

水処理施設の逐次電力モニタリングによる 電力観測と線形計画法による最適運用の検討

牧誠也¹・平野勇二郎²・中久保豊彦³・角谷亮介⁴・小出光雄⁴・近藤大祐⁵

¹正会員 国立研究開発法人国立環境研究所 社会環境システム領域 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

E-mail: maki.seiya@nies.go.jp

²正会員 国立研究開発法人国立環境研究所 社会環境システム領域 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

E-mail: yhirano@nies.go.jp

³正会員 お茶の水女子大学 基幹研究院自然科学系 (〒112-8610 東京都文京区大塚2-1-1)

E-mail: nakakubo.toyohiko@ocha.ac.jp

⁴非会員 日本エヌ・ユー・エス株式会社 安全・環境解析ユニット (〒220-6001 神奈川県横浜市西区みなとみらい2-3-1 クイーンズタワーA 17階)

⁵非会員 日本エヌ・ユー・エス株式会社 エネルギー事業本部 安全・環境解析ユニット (〒460-0008 愛知県名古屋市中区栄4-3-26 昭和ビル2階)

パリ協定が採択され、世界全体で地球温暖化対策が一層進むとともに、COP26 の声明によって 1.5°C 目標を目指して対策を行う必要がある。このような背景から、電力の大口需要家でもある下水道部門において施設や機器変更のような対策だけでなく、デマンドレスポンスなどの運用面による省エネ対策が求められている。本研究では、運用面での対策の基礎情報を整備するため、プロセス単位での電力消費計測システムを開発し、プロセス単位ごとの電力消費量のモニタリングを行った。その結果から、各プロセスにおける電力消費量の時間変動性を把握した。また、観測を実施している水処理施設の運用における変更可能な機器運用の範囲を確認し、運用変更による電力消費の削減及び時間帯移動の可能性を検討した。この結果から、得られた電力消費量データをもとに複数日を対象にした運用変更を検討する線形計画法を用いて最適化運用計画を作成するアルゴリズムの開発を行い、実データから運用変更に伴う太陽光発電を最大限利用する天候別のシナリオ分析を行うことで、再生エネルギーの利用最大化と消費電力の最小化を検討した。

Key Words: Electricity demand monitoring, Time-series demand observation, Wastewater Treatment Plant, Optimal Operation Planning, Liner Programming

1. 背景・目的

グラスゴーで開かれらCOP26を契機に1.5°C目標を達成するため、温暖化対策をこれまで以上に重要になった。このような社会的な要請がある中、都市の健全な発達、公衆衛生の向上、水域の水質保全を目的とする下水道は、我が国における年間消費電力の約0.7%を占める大口需要家²⁾でもあるため、その省エネポテンシャルを把握し、省エネ化を進める必要がある。

下水道を対象として電力消費量や温暖化対策について検討した研究には、メーカーや事業者へのアンケートを実施することで規模や処理方式の異なる下水処理場を対象に電力消費量の試算を行い、省エネ機器に変更した際の削減効果を推計した藤井らによる研究³⁾があるが、運用変更による省エネ施策を検討できる詳細な電力消費の実態を把握するには至っていない。

また、筆者らによる下水処理場の電力消費量の実績デ

ータをプロセスごとに継続的に観測を行い、マルコフスイッチングモデルによって再現をするモデルの構築を行った研究⁴⁾などがある。

ただし、デマンドレスポンスのような運用面からの省エネ対策を検討するには時間単位やそれよりも細かい単位での逐次的な電力消費実態を把握し、対策を講じるための基礎情報の整備が必要であるが、十分に実施されているとは言えない。

そこで、本研究では、下水処理場を対象に、多様な省エネ対策を検討するため、逐次的なエネルギー消費状況を把握できるモニタリングシステムを開発し、各プロセスのエネルギー需要の計測を行った。また、得られた電力消費量データをもとに複数日を対象にした運用変更を検討する線形計画法を用いて最適化運用計画を作成するアルゴリズムの開発を行い、実データから運用変更に伴う太陽光発電を最大限利用する天候別のシナリオ分析を

パッケージを用い、二つの目的関数からなる多目的最適化モデルとなる。

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_i^n (PV_i - C_i) \\ & 0 \leq PV_i \leq b_i \\ & 0 \leq E_i \\ C_i = \quad & \sum_d a_{d,i} C_{d,i} \\ C_i = \quad & PV_i + E_i \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 PV_i は時刻*i*における太陽光発電の使用量[kWh]、 C_i は時刻*i*における電力消費量[kWh]、 b_i は時刻*i*における太陽光発電電量[kWh]、 E_i は時刻*i*における系統電力使用量[kWh]を表す。 $C_{d,i}$ は時刻*i*における設備*d*における電力使用量[kWh]を表し、その変更可能率 $a_{d,i}$ は現地でのインタビュー調査によって決定した。また、 $a_{d,i}$ はシナリオによって、処理工程に多大な影響を与えないと考えるものは意図的に変更範囲を拡大できるものとして設定した。

2.5 天候シナリオ設定と運用モデルによる再エネ利用可能性の評価

24で構築した数理最適化モデルをもとに、Table. 3に示す既存の設定を考慮して Case1 と 2 を設定した。また、現状の制約から大幅な変更を可能とする Case2 では太陽光による発電量が異なる 4 パターンの分析を実施した。

Table. 3 各 Case における制御範囲と変更点

Case	制御範囲	変更点
Case1	現在のプロセス制御から変更をしない、評価期間を 24 時間 (1 日) とする。	全系統のプロセス開始時刻を 1 時間ごと 0 から 23 時まで変動 太陽光発電設備の適切な規模を推定するため、発電データに 0.01 から 10 までの係数を乗じてポテンシャル評価
Case2	処理量と電力消費量が比例するものと仮定し、評価期間を 48 時間 (2 日) として処理の時間帯を変更可能とする。	Case2-1 太陽光発電 100%
		Case2-2 初日の発電量を 50% に限定
		Case2-3 初日、二日目ともに発電量を 40% に限定
		Case2-4 初日 20%、二日目の発電量を 40% に限定

3. 結果

3.1 観測された電力消費量及び再生エネルギーの利用ポテンシャルの分析

観測期間中に人口増加などの変化があったことから、Fig. 3 に示すように近年 1 年間のモニタリングデータから算出した 24 時間平均値を基に電力消費をモデル化する対象とする電力消費のトレンドについては 2019 年 12

月 20 日 0 時から 2020 年 12 月 20 日 14 時までの 24 時間平均を用いた。電力消費傾向として、水処理による電力消費は短時間で上下繰り返す傾向があり、動力設備類では営業時間帯に電力消費量が大きくなる傾向がみられた。汚泥処理は処理を行う日と行わない日で大きな変化があるため、平均値としては電力消費量が小さいものの、処理実施日の電力消費は無視できるものではなく、その変動に対応することは今後の課題である。

また、Fig. 3 から、平均的な太陽光発電電量であれば、日中の電力消費量を賄うことが可能であることが確認できた。

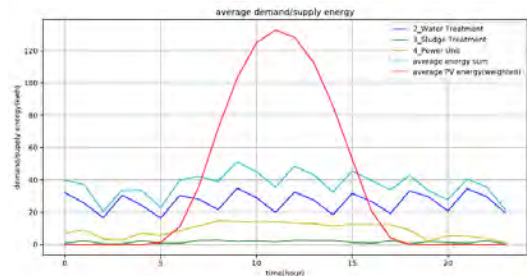


Fig. 3 近年1年間のモニタリングデータによる電力消費量及び太陽光発電電量の平均値

3.2 各シナリオ分析による再生エネルギーの活用ポテンシャルの評価

3.2.1 プロセス開始時間を変更するCase1の評価結果

全系統のプロセス開始時刻を1時間ごと0から23時まで変動させた場合の太陽光発電利用電力量と、太陽光発電量のうち消費電力モデルに供給された電力量の比率を検討した結果をFig. 4に示す。その結果、プロセス開始時刻を1時間早めた場合が再生エネルギーを最大に利用できることが分かった。

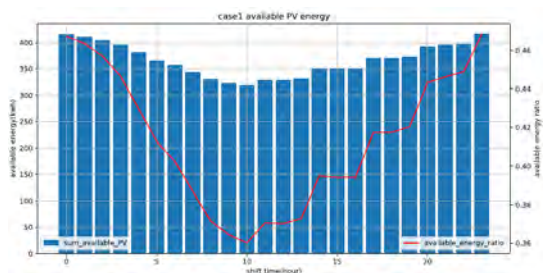


Fig. 4 各時間の太陽光発電電量と利用率

さらに、供給電力データに0.01から10までの係数を乗じた場合のポテンシャル評価結果をFig.5に示す。太陽光発電利用量と利用率の積はスケーリングファクターが0.5の時に最大となることから、太陽光発電設備は、日電力消費量の0.5倍程度の供給電力量[kWh/日]となる規模

が妥当と推定した。

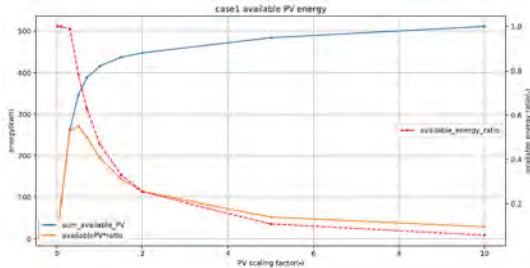


Fig.5 各係数を乗じた場合の再生エネルギー利用ポテンシャル

3.2.2 複数の天候シナリオを想定したCase2の評価結果

今後プロセスの仕様等が変更となる場合を想定した評価として、制約を考えない条件での下水処理プロセスのモデル化及びポテンシャル評価を行った。

本ケースでは評価期間を48時間、処理ステップを30分単位とした。消費電力量及び供給電力量を変動させない場合の各ケースにおける電力消費及び供給データにおける結果を示す。Fig.6は各条件における給電量の違う運用状態を含めて図にしたもので、Table.4は結果を表にまとめたものである。

この結果から、最大限の太陽光発電で運用を自由に変更可能であれば下水処理場の消費電力のほとんどを賄うことができ、運用次第で天候に恵まれないCase2-4においても3分の1前後の再生エネルギーを活用できる可能性が確認できた。

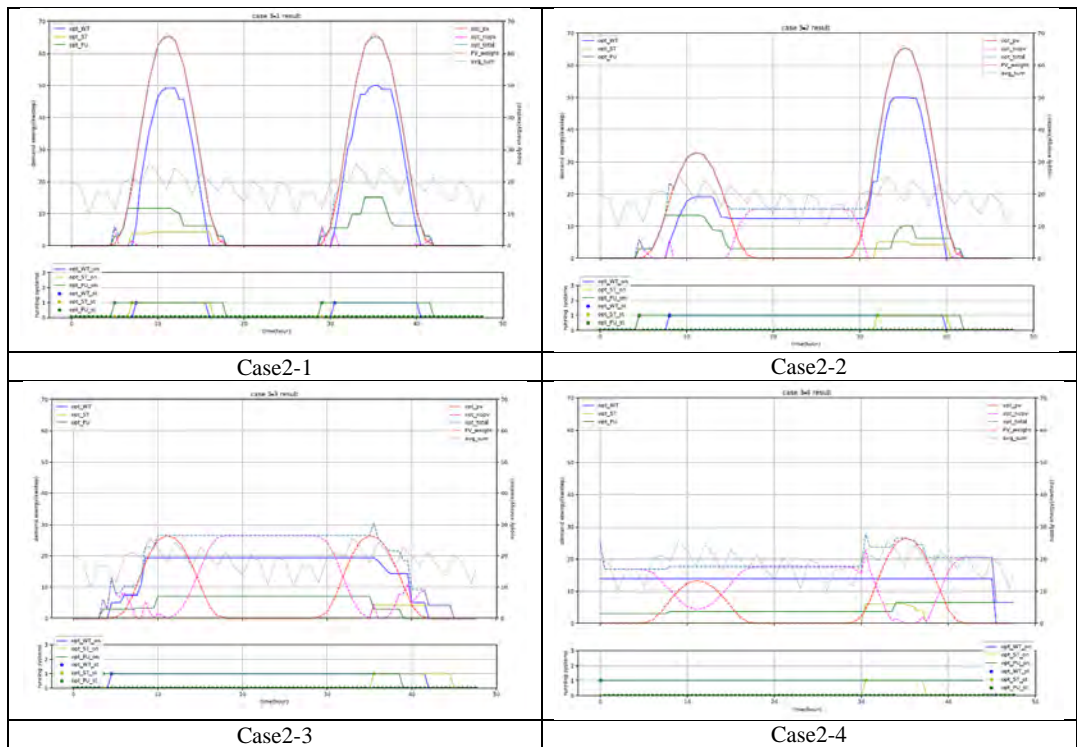


Fig.6 各天候シナリオにおける最適運用制御パターンの計算結果

Table.4 各天候シナリオにおける再生エネルギー利用量と合計消費電力量

Case	太陽光発電利用量[kWh]	太陽光以外の電力使用量[kWh]	合計消費電力量[kWh]
Case2-1	1768(利用率99.8%)	23	1791
Case2-2	1327(利用率99.9%)	457	1783
Case2-3	709(利用率100%)	1075	1783
Case2-4	531(利用率100%)	1252	1783

4. まとめ

本研究では、下水処理場における各プロセスの電

力消費量を計測した。また、計測したデータをもとに運用の変更を検討する数理モデルを構築し、各天候シナリオにおける電力消費量の削減および再生エ

エネルギーの利用率を最大化する場合を検討した。

各ケースの分析結果から、対象とした下水処理場の運転について以下の知見が得られた。

- 太陽光発電設備の発電が大きくなるより前に各系統を起動させておいた方がよい
- 太陽光発電の総発電量がある程度以下となった場合は、初日の発電立ち上がりから二日目の発電量減衰に沿うような台形型の電力消費となる運転が太陽光発電利用量を確保しつつ無用な電力消費を抑える運転が適切
- 太陽光発電の発電量がある程度以下となった場合は、初日と二日目とで発電量に多少の違いがあっても消費電力を一定とし運転期間を延ばす運用が合理的

上記の評価は運用を自由に変更できる仮定の下での評価結果から導いたものであるが、太陽光発電がある程度以下となるような場合では、現行の自動運転を変更せずとも最適な運転ができる可能性があることを示唆された。

本研究の結果は、下水処理場の目的である放流水質の維持に必要なプロセスモデルを検討しきれていないことと将来の電力消費量予測まで含めておらず、これらの問題を解決することで、より実装が可能なデマンドレスポンスに活用できるシステムの開発を行う必要がある。

謝辞

本研究では、対象地下水処理場の運用調査のため、新地町都市計画課の佐藤様及び株式会社ウォーター

エージェンシーの青田様から運用条件について貴重な情報を提供いただいた。ここに感謝の意を記載いたします。

<参考文献>

- 1) 国連気候変動枠組条約第 26 回締約国会合 (COP26) 結果概要
<https://www.env.go.jp/press/files/jp/117098.pdf>
(2022年8月閲覧)
- 2) 国土交通省, 下水道における資源・エネルギー施策の現状分析
<http://www.mlit.go.jp/common/001022698.pdf>
(2022年8月閲覧)
- 3) 藤井都弥子, 浜田知幸, 前田光太郎, 重村浩之, 山下洋正, 2017. 下水道設備における電力消費特性をふまえた処理場全体の電力消費量削減検討手法, 土木学会論文集 G (環境)
- 4) Maki, S., Chandran, R., Fujii, M., Fujita, T., Shirai-shi, Y., Ashina, S., & Yabe, N. (2019). Innovative information and communication technology (ICT) system for energy management of public utilities in a post-disaster region: Case study of a wastewater treatment plant in Fukushima. *Journal of cleaner production*, 233, 1425-1436.
- 5) 日本下水道協会, 2016. 平成26年度下水道統計. 日本下水道協会, 東京.

(Received March 28, 2022)

(Accepted August 22, 2022)

Electricity Demand observation by Time-series Monitoring Systems of the Waste Water Treatment Plant and Development of optimal operation planning algorithm by linear programming

Seiya MAKI, Yujiro HIRANO, Toyohiko NAKAKUBO, Ryosuke KAKUYA, Mitsuo KOIDE, Daisuke KONDO

It has become necessary to take further measures against global warming throughout the world with the adoption of the Paris Agreement, and to take measures toward the 1.5 °C target goal by the statement of COP26. Therefore, the sewerage sector, which is also a major consumer of electricity demand, is required not only to change equipment but also to save energy by operation changes such as demand response. In this study, in order to prepare basic information for taking operational process, we developed electricity demand monitoring systems for each process and conducted a survey of its electricity demand. In addition, we confirmed the range of changeable in operation of the waste water treatment plant. From these results, we developed an algorithm to create an optimized operation planning that minimizes the electricity consumption and maximizes solar energy use by using the linear programming method based on the obtained monitoring data. As a result, the energy saving and reusable energy potential associated with the operational change and using reusable energy were calculated from the actual data and some of scenario analysis.