

Ⅱ. その他の予算による調査研究

1. 下水道を核とした資源循環システムの

広域化・共同化に関する研究

(研究期間 令和3年度～令和5年度)

下水処理研究室 室 長 重村 浩之
研 究 官 高濱 俊平
研 究 員 長 崎 真

1. はじめに

パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略に基づき、温室効果ガスの大胆な削減に取り組むため、再生可能エネルギーの普及拡大及びエネルギーシステムの強靱化に資する分散型エネルギーシステムの構築が求められている。

下水道においては、下水処理過程で発生する汚泥の利活用を推進しているところであるが、更なる持続的な資源循環型社会を目指し、地域全体でより一層の省エネ・創エネ及びリン等のマテリアル回収を推進していく必要がある。そのような背景のもと、下水処理と廃棄物処理を連携させ、廃棄物処理施設で焼却処分されている生ごみ等を下水道に受け入れて、地域全体でエネルギー・マテリアルを効率的に回収し、最終処分量も減らす新たな資源循環システムを構築する必要がある。

そのためには、生ごみ等を下水道に受け入れる場合に下水道施設に与える影響に関する技術的な検討や、資源循環システムの経済性、温室効果ガス削減効果（本稿では環境性という）等の評価手法の確立が不可欠である。本研究は、評価手法を確立し、持続可能な資源循環システムの構築促進を目的とする。

令和4年度は、既往文献や下水処理施設への生ごみ等の地域バイオマス受入れ業務に携わった実績があるメーカー等から情報を収集・整理し、経済性や環境性評価の簡易算定式を作成するとともに、さらに実現性が高いものとなるよう令和3年度に類型化した連携パターンを精査した。

2. ヒアリング等に基づく連携パターンの精査

2. 1 連携パターンの精査方法

表1に示すとおり、令和3年度の整理では、生ごみ受入れを実施している先進事例の多くで、目的として「資源の有効利用（循環型社会）」が挙げられている点を踏まえ、資源利用用途を網羅する観点で分類を検討した。また、先進事例では、生活系ごみと事業系ごみを受入れている場合と、事業系ごみのみを受入れている場合があった点を踏まえ、各分類内で場合分けを行った。令和3年度は、受入れる廃棄物による分類、肥料利用方法の分類等の観点から精査を行った。

2. 2 連携パターンの精査結果

連携パターンの精査結果を表2に示す。まず、下水処理施設へ生ごみ受入れ施設を設置した

実績のあるメーカーへヒアリングした結果、生活系ごみを含むかどうかによらず、設置する施設は変わらないことがわかった。このことから、受け入れる廃棄物による分類は行わないこととした。次に、肥料利用の代表的方法である汚泥を乾燥させる場合と発酵させる場合では、処理工程の違いや性状の違い等の相違点があることを踏まえ、「乾燥汚泥肥料」「発酵コンポスト」に分類した。その他、表記の見直しとして、焼却廃熱に限らず、場内における廃熱全般からの回収・利用とわかるようにした。

表 1 令和 3 年度 連携パターン類型化一覧

連携パターン ン	資源利用用途		脱水汚泥	生ごみ	
				事業系	生活系
1	消化ガス 発電	—	廃棄物処理施設へ搬出	受入れ	—
2				受入れ	受入れ
3			汚泥処理、焼却等	受入れ	—
4				受入れ	受入れ
5	消化ガス 発電	固形燃料	資源化	受入れ	—
6				受入れ	受入れ
7		肥料		受入れ	—
8				受入れ	受入れ
9		リン回収	汚泥処理、焼却等	受入れ	—
10				受入れ	受入れ
11		熱利用	焼却	受入れ	—
12				受入れ	受入れ

表 2 令和 4 年度 連携パターン類型化一覧（精査後）

連携パターン	資源利用用途		脱水汚泥
1	消化ガス発電	—	汚泥処理、焼却等
2			廃棄物処理施設へ搬出
3		固形燃料	— (資源化)
4		乾燥汚泥肥料	
5		発酵コンポスト	
6		リン回収	汚泥処理、焼却等
7		場内廃熱利用	焼却

3. 文献調査・アンケート調査に基づく簡易算定式の作成

3. 1 簡易算定式作成に向けた費用関数等の調査方法

簡易算定式を整理するため、既存の指針・ガイドライン等を対象に生ごみを受け入れるために必要となる前処理設備等の主要設備に関する費用関数及び温室効果ガス排出量原単位の整備状況を確認するとともに、「建設費」や「維持管理費」、「汚泥処分費用の変化」等について、各設備の施工実績のあるプラントメーカー5社及び生ごみ受入れ実績のある5自治体へのアン

ケート調査を実施した。

3. 2 費用関数等の調査結果

調査の結果により作成した経済性評価及び環境性評価に関する簡易算定式を、それぞれ表 3、表 4 に示す。ここでは、代表例として連携パターン 1 について紹介する。経済性評価では、下水側に設置する各主要施設については、既存の費用関数を確認できたため、これらの費用関数をアンケートにより得られた実績データと比較し、妥当性の確認を行った。実績データと同等な値であった費用関数は、デフレーター補正値を係数として追加した簡易算定式を作成した。前処理施設の建設費は、実績データから大きく乖離していたため、アンケートより得られた実績データをもとに回帰分析を行い、簡易算定式を作成した。

一方、廃棄物側における収集・運搬および規模縮小によるコスト縮減効果については、従前の収集方法や廃棄物側の施設計画等の現地条件に大きく左右され、コスト増大あるいは縮減の一定の傾向を見い出すことが困難であることが確認された。

環境性評価では、生ごみ受入れに伴う変化する電力収支等から温室効果ガス排出量の簡易算定式を作成した。

表 3 連携パターン 1 に関する経済性評価の簡易算定式

項目	費用関数	単位	デフレーター 補正値 ※ 1 (α)	参考 ※ 2	備考
前処理施設(建設費)	$Y = 56.054Q_w^{.4491}$	百万円	-	-	
前処理施設 (維持管理費)	$Y = 11.96646Q_w^{.0.7} \times b \times 365 \times C \div 10^6 \times \alpha$	百万円/年	1.04	1	b : 人件費
混合槽(機械)	$Y = 8.26 \times Q_v^{.400} \times \alpha$	百万円	1.19	2	
混合槽(電気)	$Y = 0.836 \times Q_v^{.535} \times \alpha$	百万円			
混合槽(土建)	$Y = 2.01 \times Q_v^{.583} \times \alpha$	百万円			
混合槽 (維持管理費)	$Y = 9.45 \times Q_v^{.493} \times C \times \alpha$	百万円/年			C : 電気使用 量単価
混合槽(補修費)	$Y = 0.184 \times Q_v^{.400} \times \alpha$	百万円/年			
消化槽(機械)	$Y = (0.07359 \times Q_v + 18.54433) \times \alpha$	百万円	1.04	1	
消化槽(土建)	$Y = (0.05367 \times Q_v + 20.30994) \times \alpha$	百万円			
消化槽(維持管理)	$Y = (0.05y + 0.0030474Q_v + 0.4839338) \times \alpha$	百万円/年			y : 機械設備 費
ガスタンク	$Y = 10.4 \times Q_v^{.437} \times \alpha$	百万円	1.19	2	
ガスタンク (維持管理費)	$Y = 0.283 \times Q_v^{.302} \times \alpha$	百万円			
脱水機(機械)	$Y = 0.434 \times Q_{s1}^{.373} \times \alpha$	百万円	1.30	3	
脱水機(土木)	$Y = 0.227 \times Q_{s1}^{.444} \times \alpha$	百万円			
脱水機(維持管理)	$Y = 0.039 \times Q_{s1}^{.595} \times \alpha$	百万円/年			
消化ガス発電機 (機器費)	$Y = (0.039538 \times Q_g + 9.073315) \times \alpha$	百万円	1.04	1	
消化ガス発電機	$Y = 0.0988Q_a T \times \alpha$	百万円/年			T : 年間稼働

(維持管理費)					時間
汚泥処分費用	$Y = Q_s \times B$	円	-	-	
売電収入(下水)	$Y = Q_p \times C$	円	-	-	
廃棄物焼却炉運転	$Y = Q_s \times E \times C$	円	-	-	
売電収入(廃棄物)	$Y = Q_p \times C$	円	-	-	

Y：費用、 Q_w ：生ごみ受け入れ量、 Q_v ：容量、 Q_{s1} ：汚泥量(固形物 1%換算)、 Q_g ：消化ガス量、 Q_s ：汚泥処理量、 Q_a ：ガス発電容量、 Q_p ：発電量、B：汚泥処分単価、C：電力単価、E：処理量当たりのエネルギー使用量、

※1 出典：参考文献 1)

※2 出典：参考文献 2) ～4)

表 4 連携パターン 1 に関する環境性評価の簡易算定式

項目	費用関数	単位	備考
前処理施設運転	$G = 2.1186Q_w^{0.7772}$	t-CO ₂ /年	
再エネ生成 (発電・下水)	$G = Q_p \times a$	t-CO ₂ /年	
廃棄物焼却に伴う 燃料使用	$G = Q_e \times a$	t-CO ₂ /年	
再エネ生成 (発電・廃棄物)	$G = Q_p \times a$	t-CO ₂ /年	
埋め立て処分量	$G = Q_s \times a$	t-CO ₂ /年	埋立でない場合不要

G：温室効果ガス排出(削減)量、 Q_w ：生ごみ受け入れ量、 Q_s ：汚泥処理量、 Q_p ：発電量、 Q_e ：エネルギー使用量、a：温室効果ガス排出量原単位（項目によって異なる）

4. まとめと今後の課題

今回、令和 3 年度に類型化した連携パターンを、さらに実現性が高いものとなるよう精査した。また、既往文献やヒアリング等により得られた費用関数や情報から簡易算定式を策定した。整理した簡易算定式は、これらを組み込んだ簡易検討ツールを作成し、経済性評価及び環境性評価の結果を簡易に算出できるようにする予定である。また、先進事例をモデル都市として簡易検討ツールを用いた連携パターンの選定を行い、実際の連携パターンが選定されるかを検証する予定である。

廃棄物側のコスト削減効果について、本調査研究の過程で意見交換を行っている廃棄物の研究機関からも、一律の評価が難しい点として述べられている。一方で、連携検討を進めるにあたって重要な点であることの情報も得られている。

今後、自治体向けの検討手順書としてまとめていく中で、費用関数により評価できない点に関しては、先進事例における事例や留意点として示す等、引き続き、廃棄物担当部局等の意見も伺いながら、研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) 出典資料の発刊年度を基準とした最新年度の値（R4，12月時点最新年度 2021 年値の値で記載）への補正值
- 2) 下水処理場におけるエネルギー自立化の可能性調査研究技術資料，下水道新技術機構，2019
- 3) 下水処理場へのバイオマス（生ごみ等受入れマニュアル）受入れ，下水道新技術機構，2011
- 4) バイオソリッド利活用基本計画（下水汚泥処理総合計画）策定マニュアル，下水道協会，2004

2. 下水汚泥からの生分解性プラスチック回収可能性に関する研究

(研究期間 令和4年度～令和5年度)
下水処理研究室 室長 重村 浩之
研究官 石井 淑大
研究員 長寄 真

1. はじめに

下水道は、水、下水汚泥中の有機物、希少資源であるリン、再生可能エネルギー熱である下水熱など多くの水・資源・エネルギーポテンシャルを有するが、その利用は未だ低水準である。そのため、国土交通省が平成27年12月（令和5年3月一部改定）に策定した「下水道技術ビジョン」では、下水中の多様な物質の効率的回収に関する技術の開発が技術目標として定められている¹⁾。

そこで本調査では枯渇性資源の使用削減、海洋プラスチックごみ汚染の抑制に資すると考えられる生分解性プラスチックの原料であるポリヒドロキシアルカン酸（PHA）に着目した。下水汚泥からのポリヒドロキシアルカン酸回収は実用化されておらず、下水汚泥の新たな価値の創出に向けて検討が必要であると考えられる。本調査では、余剰汚泥のポリヒドロキシアルカン酸生産ポテンシャルを把握するため、日本全国の下水処理場から採取した様々な処理方式の余剰汚泥試料を対象にポリヒドロキシアルカン酸生産実験及び賦存量の試算を行った。

2. 研究方法

2. 1 試料採取

2022年11月から2023年2月において、国内17か所の下水処理場から25種類の余剰汚泥試料を採取した。本調査では、標準活性汚泥法、嫌気無酸素好気法、嫌気好気活性汚泥法などの様々な処理方式の汚泥試料を採取したため、その内訳を表1に示す。

表1 汚泥試料の処理方式の内訳

標準活性汚泥法（標準法）	5
嫌気好気無酸素法（A2O）	5
嫌気好気活性汚泥法（AO）	5
循環式硝化脱窒法（循環式）	2
ステップ流入式多段硝化脱窒法（ステップ）	3
オキシデーションディッチ法（OD）	4
修正 Bardenpho 法（修正）	1

2. 2 PHA 生産能力試験

採取した汚泥試料について、PHA の生産能力を把握するための PHA 生産実験を行った。まず、携帯用 MLSS 測定装置（笠原理化学工業株式会社 SS-10Z）を用いて、純水で希釈することにより MLSS を 2,000 mg/L 程度に調整した。調整汚泥試料 1 L に対し、炭素源として酢酸ナトリウム（以下、「基質」という）7 g を投入した。基質投入時点を実験開始とし、24 時間曝気し、実験終了とした。実験中の溶存

酸素量は 2~3 mg/L 程度であった。水温は 18~20 ℃程度、pH については試料により大きく異なるが実験開始時は 6.5~7.5 程度、実験終了時は 8.0~9.5 程度であった。

2. 3 分析項目・分析方法

汚泥試料内の PHA として、ポリヒドロキシ酪酸 (PHB)、ポリヒドロキシ吉草酸 (PHV) 及びポリヒドロキシヘキサン酸 (PHH) の含有量を測定した。PHA の分析方法是文献²⁾を参考にアルカリ分解を用いた UV 検出器による液体クロマトグラフ (LC/UV) 法とした。

また、実験前後の MLSS については、先述の携帯用装置に加え、下水試験方法に従い測定を行った。

2. 4 PHA の抽出・精製

PHA 生産実験後の 2 種類の試料について、PHA 抽出・精製を試みた。本調査では、有機溶媒による溶媒抽出法を用いた。得られた生成物の物性評価として、純度 (重量法及び HPLC 法)、融点 (示差走査熱量計 (DSC) 法)、分子量 (ゲル浸透クロマトグラフィー (GPC) 法) の測定を行った。

3. 結果・考察

3. 1 PHA 生産能力

生産能力試験 (24 時間曝気) 後の試験前初期含有量も含めた汚泥試料中の PHA 含有量を PHA 生産能力とし、その結果を図 1 に示す。3 物質 (PHB、PHV、PHH) の合計を積み上げ棒グラフで示している。最大値は試料 18 の 340 mg/L であり、最小値は試料 12 の 14 mg/L であった。

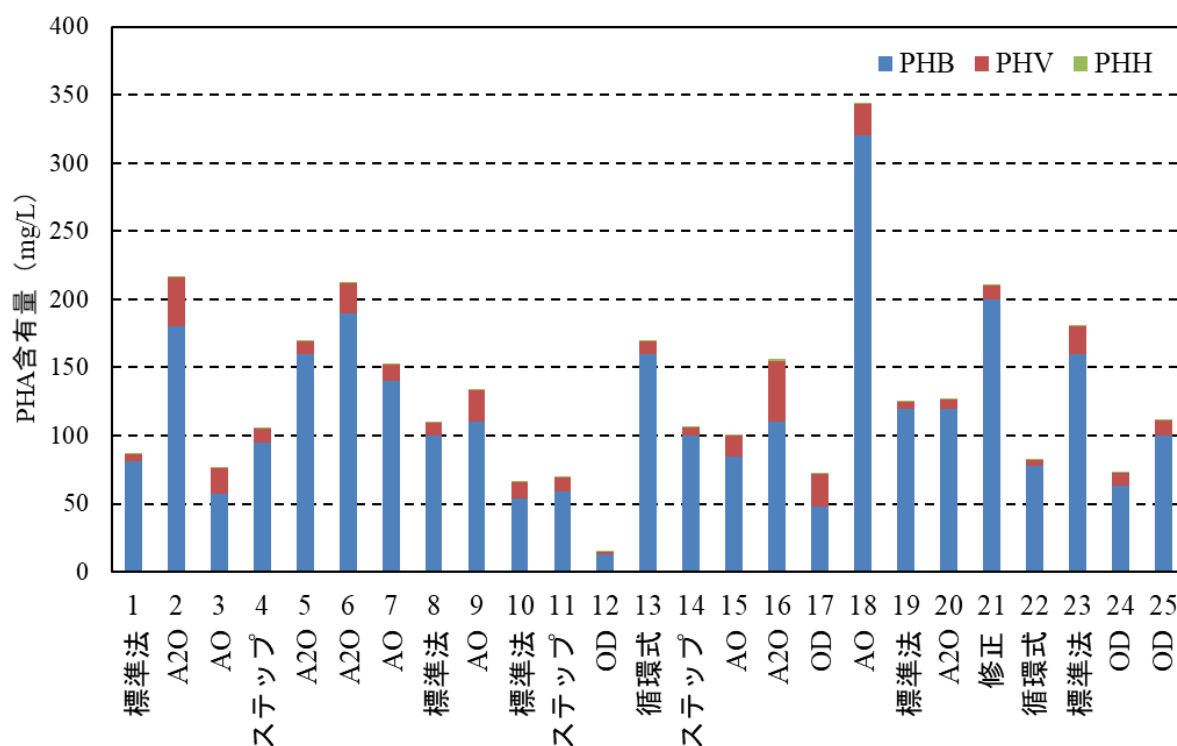


図 1 PHA 含有量分析結果

また、各物質の割合は試料 3、16、17 を除き PHB が 80%以上を占めていることが確認された。PHH については 0~1%であり、ほとんど生産されていないことが確認された。

また、MLSS あたりの PHA 含有率（%（mgPHA/mgMLSS*100））を試算し、処理方式毎に比較した結果を図 2 に示す。処理方式毎の平均値も併せて上部に示す。なお、全試料の平均は 6.50%であった。各処理方式の平均値を比較すると A2O、AO の生産能力が一番高く、次いで循環式、標準法、ステップ法、OD 法の順になった。一方で他の文献^{3),4)}では、A2O より標準法の方が、生産能力が高いと評価しており、本研究とは異なる結果が出ている。本研究では各処理方式の試料数は最大でも 5 にとどまっており傾向を見出すためのデータが十分に揃っていないと言え、引き続きデータを収集していく必要があると考える。

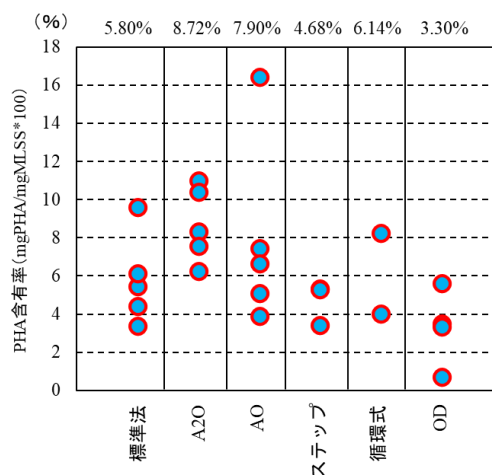


図 2 処理方式毎の PHA 含有量の比較

3. 2 賦存量の試算

PHA 含有率を用いて、国内の下水汚泥の年間発生量あたりに換算した賦存量を簡易的に試算した。試算にあたり、下水道統計（令和 2 年度版、日本下水道協会）のデータを活用した。下水道統計に掲載されている最終沈殿池汚泥（以下、終沈汚泥）（=余剰汚泥）発生量とその含水率から固形物分を算出し、各処理方式の PHA 含有率平均値を乗ずることで各下水処理場の PHA 生産ポテンシャルを試算した。処理方式を複数有する処理場については単純に発生量を按分し、それぞれの処理方式の平均値を乗じた。本調査では、収集していない処理方式を有する処理場及び複数処理場の汚泥を集約処理している汚泥処理施設に関しては、全試料の平均値を用いた。また、終沈汚泥のデータが無く、混合汚泥のデータが有る場合は、統計に掲載されている全ての最初沈殿池汚泥と終沈汚泥の発生量の比から、混合汚泥中の終沈汚泥分の量を推定し、各処理方式の平均値を用いて試算した。上記の条件を踏まえ試算した結果、PHA の賦存量は約 97,000 t と試算された。2019 年度における国内の生分解性プラスチック出荷量は 4,300 t⁹⁾であり、下水道資源としての PHA 生産ポテンシャルは十分に高いと考えられる。

3. 3 PHA 抽出・精製

3. 2 より下水道資源としての PHA 生産ポテンシャルは十分に高いと考えられるが下水汚泥から生産された PHA の質を確認するため、本研究では、PHA 生産実験後の汚泥からの PHA 抽出・精製も試みた。抽出・精製した PHA の純度、分子

表 2 抽出・精製された PHA の物性評価

試料名	純度 (%)	数平均分子量 (Mn)	融点 (°C)
A	38	5.2×10^3	171.5
B	120	3.9×10^3	171.1

量、融点の分析結果を表 2 に示す。なお、試料 A は図 1 で示す試料 19、試料 B は試料 20 に対応する。純度について、PHA をアルカリ熱分解処理を行い、アルカリ溶液中の PHA の重量を精製された PHA の重量で除して算出している。精製された試料 A では 38%と低くなっている

が、精製された PHA の性状がフィルム製の強靱性を持っておりアルカリ熱分解処理では完全に溶解しなかったことから、本来はより高い値であると考えられる。試料 B については 120% と 100%を超えているが、PHA 濃度の測定にあたり、アルカリ熱分解した際の分解生成物から濃度換算係数を用いて間接的に測定しているため、過大に評価した可能性がある。

過去の文献⁶⁾と比較すると、融点については同様の結果が得られているが、数平均分子量が約 10 倍程度小さかった。文献⁶⁾では PHA 含有率が約 50%まで蓄積させた汚泥試料を用いており、本研究では約 6%の試料を使用したため、不純物も含まれていたと考えられ、高品質な PHA を生産するためには PHA 含有率を上げる必要がある。

4. まとめ

本調査により得られた知見を以下に示す。

- ・ PHA 生産能力を処理方式毎の平均値を比較した結果、A2O、AO の生産能力が一番高く、次いで循環式、標準法、ステップ法、OD 法の順となった。一方で、他の文献と異なる結果となり、データ数が最大でも 5 であるためデータの収集が必要である。
- ・ 国内の下水汚泥の年間発生量あたりに換算した賦存量を簡易的に試算した結果、約 97,000 t と試算され、2019 年度における国内の生分解性プラスチック出荷量と比較すると下水道資源としての PHA 生産ポテンシャルは高いと考えられる。
- ・ 下水汚泥から生産された PHA の質を確認するため、汚泥試料からの PHA の抽出・精製を試みた結果、純度や数平均分子量に過去の文献と大きく隔たりがあり、PHA 含有率の違いと考えられ、高品質の PHA 生産には含有率を上げる必要がある。

参考文献

- 1) 下水道技術ビジョン，平成 27 年 12 月（令和 5 年 3 月一部改訂）
- 2) アルカリ分解を用いた活性汚泥一時貯蔵物質 PHA の測定法，坂本 俊彦，第 50 回下水道研究発表会講演集，2013
- 3) 余剰汚泥をバイオ触媒としたポリヒドロキシアルカン酸の生産，池 道彦，井上 大介，日本水処理生物学会誌・第 59 巻，2023
- 4) 実下水処理活性汚泥の生分解性プラスチック生産能力調査、高畠ら，環境工学研究論文集・第 36 巻，1999
- 5) バイオプラスチック概況，日本バイオプラスチック協会，令和 2 年 5 月
- 6) 余剰汚泥に蓄積したポリヒドロキシアルカン酸の高効率回収法の検討，井上ら，第 58 回下水道研究発表会講演集，2021