

# 固定床式嫌気性反応槽の流動特性

## Fluid Characteristics in a Fixed-Bed Anaerobic Reactor



(環)技術室  
枅 田 耕 平  
Kohei Masuda  
浦 上 研 二  
Kenji Urakami  
技術開発本部  
宝 月 章 彦  
Akihiko Hogetsu

The flow pattern in a fixed-bed reactor is very important to clarify existence of dead space and short circuit flow in a reactor. While direct and accurate measurement of flow patterns takes extraordinary manpower to collect the data, a numerical simulation of fluid analysis has been realized by a computer. The simulation by a commercial fluid analytical software "STREAM" demonstrate a good fit to the data obtained from a small pilot scale unit. This report is described about the relationship between the void volume ratio and the configuration of reactor, average flow rate and length of weir of a fixed-bed type anaerobic bio reactor.

### まえがき

固定床式嫌気性反応槽のフローパターンを知ることは、処理効率を考えるうえで、槽内のデッドスペースやショートパスの有無を推定する手段にもなり、装置の設計にとって重要であると考えられる。

しかし、反応槽内のフローパターンに関しては、これまで実験的にも、モデル解析的にも必ずしも明確にされていない。これは反応槽内に充填材が存在するために物理的に実測が困難なことによる。

幸い近年のコンピュータの発達により、流体解析に関する種々のプログラムが開発され、数値シミュレーションが可能になった。

そこで、今回、当社の固定床式嫌気性反応槽を対象として、流体解析プログラム "STREAM"<sup>1)</sup> を用いて、槽内の流動解析を行った。

その結果小型実験装置により得られたデータと "STREAM" を用いた数値シミュレーションの結果から数値解析は実際のフローパターンを良く表現していることが確認された。そこで、実装置規模の反応槽内のフローパターンを数値解析から求め、槽内平均流速・槽形状・越流堰長さ・充填材充填後の反応槽の空隙率とフローパターンに及ぼす影響について解析を行ったので、その結果を次に報告する。

### 1. 基礎方程式

固定床式嫌気性反応槽内のフローパターンの解析を行うため、流体質量の保存式と流体運動量の保存式すなわちナビエ・ストークスの式を用いて、コンピュータによる数値解析を行った。

流体質量の保存式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

流体運動量の保存式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad (2)$$

(1)(2)式の添字は、Einsteinの総和規約に従うものとする。差分化には移流項は上流差分、時間については後退差分とし、計算は半陰解法を用いた。

ここで "STREAM" で計算を行うために必要な項目である充填材による抵抗係数は次式<sup>2)</sup>で求めた。

$$Cd = 4 \cdot f \cdot L / dv \quad (3)$$

$$f = \frac{75}{Re_v} \cdot \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} + 0.875 \cdot \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \quad (4)$$

(1)(2)式を用いて数値解析を行った結果より、ある流速以下となる部分をデッドスペースと定義し、それが全体に占める割合を求めた。

またデッドスペースは、平均流速(u)、槽形状(H/D)越流堰長さ(D/堰長さ)、充填材および付着汚泥による反応槽内の空隙率( $\epsilon_0$ )、充填材形状により影響を受けるものとし、その関係は無次元式で表示される。

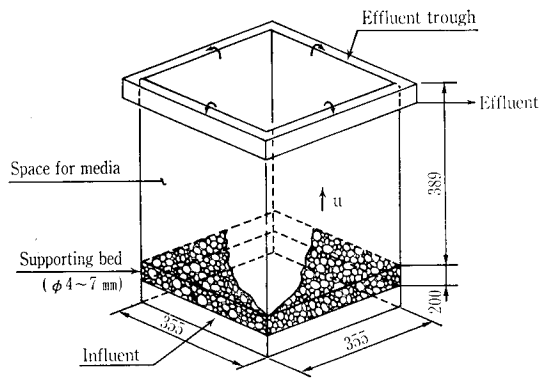
$$Vd = \alpha \cdot (Vde)^a \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^b \cdot \left(\frac{u^2}{g \cdot D}\right)^c \cdot \left(\frac{D}{B}\right)^e \quad (5)$$

$$Vde = 1 - \epsilon_0 \quad (6)$$

上式で、反応槽内のデッドスペースすなわち Vd は、数値解析により求めた流れによるデッドスペースと充填材および付着汚泥が槽内に占める割合を足し合わせたものと定義する。

ここに、

- x : 位置座標(m)
- u : x 方向の流速(m/s)
- t : 時間(s)
- $\rho$  : 流体密度(kg/m<sup>3</sup>)
- $\nu$  : 動粘性係数(m<sup>2</sup>/s)
- $f_i$  : 体積力(m/s<sup>2</sup>)



第1図 小型実験装置  
Fig. 1 Configuration of test plant

- P : 流体の圧力(N/m<sup>2</sup>)
- f : 摩擦係数(-)
- Rev : レイノルズ数(-)
- ε : 充填材の空隙率(%)
- Vd : デッドスペース容量割合
- Vde : 充填材および付着汚泥による体積占有率(%)
- H : 反応槽高さ(m)
- Cd : 充填材の抵抗係数(-)
- D : 反応槽径(m)
- L : 充填層高(m)
- B : 堰長さ(m)
- dv : 充填材の相当直径(m)

## 2. 数値解析結果の実験による確認

小型実験装置を用いて、コンピュータによる数値シミュレーションを実装置レベルへ適応できるかどうかを確認するために、実験から得られたデータと数値シミュレーションから得られたフローパターンとの比較を行った。

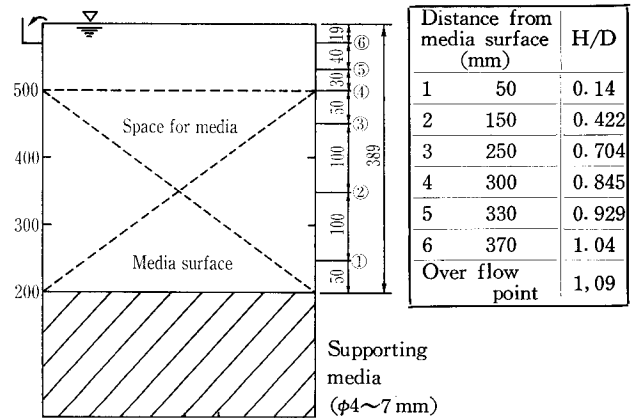
### 2.1 実験装置及び実験方法

反応槽内の流速分布を調べるために、第1図に示すとおり、355 mm<sup>u</sup> × 355 mm<sup>w</sup> × 有効水深 389 mm<sup>d</sup>の透明塩ビ製の小型実験装置を製作した。底部に支持材(径4~7 mmの汙材)200 mm<sup>d</sup> 充填した。

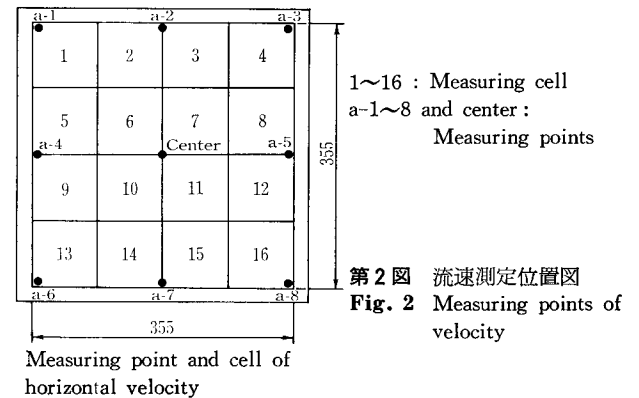
槽内に何も充填しない場合と充填材(ビオレット65#)を260 mm<sup>d</sup> 充填した場合の槽内各点の流速を測定範囲0~60 mm/sec サーマル式微流速計(計測技研(株)製)を用いて測定した。槽内の流れは、アップフローで平均流速U=8.8 mm/secとした。但し水温は10 °Cであった。測定点は第2図に示す。水平方向の1~16のエリア、a-1~8および中央の計25カ所と垂直方向の7カ所の計175カ所の流速を測定した。

### 2.2 実験結果と数値シミュレーションの比較

実験結果より求められた各点の流速を更に(1, 4, 13, 16), (2, 3, 5, 6, 8, 9, 12, 14, 15), (6, 7, 10, 11), (a-1, 3, 6, 8), (a-2, 4, 8, 7) および Center の6つのブロックにまとめて、それぞれのブロックごとに流速を補正した。補正された流速を用いて、反応槽内に充填材を充填していない場合のフローパターンを第3図に、また充填材を充填した場合のフローパターンを第4図に示す。



Measuring point of vertical velocity



第2図 流速測定位置図  
Fig. 2 Measuring points of velocity

Measuring point and cell of horizontal velocity

また小型実験装置と同じ条件の下でコンピュータによる数値解析を行い槽内のフローパターンを求めた。第5図に充填材を充填しない場合のフローパターン図を、第6図に充填材を充填した場合のフローパターン図を示す。特に充填材のない場合、槽内のフローパターンは、槽底部においては流速のバラツキが小さく上部になるに従って流速のバラツキが大きくなることから、実測値とシミュレーション結果とが非常に近似している。このことより、フローパターンを求めるためにコンピュータによる数値シミュレーションが近似的に適用できると考えた。

数値シミュレーションによるフローパターンの流速分布の計算例を第7図に示す。流速は平均流速の±30%以内に多く分布している。今、槽内平均流速の30%以下となる容量を流れによるデッドスペースと仮定し、全槽容量に対し何割にあたるかを次に求めることとした。

## 3. 大型装置(実装置レベル)の数値シミュレーション

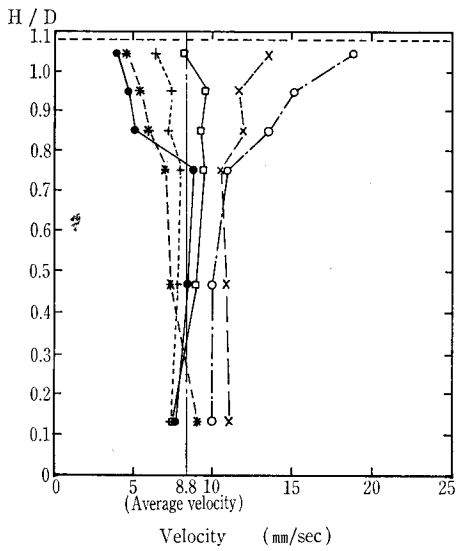
小形装置の結果よりコンピュータを用いた数値シミュレーションが適用できることが確認されたので、実装置スケールの槽内フローパターンの解析を行い、その結果よりデッドスペース容量割合Vdの計算を行った。

またスケールアップした場合のVdに影響を及ぼす因子すなわち槽形状H/D, 平均流速u(u<sup>2</sup>/g·D), 堰負荷D/B空隙率ε<sub>0</sub>について検討を行った。

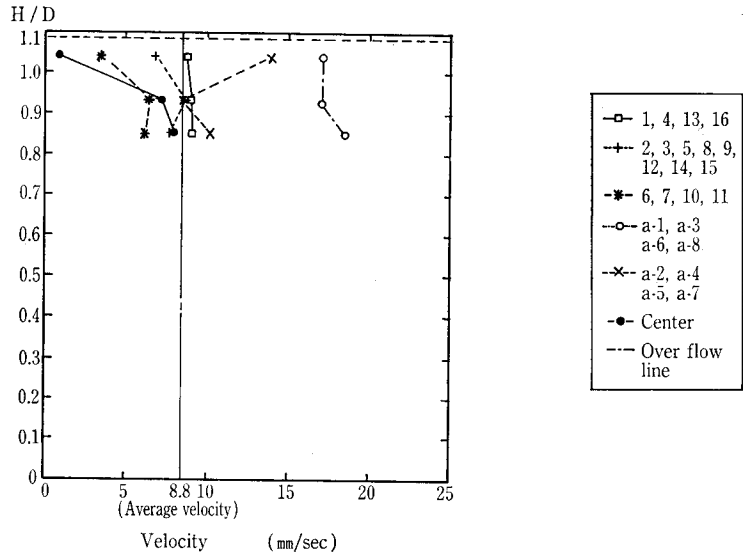
### 3.1 計算結果と考察

#### 3.1.1 槽形状H/Dの影響

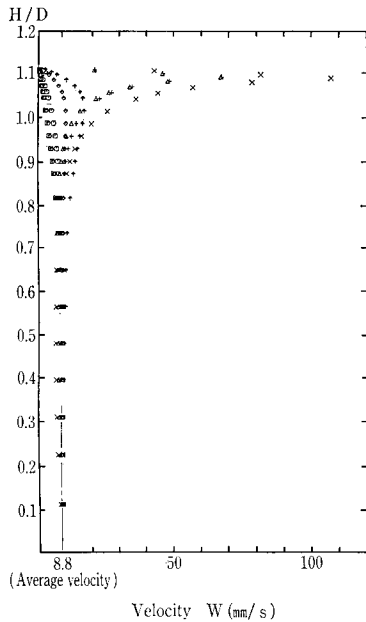
第1表に空隙率, 平均流速, 越流堰長一定の条件において槽形状すなわちH/Dを変えて計算したVdの値を示す。



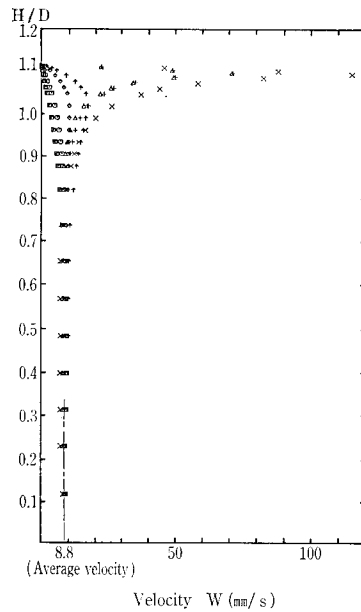
第3図 実測フローパターン図 (充填材なし)  
Fig. 3 Flow pattern in reactor without media



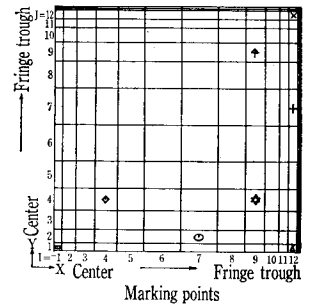
第4図 実測フローパターン図 (充填材あり)  
Fig. 4 Flow pattern in reactor with media



第5図 コンピュータによるフローパターン図 (充填材なし)  
Fig. 5 Flow pattern in reactor without media by computer simulation



第6図 コンピュータによるフローパターン図 (充填材あり)  
Fig. 6 Flow pattern in reactor with media by computer simulation



第7図 流速分布  
Fig. 7 Distribution of flow velocity

第1表 H/Dの影響  
Table 1 Effect of H/D ( $\epsilon=0.8$  const. condition)

		Average velocity		
		0.2 m/h	0.5 m/h	1.0 m/h
Reactor dimensions				
Vd	2.5 m <sup>H</sup> /10 m <sup>φ</sup> H/D	20.5 %	20.3 %	20.5 %
	5 m <sup>H</sup> /10 m <sup>φ</sup> H/D	20.5 %	20.4 %	20.5 %
	10 m <sup>H</sup> /10 m <sup>φ</sup> H/D	20.5 %	20.2 %	20.2 %

第2表 平均流速の影響

Table 2 Effect of average velocity ( $\epsilon=0.8$  const. condition)

Average velocity	Reactor dimensions	5 m <sup>H</sup> /5 m <sup>φ</sup> H/D	10 m <sup>H</sup> /10 m <sup>φ</sup> H/D	15 m <sup>H</sup> /15 m <sup>φ</sup> H/D
	Vd	0.2 m/h	20.2 %	20.2 %
	0.5 m/h	20.2 %	20.2 %	20.3 %
	1.0 m/h	20.2 %	20.2 %	20.2 %

第4表 空隙率εによる影響

Table 4 Effect of void volume ratio

ε	0.9	0.85	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
Vd	10.2 %	15.2 %	20.2 %	30.1 %	40.02 %	50.02 %	60.01 %	70.01 %	80.01 %
Vd by flow velocity effect	0.2 %	0.2 %	0.2 %	0.1 %	0.02 %	0.02 %	0.01 %	0.01 %	0.01 %

Condition  
Average velocity: 1.5 m/h  
Reactor dimension (H/D):  
10 m<sup>H</sup>/10 m<sup>φ</sup>  
Trough dimension:  
Fringe trough only

(5)式と第1表からべき乗bは0となり、次の式が成り立つ。

$$Vd = \alpha_1 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^b = \alpha_1 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^0 \quad (7)$$

以上の結果より、槽形状はVdに影響しない。

### 3.1.2 平均流速の影響

第2表に空隙率、槽形状、堰負荷一定の条件において平均流速uを変えて計算したVdの値を示す。(5)式と第2表からべき乗cは0となり、下記の式が成り立つ。

$$Vd = \alpha_2 \cdot \left(\frac{u^2}{g \cdot D}\right)^b = \alpha_2 \cdot \left(\frac{u^2}{g \cdot D}\right)^0 \quad (8)$$

以上の結果より、平均流速0.2~1.0 m/hではVdに影響しない。

### 3.1.3 越流堰長の影響

第3表に空隙率、槽形状、平均流速一定の条件において越流堰長を変えて計算したVdの値を示す。(5)式と第3表からべき乗eは0となり、下記の式が成り立つ。

$$Vd = \alpha_3 \cdot \left(\frac{D}{B}\right)^e = \alpha_3 \cdot \left(\frac{D}{B}\right)^0 \quad (9)$$

以上の結果より、越流堰長はVdに影響しない。

### 3.1.4 空隙率の影響

第4表より、槽形状、平均流速、堰負荷一定の条件において空隙率を変えて計算を行い、Vdに対する影響を検討した結果、空隙率自体が影響する。ここで、槽内の流れによるVdに及ぼす影響に注目すると、空隙率の減少に伴い平均流速が増加することによって、むしろ流れによるデッドスペースは減少する結果となる。しかし、流れによるデッドスペースの絶対値が空隙率εから求められるVdeの値と比較して無視できるほど小さいため、下記の関係が成り立つ

$$Vd = \alpha_4 \cdot (Vde)^a = (Vde)^{1.0} = (1 - \epsilon_0)^{1.0} \quad (10)$$

以上の結果より空隙率が直接Vdに影響を与える因子で

第3表 堰長さの影響

Table 3 Effect of weir length ( $\epsilon=0.8$  const. condition)

Average velocity	1.0 m/h	1.0 m/h	1.0 m/h	
	Reactor dimensions	5 m <sup>H</sup> / 5 m <sup>φ</sup> H/D	10 m <sup>H</sup> / 10 m <sup>φ</sup> H/D	15 m <sup>H</sup> / 15 m <sup>φ</sup> H/D
Trough dimension				
Vd	Fringe trough	20.2 %	20.2 %	20.2 %
	Fringe trough + Center trough	20.2 %	20.1 %	20.0 %

あることが判明した。

(5)~(10)式よりVdは、槽形状、越流堰長および平均流速には、ほとんど影響されずVdすなわち(1-ε<sub>0</sub>)に比例することが判明した。以上の関係を次に示す。

$$\begin{aligned} Vd &= (Vde)^{1.0} \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^0 \cdot \left(\frac{u^2}{g \cdot D}\right)^0 \cdot \left(\frac{D}{B}\right)^0 \\ &= (1 - \epsilon_0)^{1.0} \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^0 \cdot \left(\frac{u^2}{g \cdot D}\right)^0 \cdot \left(\frac{D}{B}\right)^0 \\ &= 1 - \epsilon_0 \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、Vdに影響を及ぼす因子を確かめるために求めたフローシート図の代表例を第8図(a)~(k)に示す。

第8図(a)~(c)には槽形状の影響を、第8図(d)~(f)には平均流速の影響を、第8図(g)~(i)には空隙率の影響を求めるためのフローパターン図を、第8図(j), (k)には越流堰長の影響をそれぞれ示す。ここで、槽内のフローパターンを比較し易くするために縦軸に全槽高(オーバーフロー位置)H=1となるようにh/H(hはある水深を表わす)で表示した。

## むすび

固定床式嫌気性反応槽(ABリアクター)の槽内流動特性について、実験装置レベルおよび実装置レベルの数値シミュレーションの結果から、次のことが確認された。

- 1) デッドスペース割合は空隙率ε<sub>0</sub>を測定することによって実用的には(1-ε<sub>0</sub>)で代表され、均一流入条件においては槽形状、平均流速、越流堰長にほとんど影響を受けないと考えられる。
- 2) 処理効率に影響を及ぼす主な因子は槽の有効容量と汚泥保持量であるが、槽の有効容量は槽の大小によって影響を受けないことが数値シミュレーションから判明した。

## 【参考文献】

- 1) (株)ソフトウェアクレイドル
- 2) SABURI ERGUN: FLUID FLOW THROUGH PACKED COLUMNS, Chemical Engineering Progress Vol. 48, No. 2 (1953)

第8図 コンピュータを用いたフローパターン (実装置レベル) (a)~(k)  
 Fig. 8 Flow pattern by computer simulation

