

## 未利用植物系バイオマスのメタン発酵

高島 正信\*

### Methane fermentation of unused plant biomass

Masanobu Takashima

#### Abstract

Methane fermentation of various plant biomass, including paper, wood, rice straw, rice hulls, common reed, wild rice and two kinds of weed, was investigated in a batch vial test. Gompertz model fit the experimental data well, and was used to estimate the maximum methane potential and so on. Paper showed the highest methane conversion efficiency of 87% (based on  $COD_{Cr}$ ), while rice hulls and wild rice the lowest of 25%. It is concluded that the biomass studied can be used as part of feed for existing methane fermentation facilities.

Keywords: Gompertz equation, methane fermentation, methane production potential, plant biomass

#### 1. はじめに

2007年、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）は第4次評価報告書<sup>1)</sup>において、地球温暖化は二酸化炭素など温暖化ガスによるものだとほぼ断定した。また、昨今の原油高騰が私たちの生活にも大きな打撃を与えている。よって、多様な自然エネルギーを普及させ、化石燃料に頼らない社会を構築する必要性がますます高まっている。

このような状況のなか、さまざまなバイオマス、とくに廃棄物系バイオマスをエネルギー化する技術にあらためて注目が集まっている。代表的なものとして、メタン発酵、堆肥化、固形燃料、炭化、熱分解ガス化、バイオエタノール、バイオディーゼルなどがある。この中でメタン発酵は、水分を含む有機性廃棄物を分解・安定化し、同時にメタンガスを生成することができるエネルギー創生型処理技術である。主なバイオガスの利用方法として、1) ボイラーの燃料、2) 都市ガスの原料、3) 自動車の燃料、4) 消化ガス発電、および5) 燃料電池による発電がある。

従来では、食品廃棄物、下水汚泥などの有機性廃棄物がメタン発酵の主な処理対象であったが、メタン発酵施設は全国に何百箇所も存在するので、これまで対象でなかったものでも原料の一部として混合すれば、エネルギー化および資源の循環利用を実現することができる。そこで本研究では、存在量が豊富で、そのまま廃棄されることの多い植物系バイオマスを取り上げ、そのメタン発酵性について調べた。また、モデル式を適用して、その分解の限度や速度を推察した。

---

\* 原子力技術応用工学科

## 2. 実験方法

### (1) バイオマスの種類と前処理

実験に用いた植物系バイオマスの種類と供試量を表1にまとめて示す。

紙および木としては、それぞれ PPC 用紙、割り箸（白樺と推測される）を用いた。ヨシとマコモは、北潟湖湖岸で6月に採取したものを用いた。雑草については、大学近くの空き地からよくみかけるものを2種類（Aはキク科ヨモギの一種、Bはイネ科ムギの一種と推測される）を採取した。

いずれも事前に粉碎または微細化したが、紙、もみがらおよび雑草についてはジューサーミキサー（MJ-680G、ナショナル）、ヨシおよびマコモについてはミル（IFM-710、岩谷産業）を使用した。また、木についてはのこぎりくず、わらについてはハサミで数mm以下に切断したものを用いた。

### (2) 回分式バイアル試験

上記バイオマスからのメタン発酵性については、回分式バイアル試験によって調べた。バイオマスを混入した蒸留水 30 mL を種汚泥の嫌気性消化汚泥 30 mL と一緒に 120 mL のバイアル瓶に加え、ヘッドスペースを  $N_2 : CO_2 = 80 : 20$  のガスで置換し、ブチルゴム栓とアルミシールで密閉した後、35℃、60 rpm で振とう培養した。一条件当たりバイアル瓶を2ないし3本使用し、発生ガスの濃度と量を50日間にわたり測定した。なお、嫌気性消化汚泥は、福井市内下水処理場の嫌気性消化タンクから採取したものを用いた。

バイアル実験におけるガス成分の分析にはガスクロマトグラフ（GC-9A、島津製作所）を用い、ガス発生量の測定にはメスシリンダーによる水上置換法<sup>2)</sup>（図1）を採用した。なお、各バイオマスの有機物濃度は化学的酸素要求量（ $COD_{Cr}$ ）<sup>3)</sup>によって求めた。

### (3) 解析方法

Lay *et al.* (1996)<sup>4)</sup>は、回分式メタン発酵における累積ガス生成量を表すモデル式として、以下に示す

表1 バイオマスの種類と供試量

種類	供試量 (湿潤 g/バイアル)
紙	0.36
木	0.36
わら	0.36
もみがら	0.36
ヨシ	1.0
マコモ	1.0
雑草 A	1.8
雑草 B	1.8



写真1 試料の写真

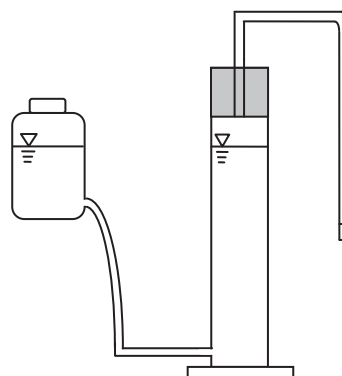


図1 ガス量測定装置

Gompertz 式が適切であるとしており、本研究でもこのモデルを採用した。

$$M = P \cdot \exp \left\{ - \exp \left[ \frac{R_m \cdot e}{P} (\lambda - t) + 1 \right] \right\}$$

ここで、 $M$  = 累積メタン生成量

$P$  = メタン生成能

$R_m$  = 最大メタン生成速度

$\lambda$  = 遅延時間

パラメーター  $P$ 、 $R_m$  および  $\lambda$  の値は、マイクロソフト社表計算ソフト Excel のソルバーを用いることによって、実測値とモデル値の差の二乗の合計が最小となるように算出した。

### 3. 実験結果および考察

各種バイオマスのメタン発生量と Gompertz 式による外挿の結果を図 2 に示す。また、得られた Gompertz 式のパラメーター、バイオマスの投入 COD<sub>Cr</sub> およびメタン転換率（バイオマスの単位 COD<sub>Cr</sub> 当り発生したメタンガスの COD<sub>Cr</sub> の割合）を表 2 にまとめる。

実験したバイオマスのなかでは、紙（成分はセルロース）、次いで雑草 B からもっとも多くメタンが発生し、メタン転換率はそれぞれ 87%、73% と高いものであった。一方、もみがらやマコモについては、メタン発生量はわずかであり、メタン転換率は 25% にとどまった。木、わら、ヨシや雑草 A についてはそれらの中間であり、メタン転換率としては 50% 前後であった。本研究で用いたような未利用植物系バイオマスについては、分解率あるいはメタン転換率に関する既往の報告が意外に少ない。落<sup>5)</sup>による牧草 60%、草木剪定枝 20%、紙 66%（TS または VS 分解率）という調査結果があるが、今後さらに詳しく調べる必要がある。

ここでは割愛するが、バイオマスの分解性を高め、メタンをより多く発生させることを目的に、木、もみがらおよびわらについて熱処理（pH 調整なしと pH 約 2 に調整）を実施した。しかし、その効果はほとんど見られなかった。

次に、モデルの妥当性について考察する。図 2 においては、実測値とモデル式はおおむね合致している。しかし、細かにみると、次の二点について問題があると思われる。一つは、マイナス値となった遅延時間  $\lambda$  があることである（この場合、表 2 には一で示されている）。今回の実験結果は、マコモと木を除きほとんど遅延時間を示さず、そういった場合にほとんどの  $\lambda$  がマイナス値となった。二点目は、メタン生成能が小さく見積もられることである。メタン発生量がわずかながらも増加していく傾向があったとしても、モデル式ではそれが頭打ちされ、最終的にメタン生成能が小さく見積もられている。モデル式と実測値の軌跡が微妙に異なることが影響していると思われる。

以上のような不整合が生じる理由の一つとして、バイオマスは多成分からなっていることが考えられる。一つの成分だと理論通り分解が頭打ちされるとしても、多成分だと一つの成分がほぼ分解されても別の成分の分解が続くため、だらだらとメタン生成が続く傾向があり、結果として

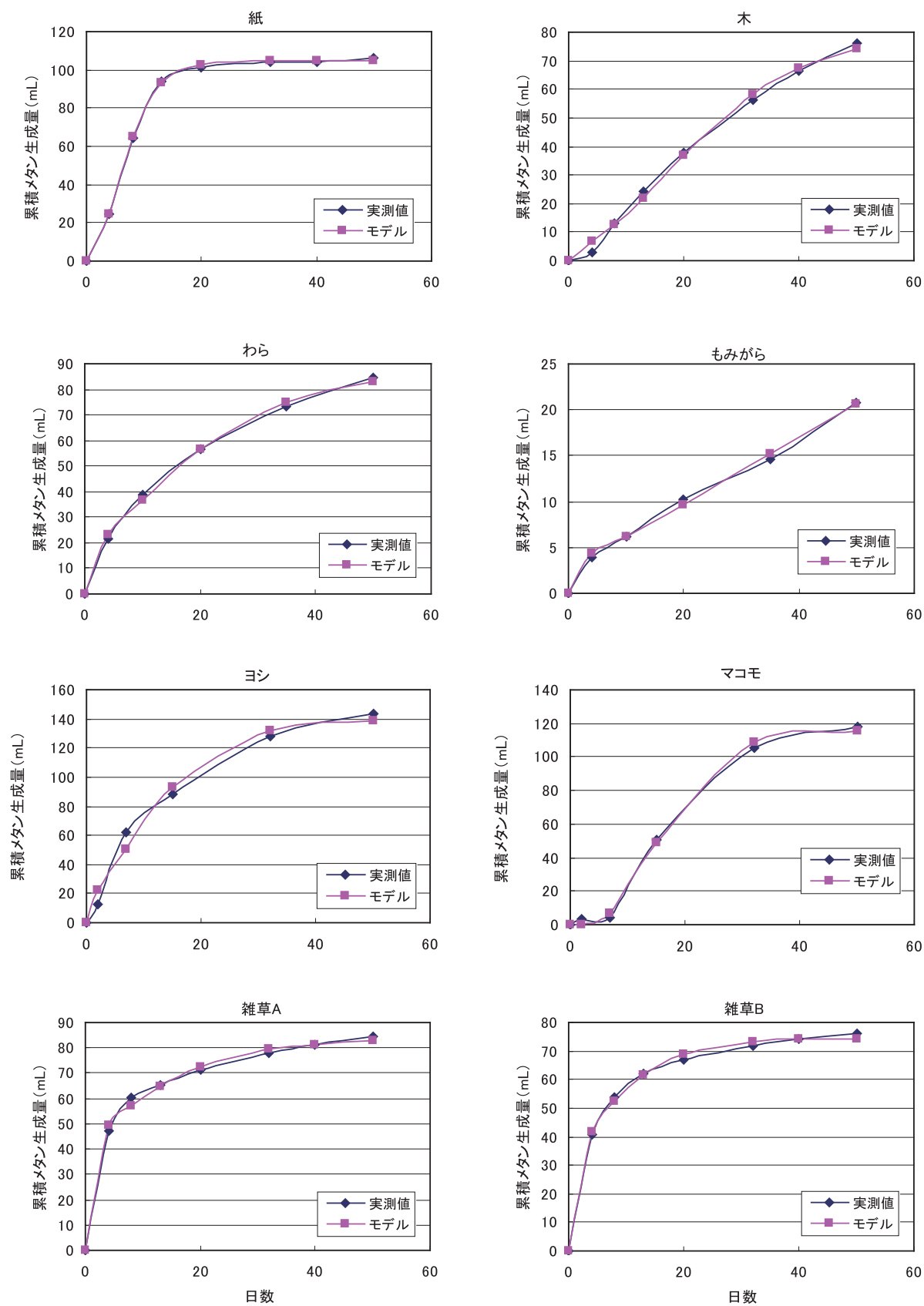


図2 実験結果とモデル外挿

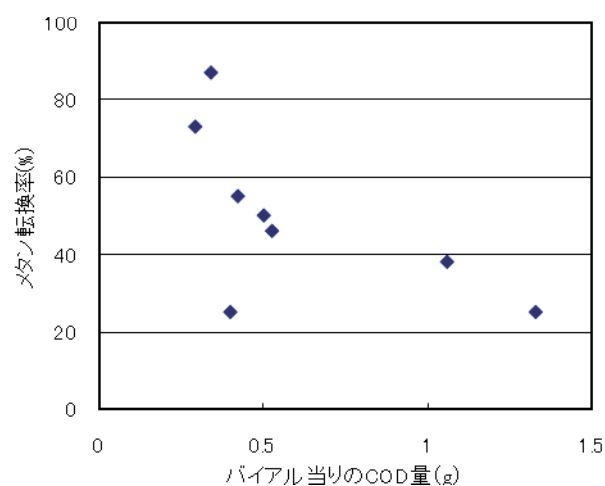
表2 Gompertz モデルのパラメーターとメタン転換率

バイオマス	$P$ (mL)	$R_m$ (mL/日)	$\lambda$ (日)	投入 COD <sub>Cr</sub> (g/バイアル)	メタン 転換率 (%)
紙	104	10.8	1.77	0.340	87
木	81.4	2.15	2.85	0.422	55
わら	88.2	2.22	—	0.501	50
もみがら	35.1	0.383	—	0.399	25
ヨシ	140.1	5.87	—	1.06	38
マコモ	116.3	6.32	7.24	1.33	25
雑草 A	83.9	2.47	—	0.526	46
雑草 B	74.5	3.40	—	0.292	73

モデル式ではメタン生成能が低く見積もられてしまうことになる。

また、図2からわかるように、累積メタンガス発生量の曲線は、実にさまざまな形状を示している。これには分解性の違いに加え、供試量も影響すると考えられる。例えば、生分解性のものが試料中に存在しすぎている（つまり、負荷量が大きい）と、50日間で分解が終了しない可能性や、有機酸による一時的阻害が生じる可能性がある。また、種汚泥による影響も考えられ、下水処理場から採取して間もないと活性が高いが、時間が経過していると活性を発現するまで時間がかかる、つまり、遅延時間が長くなる。

供試量のメタン生成への影響をみるために、バイアル当りの投入 COD<sub>Cr</sub> 量と得られたメタン転換率の関係を図3に示す。大ざっぱに言って、COD<sub>Cr</sub> 量とメタン転換率は逆の相関があるとも見られる。しかし、COD<sub>Cr</sub> 量が 0.4~0.5g であった、一般に分解性の低い木、わらおよびもみがらの結果から、この程度の COD<sub>Cr</sub> 量までは負荷量が過大でなく、試料の分解性に応じたメタン転換率が得られているように判断される。データ数が多くないため断定できないが、COD<sub>Cr</sub> 量が約 0.5g を超えると 50 日間で十分に分解できないおそれがある。試験日数や種汚泥の性状も含め、バイアル試験の方法について標準化しておく必要がある。

図3 COD<sub>Cr</sub> 量とメタン転換率との関係

#### 4. まとめ

未利用植物系バイオマスとして、紙、木、わら、もみがら、ヨシ、マコモおよび雑草2種類を選択し、それらのメタン発酵性について回分式バイアル試験によって調べた。実験の結果から、紙、雑草、木、わらおよび2種類の雑草はメタン転換率が下水汚泥と同等または高く、十分にメタン発酵の原料になることがわかった。

一方、メタン生成能、最大メタン生成速度および遅延時間を推定するために Gompertz 式を適用したところ、実験値とほぼ一致するものの、詳細にみると、とくに重要なメタン生成能について過小評価する傾向が明らかとなった。

例えば、草刈りされた草はごみとして焼却処分されることが圧倒的に多いと推測されるので、未利用植物系バイオマスを実規模メタン発酵施設へ供給すれば、より多くのメタンガスを生み出すことが可能となり、エネルギー・資源枯渇問題の一助となることが可能である。

今後は、バイアル試験の方法を確立するとともに、未利用バイオマスの存在量、バイオマス原料の刈り取り・運搬にかかる費用、メタン転換率の低いものに対しての前処理、有機物以外の資源の回収（特にリン、カリウム）等について調査・検討していくべきである。

#### <参考文献>

- 1) IPCC: Fourth Assessment Report, 2007.
- 2) Tang, N. H., Blum, D. J. W. and Speece, R. E.: Comparison of serum bottle toxicity test with OECD method, *J Env Eng*, ASCE, 116, 1076-1084, 1990.
- 3) APHA, AWWA and WEF: *Standard Methods*, 2000.
- 4) Lay, J.-J., Li, Y.-Y. and Noike, T.: Effect of moisture content and chemical nature on methane fermentation characteristics of municipal solid wastes, *J. Environ. Syst. Eng.*, JSCE, no.552/VII-1, 101-108, 1996.
- 5) 落修一：廃棄物系バイオマスのメタン発酵、野池達也編著、メタン発酵、p.141-154、技報堂、2009.

(平成23年3月31日受理)