

II-31 活性汚泥の沈降性悪化の影響因子に関する一考察 ——主として曝気槽形状の影響について——

北海道開発コンサルタント(株) 正員 藤嶋正紀

(1) はじめに

活性汚泥法は、都市下水の生物処理法の主流を占めており、設計・維持管理手法が比較的確立されている処理法とされている。しかしながら、同法の重要な問題点の1つとして、汚泥の沈降性悪化（バルキング）があげられてから久しく、近年でも、バルキング防止を考慮した処理法、維持管理法に関する報告が多く見受けられている。

筆者は、当社における技術開発の一環として「北海道における下水終末処理場の実態調査」を行う機会を得ることができたが、道内の下水処理場においても活性汚泥の質的变化とそれに伴う汚泥の沈降性及び濃縮性の悪化により維持管理に苦慮していることがわかった。この調査結果の一部については、既に拙文^{1) 2)}にて紹介させて頂いているが、ここでは、活性汚泥の沈降性悪化の影響因子のうち、特に曝気槽形状（L/W/H）比の影響について若干の検討を行ったので報告するものとする。

(2) 活性汚泥の沈降性悪化（バルキング）の影響因子

一般に、活性汚泥の沈降性悪化（バルキング）には、糸状性、非糸状性の2種類があるとされており、SVIを指標として論じられている。バルキングの発生機構とその制御方法については、これまで多くの研究がなされてきているが、その中から主要な影響因子を列記すると次のとおりとなる。

- ① 流入下水の基質成分 ② 流入負荷量 ③ 負荷変動 ④ 水温 ⑤ 溶存酸素濃度
- ⑥ 曝気槽内の混合特性 ⑦ 返流水 ⑧ その他

しかしながら、これまでは、各因子毎に影響がどの程度あるかといった経験的な報告、研究が多く、各因子間の関係および影響度合の定量的評価といった研究は余り多くないように見受けられる。上記の影響因子は、曝気槽への流入条件および維持管理条件に関する因子が主である。これらの因子と処理場および処理区

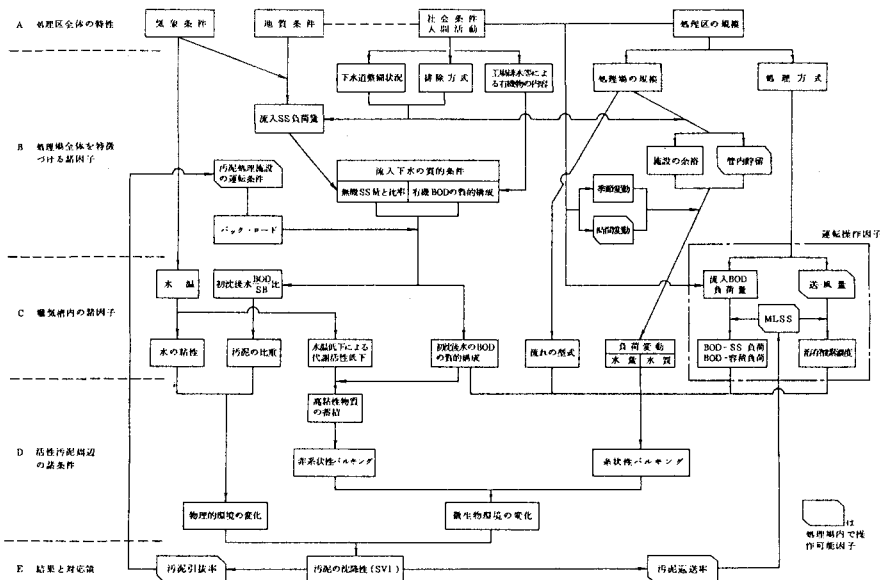


図-1

SVIと各影響
因子の関係図

全体の因子との関係あるいはその結果としてのSVIとの関係を理解することが必要と考え、図-1に示すようなSVIと各影響因子との関係図を作成してみた。^{1) 2)} 活性汚泥のSVIについては影響因子が多様であり、複雑な関係となっていることがわかる。そのため、定量的な研究は余りなされてこなかったものと考えられる。そこで、道内約30ヶ所の標準活性汚泥法を採用している処理場について数量化理論Ⅱ類を適用し、各因子の影響度合について検討を行ってみた。

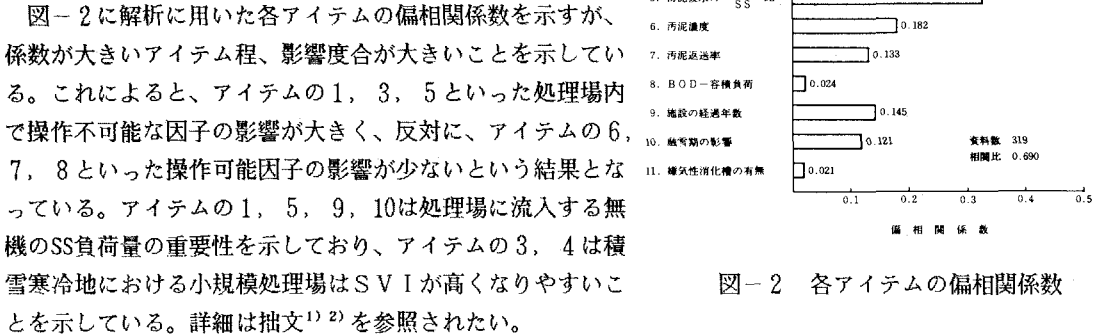


図-2 各アイテムの偏相関係数

図-2に示した各アイテムの内、設計者が比較的主体的に設定することができ、影響度合が大きい因子として「曝気槽の混合特性」があげられる。筆者は、混合特性の指標として、曝気槽形状 (L/W・H) 比を用いて解析を行った。以下に、混合特性と曝気槽形状 (L/W・H) 比について若干の検討を行うものとする。

(3) 曝気槽の混合特性および曝気槽形状 (L/W・H) 比の影響について

(3-1) 混合特性について

装置の混合特性としては、理想状態である「完全混合流れ」、「押し出し流れ」と現実にかかる両者の中間的な混合状態である「不完全混合流れ」とに分類することができ、滞留時間分布の特性により実験的に求めることができる。混合特性の評価方法としては、次のような方法が知られている。

(1) 拡散モデル

拡散モデルは、図-3のように、流体が一樣な流速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、このDを用いて混合の程度を示そうとするものである。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - U \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \quad \text{----- (1)}$$

C : 濃度 t : 時間 x : 距離 U : 流速 D : 拡散係数

(1) 式の解析解は、次式で表されることが知られている。

$$E(\phi) = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \mu_n \exp(\text{Pe}B/2)}{(\text{Pe}B/2)^2 + \text{Pe}B + \mu_n^2} \exp \left\{ \left(-\frac{\text{Pe}B/2 + \mu_n}{\text{Pe}B} \right) \phi \right\} \quad \text{----- (2)}$$

ここで $\mu_n : \cot \mu = \frac{1}{2} \left(\frac{2\mu}{\text{Pe}B} - \frac{\text{Pe}B}{2\mu} \right)$ の n 番目の正根

PeB : ペクレ数 $\text{Pe} = \frac{Ud}{D}$, $B = \frac{L}{d}$

L : 装置長さ U : 流速 d : 装置内の代表径

$\phi : \frac{t}{T_a}$ T_a : 理論滞留時間

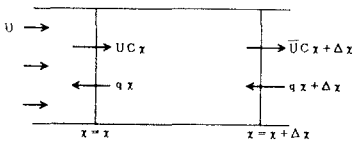


図-3 拡散モデル

(2) 槽列モデル

槽列モデルは、図-4のように、装置を j 個の小さな完全混合槽からできていると考え、装置内の流体の混合の程度をこの j で示そうとするものであり、次式より求められる。

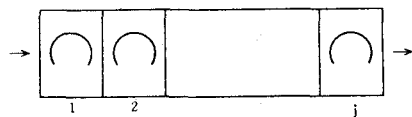


図-4 槽列モデル

$$E(\phi) = \frac{\phi^{j-1} \cdot e^{-\phi}}{(j-1)!} \quad \text{----- (3)}$$

j : 完全混合槽列数

他に、PFR (Plug-Flow-Reactor) と CSTR (Complete-Stirred-Tank-Reactor) とデッドゾーンで構成されとするMixed-Modelがあるが、ここでは省略するものとする。

槽列モデルのパラメーター j と拡散モデルのパラメーター Pe_l との関係については、両モデルの分散を比較することにより、次のような式が提案されている。³⁾

$$\text{Kramers} \quad j-1 = 1/2 \cdot Pe_l \quad (j > 10) \quad \text{----- (4)}$$

$$\text{Levenspiel} \quad \frac{1}{j} = \frac{2}{Pe_l} \left(1 - \frac{e^{-Pe_l}}{Pe_l} \right) \quad \text{----- (5)}$$

$$\text{宮内} \quad Pe_l = \frac{2 \cdot (j-1)^2}{j} \quad \text{----- (6)}$$

以上の3式より、 PeB あるいは Pe_l と j との関係を求めると図-5に示すとおりであり、どれを用いても大差がなく、同様な傾向を示していることがわかる。また、 $E(\phi)$ については、図-6に示すとおりとなる。従って、 Pe_l および j を大きくすることにより「押し出し流れ」に近づけることができる。

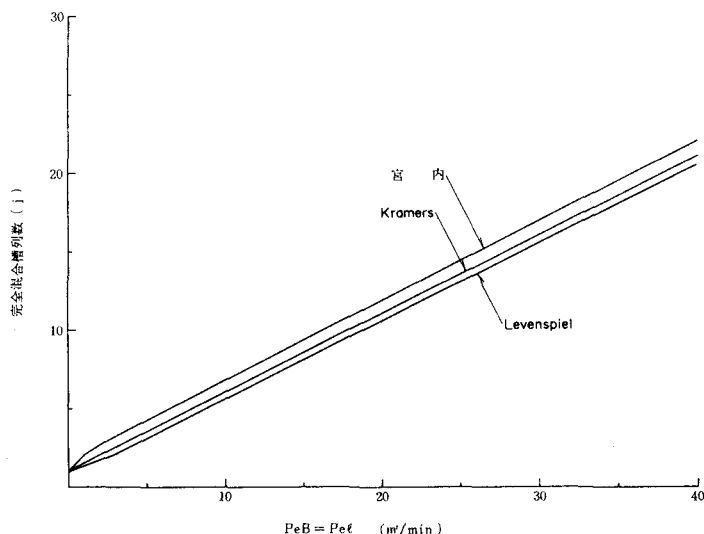


図-5 ペクレ数 (Pe_l) と完全混合槽列数 (j) との関係

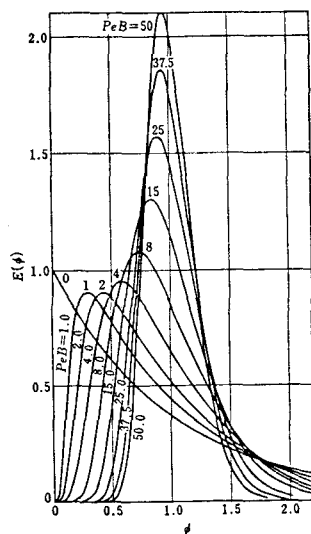


図-6 拡散モデルの $E(\phi)$

〔3-2〕ペクル数 (Pe_l) と曝気槽形状 ($L/W \cdot H$) 比の関係について

拡散モデルのパラメーターであるペクレ数 (Pe_l) は次のように変形することができる。

$$Pe_l = \frac{U \cdot L}{D} = \frac{Q}{W \times H} \cdot \frac{L}{D} = \frac{L}{W \times H} \times \frac{Q_0 (1+r)}{n} \times \frac{1}{D}$$

$$= (\text{各池の槽形状}) \times (1 \text{ 池当りの流量}) \times (1/\text{拡散係数}) \quad (7)$$

U: 流速 (m/min) W: 池幅 (m) H: 有効水深 (m) Q: 1 池当りの流量 (m³/min)

Q₀: 計画汚水量 (m³/min) n: 池数 r: 汚泥返送率 (%)

(7) 式のうち、1 池当りの流量 Q は、処理場の計画汚水量 Q₀、池数 n、汚泥返送率 r によって求まるが、各処理場の資料を整理する上では、流入汚水量、汚泥返送率の季節変動があるため、非常に扱いにくい。しかしながら、(7) 式においては、季節変動の影響より計画時における池数の設定の影響の方が大きいと考えられる。汚水量と系列数との関係については、図-7 に示す調査事例が知られており、汚水量が多い程系列数も多くなり、1 系列当りの汚水量は極端に多くはならないことを示している。また、中・大規模処理場においては低水量対策として 1 系列目の池数を多くする場合があり、小規模処理場では 1 系列当りの池数を少なくして段階的な系列計画を採用することが多いようである。道内処理場の実績では計画汚水量と池数の関係は図-8 に示すとおりとなっており、小規模処理場でも池数が比較的多いことを示している。

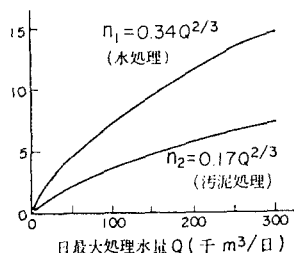


図-7 系列数⁴⁾ (1 系列当り 1~4 池)

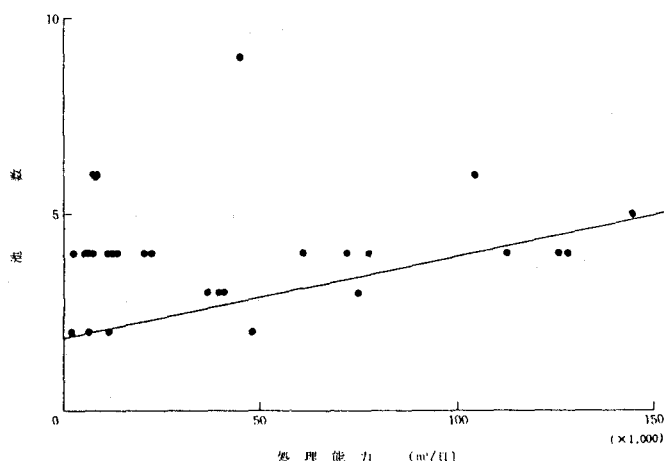


図-8 処理能力と池数の実績 (認可申請書より作成)

また、拡散係数 D については実装置における測定例が少ないため、詳細は不明である。表-1 に文献による曝気槽混合特性の測定例を示す。^{5) 6)} これによると、曝気方式、槽形状、仕切壁の有・無等によって D は変化するようであり、概ね、次のことが言える。

- ① 小台処理場の実験結果によれば、同一条件下であっても混合拡散流方式 (全面曝気) の方が従来の片側旋回流方式よりも拡散係数が小さく、押し出し流れに近くなりやすい。
- ② 神戸大学の調査結果によれば、曝気槽内に仕切壁を設けた方が拡散係数が小さくなり、押し出し流れに近くなりやすい。また、同一槽であっても、流入水量が小さい程拡散係数が大きくなり、完全混合流れに近くなりやすい。
- ③ 三河島処理場の実験結果によれば、槽容積当りの空気量が変動したとしても拡散係数 D があまり変化しておらず、通常の維持管理下では風量を大巾に変動させることは余りないため、風量の影響を考慮する必要はない。

以上のように (7) 式に示した Pe_l の各項のうち、1 池当りの流量 Q と拡散係数 D については不確定要素が大きく、資料も不十分なため、図-2 に示したように、混合特性と SVI との関係进行调查する上では曝気

槽形状 (L/W・H) 比が有効な指標となると考えている。

表-1 曝気槽混合特性の測定例⁵⁾より作成

処理場名	曝気槽の形状	曝気方式	実 験 条 件			実 験 結 果		備考	
			流量Q (m/min)	風量Q ₀ (m/min)	トレーサー物質	D (m/min)	J (層回数)		
三河島処理場 (東 系)	巾 長 深 15.5m × (11×4) m × 10.0m	全断面 多段縦回流式	24.6	——	食用青色1号	Pe1=2.3 D=3.0	(2.8)	0.28	各断層は自孔壁により仕切られている。逆混合が生じていると考えられる。
西多摩処理場	巾 長 深 18.0m × (7.5×5) m × 4.5m	同 上	I系 12.4	——	ウ ラ ニ ン	(1.69)	3.4	0.46	同 上 恒常的にバルキング状態 SVI=200~300
			II系 10.8	——		(1.65)	3.2		
小台処理場	巾 長 深 6.3m × (70×4) m × 4.2m	西系 混合縦回流方式	37.9	——	ウ ラ ニ ン	(1.70)	120	10.6	ステップ投入
		東系 片側縦回流方式	37.6	——		(2.92~19.73)	12 ~70		
三河島処理場 (豊隆系)	巾 長 深 7.35m × (75×4) m × 4.2m	片側縦回流方式	63.7	65.0	食用青色1号	4.27	(74.3)	9.7	
			61.8	44.7		4.68	(66.1)		
			66.5	24.7		4.85	(68.6)		
(神戸大学)	T-1 巾 長 深 7.5m × (33.4×3) m × 4.4m	片側縦回流方式	6	66.5	塩化リチウム	13.76	2	3.0	仕切無し
	T-2 巾 長 深 7.5m × (33.4×3) m × 4.4m		6	66.5		2.29	6	3.0	仕切壁有 同列配置 (開口比 92%)
	T-3 巾 長 深 10.0m × 54.4m × 6.45m		12.4	25.4		1.78	4	0.84	仕切壁有 交互配置 (開口比 17%)
	T-4 巾 長 深 10.0m × 52.4m × 6.7m		12.2	16.0		5.45	2	0.78	仕切壁無
			4.7	15.5		8.73	1		

() は (6) 式よりの換算値

(3-3) 曝気槽の混合特性および曝気槽形状 (L/W・H) 比とSVIの関係について

曝気槽の混合特性と汚泥の沈降性 (SVI)、糸状性バルキングの発生条件との関係については、既に、種々の報告があり、代表例としては図-9に示したChudobaらの実験結果がある。また、糸状性バルキングの発生機構については、次のような仮説が提案されているが、各々、問題点もあり、今後の検討が期待されているところである。⁷⁾

(1) 基質濃度勾配説 (Chudobaら、図-9参照)

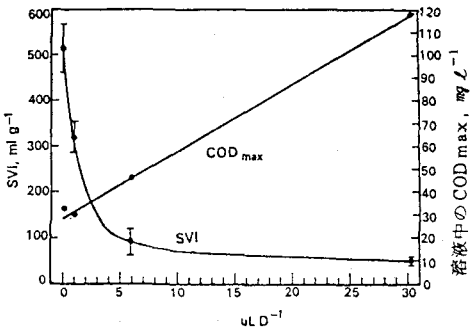
(2) 飢餓時間説 (安田)

一方、道内の各処理場について、曝気槽形状 (L/W・H) 比とSVIの関係を整理すると図-10に示すとおりとなり、図-9の実験結果と同様な傾向を示している。これによっても、曝気槽形状 (L/W・H) 比が混合特性の有効な指標であることがわかる。但し、この調査結果については、以下の点に留意する必要がある。

① 各処理場のBOD-SS負荷は、0.10~0.45kgBOD/kgSS日が多く、0.5kgBOD/kgSS日以上処理場は少なかった。

② 但し、各処理場の日常試験結果を用いており、採水時刻によっては日平均値を表しているとは限らない。

③ S市では、L/W・H比の大きな大規模処理場が多いが、嫌気性消化方式を採用していないため、消化脱離液等の逆流による影響が少ない。図-2の調査結果によれば、消化槽の有・無の影響度合は小さい



7) より引用

図-9 バク数とSVI, COD_{max}の関係
(MLSSは2~3g/lの範囲)

とされているが、他の指標（例えば、N、P 負荷量）で影響度合を評価した場合にどの程度効いてくるのかについては不明である。

- ④ 大規模処理場に比べ、小規模処理場程 S V I が高く、変動中も大きい。冬期間の低水温時に S V I が高くなりやすく、融雪期は水温は低下するが、無機の SS 成分の流入が効いているのか S V I も低下することが多い。
- ⑤ 各処理場とも片側旋回流方式である。散気方式、仕切壁の有・無等については詳細は不明である。

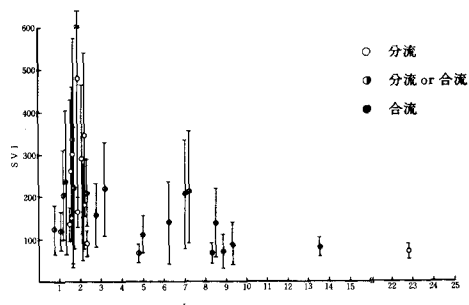


図-10 L/W·H 比と S V I の関係¹⁾

〔4〕設計上の対応策について

これまでの検討結果より、曝気槽の混合特性と曝気槽形状 (L/W·H) 比については、次のことがわかった

- ① (7) 式より、ペクレ数は、曝気槽形状 (L/W·H) 比、1 池当りの流量 Q、拡散係数 D により求められる。
- ② このうち、拡散係数 D については資料不足であり、特定することができなかった。但し、設計上の対応策としては仕切壁の設置は、D を小さくする上で有効な方法であることがわかった。
- ③ 曝気槽形状 (L/W·H) 比、1 池当りの流量 Q を大きくすることにより、ペクレ数を大きくすることができる。特に、(7) 式は次のように変形することができ、各池の池長 (L) を大きくすることが重要

$$Pe_L = \frac{U \cdot L}{D} = \frac{Q}{W \cdot H} \times \frac{L}{D}$$

$$= \frac{WHL}{T_a} \times \frac{1}{WH} \times \frac{L}{D}$$

$$= \frac{L^2}{T_a D} \quad (8)$$

表-2 バルキング防止を考慮した設計上の対応策

曝気槽設計上の対応策	備 考
(1) 曝気槽の形状を工夫し、流れを押し出し流れに近づける方法	① 池幅、水深を必要最小値とし、池長を長くする。 ② 系列内の池数を少なくし、1 池あたりの L/W·H 比を大きくする。 ③ 曝気量増設時に水路数を増やし、1 池あたりの池長を長くする。 ④ 槽内に仕切壁を設置し、水の流れを押し出し流れに近づける。
(2) 曝気、汚泥返送方法を工夫し、維持管理で対応する方法	① 酸素供給律通法。 ② MLSS 濃度調整法。
(3) 処理方式の変更	① 二段活性汚泥法等の採用 ② 冬期間のステッブレーションの停止

以上の他に、維持管理によって汚泥の沈降性悪化 (バルキング) を防止しようとする方法も報告されており、これらを整理すると表-2 に示すとおりとなる。

〔おわりに〕

活性汚泥の沈降性悪化 (バルキング) については、まだまだ不明な点が多く、具体的な解決策を見出すことが困難な場合が多い。本論文では、バルキングの影響因子のうち、曝気槽の混合特性および曝気槽形状 (L/W·H) 比の影響について検討を行った。尚、本論文作成にあたり、北海道庁住宅都市部下水道課、札幌土木現業所の関係者の方々、北大衛生工学科井上、松藤両助手に御指導を頂き、心より感謝申し上げます。

〔参考文献〕

- (1) 藤嶋正紀：技報 No 9 PP.121~136 (1984) 北海道開発コンサルタント株式会社
- (2) 藤嶋正紀：昭和61年度技術報告集 PP.69~72 (昭和62-2) 社団法人全国上下水道コンサルタント協会
- (3) 化学工学便覧：p.1465 (1978) 丸善株式会社
- (4) 亀田泰武 明石哲也：下水道協会誌 Vol.16, No.184 PP.2~11 (1979-9)
- (5) 東京都下水道局技術調査年報：昭和57年、59年、62年
- (6) 黒林寛治他 3 名：土木学会第42回年次学術講演会講演概要集 第2部 PP.802~803 (昭和62-9)
- (7) 須藤隆一 松本利通監・著：活性汚泥のバルキングとその対策 PP.180~213 アイシービー