

# 垂水処理場東 1 系 最終沈殿池水理特性調査

計画課水質計画担当

東灘処理場本場、西部処理場 2 系、垂水処理場東 1 系、玉津処理場 2 系の最終沈殿池では集水管式 2 階層最終沈殿池が採用されている（西部 2 系、垂水東 1 系は越流堰との併設）。

多階層式沈殿池は限られた敷地の効率的な利用に有効であるが、一方、現場では①流量が増減した際に、各層に均等に流入しているか確認し難い、②最終沈殿池自体が圧力損失を有し（特に下層）、流量増大時に水位が上昇しやすく、処理量が限られる。③下層は目視できないため、汚泥のキャリーオーバーなどの異常が分かりづらい。など問題が見られる。

垂水東 1 系においては、現在集水管を使用せず、ほぼ末端の越流堰からのみ流出させている。また、現在工事中である垂水東 2 系は集水管と枝管の配置、及び集水孔の方向が変更できるような構造となっており、これらを最適化して、SS 流出などの問題を起こさないようにしたい。

今回は、集水管式 2 階層最終沈殿池の調査の一環として垂水東 1 系の現状、すなわち越流堰のみ使用したときの水理特性を調べるために、トレーサ調査を行ったので報告する。

## 1. 調査概要

条件： 前日より集水管の流出可動堰を全閉にし、越流堰からの流出のみとした。  
トレーサ物質： リチウム（アルコールにより比重約 1kg/L に調整した塩化リチウム溶液）  
調査場所： 垂水東 1 系 4-2 池

### (1) 上下層流量比の調査

調査方法： 上層流末の越流堰から数 m 上流より、一定流量でトレーサを滴下し、流出水を採水した。

採取箇所： ①1-4 上層越流堰、②1-4 下層越流堰、③上下層越流堰混合後。

他の条件については表 1 の通り。

表 1：上下層流量比の調査

	1 回目	2 回目
調査日	2021 年 8 月 3 日	2021 年 11 月 2 日
トレーサ滴下速度	約 30mL/min	約 220mL/min
採水頻度	滴下 8 分後より 4 分毎に 3 回	滴下 8 分後より 40 秒毎に 11 回

## (2) トレーサ調査

調査日：2021年10月6日

調査方法：終沈流入ゲートからトレーサを池容量に対して1mg/Lになるように添加し、流出水を採水した。

採取箇所：① 1-4 上層末端水面  
② 1-4 下層末端水面  
③ 1-3 上層末端水面から1m程度（比較池）  
④ 1-3 上層末端水面から1m程度（比較池）

採水頻度：①、② 0分~180分 5分間隔  
180分から360分 15分間隔  
360分から600分 30分間隔  
③、④ 60分間隔

## 2. 結果と考察

### (1) 上下層流量比の調査

流量比の調査結果を表2及び3に示す。

サンプリング時間[min]	リチウム濃度[mg/L]		
	上層	下層	混合後
8	0.15	0.01	0.07
12	0.09	0.01	0.12
16	0.06	0.01	0.10
平均	0.10	0.01	0.10

サンプリング時間[min]	リチウム濃度[mg/L]		
	上層	下層	混合後
8.00	1.0	0.01	1.3
8.67	1.2	0.01	1.1
9.33	1.2	0.01	1.2
10.00	1.0	0.01	1.3
10.67	1.1	0.01	1.2
11.33	1.1	0.01	1.6
12.00	1.5	0.01	1.6
12.67	2.8	0.01	1.6
13.33	1.8	0.01	1.5
14.00	1.8	0.01	1.5
14.67	1.6	0.01	1.8
平均	1.5	0.0	1.4

今回の調査において、混合後の想定濃度はそれぞれ0.23mg/L（1回目）、2.6mg/L（2回目）であった。しかし、混合後のリチウム濃度の平均はそれぞれ0.10mg/L、1.4mg/Lとなった。また、上層のリチウム濃度の平均も0.10mg/L、1.5mg/Lと混合後とほぼ同じ濃度であった。調査が正しく行われたとすると、上層と混合後のリチウム濃度がほぼ同じであることから、下層にほとんど水が流れていないことになる。しかしながら現地で見える限りにおいては、下層の越流堰からも十分な量の流出が見られたため、実情を表しているとは考え難い。この原因として、①添加方法、②上向流の影響が考えられる。

## ① 添加方法の影響

上層のリチウム濃度が低い原因として考えられるのが、添加方法である。本調査において、リチウムは  $34 \times 10^3 \text{mg/L}$  に調整し（密度  $1.00 \text{kg/L}$ ）、上層の末端から数 m 上流に設置したポリタンクより滴下した。滴下速度はポリタンクのコックの開度によって調整した。滴下後速やかに鉛直及び水平方向に分散すると考えたが、後述するように垂水東 1 系における流れは層流であり、鉛直及び水平方向にはあまり分散しなかった可能性がある。上層のサンプリングは添加点の直下を避けた 2 か所から行ったため、濃度が低くなったことが考えられる。

一方、混合後の濃度が想定より低かったことについては、添加方法の不備は考えにくい。なぜなら、混合後の採水点直前で（添加点の直下を含む）上層、下層から越流水が集まり、十分に混合されていると考えられるからである。

## ② 上向流の影響

混合後の濃度が想定より低かったことについては、上向流の影響と考えている。垂水東 1 系では水は流末付近まで、上層、下層ともに層流で水平方向にのみ流れている。一方、流末ではそれに加えて堰に向かっての上向きの流れが加わる。そのため、上層流末での上向きの流れが、表層を流れるリチウムの希釈要素となり、想定より濃度が低くなった可能性がある。

しかしながら、物質収支を考えると説明がつかないので、採取時間の延長などを行い、流末付近の水の流れ方について理解することが必要である。

## (2) トレーサ調査

調査日の運転状況を表 4 に示す

1-4反応槽流入量	15,557	$\text{m}^3/\text{day}$	10/6日報
1-4終沈引抜汚泥量	9,504	$\text{m}^3/\text{day}$	10/6日報
返送率	61	%	-
最終沈殿池寸法	幅8.1m×長81.8m×深3.5m（上層・下層共）		管理年報
最終沈殿池容量	4,672	$\text{m}^3/\text{池}$	管理年報
水面積	1,335	$\text{m}^2/\text{池}$	-
滞留時間	432	min	-
水面積負荷	11.7	$\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$	-

各採水点での調査結果を図 1 に示す。

1-4 池上層はトレーサ投入後 85 分から濃度が上昇し始め、130 分後、最大濃度  $0.95 \text{mg/L}$  になり、その後なだらかに低下し、480 分後に  $0.20 \text{mg/L}$  の最小になった後、再び上昇し始め、600 分後には  $0.26 \text{mg/L}$  になっている。この濃度上昇の原因はわからない。

1-4 池下層はトレーサ投入後 100 分後から濃度が上昇し始め、170 分後に最大濃度  $1.08 \text{mg/L}$  になり、その後一様に低下し、600 分後の濃度は  $0.16 \text{mg/L}$  であった。

また、1-3 池は上層下層に関わらず、 $< 0.01 \text{mg/L} \sim 0.02 \text{mg/L}$  の範囲であり、600 分までは返送汚泥による影響がないことが分かった。

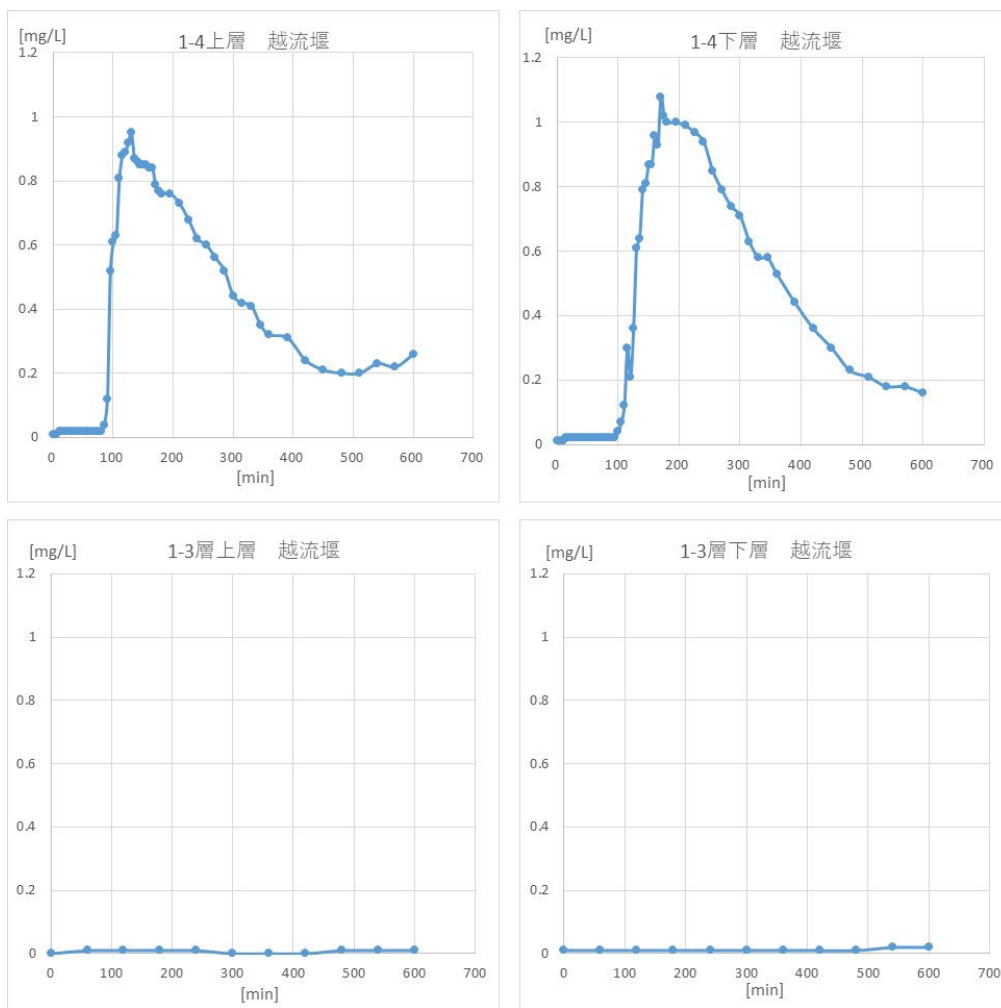


図1：1-4池トレーサ調査結果

① 平均滞留時間の算出

図1で分かるように、今回採水した600分後の時点では、トレーサはまだすべて回収されていない。そこで、ピークトップ以降について、指数関数として濃度が0.01mg/L（時間0における濃度と同じ）になるまでフィッティングし、平均滞留時間を求めた。フィッティングの結果を図2に、それによって求めた滞留時間などを表5に示す。

表5：ピーク時間と平均滞留時間

	1-4上層	1-4下層
ピーク時間 [min]	130	170
平均滞留時間 [min]	336	328

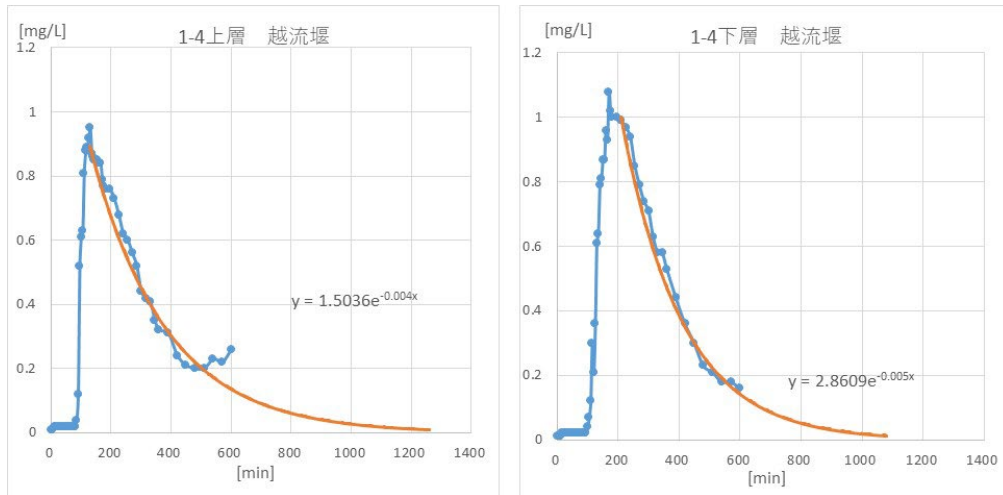


図2：1-4池フィッティング結果

② 最終沈殿池内での水の流れ方の推定

最終沈殿池内でどのように水が流れているかをレイノルズ数を使って判定する。

レイノルズ数とは式(1)で表される、慣性力と粘性力との比で定義される無次元数である。流れが粘性力が支配的（層流）であるか、慣性力が支配的（乱流）であるかを知る指標となる。

$$Re = \rho UL / \mu \quad \dots(1)$$

U：代表速度 m/s

L：代表長さ m

$\rho$ ：密度 kg/m<sup>3</sup>

$\mu$ ：粘性係数 kg/(m・s)

最終沈殿池における代表速度と代表長さは、下記のとおりである。この時、最終沈殿池の断面積は図3のようになっているが、模式的に幅 4.05m 深さ 3.5m の開水路（上層）2条と配管（下層）2条からなる。代表速度についても下記のように算出した。ここで、上層と下層との流量比は 1：1 としている。（(1)上下層流量比の調査で流量比が分からなかったため。）

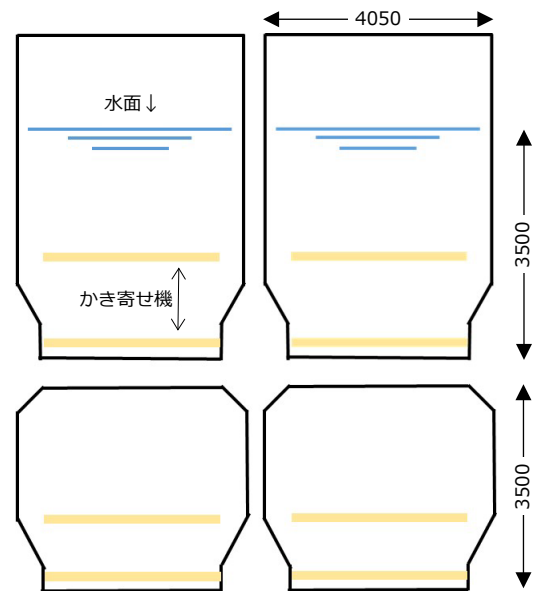


図3：垂水東1系最終沈殿池断面概要

代表長さ（上層）：  $Lu = 4 \times (4.05 \times 3.5) / (3.5 + 4.05 + 3.5) = 5.13 \text{ m}$

代表長さ（下層）：  $Ll = 4 \times (4.05 \times 3.5) / (4.05 + 3.5 + 4.05 + 3.5) = 4.89 \text{ m}$

代表速度：  $U = (15557/4) / (4.05 \times 3.5) = 274.67 \text{ m/day} = 0.00318 \text{ m/s}$

また、水温 28℃における水の各物性、密度  $\rho = 996.233 \text{ kg/m}^3$ 、粘度  $\mu = 0.8359 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$  より、上層と下層におけるレイノルズ数は以下のようなになる。

$$Re \text{ (上層)} = 19.4$$

$$Re \text{ (下層)} = 14.2$$

一般に、

層流：  $Re < 4 \sim 25$

遷移領域：  $4 \sim 25 < Re < 1000 \sim 2000$

乱流：  $Re > 1000 \sim 2000$

と言われている<sup>3)</sup>。これより、今回の調査時においては、上層、下層共に層流であったといえる。

### ③ 平均滞留時間に及ぼすかき寄せ機の影響

表5よりトレーサ調査から求まる平均滞留時間（上層 336min、下層 328min）は、表4より計算から求まる平均滞留時間（432min）に比べて早い。この原因として考えられるのが、かき寄せ機による流れの遮りである。

かき寄せ機は幅約 4.05m、高さ 0.18m であり、池の底を 0.3m/min の速度で下流から上流へ、池の上部から中部を上流から下流へ移動している。

今回の調査では層流が保たれているので、底面のかき寄せ機のことを考慮して、鉛直方向の流速の分布を推測すると、図4のようになっていると考えられる。

図4より、平均滞留時間を求める際に必要となる寸法の内、水深はかき寄せ機によって流れが影響する部分を減算（今回は 0.3m）したほうが良いと思われる。また、最終沈殿池への流入量としては、反応槽流入量にかき寄せ機によって逆向きに流れる水量を加算したほうが良いと思われる。

以上を反映して補正した、1-4 池反応槽流入量、沈殿池寸法、沈殿池容量及び滞留時間を表6に示す。補正された滞留時間は 346min となり、調査結果との差は約 15 分と短縮された。

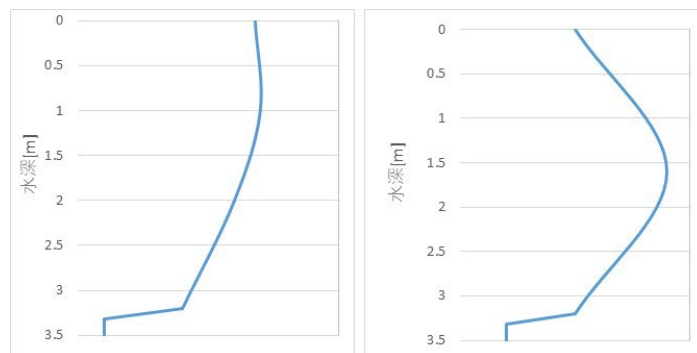


図4：1-4 池の鉛直方向流速模式図（左：上層（開水路）右：下層（角型配管））

表6： かき寄せ機を考慮して補正した運転状況（垂水東系1-4池）

1-4反応槽流入量	17,657	$m^3/day$	かき寄せ量を加算
最終沈殿池寸法	幅8.1m×長81.8m×深3.2m（上層・下層共）		整流壁から流出ピットまで
最終沈殿池容量	4,241	$m^3/池$	トまで
水面積	1,212	$m^2/池$	-
滞留時間	346	min	-
水面積負荷	14.6	$m^3/m^2 \cdot day$	-

④ 層流管型反応器モデルとの比較

理想的な層流管型反応器における、トレーサの濃度分布は下式(2)であらわされる。

$$E(\theta)=0 \quad (0 \leq t < t_{ave}/2), \quad E(\theta)=1/\theta^3 \quad (t \geq t_{ave}/2) \quad \dots(2)$$

t : 実時間

t<sub>ave</sub> : 平均滞留時間

θ : t/t<sub>ave</sub>

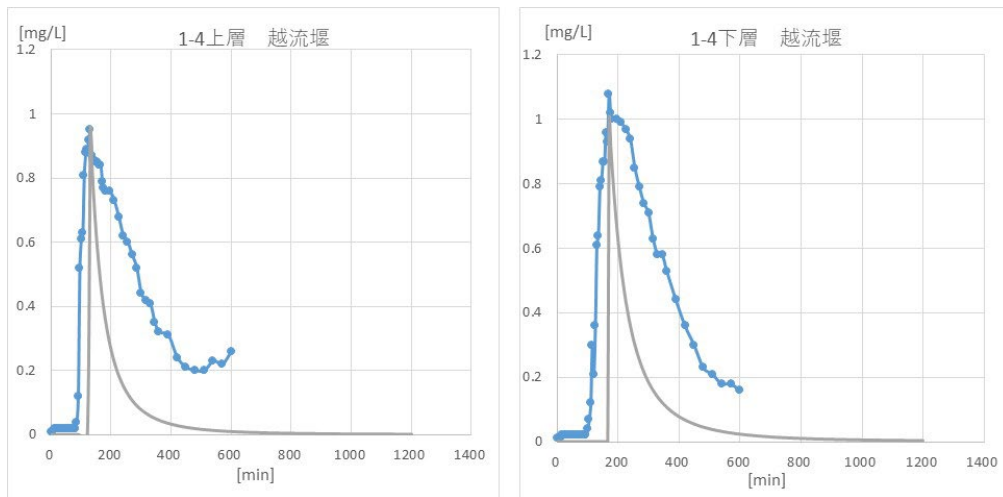


図5：1-4池トレーサ調査と層流管型反応器との比較

最終沈殿池は上層も下層も円管型ではなく、理想状態でもないが、比較のために式(2)で求めた濃度曲線を重ねたものを図5に示す。この時、ピーク時間を t<sub>ave</sub>/2 に、その時の濃度を実験と同じになるようにした。

層流管型モデルの鉛直方向の流速の分布は、端（壁）側が 0、中央が平均速度の 2 倍になるような放物線を描く。またピーク時間は平均滞留時間の半分の時間になる。

下層はピーク時間が 170min、平均滞留時間が 328min と層流管型モデルとよく似た挙動を示している。一方、濃度の上昇はトレーサ投入 100min 後から始まり、モデルとは少し異なる。これは速度に直すと、0.82m/min と補正した流入量より算出した平均速度 0.24m/min の 3.5 倍であり、モデルから考えてもずいぶん早く、ショートパスの可能性を示唆している。

また、ピーク時間からの濃度減少については、モデルの濃度曲線に比べて、緩やかではあるが、同様の傾向を示している。濃度の減少が緩やかなのは、トレーサの投入がパルスではあるが 3 分程度かかっていることと、部分的な流れの乱れによる拡散によるものと思われる。

上層はピーク時間が 130min、平均滞留時間が 336min と層流管型モデルとは異なる挙動となる。これは、図4で示すように鉛直方向の流速の分布が層流管型モデルとは大きく異なるためと考えられる。

ピーク時間が 130min であることから、上層のほうが流量が多いことが推測される。しかしながら、平均滞留時間は上層のほうが長い。図5を見ても、濃度の減少がより緩やかである。

流れの特徴に加え、下層と同様、投入時間の長さや部分的な流れの乱れの影響と考えられる

が、よくわからない。

平均滞留時間から流入量を求めると、9085 m<sup>3</sup>/day(上層)、9314m<sup>3</sup>/day(下層)、18400m<sup>3</sup>/day (全体) となる。

⑤ 流れへのかき寄せ機による影響

かき寄せ機は底面の泥を排除した後、最終沈殿池の上部から中部を水の同じ方向に動く。この時、水の速度が速く、かき寄せ機速度を上回る部分では、かき寄せ機の板が邪魔板のように作用する可能性がある。

垂水東1系では最終沈殿池の形状から、水の平均速度が他の処理場よりも早く、今回の調査では 0.24m/min であった。これは水深によってはかき寄せ機の速度を上回っていることを示している。

今回、調査中、比較池である 1-3 池上層において、SS が高い傾向が見られたため、追加で 1-3 池上層、下層の SS を調査した。その結果を表 7 に示す。これを見ると、上層のほうが SS は全体的に高く、特に 360 分や 600 分では 10 以上である (0 分で SS が 11 と高いのは、ホース内の汚れを拾ってしまった可能性がある)。一応に高く、時折局所的により高い値を示していることから、通常時に比べて流れに何らかの乱れがあることが考えられるが、かき寄せ機の可能性も考えられる。

表 7 : 1-3 池の SS

経過時間	1-3上層	1-3下層
[min]	SS	SS
0	11	3
60	3	2
120	1	1
180	3	1
240	2	1
300	3	1
360	10	1
420	3	1
480	4	<1
540	2	<1
600	18	<1



### (3)過去の調査との比較

H26に行われたトレーサ調査の結果を表8に示す。

この時は、越流堰と集水管出口の可動堰を同じ高さに調整し、調査を行った。また、当日の処理水量は13855m<sup>3</sup>/day（1-4池のみ）であった。表5と比較すると、H26のほうが処理水量が少ないにもかかわらず、平均滞留時間が短い。

		1-4上層 オーバーフロー	1-4上層 集水管	1-4下層 オーバーフロー	1-4下層 集水管
ピーク時間	[min]	165	150	180	135
平均滞留時間	[min]	313	284	308	196

### 3. まとめ

垂水東1系最終沈殿池の水理特性について調査を行い、

- (1) 上層、下層共に層流を保って流下していることが分かった。
- (2) 越流堰のみ使用時のトレーサ調査を行い、平均滞留時間が約330分であることが分かった。
- (3) 上記の平均滞留時間は、沈殿池容量から計算した平均滞留時間と大きく異なるが、かき寄せ機の沈殿池底部に占める体積及びかき寄せ機によってできる逆向きの流れを考慮して再計算すると比較的良く再現できた。
- (4) ピーク時間からは上層の速度が速いことが示唆されるが、平均滞留時間からは逆の結果が得られた。
- (5) かき寄せ機が上流から下流に移動する際に、流れを乱している可能性がある。
- (6) 上下層の流量比については、調査方法を含め、さらなる検討が必要であることが分かった。

### 4. 今後の検討課題

- (1) 越流堰、集水管付近での上向流について計算、影響について推測できないか。
- (2) 最終沈殿池、及び流出堰、集水管での圧力損失を計算することで、上層と下層への水の流入割合を推定することはできないか。
- (3) 反応槽出口から整流壁までの流れを整理することで、上層と下層への汚泥の入り方の違いを推測することはできないか。
- (4) 汚泥の沈降状況を推測することで、巻き上げなどについて考えることはできないか。

### 5. 参考文献

- (1) 最終沈殿池の水理特性調査 H26 水質向上調査報告書
- (2) 反応工学 橋本健治著 培風館
- (3) Transport Phenomena R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot 著 John Wiley and Sons