# 〈論文〉

# 円形加圧浮上装置におけるバッフル設置による水深低減効果

寺 嶋 光 春<sup>1)</sup>,安井 英 斉<sup>2)</sup>,須 藤 孝 一<sup>3)</sup>,井 上 千 弘<sup>4)</sup>
 <sup>1)</sup> 栗田工業㈱ 開発本部 (〒329-0105 栃木県下都賀郡野木町川田 1-1 E-mail:misuharu.terashima@kurita.co.jp)
 <sup>2)</sup> 北九州市五大学 国際環境工学部
 (〒808-01351 北九州市若松区ひびきの1-1 E-mail:hidenari-yasui@kitakyu-u.ac.jp)

3) 東北大学 大学院環境科学研究科

(〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20 E-mail: suto@er.kankyo.tohoku.ac.jp)

4) 東北大学 大学院環境科学研究科

(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20 E-mail: inoue@er.kankyo.tohoku.ac.jp)

#### 概要

大型の円形加圧浮上装置の槽水深について、水理的性能及び気泡付着フロックの除去性に対する その影響と簡易リング状バッフル設置によるその低減効果を、CFD 計算で求めたトレーサー流出曲 線の解析及び気泡付着フロックの流出率から検討した。水深の増加に伴い短滞留時間流出度 (1-θ<sub>10</sub>)や分離水槽性能係数が改善し、気泡付着フロックの除去率が向上した。バッフルの設置に よっても水深を深くすることと同様の効果が得られ、アスペクト比を 0.29 減らすことが可能であっ た。半径が 3500 mm の浮上槽の場合、バッフル設置によって約 1000 mm の水深を浅くすることが できた。

キーワード:排水処理,固液分離,加圧浮上装置,RTD曲線,CFD 原稿受付 2012.4.17 原稿受理 2012.6.19

EICA: 17(2·3) 73-80

## 1. はじめに

加圧浮上法は排水に含まれる浮遊物質を固液分離除 去する一般的な方法である。加圧浮上装置では、凝集 剤を添加して浮遊物質を凝集フロックとした後、微細 気泡を混合して気泡付着フロックとし、これを浮上槽 内の浮上分離室において浮上分離する。処理によって 発生した浮上スカムは浮上槽上部で濃縮し、スカムス キマーによって系外へ排出する。清澄水は浮上槽下部 の取水口から取り出す<sup>1)</sup>。

浮上槽や沈殿槽といった重力式の固液分離装置では, 原水に含まれる微細気泡(浮上槽の場合),固体粒子 (沈殿槽の場合)及び水温の影響で原水と周辺水との 間に密度差が生じることにより,密度流という特徴的 な循環流が発生し,流出する浮遊物質濃度に影響を及 ぼす<sup>2)</sup>。浮上槽では流入した原水は上昇して水面方向 に向かう。槽の上部は,気泡が多く,流れの乱れた循環 流領域になる。この下側には気泡が少なく流れが緩や かな領域(清澄領域)ができ,主にここで気泡付着フ ロックの分離が行われる<sup>3)</sup>。低液深の浮上槽では槽底 まで循環流領域となるものの処理水取水口の設置位置 を工夫することで良好な処理ができる例も報告されて いる<sup>4)</sup>が,一般的には,良好な処理のためには,深さ方 向に十分な清澄領域を形成させることが必要である。

加圧浮上装置の浮上槽は,水面積負荷(LV)に基づき設計を行う<sup>5</sup>ため処理流量から面積が決定される。水

深については, 浮上分離部の清澄領域確保の観点から 深い方が良いと考えられるが, 深い水深は, 掘削深さの 増大, 側壁材料の増大及び水圧の増大による必要強度 の増加を招き, 建設費用や環境負荷の増大をもたらす ことになる。横方向の長さの増大に伴い循環流の大きさ が大きくなるので, 特に大型の設備では, 良好な処理性 能のためには水深を深くする必要が生じると考えられる。

流体抵抗を与えることで循環流を抑えることを図り 実設備の製作が容易で簡易に循環流領域に流体抵抗を 与える構造として,棒状のバッフルを設置した浮上槽構 造がある。小型の矩形の浮上槽についてバッフルが無 い場合と有る場合の比較試験を行い、バッフルを設置 することにより、短滞留時間で流出する流体成分が減 少すること、SSの除去率が向上すること、さらに CFD (Computational Fluid Dynamics, 数値流体力学) 計算によって循 環流の領域が減少することが示されている<sup>6)</sup>。また、こ れと同じ小型矩形浮上槽で RTD (Residence Time Distribution,滞留時間分布)曲線の実験結果に基づいた水理学的な 検討からバッフルの設置は循環流領域を減らし清澄領 域を大きくする効果があることが報告されている<sup>7</sup>。こ のバッフルの効果によれば循環流領域を小さくするこ とによって、清澄領域を大きくすることができ、その 結果水深を小さくすることができる可能性がある。

大流量を処理する排水処理設備では円形の中央給水 式加圧浮上装置が良く用いられている。バッフル設置 による処理性能の向上は小型浮上槽では効果が示され ているものの,これよりも大幅にレイノルズ数が高く, 粘性の効果が出にくい大型浮上槽でも同様に効果があ るか明らかでない。また,中央給水の円形浮上槽では, 中央に供給された原水が外側に向かい放射状に広がる ため外側ほど流速が小さくなる。このため,矩形浮上 槽と同様に,通常の構造では循環流が発生し,上部の 原水入口付近に設置したバッフルはこの循環流を弱め て清澄領域を拡大する効果があるのか不明である。

数値流体力学 (CFD) 計算手法は,密度流や慣性流の 影響による水の流れを計算することができるため,加 圧浮上槽内の流動挙動をコンピュータ上で再現するこ とができる。流速分布の CFD 計算結果が LDV (Laser Doppler Velocity meter) による流速の測定結果と一致す ることを示した報告<sup>8.9)</sup>がある。また,水処理装置の 水理的性質を表すものとして滞留時間分布 (RTD) 曲線がある<sup>10,11)</sup>。RTD 曲線は CFD 計算によって精度 良く求められることが報告されている<sup>6.10)</sup>。

本研究では、CFD 計算を用いて、大型の円形加圧浮 上装置の水深について、水理的性能及び気泡付着フ ロックの除去性に対する影響を調べた。さらに、簡易リ ング状バッフル設置による水深の低減効果を検討した。

# 2. 方 法

## 2.1 加圧浮上装置の構造と運転条件

本研究では中央給水円形の加圧浮上装置を検討対象 とした。主要な寸法及び流量条件を Table 1 に示す。 加圧浮上装置の構造を Fig. 1 に示す。浮上槽の半径 (*R*) は 3500 mm とし,深さ(*H*)を 1500 mm から 4000 mm まで変化させることでアスペクト比(*H*/*R*) を 0.43 から 1.14 に変化させた。中央給水円形の加圧 浮上槽では、全体構造の断面で左右に二つの循環流が

Tab	le 1	: The	dimension	and	operating	condition	of DAI
-----	------	-------	-----------	-----	-----------	-----------	--------

		- 0
Item	Unit	Value
Radious, R	mm	3500
Tank depth, $H$	mm	1500, 2000, 2500, 3000, 3500 or 4000
Aspect ratio, $H/R$	-	0.43, 0.57, 0.71, 0.86, 1.00  or 1.14
Separation area, A	$m^2$	38
Tank volume, V	$m^3$	58, 77, 96, 115, 134 or 154
LV, QIA	$m hr^{-1}$	10
Water surface	Outlet1	↑↑ Ring-type baffles
1 Inlot	Outlet2	$\uparrow \uparrow \uparrow$



できることから,水理的性能に関係する循環流形成に 関係するアスペクト比の観点から,アスペクト比の定 義として,浮上槽の半径を分母にした。循環流を抑え るために原水を供給するフィードウエルの上部に環状 バッフル8本を設置した構造についても検討を行った。

浮上槽の水面の一部に出口(Outlet 1)を設け、こ こから、原水流量の5%の流量で浮上したフロック を多く含む水が流出するものとしてスカムの出口をモ デル化した。残りの95%の水を側壁底部に設けたも う一つの出口(Outlet 2)から処理水として取り出し た。加圧水は原水に混合して流入するものとし、原水 に対する加圧水の割合を20%、加圧水圧力0.35 MPa, 水温10℃及び溶解効率90%という想定に基づき、原 水に対する空気の体積割合は0.015とした。

#### 2.2 加圧浮上装置の CFD 計算

構造の対称性から中心角 5°の軸対称構造を CFD 計 算の構造とした。浮上槽の気液2相流の流動状態を解 析する方法には,浮上槽をはじめとする気泡塔の解析 において実績<sup>8.9.12,13)</sup>があるオイラー・オイラー法を使 用した。本方法は2流体モデルとも呼ばれ,液相と気 相の両方を連続体とみなし,それぞれの相に対してボ リュームフラクション(容積比)を変数とした連続の 式と運動量輸送方程式を解いている<sup>14,15)</sup>。運動量輸送 方程式には重力の影響と相間の運動量の移動を含んで いる。重力の項の存在によって密度流が再現される。 気泡と水の混合液の局所的な密度は,水と気泡のそれ ぞれの密度をそれぞれの体積分率で重み付けした合計 として計算される。CFD 計算には汎用熱流体解析ソ フト CFX14.0 (ANSYS 社)を用いた。

モデルと条件の一覧を Table 2 に示す。気液2 相間

Table 2: Models and conditions for the simulation of DAF

Items	Condition		
Multiphase model	Eulerian <sup>-</sup> Eulerian <sup>14)</sup>		
Phase	2-Phase		
Drag coefficient	Ishii Zuber model <sup>17)</sup>		
Turbulence model	Standard k-ε <sup>16)</sup> (Liquid phase) Laminar (Gas phase)		
Geometry	2- Dimension, axi-symmetric		
Mesh	Hexa		
Number of element	About 10,000		
Wall	Slip (Gas), Non-slip (liquid)		
Gas phase	Non-compressible, Air at 10 °C Constant bubble size(100 µm)		
Liquid phase	Water at 10 °C (density: 1000 kg m <sup>-3</sup> , viscosity 0.0013 Pa s) Flocs are described using algebra slip model (floating rate: 15 m/hr)		
System	Intel® Core <sup>TM</sup> i7-2920XM CPU operating at 2.5 GHz		

の相関抗力のモデル化には、Ishii-Zuber (1978)の モデル<sup>17)</sup>を使用した。気泡径は 100  $\mu$ m とした。気泡 の終末浮上速度は約 22 m/hr となる。気泡付着フ ロックは液相の中の成分とし液相に対して相対速度を 保って運動することを仮定し、代数スリップモデルを 用いて表現した。化学工業工場排水の生物処理水を加 圧浮上処理装置で処理するために形成させた気泡付着 フロックの浮上速度の測定結果から気泡付着フロック の浮上速度を 15 m/hr とした。この浮上速度は加圧 浮上装置の LV の 1.5 倍である。フロックの水中密度 ( $\rho_e = \rho_f - \rho_w$ ) はフロック密度関数<sup>18)</sup>によって(1)式で 算出できる。

$$\rho_e = a \cdot \left(\frac{d_f}{1}\right)^{-k_p} \tag{1}$$

ここで、 $\rho_e$ : フロックの水中密度 (g cm<sup>-3</sup>)、 $\rho_f$ : フ ロック密度 (g cm<sup>-3</sup>)、 $\rho_w$ : 水の密度 (g cm<sup>-3</sup>)、a: 定 数 (g cm<sup>-3</sup>)、 $d_f$ : フロック径 (cm)、1: 次元を整える ための定数 (cm) 及び  $K_\rho$ : 定数 (-) である。カオ リンフロックで ALT 比 0.05 の場合 a=5×10<sup>-4</sup>及び  $K_\rho$ =1.2 である<sup>18)</sup>。フロック径 ( $d_f$ )を1 mmと想定す ると、水中密度 ( $\rho_e$ )の想定値は 0.0079 (g cm<sup>-3</sup>)と 計算される。

非定常計算で十分に時間が経過し、処理水に流出す るフロックの濃度が一定になったときに定常状態に なったと判断した。

#### 2.3 RTD 曲線の計算

滞留時間分布(RTD)曲線による水理学的性能の 評価を行うために,CFD計算によるトレーサー移動 の計算を実施した。スカラー量として定義したトレー サー物質の輸送方程式によって,トレーサーの移動を 計算した。輸送方程式には流速による移送と乱流によ る拡散の項を含んでいる。

定常に達した後に,原水に1秒間トレーサー物質を 投入し,出口から流出するトレーサーの濃度の経時変 化を求めることでトレーサー流出曲線を得た。各々の 計算結果について投入したトレーサーの量と排出した トレーサーの量の物質収支が取れていることを確認し た。滞留時間に比べてトレーサーの投入時間が1% 以下と短いのでパルス投入と見なすことができ<sup>19</sup>,こ のトレーサー流出曲線は RTD 曲線となる。

CFD 計算による滞留時間分布の精度を確認するために、本研究の浮上槽よりも小型の浮上槽(W:800 mm,L:1072 mm,H:800 mm)について、実験結果と CFD 計算結果を比較した結果<sup>60</sup>を **Fig.2**に示す。 バッフル有り無し共に CFD 計算と実験による RTD 曲線は良く一致し、CFD 計算で精度良くトレーサーの移動を計算できることが確認できている。



Fig.2: Comparison of experimental and calculated RTD curves  $^{\rm 6)}$ 

#### 2.4 RTD 曲線の解析

RTD 曲線から短滞留時間流出度 $(1-\theta_{10})$ 及び分離 水槽性能係数(n)を求めて,浮上槽の構造を評価し た。トレーサー計算から得られた RTD 曲線は,式 (2)-式(5)で無次元化した<sup>20)</sup>。

$$E_t = \frac{C(t)}{\Sigma(C(t) \cdot \Delta t)} \tag{2}$$

$$\theta = \frac{t}{t_h} \tag{3}$$

$$t_h = \frac{V}{Q_{ef}} \tag{4}$$

$$E_{\theta} = t_h \cdot E_t \tag{5}$$

ここで,  $E_t$ : 出口寿命分布 (s<sup>-1</sup>), C: 出口トレーサー 濃度 (mg L<sup>-1</sup>), t: 時間 (s),  $\Delta t$ : 出口トレーサー濃度 のサンプリングの時間間隔,  $\theta$ : 無次元時間 (-),  $t_h$ : 水 理学的滞留時間 (s), V: 浮上槽容積 (m<sup>3</sup>),  $Q_{ef}$ : 処理 水流量 (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) 及び  $E_{\theta}$ : 出口寿命の無次元化分布 (-) である。各々の RTD 曲線の計算結果について, 全 区間についての  $E_{\theta}$ の積分値は1になることを確認した。

水理学的性能を評価するために水理学的パラメータ を式(6)-式(10)で求めた<sup>10,11)</sup>。

$$t_{mean} = \frac{\Sigma(t \cdot C(t) \cdot \Delta t)}{\Sigma(C(t) \cdot \Delta t)}$$
(6)

$$F_{\theta} = \int_{0}^{\theta} E_{\theta} d\theta \tag{7}$$

$$F(\theta_{10}) = 0.1 \tag{8}$$

$$\sigma^{2} = \frac{\Sigma(t^{2} \cdot C(t) \cdot \Delta t)}{\Sigma(C(t) \cdot \Delta t)} - t^{2}_{mean}$$
(9)

$$N = \frac{t_{mean}^2}{\sigma^2} \tag{10}$$

ここで、 $t_{mean}$ :平均滞留時間(s)、 $F_{\theta}$ :出口寿命の 無次元化積分分布 (-), θ<sub>10</sub>: トレーサーの 10% 流出 無次元化時間(-)及び σ<sup>2</sup>: 出口寿命の分散(-)及び N: 浮上槽の混合状態を多段完全混合槽としたときの 槽数(-) である。*θ*<sub>10</sub>は短い滞留時間で流出する流れ 成分が多いと小さい値になる。無次元水理学的滞留時 間 (=1) と θ<sub>10</sub>の差を求め、この値を短時間流出度と 定義し、短い滞留時間の流れ成分の大きさを評価した。  $(1-\theta_{10})$ は0から1の間の値を取り、値が小さい方 が短い滞留時間で流出する流れ成分が少なく、良い水 理的性能と言える。

加圧浮上槽と同じく重力式の固液分離装置である沈 殿池については、RTD 曲線からフロック除去率を計算 する方法が提案されている。沈殿池の混合状態を N 個 の完全混合槽の槽列モデルで近似し、Fair<sup>21)</sup>式と呼ば れる式(11)によってフロック除去率が計算される<sup>22,23)</sup>。

$$R = 1 - \left(1 + \frac{n \cdot u_f}{\left(Q_{ef}/A\right)}\right)^{-\frac{1}{n}}$$
(11)  
$$n = \frac{1}{N}$$
(12)

ここで, R: フロック除去率 (-), uf: 気泡付着フ ロック浮上速度 (m s<sup>-1</sup>)である。n: 分離水槽性能係数 (-) である。分離水槽性能係数の評価は、*n*=0: 最上、 n=1/8 (=0.125); 優秀, n=1/3 (=0.333); 良好, n=1/2 (=0.5); やや不良, n=1; 不良, と言われている<sup>24)</sup>。

#### 3. 結 果

#### **3.1** 流れ状態

バッフル無し(図中では Control と表記,以下同様)及び

Air Volume Fraction ( ) 0.0010 0.0009 Baffles 0.0008 0.0007 0.0006 Baffles 0.0005 0.0004 0.0003 0.0002 0.0001 Baffles 0.0000



バッフル有り(図中では Baffles と表記,以下同様)のそれぞ れの構造について、空気の存在比分布の計算結果を Fig.3に、フロックの存在比分布の計算結果をFig.4 に、流速分布の計算結果を Fig.5 にそれぞれ示す。 どの構造も槽の上部に形成した循環流によって空気及 びフロックが下方向に引き込まれている。例えば, バッフルの無い水深 2500 mm の浮上槽について,外 側壁近傍の下向きの流速は, 槽の上層で約 0.007m s<sup>-1</sup>, 槽の中層で約 0.004 m s<sup>-1</sup>である。空気の終末浮上速 度は約0.006 m s<sup>-1</sup>なので空気は上層のみで引き込ま れており、フロックの浮上速度は約0.004 m s<sup>-1</sup>であ るので、下層まで引き込まれている。





Fig.4: Floc mass fraction in the DAF tanks (left: control, right: with baffles, upper: H=1500 mm, middle: H=2500, under: H = 3500 mm)

Water Velocity (m s  $^{1}$ )



Fig.5: Vector expression of water velocity in the DAF tanks (left: control, right: with baffles, upper: H=1500 mm, middle: H= 2500, under: H = 3500 mm)

バッフルが無い構造では、水深が極めて浅い(H= 1500 mm)ときには槽のほぼ全体が循環流の領域と なっており、循環流によって空気は中層まで、フロッ クは底面まで引き込まれている。このため、処理水の 出口にまでフロックが至っている。水深を大きくした 構造(H=2500 mm 及び 3500 mm)では、循環流の 領域がやや大きくなるものの、その下の流れの緩やか な領域はそれ以上に拡大し、空気の引き込まれは槽の 上部までに留まっている。フロックは底部付近まで引 き込まれており、処理水出口の直近で分離がされてい る。H=2500 mm では処理水出口まで存在率がやや高 くなっているが H=3500 mm ではこれよりも存在率 は低くなっている。

バッフル有りの構造ではバッフル無し構造に比べて いずれの水深でも循環流の領域が浅くなっており、空 気の引き込みの深さが小さい。循環流の下側の領域で は、流れは槽の中心付近を通って下に向かった後に、 底付近で槽の外側の処理水出口に向かっている。この 下に向かう流れに引き込まれて、フロックは一旦底近 くまで至っているが横向きの流れの領域が清澄領域と して働き、ここでフロックが分離されて、処理水出口 付近ではその存在率が低くなっている。

### 3.2 RTD 曲線

RTD 曲線の計算結果を **Fig.6** に,式(7)で求めた *F* 曲線を **Fig.7** にそれぞれ示す。すべての計算結果の中でアスペクト比 0.43,0.71 及び 1.00 の場合を示した。バッフル無し又は有りのそれぞれの中ではアスペクト比が大きいほど,同じアスペクト比ではバッフル有りの方がトレーサーの流出開始が遅くなった。



Fig.6: Computational RTD curves (legend; Control or Baffles, aspect ratio)

短時間流出度(1-θ<sub>10</sub>)の計算結果を Fig. 8 に示す。 バッフルが無い構造及びバッフルが有る構造ともにア スペクト比の増大に伴い,短時間流出度(1-θ<sub>10</sub>)の 値は減少した。水深が極めて小さい,アスペクト比が 0.41のときにはバッフル有無で短時間流出度の違いは 小さかった。アスペクト比がこれよりも大きくなると バッフル有無で差が大きくなった。バッフル無し構造 ではアスペクト比を1以上に増加させても短時間流出 度はそれ以上減少しなかった。バッフル有り構造では アスペクト比 0.71 で短時間流出度は一定となった。 バッフル無し構造のアスペクト比 1.00 とバッフル有 り構造のアスペクト比 0.71 が同程度以下の短時間流 出度となった。

分離水槽性能係数 n の計算結果を Fig. 8 に示す。 固液分離に大きな影響を与える分離水槽性能係数 n



**Fig.7**: Computational Fcurves (legend; Control or Baffles, aspect ratio)



**Fig.8**: The parameters  $(1 \cdot \theta_{10}, n)$  from RTD

の値は、アスペクト比の増大に伴い小さくなったが、 短時間流出度と同じく、バッフル無し構造ではアスペ クト比 1.00 で、バッフル有り構造ではアスペクト比 0.71 でそれぞれ一定となった。アスペクト比が小さい ときには約 n=0.5 でやや不良であるが、水深を大き くすると n が減少し、十分に水深が大きいときには、 約 n=0.2 となり、良好と優秀の間となった。

バッフル無し構造のアスペクト比 1.00 と比べ, バッフル有り構造のアスペクト比 0.71 は同程度以上 のn値となった。

#### 3.3 フロック除去率

バッフル有り無しそれぞれについてアスペクト比と フロック除去率の関係の計算結果を Fig.9 に示す。 バッフル有り無しのどちらの構造もアスペクト比の増 大に伴いフロックの除去率は向上した。バッフル無し の通常の構造はアスペクト比(水深/半径)が0.45 から 1.0 に倍増すると、フロックの除去率が0.57 から 0.97 に増加した。一方、バッフル有りの構造は、アス ペクト比が0.45 から0.71 に増加して、除去率が0.74 から0.97 に増加した。バッフル有りのアスペクト比 0.71 構造は、バッフル無しのアスペクト比1.0 構造と 同等以下のフロック除去率となった。



Fig.9: Relationship between aspect ratio and floc removal rate

# 4. 考 察

#### 4.1 処理性能への水深の影響

浮上槽の水理状態は、上部循環領域で混合モデル、 下部の清澄領域は栓流モデルで、モデル化できるとい われている<sup>25)</sup>。水深が極端に小さいアスペクト比 0.45 では、循環流の中に処理水出口が入ってしまうため、 短滞留時間流出度が高く,処理水へ多くのフロックが 流出した。水深を大きくしていくと,清澄領域が形成 されるようになるため,短滞留時間流出度が下がり, フロックの除去率が急激に良くなった。

深さを大きくすると清澄領域が大きくなるのと同時 に循環流領域も大きくなるため、今回の検討の範囲で は、十分に清澄領域ができてフロック除去率が十分に 高い水深以上に水深を大きくしても RTD 曲線から求 めた1-θ<sub>10</sub>及び n はあまり変化しなくなった。

以上のことから,加圧浮上装置の最適なアスペクト 比として,バッフル無し構造についてアスペクト比 1.0,バッフル有り構造についてアスペクト比 0.71 が 得られた。

#### 4.2 水深を低くすることに対するバッフルの効果

いずれのアスペクト比でも、バッフル有りの構造は バッフル無しの構造に比べて、短滞留時間で流出する 流体成分の大きさを表すパラメータである(1-θ<sub>10</sub>) や分離水槽性能係数(n)が好ましく、フロックの除 去率が高かった。バッフル有りアスペクト比0.71の 構造は、バッフル無しアスペクト比1.00の構造と比 ベ、アスペクト比が0.29 低いものの、同程度以上に (1-θ<sub>10</sub>)や分離水槽性能係数が好ましく、フロック の除去率が高かった。このことから、バッフル設置に よってアスペクト比を0.29 減らすことが可能であり、 半径が3500 mmの浮上槽の場合、バッフル設置に よって約1000 mmの水深を浅くすることができる。

小型の矩形の浮上槽(代表長さを長手方向長さ,代 表流速を平均下降流速としたレイノルズ数は1.6× 10<sup>3</sup>)については,バッフルのない通常の構造では, 上部の循環流が大きく形成されるもののバッフル設置 によって循環流が弱められ処理性能が向上することが 報告されている<sup>6.7)</sup>。本研究では,レイノルズ数が大 幅に高い(代表長さを半径,代表流速を平均下降流速 としたレイノルズ数は7.5×10<sup>3</sup>)ために粘性の効果が 出にくい大型で,中央に供給された原水が外側に向か い放射状に広がるため外側ほど流速が小さくなる中央 給水の浮上槽であってもバッフルの効果で循環流が弱 まり,処理性能が向上することが示された。また,循 環流を弱めることは除去率を向上させるばかりではな く,同程度の除去率とするための浮上槽水深を低減さ せる効果もあることが明らかとなった。

# 5. おわりに

大型の円形加圧浮上装置の槽水深について,水理的 性能及び気泡付着フロックの除去性に対するその影響 と簡易リング状バッフル設置によるその低減効果を, CFD 計算で求めたトレーサー流出曲線の解析及び気 泡付着フロックの流出率から検討した。

水深の増加に伴い短滞留時間流出度(1-θ<sub>10</sub>)や分 離水槽性能係数(n)が改善し,気泡付着フロックの 除去率が向上した。バッフルの設置によっても水深を 深くすることと同様の効果が得られ,アスペクト比を 0.29 減らすことが可能である。半径が 3500 mm の浮 上槽の場合,バッフル設置によって約 1000 mm の水 深を浅くすることができる。

#### 参考文献

- K. E. James: Principles and Application of Dissolved Air Flotation, Wat. Sci. Tech., Vol. 31, No. 3–4, pp. 1–23 (1995).
- 2) A. M. Goula, M. Kostoglou and T. D. Karapantsios: The Effect of Influent Temperature Variations in a Sedimentation Tank for Potable Water Treatment- A Computational Fluid Dynamics Study, Wat. Res., Vol. 42, No. 13, pp. 3405–3414 (2008).
- 3) M. Lundh, L. Joensson and J. Dahlquist : Experimental Studies of the Fluid Dynamics in the Separation Zone in Dissolved Air Flotation, Wat. Res., Vol. 34, No. 1, pp. 21–30 (2000).
- 4) 寺嶋光春,安井英斉, ラジブゴエル,須藤孝一,井上千弘: CFD 解析による低液深横流式加圧浮上装置の処理水取水部の 構造最適化,土木工学論文集G(環境), Vol 67, No. 7, pp. 705-713 (2011).
- 5) 和田洋六:造水の技術, pp. 34, 地人書館 (1996).
- 6) 寺嶋光春, 岩崎 守, 安井英斉, ラジブゴエル, 須藤孝一, 井上千弘: CFD 解析と実験によるバッフル設置加圧浮上槽の 検討, 環境工学論文集, Vol. 46, pp. 145-154 (2009).
- 7) M. Terashima, M. Iwasaki, H. Yasui, R. Goel, K. Suto and C. Inoue: Tracer Experiment and RTD Analysis of DAF Separator with Bar-Type Baffles, The 4th IWA-ASPIRE Conference & Exhibition, USB flash drive (2011).
- 8) C. T. Ta, J. Beckley and A. Eades : A multiphase CFD model of DAF process, Wat. Sci. Tech., Vol. 43, No. 8, pp. 153–157 (2001).
- 9) J. Hague, C. T. Ta, M. J. Biggs and J. A. Sattary : Small scale model for CFD validation in DAF application, Wat. Sci. Tech., Vol. 43, No. 8, pp. 167–173 (2001).
- A. I. Stamou: Verification and application of a mathematical model for the assessment of the effect of guiding walls on the hydraulic efficiency of chlorination tanks, J. Hydroinformatics, Vol. 4, pp. 245–254 (2002).

- J. Li, J. Zhang, J. Miao, J. Ma and W. Dong: Application of computational fluid dynamics (CFD) to ozone contactor optimization, Wat. Sci. Tech. Wat. Sup., Vol. 6, No. 4, pp. 9–16 (2006).
- 竹田 宏:気泡塔内の流動シミュレーションの現状と将来展望, 化学工学シンポジウムシリーズ 77, pp. 3-10 (2003).
- 13) 寺嶋光春,安井英斉, ラジブゴエル,久保田宏:ハイドロダ イナミクスモデルによる曝気槽の酸素溶解性能の把握,環境 工学研究論文集, Vol. 40, pp. 29-37 (2003).
- 14) D. Pfleger, S. Gomes, N. Gilbert and H.-G. Wagner: Hydrodynamic Simulations of Laboratory Scale Bubble Columns Fundamental Studies of the Eulerian-Eulerian Modelling Approach, Chem. Eng. Sci., Vol. 54, pp. 5091–5099 (1999).
- D. Pfleger and S. Becker: Modelling and Simulation of the Dynamic Flow Behaviour in a Bubble Column, Chem. Eng. Sci. Vol. 56, pp. 1737–1747 (2001).
- B. E. Launder, D. B. Spalding: Mathematical Models of Turbulence, London, GB: Academic Press (1972).
- M. Ishii and N. Zuber : Drag Coefficient and Relative Velocity in Bubbly, Droplet or Particulate Flows, AIChE Journal, Vol. 25, No. 5, pp. 843–855 (1979).
- N. Tambo and Y. Watanabe : Physical characteristics of Flocs-I- The floc density function and Aluminum floc, Water Res., Vol. 13, pp. 409–419 (1979).
- 19) 新堀雄一,和嶋延寿,千田 佶,田中正三:地熱貯留層におけるトレーサー応答に及ぼす伝熱の影響:日本地熱学会誌, Vol. 8, No. 3, pp. 261-276 (1986).
- O. Levenspiel: Chemical Reaction Engineering, 3rd ed., Chapter 11, pp. 257–282, John Wiley & Sons, New York (1999).
- 21) G. M. Fair, J. C. Geyer and D. A. Okun : Water and Wastewater Engineering, Volume 2. Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal, Sedimentation, Chapter 25, pp. 13, John Wiley & Sons, New York (1968).
- 22) 土木学会 環境工学委員会:環境工学公式・モデル・数値集,
   p. 19, (出土木学会 (2004).
- 中川義徳: 矩形沈澱池の沈殿効果についての理論的研究(その1),水道協会雑誌,第331号,pp.15-23 (1962).
- 24) 斉藤豊, 中島重旗, ゼベディアピリ, 原田浩幸: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, Vol. 31, No. 371, pp. 57-63 (1994).
- 25) M. Lundh and L. Joensson: Residence Time Distribution Characterization of the Flow Structure in Dissolved Air Flotation, J. Env. Eng., Vol. 131, No. 1, pp. 93–101 (2005)

# Tank Depth Reduction by Introduction of Ring-Type Baffles in the Central Feed Circular DAF (Dissolved Air Flotation)

Mitsuharu Terashima<sup>1)†</sup>, Hidenari Yasui<sup>2)</sup>, Koichi Suto<sup>3)</sup> and Chihiro Inoue<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Research & Development Division, Kurita Water Industries Ltd.

 $^{\scriptscriptstyle 2)}$  Faculty of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu

<sup>3)</sup> Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

† Correspondence should be addressed to Mitsuharu Terashima : (Research & Development division, Kurita Water Industries Inc. E-mail : E-mail : misuharu.terashima@kurita.co.jp)

#### Abstract

Studies are conducted on the hydraulic performance of large scale dissolved air flotation with a central feed well by the analysis of RTD curves and removal efficiencies of the floc aggregated microbubbles. Through the extensive studies using the Computational Fluid Dynamics, it is clearly shown that the introduction of ring type baffles just outside the center well are very effective to improve the hydraulic performance and the floc removal efficiency even if the depth of the flotation tank is reduced. The baffles increased the clear zone in the flotation tank, and then reduced the parameter,  $1-\theta_{10}$ , degree of short time flow through, resulting that about 1 m height reduction can be achieved for a 3.5 m radius dissolved air flotation system.

Key words: Wastewater treatment, Particle separation, Dissolved Air Flotation, RTD, CFD