

矩形処理槽用首振り機構付き攪拌機

On the Oscillating Mixer for Rectangular Anaerobic Treatments Tank

岡本 幸彦 エンジニアリング研究所 船舶・構造研究部 主幹 工博
 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 計画部 グループマネージャー
 篠原 淳二 水エンジニアリング本部 計画部 統括スタッフ
 金森 聖一 水エンジニアリング本部 統括スタッフ
 長藤 雅則 大阪支社 機械プラント部 統括スタッフ

Yukihiko Okamoto, Kazutoshi Ohashi,
 Jun Endo, Junji Shinohara, Seiichi Kanamori
 and Masanori Nagafuji

大規模下水処理場における，窒素，りん除去を目的とした矩形嫌気槽用の攪拌機には主に水中攪拌式曝気装置（水中エアレーター）が使用されている。しかしこの曝気攪拌装置は，攪拌のための消費電力が大きい，重量が大きい，さらに設置，点検のための足場を設置する必要があるなどの問題があり，ランニングコストやメンテナンス面からも改善の要望が強い。これらの問題を解決するために，消費電力面で有利である水平な回転軸を持つ水中プロペラ式攪拌機の適用を検討し，これに新たに首振り機能を付加することで，従来機種と比較し低動力で維持管理性の良い矩形処理槽用攪拌機を開発し，その諸性能を確認した。

In large size waste water treatment plants, rectangular tanks are usually adopted for the anaerobic reactor tanks for removing nitrogen and phosphorus. "Airator", the mixer for both aerobic and anaerobic reaction tanks, is usually used as a mixing device. As Airator has heavy weight and needs much electric power for mixing, also needs scaffolding for installations, inspections and maintenances, there are strong demands for improvements from the viewpoint of running costs and maintenances. In order to find a solution for these problems, an application of propeller type mixer, which has the blades with horizontal rotation axis, is investigated and a new propeller type mixer which has oscillating ability like oscillation fan is developed and applied for the anaerobic reaction tanks. This paper deals with various experimental investigations in order to clarify the hydrodynamic characteristics and reaction performances of newly developed oscillating mixer.

1. はじめに

大規模下水処理場における，窒素，りん除去を目的とした嫌気槽・無酸素槽は，通常矩形槽であるが，その攪拌機には主に水中攪拌式曝気装置（水中エアレーター）が設置されている。しかしながら，水中攪拌式曝気装置は，攪拌のための消費電力が大きく，重量も大きい。さらに設置，点検のための足場を水面上に設置する必要があるため，ランニングコストやメンテナンス面からも改善の要望が強い。

そこで，これらの問題を解決するために，消費電力面で有利である水平な回転軸を持つ水中プロペラ式攪拌機を適用することを検討し，これに新たに首振り機能を付加することで，従来機種と比較し低動力で維持管理性の良い矩形処理槽用攪拌機（以下，首振り機構付き水中攪拌機と略記する）を開発した。ここでは，本機に対する種々の性能試験とその結果について報告する。

2. 縮小模型を用いた攪拌機の槽内混合性能および最適配置探索実験

矩形槽内における攪拌機の首振りの有無および攪拌機の配置が攪拌性能にどのような影響を及ぼすかを調査するために矩形処理槽および首振り機能を持つ攪拌機の縮小模型を作成して以下の試験を行った。実験に用いた模型水槽，攪拌機をFig.1およびFig.2に，また槽内攪拌機配置をFig.3

に示す。模型水槽は後述するK浄化センター生物反応槽第3槽の1/10縮尺模型である。なお，首振り機構付き水中攪拌機も後述する実設備対応機種の1/10の忠実な縮尺模型である。

2.1 食塩水トレーサーによる混合性能確認試験

トレーサーは食塩水を用い，Fig.1に示すとおり流入口にトレーサー注入管を，槽出口に試料採取用のサンプリング管を設けた。食塩濃度は，あらかじめ既知の食塩濃度に対する電気伝導度検定曲線を作成しておき，これを用いて電気伝導度計により計測した。

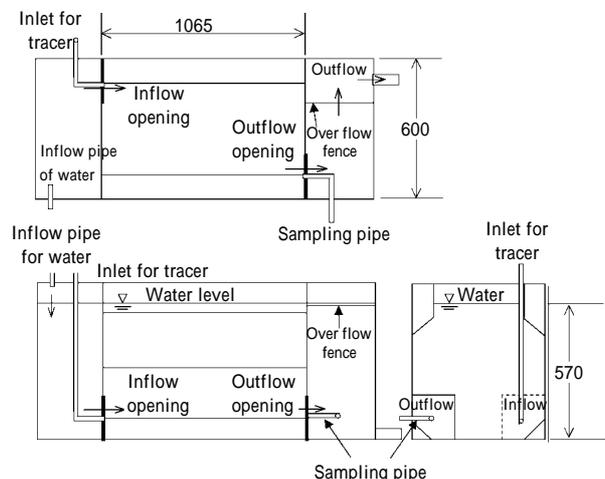


Fig.1 1/10 scaled model of rectangular tank

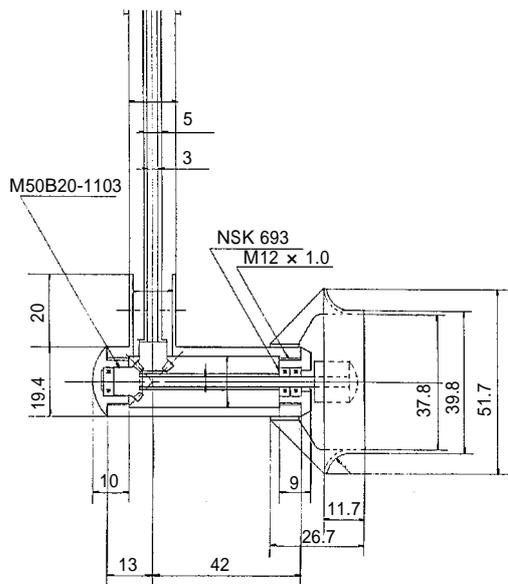


Fig.2 1/10 scaled model of mixer

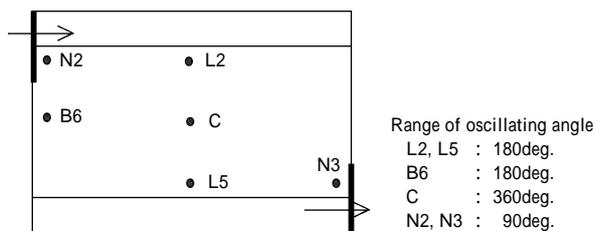


Fig.3 Arrangements of oscillating mixer in model tank

槽内への流入量は、槽の滞留時間が実規模と同等となるように実規模の 1/1000 とし 3.0 l/min とした。また、サンプリングは理論滞留時間の約3倍の時間まで実施し、サンプリング間隔は約10分に1回とした。なお、実験はFig.3に示す攪拌機配置すべてについて実施した。

攪拌機の運転条件については攪拌機回転数を852rpm、首振り速度を 3.0deg/s とした。

実験結果の評価は、まず各計測時間を理論滞留時間で無次元化した無次元時間と流出トレーサー濃度Cを理論初期濃度C₀で無次元化した無次元濃度C/C₀で表わされるトレーサー流出曲線を作成し、理論完全混合曲線と比較するとともに、トレーサー流出曲線から下式(1)で表わされる平均滞留時間 (Mean Residence Time) を求め、これが1.0に近いほど死水域が少なく攪拌性能が良いと判断することとした。

$$MRT = \int_0^{\infty} \theta \frac{C}{C_0} d\theta / \int_0^{\infty} \frac{C}{C_0} d\theta \quad \dots\dots(1)$$

これらの実験結果から、いずれの攪拌機配置についても、得られた流出曲線は理論完全混合曲線とほぼ一致し、MRTもほぼ1.0となった。よって、各配置とも攪拌機の首振りを行えば死水域がほとんどない良好な攪拌状態が達成

されており、攪拌機の最適配置は、汚泥沈積防止の観点から評価すれば良いことがわかった。前述の各攪拌機配置に対するMRTをFig.4に示す。

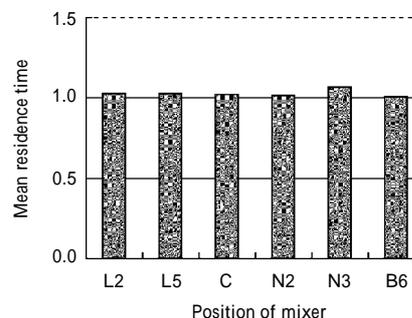


Fig.4 Comparison of mean residence time

2.2 樹脂製トレーサーによる汚泥沈降防止性能試験

槽底部に比重1.05程度の樹脂製トレーサーをほぼ均一に堆積させ攪拌を行い、首振りの有無によってトレーサーがどのように動くかを観察し、首振り汚泥沈積防止に及ぼす効果を定性的に把握した。攪拌機の配置は、Fig.3のB6を除く場合について行った。

プロペラ作動条件および首振りの有無はTable 1に示すとおりとした。プロペラ回転数はトレーサーの比重と流動性を考慮し前述の試験の回転数の約1.5倍とした。

Table 1 Conditions of wipe out ability of sunk plastic tracers

Position of mixer	Rpm	Angular velocity of oscillating	Range of oscillating angle	Without oscillating	With oscillating
C	1205	3.0 deg/sec	360deg.	-	
L2			180deg.		
N3			90 deg.		
N2			90deg.		
L5			180deg.		

すべての実験条件の中から首振りの有無の差を示す実験結果の一部をPhoto 1およびPhoto 2に示す。

これらから、攪拌機は槽長手方向の中央の壁面近傍に配置し、側壁の直角方向に対し±90deg(180deg)程度の首振りを行う場合が最適であり、その際攪拌機の首振りによる汚泥沈積防止効果は非常に大きいと考えられる。



Photo 1 Result of wipe out experiments without oscillation



Photo 2 Result of wipe out experiments with oscillation

3. 実規模における水負荷試験

前述の縮小模型実験をふまえて、実規模の矩形生物反応槽に首振り機構付き水中プロペラ式攪拌機を適用した場合の混合性能および槽内の流動状況を把握するために、K 浄化センターの矩形処理槽第 1 槽を借用して実験を実施した。

試験に用いた水槽寸法と攪拌機仕様を Fig.5 および Fig.6 に示す。なお槽容量は約 300m³、流入量は 3.0m³/min であり滞留時間は約 100 分である。

ここで、攪拌機の動力選定は、対応する従来機種（水中エアレーター）の選定基準（8 ~ 10W/m³）の半分程度を狙い、1.5KW（約 5W/m³）とした。

攪拌機の配置は槽の構造上の制約から槽長さ方向の中央に配置することができなかつたため、Fig.5 中に示す位置に配置した。

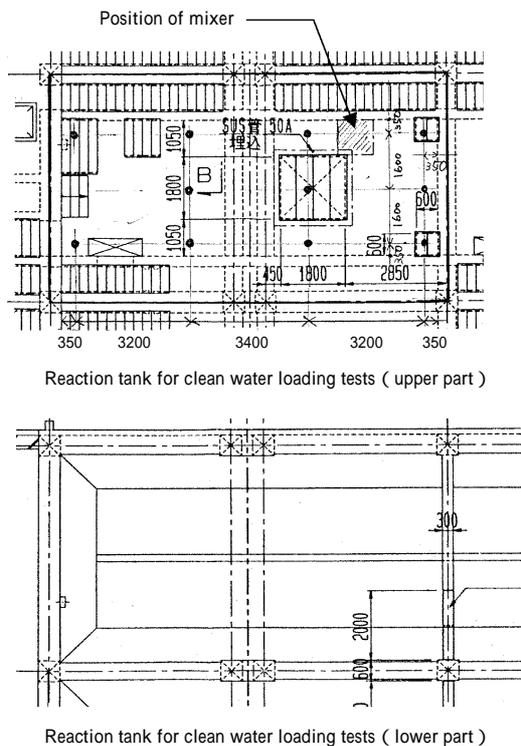
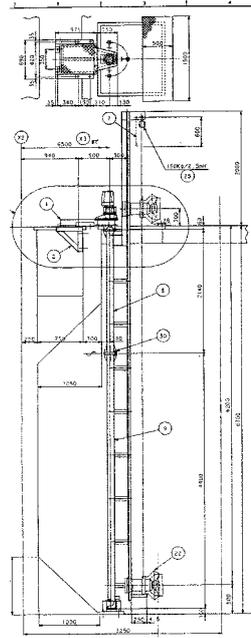


Fig.5 Reaction tank for clean water loading tests (K-waste water treatment center)



Specifications of mixer

Motor output	: 1.5Kw
Blade angle	: 4.0deg.
Number of blades	: 3
Revolution of mixer	: 852rpm
Force	: 340N
Angular velocity of oscillation	: 3.0deg./s

Fig.6 Oscillating mixer for clean water loading tests

3.1 攪拌性能試験

槽内の混合性能を調べるために、塩化リチウム水溶液を用いてトレーサー試験を実施した。塩化リチウムはリチウム初期濃度が 5.0mg/l になる量の水溶液を作り流入管位置からパルス投入し、滞留時間の 3 倍の 300 分間を 15 分おきに試料サンプリングを行った。流入水は Fig.5 中に示す位置まで配管し、下向きパイプから水面へ落下させた。また、採水は流入位置と対角の底部位置にある流出口中央部に配置した試料採取用配管からポンプで行うこととした。サンプリングした試料は蛍光光度計を用いてリチウム濃度を求めた。分析結果は前述の方法で濃度および時間を無次元化してトレーサー流出曲線を求めた。実験を行った攪拌機の作動状態は Table 2 に示すとおりである。

実規模トレーサー試験の結果を、それぞれ Fig.7 に示す。同図から得られた流出曲線は理論完全混合曲線とほぼ一致し、良好な攪拌が行われていることが確認できた。

3.2 流速測定

槽内の流動状況、特に汚泥沈積防止に影響の大きな槽底部流速分布の平均値および首振り時の時系列データについて計測を実施した。流速計測は、三次元の流速分布が同時計測できる電磁流速計（アレック電子製 ACM300）を用いて計測した。計測点を Fig.8 に示す。

Table 2 Testing conditions of tracer tests using LiCl₂

	Rpm	Inflow rate (m ³ /min)	Oscillation	Range of oscillation angle (deg.)	Angular oscillation velocity (deg./sec)
Condition-1	0	3.0	No	0	-
Condition-2	852	3.0	No	90 fixed	0
Condition-3	852	3.0	Yes	180	3.0

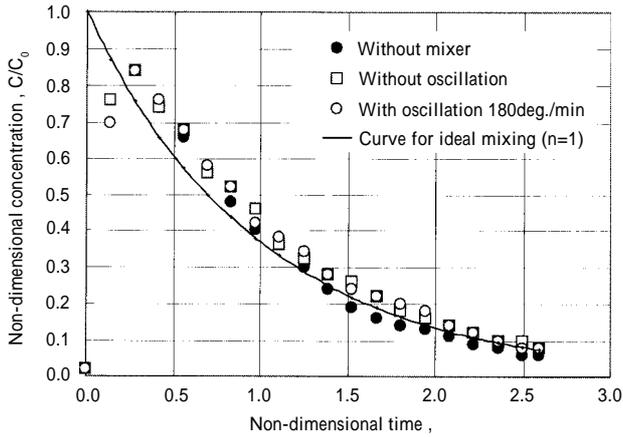


Fig.7 Outflow tracer concentration curves using $LiCl_2$ (K-Waste water treatment center)

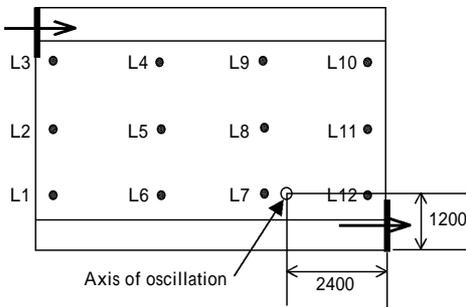


Fig.8 Points for measurements of tank bottom velocity

槽底部の流速計測は攪拌機の首振りが1往復する時間についてx, y, z各方向の速度成分 V_x, V_y, V_z の時系列を採取し、これらから求めた合成速度ベクトル V の時系列データの平均値, 最大値および最小値を各計測点について求めた。

計測は 槽上部スラブの開口から流速計を先端に取り付けた長いアルミ製の竿を水中に挿入して行った。計測条件は Table 2 と同一である。

各計測条件における槽底部流速計測結果をFig.9, Fig.10 およびFig.11に示す。図中には流速の平均値を \bullet で, 最大最小値を \circ で示した。なお, Fig.11では最大値が縦軸の範囲を超えているデータがある。これらのデータから下記のことになった。

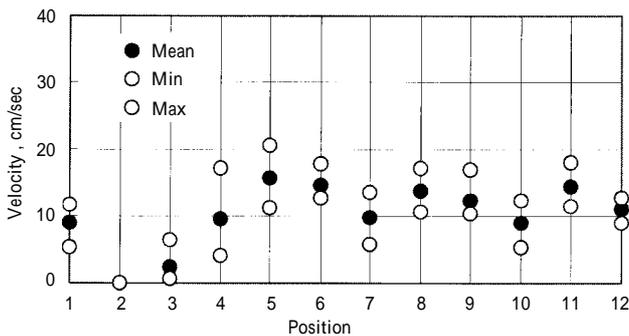


Fig.9 Tank bottom velocity (mixer not operating)

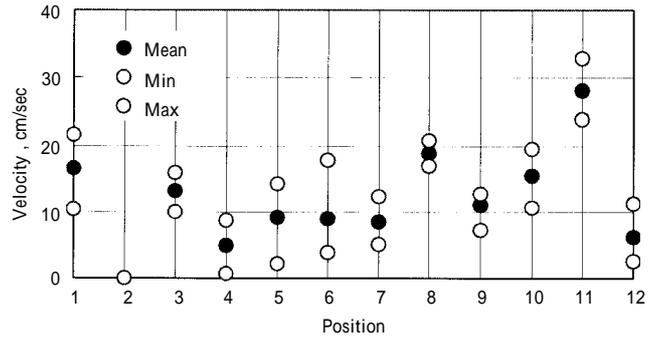


Fig.10 Tank bottom velocity (fixed direction, mixer operating)

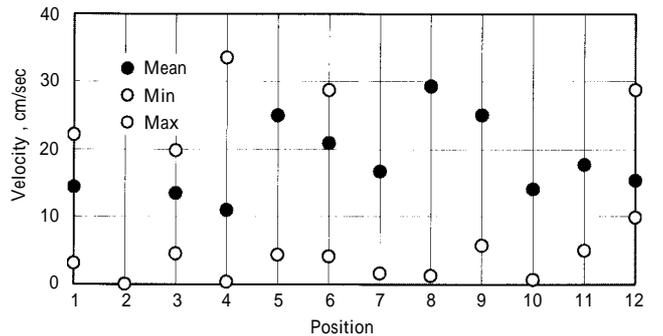


Fig.11 Tank bottom velocity (oscillating, mixer operating)

(1) 攪拌機が作動しない状態では, 約半数の計測点において底部平均流速10cm/sec(汚泥沈降防止のための基準値)を達成していない。

(2) 攪拌機を90deg方向に固定した場合にも, 攪拌機が作動しない状態と同様に 約半数の計測点において底部平均流速10cm/secを達成していない。ただし攪拌機近傍では流速が増加している。また流速の変動幅も大きくなっている。

(3) 攪拌機180deg首振りさせた場合には, 計測した全点において底部平均流速10cm/secを達成している。また流速の変動幅は前出2条件に比べて大幅に大きくなっており, 首振りによる底部流速の上昇効果が顕著であることがわかった。

4. 実規模における実負荷実験

嫌気好気活性汚泥法にて実際に稼働している矩形嫌気処理槽に本攪拌機を適用した場合の攪拌性能および処理性能を把握するためにA浄化センターの矩形処理槽第1槽(嫌気槽)を借用して実験を実施した。

槽容量は944 m^3 , 流入汚水量は約6.25 m^3/min , 返送汚泥流入量は2.5 m^3/min の合計8.75 m^3/min であり滞留時間は約107分である。槽形状を表わす平面を Fig.12 に示す。攪拌機の動力は, 前述の水負荷試験と同様の選定方法により5.5KW(約6W/ m^3)を選定した。また, 攪拌機の取り付け状況を Photo 3 に示す。

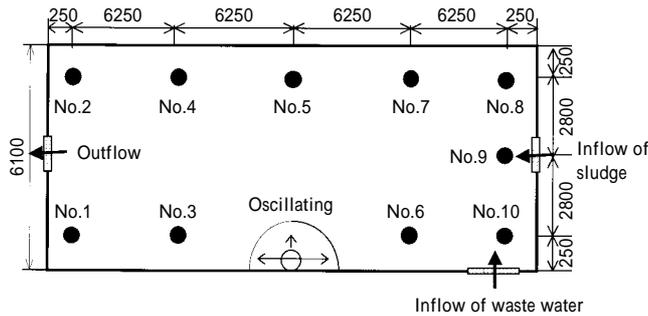


Fig.12 Points for measurements of tank bottom velocity (A-waster water treatment center)



Photo 3 Oscillating mixer installed in anaerobic reaction tank at A-waste water treatment center

4.1 槽底部の流速分布計測

Fig.12 に示す No.1 ~ No.10 の 10 箇所、3 水深について流速を計測した。計測には、電磁式三次元流速計 (アレックス電子製 ACM300) を用い、それぞれ首振り一往復に渡ってその時系列データを計測した。なお攪拌機が汚水流入口側に 90deg 首を振った状態を計測開始点とした。

攪拌性能上、最も重要と考えられる槽底部流速について、首振り 1 周期 120 秒の各計測点における平均流速および最大最小流速を Fig.13 に示す。また、点 No.5 における流速の時系列データの一例を Fig.14 に示す。

平均流速では点 No.1, No.8 および No.9 においてわずかに 0.1m/s を下回るものの、ほぼ 0.1m/s 以上が達成されて

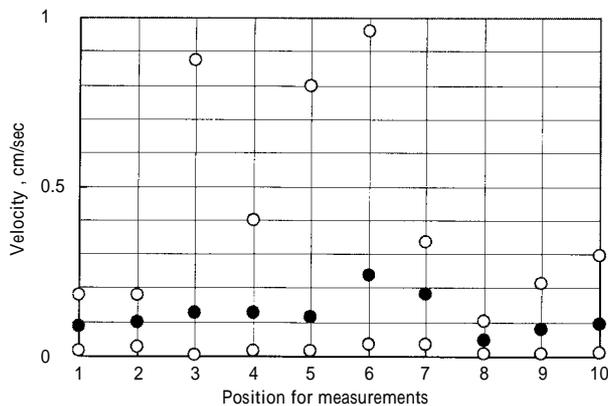


Fig.13 Tank bottom velocity (mean, max, min)

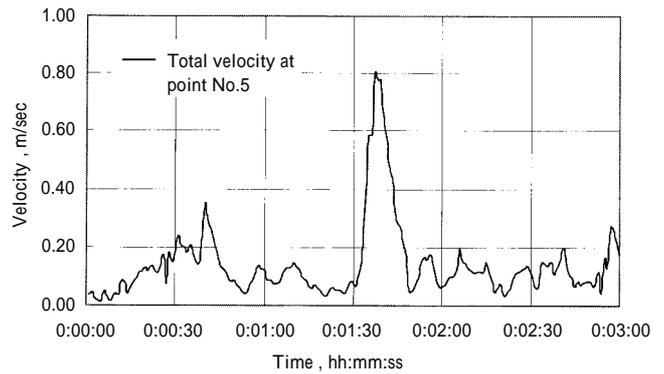


Fig.14 An example of tank bottom velocity time history (at point No.5)

おり、首振り一往復中の最大流速はいずれの箇所でも 0.1m/s を上回っていることがわかる。また時系列データについてみると、汚水流入側の攪拌機から最も離れた点 No.8 のみ最大流速が 0.1m/s を越える時間が短くなっているが、それ以外の点においては 0.1m/s を越えている時間はかなり長くなっている。また、点 No.3 ~ No.7 では最大流速は 0.1m/s を大きく上回っていることがわかる。

4.2 塩化リチウムトレーサーによる混合特性試験

実規模水負荷試験の場合と同様、塩化リチウムをトレーサーとして反応タンクの混合特性試験を実施した。トレーサーである塩化リチウムの投入量はリチウムの初期濃度が約 5mg/l となる約 30kg とした。投入方法は塩化リチウム水溶液を反応槽流入部よりバケツで投入した。

サンプリング位置は槽流出口に設けた採水管よりサンプリングポンプで採水した。サンプリング間隔は最初の 1 時間は 7.5 分に 1 回とし、その後は 15 分に 1 回とした。またサンプリング時間は理論滞留時間の約 3 倍である約 300 分とした。

これらのデータを用いて原子吸光計を用いた炎光光度法によりリチウム濃度を求めて解析を行い、無次元リチウム濃度と無次元時間で表わしたトレーサー流出曲線を Fig.15 に示す。この結果から、この矩形嫌気反応槽では理論完全混合に非常に近い混合状態が実現されていることがわかる。

なお、本反応タンク流出水は返送汚泥として循環しているので、念のため、流入返送汚泥のリチウム濃度を随時測定し、計測されるリチウム濃度に対する影響を調査したが特に問題のない濃度であることがわかった。

4.3 活性汚泥浮遊物質の濃度分布測定

Fig.12 に示す No.1 ~ No.10 の 10 箇所 3 水深について採水し、活性汚泥浮遊物質 (MLSS) 濃度計測を実施した。採水は、攪拌機の方角により低層部と中層部については 3 条件、上層部については 2 条件で実施した。

上層、中層、下層の各採水点における MLSS の分析値を Table 3 に示す。1 列目の数値は採水を行ったときの攪拌機の方角を示す。計測したすべての箇所、ほとんど同等の

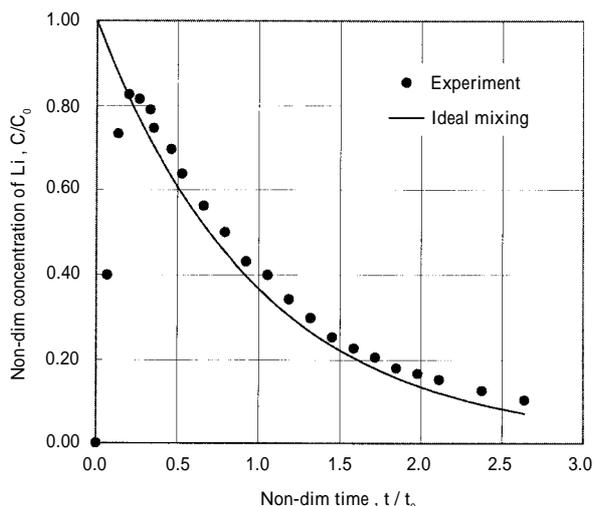


Fig.15 Outflow tracer concentration curves using using LiCl_2 (A-waste water treatment center)

MLSS値(2200 ~ 2500mg/l)であり攪拌機による活性汚泥の攪拌は、非常に効率良くかつ十分行われているものと考えられる。

なお、点 No.9, No.10 の底部には2500mg/l 以上の MLSS 値がやや高い点があるが、この部分は返送汚泥の流入口の近くであるためと考えられる。

4.4 嫌気槽水質分析

(1) 酸化還元電位の計測

Fig.12のNo.2, No.5およびNo.8の水深方向中間部の3個所の酸化還元電位(以下,ORPと略記する)を計測した。これらの計測結果を Table 4 に示す。槽流入部側の No.8 のORPは-170mVであるが、中央部および流出部は約-200mVとなっている。嫌気・無酸素・好気法運転マニユ

アル(案)²⁾によれば「通常,嫌気槽のORPは、-200 ~ -300mV程度に維持する。」とあり、本嫌気槽は、りん放出に良好な状態であると考えられる。

Table 4 Measurement results of ORP

	ORP
No.8 (inflow side)	-170mv
No.5 (center)	-199mv
No.2 (outflow side)	-200mv

(2) りん酸態りんの測定

Fig.12のNo.2, No.5およびNo.8の水深方向中間部の3個所,反応槽流入水および返送汚泥について採水し,分析を行った。採水は、攪拌機の方角により3条件(対向直前,直後その中間)について実施した。

計測結果を Table 5 に示す。同表の左端欄の括弧内数値は、攪拌機が汚水流入口側に90deg.首を振り切った状態を0deg.とした場合における採水時の攪拌機の方角を示す。

Table 5 Measurement results of $\text{PO}_4\text{-P}$ (sampled on 20th Feb. 2001)

Sampling position	mg/l	
	$\text{PO}_4\text{-P}$	
No.8 (135)	24.3	
No.8 (150)	23.7	
No.8 (165)	24.4	
No.5 (115)	23.8	
No.5 (130)	25.6	
No.5 (145)	25.6	
No.2 (85)	25.3	
No.2 (100)	25.5	
No.2 (115)	25.0	

Table 3 Distributions of MLSS in anaerobic reaction tank

	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5	
	Angular position	MLSS concentn								
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 concentn								
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

同表より、流入部、中央部、流出部の各部においてりん酸態りん ($\text{PO}_4\text{-P}$) の差違はほとんどなかった。また、別の日に再度採水し計測した結果を Table 6 に示した。いずれもスポットサンプリングデータであるが、両日に渡って安定したりんの放出が行われている。

Table 6 Measurement results of $\text{PO}_4\text{-P}$
(sampled on 21st Feb. 2001)

Sampling position	mg/l
	$\text{PO}_4\text{-P}$
No.8	21.5
No.5	22.6
No.2	23.5
Outflow	5.8
Inflow	6.6

ここで、本分析結果をもとに、高度処理施設設計マニュアル(案)³⁾に基づき、りん除去に関する試算を行ったところ、嫌気槽のりん濃度計算値 $C_{P,AN}$ は、21.0mg/l となった。

Table 5 より今回測定された嫌気槽でのりん放出値は、本計算値以上となっており、十分なりんの放出が行われていると考えられる。

なお、詳細の生物処理過程の解明には、嫌気槽でのりんの放出速度や好気槽におけるりん摂取速度などを解析していく必要があるが、今回は、嫌気槽内でのりんの放出の確認分析にとどめた。

5. まとめ

首振り機構付き水中攪拌機の攪拌性能確認実験および実負荷実験から以下の結論を得た。

(1) トレーサー流出曲線の解析からは、槽内の攪拌機配置は攪拌性能にあまり大きな影響を及ぼさない結果となった。よって、攪拌機の配置は汚泥沈積防止の観点から決めれば良いと考えられる。

(2) 今回の検討範囲では、首振り機能付き水中攪拌機は槽長手方向の中央の壁面近傍に配置し、側壁の直角方向に対し $\pm 90\text{deg.}$ (180deg.) 程度の首振りを行う場合が最適となった。

(3) 首振り機構付き水中攪拌機を(2)の条件で設置することで、槽内流速は、ほぼ計測した全点において底部平均流速 10cm/sec を達成していた。

(4) 嫌気好気活性汚泥法の実施設嫌気槽において首振り機構付き水中攪拌機を適用し、実負荷運転中の槽内の汚泥濃度を確認したところ、すべての計測点で、ほぼ同じ MLSS 値(2200 ~ 2500mg/l)であり、本攪拌機による活性汚泥の攪拌が、非常に効率良くかつ十分行われていることがわかった。

(5) 以上より、今回の実験では首振り機構付き水中攪拌機は、従来機種の約半分の動力投入密度 ($5 \sim 6\text{W/m}^3$) で十分な攪拌性能が得られることがわかった。

(6) 嫌気好気活性汚泥法の実施設嫌気槽において首振り機

構付き水中攪拌機を適用し、実負荷運転中の槽内の水質分析を行ったところ、同槽内では十分なりんの放出が行われていた。よって、首振り機構付き水中攪拌機は、生物学的りん除去法の嫌気槽攪拌機として十分適用が可能であることが確認できた。

6. おわりに

本首振り機構付き水中攪拌機は、構造的にも全く新たな発想のもとに設計を行ったが、A 処理場に設置した2機の攪拌機は、設置から8ヶ月以上の間順調に稼働している。今後も耐久性に関する検証も兼ねて稼働状態を確認していく予定である。

また、さらに本攪拌機に関して矩形槽の容積や槽形状が変わった場合の攪拌機容量と最適配置選定および最適首振り速度などに関する実験やシミュレーション計算を行い、あらゆるニーズに対応できる体制を整えていく予定である。そして、これらの研究成果をもとに、本攪拌機を速やかに商品化し水処理施設の水質向上、省エネルギー化および省メンテナンス化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(株)、前沢工業(株)、ITT フリクト(株)との共同研究として実施された。各関係の方々には謝意を表わす次第である。

参 考 文 献

- 1) 下水試験方法. (社)日本下水道協会.
- 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(株)編.
- 3) 高度処理施設設計マニュアル(案). (社)日本下水道協会編.

<問い合わせ先>

水エンジニアリング本部 計画部

Tel. 03 (3217) 2611 大橋 一聡

Kazutoshi_Ohashi@ntsgw.tokyo.nkk.co.jp