



【写真提供】(株)堀場アドバンステクノ



JS研究報告会 (2022.2.25)

[調査研究テーマ] 改築・更新を契機とした水処理の効率化、省エネ・維持管理性向上

アンモニア計を利用した曝気風量制御技術の評価

日本下水道事業団(JS)
技術戦略部 技術開発企画課

糸川 浩紀

アンモニア計を利用して反応タンクの省エネ化等を図る「アンモニア制御」について、

- ・ JSの技術評価での取り纏め内容
- ・ 数値シミュレーション結果等をご紹介します。



Japan Sewage Works Agency

曝気風量の削減と制御

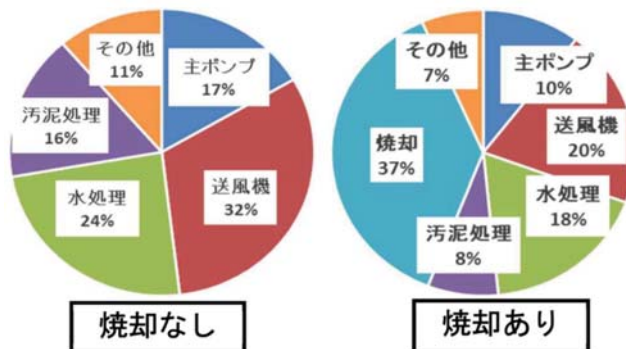
➤ 曝気風量削減の必要性

- ✓ 下水処理場における省エネ・コスト削減の必要性。
- ✓ 水処理施設における消費動力と送風動力の寄与。
⇒ 送風動力低減の重要性。



➤ 曝気風量の制御

- ✓ 従来/現状の制御：
 - 風量一定運転(手動調整)
 - 送気倍率一定制御
 - DO一定制御
- ✓ 新たな(?)制御技術：
 - ORP制御
 - 二点DO制御
 - NADH制御
 - アンモニア制御
 - ...



下水処理場における設備別の消費エネルギーの割合 (33処理場を対象とした国土交通省の調査結果)

[出典] 国土交通省水管理・国土保全局下水道部(2019)：下水処理場のエネルギー最適化に向けた省エネ技術導入マニュアル(案)

「アンモニア計を利用した曝気風量制御技術」(アンモニア制御技術)

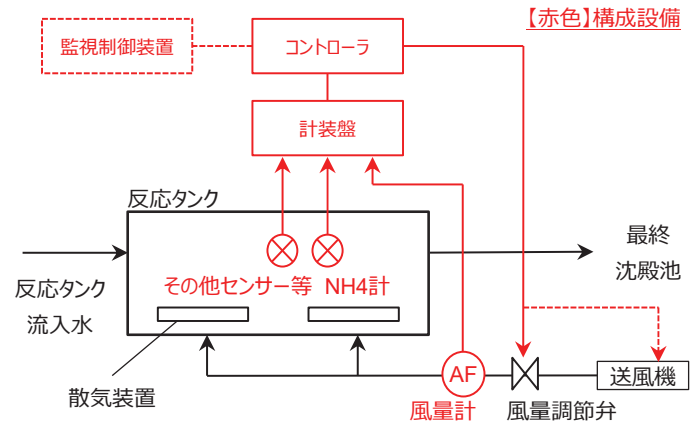
= 「活性汚泥法の反応タンク内等におけるアンモニア性窒素濃度を含む
センサー計測値に基づき、反応タンクの曝気風量を自動で制御する技術」

※JS技術評価(R2.4)における定義付け。

- ✓ アンモニア計を使用すること。
- ✓ 制御対象が曝気風量であること。
- ✓ 自動制御であること。

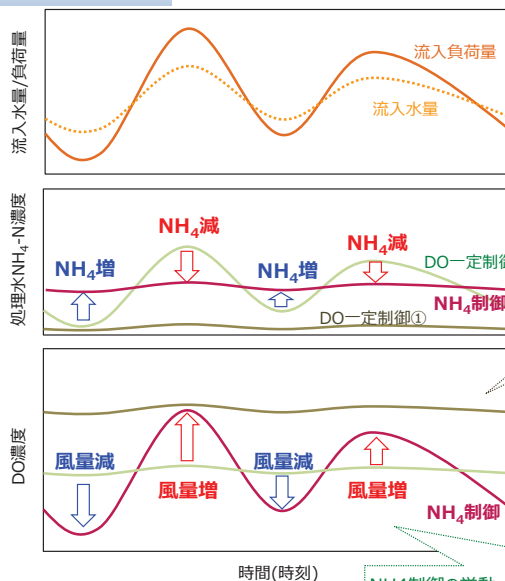
アンモニア制御の目的

- ✓ 以下の2点の両立
 - ① 曝気風量の適正化
 - ② 目標とする処理水質(NH₄-N濃度)の維持



アンモニア制御技術のイメージ

アンモニア制御の動作のイメージ



※各種制御の違いを示すためのイメージ図であり、反応タンクの混合特性に応じた時間遅れ等は反映していない。
※図内の矢印は、DO一定制御と比較した場合のアンモニア制御における増減傾向を示す。

NH₄制御の挙動 【DO一定制御①(最大負荷ベース)との比較】

- ・概ね1日を通して、曝気風量が低減される代わりに処理水NH₄-N濃度が上昇。

DO一定制御①(目標DO高)
※最大負荷に合せた設定

DO一定制御②(目標DO低)
※平均負荷に合せた設定

NH₄制御の挙動 【DO一定制御②(平均負荷ベース)との比較】

- ・低負荷の時間帯：曝気風量が低減される代わりに処理水NH₄-N濃度が上昇。
- ・高負荷の時間帯：曝気風量が増加し処理水NH₄-N濃度が低減。

【ポイント】

- ◆アンモニア制御による風量削減効果は、酸素要求量が小さい時間帯の過剰な曝気の抑制によるものが主体。
- ◆アンモニア制御が(従来制御より)常に小さい目標風量を出力するわけではない。

流入負荷量の時間変化に対するアンモニア制御およびDO一定制御の挙動の違いのイメージ

➤ 曝気風量制御に係るJSの検討の経緯

- ✓ S49～58 : DO一定制御の実証・評価等
(⇒ S58「下水処理場の自動制御の評価(第3次)」)
- ✓ H15～ : 新たな曝気風量制御の開発・実証(共同研究等)
- ✓ H25～ : アンモニア制御に係る一連の開発・実証(共同研究、B-DASH等)
- ✓ R1 : 技術評価「アンモニア計を利用した曝気風量制御技術の評価」
(JS技術評価委員会; R2.4答申)

アンモニア制御技術の評価

➤ 「技術評価」の概要

- ◆ 名称 : アンモニア計を利用した送風量制御技術の評価
- ◆ 対象技術 : アンモニア計を利用した曝気風量制御技術 (アンモニア制御技術)
- ◆ 評価期間 : 平成31年3月(諮問)～令和2年4月(答申)
- ◆ 評価主体 : JS技術評価委員会(会長:古米教授)
⇒ 「アンモニア計を利用した送風量制御技術専門委員会」(委員長:長岡教授)へ付託
- ◆ 評価の目的 : 同技術の普及促進⇒下水処理場の省エネ化・低コスト化を推進
 - ✓ 実証試験結果等の最新の技術的知見を統合的に整理
 - ✓ 技術の特徴、機能・性能、導入効果等の明確化
- ◆ 評価内容 : アンモニア制御技術の、①技術的特徴、②導入手法、③運転管理手法

※評価結果は、「アンモニア計を利用した曝気風量制御技術の評価に関する報告書」としてJSのHPにて公開 (<https://www.jswa.go.jp/g/q01/q4q/q4q.html>)。

➤ 材料

- ✓ 4種の制御技術の実証実験結果(JS共同研究、うち1種はB-DASH)。
- ✓ 活性汚泥モデル(ASM)による数値シミュレーションを援用。

➤ 機能・性能に係る主たる評価事項

- ✓ 曝気風量削減効果 (⇒ 従来技術に対する削減率、等)
- ✓ 処理水質安定化効果 (⇒ 処理水NH₄-N濃度、等)

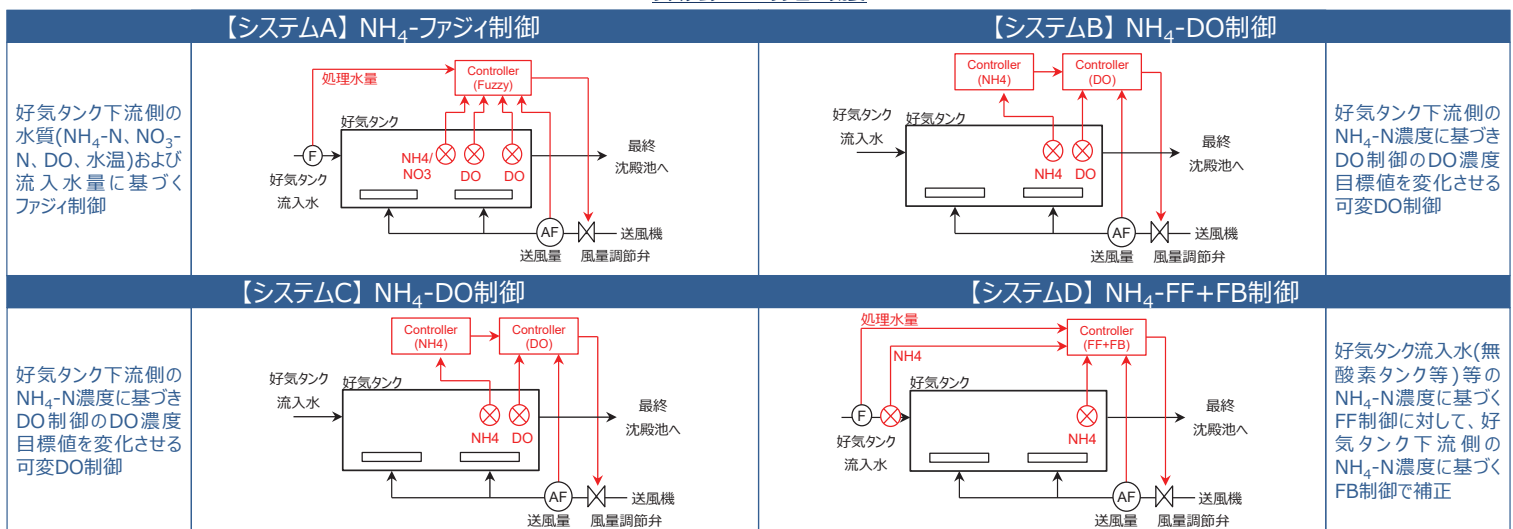
➤ 評価の基本方針

- ✓ 4技術の実証実験結果等を使用するが、4技術個別の評価/比較ではなく、「アンモニア制御技術」としての総合的な評価を行なう。

評価で使用した制御技術

➤ 評価で使用した4種の個別技術

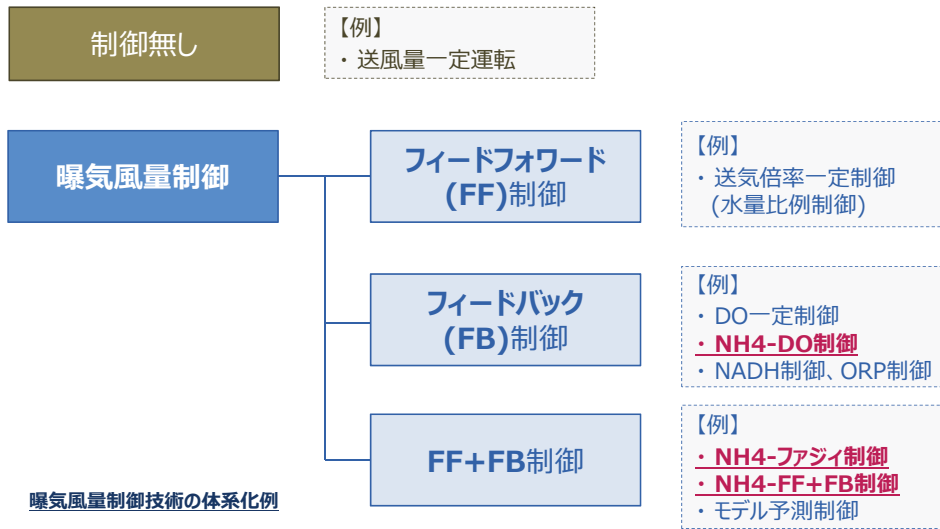
システムA～Dのフロー概要



【共同研究者】

- ・ システムA：(株)西原環境
- ・ システムB：(株)東芝インフラシステムズ、福岡県、(公財)福岡県下水道管理センター【H26～27 B-DASH実証】
- ・ システムC：(株)神鋼環境ソリューション【R2.2 JS新技術I類選定】
- ・ システムD：日新電機(株)、(株)日新システムズ【R2.2 JS新技術I類選定】

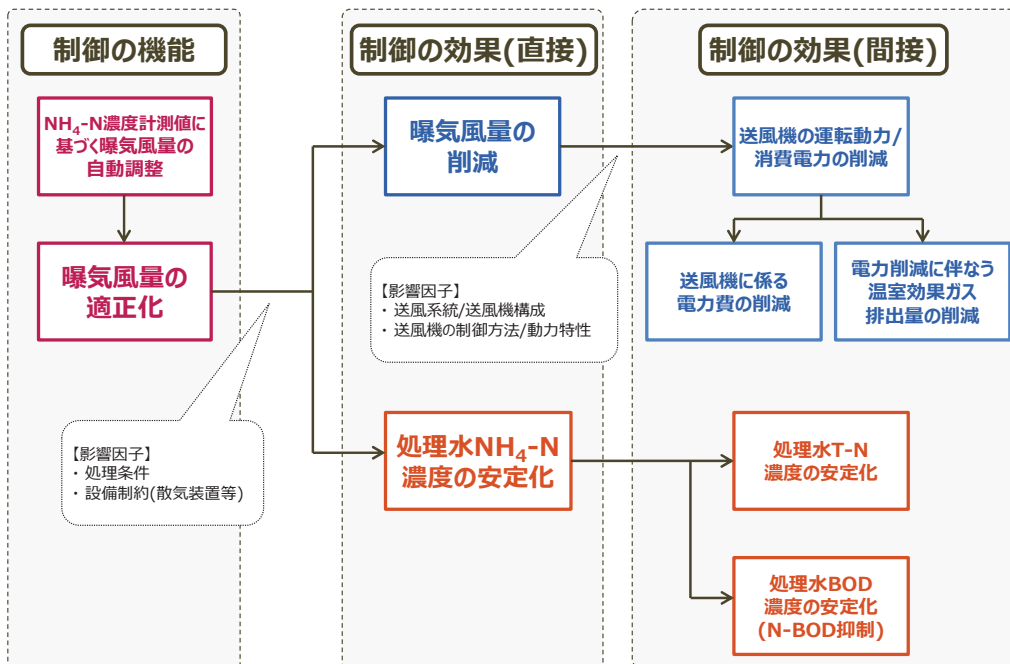
➤ 曝気風量制御一般の体系化 ⇒ アンモニア制御技術の位置付け



※**FF制御**：プロセスの外乱(例：流入水量/水質)を計測して操作量を決定。

※**FB制御**：外乱等を受けた処理の状態(例：AT内DO/NH₄-N濃度)を計測して操作量を決定。

➤ 導入効果の体系化



実証実験結果(システムA~D)

システムA~Dの実証実験における曝気風量削減率および処理水NH₄-N濃度の実績

- ✓ 各々、実施設の1池を使用して長期実証
- ⇒対照系(DO一定制御)と比較。

制御技術	制御モード/目標値等	比較対象	曝気風量削減率		処理水NH ₄ -N濃度 ^{※1} [mg/L]	
			削減率(平均)	評価方法	実証	対照(DO一定制御)
システムA (NH ₄ -フアジ制御)	実証期間: 1.8yr 対照期間: 1.0yr	DO一定 (1.5mg/L)	20.4%	・送気倍率の削減率(対・DO一定制御期間)。 ・下段は実証期間と対照期間の長さを揃えた結果。	0.9±0.7	0.9±0.8
	実証期間: 1.0yr 対照期間: 1.0yr	DO一定 (1.5mg/L)	20.0%		0.9±0.7	0.9±0.8
システムB (NH ₄ -DO制御)	①目標曲線1 (水質重視)	DO一定 (2mg/L)	6.4%	・対照系列に対する風量比(相対風量)の削減率(対・DO一定制御期間)。 ・送風機能力下限のデータを除外。	0.4±0.2	0.0±0.1
	②目標曲線3(省エネ)	DO一定 (2mg/L)	10.3%		0.4±0.2	0.2±0.2
	③目標曲線3(省エネ) +自動補正	DO一定 (2mg/L)	12.5%		0.6±0.3	0.4±0.2
システムC (NH ₄ -DO制御)	①目標NH ₄ -N =3.8mg/L	DO一定 (2mg/L)	11.0%	・他系列に対する送気倍率比の削減率(対・DO一定制御期間)。	0.5±0.3	0.1±0.1
	②目標NH ₄ -N =3.1~3.3mg/L	DO一定 (2mg/L)	12.8%		0.5±0.3	0.2±0.0
システムD (NH ₄ -FF+FB制御)	①目標NH ₄ -N(FB) =2mg/L	DO一定 (2mg/L)	10.5%	・NH ₄ -N負荷量当り曝気風量の削減率(対・DO一定制御の対照池)。流入水を共有する2池における同一期間の比較のため、同削減率は送気倍率の削減率と同等。 ・対照池の曝気風量を×0.88で補正(両池でDO一定制御を実施した期間の実績に基づく)。	0.8±0.3	0.3±0.0
	②目標NH ₄ -N(FB) =1mg/L	DO一定 (2mg/L)	14.5%		0.3±0.0	0.3±0.0

※1 期間値および標準偏差。元データは、システムA: 1日平均値、システムB: 1日平均値(モード①、②)、スポット値(同③)、システムC: 1日平均値、システムD: スポット値。

曝気風量の削減効果 【指標】 風量削減率(対・DO一定制御)

- ✓ JS実証結果 : 10~20%
- ✓ その他国内事例 : 10~30%
- ✓ 海外事例 : 10~20%



「実証実験の結果等によれば、従来のDO一定制御と比較して10%以上の削減が期待できる。」

処理水質の安定化効果 【指標】 処理水NH₄-N濃度

✓ システムA~Dの実証結果 :

- ◆ アンモニア制御 : 0.3~0.9 mg/L (±0.0~0.7 mg/L) ※全データ
0.4~0.9 mg/L (±0.2~0.7 mg/L) ※スポット採水値除外
- ◆ DO一定制御 : 0.1~0.9 mg/L (±0.0~0.8 mg/L)



「実証実験の結果によれば、アンモニア制御技術の運用期間における処理水のNH₄-N濃度(1日平均水質)の実績は、平均値および標準偏差のいずれも1mg/L未満である。」

➤ 所与の曝気風量削減率における経費回収年数を試算

- ✓ 導入コスト : 建設費(設置費/改造費)、運用費(計測器の維持管理費)
- ✓ 削減コスト : 送風機電力費

「DO一定制御に対して経済的なメリットが出る1ユニット当たり制御対象水量は、曝気風量削減率が10~20%の条件で1.5万~3万m³/d程度以上である。」

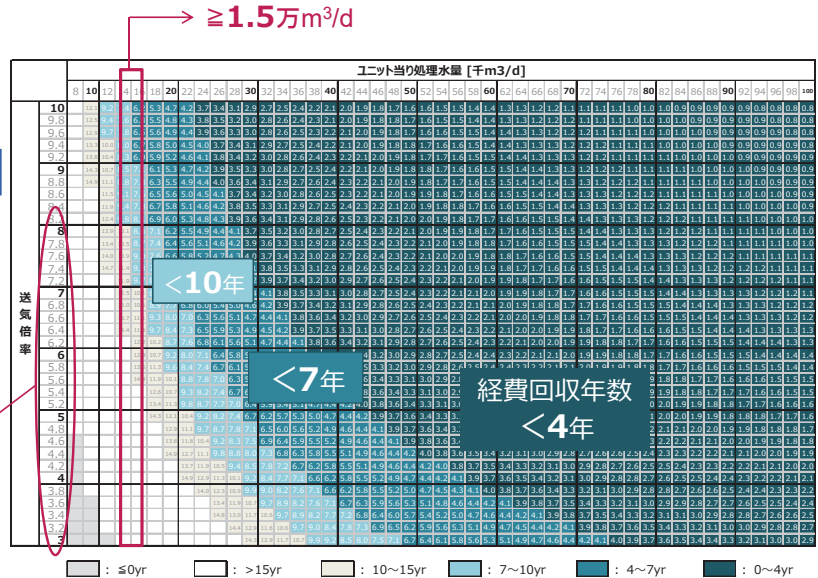
⇒ 複数池を一括制御する形態が基本となる。

※1池当たり処理水量の典型値(中央値)

- 20~50MLD : 6,500m³/d
- 50~100MLD : 8,800m³/d
- 100MLD~ : 11,500m³/d

一般的な送気倍率の範囲(3~8倍)

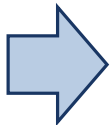
アンモニア制御技術の導入に係る経費回収年の試算結果
(曝気風量削減率=20%の例)



アンモニア制御の数値シミュレーション

➤ 「制御性能の一般化」に係る課題 (曝気風量制御全般について同様)

- ✓ 制御性能が設備や処理条件により異なる。
- ✓ 特定の施設/条件での実績を外挿することには限界がある。
- ✓ そもそも、制御の動作の結果/影響に係る知見が乏しい(実施設では把握も困難)。



- ◆ 活性汚泥モデル(ASM)を用いた数値シミュレーションによるアンモニア制御の挙動推定
- ◆ 活性汚泥法の処理条件(ASRT, 流入負荷量等)が変化した場合の制御性能等への影響を推定
- ◆ 対象技術 : システムC(NH₄-DO制御), システムD(NH₄-FF+FB制御), DO一定制御

【ポイント】

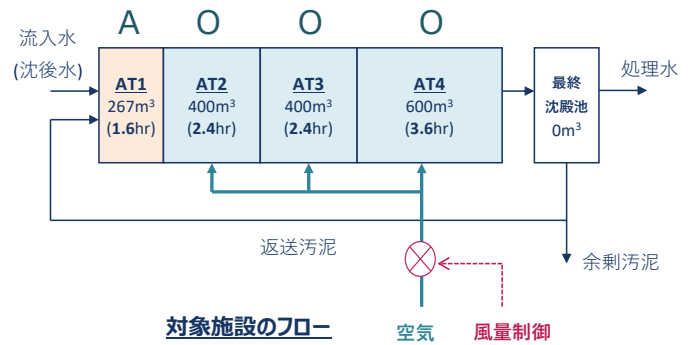
- ☞ ASMにより現実的な制御性能の推定が可能か?
- ☞ 各種処理条件の影響が、直観的に理解可能な範囲か?

対象施設

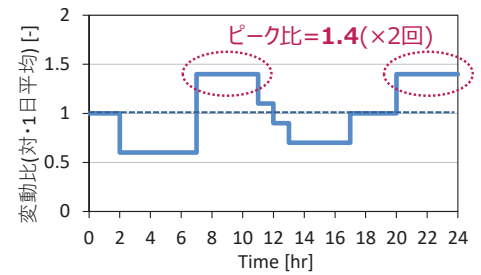
- ✓ 仮定の標準活性汚泥法(反応タンク+終沈)×1池
- ✓ 処理能力 : **5,000m³/d** (日最大; HRT=8hr)
- ✓ 反応タンク : 4区画 (A000運転)

処理条件(「基本条件」)

- ✓ 水温 : **20°C**
- ✓ 流入水量 : **4,000m³/d** (日平均; HRT=**10hr**)
- ✓ 時間変動 : 水量×**ピーク比1.4** (水質は一定)
- ✓ 汚泥返送比 : **0.50** (固定)
- ✓ ASRT : **6.9d** (容量計算上の必要ASRT×**1.2**)
- ✓ 流入水質 : T-COD_{Cr}=**246mg/L** (←BOD=**120mg/L**)
NH₄-N=**26mg/L** (←T-N=**35mg/L**)
- ✓ 制御SV(AT4) : 【NH₄制御】 NH₄-N=**1.0mg/L**、【DO制御】 DO=**2.0mg/L**



対象施設のフロー



流入水量の時間変動パターン

基本条件での計算結果

※20°C、ASRT=6.9d

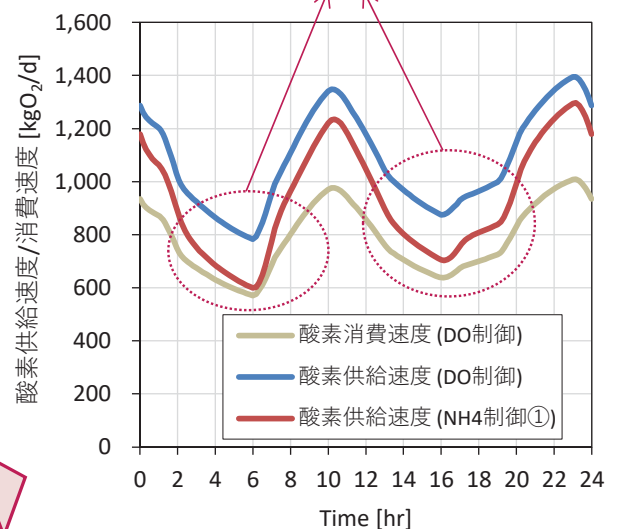
- ✓ DO一定制御(SV=2mg/L)に対する曝気風量削減率 :
⇒ 約**14%** (⇒実証実験結果と同水準)
- ✓ 末端槽のDO濃度 :
【NH₄制御】 **0.6mg/L** ⇔ 【DO制御】 **2.0mg/L**
- ✓ 末端槽の平均NH₄-N濃度 :
【NH₄制御】 **1.0mg/L** ⇔ 【DO制御】 **0.3mg/L**

「曝気風量制御の最も根本的な動作原理は、反応タンクにおける生物処理過程での**酸素要求量の時間変化**に対して、**酸素供給速度**を追従させることにある。」

[JS技術評価報告書抜粋]

⇒ シミュレーション結果から、酸素要求量と酸素供給速度の時間変化を可視化した例
※酸素要求量は、酸素消費速度で代替。

NH₄制御では、特に低負荷時間帯での削減幅が大きい



基本条件におけるAT2~4の酸素消費速度と酸素供給速度の時間変化(システムCの例)

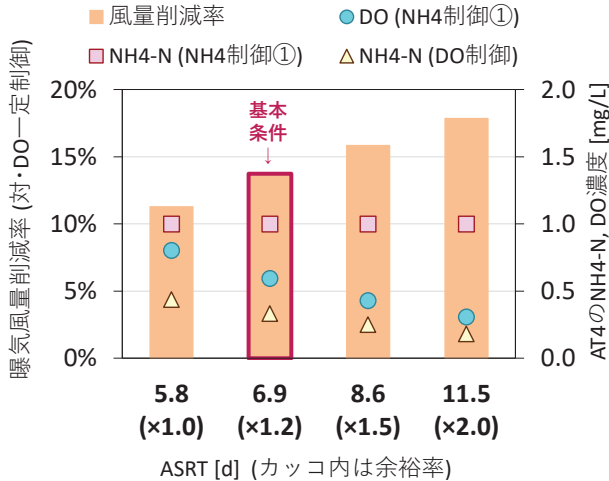
ASRTの影響(水量固定、MLSS変化)

✓ ASRT = 5.8~11.5(余裕率: 1.0~2.0)で4段階。

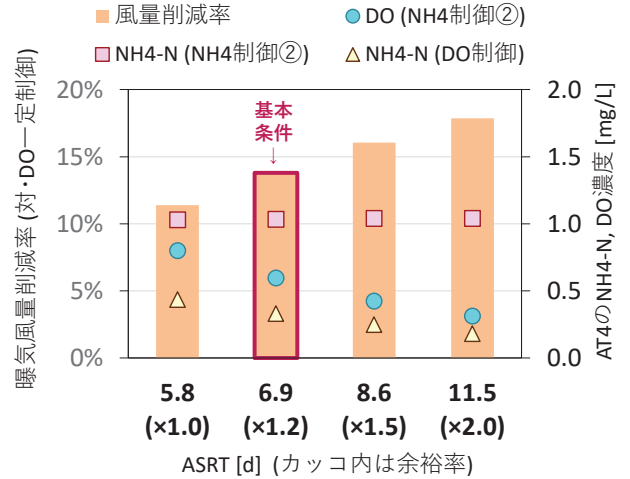
◆ ASRTが長くなるほど...

- ✓ NH4制御: 風量削減率が上昇
- ✓ NH4制御: DOが減少 (NH₄-Nは一定)
- ✓ DO制御: NH₄-Nが減少

【システムC】



【システムD】



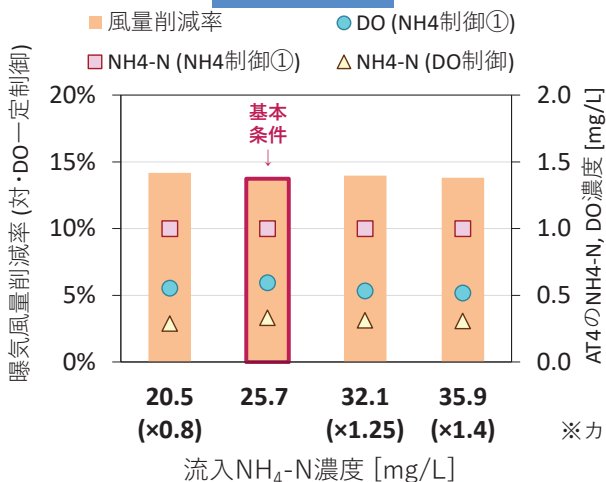
ASRTに応じた曝気風量削減率およびAT4の水質の計算結果

流入負荷量(NH₄-N濃度)の影響

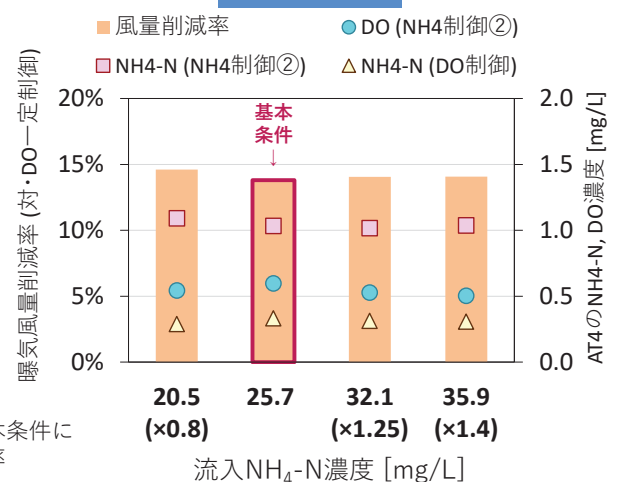
- ✓ 流入NH₄-N = 20.5~35.9mg/L(基本条件×0.8~1.4)で4段階。
- ✓ その他は固定(HRT=10hr、ASRT=6.9d)

- ✓ 流入NH₄-N濃度が増加すると風量削減率が減少
- ✓ 影響度合いはASRTより全然小さい

【システムC】



【システムD】



流入NH₄-N濃度に応じた曝気風量削減率およびAT4の水質の計算結果

4種の個別技術の実証実験結果等を材料に、「アンモニア計を利用した曝気風量制御技術」の評価を実施。技術の機能、効果、性能、経済性等を明確化。

😊 重要な評価結果

【機能・性能】

- 曝気風量削減効果：DO一定制御に対して**10%以上**。
- 処理水質(NH₄-N)安定化効果：平均値と標準偏差がいずれも**1mg/L以下**。

【経済性】

- 1ユニットの制御設備の対象水量が**1.5万～3万m³/d**以上でないと、経済的なメリットが出ない。

【今後の課題】

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> 実証/実運用のデータの蓄積 | <input type="checkbox"/> 導入効果の予測手法 |
| <input type="checkbox"/> 複数池一括制御の方法/実績 | <input type="checkbox"/> 多様な硝化管理への展開(季別運転等) |
| <input type="checkbox"/> 新規の制御方法/技術 | <input type="checkbox"/> アンモニア計の改良・コスト削減 |

公表文献 (1/2)

【アンモニア制御全般】

- ・ Itokawa,H., Hashimoto,T.: Full-scale demonstration of NH₄-based aeration control systems for activated sludge process, Proceedings of IWA World Water Conference & Exhibition 2018, Tokyo, Sep.16-21, 2018.
- ・ 糸川浩紀,橋本敏一：アンモニア計を利用した曝気風量制御技術の評価, 第57回下水道研究発表会講演集, pp.829-831, 2020.
- ・ 糸川浩紀,橋本敏一：数値シミュレーションによるアンモニア制御の挙動解析, 第58回下水道研究発表会講演集, pp.698-701, 2021.

【システムA (NH₄-ファジィ制御)】

- ・ 中村知弥,浜本洋一,大下信子,橋本敏一,糸川浩紀：アンモニア・硝酸連続測定計を用いた送風量制御システムの下水処理場での実証, 第51回下水道研究発表会講演集, pp.907-909, 2014.
- ・ 和田真澄,中村知弥,浜本洋一,大下信子,糸川浩紀,橋本敏一：アンモニア・硝酸計を用いた送風量制御システムの活性汚泥モデルによる検証と評価, 第52回下水道研究発表会講演集, pp.1019-1021, 2015.

【システムB(NH₄-DO制御)】

- ・ 小原卓巳,山中理,難波諒,平岡由紀夫,橋本敏一,糸川浩紀,中村正次,小齊平知良,大西宵平：ICTを活用した革新的水処理運転管理技術の実証, 第52回下水道研究発表会講演集, pp.893-895, 2015.
- ・ 小原卓巳,山中理,難波諒,山本浩嗣,平岡由紀夫,中川祐一,橋本敏一,糸川浩紀,井上英男,矢野洋一郎,板倉舞：リモート診断機能を付加したNH₄-N/DO制御による省エネ風量制御技術の実証, 第53回下水道研究発表会講演集, pp.854-856, 2016.
- ・ 難波諒,平岡由紀夫,橋本敏一,糸川浩紀,井上英男,矢野洋一郎,板倉舞：遠隔監視システムによる制御性能改善技術の実証と有効性評価, 環境システム計測制御学会誌, Vol.21(2/3), pp.60-64, 2016.
- ・ 小原卓巳,山中理,難波諒,平岡由紀夫,橋本敏一,糸川浩紀,井上英男,矢野洋一郎,岸川昭夫：標準活性汚泥法におけるNH₄-N/DO制御の省エネ性能と窒素除去特性の評価, 第54回下水道研究発表会講演集, pp.790-792, 2017.
- ・ 難波諒,平岡由紀夫,橋本敏一,糸川浩紀,井上英男,矢野洋一郎：遠隔監視システムへの適用を目的とした制御性能改善技術の信頼性向上, 環境システム計測制御学会誌, Vol.22(2/3), pp.12-19, 2017.

【システムB(NH4-DO制御)】(続)

- ・平岡由紀夫,橋本敏一,糸川浩紀,井上英男,釜場寛: ICTを活用したプロセス制御とリモート診断による効率的な水処理運転管理技術の導入ガイドライン(案)の概要と普及展開, 環境システム計測制御学会誌, Vol.22(1), pp.31-35, 2017.
- ・小原卓巳,山中理,難波諒,平岡由紀夫,橋本敏一,糸川浩紀,高木雄史,矢野洋一郎: リモート診断機能を付加したNH4-N/DO制御の長期運用評価および機能改良, 第55回下水道研究発表会講演集, pp.965-967, 2018.
- ・Yamanaka,O., Namba,R., Hiraoka,Y., Itokawa,H., Takagi,Y., Yano,Y.: Demonstration of remote monitoring and controller tuning methods for full-scale wastewater treatment plant, Proceedings of IWA World Water Conference & Exhibition 2018, Tokyo, Sep.16-21, 2018.
- ・小原卓巳,山中理,難波諒,平岡由紀夫,糸川浩紀,山下洋正,高木雄史,奥蘭剛: リモート診断機能を付加したNH4-N/DO制御の長期運用による性能および経済性評価, 第56回下水道研究発表会講演集, pp.1022-1024, 2019.

【システムC(NH4-DO制御)】

- ・熊田浩英,島田光重,石山明,糸川浩紀,竹内智哉,橋本敏一: 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実規模実証, 第55回下水道研究発表会講演集, pp.968-970, 2018.
- ・石山明,熊田浩英,島田光重,糸川浩紀,中西啓,山下洋正: 省エネ機器とNH₄制御による低動力反応タンクシステムの性能・導入効果の評価, 第56回下水道研究発表会講演集, pp.1019-1021, 2019.

【システムD (NH4-FF+FB制御)】

- ・宇代晋也,田端隆雄,竹原輝巳,石倉和明,福田隆之,小森政明,糸川浩紀,竹内智哉,橋本敏一: 流入窒素負荷量と送風量のハイブリッド型最適制御技術の実規模実証, 第55回下水道研究発表会講演集, pp.962-964, 2018.

ご清聴
ありがとうございました。



【謝辞】

- ・ 各制御技術の実証実験にご協力頂いた地方公共団体および各共同研究等の関係者各位に深く感謝いたします。
- ・ 評価に当り審議を頂いたJS技術評価委員会および本技術の専門委員会の委員各位にも深く感謝いたします。