

<研究発表>

低動力型攪拌機の運転性能

奥田 正彦、土井 知之、山口 明浩、劉 大偉、坂上 正美

株式会社タクマ (〒660-0806 兵庫県尼崎市金楽寺町 2-2-33 E-mail:okuda@takuma.co.jp)

概要

下水処理設備の反応タンク嫌気槽及び無酸素槽に攪拌機を導入する際には、攪拌能力が十分であること、省電力で攪拌できるかが重要な課題となっている。

そこで、これらの要求を満足する低動力型攪拌機を開発し、実設備においてその運転性能を確認した。その結果、従来 6~10 W/m³ 程度であった攪拌動力密度が 3 W/m³ 以下の動力攪拌密度で槽底部の全領域において流速 0.1 m/sec 以上が得られ、槽内を均一に攪拌できることがわかった。それと同時に攪拌機の開発にあたって、攪拌機性能を評価するために攪拌槽内の流れ・混合攪拌状態をシミュレーションする解析モデルを構築し、実設備での実験結果と比較した上、解析手法を確立した。

キーワード: 下水処理、攪拌機、低動力、シミュレーション

1. 攪拌機の構造

Fig. 1 に攪拌機の構造を示す。本装置は、駆動装置(電動機、減速機)からシャフトを垂直に下ろし、先端に攪拌翼を接続する。攪拌翼表面に複数の副翼と孔を設けることで、攪拌能力の向上と動力の低減、及び回転の安定化を図った。攪拌翼の直径は、2,520 mm を標準とし、槽容量に応じて 10~40rpm の回転数でゆっくりと攪拌を行う。また、駆動装置はすべて槽上部に位置するため、日常点検および維持管理が容易である。

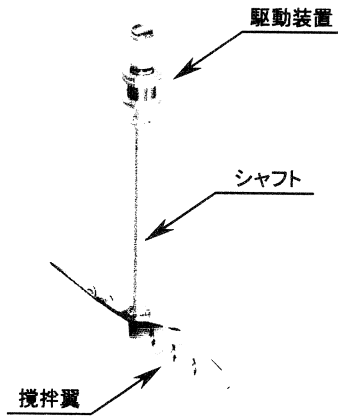


Fig.1 攪拌機全体図

2. 実施設における運転条件

2.1 槽形状

実施設における攪拌性能の調査は、標準活性汚泥法で設計された A 処理場の反応タンクの 1 区画に攪拌機を設置して行った。Table 1 に攪拌機を設置した A 処理場の槽形状と流入水量を示す。

Table 1 槽形状と流入水量

項目	緒元
平均処理水量	21,842 m ³ /日
攪拌機設置槽寸法	6.6 m ^W × 13.9 m ^L × 5.9 m ^H (水深 5m) 縦横比 1:2.1
攪拌機設置槽容量	431 m ³

2.2 回転数と攪拌動力密度

攪拌に必要な動力を把握するため、攪拌羽の回転数を 10~16rpm の範囲で変動させ、このときの攪拌動力と槽内の各測定点における流速と MLSS 濃度 (MLSS: Mixed Liquor Suspended Solids) の挙動を調査した。動力性能の評価は、攪拌動力密度 W/m³ (1m³ の混合液を攪拌するのに必要な動力) とし、目標とする攪拌性能は、槽の底部平均流速が 0.1 m/sec 以上で、槽内の MLSS 濃度が均一になるような条件とした。

2.3 測定ポイント

Fig. 2 に各測定ポイントを示す。測定ポイントは 10 カ所(2 および 11 は欠番)とした。各測定ポイントにつき 3 点、底部(底から 0.1 m)、中間部(底から 2.5 m)、上部(底から 4.7 m) の平均流速と MLSS 濃度を測定した。

流速は、電磁式 3 次元流速計によって X-Y-Z 方向の流速を測定し、合成流速を算出した。

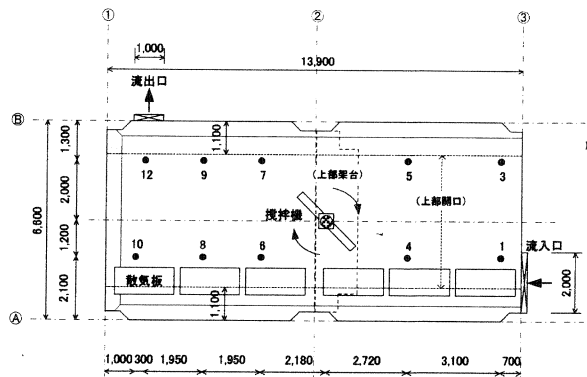
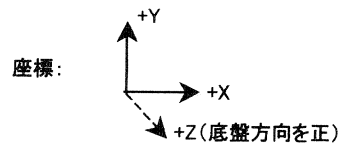


Fig.2 測定ポイント(平面図)

3. 測定結果

3.1 最適運転条件

(1) 攪拌動力密度と槽底部平均流速

Table. 2 に各 RUN における攪拌動力と底部平均流速を示す。攪拌動力密度が 1.39 W/m^3 (RUN2) 以下では、底部平均流速が 0.1 m/sec を下回るポイントがあったが、 2.19 W/m^3 (RUN3) 以上とすることで、全てのポイントの底部平均流速が 0.1 m/sec 以上となり、目標とする流速を満足することができた。

(2) 槽内 MLSS 濃度

Table.3 に各 RUN における MLSS 濃度を示す。表の数値は、各測定ポイントの槽底部、中部、上部における最大/最小値及び平均値を示す。攪拌動力密度が 0.93 W/m^3 (RUN1) では、平均値と最小値との差が 220 mg/L と大きく、MLSS 分布(標準偏差÷平均)¹⁾が 5 %以上となった。一方、 1.39 W/m^3 (RUN2) 以上では、平均値と最大値および最小値の差が 200 mg/L 以下、MLSS 分布も 4 %以下となり、槽内が均一に混合されていた。

(3) 槽内部の挙動

Fig. 3 に攪拌動力密度 2.19 W/m^3 (RUN3) における槽底部、中間部、上部の各流速を示す。Fig. 4 に MLSS 濃度を示す。測定ポイント 3 の上部及び測定ポイント 7 の中間部で平均流速が 0.1 m/sec 以下であったにもかかわらず、槽内の MLSS 濃度は均一であった。平均流速が 0.1 m/sec 以下であっても流速は時間とともに大きく変動し、最大流速は 0.1 m/sec を上回っていた。このため、底部平均流速が 0.1 m/sec 以上であれば、中間部および上部で平均流速が 0.1 m/sec 以下の部分があっても、槽内が均一に攪拌されていることが確認された。

Table 2 攪拌動力密度と底部平均流速

RUN No.	回転数 (rpm)	消費動力 (kW)	攪拌動力密度 (W/m^3)	底部平均流速 (m/s)
1	10	0.40	0.93	0.07~0.20
2	11.5	0.60	1.39	0.08~0.21
3	13	0.94	2.19	0.11~0.28
4	16	1.49	3.46	0.14~0.33

Table 3 MLSS 濃度

RUN No.	平均 (mg/L)	最小 (mg/L)	最大 (mg/L)	MLSS 分布(%)
1	1,720	1,500	1,890	5.2
2	1,950	1,760	2,090	3.9
3	1,550	1,420	1,710	4.0
4	1,540	1,410	1,650	3.2

MLSS 分布 = 標準偏差 / 平均

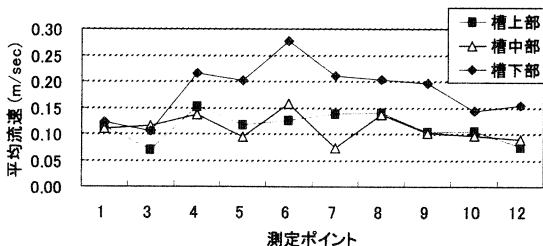


Fig.3 槽上、中、下部の平均流速 (RUN3)

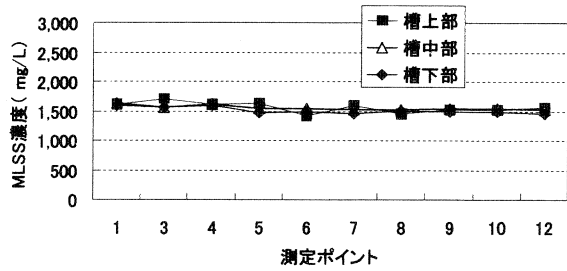


Fig.4 槽上、中、下部の MLSS 濃度 (RUN3)

4. 槽内の流動シミュレーション

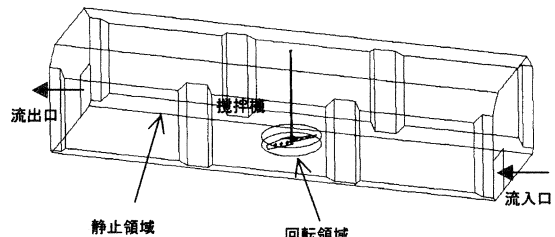
4.1 基礎式

装置内を流れる流体は、一般に偏微分方程式で表される基礎式によって記述することができる。ここで取り扱っているような水槽内の流れ解析を行う場合には、質量保存式(連続の式)、運動量保存式(Navier-Stokes 方程式)により流体の状態を記述することができるが、装置内の流れが乱流である場合、実用的な解析を行うには精度の高い乱流モデルを導入する必要がある。本解析では、Menter が提唱した解析精度が高い SST モデル(Shear Stress Transfer $k-\omega$ Based Model)を採用し、Reynolds 平均した質量保存式(連続の式)と運動量保存式(Navier-Stokes 方程式)を合わせて槽内流れ場を解いた。これらの各保存式は有限体積法により計算領域の解析メッシュ上に作成されたコントロールボリューム内で保存則を満たすように離散化され、これらの離散化された方程式は解が収束するまで繰り返し計算が行われる。なお、本解析は汎用流体解析ソフト CFX-5 を用いて行った。

4.2 解析手順

Fig. 5 に示すように攪拌槽内の攪拌機の翼が回転する領域を回転領域、それ以外の水槽内部の領域を静止領域として設定する。回転領域と静止領域の境界では各物理量(質量、運動量、エネルギー等)が保存されるように方程式が解かれる。また、解析を行う際の境界条件は Fig. 5 に示すように設定した。

解析手順としては攪拌機の回転位置をある角度に固定した状態で定常計算を行った後、その定常計算の解析結果を初期値として非定常計算を行った。その結果として、すべての解析ケースにおいて流れが十分に発達すると回転領域以外の静止領域の流れは定常状態となることがわかり、本稿で示した解析結果はその定常値を示している。



- (1) 槽上面(水面): スリップ壁(面上のせん断応力がゼロ)
- (2) 槽底面及び側面: ノンスリップ壁(壁面上の流速がゼロ)
- (3) 流入口: 流入水量に対応した流速値を設定
- (4) 流出口: 圧力境界(出口の平均相対静圧値がゼロ)

Fig.5 解析領域及び境界条件

4.3 攪拌機翼周りの流れ構造

Fig.6 に攪拌機翼の中心断面を通る平面の翼周りの流れを示す。攪拌翼は2枚羽根で主翼に開いた孔と副翼で構成されており、この攪拌機の特異な翼構造により遠心方向の流れ以外に上下方向への流れが形成されていることがわかる。この上下方向の流れ形成が攪拌槽全体の混合攪拌の安定化と均一化に寄与しているものと考えられる。

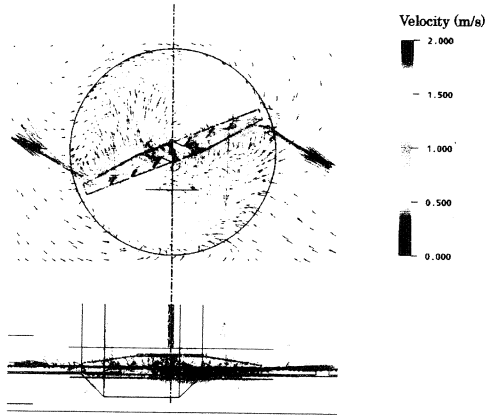


Fig.6 攪拌機翼周りの流れ解析

4.4 解析モデルの検証

シミュレーションによる解析は、実施設と同様の条件(槽形状、流入水量)とし、攪拌翼の回転数は13rpm、攪拌動力密

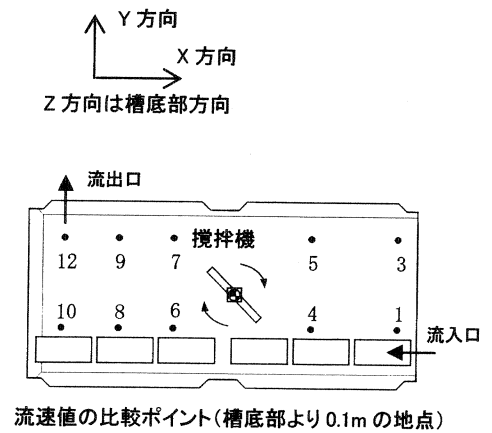
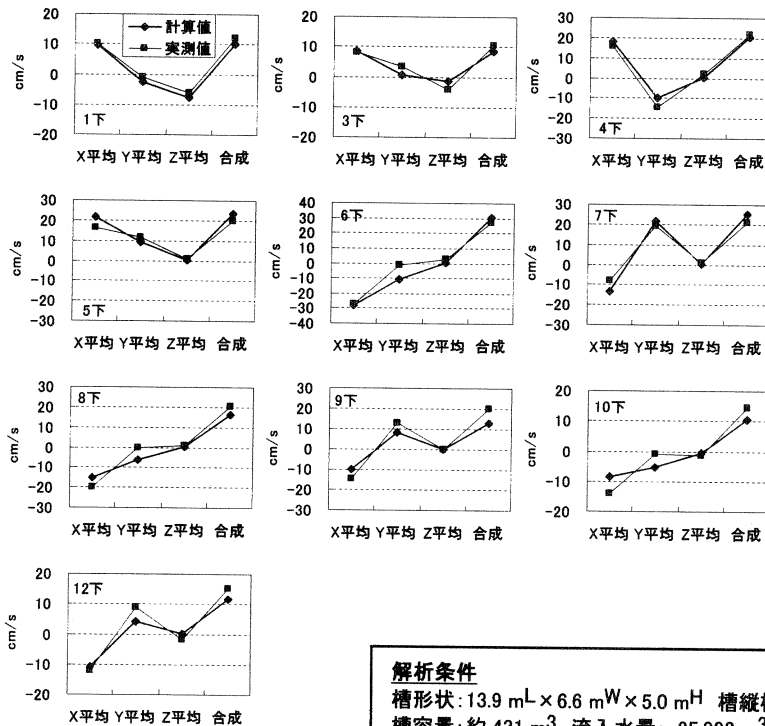
度 2.19 W/m^3 (RUN3と同様)で行った。Fig.7 に実施設で測定した槽底部(槽底部より0.1mのポイント)におけるX-Y-Z方向の流速とその合成流速とシミュレーションによって計算された値を示す。これより、実施設で実際に測定した流速値とシミュレーションによる計算値はよく一致したことから、解析モデルの妥当性、有効性を確認することができた。

4.5 解析事例

(1) 縦長槽

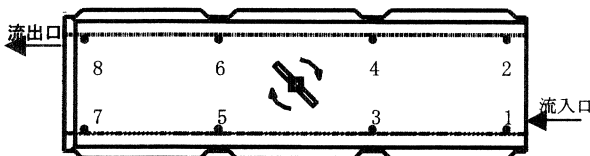
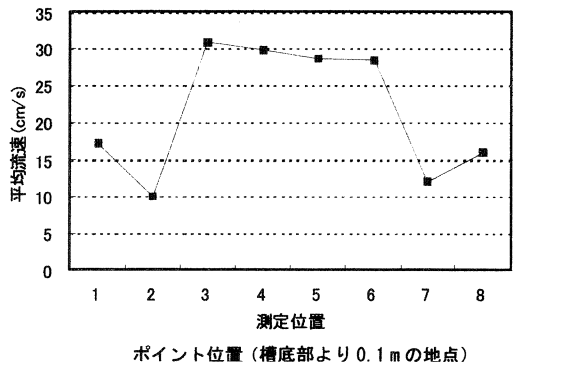
Fig.8 に構築した攪拌槽流れ解析モデルを用いて行った解析事例を示す。槽形状は縦21.0m、横6.6m、水深5.0m、槽の縦横比が1:3.18、槽容量が約650 m^3 の縦長い形状の槽とした。1.5m×2.0mの流入口および流出口が側壁に設置され、流入水量は25,992 m^3 /日とした。攪拌機は、回転数17rpm、消費動力1.8kW、攪拌動力密度 2.8 W/m^3 の条件において解析を行った。Fig.8 に示すように槽底部より0.1mの地点の各位置において、0.1 m/sec以上の流速値が得られることを計算によって確認できた。

Fig.9 に同条件での攪拌槽内の混合攪拌状態(流線)を示す。これを見れば槽内の流れは槽の対角を結んで8の字を描くような流れ構造であることがわかる。これにより流線の軌跡から槽内が十分に混合攪拌されている様子を確認することができる。



解析条件
 槽形状: $13.9 \text{ m}^L \times 6.6 \text{ m}^W \times 5.0 \text{ m}^H$ 槽縦横比: 1:2.1
 槽容量: 約 431 m^3 流入水量: 25,992 m^3 /日(実測値)
 開口寸法: $2.0 \text{ m}^W \times 3.0 \text{ m}^H$ (流入口)、 $1.0 \text{ m}^W \times 1.0 \text{ m}^H$ (流出口)
 攪拌機回転数: 13 rpm 消費動力: 0.94 kW 攪拌動力密度: 2.19 W/m^3

Fig.7 実測値とシミュレーション計算値の比較



解析条件
 槽形状: 21.0 m^L × 6.6 m^W × 5.0 m^H 槽縦横比: 1:3.18
 槽容量: 約 650 m³ 流入水量: 25,992 m³/日
 開口寸法: 1.5 m^W × 2.0 m^H (流入口、流出口)
 攪拌機回転数: 17 rpm 消費動力: 1.8 kW
 攪拌動力密度: 2.8 W/m³

Fig.8 縦長槽解析条件および解析条件

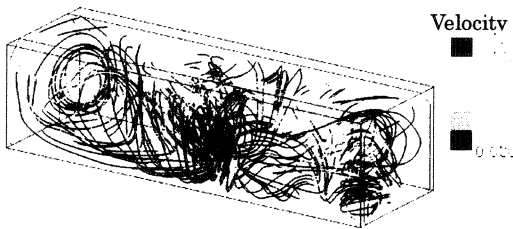


Fig.9 縦長槽内の混合状態(流線)

(2) 正方形大型槽

また、正方形の大容量槽における底部平均流速をシミュレーションにより検討した。Fig. 10 に槽形状と解析条件を示す。槽容量は 2,000m³ 以上とした。

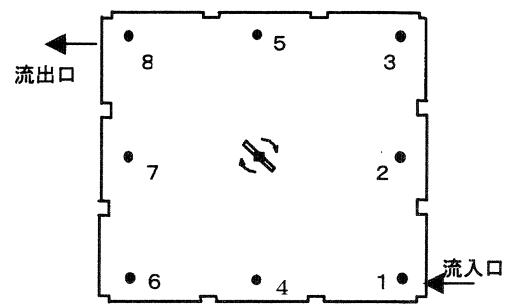
Fig. 11 に各ポイント(底から 0.1m)における流速の計算結果を示す。コーナー部であるNo.6 では底部平均流速が 0.11 m/sec と最も低く、他のポイントではいずれも 0.1 m/sec を大きく上回っており、攪拌動力密度 2.1 W/m³ (RUN3 相当) で十分攪拌できることが確認できた。これにより槽形状が正方形に近い場合、2,000m³ 以上でも攪拌動力密度は 3 W/m³ 以下で攪拌できることがわかった。

Fig. 12 に槽内の底部(底から 0.1m)における流速の等高線を示す。赤くなっている部分が流速 0.1m/sec 以上を示しており、槽底部全体の流速が 0.1m/sec 以上となっていることが確認できる。

5. まとめ

実施による運転とシミュレーションにより下記のことがわかった。

- (1) 低動力型攪拌機は、攪拌動力密度が 3 W/m³ 以下



解析条件
 槽形状: 19.4 m^L × 19.1 m^W × 5.8 m^H 槽縦横比: 1:1.02
 槽容量: 約 2,150 m³ 流入水量: 60,000 m³/日
 開口寸法: 1.0 m^W × 1.5 m^H (流入口、流出口)
 攪拌機回転数: 33 rpm 消費動力: 4.5 kW
 攪拌動力密度: 2.1 W/m³

Fig.10 正方形大型槽の解析条件

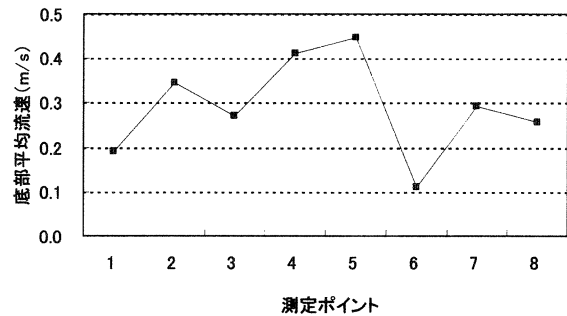


Fig.11 各測定ポイントの底部平均流速

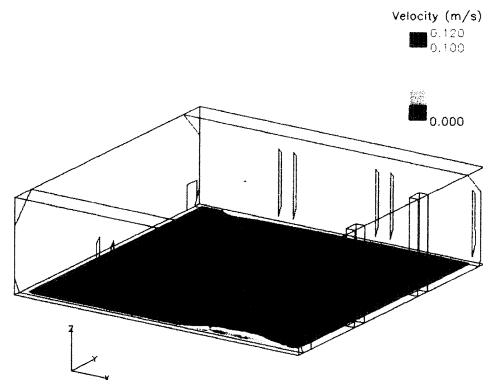


Fig.12 正方形大型槽内の混合状態(流速等高線)

で槽底部の全領域において流速 0.1 m/sec 以上が得られ、槽内を均一に攪拌できる。(従来 6~10 W/m³ 程度)

(2) 攪拌槽内の流れ・混合攪拌状態をシミュレーションする解析モデルを構築し、実施での実験データと比較することで解析精度を確認し、解析手法を確立した。

(3) シミュレーション手法を用いた検討によって槽形状が縦横比 1:3 かつ 2,000 m³ でも、汚泥の均一混合に必要な底部平均流速はすべてのポイントで 0.1m/sec 以上とすることができると確認した。

参考文献

- 1) 日本下水道事業団 オキシデーシオンディッチ法の技術資料 (1986)