

論文・解説

17

バイオ燃料と人工光合成 Biofuel and Artificial Photosynthesis

岩国 秀治*¹
Hideharu Iwakuni

要 約

バイオ燃料と人工光合成の研究動向を概観したうえで、マツダの人工光合成の研究について報告する。

バイオ燃料の課題は、ライフサイクルでの温室効果ガス排出量削減、供給安定性、経済性確保、食料との競合回避である。これらを解決するため、微細藻類バイオ燃料が注目されている。

一方、植物のエネルギー変換効率 (0.2%) を低コストで上回る可能性がある技術として人工光合成がある。国家プロジェクトの人工光合成プロジェクトでは、太陽光エネルギー変換効率目標 10% (2021 年) に対し、2015 年時点で 2.2% まで達している。

マツダも大阪市立大学と共同研究を行い、光エネルギーを用いて酢酸からエタノールを合成する新しい人工光合成技術を開発したので報告する。

Summary

Mazda overviewed recent research trends in biofuel and artificial photosynthesis in Japan.

The biofuel, which derives from edible biomass, presents such challenges as improvement in effectiveness of CO₂ emissions cut, stable supply and economic efficiency, and competition with food stuffs. As a means to resolve these challenges, inedible and high energy producing microalgae biofuel has attracted a lot of attention in recent years.

On another front, artificial photosynthesis is available as a technology to greatly improve energy conversion efficiency. In the NEDO project, 2.2% solar energy conversion efficiency has been attained in 2015, with respect to 10% target for 2021.

In collaboration with Osaka City University, Mazda developed a new artificial photosynthesis system to synthesize ethanol from acetic acid using light energy, which is detailed in this article below.

1. はじめに

自動車や航空機等の移動体の燃料は、エネルギー密度や貯蔵・輸送等の点から液体燃料が望ましい。便利で貴重な液体燃料を使い続けながら、二酸化炭素 (CO₂) 削減と石油需要の抑制を実現するには、太陽光エネルギーや自然エネルギー等の再生可能エネルギーのみを用いて製造した再生可能液体燃料の比率を高め、普及させていく必要がある。

再生可能液体燃料実現のため、マツダでもバイオ燃料や人工光合成等の将来技術についていろいろな観点から検討している。本稿では、バイオ燃料と人工光合成の研究動向を概観したうえで、マツダが大阪市立大学と共同で研究している人工光合成の研究成果について述べる。

2. 再生可能液体燃料の取り組みの必要性

2.1 再生可能液体燃料の意義

経済産業省は「次世代自動車戦略 2010⁽¹⁾」において、次世代自動車 (ハイブリッド、電気自動車、燃料電池車、クリーンディーゼル) の普及目標を政府目標として設定している。これによると、2030 年においても、内燃機関搭載車が主流となっている。すなわち、2030 年時点も、自動車燃料の大半はガソリンや軽油といった液体燃料が占めていることになる。

一方、地球温暖化防止の観点から、化石資源由来の液体燃料の使用量はできる限り削減したい。これらの要求を満足するには、内燃機関や車両の効率改善に加え、再生可能液体燃料の比率を上げていくことが重要と考える。

*1 技術研究所
Technical Research Center

2.2 エネルギーの種類とエネルギー変換技術

エネルギーの種類とエネルギー変換技術を Fig. 1 に示す。太陽光発電と電解技術を組み合わせて水素やメタン等の高エネルギーな化学物質を製造することが技術的に可能である。目的とする再生可能液体燃料を得るには、複数のプロセスを組み合わせることとなるが、エネルギー変換プロセスが増えるほど効率は低下する。これらのプロセスの選択には、プロセス全体で投入エネルギー、コストが最少で、CO₂削減量が最大となる観点で検討することが望まれる。このような視点から、将来のエネルギー創成技術として、光エネルギーを化学エネルギーに直接変換できるバイオ燃料と人工光合成が有望と考えられる。以下、バイオ燃料と人工光合成の日本での研究動向について総説する。

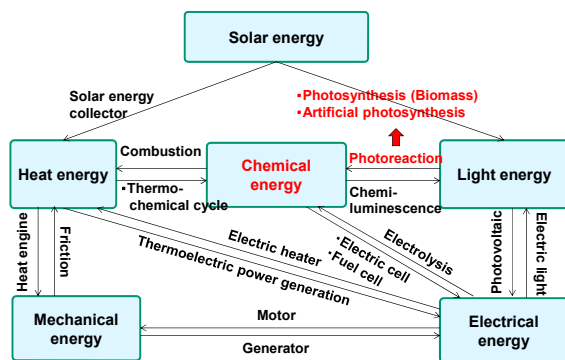


Fig. 1 Energy Conversion Technology

3. バイオ燃料の研究動向

CO₂排出量の削減に加え、エネルギー安全保障、地域経済活性化という観点からもバイオ燃料が注目されている。

3.1 第一世代バイオ燃料（可食バイオマス由来）

バイオ燃料は、植物が生育する際に大気中の CO₂ を吸収するので、CO₂削減効果があると考えられている。

(1) バイオエタノール

ガソリンに混ぜて自動車用燃料として使う植物由来のエタノールのことを「バイオエタノール」と呼ぶ。ブラジルではサトウキビの糖質、米国ではトウモロコシのデンプン質を原料に、発酵法で生産している。

米国では 2007 年にエネルギー政策法が改定され、バイオエタノールの生産を 2022 年までに自動車燃料の 20% に当たる 360 億ガロンとしようとしている。米国、ブラジル、欧州の一部では 10vol% を超えるバイオエタノールをガソリンに含有した E10 燃料を、日本では 3vol% 混ぜた E3 燃料を使用している。

(2) エチルターシャリーブチルエーテル (ETBE)

ETBE は、バイオエタノールとイソブテン（石油精製時の副産物）から合成される。バイオエタノールを原料と

する ETBE は 8vol% 以下でガソリンに混合され、日本では 2007 年からバイオガソリンとして販売が始まった。

エタノールは水との親和性が高く、空気中の水分を吸収するため取り扱いが難しいが、ETBE は水に溶けないのでガソリンと同じように取り扱える利点がある。

(3) バイオディーゼル燃料

植物あるいは動物から採れる油脂にメタノールを加えてメチルエステル化すると、軽油に近い物性をもつ脂肪酸メチルエステル (FAME : Fatty Acid Methyl Ester) ができる。FAME は原料によって性状が異なるので、ディーゼル燃料への混合は 5wt% 以下と定められている。

粗パーム油を水素化処理によって脱炭素・分解し、ディーゼル燃料として利用する水素化バイオ軽油 (BHD : Bio Hydro-fined diesel) の研究開発や実証実験が進められている。BHD は石油系燃料と同等性能なので添加量制限はなく、次世代バイオディーゼル燃料として期待されている。

3.2 第二世代バイオ燃料（非可食バイオマス由来）

食糧と競合しない農業残渣や建築廃材、製材残材等の廃棄物系バイオマスから製造されるバイオ燃料を第二世代バイオ燃料と呼ぶ。第二世代バイオ燃料は、研究開発段階にあり、実用化には至っていない。

(1) バイオエタノール（非可食）

木材をチップや粉状にし、濃硫酸法、希硫酸法、酵素糖化法等で前処理した後、セルロースやヘミセルロースを発酵プロセスで糖化してバイオエタノールを製造する研究が進められている。セルロース由来エタノールは、原料に廃棄物系バイオマスを用いるため、生産時にエネルギーを大量投入する可食バイオマス、特にトウモロコシ由来のバイオエタノールに比べて CO₂ 排出量の削減効果が大きい。

(2) バイオマス・ツー・リキッド (BTL)

ガス化炉を用いて廃棄物系バイオマスを一酸化炭素 (CO) と水素に分解し、この合成ガスを「フィッシャー・トロプシュ (FT) 合成」で反応させると、軽油相当の炭化水素系液体燃料が製造できる。

BTL ディーゼル燃料は、硫黄や芳香族炭化水素を全く含まないため、すすや窒素酸化物がほとんど生成しないクリーンな排出ガスになる。

3.3 第三世代バイオ燃料（藻類由来）

藻類とは、淡水または海水に生育し、体内の葉緑素で酸素発生を伴う光合成を行い、陸上植物のように明確な根、茎、葉の区別がない生物の総称である。大型藻類（ノリ、ワカメ等）と微細藻類に大別される。

微細藻類は光合成により炭水化物を合成するが、その副産物として油脂を生産する。微細藻類は光合成能力が高く、その多くは 24 時間以内で倍増するため、陸上植物の 10 倍以上の CO₂ 固定能力をもっている²⁾。

日本の主な微細藻由来バイオ燃料開発事業を Table 1 にまとめた³⁾。実用化段階に近い (1) 油生成微細藻類のシュードコリスチス, (2) 炭化水素生成微細藻類のボトリオコッカス, (3) パラミロン生成微細藻類のユーグレナについて以下で詳細に述べる。これらに加え, バイオ燃料の課題である耕作地や水資源問題の本質的解決のため, 海洋微細藻類の基礎研究も行われている。

(1) 油生成微細藻類

シュードコリスチス (*Pseudochoricystis ellipsoidea*) は, 5 μ m 程度の緑色単細胞の軽油産出微細藻類⁴⁾である。光合成により増殖するが, 窒素が不足すると軽油相当の炭化水素を成分とする油を作り, 細胞内に蓄積する。(株)デンソーが中心となり, 中央大学・(株)クボタ・出光興産(株)らと研究開発を進めている。

(2) 炭化水素生成微細藻類

ボトリオコッカス (*Botryococcus braunii*) は淡水に生息する緑色から赤色の藻類で, 30~500 μ m のコロニーを形成する⁴⁾。光合成により炭化水素を生産し, 細胞及びコロニー内部に乾燥重量の 20~75%の炭化水素を蓄積する。植物油の中でも生産性が高いパーム油と比較して 3 倍以上の生産性がある。(株)IHI が保有するボトリオコッカスの稈本藻は, 増殖速度が速く, 雑菌にも強いという特徴をもっており, 屋外培養に有利である。

(3) パラミロン生成微細藻類

和名「ミドリムシ」で馴染みのあるユーグレナ (*Euglena*) は, 湖沼などの淡水に広く分布する微細藻類の一種である。葉緑体で光合成を行うとともに鞭毛を使って水中を移動することから, 植物と動物の両方の分類に属する。温度, pH などの環境条件に対して適応能力が高く,

CO₂ 固定能力に優れている。ユーグレナは, 酸素が存在する好気的な培養条件下において光合成によりパラミロンを蓄積し, これを酸素が存在しない嫌気的条件下に移すと, パラミロンを細胞内で貯蔵脂質ワックスエステルへと変換する特異な代謝経路を有している⁵⁾。

3.4 バイオ系再生可能液体燃料の課題と解決法

第一世代バイオ燃料には, ライフサイクルでの温室効果ガス排出量削減, 供給安定性確保, 経済性確保(化石燃料同等コスト)に加えて, 食料との競合回避という課題がある。バイオ燃料でも現在注目を集めているのが, 微細藻類由来バイオ燃料である。藻類は単位面積当たりのエネルギー生産量が高く, 海洋性藻類であれば土地や水で食糧作物と競合することもない。ただし, 光合成の太陽光エネルギー変換効率は 1~2%前後で, 燃料等への化学処理で更に効率は低下する。この課題を解決するには, バイオマスの育成と燃料製造プロセスを低エネルギーにするだけでなく, 微細藻類そのものの太陽光エネルギー変換効率を大幅に向上することが必要となってくる。

4. 人工光合成の研究動向

近年, 光触媒を用いた水分解による水素製造や CO₂ 固定のような人工光合成の研究に関心が高まっている。

4.1 人工光合成の定義

光合成とは, 光合成細菌や植物など光合成色素(葉緑体)をもつ生物が行う光エネルギーを化学エネルギーに変換する生化学反応のことである。一般には太陽光エネルギーと CO₂と水を用いて, 糖と酸素を生産する反応をいう。

Table 1 Main National Projects of the Biofuel from Microalgae

	Company / University	Stage	Kind of microalgae	Environment	Product	Purpose alternative fuel	Fund
(1)	DENSO・Kubota・Idemitsu・Chuo Univ.	Application	<i>Pseudochoricystis ellipsoidea</i>	Fresh water	・Hydrocarbon ・Triglyceride	Jet fuel Diesel oil	NEDO 2011~
(2)	IHI・Chitose Lab.・Kobe Univ.	Application	<i>Botryococcus braunii</i>	Fresh water	Hydrocarbon	Jet fuel	NEDO 2012~
(3)	euglena・JX・HITACHI・Keio Univ.	Application	<i>Euglena</i>	Fresh water	Wax ester	Jet fuel	NEDO ~2015
(4)	DIC・Kobe Univ.	Basic	<i>Chlamydomonas</i>	Salt water		Jet fuel	NEDO 2012~
(5)	J-POWER・JGC・TAT ^{a)}	Basic	Marine diatom <i>Fistulifera solaris</i>	Salt water	・Triglyceride ・Hydrocarbon	Jet fuel	NEDO 2013~
(6)	IIT ^{b)} ・Saitama Univ.・Univ. of Tokyo・Tohoku Univ.・Kao	Basic	<i>Nannochloropsis</i>	Fresh & Salt water	Triacylglycerol	Jet fuel	CREST 2011~
(7)	Kobe Univ.	Basic	Marine algae <i>A.platensis</i>	Salt water	Glycogen	Bioethanol	CREST ~2015
(8)	TAT・Nihon Univ.・Yamaha Motor・J-POWER	Basic	Marine diatom <i>Fistulifera solaris</i>	Salt water	Triacylglycerol	Diesel oil	CREST ~2015
(9)	Shimane Univ.・Kinki Univ.・euglena	Basic	<i>Euglena</i>	Fresh water	Wax ester	Diesel oil	CREST 2011~

a)TAT : Tokyo Univ. of Agriculture and Technology

b)TIT : Tokyo Institute of Technology

光合成は大きく二つの反応系から成る。一つは太陽光を利用した光化学反応（明反応）で、もう一つはエネルギーを利用して糖を合成するカルビン回路（暗反応）である。

光化学反応（明反応）では、水から電子が引き抜かれ、Z 機構と呼ばれる複雑な電子伝達経路を経て、太陽光エネルギーが電子伝導体のニコチンアミドアデニンジヌクレオチドリン酸（NADPH）に蓄積される。また、チラコイド膜を隔てた水素イオンの濃度差を駆動力にしてアデノシン三リン酸（ATP）が合成される。

カルビン回路（暗反応）では NADPH と ATP を使って CO_2 と水から糖を合成する。このように光合成では、光エネルギーは最終的に化学エネルギーとして蓄積される。

人工光合成とは文字どおり光合成を人工的に行うことであるが、一般的には、光エネルギーを化学エネルギーに変換する人工的な物質システムと定義できる。人工光合成を広い意味でとらえれば太陽光エネルギーの高エネルギー物質（水素や CO_2 還元物）への変換であり、光触媒による水素製造のほか、光電極と電解還元、または太陽光発電と電解還元を組み合わせた化学物質製造もその範疇に入る。

人工光合成の研究テーマは、光合成メカニズムの理解に始まり、光合成の模倣、高付加価値物質の合成、燃料のような高エネルギー化学物質の生成まで多岐にわたる。本稿では、エネルギー生産関連テーマに絞って解説する。

4.2 人工光合成の原理（光触媒による水分解）

世界初の「人工光合成」は、1972年に科学雑誌“Nature”に発表された“本田-藤島効果”である。酸化チタン（ TiO_2 ）の単結晶を陽極に、白金を陰極に配置し、波長 400nm 以下の紫外線を照射すると、わずかなバイアス電流で水を水素と酸素に分解できることから、水から燃料を得るブレイクスルー技術として世界的に注目された。

TiO_2 の伝導体の下端電位が H^+/H_2 の酸化還元電位（標準水素電位 SHV で 0V）よりも負、 TiO_2 の価電子帯の上端電位が水の酸化電位（1.23V SHE）よりも正のとき、“本田-藤島効果”が発現する（Fig. 2）。 TiO_2 が電解液に接触すると TiO_2 表面付近のバンドが曲がって空間電荷層が形成される。光照射で電子-正孔対ができると、空間電荷層による電場勾配によって電子はバルク側へ、正孔は表面へと電荷が分離される。

伝導体の下端電位と価電子帯の上端電位の差であるバンドギャップエネルギー（ E_g ）は、アナタース型 TiO_2 では 3.2eV となる。 E_g に相当する波長の光より短波長の光を当てると、 E_g 以上のエネルギーが供給され、価電子帯の電子は伝導帯に励起される。価電子帯には正孔が生じて光反応が進む。励起電子は、伝導帯の下端電位が基質の酸化還元電位よりも-に大きい場合、還元反応が起こる。一方、価電子帯に生成した正孔は、基質の酸化還元電位よりも+に大きい場合、電子を奪い取って酸化反応が起こる。

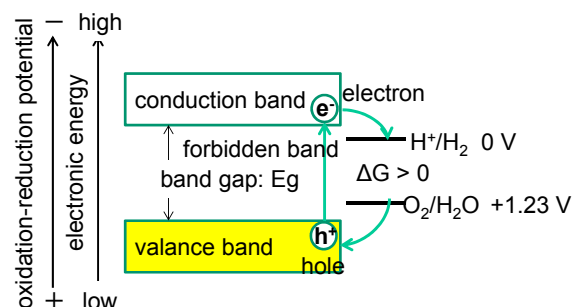


Fig. 2 Oxidation-Reduction Reaction of Photocatalyst

4.3 人工光合成技術の開発状況

米国エネルギー省「エネルギー・イノベーション・ハブ」プログラムや欧州の第7次技術開発枠組計画（FP7）公募型研究及び日本の新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「人工光合成プロジェクト」といった国家プロジェクトの支援もあり、米国、欧州、日本等では人工光合成の研究開発が加速している。NEDO「人工光合成プロジェクト」は、2021年時点で10%の太陽エネルギー変換効率を目標に掲げている。この変換効率10%は、経産省水素供給価格目標値（40円/Nm³@2020年）を満たすための実用上の必須条件とされている。

日本における人工光合成研究のトップランナーの研究開発状況を以下に述べる。

(1) 半導体/金属錯体ハイブリッド光電極

(株)豊田中央研究所は、2011年9月、太陽光エネルギー（可視光）を利用し、外部アシストなしで水と CO_2 のみを原料にして有機物（ギ酸）を合成する人工光合成の実証に世界で初めて成功と発表した⁽⁶⁾。太陽エネルギー変換効率は0.04%で、これは一般的な植物であるスイッチグラス（0.2%）の1/5程度である。

本システムは、生成酸素による触媒被毒防止用に設けたプロトン交換膜で仕切られた CO_2 還元光電極と H_2O 酸化電極を導線をつないだ電気化学セル構造をとっている。 CO_2 還元電極の光触媒には Rh 錯体と半導体 InP から成る InP/Rh 錯体を、 H_2O 酸化電極の光触媒には TiO_2 を用いている⁽⁷⁾。2015年には、光吸収層にシリコンゲルマニウム（SiGe-jn）を用い、太陽光変換効率4.6%に達する1チップ人工光合成デバイスを開発した⁽⁸⁾。

(2) 半導体光電極と金属触媒電極の組み合わせ

パナソニック(株)は、窒化物半導体（窒化ガリウム：GaN）と金属触媒インジウム（In）を導線をつないだ電気化学セルで、 CO_2 から有機物のギ酸を生成する人工光合成システムを開発した^{(9),(10)}。2014年には、GaN に In を混ぜた半導体と銅（Cu）触媒電極を組み合わせ、太陽エネルギー変換効率0.3%で CO_2 をメタン等に還元した⁽¹¹⁾。

(株)東芝もパナソニック(株)と類似した人工光合成システムを2014年11月の国際学会で報告した⁽¹²⁾。

(株)東芝とパナソニック(株)の大きな違いは、カソード極の触媒材質にみられる。パナソニック(株)は Cu 触媒で CO₂ をメタン等に還元したのに対し、(株)東芝はナノサイズの金 (Au) 触媒で CO₂ を CO に還元している⁽¹³⁾。

(株)東芝はアノードに助触媒の酸化コバルトを担持した多接合型太陽電池を使用している。このアモルファスシリコン太陽電池は、アモルファスシリコン及びアモルファス・シリコンゲルマニウムから成る 3 層構造の太陽電池で、紫外線から赤外線まで波長が異なる光を幅広く吸収できる。

(3) 水素発生用光触媒と酸素発生用光触媒の組み合わせ NEDO 人工光合成化学プロセス技術研究組合 (ARPCHEM) は、太陽エネルギーを利用した光触媒による水からの水素製造で、エネルギー変換効率が世界最高レベルとなる 2.2% を達成したと発表した⁽¹⁴⁾。酸素発生用触媒に BiVO₄、水素発生用触媒には可視光領域の光を吸収できる Cu(In,Ga)Se₂ を採用し、これらを塗布した電極を導線をつないでタンデムに配置した。

各研究機関で研究開発された人工光合成システムの太陽光エネルギー変換効率を Fig. 3 に示す。

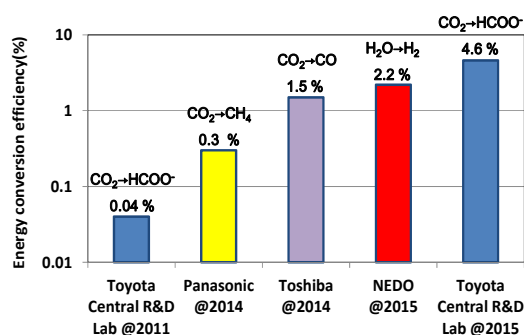


Fig. 3 Energy Conversion Efficiency of latest Artificial Photosynthesis

5. マツダの人工光合成の研究

大阪市立大学人工光合成研究センター天尾教授とマツダは、酢酸から自動車の燃料になるエタノールを作り出す新規の人工光合成技術を開発した⁽¹⁵⁾。

5.1 研究コンセプト

光触媒あるいは人工光合成による CO₂ 還元生成物として、CO、ギ酸、メタノール等が報告されている。メタノールについては、天尾教授らによって原理検証が行われている^{(16),(17)}。このように CO₂ を炭素数 1 のメタノールに変換する人工光合成系は報告されていたが、炭素数を更に一つ増やしたエタノールを作り出す技術には至っていなかった。光エネルギーのみで CO₂ から一段でエタノールを人工的に合成することが可能かどうかは現時点では分からないが、酢酸を出発原料にすれば天尾教授の CO₂-メタノール

ール変換技術を応用し、CO₂→酢酸→アセトアルデヒド→エタノールの経路でエタノール合成が可能ではないかと考えた。CO₂ からの酢酸合成は、CO₂ と水素と酢酸生成菌で成立する可能性がある。この反応の原料となる水素は、再生エネルギーや光触媒等を用いて製造することができるので、化石燃料を一切用いないシステムを構築できる可能性がある。上記のコンセプトを Fig. 4 に示す。

天尾教授の人工光合成による CO₂ からのメタノール合成の知見をベースに、CO₂ を酢酸に変換する酢酸生成菌を組み合わせることを前提に、酢酸-エタノール合成人工光合成システムを検証した。

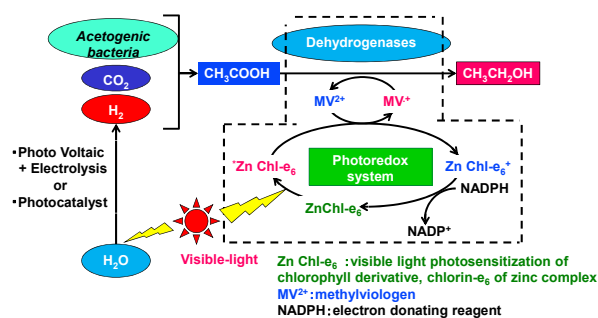


Fig. 4 Concept of Visible-light Induced Ethanol Synthesis from Carbon Dioxide, Water

5.2 実験結果と考察

酢酸-エタノール合成人工光合成システムは、電子供与体 NADPH、光増感剤クロリン-e6 亜鉛錯体、電子伝達体メチルビオローゲン及びアルデヒド脱水素酵素、アルコール脱水素酵素から成る (Fig. 5)。

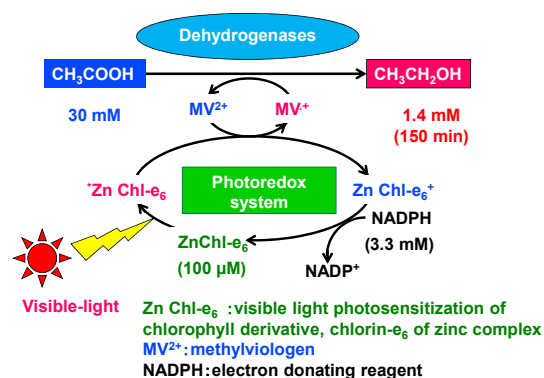


Fig. 5 Experimental Condition

このシステムに可視光を照射し、150 分後に反応溶液を分析した結果、エタノールが生成した (Fig. 6)。生成エタノール濃度を原料の酢酸の濃度で除した変換効率は、4.7% となった。電子伝達体メチルビオローゲンの濃度が高くなるほど、エタノールの生成濃度・効率が向上することを見出した。一方、光照射が無い条件では、エタノール

は生成しなかった。

光照射によりメチルピオローゲンが還元され、還元型のメチルピオローゲンがアルデヒド及びアルコール脱水素酵素の基質となり、酢酸がアルデヒドを經由してエタノールに変換することを確認した。光合成のカルビン回路に相当する物質変換系に酵素系触媒を用いた高効率・高選択性をもつ人工光合成システムの可能性が検証できた。

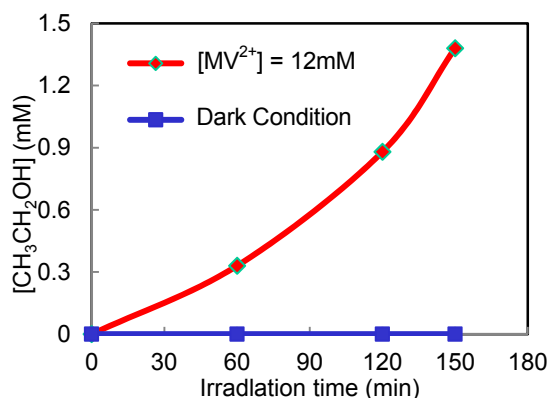


Fig. 6 Time Dependence of Photochemical Ethanol Synthesis under Steady State Irradiation with Visible Light

6. まとめ

大阪市立大学人工光合成研究センターと共同研究を行い、酢酸から光エネルギーを用いてエタノールを合成する新規反応系を世界で初めて見出した。これまで人工光合成によるCO₂還元反応の生成物は、CO、ギ酸、メタノール等炭素数が1のものに限られていたが、Fig. 4に示した技術が達成できれば、炭素数が2のエタノールを太陽光とCO₂から作り出すことが可能になる。

この技術を発展させると、CO₂と水を原料に太陽光エネルギーのみを使ってガソリン、軽油相当の液体燃料も合成可能になる。再生可能液体燃料の実現・普及によって、内燃機関自動車が永遠に存在し続け、エンジンの鼓動を感じながら走る喜びを未来のお客様と共有していきたい。

参考文献

- (1) 次世代自動車戦略研究会：次世代自動車戦略 2010, p.9 (2010)
- (2) 池島ほか：微細藻類からの潤滑油, PETROTECH, Vol.35, No.5, pp.47-55 (2012)
- (3) 産業技術総合開発機構：NEDOにおけるバイオ燃料製造技術開発の取り組み (2015)
- (4) 石油エネルギー技術センター：JPEC レポート 2011年度第5回 (2011)
- (5) 中央大学研究開発機構：微細藻類バイオマス利用シンポジウム予稿, 2015年9月3日 (2015)
- (6) TOYOTA CRDL, INC. NEWS, 2011年9月20日
- (7) S. Sato et al.: Selective CO₂ Conversion to Formate Conjugated with H₂O Oxidation Utilizing Semiconductor/Complex Hybrid Photocatalysts, *J. Am. Chem. Soc.*, 133, pp.15240-15243 (2011)
- (8) T. Arai et al.: A monolithic device for CO₂ photo-reduction to generate liquid organic substances in a single-compartment reactor, *Energy Environ. Sci.*, 8, pp.1998-2002 (2015)
- (9) Panasonic プレスリリース, 2012年7月30日
- (10) M. Deguchi et al.: Enhanced Capability of Photoelectrochemical CO₂ Conversion System Using an AlGaIn/GaN Photoelectrode, *Japanese Journal of Applied Physics*, 52, 08JF07 (2013)
- (11) 日本経済新聞電子版 2014年9月15日
- (12) Y. Sugano et al.: Solar-to-Conversion Efficiency by Wired PV Cell System with Cobalt Oxide and Gold Nanoparticles catalyst, 2014 International Conference on Artificial Photosynthesis, P5-08, p.236 (2014)
- (13) TOSHIBA 研究開発センターHP, 2014年12月
- (14) NEDO News Release, 2015年3月31日
- (15) Y. Amai et al.: Ethanol Synthesis based on the Photoredox System Consisting of Photosensitizer and Dehydrogenases, *Applied Catalysis B: Environmental*, 180, pp.403-407 (2016)
- (16) Y. Amai et al.: Photochemical and Enzymatic Synthesis of Methanol from HCO₃⁻ with Dehydrogenases and Zinc Porphyrin, *Chemistry Letters*, 33 (12), pp.1544-1545 (2004)
- (17) Y. Amai et al.: Photochemical and enzymatic methanol synthesis from HCO₃⁻ by dehydrogenases using water-soluble zinc porphyrin in aqueous media, *Applied Catalysis B*, 86, pp.109-113 (2009)

■ 著 者 ■



岩国 秀治