

人口減少社会に対応した下水道

— 汚水処理システムの効率化に向けた検討 —

国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室長

田 陽

淳

1. はじめに

人々の日常生活に不可欠な汚水処理システムは、下水道や農業集落排水等、それぞれの地域特性に応じて採用されており、汚水処理システムを利用できる人口の割合を示す汚水処理人口普及率はすでに91.9%（2018年度末）に達している¹⁾。一方、これら汚水処理システムについては、今後さらに進むと予測される人口減少に伴う処理水量の減少により、下水道使用料収入の減少や汚水処理施設の稼働率低下等に伴う事業経営の非効率化が懸念されている。このため、第4次社会資本整備重点計画で「人口減少等を踏まえた持続的な汚水処理システム構築」が重点施策に位置付けられた²⁾ほか、「経済・財政再生計画改革工程表2017改定版」では2022年度までに全ての都道府県において汚水処理の広域化・共同化に関する計画策定が目標に掲げられる³⁾等、汚水処理システムの効率化が求められているところである。

このような背景のもと、国土技術政策

総合研究所では、地方公共団体がそれぞれの地域特性に応じた持続可能な汚水処理システムを実現するために、下水処理場の既存施設能力を活用した汚水処理システムの効率化に関する研究に取り組んできた。本稿では、その研究成果の概要を報告する。

2. 研究目的および対象とする施設

研究目的は、事業の垣根（下水道、農業集落排水、し尿処理）を越えた統廃合も見据えた汚水処理システム効率化において人口減少を踏まえた概略検討を行うために必要となる、各汚水処理事業の費用関数の整理・作成、人口減少に伴う稼働率低下がコスト・エネルギーに与える影響の明確化およびコスト・エネルギー算定手法の提示、さらには、これらの知見を踏まえた地方公共団体職員自ら実施可能な汚水処理システム効率化検討手法の構築である。

研究の対象施設は、主要な汚水処理システムである下水道、農業集落排水、し

尿処理における各汚水処理施設（以下それぞれ「下水処理施設」、「農業集落排水施設」、「し尿処理施設」という。）とし、特に、人口減少に伴う処理水量減少により運転効率が悪化しやすく費用面の影響を大きく受けると考えられる中小規模の施設（処理能力がそれぞれ、下水処理施設は10,000m³/日以下、農業集落排水施設は1,000m³/日以下、し尿処理施設は100kl/日以下）を対象とした。対象とする処理方式については中小規模の地方自治体で採用されているものとし、下水処理施設はオキシデーションディッチ法（以下「OD法」という。）、標準活性汚泥法（以下「標準法」という。）、農業集落排水施設はJARUS-Ⅰ、Ⅲ、Ⅺ、Ⅻ、ⅩⅣ（処理方式の分類）とした。ただし、し尿処理施設は、下水処理施設、農業集落排水施設に比べ処理場の箇所数が少ないことから、処理方式を特定しないこととした。

表－1 新たに作成した費用関数

区分	施設			適用範囲	関数式
建設費 [千円]	下水	標準法	処理場全体機械設備	1,000～10,000m ³ /日	$y = 72,734x^{0.26}$
			水処理系機械設備	1,000～10,000m ³ /日	$y = 978x^{0.59}$
		OD法	水処理系機械設備	1,000～10,000m ³ /日	$y = 1,580x^{0.66}$
			汚泥処理系	15～170m ³ /日	$y = 112,140x^{0.26}$
		共通	脱臭設備（活性炭）	1,000～10,000m ³ /日	$y = 125,019x^{0.04}$
	し尿	施設全体	標準脱窒素処理	20～100kl/日	$y = 237,636x^{0.4571}$
			高負荷脱窒素処理	20～100kl/日	$y = 796,386x^{0.1031}$
			高負荷膜分離	20～100kl/日	$y = 766,089x^{0.0971}$
			浄化槽汚泥比高い脱窒素	20～100kl/日	$y = 226,590x^{0.4569}$
維持 管理費 [千円/年]	下水	標準法	処理場全体	1,000～10,000m ³ /日	$y = 2,468x^{0.382}$
	し尿	施設全体	処理場全体	20～100kl/日	$y = 17,845x^{0.57}$
		前処理施設	処理場全体	20～100kl/日	$y = 6,716x^{0.2692}$

3. 費用関数の整理・作成

汚水処理システム計画策定時の経済性比較では、通常、詳細な機器の費用を積み上げるのではなく、処理能力等を変数とした処理場単位での費用関数により概算コストを算定する。今回、中小規模の処理場に適用可能な費用関数を整理、作成するために、既往文献調査における費用関数を整理した上で、既往文献に記載のない費用関数については、全国約300の汚水処理施設へのアンケート調査に基づき新たに作成した。

(1) 調査方法

2014年度（研究当時最新）の処理能力、処理量、消費電力量、維持管理人員数、主要設備の更新費、定格電力、薬品費、保守点検費等の建設費・維持管理費を調査した。調査結果に基づき、各施設のコストを積み上げ、処理能力別のコストとして整理した。

(2) 調査結果

今回作成した主な費用関数を表-1に示す。これらは今まで作成されていなかった、下水処理施設における処理能力

10,000 m^3 /日以下の中小規模施設に適用可能な費用関数やし尿処理施設の費用関数等であり、多様な検討に対応できるようになった。

4. 稼働率低下がコストおよびエネルギーに与える影響の明確化

近年の人口減少および節水型社会に伴い汚水量が減少している地域では、多くの汚水処理施設において、図-1に示すように、処理能力を大きく下回る水量での運転、すなわち施設の稼働率が低下している状況が見られる⁴⁾。

そこで、稼働率低下が汚水処理施設のコストおよびエネルギーに与える影響を明確化するため、全国の汚水処理施設の運転状況（稼働率が変化してきた過去10年程度の経年変化）を調査・分析した。

ここで、稼働率は以下の式のとおり定義した。
稼働率[%] = 年間平均処理水量 $[\text{m}^3/\text{日}]$ / 処理能力 $[\text{m}^3/\text{日}] \times 100$

稼働率が最大（定格運転）となるのは、年間平均処理水量が設計上の日平均処理水量となる場合であり、その際の稼働率はそれぞれ、下水処理施設が70%、農

業集落排水施設が100%、し尿処理施設が87%である。（各事業の設計思想^{5, 6, 7)}の違いにより処理能力と平均処理水量の比が異なる。）

(1) 調査方法

既往統計資料および事業者へのアンケート調査により、過去10年間程度の処理場における処理能力、処理量、消費電力量を調査した。消費電力量のみを対象とした理由は、以前の調査結果⁸⁾から、電力費以外の人件費等の費用は稼働率の影響を受けにくいことが推察されていたためである。

調査対象の処理施設としては、稼働率の影響をより明確にするためにより安定した条件の施設を対象とし、供用開始後5年以上を経過した処理場、調査対象期間中に水処理能力の変更を行っていない処理場、過去10年間の稼働率差が10%以上ある処理施設等の条件に該当する全国約300の処理施設を統計資料から抽出して選定した。

(2) 消費電力量と稼働率の関係

調査結果に基づき、稼働率ごとに消費電力量をプロットし、単純化を目的に次式の電力係数として定義した。電力係数が大きいほど消費電力量原単位^{*}が大きく、非効率な運転状況であることを示す。
電力係数 $[kp(x)]$ = ある稼働率 (x) での消費電力量原単位^{*} / 稼働率最大時（定格運転）の消費電力量原単位^{*}
※消費電力量原単位 $[\text{kWh}/\text{m}^3]$ = 年間消費電力量 $[\text{kWh}/\text{年}]$ / 年間処理水量 $[\text{m}^3/\text{年}]$

電力係数については、中央値を代表値とし、中央値を結ぶ近似式を簡易算定式として整理した。

その結果は図-2の下水処理施設（OD法）のように、稼働率の低下に伴い電力係数が増加する傾向となった。この結果は、下水処理施設（標準法）、農業集落排水処理施設およびし尿処理施設についても同様の傾向となることを確認した。

(3) 維持管理費と稼働率の関係

3. の調査（維持管理費の内訳）および4. (2) の稼働率と電力係数の関係を用いて、稼働率と維持管理費の関係を整理した。

具体的な算出方法としては、図-3のイメージ図に示すように、3. の調査で得た施設全体の維持管理費から電力費を

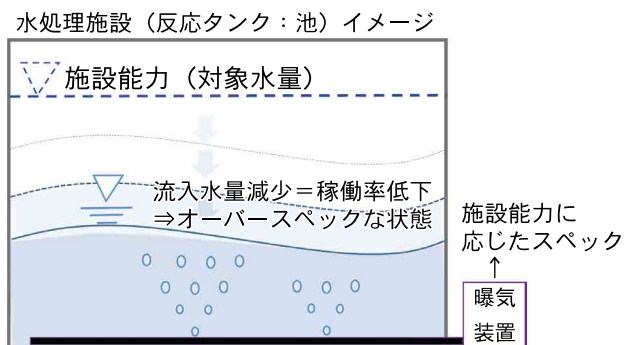


図-1 稼働率低下イメージ

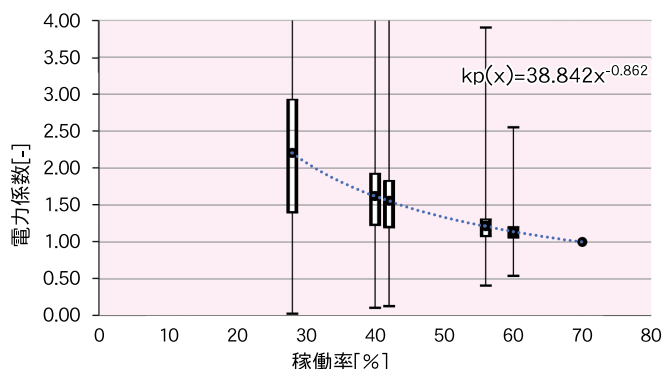


図-2 稼働率と電力係数の関係（下水処理施設：OD法）

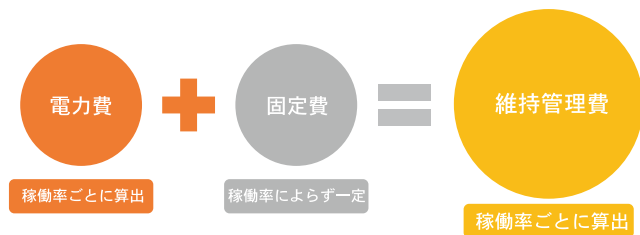


図-3 稼働率ごとの維持管理費算出イメージ

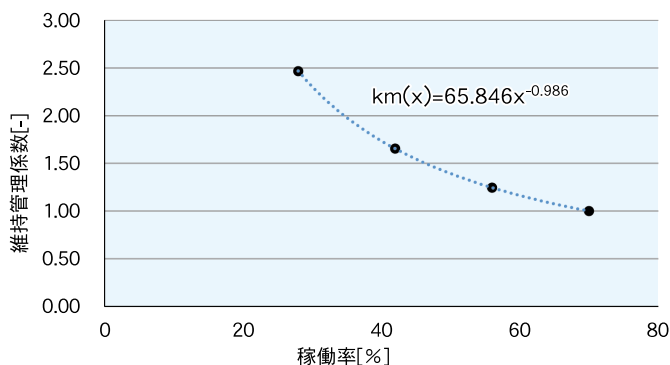


図-4 稼働率と維持管理係数の関係（下水処理施設：0D法）

差し引いた額を固定費（稼働率による影響を受けない一定値）として設定した上で、4.（2）で述べた電力係数を用いて算出した稼働率ごとの電力費を足し合わせて稼働率ごとの維持管理費を算出した。なお、汚泥処分費については、統廃合による影響が相対的に軽微であるとして、ここでは算出の対象外とした。

このように算定した維持管理費についても、電力係数と同様、次式の通り維持管理係数を定義し、稼働率ごとの維持管理係数を結ぶ近似式を簡易算定式として整理した。

維持管理係数 $[km(x)]$ =ある稼働率 (x) での維持管理費原単位 * ／稼働率最大時（定格運転）の維持管理費原単位 *

※維持管理費原単位 $[\text{円}/\text{m}^3]$ =年間維持管理費 $[\text{円}/\text{年}]$ /年間処理水量 $[\text{m}^3/\text{年}]$

その結果は図-4の下水処理施設（0D法）のように、稼働率の低下に伴い維持管理係数が増加する傾向となった。この結果は、下水処理施設（標準法）、農業集落排水施設およびし尿処理施設についても同様の傾向となることを確認した。なお、維持管理係数算出で用いた電力係数はすでに中央値として決定された値であるため四分位範囲を表示していない。

以上の通り、消費電力量および維持管理費と稼働率との関係を明確化すること

によって、将来の人口減少時、稼働率低下に伴う影響を踏まえたコストおよびエネルギーを算定することが可能となった。

5. 汚水処理システム効率化検討手法

汚水処理効率化の先進事例の調査・ヒアリングおよび上述の成果を踏まえ、地方公共団体職員自ら実施可能な汚水処理システム効率化検討手法を構築した。本検討手法では、最終的に、地域特性に応じた最適な汚水処理システムの統廃合ケースを選定することを目的とする。

（1）代表的な統廃合ケースの設定および検討手順

代表的な統廃合ケースとして、図-5に示すように、将来の流入水量予測に基づき適切な施設能力でそれぞれの施設を更新（非統合）する「①既存施設の更新」、処理施設の統廃合によって処理区を統合（完全統合）する「②処理施設の再編成」、集約によるスケールメリットが出やすい汚泥処理機能のみを集約（部分統合）する「③既存施設の能力活用」の3つを設定した。

検討手順としては、図-6に示す検討フローのとおり、経済性比較だけでなく、技術面および環境面の確認も行い、それらをすべて踏まえて最適な統廃合

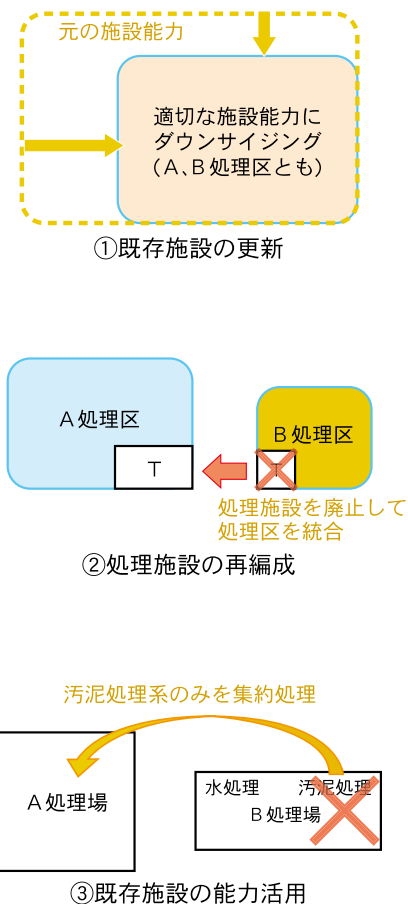


図-5 代表的な統廃合ケース（A、B2つの処理区の場合）

ケースを選定する。

（2）稼働率を踏まえた経済面の検討

経済性比較においては、3つの統廃合ケースにおける総費用を算定し、最も経済的なケースを確認する。ここでは、3.で紹介した費用関数を活用して建設費・維持管理費を算定するだけでなく、以下のステップに示す維持管理係数を活用した計算方法により、将来の維持管理費をより正確に算定することが可能となっている。

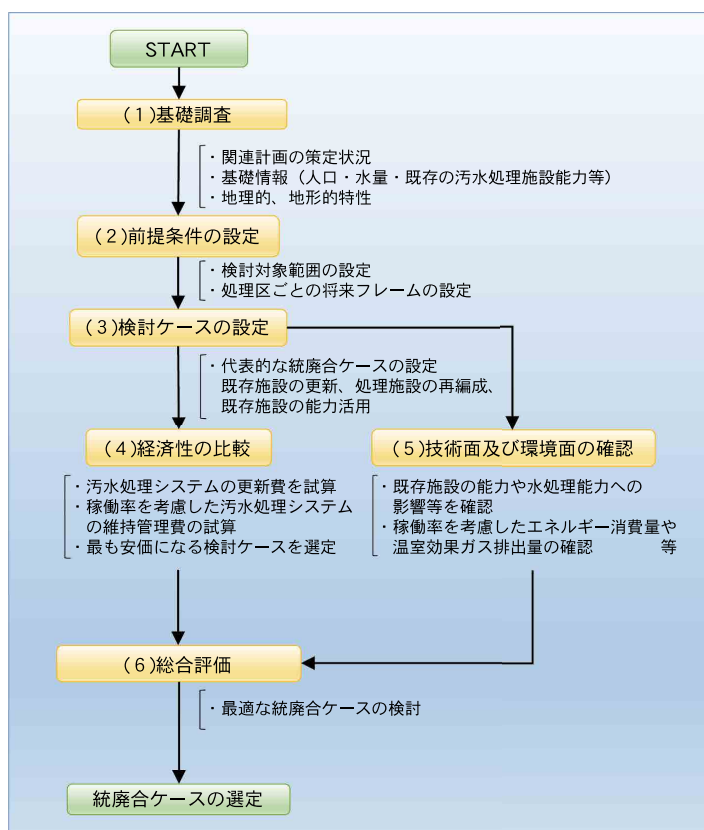
ステップ1：

①現状の維持管理費原単位 $[\text{円}/\text{m}^3]$ =
現状の維持管理費の総額 $[\text{円}/\text{年}]$
／現状の年間処理水量 $[\text{m}^3/\text{年}]$

ステップ2：

②維持管理係数の比 $[-]$ =将来の維持管理係数 * ／現状の維持管理係数 *
※ $km(x)$:維持管理係数 $[-]$, x :稼働率 $[\%]$

- ・下水処理施設(0D法) $km(x)=65.846x^{-0.986}$
- ・下水処理施設(標準法) $km(x)=63.406x^{-0.977}$
- ・農業集落排水施設 $km(x)=66.057x^{-0.910}$
- ・し尿処理施設 $km(x)=62.107x^{-0.925}$



図－6 検討フロー

【参考文献】

- 1) 国土交通省ホームページ（平成30年度末の污水处理人口普及率をとりまとめ）2019年8月
https://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo13_hh_000422.html
- 2) 第4次社会資本整備重点計画、2015年9月
- 3) 経済財政諮問会議、経済・財政再生計画改革工程表、2017年12月
- 4) (公社) 日本下水道協会、下水道統計
- 5) (公社) 日本下水道協会、下水道施設設計計画・設計指針と解説 前編 2019年版、p. 58
- 6) 農業集落排水事業諸基準等作成全国検討委員会、農業集落排水施設設計指針 平成14年度版、p. 37
- 7) (公社) 全国都市清掃会議、汚泥再生処理センター等施設整備の計画・設計要領 2006改定版、p. 51
- 8) 松本ら第53回下水道研究発表会講演集、p. 344-346
- 9) 国土交通省 国土技術政策総合研究所、国土技術政策総合研究所資料第1071号（人口減少下での污水处理システム効率化技術資料）
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn1071.htm>
- 10) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 下水道研究部 下水処理研究室、研究概要紹介ホームページ
<http://www.nilim.go.jp/lab/ecg/outline.htm#syuyaku>

ステップ3：

$$\text{③将来の維持管理費原単位} [\text{円}/\text{m}^3] = \text{①現状の維持管理費原単位} [\text{円}/\text{m}^3] \times \text{②維持管理係数の比} [-]$$

ステップ4：

$$\text{将来の維持管理費} [\text{円}/\text{年}] = \text{③将来の維持管理費原単位} [\text{円}/\text{m}^3] \times \text{将来の処理水量} [\text{m}^3/\text{年}]$$

(3)技術面および環境面の確認

技術面の確認としては、既存管きょ能力の確認等、統廃合の際に留意すべき内容を簡易的に確認する。特に、下水処理施設で尿等を受け入れる場合には、水処理施設における負荷が増大し、必要酸素量の不足や処理水質の悪化が懸念されるため、本検討手法においては尿等受入れ後の処理水質や送風機的能力等を簡易計算式によって確認する。一方、環境面の確認としては、消費電力量、エネルギー消費量および温室効果ガス排出量を算定する。消費電力量については、3.で述べた電力係数の活用により、将来の消費電力量をより正確に算定することが可能となっている。エネルギー消費量は消費電力量に換算係数を乗じて算定し、温室効果ガス排出量（CO₂、CH₄およびN₂O）

は消費電力量に排出係数を乗じることおよび処理水量にそれぞれの処理方式に応じた排出係数を乗じることによって算定する。また、汚泥集約に伴う消化ガス有効利用量増加等の統廃合効果もあわせて確認することとしている。

6. おわりに

本研究により、中小規模処理施設に適用可能な費用関数や稼働率変化を踏まえたコスト・エネルギー算定手法を作成し、それらの知見を踏まえた污水处理システム効率化検討手法を構築した。これら研究成果は地方公共団体が活用できるように国土技術政策総合研究所資料⁹⁾として公表するとともに、本稿で紹介した費用や温室効果ガス排出量等について簡易的に算定するための計算シートをホームページで公開している¹⁰⁾。これらの研究成果が全国の污水处理システムの効率化または広域化検討の際に活用され、污水处理サービスの維持・効率化に貢献することが期待される。