

京都大学 ○ 正 員 酒井 伸一
 京都大学 正 員 平岡 正勝
 京都大学 正 員 武田 信生

1. はじめに : 嫌気性消化プロセスは無酸素状態で微生物が有機物をメタン化する生物反応プロセスであり、汚泥の減量化とエネルギー生産が行える。この嫌気性消化プロセスと焼却・熱分解などによる熱化学プロセスとはエネルギー的に密接な関連を持ち、両プロセス間の消費・発生エネルギーにはトレードオフ関係が存在する。たとえば嫌気性消化プロセスの高効率化が達成されれば逆に汚泥のエネルギー価値が低下し、熱化学変換プロセスのエネルギー消費が大きくなるといった側面である。したがって汚泥処理システムの最適設計を行うためには両プロセスを結合させてエネルギーフローの最適化に関する検討を加える必要があり、本報告では汚泥処理システムの数学的なトータルシステムモデルを作成しエネルギー収支シミュレーションにより検討した。なお、ここで用いたトータルシステムモデルの概略は今回の土木学会学術講演会で別途報告される。

2. 嫌気性消化プロセスモデルについて : 嫌気性菌の菌体増殖と基質分解は Monodモデルにより表現され、消化槽内は完全混合の定常状態にあるものとした。嫌気性菌の自己分解速度を零と仮定し、流出流中の生物分解性気質 S は $S = K_m / (K_c * T D - 1)$ となる。ここで K_c 、 K_m はそれぞれたんにバイオマスあたりの最大比増殖速度、Michaelis-Menten飽和定数で $T D$ は消化日数である。またメタンガス発生量 GCH_4 は消化槽まわりの COD 収支から $GCH_4 = (S_i - S) * 0.35 * 10 * q_i$ となる。ここで S_i は流入生物分解性基質、 q_i は流入汚泥量である。消化槽の加温必要熱量は投入汚泥を消化温度まで高めるのに必要な熱量と消化槽からの放熱量の和とした。放熱量の算出のために、槽形状に卵形槽を考え槽表面積を槽容積の関数として定式化し、槽数は全消化槽容量に応じて設定した。またメタンガスは全量ガスエンジン発電を行い電力回収し、ガスエンジンの排ガスからは廃熱ボイラによりスチーム回収し、エンジン冷却水も温水として回収する。

3. 消化日数と消化プロセスのエネルギー収支の関係 : 嫌気性消化プロセスにおいては消化日数 $T D$ が決定変数となっており、たとえば、 $T D$ は長くするほど嫌気性菌により基質分解は進行しメタンガス量も増加するが、消化槽容量も増加し放熱量も増大するため、 $T D$ によりエネルギー収支は変化するものと思われる。投入汚泥濃度を 3% とした場合の消化槽まわりのスチーム収支 (図-1) をみれば消化日数の全期間を通じて消化槽加温用スチーム (ガスエンジン冷却温水を利用後の必要スチーム) はガスエンジン廃熱ボイラからの回収スチームを上回る。消化槽加温用スチームの曲線が $T D = 10$ 日前後で極小値を持っているのは図-2 の消化槽まわりの熱収支より理解される。消化槽の加温エネルギーは消化日数が増加していくにつれて、槽表面からの放熱量の増加に応じて増加している。不連続点が生じているのは消化槽数を規模により設定しているためである。一方、生成メタンガスをガスエンジン発電した後の回収エネルギーは微生物反応を反映して $T D$ の増加による増加傾向は徐々に鈍くなり、収束傾向を示す。この両曲線の差により消化プロセスの加温用スチーム量が決定されるため図-1 のように $T D = 10$ 日前後に極小点が存在することになり、ガスエンジン廃熱ボイラからの回収スチーム量も発生ガス量を反映して収束傾向を示すため消化槽のスチーム収支も極値を持った曲線となっている。

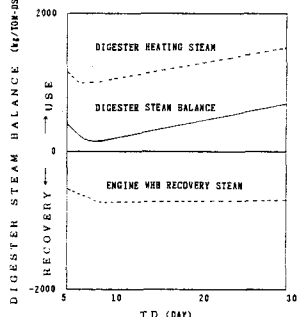


図-1 嫌気性消化日数と消化槽スチーム収支

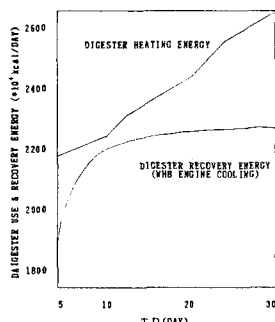


図-2 嫌気性消化日数と消化槽熱収支

4. 嫌気性消化プロセスの有無によるエネルギー収支の得失とトレードオフ：嫌気性消化プロセスでは嫌気性菌によりメタンガス発生があり、これをガスエンジン発電などによりエネルギー生産を行なうことができる一方、汚泥の燃料的価値は低下し後続の乾燥焼却システムにおいて新たな投入エネルギーが必要となる可能性がある。ここでは汚泥処理システムにおける嫌気性消化プロセスの得失ならびに有利となる条件をエネルギー収支モデルより検討した。

図-3に示した嫌気性消化・乾燥焼却システムのエネルギー収支から嫌気性消化プロセスを含むADDCシステム、含まないDCシステムのエネルギー収支上の得失が考察される。まず、脱水汚泥含水率 $W_0 = 80\%$ で無乾燥の場合、オイル消費量はDCシステムで509 l/TON-DSであるのに対し、ADDCシステムでは294 l/TON-DSとなる。これは嫌気性消化により汚泥有機分率は80%から56%に低下し、燃料性状も脱水ケーキLCVで330 kcal/kg-wsから90 kcal/kg-wsに低下するものの、固形物量が1.0 TON-DSから0.45 TON-DSに大きく減少するためである。また、乾燥汚泥含水率に最適値をとった場合、oil GROSSはDCシステムで148 l/TON、ADDCシステムで151 l/TONとほぼ同じ重油消費量である。いずれもスチームバランスより重油消費量は決定され、スチームタービンによる発生電力は零であるが、ADDCではメタンガスによる発生電力が850 kw/TON-DSあり、 $W_0 = 80\%$ では嫌気性消化プロセスを組み入れたシステムの方がエネルギー収支的には有利となる。表-1にこれらの結果を要約し、電力を重油換算して示した。

表-1には $W_0 = 70\%$ の場合も併記したが、 $W_0 = 80\%$ の場合とは少し傾向が異なっている。無乾燥の場合、両システムともoil GROSSは約20 l/TONであり、メタンガスによるガスエンジン発生電力分だけoil NETではADDCシステムが有利となっている。つぎに乾燥プロセス最適点においてはDCシステムのoil GROSSは零となり、スチームタービン発電によりエネルギー生産型となっている。

一方、ADDCシステムでは最適点においても47 l/TONのオイル消費がある。つまり、オイル消費面から評価すればDCシステムの評価は高くなるが、発生電力はADDCシステムで815 kw/TONであるのに対し、DCシステムでは245 kw/TONと嫌気性消化を組み入れる方が有利となる。このように、 $W_0 = 70\%$ の場合には汚泥処理システムの選定問題に重油量低減を考えるか、発生電力を考えるかというトレードオフが生じることになる。

以上、嫌気性消化プロセスの有無による汚泥処理システムのエネルギー収支に対する得失は、決定変数の組み合わせにより変化し、条件によっては重油消費と電力発生とのトレードオフといった状況が発生することが示された。

4. おわりに：嫌気性消化プロセスのエネルギー収支には消化日数が大きな影響を与えること、また汚泥処理システム全体から見て嫌気性消化プロセスの有無による得失は決定変数の組合せにより変化し、条件によっては重油消費と電力発生とのトレードオフといった状況が生まれることがわかった。今後は最適化手法を駆使して本システムのエネルギーフローの最適化を図る必要がある。

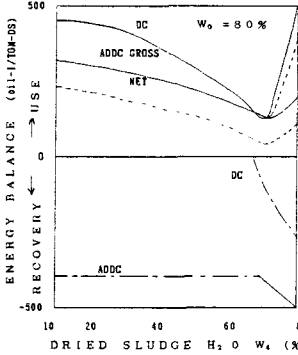


図-3 乾燥汚泥含水率とエネルギー収支の関係

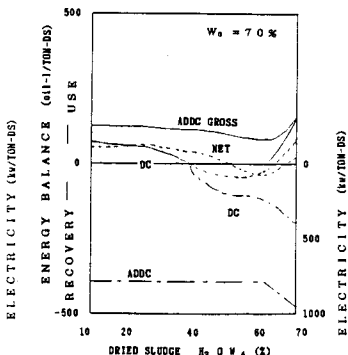


図-3 乾燥汚泥含水率とエネルギー収支の関係

表-1 ADDC、DCシステムのエネルギー収支比較

		嫌気性消化 乾燥焼却システム ADDC		乾燥焼却システム DC
W ₀ = 80%	乾燥プロセス無			
	オイル消費量 GROSS (l/TON-DS)	294	509	
	NET (l/TON-DS)	182	440	
	発生電力 (kw/TON-DS)	815	0	
W ₀ = 70%	乾燥プロセス有			
	乾燥最適点の一例			
	オイル消費量 GROSS (l/TON-DS)	151	148	
	NET (l/TON-DS)	69	148	
	発生電力 (kw/TON-DS)	815	245	
W ₀ = 60%	乾燥プロセス無			
	オイル消費量 GROSS (l/TON-DS)	119	122	
	NET (l/TON-DS)	21	80	
	発生電力 (kw/TON-DS)	815	245	

嫌気性消化条件 TD = 15日、TS = 3.0%