

省エネ機器とアンモニア制御による低動力反応タンクシステムの性能実証

Performance Demonstration of Low-Energy Reaction Tank System with Energy-saving Equipment and NH₄-Based Aeration Control



島田光重*
Mitsushige Shimada



熊田浩英*
Hirohide Kumada



石山 明*
Akira Ishiyama

下水処理施設において、反応タンクの電力消費量は施設全体の30～60 %程度を占め、反応タンクの低動力化は下水処理施設の電力消費量削減に大きく貢献する。当社の低動力反応タンクシステムは、省エネ機器として低圧損型メンブレン式散気装置 PABIO TUBE と双曲面形攪拌機 PABIO Mix を採用し、さらにアンモニアセンサーを用いた曝気風量制御を加えた反応タンクシステムで、好気タンクの曝気動力と嫌気タンクや無酸素タンクの攪拌動力の削減を図ったものである。

本稿では、各構成技術、および、システム全体の低動力性について、試験水槽での性能確認実験と実処理場での実証実験の結果を報告する。低圧損型メンブレン式散気装置の高い酸素移動効率、双曲面形攪拌機の高い攪拌性能、および、アンモニア制御による過剰曝気削減効果により、システム全体として30 %以上の動力削減が可能であるとの試算結果が得られた。

In the sewage treatment facility, the power consumption of the reaction tank accounts for about 30 to 60 % of the whole facility and saving power used by the reaction tank will greatly contribute to the reduction in electricity consumption of the facility. The Low-Energy Reaction Tank System consists of membrane diffusers with low pressure loss called PABIO TUBE, hyperboloid shaped mixers called PABIO Mix and an aeration control system that uses an ammonia sensor. This system is for the reduction of the aeration energy consumption of the aerobic tanks and the mixing energy consumption of the anaerobic or anoxic tanks. In this paper, we report the results of the performance confirmation experiment of the test tank and demonstrative results in the actual treatment plant for each component technology and the low power of the system overall. The energy consumption of the reaction tank was reduced due to the high oxygen transfer efficiency of the diffuser, the high mixing performance of the hyperboloid shaped mixer and the reduction of excess aeration by the NH₄-based aeration control system, and it was calculated that we could reduce energy consumption by more than 30 %.

Key Words :

低	動	力	Low-Energy
下	水	処	Sewage treatment
散	気	装	Diffuser
攪	拌	機	Mixer
曝	気	制	Aeration Control

【セールスポイント】

- ・ 低圧損型メンブレン式散気装置 PABIO TUBE の高い酸素移動効率により曝気風量を低減でき、送風機動力を削減できる。さらに、アンモニア制御では、負荷変動により生じる過剰曝気を抑制し、効率的な送風量制御が可能である。
- ・ 双曲面形攪拌機 PABIO Mix は混合に適した翼形状で効率的な攪拌が可能であり、小さい攪拌動力で、高度処理における嫌気タンク・無酸素タンクの攪拌が可能である。

まえがき

下水処理施設における総消費電力は、日本全体の約0.7%と言われており、その中で反応タンクにおける消費電力は施設全体の消費電力の30~60%程度を占めている¹⁾ため、反応タンクの低動力化は下水処理施設の電力消費量削減に大きく貢献する。

反応タンクでは、曝気用送風機による電力消費量が多く、効率の高い散気装置の採用が効果的な電力削減に直結する。近年、酸素移動効率が高いメンブレンパネル式散気装置や高酸素移動効率と低圧損を両立する低圧損型メンブレン式散気装置が採用されつつある。また、アンモニアセンサーを用いた曝気風量制御に関しては、国土交通省のB-DASHプロジェクトなどで省エネ効果が報告されている。一方、嫌気タンクや無酸素タンクの攪拌動力は、好気タンクの曝気動力と比較すると小さいが、攪拌動力低減は反応タンクの省エネに有効である。日本下水道新技術機構の建設技術審査証明で公的に評価されている省エネ型反応タンク攪拌機の攪拌動力密度を水中攪拌機のメーカー値と比較すると42~92%の削減効果²⁾があると報告されている。

本稿で紹介する低動力反応タンクシステムは、省エネ機器として低圧損型メンブレン式散気装置 PABIO TUBE と双曲面形攪拌機 PABIO Mix を採用し、さらにアンモニアセンサーを用いた曝気風量制

御を加えたシステムで、好気タンクの曝気動力と嫌気タンクや無酸素タンクの攪拌動力の削減を図ったものである。各構成技術の性能とシステム全体の低動力性の評価を目的とし、試験水槽を用いた性能確認実験、実処理場での実証実験を実施した結果を報告する。なお、A 処理場における各種実験とその評価、および、低動力性の試算に関しては、日本下水道事業団との共同研究にて実施した。

1. 低動力反応タンクシステムの要素技術

低動力反応タンクシステムの構成例を図1に示す。

低動力反応タンクシステムは、省エネ機器である低圧損型メンブレン式散気装置 PABIO TUBE（以下 PABIO TUBE）と双曲面形攪拌機 PABIO Mix（以下 PABIO Mix）、およびアンモニアセンサーを用いた曝気風量制御（以下 NH₄ 制御）の3つの要素技術から成る。処理方式や処理場ニーズに応じた、必要な要素技術の採用が可能である。

1.1 PABIO TUBE

PABIO TUBE の構造を図2に示す。

図2に示すように、PABIO TUBE は、筒型の低圧損型メンブレン式散気装置で、多数のスリットを有するシリコン製メンブレンをポリプロピレン製のサポートパイプにバンドで固定した構造である。空気供給管とは専用の接続継手を介して接続する。空気

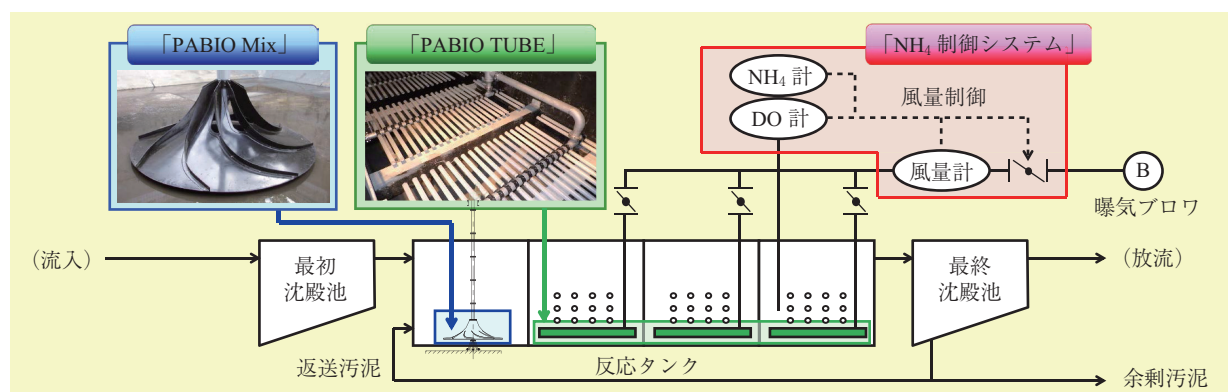


図1 低動力反応タンクシステムの構成例

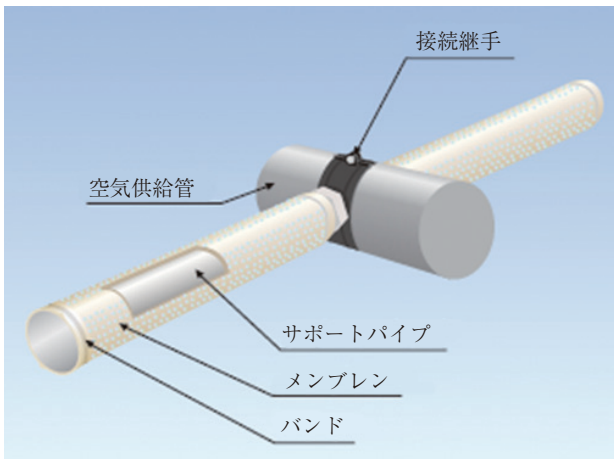


図2 PABIO TUBE の構造

供給管からの空気供給によりメンブレンが膨張してスリットが開き、超微細気泡を発泡する。空気供給を停止するとメンブレンが元に収縮し、スリットが閉じる。

PABIO TUBE は、超微細気泡を発泡するため、気泡総表面積が大きく、より少ない通気量で効率よく酸素を溶解させることができる。また、通気抵抗が小さく目詰まりしにくい特長を有するため、定常的な圧損回復操作なく、低圧損で運転することが可能である。また、空気供給停止時にスリットが閉じることにより汚泥侵入が抑制されるため、間欠運転も可能である。

1.2 PABIO Mix³⁾

PABIO Mix は、嫌気・無酸素状態を確保した状態で活性汚泥を攪拌・混合する低動力攪拌機で、高度処理および低動力ニーズに合致した攪拌機として採用されており、2018年4月時点で411台の国内納入実績を有する。従来の翼は一体構造であるが、躯体の開口制約に対応するため、分割型翼を新たに採用した。PABIO Mix 一体型・分割型の構造と翼形状を表1に示す。

表1に示すように、PABIO Mix は、一体型、分割型ともに、駆動部、シャフト、攪拌翼から構成される。深槽に設置する場合は水槽底部に振れ止めを設置する。双曲面形の攪拌翼を水槽中央の底部付近で低速回転させることにより、水槽底部を効率よく攪拌し、小さな動力で十分な底部流速が得られる。また、駆動部は槽外にあるため、メンテナンス性に優れる。分割型翼は、翼が8分割構造となっており、覆蓋のある躯体で攪拌翼を槽内に搬入する開口部が小さい場合に、分割搬入、槽内組立ができる。

表1 PABIO Mix の構造と翼形状

	一体型翼	分割型翼
構造		
攪拌翼外観		

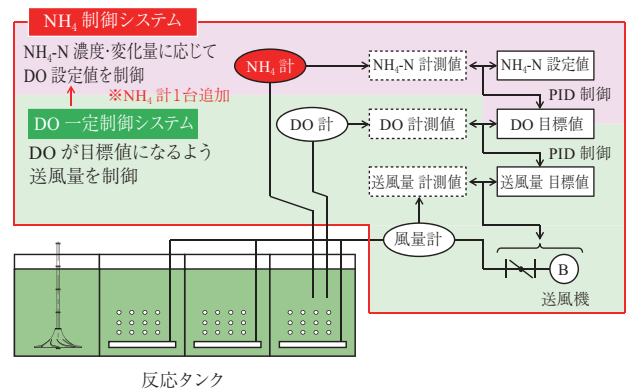


図3 NH₄制御の概要

1.3 NH₄制御

曝気風量の制御には、風量一定制御やDO一定制御が一般的に用いられている。風量一定制御は、設定送風量になるように送風量を制御する方法で、常に一定の空気を送込むため送風量の無駄が多い。DO一定制御は、反応タンク内DOが目標DO値になるように送風量を制御する方法である。反応タンクへの流入水量や水質に応じて送風量が変化するため比較的送風量の無駄は少ないが、本来処理に必要なDO濃度が流入負荷により異なるため、余裕を持ったDO値を設定する必要がある。

NH₄制御は、反応タンク内アンモニア濃度計測値を基に送風量を制御する方法で、硝化促進を維持しながら曝気風量の削減を図る方法である。NH₄制御の概要を図3に示す。

図3に示すように、NH₄制御は、アンモニアセンサー（NH₄計）によるアンモニア態窒素（NH₄-N）連続計測値を基に、従来のDO一定制御の目標DO値を設定する方式を採用した。目標DO値は、NH₄-N濃度とその変化量よりPID制御を用いて連続的に変化させた。反応タンク内の硝化状況に応じてDO濃度が調節されるため、硝化が安定している場合には過剰曝気を低減でき、逆に、高負荷時には曝気風量を増加させて水質安定化を図ることができる。

2. 実験設備

低動力反応タンクシステムの各構成技術の性能とシステム全体の低動力性を評価するため、試験水槽を用いた性能確認実験と2カ所の実処理場での実証実験を実施した。

2.1 試験水槽

試験水槽の外観を写真1に示す。試験水槽の平面積は2 m^W × 2 m^Lの4 m²で、散気水深は5 mまで設定できる。PABIO TUBEの全面エアレーション式と旋回流式の酸素移動効率の測定に用いた。

2.2 A処理場反応タンク設備

A処理場の反応タンク設備では、PABIO TUBEの深槽旋回流式の酸素移動効率の測定、PABIO Mixの攪拌性能の評価、NH₄制御の風量削減効果の評価、および、低動力反応タンクシステムの処理水質を確認した。A処理場の処理システムを図4に、実験池の反応タンク設備仕様を表2に示す。

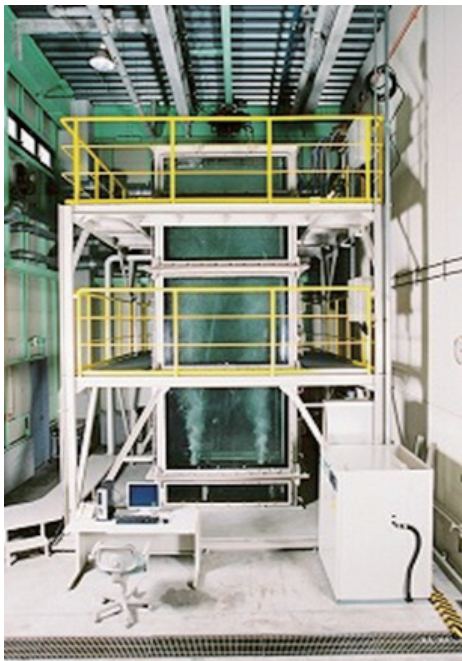


写真1 試験水槽外観

図4に示すように、4系列×4池で構成される反応タンク設備の1池（4系3号池）を実験池とし、第2槽、第4槽、第7槽、第8槽の好気タンクにはPABIO TUBEを、第1槽、第3槽、第6槽の無酸素タンクにはPABIO Mixを設置した。PABIO Mixは分割型翼を採用した。第5槽は槽内に障害物がありPABIO Mixを設置できなかったため、既設散気板（間欠曝気）をそのまま使用した。実験池と同系列の他池には、全槽にセラミック散気板（気孔径260 μm）が設置されており、無酸素タンクでは2時間毎に5分間の間欠曝気により攪拌した。

全体風量は、1系と2系の平均DOが一定になるように制御され、各池には手動による弁開度調整にて分配した。実験池の送風量は、配分された空気量の範囲内で、DO一定制御とNH₄制御を切り替えて運転できるようにした。

表2に示すように、設計処理水量は7 500 m³/d、処理方式は凝集剤併用ステップ流入式多段硝化脱窒法、散気方式は深槽旋回流式である。

2.3 B浄化センター反応タンク設備

B浄化センターの反応タンク設備では、PABIO TUBEの風量削減効果と圧損推移、および、NH₄制御の風量削減効果の評価した。B浄化センターの処

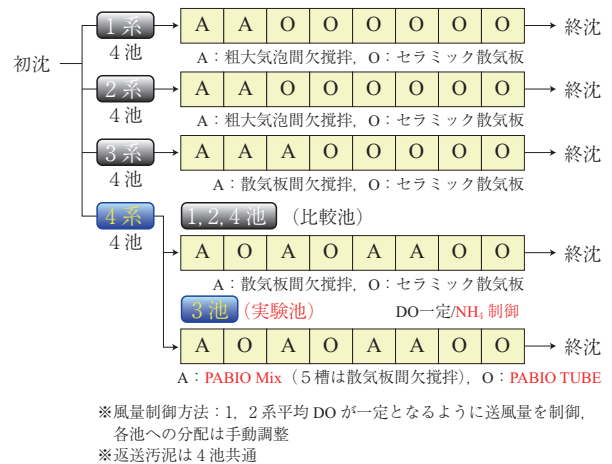


図4 A処理場の処理系統図

表2 A処理場実験池の反応タンク設備仕様

処理方式	凝集剤併用ステップ流入式多段硝化脱窒法
処理水量	7 500 m ³ /d/池 (日最大)
池形状	7.5 m ^W × 31.8 m ^L × 7.8 m ^{WH} (機能満足潮位時)
散気方式	深槽旋回流式
散気水深	4.948 m (機能満足潮位, 日最大汚水量時)

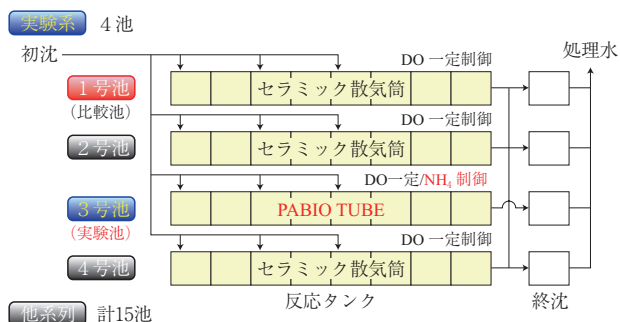


図5 B浄化センター処理系統図

表3 実験系の反応タンク設備仕様 (B浄化センター)

処理方式	3段ステップ流入式 ※冬季は硝化抑制運転 実験池：嫌気好気法 他池：3段硝化脱窒法
処理水量	7 200 m ³ /d/池 (日最大)
散気方式	旋回流式
散気水深	5.04 m
槽形状	第1, 8槽：6.9 m ^W × 9.0 m ^L × 6.04 m ^{WH} , ハンチあり 第2～7槽：6.9 m ^W × 6.2 m ^L × 6.04 m ^{WH} , ハンチあり
PABIO TUBE 数量	第1槽：呼び長さ0.75 m 品 × 40本/槽 第2～7槽：呼び長さ1 m 品 × 68本/槽 第8槽：呼び長さ0.75 m 品 × 96本/槽
発泡面積比	第1槽：7.4%, 第2～7槽：24%, 第8槽：18%

理系統を図5に、実験系の反応タンク設備仕様を表3に示す。

図5に示すように、4池から成る系列(実験系)の3号池を実験池としてPABIO TUBEを設置し、セラミック製散気筒が設置されている1号池を比較池とした。比較池のセラミック製散気筒は反応タンク幅の約25%の領域に設置されているが、PABIO TUBEは70%以内に幅広く設置した。PABIO TUBEは2015年12月に運用開始した。比較池の送風量はDO一定制御されており、実験池の送風量はDO一定制御とNH₄制御を切替できるようにした。

表3に示すように、設計処理水量は7 200 m³/d、処理方式は3段ステップ流入式硝化脱窒法であるが、冬期は実験池で嫌気好気法、他池はステップ流

入を停止し3段硝化脱窒法の硝化抑制運転をおこなった。散気方式は旋回流式である。

3. PABIO TUBEの性能評価

3.1 酸素移動効率

(1) 実験方法

全面エアレーション式と旋回流式の酸素移動効率は試験水槽で非常法を、深槽旋回流式の酸素移動効率は実処理場でオフガス法を用いて測定した。

非常法による測定には、試験水槽を用いた。呼び長さ1 mのPABIO TUBE 4本を水槽底部に全面配置あるいは旋回流配置し、散気水深は5 m、発泡面積比15.4%の条件で測定した。

オフガス法による測定は、A処理場の反応タンク設備でおこなった。測定場所と条件を表4に示す。

表4に示すように、第3ステップ好気槽の第7槽、第8槽で酸素移動効率を測定した。発泡面積比は両槽ともに27%、測定時の散気水深は4.96 mであった。

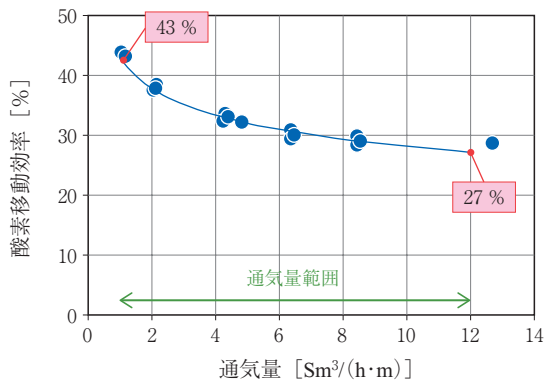
オフガスは、水槽上部空間から吸引捕集したが、低通気量時は当該水槽外から侵入する空気の影響が大きかったため、水面に捕集ポートを浮かべて捕集した。なお、捕集位置によりオフガス成分濃度に差異があったため、散気装置設置側、中央付近、散気装置を設置していない側の3カ所で捕集したオフガスからそれぞれ酸素移動効率を求め、それらの平均値を算出した。

(2) 実験結果

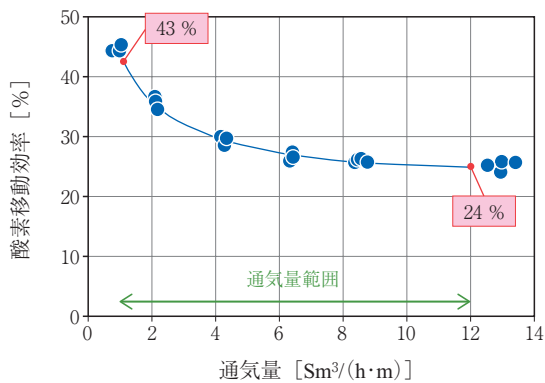
全面エアレーション式、旋回流式、深槽旋回流式の酸素移動効率測定結果を図6に示す。なお、図中の酸素移動効率は、清水、20℃、散気水深5.0 mの条件に換算した値である。また20℃条件に換算した風量をSm³と表す。

表4 酸素移動効率測定場所と条件 (A処理場)

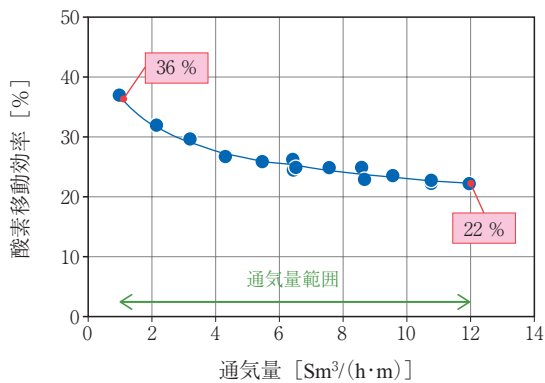
測定対象槽	3段ステップ好気槽 (第7槽, 第8槽)
測定槽形状	第7槽：7.50 m ^W × 6.93 m ^L × 7.8 m ^{WH} , ハンチあり
	第8槽：7.50 m ^W × 6.86 m ^L × 7.8 m ^{WH} , ハンチあり
PABIO TUBE 数量	第7槽：呼び長さ0.75 m 品 × 120本
	第8槽：呼び長さ0.75 m 品 × 120本
散気水深	4.96 m
発泡面積比	第7槽：27%, 第8槽：27%



(a) 全面エアレーション式



(b) 旋回流式



(c) 深槽旋回流式

図6 酸素移動効率測定結果
(清水, 20℃, 散気水深5.0m換算値)

図6に示すように、通気量1~12 Sm³/(h·m)の範囲で、全面エアレーション式では27~43%、旋回流式では24~43%、深槽旋回流式では22~36%の酸素移動効率を有することを確認した。

3.2 風量削減効果

(1) 実験方法

B浄化センターにて、PABIO TUBEを設置した実験池とセラミック製散気筒が設置されている比較池の送風量を比較し、風量削減率を算出した。実験池

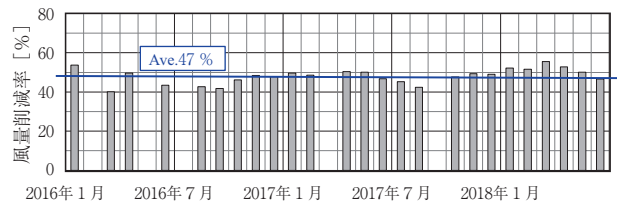


図7 実験池の比較池に対する風量削減率
(B浄化センター)

では、DO一定制御とNH₄制御の切り替え運転をおこなったが、送風量の比較は、比較池と同じDO一定制御運転の期間でおこなった。

(2) 実験結果

2016年1月から2018年6月までの2年6カ月間の実験池の比較池に対する風量削減率を図7に示す。なお、2016年2月、5月、7月、2017年9月はDO一定制御運転を実施せず、2017年3月は槽内点検のため運転を休止した。

図7に示すように、実験池の比較池に対する風量削減率はAve.47%に達し、季節変動はあったが長期的な漸減性は見られず、PABIO TUBEが高い酸素移動効率を安定して保持していたと考えられる。風量削減率については、セラミック製散気筒よりもPABIO TUBEを幅広く設置した効果も含まれていると考えられる。A処理場では、PABIO TUBEを設置した実験池とセラミック製散気板を設置している既設比較池の日平均DOが同等である日の送風量を比較しており、現時点で風量削減率33.5%と評価している。A処理場は、深槽旋回流式で、実験池と比較池の散気装置設置幅は同じである。

3.3 圧損推移

(1) 実験方法

B浄化センターに設置したPABIO TUBEへの送風圧力と送風量を測定し、PABIO TUBEの圧損と通気量の推移を調査した。圧損は、末端の第8槽下流側ライザー管（各槽上流側と下流側の2本のライザー管を経由して送風）に設置した圧力計計測値（送風圧力）から散気水深分の水圧を減じて求めた。通気量は、当該ライザー管に設置した風量計計測値をPABIO TUBE総長（呼び長さ）で除して算出した。なお、測定対象の第8槽下流側ライザー管では、強制的な圧損回復操作はおこなわなかった。

(2) 実験結果

2015年12月から2018年6月までの2年7カ月間の圧損と通気量の推移を図8に示す。各値は約半月毎、正午の測定結果である。

図8に示すように、PABIO TUBEの圧損は、運転初期上昇後、漸増性なく6 kPa以下を推移した。

4. PABIO Mix の攪拌性能評価

(1) 実験方法

PABIO Mix を設置したA処理場実験池の第1槽と第3槽の底部流速とMLSS濃度分布、および、PABIO Mix の攪拌動力を測定した。

底部流速とMLSS濃度分布の測定位置を図9に示す。底部流速は第1槽で1カ所、第3槽では槽壁近傍を含む3カ所で、槽底から10 cm 高さの位置で測定した。MLSS濃度分布は各槽2カ所で垂直方向に概ね2 m 間隔で測定した。底部流速は3軸電磁

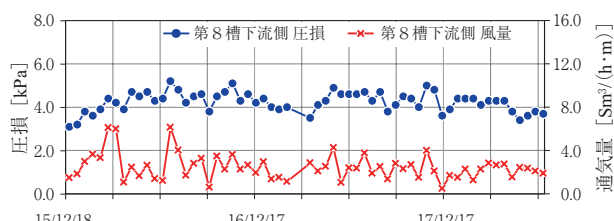


図8 PABIO TUBE の圧損と通気量の推移 (B 浄化センター)

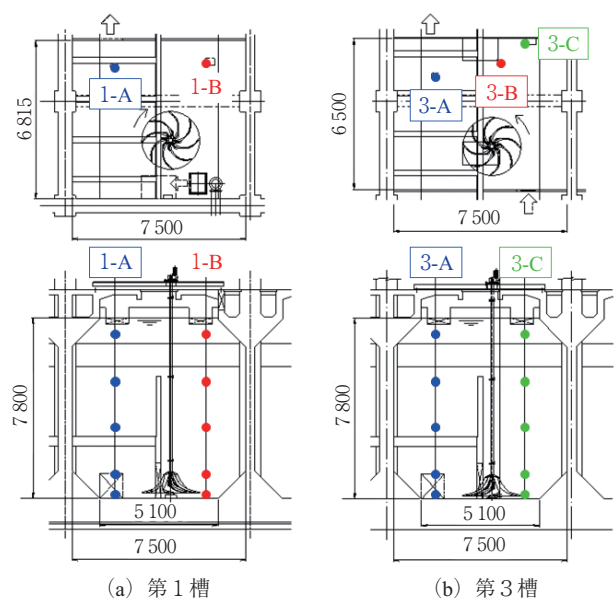


図9 底部流速とMLSS濃度分布の測定位置 (A 処理場実験池第3槽)

表5 底部流速測定結果 (A 処理場実験池)

測定点	第1槽		第3槽	
	1-A	3-A	3-B	3-C
底部流速 [m/s]	0.18	0.20	0.18	0.11

流速計を、MLSS濃度は光透過式MLSS計を用いて測定し、攪拌動力はクランプ式電力計を用いてモーター入力電力を測定した。

(2) 実験結果

底部流速測定結果を表5に、MLSS濃度測定結果を図10に示す。

表5に示すように、全測定地点で0.1 m/s以上の底部流速が得られており、また、図10に示すように均一なMLSS濃度分布であることが確認された。

PABIO Mix の攪拌動力測定結果、ならびに、従来型水中攪拌機に対する電力削減効果の試算結果を表6に示す。従来型水中攪拌機の攪拌動力は、深槽の攪拌動力密度を8 W/m³とし、各槽容量を乗じて算出した。

表6に示すように、PABIO Mix は従来型水中攪拌機と比較して約1/10の攪拌動力で十分な攪拌が可能であると評価した。

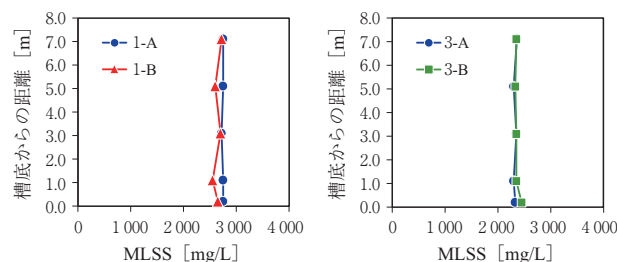


図10 MLSS濃度測定結果 (A 処理場実験池)

表6 PABIO Mix の攪拌動力測定結果 (A 処理場実験池) と電力削減効果試算結果

		PABIO Mix ^{※1}	従来型水中攪拌機 ^{※2}
第1槽	槽容量 [m ³]	374	
	攪拌動力 [kW]	0.26	3.0
	攪拌動力密度 [W/m ³]	0.70	8.0
	年間電力量 ^{※3} [kWh/年]	2 280	26 300
	電力削減効果 [%]	91	-
第3槽	槽容量 [m ³]	355	
	攪拌動力 [kW]	0.3	2.8
	攪拌動力密度 [W/m ³]	0.85	8.0
	年間電力量 ^{※3} [kWh/年]	2 630	24 900
	電力削減効果 [%]	89	-

※1 測定結果に基づく

※2 試算値；攪拌動力密度を8 W/m³として算出

※3 24時間×365日/年運転

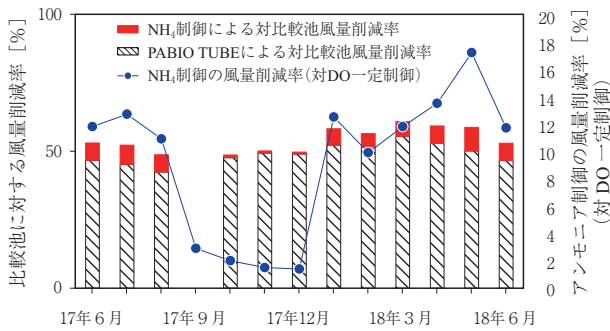


図11 実験池の比較池に対する風量削減率とNH₄制御のDO一定制御に対する風量削減率 (B浄化センター)

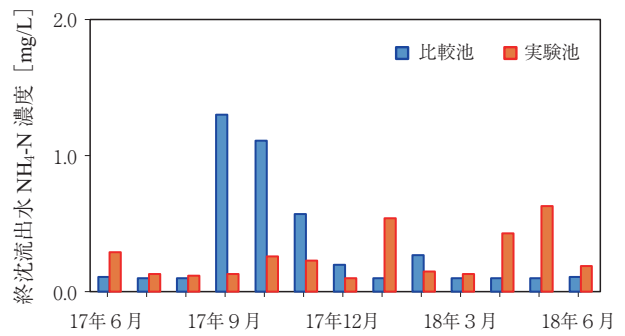


図12 終沈流出水NH₄-N濃度(月平均値) (B浄化センター)

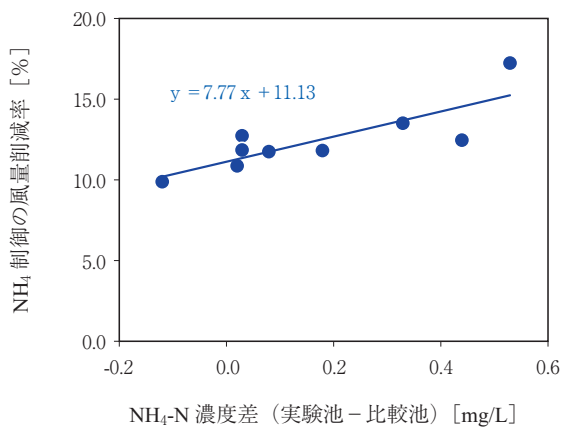


図13 実験池と比較池の終沈流出水NH₄-N濃度差と風量削減率の関係 (B浄化センター)

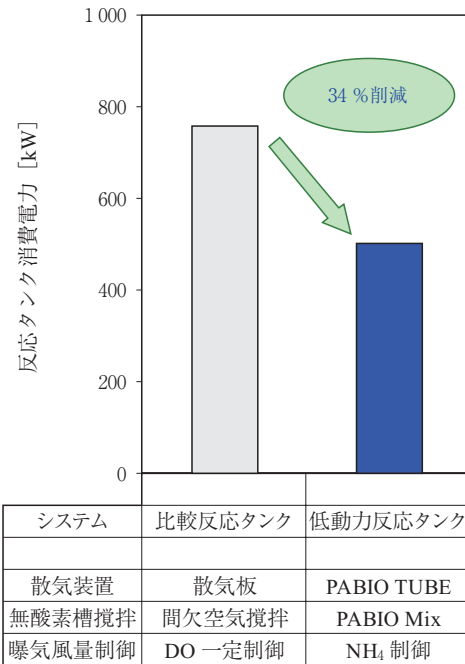


図14 低動力反応タンクシステムの動力削減効果試算結果 (A処理場想定)

5. NH₄制御の風量削減効果

(1) 実験方法

B浄化センター実験池にて、NH₄制御運転とDO一定制御運転を交互に切替え、その送風量差からNH₄制御の風量削減率を算出した。

(2) 実験結果

2017年6月から2018年6月までの実験池の比較池に対する風量削減率とNH₄制御のDO一定制御に対する風量削減率を図11に示す。また、実験池NH₄制御運転期間中の終沈流出水NH₄-N濃度(月平均値)を図12に示す。

図11に示すように、実験池では、比較池に対して48~60%の風量削減効果が得られた。PABIO TUBEとNH₄制御の相乗効果と考えられる。

NH₄制御のDO一定制御に対する風量削減率は、2017年6月~8月と2018年1月~6月は9.9~17.2%、2017年9月~12月は1~3%であった。

風量削減率が低かった2017年9月~12月は、図12

に示すように、比較池の終沈流出水NH₄-N濃度が高かった。これは、台風(9, 10月)、汚泥処理設備改築工事に伴うMLSS低減・余剰汚泥引抜き停止処置(9, 10月)、既設制御システムの更新切替え(11月)の影響と考えられた。一方、NH₄制御運転の実験池では、NH₄-N濃度計測値に応じて送風量が増加し、終沈流出水NH₄-N濃度上昇を抑制したと考えられる。

図13に、2017年6月~8月と2018年1月~6月の実験池と比較池の終沈流出水NH₄-N濃度差と風量削減率の関係を示す。

図13に示すように、終沈流出水NH₄-N濃度差と風量削減率には相関性が見られ、同等水質(濃度差

= 0 mg/L) では、約11 %の風量削減効果が得られると考察した。A 処理場では、DO=2.0 mg/L の DO 一定制御と比較し 9 %の風量削減効果が得られている。

6. 低動力反応タンクシステムの低動力性試算結果

A 処理場において、低動力反応タンクシステムの既設反応タンク設備に対する動力削減効果を試算した。試算結果を図14に示す。

PABIO TUBE の既設セラミック製散気板に対する風量削減率と NH₄ 制御の DO 一定制御に対する風量削減率は、それぞれ、A 処理場実証実験の暫定評価値である33.5 %、9 %とした。また、PABIO Mix の攪拌動力は、A 処理場実験池での測定結果を基に算出し、既設間欠曝気攪拌動力は、0.5 m³/min × 5 分 / 2 時間の条件で A 処理場の送風機の風量と消費電力の関係から算出した。

図14に示すように、低動力反応タンクシステムは、セラミック製散気板、無酸素槽間欠空気攪拌、DO 一定制御で構成される反応タンクシステムと比較し、34 %の動力を削減できる試算結果が得られた。

む す び

下水道事業において、省エネは重要な課題であり、低動力反応タンクシステム、ならびにその構成

技術は、電力消費量削減ニーズに応えることができると考える。低動力反応タンクシステムの消費エネルギー削減効果について、本稿では処理場の試算結果を示したが、今後、処理方式や処理水量など各種条件でケーススタディをおこなう予定である。

低圧損型メンブレン式散気装置 PABIO TUBE については、高い酸素移動効率と風量削減効果を確認し、双曲面形攪拌機 PABIO Mix については、低動力で十分な攪拌性能が得られることを確認した。これら省エネ機器の採用により、送風機動力や攪拌動力の低減に寄与できると考える。NH₄ 制御についても、実処理場で風量削減効果を確認したが、処理場特性による風量削減効果の差異や採算性などの検討を継続し、実用化を目指したい。

最後に、実証実験を実施するにあたり多大なご協力をいただきました自治体・下水処理場の関係各位、また、共同研究者としてご協力をいただきました地方共同法人日本下水道事業団の関係各位に深く感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 財団法人下水道新技術推進機構：メンブレンパネル式散気装置 技術マニュアル (2005), P.1
- 2) 田村ほか、省エネ型反応タンク攪拌機の導入による省エネ効果、第53回下水道研究発表会講演集 (2016), P887~889
- 3) 上田ほか、双曲面形攪拌機 (パビオミックス)、神鋼環境ソリューション技報 Vol. 5 No. 2 (2009)