

(80) 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

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

低液深の横流式加圧浮上装置について、CFD 解析を用いて最適な処理水取水管の位置と構造を検討した。処理水取水口を浮上分離室の入口から遠い側に設置したときには 10%のトレーサが流出する無次元化時間は 0.14 であったが、入口に近い側のときには 0.37 になり、大幅に改善した。処理水の流出気泡は大幅に減少し、高い SS 除去性能が予想された。底面から取水することを意図して設置した取水口の覆いは若干の水理的向上をもたらした。CFD で最適構造を決定した実際の装置について水中カメラを用いて観察した結果、CFD 解析結果と同じく、入口から遠い側の底部は循環流領域になっているものの、近い側の底部は清澄領域になっていた。近い側の底部から集水したところ良好な処理水質が得られた。

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一般的な方法のひとつである。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、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。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¹⁾。

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²⁾。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³⁾。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⁴⁾及び水面積負荷や加圧水量によって層状構造が乱れて偏流ができること⁵⁾が確認されている。Lundh et al (2002)⁶⁾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。また、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、棒状のバップルを設置することで SS 除去率が向上することが報告されている⁶⁾。

加圧浮上装置の浮上槽は、水面積負荷(LV)を設計パラメータとした設計を行う⁷⁾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高い SS 除去率になると考えられるが、配置上の制約から制限される場合があり、このときには大流量を処理するためには、アスペクト比(横方向長/水深)が大きい浮上槽形状となる。浮上槽の上部に形成される循環流は横方向長さに伴い大きくなるため、アスペクト比の増大は清澄領域を減少させ、処理水に流出する SS 濃度の増大(処理性能悪化)を招くと予想される。

数値流体力学(CFD)解析手法は、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、このよ

うな水理的現象をコンピュータ上で再現することができる。浮上槽の流れ構造の検討のための流体解析の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を示した報告⁸⁾、⁹⁾や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¹⁰⁾。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(RTD)曲線がある¹¹⁾、¹²⁾、¹³⁾。RTD 曲線は CFD 解析によって精度良く求められることが報告されている⁶⁾、¹¹⁾。

既報のアスペクト比 1.3 の従来型の浮上槽では、CFD 解析結果⁶⁾によると、液深の 3 分の 1 から 2 分の 1 程度が大きな流速となっていることから、これに対応してアスペクト比をこの 2 倍から 3 倍に増やすと、浮上槽の深さ方向全体に循環流領域が広がるものと予想される。極端な数値の方が結果ははっきりするので、本研究では、既報のアスペクト比(1.3)の 3 倍のアスペクト比について検討した。アスペクト比 3.9 の低液深の横流式加圧浮上槽について、CFD 解析及び RTD 曲線を用いて、異なる構造条件設定の場合の流動挙動を比較し、清澄領域を確保するための処理水構造について論証し、新たな知見を得た。さらに、実際に最適化した浮上槽内を水中カメラで観察しこれを確認した。

2 方法

(1) 浮上槽構造と水理学的条件

本研究で検討対象とした浮上槽の構造を図-1に示す。浮上槽の主要な寸法及び流量条件を表-1に示す。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。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カムスキマー(図示していない)で浮上スカムを分離除去した。処理水の取水管の設置位置(処理水取水位置)としては、混合室から遠い側の底部に設置した構造(構造 1)、混合室に近い側の底部に設置した構造(構造 2)及び浮上分離室の底部 3 箇所に均等に配した構造(構造 3)とした。また、処理水取水口への上方からの流れを防ぎ、浮上分離室の底面付近から処理水を取水できるようにすることによって、良好な処理水を得ることを狙い、それぞれの処理水取水位置構造について、浮上槽と同じ幅を持ち、浮上槽の底面と接する部分にスリットを設けた長方形の箱で処理水取水口を覆った構造(処理水取水部パッフル構造)を検討した(それぞれ構造 4、構造 5 及び構造 6)。

(2) 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⁸⁾、⁹⁾、¹⁰⁾、¹⁴⁾、¹⁵⁾があ

表-1 浮上槽の寸法と流量条件

項目	単位	値
幅(W)	mm	1124
長さ(L)	mm	3100
水深(H)	mm	800
アスペクト比(L/H)	-	3.9
槽容積(V)	m^3	2.8
分離部面積(A)	m^2	3.5
原水流量(Q)	$m^3 hr^{-1}$	20
加圧水流量(Q_p)	$m^3 hr^{-1}$	4
水面積負荷(L_f)	$m hr^{-1}$	6.9
水理学的滞留時間(t_h)	sec.	418

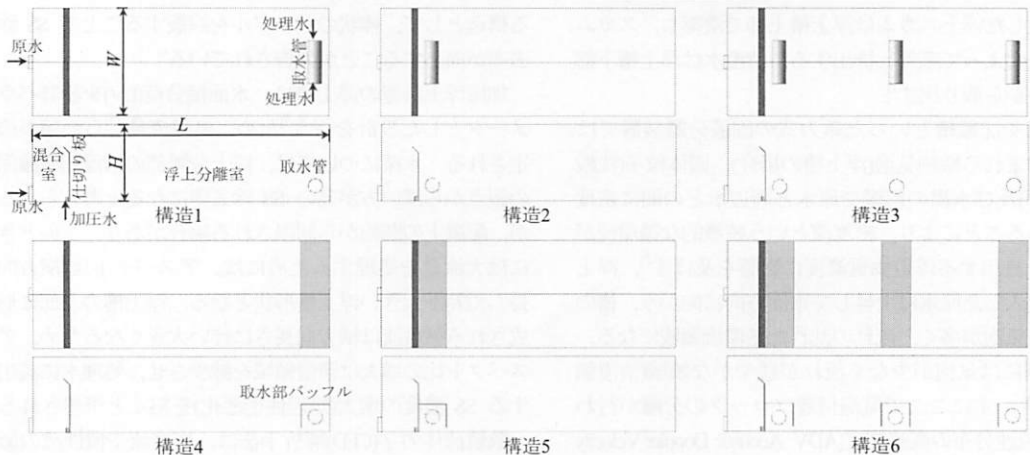


図-1 加圧浮上槽の構造(それぞれの構造について、上段は立面図、下段は側面図である)

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ウムフラクション(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^{16, 17)}。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。CFD 解析には汎用熱流体解析ソフト CFX12.1 (ANSYS 社)を用いた。モデルと条件の一覧を表-2に示す⁹⁾。気液 2 相間の相関抗力のモデル化には、Ishii-Zuber(1978)のモデル¹⁸⁾を使用した。このモデル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、楕円球形及びびきのご筈状(CAP 形状)の形状として相関抗力係数の算出式が変わる。本加圧浮上装置の実験における微細気泡の浮上速度を測定したところ 6.1 mm sec^{-1} であったことから、本相関抗力モデルでこの浮上速度となる気泡径を逆算し、気泡径は $100 \mu\text{m}$ として計算した。運転条件から液体は温度 10°C の純水、気体は温度 10°C 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 $k-\varepsilon$ モデルを用いた。加圧水入り口からの空気の流量は、気液分離槽圧力 0.35 MPa 、水温 10°C 、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。

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ブロック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¹⁹⁾。これは、固形物であるブ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ブロックの影響は無視でき、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。

加圧浮上装置の処理水への流出で問題となるのは気泡付着ブロックの流出率であるが、気泡付着ブロックの流出挙動は浮上速度が同じ微細気泡と同じ流動挙動をすると考えられることから、本研究では、微細気泡の流出率をそれと同じ浮上速度の気泡付着ブロックの流出率と同様に扱って評価を行った。

(3) RTD 曲線の計算方法

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 解析においてトレーサの計算を実施した。流速分布の計算が終了した後、その流速分布及び乱流強度の分布を用いて、スカラー量として定義したトレーサ物質の輸送方程式を解いた。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。原水入口から混合室に 1 秒間トレーサ物質を投入し、出口から流出するトレーサの濃度の経時変化を求めることでトレーサ流出曲線を得た。滞留時間に比べてトレーサの投入時間が 1% 以下と短いのでパルス投入と見なすことができ¹⁹⁾、このトレーサ流出曲線は 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: 1062 mm , H: 800 mm)について、実験結果と CFD 解析結果を比較した結果⁹⁾を図-2に示す。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の移動を計算できることが確認できている。

(4) RTD 曲線の解析方法

トレーサ計算から得られた RTD 曲線は、式(1)-式(4)で無次元化した²¹⁾。

$$E_i = \frac{C}{\sum_{i=1}^{i=n} C_i \cdot \Delta t_i} \quad (1)$$

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

表-2 加圧浮上装置の CFD 計算のモデル及び条件

項目	条件
多相流	オイラー・オイラー
相数	2 相
相関抗力	Ishii-Zuber model ¹⁸⁾
乱流モデル	液相: 標準 $k-\varepsilon$ ²¹⁾ , 気相: なし(層流)
構造	3 次元, 対称性から半分構造
エレメント数	約 40 万
壁	液相: ノンスリップ, 気相: スリップ
気相	非圧縮, 10°C の空気, 一定気泡径($100 \mu\text{m}$)
液相	10°C の水
計算システム	A Intel(R) Core 2 Duo PC Operating at 2.93 GHz

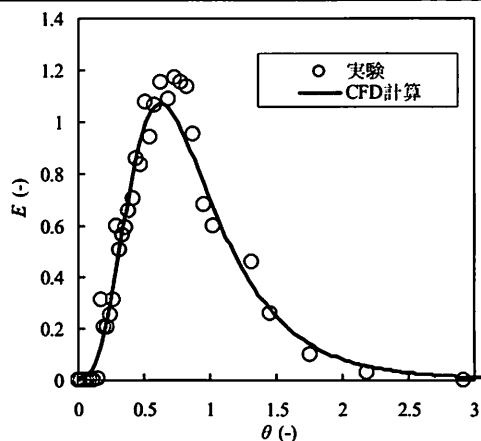


図-2 実験と CFD 計算による RTD 曲線の比較⁹⁾

$$t_h = \frac{V_F}{Q} \quad (3)$$

$$E_\theta = t_h \cdot E_t \quad (4)$$

ここで、 E_t : 出口寿命分布 (s^{-1})、 C : 出口トレーサー濃度 ($mg \cdot L^{-1}$)、 t : 時間 (s)、 θ : 無次元時間 (-)、 t_h : 水理学的滞留時間 (s)、 V_F : 浮上槽容積 (m^3)、 Q : 流量 ($m^3 \cdot s^{-1}$)、 E_θ : 出口寿命分布 (-)である。また、水理学的性能を評価するために水理学的パラメーターを式(5)-式(7)で求めた^{11), 12), 13)}。

$$t_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} t_i \cdot C_i \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{i=n} C_i \cdot \Delta t_i} \quad (5)$$

$$F(\theta) = \int_0^\theta E d\theta \quad (6)$$

$$F(\theta_{10}) = 0.1 \quad (7)$$

ここで、 t_{mean} : 平均滞留時間 (s)、 θ_{10} : トレーサーの10%流出無次元化時間 (-)である。

θ_{10} 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。無次元化水理学的滞留時間(=1)と θ_{10} の差を求め、この大きさと短い滞留時間の流れ成分の大きさを評価した。(1 - θ_{10})は0から1の間の値を取り、値が小さいほうが短い滞留時間で流出する流れ成分が少なく、良い水理学的性能と言える。

(5) 加圧浮上装置の運転条件

加圧浮上装置の実運転による処理性能の確認は構造5の浮上槽を用いて実施した。有機系総合排水を生物学的水処理装置で処理した排水にカオリン 185 $mg \cdot L^{-1}$ を混合した調整排水(SS濃度: 225 - 252 $mg \cdot L^{-1}$)に、pH7.5に調整下

でPAC 42 $mg \cdot L^{-1}$ as Al_2O_3 を添加して凝結させ、アニオン性ポリマー3 $mg \cdot L^{-1}$ を添加して凝集させたフロックを含む水を浮上槽の原水として使用した。実験装置の全体の概略図を図-3に示す。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。加圧浮上装置の処理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(気固比 = 0.07)。処理水を5分間隔で取水しSS濃度を測定した。

(6) 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、深さ及び水平方向を移動して15秒間撮影し、ビデオ映像を録画した。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評価した。

3 結果

(1) CFD 解析結果

a) 流動状態と気泡の分布

各構造について、流速分布及び気泡ボリュームフラ

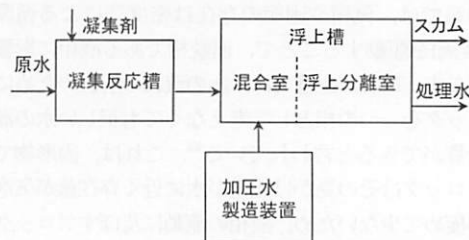


図-3 加圧浮上実験装置全体

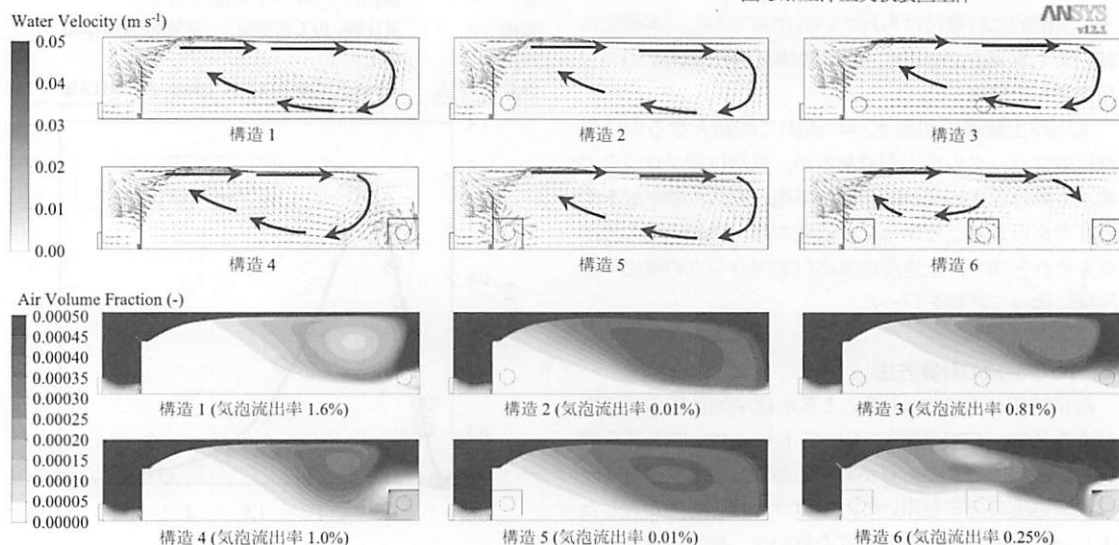


図-4 流速分布のベクトル表示と気泡ボリュームフラクション分布のCFD計算結果

クシンの計算結果を図-4に示す。処理水に流出する気泡量を流入する気泡量で除して求めた気泡流出率を図-4に合わせて示す。構造1～構造5は、混合室から浮上分離室に入った水は、水面付近を通過して反対側の壁まで至り、下向きに向きを変えて槽底に至り、浮上分離室入口に向かっていく。水平方向は浮上分離部の入口側からその反対側に至るまで、水深方向は水面から槽底に至るまでの、大きな循環流が形成されている。構造6は、循環流の一部が底部において処理水取水部バップルに遮られているものの同様に循環流が見られる。

いずれの構造も気泡は下降流によって槽の底部にまで引きこまれている。下降流がある場所(混合室の反対側)に処理水取水部がある構造では、処理水取水部の位置まで気泡が到達している。このため、構造1は気泡流出率が高い。逆に下降流の場所に処理水取水部の無い構造2は気泡流出率がほとんど無い。構造3は3箇所から分

散して処理水を取水しているために、この中間となっている。また、処理水取水部バップルについては、構造5は構造2と同様に低く流出の違いが無い。構造4及び構造6は底面付近から取水するため、無い構造に比べて気泡流出率が低くなっている。

実際の加圧浮上装置では、浮上分離部へは気泡と気泡付着ブロックの両方が流入する。本解析は気液2相流を扱ったために、気泡付着ブロックは計算されていないが、気泡付着ブロックは浮上速度が同じである気泡と同じ挙動をするものと考えられる。今回検討した構造の中で、気泡流出率からは、構造2及び構造5が最も良い構造であった。

b) RTD 曲線

各構造について、トレーサーの分布の経時変化を図-5に示す。浮上分離室に入ったトレーサーは、水面付近を

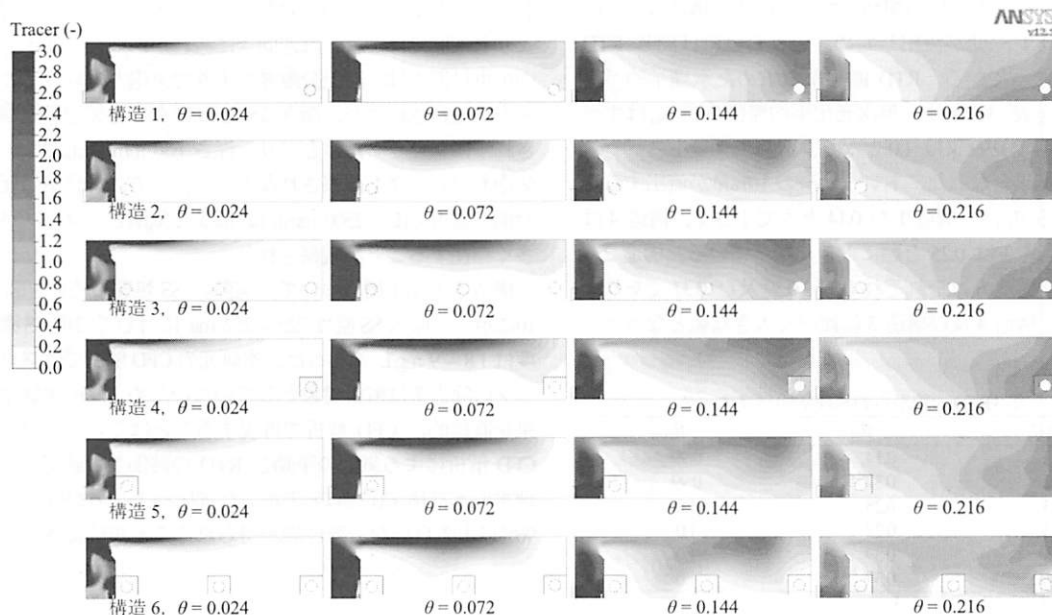


図-5 トレーサー分布の時間変化

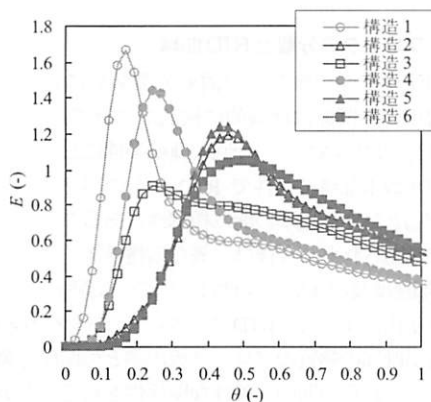


図-6 浮上槽の RTD 曲線

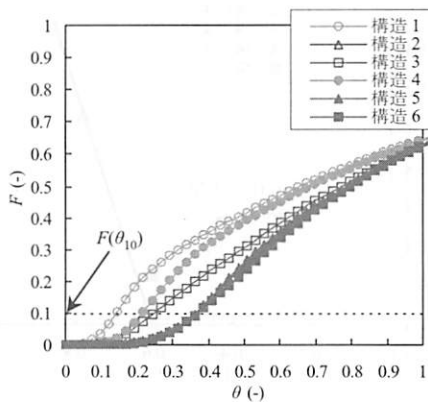


図-7 浮上槽の F 曲線

通って反対側の壁付近まで至り、下向きに向きを変えて、槽底に至っている。構造 1 は、流れが下向きに向きを変えた直下に処理水取水管があるために、槽の大部分にはまだトレーサーが至っていない $\theta = 0.072$ という早い時間で、無次元化トレーサー濃度 0.2 以上のトレーサーが処理水取水部の上端に至っている。一方、構造 2 は、大部分にトレーサーが至った $\theta = 0.144$ の時間で、無次元化トレーサー濃度 0.2 以上のトレーサーが処理水取水部の上端に至っている。構造 3 は、3 本ある処理水取水管の中で混合室から遠い順にトレーサーが到達している。処理水取水部にバッフルのある、構造 4、構造 5 及び構造 6 では、処理水取水部の上側がバッフルで覆われているために、それぞれバッフルの無い構造よりもわずかに時間が遅れてトレーサーが到達している。

RTD 曲線の計算結果を図-6に、式(6)で求めた浮上槽の F 曲線を図-7にそれぞれ示す。構造 1、構造 4、構造 3 の順にトレーサーの流出が開始した。その他の構造はさらに遅れてトレーサーが流出し始め、これらはほぼ同じ RTD 曲線となっている。RTD 曲線から求めた水理学的パラメータを表-3に示す。無次元化平均滞留時間 θ_m はすべての構造で 0.99 又は 1.0 となり、計算上デットスペースは無い結果となった。トレーサーの 10% 量が流出する時間である θ_{10} は、構造 1 が 0.14 と大変小さく、構造 4 は 0.22、構造 3 は 0.25 と順に大きくなっている。構造 2、構造 5、構造 6 はそれぞれ 0.37、0.39 及び 0.37 であり、構造 1、構造 4 及び構造 3 に比べて大きな値となった。

表-3 RTD 曲線からの水理学的パラメータ

構造	θ_{10}	θ_m
1	0.14	0.99
2	0.37	0.99
3	0.25	1.0
4	0.22	1.0
5	0.39	1.0
6	0.37	1.0

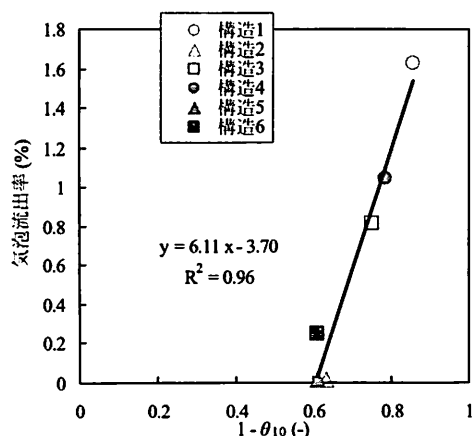


図-8 $(1 - \theta_{10})$ と気泡流出率の関係

構造 5 が最も大きな値となった。

気泡流出率の解析結果は構造 2 と構造 5 で同じであったが、 θ_{10} は構造 5 が約 5% の大きくなった。違いは小さいものの、構造の複雑さがわずかに増加するだけであるので、 θ_{10} が最も大きい構造 5 を採用することにした。

トレーサーが 10% 流出する時間と水理学的滞留時間との差 $(1 - \theta_{10})$ と気泡流出率の関係を図-8に示す。今回の条件では、 $(1 - \theta_{10})$ が 0.6 程度であれば、気泡流出はほとんどないが、 $(1 - \theta_{10})$ が 0.6 よりも高いと $(1 - \theta_{10})$ の増加に伴い気泡流出率は直線的に増加した。

(2) 低液深浮上槽の運転結果

CFD 解析及び RTD 曲線からの評価で水理学的性能が良かった構造 5 について、実際の浮上槽内の様子を水中カメラによって観察した。観察結果を図-9に示す。

浮上槽の長手方向中央付近 ($L=1500$ mm) では、上部において混合室からその反対側に向かう流れがあり、中層よりも下側ではこれとは逆向きに流れがあった。長手方向中央付近では、浮上分離部の上部で気泡とブロックの両方が観察されたが、深さ 550 mm になると気泡が観察されずにブロックだけとなり、深さ 650 mm 以上では、気泡もブロックも観察されなかった。一方、混合室の反対側の壁近く ($L=2500$ mm) は底部まで気泡とブロックが多く存在することが観察された。

構造 5 の浮上槽について、実際の SS 処理の結果を図-10に示す。原水 SS 濃度 225 - 252 mg に対して処理 SS 濃度は 1.8 - 9 mg/L であった。本研究の CFD 解析ではブロックの除去率は解析対象としていないため、この実験結果を直接的に CFD 解析で再現することはできないが、CFD 解析による気泡の挙動と RTD の評価から適切な処理水取水部構造(位置)を決定した加圧浮上装置が除去率 96% 以上の良好な分離性能が得られることが確認された。

4 考察

(1) フロックの分離と RTD 曲線

加圧浮上や沈殿などの固液分離装置において、RTD と流出率の関係は理論的に検討がされている^{9), 21), 23)}。本研究では図-8から、今回の運転条件において、異なる処理水取水部構造条件で RTD からのパラメータである $(1 - \theta_{10})$ と気泡流出率の間に相関性があることが計算上実際に確認された。今後は、異なる槽構造、フロック浮上(沈降)速度及び LV の条件について、実験的手法や CFD 解析手法によって、RTD からのパラメータと浮上(沈降)速度が既知の物質のフロック流出率との関係を調べることで、これらの間の一般性な関係性を得ることが課題で

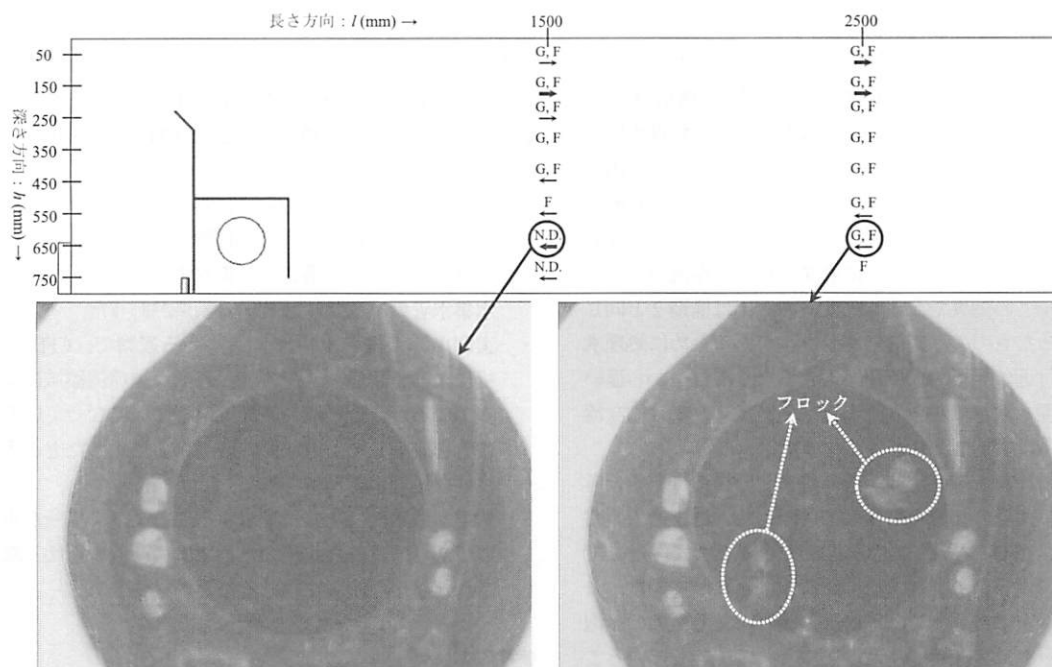


図-9 浮上槽(構造 5)の中ビデオカメラ撮影結果。二重線矢印は速い流れ(0.01 m/sec 程度以上)を示す。実線矢印は緩やかな流れ(0.005 m/sec 程度)を示す。矢印の向きは流れの向きを表す。矢印がないのは顕著な流れが無いことを表す。“G”又は“F”は15秒間の撮影時間中でそれぞれ気泡又はフロックが出現しなかったことを示す。N.D.は15秒間の撮影時間中で気泡及びフロックが出現しなかったことを表す。

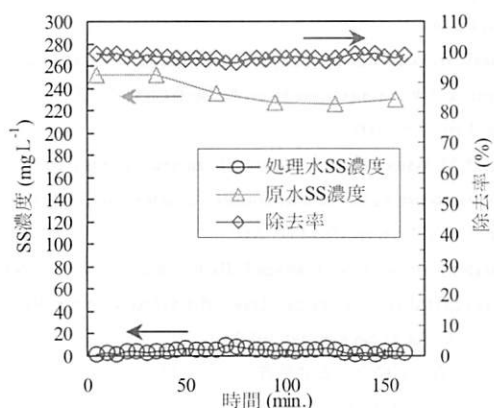


図-10 加圧浮上装置(構造 5)のSS除去試験結果

ある。気泡付着フロックの除去性は原水性状や凝集の条件などで変わることから原水の異なる加圧浮上装置間での浮上槽の性能比較は困難であるのに対し、RTD 曲線は原水性状に依存しにくいことから RTD 曲線を用いることで浮上槽性能の比較評価が容易に可能になると考えられる。

(2) 低液深横流式浮上装置に最適な処理水取水管構造

横流式加圧浮上装置は、一般的には、混合室の反対

側に処理水取水部を設ける^{8), 13), 24), 25), 26)}。ところが、加圧浮上槽では循環流が生じ、アスペクト比が大きい構造で底付近まで循環流となることが示されている^{8), 9)}。本研究においても、CFD 解析によって、アスペクト比が大きい低液深浮上槽構造について底付近まで循環流となることが示された。このため、混合室の反対側に処理水取水部を設けた本研究の構造 1 は、処理水取水部が循環流の中に存在しており、トレーサーがすぐに到達した。また気泡の流出量も多く、気泡付着フロックが処理水と共に流出することが懸念された。構造 1 の浮上槽の中でも、浮上槽左下の箇所は小さい流速になっていることと浮上分離室左下の箇所へは、比較的長い時間トレーサーが到達していないことから左下の領域に清澄領域を作ることができると考え検討した浮上槽左下の箇所に処理水取水口を配した浮上槽(構造 2)は狙い通り、気泡の流出が低く、トレーサーの出現も大幅に遅くなった。

構造 1、構造 2 共に、トレーサーは丸い取水口の上から取水口に至っている。また、構造 2 は気泡は処理水取水口まで至っていないが、構造 1 は気泡が上方から取水口に至っている。このことから、槽底から取水すれば、トレーサーの流出開始が遅くなり、構造 1 については気泡流出も少なくなると考え、処理水取水口の上側を覆うバッフル構造を検討したところ、取水口の付近の水を吸

い込む方向が下からに変わったただけなので、効果は少ないものの、若干の改善があった。

処理水の取水を浮上分離室全体に均一にすることを図った構造も実施されている^{10, 27, 28, 29}が、構造 3 で見るように、混合室から遠い側に設置してある処理水取水口からは早い時間でトレーサーが流出し、気泡の流出もあるため、混合室に近い側のみに処理水取水口を設置する方が好ましいと考えられる。構造 3 にバッフルを設置した構造 6 では、バッフルに邪魔されて循環流が小さくなった。この効果で、トレーサーの流出は構造 2 と同じにはなったものの、底部にバッフルがあるために処理水取水口付近の局所的な流速が大きくなり混合室から遠い側の処理水取水口からの流出気泡量が多く、総合的な流出気泡量は構造 2 よりも多くなった。

以上の検討から構造 5 が最も好ましい構造であると考えられ、実際の装置を製作して運転した。浮上槽の観察の結果、CFD 解析通り混合室の反対側では底付近まで気泡とフロックが存在する循環流領域となっていた。また、混合室に近い側では、底部は流れはあるものの気泡やフロックは存在せず、清澄領域として機能していることが明らかとなった。処理水取水部を適切な場所に配した加圧浮上装置は、良好な処理ができることを確認した。

(3) 浮上槽内の流動と処理水取水部構造

構造 2 に示すように処理水取水部を左下にしたとき、構造 1 に比べて、循環流は若干左側に広がるものの、左下の部分は循環流から切り離されたままである。構造 6 は他と流れの構造が異なっている。この理由は、取水部バッフルが横断的に設置しているために流れを妨げ抵抗として働いているためと考えられる。循環流の中に設置した障害物は循環流を弱める働きがあり、浮上槽の性能向上に役に立つことが報告されている⁹。この効果が構造 6 でも生じている。構造 6 を除いては、各構造で処理水取水部周辺の局所的な流れが変化したことと循環流が若干左に広がったことだけが構造の違いによる流れの違いであり、循環流の構造は大きく変わっていない。また、底部付近からの集水を図って覆いを被せた構造 3 及び構造 4 は、若干の改善があるものの、位置を変えたのに比べると効果は小さい。つまり、全体の流れ構造は原水の流入の慣性力と気泡による密度流で支配されており、処理水取水部は全体の流れ構造には大きな影響を与えないことがわかる。よって、処理水取水部はその構造を改良して均一に集水することより場所が重要であり、良好な処理のためには循環流から切り離された静かな領域に処理水取水部を設けることが必要である。

5 結論

本研究では、アスペクト比の高い浮上槽を持つ横流式加圧浮上装置について、水理学的性能に及ぼす処理水取水口の設置場所及び構造の影響を CFD 解析を用いて調べ、以下の結論を得た。

- ・ 処理水取水口は入口から遠い側の底部に設置するよりも入口に近い側の底部に設置するのが良い水理学的性能となった。槽底から集水するようにした処理水集水管のバッフルは若干の効果があった。
- ・ 実際の浮上槽の水中カメラによる観察で、CFD 解析による予想通り、遠い側の底部は循環流領域になっているが、近い側の底部は清澄領域になっていることを確認した。近い側の底部から集水したところ、良好な処理水質が得られた。
- ・ 処理水取水部は均一に集水することよりも場所が重要であり、良好な処理のためには循環流から切り離された静かな領域に設けることが必要である。

参考文献

- 1) James K. Edzwald: Principles and application of dissolved air flotation, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 31, No. 3-4, pp.1-23, 1995.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 寺嶋光春, 岩崎守, 安井英奇, 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.
- 7) 和田洋六: 造水の技術, pp. 34, 地人書館, 1996.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Kwon S. B., Park N. S., Lee S. J. and Ahn H. W.: Examining the effect of length/width ratio on the hydro-dynamic behaviour in a DAF system using CFD and ADV techniques, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 53, No. 7, pp. 141-149, 2006.

- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) Arnato 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.
- 14) 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.
- 15) 寺嶋光春, 安井英奇, 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 新堀雄一, 和嶋延寿, 千田信, 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.
- 20) Launder B. E. and Spalding D. B.: Mathematical models of turbulence, London, GB: Academic Press, 1972.
- 21) Levenspiel O.: Chemical Reaction Engineering, 3rd ed., Chapter 11, pp. 257-282, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- 22) Fair G. M. and George J. C.: Water Supply and Waste Water Disposal, John-Wiley, New York, 1954.
- 23) 中川義徳 “矩形沈殿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, Vol. 333, pp. 15-36, 1962.
- 24) Kiuru.: Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest (third) one (DAF in the turbulent flow conditions), *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 43, No. 8, pp. 1-7, 2001.
- 25) Jokela P., Ihalainen E., Heinanen J. and Viitasari M.: Dissolved air flotation treatment of concentrated fish farming wastewaters, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 43, No. 8, pp. 115-121, 2001.
- 26) Metcalf & Eddy Inc., Tchobanoglous G., Burton F. L. and Stensel H.D.: Wastewater Engineering Treatment and Reuse, 4th ed., pp. 420, McGraw-Hill, New York, 2004.
- 27) Leppinen D. M. and Dalziel S. B.: Bubble size distribution in dissolved air flotation, *J. Water Supply Res. Tech. AQUA*, Vol. 53, No. 8, pp. 531-543, 2004.
- 28) 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.
- 29) Crossley I. A. and Valade M. T.: A review of the technological developments of dissolved air flotation, *J. Water Supply: Res. Tech. AQUA*, Vol. 55, No. 7/8, pp. 479-491, 2006.

(2011. 5. 30 受付)

Hydraulic Optimization of Outlet-Structure in Low Depth Rectangular Dissolved Air Flotation Tank using CFD

Mitsuharu TERASHIMA^{1*} · Hidenari YASUI² · Rajeev GOEL³
· Koichi SUTO⁴ · Chihiro INOUE⁴

¹ Kurita Water Industries Ltd.

² Faculty of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu

³ Hydromantis, Inc.

⁴ Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

Computational Fluid Dynamics (CFD) was applied to optimize a outlet position and structure of a low-depth rectangular dissolved air flotation tank. According to the hydraulic characteristic analyses for residence time distribution (RTD) curves, the parameter, θ_{10} (dimensionless time at which 10% of tracer has discharged) increased from 0.14 to 0.37 by moving a outlet pipe from the far side to the near side of inlet position, suggesting significant reduction in short circuiting flow. An outlet pipe near inlet position also showed the better removal efficiency by reducing the bubble contents in the effluent. A covering of outlet pipe to take the effluent from the bottom of flotation tank improved hydraulic performance slightly. The video camera observation of an actual flotation tank optimized by the CFD simulation showed the far side bottom of inlet position seemed a recirculating region but near side bottom seemed calm region same as the CFD simulation. The effluent from the near side bottom in the flotation tank resulted in good SS removal efficiency.