

(19) CFD解析と実験によるバップル設置加圧浮上槽の検討

寺嶋 光春^{1*}・岩崎 守¹・安井 英斉²・ラジブ ゴエル³
・井上 千弘⁴・須藤 孝一⁴

¹栗田工業株式会社(〒329-0105 栃木県下都賀郡野木町川田五丁目1-1)

²北九州市立大学国際環境工学部 エネルギー循環化学科(〒808-0135 福岡県 北九州市 若松区 ひびきの1-1)

³Hydromantis, Inc., (〒L8P 4R5 James Street South 1, Suite #1601, Hamilton, Ontario, Canada)

⁴東北大学大学院環境科学研究科環境科学専攻(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20)

* E-mail: mitsuharu.terashima@kurita.co.jp

加圧浮上槽の流れ構造に及ぼす簡易バップル設置の影響を、CFD解析によって検討し、実際の浮遊物質除去性能から解析結果を検証した。CFD解析による滞留時間分布及び流速分布の計算の結果、浮上槽流入部に簡易なバップルを設けることによって、槽下部の清澄領域が大きくなることが示唆された。RTD曲線の解析からフロックが10%流出するフロック浮上時間(θ_{10})が0.38から0.5へ増加し、除去率向上が期待された。パイロット装置による実際の浮遊物質除去試験では、バップル有りの加圧浮上装置は、浮遊物質の除去率が97%から99%に増加し、流出してしまう浮遊物質を3分の1に減少させることができた。

Key Words : Computational fluid dynamics (CFD); Dissolved air floatation (DAF); Residence time distribution (RTD); SS removal

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最も一般的な方法のひとつである。加圧浮上槽では、凝集剤を添加して浮遊物質を凝集フロックとした原水に対して、浮上槽内の混合室において微細気泡を混合することでフロックに気泡を付着させ、さらに、浮上槽内の浮上分離室において気泡付着フロックを浮上分離する。ここで、微細気泡は、空気を加圧溶解した加圧水を減圧することにより発生させる。処理によって発生した浮上スカムは浮上槽の上部で濃縮し、スカムスキマーによって系外へ排出する。清澄水は浮上槽の下部に設けられた取水口から処理水として取り出す¹⁾。

加圧浮上装置の処理水に流出してしまう浮遊物質濃度は、1) 気泡付着フロックの浮上速度、及び、2) 浮上槽内の流れ構造の両方によって大きく影響を受ける。

このうち、1) 気泡付着フロックの浮上速度は、凝集状態、フロック及び微細気泡の濃度、pH、乱流強度及び接触時間などに依存するフロックに対する微細気泡の付着性、及び、気泡付着フロックの大

きさや周辺水との密度差などに依存する気泡付着フロックと周辺水との相互作用によって決定付けられる^{2), 3), 4), 5), 6)}ことが良く知られている。

一方、2) 浮上槽内の流れ構造は、槽の構造や運転条件(水面積負荷や加圧水量)によって変化する。加圧浮上槽や沈殿槽といった重力式の分離装置では、原水に含まれる微細気泡(加圧浮上槽の場合)、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生じ、処理水に流出する浮遊物質濃度に影響を及ぼす⁷⁾。加圧浮上槽では、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(垂直移動領域、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⁸⁾。

浮上槽内の流れ構造については、流速分布の直接測定(ADV: Acoustic Doppler Velocity meter)により、混合室の形状によって清澄領域の大きさが変わること⁹⁾と水面積負荷や加圧水量によっては偏流ができること¹⁰⁾が確認されている。また、清澄領域の大きさは浮遊物質の分離と深い関連性があり¹¹⁾、同じく

重力式の固液分離装置である沈殿槽¹²⁾と同様、滞留時間分布(RTD: Residence Time Distribution)曲線からのパラメータによって特徴づけられる^{13), 14)}ことが報告されている。

加圧浮上槽の流れ構造の検討のための流体解析的手法の応用としては、流速分布の計算結果がLDV(Laser Doppler Velocity meter)による流速の測定結果と一致すること^{15), 16)}及び流速分布及び気泡の存在比の計算結果が水中カメラによる全体的な流れの特徴と気泡の分布の観察結果と一致すること¹⁷⁾が報告されている。槽構造を検討した例としては、低流速領域の大きさが槽の幅と長さの比によって変化し、この比が1:1のときにその低速度領域が最小化されると述べている報文がある¹⁸⁾。

処理水水質に影響を与える1)気泡付着フロックの浮上速度と2)浮上槽内の流れ構造のうち、1)気泡付着フロックの浮上速度を高めることによる処理水質向上については、排水毎の実験的な適用研究が行われており、処理対象とする懸濁物質や凝集剤の種類、量によって最適条件が変化する。一方、2)浮上槽内の流れ構造は、処理対象に直接的に大きな影響を受けるものではなく、どの処理対象に対しても応用できるため、流れ構造を改良し、清澄領域を大きくすることによる処理水質向上は、その波及効果が大きいと考えられる。このため、本研究では、流れ構造の改良による処理水質の向上を狙った。

上述のように、浮上槽では、上部に発生する循環流領域の下側の清澄領域で分離がおこなわれる。この清澄領域を大きくして浮遊物質の除去率を向上させるためには循環流を弱めてことが重要である。

気泡塔における循環流の促進力は浮上槽原水に気泡が含まれることによる密度差であり、循環流を抑制するのは流体抵抗である^{19), 20)}。Lundh et al (2002)⁹⁾は、混合室と浮上分離室を隔てる仕切り板の形状は浮上槽の流れ構造にあまり関係しないが、仕切り板の高さが低く、仕切り板上端と水面の距離が長いと、循環流が大きくなることを報告している。気泡存在部の高さは、密度流の促進力と正の関係があることからこの現象は理解できる。さらに循環流を弱めるためには流体抵抗を与える必要がある。

本研究では、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構造を検討した。浮上槽の流れ構造への棒状バッフルの影響を、CFD解析を用いて流速分布及びRTD曲線によって検証し、さらに実験により実際の浮遊物質除去効果を確認した。

2 方法

(1) 浮上槽構造

検討対象とした浮上槽の構造を図-1に示す¹⁷⁾。矩形の浮上槽の一部を上部が屈曲した仕切り板で仕切り、混合室と浮上分離室に分けている。浮上槽の寸法は、幅(W): 800mm、長さ(L): 1071mm、水深(h): 800mmである。浮上槽容積(V)は、 0.69 m^3 であり、浮上槽面積(A)は、 0.85 m^2 である。

凝集フロックを含む原水と微細気泡を含む加圧水は混合室に導入され、水流によって混合されて気泡付着フロックが生成される。混合室で生成した気泡付着フロックと残りの微細気泡は仕切り板の上側を乗り越え、浮上分離室に流入する。浮上分離室では、下部の取水口から処理水が取り出される。実験では、水面部に設置したスクラムスキマー(図示していない)で浮上スカムを分離除去した。

(2) バッフル付き浮上槽構造

浮上槽上部の循環流を弱めることにより図-1の浮上槽の処理水質を向上させることを意図して、浮上分離室の入口部にバッフルを設置した浮上槽構造を検討した。バッフル有り浮上槽¹⁷⁾の構造を図-2に示

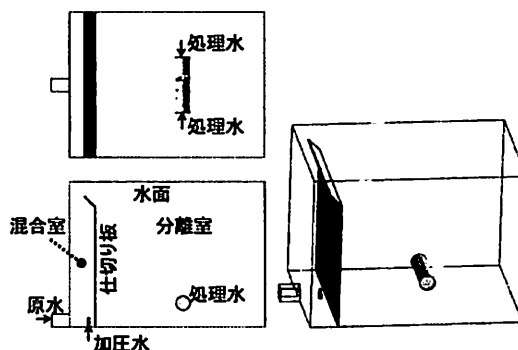


図-1 The flotation tank

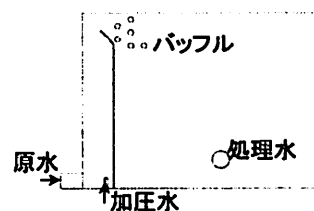


図-2 The flotation tank equipped with bar-type baffles

す。バッフルは、太さ 32 mm の棒状で浮上槽幅と同じ長さである。浮上槽の幅方向に対して平行に、長手方向に 3 列、混合室に近い側から 2 本、3 本及び 1 本の計 6 本設置している。棒の中心間の水平距離 60 mm、垂直距離 60 mm である。

(3) 加圧浮上装置の運転条件

有機系排水の生物処理水を凝集沈殿槽で固液分離し、粒状活性炭で有機物を吸着除去した水（以下、回収水と記載する）にカオリン 120 mg/L を混合し、pH7.5 に調整下で PAC 34 mg/L as Al_2O_3 添加して凝結させ、アニオンポリマー 3 mg/L を添加して凝集させたフロックを含む水を加圧浮上槽の原水として使用した。浮遊物質(SS)濃度の測定結果は 175 mg/L であった。

加圧水は、過流ポンプ式微細気泡作成装置（ニクニ社製）で作成した。回収水を大気と共に、過流ポンプで吸引し、気液分離槽（容積 10 L）で余分な空気を分離して、混合室に入る直前にバルブによって減圧して微細気泡混合水として混合室に供給した。

原水の流量は 5.0 m³/hr、加圧水量は 1.0 m³/hr とし、気液分離槽圧力は 0.35 MPa とした。浮上槽における理論滞留時間(t_m)は 411 s、浮上分離室下部断面における水面積負荷(L/l)は、7 m/hr である。

(4) 水中カメラによる浮上槽内観察

水中カメラによる観察では、壁面を背面として中央側にレンズを向け、深さ方向、水平方向の 2 次元方向を移動して撮影した。水の流れの向きと同時に微細気泡の有無とフロックの有無を観察した。

(5) CFD 解析方法

浮上槽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^{18), 16), 21), 22), 23), 24)}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^{25), 26), 27)}。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。CFD 解析には汎用熱流体解析ソフト CFX5.7 (ANSYS 社)を用いた。

CFD 解析のモデルと条件の一覧を表-1に示す。気液 2 相間の運動量の移動のモデル化には、Ishii-

表-1 Models and conditions for the simulation of DAF

Items	Condition
Multiphase model	Eulerian- Eulerian ²⁵⁾
Phase	2-Phase
Drag coefficient	Ishii- Zuber model ²⁹⁾
Turbulence model	Standard k- ϵ ²⁸⁾ (Liquid phase) Laminar (Gas phase)
Geometry	3- Dimension, Symmetric Half,
Mesh	Tetrahedral
Number of element	About 340,000
Wall	Slip (Gas), Non-slip (liquid)
Gas phase	Non-compressible Air at 10 °C Constant bubble size(75 μ m)
Liquid phase	Water at 10 °C
System	A Pentium M PC operating at 1700 MHz

Zuber(1978)のモデル²⁹⁾を使用した。ここでは、気泡の粒子レイノルズ数が小さい場合から順に、球形、楕円球形及び、きのこ笠状(CAP 形状)の 3 種類の形状となり、気泡径等により相関抗力係数が変わる。本検討のパイロット試験の運転条件に近い水温(7.5℃)及び加圧水圧力(0.415 MPa)の条件下で測定された気泡径であることを根拠として、Han ら(2009)³⁰⁾が測定した加圧浮上槽内の気泡径分布の重量平均から、気泡径 75 μ m として計算した。

混相系では、気相や固相の存在は密度差による循環流(密度流)を駆動することで、連続相である液相に影響をもたらす。加圧浮上槽では、水の流れの解析のためには粒子を一つの相として考えなくても正しい水の流れの計算ができると言われている¹⁸⁾。これは、固形物であるフロックはその見かけ比重が水に近く存在量が気泡に比べ極めて少ないため、液相の流動に及ぼすフロックの影響が無視でき、流れは気泡の存在による密度流によって支配的に特徴付けられているためである。本研究においても簡略化のため、気相(微細気泡)と液相(水)の 2 相モデルを構築した。液体は温度 10℃の純水、気体は温度 10℃の実空気として、密度の物性を与えた。

乱流モデルとしては計算負荷が小さく、工学的な応用において実績のある標準 k- ϵ モデルを用いた。流体について壁では滑らないことを想定し、壁での熱交換は無いものとした。水面では気泡のみ流出を許す条件とした。

加圧水入り口からの空気の流量は、実験条件から、気液分離槽圧力 0.35 MPa、水温 10℃、溶解効率 90%として決定した。解析構造は、対称性を考慮し、中央線における面对称の 1/2 構造とした。三次元構造とし、槽構造が複雑であるためにテトラメ

ッシュを採用して解析構造を構築した。

(6) トレーサー解析

短い滞留時間で流出してしまう流れの大きさの程度は、滞留時間分布(RTD)曲線からの滞留時間の中央値(t_{median})で特徴付けることができる^{31), 32)}。この値は、固液分離槽において、分離できずに処理水に流出してしまう固形物の濃度に影響を及ぼす^{14), 33)}。そこで、式(1)で示すように、水力学的滞留時間に対する水力学的滞留時間値と中央値の差の比の値で短滞留時間流出度を定義した¹²⁾。

$$SF_i = 1 - \frac{t_{median}}{t_h} \quad (1)$$

ここで、 SF_i : 短滞留時間流出度 (-), t_h : 水理学的滞留時間 (s), t_{median} : 滞留時間の中央値(s)である。

流入した原水の大部分が瞬時に出口から出る場合には、 $t_{median} \rightarrow 0$ となるため、 $SF_i \rightarrow 1$ となる。一方、 $t_{median} = t_h$ となるときには、 $SF_i = 0$ となる。無次元化滞留時間(θ)を式(2)で定義すると、 SF_i は式(3)で表される。

$$\theta = \frac{t}{t_h} \quad (2)$$

$$SF_i = 1 - \theta_{median} \quad (3)$$

ここで、 θ : 無次元滞留時間(-), θ_{median} : 無次元滞留時間の中央値(-)である。

RTD 曲線の CFD 解析結果から、短滞留時間流出度(式(3))及び平均滞留時間を算出した。

所定の浮上速度を持つ気泡付着フロクの流出率を RTD 曲線に基いて解析する方法が良く知られており、流出率は式(4)で表される³⁴⁾。

$$R(\theta_f) = \int_0^\infty R(\theta) E(\theta) d\theta \quad (4)$$

ここで、 $R(\theta_f)$: 浮上槽における気泡付着フロク(無次元浮上速度= θ_f)の流出割合、 $R(\theta)$: 流体要素の無次元化滞留時間 θ に対する気泡付着フロクの流出割合、 $E(\theta)$: 浮上槽の滞留時間分布関数である。

本検討では、垂直流式重力固液分離槽の理想モデル³⁵⁾を前提とし、実際の浮上槽に適用するために流速に分布のある複数の下降流の集まりとしてモデル化した。この模式図を図-3に示す。 u_f : 単一の気泡付着フロクの浮上速度 (m/s), u_d : 浮上槽内の液下降流速 (m/s)とすると、 $u_f < u_d$ の条件では、フロクは下方向に移動して処理水と共に流出し、 $u_f > u_d$ の条件では、フロクは上方向に向かい、水面でスクムスキマによって槽外に排出される。このことから、浮上速度(u_f)の気泡付着フロクが処理水

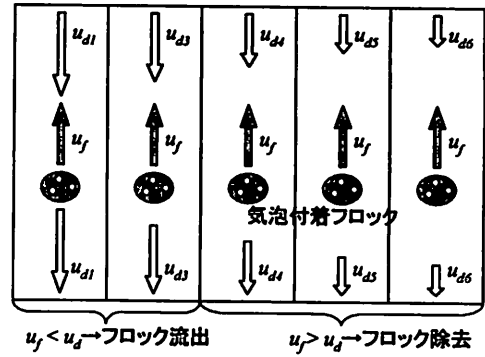


図-3 The multi down flow model of DAF

とともに流出してしまう条件は式(5)で表される³⁵⁾。

$$u_f < u_d \quad (5)$$

浮上槽の槽高 h に対する原水の下降時間(滞留時間)及び気泡付着フロクの浮上時間はそれぞれ式(6)及び式(7)で表される。

$$t = \frac{h}{u_d} \quad (6)$$

$$t_f = \frac{h}{u_f} \quad (7)$$

ここで、 h : 水深(m), t : 滞留時間(s), t_f : 気泡付着フロク浮上時間(s)である。また、水深 h は式(8)で定義する。

$$h = \frac{V}{A} \quad (8)$$

ここで、 V : 浮上槽容積(m^3), A : 浮上槽面積(m^2)である。式(5)~(8))より気泡付着フロクの流出条件は式(9)になり、無次元化浮上時間(θ)を使うと、流出条件は式(10)になる。

$$t < t_f \quad (9)$$

$$\theta < \theta_f \quad (10)$$

よって、式(4)における $R(\theta)$ は、式(11)で表される。

$$R(\theta) = \begin{cases} 1 & (\theta < \theta_f) \\ 0 & (\theta_f < \theta) \end{cases} \quad (11)$$

式(4)に式(11)を代入して整理すると滞留時間分布 $E(\theta)$ の浮上槽における浮上時間 θ_f の気泡付着フロクが流出する割合は式(12)になる。

$$R(\theta_f) = \int_0^{\theta_f} E(\theta) d\theta \quad (12)$$

$E(\theta)$ と $R(\theta_f)$ の関係を図-4に図示する。

以下に、本研究で使用した浮上槽構造と式(1)~(12)式の関係を述べる。本検討において、滞留時間

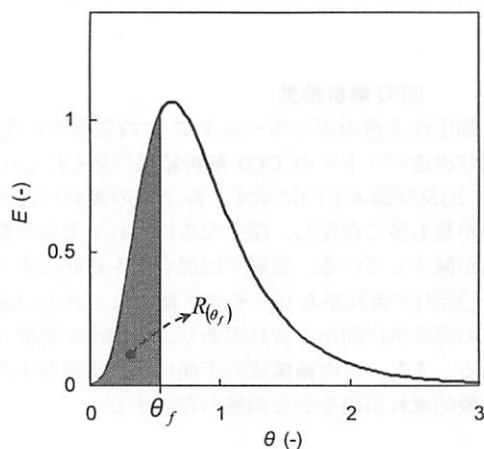


図-4 Typical E-Curve and the relationship to R

の検討範囲は、混合室の入口から浮上分離室の出口までとすることを前提とした。つまり、水理学的滞留時間(t_r)を算出するための槽容積は浮上槽容積の 0.69 m^3 である。浮上槽の槽高 h は、(8)式の定義を前提とし、パイロット装置の水深と等しい $h = 0.8 \text{ m}$ である。パイロット装置では処理水集水部は槽底よりも 0.1 m 高い位置にあり、これは、気泡付着フロックの流出が過大に計算される誤差が生じる要因になるが、バブルの有無の相対的な検討のためには問題ないと考えた。

本研究では、滞留時間分布を用い、バブル有る無し2種類の加圧浮上槽について、浮上槽の短滞留時間流れの程度及び所定の浮上速度を持つ気泡付着フロックの流出割合について比較検討を行った。

(7) RTD 曲線の CFD 解析とトレーサー試験

バブル有る無し2種類の加圧浮上槽について、滞留時間分布による水理学的性能の評価を行うために、トレーサー解析を実施した。流速分布の計算が終了した後、その流速分布を用いて、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を解くことで、浮上槽内のトレーサーの移動を計算した。原水入口から混合室に1秒間トレーサー物質を投入した後、浮上槽内のトレーサー移動を計算し、出口におけるトレーサーの濃度の経時変化を求めることで浮上槽の滞留時間分布を求めた。

CFD 解析による滞留時間分布を確認するために、バブル有る無し2種類の加圧浮上槽について、CFD 解析と同じ条件で実験を行った。トレーサー物質としては、メタノールで密度を調整した塩化リ

チウム溶液中のリチウムイオンを用いた。連続運転中の加圧浮上槽において混合室の原水流入部に瞬時に40%塩化リチウム溶液 100 g を入れた後、浮上槽出口にて経時的に採水を行った。サンプル中のリチウムイオン濃度は、原子吸光光度法で測定した。

(8) 処理水の分析

バブル有る無し2種類の加圧浮上槽について、原水の浮遊性物質の除去性能を比較するために水質分析を行った。バブル無し、有りそして再び無しと合計3回の通水試験を行った。通水開始後、処理水の浮遊物質濃度が安定するのに15分間を要した。このため各試験において、処理水水質が安定する15分後から採水を開始し、15分間隔で3回採水した。JIS 工業排水試験法に基づき浮遊物質濃度の分析を行った。

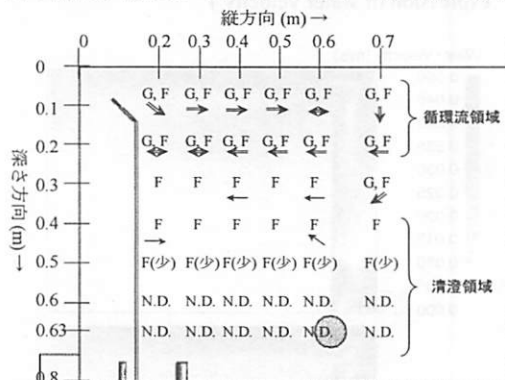
3 結果

(1) 浮上槽の流れの状態

① 実験結果

図-1の浮上槽について水中ビデオカメラを設置して、運転中の浮上槽内部を観察した結果¹⁷⁾を図-5に示す。

槽の上上部では、混合室から出て反対側の端に至る流れがある一方で、そのすぐ下ではこれとは反対向きの流れが存在しており、これらで循環流を形成し



- ・二重線矢印は速い流れ (0.03 m/sec 程度以上) を示す。
- ・実線矢印は緩やかな流れ (0.005 m/sec 程度) を示す。矢印の向きは流れの向きを表す。
- ・両矢印は頻繁に流れの向きが変化することを表す。
- ・矢印がないのは顕著な流れが観察されなかったことを表す。
- ・G は気泡が観察されたことを表す。
- ・F はフロックが観察されたことを表す。
- ・N.D. は気泡及びフロックが観察されなかったことを表す。

図-5 Observation in flotation tank by video camera

ていた(循環流領域)。その下側の層では、流れがほとんど観察されなかった(清澄領域)。清澄領域では、下向きの流速があるはずであるが、この流速は、とても小さい(運転の $LV=7$ m/hr から下向き平均流速は約 2 mm/sec である)ために、観測することができなかったと考えられる。循環流領域では、フロックと気泡が多く存在し、その下側では、フロックのみが観察された。水深が深くなるに従いフロックの存

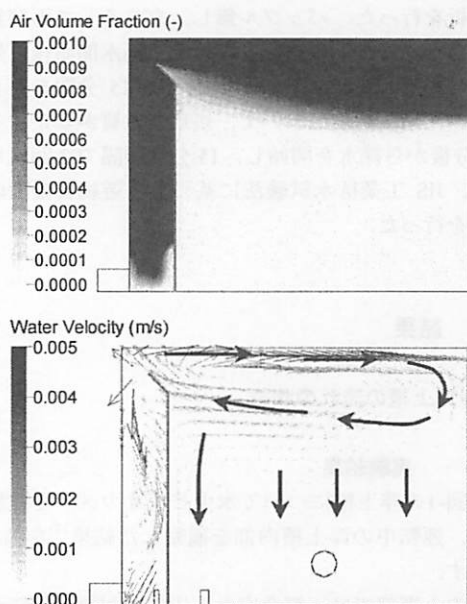


図-6 CFD results of the flotation tank without baffles (upside: distribution of air holdup, downside: vector expression of water velocity)

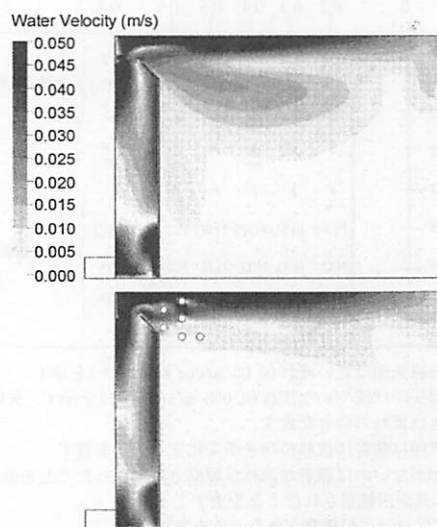


図-7 Water velocity distribution by CFD (upside: without baffles, downside: with bar-type baffles)

在量は減少し、水深 0.6 m 以上では観察されなかった。

② CFD 解析結果

加圧浮上槽のガスホールドアップ(気泡の存在比)及び流速ベクトルの CFD 解析結果¹⁷⁾をそれぞれ図-6 (上)及び図-6 (下)に示す。浮上槽の表面付近に気泡が最も多く存在し、深くなるにつれて気泡の存在量が減少している。表層では混合室から吐出する向き(矢印)に流れがあり、その下側ではこれとは逆向きの混合室に向かう流れがあり、循環流を形成している。また、この循環流の下側には、流速が小さく比較的流れが穏やかな領域が存在する。

(2) バッフル設置による変化

① 流速分布の変化

浮上分離室の入口に棒状のバッフルを設置している図-2の浮上槽の CFD 解析を行った。浮上槽の側断面における流速分布¹⁷⁾を図-7に示す。バッフル無し構造では、上部で循環流を形成していて槽の中層以下が低い流速になっているのに対し、バッフル有り構造では、より上部から流速が低くなっている。

② トレーサー流出曲線の変化

バッフル設置前後の CFD 計算と実験による RTD 曲線を図-8に示す。両方の構造ともに CFD 計算と結果実験結果の RTD 曲線はよく一致している。

流速分布から水理的構造の改善が予測されたバッフル有り構造は、バッフル無し構造に比べてトレーサーの出現開始時間が遅くなっている。これはバ

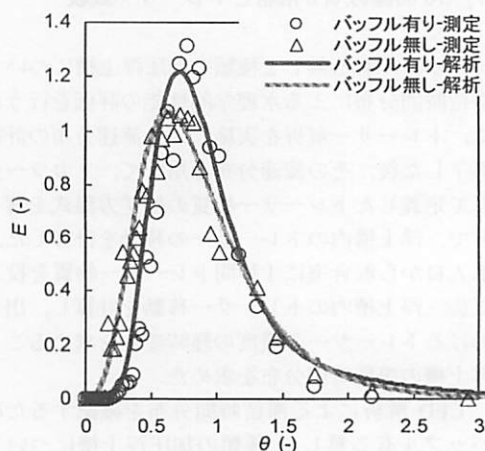


図-8 CFD and experimental RTD curve for with and without bar-type baffles

ッフル設置により循環流が減り清澄領域が増えたためと考えられる。無次元化平均滞留時間(θ_m)は、バッフル無し構造が 0.90 なのに対して、バッフル有り構造は 0.98 であり、バッフル有り構造の方が大きくなった。短い滞留時間で流出する流れの大きさの程度を特徴付ける指標である SFi の計算結果は、バッフル無し構造が 0.22 なのに対して、バッフル有り構造は 0.15 であり、バッフル有り構造の方が小さくなった。

浮上槽の気泡付着フロックの流出割合分布($R(\theta_f)$)を図-9に示す。バッフル無し構造に比べバッフル設置浮上槽は、フロック浮上時間(θ_f)に対する流出率が低くなっており、浮上槽としての浮遊物質除去能力が向上しているといえる。

③ バッフル設置による除去率の向上

模擬排水を凝集加圧浮上処理した結果を図-10に示す。処理水の浮遊物質濃度の平均値は、バッフル無し構造は 5.1 mg/L(流出率 3%)であるのに対し、バッフル有り構造では 1.7 mg/L(流出率 1%)となった。バッフル設置によって浮遊物質除去能力が大幅に向上することが確認された。

4 考察

(1) 浮上槽の流動状態及び気泡とフロックの分布

浮上槽の上部では循環流ができていて気泡が多く存在すること、また、その下側では流れがほとんど無く気泡も存在しないことを図-5の観察と図-6のCFD解析で確認した。これらは、浮上槽における流れ構造についての Lundh et al (2001)¹⁰や Amato and Wicks (2009)¹⁴の報告及び気泡分布についての Han et al (2009)³⁰の報告と矛盾しない結果となった。

また、清澄領域において、その上部では、気泡付着フロックが存在するが、水深が深くなる程フロックの存在が少なくなっていることが観察された。このことから、清澄領域で気泡付着フロックの分離がなされており、清澄領域を大きく形成することが、フロックの存在率が低い良好な処理水質を得るために重要であることがわかる。

(2) バッフルによる流動状態と滞留時間分布の変化

本研究では、浮上槽上部の循環流を抑制することで清澄領域を増やし、浮遊物質除去率を上げるこ

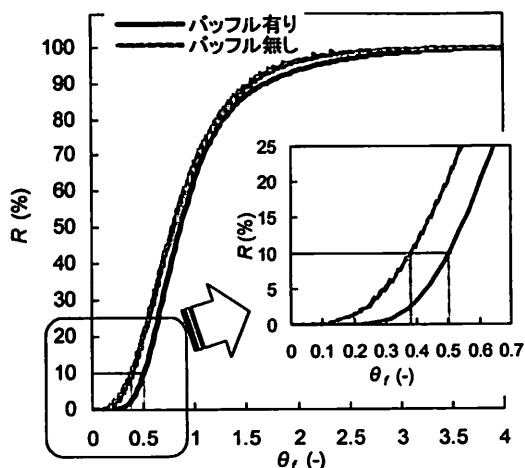


図-9 Effluent rate of floc in flotation tank

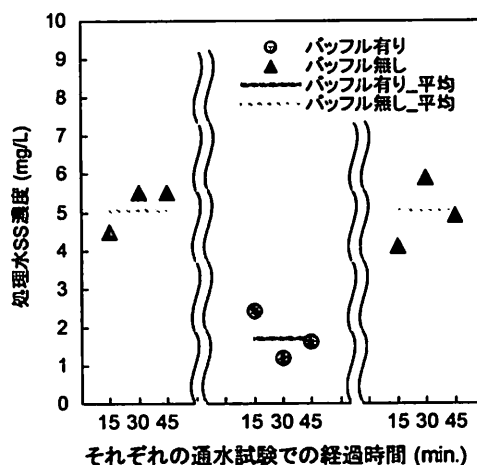


図-10 Effluent SS concentration with and without bar-type baffles

とを意図して、流体抵抗を与えるバッフルを設置した構造を検討した。

流速分布の違い(図-7)から狙い通りのバッフルによる循環流の抑制効果が確認できた。滞留時間分布を表すトレーサー流出曲線において、バッフルを設置して循環流を抑制した構造でトレーサーの出現開始時間が遅くなっている。また、流出曲線の中央値が遅い時間になり、短滞留時間流れの大きさを示す指数である SFi 値が小さくなっている。バッフル有り構造では、循環流の領域が小さくなり、清澄領域が大きくなったために短い滞留時間で流出する原水の割合が小さくなったと考えられる。

(3) バッフルによる浮遊物質除去率の向上

加圧浮上装置では気泡とフロクの付着過程で、気泡付着フロクの浮上速度の分布に大きな幅ができる⁹⁾。このため、浮上槽において浮遊物質の除去率を高めるためには、浮上速度がより低い(θ_f が大きい)気泡付着フロクを分離する必要がある。

一般的に、加圧浮上装置を初めとする重力式の固液分離装置では、流出率は10%程度以下であり、除去しようとする粒子の浮上(沈殿の場合には沈降)速度の1/3程度の LV で設計するのが良いといわれている。これは、 $\theta_f=0.33$ として設計することと同じである。

流出率10%($R=10\%$)となるフロク浮上時間(これを θ_{f0} と表記する)を求めるため、図-9中において、Y軸の $R=10\%$ から右に直線を引き、これに対応するX軸のフロク浮上時間(θ_{f0})を図示した。単純な形状の加圧浮上槽は $\theta_{f0}=0.38$ であり、一般的な加圧浮上槽と同程度の浮遊物質除去率といえる。また、バッフル有り構造は $\theta_{f0}=0.5$ である。バッフル無し構造に比べて浮上速度が約24%小さい気泡付着フロクを良好に分離できることから、バッフル有り構造はより浮遊物質除去能力の高い構造であるといえる。

バッフル無し構造に比べバッフル有り浮上槽ではトレーサー出現開始時間が遅くなったために、あるフロク浮上時間(θ)に対するフロク流出率が低くなり、フロク流出率に対応するフロク浮上時間(θ)が大きくなっている。

フロクと気泡の付着過程は混合室で行われるため、バッフル有り無しによらず、気泡付着フロクの浮上速度は等しいと考えられる。そこで、今回の浮遊物質除去試験において、フロクの浮上速度分布が無いと仮定し、浮遊物質除去実績からフロクの浮上時間を逆算してみる。バッフル無しで3%流出するフロク浮上時間 $\theta_{0.3}=0.25$ に対して、バッフル有りで1%流出するフロク浮上時間 $\theta_{0.1}=0.32$ であり、若干の差がある。実際の気泡付着フロクの浮上速度にはかなり幅の広い分布があるといわれている⁹⁾。フロクの浮上速度分布の各成分ごとに図-9の R 分布から流出率を算出し、これらを足し合わせた合計が総合的な処理水の浮遊物質質量になる。浮上速度の分布があることがこの差の主要因であり、本方法における精度の限界と考えられる。

今回のCFD解析は気液2相流であり、実際の気泡付着フロクの除去挙動は計算していない。今後浮上速度分布を持つ気泡付着フロク成分を組み入

れることで、より精度の高い直接的な処理水流出浮遊物質濃度の計算が可能であると期待される。

5 結論

本研究では、バッフル設置加圧浮上槽における流れ構造の変化と浮遊物質除去性能の向上を、CFD解析及び実験で検討した結果、以下の結論を得た。

- ・ 気液2相流のCFD解析で、滞留時間分布を精度良くシミュレーションすることができる。
- ・ バッフルで流体抵抗を与えることにより、浮上槽内の清澄領域を大きくすることができ、フロクが10%流出するフロク浮上時間(θ_{f0})を0.38から0.5へ増加させることができる。
- ・ バッフル設置加圧浮上槽は、浮遊物質の除去率が97%から99%に増加し、流出してしまう浮遊物質濃度を3分の1に減少させることができた。

参考文献

- 1) James K. Edzwald: Principles and application of dissolved air flotation, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 31, No. 3-4, pp1-23, 1995.
- 2) Fukushi K., Tambo N. and Matsui Y.: A kinetic model for dissolved air flotation in water and wastewater treatment, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 31, No. 3/4, pp. 37-47, 1995.
- 3) 丹保憲仁, 五十嵐敏文, 沼塚雅彦: 気ほう付着フロク生成の電気泳動的研究 溶解空気浮上法の基礎的研究 II, 水道協会雑誌, Vol. 54, No. 1 pp. 2-6, 1985.
- 4) 丹保憲仁, 福士憲一: 加圧浮上分離の動力学過程 溶解空気浮上法の基礎的研究 III, 水道協会雑誌, Vol. 54, No. 3, pp. 22-30, 1985.
- 5) 福士憲一, 丹保憲仁, 沼塚雅彦: 加圧浮上分離の動力学過程の実験的評価 溶解空気浮上法の基礎的研究 IV, 水道協会雑誌, Vol. 54, No. 4, pp. 32-41, 1985.
- 6) 丹保憲仁, 松井佳彦, 福士憲一: 加圧浮上法の微気ほう付着過程の解析 溶解空気浮上法の基礎的研究 V, 水道協会雑誌, Vol. 54, No. 7, pp. 2-11, 1985.
- 7) Goula A. M., Kostoglou M. and Karapantsios T. D.: 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.
- 8) Lundh M., Joensson L. and Dahlquist J.: Experimental studies of the fluid dynamics in the separation zone in dissolved air flotation, *Wat. Res.*, Vol. 34, No. 1, pp. 21-30, 2000.
- 9) Lundh M., Joensson L. and Dahlquist J.: The influence of

- contact zone configuration on the flow structure in a dissolved air flotation pilot plant., *Wat. Res.*, Vol. 36, No. 6, pp. 1585-1595, 2002.
- 10) Lundh M, Joensson L. and Dahlquist J.: The flow structure in the separation zone of a DAF pilot plant and the relation with bubble concentration, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 43, No. 8, pp. 185-194, 2001.
 - 11) Lundh M. and Joensson L.: Flow structures in a dissolved air flotation pilot tank and the influence on the separation of MBBR floc, *Wat. Sci. Tech. Wat. Sup.*, Vol. 2, No. 2, pp. 69-76, 2002.
 - 12) Fair G. M. and George J. C.: *Water Supply and Waste Water Disposal*, John-Wiley, New York, 1954.
 - 13) Lundh M. and JOENSSON L.: Residence Time Distribution Characterization of the Flow Structure in Dissolved Air Flotation, *J. Env. Eng.*, Vol. 131, No.1, pp. 93-101, 2005.
 - 14) Amato T. and Wicks J.: The practical application of computational fluid dynamics to dissolved air flotation, water treatment plant operation, design and development, *J. Water Supply Res. Tech. AQUA*, Vol. 58, No. 1, pp.65-72, 2009.
 - 15) Ta C. T., Beckley J. and Eades A.: A multiphase CFD model of DAF process, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 43, No. 8, pp. 153-157, 2001.
 - 16) Hague J., Ta C. T., Biggs M. J. and Sattary J. A.: Small scale model for CFD validation in DAF application, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 43, No. 8, pp. 167-173, 2001.
 - 17) 寺嶋光春：流体解析シミュレーションによる水処理装置設計の実例, *EICA*, Vol. 13, No. 13, pp. 15-18, 2008.
 - 18) Kwon S. B., Park N. S., Lee S. J. and Ahn H. W.: Examining the effect of length/width ratio on the hydrodynamic behaviour in a DAF system using CFD and ADV techniques, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 53, No. 7, pp. 141-149, 2006.
 - 19) Heijnen J.J., Hols J., van der Lans R. G. J. M., van Leeuwen H. L. J. M., Mulder A. and Weltevrede R.: A simple hydrodynamic model for the liquid circulation velocity in a full-scale two- and three-phase internal airlift reactor operation in the gas recirculation regime, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 52, No. 15, pp. 2527-2540, 1997.
 - 20) Kubota H., Hosono Y. and Fujie K.: Characteristic evaluations of ICI AIR-LIFT type deep shaft aerator, *J. Chem. Eng. Jpn.*, Vol. 11, No. 4, pp. 319-325, 1978.
 - 21) 李泰日, 長岡裕：数値流体力学(CFD)手法を用いた浸漬型膜分離活性汚泥法における膜面せん断応力の評価, *土木学会論文集 G*, Vol. 65, No. 1, pp. 8-15, 2009.
 - 22) 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.
 - 23) 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.
 - 24) Ta C. T., Beckley J. and Eades A.: A multiphase CFD model of DAF process, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 43, No. 8, pp. 153-157, 2001.
 - 25) Pfleger D., Gomes S., Gilbert N. and Wagner H.-G.: Hydrodynamic simulations of laboratory scale bubble columns fundamental studies of the Eulerian-Eulerian modelling approach, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 54, pp. 5091-5099, 1999.
 - 26) Pfleger D. and Becker S.: Modelling and simulation of the dynamic flow behaviour in a bubble column, *Chem. Eng. Sci.* Vol. 56, pp. 1737-1747, 2001.
 - 27) ANSYS, CFX5.7-Flow solver manual, 2004.
 - 28) Launder, B. E., Spalding, D. B.: *Mathematical models of turbulence*, London, GB: Academic Press, 1972.
 - 29) Ishii M. and Zuber N.: Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows, *AIChE Journal*, Vol. 25, No. 5, pp. 843-855, 1979.
 - 30) Han M. Y., Kim T. I. and Kwak D. G.: Measurement of bubble bed depth in dissolved air flotation using a particle counter, *J. Water Supply: Res. Tech. AQUA*, Vol. 58, No. 1, pp. 57-63, 2009.
 - 31) Stamou A. I.: 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.
 - 32) Li J., Zhang J., Miao J., Ma J. and Dong W.: Application of computational fluid dynamics (CFD) to ozone contactor optimization, *Wat. Sci. Tech. Wat. Sup.*, Vol. 6, No. 4, pp. 9-16, 2006.
 - 33) Stamou A. I. and Noutsopoulos G.: Evaluating the effect of inlet arrangement in settling tanks using the hydraulic efficiency diagram, *Water SA*, Vol. 20, No. 1, pp. 77-83, 1994.
 - 34) 井出哲夫：水処理工学-理論と応用-第2版, pp. 19, 技報堂出版, 2001.
 - 35) 通商産業省環境局地局：公害防止の技術と法規水質編, pp.135-136, 丸善, 1995.

(2009. 5. 22 受付)

Hydraulic Estimation of Bar-Baffles DAF using CFD Simulation and Experiment

Mitsuharu TERASHIMA^{1*} • Mamoru IWASAKI¹ • Hidenari YASUI² •
Rajeev GOEL³ • Chihiro INOUE⁴ • Koichi SUTO⁴

¹Kurita Water Industries Ltd.

² Faculty of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu

³Hydromantis, Inc.

⁴Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

Computational Fluid Dynamics (CFD) was applied to dissolved air flotation (DAF), to clarify the effect of the very simple baffles installed at the inlet part of the flotation zone. The results of the two-phase CFD simulation were found to be in good agreement with experimental residence time distribution (RTD) curve. The simulation results indicate significant improvement for overall flow pattern and profiles of the hydraulic retention times. The separation zone in flotation tank enlarged by installing the bar type baffles at the inlet part of the flotation zone due to the hydraulic friction. From the analysis of RTD curve, the normalized time for flock flotation giving the 10% flow out of flock (θ_{10}) is improved from 0.38 to 0.5 and the increase of removal rate in SS is expected. The CFD results are verified by the experimental pilot study with better SS removal efficiency of 99% for the baffled separator compared to 97% for the conventional ones.