

前処理を利用したメタン発酵処理システムのモデル化とシミュレーション解析

大阪工業大学大学院 学生会員 葭井宏章

コーンズ・アンド・カンパニー・リミテッド 非会員 宮西弘樹

大阪工業大学工学部 正会員 石川宗孝 笠原伸介

1.はじめに...都市部でのメタン発酵処理では、敷地面積の問題などから HRT の短縮が必要である。既往の研究¹⁾より、水熱、超音波処理を粉碎処理と併用した場合、HRT を短くしても高い POC、TOC 分解率で処理できることが明らかとなった。しかし、メタン発酵に対する前処理効果を実験により検討するには、長時間を要する。そのため、前処理の影響を考慮したメタン発酵モデルを構築し、解析結果に基づく検討が有効である。そこで、本研究では、モデル構造および生分解速度により厨芥成分を定量するとともに、POC、TOC の分解に及ぼす前処理の影響をシミュレーション解析により検討した。

2.メタン発酵分解モデルの構築...図 1 に示すメタン発酵分解モデルは、以下の仮定に従う。1) 前処理前の厨芥は、 C_0 (モデル上の分解されない懸濁成分)とする。2) 前処理後の厨芥は、 C_S (迅速に分解されない懸濁成分,以下,未破壊成分), C_E (迅速に分解される懸濁成分,以下,破壊成分), C_D (溶存成分), C_G (ガス成分)とする。3) メタン発酵は、懸濁成分が分解されて溶存成分となる加水分解過程,溶存成分が分解されてバイオガスと微生物になるガス生成過程とする。4) 反応は、それぞれの分解過程を担う細菌群により進むのではなく、それら細菌群の集合体であるモデル上の嫌気性微生物により行われる。5) 嫌気性微生物は、死滅により即座にバイオガスとなる。6) 基質の分解は、Monod 式に従う。表 1 に、メタン発酵分解プロセスの反応式を示す。

3.実験...表 2 に、 C_S , C_E の定量実験条件 (実験 1) を、表 3 に、動力学パラメータ算出実験条件 (実験 2) を示す。粉碎処理 (Retsch 社製 GM200 型,有効容積 1L) は、充填量 300g,呼び水 0.15L で処理し、TS12% に調整した。超音波処理 (カワジリマシナリー社製 H3-650 型,20kHz,振動子 36,振幅 32 μ m) は、ピーカー (有効容積 0.1L) 内で行った。水熱処理 (耐圧硝子工業社(株)社製 TEM-V1000N 型,最高温度 200 ,最大圧力 1.5MPa,有効容積 1L) は、充填率 45%,攪拌 500rpm の条件で行った。超音波、水熱処理はいずれも粉碎処理 (条件 1) 後の厨芥に対して行った。両実験ともに、三角フラスコ (有効容積 1L) 内を窒素ガスで置換後、種汚泥を 5.0g-VSS/L となるよう投入した。実験 1 は、各条件での前処理後厨芥の懸濁成分のみ(1.0g-C/L) を基質とし、実験 2 は、条件に従って注入した。種汚泥と基質を注入後、36 ,振とう回数 100rpm で培養した。

4.結果および考察

4.1 生分解速度に基づく POC の分類...図 2 に、POC 分解速度の経時変化 (条件 2) を例として示し、 C_S , C_E の定量法を説明する。まず、 dC_P/dt

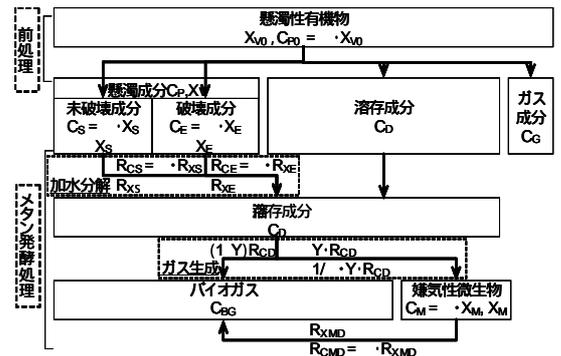


図1 厨芥成分の分類とメタン発酵分解モデル

表1 メタン発酵分解プロセスの反応式

	反応速度式
C_S	$\frac{dC_S}{dt} = -R_{CS} = -\frac{k_1 \cdot C_S \cdot X_M}{K_{S1} + C_S}$
C_E	$\frac{dC_E}{dt} = -R_{CE} = -\frac{k_2 \cdot C_E \cdot X_M}{K_{S2} + C_E}$
C_D	$\frac{dC_D}{dt} = R_{CS} + R_{CE} - R_{CD} = \left(\frac{k_1 \cdot C_S}{K_{S1} + C_S} + \frac{k_2 \cdot C_E}{K_{S2} + C_E} - \frac{k_3 \cdot C_D}{K_{S3} + C_D} \right) \cdot X_M$
C_M	$\frac{dC_M}{dt} = Y \cdot R_{CD} - R_{CMD} = \left(\frac{Y \cdot k_3 \cdot C_D}{K_{S3} + C_D} - b \right) \cdot X_M$
C_T	$\frac{dC_T}{dt} = (Y-1) \cdot R_{CD} - R_{CMD} = \left(\frac{(Y-1) \cdot k_3 \cdot C_D}{K_{S3} + C_D} - b \right) \cdot X_M$
X_S	$\frac{dX_S}{dt} = -R_{XS} = -\frac{R_{CS}}{X_M} = -\frac{1}{X_M} \cdot \frac{k_1 \cdot C_S \cdot X_M}{K_{S1} + C_S}$
X_E	$\frac{dX_E}{dt} = -R_{XE} = -\frac{R_{CE}}{X_M} = -\frac{1}{X_M} \cdot \frac{k_2 \cdot C_E \cdot X_M}{K_{S2} + C_E}$
X_M	$\frac{dX_M}{dt} = \frac{1}{X_M} \cdot (Y \cdot R_{CD} - R_{CMD}) = \frac{1}{X_M} \cdot \left(\frac{Y \cdot k_3 \cdot C_D}{K_{S3} + C_D} - b \right) \cdot X_M$

C_S, C_E, C_D : 基質濃度 (g-C/L), C_M : 微生物濃度 (g-C/L), C_T : 全有機炭素濃度 (g-C/L), X_S, X_E : 基質濃度 (g-VSS/L), X_M : 微生物濃度 (g-VSS/L) $k_{1,2,3}$: 速度定数 (1/day), $K_{S1,2,3}$: 半飽和定数 (g-C/L), Y : 微生物収率 (g-C/g-C), b : 死滅係数 (1/day), ρ : 炭素含有比 (g-C/g-VSS)

表2 C_S, C_E の定量のための実験条件 (実験 1)

条件	処理方法	処理時間 (min)
1,2	粉碎処理 (10000rpm) の懸濁成分	0.7, 10
3,4,5	超音波処理 (650) の懸濁成分	10, 20, 60
6	水熱処理 (160 , 0.6MPa) の懸濁成分	60

表3 動力学パラメータ算出のための実験条件 (実験 2)

実験	基質	基質濃度 (g-C/L)	種汚泥濃度 (g-VSS/L)
1	ブランク	0	
2	水熱処理 (条件6) の懸濁成分	0.5, 1.0, 1.5	5.0
3	粉碎処理 (条件2) の懸濁成分		
4	粉碎処理 (条件2) の溶存成分	0.4, 0.8, 1.5	

嫌気性消化、メタン発酵分解モデル、シミュレーション、厨芥成分の定量化

〒535 - 8585 大阪府大阪市旭区大宮 5 - 16 - 1 TEL06 - 6954 - 4083 FAX06 - 6957 - 2131

(POC 分解速度) は, 反応式より dC_s/dt (C_s 分解速度), dC_E/dt (C_E 分解速度), dC_M/dt (微生物反応速度) の和となる。一般に, 嫌気性微生物の増殖速度は小さく, 誤差の範囲内と仮定し, dC_M/dt は死滅による減少のみとし, 種汚泥の実験結果と同様とした。分解速度の低下がほぼ一定となる 36hr 以降では, C_s のみが残存していると考えられ, 近似した一次線形を $dC_E/dt + dC_M/dt$ とし, ブランクの結果より得られた dC_M/dt の一次線形との交点を t_2 として積分値より C_s を算出した。また, 18hr 以前では, C_E が残留しているとし, $dC_E/dt + dC_M/dt$ との交点を t_1 として積分値より C_E を算出した。図 3 に, 厨芥成分の内訳を示す。これより, 粉碎, 超音波処理によるガス化はほとんど認められず, $C_G = 0$ とした。粉碎, 超音波処理では, 処理時間が長いほど C_s が減少し, C_E の増加が確認された。一方, C_D は 35 ~ 40% 程度でほぼ一定となり, これ以上の可溶化は困難と考えられる。水熱処理では, C_s が 36% 程度まで減少し, C_D が 60% 程度まで増加することが確認された。これは, 水熱処理が強い固形物分解能を持つことから, C_E がほぼ可溶化されたためと考えられ, $C_E = 0$ とした。

4.2 動力学パラメータの算出とシミュレーション解析...表 4 に, 実験 2 の結果より算出した動力学パラメータを示す。なお, 微生物収率 Y は文献値²⁾0.1 を用いた。これら算出したパラメータの整合性を検討し, 実測値との比較を行った。図 4 に, 実測値と解析値の比較を示す。これによると, すべての項目において高い整合性が確認され, 分解プロセスにおける加水分解, ガス生成といった逐次反応が再現できていると判断された。そこで, 本モデルを用いて, 実験 1 により定量した前処理の解析を行い, その効果を検討した。図 5 に, 各前処理における POC, TOC 濃度の経日変化を示す。ここでは, 種汚泥濃度 5 g-VSS/L, 基質濃度 2g-C/L として解析を行った。代表例として, 条件 1, 2, 4, 6 の結果を示す。POC に注目すると, 条件 1, 2, 4 において, C_E が増加した基質ほど, 短時間で POC が減少し, 懸濁成分の分解に対する前処理の効果が確認され, 条件 2 (粉碎 10min) は, 経過日数 1day 付近で条件 6 (水熱処理) とほぼ同様まで, 減少し, 特に高い効果が確認された。TOC 濃度に注目すると, 条件 6 (水熱処理) が最も速く減少し, 次いで C_E の含有比が高い条件ほど短時間で減少した。これより, ガスの生成に対する前処理の効果は, 溶存成分を多く増加する効果のある水熱処理が有効であり, 条件 2 のような C_E を多く増加する前処理も効果的であることが明らかとなった。

5. おわりに...前処理を併用したメタン発酵をモデル化し, 厨芥成分の定量化および解析を行った結果, 粉碎, 超音波処理は, 処理時間が長いほど C_E が増加することが確認された。メタン発酵処理の際の加水分解およびガス生成能の向上効果の大きくなるのが, C_E の増加により明らかとなった。水熱処理は, C_D の増加により, ガス生成能の向上効果が, 粉碎, 超音波処理などの液化が進まない前処理と比較して大きくなることが明らかとなった。

参考文献...1) 宮西弘樹 他: 水熱反応処理の利用による厨芥を対象としたメタン発酵の高効率化, 廃棄物学会論文誌, 第 17 巻, 第 1 号, pp23-30 (2006) 2) 今井剛 他: メタン生成流動床における生物膜のモデル化に関する研究, 環境工学研究論文集, 第 30 巻, pp209-217 (1993)

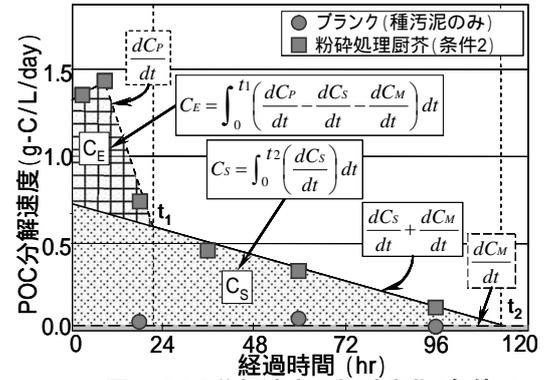


図2 POC分解速度の経時変化(条件2)

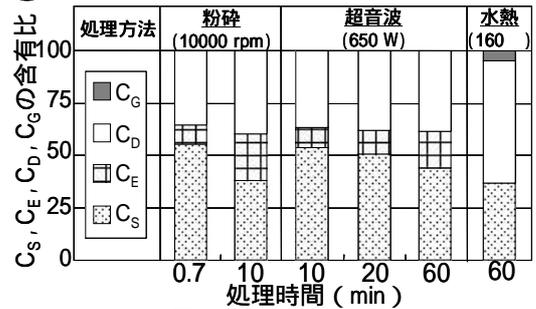


図3 厨芥成分の内訳

表4 動力学パラメータ

項目	k_{1-3} 1/day	k_{S1-3} g-C/L	b g-C/g-VSS	b 1/day
C_s	0.146	0.790	0.53	-
C_E	0.281	0.604	0.54	-
C_D	0.368	0.901	-	-
C_M	-	-	0.62	0.009

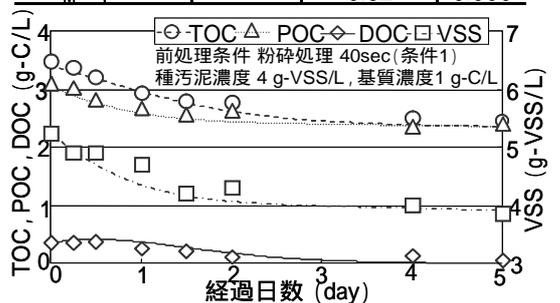


図4 実測値と解析値の比較

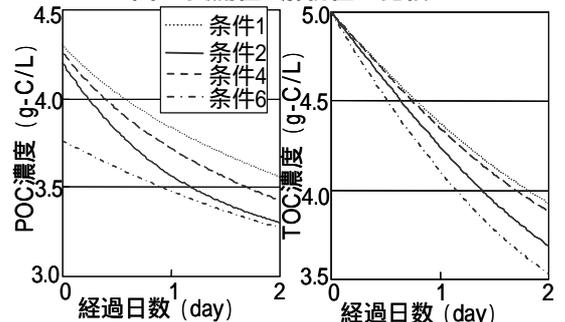


図5 前処理条件におけるPOC, TOC濃度の経日変化