

「光合成のエネルギー利用と環境応用」, 三宅ら監修, CMC 出版, p.112-117, 2014

## 4 廃糖蜜や海藻を発酵基質に使用したバイオ水素生産

谷生重晴\*

### 4.1 はじめに

サトウキビを原料にした蔗糖の生産では、結晶化できない糖分が液体残渣として発生する。廃糖蜜または糖蜜と呼ぶ液体残渣は、沖縄県全体では毎年2万数千トン発生しており、33%前後のスクロース（蔗糖）と合わせて9%程度のグルコースとフラクトースを含んでいる。そのため、古くから本土に運ばれエタノールなど発酵工業の原料として利用されてきた。しかし、多くは沖縄本島以外の島嶼部で発生するため輸送コストが高くなり、商品価値は低い。近年、温暖化防止のために、再生可能エネルギーの重要性が認識され、自動車燃料としてのバイオエタノール使用が世界中で盛んになったことから、宮古島ではE3用エタノールの製造原料として使用され、バイオマスエネルギー源として注目されるようになった。

糖蜜は発酵水素生産の原料としても非常に良質であり、筆者は安定した高速水素発酵を目指して長年研究を続けてきたが、2004年に、多くの糖類、糖類似物およびデンプンから非常に高速で水素を発生するバクテリア *Clostridium* 属 HN001株を発見<sup>1)</sup>、近年の燃料電池の進歩により、このバクテリアを使用すれば離島などでは現在の発生速度で十分に経済性を持つ地産地消型の電力源になることが分かった。また、褐藻類の主成分の一つであるマンニトール資化バクテリアも発見しており、今後、日本のエネルギー需要の大きな部分を賄うに足る資源として、コンブなど大型褐藻が有望な栽培バイオマスになることが栽培実験で判明した。

### 4.2 沖縄県の糖蜜発生量と水素生産可能量

沖縄県ではサトウキビ生産が年々少なくなっているが、平成24/25年期は前期より栽培面積がわずかではあるが増えて約1万3千ヘクタールで栽培され、1ヘクタールあたり平均収穫量は52トン、生産量は約67万5千トンであった<sup>2)</sup>。製糖方法には、スクロースだけでなくグルコースとフラクトースも一緒に結晶化する含蜜製糖法とスクロースだけを結晶化する分蜜製糖法があり、生産されたサトウキビは、含蜜糖の原料として5万4千トン、分蜜糖の原料として62万1千トンが使用された。糖蜜は分蜜製糖法において発生し、原料処理量の約12%が粗糖に、約3%が糖蜜になる。そのため、表1に示すように、沖縄県全体では平成24年12月から平成25年3月までの24/25年期に1万9千367トンの糖蜜が発生した。ただ、糖蜜は分蜜製糖工場のある島でしか発生しないので、沖縄本島、伊是名島、久米島、南大東島、北大東島、宮古島、石垣島に限られる。南大東島を例とすれば、粗糖生産量6,406トン、糖蜜発生量2,094トンである。

筆者の研究室で発見された高速で発酵水素発生するバクテリアの *Clostridium* 属 HN001株は、グルコースから $2.5 \text{ mol-H}_2/\text{mol-glucose}$  の収率で水素を発生する<sup>3,4)</sup> ので、いま、表1の(4)行に示した推定糖濃度の糖をグルコースに換算して水素生産可能量を計算すると、

---

\* Shigeharu Tanisho バイオ水素(株)；横浜国立大学名誉教授

## 第9章 嫌気性微生物による水素生産とエネルギー変換

表1 糖蜜から生産可能な水素量と燃料電池で発電可能な電力量およびCO<sub>2</sub>排出削減量  
(平成24/25年度の沖縄県製糖実績と平成21年度の電力需要から)

	沖縄本島	伊是名島	久米島	南大東島	北大東島	宮古島 <sup>7)</sup>	石垣島	合計
(1) 甘蔗糖生産量 [ton]	14,977	1,248	4,482	6,406	1,757	38,339	8,434	75,643
(2) 糖蜜産出量 [ton]	4,609	386	1,256	2,094	567	8,332	2,123	19,367
(3) 平均糖度 <sup>1)</sup> [%]	34.5	33.0	31.8	36.8	35.5	32.6	25.6	32.9
(4) 推定糖濃度 <sup>2)</sup> [%]	43.5	42.0	40.8	45.8	44.5	41.6	34.6	41.9
(5) 水素生産可能量 <sup>3)</sup> [Nm <sup>3</sup> ]	623,034	50,437	159,428	298,372	78,498	1,077,482	228,529	2,524,596
(6) 発電可能電力量 <sup>4)</sup> [MWh]	935	76	239	448	118	1,616	343	3,787
(7) 各島電力消費量 <sup>5)</sup> [MWh]	—	8,032	49,831	8,873	4,381	255,130	265,489	591,736
(8) 電力代替可能率 [%]	—	0.9	0.5	5.0	2.7	0.6	0.1	0.5
(9) 代替可能日数 [日]	—	3.4	1.8	18.4	9.8	2.3	0.5	1.8
(10) CO <sub>2</sub> 排出削減量 <sup>6)</sup> [ton]	841	68	215	403	106	1,455	309	3,408

- ① 糖度はショ糖（スクロース）の濃度で、製糖期の平均値が平均糖度。  
 ② 糖蜜にはグルコースとフラクトースが平均9%含まれているので、各社の平均糖度に9.0を加えた量を発酵可能糖濃度とした。  
 ③ グルコース換算で計算した。水素収率2.5 mol/mol-glucose。  
 ④ 1 Nm<sup>3</sup>の水素で1.5 kWhの電力が得られるとした。  
 ⑤ 沖縄県商工労働部産業政策課が発酵した「沖縄県エネルギービジョン」p.125から抜粋。平成21年度の消費量。  
 ⑥ ディーゼル発電に対するCO<sub>2</sub>削減量を0.90 kg-CO<sub>2</sub>/kWhとする。  
 ⑦ 宮古島の甘蔗糖、糖蜜の生産量は宮古島と伊良部島の合計である。

沖縄県全島の水素生産可能量

$$= 19,367 * 0.419 / 0.18 * 2.5 * 22.4 = 2,524,596 \text{ Nm}^3$$

南大東島の水素生産可能量

$$= 2,094 * 0.458 / 0.18 * 2.5 * 22.4 = 298,372 \text{ Nm}^3$$

となり、沖縄県全体では約252万Nm<sup>3</sup>の、南大東島では約30万Nm<sup>3</sup>のバイオ水素を糖蜜から生産することが出来る。

### 4.3 沖縄県の離島における電力消費量と糖蜜からの水素発電可能量

トヨタ、ホンダ、東京ガスなど自動車メーカーやエネルギー販売会社13社は、2015年からの燃料電池車の販売・普及を目指して、四大都市圏で100カ所程度の水素ステーション建設目標を2011年1月に公表した。自動車の燃料電池は、100 kWの出力があるので、エネルギー変換効率が60%で発電しても十分な出力を得ることが出来る。バイオ水素をこの様に大きな出力の燃料電池で使用すれば、非常に効率の良い発電が可能になる。そのため、1 m<sup>3</sup>の水素で1.5 kWhの発電（HHVで42%の変換効率）をするなら、南大東島ではバイオ水素で44万kWhの電力が供給できる（表1の(6)参照）。この島の平成21年度における電力需要は887万kWhであった<sup>5)</sup>ので、島の全電力を18日間賄う量と等しい（表1の(9)）。家庭の電灯のみに使用するなら一月以上電力を供給できるであろう。

## 光合成のエネルギー利用と環境応用

### 4.4 地産地消に適した発酵水素一発電の利用

表1に示すように、糖蜜から発酵水素生産し電力に変換すると、沖縄本島を除く離島のそれぞれの生産地で、半日から18日間の電力を賄えるほどの発電量になる。さらに、自社で発電すれば、多くの製糖会社にとっては糖蜜として販売するより販売収益が多くなる可能性がある。糖蜜の産出量は収穫期毎、製糖会社毎に異なるが、年間を通して連続発酵するなら、発酵槽はわずか $10\text{ m}^3$ 前後で各生産地の産出量を全量処理するに足る十分な規模になる。 $10\text{ m}^3$ の発酵水素一発電プラントの建設費を5,700万円と見積り、売電価格を平成24年度のバイオガス発電の電力会社買取り価格39円に設定すると、南大東島を例にすれば炭素クレジットも含む総収入は1,845万円に上り、設備償却費（10年均等償却）、保守費（建設費の3%）、人件費（1人）など支出を合わせて1,041万円と見積もっても804万円の利益が発生する。南大東島では糖蜜がトン当たり500円で農家に販売されており、糖蜜の販売収益はわずか105万円しかないのので、エネルギーとして販売する方が会社の経営に利する可能性が高い<sup>6,7)</sup>（これらの計算方法の詳しい説明は文献<sup>6,7)</sup>に記載している）。ただし、糖蜜の売買価格は離島ごとに異なっており、生産量が少ない島では水素発電しても設備償却費を負担できるほどの収入にはならないところもある。そのため、全ての生産地、製糖会社に適した糖蜜の利用方法になるということではない。

### 4.5 パイロットプラントの建設

筆者らは、机上計算を実証するべく、現在、沖縄県糸満市に、発酵槽体積200Lで1日200kgの糖蜜を発酵処理し、 $22\text{ m}^3$ の水素を生産して発電するパイロットプラントを、沖縄県産業振興公社の補助金を得て建設しているところである。発酵水素生産に使用する*Clostridium*属 HN001株は、増殖速度が極めて速いので、図1に示すように、実験室では発酵基質の平均滞留時間がわずか1時間という非常に短い連続操作でも、十分に発酵反応が進んで $5\text{L-H}_2/\text{L-culture}\cdot\text{h}$ という速い速度で水素発生した<sup>6)</sup>。

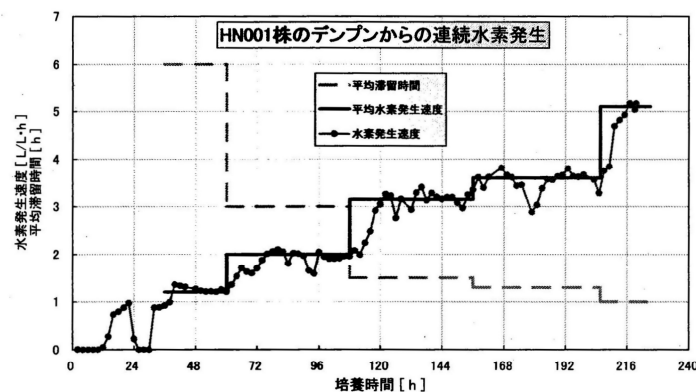


図1 発酵水素発生速度と培養液の平均滞留時間の関係

## 第9章 嫌気性微生物による水素生産とエネルギー変換

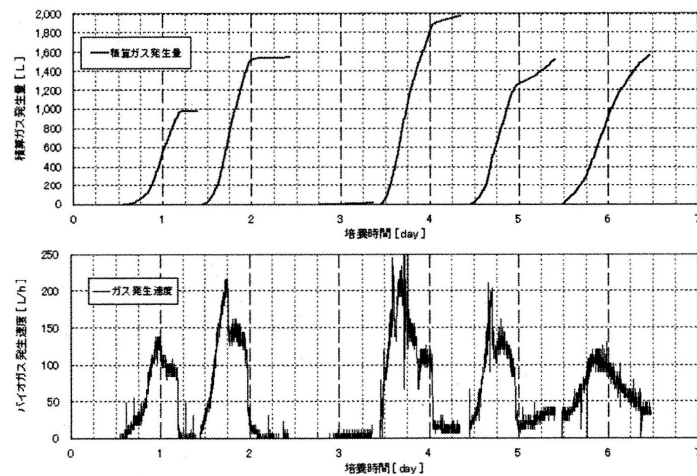


図2 半回分式連続発酵による糖蜜からの水素生産試験運転結果

パイロットプラントではまだ発酵試験をしているところで発電には至っていないが、1日に1回、160Lの発酵液から半分の80Lを抜き取り、新たに80Lの新しい培養液を加える半回分連続発酵で、図2に示すようなバイオガス発生データを得ることが出来た。試運転初日と第3日目のトラブルにより完全な成功データにはならなかったが、フィードの糖濃度が3.5%になるよう操作したので、計算では1,400Lのガス発生が期待され、ほぼ計算通りのバイオガス量を繰り返し生産することに成功した。ただ、半回分操作では、バイオガス中の水素濃度は53%で、連続培養より水素濃度は低かった。今後、平均滞留時間2時間で発酵操作を行い、 $22\text{ m}^3/\text{day}$ の水素生産を検証する予定である。

### 4.6 水素発酵の原料として期待できるバイオマス

今、世界の各国は、地球温暖化を防ぐために、太陽エネルギー、風力エネルギー、バイオマスエネルギーなど再生可能エネルギーの普及を進めている。サトウキビは表2に示すようにバイオマスの生産性が高く、ブラジルのバイオエタノールでよく知られているように、エネルギーバイオマスの代表植物の一つである。日本でも、宮古島の糖蜜から自動車燃料用としてエタノールを生産しているが、サトウキビは鹿児島県と沖縄県の離島で栽培されているだけで、サトウキビからの糖蜜生産量は非常に少なく、再生可能エネルギーとして利用しても日本のエネルギー消費量に対する寄与率はわずかである。また、増産しようにも国土が狭く急峻な山地が多い日本では栽培する土地がない。しかし、日本は四面を海に囲まれ国土の12倍にもなる広い専管水域を持っていることを考慮すれば、陸生のバイオマス栽培ではなく、海生のバイオマス栽培に目を向けるべきである。

古くから食用として採取栽培されているコンブは、収穫期には葉中に約8%のマンニトールを

光合成のエネルギー利用と環境応用

表2 陸生バイオマスと海生バイオマスの生産性比較

植物名	測定地	固定系	純生産量 [t/ha/yr]	水分を含む重量
ネピアグラス	プエルトリコ	C4	85.9	
サトウキビ	ハワイ	C4	67.3	蔗糖 約10t 栽培期間 12ヶ月
ソルガム	カリフォルニア	C4	46.6	
トウモロコシ	イタリア	C4	34.0	
トウモロコシ	塩尻	C4	26.5	食用でなければ 10倍近い生産性が期待できる
キャッサバ	ジャワ	C3	41.0	
テンサイ	カリフォルニア	C3	42.4	
テンサイ	札幌	C3	22.9	
コンブ*	北海道羅臼	-	149	
マコンプ	島根県海士町	-	600~1,000	マンニトール 約24t 栽培期間 6~7ヶ月

日本応用微生物学会第10回大会, 2011年7月9日  
発表者: 依田, 能登谷から計算

村田吉男, 植物の生産性, 「バイオマス」生産と変換(上), 柴田/木谷編, 学会出版センター(1981), p.20  
\*農水省農林水産技術会議事務局編, バイオマス変換計画, 光琳(1991)

含み, マンニトールはグルコースより優れた水素発酵の良い基質であることを筆者らは報告している<sup>8)</sup>。依田らは, 幹ロープに6mの種苗ロープを一定間隔で垂らし, 幹ロープの下1mから20cm間隔で25カ所に種糸を植え込む方法で, 島根県隠岐郡海士町の海域では自生しないマコンプの立体多面的栽培を行い, 条件によっては非常に多収穫が可能であることを明らかにした<sup>9)</sup>。表2に示すように, 依田らの報告資料を参考に筆者が計算すると, 湿重量で1haあたり約600トンのバイオマスが収穫可能で, サトウキビの10倍近い収穫量になる。発酵基質の糖類の含有量で比較しても, サトウキビは約10トン, マコンプは約24トンで, 2倍以上の収穫が期待できる栽培結果であった。また, サトウキビの栽培期間が約1年であるのに対し, コンブは半分の5~6ヶ月で済むから, 収穫時期の異なるワカメなどと二毛作, 三毛作の栽培をすれば, 狭い栽培面積でもさらに収穫量を増やすことができる。また, 収穫時期も広げられるので, プラントの稼働率が上がるという利点も合わせ持つ。さらに, 理論的にはグルコース1モルから4モルの水素が発生するに  
対し, マンニトール1モルからは5モル発生するので, 1haの栽培面積で, 水素は15,000Nm<sup>3</sup>以上生産可能である。水素収率の高い新規バクテリアを見つけることが出来れば, 海藻バイオマスは, 日本の主要なエネルギー源になる可能性を大いに秘めていると言えるであろう。

## 第9章 嫌気性微生物による水素生産とエネルギー変換

### 文 献

- 1) 谷生重晴, 西山大樹, PCT出願, 公開番号WO2008111608, 米国特許登録番号, US8241882
- 2) 沖縄県農林水産部, 平成24/25年期さとうきび及びび甘しゅ糖生産実績
- 3) H. Nishiyama and S. Tanisho, Proceedings of the 16th World Hydrogen Energy Conference, Lyon, France, in CD ROM (2006)
- 4) 谷生重晴, 藻類系バイオマスからの水素製造とその利用, 2008年7月18日技術情報センター講演会予稿集
- 5) 沖縄県商工労働部産業政策課, 沖縄県エネルギービジョン, H22, p.125
- 6) 谷生重晴ほか, 第32回水素エネルギー協会大会予稿集 (2012)
- 7) 谷生重晴, 第140回水素エネルギー協会定例研究会予稿集 (2013)
- 8) 谷生重晴, 菅沼剛, 水素エネルギーシステム, **24**(1), pp.19-24 (1999)
- 9) 依田欣文ほか, 日本応用藻類学会第10回大会, P04 (2011)

# 光合成のエネルギー利用と環境応用

## Application of Photosynthesis : Energy and Environment

監修：三宅 淳, 佐々木 健

Supervisor : Jun Miyake, Ken Sasaki

**シーエムシー出版**