

微細藻類を利用した物質循環型再資源化技術



夢はバラ色

宮本和久*, 平田收正**

Microalgal CO₂ Fixation and Biological Recycling of Resources

Key Words : Microalgae, Biomass Energy, Bioconversion

1. はじめに

我が国では、有史以前から海藻を食用にする習慣があり、とりわけ、ノリやコンブ等には馴染が深い。一方、クロレラやスピルリナのように顕微鏡でしか識別できない微細藻類は、人間生活との直接的な関係が希薄で、一般には余り知られていない。しかし、藻類は高等植物と同様に、光合成を行い空気中の二酸化炭素 (CO₂) を固定し、生態系における一次生産者として我々の生存を根底から支えている。また、酸素の供給者として、さらに、大気、水、土壌圏における環境浄化の担い手としても大いに活躍してい

る。ここでは、微細藻類を利用した大気汚染物質の回収、再資源化について解説する。

2. 微細藻類による CO₂ と NO_x の固定

石油や石炭などの化石燃料の大量消費にともなう、年々 200 億トンを超える CO₂ が大気中に放出されている。大気中の CO₂ 濃度の増加は、地球温暖化を加速し、同時に放出される硫酸化物 (SO_x) や窒素酸化物 (NO_x) は、酸性雨の原因となって、湖や森林の生態系を破壊している。ボイラー排ガス中の CO₂ は、化学吸収法などの既存の技術によって回収することができる。回収した二酸化炭素は、化成品の製造やドライアイス、食品などに利用されるが、その需要には限度がある。したがって、分離・回収した大量の CO₂ を、処理あるいは再資源化する技術の開発が今後の重要な課題である。我々は、CO₂ と NO_x を同時に通気した過酷な環境下でも増殖できる数種の微細藻類を見いだし、このような大気汚染物質の除去、回収に活用することを試みた。

藻類の培養には、ガラス製の垂直管型フオートバイオリアクター (内径 5 cm, 高さ 250 cm, 培養量 4 L) を用いた。このリアクターは、光の利用効率が優れていることから、高 CO₂ 固定速度が確保でき、また通気ガスと細胞の接触時間が長いこと、ボイラー排ガス中の主な NO_x である NO のような水に溶解難いガスの処理にも適している。材料は、火力発電所などの集中発生源近傍での実際的な使用を考慮して、海産

*Kazuhisa MIYAMOTO

1941年 7月22日生

昭和 40 年京都大学・工学部・化学機械学科卒業

現在、大阪大学薬学部、環境生物薬学専攻、教授、工学博士、環境生物工学

TEL 06-879-8235

FAX 06-879-8239

E-Mail miyamoto@phs.osaka-u.ac.jp



**Kazumasa HIRATA

1957年 6月5日生

昭和 62 年大阪大学大学院薬学研究科博士課程修了

現在、大阪大学薬学部、環境生物薬学専攻、助教授、薬学博士、環境生物工学

TEL 06-879-8236

FAX 06-879-8239

E-Mail hirata@phs.osaka-u.ac.jp



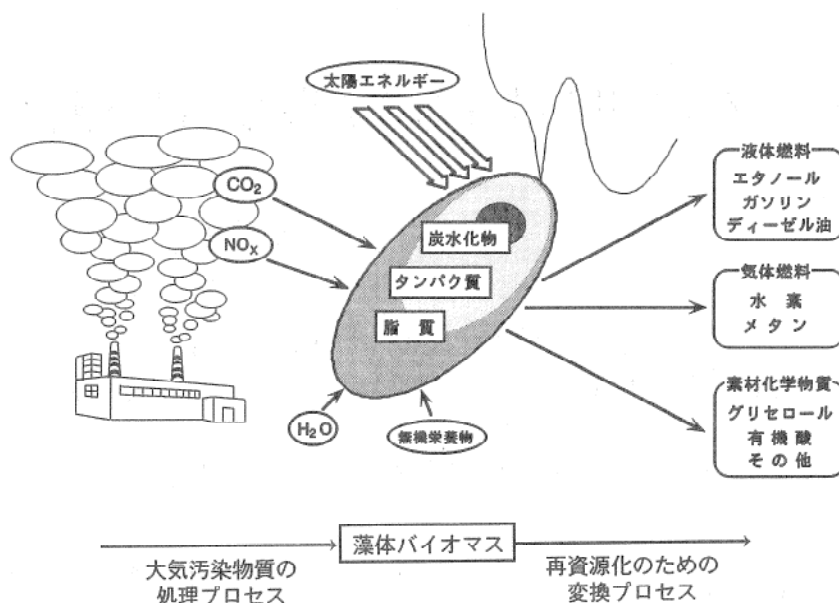


図1 微細藻類による大気汚染物質の処理とその再資源化プロセスの概略

性の藻類の中から高濃度 CO_2 通気によって起こる培地の pH 低下に適応できる藻株を選抜して用いた。その結果、15% CO_2 を通気した場合、対数増殖期で $10 \text{ g 炭素}/\text{m}^2/\text{day}$ の高い CO_2 固定速度が得られた。また、ボイラー排ガス中の濃度に相当する 100 ppm あるいは 300 ppm の NO を約 50% 除去でき、この NO 除去能力はこの藻株の正常な増殖が維持できる最大通気速度である 300 ml/min まで保たれた。100 ppm-NO を 300 ml/min で通気した場合、約 $0.3 \text{ g NO}/\text{m}^2/\text{day}$ の速度で除去されており、 CO_2 と NO の同時処理が達成された。

3. 生物機能を利用した再資源化

バイオマスエネルギーシステム

地球面積の約 30% を占める陸地における一次生産、すなわち光合成による有機物の純生産量は、年間 880 億トンで、これは地球全体の 62% に相当する。残りは海洋における、主として植物プランクトンによる一次生産であり、全体の 38% を占めている。地球全体では、毎年 1,438 億トンの有機物（バイオマス）が生産されており、毎年生産されるバイオマスは、世界の年間エネルギー消費量の約 10 倍のエネルギーに相当する。したがって、この植物体（バイオマス）をエネルギーとして実際に利用でき

れば、「二酸化炭素を増加させない」エネルギーシステムが成立することになる。藻類（植物プランクトン）のバイオマスは、水分を多く含んでいるから、木材のように直接燃料とするには適していない。しかし、藻類や微生物の特別な機能に着目すると、興味深い利用方が考えられる。すなわち、図1のように、 CO_2 や NO_x といった大気汚染物質の処理過程で藻類の細胞内に蓄えられた炭水化物、タンパク質、脂質などの有機物から、多様な生物機能を利用して、エタノール、ガソリンやディーゼル油などの液体燃料、水素やメタンガスなどの気体燃料、あるいは素材化学物質として重要なグリセロールや有機酸などを生産することが可能である。以下に、我々の研究例を含めた具体的な取り組みを紹介する。

エタノールの醗酵生産

エタノールは化石燃料の代替エネルギーとして注目され、ブラジルやアメリカではエネルギー生産を目的とした甘薯搾汁を原料とするエタノール発酵が実施されている。高い光合成能を有する藻類によって細胞内に蓄積されたデンプンは、微生物による嫌気発酵によって同様にエタノールへ変換することが可能である（図1）。例えば、淡水産緑藻 *Chlamydomonas reinhardtii* は、ボイラー排ガスに相当する 15% の CO_2 を通気

表1 *C. reinhardtii* に蓄積されたデンプンの抽出と加水分解とエタノール生産

抽出	処理方法	エタノール発酵	エタノール変換率 (%)
	加水分解		
	1N 塩酸	<i>Z. mobilis</i>	75
	オートクレープ+1N 塩酸	<i>Z. mobilis</i>	97
	3N 過塩素酸	<i>Z. mobilis</i>	7
凍結処理	glucoamylase	<i>Z. mobilis</i>	78
凍結処理	glucoamylase amylase	<i>Z. mobilis</i>	90
凍結処理	glucoamylase amylase	固定化 <i>Z. mobilis</i>	77

した場合でも14g 炭素/m²/day の高いCO₂固定能を示し、細胞乾燥重量の約40%のデンプンを生産することができる。このデンプンからのエタノール生産は、藻類自身の嫌気発酵によっても一部行われるが、藻体抽出液を酵母や醸酵細菌の機能を利用して嫌気発酵させると、デンプンからのエタノールへの変換がより集約的に達成される。我々の検討では、藻体濃縮液を塩酸存在下でオートクレープ処理することによりデンプンを加水分解し、これを基質として発酵細菌 *Zymomonas mobilis* によるエタノール発酵を行うことによって、ほとんど全ての藻体デンプンをエタノールへ変換させることが可能であった。また、エネルギー収率の向上やシステム運用の省力化の面で有利と考えられる固定化加水分解酵素と固定化 *Z. mobilis* を組み合わせたシステムによっても、高収率でエタノール変換が達成された(表1)。さらに、耐塩性を有する発酵微生物を利用すれば、先に示したCO₂

とNOの同時処理に用いた海産性藻類からも、同様なプロセスによるエタノールへの変換を行うことが可能である。

生物的水素生産

微細藻類や細菌の優れた機能をうまく利用すると、未来のエネルギーとして注目されている水素を生産することも可能である¹⁾。水素は燃やしても水ができるだけで、有害な排ガスを出さないクリーンなエネルギーとして、大きな期待が寄せられている。現在、水素は石油などの化石燃料を消費して作られているが、製品である水素がいかにクリーンであっても、それを作る過程で環境を汚しては論外である。環境に調和した製造法の開発が望まれている。微細藻類や細菌の中には、特殊な酵素(ヒドロゲナーゼまたはニトロゲナーゼ)の働きで嫌気条件下で水や有機物を分解して水素を発生することのできる種類が知られている。このとき必要な有機物は藻類や植物の光合成によって二酸化炭素を固定して作ることが可能であるから、生物機能を利用した水素製造法は、二酸化炭素を増やさない環境調和型の製造技術として研究開発の目標になっている。

我々は、図2に示す緑藻と光合成細菌の代謝を利用した光合成産物の水素への変換システムを想定して、緑藻が発酵過程で生成する有機物からの光合成細菌のニトロゲナーゼに依存した水素発生について検討を行った。材料とした海産性緑藻 *Chlamydomonas* sp. MGA161 株の場合、暗嫌気条件で水素とともに比較的高濃度の

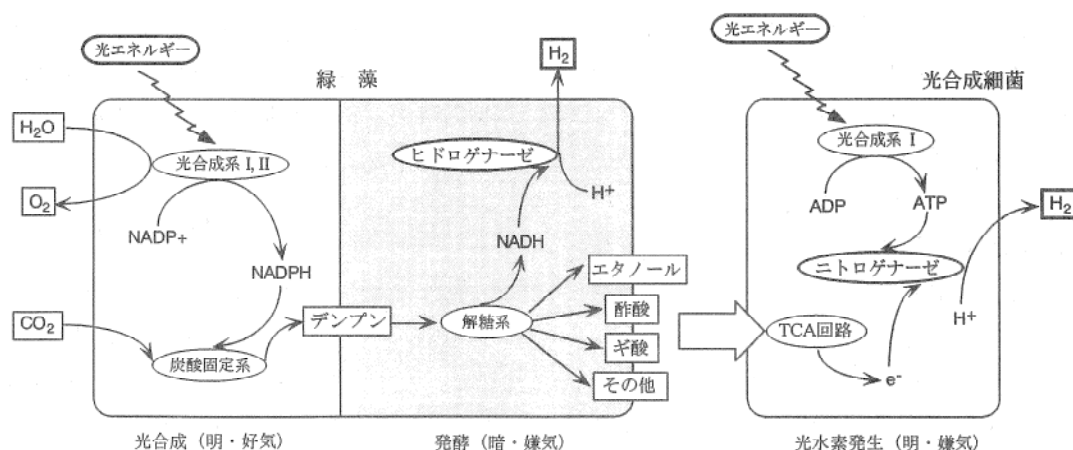


図2 緑藻及び光合成細菌のエネルギー代謝の概要

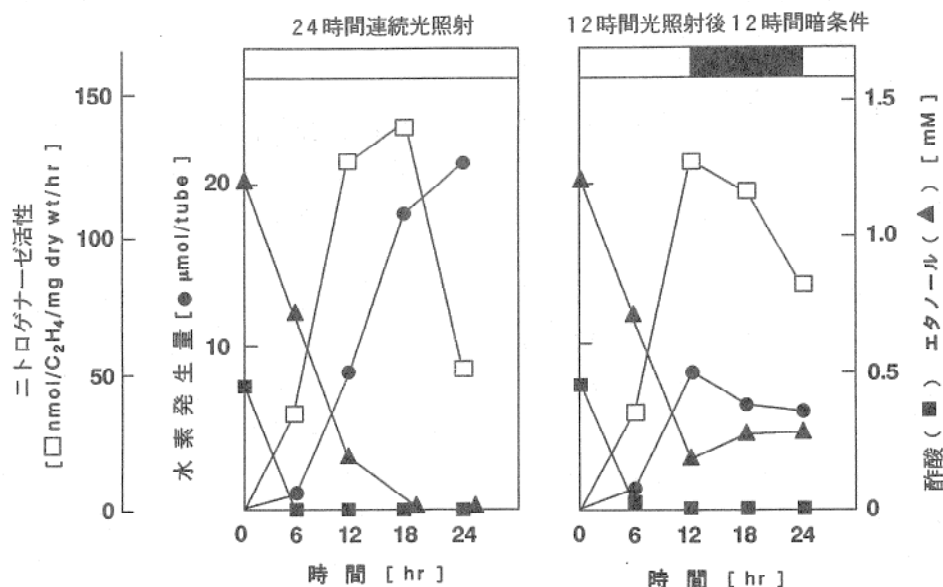


図3 海産性緑藻の発酵液を基質とする光合成細菌の水素発生

酢酸とエタノールを細胞外に放出する。そこで、これらの有機物を水素発生の基質とし得る光合成細菌 W1S 株による緑藻発酵液の明嫌気発酵を行ったところ、図3に示すように、ニトロゲナーゼの誘導にやや遅れて水素発生が認められた。水素発生量を最大にするには12時間の光照射では十分ではなく、24時間の連続照射が必要であった^{2,3)}。この場合、緑藻の発酵によって分解されたデンプン量(グルコースとして換算)から計算すると、最大発生時グルコース1モル当り、量論的最大値12モルの約90%という高効率の水素生産が達成されたことになる。

その他の再資源化技術

図1にも示したように、微細藻類は光合成産物として主に炭水化物、タンパク質及び脂質を合成する。個々の藻株におけるこれらの有機物の組成は非常に多様であり、また環境因子によって調節することができる。例えば、微細藻類の細胞膜や葉緑体の膜系には細胞乾燥重量の20から40%の脂質が含まれるが、ある種の藻類では栄養制限下で培養することによって脂質含量を80%近くまで高めることができる。この株を利用すれば、これらの脂質からガソリンやディーゼル油などの液体燃料に変換することが可能である。実際に、高い光合成能と脂質含量を持つ優良株を選抜し、屋外培養での生産性の

検討が行われた例や、液体燃料に変換しやすい脂肪酸組成を得るために培養条件の最適化の検討を行った例がある⁴⁾。また、炭水化物や脂質の代謝過程では種々の有機酸やグリセロールなどの物質が生成される。これらは高分子材料合成などの原料物質としての利用価値が高く、代謝制御による生産性の向上に関する研究が行われている。最近我々の研究室では、藻類の有機酸をさらに光合成細菌によって水素に集約するシステムの検討を行っており、高い有機酸含量を得るための培養条件の設定や、藻類の有機酸組成に適合した水素変換能を有する光合成細菌の検索を進めている。藻類に含まれるタンパク質は、炭水化物や脂質に比べると有用物質への直接的な変換は難しいが、従来行われてきた生物廃棄物からのメタン発酵の技術を利用すれば、再資源化の最終段階として、細胞残渣からのメタンの生産も可能である。

4. おわりに

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の将来予測によると、大気中のCO₂濃度は2050年には1850年当時の2倍に達し、異常気象の頻度が増すことなどによる被害は世界総生産の1.5~2.0%に達すると見積もられている。CO₂による地球温暖化については不確定な要

素が多いとし、排出削減対策に消極的な態度をとる国もあった。しかし、米国や英国で最近に発表された観測データは、化石燃料を消費することで温暖化が進行していることを示唆している。したがって、温暖化対策には化石燃料の消費を抑制することが必要であり、物質循環型の化学素材およびエネルギー生産システムの開発が急務である。

異常気象による被害は、人口爆発という大問題を抱える発展途上国において、とりわけ大きくなる恐れがあり、これらの国々にも容易に移転できる技術であることも大きな要素である。我々は、生物圏の物質循環をモデルにし、環境汚染物質を浄化・再資源化するバイオ技術の開発を目指している。バイオテクノロジーを基盤とするソフトな環境技術が、多様な生物資源を有する発展途上国において、大きな花を咲かせることを夢見ている。

参 考 文 献

- 1) Miyamoto, K. : Hydrogen production by photosynthetic bacteria and microalgae. "Recombinant Microbes for Industrial and Agricultural Applications" (edited by Y. Murooka and T. Imanaka), MARCEL DEKKER, INC., pp.771-786 (1994).
- 2) 宮本和久, 平田收正, 三浦喜温: 海産性微細藻類の光合成による炭酸ガスの固定および水素生産. 化学工学, 55, 703-705(1991).
- 3) Miura, Y., C. Saitoh, S. Matsuoka, and K. Miyamoto : Stably sustained hydrogen production with high molay yield through a combination of a marine green alga and a photosynthetic bacterium. Biosci. Biotechnol. Biochem., 56, 751-754(1992).
- 4) 宮本和久, 三浦喜温: 微細藻類によるエネルギーおよび化学物質の生産. PETROTECH, 12, 52-57(1989).

