

## 食品廃棄物からの水素・メタン回収\*

板谷 勉\*\*・斎藤直己\*\*

キーワード ①食品廃棄物 ②減容化 ③再資源化 ④水素生成 ⑤エネルギー生産

### 要 旨

廃棄物の減容化と再資源化を目的に、食品廃棄物からクリーンエネルギーである水素およびメタンの生産・回収について検討した。県内の下水汚泥から水素生成菌株の単離を行い、*Clostridium beijerinckii* と同定された細菌を得た。本菌株はデンプンから水素と二酸化炭素を1:1の割合で生成し、水素生成効率は1.5(モル水素生成/モル消費グルコース)および2.1(モル水素生成/モル消費デンプン)と計算された。本菌株を実食品廃棄物処理に応用した実験の結果、約50%の水素ガス組成を有するガスを水素生成効率約2で生産できることが確認された。また、固形物(乾重量)が約60%減少することが確認された。さらに、本菌株を用いた水素・メタン2段発酵による実際の食品廃棄物処理実験の結果、廃棄物226g(乾燥重量)から水素を36L、メタンを76L生産でき、廃棄物を約76%(乾燥重量換算)減容化できることが判明した。

### 1. はじめに

わが国では1年間に一般廃棄物が5,000万t、産業廃棄物が4億t排出される。このうちバイオマス系廃棄物は畜産廃棄物が1億t、汚泥が1億t、生ごみを含む食品関連廃棄物が2,000万t、古紙や廃木材を含めた木質系廃棄物4,000万t、農業残渣2,500万tの合計約2億8,000万tが排出され、全廃棄物の63%を占めている<sup>1)</sup>。岡山県では食品関連(ホテル、レストラン、デパート、スーパー等を含む)の事業系有機性廃棄物が年間約7万3,000t排出され、このうちリサイクルされている量は約2,000tで発生量の2.6%である。また、厨芥ごみの年間排出量は約14万tと推定され、そのほとんどは焼却・埋立処分され、温暖化ガス排出源の一つとなっているのが現状である<sup>2)</sup>。

一方、わが国は京都議定書の締結により、2008年から2012年までに温室効果ガスを90年比6%削減が義務づけられている。しかし、温室効果ガスの05年時点での排出量は90年比8.1%の増加となっており、14%以上を削減しなければならない。排出量増加の最大の原因はエネルギー生産に伴う化石燃料の大量消費であり、省エネルギー対策と並行して、化石燃料以外からの新たな代替エネルギーの比率を高めていくことがきわめて重要な課題である。

このような背景から、廃棄物の減容化と同時に廃棄物からの創エネルギーの試みとして、環境中からの水素生成菌の分離と、水素生成菌を用いた食品廃棄物からの、クリーンエネルギーである水素とエネルギー源となり得るメタンガスの生産に

\*Hydrogen and Methane Production and Recovery from Food Wastes

\*\*Tutomu ITADANI, Naomi SAITOH(岡山県環境保健センター)Okayama Prefectural Institute on Environmental Science and Public Health

ついて検討したので報告する。

## 2. 材料および方法

### 2.1 材 料

水素生成菌分離材料として、その存在が推定される下水処理場汚泥を使用した<sup>3)</sup>。実験には、模擬廃棄物と実廃棄物を使用した。模擬廃棄物として使用したドッグフードは市販のI社製製品であった。I社製ドッグフードの保証分析値を表1に示した。実廃棄物としては、一般家庭の台所から排出される生ごみおよび県内の給食弁当販売会社から排出される食品廃棄物を用いた。

### 2.2 水素生成菌の分離および生化学性状

分離源の汚泥を0.5%酵母エキス(以下YEと略す)。2%グルコースまたは2%デンプンを含む溶液中で1ヵ月間馴養したのち、同組成の寒天培地を用い30℃3日間嫌気培養後、得られたコロニーを釣菌し、同組成の液体培地に植え継ぎ、ガスが活発に発生する菌株を標準寒天培地(日水製菓製)を用い、上記操作を繰り返すことで純化し、ガス生成菌株を得た。ガス生成菌株から得られたガス中の水素濃度をガス検知管(ガステック製)で測定し、濃度が比較的高く性状の異なる菌株を最終的に水素生成単離菌株とした。

単離菌株の形態、グラム染色、酸素に対する性質、オキシダーゼ・カタラーゼの有無、生化学性状およびGMB培地並びにPYG+Bile培地中での発育<sup>4)</sup>等から菌の同定を行った。菌の生化学性状検査はapiシステム(ピオメリユウ製)を用いた。単離菌株の形態は走査電子顕微鏡によった。すなわち、2%デンプン含有寒天培地を用い30℃72時間培養後、出現コロニーを定法どおりエタノール脱水後、t-ブタノールと置換し、凍結乾燥したのち、エイコーエンジニアリング製IB-3型イオン

表1 I社製ドッグフードの保証分析値

粗タンパク質	18.0%以上	NaCl	0.3%以上
粗脂肪	5.0%以上	リノール酸	1.0%以上
粗繊維	6.0%以上	Vitamin A	5,000IU/kg以上
粗灰分	8.0%以下	Vitamin B1	1.0mg/kg以上
水分	10.0%以下	Vitamin B2	2.2mg/kg以上
Ca	0.8%以上	Biotin	0.1mg/kg以上
P	0.6%以上	その他(デンプン等)	50%以下

コーターによる金コーティングののち、走査電子顕微鏡 JEOL JSM-5300LV により観察した。

### 2.3 分離株による各種糖質からの水素生産

グルコース、廃糖蜜、乳糖およびデンプンを用いて生成ガスの生産実験を行った。0.5%酵母エキス溶液に2%のおのおのの糖質を含む溶液1Lを121℃15分間高圧滅菌したのち、あらかじめ分離に用いた2%デンプンを含む培地で培養した前培養液5mlを添加し、30℃で72時間静置培養し、この間発生したガスをテドラーバッグ(アズワン製)で捕集し、容量測定とガス組成分析を行った。ガス組成分析はヘリウムガスをキャリアーとしたGC/TCDガスクロマトグラフによった。なお、乳糖からの水素生産実験ではBGLB培地(日水製菓製)を用いた。

### 2.4 単離菌株の水素生成効率

2.3の実験と同様、グルコースおよびデンプンを用いた水素の生成実験終了後(30℃72時間静置後)、生成ガス中の組成から生成水素ガス量を求め、別に測定したグルコース消費量とからグルコース1モル当たりの水素ガス生成モル数を求め、水素生成効率とした。この際、グルコースの測定はHodge<sup>5)</sup>らのフェノール硫酸法によった。ドッグフードからの水素生成効率は次のように概算した。すなわち、実験前後の乾燥固形物減少量を消費デンプン量と仮定し、その値を0.9で除し消費グルコース量とした。この値で生成水素量を除してグルコース1モル当たりの水素生成モル量を概算し、水素生成効率とした。乾燥重量はJISK-0102のSS測定法に準拠し、120℃2時間乾燥後の重量とした。

### 2.5 廃棄物からの水素生成

模擬廃棄物処理実験としてはI社製ドッグフードを用いた。ハンドリングの容易さから、上記ドッグフード50g、100gおよび150gを蒸留水でそれぞれ1Lにメスアップし、得られた5%~15%濃度のドッグフード懸濁液を121℃15分間高圧滅菌したのち、2.3で行ったのと同様の条件で実験を行った。実験前後の減少固形物乾重量と生成水素ガスのモル数とから水素生成効率を概算した。

一方、実際に家庭の台所から排出された生ごみを用いた実廃棄物処理実験は2回連続して行った。生ごみの湿重量を測定後、ワーリングブレン

ダーでスラリーとし、蒸留水で1Lにメスアップ後、120℃15分間高圧滅菌し、放冷後pH7.0に調整したのち、*Clostridium* 属菌株前培養液10mlを添加し、気相を窒素ガスで置換後、1回目の反応を開始した。反応は30℃、8日間で静置して行った。第2回目は、第1回目の反応液を100ml残し、新たに台所廃棄物のスラリーを1L添加後、今度は70℃5分間加熱処理し、高圧滅菌および窒素ガス置換は省略し、第1回目と同じ条件下で反応させた。同時に実験前後の乾燥重量を測定し乾燥固形物減少量を求めた。

## 2.6 水素・メタン2段階発酵による食品廃棄物からの水素、メタンの回収

実廃棄物には県内の給食弁当販売会社K社から排出された残飯(白米、惣菜および果物等)を用いた。実廃棄物の大まかな組成は湿重量換算で白米57%、惣菜29%および果物野菜類14%であった。上記廃棄物3.5kgをワーリングブレンダーで30秒間破碎後、蒸留水で7.0Lにメスアップして廃棄物スラッジを得た。当該廃棄物スラッジを2.0L用い、蒸留水で4.0Lにメスアップしたのち、pH調整、加圧滅菌後、水素生成菌培養液200mLを添加して実験を開始した。ガス生成が認められなくなるのを確認後、混合液1Lをあらかじめ馴養していたメタン発酵汚泥1L中に添加し、37℃

水浴中に静置し反応を行った。実験中、ガス生成量、メタンガス組成および乾燥固形物量を測定した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 分離株の性状

下水処理場汚泥から2種類の水素生成菌を分離した。1種類は表2に示したように偏性嫌気性のグラム陽性の桿菌で、その形態および生化学性状から、*Clostridium beijerinckii*(以下クロストリジウム属菌株称す)と同定された。図1にその顕微鏡写真を示した。クロストリジウム菌株は耐熱性の芽胞を有し、表2に示したようにブドウ糖からデンプンまで広い炭水化物資化性を有していた。とくにデンプン分解能については、図2に示したようにデンプン含有寒天培地で培養後にヨードデンプン反応を行ったところ、菌の増殖したコロニーの周囲が反応を起こさず、デンプンの加水分解能を有することが確認された。このことは、実廃棄物である生ごみの主たる炭水化物であるデンプンを水素生産の基質として利用できる可能性があり、実際の廃棄物処理においても優れていると考えられた。消化汚泥を種汚泥とした食品廃棄物の混合微生物系での水素生産に関する研究でも、ガス生成槽での優先微生物はクロストリジウム属に属する細菌であるとの報告がある<sup>6)</sup>。われわれが今回分離源としたのも下水処理場汚泥で、馴養の過程でクロストリジウム属に属する菌が優先したものと思われる。

もう1種類は表3に示したように、通性嫌気

表2 グラム陽性単離水素生成菌の性状

- 細胞形態  
桿菌(大きさ0.5-1.5×2.0-7.0μm)、グラム染色+, 内生孢子+
- 生理的性質  
カタラーゼ-, チトクロームオキシダーゼ-, ゼラチン液化能+, インドールの生成-, ウレアーゼ-, エスクリン加水分解+, デンプン加水分解+
- 酸素に対する態度 偏性嫌気性
- 糖からの酸生成  
グルコース+, D-マンニトール+, ラクトース+, サッカロース+, マルトース+, サリシン+, D-キシロース+, L-アラビノース+, グリセリン+, D-セロピオース+, D-マンノース+, D-メレチトース+, D-ラフィノース+, D-ソルビトール+, L-ラムノース+, D-トレハロース+, デンプン+
- GMBでの増殖-
- PYG+Bileでの増殖+
- 70℃5分加熱処理後の増殖+

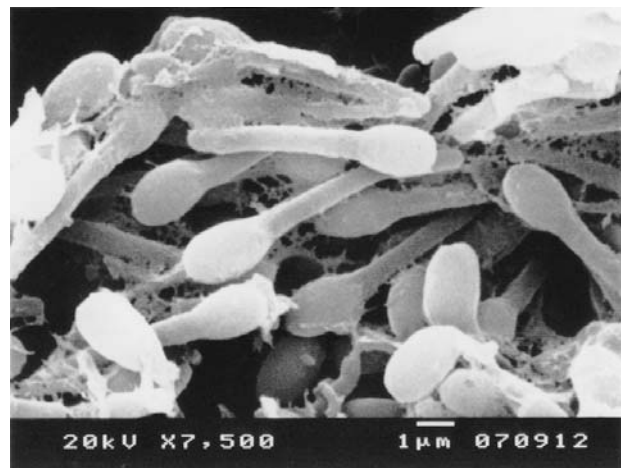


図1 クロストリジウム属菌株の電子顕微鏡観察

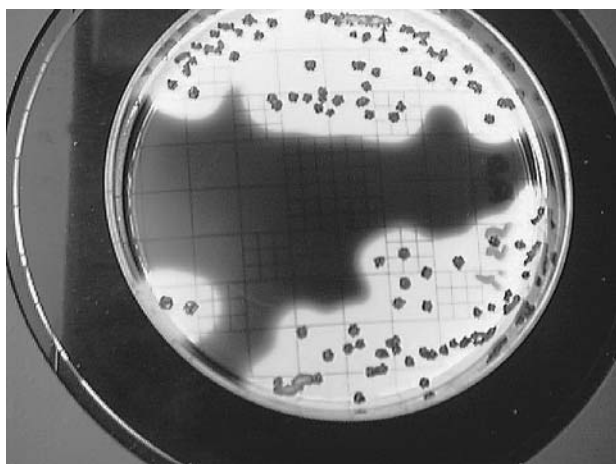


図2 デンブンプン含有寒天培地上に発育したクロストリジウム属菌株によるデンブンプン分解に伴うハロー現象

表3 グラム陰性単離水素生成菌の性状

- 細胞形態  
短桿菌(大きさ $0.5-1.5\mu\text{m}\times 1.5-2.0\mu\text{m}$ ), グラム染色-, 内生孢子-
- 生理的性質  
カタラーゼ+, チトクロームオキシダーゼ-, 乳糖分解能+, ONPG-, ADH(アルギニン脱水素酵素)+, LDC(リジン脱炭酸酵素)-, ODC(オルニチン脱炭酸酵素)+, クエン酸資化性+,  $\text{H}_2\text{S}$ 産生性-, 尿素分解能-, TDA(トリプトファンデアミナーゼ)-, インドール産生能-, VP(ボーゲスプロスカウアー)テスト+, ゼラチン液化能-
- 酸素に対する態度 通性嫌気性
- 糖からの酸生成  
グルコース+, D-マンニトール+, イノシトール+, ラフィノース-, サッカロース+, D-メリピオース+, D-アミグダリン+, L-アラビノース+, 硝酸還元能+
- 脱窒素能+

性のグラム陰性の無芽胞桿菌で、その生化学性状から *Enterobacter cloacae* と同定された。しかし、本菌株はブドウ糖からは水素生成するものの、デンブンプンからの生成は認められず、実用面で劣るため以下の実験には *Clostridium* 属菌株だけを使用した。

### 3.2 分離株による各種糖質からの水素生産

クロストリジウム属菌株によるグルコースおよびシヨ糖からの水素生成の結果を表4に、デンブンプンからの水素生成の結果を表5に示した。ク

表4 クロストリジウム属菌株によるグルコースおよびシヨ糖からの水素生成

培地	YE加2%グルコース	YE加2%廃糖蜜	
発生ガス量(1)*	6.5	3.5	
ガス組成 (濃度%)	$\text{H}_2$	55.06	54.11
	$\text{CO}_2$	41.41	44.18
	その他	3.52	1.7
	合計	100	100

\* $30^\circ\text{C}$ 72時間培養後の積算ガス生成量, 培地容量1.0L

ロストリジウム属菌株はグルコースおよびシヨ糖に加え、デンブンプンからもガスを生成し、その生成ガス量は6.7Lとグルコースの場合の6.5Lとほぼ同量であり、また生成ガス中の水素ガス組成も約50%と、グルコースの場合とほとんど同じ結果を得た。この結果、*Clostridium* 属菌株はデンブンプンからもグルコースの場合と同程度の水素ガス組成を持つ生成ガスを同量生成することが明らかとなった。

### 3.3 クロストリジウム属菌株の水素生成効率

グルコースおよびデンブンプンを用いてクロストリジウム属菌株の水素生成効率を求めたのが表6である。その結果クロストリジウム属菌株は1モルのブドウ糖およびデンブンプンからそれぞれ1.5モルおよび2.1モルの水素を生産することが可能であった。微生物による水素の生成については多くの報告がある。Taguchi<sup>7)</sup>らは *Clostridium beijerinckii* AM21B 株を用いたグルコースからの水素ガス生成実験を行い、水素生成効率1.8~2.0を得ているが、本研究で得られた水素生産効率はそれより小さい値となった。これは実験誤差に加え、われわれの実験が廃棄物処理を想定しており、低濃度のYEとグルコースしか含まない限定された条件でのものであり、グルコースが当該菌の増殖や、エネルギー獲得のために消費され、結果として水素生成効率が小さくなったものと推定される。一方、デンブンプンを用いた実験では、Taguchiらの結果とほとんど同じ約2.1の生成効率が得られた。また、模擬廃棄物であるドッグフードを用いたわれわれの実験では水素生成効率は1.5~2.4と概算できた。

腸内細菌科の *Enterobacter aerogenes*<sup>8)</sup>, *E. Coli*<sup>9)</sup>や *Enterobacter cloacae*<sup>10)</sup>でも水素生成につ

表5 クロストリジウム属菌株およびエントロバクター属菌株によるデンプンからの水素生成

		Clostridium 属菌株	Enterobacter 属菌株	Clostridium 属菌株+ Enterobacter 属菌株
発生ガス量( l )*		6.7	0.2	6.3
ガス組成 (濃度%)	H <sub>2</sub>	54.05	---	42.5
	CH <sub>4</sub>	0	---	0
	CO <sub>2</sub>	40.85	---	55.82
	その他	5.09	---	1.68
	合計	100	---	100

表6 クロストリジウム属菌株によるグルコースおよびデンプンからの水素生成効率

グルコース使用		
消費グルコース量 (mol)	生産水素量 (mol)	生産効率 (mol H <sub>2</sub> /mol glucose)
0.104	0.157	1.5
デンプン使用		
消費グルコース量 (mol)	生産水素量 (mol)	生産効率 (mol H <sub>2</sub> /mol glucose)
0.086	0.184	2.1

いての検討が行われ、それらの水素生産効率はそれぞれ1.0, 0.9および2.2であった。また、好熱菌あるいは超好熱菌を用いた水素生成についても研究が進められており<sup>11,12)</sup>、とくに *Thermotoga malitima*<sup>11)</sup> の場合には水素生産効率は4.0と非常に高い値となったとの報告がされている。しかし、この実験条件下では菌体濃度が $1.4 \times 10^8$ 個/mlと低く、また、グルコース消費量が1.6mMと極端に低かったことから、高い水素生産量を得るには、菌体濃度をさらに高くする必要があると考えられる。このことが可能となれば、好熱菌あるいは超好熱菌を用いる方法は、雑菌汚染を最小限に抑えるための高温処理が可能で、水素生産の有力な手段となり得ると思われた。

### 3.4 廃棄物からの水素生成

模擬廃棄物としてドッグフードを使用した時の処理時間と水素生成の様子を示したのが図3である。固形物濃度5%, 10%および15%の3条件下とも Clostridium 属菌株は良好に水素生成を行うことが示された。生成してきたガス中の水素組成はそれぞれ51%, 49%および50%と本実験条件

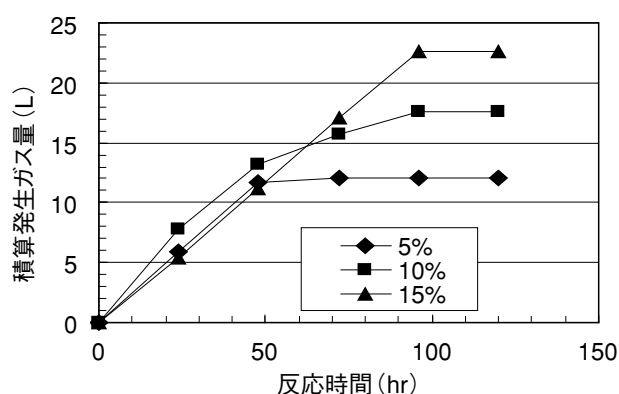


図3 クロストリジウム属菌株による模擬廃棄物からの水素生成

表7 クロストリジウム属菌株によるドッグフードからの水素生成と水素生成効率の概算

ドッグフード濃度	5%	10%	15%
消費ドッグフード量(g 乾重)	18	41	43
生産水素量(mol)	0.27	0.34	0.49
生産効率*(mol/mol)	2.4	1.5	1.8

\*減少固形物量を消費デンプン量と仮定し、消費デンプン量を0.9で除して消費グルコース量として計算した

下での固形物濃度による水素組成に差は認められなかった。また、この時の水素生成効率は表7に示されたように1.5~2.4と概算された。これらの値はグルコースおよびデンプンを用いた時の水素生成効率に近い値であった。

次に、実廃棄物として生ごみを使用したときの水素生成実験の結果を表8に示した。2回連続して行ったバッチ処理の1回目と2回目で、生成ガス量、固形物減少率、生成ガス中の水素ガス組成に大きな差異は認められなかった。固形物減少

表8 クロストリジウム属菌株による生ごみからの水素生成

		1回目	2回目
ガス発生量(l)		17.4	16.8
固形物減少率(%)		59.8	57.3
ガス組成 (濃度%)	H <sub>2</sub>	47.5	44.2
	CH <sub>4</sub>	0	0
	CO <sub>2</sub>	52.2	55.7
	その他	0.3	0.1
	合計	100	100

量およびガス生成量は処理される材料中の Clostridium 属菌株の基質となる炭水化物量によって決まってくるものの、今回の実験から乾燥重量の約60%が減少すると判明した。このことから、生ごみ等食品廃棄物を Clostridium 属菌株で処理し水素ガスを回収することは、有機性廃棄物の減容化および再資源化の有効な手段となり得ることが示唆された。しかし、処理後の混合物中にはまだ約40%の固形物が残存しており、この残存固形物の処理が課題として残った。

近年、水素・メタン2段発酵の研究が廃棄物、とくに食品廃棄物の処理領域で活発に行われるようになってきた<sup>13-16)</sup>。これらは混合微生物系での処理のため、さまざまな成分を含む廃棄物に対し適用可能であるものの、基質である炭水化物を水素ガスやメタンガス等の有用なガスに変換することのできない多量で多種類の菌が、水素生成菌と炭水化物の獲得で競合することとなり、基質の炭水化物の有効利用の面からは必ずしも優れた処理方法とは言いがたく、一長一短を有する処理方法と考えられる。とはいえ、条件設定を変えることによって、水素生成槽では水素の回収を行い、残渣をメタン発酵槽で処理し固形物のさらなる減容化を図るとともに、生成するメタンを回収しようとする実用的処理方法である。そこで、われわれも前段に Clostridium 属菌株を使用した水素生成を重視した水素生産槽、後段に混合微生物系を用いる処理を重視したメタン発酵槽を想定して、2段処理実験による固形物のさらなる減少と付随するメタンの回収を試みた。

### 3.5 水素・メタン2段発酵による食品廃棄物からの水素、メタンの回収

給食弁当販売会社の廃棄物を用いた2段発酵処理実験における水素生成実験の結果を図4に示した。また、水素生成後の残渣を用いたメタン生産実験の結果を図5に示した。水素生成は実験開始後4日間で終了し、実験開始前の乾燥重量226gから88.2gと固形物が61%減少した。減少した固形物がデンプンであると仮定したときの消費グルコース量は0.85モルと計算された。一方、生成ガスの実測値は63Lであり、この時の発生ガス中の水素組成が52%であったことから、水素ガスが32.7L(1.46モル)生成したと計算された。

これらの結果から、水素生成効率を概算すると約1.7となり、これまでグルコース、デンプンおよびドッグフードで求めた水素生成効率1.5~2.4に近い値が得られた。一方、メタン発酵実験の結果である図5からは、反応の進行は緩慢であり、14日後においても反応の進行が観察された。14日後の積算生成ガス量は31Lであり、水素生産後の

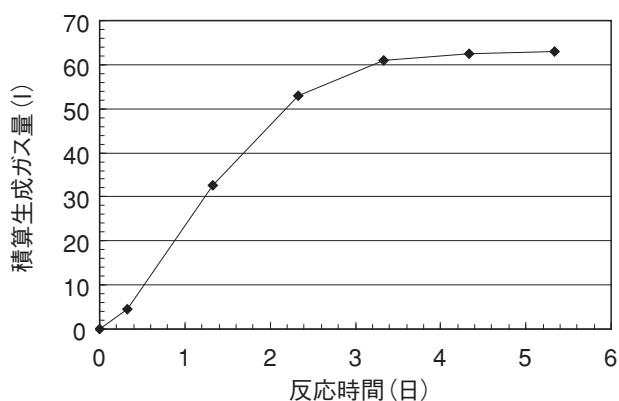


図4 クロストリジウム属菌株による食品廃棄物からの水素生成

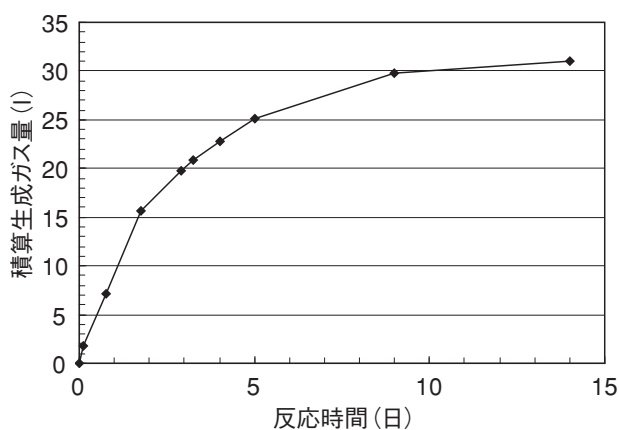


図5 クロストリジウム属菌株による食品廃棄物からの水素生成後の残渣を用いたメタン発酵処理

残渣からは4倍の124Lのガスが生産できるものと計算された。また、このときの生成ガスのメタンガス組成が62%であったことから、実廃棄物の水素生産残渣をメタン発酵処理することによって、76.8Lのメタンガスを生産できることが判明した。メタン発酵処理前後の乾燥固形物は87.0g/Lから53.6g/Lと、メタン発酵処理により廃棄物量が約38%減少することが確認された。すなわち、食品廃棄物を水素・メタン2段階発酵処理することにより、乾燥固形物量として約76%減少させることが判明した。

#### 4. まとめ

廃棄物の減容化と再資源化を目的に、食品廃棄物から水素およびメタンの生産・回収について検討した。県内の下水汚泥から水素生成菌株の単離を行い、*Clostridium beijerinckii* と同定された細菌を得た。本菌株はデンプンから水素と二酸化炭素を1:1の割合で生成し、水素生成効率は1.5(モル水素生成/モル消費グルコース)および2.1(モル水素生成/モル消費デンプン)と計算された。本菌株を実食品廃棄物処理に応用した実験の結果、約50%の水素ガス組成を有するガスを水素生成効率約2で生産できることが確認された。また、固形物(乾重量)が約60%減少することが確認された。さらに、本菌株を用いた水素・メタン2段階発酵による実食品廃棄物処理実験の結果、廃棄物226g(乾燥重量)から水素を36L、メタンを76L生産でき、廃棄物を約76%(乾燥重量換算)減容化できることが判明した。

#### —参考文献—

- 1) 廃棄物学会バイオマス系廃棄物研究部会編：バイオマス・ニッポンを廃棄物学で切る，藤本 潔：バイオマス・ニッポン総合戦略の推進について，3-18，廃棄物学会，東京，2003
- 2) 岡山県廃棄物新処理技術検討委員会編：生ごみ等バイオマスの発酵等に係る新処理技術調査報告書，3，2002
- 3) 板谷勉，山本淳，小野質，北村雅美，斎藤直己，杉本盛正：バイオ技術による廃棄物の再資源化に関する研究—光合成細菌の応用—，岡山県環境保健センター年報，28，17-21，2004
- 4) Cummins, C. S., Johnson, J. L.: Taxonomy of Clostridia: Wall Composition and DNA Homologies in *Clostridium butyricum* and Other Butyric Acid-producing Clostridia, *J. General Microbiol.*, 67, 33-46, 1971
- 5) Hodge, J. E., Hofreiter, B. T.: *Method in Carbohydrate, Chemistry*, 1338, 1962
- 6) 西村和，金田一友，規川本克也：有機廃棄物からの2段階嫌気性発酵プロセスの構築と菌叢特性，平成16年度水環境学会講演要旨集，194，2004
- 7) Taguchi, F., Chang, J. D., Takiguchi, S., Morimoto M.: Efficient hydrogen production from starch by a bacterium isolated from termites. *J Ferment Bioeng* 73, 244-245, 1992
- 8) Tanisho S., Wakao N., Kosako Y.: Biological hydrogen production by *Enterobacter aerogenes*. *J. Chemm. Eng. Japan*, 16,, 529-530, 1983
- 9) Blackwood A. C., Neish A. C., Ledingham G. A.: Dissimilation of glucose at Controlled pH values by pigmented and non-pigmented strains of *Escherichia coli*. *J. Bacteriol.*, 72, 497, 1956
- 10) Kumar N., Das, D.: Enhancement of hydrogen production by *Enterobacter cloacae* HT-BT 08. *Process Biochem.*, 35, 589-593, 2000
- 11) Schroeder, C., Selig, M., Schoenheit, P.: Glucose fermentation to acetate CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> in the anaerobic hyperthermophilic eubacterium *Thermotoga maritima* involvement of the Embden-Meyerhof pathway. *Arch. Microbiol.*, 161, 460-470, 1994
- 12) Kanai, T., Imanaka, H., Nakajima, A., Uwamori, K., Omori, Y., Fukui, T., Atomi, H., Imanaka, T.: Continuous hydrogen production by the hyperthermophilic archaeon, *Thermococcus kodakaraensis* KOD 1<sup>st</sup>. *J. Biotechnol.*, 116(3), 271-282, 2005
- 13) 片岡直明，菖蒲昌平，宮晶子，石田健一，鈴木隆幸：セルロース系廃棄物の水素・メタン2段階発酵に関する研究，第15回廃棄物学会研究発表会講演論文集，518-520，2004
- 14) 竹本裕，片岡直明，上野嘉之，澤山茂樹，横田長雄：2段階発酵法による食品系廃棄物および生ゴミ・紙ゴミからの水素・メタン回収システム，平成16年度水環境学会講演要旨集，194，2004
- 15) 片岡直明，菖蒲昌平，宮晶子：有機性廃棄物の水素・メタン二段発酵における可溶化・水素発酵特性，第16回廃棄物学会研究発表会講演論文集，529-531，2005
- 16) 福井久智，上野寿之，片岡直明，大下信子，澤山茂樹，横田長雄：水素・メタン二段発酵システムによる有機性廃棄物のエネルギー転換，第16回廃棄物学会研究発表会講演論文集，523-525，2005