

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

3-1907 人口減少・高齢化地域における一般廃棄物の
持続可能な処理システムの提案
(JPMEERF20193007)
令和元年度～令和3年度

Sustainable Systems of Municipal Solid Waste Management in Depopulated and Aging Areas of Japan

<研究代表機関>

国立研究開発法人国立環境研究所

<研究分担機関>

京都大学

石川県立大学

(株)エックス都市研究所

みずほリサーチ&テクノロジーズ(株)

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ. 成果の概要」の図表番号は「0. 通し番号」としております。なお、「Ⅱ. 成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ. 成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号. 通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和4年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 将来の一般廃棄物発生量及び性状予測	20
(京都大学)	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-2 資源化システムモデルの構築及びインベントリ分析	35
(国立研究開発法人国立環境研究所、石川県立大学)	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-3 資源化システムの事業運営に関する検討	50
(株エックス都市研究所)	
要旨	

7. 研究開発目的	
8. 研究目標	
9. 研究開発内容	
10. 結果及び考察	
11. 研究目標の達成状況	
12. 引用文献	
II-4 資源化システム導入効果の評価・・・・・・・・・・・・・・・・	63
(みずほリサーチ&テクノロジーズ株)	
要旨	
13. 研究開発目的	
14. 研究目標	
15. 研究開発内容	
16. 結果及び考察	
17. 研究目標の達成状況	
18. 引用文献	
III. 研究成果の発表状況の詳細	77
IV. 英文Abstract	80

I. 成果の概要

課題名 3-1907 人口減少・高齢化地域における一般廃棄物の持続可能な処理システムの提案

課題代表者名 河井 紘輔 (国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環領域 主任研究員)

重点課題 主：【重点課題⑨】3Rを推進する技術・社会システムの構築

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

行政要請研究テーマ (行政ニーズ) (3-5) 循環型社会形成に資する環境・経済・社会の統合的取組に関わる新たな評価指標体系及び経済効果等の評価基盤の構築

研究実施期間 令和元年度～令和3年度

研究経費

73,170千円 (合計額)

(各年度の内訳：令和元年度：26,020千円、令和2年度：24,837千円、令和3年度：22,313千円)

研究体制

(サブテーマ1) 将来の一般廃棄物発生量及び性状予測 (京都大学)

(サブテーマ2) 資源化システムモデルの構築及びインベントリ分析 (国立研究開発法人国立環境研究所)

(サブテーマ3) 資源化システムの事業運営に関する検討 (㈱エックス都市研究所)

(サブテーマ4) 資源化システム導入効果の評価 (みずほリサーチ&テクノロジーズ㈱)

研究協力機関

研究協力機関はない。

本研究のキーワード

人口減少、高齢化、一般廃棄物、紙おむつ、可燃ごみ、官民連携、焼却、生物乾燥、エネルギー

1. はじめに（研究背景等）

人口減少・高齢化地域における市町村は財政逼迫により一般廃棄物処理事業の経費縮減を迫られる可能性が高い。「自区内処理の原則」により、多くの市町村が「直営(自ら処理施設を運営)」をしていて、多額の公共事業費を要する。老朽化した焼却施設を更新することが財政的に困難な市町村の数は人口減少・高齢化に伴って今後も増加することが見込まれる。

一般廃棄物の主な処理方法は「直接焼却」で、焼却ごみには生ごみ(食べ残しや調理くず等)が混合されているのが一般的である。廃棄物を循環資源と捉える場合には素材に応じた処理・資源化方法を採用するべきで、エネルギー回収の観点では、生ごみの処理・資源化を再考すべきである。

人口減少・高齢化地域では市町村の財政逼迫が懸念され、そのような地域で一般廃棄物処理事業を持続的に実施するためには、抜本的に事業運営を見直す必要がある。自治体が単独で処理システムを維持するのは限界があり、今後は様々な主体が連携し合って新たな資源化事業を構築することが求められる。資源化事業を広域的に導入することにより地域循環共生圏が形成されると考える。

2. 研究開発目的

本研究は、人口減少・高齢化地域において一般廃棄物の持続可能な処理システムを提案することを目的とする。現在は「直接焼却」、「自区内」、「直営」で処理されている焼却ごみの処理システムを見直して新たな資源化システムを描出し、様々な主体との連携を前提とした新たな資源化事業を検討する。資源化事業が広域的に普及する場合の導入効果を評価し、地域循環共生圏の形成を例示する。

3. 研究目標

全体目標

人口減少や高齢化等の影響を考慮した一般廃棄物処理システムのBaUシナリオおよび対策シナリオを4つのサブテーマにおいて設定・評価し、持続的な処理システムを提案する。サブテーマ1では社会的側面から一般廃棄物の質と量を将来予測し、他のサブテーマに必要な基盤データを整備する。サブテーマ2では技術的側面から「直接焼却」、「自区内」、「直営」処理に代わる資源化システムを描出し、ライフサイクルインベントリを分析する。サブテーマ3では財政的側面から資源化システムを実現させるための事業運営体制を検討し、実現に向けた具体的方策を提示する。サブテーマ4では将来的に資源化事業が広域的に普及する場合の効果や地域循環共生圏の形成状況を明示する。サブテーマ1～3の中で示すBaUシナリオから描出される自治体レベルの地域特性を、サブテーマ4での地域レベルの地域類型化に反映させるとともに、それぞれの地域類型に応じた対策シナリオをサブテーマ1～3で個別に評価し、さらにサブテーマ4で包括的・広域的に評価する。

サブテーマ1	将来の一般廃棄物発生量及び性状予測
サブテーマリーダー /所属機関	大下 和徹/京都大学
目標	将来人口統計、一人当たり発生量の推移を踏まえて将来の一般廃棄物発生量を予測する。高齢化・人口減少が顕在化している自治体を対象に焼却ごみの物理組成調査を実施する。焼却ごみの素材別（物理組成の小・中分類）の性状（三成分(可燃分、水分、灰分)、発熱量、塩素濃度、バイオマス含有量)を既往文献から整理するとともに、上記物理組成調査に連動して性状分析を行う。人口減少や高齢化等の将来の社会変化によるごみ発生や分別行動への影響を構造化する。将来の社会変化を説明変数として、システム思考を用いてごみ発生や分別行動への影響を踏まえた焼却ごみの発生量及び性状（被説明変数）の予測モデルを設計する。
サブテーマ2	資源化システムモデルの構築及びインベントリ分析
サブテーマリーダー /所属機関	河井 紘輔/国立研究開発法人国立環境研究所
目標	焼却ごみの「直接焼却」、「自区内」、「直営」処理に代わる資源化システムを描出し、資源化システムのライフサイクルインベントリを分析するためのツールとして資源化システムモデルを設計する。BaU処理システムと資源化システムのライフサイクルインベントリを比較評価する。将来想定される残渣ごみの組成を踏まえて生物乾燥（Bio drying）及び分級技術の適正運転に係る技術上の要点を示すとともに、地域へのシステム導入可能性評価に資する技術上のパラメータを提示する。
サブテーマ3	資源化システムの事業運営に関する検討
サブテーマリーダー /所属機関	秦 三和子/(株)エックス都市研究所
目標	これまでの各市町村の財政、職員体制等の一般廃棄物処理事業に関する情報を整理し、特に三重県内の市町村に関して将来の概況を予測する。サブテーマ4で整理する地域類型に応じて、サブテーマ2で提示する資源化システムをベースとしたバウンダリ設定と官民連携による事業運営体制の在り方を示す。また、資源化事業の持続可能な運営に向けた事業手法、官民連携の形態、財源、制約とその対応策等の具体的方策を提示する。
サブテーマ4	資源化システム導入効果の評価
サブテーマリーダー /所属機関	高木 重定/みずほリサーチ&テクノロジーズ(株)
目標	サブテーマ2で提案する資源化システムを評価するための指標を検討する。人口減少、高齢化、財政力指数、一般廃棄物処理事業経費等に着眼して時間軸に沿って全国の市町村を類型化する。農地、民間処理業者、動脈産業（鉄鋼業、製紙業、セメント業）等の全国分布を示し、堆肥、液肥、代替燃料等資源物の需要分布を示す。将来的にサブテーマ2及び3で検討した資源化事業が広域的に普及する場合の環境性、経済性、社会性に関する効果や地域循環共生圏の形成状況を評価する。

4. 研究開発内容

4. 1 将来の一般廃棄物発生量及び性状予測（サブテーマ1）

（1）人口減少・高齢化地域における可燃ごみの性状調査

人口減少・高齢化がすでに進行しつつある三重県南伊勢町において、可燃ごみの性状を分析した（分析組成：[1]一般厨芥、[2]手つかずの食料品、[3]大人用紙おむつ、[4]子供用紙おむつ、[5]紙類、[6]食品ラップ、[7]容器包装プラスチック、[8]製品プラスチック、[9]木竹草木類、[10]ガラス類、[11]金属類、[12]繊維類、[13]ゴム皮革類、[14]その他）。「クリーンセンターなんとう」内のごみピットより可燃ごみを採取し、組成別に分類し、湿重量を測定した。各組成の水分を測定後、[10][11]を除く12種類について乾燥破碎を行い、均一化した。各組成サンプルの炭素、水素、窒素、塩素、硫黄、可燃分、灰分、発熱量、バイオマス炭素割合を分析した。

（2）紙おむつの使用実態、将来の使用済み紙おむつの排出量推計

オンラインでのアンケート調査（以下、「ネットリサーチ」という。）を通じて、大人用紙おむつおよび子供用紙おむつの使用実態を明らかにした。大人用紙おむつの使用実態調査では、要介護者を要支援1、要支援2、要介護1、要介護2、要介護3、要介護4、要介護5の7区分に均等に割り付け、合計1,000サンプルを回収とした。子供用紙おむつの使用実態調査では、子供を0歳児、1歳児、2歳児、3歳児、4歳児の5区分に均等に割り付け、合計1,000サンプルを回収とした。

ネットリサーチ結果を用いて使用済み紙おむつの排出原単位（g/人/日）を算出したが、算出方法として、「紙おむつ製品（大人用はアウターとインナー）の使用枚数」、「紙おむつを装着した状態での尿の排泄量」、「紙おむつを装着した状態での便の排泄量」を区別し、さらに、「昼間」と「夜間」を区別した。また、子供用は年齢別の5区分、大人用は要介護度別の7区分に分けて算出した。

将来の使用済み紙おむつの排出量は、算出した使用済み紙おむつの排出原単位に、将来想定される紙おむつ使用者数を乗じて推計した。各自治体における要介護度別の要介護者数は厚生労働省が統計情報として公開しており、将来もその割合は一定として、各自治体における将来の要介護者数及び紙おむつ使用者数を推計した。ただし、本研究の対象者は第1号被保険者（65歳以上）とした。以上により、将来の可燃ごみ中に占める使用済み紙おむつの割合を推計した。なお、使用済み紙おむつ以外の可燃ごみの排出原単位は自治体ごとに算出したが、2013年から2017年までの平均とし、将来も一定とした。

（3）将来の可燃ごみの質と量の予測

三重県南伊勢町等で調査した可燃ごみの性状データや、省庁および自治体の統計データをもとに、プラスチック資源循環戦略や食品ロスの低減等の政策動向を考慮して、将来の可燃ごみの質と量を予測する詳細推計モデルおよび簡易推計モデルを構築した。詳細推計モデルは京都市を事例として、京都市における家庭系および事業系のごみ細組成調査結果を用いて、さらに家庭系可燃ごみと事業系可燃ごみを区別して将来の可燃ごみの質と量を推計した。一方、一般的な自治体においては、京都市のような詳細なデータの蓄積が乏しい。そこで、京都市以外の自治体においては、環境省の一般廃棄物処理実態調査結果（環整95号による6区分の可燃ごみ組成データ等）を用いて、家庭系および事業系の区別なく将来の可燃ごみの質と量を予測する簡易推計モデルを構築した。詳細推計モデルおよび簡易推計モデルともに、将来の可燃ごみの排出原単位を算出する際に、BaUごみ組成と、対策ごみ組成（ごみ減少シナリオ）を設定した。可燃ごみを「使用済み紙おむつ」と「使用済み紙おむつ以外の可燃ごみ（以下、「その他可燃ごみ」）」に分け、使用済み紙おむつに関しては、BaUごみ組成および対策ごみ組成ともに環境省のガイドラインに準じて将来の排出量を推計した。その他可燃ごみに関しては、BaUごみ組成では排出原単位を将来も一定と設定し、対策ごみ組成ではごみ組成区分ごとに対策導入量および対策導入時期を考慮して排出原単位を設定した。

4. 2 資源化システムモデルの構築及びインベントリ分析（サブテーマ2）

（1）可燃ごみ処理に伴うGHG排出量のシナリオ評価

京都市を事例として、将来の可燃ごみ処理に係るGHG排出量をBaUシナリオ(S1)と4つの対策シナリオ（ごみ減少シナリオ(S2)、+バイオマスプラスチック導入シナリオ(S3)、+発電効率向上シナリオ(S4)、メタンコンバインドシステム積極導入シナリオ(S5)）を設定して試算した。特にS3～S5については、S2のごみ減少シナリオに、それぞれの施策を順に加えていくことを想定して試算を行った。これら5つのシナリオでは、電力のCO2排出係数は将来的にも変化しないとしたが、別途、再生可能エネルギー導入による電力のCO2排出係数の減少シナリオ(S6)を考慮し、上記5つのシナリオと組み合わせた試算を行い、それぞれS1-6、S2-6、S3-6、S4-6、S5-6として標記した。サブテーマ1で構築した将来の可燃ごみの質と量を予測する詳細推計モデルを用いて、処理対象とする可燃ごみを推計し、サブテーマ1で実施した可燃ごみの性状分析結果（バイオマス炭素割合等）を用いてGHG排出量を算出した。

（2）将来の可燃ごみ処理方法とエネルギーの有効利用

再生可能エネルギーの導入が進み、2050年には電力に伴うGHG排出係数は16 g-CO₂/kWhとサブテーマ1で試算された。将来、焼却発電によるGHG排出削減効果はほぼゼロになることが想定され、人口減少・高齢化地域における将来の可燃ごみの処理方法を選択する際に、GHG排出量（および削減量）を評価指標することが必ずしも適切ではない可能性がある。一方、今後はエネルギーの価値（コスト）が一層高まることも想定され、ごみが保持しているエネルギー（発熱量）を無駄なく有効利用することが求められる。そこでサブテーマ2では、人口減少・高齢化地域における処理シナリオごとの可燃ごみの「エネルギー有効利用量」を評価し、エネルギーの有効利用の観点で選択すべき可燃ごみの処理方法を提案した。後述するサブテーマ4でも同様の指標を用いて評価している。

サブテーマ1で検討したように、プラスチック資源循環戦略や食ロス対策等の政策動向を踏まえて、今後は資源化されるごみの割合が高まり、可燃ごみの組成が変化することが予想される。そこで、サブテーマ1で構築した、将来の可燃ごみの質と量を予測する簡易推計モデルを用いて、2045年の三重県29自治体における可燃ごみの質と量を推計した（BaUごみ組成、対策強化ごみ組成）。なお、ここでの対策強化ごみ組成は、サブテーマ1で設定した対策ごみ組成よりもさらに資源化が進み、紙類および布類はプラスチック類と同等レベルの資源化が行われるとした。自治体が単独で焼却処理を行う場合（以下、「単独焼却」という。）、2045年時点で処理能力が70 t/日以下になる小規模自治体の可燃ごみ組成の平均をサブテーマ2の評価に用いた。

可燃ごみの処理シナリオは、BaUシナリオとして「単独焼却シナリオ」、対策シナリオとして「広域焼却シナリオ」、「RDF化シナリオ」、「生物乾燥シナリオ」とした。生物乾燥の工程としては以下の通りである。可燃ごみを破碎して木くず等と混合した後に、温度と通気量を調整してごみ中の有機物を一定期間、好氣的に生物分解させる。有機物の分解熱を使ってごみを乾燥させ、生物乾燥後の処理物を機械で分級することでフラフ状のごみ由来燃料（以下、「SRF」という。）が製造され、製紙工場やセメント工場等で燃料として利用される。昨今の急速な脱炭素化の流れ、とりわけ脱石炭の点から製紙工場等はこれまで制約条件となっていた塩素濃度を撤廃し、一般廃棄物由来のSRFの需要が拡大しつつある。国内では生物乾燥の唯一の事例である香川県三豊市の施設にヒアリング調査およびアンケート調査を実施し、施設内で利用される電力消費およびユーティリティ消費に関する情報を収集した。

RDF化は、可燃ごみを破碎し、灯油等を用いた熱乾燥により可燃ごみの水分を除去し、燃料化する技術で、一般的にはRDF専焼発電所で利用されてきた。近年、高い処理コストを理由に、またRDF発電所の閉鎖に伴い、可燃ごみのRDF化を停止する施設が増えてきた。サブテーマ2では、三重県および石川県の複数のRDF化施設に対してヒアリング調査およびアンケート調査を実施し、施設内で利用される電力消費およびユーティリティ消費に関する情報を収集した。

焼却施設の最新動向を把握するために、2010年から2020年までに新設された154の焼却施設を対象に施設でのインベントリ・仕様に関するアンケート調査を実施した（回答率：59.7%、92施設）。本研究

では、アンケート調査に回答された各施設のごみ処理量、発電効率、電力消費量、ユーティリティ消費量（用水、消石灰、キレート剤）等のデータを利用した。

エネルギー有効利用量は、可燃ごみ1 kgを処理する際に消費されるエネルギーをマイナス換算、可燃ごみ1 kgを処理することで回収・供給・利用されるエネルギーをプラス換算した。

マイナス換算するエネルギー量：焼却に伴う電力および燃料消費量、RDF化に伴う電力および燃料消費量、SRF化（生物乾燥）に伴う電力および燃料消費量、輸送に伴う燃料消費量

プラス換算するエネルギー量：広域焼却に伴う電熱供給量、RDF発電所における電熱供給量、セメント工場における電熱供給量、製紙工場における電熱供給量

（3）将来想定される可燃ごみの組成に準じた生物乾燥の実証試験

将来想定される可燃ごみの性状に生物乾燥技術が適用可能かを検証するため、ラボスケールおよびパイロットスケールでの生物乾燥の実証試験を実施した。まず、可燃ごみの湿潤性などの特性に対して最適な生物乾燥の運転方法をラボスケールで検証した。サブテーマ1で提示した三重県南伊勢町での可燃ごみの組成情報を参考に、実験用の廃棄物を調合し、直径250 mm x 高さ700 mmの円筒容器に廃棄物を投入した上で、15分間通気、45分間無通気の間欠運転を実施した。生物乾燥および分級の効率性に影響を与えるとされる廃棄物の水分保持性能を評価するとともに、水分の蒸発メカニズムについて考察した。さらに、紙おむつ（図0.1）が全体の10%となるよう調整したうえで、同様の生物乾燥実験を実施し、紙おむつによる影響や処理特性を検討した。

サブテーマ1での簡易推計モデルで予測した将来の可燃ごみの組成（BaUごみ組成、対策強化ごみ組成）に対する生物乾燥の適用性を検証するため、パイロットスケールでの生物乾燥の実証試験を2度（BaUごみ組成、対策強化ごみ組成）実施した。香川県三豊市で実験用のごみを調達してBaUごみ組成と対策強化ごみ組成に調合し、20 m³の生物乾燥実証槽に3,500 kgの可燃ごみおよび同量の副資材を投入した（図0.2）。2週間の運転の後、処理物を選別・分級して、燃料画分の性状を評価した。

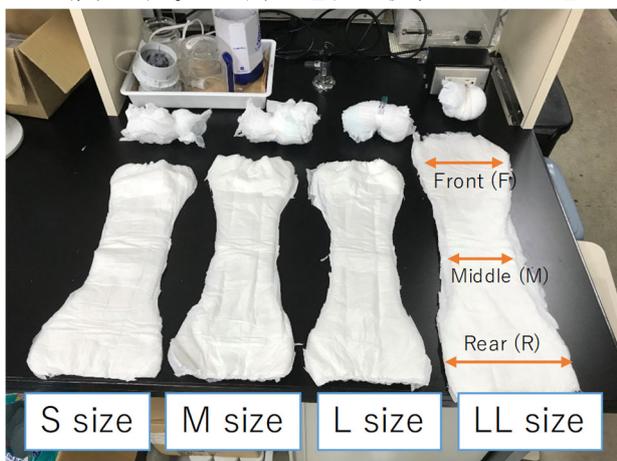


図0.1 ラボスケールの実験で用いた紙おむつ



図0.2 パイロットスケールでの生物乾燥実験

4. 3 資源化システムの事業運営に関する検討（サブテーマ3）

（1）エネルギーの有効利用の観点での広域化の限界

現状技術では70t/日未満の小規模焼却施設においては発電が困難であり、この状況は将来も続くと思定される。2019年度の時点で単独焼却を行っている自治体数は351（21%）で、広域焼却を行っている自治体数は1,309の自治体（79%）であった。サブテーマ2では、単独焼却シナリオに比べて広域焼却シナリオにおいてエネルギーの有効利用量が高まると提示された。それを受けてサブテーマ3では、人口減少およびごみ減少が進む2045年において処理規模が70t/日に満たない自治体の数を算出した。ここで対象とする自治体は、2019年度の時点で単独焼却あるいは広域焼却のどちらかを行っている自治体で、今後も現行の処理体制で焼却処理を継続することとした。なお、施設更新は考慮せず、あくまで可燃ごみの処理量（推計）に着目した。

(2) 人口減少・高齢化地域における将来の可燃ごみ処理に係る事業費の試算

国内でごみ処理が行われている行政単位（市町村または一部事務組合）に着目すると、人口2万人～5万人規模が最も多く、施設規模に換算すると20～50t/日となる。このような地域では2045年までに人口が年間1%～2%減少し続けると予測されている。そこで40t/日（約10,000t/年）の施設規模（処理能力）の人口減少・高齢化地域を想定し、今後20年間の可燃ごみの処理事業費および処理単価の経年変化を試算した。処理事業シナリオとして、①自治体が自ら焼却施設を整備・運営する方式（以下、「焼却・直営方式」という。）、②自治体が自ら生物乾燥施設を整備・運営する方式（以下、「生物乾燥・直営方式」という。）、③自治体が民間業者に焼却処理を委託する方式（以下、「焼却・民間委託方式」という。）の3つを設定した。表3.2に事業費試算の条件を示す。

表3.2 可燃ごみ処理の事業費試算の条件

個別費目	設定・算出方法・留意事項	
比較対象期間	・工事期間及び稼働後20年間（2022年着工、2024～2043年度）	
焼却対象ごみ量	・直接焼却 + 焼却以外中間処理（堆肥、飼料、メタン、燃料） + 残渣焼却（粗大、その他資、その他）	
施設規模	・40t/日（処理対象ごみ量で10,000t/年程度を想定）	
建設費	・文献及び事業者ヒアリング調査等を元に、焼却4,110百万円、生物乾燥2,500百万円と設定 ・循環型社会形成推進交付金（交付率1/3）、起債充当率90%、償却期間20年間（3年据置）	
運営費	人件費	・文献及び事業者ヒアリング調査等を元に、焼却16名、生物乾燥7名と設定
	用役費	・光熱水・薬品費。うち固定費の割合を設定（焼却：50%、生物乾燥：24%）し、変動費部分を従量変動
	点検・補修費	・焼却：個別施設計画のひな形を使用 ・生物乾燥：20年平均で設備費の4%、ただし10年経過時点で大規模修繕（設備費の10%程度）を実施
	残渣処理費	・焼却灰（処理量の10%）、固形燃料化不適物（処理量の5%）について運搬費、処分費を計上
	販売収益	・焼却（売電収益等）：40t/日規模のため収益なしと設定 ・生物乾燥（SRF）：輸送費込みで0円/kgと設定

(3) 民間委託を含めたごみ処理事業形態の選択フローの作成

一般廃棄物処理事業における官民連携の事業方式を調査し、民間側の関与の程度に応じた公共側と民間側のコスト負担の構造と、事業運営に及ぼす人口減少の影響を整理した。一般廃棄物の中間処理における民間委託の事例のうち、建替工事期間中等の短期的な委託以外の事例を公表資料から抽出し、委託に至るまでの経緯、委託処理の成立要件、想定されるリスクと対策の考え方等について、関係者へのヒアリング調査を行い、特徴を整理した。また、ヒアリング調査結果を踏まえて、民間委託を含めたごみ処理事業形態についての標準的な選択フローの作成を試みた。合わせて、自治体が民間委託方式を検討するに当たって検討すべき評価項目の案を整理した。

4. 4 資源化システム導入効果の評価（サブテーマ4）

(1) 可燃ごみの広域的な焼却処理や生物乾燥の導入効果

焼却処理施設の運営上の課題を踏まえ、各自治体を類型化し、2045年の各自治体における可燃ごみの処理方法の変更（単独焼却から広域焼却あるいは生物乾燥へ）と、運営方法の変更（収集運搬および中間処理の直営から民間委託へ）を提案した。サブテーマ1、サブテーマ2、サブテーマ3での地域特性に関する検討結果を踏まえ、人口減少・高齢化地域における焼却施設の運営上の課題（地域特性）と、課題を評価するための指標を表0.1に抽出した。「施設寿命到来時期」と「2045年の処理規模」は「処理方法の維持あるいは変更」を判断するための指標とし、「財政力指数」は「運営方法の維持あるいは変更」を判断するための指標とした（図0.3）。「処理方法の維持」、「処理方法の変更」、「運営方法の維持」、「運営方法の変更」の組合せを4つの類型とし、各自治体を類型化した。処理方法についてはBaUシナリオ、広域焼却促進シナリオ、生物乾燥促進シナリオを設定し、類型③および④に該当する自治体は単独の焼却処理から広域的な焼却処理あるいは単独の生物乾燥へ変更することとした（表0.2）。運営方法の変更が必要な自治体（類型②および④に該当する自治体）では、施設の運営方法を

変更することにより処理コストが一律で7.3%削減されるとした。ただし、生物乾燥施設については類型に関わらず民間で運営されると想定した。焼却処理に係るコストはサブテーマ3で検討した40 t/日の処理規模におけるコストを踏まえ、処理規模から処理単価を算出する関数を設定した。資源化システム評価モデルを構築し、将来の三重県および全国における可燃ごみ処理に係るエネルギーの有効利用量および処理コストを推計した。

表 0.1 焼却処理施設の運営上の課題と指標

課題（地域特性）	指標
施設の老朽化・更新	施設寿命到来時期 [年]
人口減少による施設当たりのごみ処理量の減少	2045年の処理規模 [t/日]
運営コストの確保	財政力指数 [-]

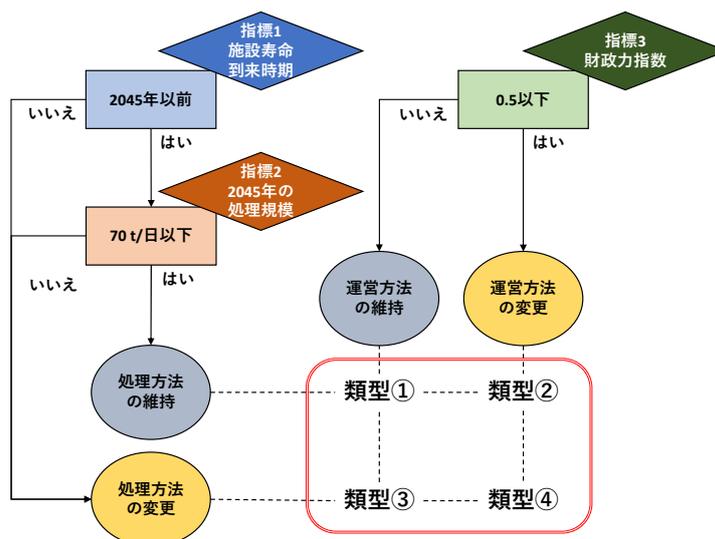


図 0.3 処理方法および運営方法に係る指標と判定基準、自治体の類型化

表 0.2 処理方法に関するシナリオの概要

シナリオ	類型	概要
BaUシナリオ	すべての類型	<ul style="list-style-type: none"> 焼却施設の寿命が到来した時点で施設を更新する。 更新時は可燃ごみ排出量に応じて処理規模を変更する。
広域焼却促進シナリオ	類型①および②	<ul style="list-style-type: none"> 焼却施設の寿命が到来した時点で施設を更新する。 更新時は可燃ごみ排出量に応じて処理規模を変更する。
	類型③および④	<ul style="list-style-type: none"> 焼却施設の寿命が到来した時点で廃止し、廃止後は広域化拠点で可燃ごみを集約的に焼却処理する。
生物乾燥促進シナリオ	類型①および②	<ul style="list-style-type: none"> 焼却施設の寿命が到来した時点で施設を更新する。 更新時は可燃ごみ排出量に応じて処理規模を変更する。
	類型③および④	<ul style="list-style-type: none"> 焼却施設の寿命が到来した時点で廃止し、廃止後は単独で生物乾燥（SRF化）施設を整備する。 製造された SRF は製紙工場あるいはセメント工場で利用される。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

5-1.1 将来の一般廃棄物発生量及び性状予測（サブテーマ1）

（1）人口減少・高齢化地域における可燃ごみの性状調査

三重県南伊勢町における可燃ごみの性状分析結果を表 1.3 に示す。バイオマス炭素割合に関して、先行研究ではプラスチック類が0.9%、紙おむつが41%と報告されていたが、本研究ではプラスチック類が5~30%、紙おむつは約50%であった。プラスチック類の中でもラップはバイオマス炭素割合が30%と大きくなったが、これは厨芥の付着物由来の影響が大きいと考えられる。なお、物理組成を考慮してバイオマス炭素割合を加重平均して可燃ごみ全体のバイオマス炭素割合を推計したところ、74.7%であ

った。紙おむつの低位発熱量は、福岡県リサイクル総合研究事業化センターが3,800 kJ/kgと報告していたのに対し、本研究では子供用は3,810 kJ/kgとほぼ同じであったが、含水率が小さかった大人用は

表1.3 ごみ組成ごとの特性値分析の結果

区分	三成分			固形分中組成					高位発熱量 (kJ/kg-dry)	低位発熱量 (kJ/kg)	バイオマス 炭素割合(%)
	水分(%)	可燃分(%)	灰分(%)	C(%-dry)	H(%-dry)	N(%-dry)	燃焼性S(ppm)	揮発性Cl(ppm)			
一般厨芥	75	20.8	4.15	44.3	6.43	3.37	7280	9960	16400	1890	100
手つかずの食料品	49.5	48.8	1.7	45.5	6.97	2.23	7220	11800	17800	6900	100
大人用紙おむつごみ	61.5	34.2	4.35	52.7	8.42	0.583	1240	4870	24300	7260	54
子供用紙おむつごみ	72.1	24.4	3.52	51.7	8.1	0.838	1310	11400	21000	3810	51
紙類	31.6	57.9	10.5	37.8	5.59	0.18	1940	1960	13300	7360	98
ラップ	45.1	53.2	1.69	48.6	7.53	0.378	1160	348000	24300	11300	30
容器包装プラ	28.8	67.1	4.19	74.7	12.9	0.338	4960	7600	37800	24200	15
製品プラ	6.1	88.7	5.2	73.3	12.1	0.485	1970	35300	36300	31200	5
木竹草木類	47.4	48.4	4.25	44.6	5.97	0.845	3260	2040	17800	7510	100
ガラス類	1.2	0	98.8	0	0	0	0	0	0	0	-
金属類	7.8	0	92.2	0	0	0	0	0	0	0	-
繊維類	20.7	78.1	1.21	54.9	5.43	1.57	7380	1520	22800	16800	75
ゴム皮革類	9.1	76.2	14.7	54.5	7.05	1.76	263	108000	24800	19600	80
その他	26.6	51.8	22.9	27.2	4.01	1.25	2160	8070	9210	4720	0

7,260 kJ/kgとそれほど小さくはならなかった。

(2) 紙おむつの使用実態、将来の使用済み紙おむつの排出量推計

三重県29自治体における将来の使用済み紙おむつの排出量を推計した。2045年における三重県全域での使用済み紙おむつ排出量は2015年に比べて約17%増加し、使用済み紙おむつ発生量のうち約76%は大人用であると推計された。将来的に29自治体すべてにおいて高齢化率（65歳以上の人口割合）が上昇するが、南部における老年人口は2015年以降、すでに減少傾向に転じている。大人用の使用済み紙おむつ発生量は北部では増加傾向で、南部では減少傾向であることがわかった。人口減少により、焼却ごみの発生量も大幅に減少する。焼却ごみに占める使用済み紙おむつの割合はすべての自治体で上昇する見込みで、北部では10%程度、南部では15~20%程度を占める自治体もあると推計された（図0.4）。

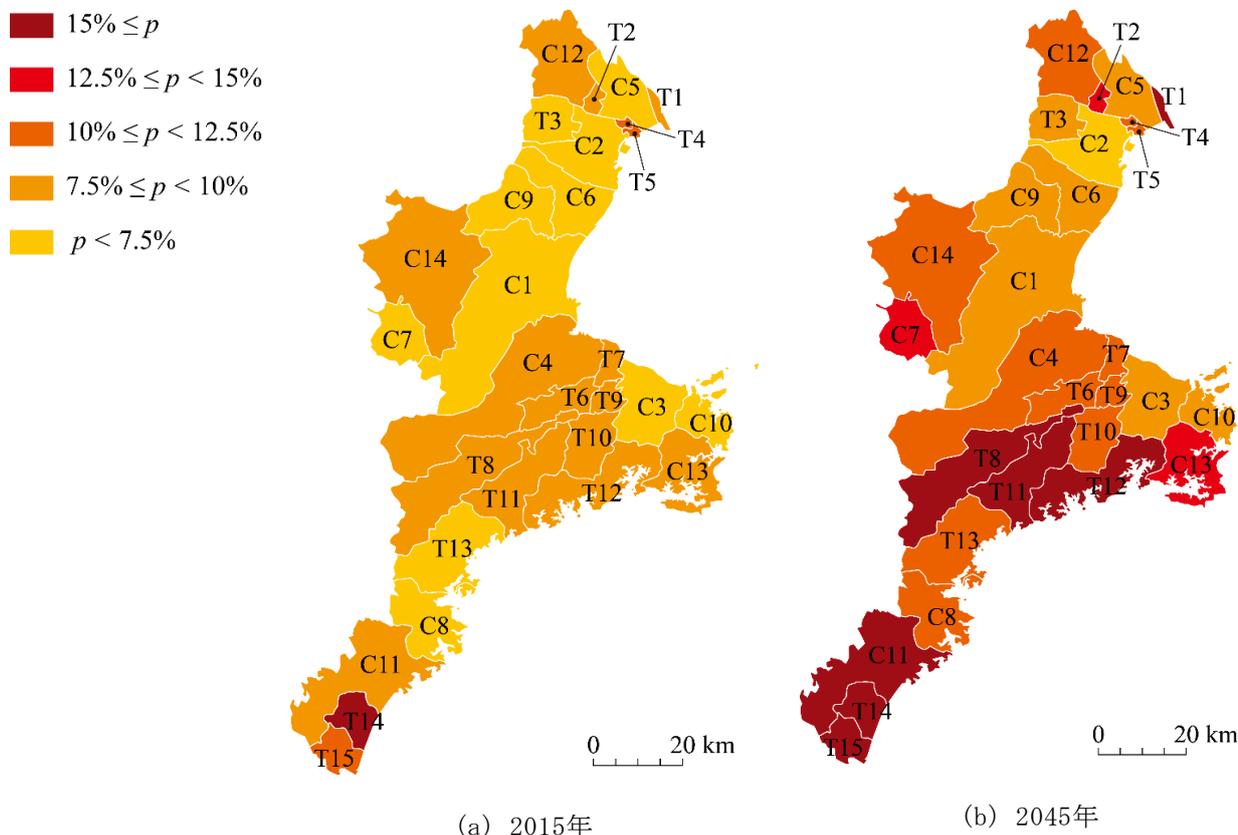


図0.4 三重県29自治体における可燃ごみに占める使用済み紙おむつの割合：(a) 2015年、(b) 2045年

(3) 将来の可燃ごみの質と量の予測

将来の可燃ごみ排出量を詳細推計モデルと簡易推計モデルを用いて推計した。京都市における将来の可燃ごみの排出量（対策ごみ組成）を推計したところ、詳細推計モデルでは34.8 t/年（2025年）から26.8万 t/年（2050年）まで減少すると予測され、簡易推計モデルでも27.4 t/年（2050年）まで減ると予測された。京都市のような大規模自治体では、将来の人口減少・高齢化によるごみ排出量への影響は限定的である一方、南伊勢町のような小規模自治体では、BaUごみ組成であっても人口減少・高齢化による可燃ごみ排出量への影響が大きく、さらに対策ごみ組成では大幅に可燃ごみ排出量が減少することを示した（図0.5）。今後簡易推計モデルの精度を上げていくためには、環整95号に記載されているごみ質分析の方法をこれからの社会・政策動向を踏まえて再考する必要があると考えられ、具体的にはごみ組成区分、乾ベース、縮分について目的に応じた方法を提案するのが望ましい。

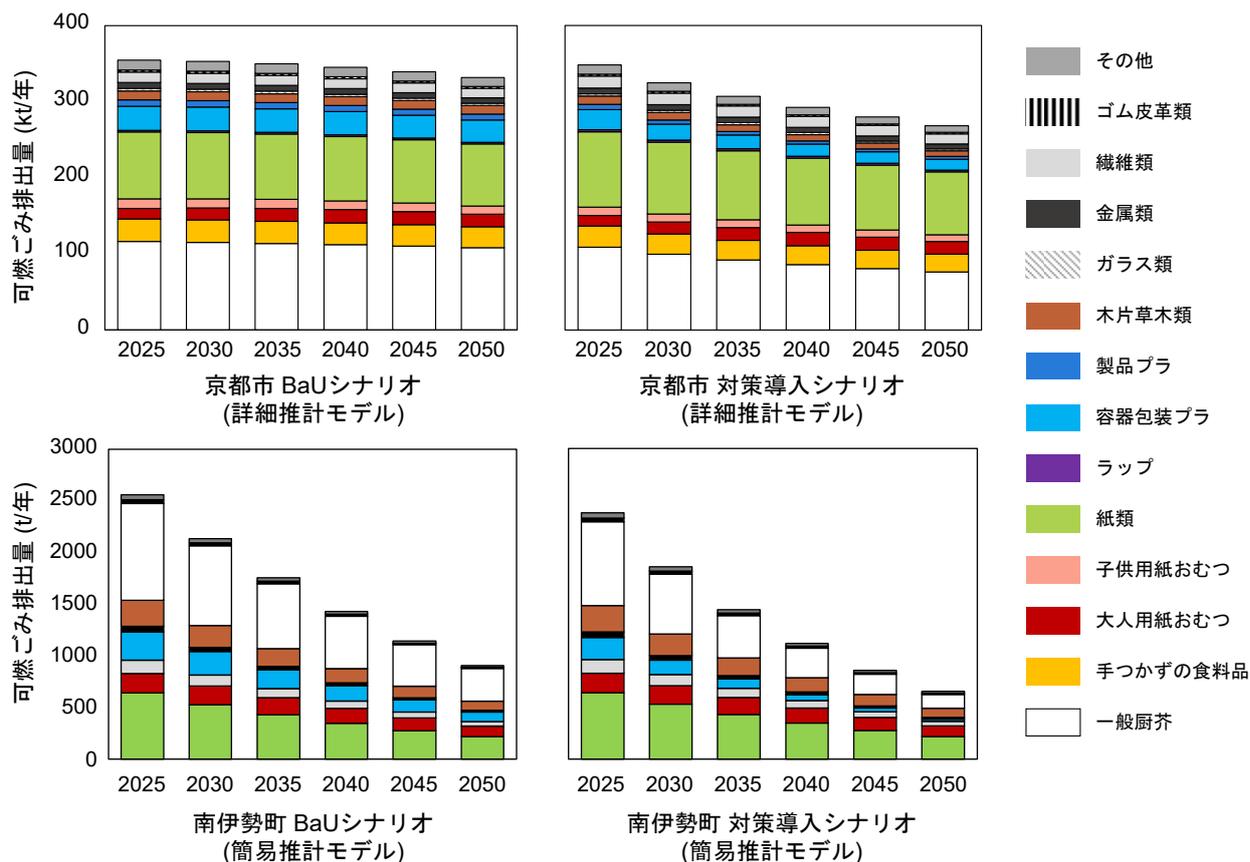


図0.5 将来の可燃ごみ排出量の推計（上：京都市、下：南伊勢町）

5-1.2 資源化システムモデルの構築及びインベントリ分析（サブテーマ2）

(1) 可燃ごみ処理に伴うGHG排出量のシナリオ評価—京都市を事例にして—

再生可能エネルギー導入により2050年まで電力のCO₂排出係数が減少していくとしたシナリオ(S1-6～S5-6)におけるGHG排出量（CO₂換算）を図2.1に示す。どのシナリオにおいても、電力消費によるCO₂排出量、発電電力によるCO₂削減量は2050年にはほぼゼロになることが確認された。すなわち、2050年における焼却施設およびメタンコンバインド施設からのGHG排出量は非バイオマス由来（化石由来）のCO₂直接排出量となり、廃棄物中に含まれる非バイオマス成分量に依存することになる。本研究の結果として、GHG削減の面からは、ごみ発電の寄与は将来非常に小さくなることが試算された。しかし、焼却発電は、太陽光や風力などの自然依存型再生可能エネルギーに比較して、安定した発電が可能であり、優位性がある上、CCS稼働にも電力が必要であり、発電電力はここにも充てることできる。したがって、コスト面も含めて、焼却発電は依然として重要であると考えられる。さらに、今後は焼却施設からの熱供給についても考える必要がある。

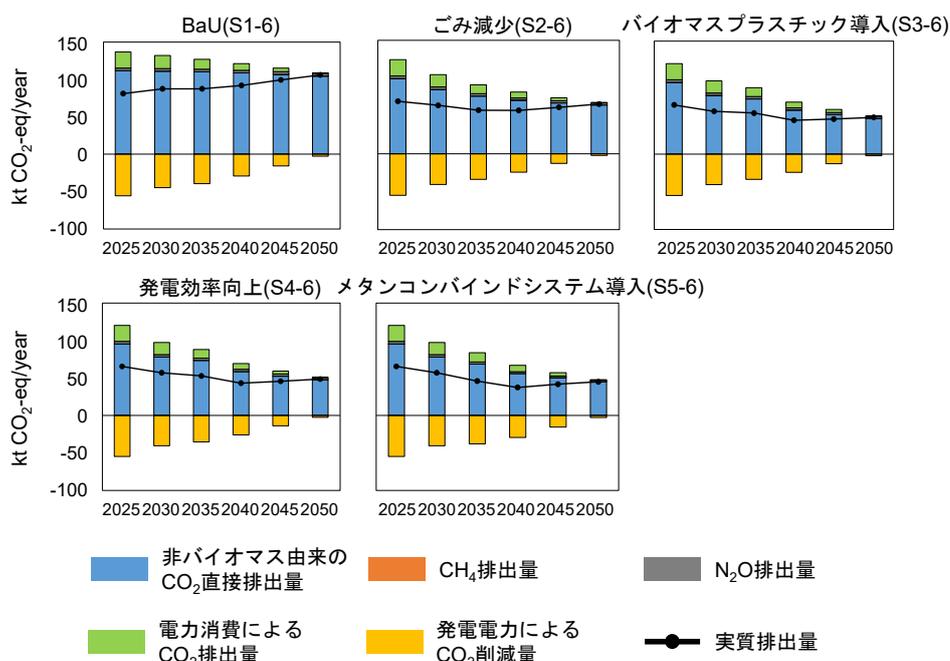


図2.1 各シナリオのGHG排出量予測結果

(2) 将来の可燃ごみ処理方法とエネルギーの有効利用

将来、可燃ごみの組成が変化しても、可燃ごみの生物乾燥・SRF化がエネルギーの有効利用の観点で最も有効であることを示した(図0.6)。将来の可燃ごみ(BaUごみ組成)の低位発熱量は11,262 kJ/kgと推計され、最もエネルギー有効利用量が高かったのは生物乾燥シナリオであることがわかり、有効利用率は43.8%から60.7%であった。可燃ごみの生物乾燥・分級工程で水分や不適物を除去し、SRFをセメント工場や製紙工場に化石燃料と同等の燃料として供給できる。RDF化では熱乾燥・成形工程でのエネルギー消費が高く、RDFの発電のみではエネルギー有効利用量はマイナスとなってしまう、発電に加えて余熱利用を行っても、有効利用率は12.9%であった。近年、可燃ごみのRDF化を停止した自治体が多くみられるが、エネルギーの観点からも非効率であったと本研究で立証された。発電に加えて余熱利用を最大限行う焼却施設で広域的に可燃ごみを処理する場合(広域焼却シナリオ)、SRFを製紙工場で燃料利用する場合のエネルギー有効利用量に近づく。対策強化ごみ組成でもSRF化が最もエネルギー効率が良かったが、有効利用率はBaUごみ組成よりも低く、35.5%から50.3%であった。これは、可燃ごみ中の厨芥類の割合が高くなったことにより、生物乾燥・分級工程でSRFの重量が可燃ごみの28%に減少することが主な要因である。対策強化ごみ組成では可燃ごみの低位発熱量が下がったこともあり、エネルギーの有効利用の観点では可燃ごみをRDF化する利点は見いだせなかった。

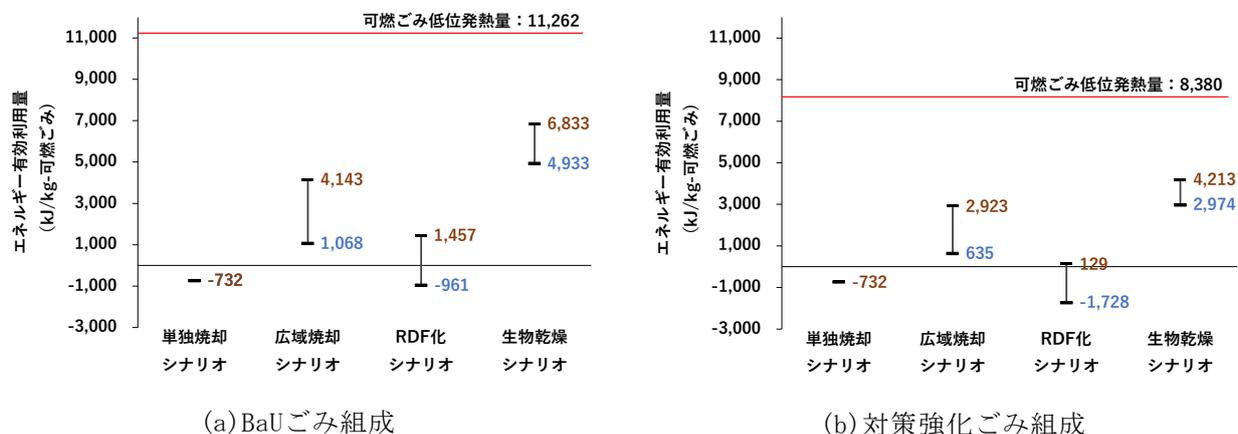


図0.6 将来の可燃ごみ処理シナリオとエネルギー有効利用量：(a) BaUごみ組成、(b) 対策強化ごみ組成

(3) 将来想定される可燃ごみの組成に準じた生物乾燥の実証試験

ラボスケールでの生物乾燥実験を行った結果、初期含水率が高いほど温度の最高値は低くなる一方で、炭素分の分解量は増加する傾向が示された（図0.7）。また、温度が減少に転じるタイミングに前後して水分の蒸発が活発となっていて、炭素の分解に伴う生成熱の一部が潜熱（蒸発熱）として消費されていたことが推測される。廃棄物の水分保持性能が有機物の分解によって変化したことで、保持していた水分の蒸発が促されるというメカニズムが示唆された。

使用済み紙おむつが全体の10%となるように調整した可燃ごみを用いて同様の運転条件下で生物乾燥処理を実施したところ、温度上昇が確認されなかった。充填密度および通気量を抑えて生物乾燥実験を実施した結果、温度上昇が確認された。適切な処理条件を設定すれば、可燃ごみ中の使用済み紙おむつ割合が増加しても、生物乾燥は滞りなく実施できると言える。一方、紙おむつ中の高分子吸収材をバインダーとしたごみ同士の結着が確認され、こうした状況が生物乾燥後の選別および燃料化プロセスに与える影響について検討する必要があると示唆された。

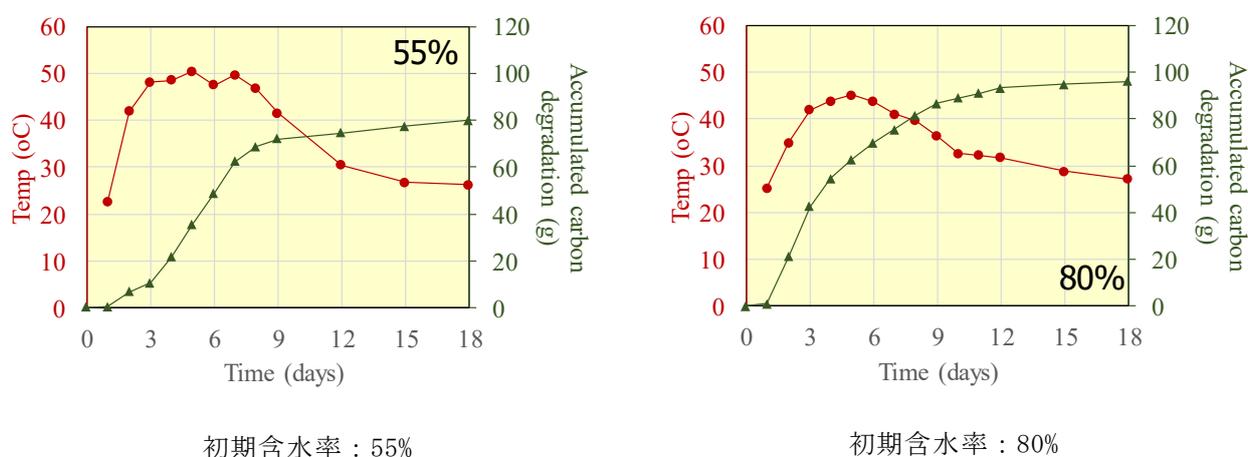


図0.7 生物乾燥における温度および炭素分解量の経時変化

将来の可燃ごみのBaUごみ組成および対策強化ごみ組成を用いてパイロットスケールで生物乾燥実験を実施した結果、いずれの組成に関しても速やかな温度上昇が示された。使用済み紙おむつ割合のお増が温度上昇に影響しないことが、実証規模でも確認されたほか、可燃ごみの組成が大幅に変化した場合でも、生物乾燥が適用可能であることが示された。水分に関して、BaUごみ組成では71%、対策強化ごみ組成では64%の削減効果が確認された。一方、固形分重量に関して、BaUごみ組成では12%、対策強化ごみ組成では6%程度の削減効果があり、生物乾燥が分解に基づく物質の削減よりも乾燥に主眼が置かれていることが改めて示されたものといえる。投入ごみに対する燃料画分の分級割合は、BaUごみ組成では25%、対策強化ごみ組成では37%と見積もられた。対策強化ごみ組成では、BaUごみ組成に比べて紙おむつ割合が多いため、ごみ同士の結着により、燃料画分に移行するごみの割合が高くなったことが推測される。ただ、燃料画分の発熱量は十分な燃料品質を確保しており、選別不良等を引き起こすには至っていないことが示唆された。

5-1.3 資源化システムの事業運営に関する検討（サブテーマ3）

(1) エネルギーの有効利用の観点での広域化の限界

今後の人口減少およびごみ減少により、2045年には588（44%）の自治体において、単独焼却あるいは広域焼却に関わらず、発電可能な70t/日の処理規模を満たさない可燃ごみ量になることがわかった。今後、単独での70t/日の処理規模を確保できる自治体は、政令指定都市や中核市などの一部に限られる。人口10万人未満の自治体では広域焼却あっても70t/日の処理規模を満たすことができず、70t/日の処理規模の確保を目指す場合、際限のない広域化を必要とすることが想定され、広域化処理の限界も認識すべきであると言える。

(2) 人口減少・高齢化地域における将来の可燃ごみ処理に係る事業費の試算

40 t/日の施設規模（処理能力）の人口減少・高齢化地域を想定し、今後20年間の可燃ごみの処理事業費の経年変化を試算した結果、人口減少に伴って可燃ごみの排出量は減少するにも関わらず、直営方式の場合の処理事業費は増加する傾向が見られた（図3.6）。また、処理事業費を可燃ごみ1トンあたりに換算した処理単価（円/t）は、人口減少率が大きいほど増加した（図3.7）。この理由として、処理施設の運営費のうち固定費の影響が大きいことが挙げられた。固定費は、建設費、人件費、維持管理費と、用役費（光熱水・燃料費）のうち契約料金等であり、ごみ量に関わらず一定額必要となる。今後大幅な人口減少が進む地域では、民間委託の有効性が示唆された。ただし、可燃ごみの受入が可能な民間焼却施設の今後の稼働状況、生物乾燥方式による民間施設の事業化可能性も含め、処理委託単価の変動については留意する必要がある。

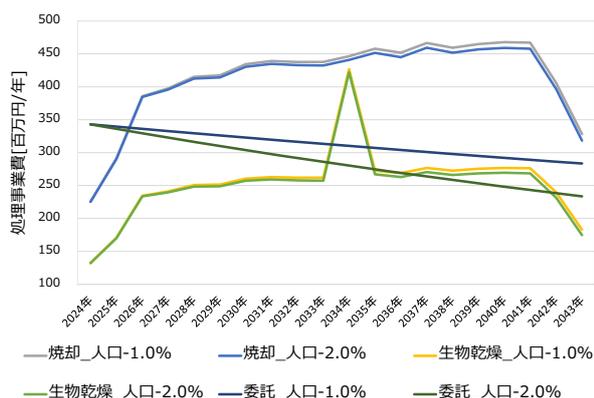


図3.6 人口減少によるごみ処理事業費への影響（処理・運営方式別）

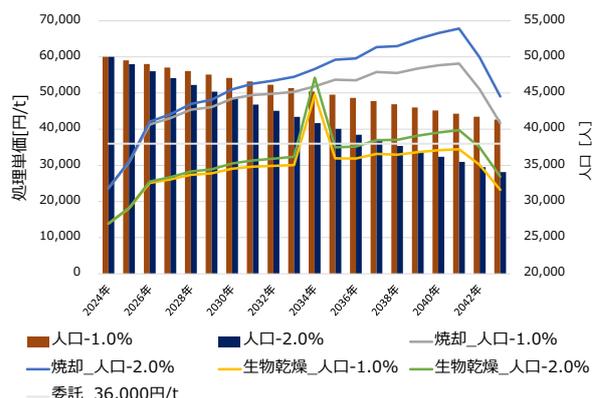


図3.7 人口減少によるごみ処理単価への影響（処理・運営方式別）

(3) 民間委託を含めたごみ処理事業形態の選択フローの作成

民間施設への一般廃棄物の中間処理委託事例を整理すると、当該自治体内（自区内）の民間施設に委託する事例や、当該自治体の一般廃棄物を処理することを前提に、計画段階から自治体が関与して施設を整備している事例などがあつた。また、委託先での中間処理方法は焼却以外（堆肥化、メタン化、燃料化等）であることが多かった。

民間委託を含めたごみ処理事業形態についての標準的な選択手順として、試行的に図3.9に示すフローを作成した。図3.9中の「民間委託の可能性検討」では、制度上は、当該自治体内（自区内）に民間施設がある場合は市町村が一般廃棄物処理の許可を付与することで委託処理が可能となる。また、当該自治体外に一般廃棄物処理の許可を有する民間施設がある場合は、立地自治体との事前協議で受入許可を得ることにより委託可能である。なお、地域外からの一般廃棄物の受入にあたっては、排出自治体に対して、環境保全負担金等（目安として1,000円/t程度）の支払いを条例等で定めている例がある。いずれのケースでも、一般廃棄物処理基本計画において、民間への委託処理の可能性を明記しておくことが必要である。

ごみ処理の民間委託を行うには、一般廃棄物処理責任の履行と、議会承認が必要であるが、議会承認を得るためには、環境保全、経済性、産業振興等、民間委託の効果を定量的に示すことが必要である。また、廃棄物処理法の「市町村の一般廃棄物処理責任」は、施行令第4条第9号で基準が示されており、民間委託を制限するものではない。

周辺に適切な一般廃棄物処理施設が存在しない場合、立地自治体の受入許可が得られない場合（施設立地自治体以外からは受け入れないことを地元との協定で定めている事例がある）、あるいは民間施設との委託条件（価格、量、その他）が合意できない場合は、老朽化した既存施設の修繕等により現状の処理を維持しながら、また周辺自治体等への暫定的な処理委託等をしながら、対象エリア（広域化等）、処理計画等を再検討することとなる。この結果、多分別により資源化を促進し、可燃ごみ量を極

小化した上で近隣の清掃工場への処理委託を行い、自らは焼却処理施設を持たないという判断をしている例もある（図3.9中では左側の流れ：上勝町、大崎町・志布志市等）。

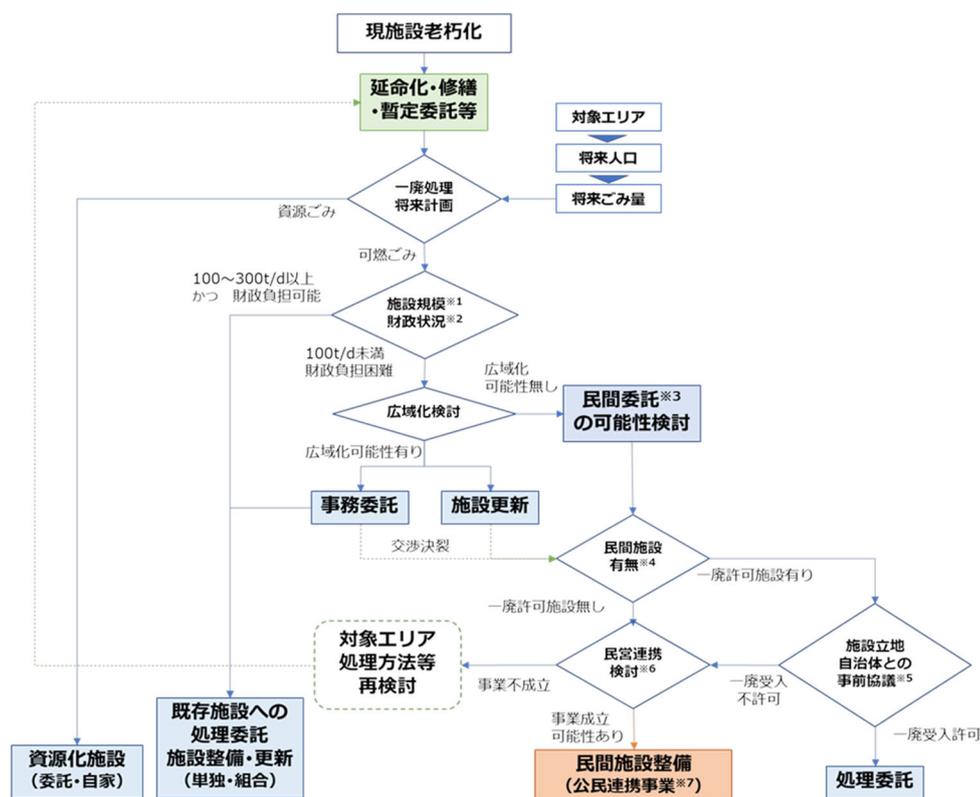


図3.9 民間委託を含めたごみ処理事業形態の選択フロー（試案）

5-1.4 資源化システム導入効果の評価（サブテーマ4）

（1）三重県における可燃ごみの広域的な焼却処理や生物乾燥の導入効果

三重県の各自治体における可燃ごみの処理について、2045年の各シナリオを対象に推計したエネルギー有効利用量と処理コストの推計結果を図0.8に示す。広域焼却あるいは生物乾燥が促進することによってエネルギー有効利用量が増加し、広域焼却促進シナリオではBAUシナリオ比で63%増加、生物乾燥促進シナリオでは、BaUシナリオ比111%増加すると推計された。生物乾燥によって製造されたSRFがセメント工場で利用される場合には、エネルギー有効利用量は1,024 TJ/年まで高まり、BaUシナリオ比で148%増加する。

処理コストに関しては、BaUシナリオで約167億円/年であるところ、広域焼却促進シナリオでは約145億円/年（13%減）、生物乾燥促進シナリオでは約156億円/年（7%減）と推計された。いずれのシナリオにおいても追加的な輸送コストが計上されるが、処理単価が高い既存の焼却処理施設の廃止によるコスト削減が主な削減効果とみられる。類型③や④に分類された自治体（いなべ市、菰野町、亀山市、多気町、鳥羽市、志摩市、南伊勢町、大台町、大紀町、紀北町、尾鷲市、熊野市、御浜町、紀宝町）では、いずれのシナリオにおいてもBaUシナリオよりも処理コストが削減される結果となり、人口減少・高齢化が進行する地域では、焼却処理の広域化あるいは生物乾燥の導入を積極的に検討するのが望ましいことがわかった。

（2）全国における可燃ごみの広域的な焼却処理や生物乾燥の導入効果

2045年における可燃ごみの資源化事業の日本全国への広域的な導入による効果について、エネルギー有効利用量の推計結果および処理コストの推計結果を図0.9に示す。シナリオごとのエネルギー有効利用量（ネット）は、BaUシナリオでは18,817 TJ、広域焼却促進シナリオでは35,284 TJ、生物乾燥

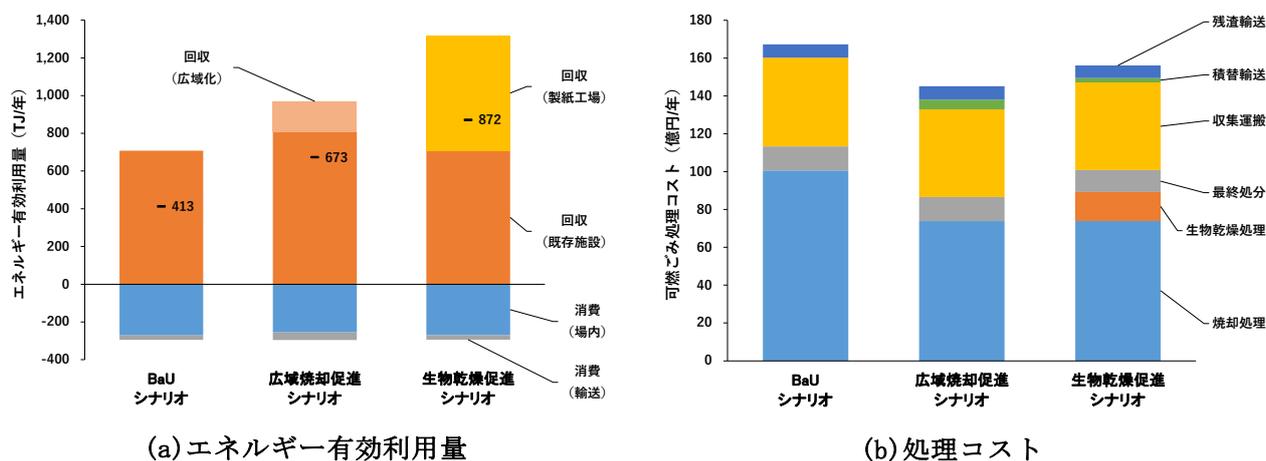


図0.8 三重県における可燃ごみ資源化シナリオの導入効果：(a)エネルギー有効利用量、(b)処理コスト

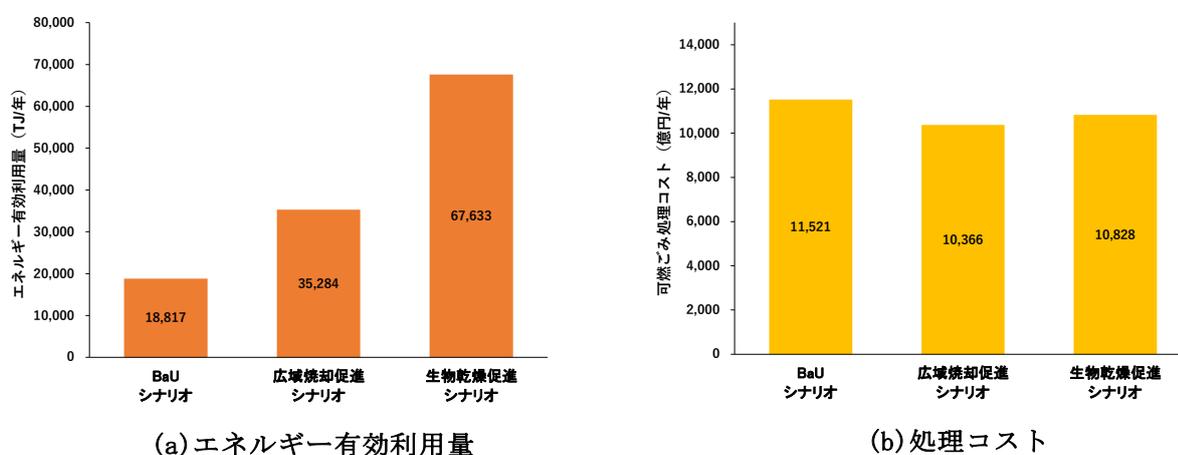


図0.9 全国における可燃ごみ資源化シナリオの導入効果：(a)エネルギー有効利用量、(b)処理コスト

促進シナリオでは67,633 TJと推計され、三重県での推計と同様に、生物乾燥を実施する場合は製紙工場やセメント工場といった動脈産業へのSRF供給によってエネルギー有効利用量が大幅に向上した。可燃ごみの処理コストに関して、BAUシナリオでは1兆1,521億円、広域焼却促進シナリオでは1兆366億円（10%減）、生物乾燥促進シナリオでは1兆828億円（6%減）と推計された。

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

人口減少・高齢化によって使用済み紙おむつの排出量が増加する地域でも減少する地域でも、可燃ごみ中に占める使用済み紙おむつの割合は高まることが分かった。特に人口減少・高齢化が進行する地域では、使用済み紙おむつの割合は20%程度に上昇することも想定され、資源循環や衛生処理の観点で、使用済み紙おむつを適切に収集、処理する必要がある。今後、使用済み紙おむつの排出量にも着目して一般廃棄物処理計画を策定する自治体では、本研究で構築した使用済み紙おむつの排出量推計モデルを（地域特性を考慮した上で）活用することが可能である。

これまで、多くの自治体において将来の一般廃棄物排出量を推計する際には、排出原単位（1人当たりの排出量）を定数とする事例が多かった。しかし、プラスチックに係る資源循環の促進等に関する

法律（プラ新法）の施行や、脱炭素社会の実現に向けた消費と生産の構造改革といった大きな潮流の変化が起こりつつあり、自治体が将来の一般廃棄物排出量を推計する場合には、排出原単位の大幅な変化を前提条件として推計する必要がある。本研究では、プラスチック資源循環戦略や食品ロス対策等を考慮して将来の可燃ごみ排出原単位を予測する詳細推計モデルおよび簡易推計モデルを構築した。今後の対策およびその導入量を修正しつつ、また地域特性を考慮して、本研究で構築した推計モデルを個別自治体の一般廃棄物排出量の将来推計に活用することが見込まれる。

これまで、焼却施設における発電や余熱利用、製紙工場やセメント工場等動脈産業におけるRDF・RPF・SRFの燃料利用は、化石由来エネルギーを代替するとしてGHG排出削減効果が認められている。しかし、脱炭素社会が実現した2050年ごろには、化石由来エネルギーの消費が極限まで低下すると想定され、廃棄物を燃料利用することによるGHG排出削減効果は見いだせない。一方で、資源化できない可燃ごみは引き続き燃料として利用する価値があり、エネルギーの有効利用の観点で廃棄物の燃料利用を評価すべきと考える。本研究で提案した「エネルギー有効利用量」は廃棄物が産み出すエネルギーから廃棄物処理で消費するエネルギーを差し引いたもので、廃棄物処理を評価する新たな指標として、行政だけでなく廃棄物処理に関わる民間の廃棄物処理業者が活用することが見込まれる。

人口減少・高齢化が進行する地域においては、エネルギーおよびコストの観点で単独焼却の非効率性を指摘した。さらに、将来の可燃ごみ組成が変化しても、生物乾燥技術および分級技術が適用可能であることをラボスケールおよびパイロットスケールで実証した。今後、単独焼却から生物乾燥・SRF化へ処理システムを変更することによって効率的な廃棄物処理事業に転換することが可能な地域もあり、そのような地域では生物乾燥・SRF化を導入することが見込まれる。

ごみ処理（特に中間処理）の民間委託は憚られると考える自治体は少なからず存在する。本研究では民間委託による処理コストの削減効果を示すとともに、民間委託を含めたごみ処理事業形態の選択フローを作成した。人口減少・高齢化が進行することによって税収が減少し、財政がひっ迫する地域が増加するが、そのような地域ではごみ処理の民間委託を選択肢のひとつとして捉えるべきで、本研究での民間委託の選択に関する取りまとめ結果を客観的情報として活用することが見込まれる。

人口減少・高齢化地域における可燃ごみの性状を分析し、輸送効率の観点からかさ密度についても検討した。その過程で、国内および海外におけるSRF/RDFのかさ密度の分析方法に関する規格をレビューし、ISO/TC 300 (Solid recovered materials, including solid recovered fuels) WG4にてSRFのかさ密度分析に関する国際規格を提案するに至った。今後は数年かけて国際規格化し、国内外において本研究の取組が発端となったかさ密度の分析方法が活用されることが見込まれる。

5-3. 研究目標の達成状況

人口減少や高齢化等の影響を考慮した一般廃棄物処理システムのBaUシナリオおよび対策シナリオを各サブテーマにおいて設定・評価し、持続的な処理システムを提案することを研究目標とした。各サブテーマにおいて三重県をモデル地域として検討と進め、各サブテーマの役割を明確にしつつ、サブテーマ間の連携を重視した結果、研究全体として目標どおりの成果をあげた。

サブテーマ1では、特に大人用紙おむつの使用量増加に着目して、バイオマス炭素割合等の可燃ごみの性状分析を実施した。さらに、社会的側面から可燃ごみの質と量を将来予測する詳細推計モデルおよび簡易推計モデルを構築し、目標どおりの成果をあげた。コロナ禍で研究活動が制限される中、人口減少・高齢化が進行する三重県南伊勢町での可燃ごみの性状を精力的に行い、また複数の地域で使用済み紙おむつをひとつひとつ計量するなど、許される範囲で現場での作業を遂行した。コロナ禍において対面調査が不可能となったため、オンラインでのアンケート調査に切り替えるなどして紙おむつの使用実態に係るデータ収集に努めた。

サブテーマ2では、技術的側面から可燃ごみの「直接焼却」、「自区内」、「直営」処理に代わる資源化システムとして生物乾燥・SRF化システムを提示し、エネルギーの有効利用の観点で有効性を示すことができた。また、将来的に可燃ごみの組成が変化しても生物乾燥技術および分級技術が適用可能であることを示すことができ、目標を上回る成果をあげた。コロナ禍での現場（特に処理施設）での調査

が十分に遂行できなかったため、アンケート調査やオンラインでのヒアリング調査に切り替え、処理施設におけるインベントリデータを収集した。パイロットスケール（3,500 kgの模擬ごみを現地で調合）での生物乾燥実験もコロナ禍で延期していたが、香川県三豊市および株式会社エコマスターの厚意により実施でき、貴重な研究成果を得ることができた。

サブテーマ3では、今後の広域化処理の限界を示した後に、財政的側面から将来の可燃ごみ処理に係る事業費を試算し、民間委託を含めたごみ処理事業形態の選択フローを作成した。目標にはやや及ばないが、一定の成果をあげた。三重県を中心として全国の可燃ごみ処理事業に関して精力的に情報収集を行ったが、コロナ禍による活動制限から、当初計画していた三重県内でのステークホルダーを招聘しての官民連携に関するワークショップ開催および具体的な事業化検討には至らなかった。

サブテーマ4では、サブテーマ1、サブテーマ2、サブテーマ3の検討結果を踏まえて、資源化システム評価モデルを構築し、技術的側面および（自治体の）財政的側面の効果について、特に地域資源（＝可燃ごみのエネルギー）を有効活用することによる効果を評価した。目標にはやや及ばないが、一定の成果をあげた。一方で、社会的側面の評価や、地域循環共生圏形成の総合的な効果の評価については今後の課題とされた。

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

2件

<主な査読付き論文>

- 1) 早崎真也、大下和徹、河井紘輔、高岡昌輝：脱炭素社会における都市ごみ焼却施設からの温室効果ガス排出量の将来推定－京都市を例に，*廃棄物資源循環学会論文誌* (in press) (2022)
- 2) Kawai K, Oshita K, Kusube T.: Model for projecting the generation of used disposable diapers in the era of depopulation and aging in Japan. *Waste Management & Research* (投稿中) (IF: 3.5)

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	1件
口頭発表（学会等）	22件
「国民との科学・技術対話」の実施	3件
マスコミ等への公表・報道等	2件
本研究に関連する受賞	0件

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究者略歴

研究代表者

河井 紘輔

京都大学大学院地球環境学舎 博士課程修了 博士（地球環境学）

現在 国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環領域 主任研究員

研究分担者

- 1) 大下 和徹（サブテーマ1リーダー）

京都大学大学院工学研究科 修士課程修了 博士（工学）

現在 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 准教授

- 2) 石垣 智基（サブテーマ2）

大阪大学大学院工学研究科 博士後期課程修了 博士（工学）

現在 国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環領域 主幹研究員

- 3) 楠部 孝誠（サブテーマ2）

京都大学大学院工学研究科 博士課程修了 博士（工学）

現在 石川県立大学 生物資源環境学部 講師

4) 秦 三和子 (サブテーマ3リーダー)

東京農工大学大学院工学研究科 博士前期課程修了 修士 (工学)

現在 (株)エックス都市研究所 環境エンジニアリング事業本部 環境事業支援グループ 副グループ長

5) 高木 重定 (サブテーマ4リーダー)

東京理科大学大学院工学研究科 修士課程修了 修士 (工学)

現在 みずほリサーチ&テクノロジーズ(株) 環境エネルギー第1部 持続型社会チーム 次長

II. 成果の詳細

II-1 将来の一般廃棄物発生量及び性状予測

京都大学大学院

工学研究科 都市環境工学専攻

大下 和徹

国立研究開発法人国立環境研究所

資源循環領域 資源循環社会システム研究室

河井 紘輔

石川県立大学

生物資源環境学部

楠部 孝誠

<研究協力者>

京都大学大学院

工学研究科 都市環境工学専攻 修士課程

早崎 真也

[要旨]

本サブテーマは、将来の人口減少・高齢化地域を含めた、特に焼却対象ごみとしての一般廃棄物発生量及び性状を予測することを目的とした。まず、人口減少が著しい三重県南伊勢町において、焼却対象ごみの物理組成調査を14分類のごみ組成区分で2回/2年実施するとともに、得られた試料について、三成分(可燃分、水分、灰分)、発熱量、元素濃度、バイオマス含有量を測定し、文献値と比較しつつ、基盤データとして整備した。次に、京都市および三重県南伊勢町を対象に、ごみ組成基盤データや、各自治体の統計データを基に、2050年までの焼却ごみ発生量およびその性状を、人口減少、高齢化に加え、プラスチック資源循環戦略、食品ロスの低減を考慮して、予測できる詳細モデル、および簡易モデルを構築した。予測結果では、2050年までに京都市、三重県南伊勢町ともに大人用紙おむつが増加し、プラスチックが減少しても、厨芥類も減少するため、ごみ低位発熱量の低下は3%以内であり、あまり影響はないと予想された。また詳細モデルと簡易モデルの結果は概ね整合したが、簡易モデルの精度を上げていくためには、ごみ組成情報を現状の6区分乾燥ベースから、9区分湿ベースに変えていくこと、複数回の平均値として示していくことが重要であると考えられた。

1. 研究開発目的

我が国における一般廃棄物の主要な処理方法は焼却であるが、将来的にはライフスタイルの変化や、高齢化による使用済み大人用紙おむつ等の発生量も増加すると想定され、一般廃棄物の発生量減少に加えて、焼却ごみの性状が変化する可能性が高い。そこで本サブテーマでは、将来の人口減少・高齢化地域を含めた、特に焼却対象ごみとしての一般廃棄物発生量及び性状を予測することを目的とした。

2. 研究目標

将来人口統計、一人当たり発生量の推移を踏まえて将来の一般廃棄物発生量を予測する。高齢化・人口減少が顕在化している自治体を対象に焼却ごみの物理組成調査を実施する。焼却ごみの素材別(物理組成の小・中分類)の性状(三成分(可燃分、水分、灰分)、発熱量、塩素濃度、バイオマス含有量)を既往文献から整理するとともに、上記物理組成調査に連動して性状分析を行う。人口減少や高齢化等の将来の社会変化によるごみ発生や分別行動への影響を構造化する。将来の社会変化を説明変数として、システム思考を用いてごみ発生や分別行動への影響を踏まえた焼却ごみの発生量及び性状(被説明変数)の予測モデルを設計する。

3. 研究開発内容

3.1 焼却ごみの性状分析

サンプリングの協力が得られた三重県南伊勢町クリーンセンターなんとうにおいて、2019年12月と2020年12月の計2回、以下の14区分で都市ごみのうち焼却対象ごみの組成と組成別の特性値分析を行った。その結果について、文献値との比較を行い、その妥当性を確認した。

[1]一般厨芥、[2]手つかずの食料品、[3]大人用紙おむつ、[4]子ども用紙おむつ、[5]紙類、[6]ラップ、[7]容器包装プラスチック(容器包装プラ)、[8]製品プラスチック(製品プラ)、[9]木竹草木類、[10]ガラス類、[11]金属類、[12]繊維類、[13]ゴム皮革類、[14]その他

まず、ごみピット内より焼却対象ごみを200kg採取し、これらを十分に均一化し、50kgまで縮分した。その後、各組成別に分別を行い、それぞれの湿重量を測定した。各組成のサンプルについて水分測定後、[10][11]を除く12種類について乾燥破碎を行い十分に均一化した。その上で、表1.1^{1)~7)}に示す項目について、それぞれの測定方法にて分析をおこなった。炭素、水素、窒素(CHN)の組成測定については各試料2回ずつ、水分・可燃分・灰分、発熱量、塩素・硫黄濃度、バイオマス炭素割合については各試料1回ずつ測定した。

3.2 紙おむつの使用実態、将来の使用済み紙おむつの排出量推計

日本は高齢化社会に突入しつつあり、大人用紙おむつの消費量も増加傾向である。使用済み紙おむつの再生利用等導入を検討する自治体を対象として、取組事例、関連技術、関連規制等を整理したガイドライン⁸⁾が2020年3月に策定された。ガイドラインでは、土田らの報告⁹⁾を参考にして使用済み紙おむつの発生量の推計方法が例示されているが、紙おむつの使用枚数や使用済み紙おむつの重量に関しては、実態と照らし合わせて妥当性を確認する必要がある。大人用紙おむつは要介護(要支援)認定者(以下、「要介護者」という。)が、子供用紙おむつは0~4歳児(以下、「子供」という。)が使用することとし、楽天インサイト株式会社のオンラインシステムを用いたアンケート調査(以下、「ネットリサーチ」という。)をもとに、要介護者及び子供の紙おむつの使用実態を明らかにした。

大人用紙おむつの使用実態調査では、全国の18歳~69歳のパネルを対象とし、パネルの家族に65歳以上の要介護者が1人いることをスクリーニング条件とした(パネル本人が要介護者の場合を除く)。要介護者を要支援1、要支援2、要介護1、要介護2、要介護3、要介護4、要介護5の7区分に割り付け、1区分あたり142あるいは143サンプル、合計1,000サンプルを回収目標数とした。

子供用紙おむつの使用実態調査では、全国の20歳~49歳の女性パネルを対象とし、同居する家族に5歳未満の子供が1人いることをスクリーニング条件とした。子供を0歳児、1歳児、2歳児、3歳児、4歳児の5区分に割り付け、1区分あたり200サンプル、合計1,000サンプルを回収目標数とした。

紙おむつの使用実態調査は2021年3月24日からネットリサーチを開始し、回収目標数に達した時点で終

表1.1 各特性値の分析方法 ^{1)~7)}

測定項目	方法
可燃分・灰分	乾燥試料約1gをマッフル炉で815°C 1時間で強熱し、放冷後重量を測定し可燃分灰分を求めた
CHN組成	試料約2 mgをCHNコーダ(ジェイサイエンス・ラボ製: MICRO CORDER JM10)を用いて測定
高位発熱量	試料約1 gをボンベ熱量計(株式会社島津製作所製: CA-4AJ)で測定
塩素・硫黄濃度	ボンベイオンクロマトグラフ法により、イオンクロマトグラフ(島津製作所製: HIC-20ASUPER)を用いて測定
バイオマス炭素割合	BETA Analytic Testing Laboratoryに試料を送付し、加速器質量分析(AMS)を用いて測定

了した。矛盾する回答を有したサンプルは無効とし、分析対象外とした。

使用済み紙おむつの排出原単位 (g/人/日) は、ネットリサーチで得られたデータを踏まえて、①紙おむつ製品 (大人用はアウターとインナー) の使用枚数、②紙おむつを装着した状態での尿と便の排泄量、③紙おむつを装着した状態での便の排泄量を区別し、さらに、昼間と夜間を区別して算出した。使用済み紙おむつの排出原単位は、子供は5区分、要介護者は7区分に分けて算出した。

将来の使用済み紙おむつの排出量は、使用済み紙おむつの排出原単位 (定数) に、将来想定される紙おむつ使用者数 (変数) を乗じて推計した。各自治体における要介護度別の要介護者数は厚生労働省が統計情報として公開しており、将来もその割合は一定として、各自治体における将来の要介護者数及び紙おむつ使用者数を推計した。ただし、ここでの対象者は第1号被保険者 (65歳以上) とした。

3. 3 焼却ごみ発生量及び性状予測モデルの開発

(1) 詳細モデル—京都市を事例として—

まず、京都市における家庭系 (1998年~2017年)、および事業系 (2016年~2017年) のごみ細組成調査結果¹⁰⁾、¹¹⁾と環境省の一般廃棄物処理実態調査結果¹²⁾を用いて1998年から2017年までのごみ組成区分ごとの焼却ごみ量原単位を推計した。ごみ組成区分は将来的な高齢化の影響やごみ減量政策との関連性を考慮し、3. 1で記載した14区分とした。

はじめに焼却ごみの全量を総人口で除することで1人1日当たりの焼却ごみ量 (g/人/日) (焼却ごみ量原単位) を求めた。家庭系ごみについては焼却ごみ量原単位に細組成調査結果で得られた組成割合を乗じることで、20年間のごみ組成区分ごとの焼却ごみ量原単位を推計し、その経年変化を明らかにした。一方、事業系ごみについては入手可能な2年分のみのデータを用いた。ただし、大人用紙おむつについては、高齢化の影響を直接的に受けると考えられたため、家庭系および事業系を合わせて考えることとし、基本的に環境省¹³⁾が提示している年齢別人口を考慮した大人用紙おむつごみの排出量試算方法を用いることとした。しかしながら、環境省の試算方法は使用量等の設定値が過大評価である可能性があることや、業者に回収され産業廃棄物に流れた分も含んでいることから、実際には試算結果の65%が一般廃棄物として処理されるとした。これら過去のデータを基に下記2つのシナリオで将来のごみ量を推計した。

1) BaUシナリオ

家庭系については、2017年のごみ組成区分ごとの焼却ごみ量原単位が将来も変化しないとした。原単位に国立社会保障・人口問題研究所¹⁴⁾ (社人研) が提示している将来推計人口を乗じて、ごみ組成区分ごとのごみ量を推計した。一方、事業系については、京都市が一大観光都市であるという地域特性を考慮して、人口減少によるごみ量の減少は考慮せず、2017年のごみ組成区分ごとのごみ量が将来も変化しないとした。ただし、紙おむつについては家庭系と事業系を合わせて環境省が提示している排出量試算方法と社人研の年齢別の将来推計人口を用いて計算し、さらに一般廃棄物として処理される割合を65%と設定して、将来のごみ量を推計した。

2) ごみ減少シナリオ

京都市が示している2030年の目標値¹⁵⁾を達成したうえで、その後もごみ量が減少していくことを想定した。家庭系については基本的に1998年~2017年の傾向を基に修正指数関数式 (式1) で最小二乗法により、将来の焼却ごみ量原単位を推計した (分別開始時期を踏まえ、容器包装プラ・ガラス類・金属類については2007年以降のデータを用いた)。修正指数関数は、通常、水需要の増加の予測等に成長曲線として用いられるが¹⁶⁾、本研究ではごみ減少を扱うため、減少関数として用いた。

A: 一般厨芥、B: 容器包装プラ、C: 製品プラの3つについては京都市の計画の中で、これらに関連する個別の減量目標設定がされているため、その目標値を達成することを推計に組み込んだ。

A家庭系一般厨芥については、その一部である食品ロスを現在比で20%減少させる目標値を設定していることを踏まえ、家庭系一般厨芥の原単位についても同様に減少するとし、2030年に2017年比で80%になると見込んだ。

B家庭系容器包装プラについては、家庭系と事業系を含め、過去の焼却と資源化に流れた量の和の推移から、2030年の排出量全体を推計した上で、2030年における分別率の目標値が60%であることを踏まえ、

この年に40%が焼却に流れると考えた。過去の焼却ごみ中の家庭系容器包装プラと事業系容器包装プラの比率はあまり変化がなかったため、焼却に流れた量のうち42%(これまでの平均値)が家庭系由来であると、2030年の家庭系容器包装プラの原単位を定めた。

C家庭系製品プラについては、過去の原単位に一定の傾向が見られなかったことから、これまでの平均値の60%が分別され資源化される¹⁵⁾が、40%が2030年に焼却に流れると考え、2030年の家庭系製品プラの原単位を定めた。

また、ラップと金属類については全体に占める割合が小さく、過去の原単位の推移のばらつきが大きいため、修正指数関数は用いず、過去の平均値を用いた。

一方で事業系焼却ごみのうち大人用紙おむつを除いたものについては、人口減少によるごみ量の減少は考慮せず、過去のごみ量の変化の傾向を基に修正指数関数で最小二乗法により将来のごみ量を推計した。ただし2030年の京都市の焼却ごみ量原単位の目標値を参考に、大人用紙おむつを除いた事業系の焼却ごみ量原単位が294 g/人/日となるとした。これに将来推計人口を乗じ、2030年の事業系焼却ごみのうち大人用紙おむつを除いたごみ量が41.9万 kg/dayとなるとし、これを達成すると考えた。将来的に事業系のごみ組成割合は変化しないとして、ごみ組成区分ごとのごみ量を推計した。

大人用紙おむつについては、1)と同様に家庭系と事業系を合わせた量を推計した。

最後に2030年の家庭系紙類以外の焼却ごみ量原単位を合計した上で、2030年における家庭系と事業系を合わせた焼却ごみ量原単位が京都市の目標値である625 g/人/日となるように2030年の家庭系紙類の焼却ごみ量原単位を設定し、紙類の2030年の目標値とした。

$$y = K - ab^t$$

y: 推計値

t: 年

K: 関数が収束する極限の最大値または最小値

a: $K-a$ が切片となるように求められた係数で負の値

b: 0以上1以下の係数

(1)

(2) 簡易モデル—南伊勢町を事例として—

一般的な自治体においては、京都市が行っているような細かい区分でのごみ組成調査は行われていないし、粗い区分でも過去からのデータ蓄積は少ない。そこで、京都市以外の市町村でも過去のごみ組成区分ごと焼却ごみ量原単位を推計し、その上で、将来のごみ量・ごみ組成を予測できる簡易モデルを構築し、三重県南伊勢町の将来のごみ量・ごみ組成を推計した。なお簡易モデルにより京都市の将来推計も実施し、(1)の方法で予測した結果との比較を試みた。

まずは、ごみ組成として、環境省が毎年実施している一般廃棄物処理実態調査結果¹²⁾のごみ組成(6区分、乾ベース)を用いることを想定した、このデータは家庭系と事業系が合わさった焼却ごみ全体の組成と考えられる。ここではまず、市町村ごと過去の焼却対象ごみ(燃料化施設に流れた分も含む)の9区分での焼却ごみ量原単位(g/人/日)を求める方法を示した。ごみ組成区分は紙類、大人用紙おむつ、繊維類、プラスチック類、ゴム皮革類、木竹わら類、厨芥類、不燃物、その他の9区分である。市町村合併の影響を避けるため、2006年以降、2019年までの推計を行った。2006~2019年の一般廃棄物処理実態調査結果¹⁰⁾のうち、ごみ処理状況に記載されているごみ処理量のうち直接焼却量とごみ燃料化施設の処理量、総人口、施設整備状況に記載されているごみ組成分析結果(乾ベース)、水分を計算に用いた。また、「住民基本台帳に基づく人口、人口動態及び世帯数」における市町村別年齢別人口¹⁷⁾と(1)で示した大人用紙おむつごみの排出量試算方法を大人用紙おむつごみの焼却ごみ量原単位の推計に用いた。計算方法を以下に示す。

① 焼却対象ごみ量: Q_i [t/year]

一般廃棄物処理実態調査結果ごみ処理状況における各市町村の直接焼却量とごみ燃料化施設の処理量を用いる。以下 i は2006~2019年とする。例えば Q_{2006} は2006年の焼却対象ごみ量を示す。

$$Q_i = I_i + R_i$$

(2)

I_i : 直接焼却量 (t/year)

R_i : ごみ燃料化施設の処理量 (t/year)

② 焼却ごみ量原単位 : B_i [g/人/日]

一般廃棄物処理実態調査結果ごみ処理状況での各市町村の総人口を用い焼却ごみ量原単位を求める。

$$B_i = Q_i \times 10^6 \div P_i \div 365$$

(3)

P_i : 総人口 (人)

③ 湿基準6区分のごみ組成割合 : E_{ik} [%]

一般廃棄物処理実態調査結果施設整備状況におけるごみ組成分析結果(乾ベース)を用い、湿基準6区分のごみ組成割合を求めた。ただし、 $k=1\sim 6$ で、1:紙・布類、2:ビニール、合成樹脂、ゴム、皮革類、3:木竹わら類、4:厨芥類、5:不燃物類、6:その他である。

$$E_{ik} = \frac{\frac{D_{ik}}{100 - W_k}}{\sum_{k=1}^6 \frac{D_{ik}}{100 - W_k}} \times 100$$

(4)

D_{ik} : 乾基準6区分のごみ組成割合 (%)

ただし、

$$20 \leq W_1 \leq 35$$

$$5 \leq W_2 \leq 30$$

$$30 \leq W_3 \leq 50$$

$$70 \leq W_4 \leq 80$$

$$0 \leq W_5 \leq 10$$

$$0 \leq W_6 \leq 40$$

であるとし、

全体の含水率 A_i (%) を求めた。

$$A_i = \sum_{k=1}^6 E_{ik} \times W_k$$

その上で、

A_i' : 報告されている測定された全体の水分 (%) として

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=2006}^{2019} (A_i - A_i')^2}{14}}$$

が最小となるように W_k を設定した。

④ 湿基準8区分のごみ組成割合 : F_{ik} [%]

紙類と繊維類、プラスチック類とゴム皮革類を分け、8区分の組成割合を求めた。 $k=1\sim 8$ で、1:紙類、2:繊維類、3:プラスチック類、4:ゴム皮革類、5:木竹わら類、6:厨芥類、7:不燃物類、8:その他である。区分中の内訳については、三重県の平成22年度ごみ減量導入可能性調査報告書¹⁸⁾を参考にした。ビニール、合成樹脂、ゴム、皮革類についてはプラスチック類とゴム皮革類に分けたが、市町村の分別方法によって比率を変えた。

$$F_{i1} = E_{i1} \times \frac{85.4}{100}$$

$$F_{i2} = E_{i1} \times \frac{14.6}{100}$$

・ 容器包装プラスチック、ペットボトルを分別している場合

$$F_{i3} = E_{i2} \times \frac{83.8}{100}$$

$$F_{i4} = E_{i2} \times \frac{16.2}{100}$$

(5)

・ ペットボトルのみ分別している場合

$$F_{i3} = E_{i2} \times \frac{91.7}{100}$$

$$F_{i4} = E_{i2} \times \frac{8.3}{100}$$

⑤ 8区分のごみ組成区分ごとの焼却ごみ量原単位： C_{ik} [g/人/日]

$$C_{ik} = B_i \times F_{ik} \quad (6)$$

さらに、「住民基本台帳に基づく人口、人口動態及び世帯数」における市町村別年齢別人口と「使用済紙おむつの再生利用に関するガイドライン」、さらに**3.2(1)**で示した焼却ごみへの流入率を用いて大人用紙おむつごみの焼却ごみ量原単位： O_i を推計した。なお、一般廃棄物処理実態調査結果施設整備状況における総人口と、住民基本台帳に基づく人口、人口動態及び世帯数における総人口は値が異なるため、 P_i/P'_i (P'_i : 住民基本台帳に基づく人口、人口動態及び世帯数における総人口)を年齢別人口に乗じて、一般廃棄物処理実態調査結果の総人口に調整した。

⑥ 9区分のごみ組成区分ごとの焼却ごみ量原単位： B_{ik} [g/人/日]

大人用紙おむつ以外の紙類と大人用紙おむつを分けて、9区分のごみ組成区分ごとの焼却ごみ量原単位とした。ただし、 $k=1\sim 9$ で、1: 紙類(大人用紙おむつを除く)、2: 大人用紙おむつ3: 繊維類、4: プラスチック類(プラ類)、5: ゴム皮革類、6: 木竹わら類、7: 厨芥類、8: 不燃物類、9: その他である。

$$\begin{aligned} B_{i1} &= C_{i1} - O_i \\ B_{i2} &= O_i \\ B_{ik} &= C_{ik+1} \quad (k=3\sim 9) \end{aligned} \quad (7)$$

⑦ ごみ組成区分ごとの焼却ごみ量原単位の14年間の平均値： BA_k [g/人/日]

$$BA_k = \frac{\sum_{i=2006}^{2014} B_{ik}}{14} \quad (8)$$

これらの過去のデータを基に以下の2つのシナリオで将来のごみ量を推計した。

1) BaUシナリオ

基本的に式(8)で推計した過去14年間のごみ組成区分ごとの焼却ごみ原単位の平均値を維持する設定とした。原単位に国立社会保障・人口問題研究所¹⁴⁾(社人研)が提示している将来推計人口を乗じて、ごみ組成区分ごとのごみ量を予測した。ただし、大人用紙おむつについては**3.2(1)**の排出量試算方法と社人研の年齢別の将来推計人口を用いて原単位を計算した。2050年の人口については2045年までの将来推計人口を二次式で近似して予測した値を用いた。

2) ごみ減少シナリオ

プラスチック類については、2006年~2019年までの資源化量と焼却量を合計して、人口で除して焼却および資源化されたプラスチックごみの原単位(g/人/日)を求めた。さらに14年間の平均値を求めた。プラスチック資源循環戦略を基に、2030年に分別率60%が達成され、この平均値の40%が焼却に流入すると考え2030年のプラ類の焼却ごみ量原単位を求めた。

厨芥類については、京都市が掲げる2030年に現在比25%減を参考に、2030年に過去の平均値の75%にまで焼却ごみ量原単位が減少するとした。

プラ類と厨芥類は2020年までは過去の平均値をたどり、その後2030年に目標値を通るように減少していくとした。2020年と2030年の値を

$$y = -ab^t$$

y : 予測値
 t : 年
 a : $-a$ が切片となるように求められた係数で負の値
 b : 0以上1以下の係数

$$(9)$$

が通るように式を設定し将来の原単位を予測した。

4. 結果及び考察

4.1 焼却ごみの性状分析

表1.2にごみ組成の調査結果を示す。

厨芥類、紙類、プラスチック類が多くを占め、紙おむつは、年ごとにばらつきがあったが、大人と子供あわせて、全体の1.6~6.1%を占めていた。

表1.3に組成ごとの特性値分析の結果を示す。特に、三成分(水分、可燃分、灰分)・固形分中の炭素割合・バイオマス炭素割合、発熱量についてごみ組成調査の結果^{19)~21)}と、日本国温室効果ガスインベントリ報告書での掲載値²²⁾と比較した。三成分は基本的に先行研究と同程度であり、妥当な範囲であると考えられた。紙類については、先行研究においては水分が5%から30%まで幅広い値となっていた。紙おむつについては、福岡県リサイクル総合研究事業化センターの報告書²³⁾では水分は68.1%と報告されている。本分析値の大人用61.5%、子ども用72.1%となり子供用は

先行研究と同程度であるものの、大人用については水分が小さめの値となった。紙類や、紙おむつは吸水性が非常に高く、ごみ袋中の周囲のごみの水分の多寡によって含水率に違いが生じると思われる。固形分中の炭素割合も日本国温室効果ガスインベントリ報告書¹³⁾では紙屑が41%、プラスチック類が76.8%、紙おむつが56%、繊維類が63%と報告されており、それに対して本分析値は、紙類が38%、容器包装プラと製品プラが73~75%、紙おむつは約50%、繊維類が55%と大きく変わらなかった。バイオマス炭素割合は先行研究では廃プラスチックが0.9%、紙おむつが41%となっていた。分析値ではプラスチック類が5~30%、紙おむつは約50%であった。プラスチック類の中でもラップはバイオマス炭素割合が30%と大きくなったが、これは分析値の方が有機物の付着物由来の影響が大きいと考えられる。なお、バイオマス炭素割合について表1.2および表1.3の値を用いて、加重平均をとり、焼却ごみ全体の値を推計したところ、74.7%であった。別の都市ごみ炭化施設から得られた炭化物のバイオマス炭素割合は71.2%であり、概ね同様の値であった。これらの値は、別途測定した下水汚泥の値：90.5%よりも低く、プラスチックの影響が現れているものと考えられる。発熱量については、厨芥類は先行研究の範囲内にあったが、紙類は本分析値では7,360 kJ/kgであったのに対して先行研究では10,000~16,000 kJ/kgとなっていた。分析結果は一般的な値に比べるとかなり低い結果であり、ごみ中の水分を吸収している可能性が

表1.2 南伊勢町における焼却ごみ組成調査結果(湿重量%)

項目	2019	2020
手つかず食品	1.4	2.56
その他の厨芥類	18.93	32.04
紙おむつ(大人)	4.89	0.83
紙おむつ(子供)	1.23	0.73
古紙(新聞、広告、雑誌、コピー紙)	9.94	13.21
容器包装紙類(段ボール、紙パックなど)	10.4	7.46
その他の紙類	9.04	12.11
繊維類	7.8	6.32
木竹わら類	15.96	1.58
プラスチック製容器包装(資源化対象外)	10.63	10.54
ペットボトル	0.36	0.18
持ち帰り弁当の容器	0.4	0.77
ラップ類	0.4	0.39
その他のプラ類	4.02	1.77
ゴム皮革類	0.48	1.22
ビンガラス類	0	0.02
金属類	0.67	0.45
陶磁器類	0.02	0
その他(可燃物)	3.16	7.23
その他(不燃物)	0.27	0.59
合計	100.00	100.00

表1.3 ごみ組成ごとの特性値分析の結果

区分	三成分			固形分中組成					高位発熱量(kJ/kg-dry)	低位発熱量(kJ/kg)	バイオマス炭素割合(%)
	水分(%)	可燃分(%)	灰分(%)	C(%-dry)	H(%-dry)	N(%-dry)	燃焼性S(ppm)	揮発性Cl(ppm)			
一般厨芥	75	20.8	4.15	44.3	6.43	3.37	7280	9960	16400	1890	100
手つかずの食料品	49.5	48.8	1.7	45.5	6.97	2.23	7220	11800	17800	6900	100
大人用紙おむつごみ	61.5	34.2	4.35	52.7	8.42	0.583	1240	4870	24300	7260	54
子供用紙おむつごみ	72.1	24.4	3.52	51.7	8.1	0.838	1310	11400	21000	3810	51
紙類	31.6	57.9	10.5	37.8	5.59	0.18	1940	1960	13300	7360	98
ラップ	45.1	53.2	1.69	48.6	7.53	0.378	1160	348000	24300	11300	30
容器包装プラ	28.8	67.1	4.19	74.7	12.9	0.338	4960	7600	37800	24200	15
製品プラ	6.1	88.7	5.2	73.3	12.1	0.485	1970	35300	36300	31200	5
木竹草木類	47.4	48.4	4.25	44.6	5.97	0.845	3260	2040	17800	7510	100
ガラス類	1.2	0	98.8	0	0	0	0	0	0	0	-
金属類	7.8	0	92.2	0	0	0	0	0	0	0	-
繊維類	20.7	78.1	1.21	54.9	5.43	1.57	7380	1520	22800	16800	75
ゴム皮革類	9.1	76.2	14.7	54.5	7.05	1.76	263	108000	24800	19600	80
その他	26.6	51.8	22.9	27.2	4.01	1.25	2160	8070	9210	4720	0

考えられた。紙おむつについては、福岡県リサイクル総合研究事業化センターの報告書²³⁾が3,800 kJ/kgと報告しているのに対し、本分析値では子供用は3,810 kJ/kgとほぼ同じであったが、含水率が小さかった大人用は7,260 kJ/kgとそれほど小さくはならなかった。後述の発熱量の計算では、大人用紙おむつの発熱量を3,800 kJ/kgとして計算した。発熱量に大きく影響すると考えられるプラスチック類については基本的に先行研究と同程度であった。先行研究で単独の分析結果がなかったラップについては、本分析値は11,300 kJ/kgと他のプラスチック類に比べてかなり小さかったが、ラップが全体に占める割合は1%以下であり、全体に対する影響は小さいと考えられる。

4. 2 紙おむつの使用実態、将来の使用済み紙おむつの排出量推計

ネットリサーチの結果、要支援1、要支援2、要介護1の90%以上が自宅に住んでいることが分かった。要介護度が高まるにつれて、介護施設等に住む人々の割合が増加し、要介護4および要介護5に認定される要介護者の半数以上が介護施設等に住んでいることがわかった。要介護度が高まるにつれ、おむつの使用割合は上昇し、要介護5で93.8%（布おむつを含む）に達した。本研究で明らかとなった紙おむつの使用割合は、環境省がガイドラインで提案した割合よりも高かった。1人1日当たりの紙おむつ使用枚数に関して、要介護3以上の要介護者は、紙おむつをより多く消費していることがわかった（図1.1）。環境省のガイドラインによると、1人1日当たりアウター1枚とインナー4枚のおむつを使用すると提示されていたが、本研究ではそれよりも多くのアウターが使用されていることがわかった。就寝前と起床後に紙おむつを交換していたことが示唆された。

子供は1人1日当たり平均5.6枚の紙おむつを使用していることがわかった。年齢別にみると、0歳児は1日平均7.3枚の紙おむつを使用しており、成長するにつれて紙おむつの使用量は減少し、4歳児は1日平均1.4枚のおむつを使用していた（図1.1）。3歳児と4歳児のおむつ使用者の割合は、土田らの結果⁹⁾（保育施設の調査で3歳児の4.8%、4歳児の0.7%が紙おむつを使用していたと報告）よりも著しく高かった。本研究では、3歳児と4歳児は夜間のみ紙おむつを使用している割合が高いことがわかっており、夜間の紙おむつ使用実態が把握しにくい保育施設の調査を補完することができた。

図1.2に、1人1日当たりの使用済み紙おむつ（紙おむつ製品、尿、便）の重量を示す。大人用紙おむつの総重量の50%以上を尿が占め、要介護度が高まるにつれて、排泄物の割合が増加した。日本衛生材料工業連合会や紙おむつメーカーは、衛生の観点から紙おむつに排泄した便は、紙おむつを廃棄する前にトイレに廃棄する必要があると指示している。しかし、大人用紙おむつを使用している人の37.3%は、紙おむつと一緒に便を廃棄し、その割合は、要介護4で44.7%、要介護5で62.3%に達した。

三重県29自治体をケーススタディ地域として将来の使用済み紙おむつの排出量を推計した。2045年における三重県全域での使用済み紙おむつ排出量は2015年に比べて約17%増加し、使用済み紙おむつ発生量のうち約76%は大人用であると推計された。将来的に29自治体すべてにおいて高齢化率（65歳以上の人口割合）が上昇するが、南部における老年人口は2015年以降、すでに減少傾向に転じている。大人用の使用済み紙おむつ発生量は北部では増加傾向で、南部では減少傾向であることがわかった（図1.3）。人口減少により、可燃ごみの発生量も大幅に減少する。可燃ごみに占める使用済み紙おむつの割合はすべての自治体で上昇する見込みで、北部では10%程度、南部では15~20%程度を占める自治体もあると推計された（図1.4）。

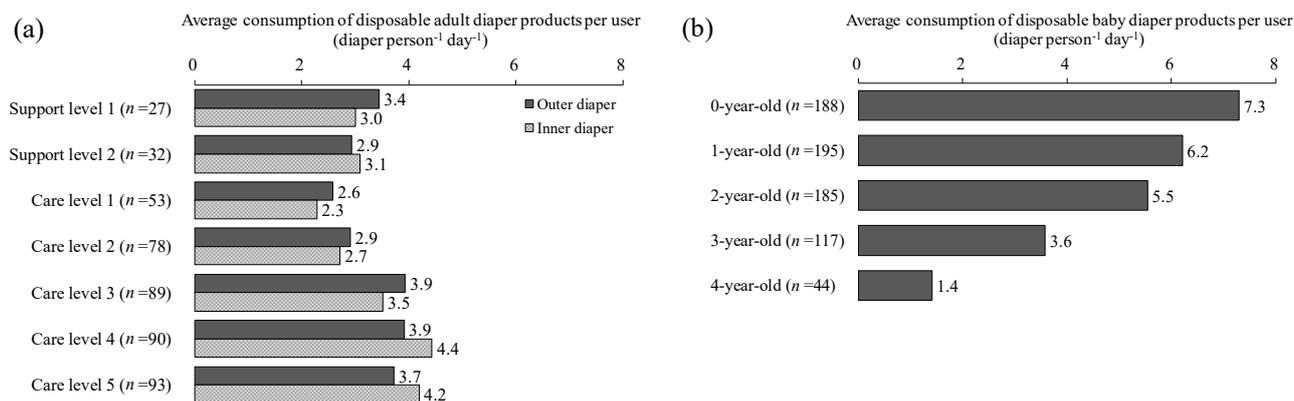


図1.1 紙おむつ製品の1人1日当たり使用枚数 (枚/人/日) : (a)大人用、(b)子供用

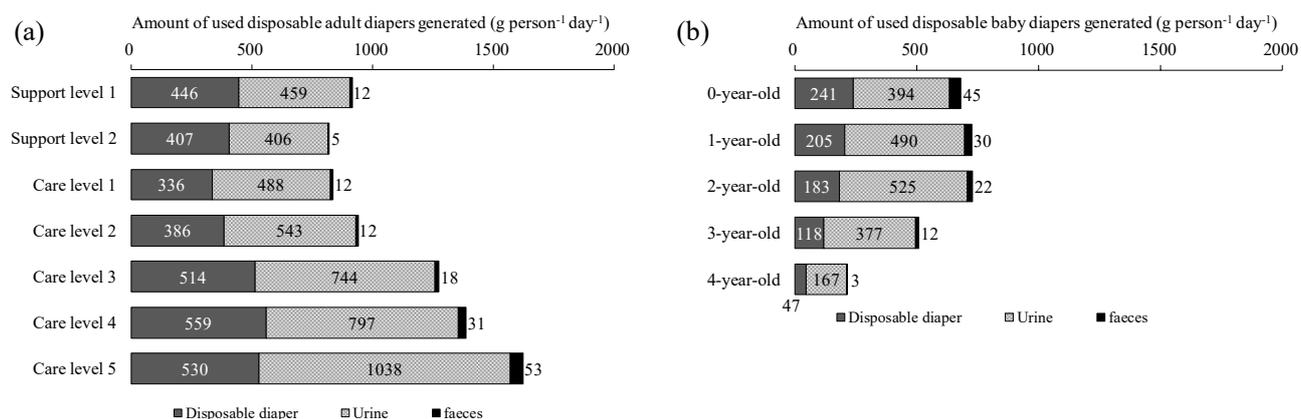


図1.2 使用済み紙おむつの排出原単位 (g/人/日) : (a)大人用、(b)子供用

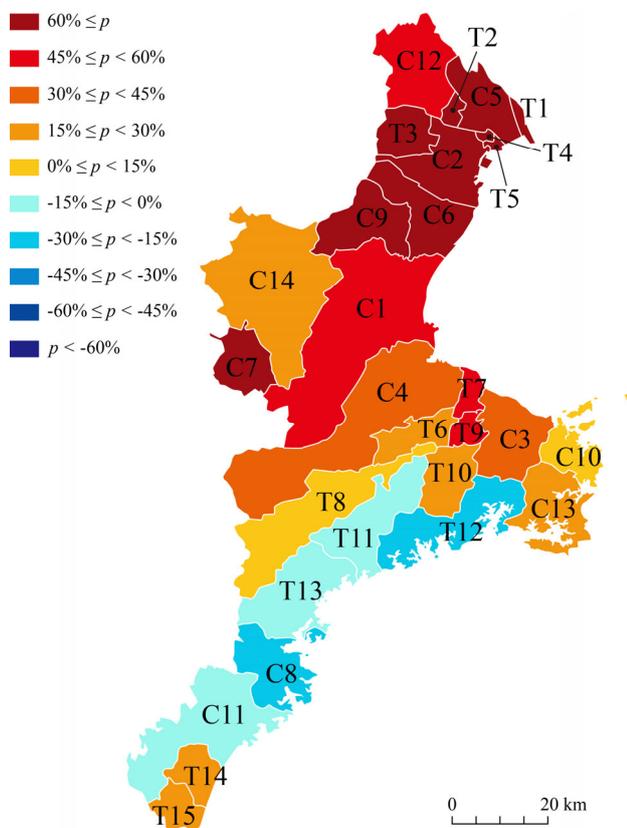


図1.3 三重県29自治体における2045年の大人用の使用済み紙おむつ発生量の変化 (2015年比)

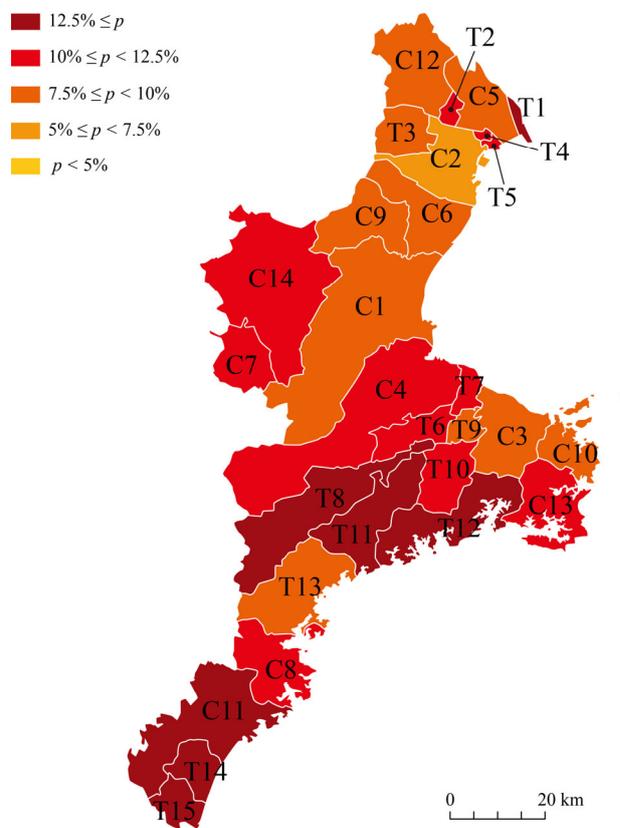


図1.4 三重県29自治体における2045年の焼却ごみに占める使用済み紙おむつの割合

4.3 焼却ごみ発生量及び性状予測モデルの開発と

(1) 詳細モデル—京都市を事例として—

図1.5にBaUシナリオとごみ減少シナリオそれぞれの、焼却ごみ量原単位とごみ量の将来推計値の結果を示した。BaUシナリオでは、事業系のごみ量に変化せず人口は減少する設定となっているために、原単位としては増加傾向にあった。原単位が2025年には670 g/人/日であるのが2050年には732 g/人/日まで増加する傾向となった。しかしながらごみ量としては人口減少の影響を受け、2025年は35.5万t/yearであるのが、2030年に35.3万t/year、2050年に33.2万t/yearまで減少すると推計された。2050年には2025年の93.6%までごみ量は減少する結果となった。京都市では2050年に2025年比で人口は14.4%減少すると推計されており、ごみ量の減少は人口減少に対応している。大人用紙おむつは原単位の増加により、全体に占める割合は大きくなり、2025年にはごみ量全体に占める割合は3.9%であったのが、2030年には4.4%、2050年には4.9%にまで増加すると推計された。福岡県リサイクル総合研究事業化センターの報告書²³⁾では2050年には大人用と子供用を合わせた紙おむつごみが日本全体の焼却ごみ中の約8.5%を占めると推計している。本研究では大人用と子供用を合わせると2050年には8.1%となり、概ね同様の値を示した。

一方、ごみ減少シナリオでは原単位は2025年の657 g/人/日から2050年には591 g/人/日まで減少すると予想された。ごみ量としては、原単位の減少と人口減少の双方の影響から減少はBaUに比較し大きくなり、2030年には32.5万t/year、2050年には26.8万t/yearとなり、2050年には2025年の約77.0%にまでごみ量が減少する結果となった。特に2025年比で2050年に一般厨芥は29.8%、容器包装プラは45.0%、製品プラは47.6%と大きく減少する結果となった。

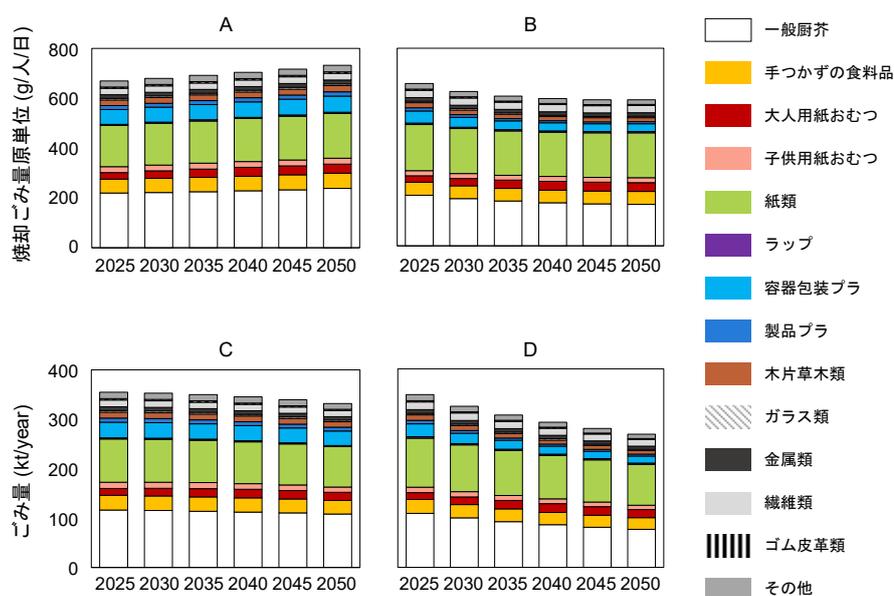


図1.5 京都市におけるBaUシナリオの焼却ごみ量原単位予測(A)、ごみ減少シナリオの焼却ごみ量原単位予測(B)、BaUシナリオのごみ量予測(C)、ごみ減少シナリオのごみ量予測(D)

図1.6にBaUシナリオとごみ減少シナリオそれぞれのごみ全体の低位発熱量の推移を示した。BaUシナリオでは発熱量は2025年の8,650 kJ/kgから2040年に8,600 kJ/kgまで減少した後、2050年に8,610 kJ/kgまで微増したが、ほとんど変化はなかった。発熱量が3,800 kJ/kgと小さい大人用紙おむつの増加による影響は見られなかった。一方、ごみ減少シナリオでは2025年の8,670 kJ/kgから2040年に8,300 kJ/kgまで減少した後、2050年に8,320 kJ/kgまで微増した。発熱量の大きい紙類(12,000 kJ/kg)、容器包装プラ(24,200 kJ/kg)、製品プラ(31,200 kJ/kg)の減少の影響と、発熱量の小さい一般厨芥(1,890 kJ/kg)の減少の影響が打ち消し合うことで、全体としては大きな影響は見られなかった。

2つのシナリオ共に、変動はあるもののどの年においても発熱量は8,300 kJ/kgから8650 kJ/kgの範囲に

収まっており、ごみ組成が変化しても、ごみ全体としての発熱量は2025年の値から5%以内の減少にとどまっており、それほど影響は生じないと考えられた。

(2) 簡易モデル—南伊勢町を事例として—

図1.7にBaUシナリオとごみ減少シナリオそれぞれの、焼却ごみ量原単位とごみ量の将来予測値の結果を示した。BaUシナリオでは、大人用紙おむつ以外のごみ組成区分は原単位が変化せず、大人用紙おむつについては高齢化の影響で原単位が増加する設定であるため、原単位全体としては増加傾向にあった。2025年には774 g/人/日であるのが、2050年には807 g/人/日まで増加した。しかしながら、ごみ量全体としては、人口減少の影響を大きく受け、2025年には2560 t/yearであるのが2050年には909 t/yearにまで減少すると予測された。2050年のごみ量は2025年比で64.5%減少する結果となったが、これは南伊勢町の人口が2025年の9060人から2050年の3086人と65.9%減しているのに対応している。大人用紙おむつは原単位の増加により、全体に占める割合は大きくなり2025年にはごみ量全体に占める割合は7.3%であったのが、2030年には8.4%、2050年には11%にまで増加すると予測された。福岡県リサイクル総合研究事業化センターの報告書²³⁾では2050年には大人用と子供用を合わせた紙おむつごみが日本全体の焼却ごみ中の約8.5%を占めると予測しているが、高齢化の進む南伊勢町では、大人用紙おむつのみでそれより大きい割合を占めると予測された。

一方、ごみ減少シナリオでは原単位は2025年の719 g/人/日から580 g/人/日まで減少すると予測された。ごみ量としては、原単位の減少と人口減少の双方の影響から減少はBaUに比較して大きくなり、2025年に2380 t/yearであるのが2050年には653 t/yearと72.5%減少する結果となった。特に、2030年の原単位の目標値を定め原単位も減少させる設定としたプラ類と厨芥類のごみ量は大きく減少し、2025年比で2050年にそれぞれ89.9%、83.4%減少する結果となった。GHG排出量に影響するプラ類は、ごみ量全体に占める割合が2025年に9.0%あったのが、2050年には3.3%と大きく減る結果となった。大人用紙おむつについては、他のごみ組成区分のごみ量が減少することでBaUシナリオよりも全体に占める割合としては大きくなり、2025年に7.9%であったのが、2050年には15.4%まで増加すると予測された。

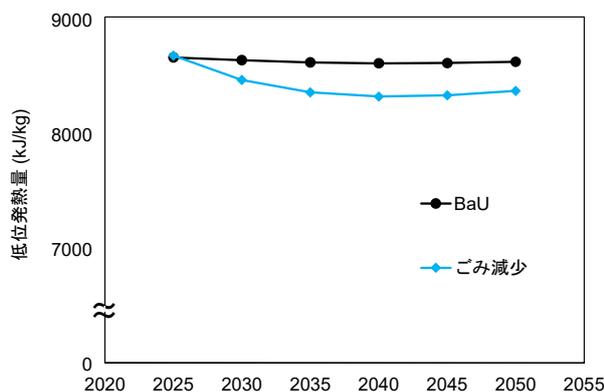


図1.6 各シナリオにおけるごみ全体の発熱量

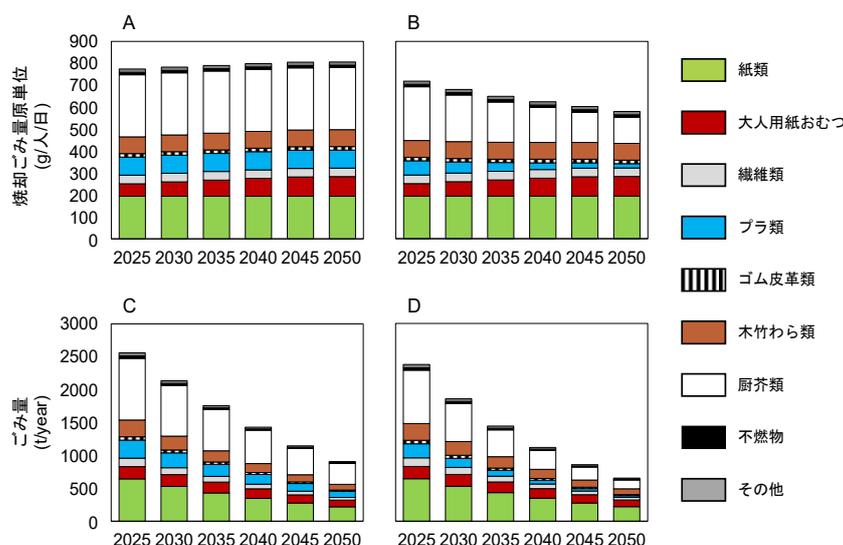


図1.7 三重県南伊勢町におけるBaUシナリオの焼却ごみ量原単位予測(A)、ごみ減少シナリオの焼却ごみ量原単位予測(B)、BaUシナリオのごみ量予測(C)、ごみ減少シナリオのごみ量予測(D)

図1.8にBaUシナリオとごみ減少シナリオそれぞれのごみ全体の低位発熱量の推移を示した。BaUシナリオでは2025年の8670 kJ/kgから2050年の8470 kJ/kgまでわずかに、減少する傾向にあった。全体の発熱量に比べて発熱量の小さい大人用紙おむつ(3800 kJ/kg)の割合が増加することで、発熱量が減少する結果となった。

一方、ごみ減少シナリオでは2025年の8640 kJ/kgから2040年に8550 kJ/kgまで減少した後、2050年に8620 kJ/kgまで増加すると予測された。発熱量の大きいプラ類(24200 kJ/kg)の減少と発熱量の小さい大人用紙おむつ(3800 kJ/kg)の増加の影響が、発熱量の小さい厨芥類(1890 kJ/kg)の減少の影響と打ち消しあうことで、全体としては大きな影響は見られなかった。

2つのシナリオ共に、変動はあるものの2025年から2050年まで発熱量は8470 kJ/kgから8670 kJ/kgの間に収まっており、ごみ全体としての発熱量は2025年の値からBaUシナリオで2.2%、ごみ減少シナリオで1.1%の範囲の変動に留まっていた。本研究で想定するごみ減少シナリオの設定の範囲では、ごみ組成が変化しても、ごみ全体としての発熱量にはそれほど影響は生じないと考えられた。

(3) 詳細モデルと簡易モデルの比較

京都市を対象に、4.2(1)での詳細モデルを用いた予測結果と簡易モデルでの計算結果を比較した。BaUシナリオではごみ量は詳細モデルでは2025年の35.5万 t/yearから33.2万 t/yearまで減る結果となっていたが、簡易モデルでは42.7 t/yearから37.0万 t/yearと全体的に量が多くなった。京都市では過去から原単位が減少傾向にあり、詳細モデルでは得られた最新の値を維持する設定を用いているが、簡易モデルでは基本的に過去の平均値を将来も維持する設定となっていることが結果に影響している。しかしながら傾向は同様であった。

ごみ減少シナリオについては、詳細モデルが2025年の34.8 t/yearから2050年に26.8万 t/yearまで減少すると予測されたが、簡易モデルでも2050年に27.4 t/yearまで減ると予測され、BaUシナリオに比べると量としては近い予測値となった。さらに、ごみ量全体に占める割合の違いについて比較した。詳細モデルでは14区分でごみ量を予測しているため、9区分に変えた値を示す。具体的には詳細モデルの一般厨芥と手つかずの食料品は簡易モデルの厨芥類にまとめ、同様に子供用紙おむつと紙類は簡易モデルの紙類、ラップと容器包装プラと製品プラはプラ類、ガラス類と金属類は不燃物として示した。図1.9にBaUシナリオとごみ減少シナリオそれぞれの詳細モデルと簡易モデルのごみ量に占めるごみ組成区分ごとの割合の推移を示す。さらに図1.10に2050年の9区分のごみ組成割合について、詳細モデルと簡易モデルの比較を示す。2つのシナリオ共に、簡易モデルで予測したとしても詳細モデルと比較して大きな違いはなかった。基本的に詳細モデルの方が紙類の割合が小さく、厨芥類の割合が大きい結果となった。

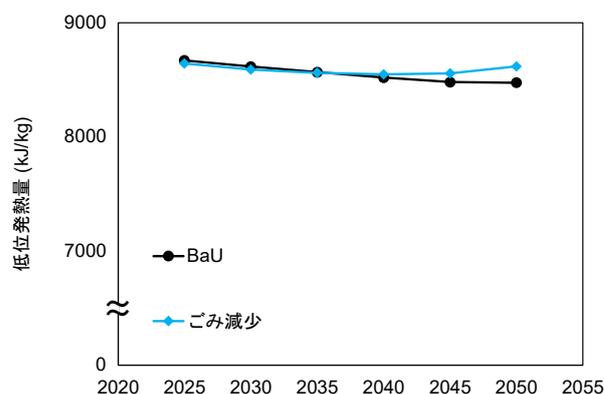


図1.8 三重県南伊勢町における各シナリオのごみ全体の発熱量の予測

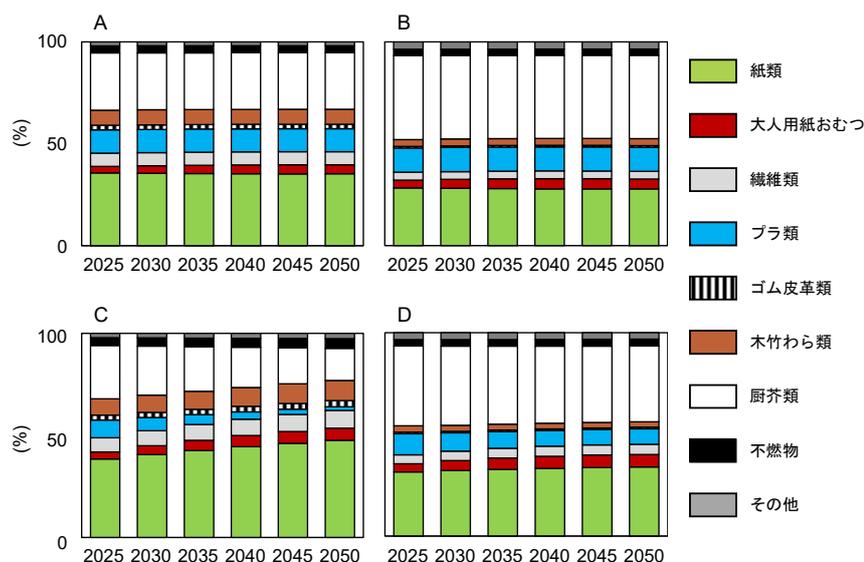


図1.9 京都市におけるごみ量中のごみ組成区分の割合：BaUシナリオ簡易モデル版(A)、BaUシナリオ詳細版(B)、ごみ減少シナリオ簡易モデル(C)、ごみ減少シナリオ詳細版(D)

BaUシナリオでは詳細モデルでは紙類が約28%、厨芥類が約41%であるのに対して、簡易モデルではそれぞれ約35%、約28%となっていた。プラ類についてはBaUシナリオでは詳細モデルが約12%、簡易モデルが約11%となりあまり差がなかった。

ごみ減少シナリオでは、簡易モデルについては、原単位の減量目標値を設定したプラ類と厨芥類の割合が大きく減少した。2050年のプラ類の割合は詳細モデルでは7.6%であるのに対して、簡易モデルでは1.9%となった。詳細モデルでは事業系については人口に比例する計算をとなっていないことや、簡易モデルで予測をする際に過去の減少傾向を使わず、平均値を用いたことで、将来の減少傾向として単純な指数関数を用いざるを得なかったことが原因で、簡易モデルの方がより大きく減少すると予測されたと考えられる。今後簡易モデルの精度を上げていくためには、環境省一般廃棄物処理情報におけるごみ組成データを6区分(乾ベース)から、紙おむつ類、繊維類、プラスチック類、ゴム皮革類を考慮した、9区分(湿ベース)とし、かつ複数回の平均値として示していくことが重要であると考えられる。

5. 研究目標の達成状況

将来人口統計、一人当たり発生量の推移を踏まえて将来の一般廃棄物発生量を予測する目標に対し、京都市、および三重県南伊勢町において焼却ごみについて、人口減少、高齢化の影響を考慮した2050年までの発生量を予測し、概ね目標は達成された。

高齢化・人口減少が顕在化している自治体を対象に焼却ごみの物理組成調査を実施すること、焼却ごみの素材別(物理組成の小・中分類)の性状(三成分(可燃分、水分、灰分)、発熱量、塩素濃度、バイオマス含有量)を既往文献から整理するとともに、上記物理組成調査に連動して性状分析を行う目標に対し、三重県南伊勢町において、焼却対象ごみの物理組成調査を14分類のごみ組成区分で2回/2年実施す

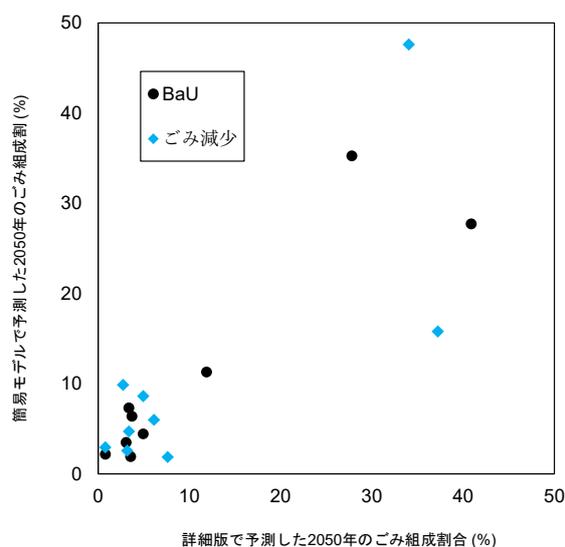


図1.10 2050年のごみ組成割合の詳細版と簡易モデルによる予測結果の比較

るとともに、得られた試料について、三成分(可燃分、水分、灰分)、発熱量、元素濃度、バイオマス含有量を測定し、文献と比較しつつ、基盤データとして整備し、目標は達成された。

人口減少や高齢化等の将来の社会変化によるごみ発生や分別行動への影響を構造化すること、将来の社会変化を説明変数として、システム思考を用いてごみ発生や分別行動への影響を踏まえた焼却ごみの発生量及び性状(被説明変数)の予測モデルを設計する目標に対し、まず、将来の社会変化として、人口減少、高齢化に加え、プラスチック資源循環戦略、食品ロスの低減といったごみ減量政策の影響を考慮した。人口減少は排出原単位を用いた直接的なごみ減少、高齢化については、大人用紙おむつの発生量増加、プラスチック資源循環戦略については2030年時点での容器包装+製品プラスチックのリサイクル率上昇、食品ロスの低減についても2030年時点での厨芥類割合の減少に反映されるとした。これらを基に、修正指数関数を用いた焼却ごみの発生量、性状を予測するための詳細モデルと簡易モデルを構築した。詳細モデルは京都市のように過去からのごみ組成データが充実している場合に適用され、簡易モデルは、三重県南伊勢町のように過去からのごみ組成データが限定される場合に適用される。分別行動への影響までは評価できなかったが、目的はおおむね達成された。

6. 引用文献

- 1) JIS7302-3 廃棄物固形化燃料-第3部：水分試験方法
- 2) JIS7302-4 廃棄物固形化燃料-第4部：灰分試験方法
- 3) TRZ0014廃棄物固形化燃料-元素分析試験方法
- 4) JIS7302-2廃棄物固形化燃料-第2部：発熱量試験方法
- 5) JIS7302-6廃棄物固形化燃料-第6部：全塩素分試験方法
- 6) TR Z 0012 廃棄物固形化燃料-硫黄分試験方法
- 7) ASTM D6866-21, Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA (2021)
- 8) 環境省環境再生・資源循環局総務課リサイクル推進室：使用済紙おむつの再生利用等に関するガイドライン(2020)
- 9) 土田大輔, 清水美佐子, 松村洋史, 田中和樹：福岡都市圏における介護施設, 医療施設および保育施設からの使用済み紙おむつ発生量の推計, 廃棄物資源循環学会論文誌, 第28巻, pp.76-86 (2017)
- 10) 京都市環境政策局循環型社会推進部ごみ減量推進課：京都市家庭ごみ細組成調査(1981~2017)
- 11) 京都市環境政策局：業者収集ごみの組成実態調査報告書(2015~2017)
- 12) 環境省廃棄物処理技術情報：一般廃棄物処理実態調査結果(ごみ処理状況)
https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/stats.html (閲覧日2022/4/20)
- 13) 環境省：使用済紙おむつの再生利用等に関するガイドライン, pp10-17(2020)
http://www.env.go.jp/recycle/omutu_gaido.pdf (閲覧日2021/5/31)
- 14) 国立社会保障・人口問題研究所：男女・年齢(5歳)階級別データ『日本の地域別将来推計人口』(平成30(2018)年推計)、京都府 <http://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson18/t-page.asp> (閲覧日2021/11/7)
- 15) 京都市環境政策局循環型社会推進部ごみ減量推進課：京・資源めぐりプランー京都市循環型社会推進基本計画(2021-2030)ー(2021)
- 16) 日本水道協会：水道施設設計指針 2012年版 (2012)
- 17) e-Stat：住民基本台帳に基づく人口、人口動態及び世帯数調査、調査の結果(2006年~2019年)
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200241&tstat=000001039591&cycle=7&tclass1=000001039601&tclass2val=0> (閲覧日2022/1/12)
- 18) 三重県：平成22年度ごみ減量導入可能性調査報告書(2011)

<https://www.pref.mie.lg.jp/common/content/000153627.pdf> (閲覧日2022/1/12)

- 19) 全国都市清掃会議：ごみ処施設整備の計画・設計要領、pp.136-141(1999)
- 20) 酒井護，北野雅昭，西谷隆司：大阪市の都市ごみ焼却施設搬入ごみ質調査，大阪市立環科研報告，Vol.73，pp.59-64（2011）
- 21) 松藤敏彦，石井翔太：家庭系ごみ中可燃性成分の特性値データベース作成とその利用法に関する研究，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol.22，No.6，pp.382-395(2011)
- 22) 国立環境研究所：日本国温室効果ガスインベントリ報告書2021年
http://www.nies.go.jp/gio/archive/nir/jqjm1000000x4g42-att/NIR-JPN-2021-v3.0_J_GIOweb.pdf(閲覧日2022/4/20)
- 23) 福岡県リサイクル総合研究事業化センター：福岡都市圏紙おむつリサイクルシステム検討委員会報告書（2016）https://www.recycle-ken.or.jp/activite/document/01_honbun_all.pdf(閲覧日2022/4/20)

II-2 資源化システムモデルの構築及びインベントリ分析

国立研究開発法人国立環境研究所

資源循環領域	資源循環社会システム研究室	河井 紘輔
	廃棄物適正処理処分技術研究室	石垣 智基

石川県立大学

生物資源環境学部	楠部 孝誠
----------	-------

京都大学大学院

工学研究科	都市環境工学専攻	大下 和徹
-------	----------	-------

<研究協力者>

国立研究開発法人国立環境研究所

資源循環領域	廃棄物適正処理処分技術研究室	Noppharit Sutthasil
--------	----------------	---------------------

京都大学大学院

工学研究科	都市環境工学専攻	修士課程	早崎 真也
-------	----------	------	-------

[要旨]

2050年までの京都市の都市ごみ焼却施設からの温室効果ガス(GHG)排出量を推計した。都市ごみ組成別の特性値分析とGHG排出量の試算モデル構築を行った上で、BaU(S1)、ごみ減少(S2)、+バイオマスプラスチック導入(S3)、+発電効率向上(S4)、+メタンコンバインドシステム導入(S5)のシナリオ、これらに電力CO₂排出係数の減少を考慮したシナリオ(S1-6~5-6)を設定し、将来のGHG排出量を評価した。この結果、S1-6~S5-6では電力消費および発電によるGHG排出・削減がほぼなくなり、最も低くなったS5-6であってもS1比で15.2%減に留まり、2050年に実質排出量を0以下とするには、CO₂直接排出量のうち少なくとも20.3%を回収・貯留する必要があることが明らかとなった。

三重県の人口減少・高齢化地域における可燃ごみの処理方法ごとのエネルギー有効利用量を評価した。将来、将来、可燃ごみの組成が変化しても、可燃ごみの生物乾燥・SRF化がエネルギーの有効利用の観点で最も有効であることを示した。

将来の可燃ごみ処理を想定し、ラボスケールおよびパイロットスケールでの生物乾燥実験を行った。紙おむつ中の高分子吸水材の影響を考慮して、生物乾燥処理にあたって、充填密度ならびに通気量といった運転パラメータを適切に調整する必要性が示された。パイロットスケールでの生物乾燥・分級実証試験では、将来の可燃ごみのBaUごみ組成と対策ごみ組成のいずれについても、生物乾燥および分級が適用可能であり、十分な発熱量を有する代替燃料画分が生産可能であることが確認された。紙おむつ中の高分子吸水材が水分を保持し、廃棄物どうしを結着することが目視および物質収支から観測されたが、選別性能を低下させるほどの影響は示さなかった。以上のことから、将来の廃棄物処理・資源化技術のひとつとして、生物乾燥及び分級技術の適用可能性が示された。

1. 研究開発目的

京都市を対象とし、都市ごみ焼却施設からのGHG排出量の2050年までの推定として、サブテーマ1で得られた結果を基に、各シナリオ設定におけるインベントリ分析を行い、人口減少や高齢化、種々のCN政策シナリオの影響を明らかにすることを目的とする。

脱炭素社会において、ごみ処理システムを評価する新たな指標を提案する。さらに人口減少・高齢化地域において、可燃ごみの価値を高める処理方法を提案し、定量的に評価する。

人口減少・高齢化地域において一般廃棄物の持続可能な処理・資源化システムを検討するうえで、その中核となりうる技術のひとつとして生物乾燥・分級による代替燃料製造プロセスをとりあげ、その適

用可能性について検討する。

2. 研究目標

焼却ごみの「直接焼却」、「自区内」、「直営」処理に代わる資源化システムを描出し、資源化システムのライフサイクルインベントリを分析するためのツールとして資源化システムモデルを設計する。BaU処理システムと資源化システムのライフサイクルインベントリを比較評価する。将来想定される可燃ごみの組成を踏まえて生物乾燥（Bio drying）及び分級技術の適正運転に係る技術上の要点を示すとともに、地域へのシステム導入可能性評価に資する技術上のパラメータを提示する。

3. 研究開発内容

3. 1 都市ごみ焼却施設からの温室効果ガス排出量の将来推定

(1) 都市ごみ焼却、およびメタンコンバインドシステムにおけるGHG排出量の試算モデル

都市ごみ焼却施設、メタンコンバインドシステムそれぞれにおいて、都市ごみ全体の低位発熱量、発電電力量、消費電力量、都市ごみの燃焼によるCO₂排出量、そのうち非バイオマス由来のCO₂排出量、CH₄排出量、N₂O排出量を算出した。

家庭系・事業系両方を含めた都市ごみ焼却施設に流入する都市ごみについて、サブテーマ1で特性値分析を行った14種類のごみの組成区分ごとの排出量をZⁱ (kg/day)とした。Zⁱのうちのごみの可燃分の割合をBⁱ (%)、可燃分中の炭素・水素の割合をCⁱ、Hⁱ (%)、炭素中のバイオマス炭素割合をr_Bⁱ (%)、湿基準低位発熱量をH_Lⁱ (kJ/kg)とした。

ごみ組成区分ごとの可燃分の重量B_wⁱ (kg/day)を式(1)で求めた。次に式(2)にしたがって、これらの和をとり、ごみの全重量Q (kg/day)で除することでごみ総量中の可燃分の割合B(%)を求めた。同様の計算を行って水分、灰分についてもごみ総量中の割合を求めた。

$$B_w^i = Z^i \times \frac{B^i}{100} \quad (1)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^{14} B_w^i}{Q} \times 100 \quad (2)$$

ごみ全体の低位発熱量H_L (kJ/kg)については式(2.3)でごみ全体の発熱量を求めた。

$$H_L = \frac{\sum_{i=1}^{14} Z^i \times H_L^i}{\sum_{i=1}^{14} Z^i} \quad (3)$$

以下に焼却とメタンコンバインドシステムのGHG排出量の計算方法を示す。

1) 焼却

CO₂排出量のうち、ごみ組成区分ごとのバイオマス炭素割合を用いて、非バイオマス由来のCO₂直接排出量を算出した。式(4)に従って、ごみ組成区分ごとの非バイオマス由来のCO₂直接排出量Q_{CO₂f}ⁱを算出し、これらを合計した。

$$Q_{CO_2f}^i = B_w^i \times \frac{C^i}{100} \times \frac{100 - r_B^i}{100} \times \frac{44}{12} \quad (4)$$

また、CH₄排出係数、N₂O排出係数を用いてCH₄とN₂Oの排出量を求めた。次に、ごみ量当たりの消費電力量を用いて消費電力量を求め、電力のCO₂排出係数を乗じて消費電力によるCO₂排出量を求めた。さらに、組成区分ごとの可燃分量・低位発熱量、発電効率を用いて発電電力量を求めた上で、電力のCO₂排出係数を乗じて発電によるCO₂削減量を求めた。最後にCO₂換算係数を用い、CH₄とN₂Oの排出量をCO₂排出量に換算した上で、これらを総和し、施設からの実質排出量を算出した。各設定値を表1¹⁷⁾に示した。発電効率、電力のCO₂排出係数についてはシナリオにより異なるため後述する。

2) メタンコンバインドシステム

メタン化施設に投入された都市ごみの組成区分ごとの量に対して、投入TS比ガス発生量を乗じ、ガス発熱量、発電効率を用いてガス発電量を求めた。メタン化施設における消費電力量は投入された都市ごみ量に対して、ごみ量当たりの消費電力量を乗じて求めた。ガス発電量と消費電力量に電力のCO₂排出係数を乗じて、それぞれ消費電力による排出量、発電による削減量を求めた。焼却に流れた都市ごみとメタン発酵残渣については、1)と同様の計算を行った。各設定値を表2.1^{1)~7)}に示した。

(2) 2050年までの都市ごみ焼却施設由来のGHG排出量のシナリオ評価

京都市内では京都市北部クリーンセンター(2007年稼働、400 t/day)、京都市東北部クリーンセンター(2001年稼働、700 t/day)、京都市南部クリーンセンター(2019年稼働500 t/day)の3つのごみ処理施設が稼働中である。このうち南部クリーンセンターについてはバイオガス化施設(60 t/day)が併設されている。従来の施設更新ペースを維持すると仮定すると、北部クリーンセンターについては2037年、東北部クリーンセンターについては2031年、南部クリーンセンターについては2049年に建て替えが行われ、施設の処理能力に変化が起きると考えられる。サブテーマ1で推計した焼却ごみ量を参考に、建て替え後の各焼却施設の処理能力を推計し、処理能力の比で焼却ごみの全量を割り振ると仮定した。施設ごとにGHG排出量の試算を行い、最終的に3施設の計算結果を合計した。

サブテーマ1で明らかにした、各ごみ組成区分の特性値分析結果と、将来の焼却ごみ量や性状の詳細推計モデルを用いて都市ごみ焼却施設由来の将来のGHG排出量を5つのシナリオ(BaUシナリオ(S1)、ごみ減少シナリオ(S2)、+バイオマスプラスチック導入シナリオ(S3)、+発電効率向上シナリオ(S4)、メタ

表2.1 試算モデルに使用した各設定値^{1)~7)}

項目		単位	値	出典
	ごみ量当たりの消費電力量	kWh/t-wet	149	1)
焼却施設	CH ₄ 排出係数	g-CH ₄ /t-wet	2.6	2)
	N ₂ O排出係数	g-N ₂ O/t-wet	37.8	
機械選別率	厨芥	%	100	3)
	紙類	%	65	
	プラ類	%	20	
	繊維類	%	15	
	上記以外	%	40	
可燃分の分解率	厨芥	%	78	4)
	紙類	%	67	
	木竹草木類、繊維類、ゴム皮革類、その他	%	15	
	上記以外	%	0	
メタン化施設	分解後の固形分捕集率	%	86	5)
	残渣含水率	%	65.1	
可燃分比ガス発生率	厨芥	Nm ³ /kg-可燃分	0.660	4)
	紙類	Nm ³ /kg-可燃分	0.549	
	木竹草木類、繊維類、ゴム皮革類、その他	Nm ³ /kg-可燃分	0.121	
	上記以外	Nm ³ /kg-可燃分	0	
ガス発熱量		MJ/Nm ³	22	
発電効率		%	40.2	6)
発生ガス中の割合	CH ₄	%	60	
	CO ₂	%	40	
メタン化施設におけるごみ量当たりの消費電力量		kWh/t-wet	118	1)
GHG計算	CH ₄ のCO ₂ 換算係数	CO ₂ /CH ₄	29.8	7)
	N ₂ OのCO ₂ 換算係数	CO ₂ /N ₂ O	273	

ンコンバインドシステム積極導入シナリオ(S5)で、試算した。特にS3～S5については、S2のごみ減少シナリオに、それぞれの施策を順に加えていくことを想定して試算を行った。これら5つのシナリオでは、電力のCO₂排出係数は将来的にも変化しないとしたが、別途、再生可能エネルギー導入による電力のCO₂排出係数の減少シナリオ(S6)を考慮し、上記5つのシナリオと組み合わせた試算を行い、それぞれS1-6、S2-6、S3-6、S4-6、S5-6として標記した。以下に各シナリオの詳細を記す。

1) BaUシナリオ(S1)

サブテーマ1のBaUシナリオとして推計したごみ量を用いた。将来にわたってごみ中のバイオマス炭素割合など性状に変化はなく、都市ごみ焼却施設の更新はあるものの、発電効率に大幅な上昇は生じないものとした。具体的には、発電効率は更新までは現在の値⁶⁾を用い北部14.3%、東北部13.7%、南部20.6%とし、更新後は現在の最新の施設である南部の20.6%まで全ての処理場の発電効率が上がると設定した。北部・東北部については単独焼却、南部についてはメタンコンバインドシステムの計算を行った。電力のCO₂排出係数については2020年の電力の排出係数の代替値470(g-CO₂/kWh)を用いた⁸⁾。

2) ごみ減少シナリオ(S2)

サブテーマ1の対策導入シナリオとして推計したごみ量を用い、他の設定についてはS1と同様の前提条件で計算を行った。

3) バイオマスプラスチック導入シナリオ(S3)

S2の設定の下で、プラスチックの炭素中のバイオマス炭素割合が上昇する設定を加えた。プラスチック資源循環戦略⁹⁾によると、バイオマスプラスチックは2030年に200万t(バイオマス度は30～40%)導入される目標がある。プラスチック循環利用協会¹⁰⁾の1996年から2019年までの国内樹脂製品消費量を用いて2030年の消費量を式2.5で推計すると、2030年には885万tとなると推計される。2030年にこのうち200万tがバイオマス炭素割合35%のバイオマスプラスチックに置き換わるとすると、2030年にはプラスチック中の7.9%がバイオマス素材に変わることになる。2030年以降は、プラスチック中のバイオマス炭素割合が各年一定の割合で上昇していくと仮定した。また、紙おむつについては、紙おむつは材料に紙とプラスチックの両方を含むため、現在のバイオマス炭素割合は約50%であるが、2050年にはバイオマスプラを導入することで100%がバイオマス由来のものになると仮定し、現在の値から今後2050年まで各年一定の割合でバイオマス炭素割合が上昇していくと設定した。**表2.2**に各項目のバイオマス炭素割合の推移を示した。

4) 発電効率向上シナリオ(S4)

S3までの設定に加えて、発電効率がさらに上昇する設定を加えた。施設更新の際に6 MPa、450℃の高効率発電施設を導入すると仮定し、S3までよりも発電効率が上がり、北部は2037年以降23.0%、東北部は2031年以降24.0%、南部は2049年23.0%になると設定した¹¹⁾。なお、発電効率の向上に関しては、蒸気条件の変更によりエンタルピーから計算すると約1%の向上が見込める。さらに、現在京都市で採用されている湿式スクラバー+脱硝触媒による排ガス処理に変えて、更新の際にエネルギー回収率がより高い乾式を採用することで現在より3～4%高い発電効率が実現されるものとした。

5) メタンコンバインドシステム導入シナリオ(S5)

S4までの設定に加えて、施設更新の際にメタンコンバインドシステムがより積極的に導入されるシナリオを想定した。具体的には、表1のごみ組成区分ごとの機械選別率に従って、メタン化対象ごみがすべてメタン発酵施設で処理される設定とした。

6) 再生可能エネルギー導入による電力のCO₂排出係数の減少シナリオ(S1-6～S5-6)

表2.2 バイオマス炭素割合の設定値

バイオマス炭素割合の設定値(%)	2025	2030	2035	2040	2045	2050
プラスチック (容器包装プラ・ラップ・製品プラ)	4.0	7.9	11.9	15.8	19.8	23.7
大人用紙おむつ	61.7	69.3	77.0	84.7	92.3	100
子供用紙おむつ	59.2	67.3	75.5	83.7	91.8	100

将来的に発電において再生可能エネルギーが普及することにより、電力のCO₂排出係数が減少するシナリオを設定した。2000年と2016年の電源別CO₂排出量¹²⁾から2030年の電源別CO₂排出量を設定した上で、第6次エネルギー基本計画¹³⁾における2030年のエネルギーミックスを用いて2030年の発電電力当たりのCO₂排出量を求めると319(g-CO₂/kWh)となった。これと2020年の電力の排出係数の代替値470(g-CO₂/kWh)を用いて⁸⁾、2050年まで線形で排出係数が減少していくと仮定した。

3.2 将来の可燃ごみ処理方法とエネルギーの有効利用

「焼却」「直営」「自区内処理」を代替する資源化システムモデルとして、小規模自治体をターゲットとした生物乾燥(Bio drying)による資源化(燃料化)システムモデルの導入効果を検証した。

まず、生物乾燥システム、RDF(Refuse Derived Fuel: 固形燃料)システム、焼却システムのインベントリを作成するために、ヒアリングおよびアンケート調査を実施した。

生物乾燥システム(以下、「SRF化」という。)は、廃棄物を対象とした機械選別と生物処理を組み合わせたシステムであり、欧米では先行的に実施されているが、国内では香川県三豊市の施設しか例がない。具体的には可燃ごみを破碎し、木くず等と混合し、廃棄物中の有機物を分解・乾燥することで減容化し、残渣物を機械選別することでフラフ状のSRFとなる。ヒアリング対象施設では投入したごみは49%まで減容化していた。しかし、SRFはそのまま石炭代替燃料として利用するには塩素濃度が高いため、塩素濃度の低下と発熱量上昇を目的として産業廃棄物起源のプラスチックごみと混合しSRFが製造される。今回、ヒアリング調査を実施した施設でも製造したSRF原料を別工場に搬送し、廃プラスチックを添加し、破碎・選別・成形工程の後、SRFとして出荷されている。しかし、昨今の急速な脱炭素化の流れ、とりわけ脱石炭の点から製紙工場等はこれまで制約条件となっていた塩素濃度を撤廃し、廃棄物燃料の利用が拡大しつつある。そのため、ここでの検証ではヒアリング施設の工程に別工場の成形工程を追加したプロセスで評価するとし、施設内のマテリアルフローをヒアリングした。次にRDFシステムは、一般廃棄物を固形燃料とするために可燃ごみを破碎し、灯油等による燃焼による乾燥により廃棄物の水分を除去し、燃料化するシステムである。生物乾燥システムと同様に3つの施設に対してアンケート調査を実施し、施設内で利用される電力およびユーティリティ消費量を把握した。最後に焼却システムを評価するために、2010年から2020年までに新設された154の焼却施設を対象に処理施設の仕様についてアンケート調査を実施した。回答率は59.7%(92施設)であり、調査では施設における物質フロー、施設内でのユーティリティ使用量、発電量、ごみ性状、管理体制を調査した。ここでは、小規模自治体を対象とするため、発電しない70t以下の施設データ(17施設)を抽出し、各施設のごみ処理量と電力消費量、ユーティリティ消費量(用水、消石灰、キレート剤)のデータを利用した。

人口減少・高齢化を背景とした将来のごみ処理システムを検証する上で、評価指標をCO₂排出量として評価したが、2030年に温室効果ガス排出量の半減が目標とされるなど、今後の急速な脱炭素の流れを踏まえると、CO₂排出量が果たして評価指標として適切かという課題に直面した。特に、施設寿命が20~30年もあるごみ処理施設を核としたごみ処理全体を評価する上では、施設の電力が再生可能エネルギーに代替されるようになれば、評価結果が大きく異なることにある。そこで、新たな評価指標として、ごみが持つエネルギーをどれくらい有効に活用できているのかという視点で改めて評価することとした。単独焼却シナリオ(BaU)、広域焼却シナリオ、RDF化シナリオ、SRF化シナリオを設定、評価した。RDF化シナリオおよびSRF化シナリオでは、各々処理後は製紙工場等で燃料利用されるとした。それぞれの評価枠組は以下に示すとおりである。

(a) 【単独焼却における可燃ごみのエネルギー有効利用量】

$$= \text{焼却時の電力消費}$$

(b) 【広域焼却(電熱利用)における可燃ごみのエネルギー有効利用量】

$$= \text{発熱量} + \text{発電電力量} - \text{焼却時の電力消費} - \text{輸送燃料消費}$$

$$= \text{ごみ低位発熱量} \times (\text{発電効率} + \text{熱利用率}) - \text{焼却時の電力消費} - \text{輸送燃料消費}$$

(c) 【RDF化における可燃ごみのエネルギー有効利用量】

$$= \text{発熱量} + \text{発電電力量} - \text{生物乾燥電力消費} - \text{輸送燃料消費}$$

=低位発熱量×(発電効率+熱利用率) - (RDF時の電力, 燃料消費) - 輸送燃料消費

(d) 【SRF化(生物乾燥)における可燃ごみのエネルギー有効利用量】

=発熱量+発電電力量-生物乾燥電力消費-輸送燃料消費

=低位発熱量×(発電効率+熱利用率) - (生物乾燥時の電力, 燃料消費) - 輸送燃料消費

広域焼却では、可燃ごみの燃焼によるエネルギー回収効率の最小値を17.7%、最大値を45%と設定した。最小値はアンケート調査に基づき、最大値は現在実施される最大レベルを参照した。RDF化のエネルギー回収効率は、最小値を28% (三重ごみ固形燃料発電所での発電効率) とし、最大値を48% (余熱利用率を20%上乘せ) とした。SRF化では、SRFを燃料として利用する製紙工場およびセメント工場におけるエネルギー回収効率から最小値を60%、最大値を80%と設定した。

3.3 可燃ごみの生物乾燥の適用可能性評価

(1) 将来想定される廃棄物の生物乾燥技術による処理特性の検討

代替燃料化の要素技術である生物乾燥(bio drying)及び分級技術の、国内最適化に係る技術的検討を行う。将来想定される可燃ごみの湿潤性などの特性に対して最適な生物乾燥運転方法を実験的に検証した。サブテーマ1で提示された南伊勢町でのごみ組成を参考に、基本的な可燃ごみ組成(動物系食品残さ: 5.7%、食品系植物残さ: 17.5%、同不可食部および枝葉類17.8%、紙類: 12%、プラスチック類: 7.0%、有機系残さ: 23%、無機系残さ: 17%)を設定し、対象廃棄物として調整した。同廃棄物を用いて、効率的な生物乾燥および分級プロセスのネックとなることが知られている廃棄物中の水分について持ち込み水分の影響を評価するとともに、その除去(蒸発)メカニズムについて考察を加えた。生物乾燥処理は、容器内に直径250 mm x 高さ700 mmの円筒容器に廃棄物を投入した上で、15分間通気、45分間無通気の間欠運転を実施した。また初日以降3日おきに切り返しを行った。試験期間を通じて、重量の減少、含水率、水分蒸発量、二酸化炭素発生量を計測した。

さらに、上記の検討結果を踏まえて、紙おむつを含む廃棄物を対象にした処理特性の検討を行った。基本的な可燃ごみ組成を維持したまま、紙おむつが全体の10%となるよう調整したうえで、同様の生物乾燥処理を実施した。紙おむつは使用済みの状態を想定し、人工尿¹⁾ 90 mlおよび人工便²⁾ 20 gを事前に含ませたうえで廃棄物に添加した。

(2) 将来想定される廃棄物の生物乾燥処理実証試験

将来の廃棄物組成に対する生物乾燥処理の適用性を検討するため、パイロットスケールの実証試験を実施した。香川県三豊市で実施されている生物乾燥を用いた燃料化システムの運転実績を参考に、20 m³の生物乾燥実証槽に対して、3500 kgの廃棄物および同量の副資材を投入し、2週間の運転ののち、選別し燃料画分の性状評価に供した。投入する廃棄物組成については三豊市で調達できる廃棄物組成も加味したうえで、(A)将来の廃棄物組成および(B)循環・廃棄物政策としてプラスチック削減および紙類の分別・資源化対策が実行された場合の廃棄物組成の二種類を用意した。具体的な組成としては、(A)紙類22.1%、紙おむつ14.0%、布類5.4%、プラ類12.6%、ゴム・皮革類1.9%、木、竹、わら類7.5%、厨芥類32.6%、不燃物+その他3.9%、ならびに(B)紙類10.2%、紙おむつ21.9%、布類1.7%、プラ類3.6%、ゴム・皮革類3.0%、木、竹、わら類11.9%、厨芥類41.6%、不燃物+その他6.1%とした。

4. 結果及び考察

4.1 2050年までの都市ごみ焼却施設由来のGHG排出量の推計

再生可能エネルギー導入により2050年まで電力のCO₂排出係数が減少していくとしたシナリオ(S1-6～S5-6)について、図2.1に非バイオマス由来のCO₂直接排出量、CH₄のCO₂換算排出量、N₂OのCO₂換算排出量、電力消費によるCO₂排出量、発電電力によるCO₂削減量、さらにそれらを合計した実質排出量の推移を示した。図2.1では、どのシナリオにおいても、電力消費によるCO₂排出量、発電電力によるCO₂削減量は2050年にはほぼゼロになることが確認された。詳細には、現在のCO₂排出係数が470 g-CO₂/kWh⁸⁾であるのに対して、2050年の電力のCO₂排出係数の設定値を16 g-CO₂/kWhとほぼ無視できる値に設定していることから、電力を消費することによるCO₂排出量や発電による削減量は直接排出量に比べて非常に小さいものとなった。すなわち、2050年における都市ごみ焼却施設およびメタンコンバインド施設からのGHG排出量は非バイオマス由来のCO₂直接排出量となり、廃棄物中に含まれる非バイオマス成分量に依存することになる。

本研究の結果として、GHG削減の面からは、ごみ発電の寄与は将来非常に小さくなることが試算された。しかし、ごみ発電は、太陽光や風力などの自然依存型再生可能エネルギーに比較して、安定した発電が可能であり、売電等を考えると、この点については優位性がある上、CCS稼働にも電力が必要であり、発電電力はここにも充てることができる。したがって、コスト面も含めて、ごみ発電は依然として重要であると考えられる。さらに、今後は都市ごみ焼却施設からの熱供給についても考える必要がある。熱供給については利用先との距離やコストに制約があるが、環境省は廃棄物のもつエネルギー源としての価値を最大限に活かし、地域への多様な価値の創出を実現するために廃棄物エネルギー利活用計画策定指針^{15), 16)}を策定している。今後は熱供給によるGHG削減についても考えねばならない。

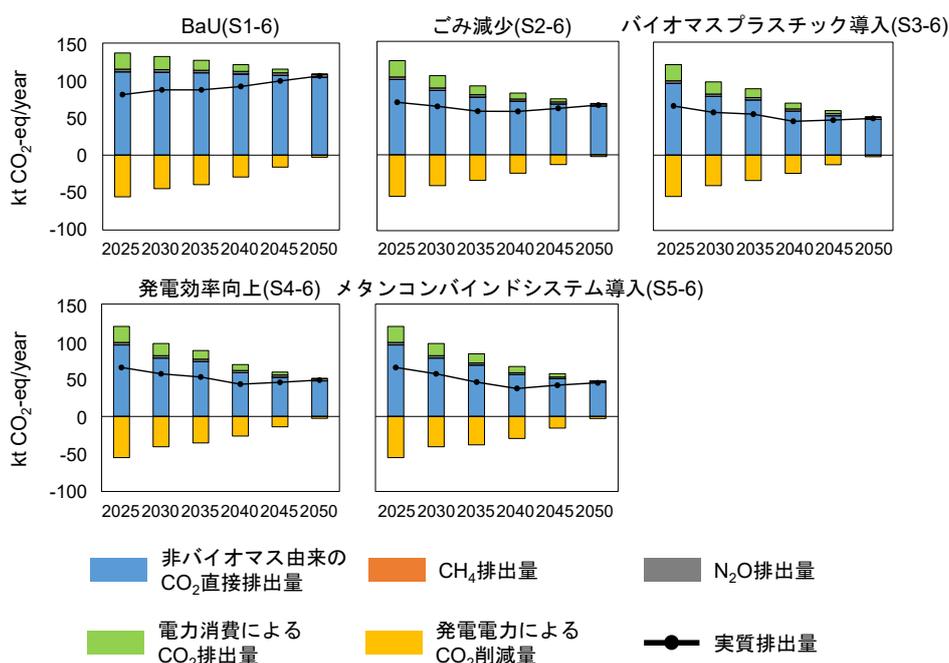


図2.1 各シナリオのGHG排出量予測結果

4. 2 将来の可燃ごみ処理方法とエネルギーの有効利用

三重県内29自治体を対象に現在と将来の可燃ごみのエネルギー有効利用量を推計した。ここでは尾鷲市および南伊勢町を事例にして、単独焼却、広域焼却、RDF化、SRF化の4つの処理シナリオにおける可燃ごみのエネルギーの有効利用量の推計結果を示す（図2.2、図2.3）。図中における数値は各処理シナリオにおける可燃ごみのエネルギーの有効利用量の最小値（下段）と最大値（上段）を示している。単独焼却は可燃ごみを燃焼処理し、エネルギーは回収しないので、最小値と最大値は同値である。いずれの自治体においても、単独焼却およびRDF化（最小値）は可燃ごみのエネルギーの有効利用量がマイナス値になっているが、前者は可燃ごみのエネルギーを有効利用していないためであり、後者はRDF化工程における施設内電力消費および水分除去のための燃料消費が大きいため、可燃ごみのエネルギー以上に外部からの投入を必要としているためである。また、可燃ごみが持つエネルギーを最も有効に利用できていたのがSRF化であり、次いで広域焼却であった。この要因の一つとして、エネルギー回収効率の違いがあり、SRFおよびRDFは製紙工場等で60～80%が有効に利用される一方で、広域焼却は45%に留まっていることが影響している。また、廃棄物のエネルギーの有効利用率（可燃ごみのエネルギーの有効利用量を可燃ごみの低位発熱量で除した値）で見ると、広域焼却は概ね35～40%であり、SRFは45～65%とかなり幅がある。SRF化は燃料化の過程で水分を除去し、厨芥類等の有機物を分解することにより、廃棄物自体が減少することに加えて、組成が大きく変化するため、基準となる2020年の時点でのプラスチック類や紙類が多い自治体では相対的に可燃ごみのエネルギー有効利用量が高いが、2045年に対策によってプラスチック類が減少するため、可燃ごみのエネルギー有効利用量が低下する。

SRF化ではシナリオによってプラスチックおよび紙ごみが減少するが、可燃ごみ中の水分が減量されていること、さらに重量が減少するため、輸送負荷が広域焼却と比較して小さいことも影響している。一例として、紀宝町の2045年のBaUごみ組成、対策ごみ組成、対策強化ごみ組成に基づき、輸送距離100kmと300kmを比較した結果を図2.4に示す。SRF化では輸送距離が伸びても廃棄物のエネルギー利用量の減少は小さいが、広域焼却はその差分が拡大する。つまり、SRF化は周辺に連携できる規模の大きい自治体がなく、長距離の輸送を強いられる小規模自治体に適しているといえる。SRF化は脱炭素が喫緊の課題となっている製紙工場やセメント工場、さらには製鉄工場といった施設だけでなく、化石燃料の代替燃料として様々な施設と連携することで廃棄物が持つエネルギーを有効に利用でき、小規模自治体の将来の廃棄物処理システムの選択肢として有効な手段となりえる。

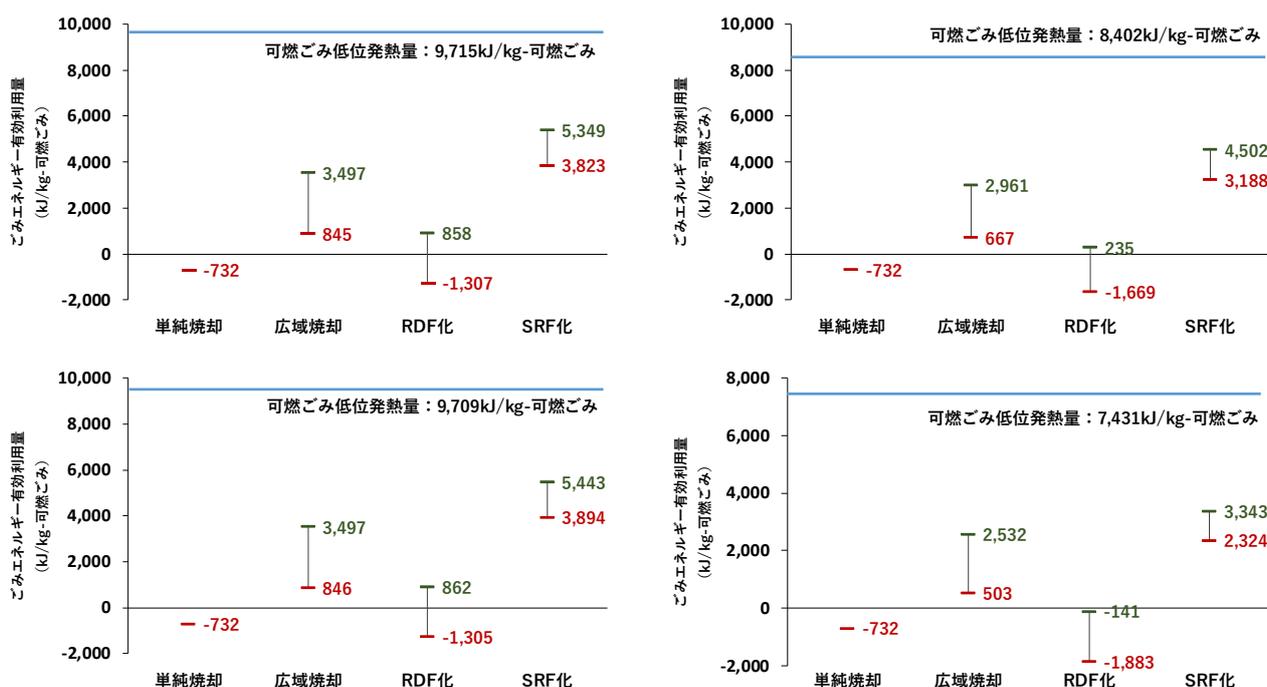


図2.2 シナリオに基づく尾鷲市における可燃ごみのエネルギーの有効利用量

(左上)2020年、(右上)2045年対策ごみ組成、(左下)2045年BaUシナリオ、(右下)2045年対策強化ごみ組成

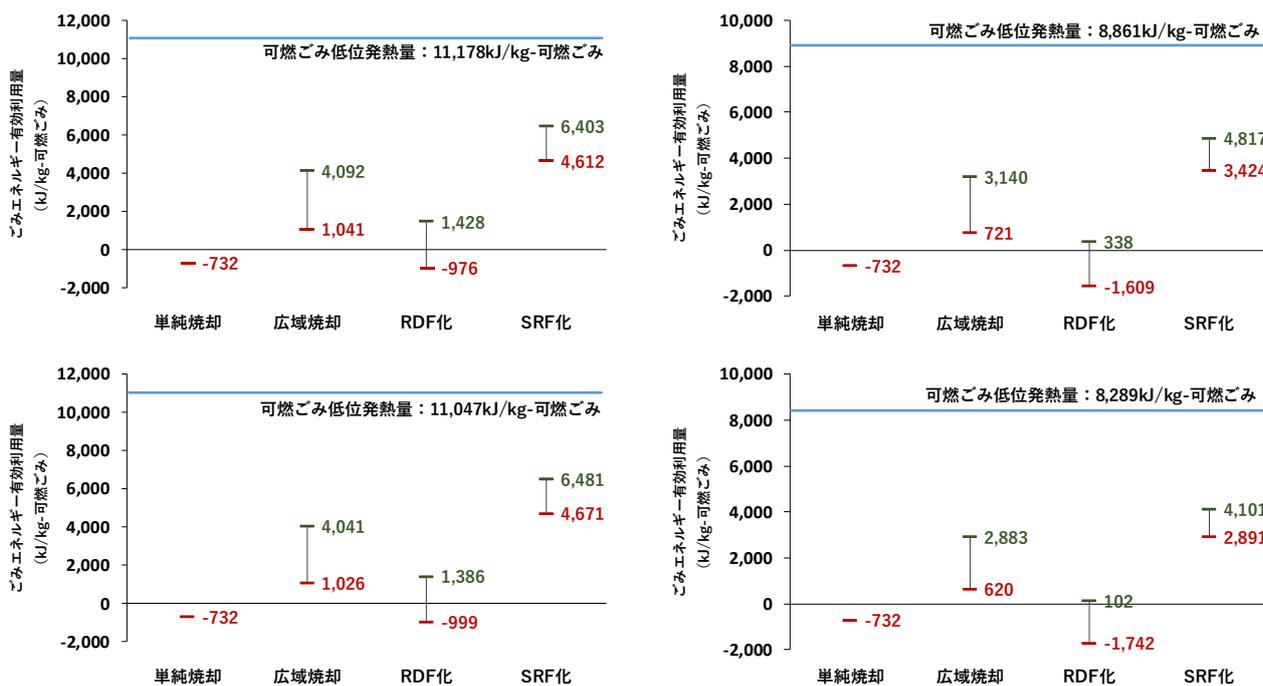


図2.3 シナリオに基づく南伊勢町における可燃ごみのエネルギーの有効利用量
 (左上) 2020年、(右上) 2045年対策ごみ組成、(左下) 2045年BaUシナリオ、(右下) 2045年対策強化ごみ組成

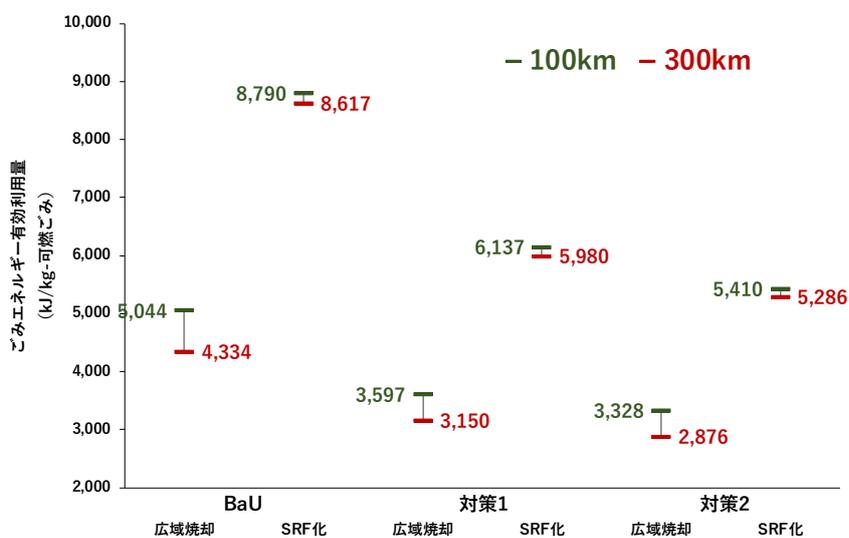


図2.4 可燃ごみエネルギーに対する輸送距離の影響

4.3 可燃ごみの生物乾燥の適用可能性評価

(1) 可燃ごみを想定した廃棄物の生物乾燥処理特性

廃棄物の初期水分含有量を調整した上で、廃棄物充填密度を 400 kg/m^3 、通気量を 1000 ml/分 として生物乾燥処理を実施した際の廃棄物温度および炭素分の分解量の経時変化を図2.5に示す。初期含水率が高いほど温度の最高値は低くなる一方で、炭素分の分解量は増加する傾向が示された。すなわち、含水率が高い場合は、炭素分の分解に伴う生成熱が系内の温度上昇（蓄熱）に利用されず、別の用途に消費されていることを示唆している。また、図2.6には、炭素分解量あたりの水分蒸発量（生物乾燥指数）の経時変化を示す。いずれの含水率条件においても、温度変化が減少に転じるタイミングに前後して蒸発が活発となっていた。すなわち、炭素分の分解に伴う生成熱の一部は潜熱として消費されていたことが推測される。また、蒸発挙動は炭素成分の分解にも追従していることから、廃棄物の水分保持性能が有機物の分解によって変化したことで、保持していた水分の蒸発が促されるというメカニズムが類推可能である。生物処理において温度は容易に観測可能な運転指標の一つであるが、生物乾燥においては実質的な蒸発・乾燥を必ずしも反映しておらず、水分蒸発および有機物の分解挙動による評価の必要性が示された。また、効率的な乾燥と分級を進めるには、対象とする廃棄物の水分保持性能の制御が求められることが明らかにされた。

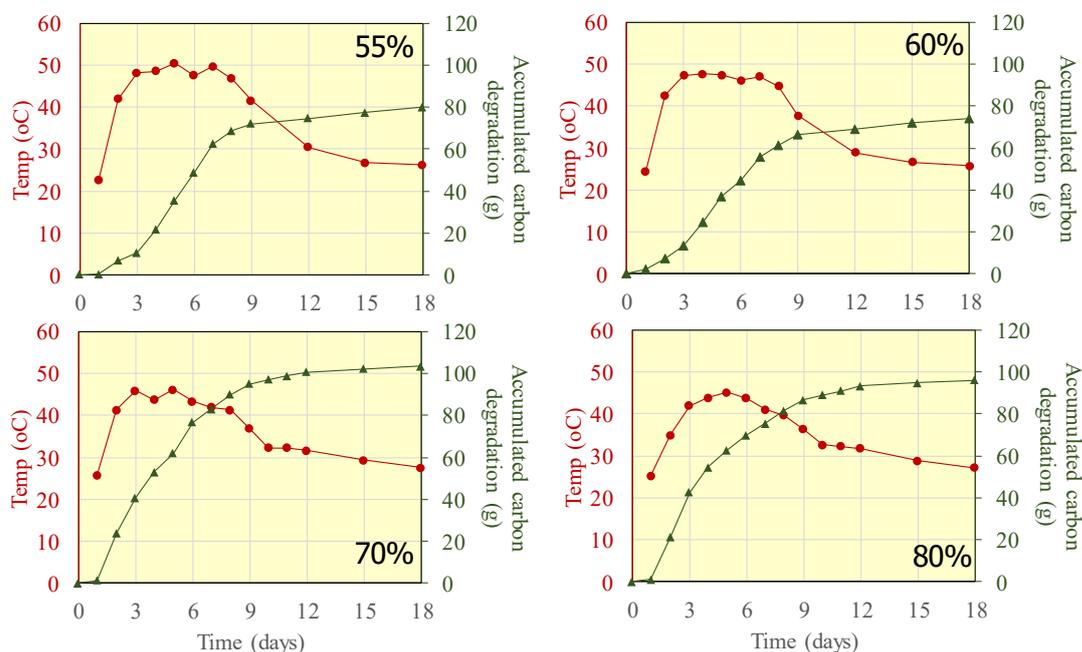


図2.5 生物乾燥処理における温度および炭素分解量の経時変化

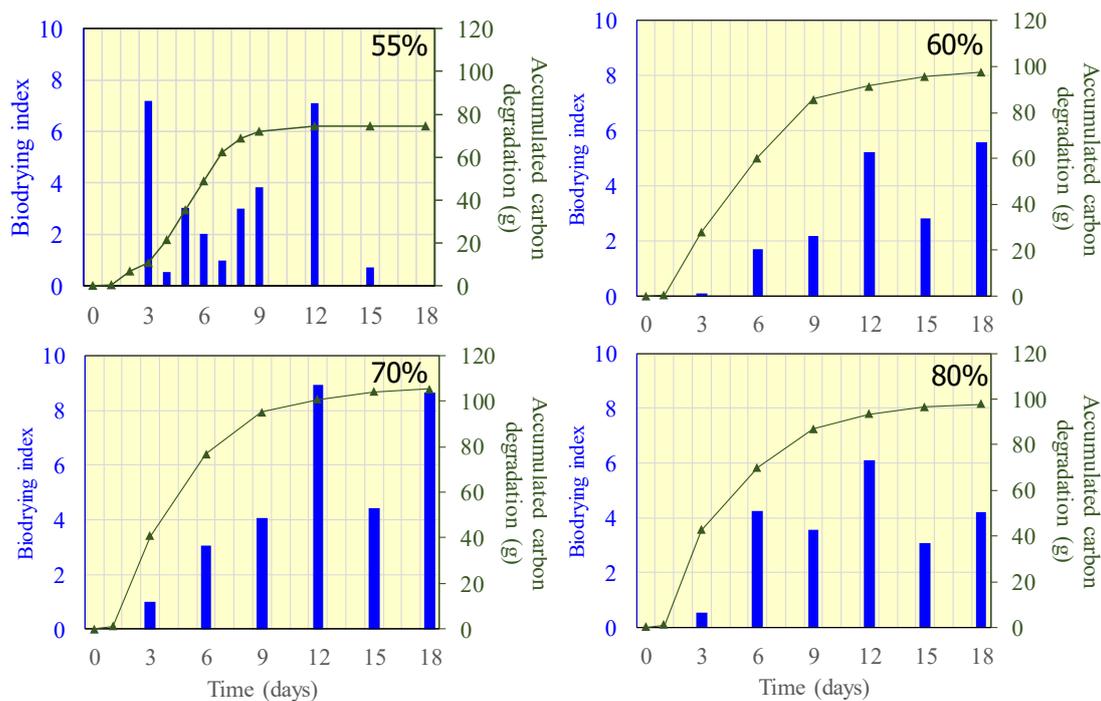


図2.6 生物乾燥処理における生物乾燥指数および炭素分解量の経時変化

(2) 紙おむつを含む将来の廃棄物を対象とした場合の生物乾燥処理特性

紙おむつを含む廃棄物組成を調整し、(1)と同様の運転条件で生物乾燥処理を実施したところ、廃棄物温度の上昇が確認されなかった。これについて、生物分解により発生した熱が、上記で指摘されたように潜熱として消費されている場合、紙おむつに含まれる高分子吸水材の水分保持により熱のシンクとなっていることが懸念される。これが水分蒸発の阻害要因となっている可能性があるため、その機構について詳細な検討を行った。紙おむつに代替して、高分子吸水材のみを添加して生物乾燥実験を実施した結果を図2.7に示す。乾燥状態の高分子吸水材を添加した場合は、高分子吸水材非添加（廃棄物のみ）で水分59%条件時と同様の温度上昇が確認された。すなわち、乾燥状態から吸水される過程においては、熱収支にほとんど影響を与えないことが推測された。一方で完全に湿潤させた状態の高分子吸水材を添加した場合には、温度上昇の鈍化が確認された。これは高分子吸水材が保持した水分が実質的に利用可能な状態ではないことによる生物反応に必要な水分の不足、同水分による潜熱消費、および膨潤によって透気性に影響を与えた可能性を示唆している。実際に廃棄される使用済み紙おむつおよびそれを模した実験廃棄物中の紙おむつに含まれる高分子吸水材は、完全に湿潤はしておらず、吸水能力としては余裕がある状態であることを確認している。すなわち、熱収支に高分子吸水材中の水分が影響している可能性も否定できないが、実用的な対策としては透気性を増すための運転条件の最適化を図ることとした。実験的な検討によって、廃棄物の充填密度を350 kg/m³、通気量を720 ml/分とすることで、温度上昇が確認されたことから、以降の検討ではこの条件を採用することとした。

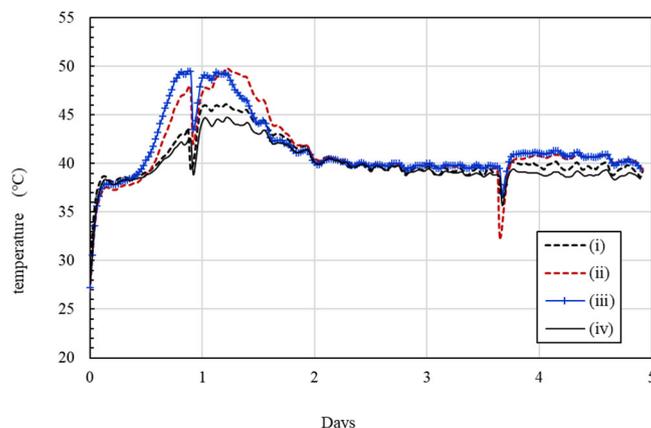


図2.7 高分子吸水材を添加した廃棄物の生物乾燥処理における温度変化(i)高分子吸水材なし、水分55%、(ii)高分子吸水材なし、水分59%、(iii)乾燥高分子吸水材40mg添加、水分59%、(iv)湿潤高分子吸水材10g(乾燥時40mg)添加、水分59%(高分子吸水材を除くと55%)

最適化の図られた実験条件下における、生物乾燥処理の実施結果を図2.8に示す。紙おむつ非添加系に対して、紙おむつ添加系ではおおむね早い温度上昇および高い二酸化炭素発生挙動を示した。特に二酸化炭素発生は、紙おむつに添加した人工尿および人工便の影響によるものと考えられ、有機物の生物分解に大きな影響を与えたことが明らかである。また、4日目および7日目の切り返し後における温度の再上昇についても、残存している有機物の分解を促進したことがうかがわれる。いずれにしても、実際に廃棄される紙おむつの性状を模した上で調整された廃棄物組成に対して、適切な運転条件を設定することで生物乾燥処理の適用が可能であることが確認された。

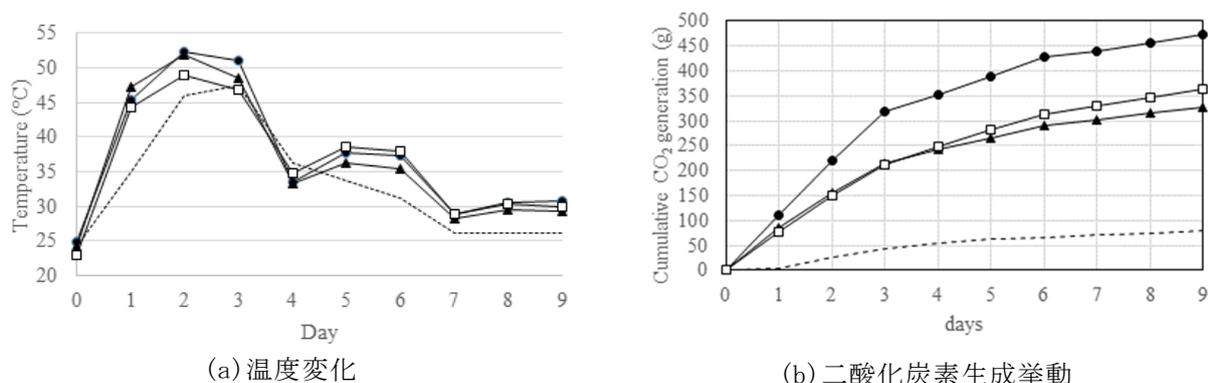


図2.8 最適条件下における廃棄物の生物乾燥処理実験における温度変化および二酸化炭素生成挙動
破線：紙おむつ非添加系、実線：紙おむつ添加系（実験系●I、▲II、■III：いずれも同条件）

生物乾燥実験の過程における廃棄物の含水率の変化について図2.9に示す。紙おむつ添加系では、人工尿及び人工便を含む影響で開始時の含水率がやや高くなるが、それでも全体の傾向としては紙おむつ非添加系と同様に経時的な含水率の減少、すなわち乾燥が確認された。ただし、同条件での繰り返しにもかかわらず、実験系IIの含水率減少は6.2%で、実験系I (4.4%) およびIII (3.9%) よりも進行していた。実験系IIは二酸化炭素発生量は他の系よりも低く、生物乾燥指数の点では効率的な乾燥が起こったことになるが、熱収支に大きな差異が生じた原因までは特定できていない。したがって、ここではあくまで廃棄物調整上の変動の範囲内ということで実験系I-IIIの結果についてまとめるに留める。紙おむつ非添加系の含水率減少(7.3%)に対して、非添加系の含水率減少(平均4.8%)が低くなったのは、紙おむつ中の高分子吸水材の水分保持によるところが大きく、処理後の目視観察においても高分子吸水材をバインダーとした廃棄物同士の結着がみられた(図2.10)。こうした状況が、生物乾燥後の選別および燃料化プロセスに与える影響について検討する必要性が示唆された。

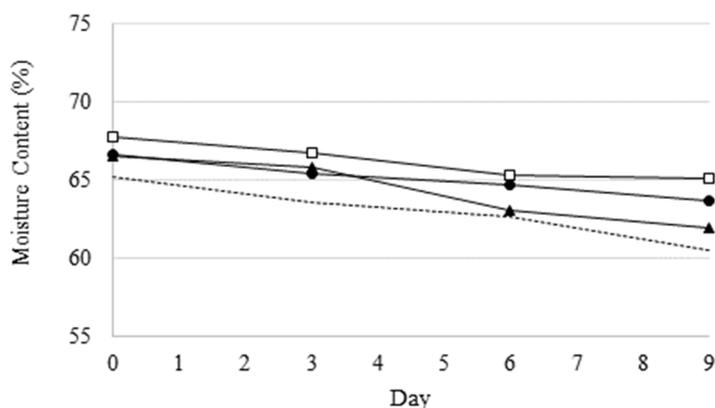


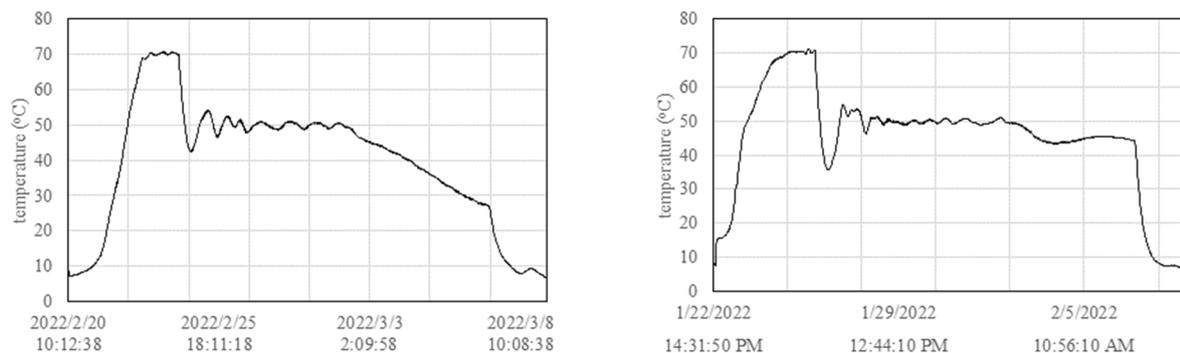
図2.9 生物乾燥処理における廃棄物の含水率変化



図2.10 生物乾燥処理後の廃棄物試料

4.3 将来想定される廃棄物の生物乾燥処理実証試験

将来の組成を模擬した廃棄物における生物乾燥処理実験を実施した結果、紙おむつを含む廃棄物組成を調整し、4.1節と同様の運転条件で生物乾燥処理を実施したところ、将来のごみ組成（通常）およびごみ組成（対策実施時）ともに、速やかな温度上昇が示された（図2.11、図2.12）。紙おむつ自体の混入が温度上昇に影響しないことが、実証規模でも確認されたほか、各種施策によりその他の廃棄物組成が変化した場合でも、十分対応可能であることも示されたものといえる。

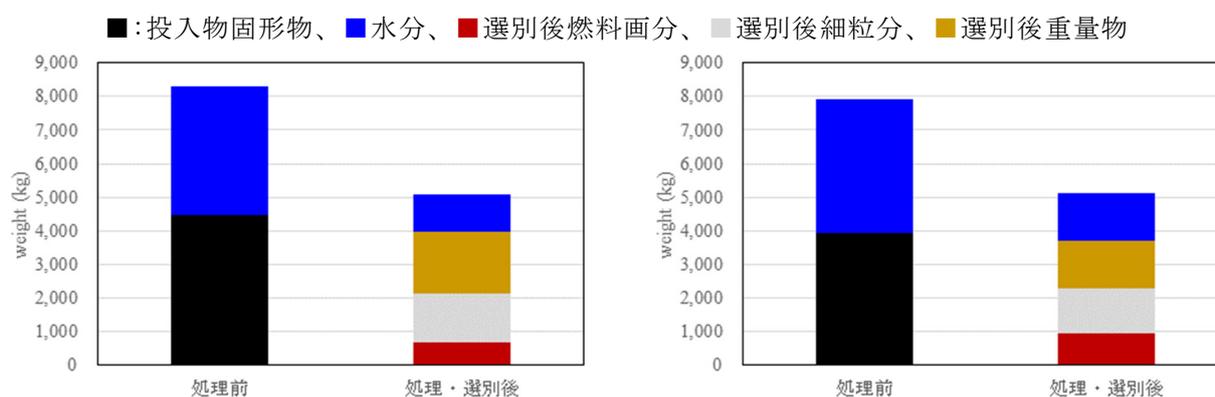


(a) BaUごみ組成

(b) 対策ごみ組成

図2.11 将来のごみ組成の生物乾燥処理実施時の廃棄物温度変化

生物乾燥処理前の投入物および、振動ふるい選別によって分級された処理物の物質収支を図2.12に示す。水分について、将来のごみ組成（通常）においては71%、将来のごみ組成（対策実施時）においては64%の削減が確認された。固形物分の重量減少は、将来のごみ組成（通常）においては12%、将来のごみ組成（対策実施時）においては6%程度であり、本プロセスが分解に基づく物質の削減よりも乾燥に主眼が置かれていることが改めて示されたものといえる。投入廃棄物に対する代替燃料画分の分級割合は、将来のごみ組成（通常）においては25%、将来のごみ組成（対策実施時）においては37%と見積もられた。将来のごみ組成（対策時）については、将来後ごみ組成（通常）にくらべておむつ割合が多いため、前節で示したような廃棄物どうしの結着により、燃料画分に移行する廃棄物の割合が高くなったことが推測される。ただ、燃料画分自体は十分な燃料品質を確保しており、選別不良等を引き起こすには至っていないことが示唆された。



(a) BaUごみ組成

(b) 対策ごみ組成

図2.12 将来のごみ組成の生物乾燥処理実証試験における物質収支

5. 研究目標の達成状況

技術的側面から可燃ごみの「直接焼却」、「自区内」、「直営」処理に代わる資源化システムとして生物乾燥・SRF化システムを提示し、エネルギーの有効利用の観点で有効性を示すことができた。また、将来的に可燃ごみの組成が変化しても生物乾燥技術および分級技術が適用可能であることを示すことができ、目標を上回る成果をあげた。

京都市を事例として、様々な処理シナリオを設定して将来の可燃ごみ処理に係るGHG排出量を算定した結果、どのシナリオにおいても電力消費によるCO₂排出量、発電電力によるCO₂削減量は2050年にはほぼゼロになることが確認され、GHG削減の面からは焼却発電の寄与は将来非常に小さくなることが試算された。将来の可燃ごみの処理方法を選択する際に、GHG排出量を評価指標することが必ずしも適切ではない可能性があり、可燃ごみのエネルギー有効利用量を評価指標として提案した。その結果、将来、可燃ごみの組成が変化しても、可燃ごみの生物乾燥・SRF化がエネルギーの有効利用の観点で最も有効であることを示した。さらにラボスケールおよびパイロットスケールでの生物乾燥実験を実施し、将来、可燃ごみの組成が変化しても生物乾燥及び分級技術は適用可能であることを証明することができた。

6. 引用文献

- 1) 京都市ヒアリング結果
- 2) 国立環境研究所：日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2021 年
http://www.nies.go.jp/gio/archive/nir/jqjm1000000x4g42-att/NIR-JPN-2021-v3.0_J_GIOweb.pdf (閲覧日 2021/9/22)
- 3) 高岡好和, 河村公平, 角田芳忠：南但地域における可燃ごみのバイオガス化と焼却のコンバインドシステム, 廃棄物資源循環学会誌, Vol.25, No.1, pp.36-42 (2014)
- 4) メーカーヒアリング結果
- 5) 井上裕晶, 大下和徹, 高岡昌輝, 藤森崇, 日下部武敏：都市ごみと汚泥を基質とした高温メタン発酵残渣の脱水・燃焼特性, 環境工学研究フォーラム講演集, Vol.56, p13 (2019)
- 6) 環境省：一般廃棄物処理実態調査結果、令和元年度調査結果、施設整備状況(2021)
- 7) IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L.Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- 8) 環境省：温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度、算定方法・排出係数一覧、電気事業者別排出係数一覧、令和3年提出用(2021)
https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/r03_coefficient_rev.pdf (閲覧日 2021/9/22)
- 9) 消費者庁、外務省、財務省、文部科学省、厚生労働省、農林水産省、経済産業省、国土交通省、環境省：プラスチック資源循環戦略(2019)
- 10) 一般社団法人プラスチック循環利用協会：プラスチック再資源化フロー図(1996-2019)
https://www.pwmi.or.jp/flow_backnumber.php (閲覧日 2021/10/13)
- 11) 環境省 環境再生・資源循環局：廃棄物・資源循環分野における 2050 年温室効果ガス排出実質ゼロに向けた中長期シナリオ(案)(2021)
http://www.env.go.jp/council/03recycle/y030-38b/mat01_1.pdf (閲覧日 2021/9/22)
- 12) 電力中央研究所：電力中央研究所報告、日本における発電技術のライフサイクル CO₂ 排出量総合評価(2016)
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDownload?reportNoUkCode=Y06&tenpuTypeCode=30&seqNo=1&reportId=8713> (閲覧日 2021/10/13)

- 13) 資源エネルギー庁：エネルギー基本計画(素案)の概要 (2021)
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/046/046_004.pdf(閲覧日 2021/10/13)
- 14) Pour, N., Webley, PA., Cook, PJ.: Potential for using municipal solid waste as a resource for bioenergy with carbon capture and storage (BECCS), International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol.68, pp.1-15 (2018)
- 15) 環境省環境再生・資源循環局廃棄物適正処理推進課：廃棄物エネルギー利活用計画策定指針 (2019)
<http://www.env.go.jp/recycle/misc/guideline/rikatsuyo-shishin/rikatsuyo-shishin31.pdf>
(閲覧日 2021/9/22)
- 16) 大沼康宏：環境省の政策—ごみ焼却施設の廃棄物エネルギー利活用による低炭素化—、廃棄物資源循環学会誌、Vol.30, No.4, pp.239 -244 (2019)

II-3 資源化システムの事業運営に関する検討

株式会社エックス都市研究所

環境エンジニアリング事業本部

秦 三和子

吉川 克彦

村上 友章

西村 富男

【要旨】

人口減少・少子高齢化が著しい地方圏では、焼却施設をはじめとする従来の一般廃棄物処理インフラの持続性に課題が生じている。国では、広域化による施設整備・運営維持管理の効率化¹⁾やPFI等の民間活用による財政負担の平準化²⁾により計画的な事業推進等の対策を取ろうとしている。このことを受け、本研究では、自治体が持続可能な廃棄物処理システムを検討・選択する際の判断材料となる情報の提供を目指した。

研究対象とした三重県の自治体を分析し、広域化の進捗状況と、必ずしも広域化が容易ではない地域の存在、その場合の対策として民間委託の実態があることが判明した。そこで、以下の2通りの方法で、一般廃棄物処理システムにおける将来の課題の一般化を試みた。

ア) 全国市町村における将来の広域化の可能性

イ) 広域化が困難（又は広域化しても小規模）な地域におけるごみ処理システムの選択肢

ア)の結果、人口減少により、2045年には全国44%の自治体で、高効率発電に必要な施設規模（70t/日）を下回ると試算された。また、イ)の結果、ごみの発生量が年間1万トン（施設規模で40t/日）程度の人口減少自治体では、後年度になるほど処理事業費が増加し、設備費・維持管理費が安価な生物乾燥方式等、焼却以外の処理方式や、民間施設への処理委託の有効性が示された。

そこで、民間施設への委託事例を調査し、民間委託による廃棄物処理事業を進める際の課題と解決策を検討した。民間施設では、産業廃棄物との合わせ処理等による効率化が図られ、経済的なメリットが生じる可能性がある一方、信頼関係の構築や社会情勢変化による価格変動・事業中止のリスクがある。そこで、近年の官民連携の事例等も踏まえ、一般廃棄物処理の事業形態の選択フローを試案し、民間委託の導入検討における事業評価項目の提案を行った。

1. 研究開発目的

人口減少・高齢化地域では市町村の財政逼迫が懸念され、そのような地域で一般廃棄物処理事業を持続的に実施するためには、抜本的に事業運営を見直す必要がある。これまで、一般廃棄物処理システムは「直接焼却」、「自区内」、「直営」を前提として構築されてきたが、市町村が単独で処理システムを維持するのは限界があるため、今後は様々な主体が連携し合って新たな資源化事業を構築することが求められる。そこで、サブテーマ3では「自区内」処理を再考し、サブテーマ2で描出した資源化システム（生物乾燥方式等）の実現も視野に、官民連携による事業運営体制を検討し、人口減少・高齢化地域において資源化事業の実現に向けた具体的方策を提示することを目指した。

2. 研究目標

これまでの各市町村の財政、職員体制等の一般廃棄物処理事業に関する情報を整理し、特に三重県内の市町村に関して将来の概況を予測する。サブテーマ4で整理する地域類型に応じて、サブテーマ2で提示する資源化システムをベースとしたバウンダリ設定と官民連携による事業運営体制の在り方を示す。また、資源化事業の持続可能な運営に向けた事業手法、官民連携の形態、財源、制約とその対応策等の具体的方策を提示する。

3. 研究開発内容

当初計画では、三重県内で関係主体と密な協議を行うとともに、ドイツにおけるシュタットベルケの事例調査を行い、日本国内の一般廃棄物処理において参考となる廃棄物処理システムを三重県内で具体的に提案することを目指していた。しかしながら、2020年の緊急事態宣言をはじめとする県境を越えた移動・対面ヒアリングの自粛、及び渡航困難であったことを受けて、中間研究成果報告時点で開発内容の一部を修正した。

3. 1 三重県内及び全国市町村における将来の一般廃棄物処理システムの課題抽出

(1) 三重県内のごみ処理状況の調査

一般廃棄物処理実態調査結果³⁾（以下、「実態調査結果」という。）及び循環型社会形成推進地域計画⁴⁾（以下、「地域計画」という）を調査するとともに、表3.1に示す主体を対象としたヒアリング調査により、三重県及び他地域におけるごみ処理施設の整備状況を整理し、計画中の情報も加味して2030年頃の処理・施設整備の状況をまとめた。

表3.1 ヒアリング調査の対象先

三重県内	三重県、三重ごみ固形燃料発電所、津市、松阪市、四日市市、尾鷲市、紀北町、南伊勢町、桑名広域清掃事務組合、香肌奥伊勢資源化広域連合、伊勢広域環境組合、三重中央開発株式会社、太平洋セメント株式会社藤原工場、北越コーポレーション株式会社紀州工場、有限会社三功 ほか
他地域	熊本市、みやま市、三豊市、大崎町、中・北空知廃棄物処理広域連合、北空知衛生センター組合、砂川地区保健衛生組合、中空知衛生施設組合、置賜広域行政事務組合、ユニ・チャーム株式会社、トータルケア・システム株式会社、株式会社水ロテクノス ほか

(2) 将来の一般廃棄物処理コストの試算

国立社会保障・人口問題研究所「日本の地域別将来人口（平成30(2018)年推計）」⁵⁾（以下、「地域別将来人口推計」という。）を基に、2045年までの人口変化（人口減少率）を、自治体人口規模ごとに分析し、全国の人口変化の傾向を把握した結果、2～5万人規模の自治体が最も多いことがわかった。そこで、(1)の結果と合わせて、三重県内で人口2～5万人、40t/日規模の焼却施設を有する自治体を抽出し、経年の実態調査から費目別の歳入、歳出、ごみ処理量、処理単価、工程別（収集運搬、中間処理、最終処分）の処理経費を比較した。

また、人口減少地域において、焼却対象ごみを①市町村が自ら焼却施設を整備・運営する方式、②市町村が自ら生物乾燥（トンネルコンポスト）施設を整備・運営する方式、③市町村が民間の処理業者に委託する方式の3つのシナリオを設定し、今後20年間のごみの処理費および処理単価をシナリオ間で比較した上で、事業運営に及ぼす影響について考察した。対象エリアは人口5万人、ごみの年間排出量で1万トン程度とし、施設規模を40t/日として、市町村又は一部事務組合等が処理施設を整備（更新）する際の事業費を検討した（表3.2）。

表3.2 可燃ごみ処理の事業費試算の条件

個別費目	設定・算出方法・留意事項	
比較対象期間	・ 工事期間及び稼働後20年間（2022年着工、2024～2043年度）	
焼却対象ごみ量	・ 直接焼却 + 焼却以外中間処理（堆肥、飼料、メタン、燃料） + 残渣焼却（粗大、その他資、その他）	
施設規模	・ 40 t / 日（処理対象ごみ量で10,000t/年程度を想定）	
建設費	・ 文献 ⁶⁾ 及び事業者ヒアリング調査等を元に、焼却4,110百万円、生物乾燥2,500百万円と設定 ・ 循環型社会形成推進交付金（交付率1/3）、起債充当率90%、償却期間20年間（3年据置）	
運営費	人件費	・ 文献及び事業者ヒアリング調査等を元に、焼却16名、生物乾燥7名と設定
	用役費	・ 光熱水・薬品費。うち固定費の割合を設定（焼却：50%、生物乾燥：24%）し、変動費部分を従量変動
	点検・補修費	・ 焼却：個別施設計画のひな形 ⁶⁾ を使用 ・ 生物乾燥：20年平均で設備費の4%、ただし10年経過時点で大規模修繕（設備費の10%程度）を実施
	残渣処理費	・ 焼却灰（処理量の10%）、固形燃料化不適物（処理量の5%）について運搬費、処分費を計上
	販売収益	・ 焼却（売電収益等）：40t/日規模のため収益なしと設定 ・ 生物乾燥（SRF）：輸送費込みで0円/kgと設定

（3）将来の一般廃棄物排出量の減少を考慮した自治体の類型化と広域処理の限界性調査

将来の人口減少等によるごみ排出量減少を踏まえ、現在の処理体制を継続した場合に、将来広域化を検討すべき地域がどの程度あるのかを試算し、それらの地域における将来の広域化とごみ処理システムの方向性について考察した。

ごみ量は実態調査結果（令和元年度）³⁾、人口データは地域別将来人口推計⁵⁾を使用した。処理対象物は実態調査結果のうち、直接焼却量、焼却以外の中間処理量（ごみ堆肥化施設、ごみ飼料化施設、メタン化施設、ごみ燃料化施設）、焼却施設以外の中間処理施設からの搬入量（粗大ごみ処理施設、その他の資源化等を行う施設、その他施設）とし、実態調査結果から令和元年度の1人当たりの処理量原単位を算出した。

2045年の処理量は、令和元年度の処理量原単位に将来人口を乗じて算出した。算出した処理量をもとに、月最大変動係数として「ごみ処理施設整備の計画・設計要領（全国都市清掃会議）」⁷⁾で例示される数値を用いて施設規模を算出した。

類型化に当たっては、「エネルギー回収型廃棄物処理施設整備マニュアル（令和3年4月改定）」⁸⁾で「現状技術では70t/日程度未満の小規模施設においては、高効率発電は言うまでもなく発電設備そのものを設置することが困難な場合が多い」とされていることから、施設規模70t/日を基準とし、算定した施設規模をもとに、現行の処理体制（施設整備など具体的な広域化の計画が進んでいる場合も現行体制とした。）を踏まえ、表3.3に示す手順で下記のような類型化を行った。なお、福島県については市町村別の将来人口データがないことから、本研究では評価対象外とした。

- 類型①：単独自治体で 70t/日以上（分類 A）を確保でき単独処理
- 類型②：単独自治体で 70t/日以上（分類 A）を確保できるが広域処理
- 類型③：単独自治体では 70t/日未満（分類 B）で、広域処理によって 70t/日以上を確保
- 類型④：単独自治体では 70t/日未満（分類 B）で、広域処理を行っても 70t/日未満
- 類型⑤：単独自治体で 70t/日未満（分類 B）で単独処理

表3.3 広域処理の検討手順

手順1：単独自治体におけるごみ量から算出した施設規模が 70 t / 日以上は分類 A、70 t / 日未満は分類 B とした。
手順2：既存の処理体制において、単独処理、組合や委託等により広域処理を行っているかを分類し、広域処理している場合は、その構成自治体合計の施設規模が 70 t / 日以上となるか 70 t / 日未満となるかで細分類した。
※1 単独処理、組合、委託等の情報については市町村 HP 等での情報をもとに振り分けを行っているため、全自治体の実態を網羅できていない可能性がある。
※2 単独自治体中で市町村合併前の一部地域が他組合等で処理を行っている場合でも、単独自治体として集計した。

3.2 民間委託方式選択の手順と評価方法

(1) 官民連携の事例調査

一般廃棄物処理事業における官民連携の形態を調査し、民間事業者の関与（裁量）の大きさを横軸として、公共側と民間側のコスト負担と人口減少の影響を整理した。本研究では、このうち特に民間の裁量が最も大きい（ほぼ民間の裁量に委ねる）「民設民営への処理委託」（以下、「民間委託」という）に着目した。

一般廃棄物の中間処理における民間委託の事例のうち、建替工事期間中等の短期的な委託以外の事例を公表資料から抽出し、関係者へのヒアリング調査を行って特徴を整理した。

(2) 民間委託方式選択の手順の検討

事業形態についての選択手順について、試行的なフローの作成を試みた。

また、近年、官民連携の形を作るまでの新たなプロセスとして注目されている「包括連携協定」の中から、一般廃棄物の中間処理における民間委託の事例について調査した。ここで「包括連携協定」とは、地域社会が直面するさまざまな課題に対応するために、自治体と企業とが締結するものである。

(3) 民間委託において想定されるリスクと対策

経済的な効果が期待される民間委託であるが、公設の一般廃棄物処理施設にはない事業リスクがある。そこで、文献や、3.1(1)の民間処理施設、自治体等へのヒアリング調査結果を基に、想定されるリスクについてとその対応について検討した。

4. 結果及び考察

4.1 三重県内及び全国市町村における将来の一般廃棄物処理システムの課題抽出

(1) 三重県内のごみ処理状況の調査

三重県では2019年7月時点で焼却施設15施設、固形燃料化施設6施設が稼働していた（図3.1）。三重ごみ固形燃料発電所の事業が2019年9月に終了したのに伴い、三重県内のごみ処理システムは大きく転換した。桑名広域清掃事業組合のように、固形燃料化施設から焼却処理施設へと更新した地域も存在している。香肌奥伊勢資源化広域連合では、固形燃料化施設で可燃ごみを積み替え、民間処理業者に焼却処理を委託している。伊賀市さくらリサイクルセンターでの固形燃料化を終了し、伊賀市で収集される可燃ごみはすべて伊賀南部環境衛生組合が運営する伊賀南部クリーンセンターで焼却処理されることになった。一方、紀北町及び南牟婁清掃施設組合では2020年以降も固形燃料化を継続している。

三重ごみ固形燃料発電所の事業終了に伴い、これまで固形燃料化していた自治体のうち、財政的に体力のある自治体は焼却処理への転換を急ピッチで進め、施設建設に向うことができたが、人口減少・高齢化が進んだ小規模自治体は財政的に早急な対応は難しかった。そこで、当面は県内の民間処理業者に可燃ごみや固形燃料の引き取りを委託することで、次期ごみ処理体制構築への時間的猶予を確保した。一方、大牟田リサイクル発電所や石川北部RDFセンターのように、他地域においても固形燃料発電所事業が終了しつつあるが、固形燃料化を終了した後の選択肢が小規模な焼却処理施設の建設しかなく、将来的な財政負担などを踏まえた広域処理を十分に検討する時間がないケースが見られた。

社会状況の変化が将来のごみ処理システムに及ぼす影響を検討した結果、人口減少・高齢化によって、ごみ処理に関わる人材や財政逼迫等の影響に加え、人口の散在や高齢者の増加による収集運搬等への影響等が想定された（図3.2）。地方における労働人口の減少は、地方財政のみならずごみ処理に関わる人材の逼迫等にも直結するため、処理事業費の削減や効率化が必要となる。一方で、人口分布とごみ排出源の偏在、高齢者や外国人の増加に伴い分別の継続が困難となることも想定され、分別・収集運搬ルールの見直し等も必要となることが想定される。加えて、温室効果ガス対策やSDGsを始めとする様々な社会制約も鑑み、産業形態や消費財の素材、ライフスタイルの変化が生じると、ごみ量・ごみ質も変化する可能性が高い。資源化システムのあり方として、以下のような項目が挙げられる。

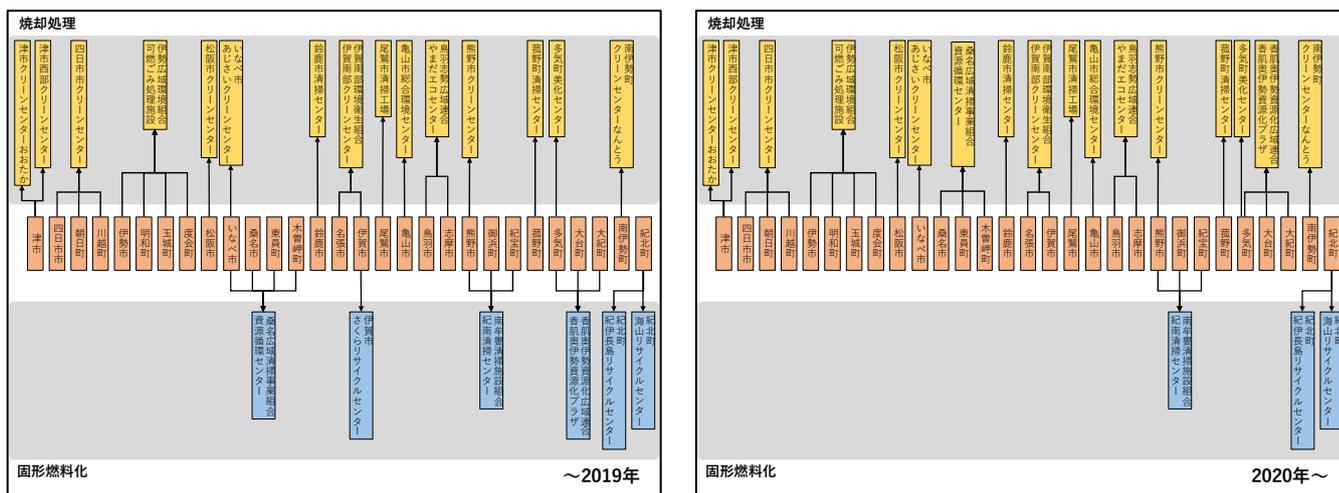


図3.1 三重県内の可燃ごみの処理状況（左：2019年以前、右：2020年以降）

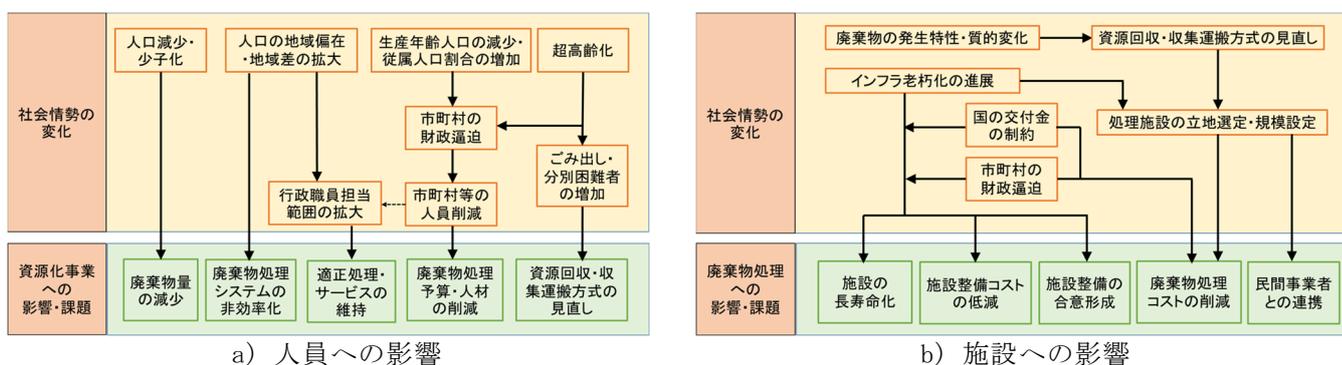


図3.2 社会状況の変化とごみ処理事業への影響

- ・資源化対象品目ごとに、適切な規模・収集地域を設定した地域システムの構築
- ・焼却施設の整備を基本とする処理方式から、複数の処理方法の組み合わせへの転換
- ・事業期間内にもごみ量の減少やごみ質が変化していくことへの対応

(2) 将来の一般廃棄物処理コストの試算

施設整備後に人口減少が進むと、廃棄物処理施設の稼働率は運営開始時がピークとなり、年々低下する。廃棄物処理施設は稼働後20～30年間供用されることから、将来的な稼働率の低下も含めた長期的な事業費負担等を検討しておく必要がある。

2030年頃までの施設整備計画では、2～5万人の人口規模が最も多く、処理施設規模に換算すると20～50t/日となることが想定される。2019年から2045年までの人口減少率の年平均変化率（推計値）は単純平均で-1.62%であり、全ての規模で総人口が減少傾向にあるが、規模の小さい市町村ほど減少傾向が大きい（図3.3）。2万人より小規模な市町村では、-2.0%以下となることも想定される。1人あたりのごみ排出源単位が維持されると仮定した場合、人口が年-2.0%で減少すると、20年後のごみ量は3割以上減少する。三重県内のごみ処理施設のうち、20年程度の運営実績を有する40t/日規模の焼却施設について分析した結果、以下のことがわかった。

- ・基幹的改良工事を行う年次の歳出額は、通常年次の処理費の3倍程度となり、建設・改良費に相当する2～4億円を地方債により調達している。なお、地方債の返済が必要であるため、自治体にとっては長期的な負担となっているといえる（図3.4）。
- ・ごみ処理量単価（ごみ量あたりの処理費）は30,000～40,000円/tであるが、ごみ量は一定又は微減傾向にあるのに対して、ごみ処理量単価は増加傾向にある（図3.5）。
- ・工程別の処理費をみると、中間処理費が運営費の6～7割、収集運搬費が2～3割を占めている。（

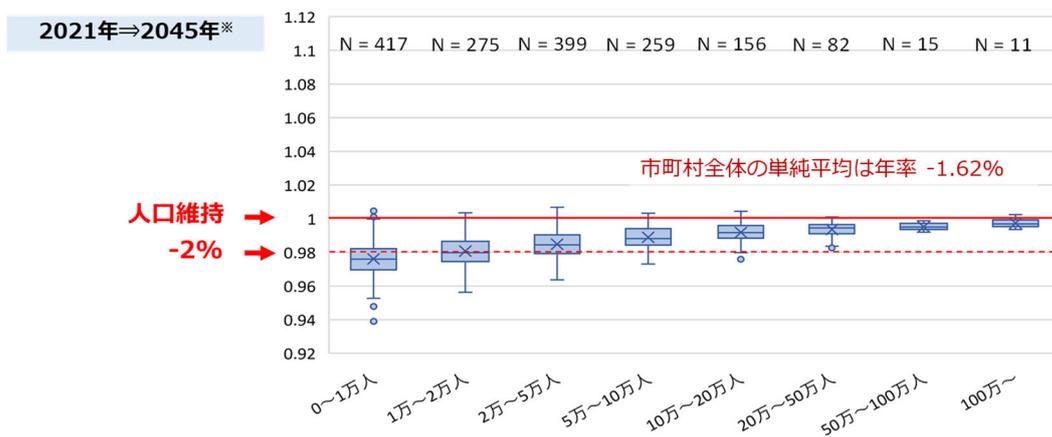


図3.3 人口規模別の人口減少率の年平均変化率



歳入

歳出

図3.4 三重県内の40t/日規模の焼却施設を有する自治体のごみ処理事業に係る歳入および歳出（1998年度～2018年度）

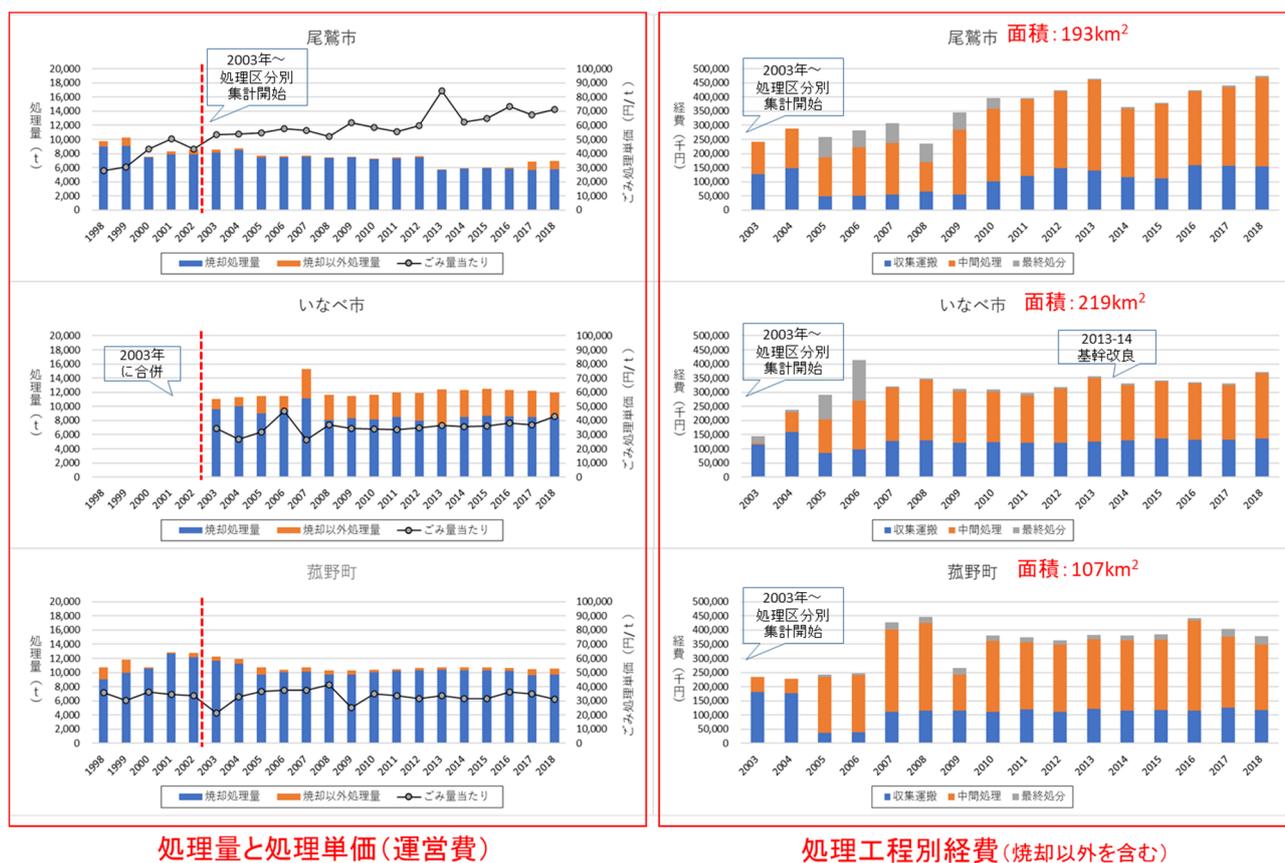


図3.5 三重県内の40t/日規模の焼却施設を有する自治体のごみ処理単価と処理工程別経費（1998年度～2018年度）

続いて、同規模の市町村を想定し、①市町村が自ら焼却施設を整備・運営する方式、②市町村が自ら生物乾燥（トンネルコンポスト）施設を整備・運営する方式、③市町村が民間の処理業者に委託する方式について、処理事業費及び処理単価の20年間の経年変化を試算した。設定条件を表3.3に、試算結果を図3.6および図3.7に示す。

ごみ量は後年度になるほど減少するにも関わらず、施設を有する場合の処理事業費は増加する傾向が見られた（図3.6）。また、処理事業費を処理対象ごみ1トンあたりに換算した処理単価は、人口減少率の大きいほど増加し、人口減少率2.0%の場合、2041年度には、焼却方式では人口維持ケースの1.4倍、生物乾燥方式では1.3倍となると推計された（図3.7）。この理由として、廃棄物処理施設の運営費のうち固定費の影響が大きいことが挙げられた。固定費は、建設費、人件費、維持管理費と、用役費（光熱水・燃料費）のうち契約料金等であり、ごみ量に関わらず一定額必要である。

今後大幅な人口減少が進む可能性が高い自治体では、民間委託の有効性が示唆された。処理委託単価については、焼却処理での事例をもとに設定したが、一般廃棄物の受入が可能な民間焼却施設の今後の稼働状況、生物乾燥方式による民間施設の事業化可能性も含め、処理委託単価の変動についても検討する必要がある。

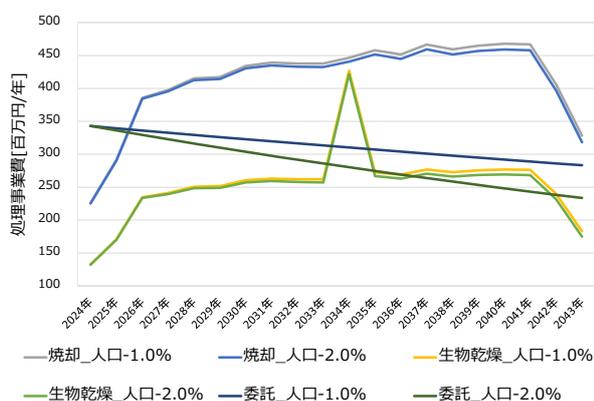


図3.6 人口減少によるごみ処理事業費への影響 (処理・運営方式別)

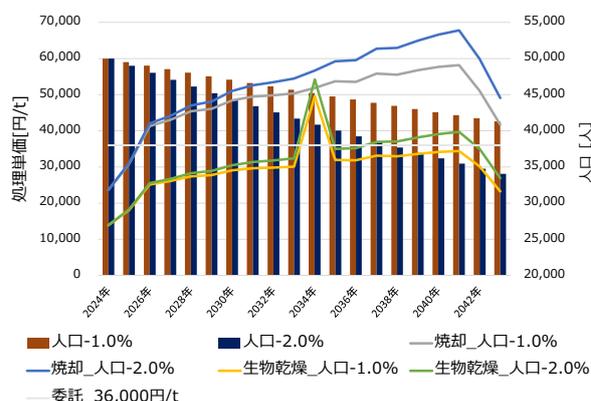


図3.7 人口減少によるごみ処理単価への影響 (処理・運営方式別)

表3.4 想定される焼却施設規模による地方自治体の類型化

類型	2019年		2045年		増減
	自治体数	割合	自治体数	割合	
①：単独自治体で70 t/日以上（分類A）を確保でき単独処理	145	9%	122	7%	▲ 23
②：単独自治体で70 t/日以上（分類A）を確保できるが広域処理	234	14%	182	11%	▲ 52
③：単独自治体では70 t/日未満（分類B）で、広域処理によって70 t/日以上を確保	693	42%	635	38%	▲ 58
④：単独自治体では70 t/日未満（分類B）で、広域処理を行っても70 t/日未満	382	23%	528	32%	▲ 146
⑤：単独自治体で70 t/日未満（分類B）で単独処理	206	12%	193	12%	▲ 13
全体	1,660	100%	1,660	100%	—

(3) 将来の一般廃棄物排出量の減少を考慮した自治体の類型化と広域処理の限界性調査

将来の広域化に関する類型化の結果を表3.4に示す。2019年度時点で単独処理を行っている自治体は全国の21%であり、その他の多くの自治体で既に広域処理が行われていることがわかる。一方で、現状の処理体制を維持した場合、2019年時点で類型①であった自治体のうち、23自治体が2045年には類型④または類型⑤に移行すると想定される。これらの自治体は、2019年時点の人口規模が70~100千人程度であり、今後の人口減少によって、ごみ量が減少し、発電可能な焼却施設規模を確保することが難しくなると推察される。また、2019年時点で広域処理を行い、発電可能な施設規模を確保できている類型②、類型③に属する地域でも、2045年には110自治体が広域処理を行っても70t/日に満たない類型④に移行することが想定された。人口減少が進む2045年には、現状の焼却処理を前提とした広域処理体制を維持した場合でも発電が難しい施設規模になる地域（類型④）が32%に達し、単独処理（類型⑤）を含めると44%となる。

表3.5は2019年度の人口規模別の自治体数であるが、人口10万人以上の自治体は16%であり、今後単独での処理体制の維持が成り立つ自治体は政令指定都市や中核市などの一部に限られると推察される。2045年に類型④、類型⑤に分類される地域は、現状で人口10万人未満の自治体がほとんどであり、今後の人口減少・財政逼迫等を考慮すると、広域化だけでは際限のない拡大を必要とする場面が想定されるため、処理・再資源化方式や事業方式の見直しが必要になることがわかる。

表3.5 2019年度人口規模別自治体数

人口規模	自治体数	割合
20万人以上	108	7%
10万人以上20万人未満	154	9%
7万人以上10万人未満	114	7%
5万人以上7万人未満	133	8%
1万人以上5万人未満	660	40%
1万人未満	491	30%

4.2 民間委託方式選択の手順と評価方法

(1) 官民連携の事例調査

一般廃棄物処理事業における官民連携の形態を図3.8のように分類した。民間事業者の関与（裁量）が大きいくほど、事業採算性を考慮した施設設計・整備を行うことができ、自らの営業努力でごみ処理インフラの稼働率を維持し、受け入れる品目に合わせた単価設定と最適な運転、稼働日数や設備修繕のタイミングの調整等、民間の有する運営ノウハウを基に高い自由度をもった経営が可能である。こうした施設で一般廃棄物を効率的に処理することで、自治体にとっては自己処理よりも処理単価を低く抑えられる可能性がある。

民間施設への一般廃棄物の中間処理委託事例（施設建設中・施設トラブル時等の短期的な委託を除く）を表3.6に示す。一般廃棄物処理業許可を有する地域内の既存施設に委託するケースや、当該地域の一般廃棄物を処理することを前提に、計画段階から自治体が発注して施設を整備しているケースなどがある。また、委託先での中間処理方法は焼却以外（堆肥化、メタン化、燃料化等）であることが多い。この理由は、長期間にわたる委託では議会の承認が必要であり、資源化処理・脱炭素に資する処理であること、委託先の独自技術を活用した処理であること、地域内の施設であれば産業振興（税収あり）につながるといった説明をすることで、議会の承認を得ているためと推察する。

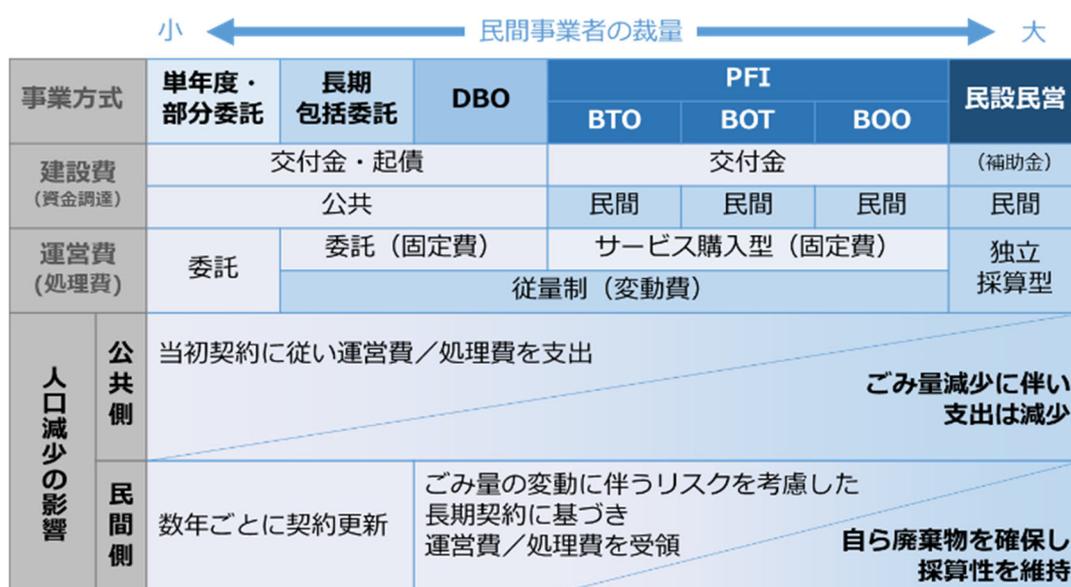


図3.8 官民連携による一般廃棄物処理事業費の方式と人口減少の影響

表3.6 一般廃棄物処理事業の民間委託の事例（建設中・施設トラブル時等の短期的な委託を除く）

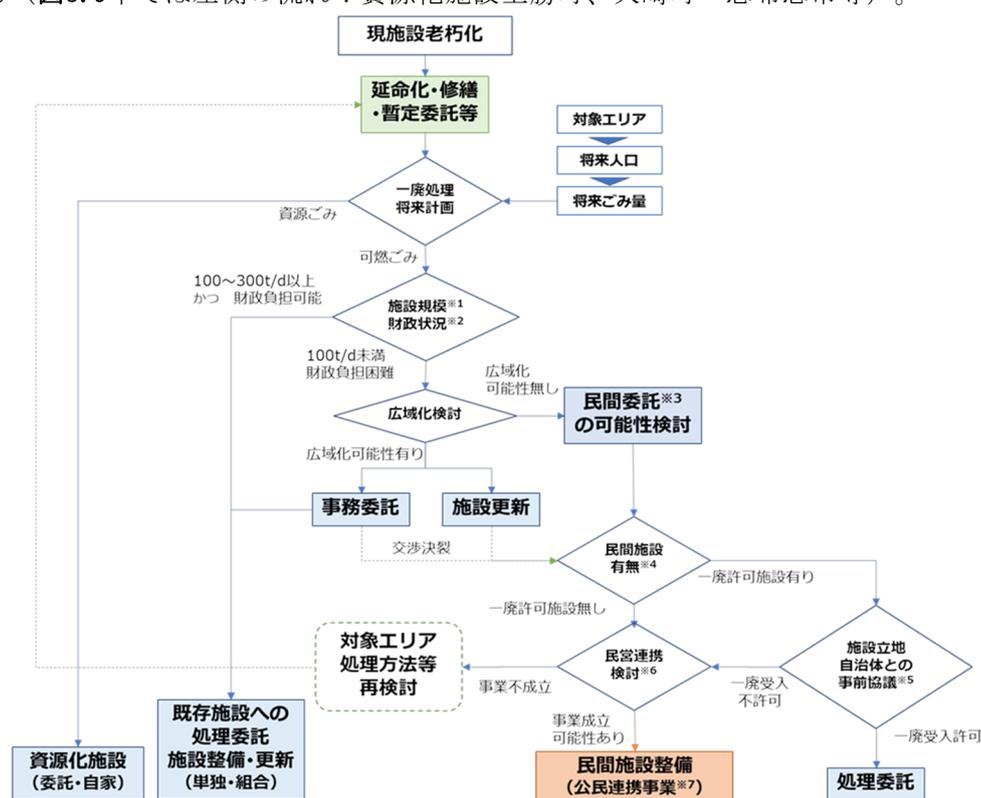
No	地域	民間委託の状況	状況 (契約時期、期間等)
1	鹿児島県大崎町、志布志町、有明町	そおりサイクルセンター（大崎町）に資源ごみの収集と中間処理、保管業務を委託。	1999年8月～運営中
2	埼玉県日高市	太平洋セメント(株)（市内）に可燃ごみ（陶磁器含む）の処理を委託（有休キルンを活用した用いたセメント原料化）	運営中（2002年11月～5年毎に契約更新）
3	島根県安来市	老朽化に伴い、旧施設内に積替保管施設を設置し、可燃ごみの処理を三光(株)（松江市の工場）に委託（焼却）	運営中（2007年～現在は3年毎に契約更新）
4	北海道羊蹄山麓7町村	ニセコ環境(株)（倶知安町）用地内に整備した施設に、衛生ごみ（おむつ等）以外の可燃ごみの処理を委託（固形燃料化）	運営中（2015年3月～）
5	宮城県南三陸町	アマタ(株)が町内に整備した民設民営の施設に、生ごみ、し尿・浄化槽汚泥の処理を委託（湿式メタン発酵）	運営中（2015年～15年間契約）
6	香川県三豊市	(株)エコマスターが市内に整備した民設民営の施設に、可燃ごみの処理を委託（固形燃料化）	運営中（2017年4月～20年間契約）
7	香川県観音寺市	(株)富士クリーン（綾川町）に可燃ごみの処理を委託（乾式メタン発酵）	運営中（2018年11月～5年毎に契約更新）
8	埼玉県小川地区衛生組合（5町村）	埼玉県が整備した公共発注の施設（彩の国資源循環工場）に立地する(株)オリックス資源循環（寄居バイオガスパラント）に、可燃ごみの処理を委託する協定を締結（乾式メタン発酵）	試運転中（2022年4月～10年間契約）

(2) 民間委託を含めたごみ処理事業形態の選択フローの作成

民間委託を含めたごみ処理事業形態についての標準的な選択手順として、試行的に図3.9に示すフローを作成した。図3.9中の「民間委託の可能性検討」では、制度上は、当該自治体内（自区内）に民間施設がある場合は市町村が一般廃棄物処理の許可を付与することで委託処理が可能となる。また、当該自治体外に一般廃棄物処理の許可を有する民間施設がある場合は、立地自治体との事前協議で受入許可を得ることにより委託可能である。なお、地域外からの一般廃棄物の受入にあたっては、排出自治体に対して、環境保全負担金等（目安として1,000円/t程度）の支払いを条例等で定めている例がある。いずれのケースでも、一般廃棄物処理基本計画において、民間への委託処理の可能性を明記しておくことが必要である。

ごみ処理の民間委託を行うには、一般廃棄物処理責任の履行と、議会承認が必要であるが、議会承認を得るためには、環境保全、経済性、産業振興等、民間委託の効果を定量的に示すことが必要である。また、廃棄物処理法の「市町村の一般廃棄物処理責任」は、施行令第4条第9号で基準が示されており、民間委託を制限するものではない。

周辺に適切な一般廃棄物処理施設が存在しない場合、立地自治体の受入許可が得られない場合（施設立地自治体以外からは受け入れないことを地元との協定で定めている事例がある）、あるいは民間施設との委託条件（価格、量、その他）が合意できない場合は、老朽化した既存施設の修繕等により現状の処理を維持しながら、また周辺自治体等への暫定的な処理委託等を行いながら、対象エリア（広域化等）、処理計画等を再検討することとなる。この結果、多数分別により資源化を促進し、可燃ごみ量を極小化した上で近隣の清掃工場への処理委託を行い、自らは焼却処理施設を持たないという判断をしている例もある（図3.9中では左側の流れ：資源化施設上勝町、大崎町・志布志市等）。



※1：広域化通知¹⁾も参考に、中長期的な視点で安定的・効率的な廃棄物処理体制を確保できるよう施設規模を設定。

※2：一般財源、地方交付税、起債、長期修繕費用、行政サービス見直し、基金創設等、費用負担と財政の将来予測を総合的に勘案して判断。

※3：公共主導を前提に暫定的な委託とするか、一定の長期間を前提に民間委託とするかを検討。

※4：一般廃棄物処理施設の許可を有する施設で受入余力があれば、自治体間の協議で委託は可能。

※5：廃棄物処理法施行令第4条第9号イに基づく。

※6：官民連携で地域内に民間処理施設を整備する可能性を検討。

※7：これまでの官民連携では、公共側が施設の処理能力や処理方式等の性能要件を示してきたのに対し、施設の処理能力や処理方式を民間事業者の裁量で決定し、一般廃棄物の処理委託条件を定めて委託処理契約をするもの。

図3.9 民間委託を含めたごみ処理事業形態の選択フロー（試案）

また、図3.9の「民間施設整備」の事例は、官民連携の形を作るまでの新たなプロセスとして注目されている「包括連携協定」を活用したものである。相生市では、産業廃棄物と合わせ処理を前提として民間事業者が200t/日規模の施設を設置する計画をしている⁷⁾。この事例では、産業廃棄物処理量を調整することで施設の稼働率を維持して事業の安定性を確保することとしている。また、発災時には産業廃棄物の搬入を停止して地域の災害廃棄物を優先的に処理することを協定で明示することにより、地域にとって必要性の高いインフラとして位置づけられるといった効果が期待される。既に、自治体と事業者とで協定が締結されており、今後、事業の実現に向けた調査・検討を行うこととなっている。こうした官民連携を通じた民間事業者による処理施設の立地は、持続可能なごみ処理事業の確保が必要な自治体側と地域住民の理解と事業採算性の確保の両面から一定の効果があり、今後のごみ処理事業の選択肢のひとつになると考えられる。

(3) 民間委託において想定される課題と対策

民間委託において想定される課題と、その対応に関する検討結果を以下に示す。

- a) 継続的な適正処理の確保：民間企業は安全安心に契約を履行して処理を継続できるか
実績の確認を行うとともに、長期協定及び定期的な見直しを行う。周辺自治体や民間事業者との間での協定を結び、バックアップ体制を構築する。
- b) 施設用地の選定・確保：導入システムに必要な用地の確保、施設の設置に対する合意形成の必要性
地域住民の雇用を含め、地域で実績や信頼を構築している事業者と連携する。自治体側で用地を確保する。協定の中で、公共側が主体となり説明を行う。事業収益等を地域に還元する仕組みづくりや、発災時の防災拠点機能など、地域ニーズへの対応を行う。
- c) 市民への協力要請の必要性：民間委託への変更による分別区分や収集方式の変更等
一般廃棄物の処理責任を有する市町村が、市民に対する説明を行う。普及啓発や地域コミュニティ形成等、様々な角度から民間との連携を図る、民間提案を幅広く受け付ける。
- d) 自治体間の合意形成の必要性
排出側と受入側（民間施設立地自治体）とで、環境保全負担金の支払い等も含む自治体間協定を締結する。排出側自治体による処理委託先事業所のモニタリングを実施。発災時には産業廃棄物の搬入を停止して地域の災害廃棄物を優先的に処理することを約束する。地域にとって必要性の高いインフラとして位置づけられるよう、その効果について丁寧な説明を行う。
- e) 処理事業（委託先）の事業継続：処理量減少時の稼働率の確保、稼働率の低下による処理単価の上昇リスク
他自治体からのごみの受入、産業廃棄物の受入、ごみ量の変動を想定した協定・契約（受入量の減少分での産業廃棄物の受入の許容、ごみ量の増減が生じた際の処理委託費精算方法の検討等）を行う。
- f) 再生品の安定的な利用先確保：堆肥化やメタン発酵、固形燃料化では再生品や処理残さの受け皿、処理先の確保
メタン発酵の消化液の農業利用、エコフィードの利用等について、大学や研究機関との共同研究を通じて安全性や有効性を確認し、利用を促進する。民間の処理事業者が、自ら（グループ会社を含む）利用者となり再生品の利用先の確保まで請け負う。残渣の処理委託先（焼却灰の処理等）に対しても事前通知を行う必要がある。

表3.7 民間委託の導入検討における事業評価項目（案）

項目	内容
適正処理の確保	<ul style="list-style-type: none"> ・ 安全性の確保（モニタリング・情報公開等の仕組みづくり） ・ 安定処理（短・長期的な量・質変動への対応） ・ 災害対応（発災時のBCP、災害廃棄物の処理等） ・ 民間事業者の実績・経験の活用
事業性の確保	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地域特性を考慮した規模の確保・高稼働率の維持 ・ 地域インフラとの連携・集約化（下水、し尿処理施設、エネルギー産業、素材産業等） ・ 民間事業者の有する技術・ノウハウを引き出す ・ 外部資金の活用（交付金・補助金、低利率融資、ファンド等）
社会受容性の確保	<ul style="list-style-type: none"> ・ 周辺住民合意形成（基準値の設定、迷惑施設＜多面的価値等） ・ 地域に最大限の価値・効果を創出する用地選定 ・ 受益者負担の公平性 ・ 地域の協働（住民協力・参画等）
地域課題の解決	<ul style="list-style-type: none"> ・ 課題の共有と解決に向けた協働（市民、事業者、行政） ・ 人材育成（民間人材の活用を含む） ・ 地域産業振興 ・ 地域経済循環の向上

こうした民間委託の特性を踏まえ、自治体が民間委託方式を検討するに当たって検討すべき評価項目の提案を表3.7に整理した。

大項目は、「適正処理の確保」「事業性の確保」「社会受容性の確保」「地域課題の解決」の4項目とした。特に重要な点を以下に示す。

- ・ 適正処理の確保は、官民によらず最も重要な要素であるが、民間事業者の技術・運営能力の把握に必要な情報共有と、モニタリング・情報公開の実施など廃掃法施行令への対応のルール化を図る。災害時には、BCPや災害廃棄物の処理等への対応を期待。
- ・ 事業性の確保では、継続的な運営のため地域の各種資源との連携を検討すること。民間事業者の創意工夫、技術・ノウハウを引き出すための独自提案・自由度を残す。官民連携事業により民間事業者の公的信頼性を高め、資金調達をやすくする効果も期待。
- ・ 社会受容性の確保については、公共施設の場合、住民合意を図るために「安全性」に上乗せして「他地域と同等以下の厳しい基準値」を求められ、結果的に高コストや温室効果ガス削減効果の低下につながる例もある。適切なモニタリングと情報公開の仕組みづくり等により、安全性の確保と費用対効果のバランスを評価する。地域への多様な価値・効果を生み出すための用地選定についても考慮。
- ・ 地域課題の解決では、廃棄物処理のみを目的とするのではなく、防災・地域エネルギー拠点や福祉分野、人材育成等、民間との連携による多面的な価値の創出を評価する。

5. 研究目標の達成状況

「自区内」処理の再考という観点から、「広域化」及び「民間委託」に着目し、「焼却方式」、「生物乾燥方式」、「民間委託」のLCC比較から、民間委託を中心とする新たな処理システムの経済的有効性を示した。

調査事例分析から事業成立要件等を整理し、事業化可能性検討に反映すると共に、現状の清掃事業費等の整理を行い、公共と民間が適切な役割分担の下で、安全・安心な安定処理の確保とごみ処理事業の効率化を両立するための事業評価指標の案を作成した。

なお、三重県内の一般廃棄物処理事業に関する実態については、精力的に情報収集を行ったが、官民連携の課題整理については、新型コロナウイルス感染症の流行拡大の影響による活動制限から、当初計画していた三重県内での具体的な事業化検討には至らなかった。

6. 引用文献

- 1) 環境省環境再生・資源循環局：持続可能な適正処理の確保に向けたごみ処理の広域化及びごみ処理施設の集約化について（通知）（平成31年3月29日環循適発第1903293号）（2019）
- 2) 内閣府民間資金等活用事業推進室：PPP/PFI事業民間提案推進マニュアル、令和3年4月
- 3) 環境省：一般廃棄物処理実態調査結果（平成10年度～令和元年度調査結果）
- 4) 環境省：循環型社会形成推進地域計画一覧（平成29年12月20日現在）
- 5) 国立社会保障・人権問題研究所：日本の地域別将来人口（平成30(2018)年推計）
- 6) 環境省：個別施設計画のひな形（焼却施設）
- 7) 全国都市清掃会議：ごみ処理施設整備の計画・設計要領（2017改訂版）、平成29年5月
- 8) 環境省：エネルギー回収型廃棄物処理施設整備マニュアル（令和3年4月改定）、令和3年4月
- 9) 相生市、㈱エックス都市研究所、㈱神鋼環境ソリューション、大栄環境㈱：（仮称）地域エネルギーセンター（新相生市美化センター）整備運営事業の推進に向けた公民連携協定の締結について、2021年10月5日

II-4 資源化システム導入効果の評価

みずほリサーチ&テクノロジーズ(株)

環境エネルギー第1部

高木 重定

中西 翔太郎

横尾 祐輔

【要旨】

焼却処理施設の運営上の課題を踏まえ、各自治体を類型化し、2045年の各自治体における可燃ごみの処理方法の変更（単独焼却から広域焼却あるいは生物乾燥へ）と、運営方法の変更（収集運搬および中間処理の直営から民間委託へ）を提案した。サブテーマ1、サブテーマ2、サブテーマ3での地域特性に関する検討結果を踏まえ、人口減少・高齢化地域における焼却施設の運営上の課題（地域特性）と、課題を評価するための指標として「施設寿命到来時期」、「2045年の処理規模」、「財政力指数」を設定した。3つの指標を用いて「処理方法の維持」、「処理方法の変更」、「運営方法の維持」、「運営方法の変更」の組合せを4つの類型とし、各自治体を類型化した。処理方法についてはBaUシナリオ、広域焼却促進シナリオ、生物乾燥促進シナリオを設定した。運営方法の変更が必要な自治体では、施設の運営方法を変更することにより処理コストが一律で7.3%削減されるとした。

三重県の各自治体における可燃ごみの処理について、2045年の各シナリオを対象に推計したエネルギー有効利用量と処理コストを推計した結果、広域焼却あるいは生物乾燥が促進することによってエネルギー有効利用量が増加した。処理コストに関しては、広域焼却促進シナリオ、生物乾燥促進シナリオともに追加的な輸送コストが計上されるが、施設運営コストの削減によりBaUシナリオよりも削減効果があった。2045年における可燃ごみの資源化事業の日本全国への広域的な導入による効果についても、広域焼却促進シナリオ、生物乾燥促進シナリオともにエネルギー有効利用および処理コストの観点でBaUシナリオよりも優位であった。人口減少・高齢化が進行する地域では、単独焼却に代わる広域焼却あるいは生物乾燥の導入が有効であると言える。

1. 研究開発目的

人口減少・高齢化地域における市町村は財政逼迫により一般廃棄物処理事業の経費縮減を迫られる可能性が高い。人口減少・高齢化に伴い、老朽化した焼却施設を更新することが財政的に困難となる市町村の数は増加することが見込まれる。

このため、財政逼迫が懸念される地域において、一般廃棄物処理事業を持続的に実施するためには、抜本的に事業運営を見直す必要がある。自治体が単独で処理システムを維持するには限界があり、今後は様々な主体が連携しあって新たな資源化事業を構築することが求められる。こうした考え方は環境省が掲げている「地域循環共生圏」の概念とも整合するものであり、具体的な地域を対象として、一般廃棄物の持続可能な処理システムを提案することは重要となっている。

2. 研究目標

サブテーマ2で提案する資源化システムを評価するための指標を検討する。人口減少、高齢化、財政力指数、一般廃棄物処理事業経費等に着眼して時間軸に沿って全国の市町村を類型化する。農地、民間処理業者、動脈産業（鉄鋼業、製紙業、セメント業）等の全国分布を示し、堆肥、液肥、代替燃料等資源物の需要分布を示す。将来的にサブテーマ2及び3で検討した資源化事業が広域的に普及する場合の環境性、経済性、社会性に関する効果や地域循環共生圏の形成状況を評価する。

3. 研究開発内容

(1) 地域の類型化

資源化システムの導入効果の評価、および他のサブテーマで検討する各種取組の適用先の自治体の設定等に資する基礎情報として焼却施設運営上の課題に基づく地域の類型化を検討した。

焼却施設運営について想定される課題について下記の3点と想定し、これらの課題に対する自治体の状況を地域特性として扱うこととした。他のサブテーマから提供された地域特性ごとに表4.1の指標と閾値を設定した。

課題1：施設の老朽化・更新

課題2：人口減少による施設当たりのごみ処理量の減少

課題3：運営コストの確保

課題1と課題2は「処理方法の維持/変更」に関係すると想定し、両課題の指標によって要変更と判定された場合、処理方法の変更を行うとした。課題Cについては「運営方法の維持/変更」に関係すると想定し、要変更と判定された場合、運営方法の変更を行うとした。処理方法と運営方法の維持/変更の4通りの組み合わせを表4.2に示す地域類型①～④とした。

表 4.1 焼却処理施設運営上の課題と対応する指標・閾値の設定

焼却処理施設運営上の課題（地域特性）		指標	閾値（2045年）
課題1	施設の老朽化・更新	施設寿命到来年度 [年]	2045年以前の場合、処理方法を変更
課題2	人口減少による施設当たりのごみ処理量の減少	将来の焼却処理量 [トン/日]	日量70トン未満の場合、処理方法を変更
課題3	運営コストの確保	財政力指数 [一]	0.5以下の場合、運営体制を変更

※運営体制の変更は、収集運搬と施設運営の2種類を直営から民間委託へ変更することを想定し、各自治体の財政力指数が閾値（0.5）以下の場合に民間委託へ変更するとした。ただし、一部事務組合が有する施設については、組合の構成自治体全体の財政力指数を算出して判定した。

表 4.2 処理方法および運営方法に係る類型

処理方法 \ 運営方法	維持	変更
維持	類型①	類型②
変更	類型③	類型④

(2) SDGsおよび地域循環共生圏の概念を踏まえた資源化システム導入効果の評価指標の検討

地域循環共生圏に係る文献^{1)~3)}および都道府県、政令市の循環型社会計画、SDGs未来都市各都市のKPI指標などを参考にして指標の抽出を実施した。指標の抽出にあたっては「環境性」、「経済性」の観点から指標を類型化し、また、(1)地域の類型化または(3)三重県内における資源化事業の導入効果評価および地域循環共生圏の形成の可能性の検討において活用可能な指標を本検討の評価指標とした。

(3) 三重県内における資源化事業の導入効果評価および地域循環共生圏の形成の可能性の検討

本検討で構築した「資源化システム評価モデル」は人口減少・高齢化の一般廃棄物処理への影響と対策について他のサブテーマの検討内容を極力、反映可能な形式で三重県における一般廃棄物の処理フローをモデル化するものであり、特に①収集区分・処理方法、②既存施設に関する施設単位の変数設定、③施設統合計画の設定が可能な点が特徴となる。なお、将来推計の推計年は2045年とした。以下、資源化システム評価モデルの構造及びシナリオ設定について示す。

<資源化システム評価モデルの構造>

資源化システム評価モデルの構造を図4.1に示す。三重県内各自治体の将来人口及び1人当たり可燃系ごみ排出量を基に2045年の可燃系ごみ排出量を推計し、シナリオ等で別途設定したごみの搬入先施設や施設別のエネルギー消費原単位/コスト原単位を用いて、可燃系ごみの処理に要するエネルギーやごみ処理コストを推計している。なお、各パラメータ設定やシナリオ設定に際しては、図中の緑色の吹き出しに示すようにサブテーマ1～3の検討内容を考慮した。

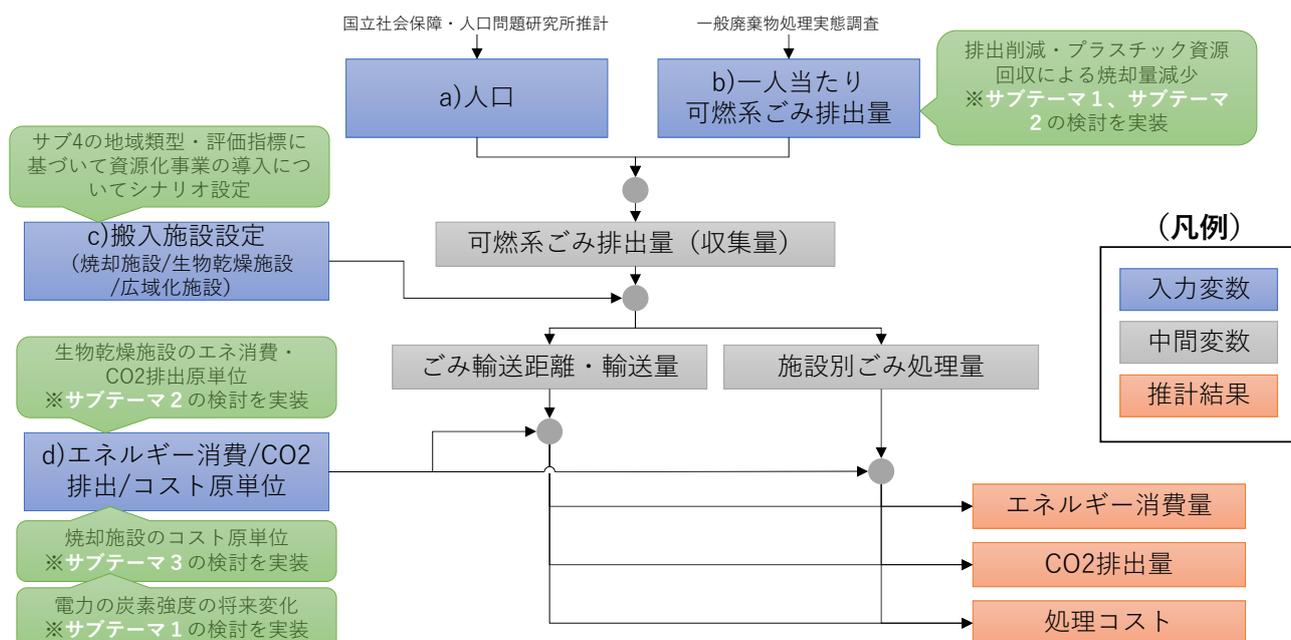


図4.1 資源化システム評価モデルの構造

※上図の通り、モデル構造上はCO2排出量の推計も可能であるが、将来の各エネルギー源/焼却ごみのCO2排出係数の設定が困難であることから、以降の推計結果ではエネルギー消費量と処理コストのみを推計した。

<資源化システム評価モデルの入力パラメータの設定>

資源化システム評価モデルの入力パラメータの設定値及びその出典・根拠について表4.3に示す。

表4.3 資源化システム評価モデルの入力パラメータ

入力パラメータ	設定値	出典・根拠
自治体別人口	2015年：1,816 [千人] 2045年：1,431 [千人] ※ 三重県人口の設定。モデルでは県内自治体別人口を入力パラメータとして使用。	国立社会保障・人口問題研究所「将来推計人口・世帯数」 ⁴⁾
一人当たりごみ排出量	0.336 [トン/人・年]	環境省「一般廃棄物処理実態調査結果」 ⁵⁾ より推計
焼却施設への搬出割合	59%~100% ※ 県内自治体別に設定。 ※ 対象となるごみ量は、直接焼却処理量、ごみ堆肥化施設・ごみ飼料化施設・メタン化施設の各施設における処理量、粗大ごみ処理施設・その他の資源化等を行う施設における残渣焼却量の合計量とした。	環境省「一般廃棄物処理実態調査結果」 ⁵⁾ より推計
自治体～各施設輸送距離	自治体の市役所・役場と各焼却施設間の距離を設定。(一般道のみを利用を想定)	Googleマップ ⁶⁾ を用いて左記の2地点間の距離を取得

入力パラメータ	設定値	出典・根拠
輸送に係るエネルギー消費量設定	往路：0.1 [L/トン・km] と仮定 復路は往路のエネルギー消費の0.7倍と仮定	経済産業省・国土交通省 (2016)「ロジスティクス分野におけるCO ₂ 排出量算定方法 共同ガイドライン Ver. 3.1」 ⁷⁾
焼却施設における施設別電力消費量	施設別に設定 (3階級)	志賀ら (2007) 「ごみ焼却処理施設の現状と課題 ～循環型地域エネルギーシステムを目指して～」 ⁸⁾
焼却施設における施設別エネルギー回収率 (実績)	施設別に設定 (0%、12%、20%、30%の4階級)	環境省「一般廃棄物処理実態調査結果」 ⁵⁾
生物乾燥で製造された燃料によるエネルギー回収率	製紙工場のエネルギー回収効率60%、セメント工場のエネルギー回収効率80%を想定	大王製紙株式会社資料 ⁹⁾ 、 一般社団法人セメント協会資料 ¹⁰⁾
低位発熱量	9,000 [kJ/kg] 一定と仮定	—
焼却処理コスト	施設別に設定 ※施設建設費 (20年の利用を想定して等分した費用)、補修費、人件費、用役費を計上	岡山県 (2007) 「新岡山県ごみ処理広域化計画資料4 広域化の効果」 ¹¹⁾
最終処分コスト	残渣搬出 (輸送) : 16,667 [円/トン] 最終処分 (焼却後) : 30,000 [円/トン] 最終処分 (生物乾燥後) : 24,420 [円/トン]	サブテーマ3の検討結果を 実装
生物乾燥処理コスト	24,800 [円/トン]	施設運営事業者へのヒアリングにより設定
収集運搬コスト	自治体内でのごみ収集 : 1,260 [円/トン・km] 広域圏内での運搬 : 162 [円/トン・km]	松藤 (2005) 「都市ごみ処理システムの分析・計画・評価」より試算 ¹²⁾

<シナリオの設定 (処理方法の変更)>

処理方法の変更が必要な自治体 (類型③・④に該当する自治体) では、処理方法の変更方法として表4.4に示す3つのシナリオ (A : 広域化のみを選択、B : 生物乾燥のみ選択、C : 両者のいずれかを選択) を置いて検討した。「C : 両者のいずれかを選択」の場合は、自治体ごとにRPF工場が25km以内に立地する場合には生物乾燥技術を導入し、それ以外の自治体は広域化すると想定した。なお、広域化施設、生物乾燥施設の立地場所は表4.5に示す想定とした。

表 4.4 シナリオ設定の概要

	概要
BAUシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> 既存施設の施設更新のみ実施する。 更新時は施設容量のみ変更する。
シナリオA (広域化のみ選択)	<ul style="list-style-type: none"> 既存施設は寿命到来時に廃止し、廃止後は広域化施設に集約する。
シナリオB (生物乾燥のみ選択)	<ul style="list-style-type: none"> 既存施設は寿命到来時に廃止し、廃止後は生物乾燥施設に搬入する。 製造した燃料は三重県内に存在する製紙工場 (紀宝町) やセメント工場 (いなべ市) で利用されるものと想定する。
シナリオC (広域化と生物乾燥の いずれかを選択)	<ul style="list-style-type: none"> 既存施設は寿命到来時に廃止し、広域化施設あるいは生物乾燥施設に搬入する。 <u>RPF 工場が 25km 以内に立地する自治体</u>については生物乾燥技術を導入する。 生物乾燥が実施困難な場合は広域化を選択する。

表 4.5 広域化施設、生物乾燥施設の立地場所の想定

		想定内容
広域化施設	シナリオA	<ul style="list-style-type: none"> 県内の中心都市に1施設の広域化施設を新設するケース ※立地自治体は津市を想定。
	シナリオC	<ul style="list-style-type: none"> 広域化を選択する自治体が集中する県南部に1施設を新設するケース。 ※立地自治体は既存施設立地状況や本シナリオで広域化を選択する自治体の人口分布より尾鷲市に選定した。
生物乾燥施設	シナリオB・シナリオC共通	<ul style="list-style-type: none"> 各自治体別に搬入する焼却施設と同じ敷地に生物乾燥施設を設定すると想定。 ※複数施設へ搬入している津市は津市西部クリーンセンターに立地すると想定。

<シナリオの設定（運営方法の変更）>

運営方法の変更が必要な自治体（類型②・④に該当する自治体）については国土交通省「VFM簡易算定モデルマニュアル」¹³⁾より処理コストが一律で7.3%削減されると想定した。ただし、生物乾燥施設については類型に関わらず民間で運営されると想定した。

（4）資源化事業の他地域への展開可能性検討、広域的導入効果の推計

全国展開時の対策導入効果の推計は、3.（1）で示した4類型を全国の自治体に対して付与し、三重県の類型別のエネルギー消費原単位、エネルギー回収原単位、処理コストの変化割合を乗じることで推計することを原則とした。具体的には、エネルギーに係る原単位は各自治体の可燃ごみ量に、コスト変化割合は各自治体のごみ処理費用（一般廃棄物処理実態調査における各市区町村の処理費用及びその他、並びに一部事務組合施設の処理費・維持費の合計額）に乗じて推計した。

ただし、上述の三重県を対象とした検討と本項における日本全国を対象とした検討では地域特性に差があることを踏まえ、シナリオ設定と類型設定を下記のように変更した。

<全国展開時のシナリオ設定・類型設定の変更点>

- 類型設定：
 - 生物乾燥技術の主な処理対象となる厨芥について既に生ごみ回収・資源化処理を講じている自治体があることから2019年時点で生ごみ回収を実施している地域（※）は既存の処理を継続するものと想定し、類型⑤とした。1類型の追加を実施し、5類型に分けた推計を行った。
 - ※環境省「一般廃棄物処理実態調査」において、2019年時点で全地域あるいは一部地域で生ごみ回収を実施している地域を対象とした。
 - （1）で地域特性の一つとしている施設寿命到来年度については、各市区町村の直営施設のみを対象とし、一部事務組合の施設は本検討の対象外とした。
- シナリオ設定：
 - 生物乾燥施設を新設するシナリオBでは、類型③・④の自治体のうち、製紙工場もしくはセメント工場が存在する都道府県内の自治体のみ技術導入ができるものと想定した。製紙工場もセメント工場も存在しない都道府県内の自治体は現状の処理方法を維持すると想定した。

4. 結果及び考察

（1）地域の類型化

焼却処理施設運営上の課題に基づく三重県内各自治体の地域類型の判定結果と各シナリオにおける処理方法及び運営方法の変更方針について表4.6に示す。また、各自治体の地域類型を白地図に反映した結果を図4.2に示す。

表 4.6 焼却処理施設運営上の課題に基づく地域類型の推計結果

地方	自治体名	地域類型	変更対象				
			BaU	処理方法			運営方法
				シナリオ A (広域化のみ)	シナリオ B (生物乾燥のみ)	シナリオ C (広域化/生物乾燥 のいずれかを選択)	
北勢	桑名市	①	現状維持				
	いなべ市	③		広域化(津市)	生物乾燥	生物乾燥	
	木曾岬町	①					
	東員町	①					
	四日市市	①					
	鈴鹿市	①					
	亀山市	③		広域化(津市)	生物乾燥	生物乾燥	
	菰野町	③		広域化(津市)	生物乾燥	生物乾燥	
	朝日町	①					
	川越町	①					
	伊賀	名張市		①	※現存施設の更新のみ実施		
伊賀市		①					
中南勢	津市	①	(広域化拠点)				
	松阪市	①					
	多気町	①					
	明和町	①					
	大台町	④	広域化(津市)	生物乾燥		広域化(東紀州)	○
	大紀町	④	広域化(津市)	生物乾燥		広域化(東紀州)	○
伊勢志摩	伊勢市	①					
	鳥羽市	④	広域化(津市)	生物乾燥		生物乾燥	○
	志摩市	④	広域化(津市)	生物乾燥		生物乾燥	○
	玉城町	①					
	度会町	①					
	南伊勢町	④	広域化(津市)	生物乾燥	生物乾燥	○	
東紀州	尾鷲市	④	広域化(津市)	生物乾燥	(広域化拠点)	○	
	紀北町	④	広域化(津市)	生物乾燥	広域化(東紀州)	○	
	熊野市	④	広域化(津市)	生物乾燥	広域化(東紀州)	○	
	御浜町	④	広域化(津市)	生物乾燥	広域化(東紀州)	○	
	紀宝町	④	広域化(津市)	生物乾燥	広域化(東紀州)	○	

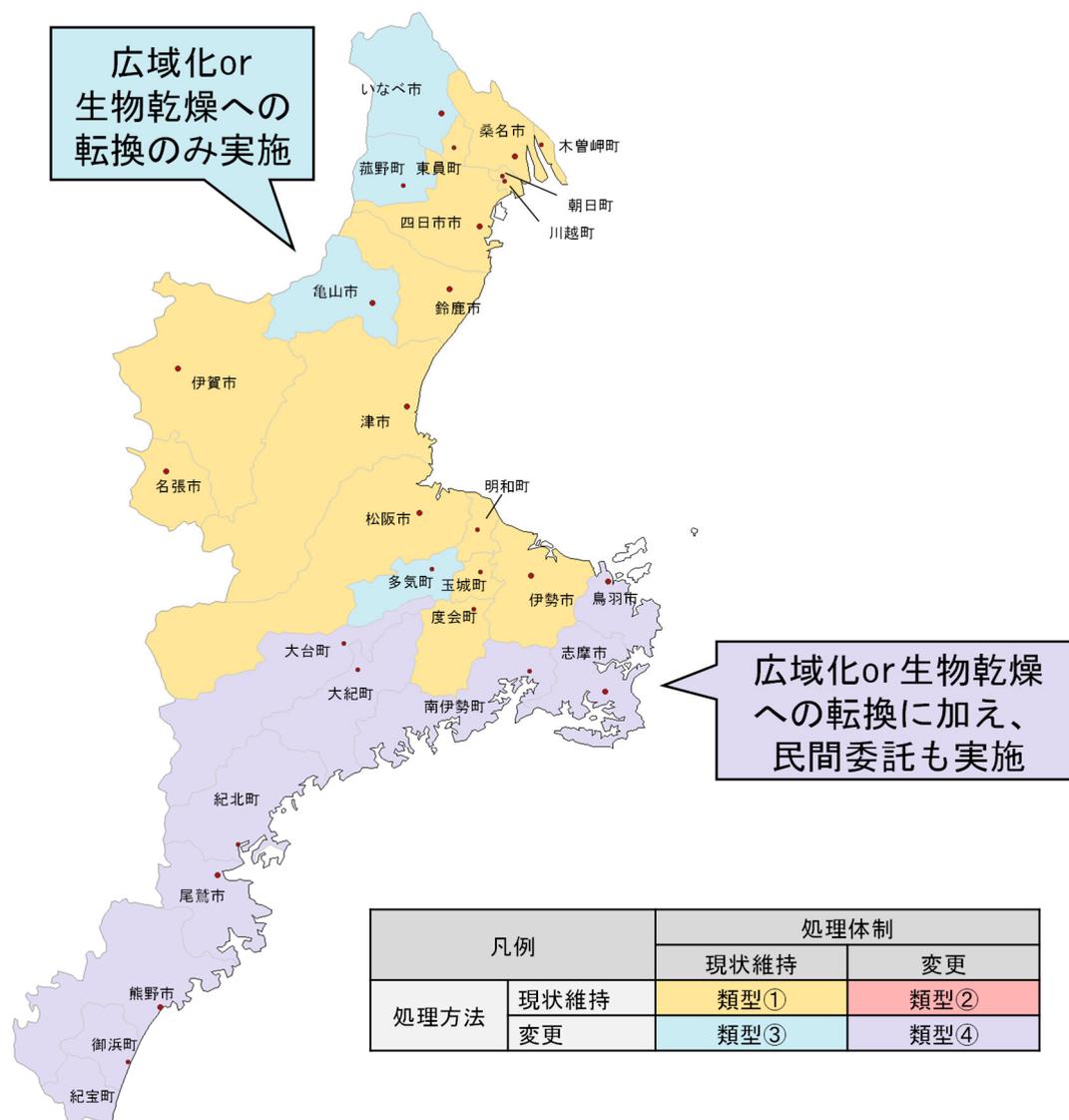


図 4.2 三重県 29 自治体における焼却処理施設運営上の課題に基づく地域類型

(2) SDGsおよび地域循環共生圏の概念を踏まえた資源化システム導入効果の評価指標の検討

地域循環共生圏などに係る指標を抽出し、(1) 地域の類型化、(3) 三重県内における資源化事業の導入効果評価の検討に用いる指標として表4.7の指標を選択した。

表 4.7 地域特性・資源化システム導入効果評価の指標の設定

	環境面の指標	経済面の指標
地域特性	(焼却処理施設運営上の課題に関する指標) ● 将来の焼却処理量 [トン/日] ● 施設寿命到来年度 [年]	(焼却処理施設運営上の課題に関する指標) ● 財政力指数 [-]
評価指標	(資源化システム評価モデルで推計する指標) ● ごみ処理に係るエネルギー消費量 [MJ/年] ● ごみ処理に係るエネルギー供給量 [MJ/年] ● ごみ処理に係るエネルギー有効利用量 (上記合計)	(資源化システム評価モデルで推計する指標) ● ごみ処理コスト [円/年]

(3) 三重県内における資源化事業の導入効果評価および地域循環共生圏の形成の可能性の検討

三重県の各自治体における可燃ごみの処理について、2019年と2045年の各シナリオを対象に推計したエネルギー有効利用量の推計結果を図4.3に、処理コストの推計結果を図4.4に示す。エネルギー有効利用量に関してはシナリオA、B、Cのすべてにおいて、エネルギー有効利用量が増加した。シナリオA（広域化のみ実施）では、収集運搬に伴うエネルギー消費量が増加するものの、広域化・施設集約に伴う発電効率の向上及び施設内電力消費の削減によってエネルギー有効利用量が向上し、BAUシナリオ比で63%増加すると推計された。シナリオB（生物乾燥のみ実施）では、製造されるSRFの供給先となる動脈産業のエネルギー利用効率が焼却施設におけるエネルギー回収効率よりも高い水準となるため、シナリオAよりもエネルギー有効利用量が向上し、BaUシナリオ比で111%~148%増加すると推計された。シナリオC（広域化と生物乾燥のいずれかを選択）では広域化・集約化に伴う発電効率の上昇及び施設内電力消費の削減、生物乾燥施設の導入によるエネルギー利用効率の上昇によって、エネルギー有効利用量がBaUシナリオ比で90%~118%増加すると推計された。

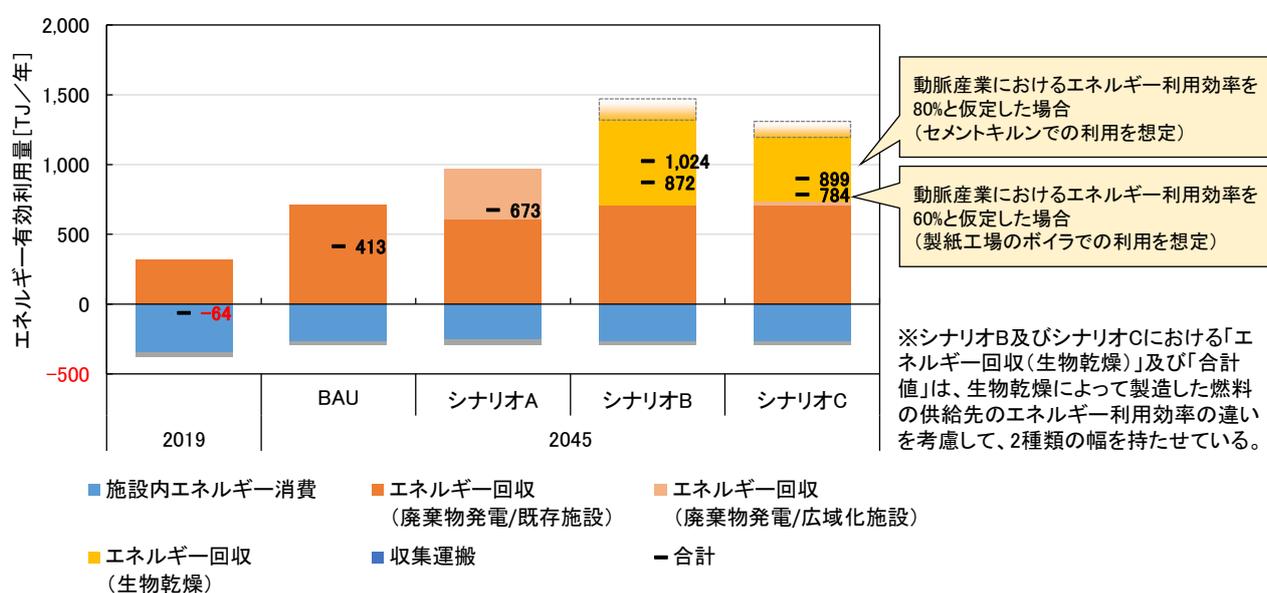


図 4.3 三重県の可燃ごみ処理に伴うエネルギー有効利用量の推計結果

処理コストに関しては、BaUシナリオで約167億円であるところ、シナリオAでは約145億円（13%減）、シナリオBおよびシナリオCでは約156億円（7%減）と推計され、いずれのシナリオにおいても処理コストが削減されると推計された。いずれのシナリオにおいても追加的な輸送コストが計上されるが、処理単価が高い既存の焼却処理施設の廃止によるコスト削減が主な削減効果とみられる。

BaUシナリオの処理コストに対する変化率をシナリオ別・自治体別に示した結果を図4.5に示す。本研究で注目している自治体は類型③や④に属する自治体であるが、いずれのシナリオにおいてもBaUシナリオよりもコストが削減される結果となった。また、同一自治体をシナリオ間で比較すると、広域化（シナリオAあるいはシナリオC）の方が生物乾燥（シナリオB）よりもコスト削減効果が数%大きい結果となった。これは主に中間処理施設における処理単価による差であり、広域化施設における焼却処理の処理単価（シナリオA：13,386円/トン、シナリオC：15,648円/トン）が生物乾燥による処理単価（24,800円/トン）よりも低くなることに起因しているものとみられる。

このように生物乾燥のコスト削減効果は広域化よりもわずかに小さいものの、BaUシナリオ比でコスト削減は可能であると同時に、広域化よりも大きなエネルギー有効利用量の向上が見込まれることから、可燃ごみの処理コスト削減とエネルギー有効利用量向上の両立を行える可燃ごみの処理方法の選択肢の一つに生物乾燥は含まれると考えられる。

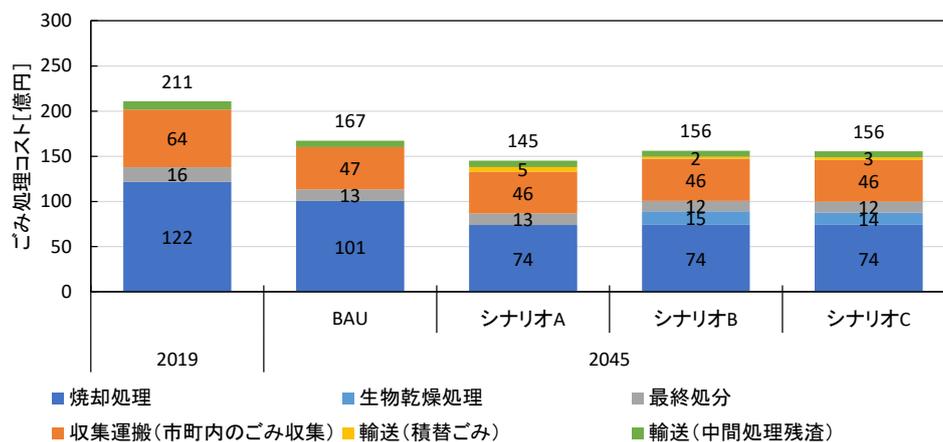


図 4.4 三重県の可燃ごみ処理コストの推計結果

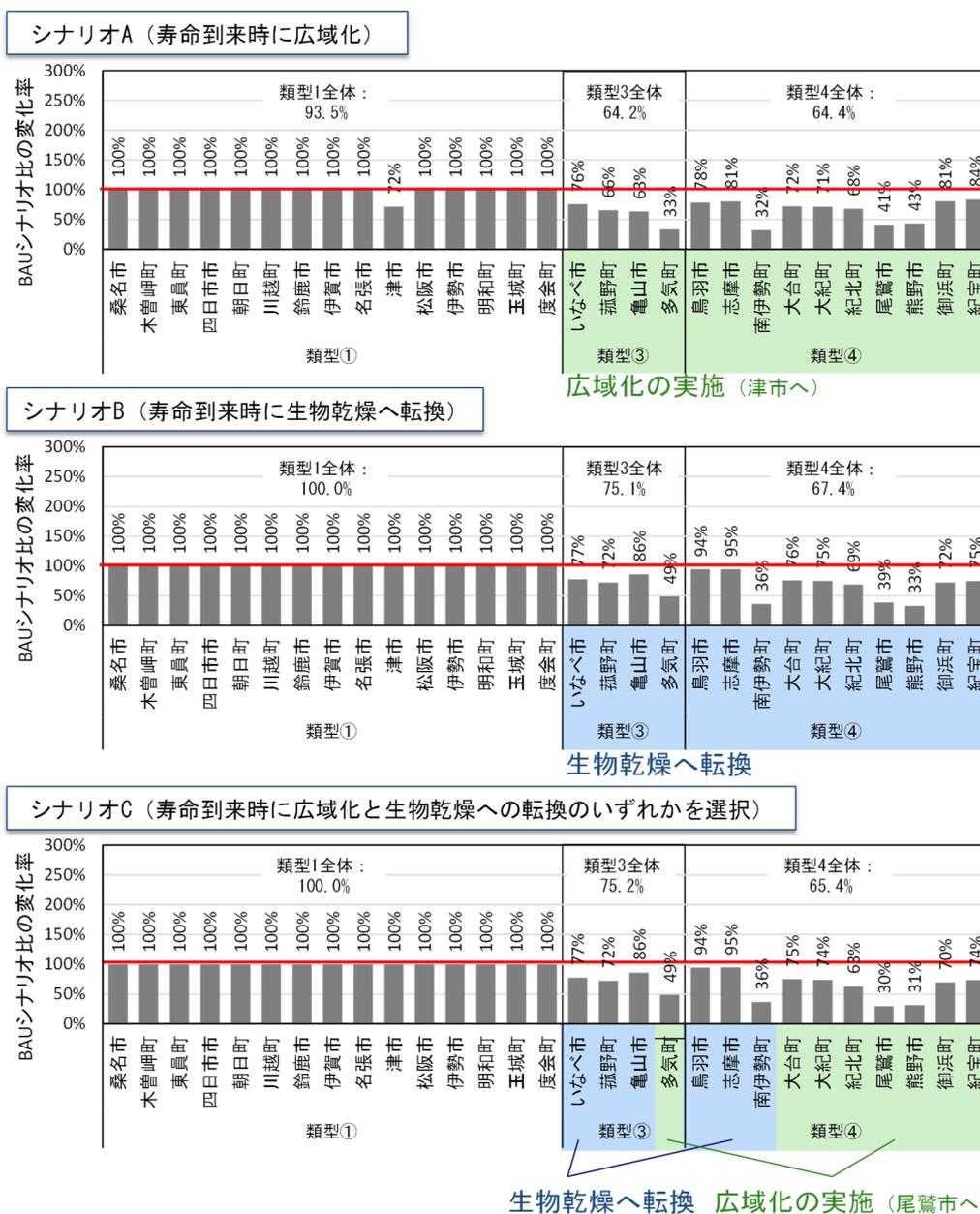


図 4.5 BaU シナリオの可燃ごみ処理コストに対する変化率 (シナリオ別・自治体別)

(4) 資源化事業の他地域への展開可能性検討、広域的導入効果の推計

(1) に示す各指標を用いて判定した全国の自治体の地域類型の結果を図4.6に示す。また、三重県と日本全国の地域類型の分布状況について、総人口及び可燃ごみ量のそれぞれのカバー率並びに自治体数の集計結果を表4.8に示す。自治体数で見ると本研究で注目している類型③・④の自治体村は約70%を占めるが、人口及び可燃ごみ量のカバー率で見ると類型③や④に属する自治体は約21%である。なお、可燃系ごみ量ベースで都道府県別の分布状況を集計した結果を図4.7に示す。これを見ると、山梨県、福井県、徳島県などに類型③・④に該当する自治体が多いことが分かった。

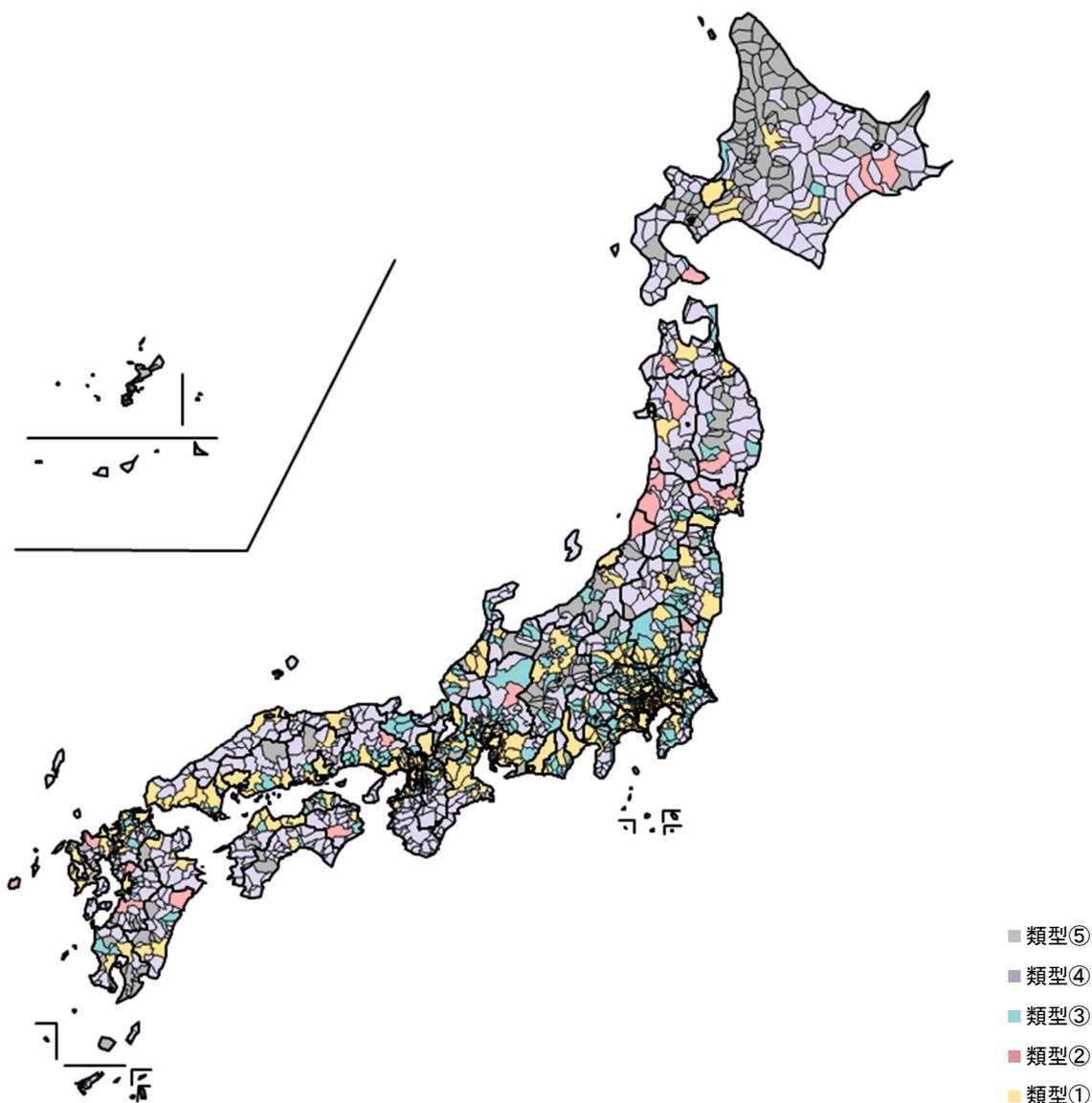


図 4.6 全市区町村の類型分布状況

表 4.8 類型ごとの人口、可燃系ごみ量、自治体数の分布

	人口カバー率		可燃系ごみ量カバー率		自治体数	
	三重県	全国	三重県	全国	三重県	全国
類型①	85%	66%	86%	67%	52%	15%
類型②	0%	6%	0%	6%	0%	2%
類型③	9%	15%	8%	14%	14%	26%
類型④	6%	7%	6%	7%	34%	44%
類型⑤	0%	6%	0%	6%	0%	13%

(3) の推計より得られた各類型のエネルギー消費量原単位、エネルギー回収原単位、処理コストの変化割合を表4.9～表4.11に示す。

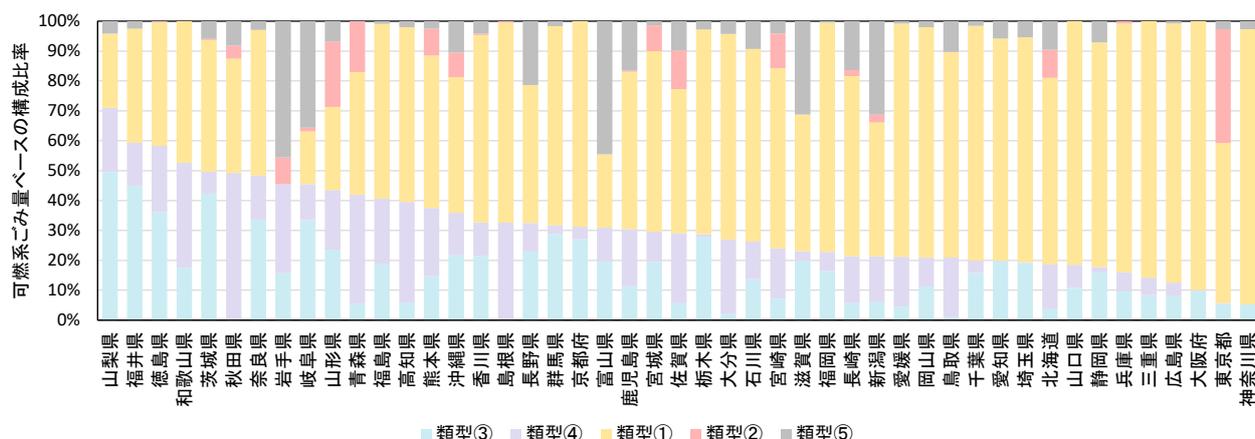


図 4.7 全市区町村の都道府県別類型分布状況

表 4.9 類型別の対策導入効果（エネルギー消費量原単位）

類型	対策導入内容		エネルギー消費量原単位 [MJ/トン]			
	広域化/生物乾燥の導入	民間委託の実施	2019	2045		
				BAUシナリオ	シナリオA (広域化)	シナリオB (生物乾燥)
①			677	673	673	673
②		○	677	673	673	673
③	○		806	807	815	784
④	○	○	881	878	1,105	874
⑤			676	670	670	670

※類型②及び⑤は原単位生成の基となる三重県内の自治体が存在しないため、下記のように設定した。
 類型②：広域化/生物乾燥の導入はせずに既存処理を継続する類型であるため、類型①と同値とした。
 類型⑤：類型①～④の自治体のごみ量とエネルギー消費量原単位から求めた加重平均値を設定した。
 ※類型③および④の自治体のうち、所属する都道府県内に生物乾燥後の燃料供給先となる動脈産業（製紙工場、セメント工場）が存在しない場合、シナリオBの原単位はBaUシナリオと同値とした。

表 4.10 類型別の対策導入効果（エネルギー回収量原単位）

類型	対策導入内容		エネルギー回収量原単位 [MJ/トン]			
	広域化/生物乾燥の導入	民間委託の実施	2019	2045		
				BAUシナリオ	シナリオA (広域化)	シナリオB (生物乾燥)
①			698	1,945	1,945	1,945
②		○	698	1,945	1,945	1,945
③	○		15	0	2,741	8,978
④	○	○	77	0	2,703	8,855
⑤			489	1,417	1,417	1,417

※類型②及び⑤は原単位生成の基となる三重県内の自治体が存在しないため、下記のように設定した。
 類型②：広域化/生物乾燥の導入はせずに既存処理を継続する類型であるため、類型①と同値とした。
 類型⑤：類型1～4の自治体のごみ量とエネルギー消費量原単位から求めた加重平均値を設定した。
 ※類型③および④の自治体のうち、所属する都道府県内に生物乾燥後の燃料供給先となる動脈産業（製紙工場、セメント工場）が存在しない場合、シナリオBの原単位はBaUシナリオと同値とした。

表 4.11 類型別の対策導入効果（ごみ処理コスト変化割合）

類型	対策導入内容		ごみ処理コスト変化割合 [%]			
	広域化/生物乾燥の導入	民間委託の実施	2019	2045		
				BAUシナリオ	シナリオA (広域化)	シナリオB (生物乾燥)
①			100%	82.8%	82.8%	82.8%
②		○	100%	82.8%	82.8%	82.8%
③	○		100%	86.5%	55.5%	65.0%
④	○	○	100%	60.3%	38.8%	40.6%
⑤			100%	82.8%	82.8%	82.8%

※類型②及び⑤は原単位生成の基となる三重県内の自治体が存在しないため、下記のように設定した。

類型②：類型1のコスト変化率に民間委託時のコスト削減率7.3%を乗じて設定した。

類型⑤：類型1～4の自治体のごみ量とエネルギー回収量原単位から求めた加重平均値を設定した。

※類型③および④の自治体のうち、所属する都道府県内に生物乾燥後の燃料供給先となる動脈産業（製紙工場、セメント工場）が存在しない場合、シナリオBの原単位はBaUシナリオと同値とした。

資源化システムの日本全国への広域的な導入による効果について、エネルギー有効利用量の推計結果を図4.8に示す。シナリオごとのエネルギー有効利用量（ネット）は、BaUシナリオでは18,817 TJ、シナリオA（広域化のみ）では35,284 TJ、シナリオB（生物乾燥のみ）では67,633 TJと推計され、

（3）における三重県の推計と同様に、生物乾燥を実施する場合は燃料投入先のエネルギー利用率の高さに起因してエネルギー有効利用量が向上している。なお、エネルギー有効利用量は前述の原単位を用いて推計したエネルギー消費量およびエネルギー回収量（図4.9）の合計量で算出した。

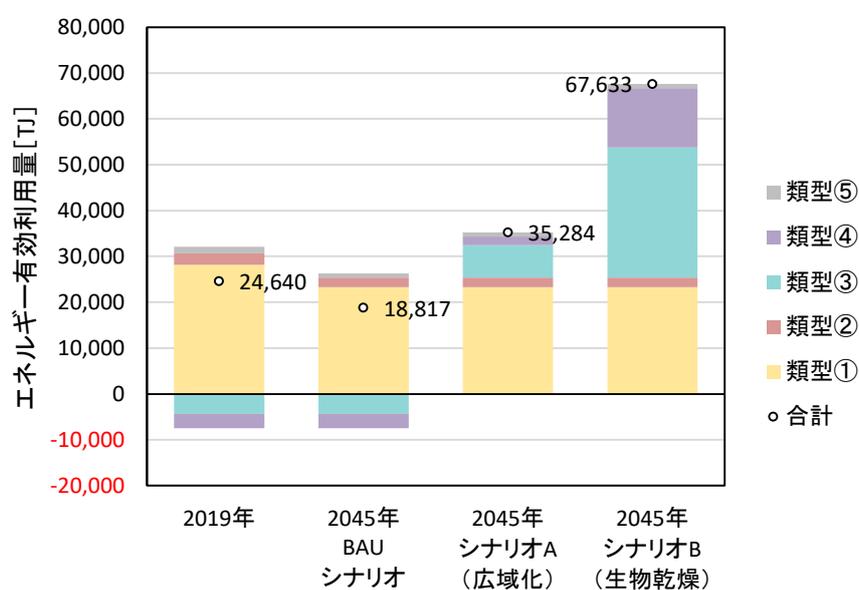


図 4.8 日本全国への資源化システムの広域的導入を想定した場合のエネルギー有効利用量

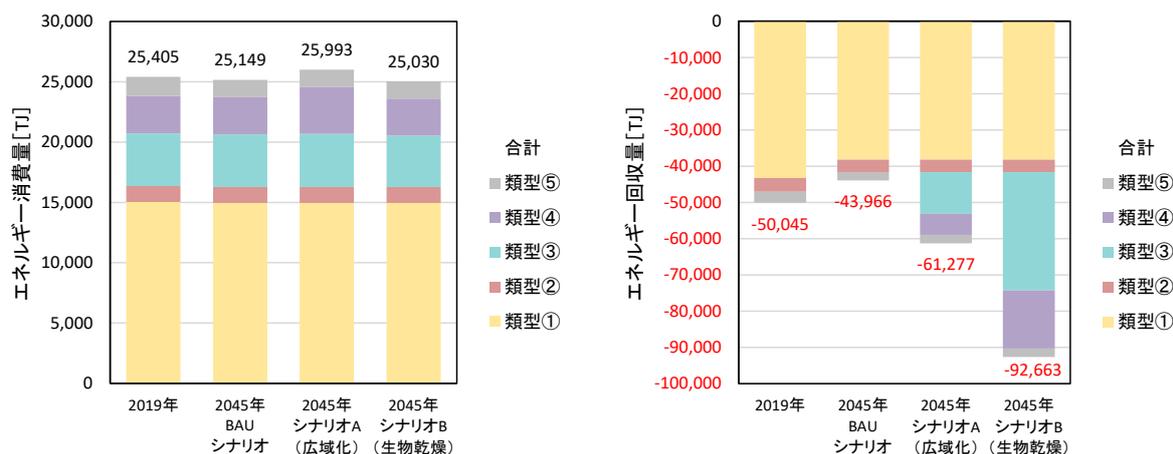


図 4.9 日本全国への資源化システムの広域的導入を想定した場合のエネルギー消費量（左）及びエネルギー回収量（右）

また、可燃ごみ処理コストの推計結果を図4.10に示す。BAUシナリオでは11,521億円、シナリオA（広域化のみ）では10,366億円（10%減）、シナリオB（生物乾燥のみ）では10,828億円（6%減）と推計され、シナリオA、シナリオBのいずれもBAUシナリオより低いコストとなった。

従って、（3）における三重県の推計と同様に、生物乾燥のコスト削減効果は広域化よりも小さいものの、BAUシナリオからコスト削減が行えると同時に広域化よりもエネルギー有効利用量の向上が見込まれることから、可燃ごみの処理コスト削減とエネルギー有効利用量向上の両立を行える可燃ごみの処理方法の選択肢の一つに生物乾燥があると言える。

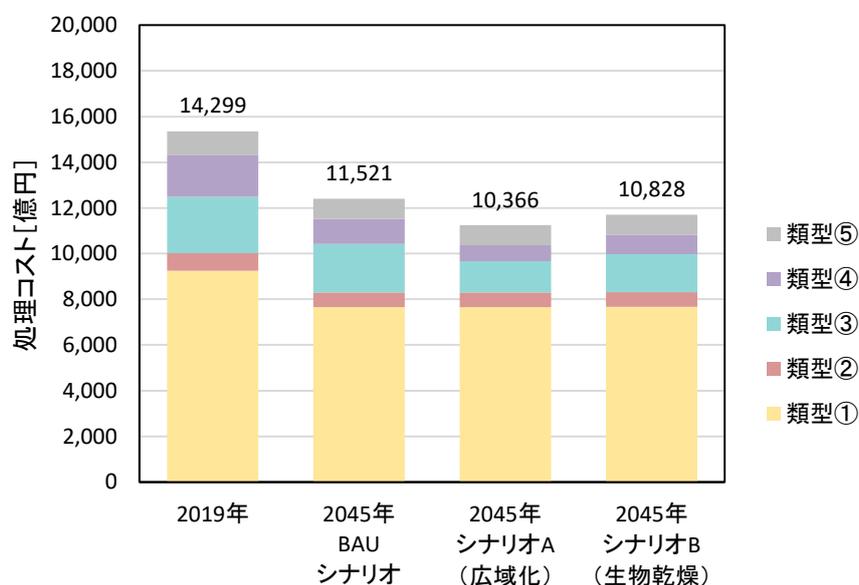


図 4.10 日本全国への資源化システムの広域的導入を想定した場合の可燃ごみ処理コスト

5. 研究目標の達成状況

本プロジェクトで検討した焼却処理の広域化、生物乾燥への転換などの取組を三重県で実施した場合の効果について、「資源化システム評価モデル」を構築し、シナリオを設定して将来推計を行った。その結果、焼却施設の広域化や生物乾燥への転換を行うことで、エネルギー有効利用量はそれぞれ63%、111%～148%向上され、処理コストはそれぞれ13%削減、7%削減されると推計された。

また、同様の取組を日本全国で展開した場合の効果についても推計した。その結果、焼却施設の広域化や生物乾燥への転換を行うことで、エネルギー有効利用量はそれぞれ88%、259%向上され、処理コストはそれぞれ10%削減、6%削減されると推計された。

このように特に環境面、自治体の財政面の効果について、地域の資源を有効活用する取組を実施することの影響を算定することで目標の一部を達成した。一方で、それらの取組が有する社会面やより広い地域への経済効果などの算定および地域循環共生圏形成の総合的な効果の算定については今後の課題となっている。

6. 引用文献

- 1) 環境省：地域循環圏形成の手引きガイドライン（2016）
- 2) 環境省：市町村における循環型社会づくりに向けた一般廃棄物処理システムの指針（2013改訂）
- 3) 環境省：地域循環圏ガイドライン（2012）
- 4) 国立社会保障・人口問題研究所：将来推計人口・世帯数（2018）
- 5) 環境省：平成27年度一般廃棄物処理実態調査結果（2017）
- 6) Google社：Googleマップ
- 7) 経済産業省、国土交通省：ロジスティクス分野におけるCO2 排出量算定方法 共同ガイドライン Ver. 3.1（2016）
- 8) 志賀ら（2007）「ごみ焼却処理施設の現状と課題 ～循環型地域エネルギーシステムを目指して～」
- 9) 大王製紙株式会社（2022）「大王製紙グループの温暖化対策について ～燃料転換と高付加価値化～」
- 10) 一般社団法人セメント協会（2014）「セメント産業の省エネルギー対策について」
- 11) 岡山県（2007）「新岡山県ごみ処理広域化計画資料4 広域化の効果」
- 12) 松藤（2005）「都市ごみ処理システムの分析・計画・評価」
- 13) 国土交通省：VFM簡易算定モデルマニュアル

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) 早崎真也、大下和徹、河井紘輔、高岡昌輝：脱炭素社会における都市ごみ焼却施設からの温室効果ガス排出量の将来推定—京都市を例に、*廃棄物資源循環学会論文誌* (in press) (2022)

【サブテーマ2】

- 1) Kawai K, Oshita K, Kusube T.: Model for projecting the generation of used disposable diapers in the era of depopulation and aging in Japan. *Waste Management & Research* (投稿中) (IF: 3.5)

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

【サブテーマ2】

- 1) 河井紘輔：地域循環共生圏の形成に向けた未利用廃プラスチックのエネルギー利用, *JEFMA* 68, 12-16 (2020)

(2) 口頭発表(学会等)

【サブテーマ1】

- 1) Hayasaki S., Oshita K., Kawai K., Takaoka M.: Prediction of Municipal Solid Waste Composition and Estimation of Impact on Incineration Process in Depopulation and Aging Society, Japan. 6th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management, Abstracts (2020)
- 2) 早崎真也, 大下和徹, 高岡昌輝, 河井紘輔: 人口減少・高齢化にともなう都市ごみ組成の将来予測と焼却処理への影響推定. 京都大学環境衛生工学研究会第42回シンポジウム講演論文集. 79-81 (2020)

【サブテーマ2】

- 1) Sutthasil N., Ishigaki T., Ochiai S., Yamada M.: Preliminary study on breaking down of organic waste composition; A case study in Thailand. The 23rd Korea-Japan Joint International Session of Korea Society of Waste Management, Proceedings of the 2019 Spring Conference of Symposium / Special Session, 300-301 (2019)
- 2) Kawai K.: Sustainable municipal solid waste management in Asia. 2019 4th Asia Conference on Environment and Sustainable Development, Abstracts, 12-13 (2019)
- 3) 河井紘輔, 楠部孝誠, 岡山朋子: 長井市における20年間の生ごみ分別収集量の変遷と人口動態が及ぼす影響. 第30回廃棄物資源循環学会研究発表会, 同予稿集, 3-4 (2019)
- 4) 楠部孝誠, 河井紘輔: 家庭ごみの有料化に伴う資源化促進及び可燃ごみ減量が与えるごみ処理コストの変化. 第30回廃棄物資源循環学会研究発表会, 同予稿集, 97-98 (2019)
- 5) 河井紘輔, 大下和徹, 楠部孝誠: ネットリサーチによる子供用及び大人用紙おむつの使用実態把握. 第31回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集. 17-18 (2020)
- 6) Sutthasil N., Ishigaki T., Hoang H.N., Hiroki K., Ochiai S., Yamada M.: Insights on organic waste composition from cities in Southeast Asia: The behavior and Seasonal effects, The 6th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste

Management (2020)

- 7) Sutthasil N., Ishimori H., Ishigaki T., Yamada M.: The determination of adhesive properties of the organic waste, The 18th International Symposium on Waste Management and Sustainable Landfilling (2021)
- 8) Sutthasil N., Ishigaki T., Kawai K., Yamada M.: Assessment of the operational condition of Biodrying of waste including Super Absorbent Polymer, The 32nd Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management (2021)
- 9) 河井紘輔: 人口減少・高齢化社会におけるごみ発生に関する調査と将来予測. 2021年度廃棄物資源循環学会, 春の研究討論会, 若手の会 (2021.5.27)
- 10) 楠部孝誠, 河井紘輔: 人口減少下の可燃ごみの広域処理と処理方式に関する検討. 第32回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集. 73-74 (2021)
- 11) Ishigaki T.: Mechanical and Biological Treatment of Solid Waste to Complement the Centralized Technology, The 8th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (2022)
- 12) Sutthasil N., Ishimori H., Ishigaki T., Yamada M.: The application of municipal solid waste viscoelastic properties to the tommel simulation, The 8th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (2022)
- 13) Ishigaki T., Sutthasil N., Kawai K., Yamada M.: Effect of superabsorbent polymers from diaper on biodrying process for municipal waste treatment, The 24th Korea-Japan Joint International Session of Korea Society of Waste Management (2022)

【サブテーマ3】

- 1) 秦三和子, 村上友章, 吉川克彦, 河井紘輔, 大迫政浩, 西村富男: 人口減少・高齢化社会における廃棄物処理事業の官民連携に関する課題と解決策の例示. 第31回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集. 89-90 (2020)
- 2) 秦三和子, 西村富男, 村上友章, 吉川克彦, 河井紘輔: 人口減少自治体におけるごみ処理方式と将来の事業費負担. 第32回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集. 89-90 (2021)
- 3) 村上友章, 秦三和子, 西村富男, 吉川克彦, 河井紘輔: 将来の一般廃棄物排出量の減少を考慮した新たな広域処理の必要性. 第32回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集. 105-106 (2021)
- 4) 秦三和子: 人口減少・高齢化社会における新たな廃棄物処理事業について. 2021年度廃棄物資源循環学会 春の研究討論会 (2021.5.27)
- 5) 秦三和子: バックキャストで考える新たな官民連携一般廃棄物処理事業. 廃棄物資源循環学会企画セミナー (2021.12.8)
- 6) 秦三和子, 村上友章, 吉川克彦, 西村富男, 河井紘輔, 大迫政浩: 人口減少自治体のごみ処理における官民連携の可能性. 第43回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集. 1-2 (2022)

【サブテーマ4】

- 1) 横尾祐輔, 中西翔太郎, 高木重定, 河井紘輔: 人口減少社会を考慮した一般廃棄物の焼却処理の広域化によるエネルギー回収効果の将来推計. 第32回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集. 27-28 (2021)

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1】

- 1) 河井紘輔: 都市域における循環型社会, 2019年度中央区総合環境講座. 中央区立環境情報センター (2019.7.3)

- 2) 大下和徹：廃棄物としてのプラスチックを巡る諸問題～処分・リサイクル・今後など～、特定非営利活動法人水環境創造機構講演会 (Web セミナー, 2020, 11, 10)
- 3) 大下和徹：廃棄物処理の未来 – 都市ごみ焼却、下水汚泥処理を中心に – メタウォーター株式会社 学識者講演会 (2021. 12. 17)

(4) マスコミ等への公表・報道等>

【サブテーマ2】

- 1) 日本経済新聞 (2021年10月4日、「危うしリサイクル先進国」)
- 2) The New York Times (2021年11月15日、「A New Source of Fuel in an Aging Japan: Adult Incontinence」)

(5) 本研究費の研究成果による受賞

特に記載すべき事項はない。

IV. 英文Abstract

Sustainable Systems of Municipal Solid Waste Management in Depopulated and Aging Areas of Japan

Principal Investigator: Kosuke Kawai

Institution: National Institute for Environmental Studies, 16-2, Onogawa, Tsukuba
305-8506, Japan

Tel; +81-29-850-2727/Fax; +81-29-850-2830

E-mail: kawai.kosuke@nies.go.jp

Cooperated by: Kyoto University, Ishikawa Prefectural University, EX Research Institute
Ltd., and Mizuho Research & Technologies, Ltd.

[Abstract]

Key Words: Depopulation, Aging, Municipal solid waste, Disposable diaper, Combustible waste, Public private partnership, Incineration, Bio drying, Energy

Municipalities in areas with depopulation and aging in Japan are more likely to be forced to reduce the cost of their municipal solid waste management due to financial tightness. We reviewed the conventional incineration system to manage municipal solid waste and proposed an alternative management system, which could contribute to solving technical and financial challenges in depopulation and aging areas.

We projected that the proportion of used disposable diapers in combustible waste would increase in both areas where the amount of used disposable diapers increases or decreases due to the declining population and aging. The proportion of used disposable diapers is expected to rise to about 20% in areas with depopulation and aging, and it is necessary to properly manage used disposable diapers from the viewpoint of recycling as well as sanitation.

We proposed bio drying and production of solid recovered fuels as the alternative management system in depopulation and aging areas, and confirmed the effectiveness of the system using an indicator called "effective energy use." We also demonstrated on a lab scale and pilot scale that bio drying technology was applicable even if the physical composition of combustible waste may dramatically change in the future.

In addition to showing the effect of reducing management costs by outsourcing to the private sector, we designed a decision-making flow for selecting business options to manage municipal solid waste including outsourcing to the private sector. As the population declines and the population ages, tax revenues will decrease and the number of areas where public finances will be tight will increase. It is expected that the results of our study will be utilized as scientific references.