

創発セミナー第3回報告

京都産業大学 吉田 賢右

大隅基礎科学創成財団の第3回創発セミナーは、東京ガーデンパレスにて、企業会員の方と財団の関係者とが丸テーブルを囲んで話しやすい会場で行われました。テーマは「光合成」です。

光合成細菌や藻類、植物は、巧妙な仕組みで光のエネルギーを化学エネルギーに変えて生体成分を合成しています。動物もそれを捕食して生きているわけで、結局、ほとんどの生物は太陽の光を究極のエネルギー源としています。人間の活動にとっても、主要なエネルギー源は究極的には太陽の光です。石油も過去の太陽光の産物です。しかし、石油は略奪的な資源でそのうちに枯渇するし、炭酸ガスによる温暖化は今や疑いのない脅威で、持続可能な太陽の光のエネルギー変換が期待されています。

今回のセミナーでは、光合成する藻類と、人工的な光合成について2人の方に話をいただきました。以下はその要旨です。

「ミトコンドリアと葉緑体のようなエネルギー変換器はどのように誕生したか」

宮城島進也 国立遺伝学研究所 細胞遺伝研究系 共生細胞進化研究部門 教授

1. 研究対象生物について

・光合成を研究するうえで、単細胞の藻類は、簡単なゲノム組成と細胞構造、均一な細胞集団が簡単に得られる、など利点はあるが、遺伝的操作が難しいということが大きな制約となっていた。

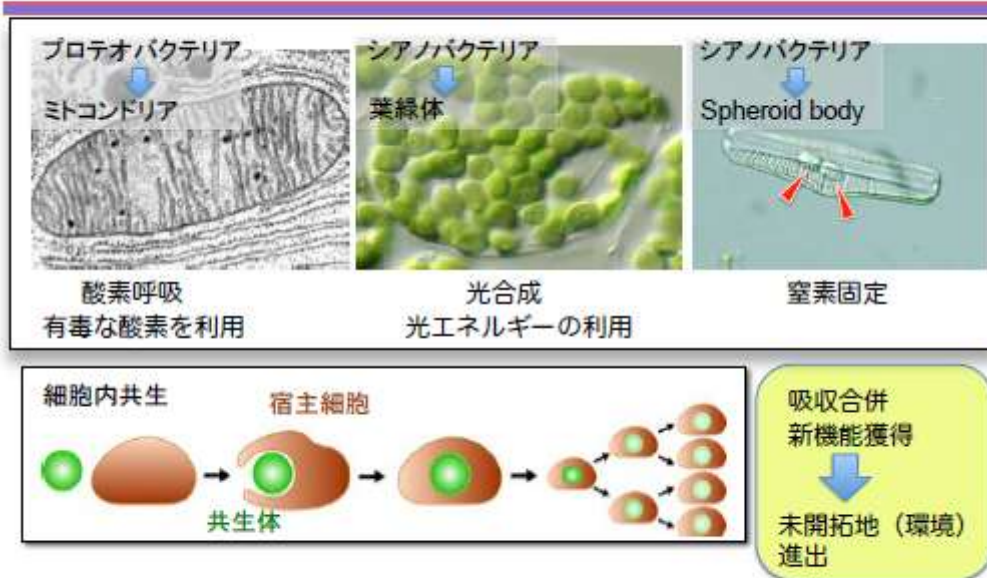
・酸性の温泉から採取された真核単細胞紅藻シズンは、操作上やっかいな細胞壁がないうえに、ゲノムが約1600万塩基で真核生物として最小クラス、遺伝子破壊・改変・導入など自由にできる系を作ることができた。



国立遺伝研究所 教授 宮城島進也氏

2. 共生における宿主と葉緑体の関係

- ・葉緑体はシアノバクテリアのたぐいが宿主細胞に共生したものを起源とする。そして、宿主と連絡をとりあってお互いに制御している。
- ・葉緑体の分裂装置はシアノバクテリアのそれとよく似ている。しかし、いくつかの重要な成分の遺伝子は宿主の核の方に移動している。さらに宿主は、分裂装置の他の必要成分の遺伝子も核に持っていて、葉緑体の分裂を支配している。
- ・同じく細胞内共生で生じたミトコンドリアの分裂装置も葉緑体と似ており、核支配を受ける。
- ・逆に、葉緑体も宿主の分裂を支配している。すなわち葉緑体の分裂開始が宿主細胞の分裂に必要である。



1. 宿主細胞による共生細胞・細胞内小器官の増殖制御
2. 共生細胞・細胞内小器官によるエネルギー供給と宿主細胞の増殖の関係

3. 活性酸素の問題への生物の対応

・光合成は副産物として活性酸素を生じやすく、ゲノムに損傷を与える。藻類は光合成のない夜間に核 DNA を複製し細胞分裂をする。たしかに、光合成をしながら核 DNA の複製を行わせると、2 本鎖 DNA 切断が起こりやすくなる。ミトコンドリアの呼吸も活性酸素を生じるので、夜間は呼吸が低下する。

・藻類を食べるアメーバがいるが、食べると強光によって損傷を受けようになる。



4. 関連情報（産業界に向けたヒント）

・シゾン（シアニジウム）は、ビタミン類やタンパク質が豊富で、クロレラなどと比べたら10倍くらい高密度な屋外培養ができる。基礎研究の材料生物として、また機能性食品などの応用を考えて、日本の酸性高温地をめぐるさらには好適な新種を探している。

「人工光合成」

森川健志 豊田中央研究所 森川特別研究室 シニアフェロー

1. 研究の狙い

・化石燃料の代替エネルギー源の創成が求められている。太陽光による発電、水からの水素ガス発生、の改良が進んでいる。一方、人工光合成は、光エネルギーを有機分子に貯蔵する技術である。具体的には、水と炭酸ガス(CO₂)からギ酸を合成する反応($\text{H}_2\text{O} + \text{光} \rightarrow 1/2 \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$, $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- + \text{CO}_2 \rightarrow \text{HCOOH}$)などを遂行できる光触媒系の開発を行っている。



(株)豊田中央研究所 シニアフェロー 森川健志氏

2. 研究の課題と、生物からのヒント

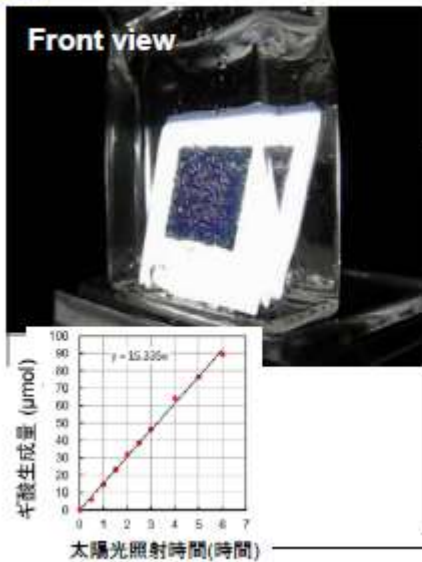
・触媒としては、半導体光触媒あるいは錯体光触媒が使われるが、いずれにせよ可視光で炭酸ガスと水から有機物を、常温常圧において太陽光の変換効率を提示できるレベルで合成する成功例はなかった。

・可視光でギ酸を生じるには、水素ガス発生よりも高いエネルギーが必要で、生物のように、2段階励起（Zスキーム）が理想である。

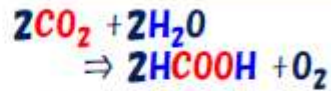
・金属リン化合物や硫化物などの半導体と、水から電子を引き抜き CO_2 還元能力のあるルテニウム錯体触媒をハイブリッドした1枚の電極とした。外部電圧を少しだけ印加し励起エネルギーの一部を補助して可視光を照射すると、水中でギ酸が生じた。

・チタン酸化物半導体光触媒を陰極とし上記ハイブリッドを陽極とし、両者を銅線でつなげた。陰極では光によって水からの電子の引き抜きが起きて、その電子は導線を通して陽極に達し、そこでまた光によってさらに励起され、 CO_2 還元（ HCOOH 合成）が起きた。ここでは外部から電圧の補助は不要であり、植物と同じ2段階励起による、水と CO_2 と太陽光による人工光合成が実現した。

板状素子の人工光合成(ソーラーシミュレータ光照射)



二酸化炭素と水から有機物！



TOYOTA CRDL, INC.

30

3. 現在までの成果と今後の展望

・さらに全てを一枚の板にまとめた、人工の葉っぱを作製した。電線はなく印加電圧も必要ない。炭酸ガスを曝気した溶液に置いて太陽光を当てると、ぶくぶくと酸素ガスの泡が発生し、～94%の選択性でギ酸が合成された。少なくとも数時間は合成が続く。太陽光エネルギーの4.6%がギ酸分子として貯蔵された。生成物はまだギ酸だが、この時の太陽光エネルギー⇒化学エネルギーへの変換効率は、植物(コメ～1.1%、トウモロコシ～2.7%)を超えている。

・今後、さらに新しい半導体材料、触媒材料、界面技術などの研究が必要である。いずれはアルコール、エチレン、プロピレンなどを作ることが必要だろう。



その後、自由なディスカッションがあり、交流会でもいろいろな意見の交換がありました。以下はその一部のメモです。

- ・シゾンのゲノムを決めて遺伝子操作系を作り上げたのは素晴らしい。こういう地道な努力が新しい研究局面を開く。
- ・新たなシゾン種をもとめて各地を探索しているのは有意義で楽しい。着実な基礎研究と魅力ある応用研究が自然なかたちで両立している。
- ・太陽光は大きく変動するエネルギー源で、生物は自分が使えるエネルギーとして獲得すること以上に、強光による損傷の回避や修復などに大きな努力を払っているようだ。車でいえば、エンジンはもちろん大切だが、ブレーキや整備システムなしには使用できないのと同じだ。
- ・人工光合成がここまで進歩しているのに驚いた。
- ・太陽電池は20%の効率が普通だ。送配電系統に流すかあるいはかさばって重い蓄電池が必要である。自動車は電気自動車へという流れもあるので将来はどうか不透明だが、炭化水素はエネルギー密度が高く太陽光でさらに効率よく合成できれば有用だろう。

・人工光合成の産物をやっぱり燃やすとしたら、大気に炭酸ガスを放出することになる。しかし単純には、人工光合成には大気の炭酸ガスを使っているのだからプラスマイナスゼロで、空気中の炭酸ガス濃度は上昇しないと考えられる。

・石油は、プラスチックなどの有機分子の合成の原料として非常に重要だ。単に燃やしてしまうのはもったいないくらいだ。したがって、人工光合成の産物は、石油枯渇後の有機分子の合成原料として重要になるではないか。

・ギ酸では確かに後の処理や利用が難しい。もし、エチレンができれば重合材料としてとてつもなく有用だろう。

・人工光合成の将来は触媒の改良にかかっている。触媒化学は経験的な要素が大きい。計算機の能力を飛躍的に高めて有効な触媒を探すことができれば、一大革命となる。大変な費用と研究能力が必要と思うが、追求すべきと思う。タンパク質の世界では、米国の学者が株で大富豪となり、巨額の私費を投じてタンパク質の構造計算に特化した計算機を作り、威力を発揮している。

・面積あたりのエネルギー密度が低い、というのが太陽光の欠点と言われる。しかし、巨大密度、巨大スケールのエネルギー源の利用は難しいし危険である。小刻みにゆっくり分割して取り出すのが難しいし、失敗すれば大災害となる。地球に内在する主たるエネルギーは地球内部の熱で、火山爆発や地震などの災害をもたらすが、人も生物もこれをエネルギー源として利用することはできない（地熱発電や深海熱水孔生物などわずかな例外はあるが）。原子力も結局、制御が難しく事故が起これば甚大な被害がおきるのは経験済みだ。核融合炉の研究は延々と続くが目処が立たない。核反応はせいぜい破壊目的の爆弾くらいにしか使えない。その点、太陽光はヒトのスケールにあったエネルギー源なのだ。

少人数で和やかな雰囲気、その分野について非専門家の多い集まりなので、かえって学会などよりももっと率直多面的な議論ができたように思います。視野の広がる楽しいセミナーでした。