PRESS RELEASE（2026/09/28）

蛍光イメージングと MRI の両方で使えるイメージング材料を新たに開発

水に溶ける「光るラジカル」が二つのイメージング技術に応用できることを世界で初めて実証

ポイント

① 報告例が極めて少ない水溶性発光ラジカル※1（水に溶けて発光するラジカル）の開発に成功。

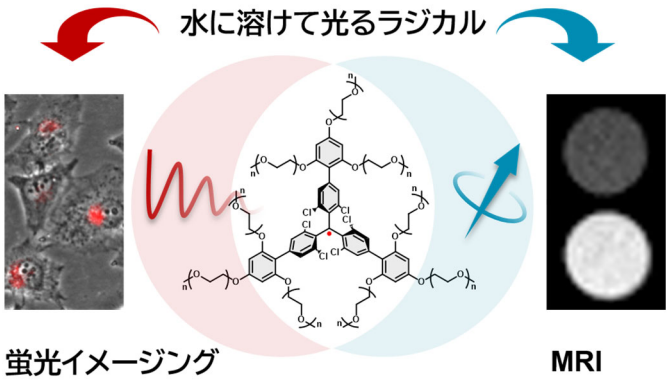
② 水中での深い赤色の発光（ピーク波長約 690 nm）と高い安定性を観測。

③ 水溶性発光ラジカルを蛍光イメージング（FI）※2 および核磁気共鳴イメージング（MRI）※3 のバイオイメージング材※4 として実証。医療応用への展開が期待される。

概要

FI や MRI は、体内での薬剤の行方や腫瘍等の場所の特定、がん手術におけるがん細胞の見える化など、基礎研究だけでなく臨床的にも重要な技術です。赤色-近赤外領域の光を発する発光ラジカルは、その性質から FI と MRI の両方で使用できるイメージング剤として期待されています。九州大学 先導物質化学研究所のアルブレヒト建 准教授、大学院 総合理工学府 博士課程 3 年の安楽滉允、東京科学大学 総合研究院 化学生命科学研究所の岡田智 准教授、量子科学技術研究機構 量子医科学研究所の住吉晃主幹研究員、産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門の細貝拓也 上級主任研究員らの研究グループは、水の中で光る発光ラジカルの開発とその FI および MRI への応用を検討しました。一般的な発光ラジカルは水に溶けず、溶けても FI に重要な発光性を失ってしまうものがほとんどでした。我々は、適切な分子設計により、水の中で深い赤色の光を明瞭に発するラジカル分子の開発に成功しました。また、開発した発光ラジカルは、MRI 造影剤※5 の要件ともいえる常磁性緩和促進効果※6 を示しました。これらの結果を踏まえて、本研究では実際に開発したラジカル分子を用いた細胞内 FI および MRI 画像の取得に成功し、発光ラジカルのこれらの分野への応用可能性を提示しました。今後さらに性能を高めることで、一つの分子で FI/MRI の両方を同時に測れるイメージング材としての応用も期待されます。

本研究成果は Wiley 社発行の国際学術誌「Advanced Science」に 2026 年 9 月 28 日（月）午後 3 時（日本時間）にオンライン掲載されました。



参考図　（中央）開発した水溶性発光ラジカルの分子構造および概念図とそれを用いた（左）蛍光イメージング画像および（右）MRI 画像

研究者からひとこと：

通常、ラジカルは非常に反応しやすいため、安定に扱うことが難しい物質として知られています。一方、本研究で開発したラジカルは有機溶媒中や水中で安定であり、さらに発光を示すことが分かりました。

加えて、FI と MRI のどちらにも応用可能であることが実証できました。今後は、例えばがん細胞に集積するようにしたり、発光効率を改善したりすることで、臨床的な応用に近づけていければと考えています。

（アルブレヒト建）

【研究の背景と経緯】

FI や MRI といったバイオイメージング技術は、薬剤の行方の追跡、がんや腫瘍等の場所の特定、がん手術におけるがん細胞の可視化、臓器の状態の検査など、基礎研究や臨床応用において極めて重要な役割を果たしてきた強力な画像化技術です。FI は高感度であるため、細胞や分子を正確に追跡することができますが、撮像できる深さが比較的浅いという欠点があります。一方で、MRI には理論上撮像できる深さに上限がないため、体内のあらゆる場所を撮像できるという利点がありますが、感度が比較的低いという欠点があります。このように、FI と MRI はそれぞれに利点と欠点があるため、互いに相補的な二つのイメージング技術を組み合わせることで、基礎科学の進歩だけでなく、医療現場においてより信頼性の高い診断結果につながることが期待されています。

そこで我々は、蛍光プローブ※7 として必要な発光性を有し、かつ MRI 造影剤として振る舞うことが期待できる *tris*(2,4,6-trichlorophenyl) methyl (TTM)ラジカルに着目しました（図１）。TTM ラジカル誘導体は、FI に有利な赤色-近赤外発光を示し、従来の常磁性金属錯体※8 を基盤とする MRI 造影剤とは異なりメタルフリーな材料であることからも、FI および MRI への応用が期待されています。しかし、一般的な発光ラジカルは水に溶けず、溶けても FI への応用に必要不可欠な「発光性」を失ってしまうものがほとんどであったため、報告されている論文の数も限られていました。

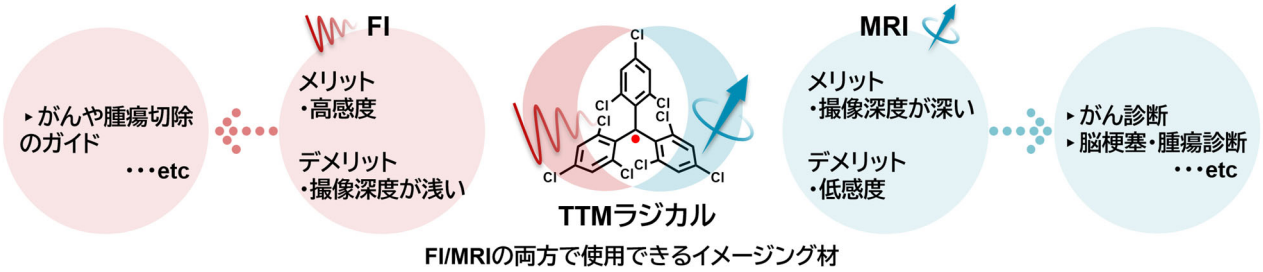


図１. FI/MRI のメリットおよびデメリットと TTM ラジカルの分子構造

【研究の内容と成果】

我々の研究グループは、水中で明確に発光する水溶性発光ラジカルを開発し、その FI および MRI の両用イメージング材としての応用可能性を実証しました。

水の中で安定に存在しかつ発光する発光ラジカルの開発を目指し、不安定な化学種として知られるラジカルの中でも比較的安定とされる TTM に対して、水溶性かつ発光性を促す置換基（TP3B または TP9B）を三方向に結合した、TTM-*tris*TP3B および TTM-*tris*TP9B を設計・合成しました。狙い通りこの水溶性発光ラジカルは、水中で明確な劣化挙動が見られないほど高い安定性を示し、約 690 nm の深赤色の発光を示しました。発光の効率を表す発光量子収率（PLQY）※9 は 1%以上の値を示しました。また、開発した水溶性発光ラジカルは、MRI 造影剤として必要な常磁性緩和促進効果も併せて示しました。

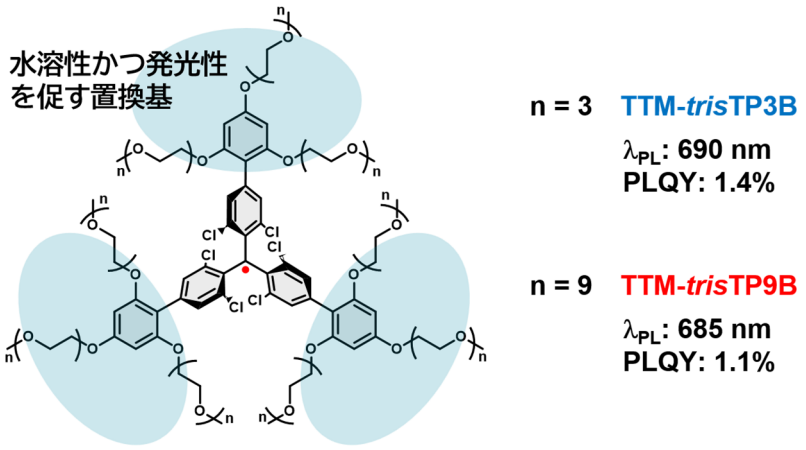


図２．開発した水溶性発光ラジカル（TTM-*tris*TP3B および TTM-*tris*TP9B）の分子構造と、それぞれの水中における発光ピーク波長（λ_{PL}）および PLQY

これらの結果に基づいて行った水溶性発光ラジカルを用いた FI および MRI 実験では、それぞれ HeLa 細胞[※10]の蛍光イメージング画像および縦緩和時間（T_1）-強調 MRI ファントム画像[※11]の取得に成功しました。この結果は、一つの発光ラジカルが FI と MRI のどちらにも応用可能であることを示しています。

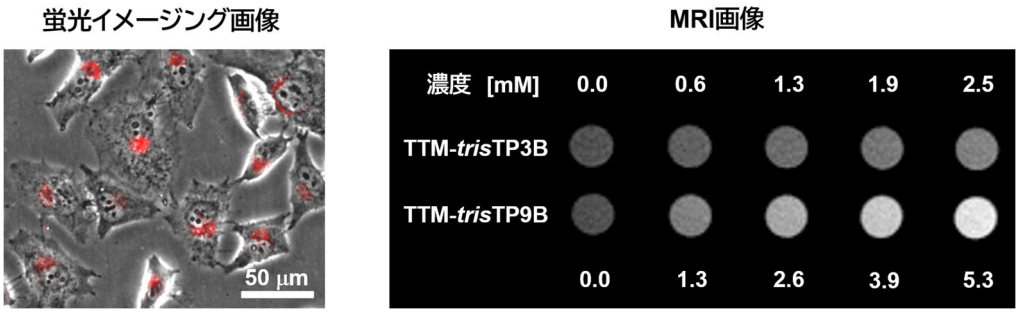


図３．開発した水溶性発光ラジカル（TTM-*tris*TP3B）を用いた HeLa 細胞の蛍光イメージング画像および TTM-*tris*TP3B と TTM-*tris*TP9B を用いた T_1-強調 MRI ファントム画像。

【今後の展開】

本研究は、発光ラジカルの FI および MRI への応用可能性に加えて、水に溶けて発光するラジカルの新たな分子設計指針を提示しています。本研究成果を基盤として、例えばがん細胞に集積するようにしたり、発光効率を改善したりした水溶性発光ラジカルが開発できれば、将来的には FI や MRI のみならずいくつかのバイオイメージング手法への臨床応用も期待できます。さらに、本研究における分子設計指針は、細胞内での微小な磁場や温度変化等をセンシングできる量子センシング技術にも応用できる可能性があります。

【用語解説】

(※1) ラジカル

奇数個の電子を有し、電子のペアを作らない不対電子を有する分子。一方、通常の分子は偶数個の電子を有し、電子同士がペアを作る。ラジカルはこの電子構造に由来して通常の分子よりも不安定な化学種として知られている。

(※2) 蛍光イメージング（FI）

標的となる生体内の組織や細胞等に蛍光色素を集積させて共焦点蛍光顕微鏡等で観察することで、標的部位を光で検出するイメージング技術。がんをはじめとする様々な病気の早期発見に役立つ。

(※3) 核磁気共鳴イメージング（MRI）

生体内にある水分子に含まれる水素原子核の緩和時間（磁場の存在下で水素原子の核スピンを励起した後、平衡状態に戻るまでにかかる時間）を測定し、その違いを通常白から黒のグラデーションで表現するイメージング技術。病変部位と健常部位の緩和時間が異なることを利用してその白黒の濃淡の違いで通常は病変部位を特定するが、不明瞭な場合がしばしばある。そこで、MRI 造影剤※5 を使用することでその白黒の濃淡の違いをより明瞭にすることができる。

(※4) バイオイメージング材

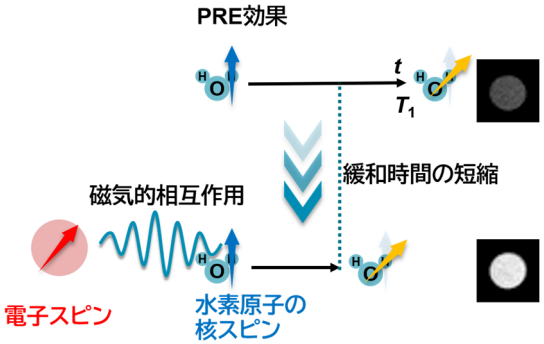
生体内の組織や細胞等を可視化（イメージング）するために用いられる材料。通常、イメージング手法によって用いられるイメージング材の設計が大きく異なる。

(※5) MRI 造影剤

標的部位に集積させることで、標的部位とそれ以外の白黒のコントラストをより明瞭にするイメージング材。ラジカルのようにペアを作らない独立した電子を有する常磁性材料が使われ、この独立した電子と水分子の水素原子核が相互作用することで緩和時間が短くなり、標的部位以外との緩和時間が変化することでコントラストの良い MRI 画像を取得できる。

(※6) 常磁性緩和促進効果（PRE 効果）

MRI 造影剤のような常磁性材料が持つペアを作らない電子と水分子の水素原子核が磁気的に相互作用することで、水素原子核の緩和時間が短縮する効果。これにより、標的部位とそれ以外の部位における水分子の水素原子核の緩和時間に違いが生まれ、よりコントラストの良い MRI 画像の取得が可能になる。常磁性緩和促進効果は英語では Paramagnetic Relaxation Enhancement effect と呼ばれ、PRE 効果と略される。



(※7) 蛍光プローブ

蛍光イメージングに使われる自らが発光するイメージング材。光の生体透過性の観点から、赤色から近赤外といった長波長領域で発光する蛍光プローブの開発が求められている。

(※8) 常磁性金属錯体
ラジカルのようにペアを作らない独立した電子を有する金属イオンと有機分子が化学的に結合した分子。MRI 造影剤としても広く研究されており、特にガドリニウム錯体は臨床にも使用されている。しかし、ガドリニウム錯体をはじめとするいくつかの常磁性金属錯体は、脳への蓄積や腎機能が低下した患者への副作用が問題視されている。

(※9) 発光量子収率（PLQY）
発光材料がどれだけ効率よく発光するかを表した指標。発光量子収率は発光材料が吸収した光子数と放出した光子数の割合で表され、0 から 100％までの値をとる。発光量子収率は英語では Photoluminescence Quantum Yield と呼ばれ、PLQY と略される。

(※10) HeLa 細胞
ヒト子宮頸がん由来の培養細胞株。細胞生物学や薬理学、バイオイメージング等で非常によく使われる代表的なヒト細胞株である。HeLa 細胞という名前は、初めてこの細胞を提供した患者である Henrietta Lacks の名前に由来している。

(※11) MRI ファントム画像
MRI 造影剤の水溶液が入ったチューブを模型（ファントム）として撮像したもの。

【謝辞】
本研究は JSPS 科研費 （JP26K01568, JP25K01850, JP24KJ1764 and JP26KJ1765）、JST 先端国際共同研究推進事業(ASPIRE) （JPMJAP2334）、「人と知と物質で未来を創るクロスオーバーアライアンス」（文部科学省）（2026Y004）、JST SPRING（JPMJSP2136）、公益財団法人渡邉財団の助成を受けたものです。

【論文情報】
掲載誌： Advanced Science
タイトル： Water-Soluble Luminescent Trityl Radical for Fluorescence/Magnetic Resonance Dual-Modal Imaging Probe
著者名： Kosuke Anraku, Satoshi Okada, Akira Sumiyoshi, Kenshiro Matsuda, Kazuhiro Nakamura, Takuya Hosokai, Ken Albrecht
ＤＯＩ：10.1002/advs.77710

【お問合せ先】
＜研究に関すること＞
九州大学　先導物質化学研究所　准教授　アルブレヒト 建（アルブレヒト ケン）
ＴＥＬ：092-583-7815
Mail：albrecht@cm.kyushu-u.ac.jp

＜報道に関すること＞
九州大学　広報課
TEL：092-802-2130　FAX：092-802-2139
Mail：koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

東京科学大学　総務企画部　広報課　総務・メディアグループ
TEL：03-5734-2975
Mail：media@adm.isct.ac.jp

産業技術総合研究所　ブランディング・広報部　報道室
TEL：029-862-6216
Mail：hodo-ml@aist.go.jp