

研究助成実施報告書

助成実施年度	2018年度（平成30年度）
研究課題（タイトル）	マイクロ波照射を用いた中小都市型メタン発酵システムの開発
研究者名※	戸荻 丈仁
所属組織※	公立鳥取環境大学 環境学部 環境学科 講師 (公立鳥取環境大学環境学部 准教授)
研究種別	研究助成
研究分野	都市環境工学
助成金額	150万円
概要	本研究では中小都市の下水処理で多く採用されているオキシデーションディッチ法から発生する汚泥（OD汚泥）を対象とし、マイクロ波照射前処理による、メタン発酵における生分解性の向上およびエネルギー回収量の向上を試みた。様々な条件でOD汚泥マイクロ波を照射し、照射前後の性状変化を調べるとともに、回分式実験、連続実験によりマイクロ波照射OD汚泥によるメタン発酵反応への影響を検討した。マイクロ波照射により汚泥温度が上昇し、溶解性COD _{Cr} の増加が確認されたが、ガス発生量総量との明確な相関は確認できなかった。また、低出力照射（平均10.6W, 4.4kJ/g-TS）で温度上昇を抑えた照射条件（最高到達温度44℃）では、14%のガス発生量の増加が確認された。これはマイクロ波の非熱的効果による可能性が考えられる。マイクロ波照射後のOD汚泥(200W, 6.7kJ./g-TS)を用いた長期間の連続実験では、未処理に比べ、ガス発生量が21%増加した。
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

() は、報告書提出時所属先。

1. 研究の目的

(注) 必要なページ数をご使用ください。

近年、下水汚泥からの再生可能エネルギーの創出が注目されている。下水汚泥は、安定的に、大量に、均質に発生する非常に良質なバイオマス資源であり、下水汚泥からの再生可能エネルギー創出が可能な処理方式としては、メタン発酵があげられる。メタン発酵は、酸生成菌およびメタン生成古細菌によって、汚泥中の有機分を分解し、メタンガスを発生させる。メタンガスは可燃性であり、発電や熱エネルギー利用をすることが可能である。しかし、下水汚泥、特に中小都市で発生する脱水汚泥は、水処理方式の特性もあり、極めて生分解性が小さい。これまでに下水汚泥の生分解性向上・ガス発生量の増加を目的に、熱処理、水熱処理、オゾン処理、超音波処理など、様々な前処理方法の研究が行われてきたが、いずれの前処理方法も経済性や設備的な問題から普及には至っていない。本研究ではマイクロ波照射に着目した。マイクロ波は、主に食品の加熱などを目的に家庭用電子レンジに用いられていることで広く知られており、極性分子のみに作用するため内部からの均一作用が可能である。これにより対象物の攪拌が不要となるため、下水汚泥、特に含水率85%程度であり、粘度の大きな脱水汚泥の前処理として適している。脱水汚泥ベースでのメタン発酵の前処理が可能となれば、集約・運搬時の汚泥ボリュームが著しく小さくなりコスト縮減に繋がるため、マイクロ波照射前処理システムの実用化・普及の可能性が非常に高いと考えた。また、マイクロ波照射は有機合成などの分野において工業的に用いられているが、その効果として対象物を加温する熱源としての作用に加えて、非熱的な効果の有無が議論となっている。本研究では非熱的な効果を含むマイクロ波照射効果の機構解明を行い、中小都市で発生する下水脱水汚泥への最適照射条件を求める。一般的な下水処理場でのメタン発酵は含水率98%程度の高含水率汚泥を対象に実施しており、汚泥細胞を囲む大量の水分子にエネルギーを吸収されてしまい非効率であるが、含水率85~90%程度の低含水率の脱水汚泥へのマイクロ波照射により、さらに効率的なエネルギー回収システムの開発が可能となる。本研究では中小都市をターゲットとし、脱水汚泥ベースでの集約・投入、低含水率の脱水汚泥へのマイクロ波照射を行う新しいシステムの検討を目的とした。

2. 研究の経過

(注) 必要なページ数をご使用ください。

①マイクロ波照射実験および回分式メタン発酵実験

本研究ではOD汚泥に対して様々な条件でマイクロ波を照射し、シリーズI~シリーズIVの4回の回分式実験を行った。マイクロ波照射には図1に示すマイクロ波照射機を用いた。



図1 マイクロ波照射機 (左: μ Reactor-EX 右: ETHOS EAZY)

<シリーズⅠ>

マイクロ波装置 μ ReacterEX により 50g の OD 汚泥に対し 200W10min, 500W4min, 1000W2min の 3 条件で照射した。OD 汚泥冷却後、消化汚泥 30g に対して OD 汚泥 1g, 100mL プラスティックシリンジに投入し恒温振盪水槽を用い 53°C の高温条件で回分式実験を行った。比較のため BLANK も同様の条件で 100mL プラスティックシリンジに投入し回分式実験を行った。

<シリーズⅡ>

マイクロ波装置 μ ReacterEX により 50g の OD 汚泥に対し 200W10min, 500W4min, 1000W2min の 3 条件で照射した。OD 汚泥冷却後、セパラブルフラスコに消化汚泥を 500g と共に 200W10min 27.2g, 500W4min 28.6g, 1000W2min 26.7g, 未処理 25g を投入し, 37°C で 26 日間回分式実験を行った。

<シリーズⅢ>

マイクロ波照射装置 ETHOS EAZY (完全密閉条件) により, 50g の OD 汚泥に対し 200W20min, 200W10min, 200W1min, 500W4min, 1000W2min とすべて同エネルギー量となる条件で照射した。照射した OD 汚泥は冷却後セパラブルに消化汚泥と共に投入し, 37.5°C で 35 日間回分式実験を行った。

<シリーズⅣ>

マイクロ波装置 μ ReacterEX により, 66g の OD 汚泥に対し平均 10.6W, 制御温度 40°C, 1h の照射を行った。照射した OD 汚泥は 100mL シリンジに消化汚泥と共に投入し, 53°C で 19 日間回分式実験を行った。

②連続式メタン発酵実験

マイクロ波照射装置 ETHOS EAZY (完全密閉条件) を用いて, OD 汚泥 360g に対し, 200W36min のマイクロ波照射を行った OD 汚泥を基質として, 有効容積 2L の反応槽を用い, 71 日間の連続実験を行い, 未処理 OD 汚泥を基質として用いた系と比較した。この反応槽に HRT (水理的滞留時間) が 20 日となるよう 100mL/日の OD 汚泥 (蒸留水で TS 濃度を 3.0% に希釈) を投入した。

回分式実験の様子を図 2 に, 連続式実験の様子を図 3 に示す。

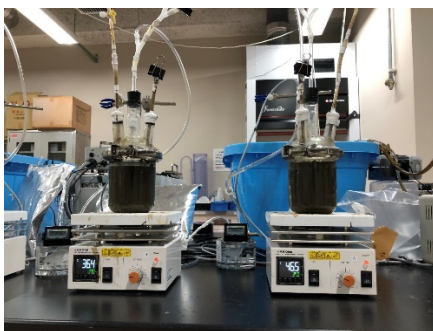


図 2 回分式実験 (左: セパラブルフラスコ 右: 100mL シリンジ)



図 3 連続式実験 (有効容積 2L)

3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

<シリーズ I >

シリーズ I では投入エネルギーを同等としたマイクロ波照射により、到達温度は各条件 95℃, 95℃, 98℃ と大きな違いは見られなかった。溶解性 COD は各条件とも未処理 (14mg/g-TS) に対して大きく増加し、最大は最も温度が上昇した 1000W 2min の照射条件で、162mg/g-TS となった。また、VS1g あたりのバイオガス生成量は 500W 4min の照射条件の汚泥が最も大きく、292±18 NmL/g-VS となった。これは未処理 OD 汚泥の 248±2 NmL/g-VS に対し 1.2 倍の増加となった。一方、1000W 2min と 200W 10min はそれぞれ、未処理 OD 汚泥からのガス生成量に対して 1.0 倍、0.8 倍とバイオガス生成量の増加が見られなかった。図 4、表 1 に各条件におけるバイオガス生成量、および照射後の変化と到達温度について示す。

表 1 照射条件と照射後汚泥性状

照射条件	TS (%)	VS (%)	到達温度 ℃	溶解性COD (mg/g-TS)
未処理	25	23		14
200W 10min	33	30	95	150
500W 4min	32	29	95	149
1000W 2min	37	33	98	162

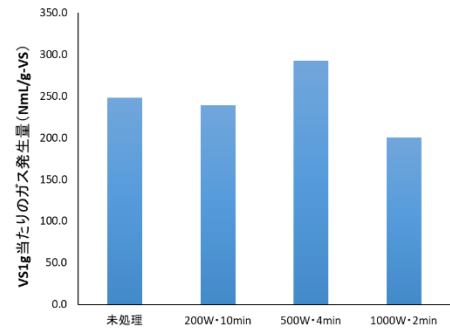


図 4 各条件のバイオガス生成量(シリーズ I)

<シリーズ II >

シリーズ II ではシリーズ I と同様に、投入エネルギーを同等としたマイクロ波照射を行った。各条件における照射後汚泥の到達温度は 94℃, 94℃, 92℃ と大きな違いは見られなかった。VS1g あたりのバイオガス生成量は、200W 10min の照射条件の汚泥が最も大きく、343 NmL/g-VS となった。これは未処理 OD 汚泥の 290 NmL/g-VS に対し約 1.2 倍の増加となった。一方、1000W 2min と 500W 4min はいずれも、未処理 OD 汚泥からのガス生成量に対して約 0.8 倍とバイオガス生成量の増加が見られなかった。図 5 に各条件におけるバイオガス生成量を示す。

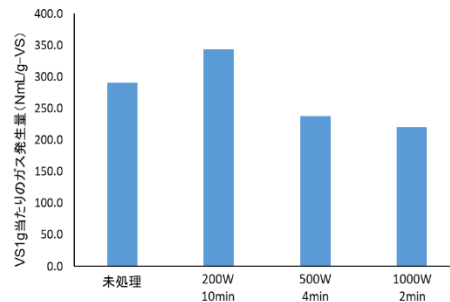


図 5 各条件のバイオガス生成量(シリーズ II)

表 2 照射条件と照射後汚泥性状(シリーズ III)

照射条件	TS (%)	VS (%)	到達温度 ℃	溶解性COD (mg/g-TS)
未処理	18	16		79
200W20min	18	16	190	647
200W10min	19	17	134	360
200W1min	17	15	33	67
500W4min	16	14	183	379

<シリーズ III >

シリーズ III では、投入エネルギーを同等とした条件、および投入エネルギーを変化させた条件でマイクロ波照射 (完全密閉条件) を行った。溶解性 COD は各条件とも未処理 (79mg/g-TS) に対して大きく増加し、最大は最も温度が上昇した 200W 20min の照射条件で、647mg/g-TS となった。また、VS1g あたりのバイオガス生成量は 200W 10min の照射条件の汚泥が最も大きく、199 NmL/g-VS となった。これは未処理 OD 汚泥の 196 NmL/g-VS とほぼ同等の値となった。その他の条件ではいずれもバイオガス生成量の増加が見られなかった。図 6、表 2 に各条件におけるバイオガス生成量、および照射後の変化と到達温度について示す。

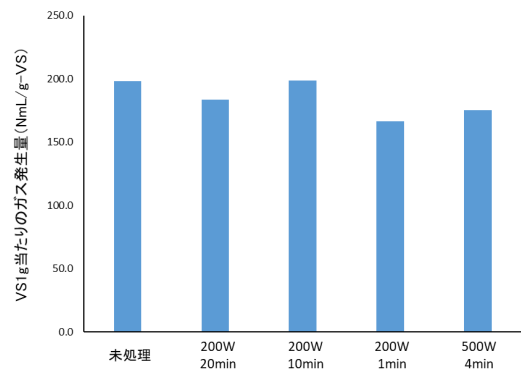


図 6 各条件のバイオガス生成量(シリーズ III)

<シリーズⅣ>

シリーズⅢでは、低出力（平均出力 11W：最大 36W）で、温度制御（最大 44.1℃）を行いながら 1 時間の照射を行った。VS1g あたりのバイオガス生成量は MW 照射汚泥が、194±11 NmL/g-VS となった。これは未処理 OD 汚泥の 221±8 NmL/g-VS に対し約 1.14 倍の増加となった。

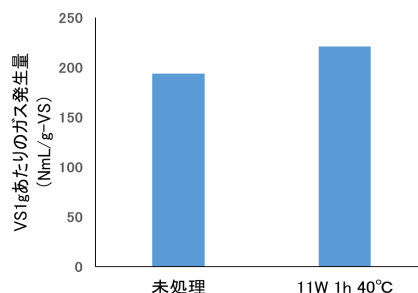


図 7 各条件のバイオガス生成量(シリーズⅣ)

<連続式実験>

表 3 に連続式実験による結果のとりまとめを示す。Run1 を未処理 OD 汚泥を基質として用いた系、Run2 を 200W36min の条件で 360g に対しマイクロ波照射を行った OD 汚泥を基質とする系とし、立上げ期間を含めて 72 日間の実験を行った。投入基質の TS 濃度は 3.0%に調整し、SRT（汚泥滞留時間）を 20 日とし、高温条件（53℃）で、投入引抜は 1 日 1 回行った。Run1（未処理系）の VS1g あたりのバイオガス生成量は 112 NmL/g-VS であり、Run2（マイクロ波照射系）は 136 NmL/g-VS であった。マイクロ波照射により 1.2 倍のガス生成量増加効果が確認された。いずれの系もメタン発酵の阻害要因と成り得る揮発性有機酸やアンモニア性窒素の顕著な蓄積は見られなかった。

表 3 連続実験結果のとりまとめ

連続実験	OD汚泥	
	期間 I	
	RunA	RunB
	未処理	MW照射 200W(密閉) 1.2kJ/g-wet
日数	72	72
有機物負荷(g-VS/L/day)	1.32	1.34
メタン濃度	65	69
バイオガス発生率(NmL/g-TS)	99	122
バイオガス発生率(NmL/g-VS)	112	136
MW照射後平均到達温度(°C)	-	117
平均投入エネルギー(kJ/g-VS)	-	8

<まとめ>

- ・ 回分式実験および性状分析の結果からマイクロ波照射実験では温度の上昇とともに、溶解性 COD_{Cr} が増加する傾向がみられたがガス生成量との間に明確な相関は見られなかった。
- ・ 回分式実験では、各照射条件（照射強度、照射時間、到達温度）とガス生成量との間に明確な相関は確認できなかった。しかし、連続実験ではマイクロ波照射系のガス生成量が増加しており、長期間の連続投入により、微生物が馴致された可能性が考えられる。
- ・ 低出力、低温制御の照射により、ガス生成量の増加が確認されたため、更なる省エネ照射の可能性が示された。
- ・ 連続実験では安定的なガス生成が確認でき、マイクロ波照射系のガス生成量が増加したが、今回の実験でのマイクロ波照射条件とメタンの回収量ではエネルギー収支がマイナスであり、更なる省エネ型の照射条件が必要となる。

4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究では、中小都市の下水処理場で数多く採用されている水処理方式であるオキシゲーションディッチ法から発生する汚泥（OD 汚泥）に、メタン発酵の前処理としてマイクロ波照射を用いることで、バイオガス生成量の増加、生分解性の向上を試みた。本研究の結果により、マイクロ波照射により溶解性 COD が増加するが、ガス発生総量に対しては大きな影響がないことが確認された。また、連続式実験においては、安定的な反応が確認できた。今後の課題としては以下の点が考えられる。

①更なる省エネ型照射法の開発

本研究の回分式実験シリーズIVでは、低出力での照射を試みた。低出力の照射においても 1.2 倍程度のガス生成量の増加が確認された。低出力の照射では温度上昇も小さいため、溶解性 COD などの増加も生じておらず、マイクロ波による何らかの非熱的效果が生じていると考えられる。これは、他研究で実施している余剰汚泥に対するマイクロ波照射でも同様の傾向が確認されており、低出力・低温での照射においてどのような変化が生じているかを解明し、省エネ型照射法の検討が必要と考える。

②現場装置に合わせたマイクロ波照射技術の組み込み

メタン発酵においては、槽内の温度を中温条件では 37℃程度、高温条件では 55℃程度に保つことが必要となる。通常は槽内の汚泥を循環して温水等で間接加温を行っている事例が多いが、温水の代わりにマイクロ波照射を組み込むなど、加温と生分解性の向上を同時に行うことができれば、更に省エネ効果、創エネ効果が高まり、中小規模の処理場においても、維持管理コストなどでのメリットが大きくなる。

③エネルギー貯留の検討

マイクロ波を OD 汚泥に照射し、メタンガス生成量を増加させることは、電気エネルギーをメタンの形に変えて貯留していることになる。メタン発酵は加温を続けることができれば、ある程度の期間ガスが出続けるので、そこで生み出されたメタンを用いて発電が可能となれば、災害時などの利用が考えられる。