

6. 下水道における水環境マネジメント推進に関する調査

下水道処理研究室	室長	山下 洋正
	主任研究官	田嶋 淳
	研究官	濱田 知幸
	交流研究員	山口 修史
	交流研究員	前田光太郎

1. はじめに

2015年に実施された気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）に先立ち、2020年以降の我が国の温暖化対策の目標である「約束草案」¹⁾が提出され、2030年度に2013年度比▲26.0%の水準（約10億4,200万t-CO₂）にすることとしている。

下水道処理場における電力使用量は平成25年度の時点で6,991百万kwh/年²⁾であり、我が国で消費された総電力量の約0.74%に相当する。下水道処理場における電力由来の温室効果ガス排出量は約360万t-CO₂/年であり、公共団体が実施する事務事業のなかでも温室効果ガス排出量が大きい。「約束草案」における温室効果ガス削減目標の積み上げの基礎となった対策・施策において、下水道における省エネ・創エネ対策の推進が挙げられており、公的機関として率先した省エネ方策の推進が求められる。

下水道処理場においては、処理方法や導入されている設備等の特性によりエネルギー使用量が大きく異なるため、特性を踏まえエネルギー使用状況を把握することが下水道処理場のエネルギー使用量を最適化するうえで重要となる。下水道処理設備のエネルギー使用量のうち大部分を送風システム、汚泥処理システムが占めており、電力使用量の削減が特に課題となっている。このため、本研究においては送風システム及び汚泥処理システムのエネルギー使用量について調査を行っており、本稿ではそのうち送風システムの調査結果を示す。

2. 調査方法

送風システムにおける省エネ方策として、高効率散気装置などの省エネ設備、必要風量をセンサ等で把握して送風機を制御する技術の導入等による送風量の削減が挙げられる。一方で、送風量の制御（削減）による電力使用量の削減効果については、処理場の送風機により異なることが予想されるが、これらについて送風機の形式や送風機の機械的な送風量制御方式の違いによる影響の調査事例が少ない。

そこで本研究では、まず下水道処理場の送風機について主要メーカーを対象にヒアリング調査を行い、送風機の形式や送風機の機械的な送風量制御方式毎に送風量と電力使用量の関係を明らかにした。次に、下水道処理場の流入水量・水質の時間変動に応じた送風量制御による電力使用量を把握するため、流入水量毎にモデル下水道処理場を数ケース設定し、ヒアリング調査で整理した送風量と電力使用量の関係を用いて、送風システムの特性毎に消費電力量を試算した。

2. 1 送風量と電力消費量の関係

2. 1. 1 ヒアリング調査

(1) 調査方法

送風機の風量調節機構により風量を絞ったときの送風量と電力量の関係を明らかにするため、表1に

示す算定条件でメーカーヒアリングを行った。送風機の型式は、小規模処理場で採用数が多いルーツブロワと中規模、大規模処理場で採用が多い鋳鉄製多段ターボブロワ（以下、ターボブロワ）、近年採用が多くなっている軸浮上ターボブロワを調査対象とした。また、送風機の風量調節機構は、ルーツブロワ、軸浮上ターボブロワで多く採用されるインバータ制御、ターボブロワで多く採用されるインレットベーン、吸込み弁とした。送風量はブロワの採用実績調査³⁾から採用実績の多い範囲を設定した。また、吐出圧によっても電力量が異なるため、5,800mmAq と 6,500mmAq の 2 ケース設定した。ターボブロワについて、表 1 の①～③の条件で 2 社、④～⑤の条件で 3 社、ルーツブロワ（⑥～⑧の条件）については 1 社、軸浮上ターボブロワ（⑨～⑫の条件）

表 1 送風機の調査条件

送風機型式	No.	風量調整機構	送風量	吐出圧
			[m ³ /min]	[mmAq]
ターボブロワ	①	インレットベーン	300	5,800
	②	インレットベーン	300	6,500
	③	吸込み弁	300	5,800
	④	インレットベーン	107	5,800
	⑤	吸込み弁	107	5,800
ルーツブロワ	⑥	インバータ	50	6,500
	⑦		50	5,800
	⑧		20	6,500
軸浮上ターボブロワ	⑨	インバータ	92	5,800
	⑩		92	6,500
	⑪		138	5,800
	⑫		138	6,500

については 1 社より回答があり、入手した性能曲線をもとに、送風量と軸動力の関係をグラフ化し近似式を導いた。なお、ターボブロワについては軸動力、ルーツブロワについては出力、軸浮上ターボブロワについては入力動力で回答があった。

(2) 調査結果

ターボブロワの送風量制御時の風量と軸動力の関係を図 1 に示す。インレットベーン制御は、吸込み弁制御に比べて軸動力が低い傾向にあった。また、インレットベーン 300m³/min について、吐出圧 5800mmAq と吐出圧 6500mmAq を比較すると、同じ風量条件における軸動力は、吐出圧 6500mmAq が 10% 程度高い傾向にあった。ルーツブロワの送風量制御時の送風量と出力の関係を図 2 に示す。吐出圧

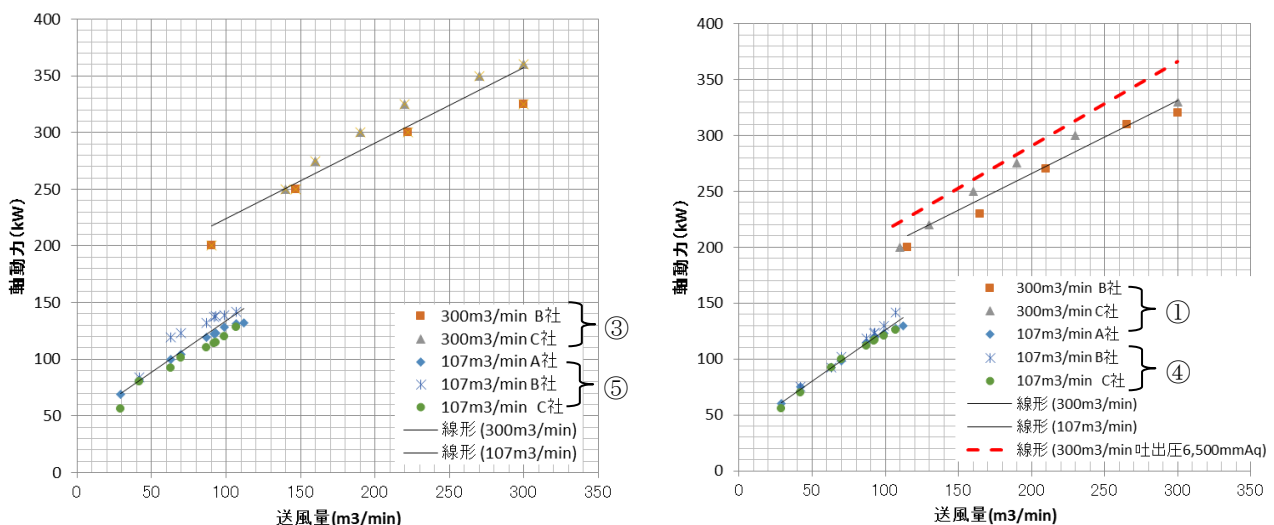


図 1 ターボブロワの送風量と軸動力の関係（左図：吸込み弁制御、右図：インレットベーン制御）

5800mmAq と吐出圧 6500mmAq を比較すると、同じ風量条件における軸動力は、ターボブロア同様に吐出圧 6500mmAq が 10%程度高い傾向にあった。軸浮上ターボブロアの送風量制御時の風量と入力動力の関係を図 3 に示す。吐出圧 5800mmAq と 6500mmA を比較すると、同じ風量条件における入力動力は、ターボブロア同様に 6500mmAq が 10%程度高い傾向にあった。

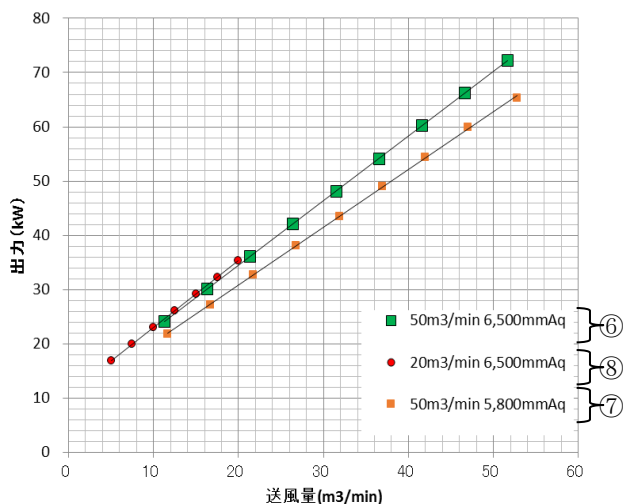


図 2 ルーツブロアの送風量と出力の関係

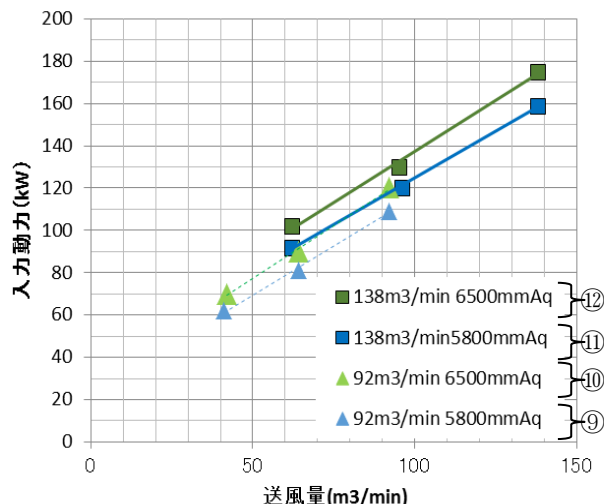


図 3 軸浮上ターボブロアの送風量と入力動力の関係

(3) 送風量と入力動力等の関係

表 2 に送風量と入力動力の関係を示す。ターボブロアとルーツブロアは、メーカーヒアリングにより得た軸動力の性能曲線から図 1、図 2 を整理していたため、電動機効率とインバータ効率を考慮して入力動力を算出した。

ターボブロアについて、定格に近い領域で運転した場合、送風量 300m³/min は送風量 100m³/min よりも 10%程度単位風量当たりの入力動力が低くなった。スケールアップにより全熱断熱効率の上昇が寄与したものと考えられる。

表 2 送風量と入力動力の関係

送風機 型式	No.	関係式	効率	送風量 [m³/min]	定格に対する風量比率 単位風量当たり入力動力(kw/m³)			
					100%	80%	60%	40%
ターボ ブロア	①	$y = 0.6541x + 135.43$	0.93	300	1.19	1.31	1.51	1.92
	②	$y = 0.754x + 139.72$	0.93	300	1.31	1.44	1.65	2.06
	③	$y = 0.6632x + 158.27$	0.93	300	1.28	1.42	1.66	2.13
	④	$y = 0.914x + 34.448$	0.93	107	1.32	1.40	1.54	1.82
	⑤	$y = 0.9078x + 43.376$	0.93	107	1.41	1.52	1.70	2.07
ルーツ ブロア	⑥	$y = 1.1906x + 10.647$	0.95	50	1.48	1.53	1.63	1.81
	⑦	$y = 1.0665x + 9.4649$	0.95	50	1.32	1.37	1.45	1.62
	⑧	$y = 1.2257x + 10.779$	0.95	20	1.86	2.00	2.24	2.71
軸浮上 ターボ ブロア	⑨	$y = 0.9244x + 23.299$	-	92	1.18	1.24	1.35	1.56
	⑩	$y = 1.0032x + 27.123$	-	92	1.30	1.37	1.49	1.74
	⑪	$y = 0.8834x + 36.505$	-	138	1.15	1.21	1.32	1.54
	⑫	$y = 0.9648x + 40.798$	-	138	1.26	1.33	1.46	1.70

送風機形式による傾向として、ターボブロワ 300 m³/min や軸浮上ターボブロワは、定格運転時の単位風量当たりの入力動力が低くなった。また、ターボブロワは定格に対する風量比率が低い（40%）場合に単位風量当たりの入力動力が高くなった。ターボブロワは、定格に対する風量比率が低い領域において、風量制御による省エネ効果が低くなるものと推察された。一方で、ルーツブロワ 50m³/min、軸浮上ターボブロワは、定格に対する風量比率が低い（40%）領域において、ターボブロワよりも 15～25%程度単位風量当たりの入力動力が低くなり、変動幅の大きい送風量制御に適するものと推察される。

2. 1. 2 実態調査

メーカーヒアリング調査結果について、下水処理場の実態と一致しているか確認するため、下水処理場の送風機の風量と電力に関する実態調査を実施した。送風量データの整理に当たり気温による体積変化を踏まえ温度補正を行い、気温 20℃時の送風量に換算した。調査結果の一例を図 4、図 5 に示す。メーカーヒアリングの前提条件が現商品の性能曲線の収集であったため、図 4 のように送風機の製造年度が新しい（2010 年製）下水処理場では、メーカーヒアリングにより整理した送風機の性能線と調査結果が概ね一致した。一方で送風機の製造年度が古い（2005、2006 年製）下水処理場では性能線よりも電力使用量が高くなった。また、図 5 のように冬季は性能線と概ね一致したのに対し、夏季は性能線よりも電力使用量が高くなる調査結果が見受けられた。送風機の機械効率に気温上昇が影響している可能性があり、確認が必要と考えられる。

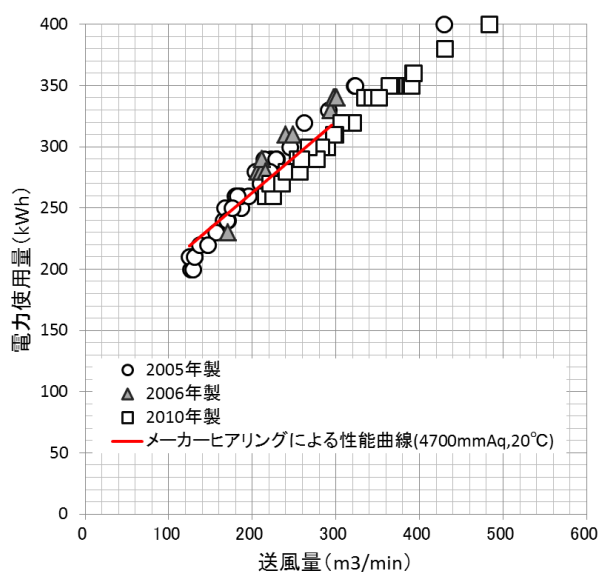


図 4 下水処理場実態調査結果
(ターボブロワの一例)

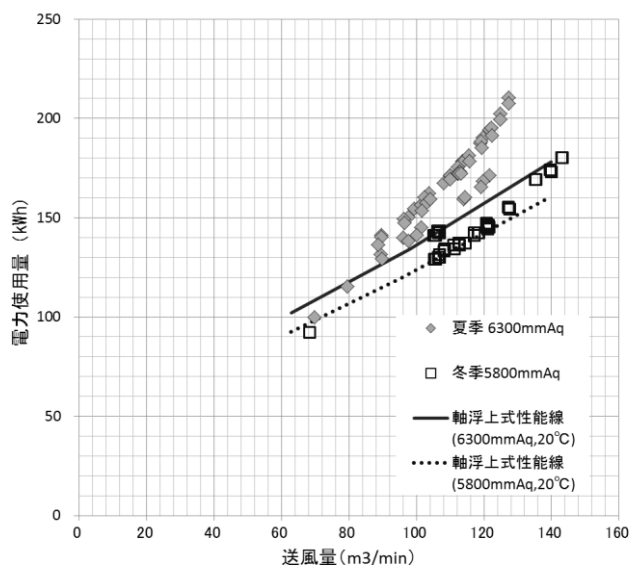


図 5 下水処理場実態調査結果
(軸浮上ターボブロワの一例)

2. 2 流入水量・水質の時間変動と電力消費量の関係

2. 2. 1 モデル下水処理場の設定

(1) 調査方法

実下水処理場の流入水量と水質の時間変動を把握する為、全国の自治体にアンケート調査を実施した。処理方式として標準活性汚泥法または高度処理法を実施している施設において、H25 年度の年間の日平均流入水量²⁾ が約 1 万 m³/day、約 5 万 m³/day、約 10 万 m³/day である施設を抽出し、アンケート対象とした。表 3 にアンケートの回答施設数を示す。対象施設の表 4 に示すデータ項目について時間変動データを整理した。

表3 アンケート回答施設数

施設規模	標準法	高度処理	合計
1万m ³ /day	17	2	19
5万m ³ /day	9	8	17
10万m ³ /day	6	7	13

表4 アンケートの時間変動データ項目

	初沈流入水または流出水	反応タンク流出水	その他
データ項目	・流入水量・BOD濃度 ・SS濃度・NH ₄ -N濃度	・BOD濃度 ・NH ₄ -N濃度またはT-N濃度	・送風機の常用 運転台数

(2) 調査結果

アンケート調査により得られた結果から各規模別に流入水量と、反応タンクへの流入水質としてBOD濃度、SS濃度、T-N濃度の時間変動モデルを作成した。結果を図6に示す。流入水量・水質の変動データは変動比率(日平均値に対する各時間帯の割合(%))として整理した。流入水量の変動データは最も変動比率の小さい時間帯が6:00となるように補正し、補正後の各時間帯の平均値を変動率として採用した。流入水質の変動比率はそれぞれの規模で一般的と思われる1施設の変動率を採用した。なお反応タンクへの流入水中の各濃度の日平均値は、実処理場の提供データの平均よりBOD濃度=118mg/L、SS濃度=49mg/L、T-N濃度=28mg/Lだった。

また各規模における送風機の常用運転台数と機種に関するアンケート結果を表5に示す。小規模処理場ではルーツブロワが多く採用されており、大規模になるほどターボブロワの採用率が高くなり、10万 m³/day 規模では全ての機種がターボブロワとなっており、送風機機種と処理場規模との間に明確な関係性が見られた。

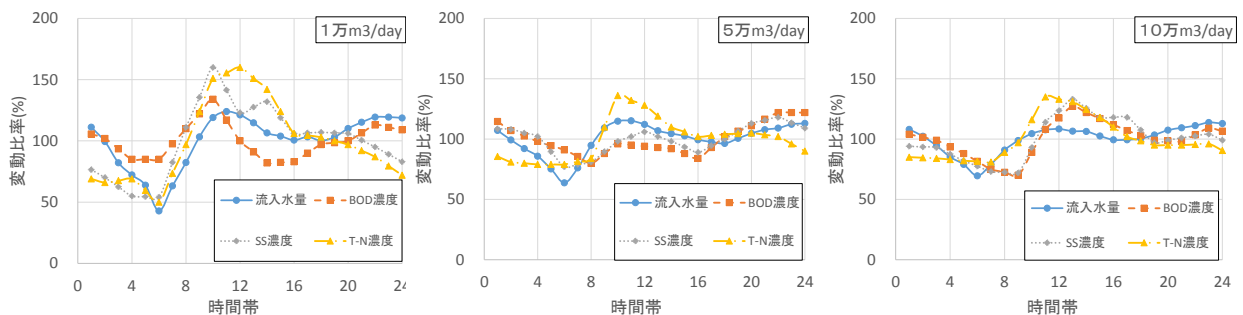


図6 流入水量・流入水質の時間変動モデル

(左：1万 m³/day、中央：5万 m³/day、右：10万 m³/day)

表5 時間変動モデルにおける送風機の設置台数・機種

流入汚水量 (日最大)		1万 m ³ /日	5万 m ³ /日	10万 m ³ /日	
調査処理場数		19	17	13	
合計常用台数		36	32	52	
内訳	ルーツブロワ	23	3	0	
	ターボブロワ	9	29	52	
	ターボブロワ もしくはルーツブロワ	4	0	0	
常用台数		平均	1.9	1.9	4.0

2. 2. 2 時間変動モデルを活用した電力消費量の試算

(1) 送風機の試算条件

時間変動モデルにおける各時間帯の流入水量・流入水質から必要酸素量を試算した。必要酸素量の試算方法は、「下水道施設計画・設計指針と解説4」(以後設計指針)に記載されている試算方法に準じた。また処理水の水質は2. 2. 1におけるアンケート結果および設計指針の計算例より表6の通りに設定した

必要酸素量から送風量への換算にあたり、散気装置に関しては現在一般的に使用されている散気板、酸素移動効率の良い微細気泡散気装置の2種類の散気装置を水深4.5mの位置に設置するものと想定した。酸素移動効率についてはそれぞれ設計指針の試算例を参考とし、散気板では12%、微細気泡散気装置では23%と設定した。

また、送風量制御方法として多くの施設で用いられているDO一定制御、送風量一定制御、送風倍率一定制御の3種類の制御方法で試算した。DO一定制御では反応タンク末端でのDO濃度が2.0mg/Lとなるような必要空気量を送風量として出力する制御方法とした。送風量一定制御はDO一定制御で試算した送風量の日最大量を一定送風する制御方法とし、深夜から早朝などの低負荷時間帯では送風量を減らす二段階の一定制御を想定した。送風倍率一定制御はDO一定制御で試算した各時間帯での送風倍率(送風量÷流入水量)の日最大値を計算し、常時流入水量に対してその日最大値を乗じたものを送風量とした。

表6 時間変動モデルにおける処理水質の設定値

	標準活性汚泥法		高度処理法
	硝化抑制	硝化促進	
BOD濃度(mg/L)	5	5	3
Kj-N濃度(mg/L)	5	2	2

(2) 消費電力量の試算条件

送風量から消費電力量への試算に際して、送風機の機種および常用運転台数を設定した。また、「2. 1」で示したようにターボブロワでは定格に対する風量比率によって消費電力量が大きく異なるため、常用運転台数から定格能力を設定した。

送風機の吐出圧は設計指針に乗っ取り試算した。散気板は設計指針より400mmAq、微細気泡散気装置ではメーカーヒアリングにより1120mmAqの散気装置の通気抵抗が発生すると仮定し、水深4.5mの位置に設置した場合を想定し試算したところ、散気板使用時は5800mmAq、微細気泡散気装置を使用時は6300mmAqの吐出圧となり、この値を採用した。

前述の表5に示したアンケート結果から、1万m³/dayはルーツブロワを2台、5万m³/day、10万m³/dayはターボブロワをそれぞれ2台、4台が常用運転台数として設置されていると想定した。必要空気量(m³/h)の日最大を常用運転台数(台)で除し、10%の余裕率を加算することにより、各規模、処理方式における送風機の定格能力(m³/h/台)を設定した。設定した定格能力と、表2に示した送風量と入力動力の関係から、送風機の性能曲線を試算した。(1)で算出した各時間帯における送風量に対して、稼働率(定格能力に対する1台当たりの送風量)が一定割合以上となるような台数制御を考慮して消費電力量を試算した。

(3) 試算結果

各制御方法における消費電力量の試算結果を表7に示す。

表7 各制御方法における消費電力量の試算結果

水処理方式	流入水量	散気装置	目標水質	送風量制御方法	送風量	消費電力量
					m ³ /日	kWh/日
標準活性汚泥法	1万m ³ /日	散基板	硝化促進	送風量一定	113,000	2,610
				送風倍率一定	101,000	2,350
				DO一定	82,300	2,000
			硝化抑制	送風量一定	60,700	1,400
				送風倍率一定	65,900	1,700
				DO一定	45,400	1,100
		微細気泡散気装置	硝化促進	送風量一定	58,200	1,710
				送風倍率一定	52,900	1,600
				DO一定	42,900	1,370
			硝化抑制	送風量一定	31,700	931
				送風倍率一定	34,400	1,100
				DO一定	23,700	778
	5万m ³ /日	散基板	硝化促進	送風量一定	542,000	12,100
				送風倍率一定	472,000	11,100
				DO一定	405,000	10,200
			硝化抑制	送風量一定	250,000	6,220
				送風倍率一定	230,000	5,940
				DO一定	207,000	5,620
		微細気泡散気装置	硝化促進	送風量一定	283,000	7,260
				送風倍率一定	246,000	6,640
				DO一定	212,000	6,070
			硝化抑制	送風量一定	141,000	3,770
				送風倍率一定	139,000	4,230
				DO一定	118,000	3,390
10万m ³ /日	散基板	硝化促進	送風量一定	951,000	19,800	
			送風倍率一定	907,000	19,300	
			DO一定	810,000	19,300	
		硝化抑制	送風量一定	543,000	11,500	
			送風倍率一定	487,000	10,800	
			DO一定	453,000	10,300	
	微細気泡散気装置	硝化促進	送風量一定	495,000	11,700	
			送風倍率一定	482,000	11,600	
			DO一定	422,000	10,700	
		硝化抑制	送風量一定	271,000	6,990	
			送風倍率一定	255,000	6,760	
			DO一定	236,000	6,480	
高度処理	1万m ³ /日	散基板	送風量一定	130,000	2,970	
			送風倍率一定	137,000	3,130	
			DO一定	103,000	2,460	
		微細気泡散気装置	送風量一定	69,200	2,080	
			送風倍率一定	71,400	2,100	
			DO一定	53,800	1,700	
	5万m ³ /日	散基板	送風量一定	643,000	14,100	
			送風倍率一定	591,000	13,400	
			DO一定	512,000	12,400	
		微細気泡散気装置	送風量一定	360,000	9,070	
			送風倍率一定	313,000	8,350	
			DO一定	267,000	7,630	
10万m ³ /日	散基板	送風量一定	1,120,000	24,600		
		送風倍率一定	1,130,000	24,800		
		DO一定	1,020,000	23,200		
	微細気泡散気装置	送風量一定	576,000	14,800		
		送風倍率一定	589,000	15,000		
		DO一定	532,000	14,000		

試算結果から、例えば標準活性汚泥法で硝化促進運転を行う場合、DO 一定制御と比較して、送風量一定制御では 110～130%、送風倍率一定制御では 110～120%の電力量が必要となることが分かった。また、標準活性汚泥法の硝化抑制運転と硝化促進運転を比較すると硝化促進運転が硝化抑制運転の 2 倍近い消費電力量となっており、硝化反応において消費される空気量、消費電力量の割合が大きいことが示された。加えて、同条件において、微細気泡散気装置は散気板よりも 30～40%程度消費電力量が低くなった。

3. まとめ

メーカーヒアリングにより送風機の種類や能力等の条件別に、定格及び風量制御運転時の風量と入力動力の関係を求めた。送風機の機種、容量、定格に対する風量調整域により単位風量当たりの動力が異なり、適正な風量制御手法の検討に資するものと考えられる。また、処理場の大きさによる汚濁負荷の時間変動、送風量制御方法、散気装置、高度処理有無など条件による消費電力量を試算した。同規模の処理場でも条件により消費電力量に差が出ることを定量的に示した。

これらの資料について、処理場におけるエネルギー削減計画の策定に際し、基礎的な検討を行うための資料としての活用が見込まれる。

今後は、汚泥処理システムのエネルギー調査結果とあわせて、より総合的な検討が可能となるように研究を進めてとりまとめる予定である。

参考文献

- 1) 環境省地球温暖化本部, (2015), 報道発表資料「日本の約束草案」, <http://www.env.go.jp/press/files/jp/27581.pdf>
- 2) 公益社団法人日本下水道協会, (2015), 平成 25 年度版下水道統計.
- 3) 浜田ら, (2015), 「送風量制御方式による送風機の電力使用量への影響に関する調査」, 第 52 回下水道研究発表会講演集, pp515-517, 公益社団法人日本下水道協会.
- 4) 社団法人日本下水道協会, (2009), 下水道施設計画・設計指針と解説-2009 年版-後編.