

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：82111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26870838

研究課題名(和文)堆肥発酵熱をエネルギーとする発電技術の開発

研究課題名(英文)Development of power generation system using composting fermentation heat as high heat source

研究代表者

小島 陽一郎(KOJIMA, Yoichiro)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・畜産研究部門・飼養管理技術研究領域・主任研究員

研究者番号：80577916

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、我が国における廃棄物処理の主要な方法である堆肥化処理過程で発生する発酵熱を堆肥化施設から排気として回収し、温度差発電の熱源として利用することを目的として実施した。その結果、工場排熱などによる発電で実績のあるバイナリ発電方式を用いて、これまでの温度差発電の報告と比較しても低い、60℃程度の排気を実際の堆肥化施設から回収し、最大700W以上の発電が可能であることを示した。また、発酵排気を効率的に回収するため、堆肥化過程における熱の発生・回収特性を解析した。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study was using composting fermentation heat extracted as exhaust from composting process, which was the most popular treatment process of organic waste in Japan, as a heat source of the temperature difference power generation. As a result, composting fermentation heat could be used for heat source of binary power generation system which was reported utilizing of waste heat from industry, and 700 W of electricity was generated; composting exhaust which had the 60 °C of temperature was the lowest level of high heat source for the temperature difference power generation. Moreover, outbreaking and recovery of fermentation heat under composting process was analyzed done in order to recover the fermentation exhaust effectively.

研究分野：農業環境工学

キーワード：再生可能エネルギー 堆肥化 バイオマス 発酵熱

1. 研究開始当初の背景

堆肥化は、日本における家畜ふん尿や生ごみなどの有機性廃棄物を資源化するための主要な方法であり、酸素を供給し有機物を微生物の作用により分解し、安定化させる手法である。有機性廃棄物を堆肥化处理する際には有機物の酸化反応により熱(以後、発酵熱)が発生し、その熱量は家畜ふんで、有機物 1kg あたり 20MJ にも達する。しかし、これまでの堆肥化技術では、発酵熱は有効に利用されることなく環境中へ放出されてきた。著者らは、堆肥原料底部から空気を吸引して通気を行う吸引通気式堆肥化システムを用いて、堆肥化促進には不可欠な通気によって、発酵熱を 60 前後の排気(以後、発酵排気)として回収し、そのうち利用可能な熱量をエクセルギを指標として明らかにした。発酵排気は、数百 で排出されるような工場排熱に比べて温度は低いものの、相対湿度がほぼ 100%_{RH} であり、凝縮熱が大きいという特徴がある。実際に応募者らが調査した結果、乳牛 120 頭規模の酪農家に設置した実規模堆肥化施設で得られる排気は、年間通じて 40 ~ 60 程度の温度で、30kW 程度の熱量を持っていることが明らかになった(小島ら, 2014)。さらに他の施設においては排気温度が 70 , 40kW 程度で回収できた事例もある。こうして回収した熱エネルギーを利用して温水を得ることが可能である。このように実規模レベルで発酵熱の回収・利用に成功した例は国内外をみてもほとんどない。

しかし、熱エネルギーは、輸送や貯蔵が難しく、利用先が限定されてしまう上、暑熱期には、熱需要が低下してしまうため、熱エネルギーを別の形態のエネルギーに変換する技術開発が求められている。その一つとして電気エネルギーへの変換技術が挙げられる。熱から発電を行う技術としては、スターリングエンジン、バイナリ発電、ゼーベック効果発電などが挙げられる。これらの発電技術は、数百 の高温で排出される工場排熱の熱交換水や、90 ~ 100 で湧出する温泉の源泉などで検討された事例があるものの、発酵排気のような 60 前後の気体を高熱源として利用した例はない。また、先行事例である工場排熱での発電は、工場での消費電力に対する発電量が小さいため、本質的な電力削減にはなりにくく、温泉源泉による発電は、発電施設の周辺に電気を利用できる施設が少なく、その立地条件が問題である。それに対して、堆肥発酵熱により発電が可能になれば、施設周辺に発生した電力を消費する施設が固まっております。また工場などに比べて消費電力規模が小さいため、電力のピークカットや電力消費を抑えることにより得られるメ

リットは大きい。

2. 研究の目的

本研究では、前項で示した課題を背景に、堆肥発酵熱を高熱源として、低温熱源とのエネルギー差により発電を行う技術を開発する。具体的には、素子の両面に温度差を作ることによって発電するゼーベック効果発電や、ゼーベック効果発電よりも発電に要する温度差は大きいものの、電気変換効率が高いバイナリ発電について発電特性を解明し、堆肥発酵熱を電気に変換する技術の開発のための基礎的な知見を蓄積することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、有機性廃棄物の堆肥化過程で発生し、堆肥化施設の強制通気の排気から回収できる発酵熱を高熱源として利用し、発電を行う技術を開発するために、以下の 2 つの項目について研究を行った。

(1)まず、ゼーベック効果発電方式やバイナリ発電方式を対象とし、低温熱源である発酵熱に適した発電方式を検討し、発酵熱により発電が可能なシステムの開発した。

堆肥発酵熱による発電可能性を検証するため、堆肥発酵熱を熱交換し得られた温水を高熱源とし、地下水や農業用水を低熱源として想定した系において、2 つの発電方式を採用した。つまり、安価な部品で装置製造が可能なゼーベック効果発電方式(以後、ZEPG)と、温泉熱などで実証例があるバイナリ発電方式(以後、BPG)である。

ZEPG は、市販のペルチェ素子(TEC-12708)を用いて、22 個の素子を 2 本の角型ステンレス管(5×5×100cm)ではさむように設置した装置を試作した。試験には、この装置を 1 ユニットとして、4 ユニットの組み合わせを用いた。2 本のステンレス管には、発酵熱を回収して得た温水を想定した、高熱源である 65 の水と、低熱源である常温の水をそれぞれ通水した。また、電力消費のため 1M のカーボン抵抗を接続した。

BPG は、バイナリ発電装置(アドバンス理工製 ECOR-3-Ft)を用いた。これを、実規模吸引通気式堆肥化施設(栃木県栃木市)に接続し、施設で得られた温水を高熱源として用いて発電をおこなった。低熱源には常温の農業用水を用いた。発電装置は、100 W の白熱電球 30 個を用いた電力消費装置に接続した。

各発電方式について、高熱源・低熱源の流量、装置前後の高熱源・低熱源の温度、および発電量を測定した。また、これらの値を用いて以下に示す式(1)を用いて発電効率(E, %)を求めた。

$$E = P / Q_{(h-loss)} \quad (1)$$

ここで、P: 発電量(W), Q_{h-loss} : 単位時間において高熱源が損失したエネルギー量(W)

(2)次に、(1)の結果を受けて、有機性廃棄

物を処理対象として、必要な発酵条件を設定する。具体的には、パイロットスケール(430L)の堆肥化装置を用いて、堆肥としての品質を担保しつつ、発酵排気を高温・高エクセルギで回収するための通気方法等堆肥化条件の検討した。

供試材料は搾乳牛ふんである。ここに、オガクズを容積比で牛ふんの2倍量混合して堆肥化に供した。供試発酵槽は、充填高さ93cm、容積431Lのステンレス製発酵槽である。ここで、通気量を3条件に設定した。すなわち、30L/(min・m³)で連続通気をおこなう条件(連続区;CONT), 30L/(min・m³)で2時間運転-2時間停止の間欠通気をおこなう条件(間欠50区;INT50), および60L/(min・m³)で同様に間欠通気をおこなう条件(間欠100区;INT100)である。各条件について、外気による影響を考慮するために、夏季(2014年6月~8月)および冬季(2015年1月~3月)に実験をおこなった。堆肥化期間は28日間とし、1週間ごとに切り返しを行った。測定項目は、原料質量および容積、原料温度、排気温度、外気温湿度、通気量、燃焼熱量、含水率(MC)、強熱減量(VS)である。また、小島ら(2011)の方法に従い、これらの数値から、有機物の分解により発生する熱量(発酵熱量)、入気および排気の熱量、二酸化炭素濃度(CO₂)および排気の利用可能エネルギーとしてエクセルギを求めた。

4. 研究成果

(1) 発酵熱を高熱源とした温度差発電

写真1-1に試作ゼーベック効果発電装置(ZEPG)の外観を示した。また、供試ペルチエ素子の発電特性を示した。供試したペルチエ素子は、接続する抵抗の値に伴って出力が増加傾向にあり、1Mの抵抗を接続したとき、高熱源と低熱源の温度差が50の条件では、約0.10VA/素子であった(図1-1)。この素子を用いた試作ZEPG装置における発電量を表1-1に示した。本方式では、高熱源64.9、低熱源22.0、すなわち温度差42.9の条件において、11.6Wの発電が可能であった。



写真 1-1 試作した ZEPG の外観

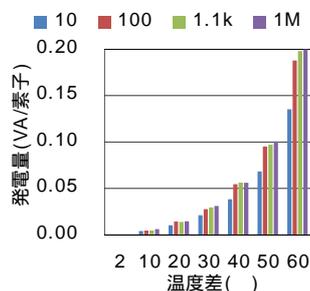


図 1-1 供試ペルチエ素子の発電特性

表 1-1 バイナリ発電方式(BPG)とゼーベック効果発電方式(ZEPG)の比較

		BPG	ZEPG	
高熱源	装置入口温度	58.8	64.9	
	装置出口温度	54.7	62.7	
	流量	L/min	54.9	7.7
	損失熱量	kW	14.4	1.19
低熱源	装置入口温度	16.1	22.0	
	装置出口温度	20.1	23.8	
	流量	L/min	53.8	8.5
	獲得熱量	kW	15.3	1.12
	発電量 (P)	W	725	11.6
	発電効率 (E)*	%	5.0	1.0

次に、写真1-2に実規模吸引通気式堆肥化施設において発酵熱回収装置と供試したバイナリ発電装置(BPG)との接続状況を示した。本研究では、堆肥の発酵状況による回収発酵熱量の影響を小さくするために、発酵熱回収装置とバイナリ発電装置間で高熱源(温水)を輸送する際に、間に温水タンクを設置した(小島ら, 特願2015-142763)。これにより、温水タンクが熱と水の緩衝効果を持ち、堆肥の発酵状態による熱発生の変動を吸収した。このときの発電量を表1-1に示した。本方式では、高熱源58.8、低熱源16.1、すなわち温度差42.7の条件において、700Wの発電が可能であった。



写真 1-2 バイナリ発電装置と発酵熱回収装置の設置状況

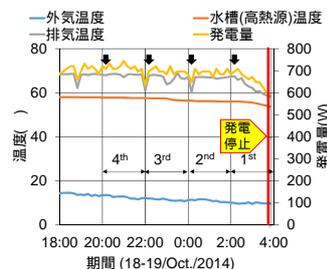


図 1-2 堆肥切り返し工程における回収発酵排気温度と発電量

同一の温度差条件において、ZEPGは1%の発電効率であったのに対し、BPGは5%の発電効率であった。同様の温度条件で、理論上最大の熱効率を有するカルノーサイクルの熱効率は12.8%であり、本研究におけるBPGはその40%に相当する高効率での発電が可能であった。

一方、発電の継続性においては課題が残った。図1-2に堆肥切り返し工程における回収発酵排気温度と発電量の推移を示した。堆肥化においては、良好な発酵を維持するため、発酵が安定した原料を攪拌・更新する、切り返し作業が行われる。本研究で対象とした施設では、自動切り返し装置が設置されており、

切り返しにより一時的に堆肥原料が堆肥化施設から移動され、空いた空間に新規の原料が投入される。新規に投入された原料は、発酵が進展し排気温度が上昇するまでに数時間～1日程度を要する。この排気温度上昇のブランクによって、排気温度が低下し、発電も停止した。本研究における最長発電継続時間は約60時間であった。これは、堆肥切り返し間隔の3日間(72時間)から、発電停止後に温度上昇するまでに要する時間12時間を差し引いた値であった。

以上より、本項では、1)供試した2つの発電方式では、どちらの方式でも発電が可能であったこと、2)同様の温度条件では、バイナリ発電方式はゼーベック効果発電方式よりも発電効率が高く、実規模施設では700Wの発電が可能であったこと、および3)実際の施設で発電を行う場合は、切り返しによる排気温度低下が連続的な発電を実施するためのボトルネックであり、より効率的に発酵熱を回収するための堆肥管理技術の検討が必要であること、などが示された。

(2)発酵熱回収のための通気条件の検討

本項では、(1)の結果を受けて、特に堆肥化開始後の排気熱量の発生・回収特性を解明することとした。

図2-1に各通気条件における堆肥原料温度の変化を示した。また、図2-2には、連続通気区における堆肥原料温度、排気温度、および排気中CO₂濃度の変化を示した。

通気条件において、特に堆肥化開始後2週間以内の温度変化は異なった。連続区(CONT区)を基準とすると、間欠100区(INT100区)は温度上昇、下降の変化が早く、2週目以降は温度上昇が小さかった。また、間欠50区(INT50区)は、温度上昇は遅いものの、原料温度上昇後は、高い温度を維持した。このとき、排気温度は原料温度よりやや遅く、二酸化炭素(CO₂)濃度は原料温度より早い変化を示した(図2-2)。

図2-3に堆肥化過程における熱的特性の変化を示した。図中 v_c は、堆肥原料事態の加温

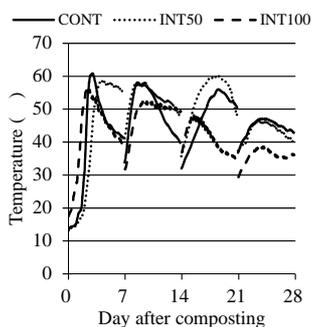


図2-1 各条件における堆肥原料温度の変化

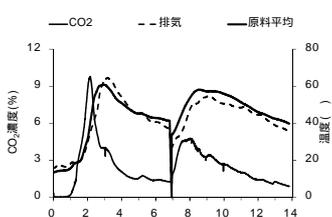


図2-2 原料、排気温度及びCO₂の推移 (CONT区)

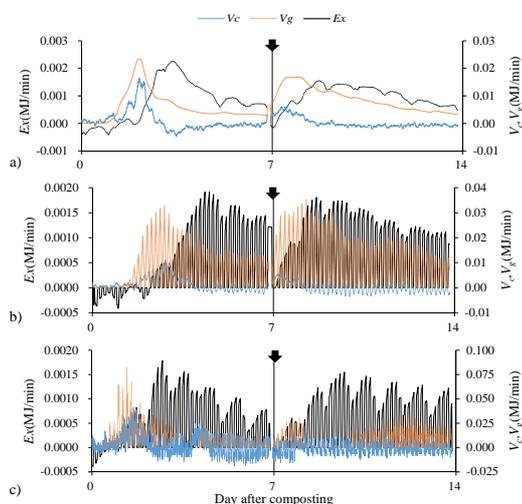


図2-3 堆肥化過程における熱量の変化

a)CONT区, b)INT50区, c)INT100区

に用いられた熱量の消費速度、 v_g は堆肥化により有機物が分解された熱量の発生速度、 Ex は排気中のエクセルギ発生速度を表している。どの通気条件においても、 v_c は v_g と同時期にピークに達するが、 Ex は v_c が減少した後に上昇することが明らかになった。つまり、堆肥化過程で発生する熱量が排気として抽出されるためには、堆肥原料の昇温を早めることが重要であり、堆肥開始後の温度上昇を早める必要があることが明らかになった。

以上より、本研究では、堆肥発酵熱を高熱源として発電が可能であることを示し、また、その技術的課題である発酵熱発生速度向上のための基礎的な知見を得た。本研究の成果は、我が国において主要な廃棄物処理方式である堆肥化過程で発生する発酵熱を用いて、これまで報告されてきた温泉水など低温熱源を用いた発電システムと比較しても最低温の水準で発電が可能であることを実規模施設で実証するとともに、堆肥化施設のエネルギー生産施設としての可能性を示すものである。

また、本研究では、効率的な発酵熱回収のため、特に堆肥化開始後の熱発生を早めることの必要性が示されたが、これについては本研究の後継課題において解決を目指す。

<引用文献>

小島 陽一郎他、引通気式堆肥化施設で回収した発酵熱による水の加温、農業施設 45巻3号、2014、99-107

小島 陽一郎他、吸引通気式堆肥化処理による発酵熱の回収と利用、農業施設 42巻2号、2011、51-58

小島 陽一郎他、堆肥発酵熱を用いた発電システム及び発電方法、特願 2015-142763

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計4件)

小島 陽一郎他、堆肥発酵熱を高熱源とする温度差発電技術の可能性、農業環境工学関連学会 2015 年合同大会、2015 年 9 月 17 日、「岩手大学(岩手県・盛岡市)」

小島 陽一郎他、吸引通気式堆肥化における間欠通気が発酵熱の回収に及ぼす影響、農業環境工学関連学会 2015 年合同大会、2015 年 9 月 16 日、「岩手大学(岩手県・盛岡市)」

勝又 幹太、小島 陽一郎他、吸引通気式堆肥化処理における間欠通気方法に関する研究、農業環境工学関連学会 2015 年合同大会、2015 年 9 月 16 日、「岩手大学(岩手県・盛岡市)」

小島 陽一郎他、Binary Power Generation Using Composting Fermentation Heat as Heat Source, ASABE annual meeting 2015, 2015 年 7 月 28 日、「New Orleans (USA)」

〔図書〕(計 1 件)

小島 陽一郎、堆肥発酵熱の経営内有効利用、省力・自動化酪農の手引き(デイリーマン 2015 年秋期臨時増刊号)、70-76, 2015 年 9 月

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：堆肥発酵熱を用いた発電システム及び発電方法

発明者：小島 陽一郎他 8 名

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2015-142763

出願年月日：2015 年 7 月 17 日

国内外の別：国内

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

小島 陽一郎、堆肥のアツさを利用する-ふん尿から再生可能熱エネルギーを回収する-、アグリビジネス創出フェア展示、2015 年 11 月 18 日~20 日、東京ビッグサイト

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小島 陽一郎 (KOJIMA, Yoichiro)

国立研究開発法人農業・食品産業総合技術研究機構・畜産研究部門・飼養管理技術研究領域・主任研究員

研究者番号：80577916