

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

1RF-1904 事業効率化と環境価値創出の両立を目指す排水処理・汚泥資源化  
システムの再編

(JPMEERF20191R04)

令和元年度～令和3年度

Restructure of the Wastewater Treatment and Sludge Recycling Systems to Achieve  
Both the Improvement in Business and Environment Performances

〈研究代表機関〉

国立大学法人お茶の水女子大学

令和4年5月

## 目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	12
II-1 事業効率化と環境価値創出の両立を目指す排水処理・汚泥資源化システムの再編 （国立大学法人お茶の水女子大学）	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
III. 研究成果の発表状況の詳細	27
IV. 英文Abstract	29

## I. 成果の概要

課題名 1RF-1904 事業効率化と環境価値創出の両立を目指す排水処理・汚泥資源化システムの再編

課題代表者名 中久保豊彦（国立大学法人お茶の水女子大学 基幹研究院自然科学系 准教授）

重点課題 主：【重点課題⑩】バイオマス等の廃棄物からのエネルギー回収を推進する技術・システムの構築

副：【重点課題⑮】大気・水・土壌等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び評価・解明に関する研究

行政要請研究テーマ（行政ニーズ） (1-6) 人口減少、高齢化などの社会情勢を踏まえたIoT等の活用も含めた持続可能な浄化槽システム構築に関する研究

研究実施期間 令和元年度～令和3年度

研究経費

8,580千円（合計額）

（各年度の内訳：令和元年度：3,120千円、令和2年度：2,730千円、令和3年度：2,730千円）

研究体制

（サブテーマ1）事業効率化と環境価値創出の両立を目指す排水処理・汚泥資源化システムの再編（お茶の水女子大学）

（他のサブテーマはない）

本研究のキーワード 汚水処理率、汚泥資源化、統合型更新計画、温室効果ガス、生態リスク

### 1. はじめに（研究背景等）

我が国における汚水処理インフラの整備は、処理コストの分岐点を踏まえて集合処理区域（下水道区域等）と個別処理区域（浄化槽区域）の分担により進められてきた。2020年度末における汚水処理人口普及率の全国値は91.7%まで到達しているが、人口規模5～10万人の市町村では87.1%、5万人未満の市町村では81.9%と低くなり、地方農村域において生活雑排水の未処理排出は依然として残っている。ここで、汚水処理人口普及率では下水道整備人口を分子とするため、普及率の一部に未接続人口も含めている（下水道等接続人口を分子とする割合を汚水処理率と定義する）。地方財源縮小時代において汚水処理率を向上させていくという課題を我が国は抱えている。一方で、汚水処理率を向上させることにより得られる水質改善効果については、十分に定量的評価がなされてこなかった。そこで本研究では、水生生物生息環境の視点から汚水処理率の向上がもたらす水質改善効果を評価するための手法の構築に取り組んだ。

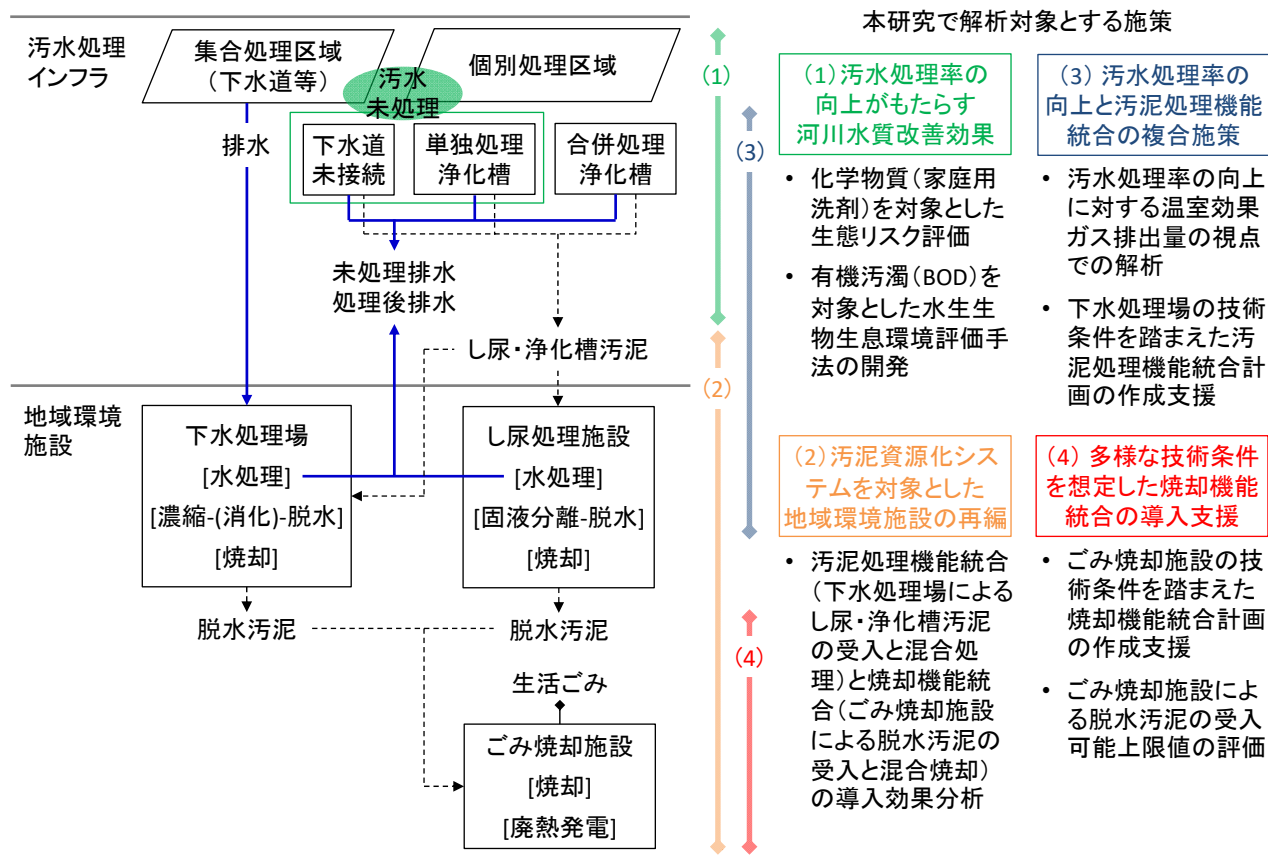
環境インフラ分野における事業効率化という視点では、排水処理を集合処理（下水道等）と個別処理（浄化槽）の分担で行うこと自体に変わりはないが、後段の汚泥資源化システムはその分担構造の見直しが求められる。し尿処理施設を取り巻く環境は大きく変化しており、し尿の発生量が減少し、し尿処理施設での処理対象物に占める浄化槽汚泥比率の増加に伴い、し尿処理を前提とした水処理設備（生物学的窒素処理）を維持するかどうかを検討課題となる。本研究では下水処理場によるし尿・浄化槽汚泥の受入に着目することで、汚泥資源化システムの再編を論じる。また、下水処理場における脱水汚泥を

対象としたエネルギー化技術の導入は、経済性の観点から大都市の下水処理場に限定されるため、中小下水処理場において脱水汚泥の処理に要するエネルギー効率を高める手段についても、汚泥資源化システムの再編の中で模索する必要性がある。本研究ではごみ焼却施設による脱水汚泥の受入と汚泥混焼を題材として、施策立案のための支援モデルを開発する。

本研究では、汚水未処理人口の解消策と汚泥資源化システムの再編計画を体系化させ、事業効率化による環境インフラ維持管理の頑健性向上と、水環境の健全化と地域環境施設の低炭素化による環境価値の創出、その両立を目指す地域循環圏像を提示することを目指す。

## 2. 研究開発目的

本研究課題の対象領域と解析対象とする施策を図 I-1 に示す。本研究では、汚水処理インフラにおける汚水未処理人口の解消策（下水道等未接続世帯による接続、単独処理浄化槽の合併転換）、ならびに地域環境施設（下水処理場、し尿処理施設、ごみ焼却施設）の再編計画を対象とする。地域環境施設の再編にあたっては、汚泥処理機能統合（下水処理場によるし尿・浄化槽汚泥の受入と混合処理）と焼却機能統合（ごみ焼却施設による脱水汚泥の受入と混合焼却）に着目する。



課題(1)では、汚水処理率の向上がもたらす河川水質改善の効果をシナリオ解析するための方法論を構築する。水生生物の生息環境保全の観点から、処理率が低いことが水生生物に対してどの程度の影響を与えているのか、処理率の向上により水生生物への影響がどの程度改善できるのか、定量的に評価することを目的とした。対象地域は、関東圏で最も汚水処理人口普及率の低い群馬県とした。解析モデルとして、生活雑排水に含まれる洗剤（LAS、AE）を対象とした生態リスク評価手法、ならびに有機汚濁物質（BOD）を対象とした水生生物生息環境評価手法の2種類を構築した。

課題(2)では、汚泥処理事業の効率化に向けた地域環境施設の再編計画の有効性を評価することを目的とした。具体的な再編計画として、汚泥処理機能統合と焼却機能統合の両方を対象とした。現在の交

付金関連指標は個別施設ごとの性能を評価するものであるため、個別施設での最適化ではなく、地域環境施設全体で評価すべき更新計画に対して適用するための指標として「地域環境施設全体でのエネルギー回収率」を提案し、その適用事例を示した。

課題(3)では、多様な地域での汚泥処理機能統合の立案支援に向け、下水処理場における技術条件ならびにし尿・浄化槽汚泥の受入量を踏まえ、汚泥処理プロセスからの逆流負荷が水処理プロセスに与える影響を評価するための方法論を構築した。その上で、汚水処理率の向上と汚泥処理機能統合の複合施策を、非エネルギー起源の $\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$ 排出に着目して温室効果ガス（GHG）排出量に基づき評価した。

課題(4)では、多様な地域での焼却機能統合の立案支援に向け、ごみ焼却施設による脱水汚泥の受入率、ごみ焼却施設の技術条件（ストーカ炉、流動床炉）を踏まえ、受入可能な脱水汚泥量の上限値を評価するための熱収支解析モデルを開発することを目的とした。ごみ焼却施設が新設時に汚泥混焼を想定して設計されるケースに加え、混焼を想定せず設計した既設施設において汚泥混焼を開始するケースも対象としてモデルを開発した。

### 3. 研究目標

サブテーマ1	事業効率化と環境価値創出の両立を目指す排水処理・汚泥資源化システムの再編
サブテーマリーダー/所属機関	中久保豊彦/国立大学法人お茶の水女子大学
目標	<p>2019年度研究目標は、汚水処理人口普及率の向上による生態リスク削減シナリオの設計・評価である。具体的には、群馬県を対象とし、汚水処理方式別人口分布に基づく洗剤排出分布図とAIST-SHANEL（産業技術総合研究所-水系暴露解析モデル）を連結させ、公共用水域における洗剤濃度を推計するためのモデルを開発する。汚水処理人口普及率の到達目標設定と将来人口予測に基づき、将来の汚水処理方式別人口分布をシナリオで表現する。種の感受性分布に基づくPAF（Potentially Affected Fraction of species）を評価指標とし、シナリオ解析を通して生態リスク削減効果を可視化する。</p> <p>2020年度研究目標は、横断系（排水処理、汚泥資源化）での温室効果ガス排出削減シナリオの設計・評価である。具体的には、浄化槽ならびに地域環境施設（下水処理場、し尿処理施設、ごみ焼却施設）を対象とした連携型更新計画を設計・評価するための支援モデルを開発する。多様な循環圏スケール（中核自治体単独、中核自治体と小規模自治体の連携、小規模自治体間の連携、流域下水道事業による集約）を対象としたケーススタディを積み重ねることにより、地域の環境施設全体での最適化を図るための更新計画論を体系化する。</p> <p>2021年度研究目標は、人口減少社会への頑健な適応に向けた事業効率性評価と環境価値の可視化である。具体的には、2019年度研究のとりまとめに向け、化学物質管理分野における生態リスク削減対策を対象とした費用対効果の分析事例のレビューを通して、生態リスク管理基準を体系化する。汚水処理人口普及率の向上による生態リスク削減の費用対効果を分析し、管理基準との比較・検証を行う。また、2020年度研究のとりまとめに向け、多様な循環圏スケールを対象としたケーススタディにコスト評価を加え、更新計画の策定支援に向けた技術資料・マニュアルを作成する。事業コスト面での環境インフラ維持管理の頑健性の向上と、温室効果ガスの排出削減を両立した地域循環圏像を描く。</p>

備考：中間研究成果報告書において、研究計画書に基づき設定。

4. 研究開発内容

(1) 汚水処理率の向上がもたらす河川水質改善効果のシナリオ解析

群馬県を対象として、汚水処理方式別人口の分布データを3次メッシュベース（1×1 km<sup>2</sup>）で作成した。汚水処理率が向上する将来を描くため、2015年度を基準とした現状シナリオに対し、2030年度に向け、シナリオAでは集合処理区域において未接続世帯による接続が進む施策（下水道接続率、農業集落排水接続率の向上）のみを反映させた。シナリオBでは、接続率の向上に加え個別処理区域での単独処理浄化槽の合併転換が進むことを反映させた（県の中期計画目標に到達）。2040年度を想定したシナリオCでは汚水処理率が100%に到達するシナリオとした。河川水質の改善効果の定量化に向け、解析モデルとして、生活雑排水に含まれる洗剤（LAS、AE）を対象とした生態リスク評価手法、ならびに有機汚濁物質（BOD）を対象とした水生生物生息環境評価手法の2種類を構築した。汚水処理率の向上に伴う河川水中での洗剤濃度の低減、ならびに生態リスクの削減効果を定量化すること自体は達成したが、大きな改善効果が得られない結果となった。そこで本研究では課題を追加し、BOD排出と河川水中汚濁解析を対象とし、水生生物生息環境評価手法の開発に取り組んだ。水質改善の効果は、清浄な水域に生息する傾向があり、生物調査において水質汚染の指標生物として用いられる底生生物（カゲロウ目、カワゲラ目、トビケラ目）の種数を指すEPT種数を採用し、生物生息環境を判定する指標として用いた。

本研究課題で開発した、河川水質改善効果のシナリオ解析を行うためのモデルの概要を図 I -2 に示す。産業技術総合研究所-水系暴露解析モデル（AIST-SHANEL ver. 3.0）を改良し、有機汚濁物質に適用するためのプログラミングとして再構築した。推計した河川水中BOD濃度にBOD濃度-EPT種数相関式を適用し、出力されるEPT種数の推計値を用いて生物生息環境を評価した。生息環境に基づく水質判定のための区分（Ⅰ：非常に良好、Ⅱ：良好、Ⅲ：良好と言えない、Ⅳ：生息しにくい）を設け、区分ごとの地点数を算出することにより、水質改善の効果を可視化した。市町村ごとに汚水未処理人口の解消のための費用（下水道等への接続費用、単独処理浄化槽の合併転換費用）を推計し、生物生息環境区分が改善する地点数に対する費用対効果を定量化した。

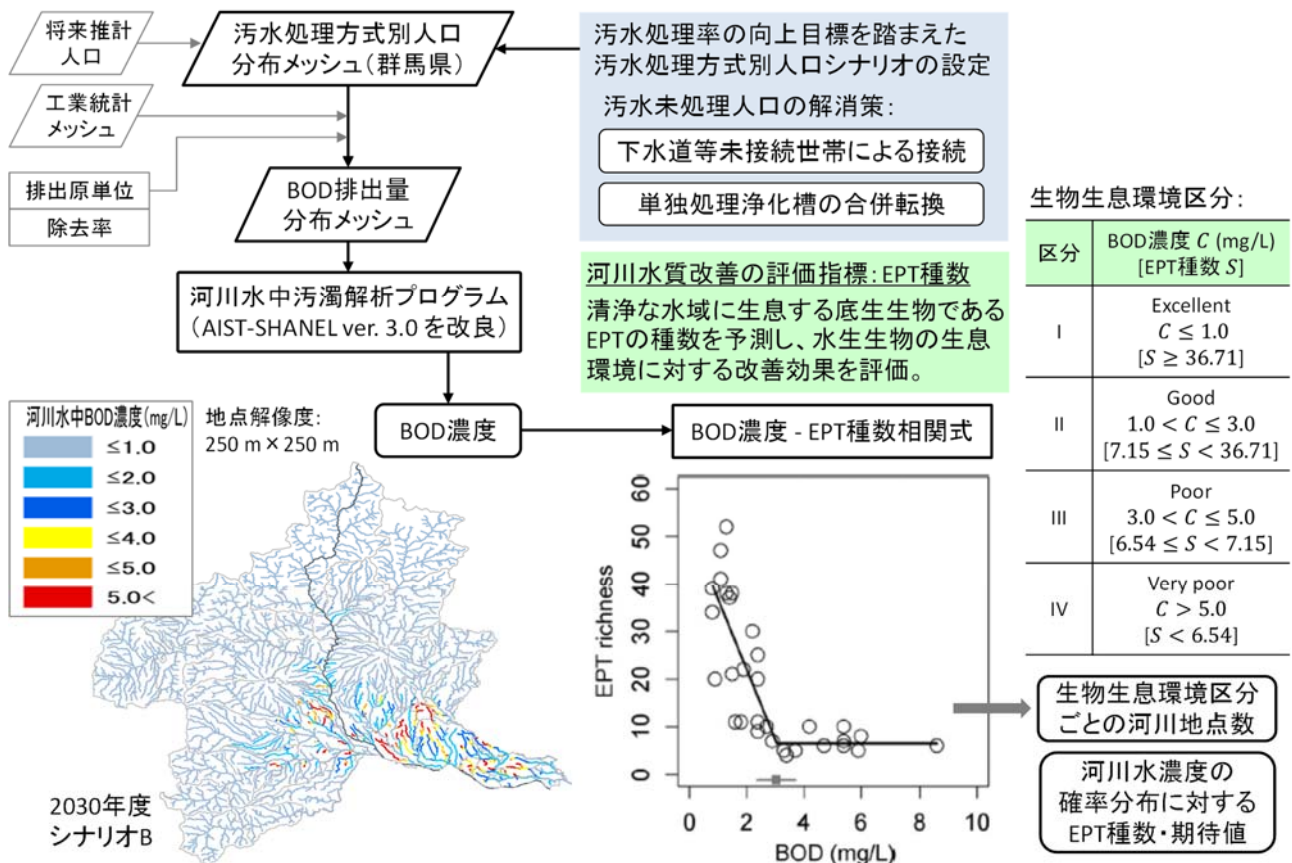


図 I -2 汚水処理率の向上がもたらす河川水質改善効果の解析枠組み

(2) 汚泥資源化システムを対象とした地域環境施設の再編

汚泥資源化システムの再編を解析するにあたり、本課題では特に焼却機能統合の評価に力点を置き、ごみ焼却施設（流動床炉、新設時に汚泥受入を想定した設計）で脱水汚泥を直接混焼する方式を対象とした熱収支解析モデルの開発に取り組んだ。解析シミュレーションの枠組みを図 I -3に示す。ごみ焼却施設においては、投入ごみのごみ組成が毎時変動するため、それに応じて投入ごみの低位発熱量も変動する。低質ごみが入る時間帯には燃焼ガス温度が低下するため、脱水汚泥を直接混焼する場合、低質ごみとの混焼時に燃焼ガス温度が低下することが懸念される。一方、ごみ焼却施設では焼却炉内で確保できる熱エネルギーは十分にあり、ボイラでの水冷壁収熱量を適切に下げて設計することにより、脱水汚泥の直接混焼に対応することができる。この熱環境をモデルで表現し、1年を6,720回（280日×24時間）解像度でシミュレーション解析することで燃焼ガス温度を推計し、燃焼ガス温度のベース値920℃に対し±50℃での運転管理を行うとし、年間での補助燃料消費の頻度と量を推計した。これにより、ごみ焼却施設での補助燃料消費を増やすことなく汚泥混焼ができることを示した。

中核自治体として計画処理人口を10万人とし（下水道人口比率：65%、浄化槽人口比率：35%）、2つの機能統合策（汚泥処理機能統合、焼却機能統合）が導入される更新計画に対する評価を行った。Case Aを汚泥処理機能統合のみが行われるケースとし、し尿処理場を廃止して浄化槽汚泥の処理機能を下水処理場に統合する。Case Bは汚泥処理機能統合と焼却機能統合の両方が行われるケースとした。機能統合計画の導入効果は、下水処理場での嫌気性消化の有無（あり：AD、なし：nonAD）を踏まえて評価した。消化が行われない条件下においては二液調質脱水機が着目され、直接脱水汚泥の含水率を70%程度まで低下させ、焼却機能統合の高効率化を図ることが可能となる。そこで、消化なしの条件では通常の脱水機を導入するCase B1（nonAD）、二液調質脱水機を導入するCase B2（nonAD）の2ケースを設けた。環境評価として、個別の施設に対してではなく地域全体での効率改善を見るための「地域環境施設全体でのエネルギー回収率」での評価、ならびにGHG排出量により評価を実施した。

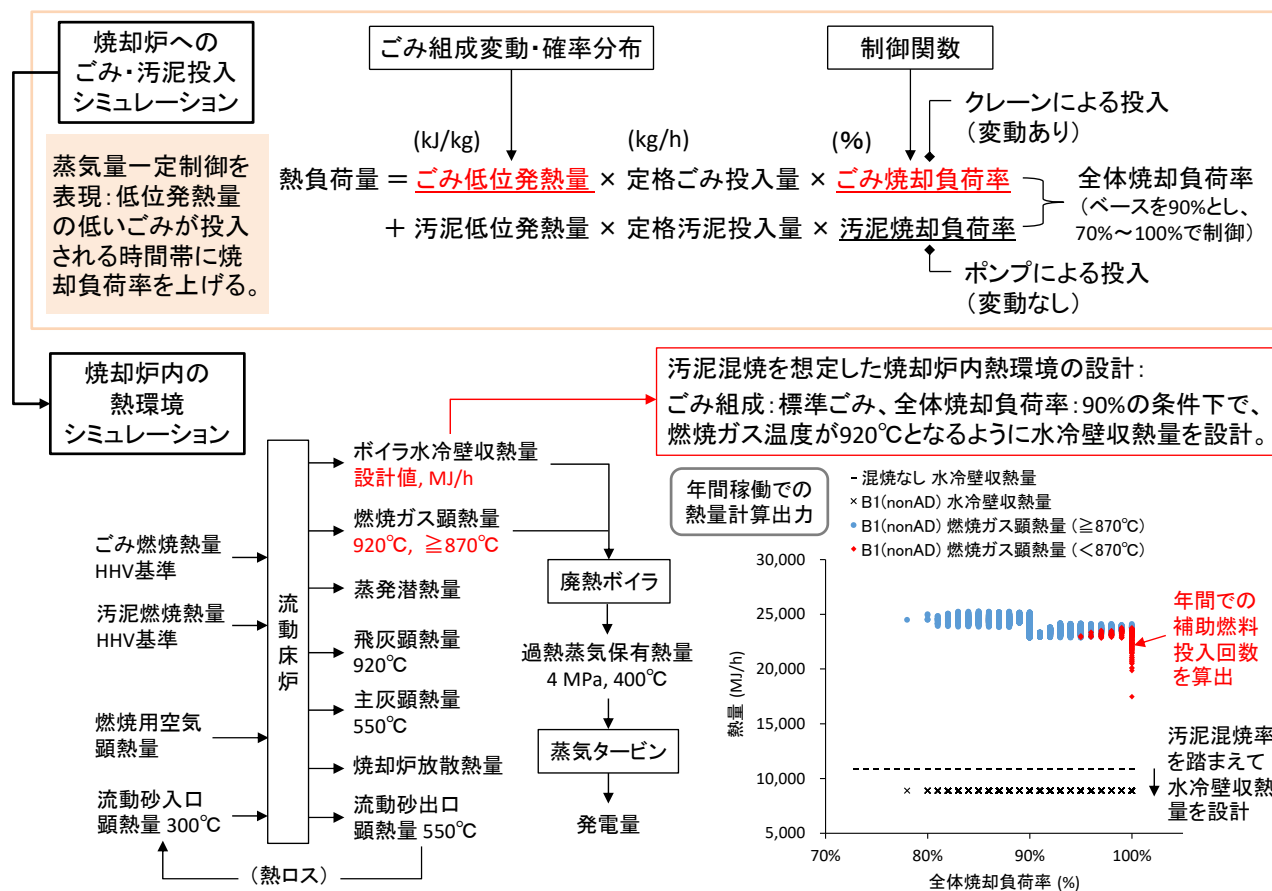


図 I -3 ごみ焼却施設（流動床炉）での汚泥混焼解析シミュレーションの枠組み

(3) 汚水処理率の向上と汚泥処理機能統合の複合施策

多様な地域での汚泥処理機能統合の導入支援に向け、実施する下水処理場において、排水処理の諸条件（流入水の水質、目標とする放流水質）やし尿・浄化槽汚泥の受入量の違いを反映した設備改修が求められる。下水処理場でのし尿・浄化槽汚泥の受入が汚泥処理プロセス側に与える影響については、必要となる処理能力の増設により対応できる。その上で、汚泥処理プロセスからの逆流負荷が水処理プロセスに与える影響を検討することが求められる。そこで本課題では、逆流負荷の影響が評価可能な下水処理場・物質収支モデルを構築した。モデルの概要を図 I-4 に示す。下水処理場によるし尿ならびに浄化槽汚泥の受入に対して、逆流負荷の増加が及ぼす反応タンクでの酸素消費量（ブロウ動力）の増加を踏まえ、電力消費、事業コストの増加を評価できるモデリング技法を構築した。これにより、汚泥処理機能統合策の導入支援につなげることが可能となる。

対象とする水処理プロセスは、標準活性汚泥法、標準活性汚泥法施設での硝化促進・脱窒運転、オキシデーションディッチ（OD）法とした。OD法は小規模自治体への適用も見据えて対象とした。標準活性汚泥法施設については、既存の反応タンクの余剰容量を活用し、反応タンクの前段に無酸素ゾーンを設け、返送汚泥比を高めて硝化液を循環させる方式を対象とした。3つの水処理方式に対し、脱水設備からの逆流窒素負荷が増加する嫌気性消化の有無を反映できる仕様とした。逆流窒素負荷の増加に対する対応として、標準活性汚泥法施設での硝化促進・脱窒運転の導入により、放流水T-N濃度の低減効果を把握できるモデルとした。

本課題では排水処理系をGHG排出量推計のバウンダリーとして、汚水処理率の向上と汚泥処理機能統合の複合施策を評価した。汚水処理方式別人口については、なりゆきで汚水処理率がほぼ向上しない Case X と、下水道等未接続世帯による接続ならびに単独処理浄化槽の合併転換が2030年度までに完了する Case Y（早期解消）を設けた。地域環境施設の更新計画については、Case I（下水処理場とし尿処理施設での個別処理）とII（下水処理場による汚泥処理機能統合）を設けた。Case II の下では下水処理場での設備改修が行われる施策も対象とした（N：標準活性汚泥法施設での硝化促進・脱窒運転、AD：消化・バイオガス発電の導入）。GHG排出量の勘定は非エネルギー起源のCH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>O排出に注目し、排水処理プロセス、処理後排水、未処理排水からの排出も対象とした。

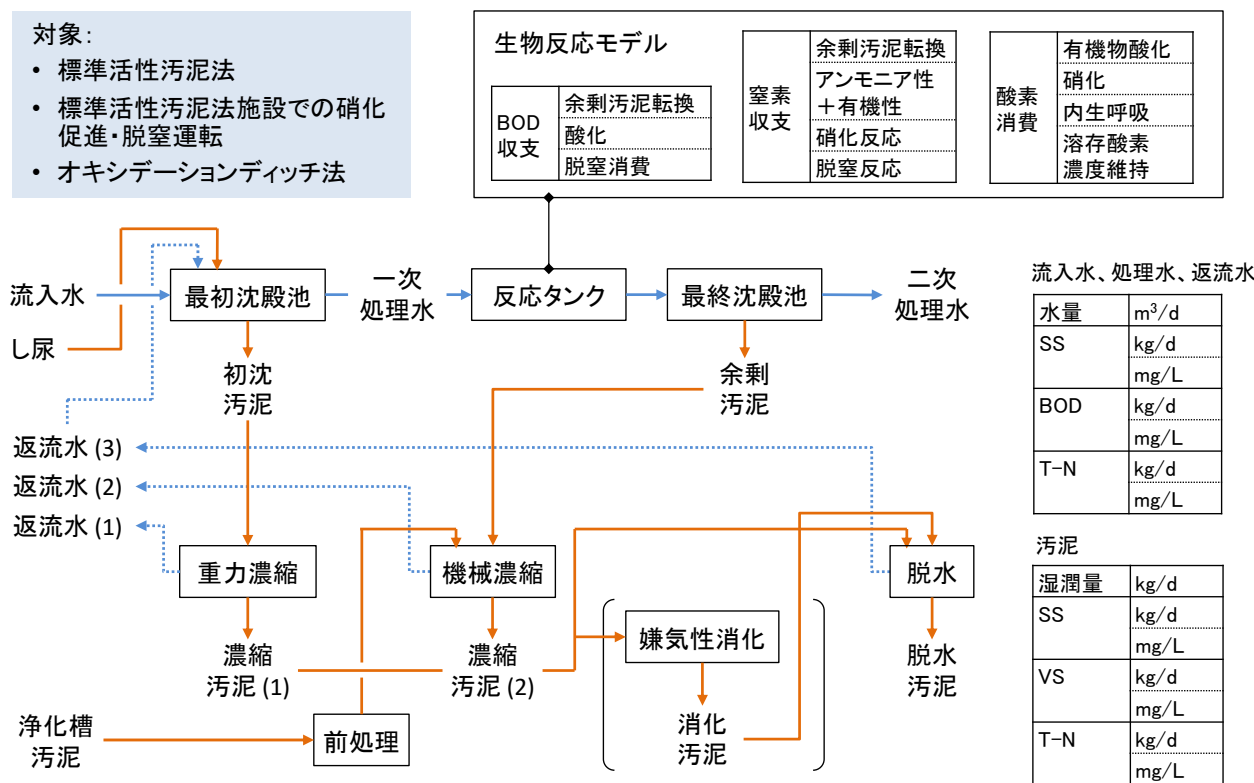


図 I-4 汚泥処理機能統合に向けた下水処理場・物質収支モデルの枠組み



(4) 多様な技術条件を想定した焼却機能統合の導入支援

多様な地域で焼却機能統合の実装を具体化していくにあたり、ごみ焼却施設での汚泥混焼に向けて受入可能となる汚泥量を把握することが必要となる。そこで本課題では、汚泥混焼時の焼却炉内熱環境を表現するため、年間稼働を6,720回（280日×24時間）解像度とする熱収支解析モデルを開発した。焼却炉のタイプとしてストーカ炉と流動床炉の2種類を扱う。また、新設時に脱水汚泥の受入を想定した施設計画、既設施設での脱水汚泥の受入の両方を対象とすることで、より多様な技術条件に対する受入能力を分析した。それぞれの技術条件に対する、ごみ焼却施設での汚泥受入率の上限値を分析するためのモデル設計の概要を図 I-5 にとりまとめた。なお、ごみ焼却施設での汚泥受入率は、湿潤重量ベースでの処理量（t-wet/h）に対し、汚泥受入率＝定格での汚泥処理量 / （定格でのごみ処理量＋定格での汚泥処理量）と定義した。ストーカ炉（条件：新設時に汚泥受入を想定した設計）以外の技術条件では、脱水汚泥を焼却炉に直接投入するため、汚泥受入率＝汚泥混焼率となる。

ストーカ炉では炉内の乾燥帯での熱収支を扱う必要があり、汚泥の直接混焼に対する適合性が低い技術仕様である。新設時に汚泥受入を想定する場合は、タービン抽気を活用した間接加熱型汚泥乾燥機を設置し、脱水汚泥を乾燥機で乾燥させた後に、乾燥汚泥を焼却炉に投入する方式とした。よって、タービンに投入する過熱蒸気量に対し、乾燥用に配分できる抽気量を汚泥受入の制約とした。

流動床炉は瞬時にごみを燃やす仕組みであるため、焼却炉内全体での熱収支を満たすように熱環境を設計すればよく、汚泥受入率を踏まえ適切にボイラ水冷壁収熱量を設計することにより、汚泥を直接、焼却炉に投入して混焼することができる。新設の段階で汚泥混焼を想定する場合、汚泥受入率の計画値を踏まえてボイラ水冷壁収熱量が設計される。また、既設の施設での汚泥受入を想定する場合には、新設時に可燃ごみのみの燃焼を想定して設計したボイラ水冷壁収熱量に対して、改修することで収熱量を低下させることができる（設計時の50%まで低下させることが可能とした）。そのため、既設の施設においても焼却機能統合への適合性が高い。

開発した熱収支解析モデルは、焼却機能統合の事業コスト評価に対しても活用できるものとした。

処理計画	汚泥混焼に関わる技術プロセス	汚泥の混焼方式と受入上限
<b>ストーカ炉</b> 条件：新設時に汚泥受入を想定した施設計画		<b>【混焼方式】</b> タービン抽気を活用した間接加熱型汚泥乾燥機を設置し、脱水汚泥を乾燥機で乾燥させた後に、乾燥汚泥を焼却炉に投入。 <b>【汚泥受入上限】</b> タービンに投入する過熱蒸気量に対し、抽気量（ボイラ給水加温用、汚泥乾燥用の総計）が30%以内となることを技術上の制約とした。
<b>ストーカ炉</b> 条件：既設施設での汚泥受入	<b>焼却炉内乾燥帯での熱収支</b> 	<b>【混焼方式】</b> 脱水汚泥を直接、焼却炉に投入。 <b>【汚泥受入上限】</b> 焼却炉内乾燥帯で汚泥含む燃焼物が十分に乾燥せず着火しない頻度。年間稼働を通して、同頻度が10%を超えないことを制約とした。
<b>流動床炉</b> 条件：新設時に汚泥受入を想定した施設計画	<b>焼却炉内全体での熱収支</b> 	<b>【混焼方式】</b> 脱水汚泥を直接、焼却炉に投入。 <b>【汚泥受入上限】</b> 新設時に焼却炉内のボイラ水冷壁収熱量を低下させる下限値。年間稼働を通じた燃焼ガス温度の変動値に対して、補助燃料消費の頻度（条件：燃焼ガス温度 < 850°C）が5%を超えないことを制約とした。
<b>流動床炉</b> 条件：既設施設での汚泥受入		<b>【混焼方式】</b> 脱水汚泥を直接、焼却炉に投入。 <b>【汚泥受入上限】</b> 供用後に改修し、焼却炉内のボイラ水冷壁収熱量を低下させる下限値（設計値の50%まで低下可能）。年間稼働を通じた燃焼ガス温度の変動値に対して、補助燃料消費の頻度が5%を超えないことを制約とした。

図 I-5 焼却機能統合に向けた汚泥受入率上限値の解析枠組み

## 5. 研究成果

### 5-1. 成果の概要

#### (1) 汚水処理率の向上がもたらす河川水質改善効果のシナリオ解析

河川水中BOD濃度の将来推計結果を踏まえ、群馬県下の河川地点（250m×250m解像度）を生物生息環境区分ごとに判定し可視化した分布図を作成した。個別河川に対する効果の可視化を通して、生活者が下水道接続、浄化槽更新に要する費用支出への理解を深めるための情報として活用することができる。

生物生息環境区分について、EPT種数はBOD濃度が3 mg/Lを超えると種数が小さくなる傾向があるため、BOD濃度3～5 mg/Lの区分Ⅲ（良好と言えない）、5 mg/Lを超える区分Ⅳ（生息しにくい）の地点数に基づき、汚水処理率の向上による水質改善効果を評価した。群馬県下の河川全体で区分Ⅲ・Ⅳとなる地点数の総計は、現状シナリオの1,610地点に対し、下水道等への接続が進むシナリオAでは1,212地点（25%削減）、単独処理浄化槽の合併転換の効果も加わるシナリオBでは619地点（62%削減）まで減少した。汚水処理率が100%に到達するシナリオCでは50地点（97%削減）にまで減少する結果となった。このように、汚水処理率の向上は水生生物の生息環境の改善に十分な効果をもたらすことを定量化した。

単独処理浄化槽の合併転換に向けた助成や公共浄化槽整備が市町村単位で検討されることを踏まえ、河川水質改善の効果を市町村単位で集計した。汚水未処理人口の解消がどの程度の地点数に対して生物生息環境区分の改善をもたらすかを、現状からシナリオB（県の中期計画目標下）への到達、シナリオBからC（長期計画目標下）への到達のそれぞれについて定量化した。加えて、解消に要する費用との比をとることで、費用対効果も推計した。費用対効果は、汚水処理率の向上が水質改善に及ぼす効果の効率性を判断する一助となる基礎データとして活用することが可能となる。また、現状シナリオにおいてBOD濃度が1 mg/Lを超過している地点（生物生息環境区分がⅡ、Ⅲ、Ⅳである地点）を市町村ごとに抽出して算定したEPT種数の期待値での評価結果に基づき、人為的な有機汚濁負荷の影響を受ける河川が、各市町村での全体的な傾向としてどの程度、生物生息環境区分が改善することにつながるのかをとりまとめた。これにより、市町村全体で見ても包括的にどの程度、生物生息環境が改善されるかを把握することができる基礎データを作成した。

#### (2) 汚泥資源化システムを対象とした地域環境施設の再編

2つの機能統合策（汚泥処理機能統合、焼却機能統合）を対象に、地域環境施設全体でのエネルギー回収率を評価した。下水処理場が消化槽を保有しない条件では、Base（nonAD）で15.1%、汚泥処理機能統合のみを導入するCase A（nonAD）で20.0%、焼却機能統合も合わせて行うCase B1（nonAD）で24.4%となり、機能統合策の導入効果が定量化された。消化ありの条件下においても傾向は同様であり、Base（AD）での20.0%と比較し、Case A（AD）で25.1%、Case B（AD）で29.2%と回収率が向上する。汚泥処理機能統合、焼却機能統合の実施により、着実な改善効果が得られることが示された。複数の地域環境施設を合わせてエネルギー収支を評価することが求められる更新計画に対しては、個別施設での交付金に関わる指標に加え、本研究で提案する指標を補完的に用いることで、適切かつ公平な判断基準を提供することができることを示した。

2つの機能統合策をGHG排出量により評価した結果では、ごみ焼却施設での汚泥混焼による燃料消費由来CO<sub>2</sub>排出の低減（ごみ焼却施設では水冷壁収熱量の適切な設計により汚泥混焼に伴う補助燃料消費の増加は生じない）に加え、汚泥焼却由来N<sub>2</sub>O排出の削減（ごみ焼却施設では燃焼ガス温度を平均920℃で制御）も効果として得られる。Base（nonAD）を基準としたGHG排出削減効果では、Case B2（nonAD）で59%の削減、Case B（AD）で57%の削減が可能であることが示された。地域のごみ・汚泥処理を対象として、GHG排出半減以上の削減効果が期待できることが示された。また、下水処理場で嫌気性消化を行わず、二液調質脱水条件下で焼却機能統合を行うCase B2（nonAD）が、消化を行うCase B（AD）と同性能の評価結果となった。焼却機能統合を実施する場合、脱水汚泥の含水率を低下させる施策が嫌気性消化の導入と同水準の効率改善を生み出すことを明らかにしたことも、有用な知見であると言える。

### (3) 汚水処理率の向上と汚泥処理機能統合の複合施策

汚泥処理機能統合の導入支援に向けては、下水処理場の改修が検討事項となる。本課題では下水処理場・物質収支モデルを作成し、し尿・浄化槽汚泥の受入量を踏まえ、汚泥処理プロセスからの逆流負荷が水処理プロセスに与える影響を評価する手法を構築した。これにより、汚泥処理機能統合に必要な設備増強量を把握することが可能となる。

同モデルの活用も含め、汚水処理率の向上と汚泥処理機能統合がGHG排出量に及ぼす影響について、排水処理系をバウンダリーとした評価を行った（対象エリアは群馬県の沼田市・みなかみ町、基準年を2015年度、目標年を2030年度とした）。汚水未処理人口が残るCase X-I（年間7,409 t-CO<sub>2</sub>eq）と解消されるCase Y-I（年間8,031 t-CO<sub>2</sub>eq）を比較すると、Y-Iでは未処理排水由来のCH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>O排出がなくなる一方、地域内での生活雑排水の処理量自体が増加するため、とりわけCO<sub>2</sub>排出（電力消費）とCH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>O排出（処理プロセス）の増加を招く結果となった。そのため、汚泥処理機能統合により下水処理場にし尿・浄化槽汚泥の処理機能を統合するとともに、下水処理場でのGHG排出削減策の導入を図る施策を評価した。汚泥処理機能統合を行うとともに標準活性汚泥法施設での硝化促進・脱窒運転を導入することにより（Case Y-II-N）、下水処理場でのCH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>O排出（処理プロセス）とN<sub>2</sub>O排出（処理後排水）を低減することができ、7,673 t-CO<sub>2</sub>eqとなる。硝化促進・脱窒運転が実施されている条件下で、汚泥処理プロセスに消化を導入するCase Y-II-N-ADでの年間GHG排出量は7,383 t-CO<sub>2</sub>eqとなり、生活雑排水の未処理排出が残るX-Iと同水準の排出量となる。生活雑排水の処理量を高まることによるGHG排出の増加分は、汚泥処理機能統合と下水処理場側でのGHG排出削減分により相殺することができる評価の一例を提示した。汚水未処理人口の解消は河川水質の改善に貢献していることを踏まえると、水質改善とGHG排出削減を両立できる施策を示すことができたとと言える。

### (4) 多様な技術条件を想定した焼却機能統合の導入支援

焼却機能統合の導入支援に向け、ごみ焼却施設で汚泥混焼を行うための施設設計（または改修）と受入可能量の評価を行うための熱収支解析モデルを開発した。本解析モデルを用いることで、異なる性状の汚泥（下水処理場からの直接脱水汚泥、二液調質脱水汚泥、消化脱水汚泥、し尿処理施設からのし尿脱水汚泥）に対して、汚泥受入率の上限値を分析することができる。また、可燃ごみの量・質の変化に対応する解析も可能であり、プラスチック分別の強化に伴うごみ組成変化などの諸条件を反映させることのできる仕様とした。本解析モデルは、焼却機能統合の導入によるエネルギー収支、GHG排出量、事業コスト評価にも活用することができる。

ごみ焼却施設における技術条件を踏まえ、汚泥受入率の上限値をケーススタディした結果、新設時に汚泥受入を想定した設計を行う場合は、消化脱水汚泥に対しても、ストーカ炉（乾燥機付き）において上限47%まで、流動床炉において上限63%まで、汚泥受入能力を確保することが可能であることを示した。新設時に汚泥混焼を想定する条件下では、ストーカ炉、流動床炉ともに汚泥受入能力を十分に保有していることを明らかにした。

ストーカ炉と流動床炉を比較して、流動床炉の場合は焼却炉内全体での熱収支（入熱量＝出熱量）を満たすように熱環境を設計すればよいため、汚泥混焼に対する適合性が高い。既設の施設での汚泥受入に対しても、設備改修でボイラ水冷壁収熱量を低下させることにより汚泥受入の準備が可能となる。流動床炉（条件：既設の施設での汚泥受入）においても、消化脱水汚泥に対して上限31%まで汚泥受入率を確保できる。焼却機能統合に向け下水処理場において二液調質脱水機で低含水率化を図ることも可能であり、二液調質脱水汚泥に対しては上限46%となることより、十分な受入能力を確保できる。一方で、ストーカ炉（条件：既設の施設での汚泥受入）では、乾燥帯での熱環境の管理が求められるため、汚泥受入率の上限値は低い水準に留まり、二液調質脱水汚泥に対しても上限値12%と算定された。既設のストーカ炉に対しては、し尿脱水汚泥（上限値8%と試算）の受入に留めるなど、限定した焼却機能統合策が検討事項となる。人口減少やごみ減量化に対して、ごみ焼却施設の供用後に汚泥混焼を検討することを想定した場合、流動床炉が技術面で有利となる。

## 5-2. 環境政策等への貢献

### <行政等が活用することが見込まれる成果>

本研究課題では、汚水処理率の向上がもたらす河川水質の改善効果を評価する手法を構築した。汚水未処理人口の解消（下水道等未接続世帯による接続、単独処理浄化槽の合併転換）には、生活者による費用負担が求められる。本研究で構築した手法を活用することで、生物生息環境の改善効果を可視化することができ、費用支出を促すための情報提供（効果の提示）が可能となる。また、自治体による公費支出（浄化槽設置整備事業、公共浄化槽等整備推進事業）に対し、その妥当性を判断する上での情報として、費用対効果を提示した。

事業効率化と連動した地域環境施設の更新計画として、汚泥処理機能統合（下水処理場によるし尿・浄化槽汚泥の混合処理）と焼却機能統合（ごみ焼却施設による脱水汚泥の混合焼却）の導入効果を示した。し尿処理施設での汚泥焼却、下水処理事業での汚泥焼却が行われていることを基準として、温室効果ガス排出量で評価した結果、2つの機能統合策を導入することで、半減以上の削減効果が得られることを明らかにした。対象とした施策は、地方公共団体実行計画に反映させることが可能な施策である。また、個別の自治体が汚泥処理機能統合を立案することを支援する手法としての下水処理場・物質収支モデル、焼却機能統合の立案を支援する熱収支解析モデルを開発した。これにより、多様な地域での施策立案を支援することができる技術資料とした。

## 5-3. 研究目標の達成状況

汚水処理率の向上を反映させた生態リスク削減効果のシナリオ解析モデルの構築にあたっては、洗剤を対象として、種の感受性分布に基づく生態リスクを評価することを研究目標とした。このモデル構築自体は達成し、研究成果物は論文（中久保・石川，2020）として取りまとめた。一方で、汚水未処理人口の解消を促す、大きな改善効果を評価結果より導くことはできなかった。そこで、研究課題を追加し、BOD排出と河川水中汚濁解析を対象とし、水生生物生息環境評価手法の開発に取り組んだ。研究資金の運用にあたっては、河川水中汚濁解析プログラム（AIST-SHANEL ver. 3.0を改良）の作成を追加した。シナリオ解析の結果、汚水処理率の向上がもたらす生物生息環境の改善効果を定量化し、その改善効果が大きいことを示すとともに、費用対効果を提示するという目標に到達した。

地域環境施設（下水処理場、し尿処理施設、ごみ焼却施設）を対象とした連携型更新計画を設計・評価するための支援モデルは、ごみ焼却施設（流動床炉、新設時に汚泥受入を想定した設計）で脱水汚泥を直接混焼する方式を対象とした熱収支解析モデルの開発を通して構築した。地域の施設全体で最適化を図る汚泥処理機能統合と焼却機能統合の導入効果を温室効果ガス排出量で評価した結果、2つの機能統合策を導入することで、57%～59%の削減効果が得られることを示し、事業効率化と温室効果ガスの排出削減を両立する地域循環圏像を提示するという目標に到達した。

多様な循環圏スケールでの更新計画（汚泥処理機能統合、焼却機能統合）の策定支援に向けて技術資料・マニュアルを作成するという目標に対しては、汚泥処理機能統合に対して下水処理場・物質収支モデルを、焼却機能統合に対して熱収支解析モデルを構築することで到達した。下水処理場・物質収支モデルでは、返流負荷が水処理プロセスに与える影響も含め下水処理場で必要となる設備増強量を把握することが可能となる。熱収支解析モデルでは、汚泥混焼計画を立案するごみ焼却施設に対して焼却炉タイプ（ストーカ炉、流動床炉）と新設/既設別を踏まえて受入可能な脱水汚泥量を把握することができる。

## 6. 研究成果の発表状況

### 6-1. 査読付き論文

<件数>

3件

<主な査読付き論文>

1) 中久保豊彦、石川百合子：土木学会論文集G（環境）76(6)，II\_129-II\_140（2020）

「汚水処理率の改善に伴う生態リスク削減効果の解析－群馬県汚水処理計画を対象として－」

2) 盧梓馨、王柯樺、中久保豊彦：土木学会論文集G（環境）76(6)，II\_153-II\_164（2020）

「地域全体でのエネルギー収支の改善に向けた汚泥処理機能・焼却機能の統合」

3) 村岡治城、尾崎平、中久保豊彦：土木学会論文集G（環境）76(6)，II\_305-II\_317（2020）

「人口減少下の下水処理施設更新に係る集約型・分散型更新施策のライフサイクル評価－小規模施設が点在する地域を対象として－」

### 6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

### 6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	1件
口頭発表（学会等）	15件
「国民との科学・技術対話」の実施	0件
マスコミ等への公表・報道等	0件
本研究に関連する受賞	1件

## 7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 8. 研究者略歴

研究代表者

中久保 豊彦

大阪大学工学部卒業、博士（工学）、現在、お茶の水女子大学基幹研究院自然科学系准教授

## II. 成果の詳細

### II-1 事業効率化と環境価値創出の両立を目指す排水処理・汚泥資源化システムの再編

国立大学法人お茶の水女子大学

基幹研究院自然科学系 中久保豊彦

<研究協力者>

国立研究開発法人産業技術総合研究所 石川百合子

荏原環境プラント株式会社 長洋光

#### [要旨]

本課題では排水処理・汚泥資源化システムの再構築に向け、汚水未処理人口の解消策、地域環境施設の再編計画の効果を解析するためのモデル開発に取り組んだ。汚水未処理人口の解消策（下水道等未接続世帯による接続、単独処理浄化槽の合併転換）に関しては、群馬県を対象として河川水中汚濁解析プログラム（AIST-SHANEL ver. 3.0を改良）を構築し、河川水中BOD濃度の推計、EPT種数を代理指標とした生物生息環境の評価を実施した。その結果、汚水処理率の向上がもたらす生物生息環境の改善効果を定量化し、個々の河川地点における生物生息環境区分の改善予測結果が把握できる分布図を可視化するとともに、費用対効果や地域の河川全体での包括的な改善効果を提示した。地域環境施設の更新計画としては、汚泥処理機能統合（下水処理場によるし尿・浄化槽汚泥の混合処理）と焼却機能統合（ごみ焼却施設による脱水汚泥の混合焼却）の導入効果を評価するためのモデル開発を行った。温室効果ガス排出量で評価した結果、2つの機能統合策を導入することで、59%削減（消化なし、二液調質脱水条件）、57%削減（消化あり条件）の効果が得られることを明らかにした。多様な地域での汚泥処理機能統合の立案支援に向けて、設備増強量を把握するための下水処理場・物質収支モデルを構築した。焼却機能統合の立案支援に向けては、焼却炉タイプ（ストーカ炉、流動床炉）と新設/既設別を踏まえて熱収支解析モデルを開発し、汚泥混焼計画を立案するごみ焼却施設に対して受入可能な脱水汚泥量を推計できることを示した。

#### 1. 研究開発目的

本研究では、排水処理インフラにおける汚水未処理人口の解消策（下水道等未接続世帯による接続、単独処理浄化槽の合併転換）、ならびに地域環境施設（下水処理場、し尿処理施設、ごみ焼却施設）の再編計画を対象とする。地域環境施設の再編にあたっては、汚泥処理機能統合（下水処理場によるし尿・浄化槽汚泥の受入と混合処理）と焼却機能統合（ごみ焼却施設による脱水汚泥の受入と混合焼却）に着目する。

課題(1)では、汚水処理率の向上がもたらす河川水質改善の効果をシナリオ解析するための方法論を構築する。水生生物の生息環境保全の観点から、処理率が低いことが水生生物に対してどの程度の影響を与えているのか、処理率の向上により水生生物への影響がどの程度改善できるのか、定量的に評価することを目的とした。対象地域は、関東圏で最も汚水処理人口普及率の低い群馬県とした。解析モデルとして、生活雑排水に含まれる洗剤（LAS、AE）を対象とした生態リスク評価手法、ならびに有機汚濁物質（BOD）を対象とした水生生物生息環境評価手法の2種類を構築した。

課題(2)では、汚泥処理事業の効率化に向けた地域環境施設の再編計画の有効性を評価することを目的とした。具体的な再編計画として、汚泥処理機能統合と焼却機能統合の両方を対象とした。現在の交付金関連指標は個別施設ごとの性能を評価するものであるため、個別施設での最適化ではなく、地域環境施設全体で評価すべき更新計画に対して適用するための指標として「地域環境施設全体でのエネルギー一回収率」を提案し、その適用事例を示した。

課題(3)では、多様な地域での汚泥処理機能統合の立案支援に向け、下水処理場における技術条件ならびにし尿・浄化槽汚泥の受入量を踏まえ、汚泥処理プロセスからの逆流負荷が水処理プロセスに与え

る影響を評価するための方法論を構築した。その上で、汚水処理率の向上と汚泥処理機能統合の複合施策を、非エネルギー起源の $\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$ 排出に着目して温室効果ガス（GHG）排出量に基づき評価した。

課題(4)では、多様な地域での焼却機能統合の立案支援に向け、ごみ焼却施設による脱水汚泥の受入率、ごみ焼却施設の技術条件（ストーカ炉、流動床炉）を踏まえ、受入可能な脱水汚泥量の上限值を評価するための熱収支解析モデルを開発することを目的とした。ごみ焼却施設が新設時に汚泥混焼を想定して設計されるケースに加え、混焼を想定せず設計した既設の施設において汚泥混焼を開始するケースも対象としてモデルを開発した。

## 2. 研究目標

2019年度研究目標は、汚水処理人口普及率の向上による生態リスク削減シナリオの設計・評価である。具体的には、群馬県を対象とし、汚水処理方式別人口分布に基づく洗剤排出分布図とAIST-SHANEL（産業技術総合研究所-水系暴露解析モデル）を連結させ、公共用水域における洗剤濃度を推計するためのモデルを開発する。汚水処理人口普及率の到達目標設定と将来人口予測に基づき、将来の汚水処理方式別人口分布をシナリオで表現する。種の感受性分布に基づくPAF（Potentially Affected Fraction of species）を評価指標とし、シナリオ解析を通して生態リスク削減効果を可視化する。

2020年度研究目標は、横断系（排水処理、汚泥資源化）でのGHG排出削減シナリオの設計・評価である。具体的には、浄化槽ならびに地域環境施設（下水処理場、し尿処理施設、ごみ焼却施設）を対象とした連携型更新計画を設計・評価するための支援モデルを開発する。多様な循環圏スケール（中核自治体単独、中核自治体と小規模自治体の連携、小規模自治体間の連携、流域下水道事業による集約）を対象としたケーススタディを積み重ねることにより、地域の環境施設全体での最適化を図るための更新計画論を体系化する。

2021年度研究目標は、人口減少社会への頑健な適応に向けた事業効率性評価と環境価値の可視化である。具体的には、2019年度研究のとりまとめに向け、化学物質管理分野における生態リスク削減対策を対象とした費用対効果の分析事例のレビューを通して、生態リスク管理基準を体系化する。汚水処理人口普及率の向上による生態リスク削減の費用対効果を分析し、管理基準との比較・検証を行う。また、2020年度研究のとりまとめに向け、多様な循環圏スケールを対象としたケーススタディにコスト評価を加え、更新計画の策定支援に向けた技術資料・マニュアルを作成する。事業コスト面での環境インフラ維持管理の頑健性の向上と、GHGの排出削減を両立した地域循環圏像を描く。

## 3. 研究開発内容

### (1) 汚水処理率の向上がもたらす河川水質改善効果のシナリオ解析

対象地域を群馬県とし、現状シナリオとして取り扱う基準年度を2015年度とした。地理情報システム（Arc GIS Pro）を用いて群馬県汚水処理計画図に基づき集合処理区域図を3次メッシュ（ $1 \times 1 \text{ km}^2$ ）データ化し、汚水処理方式別人口（下水道接続人口、同未接続人口、農業集落排水接続人口、同未接続人口、合併処理浄化槽人口、単独処理浄化槽人口）の分布データを作成した。群馬県下を流れる利根川水系河川の流域界を踏まえ、栃木県4市を排出源として加えた。

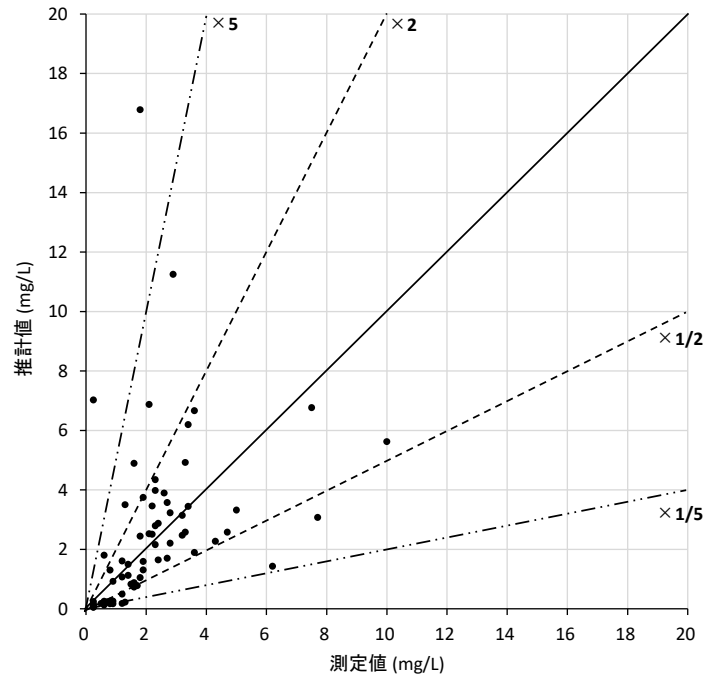
汚水処理率の向上を反映させた、汚水処理方式別人口の将来シナリオの設定を表II-1に示す（減少させる汚水未処理人口の推計は図II-1を参照）。2030年度に向け、シナリオAでは、集合処理区域において未接続世帯による接続が進む施策のみを反映させた。シナリオBでは、シナリオA（下水道接続率、農業集落排水接続率の向上）に加え、個別処理区域での単独処理浄化槽の合併転換が進むことを反映させた。シナリオBでの個別処理区域における市町村ごとの合併処理浄化槽比率は群馬県汚水処理計画<sup>1)</sup>での中期計画目標に到達するように値を設定した。2040年度を想定したシナリオCは同計画での長期計画目標（整備完了）に到達するシナリオとした。全ての市町村での下水道接続率、農業集落排水接続率、合併処理浄化槽比率を100%と設定して、汚水処理率ベースにおいても100%を達成するとした。





資する大きさの効果は得られなかった。そこで本研究では研究課題を追加し、有機汚濁物質（BOD）を用いた水生生物生息環境の評価に取り組むこととした。

化学物質の水環境動態解析を目的としたAIST-SHANEL ver. 3.0（250mメッシュ全国水系版）を改良し、有機汚濁物質（BOD、COD、SS）に適用するためのプログラミングとして再構築した。流れ解析は非定常解析で実施して年間を通した流量を算定する一方で、計算時間の短縮のため濃度解析は定常解析で実施するモデルとし、対象流域最下流点の流量の降順75%値に対する濃度を出力させるモデルとした。流量と比較して排出量の季節変動が小さいことを踏まえると、出力値は年間を通した河川水中濃度の75%値と解釈することが可能となる。河川中での沈降速度と分解速度の設定値に対するキャリブレーションを実施し、2015年度を対象とした現状シナリオでのBOD排出量を入力して算出される推計濃度と、測定濃度（群馬県による公共用水域水質測定結果、2015年度測定値の75%値）を比較した（図Ⅱ-2）。Factor 5（測定値に対して推計値が1/5倍～5倍の範囲に入る精度）に91%（70地点中64地点）が収まる結果となり、Factor 5での推計精度は担保された。Factor 2には60%（70地点中42地点）が収まっており、特に未処理人口からの地先排出が大きいエリアがFactor 2の精度を満たしていることを確認した。



図Ⅱ-2 BOD濃度のキャリブレーション結果

BOD濃度を用いた水生生物に対する水質改善の効果は、清浄な水域に生息する傾向があり、生物調査において水質汚染の指標生物として用いられる底生生物（カゲロウ目、カワゲラ目、トビケラ目）の種数を指すEPT種数を用いることとした。EPT種数の増加は生息・生育・繁殖可能な生物種数の増加（水生生物の生息環境の改善）を示すと解釈することができる。推計した濃度にBOD濃度-EPT種数相関式（式Ⅱ-1、Iwasaki et al.<sup>2)</sup>）を適用させ、生物生息環境の視点からの水質評価を行った。

$$S = 51.49 - 14.78 \times C \quad (C \leq 3.04), \quad S = 6.54 \quad (C > 3.04) \quad (\text{式Ⅱ-1})$$

S: EPT richness, C: BOD concentration (mg/L)

EPT種数に基づく評価では、生物生息の視点からの水質判定のための区分を提案し、群馬県下の河川地点（メッシュ）を各区分で可視化した。具体的には、区分Ⅰ：非常に良好（ $C \leq 1.0$ ,  $S \geq 36.71$ ）、Ⅱ：良好（ $1.0 < C \leq 3.0$ ,  $7.15 \leq S < 36.71$ ）、Ⅲ：良好と言えない（ $3.0 < C \leq 5.0$ ,  $6.54 \leq S < 7.15$ ）、Ⅳ：生息しにくい（ $C > 5.0$ ,  $S < 6.54$ ）に分類した。水質改善効果の評価にあたっては、現状シナリオにおいてBOD濃度が1 mg/Lを超過している地点（生物生息環境区分がⅡ、Ⅲ、Ⅳであり、区分が改善する余地のある地点）を評価対象地点とした。抽出地点のBOD濃度の確率分布（市町村単位で集計したヒストグラム、 $PD(C)$ ）とBOD濃度-EPT種数相関式（式Ⅱ-1、 $S(C)$ ）によりEPT種数の期待値（ $EV_{EPT}$ ）を算定した（式Ⅱ-2）。

$$EV_{EPT} = \int PD(C) S(C) dC \quad (\text{式Ⅱ-2})$$

費用対効果の推計にあたり、費用は下水道ならびに農業集落排水施設の未接続世帯による接続費用、単独処理浄化槽世帯の合併処理浄化槽への転換費用を対象とした。効果は、評価対象地点に対して生物生息環境区分が改善した地点数とした。浄化槽処理促進区域の指定や、同区域における公共浄化槽の設置は市町村により行われるため、評価は市町村単位で行った。

## (2) 汚泥資源化システムを対象とした地域環境施設の再編

汚泥資源化システムの再編を解析するにあたり、本課題では特に焼却機能統合に力点を置き、ごみ焼却施設で脱水汚泥を直接混焼（乾燥させずに混合焼却）する方式を対象とした熱収支解析モデルの開発に取り組んだ。直接混焼を想定するため、流動床炉を対象とし、新設時に汚泥受入を想定した設計が行われるとした。ごみ焼却施設においては、投入ごみのごみ組成が毎時変動するため、それに応じて投入ごみの低位発熱量も変動する。低質ごみが入る時間帯には燃焼ガス温度が低下するため、脱水汚泥を直接混焼する場合、低質ごみとの混焼時に燃焼ガス温度が低下することが懸念される。一方、ごみ焼却施設では焼却炉内で確保できる熱エネルギーは十分にあり、ボイラでの水冷壁収熱量を適切に下げた設計することにより、脱水汚泥の直接混焼に対応することができる。制御基準（ごみ組成：標準ごみ、可燃ごみと汚泥の焼却負荷率を足し合わせた全体焼却負荷率：90%）下で燃焼ガス温度が920℃となるように、汚泥混焼率を踏まえて水冷壁収熱量を設定した。年間稼働のモデル表現のため1年を6,720回（280日×24時間）に分割し、1時間あたりのシミュレーション解析とした。ごみ組成変動を踏まえた蒸気量一定制御運転の下、汚泥混焼による燃焼ガス温度の変動解析を実施した。全体焼却負荷率のベースを90%、操作範囲を[70%、100%]と設定した。ここで、設計段階から汚泥混焼を想定する場合、可燃ごみはクレーンで焼却炉内に投入するのに対し、タンクに貯留させた汚泥はポンプで投入できるため、汚泥投入量は一定に制御することが可能となる。そのため、汚泥の毎時投入量は一定となり、燃焼ガス温度の変動の抑制にもつながる。ごみ焼却施設での補助燃料の消費は、燃焼ガス温度のベース値920℃に対し±50℃での運転管理を行うとし、燃焼ガス温度が870℃を下回る場合、補助燃料を投入するとした。

本研究では、ボイラ・タービン発電付きごみ焼却施設を導入できる中核自治体を想定し、計画処理人口を10万人とした。2020年度末の5～10万人市町村の下水道普及率の平均値65.9%を参考に、下水道人口が65%、浄化槽人口が35%と設定した。更新ケースに対する脱水汚泥の年間処理量と汚泥混焼率の設定を表II-2に、2つの機能統合策の評価バウンダリーを図II-3に示す。Case Aは汚泥処理機能統合を反映させたケースであり、し尿処理場を廃止して浄化槽汚泥の処理機能を下水処理場に統合する。Case Bは汚泥処理機能統合と焼却機能統合の両方が行われるケースとした。焼却機能統合では脱水汚泥単独での焼却は行われずにごみ焼却施設で汚泥混焼する。機能統合計画の導入は嫌気性消化の有無（あり：AD、なし：nonAD）を踏まえて評価する。下水処理場で消化が行われる場合、下水処理場でのバイオガス発電（エネルギー回収）が可能となる一方、脱水汚泥の有機物量は低下し、後段の焼却プロセスに影響する。Case Bにおいてごみ焼却施設側での汚泥混焼（エネルギー回収）を想定すると、消化槽のない条件下においては二液調質脱水機が着目され、直接脱水汚泥の含水率を70%程度まで低下させることができる。そこで本研究では、焼却機能統合の高効率化に向け、通常脱水機を導入するCase B1（nonAD）、二液調質脱水機を導入するCase B2（nonAD）の2ケースを設けた。

システム全体での最適化に向け、現状の施設更新は個別施設の性能に対して交付金を判定するものであるが（例：ごみ焼却施設のエネルギー回収率）、こうした枠組みでは汚泥処理機能統合（浄化槽汚泥受入に伴う負の影響）、焼却機能統合（脱水汚泥受入に伴う負の影響）を適切に評価できない。そこで本研究では、個別施設ではなく地域エネルギー計画に対しての交付金のあり方を検討するための一助となる「地域環境施設全体でのエネルギー回収率（ $PERR$ 、式II-3）」を評価指標として提案した。分母は、下水汚泥は濃縮、脱水等により含水率が調整されることを踏まえ、高位発熱量基準を採用し、ごみと汚泥が潜在的に保有する熱エネルギー量とした。分子は、産出量から消費量を差し引いた供給量で見ることとし、電力と燃料のエネルギー価値の統一のため、一次エネルギー基準（受電端熱効率36.9%、1 kWh=9.76 MJ）に換算する指標とした。下水処理場の水処理プロセスは含めず、汚泥資源化システムをバウンダリーとして、機能統合の効果を分析した。

$$PERR = \frac{(PEG-PEC) + (FS-FC)}{D_{waste} \times HHV_{waste} + D_{sludge} \times HHV_{sludge}} \quad (\text{式 II-3})$$

$PEG$ : 発電量 [GJ-PE/year]、 $PEC$ : 電力消費量 [GJ-PE/year]、 $FS$ : 燃料供給量 [GJ/year]、 $FC$ : 燃料消費量 [GJ/year]、 $D$ : 年間処理量 [t-dry/year]、 $HHV$ : 高位発熱量 [GJ-HHV/t-dry]、 $waste$ : 可燃ごみ、 $sludge$ : 汚泥。

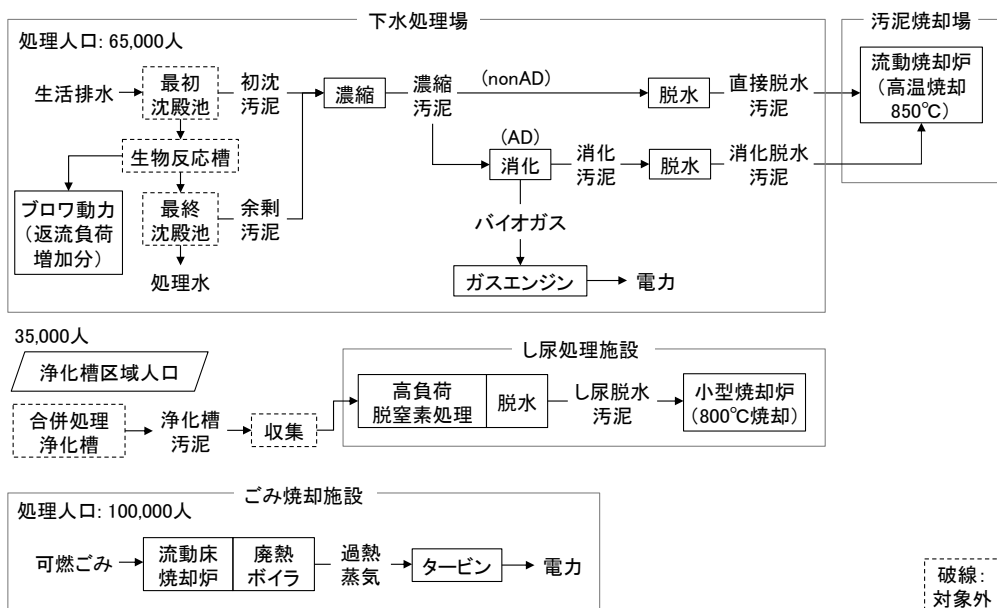
表 II-2 脱水汚泥の年間処理量と汚泥混焼率の設定

更新ケース			脱水汚泥焼却量 (t-wet/year)	ごみ焼却施設での 汚泥混焼率 <sup>e</sup>	
消化 なし	基準		Base (nonAD)	-	
	汚泥処理機能統合		Case A (nonAD)	-	
	汚泥処理機能統合 + 焼却機能統合	標準脱水	Case B1 (nonAD)	10,383 <sup>b</sup>	28.9%
		二液調質脱水	Case B2 (nonAD)	7,614 <sup>c</sup>	23.0%
消化 あり	基準		Base (AD)	-	
	汚泥処理機能統合		Case A (AD)	-	
	汚泥処理機能統合+焼却機能統合		Case B (AD)	7,299 <sup>d</sup>	22.3%

<sup>a</sup> し尿脱水汚泥、<sup>b</sup> 直接脱水汚泥、<sup>c</sup> 二液調質脱水汚泥、<sup>d</sup> 消化脱水汚泥。

<sup>e</sup> 汚泥混焼率= 定格での汚泥投入量 / (定格でのごみ投入量+ 定格での汚泥投入量)。投入量: t-wet/h。

(a) 基準



(b) 汚泥処理機能統合・焼却機能統合

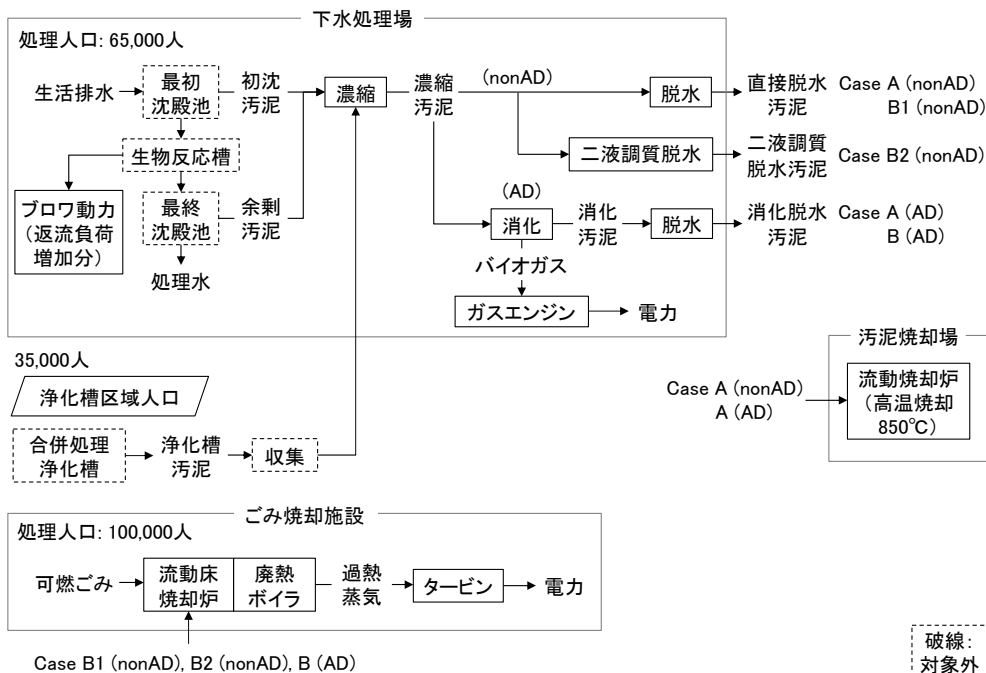


図 II-3 汚泥資源化システムに着目した2つの機能統合策の評価バウンダリー

(3) 汚水処理率の向上と汚泥処理機能統合の複合施策

多様な地域での汚泥処理機能統合の導入支援に向け、下水処理場によるし尿・浄化槽汚泥の受入量の違いを反映した設備改修が求められる。ここでは、下水処理場ごとに異なる流入水の水質、目標とする放流水質の違いも検討事項となる。下水処理場でのし尿・浄化槽汚泥の受入にあたっては、汚泥処理プロセス側については、必要となる処理能力の増設により対応できる。その上で、汚泥処理プロセスからの逆流負荷が水処理プロセスに与える影響を検討することが求められる。そこで本課題では、逆流負荷の影響が評価可能な下水処理場・物質収支モデルを構築した。対象とする水処理プロセスは、標準活性汚泥法、標準活性汚泥法施設での硝化促進・脱窒運転、オキシデーションディッチ（OD）法とした。OD法は小規模自治体への適用も見据えて対象とした。標準活性汚泥法施設については、既存の反応タンクの余剰容量を活用し、反応タンクの前段に無酸素ゾーンを設け、返送汚泥比を高めて硝化液を循環させる方式を対象とした。3つの水処理方式に対し、脱水設備からの返流窒素負荷が増加する嫌気性消化の有無を反映できる仕様とした。

下水処理場によるし尿ならびに浄化槽汚泥の受入に対して、逆流負荷の増加が及ぼす反応タンクでの酸素消費量（プロワ動力）の増加を踏まえ、電力消費、事業コストの増加を評価できるモデリング技法を構築したことにより、汚泥処理機能統合策の導入支援につなげることを目指した。加えて、下水処理場が受け入れる窒素負荷の増加に対する対応として、標準活性汚泥法施設での硝化促進・脱窒運転の導入により、放流水T-N濃度の低減効果を把握できるモデルとした。

課題(2)では汚泥の処理・資源化システムをバウンダリーとした評価であるため、課題(3)では排水処理系に着目して、汚水処理率の向上と汚泥処理機能統合の複合施策を評価した。その評価枠組みを図II-4に示す（対象エリアは群馬県の沼田市・みなかみ町、基準年を2015年度、目標年を2030年度とした）。汚水処理方式別人口については、なりゆきで汚水処理率がほぼ向上しないCase Xと、下水道等接続率ならびに単独処理浄化槽の合併転換が2030年度までに完了するCase Y（早期解消）を設けた。下水道未整備区域は、Case Yでは浄化槽処理促進区域に変更する設定とした。合併処理浄化槽については、

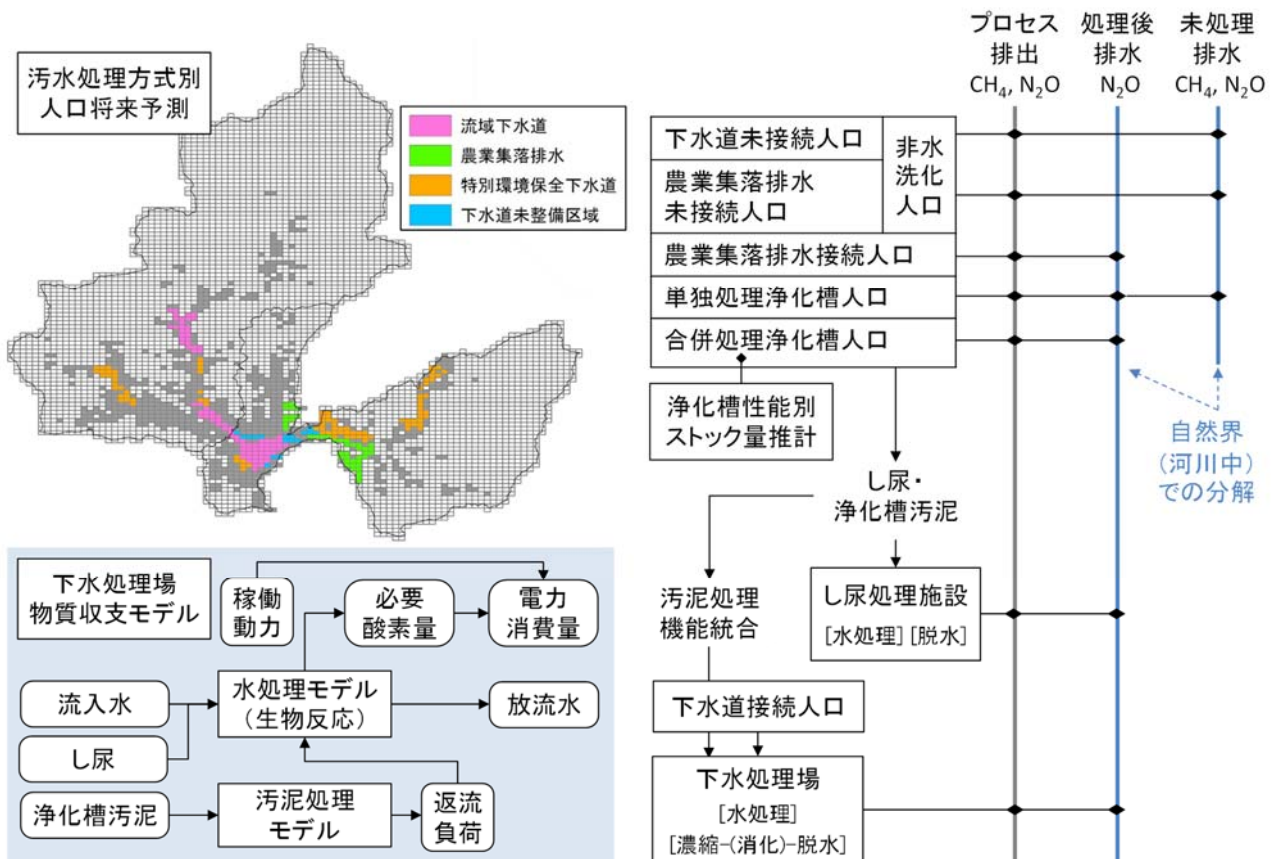


図 II-4 排水処理系に着目した汚泥処理機能統合策の評価枠組み

浄化槽性能別のストック量を推計し、2019年度以降に行われる合併処理浄化槽人口による浄化槽の更新、単独処理浄化槽の合併転換に対しては、性能評価型（環境配慮・窒素除去型）浄化槽が導入されるとした。地域環境施設の更新計画については、Case I（下水処理場とし尿処理施設での個別処理）とII（下水処理場による汚泥処理機能統合）を設けた。Case IIの下では下水処理場での設備改修が行われる施策も対象とした（N：標準活性汚泥法施設での硝化促進・脱窒運転、AD：消化・バイオガス発電の導入）。GHG排出量に対する評価は非エネルギー起源の $\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$ 排出に注目し、排水処理プロセスからの排出に加え、自然分解による処理後排水からの排出、未処理排水からの排出も対象とした。

#### (4) 多様な技術条件を想定した焼却機能統合の導入支援

多様な地域での焼却機能統合の導入支援に向け、ごみ焼却施設による脱水汚泥の受入可能量を解析するためのモデル開発を行った。焼却炉内熱環境は、年間稼働を6,720回（280日×24時間）解像度とするシミュレーション解析で扱った。同解析モデルを用い、投入されるごみ質（組成比、低位発熱量）の変動を踏まえて焼却負荷率を制御する蒸気量一定制御運転の下、汚泥混焼による燃焼ガス温度の変動解析を実施した。ごみ焼却施設での焼却炉のタイプとしてストーカ炉と流動床炉の2種類を扱う。また、新設時に脱水汚泥の受入を想定した施設計画、既設施設での脱水汚泥の受入の両方を対象とすることで、より多様な技術条件に対する受入能力を分析することとした。

ストーカ炉と流動床炉の焼却炉内における熱収支の考え方を図II-5に示す。流動床炉が瞬時にごみを燃やす仕組みであるのに対して、ストーカ炉は炉内の滞留時間を取り、乾燥帯、燃焼帯、おき燃焼帯を経てごみを燃やす仕組みである。汚泥混焼を想定した際、基本的に流動床炉では焼却炉内の熱収支（入熱量＝出熱量）を満たすように熱環境を設計すればよいのに対し、ストーカ炉では乾燥帯での熱環境を扱い、乾燥帯で汚泥含む燃焼物が乾燥・着火することに対する制約が生じる。技術的見地から表II-3に示す分類の下、ごみ焼却施設での汚泥受入率の上限値を分析するためのモデル設計を行った。

ストーカ炉（条件：新設時に汚泥受入を想定した設計）では、脱水汚泥の直接混焼は行わず、タービン抽気を活用した間接加熱型汚泥乾燥機を設置し、脱水汚泥を乾燥させ、乾燥汚泥を混焼するシステムを対象とした。この場合、乾燥機に配分できるタービン抽気量の上限値が汚泥受入量の制約となる。一方、ストーカ炉（条件：既設の施設での汚泥受入）では、脱水汚泥を直接、焼却炉に投入して混焼する。ここでは、焼却炉内の乾燥帯での熱収支（入熱量：火炎・燃焼ガスからの輻射熱量＋乾燥用空気顕熱、出熱量：蒸発潜熱量）を取り、年間稼働シミュレーションで算出した、汚泥含む燃焼物が十分に乾燥せず着火しない頻度を、汚泥受入量の上限値を分析する上での制約とした。

流動床炉では、汚泥受入率を踏まえ、焼却炉内熱収支を対象に、ベース条件（ごみ質：標準ごみ、全体焼却負荷率：90%）での燃焼ガス温度が $920^{\circ}\text{C}$ となるようにボイラ水冷壁収熱量を設計することにより、汚泥受入率の上限値を分析することができる。新設時に汚泥混焼を想定した設計では、ボイラ水冷壁収熱量を設置しない（水管を設置しない設計を行うこと）が、収熱量を低下させる下限値となる。一方、既設の施設での汚泥受入条件では、新設時に可燃ごみのみでの燃焼を想定して設計したボイラ水冷壁収熱量に対して、改修し、低下させることのできる下限値を制約とした。技術ヒアリングの下、本解析では設計時の50%となるまでボイラ水冷壁収熱量を低下させることが可能とした。燃焼ガス温度が $850^{\circ}\text{C}$ （ダイオキシン類対策規制値）未満となる時間帯には補助燃料を投入するとし、シミュレーションで算出した年間での補助燃料消費頻度が5%を超えないことを制約とした。

ごみ焼却施設での汚泥受入率は、ごみならびに汚泥を湿潤重量ベースでの処理量（t-wet/h）で扱い、汚泥受入率＝定格での汚泥処理量／（定格でのごみ処理量＋定格での汚泥処理量）と定義した。ストーカ炉（条件：新設時に汚泥受入を想定した設計）以外の技術条件では、脱水汚泥を焼却炉に直接投入するため、汚泥受入率＝汚泥混焼率となる。汚泥受入率上限値の分析にあたっては、多様な焼却機能統合策の検討を見据え、下水処理場からの3種類の脱水汚泥の受入（直接脱水汚泥、二液調質脱水汚泥、消化脱水汚泥）、し尿処理施設からのし尿脱水汚泥の受入を対象とした。また、本解析モデルは、可燃ごみの量・質の変化に対応することも可能であり、人口減少に伴うごみ量の減少を踏まえた汚泥混焼の検討、プラスチック分別の強化に伴うごみ組成変化などの諸条件を反映させた解析も可能となる。

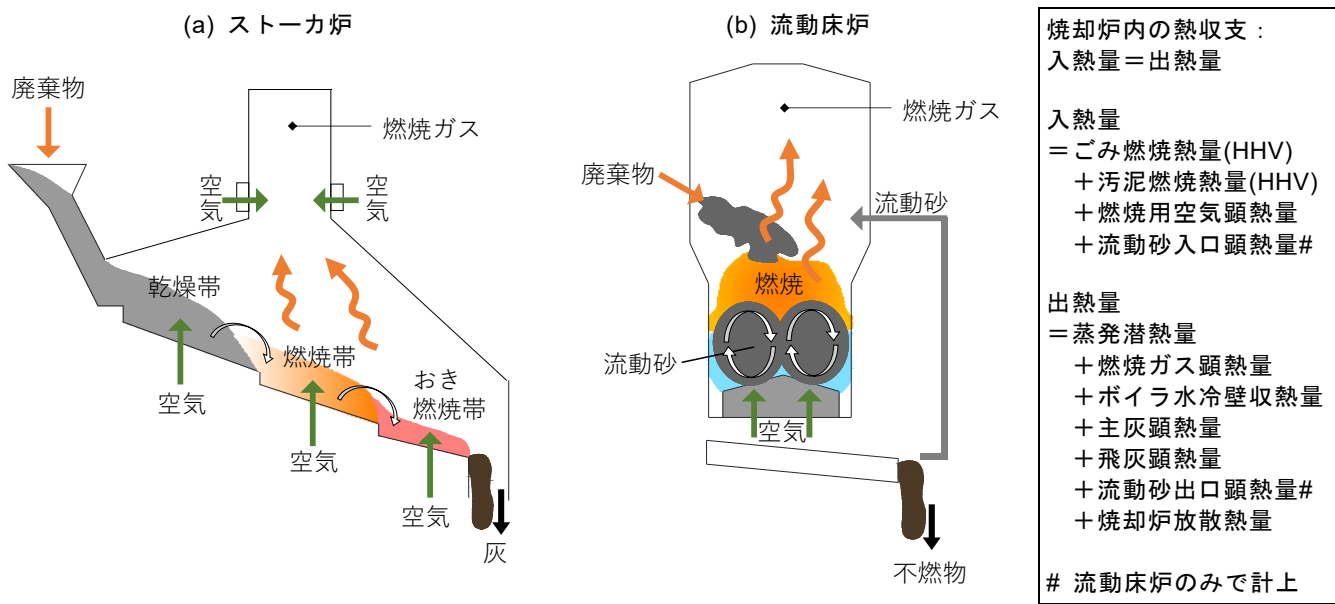


図 II-5 焼却炉内における熱収支の考え方

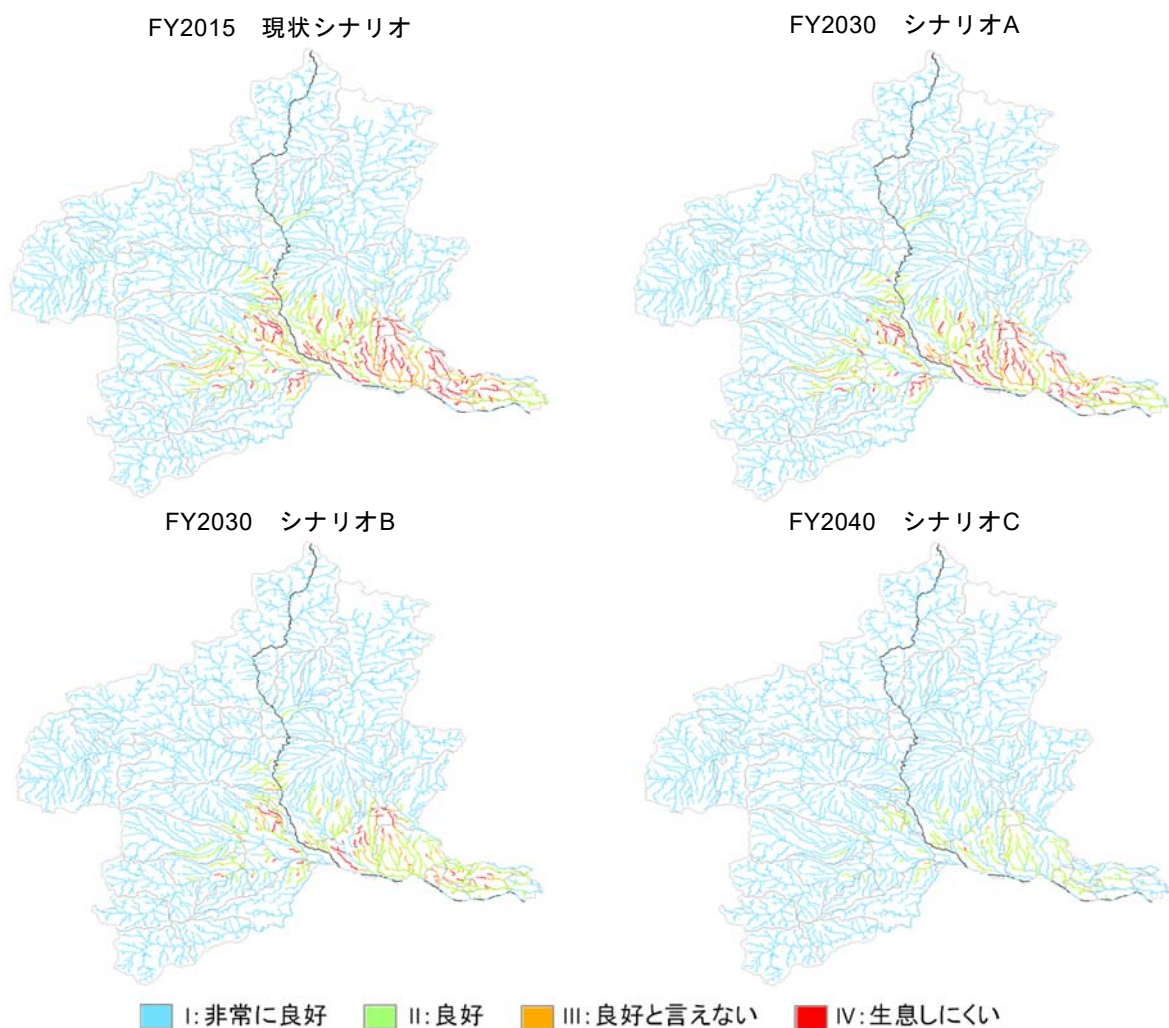
表 II-3 ごみ焼却施設での脱水汚泥受入上限値を分析するためのモデル設計

炉のタイプ	処理計画	技術設計	制約
ストーカ炉	新設時に汚泥受入を想定した施設計画	<ul style="list-style-type: none"> <li>タービン抽気を活用した間接加熱型汚泥乾燥機を設置し、脱水汚泥を乾燥機で乾燥させる。乾燥後の含水率は40%と設定。</li> <li>乾燥汚泥はごみピットに貯留し、クレーンで焼却炉に投入。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>乾燥機に配分できるタービン抽気量の上限值。</li> <li>タービンに投入する過熱蒸気量に対し、抽気量（ボイラ給水加温用、汚泥乾燥用の総計）が30%以内となることを技術上の制約とした。</li> </ul>
	既施設での汚泥受入	<ul style="list-style-type: none"> <li>脱水汚泥をごみピットに貯留し、クレーンで焼却炉に投入（毎時投入量の変動する条件）。</li> <li>乾燥帯での熱収支（入熱量：輻射熱量＋乾燥用空気顕熱量、出熱量：蒸発潜熱量）に基づき評価。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>焼却炉内乾燥帯で汚泥含む燃焼物が十分に乾燥せず着火しない頻度。</li> <li>年間稼働を通して、同頻度が10%を超えないことを制約とした。</li> </ul>
流動床炉	新設時に汚泥受入を想定した施設計画	<ul style="list-style-type: none"> <li>脱水汚泥は専用タンクに貯留し、ポンプで焼却炉に投入（毎時投入量が一定となるように制御）。</li> <li>脱水汚泥受入率を踏まえ、ベース条件（ごみ質：標準ごみ、全体焼却負荷率：90%）での焼却炉内熱収支について、燃焼ガス温度が920℃となるように新設時にボイラ水冷壁収熱量を設計。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>新設時に焼却炉内のボイラ水冷壁収熱量を低下させる下限値。ボイラ水冷壁収熱量が0 MJ/hまで低下させること（水管を設置しない設計を行うこと）が可能。</li> <li>年間稼働を通した燃焼ガス温度の変動値に対して、燃焼ガス温度が850℃未満となる時間帯には補助燃料を投入。設計したボイラ水冷壁収熱量の下、年間での補助燃料消費頻度が5%を超えないことを制約とした。</li> </ul>
	既施設での汚泥受入	<ul style="list-style-type: none"> <li>脱水汚泥をごみピットに貯留し、クレーンで焼却炉に投入（毎時投入量の変動する条件）。</li> <li>脱水汚泥受入率を踏まえ、ベース条件（ごみ質：標準ごみ、全体焼却負荷率：90%）での焼却炉内熱収支について、燃焼ガス温度が920℃となるようにボイラ水冷壁収熱量を改修する（水管に張り付けた耐火物の厚みを増す）。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>供用後に改修し、焼却炉内のボイラ水冷壁収熱量を低下させる下限値。ボイラ水冷壁収熱量を設計値の50%となるまで、低下させることが可能。</li> <li>年間稼働を通した燃焼ガス温度の変動値に対して、燃焼ガス温度が850℃未満となる時間帯には補助燃料を投入。改修後のボイラ水冷壁収熱量の下、年間での補助燃料消費頻度が5%を超えないことを制約とした。</li> </ul>

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 汚水処理率の向上がもたらす河川水質改善効果のシナリオ解析

BOD濃度の将来推計に基づく生物生息環境区分での判定結果（250m×250m解像度）を図Ⅱ-6に示す。EPT種数はBOD濃度が3 mg/Lを超えると種数が小さくなる傾向があるため、BOD濃度3～5 mg/Lの区分Ⅲ（良好と言えない）、5 mg/Lを超える区分Ⅳ（生息しにくい）の地点数に基づき、汚水処理率の向上による水質改善効果の評価した。区分Ⅲ・Ⅳとなる地点数の総計は、現状シナリオの1,610地点に対し、下水道等への接続が進むシナリオAでは1,212地点（25%削減）、単独処理浄化槽の合併転換の効果も加わるシナリオBでは619地点（62%削減）まで減少した。汚水処理率が100%に到達するシナリオCでは、区分Ⅲ・Ⅳの地点数は50地点（97%削減）にまで減少する結果となった。汚水処理率の向上は水生生物の生息環境の改善に十分な効果をもたらすことを示し、その効果を河川地点ごとのメッシュデータとして可視化した。個別河川に対する効果の可視化を通して、生活者が下水道接続、浄化槽更新に要する費用支出への理解を深めるための情報としても活用することができる。



		生物生息環境区分に対する地点数 (C: BOD濃度, mg/L)			
		I: $C \leq 1.0$	II: $1.0 < C \leq 3.0$	III: $3.0 < C \leq 5.0$	IV: $C > 5.0$
FY2015	現状シナリオ	11,934	1,528	781	829
FY2030	シナリオA	12,366	1,494	554	658
	シナリオB	12,944	1,509	362	257
FY2040	シナリオC	14,152	870	47	3

図Ⅱ-6 BOD濃度の将来推計に基づく生物生息環境区分の判定結果

市町村単位で集計した、生物生息環境区分の改善に対する費用対効果ならびに期待値の評価結果を表Ⅱ-4に示す。各市町村を流れる河川について、汚水未処理人口の解消がどの程度の地点数に対して

表Ⅱ-4 生物生息環境区分の改善に対する費用対効果ならびに期待値の評価結果

市町村 <sup>a</sup>	評価対象地点数 <sup>b</sup>	改善地点数 <sup>c</sup>		費用対効果 <sup>d</sup>		EPT種数の期待値 <sup>e</sup>		
		シナリオ 現状→B	シナリオ B→C	シナリオ 現状→B	シナリオ B→C	現状	シナリオ B	シナリオ C
前橋市	592	423	201	57	72	18.5	32.2	41.3
高崎市	442	244	249	30	30	16.3	29.5	42.1
太田市	421	272	255	22	63	7.8	18.4	33.1
伊勢崎市	368	167	246	15	33	13.6	21.4	34.2
安中市	180	155	67	30	52	16.9	36.3	43.5
渋川市	177	113	115	38	71	16.7	31.7	43.8
館林市	171	65	149	27	91	10.0	21.0	36.9
富岡市	134	104	68	29	39	19.1	33.1	44.5
桐生市	121	76	69	41	66	18.4	26.7	43.6
邑楽町	91	42	89	19	56	7.5	18.4	38.2
板倉町	89	60	30	80	100	25.9	35.7	43.2
藤岡市	83	64	34	15	34	9.0	22.4	34.6
沼田市	40	20	22	14	19	26.1	36.0	46.6
玉村町	38	37	4	27	27	22.6	38.5	42.8
榛東村	37	21	24	47	141	16.2	33.7	43.5
みどり市	34	2	28	1	11	8.9	11.7	24.8
千代田町	28	18	11	11	38	6.5	12.0	28.4
吉岡町	21	9	13	40	54	15.5	32.4	42.5
大泉町	20	1	17	0	20	6.5	6.9	20.7
甘楽町	15	8	0	16	0	24.5	35.0	35.2
明和町	8	7	4	8	20	6.8	19.0	31.9
長野原町	6	6	0	16	0	31.8	46.1	48.0
みなかみ町	6	2	4	3	10	19.0	37.2	47.1
下仁田町	5	5	0	7	0	28.1	40.0	47.1
東吾妻町	4	4	0	6	0	33.8	44.8	47.8
嬭恋村	3	3	0	9	0	27.4	44.1	48.0
中之条町	2	1	1	2	11	32.3	41.1	42.6
草津町	2	2	0	12	0	35.2	38.2	38.2
昭和村	1	1	0	3	0	32.3	44.1	50.1
上野村	0	—	—	—	—	—	—	—
神流町	0	—	—	—	—	—	—	—
南牧村	0	—	—	—	—	—	—	—
高山村	0	—	—	—	—	—	—	—
片品村	0	—	—	—	—	—	—	—
川場村	0	—	—	—	—	—	—	—

<sup>a</sup> 評価対象地点数が多い順。

<sup>b</sup> 現状シナリオにおいて、生物生息環境区分がⅡ，Ⅲ，Ⅳと評価された地点数。

<sup>c</sup> 評価対象地点数について、生物生息環境区分が改善した地点数。

<sup>d</sup> 単位：地点数／10億円。下水道等接続費用と単独処理浄化槽の合併転換費用に対する、区分が改善した地点数。

<sup>e</sup> 式Ⅱ-2に基づく評価結果。区分は、評価対象地点数の期待値に対して分類した。■ 区分Ⅰ □ 区分Ⅱ



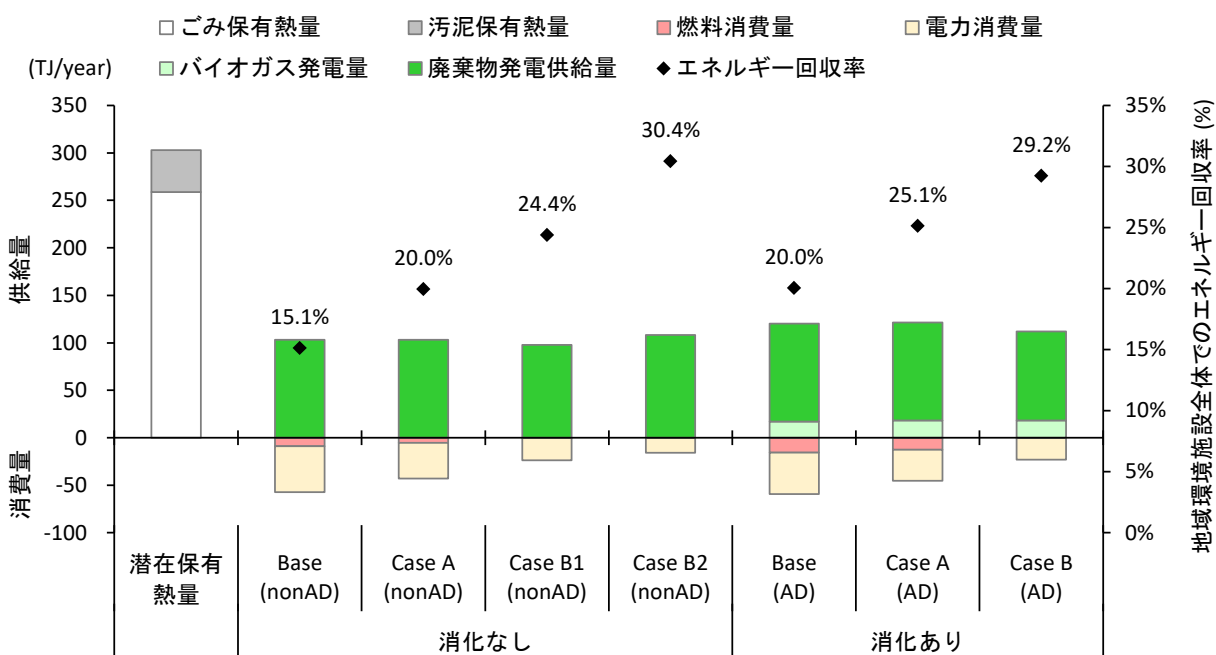
区分の改善をもたらすかを、現状からシナリオB（県の中期計画目標下）への到達、シナリオBからC（長期計画目標下）への到達のそれぞれについて定量化した。加えて、解消に要する費用との比をとることで、費用対効果も推計した。未処理排水の排出分布密度や河川水での自然浄化を踏まえると、費用対効果が小さい自治体があることも定量化され、自治体による合併転換に対する助成（公的負担比率の増加）、公共浄化槽整備に対する判断の一助となる基礎データとしても活用することが可能となる。

また、現状シナリオにおいてBOD濃度が1 mg/Lを超過している地点（生物生息環境区分がⅡ，Ⅲ，Ⅳである地点）を市町村ごとに抽出して算定したEPT種数の期待値に基づき、人為的な有機汚濁負荷の影響を受ける河川が、各自治体での全体的な傾向としてどの程度、生物生息環境区分の改善につながるのかを把握することができる基礎データを示した。

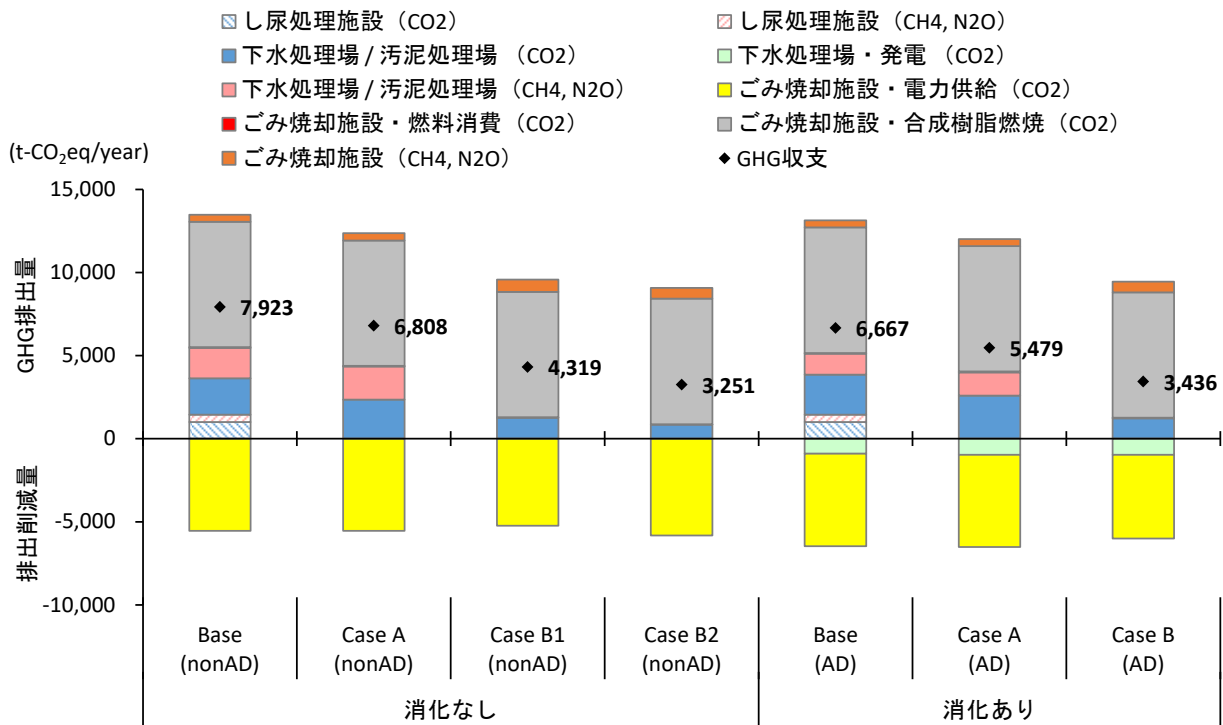
(2) 汚泥資源化システムを対象とした地域環境施設の再編

2つの機能統合策（汚泥処理機能統合、焼却機能統合）について、地域環境施設全体でのエネルギー回収率を評価した結果を図Ⅱ-7に示す。下水処理場が消化槽を保有しない条件では、Base（nonAD）で15.1%、汚泥処理機能統合のみを導入するCase A（nonAD）で20.0%、焼却機能統合も合わせて行うCase B1（nonAD）で24.4%となり、機能統合策の導入に伴う効果が定量化された。消化なしの条件では二液調質脱水により脱水汚泥の含水率を70%まで低減することが可能となり、ごみ焼却施設で二液調質脱水汚泥の混焼を行うCase B2（nonAD）では回収率が30.4%と全ケースで最も高い評価結果となった。消化ありの条件下においても傾向は同様であり、Base（AD）での20.0%と比較し、Case A（AD）で25.1%、Case B（AD）で29.2%と回収率が向上する。汚泥処理機能統合、焼却機能統合の実施により、着実な改善効果が得られることが示された。複数の地域環境施設を合わせてエネルギー収支を評価することが求められる更新計画に対しては、個別施設での交付金に関わる指標に加え、本研究で提案する指標を補完的に用いることで、適切かつ公平な判断基準を提供することができることを示した。

2つの機能統合策をGHG排出量により評価した結果を図Ⅱ-8に示す。GHG排出量での評価では、ごみ焼却施設での汚泥混焼による燃料消費由来CO<sub>2</sub>排出の低減（ごみ焼却施設では水冷壁収熱量の適切な設計により汚泥混焼に伴う補助燃料消費の増加は生じない）に加え、汚泥焼却由来N<sub>2</sub>O排出の削減（ごみ焼却施設では燃焼ガス温度を平均920℃で制御）も効果として得られる。Base（nonAD）を基準としたGHG排出削減効果では、Case B2（nonAD）で59%の削減、Case B（AD）で57%の削減が可能であることが示された。地域のごみ・汚泥処理を対象として、GHG排出半減以上の削減効果が期待できることが示された。



図Ⅱ-7 エネルギー回収率による更新計画（汚泥処理機能統合、焼却機能統合）の評価結果



図Ⅱ-8 温室効果ガス排出量による更新計画（汚泥処理機能統合、焼却機能統合）の評価結果

本解析での汚泥処理機能統合の効果については、し尿処理施設での汚泥焼却の撤退が含まれるため、実際には汚泥焼却を効率化させる効果が含まれている。また、下水処理場で嫌気性消化を行わず、二液調質脱水条件下で焼却機能統合を行うCase B2 (nonAD)が、消化を行うCase B (AD)と同性能の評価結果となった。焼却機能統合を実施する場合、脱水汚泥の含水率を低下させる施策が嫌気性消化の導入と同水準の効率改善を生み出すことを明らかにしたことも、有用な知見であると言える。

### (3) 汚水処理率の向上と汚泥処理機能統合の複合施策

排水処理系に着目し、個別処理（浄化槽、し尿処理施設）と集合処理（下水処理場、農業集落排水施設）に伴うGHG排出量に対して、汚水処理率の向上と汚泥処理機能統合が反映される評価結果を図Ⅱ-9に示す。2030年度に向けて汚水未処理人口が解消されるCase Y-Iにおいては、未処理排水に由来する汚濁負荷の河川中での分解に伴うCH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>O排出が解消されており、管理できないGHG排出源をなくすことにつながる。一方で、汚水未処理人口が残るX-Iと比較すると、地域内での生活雑排水の処理量自体が増加するため、浄化槽ならびに下水処理場において、とりわけCO<sub>2</sub>排出（電力消費）とCH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>O排出（処理プロセス）の増加を招く結果となった。そのため、汚泥処理機能統合により下水処理場にし尿・浄化槽汚泥の処理機能を統合するとともに、下水処理場でのGHG排出削減策の導入を図る。Y-Iでの年間GHG排出量8,031 t-CO<sub>2</sub>eqに対し、標準活性汚泥法施設での汚泥処理機能統合を行うY-IIでは7,992 t-CO<sub>2</sub>eqに減少する（汚泥焼却は対象に含まない）。更に、標準活性汚泥法施設での硝化促進・脱窒運転を導入することにより、Y-II-Nでは下水処理場でのCH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>O排出（処理プロセス）とN<sub>2</sub>O排出（処理後排水）を低減することができ、7,673 t-CO<sub>2</sub>eqとなる。硝化促進・脱窒運転が実施されている条件下では、消化により増加する返流窒素負荷に対する対応能力が高まることから、汚泥処理プロセスに消化を導入するケースをY-II-N-ADとする。Y-II-N-ADでの年間GHG排出量は7,383 t-CO<sub>2</sub>eqとなり、生活雑排水の未処理排出が残るX-Iと同水準の排出量となる。生活雑排水の処理量を高めることによるGHG排出の増加分は、汚泥処理機能統合と下水処理場側でのGHG排出削減分により相殺することができる評価の一例を提示した。汚水未処理人口の解消は河川水質の改善に貢献していることを踏まえると、水質改善とGHG排出削減を両立できる施策を示すことができたとと言える。

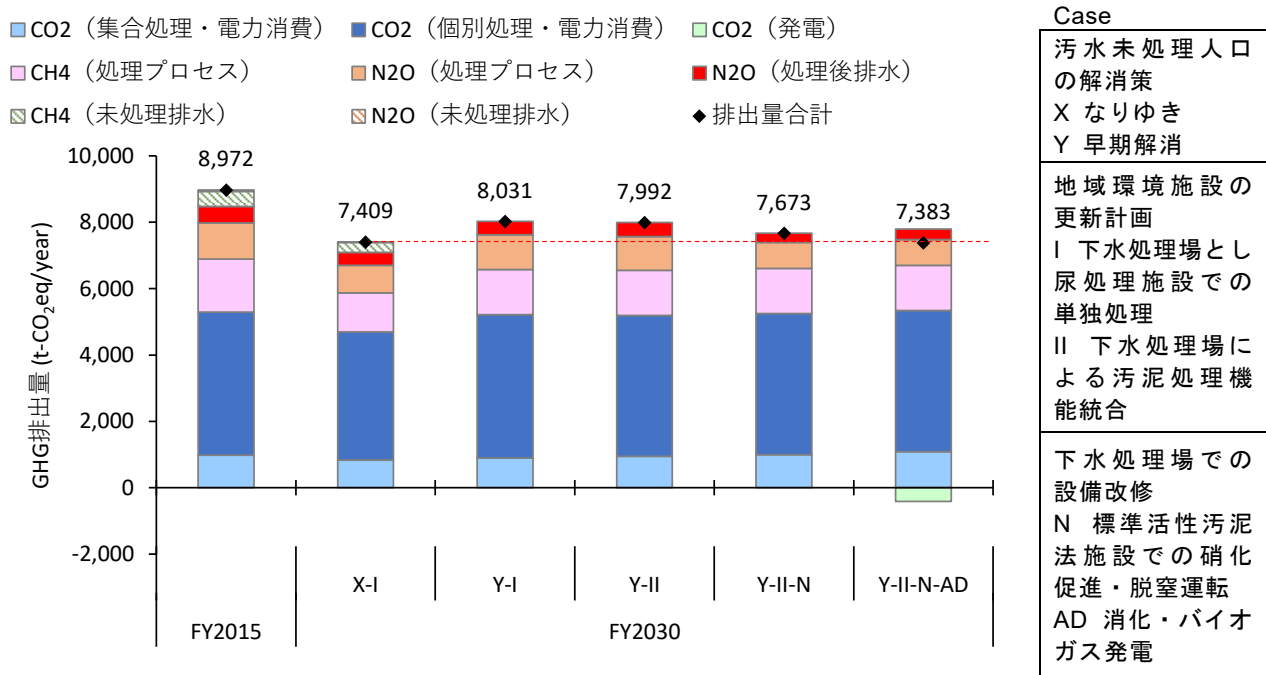


図 II-9 排水処理系に着目した浄化槽・地域環境施設更新による温室効果ガス排出量の評価結果

(4) 多様な技術条件を想定した焼却機能統合の導入支援

ごみ焼却施設における技術条件を踏まえ、脱水汚泥の受入可能率について、上限値を解析した結果を表 II-5 に示す。焼却機能統合策を導入する際に、各地域で求められる受入可能率に関しては、汚水処理方式別人口比率が影響し、一般に下水道人口比率が低く、浄化槽人口比率が高い場合には汚泥量が小さくなる。下水道人口比率を65%とした表 II-2 に示す汚泥混焼率（直接脱水汚泥：28.9%、二液調質脱水汚泥：23.0%、消化脱水汚泥：22.3%）を参考値として考察する。

新設時に汚泥受入を想定した設計を行う場合は、消化脱水汚泥に対しても、ストーカ炉（乾燥機付き）において上限47%まで、流動床炉において上限63%まで、汚泥受入率を確保することができる結果となった。汚泥処理機能統合策とも連動して、汚泥を集約処理する下水処理場から積極的な脱水汚泥の受入を行うことに対する、技術的見地からの受入能力は十分に高い。

表 II-5 ごみ焼却施設での汚泥受入率上限値の解析結果

		汚泥受入率 <sup>a</sup> の上限値（汚泥種類別 <sup>b</sup> ）			
		直接脱水汚泥	二液調質脱水汚泥	消化脱水汚泥	し尿脱水汚泥
ストーカ炉	汚泥受入を想定した設計（抽気を活用する乾燥機付き、制約：乾燥機に配分できる抽気量）	52%	64%	47%	44%
	既設の施設での汚泥受入（制約：焼却炉内乾燥帯で汚泥含む燃焼物が乾燥・着火しない頻度）	9%	12%	8%	8%
流動床炉	汚泥混焼を想定した設計（制約：設計時にボイラ水冷壁収熱量を低下させる下限値）	72%	93%	63%	58%
	既設の施設での汚泥受入（制約：供用後にボイラ水冷壁収熱量を改修して低下させる下限値）	36%	46%	31%	30%

<sup>a</sup> 標準ごみ組成比の設定 厨芥：35.4%、紙ごみ：26.2%、繊維ごみ：4.5%、プラスチックごみ：16.2%、木質ごみ：16.6%、不燃物：1.1%。

<sup>b</sup> 汚泥性状の設定 W：含水率(%), VTS：固形物中有機分率(%), LHV：低位発熱量(kJ/kg-wet)  
 直接脱水汚泥 (W:78.0%, VTS:80.0%, LHV:1,989)、二液調質脱水汚泥 (W:70.0%, VTS:80.0%, LHV:3,622)、  
 消化脱水汚泥 (W:81.0%, VTS:66.8%, LHV:561)、し尿脱水汚泥 (W:85.0%, VTS:80.0%, LHV:865)。

ストーカ炉と流動床炉を比較して、流動床炉の場合は焼却炉内全体の熱収支（入熱量＝出熱量）を満たすように熱環境を設計すればよいため、汚泥混焼に対する適合性が高い。既設の施設での汚泥受入に対しても、設備改修によりボイラ水冷壁収熱量を低下させることにより汚泥混焼のための準備が可能となる。流動床炉（条件：既設の施設での汚泥受入）では、消化脱水汚泥に対して上限31%まで汚泥受入率を確保できる。下水処理場において二液調質脱水機で低含水率化を図ることも可能であり、二液調質脱水汚泥に対しては上限46%となることより、十分な受入能力を確保できる。

ストーカ炉（条件：既設の施設での汚泥受入）では、乾燥帯での熱環境の管理が求められるため、汚泥受入率の上限値は低い水準に留まり、これはし尿処理施設からのし尿脱水汚泥受入に際して、汚泥受入率を10%程度に留めている実情とも一致する。既設のストーカ炉に対しては、し尿脱水汚泥の受入に留めるなど、限定した焼却機能統合策が検討事項となる。

多様な地域での焼却機能統合策の具体化に向けては、新設時に汚泥混焼を想定する条件下では、ストーカ炉、流動床炉ともに脱水汚泥受入能力を十分に保有できることを明らかにした。また、人口減少やごみ減量化に対して、ごみ焼却施設の供用後に汚泥混焼を検討することを想定した場合、流動床炉が技術面で有利となる。

## 5. 研究目標の達成状況

汚水処理率の向上を反映させた生態リスク削減効果のシナリオ解析モデルの構築にあたっては、洗剤を対象として、種の感受性分布に基づく生態リスクを評価することを研究目標とした。このモデル構築自体は達成し、研究成果物は論文（中久保・石川，2020）として取りまとめた。一方で、汚水未処理人口の解消を促す、大きな改善効果を評価結果より導くことはできなかった。そこで、研究課題を追加し、BOD排出と河川水中汚濁解析を対象とし、水生生物生息環境評価手法の開発に取り組んだ。研究資金の運用にあたっては、河川水中汚濁解析プログラム（AIST-SHANEL ver. 3.0を改良）の作成を追加した。シナリオ解析の結果、汚水処理率の向上がもたらす生物生息環境の改善効果を定量化し、その改善効果が大きいことを示すとともに、費用対効果を提示するという目標に到達した。

地域環境施設（下水処理場、し尿処理施設、ごみ焼却施設）を対象とした連携型更新計画を設計・評価するための支援モデルは、ごみ焼却施設（流動床炉、新設時に汚泥受入を想定した設計）で脱水汚泥を直接混焼する方式を対象とした熱収支解析モデルの開発を通して構築した。地域の施設全体で最適化を図る汚泥処理機能統合と焼却機能統合の導入効果を温室効果ガス排出量で評価した結果、2つの機能統合策を導入することで、57%～59%の削減効果が得られることを示し、事業効率化と温室効果ガスの排出削減を両立する地域循環圏像を提示するという目標に到達した。

多様な循環圏スケールでの更新計画（汚泥処理機能統合、焼却機能統合）の策定支援に向けて技術資料・マニュアルを作成するという目標に対しては、汚泥処理機能統合に対して下水処理場・物質収支モデルを、焼却機能統合に対して熱収支解析モデルを構築することで到達した。下水処理場・物質収支モデルでは、逆流負荷が水処理プロセスに与える影響も含め下水処理場で必要となる設備増強量を把握することが可能となる。熱収支解析モデルでは、汚泥混焼計画を立案するごみ焼却施設に対して焼却炉タイプ（ストーカ炉、流動床炉）と新設/既設別を踏まえて受入可能な脱水汚泥量を把握することができる。

## 6. 引用文献

- 1) 群馬県：群馬県汚水処理計画，2018年3月公表。
- 2) Y. Iwasaki, T. Kagaya, H. Matsuda: Comparing macroinvertebrate assemblages at organic-contaminated river sites with different zinc concentrations: Metal-sensitive taxa may already be absent, *Environmental Pollution* 241, 272-278, 2018.

### Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

#### (1) 誌上発表

##### <査読付き論文>

- 1) 中久保豊彦、石川百合子：土木学会論文集G（環境）76(6)，II\_129-II\_140（2020）  
「汚水処理率の改善に伴う生態リスク削減効果の解析－群馬県汚水処理計画を対象として－」
- 2) 盧梓馨、王柯樺、中久保豊彦：土木学会論文集G（環境）76(6)，II\_153-II\_164（2020）  
「地域全体でのエネルギー収支の改善に向けた汚泥処理機能・焼却機能の統合」
- 3) 村岡治城、尾崎平、中久保豊彦：土木学会論文集G（環境）76(6)，II\_305-II\_317（2020）  
「人口減少下の下水処理施設更新に係る集約型・分散型更新施策のライフサイクル評価－小規模施設が点在する地域を対象として－」

##### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

##### <その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 村岡治城、尾崎平、中久保豊彦：第57回下水道研究発表会講演集、3頁（2020）  
「下水道既整備地域における汚水処理インフラ集約型・分散型更新のLCC評価」

#### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 盧梓馨、王柯樺、中久保豊彦：第30回廃棄物資源循環学会研究発表会（2019）  
「ごみ焼却施設での脱水汚泥の直接混焼を想定したシステム設計とエネルギー収支解析」
- 2) T. Nakakubo: SRA 2019 (The Society for Risk Analysis, 2019 Annual Meeting, Arlington, Virginia, USA) (2019)  
“Scenario-based analysis of reduction effects of improving sewage facilities’ diffusion rate on ecological risk: A case study focusing on emission of detergents”
- 3) T. Nakakubo, Z. Lu and K. Wang: 3RINCs 2020 (The 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management, Tsukuba) (2020)  
“Analysis of improvement effect on energy balance by introducing function integration measures in rural areas of Japan”
- 4) 中久保豊彦、盧梓馨、王柯樺：第31回廃棄物資源循環学会研究発表会（2020）  
「地域環境施設における汚泥処理機能統合ならびに焼却機能統合の設計とその評価」
- 5) 中久保豊彦、石川百合子：第48回環境システム研究論文発表会（2020）  
「汚水処理率の改善に伴う生態リスク削減効果の解析－群馬県汚水処理計画を対象として－」
- 6) 盧梓馨、王柯樺、中久保豊彦：第48回環境システム研究論文発表会（2020）  
「地域全体でのエネルギー収支の改善に向けた汚泥処理機能・焼却機能の統合」
- 7) 村岡治城、尾崎平、中久保豊彦：第48回環境システム研究論文発表会（2020）  
「人口減少下の下水処理施設更新に係る集約型・分散型更新施策のライフサイクル評価－小規模施設が点在する地域を対象として－」
- 8) 川幡翠、中久保豊彦、石川百合子、岩崎雄一：令和2年度廃棄物資源循環学会関東支部主催研究発表会（2021）  
「BOD濃度とEPT種数との相関を踏まえた水質改善効果の分析：群馬県汚水処理計画を対象とし

- て」
- 9) 高橋茜、中久保豊彦：令和2年度廃棄物資源循環学会関東支部主催研究発表会（2021）  
「下水処理場における物質収支モデルの開発：し尿・浄化槽汚泥受入による逆流負荷に着目して」
  - 10) 川幡翠、中久保豊彦、石川百合子、岩崎雄一：第49回環境システム研究論文発表会（2021）  
「汚水処理率の向上による生物生息ポテンシャルの改善効果分析：BOD濃度とEPT種数の相関に着目して」
  - 11) 高橋茜、中久保豊彦、鶴巻峰夫：第49回環境システム研究論文発表会（2021）  
「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」
  - 12) 川幡翠、中久保豊彦、石川百合子、岩崎雄一：第34回日本リスク学会年次大会（2021）  
「EPT種数を用いた水生生物生息ポテンシャルの評価：群馬県汚水処理計画を対象として」
  - 13) 高橋茜、中久保豊彦：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（2022）  
「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」
  - 14) T. Nakakubo, K. Wang: 3RINCS 2022 (The 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management) (2022)  
“Comprehensive analysis of co-incineration and thermal treatment function of dewatered sludge by waste incineration plant”
  - 15) T. Nakakubo, M. Kawabata, Y. Ishikawa, Y. Iwasaki: EcoBalance 2022 (2022) 【予定】  
“Modeling the effect of improving sewage disposal rate on ecological health for aquatic organism: A case study Gunma prefecture, Japan”

### (3) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

### (4) マスコミ等への公表・報道等>

特に記載すべき事項はない。

### (5) 本研究費の研究成果による受賞

- 1) 令和2年度廃棄物資源循環学会関東支部主催研究発表会、優秀発表賞（川幡翠）。2021年3月4日、廃棄物資源循環学会関東支部より。研究発表「BOD濃度とEPT種数との相関を踏まえた水質改善効果の分析：群馬県汚水処理計画を対象として」に対して。

## IV. 英文Abstract

**Restructure of the Wastewater Treatment and Sludge Recycling Systems to Achieve Both the Improvement in Business and Environment Performances**

Principal Investigator: Toyohiko NAKAKUBO

Institution: Ochanomizu University

112-8610 / 2-1-1, Otsuka, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

Tel: 03-5978-5746 / Fax: 03-5978-2032

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

[Abstract]

Key Words: Sewage disposal rate, Sewage sludge recycling, Updating measure toward integration, Greenhouse gases, Ecological risk

In this research, simulation models were developed towards restructure of wastewater treatment and sludge recycling systems. For wastewater treatment system, an environmental fate model was built to estimate the effect of the improved sewage disposal rate on the ecological health of aquatic organism in rivers as receiving sources. In which, the rate can be improved by (1) increasing the number of households connecting to the sewage line in corresponding area, and (2) replacing the singular type of onsite water-purifier tank in households with combined type of tank. Based upon the sewage disposal rate of 70.5% (FY2015) in Gunma prefecture, three scenarios were considered including scenario A, the rate is improved to 75.2% in FY2030, scenario B to 88.2% and achieving medium target in FY2030, and scenario C to 100% in FY2040. The biochemical oxygen demand (BOD) estimation model was customized based on AIST-SHANEL ver.3.0, and BOD concentrations in river water were estimated for each scenario. Besides, ecological health of the river was evaluated using EPT (Ephemeroptera, Plecoptera, and Trichoptera) richness index - a substituted indicator for habitat environment quality. Improvement effect was then visualized according to EPT richness after an introduction of a correlation equation between BOD concentration and EPT richness index. The number of locations with improved habitat environment in research area through simulation and associated cost-effectiveness were evaluated. As for sludge recycling system, restructuring was based on two updated measures including (1) integration of sludge treatment function to a wastewater treatment plant (WWTP), and (2) integration of incineration function to a waste incineration plant (WIP). The results of total greenhouse gases emissions showed that a 59% reduction was reached by introducing both integration measures under a system where a high-efficiency sludge dewatering equipment was installed in a WWTP, and a 57% reduction was obtained under a system with anaerobic digestion. For supporting the preparation of proposed measures, the material balance model was built for a WWTP, and the heat balance model was developed for a WIP.