

# 凝集沈澱装置におけるスケールアップ効果と その性能に及ぼす影響

The Scaling Up Effect of Sedimentation Tank and Its  
Interaction for the Performance



技術開発本部 開発企画室  
須田 龍生  
Tatsuo Suda  
技術開発本部 研究開発部  
小西 嘉雄  
Yoshio Konishi  
高田 一貴  
Kazutaka Takata

凝集沈澱装置における性能は、小さな実験水槽で得られた水力学的特性をいかに実機において維持するかによると考えられる。本論では、沈澱槽内の水力学的特性に対する定性的評価法としてトレーサーテスト法を採用し、更に流動数値解析 (CFD) の手法を適用して沈澱槽のスケールアップが性能に及ぼす影響を調べた。その結果、本事例の場合、槽内レイノルズ数をスケールアップファクターとするのは無理があることならびに、実装置において実験水槽レベルの粒子除去性能を維持するために、多段槽列モデル槽数  $J = 3$  槽以上を確保する必要があることが示唆された。

The hydraulic characteristics and the performance of sedimentation tank, there exists strong correlation. At the presumption of the performance of sedimentation tank by using small model tank, it is very important to maintain the same hydraulic property as small tank and on full-scale tank for obtaining good performance. In this study, tracer method was carried out for determining hydraulic characteristic, and computational fluid dynamics was applied for examination of scaling up effect of sedimentation tank. The observational and computational results show that applying the scaling up rule which Reynold's number was fixed as Reynold's law, is not suitable only this case. And, for obtaining good result as a solid separation performance, it is desirable that the number of CSTR (Continuous stirred Tank Reactor) to continuous stirred tank reactor model to be kept over 3 in the full-scale tank.

## Key Words :

凝集沈澱装置  
水力学的特性  
トレーサーテスト法  
流動数値解析  
多段槽列モデル

Sedimentation tank  
Hydraulic characteristic  
Tracer method  
Computational fluid dynamics  
CSTR

## まえがき

凝集沈澱処理装置は、凝集剤等を添加し、液体中に分散した固形物を凝集させた凝集体 (フロック) を形成させ、このフロックの沈降により固液分離を行う装置であり、電力や鉄鋼などにおける用水処理ならびに、上下水処理や工業廃水処理等において広く用いられている。

凝集沈澱処理装置の性能は、効率の良い固液分離にかかっていると見え、固液分離を確実にを行うため、安定して緻密なフロックが得られるよう、凝集剤の種類や攪拌条件といった凝集条件が実験データ等を基に慎重に決定される。

一方、沈澱槽内の水の流れも固液分離に大きく関与しており、槽内の流れを出来る限り均一にする事が重要である

と考えられる。

10数年前から、このような点を改善した高効率な凝集沈殿処理装置が各社から開発されたが、高効率化には実験室レベルで得られた結果を出来るだけ低下させずに実装置に反映する事が重要で、凝集条件はもちろん、槽内の流れをいかに均一に保った状態でスケールアップが出来るかが一つのポイントになると思われる。

本稿では、沈殿槽内の流れを定性的に判断するため、トレーサーテスト及び流動数値解析 (CFD) の手法を用いて、種々の大きさの沈殿池を想定したトレーサーテストシミュレーションを行い、スケールアップ時における沈殿池の性能の予測・評価をする事を試みた。

## 1. 槽内の流動状態と沈殿装置としての評価方法

### 1.1 トレーサーテストによる槽内流れの定性的評価<sup>1)2)3)</sup>

沈殿槽内に供給される水にトレーサーを瞬間的に投入する。その後槽から流出するトレーサー濃度を経時的に分析すると第1図に示すような応答が見られる。

時間  $t=0$  で投入されたトレーサーを  $\Delta t$  時間毎に  $n$  回サンプリングする時、各時間毎のサンプル濃度を  $C_n$  とすれば水理学的な平均滞留時間は次式で求めることができる。

$$t_a = \sum t_n \cdot C_n / \sum C_n \quad (1)$$

$t_a$  : 平均滞留時間 [ min. ]

$t_n$  : サンプリング時間 [ min. ]

$C_n$  : サンプル濃度 [ g/l ]

トレーサーの出口における応答から E 関数 (Exit Distribution Function) を求める。この E 関数は槽内の流体の滞留時間分布曲線である。

$$E(t_n) = C_n / \sum C_n \cdot \Delta t_n \quad (2)$$

$\Delta t_n$  : サンプリング間隔 [ min. ]

$E(t_n)$  : 時間の単位を有する E 関数 [  $\text{min}^{-1}$  ]  
(実時間基準)

ここで時間についても平均滞留時間で無次元化し、第2式を  $\theta_n$  で表すと、無次元 E 関数を得る

$$\theta_n = t_n / t_a \quad (3)$$

$$E = t_a \cdot E(t_n) \quad (4)$$

$\theta_n$  : 無次元のサンプリング時刻 [ - ]

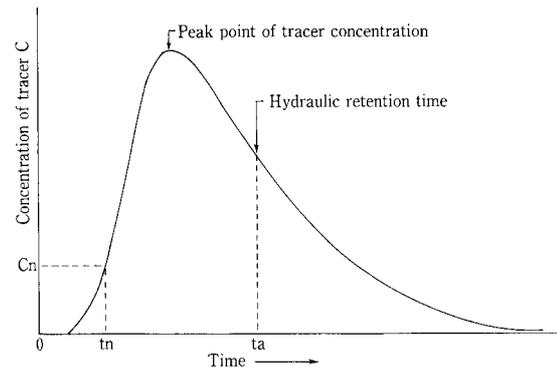
バリエンス (二次モーメント) は、平均滞留時間における分布曲線の分布の幅を与えるもので、次式により求められる。

$$\sigma^2 = \sum (\theta_n^2) \cdot E \cdot \Delta \theta - 1 \quad (5)$$

$\Delta \theta$  : 無次元のサンプリング間隔 [ - ]

$\sigma^2$  : バリエンス [ - ]

槽内に完全混合槽が直列に並んでいると仮定した多段槽列モデルは、槽内流れの定性的な評価法として用いる事が出来る。多段槽列モデルにおける槽数:  $J$  は、バリエンス



第1図 トレーサー応答曲線

Fig. 1 Typical Real Response Curve of Tracer

と次の関係にある。

$$\sigma^2 = 1 / J \quad (6)$$

傾向として、 $J$  値が大きいくほど槽内の流れは均等流 (栓流) に近づき、完全な栓流では  $J = \infty$  となる。また  $J$  値が小さいほど槽内が強い混合状態にあるか、または大きな循環流やショートパス等が存在する可能性がある。完全混合槽では  $J = 1$  である。第2図に多段槽列モデルにおける槽数  $J$  とそのトレーサー応答の理論値を示した

安定した固液分離のためには、乱れの少ない均等流であることが好ましく、出来るだけ  $J$  値が大きくなる条件を作り出す必要がある。

### 1.2 沈殿装置としての性能評価<sup>4)</sup>

齊藤らは、Fair らの提案した固形物の沈殿除去率の算定公式から求められた沈殿池性能係数を使用して、模型沈殿池のトレーサーテストの結果から沈殿池の性能評価を行った。

$$n = T_m - T_{m0} / T_m \quad (7)$$

$n$  : 沈殿池性能係数 [ - ]

$T_m$  : 無次元平均滞留時間 [ - ]

$T_{m0}$  : 流出トレーサー最大濃度時の無次元時刻 [ - ]

また沈殿池性能係数  $n$  の評価は次の通りであった。

$$\begin{array}{ll} n = 0 \cdots \cdots \cdots \text{最上} & n = 0.5 \cdots \cdots \cdots \text{やや不良} \\ n = 0.125 \cdots \cdots \cdots \text{優秀} & n = 1 \cdots \cdots \cdots \text{不良} \\ n = 0.333 \cdots \cdots \cdots \text{良好} & \end{array}$$

齊藤らの評価に対し、第1~6式より求められる理論槽数:  $J$  を適用した場合、槽数と評価の関係はおおよそ次のようになる。

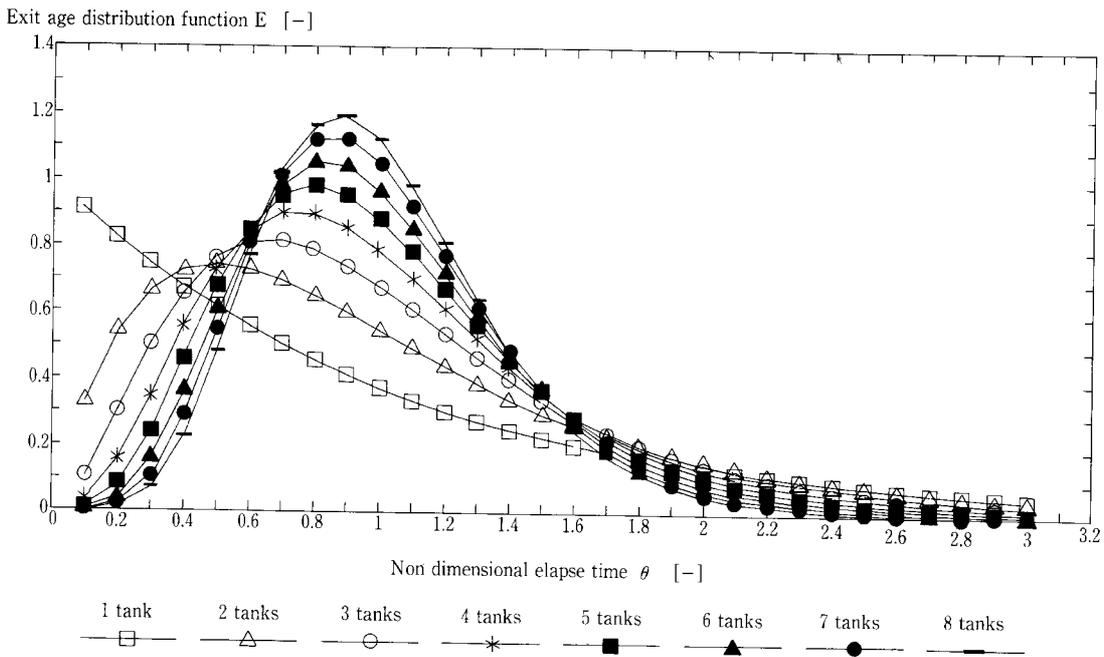
$$\begin{array}{ll} n = 0 \cdots \cdots \cdots J = \infty & n = 0.5 \cdots \cdots \cdots J \div 2 \\ n = 0.125 \cdots \cdots \cdots J \div 7 & n = 1 \cdots \cdots \cdots J = 1 \\ n = 0.333 \cdots \cdots \cdots J \div 3 & \end{array}$$

Fair らの既往研究における粒子除去率は次式で示される。

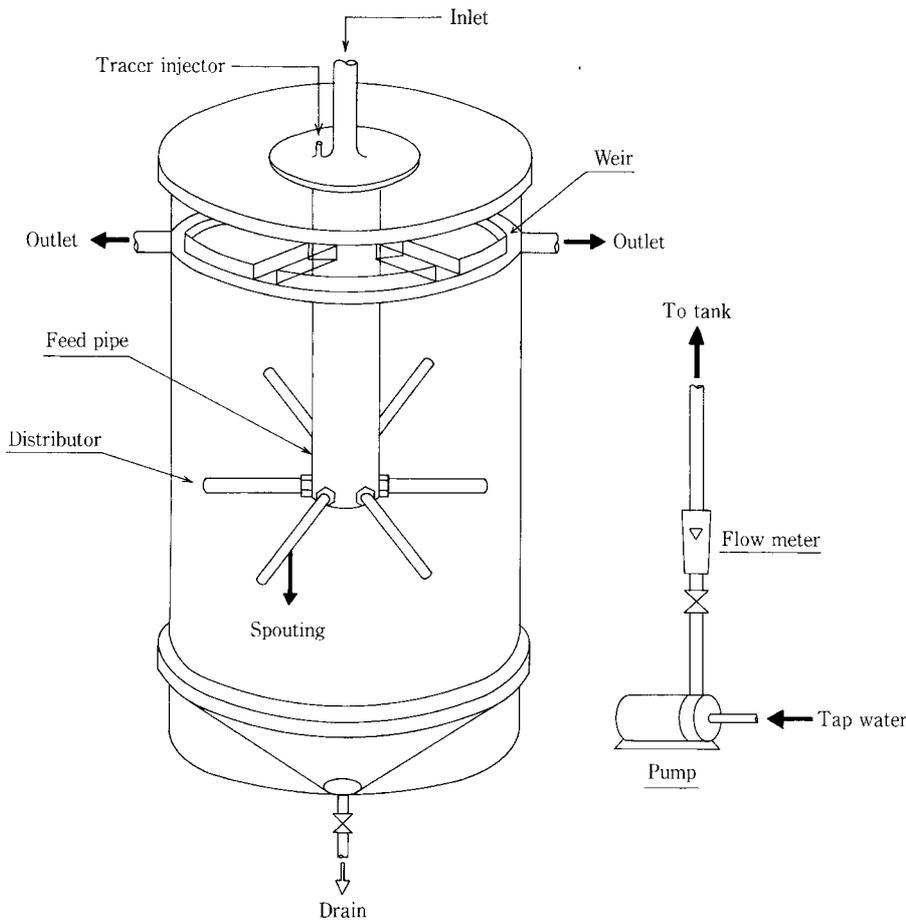
$$y / y_0 = 1 - (1 + nV_0 / (Q/A))^{-1/n} \quad (8)$$

$y$  : 除去粒子

$A$  : 水槽断面積



第 2 図 多段槽列モデルにおける槽数とその理論応答  
 Fig. 2 Theoretical Response curve in Continuous Stirred Tank Reactor Model



第 3 図 実験水槽の模式図  
 Fig. 3 Schematic diagram of experimental tank

$y_0$ : 流入粒子                     $Q$ : 流入水量  
 $V_0$ : 流入粒子沈降速度         $Q/A$ : 通水線速度 (LV)  
 $n$ : 第7式で求められる沈澱池性能係数

第8式より、流入粒子の沈降速度、槽内の通水線速度 (LV),  $n$  値が判れば沈澱装置の固液分離性能としての評価が可能になる。

## 2. 実験方法

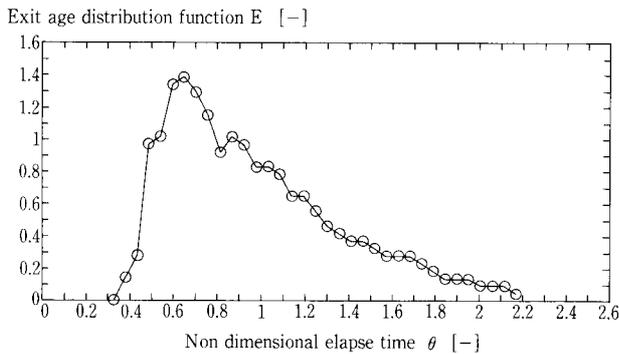
### 2.1 実験装置

沈澱槽内の流れの把握のため、実装置を模した実験水槽を製作し、実験に供した。実験装置を第3図に示した。

材質は透明塩化ビニル樹脂で、槽径1.4 m、水深1.6 mで槽容量は2.2 m<sup>3</sup>である。水は中央部の供給管より供給され、槽内に放射状に配したディストリビュータより下向きに噴射される。噴射流速はフロックの極端な破壊やまき上げ等が起らないような条件をあらかじめ実験で決めた。

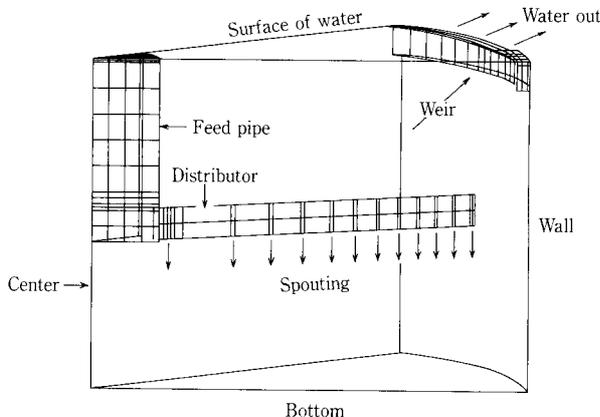
### 2.2 実験水槽におけるトレーサートテスト

テスト前に水を30分以上連続通水し流れを安定させた。トレーサは食塩水を用い、槽上部の投入口から瞬間的に投入した。更に流出水を一定時間毎にサンプリングし、サンプルの電導度を電導度計 (東亜電波 PW-10) で測定



第4図 実験水槽におけるトレーサートレスの一例

Fig. 4 An example of real response curve of tracer in experimental tank



第5図 数値計算モデル

Fig. 5 A sedimentation tank model for numerical calculation

し食塩濃度換算してデータとした。事前の検討結果から食塩量は40 g (槽当たり)とした。第4図に実際のトレーサートレスの一例を示した。

今回のテストはフロックの無い清水系で行った。フロックの存在下では、フロック層が水の整流効果をもたらすと思われ、槽本来の流れの把握の障害になると考えたからである。

### 2.3 槽内流れの数値シミュレーション

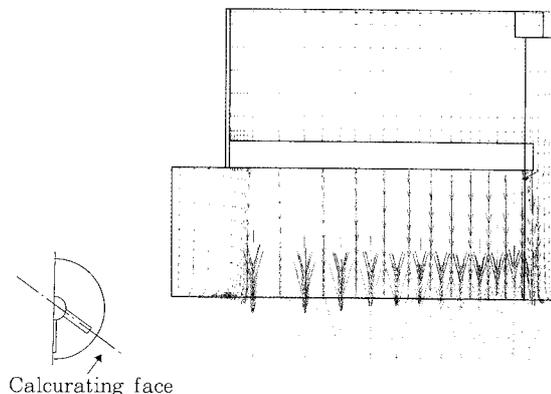
実装置における槽内流速の把握は、測定装置の精度とシステムの複雑さといった問題から、現時点では困難と言わざるを得ない。そこでCFDの手法を用いてトレーサートレスをシミュレートし、沈澱装置のスケールアップ時における性能への影響を予測する事を試みた。

流れを支配する方程式は連続の式、円筒座標系で記述される Boussinesq 近似を採用した時間平均 Navier-Stokes 方程式、時間平均エネルギー輸送方程式そして乱流エネルギーと粘性消散率の輸送方程式 ( $K-\epsilon$  モデル) であり、これら方程式を熱流体解析用のコードを用いて解き、沈澱池内の流速ならびにノズル先端から噴射されるトレーサの時々刻々の変化を求めた。解析では移流項に1次風上差分を採用し、また圧力の変化率が十分に小さくなり、流れが準定常に達した時を収束とみなし、この計算結果上で物質の輸送方程式を解いて沈澱池内のトレーサ濃度を求めた。境界条件は、流入部 (ノズル部) に所定の流速、乱流エネルギーと粘性消散率、トレーサ濃度を、また流出部 (越流堰部) には自然流入・流出条件を各々与えた。水面にはスリップ条件を沈澱池内の壁面にはノンスリップ条件 (対数則) を与えた。

第5図に計算に用いたモデルを、第6図に流速ベクトル計算結果の一例を示した。

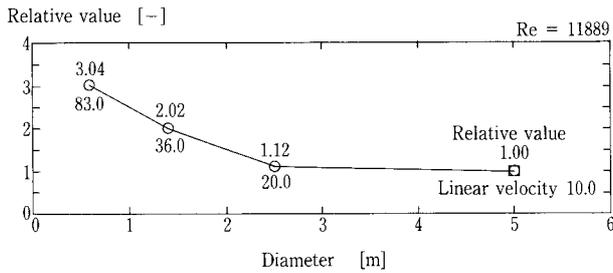
## 3. スケールアップの検討

前述のように実機サイズの水槽を用いて沈澱装置の性能に関するデータを採取する事は極めて困難である。従って小型水槽で得られたデータを実装置へ展開していく手法が取られる。ここでは、実験水槽で得られた結果と数値シミュレーションによる検討を加えて、スケールアップファクターならびにスケールアップ後の性能予測について検討を行った。



第6図 流速ベクトル図の計算結果の一例

Fig. 6 An example of velocity vector plot



第7図 レイノルズ数を一定としたときのトレーサテストシミュレーションの結果(槽径5mでの槽数Jの計算結果を基準とした相対値として表現)

Fig. 7 Computational tracer test result of each size of tank. Reynold's number is const. (express in relative value to  $\phi$  5 m tank's result J as a standard)

### 3.1 スケールアップファクターの検討

スケールアップを考える場合、実装置での現象を支配する物理法則が実験水槽でも同様に支配するにすればよい。槽内流れの現象を支配する主要因子は流体の粘性力と慣性力であると考えられ、これらの力から定義される無次元数であるレイノルズ数をスケールアップファクターとし、これを一定としたときに相似(レイノルズ相似則)が成立するかどうかを考察してみた。

検討範囲として水槽の径を0.6 m, 1.4 m, 2.5 m, 5.0 mの4通りとし、また水深/槽径比=1.0とした。槽形状は、水の噴射ノズルも含めて、レイノルズ相似則に基づき、槽径比例の幾何学的相似とした。通水量は槽径5.0 mの場合の通水線速度(流量/断面積、以下LV)を10 m/hrとし、この時のレイノルズ数を基準に各々の通水量を決定した。

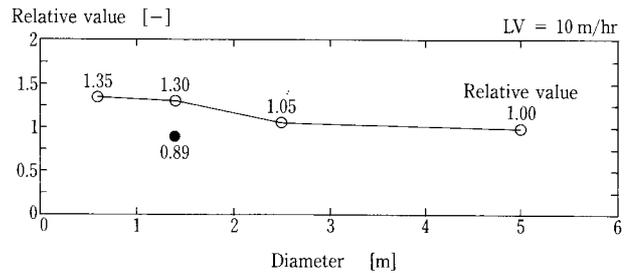
第7図に槽内のレイノルズ数を一定としたときの数値解析におけるトレーサテストの結果を示した。本結果の絶対評価は実機での実証をしない限り不可能であるため、本稿では槽径5.0 mの数値解析による槽数J(以下単にJ)を基準とし、各槽径のJ値を相対値で評価した。相対値が大きいほど槽内流動はより均等流に近づく事を意味する。

もしレイノルズ数を一定とした相似が成立するならば、相対値は槽径によらず一定になるはずであるが、槽径2.5 m以下で急激に増加し、0.6 mと5.0 mとでは相対値に3倍の開きが認められ、相似が成立していないと考えられる。これは、レイノルズ数一定のため、槽径が小さくなるほどLVが大きくなるためであると思われる。従ってこの事例では単純に槽内レイノルズ数を一定とした相似を適用するのは無理があり、単位時間、単位断面積当たりの流量を一定として考える必要があると思われる。

### 3.2 スケールアップが性能へ与える影響の検討

次いで前項同様の条件で、幾何学的相似を保ったまま解析を行い、これが沈澱池としての性能にどのような影響を与えるかを検討した。但し、LVは前項のテスト結果を受け、全てのケースで実機の運転条件と同等の10 m/hrに設定した。なお、水深/槽径比は1.0とした。第8図にLVを同一にした場合の数値解析上におけるトレーサテストのこの結果を示した。

この結果、水深/槽径比1.0の場合、槽径1.4 mの実験水槽に対し、槽径5.0 mまでスケールアップした場合の性能



第8図 槽内通水線速度(LV)一定としたときのトレーサテストシミュレーションの結果(槽径5mでの槽数Jの計算結果を基準とした相対値で表現)

Fig. 8 Computational tracer test result of each size of tank. Linear velocity is const. (express in relative value to  $\phi$  5 m tank's result J as a standard)  
●: shows in case of the result of water depth diameter ratio=0.38

低下については、槽数として約30%の低下を見ておく必要があると考えられた。

ここで、槽数の減少が沈澱池の性能にどのように影響するかを具体的に考察してみた。

槽径1.4 mの水槽実験におけるJ値は、およそ4.5槽であった。これは1.2項に示した既往研究の例では“良好”にランクされ、この時の第7式におけるn値は12点の実験値の平均から0.353であった。J値の30%低下は、槽径5.0 mではおよそ3.2槽になると考えられる。J=3.2の時のn値は12点の実験値の平均から0.421であった。今仮に沈澱池内の粒子の沈降速度 $V_0=11$  m/hr, LV=10 m/hrとすれば、実験水槽の結果を第8式に代入すると

$$y/y_0 = 0.605 \quad [-]$$

次に槽径5.0 mの解析結果(J=3.2)も同様に代入すると、

$$y/y_0 = 0.595 \quad [-]$$

ここで5.0 mのLVを10 m/hrから9.6 m/hrに落とした場合、

$$y/y_0 = 0.607 \quad [-]$$

よって水深/槽径比=1の条件下では、J値が4.5→3.2へ30%低下したことによる粒子除去率の低下は、LV値で5%程度の減少だけで十分回避しようと考えられた。

しかし実際の大型沈澱池は、槽径が水深に対し大きく、水深/槽径比は1以下である。このため、槽径13 m, 水深5.0 mの装置を想定した考察を行なった。但し、このような大型の解析を他の例と同精度で行うには、例えば槽径0.6 mの約4000倍もの解析メッシュを必要とし、コンピュータの能力も考えた場合現実的ではなかった。従って槽径=1.4 m, 水深/槽径比=0.38(5/13=0.38)としてまず解析を試みた。

その結果、第8図に示したように、J値の相対値は0.89であり、水深/槽径比が1→0.38になれば相対値が1.30→0.89と30%程度低下すると予想された。またスケールアップによる効果は、これまでの結果から、槽径1.4 m→5.0 mで30%程度低下すると推定されるため、槽径13 m水深5.0 mといった大径の沈澱池では、実験水槽の少なくとも50%以上の槽数低下が生じると推定され、この時Jは2.3槽以下であると推定される。

この結果から第8式に従って同様に検討すると、

- (1) J値40%ダウン (2.7槽) ...  $y/y_0=0.577$
- (2) J値50%ダウン (2.3槽) ...  $y/y_0=0.563$
- (3) J値60%ダウン (1.8槽) ...  $y/y_0=0.550$

となり、仮に実験水槽での結果から推定される除去率=0.605にまで回復させるには、LV値をそれぞれ、(1)LV=9.0, (2)LV=8.5, (3)LV=8.1にまで減少させなければならず、そのままでは実験水槽で得られる除去性能を満足出来ない恐れがあると考えられる。

沈澱値性能係数nは第8式より、トレーサー応答のピークが平均滞留時間=無次元時間 $\theta=1$ からどれだけ離れているかで決まり、離れているほどnは大きくなって除去率は低下する。第2図から理解出来るように、J=2とJ=3とではピークの出現する位置が大きく違うのに対し、J=3以上であれば、Jの増加に対し、ピーク出現位置の変化は小さい。この事及び上述の検討結果から、実機における槽数は3以上に保つことが実験装置で得られた沈澱池性能を維持する上で望ましいと考えることが出来る。

これらの結果は数値解析による検討であるため、精度検証のため、実際のフィールドにおいて確認実験を行う必要があるが、これらのデータを蓄積してデータベース化すれば、実際の沈澱池設計や稼働中の沈澱池の性能評価、トラブルの未然防止やトラブルシューティングといった事に応用することが可能になると思われる。

## むすび

本稿ではCFDの手法を凝集沈澱装置内の流れ解析に適

用し、トレーサーテストをシミュレートする事により、スケールアップの沈澱池性能に与える影響を中心に予測・評価を行った。その結果レイノルズ数をスケールアップ因子とし、これを一定として行うことは、今回のような事例では無理があることが示唆された。またトレーサーテストの結果から求められる沈澱池性能係数より、沈澱池の性能評価を行い、実験装置レベルでの粒子除去性能を維持させるためには、槽例モデル槽数J=3以上を実機で保つ必要があることが示唆された。

現在、これらから得られた結果などを基に、容量約7 $m^3$ のパイロットテスト機において、模擬廃水を使用した処理テストを実施しており、LV=10 m/hrの条件において良好な固形物除去性能を示している。今後は、本稿で述べた結果について更に大型のフィールドでの確認テストを行い、沈澱池設計や稼働中の性能評価へ活かしていく事が必要であり、より確かな性能でユーザにご満足頂ける装置開発に役立てていきたい。

## 【参考文献】

- 1) 井本立也：反応工学，日刊工業新聞（1970）
- 2) O. Levenspiel et al.：“Notes on the diffusion-type model for the longitudinal mixing of fluids in flow”，Chem Eng Sci. 6 pp 227-233（1957）
- 3) R. J. Tekippe et al.：“Model Studies of A Peripheral Feed Settling Tank”，PROC. ASCE. J. Sanitary Eng. Div. 94 SA-1 pp 85-102（1968）
- 4) 齊藤ら：“中央供給型沈澱池と周辺供給型沈澱池の性能比較”，下水道協会誌 31 No 371 pp 57-63（1994）

## 連絡先

須田 龍生 技術開発本部  
開発企画室  
TEL 078-992-6525  
FAX 078-992-6504  
E-mail t.suda@pantec.co.jp

小西 嘉雄 技術開発本部  
研究開発部  
TEL 078-992-6525  
FAX 078-992-6504  
E-mail y.konishi@pantec.co.jp

高田 一貴 技術開発本部  
(工学博士) 研究開発部  
TEL 078-992-6525  
FAX 078-992-6504  
E-mail k.takata@pantec.co.jp