

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「低コスト小型メタン発酵及び脱臭機能付バイオガス発電装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成24年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 京葉瓦斯株式会社

目次

第1章研究開発の概要	
1. 背景	・・・ 2
2. 研究目的及び目標	・・・ 3
3. 研究体制	・・・ 3
4. 成果概要	・・・ 5
5. 当該研究開発の連絡窓口	・・・ 5
第2章本論	
1. 小型メタン発酵装置の開発	
1-1 実用機的设计、試作と最適化運転	・・・ 7
1-2 中温菌によるメタン収率試験	・・・ 8
2. バイオガスによる最適燃焼発電システムの開発	
2-1 実用機的设计、試作と最適化運転	・・・ 10
3. 脱臭機能性向上のためのシステム化	
3-1 悪臭成分の燃焼脱臭及び排ガスのセラミック脱臭剤による併用試験	・・・ 15
4. 発酵残渣の有効利用技術の開発	
4-1 メタン消化液栽培試験	・・・ 17
5. 総括	・・・ 20

第1章 研究開発の概要

1. 背景

東日本大震災の影響で、風力、太陽光、バイオマスなどの再生可能エネルギーの開発に加速がかかっている。バイオマスの活用を促進するためのバイオスタウンは全国で平成22年3月現在126件構想されており、64%にあたる172件が家畜排泄物の肥料化を、更に43%にあたる117件でメタン発酵を検討している（バイオスタウンアドバイザー宇佐洋二氏資料参照）。一方で実用化されている92事業においてメタン発酵が採用されているのは15件で、実稼動は更に少なく、現在のところ普及ベースにあるとはいえない。その理由として高額な設備費が最大の原因と考えられる。現在普及している事業においても数億円規模の設備に補助金事業を前提として組合せたものが一般的であり、補助金がなくても普及できるような低コストシステムの開発が期待されている。

一方、様々なバイオマスを利用可能なスターリングエンジンはバイオマス発電の中心的な存在となるべき外燃機関であるが、古くから開発されてきた技術にも拘わらず、その普及は、特殊分野や研究用に留まり実用化されたバイオマス発電としては、事実上存在しないというのが現状である。部品点数が少なく、機器の内部を痛めにくい優れた特徴をバイオマスへの応用に結びつけること、また実用可能なコストパフォーマンスが期待されている。最近量産小型スターリングエンジンが開発されるようになったが、家庭用発電給湯機として欧州で一部普及しているに過ぎない。これを契機として国内外へのバイオマス利用に最短距離で結びつけることを使命と考え、今回のプロジェクトに取り組むに至った。

また、これまで実施したヒアリング調査によれば、メタン発酵過程において副生する捌ききれないほどのメタン発酵消化液の処分がこれまでの問題であり、メタン発酵導入の成否に影響する要因となっている。肥料として露地栽培で利用する場合、季節による消費変動を考慮する必要があるが、メタン発酵消化液は発電と共に発生するため、年間でのコンスタントな利用を意識しなければならない。ハウス栽培や植物工場においては、養液を使って周年で様々な植物を栽培に取り組めるため、液体であるメタン発酵消化液の養液（土耕）栽培の利用が今後の課題である。メタン発酵消化液は、養液（土耕）栽培に適しており、この分野で肥料化の研究で経験のある茨城大学の協力の下に、技術検証に取り組んだ。

更に、畜産現場のヒアリングを通して悪臭問題が最大の懸案事項の一つとなることが分かった。これまであまり問題がないと思われた郊外においてさえも市街化の進展により畜産農家は苦しい状況にある。一方で六次産業化を指向する農家も多くあり、周辺環境との共存のためにも環境問題に対する積極的な取組みが望まれている。脱臭方法において燃焼脱臭は優れた方法であるが、その燃料を購入するのであれば、高額な維持費となり現実的でない。しかしながら、悪臭空気を吸い込みながら自家製のバイオガスを燃料とする脱臭ならばよりよい解決方法の一つとなる。更にセラミック脱臭剤などの利用も含めて積極的に悪臭対策に取り組むことが、本開発品の普及を促進する上で必須要素であると考えた。

以上が、本課題の解決に取り組んだ動機である。

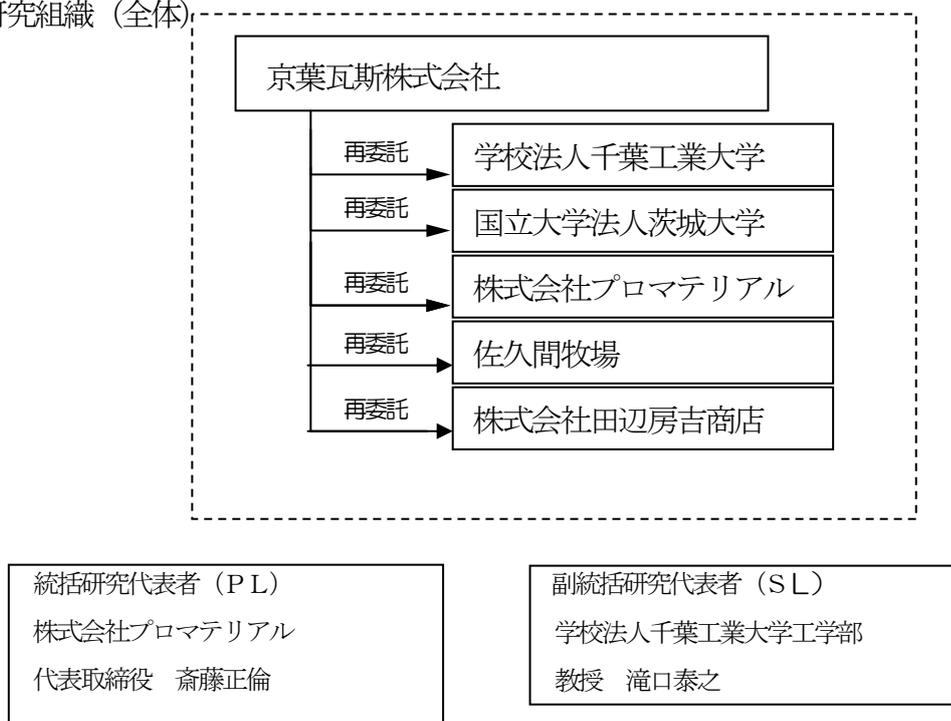
2. 研究の目的及び目標

本研究開発の目的は、低コスト小型メタン発酵及び脱臭機能付バイオガス発電装置の開発である。安価な材料、デバイスの選定、及び既製品の利用可能なモジュール型とすること、一方、従来機器を痛めないためバイオガス利用の内燃機関や燃料電池による発電は煩雑な浄化装置を必要としたが、スターリングエンジンは外燃機関である特徴を生かしてそれらの設備を簡素化すると共に量産型小型スターリングエンジンを採用することで、従来方式に比べ約 50%程度 of 設備の低コスト化を図る。同時に電力、発酵への熱利用を含め総合的な省エネルギー化を図る。また、スターリングエンジンの効率的な作動のための管状火炎バーナを開発すると共に環境性のよい燃焼が期待できることから悪臭対策にも役立つ。バイオガスの悪臭成分も含めて燃焼により浄化すると共に自己再生機能のあるセラミック脱臭剤をシステム化し高度化を図ることで排ガス中の NO_x SO_x の低減も可能とし環境性の向上にも努める機能をもたせる。

発酵システムについて千葉工業大学の開発した、簡易なサイホン原理を応用した自動浸漬培養技術を含む新方式を開発すると共に量産型既成材料を極力使用した低コストな装置の構築を行う。メタン発酵残渣が極力少なくなるような、菌の馴化技術、有効利用技術も併せて開発する。発酵残渣の肥料効果の検証としては、第 1 段階として、原材料や成熟程度の異なるメタン発酵残渣が植物体に及ぼす生育阻害などの悪影響をまず明らかにすることで、安全安心な利用法を検討する際の基礎とする。そのうえで、残渣の発酵レベルの違い、施用方法、施用量が植物の生育に及ぼす影響を明らかにする。さらに、育苗培地への最適な施用形態を検討する。これらの知見を総合して、年間で利用しやすい養液土耕栽培（バッグ栽培）へメタン発酵消化液を追肥として利用する方法を検討する。

3. 研究体制

(1) 研究組織 (全体)



(3) 管理員及び研究員

【事業管理機関】京葉瓦斯株式会社

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
松本 二郎	技術研修センター参与	⑤-1、⑤-2、⑤-3
永塚 孝幸	技術研修センター係長	⑤-1、⑤-2、⑤-3

② 研究員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
松本 二郎 (再)	技術研修センター 参与	①-2、②、③
永塚 孝幸 (再)	技術研修センター 係長	②-1、②、③

【再委託先】

③ (研究員)

学校法人 千葉工業大学

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
滝口 泰之	工学部 教授	1-②、③

国立大学法人 茨城大学

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
井上 栄一	農学部 准教授	④

株式会社プロマテリアル

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
斎藤 正倫	代表取締役	①-1、②

佐久間牧場

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
佐久間 孝雄	担当	①-1、②

株式会社 田辺房吉商店

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
浦辺 誠	担当	①-1、①-2

④ 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
斎藤正倫	株式会社プロマテリアル 代表取締役	PL
滝口泰之	学校法人千葉工業大学工学部 教授	SL
井上栄一	国立大学法人茨城大学農学部 准教授	
浦辺誠	株式会社田辺房吉商店 茂原農場担当	
佐久間孝雄	佐久間牧場 担当	
松本二郎	京葉瓦斯株式会社 技術研修センター参与	業務管理者
前川孝昭	国立大学法人筑波大学 名誉教授	アドバイザー
石塚悟	国立大学法人広島大学大学院教授	アドバイザー
高見弘	学校法人芝浦工業大学 工学部 教授	アドバイザー
横田剛	有限会社チャイルドフラワー	アドバイザー

4. 成果概要

テーマ名 低コスト小型メタン発酵及び脱臭機能付バイオガス発電装置の開発

22年度に得られた基礎技術をベースとして、23年度の主な目的は小型発酵機及びスターリングエンジンユニットの実用機を試作設計することである。また、燃焼脱臭とセラミック脱臭剤を併用した脱臭機能技術の確立とメタン発酵消化液の養液栽培における有効利用技術を確立することである。

計画と成果概要

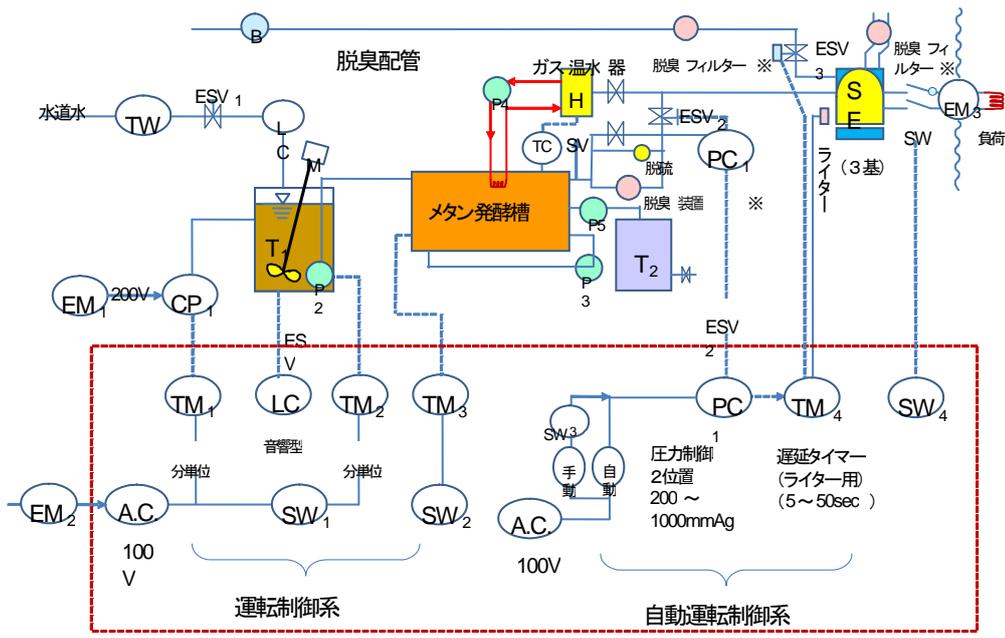
メインテーマ	サブテーマ	計画	成果概要
1. 小型メタン発酵装置の開発	1-1 実用機的设计、試作と最適化運転	プロトタイプ製作から技術的課題を抽出し、改良を加えると共に、低コスト用部材の選定、既製品の応用など低コスト化に向けた実用機を製作し、実証試験を行う。	発酵装置の構造は、場所を選ばない全天候型のリサイクル部材の利用可能なコンテナ型を採用した。発酵部は気相、液相を一つの膜式のバッグにした。極力シンプルな構造にし、低コスト化に努めた点である。リサイクル部材として流通しているものを選定しているため、大幅な低コスト化が期待できる。
	1-2 中温菌によるメタン収率試験	プロトタイプで製作した発酵槽を用いて省エネ性の観点からメタン収率のよい中温菌を検索する試験を実施する。	3つの発酵槽の温度を変えて試験可能な簡易メタン発酵槽を用いて試験を実施した。培養条件の設定により収率を向上させ中温菌で少しでも省エネルギー化を図ることを目的としている。現在のところ、メタン発生量とメタン菌の相関解析で中温菌の同定も可能などところまできており、今後のフィールドテストで応用する。
2. バイオガスによる最適燃焼発電システムの開発	実用機設計と最適化運転	プロトタイプの運転時における問題点の解析から技術的課題を見出し、実用機的设计製造、運転試験を行う。	量産品のスターリングエンジンをベースとして、実用機の基本となる管状火炎バーナを開発し、ユニット化した。また、3台の発電ユニットにより台数制御を行えるシステムとした。
3. 脱臭機能向上のためのシステム化	悪臭成分の脱臭及び排ガスのセラミック脱臭剤による併用試験	燃焼脱臭及び排ガス浄化試験を22年度基礎データを得たセラミック脱臭剤を用いてフィールド試験を実施すると共にその制御技術を確立する。	セラミック脱臭剤と燃焼脱臭の併用により90%以上の脱臭を確認した。セラミックの再生条件を検討しており、今後はフィールドテストを通して様々な顧客に対応可能な技術を確立する。
4. 発酵残渣の有効利用技術の開発	メタン発酵消化液試験	苗ポット試験で得た知見をベースに養液栽培における追跡調査を行い、残渣高度堆肥化技術を確立する。	養液土耕栽培(バッグ栽培)にメタン発酵消化液を追肥として利用する方法を実証した。概ね良好な結果が得られた。今後1年間のフィールドテストにより検証してゆく。

京葉瓦斯株式会社 技術研修センター 参与 松本二郎 千葉県市川市市川南 2-8-8

TEL047-325-4500 FAX047-323-0692 E-mail j-matsumoto@keiyogas.co.jp

株式会社プロマテリアル 代表取締役 斎藤正倫 東京都港区東新橋 1-2-16

システム図と試験サイト写真



※脱臭フィルター位置検証中



(SE) スターリングエンジン発電装置 3 基



1 kW SE 単体



(T 2) 消化液タンク

メタン発酵槽

(T 1) レシーバータンク



脱硫脱臭装置

第2章 本論

1. 小型メタン発酵装置の開発 (プロマテリアル 齊藤正倫)

1-1 実用機の設計、試作と最適化運転

実施内容要約

2011年12月より、佐久間牧場内にスターリングエンジン用バイオガス発生システムを設置した。システムフロー図を以下に示す(図1)。牛糞尿は一旦既設の尿溜槽に溜められており、カッターポンプによりレシーバータンクに送られる。レシーバータンクでは液位計により井戸水と攪拌機で混合する。レシーバータンクからメタン発酵槽へは、タイマーによる時限制御で送られる。移送と同時にメタン発酵槽内の内圧によりメタン発酵槽内の消化液が消化液タンクへ送られる。発酵槽内で発生したバイオガスは、液位と圧力制御機により2~9kPaに制御され、スターリングエンジンへと送られる。発酵槽とスターリングエンジンの間には脱硫脱臭装置を設置した。装置の仕様については表1に示す。

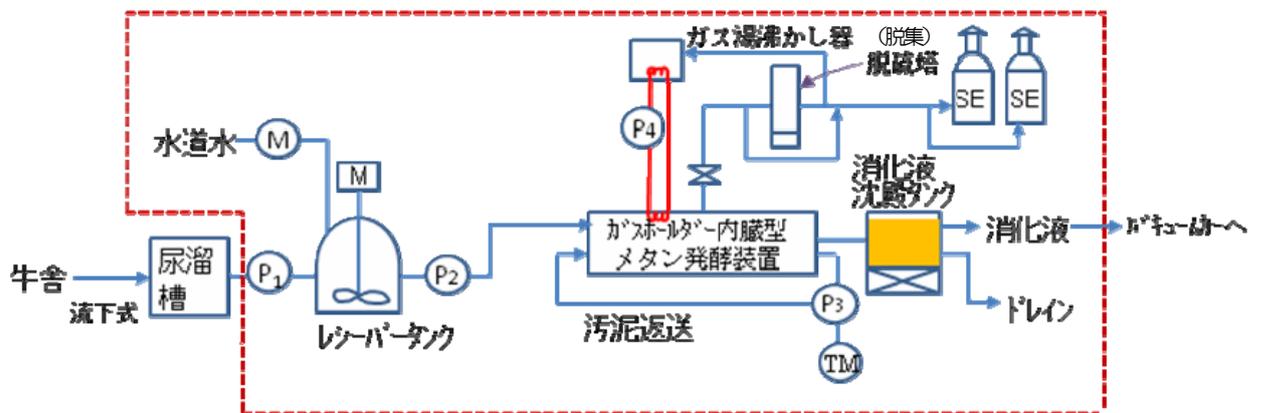


図1 システムフロー図

表1 主な装置仕様

(1) レシーバータンク	1 m ³ 、攪拌機0.4kW 付き
(2) メタン発酵装置	発酵様式；在来法；P VC 多層ラミネートバッグを海上輸送コンテナ内に収納したガスホルダー内蔵型①総容積：28.13 m ³ ②気相容積：11.2 m ³ ③液相容積：16.9 m ³
(3) メタン発酵関連	①投入牛糞尿：300kg/日 ②基準揮発性乾物量：50.7kg/日 ③設計バイオガス量 (メタン濃度)：10.1 Nm ³ /日 (60%)
(4) バイオガス	①低位発熱量 (メタン濃度60%として)：21.44 kJ/Nm ³ (5,145kcal/Nm ³) ②メタン低位発熱量：35.726kJ/Nm ³ (50.016kJ/kg)
(5) 消化液	①投入原料の希釈：投入原料に300kg/日に井戸水を合計500kg/日 ②設計平均水理学的滞留日数 (HRT)：16,900/500=33.8日

当該装置の主要構成部であるメタン発酵装置の位置は牛舎から流下する方式による尿だめの近くに配置すること、またメタン消化液はトウモロコシ畑や牧草地に糞尿散布機で散布する必要があるため、牧場内農道と平行に設置する必要があった。そのため、コンクリート床と屋根のある農機具舎の横に発酵槽を設置し、農機具舎にスターリングエンジン発電機3基を設置した(図2)。また、電源は牛糞尿溜舎内まできているので、ここから分岐してメタン発酵装置内の配電盤に電力を引き込んだ。

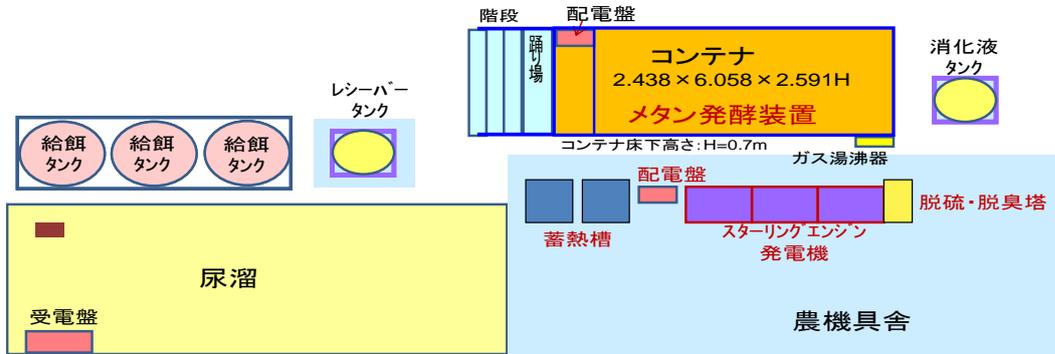


図2 装置配置図 (P 6 写真参照)

低コスト化への試みとして、メタン発酵槽を極力簡素にしたことである。輸送用コンテナの内部を断熱した上で一つのPVC多層ラミネートバッグでメタン発酵槽とガスホルダーを兼用した。今後1年間のフィールドテストにより性能を実証する。更に、コンテナ、レシーバータンク、消化液タンク等は中古品が数十万円単位で流通していることから、従来にない低コスト化、組合せにより規模の拡大が期待できる。

1-2 中温菌によるメタン収率試験

(1) 目的

家畜排泄物を用いて培養ビンによるメタン発酵を行い、家畜糞尿の種類、添加物の影響など培養条件を変えた場合のメタン発生量を経時的に測定した。

(2) 実験方法

培養ビンにバイオガス捕集用のテドラーバッグを付け、所定量の家畜排泄物と添加物を加え、所定温度のインキュベータ内でメタン発酵を行った。数日毎にテドラーバック内に捕集されたバイオガス量は水上置換法で測定した。さらに、そのバイオガス中のメタン濃度をガスクロマトグラフィーにより測定した。鶏糞は田辺房吉商店茂原農場のものを、牛糞尿は佐久間牧場のものを用いた。

(3) 結果

① 牛糞尿を用いたメタン発酵

1000ml 培養ビンに表2に示した牛糞尿、破碎枝、水、および種汚泥を入れ、37°Cのインキュベータ内でメタン発酵を行った。結果を図3に示す。

表2 牛糞尿を用いたメタン発酵の組成

	培養④	培養⑤	培養⑥
牛糞尿 (g)	151.5	150.0	148.0
破碎枝 (g)	36.1	36.0	36.0
水 (ml)	300	600	—
種汚泥 (ml)	—	—	300

図3より、牛糞尿で種汚泥を加えた場合はメタン発生量が抑制され、種汚泥を加えない場合の方が5～7日目以降、メタン発生が確認された。このことより、牛糞尿中にはすでにメタン発酵に必要な微生物が十分存在し、嫌気的条件下にすることでメタンが直ちに発生することがわかった。メタンガスの累積発生量は最大約1500 mlであった。

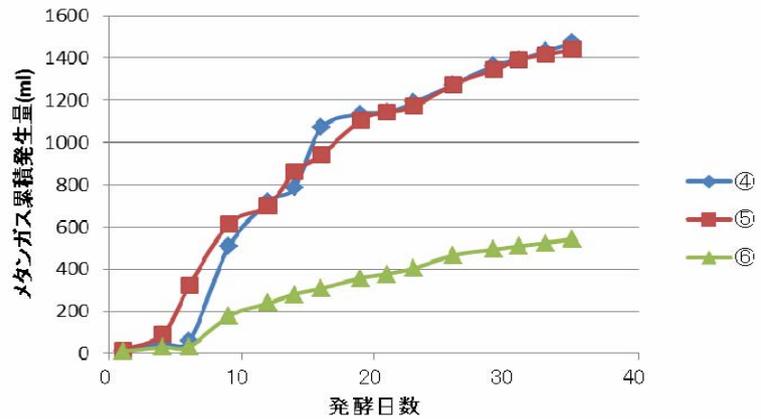


図3 牛糞尿を用いたメタン発酵

また、牛糞尿1gあたりのメタン発生量は9.93 mlであった。

② 鶏糞と牛糞尿のメタン発酵の比較

鶏糞と牛糞尿、およびそれらの発酵産物である消化物の元素分析結果を表3に示す。

表3 糞尿試料およびそれらの消化物の元素分析

	炭素 (C) 含量	窒素 (N) 含量	C/N
鶏糞	10.2	1.20	8.53
牛糞尿	3.08	0.238	13.0
鶏糞消化物	0.488	0.0877	5.60
牛糞消化物	0.389	0.0433	8.98

表3より、鶏糞と牛糞尿を比べると、炭素量が3.3倍、窒素量が13倍鶏糞の方が高い結果となった。このため、牛糞尿と比べて鶏糞のメタン生成量が4.1倍高くなったと考えられる。また、鶏糞のC/N値は8.53と牛糞尿の13.0と比べて小さい値となった。文献よりメタン発酵に適しているC/N値は10～20とあったが、今回、C/N値8.53の鶏糞でもメタン発酵を行うことができた。さらに、メタン発酵の残渣である消化物はどちらのものも、炭素および窒素含量が発酵前の試料と比べて10分の1以下に低下したことから、メタン発酵が十分に進んだと思われる。

1.6 メタン発酵液のメタン生成菌のDGGE解析

培養ビンを用いてメタン発酵を行い、数日毎にサンプリングした培養液のメタン生成菌のDGGE解析を行った。プライマーはメタン生成菌用のものを用いた。鶏糞から単離菌を、牛糞から複数のメタン菌を同定中である。

(4) 考察

- 1) 鶏糞と牛糞尿のメタン発酵において、メタン生成量は鶏糞および牛糞尿がそれぞれ質量1kgあたり、40.4L、9.93Lであり、鶏糞の方が、多量のメタンを生成した。
- 2) 鶏糞と牛糞尿のメタン発酵物のDGGE解析より、メタン生成菌の種類は鶏糞に少なく、牛糞尿に多いことがわかった。
- 3) 鶏糞をメタン発酵させる場合、種汚泥を入れない場合はメタン発生がおこるまで長時間を要することから、メタンの発生効率を高めるためには種汚泥の添加が必要と思われる。これは鶏糞中にメタン生成に関与する微生物叢が少ないことが推察された。
- 4) 牛糞尿は種汚泥の添加がメタン発酵を低下させた。これは牛糞尿発酵物にメタン発酵を阻害する因子が含まれることが考えられる。さらに、牛糞尿には、多くのメタン発酵に必要な微生物叢がすでに含まれるためであると推察された。

2. バイオガスによる最適燃焼発電システムの開発（株式会社プロマテリアル齋藤正倫）

2-1 実用機的设计、試作と最適化運転：

序論 東日本大震災後、非常用電源の重要性が認識され、ガスエンジンやディーゼルエンジンを用いた発電システムの需要が高まっている。しかし、これら内燃機関は、特定・高品質の燃料を必要とするため、より多種の燃料に対応できる外燃機関、とりわけ、理論熱効率が高いスターリングエンジンがその動力源として注目を集めている。

このスターリングエンジンは、高温熱源と低温熱源間で作動するが、受熱部は一般的に円筒状であり、この円筒部を、いかに効率良く、且つ、均一に加熱するかが発電効率とエンジンの寿命に大きく関係する。

そこで、近年、“管状火炎バーナ”なるものが開発され、これにより温度帯が均一な燃焼ガスが得られることが明らかにされた。ここで、管状火炎 (Tubular Flame) とは、Ishizuka によって見出された円筒座標系の火炎素のひとつで、回転伸長流中に形成される滑らかな層流状の表面を持ち、燃焼熱学の立場から研究されてきた火炎である。円筒座標系の火炎素として研究の対象とされることに加え、Tennekes によって提案された乱流燃焼中の火炎片の構造と極めて類似しているものと考えられ、このような側面からも研究の対象とされてきた。火炎構造は軸対象で、濃度・速度・温度等も軸対象の分布を持つ。管状火炎は次のような優れた特性を持つことが明らかになっている。

- ① 温度分布の対称性から、断熱性が高い火炎である。
- ② 内部が密度の低い既燃ガス、外部が密度の高い未燃ガスという構造から、流れの回転運動に対して空気力学的に安定である。
- ③ 火炎は低温の未燃ガスに覆われているため、バーナ壁への熱的負担をかけない、いわゆる自己冷却作用を持っている。

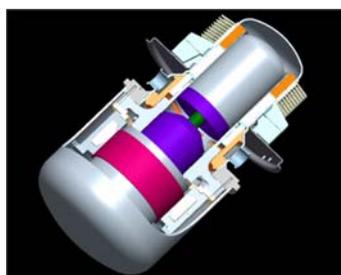
平成22年度より、スターリングエンジン用管状火炎バーナの開発を試みたので報告する。

(1) 目的

本研究では量産型のスターリングエンジン (Microgen Engine Corporation 製、定格出力 1kW (表1、図1)) 用の管状火炎バーナを試作し、高効率化を目指すことを目的としている。また、燃料としては天然ガスの主成分であるメタンや、一般家庭用のLPGとしてプロパン、および、バイオガスを模したメタン/二酸化炭素混合気を用い、多様な燃料を利用できることを確認する。

表1 スターリングエンジン発電機 諸元

形式	FPSE フリーピストン型 スターリングエンジン
出力	1 kW級
電圧	230V
周波数	50Hz
使用ガス	ヘリウム
充填ガス圧力	約 25at
起動温度	180~525°C
本体重量	約 50kg



フリーピストン型内部構造



工場出荷製品

図1 スターリングエンジン発電機の形状

(2) 管状火炎バーナの開発

①管状火炎バーナの構造

22年度の知見を元に、マイクロジェン社のスターリングエンジン発電機の受熱部に適応する管状火炎バーナを開発する。主要な構造部は以下の通りである。(図2、図3)

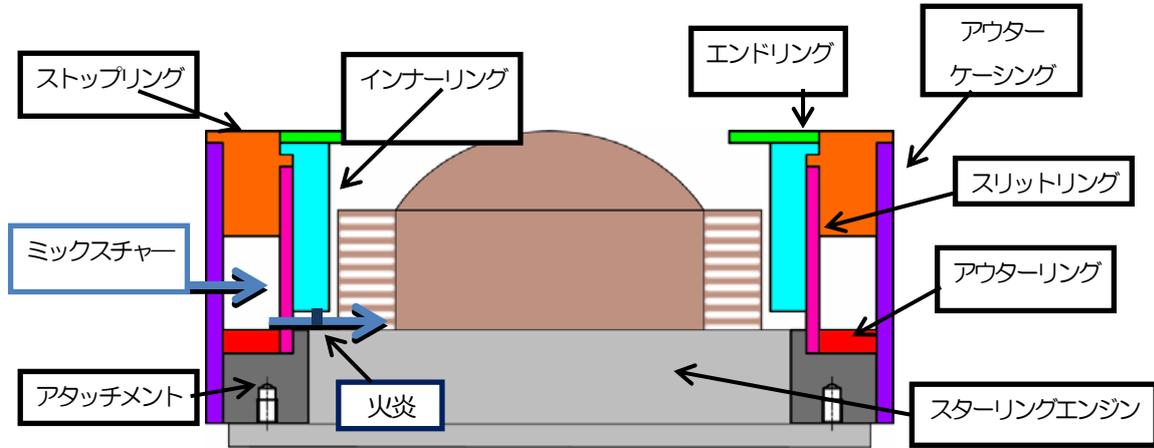
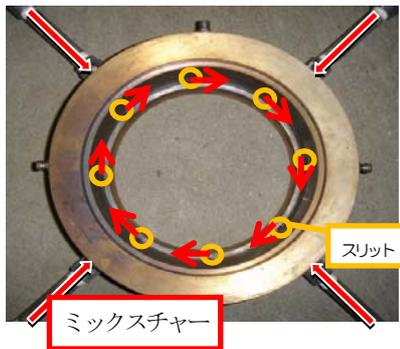


図2 管状火炎バーナの構造



スリットから可燃性混合気が
接線方向に吹き出し、管状火炎を形成。

図3 火炎の噴出し方向

②火炎形状観察実験

1) 方法

まず、コンプレッサから吹き出された空気を浮き子式流量計で測定値に設定し、次に希釈剤である二酸化炭素を同様に浮き子式流量計で測定値に設定する。その後、燃料であるプロパンもしくはメタンを浮き子式流量計で制御しながら、バーナに供給し、点火トーチにより着火する。なお、各気体の流量は、火炎を形成後、流量計の上流圧に注意しながら設定値に固定した。

燃料にプロパン、メタン、メタンと二酸化炭素の混合気を使用し、インナーリング無し、有りの条件でそれぞれ燃料、当量比、二酸化炭素濃度を変更して、火炎形状観察・燃焼範囲測定実験を行った。燃焼範囲を燃料希薄側のみで調べた理由としては、スターリングエンジンに搭載するバーナは燃費が悪く、燃料過濃側で使用することはないからである。燃料はプロパン、メタンの2条件、燃料にメタンを使用する場合のみ希釈剤として、二酸化炭素濃度を0%、30%、40%、50%の4条件とした。なお、二酸化炭素濃度の値は、メタンと二酸化炭素の混合ガス中の二酸化炭素の割合である。また、発熱量は2.5kW、5.0kW、7.5kW、10.0kWの4条件、インナーリング(厚さ6mm)有無の条件で実験を行った。当量比 Φ は1.0から0.1刻みで下げていき、消炎するまでの条件で行った

(図4)。

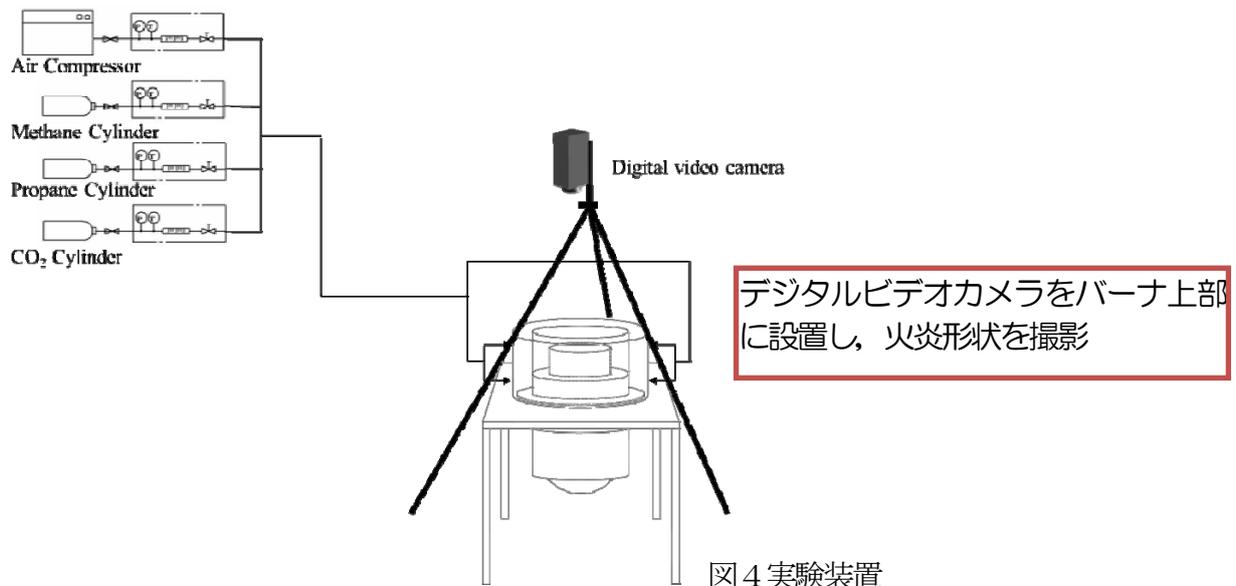


図4 実験装置

2) 結果

①火炎形状観察実験

計算によると、火炎の途切れが無いはずの条件でも、火炎が途切れ、スリット毎に火炎が個々に形成されていた。これは、今回使用した計算式が、スリットから吹き出した混合気が下流側へ押し流される効果を考慮していないためであると考えられ、実際に均一な管状火炎を形成するには、さらに多くの混合気流量が必要であると考えられる。しかし、インナーリングをバーナ内部に挿入すると、インナーリング無しの場合と比較すると均一な火炎が形成されやすくなった。その理由としては、インナーリングが混合気の下流側への流れを遮ったためであると考えられる。また、メタンと二酸化炭素の混合気を燃焼すると、メタンのみの場合と比べて、火炎直径が小さくなっていた。ここで、管状火炎は半径方向流速と燃焼速度の釣り合うところで形成されることが分かっている。つまり、二酸化炭素を加えると燃焼速度が遅くなり、より内側で火炎が形成されたと考えられる。

②安定燃焼範囲測定実験

可燃燃焼範囲における本実験における安定燃焼範囲を図示する(図5)。これは希薄側の燃焼限界に近いことを確認した。

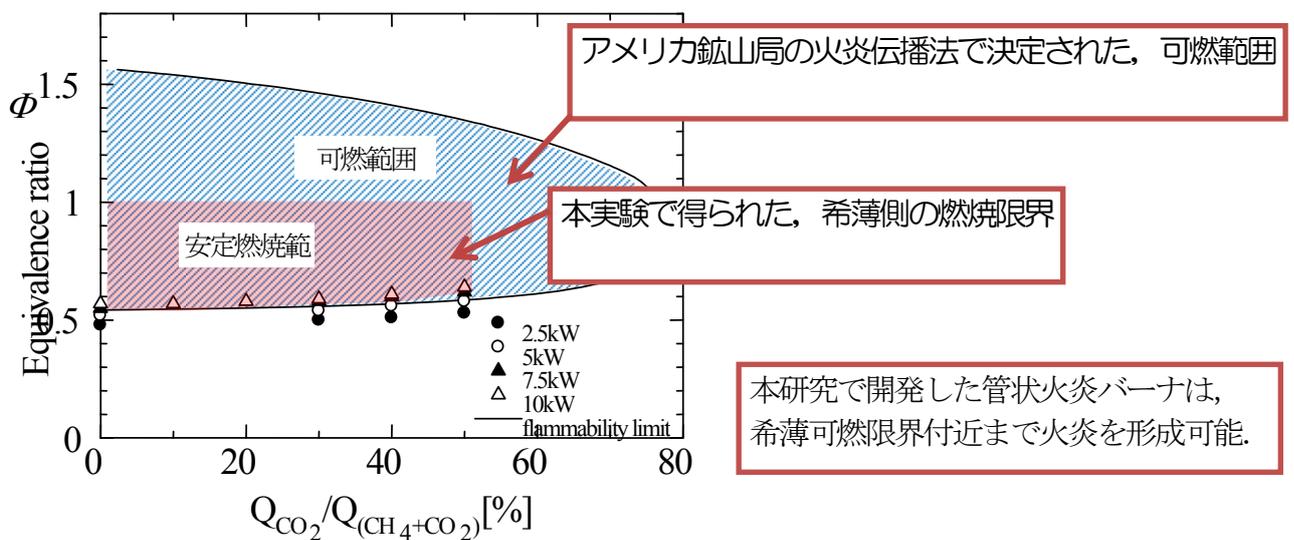


図5 管状火炎バーナの燃焼範囲

(4) スターリングエンジン発電試験

1 kW スターリングエンジン発電機を用いて発電試験を行った。実験装置は図6に示す。

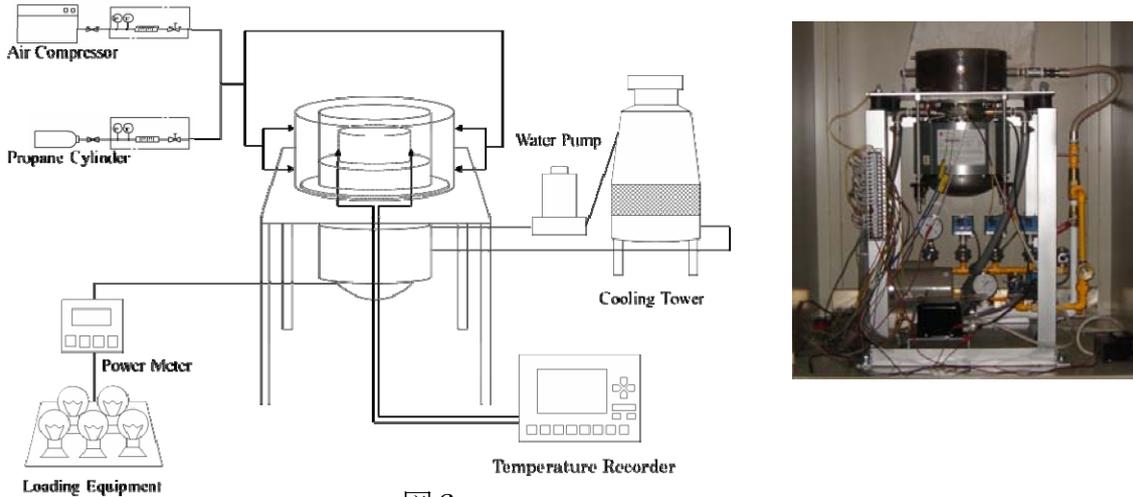


図6

(5) 管状火炎バーナ改良 I

燃焼ガスをさらに加熱円筒部に近づけるためインナーリング，効率よくフィンに通すため，断熱材を挿入した。(図7)

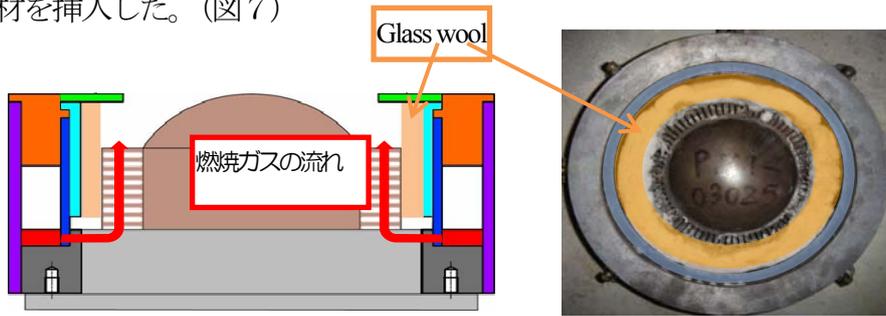
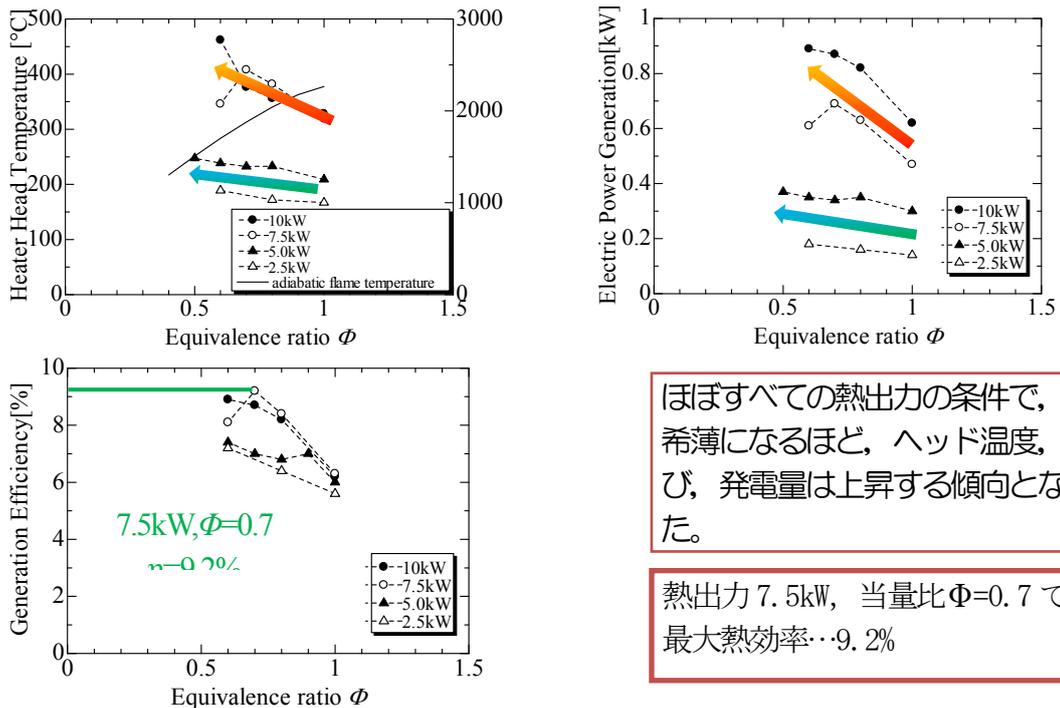


図7 断熱材の挿入



ほぼすべての熱出力の条件で，燃料希薄になるほど，ヘッド温度，および，発電量は上昇する傾向となった。

熱出力 7.5kW，当量比 $\phi=0.7$ で最大熱効率 $\eta=9.2\%$

図8 断熱材挿入時の各種データ

改良の結果として、断熱材を挿入したり、燃料希薄とすることで、効率が上がる傾向が見られた。これは、燃焼ガスの通過する流路が狭まったこと、燃料一定の条件で希薄にしたため、混合気流量が増えたことで、流速が増えたことにより熱伝達が向上したからであると考えられる。このことから、希薄可燃限界付近まで、安定して形成できる管状火炎は有利であるといえる。(図8)

(7) 管状火炎バーナの改良Ⅱ

従来では排気されていた燃焼ガスをエジェクター効果で再循環させる、再循環型インナーリングを使用する。(図9)

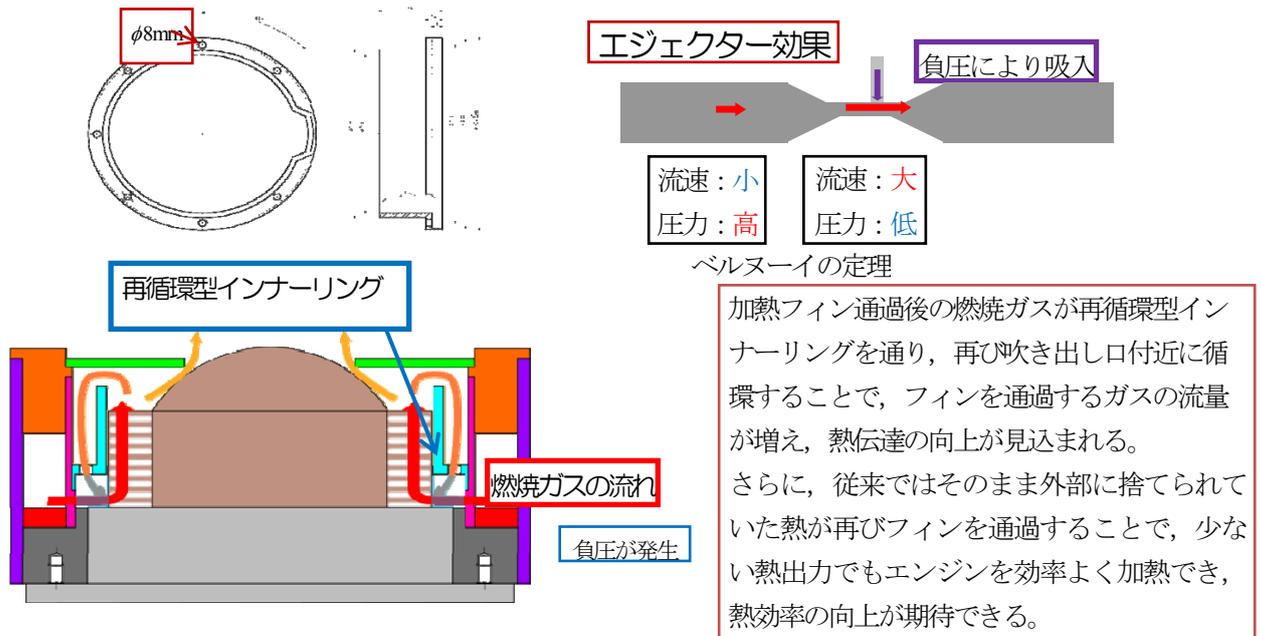


図9 再循環型管状火炎バーナ

(8) 考察と今後の展望

断熱材を挿入した場合、熱出力10kWで加熱すると、ほぼ定格の0.89kWの発電が可能であり、このときの効率は8.9%であった。また、熱効率的には、熱出力が7.5kWで加熱した場合の9.2%が最大であったが、このときの発電量は0.69kWと低い値であった。さらに、同条件で、熱出力を5kWまで下げると、効率はさらに下がって7.4%となり、発電量も0.37kWと低くなった。そこで、今回新しく製作した再循環型インナーリングを使用することで、7.5kWの熱出力でも定格の発電量である1kWを得られ、5kWの熱出力でもさらに効率が向上すると考えられる。ファロー研究として再循環型管状火炎バーナの試験継続中である。

(9) スターリングエンジンの自動制御

スターリングエンジンの自動制御に当っては、芝浦工業大学パワーエレクトロニクス研究室で開発されたパワーエレクトロニクス機器に特化した高性能コントローラ DSP (デジタル・シグナル・プロセッサ) 使用することとした。(図10)

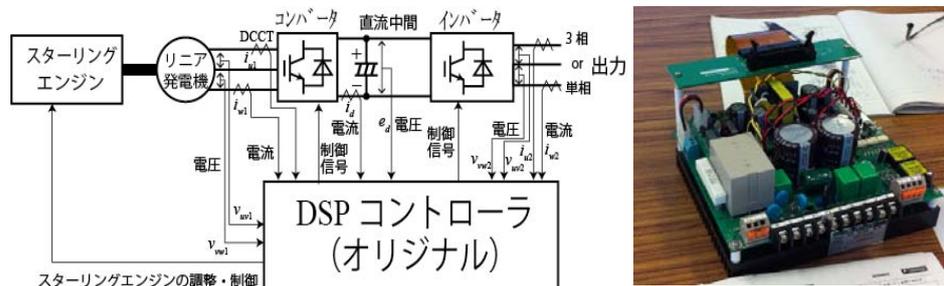


図10 高性能DSP

3. 脱臭機能性向上のためのシステム化 (千葉工業大学 滝口泰之)

3-1 悪臭成分の燃焼脱臭及び排ガスのセラミック脱臭剤による併用試験

都市近郊にある養鶏場や養豚場では、排泄物由来の臭気が近隣の住民と問題になっている。そこで、簡便で安価な処理方法としてメタン発酵で生産されるバイオガスの燃焼とセラミック脱臭剤とを組み合わせた脱臭方法を検討した。

(1) 実験方法

セラミックス脱臭剤としてはザインニヒト社製のセラクリン S-BALL (図1) を用いた。



図1 セラミック脱臭剤 (セラクリン S-BALL、直径 20mm)

この脱臭剤は目的別に色分けされており、アンモニア用は黄色、硫化水素は灰色、有機酸は白であった。また、この脱臭剤は水を吹きかけることで脱臭能が再生することが確認された。

実験室内での実験は図2に示す装置をドラフト内に組み立て、マルチガス検知装置またはガス検知管(ガステック製)を用いて、図2に示す装置で行った。

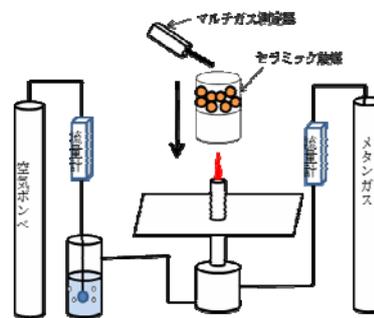


図2 脱臭実験装置

(2) 実験室における脱臭実験

養鶏場や養豚場の排泄物置き場付近からはアンモニアが検出された。また、メタン発酵ではバイオガス中に硫化水素の存在が報告されていることから、これらのガスを発生させ、触媒法、燃焼法、および両者の併用法によってその除去効率を検討した。アンモニアの結果を表1に、硫化水素の結果を表2に示す。

表1 燃焼法、セラミック法、および併用法によるアンモニアの除去

アンモニア入口濃度	60 ppm	60 ppm	60 ppm
触媒法	○	—	○
燃焼法	—	○	○
アンモニア出口濃度	15ppm	5 ppm	2 ppm
アンモニア除去率	75%	92%	97%
副生物	検出下限以下	二酸化窒素	検出下限以下
副生物濃度	<1 ppm	3 ppm	<1 ppm

表2 燃焼法、セラミック法、および併用法による硫化水素の除去

硫化水素入口濃度	23 ppm	23 ppm	23 ppm
触媒法	○	—	○
燃焼法	—	○	○
硫化水素出口濃度	2 ppm	<1 ppm	<1 ppm
硫化水素除去率	92%	>95 %	>95 %
副生物	検出下限以下	二酸化硫黄	二酸化硫黄
副生物濃度	<1 ppm	6 ppm	2 ppm

燃焼法、触媒法単独でもかなりの除去効率があったが、両者を併用することで除去効率はさらに上がり 95%以上を達成できた。さらに副生される酸化物の濃度も低減できることがわかった。

さらに、アンモニア濃度 60 ppm を含む空気を 1.5L/min、メタンを 1.0L/min をバーナーに連続供給し、燃焼ガスをセラミック剤を詰めた充填塔を通過させた。装置の写真を図3に、出口のアンモニア、および二酸化窒素濃度を測定した結果を図4に示す。

図4より5時間の連続実験においてもアンモニア除去率 93%を達成できた。ただし、二酸化窒素濃度が2時間以降徐々に増加傾向を示した。今後、触媒能を回復させるために水を添加する間隔と方法を検討する必要がある。



図3 連続脱臭試験装置

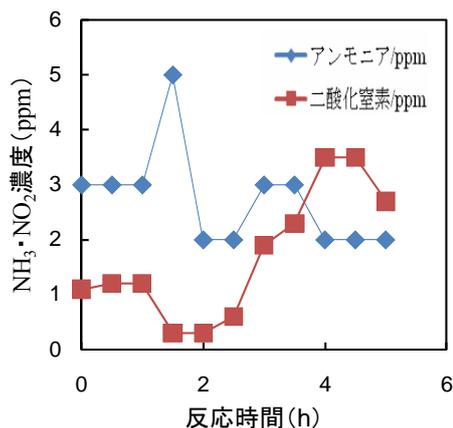


図4 セラミック触媒と燃焼法の組み合わせによるアンモニア除去試験

(3) 養豚場における脱臭実験

養豚場において、豚糞の堆肥化装置の排ガスをガス検知管で測定したところ、アンモニア濃度が 60 ppm であった。現地において、その排ガスを図3のセラミック充填塔に通したところ、アンモニア出口濃度は検出下限の 1 ppm 以下となり、アンモニア除去率が 98%以上となった。今後、燃焼法との併用も含めて実機での長期の連続実験を予定している。

(4) 脱臭用セラミック触媒の分析

60ppmの硫化水素を1時間程度通過させたセラクリン S-BALL (灰色) を分析試料としてX線回折スペクトルを測定した。X線広角スペクトルから脱臭用セラミック触媒はゼオライトとカルシウム化合物の混合物と考えられる。また、X線低角スペクトルより、触媒表面に0.6~1 nmの細孔があることが判明した。このことからこのセラミック触媒は分子ふるい効果によって、アンモニアや硫化水素を吸着していることが推測できる。

また、硫化水素ガス吸着後のセラミック触媒に硫酸イオンが検出されたことから、触媒表面で硫化水素が酸化されて硫酸イオンが生じたことが予測される。元素分析よりセラミック触媒はカルシウム、珪素、アルミニウムが重量比で84.4 : 12.4 : 3.2、モル比で79.1 : 16.6 : 4.4となった。(表3)

表3 硫化水素通気後のセラミック触媒の元素分析値

Ca (mg)	Si (mg)	S (mg)	Al (mg)
1.9037	0.2796	3.5174	0.0712

(5) まとめ

- 1) 実験室および養豚場の野外実験において、バイオガスのアンモニアや硫化水素は、燃焼脱臭とセラミック触媒の併用で95%以上の効率で脱臭できた。
- 2) セラミック触媒は長期間の使用が可能であり、水の噴霧で再生できることが検証された。
- 3) 脱臭用セラミック触媒は主成分がゼオライトとカルシウム塩で、分子ふるい効果で、脱臭を行っていることが推察された。

4. 発酵残渣の有効利用技術の開発（茨城大学農学部 井上栄一）

4-1：メタン消化液栽培試験

本プロジェクトでも実証されたように、家畜糞尿をメタン発酵処理することでメタンガスを取りだし発電に供する技術は、再生可能なエネルギーを得る手段のひとつとして有望である。しかしながら、多くのメタン発酵施設において、メタン発酵処理後に残る消化液（以下、消化液）はコストをかけて下水処理しているのが現状であり、循環型エネルギーの最後のステップが達成できていない場合が多い。このように、エネルギー生産コストの面において、さらに、循環型のエネルギー生産を目指すうえでも、消化液の最終処理方法の確立が求められている。そのため、窒素成分を含む消化液を液肥として農地に施用する手法が提案されているが、普遍的な施用法の確立には至っていない。そこで本小課題では、効率的で自動化された施用法を確立するため以下の試験を行った。まず、原料の異なる消化液を用いて園芸作物の種子発芽試験および栽培試験を行い、消化液の性状の違いが種子発芽および生育に及ぼす影響を明らかにし、その施用効果を検討した。次いで、その結果を踏まえて自動化された溶液土耕栽培システムを用いて、消化液の自動施用の実証研究を行った。

(1) 試験に用いた消化液：

バイオガспラントより得られた消化液およびその原材料を表1に示す。消化液の炭素含有量は原料の違いによって大きな差異はみられなかったが、窒素に関しては鶏糞由来消化液は牛糞由来のそれの約2倍の含有量を示した。しかし、C/N比に関しては牛糞消化液のほうが、8.98と高めであり、鶏糞消化液の約1.5倍であった。双方の消化液はともに原料よりも大幅に炭素含有量が減少していることから、ほぼメタン発酵が終了しているものと推察された。

表1 本試験で用いた消化液の炭素、窒素含有率、およびC/N比

試料名	全炭素 (%)	全窒素 (%)	C/N
牛糞	3.08	0.238	12.97
鶏糞	10.59	1.812	6.93
牛消化液	0.39	0.043	8.98
鶏消化液	0.49	0.087	5.60

(2) 野菜の初期生育に及ぼすメタン発酵残渣施用の影響に関する検討

①材料及び方法

メタン消化液は、発酵条件の検討過程で得られた牛糞由来のものを用いた（表1）。野菜種は、葉菜類のコマツナと根菜類のハツカダイコンを用いた。処理区としては、まず対照区としてN・P・Kがコマツナで7Kg/10a、ハツカダイコンで12Kg/10aとなるように化成肥料を施用した区を設けた。次にメタン消化液施用区としては、各メタン発酵残渣の全窒素含有量に基づいて、牛糞消化液の試験においてはそれぞれ窒素成分全量がメタン発酵残渣由来の窒素で補完できるように播種当日および7日前に施用した区、そしてメタン発酵残渣をこの半分量施用した当日施用した区を設けた。これらに無施肥区を加えた5処理区で試験を行った。牛糞消化液の7日前施用区以外の肥料成分は全て播種当日に施用した。

以上の5処理区について、土壌培地を作製しコマツナおよびハツカダイコンをポットあたりそれぞれ32粒および18粒ずつ播種した。牛糞消化液の7日前施用区以外の肥料成分は全て播種当日に施用した。栽培試験はそれぞれ3反復行った。播種してから1週

後にそれぞれポットあたり 16 個体および 8 個体に間引きにより調整した。収穫調査は播種後 20 または 30 日目に行い、生体重、乾物重、最大葉身長および葉枚数を調査した。結果は Tukey の多重検定によって 5%水準での有意性を評価した。牛糞由来消化液の栽培試験においては、栽培試験後の土壌の三相分布の分析を行った。さらに植物体地上部と土壌について、炭素および窒素成分の分析を行った。

②結果及び展望

牛糞消化液施用によるコマツナのポット栽培試験の結果を図 1 に示す。生体重においては、他の処理区と比較して当日施用のメタン発酵残渣処理区では顕著に生育が劣っていた。特に無施肥以外の処理区との間では有意な生育の違いがみられた。同様に、葉枚数についても当日施用のメタン残渣区では、他の全ての処理区と比較して有意に生育が劣っていた。データは示していないが、牛糞消化液当日施用区では生育だけでなく、種子の発芽についても抑制されていた（データ省略）。このように、牛糞消化液ではコマツナの初期生育を阻害する効果が確認されたが、半量区や事前施用区ではそのような阻害は確認されなかったことから、少なくとも事前施用を行うことで対応できると推察された。

消化液の施用が栽培後の土壌に及ぼす影響を明らかにするため、牛糞消化液でのコマツナ栽培試験において、栽培後土壌の三相分布と炭素および窒素含有率を調査した（表 2）。土壌の固相率は、化成肥料処理区よりも三つの消化液施用区でいずれも低かった。特に当日および事前施用の消化液区では、化成肥料区よりも有意に固相率が低かった（図 2）。このことから、消化液の施用により、土壌の空隙率の増加が促進されると推察された。一方、土壌および植物体の窒素含有率の調査結果から、化成肥料区と消化液処理区の間では地上部の窒素含有率に顕著な差異はみられないが、土壌における窒素含有率は施用時期に関わらず消化液区で高かった。このことから、消化液区では投入した肥料成分の利用効率が低いと推察された。

以上の結果から、メタン発酵残渣が野菜の初期生育に及ぼす影響は対象とする野菜の種類と消化液の原料によって異なることが明らかとなった。しかし、いずれにおいても消化液の肥料効果は確認され、土壌改良効果についても示唆的な結果が得られた。したがって、消化液の種類とその利用対象作物ごとに、施用指針を策定することによって、肥料として有効に循環利用を進めることができると考えられた。

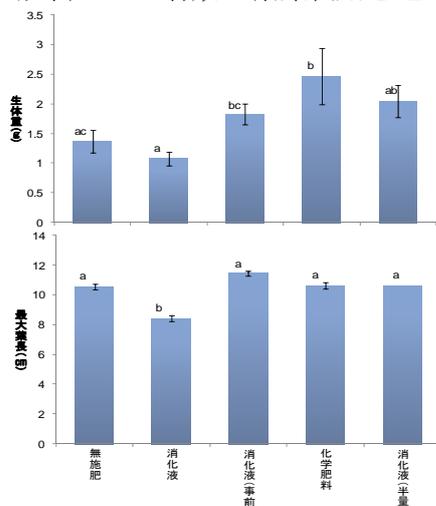


図 1 牛糞由来メタン発酵残渣の施用が小松菜の生育に及ぼす影響

異なるアルファベット間には Tukey の多重比較により 5%水準で有意差あり、垂直のバーは標準誤差範囲を示す (以下省略)

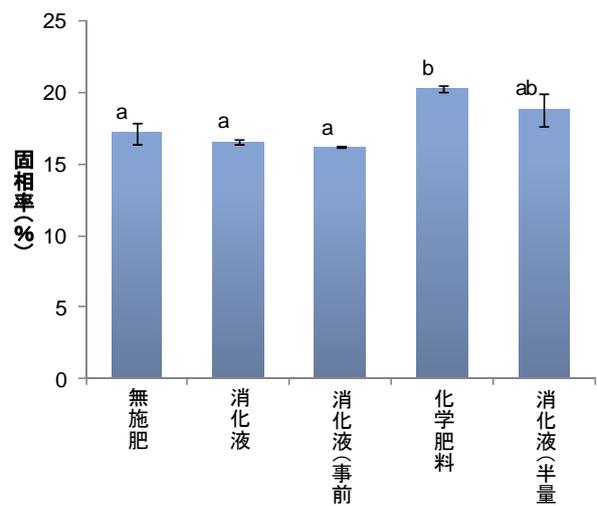


図 2 小松菜の栽培における牛糞由来メタン発酵残渣の施用が土壌に及ぼす影響

表2 牛糞由来メタン発酵残渣を用いた栽培試験後における窒素及びC/N比の比較

		施肥条件				
		無施肥	化成肥料	消化液	消化液(事前)	消化液(半量)
植物体 地上部	窒素 (%)	3.3	5.0	5.3	4.7	4.9
	C/N	12.5	8.4	7.8	8.6	8.2
栽培後 土 壤	窒素 (%)	0.35	0.37	0.40	0.41	0.38
	C/N	15.1	13.9	13.1	13.1	14.1

()内はポットあたりの施用窒素の利用率

(3) 溶液土耕栽培システムを用いた消化液自動施用の実証

これまでの試験によって、メタン消化液の野菜栽培における肥料としての施用効果が確認された。しかし、実際の営利栽培において普及を目指すうえでは、施用効率および作業コストも考慮した施用方法の確立が必要不可欠である。そこで本試験では、液肥の自動かん水同時施肥による溶液土耕栽培システムにおいて、従来の化学液肥に加えて消化液を同時施用することを試みた。

①材料及び方法

メタン発酵残渣（消化液）は、前小課題でも用いた牛糞由来のものを用いた（表1）。消化液原液を10倍希釈し、良く攪拌した後、かん水同時施肥に用いた。溶液土耕システムは、土壤水分センサーとして スイビュー™（TE-10F, 株山武）を用い、設定pF値に達すると比例式液肥自動混入器ドサトロン（DR6-GL, 株サンホープ）で設定濃度の液肥を混入した水を一定時間、点滴かん水するシステムを用いた（図3）。培地は、市販のバッグ栽培用培土を用いたバッグ栽培とした。溶液土耕栽培用の液肥としては、溶液土耕1号（大塚アグリテクノ株）の10倍希釈濃厚原液を調整し、ドサトロンで100倍希釈して灌漑水に混入し、終濃度が1000倍希釈となるように施用した。前述の溶液土耕栽培により収穫期まで育成したイチゴおよびミニトマトを用いた。いずれも試験開始時までの溶液土耕1号1000倍液の施用に加えて、もう1台のドサトロンから10倍希釈した牛糞消化液をさらに100倍希釈し、1000倍希釈液として施用した。消化液の施用を開始する直前と開始2週後にそれぞれ10果の果実を収穫し、品質項目として生体重およびBrix糖度を調査した。

②結果及び展望

ミニトマトにおいては、果実生体重が消化液施用前と比較して有意に増加した（図4）。さらに、糖度についても、有意差は無かったが上昇がみられた。イチゴにおいては、果実生体重が消化液施用前と比較して有意に低下した。しかし、果汁糖度に関しては有意差が無かったものの、Brixの平均が1以上上昇した（図5）。今回の試験で行った果実の品質評価は、施用の前後における比較であるため、有意差はみられたが生体重については参考程度にとどめるべきであると考えられる。しかし、果菜類の品質評価の基準のひとつである糖度については有意差が無かったものの明らかに上昇する傾向にあった。

これまで、消化液の液肥化においては、原液に含まれる夾雑物の影響によってかん水配管や混入器の詰まりなどの不具合が問題となっていた。しかし、本試験のようにドサトロンと点滴灌漑を組み合わせた溶液土耕システムを用い、希釈した消化液をさらに自動混入して用いれば、実用化が可能であると推察された。また、消化液の施用により、糖度の上昇が確認されたことから、消化液利用による収穫物の品質的な付加価値の上昇

も期待できる可能性が示唆された。



図3 溶液土耕栽培における牛糞由来メタン発酵残渣の自動施用の試験風景.
左写真:液肥自動施用システム 右写真:溶液土耕栽培用栽培棚

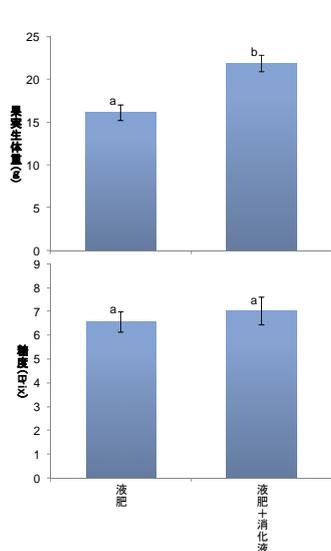


図4 溶液土耕栽培における牛糞由来メタン発酵残渣の自動施用がミニトマト果実の品質に及ぼす影響

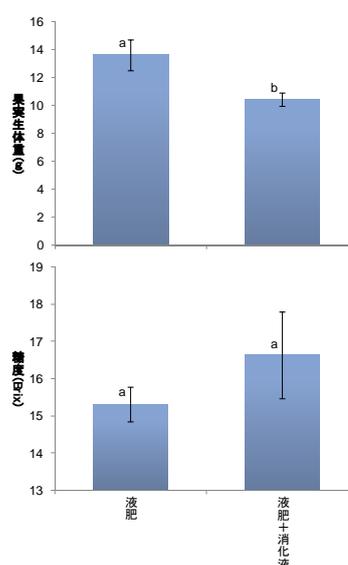


図5 溶液土耕栽培における牛糞由来メタン発酵残渣の自動施用がイチゴ果実の品質に及ぼす影響

5. 総括

今回、本プロジェクトでは低コスト小型メタン発酵及び脱臭機能付バイオガス発電装置の開発を実施した。我々が取組んだ背景としては、我が国のバイオマス資源発生量の20%が利用可能とされており、このうち家畜排せつ物を中心とする畜産系バイオマスは、現状、我が国一次エネルギーの約0.3%程度である。一方、家畜排せつ物は、悪臭や水質汚染等環境問題を発生させており、その管理の適正化のために04年10月までに施設整備を行うことが法律で義務付けられている。デンマーク、ドイツ等ヨーロッパではある程度の普及をみているが、我が国での取組みは緒についたばかりで、20強建設されているプラントのほとんどは実験的プラントである。ヨーロッパでのバイオガスプラント普及は、政府の再生エネルギーを重視した断固とした方針の確立と、これら取組みを容易にするための税制等支援の存在によるところが大きい。現状では投資負担が過大になることから、政策支援なしでの普及は困難なのが現状である。そこで、実際に経済性を考慮できる、低コストは設備というのが普及のための条件となると考え、本研究開発に取組んだ。

従来のバイオガス発電は発生したバイオガスを精製しガスエンジンによる発電する方式が多い。そのため、ガス精製等諸々の付帯設備を要し、また、エンジンメンテナンスコストも大きい。それに対して本研究開発は畜糞発酵によって発生するバイオガスを燃料として、スターリングエンジンを使い、コージェネシステムを構築。バイオガスをダイレクトに効率よく電気、温水または温風に変換する。コージェネとして電気、温水を有効に設備内で活用できる。

また、スターリングエンジンは外燃機関であるが故にエンジン内部のメンテナンスは基本的に不要であり、エンジン受熱部の耐食性を向上させることで脱硫装置を含めたガス改質装置を不要にし、システムとしてのコスト低減を図った。最終目標は普及を可能にする低コストシステムであり、上記最適化と並行して量産時の低コスト化を前提にした開発を行った。発電部のエンジンは世界で初めて量産を行ったマイクロジェン社の1 kWエンジンを使用し、安定供給の確保と量産によるコスト低減の道筋を付けることが出来た。アプリケーションとして広島大学石塚教授の開発した管状か火炎バーナも部品点数が従来の数分の一程度であり、かつコントローラブルでバイオガスの不安定な性状に対しても安定燃焼が確保できる。そのため、本システムは理論上最もシンプルで構造的に大いに低コスト化を図っていくことが出来るシステムであり、本研究開発は研究開発に留まらず、上記課題を抱えている畜産農家が助成金に頼らずとも導入を可能にする、普及可能な製品化を目指し、そのための一歩となるシステムを開発した。また、バングラディッシュ、ベトナム、マレーシア等のバイオガス施設の多い東南アジア諸国へのアプライも可能になるよう想定し開発を行った。本開発によって、不安定なバイオガスを燃料として、量産型スターリングエンジンの性能を最大限発揮出来るようなバーナが開発でき、コージェネシステムとして完成したことは今回想定した畜産業界のみならず、他への波及効果も大きい。本システムはバイオガス以外にも他のガス発電にも対応が可能であり、温泉付随ガス、炭化炉、焼却炉等から発生する乾留ガス、塗装工場等から発生するVOC、これらを燃料として発電を行うことも出来る。スターリングエンジンならではの特徴を活かしたシステムである。

なお、今回のアドバイザーである前川筑波大学名誉教授によれば、バイオガスのエネルギー変換後の二酸化炭素及び消化液はバイオ燃料等を製造可能な微細藻類培養の炭素原ならびに肥料・ミネラル供給源となることで高付加価値な物質循環が期待できること、食品残渣と組合せればバイオガス収率を向上できるなど、今後の応用展開が期待できる。