

(2) メタンガス循環式嫌気性ガスリフト型リアクターの混合特性と操作因子の関係

THE RELATIONSHIPS BETWEEN THE OPERATIONAL CONDITIONS AND MIXING BEHAVIOUR IN THE METHANE-CIRCULATION ANAEROBIC GAS-LIFT BIOREACTOR

張 振家*・中西 弘*・浮田正夫*・深川勝之**

Zhen Jia ZHANG*, Hiroshi NAKANISHI*, Masao UKITA*, Hasayuki FUKAGAWA**

ABSTRACT; In this paper the mixing characteristics and their influencing elements in a gas-lift bioreactor with bio-gas circulation were analysed by means of tracer test. The results showed that the sludge concentration in the reactor influenced the mixing state for the bypass and the dead space increased with increasing of the sludge concentration. The volume utilizing efficiency (η_v) of reactor decreased from 89.9% to 82.5%, and the bypass rate ($1-\eta_v$) increased from 11.5% to 23.1%, when the sludge concentration increased from 14.6gl^{-1} to 21.8gl^{-1} . Therefore it can be deduced that it is unilateral to increase simply the sludge concentration of reactor in an anaerobic contact process. The bypass is main factor for the decline of treatment efficiency of reactor.

KEYWORDS; Anaerobic process, Methane gas circulation, Mixing behaviour, Gas-Lift Bioreactor.

1. はじめに

環境工学研究の分野において排水処理も重要な位置を占めている。本研究は省エネ型のガスリフト型循環混合を嫌気性処理に適用した新しい装置の開発に関するもので、発生するメタンガスを循環させる試みであり、先ず装置の混合特性について実験解析を行った。この装置はビール廃液をはじめ高濃度有機性廃液の省エネ処理を目的としている。

メタン発酵リアクター内における基質と嫌気性微生物との混合状態、即ちリアクター内の液体の流れ形式が基質の利用率とメタンの生成率に対して大きな影響を与えている。リアクターを設計する場合に、一般的には汚泥と基質をある混合状態（例えば、完全混合状態）を仮定して装置の容積を計算している。しかし、実際の装置には短絡流や死水域などが存在するため、理想的な流れ形式に従わない。このような仮定によって設計した実用装置に対して、その動力学特性には相違があり、時によってこの相違はかなり大きい。Tennyと Budxin¹⁾の調査によれば、消化槽の実際の有効容積はその設計値の半分でしかなく、他の部分は死水域となっていた。この影響を補正するために、通常、安全係数を大きくとっている。しかし、これだけではまだまだ不十分であり、装置内の混合状況を十分に把握した設計が必要である。したがって、その混合特性を把握することは、リアクターの反応動力学特性の研究と実際の装置設計及び運転管理に対して重要な意義がある。

* Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube, Yamaguchi 755, Japan

** Ube Technical College, Ube, Yamaguchi 755, Japan

一般的に、リアクターの流れ特性に影響する因子は、おおよそ次の二種類に分けられている²⁾。

①リアクターの幾何学的形状

②リアクターの操作条件

この中、②に関する因子は複雑であり、実験によって把握することが必要である。

本論文は、ビール工場排水などの高濃度排水処理³⁾の省エネ型処理装置の開発を目指し、ガスリフト型ガス攪拌メタン発酵リアクターの混合特性について、開発した実験室規模の装置を用い、トレーサー実験によって解析したものである。

2. 実験装置

実験装置の概要をFig. 1に示す。リアクターは透明なアクリル製円筒形のものである。本体を反応区と固体、液体、気体の三相分離区に分けた。三相分離区の円筒部は内径13cm、高さ25cmであり、反応区の円筒部は内径8cm、高さ100cmであり、ガスリフト管は内径2.2cm、長さ90cmである。三相分離区、反応区の有効容積はそれぞれ2.1Lと5Lである。

3. 流れモデルの仮定

Fig. 2に示すように、ガス攪拌型メタン発酵リアクターを完全混合区と死水域に分けて、容積はそれぞれ V_1 と V_2 とする。また、流入水の一部 f_1 は完全混合区を通して流出し、他の部分 f_2 は直接に流出すると仮定した。

流出水中のトレーサー濃度 C の変化は、次の物質収支計算によって求める⁴⁾。

完全混合区について

$$f_1 C_{in} - f_1 C_1 = V_1 \frac{dC_1}{dt} \quad (1)$$

式(1)を境界条件 $t=0, C_1=C_0$ 、かつ $t \geq 0, C_{in}=0$ 下で解くと、次の解が得られる。

$$\frac{C_1}{C_0} = \exp\left(-\frac{f_1}{V_1} t\right) \quad (2)$$

流出水について

$$FC = f_1 C_1 + f_2 C_{in} \quad (3)$$

式(2)、(3)により

$$\frac{C}{C_0} = \frac{f_1}{F} \exp\left(-\frac{f_1}{V_1} t\right) \quad (4)$$

さらに、 $V = V_1 + V_2$ 、 $\tau = V/F$ 、 $\theta = t/\tau$ とすれば、

$$F(\theta) = \frac{C}{C_0} = \eta_f \exp\left(-\frac{\eta_f}{\eta_o} \theta\right) \quad (5)$$

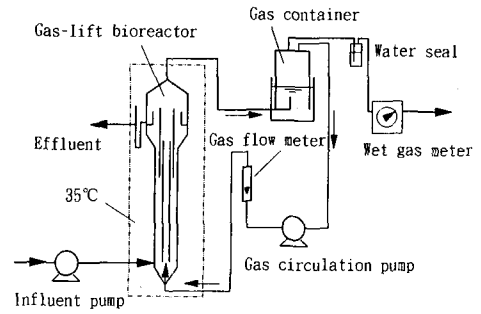


Fig. 1a Schematic diagram of the experimental equipments

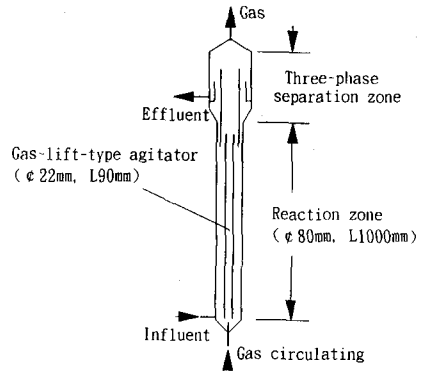


Fig. 1b The anaerobic gas-lift bioreactor of the laboratory scale

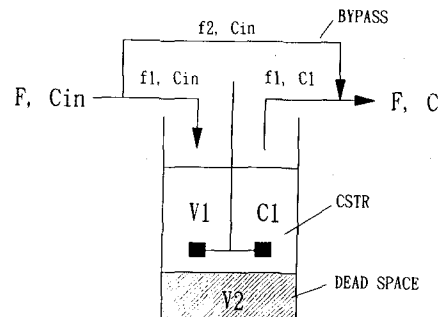


Fig. 2 The CSTR model with short circuiting and a dead space

ここで、 V はリアクターの設計容積、 τ は設計水理学的滞留時間 (HRT)、 θ は無次元の水理学的滞留時間、 $\eta_i = f_i/F$ は流入水量の処理率、 $\eta_v = V_i/V$ は実際の容積利用率である。

ここで、 V はガスおよび生物の容積を差し引いたものでなければならないが、実際にはこの部分の容積が小さいので本実験では省略して取り扱った。

式 (5) は、短絡流と死水域の影響を含めた不完全混合状態下でのトレーサの応答方程式であり、リアクター内を流れている微小な流体塊の滞留時間分布関数である⁴⁾。その両辺に対数を取ると、次の直線形方程式が得られる。

$$\ln \frac{C}{C_0} = \ln \eta_i - \frac{\eta_i}{\eta_v} \theta \quad (6)$$

したがって、その切片と勾配により、パラメータ η_i と η_v を求めることができる。

4. 実験方法

4.1 トレーサの選択

トレーサとしては、測定が容易な物質で安全性の高いものが要求される。吸着性の高い物質はトレーサとして不適当である²⁾。文献5)~7)では放射性同位元素を利用することに利点を認め、文献8), 9)ではNaFを利用して F^- を F^- 選択電極で測定している。その他、 $LiCl$ ^{10), 11)}や染料⁴⁾をトレーサとする例もある。本実験では、安価で容易に入手でき、しかも、検出濃度の範囲内に微生物に阻害作用はなく、検出方法も簡単であるNaClをトレーサとした。

4.2 実験方法

一定量の食塩溶液 (リアクター内の Cl^- 濃度を約 $200 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ とする) をリアクターに注入する同時に、流入水をストップさせる。リアクター内の食塩濃度を均一化させるため2時間攪拌してから、塩素イオン濃度零の流入水を供給して、所定時間ごとに25 mlの流出水を採水した。トレーサとしての Cl^- 濃度の測定は硝酸銀滴定法によって行った¹²⁾。実験はガス流量及び水流量を一定にさせ、各実験の測定間隔は少なくとも前の実験後、4日間経過後に行った。

得られたデータを式 (5) と式 (6) に基づいて整理した。

5. 結果及び考察

ガス攪拌型メタン発酵リアクターの混合特性に対する操作条件の影響因子には、①攪拌動力としてのガス流量、②嫌気汚泥の濃度③水理学的滞留時間の三つが挙げられる。

5.1 ガス流量の影響

循環ガス流量は、リアクター内の固 (嫌気汚泥) - 液 (水) 2 相の混合効率に影響を与える。ここで、ガスリフト管の断面を基準とする循環ガスの流速はそれぞれ 0.007 , 0.015 , 0.022 , $0.029 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ として、MLSS濃度は $21,800 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ で、HRTは 29.4 h であるの条件下で、その影響を調べた。この条件下で、流出水中のトレーサ濃度の応答によれば、ガス循環量の増加につれて、 η_i と η_v の値も増加して混合状態が良くなっている。しかし、ガス流量を $0.022 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ に増加させた後は混合状態はほとんど変わらないこ

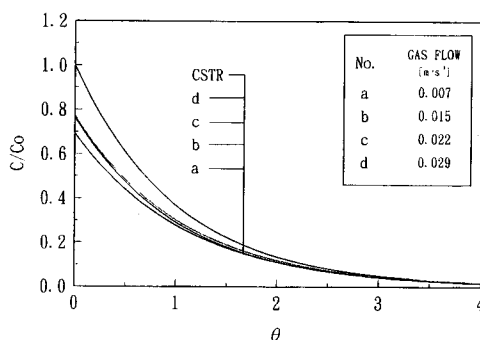


Fig. 3 The effect of gas flow rate on mixing state (MLSS : $21.8 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$, HRT : 29.4 h)

とが示された (Fig. 3)。したがって、装置の幾何学的形状及びその中の汚泥濃度が一定の場合に、省エネ的なガス循環流量の最適値が存在し、本実験ではこの値が $0.022\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ となる。

各ガス循環流量条件下でのトレーサの応答回帰方程式を Table 1 に示す。

Table 1 The effect of gas flow rate on mixing state

No.	Gas flow rate [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Cumulative distribution function	Correlation coefficient	η_t^* [%]	η_v^{**} [%]
a	0.007	$\frac{C}{C_0}=0.693 \exp (-0.915\theta)$	0.993	69.3	75.8
b	0.015	$\frac{C}{C_0}=0.766 \exp (-0.966\theta)$	0.998	76.6	79.3
c	0.022	$\frac{C}{C_0}=0.769 \exp (-0.932\theta)$	0.942	76.9	82.5
d	0.029	$\frac{C}{C_0}=0.774 \exp (-0.939\theta)$	0.992	77.4	82.4

* $\eta_t = [\text{Influent flow} - \text{Short pass flow}] / [\text{Influent flow}]$

** $\eta_v = [\text{Reactor volume} - \text{Dead space}] / [\text{Reactor volume}]$

5.2 汚泥濃度の影響

ガスリフト型装置の内において、循環ガスは流入水と装置内の固-液混合相 (被作用物を略す) を混合する動力源であり、循環ガスから被作用物に運動量の輸送効率に対する影響は、装置の形状が一定の場合にその物性 (粘度 μ 、密度 ρ など)、ガスリフト管の中にガスの流動速度 q に関係がある。本実験では、汚泥濃度の影響を考察するため、ガス流速を $0.022\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、HRTを29.4hに一定させた条件下で、MLSS濃度それぞれ0, 14.6, $21.8\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 場合のトレーサの応答を測定した。それらの回帰方程式、回帰曲線と理想的な完全混合型装置 (図の中にCSTRをとす。全文同) の応答曲線と

の比較をそれぞれ Table 2、Fig. 4 に示す。汚泥濃度が高くなるとともに被作用物の物性も変化しているの、循環ガスからの運動量の転送率が低下して、混合が不十分となる。実験データから見れば η_t 、 η_v とも小さくなった。なお、本実験条件下では、 Cl^- が汚泥への浸透拡散する影響は実験データのプロットによればあまり認められないから、浸透拡散が平衡する状態であると考えられる。このことから汚泥濃度の多少による浸透拡散現象の影響ではなく、これは混合特性の変化によるリアクター内の短絡流や死水域の影響と考えられる。汚泥濃度を $14.6\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ から $21.8\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ まで増加させた場合に、容積利用率 η_v は逆に89.9%から82.5%まで減少し、短絡率 ($1-\eta_t$) は11.5%から23.1%まで増加した。

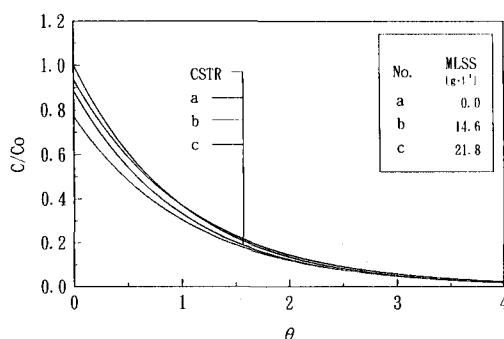


Fig. 4 The effect of MLSS on mixing state
(gas flow : $0.022\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, HRT : 29.4h)

5.3 水理学的滞留時間の影響

水理学的滞留時間の影響を考察するため、ガス流速を $0.022\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、MLSS濃度を0に設定して、HRTはそれぞれ0.9, 29.4hの条件下で、トレーサー応答を調べた。その結果、極端な滞留時間0.9hと定常処理の滞留時間29.4hとの場合の両者のトレーサー応答はほとんど同じと認められた (Table 3、Fig. 5)。したがって、水理学的滞留時間の影響はあまりないと考えられる。

Table 2 The effect of MLSS conc. on mixing state

No.	MLSS [$\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]	Cumulative distribution function	Correlation coefficient	η_t [%]	η_v [%]
a	0	$\frac{C}{C_0}=0.926 \exp(-0.932\theta)$	0.998	92.6	99.4
b	14.6	$\frac{C}{C_0}=0.885 \exp(-0.984\theta)$	0.982	88.5	89.9
c	21.8	$\frac{C}{C_0}=0.769 \exp(-0.932\theta)$	0.942	76.9	82.5

Table 3 The effect of HRT on mixing state

No.	HRT [h]	Cumulative distribution function	Correlation coefficient	η_t [%]	η_v [%]
a	0.9	$\frac{C}{C_0}=0.946 \exp(-0.947\theta)$	0.987	94.6	99.9
b	43.7	$\frac{C}{C_0}=0.926 \exp(-0.932\theta)$	0.998	92.6	99.4

以上のまとめとして、ガス流速と汚泥濃度の影響をFig. 6とFig. 7に示す。

5.4 処理効率に及ぼす混合特性の影響の考察

簡単のため、ここでは基質の比除去反応速度 (q_s) と装置内に液中基質濃度 (C_1) のみ関係があるとして1次反応、即ち $q_s=kC_1$ (k : 動力学定数) を仮定して考察した。

式(1)に反応項を導入すると、

$$f_1 C_{in} - f_1 C_1 - q_s V_1 = V_1 \frac{dC_1}{dt} \quad (7)$$

定常状態 ($dC_1/dt=0$) 下で、式(7)を解くと、

$$k C_1 = \frac{f_1}{V_1} (C_{in} - C_1) \quad (8)$$

また $f_1 = \eta_t F$, $V_1 = \eta_v V$ を式(8)に導入すると、

$$\frac{\eta_t F}{\eta_v V} (C_{in} - C_1) = k C_1 \quad (9)$$

あるいは

$$C_1 = \frac{\alpha}{k\tau + \alpha} C_{in} \quad (10)$$

ここで、 $\alpha = \eta_i / \eta_v (= [f/F] \cdot [V/V]^{-1} = [V/F] \cdot [V_i/f_i]^{-1})$ 即ち、 α の意味は装置の HRT の [設計値] と [実際の操作値] の比である。ここで、この α は「操作合理性の評価基準値」と呼ばれる。

式 (10) を式 (3) に導入すると

$$FC = f_1 \frac{\alpha}{k\tau + \alpha} C_{in} + f_2 C_{in} \quad (11)$$

$f_1 = \eta_i F$, $f_2 = (1 - \eta_i) F$ により、上式中の C を解くと

$$C = \eta_i \frac{\alpha}{k\tau + \alpha} C_{in} + (1 - \eta_i) C_{in}$$

$$= \frac{k\tau(1 - \eta_i) + \alpha}{k\tau + \alpha} C_{in} \quad (12)$$

あるいは

$$\frac{C}{C_{in}} = 1 - \frac{k\tau}{k\tau + \alpha} \eta_i \quad (13)$$

式 (13) は短絡流と死水域の存在因子を含んだ不完全混合状態下での処理水濃度の動力学モデル式である。この場合に、基質の除去率 η は次のモデル式で表すことができる。

$$\eta_s = 1 - \frac{C}{C_{in}} = \frac{k\tau}{k\tau + \alpha} \eta_i \quad (14)$$

また、 $\eta_i = 1$, $\eta_v = 1$ 時に、リアクターは完全混合状態となる。この場合の除去率 η_s' は式 (14) によると

$$\eta_s' = \frac{k\tau}{k\tau + 1} \quad (15)$$

式 (14) と式 (15) によって

$$\frac{\eta_s}{\eta_s'} = \frac{k\tau + 1}{k\tau + \alpha} \eta_i \quad (16)$$

式 (16) によれば、実装置（ほとんど不完全混合状態となる）の場合に、装置の処理効率に影響する因子が流入水の実処理率、 η_i （短絡流因子）と操作合理性評価基準値、 α との二つの因子がある。しかし、本実験のデータによれば、いずれの実験条件下で、 α 値の変化は 0.915 から 0.984 までの範囲で、あまり大きくない。それに対して η_i 値の変化は (0.693 から 0.946 ま

で) かなり大きいので、 η_i からの影響は大きいと考えられる。これによって、操作条件の設定は実装置の処理効率に大きな影響がある。

6. まとめ

1) 攪拌動力としてのガス流量を大きくすればするほど、混合状態は良くなるが、一定量に増加したあとはあま

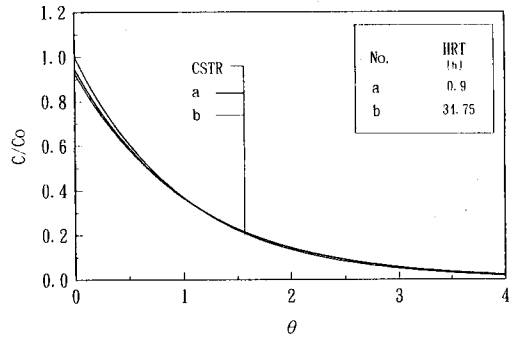


Fig. 5 The effect of HRT on mixing state (gas flow : $0.022 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, MLSS : 0.0)

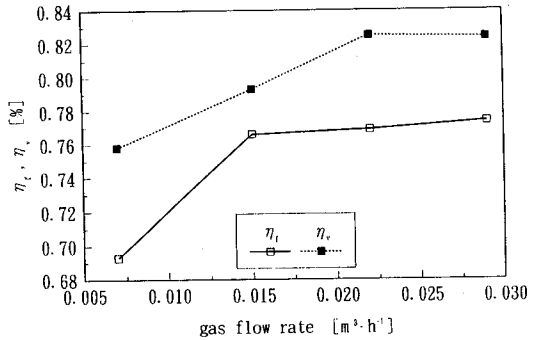


Fig. 6 The effect of gas flow rate on η_i and η_v

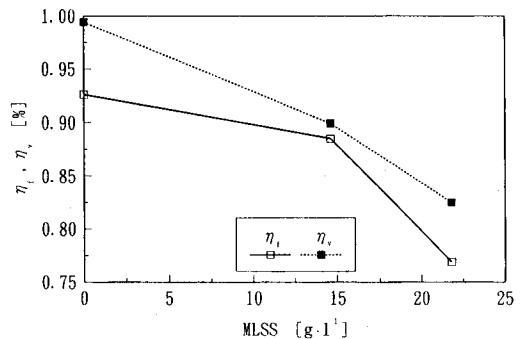


Fig. 7 The effects of MLSS to η_i and η_v

り変わらない。ガス流量の増加するとともに、ガスリフト管の中に気-液2相の相境界面に発生する剥離現象も顕著となり、結果的に循環ガスからの運動量の輸送効率を低下した。したがって、最適値が存在し、本実験下でこの値は $0.022\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ である。

- 2) ガス攪拌式メタン発酵リアクターに対して、汚泥濃度を高くすればするほど、処理効率も高くなるわけではない。汚泥濃度が高過ぎると、リアクター内の混合状態が悪くなって、容積利用率の低下や短絡流量の増加などの不完全混合流れからの影響が大きくなり、それを無視することができない。
- 3) ガス攪拌式メタン発酵リアクターの混合状態に対する水理学的滞留時間の影響は小さいと認められた。
- 4) ガス攪拌式メタン発酵リアクターの処理効率は式(14)で評価することができる。

参考文献

- 1) Tenny, M.W. and Budzin, G.J. (1972) How Good is Your Mixing? Water & Wastes Eng. 9(5), 57.
- 2) 海野肇ら著 (1992) 生物化学工学, 講談社サイエンティフィック出版.
- 3) 張振家, 中西弘, 浮田正夫, 深川勝之 (1993) 嫌気性ガスリフト式反応装置による廃液処理, 第45回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集, II-26.
- 4) C.P. Leslie Grady, Jr. and Henry C. Lim (1980) Biological Wastewater Treatment. MARCEL DEKKER, INC. New York and Basel.
- 5) Burgess, S.G. et al. (1957) The Determination of Flow Characteristics in Sewage Works Plant. Jour. Inst. Sewage Purif. Part 3, 206.
- 6) Young, H.W. and Young, J.C. (1988) Hydraulic Characteristics of Upflow Anaerobic Filters. Journal of Environmental Engineering, 114(3).
- 7) Montens, A. (1954) The use of radio active isotopes for water flow and velocity measurements. Radioisotopes Conference, (2).
- 8) Motein, H.D. and Stephenson, J.P. (1981) Mixing Efficiencies in Full-scale Anaerobic Digester by Tracer Methods. Journal WPCF, 53(1).
- 9) Meer, R.R., Vletter, R. (1982) Anaerobic Treatment of Wastewater: The Gas-Liquid Sludge Separator. Journal WPCF 54(11).
- 10) Zoltek, J. and Gram, A.L. (1975) High-rate Digester Mixing Study Using Radioisotope Tracer. Journal WPCF, 47(1).
- 11) 和泉, 矢野 (1992) エアレーションタンクの構造と水理特性及び処理機能について, 下水道協会誌, 341(5), 74-78.
- 12) (社団法人) 日本下水道協会、下水試験方法、1984年版。