

〈研究発表〉

高速沈殿槽の流体解析モデルの確立と処理性能評価

田中 夕佳¹⁾, 出 健志²⁾, 松代 武士²⁾, 高橋 秀昭¹⁾¹⁾ 東芝インフラシステムズ(株) 水・環境プロセス技術部
(〒212-8585 川崎市堀川町72-34 E-mail: yuka.hiraga@toshiba.co.jp)²⁾ 東芝インフラシステムズ(株) システム制御・ネットワーク開発部
(〒183-8511 東京都府中市東芝町1 E-mail: takeshi2.ide@toshiba.co.jp)

概要

産業排水処理では、水中懸濁物質を沈降分離させ、清澄な処理水を得る沈殿槽が多く採用されている。沈殿槽は、原水水質や処理規模によって処理性能が異なり、装置の大型化においては構造検討や性能検証期間の長期化、費用増大などの問題があった。そこで、CFDにより槽内の懸濁物質の挙動を可視化して沈殿槽の処理性能を評価する解析モデルを立案した。単位面積当たりの処理量4 m/hの高速沈殿槽を対象に解析結果と実測データを比較し、その妥当性を検証した。さらに、本解析モデルにより高速沈殿槽のスケールアップに対する処理性能を評価した。

キーワード：CFD、数値流体力学、沈殿槽、重力沈降、排水処理

原稿受付 2020.7.3

EICA: 25(2・3) 111-115

1. はじめに

産業排水処理では、薬剤を注入して懸濁物質（以下、SS: Suspended Solid）をフロック（凝集物）とした後、沈降分離させ、清澄な処理水を得る沈殿槽が多く採用されている。沈殿槽に流入した排水は、上昇流とともに槽上部より処理水として排出される。この時、流体抵抗で水の流れと共にフロックが上昇するため、処理水として槽上部からフロックが流出しないよう、装置構造を適切に設計する必要がある。

これまで、フロックの流出を抑制するための装置構造を検討するに当たっては、構造が異なる複数の沈殿槽を製作して処理性能を検証していた。しかしながら、沈殿槽のサイズが大型化するほど、装置構造の検討や製作、性能検証に要する期間が長期化することや、費用が増大することなどが問題となっていた。

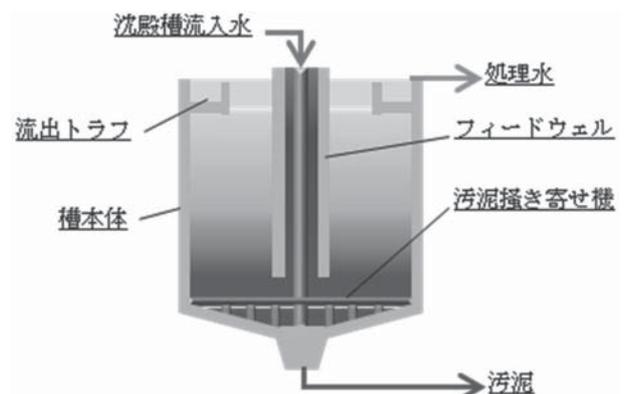
そこで著者らは、単位面積当たりの処理量（以下、水面積負荷）が4 m/hの高速沈殿槽を対象として、CFD（Computational Fluid Dynamics, 数値流体力学）解析を用いて、沈殿槽内におけるフロックの挙動を可視化し、沈殿槽の処理性能（処理水SS濃度）を求める解析モデルを確立した。

本報告では、解析結果と実証データの比較をすることで、解析モデルの妥当性を評価した。また、本解析モデルを用いて高速沈殿槽のスケールアップに対する処理性能を評価した結果について報告する。

2. 対象システムおよび評価方法

2.1 高速沈殿槽

今回、対象とする高速沈殿槽の基本構成を Fig. 1 に示す。高速沈殿槽は、フロックを沈降分離するための円筒型の沈殿槽本体と、その中心部に排水の流入部となる円筒型のフィードウェルが設置されている。排水はフィードウェル上部から流入し、フィードウェルの下方から槽内へ短絡流が発生しないよう、フィードウェル下部に設けられた分散機構により水平方向に均一に分散供給される。水平方向に分散された排水は、槽内壁面と衝突することで上昇流となり流出トラフへ向かい、槽内にせり出た流出トラフの底面により、その上昇流速を抑えることで、内向きの循環流となり槽内に滞留する。その流れの中で、フロックが沈降分離され、処理水は流出トラフ壁を越流して槽外へ均等に排出される。沈降分離したフロックは円周方向に回転

Fig. 1 Structure of high-rate Clarifier¹⁾

する汚泥掻き寄せ機によって槽下部中央に集められ汚泥として槽下部より排出される。

2.2 解析方法

高速沈殿槽の処理水 SS 濃度を以下の方法にて解析することで処理性能とした。

- (1) 静水中での重力沈降速度を変数とした質量粒子の軌跡を CFD 解析にて可視化し、沈降速度別に質量粒子の流出トラフからの流出率を算出
- (2) 解析対象とする実証試験での沈殿槽流入水の沈降速度別 SS 濃度をビーカー試験から算出
- (3) 以下に示す計算方法にて高速沈殿槽処理水の SS 濃度を計算

解析境界条件および解析方法を **Table 1** と **Table 2** に示す。今回、 $\phi 3$ m と $\phi 5$ m の円筒型の高速沈殿槽

Table 1 Boundary condition for CFD simulation

境界		単位	円筒型	
			$\phi 3$ m モデル	$\phi 5$ m モデル
入口	質量流量一定 Q	kg/sec (m ³ /h)	7.85 (28.3)	21.8 (78.5)
	水面積負荷	m/h	4.0	
出口	圧力一定	kPa	0	0
内径		m	$\phi 3$	$\phi 5$

Table 2 Condition for CFD simulation

ソフト	Siemens STAR-CCM+®
バージョン	Ver. 13.04.010
流体	非圧縮性流体 (密度一定)・水 (密度 1,000 kg/m ³)
乱流モデル	k- ϵ
数値解法	分離型流れ陰解法非定常解析
	1次精度
粒子解析	ラグランジェ混相
	質量粒子
	サイズ: $\phi 1$ mm
	密度: 沈降速度毎に 4 種類 静水中の沈降速度
	粒子 1 (0.5 m/h) 粒子 2 (1.6 m/h) 粒子 3 (3.1 m/h) 粒子 4 (6.0 m/h)

について解析した。入口条件は、それぞれ、水面積負荷が 4 m/h となる 7.85 kg/sec (28.3 m³/h), 21.8 kg/sec (78.5 m³/h) の流量一定とし、出口圧力一定 (0 kPa) として解析した。解析メッシュは、汎用流体解析ソフト STAR-CCM+® を使ってポリヘドラルメッシュにて作成した。解析作動流体は非圧縮性の水 (密度 1,000 kg/m³) とし、槽下部に設置した汚泥掻き寄せ機が回転する部分は回転領域、その他は静止領域とし、粒子軌跡はラグランジェ混相流として k- ϵ 乱流モデルにて分離型流れ陰解法非定常解析を実施した。質量粒子は $\phi 1$ mm の球状の剛体粒子と仮定し、静水中での重力沈降速度が小さいものから粒子 1~粒子 4 として密度を調整した。解析時間は、解析開始後、槽内の流れが定常になる時間から質量粒子を投入し、各粒子の流出が定常状態になるまで解析し、粒子別に流出率を求めた。

次に、処理水 SS 濃度を計算するため、対象とする沈殿槽流入水をサンプリングし、静置時間ごとの上澄み水の SS 濃度を測定した。静置時間から沈降速度を計算し、沈降速度別の SS 濃度 (SS_n) を求めた。さらに、対応する沈降速度の質量粒子の流出率をかけた総和を処理水 SS 濃度とした。(式(1))

$$\text{処理水SS濃度 [mg/L]} = K \times \sum (SS_n \times \text{流出率}_{\text{粒子}n}) \quad (1)$$

ここで K は、沈殿槽内での凝集フロックの成長にて沈降性が向上することによる処理水 SS 濃度の低下分を補正する係数であり、 n は、沈降速度が異なる粒子 1~4 に対応する番号である。

2.3 実証試験と解析モデルとの比較評価

解析モデルによる性能評価の妥当性を確認するため、インドの某工業団地の集合排水処理場内に高速沈殿槽の試験プラントを建設し、実排水を用いた実証試験を行った。この実証試験の試験フローを **Fig. 2** に示す。実証試験に用いた高速沈殿槽の仕様は **Table 1** に示した $\phi 3$ m モデルと同様である。実排水の原水は **Fig. 2**

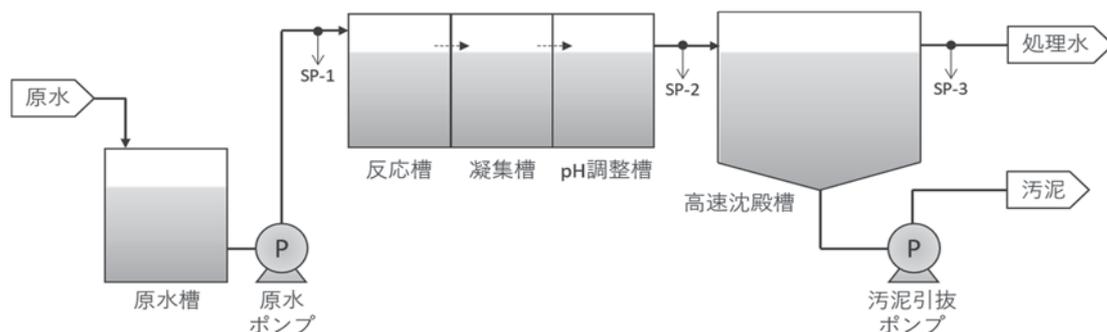


Fig. 2 Pilot plant test Process Flow Diagram

Table 3 Quality of Raw water and Treated water in Pilot plant test

条件 No.	原水 SS 濃度 (mg/L)	処理水 SS 濃度 (mg/L)
No. 1	84	11
No. 2	114	≤5
No. 3	112	8
No. 4	246	≤5
No. 5	346	≤5

の SP-1 より、沈殿槽流入水は SP-2 より、処理水は SP-3 よりサンプリングした。実証試験による原水 SS 濃度、および、処理水 SS 濃度の分析結果を **Table 3** に示す。今回、解析対象とする静置時間ごとの上澄み水の SS 濃度は、**Table 3** に示した各条件において測定した。処理水の SS 濃度実測値が解析値より安全側、即ち解析値が実測値より高くなり、かつ処理水 SS 濃度の目標値以下であれば、作成した解析モデルが高速沈殿槽の処理性能評価に用いることができると判断した。

2.4 スケールアップへの適用性評価

より大型の高速沈殿槽への解析モデルの適用性を評価するため、**Table 3** で示した5条件について、2.2章と同様の方法で、φ5 m モデルの処理水 SS 濃度の算出し、スケールアップに対する高速沈殿槽の処理性能を予測した。

3. 結 果

3.1 解析結果

φ3 m モデルの高速沈殿槽における流速ベクトルの解析結果と沈降速度別粒子軌跡を **Fig. 3** に示す。本図は、槽内における SS 挙動を把握するため、槽全体の流速ベクトルから線積分畳み込み法 (Line Integral Convolution) により、流れ場全体の大局的な性質を一断面で可視化した図である。また、各位置の流速を凡例に従って表示した。フィードウェル下方から流入後、分散機構により水平方向に均等分散し、水平に流れたあと槽内壁面と衝突することで上昇流となり流出トラフへ向かう流れとなっている。上昇流は、流出トラフから処理水として排出される流れと、槽内にせり出た流出トラフの底面に衝突により槽内側への循環流となり槽内に滞留していくことが確認できる。一方、分散流の一部は、沈殿槽下方に回り込んだ後に上記の上昇流に合流している。また、A 地点での上昇流速は、0.004m/s(14 m/h) となった。

沈降速度別粒子軌跡において、沈降速度が小さい粒子 2 は、フィードウェルから水平に均等分散後、沈降せずに槽内壁に当たり上昇流によって流出した。ただし、粒子 2 の一部は、槽上側の循環流によって分散しながら沈降する傾向がみられた。やや沈降速度が大きい粒子 3 は、槽下方に回り込む流れの中で沈降して槽下部中心に向かって集められているが、僅かに沈降しきれず上昇流によって流出した。沈降速度が大きい粒子 4 は、フィードウェル下方で水平方向に均等分散さ

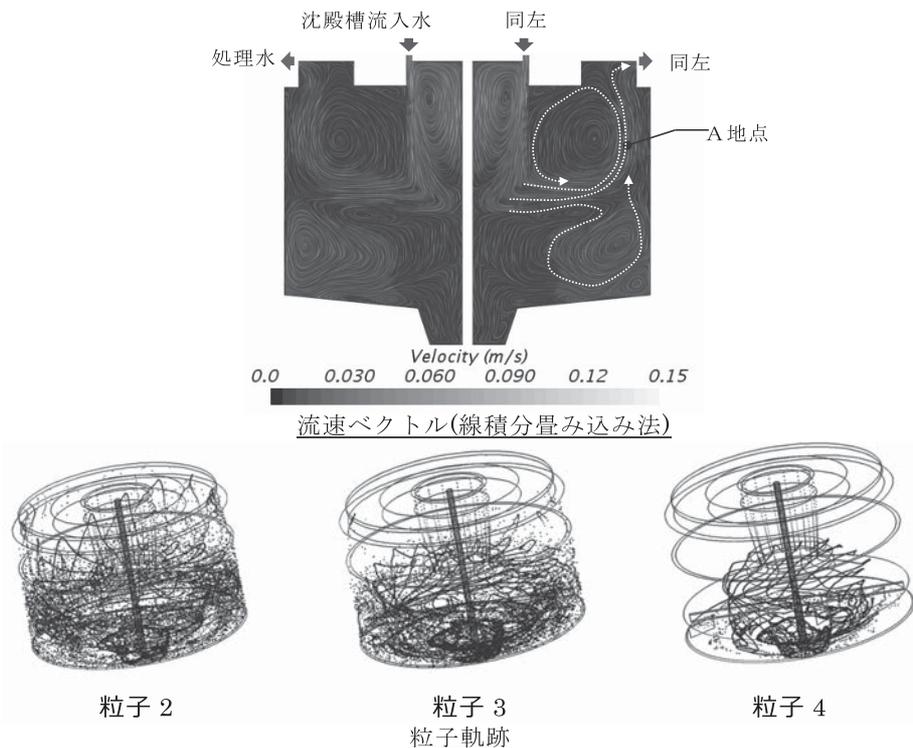


Fig. 3 Velocity vector plot and Stream line path for each particle type (φ3 m model)

れた分散流の間に沈降し、掻き寄せ機にて槽下部中心に集められていく様子を可視化できた。

3.2 実証試験と解析モデルとの比較評価結果

3.1 章における $\phi 3$ m モデルの解析結果と **Table 3** から導いた沈降速度ごとの流入水 SS 濃度 (SS_n) から、式(1) を用いて処理水 SS 濃度の解析値を算出した。処理水 SS 濃度の解析値と実証試験における処理水 SS 濃度の実測値との関係について、解析値と実測値の違いを **Table 4** に示す。原水 SS 濃度の違う実排水 5 条件に対して、処理水 SS 濃度の解析値と実測値を比較したところ、全ての条件において解析値が実測値より高く、かつ、目標とする処理水 SS 濃度を 20 mg/L とした場合、それ以下となる解析結果となった。以上により、高速沈殿槽の実際の処理性能に対して、解析による処理性能は安全側に評価ができていないことを確認した。

3.3 スケールアップ評価結果

Table 3 で示した条件について $\phi 5$ m モデルの処理水 SS 濃度の解析を行い、スケールアップに対する高

Table 4 Comparison of simulation value and measurement data

条件 No.	処理水 SS 濃度 実測値 (mg/L)	処理水 SS 濃度 解析値 (mg/L)	処理水 SS 濃度 目標値 (mg/L)
No.1	11	13.6	20
No.2	≤5	4.5	
No.3	8	9.7	
No.4	≤5	9.0	
No.5	≤5	6.6	

速沈殿槽の処理性能を予測した。 $\phi 5$ m モデルの高速沈殿槽断面における流速ベクトルの解析結果と沈降速度別粒子軌跡を **Fig. 4** に示す。また、各モデルにおいて、処理水 SS 濃度の解析値が最も高い値をそのモデルの処理性能とした。 $\phi 3$ m モデルと $\phi 5$ m モデルの処理性能を **Table 5** に示す。

$\phi 5$ m モデルでは、 $\phi 3$ m モデルより径が大きい為、槽中心から槽内壁までの距離が長く、フィードウェルからの水平分散流全体が沈殿槽の下方に沈み込む流れとなっている。また、 $\phi 5$ m モデルの構造は $\phi 3$ m モデルからの相似でスケールアップしており、 $\phi 5$ m モデルは $\phi 3$ m モデルの 2 倍長くせり出ている。この構造の違いにより、槽内側への循環流量が $\phi 3$ m モデルより多くなっている。また、B 地点での上昇流速は、0.005 m/s(18 m/h) となった

$\phi 5$ m モデルの沈降速度別粒子軌跡は、沈降速度が小さい粒子 2 及びやや大きい粒子 3 で、フィードウェルから水平に均等分散後、分散流の全てが掻き寄せ機によって流れが乱れる沈殿槽下方に沈み込みこみ、粒子が拡散された状態となり上昇流によって流出した。ただし、この上昇流で運ばれた粒子の一部は、沈殿槽上側の循環流で槽内に分散しながら滞留している間に沈降した。沈降速度が大きい粒子 4 は、 $\phi 3$ m モデル

Table 5 Evaluation result of the treatment performance

	水面積負荷 (m/h)	処理量 (m ³ /h)	原水 SS 濃度 (mg/L)	処理水 SS 濃度 (解析値) (mg/L)
$\phi 3$ m モデル	4	28.2	84	13.3
$\phi 5$ m モデル	4	78.4	84	13.0

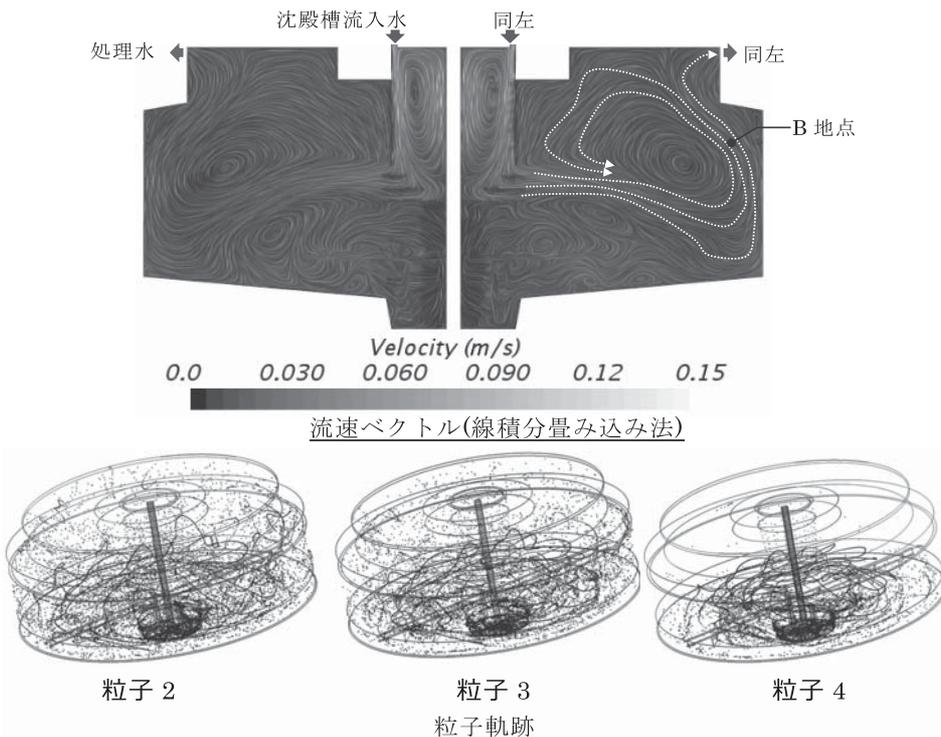


Fig. 4 Velocity vector plot and Steam line path for each particle type ($\phi 5$ m model)

Table 6 Outflow rate of particles to treated water for each particle type

	粒子1 (0.5 m/h)	粒子2 (1.6 m/h)	粒子3 (3.1 m/h)	粒子4 (6.0 m/h)
φ3 m モデル	91%	55%	4%	0%
φ5 m モデル	72%	39%	23%	1%

(括弧) 静水中の沈降速度

と同様に分散流で沈降し掻き寄せ機によって沈殿槽の中央に集められていることが確認された。

ここで各粒子の流出率を **Table 6** に示す。粒子3は、前述したφ5 m モデルにおけるフィードウェルからの分散流の沈み込みによる粒子拡散の影響で、φ3 m モデルの流出率4%に対してφ5 m モデルでは流出率23%と高くなった。分散機構による水平分散流の中で沈降しきれない粒子1や粒子2は、φ3 m モデルが壁面A地点で上昇流速0.004 m/s (14 m/h)、φ5 m モデルが壁面B地点で上昇流速0.005 m/s (18 m/h) と速い上昇流の中では沈降分離はできない。しかし、φ5 m モデルの方が流出トラフのせり出し長さの影響で循環流量が多い分、循環滞留時の沈降が増え、流出率がφ3 m モデルより抑えられた。スケールアップをすることで流れの乱れが発生し、処理性能の悪化が懸念されたが、槽径による構造の違いにより沈降速度が

小さい粒子の流出を抑えられた結果、φ3 m モデルとφ5 m モデルでは処理性能は同等となった。

4. おわりに

単位面積当たりの処理量が4 m/hの高速沈殿槽を対象として、沈殿槽内におけるフロックの挙動を可視化し、処理性能を評価する解析モデルを確立した。解析結果と実証データの比較することで、本解析モデルが高速沈殿槽の処理性能の評価に適用できることを確認した。さらに、φ3 m モデルに加え、φ5 m モデルにも本解析モデルを適用したところ、両者は同等の処理性能となる見込みが得られた。本解析モデルを用いることにより、特に大型の高速沈殿槽の設計や装置構造の検討に係る期間および費用の低減につなげることが期待できる。今後、より大型の高速沈殿槽への適用性も視野に、解析モデルの有効性を検証していく。

参考文献

- 1) (株)東芝 東芝インフラシステムズ(株): 日本特許, 特許第6301860号(2018)