

【国際会議発表論文：日本語訳】

4-2-1 温室効果ガスの削減と水質改善を両立するための新たな 下水処理施設の維持管理の取組

施設管理部 環境管理課 森川 拓未
(現 計画調整部 計画課)

要約

東京都下水道局は、汚水の浄化のため東京都内の年間電力使用量の約1%を消費していることから、これまでも温室効果ガス削減のために電力削減に努めてきた。更に、東日本大震災後の原子力発電所の停止と火力発電の燃料高騰による大幅な電力料金の値上げ等により、更なる電力削減が求められることとなった。しかしながら、過度の電力削減は水質を悪化させてしまう。そこで当局では、このようなトレードオフの関係にある水質改善と電力削減を両立させるためのツールとして「二軸管理」手法を考案・導入し、運用している。

キーワード

operation, total nitrogen concentration, electric power concentration

1. 取組の背景

窒素は閉鎖性公共用水域の富栄養化要因の一つであるため、下水処理場からの放流水中の窒素濃度は積極的に低減していく必要がある。生物学的窒素除去を行うためには、下水中のアンモニアを硝酸まで硝化する必要がある、このプロセスには大量の送風を必要とする。そのため、硝化を行うと送風機の電力消費により大量の温室効果ガスの排出につながってしまう。東京都下水道局の使用電力量は都内の全使用電力の約1%（約9.8億kWh/年）を占めており、水質改善と共に電力使用量の削減すなわち温室効果ガス削減を計画的に進めていく必要がある。さらに、2011年3月に発生した東日本大震災後の原子力発電所の停止と火力発電の燃料高騰による大幅な電力料金の値上げ等に対応するため、エネルギー使用量の更なる削減が求められている。

各下水処理場（以下「処理場」という）においては、省エネ機器の導入、運転管理の工夫や高度処理の導入など従来から処理水質の改善（以下「水質改善」という）と省エネルギー（以下「省エネ」という）に取り組んでいた。両者の改善が進んだことで、省エネ対策を過度に進めると、放流水質が悪化する懸念が生じるようになった。そのため、より細やかな管理が必要になり、水質改善と省エネをバランスよく管理する手法が求められるようになってきた。変動する流入水量や流入負荷量に適切に対応した運転を行い、常に一定以上の水質を確保するとともに更なる送風電力量削減を達成するという困難な課題に取り組むための現状把握ツールとして、二軸管理手法を導入した。本論文では、二軸管理手法の運用方法とその結果について報告する。

2. 二軸管理手法の概要と活用方法

2.1 二軸管理手法の概要

二軸管理手法は、処理場からの放流水質と電力使用量をそれぞれ縦軸、横軸に取ったグラフを作成することにより、運転改善や設備更新の成果を視覚化し、その成果を評価する手法である。処理場からの放流水質と電力使用量の代表として、放流水中の全窒素濃度（規制項目）と送風電力量原単位の2項目を管理に適用した。前年度又は前月の実績値を始点、当該年度又は当月の実績値を終点とするベクトルを描き、そのベクトルが左下を向くよう運転管理の工夫や省エネ設備導入の選定を行うことで、水質改善と省エネの両立を図った。

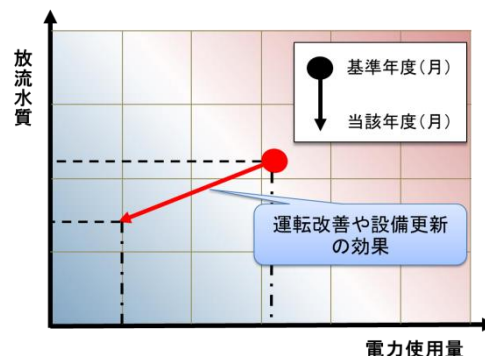


図1 二軸管理グラフのイメージ

2.2 二軸管理の運用と評価

我々は、水質改善と省エネの両立に向けた取組みの結果やセンターの置かれた状況を確認し改善策を考えていく手順に、PDCAサイクルを取り入れた。具体的には、図2で示した流れで管理することで、運転改善や設備改善を継続して行い、両立のスパイラルアップを進めている。

処理場毎に機器の更新効果や運転改善効果を最大限引き出すため、年度当初に全窒素濃度と送風電力量原単位の目標を設定、取り組むこととした。

各処理場においては、全窒素濃度、送風電力量原単位の両者がともに改善する方向である左下に向くよう取組み、定期的に作成したグラフを基に、その実績を分析、評価し、取組みを改善した。評価の際には、各処理場のベクトルの長さや方向に着目し、気象条件や季節変動のほか、各処理場で行う運転の工夫や設備更新効果等、どの要因や運転手法が影響を与えたのかを検討した。また、目標値とのずれを百分率で計算し、適宜取組み内容を修正した。

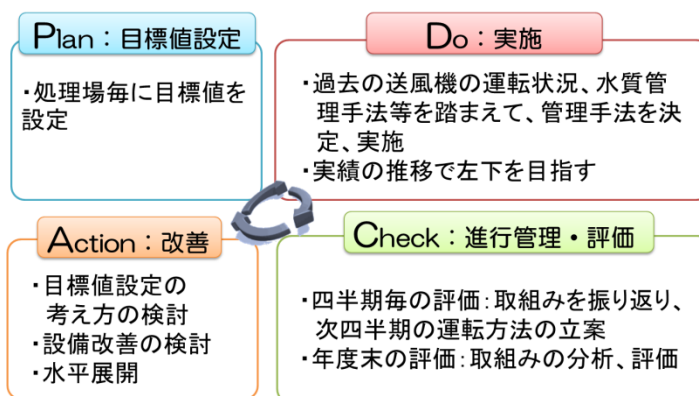


図2 二軸管理の進め方

2.3 二軸管理グラフの作成方法

今回は、東京区部エリアの処理場13か所を対象にした取組みを報告する。処理場の各放流口からの放流水全窒素濃度およびセンター全体の送風機電力量の月合計値、6か月合計値、年合計値を集計し、それぞれについて処理場全体の加重平均全窒素濃度および単位処理水量当たりの原単位を算出した。計算した全窒素濃度、送風電力量原単位の変化をベクトルで結び、各処理場のベクトルの長さや方向について評価した。また、すべての処理場のデータを一枚に集約し、その位置関係を評価した。

3. 目標値の設定と目標達成に向けた取り組みについて

3.1 目標値の設定

二軸管理は、処理場毎に機器の更新効果や運転改善効果を最大限引き出すため、全窒素濃度と送風電力量原単位に目標を設定し、取り組んでいる。例えば 2014 年度の目標設定の際には、2013 年度中に行われた工事や機器故障等、特別な事情による全窒素濃度や送風電力量原単位の悪化分（上昇分）を定量化し、その影響を 2013 年度実績から差し引いた。これに、2014 年度に見込まれる機器の更新や運転改善による全窒素濃度や送風電力量原単位の向上分（減少分）と、予定されている工事による悪化分（上昇分）をリストアップし、これらを反映させて具体的な目標値を設定した。

表 1 に目標設定の具体例を示す。このセンターでは、2013 年度に工事による反応槽の停止があり、その影響で全窒素が 0.1mg/L、送風電力量原単位が 0.004kWh/m³ 悪化（上昇）した。この工事は 2013 年度中に完了しており、2014 年度にはこの悪影響はなくなる。そこで目標値設定の際には、2013 年度の年間実績値（全窒素 10.6mg/L、送風電力量原単位 0.111kWh/m³）からこの値（全窒素 0.1mg/L、送風電力量原単位 0.004kWh/m³）をそれぞれ差し引いた（全窒素 10.6－0.1mg/L、送風電力量原単位 0.111－0.004kWh/m³）。また、このセンターでは 2013 年度中に反応槽散気設備が省エネ型の微細気泡散気装置に更新され、2014 年度はこの効果により 2013 年度実績と比べて送風電力量原単位 0.001 kWh/m³ の低減が可能であると判断できた。そこで、目標値設定の際にはさらにこの数字を上記の計算値から差し引いた（全窒素送風電力量原単位 0.107－0.001kWh/m³）。一方、全窒素濃度については、好気槽一部の送風量を制限し、脱窒を促すことで全窒素濃度が 0.5mg/L 低減できるが、2014 年度に予定されている再構築工事に伴う反応槽の停止により全窒素濃度が 0.2mg/L 悪化すると判断し、以上の項目を足し合わせ、目標値を設定した（全窒素 10.5－0.5＋0.2mg/L）。

表 1 目標設定の一例

項目		効果・影響		
		送風電力量原単位 (kWh/m ³)	全窒素(mg/L)	
2013 年度	年度平均値		0.111	10.6
	実績に影響を与えた工事、機器故障	工事による反応槽停止	-0.004	-0.1
	特別な事情を除いた値		0.107	10.5
2014 年度	省エネ機器への更新	微細気泡散気装置の導入	-0.001	
	新たな運転の工夫	好気槽一部制限曝気		-0.5
	目標設定に当たって考慮する工事、機器故障	工事による反応槽停止		+0.2
目標値		0.106	10.2	

3.2 二軸管理の運用結果

目標値を達成するため、各処理場では二軸管理グラフを月ごとに作成し、取り組み成果を評価した。また、各処理場の運転条件の変更履歴や取り組み内容を四半期ごとに集計し、

ベクトルの評価の参考とした。これを基に、ベクトルの方向性を評価し、その原因が何であるかを評価した。

3.2.1 各処理場の取り組み成果の解析結果

当該年度の管理状況（結果）を把握するため過去の平均値と比較し、2014年度のベクトルの位置、方向や長さが大きく異なる場合には、特殊な処理条件や影響があったと推察した。図3～5に、特徴的であった例を示す。図中の赤は2014年度各月の全窒素濃度および送風電力量原単位の実績値を、青は過去5ヵ年（2009年度から2013年度）の月別平均値を、破線は年度末目標値を示している。

図3は降雨の影響を受けたと考えられる例である。図中赤は2014年4月から6月の結果を、青は4月から6月の過去5ヵ年平均値を示している。過去5ヵ年の傾向では、4月から6月にかけて全窒素濃度が低下していくが、送風電力量原単位は大きく変化していない（青矢印）。一方、2014年度の結果は、5月から6月にかけて送風電力量原単位が大きく低下することでベクトルが大きく左下に向いており、過去平均値と比較して方向と長さが大きく異なっている（赤矢印）。これは6月に例年の3.8倍の降雨量があり、その影響を受けたと分析できた。東京区部では合流式下水道である場合が多く、降雨時に雨水が大量にセンターに流入する。この影響により送風電力量原単位が大きく低減することが確認できた。

図4は、脱窒促進運転の効果が出たと考えられる事例である。図中赤は2014年10月から12月の結果を、青は10月から12月の過去5ヵ年平均値を示している。この例の過去5ヵ年の傾向では、10月から12月にかけて全窒素濃度および送風電力量原単位がともに増加することでベクトルが右上に移行する（青矢印）。2014年度では、全窒素濃度が低下することでベクトルが全体的に下に位置していた（赤矢印）。この処理場では、好気槽一部の送風量を制限し、脱窒を促進する運転を試みた。その結果、全窒素濃度が低下したと考えられた。この好事例は、次年度以降の対象槽拡大や他処理場への水平展開を進めている。

図5は、工事の影響を受けたと考えられる例である。図中赤は2014年10月から12月の結果を、青は10月から12月の過去5ヵ年平均値を示している。過去5ヵ年の傾向では、10月から12月にかけて全窒素濃度および送風電力量原単位がともに増加することでベクトルは右上方向に推移している（青矢印）。一方、例年の結果と比較すると、2014年度の結果ではベクトルの長さ、方向および位置が大きく異なっていた。特に、2014年度では11月から12月にかけて全窒素濃度が大きく増加した（赤矢印）。この事例の処理場では、11月以降、工事に伴う施設停止により処理能力が低下し、硝化が停滞した。そのため、硝化の停滞により送風電力量は例年と比べ低減したものの、水質に悪影響が出たため、ベクトルが大きく上方向を向いたと分析できた。

図6は、設備更新効果が発現されたと考えられる事例である。図中赤は2014年10月から12月の結果を、青は10月から12月の過去5ヵ年平均値を示している。10月から12月にかけて全窒素濃度および送風電力量原単位がともに上昇し、右上方向に推移する傾向は過去平均値および2014年度でも変わらなかった（青、赤矢印）。一方、過去5ヵ年平均値および2014年度の同月の結果を比較すると、2014年度の結果では送風電力量原単位が低下しており、ベクトルの位置が左方向にスライドしている。この処理場では今年度春から順次散気設備を省エネ型に更新しており、8月下旬に当該反応槽4槽中2槽、11月からは4槽中3槽で運用を開始した。この設備更新の効果をいかに発揮したことが原因で

あると分析できた。また、この効果により、送風電力量原単位は年間で 0.007kWh/低下した。

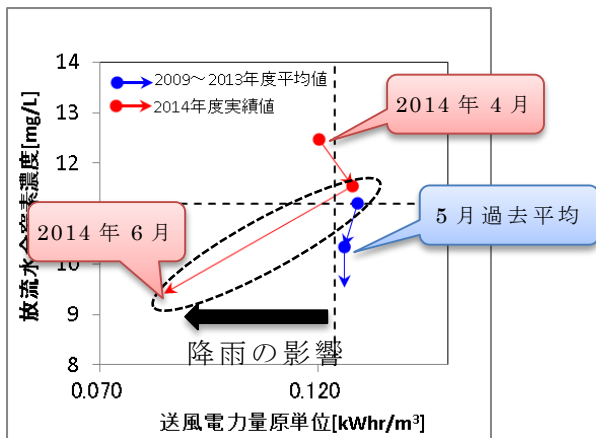


図3 降雨の影響を受けた例

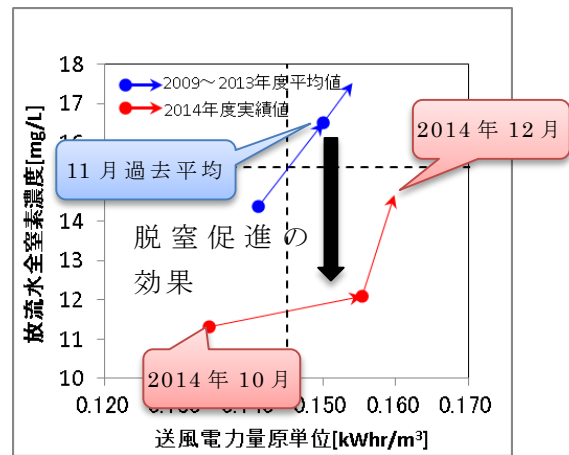


図4 脱窒促進の効果が出た例

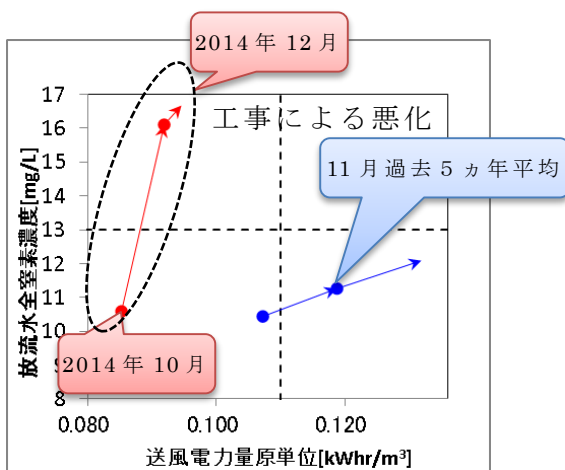


図5 工事の影響を受けた例

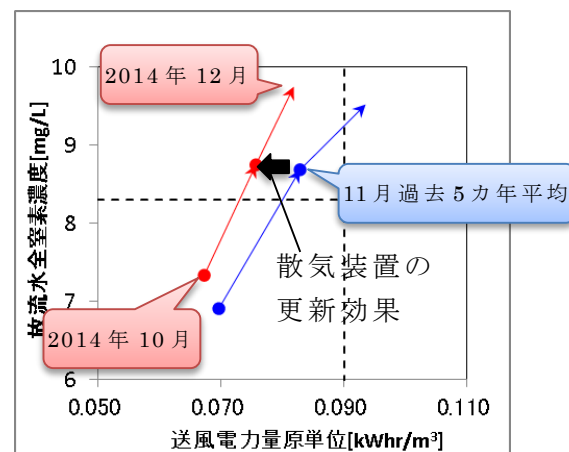


図6 設備更新効果が発揮された例

3.2.3 目標値達成に向けた取り組み結果

各処理場では、定期的に二軸管理グラフの動きや目標値とのずれを確認し、適宜運転改善を進めている。図7から11は、各センターの目標値を原点に取り、各時点における全窒素と送風電力量原単位の累積値と目標値とのずれを百分率で示したものである。図7は2013年度末時点での目標値とのずれを示したものである。図中A処理場では、年度末には目標値よりも送風電力量原単位を4.0%多く低減することに成功したものの、全窒素は年度末時点で目標よりも17%高くなり、水質改善と電力削減のバランスを取ることができなかった。その反省から、2014年度は水質をより改善する目標を掲げ、運転改善を行った。図8は2014年4月末時点、図9は2014年9月時点、図10は2015年3月時点の累積値と目標値とのずれを示したものである。2014年4月、9月末時点では送風電力量原単位が高い傾向にあったものの、DO設定値を低下させつつMLSSを例年より高めにするすることで、送風電力量原単位の上昇を最小限に抑えながら適宜硝化と脱窒を維持した。その結果、年

度末には全窒素濃度 3.8%、送風電力量 4.0%目標よりも多く低減することができ、水質改善と省エネの両立を図ることができた（図 8～10）。

目標値とのずれを視覚化することで、水質改善と送風電力量原単位の低減のどちらに重点を置いて取り組めばよいのかが明確化し、水質改善と省エネの両立についての動機づけを図ることが容易になった。

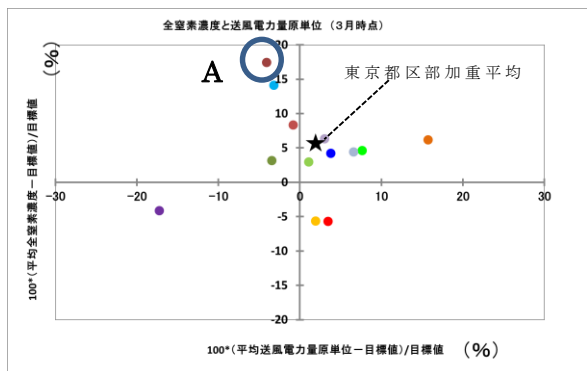


図 7 2014年3月時点での目標値とのずれ

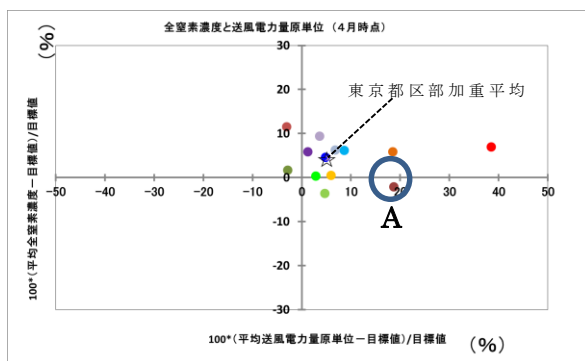


図 8 2014年4月時点での目標値とのずれ

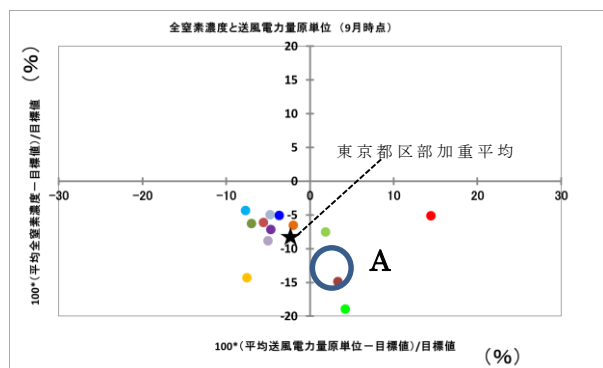


図 9 2014年9月時点での目標値とのずれ

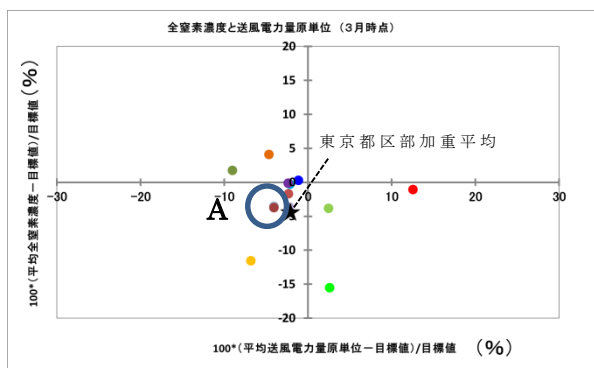


図 10 2015年3月時点での目標値とのずれ

3.2.4 処理場間の比較

次に各処理場の 2014 年度年間実績を一覧にし、比較を行った。図 11 に、2013 年度実績を始点、2014 年度実績を終点とした全窒素濃度と送風電力量原単位の結果を示す。各処理場のベクトルを見ると、始点の位置は様々であり処理場独特の特色があることがわかる。これらの位置の違いは各処理場の規模や流入水質、設備構造や反応時間の違い等を反映していると考えられた。年間の取組みの結果、東京都区部の加重平均で送風電力量原単位は $0.117\text{kWh}/\text{m}^3$ から $0.109\text{kWh}/\text{m}^3$ に、全窒素濃度は $11.9\text{mg}/\text{L}$ から $11.3\text{mg}/\text{L}$ に改善した。処理場個別に見ると、ベクトルは様々な方向を向いている。例えば、図中の A は、運転管理の工夫というソフト対策により、過度な硝化を進めず脱窒を促すことで水質改善できたと評価される好事例である。また、B はハード対策である設備改善として散気板更新を行った効果をいかに発揮し、送風電力量原単位を改善した事例である。

処理場個別の評価では A は改善されているが、処理場間のベクトルの位置を比較すると、相対的に全窒素濃度、送風電力量原単位共に区部加重平均を上回っている。そこで今後、積極的にハード、ソフト対策を進めていくこととした。

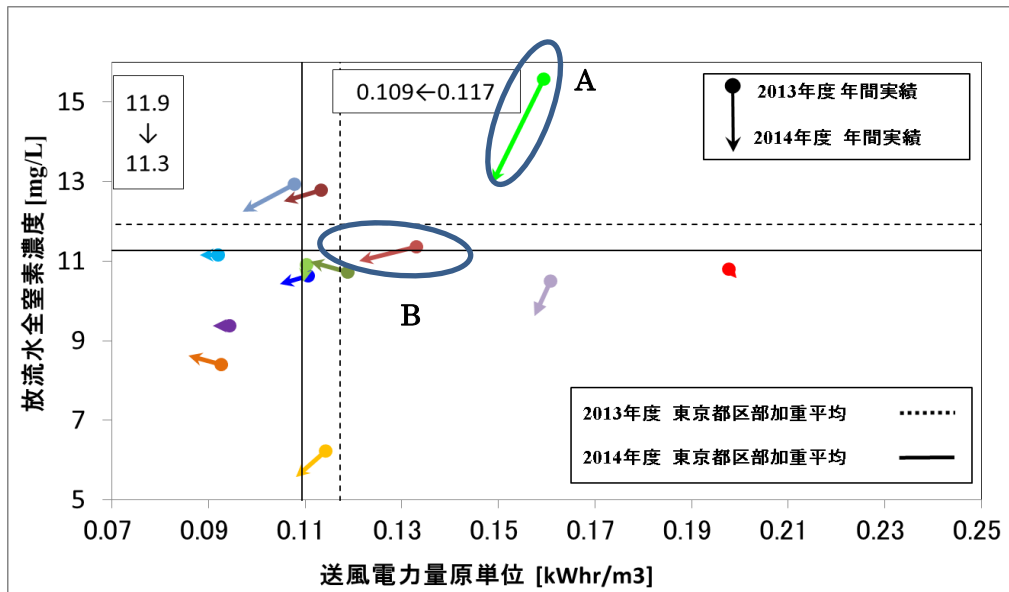


図 11 2013 年度と 2014 年度の比較

4. 結論

以上のように、全窒素濃度と送風電力量原単位の推移を視覚化したベクトルを描くことで、設備改善や運転改善の工夫の効果が明確に把握できるようになった。また、処理場毎に目標値を設定し、目標設定に向けて適宜運転条件の変更を行っていくことで、水質改善と省エネの両立への意識づけが図られたことにより、取り組みが進みやすくなった。

東京都下水道局では、良好な水環境と環境負荷の少ない都市の実現に貢献していくため、今後もこの二軸管理手法を更に改良、発展させながら、水質改善と電力削減、ひいては水質改善と温室効果ガス削減の両立に向けた取組みを進めていく。