

## 光合成細菌を用いた下水汚泥からの水素生産

Hydrogen production using Sewage sludge by photosynthetic bacteria

河 杉 忠 昭  
Tadaaki kawasugi

(株)クボタ 基盤技術研究所 茨城県竜ヶ崎市向陽台5-6

### 1. はじめに

水素は、多くの工業分野で基本原料として広く利用されており、地球環境保全の視点で見れば、CO<sub>2</sub>を生じることのないクリーンな水素生産に関する研究開発が広く進められている。

一方、微生物を利用した水素の生産に関する試みも光合成細菌や藻類を用いた基礎的研究が進められているが、実用化には至っていない。

しかしながら、光合成微生物は基本的には太陽光エネルギーをDriving forceとして有機物を水素に変換することが可能であることから、環境浄化の対象である有機性廃水や廃棄物を基質として水素を生産することが出来れば環境浄化のための負荷を低減することとともに、工業原料としての水素製造のために消費される化石資源消費をも低減することが可能となる。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託研究“環境調和型水素製造技術研究開発”として現在進行中のものであり、以下にその一部である光合成細菌を用いた下水汚泥からの水素製造技術開発の概要を述べる。

### 2. 有機資源としての下水汚泥

#### 2.1 汚泥量と有機物量

我国の下水道普及率は50%を越え、それにとまって発生する汚泥量も年々増加し、平成5年度の年間汚泥発生率は3億m<sup>3</sup>に達している。<sup>1)</sup> こうした汚泥(下水汚泥)は水分濃度99~96%濃度の液状スラリーであるが、減容のため、脱水、乾燥、焼却処理を施した後、埋立処分に付されているが、最近では、熔融技術も導入され、建設資材への再生利用なども行われている。

平成5年度に発生した下水汚泥量304百万m<sup>3</sup>中の固形分(Dry solid)濃度を平均2%とすれば、汚泥固形分量は600万ton/年となる。

図-1<sup>2)</sup>は、東京都に於ける汚泥量(固形分換算したもの)と、汚泥中の有機物量と無機物量を経年変化で示したものである。

図-1に示すように汚泥固形分中にはおよそ80%の有機物が含まれており、汚泥発生量(固形分量)が600万tonであるとすれば、およそ年間480万tonの有機物が有機資源の対象とすることが出来る。

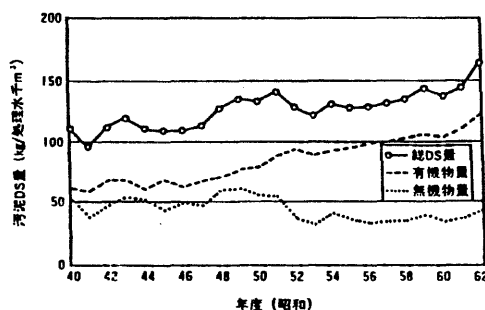


図-1. 東京都区部における汚泥発生量<sup>2)</sup>

## 2. 2 下水汚泥の調質

汚泥中や汚泥付着物の物性及び可溶性について、薬剤添加など化学的調質方法が数多く研究されているが、これらの多くはスラリー状で発生する汚泥を減容するための脱水性改善を目的としたもので、有機物の溶出（可溶性）についてみれば30%程度である。

下水汚泥中の有機物の溶出率を高める方法の1つに加熱、加圧による物理的方法がある。熱処理法と称されるこの方法は、本来、汚泥に由来するタンパク物質を熱変性し脱水性を改善する目的で研究されたものであるが、ここでは、汚泥からの生物資化性有機物の可溶性を目的として検討した。<sup>3)</sup>

図-2に汚泥を50~200℃に加熱したときの溶出液（熱処理分離液）の性状を例示する。

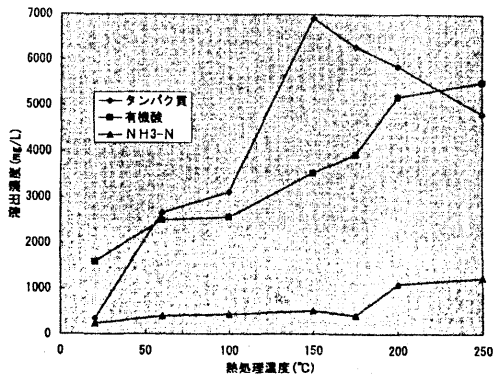


図-2. 熱処理温度とタンパク質、有機酸及びNH<sub>3</sub>-Nの溶出

表-1. 熱処理分離液の有機酸濃度

熱処理温度	(mg/L)					
	酢酸	プロピオン酸	iso-酪酸	n-酪酸	iso-吉草酸	n-吉草酸
原汚泥ろ液	599	379	68	221	71	97
150℃	853	391	63	189	97	128
175℃	1,016	347	49	178	68	169
200℃	1,425	400	52	176	102	227

この結果に見られるように全糖の溶出が総じて低い、有機酸濃度は反応温度の上昇とともに濃度が高くなっている。溶出液中のアンモニア濃度も同様の傾向を示した。表-1は各反応条件下の溶出液中の各種有機酸濃度を示したものである。表-1に示すようにプロピオン酸、酪酸は熱処理反応温度を高くしても溶出に差

異はないが、酢酸は反応温度に比例して、溶出濃度が上昇している。

これらの結果に示すように原汚泥に対し、熱処理による調質を行うことにより、汚泥中の生物資化性有機物の溶出の効率を向上させることが出来る。

熱処理による調質は、汚泥に対し150~170℃の加熱を行うため、分離液を基質として特定微生物を用いた反応に供する場合の殺菌の機能も備えることになるため、今後、廃棄物等を対象とした生物反応を用いた資源回収システム等には検討に供することの出来る調質方法として活用できると思われる。

## 3. 微生物を用いた水素生産

### 3. 1 水素を生産する微生物

太陽光エネルギーをDriving forceとして水を直接分解、あるいは、有機物を分解して水素を生産する機能を有する光合成微生物としては、藍藻と光合成細菌がよく知られている。

このうち藍藻は光エネルギーを受けて水を電子供与体としてH<sub>2</sub>とO<sub>2</sub>を生産する機能を有していることから、生物反応を利用した水素生産を検討する上では今後も研究の対象になると思われるが、反応速度が極めて低いため、現状では生産システムに取り入れることは困難と考えられ、一方、光合成細菌は、有機物（有機酸）を水素とCO<sub>2</sub>に分解する機能を有し、かつ藍藻と比較して反応速度が大きいことから機能を考慮すれば太陽光エネルギーの導入方法を含む培養方法等に多くの課題があるとしても、菌の改良・改質をも視野に入れて、今後も研究が進め

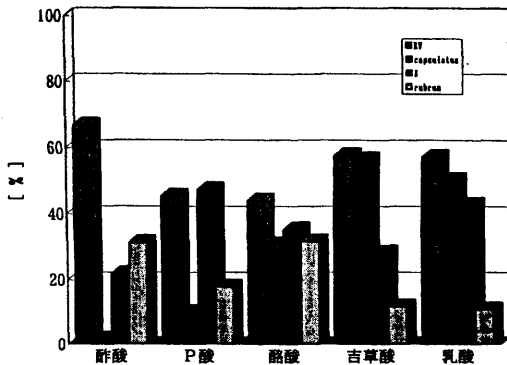
られるものと思われる。

### 3. 2 光合成細菌の基質特性

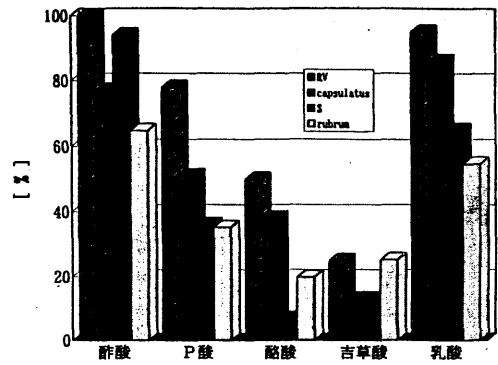
光合成細菌は種々の有機酸を電子供与体として水素生産をおこなうが、それぞれの菌株が供与される有機酸により水素生産量に差異が生じる。4菌株の光合成細菌に酢酸、プロピオン酸、酪酸、吉草酸、乳酸をそれぞれ基質とした場合の水素生産量を比較した事例を以下に示す。<sup>5)</sup> 供試菌株は次の4種である。

- Rhodobacter sphaeroides, RV
- Rhodobacter Sphaeroides, S
- Rhodobacter capaelatus
- Rhodospirillum rubrum, DSM467

比較実験は30℃に保たれた培養槽表面で約10000lxの照度が与えられる条件下で行った。実験に供した5種類の有機酸はすべて同mol濃度(35mM)の添加としている。しかし、理論的にはそれぞれの有機酸1molから生成する水素量は異なるので、供与した有機酸は、すべて水素とCO<sub>2</sub>に変換すると仮定すれば、1molの酢酸では4molの水素が生産され、乳酸1molからは水素6molが生成されることになるので、実際に生成した水素量を理論値で除した値を変換効率として表示し比較した。この結果を図-3に示す。このとき消費された有機酸について資化率として表示し、図-4に示した。



図・3 光合成細菌の基質特性(2)  
[有機酸変換効率]



図・4 光合成細菌の基質特性(4)  
[有機酸消費率]

これらの結果からみれば酢酸、プロピオン酸を主基質とした場合の水素生産量はRV株がすぐれていることから下水汚泥など生活系廃棄物を原料とした水素生産システムでは現時点ではRV株が適していると思われる。

この段階での評価では、供試菌株に対応する至適有機酸濃度には配慮せず、初期の基質濃度設定は酢酸を基準としているので、各菌株に対する基質特異性を正しく評価するためには至適濃度の他、その他の微量物質の有無などについての検討が必要である。

### 3. 3 アンモニアによる阻害

アンモニアは光合成細菌の水素生成反応を阻害する物質として知られている。下水汚泥等生活系有機性廃棄物にはアンモニア(NH<sub>3</sub>-N)が多量に含まれており、水素生産システムを構築するには、この点に配慮する必要がある。

図-5は光合成細菌に対するNH<sub>3</sub>-Nによる水素生産阻害の影響を示したものである。

実験に供試したいずれの光合成細菌もアンモニア濃度4~5mMで水素生成は阻害されている。下水汚泥を熱処理したときに得られる脱離液中のアンモニア濃度は約20~30mMであるため実用に供する場合は調質段階でアンモニア除去を考慮しておく必要がある。

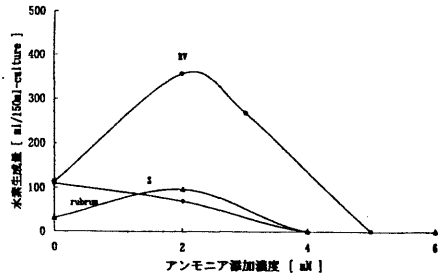


図-5 光合成細菌の水素生成におけるアンモニア濃度の影響

### 3. 4 光照射条件

光合成細菌RV株を用いた光照射強度の異なる条件下での水素生産量の経時変化例を図-6<sup>5)</sup>に示す。

RV株では光照射量を上げるに従って水素生産速度も大きくなるが、10000lxを越えるとエネルギーのオーバーフローにより水素生産機能が失活することを示しており、供試菌株やその培養条件と併せて至適照射条件の検討が実用化への大きな課題である。

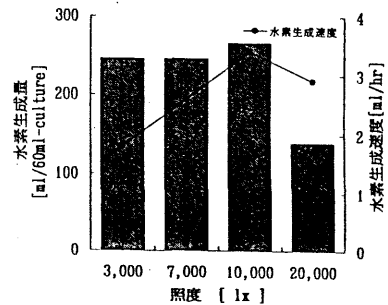


図-6 RV株の照射別水素生成能の比較

## 4. 下水汚泥を用いた光合成細菌による水素生産

### 4. 1 水素生産システム

光合成細菌を用いた水素生産システムは供試菌株、供試原料、生産場所の立地条件等によっても異なるが、下水汚泥を用いた場合、図-7に示すシステムフローをイメージしている。すなわち、汚泥は調質（可溶化、アンモニア除去）の後、光エネルギーを導入した培養槽によって、水素と二酸化炭素を生産する。培養槽からの流出水は固液分離され、分離液は水処理工程へ送る。ここで回収された菌体等は副産物として別途利用する。このシステムの工程に供される個々の諸元の確立をめざして現在検討中であるが、実用化に近づくためには優れた特性を有する菌株の研究開発も含めた検討が必要である。

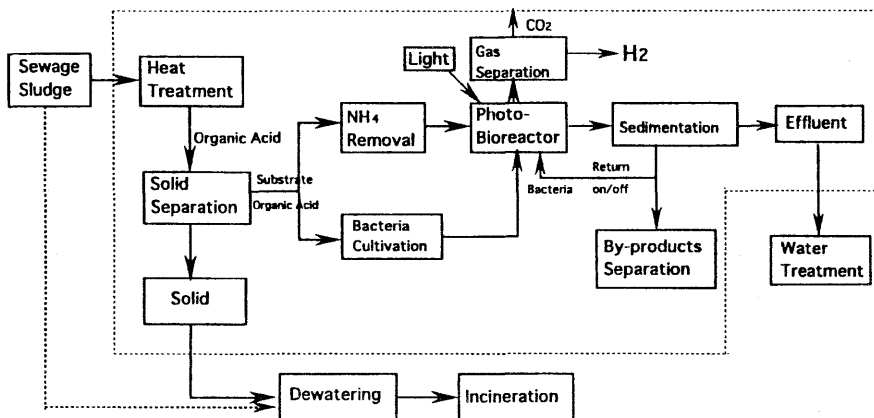


図-7 下水汚泥を用いた光合成細菌による水素生産の総合システムフローシート

#### 4. 2 リアクター

光エネルギー導入のため、受光面を大きくすることの出来る水深の浅い平盤タイプが一般的ではあるが、設置する土地の有効利用を考慮した内部照射型も考えられる。写真-1には、内部照射リアクターのモデルを示す。

これらはスケールアップした場合、光エネルギーをいかに円滑かつ効率よく導入できるかがポイントであり、培養条件と併せた検討が課題である。

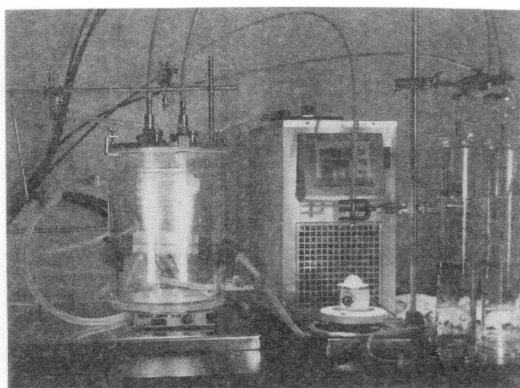


写真-1 内部照射型リアクター

#### 4. 3 光合成細菌RV株を用いたH<sub>2</sub>生産

図-8に光合成細菌RV株を用い、下水汚泥を150℃加熱処理して得た熱処理脱離液を基質とした場合の水素生産成績を示す。

ここでは、基礎実験に供試した人工培地（模擬廃水）と対比しているが、熱処理調質液によって得た基質の成績との差はないことから、下水汚泥の熱処理調質液はRV株を用いたときの培地として利用できることが示唆された。

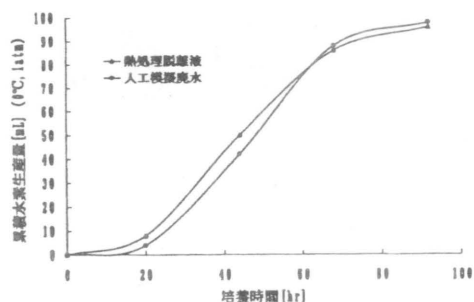


図-8 *Rb. sphaeroides* RV株による水素生産

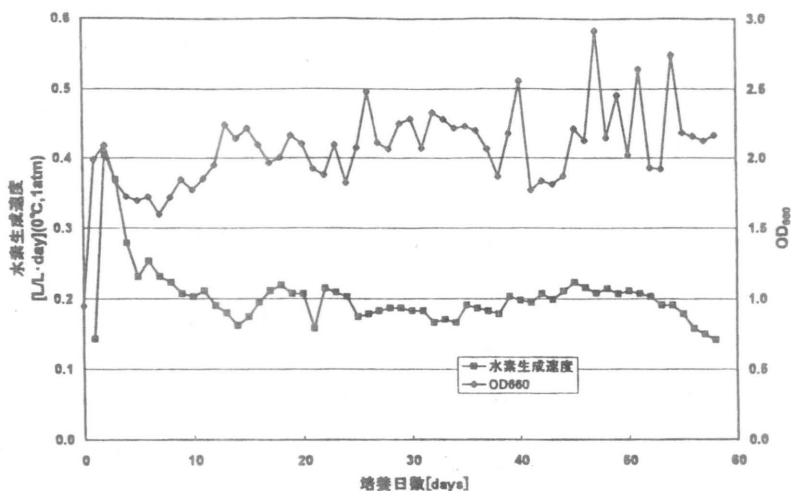


図-9. 模擬廃水を用いた連続水素生産

図-9は模擬廃水による連続生産テストの成績であるが、長期にわたって安定した成績が得られていることから、現在、熱処理調質液による連続生産テストが進行中である。単純にこれまでの成績から下水汚泥（濃度3%）1m<sup>3</sup>あたりの水素の生産量を算出すれば2.25m<sup>3</sup>の値が得られる。この値を年間に発生する3億m<sup>3</sup>の汚泥（固形分濃度2%）に拡げると4億m<sup>3</sup>の水素が得られることになる。しかし、これらの連続生産テストに供しているリアクター規模は有効容量10Lと小さく、実用化のためにはスケールアップした場合の光エネルギー導入方法なども含め未だ多くの課題を有している。

#### おわりに

光合成微生物を利用して水素を生産する試みはこれまで基礎的研究レベルでは試みられてきたが、光合成細菌を利用し、有機系廃棄物、廃水を基質として水素を生産する試みは、これまでの基礎研究の上でようやく始まろうとしている段階である。我国の下水汚泥だけについてみても年間およそ480万tonの有機物が発生している。

これらの汚泥を水素エネルギーに変換することが出来れば、およそ4億m<sup>3</sup>/年の水素が製造できると推定され、地球環境保全の見地からも実現に向けての研究開発が期待される。

#### 参 考 文 献

1. 下水道統計要覧（平成5年度版）（1995）（社）日本下水道協会
2. 船越泰司ら；第27回下水道研究発表会講演集 p447～449（1990）
3. 平成3年度地球環境産業技術研究開発事業 新エネルギー・産業技術総合開発機構委託 環境調和型水素製造技術研究開発 成果報告書（財）地球環境産業技術研究機構（1992）
4. （財）バイオインダストリー協会；農林産廃棄物及び有機性廃水からの新燃料油生産システムに関する調査 p187（1989）
5. 平成3年度地球環境産業技術研究開発事業 新エネルギー・産業技術総合開発機構委託 環境調和型水素製造技術研究開発 成果報告書（財）地球環境産業技術研究機構 p233～239（1995）