

1. 実証研究結果

1.1. 実証研究概要

(1) 実証研究

1) 研究名称

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実証研究

2) 実施者

株式会社東芝・日本下水道事業団・福岡県・公益財団法人福岡県下水道管理センター
共同研究体

3) 実施期間

平成 26 年 7 月 15 日～平成 27 年 3 月 25 日（平成 26 年度委託研究期間）

平成 27 年 6 月 10 日～平成 28 年 3 月 29 日（平成 27 年度委託研究期間）

4) 実施場所

実証施設設置場所：福岡県宝満川流域下水道 宝満川浄化センター

（所在地：福岡県小郡市津古 153 番地）

5) 処理対象

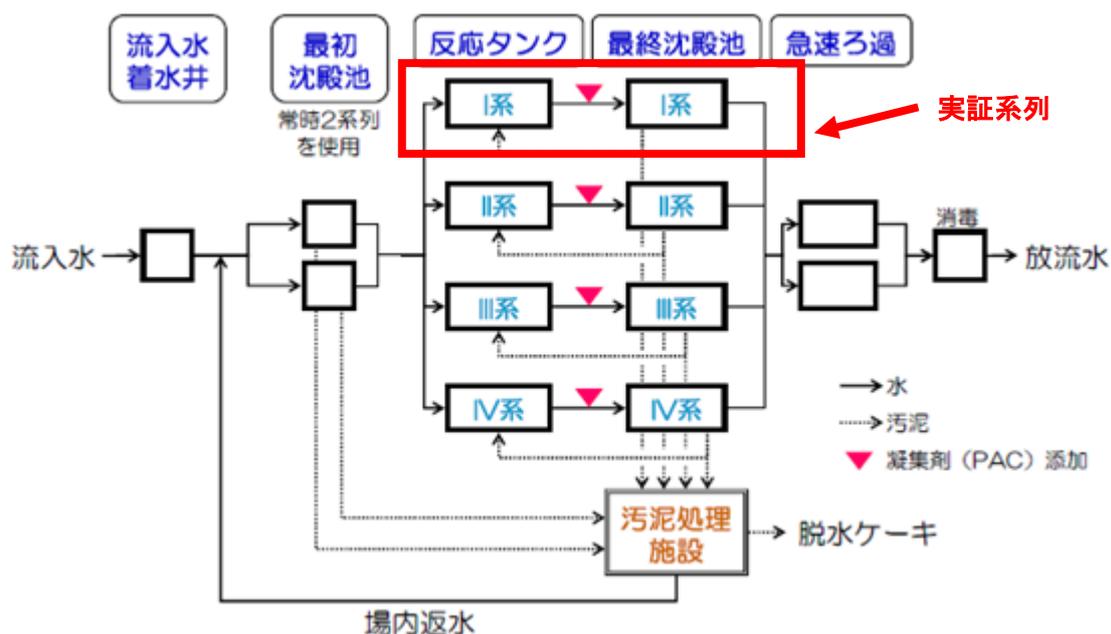
処理対象は、実証施設への流入下水を対象とした。

6) 処理水量

処理水量は、実証施設（宝満川浄化センター I 系）の処理能力である 5,400 m³/日（2,700 m³/日×2 系列）とした。

7) 実証施設フロー

実証施設の概略フローを**図資 1-1** に示す。



図資 1-1 実証施設の概略フロー

8) 実証工程

実証研究の実証工程を**表資 1-1**に示す。

表資 1-1 実証工程

実証項目		平成 26 年度			平成 27 年度		
		7~9 月	10~12 月	1~3 月	6~9 月	10~12 月	1~3 月
準備期間	実証施設の設計・製作	●→					
	実証施設設置工事		●→				
試験期間	機器動作試験・立上げ		●→				
	実証施設連続運転			●→	●→	●→	●→
	実証施設データ収集			●→	●→	●→	●→
	NH ₄ -N/DO 制御技術評価			●→	●→	●→	●→
	制御性能改善技術評価			●→	●→		
	MSPC 技術評価			●→	●→	●→	
	総合評価 (オンライン適用)						●→

(2) 結果まとめ

実証研究結果のまとめを**表資 1-2**に示す。

表資 1-2 実証研究結果のまとめ

評価項目	評価指標	目標	成果
(1) 硝化機能の維持効果 ^{※1}	処理水の日平均 NH ₄ -N 濃度目標値 (1.0mg/L 以下) 達成率	DO 一定制御の達成率以上 (100%)	91.9% (年末・年始の高負荷期間を除いて達成)
(2) 曝気風量低減効果 ^{※1}	曝気風量低減率	DO 一定制御比 ^{※3} 10%以上 送風量一定制御比 20%以上	DO 一定制御比 10.3% 送風量一定制御比 32.9%
(3) 電力量削減効果 ^{※2}	電力量削減率	DO 一定制御比 ^{※3} 10%以上 送風量一定制御比 20%以上	DO 一定制御比 8.49% (削減電力量: 315.7 千 kWh/年) 送風量一定制御比 23.0% (削減電力量: 1,016.9 千 kWh/年)
(4) 温室効果ガス削減効果 ^{※2}	CO ₂ 削減率	DO 一定制御比 ^{※3} 10%以上 送風量一定制御比 20%以上	DO 一定制御比 8.49% (CO ₂ 削減量: 182.8 千 kg-CO ₂ /年) 送風量一定制御比 23.0% (CO ₂ 削減量: 588.8 千 kg-CO ₂ /年)
(5) コスト面での導入容易性(経済性) ^{※2}	経費回収年	4 年未満 (従来技術を送風量一定制御として)	2.33 年 ^{※4}

※1 評価項目 (1)、(2) については、実証試験結果に基づく評価結果

※2 評価項目 (3)～(5) については、委託元からの試算条件に基づく試算結果 (処理能力 50,000m³/日の場合)

※3 DO 一定制御比については、DO 制御目標値 2.0mg/L との比較

※4 リモート側に接続する下水処理場数を 8 カ所とした場合の試算

なお、本実証研究では、各要素技術についても評価を行い、その結果を**表資 1-3**に示す。各要素技術の基本的な性能について確認することができた。

表資 1-3 各要素技術の評価結果のまとめ

評価対象	評価項目	評価指標	目標	成果
NH ₄ -N/DO 制御技術	曝気風量の低減効果	曝気風量低減率	DO 一定制御比 ^{※1} 10%以上 送風量一定制御比 20%以上	DO 一定制御比 10.3% 送風量一定制御比 32.9%
	電力量の削減効果	電力量削減率	DO 一定制御比 ^{※1} 10%以上 送風量一定制御比 20%以上	DO 一定制御比 8.5% 送風量一定制御比 23.0%
	硝化機能の維持効果	処理水の日平均 NH ₄ -N 濃度 (1.0mg/L 以下) 目標値達成率	DO 一定制御の達成率以上 (100%)	91.9% (年末・年始の高負荷期間を除くと、100%)
制御性能改善技術	制御の安定化効果	DO 計測値平均二乗誤差	制御パラメータ調整前の DO 濃度の平均二乗誤差以下	0.082mg/L 0.163mg/L
MSPC 技術	異常兆候検出による運転支援情報の有用性	有効検出率 (オフライン評価)	—	1 (異常事象数 7)
		有効検出率 (オンライン評価)	—	0.926 (異常発報件数 27)
	センサードリフトによる曝気風量増加リスク回避効果	曝気風量増加量回避率	—	3.8%

※1 DO 一定制御比については、DO 制御目標値 2.0mg/L との比較

1.2. 実証研究の成果

ここでは、実証研究において、実証施設の運転等を通じて得られた計測データ、測定データをもとに、得られた成果について示す。

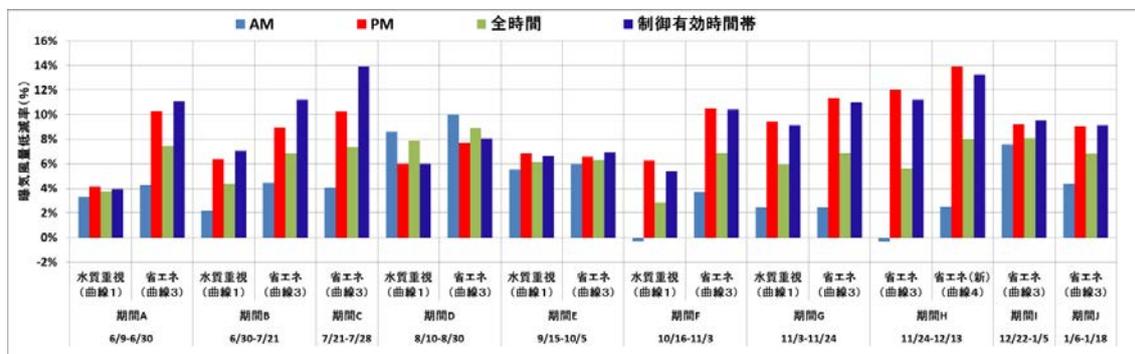
(1) NH₄-N/DO 制御技術に関する結果

NH₄-N/DO 制御技術については、曝気風量低減効果および硝化機能の維持効果を評価項目として、それぞれ曝気風量低減率、日平均 NH₄-N 濃度の評価を行った。その結果を以下に示す。

1) 曝気風量低減率の評価結果

曝気風量低減率の評価結果を図資 1-2、水質重視型曲線（曲線 1）、省エネ型曲線（曲線 3）別に曝気風量低減率の平均値と標準偏差を表資 1-4 に示す。

制御有効時間帯（送風量下限値とならず、曝気風量制御が有効に行われた時間帯）の曝気風量低減率の平均値は、水質重視型曲線の場合が 6.4%、省エネ型曲線の場合が 10.3%であった。また、新省エネ型の曲線（曲線 4）を設定した期間に関しては、13.3%の曝気風量低減率を達成でき、制御目標曲線を省エネルギー方向に変更することにより、更なる省エネルギー効果が期待できることがわかった。



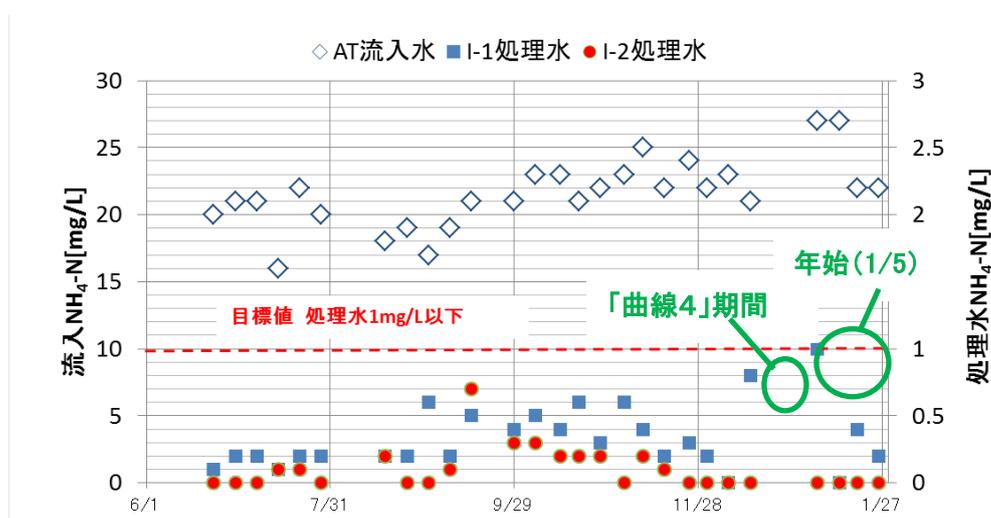
図資 1-2 曝気風量低減率の評価結果（性能評価期間）

表資 1-4 制御目標曲線別の曝気風量低減率の平均値と標準偏差

	水質重視（曲線 1）		省エネ（曲線 3）	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
午前	3.6%	3.1%	4.7%	2.9%
午後	6.5%	1.7%	9.6%	2.1%
全期間	5.2%	1.8%	7.1%	0.9%
制御有効時間帯	6.4%	1.7%	10.3%	2.2%

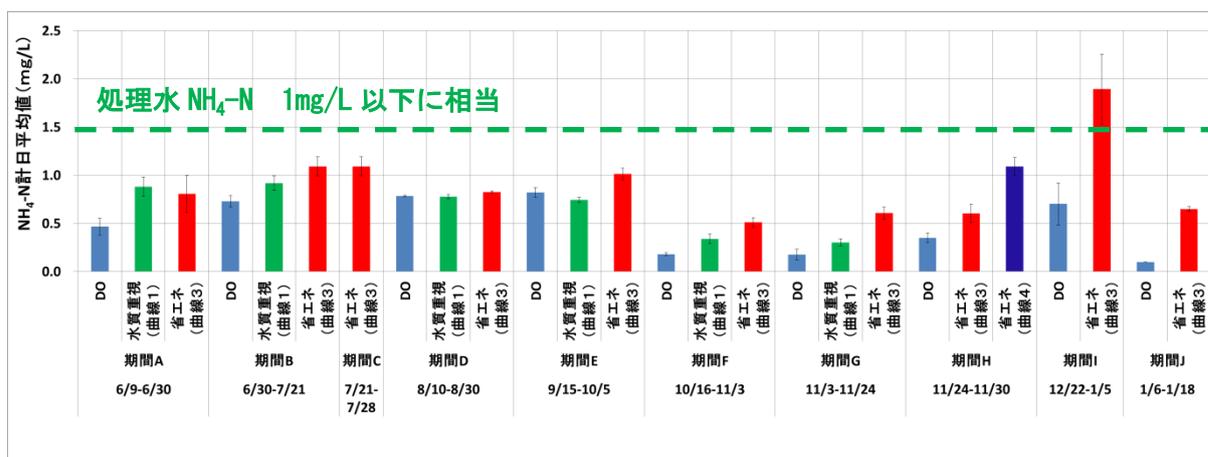
2) 日平均 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の評価結果

定例採水調査サンプルの $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の評価結果を図資 1-3 に示す。定例採水調査は 3 時間ごとのコンポジットサンプルを分析している。定例採水サンプルに関しては、すべての期間で硝化機能の維持基準である処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 1mg/L 以下の目標を達成でき、「硝化機能の維持基準」を 100%達成した。比較的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高いデータは、新省エネ型の制御目標曲線（曲線 4）を設定していた期間のサンプル（12/13 9:00～12/14 9:00 のコンポジット）、ならびに年始の 1/5 のサンプル（1/4 9:00～1/5 9:00 のコンポジット）でそれぞれ、0.8mg/L、1.0mg/L であった。



図資 1-3 定例採水調査による処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の評価結果

次に、I-1 系 $\text{NH}_4\text{-N}$ センサー計測値の日平均値を図資 1-4 に示す。図資 1-4 に示すように年末・年始期間である「期間 I」の省エネ型の制御目標曲線（曲線 3）を設定している期間で、反応タンク $\text{NH}_4\text{-N}$ センサー計測値の日平均値が 1.5mg/L 以上となり目標を超過したものの、それ以外の期間については、目標を達成できた。評価指標の処理水の日平均 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度目標値達成率は 91.9%であった。

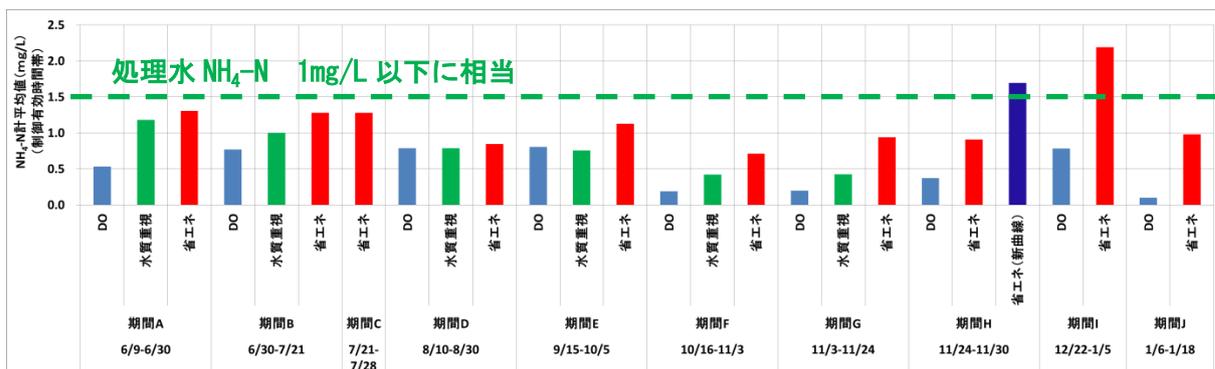


図資 1-4 I-1 系 NH₄-N センサー計測値の日平均値 (性能評価期間)

「期間 I」で目標を達成できなかったのは、年末から年始にかけて窒素の流入負荷が高くなったためと考えられる。2015/12/29～2016/1/5 の期間の BOD/MLSS 負荷、NH₄-N /MLSS 負荷ともに高く、2015/12/22～29 の期間に比べ、BOD/MLSS 負荷は 40%、NH₄-N /MLSS 負荷は 50%高かった。このように流入負荷が高くなることがあらかじめ予想される場合には、あらかじめ制御目標曲線を水質重視型の曲線に変更する等の対応が必要と考えられる。

図資 1-5 に I-1 系 NH₄-N センサー計測値の制御有効時間帯の平均値を示す。制御有効時間帯の評価では負荷の低い夜間の時間帯を除いた評価となるため、日平均値よりも制御有効時間帯の平均値の方が、値が高くなる。その結果、図資 1-5 に示すように年末・年始の「期間 I」の他に新たに「期間 H」の新省エネ型の制御目標曲線 (曲線 4) を設定したケースでも平均値が 1.5mg/L を超過する結果となった。

「期間 H」に関しては、図資 1-4 に示すように日平均値では目標をクリアしているが、負荷の低い夜間の時間帯を除いた制御有効時間帯の評価では、1.5mg/L を超過する結果となった。ただし、負荷の低い時間帯も含めて、1 日間制御が有効に機能した場合においては、日平均で目標値の硝化機能の維持効果を達成できる可能性もある。



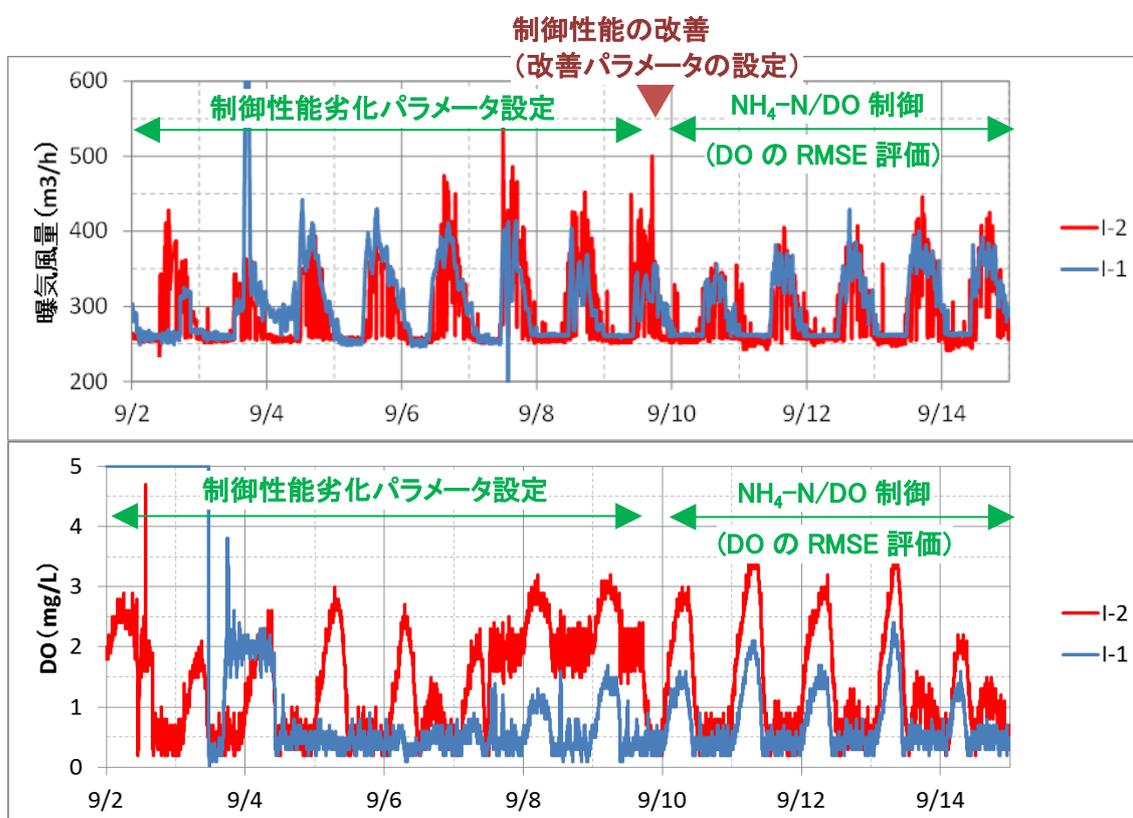
図資 1-5 I-1 系 NH₄-N センサー計測値の制御有効時間帯平均値 (性能評価期間)

(2) 制御性能改善技術に関する結果

制御性能改善技術については、制御の安定化効果を評価指標として、DO 計測値の平均二乗誤差の評価を行った。その結果を以下に示す。

1) 制御の安定化効果の評価

2015/9/2～15 の期間の曝気風量と DO 計測値のトレンドを図資 1-6 に示す。2015/9/2～9 の間、制御パラメータが劣化した場合を想定したパラメータ設定を行い、制御性能劣化時データの収集を行った。その後、2015/9/9 に収集したデータを制御性能改善技術に適用して、改善パラメータを算出した。結果を表資 1-5 に示す。



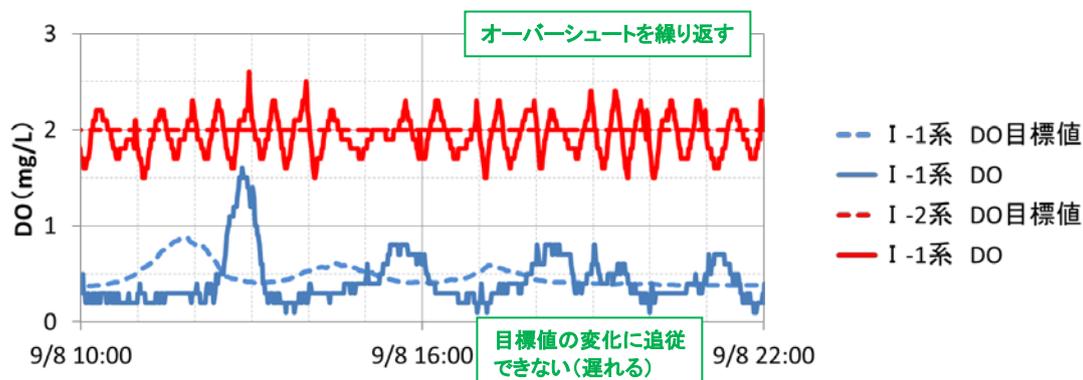
図資 1-6 2015/9/2～9/15 の曝気風量と DO の推移

表資 1-5 パラメータ改善前後の制御パラメータ値

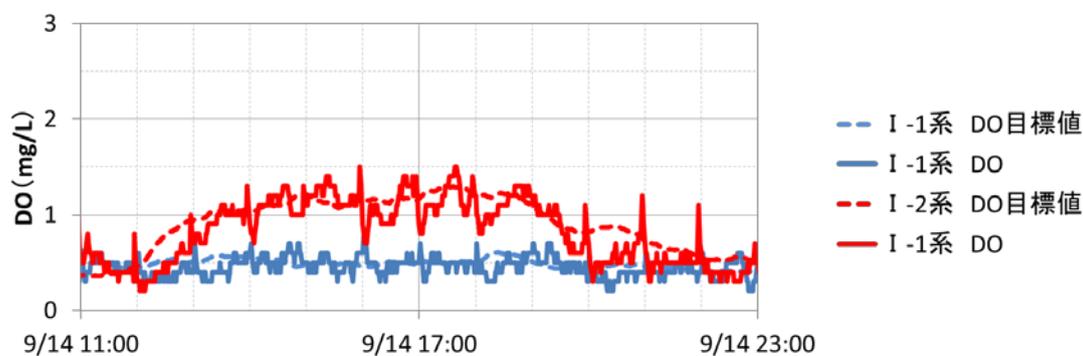
系列	制御パラメータ	改善前	改善後
I-1 系	Kp (比例ゲイン)	0.14	0.94
	Ti (積分時間)	3.77	18.30
I-2 系	Kp (比例ゲイン)	3.26	2.98
	Ti (積分時間)	12.64	58.78

評価指標である目標値に対する DO 計測値の平均二乗誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) については、I-1 系が 0.22mg/L から 0.12mg/L となり改善がみられたが、I-2 系は 0.19mg/L のまま変わらず改善がみられなかった。

制御性能劣化設定期間 (制御パラメータ改善前) と制御性能改善技術で制御性能を改善した期間 (制御パラメータ改善後) の DO の詳細なトレンドを図資 1-7、図資 1-8 に、その際の制御モードを表資 1-6 に示す。



図資 1-7 制御パラメータ改善前の期間の DO 目標値と DO 値の推移

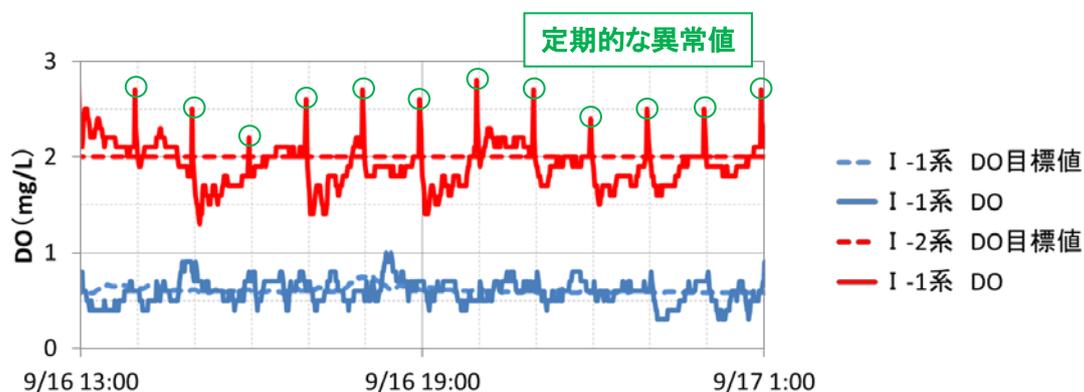


図資 1-8 制御パラメータ改善後の期間の DO 目標値と DO 値の推移

表資 1-6 トレンドの図番号と制御モード

期間		改善前	改善後		再改善後
図番号		図資 1-7	図資 1-8	図資 1-9	図資 1-10
I-1 系	制御モード	NH ₄ -N/DO	NH ₄ -N/DO	NH ₄ -N/DO	
	DO 目標値	可変	可変	可変	
I-2 系	制御モード	DO 一定	NH ₄ -N/DO	DO 一定	
	DO 目標値	2.0mg/L	可変	2.0mg/L	

I-2 系が改善されなかった理由に関して調査を実施したところ、**図資 1-9** に示すように 2015/9/16 のトレンドから、定期的に DO 計測値に突起状の異常値が含まれており、その結果、平均二乗誤差が改善されていないことが判明した。

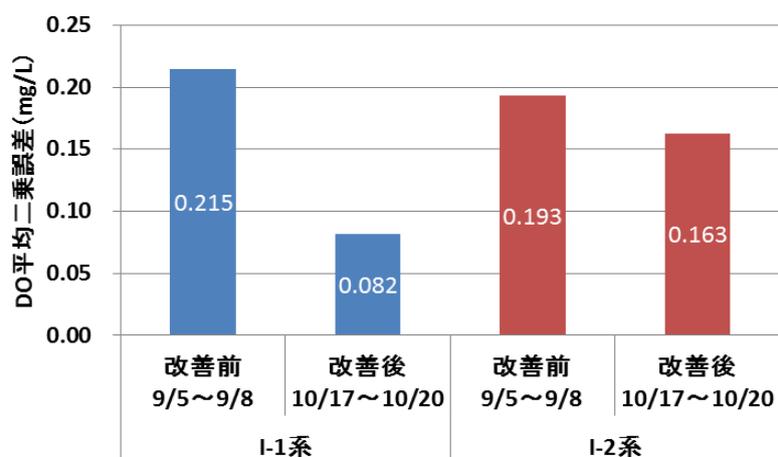


図資 1-9 制御パラメータ改善後の期間の DO 目標値と DO 値の推移

異常値が発生する周期が DO 計の定期洗浄周期である約 1 時間となっていたことから、DO 計の定期洗浄設定を確認したところ、洗浄時間 30 秒に対し、センサー値の待機（ホールド）時間が 30 秒であった。本実証における DO 一定制御の制御周期は 1 分であり、待機時間が短いと定期洗浄時の異常値を収集して捉えてしまうため、待機時間を 3 分に設定し直し、再度、制御性能改善技術による制御パラメータを算出した。結果を**表資 1-7**に示す。

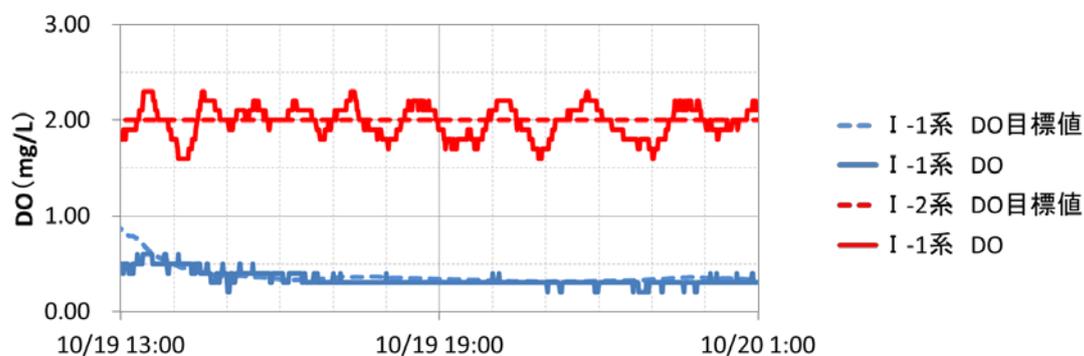
表資 1-7 パラメータ改善前後の制御パラメータ値

系列	制御パラメータ	改善前	改善後	再改善後
I-1 系	Kp (比例ゲイン)	0.14	0.94	—
	Ti (積分時間)	3.77	18.30	—
I-2 系	Kp (比例ゲイン)	3.26	2.98	1.10
	Ti (積分時間)	12.64	58.78	14.16



図資 1-10 制御パラメータ調整前後の平均二乗誤差の変化

最終的に制御性能劣化設定を実施した 9 月第 1 週の DO 平均二乗誤差と再改善後の 2015/10/15 以降の平均二乗誤差を比較したところ、I-1 系が 0.22mg/L から 0.08mg/L へ、I-2 系が 0.19mg/L から 0.16mg/L となり、平均二乗誤差がともに改善した (図資 1-11)。平均二乗誤差の改善幅はプロセスの状態に依存するが、改善後に増加することはなく、目標を達成した。



図資 1-11 制御パラメータ再改善後の期間の DO 目標値と DO 値の推移

(3) MSPC 技術に関する結果

MSPC 技術については、異常兆候検出による運転支援情報の有用性、センサードリフトによる曝気風量増加リスク回避効果を評価項目として、それぞれ有効検出率、曝気風量増加回避率の評価を行った。その結果を以下に示す。

1) 有効検出率の評価結果

○オフライン評価結果

① 有効検出率

表資 1-8 に示した 7 種類の異常シナリオに対し、**表資 1-9** に示した 7 種類 (8 個) の異常診断ユニットを適用して、異常検出の可否を評価した。その結果、全ての異常事象について、いずれか一つ以上の異常診断ユニットでその状態を検出できた。これにより、有効検出率 (オフライン評価) は、 $\text{有効検出率} = \text{異常検出数} \div \text{異常事象数} = 7 \div 7 = 1$ となった。すなわち、対象とした 7 種類の異常シナリオは、本技術を適切に適用することにより検出可能であることがわかった。

表資 1-8 平成 27 年度に実施した異常シナリオ試験と実際に生じた異常事象

番号	異常シナリオ・事象名称	想定する異常	実施日
模擬 1	センサー校正異常	センサーのゼロ点校正不良によるセンサー値異常	2015 年 9 月 8 日
模擬 2	返送汚泥ポンプ故障	返送汚泥ポンプのつまりによるポンプ回転数-流量関連の異常	2015 年 9 月 9 日
模擬 3	散気管バルブ誤作動・誤操作 (開方向)	散気管バルブ操作ミス (開方向) による水質変化・異常	2015 年 10 月 5~12 日
模擬 4	流入量・流入水質変動	流入負荷変動の増大によるプロセス状態変化	2015 年 10 月 14 日 ~11 月 3 日
模擬 5	散気管バルブ誤作動・誤操作 (閉方向)	散気管閉塞 (散気管バルブ閉方向) による水質変化・ブロー異常	2015 年 12 月 14~15 日
模擬 6	系列間流入量アンバランス	系列への流入量のアンバランスによる放流水質の悪化・不均一化	2015 年 12 月 16~22 日
実際 1	NH ₄ -N センサードリフト異常	NH ₄ -N センサードリフトによるブローおよび電力量の増加	2015 年 4 月中旬~ 6 月 9 日 (6 月 9 日校正)

表資 1-9 異常診断ユニットの定義と概要

番号	異常診断ユニット名称 (略称)	検出を想定する事象
1	ブロー関連異常 (ブロー)	ブロー故障やブロー風量の急変等の検出を想定
2	ポンプ・流量・水位関連異常 (流量・水位)	ポンプ故障、水量収支の異常、処理水量の急変等の検出を想定
3	窒素・りん水質関連異常 (水質)	窒素やりのんの水質に関連する指標の変化等の検出を想定
4	エネルギー原単位関連異常 (原単位)	ブローやポンプのエネルギー原単位の変化等の検出を想定
5	センサー関連異常 (センサー)	主に異系列に設置した同種のセンサーの異常の検出を想定
6	制御ループ異常 (制御)	フィードバック制御ループの異常の検出を想定
7	汚泥関連異常 (汚泥)	汚泥引き抜きに関する異常や MLSS 濃度の急変等の検出を想定

② 各異常シナリオを検出可能な異常診断ユニット

7種類の各異常シナリオについて、異常兆候を検出した異常診断ユニットを**表資 1-10**に示す。**表資 1-10**の○あるいは△の記号は、対応する異常事象を検出できた異常診断ユニットを示す。○で示した異常診断ユニットは、各異常事象に関連する変数（監視項目）の少なくとも一つ以上の寄与量が統計量(Q統計量あるいはT²統計量)のしきい値の50%を超えて異常事象を明確に検出したことを意味する。

表資 1-10 シナリオおよび実際の異常事象を検出した異常診断ユニット

番号	異常シナリオ・事象名称	異常事象を検出した異常診断ユニット						
		フロウ	流量・水位	水質	原単位	センサー	制御	汚泥
模擬 1	センサー校正異常	○		○		○		
模擬 2	返送汚泥ポンプ故障		○		○			○
模擬 3	散気管バルブ誤作動・誤操作 (開方向)	○		△		○		
模擬 4	流入量・流入水質変動	○	△	○	△	○	○	
模擬 5	散気管バルブ誤作動・誤操作 (閉方向)	○						
模擬 6	系列間流入量アンバランス				△	○		○
実際 1	NH ₄ -N センサードリフト異常	○		○		○		

表資 1-10より、各異常シナリオについて、少なくとも二つ以上の異常診断ユニットにより、シナリオで定義した異常事象を検出できることが確認できた。

③ 検出時間と検出レベル

7つの各異常シナリオを最も感度よく検出した異常診断ユニットにおいて、異常発生時から異常検出時までに要した時間（検出時間）と、検出時に各事象に関連する主な変数の変化量（検出レベル）を**表資 1-11**に示す。検出時間や検出レベルは、診断モデル構築に用いるデータ長や異常検出を判定しきい値等の判断基準に依存するため、一般性があるとは言えないが、参考情報として有用であると考え、**表資 1-11**に示した。**表資 1-11**は、実証で用いたデータ長1週間、しきい値99.9%信頼限界、の場合の結果である。

なお、括弧で示した検出時間は、異常発生時刻が特定できない、あるいは、異常に関連する変数を特定することが困難、等の理由で明確に検出時間を定義することが難しい場合の、おおよその値を示している。

表資 1-11 シナリオおよび実際の異常事象の検出時間と検出レベル

番号	異常シナリオ・事象名称	検出時間	検出レベル*
模擬 1	センサー校正異常	20 分	ORP 50~100mV 程度
模擬 2	返送汚泥ポンプ故障	5 分	返送ポンプ回転数 5~10%程度
模擬 3	散気管バルブ誤作動・誤操作 (開方向)	4 時間 5 分	ORP 25~30mV 程度
模擬 4	流入量・流入水質変動	(2~6 時間程度)	流入量変動標準偏差 1.67 倍 (12m ³ /h→20m ³ /h)
模擬 5	散気管バルブ誤作動・誤操作 (閉方向)	30 分	DO 1.5mg/L 程度
模擬 6	系列間流入量アンバランス	1 時間	流入量差 400m ³ /日
実際 1	NH ₄ -N センサードリフト異常	(1~2 週間程度)	NH ₄ -N 0.5~1mg/L 程度

*各数値は変化量

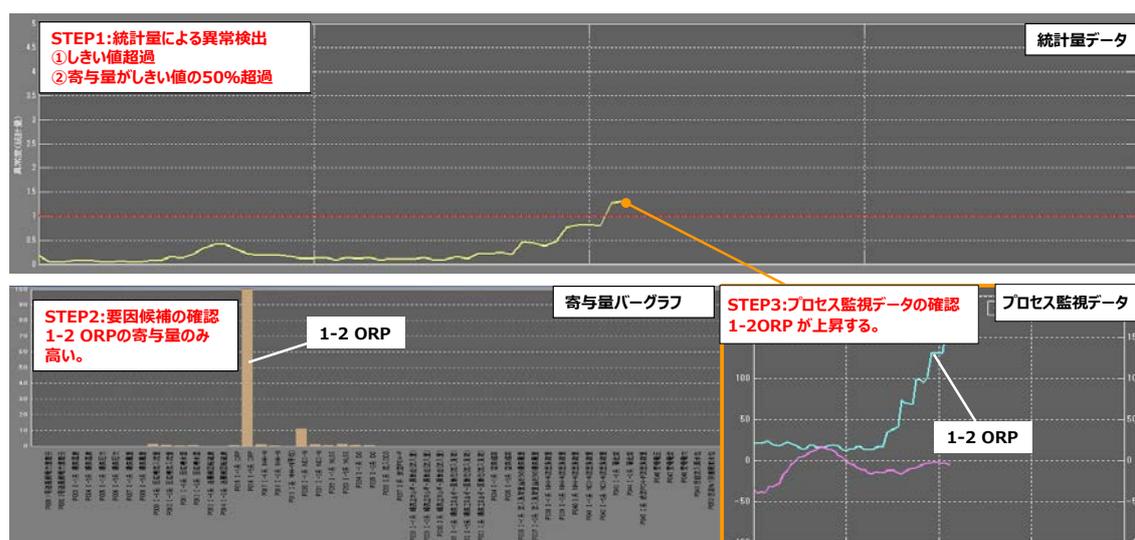
表資 1-11 に記載した検出レベルは、通常の監視で行われる計測項目（変数）ごとの管理限界によるアラーム発報のレベルよりも十分に小さい値である。従って、本技術により、通常の運転管理における異常検出レベルよりも高い感度で、異常兆候を検出できることを確認できた。

④ 各異常シナリオの診断例

各異常シナリオの異常事象がどのように検出されたかを可視化するため、異常シナリオごとの異常診断例を図資 1-12~図資 1-18 に示す。

a) センサー校正異常

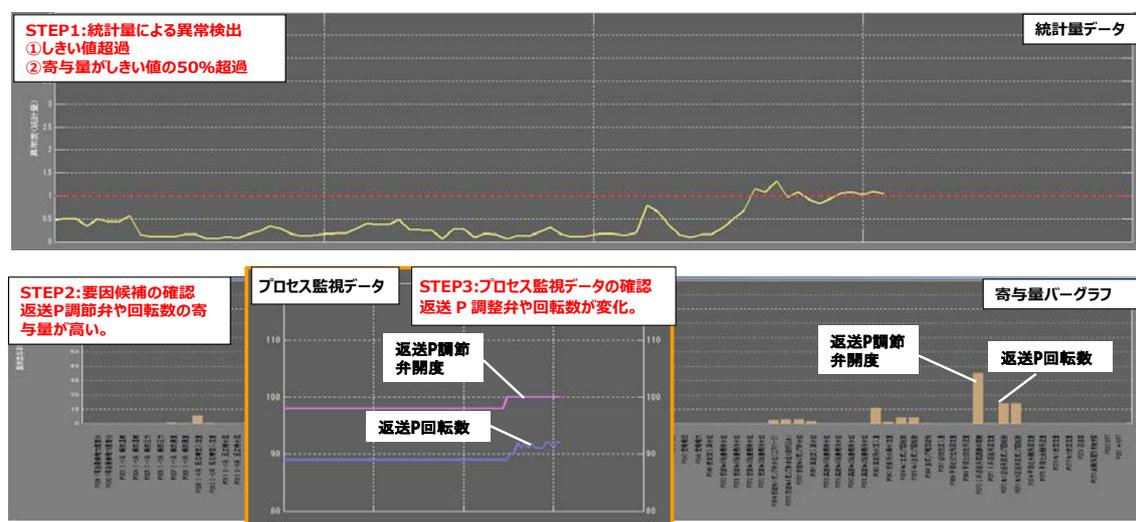
図資 1-12 は、I-2 系の ORP センサーの校正異常時のセンサー診断ユニットによる検出の様子である。センサー診断ユニットの Q 統計量が正規化されたしきい値 1 を超過し、その時、I-2 系 ORP の寄与が高くなっている。実際に I-2 系 ORP の時系列データを確認すると、その値が増加している様子がわかる。



図資 1-12 センサー校正異常の異常診断結果（センサー診断ユニット）

b) 返送汚泥ポンプ故障

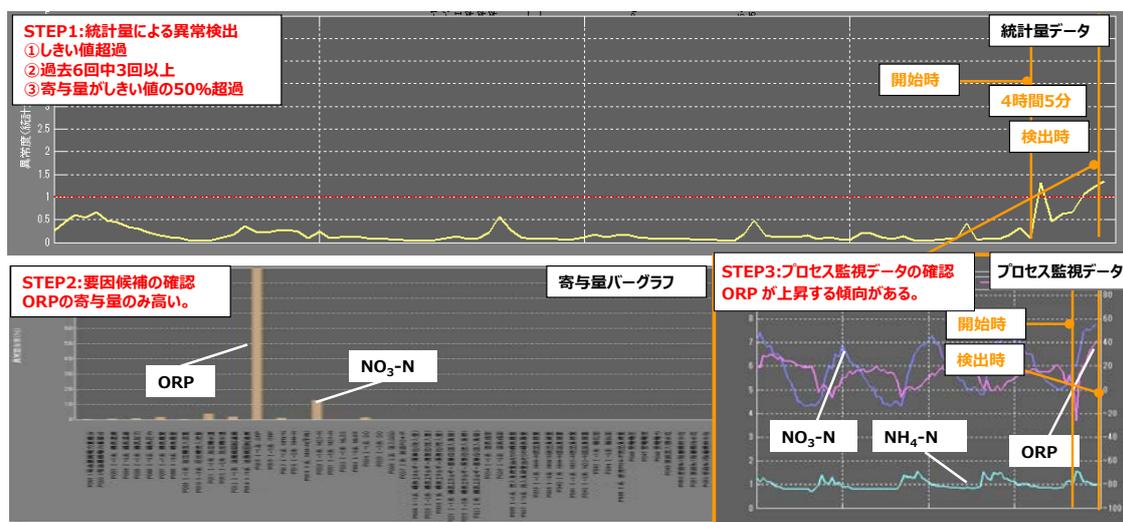
図資 1-13 は、返送汚泥ポンプの目詰まりを模擬した場合のエネルギー原単位診断ユニットでの検出の様子である。エネルギー原単位診断ユニットにおいて、Q 統計量がしきい値 1 を超過し、その時返送汚泥ポンプの調節弁開度や返送汚泥ポンプの回転数の寄与量が高くなっている。実際にこれらの時系列データを確認すると、返送汚泥ポンプ回転数や調節弁開度に変化が認められる。返送汚泥ポンプの回転数は、年間を通してみると、異常時や起動・停止時を除いて $55\sim 97\text{min}^{-1}$ 程度の範囲で動作しているのに対し、本試験では、回転数は $88\sim 93\text{min}^{-1}$ 程度に約 5% 程度増加した変化を検出しており、MSPC 技術により高い検出感度で回転数や調節弁開度の変化を検出できることを確認できた。



図資 1-13 返送汚泥ポンプ故障の異常診断結果（エネルギー原単位診断ユニット）

c) 散気管バルブ誤作動・誤操作（開方向）

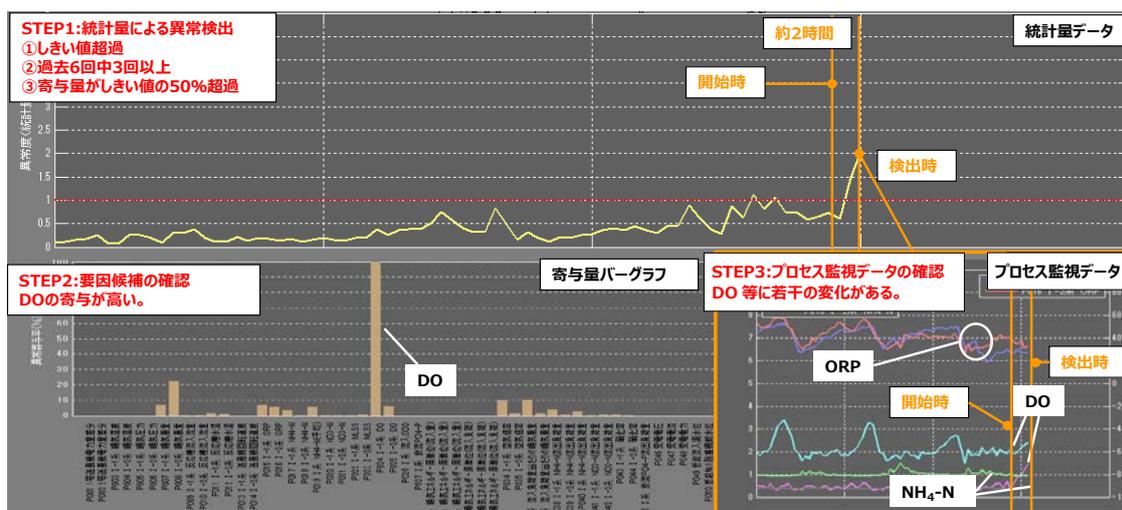
図資 1-14 は、疑似嫌気好気処理となっている水処理プロセスの前段の散気管バルブを開方向にした場合の結果である。I-1 系ブロウ診断ユニットの Q 統計量で、バルブを開方向にした後 4 時間程度で異常が検出され、その時の I-1 系 ORP の寄与が高くなった。実際に I-1 系 ORP の時系列データを確認すると値が上昇していることが確認できた。なお、本試験期間中において NO₃-N 濃度が 1mg/L 未満の若干量増加したことを水質分析データからは確認しているが、MSPC 技術ではこの事象については検出することができなかった。



図資 1-14 散気管バルブ誤作動・誤操作（開方向）の異常診断結果（I-1 系ブロウ診断ユニット）

d) 流入量・流入水質変動

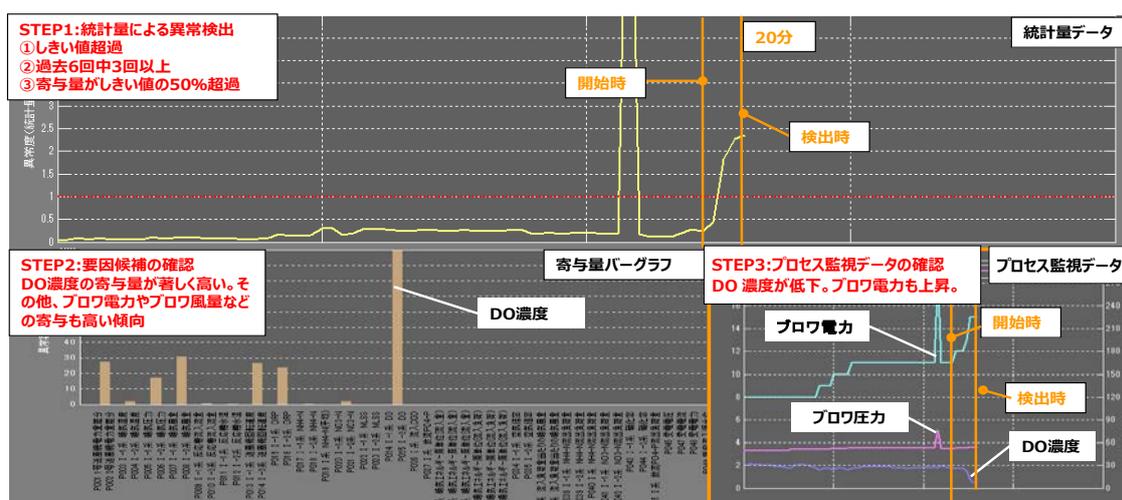
図資 1-15 は、流入量・流入水質変動時の水質診断ユニットによる異常診断の様子である。汚水調整池の運用を停止して流入量変動幅を標準偏差で約 1.7 倍に大きくした時、流入量変動幅を変更後 2 時間程度で水質診断ユニット等により、その事象が検出された。この時、I-1 系 DO 濃度の寄与量が高くなっており、その時系列データを確認すると、若干 DO 濃度の上昇が見られた。流入量・流入水質の変動は、ORP や NH₄-N 濃度、NO₃-N 濃度にも影響を与えており、しばらく時間が経過すると、これらの変数も要因候補変数に含まれ、統計量は明らかに異常な状態を示した。このように、流入量や流入水質の変化は処理プロセスに大きな影響を与えるため、時間の経過と共に、明らかな異常状態を示すようになる一方、ある程度時間が経過してしまうと、MSPC に取り込んでいる様々なプロセス変数に影響が及ぶため、多くの変数の寄与量が同時に高くなり、その要因を推定することは困難になってくる。



図資 1-15 流入量・流入水質変動時の異常診断結果（水質診断ユニット）

e) 散気管バルブ誤作動・誤操作（閉方向）

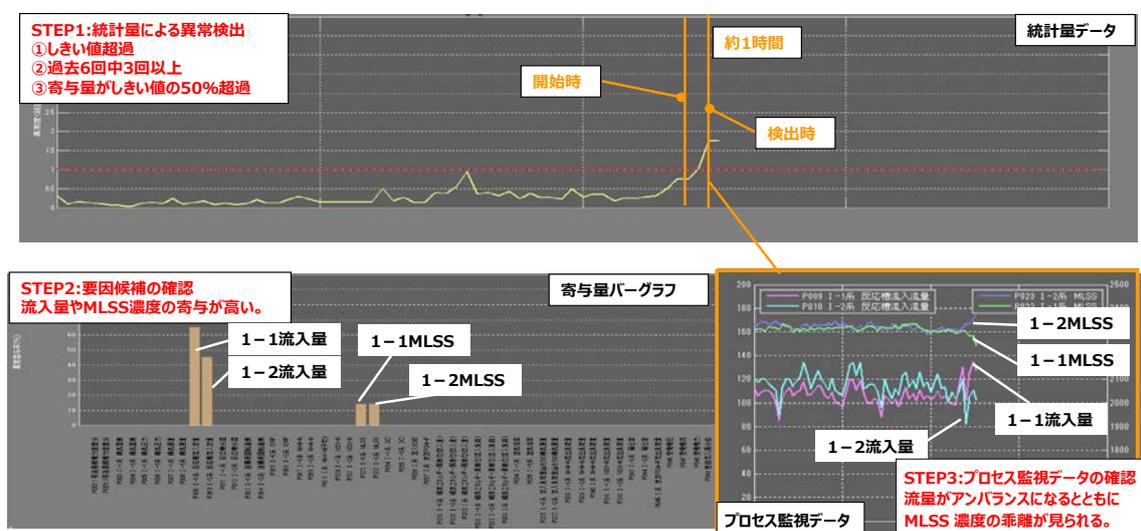
図資 1-16 は、流れ方向に 4 つに分割された反応タンクの第 4 区画の散気管バルブを閉方向に操作した時の、I-2 系ブロワ診断ユニットによる検出の様子である。閉操作後 20 分程度で、異常を検出し、その要因候補変数として I-2 系 DO 濃度が抽出された。実際に I-2 系 DO 濃度の時系列データを確認すると、DO 濃度レベルの低下が認められる。これは、空気供給が不十分になったことが、DO 濃度低下を引き起こしたためである。図資 1-16 において、開始時よりも前のところで明確な異常が現れている部分は、全区画の散気管バルブを閉操作した時の結果であり、ブロワ電力やブロワ圧力が要因候補として抽出された。この時、ブロワ電力やブロワ圧力に大きな変化が現れていることは、図資 1-16 のプロセス監視データからも明確にわかる。



図資 1-16 散気管バルブ誤作動・誤操作（閉方向）の異常診断結果（I-2 系ブロワ診断ユニット）

f) 系列間流入量アンバランス

図資 1-17 は、I-1 系と I-2 系の流入量を意図的に変化させた場合の汚泥診断ユニットによる異常診断の様子を示している。流入ゲートの高さを調整して、流入量を変化させた後、約 1 時間程度で検出されており、異常要因候補変数として、I-1 系と I-2 系の流入量の寄与量が高くなっていることに加え、I-1 系と I-2 系の MLSS 濃度の寄与量も若干高くなっている。その後、MLSS 濃度の寄与量が徐々に大きくなっていくことも確認している。実際にプロセス監視データを確認すると、流入量を増加させた I-1 系 MLSS 濃度は低下方向に、流入量を減少させた I-2 系 MLSS 濃度は増加減少方向に変化していく様子がわかる。



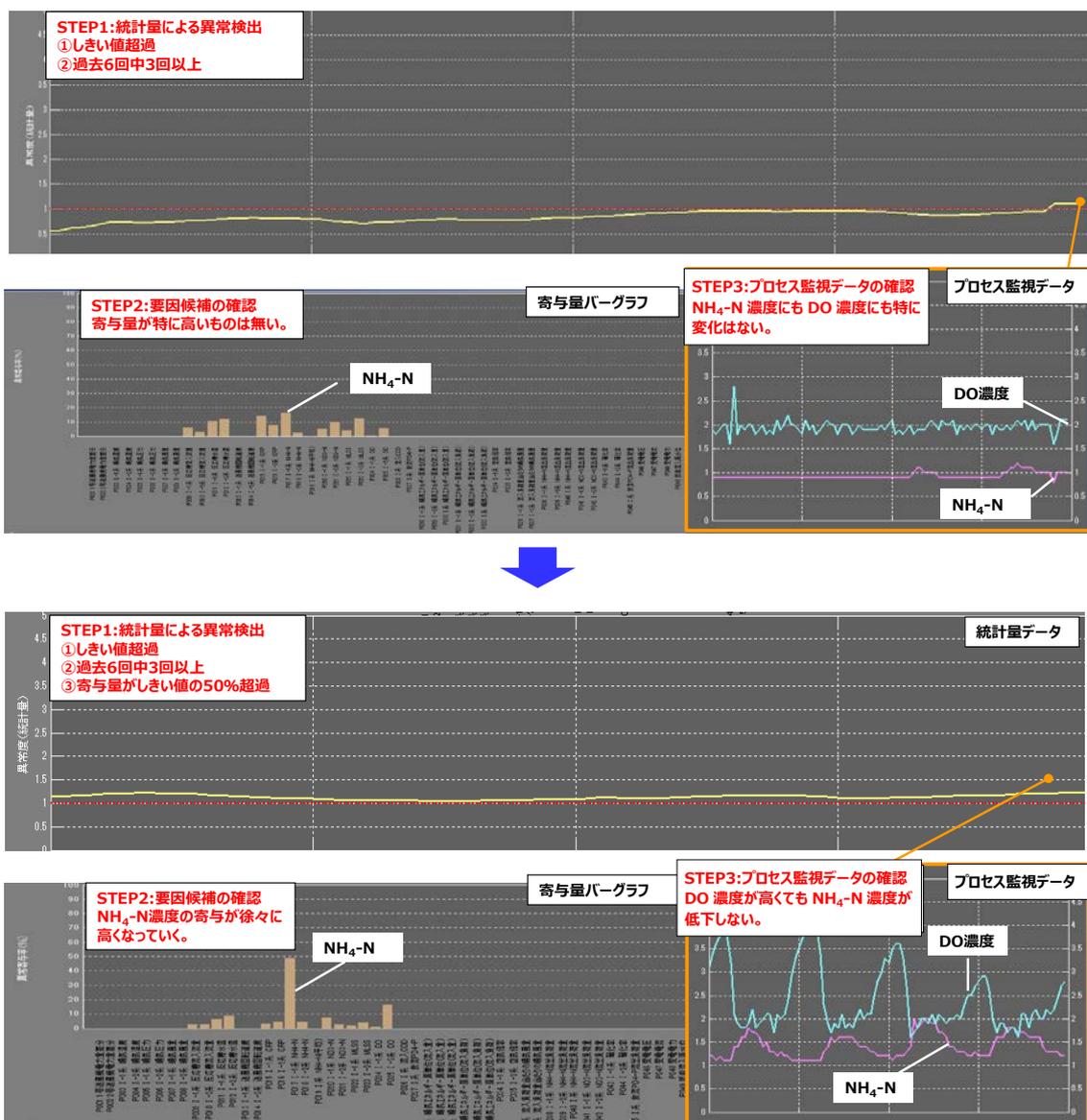
図資 1-17 系列間流入量アンバランス時の異常診断結果（汚泥診断ユニット）

g) $\text{NH}_4\text{-N}$ センサードリフト

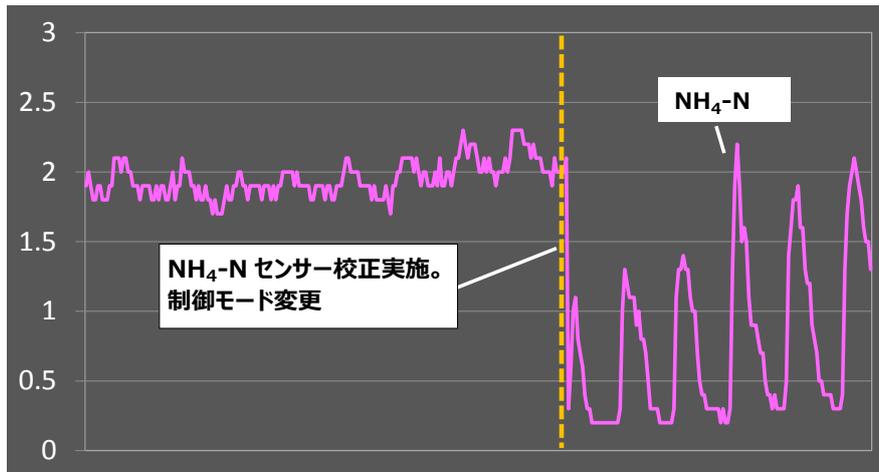
図資 1-18 は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ センサーが実際にドリフトした時期のセンサー診断ユニットによる異常検出の様子である。図資 1-18 上段は、Q 統計量が初めて 1 を超えた直後の状況を示している。この時点では、特別寄与量の高いものは無いため、異常の要因を推定することは困難である。念のため、実際にドリフトしていた $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の時系列データと関連する DO 濃度の時系列データを確認しても、特に変わった動きは認められない。ただし、DO 濃度が 2mg/L 程度に対して、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が 1mg/L 常時残存しているため、センサーがドリフトしていた事実を既知とすると、その可能性があることも理解できるが、ドリフトの事実を知らない段階では要因を推定することは困難である。図資 1-18 下段は、その後時間が経過して、 $\text{NH}_4\text{-N}$ センサーの寄与量が 50%程度になった時点のデータを示しており、Q 統計量は 1 を若干超過したあたりで推移している。 $\text{NH}_4\text{-N}$ センサーの寄与量が 50%程度になった時点のプロセス監視データを確認しても、一見するだけでは $\text{NH}_4\text{-N}$ センサーが異常であることはわかりづらい。しかし、DO 濃度が 3.5mg/L を超えるような高い濃度になる場

合でも、NH₄-N 濃度が 1mg/L 以下になることは無いため、**図資 1-18** 下段の寄与量が NH₄-N の異常を強く示唆している事と併せて判断すると、NH₄-N センサーの異常の可能性が高いと推測される。特に、寄与量の変化を継続的に確認すると、NH₄-N センサーの寄与量が徐々に増加していくため、NH₄-N センサーのドリフトの可能性が高いと推測できる。

なお、この事象については、実際に NH₄-N センサーを校正することによって、NH₄-N センサーのドリフトであったことが確認されている。NH₄-N センサーを校正前後の NH₄-N 濃度の時系列データを**図資 1-19** に示す。



図資 1-18 NH₄-N センサードリフト時の異常診断結果 (センサー診断ユニット)



図資 1-19 NH₄-N センサードリフト校正前後の NH₄-N 濃度の時系列データ

○オンライン評価結果

① 有効検出率

異常兆候検出時のメール自動配信を開始した 2016/2/1～3/8 の 9:00～17:00 の評価期間に発報されたアラーム発報件数は 39 件であった。この中で、実証機場の運転管理者の方に評価を頂いた、平日に発報された、27 件を評価対象とした。その結果、27 件中 2 件が発報の原因不明と判断された。それ以外の 25 件は、全て運用変更か流入変化によるものと判断され、異常事象は検出されなかった。これより、有効検出率（オンライン評価）は、有効検出率＝有効発報数÷異常発報数＝25÷27＝0.926（92.6%）となった。

② アラーム発報数と推定要因の分類

表資 1-12 は、評価期間中の日ごとのアラーム発報数と、運転管理者が判断した要因分類をまとめたものであり¹、ここから有効検出率＝0.926 が算出される。

表資 1-12 から、運転管理者が「異常」と判断した事象は 1 件も無く、不明の 2 件を除く、すべての事象は「運用変更」もしくは「流入変化」として推定されている。

また、MSPC1（I-1 系ブロワ診断ユニット）によるアラーム発報と MSPC2（水質診断ユニット）によるアラーム発報は、MSPC2 の方が多かった。この原因として、MSPC2 の方が変数の数が多く様々な異常を検出しやすいことや、MSPC2 には余剰汚泥引き抜き率等運転条件に関する変数を含むため運用変更という事象を検出しやすいこと、等が考えられる。

¹表資 1-12 の要因分類は重複してチェックされたものがあるため、要因分類の各項目の総和はアラーム発報数より多くなっている。また、MSPC1 と MSPC2 で同時に異常発報があったアラームが 1 件あるため、MSPC1 と MSPC2 の総和はアラーム発報数+1 となっている。

表資 1-12 オンライン評価期間中のアラーム発報数とその要因分類

月日	曜日	アラーム発報数	要因分類				MSPC1	MSPC2
			異常	運用変更	流入変化	不明		
2月1日	月	0	0	0	0	0	0	
2月2日	火	0	0	0	0	0	0	
2月3日	水	0	0	0	0	0	0	
2月4日	木	0	0	0	0	0	0	
2月5日	金	0	0	0	0	0	0	
2月6日	土	1	-	-	-	0	1	
2月7日	日	3	-	-	-	1	2	
2月8日	月	5	0	5	5	0	3	
2月9日	火	2	0	2	2	0	2	
2月10日	水	2	0	0	1	2	1	
2月11日	木	2	-	-	-	1	1	
2月12日	金	3	0	3	3	0	1	
2月13日	土	2	-	-	-	0	2	
2月14日	日	2	-	-	-	1	1	
2月15日	月	2	0	0	2	0	1	
2月16日	火	0	0	0	0	0	0	
2月17日	水	1	0	1	1	0	1	
2月18日	木	2	0	2	0	0	1	
2月19日	金	0	0	0	0	0	0	
2月20日	土	0	-	-	-	0	0	
2月21日	日	0	-	-	-	0	0	
2月22日	月	0	0	0	0	0	0	
2月23日	火	0	0	0	0	0	0	
2月24日	水	1	0	1	0	0	1	
2月25日	木	1	0	1	0	0	1	
2月26日	金	1	0	1	0	0	1	
2月27日	土	2	-	-	-	0	2	
2月28日	日	0	-	-	-	0	0	
2月29日	月	0	0	0	0	0	0	
3月1日	火	2	0	1	1	0	1	
3月2日	水	4	0	4	4	0	0	
3月3日	木	0	0	0	0	0	0	
3月4日	金	0	0	0	0	0	0	
3月5日	土	0	-	-	-	0	0	
3月6日	日	0	-	-	-	0	0	
3月7日	月	1	0	1	1	0	1	
3月8日	火	0	0	0	0	0	0	

③ 運転管理者による評価の妥当性検証

運転管理者による要因推定結果が妥当であったか否かを検証するため、要因推定結果と、運転管理者に提示した MSPC の結果と対応するプロセス監視データを照合し、その整合性を確認する。ここでは、特に発報回数が最も多かった 2/8 の記録を確認した。運転管理者は、**図資 1-20** に示すように、水処理系列の一部の運用を停止し、流入量を他の水処理系列に分配する運用変更を要因として推測している。この時、異常兆候を検出した時点における MSPC1 (I-1 系ブロワ関連診断ユニット) と MSPC2 (水質関連診断ユニット) の寄与量バーグラフ (**図資 1-21** と **図資 1-22**) を確認すると、曝気風量やこれに関連するブロワ (送風機) の回転速度や電力が関連する変数として抽出されていることが確認できる。以上のことを念頭において、**図資 1-23** に示すリモート監視画面で、2 月初旬から中旬までの監視

項目のトレンドグラフを確認すると、2/8 付近から実証系列への流入量が増加し、これに伴い、ブロワ回転速度、ブロワ電力、曝気風量が増加していたことが確認できる。このことから、**図資 1-20** の記録に記載された推定要因のと通りの事象が生じていたと考えられる。

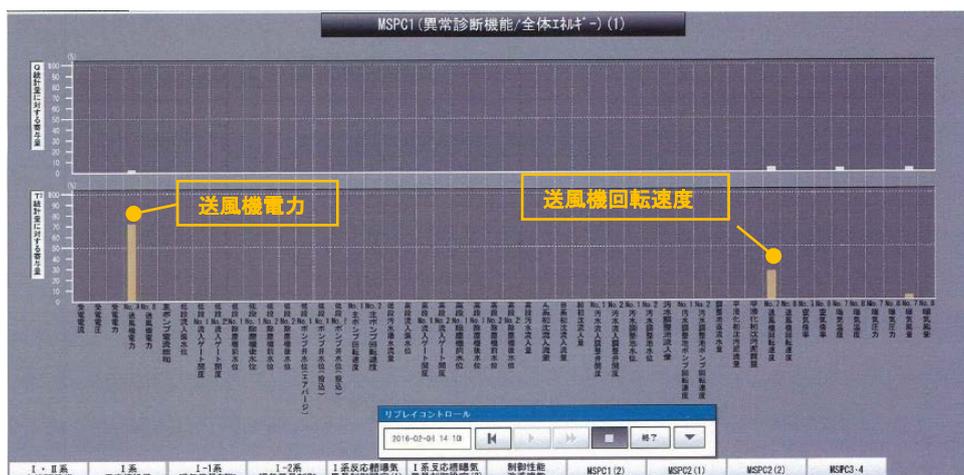
その他の運転管理者による要因推定結果についても、ほとんどのものについてその推定を裏付けるプロセス監視データの変化があることが確認できた。以上より、運転管理者による判断は、ほぼ適切であったと考えられ、運転管理者が判断するための MSPC のアラーム発報も適切になされていたと考えられる。

ただし、この評価期間中に I-2 系の NH₄-N センサーにドリフトが生じていたが、これについては、運転管理者がその可能性を疑うことは無かった。その最大の理由として、NH₄-N センサーのドリフトが顕著に検出されたセンサー診断ユニットを運転管理者による評価対象としていなかったため、センサー診断ユニットからの情報を運転管理者が認識していなかったことが考えられる。ただし、評価対象とした水質診断ユニット (MSPC2) でも、**図資 1-24** に示すように 2/10 頃には、I-2 系 NH₄-N 濃度の寄与量が高くなっており、NH₄-N センサーの異常が若干疑われる。しかし、I-2 系 NH₄-N 濃度の寄与量は最大となっていないため、見逃されたと考えられる。実際、2/10 は、**図資 1-20** の記録に記載された運用変更が継続しており、この運用変更とは無関係の I-2 系の NH₄-N センサーのドリフトが同時に発生していたと考えられる。そのため、運用変更に伴って高くなった曝気風量の寄与量が最大となり、NH₄-N 濃度の寄与量は、これよりは低い値になった。このように、複数の事象が同時に発生する場合は、要因となる事象自身が複数あるため、判断が難しく、このような場合の診断方法およびその提示方法は今後の検討課題である。

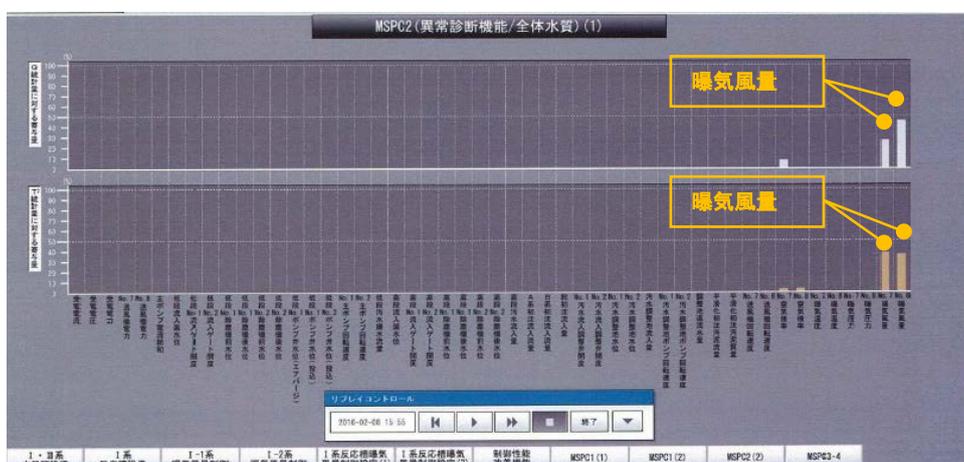
異常発報メール受信時記録

平成 28 年 2 月 8 日				
イベント番号	発生時刻	MSPCの種類	分類	推測される要因
1	14:11	<input checked="" type="checkbox"/> MSPC1 <input type="checkbox"/> MSPC2	<input type="checkbox"/> 異常 <input checked="" type="checkbox"/> 運用変更 <input checked="" type="checkbox"/> 流入変化 <input type="checkbox"/> 不明	Ⅲ-1反応槽工事に伴い、Ⅲ-1槽の水を他系列(Ⅲ-2、Ⅳ-1、2)へ振り分けている影響がⅠ系にも及んでいると推測される。
2	14:36	<input type="checkbox"/> MSPC1 <input checked="" type="checkbox"/> MSPC2	<input type="checkbox"/> 異常 <input checked="" type="checkbox"/> 運用変更 <input checked="" type="checkbox"/> 流入変化 <input type="checkbox"/> 不明	Ⅲ-1反応槽工事に伴い、Ⅲ-1槽の水を他系列(Ⅲ-2、Ⅳ-1、2)へ振り分けている影響がⅠ系にも及んでいると推測される。
3	15:21	<input checked="" type="checkbox"/> MSPC1 <input type="checkbox"/> MSPC2	<input type="checkbox"/> 異常 <input checked="" type="checkbox"/> 運用変更 <input checked="" type="checkbox"/> 流入変化 <input type="checkbox"/> 不明	Ⅲ-1反応槽工事に伴い、Ⅲ-1槽の水を他系列(Ⅲ-2、Ⅳ-1、2)へ振り分けている影響がⅠ系にも及んでいると推測される。
4	15:56	<input type="checkbox"/> MSPC1 <input checked="" type="checkbox"/> MSPC2	<input type="checkbox"/> 異常 <input checked="" type="checkbox"/> 運用変更 <input checked="" type="checkbox"/> 流入変化 <input type="checkbox"/> 不明	Ⅲ-1反応槽工事に伴い、Ⅲ-1槽の水を他系列(Ⅲ-2、Ⅳ-1、2)へ振り分けている影響がⅠ系にも及んでいると推測される。
5	16:06	<input type="checkbox"/> MSPC1 <input checked="" type="checkbox"/> MSPC2	<input type="checkbox"/> 異常 <input checked="" type="checkbox"/> 運用変更 <input checked="" type="checkbox"/> 流入変化 <input type="checkbox"/> 不明	Ⅲ-1反応槽工事に伴い、Ⅲ-1槽の水を他系列(Ⅲ-2、Ⅳ-1、2)へ振り分けている影響がⅠ系にも及んでいると推測される。

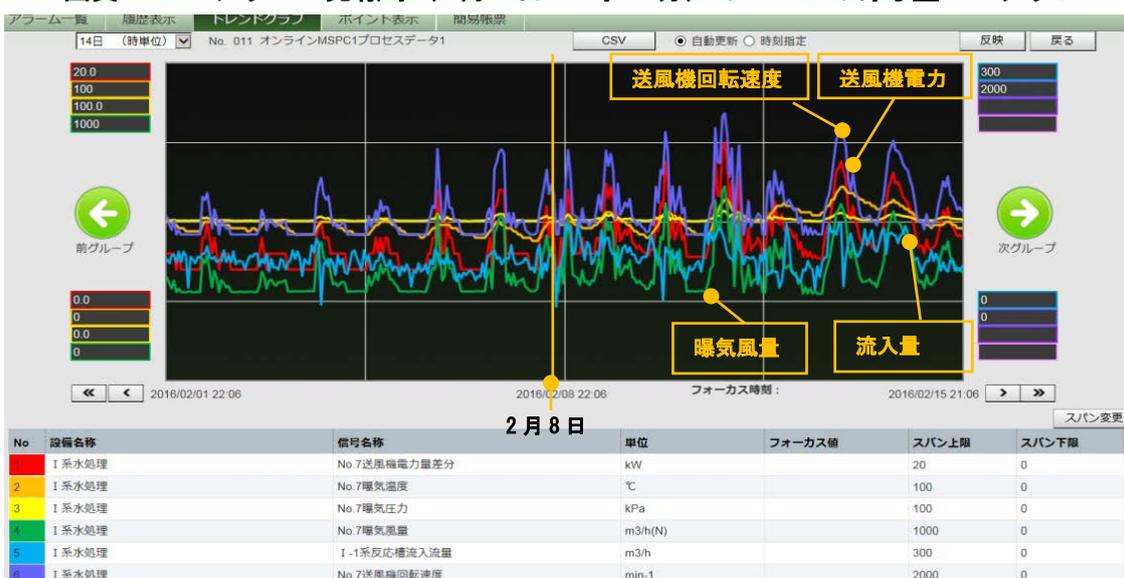
図資 1-20 アラーム発報回数が増えた2月8日の記録



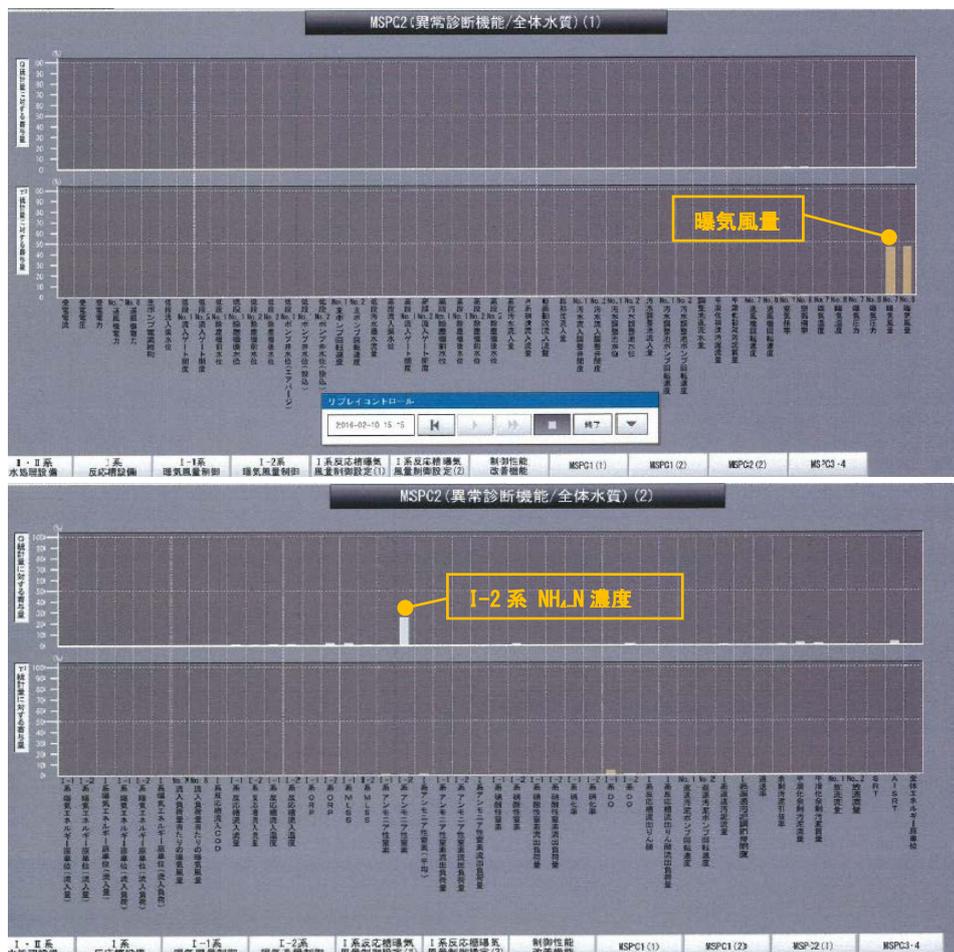
図資 1-21 アラーム発報時 (2月8日 14時 11分) のMSCP1の寄与量バーグラフ



図資 1-22 アラーム発報時 (2月8日 15時 56分) のMSCP2の寄与量バーグラフ



図資 1-23 2月8日を含む前後2週間の監視項目の時系列データ



図資 1-24 アラーム発報時（2月10日15時16分）のMSPC2の寄与量バーグラフ

④ 運転管理者へのインタビュー結果

本オンライン評価を実施後、実際に評価を実施頂いた運転管理者の方へのインタビューを実施し、本技術の有効性についての意見を伺った。主な意見を以下に列挙する。

- (ア) プラントの運用状態が変化したことを検知し、関連する変数を寄与量バーグラフで提示できることは良い。ただし、バーの数が増える傾向がある事やバーの高さと異常の強さの関係等がわかりづらいため、維持管理に用いるためには、もう一步踏み込んだ要因の絞り込みが必要と思う。
- (イ) 変数単位の要因である必要はなく、「ブロウに関連する異常」、「ポンプに関連する異常」、「流入負荷に関連する異常」、「センサーに関連する異常」等、何を確認すれば良いのかが分かるメッセージ機能があると維持管理に活用できる可能性がある。
- (ウ) 寄与量バーグラフでは、異常が生じた変数が多い側か少ない側かの符号がわからないので、符号がわかると良い。また、バーグラフとトレンドグラフ（時系列データ）

が連動していないため、操作性が悪い。バーグラフから、上位の要因候補となる変数のトレンドグラフを一括して見ることができると、維持管理に活用できる可能性がある。

これらのコメントから、基本的な異常診断ロジックには問題が無いが、a) 要因の抽出と提示方法、b) 監視画面の操作性、の2点に改善の余地があることがわかる。本技術を維持管理に活用するためには、これらの改善を継続的に実施していく必要がある。

2) 曝気風量増加量回避率の評価結果

4～6月にかけて NH₄-N センサーのドリフトがあったと考えられたことから、この期間のデータを用いて(1)で NH₄-N センサーのドリフトの検出可否を評価した。その結果、3種類の異常診断ユニットで NH₄-N センサーのドリフトを検出できた(表資 1-10)。最も検出感度の高かったブロワ関連診断モデルでは、4月初旬の1週間のデータを使って構築した診断モデルにより、4/27の時点で NH₄-N センサーのドリフトを検出できていたが、実際の運転では、NH₄-N センサーがドリフト異常のまま運転を継続しており、センサーの校正を行った日は6/9であった。制御目標曲線検討期間におけるセンサードリフト異常を検知する前の期間(2015/4/21～27)と、ドリフト異常の状態での NH₄-N /DO 制御で運転した期間(2015/5/19～25)の曝気風量低減率の評価結果のデータを用いて、以下のように曝気風量増加量の回避率を試算した。

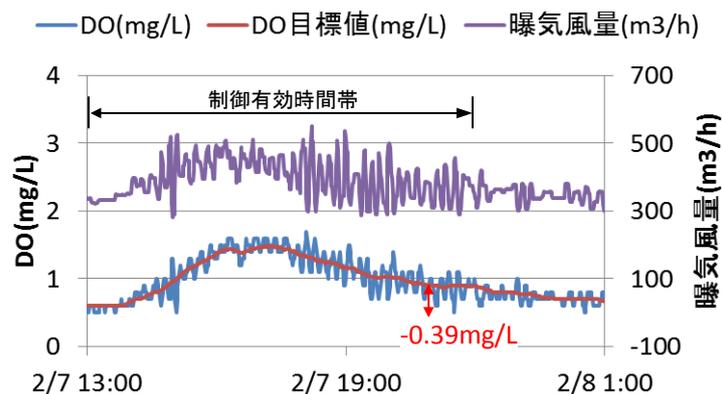
ドリフト異常を検出する直前の4/19～27の期間、ドリフト異常の状態での NH₄-N /DO 制御で運転した5/19～25の期間、の曝気風量低減率は、午後データで、それぞれ9.6%と5.8%であった。前者は NH₄-N センサーのドリフトを診断ユニットで検出した時期にほぼ相当し、後者はドリフト異常状態のまま NH₄-N /DO 制御を行った期間に相当するため、この差分をドリフト異常検知による曝気風量増加量回避率として評価した。すなわち、曝気風量増加量回避率 = 正常時曝気風量低減率 - 異常時曝気風量低減率 = 9.6 - 5.8 = 3.8%となる。

なお、本評価は、診断技術が曝気風量増加を招くリスクを回避するために有用であることを示すための試算による評価であり、実際の運用では、本試算ケースのようにセンサーのドリフトを放置したまま運用を継続することはないと考えられる。従って、本評価による効果は、3つの技術を組み合わせたコスト試算では考慮しないが、実際に NH₄-N センサーのドリフト異常を放置した場合に、曝気風量が増加(≒風量低減率が低下)してしまうリスクがあり、このドリフト異常を早期に気づくことで、曝気風量の増加リスク(電力量の増加リスク)を低減するために MSPC 技術が有効であることを示す具体的な事例として評価し、記載したものである。

(4) 3つの技術を組み合わせた技術に関する結果

1) 曝気風量低減率の維持効果に関する結果

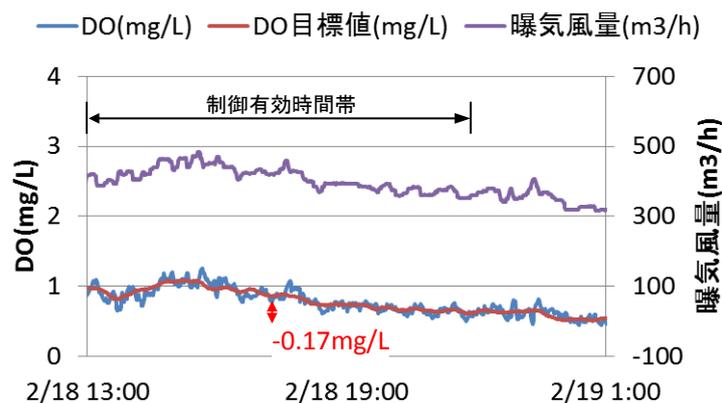
2016/2/5～11 の制御性能劣化設定期間に、制御性能改善技術の評価に使用した制御パラメータ（比例ゲイン 3.26、積分時間 12.64）を、制御目標曲線を劣化設定のものに設定し、相対風量を評価した。制御性能劣化設定期間中の DO および曝気風量のトレンドを図資 1-25 に示す。



図資 1-25 制御性能劣化設定期間中の DO および曝気風量のトレンド

制御性能劣化設定期間中の相対風量²⁾は 1.182 であった。なお、評価期間の中では、制御有効時間帯は 13:00～21:59 であった。

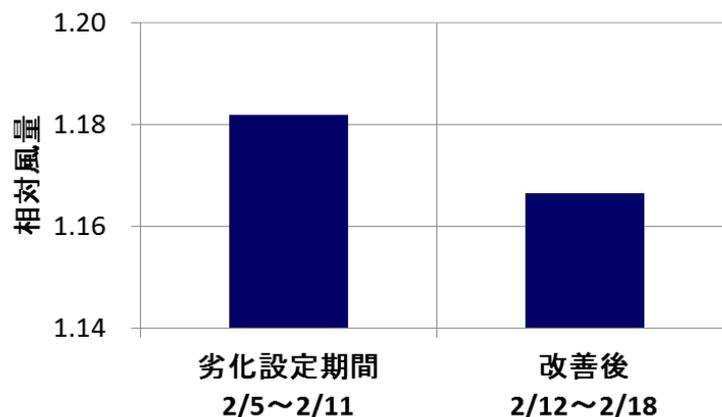
2016/2/12 に制御性能改善機能によって制御パラメータを制御性能改善機能の出力である比例ゲイン 1.24、積分時間 15.03 に設定し、制御目標曲線を省エネ型曲線に設定し、相対風量を評価した。制御性能改善後の DO および曝気風量のトレンドを図資 1-26 に示す。



図資 1-26 制御性能改善後の DO および曝気風量のトレンド

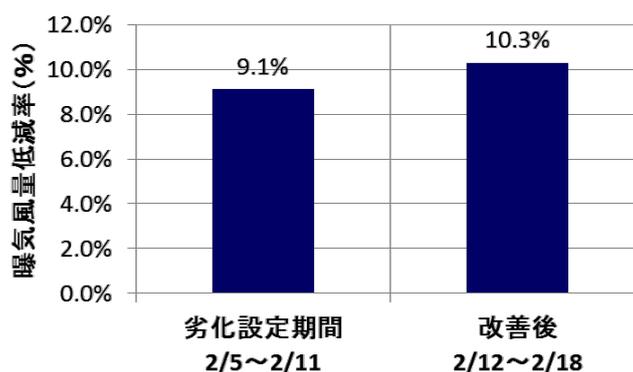
²⁾ 対照系列である I-2 系の風量に対する風量。I-2 系は DO 目標値 2.0mg/L の DO 一定制御。

制御性能劣化設定期間後の相対風量は 1.166 であった。相対風量の変化を**図資 1-27**にまとめる。



図資 1-27 制御性能改善前後の相対風量

オンライン総合評価期間中は I-1 系による DO 一定制御を実施しないため、DO 一定制御と比較した曝気風量低減率の評価を実施することはできなかった³。改善後の曝気風量 1.166 が低減率 10.3% となった結果と仮定すると、DO 一定制御に対応する相対風量は $1.166 \div (1 - 0.103) = 1.300$ となる。このとき、制御性能劣化設定期間中の相対風量 1.182 は曝気風量低減率 9.1% に相当する。この結果を**図資 1-28**に示す。本評価試験の条件では、制御性能改善技術が寄与する $\text{NH}_4\text{-N/DO}$ 制御技術の曝気風量低減率の維持効果は約 1.2% と考えられる。



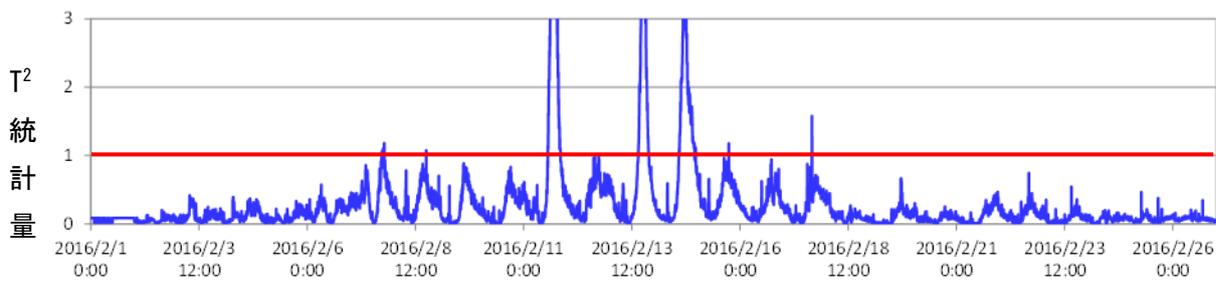
図資 1-28 制御性能改善前後の曝気風量低減率

³ 直近の I-1 系 DO 一定制御時の相対風量を使用することも検討したが、2 月より実証系列とは別の系列の運用変更による影響で直接比較することはできなかった。

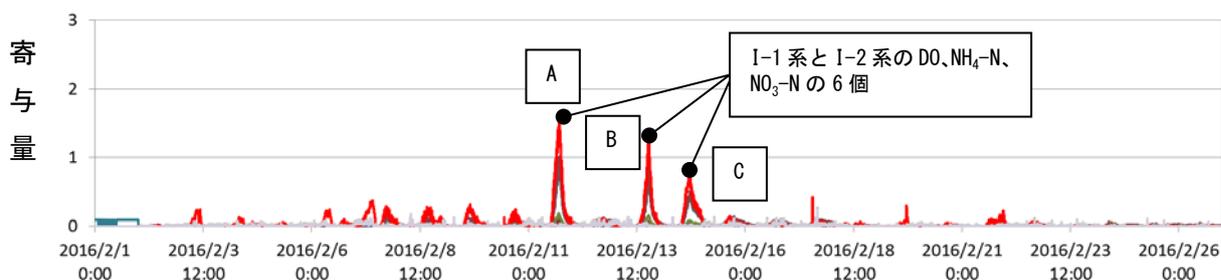
2) 硝化機能に関する結果

2016/2/1～26の期間にオンラインで稼働をさせた表資 1-9 に示す 7 種類 (8 個) の異常診断ユニットの中の一つであるセンサー診断ユニットにおいて、硝化に関連する $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高い状態や I-2 系の $\text{NH}_4\text{-N}$ センサーのドリフトが疑われる状態が検出されていることが確認できた。

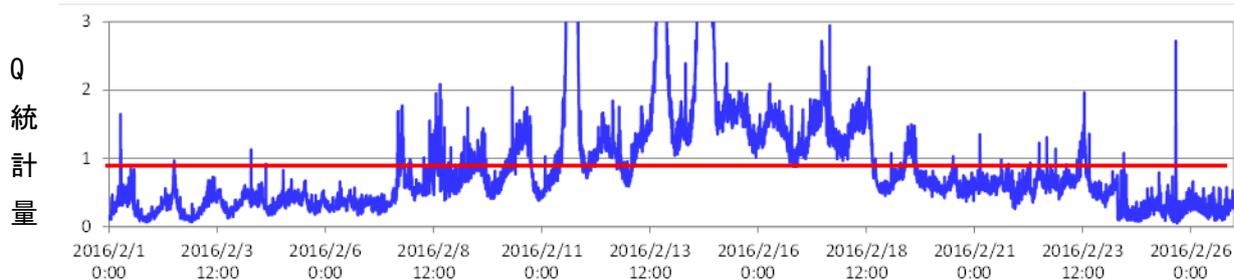
図資 1-29～図資 1-32 に T^2 統計量および Q 統計量とその寄与量のグラフを示す。



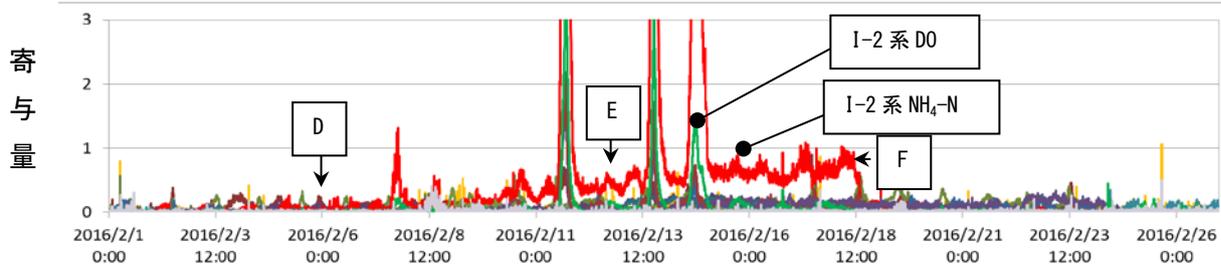
図資 1-29 総合評価期間中のセンサー診断ユニットの T^2 統計量



図資 1-30 総合評価期間中のセンサー診断ユニットの T^2 統計量に対する寄与量



図資 1-31 総合評価期間中のセンサー診断ユニットの Q 統計量



図資 1-32 総合評価期間中のセンサー診断ユニットの Q 統計量に対する寄与量

図資 1-29 と **図資 1-30** の T^2 統計量とその寄与量からは、土日祝日であった 2/11、13、14 に、硝化や脱窒等、窒素に関連する監視データに大きな変動があったことが疑われた。一方、**図資 1-31** と **図資 1-32** の Q 統計量とその寄与量からは、I-2 系の $\text{NH}_4\text{-N}$ センサー（もしくは DO センサー）にドリフトが生じている可能性が疑われた。

そこで、対応する期間の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度、DO 濃度の時系列データを確認すると、**図資 1-33**～**図資 1-35** に示すとおりであった。

図資 1-33 を見ると、土日祝日に $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高くなっていることが確認できた。また、**図資 1-32** から I-2 系の $\text{NH}_4\text{-N}$ センサーにドリフトが生じている可能性が示唆されていることを念頭において I-2 系の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の変化を確認すると、わずかに上昇傾向があるようにも見える。そのため、I-2 系の $\text{NH}_4\text{-N}$ センサーにドリフトが生じている可能性も考えられるが、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度のデータだけでは判断が難しい状態であった。

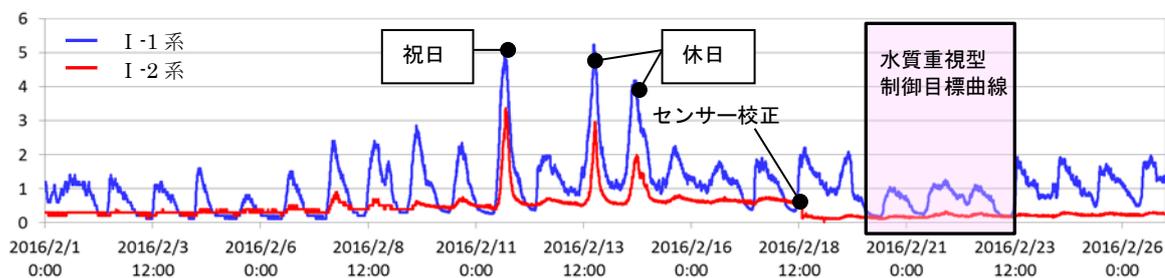
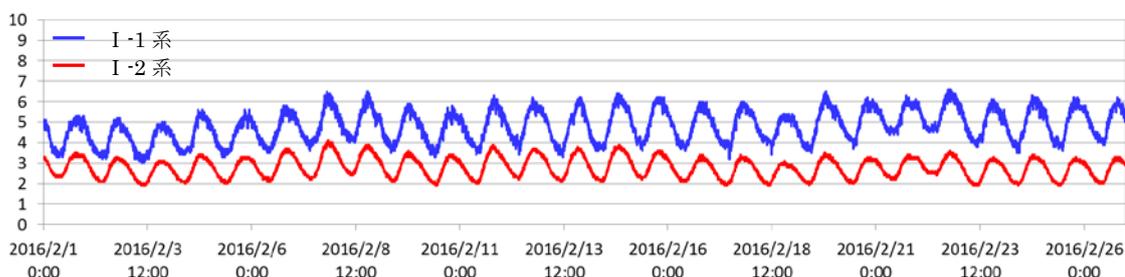
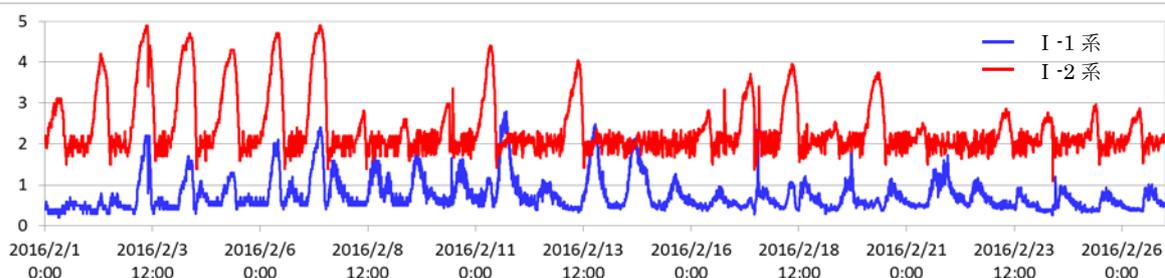
$\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高くなった要因として、負荷が高くなる祝日であることに加え、別の水処理系列の停止に伴い流入負荷がより高くなったことが推測されたため、翌週の土日である 2/20 と 2/21 の制御目標曲線を水質重視型に切り替えた。

一方、 $\text{NH}_4\text{-N}$ センサーのドリフトについては、明確な判断はできなかったが、ドリフトの可能性が疑われたため、 $\text{NH}_4\text{-N}$ センサーの校正を行うこととし、2/18 に校正を行った。

その結果、**図資 1-33** からわかるように、制御目標曲線の変更により 2/20 と 2/21 の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を低く抑制することができ、2/11、13、14 の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の平均値がそれぞれ 1.6mg/L、2.0mg/L、2.1mg/L に対し、2/20、21 の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度平均値は 0.6mg/L、0.7mg/L となった。

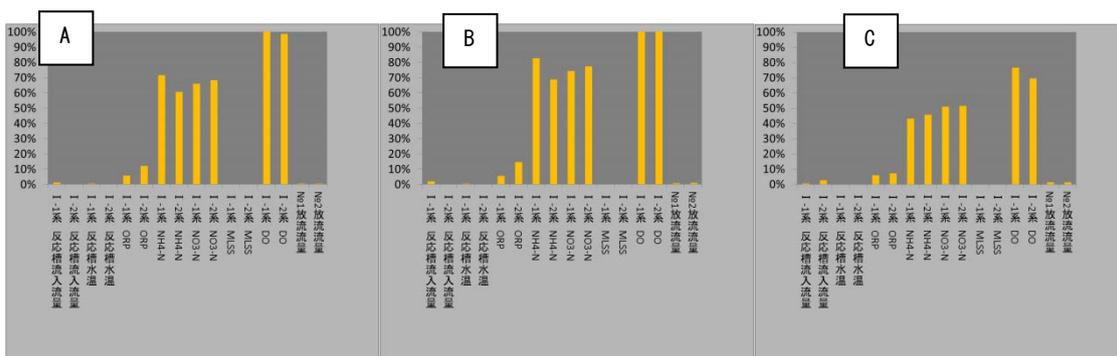
一方、I-2 系の $\text{NH}_4\text{-N}$ センサーが実際に 0.5mg/L 程度ドリフトしていたことを確認できた。また、MSPC 技術による異常を判定では、2/10 の 11:00 頃に異常と判定され、センサーを校正した 1/18 から約 3 週間（23 日）でドリフトを検出したと考えられた。この結果より、 $\text{NH}_4\text{-N}$ センサーのドリフト異常が 3 週間程度で生じうること、及びそのドリフト異常を MSPC 技術により、検知可能なことを確認した。この結果と 2015/10/19～2016/1/19 の運転実績に基づいて、 $\text{NH}_4\text{-N}$ センサーのメンテナンスに関しては、以下のように考えて、コスト試算を行った。

- ・従来のセンサーメンテナンス周期（センサーメーカーの推奨）
引上洗浄 1 回/週、校正 1 回/月
- ・実証技術導入時のセンサーメンテナンス周期
引上洗浄 1 回/3 週、校正 1 回/3 週

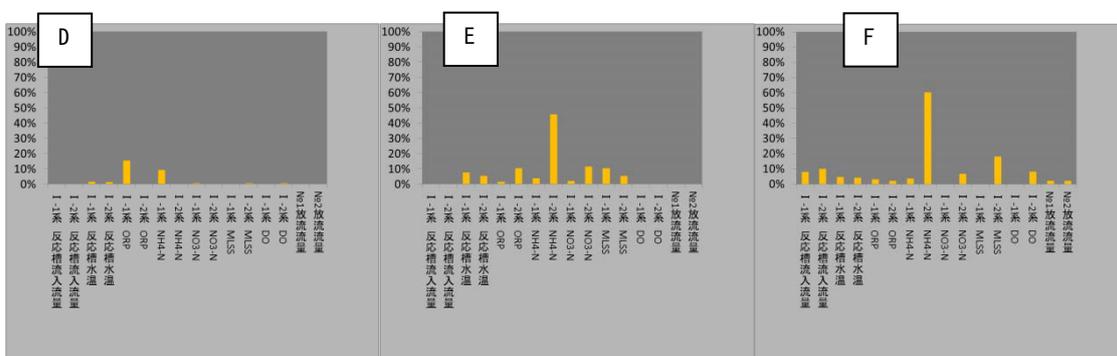
図資 1-33 総合評価期間中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の時系列データ図資 1-34 総合評価期間中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の時系列データ

図資 1-35 総合評価期間中の DO 濃度の時系列データ

センサー診断ユニットは、リモート側で稼働させており、実証施設の監視画面には情報を提示していなかったが、参考のため、図資 1-30 の **A**~**C** の時点と図資 1-32 の **D**~**F** の時点の寄与量バーグラフを表示すると、図資 1-36 と図資 1-37 のようになる。図資 1-36 からは、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度、DO 濃度等に何らかの変化があることが推測され、図資 1-37 からは、I-2 系の $\text{NH}_4\text{-N}$ センサーのドリフトの可能性が強く疑われることを確認できる。



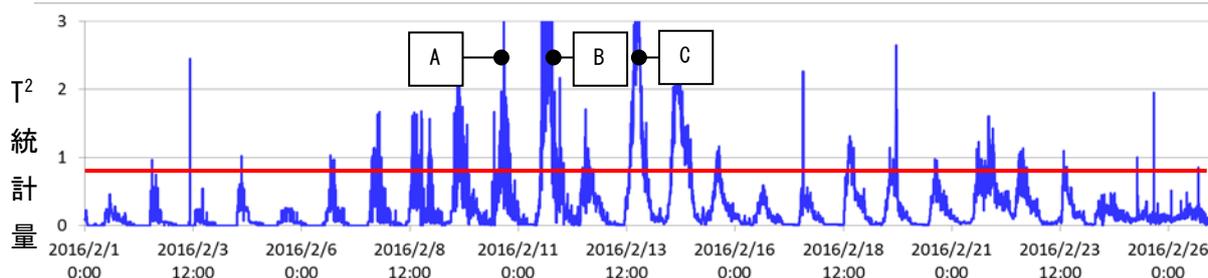
図資 1-36 時点 A~C における T² 統計量に対する寄与量



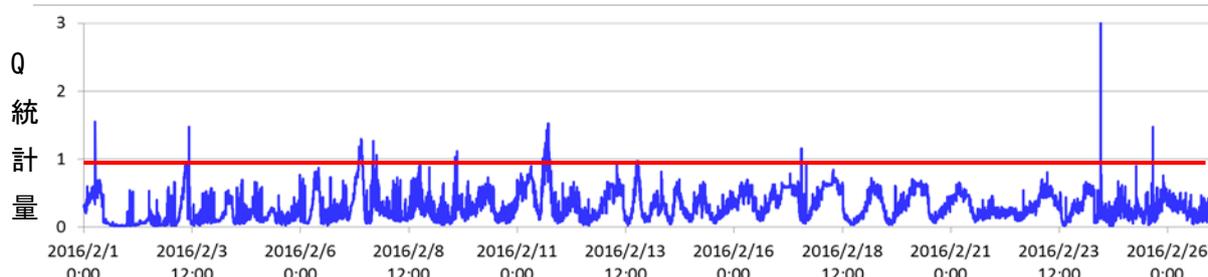
図資 1-37 時点 D~F における Q 統計量に対する寄与量

最後に、実証施設の監視画面に情報を提示し、異常兆候検出時のアラーム発報に用いた I-1 系ブロワ関連診断ユニットと水質関連診断ユニットによる結果について補足する。これらの異常診断ユニットでも、センサー診断ユニットの結果ほどわかりやすい形ではないが、上記の関連する診断結果が得られている。

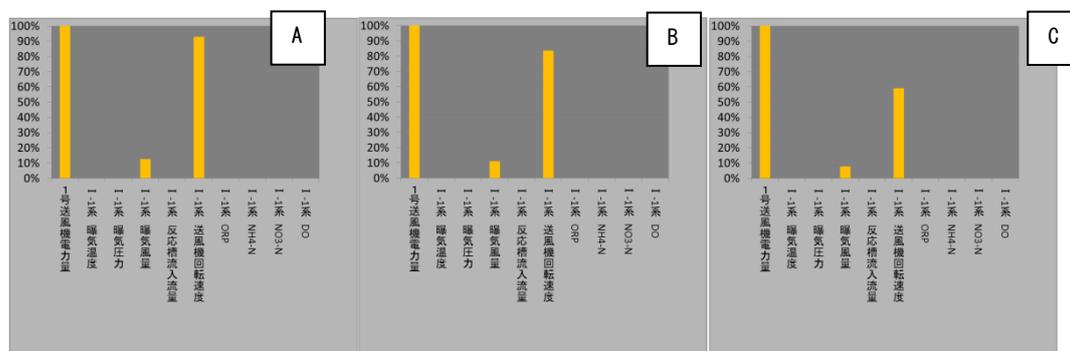
NH₄-N 濃度の水質変動に関しては、**図資 1-38** に示すように、I-1 系ブロワ関連診断ユニットの T² 統計量で顕著な異常として検出され、関連する主な変数はブロワ電力や回転数となっていた (**図資 1-40**)。これは、負荷が高い状態であることを間接的に示すものであると考えられ、実際これらの値も大きくなっていった。



図資 1-38 総合評価期間中の I-1 系ブロワ関連診断ユニットの T² 統計量

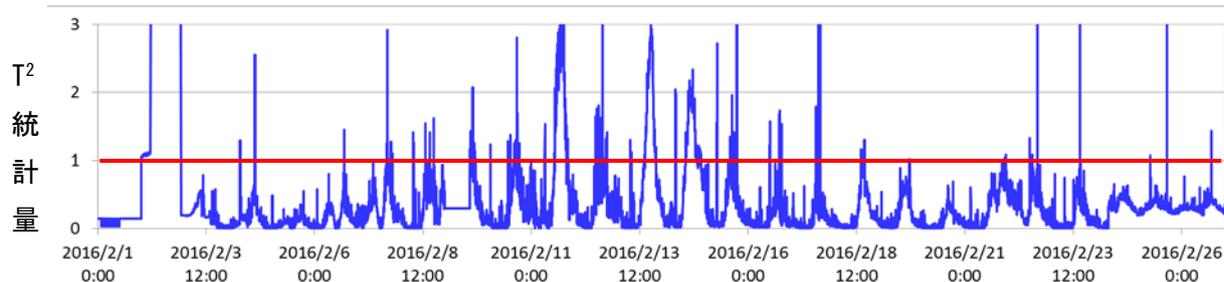


図資 1-39 総合評価期間中の I-1 系ブロワ関連診断ユニットの Q 統計量

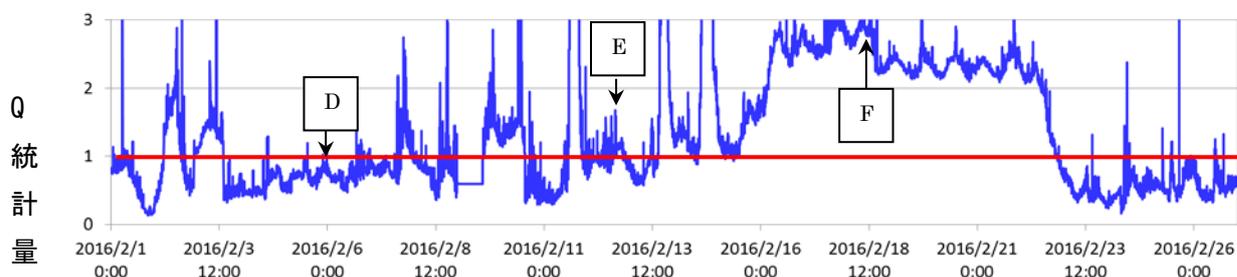


図資 1-40 時点 A~C における T² 統計量に対する寄与量 (I-1 系ブロワ関連診断ユニット)

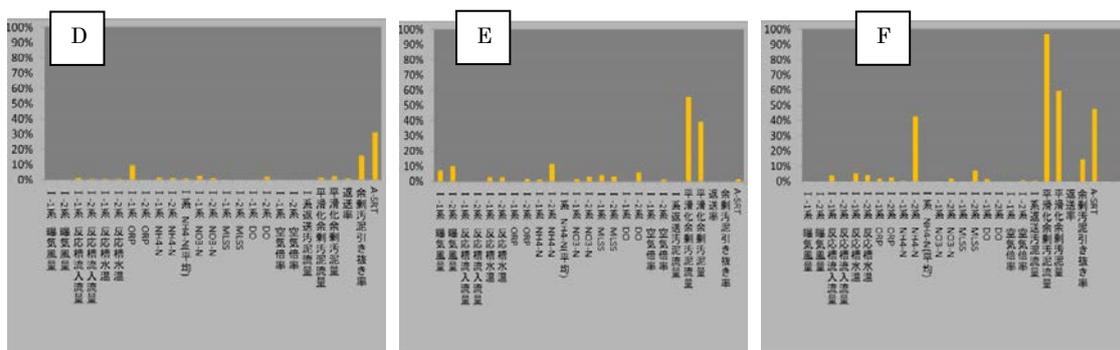
一方、I-2 系の NH₄-N センサーのドリフトについては、水質関連診断ユニットの Q 統計量で、その傾向が検出されている。図資 1-32 の **D**~**F** と同じ時点 (=図資 1-41、図資 1-42 の **D**~**F**) における寄与量バーグラフ (図資 1-43) を確認すると、**E** の時点で若干傾向が現れ、**F** の時点で比較的高い寄与量となっている。ただし、診断モデルを構築した時期 (1 月の最終週) の余剰汚泥引き抜き量や ASRT がほぼ一定であったのに対し、その後運用を変更したため、余剰汚泥引き抜き量に関連する変数の寄与量の方が高い状態となっており、I-2 系の NH₄-N センサーのドリフトを疑うには、ややわかりにくい結果となっている。



図資 1-41 総合評価期間中の水質関連診断ユニットの T² 統計量



図資 1-42 総合評価期間中の水質関連診断ユニットの Q 統計量



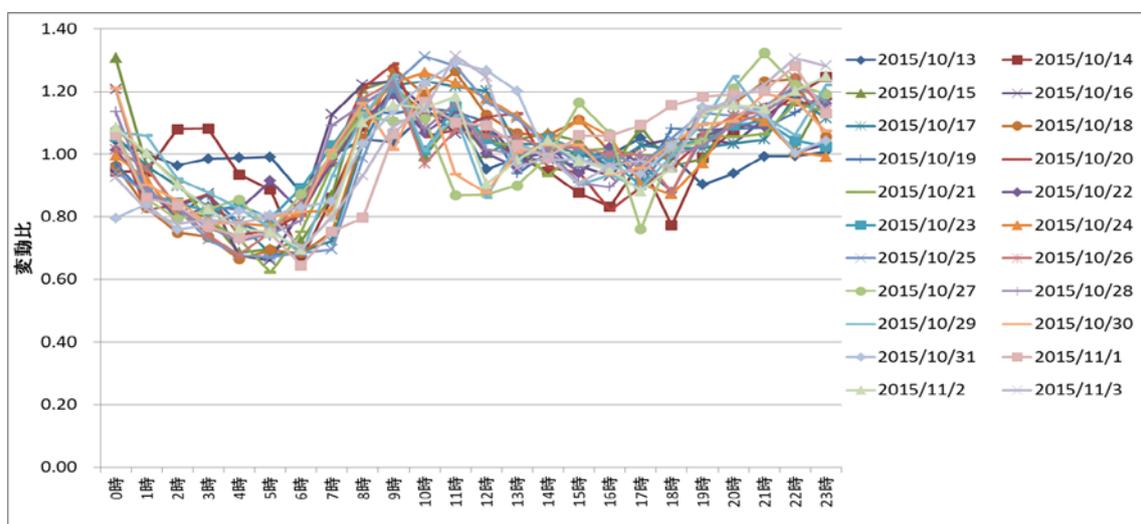
図資 1-43 時点 D~F における Q 統計量に対する寄与量（水質診断ユニット）

以上より、適切な異常診断ユニットを適用することで、硝化機能に関わる NH₄-N 濃度等に関連する異常状態を検出でき、制御目標曲線の適切な選定やセンサーの適切なタイミングでの校正に関する情報を与えることができると考えられる。

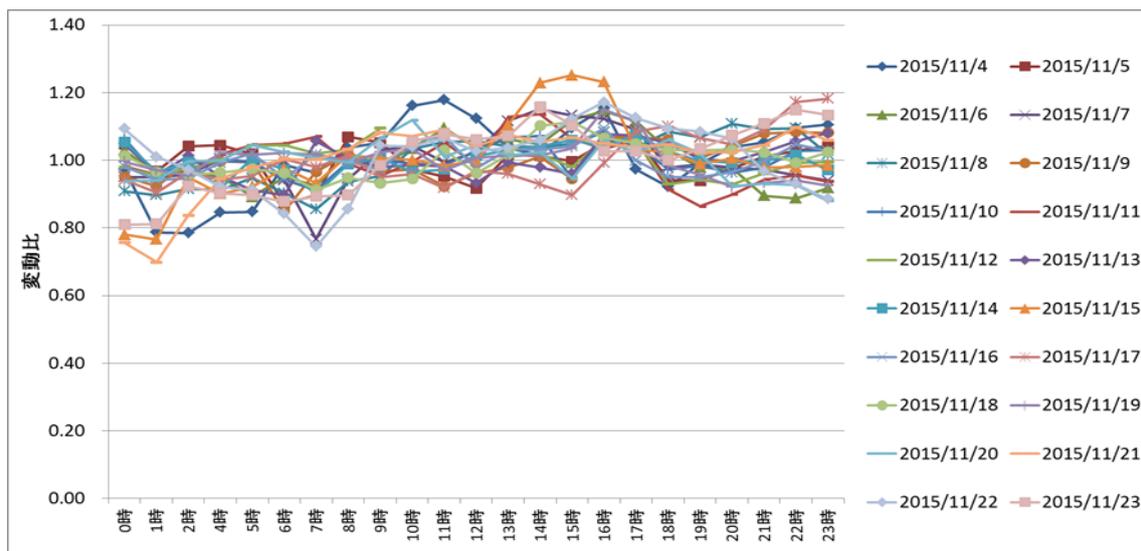
(5) 質的・量的変動に対する処理の安定性に関する結果

1) 流量調整池の運用停止期間における処理の安定性

本処理施設では、通常、流量調整池を運用することにより、反応タンクへの流入水量を平滑化しているが、2015/10/13～11/3 の期間は汚水調整池の運用を停止し、水量変動を大きくする試験を実施した。流入調整槽の運用停止期間の I-1 系流入量変動比の推移を図資 1-44 に、流入調整槽の運用を開始し、通常運用に戻した期間の I-1 系流入量変動比を図資 1-45 に示す。通常運用期間の変動比（図資 1-45）はおおよそ 0.8～1.2 であるのに対し、汚水調整池運用停止期間（図資 1-44）の変動比は 0.6～1.3 であり、流入量の変動が大きくなっていることがわかる。

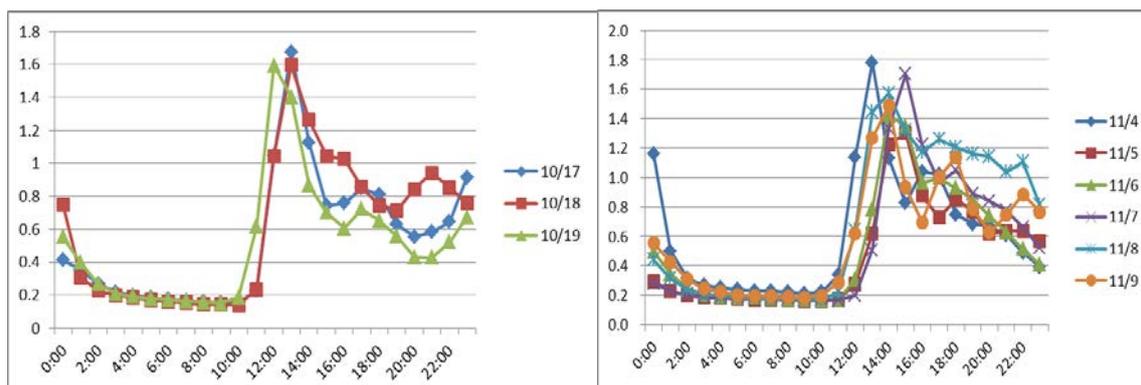


図資 1-44 流量調整槽運用停止期間（2015/10/13～11/3）の I-1 系流入量変動比



図資 1-45 流量調整槽の運用期間（通常運用）（2015/11/4～23）の I-1 系流入量変動比

これに対し、NH₄-N/DO 制御の省エネ型制御目標曲線（曲線 3）を設定した期間の NH₄-N 計測値の変動に関して、流量調整池運用停止期間、通常運用期間別に図資 1-46 に示す。水量変動の前後において、NH₄-N 計測値の変化パターンに大きな変化はなく、また、NH₄-N の日平均値についても、流量調整池運用停止時 0.52mg/L、通常運用時 0.6mg/L と大きな変化はなく、水量変動が 0.6～1.3 の範囲においては、概ね今回の評価結果とほぼ同様の性能が得られると推定された。



図資 1-46 NH₄-N/DO 制御（曲線 3）時の NH₄-N 計測値の変化

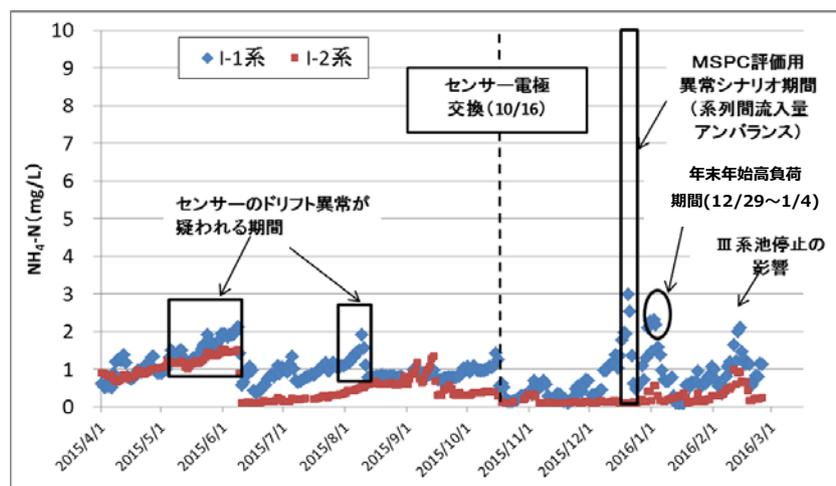
（左図：流量調整池運用停止時（電極交換後の 10/17～19 データ）、右図：流量調整池通常運用時）

2) 実証運転期間中の処理の安定性

流入水量、水温、ならびに流入水質の日平均に関して、平均値ならびに変動幅を表資 1-13 に示す。表資 1-13 に示す変動に対して、定例水質調査の結果では、実証系列（I-1 系）、対象系列（I-2 系）ともに、処理水 BOD に関しては、計画放流水質である処理水 BOD 8mg/L 以下の水質を常に達成するとともに、処理水 NH₄-N に関しては、1mg/L 以下の処理水質を常に達成でき、安定的な処理が可能であった。

表資 1-13 流入量、水温、流入水質の日平均値の平均と変動幅

項目	単位	平均値	変動幅	備考
			最小値～最大値	
I-1 系流入量	m ³ /h	112.6	96.5 ～ 135.8	オンラインセンサー
I-2 系流入量	m ³ /h	110.0	84.0 ～ 133.3	オンラインセンサー
I-1 系水温	℃	23.1	17.2 ～ 27.8	オンラインセンサー
I-2 系水温	℃	23.3	17.4 ～ 27.9	オンラインセンサー
流入 BOD	mg/L	100.7	77.0 ～ 160.0	定例調査（週 1 回）
流入 SS	mg/L	60.4	52.0 ～ 100.0	定例調査（週 1 回）
流入 T-N	mg/L	29.9	22.3 ～ 36.4	定例調査（週 1 回）
流入 NH ₄ -N	mg/L	21.8	16.0 ～ 27.0	定例調査（週 1 回）



図資 1-47 センサー設置位置における日平均 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度のトレンドグラフ

一方で、I-1 系の $\text{NH}_4\text{-N}$ 計の計測値からは、**図資 1-47** に示すように冬季の a) ~c) の期間で、センサー設置位置の日平均 $\text{NH}_4\text{-N}$ が 1.5mg/L (処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 1mg/L に相当) を超過する場合があった。

- a) 系列間流入量アンバランス期間
- b) 年末年始の高負荷期間
- c) III系の池停止直後の休祝日 (2016/2/11、13、14)

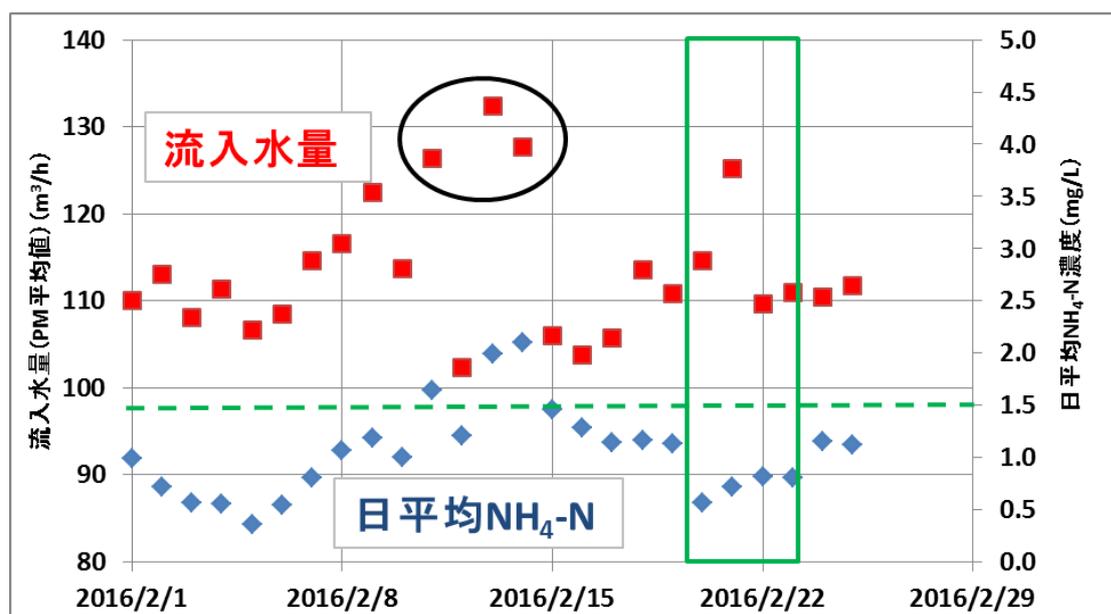
この a) ~c) の期間で $\text{NH}_4\text{-N}$ が高くなった理由に関して考察する。

a) の期間において、I-1 系では $\text{NH}_4\text{-N}/\text{DO}$ 制御を実施しており、省エネ型の制御目標曲線 (曲線 3) よりも、さらに省エネルギーを指向した制御目標曲線 (曲線 4) を設定していた。この制御目標曲線の設定に加え、MSPC 技術の系列間流入量アンバランスシナリオの評価のために、I-1 系の流入水量が通常日平均 $2,600\text{m}^3/\text{日}$ に対し、日平均 $2,900\text{m}^3/\text{日}$ 以上の流入量があった期間であった。(曲線 4) の制御目標曲線に関しては、省エネルギー効果は高いものの $2,600\text{m}^3/\text{日}$ の水量に対して、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 計設置位置での日平均 $\text{NH}_4\text{-N}$ 1.5mg/L 以下の硝化機能維持基準をぎりぎり満たす曲線であった。これらのことから、制御目標曲線として (曲線 4) を設定していたこと、流入水量が 10%以上増えたことにより、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が高くなったものと推察される。

b) の期間において、I-1 系では $\text{NH}_4\text{-N}/\text{DO}$ 制御を実施しており、省エネ型の制御目標曲線 (曲線 3) を設定していた。この期間中に採水を実施した、2016/1/4 の朝 9:00 のスポットサンプルで流入の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が 40mg/L と通常よりも高かったことが影響していると考えられる。流入の $\text{NH}_4\text{-N}/\text{SS}$ 負荷は年末前の 1 週間では、 $0.032\text{kgNH}_4\text{-N}/\text{kgSS}$ であったのに対し、2015/12/29~2016/1/4 の 1 週間は $0.048\text{kgNH}_4\text{-N}/\text{kgSS}$ となっており、このような高負荷が予想される場合には、あらかじめ制御目標曲線を水質重視型の曲線に切り替える等の対応が必要と考えられる。

c) の期間において、I-1 系では $\text{NH}_4\text{-N/DO}$ 制御を実施しており、省エネ型の制御目標曲線（曲線 3）を設定していた。Ⅲ系の池停止の影響等により、センサー設置位置における $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が 1.5mg/L を超過した日（2/11、2/13、2/14）に関しては、日平均水量の増加はそれほど顕著ではなかったが、**図資 1-48** に示すように午後の平均水量がいずれも $3,000\text{m}^3/\text{日}$ （ $=125\text{m}^3/\text{h}$ ）を超え、通常に比べ約 15% 増の水量となっていた。休祝日の流入水質に関しては、測定を行っていないが、この流入水量の増加に加え、流入水質も高くなっていた可能性が推定され、これに伴い、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高くなったものと推察される。この週末の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の悪化を MSPC 技術で検知できたことから、翌週の週末の期間（図中の□で囲った期間）を水質重視型の制御目標曲線（曲線 1）を設定して運転した。その結果、処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を改善することができた。

今回のような $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の悪化は、センサーの上下限の管理限界値に比べると小さな変動であり、従来型の異常検知システムでは検知できないレベルであるが、MSPC 技術をオンラインで適用しながら運転することにより、 $\text{NH}_4\text{-N/DO}$ 制御の硝化機能の維持効果を安定化することが可能となる。



（□で囲った期間は、水質重視型の制御目標曲線（曲線 1）を、それ以外の期間は省エネ型の制御目標曲線（曲線 3）をそれぞれ設定し運転）

図資 1-48 I-1 系の流入水量の PM 平均値と日平均 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度のトレンド

大部分の期間において安定した処理が可能であったが、週末、年末・年始に $\text{NH}_4\text{-N}$ が高くなる傾向にあった。流入水量としては、通常処理 $2,600\text{m}^3/\text{日}$ に対して、約 10~15% 増で、かつ流入する $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高いと推測される場合に悪化する傾向がわかった。

今回の実証試験で得られた知見より、年末・年始等の長期連休期間や冬季の週末で高負荷が予想されるような期間や MSPC 技術により $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の悪化傾向が事前に予想できるケースでは、制御目標曲線の管理方法として、制御目標曲線を水質重視型で設定し、硝化機能の維持を行う運用にする等が必要になると考えられる。

(6) N₂O 排出量に関する調査結果

I-1 系、I-2 系それぞれの反応タンク第 1～第 4 区画からガスを採取し、採取したガス中の N₂O 濃度をガスクロマトグラフにより測定することで、反応タンクからの N₂O 排出状況について、調査を行った結果を示す。

1) 調査計画

調査は、予備調査 1 回、本調査 2 回を実施することとした。調査項目に関して**表資 1-14**に示す。反応タンクからの N₂O 排出状況を窒素の処理状況と共に把握するために、ガスを採取するとともに反応タンク流入水 (AT 流入水) ならびに処理水、反応タンクの第 1～第 4 区画の NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N の水質調査も併せて実施することとした。なお、予備調査、本調査日ともに I-1 系は NH₄-N/DO 制御の省エネ型制御目標曲線 (曲線 3) とし、I-2 系は DO 一定制御で運転を行い、調査を実施した。

予備調査は 2015/9/8 に実施し、ガス試料、溶存態 N₂O 試料、AT プロファイル試料について、13:00 に実施し、定例水質調査についても、同日に実施した。予備調査は実証施設における N₂O の排出状況の把握と液中 N₂O の調査頻度、調査箇所を決定するために行った。

本調査は、2015/9/28、2016/1/19 の 2 回を予定し、**表資 1-15** に示す試料および頻度で採水・採ガスする計画とした。予備調査の結果、実証技術が N₂O 排出状況に与えることが多いと判断した場合には、採ガス頻度や溶存態 N₂O 試料の採取頻度を増やす等の計画の見直しを実施する予定とした。

表資 1-14 N₂O 排出状況調査の調査計画

サンプル	調査項目	AT 流入水	I-1 系および I-2 系						返送 汚泥
			第 1 区画	第 2 区画	第 3 区画	第 4 区画	処理 水	活性 汚泥	
ガス試料	N ₂ O		○	○	○	○			
溶存態 N ₂ O 試料	N ₂ O		○	○	○	○			
AT プロファイル 試料	NH ₄ -N、NO ₃ -N、 NO ₂ -N、PO ₄ -P		○	○	○	○			
定例調査試料	NH ₄ -N、NO ₃ -N、 NO ₂ -N、ケルダール 窒素、T-P、汚泥 中の窒素、リン	○					○	○	○
通日調査試料	NH ₄ -N、NO ₃ -N、 NO ₂ -N、ケルダール 窒素、PO ₄ -P	○					○		

表資 1-15 本調査時の試料採取計画

サンプル	調査項目	9:00	13:00	17:00	21:00
ガス試料	N ₂ O	○	○	○	○
溶存態 N ₂ O 試料	N ₂ O	○		○	
AT プロファイル試料	NH ₄ -N、NO ₃ -N、NO ₂ -N、PO ₄ -P	○	○	○	

N₂O 排出量は、調査時に採取したガスの N₂O 濃度分析結果から I-1 系、I-2 系別に、反応タンクの第 1～第 4 区画から排出される N₂O 排出量をそれぞれ演算し、第 1～第 4 区画からの排出量を合算することで、N₂O 排出量 [gN₂O/日] を算出する。本調査の際には、**表資 1-15** に示すように 4 回/日のガス採取を行う計画であるが、4 回の調査の平均値を N₂O 排出量とし、その値を下水処理量 [m³/日] で割ることで、N₂O 排出係数 (1m³ の下水処理あたりの N₂O 排出量) を算出する。

調査時には、I-1 系の結果を NH₄-N/DO 制御、I-2 系を DO 制御することで制御方式別の排出係数の算出を行い、比較を行う。また、排出係数の評価に当たっては、標準的な処理施設との比較のために、「日本国温室効果ガスインベントリ報告書 (2015 年 4 月)」に記載の N₂O 排出係数との比較により、一般的な下水処理施設と比較した際の N₂O 排出量の大小関係について評価を行うこととした。

$$L_a = \sum x \times 10^{-6} \times \frac{1}{22.4 \times \frac{c+273}{273} \times 10^{-3}} \times Q_n \times 24 \times 44 \quad \text{式 5-1}$$

ここで、各記号は、以下のとおりである。

L_a : N₂O 排出量 [gN₂O/日]

x : ガス中の N₂O 測定値 [ppm]

c : サンプルング時の気温 [°C]

Q_n : 第 n 区画の曝気風量 [m³/h] ($n=1, 2, 3, 4$)

なお、上記の式の第 n 区画の曝気風量 Q_n に関しては、ガス試料のサンプルング時に現場の各区画に設置されたフロート式の曝気風量計の値を読み取ることでデータを取得した。

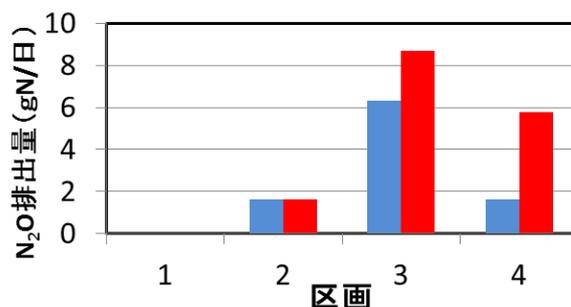
2) 予備調査結果 (2015/9/8 13:00)

予備調査時の N_2O ガス濃度、水質濃度の分析結果を**表資 1-16**に示す。各区画へのガス発生量とガス中 N_2O 濃度から求めた N_2O 排出量を**図資 1-49**に示す。**図資 1-49**より、いずれのケースも第3区画からの排出量が最も大きいことがわかる。また、**表資 1-16**に示すようにガス中 N_2O 濃度は、1.0~3.3ppm と低い濃度であった。

表資 1-16 N_2O 排出量の予備調査結果 (2015/9/8 実施)

項目	単位	I-1系				I-2系			
		第1区画	第2区画	第3区画	第4区画	第1区画	第2区画	第3区画	第4区画
気温	℃	25.5	25.5	25.5	26.0	25.5	25.5	25.5	26.0
ガス中 N_2O 濃度	ppm	検出せず	1	2.1	1	検出せず	1	3.3	1.4
水温	℃	26.6	26.4	26.4	26.5	26.1	26.2	26.1	26.1
pH	—	6.76	6.68	6.26	6.12	6.72	6.59	6.25	6.08
DO	mg/L	0	0.2	0.5	0.7	0	0.1	0.4	2.3
$\text{NH}_4\text{-N}$	mg/L	12	11	1.5	<0.1	15	8.9	3.0	<0.1
$\text{NO}_2\text{-N}$	mg/L	0.3	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	0.3	0.1	<0.1
$\text{NO}_3\text{-N}$	mg/L	0.8	0.2	9.2	11	<0.1	2.0	8.7	12
液中 N_2O 濃度	mg/L	0.0066	0.0040	0.0070	0.0073	0.0033	0.0040	0.0078	0.0049

* ガス中の N_2O の検出限界濃度は、0.5ppm 以下

図資 1-49 N_2O 排出量の予備調査結果 (2015/9/8 実施)

図資 1-49の結果に基づいて算出した N_2O 排出係数 (1m^3 の下水処理あたりの N_2O 排出量)は、「日本国温室効果ガスインベントリ報告書 (2015年4月)」にて報告されている標準活性汚泥法の排出係数 $142\text{mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ 下水と比較すると、今回調査結果の排出係数はI-1系 $5.8\text{mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ 下水、I-2系 $9.7\text{mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ 下水であり、非常に小さく、硝化を伴う高度処理方式の数値と同等レベルであった。これは、宝満川浄化センターでは、両系列共にほぼ完全硝化が実現できていることが要因となっていると推定される。

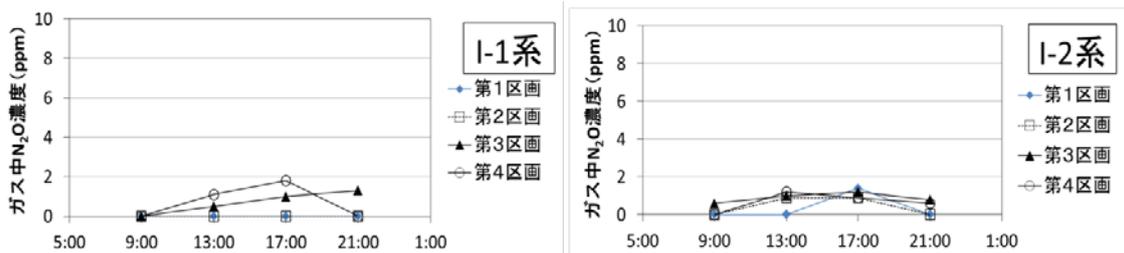
いずれの系列ともに採取ガスの N_2O ガス濃度が低く、以下のことがわかった。

- ①硝化状況が良好であることに起因し、 N_2O 排出係数は非常に小さく、 CO_2 排出量をベースとした温室効果ガスの排出量算定に大きな影響を与えない可能性が高い。
- ② $\text{NH}_4\text{-N/DO}$ 制御では、低 DO 運転であることから、DO 一定制御に比べ、 N_2O の排出量が増加する懸念があったが、その影響は小さい可能性が高い。

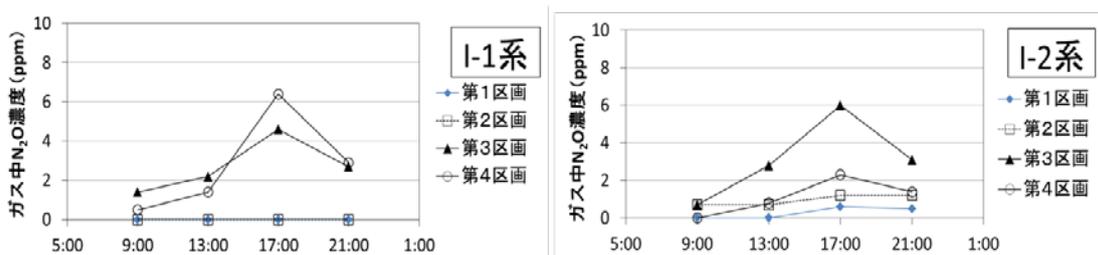
この結果を受けて、本調査に関しては、追加の詳細調査を行う必要性は低く、当初の計画通りで十分と判断し、本調査を実施した。

3) 本調査結果 (2015/9/29 (第1回調査)、2016/1/19 (第2回調査))

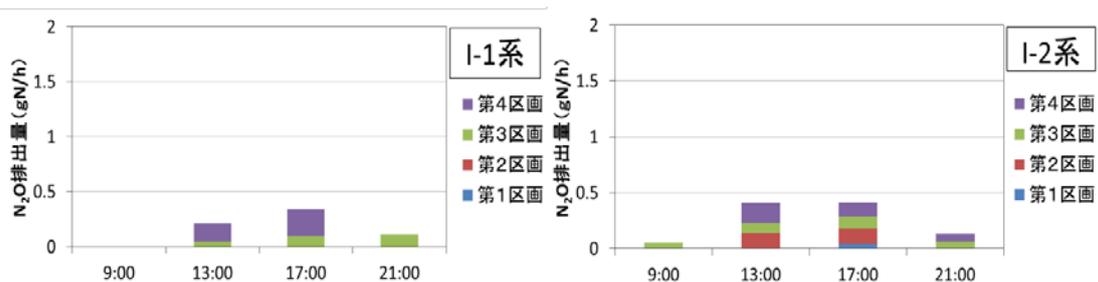
2015/9/29 の第1回調査、2016/1/19 の第2回調査に関して、ガス中の N_2O 濃度をそれぞれ**図資 1-50**、**図資 1-51** に示す。各区画のガス濃度に各区画の曝気風量を乗じて求めたガス中の N_2O 排出量をそれぞれ**図資 1-52**、**図資 1-53** に示す。傾向として、第1回調査に比べ、第2回調査において、 N_2O 排出量が I-1 系、I-2 系ともに多いこと、時間経過で見ると、13:00、17:00 の排出量が多い傾向にあった。この時間傾向は、流入水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が 9:00~17:00 にかけて高いことが影響していると考えられる。また 19:00 以降、流入水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は小さくなっていくため、 N_2O の排出量は小さくなる方向になると考えられる。このため、今回調査した時間の平均値から N_2O 排出係数を求めることで、排出係数が過小に評価される可能性は低いと考えられる。



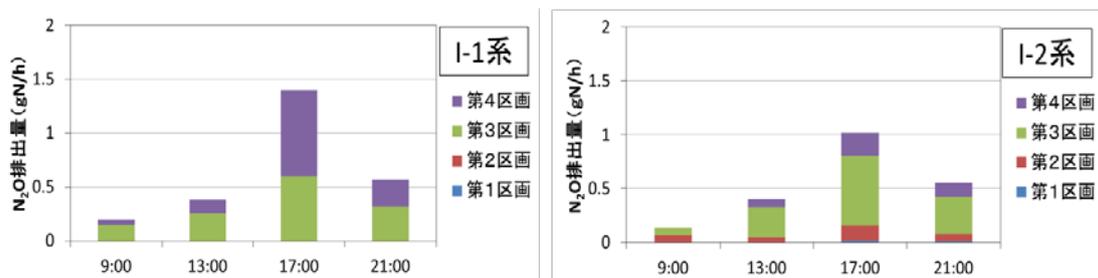
図資 1-50 ガス中 N₂O 濃度の調査結果 (第 1 回本調査 (2015/9/29 実施))



図資 1-51 ガス中 N₂O 濃度の調査結果 (第 2 回本調査 (2016/1/19 実施))

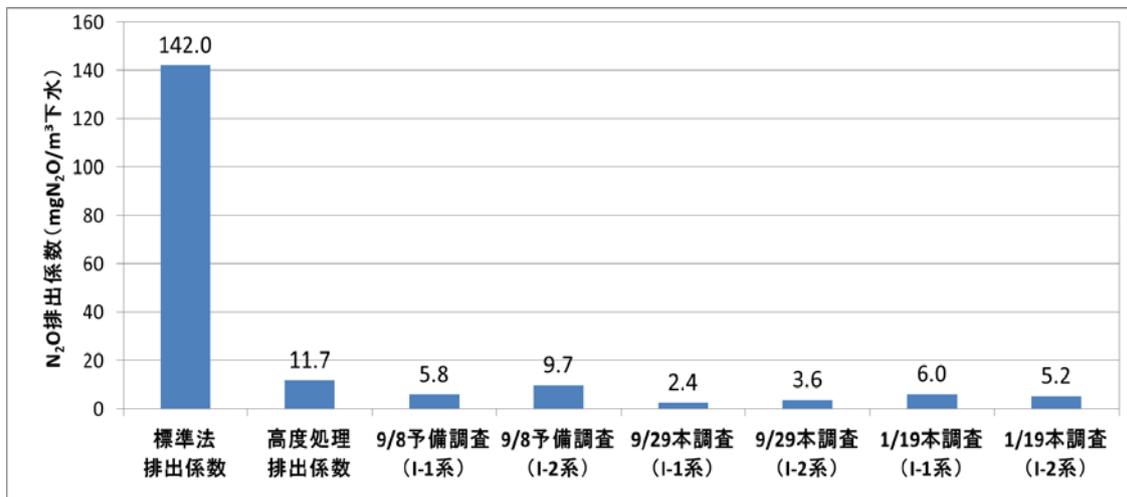


図資 1-52 N₂O 排出量の調査結果 (第 1 回本調査 (2015/9/29 実施))



図資 1-53 N₂O 排出量の調査結果 (第 2 回本調査 (2016/1/19 実施))

図資 1-52、図資 1-53 に示す調査結果に基づいて、N₂O 排出係数を算出した結果を図資 1-54 に示す。予備調査、2 回の本調査全てにおいて、I-1 系、I-2 系ともに N₂O 排出係数は、標準活性汚泥法の公表値に比べ、非常に小さく、硝化を伴う高度処理施設並みの数値と同等レベルに低いことが分かった。また、N₂O 排出係数の大小関係については、予備調査ならびに第 1 回本調査においては NH₄-N/DO 制御を実施した I-1 系の方が小さい一方で、第 2 回本調査では I-1 系の排出係数が大きくなった。2 回の本調査の平均値をとると、I-1 系 4.2mgN₂O/m³ 下水、I-2 系 4.4mgN₂O/m³ 下水 となり、大きな差はなかった。



(標準法・高度処理 (A₂O 法、循環式硝化脱窒法) の排出係数は、
「日本国温室効果ガスインベントリ報告書 (2015 年 4 月)」記載の報告値)

図資 1-54 N₂O 排出係数の評価結果

予備調査、2 回の本調査の結果から、以下のことがわかった。

- 1) 排出係数は標準活性汚泥法の排出係数と比べ非常に小さく、硝化を伴う高度処理施設並みの数値と同等レベルに低い。
- 2) 実証技術導入により N₂O 排出係数が増加することが懸念されたが、その影響は小さい。

よって、温室効果ガス低減効果の算出においては、「実証技術と DO 一定制御の N₂O 排出係数に変化はない」として、温室効果ガスとしては、CO₂ 排出量のみを考慮することとした。