

# バイオガス発電機の 高効率運用に関する研究

Research on High efficiency operation of biogas generator

## 1. はじめに

太陽光、風力、バイオマスなどの再生可能エネルギーは、持続的に利用することができるエネルギーであり、その利用を拡大することは、持続可能な社会を目指す上で非常に重要である。また、国内に資源の乏しい我が国においては、エネルギーの海外依存度を下げるためにも、今後利用の拡大が期待されている。

しかし、再生可能エネルギーを利用した発電は、発電コストが高いため、初期の設備投資を回収するまでの期間が長く、導入しにくい問題があった。そこで、日本では2012年7月から固定価格買取制度(FIT)を導入し、一定期間買取価格を保証することで、再生エネルギーを利用した発電の普及を促進させている。固定価格買取制度では、太陽光、風力、地熱、バイオマスなど、発電方法によって買取価格が異なり、また、年度ごとに価格が見直される。太陽光発電は普及が進んでいるため、買取価格は低下する傾向にある。一方、バイオマス発電は普及が遅れているため、買取価格は固定価格買取制度導入時から据え置かれており、買取期間も20年と長く設定されている。

そこで、当社は太陽光発電設備を取り扱う中で培った系統連系の設備および知見を活かせる、バイオマス発電設備事業に参入した。バイオマス発電の中でも家畜糞尿や食品残渣を発酵し、メタンを生成することで発電するバイオガス発電に注目した。バイオガス発電設備には、前処理、メタン発酵、脱硫、発電、排熱回収などの技術と知識が必要であり、当社では、それぞれの技術について研究し、改良を進めている。今回はこれらの技術の中で、発電に関する研究内容を報告する。

## 2. 目的

前項で述べたように、バイオガスなどの再生エネルギーによる発電では、発電コストが高いため設備費の回収に長い期間が必要となる。そのため、事業の採算性向上には、初期の設備投資を少なくすること、および高い発電効率を維持し効率良く売電収入を得ることが必要である。バイオガスで発電するために、日本国内でバイオガス発電用の発電機を入手しようとした場合、数社から入手が可能である。日本製の発電機は高性能で、燃料と空気の混合比、点火のタイミングなどを制御し、燃料の発熱量が変化しても、最適な状態で発電ができるように工夫されている。しかし、

高性能な反面、高価であり、当社の顧客として想定している比較的小規模な農家や食品製造業者向けの発電設備ではコスト的に採用できないケースが多い。そこで今回は、発電機の制御機能は制限されるが安価な発電機を採用し、状況に応じて自動制御機器を追加することで全体の設備費を抑えることを検討した。本研究の目的は、ここで得られた知見を実機に反映し、バイオガス発電設備の採算性を向上させることである。

## 3. 実験装置

実験装置は汎用のガス発電機と、本研究のために追加した付帯設備から構成されている。以下に発電機の仕様と付帯設備の概要を示す。また、実験装置全体の概略を図1に示す。

### (1) 発電機仕様

発電機はバイオガスを燃焼し回転力を得るエンジン部と、回転力を電気に変換する発電部から構成される。今回採用した発電機のエンジン部は、排気量が3.7 Lと小型のトラック程度の排気量であり、定格出力は33 kWである。また、燃料に使用できるバイオガスは、メタン濃度50～70%の範囲となっている。発電機の主な仕様について、エンジン部の仕様を表1に、発電部の仕様を表2に示す。

表1 エンジン部の仕様

項目	仕様
定格出力	33 kW
定格回転数	1500 rpm
シリンダ数とレイアウト	直列4気筒
排気量	3.7 L
その他	4ストローク スパークプラグ点火

表2 発電部の仕様

項目	仕様
定格出力	30 kW
定格電圧	200 V
定格電流	87 A
定格周波数	50 Hz
結線	三相4線式
励磁方法	ブラシレス

※ 電力事業部 電力システム部 プラントG

## (2) 付帯設備

付帯設備は、燃料供給装置、空気供給装置、パワーアナライザと抵抗器から構成されている。

燃料供給装置は、燃料を貯蔵するガスバック、燃料を送るブロア、燃料流量を測定する流量計から構成されている。燃料は予めメタンと二酸化炭素を混合し、ガスバックに貯蔵する。発電機の燃料供給仕様は3～5 kPaとになっているので、ブロアを用いて4 kPaに加圧し供給した。

空気供給装置は、空気流量を測定する流量計、空気流量を調整する比例制御式の空気制御弁から構成されている。今回採用した発電機は、空気の吸入量を手動のボール弁で調整する仕様であったため、空気の微調整が困難であった。そこで、空気供給装置に空気制御弁を設置し、発電機を運転中に空気量を微調整できるようにした。

発電した電気は、発電量をパワーアナライザで測定し、抵抗器によって消費した。

## 4. 実験方法

実験は燃料を準備することから開始した。メタン発酵のバイオガスを生成するプロセスは省略し、メタンと二酸化炭素を購入して、任意の割合で混合することで模擬のバイオガスとした。バイオガスは元となる原料によってメタンの濃度が異なり、発熱量が変化する。家畜糞尿および食品残渣から発生するバイオガス中のメタン濃度は、55～65%程度とされているが<sup>(1)</sup>、これは適切な条件で順調にメタン発酵が行われている場合であり、場合によってはメタン濃度がこれより低下することもある。今回採用した発電機

の仕様はメタン濃度50～70%であるが、メタン濃度が低下することも考慮して、メタン濃度40～70%の範囲で混合ガスを準備して実験を実施した。

発電機を運転する場合は、空気比を適切に調整しなければ、効率良く発電機を運転することはできない。空気比とは燃料を完全燃焼させるのに必要な空気量(理論空気量)に対して、どの程度空気を使用したかの割合で、式(1)で表される。

$$m = A/A_0 \quad \dots (1)$$

$m$  : 空気比 [-]

$A$  : 使用した空気量 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$A_0$  : 完全燃焼に必要な空気量 (理論空気量) [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

空気比 $m$ が1よりも大きければ、空気過剰であり(希薄燃焼)、空気比 $m$ が1よりも小さければ、空気不足である(過濃燃焼)。一般的に理論空気量では燃料を完全燃焼させることは難しいので、空気比を1より若干大きくして、発電機等を運用することが多い<sup>(2)</sup>。

実験の手順は、発電機を起動した後、空気制御弁を徐々に開いて空気比を大きくし、まずは希薄燃焼側の発電機が運転可能な範囲を調査した。希薄燃焼側の運転範囲を調査した後、今度は徐々に空気制御弁を絞って空気比を小さくし、過濃燃焼側の運転範囲を調査した。この希薄側と過濃側の運転範囲内で、空気比と発電効率の関係を調査した。

発電機は系統連系しておらず、負荷として抵抗器を用いて調整した。今回は6 kW、12 kW、18 kWおよび定格の30 kWと変化させて発電効率を調査した。

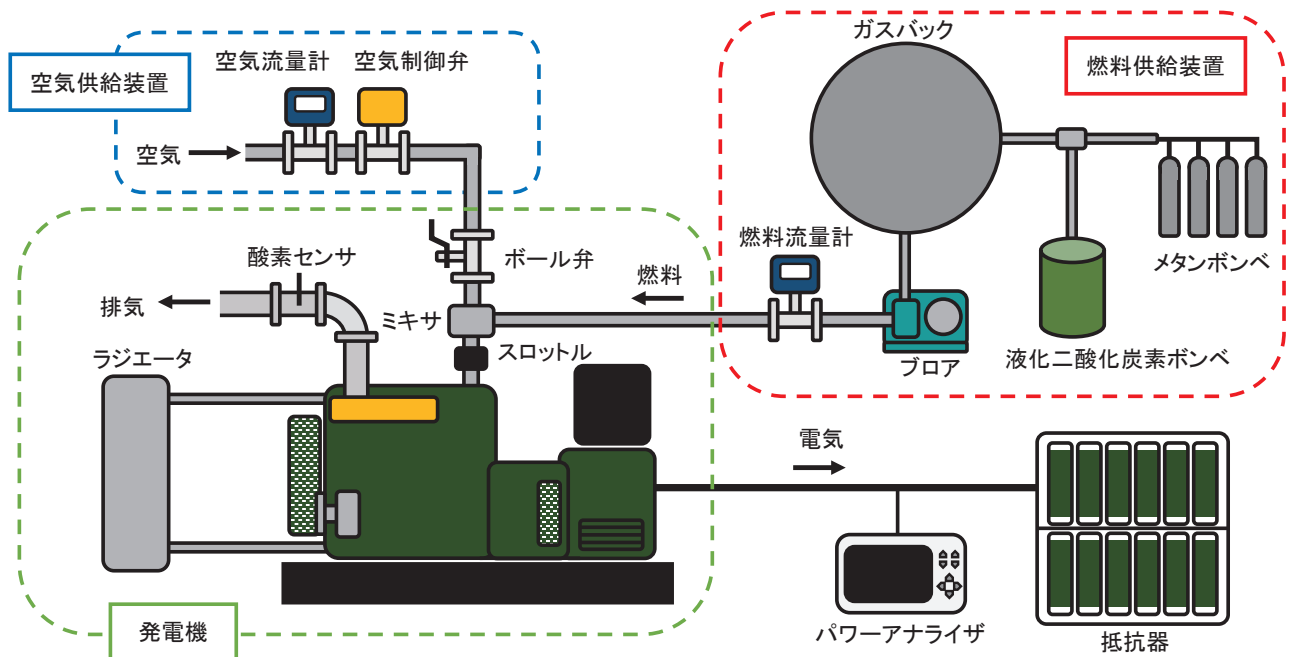


図1 実験装置概略図

## 5. 実験結果

### 5.1 空気比と発電効率の関係

空気比が変化した場合の発電効率へ与える影響を調査した。発電効率は投入した燃料に含まれるメタンの発熱量に対して、どの程度電力が得られたかの割合で、式(2)で計算した。 $Q$ はメタンの低発熱量で0℃、1気圧では35.8 MJ/m<sup>3</sup>である。

$$\eta = \frac{P}{Q \cdot U} \times 100 \quad \dots (2)$$

$\eta$  : 発電効率 [%]

$P$  : 発電量 [kW]

$Q$  : メタンの低発熱量 [kJ/m<sup>3</sup>]

$U$  : メタン流量 [m<sup>3</sup>/s]

#### (1) メタン濃度が仕様範囲内の場合

今回採用した発電機の仕様では、バイオガス中のメタン濃度が50～70%の場合に使用可能となっている。そこで、まずは燃料中のメタン濃度が50～70%の場合について、空気比と発電効率の関係を調査した。燃料中のメタン濃度を50%、60%、70%と変化させた際の、6 kW、12 kW、30 kW出力時の空気比と発電効率の関係を図2に示す。プロットは実験値で、実線は各出力時の実験値の2次の近似曲線である。

空気比1.0以下では発電効率は低下する。これは、燃料を燃焼する十分な空气がなく、導入した燃料の一部が燃焼せず排出されているためである。各出力ともに空気比1.0～1.1程度で最高出力となり、空気比の増加とともに緩やかに発電効率が低下する結果となった。これらは一般的な内燃機関を用いた発電機と同じ傾向である。

各出力において、空気比と発電効率の関係は、メタン濃度に関わらず、概ね同一の曲線上になっていることから、メタン濃度の発電効率に与える影響は小さいと考えられる。この結果から、メタン濃度50～70%の範囲ではメタン濃度によらず、空気比を1.0～1.1程度に制御することで、効率的に発電機を運用できると考えられる。

#### (2) メタン濃度が仕様範囲以下である場合

メタン発酵が順調に進まなくなると、メタン濃度が低下する可能性がある。そこで、今回採用した発電機の仕様範囲外ではあるが、燃料中のメタン濃度が50%以下の発電機の運転状態と発電効率を調査した。今回はメタン濃度40%および45%で実験を実施した。燃料中メタン濃度が低いため、発電機の起動は非常に困難であったが、空気量を絞り、混合気中の燃料濃度を高めることで起動することができた。また、メタン濃度40%の場合は出力12 kW、メタン濃度45%の場合は出力18 kWまで運転が可能であったが、それ以上では

発電機が不安定になった。

メタン濃度40%および45%の場合の空気比と発電効率の関係を図3示す。図3には図2で使用したメタン濃度50～70%の場合の6 kW、12 kWの近似曲線を比較のために合わせて記載した。まず、図2のメタン濃度50～70%の場合と比較すると発電できる空気比の範囲は狭くなっている。メタン濃度45%の場合は空気比1.0～1.1程度、メタン濃度40%の場合は空気比1.0程度が最も発電効率が高くなった。メタン濃度50～70%の場合と比較すると、メタン濃度45%の場合は、同程度の発電効率で発電できているが、メタン濃度40%の場合は、発電効率が大きく低下している。今回の実験により、メタン濃度50%以下であっても空気比を調整すれば起動し、発電することは可能であるが、メタン濃度が40%になると発電効率は大きく低下することが判明した。

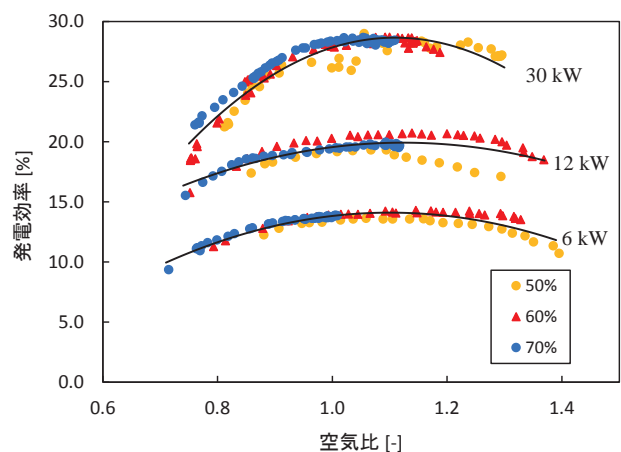


図2 空気比と発電効率の関係(メタン濃度50～70%)

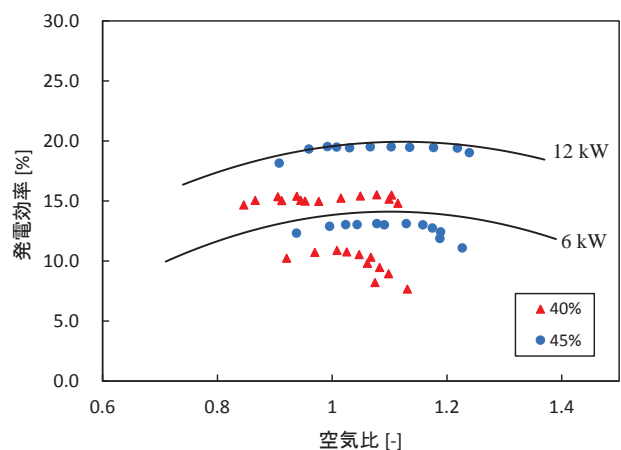


図3 空気比と発電効率の関係(メタン濃度40%、45%)

## 5.2 空気比の制御方法

5.1 空気比と発電効率の関係の結果から、メタン濃度に依存せず、空気比1.0～1.1で制御できれば高い発電効率を維持できることが判明した。ここでは、空気比を制御する方法として、3つの方式を検討した。

### (1) 空気比を自動制御しない方式

今回採用した発電機を改造することなく、そのまま使用することを検討する。発電機には空気流量を調整する手動のボール弁が取付けられている。このボール弁は固定式で、開度を一度決定すると、人が操作しない限り開度を変更することはできない。そこで、開度をどの程度に設定すれば、メタン濃度が変化した場合でも共通して発電できるか、今回設置した空気制御弁の開度を調査することで決定した。空気制御弁開度と発電効率の関係を図4に示す。図4のプロットがある開度では発電機は発電できることを示している。メタン濃度が50～70%の範囲で共通して発電できる空気調整弁の開度は67～76%の範囲である。よって、ボール弁の開度を空気制御弁開度の67～76%の範囲に相当する開度に設定すれば、メタン濃度が50～70%の範囲で共通して発電できることになる。

例えば安定性を重視してボール弁開度を開度67～76%の中央値の72%の開度に設定したとすると、メタン濃度50%の時は発電効率27.7%、メタン濃度60%の時は発電効率27.9%、メタン濃度70%の時は発電効率23.5%となる。メタン濃度70%の場合、最高効率よりも、5%程度低下する結果となった。なお、ボール弁や比例制御弁などの弁は種類やメーカーが異なると、開度と流量の関係が異なる。一般的に弁と弁を流れる流体の仕様は容量係数を用いて表す。日本では容量係数にCv値を使用することが多い。今回使用した空気制御弁の開度67～76%を、Cv値を用いて表すと14.6～20.9となる。

メタン濃度が安定しているバイオガス発電設備では、メタン濃度に合わせた開度にボール弁を設定しておけば問題ないが、メタン濃度が変化する設備の場合は、手動でボール弁をその都度調整しなければ発電効率が低下することとなる。

次に発電機の仕様外ではあるが、メタン濃度が40%および45%の場合に発電可能な空気調整弁開度を調査した。図5のように、メタン濃度が40%の場合は空気制御弁の開度が50～62%、メタン濃度が45%の場合は空気制御弁の開度が54～66%の時に発電可能であり、メタン濃度が50～70%の場合の空気制御弁開度の範囲外になる。そのため、メタン濃度が45%以下に低下した場合は、ボール弁の開度を手動で調整しなければ発電機が停止する。

### (2) 空気比をメタン濃度に応じて制御する方式

今回採用した発電機に空気制御弁を取付けて空気流量を

調整し、空気比を制御することを検討する。バイオガス発電設備では、発生したバイオガス中のメタン濃度を測定し、メタン発酵が順調であるかどうかを常時監視することが一般的である。そこで、発生しているバイオガス中のメタン濃度に応じて空気制御弁を調整し、前項の空気比を自動制御しない場合よりも効率的に発電することができる。

各メタン濃度において、発電効率が高くなる空気比1.0～1.1となる空気制御弁の範囲を図5に示す。空気比が1.0～1.1の範囲の空気制御弁開度を赤色のバーで、その中央値を青色のプロットで示した。また、中央値の近似曲線を黒色の実線で示した。事前に準備した図5の中央値の近似曲線を用いて、現在発生しているバイオガス中のメタン濃度に応じて空気制御弁の開度を決定することで、空気比1.0～1.1で発電機を運転することができると考えられる。しかし、発電機に導入するバイオガスのメタン濃度を、リアルタイムに測定していない場合は、適切な制御ができない可能性がある。また、何らかの影響で空気制御弁の開度と導入される空気量の関係が変化した場合は、それを補正する機能がないため、その都度、データを更新しなければ最適な発電機制御ができなくなる。

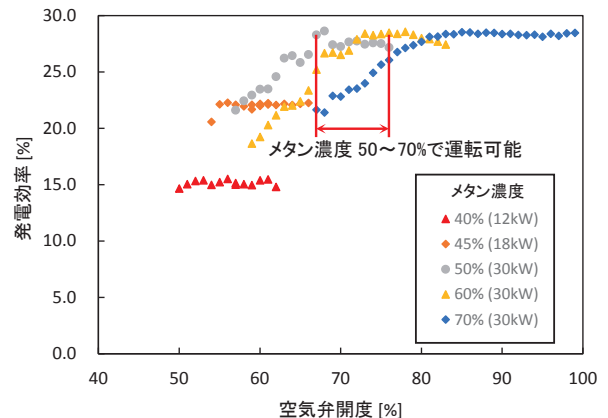


図4 空気制御弁開度と発電効率の関係

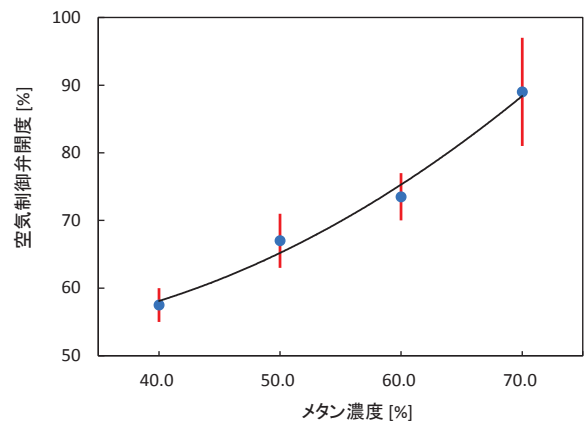


図5 空気比1.0～1.1となる空気制御弁開度

### (3) 空気比を排気ガス中の酸素濃度に応じて制御する方式

今回採用した発電機に、空気制御弁と排気ガス中の酸素を検出する酸素センサを取付けて自動制御することを検討した。酸素センサは酸素存在下では起電力を生じ0.9 V程度の電圧を出力する。逆に酸素が存在しない場合は起電力を生じない。酸素センサを用いれば、ON/OFFで排気ガス中の酸素の有無を判断することができる。このような酸素センサは一般的な自動車エンジンの制御に使用されている。そこで、市販されている自動車エンジン用の酸素センサを入手し、発電機の排気管に取付けて使用した。

排気ガス中の酸素を検出し、酸素が検出されない場合は、空気比が1以下で、投入した燃料に対して必要な酸素が不足していると考えられる。逆に酸素が検出される場合は、空気比が1より大きく投入した燃料に対して空気が多いと考えられる。そこで、酸素が検出されなければ空気制御弁を徐々に開いていき、酸素が検出されれば空気制御弁を徐々に閉じていくフィードバック制御を追加し、発電機の空気比を1.0前後で制御することを試みた。

メタン濃度60%の燃料を準備し、空気比が1.2となるように、空気制御弁を目標値の空気比1.0より開いた状態から自動制御を開始し、制御がどのように行われるか調査した。結果を図6に示す。空気制御弁は徐々に閉まり、その後、酸素比は1.0前後で調整されている。今後は応答時間の短縮やハンチングを小さくするために設定を調整する予定である。このように、酸素センサを用いて空気比を排気ガス中酸素濃度に応じて制御すれば、発電機を発電効率の良い空気比1.0前後で運用することができる。

## 6. 費用対効果

発電機の効率がバイオガス発電設備の売電収入に与える影響を計算し、5.2項で検討した空気制御方法の費用対効果を試算する。30 kW程度の小型のバイオガス発電設備を想定し、1日のメタン発生量を260 m<sup>3</sup>と設定した。また、今回採用した発電機の最大発電効率は28%であることから、メタン濃度の変動などで発電効率が1%低下したとして、27%の発電効率の場合を比較対象として計算した。

メタンの発熱量を35.9 kJ/L、固定価格買取制度(FIT)の買取価格を39 円/kWhとし、電力変換損失等がないものとする1日の売電収入は表3ようになる。試算結果から売電収入の1日あたりの差額は千円程度となる。5.2項で検討した自動制御に必要な機器は、10万円に満たない費用で設置可能である。今回検討した自動制御を用いて、発電効率を1%向上させたとしても、自動制御機器は設置に要した費用を80日程度で回収可能である。これは設備全体の費用回収期間が10年程度かかることから考えると、費用対効果は非常に高いと考えている。

## 7. まとめ

発熱量が変化するバイオガス発電を想定して、燃料の発熱量を変化させて発電機の発電効率を調査した。その結果、メタン濃度50～70%の範囲ではメタン濃度に依存せず、空気比を1.0～1.1にすることで高い発電効率が維持できることが判明した。この結果を用いて、空気比の自動制御によって高い発電効率を維持する方法を提案した。今回提案した自動制御方法は費用対効果も高く、バイオガス発電設備の採算性を向上させることができると考えている。

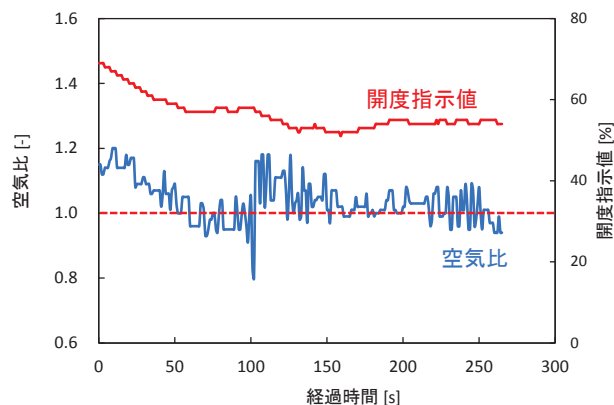


図6 空気比1.0自動制御結果

表3 売電収入の試算

項目	計算結果	
メタン発生量	260 m <sup>3</sup> /日	
発電効率	28 %	27 %
発電量	726.0 kWh	700.1 kWh
売電収入	28,313 円/日	27,302 円/日

## 参考文献

- (1) 野池、佐藤、安井、李、落、河野、渋谷、松本：「メタン発酵」技報堂出版株式会社（2009）
- (2) 架谷、木村、新井、佐藤：「燃焼の基礎と応用」共立出版株式会社（1986）