

バンコク都（BMA）の下水処理とエネルギー消費

岡寺 智大¹・珠坪 一晃²・小野寺 崇²・Wilasinee Yoochatchaval³

¹非会員 独立行政法人国立環境研究所 地域環境研究センター

(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

E-mail:okadera@nies.go.jp

²正会員 独立行政法人国立環境研究所 地域環境研究センター

³Non-member of JSCE, Department of Environmental Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand

水質汚濁はバンコクの主要な環境問題の一つであり、バンコク都（BMA）は水質改善事業の一環として7つの大規模処理場および13のコミュニティプラント（以下、コミプラ）で下水処理を行なっている。下水処理にかかるエネルギー消費は下水処理場の運用に際して重要であり、バンコク都の下水処理場の運用コストの約半分は下水揚水ポンプや好気性処理槽の曝気等にかかる電気代となっている。そこで、本研究では、BMAの管理する20の下水処理施設の月間報告書のデータを用いて、バンコクにおける下水処理にかかるエネルギー消費について分析を行った。その結果、バンコク都の下水処理施設では2012年に55.7 GWhの電力が消費されており、その内97%は大規模処理場によるものであることがわかった。また、バンコクのエネルギー消費強度（処理水量あたりの電力消費量）は0.206 kWh/m³であるが、コミプラでは0.338kWh/m³と高い値を示した。更に、エネルギー消費強度と一日あたりの下水処理量（m³/日）を比較した結果、大規模処理場では両者に負の相関が確認されたが、コミプラでは両者に有意な相関が確認されなかった。

Key Words : wastewater treatment, energy consumption, water-energy nexus, Bangkok, Thailand

1. はじめに

水質汚濁はバンコクの主要な環境問題の一つであり、バンコク都（BMA）は7つの大規模処理場および13のコミュニティプラント（以下、コミプラ）で下水処理を行なっている。設計容量は103万 m³/日で、大規模処理場が96%を占める。また、年平均73万 m³/日の下水が処理されている。ちなみに、バンコクでは335万 m³/日（内、一般排水249万 m³/日）の排水が見込まれており¹⁾、十分な下水処理容量が確保できていないため、今後も下水処理インフラの整備を検討していく必要がある。

さて、下水処理にかかるエネルギー消費は下水処理の運用において重要となる。これはBMAの下水処理費用の約半分が下水揚水ポンプや好気性処理槽の曝気等にかかる電気代で占めており、下水処理の運用に与える影響が大きいと考えられるからである。また、バンコクでは電気料金の値上げが進んでおり、将来的に下水処理場のエネルギー効率の改善が必要となる事に加え、新規処理

場の設置には多額の予算が必要であり、処理設備の省エネ化は急務である。そこで本研究ではBMAが稼働する下水処理場を対象に、下水処理場のエネルギー消費の現状について調査を行った。以下、本稿では調査方法、調査結果を紹介し、最後に結論を取りまとめる。

2. 調査方法

本研究では、BMA下水道部（Department of Drainage and Sewerage；以下DDS）と（独）国立環境研究所の間での研究協力の覚書に基づいて、BMAの管理する下水処理場（20地点）の月間報告書の12ヶ月分（2012年1月～12月）の月間電力消費量（kWh/月）および月ごとの日平均処理水量（m³/日）を収集した。

その後、日平均処理水量に月別日数（29～31日）を乗じ、月ごとの総処理水量（m³/月）を求め、それで月間電力消費量を除することにより、処理水量あたりの電

力消費量（以下、エネルギー消費強度； kWh/m^3 ）を求めた。

なお、電力消費量は処理場全体の電力消費量であり、下水処理プロセス以外の電力消費量（全消費に対して少量）も含まれる。これは下水の揚水ポンプや曝気槽でのエアレーション等、各処理プロセス毎の電力管理をDDSでは行なっておらず、詳細が入手できないためである。

また、7つの大規模処理場では、遮集管による合流下水の収集処理を行っており、雨水の流入や水路の水の逆流などにより、有機物濃度は国内の一般的な下水に比べて非常に低い（ $20\sim 70 \text{ mgBOD/L}$ ）。一方、13箇所の小規模処理場は、都市公社からBMAに移管されたもので、比較的有機物濃度の高い、コミプラの分流下水（ $70\sim 250 \text{ mg BOD/L}$ ；以下、コミプラ下水）を処理している。

3. 調査結果

(1) 電力消費量

BMAの下水処理場では、年間55.7 GWh（2010年）の電力が消費され、その内、97%は大規模下水処理場で消費されている（図-1）。Dindaeng大規模下水処理場の電力消費量が最も大きく、全体の33%を消費している。また、月別では2012年1月の電力消費量（4.9 GWh）が最も大きくなっているものの、年間を通じて下水処理場の消費電力の月ごとの変動率は比較的小さいように見受けられる。

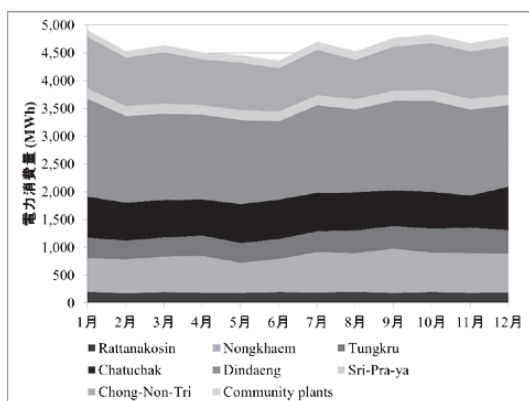


図-1 BMAの下水処理場の電力消費量

(2) エネルギー消費強度

BMAの全処理場のエネルギー消費強度の年平均値は 0.206 kWh/m^3 となった（図-2）。また、大規模下水処理場全体のエネルギー消費強度の年平均値は 0.204 kWh/m^3 である一方、コミプラ下水を処理する小規模処理場全体のエネルギー消費強度の年平均値は 0.338 kWh/m^3 と高い値を示す事が明らかとなった。これは、小規模処理場が高有機物濃度の下水を処理している事と、機械設備のス

ケールメリットの小ささが原因と考えられる。しかしながら、大規模処理場の中でも、Sri-Pra-ya処理場のエネルギー消費強度は高い値（年平均 0.376 kWh/m^3 ）を示した。本処理場は大規模下水処理場の中で最も下水処理容量が小さい（設計容量： $30,000 \text{ m}^3/\text{日}$ 、年平均処理水量 $15,552 \text{ m}^3/\text{日}$ ）処理場であるため、処理場の下水処理強度（一日あたりの下水処理量）とエネルギー消費強度との負の相関が推測される。

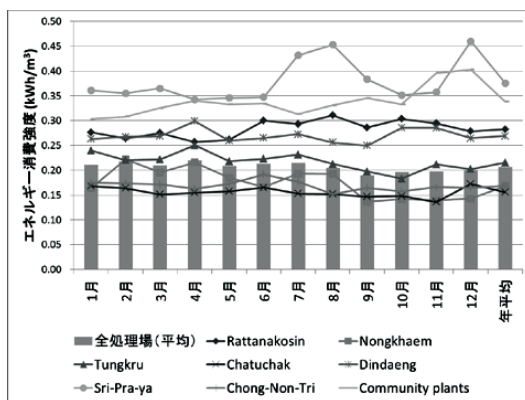


図-2 BMA下水処理場のエネルギー消費強度

(3) 相関分析

BMAの下水処理強度とエネルギー消費の相関を見ると、大規模処理場では下水処理強度が高くなるにつれてエネルギー消費強度が低下する傾向が高い事が明らかとなった（図-3）。これは下水処理容量が大きくなるほど下水処理場のエネルギー効率が改善される傾向にあることを示している。また、本結果からDindaeng下水処理場は、同規模の下水処理強度の下水処理場に比べてエネルギー消費強度が高くなるという結果が得られた。これはDindaeng下水処理場では、BODだけでなく栄養塩（窒素およびリン）除去を行なう唯一の処理場である事が原因と考えられる。

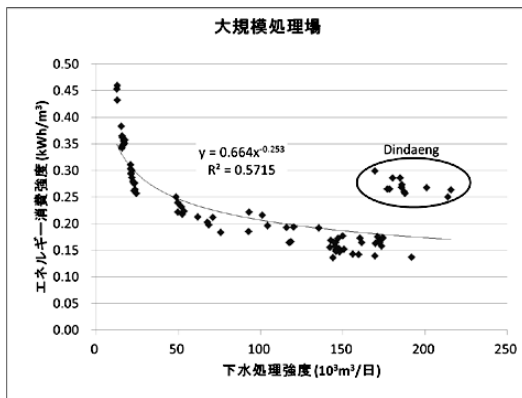


図-3 BMAの大規模下水処理場の相関分析

一方、コミプラ下水を処理する小規模処理場で同様の相関を取った所、有意な相関が観察されなかった（図-4）。これはコミプラの下水処理強度の範囲が300～3,000 m³/日と小さく、その範囲内ではエネルギー消費強度に対するスケールメリットが働きにくいためと推察される。また、大規模処理場では活性汚泥法に基づいた処理方法が採られているのに対し、コミプラでは活性汚泥法の他、オキシデーションディッチ法、曝気ラグーン法および酸化ポンド法といった多様な処理方法が採られているという違いがある。加えて、処理場間での下水水質（有機物濃度、窒素濃度）の差も大きい事も要因として挙げられる。そのため、コミプラでは、そうした技術間や下水水質の差異による影響を除外した形での評価が必要と考えられる。

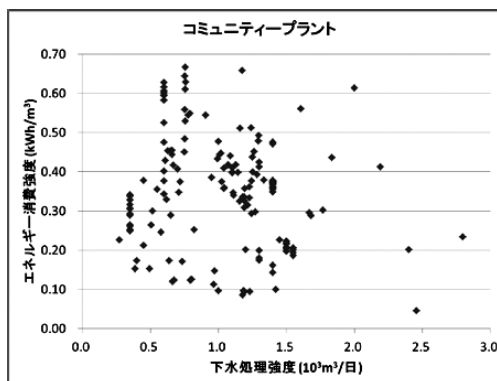


図-4 BMAのコミュニティプラントの相関分析

(4) 処理技術毎のエネルギー消費強度

BMAの下水処理技術毎のエネルギー消費強度の範囲を図-5に示す。大規模処理場では活性汚泥法をベースとする処理が行われているが、技術的特徴に基いて、二段階活性汚泥法、バーティカルループリアクター活性汚泥法（VLR-AS）、循環型活性汚泥法（CASS）、接触酸化

活性汚泥法および栄養塩除去機能付き活性汚泥法の5つに分類されている。コミプラでは標準活性汚泥法、拡張型活性汚泥法、オキシデーションディッチ法、曝気ラグーン法および酸化ポンド法に分類できる。

エネルギー消費強度の最大値が最も小さく、最小値との差が小さいことから、バンコクではCASSが年間を通じて最も高いエネルギー効率を達成していると言える。ただし、CASSは大規模処理場の中でも下水処理量が大きい施設（年平均14～16万 m³/日）に導入されているため、スケールメリットによる効果が付加されている可能性もある。また、VLR-ASも比較的年間を通じてエネルギー消費強度が低い技術と言える。しかしながら、接触酸化活性汚泥法は、年間を通じて高いエネルギー消費強度を示しており、省エネ型技術への更新が必要と考えられる。

一方、コミプラのエネルギー消費強度はいずれの技術も幅があり、年間を通じて安定した運用が難しいと考えられる。しかし、総じて標準活性汚泥法のエネルギー消費強度が低く、月と場所によっては大規模処理場よりもエネルギー消費強度が低くなる事もあるとの知見が得られた。

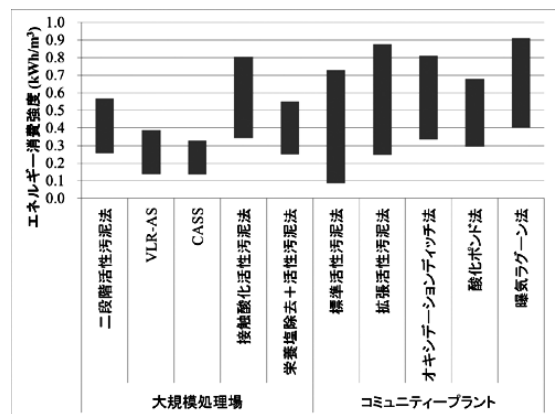


図-5 処理技術毎のエネルギー消費強度

(5) 日本の下水処理との比較

日本の下水処理場の排水処理強度とエネルギー消費強度の相関図を図-6に示す。なお、タイの下水処理システムとの整合性を保つため、下水処理水量が250,000 m³/日以下の標準活性汚泥法の下水処理施設（661箇所）²⁾を比較対象とした。日本と下水処理場においてもエネルギー消費強度と下水処理強度にはある程度の相関が見受けられ、近似曲線（図-6内；実線）が得られた。しかしながら、図-3から得られるタイの大規模処理場の近似曲線（図-6内；点線）との比較から、日本の下水処理システムのエネルギー消費強度はタイに比べて約1.5倍と高くなると考えられる。

この理由としては、まず日本ではより高いレベルでの水質の維持を目標として管理しており、タイの水質管理基準の違いが考えられる。加えて、日本では適切な下水収集により下水の有機物濃度、窒素濃度が高く、両国の収集プロセスの違いも一因と推察される。

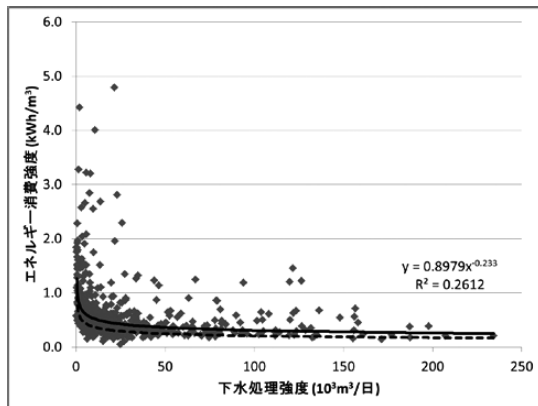


図-6 日本の下水処理場の相関分析

4. 考察および結論

(1) BMAの下水処理システムのエネルギー効率の改善

BMAの下水処理場のエネルギー効率の改善には、まず電力消費量の97%を占める大規模処理場のエネルギー効率の改善を中心とする政策の実施が効果的といえる。スケールメリットの効果について不確実性はあるものの、エネルギー消費強度の大きい二段階活性汚泥法および接触酸化活性汚泥法の施設を、より省エネ型のVLR-ASおよびCASSに更新するといった施策が実現性が高いと考えられる。

(2) 栄養塩処理シナリオ

今後、BMAの下水処理施設において、栄養塩除去が促進されるというシナリオを想定した場合、栄養塩除去を実施しているDindaeng下水処理場のエネルギー消費強度は年平均0.269kWh/m³となり、Dindaeng以外の大規模処理場の同値は13倍であることから、エネルギー消費強度が増加すると予想される。本シナリオの是非については、栄養塩除去に伴う水質改善によりBMAが受ける便益と、エネルギー消費の増加よりBMAが支払う費用の両者を定量的に評価する必要がある、BMAにおける費用便益分析の手法の開発やガイドラインの作成が望まれる。

(3) 日本の下水処理システムの導入

図-6に基づけば、日本の下水処理システムのBMAへ

の導入に際しては、エネルギー消費強度を増加させる可能性があるため、BMAの下水処理の現状に対応した形での技術導入が重要となる。現在、運用されている大規模処理場では、遮集管による非効率な収集システムにより希薄な下水の処理が行われているが、処理地域においても水質改善は進んでいない³⁾。そのため、低濃度排水を効率的に処理可能で、かつ、省エネルギー型の処理システムが必要と考えられる。また水質汚濁防止の観点から、短期的には人口密集域における分流収集・分散処理導入も一つの選択肢として有効であると考えられ、小規模分散処理のあり方についても今後検討を行っていく必要がある。

中長期的には、処理システムの更なる省エネルギー化に加え、下水集水システムの効率化、処理システムの高機能化（栄養塩への対応）³⁾の検討が必要と考えられる。大規模処理場の建設や分流管距の設置には多額の費用と期間が必要となるため、効率的な下水集水システムとセットで、日本の下水処理のノウハウを導入する可能性についての検討も今後必要と考えられる。

最後に、BMAにおける下水の処理水量や性状と言った物的情報、下水処理プロセスの技術的情報、下水処理に伴う財政情報あるいは下水の排水基準などの制度的情報など技術展開に関連する知見の積み上げを議論し、科学的あるいは学術的側面から支援する枠組みの構築も重要と考えられる。

謝辞：本研究は環境研究総合推進費（K113002）の成果の一部を取りまとめたものである。また、タイの下水処理場のデータの収集に際し、BMA下水道部（Department of Drainage and Sewerage）のMs. Suthimol KessomboonおよびMs. Nisita Khangpaitoon両氏の多大な貢献に謝辞を表する。なお、日本の下水処理場のデータ及び現状について国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部對馬育夫氏から貴重なご助言を頂いた。

参考文献

- 1) UNEP : The Bangkok State of Environment Report 2003, UNEP/ RRC. AP Bangkok, 2003.
- 2) 日本下水道協会：下水道統計(平成 21 年度版)CD-ROM 付(第 66 号), 日本下水道協会, 2011.
- 3) 独立行政法人 国際協力機構(JICA), 株式会社 東京設計事務所(TEC), 日本工営株式会社(NK)：タイ国バンコク下水道整備事業準備調査ファイナルレポート(I) 概略マスタープラン 第 1 巻 要約, 2011.

(2013. 7. 19 受付)

ENERGY FOR WASTEWATER TREATMENT OF BANGKOK METROPOLITAN ADMINISTRATION (BMA)

Tomohiro OKADERA, Kazuaki SYUTSUBO, Takashi ONODERA and Wilasinee
YOOCHATCHAVAL

Water pollution is a main environmental problem in Bangkok and Bangkok Metropolitan Administration (BMA), for the mitigation of water pollution, treats wastewater by seven central and thirteen community wastewater treatment plants (WWTPs). Energy for wastewater treatment, by the way, is an important perspective to operate wastewater facilities. Indeed, about 50% of operation costs of the WWTPs in BMA is shared by electric utility expense for pumping of sewage and aeration at treatment tanks. Therefore this study aims to analyze energy for wastewater treatment in Bangkok by using the data of monthly reports of twenty WWTPs of BMA. As a result, the WWTPs in Bangkok use 55.7 GWh as electricity for 2012 and 97% is used by the central WWTPs. In addition, annual mean electricity intensity in Bangkok is 0.206 kWh/m³ which is similar to that of the central WWTPs (0.204 kWh/m³) whereas the value of community WWTPs is 0.338 kWh/m³. Furthermore, energy efficiencies of the central WWTPs have a tendency to become more effective by the increase in amount of sewage per day, while the community WWTPs has no correlation between them.