



研究ノート

微細藻類を利用した太陽エネルギー変換

三浦喜温* 宮本和久**

1. はじめに

内外で研究開発の進められている太陽エネルギー利用技術の中で、太陽光を燃料に変換するプロセスの一つに生物学的変換 (Biosolar conversion) がある。光合成生物から燃料を得るには三つの方法が考えられる。まず第一に、植物またはその成分をそのまま燃料として用いる古くからの方法が挙げられる。最近ではこれと関連して、アオサゴなど炭化水素含量の高い植物や Short-rotation forestry に適した成長の早い樹木についての研究が盛んになってきた。つぎに、光合成生物のバイオマスを使い、易い気体あるいは液体燃料に変換してから用いることもできる。農林産廃棄物や水生植物・海藻などを原料にして、アルコールやメタンを醗酵生産する方法である。第三の方法として、光合成生物を触媒的に利用し、太陽光を推進力として水を水素と酸素に分解する方法 (Biophotolysis) が提案されている。Biophotolysis は、水素エネルギー社会の構想に支援されて注目されるようになったが、高等植物は水素を発生する能力を持たないから、研究対象は藻類、光合成細菌などの微生物が中心である。

2. 微細藻類の水素発生

微生物が水素発生能を有することは古くから知られていた。例えば、緑藻 *Scenedesmus* がある種の条件下で分子状水素を発生する現象は40年も前に報告されている。ところが、この生物機能をエネルギー生産と関連して取り上げるようになったのは、ここ10年のことである。この

間、緑藻、藍藻、光合成細菌など多種の光合成微生物の水素発生能が調べられ、それぞれの水素代謝の特徴を反映した生産方法が提案されてきた^{1)~3)}。生物学的水素発生系の欠点の一つは、水素発生を担う酵素 (ヒドロゲナーゼまたはニトロゲナーゼ) が酸素によって失活し易いことである。この障害を如何に克服するかが、Biophotolysis 系開発の最初の関門である。

Anabaena や *Nostoc* などの藍藻は、窒素欠乏条件におかれると、光照射下で水素を発生する。これは異質細胞 (ヘテロシスト) に局在する酵素 (ニトロゲナーゼ) に触媒される反応で、培養系内が完全な嫌気状態でないときでも水素発生が持続する。異質細胞は酸素発生能を欠き、かつ非常に高い呼吸活性を有するために拡散してくる酸素を速やかに消費することができる。このような機構によって、酸素に不安定なニトロゲナーゼが保護され、酸素発生の伴う光照射条件においても持続的な水素発生が可能となる。すでに我々は、好熱性藍藻 *Mastigocladus laminosus* の水素発生について報告してきた^{4)~6)}。本稿では、緑藻による安定な水素生産システムについての実験を紹介するとともに、微細藻類を利用した太陽エネルギー変換法の意義・特徴を考察する。

3. 緑藻による水素発生

Scenedesmus や *Chlorella* などの緑藻は、ヒドロゲナーゼに触媒される水素発生を行うことができる。緑藻中でヒドロゲナーゼ活性が発現するには、ある一定時間、暗・嫌気条件におかなければならない。このように処理された藻細胞に光を当てると、直ちに水素発生が認められる。しかし、光照射下では同時に発生する酸素が阻害的に作用し、有効な酸素除去システムを組み込まない限り、緑藻の光依存水素発生は短

* 三浦喜温 (Yoshiharu MIURA), 大阪大学, 薬学部, 教授, 工博, 生物化学工学

** 宮本和久 (Kazuhisa MIYAMOTO), 大阪大学, 薬学部, 助手, 工博, 生物化学工学

時間で停止してしまう。ここでは、酸素感受性に対する積極的な対策が要求されるわけである。装置あるいは操作法の工夫によって、酸素発生と水素発生を時間的または空間的に分離することができれば、水素発生系の酸素による阻害を避け、加えてガス分離操作の簡略化が計れる。我々は、緑藻が暗・嫌気条件で水素を発生する事実に着目し、Fig. 1の原理に基づく安定な水素生産システムを追究した。すなわち、日中は活発に光合成を行なわせデンプンなどの有機物を細胞内に貯蔵させる。夜間は嫌気状態に切り換え、貯えられた有機物を電子供与体とする水素発生を行なわせるわけである。

モデル系として、東大応微研保存の緑藻

*Chlamydomonas reinhardtii*を選び、緑藻が明暗サイクル中で増殖（Reductantの蓄積）と水素発生を安定にくり返すことが可能か否かを検討した⁷⁾⁸⁾。Fig. 2に示す装置を用いて、12時間の蛍光灯照射ののち、培養ビンに窒素ガスを吹き込み、ついで暗箱中で攪拌すると、ほとんど lag time もなく12時間に亘って水素発生が認められた。この操作を12時間周期で繰返したときの藻体量の変化と水素発生はFig. 3のようになった。藻体量は、暗期間中にわずかに減少したが、その後明条件下で5% CO₂を含む空気を流すと1.5~2倍に増加した。Fig. 3では、暗条件での水素発生と明期の増殖が安定に繰返されているが、藻体量の増加に見合っ

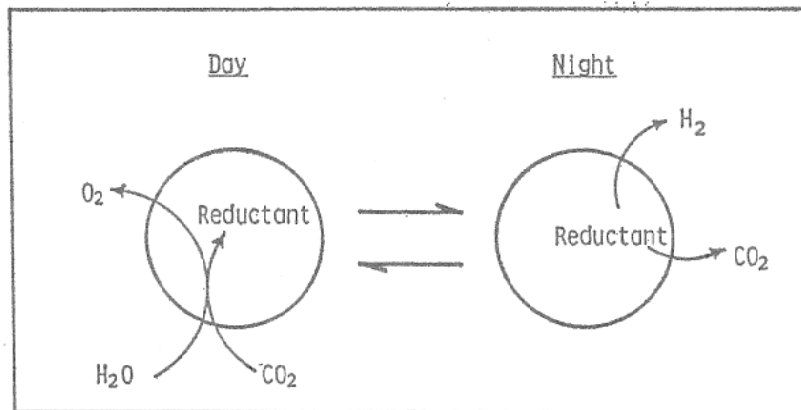


Fig. 1 Alternating O₂ and H₂ evolution by green algae in a light/dark cycle (temporal two-stage biophotolysis).

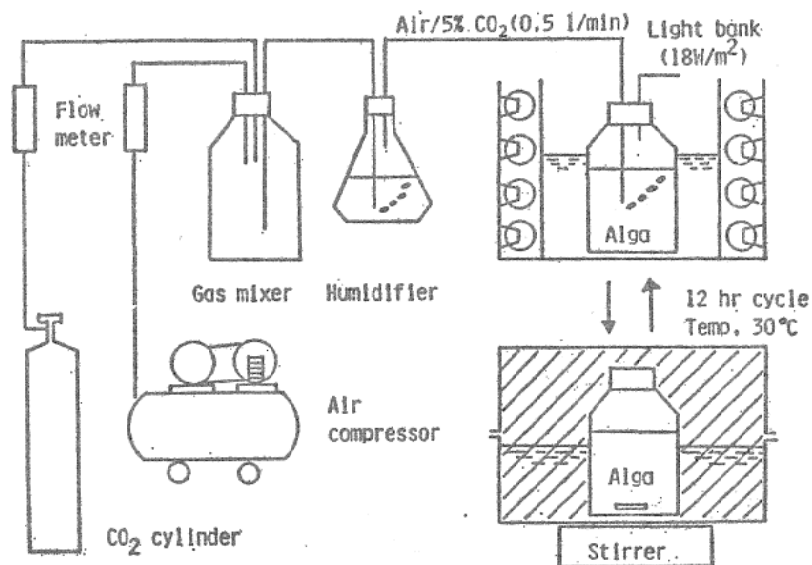


Fig. 2 Flow diagram of algal cultivation in light and H₂ production in the dark.

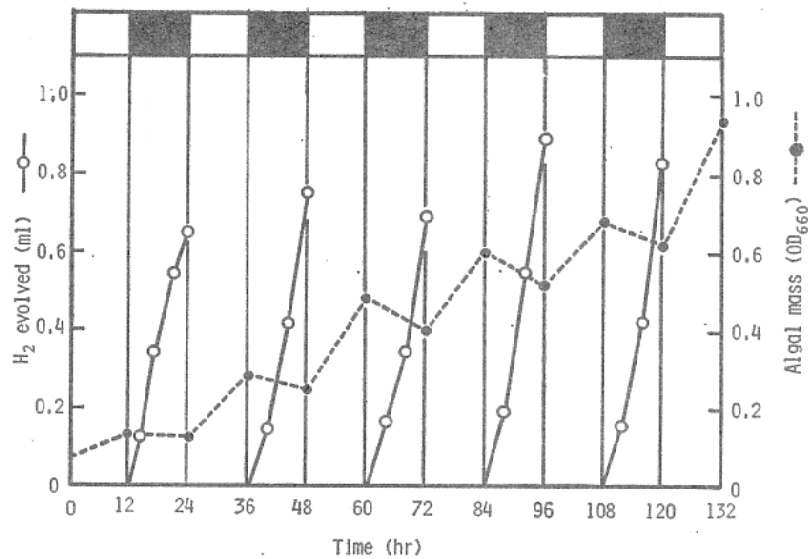


Fig. 3 Hydrogen evolution by *Chlamydomonas reinhardtii* in a light/dark cycle⁹⁾.

Clear and shaded blocks on the top of the figure represent light and dark periods, respectively. H₂ evolution (○) was measured at dark period, and algal mass (●) was measured at a 12-hr interval.

た水素量の増加は認められなかった。今回の実験条件では、光量が制限因子になっているためと考えている。事実、暗期の終りに培養液の一部を抜き取り、新たに培地を添加して藻の濃度を低く保った別の実験でも、Fig. 3の場合と同等の発生量があった。実験の場を屋外の自然環境に移すまでには、強光や温度変化に対する藻の適応現象など多くの課題を解明しなければならないが、今回の実験で緑藻水素生産のモデルを示し得たと考えている。

4. 微細藻類利用の得失

Biosolar conversion の媒体として微細藻類を利用するときの最大の利点は、その培養に可耕地を要しないことであろう。水の供給が保障されれば、不毛の砂漠地帯でも藻類の培養は可能である。さらに、藻の種類を選べば、海水、温泉水、各種産業廃水など、通常農業用水として利用できない水資源が活用できる。この二つの特徴は、藻類の培養が既存の農林業と競合しないことを示す点で重要である。また、高等植物よりも増殖速度が大で、高いエネルギー変換効率が期待できる点や、根・葉・茎の区別がない“均質なバイオマス”である点も見逃すこと

ができない。いわゆる“Industrial agriculture”の媒体としての多くの特徴を備えていることが判る。

しかし、微細藻類の水素生産速度は未だ小さく、太陽エネルギーの水素への変換効率も農業における太陽エネルギー利用効率よりも低い (*A. cylindrica* を用いた屋外実験で0.2%であった⁹⁾)。将来遺伝子工学の進歩に伴う水素発生能および光合成能力の向上が期待できるとしても、エネルギー（水素）生産のみを目的とする方法では経済的に成り立ち難いと考えられる。多目的の複合プロセスに水素生産を組み入れることによって経済性の向上を計る努力が必要である。現在海産性の微細藻類を対象として研究を進めているが、海産株の多くが水素発生能を持つことが明らかになった。また、暗水素発生後に培養濾液を分析したところ、ギ酸、酢酸、エタノール等の醗酵産物が含まれていた。これらの事実をも考慮すれば、水素の生産だけでなく、付加価値の高い化合物を回収し、さらに藻細胞を食・飼料に加工する総合システムの構成は不可能ではなからう。微細藻類の環境浄化能や海水中から有用元素を濃縮する機能などを発揮させる条件が加われば、さらに実用化へ

の研究が促進されるものと期待される。

文 献

- 1) Benemann, J.R., K. Miyamoto, P.C. Hallenbeck: *Enzyme Microb. Technol.*, **2**, 103 (1980).
- 2) Miyamoto, K., Y. Miura: *Process Biochem.*, June/July, 23 (1980).
- 3) 宮本和久, 三浦喜温: *化学工学*, **45**, 314 (1981).
- 4) Miura, Y., H. Yokoyama, K. Kanaoka, S. Saito, K. Iwasa, M. Okazaki, S. Komemushi: *Plant & Cell Physiol.*, **21**, 149 (1980).
- 5) Miura, Y., H. Yokoyama, K. Kimura, T. Iwamoto, K. Miyamoto: *Plant & Cell Physiol.*, **22**, 1375 (1981).
- 6) Miura, Y., H. Yokoyama, K. Takahara, K. Miyamoto: *J. Ferment. Technol.*, **60**, 411 (1982).
- 7) Miura, Y., K. Yagi, Y. Nakano, K. Miyamoto: *J. Ferment. Technol.*, **59**, 441 (1981).
- 8) Miura, Y., K. Yagi, M. Shoga, K. Miyamoto: *Biotechnol. Bioeng.*, **26**, 1555 (1982).
- 9) Miyamoto, K., P.C. Hallenbeck, J.R. Benemann: *J. Ferment. Technol.*, **57**, 287 (1979).

