *T. Morikawa, Photoelectrochemical hydrogen production by water splitting over dual-functionally modified oxide: p-type N-doped Ta₂O₅ photocathode active under visible light irradiation, *App. Cat. B: Enviro.*, **2017**, 202, 597-604.
- 4) ▲S. Ikeyama, *Y. Amao, Novel artificial co-enzyme based on viologen skeleton for highly efficient CO₂ reduction to formic acid with formate dehydrogenase, *ChemCatChem*, **2017**, 9, 833-838.
- 5) ▲S. Ikeyama, *Y. Amao, Novel artificial co-enzyme based on viologen skeleton for highly efficient CO₂ reduction to formic acid with formate dehydrogenase, *ChemCatChem*, **2017**, 9, 833-838.
- 6) ▲G. Sahara, H. Kumagai, K. Maeda, N. Kaeffer, V. Artero, M. Higashi, R. Abe, *O. Ishitani, Photoelectrochemical Reduction of CO₂ Coupled to Water Oxidation Using a Photocathode With a Ru(II)-Re(I) Complex Photocatalyst and a CoOx/TaON Photoanode, *J. Am. Chem. Soc.*, **2016**, 138, 14152-14158.
- 7) ▲S. Iguchi, S. Kikkawa, *K. Teramura, S. Hosokawa, *T. Tanaka, Investigation of the electrochemical and photoelectrochemical properties of Ni-Al LDH photocatalysts, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2016**, 18, 13811-13819.
- 8) ▲*K. Teramura, Z. Wang, S. Hosokawa, Y. Sakata, *T. Tanaka, A Doping Technique Suppressing Undesirable H₂ Evolution Derived from Overall Water Splitting in Highly Selective Photocatalytic Conversion of CO₂ in and by Water, *Chem. Eur. J.*, **2014**, 20, 9906-9909.

公募研究

- 9) ▲H. Kotani, T. Ishizuka, T. Kojima, Visible-Light-Driven Photocatalytic CO₂ Reduction by a Ni(II) Complex Bearing a Bioinspired Tetradentate Ligand for Selective CO Production, *J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, 139, 6538-6541.
- 10) ▲*H. Ishida, A. Sakaba, Temperature Dependence of Photocatalytic CO₂ Reduction by Trans(Cl)-Ru(bpy)(CO)₂Cl₂: Activation Energy Difference between CO and Formate Production, *Faraday Discuss.*, **2017**, 198, 263-277.
- 11) ▲T. Nakajima, Y. Tamaki, K. Ueno, E. Kato, T. Nishikawa, K. Ohkubo, Y. Yamazaki, *T. Morimoto, *O. Ishitani, Photocatalytic Reduction of Low Concentration of CO₂, *J. Am. Chem. Soc.*, **2016**, 138, 13818-13821.
- 12) ▲M. Yamamoto, *T. Yoshida, N. Yamamoto, T. Nomoto, Y. Yamamoto, S. Yagi, H. Yoshida, Photocatalytic reduction of CO₂ with water promoted by Ag clusters in Ag/Ga₂O₃ photocatalysts, *J. Mater. Chem. A*, **2015**, 3, 16810.

他 135 報

*書籍

科学普及書の刊行

夢の新エネルギー「人工光合成」とは何か 世界をリードする日本の科学技術、井上晴夫監修、講談社ブルーバックス、2016年8月刊

人工光合成の背景、現状、将来展望について、一般社会への科学普及書として解説した。領域代表者（井上晴夫）が監修し、石谷治(A04)、井上和仁(A03)、井上晴夫(A02)、神谷信夫(A02)、工藤昭彦(A03)、民秋均(A01)、正岡重行(A02)、三澤弘明(A02)他5名が執筆し、稲垣伸二(A01)、高木慎介(A01)、森川健志(A04)他3名が執筆協力した。初版15000部を刊行し、短期間に現在までに3刷の増刷を行っている。



*ホームページ

新学術領域「人工光合成」としてのホームページを開設し

領域について（・研究概要・連絡先・公募研究募集）

研究組織（・組織表・総括班・A01班・A02班・A03班・A04班）

研究活動（・研究会・報道・受賞・ニューズレター・メール通信）

研究成果（・原著論文・会議発表・著書・特許）

の項目毎に詳細な情報発信を行っている。

URL アドレス <http://artificial-photosynthesis.net/index.html>

*主催シンポジウムなどの状況

領域としての主催 16件

共催 13件

その他 4件

合計 33件

主な国際会議

《主催》2017 International Conference on Artificial Photosynthesis (ICARP2017)

日程：2017年3月2日（木）～5日（日）

場所：立命館大学朱雀キャンパス

《共催》Artificial Photosynthesis: Faraday Discussion

英国化学会から領域代表者（井上晴夫）への依頼により日本で初めての Faraday Discussion を開催した。

日程：2017年2月28日（火）～3月2日（木）

場所：立命館大学朱雀キャンパス

《企画》THE INTERNATIONAL CHEMICAL CONGRESS OF PACIFIC BASIN SOCIETIES (PACIFICHEM 2015)

日程：2015年12月15日（火）～12月20日（日）

場所：Honolulu, Hawaii, USA

1) Artificial Photosynthesis: Reduction of Carbon Dioxide (# 271)

12月15日（火）午前・午後・12月16日（水）午前

2) Artificial Photosynthesis: Bio-inspired Chemistry for Solar Fuel Production (# 278)

12月16日（水）午後・12月17日（木）午前

3) Artificial Photosynthesis: Photo-induced Water Splitting (# 193)

12月19日（土）午前・午後・12月20日（日）午前

《共催》Third International Symposium on the Photofunctional Chemistry of Complex Systems (3rd ISPPCS)

日程：2015年12月12日（土）～12月14日（月）

場所：Makena Beach & Golf Resort, Maui, Hawaii, USA

《依頼による企画》Innovation for Cool Earth Forum：経産省主催の国際シンポジウム（ダボス会議の環境版とされている）の依頼で人工光合成セッションの企画、組織化を研究代表者（井上晴夫）が務めた。

Concurrent sessions (part 2) Artificial Photosynthesis

日時：2015年10月8日（木）9:00-11:30

会場：ホテル椿山荘東京

《主催》2014 International Conference on Artificial Photosynthesis (ICARP2014)

日程：2014年11月24日（月）～28日（金）

場所：淡路夢舞台国際会議場

《依頼による企画》Science in Japan：JSPS Washington Office の依頼により米国市民対象に人工光合成シンポジウムの Organizer を領域代表者（井上晴夫）が務めた。

日程：2013年6月21日

場所：Cosmos Club, Washington DC, USA

人工光合成に関する国際論文誌（査読付）特集号の刊行：合計4件

・本領域が主催した国際会議「2014 International Conference on Artificial Photosynthesis (ICARP2014)」での発表成果について、総括班員が編集担当して下記の3件の特集号を刊行した。

1) Journal of Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry, Vol. 313, Special issue of ICARP2014, H. Inoue and H. Tamiaki, Ed., (2015).

2) Journal of Material Chemistry, A, Themed articles on Artificial Photosynthesis, K. Domen and A. Kudo Ed., (2015).

3) Journal of Photochemistry and Photobiology, C: Photochemistry Reviews, Vol. 25, Special issue on Artificial Photosynthesis in Molecular Systems, H. Tamiaki, Ed., (2015).

・さらに、2017 International Conference on Artificial Photosynthesis (ICARP2017)での発表成果について、総括班員が編集担当して下記の特集号を発刊予定である。

1) Journal of Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry, Virtual Special issue of ICARP2017, H. Inoue, H. Tamiaki, A.

Kudo, Ed., (2018).

主な国内会議、シンポジウム

《主催》新学術領域「人工光合成」公開シンポジウムを合計5回開催した。(2013～2017)

《依頼による企画》日本化学会春季年会中長期シンポジウムを人工光合成について5回企画・開催した。
(2013～2017)

《依頼による企画・共催》日本学術会議公開シンポジウム「人工光合成研究の最先端」

—資源・環境・エネルギー課題解決と新産業創成のための革新的科学技術開発—を研究項目 A03 代表者(工藤昭彦)が企画開催した。

日時：2015年12月9日(水) 13:00-18:10

会場：日本学術会議講堂

若手研究者育成シンポジウム：合計8回開催した。(2013～2016)

第1回若手研究者育成シンポジウム～光化学の新たな展開～

日時：2013年6月30日(日) 会場：北海道大学

特別講演 「固相媒体中におけるルテニウム(II)錯体の光化学物性と光誘起反応」
(大阪市立大学) 助教 伊藤 亮孝

第2回若手研究者育成シンポジウム～人工光合成と光触媒～

日時：2013年9月24日(火)～25日(水) 会場：新潟大学

特別講演 「水を電子源とするCO₂光還元反応の実現を目指した半導体と錯体触媒の複合化」
(豊田中央研究所) 研究員 佐藤 俊介
「光で色を操る ～新規マルチカラーフォトクロミズム～」
(新潟大学) 特任助教 松原 一喜

第3回若手研究者育成シンポジウム～光化学の新たな展開～

日時：2014年11月3日(月) 会場：北海道大学

特別講演 「レーザー捕捉で拓く新しい相転移の化学」
(北海道大学) 准教授 三浦 篤志

第4回若手研究者育成シンポジウム

日時：2014年12/13日(土) 会場：東京工業大学

特別講演 「ルテニウム錯体触媒による電気化学的な水の酸化反応」
(東京工業大学) 助教 玉置悠祐

第5回若手研究者育成シンポジウム～光化学の新たな展開～

日時：2015年11月1日(日) 会場：北海道大学

特別講演 「オキソ架橋ルテニウム二核錯体の多重結合性制御」
(北海道大学) 助教 吉田 将己

第6回若手研究者育成シンポジウム

日時：2016年10月17日(月) 場所：琵琶湖畔

Japan-France Artificial Photosynthesis Symposium を翌日に開催

特別講演 “Molecular-based H₂-evolving photocathodes”
(フランス CEA Grenoble) Dr. Vincent Artero

第7回若手研究者育成シンポジウム --生物から学び、応用する光反応--

日時：2016年11月18日(金)～19日(土) 会場：立命館大学 びわこくさつキャンパス

第8回若手研究者育成シンポジウム～光化学の新たな展開～

日時：2016年11月27日(日)～28日(月) 会場：北海道大学 札幌キャンパス

招待講演 (長崎大学) 准教授 作田 絵里
(東京工業大学) 博士研究員 山崎 康臣

*一般向けのアウトリーチ活動

一般向け講演会・セミナー・サイエンスカフェなど、合計111回(2013～2017)開催した。
主なアウトリーチ活動として「フォーラム人工光合成」を計6回開催した。

*人工光合成に関するニュースレターの発信

人工光合成領域に関するニュース、解説、評論、論文紹介、研究紹介などのニュースレターを合計48回(2013.4～2017.3) 領域ホームページに掲載すると共に、電子メールで配信した。

*メディア(テレビ、ラジオ、新聞など)の報道・紹介など

国内メディア： 合計140件

国外メディア： 合計10件

7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況（2ページ以内）

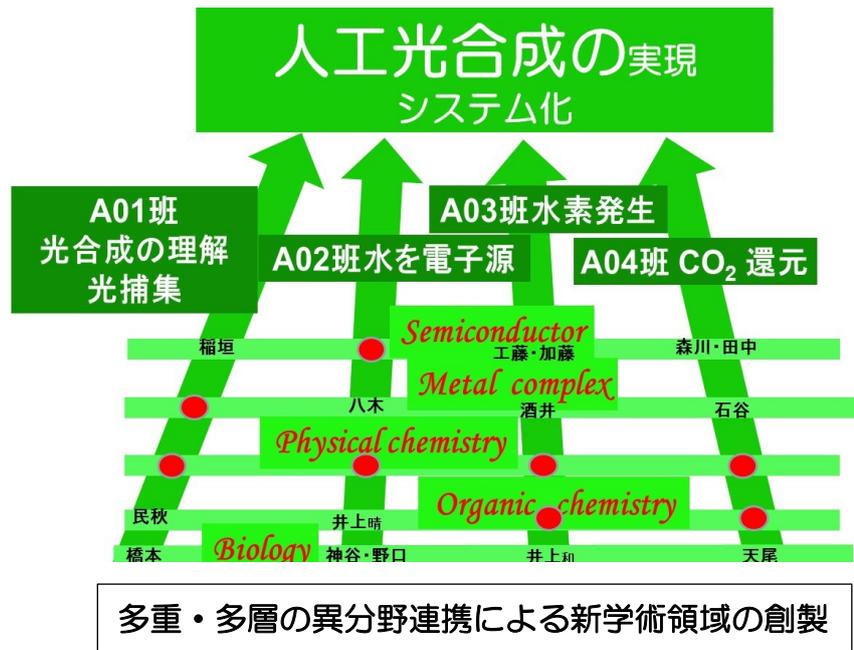
領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、総括班研究課題の活動状況も含め、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

研究戦略と研究組織

国内外の研究状況と世界動向を見ても、光合成分子機構の解明とそれを工学的に応用する太陽光利用技術確立のためのフォーラム形成を目指す本研究領域は、早期の強力な推進が不可欠である。平成 24 年度は、計画研究班のみが研究を実施した。実質半年間余りの研究となるため、領域発足直後に総括班を含めた計画班会議を行い、各班が推進すべき研究課題を全体で共有した。異分野間の研究交流が主体となるため、分野の垣根を超えた共通言語での理解を確立することが重要である。そのため、これまでの新学術領域研究プロジェクトでは見られなかった班員同士の共同研究を予算化し積極的に推進することを特徴とした。

平成 25 年度以降は、班ごとに公募研究を加え、強力な連携のもとで研究を推進した。本学術研究領域では、人工光合成による太陽光エネルギーの物質変換：実用化プロセスに向けての異分野融合を目指し、①光合成の学理と人工光捕集システム、②太陽光による水分子の酸化活性化、酸素発生、③水を電子源とする太陽光による水素発生及び④水を電子源とする太陽光による二酸化炭素の還元に関する研究者が一堂に会する異分野融合のプラットフォームを基礎に、オールジャパンの人工光合成フォーラムを形成することを大目標とした。各分野の研究を深化させる際は、決してブラックボックス化することなく、オープン・イノベーションの発想に基づく学術研究と応用研究を実現するために、構成班員で情報・知識・試料・計測技術・加工技術を共有するフォーラムを形成することで、世界各国と切磋琢磨し得る強力な光合成研究のオープン・イノベーションを実現することを志した。

光合成に学びながらも機能として光合成を超える人工光合成系は、むしろ我が国が世界を先導する半導体の光触媒領域や金属錯体の光触媒領域など、互いに見かけ上は異分野に見える領域からのブレークスルー技術の出現や、技術連携から達成される可能が極めて高い。そこで、研究推進には縦割りの個別領域ごとの班構成にするのではなく、下図に示すように目的別による班構成とし、従来は連携困難であった各領域を横串方式で共通の土俵に載せてイノベーションを図った。人工光合成を実現するために、まさに異分野融合による新学術領域の創生を志した。各研究者は横軸の個別専門領域と縦軸の目的志向軸の交点に位置し班内と班間の連携・共同研究を強烈に意識ながら研究推進する研究組織としている。図中の交点に記載の研究者名は計画班員、赤丸は公募班員を意味している。具体的な研究内容は以下の通りである。



研究項目 A01 「光捕集機能を有する人工光合成システム」

研究組織：計画班研究者数 3 名

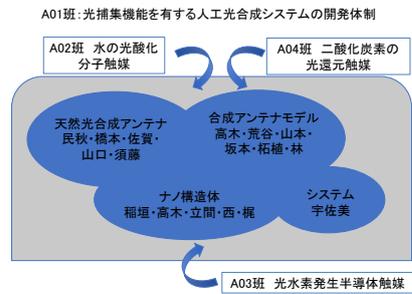
研究代表者

民秋 均 (立命館大学生命科学部・教授)
「クロロフィル集積体による光収穫アンテナ機能の解明及び研究総括」

研究分担者

橋本秀樹 (関西学院大学工学部・教授)
「光捕集機能の解明と高効率化」
稲垣伸二 (豊田中央研究所稲垣特別研究室・室長・シニアフェロー)
「メソポーラス有機シリカを光捕集系とした人工光合成の構築」

公募班研究者 10 名 (平成 25, 26 年度)、8 名 (27, 28 年度)



研究項目 A02 「水の酸化光触媒機能を有する人工光合成システム」

研究組織：計画班研究者数 4 名

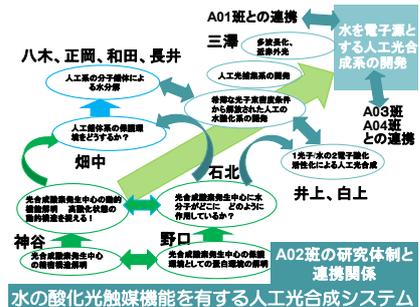
研究代表者

井上晴夫 (首都大学東京大学院都市環境科学研究科・特任教授)
「可視光による水の二電子酸化:ユビキタス金属錯体による光酸化反応及び研究総括」

研究分担者

神谷信夫 (大阪市立大学複合先端研究機構・教授)
「光合成光化学系 II の水分解・酸素発生過程の完全解明」
野口 巧 (名古屋大学大学院理学研究科・教授)
「光合成水分解系の動作原理の解明と人工光合成への応用」
八木政行 (新潟大学大学院自然科学系・教授)
「合成錯体分子による水酸化光触媒系の構築」

公募班研究者 6 名 (平成25, 26年度)、6名 (27, 28年度)



研究項目 A03 「水素発生光触媒機能を有する人工光合成システム」

研究組織：計画班研究者数 4 名

研究代表者

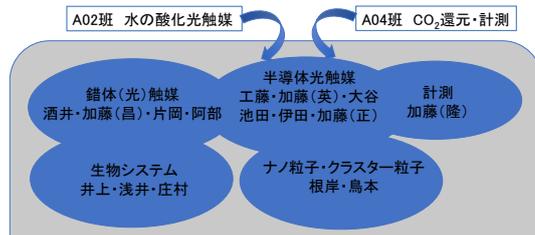
工藤昭彦 (東京理科大学理学部・教授)
「クリスタルエンジニアリングに基づくソーラー水素製造光触媒の開発及び研究総括」

研究分担者

井上和仁 (神奈川大学理学部・教授)
「窒素固定酵素ニトロゲナーゼを利用した水素生産の高効率化」
酒井 健 (九州大学大学院理学研究院・教授)
「金属錯体を基盤とした光水素生成システムの創成」
加藤英樹 (東北大学多元物質科学研究所・准教授)
「水素生成のための新規光触媒開発」

公募班研究者 7 名 (平成 25, 26 年度)、8 名 (27, 28 年度)

A03班: 水素発生光触媒機能を有する人工光合成システムの開発体制



研究項目 A04 「二酸化炭素還元光触媒機能を有する人工光合成システム」

研究組織：計画班研究者数 4 名

研究代表者

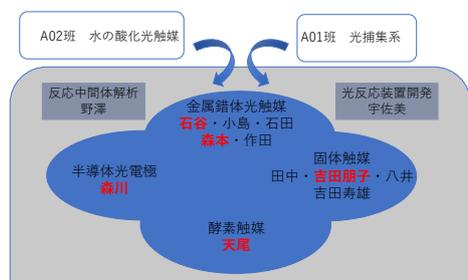
石谷 治 (東京工業大学大学院理工学研究科・教授)
「CO₂分子の光還元のための光機能性分子創成及び研究総括」

研究分担者

天尾 豊 (大阪市立大学複合先端研究機構・教授)
「二酸化炭素を燃料化する光捕集分子-酵素複合型人工光合成系の創製」
森川健志 (豊田中央研究所先端研究センター・主任研究員)
「二酸化炭素を光還元するための可視光応答性半導体の創製」
田中 庸浩 (京都大学大学院工学研究科・教授)
「固体表面の特性を活かした二酸化炭素の再資源化」

公募班研究者 5 名 (平成25, 26年度)、6名 (27, 28年度)

A04班: CO₂還元光触媒機能を有する人工光合成システムの開発体制



8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む。）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について記述してください（総括班における設備共用等への取組の状況を含む。）。

設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況

- 1) 超高精度 ESI-TOF/MS システム（H24 年度導入・立命館大学）：合成化合物の同定を行っている。特に天然化合物や錯体の同定に有効であり、領域内共同研究に利用されている。「可視光エネルギーで二酸化炭素を分子変換する光合成色素—電子伝達体—触媒三元複合体の創製」（A01 班の民秋・橋本と A04 班の天尾）や「クロロフィル/メソポーラスシリカ集積体の構造制御」（A01 班の民秋・稲垣）や「天然型光合成アンテナ超分子への両親媒性機能分子の再構成による天然系—人工系融合システムの構築」（A01 班の民秋・佐賀）など
- 2) サブナノ秒過渡吸収分光測定装置（H24 年度導入・立命館大学）：多様な分子系の光励起電子・エネルギー移動系の動力学を広い波長領域で観測でき、領域内共同研究に利用されている。「時間分解分光による天然・人工光合成アンテナ系の機能解明」（A01 班の民秋・橋本と A04 班の天尾）や「超高速時間分解分光計測および Stark 分光計測を用いた CO₂ 還元光触媒の機能解析」（A01 班の橋本と A04 班の石谷）や「ルテニウム錯体の MLCT 遷移の起源の同定と時間分解分光計測を用いた光機能評価」（A01 班の橋本と A02 班の八木）など
- 3) 光触媒反応閉鎖循環装置とガスクロマトグラフ（H25 年度導入・新潟大学）：錯体系触媒による水の分解と二酸化炭素還元とそれらの生成物の定量が行えるので、様々な触媒機能を検討するのに有益であり、領域内共同研究に利用されている。「水を電子源とした二段階光励起二酸化炭素還元系の開発」（A02 班の八木と A04 班の石谷と班友の阿部^竜）や「無機・酵素ハイブリッド型二酸化炭素光還元系の構築」（A02 班の八木と A04 班の天尾と班友の阿部^竜）や「光合成酸素発生中心モデル錯体を導入した光捕集メソポーラス有機シリカによる可視光酸素発生系の構築」（A01 班の稲垣と A02 班の八木）など
- 4) ポータブルレーザーラマン分光光度計（H24 年度導入・東京理科大学）：固体型光触媒の同定とその機能解析が容易に行え、領域内共同研究に利用されている。「溶液プロセスを利用した高効率な硫化物光触媒の構築」（A03 班の工藤・加藤^美）など
- 5) ナノ粒子解析装置（H25 年度導入・東京工業大学）：ナノサイズの光触媒の構築と同定に用いられており、領域内共同研究に利用されている。「高効率な光捕集型 CO₂ 還元光触媒系の構築を目指した PMO 構造制御」（A01 班の稲垣と A04 班の石谷）など

研究費の効果的使用について（総括班研究課題の活動状況）

平成 24 年度は、計画研究班のみが実質半年間研究を実施した。領域発足直後に総括班を含めた計画班会議を行い、各班が推進すべき研究課題を全体で共有した。異分野融合による研究推進のため、これまでの新学術領域研究プロジェクトでは見られなかった班員同士の共同研究を予算化し積極的に推進することを特徴とした。平成 25 年度以降は、班ごとに公募研究を加え、強力な連携のもとで研究を推進している。本新学術領域研究の主たる目的は研究分野の創発的な連携・融合による「All Japan 体制」での研究推進である。人工光合成研究を行っているすべての分野の研究者が集結できるフォーラムを作ることを目指している。本研究の成否は、班内のみならず各班間においても、公募班員と計画班員の違いなく共同研究を積極的に行い、これまでの体制では得ることが期待できない融合的研究を開始、加速できるかに大きく依存する。実効を上げるため、計画班員に配分する研究費は比較的安く抑え、その代わりに班員からの共同研究を公募し、有望な共同研究申請に関して総括班での審査・評価を行った。領域内共同研究として平成 25 年度に 24 件：総額 2270 万円の支援と平成 26 年度に 23 件：総額 2210 万円の支援を実施している。

研究期間の midpoint（平成 27 年度）では、それまでの計画班、公募班、上記のべ 47 件の共同研究実施状況と進展状況を中間総括し、平成 27、28 年度に総括班主導のトップダウン型での学理追求型（Creatio 軸）プロジェクトおよび実用化への視点（Innovation 軸）プロジェクトを開始し、予想以上の進展を得ている。

総括班主導プロジェクト

・Creation 軸

光捕集
Photon flux density
光子—光子 時間間隔

・Innovation 軸

- ▶1) 微生物、藻類の光合成応用
- ▶2) 金属錯体による水の酸化、二酸化炭素の還元
- ▶3) 可視光感受性半導体光触媒による水の光分解と
- ▶4) 光電気化学的展開
- ▶5) 太陽電池と分子触媒、半導体触媒の連結
- ▶6) モジュール試作への視点

・研究費の使用状況

(1) 主要な物品明細 (計画研究において購入した主要な物品 (設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。) について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。)

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価 (円)	金額 (円)	設置(使用)研究機関
24	超高精度 ESI-TOF/MS システム	ブルガー・ダルトニクス micrOTOF II-RT	1	21,000,000	21,000,000	立命館大学
	ポータブルレーザーラマン分光光度計	日本分光 RMP-5300	1	13,461,000	13,461,000	東京理科大学
	サブナノ秒過渡吸収分光測定装置	Ultrafast system 社製 EOS-VIS-S	1	9,996,000	9,996,000	立命館大学
	AKT Apurifier10	GE ヘルスケアジャパン・Frac-950	1	5,894,700	5,894,700	大阪市立大学
	溶出位置自在制御中圧分取液体クロマトグラフシステム	山 善 ・ EPCLC-Wrep2XY-Vis10VW	1	3,432,555	3,432,555	首都大学東京
	キャピラリー電気泳動システム	Agilent 7100 システム	1	3,000,000	3,000,000	新潟大学
	Milli-Q integral-3S 基本システム	メルクミリアポア ZRXQ003JP	1	2,113,020	2,113,020	大阪市立大学
など						
25	超高速液体クロマトグラフ	島津製作所・CBM-20A 他一式	1	8,066,637	8,066,637	立命館大学
	ナノ粒子解析装置	堀場製作所製 SZ-100-ZBPF	1	7,938,000	7,938,000	東京工業大学
	有機微量元素分析装置	米国エグゼターアナリティカル社 CE-440	1	4,771,355	4,771,355	新潟大学
	光触媒反応閉鎖循環装置	幕張理化学硝子製作 CLS750-M-S-01304B	1	3,496,500	3,496,500	新潟大学
	自動サンプリングバルブ付ガスクロマトグラフ	島津サイエンス東日本株式会社 GC8AIT 一式	1	1,870,000	1,870,000	東京理科大学
ソーラーシミュレーター	朝日分光株式会社 HAL-320	1	1,524,600	1,524,600	東京理科大学	
など						
26	高速液体クロマトグラフ質量分析計	LCMS-2020 他	1	7,399,296	7,399,296	立命館大学
	高速・小型ガス分析計	Agilent 490 マイクロ GC	1	4,968,000	4,968,000	新潟大学
	陰イオン分析システム	サーモフィッシャーサイエンティフィック社製 ICS-1100	1	3,996,000	3,996,000	新潟大学
	マルチモード AFM 用溶液対策 済広域スキャナー	AS-130VLR-2	1	1,814,400	1,814,400	立命館大学
など						
27	デスクトップX線回折装置	Rigaku MiniFlex600/DT/C	1	4,989,600	4,989,600	東京理科大学
	倒立型顕微鏡	倒立型顕微鏡	1	2,327,011	2,327,011	立命館大学
	PDF(Pair Distributer Function Analysis)(academic)	インストールCD	1	1,055,036	1,055,036	東京理科大学
	ファイバ光源セット	HGLGPS-SET	1	982,692	982,692	立命館大学
など						
28	差動型示差熱天秤	Thermoplus EVO II TG-DTA8121	1	3,700,000	3,700,000	東京理科大学
など						

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

【平成24年度】

- ・旅費：合計 6,279,079 円
総括班：1,450,669 円
A01 班：1,163,305 円
A02 班：650,185 円
A03 班：1,859,330 円
A04 班：1,155,590 円
- ・人件費・謝金：合計 3,806,558 円
総括班：956,438 円
A01 班：1,668,621 円
A02 班：37,500 円
A03 班：47,186 円
A04 班：1,096,813 円
- ・その他 合計 4,262,338 円
総括班：1,547,898 円
A01 班：766,221 円
A02 班：1,775,865 円
A03 班：369,473 円
A04 班：102,881 円

旅費：2012/8/14-8/20 外国出張 IMRC、メキシコでの研究発表、616,953 円 (A03 工藤昭彦)、2012/10/6-10/13 外国出張 PRIME2012、ハワイでの学会参加、情報交換、398,863 円 (A03 工藤昭彦) など
人件費：非常勤人件費、225,331 円 x 1 月、207,219 円 x 2 月、博士研究員雇用 (A04 石谷治) など
その他：キックオフミーティング開催準備作業委託、(株)ポラリス・セクレタリーズ・オフィス、94,773 円 (総括班) 第1回公開シンポジウムおよび第2回フォーラム人工光合成開催支援費、(株)ポラリス・セクレタリーズ・オフィス、657,807 円、HP 作成および維持更新費、84,000 円 (総括班) など

【平成25年度】

- ・旅費：合計 16,196,247 円
総括班：8,032,509 円
A01 班：726,370 円
A02 班：973,200 円
A03 班：4,015,256 円
A04 班：2,448,912 円
- ・人件費・謝金：合計 9,221,321 円
総括班：5,038,793 円
A01 班：3,228,537 円
A02 班：0 円
A03 班：665,379 円
A04 班：288,612 円
- ・その他：合計 17,056,138 円
総括班：9,973,238 円
A01 班：4,718,329 円
A02 班：424,063 円
A03 班：1,586,903 円
A04 班：353,605 円

旅費：2013/11/8 招聘旅費 藤田恵津子博士 (Brookhaven NL,USA) 第2回公開シンポジウムでの特別講演、395,520 円 (総括班)
2013/6/20 国内旅費、第2回合同班会議への評価委員、リーディングサイエンティスト 計7名分、281,133 円 (総括班) など
人件費・謝金：2013/11/20、第3回フォーラム人工光合成、講師謝金、5名分、77,959 円 (総括班)
その他：2013/6/2-6/3、合同班会議会場使用料、淡路島夢舞台国際会議場、376,441 円 (総括班)
第4回フォーラム開催支援費、(株)ポラリス・セクレタリーズ・オフィス、150,045 円 (総括班) など

【平成26年度】

- ・旅費：合計 21,979,164 円
総括班：4,605,865 円
A01 班：3,993,050 円
A02 班：2,292,606 円
A03 班：3,708,005 円
A04 班：7,379,638 円
- ・人件費・謝金：合計 15,505,387 円
総括班：11,221,285 円
A01 班：2,320,645 円
A02 班：1,287,166 円
A03 班：483,906 円
A04 班：192,385 円
- ・その他：合計 16,074,707 円
総括班：8,042,620 円
A01 班：1,115,722 円
A02 班：2,500,101 円
A03 班：2,242,624 円
A04 班：2,173,640 円

旅費：2014/8/18-8/22 招聘旅費 藤田恵津子博士 (Brookhaven NL,USA) リーディングサイエンティスト、第3回全体会議へのパネル討論講師として招聘、321,450 円 (総括班)、2014/8/20-8/22 国内旅費、第3回班会議、全体会議への評価委員、リーディングサイエンティストなど 計7名分、189,630 円、2014/11/23-11/27 ICARP2014 招待者宿泊費、5名分、203,472 円 (総括班) など
人件費・謝金：2014/8/20-8/22、第3回全体会議、講師謝金、3名分、156,829 円 (総括班)
その他：人工光合成プロモーションビデオ制作費、810,000 円 (総括班)、平成26年度合同班会議準備サポート業務一式、272,538 円 (総括班)、第3回合同班会議要旨集印刷費、98,648 円 など

【平成27年度】

- ・旅費：合計 15,054,590 円
総括班：3,887,886 円

<p>A01 班：1,317,462 円 A02 班：1,325,025 円 A03 班：3,188,010 円 A04 班：5,336,207 円 ・人件費・謝金：合計 22,577,176 円 総括班：12,877,449 円 A01 班：5,868,323 円 A02 班：1,441,886 円 A03 班：303,078 円 A04 班：2,086,440 円 ・その他：合計 14,725,407 円 総括班：3,994,162 円 A01 班：931,815 円 A02 班：7,658,964 円 A03 班：819,286 円 A04 班：1,321,180 円</p> <p>【平成28年度】 ・旅費：合計 16,391,088 円 総括班：5,600,000 円 A01 班：2,768,885 円 A02 班：1,149,778 円 A03 班：2,268,495 円 A04 班：4,603,930 円 ・人件費・謝金：合計 30,727,512 円 総括班：15,020,000 円 A01 班：4,609,649 円 A02 班：7,104,788 円 A03 班：130,185 円 A04 班：3,862,890 円 ・その他：合計 13,660,416 円 総括班：6,530,000 円 A01 班：2,562,016 円 A02 班：2,473,281 円 A03 班：685,429 円 A04 班：1,409,690 円</p>	<p>旅費：2015/6/12-6/14 国内旅費、第4回合同班会議、評価委員、リーディングサイエンティスト、招待者など16名分、807,980 円（総括班）、2016/1/28-1/30、第4回公開シンポジウム、評価委員、リーディングサイエンティストなど4名分、153,770 円（総括班） など 人件費・謝金：第4回合同班会議、講師謝金、56,854 円（総括班） その他：第4回合同班会議要旨集 印刷費 118,800 円（総括班）、第4回合同班会議準備サポート業務一式、237,697 円（総括班）、ISPCCS2015 会議室利用料、87,000 円（総括班） など</p>
<p>旅費：2016/8/19-8/25 招聘旅費、第5回合同班会議、国際評価委員の招聘、朴鍾震、64,871 円（総括班）、2016/8/21-8/23、第5回合同班会議、評価委員、リーディングサイエンティストなど13名分宿泊費、244,980 円（総括班） など 人件費・謝金：博士研究員雇用、1名、4,602,779 円（A01班）、第5回合同班会議、講師謝金2名、107,978 円（総括班）、国際評価委員の招聘旅費・謝金、Richard Cogdell 教授、505,016 円（総括班） その他：第5回合同班会議要旨集 印刷費 177,120 円（総括班）、平成28年度合同班会議準備サポート業務一式、298,360 円（総括班）、若手研究者育成シンポジウム会議室利用料、56,634 円（総括班）、第5回公開シンポジウム会場利用料、158,270 円（総括班）、第5回公開シンポジウ</p>	

(3) 最終年度（平成28年度）の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

課題番号：24107001

・平成28年9月までに、人工光合成の新技术として本研究で開発したユビキタス元素で構成される新奇分子触媒、アルミニウムポルフィリンによる電気化学的な水分子の酸化分解反応についてその詳細を明らかにし、平成29年3月までに、その検討結果を基礎に、光化学的手法により水分子の酸化分解反応が進行するかどうかを探索する予定であった。

・平成28年10月、当初研究計画により人工光合成の新技术として本研究で開発した電気化学的な水分子の酸化分解反応結果を基礎に光化学的手法による実験に挑戦したところ当初の予想をはるかに超える有望な結果を得た。新発見例は、人工光合成の実現に向けて画期的な反応例と考えられる。本研究目的の遂行上、この反応例の一層の展開を図る必要があり、徹底的な反応例探索には平成29年度までの研究が必要不可欠であると判断し下記の通り研究費の繰越しを行った。

合計 (①+②)	①直接経費 (計)	費目別使用内訳				②間接経費
		物品費	旅費	人件費・謝金	その他	
2,790,000	2,790,000	40,000	50,000	2,700,000	0	0

(算定根拠)
物品費：ガラス器具・試薬等 40,000円
旅費：東京-大阪予定
人件費：350,000円/月＋社会保険料等、6ヶ月雇用

9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1 ページ以内）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

人工光合成は、二酸化炭素を排出しない次世代エネルギーシステムの構築、炭素循環をコントロールし得る社会の構築という社会の強い要請を背景にしている。かつて「人類の夢、科学の夢」であったが、今や必ず実現しなくてはならない「人類の存続を賭けた課題」となったことが表しているように、人工光合成に関与する学問領域は、学理段階でも生物学、生物光物理学、生化学、有機化学、光化学、錯体化学、電気化学、半導体科学、材料科学、理論科学、計測化学、など極めて多岐にわたり、社会への適用段階では、エネルギー経済学、工学全般、社会科学などほとんどすべての学術領域にわたっている。このような広範な領域はそれぞれが固有の方法論を有しつつ、研究対象を共有する状況にある。個々の研究成果が、それぞれの方法論にまで深く影響を及ぼすかどうかについての直截判定には時期尚早と考えられるが、本新学術領域研究で得られた個別の研究成果は上記「2. 研究領域の設定目的の達成度」で述べたように、予想以上の成果を上げた結果、**新しい視点が創出**され当該領域に極めて大きいインパクトを与えたと自負する。人工光合成領域の今後の研究進展には極めて大きい波及効果が予想されるものである。

予想以上の研究進展・大きいインパクト：得られた新しい三つの視点

「異分野融合」の視点で研究推進することにより、それまでは互いに議論することもなかった光合成領域と人工光合成領域で共通のプラットフォームを先行新学術領域「人工光合成」は作り上げ、研究推進する中で新しい視点が浮かび上がってきた。その視点を三つ上げよう。

その一つは分子触媒領域から「太陽光の光子束密度条件（光子の時間間隔）」の重要性についての指摘があり、天然の光合成では光捕集のダイナミクスと PSII の Kok サイクルの時間スケール、ダイナミクスが「光子—光子の時間間隔」のチューニングの視点から見ると光子束密度条件の下で互いに整合していることが見えてきた。このことは従来、光合成領域では必ずしも明確には認識はされていなかった視点である。今後の光合成機構解明には極めて大きい学術指針となるものと予想される。人工光合成で果たす光捕集の役割や課題も光子束密度条件を考慮すべきであることが見えてきた。半導体光触媒上の助触媒が担う反応時間スケールにも多くの示唆がある。光子束密度条件をどのように解決しあるいは回避すべきかが鮮明になってきた。

その二つ目は、天然光合成反応中心 PSII の構造解明研究で徹底的な X 線ドーズ量効果を検討した結果、PSII 構造は過剰の X 線を照射してもその構造には殆ど変化がないことが明らかになった。このことは反応中心を取り巻くタンパク質環境の「保護効果」が重要であることを示しており、その保護効果を発現する系を人工光合成ではいかにして構築・実現するかの課題も見えてきた。半導体表面、分子触媒を取り巻く微小環境、反応場への視点が一層鮮明になってきた。

さらに、最も大事な三つ目の視点として、「静的視点」と「動的視点」の融合の必要性を挙げることができる。超複雑系である天然の光合成系ではこれまで、核心となる酵素の構造解明に最大の研究努力が傾注されてきた。我が国はその最先端を進んでいる。その構造解明は測定可能な安定静的構造を中心に解明が進んできたが、最も安定な状態のスナップショット 1 枚を取り出して光合成の一連の化学現象を理解することには未だ多くの障害がある。もちろん、貴重な 1 枚のスナップショットが人工光合成領域には極めて大きい示唆を与えてきたのだが。一方、人工光合成領域では、光合成反応中心に比較すれば格段にその複雑性は減じられ、分子や原子の視点で光吸収後の化学反応は充分、動的な化学計測が可能な状況であった。しかし、分子、原子周囲を取り巻く微小環境、反応場環境など光合成における超複雑系に対応する次元での設計、解析手法には多くの課題を残しているために、多くの個別共同研究事例がありながらも「総合設計」の視点で手本となる光合成のスナップショットが与えている指針を必ずしも充分には生かしていない。つまり、超複雑系を解明する光合成研究にはスナップショットをつなぐ「動的視点」を、分子・原子に注目する人工光合成研究には反応系を取り巻く微小環境、反応場の視点から時間軸を長くした「静的視点」も取り入れて両者の知見を互いにフィードバックして研究推進することが必要であるとの認識に至った。「静的視点」と「動的視点」を融合させた一層深い視点で今後の人工光合成に取り組むべきであるとの認識を共有するに至ったのである。

10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1 ページ以内）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者（※）の研究終了後の動向等を記述してください。

※研究代表者・研究分担者・連携研究者・研究協力者として参画した若手研究者を指します。

研究領域内での若手研究者育成の取り組み

* 本研究領域に参画した全ての研究グループが、積極的な若手研究者育成方針を共有して研究推進した。

* 若手研究者育成シンポジウムを合計 8 回開催した。

このシンポジウムでは、企画から運営まで全てを若手研究者が中心となって行った。

（詳細は上記「6 研究成果の取りまとめ及び公表の状況」を参照）（2013～2016 年度）

* 本領域が主催した国際学会（ICARP2014, ICARP2017）では大学院生対象の優秀発表賞を設けて研究奨励した。

若手研究者の受賞

本研究領域に参画した若手研究者は極めて活発な研究活動を展開していることは、下記の多くの受賞者を輩出していることから窺えよう。

- ・日本化学会進歩賞 3 名（2013, 2014, 2015 年度）
- ・日本学術振興会省 2 名（2106 年度）
- ・文部科学大臣表彰若手科学者賞 6 名（2013, 2014, 2016 年度）

参画した若手研究者の研究終了後の動向等

本新学術領域研究に参画した研究者の約 6 割を占める若手研究者（39 歳以下）の内、毎年約 30 % が研究職（常勤・非常勤）および研究職以外に就職している。つまり、研究に参画して約 3 年以内にはほぼ、全員が就職していることが分かる。

本研究領域の若手研究者育成の取り組みが、どの程度影響したかは判別できないが、参画している若手研究者の成長の状況は概ね、健全と考えられる。

11. 総括班評価者による評価（2 ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

国際評価委員 Professor Richard Cogdell (University of Glasgow) (光合成) のご意見

I am pleased to give short evaluation of the AnApple project. I have seen this project at work first hand twice as I have attended two of their ICARP conferences. I have been very impressed both by the interdisciplinarity and quality of work being sponsored under this program and by the excellent training that it is giving to young students and Post. Docs. Unlike many other programs AnApple seems to be really learning from Biology in a constructive and innovative way. It is also clear that the group funded under this program work together as a tight, integrated team. If I was to highlight one project it would be the link to Mistubishi to produce solar hydrogen. For me this is a fine exemplar of how to link basic science into applications. The study of artificial photosynthesis to produce solar fuels is a grand challenge that mankind must meet. Japan has recognised this by signing up to the Mission Innovation Program, which has identified Solar Fuels as one of their clear priorities. I hope that this very successful program will be continued and indeed form the core of Japanese efforts in this crucial area of science. AnApple is a project that Japan can be proud of!

国際評価委員 Professor Thomas J. Meyer (University of North Carolina) (人工光合成) のご意見

I am writing at your request to summarize my experiences as a senior advisor for your MEXT funded project on Artificial Photosynthesis. My first comments are to commend you for your organization and leadership in running the organization. Based on my observations and impressions, the choice of participants and their response to both organization and oversight by management were excellent.

The subject matter for the program was well in tune with Japan's long term energy interests. Although much of the research was basic in nature, insights gained by participating in the program had a significant impact on the participants both in extending their research interests and in developing a coterie of research experts who will continue to collaborate and contribute to this area in the future. I was especially impressed by scientific growth of the participants. With this group of talented research scientists, it will be a pleasure to watch as they continue to extend this area of science, leading Japan in the future.

My impressions of the program from inside out are warranted by the high level of production and collaboration by the contributors. With the coterie of 20 members, and additional support for 28 projects, support from AnApple led to over 800 papers from 2012 to 2017. The organization implemented 5 international conferences and sponsored the first Faraday Discussion in Japan, on Artificial Photosynthesis in February, 2017 at Kyoto. The overall quality of the participants was very high as evidenced by the extent and quality of the Principle Investigators.

Congratulations again for creating such a successful research enterprise. I will look forward in the future to a continued high level of Japanese effort in this area, one that will contribute significantly to our energy future.

国際評価委員 朴 鐘震 高麗大学校自然科学大学新素材化学科教授 (錯体光化学) のご意見

まず、本新学術領域「人工光合成」の班構成およびそれぞれの班毎の研究課題の設定と人的構成が、合目的的になされたことにより高い成果が得られたことを評価したい。これは、人工光合成研究が、その目的である可視光による水分子を電子源とした水素発生や二酸化炭素還元へと内包される困難にして複雑な内容を解明するために多様な科学・技術分野に基づかなければならず、また、高い機能を有した複数の素材の開発と共にそれらを組織化した合理的システムを構築しなければならないという本質的要求性に対応できたからである。その結果、質量共に申し分ない論文発表がなされ、また、実りある国際学会を組織することによって、日本のみならず世界の人工光合成研究の水準を質的に向上させることに大きく寄与したことは特筆すべき成果である。各論的にいくつかの注目すべき成果を挙げるならば、これまで達成されたことのなかった天然光合成と機能的に同等なアンテナ色素組織体の人工的構成、希少金属を用いない鉄原子クラスターに基づく高活性水分子酸化による酸素発生分子触媒の開発、これまでのものを凌駕する高活性かつ長期安定性の水素発生および二酸化炭素還元分子触媒の合成とそれらに基づくハイブリッド触媒の創製、赤色領域まで光吸収可能な新規光半導体の開発とその原理解明、水分子を電子源とした可視光による水素発生または二酸化炭素還元を駆動する電子伝達経路 (Z-Scheme) システムの提案などがある。これらの研究成果はこれまでにない質的飛躍をもたらしたと認められよう。

もう一つ注目すべきことは人的力量の蓄積である。本研究プロジェクトに参画した研究者の構成において新進研究者が過半近くを占め、また、これら研究集団が高い研究力量を示したことは、人工光合成の実用化が相当な時間を要することを勘案すると、今後の人工光合成の目的達成において勇気づけられる要素になるものと確信できる。

以上のように、本新学術領域プロジェクトは人工光合成の実用化が可能であることの科学的実証に成功したと認められる。本プロジェクトで得られた成果は、今後の研究進展の貴重な跳躍台になるものと信じている。

国内評価委員 伊藤 繁 名古屋大学名誉教授 (生物物理) のご意見

本研究領域は人工と天然光合成の研究を一堂に集め、議論と実践の場を作り出したといえる。進化を通じて作られた天然光合成系は、多様な原子・分子群を組み合わせ、光の吸収、励起エネルギーの移動、電荷分離、電子移動、酵素反応を行う高次最適化システムである。本領域の生体系研究者らは、この中の究極課題の一つである水分解系の分子構造を世界に先駆けて明らかにし、この情報にもとづき電子と水素イオン移動を効率よく進める複雑な分子構造の役割を明らかにしつつあり、世界的に注目を集め、さらに人工光合成研究に有益な研究指針と新たな刺激を与えた。

本領域では多様な効率良い光反応系が有機・無機化学的方法で作成されただけでなく、さらにこれらを組み合わせ、反応環境も含めて設計された効率良い高次システム作成が進められ出した。直接見て、議論することで生体系の知識を深く理解しその応用がもたらされつつある。無機半導体系人工光合成でも、生体光合成の観念的模倣として始まった Z スキーム型を、さらに原子レベルの構造にまで配慮した特製を活かした高次システムとして作りあげつつあり、高効率で安定な人工光合成システムの構築が進みつつある。

天然光合成の研究が良いモデルとなるだけでなく、全く違う材料、分子の組み合わせ、環境で、同様な機能を生み出そうという人工光合成研究は、また天然光合成への新たな理解を生み出しつつある。天然光合成系は、効率とともに安全性、経済性なども含めて、競争に勝ち残ったシステムであり、これと、まだエンジンも開発段階の車にも例えられる人工光合成系研究では発達段階が異なり比較は難しい。しかし、本領域の中では異分野研究が相乗的に作用しあって大きく進み、共通点、違いの意味も明らかになり、天然光合成系の再理解も進み、これをベースにした人工光合成系も探られている。本研究領域で活発に行われた討論、共同作業、共同研究は人工光合成実現に向けて確実な進歩をもたらしたといえる。

国内評価委員 徳丸 克己 筑波大学名誉教授 (光化学) のご意見

今から四十数年前の1973年に第一次石油ショックが起り、それに対応するために、そのしばらく前に発表された、本多・藤嶋効果の研究が着目され、太陽光を用いて水から水素を発生させ、それを燃料とする可能性を目指して、この研究が世界各国の研究を先導した。また、故赤松秀雄教授らは、水素エネルギーの研究の重要性を唱えた。このような状況の下、わが国の文部省と科学技術庁、米国のNSF、DOE(エネルギー省)の間で、1979年度末に日米科学技術協力事業「太陽光エネルギー変換」(1979-1999)が発足し、また国内でも、長倉三郎教授を代表として、当該課題の特定領域研究が発足した。この特定領域研究は、1979-1981年度は、比較的小規模であったが、1982-1984年度は規模を広げ、光エネルギーの化学的蓄積、光電子移動系による水からの水素生成、光電気化学、生物系における光エネルギー変換の四班の編成で進められ、次の1985-1987年度は生物系以外の三班の編成で研究が行われた。

さて、上の研究の終了から四半世紀を経て、世界的に自然エネルギーの利用が活発に検討される時期に、本新学術領域研究が行われた意義は極めて高い。人工光合成とは、太陽光照射下、水により二酸化炭素を還元することと言えるが、本領域の研究により、効率はまだ決して高くはなく、また太陽光のスペクトルを全て利用できてはいないが、実験室で、無機半導体の光照射により、この過程が実現されたこととともに、その基礎として、光増感剤あるいは光触媒として多くの無機半導体の研究が進められた意義はきわめて高い。四半世紀前の特定領域研究に携わった一人として、これが実現されたことに、深い敬意を表する次第である。さらに、二酸化炭素のみならず、光照射下、水による窒素の還元によるアンモニア生成も実現した。本領域研究では、四半世紀前には、対象とはされにくかった二酸化炭素の還元、窒素の還元、水を還元剤として利用するための水からの酸素発生促進、さらに人工的な光捕集系等についても格段の進歩が達成されたのは、喜ばしいことである。それに伴い、本研究が、研究者間の学術的交流の機会を増やし、また若手の研究者を育成したことも高く評価される。

過日、この関係のシンポジウムで、かねてからノーベル化学賞受賞の予想が高いと評判の海外の教授が、この研究の班長の方々の研究報告を聞きながら、最大限に情報の獲得に努めている姿は非常に印象的で、この新学術領域研究が世界的に高く着目されることを如実に示すものであった。また、本研究計画の終了に際して、2017年3月に京都において開催のFaraday Discussionおよびそれに続く国際シンポジウムにおいても、海外からの有力な研究者らが熱心に討議に参加していた。今後、太陽電池等との関連を含め、わが国がこの分野を先導していくことを期待したい。

国内評価委員 伊藤攻 東北大学名誉教授 (物理化学) のご意見

新学術「人工光合成」の研究目標は大学・国立研究所・企業研究所の研究者が連携して、様々な切り口で難題の「人工光合成」の研究を推進し、新たな学術領域を展開することである。この目標のため計画班および応募班の研究者を日本全国から幅広く、かつ、バランスよく集めている。もう一つの特徴は異分野融合による研究促進であり、各計画班に異分野の代表者を配して、班内部で異分野の研究者間の共同研究を行い、知識の共有と人的交流を促し、個別的には不可能なことも共同研究によって成果あげている。また、研究代表者のリーダーシップによって各班の間および、一見かなり離れていると思われる異分野間の共同研究も推進している。

本評価員が主に専門としている第1班の光捕集を主目的としたグループでは、バイオミメティックなクロロフィル誘導体の集積による光エネルギー移動の効率化を実現している。また、高速分光法を駆使して、キサンチン類に関連した光誘起エネルギー移動および電荷分離過程のメカニズムを解明することに成功している。さらに、有機分子系や金属錯体系の光エネルギー移動メカニズムの理論と実験の融合を初め、班員が見出したポーラス金属有機体の高効率の良い光捕集系に電荷分離・電子伝達系を組み合わせて、極めて高い光変換効率を発現している。このポーラス金属有機体の研究を行っている班員は、ここ数年、ノーベル化学賞の候補に挙げられており、今後の発展をサポートする必要がある。一方、モデル分子系では、班員が独自に発見した全く新奇な光捕集・伝達系に加えて、光閉じ込め効果を示す分子集積系が班員によって見出されているので、今後、人工光合成系との組み合わせが期待される。

第2班では光触媒などを用いて水から電子を汲み上げ、その電子を用いて後続の化学反応を起こさせて、目的物質を合成する多様な研究が展開されている。金属ポルフィリンや金属錯体などの分子系の研究から、生体をモデルとした多核金属錯体系、さらに新規プラズモンを採用した人工光合成システムの開発研究が展開された。一貫して、水を電子源とする研究発想は、人工光合成の実用化の最も重要なステップとして、本研究集団全体で共有されたことは、特筆すべきことである。

第3班では半導体光触媒研究者のZ-スキームの水素発生と異種遺伝子発現の生物研究者が一緒になってお互いに影響し合い、水を電子源として、半導体光触媒にとって水の電子をくみ上げ、可視光による水素発生に成功している。ここで、光触媒形状などを工夫することによって、酸素と分離して水素を発生することは可能であり、今まで難題であった水素と酸素の分離プロセスを回避できる可能性が見えてきた。CO₂存在下で、この電子をCO₂の還元反応に利用することが出来るが、現在は反応効率と反応選択性の高いCO₂還元触媒の探索が進んでいる。

第4班ではCO₂の固定と有用有機物への高効率化学変換のために遷移金属を初め、多くの複合材料系が開発されてきた。特に、遷移金属を用いたCO₂変換反応に、水を電子源とする光触媒と太陽電池の組み合わせが試みられ、最終物質変化に対して極めて高い光変換効率が見られている。

さらに各班を超えての分子材料、分子集合体材料、半導体材料、生物材料などの組み合わせの研究が異分野の垣根を超えて行われ、多くの共同研究が今回多数立ち上げられたことも特筆すべきであろう。

ともかく、究極のエネルギー変換法として「核融合」と「人工光合成」が挙げられて久しいが、前者の「核融合」は今世紀の実現を見透すことのできないのが現状である。一方、後者の「人工光合成」の変換効率は年々着実に向上していて、植物が数か月かけて光合成する有機物の量を数時間で人工的に光合成するところまで来ている。これに経済的因子を含めて実用化を評価する段階にあと一歩のところまで来ていると言って良い。

これらの新学術での研究成果に基づいて著書「人工光合成とは何か」が研究代表者の井上晴夫監修のもとで出版されて、若い研究者へ継続的にパトロンタッチされることを期待してやまない。

国内評価委員 高木克彦 名古屋大学名誉教授 (材料科学) のご意見

本新学術領域研究プロジェクトが目指した異分野連携・融合の進捗度を検証した。「人工光合成システム」という広範な総合科学技術に含まれる要素技術として、(AO1班)光捕集機能、(AO2班)水の酸化光触媒機能、(AO3班)水素発生光触媒機能、(AO4班)二酸化炭素還元光触媒機能の4つの主要課題に集中して検討している。一方、「人工光合成システム」関連分野として、①光化学、②電気化学、③錯体光化学、④光触媒化学、⑤生物光化学、⑥遺伝子工学、⑦バイオミメティクス、⑧ポルフィリン化学など極めて多岐にわたる。

各関連分野(①~⑧)で研究者が自由な発想で有望な要素技術(AO1班~AO4班)を探索・提案することが基本的手法であるが、井上教授らは人工光合成のような総合科学に関連するあらゆる研究分野で有望シーズを探索するため、先ず各技術分野での研究者同士が相互チェックにより成果の検討と吟味が有効と考え、あらゆる技術分野が人工光合成の可能性を求めて自由に研究競争をさせ、研究集団の中に異分野連携・融合の路線を確立させた。