

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12337

研究課題名（和文）下水道処理区域の縮小を通じた人口減少下での生活排水処理インフラの再編

研究課題名（英文）Restructuring of the Sewage Treatment Facilities through the Shrinking of Sewage-treatment Area under Depopulating Society

研究代表者

中久保 豊彦（Nakakubo, Toyohiko）

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70648766

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：下水道供用区域と浄化槽設置区域の最適な分担を検討するため、下水道区域メッシュ（3次メッシュ解像度）を全国スケールで生成し、低密度化の将来予測値、撤退ポテンシャル（候補エリア）の試算結果を提示した。汚泥処理系の再編を支援するため、汚泥処理機能統合（下水処理場での浄化槽汚泥の受入れと共同処理）の有用性を提示した。下水道人口の減少に起因する余剰能力の活用方策として、標準活性汚泥法施設における硝化促進・脱窒運転の施策モデル、OD法施設での省エネルギー・創エネルギー・デマンドレスポンスから成る施策モデルを設計し、その効果を温室効果ガス排出削減や事業コスト改善により評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人口減少社会において、下水道と浄化槽の最適な分担を検討することは多くの基礎自治体において必要不可欠な課題である。本研究での成果として、全国スケールで下水道区域メッシュを生成するとともに、撤退候補エリアを抽出可能な判定ツールを開発した。加えて、汚泥処理機能統合（下水処理場での浄化槽汚泥の受入れと共同処理）は汚泥処理事業の効率化に貢献する一方策として位置付けられる。汚泥処理機能統合と合わせて実装可能な施策モデルとして、標準活性汚泥法施設に対しては硝化促進・脱窒運転の導入を、OD法施設に対しては省エネルギー・創エネルギー・デマンドレスポンスから成る複合策を、それぞれ提示した。

研究成果の概要（英文）：Sewerage system area data (gridded spatial resolution of 1 km) was generated on a national scale, and future projected values of low population density and shrink candidate areas were presented. The output helps to reconsider the optimal division of sewerage system areas and onsite wastewater treatment system (OWTS) areas. To support the restructuring of the sludge treatment system, the usefulness of sludge treatment function integration was evaluated, where a wastewater treatment plant (WWTP) receive sludge generated from OWTSs. As a measure to utilize the excess capacity caused by the population decline, I designed two project models: one introducing nitrification promotion and denitrification operation at a WWTP with standard activated sludge method; and the other combining energy savings, renewable energy generation, and demand response at a WWTP with oxidation ditch method. Effectiveness of these models was evaluated by greenhouse gas emissions and project costs.

研究分野：環境システム学

キーワード：下水道区域メッシュ 下水道区域の縮小 汚泥処理機能統合 余剰能力の有効利用 デマンドレスポンス エネルギー自給 温室効果ガス排出削減 事業コスト評価

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地域の生活排水処理インフラは、集約処理方式(下水道および下水処理場)と個別処理方式(浄化槽およびし尿処理施設)の分担構造の中で整備されてきた。一方で、地方農村域における人口減少の将来的な進行が外的要因となり、その再編が求められる。ここで、再編に向けた取組みとしては下水道区域の再考(浄化槽設置への転換)と、浄化槽汚泥の処理に係る汚泥処理機能統合(下水処理場による浄化槽汚泥の受入を通じた汚泥処理機能の一元化)が挙げられる。集合処理方式では人口減少に応じて1人あたりのインフラ管理費用が増加するのに対し、個別処理方式では人口減少速度に応じて適切なダウンスizingが可能となり、1人あたりのインフラ管理費用の増加傾向を低減できる可能性を有している。一方で、個別処理方式において水処理を担う浄化槽から発生する浄化槽汚泥の処理をし尿処理施設に依存している状態では維持管理費用の大幅な低減は望めず、下水処理場側での汚泥処理機能統合が求められる。

本研究では、汚水処理施設の10年概成で取り込まれてきた下水道拡張計画区域の見直しに留めず、下水道既整備区域からの撤退(浄化槽設置への変更)を対象として、全国スケールでの撤退ポテンシャルの把握を目指す。加えて、下水処理場による汚泥処理機能統合の展開にあたり、温室効果ガス(GHG)排出削減策との両立を目指す統合策の設計とその評価を試みる。

### 2. 研究の目的

下水道既整備区域のメッシュデータは国土数値情報(国土交通省提供)では公開されておらず、有料コンテンツ含めて活用可能なデータは存在しない。本研究課題では、下水道区域のメッシュデータ(3次メッシュ解像度)の推計手法を構築する。その上で、下水道既整備区域からの撤退ポテンシャルを分析することを目的とする。

下水道既整備区域の縮小と浄化槽設置への転換、下水処理場での浄化槽汚泥の受入れによる汚泥処理機能統合を対象として、生活排水処理インフラ再編に対するシナリオ解析を実施する。維持管理の効率化とGHG排出削減を両立させる視点から、非エネルギー起源GHG( $\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$ )排出抑制策となる窒素除去型浄化槽(循環、流量調整機能を保有)への更新策、ならびに下水処理場(標準活性汚泥法施設)での硝化促進・脱窒運転の導入策に着目し、脱炭素化の進行により系統電力 $\text{CO}_2$ 排出係数が低下していくことを与件として、 $\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$ 排出削減を促進するアプローチの有用性を評価することを目的とした。

小規模下水処理場(Oxidation Ditch, OD法施設)においては、水処理量あたりの電力消費原単位( $\text{kWh}/\text{m}^3$ )が標準活性汚泥法と比較して高く、流入比率の低下が一層の電力消費原単位の向上を引き起こしている。小規模下水処理場での浄化槽汚泥の受入れを見据えた持続可能な改修策として、水処理プロセスの省エネルギー化(二点DO制御の導入)、創エネルギー化(太陽光発電(PV)施設との連結)、電力のデマンドレスポンス(DR)が可能な小規模下水処理場のモデリングを行った。汚泥処理機能統合のDRの観点からの効果を評価することを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 下水道既整備区域の撤退ポテンシャル分析

##### 下水道区域メッシュの推計手法

全国スケールで下水道区域メッシュ(3次メッシュ解像度)を生成するためのアルゴリズムを構築した。具体的には、市町村単位での排水量(生活排水、営業用水、工業用水)を推計し、同単位での下水道普及率を乗じて、下水道流入量(概算値)を推計する。この概算値を用いて、3次メッシュデータ(国勢調査人口、排水量)を人口の大きい順に並べ、排水量の総和が概算値に到達した時点までのメッシュを下水道区域メッシュとして、市町村ごとに同メッシュを生成した。精度検証の結果、このアプローチでは、同一市町村内に公共下水道と特定環境保全公共下水道(特環)がある場合、特環のメッシュが生成され難い傾向があった。このため、もう1段階アルゴリズムを追加して、下水処理場が立地しているにも関わらず、周囲 $25\text{ km}^2$ に下水道区域メッシュのないエリアに対して、同メッシュを追加する補正を行った。

##### 将来人口を踏まえた低密度化の分析と撤退判定

1kmメッシュ別将来推計人口データ(H30国政局推計)(国土交通省提供・国土数値情報)を用いて、下水道区域メッシュの2015~2050年度にかけての将来人口密度を推計した。下水管渠の更新開始時期を2025年度とし、同年度において30人/ha未満(下水管渠の更新を検討する時点での目安)、かつ2050年度において20人/ha未満(将来における人口減少の進行を考慮した目安)の両方の条件に合致する下水道区域メッシュを撤退候補として抽出し、そのエリア(メッシュ数ならびに面積)を推計した。

#### (2) 生活排水処理インフラ再編のシナリオ解析

##### 標準活性汚泥法施設での汚泥処理機能統合

汚泥処理機能統合については、同事業を実施している下水処理場を対象にアンケート調査(回答:8施設)を実施し、し尿・浄化槽汚泥の受入に伴う水処理ならびに汚泥処理への影響、影響

に対する対策や設備増強の有無を把握した。加えて、同事業の促進と連動して検討課題となる標準活性汚泥法施設での硝化促進・脱窒運転に着目し、運転が行われている下水処理場に対するアンケート調査（回答：28施設）を通して、モデリングに用いるパラメータ値を整理した。し尿・浄化槽汚泥の受入れに向けて下水処理場が必要とする設備改修・増強の量を分析することが可能となる設計支援モデルを構築した。加えて、安定した硝化・脱窒反応の制御による水処理プロセスからの $N_2O$ 排出係数の低下、ならびに放流水 T-N 濃度を低下させることによる処理後排水の自然界分解に伴う $N_2O$ 排出の低減に着目すると、反応タンクでの曝気動力（電力消費に伴う $CO_2$ 排出）が増える方向に寄与したとしても、硝化促進・脱窒運転を導入した方が有利に働く可能性があり、同運転の効果の分析が可能な物質・エネルギー収支モデルを構築した。

生活排水処理インフラ再編計画の設定

モデル地域（2015年度の人口70,050人、うち下水道人口40,539人）を対象に、設計した生活排水処理インフラ再編計画に対するシナリオ解析を行った。2015～2030年度にかけて、排水処理系では汚水未処理人口の合併処理浄化槽人口への転換（[A]：未解消、[B]：早期解消）し尿・浄化槽汚泥の処理機能統合（[分担]：し尿処理施設での処理、[統合]：下水処理場による共同処理）の効果と比較検証するための設定とした。ここで、下水処理場は標準活性汚泥法施設であり、[統合]では嫌気性消化とバイオガス発電の導入も行われるとした。合併処理浄化槽の設置に係る条件設定として、汎用品ではなく窒素除去型が選択されるケースを[-N]とした。同様に、標準活性汚泥法施設において硝化促進・脱窒運転が導入されるケースを[-N]とした。2030～2050年度にかけては、下水道既整備区域の一部縮小も検討対象とした（[継続]：下水道区域メッシュの変更なし、[撤退]：低密度化が顕著なエリアに対する同メッシュの縮小）。

系統電力 $CO_2$ 排出係数[kg- $CO_2$ /kWh]の設定に関しては、2015年度の0.587に対して、中期目標年である2030年度には0.370に到達し、2050年度までには脱炭素化に進行に伴い0.050まで低下している外的条件を想定した。

### (3) 小規模下水処理場でのデマンドレスポンスと汚泥処理機能統合

高時間解像度での電力需要量推計モデルの開発

小規模下水処理場（OD法施設）を対象に、電力の自立化とGHG排出削減に向け、敷地内でのPVの大規模設置と連結した小規模下水処理場の電力需給バランスモデルを開発した。反応タンクでの必要酸素量（AOR）ならびに供給酸素量（SOR）の理論値、曝気装置の稼働に基づくSORの出力値の推計に基づき、下水処理場の電力需要を30分解像度で推計できるモデルを開発した。下水処理場の年間総電力要需量と年間PV総発電量がおよそ一致するようにPVの敷設面積を稼働計画ごとに設定した。年・月・日単位でPV電力の自給率（下水処理場の電力消費量のうちPV電力により賄えた割合）ならびに消費率（PV電力のうち下水処理場で自家消費できた割合）を評価した。加えて、自給率の向上に対するGHG排出量削減への寄与、消費率の向上に対する事業コスト（正味現在価値、NPV）改善への寄与を評価した。

解析対象とした稼働計画

Baseケースでは一般的なOD法（間欠曝気方式）での稼働を再現し、Save-Eケースでは二点DO制御（OR制御が可能な連続曝気方式）を導入して水処理プロセスの省エネルギー化を図るとした。DR-WではSave-Eに加え、水処理プロセスでのDRを実施する稼働計画とした。未使用となっている反応タンク1槽を、流入水に対する負荷調整槽として活用し、PV発電時間帯に合わせて曝気装置（二点DO制御）の高負荷運転の時間帯を配置する稼働スケジュールを組み込んだ。DR-W+Sケースでは、DR-Wに加え、浄化槽汚泥の受入を含む汚泥処理プロセスでのDRを実施する稼働計画とした。対象としたモデル地域の人口条件は下水道人口が3,452人、浄化槽等人口が3,634人であり、濃縮機での浄化槽汚泥の受入れと、脱水機の稼働日数・時間・負荷率を踏まえたDRを検討した。DR-Wでの電力需給バランス推計結果を踏まえ、PVの余剰電力が大きい月（4～8月、3月）に浄化槽の清掃（汚泥の収集）業務を集中させる設定とした。

## 4. 研究成果

### (1) 下水道既整備区域の撤退ポテンシャル分析

全国スケールで下水道区域メッシュを生成するとともに、撤退候補となるエリア（撤退ポテンシャル）の3次メッシュ（ならびにその下水道区域面積）を推計した。本研究で得られた解析結果は、今後の汚水処理方式の分担のあり方（下水道供用区域と浄化槽設置区域の最適な分担）を検討するための基盤データとして活用することが可能である。下水道区域の撤退判定にあたっては、管渠延長距離や高低差（ポンプの有無）、下水処理場の維持管理状況に対して、地域ごとに検討要素があるため、撤退判定条件を変更して解析することが可能なモデル仕様とした。

図1に、近畿圏を対象とした撤退ポテンシャルの推計結果を示す。下水道区域の撤退にあたっては、計画としては2種類に分類され、下水道管渠の一部撤退（供用区域の縮小）に限定せず、下水道事業全体からの完全撤退（全供用区域の撤退ならびに下水処理場の廃止）も含まれる。特に後者の完全撤退については、都市計画区域外で行われている特環下水道事業が主な対象となることが明らかとなった。この点、特環下水道としての整備エリアの保有状況が大きい兵庫県や京都府で撤退候補エリアが大きい発生する。また、琵琶湖の水質保全を目的に下水道の普及を精力的に行ってきた滋賀県において、流域/公共下水道に対して一部撤退エリアが広範囲で生じることを明らかにした。

(a) 撤退エリアと判定されたメッシュの数

	完全撤退エリア <sup>a</sup>		一部撤退エリア <sup>b</sup>	
	総計	うち特環 <sup>c</sup>	総計	うち特環 <sup>c</sup>
兵庫	175	173	483	131
滋賀	12	3	299	0
京都	61	56	197	20
奈良	6	6	79	0
三重	22	22	59	3
大阪	6	2	67	1
和歌山	13	8	23	0

- <sup>a</sup> 下水道事業全体からの完全撤退（全供用区域の撤退ならびに下水処理場の廃止）  
<sup>b</sup> 下水道管渠の一部撤退（供用区域の縮小）  
<sup>c</sup> 特定環境保全公共下水道に限定した値

(b) 撤退エリアメッシュの出力結果

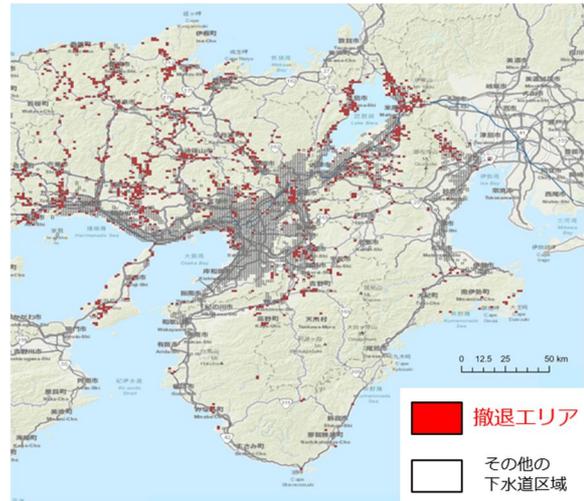


図1 下水道撤退ポテンシャルの推計（近畿圏を対象）

## (2) 生活排水処理インフラ再編のシナリオ解析

汚水処理方式別人口の将来予測（浄化槽の設置基数ベースでの予測を含む）を行い、人口減少と汚水処理方式比率を考慮したシナリオ解析を行った。ここでは GHG 排出量での評価事例を示す。

中期目標年である 2030 年度に対し、下水処理場での污泥処理機能統合に着目して GHG 排出量を評価した結果を図 2 に示す。汚水未処理人口の解消に伴い下水道接続率が向上し、下水処理場での GHG 排出量の増加を招く（[A-分担] と [B-分担] の比較）。一方で、下水処理場による污泥処理機能統合と合わせて嫌気性消化・バイオガス発電を導入することで GHG 排出量を低下できる（[A-分担] と [B-統合] の比較）。加えて、硝化促進・脱窒運転を図る [B-統合-N] では、年間 535 t-CO<sub>2</sub>eq まで GHG 排出量を低減できる結果となった。

長期目標年である 2050 年度に向けて、浄化槽を含む生活排水処理インフラ全体での GHG 排出量を評価した結果を図 3 に示す。前提として 2050 年度に人口が 37,327 人（うち下水道人口は 18,151 人）まで半減する条件下であり、人口減少により GHG 排出が低下する。加えて、系統電力 CO<sub>2</sub> 排出係数の脱炭素化により CO<sub>2</sub>（電力消費）も自動的に低下する。その中では、CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>O 排出の相対的な比率が高まっていく。よって、高度処理仕様の浄化槽（循環、流量調整機能あり）の設置割合を高めることによる CH<sub>4</sub> ならびに N<sub>2</sub>O 排出の低下、ならびに下水処理場での硝化促進・脱窒運転による N<sub>2</sub>O 排出削減の貢献度が高まることを定量的に示した。

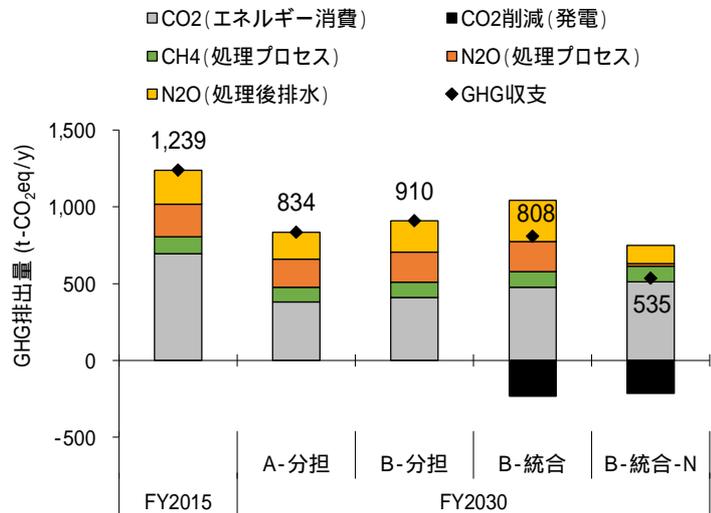


図2 下水処理場における GHG 排出量評価結果（2030 年度）

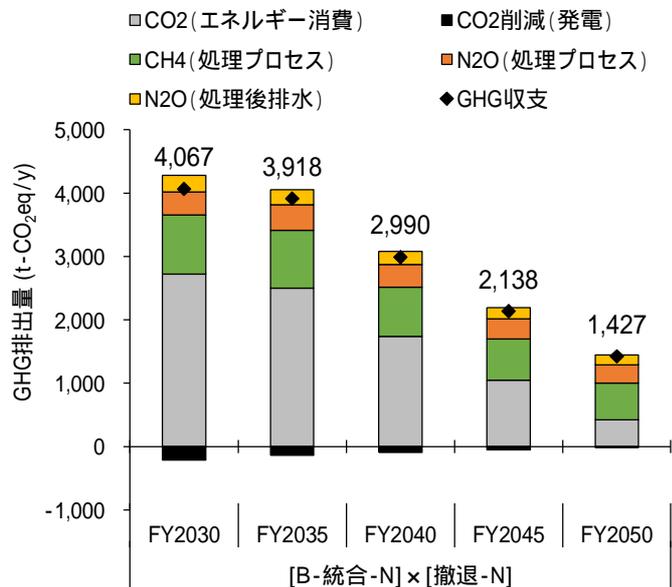


図3 生活排水処理インフラ全体での GHG 排出量評価結果

地方農村域における生活排水処理インフラの更新にあたっては、汚水処理系と汚泥処理系を分類した上で、汚水処理系に対しては下水道と浄化槽の最適な分担、汚泥処理系に対しては下水処理場への汚泥処理機能統合が有用となる。経済性に加えて、GHG 排出量を評価項目とした環境性での評価においては、非エネルギー起源 GHG (CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>O) 排出削減に対する相対的な優先度が高まる。下水道人口の低下は下水処理場での流入比率の低下を招くが、反応タンクの余剰能力を活かして前段を無曝気とする硝化促進・脱窒運転の導入は、N<sub>2</sub>O 排出削減に貢献することができる。本研究での成果として、標準活性汚泥法施設での余剰能力を活用した GHG 排出削減策の有効性を提示した。

### (3) 小規模下水処理場でのデマンドレスポンスと汚泥処理機能統合

小規模下水処理場(晴天時最大処理水量が 10,000 m<sup>3</sup>/d 未満の施設、全国 1,451 施設)のうち、OD 法を採用している施設は 1,013 施設(約 70%)を占め、複数の水処理系統のうち未使用な反応タンクを保有する施設が 378 施設(概算値)ある(下水道統計・2021 年度実績データより)。地域の人口減少に伴い下水道人口が低下していく中、OD 法施設での余剰能力を活用した省エネルギー・創エネルギー・DR の事業モデルを提案した。具体的には、流入水量の低下に伴い未使用となったタンクは負荷調整槽としての活用が可能であり、二点 DO 制御への改修(OR 制御が可能で連続曝気方式への変更)と組み合わせることで電力の DR が実装可能となる。

DR-W+S における 1 日の電力需要バランスの調整例を図 4 に示す。PV 発電曲線に対して、流入水の負荷調整により曝気装置の高負荷運転時間帯を昼間に配置することで、PV 電力の場内消費量を増加することができる。PV 電力余剰量の低減に向けては、汚泥処理機能統合も寄与し、脱水機の稼働時間を晴天日の昼間に配置することで貢献できる。

時間帯別の電力需給バランスを、年間を通して集計した自給率ならびに消費率の評価結果を図 5 に示す。消費率の観点から、Base の 44.1%に対して、DR-W では 54.4%(10.3%増)、DR-W+S では 58.2%(追加で 3.8%増)となり、PV 電力の自家消費の向上効果を確認することができる。

改正 FIT 下での売電単価の視点から、PV 電力余剰の低下は NPV に代表される事業コストの改善につながる。事業期間を 20 年とした NPV での評価の結果、Base では -4 百万円となり投資回収が図れない状況であったことに対して、DR-W では 30 百万円、DR-W+S では 29 百万円となり、ともに 14 年目で投資回収できる(NPV が正となる)結果を得た。下水処理場内での PV の大規模敷設は初期費用が大きな事業となるが、PV 電力の自給率ならびに消費率を高める DR の効果は大きく、事業コストの改善につながることを明らかにした。

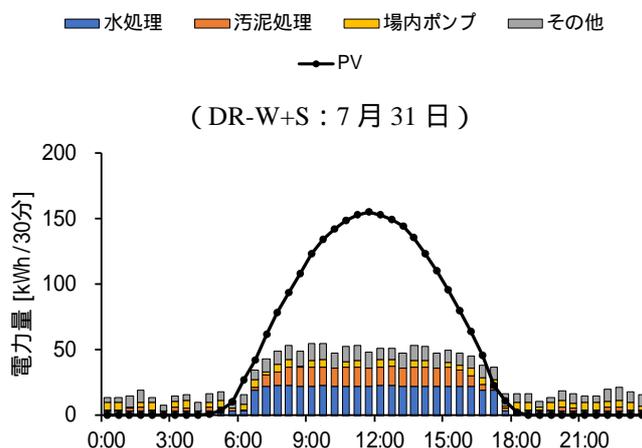


図 4 下水処理場の時間帯別電力需給バランスの例

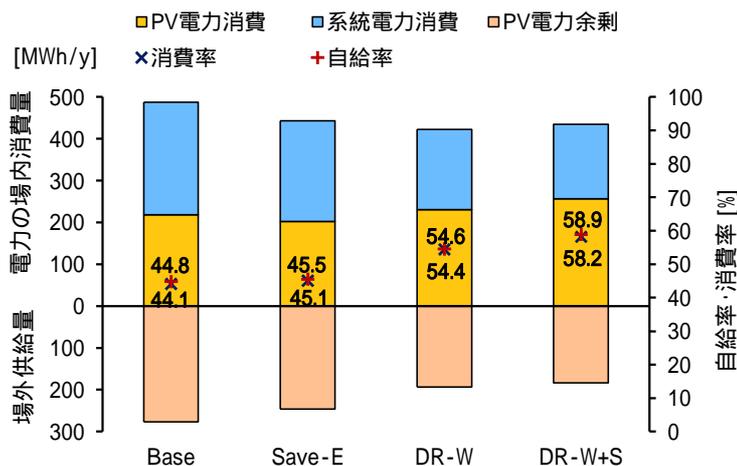


図 5 年間を通しての自給率ならびに消費率の評価

### (4) 研究成果の総括

- ・ 汚水処理施設の分担のあり方(下水道供用区域と浄化槽設置区域の最適な分担)を検討するための基盤データとして、全国スケールで下水道区域メッシュ(3次メッシュ解像度)を生成し、低密度化の将来予測値、下水道区域撤退候補エリアの試算結果を提示した。
- ・ 下水道人口の減少に起因する余剰能力の活用方策として、下水処理場(標準活性汚泥法施設)での汚泥処理機能統合と硝化促進・脱窒運転の導入効果を提示した。
- ・ 下水道人口の減少に起因する余剰能力の活用方策として、小規模下水処理場(OD法施設)での省エネルギー・創エネルギー・DRの事業モデルを提案した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 奥野文佳, 中久保豊彦, 牧誠也, 平野勇二郎	4. 巻 79(26)
2. 論文標題 小規模下水処理場での電力需要マネジメントモデルの開発と太陽光発電導入策への適用	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集G (環境)	6. 最初と最後の頁 23-26008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.23-26008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nakakubo Toyohiko, Kawabata Midori, Ishikawa Yuriko, Iwasaki Yuichi	4. 巻 9(11)
2. 論文標題 Modeling the effect of improved sewage disposal rates on ecological status for aquatic organisms in Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Heliyon	6. 最初と最後の頁 e20943
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.heliyon.2023.e20943	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 王柯樺, 中久保豊彦
2. 発表標題 ごみ焼却施設における技術条件の違いを踏まえた汚泥混焼機能の比較評価
3. 学会等名 第33回廃棄物資源循環学会研究発表会
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 高橋茜, 中久保豊彦
2. 発表標題 窒素管理に着目した汚泥の集約処理拠点となる下水処理場の環境性評価
3. 学会等名 第50回環境システム研究論文発表会
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 奥野文佳, 中久保豊彦, 牧誠也, 平野勇二郎
2. 発表標題 太陽光発電を活用した小規模下水処理場の電力需要マネジメントモデルの構築
3. 学会等名 令和4年度廃棄物資源循環学会関東支部主催研究発表会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 高橋茜, 中久保豊彦, 霧巻峰夫
2. 発表標題 下水処理場における物質収支解析モデルの開発：し尿・浄化槽汚泥受入による影響評価に向けて
3. 学会等名 第49回環境システム研究論文発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋茜, 中久保豊彦
2. 発表標題 バイオマス受入を見据えた標準活性汚泥法施設での硝化促進・脱窒運転の評価
3. 学会等名 令和3年度廃棄物資源循環学会関東支部主催研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥野文佳, 中久保豊彦, 牧誠也, 平野勇二郎
2. 発表標題 小規模下水処理場での電力需要マネジメントモデルの開発と太陽光発電導入策への適用
3. 学会等名 第51回環境システム研究論文発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------