

曝気槽の流体の混合現象に関する一試案

石川 宗孝*・中西 弘*

A Trial Method on the Mixing Conditions in the Aeration Tank

Munetaka ISHIKAWA and Hiroshi NAKANISHI

Abstract

In general, the mixing in the aeration tank have an effect on the efficiency of this tank.

Especially, in the last, the process of nitrogen removal in the aeration tank or in the deep aeration tank is a serious influenced by the mixing.

However, research data on the mixing is insufficient, and there is only analysis by the complete mixing or the plug-flow models.

The authors with to report on the experimetal results with our several trial models of the mixing in the aeration tank.

1. はじめに

一般に曝気槽内の流体の混合は BOD 除去率等の処理効率に大きな影響を及ぼすと言われている。曝気槽の形式としては旋回流式やうねみぞ式とがあるが、その設計に関しては槽内の混合現象にあまり考慮がはらわれていないと言いはる。最近では処理効率の向上、安定を得るために槽内の混合状態を知る必要があり、種々の報告がなされている^{1),2),3)}。

また、単一曝気槽内あるいは深層曝気槽内で脱窒現象が起こることが知られており^{4),5),6)}、この現象は曝気槽内の混合が大きく関与していることが考えられ、混合状態の把握が必要である。

しかし、これまでの実験室規模の装置ではこの混合現象はあまり考慮されず押し出し流れ型か完全混合型での解析が多かった。

筆者等は実験室規模の装置でも混合現象を把握やすく、かつ定量化する装置を製作して、活性汚泥法処理実験と流動実験を行なったが、その有為性を認めたので、その装置特性を流動実験より求めた混合現象から述べる。

2. 曝気槽内の混合現象

活性汚泥法における曝気槽の役目は槽内の微生物を

用いて有機物を浄化することであるが、その混合現象は浄化作用に大きな影響を与えている。混合は水温、空気量、空気噴射の方法、平均滞留時間、タンク形状、汚泥濃度、流入、流出の条件によって変化することが知られている。とくに、タンク形状、空気量、空気噴射の方法等は混合に大きな影響を与えており、重要な設計条件となっている。

現在、水処理プロセスにおいては流れ系モデルと称して次の様な解析手法を応用している。

(蓄積量) = (流入する量) - (流出する量) - (反応等により消滅する量) ……(1)

この(1)式を微分形式の一般形で表わすと

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\text{div}(v \cdot c) + R \dots\dots\dots(2)$$

[流れ特性][反応特性]

但し v : 変化速度 C : 流体の質量 R : 水質変化量

となる。これに、それぞれの条件に応じて流れ特性、反応特性を与えればよいわけであるが、問題を単純化し、次のようなモデル解析が多く取り扱われている。

2.1 完全混合モデル

完全混合というのは水質状態が装置全体どこでも均一であると仮定して解く方法であり、小規模曝気槽あるいは実験室での処理実験等で多く扱われている。Fig. 1 の仮定から、この基礎式は次のようになる。

*土木工学科

$$V \frac{dc_e}{dt} = Q(c_0 - c_e) + R V \quad (3)$$

初期条件 (I, C.) $t=0$ で $C_e = C_i$

但し、V：容積 (l, m³), Q：流入水量 (l/hr, m³/day), C₀：流入水質濃度 (mg/l), C_e：流出水質濃度 (mg/l)

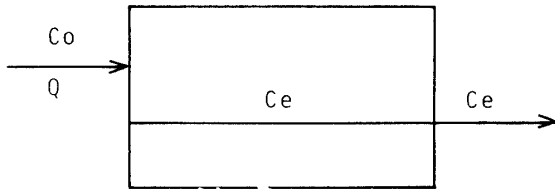


Fig.1 The Complete Backmixing Model

2.2 槽列混合モデル

Fig. 2 のように、曝気槽が n 個の小さな完全混合槽からできていると考え、曝気槽の流体の混合の程度をこの n で示したものである。

第 i 番目について収支をとると

$$\frac{V}{n} \frac{dc_i}{dt} = Q(c_{i-1} - c_i) + R(c_i) \frac{V}{n} \quad (4)$$

I. C. $t=0$ で $C_i = C_{i1}$

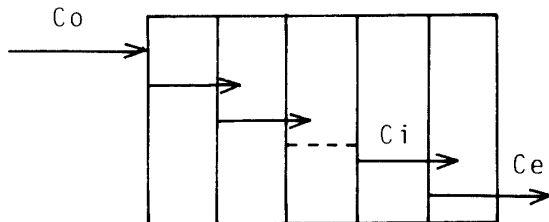


Fig.2 The Tank-in-series Model

2.3 押し出し流れモデル

槽列の区切りの極限として求めることもできる。また、実験室での考察では回分実験を押し出し流れとしてあてはめることもできる。

計算は(4)式で

$$V = A \cdot \Delta x \quad Q/A = v$$

$$\frac{dc_i}{dt} = v \frac{(c_{i-1} - c_i)}{\Delta x} + R(c_i) \quad (5)$$

但し A：断面積, Δx：微小距離

ここで $n \rightarrow \infty$ にすると $\Delta x \rightarrow dx$, $C_i - C_{i-1} = dc$ となり、(5)式は

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -v \frac{\partial c}{\partial x} + R(c) \quad (6)$$

I. C. $t=0$ で $c(x) = c_i(x)$
 B. C. $x=0$ で $c(0) = c_0(t)$

となる。模式図としては Fig. 3 に示すようになる。

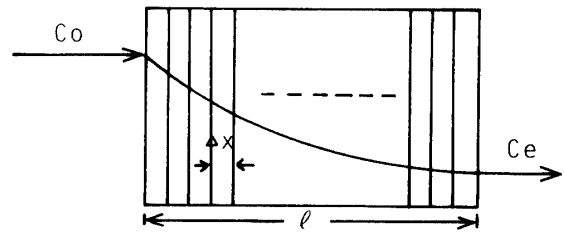


Fig.3 The Plug Flow Model

2.4 拡散モデル

拡散モデルは Fig. 4 に示すように流体が一様な流速

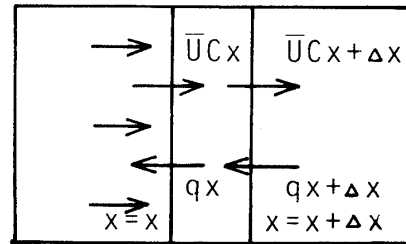


Fig.4 The Dispersion Model

U で流れ、断面方向に濃度分布がなく、系内の混合現象に均一な混合拡散係数 D が適用できるとしたものであり、(6)式に拡散項がついたものとして次のように表わせる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} + R$$

I. C. $t=0$ で $c(x) = c_i(x)$
 B. C. $x=0$ で $-\frac{\partial c}{\partial x} = v(c_0 - c)$
 $x=l$ で $\frac{\partial c}{\partial x} = 0$ (7)

これらを解いて、装置特性（定常の除去効率あるいは非定常の応答等）を求めることができる。

以上の代表的なモデルから、曝気槽の混合現象は研究・解析が行なわれている。松本等³⁾は実験用曝気槽の流体の混合現象に適用する混合モデルは槽列混合モデルが適当であると報告しており、河野等⁷⁾は曝気槽の分面を行ない、完全混合型タンクを 1 本、4 本連結、8 本連結等からその混合と処理効率の比較を行なっている。

また、酸素移動性能とその消費動力から曝気槽の混合を解析した文献^{8),9)}も多くみられる。これは曝気槽の主な役割が BOD, COD の浄化率を高めることであり、付随的に浄化率を高めることは酸素移動性能を良くすることとして、曝気方法の開発とともに、混合現象の解析がなされてきたものと思われる。

一方、曝気槽の役割が BOD, COD 除去作用のみでなく、硝化作用さらに脱窒作用まで含んだプラントが開発され、処理性能に広範囲な役割が要求され始めてい

る。そのため、混合現象の解析はさらに精度が要求されている。

3. 逆混合モデル装置の製作

単一曝気槽あるいは深層曝気槽内での脱窒作用は単一プラントにおいて、炭素系有機物、硝化作用、脱窒作用を同時に行なう現象として注目されているが、この槽内の DO 分布をみると Fig. 5 に示すようになって

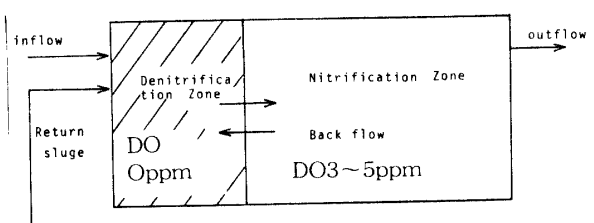


Fig.5 Dissolved oxygen (DO) distribution in the aeration tank

いる¹⁰⁾。この図にも示されるように単一槽内においても

均一な分布ではなく、流入部付近では有機物の除去等で DO が消費され、流出部付近においては DO が飽和状態に近づいている。このため、流出部付近で硝化作用によって生成された硝酸性窒素 (NO_2^- あるいは NO_3^-) が循環流あるいは旋回流による逆混合により移動し、流入部において脱窒作用を受けるものと考えられる。

このように逆混合は窒素除去に重要な要素を持っており、このプロセスを解析するためには逆混合の定量化をはかる必要がある。そのため、次のような実験装置を試作した。

3.1 実験装置

実験装置は Fig. 6, 7 に示すように 5 槽あるいは 10 槽よりなる槽列モデル型の曝気槽を製作した。各槽間の流れは自然流下とし、逆混合は定量ポンプ (チョーブポンプ) で i 槽から $(i-1)$ 槽へもどすことによつて行

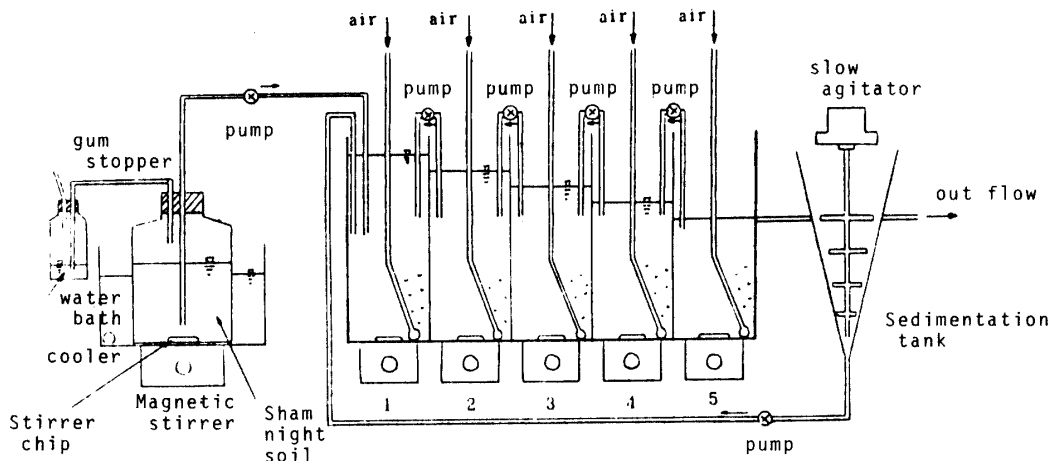
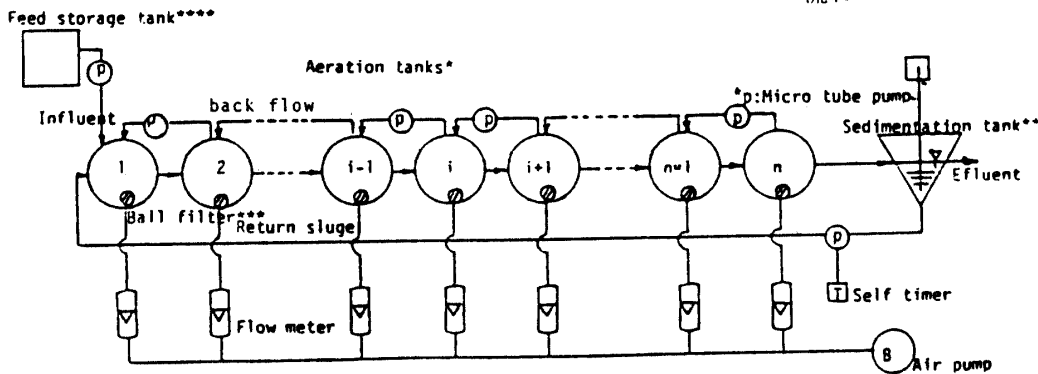


Fig.6 Experimental apparatus

なう装置である。これは槽列モデル型の装置を改良したものである。槽列モデル型においては槽数 n を変えることにより、すなわち、

完全混合 $n = 1$ ← $n = \infty$ 押し出し流れ



*Aeration tanks: total volume, $10(1)$ (Exp-1) $1(1) \times 10$, These tanks is kept temperature 30°C by (Exp-2) $2(1) \times 5$ water bath.

**Sedimentation tank: effective volume, $1(1)$

***Aerator: (Exp-1) glass pipe with some holes, air volume, $1.0(1/\text{min})$

(Exp-2) ball filter, air volume, $0.4(1/\text{min})$

****This tank is kept temperature 10°C

Fig.7 Experimental apparatus (continuous system)

としたものであるが、逆混合に対してはその流量の定量化が難点となるため、逆混合流れ (ここでは h と

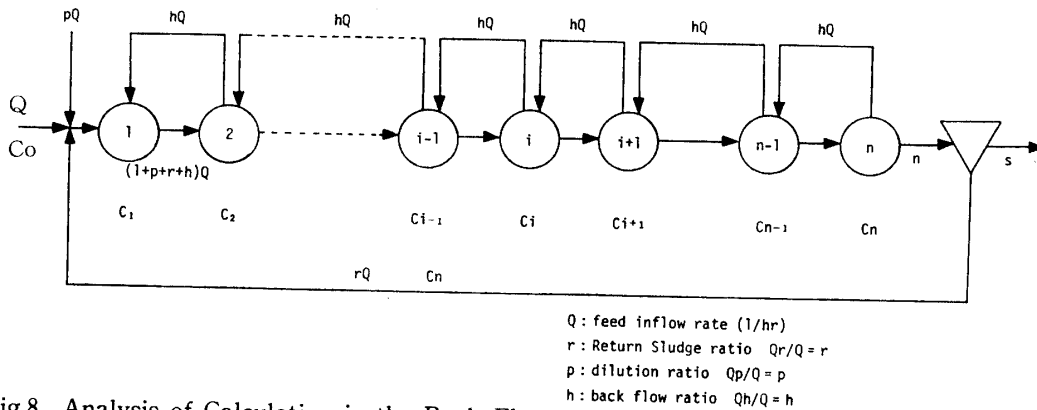
する)を加えて、基本的には

$$\left. \begin{array}{l} \text{完全混合 } n=1 \\ \text{型 } h=\infty \end{array} \right\} \longleftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} n=\infty \text{ 押し出し} \\ h=0 \text{ 流れ型} \end{array} \right. \dots\dots(8)$$

から成り立っている。

これにより、槽数 n をある数(ここでは、3, 5, 10)作り、押し出し流れ型の曝気槽としたものへ、逆混合 h を一定量ずつ増加させ完全混合型まで近づけようとしたものである。

従って、槽内の流動特性、水質特性は Fig. 8 Table.



Q: feed inflow rate (1/hr)
r: Return Sludge ratio $Qr/Q=r$
p: dilution ratio $Qp/Q=p$
h: back flow ratio $Qh/Q=h$

Fig.8 Analysis of Calculation in the Back Flow Model Apparatus.

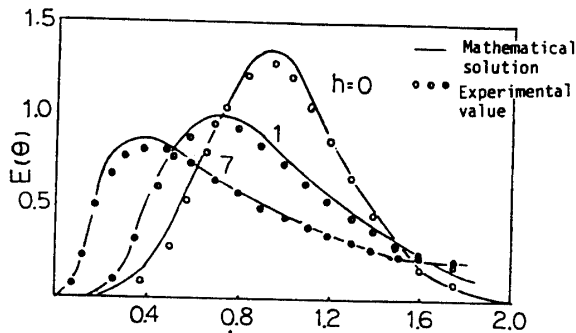


Fig.9 δ response of back flow model Experimental results and mathematical results

1に示すような基礎式で表わすことができる特徴を有している。また、空気量は散気球により、0.2l air/l(容積)/minとした。各槽内では死水域を作らないようにスターラーで緩速攪拌を行なっている。

3.2 流動実験

各実験条件による混合状態を知るため、デルタ応答法により、滞留時間分布曲線を求めた。トレーサーとして NaCl を使用し、分割槽数 n は 10, 5, 3, 逆混合比 h は流入水量 Q に対して 0~50Q について、それぞれ流動実験を行なっている。

3.3 実験結果及び考察

デルタ応答曲線は Table. 1 で示す計算方法による計算値と実測値が全く一致した。Fig. 9 にその一例を示す。また、分割槽数 n を 10, 5, 3 のとき、逆混合比 h を変えた場合のデルタ応答曲線を Fig. 10, 11, 12 に示す。

完全混合、押し出し流れ等の代表的な滞留時間分布曲線は Fig. 13 に示すようになり、押し出し流れ型には分割槽数 n を増やす程、より近づくことがわかり、完全混合型には逆混合比 h を大きくする程より近づくことがわかる。また、この中間的な流れについては本装置

による方法で完全に定量化することがわかり、先に述べた装置の基本的条件(8)式を満足した。

一方、 n と h を一元的に扱えないか検討したが、Fig. 10 に示すように $E=E_{max}$ に対応する ϕ を ϕ_{max} とすると

$$\text{完全混合型 } 0 \longleftarrow \phi_{max} \longrightarrow 1 \text{ 押し出し流れ型} \dots\dots(9)$$

となる関係となり ϕ_{max} という一変数で表わすことができた。 ϕ_{max} と n, h の関係を Fig. 14 に示す。この図から一つの流動実験で得られた値で他の実験の n, h を推定することができる。

4. まとめ

以上のように逆混合モデル装置を試作し、検討したが、次のような結論が得られた。

- 1) 曝気槽内の混合を逆混合モデル装置により簡単に定量化することができた。
- 2) 本装置は分割数 n と逆混合比 h が相反関係にあり、完全混合型では $n=1, h=\infty$, 押し出し流れ型では $n=\infty, h=0$ となる。
- 3) 2) の関係を 1 変数 ϕ_{max} で表わすことにより、混合の度合を知ることができる。
- 4) 活性汚泥実験においても、本装置により混合条件を考慮した室内実験ができることが判明した。

終りに、本研究に協力して頂いた本学卒業生、西岡利博(現宇部興産 KK), 水船清司(現東京設計 KK)

Table.1 Calculation of the Back Flow Model Apparatus

	0	i	n	s
Flow rate (ℓ/hr)	Q	$(1+p+r+h)Q$	$(1+p+r)Q$	$(1+p)Q$
Concentration (mg/ℓ)	C_0	C_i	C_n	C_s
Removal (%)	$(1 - \frac{C_n}{(1+p)C_0}) \times 100$			
Mixing model	<p>the first tank $\frac{V}{n} \frac{dC_1}{dt} = Q \{ C_0 + hC_2 - (1+h)C_1 \}$</p> <p>the i th tank $\frac{V}{n} \frac{dC_i}{dt} = Q \{ (1+h)C_{i-1} + hC_{i+1} - (1+2h)C_i \}$</p> <p>the n th tank $\frac{V}{n} \frac{dC_n}{dt} = Q (1+h)(C_{n-1} - C_n)$</p> <p>Initial conditions $t=0 \quad C_i=0 \quad V$: Tank volume $C_0 = C^\circ \int \delta(+)$ N: Tank number C°: Mean concentration in the tank $\delta(+)$: Dirac's δ function</p>			
Mixing & Kinetics model	<p>the first tank $\frac{V}{n} \frac{dC_1}{dt} = Q \{ C_0 + rC_n + hC_2 - (1+p+r+h)C_1 \} + \frac{V}{n} R_1 S$</p> <p>the i th tank $\frac{V}{n} \frac{dC_i}{dt} = Q \{ (1+p+r+h)C_{i-1} + hC_{i+1} - (1+p+r+2h)C_i \} + \frac{V}{n} R_i S$</p> <p>the n th tank $\frac{V}{n} \frac{dC_n}{dt} = Q (1+p+r+h)(C_{n-1} - C_n) + \frac{V}{n} R_n S$</p> <p>$R$: Reaction rate ($\text{mg}/\text{mgss}/\text{hr}$) S: M L S S (mg/ℓ)</p>			

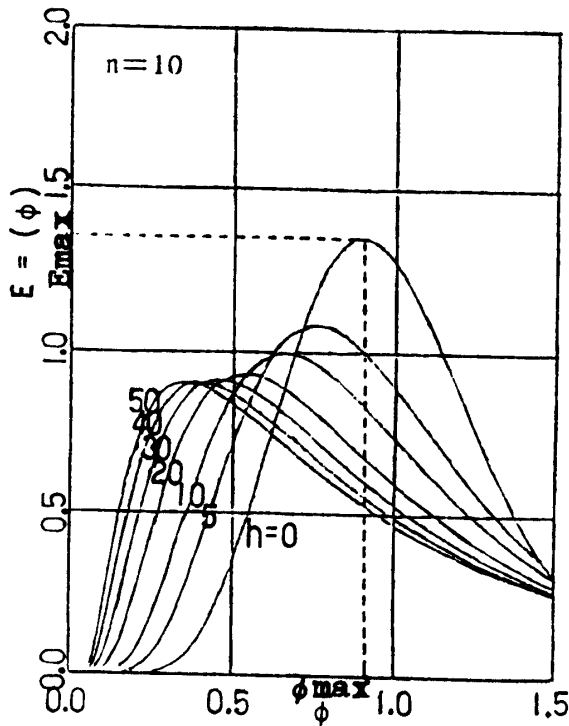


Fig.10 δ response of the back flow model
 $E(\phi)$: Age Distribution function
 ϕ : Dimensionless time(t/\bar{t})

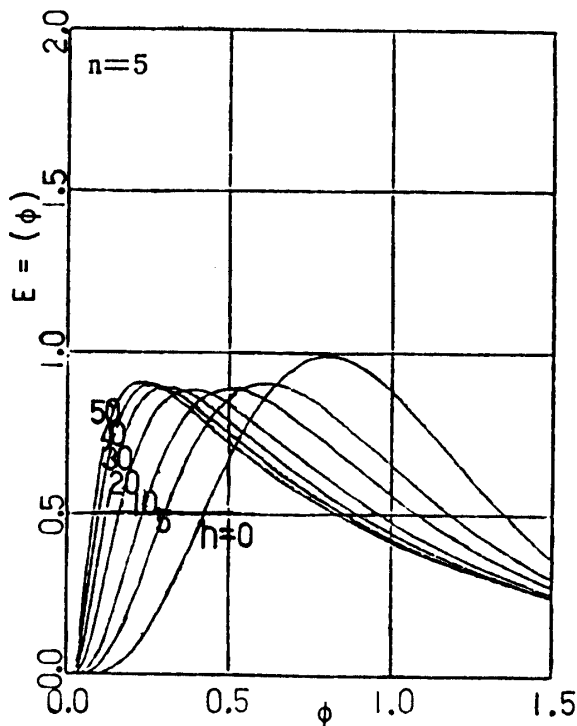


Fig.11 δ response of the back flow model

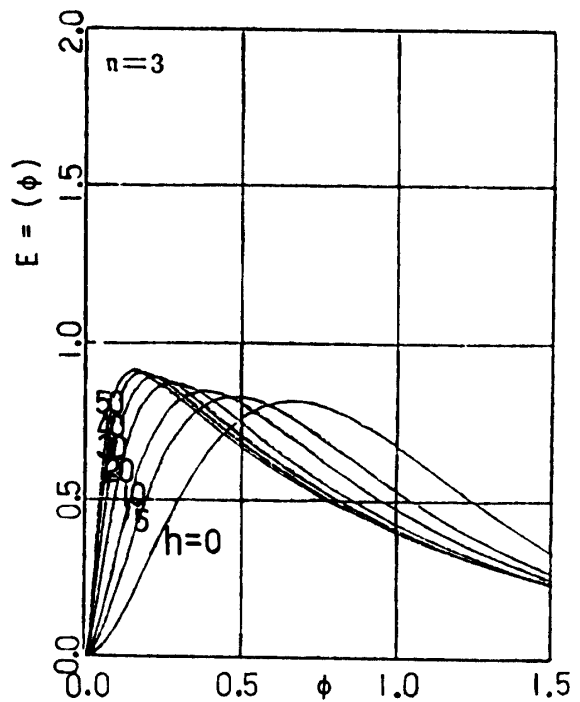


Fig.12 δ response of the back flow model

氏に深謝する。また、本研究の一部は文部省科学研究費(試験研究(2)課題番号 585159)の補助によることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 松本順一郎, 大沼正郎, 土木学会論文集, No. 154, p 15~22 (1968)
- 2) Robert B. Grieves, etl, J. WPCF, 36, 619~635 (1964)
- 3) 藤田正憲, 橋本奨, 醸酵工学会誌, 53, 808~814 (1975)
- 4) 岩井重久, 大森英昭, 水処理技術, 22, No. 8, 1~8 (1981)
- 5) 村田清美他, 水処理技術, 22, No. 7, 57~68 (1981)
- 6) 石川宗孝他, 第 18 回衛生工学討論会論文集(土木学会), P 98~105 (1982)
- 7) 河野大作他, 第 10 回下水道研究発表会講演集, p 232~234 (1973)
- 8) 松本順一郎他, 下水道協会誌, 8, No. 88, 24~31 (1971)
- 9) 野北舜介他, 第 15 回下水道研究発表会講演集, P 209~211 (1978)
- 10) 石川宗孝他, 衛生工学シンポジウム論文集(京都大学), p 165~168 (1978) (昭和 57 年 10 月 15 日受理)

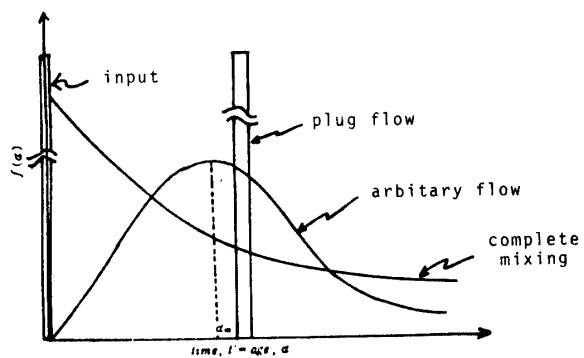


Fig.13 Age distribution function

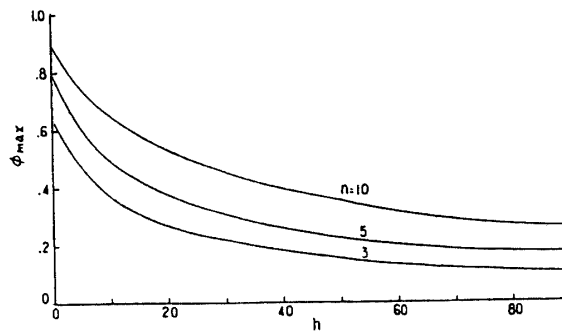


Fig.14 Relationship between n , h and ϕ_{max}