

特集

「水素社会」の実現に向けて ~光触媒と生体触媒の組み合わせによるクリーンな光水素生産システム~

奈良女子大学研究院 自然科学系 化学領域 助教 本田裕樹氏

2015年9月の国連サミットで全会一致で採択されたSDGs (Sustainable Development Goals: 持続可能な開発目標) は、「誰一人取り残さない」持続可能で多様性と包摂性のある社会の実現のため、2030年を年限とする17のゴール(目標)とその下に連なる169のターゲットから構成されています。

このSDGsへの対応を考えるために、奈良女子大学の様々な研究領域の教員の方々から研究内容の紹介や提言を頂く寄稿シリーズの第8回目です(全10回連載)。



1 はじめに

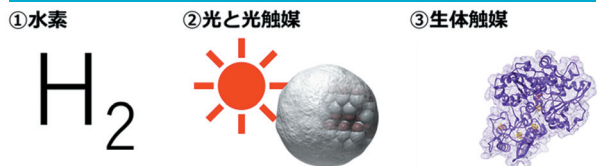
大気中の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 濃度の上昇は、ある Web ページ<sup>[1]</sup> で体感できます。データでは CO<sub>2</sub> 濃度は過去 80 万年の間 170 ppm~300 ppm の範囲で増減を繰り返し、300 ppm を超えることはなかったのですが、正確な観測がはじまった 1958 年は 315 ppm、その 57 年後の 2015 年に 400 ppm を突破、そして本稿執筆時の測定値は 415.78 ppm (0.0416%) です<sup>[1]</sup> (1958 年以降はハワイの観測所での測定値)。ちなみに換気が悪いとされる部屋の CO<sub>2</sub> 濃度は 1,000 ppm です。近年の CO<sub>2</sub> 濃度の上昇は地球規模で捉えて急激で、このまま放ってはおけないのは明らかです。

CO<sub>2</sub> 濃度の上昇は、地球環境変化、気温上昇の要因と考えられています。CO<sub>2</sub> 濃度の急激な上昇は、人間の活動すなわちエネルギー源としての化石燃料の使用に起因します。石炭や石油、天然ガスといった化石燃料をエネルギー源とすれば、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度は増え続けます。化石燃料の使用を減らし、「CO<sub>2</sub> を出さない」という意味でのクリーンなエネルギー源へと転換する必要があります。

筆者は応用生物化学、バイオテクノロジーを専門

とし、酵素や微生物といった生体触媒の機能を活用して、前述の地球規模の課題解決に資することを目指しています。特に、次世代のクリーンなエネルギー社会のキーワードである「水素社会」<sup>[2]</sup> の実現に向け、「光エネルギーを用いる水素生産」を研究テーマの1つとして、光触媒と生体触媒を組み合わせた新しい反応システムを提案してきました。本稿では、研究のキーワード(図1、「水素」「光と光触媒」「生体触媒」)を紹介しながら、「水素社会」の実現、エネルギー問題の解決に向けた筆者の研究を紹介します。

(図1) 研究キーワード「水素」「光と光触媒」「生体触媒」



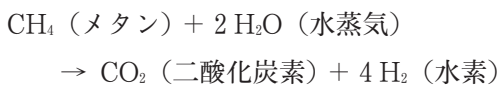
2 研究キーワード

1. 水素 H<sub>2</sub>

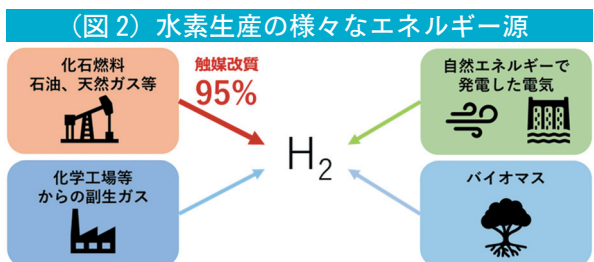
「水素社会」という言葉を耳にする機会が多くなっています。これはエネルギーを水素 (H<sub>2</sub>) の形で、貯蔵、運搬、使用する社会です<sup>[2]</sup>。水素 (H<sub>2</sub>) と酸素 (O<sub>2</sub>) から水 (H<sub>2</sub>O) ができる際のエネルギーを化学的に上手に取り出すと電気エネ

ルギーとして使えます。こうした装置は燃料電池と呼ばれ、燃料電池自動車の市販のように、水素の需要は今後ますます拡大すると見込まれます。また、水素と酸素からエネルギーを得る反応はCO<sub>2</sub>の生成を伴わず、水素は使うときには「きれい」と捉えられます。

一方、水素の生産に目を向けます。水素は様々な方法で作られます（図2）。この図は化石燃料のエネルギーや電気エネルギーを、水素の形に変換・貯蔵することを意味し、水素自体はエネルギー源としての「燃料」ではなく、「運搬体もしくは貯蔵体」です。工業的な水素の生産では、化石燃料であるメタン（CH<sub>4</sub>）といった天然ガスの水蒸気改質が95%を占めます。この反応は次のように書けます。



この反応は水素が得られますが、同時にCO<sub>2</sub>が発生します。反応は1,000℃のような高温で行われ、この条件を得るためにエネルギーが必要です。つまり、水素は作るときには「きたない」のです。



水素（H<sub>2</sub>）は様々なエネルギー源から作ることができる。工業的な水素製造では化石燃料への依存が大きく、CO<sub>2</sub>を出しながら生産される。

水素社会の実現に向け、作る段階でも「きれい」な水素、すなわち化石燃料の使用に依存しない水素の生産方法への転換が必要です。では何を原料とし何をエネルギー源にすればよいかというと、理想的には「水」と「光」です。

## 2. 水と光触媒

水（H<sub>2</sub>O）から水素を得る反応は次のように書けます。



この反応でCO<sub>2</sub>は副生しません。ただし、コップに水を溜めて待っても水素と酸素は発生しません。この反応にはエネルギーが必要だからです。例えば、電気を使えばこの反応が進みます（水の電気分解）。電気ですが、現状の発電は化石燃料の使用割合が高いため、水の電気分解は（自然エネルギーによる発電でなければ）CO<sub>2</sub>を副生しながら水素を生産することになります。

ここで理想的なエネルギーは、太陽の「光」エネルギーです。光は人類にとって無限に降り注ぐエネルギー源であり、光による水の分解ができれば「きれい」な水素が得られます。

この反応を実現するのが「光触媒」です。有名な光触媒は酸化チタンで、見た目は次頁の図3aのような白い粉です。図3bに反応の模式図を示します。酸化チタン（にプラチナなどの貴金属を助触媒とする実験系）に、光（紫外線）を照射すると、酸化チタンは光エネルギーを吸収し水が分解されて水素と酸素が生成します（図3には専門用語を用いて説明を付記）。この反応原理は、本多一藤嶋効果と呼ばれ1970年代の日本発の技術です。

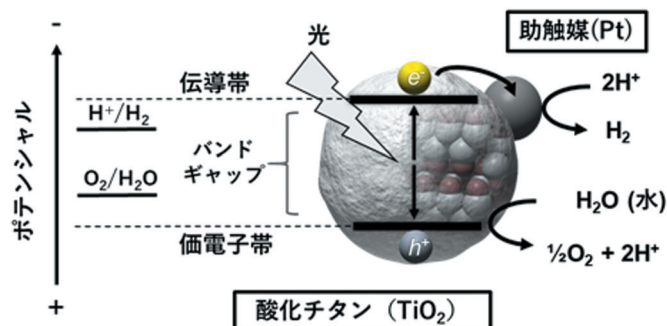
光触媒を使えば光による水の分解ができます。しかし水素生産への応用は実用化されておらず、国内外で大変精力的に研究が進められています。実用化に向けて、光エネルギー変換効率の向上や、プラチナ等の高価な貴金属を使用しない安価な反応システムの構築が必要です。

(図3) 光触媒による水の分解と水素生産

(a) 酸化チタンの粉末



(b) 水の分解による水素の生成



図中のキーワードを使った反応の説明：酸化チタンにバンドギャップ以上のエネルギーをもった光が照射されると、伝導帯に励起電子 ( $e^-$ )、価電子帯に正孔 ( $h^+$ ) が生じる。TiO<sub>2</sub> の場合には伝導帯と価電子帯のエネルギー準位が、プロトン還元と水の酸化の酸化還元電位を挟み込む位置に存在しており、励起電子はプラチナ (Pt) 上で水素イオン ( $H^+$ ) 還元を利用して水素を生じ、一方で正孔は水を酸化し酸素が生じる反応が可能となる。

### 3. 生体触媒

より良い光触媒反応の実現に向け、前述の貴金属よりも反応性が高く、安価なものへの置き換えが課題です。ここで登場するのが、筆者の専門分野である「生体触媒」です。「触媒」というのは化学反応を効率的に進める物質です。

生体内で起こる様々な化学反応には「酵素」と呼ばれるタンパク質でできた触媒が関与します。酵素には、高価な貴金属の助けがなくても、環境に優しい条件で大変効率よく化学反応を進める優れた特長があります。私たちの生活にも役立っており、例えば発酵食品やお酒などに古くから微生物やその細胞内の酵素が巧みに利用されています。ここで酵素やそれを作る微生物の細胞そのものを合わせて「生体触媒」と呼びます。現代において生体触媒は、様々な化学製品の生産にも利用されます。既存の環境負荷の大きい化学反応プロセスを、温和な反応条件で機能する生体触媒を使った反応プロセスに置き換えることで、省エネルギープロセスの構築に役立つと期待されています。

水素を作る酵素に「ヒドロゲナーゼ」があります (図4a)。この酵素は同じ重さのプラチナより

も優れた水素生産能力を示します。この酵素を前項の光触媒反応と組み合わせれば、光を使った水素生産効率の向上が期待できます。

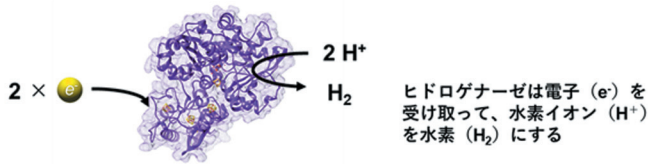
ただし、この酵素は嫌気性細菌という酸素がない場所で生育する微生物に由来し、この微生物の成長が遅いことや、元の微生物内で作られる酵素の量が少ない (通常、微生物が必要な分しか酵素は作らない) ことから、人間の目的に合わせて酵素を使うためには少々工夫が必要です。その工夫とは遺伝子工学的な手法です。図4bにその概略を示しますが、元の微生物から必要な遺伝子 (DNA) を取り出し、その遺伝子を大腸菌という別の微生物の中で機能させてヒドロゲナーゼを作らせます。大腸菌は生育速度が大きく、また人工的に大量の酵素を生産できるため、早く大量のヒドロゲナーゼを生産できます<sup>[3]</sup>。

## 3 新しい光水素生産システム

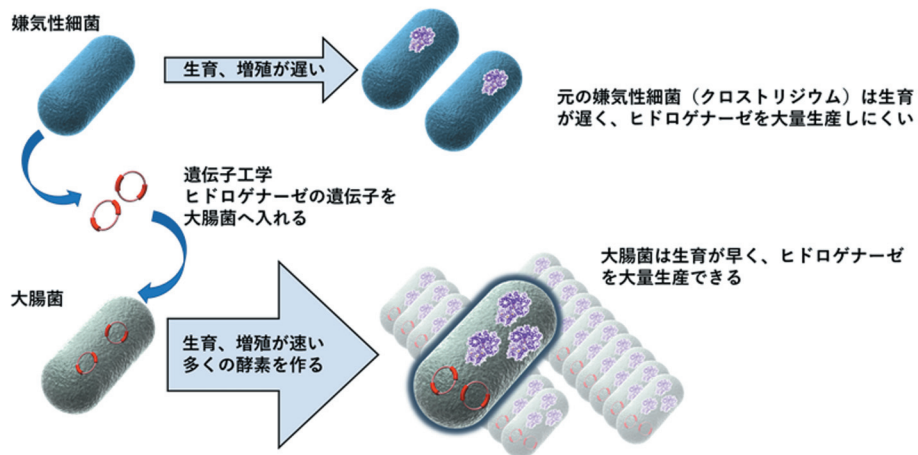
ここまでに紹介した「光触媒」と「生体触媒」を組み合わせ、 「光」を使った新しい「水素」生産システムの開発に取り組んでいます。反応の模式図は、図5aに示します。

(図4) 水素を生産する酵素「ヒドロゲナーゼ」

(a) ヒドロゲナーゼ

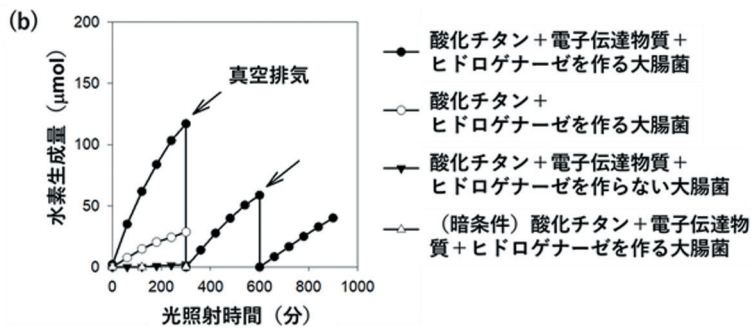
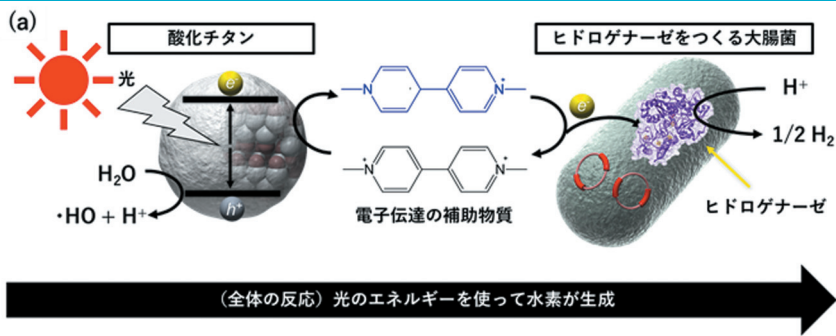


(b) 遺伝子工学を使ったヒドロゲナーゼの大量生産



(a) 水素を生産する酵素ヒドロゲナーゼと、(b) 遺伝子工学を使ったヒドロゲナーゼの大量生産の模式図

(図5) 光触媒と生体触媒を組み合わせた光水素生産システム



(a) 反応システムの概要と、(b) 光照射下での水素生成（参考文献3の図を改変）

光触媒（酸化チタン）、電子伝達の補助物質（図5中ではメチルビオローゲンという物質を使用）、ヒドロゲナーゼを作る大腸菌細胞を反応溶液に混ぜ、光を照射すると水素の発生が確認できました（図5b）。各種の対照実験（光照射をしない場合や、ヒドロゲナーゼを作らない大腸菌を使った場合）では水素は発生しませんので、この反応システムが機能することが明らかです。

筆者はこのシステムを、無機光触媒の高い安定性や効率的な光エネルギー変換能力と、生体触媒の高効率かつ高選択的な物質生産能力という両者のよいところを組み合わせた新しい水素生産システムとして提案しています。実際、生体触媒を用いると光エネルギーの水素への変換効率は向上し、貴金属を使わない反応システムとして有用です。

研究分野としては無機材料分野と生体触媒分野の融合領域にある研究でまだ新しい領域です。効率や安定性の面で実用までの道のりは長いですが、さらなる発展に向け、奈良女子大学理学部の学生と一緒に日々改良に取り組んでいます<sup>[4]</sup>。

## 4 まとめ

本稿の光をエネルギー源とした水素生産は、化石燃料の使用に依存しないクリーンなエネルギー社会の実現を目指す研究です。SDGsのうち、直接的には目標7、特に「7.2 2030年までに、世界のエネルギーミックスにおける再生可能エネルギーの割合を大幅に拡大させる。」との関連が最も大きいでしょうか。エネルギー問題は様々な地球規模の課題と切り離せませんので、目標13「気候変動とその影響に立ち向かうため、緊急対策を取る」、目標14「海洋と海洋資源を持続可能な開発に向けて保全し、持続可能な形で利用する」、目標15「陸上生態系の保護、回復および持続可能

な利用の推進、森林の持続可能な管理、砂漠化への対処、土地劣化の阻止および逆転、ならびに生物多様性損失の阻止を図る」とも関連が深いものです。また、偏った地域で産出される化石燃料の使用から脱却し、あらゆる場所で得られる「水」と「光」でエネルギー需要をまかなう世界が実現すれば、地域格差の解消につながります。

一方、エネルギー源の転換への気運や関連研究への後押しは、様々な要因から来るブームもあります。例えばオイルショックや戦争です。バイオ分野でも、地下資源のない戦時下の日本で、芋を原料に微生物の力を使って航空燃料を生産する研究が本気で行われています<sup>[5]</sup>。技術的には古くから（必要に迫られれば）バイオマス資源である芋からの燃料生産が可能です。しかし、コストの問題から平時にはCO<sub>2</sub>排出を伴うことを知りながら化石燃料を使用します。現代ではSDGsが定められました。世界が共通目標に向け努力する、あるいは努力しなければならないという認識のなかで、エネルギー資源の転換が実現することを願います。

最後に、筆者が研究内容を学生に説明する際に紹介する話を記します。水素社会の展望を記した著書<sup>[6]</sup>で知った話です。「神秘の島」という小説で、登場人物たちが石炭で暖められた広間の中で、石炭を掘りつくしたあとの商工業について語り合います。「じゃあ、石炭の代わりに何を燃やすんだ？」という問いに対し、ある人物が「水だよ」と答えます。さらに次のように続けます。

「その成分に分解した水のことだけどね。…電気によって分解された水を使うことになると思う。…水の成分である、水素と酸素が、個別に使われるにせよ、同時に使われるにせよ、尽

きることのない熱源や光源を提供してくれると  
思っているんだ。…水は未来の石炭なんだ。<sup>[7]</sup>」

化石燃料の枯渇と水素社会について語り合う登場人物が、SFの開祖ジュール・ヴェルヌによって描かれたのは1874年です。現代と変わらない問題意識に驚きながら、150年近く前の小説に語られた水から作った水素で世界のエネルギー需要をまかなう未来の姿が現実になりつつあることにロマンを感じます。

#### 【参考文献】

- [1] スクリップス海洋研究所, カリフォルニア大学サンディエゴ校「The Keeling Curves」  
<https://keelingcurve.ucsd.edu/> (2021年2月19日)
- [2] 経済産業省資源エネルギー庁「ようこそ！水素社会へ～水素・燃料電池政策について」[https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/advanced\\_systems/hydrogen/](https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/hydrogen/) (2021年2月19日)
- [3] Y. Honda, *et al.* (2016) Application to photocatalytic H<sub>2</sub> production of a whole-cell reaction by recombinant *Escherichia coli* cells expressing [FeFe]-hydrogenase and maturases genes. *Angewandte Chemie International Edition*, 55: 8045-8048.
- [4] 最近の取り組みの例：Y. Honda, *et al.* (2020) Biohydrogen production by photosensitization with biologically precipitated cadmium sulfide in hydrogen-forming recombinant *Escherichia coli*. *ChemBioChem*, 21:3389-3397.; Y. Honda, *et al.* (2020) Visible light-driven, external mediator-free H<sub>2</sub> production by a combination of a photosensitizer and a whole-cell biocatalyst: *Escherichia coli* expressing [FeFe]-hydrogenase and maturase

genes, *Catalysis Science & Technology*, 10:6006-6012.

- [5] 小林元太「アセトン・ブタノール発酵～今昔物語」, *生物工学会誌* 92巻12号, pp.669-674, 2014年
- [6] ジェレミー・リフキン (柴田裕之訳)『水素エコノミー エネルギー・ウェブの時代』日本放送出版協会, 2003年
- [7] 日本語訳の引用元：ジュール・ヴェルヌ作 (大友徳明訳)『神秘の島 [第二部]』偕成社, pp.210-211, 2004年

#### 【プロフィール】

奈良女子大学研究院

自然科学系

化学領域

助教 ほんだ ゆうき 氏  
本田 裕樹 氏



2012年早稲田大学大学院先進理工学研究科応用化学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。早稲田大学助手(2010-2013年、博士課程と一部重複)、九州大学大学院農学研究院学術研究員(2013-2014年)、九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所学術研究員(2014-2017年)を経て、2017年より現職。

専門は応用生物化学。