

## 微生物共生系を利用した余剰バイオマスの再資源化

### Production of Useful Compounds from Surplus Biomass by Microbial Consortia

平田 收正<sup>1\*</sup>, 原田 和生<sup>1</sup>, 宮本 和久<sup>2</sup>  
KAZUMASA HIRATA, KAZUO HARADA and KAZUHISA MIYAMOTO

<sup>1</sup> 大阪大学大学院薬学研究科応用医療薬科学専攻 〒565-0871 吹田市山田丘1番6号

<sup>2</sup> 大阪大学グローバルコラボレーションセンター 〒565-0871 吹田市山田丘2番7号

\* TEL: 06-6879-8236 FAX: 06-6879-8239

\* E-mail: hirata@phs.osaka-u.ac.jp

<sup>1</sup> Graduate School of Pharmaceutical Sciences, Osaka University, 1-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

<sup>2</sup> Global Collaboration Center, Osaka University, 2-7 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

キーワード: バイオ水素, 光合成細菌, 乳酸菌, 共生系, 排水処理

Key words: Biohydrogen, photosynthetic bacterium, lactic acid bacterium, bacterial consortium, wastewater treatment

(原稿受付 2009年5月31日 / 原稿受理 2009年6月26日)

#### 1. はじめに

産業革命に始まる先進国を中心とした急激な経済発展によって、今日の地球温暖化に代表される深刻な環境問題が引き起こされ、人類の生存基盤が脅かされようとしている。今後、大量生産、大量廃棄型の社会を改め、環境を保護しながら経済活動の持続的な発展を実現するためには、リサイクルを取り入れた産業体系を構築することが不可欠となり、そのためには再生可能なバイオマスを原料とするエネルギー生産技術の実用化が非常に重要となる。

高等植物やその進化上の起源と考えられるラン藻、緑藻などの藻類は、光エネルギーを利用して大気中の二酸化炭素を固定し、化学エネルギーとして貯蔵する光独立栄養生物である。地球上での生物学的な二酸化炭素固定は、約3分の2を陸上植物が担い、残りの3分の1は藻類を中心とする水生光合成生物が担うと言われており、その結果として莫大な量のバイオマスが生産される。そこで現在、光合成生物に含まれる様々な物質について、エネルギー生産原料としての利用が図られているが、何といても太陽エネルギーの直接的な変換物として蓄積されるデンプンは、熱帯地域を中心に高い生産性が期待でき、質的にも高効率で様々な物質に変換できることから、バイオ燃料生産の主原料となっている。しかし、デンプンは生物変換が容易な優れた原料であるが故に主要な食料でもあり、地球上の限られた耕地で、しかも砂漠化などの環境破壊の影響で年々耕作不能の土地が増える中で、エネルギー生産原料と食料の両方の用途を十分に満たす量のデンプンを陸上植物によって生産することは、到底困難である。穀類のエタノール生産原料への転換による取引価格の高騰が問題となっているが、最終的には

食料としての利用が優先されるであろうし、さらに今後の世界人口の増加による食料危機の到来を考えれば、“食料と競合してしまうデンプン”を原料とするバイオ燃料生産は、エネルギー問題解決の切り札とは言い難い。地球上で最も大量に存在する天然高分子であり、毎年約1兆トン生産されながら、これまでは“喰えない”存在であったセルロースの効率的な糖化など、デンプン以外のバイオマス構成物質のエネルギーへの変換技術の開発が精力的に行われ、植物バイオマスの総合的な利用が進められている所以である。

上記のような“バイオエタノール”等の生産技術の詳細については、最近多くの総説や論文が出されているのでそちらに譲るとして、ここでは“余剰バイオマス”に含まれるデンプンの再資源化技術の一つとして、高等植物に比べて大きな増殖速度、即ち優れたバイオマス生産速度が期待できるラン藻や緑藻などの微細藻類と、そのままでは環境汚染の原因となってしまう厄介な“廃バイオマス”である、食品工場等のデンプン高含有排水の有用物質への生物変換技術、特に光合成細菌を含む微生物共生系を利用したバイオ水素の生産について紹介したい。

#### 2. 微生物共生系による藻体デンプンを原料とする水素生産

植物や藻類といった光合成生物に含まれる有機物を水素に変換できる微生物はいくつか知られている<sup>1-3)</sup>。その中で光合成細菌は、水素生産に光エネルギーを必要とするため、一般に光を必要としない嫌気性細菌に比べて生産速度が小さく、また培養コストが高いといった不利な点はあるが、有機酸や糖などを完全に二酸化炭素と水素まで分解できる点では有利である。例えばデンプンに

については、理論的には構成糖であるグルコース ( $C_6H_{12}O_6$ ) 1 モルから 12 モルの水素を得ることができる。しかし、光合成細菌はデンプンを直接水素生産の基質として利用できないため、これを原料として水素を効率良く生産するためには、予め光合成細菌の良好な水素生産基質となる特定の有機酸に変換する必要がある。そこで我々は、デンプンを有機酸に変換できる発酵細菌と光合成細菌を組み合わせた混合培養系による水素生産システムの構築を目指して、以下に示すような基礎研究を行った。

最初に、デンプンから有機酸が生産できる細菌と有機酸を基質とした水素生産が可能な光合成細菌の共生系を獲得し、これを用いて微細藻類のバイオマスを原料とする水素生産について検討を行った。微生物共生系は、光合成細菌の探索源としてよく用いられるし尿処理場の活性汚泥からの単離を試みた。原料として淡水性から海産性まで様々な特性を持った微細藻類を対象とするためには、耐塩性を有する微生物共生系の方が有利であるので、希釈に海水を用いる処理場の汚泥を対象とした探索を行った。その結果、表 1 に示したように、可溶性デンプンを原料とする水素生産が可能な共生系 (BC1 と命名) が得られた。この共生系を構成する微生物は、16SrRNA 配列に基づく相同性検索から、通性嫌気性菌 *Vibrio fluvialis*、光合成細菌 *Rhodobium marinum* および遊走菌 *Proteus vulgaris* であることが明らかになった。これらの 3 株のうち *Proteus* を除いても水素生産能に大きな変化はなかったことから、単離した *V. fluvialis* (T-522 株と命名) と *R. marinum* (A-501 株と命名) からなる共生系を用いて再検討を行ったところ、T-522 株はデンプンを酢酸、オクタン酸、エタノール等に変換し、一方 A-501 株は、これらの有機物を基質として水素を生産することが明らかになった。A-501 株については、上記の T-522 株の発酵産物に含まれる 3 物質の標品の混合液を用いた場合には水素生産はほとんど認められなかった。したがって、T-522 株から A-501 株の水素生産を誘導するなんらかのシグナル物質が放出されていると予想されるが、詳細は明らかにしていない。この 2 株からなる共生系によるデンプンを原料とする水素生産系について、さらに培養条件の最適化を行い、その後緑藻を中心に種々の微細藻類を原料とする水素生産を試みた。代表的な例として、淡水性緑藻 *Chlamydomonas reinhardtii*

IAM C-238 を原料とした場合、デンプンの構成糖であるグルコース 1 モルあたり 6.2 モルの水素生産が確認され、また海産性緑藻 *Dunaliella tertiolecta* ATCC30929 では、2.6 モル生産できることが確認された<sup>4)</sup>。

### 3. 乳酸菌と光合成細菌の人工共生系による藻類バイオマスを原料とする水素生産

前述のように、し尿処理場から得た微生物共生系によって、微細藻類バイオマスを原料とする水素生産が可能になった。しかし、デンプンの水素への変換率は、最も高い *C. reinhardtii* を原料とした場合でも約 50% であり、また水素の生産速度も非常に小さかった。この原因のひとつは、T-522 株によるデンプンの酢酸やエタノール等への変換率が低いことや、これらの有機物が A-501 株の水素生産の基質として適していないことが考えられる。そこで、まず様々な有機酸を基質とした A-501 株の水素生産能に調べたところ、これまで報告されている他の光合成細菌の場合と同様に、乳酸やリンゴ酸が酢酸やエタノールよりも良好な水素生産基質になることが明らかとなった。本研究においては、共生系の探索を 1ヶ所のし尿処理場を対象にしてしか行っておらず、探索源を広げればさらにデンプンの水素への変換効率が高い共生系が得られる可能性もある。しかし、上記の検討から A-501 株の水素生産能はこれまでの報告されている高い生産能を有する光合成細菌に匹敵するものであったことから、本研究では次に、デンプンを A-501 株の良好な水素生産基質である乳酸へ直接変換することができる乳酸菌に着目し、両株の人工的な共生系を用いることによる水素への変換効率の向上を目指した。

種々の乳酸菌について文献レベルで基質特異性や乳酸発酵速度について調べたところ、*Lactobacillus amylovorus* ATCC33620 株がデンプンを高効率で乳酸に変換できると考えられたので、まず、本株による *C. reinhardtii* 及び *D. tertiolecta* の細胞を原料とする乳酸発酵について検討を行った。その結果、これらの藻細胞を予め凍結・融解処理した場合、それぞれの藻細胞に含有されるデンプンの 93% 及び 98% が乳酸へ変換された。さらに全く前処理しない生細胞についても、68% 及び 83% が乳酸へ変換されることが明らかになった。電子顕微鏡観察によると、本菌は藻細胞の内部まで侵入してデンプンを活発に分解していた。一方、比較的増殖が良く、高濃度のデンプン蓄積も可能な *Chlorella* 属についても数株の細胞を原料として *L. amylovorus* による発酵を試みたが、生細胞からの乳酸生産はほとんど認められず、凍結・融解や超音波破碎といった前処理を行った場合でも変換率の大きな改善はなかった。これは、*Chlorella* 属の緑藻については、*C. reinhardtii* や *D. tertiolecta* とは異なり、セルロースを主成分とする強固な細胞壁を持っているため、細胞内に蓄積したデンプンの分解が起こり難いことによるものと考えられる。したがって、藻細胞をバイオマス資源とする場合も、植物バイオマスと同様に、単にデンプン含量だけでなく、成分組成や細胞の構造も十分に考慮する必要がある。なお、藻類に含まれるセルロースについては、高等植物に比べて成分解析や生合成に関する基礎研究が遅れており、また資源化に関する試みも

表 1. し尿処理場から単離した微生物共生体 BC-1 による様々な有機物を基質とする水素生産

基質	水素生産 (mmol/l)	
	BC-1	<i>R. marinum</i> A501
デンプン	28.3	0
グルコース	19.9	21.6
マルトース	17.6	13.4
スクロース	18.3	12.3
酢酸	56.1	0.2
乳酸	82.9	37.3
リンゴ酸	26.4	23.5

BC-1 を構成する細菌: *Rhodobium marinum*, *Vibrio fluvialis*, *Proteus vulgaris*

ほとんど行われていないのが現状である。

上記のように、*L. amylovorus* を用いることによって藻細胞に含まれるデンプンを高効率で乳酸に変換できることが明らかになった。そこで次に、これまでに有機酸を水素へ変換できることが報告されている数種の光合成細菌について、藻類バイオマスの *L. amylovorus* による乳酸発酵液を原料とする水素生産を試みた。その結果、デンプンの水素への変換効率及び水素生産速度ともに A-501 株が最も優れていた (表 2)。なお、我々が単離した A-501 株は *R. marinum* ATCC35675 株と同等の乳酸発酵液からの水素生産能を示した。16SrRNA 配列の比較からもこれらは同じ株と推察される。

*L. amylovorus* による乳酸発酵過程と A-501 株による水素生産過程について様々な条件検討を行い、最終的にこれらを組み合わせた 2 段階培養によって、*D. tertiolecta* 由来のデンプン (グルコース 1 mol あたり) については、7.9 モル、すなわち理論値 12 モルの 66% に相当する水素生産が達成された<sup>5,6)</sup>。その後、さらにシステムの効率化を図るために、両株の混合培養、すなわち人工的な共生系による水素生産を試みた。デンプンの水素への変換率や水素生産速度に影響を与える因子として、*L. amylovorus* と *R. marinum* では培養過程での増殖速度が大きく異なるため、それぞれの初期細胞濃度とその比が重要であり、また藻細胞由来の光合成色素により培養液の光透過性が低くなるため、光照射や培養容器の形状、攪拌にも工夫が必要である。さらに、両株の至適溶存酸素濃度が異なるため、その制御も重要である。これらの条件について慎重に最適化を行なった結果、*D. tertiolecta* のデンプンについては、61% が水素へ変換された (図 1)<sup>7,8)</sup>。この人工共生系では、本来乳酸菌の培養に必須の酵母エキス<sup>9)</sup>の添加が不要であったことから、藻細胞中に代替できる成分が存在すると考えられる。また、この系による水素生産では、デンプンから変換された乳酸は速やかに光合成細菌による水素生産によって消費されるため、培養過程での蓄積は起こらず、培養期間中に pH を調節する必要がない。さらに、*D. tertiolecta* バイオマスに含まれるデンプンでは、同濃度の可溶性デンプンに比べて水素への変換効率や生産速度が有意に上昇することも明らかになった。光合成細菌において水素生産を担うニトロゲナーゼの活性が、前者の方が早く上昇し、また長期間維持されることを確認していることから、バイオマス中に本酵素の活性化物質あるいは誘導物質が存在すると予想される。

表 2. 様々な光合成細菌による藻類バイオマスの乳酸発酵産物を基質とする水素生産

光合成細菌	水素生産取率 (%)	増殖 (g-bac.chl./)
<i>Rhodobacter sphaeroides</i> RV	41	0.65
<i>Rhodobacter capsulata</i> ATCC11166	21	0.60
<i>Rhodospirillum rubrum</i> ATCC11170	32	0.56
<i>Rhodovulum sulfidophilus</i> ATCC35886	0	0.29
<i>Rhodobium marinum</i> ATCC35675 ( <i>Rhodobium marinum</i> A501)	71	0.43

以上の検討から、乳酸菌と光合成細菌の人工共生系を用いることによって、微細藻類バイオマスを原料として高い収率で水素を生産させることが可能となった。さらに藻類バイオマスを原料とすることによって、上記のように生産コストを下げる効果や生産効率を上げる効果が認められた。

そこで、さらに本システムにおける水素生産効率を上げるために、連続培養の導入を試みた。人工共生系では乳酸菌はほとんど増殖せず、一方光合成細菌は乳酸を消費し、増殖する。したがって、本システムで連続培養による水素生産を行なうためには、光合成細菌において水素生産を担うニトロゲナーゼ活性が最も高い増殖期の細胞を維持できるように基質供給と菌の希釈の速度を設定し、一方乳酸菌は固定化などにより系内に留めなければならぬ。また、連続培養においては、最適な光照射条件や装置の形状、攪拌条件等がバッチ培養とは異なることから、現在、これらの諸条件の最適化を進めている。これまでに、2 週間まで安定に水素生産能が維持できることを確認している (結果未発表)。

現在水素は、石炭のガス化や天然ガスの改質などの方法により安価に製造されている。一方、光合成細菌による水素生産については、株の育種・改良によって水素生産能力を最大限に引き出せたとしても、培養コストを下げて真にエネルギー問題解決に貢献できる規模での実用化を実現するためには、多くの解決すべき課題が残されている。“バイオ水素”を化石燃料消費に依存した方法で生産される水素と明確に区分して相応の付加価値を与えるような施策がなければ、現状では先進国における実用化への展開は容易ではない。それでも将来的に化石燃料に替わる有力な新エネルギー源が見当たらない現状では、バイオ水素も今後生産の実用化を目指さなければならぬ代替エネルギーの一つであることに間違いはなく、現在も国内外で活発な研究が行われているところである。

一方、本研究で水素生産の原料として用いた藻類バイオマスについては、食料生産と競合しない余剰バイオマス、いわゆる“第 2 世代”のバイオマス資源として期待

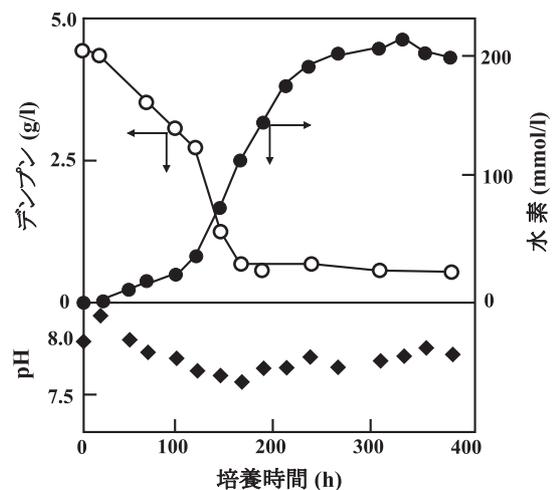


図 1. 乳酸菌 *L. amylovorus* と光合成細菌 *R. marinum* の人工共生系による藻類バイオマスを原料とする水素生産

されている。藻類バイオマスの資源化については、1970年代のオイルショックを契機としてエネルギー生産原料としての研究が活発になり、二酸化炭素排出削減に対する国際的な対応が求められる中、ここ数年、バイオ燃料の生産原料としての利用について、新たな取り組みも始められるようになった。増殖の速い微細藻類については、年間の単位面積当たりのバイオマス生産量が植物の10倍から50倍に及ぶという試算もあり<sup>9)</sup>、大量培養技術の開発も進められていることから、今後の実用的な展開が期待されている。しかし、なぜこれまで人類は藻類バイオマスを植物のように積極的に燃料や食料に利用しなかったのか、という単純な疑問も持ち上がる。本来物質生産におけるバイオテクノロジーとは、人類が長い年月をかけて培い、利用して来た生物生産技術について、反応プロセスの改善や原料・材料となる生物の改良によって効率化することを意味する。この点から考えると、既に食料としての生産技術や収穫・回収システムが整っている穀類等の植物バイオマスに比べて、藻類バイオマスについてはあまりにも情報が少ない。健康食品原料のように高い付加価値が期待できない、バイオ燃料の生産原料としてのデンプンを生産する場合、藻類バイオマスの大規模な培養と回収に必要なコストはどこまで下げることができるのであろうか。例えば、ここで紹介した藻類バイオマスを原料とする水素生産については、容積効率の問題は別にあるものの、1%前後の比較的低濃度のデンプンで反応が進行するが、それでも原料となる藻細胞は、連続培養で最も高い増殖能が得られる培養液の場合、回収後に50倍程度に濃縮する必要がある。*Dunaliella*のような単細胞藻類の場合、濾過や沈降による濃縮が難しいため、大規模な培養系では細胞濃縮に必要なコストは相当に大きくなると予想される。したがって、気候的に藻類の培養に適し、地価や人件費が安い熱帯、亜熱帯地域での運用は必須の条件としても、実用化に向けた課題は“バイオ水素”生産と同様に多いように思われる。先に紹介した筑波大学等で進められている藻類に関する様々な基礎研究に基づいた技術展開についても今後注目したい。

#### 4. 食品工場排水を原料とする水素生産と 実用化に向けた新たな展開

以上、藻類バイオマスに含まれるデンプンを原料とした発酵細菌と光合成細菌の自然共生系及び人工共生系による水素生産システムについて紹介し、また今後の課題を取り上げた。コスト面については、今後解決に向けた研究の展開を期待したいところであるが、“バイオ水素”やデンプンに対する経済的な付加価値が変わらない現状では、大規模な実用化は難しいと言わざるを得ない。

そこで我々は、水素生産系に別な付加価値を求めることによって、総合的な観点からの実用化を図る基礎検討として、“バイオ水素”生産の原料を食品工場等のデンプン高含有排水に転換し、排水処理過程で水素を生産する新たなシステムについて検討を始めた。例えば、米粉工場や清酒工場の排水には、コメの洗浄、整粒あるいは粉碎過程で、ヌカやコメの粉末、破砕片が高濃度含まれる。こういった排水の主成分はデンプンであり、また窒

素やリン、ビタミンなども豊富に含まれることから、高BOD排水であり、また富栄養化の原因ともなる。したがって、通常は活性汚泥等による処理を行なった後、再利用あるいは環境中に放出されることになるが、デンプンを始め処理の対象となる物質は微生物の良好な栄養成分であり、再資源化が可能である。しかし、デンプン濃度は高いものでも1%前後であり、排水としては難物であるが、再資源化として、例えばエタノールへ変換するにはこの濃度では薄すぎる。排水を濃縮してから再資源化しているのはコスト的に見合わないが、我々の微生物共生系用いた水素生産システムであれば、1%のデンプンは原料としてほぼ至適濃度にあたる。もちろん、生産される水素については精製する必要があるが、同時に発生するのは二酸化炭素であり、技術的には低コストで両者を分離することが可能であろう。周知のように光合成細菌自体、排水処理に用いられている実績があり<sup>10,11)</sup>、また富栄養化の原因となる窒素やリンも乳酸菌や光合成細菌によって良好な栄養成分として回収されるはずであり、理論的にはマスバランスを考慮した物質添加や培養条件の制御を行なえば、水素を生産しながら高度排水処理を行なうことができる。さらに、光合成細菌は、抗酸化作用や抗炎症作用、老化防止作用を持つと言われるコエンザイムQ10の生産菌としても知られ<sup>12)</sup>、餌料等としての商品価値もある<sup>10)</sup>。我が国の食品工場については衛生管理が行き届いており、排水自体の細菌学的な清浄度は非常に高いことから、光合成細菌と、健康食品の代名詞的存在である乳酸菌との混合培養で得られた菌体バイオマスには、健康食品は無理にしても、最近のペットブームに便乗したアンチエイジング・ペットフードの原料といった新たな付加価値が期待できるのではなかろうか(図2)。

実際には、滋賀県にある米粉工場のご好意により排水を使わせていただき、この研究に着手した。排水の成分は表3に示した通りであり、これを滅菌せずにそのまま原料として、*L. amylovorus*と*R. marinum*の混合培養を行なった。その結果、藻類バイオマスを原料とした場合に匹敵する水素生産が認められ、さらに全く培地成分を添加しない場合も、最適条件の約50%の水素生産速

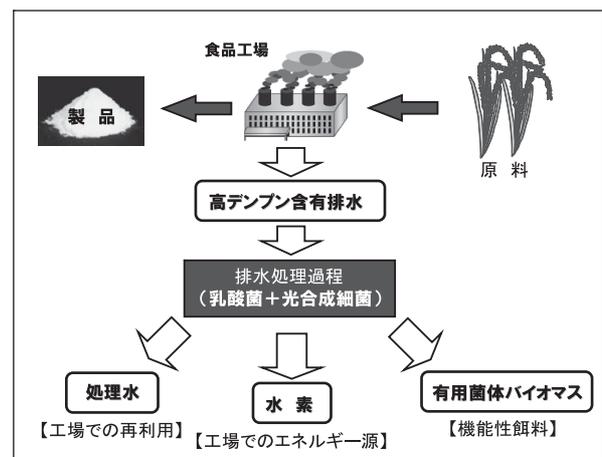


図2. 人工共生系による米粉工場排水の処理過程での水素及び有用菌体バイオマスの生産

表3. 人工共生系による米粉工場排水の処理

処理対象となる排水成分	処理前 (mg/l)	処理後 (mg/l)	処理率 (%)
BOD	17,600	1,330	92
TOC	7,600	775	90
Total N	280	28	90
Total P	146	90	38

度が得られた。排水処理については、BOD および全窒素量は10%以下に低下した(表3)。一方、リンについては38%しか減少しなかった。そこで、佐々木らによりリンの処理能が高いことが確認されている *Rhodobacter sphaeroides* NR-3 株<sup>13)</sup> を *R. marinum* に代えて使用したところ、同じ条件で排水中のリンを71%まで減少させることができた。本株については、水素生産条件におけるコエンザイム Q10 の生産能や増殖能も *R. marinum* より優れていることから、水素生産過程での排水処理能及び菌体バイオマスの付加価値の向上が可能となる(未発表)。

本系については、窒素源としてアンモニアを用いれば、光合成細菌における水素生産を担うニトロゲナーゼ活性が阻害されて水素生産能が低下し、その分増殖が促進される。コメを原料とする排水の場合、その成分の C/N 比は光合成細菌の C/N 比よりも大きくなるため、良好に光合成細菌を機能させるためには、窒素源が不足となる。仮に菌体バイオマス(乳酸菌+光合成細菌)の付加価値が非常に高ければ、これをアンモニアで補うことによってあえて水素生産を止めて、全ての成分が菌体へ集約するように制御することも可能と考えられる。この場合、“バイオ水素”生産という当初の目的は達成できなくなるが、廃バイオマスを原料に付加価値の高い有用バイオマスを生産するシステム、即ちバイオマスをエサとしてバイオマスを育てるという最も単純化された生物変換プロセスが成立する。

今回は米粉工場の排水を取り上げたが、酒造工場の排水への適用が可能であることも確認しており、また小麦や他の穀類の加工工場の排水、水質汚染が問題となっているうどんのゆで汁等、幅広い応用が期待できる。今後は、*R. sphaeroides* NR-3 株を用いて、水素生産と同時に、排水処理と有用菌体バイオマス生産に主眼を置いた培養系についても詳細な検討を行いたい。

## 5. おわりに

ここでは、我々が取り組んできた光合成生物バイオマスの有効利用技術開発に向けた基礎研究を紹介してきたが、最後に今後計画している東南アジアでの技術展開について紹介したい。前述のように、光合成細菌による水素生産や藻類バイオマスの生産については、最終的には太陽光を利用した大規模な培養装置や屋外培養系を構築することが重要であり、バイオ燃料の生産と同様に、東南アジア等への技術展開が必須となろう。そこで我々は、藻類バイオマス生産については、すでにタイの国立研究機関との共同研究により、藻類の培養に適した気候を利

用したパイロットプラントレベルでのバイオマス生産を検討している。しかし同時に、タイの主要産業は食品加工であることから、豊富な農作物を原料に穀粉製造工場やデンプン、果汁の搾取工場が数多くあり、コメと並んでタイの主要作物であるキャッサバでは、100万 ha の栽培面積から年間2,000万トンの収穫があり、1,000万トンのデンプンが製造されている。これらの工場からは莫大な量の排水が放出され、周辺地域の水質汚染は年々深刻化しており、早急な対策が必要とされている。したがって、こういった“豊富な廃バイオマス”を原料とする水素生産は、タイでも同様に排水処理との連動が可能である。実際に我々は、キャッサバやサゴヤシ由来のデンプンからも、コメデンプン同様に人工共生系による高効率での水素生産が可能であることを確かめている(未発表)。将来的にこれらのデンプンがバイオ燃料生産の原料に転換されたとしても、排水は同様に発生することから、バイオ燃料生産プラントでの運用も可能である。

もちろんこういった技術は、“エネルギー問題解決に貢献できる規模”での応用はできないが、処理した排水を工場内で再利用し、生産された水素で工場の電力消費を補えば、工場単位での完結型リサイクルも可能となる。また、“廃バイオマス”をエサに有用バイオマスを育てる単純なプロセスであることから、東南アジア等への技術移転も比較的容易である。今後は、本技術の“小さな実用化”による、エネルギー問題や温暖化問題に対する“小さな貢献”へ向けて、さらに検討を進めたい。

## 謝 辞

本研究において、貴重な実験材料の提供と有益なご助言を賜りました広島国際学院大学工学部教授・佐々木健先生に厚く御礼申し上げます。

## 文 献

- 1) Nishio, N., and Y. Nakashimada. 2007. Recent development of anaerobic digestion processes for energy recovery from wastes. *J. Biosci. Bioeng.* 103: 105–112.
- 2) Miyake, J., T. Matsunaga, and A.S. Pietro (ed.). 2001. *BIO-HYDROGEN II*. Pergamon.
- 3) Miyake, J., Y. Igarashi, and M. Rogner (ed.). 2004. *BIOHYDROGEN III*. Elsevier.
- 4) Ike, A., C. Saimura, K. Hirata, and K. Miyamoto. 1996. Environmentally friendly production of H<sub>2</sub> incorporating microalgal CO<sub>2</sub> fixation. *J. Marine Biotech.* 4: 47–51.
- 5) Ike, A., N. Toda, K. Hirata, and K. Miyamoto. 1997. Hydrogen photoproduction from CO<sub>2</sub>-fixing microalgal biomass: application of lactic acid fermentation by *Lactobacillus amylovorus*. *J. Ferment. Bioeng.* 84: 428–433.
- 6) Ike, A., N. Toda, N. Tsuji, K. Hirata, and K. Miyamoto. 1997. Hydrogen photoproduction from CO<sub>2</sub>-fixing microalgal biomass: application of halotolerant photosynthetic bacteria. *J. Ferment. Bioeng.* 84: 606–609.
- 7) Kawaguchi, H., K. Hashimoto, K. Hirata, and K. Miyamoto. 2001. H<sub>2</sub> production from algal biomass by a mixed culture of *Rhodobium marinum* A-501 and *Lactobacillus amylovorus*. 91: 277–282.
- 8) Kawaguchi, H., H. Nagase, K. Hashimoto, K. Kimura, M. Doi, K. Hirata, and K. Miyamoto. 2002. Effect of algal extract on H<sub>2</sub> production by a photosynthetic bacterium *Rhodobium marinum* A-501: analysis of stimulating effect using a kinetic

- model. 94: 62–69.
- 9) 渡辺 信 <[http://www.sakura.cc.tsukuba.ac.jp/~eeeforum/1st3EF/1st3EF\\_watanabe.pdf](http://www.sakura.cc.tsukuba.ac.jp/~eeeforum/1st3EF/1st3EF_watanabe.pdf)> 他
  - 10) 北村 博, 森田重廣, 山下仁平編. 1984. 学会出版センター.
  - 11) 佐々木健, 竹野健次, 渡辺昌規. 2001. 光合成細菌による環境修復と有用物質生産. *バイオサイエンスとインダストリー*. 56: 635–638.
  - 12) Sasaki, K., M. Watanabe, Y. Suda, A. Ishizuka, and N. Noparatnaraporn. 2005. Application of photosynthetic bacteria for medical field. *J. Biosci. Bioeng.* 100: 481–488.
  - 13) Takeno, K., Y. Yamaoka, and K. Sasaki. 2005. Treatment of oil-containing sewage wastewater using immobilized photosynthetic bacteria. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 21: 1385–1391.