

高効率エネルギー回収を目的とした高濃度下水汚泥と稲わらの混合嫌気性消化

廃棄物・有害物管理工学研究室 07528984 江口 淳
指導教員 小松 俊哉 姫野 修司

1. 背景および目的

地球温暖化や化石資源の枯渇を背景にバイオマスの利活用に注目が集まっている。下水道分野においては下水汚泥の嫌気性消化によって発生するバイオガスからのエネルギー回収が注目される。一方で、嫌気性消化は創エネルギー分野であると同時に消化槽の加温や攪拌などエネルギーを大きく消費するプロセスでもあるため、特に中小規模での処理場において発生するバイオガスは採算性の問題から燃焼廃棄されるケースも少なくない。そのため、バイオガス生産量の増大とその消化プロセスにおいての投入エネルギーの減少が求められる。

現在、進展しつつある嫌気性消化の効率的なプロセスとしては、混合嫌気性消化や高濃度消化が挙げられる。混合嫌気性消化はバイオマスを汚泥と混合する事によってバイオガス発生量を増大させる方法であり、さらに高濃度消化は通常 TS 3%程度の投入汚泥を TS 5%程度まで濃縮する事によって汚泥の容積が減少するため、消化槽加温や汚泥処理のエネルギーやコストが大幅に減少する事が期待されている。

そこで本研究では、更なる効率的なエネルギー回収を目的として先に述べた二つの方式を組み合わせ、高濃度汚泥と未利用バイオマスである稲わらを用いた混合嫌気性消化の連続実験を行い、その消化特性を把握した。そして、システムの評価として実下水処理場のエネルギーモデルを作成し連続実験から算出したパラメータを用いて、今回提案する高濃度下水汚泥と稲わらの混合嫌気性消化システムのエネルギー収支を計上し評価を行った。

2. 実験方法

Lab 内において高濃度汚泥と可溶性前処理を施した稲わらの混合嫌気性消化の連続実験を行った。実験装置は有効容量 1800ml であり、1 日 1 回の基質の投入と消化汚泥の引き抜きを 90ml 行い、消化日数を 20 日と設定した。種汚泥として、中温条件では長岡中央浄化センター、高温条

件は真岡下水処理場の消化汚泥をそれぞれ用いた。そして、基質となる高濃度汚泥は、長岡中央浄化センターからサンプリングした消化槽投入汚泥を遠心濃縮 (609G-5min) において TS 5%程度に濃縮して用いた。

表 1 に実験条件を示す。稲わら混合系においては、稲わらをそのまま投入するには、分解性、混合性に問題が生じるため、前処理を施した。稲わらを 5mm 以下に細断した後、蒸留水または 5g/L のセルロース、ヘミセルロース分解酵素群の溶液に 36 で 20 日間、固液比 1:10 において浸漬させる水処理系 (Run1) と酵素処理系 (Run2) をそれぞれ中温条件 (36) と高温条件 (52) において設定した。

定期的に発生したバイオガス量とガスの組成、そして引き抜いた消化汚泥においては pH, TS, VS, 全 COD (T-COD), 粘度, 脱水性を測定した。また、消化汚泥の上澄み液を模して孔径 0.45um のガラス繊維ろ紙により、ろ過したサンプルにおいて溶解性 COD (S-COD), NH₄-N, T-P, T-N を測定した。

表-1 連続実験の実験条件

		Control	Run1	Run2
消化温度			36, 52	
消化日数	日	20		
混合比	汚泥 TS: 稲 TS	-	1:0.5	1:0.5
前処理	-	-	水	酵素
酵素添加	稲-TS: 酵素-TS	-	-	1:0.05
TS	%	5.04	7.56	7.56
VS	%	4.35	6.46	6.46
T-COD	g/L	57.5	78.4	79.3

系列名にMと付けば中温(36), Tと付けば高温(52)条件である

3. 実験結果

連続運転は全ての系列で約 60 日間行い、全系統で遅くとも運転開始 20 日後から安定したメタン生成が見られたため、定常状態とみなした。

連続運転の期間内においては各種阻害の影響なども現れておらず、安定的な運転を行う事が可能であり、高温条件においてやや高い pH で推移したがバイオガスが順調に発生したため、pH 調整も行わなかった。

表-2 に定常状態におけるバイオガスの測定結果の平均値を示す。

表-2 連続実験中のバイオガスの性状

	単位	M-Control	M-Run1	M-Run2	T-Control	T-Run1	T-Run2
メタン濃度	%	55.8	53.3	54.1	56.2	53.0	54.2
メタン発生量	NL/L-投入	11.8	16.6	17.5	13.4	18.0	19.0
VSあたり発生量	NL/g-VS	0.270	0.258	0.271	0.308	0.278	0.294

定常状態におけるメタンガス発生量は中温条件より高温条件の方が大きくなった。また、Control 系と比較して稲わら混合系では中温条件で 43~52%、高温条件では 34~41%増加しており、稲わらのメタン化が進行している事が見て取れたが、バイオガス中のメタン含有率は稲わらの混合によって、若干であるが低下している。難分解性の木質系におけるの混合消化の研究例においてもこの現象は見られており、稲わら混合における特性と言える¹⁾。

また、前処理の影響としては、両温度域において、水処理系よりも酵素処理系においてメタンガス発生量が増加している。COD 当量での稲わらのメタン転換率を全系において汚泥からのメタン発生量は同等であると仮定して算出したところ、Control 系のメタン転換率(M-Control 53.6%,T-Control 61.0%)と同等以上の値(57~72%)を示しており、稲わらに適切に前処理を施す事により汚泥と同等以上のメタン転換を示している。

定常状態での消化汚泥及び、消化汚泥上澄み液の各測定結果の平均値それぞれを表-3、表-4 に示す。

表-3 連続実験中の消化汚泥の性状

	単位	M-Control	M-Run1	M-Run2	T-Control	T-Run1	T-Run2
pH	-	7.2	7.1	7.1	7.5	7.5	7.5
TS	%	2.01	2.34	2.26	1.79	2.30	2.23
TS除去率	%	55.6	65.6	66.9	60.6	66.3	67.3
VS	%	1.25	1.60	1.49	1.13	1.50	1.42
VS除去率	%	68.0	72.6	74.3	71.2	74.2	75.6
粘度	mPa·s	35.1	47.2	41.5	38.2	51.1	54.2
脱水後含水率	%	76.8	74.3	75.1	79.0	76.5	77.2

表-4 連続実験中の消化汚泥上澄み液の性状

	単位	M-Control	M-Run1	M-Run2	T-Control	T-Run1	T-Run2
S-COD	mg/L	1240	1488	1460	2690	2958	2740
T-N	mg/L	763	578	582	1032	804	768
NH4-N	mg-N/L	549	406	373	730	561	577
T-P	mg/L	13.6	18.9	16.8	14.9	17.9	15.4

稲わら混合に伴って TS は 12~28%、VS は 19~33%増加した。しかし、酵素処理によって固形物の除去率は向上しており、酵素による可溶化前処理の固形物除去に関しての有用性が示された。

稲わら混合系におけるその他の特徴としては、消化汚泥の上澄み液中の全窒素、アンモニア性窒素の減少が見られた。これは、比較的炭素分が多い稲わらの混合によって、投入汚泥の C/N 比が改善され、菌体の総量が増加した事に起因しているものと考えられる。しかし、一方で S-COD と全リンは増加したが、生物反応槽に脱離液を返流する場合においても水処理系への影響は軽微であると考えられ、既存の活性汚泥法においても放流先への環境への悪影響は考えにくい。

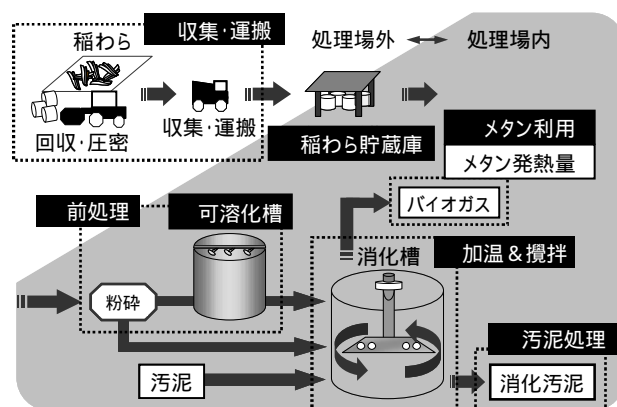
汚泥の物理的特性として、粘度と脱水性を測定した。粘度は稲わらの混合に伴い固形物量が増加した事によって大きくなった。また、中温条件と高温条件を比較すると高温条件の方が粘度が高くなった。これは高温条件において溶解性成分が蓄積しており、それらの影響を受けたものと考えられる²⁾。しかし、いずれの系も一般的な消化汚泥の粘度の範囲内(10~90mPa·s)にあり、現状の消化槽の攪拌に影響を与える事はない事が考えられる。また、汚泥の脱水性の指標として所定量の高分子凝集材を添加した後に固形物を捕集するためのガーゼをとりつけた遠沈管において遠心脱水し、模擬脱水試験を行ったところ、稲わら添加系の方が Control 系よりも、含水率が低下する事が分かった。これは消化汚泥中に残存した稲わらの繊維質等が脱水助材のような効果をもたらしたものと考えられ³⁾、脱水汚泥の減量が期待される。

4. エネルギー収支から見たシステム評価の方法

今回、長岡市中央浄化センター(処理水量: 71,500 m³/日)をモデルにエネルギー収支を計上する事によってシステムの評価を行った。

評価範囲とフローを図-1 に示す。

図-1 エネルギー収支の評価範囲とフロー



考慮した投入エネルギーとして 稲わらの収集及び運搬、稲わらの前処理、消化槽の攪拌及び加温、メタンガス利用(シナリオ A:精製後に都市ガス燃料化,シナリオ B:ガス発電) 汚泥処理エネルギー(シナリオ C:脱水後に焼却,シナリオ D:コンポスト化)の5つの評価項目に分類し、ランニングエネルギーとした。

さらに本システムにおいて新規に建設の必要がある稲わらの貯蔵庫,可溶化槽については最適なサイズを各評価系列において決定した。(稲わらの貯蔵庫:1264 m²×3m,可溶化槽:831 m³)は,それに伴う 建設エネルギーを算出し 20 年の均等償却として計上した。そしてバイオガス中に含有するメタンの発熱量(回収エネルギー)と比較する事でエネルギー収支を計上した。

5. エネルギー収支結果

全実験系列,全シナリオにおいて,エネルギー収支を計上したが,今回,中温の稲わら混合酵素処理系を抽出して各シナリオの評価を行った。その結果を図-2 に示す。

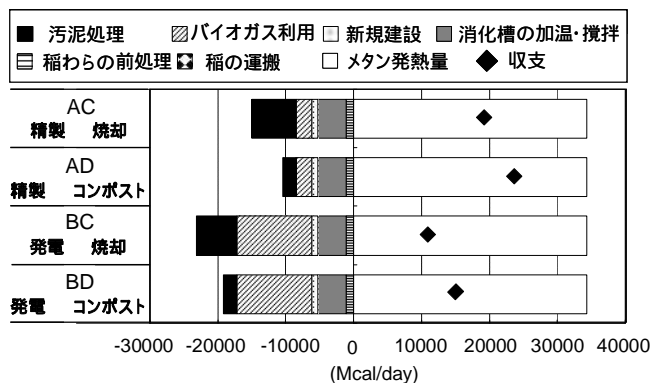


図-2 M-Run2における各シナリオの収支結果

汚泥処理に関しては,コンポスト化によって焼却と比較すると投入エネルギー量が 31%程度に減少する事が分かる。そして,バイオガスの利用に関しては,ガス発電が現在のスペック上,発生したメタンの約 25%程度の熱量が,空气中に放散されてしまうため,ガス精製よりも 488%程度にまで投入エネルギー量が増加している。それぞれの余剰エネルギー(回収 E - 投入 E)を算出すると最も優れた結果を示したのはシナリオ AD,すなわちガスを精製し直接燃料化し,消化汚泥をコンポスト化するシナリオにおいて最も余剰エネルギーが大きくなった。

シナリオ AD においての各評価系列のエネルギー収支結果を図-3 に示す。

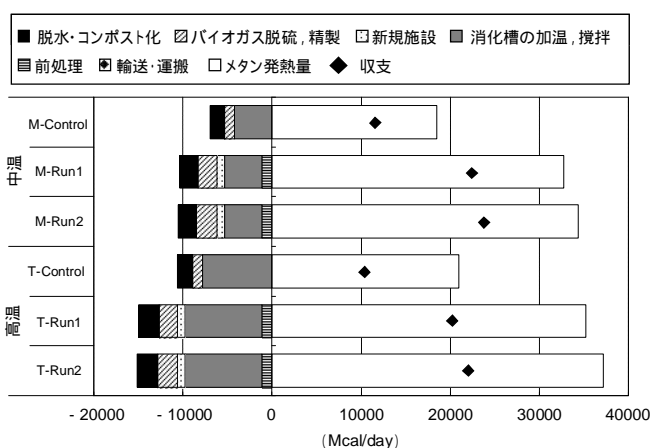


図-3 プロセス AD のエネルギー収支結果

バイオマスのエネルギー転換の際しばしば問題となる収集・運搬に関する投入エネルギーであるが,今回のエネルギー収支において,非常に割合として小さくなっている。これは,今回設定したモデルとなる長岡中央浄化センターが水田地区と非常に近接している事や,比較的稲わらが集約して発生する事に起因している。そして,投入エネルギーの中で大きな割合を占めるのはエネルギーを熱として使用する消化槽の加温エネルギー,消化汚泥を焼却するシナリオにおける焼却エネルギーであったがこれは,Bohn らの研究⁴⁾においても示されている。しかし,汚泥の高濃度化に際して有機物のロスが多少あるが,投入汚泥量また,消化汚泥量が減少するため前述した熱のプロセスにおける投入エネルギーの減少が大きく,収支は大幅に上昇した。

また,稲わら混合に伴って新たに必要となる投入エネルギーは増加したメタンガスと比較するとわずかであり,容易に相殺するため,余剰エネルギーは全ての稲わら混合系において大きくなった。中温条件と高温条件で比較すると,高温条件は消化槽温度の上昇に伴って,加温エネルギーが倍増しており,エネルギー的には不利な結果となった。それに伴って,連続実験において最もメタン発生量が多くなった高温の稲わらの酵素前処理系(T-Run2)よりも,中温の酵素前処理系(M-Run2)の方が,余剰エネルギーが大きくなった。しかし,現時点で高温消化を採用する中浜下水処理場(大阪市)においては消化汚泥と投入汚泥の保有熱量の差を利用して熱交換を行う事で,消化槽加温エネルギーの減少を図る事例もある⁵⁾。そのようなコージェネレーションシステムを採用する事によってその差は小さくなる事が予想される。

6. まとめ

- (1) 稲わらの混合によってメタン発生量は 41 ~ 48%増加した。また、稲わらのメタン転換率は下水汚泥と同等以上であり、57 ~ 72%程度であった。
- (2) 最もメタンガスが発生した系列は高温条件の稲わら混合酵素前処理系 (M-Run2) であった。
- (3) エネルギー収支を計上する事により、稲わら混合によって余剰エネルギーが全シナリオにおいて大きくなる事が示され、最も余剰エネルギーが大きくなったのは中温条件の稲わら混合酵素前処理系 (T-Run2) であった。
- (4) メタンガスを都市ガス燃料とし、消化汚泥をコンポスト化するシナリオにおいて最大の余剰エネルギーが得られた。

参考文献)

- 1) 落修一, 南山瑞彦, 長沢英和, 鈴木穰:「蒸煮・爆砕木質と下水汚泥とを混合・嫌気性消化した消化汚泥の処理特性」, 下水道協会誌, Vol.42 No508 pp111-123(2005)
- 2) Houghton JI, Quarmby J, Stephenson T: 「Municipal wastewater sludge dewaterability and the presence of microbial extracellular polymer」 Water Science & Technology, Vol.44, pp-373-379 (2001)
- 3) 落修一, 庄司仁, 牧孝憲, 尾崎正明:「下水汚泥の脱水における木質粉碎物の脱水助材性」, 再生と利用, Vol29, No114, pp37-40 (2006)
- 4) Irene BOHN, Lovisa BJÖRNSSON, Bo MATTIASSON: 「The energy balance in farm scale anaerobic digestion of crop residues at 11-37」, Process Biochemistry, 42, pp57-64(2007)
- 5) 楠本光秀:「大阪市における汚泥処理施設の更新と機能向上」, 下水道協会誌, Vol.42 No.516, pp31-35(2005)