

## メタン発酵によるエネルギー生産と地域への多面的な効用

## Energy Production and Multi-contributions to Rural Areas by Methane Fermentation

山 岡 賢\* 中 村 真 人\* 折 立 文 子\*\*  
 (YAMAOKA Masaru) (NAKAMURA Masato) (ORITATE Fumiko)

## I. メタン発酵による再生可能エネルギーの生産

## 1. メタン発酵への期待と現状

メタン発酵は、家畜ふん尿や汚泥などの水分が多いバイオマスから微生物の働きでバイオガスを生成する技術である。バイオガスは、可燃性ガスのメタンを含みガスエンジンによって発電することができる。このため、再生可能エネルギーの固定価格買取制度においても、バイオマス発電の区分の中で、間伐材など由来の木質バイオマスなどとともに、「メタン発酵ガス(バイオガス由来)」として位置づけられている。2018年時点で、メタン発酵ガス発電による電力の買取価格は、39円/kWh(税抜き)と設定されている<sup>1)</sup>(表-1参照)。この価格は、太陽光発電による電力の買取価格(10kW以上2,000kW未満)の18円/kWh(税抜き)に比べて、2倍以上高い。

バイオマス発電は気象条件に左右されない安定した電力供給として期待されつつ、一方で価格算定の基礎となる十分な事例が少なく、今後の発電費用の増加の可能性も含めつつ、買取価格は、制度創設以来据え置かれている状態である<sup>2)</sup>。

## 2. メタン発酵の特徴とエネルギーの生産効率

バイオマスは、草木類18MJ/kg DM(乾物)<sup>3)</sup>、下水汚泥19MJ/kg DM<sup>4)</sup>、牛ふん(堆肥)で17MJ/kg DM<sup>5)</sup>と、いずれも熱量(高位発熱量)を有する。このため、単純には、バイオマスを燃やすとエネルギーが得られる。しかし、バイオマスは生命を起源としているので、多くの水分を含有する。水分量を一定の割合以下に乾燥しないと自然できない。水を蒸発させるには2.3MJ/kgと比較的大きな熱量が必要であり、含水率の大きなバイオマスを自然できる状態に乾燥するには大きなエネルギーが必要である。また、自然できる状態になっても、燃焼の際にはバイオマスに残存する水分の蒸発に必要な熱量で、得られるエネルギーが相殺される。

このため、含水率が90%を超える家畜ふん尿や汚

泥から燃焼によってエネルギーを獲得することは非常に困難である。メタン発酵は、高含水率で燃焼によるエネルギー生成が困難なバイオマスからエネルギー取出しを可能にする「魔術的な」<sup>6)</sup>技術とされる。

メタン発酵の主要プロセスは、発酵槽に原料を投入し、攪拌・加温するだけの単純なものである。発酵槽の嫌気状態を保持することもメタン発酵の必須条件であるが、この点は発酵槽を密閉していれば、発酵槽内に酸素が存在しても、原料として投入されたバイオマスの分解で消費されるので、容易に嫌気状態となる。メタン発酵槽の滞留日数は、10~30日程度である。また、メタン発酵反応を担う微生物群は、自然界の酸素が乏しい場所、たとえば沼の底泥の中や牛などの胃袋に広く生息している。特に牛の胃袋はメタン生成能力が高く、牛などのゲップに含まれるメタンが世界全体の温室効果ガスの排出量の約5%に相当するとされる<sup>7)</sup>。メタン発酵反応を担う微生物群は、生息条件を整えれば容易に繁殖する。

メタン発酵槽の加温温度は、37℃または55℃とされる。37℃の場合は中温メタン発酵、55℃の場合は高温メタン発酵とされる。反応速度は高温の方が速い。一方、反応速度は落ちるが無加温でもメタン発酵は

表-1 主な再生可能エネルギーの固定買取価格\*1

項 目	価格*2	調達期間
太陽光 (2,000 kW 以上)	入札による	20年間
太陽光 (10~2,000 kW)	18円	20年間
太陽光 (10 kW 未満)	26円*3	10年間
風力 (陸上)	20円	20年間
風力 (洋上)	36円	20年間
小水力 (1,000~5,000 kW)	27円	20年間
小水力 (200~1,000 kW)	29円	20年間
小水力 (200 kW 未満)	34円	20年間
地熱 (15,000 kW 以上)	26円	15年間
地熱 (15,000 kW 未満)	40円	15年間
バイオマス (メタン発酵)	39円	20年間
バイオマス (一般木質, 10,000 kW 以上)	入札による	20年間
バイオマス (一般木質, 10,000 kW 未満)	24円	20年間

\*1 引用文献<sup>1)</sup>から作成。

\*2 価格は、1kWh当たりの2018年度の調達価格(税抜き)。

\*3 出力制御対応機器設置義務なしの場合。

\* 農研機構農村工学研究部門

\*\* 農研機構本部

可能で、東南アジアなどの農村地域で利用されている。

加温が必要なため、メタン発酵で生成されたバイオガスが持つ熱量すべてがメタン発酵によるエネルギー産出とはいえない。ただし、原料の加温に必要なエネルギーは、原料を1℃から37℃まで加温すると約0.15 MJ/kg、55℃まで加温しても0.23 MJ/kgと、水の蒸発に必要なエネルギーの10分の1以下と少ない。

図-1に、農林水産省委託研究プロジェクトで千葉県香取市に試作された山田バイオマスプラントでのバイオガスの生産量と加温に必要なエネルギー（設計値）を示した<sup>8)</sup>。

山田バイオマスプラントは、乳牛ふん尿100頭分を想定して日5tの処理として設計された。想定されたバイオガス発生量は約135 m<sup>3</sup>/dで、エネルギーとして約2,900 MJ/dである。一方、加温に必要なエネルギーは約1,340 MJ/dと見積もられた。この加温に必要なエネルギーの内訳は、投入原料の1℃から37℃への加温分、発酵槽壁面からの放熱を補う分および発酵槽から排出されるバイオガスが持ち出す分の加温が見込まれている。これらは加温設備の能力算定に用いられた値であるので、上限値である。たとえば、原料の温度が20℃であれば原料の加温のエネルギーは約400 MJ/d減少する。山田バイオマスプラントの運転中のモニタリングによるとバイオガス生成量は17.1 m<sup>3</sup>/tであったので<sup>9)</sup>、バイオガスによる生成エネルギーのうちの5~7割は加温のエネルギーで相殺される。

この試算は、日処理量5tの山田バイオマスプラントでの算定なので、より大きな容量の発酵槽であれば放熱量は相対的に小さく抑えられる。また、牛ふんに比べてバイオガス発生量が多い生ゴミなどを原料に加えることで、エネルギー収支が改善される。

いずれにしても、木質が燃焼によって1t当たり5~8 GJの有効発熱量が得られる<sup>6)</sup>のに比べると、メタ

ン発酵のエネルギーの生産効率が高いものではない。

## II. メタン発酵がもたらす多面的な効用

### 1. メタン発酵の導入の効用

メタン発酵の主な原料となる家畜ふん尿や汚泥は、水分が多くかさ張り、放置したら腐敗して悪臭を放つ。今日では法律で規制され皆無となったが、かつては家畜ふん尿の野積みが水質汚濁負荷の大きな排出源とされた。メタン発酵では、それら厄介な廃棄物から多少効率が悪くともエネルギーなどの有価物を生産できるので、それらの廃棄物の適正管理の動機付けとなる。

また、従来から家畜ふん尿の有効利用方法である堆肥化と比較すると、堆肥化では原料の含水率を60%程度以下に調整する必要があるのに、メタン発酵は原料の水分調整は不要である。さらに、堆肥化の場合、発酵槽内は通気による微生物反応で発熱し70℃程度の高温となり、有機物の分解で生成されたアンモニアが大量に揮発して、発酵槽からの排気に混じる。発酵槽からの排気を適正に扱わないと、堆肥化施設が悪臭の発生源となる。メタン発酵では発酵槽に通気は行われず、かつ、発酵槽の気相はバイオガスとして回収されるので、メタン発酵施設からの悪臭の放出は少ない。

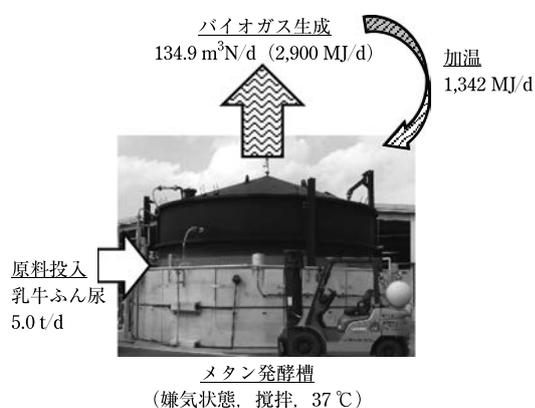
### 2. バイオガスの利用性

太陽光や小水力から得られるエネルギーが電気に限定されるのに対して、メタン発酵によって得られるバイオガスは、ボイラーの燃料として熱を得たり、エンジンの燃料として発電機を運転し電気と熱を得ることができる。エンジンの排気に含まれる二酸化炭素の利用も考えられる。バイオガスを精製しメタンの濃度を高めて自動車用燃料としても利用可能である<sup>10)</sup>。メタンを原料に水素を生産し燃料電池にも利用できる。

ただし、バイオガスの精製や水素への変換は、小規模なメタン発酵施設では経済的に困難であろう。また、発電の際に得られる熱の利用も、冬場はメタン発酵槽の加温に熱を必要として外部に供給する余力が乏しい。夏場には熱が余るが、その時期には外部での熱の需要は乏しい。そもそも日本の農村地域において熱をエネルギーとして利用するための熱導管などのインフラが整備されていない。このため、メタン発酵施設に限らず再生可能エネルギーによる熱の有効利用を促進するには、熱利用のインフラ整備が必要である。

### 3. 消化液の液肥利用による効用

メタン発酵の残さである消化液は、高濃度の有機物や栄養塩などを含む。メタン発酵プロセスでは、軽いバイオガスを取り出すだけなので、原料として発酵槽に投入した家畜ふん尿や汚泥とほぼ同じ体積・重量の消化液が排出される。



(注) 数値はいずれも山田バイオマスプラントの設計値である。

図-1 メタン発酵のエネルギーの生産性

消化液を集落排水処理に用いられている水処理技術で浄化しようとする、たとえば消化液の窒素濃度は集落排水の30倍を上回り、非常に大掛かりで高コストな処理となる<sup>11)</sup>。さらに、水処理では消化液中の窒素を窒素ガスとして大気放出するので循環利用できない。

消化液はそのままの状態ではメタン発酵施設の近傍農地に肥料として施用することが合理的である。製品段階で堆肥と消化液を比較すると、完全状態の堆肥であれば、悪臭はほとんどない。消化液は原料である生ふん尿に比べると、悪臭は大幅に低減しているが、発酵過程で生成されたアンモニア性窒素をそのまま保持しているため、農地に施用した際には近隣への悪臭防止のために速やかに耕起して土壌と混和することでアンモニアの揮散を抑制する必要がある<sup>12)</sup>。

一方で、消化液はアンモニア性窒素を保持していることで、速効性の窒素肥料として利用できる。近年、肥料価格が高止まりしていることから、消化液が安価に提供されれば、作物の生産費削減となる。また、化学肥料を消化液に代替することで、特別栽培や有機栽培につながられる。写真-1に示すとおり消化液を用いて栽培した米がブランド化して販売されている。

東京電力福島第一原子力発電所事故の被災地である福島県大熊町では、特定復興再生拠点地区内の農地の保全管理の観点からメタン発酵による資源循環システムの構想を次のように取りまとめた(図-2)<sup>13)</sup>。

- ① エリアンサス、デントコーン、ソルガムなどの資源作物を農地で栽培する。
- ② 収穫した資源作物を原料にメタン発酵を行い、バイオガスによる発電・熱利用を行う。なお、資源作物のメタン発酵には乾式メタン発酵の導入が検討されている。乾式メタン発酵は原料の含水率を60~80%で運転する方式である<sup>14)</sup>。日本国内で多く稼働しているメタン発酵施設は湿式メタン発酵であり、原料の含水率を90%以上で運転する。乾式メタン発酵を導入した施設は日本国内では少ないが、ドイツでは資源作物や作物残さを原料としたメタン



左：福島県大木町、右：京都府南丹市

写真-1 消化液で栽培されたブランド米

発酵に用いられている。

- ③ 発酵残さは、資源作物を栽培する農地に還元する。大熊町内の農地は、津波・除染で表土が失われ肥沃度が低下している。発酵残さの還元によって肥沃度を回復・向上させる。

大熊町の構想では、除染を終えた農地は放射線量が十分に低下し安全性に問題ない農作物を生産できるが、消費者は当面の間、大熊町産の農産物をほとんど購入しないであろうという前提の上で、帰還して営農を再開したいとする農家の受け皿として、かつ、帰還しても高齢化により営農が再開できない町民の農地の保全を図る方策として、検討されたものである。

住民が避難した原発事故の被災地域では、イノシシやアライグマなどによる農作物への食害や農地の掘返し被害が激しい。エリアンサスなど一部の資源作物は、鳥獣害を受けづらい点も考慮された。

### III. エネルギー生産とその先を見据えて

2010年前後のバイオマスブームの中、農地で「エネルギーを生産」と聞き、著者らも含めて多くの人々は、日本農業が高価で高付加価値な製品を生産する新たな産業に生まれ変わると夢みたのではないかと。

しかし、ブームが去った後冷静に考えると、レギュラーガソリンの小売価格は、60円/Lを上回る税金<sup>15)</sup>を除くと、500mLのペットボトル飲料と同額かそれ以下である。近年、家計支出に占める食料への支出

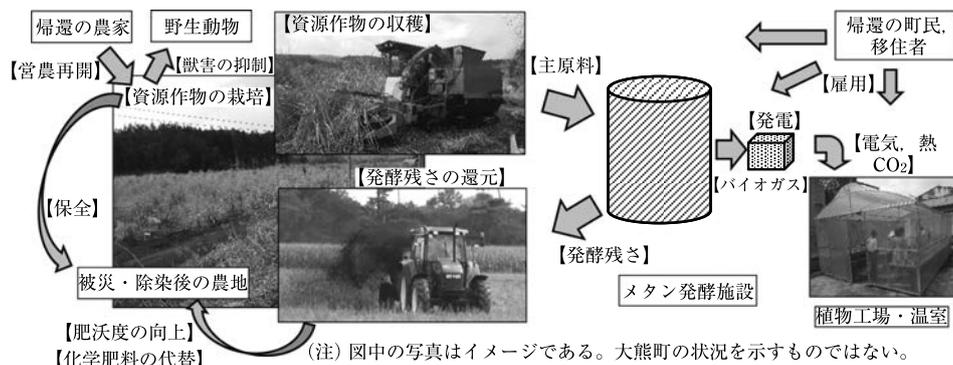


図-2 メタン発酵を活用した特定復興再生拠点地区内の農地の保全管理のための構想（福島県大熊町）

額<sup>16)</sup>の割合は約28%, 1人当たりの食品から摂取必要な熱量は約13 MJ/d (成人男子)<sup>17)</sup>であるのに対して, 家計支出に占める電気, ガス, ガソリンなどへの支出額<sup>16)</sup>の割合は約11%, 1人当たりの消費量は約56 MJ/d<sup>18), 19)</sup>である。日本社会では, エネルギーは食料に比べて低価格で大量消費されている。

メタン発酵は, エネルギー生産において決して「優等生」でないが, 新興国の農村地域では容易に実施できる貴重なエネルギーの生産技術である。消化液の液肥利用によって, メタン発酵施設では, バイオマス→メタン→二酸化炭素→バイオマスの炭素の循環と, バイオマス→消化液(窒素, リンなど)→バイオマスという窒素などの循環の環を2つ同時に構築できる。特に窒素などの循環の環は, もともと農村が有する食料生産機能やそれ以外の多面的機能と連携し波及効果をもたらす。メタン発酵は, 国際的に推進されている持続可能な開発目標(SDGs)実施指針の優先課題「省・再生可能エネルギー, 気候変動対策, 循環型社会」の解決のためのツールとなりうる<sup>20)</sup>。

#### 引用文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁: なっとく! 再生可能エネルギー, [http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/saiene/kaitori/fit\\_kakaku.html](http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/fit_kakaku.html) (参照2018年12月9日)
- 2) 調達価格等算定委員会: 平成30年度以降の調達価格等に関する意見 平成30年2月7日, p.56 (2018)
- 3) 服部育男, 上床修弘, 我有一満, 加藤直樹: バイオマス資源作物の高位発熱量の推定と草種間差異, 日本エネルギー学会誌 94, pp.510~514 (2015)
- 4) 日本下水道協会: 下水汚泥のエネルギーポテンシャル, <https://www.jswa.jp/recycle/energy/e104/> (参照2018年12月14日)
- 5) 田中章浩: 家畜ふん堆肥の燃焼利用技術, 平成27年度家畜ふん尿処理利用研究会資料(畜産草地研究所), pp.19~27 (2015)
- 6) 佐野 寛: バイオマス燃焼, 高温学会誌 33(1), pp.3~7 (2007)
- 7) 小林泰男: カシューナッツ副産物給与によるウシからのメタン生成削減, 環境バイオテクノロジー学会誌 13(2), pp.89~93 (2013)
- 8) 農林水産バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」: アグリ・バイオマスタウン構築のプロローグ, pp.20~21 (2007)
- 9) 中村真人, 柚山義人, 山岡 賢, 折立文子, 藤川智紀, 清水夏樹, 阿部邦夫, 相原秀基: メタン発酵プラントのトラブル記録と長期運転データの解析—山田バイオマスプラントを事例として—, 農工研技報 210, pp.11~36 (2010)
- 10) 柚山義人, 中村真人, 山岡 賢: 地域実証事例 [1] 都市近郊農畜産業地域モデル 山田バイオマスプラント, 農林バイオマス資源と地域利活用 (中川 仁編著), 養賢堂, pp.339~356 (2018)
- 11) 山岡 賢, 中村真人, 折立文子: メタン発酵消化液の液肥利用—地域バイオマスの利用推進に向けて—, ARIC情報 119, pp.12~19 (2015)
- 12) 中村真人, 柚山義人, 山岡 賢, 折立文子: 畑地におけるメタン発酵消化液の液肥利用—肥料としての特徴と利用に伴う環境影響—, 水と土 169, pp.72~79 (2013)
- 13) 大熊町: バイオマス活用事業 検討まとめ(案), 第6回バイオマス活用事業実現可能性検討委員会 資料2, pp.1~7 (2018)
- 14) 野池達也: メタン発酵, 技報堂, pp.105~109 (2009)
- 15) 愛知県石油商業組合: 石油豆知識 税金について, <http://www.aiseki.or.jp/pc/bits/tax.html> (参照2018年12月16日)
- 16) 総務省統計局: 家計調査(家計収支編)時系列データ(二人以上の世帯), <https://www.stat.go.jp/data/kakei/longtime/index.html#time> (参照2018年12月16日)
- 17) 農林水産省: 一日に必要なエネルギー量と摂取の目安, [http://www.maff.go.jp/j/syokuiku/zissen\\_navi/balance/required.html](http://www.maff.go.jp/j/syokuiku/zissen_navi/balance/required.html) (参照2018年12月16日)
- 18) 経済産業省資源エネルギー庁: 平成28年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2017)PDF版, [http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2017pdf/whitepaper2017pdf\\_2\\_1.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2017pdf/whitepaper2017pdf_2_1.pdf) (参照2019年2月13日)
- 19) 総務省統計局: ガソリンへの支出—家計調査(二人以上の世帯)結果より—, 家計調査通信 474号 (2013)
- 20) 中村真人, 山岡 賢, 折立文子, 柴田浩彦: メタン発酵システム構築によるSDGs達成への貢献, 水土の知 86(10), pp.25~28 (2018)

[2019.2.13.受理]

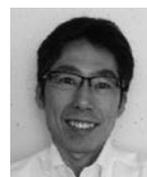
#### 略 歴

##### 山岡 賢 (正会員・CPD個人登録者)



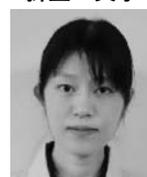
1984年 三重大学農学部卒業  
農林水産省入省  
2016年 農研機構農村工学部門水域環境ユニット長  
現在に至る

##### 中村 真人 (正会員)



2002年 神戸大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了  
(独)農業工学研究所  
2016年 農研機構農村工学研究部門地域資源工学研究領域  
現在に至る

##### 折立 文子 (正会員)



2007年 京都大学大学院農学研究科修士  
2008年 農研機構農村工学研究所  
2016年 農研機構農村工学研究部門地域資源工学研究領域  
2018年 農研機構本部企画調整部  
現在に至る