



配布先: 文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会

報道の解禁日(日本時間)

(テレビ、ラジオ、インターネット) : 2025年2月27日(木) 19時

(新聞) : 2025年2月28日(金) 付朝刊

2025年2月25日

報道機関 各位

太陽光と水で医薬品材料とグリーン水素を生成 ～「人工光合成」による新たな有機物生産法の幕開け～

【本研究のポイント】

- ・有機物を原料とする有機合成のための人工光合成^{注1)}という新しい分野を開拓した。
- ・太陽光と水を活用して、医薬品の材料などの有用な有機化合物^{注2)}の合成と、次世代の再生可能エネルギーでもあるグリーン水素^{注3)}の生産を同時に実現した。
- ・汚染有機物の分解や水の分解^{注4)}を促す 2 種類の無機半導体光触媒^{注5)}の相乗効果・協働作用によって「分解」ではなく、その逆の「合成」への転換を達成した。
- ・持続可能なエネルギーと資源を利用した医農薬生産への貢献が期待される。

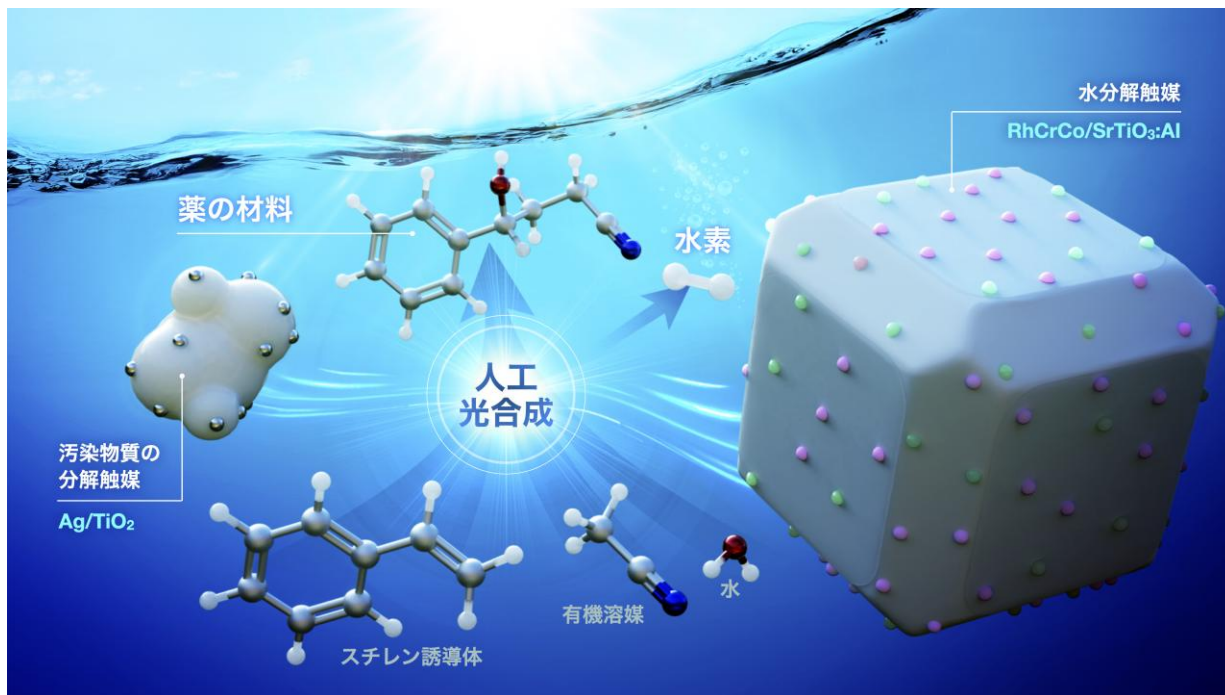
【研究概要】

名古屋大学学際統合物質科学研究機構(IRCCS)の森 彰吾 助教、斎藤 進 教授らの研究グループは、信州大学先鋭材料研究所(RISM)の久富 隆史 教授、同研究所の堂免 一成 特別特任教授(兼東京大学特別教授)と共同で、太陽光と水を活用して、医薬品の材料を含む有用な有機化合物と次世代の再生可能エネルギーとして注目されるグリーン水素の人工光合成に世界で初めて成功しました。

人工光合成とは、自然界のエネルギー循環を支える植物の天然光合成を模倣した非天然の化学反応であり、化石資源の枯渇などの環境・エネルギー問題の解決に貢献する科学技術として注目されています。これまで、無機化合物^{注2)}を反応原料として用いる人工光合成が盛んに研究されてきました。

本研究では有機物と水を反応原料として用いて、医薬品の材料などの有用な有機化合物と次世代の再生可能エネルギーでもあるグリーン水素の人工光合成に成功しました。成功の鍵は汚染有機物の分解や水の分解(水分解)を促す 2 種類の無機半導体光触媒の相乗効果・協働作用です。本研究は有機合成を指向した人工光合成という新しい分野の幕開けであり、本研究成果が太陽光や水など再生可能なエネルギーや資源を活用する持続可能な医農薬生産に貢献することが期待されます。

本研究成果は、2025年2月27日19時(日本時間)付で英国科学誌『Nature Communications』に掲載されます。

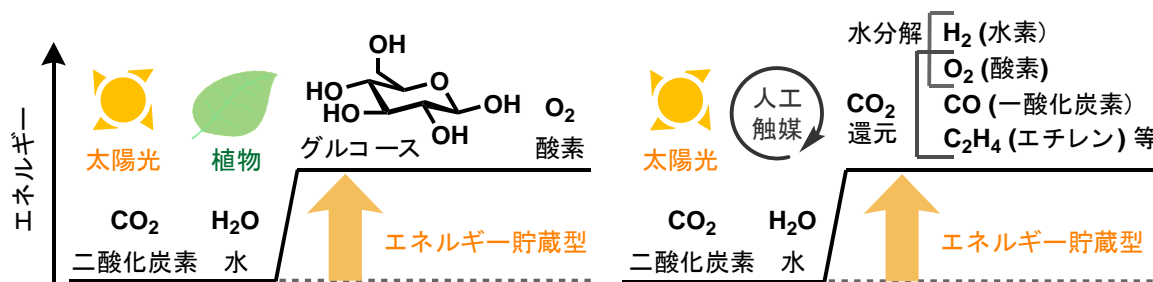


【研究背景と内容】

植物による天然光合成は太陽光エネルギーにより促される二酸化炭素と水の化学反応であり、グルコース^{注6)}と酸素が合成されます（図1a）。天然光合成と共通の特徴をもつ非天然の化学反応は人工光合成と呼ばれ、化石資源の枯渇などの環境・エネルギー問題の解決に貢献する科学技術として注目されています。人工光合成の条件は以下の三つ、

(a) 既存：植物による天然光合成

(b) 既存：無機原料を用いる人工光合成



(c) 本研究：有機原料を用いる人工光合成

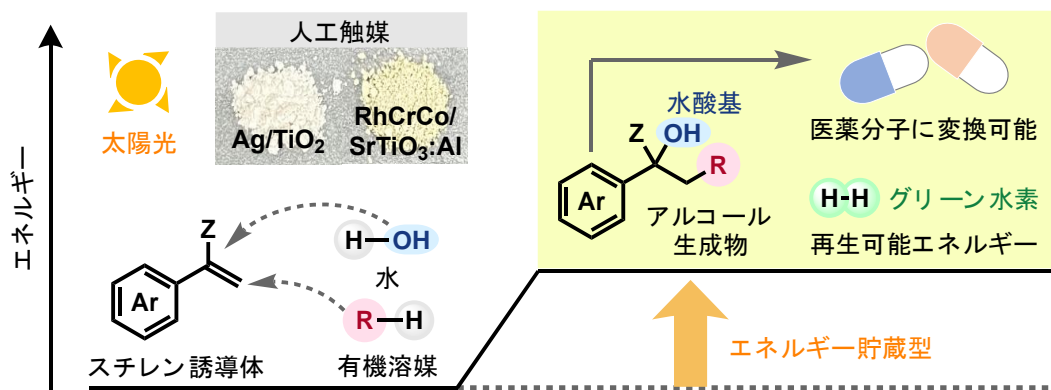


図1. 本研究の位置付け(簡単のため化学量論関係は省略されている)

①太陽光により促されること②水が電子源かつ反応原料の一つとして機能すること③エネルギー貯蔵型であること——です。

これまで無機化合物のみを反応原料として用いる人工光合成の研究が盛んに行われ、そのための人工触媒の開発が進められてきました(図1b)。例えば、無機化合物である水から無機化合物である水素と酸素を合成する水分解や、無機化合物である二酸化炭素と水の反応により一酸化炭素や単純な有機化合物であるエチレンなどを合成する二酸化炭素還元が挙げられます。

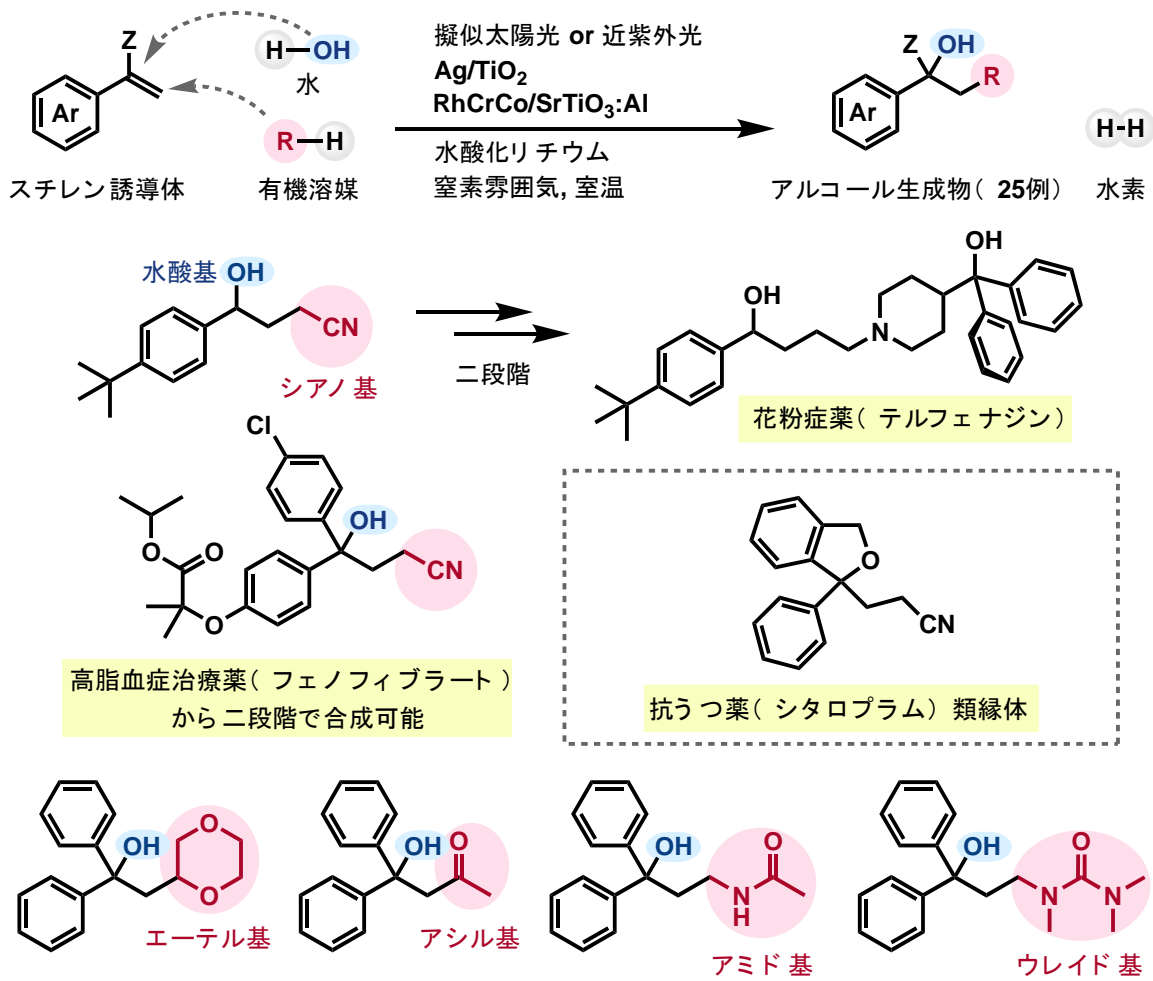
本研究では、有機物と水を反応原料として用いて、より高付加価値で複雑な構造をもつ有用な有機化合物(医薬品骨格)を合成する人工光合成、すなわち有機合成を指向した人工光合成を達成しました(図1c)。具体的には、安価な汎用有機溶媒(R-H)の炭素官能基(R)と水の水酸基(OH)がスチレン類の炭素-炭素二重結合に付加する三成分連結反応です。合成されるアルコール生成物は医薬分子に容易に変換可能です。同時に、次世代の再生可能エネルギーでもあるグリーン水素(H₂)が生産されます。

本反応は人工光合成の3条件を満たします。①疑似太陽光の照射下において本反応の進行を確認しました。②水は水素発生のための電子源であるとともに、アルコール生成物の水酸基の酸素原子源(-OH)でもあります。③密度汎関数理論計算(DFT 計算)^{注7)}により本反応がエネルギー貯蔵型であることが示唆されました。

有機原料を用いる本人工光合成によって造られる、高付加価値の医薬品骨格の例を示します(図2a)。実際に、花粉症薬テルフェナジン^{注8)}を合成できました。本反応を含む二段階で高脂血症治療薬フェノフィブラートをシアノ基と水酸基で高度に修飾することもできました。異なるスチレン誘導体や有機溶媒を用いることで、シアノ基だけでなくエーテル基、アシル基、アミド基、ウレイド基(図2a)などの官能基が導入された計25種類のアルコール生成物を合成できました。また、スチレン誘導体を用いることで、本反応システムを抗うつ薬シタロプラムの類縁体の合成に応用できました。

有機合成のための人工光合成に今回成功したのは、太陽光エネルギーによって「汚染有機物の分解」と「水の分解」を促すはずの2種類の無機半導体光触媒がこれまでにない相乗効果を示したからです(図2b)。すなわち安定化合物の「分解」システムに役立ってきたそれぞれの半導体触媒を、今回併用することで有用有機化合物の「合成」システムへと転換できました。銀担持酸化チタン(Ag/TiO₂)^{注9)}は水をヒドロキシルラジカル(HO[•])とプロトン(H⁺)に酸化します。HO[•]は極めて高活性であり、これまで主に汚染物質の分解反応のために利用されてきました。本研究ではHO[•]の反応性の制御に基づく有機溶媒の炭素-水素結合の活性化と炭素中心ラジカル(R[•])の形成を実現しました。ロジウム-クロム-コバルトが共担持され、アルミニウムがドーパされたチタン酸ストロンチウム(RhCrCo/SrTiO₃:Al)^{注10)}は高性能な水分解触媒であり、水を酸素とH⁺に酸化すると同時に二つのH⁺を水素に還元します。それぞれの光触媒が促す2種類の水の酸化、Ag/TiO₂による炭素-水素結合の活性化、およびRhCrCo/SrTiO₃:Alによる水素発生に基づく綿密な触媒反応設計により、複数の有機物と水が関わる複雑で高難度の本有機合成を実現できました。

(a) 合成可能な有機化合物の例



(b) 無機半導体光触媒の協働作用

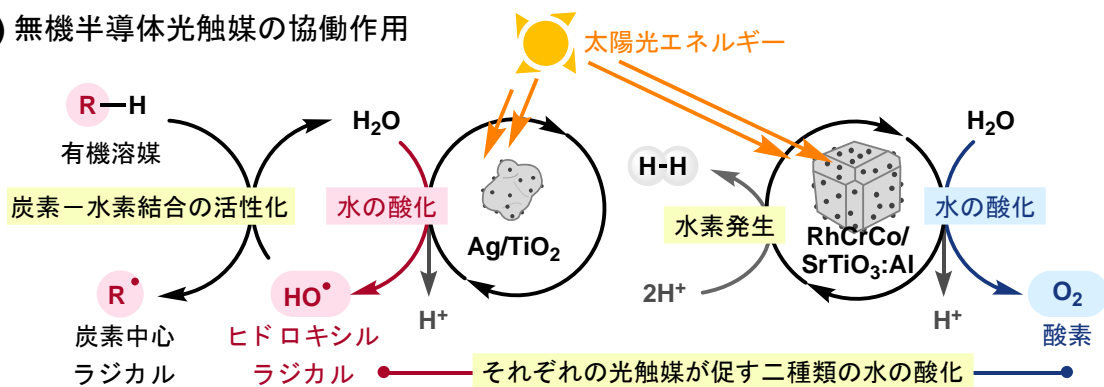


図2. 研究成果(簡単のため化学量論関係は省略されている)

【成果の意義】

本研究では、太陽光と水を活用して医薬品の材料を含む有用な有機化合物と次世代の再生可能エネルギーとして注目されるグリーン水素の人工光合成に成功しました。本研究は有機合成を容易にする人工光合成という新しい物質生産法の幕開けです。枯渇性の化石資源に依存せず太陽光や水などの再生可能資源を活用する持続可能な物質生産の実現に向けて本研究成果は大きく貢献することが期待されます。

本研究は、2022 年度から始まった科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 CREST「高酸化炭素物質の化学的アップサイクリング触媒の開拓」(JPMJCR22L2)および 2023 年度から始まった文部科学省新学術領域研究「炭素資源変換を革新するグリーン触媒科学」(23H05404)の支援のもとで行われたものです。

【用語説明】

注1) 有機合成のための人工光合成:

有機物を原料とし、高付加価値の有機化合物を合成するための人工光合成。2022 年に斎藤らにより定義された(*Coordination Chemistry Reviews* 2022, 472, 214773.)。なお、人工光合成は以下の3条件を満たす非天然の光合成であると井上晴夫氏(東京都立大学名誉教授)により説明されている(*Electrochemistry* 2014, 82, 475.)。①太陽光により促されること。②水が電子源かつ反応原料の一つとして機能すること(水の酸化を経ること、および水が生成物の一部を構成することと換言できる)。③エネルギー貯蔵型であること(反応原料がもつ化学エネルギーの総和よりも反応生成物がもつ化学エネルギーの総和の方が大きいこと、あるいは反応のギブス自由エネルギー変化が正であることと換言できる)。人工光合成では太陽光エネルギーが化学エネルギーとして貯蔵される。

注2) 有機(化合物)と無機(化合物):

燃焼により二酸化炭素と水の両方を生成する化学物質は有機(化合物)に分類され、そうでない化学物質は無機(化合物)に分類される。

注3) グリーン水素:

太陽光エネルギーなどの再生可能エネルギーの活用により二酸化炭素の排出を伴わずに合成される水素。

注4) 水の分解(水分解):

二分子の水が二分子の水素と一分子の酸素に分解される反応($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$)。

注5) 無機半導体光触媒:

光エネルギーを吸収し酸化還元反応を促す無機化合物。溶媒に溶解せずに固体のまま機能するため、不均一系触媒に分類される。

注6) グルコース:

生物の代表的なエネルギー源。分子式 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ の単糖であり、ブドウ糖とも呼ばれる。

注7) 密度汎関数理論計算(DFT 計算):

量子化学計算の一種であり、コンピュータを用いて分子がもつエネルギーを近似的に推定する手法。

注8) テルフェナジン:

かつては抗ヒスタミン作用をもつ花粉症薬として販売されていたものの、毒性が指摘され使用が停止された。現在ではテルフェナジンの構造類縁体であるフェキシソフェナジンが花粉症薬として多用されている。

注9) Ag/TiO₂:

銀(Ag)ナノ粒子により表面修飾された酸化チタン(TiO₂)の粒子。TiO₂ は身の回りでさまざまな用途で利用されている。その代表例として太陽光に含まれる近紫外光を吸収し汚染物質の分解を促すコーティング剤が挙げられる。TiO₂ 表面を銀などの金属ナノ粒子を用いて修飾することで、汚染物質の光分解作用を増強できることが知られている。

注10) RhCrCo/SrTiO₃:Al:

結晶構造中にアルミニウム(Al)が注入され、表面にロジウム(Rh)、クロム(Cr)およびコバルト(Co)のナノ粒子が修飾されたチタン酸ストロンチウム(SrTiO₃)の粒子。太陽光に含まれる近紫外光を吸収し、高効率、高耐久、大規模の水分解を促す。共同研究者である久富教授、堂免教授らが開発者である(*Nature* 2020, 581, 411.; *Nature* 2021, 598, 304.)。

【論文情報】

雑誌名: Nature Communications

論文タイトル: Artificial photosynthesis directed toward organic synthesis
(有機合成を指向した人工光合成)

著者: 森 彰吾(名古屋大学助教)、橋本陸(当時 名古屋大学大学院生)、久富 隆史(信州大学教授)、堂免 一成(信州大学特別特任教授、東京大学特別教授) 斎藤 進>(*責任著者、名古屋大学教授)

DOI: 10.1038/s41467-025-56374-z

URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-025-56374-z>



東海国立大学機構は、岐阜大学と名古屋大学を運営する国立大学法人です。
国際的な競争力向上と地域創生への貢献を両輪とした発展を目指します。

東海国立大学機構 HP <https://www.thers.ac.jp/>

