

旋回機構付きプロペラ式水中攪拌機の矩形反応槽における 攪拌性能シミュレーション

On the Mixing Performance Simulation of Oscillating Mixer in Rectangular Anaerobic Treatments Tanks

岡本 幸彦 エンジニアリング研究所 水システム研究部 主幹 工博
功刀 亮 エンジニアリング研究所 水システム研究部
大橋 一聡 水エンジニアリング本部 計画部 統括スタッフ
遠藤 淳 水エンジニアリング本部 水道環境技術部 プロセス技術室 室長
篠原 淳二 水エンジニアリング本部 計画部 統括スタッフ

Yukihiko Okamoto
Makoto Kunugi
Kazutoshi Ohashi
Jun Endo
Junji Shinohara

前報¹⁾において報告した旋回機構付きプロペラ式水中攪拌機（NKK スウィングミキサー）は、大規模下水処理場嫌気槽・無酸素槽用として開発され、低消費電力、軽量、メンテナンス性の良さや低ランニングコストを特徴とした画期的な新型攪拌機である。今回この旋回機構付きプロペラ式水中攪拌機が作動した場合の矩形槽内の流動状況を数値解析でシミュレーションする方法を新たに開発した。さらに活性汚泥に相当する固形物粒子を槽内に入れた場合に本攪拌機の槽底部への汚泥沈降防止効果についてもシミュレーション計算で求め、実設備における実験結果と比較した。この結果、槽内の流動状況および固形物の沈降状況についてもシミュレーション計算は実験と良い相関を示すことがわかった。

A propeller type underwater mixer with the oscillating mechanism is newly developed for the efficient mixing of large size wastewater treatment plants, which has already reported and named NKK Swing Mixer. It has the characteristics of low energy consumption, light weighted, easy maintenance and low running costs. This report deals with the numerical simulation method to obtain the unsteady flow field of the rectangular reaction tank using FLUENT-5 CFD code and user defined functions. Moreover the simulation of prevention from the sedimentation of sludge in the anaerobic reaction tanks by a NKK Swing Mixer are tested using algebraic slip mixing model using solid particles which has the similar diameter and specific gravity to the activated sludge in wastewater treatment tank. Simulated results containing the velocity distributions and activated sludge concentration distribution in several points in the tank were compared with the experimental results obtained at the actual working wastewater treatment plant. According to these results, the newly developed CFD simulation method showed close correlation with the experimental results.

1. はじめに

大規模下水処理場における、窒素、リン除去を目的とした矩形嫌気槽・無酸素槽用の攪拌機として開発した旋回機構付きプロペラ式水中攪拌機は、低消費電力、小型軽量で簡単に水中から引き上げられ、設置、点検のための足場も不要で維持管理性の良いことを特徴とする新型の攪拌機であり¹⁾、今後の普及が期待されている。

そこで、さまざまな大きさと槽形状に対して最適な攪拌機の選定や配置、底部流速の確保、さらに汚泥沈積防止効果の定量的な検討が実施できるように、今回、広く使われている CFD (Computational Fluid Dynamics) コードである FLUENT-5 とそのユーザー定義関数を用いて、本攪拌機を備えた矩形槽内流動解析手法を開発した。本稿では、

この計算手法の紹介と本手法を用いて行った槽内流速分布や時系列変化、また活性汚泥に性状の近い固形物の沈積防止効果などについての計算例と実施設において計測した流速分布や汚泥沈積状況の比較結果について報告する。

2. 計算モデル

2.1 プロペラ式水中攪拌機のモデル化

今回用いた槽内流れのモデル化で最も困難な点は、水中プロペラの旋回機構をどのように数値解析でモデル化するかであった。その他の点は通常の FLUENT-5 などの CFD コードに標準機能として用意されているものを使用すればシミュレーションは可能であると考えられた。

水中プロペラによる流体の加速は、最も簡単にはファンモデルと呼ばれる圧力ジャンプのある面で表現される。フ

ファンモデルではプロペラの流体力学的特性を簡略化しファンを通過する流量の関数として圧力ジャンプの大きさを与える。本攪拌機の旋回の効果を表すためには、このファンを時間とともに回転軸の周りに回転させていく必要がある。今回のモデル化では水中プロペラの運動軌跡面となる薄い円弧状の Volume に計算グリッドを貼って、時間とともにこのグリッド上を、ファン特性を持つグリッドが移動していくという設定を行った。

プロペラは、実際は円形であるが、今回のモデル化ではこれをプロペラと面積が等しい正方形のファンモデルで単純化して表現した。したがって本モデルでは本来はモデル化されるべきプロペラ羽根回転によって引き起こされるプロペラの吹き出し流れ中に存在する回転流れ成分は考慮されていない。

Fig.1 に反応槽形状とファンモデルを設定するための円弧状グリッドを示す。ファンの特性はプロペラの特性を表すプロペラ反力とプロペラ回転数などから、プロペラ面で発生する圧力差 ΔP を流速 V に対する関数として与える。Fig.2 にはファン特性の与え方を模式的に示す。

槽内の流体は非圧縮性粘性流体とし、密度と粘性係数は水の値を用いた。また乱流モデルは standard $k-\epsilon$ モデルを用いた。汚泥の沈降に関するシミュレーションを行うため鉛直下向きに体積力として重力加速度を設定した。

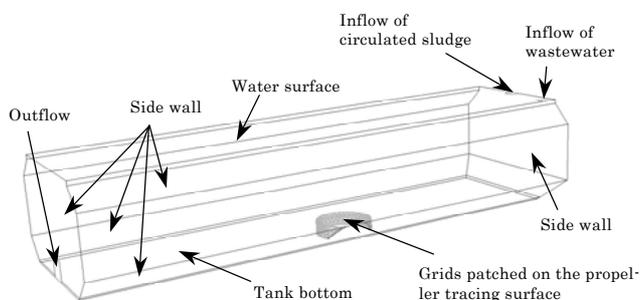


Fig.1 Geometry of the reaction tank and the grids patched on the propeller tracing surface

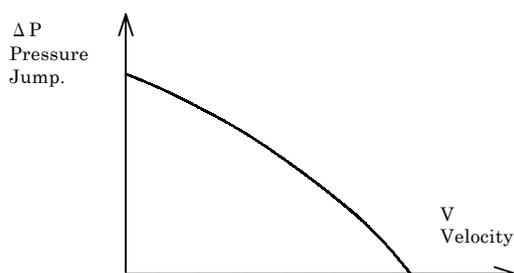


Fig.2 Characteristic curve of fan model

2.2 境界条件

流れを計算する場合に設定する境界条件は、矩形反応槽の底面、側壁および仕切壁は壁面速度が 0 の壁境界 (Wall) とし、汚水および返送汚泥の流入口は流入速度を与える流入境界 (Velocity inlet)、水面は剪断応力が 0 の対称境界 (Symmetry)、流出口は流出境界 (Outflow) とした。また前述のように水中プロペラはプロペラ羽根の運動軌跡面上のグリッド上にファンモデル (Fan) を設定した。これらの設定を Fig.1 中に合わせて示す。

2.3 沈降性固形物のモデル化

今回のシミュレーション計算では活性汚泥をモデル化してその沈降状況を調査するために固液 2 相流の解析も併せて行うこととした。物理モデルとしては、流れと固形物との相互作用を考慮に入れた簡単な 2 相流モデルである代数スリップ混合モデル (ASM) ²⁾ を用いた。このモデルでは混合物の運動量方程式と連続の方程式、第 2 相に関する体積分率方程式、相対速度に関する代数方程式を解くことによって 2 つの相の流れをモデル化することができる。

この代数スリップ混合モデルでは、第 2 相の流体は球形粒子を仮定しており、これに直径と密度とを与える。下水処理場の活性汚泥の沈降特性は、公表されているフロックの粒子サイズと沈降速度のデータ ³⁾ から汚泥フロックの粒子径をフロック径と同じ値に設定して、この球形粒子の比重をシリーズ的に変化させた場合の沈降速度をあらかじめ計算で求めておき、沈降速度が上記データとほぼ同じになるような比重を球形粒子に与えることで実験値に合わせた。以下の計算ではすべてこの設定値を用いている。

3. 実施設における実験

シミュレーションの検証のために、実際に本攪拌機を設置して実処理運転を行っている A 浄化センターの矩形嫌気反応槽において、槽内の時系列流速分布および活性汚泥の濃度分布を計測した。Photo 1 に A 浄化センターに設置された本攪拌機の写真を示す。



Photo 1 Oscillating mixer installed in anaerobic reaction tank at A-wastewater treatment center

Fig.3 に槽内における計測点の配置を示す。また、Table 1 に嫌気反応槽の仕様を、また Table 2 に本攪拌機の概略仕様を示す。

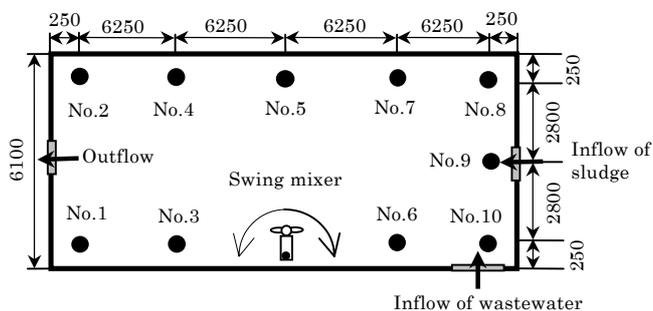


Fig.3 Points for tank bottom velocity measurements (A-waster water treatment center)

Table 1 Specification of the anaerobic reaction tank and swing mixer

| Particulars | Unit | Value |
|---------------------------|---------------------|--------|
| Length | m | 25.500 |
| Breadth | m | 6.100 |
| Depth | m | 5.100 |
| Capacity | m ³ | 944 |
| Inflow rate of wastewater | m ³ /min | 6.25 |
| Inflow rate of sludge | m ³ /min | 2.5 |
| Total inflow rate | m ³ /day | 12600 |

Table 2 Specification of the swing mixer

| Parts | Particulars | Unit | Value |
|-----------------------|--------------------|---------------------|---------|
| Mixer | Diameter of blades | mm | 580 |
| | Number of blades | | 3 |
| | Blade angle | deg | 6.0 |
| | Revolution | RPM | 575 |
| | Reaction force | N | 1360 |
| | Flow rate | m ³ /min | 37.2 |
| Motor | Rated power | kW | 5.6 |
| | Voltage | V | 200-220 |
| | Frequency | Hz | 60 |
| Oscillating mechanism | Angular velocity | deg/s | 3.0 |
| | Motor power | kW | 0.2 |
| | Voltage | V | 200-220 |

3.1 槽内の流速分布

槽内流速の計測には、直交する3方向の速度成分が計測可能な電磁流速計を用い、攪拌機が Fig.3 中に示された点 No.5 の方向を向いたときを時刻 0 として巡回 3 周期分の時系列データを収録した。データは流速計表示ユニットから出力される電圧を A/D 変換して PC に取り込み、時系列データから平均流速を求めた。

Fig.4 に No.3, 4, 5 および No.6 の各点における槽底面から 100mm 上方における流速の時系列データの例を示す。図中の○印のプロットが実験値を示す。

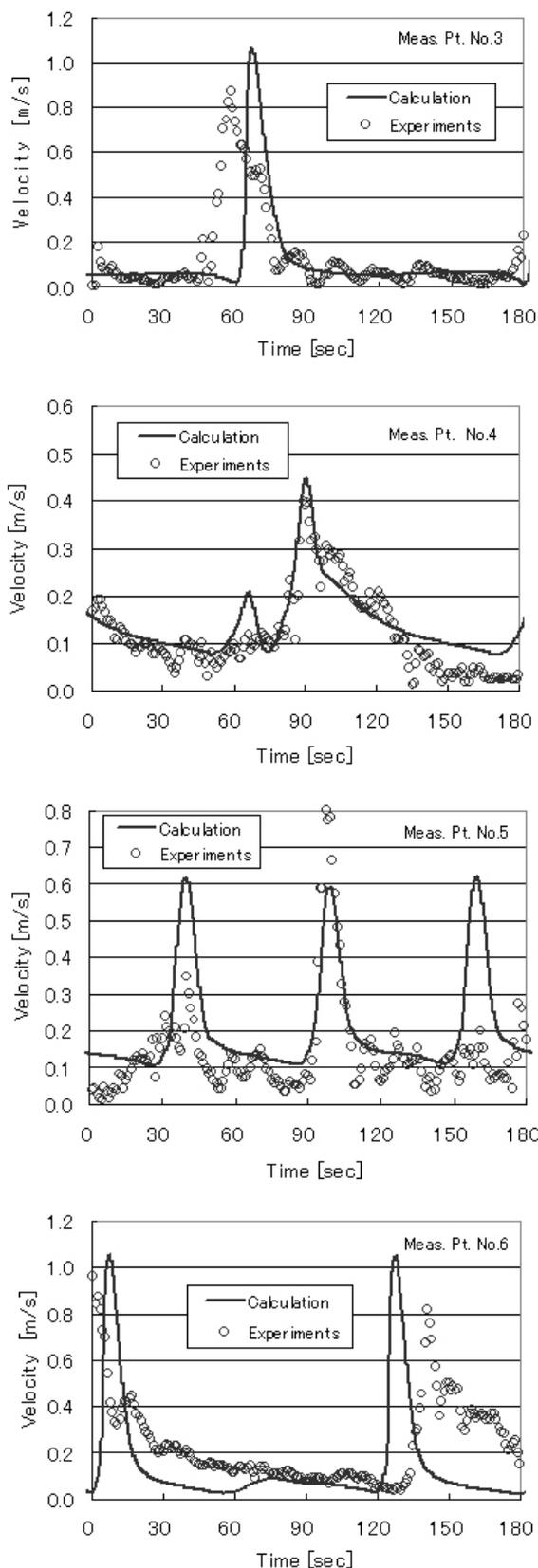


Fig.4 Time history of the bottom velocity at measuring point 3, 4, 5 and 6

3.2 槽内の汚泥濃度分布

嫌気反応槽内の汚泥濃度の分布は、Fig.3 中に示した各点において集水器でサンプルを採取して MLSS の濃度分析を行った。Table 3 に Fig.3 に示した各点の深さ方向の底層部、中層部および上層部の 3 断面における MLSS 分布を示す。汚水流入口および返送汚泥流入口のすぐ近く以外では MLSS 分布はほぼ均一で良好な攪拌状態にあることがわかる。

4. 槽内流れのシミュレーション

前述の槽内流速分布の計測および汚泥濃度分布に対応した条件の下で、まず槽内の非定常流れ場のシミュレーション計算を実施した。

4.1 槽底部の流速分布

槽底部の各計測点における 3 方向成分の合速度ベクトルの時系列データを計算値と比較して Fig.4 に示す。時系列データは、実験と計算で概ね一致していると考えられる。最も大きな相違点は実験では旋回の往路と復路で流速のピーク値がかなり異なっているのに対して、計算では大きな差は現れていない。この最も大きな原因は、計算ではプロペラ形状を正方形で近似していることとプロペラの吹き出し流れにおける回転流を想定していないためと考えられる。攪拌機の旋回による速度ベクトルとプロペラによる回転流の和が、旋回方向によって強めあったり弱めあったりすることによるためと推測できる。

Fig.6 右側には、旋回 1 周期間の槽底部(槽底から 100mm 上)の流速ベクトルの大きさを表す等速度線図の時系列変化を 45deg.おきに示す。槽底部の流速は旋回方向に対して

加速流れの通過してきた軌跡上の流速が早くなっており、槽底部全面の加速に攪拌機の旋回が有効に働いていることがわかる。

4.2 活性汚泥浮遊物質の濃度分布

次に、流速分布を求めたものと同じ条件で、ASM モデルを用いて活性汚泥と沈降速度を合わせた固形物粒子を含む流れ場における汚泥沈降状況のシミュレーション計算を実施した。

この計算においては前述の文献³⁾に示された 6 箇所の処理場における活性汚泥性状データの平均を用いることとし、汚泥フロックの粒子径を 760 μm として比重をパラメトリックに変化させた計算を行い、沈降速度が 0.424cm/sec になるよう比重を 1.0055 と設定した。

また流入水および槽内の汚泥濃度を A 浄化センターの実施設における MLSS 濃度の計測値の平均値 2500mg/l となるように設定した。汚泥を模擬する固体粒子は、前述の非定常流速計算において旋回を 3 往復した後の流場全体に初期値として均一濃度に分散させ、流入水についても同一濃度の汚泥粒子の体積率を設定した。

底部流速の時系列データを示した各計測点における固形物粒子の体積率の時系列変化を、旋回 1 周期について Fig.5 に示す。また、槽底部および側壁の固形物粒子の体積率計算結果を 45deg.おきに 1 周期分を Fig.6 に示す。この図から槽底周辺部の汚泥濃度分布にやや不均一な部分は見られるものの、攪拌機の加速流が吹き付けられれば汚泥がほぼ完全に舞い上がり、良好な攪拌状態が実現されていることがわかる。

Table 3 Distributions of MLSS in anaerobic reaction tank (Concentrations of MLSS:mg/l)

| | No.1 | | No.2 | | No.3 | | No.4 | | No.5 | |
|---------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|
| | Angular position | MLSS concen. |
| Shallow | 90 | 2100 | 75 | 2200 | 75 | 2300 | 90 | 2200 | 90 | 2200 |
| | 105 | 2300 | 90 | 2200 | 90 | 2300 | 105 | 2200 | 105 | 2200 |
| Middle | 65 | 2400 | 85 | 2300 | 75 | 2200 | 105 | 2380 | 105 | 2380 |
| | 80 | 2300 | 100 | 2300 | 90 | 2300 | 120 | 2200 | 120 | 2200 |
| Bottom | 95 | 2400 | 115 | 2300 | 105 | 2800 | 135 | 2300 | 135 | 2300 |
| | 50 | 2300 | 70 | 2200 | 60 | 2200 | 90 | 2200 | 90 | 2200 |
| | 65 | 2300 | 85 | 2200 | 75 | 2200 | 105 | 2200 | 105 | 2200 |
| | 80 | 2300 | 100 | 2200 | 90 | 2200 | 120 | 2200 | 120 | 2200 |
| | No.6 | | No.7 | | No.8 | | No.9 | | No.10 | |
| | Angular position | MLSS concen. |
| Shallow | 45 | 2300 | 0 | 2300 | 30 | 2400 | 60 | 2300 | 50 | 2300 |
| | 60 | 2300 | 15 | 2200 | 45 | 2400 | 75 | 2400 | 65 | 2300 |
| Middle | 15 | 2300 | 125 | 2200 | 135 | 2200 | 45 | 2300 | 35 | 2300 |
| | 30 | 2300 | 140 | 2200 | 150 | 2200 | 60 | 2300 | 50 | 2300 |
| Bottom | 45 | 2300 | 155 | 2300 | 165 | 2300 | 75 | 2400 | 65 | 2400 |
| | 0 | 2400 | 110 | 2400 | 120 | 2400 | 30 | 2500 | 20 | 2600 |
| | 15 | 2400 | 125 | 2300 | 135 | 2400 | 45 | 2400 | 35 | 2500 |
| | 30 | 2400 | 140 | 2300 | 150 | 2400 | 60 | 2300 | 50 | 2500 |

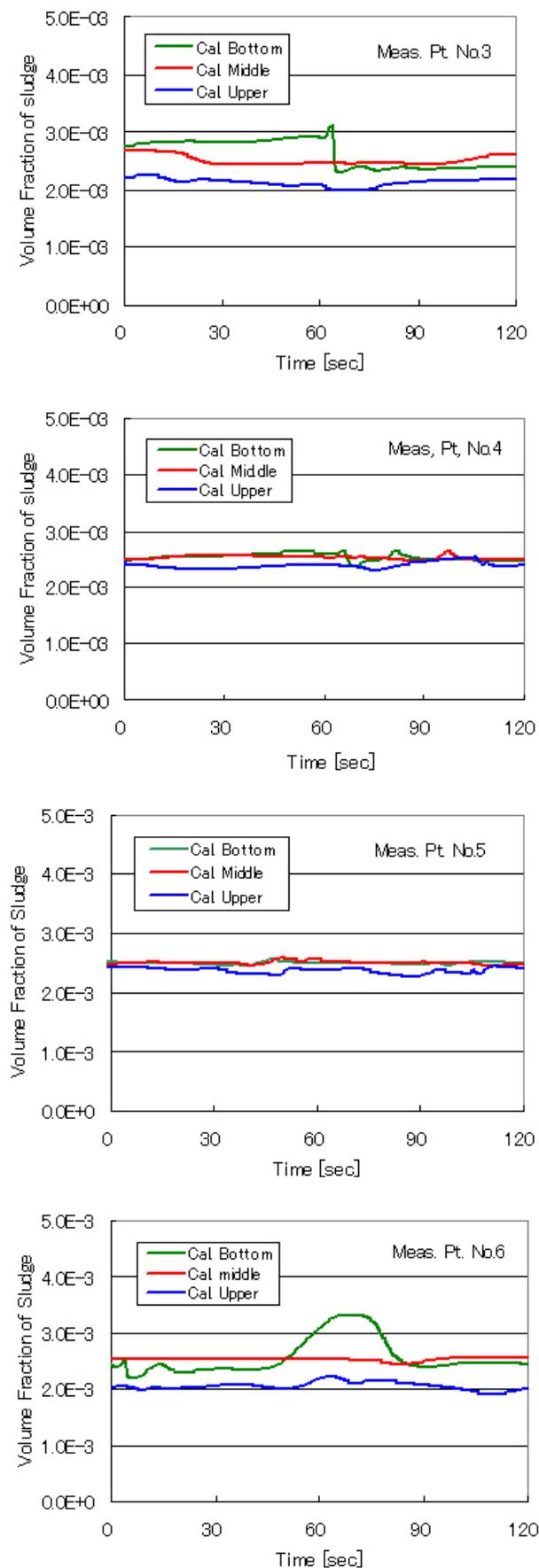


Fig.5 Time history of the sludge volume fractions at the different depth measuring point 3, 4, 5 and 6

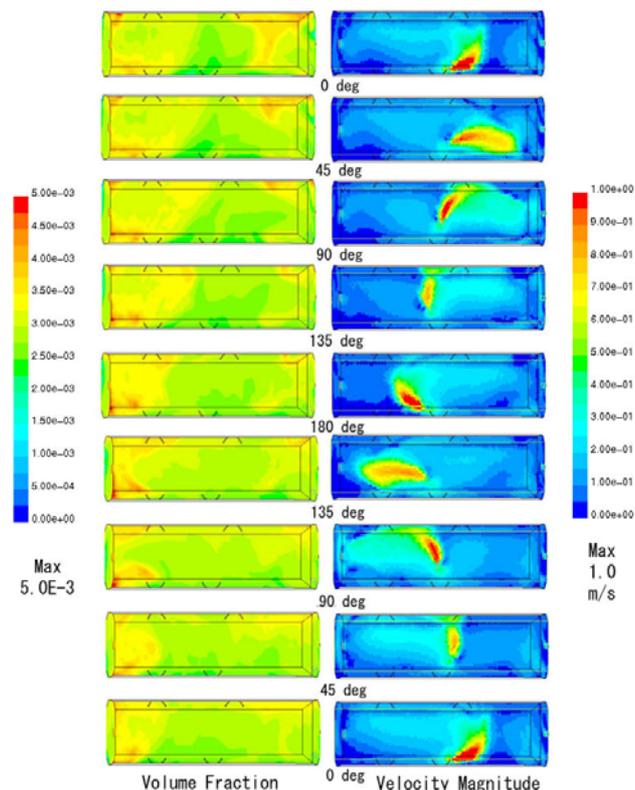


Fig.6 Volume fraction distributions of sludge and velocity contours in the plane 100mm above the tank bottom and side walls during one oscillation cycle

5. パラメトリックスタディー

このように本攪拌機を設置した場合の矩形反応槽内の流速分布および汚泥の沈降状況のシミュレーション計算が可能になったが、初期計画段階において様々な槽形状に対してどのような仕様の攪拌機を選定するのが最も良いかが簡単に判断できる手法があれば便利である。

もちろん個々のケースについて前述の CFD を用いた厳密な計算を行えば良いが、かなりの時間と計算費用がかかってしまい計画用の検討ツールとしては不適當である。そこで、現実に存在するような槽形状の範囲に対して槽の長さや幅を変化させた場合に、動力投入密度を一定とし槽容量に比例した出力の攪拌機を選定して槽内流速分布を計算し、攪拌機選定用のデータベースを作成することを試みた。Fig.7 にその一例を示す。図には攪拌機が時計方向に巡回して右端の位置に来たときの低層部、中層部、上層部における等速度線図を示す。

今後、これらのデータベースについて固形物の沈降性能や、動力投入密度をさらに低減した場合のシミュレーション計算データを拡充していく予定である。

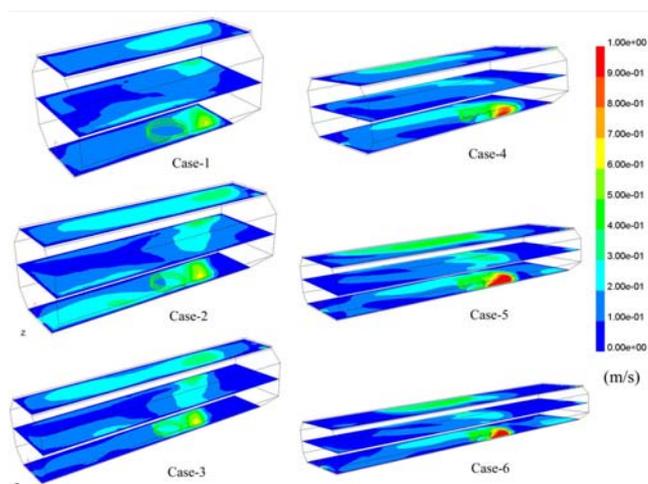


Fig.7 Parametric study on velocity distributions in several sized rectangular tanks

6. 結論

巡回機構付きプロペラ式水中攪拌機（NKK スウィングミキサー）を設置した嫌気矩形反応槽の非定常な流れ場と汚泥沈降防止機能のシミュレーション手法を開発し、現在稼働中の実施設において取得した流速分布の時系列データと汚泥濃度分布データと比較して以下の結論を得た。

- (1) 槽内の流速時系列データのシミュレーション計算結果は、実施設データと比較してそのピーク値にやや差が見られるが、ほぼ良好な一致を示している。
- (2) この差はプロペラのモデル化に回転流れを考慮していないことが一因と考えられる。
- (3) 汚泥の沈降状況のシミュレーション結果も実設備の平均値のデータとほぼ一致しており、攪拌状況のシミュレーションツールとしても有効に使える。
- (4) さまざまな槽形状に対してシミュレーション計算を行い、巡回機構付きプロペラ式水中攪拌機を装備した矩形嫌気槽を持つ水処理施設の計画時に、初期検討用として使用できる攪拌機選定データベースを構築した。

7. おわりに

本稿で示したシミュレーション手法を用いて、さまざまな槽形状に対して槽内の速度分布および汚泥粒子の沈降状況の面から、最適な巡回機構付きプロペラ式水中攪拌機の選定および配置を検討することが可能となった。今後、汚泥沈降防止効果のシミュレーションを含めて実際の計画、および詳細設計にこの手法を積極的に適用して、消費電力が小さく、しかも処理性能が高い設備の普及に貢献していきたい。

なお、本研究に際しては、各処理場関係者に実施設での実験のご許可をいただき多大なご協力をいただいた。また、本研究は日立金属㈱、前澤工業㈱、フリクト日本㈱との共同研究として実施された。各関係の方々に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 岡本幸彦ほか. “矩形処理槽用首振り機能付き攪拌機”. NKK 技報. No.174, 2001.
- 2) 嫌気・無酸素-好気法運転マニュアル(案). (東京都下水道サービス㈱編).
- 3) 須藤隆一. 廃水処理の生物学, 産業用水調査会, 昭和 52 年.

<問い合わせ先>

水エンジニアリング本部 計画部

Tel. 03 (3217) 2611 篠原 淳二

E-mail address : Junji_Shinohara@ntsgw.Tokyo.nkk.co.jp