

越流堰配置の異なる最終沈殿池の三次元密度流解析

中日本建設コンサルタント(株) ○高見澤 光佑、金井 あゆみ、中根 進

最終沈殿池の池内の流れは密度流であることは古くから知られており、筆者の一人は、有限要素法を使い最終沈殿池の二次元断面モデルを密度流で解析し、沈殿池内の流速分布や越流堰からの越流水濃度を示した。今回、越流堰の配置が異なった 2 例の最終沈殿池の密度流をフリーソフト OpenFOAM の有限体積法を使って三次元モデルで解析した。その解析結果より沈殿池内の流向と汚泥濃度分布を明らかにするとともに越流堰からの越流水濃度などを示した。

Key Words : 最終沈殿池、標準活性汚泥法、OpenFOAM、有限体積法

1. まえがき

最終沈殿池では反応槽から活性汚泥(以降、反応槽混合液と云う)が流入し、活性汚泥フロックを沈降させることにより、固液分離して処理水(上澄水)を得ている。反応槽混合液は、固形物濃度を持ち、密度、温度や粘性が清水と異なることにより、これらの流体が接すると密度流が発生する。1984 年版下水道指針には「……密度流の受けない位置に設ける越流せきの……」¹⁾の表現があり、最終沈殿池の流れが密度流であることを示唆している。また、文献²⁾、³⁾では実験や数値解析で最終沈殿池の流れを密度流で扱っている。

筆者の一人は、最終沈殿池の二次元断面モデルで有限要素法を使い密度流によって沈殿池内の流速分布や越流堰からの流出濃度を示した⁴⁾。本稿では、越流堰の配置が異なった 2 例の最終沈殿池の密度流を、有限体積法を用いて三次元モデルで解析した。その解析事例と得られた越流堰からの流出濃度などについて紹介する。

2. 最終沈殿池モデル

標準活性汚泥法の設計諸元⁵⁾を使って最終沈殿池モデルを以下のように設定する。

(1) 流量諸元

流入水量 : $3,750\text{m}^3/\text{日}$ 、返送汚泥量 : $750\text{m}^3/\text{日}$ 、越流量 : $3,000\text{m}^3/\text{日}$
滞留時間 : $(20.0\text{m} \times 6.0\text{m} \times 3.0\text{m}) / 3,000\text{m}^3/\text{日} = 0.12\text{日} = 2.88\text{hr} = 10,368\text{sec}$
流入流速 : $3,750\text{m}^3/\text{日} / 86,400\text{sec}/\text{日} \div (\text{水路幅 } 0.6\text{m} \times \text{水深 } 0.4\text{m}) = 0.181\text{m}/\text{sec}$

(2) 沈殿池諸元

水面積負荷 : $25\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{日})$ 、池長 : 20.0m 、池幅 : 6.0m 、水深 : 3.0m
越流堰負荷 : $150\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{日})$
越流堰長 : $6.0\text{m} \times 2\text{列} \times 2\text{トラフ} = 24.0\text{m}$ 、トラフ幅 0.6m
越流堰配置① 縦断方向 : 流れ方向

越流堰配置② 横断方向：流れと直角方向

越流水深 : 10cm

越流断面流速：3,000m³/日が越流するように、 $v=0.0145\text{m/sec}$ と設定

汚泥掻寄速度：0.3m/min(池底と水面上流の一部)

汚泥引抜管径： $\phi 0.25\text{m}$

解析に用いる 2 例の沈殿池各部の諸元を図-1 に示す。ここで、越流堰の名称は OUTLET1 ~OUTLET4 とし、縦断方向のものは上流に向けて右から順に名付け、横断方向のものは下流に向かって順に名付けた。

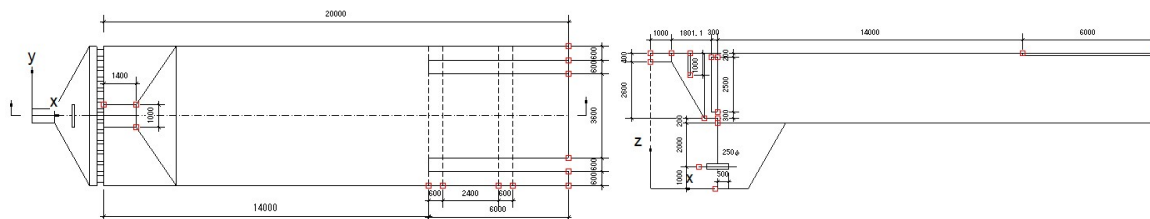


図-1 最終沈殿池形状と越流堰配置（縦断方向と横断方向）

(3) 反応槽混合液(活性汚泥)諸元

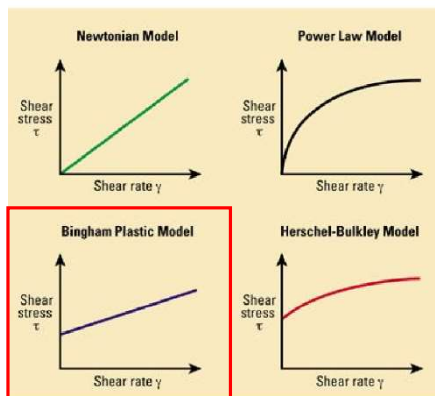
流体 : ビンガム流体(塑性流体)

固形物濃度: 2,000mg/L (0.2%) (反応槽 MLSS 濃度)

図-2 に、ずり速度とずり応力による流体の種類を示す⁶⁾。清水は、図中の Newtonian Model で表し、最終沈殿池に流入する反応槽混合液は Bingham Plastic Model で表す。なお、筆者の一人は、重力濃縮汚泥や機械濃縮余剰汚泥の流動特性値を明らかにし報告している^{7)、8)}。

低濃度濃縮汚泥 (TS 濃度 2%) と高濃度濃縮汚泥 (TS 濃度 3.83%) のずり速度とずり応力の関係をそれぞれ図-3、図-4 に示す。濃縮汚泥は濃度が低くなるほどビンガム流体(Bingham Plastic model)の特性を示し、高濃度になると擬塑性流体(Power Law Model:べき乗則モデル)の特性を示す。

Rheological Models



X-Y plots of rheological models.

図-2 流体の種類 (ずり速度とずり応力の関係)⁶⁾

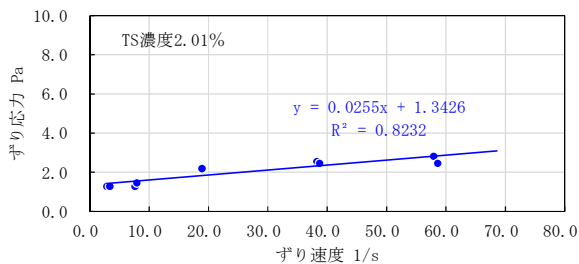


図-3 低濃度濃縮汚泥のずり速度とずり応力の関係

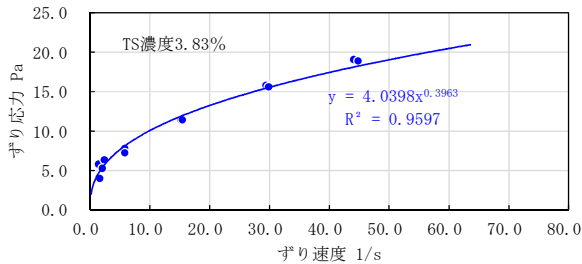


図-4 高濃度濃縮汚泥のずり速度とずり応力の関係

(4) 解析ソフト

今回解析に用いる OpenFOAM(Open source Field Operation And Manipulation)は、有限体積法を中心とする解析を無料で利用できるオープンソースソフトである。本稿では、OpenFOAM に付属している標準ソルバー⁹⁾のうち混相流解析(界面追跡法/多流体モデル)ソルバーを使って解析する。このプログラムは反応槽混合液をビンガム流体¹⁰⁾として扱っており、実際の物性値が使われている。

最終沈殿池の池内流速は不均一のため、越流堰からの流速は一定とならない。そこで、引抜汚泥管からの返送汚泥を 750 m³/日になるような引抜流速を与えて計算を試みたが、計算が発散してしまうことから、返送汚泥の引抜をフリーの境界条件とした。

なお、反応槽混合液(活性汚泥)の物性は、上記混相流/解析ソルバーの標準値を用いた。

反応槽混合液 // ビンガム塑性

水 // ニュートン流体

“(plastic|BinghamPlastic)Coeffs”

動粘性係数 1.78e-06 m²/sec

coeff 0.00023143;

密度 1000 kg/m³

exponent 0.17926;

BinghamCoeff 7.845e-07;

BinghamExponent 95.25;

BinghamOffset 0;

動粘性係数 Max 10;

密度 1042 kg/m³

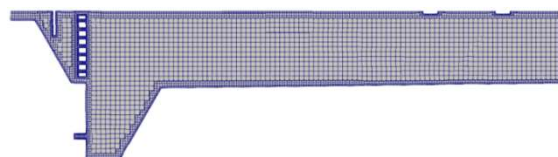


図-5 解析に利用したメッシュ

(5) 最終沈殿池モデルの作成

最終沈殿池の形状と解析に使用する壁面等の境界面の名称設定は、フリーソフト FreeCAD Ver. 0.19 を使い、メッシュの作成は、フリーソフト cfMesh を使い作成した。解析に使用したメッシュの一例を図-5 に示す。

3. 最終沈殿池の解析結果

3.1 最終沈殿池内流向

沈殿池内の流向(滞留時間 $t = 10,800\text{sec} = 3.0\text{hr}$)を図-6 に示す。なお、図中の流向の着色は、流速を表している。

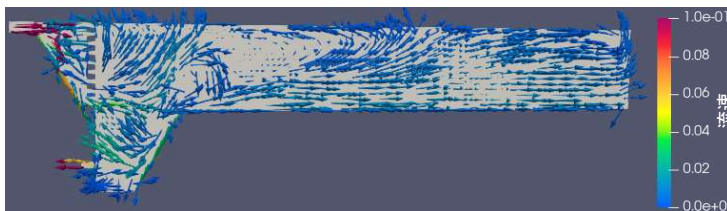


図-6 沈殿池内中央部の流向(縦断方向 $t = 10,800\text{sec}$)

図-7、図-8 に、越流堰からの流出濃度が高くなった計算

時間 $t = 4,000\text{sec}$ における沈殿池上流・中央部(整流壁から沈殿池の流れ方向 $x=4.0\text{m}$ 、 10.0m 、 12.0m)の流速分布を示す。これを見ると、上流部ほど水面から深い位置まで逆流しているが、 $x=4.0\text{m}$ 位置では水深 3.7m (池深 4.3m)まで流入方向に流れ、 $x=12\text{m}$ 位置では逆流はみられなくなった。

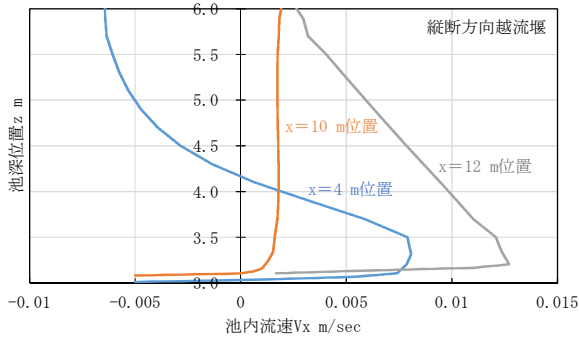


図-7 沈殿池上流・中央部流れ方向の流速
(縦断方向越流堰 t = 4, 000sec)

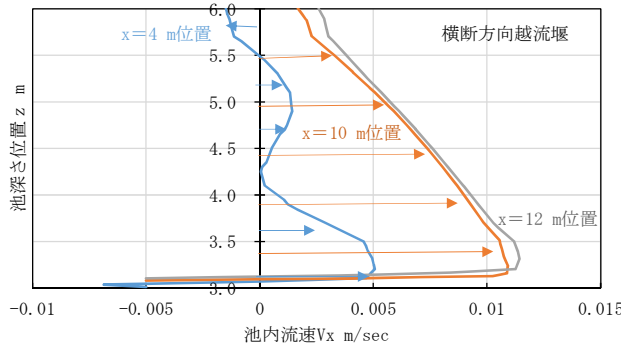


図-8 沈殿池上流・中央部流れ方向の流速
(横断方向越流堰 t = 4, 000sec)

次に、経過時間 $t=1,000\text{sec}$ 初期における流入から越流堰に至る流線を図-9、図-10に示す。阻流壁に当たった流れは、池底の両側壁面付近を流下して越流堰に達しており、その後、水面付近の逆流が発生してくる。

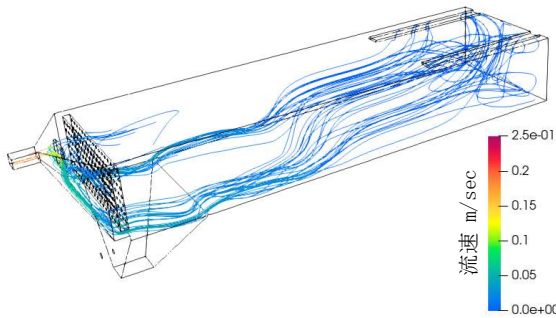


図-9 流入から越流堰に至る流線 ($t=1,000\text{ sec}$)
【越流堰配置：流れ方向】

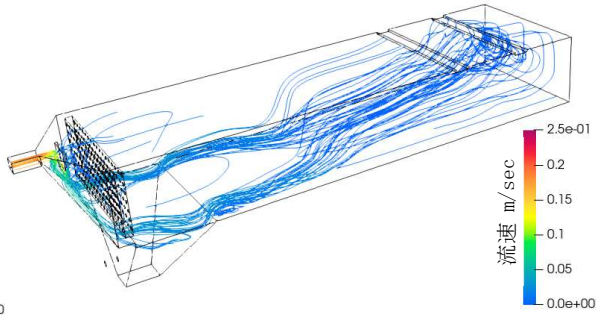


図-10 流入から越流堰に至る流線 ($t=1,000\text{ sec}$)
【越流堰配置：流れと直角方向】

3.2 汚泥の沈降状況

濃度 0.6% ($6,000\text{mg/L}$) 以上を汚泥として、経過時間 $t=5,000\text{sec}$ における沈殿池の流れ方向中央部の濃度分布を図-11に示す。水深が深くなるに従い高い濃度を示しており、 10m 位置の底部濃度が 4.0m 位置より濃度が高く、 12m 位置には底部に汚泥が堆積していない。

次に、汚泥ホopp中央部(沈殿池上流から 0.7m 位置)の深さ方向の濃度分布を図-12に示す。汚泥引抜管位置をホopp底部から 1.0m に設定したので、汚泥引抜管の中の濃度(返送

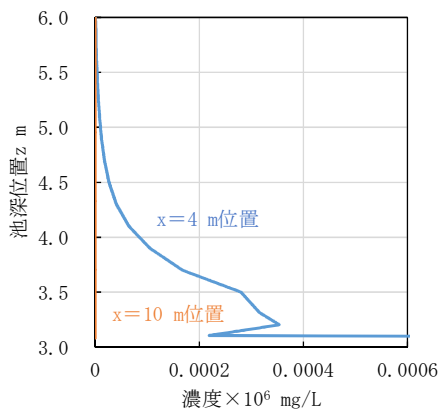


図-11 沈殿池上流から 4.0 、 10.0m 位置の中央部の濃度(縦断方向越流堰 $t=5,000\text{sec}$)

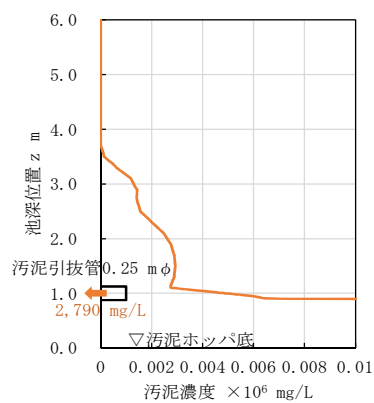


図-12 汚泥ホopp中央部の濃度(縦断方向越流堰 $t=10,800\text{sec}$)

汚泥濃度)は、0.65% (6,491mg/L) になっている。返送汚泥濃度の設計値は、返送汚泥比 25%、MLSS2,000mg/L から次式¹⁰⁾で求まり、返送汚泥比 $R = \text{MLSS} / (\text{返送汚泥濃度} - \text{MLSS})$ より MLSS10,000mg/L が必要である。本解析例の沈殿池縦断方向の中央部の汚泥濃度分布を図-13、図-14 に示す。本解析では、汚泥引抜管による汚泥引抜により引抜管回りの汚泥濃度は 3,214mg/L と低い濃度となっているが、引抜管以深では高濃度となっているので、設計の返送汚泥濃度 10,000mg/L を得るには、引抜管の吸込口をホップ底部に下げることがある。

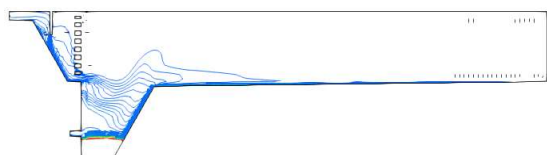


図-13 沈殿池内中央部の汚泥濃度分布
(縦断方向越流堰 t = 10,800 sec)

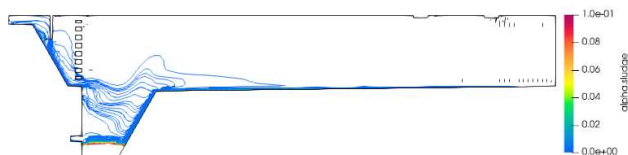


図-14 沈殿池内中央部の汚泥濃度分布
(横断方向越流堰 t = 10,800 sec)

3.4 越流水濃度(処理水濃度)

各越流堰の越流水深と越流長で表わされる越流領域(面積)の流出濃度の平均値を求め、図-15、図-16 に示す。縦断方向越流の沈殿池(図-15)では、側壁に近い OUTLET1、OUTLET4 の越流堰からの越流水濃度は低く、池中央の OUTLET2、OUTLET3 からの越流水濃度は高くなる結果となった。

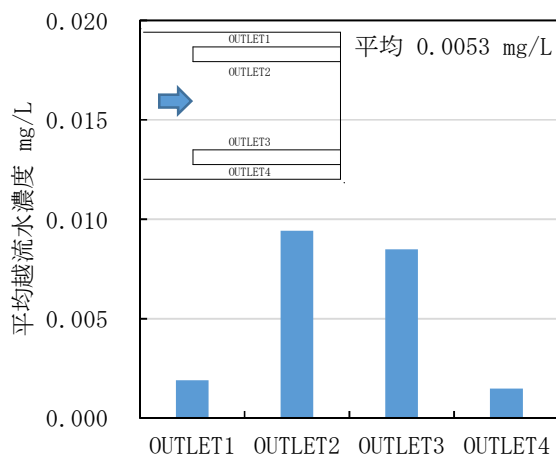


図-15 越流堰からの平均流出濃度
(処理水濃度 t = 10,800 sec)

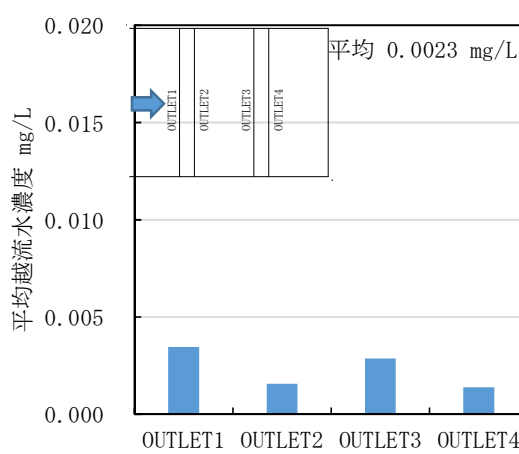


図-16 越流堰からの平均流出濃度
(処理水濃度 t = 10,800 sec)

なお、本モデルの設定滞留時間は 2.88hr (2. (1)参照) であるが、10,800sec (3.0hr) まで計算し、経過時間ごとに越流堰の平均越流水濃度を整理したグラフを図-17、図-18 に示す。経過時間による平均越流水濃度には一定の傾向は見られず、計算途中の 4,000sec が最も高濃度となり、その後低下する結果となった。

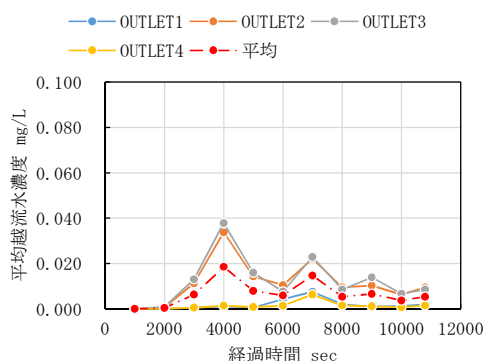


図-17 経過時間ごとの越流堰平均越流水濃度(縦断方向越流堰)

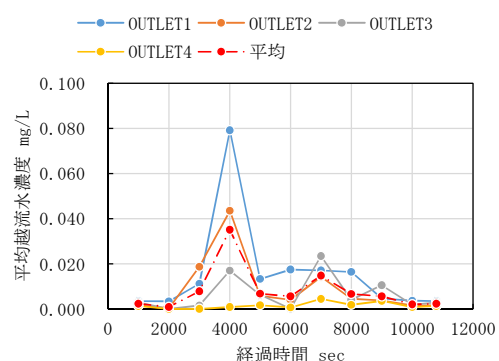


図-18 経過時間ごとの越流堰平均越流水濃度(横断方向越流堰)

4. まとめ

- (1) 沈殿池内流向：筆者の一人が報告した二次元解析でも水面付近の逆流現象は認められたが、三次元解析においても越流堰の配置如何によらず逆流現象が生じた。この逆流は実施設でも容易に観察でき、解析の妥当性を確認できる。
- (2) 縦断方向越流堰の設定滞留時間 10,800sec における越流水濃度(処理水濃度)は、横断方向越流堰の越流水濃度より、わずかではあるが高い濃度を示した。

以上より、流入濃度 MLSS 等が刻々と変動する実施設との検証はなされていないものの、本解析手法は雨天時活性汚泥処理法(3W処理法)を導入している処理場など、水量・水質負荷が増加した際の最終沈殿池の流況変化等の検証に適用できる可能性が示唆された。

<参考文献>

- 1) 日本下水道協会：下水道施設設計指針と解説 1984年版 p301
- 2) 栗谷 陽一・楠田 哲也：く形沈殿池における密度流と死水 土木学会論文集 第 168 号 1969年8月
- 3) 藤崎一裕 他：横流式沈殿池における密度流の挙動 水工学論文集 第 45 号, 2001年2月
- 4) 高見澤 光佑・中根 進：密度流による最終沈殿池の流体解析 2018年第55回下水道研究発表会 N-3-3-4 日本下水道協会
- 5) 日本下水道協会：下水道施設設計指針と解説 後編 2019年版 pp. 95-98
- 6) SLB社サイト (https://glossary.slb.com/en/terms/h/herschel-bulkley_fluid)
- 7) 若尾 貞仁・畔柳 裕充・中根 進 他：圧力計測式粘度測定装置および実管による濃縮汚泥の流動特性について 2021年第58回下水道研究発表会 N-10-4-2 日本下水道協会
- 8) 藁科 亮・若尾 貞仁・中根 進 他：圧力計測式粘度測定装置による濃縮汚泥の流動特性調査 2022年第59回下水道研究発表会 N-10-2-4 日本下水道協会
- 9) OpenFORM チュートリアル (<https://www.xsim.info/articles/OpenFOAM/Tutorials.html>)
- 10) 日本下水道協会：下水道施設設計指針と解説 後編 2019年版 p. 64