

フジシール財団 研究助成事業
成果報告書

公益財団法人フジシール財団
理事長 岡 崎 裕 夫 殿

報告日 2026 年 5 月 27 日

研究課題	「抗菌性・防汚性パッケージを志向した高効率・高耐久な高分子光触媒の開発」	助成金額
		300 万円
助成名	特別長期研究助成・研究助成・若手研究助成	
ふりがな	いもと ひろあき	研究助成申請年度
研究者氏名	井本 裕顕	2025 年度
所属機関	京都工芸繊維大学	研究期間
		2025 年 4 月～2026 年 3 月
役 職	准教授	

下記の通り、研究成果を報告いたします。

記

1. 研究成果の概要

【緒言】本研究では、抗菌・防汚性パッケージ材料への応用を目指し、光照射により一重項酸素を発生する高分子系光触媒の開発を行った。一重項酸素は高い酸化力を有する活性酸素種であり、微生物の不活化や有機汚染物質の分解に利用できる。従来、このような光触媒材料には酸化チタン等の無機半導体微粒子や低分子光増感剤が用いられてきたが、**無機微粒子では高分子材料中での分散性、透明性、成形加工性に課題があり、低分子光増感剤では材料中からの溶出や耐久性低下が懸念**される。そこで本研究では、共役系高分子そのものを光吸収部位かつ一重項酸素発生部位として機能させることで、高い光触媒能と高分子材料としての加工性・安定性を両立することを目的とした。

本研究の基本戦略は、**共役系高分子の主鎖にヘテロ元素を組み込むことで、重原子効果により項間交差を促進し、三重項励起状態から酸素へのエネルギー移動を通じて一重項酸素を効率的に発生させる**ものである。特にヒ素は、炭素との結合安定性を保ちながら適度な重原子効果を示す元素であり、光増感能と耐光性の両立に有望である。申請者はこれまでに、ジチエノアルソールを主鎖に有する共役系高分子が高い一重項酸素発生能を示すことを見出していた (*Macromolecules* **2020**, 53, 2006)。本研究ではこの知見を基盤として、ヒ素の周辺元素であるゲルマニウムおよびアンチモンを含む共役系高分子にも対象を拡張し、元素種およびモノマー構造が一重項酸素発生能に及ぼす影響を明らかにした。

【結果】ジチエノアルソール、ジチエノゲルモール、ジチエノスチボール骨格を有するモノマーを合成し、パラジウム触媒を用いた重縮合反応により共役系高分子への展開を検討した (**図 1**)。その結果、ヒ素を含むジチエノアルソールモノマー、およびゲルマニウムを含むジチエノゲルモールモノマーについては、目的とする共役系高分子の合成に成功した。一方、アンチモンを含むジチエノスチボール骨格については、モノマーおよび重合条件の検討を行ったものの、重合条件下で分解しやすく、十分な分子量を有する高分子の合成には至らなかった。この結果は、**重原子効果を高めるために単純に重い元素を導入すればよいわけではなく、元素の重**

さ、炭素—元素結合の安定性、重合反応への耐性、光照射下での安定性のバランスが重要であることを示している。

得られたヒ素およびゲルマニウム含有共役高分子について、紫外可視吸収スペクトルを測定したところ、いずれも

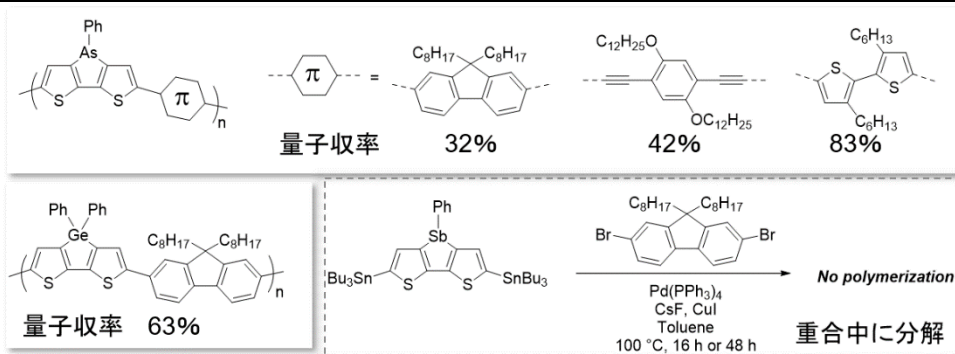


図 1. 高分子光触媒

可視光領域に及ぶ幅広い吸収帯を示した。これは、ヘテロール骨格とモノマーが主鎖方向に十分に共役し、高分子全体として光を効率よく捕集できることを示している。光触媒材料では、光吸収量の大きさが反応速度に直結するため、この広い吸収帯は高分子系光増感剤として大きな利点である。また、発光測定では主に蛍光が観測されたが、一重項酸素生成反応が進行したことから、**非発光性の三重項励起状態が生成し、酸素へのエネルギー移動に寄与している**と考えられる。

一重項酸素発生能は、化学トラップ剤を用いた紫外可視吸収測定により評価した。ジヒドロキシナフタレンを用いた反応では、光照射に伴い一重項酸素酸化生成物に由来する吸収変化が観測され、合成した高分子が光照射下で一重項酸素を発生することを確認した（図 2 左）。また、ジフェニルイソベンゾフランを用いた評価により、ローズベンガルを外部標準とした相対量子収率を算出した。その結果、ヒ素含有高分子およびゲルマニウム含有高分子はいずれも高い一重項酸素発生効率を示した。特に、**ビチオフェンをモノマーとするジチエノアルソール共重合体では、相対量子収率が 83%に達し、代表的な低分子光増感剤であるローズベンガルに匹敵する高効率化**を達成した（図 1 に量子収率を記載）。また、ジチエノゲルモール共重合体も 63%という高い相対量子収率を示し、ヒ素だけでなくゲルマニウムも高分子系一重項酸素発生材料の設計元素として有望であることが明らかとなった。さらに、電子スピン共鳴測定により、一重項酸素の発生を直接的に支持する結果を得た。4-oxo-TEMP をスピントラップ剤として用いた測定では、光照射後に 4-oxo-TEMPO に対応する ESR シグナルが増大し、一重項酸素の発生が確認された（図 2 右）。

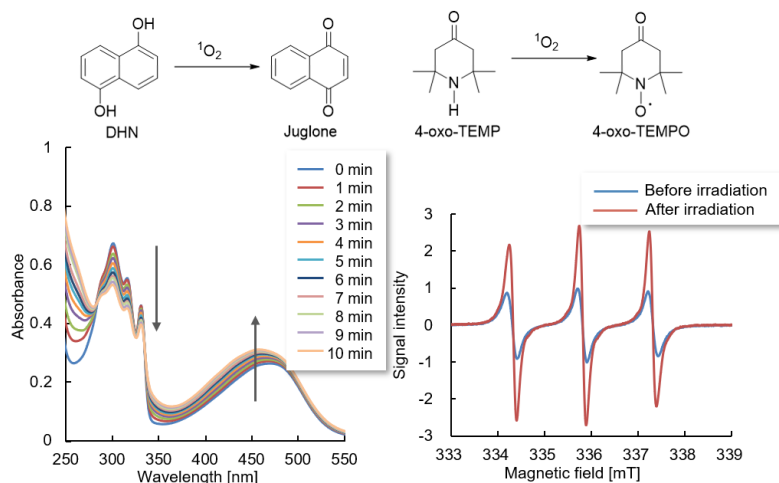


図 2. 一重項酸素発生の評価

また、**ジチエノアルソール共重合体では、相対量子収率が 83%に達し、代表的な低分子光増感剤であるローズベンガルに匹敵する高効率化**を達成した（図 1 に量子収率を記載）。また、ジチエノゲルモール共重合体も 63%という高い相対量子収率を示し、ヒ素だけでなくゲルマニウムも高分子系一重項酸素発生材料の設計元素として有望であることが明らかとなった。さらに、電子スピン共鳴測定により、一重項酸素の発生を直接的に支持する結果を得た。4-oxo-TEMP をスピントラップ剤として用いた測定では、光照射後に 4-oxo-TEMPO に対応する ESR シグナルが増大し、一重項酸素の発生が確認された（図 2 右）。

【結論】本研究では、ヘテロ元素含有共役高分子を用いた一重項酸素発生材料について、分子設計、合成、機能評価、耐久性評価、抗菌機能への展開を一貫して進めた。その結果、**ヒ素およびゲルマニウムを含む共役高分子が、高い光吸収能、重原子効果に基づく一重項酸素発生能、光照射下での安定性を併せ持つ**ことを明らかにした。また、アンチモン含有骨格の重合困難性から、重原子効果と化学安定性のバランスが高分子光触媒設計において重要であることを示した。以上の成果は、原著論文にて報告を行った(論文業績 1)。加えて、本研究では論文として報告した溶液中での一重項酸素発生能評価に加え、材料応用に向けた展開も進めた。具体的には、**得られた高分子を微粒子化することで、光照射下において高い抗菌活性を示す**ことをすでに明らかにしている。この成果は、近日中に論文報告を行う予定である。本研究成果は、共役系高分子を光触媒材料として利用する新たな設計指針を与えるとともに、衛生・医療・食品包装分野に資する機能性高分子材料の創出につながる基盤的成果である。

2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性

本研究成果は、パッケージ産業において重要性が高まっている抗菌性・防汚性・衛生保持機能の付与に貢献する可能性を有する。食品、医薬品、医療材料、衛生用品などのパッケージには、内容物を保護するだけでなく、微生物汚染の抑制、表面の清浄性維持、使用者の安全確保といった機能が求められている。本研究で開発したヘテロ元素含有共役高分子光触媒は、**光照射により一重項酸素を発生し、微生物の不活化や有機汚染物質の酸化分解を引き起こすことができる**ため、抗菌・防汚性パッケージ材料の基盤技術として期待される。

従来の抗菌性パッケージ材料では、銀、銅、亜鉛などの無機抗菌剤や低分子有機抗菌剤が用いられることが多い。しかし、無機微粒子では高分子フィルム中での分散不良、透明性の低下、加工時の物性変化が問題となり得る。また、低分子抗菌剤では、ブリードアウトや溶出、長期使用時の性能低下が懸念される。これに対して、本研究の高分子系光触媒は、光増感部位を高分子主鎖に組み込んでいるため、低分子成分の溶出を抑えやすく、高分子材料との複合化にも適している。また、有機高分子であるため、フィルム化、コーティング化、微粒子化、樹脂中への分散など、既存のパッケージ加工技術と組み合わせやすい。

本研究では、ヒ素およびゲルマニウム含有共役高分子が高効率に一重項酸素を発生し、かつ光照射下で高い安定性を示すことを明らかにした。これは、パッケージ用途において重要である。包装材料は製造、保管、輸送、使用の各段階で光や酸素にさらされるため、光機能材料には長期安定性が不可欠である。本研究の高分子光触媒は、一重項酸素を発生しながらも自己分解が小さいことから、繰り返し使用や長期保管に耐える抗菌・防汚材料としての展開が期待できる。さらに、高分子を微粒子化することで、光照射下における高い抗菌活性をすでに明らかにしている。微粒子化材料は、既存フィルムへの表面コーティング、インクや塗料への配合、樹脂中への分散などに応用しやすく、既存の包装材料に後加工で抗菌機能を付与できる可能性がある。

一重項酸素は、細菌などの微生物だけでなく、有機汚染物質、色素、臭気成分の酸化分解にも寄与する。そのため、**本材料を包装表面に導入すれば、光照射下で抗菌性と防汚性を同時に発現するセルフクリーニング型パッケージ材料の開発**につながる。特に、食品包装、医療用包装、衛生用品包装、介護関連包装など、安全性と清浄性が強く求められる分野において有用性が高い。今後、実際の包装基材への分散・塗布条件、透明性、密着性、耐摩耗性、長期保存安定性、安全性評価を進めることで、高付加価値パッケージ材料の創出に貢献できると期待される。

3. 学会発表、学会誌等への論文掲載、産業財産権出願などの実績（現時点で未発表・未掲載・未出願のため、上記「1. 研究成果の概要」、「2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性」の当財団ホームページ上の公開の延期を希望される場合、その旨 記載してください。）

論文 1) Singlet Oxygen Generation Employing Conjugated Polymer Photosensitizers Containing Arsenic or Germanium
Inaba, R.; Okochi, C.; Miyake, Y.; Naka, K.; **Imoto, H.*** *J. Polym. Sci.* **2025**, 63, 3731-3738.