

# 嫌気性消化プロセスにおける消化汚泥返送の効果

関東芝重電技術研究所 ○柴崎 和夫 遠矢 幸男 三浦 良輔

## 1. はじめに

汚泥処理プロセスにおける嫌気性消化プロセスの目的は、これまで1) 汚泥の減量化、2) 衛生的な安全化、安定化であったが、メタンを60~70%含む消化ガスが得られることから最近では3) エネルギー回収もその目的の1つになりつつある。嫌気性消化プロセスをエネルギー回収型のプロセスとして確立するためには、消化槽の加温熱量の低減および消化効率の向上(メタン発生量の増大)をさらに進める必要がある。

消化効率の向上を図る1つの方法として、嫌気性接触法を挙げることができる。嫌気性接触法では、1次消化槽から流出した菌体を2次消化槽で回収(沈降濃縮)し、1次消化槽へ返送する方法である。このため、1次消化槽での菌体濃度を高く維持できるものと考えられる。また水理的滞留時間と固形物滞留時間を個別に制御することが可能なので、菌体のウォッシュアウトを防止しつつ水理的滞留時間を短縮できるものと考えられる。

このような考えのもとに、演者らは消化効率および汚泥返送の効果について検討を進めている。今回の報告は、消化汚泥返送の効果について行った理論的解析と、モデルプラント実験の結果をまとめたものである。

## 2. 理論的な解析

今回行った理論解析は、固形物収支にもとづく定常状態解析である。図-1に嫌気性接触法のフローとパラメータを示す。また解析を行うにあたり仮定した事項を表-1にまとめた。

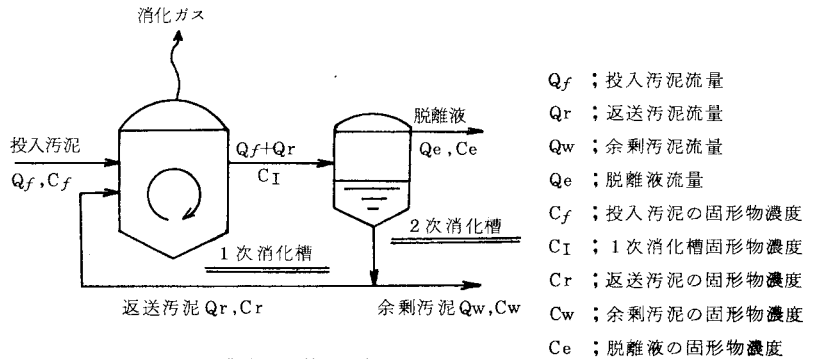


図-1 嫌気性接触法

### 2.1. 消化汚泥返送と固形物滞留時間との関係

1次消化槽での固形物収支をとると次式のようになる。

$$Q_f \cdot C_f + Q_r \cdot C_r = (Q_f + Q_r) \cdot C_I + Q_f \cdot C_f \cdot X \quad (1)$$

ここで、Xは消化効率で右辺第2項はガス化した固形物量を表わす。

消化汚泥の返送率Rを次のように定義する。

$$R = Q_r / Q_f \quad (Q_r = R \cdot Q_f) \quad (2)$$

また水理的滞留時間(消化日数)  $T_L$ および固形物滞留時間  $T_S$ は次のように表わすことができる。

$$T_L = (V_1 + V_2) / Q_f \quad (3),$$

$$T_S = (V_1 + V_2) \cdot C_I / (Q_w \cdot C_w + Q_e \cdot C_e) \quad (4)$$

ここで、 $V_1$ 、 $V_2$ は1次および2次消化槽の容積である。また仮定から  $C_w = C_r$ 、 $C_e \approx 0$ であるので、(4)式は次のように簡略化することができる。

$$T_S = (V_1 + V_2) \cdot C_I / Q_w \cdot C_r \quad (4)'$$

(3)、(4)'式から滞留時間比  $T_S / T_L$ は次のようになる。

$$T_S / T_L = (Q_f / Q_w) \cdot (C_I / C_r) \quad (5)$$

(5)式を変形して  $C_I$  について整理すると次式を得る。

表-1 仮定した事項

- |                            |
|----------------------------|
| (1) 基質の分解(ガス化)は1次消化槽だけで起る。 |
| (2) 返送汚泥と余剰汚泥の固形物濃度は等しい。   |
| (3) 脱離液の固形物濃度は無視できるほど小さい。  |
| (4) 菌体濃度は固形物濃度に比例する。       |

$$C_I = (T_S/T_L) \cdot (Q_w/Q_f) \cdot C_r \quad (6)$$

一方、嫌気性消化プロセス全体の固形物収支は次のようになる。

$$Q_f \cdot C_f = Q_w \cdot C_w + Q_e \cdot C_e + Q_f \cdot C_f \cdot X \quad (7)$$

仮定から  $C_w = C_r, C_e \approx 0$  であるので(8)式は次のようになる。

$$C_f = (Q_w/Q_f) \cdot C_r / (1-X) \quad (8)$$

(2), (6), (8)式を(1)式に代入して、返送率  $R$  について整理すると次式が得られる。

$$R = \frac{(Q_w/Q_f) \{ (T_S/T_L) - 1 \}}{1 - (T_S/T_L) \cdot (Q_w/Q_f)} \quad (9)$$

(9)式は無次元項のみによって、返送率  $R$  と固形物滞留時間  $T_S$

との関係を表わした式である。ここで  $Q_w/Q_f$  は余剰汚泥率であり、操作量となるものである。余剰汚泥率  $Q_w/Q_f$  をパラメータとして、返送率  $R$  と滞留時間比  $T_S/T_L$  との関係をシミュレーションした結果を図-2に示す。図-2から、返送を行わない場合の滞留時間比  $T_S/T_L$  は1になること、すなわち固形物滞留時間  $T_S$  は水理的滞留時間  $T_L$  に等しくなることが理解できる。また返送率  $R$  を大きくするにつれて滞留時間比が大きくなり、余剰汚泥率の逆数  $1/(Q_w/Q_f)$  に漸近し、返送率を3以上にしても固形物滞留時間をそれほど高められないことが理解できる。また余剰汚泥率を小さくするにつれて、滞留時間比は大きくなることも分る。従って、返送率をより大きくし、余剰汚泥率をより小さくした方が固形物滞留時間を大きくできる。

## 2.2. 消化汚泥返送率と消化効率

前述の(8)式を返送汚泥の固形物濃度  $C_r$  について整理すると次式が得られる。

$$C_r = C_f \cdot (1-X) \cdot (Q_f/Q_w) \quad (10)$$

また、菌体濃度は固形物濃度に比例すると考え、消化効率  $X$  は1次消化槽内の固形物濃度  $C_I$  に比例するものとして、 $X$  を次のように表わした。

$$X = K \cdot C_I \quad (K; \text{定数}) \quad (11)$$

(10), (11)式を(6)式に代入すると次式が得られる。

$$C_I = \frac{(T_S/T_L)}{(1/C_f) + K \cdot (T_S/T_L)} \quad (12)$$

(11), (12)式から消化効率  $X$  と滞留時間比  $T_S/T_L$  との関係を求めることができる。また前述したように(9)式から返送率  $R$  と  $T_S/T_L$  との関係が求まるので、返送率  $R$  と消化効率  $X$  との関係をシミュレーションすることが可能となる。図-3, 4に投入汚泥の固形物濃度  $C_f$  と余剰汚泥率  $Q_w/Q_f$  をパラメータとしたシミュレーションの一例を示す。これらの図から、返送率を大きくするにつれて消化効率は高くなるが、返送率を3以上にしても向上はあまり期待できないことが分る。さらに、投入汚泥の固形物濃度を高めるにつれて、また余剰汚泥率を小さくするにつれて、消化効率は向上することが理解できる。しかし実際の運転時には返送率、余剰汚泥率のとれる範囲はある程度限定される。返送率を大きくとりすぎれば返送汚泥濃度は低下してしまう。また余剰汚泥率を小さな値で運転するためには、2次消化槽での固液分離が良好で高濃度の汚泥を引抜けることが条件となる。高濃度の汚泥を引抜けない場合、余剰汚泥率を小さくすると多くの固形物が脱離液中に流出するので、余剰汚泥率はより大きな値で運転せ

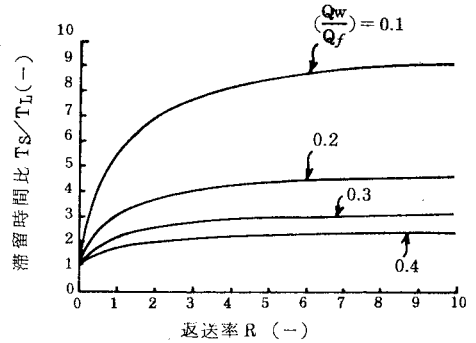


図-2 返送率と固形物滞留時間との関係

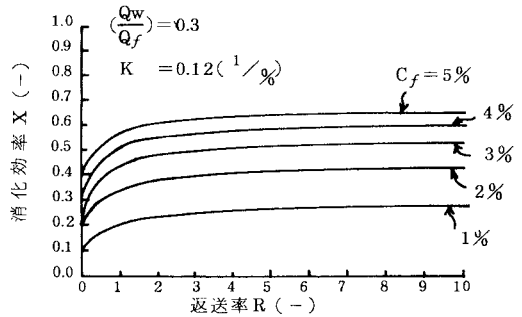


図-3 返送率と消化効率との関係

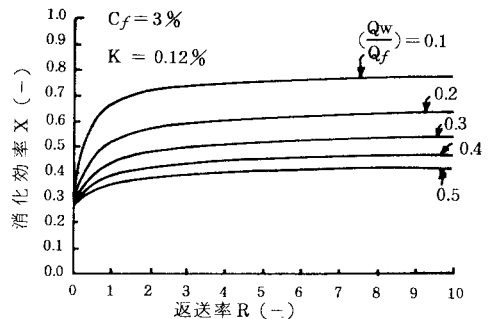


図-4 返送率と消化効率との関係

ざるを得ない。この場合、返送率をより大きな値にしても消化効率の向上はそれほど期待できないことに注意しなければならない。従って、消化汚泥返送によって消化効率の向上をより大きいものとするためには、2次消化槽での固液分離が重要なポイントになる。

### 3. 実験装置および実験方法

実験装置のフローを図-5に示す。1次消化槽容積は約100ℓ、2次消化槽容積は約50ℓである。1次消化槽はヒータのオン・オフによって30±1℃に保った。攪拌は循環消化ガスによって連続に行った。循環消化ガス量は約10ℓ/分として、攪拌混合効果を上げるためドラフトチューブを設けた。2次消化槽では消化汚泥の沈降濃縮を促進するためにレーキを設置した。消化ガス発生量は湿式ガスメータで測定し、その一時間積算値をプリンターに出力させた。このような実験装置を3セット用意し、返送率を変えた実験を平行して行った。実験条件を表-2にまとめた。実験は一日一回汚泥の投入、引抜きを行う半連続式で行った。消化日数(水理的滞留日数)は表2に示したごとく全ての消化槽で22.5日(1次, 2次消化槽合せて)で行った。従って、投入する混合汚泥量は6.7ℓ/日とした。また余剰汚泥率 $Q_w/Q_f$ は0.3とし、余剰汚泥は毎日2.2ℓ引抜いた。実験開始後2ヶ月間は余剰汚泥引抜きと混合汚泥の投入だけを行い、汚泥の馴養を行った。消化汚泥の返送を開始した後は、(i)消化汚泥の返送, (ii)余剰汚泥の引抜き, (iii)混合汚泥の投入, の順で運転した。

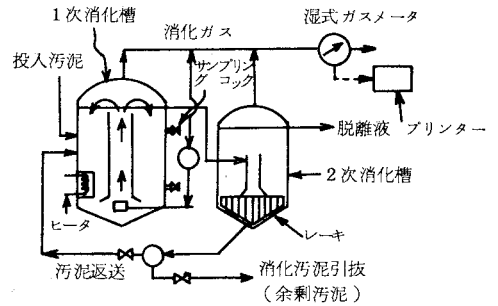


図-5 実験装置

表-2 実験条件

消化槽 No.	返送率	消化日数
No.1 消化槽	3.0	22.5 日
No.2 消化槽	0	
No.3 消化槽	1.0	

### 4. 実験結果

図-6に1次消化槽内のTS濃度の経日変化を示す。消化汚泥の返送を開始する以前の各TS濃度は約2%でほぼ同一であった。しかし、消化汚泥の返送を開始したところから投入汚泥のTS濃度が減少したために、返送を行わなかったNo.2消化槽のTS濃度は徐々に減少していく傾向にあった。これに対し、消化汚泥を返送したNo.1, No.3消化槽のTS濃度は減少することなく約2%前後の値を維持した。このことから、消化汚泥の返送を行ったNo.1, No.3消化槽ではNo.2消化槽に比較してより多くの菌体を1次消化槽内に保持できたものと推定できる。次に消化ガス発生速度の経時変化を図-7に示す。消化汚泥の返送を開始する以前の消化ガス発生速度はNo.2, No.3消化槽についてはほぼ同様な値であった。No.1消化槽はNo.2, No.3消化槽に比べ多少大きい値であったが、図中の13日目から各々所定量の消化汚泥返送を開始した。消化汚泥返送を開始した直後から、No.1消化槽(返送率3.0)およびNo.3消化槽(返送率1.0)の消化ガス発生速度はNo.2消化槽(返送なし)のそれと比較して増大した。特に、汚泥投入後3~4時間後に現われる最大の消化ガス発生速度が増大する傾向を示した。これは消化汚泥を返送することによって、1次消化槽内の菌体量が増え全体の消化反応速度が大きくなったことによると考えられる。表-3に返送開始前後に分けて、それぞれの比消化ガス発生量(消化汚泥の返送を行ったNo.1, No.3消化槽からの消化ガス発生量と消化汚泥の返送を行わなかったNo.2消化槽からの消化ガス発生量の比)の平均値をまとめた。表-3から、消化汚泥の返送を開始する以前の比消化ガス発生量はNo.3, No.1消化槽でそれぞれ1.02, 1.17であったものが、消化汚

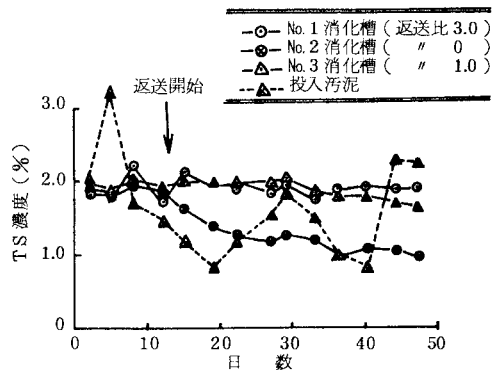


図-6 TSの経日変化

泥の返送を開始した後は、(i)消化汚泥の返送, (ii)余剰汚泥の引抜き, (iii)混合汚泥の投入, の順で運転した。

泥を返送することによって、それぞれ 1.16, 1.57 に向上したことが分る。消化汚泥返送の効果は、返送の開始前後の比消化ガス発生量の比であると考えられることから、返送率 1.0, 3.0 の場合の効果はそれぞれ 1.14 (14% 増), 1.34 (34% 増) と考えられる。

次に、消化汚泥の返送を行った場合の固形物滞留時間の試算結果について述べる。固形物滞留時間の試算を行

う際には、2次消化槽内の平均 TS 濃度は 1次消化槽内のそれと等しいものと仮定して、プロセス全体に滞留している総固形物量を推定した。また脱離液の TS 濃度はゼロと仮定した。結果を表-4 にまとめたが、返送率 3.0 の場合、滞留時間比  $T_S/T_L$  は約 3.41 で、返送率 1.0 の場合は約 2.22 であった。

### 5. 考 察

消化ガス発生量の測定結果から、消化汚泥を返送することによって消化効率は向上することが実験的に検証できた。また、消化汚泥返送によって 1次消化槽内の TS 濃度を高められることが実験的に明らかになった。従って、固形物滞留時間を大きくでき、プロセス内により多くの菌体を保持できたことが推定される。

定常状態での理論的解析では余剰汚泥率を 0.3 とした条件の場合、滞留時間比  $T_S/T_L$  は 3.33 に漸近するものと理解されるが、今回の実験結果での試算では、これより少し大きい値が得られた。これは脱離液中へ流出する固形物量を無視して計算したためと考えられる。実際には脱離液中への固形物の流出もあり、実際の固形物滞留時間は表-4 に示した値より小さいものと考えられる。また、返送汚泥のサンプリングができなかったため、その TS 濃度は不明であるが、返送を行わなかった No. 2 消化槽の余剰汚泥の TS 濃度は平均で約 3.5% であった。これは 1次消化槽の平均 TS 濃度の約 2.4 倍である。従って、No. 1, No. 3 消化槽においてもこの程度濃縮された消化汚泥を返送できたものと推定される。前述したように濃縮された消化汚泥を返送しない限り返送の効果はあまり期待できないが、今回の実験のように 2 倍程度の濃縮で返送の効果を得られるものと考えられる。

消化汚泥の返送を実際に適用する際には、2次消化槽での汚泥濃縮の状態、脱離液の性状さらには 1次消化槽での混合、攪拌の状態などを考慮して、返送率、余剰汚泥率を決める必要がある。2次消化槽での汚泥濃縮が良好に行われない場合には、今回の実験装置のようにレーキを設置することも対策の 1 つであると考えられる。

### 6. まとめ

定常状態における理論的解析および実験の結果から、消化汚泥を返送することによって消化効率を向上できることが明らかになった。この場合、濃縮した消化汚泥を返送することが重要で、2次消化槽での固液分離がポイントになるものと考えられる。

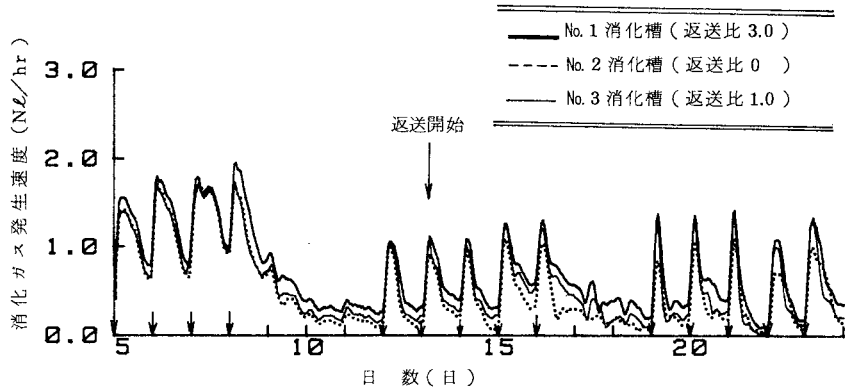


図-7 消化ガス発生速度の経時変化

表-3 比消化ガス発生量

	(1) 返送前	(2) 返送後	(2)/(1)
返送率 1.0 (No. 3 消化槽)	1.02	1.16	1.14
返送率 3.0 (No. 1 消化槽)	1.17	1.57	1.34

表-4 固形物滞留時間

消化槽 No.	返送率 (一)	平均総固形物量 (Kg)	平均余剰汚泥量 (Kg/日)	平均固形物滞留時間 (日)	$T_S/T_L$ (一)
No. 1 消化槽	3.0	2.92	0.038	76.8	3.41
No. 3 消化槽	1.0	2.85	0.057	50.0	2.22