

Environment Research and Technology Development Fund Final Research Report

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

公募区分： 環境問題対応型研究（一般課題）

研究予定期間： 令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度

課題番号： 【1-2105】

体系的番号： （J P M E E R F 2 0 2 1 1 0 0 5）

研究課題： 「汚泥濃縮車を活用した浄化槽汚泥の収集・運搬・処理過程における環境負荷削減効果の網羅的解析および最適活用方法の提案」

Research Title: Exhaustive Analysis of Reduction Effect of Environmental Burdens in Collection, Transportation and Treatment of Johkasou Sludge by Using Sludge Thickening Vehicles and Proposal of the Optimal Method for Utilization

研究代表者： 濱中 俊輔

研究代表機関： 公益財団法人日本環境整備教育センター

研究分担機関： 東北大学、埼玉県環境科学国際センター

研究領域： 統合領域

キーワード： 浄化槽、GIS、資源回収、人口減少、地域循環共生圏

令和6（2024）年5月

目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書	1
I. 成果の概要	4
1. はじめに（研究背景等）	7
2. 研究開発目的	7
3. 研究目標	7
4. 研究開発内容	8
5. 研究成果	9
5-1. 成果の概要	9
5-2. 研究目標の達成状況	16
5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	18
6. 研究成果の発表状況の概要	21
6-1. 成果の件数	21
6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果	21
7. 国際共同研究等の状況	22
8. 研究者略歴	23
II. 成果の詳細	24
II-1 サブテーマ1「汚泥の収集・運搬・処理に及ぼす濃縮車導入の影響解析」	24
[サブテーマ1要旨]	24
1. サブテーマ1研究開発目的	24
2. サブテーマ1研究目標	25
3. サブテーマ1研究開発内容	25
4. サブテーマ1結果及び考察	26
5. サブテーマ1研究目標の達成状況	37
II-2 サブテーマ2「濃縮汚泥に適した資源化システムの開発と評価」	39
[サブテーマ2要旨]	39
1. サブテーマ2研究開発目的	39
2. サブテーマ2研究目標	40
3. サブテーマ2研究開発内容	40
4. サブテーマ2結果及び考察	43
5. サブテーマ2研究目標の達成状況	53
II-3 サブテーマ3「汚泥濃縮車導入による環境負荷削減能力の網羅的評価」	55
[サブテーマ3要旨]	55
1. サブテーマ3研究開発目的	55
2. サブテーマ3研究目標	55
3. サブテーマ3研究開発内容	56
4. サブテーマ3結果及び考察	57
5. サブテーマ3研究目標の達成状況	69
III. 研究成果の発表状況の詳細	70
(1) 成果の件数	70
(2) 誌上発表	70
(3) 口頭発表	72
(4) 知的財産権	73
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	73
(6) マスメディア等への公表・報道等	74
(7) 研究成果による受賞	75

(8) その他の成果発表..... 75
Abstract..... 76

別紙 公募審査・中間評価結果への対応

I. 成果の概要
 <課題情報>

公募区分：	環境問題対応型研究（一般課題）
研究実施期間：	令和3（2021）年度～令和5（2023）年度
課題番号：	【1-2105】
研究課題：	「汚泥濃縮車を活用した浄化槽汚泥の収集・運搬・処理過程における環境負荷削減効果の網羅的解析および最適活用方法の提案」
研究代表者：	濱中 俊輔（公益財団法人日本環境整備教育センター、グループサブリーダー）
重点課題（主）：	【重点課題④】環境問題の解決に資する新たな技術シーズの発掘・活用
重点課題（副）：	【重点課題⑫】社会構造の変化に対応した持続可能な廃棄物の適正処理の確保に関する研究・技術開発
行政要請研究テーマ（行政ニーズ）：	（1-2）汚泥濃縮車を活用した浄化槽汚泥の収集・運搬・処理過程におけるCO ₂ 削減効果の評価
研究領域：	統合領域

<キーワード>

浄化槽
GIS
資源回収
人口減少
地域循環共生圏

<研究体制>

サブテーマ1「汚泥の収集・運搬・処理に及ぼす濃縮車導入の影響解析」

<サブテーマ1リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
公益財団法人日本環境整備教育センター	調査・研究グループ	グループサブリーダー	濱中 俊輔	
公益財団法人日本環境整備教育センター		参事	仁木 圭三	

＜サブテーマ1 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
公益財団法人日本環境整備教育センター	調査・研究グループ	主任	澤村 尚吾（2021年度～2022年度）
公益財団法人日本環境整備教育センター	調査・研究グループ	主任	大石 真弓（2021年度～2022年度）
公益財団法人日本環境整備教育センター	調査・研究グループ	主任	山下 雅大（2023年度）

サブテーマ2 「濃縮汚泥に適した資源化システムの開発と評価」

＜サブテーマ2 リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
東北大学	大学院工学研究科	教授	李 玉友	
東北大学	大学院工学研究科	教授	西村 修	

＜サブテーマ2 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
東北大学	大学院工学研究科博士課程	学生	カ エイシン
東北大学	大学院工学研究科博士課程	学生	郭 広澤

サブテーマ3 「汚泥濃縮車導入による環境負荷削減能力の網羅的評価」

＜サブテーマ3 リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
埼玉県環境科学国際センター	水環境担当	主任研究員	見島 伊織	
公益財団法人日本環境整備教育センター	調査・研究グループ	チームリーダー	武田 文彦	

＜サブテーマ3 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
なし			

＜研究経費（間接経費を含む）＞

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	27,667千円	8,300千円	35,967千円
2022	23,742千円	7,123千円	30,865千円
2023	20,816千円	6,243千円	27,059千円
合計	72,225千円	21,666千円	93,891千円

1. はじめに（研究背景等）

循環型社会の形成に向け、廃棄物からの資源・エネルギー回収、廃棄物の最終処分量の削減及び廃棄物の運搬・処理に係るエネルギー消費量の低減が必要不可欠である。分散型污水处理施設である浄化槽から排出された汚泥はバキューム車で汚泥処理施設に運搬されるが、今後、汚泥処理施設の統合・広域化が進むと汚泥処理施設での処理に係るエネルギー効率が向上する反面、汚泥の収集・運搬に係るコストやエネルギー消費量が増大することが懸念され、収集運搬及び汚泥処理の更なる高度化・効率化が必要となる。この問題を解決する一手法として、浄化槽汚泥を発生現場で濃縮し、運搬量及び汚泥処理量を1/3～1/4に削減できる浄化槽汚泥濃縮車（以下、濃縮車）の導入が挙げられるが、濃縮車の導入による汚泥の収集・運搬効率の向上やし尿処理施設での汚泥処理に及ぼす効果については知見が不足しており、導入実績はきわめて少ない（全国のバキューム車保有台数26,032台（平成29年度）のうち約200台）。また、濃縮汚泥の性状が汚泥処理やエネルギー回収の効率に及ぼす影響に関する研究は不十分である。浄化槽汚泥の収集・運搬・処理・資源化に係る全体のエネルギー消費量の低減を図るためには、既存の汚泥処理技術を適用した場合の濃縮車の影響を明らかにすることに加え、濃縮汚泥に適した新たな資源化システム（エネルギー自立型処理・資源化システム）を模索することも必要となる。

2. 研究開発目的

本研究の目的は、浄化槽汚泥の収集・運搬・処理・資源化に関する環境負荷の観点からの網羅的評価により濃縮車の最適活用方法を提案し、地域循環共生圏の形成に貢献することにある。濃縮車導入による効果的な省コスト・省エネ化の達成のため、以下の研究開発を行う。

- ①バキューム車及び濃縮車による収集・運搬の作業原単位の調査・解析及びGISを活用した収集運搬モデルの構築、汚泥搬出量及び汚泥性状と浄化槽使用条件の関係の解析、汚泥処理施設の方式、規模、運転条件とエネルギー消費・CO₂排出の関係の解明。
- ②濃縮汚泥に適した資源化システムの開発と評価（コンポスト・バイオ炭としての活用、エネルギー回収量・回収効率の評価等）。
- ③濃縮車導入が汚泥の収集・運搬効率に及ぼす影響の評価及び収集・運搬・処理・資源化の一連の作業を網羅的に評価し環境負荷を効果的に削減できる条件の導出。

3. 研究目標

全体目標	汚泥収集・運搬・汚泥処理・エネルギー回収の一連の作業に係る環境負荷（コストやCO ₂ 排出量等）を網羅的に評価する網羅的評価システムを開発し、当システムを用いたシナリオ分析により、地域の低炭素化社会、低環境負荷型社会、地域循環共生圏の構築に向けたバキューム車・濃縮車の最適な活用方法を提案する。
サブテーマ1	「汚泥の収集・運搬・処理に及ぼす濃縮車導入の影響解析」
サブテーマ1 実施機関	公益財団法人日本環境整備教育センター
サブテーマ1 目標	①濃縮車による収集・運搬を行っている浄化槽20基以上の調査を行い、作業原単位を整理し、GISを活用した収集運搬モデルを構築する。②バキューム車による収集・運搬を行っている浄化槽30基以上の調査を行い、汚泥搬出量及び汚泥性状と使用条件の関係について解析する。③20施設以上の汚泥処理施設から運転データを収集し、現有の汚泥処理システムのエネルギー消費・CO ₂ 排出に関する解析を行う。

サブテーマ2	「濃縮汚泥に適した資源化システムの開発と評価」
サブテーマ2実施機関	東北大学
サブテーマ2目標	濃縮汚泥の再生処理に適した創エネルギー・低炭素型資源化システムを確立することを目的として、(1) エネルギー回収に対応する分解促進型嫌気性膜分離バイリアクター (AnMBR) による高効率メタン発酵、(2) 一槽式HAP-anammox法による窒素除去とリン回収、(3) 発酵汚泥残渣の資源化処理、という3つのユニットによって構成される最新汚泥再生処理システムを確立する。

サブテーマ3	「汚泥濃縮車導入による環境負荷削減能力の網羅的評価」
サブテーマ3実施機関	埼玉県環境科学国際センター、公益財団法人日本環境整備教育センター
サブテーマ3目標	汚泥濃縮車の活用時のコスト及びCO ₂ 排出量等を考慮した環境負荷の評価が算定可能な網羅的評価システムを開発するとともに、汚泥処理の広域化・共同化及び将来的な人口減少等の動向を想定した100以上のシナリオに分けた解析を行うことで、地域の低炭素化社会、低環境負荷型社会の構築に向けた濃縮車の最適な活用方法を提案する。

4. 研究開発内容

■サブテーマ1：汚泥の収集・運搬・処理に及ぼす濃縮車導入の影響解析

濃縮車導入による汚泥の効率的な収集・運搬・汚泥処理条件を導出するため、これらの評価に必要なモデル構築のための基礎情報の収集及び解析を行う。汚泥の収集運搬モデルの構築に必要な収集・運搬の作業原単位、汚泥搬出量及び汚泥性状と浄化槽使用条件の関係について調査・解析する。また、汚泥処理・資源化工程の評価に必要な既存の汚泥処理施設の運転データを収集・解析する。

■サブテーマ2：濃縮汚泥に適した資源化システムの開発と評価

汚泥濃縮車によって収集された濃縮汚泥などの再生処理システムの革新と資源回収型処理を実現するため、近年の革新的技術シーズを考慮した濃縮汚泥のエネルギー化・資源化の最新システムとして(1) エネルギー回収に対応する分解促進型嫌気性膜分離バイリアクター (AnMBR) による高効率メタン発酵、(2) 一槽式HAP(ヒドロキシアパタイト)-anammox法による窒素除去とリン回収、(3) 資源化を含む最新の融合システムを構築し、長期連続実験を通して各ユニットの性能を把握するとともに、システム全体の物質収支・エネルギー収支を明らかにする。

■サブテーマ3：汚泥濃縮車導入による環境負荷削減能力の網羅的評価

サブテーマ1で調査した汚泥濃縮車による浄化槽汚泥収集・運搬、濃縮汚泥のし尿処理施設で汚泥処理に関する情報、また、サブテーマ2で検討した濃縮汚泥からのエネルギー回収について、コスト及びCO₂排出量等を考慮した環境負荷の評価が算定可能な網羅的評価システムを開発する。将来的な人口減少等の社会的動向や収集・運搬・処理・資源化条件を考慮したシナリオ分析を行い、濃縮車の最適な活用方法を軸とした今後の低炭素・低環境負荷型社会の構築に向けた浄化槽汚泥の処理及び有効な活用方法について提案する。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

【サブテーマ1】汚泥の収集・運搬・処理に及ぼす濃縮車導入の影響解析（実施機関：公益財団法人日本環境整備教育センター）

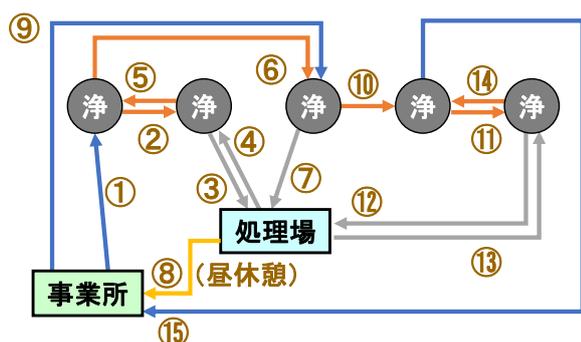
バキューム車および濃縮車を活用した場合の作業原単位（作業時間、移動時間等）、搬出汚泥量および汚泥性状、汚泥の濃縮が汚泥処理施設における処理に及ぼす影響因子を解析するため、以下①～③について調査を行った。

①収集運搬に係る作業原単位

バキューム車および濃縮車にGPSロガーを積載し、本研究で対象とした地域において車両の運行パターン、作業時間に関するデータ、車両の燃料消費量に関するデータ収集を行い、作業原単位を整理した。

車両の走行区分は事業所－浄化槽間の走行（区分(1)）、浄化槽－浄化槽間の走行（区分(2)）、浄化槽－し尿処理施設間の走行（区分(3)）、し尿処理施設－事業所間の走行（区分(4)）に分類される（図0-1（図1-9））。調査で得られた区分(1)～区分(4)の各平均走行距離に基づき、1日当たりの車両走行距離を算出できるモデルを構築することができた。併せて、1日当たりの作業時間、1日当たりの燃料消費量を算出できるようになった。

<バキューム車の場合>



<濃縮車の場合>

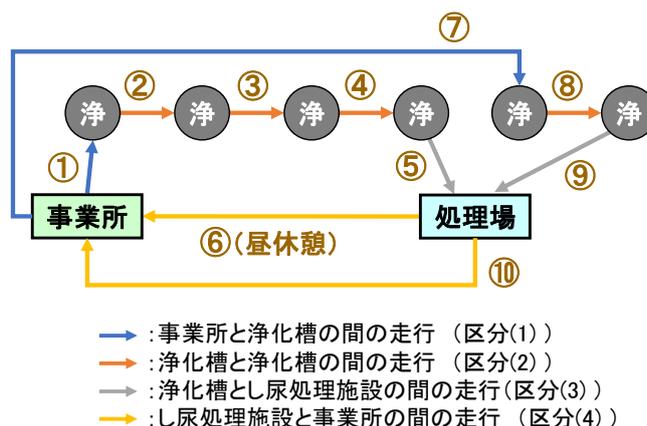


図0-1（図1-9） バキューム車および濃縮車の走行パターン例

②汚泥搬出量及び汚泥性状と浄化槽使用条件の関係

バキューム車および濃縮車の汚泥搬出量について、浄化槽のタイプ（嫌気ろ床接触ばっ気方式、コンパクト型、モアコンパクト型）、人員比（低、中、高）、浄化槽平均容量、平均汚泥搬出量、汚泥引き出し比（槽容量に対する汚泥搬出量の比）に着目して調査した（図0-2（図1-12））。結果として、バキューム車は汚泥引き出し比と各浄化槽の総容量の乗算、濃縮車は1人当たりの濃縮汚泥搬出量と使用人員を乗算することで汚泥搬出量を予測できることが明らかになった。汚泥性状については、人口減少により今後は1世帯当たりの世帯人員が少なくなり、1基当たりの濃縮汚泥量の少ない浄化槽が増加するため、濃縮車を使用した場合は収集・運搬の効率が向上し、1日当たりの清掃基数を増加できることにつながるため、バキューム車に比べて濃縮車を導入するメリットがさらに増大していくことが示唆された。

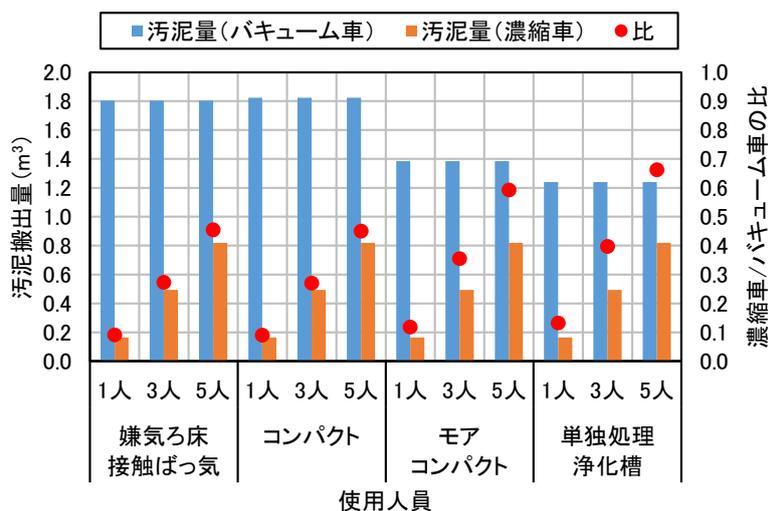


図0-2 (図1-12) 浄化槽のタイプ別のバキューム車と濃縮車の汚泥搬出量の比較

③汚泥処理施設の運転データ

解析対象施設を高負荷脱窒素処理方式（膜分離高負荷脱窒素処理方式を含む）および標準脱窒素処理方式を選定した。施設規模が大きく年間処理量の多い施設においては、処理量当たりの消費電力量が40 kWh/kL程度の値に収束しているが、処理量の少ない施設においては値のばらつきが非常に大きい傾向にあった。し尿処理施設における消費電力量を予測する場合、処理工程ごとの機器の運転方法に応じた条件設定を行い、工程ごとの消費電力量を積み上げる方法が適切と考えられた。そこで処理工程（受入・貯留設備、水処理設備、高度処理設備、消毒設備、汚泥処理設備、脱臭設備等）ごとに各機器の消費電力量と運転条件等の関係を評価し、その結果に基づいて汚泥処理に係る汚泥処理施設の消費電力量を算出することができるようになった。

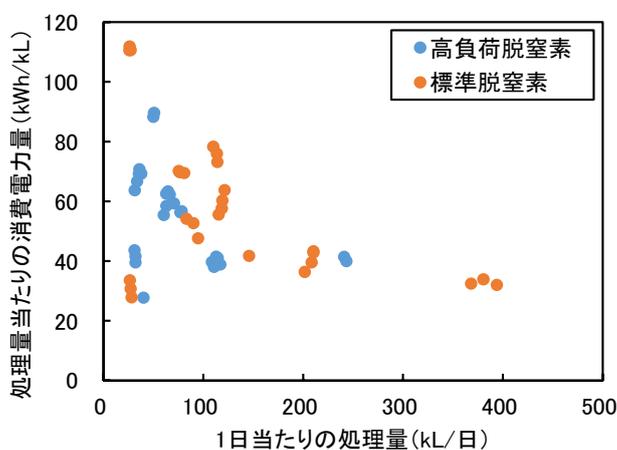


図0-3 (図1-14) 1日当たりの処理量と処理量当たりの消費電力量の関係

【サブテーマ2】濃縮汚泥に適した資源化システムの開発と評価（実施機関：東北大学）

本サブテーマでは、汚泥濃縮車によって収集された濃縮汚泥の再生処理システムの革新と資源回収型処理を実現するため、近年の革新的技術シーズを考慮して（1）エネルギー回収に対応する分解促進型嫌気性膜分離バイオリアクター（AnMBR）による高効率メタン発酵、（2）一槽式HAP（ヒドロキシアパタイト）-anammox法による窒素除去とリン回収、（3）資源化を含む最新の融合システムを構築し、長期連続実験を通して各ユニットの性能を把握するとともに、システム全体の物質収支・エネルギー収支を明らかにした。研究成果の概要を以下に記す。

エネルギー回収に対応するAnMBRによる高効率メタン発酵の技術開発研究においては、実際の濃縮汚

泥を用いて嫌気性MBRの長期連続運転実験を行い、浄化槽濃縮汚泥は高いメタン収率消化率を得られる性状であること、一般的な下水混合汚泥のバイオガス収率と同等であると評価されること、膜ろ過液のCOD_{Cr}は全COD_{Cr}のわずか0.4~0.9%に過ぎず、COD_{Cr}除去効率は97.7~98.7%と非常に高いことを明らかにした(図0-4(図2-4)、成果番号4)。

このAnMBRろ過水中の窒素除去とリン回収のために一槽式HAP-anammox法の適用を検討し、HAP促進グラニューール方式一槽型部分硝化アナモックス(PNA)プロセスを開発した。(HAP+PNA)法の連続運転実験の結果、平均窒素除去率81.3%と安定して非常に良好な処理水質を得ることができ、反応槽内DOは0.2mg/L以下(平均DO:0.12mg/L)で好気環境が安定して維持され、膜ろ過水に対して安定した一槽型アナモックス反応が確認された。さらに、HAP形成を促進するようCaを添加することで良好なリンの回収が達成でき、窒素除去速度の比(PRR/NRR比)は0.12と既往研究と比べて最も大きい比を示し、かつリアクターは安定した汚泥特性と高い窒素除去性能を維持することができた(図0-5(図2-8)、成果番号9)。

本研究で開発した最新汚泥再生処理システムである嫌気性MBRと一槽式HAP+PNA法の融合技術であるAnMBR+(HAP+PNA)法のエネルギー消費量を評価するために、浄化槽汚泥処理施設のエネルギー消費量計算システムの構築を行い、既存浄化槽汚泥処理施設において実績値と比較して再現性が高く信頼できるシステムであることを確認した。このシステムを用いて、浄化槽濃縮汚泥をAnMBR+(HAP+PNA)法および後処理として硝化脱窒素処理方式による窒素の高度処理および凝集膜分離方式によるリンの高度処理を行った場合のエネルギー消費を算出し、生成されたメタンガスをガスエンジン発電および排熱利用して回収したエネルギー量と比較したところ、濃縮汚泥を処理する施設のCO₂排出量をマイナスにすることが可能であることが示された(図0-6(図2-14))。

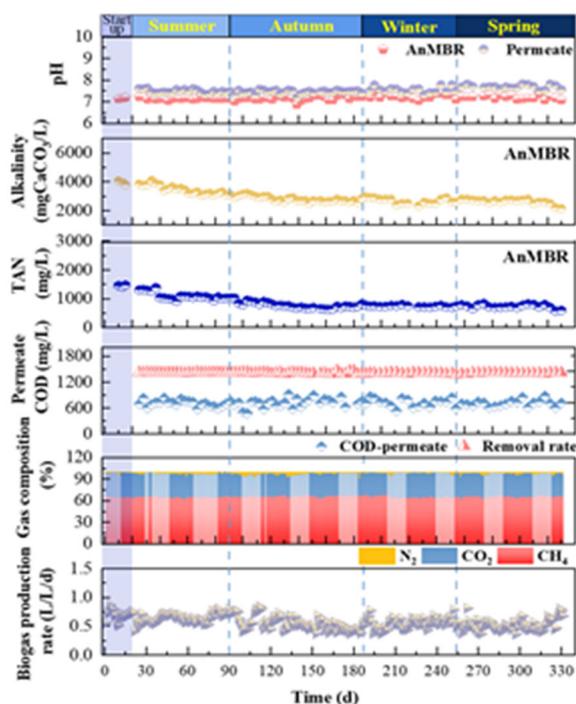


図0-4 (図2-4) AnMBRの一年間連続実験結果

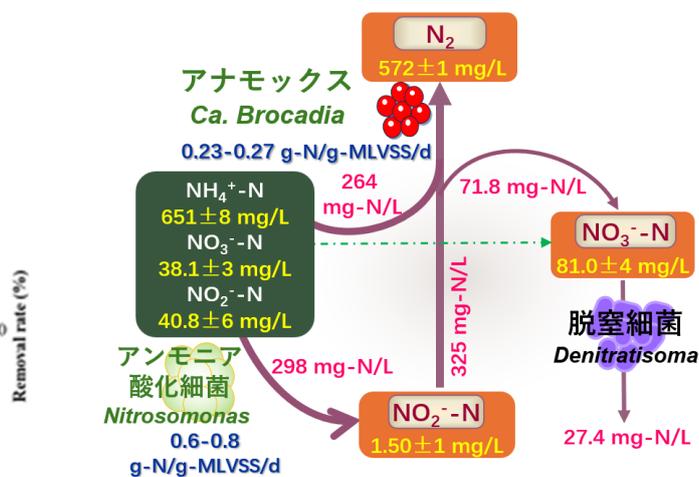


図0-5 (図2-8) HAP促進グラニューール方式一槽型PNAプロセスの脱窒経路と微生物活性

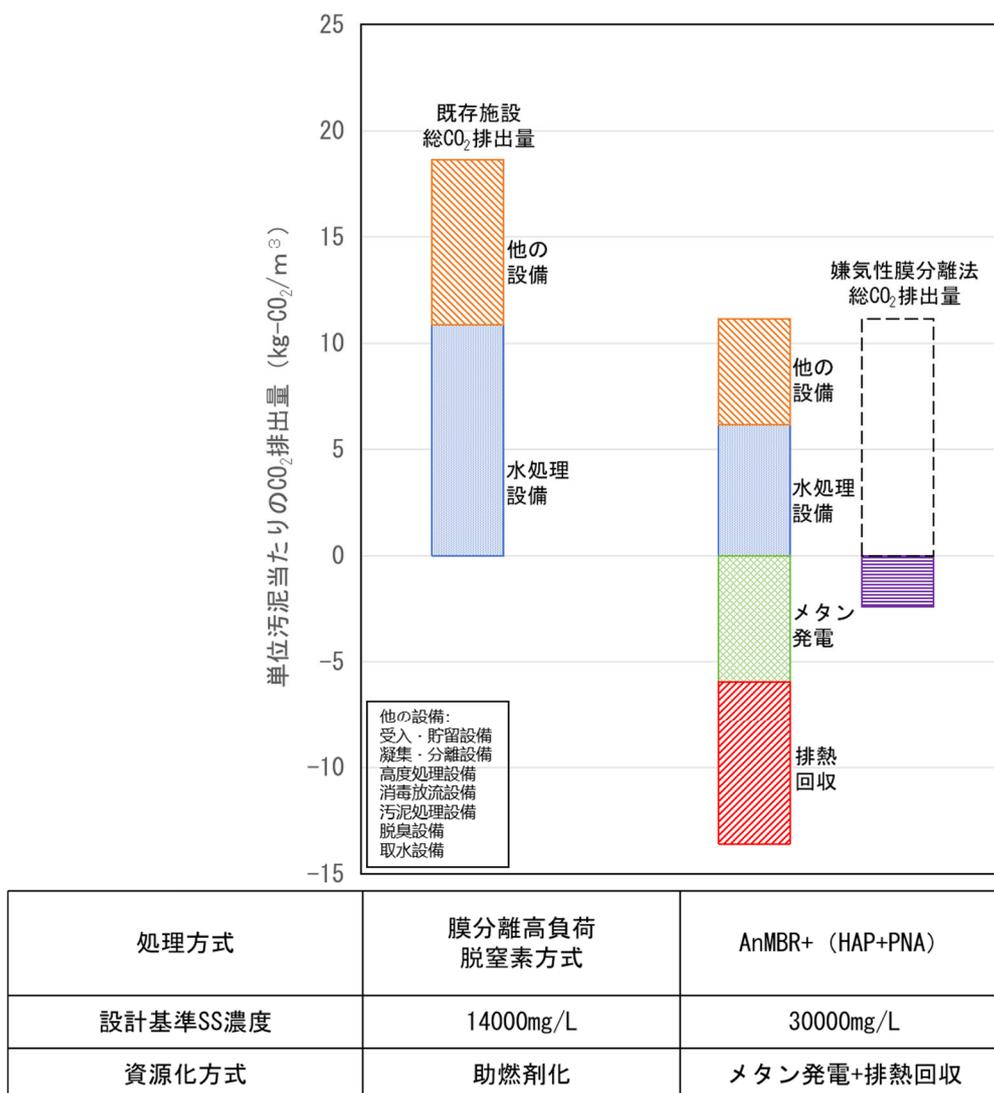


図0-6 (図2-14) 濃縮汚泥のAnMBR+(HAP+PNA)法による処理のCO₂排出量削減効果

【サブテーマ3】汚泥濃縮車導入による環境負荷削減能力の網羅的評価（実施機関：埼玉県環境科学国際センター、公益財団法人日本環境整備教育センター）

(1) 網羅的評価システムの開発

モデル市として埼玉県内の中規模人口の市を対象とした。モデル市では現状、3つのし尿処理施設があるが、将来的に一つに統合される予定になっている。モデル市を対象に、①し尿処理施設の統合、②し尿処理施設の広域化、③人口減少の影響について総走行距離、総労働時間、総CO₂排出量に基づき評価した。

①し尿処理施設の統合

バキューム車と濃縮車を使用した場合の総走行距離および総労働時間について、GISソフトウェアを用いたルート解析に基づき評価した(図0-7(図3-4))。し尿処理施設が統合される前の状況において、汚泥の収集・運搬にバキューム車を使用した場合の総走行距離は312,600km/年、濃縮車の場合は124,300km/年と算定され、濃縮車を活用することで総走行距離の大幅な削減が達成できることが示された。この傾向は統合後においても同様であった。統合前後いずれの条件においても、バキューム車に比べ濃縮車では総走行距離は約60%減、総労働時間は約19%減、総CO₂排出量は約31%減となり、いずれの指標においても濃縮車の方が優れていることが示唆された。

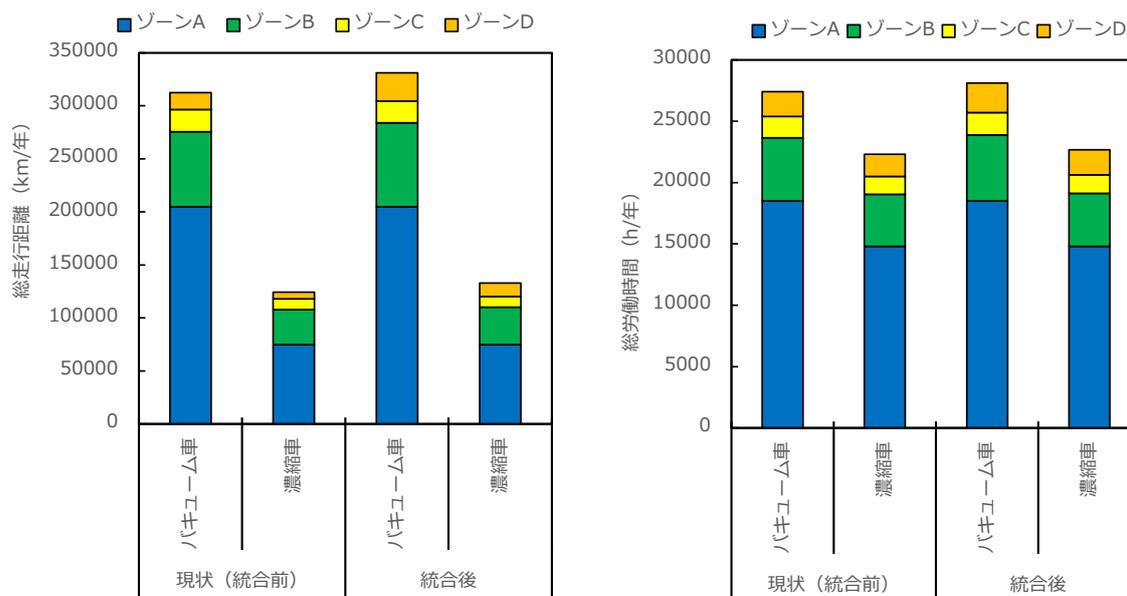


図0-7 (図3-4) 現状 (統合前)、統合後条件における総走行距離および総労働時間の比較

②し尿処理施設の広域化

し尿処理施設の配置について、モデル市内の施設を統合した場合、モデル市外の中距離、長距離に位置するし尿処理施設の3条件でルート解析を行った。①と同様にバキューム車に比べ濃縮車では総走行距離、総労働時間、総CO₂排出量は減少した(表0-1(表3-3))。とくに総労働時間と総CO₂排出量は、し尿処理施設が遠距離になるほど削減率が大きくなる傾向にあり、濃縮車の導入は、ある程度広域的な地域での汚泥の収集・運搬の場合によりメリットが生じやすいことが示唆された。

表0-1 (表3-3) 統合後、中距離、長距離条件における濃縮車導入の効果(対バキューム車の増減割合(%))

		ゾーンA	ゾーンB	ゾーンC	ゾーンD	全体
総走行距離	統合後	-63	-55	-50	-53	-60
	中距離	-55	-53	-51	-54	-54
	長距離	-53	-52	-50	-52	-52
総労働時間	統合後	-20	-20	-18	-15	-19
	中距離	-29	-29	-28	-25	-29
	長距離	-37	-36	-35	-35	-36
総CO ₂ 排出量	統合後	-33	-33	-26	-26	-32
	中距離	-40	-40	-37	-37	-40
	長距離	-43	-42	-40	-41	-42

③人口減少の影響

人口減少に伴う浄化槽設置数、分布や汚泥搬出量の減少について、人口推移に係る既存の公表データと地域メッシュ統計の情報を活用しながら、人口減少が収集・運搬に及ぼす影響の予測シナリオを構築した。シナリオに基づき現在(2022年)、2030年、2040年、2050年の4条件にてルート解析を行った(表0-2(表3-5))。年代の増加とともに浄化槽の設置基数が減少するため、総走行距離、総労働時

間、総CO₂排出量ともに減少した。2050年においては、濃縮車を使用することで、総走行距離が67%減、総労働時間が24%減、総CO₂排出量が37%減となり、いずれの指標においても濃縮車の導入の有効性が明らかとなった。

表0-2 (表3-5) 人口減少シナリオにおける濃縮車導入の効果 (対バキューム車の増減割合 (%))

		ゾーン A	ゾーン B	ゾーン C	ゾーン D	全体
総走行距離	現在	-63	-55	-51	-53	-60
	2030年	-63	-55	-51	-53	-60
	2040年	-63	-56	-51	-53	-59
	2050年	-71	-64	-61	-62	-67
総労働時間	現在	-20	-20	-18	-15	-19
	2030年	-20	-20	-18	-15	-19
	2040年	-20	-20	-18	-15	-19
	2050年	-24	-25	-24	-20	-24
総CO ₂ 排出量	現在	-33	-33	-27	-26	-32
	2030年	-33	-33	-27	-26	-32
	2040年	-33	-33	-27	-26	-32
	2050年	-38	-40	-34	-32	-37

これら①～③の手法と知見、サブテーマ1と2で得られた知見を集約することにより、バキューム車および濃縮車を使用した場合の浄化槽汚泥の収集・運搬・処理・資源化を評価できる網羅的評価システムを開発することができた (図0-8 (図3-11))。

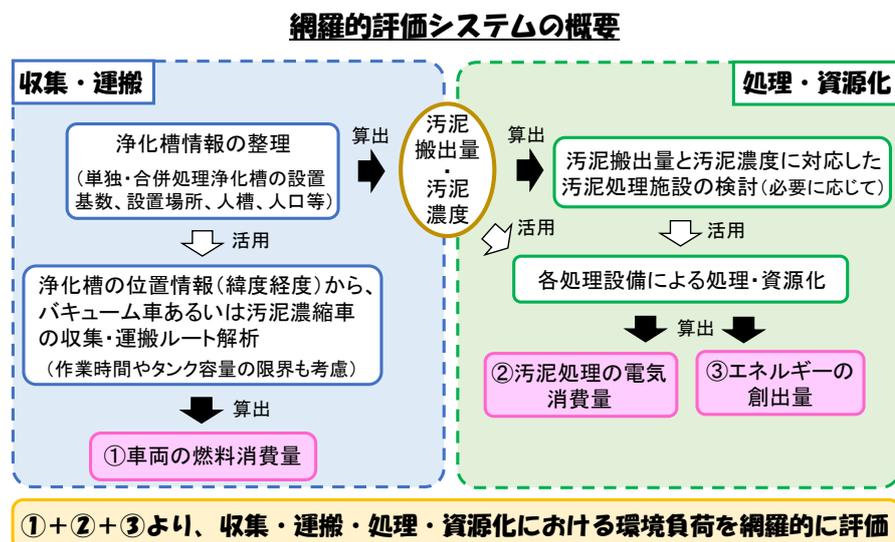


図0-8 (図3-11) 網羅的評価システムの概要

(2) 濃縮車の最適活用方法の提案

収集・運搬ではバキューム車と濃縮車、処理・資源化では標準脱窒素処理方式、膜分離高負荷脱窒素処理方式、AnMBR+(HAP+PNA)法を組み合わせた場合について、網羅的評価システムにより総CO₂排出量を計算した。バキューム車を使用する場合、標準脱窒素処理方式や膜分離高負荷脱窒素処理方式に比べAnMBR+(HAP+PNA)法の方が総CO₂排出量を大幅に減少できると試算された。濃縮車を使用する場合では収集・運搬由来のCO₂排出量はバキューム車の場合よりも低い、標準脱窒素処理方式、膜分離高負荷脱窒素処理方式との組み合わせでは、CO₂排出量の大幅削減はできなかった。一方で、濃縮車とAnMBR+(HAP+PNA)法の組み合わせでは総CO₂排出量をマイナスにできると試算された(図0-9(図3-12))。すなわち、収集・運搬・処理に係る消費エネルギー以上の創エネルギーが可能であることが示唆された。

この結果から、本研究で試算した収集・運搬・処理・資源化の組み合わせにおいて濃縮車による収集・運搬とAnMBR+(HAP+PNA)法による処理・資源化を組み合わせることが、濃縮車の最適な活用方法であり、地域循環共生圏の構築に最も寄与できると明らかになった。

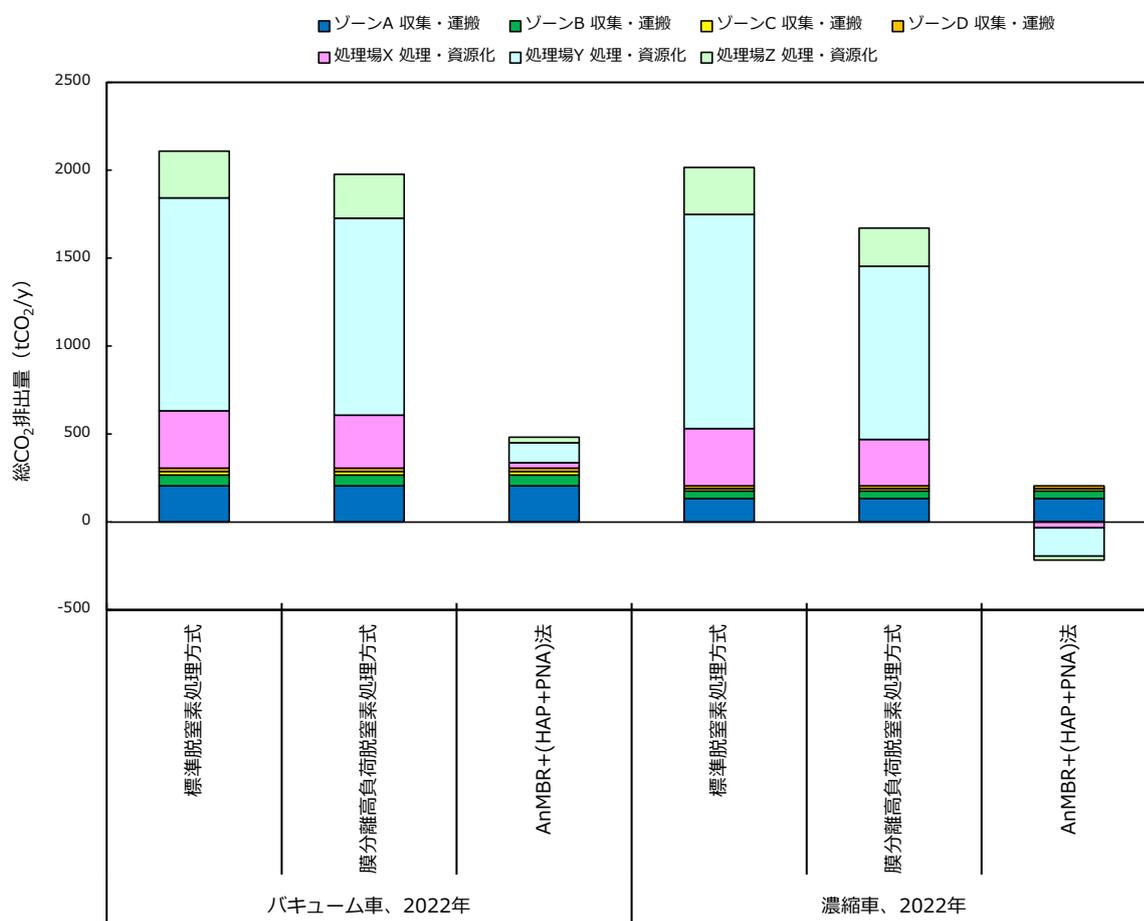


図0-9 (図3-12) 収集・運搬および処理・資源化の組み合わせの総CO₂排出量の比較

5-2. 研究目標の達成状況

<全体の達成状況> 2. 目標を上回る成果をあげた

「汚泥濃縮車を活用した浄化槽汚泥の収集・運搬・処理過程における環境負荷削減効果の網羅的解析および最適活用方法の提案」

全体目標	全体の達成状況
<p>汚泥収集・運搬・汚泥処理・エネルギー回収の一連の作業に係る環境負荷（コストやCO₂排出量等）を網羅的に評価する網羅的評価システムを開発し、当システムを用いたシナリオ分析により、地域の低炭素化社会、低環境負荷型社会、地域循環共生圏の構築に向けたバキューム車・濃縮車の最適な活用方法を提案する。</p>	<p>各サブテーマで得られた成果を統合し、バキューム車や濃縮車による収集・運搬・処理・資源化の一連の環境負荷を評価可能な網羅的評価システムを開発することができた（図3-11（図0-8））。また、本研究で開発したAnMBR+(HAP+PNA)法で汚泥を処理することで、バキューム車の場合は総CO₂排出量を大幅に減少、濃縮車の場合は収集・運搬・処理に係る消費エネルギー以上の創エネルギーが可能であると試算された（図3-12（図0-9））。濃縮車導入とAnMBR+(HAP+PNA)法による汚泥処理が濃縮車の最適な活用方法であり、地域循環共生圏の構築に寄与できると分かった。</p>

<【サブテーマ1】達成状況> 2. 目標を上回る成果をあげた

「汚泥の収集・運搬・処理に及ぼす濃縮車導入の影響解析」

サブテーマ1目標	サブテーマ1の達成状況
<p>①濃縮車による収集・運搬を行っている浄化槽20基以上の調査を行い、作業原単位を整理し、GISを活用した収集運搬モデルを構築する。②バキューム車による収集・運搬を行っている浄化槽30基以上の調査を行い、汚泥搬出量及び汚泥性状と使用条件の関係について解析する。③20施設以上の汚泥処理施設から運転データを収集し、現有の汚泥処理システムのエネルギー消費・CO₂排出に関する解析を行う。</p>	<p>①濃縮車による収集・運搬を行う浄化槽196基、バキューム車による収集・運搬を行う浄化槽85基に対する調査から、1日当たりの走行距離、汚泥搬出量、燃料消費量等の作業原単位を整理することができた（表1-1）。また、清掃業者の事業所、各浄化槽、し尿処理施設の距離についてGISを活用したネットワーク解析により算出できるようにした。得られた作業原単位、浄化槽1基当たりの汚泥搬出量、地域特性に応じた施設間の走行距離等の条件を設定することで、1日当たりの清掃基数、走行距離、燃料消費量等の推定が可能な収集・運搬モデルを構築することができた。</p> <p>②バキューム車による収集・運搬を行っている浄化槽計90基の調査結果より、バキューム車による汚泥搬出量は浄化槽タイプおよび浄化槽容量から予測できること、濃縮車による汚泥搬出量は使用人員から予測できることが分かった（表1-3～1-4）。</p> <p>③浄化槽汚泥の処理を行っている汚泥処理施設計31施設の運転データを収集し（図1-14（図0-3）～図1-19）、各処理工程で使用される主要な機器の単位流量当たりの消費電力量と稼働時間を仮定することで、汚泥処理施設における消費電力量を予測できるようになった。また、消費電力量に基づいてCO₂排出量を算出できるようになった。</p>

< 【サブテーマ2】 達成状況 > 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「濃縮汚泥に適した資源化システムの開発と評価」

サブテーマ2 目標	サブテーマ2の達成状況
<p>濃縮汚泥の再生処理に適した創エネルギー・低炭素型資源化システムを確立することを目的として、(1) エネルギー回収に対応する分解促進型嫌気性膜分離バイオリアクター (AnMBR) による高効率メタン発酵、(2) 一槽式HAP-anammox法による窒素除去とリン回収、(3) 発酵汚泥残渣の資源化处理、という3つのユニットによって構成される最新汚泥再生処理システムを確立する。</p>	<p>(1) エネルギー回収に対応する分解促進型嫌気性膜分離バイオリアクター (AnMBR) による高効率メタン発酵の技術開発を行い、濃縮汚泥は下水混合汚泥と同等のバイオガス収率であり、膜ろ過液のCOD_{Cr}は全COD_{Cr}の1%以下と非常に良好な水質であることを明らかにした(図2-4(図0-4)、成果番号4)。</p> <p>(2) AnMBRろ過水中の窒素除去とリン回収のために一槽式HAP-anammox法の適用を検討し、HAP 促進グラニューール方式一槽型部分硝化アナモックス (PNA) プロセス (HAP+PNA) 法を開発し、連続運転実験を行った結果、平均窒素除去率81.3%、反応槽内平均DO:0.12 mg/Lで安定した一槽型アナモックス反応が確認された。さらに、Caを適正に添加することで良好なリンの回収と達成できリン除去速度と窒素除去速度の比 (PRR/NRR比) は0.12と既往研究と比べて最も高い比を示した(図2-8(図0-5)、成果番号9)。</p> <p>(3) 本研究で開発した最新汚泥再生処理システムである嫌気性MBRと一槽式HAP+PNA法の融合技術であるAnMBR+(HAP+PNA)法および後処理として硝化脱窒素処理方式および凝集膜分離方式により窒素・リンの高度処理を行う施設を設計した。そのエネルギー消費量を本研究で構築した浄化槽汚泥処理施設のエネルギー消費量計算システムを用いて行った結果、生成したメタンガスをガスエンジン発電および排熱利用してエネルギーを回収することで、濃縮汚泥を処理する施設のカーボンネガティブを達成可能であること明らかになった(図2-14(図0-6))。</p> <p>本システムと濃縮車を同時に使用することで、浄化槽汚泥の収集・運搬・処理・資源化の全工程のカーボンネガティブが達成できることから、本システムの開発は濃縮車の導入メリットを大きく増大させる成果となった。</p>

< 【サブテーマ3】 達成状況 > 2. 目標を上回る成果をあげた

「汚泥濃縮車導入による環境負荷削減能力の網羅的評価」

サブテーマ3 目標	サブテーマ3の達成状況
<p>汚泥濃縮車の活用時のコスト及びCO₂排出量等を考慮した環境負荷の評価が算定可能な網羅的評価システムを開発するとともに、汚泥処理の広域化・共同化及び将来的な人口減少等の動向を想定した100以上のシナリオに分けた解析を行うことで、地域の低炭素化社会、低環境負荷型社会の構築に向けた濃縮車の最適な活用方法を提案する。</p>	<p>サブテーマ1～3で得られた知見により、バキューム車や濃縮車による収集・運搬・処理・資源化の一連のCO₂排出量や環境負荷等を評価可能な網羅的評価システムを開発することができた(図3-11(図0-8))。また、人口減少に伴う浄化槽基数・分布の予測を可能とする手法を確立した(図3-9)。</p> <p>網羅的評価システムによる168通りのシナリオ</p>

解析を行い、汚泥処理の広域化や人口減少を考慮しながら濃縮車導入によるCO₂排出量の削減効果等を評価した。結果として、濃縮車の濃縮汚泥をAnMBR+(HAP+PNA)法を導入した汚泥処理施設で処理することで、汚泥の収集・運搬・処理に係る総CO₂排出量以上の創エネルギーを達成することができた(図3-12(図0-9))。AnMBR+(HAP+PNA)法による処理との組み合わせが濃縮車の最適な活用方法であることが示され、かつ、両者の組み合わせは地域の低炭素化社会、低環境負荷型社会、地域循環共生圏の構築に向けた一手段となりうることが示唆された。

5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

<得られた研究成果の学術的意義>

■サブテーマ1

汚泥処理の広域化や人口減少等の社会情勢のなか、浄化槽汚泥の収集・運搬の効率化を図るうえで濃縮車の導入は有効な一手段になると期待される。しかしながらバキューム車と濃縮車の収集・運搬に係る知見は乏しく、両者の作業効率等を比較可能な手法はなかった。本研究成果により、バキューム車と濃縮車の作業時間、コストやCO₂排出に関する定量的評価・比較を可能とした点で新規性があり、清掃業者あるいは自治体等がバキューム車と濃縮車の効果的な使い分けの判断にも活用でき、作業効率化や低環境負荷に貢献するという点で発展性がある。また、本研究で構築した浄化槽汚泥の発生量の予測モデルは、し尿処理施設等における汚泥搬入量の将来予測、あるいは処理施設更新の際の施設規模あるいは処理方式の変更を判断するうえでの情報として活用できるという点で有用性がある。

■サブテーマ2

現在普及している浄化槽汚泥処理方法は多くのエネルギーを必要とし、脱炭素化への対応に限界がある。本研究では既存の浄化槽汚泥処理技術に代わり、濃縮汚泥を対象として汚泥処理のエネルギー自給、リン資源の回収、BODおよび窒素処理の省エネルギー化を同時に達成して炭素排出量の大幅な削減を目指すもので、開発した嫌気性膜分離バイオリクター(AnMBR)とHAP促進グラニューール方式一槽型部分亜硝酸化アナモックス(PNA)プロセスからなるAnMBR+(HAP+PNA)法は、極めて新規性が高く有用性の高い技術である。

特に嫌気性消化において、濃縮汚泥は複雑なフロック構造と硬質な細胞壁を持つため、有機固体の分解率が低く、メタン生成が不十分になる問題を抱えている。すなわち加水分解段階が濃縮汚泥の嫌気性消化における律速段階であると考えられる。本研究では、濃縮汚泥の嫌気性消化における汚泥滞留時間(SRT)の延長がもたらすメタン生成の促進効果を解析・考察し、濃縮汚泥処理に最適なSRTを特定した。また、(2) AnMBRでの濃縮汚泥処理における高固形分条件下の持続可能な膜運転フラックスを解析し、膜ファウリングの挙動を解明した上で、効率的なファウリング制御対策を検討した。さらに、(3) 物質収支とエネルギー評価を通じてシステム全体の性能を評価し、AnMBRを用いた高濃度廃棄物処理における消化効率を向上させる方法と、超高固形分濃度条件下での膜ろ過操作における適切なガイドラインを提案した。これらの成果は国際学術誌にて発表した(成果番号2)。

また、AnMBRのろ過水中に高濃度に含まれる窒素、リンの処理・資源化方法としてHAP促進グラニューール方式一槽型部分亜硝酸化アナモックスプロセス(HAP+PNA)を開発し、窒素負荷率0.73 kg-N/m³/dで窒素除去効率(NRE)81.6%および窒素除去速度0.6 kg-N/m³/dを実現した。脱窒によりアナモックス反応で生成される硝酸塩が減少し、COD_{Cr}除去が25.7%促進し、NREが改善された。リン除去効率(PRE)と汚泥の

沈降性はカルシウムの添加により大幅に向上し、流入水の Ca/P 比が2.7の場合に最大 PRE 73.2% が達成された。現在まで報告されている最大のPRR/NRR比は、膨張床反応槽で観察された0.072であったが、本研究において高リン含有のAnMBRろ過水を処理する際に、PRR/NRRが0.12と高値でも、リアクターは安定した汚泥特性と高い窒素除去性能を維持することが実証された。これらの成果は国際学術誌にて発表した（成果番号9）

サブテーマ2で開発したAnMBRとHAP促進グラニューール方式一槽型部分亜硝酸化アナモックス（PNA）プロセスからなるAnMBR+（HAP+PNA）法による濃縮汚泥処理のエネルギー自給処理の可能性について、浄化槽汚泥処理のエネルギー消費量計算システムを構築して試算したところ、生成するメタンガスによるガスエンジン発電および排熱利用によってエネルギー自給が可能であることが示された。すなわち濃縮汚泥処理・資源化にAnMBR+（HAP+PNA）法を適用することによってカーボンネガティブな浄化槽汚泥処理施設が実現可能であるという極めて新規な知見が得られた。

■サブテーマ3

本研究で提案した網羅的評価システムは収集・運搬と処理・資源化からなるが、収集・運搬を対象とする研究はこれまで例がなく、本研究で得られた成果は新規性が極めて高い。具体として、まず、実際の浄化槽情報を精緻に整理し、バキューム車および濃縮車を使用した場合それぞれについてGISソフトウェアを用いたルート解析を行い、車両の燃料消費量を求めることに成功している。処理・資源化においては、汚泥搬出量と汚泥濃度に基づき、各処理設備の電気消費量等、あるいは資源化によるエネルギー回収に係るパラメータを活用し、汚泥処理の電気消費量、エネルギー創出量の算定に成功している。これらを統合した網羅的評価システムは行政的な有用性が極めて高いだけでなく、学術的にも高い独創性を有する。さらに、網羅的評価システムを用いて、近未来に起こり得るし尿処理場の統合化、収集・運搬の広域化などの観点で環境負荷を整理できたことは非常に有用性が高い。一方で、人口減少に伴う浄化槽設置基数や汚泥搬出量の予測を他の研究に先駆けて行い、それを地図上に二次元的に表示できた。そのデータを網羅的評価システムに入力し将来の浄化槽の汚泥処理に係る収集・運搬と処理・資源化の予測を行ったことも極めて高い新規性を有している。

<行政等に既に貢献した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政等に貢献することが見込まれる成果>

本研究で明らかにした汚泥発生特性を活用し、浄化槽汚泥発生量の将来予測を行うことで、市町村が策定するし尿・浄化槽汚泥処理計画の精度の向上が見込まれる。また、本研究で実施した将来の浄化槽設置基数の推計手法を活用し、浄化槽整備区域や下水道整備区域などの区域に分けて浄化槽の基数を算定することで、単独処理浄化槽から合併処理浄化槽への転換の重点地域の選定などが可能となる。

本研究で開発した濃縮汚泥に適した資源化システムであるAnMBRとHAP促進グラニューール方式一槽型部分亜硝酸化アナモックス（PNA）プロセスからなるシステムAnMBR+（HAP+PNA）法は、老朽化が著しいし尿処理施設や汚泥再生処理センターの更新にあたって優先的に導入すべき優れた性能を有していることが明らかになった。すなわち、浄化槽濃縮汚泥処理におけるカーボンニュートラルを達成可能なシステムであり、さらに回収したリンの肥料化等の資源化ポテンシャルを有し、脱炭素社会に加えて循環型社会の形成にも寄与するシステムであることから、今後の浄化槽行政の推進に大きく貢献することが見込まれる。

また、AnMBR+（HAP+PNA）法は他の固形有機廃棄物（生ごみ）等との混合メタン発酵のポテンシャルを有することから、地域から発生する固形有機廃棄物の資源化施設としての位置付けも可能であり、廃棄物行政の推進に大きく貢献し得る成果である。

本研究で開発している網羅的評価システムを活用することで、濃縮車導入や汚泥処理の広域化につ

いて検討する際、環境負荷の定量化や広域化に適する範囲の算定が容易になる。環境負荷をCO₂排出量のみならず貨幣価値で提示することができるため、住民や一般廃棄物収集運搬業の許可業者に対して、濃縮車導入や広域化をわかりやすい価値で説明することができ、本研究の成果をこれらの関係者の理解を得る目的で活用することが見込まれる。さらに、濃縮車導入のための補助金制度の検討も可能となるほか、浄化槽の海外移転の際の汚泥処理施設の設置位置の検討にも応用できる。

本研究で開発しているエネルギー自立型処理・資源化システムは、脱炭素社会及び循環型社会の実現に大きく貢献することが期待できる。

6. 研究成果の発表状況の概要

6-1. 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	11
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	0
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	1
口頭発表（学会等・査読なし）：	10
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	17
マスコミ等への公表・報道等：	1
研究成果による受賞：	1
その他の成果発表：	0

6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果

成果番号	主要な成果（10件まで）
1	Qian, Y., Chen, F., Shen, J., Guo, Y., Wang, S., Qiang, H., Qin, Y., Li, Y. Y. (2022). Control Strategy and Performance of Simultaneous Removal of Nitrogen and Organic Matter in Treating Swine Manure Digestate Using One Reactor with Airlift and Micro-granule. <i>Bioresource Technology</i> , 355, 127199. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127199
2	Guo, G., Li, Y., Zhou, S., Chen, Y., Urasaki, K., Qin, Y., Kubota, K., Li, Y. Y. (2022). Long Term Operation Performance and Membrane Fouling Mechanisms of Anaerobic Membrane Bioreactor Treating Waste Activated Sludge at High Solid Concentration and High Flux. <i>Science of the Total Environment</i> , 846, 157435. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157435

4	Chen, Y., Guo, Y., Feng, G., Urasaki, K., Guo, G., Qin, Y., Kubota, K., Li, Y. Y. (2023). Key Factors for Improvement of Nitrogen Removal in a HAP-enhanced One-stage Partial Nitritation/Anammox Process. Chemical Engineering Journal, 452, 139589. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139589
5	Guo, G., Zhou, S., Chen, Y., Wang, W., Qin, Y., Li, Y. Y. (2023). Evaluation of Bioenergy Production and Material Flow in Treating Japanese Concentrated Johkasou Sludge Using High-solid Anaerobic Membrane Bioreactor Based on One-year Operation. Chemical Engineering Journal, 469, 143918. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143918
6	Chen, Y., Feng, G., Guo, G., Urasaki, K., Kubota, K. Li, Y.Y. (2023). Improved Properties and Enhancement Strategies of Hydroxyapatite-Based Functional Granular Sludge for a High-Rate Partial Nitritation/Anammox System. Environmental science & technology, 57(19), 7624-7633. https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00491
7	陳玉潔, 郭広澤, 李玉友. 一槽式PNA法におけるHAPグラニュール汚泥の特性及び窒素・リン除去効果の強化. 土木学会論文集, 2023. Vol.79, No.25, 23-25015. https://doi.org/10.2208/jscej.23-25015
8	陳玉潔, 郭広澤, 李玉友. アナモックス法を用いた脱炭素型窒素除去に関する研究進展. 色材協会誌. 2023. Vol.96, No.12, 405-409. https://doi.org/10.4011/shikizai.96.405
9	Guo, G., Zhou, S., Chen, Y., Qin, Y., Huang, X. Li, Y.-Y. (2024). Enhanced methanogenic degradation and membrane fouling associated with protein-EPS by extending sludge retention time in a high-solid anaerobic membrane bioreactor treating concentrated organic sludge. Water research, 248, pp.120879-120879. https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120879
10	Guo, G., Zhou, S., Chen, Y. Li, Y.-Y. (2024). Phosphorus recovery coupling with one-stage partial nitritation/anammox process for the treatment of high-nutrient permeate from anaerobic membrane bioreactor treating concentrated organic sludge. Chemical engineering journal, 484, pp.149474-149474. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149474
11	Mishima, I., Yoshikawa, N., Asakawa, S., Noguchi, Y., Amano, K. (2023). Life-cycle Analysis of Environmental Loads from Household Septic Systems in Japan Focusing on Effluent Water Discharge. Science & Technology, 88(11), 2719. DOI: 10.2166/wst.2023.370

※この欄の成果番号は「Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細」と共通です。

7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究等の概要>

特に記載すべき事項はない。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名（本部所在地等）
特に記載すべき事項はない。	

8. 研究者略歴

<研究代表者略歴>

代表者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
濱中俊輔	東北大学大学院工学研究科修了 博士（工学） 現在、（公財）日本環境整備教育センター調査・研究グループサブリーダー 主に、浄化槽の維持管理技術を研究

<研究分担者（サブテーマリーダー）略歴>

分担者氏名	略歴（学歴、学位、現職、研究テーマ等）	参画期間
李 玉友	中国天津大学大学院土木工学専攻修士課程 博士（工学），東北大学、 現在、東北大学大学院工学研究科教授 主に、嫌気性バイオテクノロジー、環境保全のための環境微生物の解析、排水・廃棄物の処理技術を研究	2021年度 ～ 2023年度
見島 伊織	立命館大学大学院博士後期課程修了 博士（工学） 現在、埼玉県環境科学国際センター水環境担当主任研究員 埼玉大学大学院理工学研究科連携准教授を兼務 主に、排水処理プロセスの評価を研究	2021年度 ～ 2023年度

II. 成果の詳細

II-1 サブテーマ1「汚泥の収集・運搬・処理に及ぼす濃縮車導入の影響解析」

[サブテーマ1 要旨]

サブテーマ1の目的は、バキューム車と濃縮車が浄化槽汚泥の収集・運搬・処理に及ぼす影響因子について解析することにある。バキューム車と濃縮車の運行・作業状況に関する調査結果に基づき、車両の走行パターン、1日当たりの車両走行距離、1日当たりの作業時間、燃料消費量に関する収集・運搬行程モデルを構築できた。浄化槽の種類、人員比等の複数の異なる条件におけるバキューム車と濃縮車の汚泥搬出量の調査から、汚泥搬出量に係る主要な因子（使用人員等）が導出され、バキューム車と濃縮車を使用した場合のそれぞれの汚泥発生量を予測できるようになった。汚泥処理施設の運転データの調査から、処理工程ごとの機器の運転条件の特徴が把握でき、各工程の消費電力量を予測する方法が整理された。

1. サブテーマ1 研究開発目的

浄化槽内に蓄積した汚泥は、主にバキューム車で収集され、汚泥処理施設に運搬されている。バキューム車を用いた場合、浄化槽内の汚泥を引き抜いて汚泥処理施設に運搬した後、汚泥を引き抜いた浄化槽内に水張りを行うため、再びその浄化槽に戻るのが一般的である。今後、汚泥処理施設の統合・広域化が進むと汚泥の収集・運搬に係る作業時間の増加、コストやエネルギー消費量が増大することが懸念され、収集運搬の更なる高度化・効率化が必要となる。

濃縮車は、浄化槽汚泥の引き出しの際に浄化槽から収集した汚水に凝集剤を添加し、汚水中の汚泥を濃縮分離することにより、汚泥を分離した分離水を水張りに使用できる特徴がある（図1-1）。濃縮車を使用すると汚泥処理施設から汚泥引き出しをした浄化槽に水張りのために戻る必要がなくなるため、汚泥運搬に係る走行距離や時間の短縮が可能となることから、濃縮車の普及は収集・運搬の高度化・効率化に寄与すると考えられる。



図1-1 濃縮車を使用した清掃の概要

しかしながら、バキューム車および濃縮車を活用した場合の作業原単位（作業時間、移動時間等）、搬出汚泥量および汚泥性状、汚泥の濃縮が汚泥処理施設における処理に及ぼす影響等については知見に乏しく、バキューム車及び濃縮車を活用した場合の収集・運搬・処理の有用性を解析・比較できないのが現状である。そこでサブテーマ1では、濃縮車の導入が浄化槽汚泥の収集・運搬・処理に及ぼす影響因子を解析することを目的に、以下3点について調査を行った。

- ①収集運搬作業を行う地域の特性と作業効率の関係
- ②搬出汚泥量および汚泥性状と使用条件の関係
- ③汚泥処理施設における処理量とエネルギー消費量の関係

2. サブテーマ1 研究目標

サブテーマ1	「汚泥の収集・運搬・処理に及ぼす濃縮車導入の影響解析」
サブテーマ1 実施機関	公益財団法人日本環境整備教育センター
サブテーマ1 目標	①濃縮車による収集・運搬を行っている浄化槽20基以上の調査を行い、作業原単位を整理し、GISを活用した収集運搬モデルを構築する。②バキューム車による収集・運搬を行っている浄化槽30基以上の調査を行い、汚泥搬出量及び汚泥性状と使用条件の関係について解析する。③20施設以上の汚泥処理施設から運転データを収集し、現有の汚泥処理システムのエネルギー消費・CO ₂ 排出に関する解析を行う。

3. サブテーマ1 研究開発内容

サブテーマ1では、上記2. で説明したとおり細分化した3つのテーマを設定した。

(1) 浄化槽汚泥の収集運搬モデルの構築

バキューム車および濃縮車にGPSロガーを積載し、車両の運行パターン、作業時間に関するデータを収集するとともに車両の燃料消費量に関するデータ収集を行い、作業原単位を整理した。これらの解析により収集・運搬工程における車両の走行距離、作業時間および燃料消費量に関する関係式を作成し、収集運搬モデルを構築することとした。

(2) 搬出汚泥量および汚泥性状と使用条件の関係

バキューム車で収集された清掃汚泥に関する調査を行い、小型浄化槽の構造のタイプごとに汚泥発生特性を解析した。近年、主に設置されている小型浄化槽は、構造例示型の嫌気ろ床接触ばっ気方式、全体容量が嫌気ろ床接触ばっ気方式の7割程度のもの（以下、コンパクト型と記す）および全体容量が嫌気ろ床接触ばっ気方式の5割程度のもの（以下、モアコンパクト型と記す）となっているため、これらの3タイプについて搬出汚泥量および汚泥の性状に関する調査を行った。調査は2地域で実施し、住宅に設置された処理対象人員10人以下の浄化槽を対象として、3つの浄化槽のタイプについて人員比（使用人員/処理対象人員）が低い施設（人員比が0.3未満）、中程度の施設（人員比が0.3以上、0.6未満）、高い施設（人員比が0.6以上）を選定した。これらの調査結果に基づき搬出汚泥量と使用条件の関係を明らかにすることとした。また、標準的な清掃作業方法が異なる2地域を対象として搬出汚泥量に関するデータを収集し、バキューム車を使用した場合の搬出汚泥量の標準値を算出した。さらに、汚泥性状の調査結果に基づき、濃縮車を使用した場合の搬出汚泥量および汚泥性状を試算した。これらの試算結果に基づき、バキューム車および濃縮車を使用した場合の今後の汚泥発生状況について検討することとした。

(3) 汚泥処理施設における処理量とエネルギー消費量の関係

し尿処理施設の精密機能検査報告書から主要な機器の能力および出力に関する情報を抽出し、施設規模と出力の関係等について解析することとした。また、機器ごとの運転時間を記録している複数のし

尿処理施設からし尿および浄化槽汚泥の処理量、各機器の仕様および運転時間、薬品等の消費量のデータを収集し、他のサブテーマと連携して実施するエネルギー消費量等の評価やシナリオ解析で使用する原単位に関する基礎情報を整理することとした。

4. サブテーマ1 結果及び考察

(1) 浄化槽汚泥の収集運搬モデルの構築に関する結果及び考察

a) バキューム車および濃縮車の走行の特性

調査期間においてバキューム車および濃縮車の運行状況を表1-1に、各車両で清掃を行った浄化槽の分布およびGPSロガーによる位置情報取得例を図1-2にそれぞれ示す。バキューム車を使用した清掃では、収集した浄化槽汚泥をし尿処理施設に運搬し、排出した後、し尿処理施設の放流水を空になったバキュームタンクに吸引し、清掃後の浄化槽に戻って水張りを行った。各車両の走行は同一地域で行っており、清掃の対象とした槽の容量はバキューム車、濃縮車ともに1.5 m³/基であった。

浄化槽汚泥の収集・運搬の効率に大きく影響すると考えられる事業所と浄化槽間の距離およびし尿処理施設と浄化槽間の距離について分布を図1-3および図1-4に示す。地点間の距離は道路ネットワークデータを用いArcGISのネットワーク解析により算出した。バキューム車で清掃を行った浄化槽は事業所から2 km以内の浄化槽がやや多く、事業所－浄化槽間の距離の分布はバキューム車を使用した場合と濃縮車を使用した場合で差異が認められた。し尿処理施設－浄化槽間の距離の分布はバキューム車を使用した場合と濃縮車を使用した場合で合致しており、し尿処理施設といった拠点から浄化槽へのアクセスのしやすさに偏りは認められなかった。このことから、おおむね同一の条件で車両の走行状況を比較することができたといえる。

表1-1 調査結果の概要

項目		バキューム車	濃縮車
車両の種類		3t (一部小型 4t)	小型 4t
タンク容量 (L)		3,000 (一部 3,700)	1,800
調査日数 (日)		13	26
調査期間 全体	清掃基数 (基)	85	196
	走行距離 (km)	947	1,029
	し尿処理施設への搬入回数 (回)	47	53
	清掃対象の槽容量 (m ³)	129	296
	搬出汚泥量 (m ³)	132	57
	燃料消費量 (L)	262	645
1日 当たり	1日当たりの清掃基数 (基/日)	6.5	7.5
	1日当たりの走行距離 (km/日)	72.8	39.6
	1日当たりのし尿処理施設への搬入回数(回/日)	3.6	2.0
	1日当たりの清掃対象の槽容量 (m ³ /基)	9.9	11.4
	1日当たりの汚泥搬出量 (m ³ /基)	10.1	2.2
	1日当たりの燃料消費量 (L/日)	20.1	24.8
浄化槽 1基当たり	1基当たりの走行距離 (km/基)	11.1	5.3
	1基当たりの清掃対象の槽容量 (m ³ /基)	3.1	3.3
	1基当たりの汚泥搬出量 (m ³ /基)	1.5	1.5
	1基当たりの燃料消費量 (L/基)	1.5	0.3

1日当たりの清掃基数はバキューム車が6.5 基/日、濃縮車が7.5 基/日であり、濃縮車を使用した方が1日当たり1基多く清掃が実施できた。

し尿処理施設への汚泥の搬入回数はバキューム車が3.6 回/日、濃縮車が2.0 回/日であり、濃縮車を使用することでし尿処理施設への汚泥の搬入回数が減少した。1日当たりの車両の走行距離はバク

ーム車が72.8 km/日、濃縮車が39.6 km/日であり、濃縮車を使用することで、バキューム車の走行距離から46%短縮できることが明らかになった。

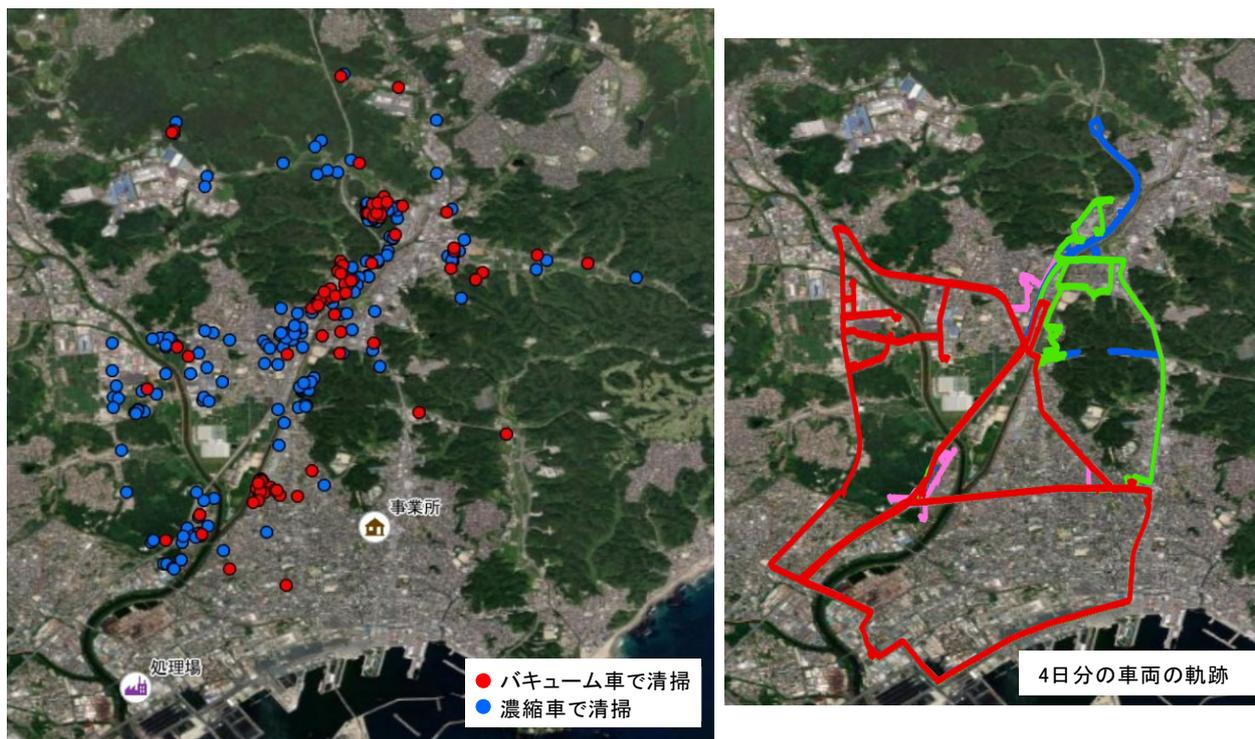


図1-2 清掃を実施した浄化槽の分布およびGPSロガーによる位置情報取得例

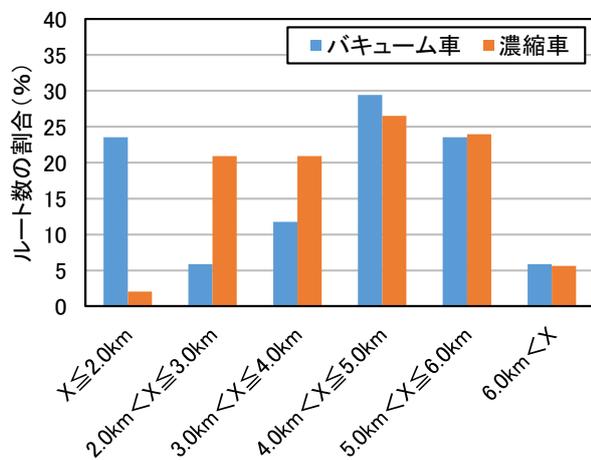


図1-3 事業所-浄化槽間の距離の分布

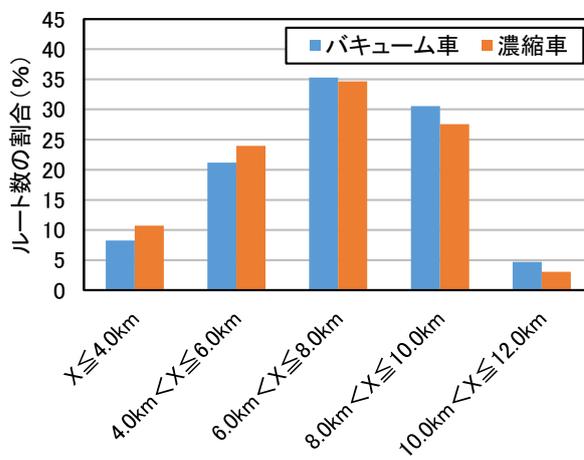


図1-4 し尿処理施設-浄化槽間の距離の分布

浄化槽1基当たりに換算した走行時間、浄化槽滞在時間およびし尿処理施設滞在時間を図1-5に示す。浄化槽1基当たりの収集・運搬作業時間はバキューム車が56分、濃縮車が47分であり、濃縮車の方が短時間で収集・運搬作業が完了するため、1日当たりの清掃基数が多くなっている。濃縮車を使用することで浄化槽1基当たりの作業時間が短縮される要因は走行時間およびし尿処理施設滞在時間の短縮である。濃縮車を使用した場合、走行時間はバキューム車に比べてほぼ半減していることが分かった。その一方で浄化槽滞在時間は濃縮車の方が長くなった。その要因として、濃縮車では汚泥を濃縮する工程があるため、作業時間が長くなることが推察された。

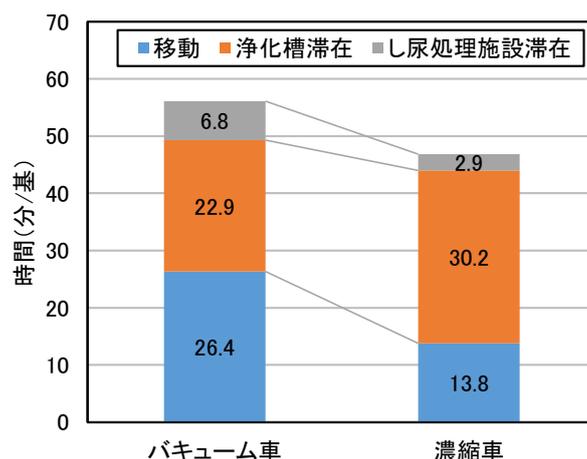


図1-5 浄化槽1基当たり換算した走行時間および施設滞在時間

清掃作業における作業地点は(i)事業所、(ii)浄化槽、(iii)し尿処理施設、(iv)休憩場所の4種類となる。車両の走行区分は事業所-浄化槽間の走行(区分(1))、浄化槽-浄化槽間の走行(区分(2))、浄化槽-し尿処理施設間の走行(区分(3))、し尿処理施設-事業所間の走行(区分(4))に分類される。1日当たりの各走行区分の走行距離を図1-6に、走行回数を図1-7にそれぞれ示す。

バキューム車を使用した場合、区分(3)の走行距離が突出しており、車両の走行の大部分を浄化槽-し尿処理施設間の走行が占めていることが分かる。一方、濃縮車を使用した場合は区分(3)の走行距離がバキューム車の3分の1程度に短縮されており、これが、1日当たりの走行時間が短縮された要因であった。調査対象としたバキューム車のバキュームタンクは容量が3.0 m³であったのに対し、濃縮車の貯留タンクは容量が1.8 m³であった。浄化槽1基当たりの汚泥搬出量は、バキューム車が1.5 m³/基であったのに対し、濃縮車が0.3 m³/基であり、浄化槽1基から発生する汚泥がタンク容量に占める割合は濃縮車の方がきわめて小さい。そのため、濃縮車を使用した場合は、し尿処理施設への搬入頻度を低下させることができ、浄化槽-し尿処理施設間の走行距離が減少した。

し尿処理施設の広域化が進むと、地域によっては浄化槽-し尿処理施設間の走行距離が長くなる。浄化槽-し尿処理施設間の走行距離が長くなった場合は、バキューム車、濃縮車のいずれも収集・運搬の効率が低下するが、その走行回数が多いバキューム車では影響がより顕著に表れることが示唆された

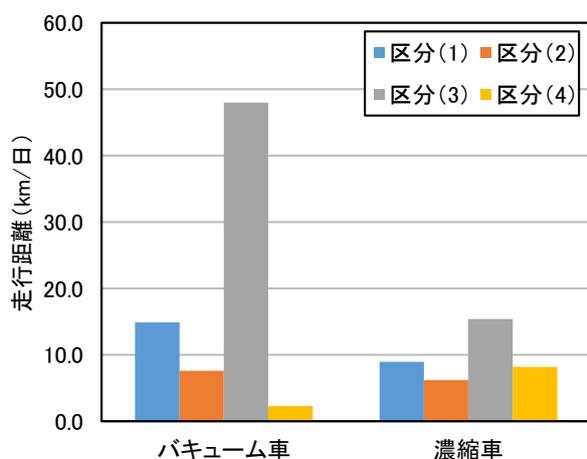


図1-6 1日当たりの走行距離

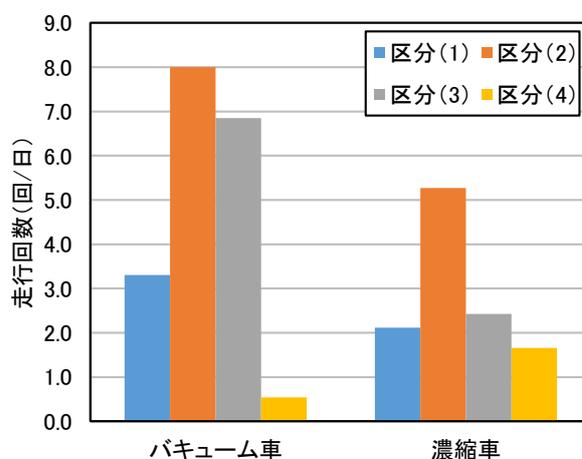


図1-7 1日当たりの走行回数

浄化槽およびし尿処理施設における滞在時間と汚泥量の関係を図1-8に示す。各浄化槽における作業時間には清掃対象の槽の容量と正の相関が認められ、清掃対象の容量が大きいほど浄化槽における作業

時間も長くなることが明らかとなった。し尿処理施設の滞在時間は5～15分程度であり、搬入汚泥量を説明変数とした近似式で表すことができた。調査期間に使用されたバキューム車は、浄化槽汚泥を積載するバキュームタンクの容量が3,000 Lまたは3,700 Lであり、1回当たりの搬入汚泥量が多いため排出時間が長くなる。さらにし尿処理施設の放流水を吸引する時間も加算されることから、バキューム車のし尿処理施設滞在時間は長い傾向が認められた。一方、濃縮車は輸送タンクの容量が1,800 Lと小さく、1回当たりの搬入汚泥量も少ないが、高濃度で粘度の高い濃縮汚泥を排出するため、単位汚泥量当たりの汚泥排出時間はやや長くなると推察された。図1-5に示した浄化槽1基当たりのし尿処理施設滞在時間は、濃縮車がバキューム車の2.4分の1程度となっており、濃縮車の方が大幅に短縮されている。これは、し尿処理施設への1回の運搬で清掃できる浄化槽基数が濃縮車の方が多い、すなわちし尿処理施設への搬入頻度が低い影響と考えられた。

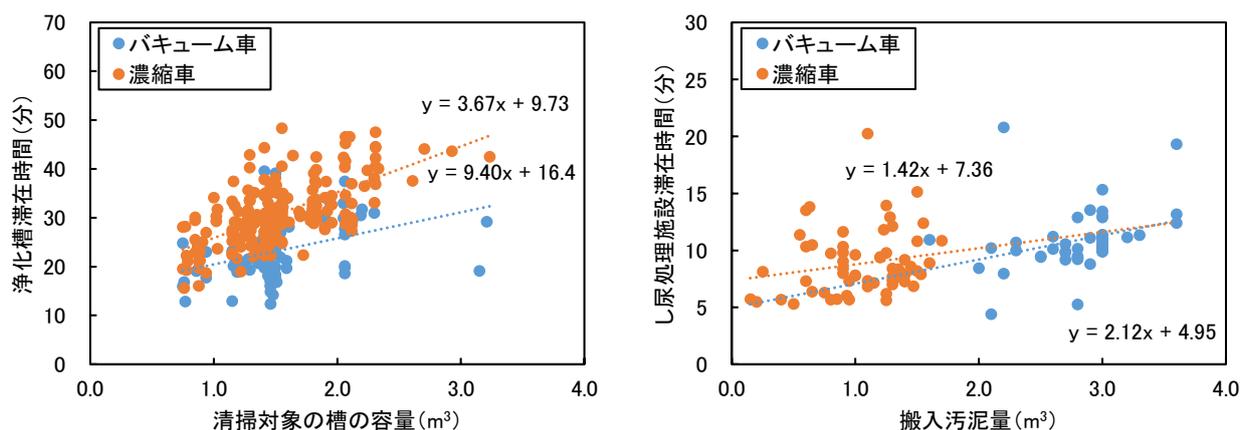


図1-8 浄化槽およびし尿処理施設における滞在時間と汚泥量の関係

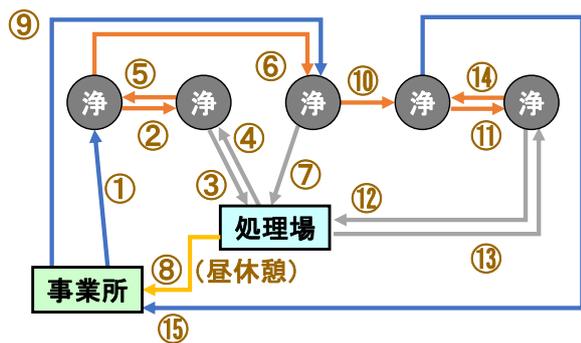
b) 収集・運搬工程のモデル化

① 各車両の走行パターン

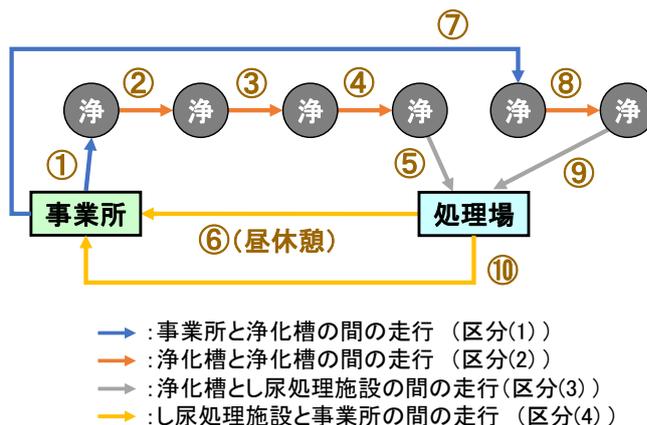
バキューム車および濃縮車の走行パターン例を図1-9（図0-1）に示す。バキューム車、濃縮車ともに浄化槽から浄化槽へ走行して汚泥を収集していくが、タンク内の汚泥量が増加することで空き容量が減少し、次の浄化槽から搬出される汚泥を積載できないと考えられる場合は、それまでに収集した汚泥をし尿処理施設に運搬する。調査対象地域では、バキューム車を使用した場合、し尿処理施設の放流水を運搬して浄化槽の水張りに用いているため、し尿処理施設を出発したバキューム車は汚泥の引き出し作業を実施した浄化槽へ引き返し、水張り作業を行う。一方、濃縮車を使用した場合は、汚泥の引き出し、反応タンク内での凝集分離および分離液を用いた水張りを一連の作業として行うため、バキューム車のように一旦浄化槽から離れた後、引き返して作業を行うことがない。1日の作業時間の中で昼休憩が必要となるが、調査対象地域では、事業所に戻って昼休憩を取ることとしていた。収集・運搬作業のため事業所外で作業している時間は半日の作業日を除くと、4.7～7.0時間であった。

作業地点間の車両の走行を前述の区分(1)～区分(4)に分類し、1日当たりの各走行区分の走行回数を求めた結果を表1-2に示す。1日当たりの清掃基数、1日当たりのし尿処理施設への汚泥搬入回数および収集・運搬区域における区分(1)～区分(4)の各平均走行距離を用いて1日の車両の全走行距離を算出できるようになった。

<バキューム車の場合>



<濃縮車の場合>



→ : 事業所と浄化槽の間の走行 (区分(1))
 → : 浄化槽と浄化槽の間の走行 (区分(2))
 → : 浄化槽とし尿処理施設の間の走行 (区分(3))
 → : し尿処理施設と事業所の間の走行 (区分(4))

図1-9 (図0-1) バキューム車および濃縮車の走行パターン例

表1-2 1日当たりの各区分の走行回数

	バキューム車	濃縮車	
		($a \geq 2$ の場合)	($a = 1$ の場合)
区分(1) (回/日)	3	2	3
区分(2) (回/日)	$2n - a - 1$	$n - a$	$n - 2$
区分(3) (回/日)	$2a - 1$	$2a - 2$	1
区分(4) (回/日)	1	2	1

n : 1日当たりの浄化槽清掃基数 (基/日)

a : 1日当たりのし尿処理施設への汚泥搬入回数 (回/日)

②1日当たりの車両走行距離

各車両の1日当たりの走行距離は式(1)から式(3)で表すことができる。濃縮車を使用した場合、し尿処理施設への汚泥の搬入頻度を低減することができるため、地域によっては1日の搬入回数が1回となる可能性もある。この場合、各浄化槽から収集した濃縮汚泥を貯留タンクに入れたまま事業所に戻り、昼休憩後、次の浄化槽へ走行することとなるが、1日の搬入回数が2回以上の場合と走行パターンが異なり、各走行区分の走行回数も異なる。

バキューム車 : $D = 3d_1 + (2n - a - 1)d_2 + (2a - 1)d_3 + d_4$ 式(1)

濃縮車 ($a \geq 2$ の場合) : $D = 2d_1 + (n - 1)d_2 + (2a - 2)d_3 + 2d_4$ 式(2)

濃縮車 ($a = 1$ の場合) : $D = 3d_1 + (n - 2)d_2 + d_3 + d_4$ 式(3)

D : 1日当たりの車両走行距離 (km/日)

$d_1 \sim d_4$: 区分(1)～区分(4)の平均走行距離 (km/回)

n : 1日当たりの浄化槽清掃基数 (基/日)

a : 1日当たりのし尿処理施設への汚泥搬入回数 (回/日)

③1日当たりの作業時間

1日当たりの全作業時間は浄化槽およびし尿処理施設の滞在時間と走行時間の合計となり、式(4)で表すことができる。浄化槽およびし尿処理施設の滞在時間は、図1-8に示した近似式に浄化槽の清掃対象となる槽の容量および搬出汚泥量を与えることで算出できる。昼休憩を除いた全作業時間の上限を与えると、その範囲内で清掃可能な浄化槽の基数およびし尿処理施設への汚泥搬入回数を求めることができる。

$$T = \sum t_{ji} + \sum t_{Ni} + V_1 D_1 + V_2 D_2 + V_3 D_3 + V_4 D_4 \quad \text{式(4)}$$

T : 1日当たりの全作業時間 (時間/日)
 T_{ji} : 浄化槽1基当たりの滞在時間 (時間/基)
 T_{Ni} : 搬入1回当たりのし尿処理施設の滞在時間 (時間/回)
 $D_1 \sim D_4$: 1日当たりの区分(1)～区分(4)の走行距離 (km/日)
 $v_1 \sim v_4$: 区分(1)～区分(4)の平均時速 (km/時)

④燃料消費量

各浄化槽およびし尿処理施設における作業中、車両はアイドリングしており、この間も燃料が消費される。浄化槽汚泥の収集・運搬に係る燃料消費量は走行距離と浄化槽およびし尿処理施設の滞在時間を用いて式(5)で表すことができる。

$$F = aD + b(\sum t_{ji} + \sum t_{Ni}) \quad \text{式(5)}$$

F : 1日当たりの燃料消費量 (L/日)
 T_{ji} : 浄化槽1基当たりの滞在時間 (時間/基)
 T_{Ni} : 搬入1回当たりのし尿処理施設の滞在時間 (時間/回)
 D : 1日当たりの車両走行距離 (km/日)
 a : 走行時の燃料消費速度係数 (L/km)
 b : アイドリング作業時の燃料消費速度係数 (L/分)

調査データを用いて、回帰分析によりaおよびbを算出した結果、バキューム車の燃料消費量は走行時が0.14 L/km、アイドリング作業時が0.042 L/分、濃縮車の燃料消費量は走行時が0.21 L/km、アイドリング作業時が0.057 L/分と算出された。

(2) 汚泥搬出量及び汚泥性状と使用条件の関係に関する結果及び考察

a) バキューム車による汚泥搬出量の特性

地域1および地域2における、浄化槽のタイプ（嫌気ろ床接触ばっ気方式、コンパクト型、モアコンパクト型）、人員比（低、中、高）、浄化槽平均容量、平均汚泥搬出量、汚泥引き出し比（槽容量に対する汚泥搬出量の比）を表1-3および図1-10に示す。嫌気ろ床接触ばっ気方式はコンパクト型やモアコンパクト型に比べて汚泥引き出し比が低い傾向が認められた。

地域1、地域2ともに、各浄化槽のタイプにおいていずれの人員比においても汚泥引き出し比に有意な差は認められなかった（Games-Howell, $p > 0.05$ ）。このことから、同一の浄化槽タイプであれば、汚泥引き出し比は人員比によらずほぼ一定であることが示唆された。

同一地域における汚泥引き出し比を浄化槽のタイプごとに比較すると、地域1においては嫌気ろ床接触ばっ気方式とモアコンパクト型、コンパクト型とモアコンパクト型に有意な差が認められた（Games-Howell, $p < 0.05$ ）。地域2においては嫌気ろ床接触ばっ気方式とコンパクト型、嫌気ろ床接触ばっ気方式とモアコンパクト型に有意な差が認められた（Games-Howell, $p < 0.05$ ）。このことから汚泥引き出し比は浄化槽のタイプにより異なることが示唆された。

それぞれの浄化槽タイプにおいて、地域1と地域2の汚泥引き出し比を比較したところ、嫌気ろ床接触ばっ気方式については地域1と地域2で有意な差が認められなかったが（Games-Howell, $p > 0.05$ ）、コンパクト型およびモアコンパクト型については地域1と地域2に有意な差が認められた（Games-Howell, $p < 0.05$ ）。清掃時の洗浄水量の相違等の地域ごとの清掃作業の特徴が汚泥引き出し比に影響を及ぼすと推測された。

表1-3 浄化槽のタイプおよび人員比別の浄化槽容量と汚泥搬出量

調査地域	浄化槽のタイプ	人員比	データ数	浄化槽容量平均値 (m ³ /基)	汚泥搬出量平均値 (m ³ /基)
地域1	嫌気ろ床接触ばっ気方式	0.3未満	5	5.19	2.06
		0.3以上、0.6未満	5	4.09	2.80
		0.6以上	5	4.08	2.50
		すべての人員比	15	4.45	2.45
	コンパクト型	0.3未満	5	2.95	1.96
		0.3以上、0.6未満	5	2.70	1.86
		0.6以上	5	2.76	1.92
		すべての人員比	15	2.80	1.91
	モアコンパクト型	0.3未満	5	1.96	1.58
		0.3以上、0.6未満	5	1.61	1.46
		0.6以上	5	1.65	1.36
		すべての人員比	15	1.74	1.47
地域2	嫌気ろ床接触ばっ気方式	0.3未満	5	4.28	2.92
		0.3以上、0.6未満	5	4.28	3.24
		0.6以上	5	4.70	4.04
		すべての人員比	15	4.42	3.40
	コンパクト型	0.3未満	5	2.83	2.97
		0.3以上、0.6未満	5	2.66	2.87
		0.6以上	5	2.52	2.70
		すべての人員比	15	2.67	2.85
	モアコンパクト型	0.3未満	5	2.01	2.27
		0.3以上、0.6未満	5	1.84	2.07
		0.6以上	5	1.95	2.16
		すべての人員比	15	1.93	2.17

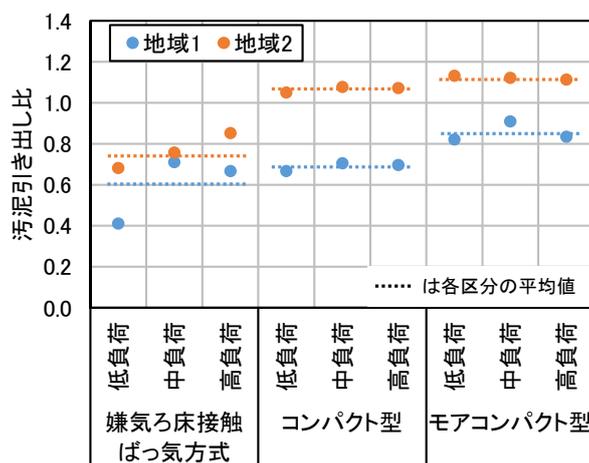


図1-10 浄化槽のタイプおよび人員比別の汚泥引き出し比

そこで地域3と4について浄化槽のタイプ（嫌気ろ床接触ばっ気方式、コンパクト型、モアコンパクト型、単独処理浄化槽）ごとの汚泥引き出し比を算出した。その結果を表1-4に示す。地域3は汚泥を引き出す槽を限定しており、適正量の清掃作業を標準としている。地域4は浄化槽内の水と汚泥を全量引き出す作業を標準としている。文献値（国安ら、1997）は全国を対象とした調査に基づいた集計結果であり、国内の標準的な汚泥引き出し比と考えられる。文献では、嫌気ろ床接触ばっ気方式の一次処理装置（嫌気ろ床槽）に対する搬出汚泥量の比を汚泥引き出し比と定義しているが、表中の数値は、5人槽

の全体容量を分母として汚泥引き出し比を算出し直している。地域1、地域2と同様に、地域3および地域4においてもコンパクト型やモアコンパクト型に比べて嫌気ろ床接触ばっ気方式の汚泥引き出し比が低い傾向にあることが示された。

地域3および地域4の各浄化槽タイプの汚泥引き出し比に基づき、浄化槽の標準的な汚泥引き出し比を算出した。地域3と地域4についてデータ数で重み付けした加重平均が文献値と合致するのは、地域3と地域4のデータ数の比が4：1の場合であり、嫌気ろ床接触ばっ気方式以外の浄化槽タイプについても同様の重み付けを行うことで標準的な汚泥引き出し比を算出した。算出された標準的な汚泥引き出し比は、嫌気ろ床接触ばっ気方式が0.64、コンパクト型が0.85、モアコンパクト型が0.94、単独処理浄化槽が1.07であった。これらの結果から、汚泥引き出し比と各浄化槽の総容量を乗じることで、バキューム車を使用して収集・運搬を行う場合の汚泥搬出量を予測できるようになった。

表1-4 10人槽以下の浄化槽の汚泥引き出し比

浄化槽のタイプ	文献値	地域3	地域4	算出した標準値
嫌気ろ床接触ばっ気方式	0.64	0.56	0.98	0.64
コンパクト型	—	0.78	1.12	0.85
モアコンパクト型	—	0.88	1.17	0.94
単独処理浄化槽	—	1.04	1.21	1.07

b) 濃縮車による汚泥搬出量の特性

①濃縮汚泥の性状と浄化槽タイプの関係

各浄化槽タイプから収集された浄化槽汚泥のTS、SS、COD_{Mn}、T-N、T-Pについて、使用人員1人当たりの年間汚泥発生量を算出し、比較を行った（図1-11）。T-Pについては、コンパクト型とモアコンパクト型で有意な差が認められたが（Games-Howell、 $p < 0.05$ ）、その他の項目については浄化槽のタイプによる搬出量の有意な差は認められなかった（Games-Howell、 $p > 0.05$ ）。すべての浄化槽タイプの平均値は、TS:5.9 kg/（人・年）、VS:5.0 kg/（人・年）、SS:5.3 kg/（人・年）、VSS:4.5 kg/（人・年）、COD_{Mn}:2.4 kg/（人・年）、T-N:0.29 kg/（人・年）、T-P:0.046 kg/（人・年）であった。

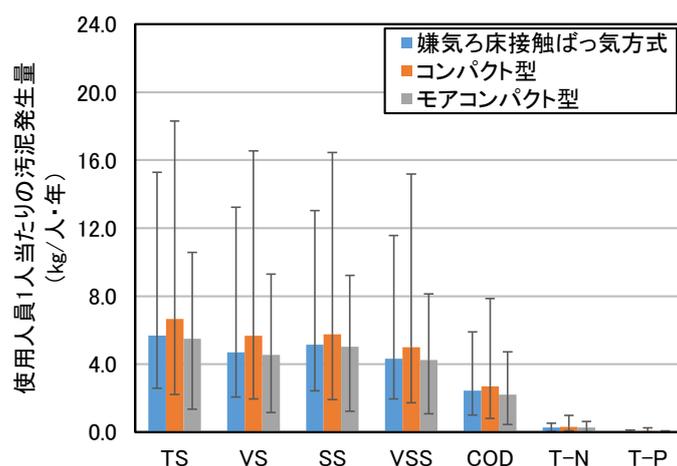


図1-11 使用人員1人当たりの年間汚泥発生量

②汚泥搬出量の予測

前述の①より得られた使用人員1人当たりのSSの値を用いて、汚泥の搬出に濃縮車を使用した場合の汚泥量を予測した。

サブテーマ3でシナリオ解析を行ったモデル自治体におけるDID（人口集中地区）を除くエリアの一般世帯数について、世帯人員別の世帯数の割合を推定し、モデル自治体の浄化槽台帳情報を入手した

2022年時点における1世帯当たりの人員数を算出したところ、平均2.47人/世帯と試算された。これを10人槽以下の浄化槽1基当たりの使用人員と仮定した。

汚泥濃縮車を使用した場合の濃縮汚泥のSSをサブテーマ2における分析結果から32,350 mg/Lと仮定すると、1人当たりのSSは5.3 kg/(人・年)であることから、1人当たりの濃縮汚泥搬出量は0.164 m³/人と試算された。濃縮車を使用した場合、使用人員(=世帯人員)と濃縮汚泥の搬出量は比例すると考えられるため、2022年時点のモデル自治体における1世帯当たりの人員数(平均2.47人/世帯)を用いることで、10人槽以下の浄化槽1基あたりの濃縮汚泥搬出量は平均0.41 m³/基と算出された。このように、前述の1人当たりの濃縮汚泥搬出量と使用人員を乗じることで濃縮車を使用して収集・運搬を行う場合の汚泥搬出量を予測できるようになった。

c) バキューム車と汚泥濃縮車による汚泥引き出し量の比較と今後の展望

前述のa)およびb)で得られた知見から、各浄化槽タイプの5人槽、各使用人員別(1、3、5人)に汚泥搬出量を予測した結果を図1-12(図0-2)に示す。バキューム車と濃縮車の汚泥搬出量を比較すると、濃縮車を使用した場合はバキューム車に比べて9~66%程度の汚泥量であり、濃縮車による汚泥搬出量が非常に少ないことが示された。現在、新設浄化槽の大部分を占めているモアコンパクト型は、嫌気ろ床接触ばっ気方式やコンパクト型と比較してバキューム車による搬出汚泥量が少なく、濃縮車導入による搬出汚泥量削減効果はこれらの浄化槽タイプよりも小さいが、使用人員の少ない浄化槽では十分な効果が得られると考えられる。

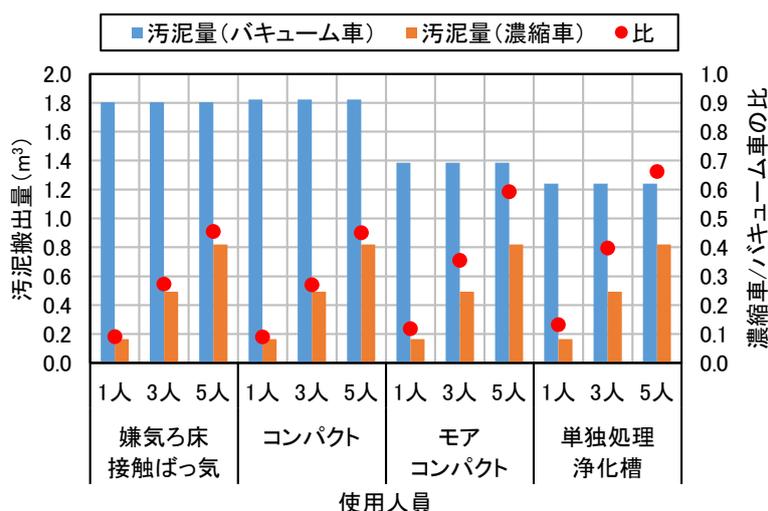


図1-12 (図0-2) 浄化槽のタイプ別のバキューム車と濃縮車の汚泥搬出量の比較

本研究のモデル自治体におけるDID(人口集中地区)を除くエリアの一般世帯数の内訳(総務省統計局、2023)を図1-13に示す。世帯人員別にみると、近年、世帯人員が2人以下の世帯の割合が上昇しており、4人以上の世帯の割合が急激に低下しているなど、1世帯当たりの人数が減少傾向にあることが分かる。今後は1世帯当たりの世帯人員が少なく、固形分の蓄積量が少ない浄化槽が増加していくと推定され、そのような場合において固形分を高濃度で収集する濃縮車の導入は、浄化槽のタイプによらず汚泥搬出量の大幅な削減に寄与すると考えられる。その結果として、汚泥処理施設の受入・貯留設備の貯留能力に余力が生じることで清掃の実施率の向上が図られることや汚泥処理施設での汚泥処理に係るエネルギーの削減が期待される。また、少人数の世帯が増加することで、1基当たりの濃縮汚泥量の少ない浄化槽が増加するため、濃縮車を使用した場合は収集・運搬の効率が向上し、1日当たりの清掃基数を増加できることにつながるため、バキューム車に比べて濃縮車を導入するメリットがさらに増大していくことが示唆された。

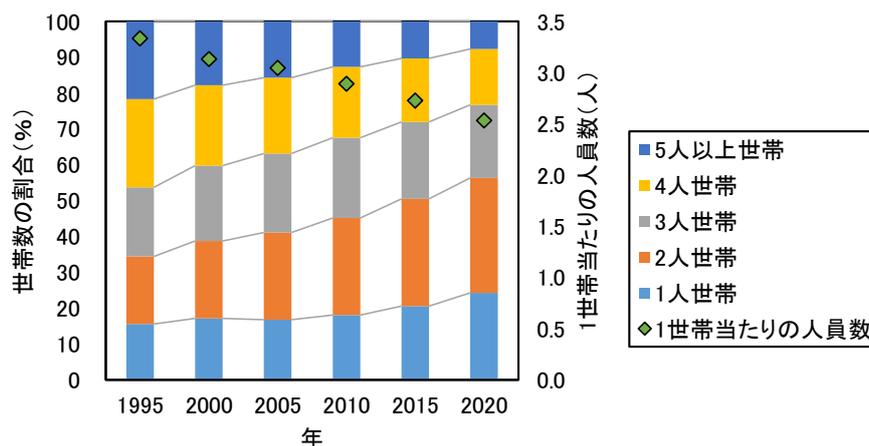


図1-13 世帯人員別の世帯数の割合および1世帯当たりの人員数

(3) 汚泥処理施設における処理量とエネルギー消費量に関する結果及び考察

し尿および浄化槽汚泥の1日当たりの処理量と処理量当たりの消費電力量の関係を図1-14（図0-3）に示す。ここでは、解析対象施設を高負荷脱窒素処理方式（膜分離高負荷脱窒素処理方式を含む）および標準脱窒素処理方式に限定し、1日当たりの処理量は年間の処理量を365で除して算出した。施設規模が大きく年間処理量の多い施設においては、処理量当たりの消費電力量が40 kWh/kL程度の値に収束しているが、処理量の少ない施設においては値のばらつきが非常に大きかった。また、処理方式と処理量当たりの消費電力量の関係には傾向が認められず、施設ごとの運転条件の差異がばらつきの要因と推察された。し尿処理施設における消費電力量を予測する場合、処理工程ごとの機器の運転方法に応じた条件設定を行い、工程ごとの消費電力量を積み上げる方法が適切と考えられた。

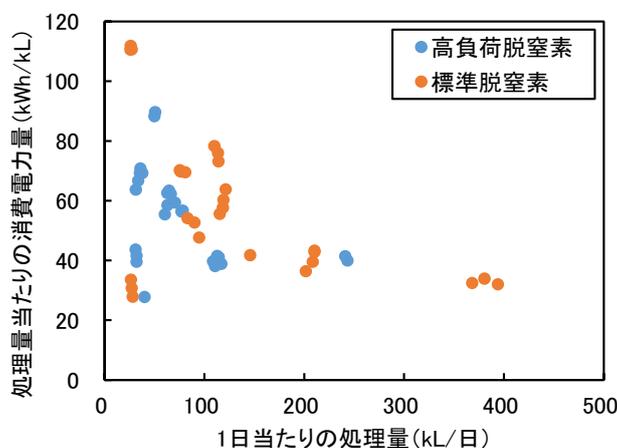


図1-14（図0-3） 1日当たりの処理量と処理量当たりの消費電力量の関係

浄化槽汚泥は主にし尿処理施設に搬入・処理されており、その処理工程は受入・貯留設備、水処理設備、高度処理設備、消毒設備、汚泥処理設備、脱臭設備等に区分できる。各処理工程で使用される主要な機器はポンプ、ブロワ、ファン等であり、これらの機器は液体または気体を移送する能力と出力が比例する傾向が認められた（図1-15～1-17）。このことから、各機器の単位流量当たりの消費電力量と稼働時間を仮定することで、し尿処理施設における消費電力量を予測できることが明らかになった。

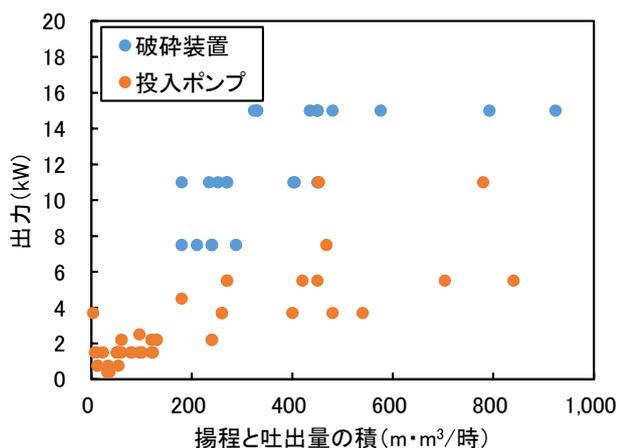


図1-15 破碎装置および投入ポンプの揚程と吐出量の積と出力の関係

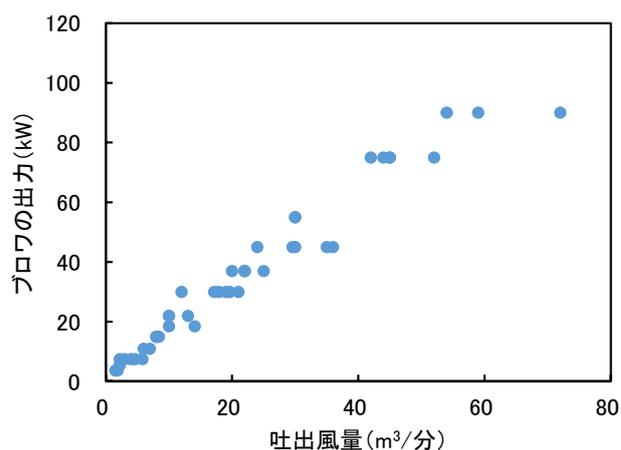


図1-16 ブロワの吐出風量と出力の関係

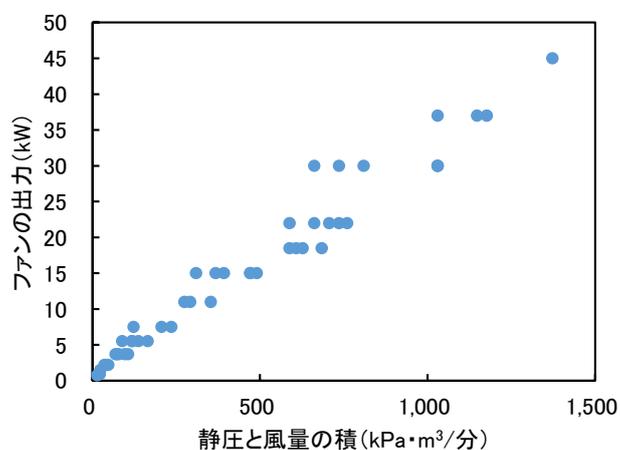


図1-17 脱臭ファンの静圧と風量の積と出力の関係

受入・貯留設備で使用される機器は、ポンプ、ドラムスクリーン、コンベア等であり、一部の機器を除き搬入汚泥量に応じて稼働時間が決定される。高度処理設備および消毒設備で使用される機器は主にポンプであり、これらの稼働時間は放流量に応じて決定される。汚泥処理設備で使用される機器は、攪拌機、ポンプ、脱水機等であり搬入汚泥量に応じて稼働時間が決定されると考えられる。これらの処理工程の機器稼働時間および消費電力量は搬入汚泥量に比例すると仮定して算出することが妥当と考えられた。

水処理設備および脱臭設備は24時間連続で運転される傾向があるため、これらの設備の消費電力量は設置した機器の仕様で決定されると考えられる。計画処理量と機器の合計出力の関係を図1-18に、計画処理量と脱臭設備の機器の出力の関係を図1-19にそれぞれ示す。いずれも正の相関が認められるが、ばらつきが大きく、処理方式、し尿および浄化槽汚泥の処理量の割合、脱臭方式等の違いが機器の出力に影響していると考えられる。これらの処理工程の消費電力量を予測する場合は、機器の出力を仮定し、搬入汚泥量に変化しても一定の電力が消費されることとして試算する方法が適切と考えられた。

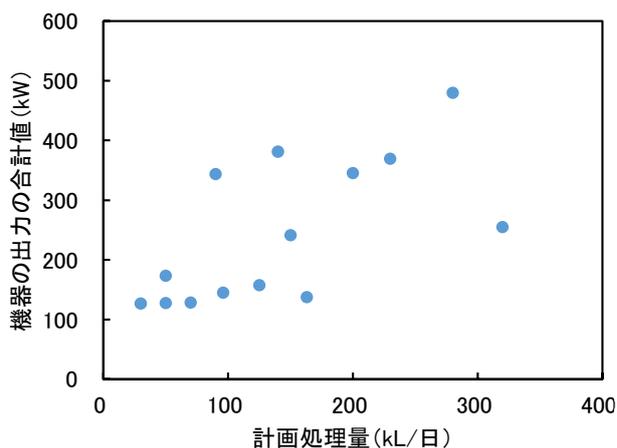


図1-18 計画処理量と水処理設備における機器の出力の関係

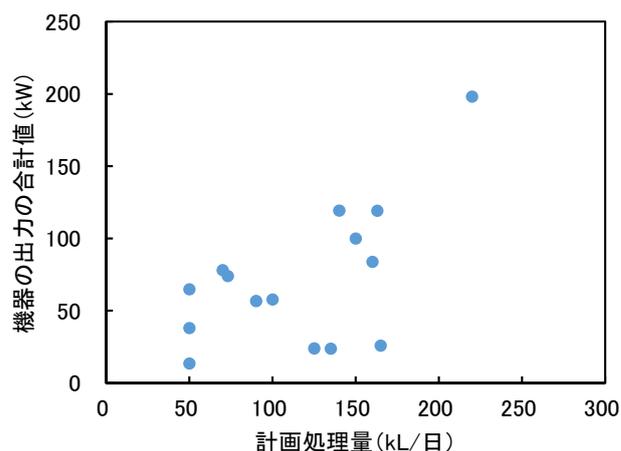


図1-19 計画処理量と脱臭設備における機器の出力の関係

引用文献：

国安克彦，小川浩，楊新泌，仁木圭三，大森英昭．小型合併処理浄化槽の清掃汚泥量に影響を及ぼす影響．1997．浄化槽研究，Vol.9，No.2，11-20

総務省統計局．2023．e-Stat 政府統計の総合窓口．<https://www.e-stat.go.jp/stat-search?page=1&toukei=00200521>

5. サブテーマ1 研究目標の達成状況

サブテーマ1では、以下①～③に示す3つの目標を設定した。これらについて、以下の通り目標とした成果を達成することができた。

目標①濃縮車による収集・運搬を行っている浄化槽20基以上の調査を行い、作業原単位を整理し、GISを活用した収集運搬モデルを構築する

- 濃縮車による収集・運搬を行っている浄化槽196基、バキューム車による収集・運搬を行っている浄化槽85基の調査を行い、作業時間と汚泥量の関係式および車両の走行距離の計算式を作成するとともに車両の燃料消費速度係数を明らかにした。
- 上記の原単位、浄化槽1基当たりの汚泥搬出量、地域特性に応じた施設間の走行距離等の条件を設定することで、1日当たりの清掃基数や走行距離の推定が可能となり、各車両の収集・運搬効率や燃料消費量を比較する手法を確立できた。

目標②バキューム車による収集・運搬を行っている浄化槽30基以上の調査を行い、汚泥搬出量及び汚泥性状と使用条件の関係について解析する

- バキューム車による収集・運搬を行っている浄化槽計90基の調査を行い、浄化槽タイプと人員比ごとの浄化槽容量と汚泥搬出量から汚泥引き出し比（槽容量に対する汚泥搬出量の比）を算出した。同一の浄化槽タイプであれば人員比と汚泥引き出し比に有意な差は認められず、使用条件によらず汚泥引き出し比は一定であり、バキューム車による汚泥搬出量は浄化槽タイプおよび浄化槽容量から予測できることが分かった。
- 各浄化槽タイプから収集された濃縮汚泥のTS、SS、COD_{mn}等について使用人員1人当たりの汚泥発生量（kg/人・年）を算出した結果、浄化槽タイプ間で汚泥発生量の有意な差は認められず、濃縮車による汚泥搬出量は浄化槽タイプを考慮せず、使用人員のみから予測できることが分かつ

た。

目標③20施設以上の汚泥処理施設から運転データを収集し、現有の汚泥処理システムのエネルギー消費・CO₂排出に関する解析を行う

- 浄化槽汚泥の処理を行っている汚泥処理施設計31施設の運転データを収集し、エネルギー消費量に関する解析を行った。
- 各処理工程で使用される主要な機器は、流体を移送する能力と出力が比例する傾向にあり、各機器の単位流量当たりの消費電力量と稼働時間を仮定することで、汚泥処理施設における消費電力量を予測できるようになった。また、消費電力量に基づいてCO₂排出量を算出できるようになった。

II-2 サブテーマ2 「濃縮汚泥に適した資源化システムの開発と評価」

[サブテーマ2 要旨]

本サブテーマでは、濃縮汚泥の再生処理に適した創エネルギー・低炭素型資源化システムを確立することを目的として、(1) エネルギー回収に対応する分解促進型嫌気性膜分離バイオリクター (AnMBR) による高効率メタン発酵、(2) 一槽式HAP-anammox法による窒素除去とリン回収、(3) 発酵汚泥残渣の資源化处理、という3つのユニットによって構成される最新汚泥再生処理システムを確立することを目標に研究を行い、以下の通り目標とした成果を達成することができた。

エネルギー回収に対応する分解促進型嫌気性膜分離バイオリクター (AnMBR) による高効率メタン発酵の技術開発研究においては、実際の濃縮汚泥を用いて嫌気性MBRの長期連続運転実験を行い、浄化槽濃縮汚泥は高いメタン収率 (消化率) を得られる性状であること、一般的な下水混合汚泥のバイオガス収率と同等であると評価されること、SRTを30日から60日に延長することでメタン生成の促進効果が確認され、余剰汚泥量の減少に効果的であること、膜ろ過液のCOD_{Cr}は全COD_{Cr}のわずか0.4~0.9%に過ぎず、COD_{Cr}除去効率は97.7~98.7%と非常に高いことが明らかになった。

このAnMBRろ過水中の窒素除去とリン回収のために一槽式HAP-anammox法の適用を検討し、HAP 促進グラニューール方式一槽型部分硝化アナモックス (PNA) プロセスを開発した。この(HAP+PNA)法の連続運転実験の結果、平均窒素除去率81.3%と安定して非常に良好な処理水質を得ることができ、反応槽内DOは0.2 mg/L以下 (平均DO:0.12 mg/L) で微好気環境を安定して維持し、浄化槽汚泥消化液に対して安定した一槽型アナモックス反応が確認された。さらに、ハイドロキシアパタイト (HAP) 形成を促進するようCaを添加することで良好なリンの回収が達成でき、窒素除去速度の比 (PRR/NRR比) は0.12と既往研究と比べて最高値を示し、かつリアクターは安定した汚泥特性と高い窒素除去性能を維持することができた。

本研究で開発した最新汚泥再生処理システムである嫌気性MBRと一槽式HAP+PNA法の融合技術であるAnMBR+(HAP+PNA)法のエネルギー消費量を評価するために、浄化槽汚泥処理施設のエネルギー消費量計算システムの構築を行い、既存浄化槽汚泥処理施設において実績値と比較して再現性が高く信頼できるシステムであることを確認した。このシステムを用いて、浄化槽濃縮汚泥をAnMBR+(HAP+PNA)法および後処理として硝化脱窒素処理方式による窒素の高度処理および凝集膜分離方式によるリンの高度処理を行った場合のエネルギー消費量を算出し、生成されたメタンガスをガスエンジン発電および排熱利用して回収したエネルギー量と比較したところ、濃縮汚泥を処理する施設のCO₂排出量をマイナスにすることが可能であることが示された。

1. サブテーマ2 研究開発目的

浄化槽から収集された浄化槽汚泥の大部分はし尿処理施設・汚泥再生処理センター (以後、合わせて浄化槽汚泥処理施設、あるいは汚泥処理施設という) に運搬・処理されているが、汚泥処理施設における処理には多くのエネルギーを必要とし、脱炭素化への対応に限界がある。サブテーマ2では、汚泥処理施設における革新的技術として高濃度嫌気性膜分離法 (Anaerobic Membrane bioreactor、以下AnMBRと記す) を用いた濃縮浄化槽汚泥の高効率メタン発酵処理に関する研究開発を行い、エネルギー回収の向上を目指した。また、嫌気性MBRの膜ろ過液に対して、HAP (ハイドロキシアパタイト) 促進グラニューール方式一槽型部分亜硝酸化アナモックスプロセス (以下、(HAP+PNA)と記す) による窒素除去とリン回収を試みることで、安定的な窒素とリン除去性能を得ることを目指した。

さらに、開発したAnMBRと(HAP+PNA)の各ユニットからなる濃縮汚泥に適した資源化システム (以下、AnMBR+(HAP+PNA)法と記す) について、浄化槽汚泥処理におけるエネルギー消費量評価方法を構築し、濃縮汚泥に適した資源化システムによる処理と既存汚泥処理施設での処理におけるエネルギー消費量比較を行った。

以上の通り、サブテーマ2では濃縮汚泥の資源化に適した資源化システムの開発研究として(1)と(2)を、濃縮汚泥の資源化に適した資源化システムの評価研究として(3)を設定し、研究を進めた。

(1) 嫌気性膜分離バイオリクター (AnMBR) による高効率メタン発酵

- (2) HAP 促進グラニューール方式一槽型部分亜硝酸化アナモックス (PNA) プロセスによる窒素除去とリン回収方法
- (3) 濃縮汚泥に適した資源化システムのエネルギー消費量評価

2. サブテーマ2 研究目標

サブテーマ2	「濃縮汚泥に適した資源化システムの開発と評価」
サブテーマ2 実施機関	東北大学
サブテーマ2 目標	濃縮汚泥の再生処理に適した創エネルギー・低炭素型資源化システムを確立することを目的として、(1) エネルギー回収に対応する分解促進型嫌気性膜分離バイオリクター (AnMBR) による高効率メタン発酵、(2) 一槽式HAP-anammox法による窒素除去とリン回収、(3) 発酵汚泥残渣の資源化処理、という3つのユニットによって構成される最新汚泥再生処理システムを確立する。

3. サブテーマ2 研究開発内容

(1) 嫌気性膜分離バイオリクター (AnMBR) による高効率メタン発酵

① 高濃度嫌気性膜分離法を用いた濃縮浄化槽汚泥のメタン発酵処理に及ぼす季節変動の影響

①では、一年を通じた連続実験により、リアクターの安定性、COD_{Cr}およびタンパク質などの有機物除去率、バイオガス生成量、物質収支、処理水質を把握することを目的とした。

図2-1に示す有効容積15Lの中温 (35℃) 嫌気性 MBR装置を利用し、福島県伊達地方衛生処理組合の汚泥再生処理センターから採取した浄化槽濃縮汚泥を用いてメタン発酵を実施した。一年間を通じて嫌気性MBRの運転安定性とバイオガス生成の状況を考察するため、季節ごとに運転段階を分けた。本研究の各段階の運転期間は40日以上を設定した。1-99日には夏期の試料を投入し、VS負荷1.32 g-VS/L/dとし、HRTを30日、SRTを60日に固定して長期連続運転実験を行った。その後は、秋、冬、春に採取した浄化槽汚泥を使用し、リアクターの運転状況を評価した。なお、HRT30日、SRT60日は固定したが、表2-3に示すように濃縮汚泥の性状は季節変化するため、VS負荷も変化した。これらの運転条件の詳細は表2-4に示す。

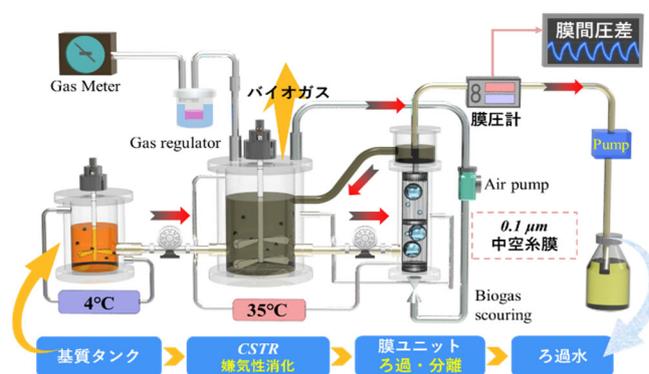


図2-1 本研究で用いた嫌気性MBR装置

② 嫌気性MBRにおける汚泥滞留時間の延長が濃縮浄化槽汚泥のメタン発酵処理に及ぼす促進効果

②では、(a)濃縮汚泥の嫌気性消化におけるSRTの変化がメタン生成性能に与える影響を考察し、濃縮汚泥処理に最適なSRTを特定する。また、(b)反応槽での高固形分条件下の持続可能な膜運転フラックスを測定し、膜ファウリングの挙動を解明した上で、効率的なファウリング制御対策を検討する。さらに、(c)物質収支とエネルギー評価を通じてシステム全体の性能を評価し、嫌気性MBRを用いた高濃度廃棄物処理におけるSRT延長の利点を検討する。これらの検討結果に基づき、嫌気性MBRの実用化に向けて、消化効率を向上させる方法および超高TS濃度条件下での膜ろ過操作における適切なガイドラインを提案することを目的とした。

嫌気性MBRの水理的滞留時間 (HRT) を20日に設定し、汚泥滞留時間 (SRT) を30日、45日、60日へ延長することで、有機物分解率、バイオガス収率 (L/g-VS)、溶解性有機物の変化、微生物群集の変動お

よび汚泥特性へ及ぼすSRTの影響を考察した。また、異なる汚泥濃度条件下での膜運転の最適化、膜ファウリングの原因となる物質の分析、および膜In-situ洗浄の効果についても検討した。

(2) HAP促進グラニューール方式一槽型PNAプロセスによる窒素除去とリン回収方法

ここでは、(a) 一槽式アナモックス法による膜ろ過水の窒素除去性能を評価する。(b) 流入Ca/P比がリンの除去効果に及ぼす影響を検討し、最適カルシウム添加量を明らかにする。さらに、(c) リン除去の強化がリアクターの安定性、汚泥特性、窒素除去性能及び微生物群集に対する影響を考察する。これらの検討により、高リン含有ろ過液の処理における(HAP+PNA)法の適用性を実証することを目的とした。

図2-2の実験装置を用い、(1)の嫌気性MBR実験で得られた膜ろ過水を調製せず投入し、連続運転を行った。HRTは24時間、窒素負荷率とリン負荷率はそれぞれ0.73 kg-N/m³/dと0.091 kg-N/m³/dであった。リン除去を促進するために、流出水のCa/P比率を0.4から段階的に1.0、1.5、2.7に上げ、カルシウムの添加がリアクターの脱窒性能、リン除去率、汚泥性質および微生物活性に与える影響を考察した。

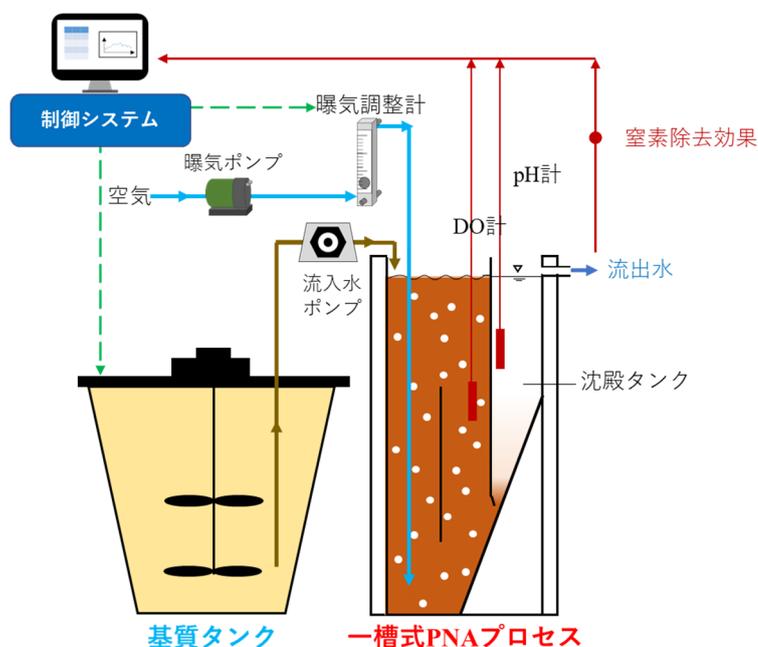


図2-2 HAP促進グラニューール方式一槽型PNAプロセス

(3) 濃縮汚泥に適した資源化システムのエネルギー消費量評価

①エネルギー消費量計算システムの構築
 浄化槽汚泥を処理する施設の機械設備等を施設の設計図書、および「汚泥再生処理センター等施設整備の計画・設計要領2021」を用いて整理し、受入・貯留工

程、取水工程、凝集分離工程、汚泥処理工程、水処理工程、高度処理工程、消毒放流工程、脱臭工程の各工程のエネルギー消費量を搬入汚泥の性状（汚泥量、汚泥濃度）を考慮して計算できる、エネルギー消費量計算システムを構築した。

なお、既存汚泥処理施設のエネルギー消費量計算システムの構築にあたっては、機械設備の定格出力を把握したうえで、ポンプ流量、ブロウのばっ気量や汚泥脱水機、スクリーンなどの稼働時間は必要な流量により決められるよう設備の処理能力を把握した。また、脱臭ファンなどの設備は通年稼働とした。後述する施設Aでは攪拌にドラフトチューブエアレーター（DTA）が採用されている。その嫌気工程の出力は、好気工程の約1/3である（奥野ら, 1991.）。よって、DTAを採用した場合には嫌気工程の攪拌出力を全出力の1/3とした。

また、施設の電気消費量等のデータを収集・整理した上で、エネルギー消費量計算システムによる結果の精度を確認した。そして、既存浄化槽汚泥処理施設で濃縮汚泥を処理する際のエネルギー消費量削減効果（CO₂排出量削減効果）を解析した。

なお、日本においては2015年からモーターのIE3基準規制が開始したため（一般社団法人日本電機工業会, 2021.）、施設の建設年代から考慮してモーター効率はIE2基準（定格出力0.4kW以下の場合に効率は0.7を採用すること）、負荷率については機械設備の構造によりそれぞれ異なるが、本研究では各設備の負荷率は0.75（池内ら, 2024.）の条件を設定し、計算した。さらに、搬入汚泥量や汚濁負荷量により機械設備の稼働時間を推定して、式(2-1)を利用して、各設備の電気消費量を算定した（日本電機工業会, 2024.）。

$$\text{機械設備の電気消費量} = \frac{\text{機械設備の定格出力} \times \text{稼働時間}}{\text{効率}} \times \text{負荷率} \dots \dots \dots \text{(式2-1)}$$

このエネルギー消費量計算システムを検証するため、膜分離高負荷脱窒素処理方式の施設において搬入実績をシミュレーション条件として計算した結果と運転実績との比較を行った。

既存浄化槽汚泥処理施設に濃縮汚泥を投入した場合のエネルギー消費量の変化を、表2-1に示す浄化槽汚泥処理施設の設計基準により、表2-2のようにバキューム車で収集・運搬した浄化槽汚泥と濃縮車で収集・運搬した濃縮汚泥のそれぞれのSSを既往の研究等を参考に設定し、それを施設の設計基準までに希釈して解析した。バキューム車(Case1)の搬入汚泥量は施設の計画処理量とした。

表2-1 浄化槽汚泥処理施設の設計基準

	膜分離高負荷脱窒素処理方式	標準脱窒素処理方式
設計基準(SS:mg/L)	14,000	3,000

表2-2 既存浄化槽汚泥処理施設における汚泥の前処理（希釈）条件

収集・運搬方式	搬入汚泥性状 SS(mg/L)	膜分離高負荷脱窒素 処理方式	標準脱窒素処理方式
Case1 バキューム車	6,600	無希釈 (SS:6600 mg/L)	2.2倍希釈 (SS:3000 mg/L)
Case2 濃縮車	30,000	2.14倍希釈 (SS:14000 mg/L)	10倍希釈 (SS:3000 mg/L)

濃縮車(Case2)の場合には、濃縮汚泥のSS濃度をもとに、バキューム車と濃縮車の搬入SS量は等しいと仮定して搬入汚泥量を算定した。また、膜分離高負荷脱窒素方式の施設においては、設計基準のSS 14,000 mg/Lに希釈して運転する。一方、標準脱窒素方式の場合には、SSの設計基準は3,000 mg/Lであり、濃縮汚泥を10倍希釈して処理することとした。また、浄化槽汚泥が濃縮されることによってBODやT-N等の汚濁負荷量は変化しないものと仮定した。そして、処理にかかる反応時間(HRT)は汚濁負荷量に比例すると仮定し、各工程の機械設備を稼働させ、そのエネルギー消費量をエネルギー消費量計算システムで算定した。

②濃縮汚泥に適した資源化システムによる処理と既存汚泥処理施設での処理におけるエネルギー消費量比較

サブテーマ2の(1)、(2)で濃縮汚泥をAnMBR+(HAP+PNA)システムで処理した実験結果を踏まえ、「汚泥再生処理センター等施設整備の計画・設計要領 2021改訂版」を参照し、放流基準まで処理する硝化脱窒素処理方式および凝集膜分離方式を付加して施設の理論的な設計を行った(図2-3)。そして、サブテーマ2の(3)①で構築したエネルギー消費量計算システムを用いてエネルギー消費量を計算した。

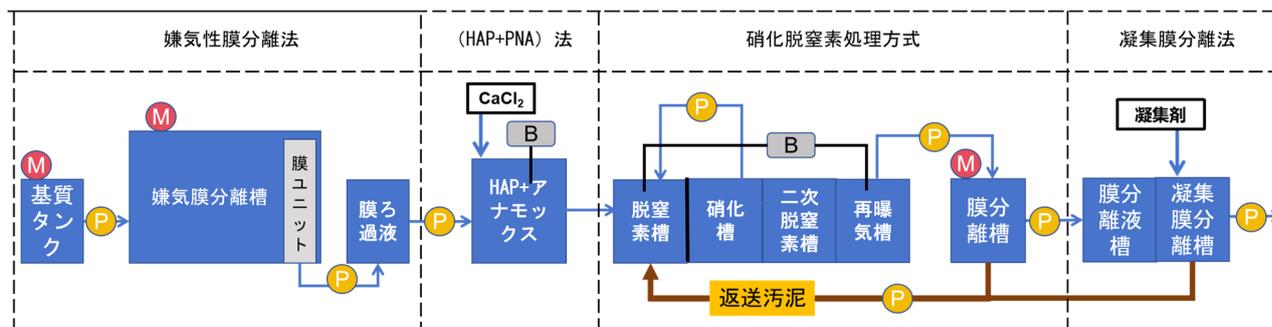


図2-3 AnMBR+(HAP+PNA)法による浄化槽濃縮汚泥の処理フロー

一方、資源化については「汚泥再生処理センター等施設整備の計画・設計要領 2021改訂版」を参照し、AnMBR+(HAP+PNA)法で生成したメタンをガスエンジンで発電し、発電によるエネルギー回収率最大40%をふまえて本研究では35%と設定した。嫌気性MBRの反応槽は35°Cに維持する必要があるため、ガスエンジンの排熱を加温に利用する。このような排熱利用によりエネルギー回収率は最大80%となるが、本研究では75%と設定した。

4. サブテーマ2 結果及び考察

(1) 嫌気性膜分離バイオリアクター (AnMBR) による高効率メタン発酵

① 高濃度嫌気性膜分離法を用いた濃縮浄化槽汚泥のメタン発酵処理に及ぼす季節変動の影響

表2-3に嫌気性MBRの長期連続運転実験で使用した濃縮浄化槽汚泥の性状を示す。本研究で使用した濃縮浄化槽汚泥のTS（全固形物）およびVS（揮発性固体）は、それぞれ30.7~41.6 g/Lおよび26.8~39.5 g/Lの範囲であり、VS/TS比は85~94%の範囲であった。COD_{Cr}濃度は50.2~73.5 g/Lの範囲で、下水処理場の余剰汚泥より高かったが、混合下水汚泥より低かった。COD_{Cr}とTSの濃度は、温暖な季節（夏と春）には高く、冷涼な季節（冬と秋）には低いことが観察された。これは、冷涼な季節に微生物の活動が低下し、浄化槽に蓄積する汚泥は栄養素濃度の高い汚泥となり、温暖な季節にその汚泥を収集・運搬することが原因であると考えられる。また、濃縮浄化槽汚泥の脂質濃度は5.07~7.06 g/Lで、全COD_{Cr}の20~33%を占め、高いメタン収率（消化率）に寄与した。

表2-3 濃縮汚泥の性状

項目	単位	夏	秋	冬	春
pH	-	5.11±0.2	5.69±0.1	5.85±0.2	5.73±0.4
TS	g/L	41.6±1.0	36.3±2.6	30.7±2.0	39.4±3.4
VS	g/L	39.5±1.0	32.3±2.1	26.8±2.0	33.7±3.3
SS	g/L	38.0±1.7	34.1±2.1	26.7±2.9	36.1±3.3
VSS	g/L	35.0±1.8	30.7±1.7	23.3±2.0	31.0±3.2
全量COD _{Cr}	g/L	73.5±7.2	60.9±6.3	50.2±9.4	62.6±5.4
溶解性COD _{Cr}	g/L	8.80±0.8	4.57±0.9	5.67±1.0	4.48±0.6
全量タンパク質	g/L	13.1±2.3	10.7±2.6	9.06±1.9	12.4±2.4
溶解性タンパク質	g/L	0.88±0.1	0.54±0.1	0.70±0.03	0.51±0.2
全量炭水化物	g/L	20.9±4.7	15.1±3.0	11.0±1.7	14.7±4.6
溶解性炭水化物	g/L	0.67±0.1	0.35±0.1	0.47±0.04	0.33±0.1
アンモニア性窒素	mg/L	469±36	227±45	315±43	334±46
脂質	g/L	5.18±0.5	7.06±0.2	5.55±0.4	5.07±0.5
C	%	48.1±0.56	47.0±0.05	48.6±0.20	49.5±0.36
H	%	6.89±0.07	6.72±0.01	6.98±0.03	6.92±0.03
N	%	3.78±0.05	4.49±0.02	4.89±0.02	5.05±0.06
S	%	0.63±0.01	0.94±0	0.88±0	0.80±0.01
O	%	34.2±0.18	28.4±0.12	29.5±0.23	27.9±0.19
C:N	-	12.74	10.46	9.93	9.79

図2-4（図0-4）に嫌気性MBRの反応槽におけるpH、アルカリ度、NH₄⁺-N濃度、膜ろ過水COD_{Cr}および除去率、バイオガス生成速度、メタン含有率の変化を示す。4つの運転段階を通じて、反応槽のpHは7.15~7.23の弱アルカリ性の範囲に保たれ、揮発性脂肪酸（VFAs）濃度は非常に低く（10.5±0.5 mg-HAc/L）、VFAsの蓄積は観察されなかった。アンモニア性窒素濃度は709~1,084 mg/Lの範囲であった。季節ごとに見ると、夏、秋、冬、春での投入VS当たりのバイオガス収率はそれぞれ0.48、0.47、0.52、0.47 L/g-VSであった。バイオガスのメタン含有率は64.6~65.8%の範囲で、硫化水素（H₂S）濃度は700~830 ppmであった。日高ら（日高ら, 2019.）は回分式実験による浄化槽汚泥のメタン発酵特性を調査し、バイオガス収率は0.05-0.2 NL/g-VSと報告した。本研究では、嫌気性MBRを用いることで、バイオガス収率が既往研究の約2倍に増加した。また、一般的な下水混合汚泥のバイオガス収率は0.5~0.6 NL/g-VS程度であり

(日本下水道協会, 2014.)、本研究での濃縮浄化槽汚泥の結果はこれと同等かやや低い範囲であった。標準的な活性汚泥法で処理された下水汚泥は、初沈汚泥を含むため、浄化槽汚泥などの生物処理で生成される排水処理汚泥に比べてバイオガス発生率が高くなる傾向がある。ただし、下水処理場の余剰汚泥のみと比較した場合、濃縮浄化槽汚泥のバイオガス発生量は高いことが分かった。バイオガス生成倍率は約15~20倍で、従来のし尿消化の約2倍であった。

図2-5に各運転段階での物質収支の結果を示す。濃縮浄化槽汚泥のメタン化率は46.6~52.4%で、下水汚泥と同等であった。また、膜ろ過水中のCOD_{Cr}は投入された汚泥のCOD_{Cr}に対して0.5~0.7%であり、膜分離による物理的除去が高いCOD_{Cr}除去率に寄与していると考えられる。

季節変動の影響に関しては、夏期にバイオガス生成収率は 0.48 ± 0.01 L/g-VS_{fed}、メタン含有量は64.6%であった。春期および秋期は濃縮汚泥の有機物質含有量がほぼ同じであり、両者のバイオガス収量は0.47 L/g-VS_{fed}であった。冬期濃縮汚泥の分解率が高い(52.4%)ため、高いバイオガス収量(0.52 L/g-VS_{fed})を得られた。年間を通して、汚泥性状の年間変化とバイオガスの生成ポテンシャルを把握できた。濃縮汚泥のバイオガス生成倍率は14~18.9%であり、濃縮汚泥の濃度による影響が大きいことが分かった。

表2-4には、一年間にわたる膜ろ過水質を示

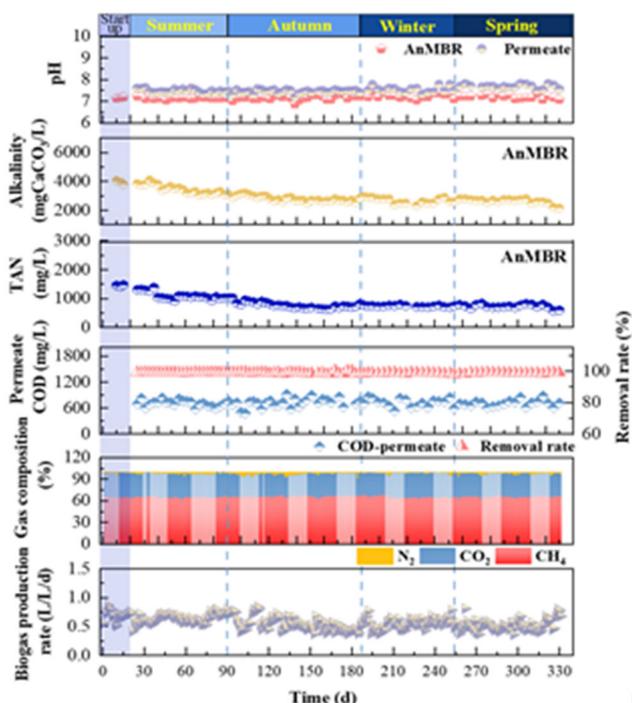


図2-4 (図0-4) AnMBRの一年間の連続実験結果

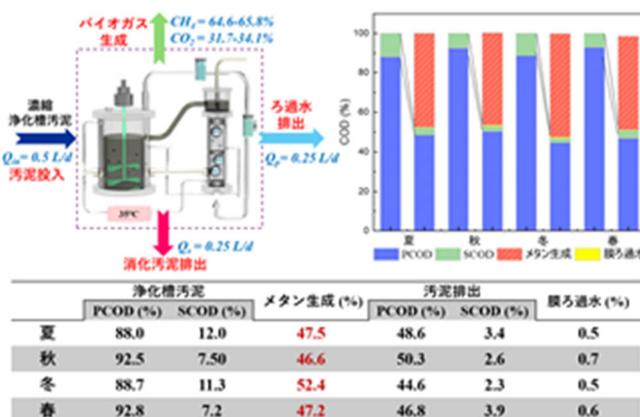


図2-5 物質収支

表2-4 嫌気性MBR長期連続実験結果

項目	単位	夏	秋	冬	春		
運転段階	日	1-99	100-188	189-253	254-331		
運転条件	水理的滞留時間	日	30				
	汚泥滞留時間	日	60				
	VS 負荷率	g-VS/L/d	1.32 ± 0.03	1.07 ± 0.07	0.89 ± 0.07	1.12 ± 0.1	
COD _{Cr} 分解率	%	47.5	46.5	52.4	47.2		
バイオガス発生倍率	L/L	18.9	15.1	14.0	15.7		
バイオガス生成速度	L/L/d	0.63 ± 0.08	0.50 ± 0.10	0.47 ± 0.08	0.53 ± 0.09		
運転状況	バイオガス収率	L/g-VS _{fed}	0.48 ± 0.01	0.47 ± 0.01	0.52 ± 0.03	0.47 ± 0.01	
		L/g-COD _{fed}	0.26 ± 0.03	0.25 ± 0.01	0.28 ± 0.03	0.25 ± 0.05	
	バイオガス組成	CH ₄	%	64.6 ± 1.0	65.8 ± 1.1	65.8 ± 1.4	65.5 ± 1.8
		CO ₂	%	33.6 ± 1.2	31.7 ± 1.4	34.1 ± 1.5	32.9 ± 0.9
		H ₂ S	ppm	831	800	700	800
平均フラックス	L/m ² /d	4.5	4.5	6.0	6.0		
ろ過水質	COD _{Cr}	mg/L	708 ± 82	683 ± 24	784 ± 117	819 ± 116	
	NH ₄ ⁺ -N	mg/L	1072 ± 30	850 ± 26	714 ± 35	750 ± 67	
	リン	mg/L	108.4 ± 25	83.8 ± 13	87.0 ± 47	85.6 ± 18	

した。嫌気性MBRは窒素とリン等の栄養物質の除去効果がほとんどないため、ろ過水の後処理が必要になる。本研究（成果番号9）では、HAP 促進グラニューール方式一槽型 PNA プロセスを用いて膜ろ過水の窒素除去とリン回収を試みた。嫌気性MBRの膜ろ過水の水質に関しては、 COD_{Cr} 濃度708~819 mg/L、アンモニア濃度714~1,072 mg/L、リン濃度83-108 mg/Lであり、 $COD_{Cr}/N < 1$ またリン濃度が比較的に高いことから、後続の(HAP+PNA)法による処理に有利な性状であった。

②嫌気性MBRにおける汚泥滞留時間の延長が濃縮浄化槽汚泥のメタン発酵処理に及ぼす促進効果

嫌気性消化では、加水分解段階が汚泥の嫌気性消化における律速段階であると認識されている。加水分解反応を促進し、メタン生産性を向上させるために、様々な汚泥前処理方法が実験室規模やパイロットレベルで導入され、メタン生成の向上が実現された。しかし、前処理はエネルギー消費と資本コストが高く、運用とメンテナンスが複雑になるため、実用化には限界がある(Niu, C. et al., 2024.)。嫌気性MBRは、長い汚泥保持時間(SRT)を利用して微生物を増殖させる一方で、比較的短い水理学的滞留時間(HRT)を用いて廃棄物を処理できる。SRTの延長は、メタン菌を反応槽内に保持し、有機物の分解を促進させ、従来の下水汚泥分解の不十分な問題を解決する(Hong, J. et al., 2009.)。本研究でもSRTの延長により、微生物の増殖時間が長くなるため、難分解性有機物の加水分解が促進され、結果としてメタン転換率とバイオガスの生産量が増加する傾向にあった。長期運転実験により、SRTの延長が NH_4^+-N 濃度、反応槽内の汚泥濃度、およびバイオガス生成速度に大きく影響することが確認された(図2-6)。

SRTを30日から60日に延長した場合、反応槽の NH_4^+-N 濃度は 621.0 ± 49 mg/Lから 1005 ± 64 mg/Lへ上昇し、アルカリ度は 3522 ± 154 mg- $CaCO_3$ /Lになった。SRTが30日、45日、60日の場合のバイオガス生成量はそれぞれ0.37、0.43、0.51 L/g-VSであり、バイオガス生成速度は0.63 L/L/dから0.98 L/L/dへと顕著に向上した。 NH_4^+-N とバイオガス生産量の顕著な増加は、タンパク質や炭水化物などの有機物分解が促進されたためと考えられた。

濃縮汚泥中に50%以上含まれるタンパク質と炭水化物は、嫌気性消化プロセスによってアミノ酸と単糖へ変換され、さらに有機酸へ分解される。タンパク質と炭水化物の分解効率はそれぞれ39.2%から58.7%、48.7%から67.7%と向上し、SRTが有機物の分解に寄与していることが示された。反応槽内の溶解性 COD_{Cr} 、タンパク質、および炭水化物濃度の増加は、加水分解の促進をさらに証明していた。SRT30日段階の溶解性 COD_{Cr} 濃度 733 ± 115 mg/Lと比べると、SRT60日の濃度は $2,137 \pm 205$ mg/Lに大幅に増加し、浄化槽汚泥の可溶化が促進されたことを示唆した。連続実験により、長SRTではVFAsの蓄積やメタン菌の損失を伴わず、有機物の分解を深め、メタン発酵において高い効率を確保することが可能になる。以上の結果から、嫌気性MBRはSRTの最適化により高い処理効率と安定なメタン回収を実現できることが実証できた。

COD_{Cr} 収支の結果から、SRTを延長することによって濃縮汚泥の分解効率が36.2%から52.0%に向上した。SRTが30日、45日、60日の場合、汚泥の COD_{Cr} 分解速度はそれぞれ1.20、1.47、1.85 g- COD_{Cr} /L/dとなり、

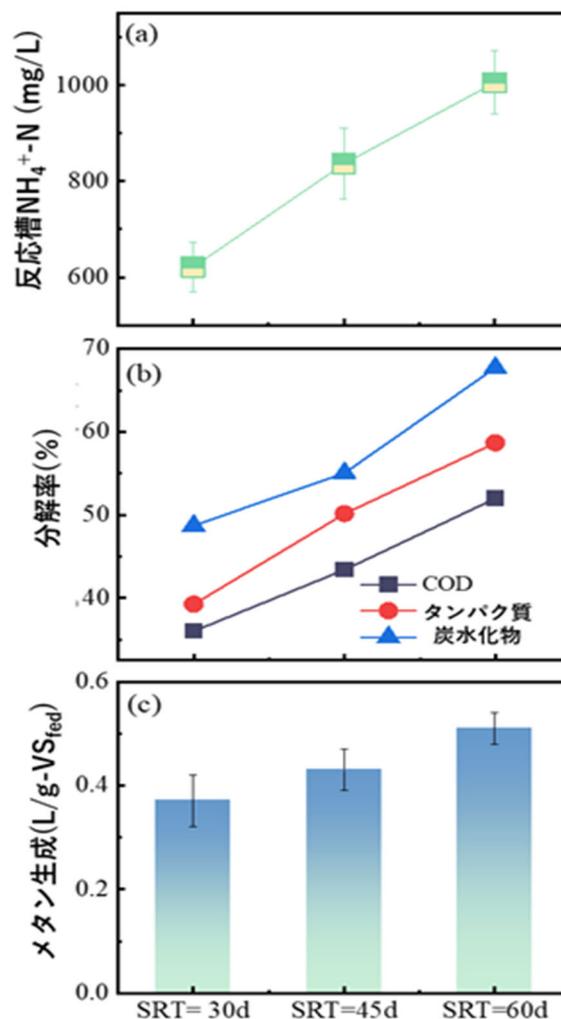


図2-6 SRTの延長による(a)反応槽 NH_4^+-N 濃度、(b)有機物分解率、および(c)メタン生成の変化

メタン生成の促進効果が確認された。最適なSRT条件下での運転により、COD_{Cr}の大部分がメタンガスに転換され、余剰汚泥へのCOD_{Cr}の流出が減少した。SRT60日では、余剰汚泥中のCOD_{Cr}が全COD_{Cr}の46.9%を占めることから、長いSRTが汚泥量の減少に効果的であることが示唆された。膜ろ過液のCOD_{Cr}は全COD_{Cr}のわずか0.4~0.9%に過ぎず、COD_{Cr}除去効率は97.7~98.7%と非常に高いことから、嫌気性MBRは有機性廃棄物処理において優れたバイオガス収率と高いCOD_{Cr}除去効率を実現した。

エネルギー収支の観点から、嫌気性MBRによる濃縮汚泥の嫌気性処理において、エネルギーコストを補うだけではなく、乾燥、脱水、堆肥化、焼却を含む日本の従来の下水汚泥処理プロセスと比べて顕著なエネルギー生成ポテンシャルを示した(Hong, J. et al., 2009.)。エネルギーの消費の大部分は、反応槽の加熱とCSTRから膜ユニットへの汚泥循環に起因し、それぞれ2.75~3.03 kJ/g-VSと2.06~2.13 kJ/g-VSであった(図2-7)。一方、メタン生成によるエネルギー回収率は7.01~9.83 kJ/g-VSで、エネルギー自給率は120~181%に達した。安定したバイオガス生産と高いバイオエネルギー回収率を達成するため、SRT60日が嫌気性MBRによる濃縮浄化槽汚泥の嫌気性消化における最適な運転SRTとして推奨され、これは実用化技術における重要な参考となった。

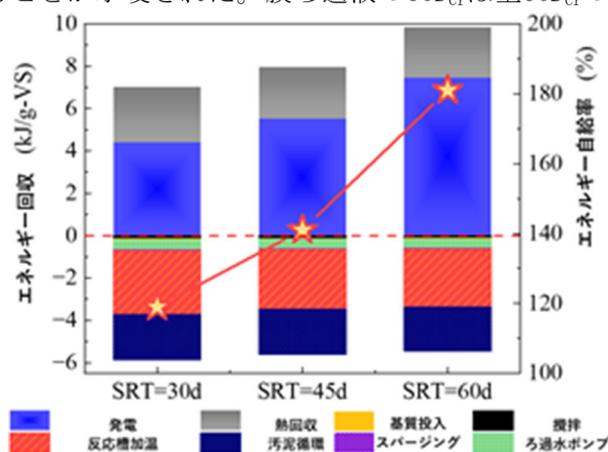


図2-7 嫌気性MBRエネルギー収支分析

表2-5 SRTの延長が濃縮汚泥のメタン発酵処理に与える影響

項目	単位	SRT = 30 d	SRT = 45 d	SRT = 60 d		
運転段階	日	1-74	75-166	167-256		
運転条件	水理学的滞留時間	日	20			
	汚泥滞留時間	日	30	45	60	
	VS 負荷率	g-VS/L/d	1.72±0.1	1.84±0.4	1.90±0.2	
COD _{Cr} 分解率	%	36.0	43.4	52.0		
バイオガス生成速度	L/L/d	0.63±0.08	0.50±0.10	0.47±0.08		
運転状況	バイオガス収率	L/g-VS _{fed}	0.37±0.05	0.43±0.04	0.51±0.03	
		L/g-COD _{fed}	0.19±0.02	0.23±0.02	0.27±0.03	
	バイオガス組成	CH ₄	%	66.6±1.6	65.8±2.3	66.4±2.2
		CO ₂	%	32.2±1.9	33.1±2.6	32.4±2.1
		H ₂ S	ppm	566.6±28	837.5±47	1150±50

(2) HAP促進グラニューール方式一槽型PNAプロセスによる窒素除去とリン回収方法

図2-8 (図0-5) にはHAP促進グラニューール方式一槽型PNAプロセス (HAP+PNA) 法の脱窒経路および微生物の活性を示した。連続運転実験の結果、90日間にわたり平均窒素除去率:81.3%と高い窒素除去率を得た。運転期間中の処理水の各態窒素濃度の平均値はNH₄⁺-N: 69.4 mg/L、NO₂⁻-N: 1.06 mg/L、NO₃⁻-N: 80.8 mg/Lと非常に良好な処理水質を示した(図2-9)。さらに反応槽内DOは、0.2 mg/L以下となり、平均DO: 0.12 mg/Lで安定し、微好気環境を安定して維持できていた。運転期間において、窒素除去率および窒素除去速度はそれぞれ79.5~81.6%および0.55~0.58 kg-N/m³/dで

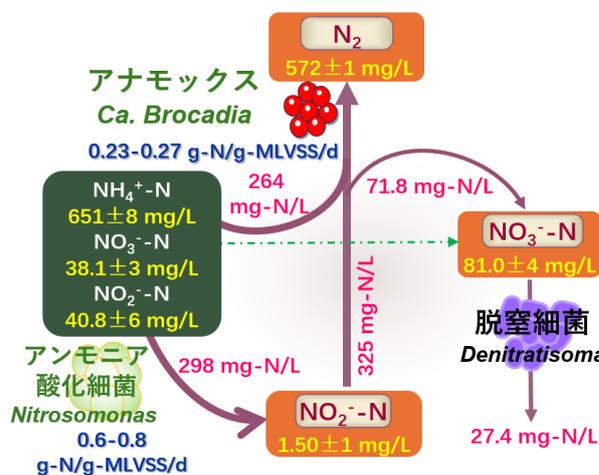


図2-8 (図0-5) HAP促進グラニューール方式一槽型PNAプロセスの脱窒経路と微生物活性

あった。除去された窒素に対して生成された硝酸窒素の比 ($\Delta \text{NO}_3^- \text{-N} / \Delta \text{N}$) は $7.79 \pm 1.4\%$ であり、理論値 12.6% (Strous, M. et al., 1998.) より低かったことから、脱窒細菌による脱窒が発生したと考えられた。以上のことから、浄化槽汚泥消化液に対して安定した一槽型アナモックス反応を確認した。

本研究では、流入Ca/P比を増加させ、ヒドロキシアパタイト (HAP) 形成を促進することで、高固形分嫌気性MBRろ過液からのリンの回収を達成した。Ca/P比が0.4の段階では、嫌気性MBRろか液の含むカルシウムが、高速なHAP形成とリンの除去には不十分であり、排水中のリン濃度は $73.9 \pm 2.8 \text{ mg/L}$ 、リン除去効率 (PRE) は 19.6% にとどまった。流入Ca/P比を1.0に調整したところ、PREは 34.2% に改善し、流出リン濃度は 60.1 mg/L に減少した。その後、流入カルシウム濃度を $143 \pm 2.1 \text{ mg/L}$ まで上げて、PREは徐々に上昇し、最終的に 47.4% の除去率で安定した (図2-10)。第2と第3段階での消費されたカルシウムとリンの比率 ($\Delta \text{Ca} / \Delta \text{P}$) はそれぞれ 2.20 と 2.28 であり、これはHAPの理論的なCa/P比 (2.16) に近い値であった。最終段階では、流入するカルシウム濃度が $243 \pm 3.3 \text{ mg/L}$ に達し、これは流入リンの 2.16 倍に対して 50 mg/L 高い値であり、十分な沈殿を確保した。流出リン濃度は 22.9 mg/L 、PREは 73.2% となり、カルシウムの添加がリン除去を効果的に促進することが示された (表2-6)。

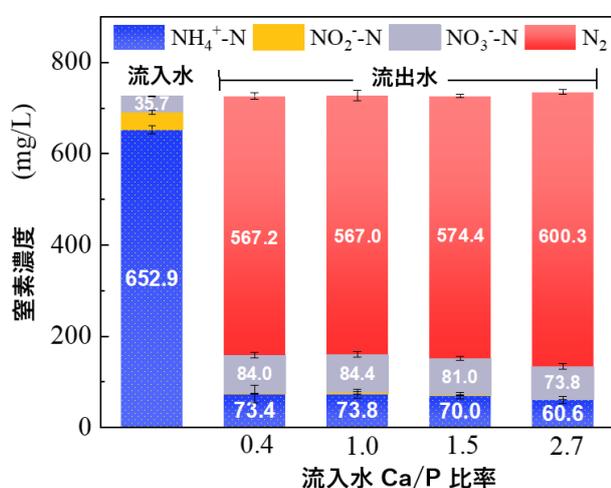


図2-9 窒素収支

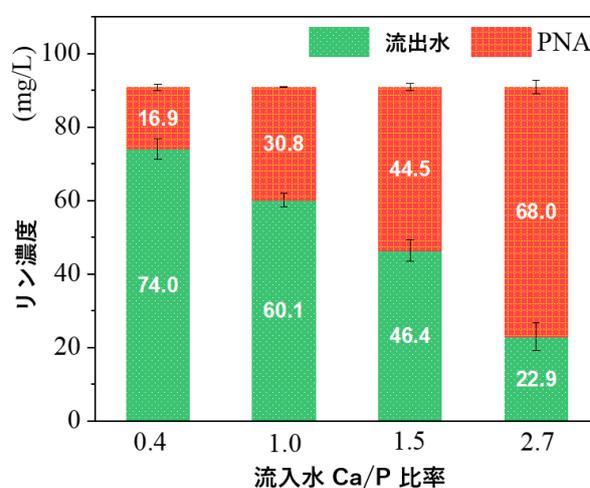


図2-10 カルシウム添加によるリン除去の促進

表2-6 HAP促進グラニューール方式一槽型PNAプロセスによる窒素とリンの除去結果

項目	単位	Ca/P = 0.4	Ca/P = 1.0	Ca/P = 1.5	Ca/P = 2.7
運転期間	日	20-35	36-50	51-70	71-90
HRT	h	24			
窒素負荷率	kg-N/m ³ /d	0.73 ± 0.02			
リン負荷率	kg-P/m ³ /d	0.091 ± 0.01			
窒素除去率	%	80.8 ± 3.6	79.5 ± 1.6	79.8 ± 1.4	81.6 ± 2.2
窒素除去速度	kg-N/m ³ /d	0.57 ± 0.02	0.58 ± 0.01	0.57 ± 0.01	0.55 ± 0.02
Anammox 活性	g-N/g-VSS/d	0.26	0.26	0.27	0.23
流入水Ca	mg/L	38.8 ± 0.7	91.2 ± 3.6	143 ± 2.1	243 ± 3.3
流出水Ca	mg/L	12.1 ± 3.9	33.6 ± 2.1	51.2 ± 4.1	71.4 ± 2.4
流入水リン	mg/L	90.9 ± 1.9			
流出水リン	mg/L	73.9 ± 2.8	60.1 ± 1.8	46.4 ± 2.9	22.9 ± 3.8
リン除去率	%	19.6 ± 1.7	34.2 ± 2.7	47.4 ± 1.7	73.2 ± 2.2
Δ Ca / Δ P	-	1.43 ± 0.4	2.20 ± 0.5	2.18 ± 0.3	2.55 ± 0.1
SVI	mL/g	41.4	34.5	25.7	16.6

Chenら (成果番号4) は良好な汚泥沈降性を実現するため、適切な微生物濃度を維持する必要がある、一槽式アナモックスプロセスにおけるリン除去速度と窒素除去速度の比 (PRR/NRR比) は 0.02 以上である

必要があると指摘している。現在まで報告されている最大のPRR/NRR比は、膨張床反応槽（EGSB）で観察された0.072であった（Ma, H., etc., 2021.）。高いPRR/NRRの場合、過剰なHAPの析出は基質の移動を制限し、窒素除去に悪影響を与える可能性がある。本研究において、Ca/P比が0.4の時のPRR/NRRは0.03であり、Ca/P比の増加に伴い、それぞれ0.05、0.08、0.12へと増加した。PRR/NRRの値は、高リン含有の嫌気性MBRろ過水を処理する際に、通常の排水処理よりもはるかに高いことがわかった。また、PRR/NRRが0.12と高値でも、リアクターは安定した汚泥特性と高い窒素除去性能を維持することができた。グラニュール汚泥の元素組成分析から、カルシウムとリンの割合がそれぞれ60.9%と33.4%であることが分かり、最初の段階でのCa/P比は1.82であった（図2-11参照）。カルシウムの添加によって、グラニュール汚泥のCa/P比は2.17、2.19、2.23へと段階的に増加し、これはHAPの組成に類似していた。以上の結果より、添加Ca濃度を240 mg/L以上にするすることで、窒素及びリンの同時除去の実現が示されたことから、HAP促進グラニュール方式一槽型PNAプロセスによる嫌気性MBRろ過水の窒素及びリン同時除去が可能であることが明らかになった。

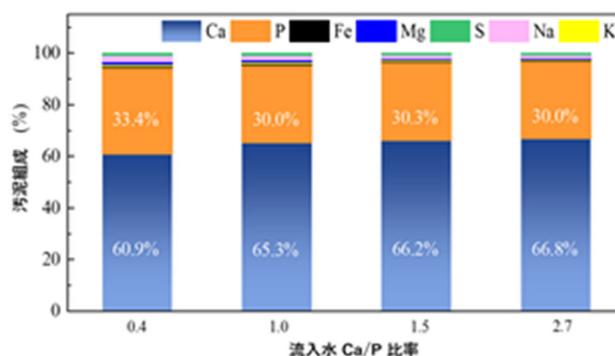


図2-11 グラニュール汚泥の元素組成

本研究の知見をふまえて、AnMBR+（HAP+PNA）法のとシステムの設計条件をまとめる（図2-12）。本研究では、嫌気性MBRと一槽式HAP+PNA法の融合により、革新的な濃縮汚泥の資源化処理を行った。このシステムは、高効率のメタン発酵、窒素除去、およびリンの回収を同時に実現することが可能であった。一年間にわたる汚泥性状の分析では、汚泥のTS濃度が30～40 g/L、COD_{Cr}濃度は50～70 g/Lの範囲であったものの、冷涼な季節にCOD_{Cr}濃度の減少傾向が観察された。このため、汚泥性状をふまえてメタン発酵におけるHRTの短縮や汚泥の濃縮など、エネルギー生産の向上を図る手法を適用する必要がある。

嫌気性MBRの長期運転結果から、安定したバイオガス生産と高エネルギー回収を実現するために、HRT20日、SRTをHRTの3倍に設定し、汚泥分解を促進して最大のメタン生成量を達成した。最適の運転条件で、バイオガス収率は0.51 L/g-VS、COD_{Cr}のメタン転換率は52%、嫌気性MBRシステムのエネルギー自給率は181%に達した。また、膜ろ過水質に関しては、COD_{Cr}、全窒素（TN）とリン濃度はそれぞれ700-820 mg/L、700-1,000 mg/L、80-108 mg/Lであり、ろ過水のCOD_{Cr}/N<1およびリン濃度が比較的に高いことから、後続の（HAP+PNA）法による処理に有利な性状であることが示された。

一年間の水質分析により、膜ろ過水の性質に大きな変化が見られなかったため、異なる季節の膜ろ過水を一槽式HAP+PNA反応槽で安定して処理することが可能であることが確認された。本研究では、窒素負荷率0.73 kg-N/m³/d、リン除去率0.091 kg-N/m³/dの条件で連続実験を行い、81.6%の窒素除去率と73.2%のリン除去率を実現した。また、リン除去を強化するため、最適のCa/P比率は2.7であった。嫌気性MBRと一槽式HAP+PNA法の処理により、最終流出水のアンモニア性窒素は60 mg/L、リンは22.9 mg/L、COD_{Cr}濃度は500 mg/L以下に抑えることができた。

（3）濃縮汚泥に適した資源化システムのエネルギー消費量評価

①エネルギー消費量計算システムの構築

本研究ではF県D市の1施設、およびK県の2施設の浄化槽汚泥処理施設（以下、し尿処理施設と汚泥再生処理センターを合わせて浄化槽汚泥処理施設という）の合計3ヶ所を対象として、施設の機械設備や運転状況などのデータを収集・整理を行った（表2-7）。対象施設は膜分離高負荷脱窒素処理方式（施設A、B）と標準脱窒素処理方式（施設C）を採用している。電気消費量の実績値から求めると、膜分離高負荷脱窒素処理方式を採用している施設A（計画処理量85m³）と施設B（計画処理量36m³）の場合には、水処理設備が施設全体の電気消費量の6割以上を占めていた。それに対して標準脱窒素処理方式採用している施設C（25m³）では水処理設備が電気消費量の8割以上となっていた。

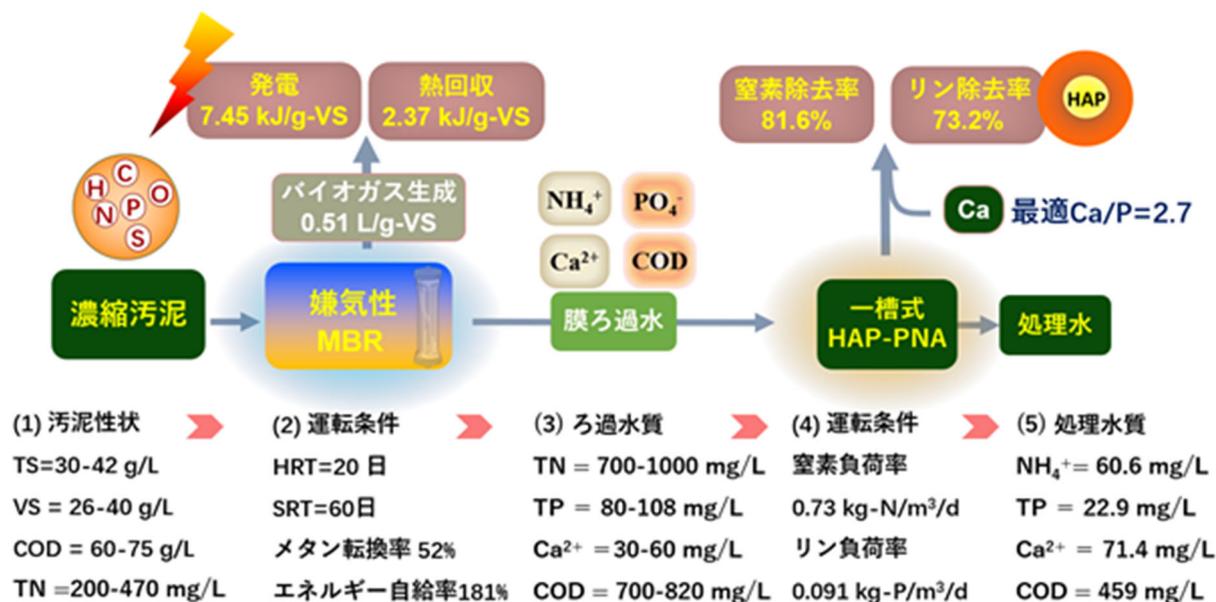


図2-12 AnMBR+(HAP+PNA)による濃縮汚泥の資源化処理

エネルギー消費量計算システムの検証としては、実際の搬入汚泥量状況をシミュレーションの条件として、各工程の設備のエネルギー消費量を計算し、その計算値をエネルギー消費量の実績と比較して再現率として求めた。シミュレーション条件は各施設の搬入汚泥量実績の平均値を採用した（表2-7）。その検証結果を表2-8に示す。3施設のエネルギー消費量計算システムによる算定値は、実績値に対して再現率としてはそれぞれ101%、102%と113%であった。なお、ここではエネルギー消費量を電気消費量として示した。構築したエネルギー消費量計算システムによる推定値は信頼できると考えられる。次に、構築したエネルギー消費量計算システムを用いて濃縮車導入後の既存施設（膜分離高負荷脱窒素方式および標準脱窒素方式）の処理由来のCO₂削減効果の解析を行った（図2-13）。ここでは、エネルギー消費量計算システムを用いて電気消費量消費量から電気消費のCO₂排出量係数（0.434 kg-CO₂/kWh）を用いてCO₂排出量を算定した。

膜分離高負荷脱窒素方式では、標準脱窒素方式に比べて高濃度汚泥に対応できるため、濃縮車導入後に16%前後のCO₂排出量を削減できる。この理由は、施設への汚泥投入量の減少により、膜吸引ポンプ等の設備の稼働時間を短縮できるためである。一方、標準脱窒素処理方式では処理するために低い濃度(SS: 3,000 mg/L)まで希釈する必要があるため、濃縮車導入による施設のCO₂排出量を減少させる効果はほぼないことが示された。

表2-7 対象浄化槽汚泥処理施設の搬入実績

施設	施設A	施設B	施設C
処理方式	膜分離高負荷脱窒素処理方式		標準脱窒素処理方式
施設の計画処理量 (m ³ /d)	85	36	25
搬入汚泥量 (m ³ /d)	64	33	27
負荷率 (%)	76	91	109
し尿搬入率 (%)	30	20	26
浄化槽汚泥搬入率 (%)	27	74	68
濃縮汚泥搬入率 (%)	43	6	6

表2-8 浄化槽汚泥処理施設のエネルギー消費量計算システムの検証結果

設備番号 No.	設備名	施設A 計算値 (kWh)	施設B 計算値 (kWh)	施設C 計算値 (kWh)
		膜分離高負荷脱窒素処理方式		標準脱窒素処理方式
1	受入・貯留設備	149000	55200	24300
2	凝集分離設備	395000	0	0
3	水処理設備	922000	316000	290000
4	高度処理設備	6910	17400	4180
5	消毒放流設備	4650	2	357
6	汚泥処理設備	121000	32400	8060
7	脱臭設備	279000	76100	0
8	取水設備	7230	2110	28300
①各施設の計算式値合計 (kWh)		1530000	450000	355000
②各施設の運転実績 (kWh)		1510000	492000	314000
再現率①/②		101%	102%	113%(104%)

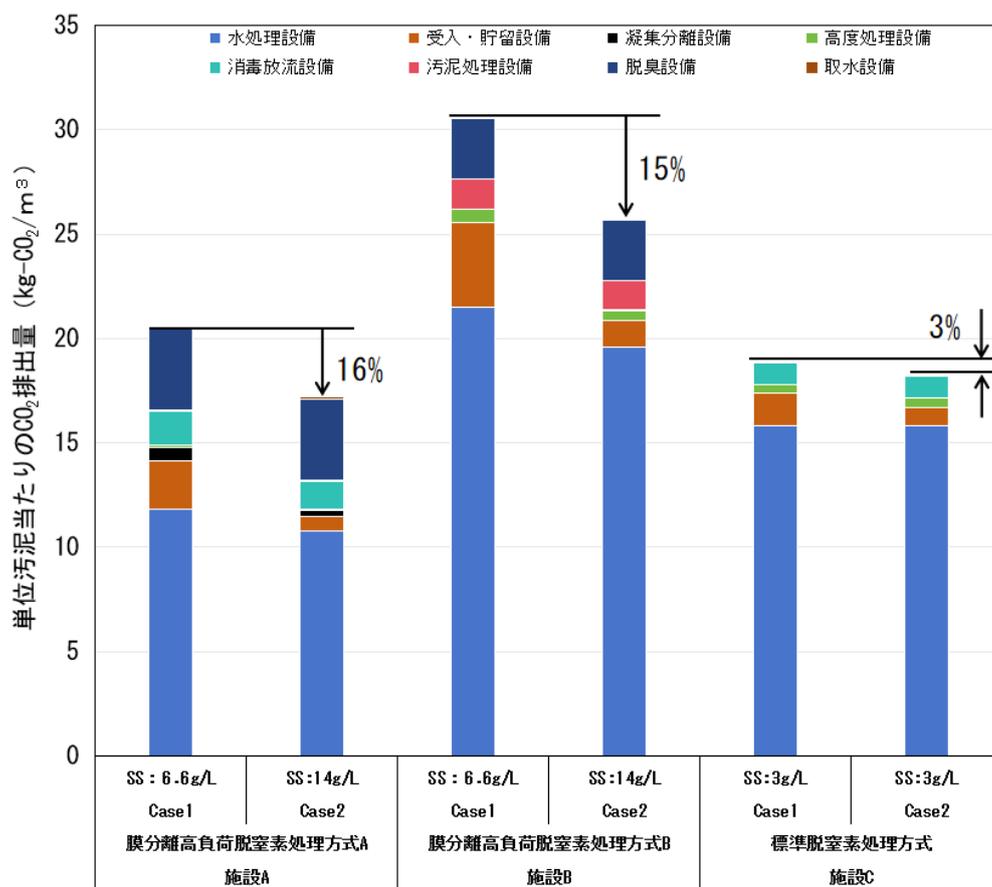


図2-13 既存汚泥処理施設への濃縮汚泥投入によるCO₂削減効果

②濃縮汚泥に適した資源化システムによる処理と既存汚泥処理施設での処理におけるエネルギー消費量比較

本研究では、搬入汚泥量 $18.7 \text{ m}^3/\text{d}$ の施設規模を想定し、すべて濃縮汚泥(SS:30,000 mg/L、BOD:10,000 mg/L、N:2,250 mg/L、P:316 mg/L)が搬入されている場合のエネルギー消費量を計算した。

なお、膜分離高負荷脱窒素方式では施設の設計基準であるSS14,000mg/Lまで希釈して処理する。一方、AnMBR+(HAP+PNA)法では、無希釈で処理を行い、後段に水処理設備を増設してAnMBR+(HAP+PNA)法の処理水に残存するBOD・窒素・リンを汚泥再生処理センターの放流水質基準をクリアするよう処理する。このような施設を設計してエネルギー消費量を計算した。

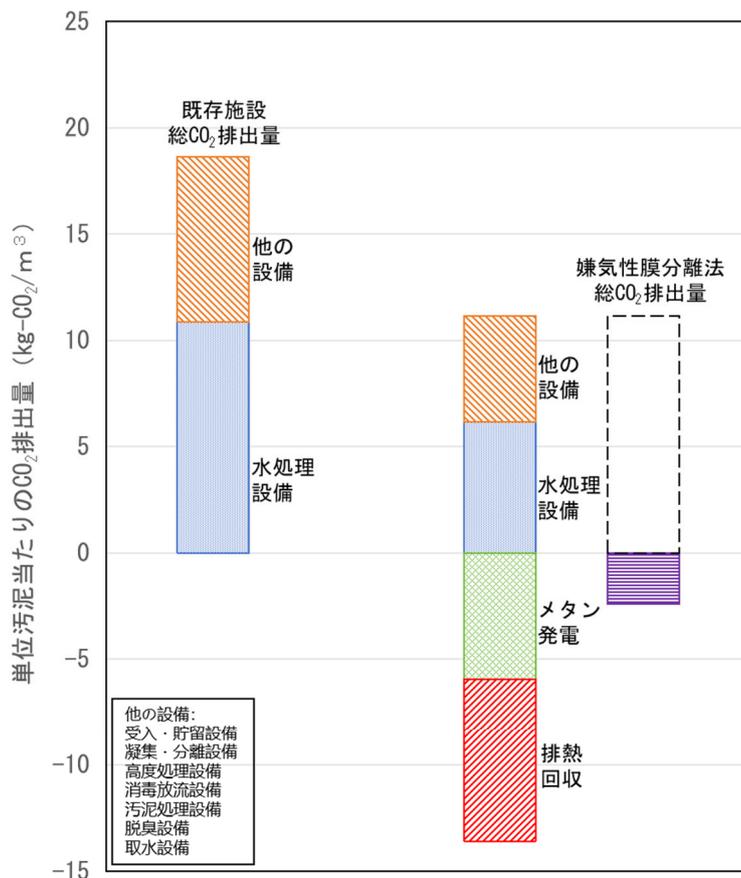
また、サブテーマ2の(1)および(2)で開発したAnMBR+(HAP+PNA)法では、嫌気性MBRによりメタンを回収できる。このメタンをガスエンジンで発電した場合のエネルギー生産については以下の通り計算した。

メタンの発生量は 216 kL/d なので、メタンの燃焼熱 55.5 kJ/L として燃焼由来のエネルギー $12,000 \text{ MJ/d}$ となる。ガスエンジンの発電率は35%、エネルギーから電気への換算係数 3.6 MJ/kWh を用いて、発電量は $1,170 \text{ kWh/d}$ となる。これを二酸化炭素排出係数 $0.434 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}$ で二酸化炭素に変換すると 508 kg-CO_2 の CO_2 排出量となる。さらに、排熱回収により合わせて燃焼熱の75%のエネルギーを回収できると仮定すると、メタン発電+排熱回収で回収したエネルギーは $1,090 \text{ kg-CO}_2$ 相当の CO_2 排出量削減ができると考えられる。

助燃剤については、汚泥再生処理センター等施設整備の計画・設計要領には資源化の方法と位置付けられているが、近年は助燃剤化を資源化としないことからここでは無視する。

資源化を踏まえた濃縮汚泥を対象とする膜分離高負荷脱窒素方式の施設の CO_2 排出量とAnMBR+(HAP+PNA)法の CO_2 排出量を図2-14(図0-6)に示す。同じ濃縮汚泥量を処理する場合、AnMBR+(HAP+PNA)法では膜分離高負荷脱窒素処理方式に比べて CO_2 排出量を30%削減できる。

また、資源化を考慮して CO_2 排出量を計算した結果、ガスエンジン発電を行った場合に70%強の CO_2 排出量削減効果があり、さらに排熱回収を含めて考慮すると浄化槽汚泥処理施設の CO_2 排出量をマイナスにすることも可能であることが示唆された。すなわち、浄化槽汚泥処理施設をAnMBR+(HAP+PNA)法として濃縮車を普及させることで実質ゼロを達成することが可能である。



処理方式	膜分離高負荷 脱窒素方式	AnMBR+ (HAP+PNA)
設計基準SS濃度	14000mg/L	30000mg/L
資源化方式	助燃剤化	メタン発電+排熱回収

図2-14 (図0-4) 濃縮汚泥のAnMBR+(HAP+PNA)法による処理のCO₂排出量削減効果

参考文献：

奥野 芳男. 下向流ドラフトチューブ式曝気装置. 「環境技術」, 1991, Vol. 20, No. 9, pp. 567-570.
 一般社団法人日本電機工業会, 電動機業務専門委員会. 低圧モータの海外高効率化動向 (2020年10月13日改訂), 2021.
 池内 大典. 電気技術解説講座・需要率、不等率、負荷率とその活用. 公益財団法人日本電気技術者協会. <<https://jeea.or.jp/course/contents/12144/>>. (参照2024-4-30).
 日本電機工業会. 地球環境保護・省エネルギーのためにトップランナーモータ. 2015.
 <<http://www.msja.co.jp/data/toprunnermotor.pdf>>. (参照2024-4-30).
 日高平, 戸苅丈仁, 中村真人, 等. 混合メタン発酵基質としての浄化槽汚泥のエネルギー価値評価[J]. 土木学会論文集 G (環境), 2019, 75(7): III_135-III_143.
 日本下水道協会: 下水道維持管理指針-2014年版(実務編), 東京, 2014.

引用文献：

郭広澤, 周士統, 王添韻, 等. 嫌気性膜分離法の応用と研究に関する最新レビュー[J]. 用水と廃水/「用水と廃水」編集委員会 編, 2022, 64(10): 743-758.
 Niu, C., Pan, Y., Lu, X., Wang, S., Zhang, Z., Zheng, C., & Li, Y. Y. (2020). Mesophilic

anaerobic digestion of thermally hydrolyzed sludge in anaerobic membrane bioreactor: Long-term performance, microbial community dynamics and membrane fouling mitigation. *Journal of membrane science*, 612, 118264.

Hong, J., Hong, J., Otaki, M., & Jolliet, O. (2009). Environmental and economic life cycle assessment for sewage sludge treatment processes in Japan. *Waste Management*, 29(2), 696-703.

Strous, M., Heijnen, J. J., Kuenen, J. G., & Jetten, M. S. (1998). The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms. *Applied microbiology and biotechnology*, 50, 589-596.

Ma, H., Zhang, Y., Xue, Y., Kubota, K., & Li, Y. Y. (2021). Efficient phosphorus recovery by enhanced hydroxyapatite formation in a high loading anammox expanded bed reactor at 15°C. *Chemical Engineering Journal*, 425, 130636.

5. サブテーマ2 研究目標の達成状況

サブテーマ2では、以下のように目標を設定した。

濃縮汚泥の再生処理に適した創エネルギー・低炭素型資源化システムを確立することを目的として、(1) エネルギー回収に対応する分解促進型嫌気性膜分離バイオリクター (AnMBR) による高効率メタン発酵、(2) 一槽式HAP-anammox法による窒素除去とリン回収、(3) 発酵汚泥残渣の資源化処理、という3つのユニットによって構成される最新汚泥再生処理システムを確立する。

これらについて、以下の通り目標とした成果を達成することができた。

(1) エネルギー回収に対応する分解促進型嫌気性膜分離バイオリクター (AnMBR) による高効率メタン発酵

- 濃縮車により収集・運搬された実際の濃縮汚泥を用いて嫌気性MBRの長期連続運転実験を行った結果、濃縮汚泥の性状は季節変化するもののTS (全固形物) 30.7~41.6 g/L、VS (揮発性固体) 26.8~39.5 g/L、COD_{Cr}濃度50.2~73.5 g/L、脂質濃度5.07~7.06 g/Lの範囲であり、脂質が全COD_{Cr}の20~33%を占めて高いメタン収率を得られる性状であることが明らかになった。
- 一年間の運転において嫌気性MBRにおけるpH、アルカリ度、NH₄⁺-N濃度、膜ろ過水COD_{Cr}および除去率、バイオガス生成速度、メタン含有率の変化を測定し、反応槽のpHは弱アルカリ性の範囲に保たれ、揮発性脂肪酸 (VFAs) 濃度は非常に低く、夏、秋、冬、春での投入VS当たりのバイオガス収率はそれぞれ0.48、0.47、0.52、0.47 L/g-VSと浄化槽汚泥のメタン発酵に関する既往研究の約2倍の収率が得られ、一般的な下水混合汚泥のバイオガス収率と同等であると評価された。
- SRTの延長によりメタン転換率とバイオガスの生産量が増加した原因は、浄化槽濃縮汚泥中に50%以上含まれるタンパク質と炭水化物の分解効率がそれぞれ向上するためであることを明らかにし、嫌気性MBRはSRTの最適化により高い処理効率と安定なメタン回収を実現できることが実証できた。
- SRTが30日、45日、60日の場合、汚泥のCOD_{Cr}分解速度はそれぞれ1.20、1.47、1.85 g-COD_{Cr}/L/dとなり、メタン生成の促進効果が確認された。SRT60日では、余剰汚泥中のCOD_{Cr}が全COD_{Cr}の46.9%を占めることから、長いSRTが汚泥量の減少に効果的であることが示唆された。また、膜ろ過液のCOD_{Cr}は全COD_{Cr}のわずか0.4~0.9%に過ぎず、COD_{Cr}除去効率は97.7~98.7%と非常に高いことから、嫌気性MBRは有機性廃棄物処理において優れたバイオガス収率と高いCOD_{Cr}除去効率を実現した。

(2) 一槽式HAP-anammox法による窒素除去とリン回収

- HAP 促進グラニユール方式一槽型部分硝化アナモックス (PNA) プロセスの連続運転実験の結果、平均窒素除去率81.3%、各態窒素濃度の運転期間中平均値はNH₄⁺-N:69.4 mg/L、NO₂⁻-N:1.06 mg/L、

NO_3^- -N:80.8 mg/Lと安定して非常に良好な処理水質を得ることができた。また反応槽内DOは0.2mg/L以下(平均DO:0.12mg/L)で微好気環境を安定して維持することができ、嫌気性MBRろ過水に対して安定した一槽型アナモックス反応を確認した。

- 流入Ca/P比を増加させ、ハイドロキシアパタイト(HAP)形成を促進することで、高固形分嫌気性MBRろ過液からのリンの回収が達成できることを確認した。
- 良好な汚泥沈降性を実現するため適切な微生物濃度を維持する必要がある、一槽型のPNAプロセスにおけるリン除去速度と窒素除去速度の比(PRR/NRR比)は0.02以上が必要であることが知られおり、現在まで報告されている最大のPRR/NRR比は0.072であった。また、高いPRR/NRRの場合過剰なHAPの析出によって基質の移動を制限し、窒素除去に悪影響を与える可能性がある。しかし高リン含有の嫌気性MBRろ過水を処理する本研究において、PRR/NRRは0.12と最高値を示し、かつリアクターは安定した汚泥特性と高い窒素除去性能を維持することができた。

(3) 最新汚泥再生処理システムの確立

- 本研究では、嫌気性MBRと一槽式HAP+PNA法の融合により、革新的な濃縮汚泥の資源化処理技術であるAnMBR+(HAP+PNA)法を開発した。このシステムは、高効率のメタン発酵、窒素除去、およびリンの回収を同時に実現することが可能であった。
- この新たなシステムのエネルギー消費量を評価するために、浄化槽汚泥処理施設のエネルギー消費量計算システムの構築を行い、既存の浄化槽汚泥処理施設(膜分離高負荷脱窒素処理方式、および標準脱窒素処理方式)のエネルギー消費量を計算し、実績値と比較して再現性が高く、信頼できるシステムであることを確認した。
- エネルギー消費量計算システムを用いて濃縮車導入後の既存施設(膜分離高負荷脱窒素方式および標準脱窒素方式)の処理由来の CO_2 削減効果の解析を行った結果、濃縮汚泥を希釈して処理する必要があるため、濃縮車導入による CO_2 排出量の削減効果はほぼないことが示された。
- 本研究で開発したAnMBR+(HAP+PNA)法のエネルギー消費量をエネルギー消費量計算システム算出し、生成されたメタンガスをガスエンジン発電および排熱利用して回収したエネルギー量はエネルギー消費量を上回り、濃縮汚泥を処理する施設の CO_2 排出量をマイナスにすることが可能であることが示された。すなわち、浄化槽汚泥処理施設をAnMBR+(HAP+PNA)法として濃縮車を普及させることで浄化槽汚泥処理の脱炭素化に貢献することが可能である。

II-3 サブテーマ3 「汚泥濃縮車導入による環境負荷削減能力の網羅的評価」

[サブテーマ3 要旨]

埼玉県内の中規模市をモデル市とし、し尿処理施設の統廃合（3つのし尿処理施設が1つに統合される計画）や浄化槽汚泥の収集・運搬の広域化がバキューム車と濃縮車の総走行距離、総労働時間、総CO₂排出量に及ぼす影響について、GISソフトウェアを用いたルート解析に基づき評価した。統合の影響については、モデル市において3つの施設の距離が近いことから、統合をしてもバキューム車と濃縮車の総走行距離は微増であった。ただし、統合前の条件で総走行距離を比較した場合には、バキューム車に比べて濃縮車は約40%となった。同様に、統合後においても濃縮車の方が総労働時間を短縮し、総CO₂排出量を削減できることが示された。またし尿処理場の広域化を想定し、モデル市外のし尿処理施設に運搬する場合のシナリオ解析においても、バキューム車に比べ濃縮車の方が総走行距離、総労働時間、総CO₂排出量が低下することが定量的に評価できた。

人口減少に伴う将来の浄化槽設置基数や分布、汚泥搬出量の減少シナリオを確立し、濃縮車導入の影響をルート解析で評価した。2050年においては、バキューム車に比べて濃縮車は総走行距離が67%減、総労働時間が24%減、総CO₂排出量が37%減となり、濃縮車の導入の有効性が示された。

サブテーマ1で得られた汚泥の収集・運搬に係る作業原単位等、サブテーマ2で得られた汚泥処理・資源化に係るパラメータと、サブテーマ3で確立したルート解析手法を組み合わせることにより、汚泥の収集・運搬・処理・資源化における総CO₂排出量や環境負荷を評価可能な網羅的評価システムを開発することができた。当該システムに基づき、バキューム車あるいは濃縮車を使用し、汚泥処理・資源化として標準脱窒素処理方式、膜分離高負荷脱窒素処理方式、AnMBR+(HAP+PNA)法を用いた場合の総CO₂排出量を評価した。結果として、濃縮車の使用とAnMBR+(HAP+PNA)法による処理を組み合わせただけの場合のみ収集・運搬・処理に係る消費エネルギー以上の創エネルギーが可能であることが試算された。この結果から、AnMBR+(HAP+PNA)法と組み合わせることが濃縮車の最適活用条件であることが示された。

1. サブテーマ3 研究開発目的

既往の研究では汚泥からのエネルギー回収など、ひとつの作業に対する最適条件を解明する事例が多い。しかし、汚泥濃縮・運搬に係る最適条件と、エネルギー回収の最適条件が必ずしも一致するとは限らず、汚泥収集・運搬・汚泥処理・エネルギー回収の一連の作業を俯瞰的に捉えたうえで最適条件を検討することが重要であるが、そのような評価方法を開発した事例はない。そこで本研究の目的は、①サブテーマ1で調査した汚泥濃縮車による浄化槽汚泥収集・運搬、濃縮汚泥のし尿処理施設で汚泥処理に関する情報、また、サブテーマ2で検討した濃縮汚泥からのエネルギー回収について、コスト及びCO₂排出量等を考慮した環境負荷の評価が算定可能な網羅的評価システムを開発すること、②開発した評価システムに基づく複数のシナリオ分析から、人口減少や汚泥の収集・運搬・処理・資源化の一連の作業において環境負荷を効果的に削減できるような濃縮車の最適な活用方法を提案することとした。

2. サブテーマ3 研究目標

サブテーマ3	「汚泥濃縮車導入による環境負荷削減能力の網羅的評価」
サブテーマ3 実施機関	埼玉県環境科学国際センター、公益財団法人日本環境整備教育センター
サブテーマ3 目標	汚泥濃縮車の活用時のコスト及びCO ₂ 排出量等を考慮した環境負荷の評価が算定可能な網羅的評価システムを開発するとともに、汚泥処理の広域化・共同化及び将来的な人口減少等の動向を想定した100以上のシナリオに分けた解析を行うことで、地域の低炭素化社会、低環境負荷型社会の構築に向けた濃縮車の最適な活用方法を提案する。

3. サブテーマ3 研究開発内容

(1) 収集・運搬・処理・資源化に係る解析

モデル市として埼玉県内の中規模の人口を有する市を対象とした。市の浄化槽設置基数は3万基程度であり、その内合併処理浄化槽は約60%、単独処理浄化槽は約40%である。市の全域は、4つのゾーン（ゾーンA、B、C、D）に分けられており、3つのし尿処理施設（処理場X、Y、Z）に浄化槽汚泥が運搬されている。イメージは図3-1のとおりである。現状ではゾーンA～Dから処理場X～Zそれぞれに汚泥を運搬しているが、将来においてはし尿処理施設が処理場Yに統合され、市全体の浄化槽汚泥が処理場Yに運搬される予定となっている。また、市内には延べ10の清掃業者が登録されている。

バキューム車、濃縮車の汚泥収集・運搬のイメージを図3-2に示す。解析においては、清掃業者を出発し、バキューム車および濃縮車の積載量の範囲でいくつかの浄化槽において汚泥収集を行い、最終的にし尿処理施設で汚泥の投入を行うこととした。バキューム車使用時は汚泥収集後の水張りが必須となるためし尿処理施設で汚泥の投入を行った後に同様の浄化槽を訪問することとし、濃縮車使用時は再度浄化槽を訪問せず直接清掃業者に移動することとした。バキューム車および濃縮車の汚泥積載量は3.9 m³/台および1.8 m³/台とした。バキューム車使用時の浄化槽からの汚泥搬出量は合併処理浄化槽（不明を含む）で1.9 m³/基、単独処理浄化槽で1.4m³/基とし、濃縮車使用時は0.42 m³/基とした。なお、今回は家庭用の浄化槽の解析に特化することとし、10人槽以下の浄化槽をターゲットとして1年間にすべての浄化槽の汚泥搬出を行うこととした。また、道路ネットワークデータとしてESRI ArcGIS Geo Suite 道路網を用い、ルートの解析にはESRI ArcGIS Pro、Network Analystに含まれる配車ルート（VRP）解析を用いた。現状（統合前）とし尿処理施設の統合後の汚泥収集・運搬を比較するため、図3-1で示したようにし尿処理施設の配置を変更してその影響を評価した。今回の解析ではそれぞれの条件において総走行距離や総走行時間を算定することで評価をすることとした。

サブテーマ1で得られた調査の結果をもとに以上の解析を行うことで、清掃業者の担当エリアの検討、し尿処理施設の配置の検討、広域化の検討、人口減少シナリオの検討を行い、走行距離、労働時間、CO₂排出量の観点から濃縮車導入の効果を定量的に評価した。

(2) 網羅的評価システムの開発および収集・運搬・処理・資源化の総合評価

サブテーマ1および3で得られた収集・運搬に係る知見、さらにサブテーマ2で得られた処理・資源化の技術開発の結果、浄化槽汚泥の収集・運搬・処理・資源化を統合して評価可能な網羅的評価システムを開発した。このシステムに基づき、現在（2022年）および将来（2050年）について、バキューム車あるいは濃縮車を活用した汚泥の収集・運搬を行い、かつ、標準脱窒素処理方式、膜分離高負荷脱窒素処理方式あるいはAnMBR+（HAP+PNA）法で処理した場合の総CO₂排出量や環境負荷（円/y）を算出した。なお、収集方法（濃縮車、バキューム車）で2種類、処理場の配置で4種類、浄化槽基数で7種類、処理方式で3種類の合計168通りのシナリオでそれぞれの計算を行った。それぞれの結果を比較し、濃縮車の最適活用条件について検討した。

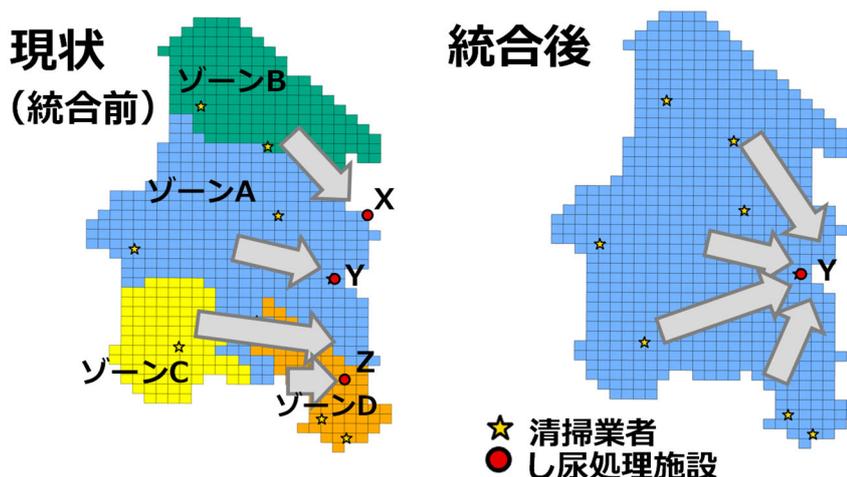


図3-1 解析対象地域のイメージ

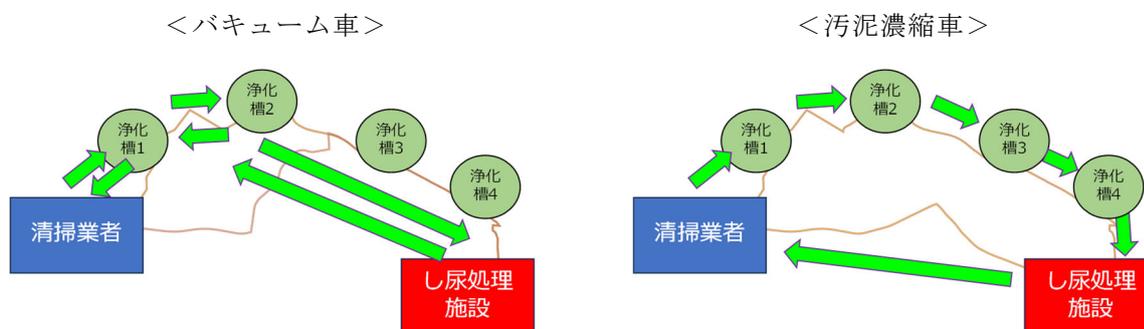


図3-2 バキューム車、濃縮車の汚泥収集・運搬のイメージ

4. サブテーマ3 結果及び考察

(1) 収集・運搬・処理・資源化に係る解析

a) 清掃業者の担当エリアの影響

ESRI社のArcGIS Business Analystのテリトリーの自動最適化（テリトリー自動最適化）、ESRI社のArcGIS Network AnalystのODコストマトリックス（ODコストマトリックス）によって、予め清掃業者が担当するエリア（≒浄化槽）を町丁目ごとに分担する条件とした。また、清掃業者がほぼ同数の浄化槽を担当する条件として、ルート解析において最小のルート数を設定する条件（ルート最小化）、乱数を発生させてゾーンの中の浄化槽をランダムに担当する条件を作成した。乱数を発生させる条件は3条件にて解析を行った（乱数1～3）。なお、解析にはオリジナルの緯度経度を与えることとした。浄化槽の分担方法が浄化槽の汚泥収集・運搬の総走行距離に与える影響の比較は図3-3に示すとおりである。最も総走行距離が低くなったODコストマトリックスで305,600 km/年、高くなった乱数1で366,300 km/年となった。乱数を発生させる場合で他の条件よりも高い走行距離となったが、テリトリー自動最適化、ODコストマトリックス、ルート最小化では大きな差は無かった。以上のことから、以降の解析においては、オリジナルの緯度経度を使うこととし、浄化槽の分担方法はテリトリー自動最適化を用いることとした。

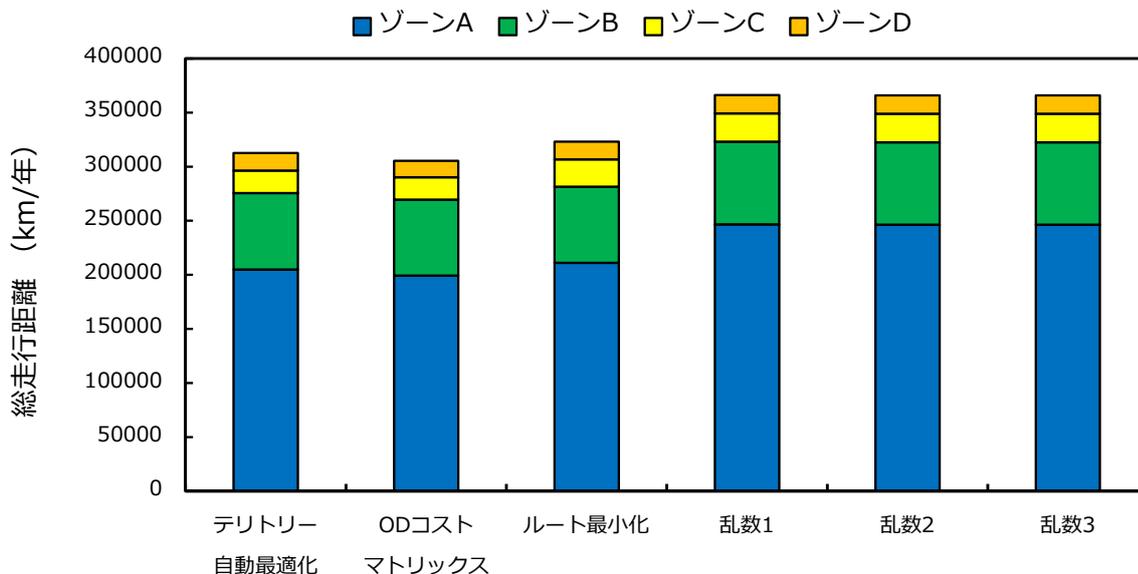


図3-3 浄化槽の分担方法が浄化槽の汚泥収集・運搬の総走行距離に与える影響の比較

b) し尿処理施設の配置の影響

ゾーンA～Dにおいて浄化槽汚泥の収集・運搬に要する総走行距離および総労働時間を算定し、現状（統合前）と統合後の条件、また、バキューム車、濃縮車の条件に分けて図3-4（図0-7）に示した。サブテーマ1の調査で得られた、浄化槽での汚泥引き抜きや水張りの作業時間、し尿処理施設での汚泥搬出の作業時間も加味して計算した。現状のバキューム車の条件においては、浄化槽の設置基数が多いゾーンAで最も総走行距離が多く、200,000 km/年を超えていた。すべてのゾーンの合計は312,600 km/年であった。現状で濃縮車を使用する場合の総走行距離は124,300 km/年となり大きな削減が試算された。これは、濃縮車使用時は水張りのために浄化槽を再度訪問する必要がなくなるためと考えられた。統合の条件においては、現状に比べて若干の総走行距離の増加が見込まれたが、その程度は低く、今回の対象地域では統合による走行距離の増加の影響は極めて限定的であることが示唆された。

総労働時間は、バキューム車から濃縮車への変更により減少がみられたものの、その減少分は総走行距離の減少分ほどは大きくなかった。これは、濃縮車使用においては、効率的な汚泥の収集・運搬により走行時の労働時間は減少するものの、浄化槽汚泥の清掃時に反応タンクでの固液分離や脱水液を浄化槽に戻す作業時間が増すことで濃縮車使用による総労働時間の削減効果が減少したためと考えられた。

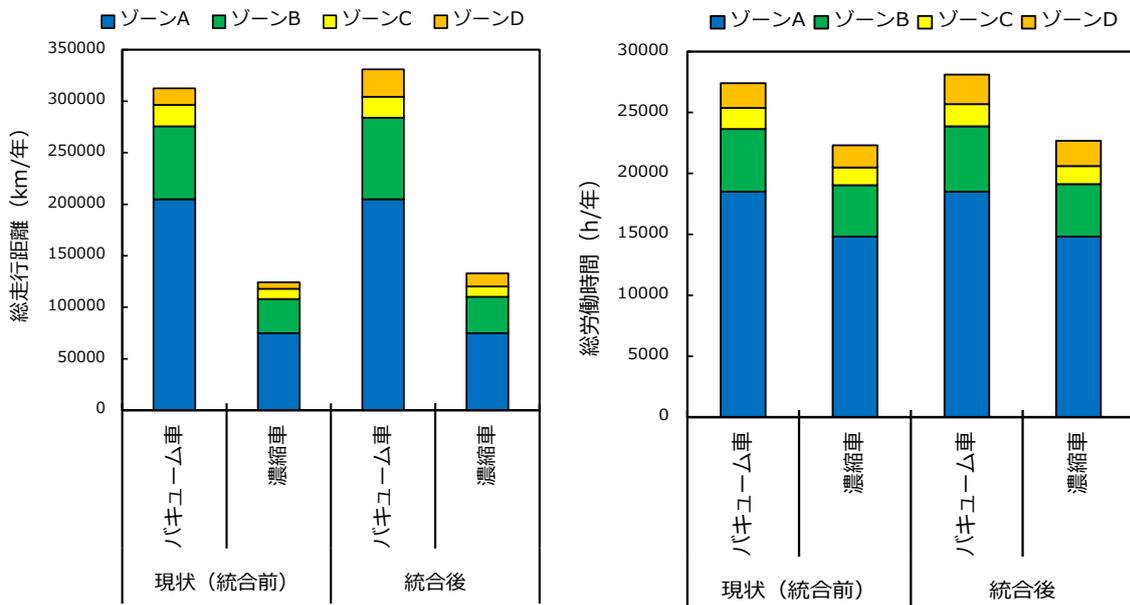


図3-4（図0-7） 現状（統合前）、統合後条件における総走行距離および総労働時間の比較

現状（統合前）、統合後条件におけるCO₂排出量の比較をゾーン別と作業別に分けて、図3-5に示した。アイドリング時には、浄化槽での作業とし尿処理場での作業の合計時間を示している。また、走行距離当りの軽油消費量、作業時間当たりの軽油消費量はサブテーマ1の調査で得た原単位を使用した。軽油の消費によるCO₂排出はLCAソフトウェアMiLCAを用いて算出した。前述したように、濃縮車導入においては浄化槽での作業時間が増すことで、アイドリング時のCO₂排出量はやや増加した。しかしながら、全体では濃縮車使用時は総走行距離が減少することでCO₂排出量も減少することが示唆された。

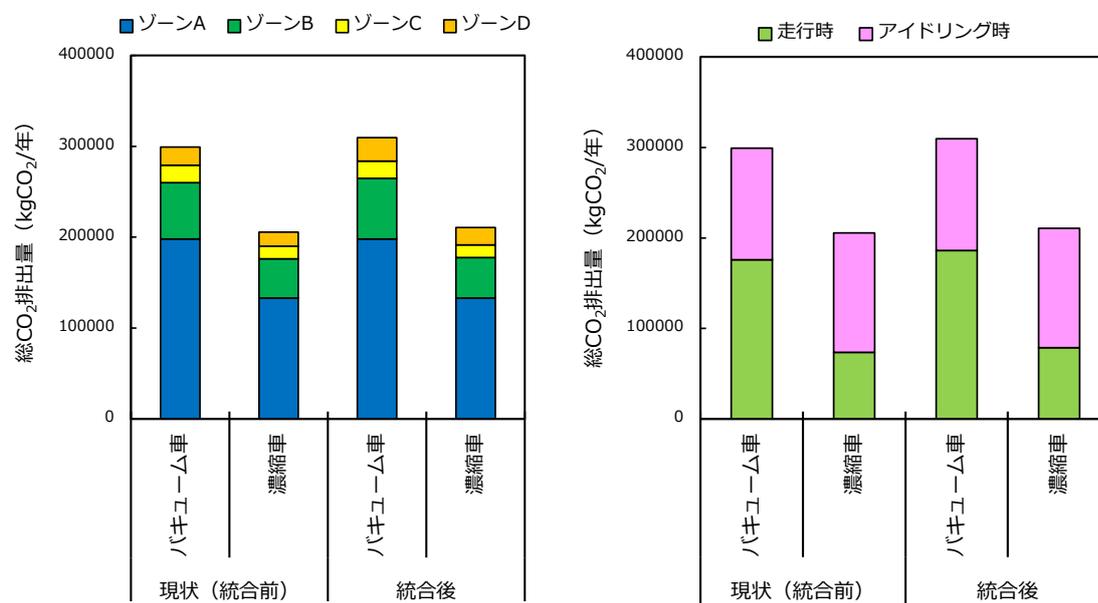


図3-5 現状（統合前）、統合後におけるCO₂排出量の比較（左；ゾーン別、右；作業別）

現状（統合前）と統合後の条件で総走行距離、総労働時間、総CO₂排出量の濃縮車導入の効果をバキューム車の結果に対する増減割合として表3-2に示した。それぞれのゾーンにおいて若干のばらつきはあるものの全体としてバキューム車から濃縮車へ変更することにより、現状の条件では、総走行距離では60%減、総労働時間では19%減、総CO₂排出量では31%減となった。また、統合後の条件でも濃縮車への変更の効果はほとんど同じであった。濃縮車導入においては、総走行距離、総労働時間、総CO₂排出量で影響の幅が異なるため、それぞれについて検討することが重要であることが示唆された。

表3-2 総走行距離、総労働時間、総CO₂排出量の濃縮車導入の効果（対バキューム車の増減割合（%））

		ゾーン A	ゾーン B	ゾーン C	ゾーン D	全体
総走行距離	現状	-63	-53	-52	-61	-60
	統合後	-63	-55	-50	-53	-60
総労働時間	現状	-20	-18	-16	-10	-19
	統合後	-20	-20	-18	-15	-19
総 CO ₂ 排出量	現状	-33	-30	-27	-23	-31
	統合後	-33	-33	-26	-26	-32

現状（統合前）、統合後条件におけるコストを人件費、燃料費、車両費、凝集剤費に分けて試算しそれぞれの合計額を図3-6に示した。人件費については、先に示した総労働時間をもとに1人、1年間当りの経費から算定した。全体のコストの中では人件費が圧倒的な割合を占めており、例えば、現状のバキューム車の条件では人件費は全体のコストの82%程度であった。濃縮車に使用する凝集剤コストが発

生するが、全体の中では極めて少ない割合であった。濃縮車の車両費はバキューム車の2倍程度であったが、濃縮車導入の場合は人件費の減少に伴って全体のコストは減少した。現状の条件では、濃縮車導入によりバキューム車使用の場合に対して7.8%のコスト削減効果が得られた。統合後の条件においても同様の結果となったが、濃縮車導入により8.8%と現状に比べ若干多いコスト削減効果が得られた。このように、コスト面からも濃縮車の導入の有効性の評価を行うことができた。

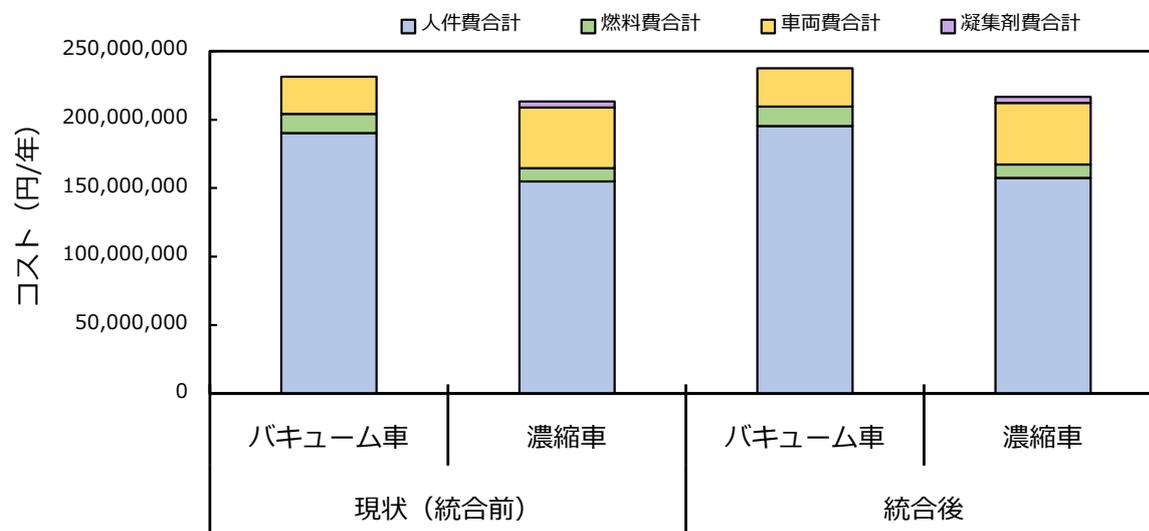


図3-6 現状（統合前）、統合後におけるコストの比較

c) 広域化の影響

し尿処理施設の配置を対象市内の統合後の条件に加え、市外の中距離、長距離に位置するし尿処理施設の3条件にてルート解析を行った。総走行距離、総労働時間、総CO₂排出量（ゾーン別、作業別）の結果は図3-7のとおりである。また、その条件における濃縮車導入の増減割合は表3-3（表0-1）のとおりである。なお、実際の収集・運搬を考慮して統合の条件では半日の時間制約を設定しているが、中距離、長距離の条件においては移動時間が長くなるため時間制約設けずにルート解析をした。対象としたすべての浄化槽と統合後、中距離、長距離のし尿処理場の直線距離の平均はそれぞれで5.9km、21km、38kmである。

統合後に比べて、中距離、長距離の条件では、総走行距離、総労働時間、総CO₂排出量ともに増加した。ただし、同数の浄化槽の収集・運搬をすることと移動距離が長くなることから相対的にアイドリング時に比べ走行時のCO₂排出が大きくなったことがわかる。増減割合では、総走行距離はし尿処理場への距離が長くなるにつれ、濃縮車の導入による効果が緩やかに減少するのに対し、総労働時間、総CO₂排出量は濃縮車の導入の効果が増加していることがわかる。このことは、濃縮車の導入は、ある程度広域的な地域での汚泥の収集・運搬にメリットが出やすいことを示唆している。

統合後、中距離、遠距離条件におけるコストを人件費、燃料費、車両費、凝集剤費に分けて試算しそれぞれの合計額を図3-8に示した。し尿処理施設の距離が離れるにつれ、バキューム車使用に対する濃縮車使用のコストが下がった。これは、図3-7に示した総労働時間の減少に起因するものである。このように、広域化により濃縮車の導入のメリットが出やすいことがコスト面からも示唆された。

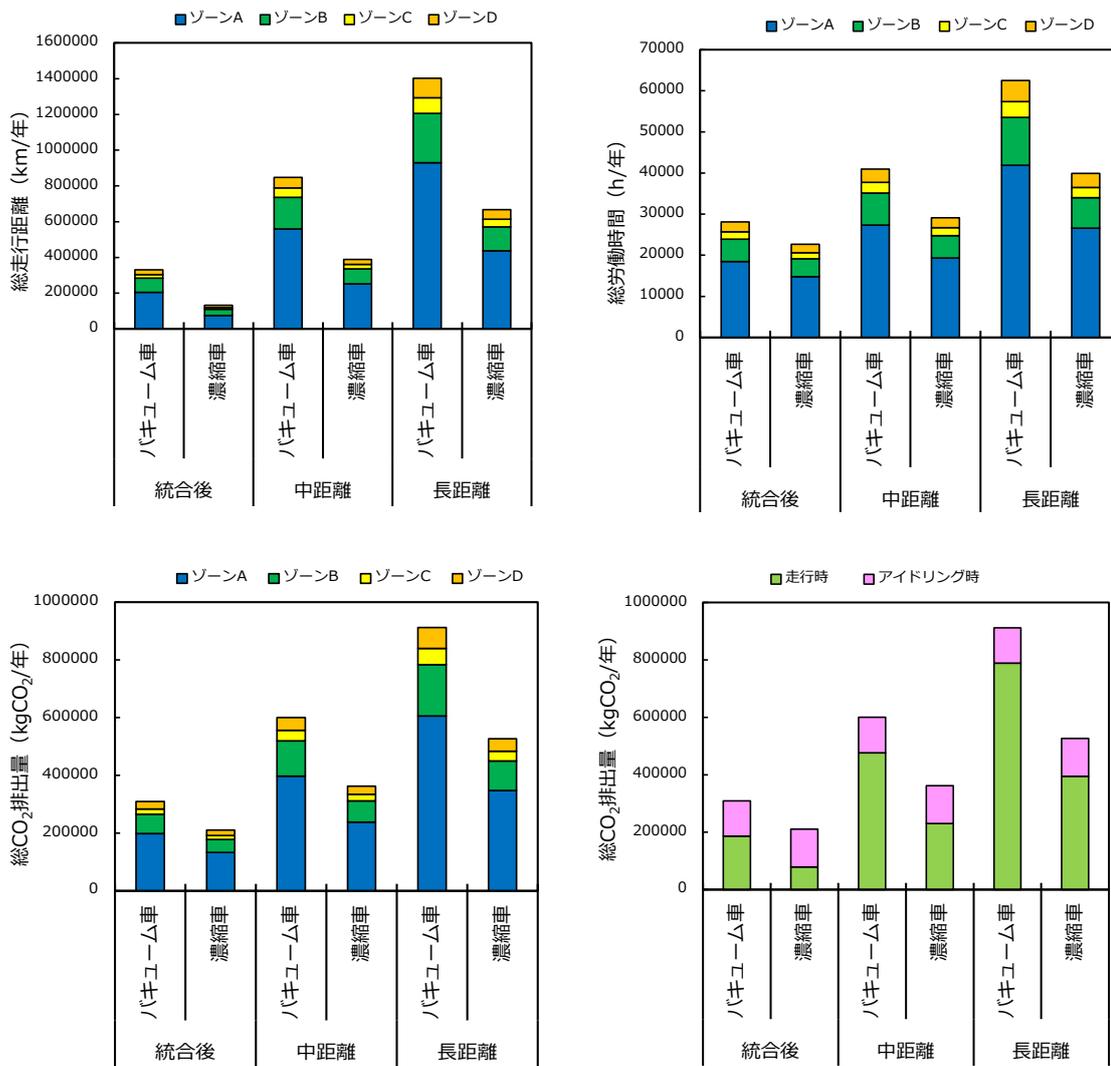


図3-7 統合後、中距離、長距離条件における総走行距離、総労働時間、総CO₂排出量（ゾーン別、作業別）の結果

表3-3（表0-1） 統合後、中距離、長距離条件における濃縮車導入の効果（対バキューム車の増減割合（%））

		ゾーン A	ゾーン B	ゾーン C	ゾーン D	全体
総走行距離	統合後	-63	-55	-50	-53	-60
	中距離	-55	-53	-51	-54	-54
	長距離	-53	-52	-50	-52	-52
総労働時間	統合後	-20	-20	-18	-15	-19
	中距離	-29	-29	-28	-25	-29
	長距離	-37	-36	-35	-35	-36
総 CO ₂ 排出量	統合後	-33	-33	-26	-26	-32
	中距離	-40	-40	-37	-37	-40
	長距離	-43	-42	-40	-41	-42

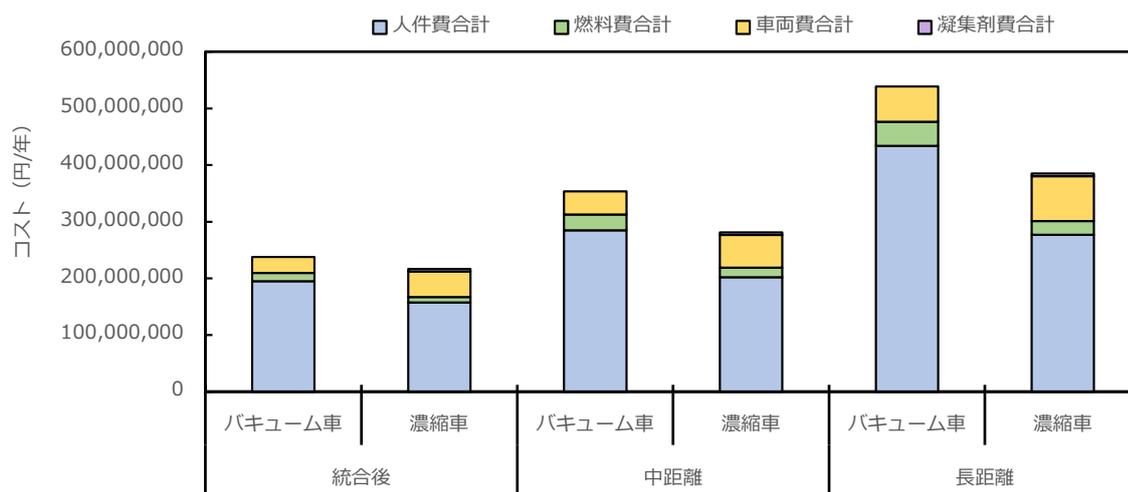


図3-8 統合後、中距離、長距離条件におけるコストの比較

d) 人口減少シナリオの影響

人口減少に伴う浄化槽設置数や汚泥搬出量の減少シナリオにおいて、濃縮車導入の効果を検討することとした。対象地域において、以下の浄化槽設置基数の予測方法および汚泥搬出量の予測方法のとおり現在（2022年）～将来（2050年）までの浄化槽の設置基数および汚泥搬出量の推移を求めた。メッシュごとに浄化槽の設置基数を求めて図示すると図3-9のとおりとなった。人口減少に伴い浄化槽の設置基数は減少するが、とくに単独処理浄化槽の減少が著しいことがわかる。

<浄化槽設置基数の予測方法>

- ① 国立社会保障人口問題研究所が公表している将来推計人口を補正し、総人口の予測値を算出する。さらに、既存のし尿処理施設の区域内人口割合を外挿して人口割合の予測値を算出し、総人口の予測値に乗じて各し尿処理施設の区域内人口の将来予測値を算出する。
- ② し尿処理施設の区域ごとの処理形態別人口割合（2013年～2021年）を外挿し、総人口の予測値に乗じることで、各し尿処理施設の区域ごとの処理形態別人口を算出する。
- ③ DID以外の区域における一般世帯について、世帯人員ごと（1人世帯から5人以上世帯までの5区分）の世帯数の割合（1995年～2020年）を外挿し将来値を予測する。将来の各年の世帯人員と世帯数割合の積の総和を当該年の1世帯当たりの人員数として算出する。
- ④ 浄化槽台帳データから2022年時点における10人槽以下の設置基数の割合を算出し、将来もその割合が継続すると仮定する。（④から⑦の手順はし尿処理施設の区域ごとに合併処理浄化槽、単独処理浄化槽のそれぞれについて実施。）
- ⑤ ③で算出した2022年時点の1世帯当たりの人員数に2022年の10人槽以下の設置基数を乗じることで10人槽以下の浄化槽人口を算出する。全浄化槽人口に占める10人槽以下の浄化槽人口の割合を算出し、将来もその割合が継続すると仮定する。
- ⑥ ②で算出した浄化槽人口に⑤で算出した割合を乗じて、10人槽以下の将来の浄化槽人口を算出する。
- ⑦ 将来の各年について、⑥で算出した10人槽以下の浄化槽人口を③で算出した1世帯当たりの人員数で除して10人槽以下の設置基数の予測値を算出する。
- ⑧ 地域メッシュ統計で使用される4次メッシュ（500mメッシュ）を用い、国土数値情報として公表されている2020年および2025年のメッシュ内人口を基に、線形補間によって2022年のメッシュ内人口をそれぞれ算出する。
- ⑨ 将来の各年についてメッシュ内人口の対2022年比を算出し、算出した値に2022時点の各メッシュ内の浄化槽基数に乗じることで補正前の設置基数を算出する。（合併処理浄化槽、単独処理浄化槽の

それぞれについて実施。)

- ⑩市と重なるメッシュをし尿処理施設の区域に振り分け、⑨で算出したメッシュ内の設置基数を区域ごとに合計し、⑦で算出した設置基数の合計値との比を算出する。算出した各年の比を⑨で算出した各メッシュ内の設置基数に乘じ、メッシュごとの設置基数の将来予測値を算出する。

<汚泥搬出量の予測方法>

- ⑪処理方式を合併処理浄化槽4区分（嫌気ろ床接触ばっ気方式、コンパクト型、モアコンパクト型、その他）、単独処理浄化槽5区分（旧構造腐敗型、旧構造ばっ気型、新構造分離接触ばっ気方式、新構造分離ばっ気方式、その他）に分け、市全体の浄化槽を対象として処理方式区分ごとの設置基数の割合を算出し、実績値に基づき将来予測を行う。
- ⑫⑪で算出した設置基数の割合を⑦で算出した設置基数の予測値に乘じ、処理方式区分ごとの設置基数の将来予測値を算出する。
- ⑬浄化槽台帳データから2022年時点における各処理方式区分の浄化槽容量の平均値を算出し、区分ごとの汚泥引き出し比を乘じて各処理方式区分の浄化槽1基当たりの汚泥搬出量を算出する。
- ⑭⑫で算出した設置基数の将来予測値と⑬で算出した1基当たりの汚泥搬出量を用い、浄化槽1基当たりの汚泥搬出量の将来予測値を算出する。（合併処理浄化槽、単独処理浄化槽のそれぞれについて実施。）
- ⑮し尿処理施設の区域ごとに、⑦で算出した設置基数の将来予測値に⑭で算出した浄化槽1基当たりの汚泥搬出量の将来予測値を乘じることで、バキューム車を使用した場合の汚泥搬出量を算出する。
- ⑯し尿処理施設の区域ごとに、⑥で算出した10人槽以下の将来の浄化槽人口に使用人員1人当たりの濃縮汚泥搬出量を乘じて濃縮車を使用した場合の汚泥搬出量を算出する。
- ⑰濃縮車で搬出された濃縮汚泥のSS濃度は固定値（本研究では32,500 mg/L）とし、バキューム車で搬出された浄化槽汚泥のSS濃度は、使用人員1人当たりのSS量を⑥で算出した浄化槽人口に乘じた結果を⑮で算出した汚泥搬出量で除して算出する。

図3-9で示した浄化槽の設置基数の条件において、現在（2022年）、2030年、2040年、2050年の4条件にてルート解析を行った結果を、総走行距離、総労働時間、総CO₂排出量（ゾーン別、作業別）に分けて図3-10に示す。なお、現在の条件ではし尿処理施設は統合後の配置としている。人口減少シナリオにおける濃縮車導入の増減割合は表3-5（表0-2）のとおりである。年代の増加とともに浄化槽の設置基数が減少するため、総走行距離、総労働時間、総CO₂排出量ともに減少した。2050年においては、濃縮車を使用することで、総走行距離が67%減、総労働時間が24%減、総CO₂排出量が37%減となり、いずれの指標においても濃縮車の導入の有効性が明らかとなった。

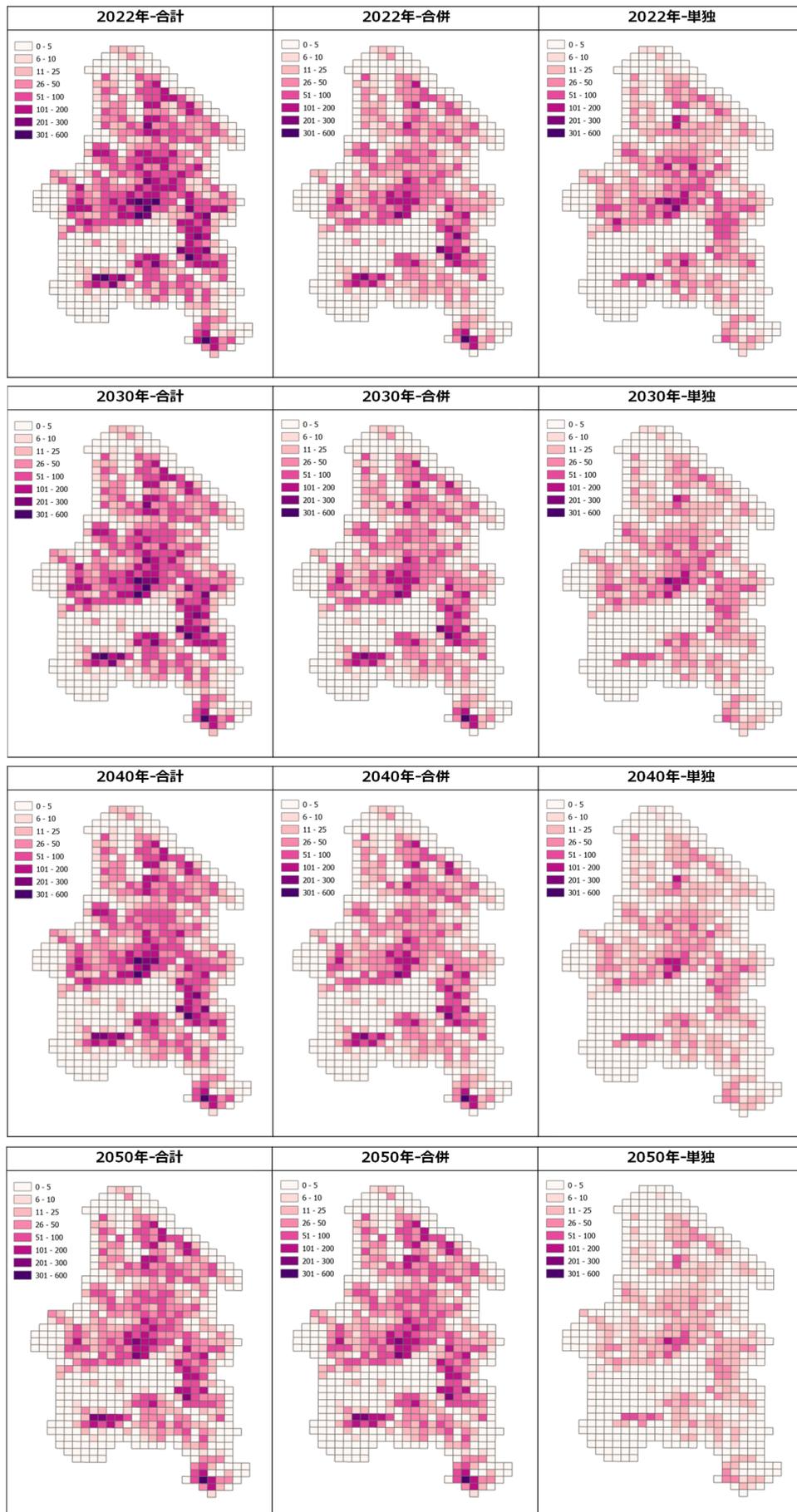


図3-9 対象地域における浄化槽設置基数の推移（2022年～2050年）

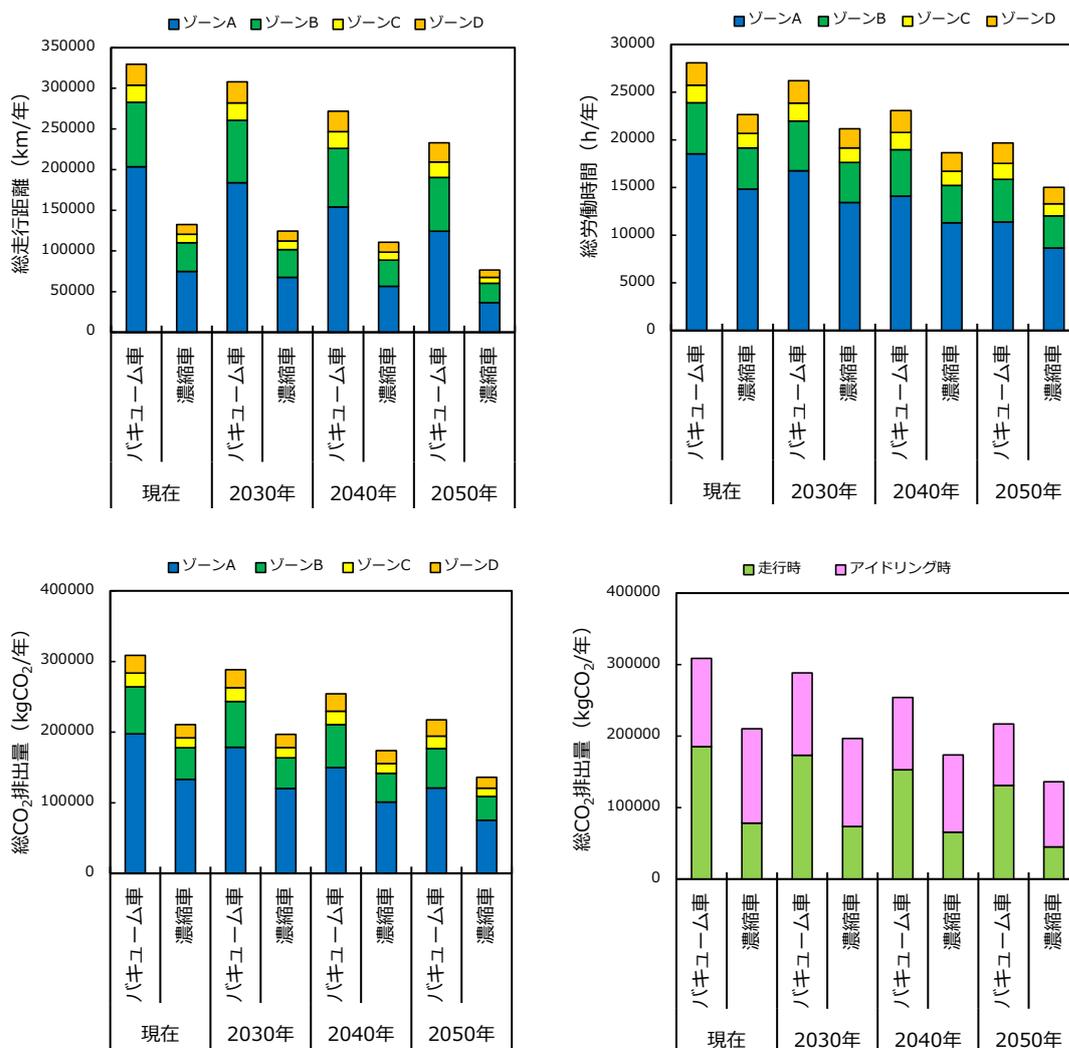


図3-10 人口減少シナリオにおける総走行距離、総労働時間、総CO₂排出量（ゾーン別、作業別）

表3-5（表0-2） 人口減少シナリオにおける濃縮車導入の効果（対バキューム車の増減割合（%））

		ゾーン A	ゾーン B	ゾーン C	ゾーン D	全体
総走行距離	現在	-63	-55	-51	-53	-60
	2030年	-63	-55	-51	-53	-60
	2040年	-63	-56	-51	-53	-59
	2050年	-71	-64	-61	-62	-67
総労働時間	現在	-20	-20	-18	-15	-19
	2030年	-20	-20	-18	-15	-19
	2040年	-20	-20	-18	-15	-19
	2050年	-24	-25	-24	-20	-24
総CO ₂ 排出量	現在	-33	-33	-27	-26	-32
	2030年	-33	-33	-27	-26	-32
	2040年	-33	-33	-27	-26	-32
	2050年	-38	-40	-34	-32	-37

(2) 網羅的評価システムの開発

サブテーマ1, 2および3で得られた知見をもとに、網羅的評価システムの開発を行った。当システムの概要を図3-11 (図0-8) に示す。当システムは「収集・運搬」と「処理・資源化」の2つのフェイズに分けて構成されている。

収集・運搬フェイズでは、まず対象地域における浄化槽情報を整理する。必須の情報としては、単独処理浄化槽、合併処理浄化槽の設置基数、設置場所（住所、緯度経度等）、各浄化槽の人口等となる。これらの情報収集には各自治体の浄化槽台帳の活用が考えられる。なお、必要に応じて4-1で示したアドレスマッチング等の独自の対応が想定される。これらの情報に基づき、当該地域における汚泥搬出量と汚泥濃度が予測できる。

浄化槽の位置情報（緯度経度）から、バキューム車あるいは濃縮車による汚泥の収集・運搬ルートの解析を行う。解析の際には、サブテーマ1で示した作業原単位等を活用するとともに、収集・運搬に係る作業時間の制約、汚泥を貯留するタンク容量の限界も考慮して行う。ルート解析から総走行距離を算出し、バキューム車あるいは濃縮車の単位走行距離当たりの燃料消費量を乗算することにより、①車両の燃料消費量を算出する。

処理・資源化フェイズでは、収集・運搬フェイズで予測した汚泥搬出量と汚泥濃度に基づき、サブテーマ2で整理した各処理設備の電気消費量等、あるいは資源化によるエネルギー回収に係るパラメータを活用し、②汚泥処理の電気消費量、③エネルギーの創出量を算出する。なお、汚泥処理施設の更新の際など、処理施設の新規建設あるいは処理施設の一部の改修を検討する際にも、汚泥搬出量と汚泥濃度が有効に活用できると考えられる。

①車両の燃料消費量、②汚泥処理の電気消費量、③エネルギーの創出量を合算することにより、収集・運搬・処理・資源化における一連の環境負荷を評価可能な網羅的評価システムを開発することができた。

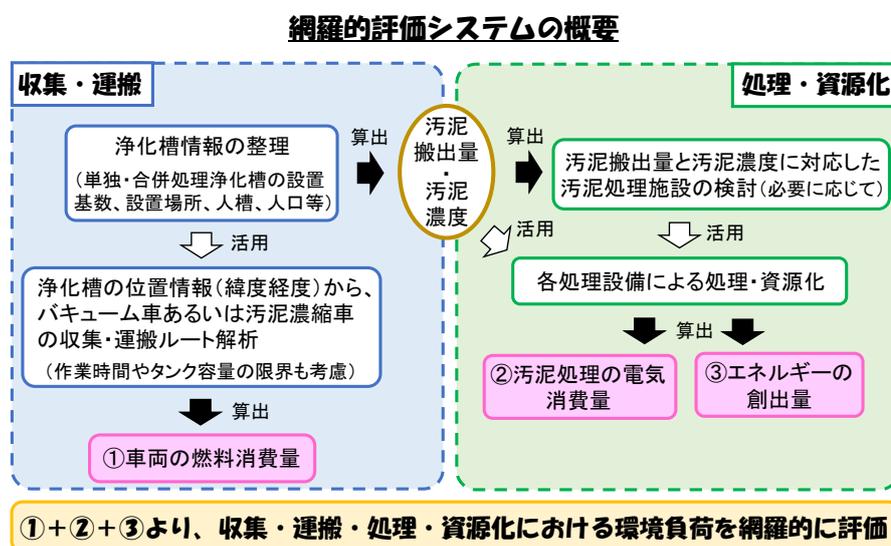


図3-11 (図0-8) 網羅的評価システムの概要

(3) 収集・運搬・処理・資源化の総合評価

収集・運搬ではバキューム車と濃縮車、処理・資源化では標準脱窒素処理方式、膜分離高負荷脱窒素処理方式、AnMBR+(HAP+PNA)法を組み合わせた場合について、網羅的評価システムにより総CO₂排出量を計算し、図3-12 (図0-9) に示した。図中には、2022年現在の統合後の条件でゾーンA~Dの収集運搬に係るCO₂排出量、し尿処理施設X~Zの処理資源化に係るCO₂排出量に分けて表示しており、マイナス分はCO₂が回収(=創エネルギー)されることを示している。バキューム車の場合、標準脱窒素処理方式、膜分離高負荷脱窒素処理方式に比べてAnMBR+(HAP+PNA)法は総CO₂排出量が大幅に削減できると考えられた。濃縮車使用の条件では収集・運搬からのCO₂排出はバキューム車よりも低い、標準脱窒素処理方

式、膜分離高負荷脱窒素処理方式との組み合わせでは、大きなCO₂排出量の削減には結びつかない結果が得られた。一方で、濃縮車とAnMBR+(HAP+PNA)法の組み合わせでは、処理・資源化において収集・運搬によるCO₂排出量を上回るCO₂回収量が試算され、収集・運搬・処理に係る消費エネルギー以上の創エネルギーが可能であることが示唆された。この結果から、濃縮車による収集・運搬とAnMBR+(HAP+PNA)法による処理・資源化を組み合わせることが、濃縮車の最適な活用方法であると明らかになったとともに、地域の低炭素化社会、低環境負荷型社会、地域循環共生圏の構築に向けた一手段となり得ることが示唆された。

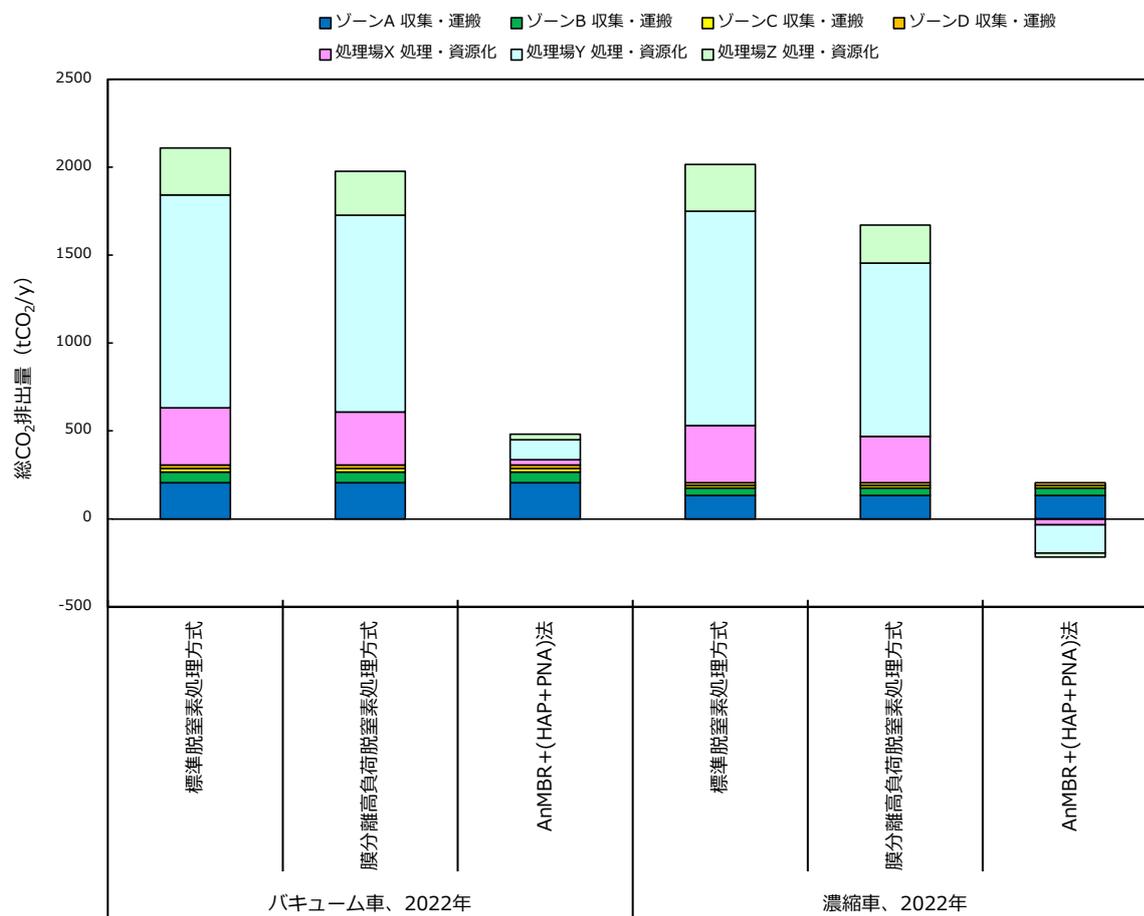


図3-12 (図0-9) 収集・運搬および処理・資源化の組み合わせの総CO₂排出量の比較

収集・運搬および処理・資源化における現在および2050年の総CO₂排出量の比較、同じく統合、中距離、長距離の総CO₂排出量の比較は図3-13、図3-14に示したとおりである。図3-13の収集・運搬においては、濃縮車の導入や2050年の浄化槽設置基数の減少によりCO₂排出量は減少している。ただし、AnMBR+(HAP+PNA)法の処理・資源化においては、相対的に2050年のCO₂排出量は増加する結果となった。その要因として、①本研究で行った解析では、現在の条件で導入した施設をそのまま使用し、電力消費の多い水処理設備と脱臭装置を現在の条件で運転させる条件で計算をしていること、②処理・資源化への汚泥投入量の減少により、資源化によるエネルギー回収量が減少したことが影響したと考えられた。

前述のように、濃縮車導入により広域化した際にも労働時間、CO₂排出量、コストの面でも優れていることが示されていることから、2050年のように浄化槽設置基数の減少により汚泥量が減少した際には、積極的に濃縮車導入と広域化を進め、また、し尿処理施設にてAnMBR+(HAP+PNA)法を導入することでCO₂削減効果が期待できるものと考えられる。

図3-14の収集・運搬においては、中距離、長距離とし尿処理場との距離が長くなるにつれCO₂排出量は増加している。処理・資源化においては、統合と同条件で中距離、長距離の結果を見積もっているため、中距離、長距離においては、収集・運搬で増加する分だけ総CO₂排出量は増加する結果となった。

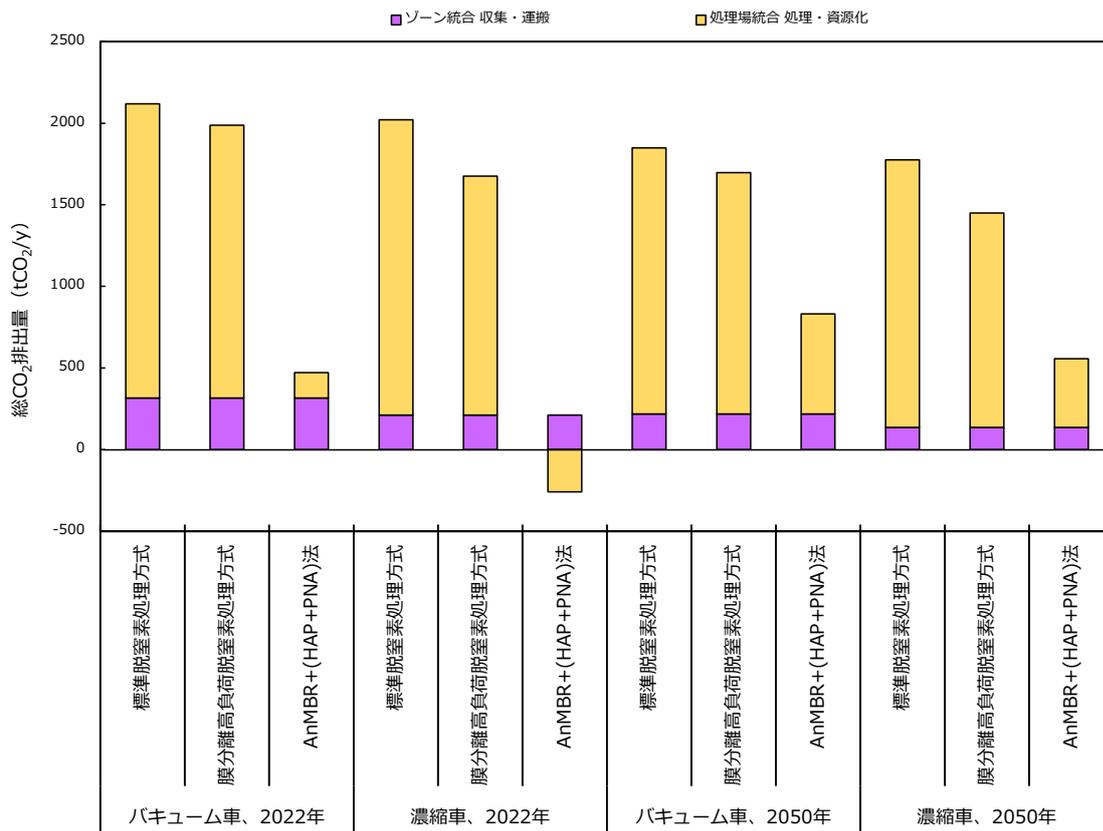


図3-13 収集・運搬および処理・資源化の現在および2050年の総CO₂排出量の比較

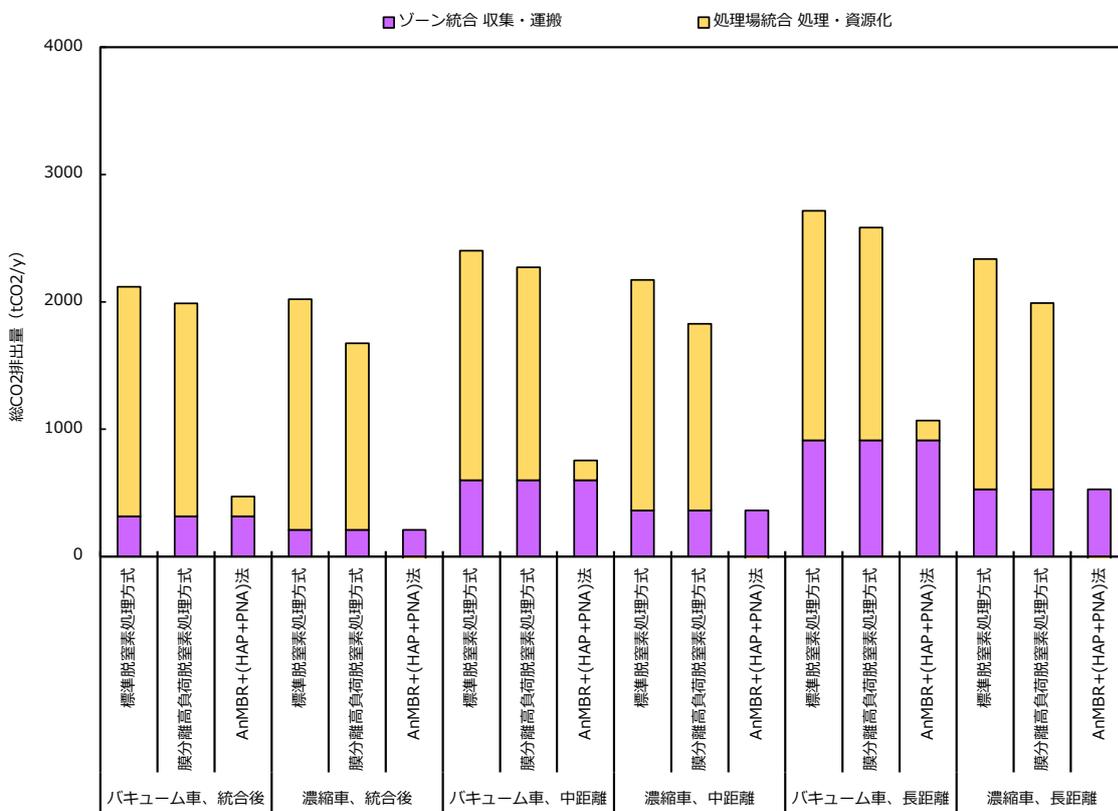


図3-14 収集・運搬および処理・資源化の統合、中距離、長距離の総CO₂排出量の比較

広域化をした際の収集・運搬と処理・資源化を合わせた総CO₂排出量を算定することには成功しているが、処理場の規模に合わせたCO₂排出量の算定は今後の課題となる。

典型的な収集・運搬と処理・資源化の技術の組み合わせとして、バキューム車と標準脱窒素処理方式、濃縮車とAnMBR+(HAP+PNA)法の2とおりで環境負荷を貨幣価値にて算定した。この算定には、LCAソフトウェアMiLCAを用いることとし、収集・運搬では軽油の使用量、処理・資源化は電力使用量から環境負荷をLIME2を用いて統合化して円で計算した。計算結果は図3-15に示すとおりである。濃縮車とAnMBR+(HAP+PNA)法を導入することで、バキューム車使用と比較して環境負荷は102%減となり、システム全体では少なくとも環境負荷を排出しないことがわかった。これにより、年間7,500,000円程度の環境負荷が低減されることが示唆された。このように、収集・運搬と処理・資源化の技術の組み合わせによる影響を比較することで最適な技術の組み合わせを明らかにし、濃縮車とAnMBR+(HAP+PNA)法の導入効果を定量的に示すことに成功した。

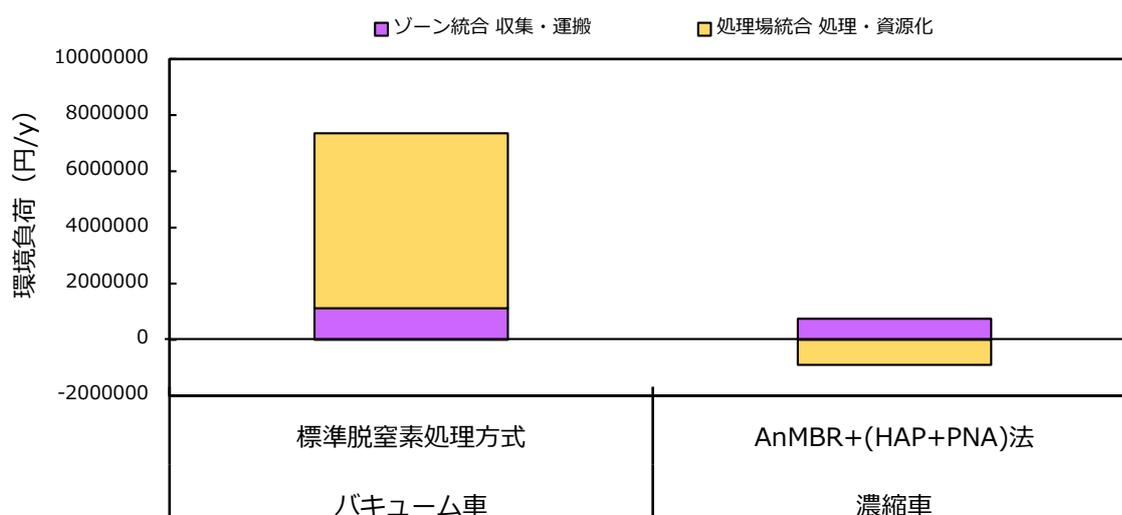


図3-15 汚泥の収集・運搬・処理・資源化の組み合わせによる環境負荷の算定の一例

5. サブテーマ3 研究目標の達成状況

サブテーマ1で得られた作業原単位等の知見、サブテーマ2で得られた汚泥処理・資源化に関する知見に加え、サブテーマ3で得られたルート解析方法を組み合わせることで、バキューム車や濃縮車による収集・運搬・処理・資源化の一連の環境負荷を評価可能な網羅的評価システムを開発することができた。また、人口減少に伴う浄化槽の基数および分布の将来予測が可能な手法を確立し、濃縮車の導入が総走行距離、総労働時間、総CO₂排出量等に及ぼす影響に関する将来予測も可能とした。

網羅的評価システムに基づいた評価により、収集・運搬ではバキューム車と濃縮車、処理・資源化では標準脱窒素処理方式、膜分離高負荷脱窒素処理方式、AnMBR+(HAP+PNA)法の組み合わせで総CO₂排出量を解析した。結果として濃縮車とAnMBR+(HAP+PNA)法の組み合わせの場合に収集・運搬・処理に係る消費エネルギー以上の創エネルギーが可能となった。AnMBR+(HAP+PNA)法と組み合わせることが濃縮車の最適活用条件であることが示され、かつ、両者の組み合わせは地域の低炭素化社会、低環境負荷型社会、地域循環共生圏の構築に向けた一手段となりうることが示唆された。

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	11
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	0
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	1
口頭発表（学会等・査読なし）：	10
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	17
マスコミ等への公表・報道等：	1
研究成果による受賞：	1
その他の成果発表：	0

(2) 誌上発表

<査読付き論文>

成果番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
	特に記載すべき事項はない。

成果番号	【サブテーマ2】の査読付き論文
1	Qian, Y., Chen, F., Shen, J., Guo, Y., Wang, S., Qiang, H., Qin, Y., Li, Y. Y. (2022). Control Strategy and Performance of Simultaneous Removal of Nitrogen and Organic Matter in Treating Swine Manure Digestate Using One Reactor with Airlift and Micro-granule. <i>Bioresource Technology</i> , 355, 127199. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127199
2	Guo, G., Li, Y., Zhou, S., Chen, Y., Urasaki, K., Qin, Y., Kubota, K., Li, Y. Y. (2022). Long Term Operation Performance and Membrane Fouling Mechanisms of Anaerobic Membrane Bioreactor Treating Waste Activated Sludge at High Solid Concentration and High Flux. <i>Science of the Total Environment</i> , 846, 157435.

	https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157435
3	哈俊彤、宋柳瑩、葉敏、李玉友. 脱炭素型嫌気性生物処理技術の発展と課題. 用水と廃水. 2022. Vol.64 No.1, p.1-12.
4	Chen, Y., Guo, Y., Feng, G., Urasaki, K., Guo, G., Qin, Y., Kubota, K., Li, Y. Y. (2023). Key Factors for Improvement of Nitrogen Removal in a HAP-enhanced One-stage Partial Nitritation/Anammox Process. Chemical Engineering Journal, 452, 139589. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139589
5	Guo, G., Zhou, S., Chen, Y., Wang, W., Qin, Y., Li, Y. Y. (2023). Evaluation of Bioenergy Production and Material Flow in Treating Japanese Concentrated Johkasou Sludge Using High-solid Anaerobic Membrane Bioreactor Based on One-year Operation. Chemical Engineering Journal, 469, 143918. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143918
6	Chen, Y., Feng, G., Guo, G., Urasaki, K., Kubota, K. Li, Y.Y. (2023). Improved Properties and Enhancement Strategies of Hydroxyapatite-Based Functional Granular Sludge for a High-Rate Partial Nitritation/Anammox System. Environmental science & technology, 57(19), 7624-7633. https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00491
7	陳玉潔, 郭広澤, 李玉友. 一槽式PNA法におけるHAPグラニュール汚泥の特性及び窒素・リン除去効果の強化. 土木学会論文集, 2023. Vol.79, No.25, 23-25015. https://doi.org/10.2208/jscej.23-25015
8	陳玉潔, 郭広澤, 李玉友. アナモックス法を用いた脱炭素型窒素除去に関する研究進展. 色材協会誌. 2023. Vol.96, No.12, 405-409. https://doi.org/10.4011/shikizai.96.405
9	Guo, G., Zhou, S., Chen, Y., Qin, Y., Huang, X. Li, Y.-Y. (2024). Enhanced methanogenic degradation and membrane fouling associated with protein-EPS by extending sludge retention time in a high-solid anaerobic membrane bioreactor treating concentrated organic sludge. Water research, 248, pp.120879-120879. https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120879
10	Guo, G., Zhou, S., Chen, Y. Li, Y.-Y. (2024). Phosphorus recovery coupling with one-stage partial nitritation/anammox process for the treatment of high-nutrient permeate from anaerobic membrane bioreactor treating concentrated organic sludge. Chemical engineering journal, 484, pp.149474-149474. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149474

成果 番号	【サブテーマ3】の査読付き論文
11	Mishima, I., Yoshikawa, N., Asakawa, S., Noguchi, Y., Amano, K. (2023). Life-cycle Analysis of Environmental Loads from Household Septic Systems in Japan Focusing on Effluent Water Discharge. Science & Technology, 88(11), 2719. DOI: 10.2166/wst.2023.370

< 査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野） >

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ1】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

(3) 口頭発表

<口頭発表（国際学会等・査読付き）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
12	Guo, G., Zhou, S., Chen, Y., Li, Y. Y. (2023). Enhanced methane production and nutrient removal by the Integration of high-solid AnMBR and one-stage partial nitrification/anammox process treating concentrated Johkasou sludge, the Water and Environment Technology Conference, Online.

成果 番号	【サブテーマ3】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

<口頭発表（学会等・査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（学会等・査読なし）
13	山下雅大、武田文彦、濱中俊輔、仁木圭三、見島伊織、李玉友、西村修（2023）．浄化槽汚泥の収集運搬プロセスのモデル解析．第37回全国浄化槽技術研究集会．パンフィコ横浜．

成果番号	【サブテーマ2】の口頭発表（学会等・査読なし）
14	Chen, Y., Feng, G, Guo, G., Li, Y. Y. (2022). Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal Performance by Hydroxyapatite (HAP) Formation in a One-stage Partial Nitritation/anammox Process with HAP-based Granules. Water Environment Technology Conference, Tohoku University, Japan.
15	Guo, G., Zhou, S., Li, Y. Y. (2022). Long term operation performance and membrane fouling mechanism of high solid anaerobic membrane bioreactor treating Johkasou sludge. 14th Japan-China-Korea International Postgraduate Academic Symposium, Online.
16	郭広澤、周士統、李玉友(2022). 嫌気性MBRによる濃縮浄化槽汚泥のメタン発酵に関する研究, 第33回廃棄物資源循環学会研究発表会. 宮崎大学.
17	KE Rongxin, 李玉友, 西村修, 濱中俊輔 (2022). 汚泥濃縮車導入による汚泥再生処理センターの脱炭素効果についての基礎的検討. 日本水処理生物学会第58回大会（熊本大会）. 熊本大学.
18	KE Rongxin, 李玉友, 西村修, 武田文彦, 仁木圭三, 濱中俊輔, 見島伊織 (2023). 濃縮車導入による汚泥再生処理センターのエネルギー消費量変化に関する基礎的検討. 第37回全国浄化槽技術研究集会. パシフィコ横浜.
19	KE Rongxin, 李玉友, 西村修, 見島伊織, 武田文彦, 仁木圭三, 濱中俊輔 (2023). 汚泥濃縮車導入による浄化槽汚泥処理の省エネ化の検討. 日本水処理生物学会第59回大会. 山形大学.

成果番号	【サブテーマ3】の口頭発表（学会等・査読なし）
20	見島伊織、武田文彦、濱中俊輔、仁木圭三、李玉友、西村修 (2023). 浄化槽汚泥の収集・運搬ステージの環境負荷の解析. 第57回日本水環境学会年会. 愛媛大学.
21	見島伊織、武田文彦、濱中俊輔、仁木圭三、李玉友、西村修 (2023). 浄化槽汚泥の収集・運搬ルート解析による環境負荷の影響比較. 第37回全国浄化槽技術研究集会. パシフィコ横浜.
22	見島伊織、武田文彦、濱中俊輔、仁木圭三、カエイシン、李玉友、西村修 (2024). 浄化槽汚泥の収集・運搬ステージにおける濃縮車活用の有用性評価. 第58回日本水環境学会年会. 九州大学.

(4) 知的財産権

成果番号	発明者	出願者	名称	出願以降の番号	出願年月日
	特に記載すべき事項はない。				

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果番号	実施年度	【サブテーマ1】の実施状況
		特に記載すべき事項はない。

成果番号	実施年度	【サブテーマ2】の実施状況

		特に記載すべき事項はない。
--	--	---------------

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ3】の実施状況
23	2022	令和3年度埼玉県環境科学国際センター講演会（2022年2月3日、埼玉会館小ホール、参加者約200名）で研究内容紹介
24	2022	令和3年度川の再生交流会（主催：埼玉県、オンライン、2022年2月5日、参加者約170名）にて研究内容紹介
25	2022	埼玉県環境科学国際センターFacebook（2022年3月2日から）にて研究内容紹介
26	2022	研究内容ポスター（埼玉県環境科学国際センター研修室、2022年3月から）を常設展示
27	2022	埼玉県環境科学国際センター研究所公開（2022年5月7日、参加者82名）にて研究内容紹介
28	2022	埼玉県環境科学国際センター研究所公開（2022年8月2日、参加者約126名）にて研究内容紹介
29	2022	埼玉県庁オープナー（主催：埼玉県、埼玉県庁、2022年11月14日、参加者約1,000名）にて研究内容紹介
30	2022	埼玉県環境科学国際センター研究所公開（2022年11月14日、参加者約265名）にて研究内容紹介
31	2023	令和3年度埼玉県環境科学国際センター講演会（2023年2月3日、参加者約200名）で研究内容紹介
32	2023	令和4年度川の再生交流会（主催：埼玉県、埼玉会館、2023年2月11日、参加者172名）にて研究内容紹介
33	2023	埼玉県環境科学国際センター研究所公開（2023年5月6日、参加者133名）にて研究内容紹介
34	2023	埼玉県環境科学国際センター研究所公開（2023年8月2日、参加者55名）にて研究内容紹介
35	2023	埼玉県庁オープナー（主催：埼玉県、埼玉県庁、2023年11月14日、参加者1,199名）にて研究内容紹介
36	2023	埼玉県環境科学国際センター研究所公開（2023年11月14日、参加者約304名）にて研究内容紹介
37	2024	令和5年度埼玉県環境科学国際センター講演会（2024年2月7日、参加者約200名）で研究内容紹介
38	2024	令和5年度川の再生交流会（主催：埼玉県、埼玉会館、2024年2月10日、参加者274名）にて研究内容紹介
39	2024	埼玉県環境科学国際センターニュースレター（2024年4月発行）にて研究内容紹介

(6) マスメディア等への公表・報道等

成果 番号	【サブテーマ1】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】のメディア報道等

40	下水道情報第1964号（2022年3月22日、8-12頁、「インタビュー東北大学李玉友教授に訊く：カーボンニュートラル実現に向けた水処理技術の開発、今後めざしていくべき下水処理場の姿とは。」
----	---

成果 番号	【サブテーマ3】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

(7) 研究成果による受賞

成果 番号	【サブテーマ1】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の研究成果による受賞
41	Guo, G., Zhou, S., Chen, Y., Li, Y. Y. (2023). Enhanced methane production and nutrient removal by the Integration of high-solid AnMBR and one-stage partial nitrification/anammox process treating concentrated Johkasou sludge, the Water and Environment Technology Conference, Online, 優秀発表賞受賞

成果 番号	【サブテーマ3】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

(8) その他の成果発表

成果 番号	【サブテーマ1】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

Abstract

[Research Title]

Exhaustive Analysis of Reduction Effect of Environmental Burdens in Collection, Transportation and Treatment of Johkasou Sludge by Using Sludge Thickening Vehicles and Proposal of the Optimal Method for Utilization

Project Period (FY) :	2021-2023
Principal Investigator :	Hamanaka Shunsuke
(PI ORCID) :	ORCID 0000-0002-4875-574X
Principal Institution :	Japan Education Center of Environmental Sanitation 2-23-3 Kikukawa, Sumida-ku, Tokyo, JAPAN Tel: +81-3-3635-4885 Fax: +81-3-3635-4886 E-mail: hamanaka@jeces.or.jp
Cooperated by :	Tohoku University, Center for Environmental Science in Saitama
Keywords :	Johkasou, GIS, Resource recovery, depopulation, Circular and Ecological Economy

[Abstract]

Due to the centralization and regional expansion of sludge treatment facilities, concerns have been raised about increased costs and energy consumption associated with the collection and transportation of Johkasou sludge. Therefore, further sophistication and efficiency in collection and transportation are required. Sludge thickening vehicles, which concentrate Johkasou sludge at the site of generation, can reduce the volume and amount of sludge handled by one-third to one-quarter, thus contributing to more advanced and efficient collection and transportation. However, the extent to which the introduction of thickening vehicles improves the efficiency of sludge collection and transportation, and how concentrated sludge affects processing and energy recovery at treatment facilities, is not well understood. The objective of this study is to propose optimal utilization methods for sludge thickening vehicles by comprehensively assessing the environmental impact related to the collection, transportation, processing, and resource recovery of Johkasou sludge.

An exhaustive analysis system has been developed that allows for the evaluation of the environmental impacts of the entire process of collection, transportation, processing, and resource recovery using vacuum trucks and sludge thickening vehicles. This was achieved by establishing work unit costs for sludge collection and transportation, knowledge about sludge processing and resource recovery, and route analysis methods.

Based on the exhaustive analysis system, total CO₂ emissions were analyzed using a combination of vacuum trucks and sludge thickening vehicles for collection and transportation, and standard denitrification treatment methods, high-load denitrification with membrane separation, and a newly developed combination of anaerobic membrane separation with the Partial Nitritation and Anammox (PNA) process for processing and resource recovery. It was found that combining a sludge thickening vehicle with anaerobic membrane separation and the PNA process could achieve zero total CO₂ emissions. This combination has been shown to be the optimal condition for the utilization of sludge thickening vehicles, and it also suggests

that such integration could serve as a measure toward building a low-carbon society, reducing environmental impacts, and establishing a circular and ecological economy.

Qian, Y., Chen, F., Shen, J., Guo, Y., Wang, S., Qiang, H., Qin, Y., Li, Y. Y. (2022). Control Strategy and Performance of Simultaneous Removal of Nitrogen and Organic Matter in Treating Swine Manure Digestate Using One Reactor with Airlift and Micro-granule. *Bioresource Technology*, 355, 127199. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127199>

Guo, G., Li, Y., Zhou, S., Chen, Y., Urasaki, K., Qin, Y., Kubota, K., Li, Y. Y. (2022). Long Term Operation Performance and Membrane Fouling Mechanisms of Anaerobic Membrane Bioreactor Treating Waste Activated Sludge at High Solid Concentration and High Flux. *Science of the Total Environment*, 846, 157435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157435>

Chen, Y., Guo, Y., Feng, G., Urasaki, K., Guo, G., Qin, Y., Kubota, K., Li, Y. Y. (2023). Key Factors for Improvement of Nitrogen Removal in a HAP-enhanced One-stage Partial Nitritation/Anammox Process. *Chemical Engineering Journal*, 452, 139589. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139589>

Guo, G., Zhou, S., Chen, Y., Wang, W., Qin, Y., Li, Y. Y. (2023). Evaluation of Bioenergy Production and Material Flow in Treating Japanese Concentrated Johkasou Sludge Using High-solid Anaerobic Membrane Bioreactor Based on One-year Operation. *Chemical Engineering Journal*, 469, 143918. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143918>

Chen, Y., Feng, G., Guo, G., Urasaki, K., Kubota, K., Li, Y. Y. (2023). Improved Properties and Enhancement Strategies of Hydroxyapatite-Based Functional Granular Sludge for a High-Rate Partial Nitritation/Anammox System. *Environmental science & technology*, 57(19), 7624–7633. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00491>

Guo, G., Zhou, S., Chen, Y., Qin, Y., Huang, X., Li, Y.-Y. (2024). Enhanced methanogenic degradation and membrane fouling associated with protein-EPS by extending sludge retention time in a high-solid anaerobic membrane bioreactor treating concentrated organic sludge. *Water research*, 248, pp.120879–120879. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120879>

Guo, G., Zhou, S., Chen, Y., Li, Y.-Y. (2024). Phosphorus recovery coupling with one-stage partial nitritation/anammox process for the treatment of high-nutrient permeate from anaerobic membrane bioreactor treating concentrated organic sludge. *Chemical engineering journal*, 484, pp.149474–149474. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149474>

Mishima, I., Yoshikawa, N., Asakawa, S., Noguchi, Y., Amano, K. (2023). Life-cycle Analysis of Environmental Loads from Household Septic Systems in Japan Focusing on Effluent Water Discharge. *Science & Technology*, 88(11), 2719.

DOI: 10.2166/wst.2023.370

This research was funded by the Environment Research and Technology Development Fund (ERTDF).

別紙系氏

【参考資料】 終了研究成果報告書 公募審査・中間評価結果への対応

指摘等	対応状況・非対応理由等
<p>■採択時コメント</p> <ul style="list-style-type: none"> ・サブテーマ間のスピードのバランスの確保が求められる。 ・本来は、サブテーマ2の成果をもとに、濃縮・収集から処理に至る最適なシステムの構築に向けた検討がなされるのが自然であろう。 ・浄化槽汚泥処理においてサブテーマ2の成果も活用するが、現状の体制も活用するというスタンスも必要であろう。 ・サブテーマ2の技術の革新の研究の進展がシステムデザインの段階に達するには時間がかかるので、タイミングが合わない上に予想される経済的な効率性の低さからサブシステムとして組み入れるには困難が伴う恐れがあり、現実的な獲得目標を明確にした方がよい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・既存の汚泥処理技術を活用した場合の環境負荷の評価手法を確立しながら、並行してサブテーマ2の研究を進めることで、効率的に成果を得ることができた。 ・サブテーマ3で総括して、現状及び将来的な資源化システムを活用するシナリオを作成して解析を行うことができた。
<p>■採択時コメント</p> <ul style="list-style-type: none"> ・サブテーマ1・3と、サブテーマ2の関係が不明確である。 ・サブテーマ2の研究要素は理解するが、その結果がどうサブテーマ1・3の研究結果と関連するのか、研究としての関連性が見えない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・サブテーマ2で開発を進めている省エネ・創エネ型資源回収システムは、濃縮汚泥が搬入されることで高いCO₂排出削減効果が得られる。 ・収集、運搬、処理、資源化を統合した評価により、それらの関連性を定量化することができた。
<p>■採択時コメント</p> <ul style="list-style-type: none"> ・既に汚泥濃縮車は存在し、一部で導入されていることから、その運用に係るコストやベネフィットに係る調査、分析、評価で十分であろう。 	<ul style="list-style-type: none"> ・濃縮車導入に伴う汚泥処理施設の運転に係る環境負荷の変化を考慮し、収集、運搬、処理、資源化を統合した分析、評価を実施した。
<p>■採択時コメント</p> <ul style="list-style-type: none"> ・サブテーマ1と3に関しては、現状の解析だけでなく、人口減少による過疎化、施設の老朽化を含めた将来予測も含めて実施すると研究成果が有効に利用できるのではないかと。 ・研究成果は濃縮車の普及策への展開に活用することも求められる。 ・何故、濃縮車が現時点で普及していないのか、を明確にすれば、その普及への道筋を描くことができるのではないかと。 	<ul style="list-style-type: none"> ・汚泥処理施設の老朽化に対応するためのシナリオとして、人口減少を考慮しつつ、既存の汚泥処理施設を単独で更新するシナリオと広域処理施設を建設するシナリオを作成し解析を行った。 ・収集運搬業者からは、濃縮車の導入効果が見えないとの意見をいただいている。本研究では、濃縮車の導入効果を必要最低限の情報から評価できる簡易な収集運搬モデルを構築した。 ・濃縮汚泥対応型の省エネ・創エネ型資源回収システムが開発されれば、当該システムを導入するために濃縮車の普及が進む可能性もある。

<p>■採択時コメント</p> <ul style="list-style-type: none"> ・サブテーマ2のグループの研究は注目される。このなかで資源回収方法としてアナモックスが使えない場合の下水道との連携も考慮すべきである。また資源回収と利用を下水道を含めて、どのように最適化するべきか、テーマ1とテーマ3との強い連携をとり実施すべきである。 	<ul style="list-style-type: none"> ・アナモックスについては期待する成果が得られ、アナモックス処理後に小規模な窒素除去設備を付加する程度で十分な結果となった。 ・嫌気性MBRのメタン発酵効率が下水汚泥と同等であることを確認し、濃縮汚泥は下水汚泥との混合処理が可能であることを明らかにした。
<p>■中間評価コメント</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地域の低炭素化社会、低環境負荷型社会、地域循環共生圏の構築に向けたバキューム車・濃縮車やGISを用いた最適な活用方法を評価し提言する重要な課題である。バキューム車と比べ、濃縮車のコスト高が普及を妨げている可能性はあるのか。本システムの社会への普及の道筋を示してほしい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・濃縮車の普及を妨げている要因として、①濃縮車の導入効果に関する情報不足、②汚泥処理施設における濃縮汚泥搬入に伴う不具合発生の懸念、③濃縮車の導入コストが考えられる。 ・関係者（汚泥収集運搬業者、自治体等）との意見交換を行い、評価システムの汎用性や信頼性、濃縮車導入の課題と解決策について議論した。また、その内容について整理し、学会会議や学術誌等で情報発信を行い、低炭素化社会等の構築に向けた濃縮車の有効な活用方法等について提言した。
<p>■中間評価コメント</p> <ul style="list-style-type: none"> ・普及にあたっての総合的なコストも検証してほしい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・モデル自治体を設定したシナリオ解析で、バキューム車・濃縮車のコスト（車両購入費、人件費、燃料費等）及び汚泥処理施設におけるユーティリティ消費に係るコストを比較・評価し、検証した。 ・また、LIME2を活用し、環境負荷に基づいた総合的なコストによる濃縮車導入の効果も評価した。
<p>■中間評価コメント</p> <ul style="list-style-type: none"> ・全体において資源化が一定の重みを持つが、現状では実験室実験のレベルであり、社会実装についてタイムスケジュールを明確にしたい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・社会実装のシナリオとタイムスケジュールは、以下の流れを想定しており、想定通りに進捗している。 <ul style="list-style-type: none"> ①【R3～4年度】長期連続実験により実験室レベルで評価 <ul style="list-style-type: none"> 【R5年度】伊達市の処理場をモデルケースとした環境負荷削減効果の解析等 ②【その後3～5年程度】パイロットプラントによる実証試験 ③【2030年を目標】社会実装 ・実験室レベルで成果を示し、事業者側へのアピールを行ってきた。

<p>■ 中間評価コメント</p> <ul style="list-style-type: none"> ・サブテーマ2の研究では、どのような定量性がある指標での評価を行うのか、下水処理場での処理と比較しての検討が期待される。C、N、Pの収支を把握する必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・定量指標について、嫌気性MBRユニットはバイオガス収率と倍率で評価すると下水汚泥並みの結果となっている。HAP-PNAユニットでは、窒素除去率80%以上、リン除去率70%以上が達成できた。 ・実験ではシステムのC、N、Pの収支を把握できた。
<p>■ 中間評価コメント</p> <ul style="list-style-type: none"> ・指摘があった汚泥性状の一般性（COD 対窒素分など）は、十分に検討する必要があると思われる。 ・出された結果（清掃汚泥の性状）の一般性や普遍性に、やや疑問が残る。 ・対象としている浄化槽の種類（単独、合併）が発表資料では不明であり、性状分析結果の代表性がよくわからなかった。環境政策に生かすアウトプットにするには、汚泥そのものと本技術の成果の定量的な解析結果比較が示されることを望む。 	<ul style="list-style-type: none"> ・汚泥性状については、文献値との比較・検証を行うとともに、他地域での調査を行い、データの精度向上を図った。
<p>■ 中間評価コメント</p> <ul style="list-style-type: none"> ・脱水濃縮車の脱水液を浄化槽に戻す際の水質負荷が評価されていない。濃縮汚泥の性状のCODとTN比が浄化槽に排出されているCODとTN（通常3：1程度）と比べ大きく異なり、脱離液の負荷は大きくなるはずであり、個別浄化槽でのTN、TPの除去はショックロードになる。汚泥脱水レベルを変えると窒素の嫌気性MBRへ持ち込まれる負荷が大きくなり、メタン発酵に支障になる可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・浄化槽に返送される分離液中の溶解性物質濃度は浄化槽の槽内水と同レベルであるため、分離液の窒素負荷は高くはないことが既往の調査結果から明らかとなっている。 ・サブテーマ2の実験は、通常の濃縮汚泥（十分な窒素濃度の汚泥）を用いて行われており、その結果、アンモニア蓄積による悪影響は認められなかった。
<p>■ 中間評価コメント</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本プロジェクトの最終的な目標である網羅的評価に向けての準備・進捗・課題について、もう少し説明されてもよかった。 	<ul style="list-style-type: none"> ・網羅的評価に向けて、モデル自治体を対象としたシナリオを設定した。収集、運搬、処理、資源化に係る環境負荷を定量化し、実際の濃縮車導入の課題を整理した。
<p>■ 中間評価コメント</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証から色々なデータが得られているが、その汎用性等、確認が必要かと思う。なお、本成果を環境行政（国、地方自治体）へ反映すべく、必要な項目は何なのかを挙げ、関係する方々と対応いただくと良いと思う。 	<ul style="list-style-type: none"> ・網羅的評価システムによる評価の精度向上や更なる内容の充実化を図るため、関係者（汚泥収集運搬業者、自治体等）との意見交換を行い、評価システムの改善すべき点（項目等）について整理のうえシステム構築に反映させた。自治体に対し当該システムによるシナリオ解析結果を提示し、当該システムの汎用性や信頼性、環境政策判断への適用可能性について議論した。

<p>■ 中間評価コメント</p> <ul style="list-style-type: none">・誌上および口頭の発表がサブテーマ2からしかないが、他のサブテーマからの発信も期待する。	<ul style="list-style-type: none">・各サブテーマから研究成果発表を行った。
--	--