

マイクロ波照射を用いた下水汚泥からの エネルギー回収システム

戸 莉 丈 仁

1. はじめに

地域で発生する有機性廃棄物からエネルギーを回収し、有効活用する技術の開発が求められている。特に中小規模の地方自治体では下水汚泥やその他有機性廃棄物の処理に多大なコスト負担が生じており、地域で発生する有機性廃棄物からのエネルギー回収は持続可能な社会の構築に大きく寄与できる。その中でも下水汚泥は安定的に、大量に、かつ、比較的均質に発生する非常に有用なバイオマスといえる。下水汚泥の年間発生量は固形物量ベースで約227万tであり、建設資材、固形燃料、緑農地利用などのマテリアル利用の指標である下水汚泥リサイクル率は68%であるが、下水汚泥中の有機分の有効利用率であるバイオマス利用率はバイオガス13%、汚泥燃料等3%、農業利用10%であり、未利用分が75%となっている（国土交通省、2017）。下水汚泥をマテリアルとして建設資材等に利用するリサイクル利用率は比較的高いが、下水汚泥中の有機分については、まだ有効利用の余地が多く残されている。

近年、下水汚泥からエネルギー回収が可能な処理方式として、嫌気性消化が注目を集めている。嫌気性消化は、酸生成菌およびメタン生成古細菌によって、基質中の有機分を分解し、メタンと二酸化炭素を主成分とするバイオガスを発生させる処理方式である。従来は汚泥発生量の低減を目的として行われてきた処理であるが、バイオガス中のメタンは可燃性であり、発電や熱利用が可能なため、エネルギー回収が可能な処理方式として再注目されている。これまで、嫌気性消化における下水汚泥の分解率、バイオガス発生率の向上を目的に、前処理として熱処理(Val del Rio A et al.,2011)、水熱処理(Qiao W et al.,2011)、オゾン処理(Weemaes M et al.,2000)および超音波処理(Bougrier C et al.,2006)などが提案されてきたが、実設備での普及促進に至っていない。これは下水汚泥処理では、日々発生する下水汚泥に対して連続処理が求められること、下水汚泥は比較的粘度が高く、均一な処理を行うために攪拌等が必要なことなどが理由として想定される。

本研究では嫌気性消化の前処理としてマイクロ波照射に着目した。マイクロ波は極性分子にのみ選択的に作用し、かつ、内部からの均一作用が可能なため、攪拌が不要であり下水汚泥の処理に適していると考えた。著者らはこれまでに、生分解性が低く、低含水率のオキシデーションディッチ脱水汚泥（OD脱水汚泥）を対象に前処理としてマイクロ波照射を行い、ガス発生量が増加することを明らかにするとともに、実証試験により、マイクロ波前処理の有効性を確認した(Togari et al.,2016)。一方で、標準活性汚泥法から発生する余剰汚泥においても、生分解性は小さく、マイクロ波照射による効果が見込まれる。鳥取市秋里下水終末処理場で発生する余剰汚泥に対し、マイクロ波照射および回分式消化実験を行うことで、標準活性汚泥法の余剰汚泥に対する適用性を検証するとともに、最適な処理条件について検討を行った。

2. 実験方法

2.1. 実験に用いた汚泥

種汚泥は鳥取市秋里下水終末処理場の高温消化槽から引き抜いた消化汚泥を用いた。また、基質として同処理場の最初沈殿池から引き抜いた生汚泥、最終沈殿池から引き抜いた余剰汚泥、一度消化工程を経てベルトプレス脱水機で脱水された消化脱水汚泥の3種類を用いた。表1に各基質の性状を示す。

表1 各基質の性状

汚泥種別		TS濃度(%)	VS濃度(%)	VTS (VS/TS)
種汚泥	消化汚泥	2.3	1.8	0.78
基質	生汚泥	1.1	0.9	0.82
	余剰汚泥	2.7	2.3	0.85
	消化脱水汚泥	16.7	12.9	0.77

2.2. 実験方法および実験条件

本研究では、マイクロ波未照射の汚泥およびマイクロ波照射後の汚泥を用いてシリーズI～IVの回分式消化実験を実施した。各シリーズの実験条件を表2に示す。マイクロ波照射には図1に示すマイクロ波照射装置（四国計測工業、 μ Reactor EX、周波数2.45GHz、最大出力1000W）を用いた。回分式消化実験には100mLプラスチック製シリンジを用い、基質2g～10gに種汚泥30mLを加え、恒温振とう水槽で高温条件（55℃）、20日間150rpmで振とう培養し、ガス発生量を測定した。ブランクとして消化汚泥のみを投入した系も準備した。シリーズIでは生汚泥、余剰汚泥、消化脱水汚泥のバイオガス生成ポテンシャルを測定した。シリーズIIでは余剰汚泥に対し、マイクロ波照射を行いバイオガス発生量の増加効果を確認した。シリーズIIIでは消化脱水汚泥に対しマイクロ波照射を行い、再度消化を行うことを試みた。また、マイクロ波照射時の固形物濃度を調整し、変化させることで最適な照射時含水率の検討を行った。シリーズIVではマイクロ波照射の照射条件（照射強度、照射時間）を変更し、その効果の違いを検証した。

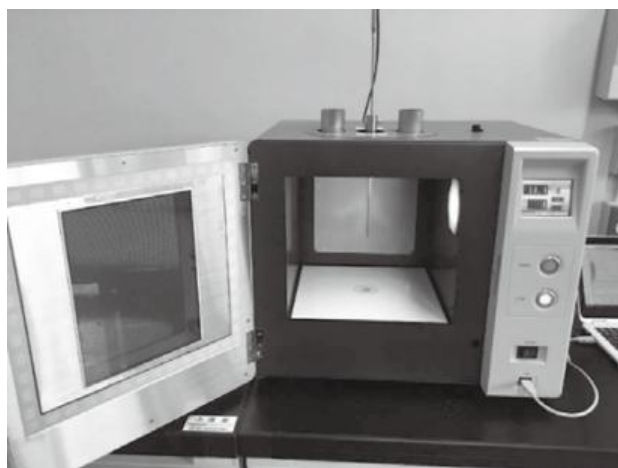


図1 マイクロ波照射装置

表2 実験条件

シリーズ	温度	基質	反応槽	MW照射条件	照射対象物 制御温度	照射対象 污泥重量
I	55°C	生污泥	100mLシリンジ	-	-	-
		余剰污泥		-	-	-
		消化脱水污泥		-	-	-
II	55°C	余剰污泥	100mLシリンジ	-	-	-
		余剰污泥		500W 10min	55°C	50g
III	55°C	消化脱水污泥	100mLシリンジ	-	-	-
		消化脱水污泥 (TS2%)		1000W 1min	90°C	固形物量5g
		消化脱水污泥 (TS5%)		1000W 1min	90°C	固形物量5g
		消化脱水污泥 (TS8%)		1000W 1min	90°C	固形物量5g
		消化脱水污泥 (TS10%)		1000W 1min	90°C	固形物量5g
		消化脱水污泥 (TS13%)		1000W 1min	90°C	固形物量5g
		消化脱水污泥 (TS15%)		1000W 1min	90°C	固形物量5g
IV	55°C	消化脱水污泥	100mLシリンジ	-	-	-
		消化脱水污泥		1000W 1min	90°C	150g
		消化脱水污泥		500W 2min	90°C	150g
		消化脱水污泥		100W 10min	90°C	150g

3. 実験結果

3.1. 各基質のバイオガス生成ポテンシャル測定

各基質のバイオガス生成ポテンシャルの実験結果を表3に示す。最初沈殿池から引き抜いた生污泥は好気性処理を行う前の污泥であり生分解性は大きい、一方、最終沈殿池から引き抜いた余剰污泥は好気性分解を経て発生した污泥であり、生分解性は小さい。本研究における回分式消化実験の結果においても同様の結果が確認され、VS1gあたりのバイオガス生成量は生污泥が611NmL、余剰污泥が277NmLとなった。また、消化脱水污泥からのバイオガス発生量は、完全混合方式の消化槽からの引抜であるため、未消化成分からのガス発生量であると考えられ、シリーズⅢ、Ⅳにおいても発生量のばらつきが確認された。

表3 バイオガス生成ポテンシャル

污泥種別	バイオガス発生量 (NmL/g-TS)	バイオガス発生量 (NmL/g-VS)
生污泥	504	611
余剰污泥	236	277
消化脱水污泥①	68	90
消化脱水污泥②	40	62

*消化脱水污泥①、②はそれぞれシリーズⅢ、Ⅳにおける測定値

3.2. 余剰污泥に対するマイクロ波照射実験 (シリーズⅡ)

余剰污泥にマイクロ波照射を実施し、バイオガス生成量を測定した結果を表4に示す。余剰污泥50gへの500W10分のマイクロ波照射により溶存態有機炭素量 (DOC) が7 mg/g-TSから25mg/g-TSに増加した。未照射余剰污泥のバイオガス発生量277NmL/g-VSに対して、マイクロ波照射余剰污泥から

のバイオガス発生量は386NmL/g-VSとなり、109NmL/g-VS増加する結果となった。投入エネルギーは233kJ/g-TSであった。バイオガス発生量はマイクロ波照射により約1.4倍に増加しており、マイクロ波照射による余剰汚泥の生分解性の向上の可能性が示された。

表4 余剰汚泥に対するマイクロ波照射効果実験結果

CASE	汚泥	制御温度(°C)	処理対象汚泥量	温度制御方法	処理時間(min)	処理前TS(%)	処理後TS(%)	VS/TS	ガス発生量(Nml/g-VS)	ガス発生増加量(Nml/g-VS)	DOC(mg/L)	DOC(mg/g-TS)	投入エネルギー(kJ/g-TS)
1	余剰汚泥	55	50g	繰返し照射(間欠照射)	10	2.7	2.6	0.82	386	109	694	25	233
2		-	-	未照射	-	-	-	0.85	277	-	42	7	-
種汚泥						2.3	-	0.79	-	-	-	-	-

3.3. 消化脱水汚泥に対するマイクロ波照射効果実験(シリーズⅢ)

消化脱水汚泥マイクロ波照射実験結果を図2に示す。消化脱水汚泥の固形物濃度を2%、5%、8%、10%、13%、15%に調整し、それぞれ固形物量5gに対し1000W 1分の条件でマイクロ波照射を行った結果、未照射汚泥からのバイオガス発生量は90NmL/g-VSであったのに対し、最もバイオガス発生量の大きかった固形物濃度10%での条件では177NmL/g-VSとなり、最大で87NmL/g-VSのバイオガス発生量の増加が確認された。消化脱水汚泥からのバイオガス発生量は、完全混合方式の消化槽から引き抜いた消化汚泥を用いているため、消化槽内の未消化成分からのバイオガス発生量によるものと考えられるが、マイクロ波照射が、未消化成分以外の生分解性の小さい成分に作用し、バイオガス発生量が向上したと考えられる。また、照射時汚泥の固形物濃度による影響について、固形物濃度10%のケースで最も大きなバイオガス発生量が確認された。マイクロ波は極性分子である水分子に作用するため、固形物濃度が小さい(含水率が高い)と下水汚泥固形分の周囲の水の加熱にエネルギーを消費し、効果が小さくなると想定したが、逆に固形物濃度が13%、15%と大きくなった場合(含水率が小さくなった場合)にもバイオガス発生量が小さくなった。これらの結果から、下水汚泥へのマイクロ波照射においては、含水率の影響が大きいことが確認された。

3.4. マイクロ波照射条件変更実験(シリーズⅣ)

マイクロ波照射条件変更実験の結果を表5に、DOCとバイオガス発生量の関係を図3に示す。

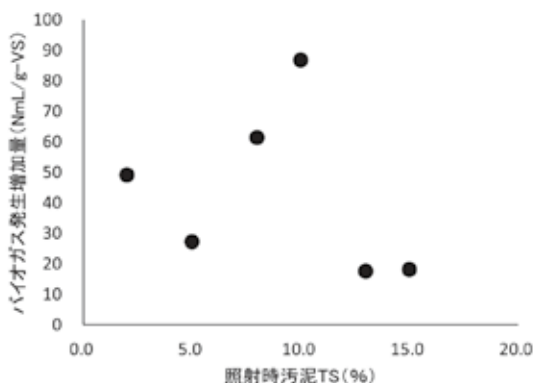


図2 消化脱水汚泥マイクロ波照射実験結果

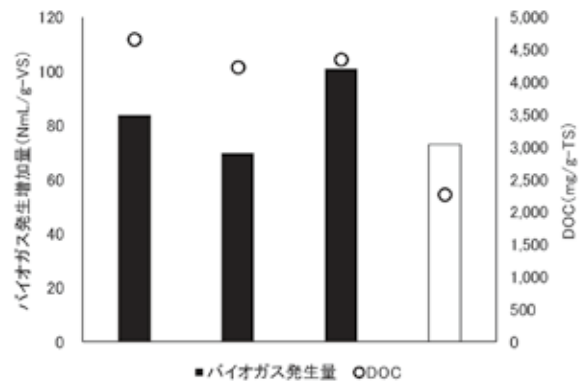


図3 DOCとバイオガス発生量の関係

表5 マイクロ波照射条件変更実験の結果

CASE	Power (W)	Time (min)	TS (%)	VS (%)	VTS	Energy (J)	Energy (J/g-VS)	温度 (°C)	照射後 TS (%)	照射後 VS (%)	照射後 VTS	DOC (mg/g-TS)	バイオガス発生量 (N ml/g-VS)	バイオガス発生増加量 (N ml/g-VS)
0	種汚泥		2.0	1.3	0.65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	1000	1	16.7	12.9	0.77	60,000	3,101	90°C以下	23.4	18.1	0.78	4,662	84	11
2	500	2	16.7	12.9	0.77	60,000	3,101	90°C以下	19.1	14.8	0.78	4,232	70	-3
3	100	10	16.7	12.9	0.77	60,000	3,101	90°C以下	17.8	13.8	0.77	4,351	101	28
4	未処理		16.7	12.9	0.77	-	-	-	-	-	0.77	2,271	73	-

消化脱水汚泥へのマイクロ波照射において、投入エネルギーを3,101J/g-VSとし、照射強度を100W、500W、1000W、照射時間をそれぞれ10分、2分、1分に変化させた。未照射汚泥からのバイオガス発生量は73NmL/g-VSであったのに対し、マイクロ波照射汚泥からのバイオガス発生量は100W10分のケースで101NmL/g-VSと最も大きな値となった。1000W 1分では84NmL/g-VSとなったが、500W 2分においては70NmL/g-VSと未照射汚泥に対するバイオガス発生量の増加が確認されない結果となった。いずれの条件においても照射によりDOCの増加が確認されたが、DOCの増加とバイオガス発生量の増加の間には明確な関連性が見られなかった。また、照射強度および照射時間とバイオガス発生増加量の間にも明確な関連性は見られなかった。今回のマイクロ波照射では投入エネルギーは同じで照射強度や照射時間を変化させたが、実際に汚泥に吸収されたエネルギーは必ずしも投入エネルギーと同等ではなく、照射強度、照射時間、汚泥性状などにより差異が生じたのではないかと考えられる。

3.5. マイクロ波照射システムの評価

マイクロ波照射による効果を試算した。対象汚泥は生分解性の小さな余剰汚泥とし、嫌気性消化槽への投入前に前処理として実施することを想定した。前処理条件としては固形物濃度10%での照射とし、ガス発生量の増加は50%とした。また、発生したバイオガスは発電を行うこととし、バイオガス中のメタン濃度は生汚泥と余剰汚泥の中間程度の値として65%（野池ら2009）に設定し、発電効率は35%（矢田部 2015）とし、売電単価は固定価格買取制度の39円/kwhを用いた。比較対象としてマイクロ波照射前処理を実施しない場合に加えて、嫌気性消化を実施しない場合も加えた。また、脱水汚泥の処分費は16,000円/t（国土交通省 2017）、運搬費は処理場の場所によって異なるがここでは5,000円/tとし、併せて21,000円/tを脱水汚泥の運搬処分費とした。また、投入エネルギーはシリーズIVで用いた有機物1gあたり3,101Jの条件と同等とした。下水汚泥1tあたりの試算結果を表6および図4に示す。嫌気性消化を用いない場合と比較して、マイクロ波前処理を用いず、消化脱水汚泥を運搬処分する場合は13,795円のコスト縮減効果、マイクロ波前処理を用いた場合は15,295円のコスト縮減効果がある結果となった。

表6 下水汚泥1tあたりのマイクロ波照射効果試算結果

項目		消化なし	消化あり MW前処理無	消化あり MW前処理有
試算結果	分解VS量	(t)	-	0.04
	ガス発生量	(Nm ³)	-	21
	発生熱量	(MJ)	-	489
	発電量	(kwh)	-	48
	汚泥脱水処理量	(t-DS)	-	0.07
	脱水処理消費電力量	(kwh)	-	1.8
	消費電力量	(kwh)	-	1.8
	消費熱量	(MJ)	-	6.5
	脱水汚泥量	(t)	-	0.43
	売電収入	(円)	-	1,852
	買電支出	(円)	-	27
	汚泥処分費	(円)	21,000	9,030
	温度上昇獲得熱量	(MJ)	-	-
	温度上昇獲得熱量	(MJ)	-	-
前処理効果	正味獲得熱量	(MJ/t)	0	482
	正味発電収入	(円)	0	1,825
	汚泥処分費削減効果【消化なしと比較】	(円)	0	11,970
	コスト改善効果	(円)	0	13,795

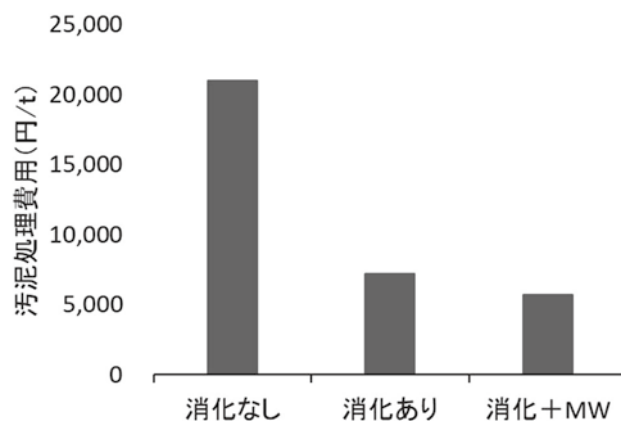


図4 下水汚泥1tあたりのマイクロ波照射効果試算結果

マイクロ波前処理の有無による下水汚泥1tあたりのコスト縮減効果の比較では、マイクロ波照射により、1,500円のコスト縮減効果がある結果となった。施設整備にはコストが生じるため、インシヤルコスト（建設コスト）と維持管理コストを併せて評価する必要があるが、例えば鳥取市の秋里下水終末処理場では年間37,792t（平均固形物濃度4.7%）の余剰濃縮汚泥が発生しており（国土交通省2017）、これを固形物濃度10%として換算し計算すると余剰汚泥由来の脱水汚泥量が21%低減し、後段の焼却処理等に用いられる燃料使用量等の部分でコスト縮減が可能となる。また、現在、鳥取県内で嫌気性消化処理を実施している下水処理場は2箇所のみであり、マイクロ波照射により、更なるコスト縮減が見込まれれば、嫌気性消化による下水汚泥からのエネルギー回収の今後の鳥取県内処理場への普及の助けとなると考えられる。

4. まとめ

本研究では、鳥取市秋里下水終末処理場から発生する生汚泥、余剰汚泥、消化脱水汚泥を用いてマイクロ波照射による嫌気性消化前処理効果の検討を試みた。以下に得られた成果を示す。

- 1) 余剰汚泥、消化脱水汚泥へのマイクロ波照射により、未照射汚泥と比べてそれぞれ最大で109NmL/g-VS(1.4倍)および87NmL/g-VSのガス発生量の増加が確認された。
- 2) 照射対象汚泥の含水率を変化させた実験の結果より、含水率10%程度で最もガス発生量の増加が大きい結果となった。
- 3) 投入エネルギーを固定し、照射強度と照射時間を変化させた実験では、照射強度、照射時間およびDOCとガス発生増加量の間には明確な傾向が見られなかったが、照射強度や照射時間、汚泥性状などにより、投入エネルギーと吸収エネルギーに差異が生じることが原因と考えられた。
- 4) マイクロ波照射効果の試算により、マイクロ波照射を用いない嫌気性消化処理に比べ、下水汚泥1tあたり1,500円のコスト縮減効果が確認された。

これらの結果より、マイクロ波照射は嫌気性消化の前処理として有用性が確認されたとともに、消化汚泥にマイクロ波照射を行い、再度消化工程に投入するシステムの可能性も示された。しかし、最適な照射条件については、さらなる検証が必要と考えられる。

5. 謝辞

本研究を実施するにあたり、鳥取市環境下水道部下水道管理室および公益財団法人鳥取市環境事業公社の皆様には下水汚泥試料の提供等において多大なるご理解とご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 国土交通省：水管理・国土保全局下水道部HP
- [2] Val del Río A, Morales N, Isanta E, Mosquera-Corral A, Campos JL, Steyer JP, Carrère H : Thermal pretreatment of aerobic granular sludge: impact on anaerobic biodegradability. *Water Res.*, 45(18), 6011-6020,2011.
- [3] Qiao W, Yan X, Ye J, Sun Y, Wang W, Zhang Z : Evaluation of biogas production from different biomass wastes with/without hydrothermal pretreatment. *Renew. Energy*, 36, 3313-3318, 2011.
- [4] Weemaes M, Grootaerd H, Simoens F, Verstraete W : Anaerobic digestion of ozonized biosolids. *Water Res.*,34, 2330-2336, 2000.
- [5] Togari, T., R. Ikemoto, H. Ono, K. Takashima, R. Honda, K. Tanaka : Effects of Microwave Pretreatment of Dewatered Sludge from an Oxidation-Ditch Process on the Biogas Yield in Mesophilic Anaerobic Digestion. *Journal of Water and Environment Technology*, Vol.14, No.3, 158-165, 2016.
- [6] 矢田部 桂：新潟県における“バイオガス発電”の取組～産官学連携による小型消化ガス発電機の開発～、再生と利用 39(146): PP87-90、日本下水道協会、2015

-
- [7] 野池達也、落修一、河野孝志、佐藤和明、渋谷勝利、松本明人、安井英斉、李玉友:メタン発酵、技報堂出版、2009
- [8] 国土交通省：下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン、2017
- [9] 国土交通省：下水道統計H26、2017