

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

3-1905 静脈系サプライチェーンマネジメントのための
情報通信技術の導入可能性と効果分析
(JPMEERF20193005)
令和元年度～令和3年度

Feasibility and Effectiveness Analysis of ICT for Reverse Supply Chain Management

<研究代表機関>
北九州市立大学

<研究分担機関>
国立環境研究所
和歌山大学
立命館大学
早稲田大学
東洋大学

<研究協力機関>
一般社団法人資源循環ネットワーク
一般社団法人廃棄物適正処理推進機構
株式会社ユーパーツ
株式会社JARA
株式会社クレハ環境
大栄環境株式会社
みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社

○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 ICT・AIの活用による排出・処理事業者間インタラクション実現による資源循環の効率化及び適正 処理の推進	・・・・・・・・・・	16
（北九州市立大学、早稲田大学）		
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 産廃のエネルギー利用高度化を想定した需給マッチングの最適化	・・・・・・・・・・	31
（国立環境研究所、東洋大学）		
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 産業廃棄物のサーマルリカバリープロセスへのICT・AI導入による施設の維持・管理の高度化

..... 44

(和歌山大学)

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-4 情報通信技術の活用による廃棄物処理事業における生産性の向上と適正処理推進のための安全管理の高度化

..... 59

(立命館大学)

要旨

1. 研究開発目的
2. 研究目標
3. 研究開発内容
4. 結果及び考察
5. 研究目標の達成状況
6. 引用文献

III. 研究成果の発表状況の詳細 74

IV. 英文Abstract 81

I. 成果の概要

課題名 3-1905 静脈系サプライチェーンマネジメントのための情報通信技術の導入可能性と効果分析

課題代表者名 松本 亨 (北九州市立大学 環境技術研究所 教授)

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】 廃棄物の適正処理と処理施設の長寿命化・機能向上に資する研究・技術開発

行政要請研究テーマ (行政ニーズ)

(3-2) ICT・AI技術の活用による産業廃棄物処理業におけるリユース・リサイクルの促進・生産性向上等に資する技術開発に関する研究

研究実施期間 令和元年度～令和3年度

研究経費

112,683千円 (合計額)

(各年度の内訳：令和元年度：39,664千円、令和2年度：37,553千円、令和3年度：35,466千円)

研究体制

- (サブテーマ1) ICT・AIの活用による排出・処理事業者間インタラクション実現による資源循環の効率化及び適正処理の推進 (北九州市立大学)
- (サブテーマ2) 産廃のエネルギー利用高度化を想定した需給マッチングの最適化 (国立環境研究所)
- (サブテーマ3) 産業廃棄物のサーマルリカバリープロセスへのICT・AI導入による施設の維持・管理の高度化 (和歌山大学)
- (サブテーマ4) 情報通信技術の活用による廃棄物処理事業における生産性の向上と適正処理推進のための安全管理の高度化 (立命館大学)

研究協力機関

- (サブテーマ1) 一般社団法人資源循環ネットワーク、一般社団法人廃棄物適正処理推進機構、株式会社ユーパーツ、株式会社JARA
- (サブテーマ2) 株式会社クレハ環境
- (サブテーマ3) 大栄環境株式会社
- (サブテーマ4) みずほりサーチ&テクノロジーズ株式会社

本研究のキーワード

ICT・AI技術、情報連携、需給マッチング、予防保全、維持・保全・生産性の高度化、サーマルリカバリー、モニタリング

1. はじめに (研究背景等)

循環型社会形成推進基本計画において設定されている物質フローの代表指標である、資源生産性、循環利用率、最終処分量であるが、2002年以降順調にそれらの値を改善してきた。しかし、近年いずれの指標も、その改善傾向に停滞感が見られるようになっている。また、少子高齢化、特に生産年齢人口の減少により労働力不足は廃棄物分野においてもすでに顕在化しており、生産性の向上や労働環境の改善

が喫緊の課題となっている。

このように、環境面での対策強化や労働力不足等多数の問題に直面しているが、これらに対する解決策の1つとして、IoT・AIを含む情報技術を活用した廃棄物回収、中間処理工程等の省人力化やリサイクルの経済性向上、マテリアル品質・エネルギー管理の高度化による大幅な低炭素化や資源回収の促進が挙げられる。これら情報通信技術を用い経済社会のイノベーションは「第4次産業革命」と呼ばれるが、廃棄物・資源循環分野においてもこれにキャッチアップすることで、よりクリーンでスマートな産業となることが、大量生産・大量消費型社会の変革と労働力の安定的確保に繋がり得ると考えられる。EUは2015年に新循環経済政策パッケージを発表し、廃棄物の発生を最小限化することとともに、持続可能で低炭素かつ資源効率的で競争力のある経済に転換させる動きが始まっているが、革新的消費形態として情報通信技術に着目している。OECDにおいても、デジタル化と循環経済に関する議論が始まっている。これらの動きを呼応する、あるいは先導するためにも、我が国における廃棄物・資源循環分野における情報通信技術の活用可能性に関する研究には緊急性があるといえる。

2. 研究開発目的

本研究課題では、静脈系サプライチェーンに対する情報通信技術の活用可能性を検討し、実証的研究を通じて、これらの導入可能性の検討と効果分析を行うことを目的とする。

サブテーマ1 排出・処理事業者間インタラクションによる収集効率化、処理業者の業務効率化を対象とし、IoT、AIを含む効率化アルゴリズム、プラットフォームのプロトタイプを開発する。

サブテーマ2 エネルギー需給マッチング、廃棄物需給マッチングによるエネルギー利用の高度化について、IoT等を用いて開発する。

サブテーマ3 焼却プロセスの原動機系と素材系を対象とした維持・保全高度化について機械学習を用いて開発する。

サブテーマ4 収集運搬、中間処理施設、各種事務処理を対象とし、スマートウェア、RPA(Robotic Process Automation)等のシステムを導入し、生産性と労働安全の向上効果を分析する。

静脈系サプライチェーン、つまり廃棄物・循環資源の発生から処理、再使用・再生利用・熱回収における課題に対して適用可能なICT・AI技術を検討し、それらを導入することで得られる効果を分析した。(図0.1)。

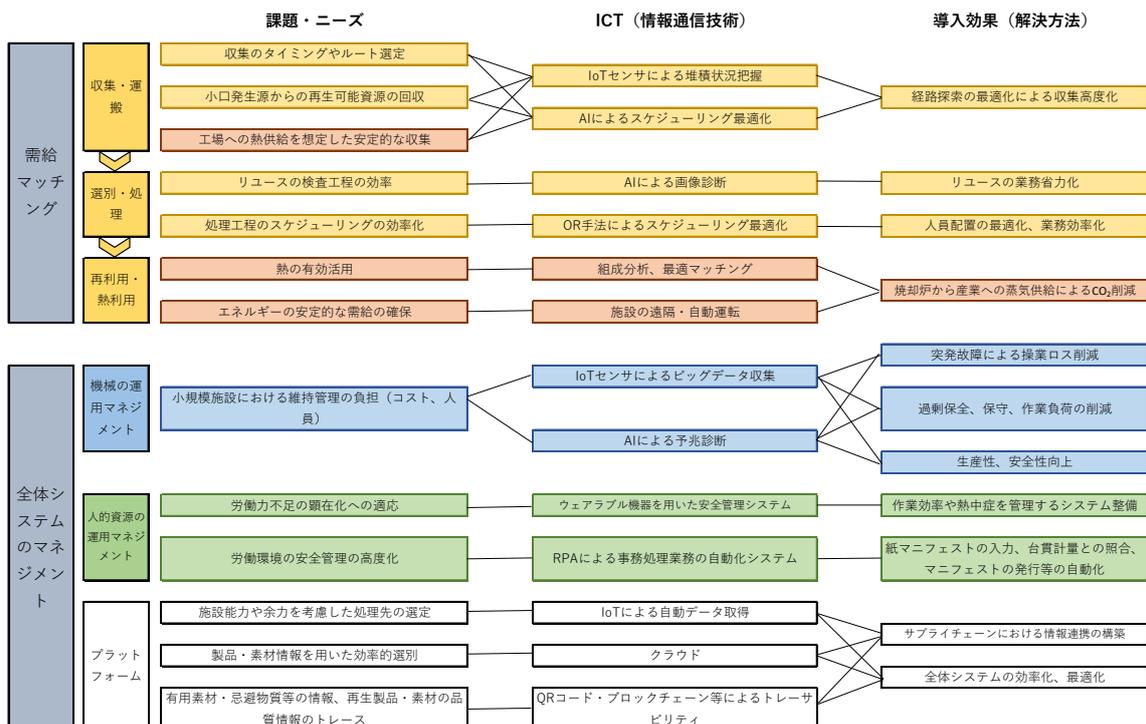


図0.1 静脈系サプライチェーンにおける課題とICT・AI技術による導入効果

3. 研究目標

全体目標	<p>静脈系サプライチェーンの最適マネジメントのために適用可能なICT・AI技術とそれらによる課題解決の可能性の組み合わせを提示し、導入による効果を評価する。さらに、その展開可能性と導入効果についての拡大推計を行う。4つのサブテーマを通じて、静脈系サプライチェーン全体の最適なマネジメントを実現させるためのプラットフォームの在り方について提示する。</p>
サブテーマ1	ICT・AIの活用による排出・処理事業者間インタラクション実現による資源循環の効率化及び適正処理の推進
サブテーマリーダー/所属機関	松本 亨／北九州市立大学
目標	<p>ICT・AIの活用による排出・処理事業者間インタラクション実現による効果を、システム構築に要する費用・環境負荷と削減可能な費用・環境負荷の対比により評価する。これにより、個別分野の実施主体別の導入利益を明らかにする。また、現行法制度、社会システムとの親和性を検討し、社会実装に向けたビジネスモデルを提示することを目標とする。QRコードとスマートフォンを活用した①WCMによるトレーサビリティシステムと②AIによる画像診断システムの2つのソリューションを核として、さまざまな廃棄物・リサイクルシステムに応用可能な汎用性のある情報管理システムのプロトタイプを開発する。具体的なモデルケースとして、医療廃棄物の小口回収、リユースパーツの生産プロセスを取り上げる。本研究のなかで、各々の個別課題に対応した①と②を組み合わせたシステムのプロトタイプの開発・実証・評価を行い、事業期間終了後に円滑に社会実装につなげることを目標とする。</p>
サブテーマ2	産廃のエネルギー利用高度化を想定した需給マッチングの最適化
サブテーマリーダー/所属機関	藤井 実／国立環境研究所
目標	<p>産業廃棄物を利用した高効率発電（発電効率20%程度）に対し、固形燃料化や焼却熱の産業利用など、エネルギー利用効率が各段に高い熱利用の促進方策を検討する。特に熱利用では発電のように系統による変動の吸収ができないため、需給をバランスさせる必要性が高い。燃料となる廃棄物の排出・収集状況、固形燃料の製造状況、焼却炉等の運転状況などを把握するセンサや情報共有の仕組みを調査し、それらを組み合わせた需給マッチングを行う情報プラットフォームの基本設計を行い、その有効性を評価するとともに、焼却熱の効率・安定的な利用に資する周辺技術の調査を実施する。</p>
サブテーマ3	産業廃棄物のサーマルリカバリープロセスへのICT・AI導入による施設の維持・管理の高度化
サブテーマリーダー/所属機関	吉田 登／和歌山大学
目標	<p>①予兆診断のためのデータ取得、機械学習（Gaussian Process Regression）を用いた異常の予兆検出を行うモニタリングシステムのプロトタイプを構築し、</p>

	<p>サーマルリカバリープロセスにおいて、原動機系・素材系装置でそれぞれ1箇所以上について、1ヶ月以上の連続モニタリングを実証する。目標とするモニタリング性能は、現状の施設維持・管理に適用されているレベルを上回る高サンプリングレートでの安定的なデータ取得を行うものとし、原動機系（振動加速度）で50kHz以上、素材系（バグフィルター差圧）で記録間隔10s以下とする。</p> <p>②ICT・AI導入による維持・管理の高度化のサーマルリカバリープロセスへの導入可能性、及び環境・経済面に与える効果を明らかにする。</p>
--	--

サブテーマ4	情報通信技術の活用による廃棄物処理事業における生産性の向上と適正処理推進のための安全管理の高度化
サブテーマリーダー/所属機関	橋本 征二/立命館大学
目標	紙マニフェスト情報の廃棄物処理業者向けパッケージソフトへの入力作業を自動化するプロトタイプシステムを、RPA(Robotic Process Automation)及びAI-OCRソフトを用いて導入し、紙マニフェストの入力・確認時間の削減効果を計測する。このシステムにより効果が得られる条件を抽出し、廃棄物処理業者のデジタル化方策の一つである当該システムの有効性と適用範囲を示す。また、スマートウェアを活用して作業員の生体情報を計測するプロトタイプシステムを廃棄物の処理及び収集運搬プロセスに導入し、40人日程度の作業員を対象に熱中症・ヒートショックの危険性や労働強度の実態を把握する。これにより、作業員の身体的な差異を踏まえた上で、第三者からの注意喚起・警告などが可能になる当該システムの有効性を示す。

4. 研究開発内容

サブテーマ1

排出・処理事業者間インタラクションによる収集効率化、処理業者の業務効率化を対象とし、IoT、AIを含む効率化アルゴリズム、プラットフォームを開発し、その効果を、システム構築に要する費用・環境負荷と削減可能な費用・環境負荷の対比により評価する。本研究では具体的に「発生量把握と予測」「収集運搬、中間処理施設運用の最適化」「情報プラットフォームのための技術と効果」の3つのフェーズに分けて実施した。

「発生量把握と予測」のフェーズにおいて、まずは基礎研究として、それぞれのセンシング手法が想定される適用方法とその特徴を整理するとともに、コスト面や適用する際の課題について横断的に整理を行った。続いて、市販のセンサ3種9製品を対象に複数の廃棄物を対象に環境を変えて測定を行いそれを観察することで、適合性について検証を行うとともに、リアルタイムで廃棄物の蓄積状況を把握するためのシステムを開発した。実証研究として、QRコードとスマートフォンを活用した活動記録管理(Work Chain Management: WCM)によるトレーサビリティシステムを提案し、そのニーズを調査するとともに、ある収集・運搬事業者のドライバー2名、9つの医療機関の協力を得て、実証試験を実施し、その有効性を確認した。なお、WCMとは、QRコードとスマートフォンによって、現場で発生する「活動」を直接、クラウドデータベースに蓄積し、タイムライン、画像等の情報を、伝票を介さずに管理することが可能なシステムであり、GPS等による収集・運搬車両の位置情報と組み合わせることでトレーサビリティを実現することができる。また、センサを使用せずに排出量予測が可能なAI予測の効果を、廃プラを対象に2年4か月の実績データを活用して予測モデル(28モデル)を作成し、最新の1か月のデータに当てはめることで検証を行った。

「収集運搬、中間処理施設運用の最適化」のフェーズにおいては、近年注目されているAI技術の一つ

である強化学習を取り入れた手法を開発し、既存の手法に比べて有効であることを確認した。また、過去の実績データを機械学習させ将来の予測ができるシステムを導入した場合を想定し、産業廃棄物の実績データ（収集運搬工程・中間処理工程）を活用することで、その有効性について検証を行った。

「情報プラットフォームのための技術と効果」のフェーズにおいて、まずは産業廃棄物の排出・処理にかかわる排出事業者、収集運搬業者、処分業者に対して利用意向に関するアンケート調査を実施することで、情報プラットフォームに対して一定のニーズがあることを確認した。また、実証研究としては自動車リユースパーツの工場へ画像解析のシステムを導入する場合を想定し、ドアの画像を対象にその有効性と課題を把握した。

サブテーマ2

産業廃棄物の焼却熱を工場の製造プロセスに蒸気として供給・利用することで、これまで一般的な焼却発電（発電効率20%程度）に対して、約2倍のエネルギー消費削減効果が得られ、結果的にCO₂排出削減効果やエネルギー販売益も約2倍となることが期待される。しかし、蒸気供給が事業化されている事例は限定的である。導入が進まない主な理由は、廃棄物を利用した蒸気供給の有効性が認知されていないことと、認知されている場合であっても、蒸気供給が不安定になりがちであることを不安視する関係者が多いためである。そこで、先行事例となる韓国・蔚山工業団地でのヒアリング調査等に基づき、一部情報技術も活用しながら、廃棄物を利用した蒸気の安定供給が可能となる仕組みを設計して、その費用対効果や便益を評価すると共に、製造工場への蒸気供給の有効性について、40機関を超える関係者で情報共有を進め、事業化に向けた検討体制の構築を試みた。その結果、複数の場所で実現可能性調査を開始することができた。更に情報共有を進めることにより、近い将来において、大きなCO₂排出削減効果をもたらすことが期待される。

サブテーマ3

産業廃棄物のサーマルリカバリープロセスへのICT・AI導入による施設の維持・管理の高度化をテーマに研究を実施した。まず、産業廃棄物焼却炉に設置されている装置のうち、原動機系として送風機の振動加速度、および素材系としてバグフィルタろ布の差圧について、データの計測、処理、記録、遠隔転送に関する一連の機能を有するモニタリングシステムを構築し、産業廃棄物焼却プラントにおける実証を行った。取得されたデータをもとに非線形回帰分析手法の1つであるGPRを用いて正常値を推定し、計測値との乖離度合いを異常度として判定する分析を行った。次に、処理規模に対応した送風機とバグフィルタろ布の維持管理費用を推計して、機材の耐用年数を延伸することによる維持管理費用の削減効果を求めた。さらに、産業廃棄物処理事業者に対してWEBアンケートを実施し、処理事業者が保有する焼却施設における設備保守・保全の状況やICT・AI導入ニーズ、意向について調査した。

サブテーマ4

産業廃棄物の処理事業者における様々な事務作業のうち、負荷が高いと考えられる紙マニフェストの入力作業を対象として、業務効率化の検討を行った。具体的には、AI-OCR（Artificial Intelligence - Optical Character Reader）により紙マニフェストの情報をデジタル化し、RPA（Robotic Process Automation）を用いて基幹業務システムに情報を転記することを試行した。また、デジタル化された情報を用いてRPAによる排出事業者向けレポートの作成を試行した。AI-OCRは、従来のOCRに比べて手書き文字の認識率が高く、読取文字のデータ項目への割り当てを自動で行うものであり、RPAは、人間がコンピューター上で行う定型作業を自動化するものである。

また、産業廃棄物処理業においても熱中症への対応が課題となっているから、処理施設及び収集運搬における作業員（それぞれ82人日、57人日）を対象として、熱中症の危険性や身体負荷（労働強度）の実態把握を行った。具体的には、作業員が着用するスマートウェア（COCOMI®）と計測機器（WHS-2もしくはWHS-1）にて心拍数等の生体情報を取得するとともに、周辺環境情報（WBGT値、気温、湿度）のデータを取得した。取得したデータをもとに、複数の基準を用いて熱中症の危険性を判定するとともに、労

働強度を算定し、これらの傾向について考察した。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

サブテーマ1

(1) 発生量把握と予測

市販のセンサ3種9製品を対象に複数の廃棄物を対象に環境を変えて測定を行いそれを観察することで、適合性について検証を行うとともに、リアルタイムで廃棄物の蓄積状況を把握するためのシステムを開発した。

収集・運搬プロセスの効率化に貢献するセンシングシステム等の体系化を図ったうえで、トレーサビリティシステムの全体構想を提示した。「医療廃棄物の小口回収システム」に関しては、収集・運搬事業者3社に対するヒアリング調査により、電話での集荷依頼が非効率であること、ドライバーの経験則によって収集ルートを決めており、必ずしも最適化されていない実態が明らかとなった。I市の小規模な医療機関260件に対してアンケート調査票を送付し、85件の回答を得た。その結果、感染性廃棄物に関しては、大半がプラスチック容器（10～40L）を使用していることがわかった。また、約30%の医療機関から実証事業への参加意向を確認することができ、小口の医療機関であっても患者の個人情報保護の観点から、トレーサビリティシステムへの関心を有することが確認できた。

以上の検討に基づき、WCMを基軸とした実証事業の全体イメージを提示し、ボタン式集荷依頼システムおよび排出事業者と収集・運搬事業者との情報共有システムのプロトタイプを構築した（図0.2）。構築したプロトタイプを用いた実証試験を2022年1月から8か所の医療機関（排出事業者）および収集・運搬事業者の協力を得て、実施した。その結果、排出事業者と収集・運搬事業者間の集荷日時のスケジュール調整が円滑に行えたこと、作業負担の軽減に貢献することをインタビュー調査により確認できた。その結果、本研究期間終了後も規模を拡張した実証試験を継続することに合意を得ている。

さらに、下記のとおり、実用化を前提とした応用先が確認できており、その社会実装に向けた動きが加速化している。こうしたニーズを受け、研究協力者と連携しながら、開発したシステムを事業化する検討にも着手している。

- 廃油回収事業者（小口回収）：重量センサを用いた集荷依頼システム（実証フェーズ）
- RPF製造事業者（工程管理）：自社工場内におけるWCMの導入（実証フェーズ）
- 金属リサイクル事業者（工程管理）：自社工場内におけるWCMの導入（実証フェーズ）
- 建設廃棄物処理業者（トレーサビリティ）：WCMをベースとした廃棄物のトレーサビリティシステムの構築（商用フェーズ）
- バイオマス発電事業者（トレーサビリティ）：WCMをベースとしたトレーサビリティシステムの導入（商用フェーズ）

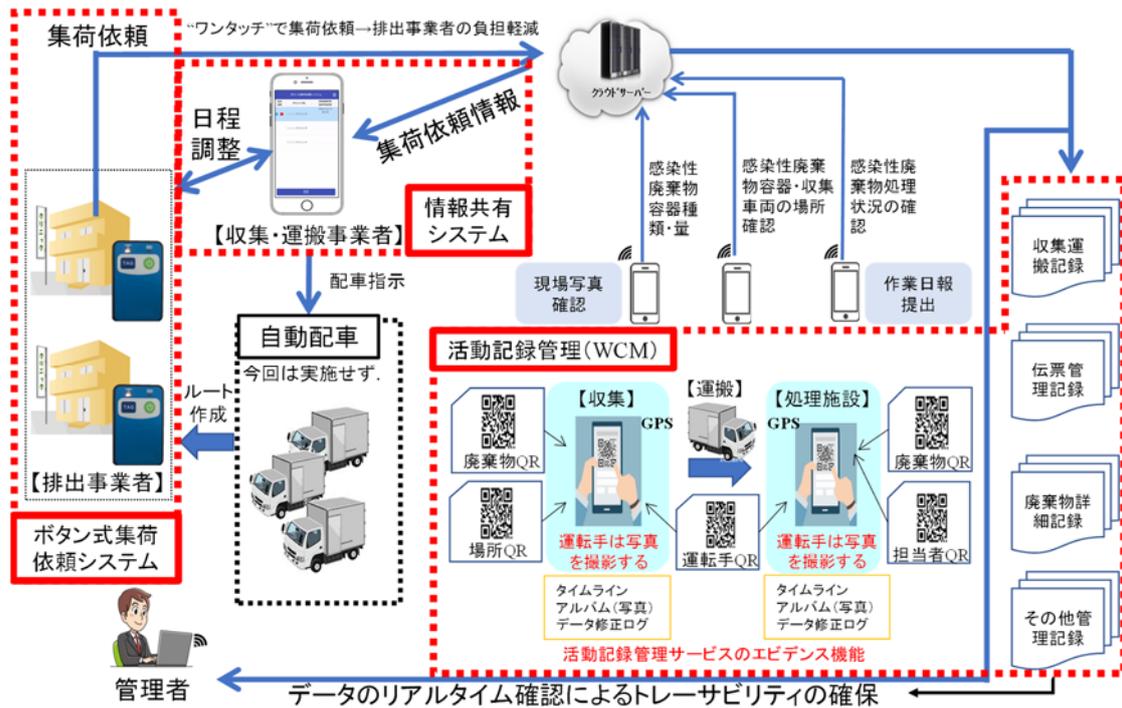


図0.2 WCMを核としたトレーサビリティシステムの全体像
(医療廃棄物の小口回収を例として)

廃プラスチックの回収ポテンシャルを把握することは、リサイクルシステムの最適化のためには重要なファクタであり、特に回収処理スケジュールの作成、配車、人員配置等を行う上では、必要な情報である。そこで、福岡県において複数施設からの産業系廃プラスチックの回収実績データを活用し、予測モデル（28モデル）を作成し、最新の1か月のデータに当てはめることで検証を行った。具体的には、個別施設から排出される廃プラの1日あたり回収需要量予測のための機械学習手法を開発した。その結果、スーパーでは84.6%、病院では84.4%、物流企業では78.2%、食品工場では82.5%、ビル管理企業では81.1%の精度を得ることができた。また、気象条件は病院と物流企業の将来予測には寄与しないことを確認した。有効な予測期間はスーパーで20日間、病院で2日間、物流企業で6日間、食品工場1日間、ビル管理企業で2日間であった。

(2) 収集運搬、中間処理施設運用の最適化

近年注目されているAI技術の一つである強化学習を取り入れた手法を開発し、既存の手法に比べて有効であることを確認した。また、過去の実績データを機械学習させ将来の予測ができるシステムを導入した場合を想定し、産業廃棄物の実績データ（収集運搬工程・中間処理工程）を活用することで、その有効性について検証を行った。

また、従来の回収システム（ルート回収・スポット回収）を統合化することを提案し、機械学習による将来予測手法を提示したうえで、Pythonを用いて総移動距離（直線距離）の最小化に関する輸送計画問題を解いた。その効果を検証するため、道路網に基づいた最適なルートを検出し、システムの統合による効果（総移動距離・CO₂排出量）を把握した。その結果、総移動距離の最適な回収ルートを検出することによって、総移動距離は回収1回当たり約22kmの削減効果（14.2%）があることを、二酸化炭素排出量は回収1回当たり4.8kg-CO₂の削減効果（10.1%）があることを確認した。本手法は、ルート回収あるいはスポット回収のみの場合にも適用可能である。

(3) 情報プラットフォームのための技術と効果

産業廃棄物の排出・処理にかかわる排出事業者、収集運搬業者、処分業者に対して利用意向に関す

るアンケート調査を実施することで、情報プラットフォームに対して一定のニーズがあることを確認した。

「ELVからのリユースパーツ生産プロセス」においては、リユースパーツの検査工程へのAIによる画像診断システムの応用を検討した。当初は、リユースパーツの流通システムで管理されている画像情報を「教師データ」として活用することを想定していたが、これらの画像の品質が低く、大半のデータが活用できないことが判明した。そこで、「フロントドアの擦り傷」にターゲットを絞り、画像診断を試行した結果、300件の擦り傷の教師データを学習することにより、約97%の精度で診断可能であることを確認した。また、同様の考え方でリユースパーツの約65%の損傷がカバーできることを示した。さらに、リユースパーツの生産システムの高度化に向けて、現場での画像情報の取得方法のルール化およびWCMによるトレーサビリティシステムを統合した全体イメージを提示した。

また、AIによる画像診断に関しては、廃棄物処理・資源循環分野で下記のような応用が期待されることを確認した。

- スマートごみ箱等と連携を前提としたごみ分別支援システム（開発フェーズ）
- ごみ収集車のバックカメラと連携することによるごみ袋の自動カウント（開発フェーズ）
- リサイクル現場における選別ロボットへの応用（開発フェーズ）
- リチウムイオン電池等に起因する廃棄物処理・リサイクル現場における火花検知（商用フェーズ）

サブテーマ2

(1) 蒸気供給の事業化を促進する情報共有

産業廃棄物の焼却熱を工場の製造プロセスに蒸気として供給・利用することで、従来一般的な廃棄物焼却発電と比較して、大きなCO₂排出削減効果やエネルギー販売益が期待される。しかし、製造工場では安定して蒸気供給を受けられることが必須要件となるため、蒸気の需給バランスを取ることが、情報プラットフォームの最大の機能となる（図0.3）。情報プラットフォームは、蒸気供給の事業化の実施前と実施後においてそれぞれ機能を果たすことになる。事業実施前には、蒸気の潜在的な需要と供給の適合性と、経済的な合理性を確認して事業化に向けた検討を促進する機能を果たす。本研究においては、適切な情報提供・情報共有によって、事業化に向けた検討を促進することの実証を行った。特に集中して情報共有を行った、2020年9月から、2021年11月の間に、自治体、民間の廃棄物処理事業者、製造工場、プラントメーカー等の関係者を含む40機関に情報提供及び面談を実施した。その結果、近年のカーボンニュートラルへの社会的関心の高まりも背景として、およそ9割の関係機関が、CO₂排出の削減に繋がるのであれば事業化を前提に検討したいとの意向を示した。しかし計9機関は、立地条件や蒸気条件の不一致等の理由により、事業化実施が難しい状況であった。2021年12月1日時点で、実現可能性調査を実施、あるいはその支援を行っている機関は、自治体（5機関/6機関）、民間廃棄物処理事業者（7機関/11機関）、製造工場（7機関/13機関）、その他の関係機関（9機関/10機関）となっている。実施が難しい条件下にある機関が9機関あることを考えると、多くの機関がSCLERの実施に関心を持ち、実現に向けて行動に移したと言える。効果的な情報共有の仕組みを持つことで、国内でも廃棄物焼却施設から製造工場への蒸気供給事業を促進できることが分かった。

(2) 蒸気安定供給のためのシステム

廃棄物焼却施設からの蒸気供給は、供給量が不安定になりがちであるが、製造工場の蒸気需要量に合わせた蒸気の安定供給を可能とする、蒸気の蓄熱システムとバックアップボイラの導入を想定したシステム（図0.4）を構築した場合の費用を評価し、蒸気供給によって得られる経済的な便益と比較して、その導入の実現可能性を判断した。産業廃棄物焼却施設としては大型となるが、660t/日を処理する焼却施設から、近隣（蒸気配管敷設距離2km）の重油を熱源とする製造工場に蒸気を安定して供給する仕組みを設置した場合、年間約5万トンのCO₂排出削減が可能であり、投資回収年数は約3年と、経済的にもメリットの大きな仕組みになり得ることを確認した。これらの成果により、産業廃棄物の高効率な熱利用を促進し得ることを示すことができた。

情報プラットフォームが果たす機能: 蒸気の需給バランス

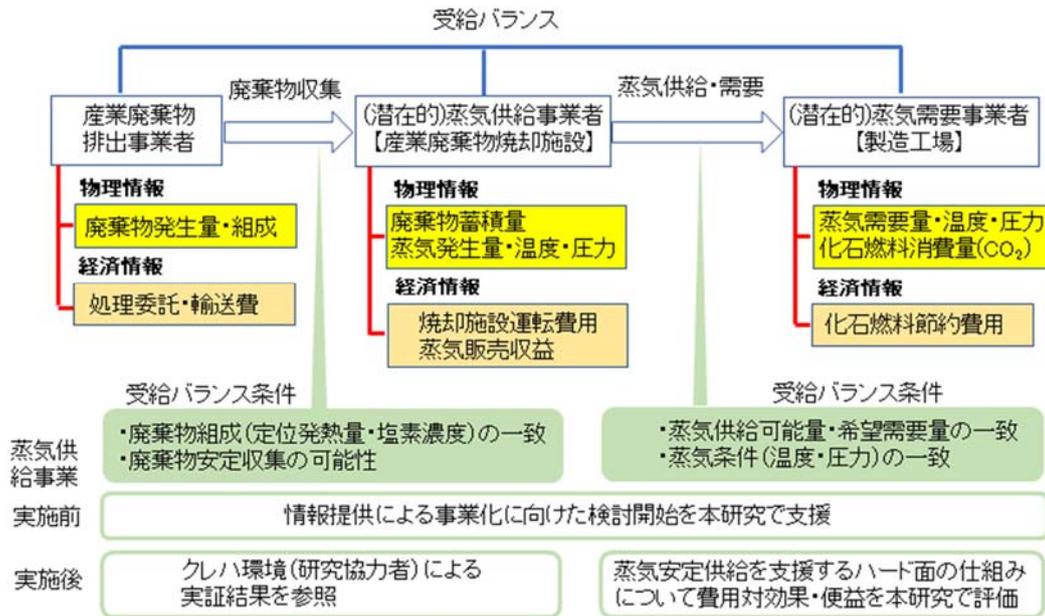


図0.3 廃棄物焼却施設から製造工場への蒸気供給に情報プラットフォームが果たす役割

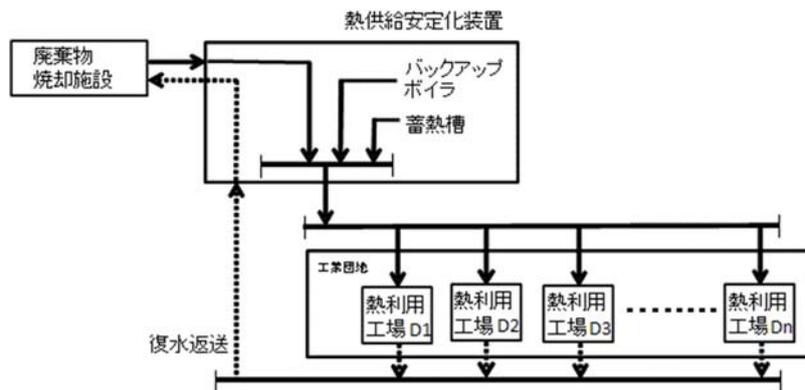


図0.4 廃棄物焼却施設から製造工場への蒸気安定供給システム

サブテーマ3

まず開発した振動モニタリングシステムを産業廃棄物焼却炉（ロータリーキルン炉）のストーカ冷風送風機に、バグフィルタろ布差圧モニタリングシステムを産業廃棄物焼却炉（ストーカ炉）のバグフィルタにそれぞれ設置し、いずれも研究目標として掲げた1ヶ月以上の連続モニタリング、かつ現状の施設維持・管理に適用されているレベルを上回る高サンプリングレート（振動加速度で50kHz以上、バグフィルタ差圧で記録間隔10s以下）、さらにモバイルルータを介しての商用クラウドストレージへのデータ記録、による安定的なデータ取得を実証した。得られたデータに対して、非線形回帰分析手法の1つであるGPRを用いて正常値を推定し、計測値との乖離度合いを異常度として判定する分析を適用した結果、振動加速度、バグフィルタ差圧のいずれにおいても、異常度判定の精度を担保するために、一定のサンプリング周期が必要であり、本研究で開発した高サンプリングレートでのモニタリングシステムが有効であることが示された。次に、誘引送風機1台（100t/日炉規模）の耐用年数を半年程度延伸することによる維持管理費用削減効果は耐用期間全体で約111万円であったのに対し、モニタリングシステムの維持管理費用は約95万円であり、誘引送風機単体でも適用するメリットを有した。また、バグフィルタろ布について予防保全によりろ布交換を現状の4年から半年分延伸出来た場合の

維持費用削減効果は約400万円（100t/日炉規模）となるのに対して、4年半のバグフィルタろ布のモニタリング費用は装置の設置とデータ通信料を含めて全体で約42万円であり、ろ布に適用するメリットは大きいことがわかった。以上によりICT・AIによる維持・管理の高度化のサーマルリカバリープロセスへの導入可能性は高いことが示された。さらに、産業廃棄物処理事業者に対するWEBアンケート調査を行った結果、人員配置の側面からは、1炉当たりの設備担当の人員数は2.0人（中央値・平均値）で、1炉当たりの運転管理担当の人員数は3.0人（中央値）と少人数での運転管理の現状が明らかとなった。点検方法の側面からは、紙を用いた点検を実施する事業者が87.1%を占め、記録の電子化が遅れており、さらに点検回数・人員ともに少ない労力で取り組んでいる実態が再確認された。記録方法の側面からは、点検業務におけるデジタル化が進んでいない実態と課題が整理された。故障の発生状況などの側面からは、日常点検や定期点検を通じた現場の経験と技術によって故障を事前に把握しており、設備保全活動の現場と中央監視による運転支援の両輪で故障個所の把握に努めていることが示唆された。また、プラントが計画外に停止した場合、再稼働までに一定の時間を要する（5日未満：51.6%）ことが明らかとなった。ICT・AI導入意向の側面からは、プラント設備を未停止で機器異常を予兆できるシステムは価格によっては導入する意向が61.3%（19/31）と比較的高いことがわかった。また、ICT・AIに期待する効果については、「突発故障の減少に期待：69.9%」、「ストックマネジメントの考え方に通ずる計画的な保全や知見の継承：30.1%」に大きな期待が寄せられていることが明らかとなった。

サブテーマ4

(1) 生産性の向上

紙マニフェストの入力・確認作業について、AI-OCRとRPAを用いて自動化・効率化するプロトタイプを構築し、導入前後で作業時間を計測したところ、AI-OCRの読取精度が高くなかったこと、RPAによるプログラム化が困難な、熟練作業者の判断が多い入力パターンが多かったこと、入力する基幹業務システムにはAI-OCRによる読取データをインポートする機能がないこと、住所等の表記方法が統一されておらず、別の情報と認識される場合があったことなどから、作業時間はほとんど削減されない結果となった。

AI-OCRの読取精度の向上やRPAによる自動入力パターンの追加などを通じて期待される作業時間削減効果があったと仮定して、情報システムのインシヤル・ランニングコストを賄うための1日当たり作業件数の目安を推計すると、入力作業、確認作業とも500～1,000件/日となった（図0.5、図0.6）。

また、産業廃棄物処理業者から排出事業者を提供する情報の例として、CO₂排出量を取り上げ、想定される情報提供先として1か月平均235社ある処理会社で、RPAを用いてプログラムを作成し所要時間を計測したところ、1か月約10時間分の人件費を削減することができ、排出事業者のニーズがあれば、安価な費用で導入可能であることが示された。

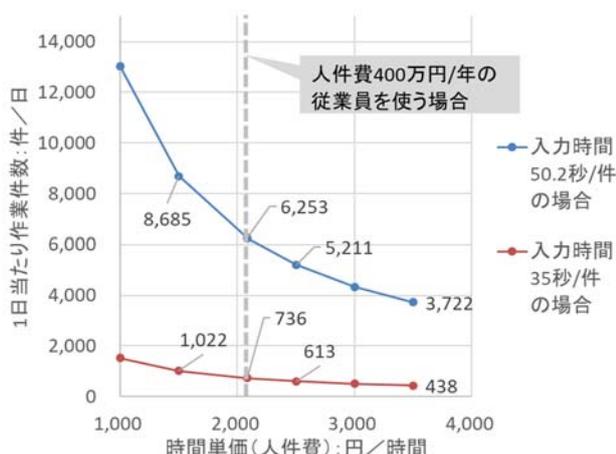


図0.5 導入効果を生む作業件数（入力作業）

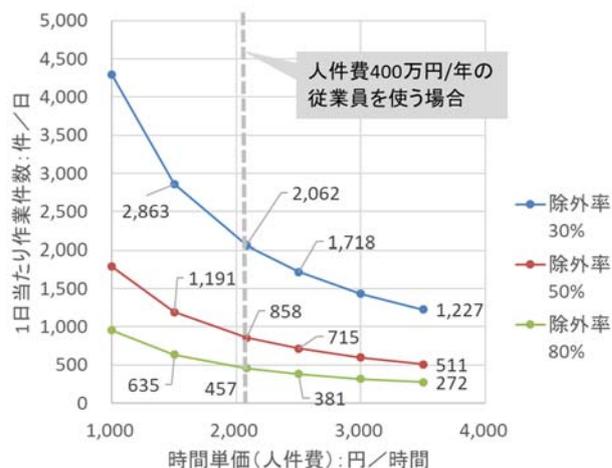


図0.6 導入効果を生む作業件数（確認作業）

(2) 安全管理の高度化

一日の作業時間に対して、熱中症の危険性の判定基準となる持続心拍数を超える作業時間の割合（図0.7）、身体負荷が高いと判定される労働強度40%以上となる作業時間の割合（図0.8）を検討したところ、熱中症の危険性（持続心拍数を超える作業時間の割合）と身体負荷（労働強度が40%以上の作業時間の割合）はともに、廃棄物処理施設での業務よりも廃棄物収集運搬業務のほうが高い傾向にあった。また、年齢の高い作業者のほうが熱中症の危険性と身体負荷は高まる傾向が見られた。一方で、年齢が低くても身体負荷が高い作業者がいることも確認された。また、同じ年齢の作業者であっても身体負荷に違いがみられ、同一の作業者でも日によって身体負荷は異なり、個人差及び日による差があることも確認された。

また、作業者へのアンケートを通じて、作業者自身が“しんどいと感じた”時間帯と数値として確認される身体負荷の高まりには差異があった。アンケートを実施した実態調査（54人日）のデータのうち、労働強度が継続して40%以上となる作業時間は計約800分であったが、そのうち作業者が“しんどいと感じた”作業時間は約421分であった。すなわち、労働強度が継続して40%以上となる（危険とされる）作業時間のうち、約47%の時間帯で作業者は身体負荷の高まりを感じていなかったことが示唆された。

以上のことから、スマートウェア等により作業者の心拍数を常時計測することは、個人単位での熱中症の予防と身体負荷の管理を行うことを可能とし、安全管理の高度化に向けて有益であると考えられた。また、作業者本人が気づかない危険性に対しても、情報通信技術を用いて各危険性を数値として把握することで第三者からの注意喚起・警告等が可能となり、安全管理の高度化に向けて有益であると考えられた。

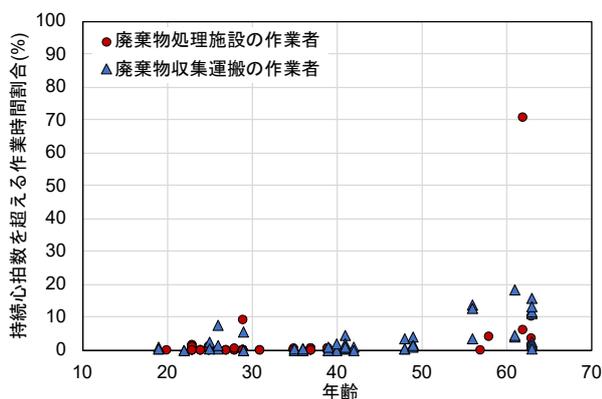


図0.7 持続心拍数を超える作業時間割合（年齢別、廃棄物処理施設・廃棄物収集運搬別）

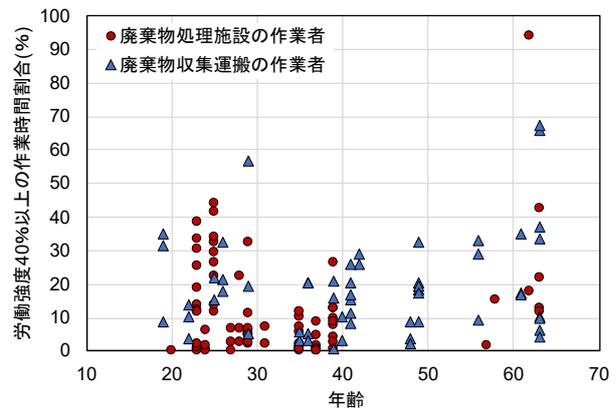


図0.8 労働強度40%以上の作業時間の割合（年齢別、廃棄物処理施設・廃棄物収集運搬別）

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

本研究事業の実施者（松本、小野田、藤井、橋本）が参画する「廃棄物処理・リサイクルにおけるDX推進のための研究会」が作成した「廃棄物処理・リサイクルに係るDX推進ガイドライン～処理業者編～」が、2022年3月に公開された。本研究事業において得られた知見を盛り込んでいる。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

排出量予測とルート・配車の最適化手法については、自治体が主導して構築された廃棄PVのスマート回収を対象にその効果を実証しており、今後活用が見込まれる。

中間処理業者の最適スケジュールリングについては、効果が明確になったことで、今後、廃棄物の到着量の変動とその不確実性を考慮した施設運用計画策定において活用が見込まれる。

WCM（Work Chain Management）に関しては、電子マニフェストへの接続が可能であり、トレーサビ

リティシステムの信頼性を向上させることに貢献し、マニフェストやリサイクル法等に係る報告書類作成の効率化に大きく寄与する。さらに、環境省が推進している資源循環プラットフォームや今後、リユース・リサイクルへの取り組みが求められるリチウムイオン電池や太陽光パネルのトレーサビリティの基盤システムとしての活用が見込まれる。

AI画像診断システムは、実用レベルに近づいており、こうした新しい仕組みを導入した分別支援システムは、民間事業者のみならず、自治体等の廃棄物処理・資源循環政策に寄与することが可能となる。とりわけ、社会問題となりつつある小型リチウムイオン電池等を原因とする火災事故の防止策として、AI画像診断システムは有効な対策となりうる。

製造工場への蒸気供給の有効性について、40機関を超える関係者で情報共有を進め、事業化に向けた検討体制の構築を試みた結果、複数の場所で実現可能性調査を開始することができた。近い将来の実現可能性が高まっているといえる。

予防保全のためのモニタリングシステムは、一般廃棄物焼却施設においても適用可能であり、活用が見込まれる。またデジタルデータの遠隔転送機能については振動加速度や差圧以外の幅広い対象で導入可能であり、行政が所有する環境インフラでの活用が見込まれる。

紙マニフェストの入力作業自動化、スマートウェアを利用した生体情報取得システムの有効性を示すことができた。前者については産業廃棄物、後者についてはそれに加え一般廃棄物処理の現場においても導入が見込まれる。

5-3. 研究目標の達成状況

全体目標

静脈系サプライチェーンの最適マネジメントのために適用可能なICT・AI技術とそれらによる課題解決の可能性の組み合わせとして、収集運搬、中間処理施設に関する要処理量と設備のマッチング、焼却熱と熱需要のマッチング、機械と人員のマネジメント高度化を対象としてその手法を提示し、導入による効果を評価した。目標を上回る成果を上げた。

静脈系サプライチェーンマネジメントのための情報プラットフォームとして、収集・運搬時のトレーサビリティ確保、廃棄物焼却熱と熱需要のマッチングの仕組みを構築、実証することで効果を示した。目標どおりの成果を上げた。

サブテーマ1

排出・処理事業者間インタラクションによる収集効率化については、収集業者の実データをもとにルート回収、スポット回収を対象にアルゴリズムを開発した。業務効率化を対象とした効率化アルゴリズムについても、処理業者の実データを用いて開発した。収集運搬に加え処理業者の保有施設の運用計画策定の効率化も示すことができ、計画を上回る成果を得た。

廃棄物収集プロセスを想定したプラットフォームのプロトタイプについては計画通り開発した。医療機関との実証事業の開始はコロナ禍により遅れたが、計画どおりの結果を得た。社会情勢の変化（非接触化への要請）により、社会実装に向けたニーズが想定以上に増えている。

サブテーマ2

リサイクル困難な低品位な産業廃棄物の焼却熱で製造した蒸気を製造工場で利用することを前提に、情報共有プラットフォームの機能を特定し、その試行的な運用をシミュレートするものとして、適切な情報共有によって事業化の検討が進むことを実証した。

事業化に当たって障害となり得る蒸気の安定供給について、経済的にもメリットを見出せる範囲内でシステムを構築できる可能性を示した。研究は計画通りに進捗した。

蒸気供給の事業化に向けた検討が複数の場所で進んだという点においては、当初の計画を上回る成果が得られたと考えられる。

サブテーマ3

振動加速度で500kHz（研究目標50kHzの10倍）、バグフィルタ差圧で記録間隔1s（研究目標10sの10分の1）と、当初の研究目標を上回る高サンプリングレートでの実証を達成した。さらに、現場で取得されたデータを汎用のモバイルルータと商用クラウドストレージを活用して遠隔で安定的にデータ取得するシステムとして運用することができ、社会実装を考慮した、さらに高度なモニタリングシステムの構築、実証を達成することができた。

ICT・AI導入による維持・管理の高度化の効果について、維持管理費用削減効果を推計して導入効果が高いことを定量的に示した。

産業廃棄物処理業者に対するWEBアンケートを実施して、点検回数・人員ともに限られた労力で取り組んでいる実態や異常予兆のシステムなどIoT・AIに期待する意向を把握することができた。

以上より、研究目標を十分に達成している。

サブテーマ4

紙マニフェストの入力作業について、プロトタイプシステムを構築・導入し、その効果検証を実施して、必要な条件を提示したことから当初の研究目標は達成した。本研究ではさらに、排出事業者向けレポート作成のシステムも構築し、その効果検証を行ったことから、その点で目標を上回る成果をあげたと言える。

スマートウェアを活用したシステムを用いて、廃棄物処理施設及び収集運搬の作業員計139人日を対象に熱中症（一部ヒートショック）の危険性や労働強度の実態を把握し、システムの有効性を示せたことから当初の研究目標は達成した。被験者数の観点では、目標であった40人日程度を大きく越え、目標を上回る成果をあげたと言える。

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

19件

<主な査読付き論文>

- 1) Richao Cong, Atsushi Fujiyama, and Toru Matsumoto, 環境科学会誌, 印刷中 (2022) AI Techniques Aid for Optimizing the Collection System of Industrial Plastic Waste
- 2) Richao Cong, Atsushi Fujiyama, and Toru Matsumoto, 環境科学会誌, 印刷中 (2022) AI Techniques Aid for Predicting the Collection Demands of Industrial Plastic Waste from Multiple Facilities
- 3) 伊藤友輔、栗栖亜矢美、合澤勝之、古閑宏幸、藤山淳史、松本亨：環境科学会誌, 印刷中 (2022) 中間処理施設における廃棄物処理計画モデルの改良
- 4) 吉留大樹、横山健太郎、程天驕、石井美也紀、小野田弘士：環境科学会誌, 印刷中 (2022) 排出事業者と収集・運搬事業者のインタラクションを考慮したトレーサビリティシステムの構築－医療廃棄物の小口回収を例として－
- 5) 胡浩、楊文博、程天驕、小野田弘士：環境科学会誌, 印刷中 (2022) 自動車リサイクル部品を対象としたAIによる画像診断システムの構築に向けた実験的検討
- 6) 藤井実、大西悟、牧誠也、岡寺智大、後藤尚弘：環境科学会誌, 印刷中 (2022) 廃棄物焼却熱の産業での活用を推進するための情報共有と安定需給に関する検討
- 7) 仮谷有優美、中尾彰文、山本秀一、吉田登：土木学会論文集G（環境）（76, 6）, II_319-II_331 (2020) 下水処理場へのICT導入時の対象機器やシステム運用の違いが維持管理費用削減に及ぼす影響を評価する分析フレームの提案と基礎的検討
- 8) 中尾彰文、山田崇雄、和田俊和、吉田登：環境科学会誌, 印刷中 (2022) ICTを用いた産業廃棄

物焼却プラント機材の予防保全モニタリング手法の開発とその効果

- 9) 秋山浩之、西野京一郎、北井俊樹、橋本征二：環境科学会誌，印刷中（2022）AI-OCRとRPAを活用した紙マニフェストの入力作業効率化に関する計測事例
- 10) 蔭山逸行、橋口伸樹、曹剣飛、塘将典、岡本宗一郎、橋本征二、児玉耕太：環境科学会誌，印刷中（2022）廃棄物処理施設作業者の生体情報を用いたヒューマンリソースマネジメント

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）	9件
口頭発表（学会等）	48件
「国民との科学・技術対話」の実施	7件
マスコミ等への公表・報道等	9件
本研究に関連する受賞	5件

7. 国際共同研究等の状況

中国科学院広州智能ビデオ実験室 主任/教授・呉軍教授（早稲田大学環境総合研究センター・招聘研究員）を日本機械学会・環境工学総合シンポジウム2019に招聘し、本研究や国際共同研究への展開可能性を議論した。廃棄物・リサイクルプロセスにおける画像診断を中心に検討している。

8. 研究者略歴

研究代表者

松本 亨

九州大学大学院総合理工学研究科修士課程修了、博士（工学）、現在、北九州市立大学環境技術研究所教授

研究分担者

1) 古閑 宏幸

九州工業大学情報工学研究科修了、博士（情報工学）、現在、北九州市立大学国際環境工学部准教授

2) 藤山 淳史

北九州市立大学国際環境工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）、現在、北九州市立大学国際環境工学部准教授

3) 池田 卓矢

京都大学情報学研究科修了、博士（情報学）、現在、北九州市立大学国際環境工学部准教授

4) 叢 日超

北九州市立大学国際環境工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）、現在、北九州市立大学環境技術研究所特任講師

5) 小野田 弘士

早稲田大学大学院理工学研究科修了、博士（工学）、現在、早稲田大学大学院環境・エネルギー研究科教授

6) 胡 浩

早稲田大学大学院環境・エネルギー研究科修了、博士（工学）、現在、早稲田大学環境総合研究センター客員主任研究員

7) 藤井 実

東京大学大学院工学系研究科、博士（工学）、現在、国立環境研究所社会環境システム研究センター（環境社会イノベーション研究室）室長

8) 岡寺 智大

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、国立環境研究所地域環境研究センター（環境技術システム研究室）主任研究員

9) 後藤 尚弘

東京大学大学院工学研究科修了、博士（工学）、現在、東洋大学情報連携学部教授

10) 吉田 登

大阪大学工学部卒業、博士（工学）、現在、和歌山大学システム工学部教授

11) 和田 俊和

東京工業大学総合理工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）、現在、和歌山大学システム工学部教授

12) 山本 秀一

大阪大学工学研究科博士前期課程修了、博士（経済学）、現在、和歌山大学システム工学部准教授

13) 山本 祐吾

大阪大学工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）、現在、和歌山大学システム工学部准教授

14) 橋本 征二

京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）、現在、立命館大学理工学部教授

15) 児玉 耕太

九州大学大学院薬学府博士課程修了、博士（薬学）、現在、立命館大学大学院テクノロジー・マネジメント研究科准教授

II. 成果の詳細

II-1 ICT・AIの活用による排出・処理事業者間インタラクション実現による資源循環の効率化及び適正処理の推進

北九州市立大学

環境技術研究所

国際環境工学部

早稲田大学

大学院環境・エネルギー研究科

環境総合研究センター

<研究協力者>

北九州市立大学 国際環境工学部

一般社団法人資源循環ネットワーク

松本 亨、叢 日超

古閑 宏幸、藤山 淳史、池田 卓也

小野田 弘士

胡 浩

伊藤 友輔

松岡 浩史

[要旨]

排出・処理事業者間インタラクションによる収集効率化、処理業者の業務効率化を対象とし、IoT、AIを含む効率化アルゴリズム、プラットフォームを開発し、その効果を、システム構築に要する費用・環境負荷と削減可能な費用・環境負荷の対比により評価する。本研究では具体的に「発生量把握と予測」「収集運搬、中間処理施設運用の最適化」「情報プラットフォームのための技術と効果」の3つのフェーズに分けて実施した。

「発生量把握と予測」のフェーズにおいて、まずは基礎研究として、それぞれのセンシング手法が想定される適用方法とその特徴を整理するとともに、コスト面や適用する際の課題について横断的に整理を行った。続いて、市販のセンサ3種9製品を対象に複数の廃棄物を対象に環境を変えて測定を行いそれを観察することで、適合性について検証を行うとともに、リアルタイムで廃棄物の蓄積状況を把握するためのシステムを開発した。実証研究として、データ収集とトレーサビリティの確保を効果的に実施する仕組みである活動記録管理システムを提案し、そのニーズを調査するとともに、ある収集・運搬事業者のドライバー2名、9つの医療機関の協力を得て、実証試験を実施し、その有効性を確認した。また、センサを使用せずに排出量予測が可能なAI予測の効果を、廃プラを対象に2年4か月の実績データを活用して予測モデル（28モデル）を作成し、最新の1か月のデータに当てはめることで検証を行った。

「収集運搬、中間処理施設運用の最適化」のフェーズにおいては、近年注目されているAI技術の一つである強化学習を取り入れた手法を開発し、既存の手法に比べて有効であることを確認した。また、過去の実績データを機械学習させ将来の予測ができるシステムを導入した場合を想定し、産業廃棄物の実績データ（収集運搬工程・中間処理工程）を活用することで、その有効性について検証を行った。

「情報プラットフォームのための技術と効果」のフェーズにおいて、まずは産業廃棄物の排出・処理にかかわる排出事業者、収集運搬業者、処分業者に対して利用意向に関するアンケート調査を実施することで、情報プラットフォームに対して一定のニーズがあることを確認した。また、実証研究としては自動車リユースパーツの工場へ画像解析のシステムを導入する場合を想定し、ドアの画像を対象にその有効性と課題を把握した。

1. 研究開発目的

データ駆動型社会とは、「Cyber Physical System: CPS」が様々な産業社会に適用され、デジタル化されたデータが、インテリジェンスへと変換されて現実社会に適用されることによって、データが付加価値を獲得して現実社会を動かす社会¹⁾とされる。廃棄物の収集運搬に当てはめて考えると、廃棄物の排出状況について経験値から仮説を立て、事前に収集スケジュールとルートを決定するのが従来の方法

であり、これは仮説駆動型といえる。これに対して、逐次データを取得できる仕組みを整備し、取得したデータを逐次解析することで、収集スケジュールとルートを決する方法がデータ駆動型である。収集運搬では、IoTセンサによる排出状況把握、リアルタイム情報を活用した配車配送計画の最適化が期待され、大口と小口排出源の共同収集や、廃棄太陽光パネルの収集ルートの最適化実証例等がある。

そこで本研究では、排出・処理事業者間インタラクションによる収集効率化、処理業者の業務効率化を対象とし、IoT・AIを含む効率化のためのアルゴリズムおよびプラットフォームを開発する。

2. 研究目標

ICT・AIの活用による排出・処理事業者間インタラクション実現による効果を、システム構築に要する費用・環境負荷と削減可能な費用・環境負荷の対比により評価する。これにより、個別分野の実施主体別の導入利益を明らかにする。また、現行法制度、社会システムとの親和性を検討し、社会実装に向けたビジネスモデルを提示することを目標とする。QRコードとスマートフォンを活用した①WCMによるトレーサビリティシステムと②AIによる画像診断システムの2つのソリューションを核として、さまざまな廃棄物・リサイクルシステムに応用可能な汎用性のある情報管理システムのプロトタイプを開発する。具体的なモデルケースとして、医療廃棄物の小口回収、リユースパーツの生産プロセスを取り上げる。本研究のなかで、各々の個別課題に対応した①と②を組み合わせたシステムのプロトタイプの開発・実証・評価を行い、事業期間終了後に円滑に社会実装につなげることを目標とする。

3. 研究開発内容

3-1. 発生量把握と予測

①センシング手法の横断的比較

収集・運搬の効率化を図るためには、センシング技術の応用が有効となる。個別のセンシング技術の開発等は行われているものの、排出形態、廃棄物・循環資源の特性による横断的な整理は行われていない。そこで、排出事業者と収集・運搬事業者間のインタラクションを効果的に行うことに貢献するセンシングシステムおよび適用可能な手法を整理した。

②IoTセンサの利用可能性

IoTセンサによる廃棄物の発生量測定に関しては、包括的な調査分析がなされないままに情報通信事業者や廃棄物処理業者が海外より輸入するなどして活用しているのが現状である。これに対して、改めてセンシング手法の横断的な比較を行い、各種センサと廃棄物特性や測定環境との適合性を明らかにした。今回、測定特性検証に使用したセンサは、赤外線センサ（三角測距）2種類、赤外線センサ（ToF測距）4種類、超音波センサ3種類である。また、測定実験にはArduino UNOを用いてセンサの制御や信号の処理、測定値の出力を行った。測定対象の廃棄物は、紙、ガラス片、アルミ廃材、木屑、ゴム、プラスチック片、土であり、実地で想定される環境として、今回は直射日光、高湿度、霧の状況も考慮し、測定を行った。専用の測定装置を作成し、装置中心の柱下部にセンサを取り付け、装置底面に測定対象物を設置した。測定対象部から1m離れた状態で測定を始め、10cmずつ近づけて測定を行った。なお、計測位置ごとに測定箇所を5回変化させ、それぞれ50回分の測定を行った。

IoT市場の拡大により、データの分析や監視、AIの導入など目的も多様化し、より様々な利用目的に応じた多種多様なセンサデータが必要とされている。しかしながら、本研究分野においてはこのような情報技術の導入が進められていない。そこで本研究では、IoTセンサを用いた廃棄物蓄積状況の収集・可視化システムの開発を通して、IoTセンサの利用可能性を示した。さらに、従来用いられているIoTセンサシステムは特定の環境における限定的な条件での実装となっているなど拡張性がない場合が多く、より汎用的な設計および実装が求められていることから、本システム設計ではその点を考慮した。本システムの実現性の評価は、実際の測定データを用いた稼働の確認によって行った。

③WCMによるデータ収集とトレーサビリティ

活動記録管理（Work Chain Management: WCM）によるトレーサビリティシステムの提案とプロトタイプの開発・実証を行った。WCMによるトレーサビリティシステムとは、QRコードとスマートフォンのみによって、管理可能な「エビデンスを残す」システムである。すなわち、現場の情報を「伝票」を介さずにデータベースに蓄積可能な仕組みとなっている。本研究では、医療廃棄物の小口回収に焦点をあて、センシング手法と連動したトレーサビリティシステムの構築を試みた。具体的には、小口回収を行っている収集・運搬事業者へのヒアリング調査や特定地域の小口医療機関の排出実態の把握を目的としたアンケート調査を通じて、本システムを通じて解決すべき課題を明らかにした。そのうえで、トレーサビリティシステムのプロトタイプを開発し、実環境下での実証試験を実施した。さらに、WCMの他の廃棄物・循環資源への応用可能性を検討し、社会実装に向けた可能性を把握した。

④機械学習による予測

産業系廃プラスチックの収集量について、福岡県内の収集運搬事業者より2年半（2018年4月1日から2020年9月30日まで）の産業廃棄物管理票（マニフェストの収集実績データを手直し、収集日と収集量、収集拠点所在地などの実績情報を把握した。更に、気候条件が廃プラの回収量に影響を与える可能性があることを考慮し、気象庁が公開した過去の気象データを用いて、当該期間内を対象に廃プラの収集量に与える影響度を日ごとに整理した。本研究で対象とした施設の概要は表1.1に示す通りである。

表1.1 産業系廃プラの回収実績の概略（5施設）

施設種類	回収量 [kg/日]				回収実績数	気候区分
	最小値	最大値	平均値	標準偏差		
スーパー	10	50	19.4	6.3	912	博多
病院	10	60	28.3	9.5	910	八幡
物流企業	40	520	225.8	86.2	909	福岡市
食品製造工場	70	1,120	593.1	153.5	912	大宰府
ビル管理会社	10	200	92.2	23.8	899	博多

将来予測のフローを図1.1に示す。まず、データの準備段階として、電子マニフェストデータと気候データの統合処理を行った。次に、将来予測の段階として、学習用データ（4ケースを用意）を28のモデルにフィッティングをさせ、そこで得られた結果をもとに、続いてテスト用データに当てはめ、予測した需要量と実績値をもとに精度評価を行い、各施設の予測に最適な予測モデルを抽出した。

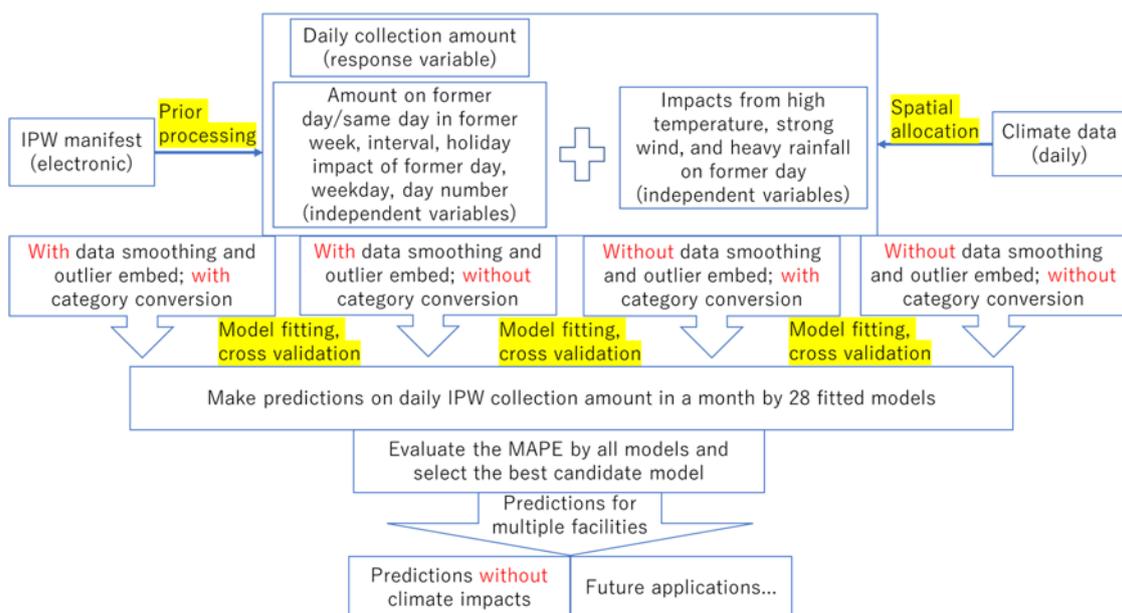


図1.1 機械学習を用いた産業系廃プラ回収需要量の将来予測フロー

3-2. 収集運搬、中間処理施設運用の最適化

①収集最適化計算手法

与えられた需要量に対する、廃棄物の定期的な収集・運搬経路の最適化問題について取り組んだ。輸送に係る温室効果ガス排出量の削減および作業スタッフの公平性を考慮し、各トラックの総走行距離、トンキロ量、使用するトラックの優先度、および各スタッフの走行距離の差などの観点から新規に最適化モデルを定式化した。この問題は混合整数非線形計画問題と呼ばれるクラスに属し、計算量の観点からその最適化計算は一般的に困難である。実際、我々が対象とする規模の問題に対して分枝限定法に基づく既存の最適化ソルバーを用いた計算では、実用的な時間での求解は容易ではない。これに対して本研究では、近年注目されるAI技術の一つである強化学習を取り入れた数値計算手法を導出し、数値解の品質および計算時間の観点から数値実験によりその有効性について検証を行った。

②収集運搬の最適化

事業所からの産業廃プラスチックの収集において、定期的なルート回収のケースと不定期なスポット回収のケースが混在しており、また、収集すべき排出量が事前に把握できない状況で、専用輸送車とドライバーの配置、収集ルートとスケジュールを勘と経験で決めていくという状況がある。本研究では、このような問題の解決のために、AI技術を用いて廃プラスチック排出量の予測とルート最適化を統合化したシステムを提案した(図1.2)。まず、ルート回収においてこれまで蓄積されてきた廃プラスチック収集量の実績データを用いて、将来の排出量(回収需要量)を予測した。後半では、事前に予測した廃プラスチック排出量を用いて最適な収集ルートを算出した。

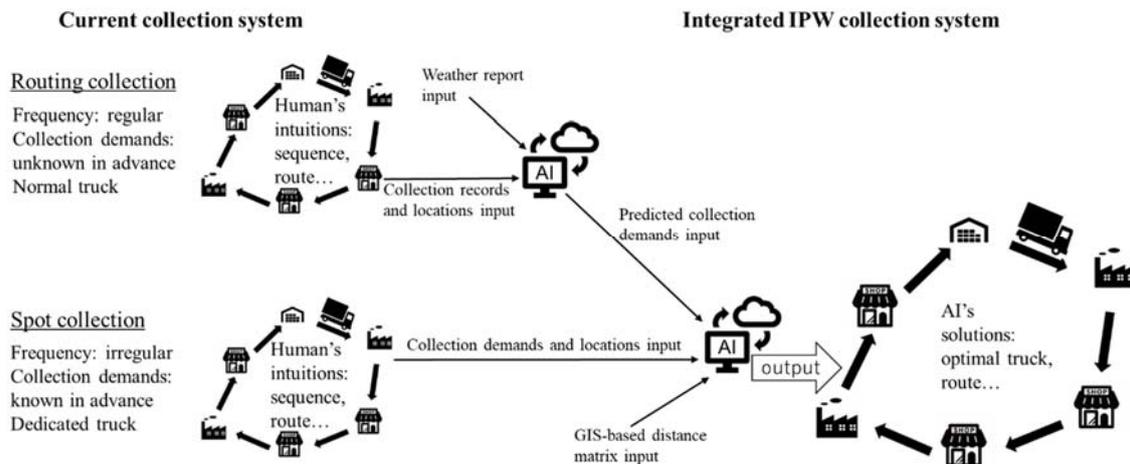


図1.2 産廃プラスチック収集ルートの最適化手法の概念図

推計フローを図1.3に示す。まず、電子 manifests データと気象データを用いて、各定期収集拠点における将来の排出量を予測する数値実験を行い、最も精度の高いモデルを特定した。各定期収集拠点における需要量の将来予測値と、スポット拠点(不定期の収集拠点)の需要量(実績データ)を用いて、総移動距離が最短となる輸送の最適化問題を設定し、最短ルートを導出した。最後に、現状の収集ルートとの比較により、最適化の効果を算出した。

続いて、各拠点の排出量の予測をもとにルートの最適化計算を行うが、ここでは実績データをもとに計算を行った。収集運搬業者より2021年8月1日のルート回収とスポット回収、計17拠点の情報(収集拠点の所在地、収集量、収集の順番)を入手し、直線に沿ったルートを図1.4に描いた。これを現状ケース(最適化前)とした。

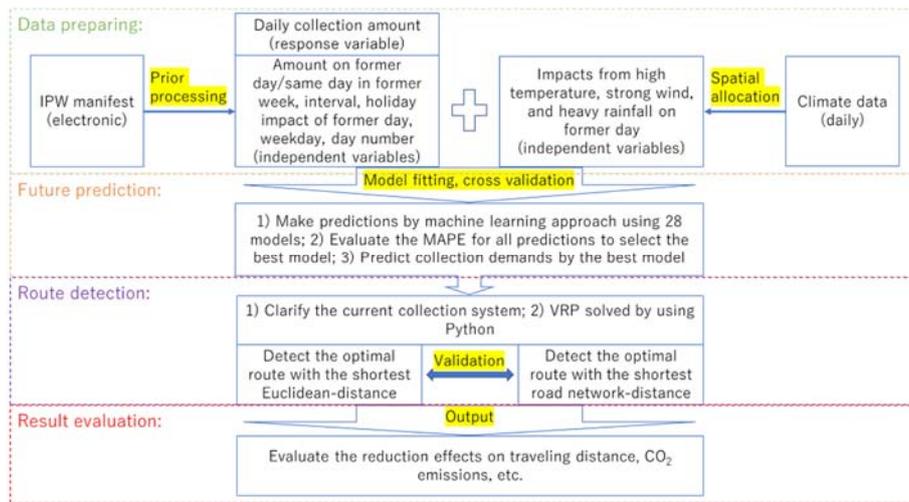
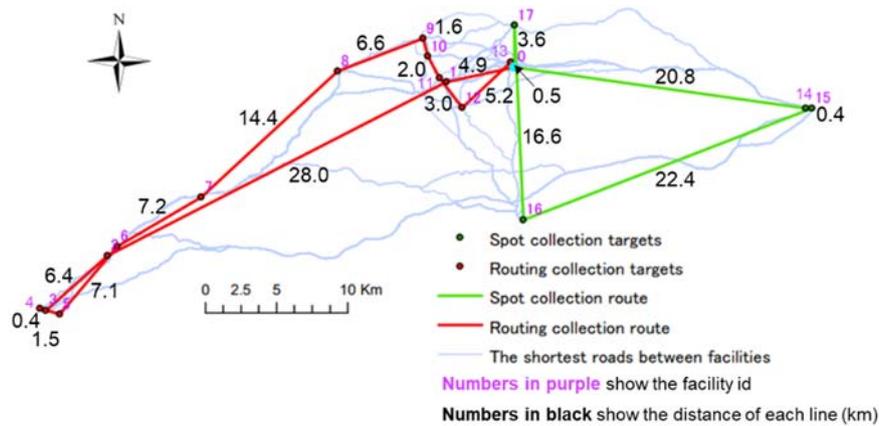


図1.3 AI技術に用いた推計フロー

図1.4 収集運搬業者の産廃プラスチック収集実績にもとづくルートと距離
(赤線：ルート回収、緑線：スポット回収)

収集量の実績から最適化計算を行う際、2トントラック1台1回で全ての拠点回ると設計した（最適化ケース）。最適解の導出にあたっては、以下のように定式化した。

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} d_{ij} x_{ij} \quad (1.1)$$

$$\text{which is subject to: } \sum_{i \in V} \sum_{j \in V \setminus \{0, i\}} q_j x_{ij} \leq Q \quad (1.2)$$

ここで、式(1.1)は収集による総移動距離を最小とする目的関数、 d_{ij} は施設*i*と施設*j*間の距離(km)、 x_{ij} は施設*i*と施設*j*間のルートを経由するか否かを表すバイナリ変数、式(1.2)は施設から収集した廃プラの量 q_j (t)がトラックの最大積載量 Q を超えないようにする制約条件を定義している。なお、収集量の実績を踏まえ、本研究では2トントラック1台が1回で全ての拠点回ると設計し、 $Q=2$ とした。

③スポット回収の最適化

スポット回収では、不定期で突発的に発生する処理要求に対し、作業担当者の経験や勘に基づき配車計画が決定されるため、不適切な配車計画となり、冗長な移動コストが発生する恐れがある。本研究では、スポット回収における移動コストを最小化するための配車計画モデルを検討した。本モデルにより、スポット回収における最適な車両の収集地点とその収集タイミングを得ることができる。実測データから算出される移動コストとの比較により、提案モデルの有効性を検証した。

④中間処理施設運用の最適化

中間処理施設では、現場担当者の経験や勘から処理計画を決定するため、最適な処理計画とはいえない

い。また、廃棄物の排出量は不明確なケースが多く、廃棄物が計画通りに到着しない場合もあるため、不適切な処理計画となる恐れがある。したがって、到着量の変動を考慮した上で、廃棄物の処理計画を適切に決定する必要がある。本研究では、処理計画の効率化と費用コストの低減を目的として、線形計画法に基づく処理計画モデルと、0-1整数計画法に基づく処理計画モデルの2つの数理モデルを提案した。前者のモデルは処理機の稼働回数、後者のモデルは稼働回数に加えて処理機の稼働台数とその組み合わせを決定する。さらに、突発的な到着量の変動に対応するために、処理計画に余裕を持たせる、もしくは制限を設けるための調節パラメータ（以降、処理余剰率 β と呼ぶ）を処理計画モデルに導入した。実データとの比較により、提案モデルの有効性を検証した。

3-3. 情報プラットフォームのための技術と効果

①情報プラットフォームによる情報連携のニーズ把握

情報プラットフォームは存在していないことから、ニーズも把握されていない。多種多様な事業者が参画する産業廃棄物処理において、情報プラットフォームを活用した情報連携のニーズと仕組みに関するアンケート調査を実施した。主なアンケート調査の項目は、「業者間の連携および情報共有の現状」「情報管理の現状」「情報プラットフォームに対するニーズ」についてであるアンケート調査の対象は「福岡県内の多量排出事業者」と「福岡県産業資源循環協会の会員企業（収集運搬業者、処理業者）」であり、回収状況は表1.2に示すとおりである。

表1.2 調査対象と回収状況

		発送数	有効発送数	回答数	回収率
福岡県内の多量排出事業者		466	456	132	28.9 %
福岡県産業資源循環協会の 会員企業	収集運搬業者	388	377	70	18.6 %
	処理業者	216	210	31	14.8 %
全体		1,070	1,043	233	22.3 %

②画像解析によるリユース可能性評価

AIによる画像診断は、技術熟度の高いシステムといわれており、省力化が期待される廃棄物処理・リサイクル現場では、有効なソリューションとなりうる。本研究では、自動車のリユースパーツへの適用をモデルケースとして、AIによる画像診断の適用可能性を評価することを試みた。具体的には、自動車のリユース生産プロセスの実態を把握し、画像診断のニーズを把握した。そのニーズに対応する「教師あり学習」を採用した画像診断プロセスを構築し、その適用可能性および実用化に向けた課題を抽出した。

③スマート回収

太陽光発電（以下、PV）設備が大量に導入されているが、近い将来、点検・保守による交換および廃棄によって使用済み太陽光パネルが大量に廃棄されることが予想されており、その回収およびリサイクルシステムを確立することは喫緊の課題となっている。本研究では、福岡県内で排出される廃棄太陽光パネルの回収に対して、情報プラットフォームを活用し、排出業者、収集運搬業者、リサイクル業者が保持する情報を共有する仕組みが導入された場合を想定し、その効果を算出した。

具体的には、複数の拠点を一度に共同で回収するケース（共同回収）と、同じ拠点を個別に回収するケース（個別回収）を設定し、輸送コストを算出する。環境省の報告²⁾によると、福岡県における廃棄太陽光パネルの排出見込み量は2020年で126t、2030年で1,176t、2039年では43,354tと推計されており、本研究では2020年と2039年の排出見込み量を対象に比較した。共同回収における最適な回収ルートのは、GISとPythonを併用して解析を行い、輸送費用（車両費と燃料費、人件費）と保管費用を考慮することで、回収に伴う費用を、保管費用は太陽光パネルが廃棄され回収するまでにメンテナンス業者で保管されている期間をもとに算出した。

4. 結果及び考察

4-1. 発生量把握と予測

①センシング手法の横断的比較

収集・運搬の形態は、対象とする廃棄物・循環資源によってさまざまである。例えば、定期回収／不定期回収、容器個数契約／重量契約等によって、適切なセンシング手法を選定することが必要となる。とりわけ、小口回収では不定期回収による非効率性が課題となっており、人による業務を極力介在しない集荷依頼方法の構築が期待される。そこで、現段階で想定される各種センシング手法を活用した集荷依頼方法を体系化した(図1.5)。例えば、本研究で、実証試験を行った小口の医療機関では、「不定期回収・容器個数契約」が大半であった。容器個数契約の場合、重量を測定する必然性がない。そこで、「通知ボタン」による集荷依頼を行うことが有効となる。

	Web受注	通知ボタン	画像認識(カメラ)	超音波等センサー	重量センサー	曜日回収	AI予測
イメージ						-	
概要	Webを介して受注クラウド管理 排出事業者は収集を希望する日時、回収物、個数等を指定して発注 ⇒収集事業者はWebで受注内容を確認	溜まってきたら押してもらう 排出事業者は回収してほしいタイミングでボタンを押す ⇒収集事業者はボタン通知を受信	集積場所に設置したカメラによりAI画像認識によるごみ量を算定 ⇒検知量を遠隔監視	ごみ箱内に設置した超音波センサーによりごみ量を検知 ⇒検知量を遠隔監視	重量センサーを搭載したごみ箱により重量を検知 ⇒検知量を遠隔監視	指定曜日に収集	過去の排出量データに基づいた排出量の予測データを自動算出
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 日時指定や回収個数等細かい設定が可能 通信設備の準備が必要なく導入が比較的簡単 	<ul style="list-style-type: none"> 排出事業者との受注やり取りが不要 導入が比較的簡単 	<ul style="list-style-type: none"> 排出事業者とのやり取りが一切不要 防犯効果あり 事業者間のトラブル発生の抑制 排出量の可視化 	<ul style="list-style-type: none"> 排出事業者とのやり取りが一切不要 センサーが安価 排出量の可視化 	<ul style="list-style-type: none"> 排出事業者とのやり取りが一切不要 重量ベースの排出量の可視化が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 排出量の有無に関わらず回収に向かう 	<ul style="list-style-type: none"> センサーなどを必要とせず排出量予測が可能
コスト	・ネット環境コスト	・通信型通知ボタン(〜3千円程度想定) ・通信費	・通信型カメラ(〜3万円程度を想定) ・通信費	・通信型センサー(〜3万円程度を想定) ・通信費	・通信型重センサー(5万円程度を想定) ・通信費	不要	・ネット環境コスト
課題	・排出事業者側の発注手間が増える	・電池交換が必要 ・回収タイミング等の事前条件設定必要 ・排出量が見えない ・通信システム必要 ・通信範囲制約あり	・画像からのごみ量予測方法検討が必要 ・誤差あり ・設置場所が限定的	・電池交換が必要 ・誤差あり ・通信システム必要 ・通信範囲制約あり ・設置場所が限定的	・センサーの設置などに工夫が必要 ・通信システム必要 ・通信範囲制約あり ・設置場所が限定的	・排出量が不明	・排出実績データの収集と学習が必要 ・排出量精度誤差が大きい可能性がある

図1.5 センシング手法の横断的比較

②IoTセンサの利用可能性

表1.3に示すように、測定に用いるセンサについて3種9製品、測定対象となる廃棄物の物性について8種、廃棄物測定場所として想定される環境について3条件(日射日光、湿度、霧)を調査し、各センサにおける廃棄物特性や測定環境との適合性を明らかにした。各センサの適合性について、以下にまとめる。

- ・ 赤外線三角測距センサは、廃棄物処理現場での測距には適さないことがわかった。これは、測距距離が投光されたレーザー光の対象物表面における反射角に大きく依存するため、廃棄物の多くの場合で安定しないからである。
 - ・ 赤外線ToF測距センサ(特にD社のVCSEL(垂直共振器面発光レーザー)センサ)は、屋内環境においてほとんどの対象物を高精度で測量可能であること、さらには高湿度環境における耐性を持っていることがわかった。しかし、直射日光や霧の水蒸気は赤外線波長特性に影響を及ぼすため、精度が劣化することに注意しなければならない。
 - ・ 超音波測距センサは、比較的環境耐性が高く、赤外線ToF測距センサと比較して若干精度は落ちるものの適用範囲が広いことがわかった。しかし、気温による音速の変化、測定環境固有の反射波形が測定値に影響を与えるため、別途フィルタリング処理が必要であることに注意しなければならない。
- 以上の結果を踏まえた上で、実際の導入には価格や耐久性との関係も精査して決定すると良いだろう。

表1.3 IoTセンサと廃棄物特性、利用環境との適合性

	赤外線三角測距		赤外線ToF				超音波		
	A社	B社	C社	D社	E社	F社	G社	H社	I社
コピー用紙	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
ガラス片	×	×	○	◎	×	×	○	○	○
アルミ廃材	×	×	○	◎	△	○	○	○	○
廃オイル	×	×	○	◎	×	△	△	△	○
木屑	△	△	○	○	×	○	△	△	○
ゴム	×	×	○	◎	○	△	◎	△	◎
プラスチック片	×	×	○	◎	×	○	○	△	○
土	×	×	△	○	×	△	○	△	△
直射日光	×	×	×	×	○	○	○	○	○
高湿度	○	○	○	○	○	○	○	○	○
霧	×	×	×	×	×	×	○	○	○

10cm ~ 100cmでの測距性能

◎：高精度、○：計測可能、△：要フィルタリング処理、×：測定不可

IoTセンサの活用による廃棄物取運効率化の検証のために、遠隔地の廃棄物蓄積状況についてIoTセンサにより測定したデータを、Webユーザインターフェースを介してリアルタイムにユーザへ提供するシステムの開発と実証を通して、IoTセンサの利用可能性を示した。図1.6は本システムの全体設計を示す。本システムは、廃棄物蓄積状況を測定するセンサ部と、測定データを収集・蓄積し、ユーザへ可視化するサーバ部、およびデータを転送するための通信プロトコルから構成される。また、測定地点およびセンサ数の増減に対するスケーラビリティを持たせるため、地点（コントローラID）とセンサー（センサID）を区別するための2種類のIDを用いたシステム設計となっている。さらに、コントローラの増加によりシステム全体の管理が困難になるため、遠隔管理のためのSSH接続環境を付加している。

- センサ部は、ネットワークと接続可能なコントローラ（Raspberry Pi）によってIoT化される。コントローラはセンサデータを取得し、コントローラIDとセンサIDを付加したデータへ整形（JSON）し、HTTPのPOSTメソッドを利用してサーバへ送信することで、サーバにセンサデータを適切に管理させる。
- サーバ部は、Node.jsを用いてコントローラから受信したセンサデータをMySQL（データを管理するDB）へ格納し、ユーザ（Webブラウザ）からの要求に応じてセンサデータの提供を行う。図1.7にサーバプログラムの処理をフローチャートで示す。サーバはHTTPリクエスト（POST、GET）によって要求内容を2種類に分類し、URLルーティング（/reiot、/reiot/manage）によって具体的な要求内容に応じて処理を区別することにより、各ユーザからの要求に対するレスポンスを返す。
- ユーザ（Webブラウザ）は、上記2種のIDを指定したJSONデータをHTTPのGETメソッドを利用してサーバに送信することで、サーバにセンサデータを要求する。

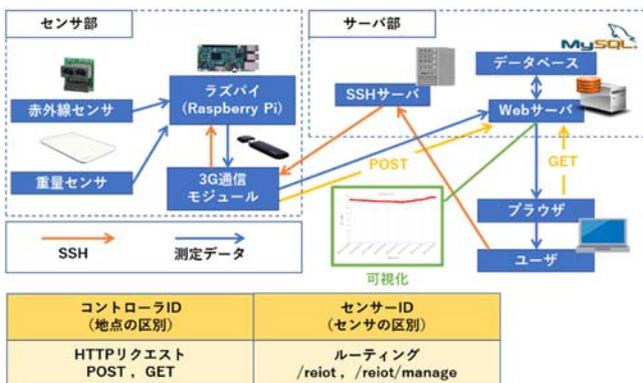


図1.6 IoTセンサを用いた廃棄物蓄積状況のリアルタイム可視化システム

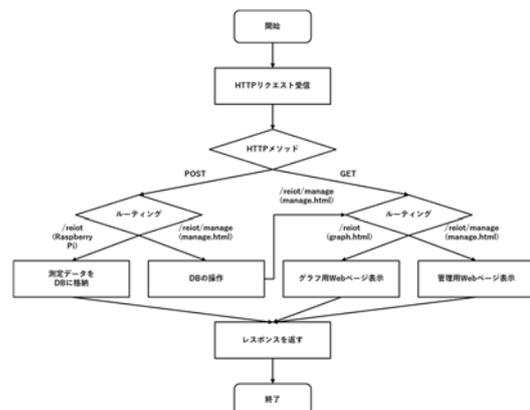


図1.7 サーバプログラムの処理のフローチャート

実証評価では、本システムを上記設計に基づき実装し、IoTセンサからの測定データをデータベースに格納し、ユーザからの要求に応じてWebブラウザに出力されるまでの通信過程を確認し、Webブラウ

ザ上にて測定データが可視化されたグラフ(図1.6)としてリアルタイムに出力できることを確認した。また、センサデータの追加・削除においては、コントローラテーブルとセンサテーブルに情報の追加と削除が容易にできることを確認した。さらに、遠隔管理として、ユーザからSSHサーバを介してコントローラ(Raspberry Pi)にSSH接続を行えることを確認した。

③WCMによるデータ収集とトレーサビリティ

収集・運搬事業者3社の管理者へのヒアリング調査を通じて、収集・運搬事業者が抱えている課題を把握した。共通の課題として、収集・運搬のルート作成はドライバーの経験則に依存しているため、効率的なルート作成のノウハウや医療機関情報などが蓄積されておらず、非効率な収集・運搬や慢性的なドライバー不足が発生していることが確認できた。また、小口医療機関の集荷依頼は、電話による受注が大半を占めるため、その際の受注ミスが課題となっていることもわかった。また、ドライバーへのヒアリング調査を行った結果、紙マニフェストと電子マニフェストが混在していることによる業務の煩雑性や事務処理に携わる業務時間が大きいことが課題として抽出された。

医療機関における感染性廃棄物の適正処理、感染性廃棄物の排出実態と収集運搬の実態を把握するため、I市(人口:48万人)の小規模な医療機関を対象としたアンケート調査を実施した。回答者の医療機関の多くは従業員人数が10名以下の小規模診療所である。回答件数は91件(回収率35%)であり、調査実施期間は2019年12月である。得られた知見を要約すると、下記のとおりとなる。

- 大半の感染性廃棄物は、種別によらず、プラスチック容器により廃棄物処分されていること。また、その容量としては、20~40Lが大半を占めていること。
- 収集・運搬事業者との契約形態は、回答者のうち約97%が容器を購入する容器個数契約となっていること。診療所のうち78%が不規則の集荷依頼を行っていること。さらに、収集・運搬事業者の集荷依頼は、すべてが電話により行われていること。
- 感染性廃棄物の処理状況に対しては、過半数が関心を示しているものの、トレーサビリティシステムに対する認知は1/3程度にとどまっていること。

また、トレーサビリティシステムの構築に向けて、魅力があるサービスを聞いた結果、「感染性廃棄物等の個人情報・機密情報管理システム」が高い支持を得た。これは、患者の個人情報保護に対する問題意識の高さが反映されている結果といえる。感染性廃棄物の適正処理のみならず、こうした点に着目してトレーサビリティシステムを訴求していくことが肝要である。

以上の検討に基づき、WCMに基づくトレーサビリティシステムを構築した。本システムは、IoTの定義どおり、「モノと情報の一体化」を簡易に実現するシステムである(廃棄物・資源化物そのものに情報を持たせる)。QRコードでスキャンした情報が直接、個々の作業をリアルタイムでクラウドサーバーに記録することが可能で、これらの記録した情報から必要な情報を「伝票」として出力することが可能である(もちろん、電子マニフェストへの対応も可能である)。また、シンプルな作業で入力が可能であり、作業員の負荷が小さく、作業データが自動的に記録されるため改ざんを防止することができる等のメリットがある。さらに、本研究では、これまでの調査結果および、現場ニーズに基づき、WCMに接続する要素技術・システムとして、ボタン式の集荷依頼システムおよび排出事業者と収集・運搬事業者間の情報共有システムを構築した(図1.8)。情報共有システムとは、ボタン式集荷依頼システムからの通知に基づき、集荷依頼の日程調整を効率化するシステムである。

ある収集・運搬事業者のドライバー2名、9つの医療機関の協力を得て、実証試験を実施した。その結果、システム上のトラブルはなく、実証期間内に集荷依頼を行った排出事業者からは、問題なく集荷依頼および日程調整ができたこと、集荷依頼の負担が少なかったことが確認できた。また、収集・運搬事業者からはシステムの実用性も含めて作業負担が少なかったこと、各工程における精神的負担がほとんどなくなったことが確認できた。その結果、研究期間終了後も規模を拡張した実証試験を継続することとなった。

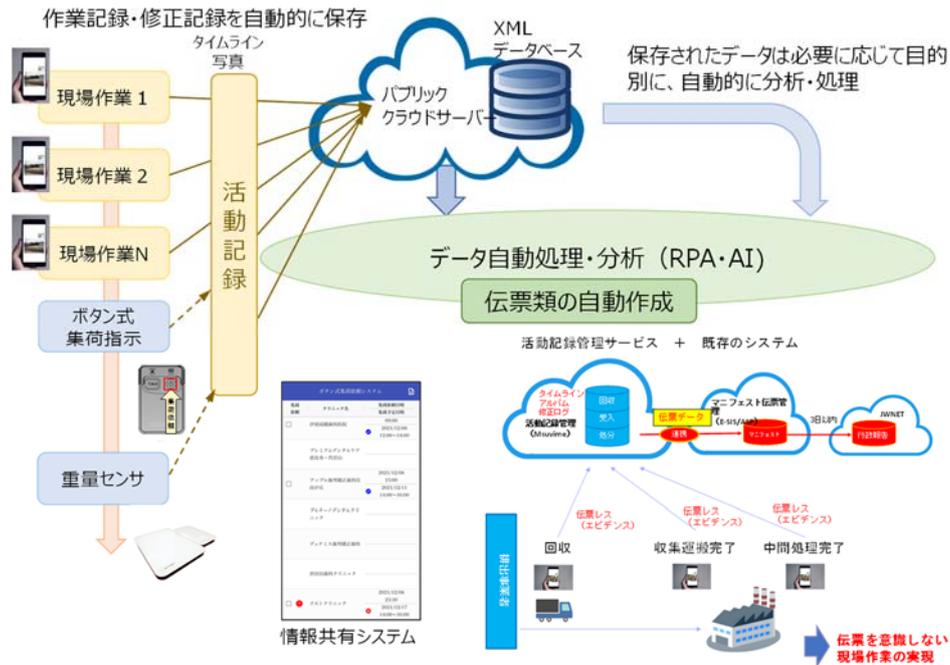


図1.8 WCMに基づくトレーサビリティシステムの構築

④機械学習による予測

機械学習による廃プラ日回収需要量の将来予測

排出量の将来予測には、MATLAB_2021aを用いた。具体的には、データの準備段階において、表1.4に示す7種の独立変数と目的変数（収集量）計912日分のデータを用意した。精度評価の目的を考慮して全てのデータを、学習用データ（2020年8月まで）とテスト用データ（2020年9月）に分割した。

表1.4 本研究で利用した独立変数のまとめ

変数名	概要
Day_num	日付順番 2018. 4. 1 ~ 2020. 9. 30
Weekday	曜日
Pre_d_climate	前日の気候による影響（カテゴリータイプ）：風速 $\geq 10 \text{ m s}^{-1}$ ，日降雨量 $\geq 20 \text{ mm}$ ，最高気温 $\geq 35 \text{ degree}$
Pre_d_holiday	前日による休日可否の影響
Interval	前回回収日との間隔
Num_fday	前回回収日の回収量
Num_sday_fw	先週と同じ曜日の回収量

まず学習用データを、線形回帰、回帰木、サポートベクターマシン(SVM)、アンサンブル回帰木、ガウス過程回帰(GPR)、ニューラルネットワークとそれぞれの最適化モデル計28モデルでフィッティングし、学習したものをテキスト期間内で将来予測を行った。次に、観測値と予測値をもとに、平均平方二乗誤差(MAPE)を用いて精度評価を行った。精度の一番高いモデルを用いて各施設に対して、有効な予測期間を導出した（有効な予測期間は最初の検証日から期間内任意日までの平均予測精度が月平均予測精度より高いものを示す）。

各施設の予測に最適な予測モデルを検出した結果、スーパーは粗いガウスSVM、病院は有理二次GPR、物流企業は複雑な回帰木、食品工場はバギング木のアンサンブル、ビル管理企業は2次SVMであった。精度評価の結果について、あるスーパーを対象とした週平均予測精度では、伝統的な回帰手法（SPSSの回帰ツール）を用いた推計精度が83.1%であるのに対し、機械学習手法（最適化可能なアンサンブル）では93.6%の精度を得た。図1.9には、福岡県内5つの施設を対象とした2020年9月の予測精度のトレンドを示す²⁾。その結果、スーパーでは84.6%、病院では84.4%、物流企業では78.2%、食品工場では82.5%、ビル管理企業では81.1%と高い予測精度の結果を得た。また、病院と物流企業の将来予測には気象条件が寄与し

ないことがわかった。さらに、2020年9月1日時点における有効な予測期間はスーパーで20日間、病院で2日間、物流企業で6日間、食品工場で1日間、ビル管理企業で2日間であった。

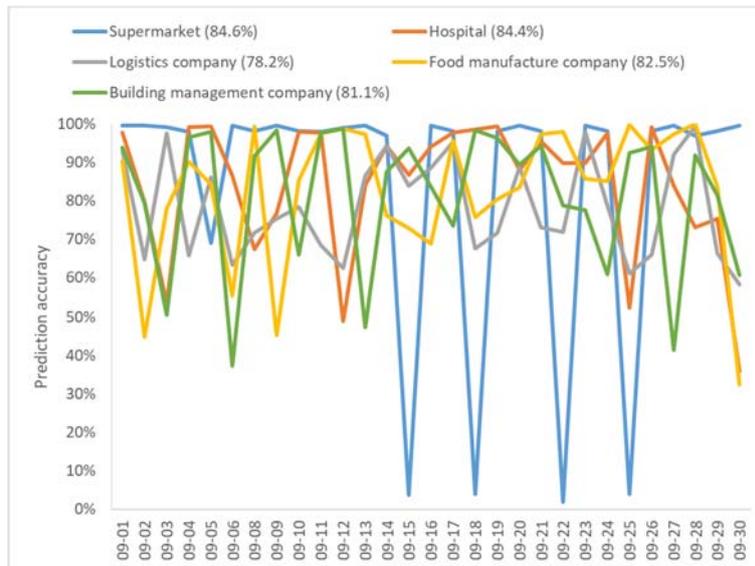


図1.9 福岡県内5つの施設における日回収需要量の予測結果
(2020年9月、凡例の括弧内は予測精度の月平均値)

4-2. 収集運搬、中間処理施設運用の最適化

①収集最適化計算手法

具体的には、提案手法により実際のある運行データと比較して評価関数値を13%程度改善させることが可能であり、また分枝限定法に基づく従来の計算手法では1時間程度かかる規模の経路設計問題に対しては、数分程度で同程度の数値解を獲得可能であることを確認した。

②収集運搬の最適化

グーグルが公開しているOR-toolsという最適化ツールをPythonに導入し、直線による総移動距離の最短ルートを導出した。検証として、道路ネットワークに基づいた最短ルートも導出した(図1.10)。各拠点の位置特定には、収集拠点所在地から取得した緯度・経度を利用した。各拠点間の距離行列は、GISソフトを用いて取得した。

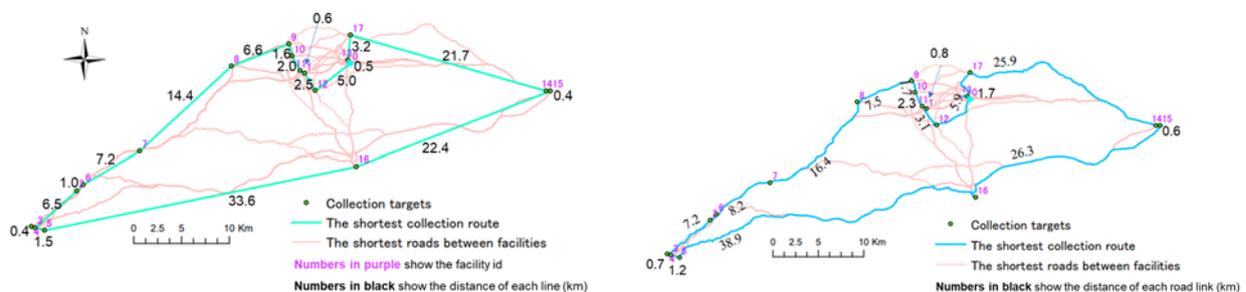


図1.10 産廃プラスチック収集ルートの最適化結果

(左：直線ベースの最短ルート、右：道路ネットワークベースの最短ルート)

導出した直線ベース(図1.10左)と道路ネットワークベース(図1.10右)の最短ルートの結果を比較すると、ルート順にわずかな違いがみられたが、前者の実用性が確認できた。解析結果に基づいて、現状ケースと最適化ケースの総移動距離を集計し、改良トンキロ法を用いて収集によるCO₂排出量を計算した。図1.11に示すように、現状ケースと比較すると最適化ケースでは1回あたり、移動距離で22km(14.2%)、

CO₂排出量で4.8kg-CO₂ (10.1%) の削減がみられ、収集システムの統合化の有効性を確認した。

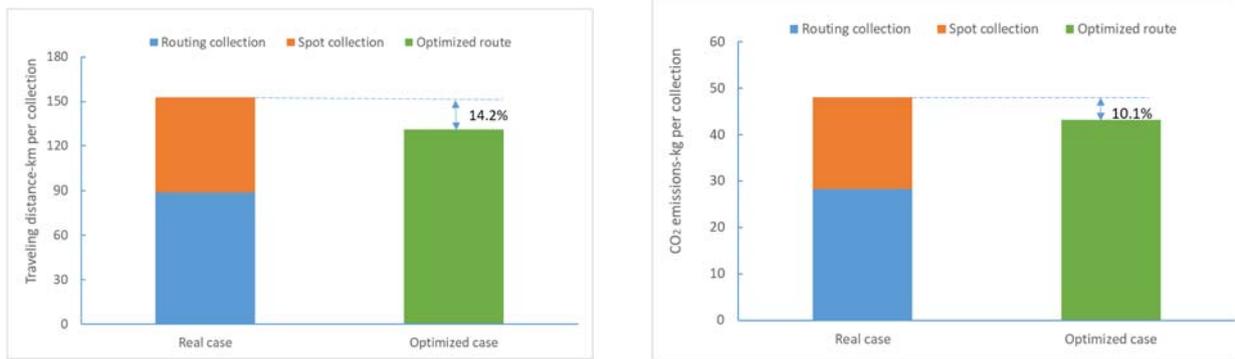


図1.11 現状ケースと最適化ケースの解析結果（左：総移動距離、右：CO₂排出量）

③スポット回収の最適化

スポット回収における移動コストを最小化するための配車計画モデルを検討し、1か月分の実測データから算出したコストとの比較によって有効性を示した。収集運搬業者は複数台の車両を用いて1日毎に各収集箇所（スポット）に発生する収集対象の収集を行う。これに対し、本モデルは1日の総移動コストを最小化する配車計画を決定する。本モデルの制約条件は以下の通りである。

- 車両は残積載量を超過するスポットには訪問しない
- 1スポットに対し、車両の訪問可能回数は1回とする
- 1車両の総移動時間は24時間を超過しない（今回は回収作業にかかる時間は無視する）
- 後日収集の予約がされているスポットは該当日のコスト計算に含めない

図1.12と図1.13は「提案モデルによって得られた配車計画」と「実際に行われた配車計画」の全期間／日毎の総移動距離をそれぞれ示したものであり、本モデルの適用により約8%の改善を得ることができる。これは、各スポットの廃棄物をどのタイミングで回収するか、1台の車両による単独回収と複数台の車両による分担回収のどちらを実施するかを最適な判断が行われた結果である。

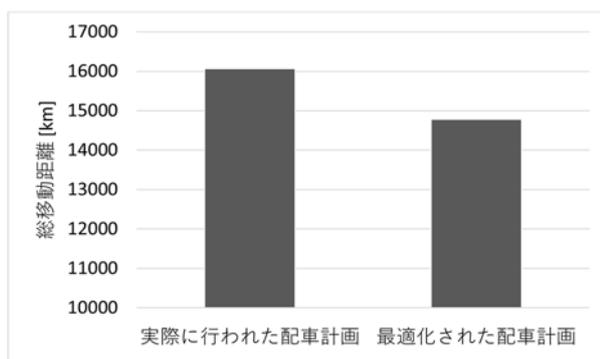


図1.12 全期間の総移動距離

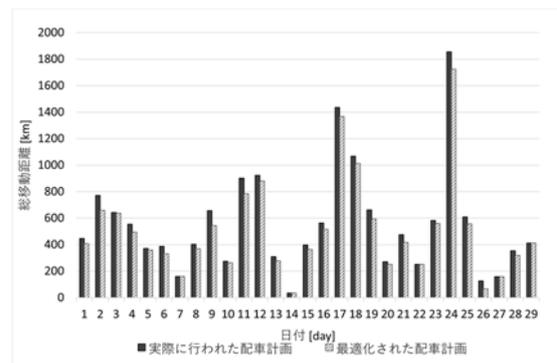


図1.13 各日付の総移動距離

④中間処理施設運用の最適化

まず、提案モデルと処理事業者の実績データ（3週間分）を比較した。提案モデルの解を得るためにソルバーとしてPythonのCBC (COIN-OR-Branch-and-Cut) を使用した。提案モデルと実データの総コストを図1.14、処理機の稼働回数を図1.15に示す。ここで、Actualは実データ、Conventionalは線形計画法に基づく処理計画モデル、Proposed は0-1整数計画法に基づく処理計画モデルを示しており、これらのモデルの総コストは実データの総コストによって正規化している。図1.14と図1.15より、Proposedは夜勤シフトでの処理機の稼働を効果的に抑制し、Actualと比べて約7%、Conventionalと比べて約4%の総コストを改善できる。ConventionalはActualと比べて低いコストを達成できるものの、処理機の稼働台数が固定であるため、冗長な処理機の稼働によってProposedと比べてその改善度は小さくなっている。

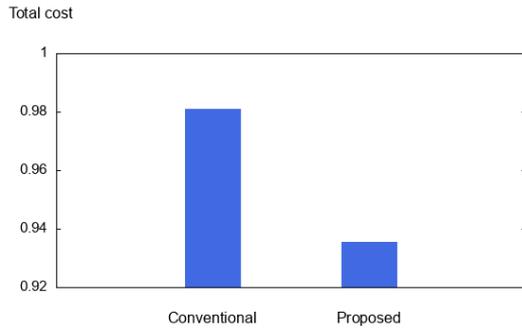


図1.14 総コスト

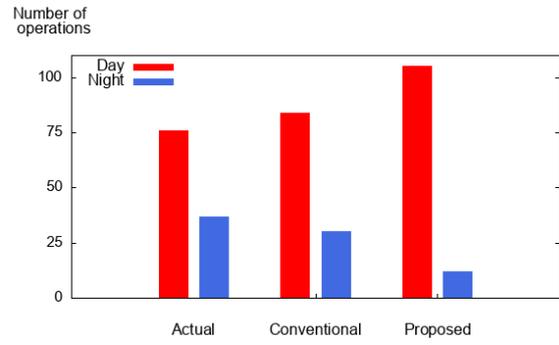


図1.15 処理機の稼働回数
(Day : 日勤シフト、Night : 夜勤シフト)

次に、到着量変動する状況において処理余剰率 β を変化させた場合の総コストと残量をシミュレーション評価した。本評価では、処理計画の決定間隔を1weekとし、この決定を1年間(52週)分繰り返し実行した。このとき、1日の到着量は計画到着量12kgを中心として $\pm 5\%$ の範囲でランダムに変動するものとした。図1.16より、 β の増加に伴ってコストは増加するが、残量が減少していることがわかる。 $\beta=1.0 \sim 1.1$ では、両モデルのコストが徐々に増加するものの、処理計画に適度な余裕を持たせることで、残量が大きく減少し、収束することがわかる。 $\beta=1.07 \sim 1.1$ では、両モデルの残量が実データと比べて改善されており、Proposedはコストについても改善できることがわかる。 $\beta > 1.1$ では、両モデルとも低残量を維持するものの、過度に処理機を稼働させることで、コストが増加し、実データのコストよりも高くなることわかる。以上の結果より、処理余剰率 β を適切に設定することで、Proposedは到着量変動する状況においてもコストを効果的に抑制しつつ、残量を十分減少させることができることから、最も有効なモデルであり、実現場に対して有益な提案であるといえる。

3-3. 情報プラットフォームのための技術と効果

①情報プラットフォームによる情報連携のニーズ把握

情報プラットフォーム(PF)の利用意向を、産業廃棄物の排出・処理にかかわる排出事業者、収集運搬業者、処分業者に対してアンケート調査をおこなった結果を図1.17に示す。なお、ここで想定している情報PFとは、産業廃棄物処理業に係るステークホルダーそれぞれが保持している情報をWEB上のシステムを通じてリアルタイムに近い形で共有することで、収集運搬、処理の効率化を図る仕組みを備えたものと想定してもらった。その結果、利用意向については、全体の約1/4は興味があると回答しており、一定のニーズがあることがわかった。業種別に見ると、排出事業者が22%、処分業者が19%であるのに対し、収集運搬業者は33%であり、他より高いことがわかった。情報PFを利用する際の公開レベルについては、II：会員登録した事業者であれば誰でもアクセス可能、III：会員登録した事業者かつ当該事業に関わる事業者のみがアクセス可能と回答した企業が全体の80%以上であった。受容できる年間利用料に関しては、興味があると回答した排出事業者のうち約70%は無償と回答しコスト受容性が低いのに対して、同じく興味があると回答した収集運搬業者の約60%は年間10万円までは受容できると回答しており、ニーズに比例しているといえる。

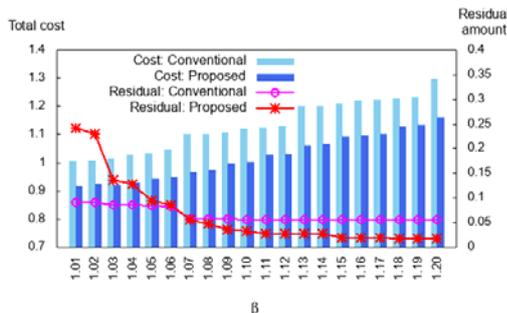


図1.16 コストと残量

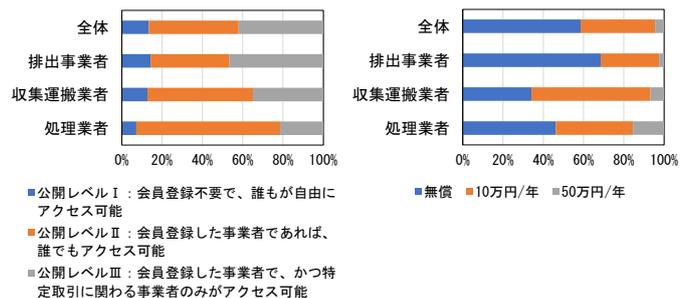


図1.17 情報プラットフォームの利用意向

②画像解析によるリユース可能性評価

ある自動車リユースパーツの生産工場を例として、AIによる画像診断システムの導入可能性を検討し、そのプロトタイプを開発・評価した。とりわけ、検査工程の効率化のニーズが高いと考えられる外装部品の損傷の抽出への応用を主眼においた。開発当初は、自動車リユースパーツの販売管理システムに格納されている画像データを教師データとすることを想定していた。しかしながら、下記の理由により、教師データとして活用できないことがわかった。

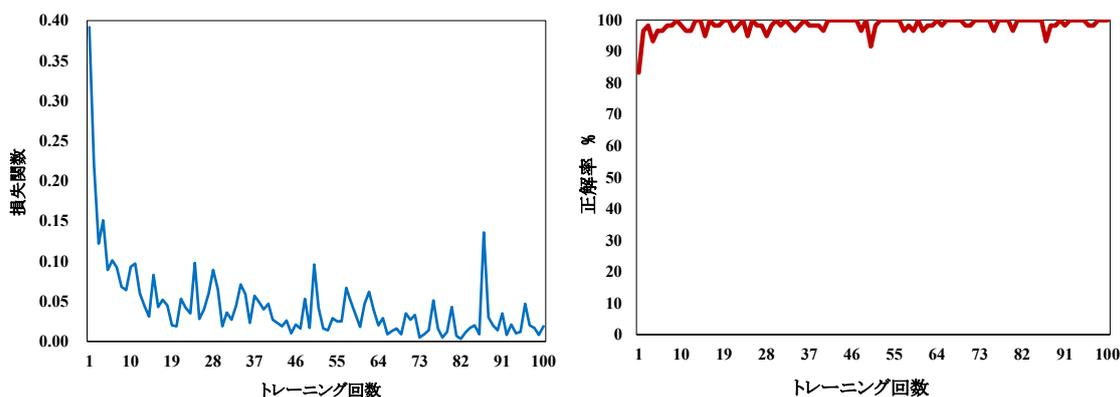
- 多くの事業者では、低画素数のタブレットやスマートフォン等で撮影しているため、在庫管理用の画像から損傷が確認できない。
- 撮影角度が統一されていないため、損傷の状態が画像から判別することができない。
- 整備工場向けの記号がマジックペン等で記入されており、画像診断の際のノイズとなる。
- 画像の撮影環境の影響で、光、撮影者等が部品上に写っており、損傷の状態が確認できない。

以上の理由から、新たに在庫車等から擦り傷のあるドアの画像（以下、「擦り傷あり」という）を300枚収集した。さらに、教師データとなりうる無損傷の画像（以下、「無損傷」という）200枚を収集した。これらの教師データのラベリング処理を行い、SSD (Single Shot MultiBox Detector) モデルを用いて機械学習を行った。その結果、トレーニング対象のデータとして有効であったのは、「擦り傷あり」で140枚、「無損傷」で100枚にとどまる結果となった。これは、500枚収集した教師データが240枚しか有効でなかったことを意味する。擦り傷が浅いことや光の反射等により、有効なデータと判定できなかったことによる。この点から、精度の高い教師データを収集することの重要性が伺える。

機械学習に関し、過学習を回避するために、0~100のエポック数で学習テストを行った。その結果、エポック数が100のときの損失が最も低いことが確認された。なお、1秒で16枚の写真を読み込むことができ、240枚の場合、約15秒でトレーニングを完了する。擦り傷の有無およびエリアを判定できるか否かを目的とした。実験用の画像として、「擦り傷あり」の画像を30枚、「無損傷」の画像を30枚準備した。実験用の画像データをSSDモデルで学習を行い、エポック数と判定精度を評価した。なお、約0.2秒で1枚の写真の判定が可能である。エポック数100までの損失関数と判定の正確率の推移による評価を行った。損失関数 (Loss function) とは、「正解値」とモデルにより出力された「予測値」のずれの大きさを計算する関数である。この値が小さくなることで、学習ができていることを意味する。正解率 (Accuracy) は、文字通り、「擦り傷あり」と正しく判定した割合である。図1.18に、擦り傷の判定実験における損失関数および正解率を示した。同図より、学習を重ねるごとに損失関数が小さくなり、エポック数100のときの正解率は約97%となっている。擦り傷は、目視でも比較的、判別しやすい損傷であることがこうした高い精度を得られたことにつながったと考える。

以上の結果と、AIの専門家へのインタビューを通じて、他の損傷への適用可能性を考察した。その結果、経験則であるが、損傷の特徴に応じた500~1000枚の写真を教師データとしてAIに学習させると、「擦り傷」と同レベルの画像診断精度を得られると示唆された。条件に合致する教師データを収集できた場合、「擦り傷」と同様の方法で、学習を行えば、全体の約65%に相当する損傷は判定可能であると推察される。

最も大きな課題は、良質な教師データを効率的に収集する方法論の構築である。例えば、写真を撮影する角度、画質等を統一化していくことが必要となる。自動車リユースパーツにおいては、プラットフォームとしての流通ネットワークが構築されており、画像情報のやり取りは日常的に行われている。費用対効果を明らかにし、システムの高度化に合わせて、その導入を検討することが期待される。



(a) 損失関数 (Loss function)

(b) 正解率 (Accuracy)

図1.18 損失関数と正解率による評価結果

③スマート回収

2020年度における個別回収と共同回収の輸送費用と保管費用の算出結果を図1.19に示す。その結果、個別回収に比べ、共同回収を行った方が費用の削減につながるということがわかった。これは共同回収を行うことで、回収に伴う輸送距離の削減につながったことが大きな要因であると考えられる。また、総費用（輸送費用と保管費用の合計）の削減率は2020年度に比べ、2039年度は小さくなる結果となった。これは排出量が大幅に増えたことから、共同回収における車両費が大きくなったことが要因であると考えられる。

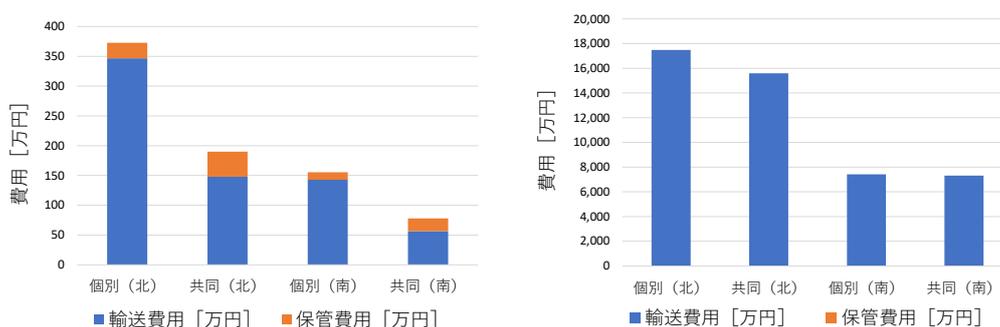


図1.19 輸送費用と保管費用の算出結果 (左：2020年度、右：2039年度)

5. 研究目標の達成状況

排出・処理事業者間インタラクションによる収集効率化については、収集業者の実データをもとにルート回収、スポット回収を対象にアルゴリズムを開発した。業務効率化を対象とした効率化アルゴリズムについても、処理業者の実データを用いて開発した。収集運搬に加え処理業者の保有施設の運用計画策定の効率化も示すことができ、計画を上回る成果を得た。

廃棄物収集プロセスを想定したプラットフォームのプロトタイプについては計画通り開発した。医療機関との実証事業の開始はコロナ禍により遅れたが、計画どおりの結果を得た。社会情勢の変化（非接触化への要請）により、社会実装に向けたニーズが想定以上に増えている。

6. 引用文献

- 1) 経済産業省産業構造審議会商務流通情報分科会情報経済小委員会：CPSによるデータ駆動型社会の到来を見据えた改革，中間とりまとめ，p.5，2015
- 2) 環境省：太陽光発電設備等のリユース・リサイクル・適正処分に関する報告書（2014年）

II-2 産廃のエネルギー利用高度化を想定した需給マッチングの最適化

国立研究開発法人国立環境研究所

社会システム領域 システムイノベーション研究室

藤井 実

地域環境保全領域 環境管理技術研究室

岡寺 智大

東洋大学情報連携学部情報連携学科

後藤 尚弘

[要旨]

1. 研究開発目的

気候変動防止のために、カーボンニュートラルの早期実現に向けた動きが国内外で加速している。廃棄物焼却施設から製造工場への蒸気供給が一般的に行われるようになれば、産業セクターからのCO₂排出の効率的な削減と、廃棄物の高効率な活用の観点から有効であるが、国内では実施がほとんど進んでいない。そこで、事業の潜在的な関係者との情報共有によって、蒸気供給の事業化を促進することができるかを検討・実証することと、事業化にあたっての障壁となる、蒸気の安定供給の仕組みを提案し、その経済性の評価を行うことを目的に研究を実施する。

2. 研究目標

産業廃棄物を利用した高効率発電（発電効率20%程度）に対し、固形燃料化や焼却熱の産業利用など、エネルギー利用効率が各段に高い熱利用の促進方策を検討する。特に熱利用では発電のように系統による変動の吸収ができないため、需給をバランスさせる必要性が高い。燃料となる廃棄物の排出・収集状況、固形燃料の製造状況、焼却炉等の運転状況などを把握するセンサや情報共有の仕組みを調査し、それらを組み合わせた需給マッチングを行う情報プラットフォームの基本設計を行い、その有効性を評価するとともに、焼却熱の効率・安定的な利用に資する周辺技術の調査を実施する。

3. 研究開発内容

3.2.1 検討の背景

気候変動防止のために、カーボンニュートラルの早期実現に向けた動きが国内外で加速している。民生や交通など、あらゆるセクターがカーボンニュートラルを達成する必要があるが、特にエネルギーを大量消費している産業系の脱炭素化は最も困難な対象の1つであり¹⁾、大量の低・脱炭素なエネルギーを安価で安定的に供給することが大きな課題となる。一方国内の廃棄物の焼却施設では、これまで焼却熱を利用した発電が行われてきたが、相対的に熱利用は少なく、特に製造工場への蒸気供給は限定的な事例に留まっている²⁾。廃棄物焼却施設では、廃棄物の燃焼ガスが腐食性に富むため、ボイラの蒸気温度を高温化することが難しく、300℃未満～400℃を少し超える範囲の蒸気が製造されている³⁾。熱力学的な制約から蒸気温度は発電効率に大きく影響するため、結果的に発電効率が低くなる。産業廃棄物焼却施設のエネルギー回収状況の実態は明確ではないが、データの整備されている一般廃棄物の焼却施設においては、現状ではよくて25%程度、一般廃棄物焼却施設の平均値では14%の発電効率となっており⁴⁾、例えば複合サイクルのガス火力発電所の発電効率が60%程度であるのと比べると、大きな差がある。しかし、製造工場であれば300～400℃の蒸気でも、乾燥や反応など、有効利用可能な用途が多い⁵⁾。蒸気は、暖房や給湯を行う場合と異なり、環境温度との温度差が大きいため、ヒートポンプによる熱供給が難しいか、それほど効率的にならないため、ボイラで化石燃料を直接燃焼して製造されている場合が多い。廃棄物焼却施設のボイラと、産業用ボイラの熱効率には大きな差がないため、焼却施設から製造工場への蒸気供給は、効率的に化石燃料の消費を削減することができ、CO₂排出削減と経済性の両面から効率的である⁶⁾。

廃棄物焼却施設から製造工場への蒸気供給が一般的に行われるようになれば、産業セクターからのCO₂排出の効率的な削減と、廃棄物の高効率な活用の観点から有効であるが、前述のように、国内では

実施がほとんど進んでいない。研究分担者らはこれまで、焼却施設を保有する自治体や民間の廃棄物処理事業者、また焼却施設からの蒸気の潜在的な需要家となる製造業者にアンケート調査や数多くの面談を実施してきたが、多くの場合廃棄物焼却熱が製造工場で有効利用できることや、その結果として環境と経済の両面で大きなメリットがあることを知らないケースがほとんどであった。また、様々な種類の廃棄物を受け入れている廃棄物焼却施設は、燃焼状態が安定しないため、発電や熱供給量も安定しないことが懸念されていた。そこで、廃棄物焼却施設から製造工場への蒸気供給の事業化に向けて、適切な情報共有を行うことで、関係者による事業化検討を促進できることを確認することと、出力が不安定な廃棄物焼却施設からの蒸気供給を、従来の焼却発電と比較して経済的にメリットの出る範囲で、安定的に実施し得るシステムを提案し、その実現可能性を評価することを目的に検討を行う。

3.2.2 既往研究

適切な情報共有によって資源循環を促進する研究は、産業共生と呼ばれる、企業間で物質やエネルギーのやり取りを行う取り組みを対象とした分野で数多く実施されてきた。Grantらは、情報通信技術を利用した情報共有が、産業共生の推進に役立たせることができることを示した⁷⁾。Liuらは、アンケート及びヒアリング調査と統計データを組み合わせて、既の実施されている産業共生と、将来可能な産業共生を特定した⁸⁾。ChenとMaは、産業廃棄物の発生状況の国・地域スケールの網羅的な調査を通じて、数多くの産業共生のポテンシャルを特定した⁹⁾。Van Capelleveenらは、データベースの廃棄物等の関連情報に基づいて、産業共生を推奨するシステムを構築した¹⁰⁾。また、韓国では国家的な取り組みで産業共生が推進されており、2015年時点で既に、焼却施設から製造工場への蒸気供給も含む、33の熱交換ネットワークが実現している¹¹⁾。このように適切な情報共有は、廃棄物焼却施設から製造工場への蒸気供給の実現にとっても有用であると考えられるが、国内での導入事例が限定的である²⁾ことから、改めて国内においても適切な情報共有によって事業化の促進が可能であるかを検証する必要がある。また、廃棄物焼却施設から製造工場への蒸気を安定供給する仕組みについては、海外では実例が増加しつつあるものの¹²⁾、詳細な技術情報が共有されていない状況であることと、安定供給の可否は蒸気の供給側と需要側の状況にも大きく依存するため、本研究では汎用性の高い安定供給の仕組みをプロセス設計した上で、その経済的な実現可能性を検証することとする。

3.3.3 情報プラットフォームの果たすべき機能

国内においても、廃プラスチックや古紙等から製造される固形燃料は、製紙工場やセメント工場などのボイラやキルン等で利用されているが、前述のように廃棄物焼却施設から製造工場への蒸気供給はほとんど実施されてこなかった。製造工場への蒸気供給は、廃棄物の焼却熱が例えば化学工場や製紙工場、プラスチックや紙の製造エネルギーとして利用されることになるため、エネルギー回収ではあるものの、閉じた循環の輪に近い形で廃棄物が利用されることになる。そのため、以下ではこれをSemi-closed Loop Energy Recovery: SCLERと表記するものとする。

国内でSCLERを実施するにあたっては、概ね何も情報がない状況からそのポテンシャルを把握することから開始し、関係者に働きかけ、検討のテーブルについてもらう過程が必要になる。国内で広くSCLERのポテンシャルを把握するには、地図上で廃棄物焼却熱の発生状況と、潜在的な蒸気の受け入れ可能性を比較するような作業がまず必要になるが^{13, 14)}、本研究では廃棄物焼却施設が製造工場と近接している（概ね5km以内）ことが分かっている地域か、もしくは大規模な蒸気需要がある工業団地に、焼却施設を新設することを想定して、熱供給事業への参画を潜在的な関係者に呼び掛ける段階からを対象とした。

このような背景を踏まえた上で、熱供給事業の実現と実施後をサポートする情報プラットフォームの機能について検討する。機能の設定には、潜在的な蒸気の供給事業者（廃棄物処理施設の運営事業者）及び蒸気の需要家（製造工場）にヒアリングを行うと共に、廃棄物焼却施設から製造工場への蒸気供給についての先行事例を有する、韓国・蔚山工業団地の関係者へのヒアリング（2019年に実施）結果を参考に実施した。製造工場では安定して蒸気供給を受けられることが必須要件となるため、蒸気の需給バランスを取ることが、情報プラットフォームの最大の機能となる（図2.1）。情報プラットフォームは、

蒸気供給の事業化の実施前と実施後において、それぞれ機能を果たすことになる。事業実施前には廃棄物の供給とそれによって可能となる、ある温度、圧力条件の蒸気供給量を把握し、製造工場側の蒸気需要条件と照らし合わせて、蒸気の供給可能量を判断する。これにより、製造工場側でこれまで蒸気供給のために利用していた化石燃料の削減可能量が推計され、経済的な節約効果およびCO₂排出削減効果を評価することができる。製造工場側のメリットを元に蒸気の販売価格を想定し、また蒸気配管など熱供給のための付帯施設の導入に要する費用を踏まえて、事業の実現可能性を判断する。本研究においては、適切な情報提供・情報共有によって、事業化に向けた検討を促進することの実証を行った。

一方、事業が実現した際には、安定して蒸気供給が行えることが情報プラットフォームの重要な機能となるが、事業化には一般的に数年間を要するため、事業実施後の実証までは本研究で実施することはできない。ここでは、廃棄物を排出事業者から安定して収集できることを確認する情報システムについて、研究協力者である(株)クレハ環境の開発したシステムについて紹介する。また、廃棄物焼却施設では、仮に十分な量の廃棄物が確保されていても、廃棄物の組成にばらつきがあるため、発熱量が不安定になりがちであり、結果的に供給できる蒸気量が不安定になる可能性がある。ここでは、製造工場の蒸気需要量に合わせた蒸気の安定供給を可能とする、蒸気の蓄熱システムとバックアップボイラの導入を想定したシステムを構築した場合の費用を評価し、蒸気供給によって得られる経済的な便益と比較して、その導入の実現可能性を判断した。

情報プラットフォームが果たす機能:蒸気の需給バランス

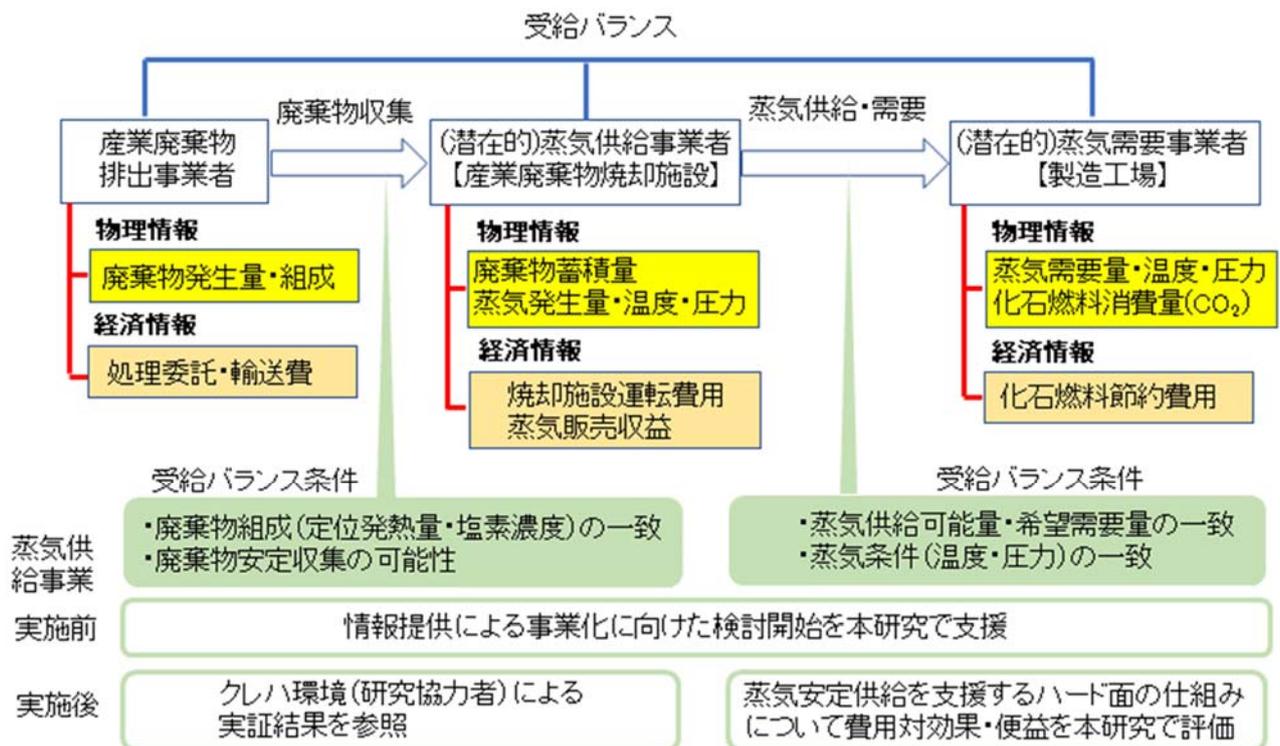


図2.1 廃棄物焼却施設から製造工場への蒸気供給に情報プラットフォームが果たす役割

3.3.4 蒸気供給の事業化を促進する情報共有

SCLER事業の実現に向けて関係者を募る過程については、何らかの組織が仲介機能を果たす必要があるが、今回は研究分担者らの一部がその役割を果たした。研究開始当初から関係機関へのヒアリング等を実施しているが、ここでは一部に一般廃棄物を対象とするケースも含めて、アプローチを加速させた2020年9月から、2021年11月の間の情報共有について記載する。SCLERの潜在的関係主体になると考えられる、自治体7機関(同一自治体内の異なる部署を含む)、民間の廃棄物処理事業者(部署又は企業単位)11機関、潜在的な蒸気需要家である製造工場(事業所単位)13機関、その他の関係機関(プラントメー

カー、商社・物流事業者、調査会社等) 10機関と、対面又はオンラインでの面談を行うことで実施した。なお自治体は、自ら保有する廃棄物焼却施設からの蒸気供給が事業化の検討対象になるケースが約半数で、残りは自治体内の事業者がSCLERを事業化することの支援に関わるケースや、大規模な熱需要がある工業団地での焼却施設の新設を前提に、SCLERの実施を検討するケースである。面談の対象機関を選定するにあたって、既存の焼却施設から製造工場への蒸気供給を行う事業を想定するケースでは、表2.1に示すように蒸気の供給側と潜在的需要家に対して、インターネット上の情報や統計情報、伝聞情報等からエネルギー回収の状況や、エネルギーの利用状況等を把握した上で、ある程度可能性があると思われる事業所を選定した。一方、大規模な工業団地に焼却施設を新設することを想定するケースでは、潜在的な需要家については同様の情報を把握し、それ以外では廃棄物の回収や輸送、焼却炉の新設や運転に関与する可能性があると思われる関係主体を選定した。将来的には情報プラットフォームを本格的に整備して、広く情報共有の促進を図ることが望ましいが、本研究ではその前段階として、どのような情報を仲介者が事前に保有し、どのような情報共有を行うことが潜在的な事業者の事業化に向けた行動促進に役立つかという観点で、検討を行った。

表2.1 蒸気供給側と蒸気需要家を対象にした事前の情報把握や情報共有項目

	蒸気供給側 (廃棄物焼却施設)	蒸気需要家 (製造工場)
仲介者による事前の情報入手	<ul style="list-style-type: none"> 事業所の所在地 エネルギー回収・利用状況 (発電, 外部蒸気供給, 外部温水供給) 【可能であれば】外部への蒸気販売の可能性 【可能であれば】外部へ蒸気供給する動機 (CO₂排出削減, 販売益増加, その他) 	<ul style="list-style-type: none"> 事業所の所在地 使用しているエネルギー (電力, 蒸気, 温水, その他) 使用している燃料 (ガス, LPG, 重油, 灯油, 石炭, その他) 【可能であれば】外部からの蒸気購入の可能性 【可能であれば】外部から蒸気を受け入れる動機 (CO₂排出削減, 燃料費削減, その他)
面談時の仲介者から関係者への情報提供	<ul style="list-style-type: none"> 材料リサイクル・ケミカルリサイクルを補完する, 低品位廃棄物を対象とした高効率エネルギー利用で, 低炭素効果を大幅に高められること。 再生可能な電力が普及する将来も, 当面は安定的な蒸気需要と低炭素効果が期待できること (高効率な焼却発電と比較しても, 約2倍のCO₂削減効果)。 製造工場への蒸気供給は, 経済性の観点でも有利なこと (高効率な焼却発電と比較しても, 約2倍のエネルギー価値を産出)。 部分最適ではなく, 廃棄物が相応しい用途に利用されることで, 社会全体として資源・エネルギー利用の効率向上 (エクセルギー効率の向上) に繋がること。 廃棄物焼却施設からも, 安定した蒸気供給が可能であること。 製造工場への蒸気供給の実例を提示 (国内事例が限定的なため, 海外の事例を中心に) 可能な範囲で, 蒸気供給に伴う燃料消費削減効果, CO₂排出削減効果, 経済性の概算値 (初期費用, 単純投資回収年数)。 	

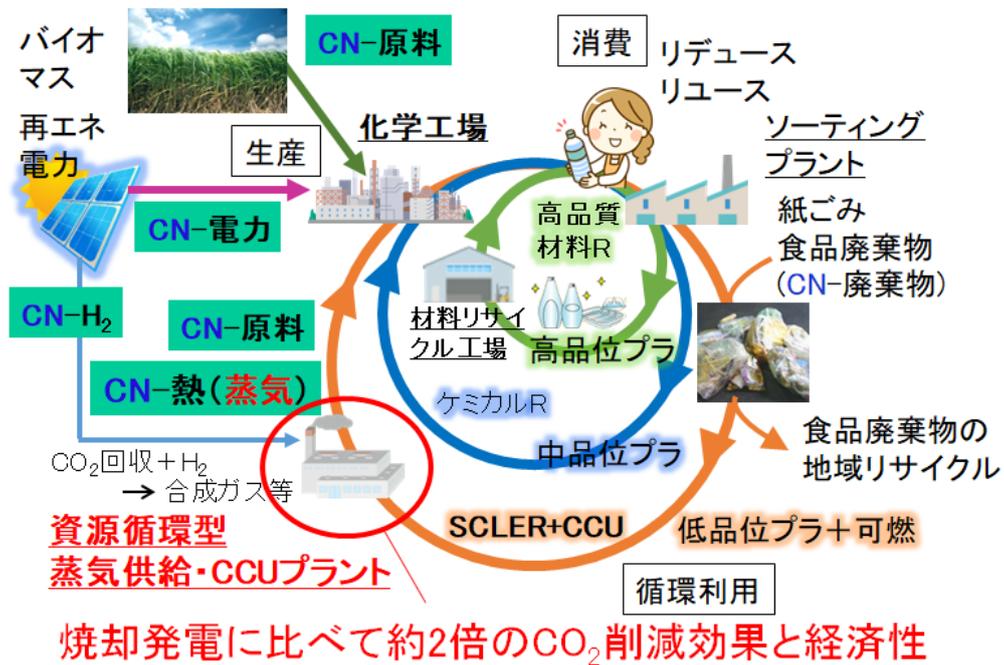
面談を行った対象機関に対しては、表2.1の下段に示すように、いずれの関係機関に対しても、SCLERの有効性や意義を説明した。廃棄物からのエネルギー回収は、容器包装リサイクル法において、材料リサイクルやケミカルリサイクルよりも低い優先順位に位置付けられており、一般にもそのような認識がもたれている。そのため、SCLERが材料リサイクルやケミカルリサイクルの対象になりにくい、低品位な廃棄物を利用する補完的な役割を果たし、そのような低品位廃棄物を高効率に素材等の製造のための熱エネルギーとして役立てることで、大幅なCO₂排出削減と、資源循環の輪を閉じることに貢献できることの意義を特に説明した。従来の焼却発電と比較した優位性や、廃棄物及び代替される化石資源がそれぞれ相応しい用途で利用されることで、社会全体としてエクセルギー効率 (エネルギーの質的な面も考慮

した効率)が向上する対策であること⁶⁾も示した。また、後述する蒸気の安定供給の仕組みを構築することで、廃棄物焼却施設から製造工場への安定供給が可能であることを説明した。更に、事業を実施した場合のおおよその費用対効果や単純投資回収年数を、海外の実例等を紹介しながら示した。その際、一部の対象機関には下記(図2.2)のような簡易な説明資料を事前に提供した上で、面談の際にはより詳細を示した15~20枚程度のスライドを用いて説明を行った。スライドに使用した説明図の一部を図2.3、図2.4に示す。



図2.2 SCRELによる廃棄物エネルギー利用の効率性や高い経済性についての情報提供素材例

プラスチックの原料・電力・熱の総てをカーボンニュートラルに変える



※CN: カーボンニュートラル

図2.3 情報共有に利用した説明図 (カーボンリサイクルの観点からの説明)

LCAからみた、プラスチックリサイクル・エネルギー回収の化石燃料代替(削減)効果

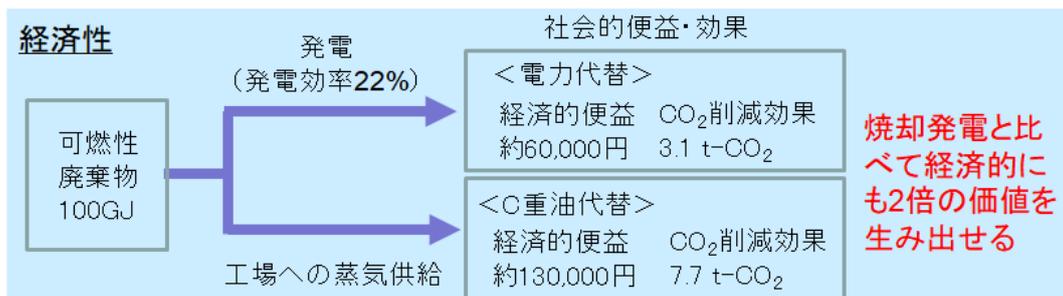
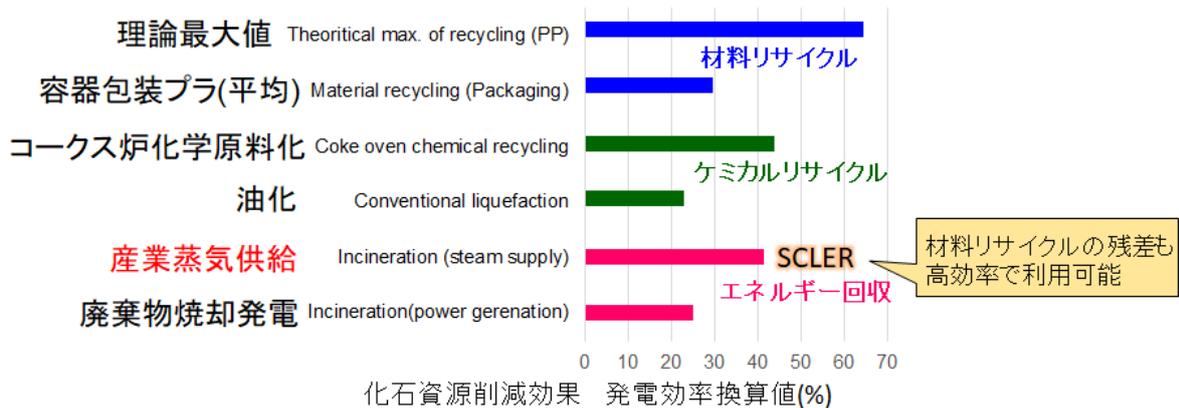


図2.4 情報共有に利用した説明図 (エネルギー及び経済効率性の観点からの説明)

3.3.5 蒸気安定供給のためのシステム設計と評価

廃棄物を安定的に集めることについては、前述のように（株）クレハ環境が開発した仕組みを紹介する¹⁵⁾。加えて、廃棄物焼却施設からの蒸気供給量を安定化させる仕組みを検討する。需要側の製造工場の蒸気消費量が何倍も大きい場合には、工場の既存ボイラを併用しながらの蒸気受け入れとなるため、廃棄物の発熱量の変動による蒸気供給量のある程度の変化や、点検等による廃棄物焼却施設からの蒸気供給の停止に対しても、柔軟に対応することができる。しかし、廃棄物焼却施設からの蒸気供給の変動が、製造工場側の生産プロセスに有意に影響する条件下では、安定・継続的な蒸気供給を担保するシステムを構築しておく必要がある。廃棄物焼却施設の設計に豊富な経験を持つ技術者や、蒸気供給に関する装置メーカー及び、蔚山工業団地のスチームハイウェイプロジェクト¹¹⁾の関係者へのヒアリング結果から、図2.5に示すように、蒸気フローをモニタリングするセンサを利用して蒸気を受給状況を把握しながら、蓄熱槽（蒸気アキュムレータ）とバックアップボイラからなるシステムを想定する。蒸気アキュムレータは、蒸気を高温・高圧の水として蓄えておく装置である。蒸気配管に比べて比表面積が小さいことから相対的に放熱ロスが抑制されるため、半日といった長時間の蓄熱も可能であるが、期間を長くするほど容積が増えるために、装置費用や設置場所の観点では不利である。ここでは、廃棄物組成の変化に伴う短周期の蒸気出力の変動をならしつづ、意図せぬ蒸気供給の停止時にも、バックアップボイラが緊急稼働して定常的に蒸気を供給できるようになるまでの十分な時間を確保できる、焼却施設から供給する蒸気の1時間分の蓄熱量を想定する。バックアップボイラには、10分程度で定格蒸気量に達する貫流式ボイラを用いることとし、ここでは最大のボイラ容量として、廃棄物焼却施設の点検時を含む停止時にも同量の蒸気を供給可能な容量を設定する。

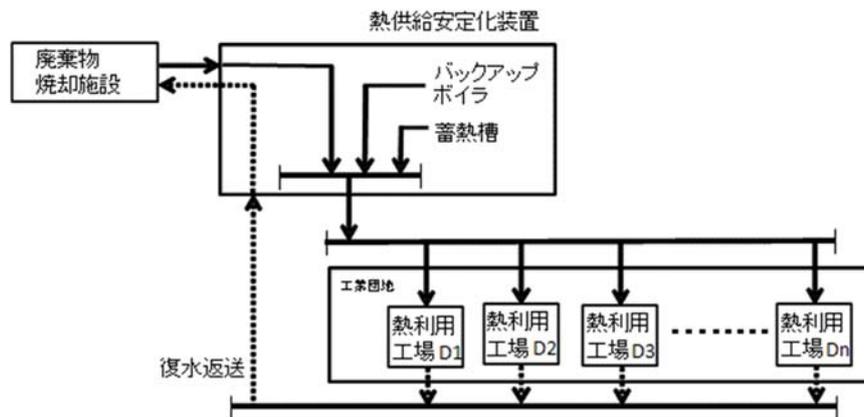


図2.5 廃棄物焼却施設から製造工場への蒸気安定供給システム

製造工場への蒸気供給によるCO₂排出削減効果と、蒸気の安定供給システムを導入した際の費用便益の評価手順を以下に示す。

- 【製造工場の蒸気需要の設定】廃棄物焼却施設から蒸気供給を行う製造工場側では、C重油ボイラで蒸気を製造しているケースを想定し、焼却施設から供給する蒸気を全量利用可能な需要であるとする。
- 【焼却施設の条件設定】廃棄物焼却施設の規模や熱供給条件（圧力、温度）などの計算条件を表2.2のように設定する。これまでの国内の産業廃棄物の焼却施設は、200t/日程度以下の処理規模の施設が多いが、今後は製造工場が集積して、まとまった熱需要が存在する産業地域に大型の焼却施設が立地する可能性を踏まえ、一般廃棄物焼却施設における実例を参考に、660 t/日の処理規模を仮定する。一般廃棄物焼却施設の方が、開示されているデータが豊富に存在する利点もある。廃棄物焼却施設では発電を行っていたものとし、これを停止して蒸気供給に切り替える想定とする。
- 【発電・燃料消費の変化の評価】1日当たりのごみ処理量、ごみの低位発熱量、年間稼働日数から焼却熱量を算定し、これに平均的な発電効率を掛けて、焼却施設で発電していた場合の発電量を求め

る。一方、発電を停止した場合に可能な蒸気供給量については、事例を参考に設定する。この蒸気供給に伴う製造工場側の化石燃料の削減量を、製造工場のボイラ効率を90%として求める。

- d. 【CO₂排出削減量の評価】焼却施設における発電の減少量と、製造工場における燃料消費削減量などにより、CO₂排出削減量を評価する。電力や燃料消費に関わるCO₂排出係数や換算係数を表2.3に示す。
- e. 【運転費用の評価】運転経費の削減費（削減できる化石燃料費）と増加分（消費電力の購入費及び発電の停止により失った売電収益）を、表2.4に記載の単価を用いて評価し、また、メーカーで焼却施設の設計を行っていた技術者へのヒアリング（2021年に実施）に基づき、年間運転管理費を推定する。運転管理には維持補修費、人件費、管理費が必要であり、年間の維持補修費は設備費（建築費も含む）の5%であると仮定する。熱供給のために新たに必要となる運転人員は1人とし、人件費は30万円/月とする。管理費は、正味燃料代削減費用（発電時の売電価格との差）の10%とする。
- f. 【蒸気供給設備費（初期投資）の評価】蒸気供給量から、バックアップ設備等の機器容量を決定する。また、同程度の蒸気供給規模を持つ韓国・蔚山工業団地における蒸気配管敷設単価（中間的な値として30万円/mと設定、2019年に現地でヒアリング）及び配管距離から敷設費を試算し、熱供給のために新たに必要となる設備費を算出する。
- g. 【事業性（単純投資回収年数）の評価】製造工場のC重油消費が削減する一方、焼却施設で売電ができなくなり、運転のための電力購入費が必要になる。設備費の初期投資を、これら削減された費用から増加した費用を引き算した年間収益で除して、単純投資回収年を求め、経済性を評価する。

表2.2 廃棄物焼却施設の設定と製造工場への蒸気供給条件

項目	単位
1日のごみ焼却量 ^{注1)}	660 t/日
ごみの低位発熱量 ^{注1)}	11.1 MJ/kg
発電効率（国内の平均的な値） ^{注2)}	14%
廃棄物焼却施設の年間稼働日数 ^{注3)}	280 日
廃棄物焼却施設からの熱供給日数 ^{注4)}	280 日
蒸気需要先までの距離（導管の長さ）（仮定）	2,000 m
蒸気条件 ^{注5)}	2.3MPa、280°C
蒸気供給量 ^{注5)}	87.2 t/h

注1) 人口規模がある程度大きな産業都市に立地する焼却施設を参考に設定

注2) 出典：環境省「一般廃棄物処理事業実態調査（平成29年度版）」2019.3の値を代用。ヒアリングを行った産業廃棄物処理事業者でも、同程度の発熱量の廃棄物を焼却していた例を複数確認

注3) 出典：全国都市清掃会議「ごみ処理施設整備の計画・設計要領」2006.6

注4) 出典：化学工場の稼働日は、日本化学工業協会へのヒアリング（2015.11.17）によると365日/年。このため、熱供給日数は廃棄物焼却施設の年間稼働日数になる。

注5) 同規模の焼却施設の実績値を参考に設定。特に、廃棄物焼却施設の蒸気圧力が製造工場側の圧力を下回ると蒸気供給が行えないが、この蒸気条件で利用可能なプロセスが多く存在することを面談で確認した。

表2.3 評価に用いた電力や化石燃料のCO₂排出係数等

項目	換算係数	単位	備考
電気事業者CO ₂ 排出係数（平均） ^{注1)}	0.000587	t-CO ₂ /kWh	
熱利用の化石燃料換算時の効率 ^{注2)}	90	%	ボイラ効率
電力の化石燃料換算時の効率 ^{注3)}	46.0	%	発電効率
C重油の熱量 ^{注4)}	0.0418	GJ/L	
C重油のCO ₂ 排出係数 ^{注4)}	74.0	kg-CO ₂ /GJ	

注1) 出典：算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧、温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度2017（2015年度までの直近5カ年の平均値）

注2) 出典：一般廃棄物焼却施設から熱供給する場合に想定される熱量から設定した規模の鋳鉄製ボイラ

の能力（1,000～10,000MJ/h）における最新のボイラ効率（4社平均値）

注3) 資源エネルギー庁、総合資源エネルギー調査会基本政策分科会 第18回会合、資料2-5（2015）を参考に設定

注4) 出典：資源エネルギー庁、エネルギー白書2017

表2.4 C重油及び電力単価

種類	仕様	単価	備考
C重油 ^{注1)}		58.0円/L	2014年度時点の価格（参考：2011年度～2020年度の平均価格は55.4円/L）
電力（売電）	バイオマス相当分（60%） ^{注2)}	17円/kWh	固定価格買取制度（FIT）（2018～2021年度）の価格
	非バイオマス相当分 ^{注3)}	13.6円/kWh	特定規模電気事業者（PPS新電力）に売電の場合：2013年調査時の平均的な価格

注1) 出典：新電力ネット（https://pps-net.org/heavy_oil_ac）

注2) 出典：資源エネルギー庁、固定価格買取制度

（https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/）

注3) 出典：環境省（2014）平成25年度廃棄物発電の高度化及び売電支援事業委託業務。

貫流式ボイラ及び蒸気アキュムレータの価格はメーカーのカタログ値より求めた。蒸気アキュムレータの容量は、熱水1m³当たり蒸発量から算出し、蒸発量は蒸気発生線図より求めた。蒸気配管敷設費用は、ドレン回収等の付帯設備費を含む総額として、国内外の敷設事例のヒアリング結果から同等の配管径となるケースを参考に、30万円/mとした。

4. 結果及び考察

4.2.1 事業化推進のための情報共有の成果

適切な情報共有によって、SCLERの事業化に向けて潜在的な関係者が行動に移すことがベンチマークとなる。表2.5に示すように、情報共有（資料の送付や面談）の実施によって、自治体の関係者は、これまで高効率な焼却発電がCO₂排出削減の観点からも、また売電による収益性の観点からも有効だと思っていたが、製造工場への蒸気供給がより効率的な手段になることを理解したとの感想が多かった。民間の廃棄物処理事業者は、一部で製造工場への蒸気供給を検討した経験をもつケースがあったが、多くは自治体と同様に発電を優先的に考えていた。また、安定して蒸気供給を行う上で、廃棄物を安定して調達することが課題であると多くの処理事業者が考えていると共に、焼却施設にトラブルが発生して蒸気供給が行えなくなる場合の、供給者責任への懸念を持っているケースも複数存在した。製造工場の関係者は一部の例外を除いて、これまで廃棄物焼却熱を利用することを一度も検討したことがなかったというケースがほとんどであった。

しかし、今回の情報共有によって多くの潜在的関係機関が、SCLERの事業化に関心を持ってもらうことができた。近年のカーボンニュートラルへの社会的関心の高まりも背景として、およそ9割（37機関/40機関）の関係機関が、CO₂排出の削減に繋がるのであれば事業化を前提に検討したいとの意向を示した。しかし、これらのうち民間廃棄物処理事業者、製造工場、その他機関のうちの計9機関は、立地条件や蒸気条件の不一致等の理由により、SCLERの実施が難しい状況にあった。SCLERの経済性については、やはり多くの機関が正味の費用低下に繋がることが望ましいと考えているが、CO₂排出削減効果が大きく、また地域の環境への取組に貢献できるのであれば、費用の増加が直ちに事業化を行わない理由にはならないと考える機関がほとんどであった。一方、廃棄物焼却施設からの蒸気供給については懸念も表明された。特に産業廃棄物については、固形燃料としての需要が伸びていることから、安定して集めることに

不安があるとのことであった。これに対しては、既存の産業炉での利用が前提となる固形燃料には利用し辛い、廃棄物専用の焼却炉では焼却することのできる、塩素濃度が高い廃棄物や、発熱量が低めの廃棄物を優先的に利用することで、解決できる可能性がある。また、情報共有の内容を踏まえて、蒸気供給が効率的に行える工業団地に焼却施設を新設したいが、迷惑施設である焼却施設は、工業団地であっても建設が難しい場合があるとの意見もあった。

2020年9月から2021年11月の間に実施した面談の結果として、2021年12月1日時点で、SCLERの実現可能性調査を実施、あるいはその支援を行っている機関は、自治体（5機関/6機関）、民間廃棄物処理事業者（7機関/11機関）、製造工場（7機関/13機関）、その他の関係機関（9機関/10機関）となっている。前述のように、実施が難しい条件下にある機関が9機関あることを考えると、多くの機関がSCLERの実施に関心を持ち、実現に向けて行動に移したと言える。本研究では、異なる情報共有の方法を試して比較した訳ではないので、どのような情報共有であれば効果が得られにくいのか、あるいはより効果的であったのかの評価はできないが、今回の成果から同様の情報共有を進めることで、国内の他の地域等の潜在的関係機関にも、SCLER実施の検討を促せる可能性があると考えられる。実際に事業化が実現するかは今後の実現可能性調査の成果を待つ必要があるが、まずは潜在的関係者が協力して検討を進めることが重要であると考えられる。

情報プラットフォームには、各サブテーマで収集される情報を集約し、表示させたり分析させたりする仕組みにすることにより、更に事業化の促進と合理化に寄与することが期待される。廃棄物収集の効率化（サブテーマ1）、プラント管理の効率化（サブテーマ3）、契約の効率化（サブテーマ4）などの機能を併せ持つことで、大きな経済的、社会的なメリットをもたらすことが期待される。

表2.5 廃棄物焼却施設から製造工場への蒸気供給に関する潜在的関係者の認識

廃棄物焼却施設から製造工場への情報共有を受ける前の状況
<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物焼却熱を利用することを検討したことがなかった（製造工場、その他の関係機関） 廃棄物焼却施設のエネルギー回収では、発電が最も効率的と考えていた（自治体、民間廃棄物処理事業者） 廃棄物焼却施設からの蒸気の安定供給は難しいと考えていた（民間廃棄物処理事業者）
製造工場への蒸気供給への期待
<ul style="list-style-type: none"> CO₂排出の削減に繋がるのであれば事業を実施したい（共通） 経済的な負担の増加にならないのであれば事業を実施したい（共通） 地域の環境負荷の削減に繋がるのであれば事業を実施したい（共通）
製造工場への蒸気供給への懸念
<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物を安定して集めることに不安がある（民間廃棄物処理事業者） 迷惑施設である廃棄物焼却施設は、工業団地への進出が難しい場合が多い（民間廃棄物処理事業者）

4.2.2 蒸気安定供給のためのシステムの評価結果

（株）クレハ環境が開発した、情報技術を活用した産業廃棄物の収集・管理システム¹⁵⁾は、契約を行っている廃棄物排出事業者に、予め排出される廃棄物の種類ごとに、排出量（処理委託量）を情報送信してもらう仕組みである。事前に種類ごとの廃棄物の組成を把握しておき、これに排出量を掛け合わせることで、どのような廃棄物がどれだけ、いつ廃棄物焼却施設に集荷されるのかを、予め知ることができる。これにより、焼却施設のピットにどれだけ廃棄物が保管されることになるのかを、1週間先まで予測することが可能となり、不足する場合には例えばR廃棄物固形燃料を他から調達してくるなどの対応を取ることができる。この仕組みは、蒸気供給のための燃料を確保するという観点で、有効に機能すると考えられる。

次に、蒸気の安定供給の仕組みについての評価結果を示す。設定した蒸気供給の条件下における化石燃料の消費削減効果や、その結果として得られるCO₂排出削減効果を、表2.6に示す。廃棄物焼却施設における発電の減少分を加味しても、製造工場におけるC重油の消費削減に伴うCO₂排出の減少分が相対的に大きいため、CO₂排出の削減に繋がる。なお、廃棄物焼却施設ボイラの熱効率や発電効率の大小によっ

て、蒸気供給量や発電停止に伴う発電量の減少分も変化する。また、系統電力に占める再生可能な電力の割合が今後増加することが想定されるなど、発電から蒸気供給に切り替えることによるCO₂排出削減効果も変動する可能性があり、この結果は固定的なものではない点に留意が必要である。

表2.6 SCLERによる化石燃料消費及びCO₂排出削減効果

大項目	項目	単位	試算結果
熱供給の効果	蒸気供給量（設定値）	t/h	87.2
	熱利用先での熱量	MJ/h	232,800
化石燃料の削減効果	A：熱供給で削減された燃料分	GJ/年	1,860,000
	B：熱供給のため減少した電力の燃料相当分	GJ/年	991,000
	A-B：化石燃料の削減量	GJ/年	869,000
CO ₂ 排出削減効果	CO ₂ 排出量		
	A：熱供給で削減された燃料分	t-CO ₂ /年	125,000
	B：熱供給のため減少した電力の燃料相当分	t-CO ₂ /年	74,400
	A-B：CO ₂ 排出の削減量	t-CO ₂ /年	50,600

今回の評価で重要なのは、蓄熱装置とバックアップボイラを組み合わせた蒸気供給の仕組みが、経済的に実現可能な範囲にあるかを確認することである。表2.7に、蒸気配管及び安定供給のための設備費と、蒸気供給に伴う正味の利益を示す。単純投資回収年数は、今回想定したケースでは約3年となり、経済的には導入可能な範囲内であると思われる。ただし、この数値は条件次第で大きく変化する可能性がある。蒸気配管の敷設費は設備費の半分近くを占めているが、これは廃棄物焼却施設から製造工場までの距離と、敷設単価（例えば道路を越える箇所が幾つ存在するかで変化）によって変化する。また、蒸気供給の規模によっても設備費の相対的な大きさが変化する。今回は、廃棄物焼却施設及び製造工場の短期的な事業性を評価するために、固定価格買取制度を反映した売電単価を用いて、発電停止に伴う逸失収益を算定する一方、製造工場への蒸気供給はボイラによる燃料消費の削減分のみを考慮しており、蒸気供給によって削減される可能性のある、製造工場側のボイラの導入やメンテナンス、人件費等に関わる費用は考慮していない。電力についても、現状では電力会社の利益等を含む電力価格によって評価しているが、火力発電所の燃料消費の削減分のみを考慮するなど、蒸気供給のために関わる追加費用に対し、蒸気供給に伴って増減する燃料費をより直接的に評価する枠組みにすれば、社会全体としての経済的メリットを評価する観点では、SCLERにより有利な形で大きく変わる可能性がある。また、再生可能な電力が普及して低価格化すれば、廃棄物焼却発電の経済性や環境性が大きく低下する一方、電気ヒーターで蒸気を製造する場合、C重油ボイラに対して価格競争力を持つには、6円/kWh未満程度まで再生可能な電力の価格が低下し、かつ安定的に蒸気供給を行える必要があるが、これは容易ではないことから、SCLERの経済的優位性は暫く続くことが期待される。対策導入を検討するケースごとに慎重な評価が必要である。

表2.7 廃棄物焼却施設から製造工場への蒸気安定供給の仕組みの費用対便益

大項目	項目	単位	試算結果
設備費	バックアップボイラ：a	千円	189,000
	アキュムレータ：b	千円	355,000
	ドレンタンク：c	千円	1,000
	ドレン返送ポンプ：d	千円	3,570
	設備費合計：A=a+b+c+d	千円	549,000
	据付け工事費：B	千円	82,300
	電気計装工事：C	千円	110,000
	建築費：D	千円	47,100
	配管敷設費：E	千円	600,000
	総建設費：F=A+B+C+D+E	千円	1,390,000
	年間運転・管理費	電気料金（売電逸失利益+購入分）：e	千円/年
人件費：f		千円/年	3,600
維持補修費：g		千円/年	44,300
管理費：h		千円/年	140,000
増加分：G=e+f+g+h		千円/年	2,170,000
減少分（C重油料金）：H		千円/年	2,590,000
年間経費の総削減額（正味利益）：I=H-G		千円/年	420,000
経済性評価	単純投資回収年：F/I	年	3.29

5. 研究目標の達成状況

カーボンニュートラルの実現に資する効率的な対策として、リサイクル困難な低品位な産業廃棄物の焼却熱で製造した蒸気を製造工場で利用することを前提に、情報共有プラットフォームの機能を特定し、その試行的な運用をシミュレートするものとして、適切な情報共有によって事業化の検討が進むことを実証した。また、事業化に当たって障害となり得る蒸気の安定供給について、経済的にもメリットを見出せる範囲内でシステムを構築できる可能性を示した。研究は計画通りに進捗し、蒸気供給の事業化に向けた検討が複数の場所で進んだという点においては、当初の計画を上回る成果が得られたと考えられる。本研究の成果により、廃棄物セクターと産業セクターとが連携した効率的なCO₂排出削減が進むことが期待される。

6. 引用文献

- 1) Ashina, S., Fujino, J., Masui, T., Ehara, T., Hibino, G (2012) A roadmap towards a lowcarbon society in Japan using backcasting methodology: feasible pathways for achieving an 80% reduction in CO₂ emissions by 2050. Energy Policy, 41, 584-598.
- 2) 大西悟, 藤井実, 後藤尚弘 (2021) 産業都市における地域循環共生圏形成にむけた障壁の実態解析と対応策の考察—熱EIP事業を対象として—, 土木学会論文集G, 77, (6), II_235-II_246.
- 3) 環境省環境再生・資源循環局廃棄物適正処理推進課 (2018) 高効率ごみ発電施設整備マニュアル, 39pp.
- 4) 環境省環境再生・資源循環局廃棄物適正処理推進課 (2021) 日本の廃棄物処理令和元年度版, 90pp.
- 5) 富士経済 (2017) 産業施設におけるエネルギー消費の実態総調査 2017
- 6) Fujii, M., Dou, Y., Sun, L., Ohnishi, S., Maki, S., Dong, H., Dong, L., Chandran, R. (2019) Contribution to a low-carbon society from improving exergy of waste-to-energy system by upgrading utilization of waste, Resources, Conservation & Recycling, 149, 586-594.
- 7) Grant, G. B., Seager, T. P., Massard, G., Nies, L. (2010) Information and communication technology for industrial symbiosis, Journal of Industrial Ecology, 14, (5), 740-753.
- 8) Liu, C., Cote R. P., Zhang, K. (2015) Implementing a three-level approach in industrial

symbiosis, *Journal of Cleaner Production*, 87, 318-327.

- 9) Chen, P. C., Ma, H. W. (2015) Using an industrial waste account to facilitate national level industrial symbioses by uncovering the waste exchange potential, *Journal of Industrial Ecology*, 19, (6), 950-962.
- 10) Van Capelleveen, G., Amrit, C., Yazan, D. M., Zijm, H. (2018) The influence of knowledge in the design of a recommender system to facilitate industrial symbiosis markets, *Environmental Modelling & Software*, 110, 139-152.
- 11) Park, J., Park, J. M., Park, H. S. (2018) Scaling-Up of industrial symbiosis in the Korean national eco-industrial park program, Examining its evolution over the 10 years between 2005-2014, *Journal of Industrial Ecology*, 23, (1), 197-207.
- 12) 環境省環境再生・資源循環局 (2021) 2050年カーボンニュートラルに向けた廃棄物分野の脱炭素対策について, 中央環境審議会循環型社会部会 (第37回) 資料1.
- 13) 大西悟, 藤田壮, 藤井実, 董亮, 戸川卓哉 (2013) 産業都市での地区内熱供給による環境改善効果の評価システム, *土木学会論文集 G*, 69, (6), II_227-II_237.
- 14) Dou Y., Ohnishi S., Fujii M., Togawa T., Fujita T., Tanikawa H., Dong L. (2018) Feasibility of developing heat exchange network between incineration facilities and industries in cities: Case of Tokyo Metropolitan Area, *Journal of Cleaner Production*, 170, 548-558.
- 15) 宮田治男, 箱崎忍, 大橋輝, 秦三和子, 村上友章 (2019) 廃棄物処理施設からの余熱等を利用した地域低炭素化モデル事業の成果の紹介, *廃棄物資源循環学会誌*, 30, (4), 277-284.

II-3 産業廃棄物のサーマルリカバリープロセスへのICT・AI導入による施設の維持・管理の高度化

和歌山大学

システム工学部

吉田 登、和田 俊和、山本 秀一、山本 祐吾

<研究協力者>

大栄環境株式会社 事業本部

山田 崇雄

[要旨]

産業廃棄物処理の中で特に焼却（サーマルリカバリー）プロセスにおいては『施設の維持・管理の高度化』へのニーズが高い。そこでサブテーマ3では、産業廃棄物のサーマルリカバリープロセスへのICT・AI導入による施設の維持・管理の高度化をテーマに研究を実施した。具体的には①原動機系・②素材系装置でそれぞれ1箇所以上について、現状の施設維持・管理以上の高サンプリングレートでの1ヶ月以上の安定的な連続モニタリングの実証及びICT・AI導入による維持・管理の高度化の効果を明らかにすることを研究目標として掲げた。

研究の結果、まず原動機系（送風機の振動加速度モニタリング）については振動加速度500kHz（研究目標50kHzの10倍）、素材系（バグフィルタ差圧）については記録間隔1s（研究目標10sの10分の1）と、当初の研究目標を上回る高サンプリングレートでの実証を達成した。これら現場で取得されたデータに対して、汎用のモバイルルータと商用クラウドストレージを活用して遠隔で安定的にデータ取得するシステムを構築、1ヶ月以上の安定運用を実証した。また、ICT・AI導入による維持・管理の高度化の効果については、原動機系、素材系の両方に対して維持管理費用削減効果を推計して導入効果が高いことを定量的に示した。さらに産業廃棄物処理業者に対するWEBアンケートを実施して、点検回数・人員ともに限られた労力で取り組んでいる実態や異常予兆のシステムなどIOT・AIに期待する意向を把握した。

1. 研究開発目的

産業廃棄物処理の中で、焼却（サーマルリカバリー）プロセスにおいては、処理のためのプラント内機器が多い上、施設稼働率が高いため、突発故障に伴う操業への影響（ダウンタイム）や緊急対応のための人的負荷、保全費用の増加等を避けるため、『施設の維持・管理の高度化』へのニーズが高いと考えられることから、「産業廃棄物のサーマルリカバリープロセスへのICT・AI導入による施設の維持・管理の高度化」を研究の目的とする。

2. 研究目標

- ①予兆診断のためのデータ取得、機械学習（Gaussian Process Regression）を用いた異常の予兆検出を行うモニタリングシステムのプロトタイプを構築し、サーマルリカバリープロセスにおいて、原動機系・素材系装置でそれぞれ1箇所以上について、1ヶ月以上の連続モニタリングを実証する。目標とするモニタリング性能は、現状の施設維持・管理に適用されているレベルを上回る高サンプリングレートでの安定的なデータ取得を行うものとし、原動機系（振動加速度）で50kHz以上、素材系（バグフィルタ差圧）で記録間隔10s以下とする。
- ②ICT・AI導入による維持・管理の高度化のサーマルリカバリープロセスへの導入可能性、及び環境・経済面に与える効果を明らかにする。

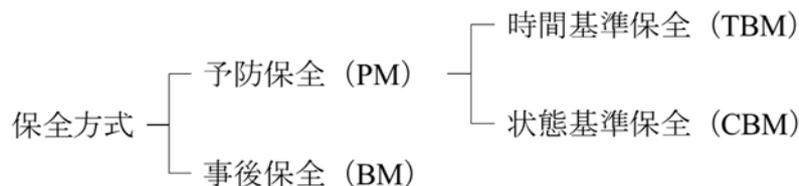
3. 研究開発内容

3-1 ICTを用いた産業廃棄物プラント機材の予防保全モニタリング手法の開発

(1) 保全方式とモニタリング対象設備機器

産業廃棄物焼却プラントはさまざまな設備・機器から構成されており、構成する設備・機器点数も多い。廃棄物処理施設長寿命化総合計画策定の手引き（ごみ焼却施設編）（以後、「手引き」という）1)

では、設備・機器に対してその重要性などを踏まえて、最適な保全方式の組合せを決定することとされている。図3.1に示すとおり、一般に保全方式は事後保全（BM: Breakdown Maintenance）と予防保全（PM: Prevention Maintenance）に大別される²⁾。照明装置や予備系列のあるコンベヤ・ポンプ類に対しては、故障してもシステムを停止せず予備系列に切り替えるなどして容易に保全可能であることからBMが用いられる。一方、コンプレッサ、ブロワなどの回転機器類は具体的な劣化の兆候を把握しにくいいため、時間基準保全（TBM: Time-Based Maintenance）が用いられ、耐火物やろ布などの素材系で摩耗、破損、性能劣化が判断できるものについては、状態基準保全（CBM: Condition-Based Maintenance）が用いられる。本研究では、TBMとCBMの2種類のPMに対応して、それぞれ回転機械の送風機、および素材系のバグフィルタ（BF: Bag filter）のろ布を対象に、ICTを用いた予防保全のためのモニタリングの実証試験を行う。実証試験の対象設備としては、故障した場合にプラント全体を停止せざるを得ない設備・機器を選定する。プラント操業の現場では、過去の補修・整備履歴、プラント操業への影響度などをもとにして、設備・機器ごとに重要度や設備更新の優先度を設定し、その度合いに応じて予防保全に努めることが望ましいが、事業者によって予防保全計画の取り組みに温度差がある。そのため、ここでは実証試験に協力頂いた産業廃棄物焼却プラントを操業する事業者に、実証実験の趣旨を説明し、この要件（高い重要度・優先度）に該当した設備機器を対象とする。



（日本プラントメンテナンス協会²⁾をもとに作成）

図3.1 保全方式

（2）システムの構成と特徴

①送風機の振動モニタリングシステム

産業廃棄物焼却プラント（ロータリーキルンストーカ炉、95t/d）に設置されているストーカ冷風送風機に、振動モニタリング用のシステムを設置し、実証試験を行った。ストーカ冷風送風機の諸元を表3.1に、システム構成を図3.2に、システム諸元を表3.2に示す。

表3.1 ストーカ冷風送風機の諸元

項目	仕様
電動機	22kw 2P 440V 60Hz
風量	100m ³ /min at 20°C
風圧	7kPa（入口-0.3, 出口+6.3）at 20°C
回転速度	3,520 min ⁻¹

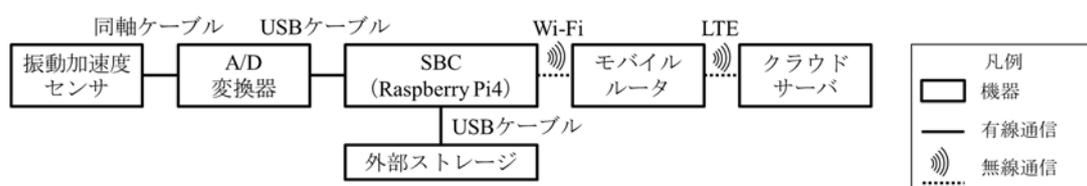


図3.2 振動モニタリングのシステム構成

表3.2 振動モニタリングのシステム諸元

項目	仕様
振動加速度センサ	3軸圧電センサ, 周波数帯域~350Hz,
A/D変換器	サンプリングレート500kHz, USB接続, 16チャンネル
シングルボード コンピュータ*	OS: Ubuntu 21.10, CPU: ARM Cortex A-9 メモリ: 8MB, ストレージ: SDメモリーカード** 16GB
外部ストレージ	ストレージ: SSD*** 240GB
モバイル ルータ	LTE伝送速度 受信Max150Mbps/送信Max50Mbps
クラウドサーバ	商用クラウドストレージ

*SBC: Single Board Computer (使用モデル: Raspberry Pi4 Model B)

**フラッシュメモリーを用いた外部記憶媒体のひとつ

***SSD: Solid State Drive

本システムは、①計測：汎用の3軸振動加速度センサ（出力周波数：DC-350Hz）からの信号データを計測し、②処理：アナログ-デジタル変換（A/D変換：Analog/Digital Conversion）の精度に影響を及ぼすサンプリングレート（アナログ信号からデジタル信号への変換時に、1sec間あたりに実行する標準化処理の回数）を通常の10倍の頻度（500kHz）で安定的に取得するA/D変換器で処理を行い、③記録：バイナリ形式で取得してファイル名を自動付与し、より少ない記憶容量で多くのサンプリングデータを保持できるようにgzipコマンドによりデータ圧縮し、外部ストレージに記録、④転送：モバイルルータを経由してrcloneコマンドにより汎用のプライベートクラウドにデータ転送、という一連の機能を有する。

日常点検で用いられるポータブル振動計は、体温計で体温の瞬時値を測定するように、回転機械の振動加速度などの瞬時値を計測することが目的であり、簡素化され操作が容易である反面、データ蓄積や高速フーリエ変換（FFT: Fast Fourier Transform）解析などの機能はもたない。一方、精密診断で用いられるデータロガーは、現地でのさまざまな診断用途に対応して、マルチチャンネル、時間波形表示、FFTや主要な関数解析などの多くの機能がパッケージ化されて搭載されており、多機能ゆえに高価である。また、こうした振動計やデータロガーは、最大でも51.2kHz程度のサンプリングレートで、サンプリング周期はストレージ容量に依存するために、高サンプリング周期での中長期連続モニタリングを想定したものとはなっていないものが大半である。ある程度決められたニーズには有用であるが、データ活用型の予防保全や操作性向上に対応した機能拡張（例えば、高サンプリングレートや高サンプリング周期などA/D変換機能の向上、自社サーバーやクラウドなど任意のストレージへの遠隔データ転送、転送効率を高めるためのデータ圧縮、データサンプリングに異常が生じた場合のアラームなど）は難しい。このような振動計やデータロガーなどの課題を踏まえて、本システムではサンプリングレートを500kHzとし、ストレージ容量およびデータ転送の負担軽減の観点からデータサンプリング周期と記録間隔を1minとしている。

本システムは、多機能ゆえ高価な市販のデータロガーを使わず、センサデータを任意のSBCに入力して、デバイス上で動作し制御が可能となるよう、独自の制御プログラムを内部ストレージ（SDメモリーカード）に格納した、汎用の振動加速度計測システムのプロトタイプとして構築した。

②バグフィルタろ布の差圧モニタリングシステム

産業廃棄物焼却プラント（ストーカ炉、50t/d）のBFに装填されるろ布の予防保全を目的として、集塵プロセスにおけるBFでの圧力損失（以後、「BF差圧」という）を計測するために、BFの1室に差圧モニタリングシステムを設置し、実証試験を実施した。BFおよびろ布の諸元を表3.3に、システム構成を図3.3に、システム諸元を表3.4に示す。

本システムは、①計測：耐震性・耐衝撃性に優れた小型シリコン・キャパシタスセンサを備えたデジタル微差圧計により差圧を信号データとして取得、②処理：市販データロガーによりデータを高サンプリング周期（1sec）でサンプリング、③記録：USB接続でPCの内部ストレージにデータを記録、④転送：モバイルルータを経由して汎用のプライベートクラウドにデータ転送、という一連の機能を有する。

通常、BFろ布については、1年毎など定期的に、炉の休止時にろ布分析により引張強度や通気度などの

機能診断を行い、強度劣化や目詰まりの状態を点検する、いわゆるCBMが推奨されている^{1) 3)}。

表3.3 BFおよびろ布の諸元

項目	仕様
室数	6
ろ布設置本数	72本 (6本×12列) /室
ろ布素材	ポリテトラフルオロエチレン (PTFE: Polytetrafluoroethylene)
ろ布交換時期	差圧と引張強度により決定 (通常, 4年毎に交換)

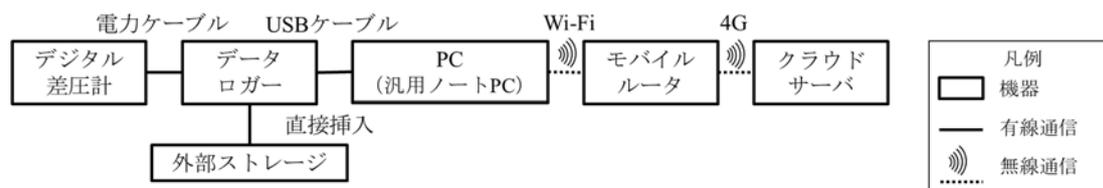


図3.3 BF差圧モニタリングのシステム構成

表3.4 BF差圧モニタリングのシステム諸元

項目	仕様
デジタル差圧計	微差圧計：差圧レンジ0～50kPa, アナログ出力1～5V
データロガー	入力アナログ:10Ch, 電圧測定:±100mV～±60V, 1-5V サンプリング周期:10ms～1hr
パーソナル コンピュータ*	OS: Windows10 64bit, CPU: Pentium Dual-Core P6200/2.13GHz メモリ: 4GB, ストレージ: SSD 500GB
外部ストレージ	ストレージ: CF**メモリーカード2GB
モバイル ルーター	4G伝送速度 受信Max300Mbps/送信Max50Mbps
クラウドサーバ	商用クラウドストレージ

*PC: Personal Computer (使用モデル: 汎用ノートPC)

**CF: Compact Flash

一方、ろ布の点検は、ラフタークレーンなどを使用して、ろ布およびリテーナーをBF室内から取り出す作業が必要でコスト要因となるため、現場の状況に応じて実際には耐用年数が近づいた段階で機能診断に基づき更新時期を決定、或いはまた日常には差圧による破れ確認のみで一定周期で交換するTBMを適用する場合も多い。また、中央制御室の分散型制御システム (DCS: Distributed Control System) では、リアルタイムのBF差圧を計測 (サンプリング周期: 1～10sec程度) し、帳票機能により日報やイベント報告 (記録間隔: 60min程度で統計値のみ) のアナログ出力することは可能であるが、その出力データがCBMの判断材料と活かされることは多くない。こうした実態を踏まえて、本システムではサンプリング周期と記録間隔を1secとしている。

本システムは、現状ではBF上部のマノメータを目視により毎日点検を行う保守・点検に対して、高サンプリング周期で差圧の変動を長期に遠隔監視可能なモニタリングシステムを構築した。

3-2 予防保全効果の推計

送風の振動およびBFろ布の差圧モニタリングシステムを導入することにより得られる予防保全効果として、維持管理費用の削減効果を推計したうえで、費用対効果を把握・検証する。ここでは、導入することでどの程度のライフサイクルコスト削減効果 (設備の耐用年数、BFろ布交換の延伸) を実現すれば、費用対効果を見込むことができるかを定量的に明らかにすることを意図した推計である。そのため、異常度の判定結果がどの程度のライフサイクルコスト削減を図れるかについては、実証試験の継続的なデ

ータ蓄積・分析による一般化が必要となる。この点は、本推計方法の限界となるので留意を要する。

(1) 対象設備

①送風機

産業廃棄物焼却プラントに装備されている回転機械は多種多様であるが、代表的な回転機械として送風機がある。山内⁴⁾は、「送風機・圧縮機など回転や往復動によって流体を圧縮したり圧送する流体機械はプラントの心臓とも言うべき重要な機械」「これらの機械の性能や機能が損なわれたり低下することによってプラントは大きな損害を受けることになる」と述べている。山田⁵⁾は産業廃棄物焼却プラントにおいて処理停止の原因箇所をアンケート調査しており、送風機などの通風設備もその原因箇所に含まれることを明らかにしている。送風機には燃焼室内に燃焼用空気を送り込むための押込送風機と、処理後の排ガスを煙突へ誘導するための誘引送風機は、炉形式に関わらず標準的な産業廃棄物焼却プラントには全て装備されている。このほか、焼却炉上部に二次燃焼室を有する場合には二次送風機が配置される。山内⁴⁾では調査結果をもとに回転機器の設備診断における最も関心の高い故障モードや、実際に通風機の故障で最も大きい現象が「異常振動」であることを示している。手引き¹⁾には、通風設備の機器別管理基準において、誘引送風機の軸受の診断項目として「異音・振動」が明記されている。以上をもとに本推計では誘引送風機を対象とする。

②BFろ布

BFのろ布を対象とする。一般に廃棄物焼却プラントの排ガス処理におけるBFのろ布素材は、安価なガラス繊維が用いられる場合が多いが、投入廃棄物の組成や周辺地域への対応などによっても異なる。特に、協定に基づき排ガス規制を厳しく設定されるケースなどでは、安全側をみて耐熱性、耐薬品性、撥水性、剥離性に優れたPTFEが採用されることも多い。本推計では、ろ布素材を設定した積上げ計算ではないが、複数の処理施設の実績データをもとに費用関数を推計しているため、安価なガラス繊維と高価なPTFE繊維との中間的な値を適用しているものと考えられる。

(2) 推計方法

①送風機

予防保全による維持管理費用の削減効果を推計する。送風機維持管理費用を式(1)と定義する。

$$MC = RC + OHC + TC \quad (1)$$

但し、MC:維持管理費用、RC:更新費用、OHC:オーバーホール費用、

TC:故障対応コスト 単位はいずれも万円/台・年

RCは一般廃棄物処理施設の基幹的設備改良や施設整備に関する報告書^{6) 7)}をもとに0.6乗則法(能力ーコスト曲線法)に基づく積算技法⁸⁾を適用して算定した設備費用を耐用年数で除して算定した。耐用年数は環境省¹⁾により10年と15年の平均値12.5年と設定した。OHCおよびTCは産業廃棄物処理業者へのアンケート調査結果⁵⁾をもとに中央値を設定した。

②BFろ布

BFろ布の予防保全による、ろ布交換費用の削減効果を推計する。ろ布交換は、ラフタークレーンなどを使用して、ろ布およびリテーナーをBF室内から取り出す特殊作業を伴うため、BF全室のろ布を一括して交換する場合が一般的である。ろ布本数は数百本単位となるため、一括取得に伴う規模効果もふまえた積算が妥当であり、また交換作業費用も伴うため、単純にろ布本数に比例した費用とはならない。ここでは、一般廃棄物処理施設の基幹的設備改良、長寿命化計画、事業評価に関する資料⁹⁾⁻¹²⁾をもとに、処理規模とろ布交換費用との関係について傾向曲線によるあてはめを行い、実績に基づく費用関数を作成した。処理規模とBFろ布交換費用の関数を図3.4に示す。

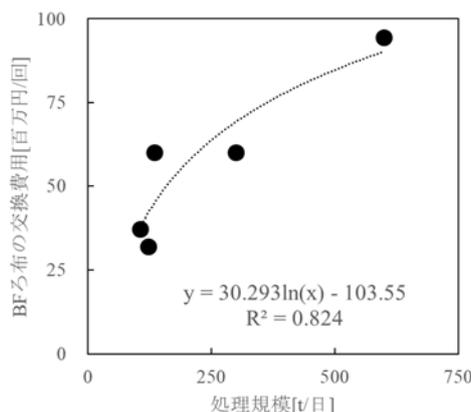


図3.4 処理規模とBFろ布交換費用の関数

3-3 産業廃棄物処理施設の保全ニーズとICTの導入可能性

(1) 産業廃棄物処理施設の保全ニーズ

国内全体として労働力人口減少が問題となるなか、行政においても業務効率化により、専門職員の配置人数が減少している。多くの民間企業においても人材不足は課題で、中小企業がほとんどである産業廃棄物処理業者では慢性的な人手不足にさらに拍車を掛けている実態にある。このような状況のなか、産業廃棄物処理業の振興方策に関する提言（2017）¹³⁾を確認すると、産業廃棄物処理業界が資源循環や再生可能エネルギー供給を担う環境ビジネスとして確立すべきなのは明らかとしている。それは、あらゆる産業が排出する廃棄物、循環資源の再資源・処理の受け皿であり、そのプロセスにおける低炭素化を実現するための主導権を握っているからである。その主導権をもつ産業廃棄物処理業界が、「社会から確実な信頼を得て、廃棄物から資源とエネルギーを作ることを通じて、持続可能な社会に貢献できる業界」を目指す将来像を描き、その将来像を実現するために「全国産業廃棄物連合会 低炭素化実行計画」で目標を掲げ、その目標達成に向けて取り組みを強化している。しかし、産業廃棄物処理業が抱える目下の主要な課題認識としては、「人材確保が難しいこと：38.3%」、「技術力を維持・継承すること：26.7%」の2項目の合計が65%を占めており、人材育成・確保に苦戦していることがわかる。

さらに、プラント設備保守・保全の現場では、団塊世代の定年退職により、労働力の減少や技術伝承の断絶によって設備の管理が難しくなるという問題が大きく取り上げられ、高齢者の継続雇用などでその場を凌いでいるが、解決されたとは言えない。また、プラントメンテナンス業界はその他の業界に比べ、IoT技術の導入が十分に進んでいるとはいえない。作業者の経験に基づく技量に頼った現場、関係者間の情報伝達も紙媒体で共有化が進んでいないことで、情報伝達ミス、勘違いなどの人為ミスを起因とするトラブルも発生している現状にある。こうしたなか、石油コンビナート等災害防止3省連絡会議¹⁴⁾によって、AIを用いたスマート保安技術の導入成功事例が紹介され、長年続いた設備保守・保安分野の大きな構造的な課題解決の糸口が見つかりつつある。石油コンビナートに集積する石油精製、石油化学などが保有する大規模プラント設備に対しては、こうしたAI技術導入の成功の声が聞こえてくるが、その多くが中小規模プラント設備とも言える産業廃棄物焼却施設においては取り組み実態の情報が不足している。

(2) 調査方法

Webアンケート調査方法の概要を表3.5に示す。調査対象は、公益財団法人 産業廃棄物処理事業振興財団が提供する「さんばいくん」の優良認定業者検索（2020年1月時点）¹⁵⁾で、優良産廃処理業者認定を受けている1,305事業者のうち焼却施設を保有する176事業者（北海道：1、東北：15、関東：59、中部：33、近畿：18、中国：18、四国：9、九州：23）を対象とする。地域ブロックの分類は、環境省が定める地域ブロック¹⁶⁾に従った。

アンケート調査方法は、Google Formsを使用したWebアンケート調査を実施した。その結果、176事業

者のうち31事業者から回答が得られている（回答率：17.6％）。

表3.5 Webアンケートの概要

調査対象	公益財団法人 産業廃棄物処理事業振興財団が提供する「さんばいくん」の優良認定業者検索[4]で、優良な産業廃棄物処理業者*として検索され、かつ、焼却施設を有する事業者を調査対象とした。
対象事業者数	176事業者
調査方法	事業者にアンケート調査の願いを郵送し、Google Formsにて回答を依頼
調査期間	2020年1月～2月
調査事項	炉形式、処理能力、一般廃棄物処理業の許可の有無、一般廃棄物処理委託および災害廃棄物処理委託実績の有無など
有効回答数 (回答率)	31事業者 (17.6%)

*都道府県・政令市において、廃棄物処理法に基づき優れた能力と実績を有する産廃処理業者として認定され、環境省に報告された事業者

4. 結果及び考察

4-1 ICTを用いた産業廃棄物プラント機材の予防保全モニタリング結果

(1) 送風機の振動モニタリング結果

①振動モニタリング結果

3.に示した振動モニタリングシステムを、ロータリーキルン焼却炉の定期修理の間の稼働期間内において、ストーカ冷風送風機に設置した。約1ヶ月の連続測定により、3軸（X/Y/Zの3方向）の振動加速度データを取得した。これにFFT解析（Multiple Radix Fast Fourier Transform）を適用し、振幅が卓越する60Hz、120Hz、180Hzの3つの周波数成分を確認した。送風機の回転速度は3、520 min⁻¹であり、電動機の周波数60Hzとほぼ一致する。

この送風機は、許容値を上回る回転軸ずれ（ミスアライメント）を起こしやすい傾向があり、定期修理ごとに、軸芯出し（シャフトアライメント）により軸ずれの調整を行っている。シャフトアライメントには、高度で熟練した技能が必要とされるため、熟練者の作業時間をその都度投入している。振動加速度の振幅に最も変化の認められた120Hz成分の推移を図3.5に示す。定期修理での軸芯出し調整から1か月半経過するとx軸（送風機主軸に対し横方向）の振動加速度の振幅は定期修理直後の10倍のオーダーにまで拡大しており、軸ずれとの関係が伺われる。特に、年末の投入停止期間をはさみ、その前後で軸受温度も上昇し、軸受温度の管理値上限値（60℃）に近いレベルに達していることが分かる。その後も同様の振幅幅を継続する中、次の定期修理まで軸受部分を冷却しつつ稼働し、軸受温度は管理レベルを下回っている。

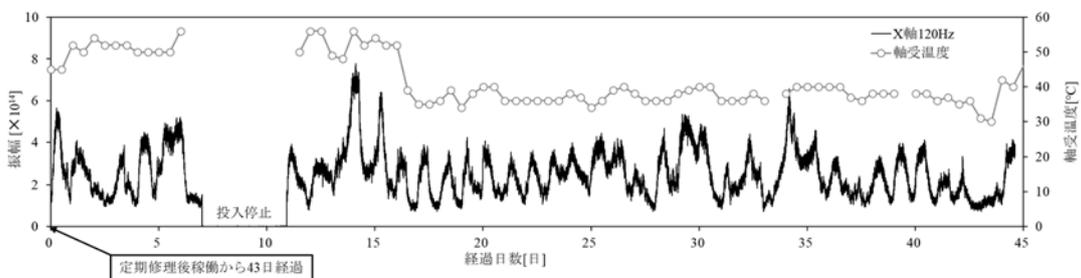


図3.5 振動加速度（主軸に対し横方向成分・周波数120Hz）振幅の推移

②異常度の判定

振動加速度モニタリングの値をもとに異常度の判定を試みる。回転機械の振動データの変動は、環境

条件の変化（外乱）に伴う正常範囲での緩やかな変動の中に瞬時的な値の逸脱（異常）を伴って推移するものと考えられる。そこで和田ら¹⁷⁾の先行研究に従い、外乱の影響を表現できる非線形回帰計算として、ノンパラメトリックなカーネルベースの確率モデルである、ガウス過程回帰（GPR: Gaussian Process Regression）を用いてモニタリングの正常値を推計し、その推計値から一定の幅以上に逸脱する値を異常として検出する。GPRは、式(1)に示すとおり、入力 x を非線形高次元写像 ϕ により高次元化し、そのベクトルに対して線形回帰を計算する方法である。

$$y(x) = w^T \phi(x) \quad (1)$$

但し、 w は回帰係数ベクトルであり、GPRではまず w の事前分布を、次式(2)に示す、平均0、分散 $\sigma^2 I$ の等方性Gaussianと仮定する。

$$w \propto N(0, \sigma^2 I) \quad (2)$$

入力ベクトル x の学習データが M 個与えられているとき、行列 $\Phi = (\phi(x_1) \cdots \phi(x_n))^T$ と、各 x に対応する出力 $y_n = y(x_n)$ を要素にもつベクトル $y = (y_1 \cdots y_n)^T$ を考えると、式(1)より $y = \Phi w$ と表せる。

正常値が殆どである通常の観測値から異常を判定するため、ある時刻 t の観測値を y 、それより1時刻前の観測値と1時刻後の観測値を x としてガウス過程回帰を適用することにより正常値を推計する。さらに、式(3)に示すように、時刻 t の観測値に対して、その平均値との差の絶対値を標準偏差により除すことにより、観測値との乖離の大きさを正規化したものを、異常度と定義する。また、異常度は、標準得点の絶対値をとったものとみなすこともできる。

$$d(x_i) = |x_i - \mu_{GP}(x_i)| / \sigma_{GP}(x_i) \quad (3)$$

但し、 $d(x_i)$: 異常度、 $\mu_{GP}(x_i)$: 平均値、 $\sigma_{GP}(x_i)$: 標準偏差

GPRにより得られた回帰曲線と異常度の推移を図3.6に示す。モニタリングデータを用いることにより、時間とともに変化する環境条件の影響をふまえた上で、正常な推移からの乖離の大きい観測値を検出することが可能となる。

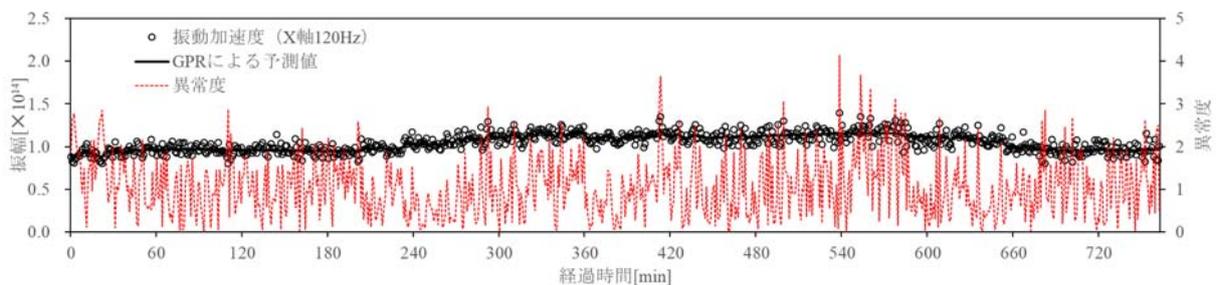


図3.6 ガウス過程回帰を用いた異常度の判定（振動）

異常度は、通常の観測値の幅とみなされる標準偏差に対してある時点の観測値が何倍の変化を起こしているかを示す。つまり、異常度が高いということは正常な推移からのずれが大きく、通常とは異なる状態である可能性が高いことを示している。但し、現実的には、異常度がある値よりも大きい場合には異常と判定できるような閾値を、設備・機器の不具合や故障の状況を確認・整理しながら試行錯誤的に設定する必要がある。ここでは、閾値を設定するには至っていないことに留意する必要がある。

ここで、適切なサンプリング周期について考察する。ガウス過程回帰に適用するデータのサンプリング周期を元の1min間隔から、2min、5min、10min、30min、60minへと変化させた場合に、異常度がどう変化するかを分析した。結果を図3.7に示す。異常度3以上4未満 (<4) および4以上 ($4=<$) の割合については折れ線と右軸により示す。これによると、高サンプリング周期1minのケースから周期が長くなるにつれて異常度1未満の割合が次第に増加した。異常度3以上4未満 (<4) の割合はサンプリング周期が長くなるにつれて変動し、30minおよび60min間隔のデータでは判定されていない。異常度4以上 ($4=<$) はサンプリング周期2min以上で判定されていない。このように異常度はサンプリング周期に影響を受ける

ことから、予防保全に向けては一定頻度以上のサンプリング周期が必要とされることが示された。

(2) バグフィルタろ布の差圧モニタリング結果

(1) 差圧モニタリング結果

3. に示した差圧モニタリングシステムを、産業廃棄物焼却プラントのBFに設置した。BF差圧の推移を図3.8に示す。図中のプロットの多くは1.0~2.0kPa付近で推移しているが、パルスエアによるろ布に付着したダストの払い落としに伴いBF差圧が低下する部分が生じる様子が示されている。

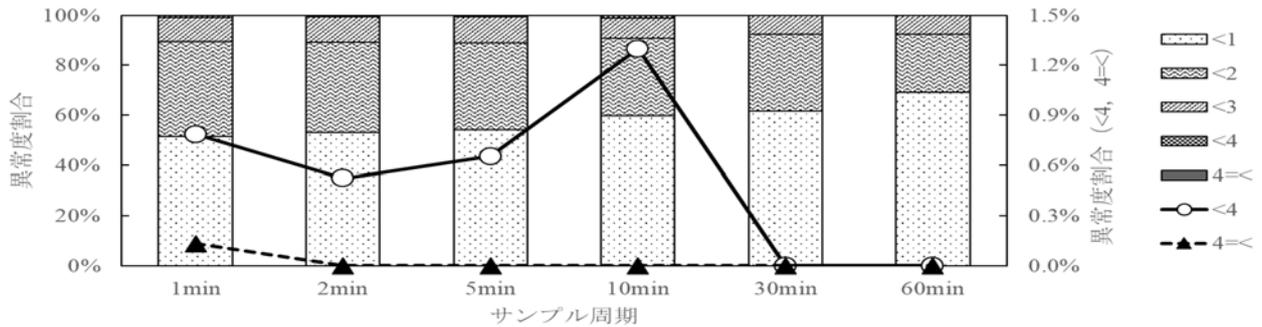


図3.7 各サンプリング周期における振動異常度の割合

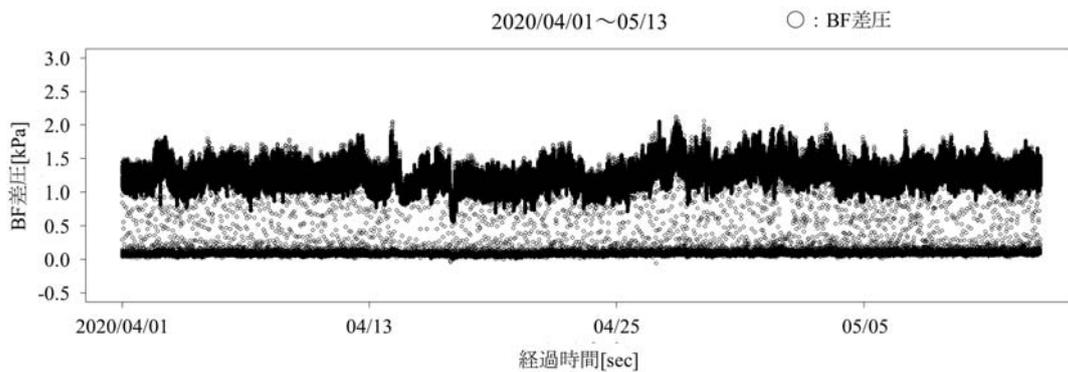


図3.8 BF差圧の推移

(2) 異常度の判定

振動加速度の異常度判定と同様の手法により、差圧計測値に対してガウス過程回帰を適用し、異常度の判定を行った。結果を図3.9に示す。

BFでは、頻繁に断片的な差圧上昇（上昇幅0.5kPa未満）がみられるほか、約77min毎に行われる3.5min間の払い落とし（パルスジェット）の間に差圧低下（低下幅約1.0kPa）が繰り返される。これによりGPRによる推計値が瞬時的に大きく振れる部分があるが、全体として計測値を忠実にトレースできている。次に、差圧モニタリングにおけるサンプリング周期の影響について考察する。サンプリング周期を1secから10sec、1min、10min、60minと変化させた場合のBF差圧異常度の割合を図3.10に示す。サンプリング周期を長くするにつれて異常度1未満（<math><1</math>）の割合が低下し、サンプリング周期10minと60minでは元の1secの際の異常度とは大きく異なった異常度の分布となるBF差圧モニタリングにおいても、予防保全に向けては一定頻度以上のサンプリング周期が必要であると考えられる。

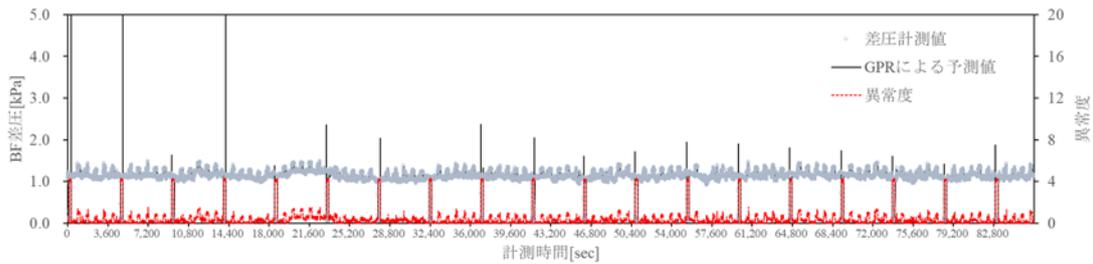


図3.9 ガウス過程回帰を用いた異常度の判定 (BF差圧)

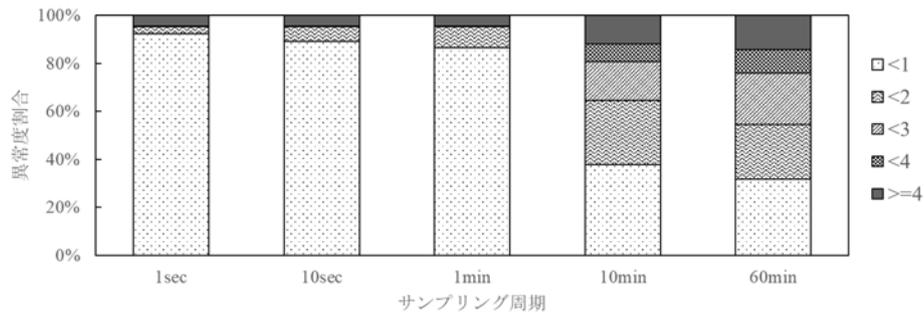


図3.10 各サンプリング周期におけるBF差圧異常度の割合

4-2 予防保全効果の推計結果

(1) 送風機の予防保全効果

通常、時間基準保全で定期的な交換による保全を行っているのに対して、予防保全により、誘引送風機の交換時期の延命化を図る場合の効果を求めた結果を図3.11に示す。予防保全の誘引送風機の維持管理費用はプラントの処理能力により異なるが、例えば比較的小規模の100t/日炉で寿命が0.5%（半年程度）延びることによる年間の維持管理費用削減効果は8.1万円/年であり、1台の耐用期間全体では約111万円となる。一方で振動モニタリング装置の耐用年数を減価償却資産の耐用年数表に記載される測定機器の5年とすると、装置の更新とモバイルルータのデータ通信料を含めたモニタリング費用は耐用期間全体で約95万円であり、誘引送風機単体に適用するメリットを有するといえる。モニタリング費用の約3割をデータ通信料が占めているため、事業所のネットワークを用いる場合、費用対効果はさらに高くなる。また、耐用年数延伸による維持管理費用の削減効果は200t/日炉では100t/日炉の約1.8倍、400t/日炉では約3.3倍となるため、処理能力の大きい施設では費用対効果は高くなる。A/D変換器の入力チャンネルには余裕があり3軸センサをさらに4台接続可能である。通常、誘引送風機周辺には押込送風機や二次送風機が配置されており、追加のセンサ設置費用のみで複数の機器に対して予防保全を図る効果は大きい。

(2) バグフィルタろ布の予防保全効果

BFろ布の耐用年数を延伸することによる維持費用削減効果を推計した結果を図3.12に示す。

予防保全によりろ布交換を現状の4年から半年（定期修理の間の稼働期間2回分）分延伸出来た場合の維持費用削減効果は100t/日炉で約400万円となる。デジタル差圧計やデータロガーなどの測定装置の耐用年数は、振動の場合と同様、減価償却資産の耐用年数に基づき5年とすると4年半での装置の更新はなく、4年半のBFろ布のモニタリング費用は、装置の設置とデータ通信料を含めて全体で約42万円ゆえ、ろ布に適用するメリットは大きいといえる。延伸3カ月（定期修理の間の稼働期間1回分）においても十分な費用対効果を有すると考えられる。さらに処理規模が200t/日炉、400t/日炉へと拡大した際には、同等のモニタリング費用に対して維持管理費用削減効果はそれぞれ約1.6倍、約2.2倍となり、より大きな削減効果を得る。

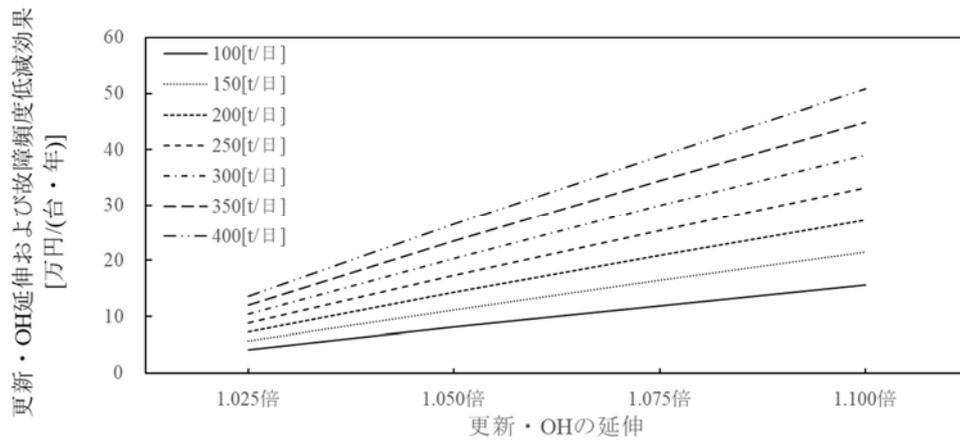


図3.11 誘引送風機の耐用年数延伸による維持管理費用の削減効果

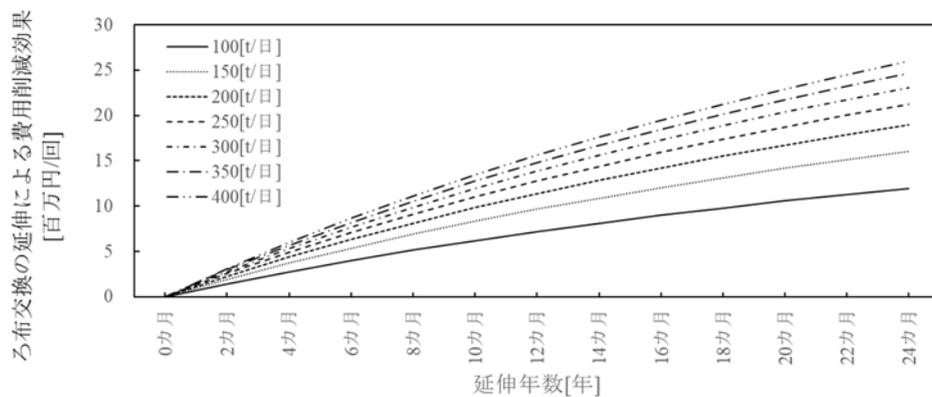


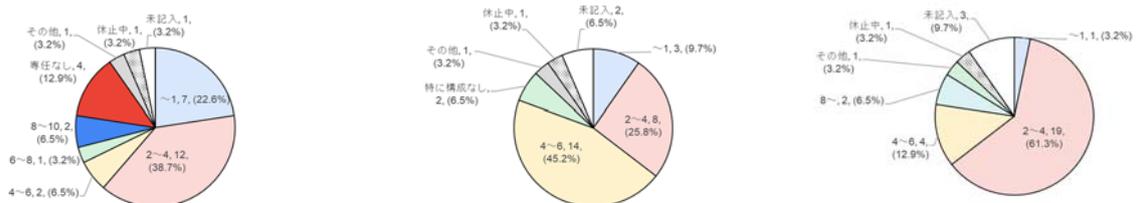
図3.12 BFろ布の耐用年数延伸による維持費用削減効果

4-3 産業廃棄物処理施設の保全ニーズとICTの導入可能性に関する調査結果

(1) 設備保全の現状調査結果

① 人員配置

人員配置に関するアンケート調査結果を図3.13に示す。設備整備担当の人数は、2～4名を配置する事業者が38.7% (12/31) を占めておりもっとも多い。4名未満の人員を配置する事業者では、全体の過半数となる61.3% (19/31) を占めている。選任なしという回答も12.9% (4/31) 確認され、その他の業務と兼任しながら設備整備している実態も明らかとなった。設備の運転操作担当の班構成は、4～6班で運用する事業者が45.2% (14/31) を占めもっとも多い。運転操作担当の班あたりの人員は、2～4名を配置している事業者が61.3% (19/31) を占めている。



設備整備担当の人数

運転操作担当の班構成

運転操作担当の班あたりの人員

図3.13 人員配置

前述した設備担当の人数は、1炉単体のみならず複数の炉 (2～4炉) を保有する事業者からの回答が含

まれている。そのため、全体的な傾向を把握するために、試算に必要なデータが整った回答サンプルを対象に1炉あたりの設備担当人数を試算する。併せて、1炉あたりの運転担当人数を試算した結果を図3.14に示す。

1炉あたりの設備担当の人員数は、中央値・平均値ともに2.0人で、1～5人の範囲の人員が配置されていることが明らかとなった。また、1炉あたりの運転管理担当の人員数は、中央値で3.0人、平均値で3.2人となる。配置人員の幅は大きく1～8人の範囲で配置されていることから、事業者によってプラントの運転方針に差があることが明らかとなった。

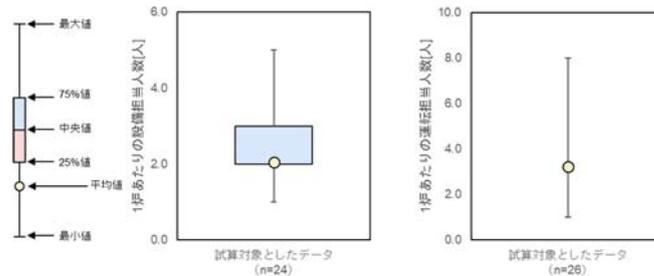


図3.14 1炉あたりの設備担当または運転担当の人数（試算値）

②点検方法

点検方法に関するアンケート調査結果を図3.15に示す。紙を用いた点検を実践する事業者が87.1% (27/31) を占めている。タブレットを用いた点検を実践する事業者は3.2% (1/31) に留まる。1日の点検回数は「0～1回」が38.7% (12/31) で、「2～4回」が35.5% (11/31) となり、これらの4回未満の点検回数を採用する事業者の総和は全体の74.2% (23/31) に達する。点検時における人員数は、1名が61.3% (19/31) で2名が25.8% (8/31) となり、2名以内での点検実施を採用する事業者の総和は全体の87 (27/31) に達する。

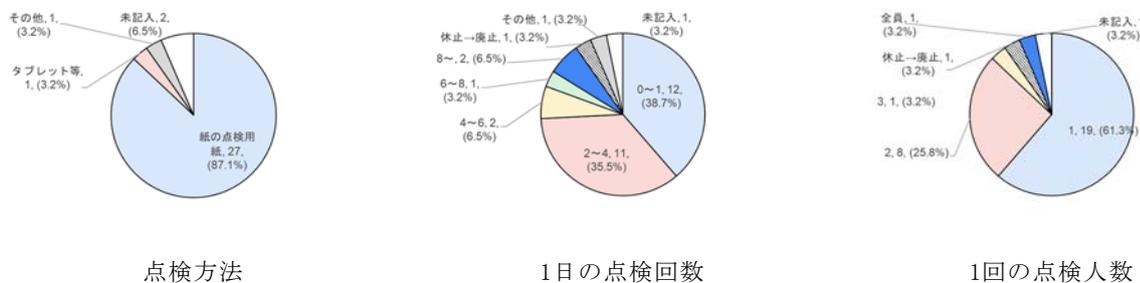


図3.15 点検方法

③記録方法

記録方法に関するアンケート調査結果を図3.16に示す。

点検結果の管理方法で、ファイルに綴じる事業者が62.9% (22/31) を占めている。点検記録をExcelに転記して記録保存する事業者は31.4% (11/31) である。

点検記録の異常判定の方法は、「決まった範囲からの逸脱」で異常判定する事業者は46.4% (26/31) で、「過去の測定値からの変化」を確認し異常判定する事業者は37.5% (21/31) を占めている。また、「トラブル発生後に対応」する事業者も一定数：12.5% (7/31) 存在することも確認できた。

点検業務におけるデジタル化（タブレットによる点検・トラブル対応の見える化システム）の認知度を確認すると、35.5% (11/31) が「ある程度知っている」と回答した。しかし、「聞いたことはあるがよく知らない」が35.5% (11/31)、「聞いたことがない」が9.7% (3/31) とその合計は45.2% (14/31) となり、点検業務におけるタブレット活用の認知度が低いことが明らかとなった。

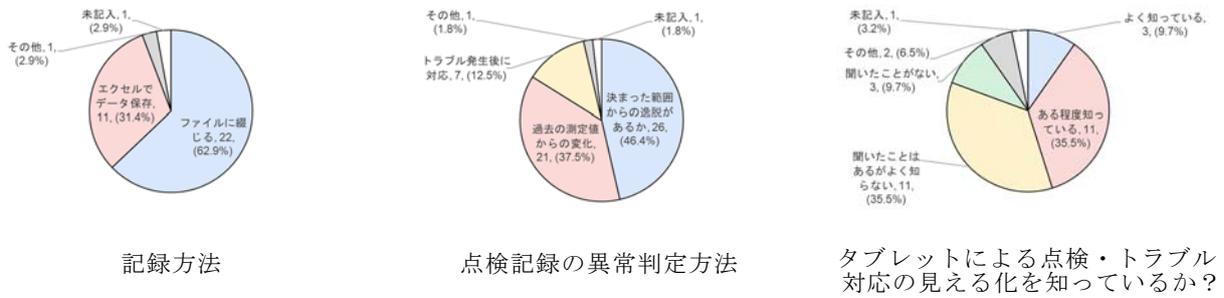


図3.16 記録方法

(2) 故障の発生状況

故障発生状況の把握に関するアンケート調査結果を図3.17に示す。故障個所の把握方法については、「日常点検」により故障個所を把握する事業者が38.4% (28/73) で、「定期点検」により故障個所を把握する事業者が31.5% (23/73) を占める。その合計は69.9 (51/73) となり現場の経験と技術によって故障を事前に把握していることがわかる。「中央制御室での監視」からの故障個所把握も23.3% (17/73) あることから、設備保全活動の現場と中央監視による運転支援の両輪で故障個所の把握に努めていることが示唆された。また、「偶然気づく」との回答が4.1% (3/73) 確認された。処理を停止した原因箇所は、焼却施設：27.0% (20/74)、ごみ・受入・供給設備：16.2% (12/31)、その他：13.5% (10/74)、焼却ガス冷却設備と排ガス処理設備ともに：12.2% (9/31)、灰出設備：8.1% (6/74)、通風設備：5.4% (4/74)、余熱利用設備と給水設備ともに：2.7% (2/74) の順となる。3炉、4炉はサンプル数が少なく判断しづらいが炉数構成による差によって構成割合の順位は大きく変化しないものと考えられる。

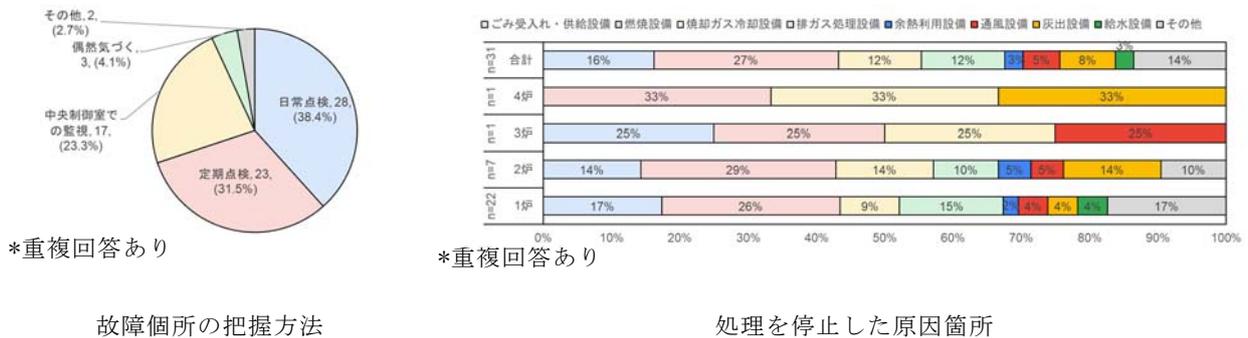


図3.17 故障発生状況の把握

故障の発生状況に関するアンケート調査結果を図3.18に示す。

過去5年間に計画外で処理を停止した回数は、1~5回の事業者が29.0% (9/31) ともっとも多くを占める。次いで、10~15回：22.6% (7/31)、5~10回：12.9% (4/31)、0回：9.7% (3/31)、15回以上：6.5% (2/31)、未記入：16.1% (5/31)、その他：3.2% (1/31) の順となる。

過去5年間に計画外で処理を停止した総停止日数は、10~20日と30日以上事業者がともに22.6% (7/31) ともっとも多くを占める。次いで、10日未満と未記入：16.1% (5/31)、20~30日とその他：6.5% (2/31) の順となる。

これらの回答データをもとに、過去5年間に1回あたりの停止日数を試算した結果を図3.19に示す。1回あたり5日未満が32.3% (10/31) でもっとも頻度が高い。次いで、回答データからの試算不能：25.8 (7/31)、1日未満：12.9% (4/31)、15日以上：9.7% (3/31)、0日と5~10日と10~15日：6.5% (2/31) の順となる。累積相対度数で確認すると、1回あたりの停止日数は、5日未満で全体に占める割合が51.6%を占め、計画外停止したとしても再稼働までに比較的時間を要していないことが明らかとなった。

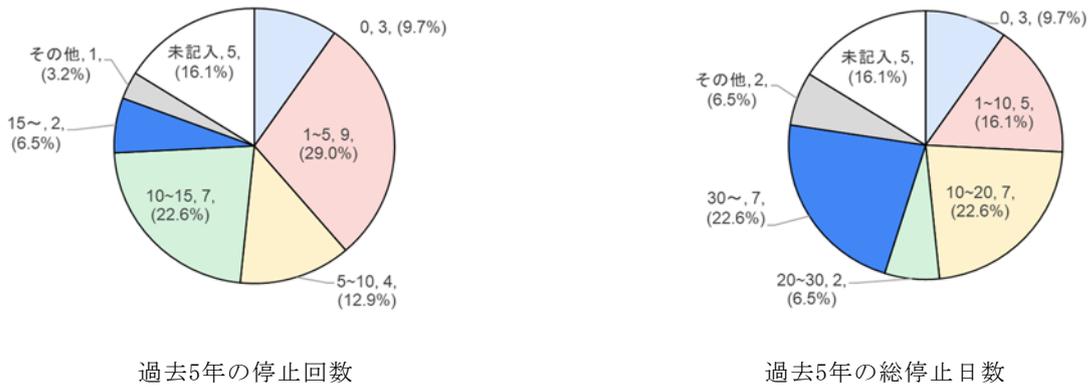


図3.18 故障の発生状況

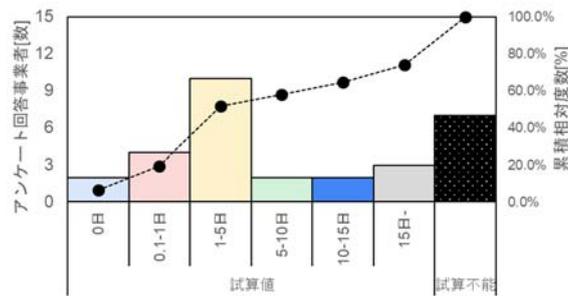


図3.19 過去5年における1回当たりの停止日数（試算値）

(3) ICT・AIの導入意向

ICT・AI導入意向に関するアンケート調査結果を図3.20に示す。

早期発見で突発的な停止を防げた故障については、「無い」と回答した事業者が58.1%（18/31）と過半数を占める。「有る」と答えた事業者は35.5%（11/31）で、「その他」と答えた事業者は6.5%（2/31）という回答を得た。

プラント設備を未停止で機器異常を予兆できるシステムの導入意向については、「価格によっては欲しい」と回答した事業者が61.3%（19/31）と過半数を占める。「有る」と答えた事業者は35.5%（11/31）で、「その他」と答えた事業者は6.5%（2/31）という回答を得た。

ICT・AIに期待する効果については、「緊急時の作業員負荷減少や危険の回避」と回答した事業者が25.8%（24/93）、「操業ロスの削減」と回答した事業者が24.7%（23/93）、「機器の延命」と回答した事業者が19.4%（18/93）で、これら合計である69.9%（65/93）が突発故障の減少に期待していることが明らかとなった。さらに、ストックマネジメントの考え方に通ずる「過剰保全を回避した、効率的で計画的な保全によるコスト削減」と回答した事業者が18.3%（17/93）、「機器保全に関する熟知された知見の継承」と回答した事業者が11.8%（11/93）という回答を得た。

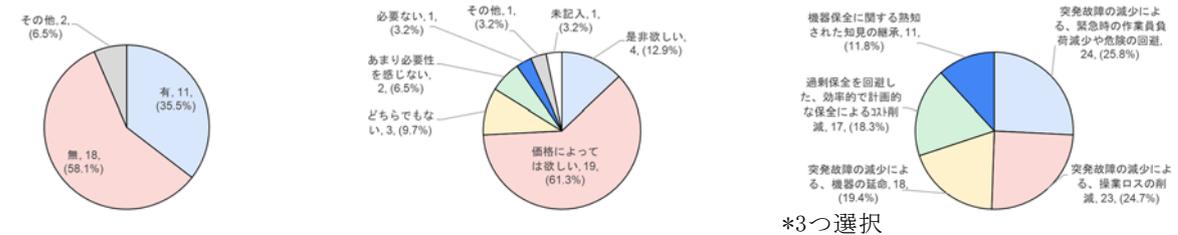


図3.20 ICT・AI導入意向

5. 研究目標の達成状況

サブテーマ3では、掲げられた研究目標に対して、振動加速度で500kHz（研究目標50kHzの10倍）、バグフィルタ差圧で記録間隔1s（研究目標10sの10分の1）と、当初の研究目標を上回る高サンプリングレートでの実証を達成した。さらに、現場で取得されたデータを汎用のモバイルルータと商用クラウドストレージを活用して遠隔で安定的にデータ取得するシステムとして運用することができ、社会実装を考慮した、さらに高度なモニタリングシステムの構築、実証を達成することができた。また、ICT・AI導入による維持・管理の高度化の効果について、維持管理費用削減効果を推計して導入効果が高いことを定量的に示した（成果を査読付き論文にて発表）。さらに産業廃棄物処理業者に対するWEBアンケートを実施して、点検回数・人員ともに限られた労力で取り組んでいる実態や異常予兆のシステムなどIOT・AIに期待する意向を把握することができた。以上により、研究目標を十分に達成している。

6. 引用文献

- 1) 環境省（2021）廃棄物処理施設長寿命化計画策定の手引き（ごみ焼却施設編）令和3年3月改訂.
- 2) 日本プラントメンテナンス協会（編）（1990）設備診断技術，日本能率協会，216pp.
- 3) 日本環境衛生センター（2014）廃棄物処理施設保守・点検の実際—ごみ焼却編．330pp.
- 4) 山内真吾（1988）送風機・圧縮機の故障診断と予防保全，ターボ機械，16（12），684-691.
- 5) 山田崇雄・中尾彰文・吉田登（2021）産業廃棄物焼却施設におけるエネルギー利用及びICT・AIの導入意向に関する調査分析日本地域学会 第58回（2021年）年次大会学術発表論文集.
- 6) 久喜宮代衛生組合（2012）八甫清掃センター基幹的設備改良事業に係る費用対効果分析結果報告書.
- 7) 十勝環境複合事務組合（2017）一般廃棄物中間処理施設整備検討報告書.
- 8) 環境省（2005）廃棄物処理施設建設工事等の入札・契約の手引き.
- 9) 熊取町（2020）熊取町環境センター長寿命化総合計画.
- 10) 犬山市（2021）犬山市一般廃棄物処理施設長寿命化総合計画（都市美化センター）.
- 11) 尾張東部衛生組合（2018）張東部衛生組合晴丘センターごみ焼却施設長寿命化総合計画書.
- 12) 札幌市（2018）札幌市事業評価調書 バグフィルターろ布交換事業費.
- 13) 環境省（2017）産業廃棄物処理業の振興方策に関する提言.
- 14) 石油コンビナート等災害防止3省連絡会議（経済産業省，厚生労働省，総務省消防庁）（2020）プラントにおける先進的AI事例集 ～AIプロジェクトの成果実現と課題突破の実践例～.
- 15) 公益社団法人産業廃棄物処理事業振興財団，「さんばいくん」産業廃棄物処理業者検索，（<http://www2.sanpainet.or.jp/zyohou/index.php>）.
- 16) 環境省『災害廃棄物対策情報サイト 各地域ブロックにおける取組』，（http://kouikishori.env.go.jp/action/regional_blocks/）.
- 17) 和田俊和・尾崎晋作・前田俊二・渋谷久恵（2013）Gaussian Process Regressionに基づく時系列データの異常モニタリング，電子情報通信学会論文誌D，J96-D（12），3068-3078.

Ⅱ-4 情報通信技術の活用による廃棄物処理事業における生産性の向上と適正処理推進のための安全管理の高度化

立命館大学

理工学部

テクノロジーマネジメント研究科

橋本 征二

児玉 耕太

<研究協力者>

立命館大学

理工学研究科

岡本 宗一郎、上鶴 喜貴（令和1年度）

湯川 力（令和3年度）

テクノロジーマネジメント研究科

橋口 伸樹、曹 剣飛（令和1年度）

みずほりサーチ&テクノロジー株式会社

サステナビリティコンサルティング第2部

秋山 浩之

環境エネルギー第1部（当時）

不破 敦（令和1年度）

森口 健生（令和1年度）

第6事業部第6部

西野 京一郎

〔要旨〕

産業廃棄物の処理業者において行われている事務作業のうち、負荷が高いと考えられた紙マニフェストの入力・確認作業を対象として、業務効率化の検討を行った。AI-OCR（Artificial Intelligence - Optical Character Reader）によって入力データを作成し、RPA（Robotic Process Automation）を用いて基幹業務システムへ転記する作業を自動化した場合の、紙マニフェストの入力・確認時間の変化を計測したところ、当該作業時間の削減には、AI-OCRの読取精度の向上や、住所表記の統一化を含む入力内容の詳細なプログラム化を実現する必要性が示唆された。一方、デジタル化された情報を用いて排出事業者向けレポートを作成する時間は、RPAにより大幅に削減できることが示された。

また、産業廃棄物の処理施設及び収集運搬の作業員（それぞれ82人日、57人日）を対象として、熱中症の危険性や身体負荷（労働強度）の実態を把握したところ、心拍数が熱中症の危険性の判断基準を超えるケースや労働強度が危険と判断されるケースがいくつか確認された。また、年齢の高い作業員、収集運搬の作業員のほうが危険性が高まる傾向が見られたが、個人差も大きかった。心拍数を用いて熱中症の危険性や労働強度を確認することで、個人個人の身体的な差異を踏まえた上で、第三者からの注意喚起・警告等が可能となり、廃棄物処理施設及び収集運搬における安全管理を高度化できることが示された。

1. 研究開発目的

産業廃棄物処理業者の事務作業は多岐にわたり、その効率化が課題となっている。なかでも、紙マニフェストの入力は多くの時間を要する作業である。電子マニフェストの普及率は2022年3月末現在で71.7%に上り¹⁾、紙マニフェストの返送作業の労力や返送の郵送作業の削減、紛失の恐れがなくなることによる情報管理の簡便化といった効果が具体的に挙げられている²⁾ものの、残りは電子化されておらず、電子マニフェストの導入がさらに進んだとしても直ちに紙マニフェストの入力作業がなくなる状況にはない。そうした帳票入力作業の効率化・自動化の方法として、AI-OCR（Artificial Intelligence - Optical Character Reader）により紙マニフェストの情報をデジタル化し、RPA（Robotic Process Automation）を用いて基幹業務システムに情報を転記することが考えられる。AI-OCRは、従来のOCRに比べて手書き文字の認識率が高く、読取文字のデータ項目への割り当てを自動で行うものである。また、RPAは、人間がコンピューター上で行う定型作業を自動化するソフトウェアで、社内システム、スプレッ

ドシートやメールなどでの操作を指定・登録し、プログラミング言語による開発よりも導入が容易である。こうしたAI-OCRとRPAを用いた帳票入力作業の効率化・自動化の検証は、他の分野では報告されているものの³⁾、紙マニフェストに関してはない。そこで、本研究では、複数ある定型紙マニフェストの使用状況の確認、AI-OCRによる入力情報の読取正答率の把握を行った上で、AI-OCRとRPAを試験的に導入し、紙マニフェストの入力に加えて、入力結果の確認作業、排出事業者向けレポートの作成に要する時間を計測し、AI-OCRとRPAの導入に関する費用対効果を検討した。

令和2年現在、廃棄物処理業における労働災害の度数率（100万延べ実労働時間当たりの労働災害による死傷者数：災害発生の頻度を表す）は全産業平均の約3.5倍、強度率（1000延べ実労働時間当たりの延べ労働損失日数：災害の重さを表す）は全産業平均の約5.3倍と非常に高く、具体的には、「墜落・転落」「挟まれ・巻き込まれ」「転倒」などの事故が多く報告されている⁴⁾。さらに、夏場における熱中症も多く報告されており⁵⁾、地球温暖化による気温上昇に伴い熱中症の危険性は今後も増加すると考えられる。廃棄物処理業は労働集約型で危険な作業が多く、製造業や建設業における取組みが参考になる。こうした業界においてはこれまで、工程の無人化や省力化、工程や設備の異常検知や予知、作業員の生体や行動の監視とリスク解析、教育訓練等に情報通信技術を活用し、安全管理の高度化がなされるようになってきており⁶⁾⁷⁾、廃棄物処理業界においても同様の取組みが求められる。本研究では、スマートウェアを活用して作業員の生体情報を計測するシステムを廃棄物処理施設及び廃棄物収集運搬に導入し、熱中症の危険性や労働強度（身体負荷）の実態を把握した。また、この結果も踏まえ、廃棄物処理業における情報通信技術の導入による安全管理の高度化の可能性について検討した。

2. 研究目標

紙マニフェスト情報の廃棄物処理業者向けパッケージソフトへの入力作業を自動化するプロトタイプシステムを、RPA及びAI-OCRソフトを用いて導入し、紙マニフェストの入力・確認時間の削減効果を計測する。このシステムにより効果が得られる条件を抽出し、廃棄物処理業者のデジタル化方策の一つである当該システムの有効性と適用範囲を示す。また、スマートウェアを活用して作業員の生体情報を計測するプロトタイプシステムを廃棄物の処理及び収集運搬プロセスに導入し、40人日程度の作業員を対象に熱中症・ヒートショックの危険性や労働強度の実態を把握する。これにより、作業員の身体的な差異を踏まえた上で、第三者からの注意喚起・警告などが可能になる当該システムの有効性を示す。

3. 研究開発内容

3. 1 廃棄物処理事業における生産性の向上

(1) 事務処理作業の現状分析

産業廃棄物処理業者の事務作業は多岐にわたり、その効率化が課題となっている。なかでも、紙マニフェストの入力や入力結果の確認作業は多くの時間を要している。さらに、事業者間で独自の情報を紙マニフェストに記入して運用されている場合もあり、記入項目が限定された電子マニフェストの導入がさらに進んだとしても直ちに紙マニフェストの入力作業がなくなる状況にはない。表4.1に示す神奈川県横浜市（A社）、京都府京都市（B社）の産業廃棄物処理業者を対象に、1件当たりの紙マニフェストの入力・確認時間や、入力・確認対象となる紙マニフェストの種類や印字状況を計測した。B社は、受入れ時の計量を行う廃棄物に対して、バーコードを用いた入力システムを導入している。

(2) AI-OCRによる入力・確認データの作成

AIを活用したOCRで市場シェアが64%（2020年12月28日時点）を占める、AI inside社のAI-OCR（DX Suite®）で紙マニフェストの情報を読取り、その正答率を計測した。DX Suite®は、帳票の読取範囲や読取対象の特性（文字やチェックボックス等の種類、文字の色など）、読取結果のデータ属性を、定義したデータ項目ごとに設定し、読取精度の向上や適正化を図ることができる。正答率を高めるため、対象となる紙マニフェストを3回に分けて、1回ごとに不正解の原因を検討しながら設定変更を行った。正答率の確認対象は表4.2のとおりである。

紙マニフェストの画像データは、各社が有する複合機のスキャン機能を用いて作成した。

表4.1 対象企業の紙マニフェストの入力・確認作業

	A社（神奈川県横浜市）	B社（京都府京都市）
事業内容	廃プラスチック類、木くず等、中間処理（破碎、圧縮、溶融） 製紙チップ・燃料チップ、フラフ燃料の製造	収集運搬、PCB収集運搬、中間処理（選別・破碎処理、焼却処理）、RPF製造、マテリアルリサイクル、炭化リサイクル、医療廃棄物処理、埋立処分、アスベスト関連処理
平均マニフェスト受付件数	269枚／日 ※実証実験時 （年間約7万件）	300枚／日程度 （年間13万件的取扱件数。うち紙マニフェストは94,000件）
基幹業務システムへの入力方法	手作業での入力 交付番号のバーコード入力はなし	（計量あり） 交付番号をバーコードで読取り、システムに入力。バーコードが付与されているのは全体の7割程度。その他は手作業で入力する情報とそれをもとにデータベースがから反映される情報がある。 （計量なし） 手作業での入力。感染性廃棄物が代表的な廃棄物。
基幹業務システム	環境将軍R®	計量プロステージ（Kiwami）®
入力内容のチェック	2人1組となって読み上げで確認	2人1組となって読み上げで確認

表4.2 正答率の確認対象

	A社		B社	
	種類		種類	
第1回	種類	建設廃棄物、産業廃棄物、電子マニフェスト、一般廃棄物	種類	医療用、建設用、積替用、直行用、電子マニフェスト
	枚数	47枚	枚数	16枚
	読取項目数	1,176	読取項目数	151
第2回	種類	産業廃棄物、電子マニフェスト、一般廃棄物	種類	医療用、建設用、積替用、直行用、電子マニフェスト
	枚数	20枚	枚数	18枚
	読取項目数	116	読取項目数	165
第3回	種類	建設廃棄物（建設系）、建設廃棄物（建設関連）、産業廃棄物、電子マニフェスト	種類	医療用、建設用、積替用、直行用、電子マニフェスト
	枚数	28枚	枚数	41枚
	読取項目数	161	読取項目数	382
合計	枚数	95枚	枚数	75枚
	読取項目数	1,453	読取項目数	698

（3）RPA/VBAによる入力・確認作業の効率化

RPA（Lupa®）及びVBA（Visual Basic for Applications）を用いて自動化プログラムを作成し、RPA/VBAを用いた場合と用いない場合の所要時間を計測した。対象作業や入力・確認項目、所要時間計測件数、対象作業の業務フローは表4.3のとおりである。なお、A社の対象項目には、業者コード等を入力することで、基幹情報システムからデータを読み出す項目も含まれている。

表4.3 入力・確認作業の効率化

	A社	B社
対象作業	基幹業務システムへの入力	基幹業務システムへの入力結果の読み合わせによる確認
対象項目	受入番号、排出事業者（事業者名）、業者コード、収集運搬事業者、運搬業者コード、現場住所、現場名称、現場コード、チェックコード（C/D）、交付番号、取引先コード、種類、マニフェストの種類（電子／紙）、フリガナ、開始期間	収運事業者（名称）、事業場名、交付番号（番号）、交付番号（日付）、品目（廃棄物種類）、品目（処理方法）、備考（社内用）、数量、単位
所要時間 計測件数	47件	44件
対象作業の 業務フロー	複合機で紙マニフェストを読撮り→スキャン画像をRPAでDX suiteにアップロード→DX suiteで読取り→DX suiteで読取り結果を修正→csv出力→環境將軍Rへの入力	複合機で紙マニフェストを読撮り→スキャン画像をRPAでDX suiteにアップロード→DX suiteで読取り→読取り結果のcsv出力→計量プレステージからのCSV出力→読取り結果と計量プレステージとの突合による「エラー候補」の出力→「エラー候補」の確認→「エラー」帳票の修正

（注）「対象作業の業務フロー」の下線部は手作業。

（4）RPA/VBAによる排出事業者向けレポートの作成

静脈系サプライチェーンでは、適正処理結果に加えて処理・再資源化の質に関する情報を排出事業者等に出力することも考えられる。そこで、既に基幹業務システムに蓄積された受入・処理情報を用いて、排出事業者向けに廃棄物排出量やCO₂排出量をまとめたレポートを、電子メールで自動送付する作業について自動化プログラムを作成し、A社で所要時間を計測した。自動化プログラムは図4.3のとおりRPA（Lupa®）及びVBAを用いて作成し、所要時間は30社の1か月分のマニフェストを、10社ずつに分けて計3回計測した。廃棄物排出量は、排出事業者別廃棄物種類別（廃プラスチック、木くず、繊維くず）に基幹業務システムから出力し、CO₂排出量は廃棄物種類別の原単位をレポートのひな型とともに用意し、廃棄物排出量を乗じて計算した。

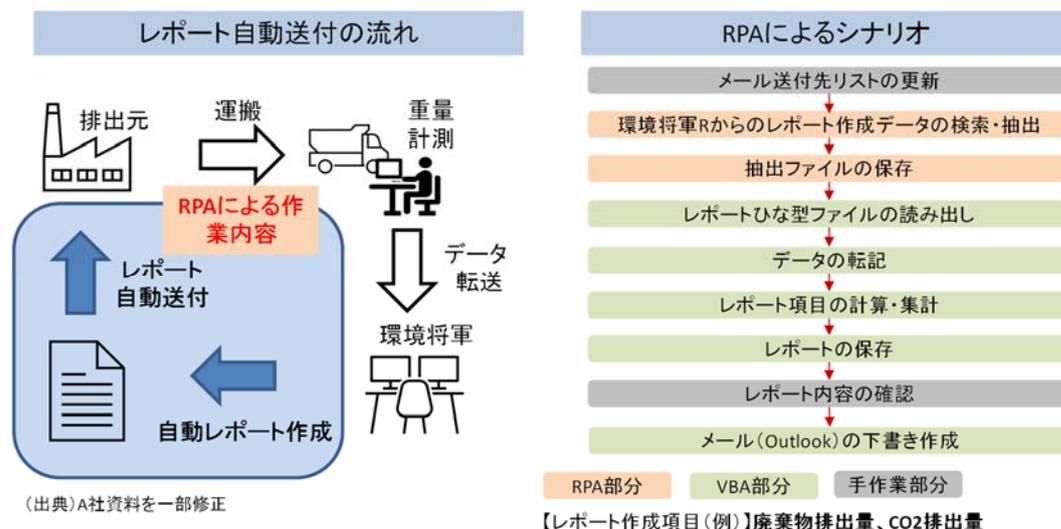


図4.3 レポート自動送付の流れと自動化作業

3. 2 適正処理推進のための安全管理の高度化

（1）計測システム

スマートウェアを用いて作業員の生体情報（心拍数、体表温度）を計測するシステム⁸⁾を用いた。本計

測システムでは、作業者が着用するスマートウェア（COCOMI®）と計測機器（WHS-1またはWHS-2）にて生体情報を取得する。WHS-1を使用する場合は、計測機器内にデータが蓄積され、WHS-2を使用する場合は、作業者が携帯する補助通信装置（CC2650-STK）にデータが無線送信される。補助通信装置に一時的に蓄積されたデータは、作業エリアに配置したアクセスポイント（Raspberry pi Zero W）に転送され、アクセスポイントに転送されたデータはWi-Fiアクセスポイントを介して、PCサーバまで無線送信される。WHS-2を使用する場合の計測システムの全体構成を、それぞれ図4.4、図4.5に示す。

また、周辺環境情報を計測するために、暑さ指数計（AD-5696）、温度計（RC-5+）、温度・湿度計（Watch Logger KT-255F）を使用した。



図4.4 計測システム（WHS-1使用時）

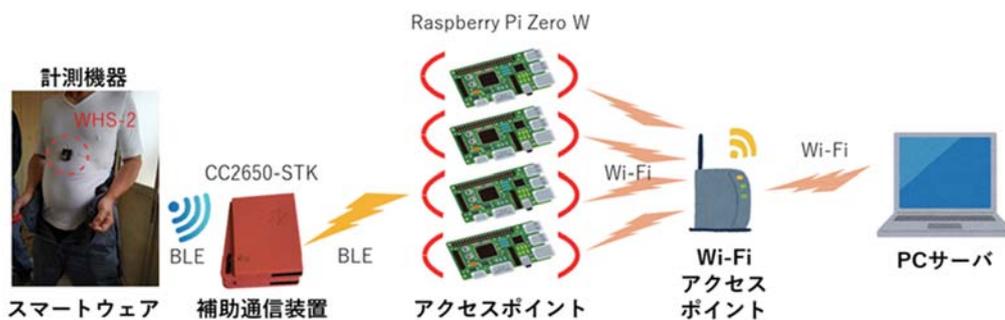


図4.5 計測システム（WHS-2使用時）

表4.4 実態調査の概要

場所	期間	被験者数	被験者年齢	対象業務
京都府京都市 (処理施設)	2019年9月4~6日	16人日	20、23、 24、57、 58、63	医療系廃棄物の積み下ろし 混合廃棄物の手選別
	2020年8月24~26日	15人日	27、28、 29、31、62	医療系廃棄物の積み下ろし 混合廃棄物の手選別 車両誘導 焼却処理施設のメンテナンス
滋賀県湖南市 (処理施設)	2021年7月6~8日	18人日	23、25、	混合廃棄物の分別
	2021年8月3~5日	18人日	29、35、	車両誘導・荷下ろし
	2021年8月31日~9月2日	18人日	37、39	重機による破碎作業
愛知県豊橋市 (収集運搬)	2020年1月27~29日	12人日	29、40、 48、63	事業系一般廃棄物の収集運搬
滋賀県草津市 (収集運搬)	2020年10月14~16日	15人日	19、26、 29、35、56	家庭系一般廃棄物の収集運搬
	2021年7月14~16日	9人日	22、42、61	
滋賀県近江八幡市 (収集運搬)	2021年8月24~26日	15人日	25、36、 41、49、63	廃棄物の収集運搬
	2021年9月7~9日	12人日	36、41、 49、63	

(2) 実態調査の概要

京都府京都市・滋賀県湖南市の廃棄物処理施設の作業員、愛知県豊橋市・滋賀県草津市・滋賀県近江八幡市の廃棄物収集運搬の作業員を対象とした実態調査を複数回実施し、各種データの計測を行った。すべての実態調査で作業員の心拍数と体表温度、気温、湿度を計測し、廃棄物処理施設での実態調査では作業エリアの暑さ指数（WBGT）も計測した。各実態調査の概要を表4.4に示す。

京都府京都市・滋賀県湖南市の廃棄物処理施設での実態調査では、混合廃棄物の手選別作業等が対象業務である。作業エリアは半屋内であり開放環境のため、空調設備の導入が難しく、夏場においては熱中症の危険性がある。被験者数は計85人日である。愛知県豊橋市・滋賀県草津市・滋賀県近江八幡市での実態調査では、廃棄物の収集運搬作業（収集運搬車への廃棄物の積み込み、収集運搬車の運転）が対象業務である。夏場は直射日光にもさらされる屋外での業務であり、熱中症の危険性がある。被験者数は計63人日である。作業員の年齢も20代から60代までできるだけ幅広く対象とした。

いずれの実態調査でも作業員ごとにデバイスIDを振り分け、一つのデバイスIDに対して一人の作業員を割り当てた。なお、京都府京都市の廃棄物処理施設、愛知県豊橋市の廃棄物収集運搬業務を対象とした実態調査ではWHS-2を、それ以外の実態調査ではWHS-1を使用し、各種情報を計測した。

(3) 熱中症の危険性の判定

WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) 値と心拍数を用いて熱中症の危険性を判定した。WBGT値については、表4.5に示すように4段階⁹⁾で熱中症の危険性を判定した。また、心拍数については、表4.6に示すように国際標準化機構（ISO9886）¹⁰⁾と米国産業衛生専門官会議（ACGIH）¹¹⁾の基準に基づき熱中症の危険性を判定した。後述する結果と考察では、主に持続心拍数（180-年齢）を指標として用いる。

表4.5 WBGT値による熱中症の危険性の判定

判定（WBGT値）	注意事項
危険（31℃以上）	高齢者においては、安静状態でも発生する危険性が高い。 外出はなるべく避け、涼しい室内に移動する。
厳重警戒（28～31℃）	外出時は炎天下を避け、室内では室温の上昇に注意する。
警戒（25～28℃）	運動や激しい作業をする際は定期的に十分に休息を取る。
注意（25℃未満）	一般に危険性は少ないが激しい運動や重労働時には派生する危険性がある。

表4.6 心拍数による熱中症の危険性の判定

機関	記載内容
国際標準化機構 (ISO9886)	・作業中の1分間の最大心拍数は（185-0.65×年齢） ・持続心拍数は（180-年齢） をそれぞれ超えてはならない。
米国産業衛生 専門官会議 (ACGIH)	・心拍数が数分間継続して（180-年齢）を超える場合 ・作業強度がピークに達した後1分間経過後の心拍数が120以下に戻らない場合 暑熱曝露を中止するよう勧告。

表4.7 労働強度の判定

労働強度（%HRR）	判定内容
30%HRR未満	8時間未満持続可能
30%HRR以上	身体的な負荷が高い
40%HRR以上	30～60分間持続する場合は危険

(4) 労働強度の判定

心拍数を用いて労働強度を判定した。労働強度（%HRR）は下式¹²⁾を用いて算出される。

$$\%HRR = (HR \text{ working} - HR \text{ resting}) / (HR \text{ maximum} - HR \text{ resting}) \times 100$$

$$HR \text{ maximum} = (208 - 0.7 \times \text{年齢})$$

ここで、%HRRは労働強度(%）、HR workingは作業時心拍数(bpm)、HR restingは安静時心拍数(bpm)、HR maximumは年齢によって推定される最大心拍数(bpm)である。労働強度の算出の際、作業時心拍数と安静時心拍数は作業員ごとに計測される実測値を、年齢によって推定される最大心拍数は上記2つ目の式から算出される推定値をそれぞれ用いた。安静時心拍数は本来であれば、十分な休息時間をとって計測することが望ましいが、本研究で実施した実態調査では十分な休息時間をとって計測することができなかつたため、作業員ごとに取得した心拍数データのうち、下位5%の値の平均値を各作業員の安静時心拍数として用いた。なお、下位5%の心拍数は、休憩時間等の一定の時間帯に集中している場合が多く、その標準偏差は数拍程度であった。

上式のように、労働強度(%HRR)すなわち作業員の身体的な負荷は、予備心拍数(HRR: Heart Rate Reserve)に対する割合で表され、その割合が高ければ高いほど、作業員の身体的な負荷が高いことを意味する。労働強度の判定として、本研究では表4.7¹³⁾を用いた。

4. 結果及び考察

4. 1 廃棄物処理事業における生産性の向上

(1) 事務処理作業の現状分析

1件当たりの紙マニフェストの入力、確認・修正時間を表4.8に示す。A社は計量結果の自動入力は行われているものの、表4.3に示すように入力項目が多いことが、入力や確認・修正に時間がかかっている理由と考えられる。

また、図4.6～図4.9に示すように、1日当たり5件以上の様式を定型マニフェストと定義すると、定型マニフェストの割合はA社、B社とも約90%であった。定型マニフェスト(備考を除く)の印字状況を見ると、全てが印字の割合はA社で約70%、B社でほぼ100%であった。なお、B社は備考欄に手書き文字が多かった。

表4.8 紙マニフェストの入力・確認時間

	A社	B社
計測日	2019年10月11日	2021年10月8日・15日
計測件数	269件	154件
1件当たり入力時間	51.5秒/件	18.4秒/件
1件当たり確認・修正時間	34.1秒/件	14.0秒/件

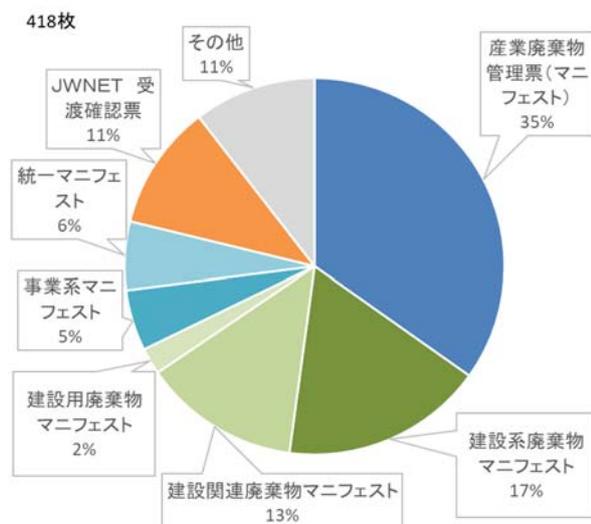


図4.6 マニフェストの種類 (A社)

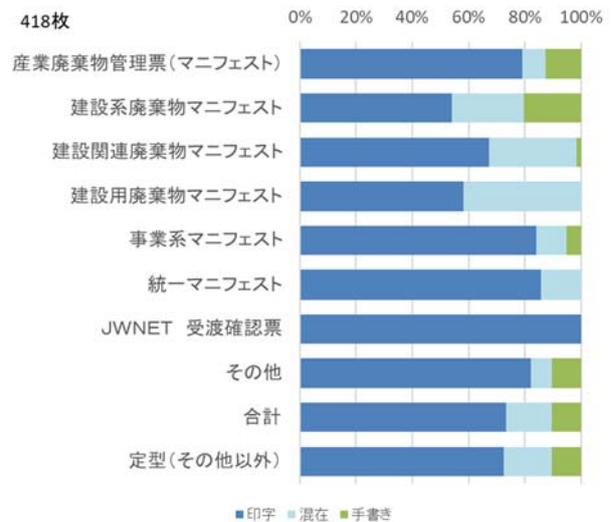


図4.7 マニフェストの印字状況 (A社)

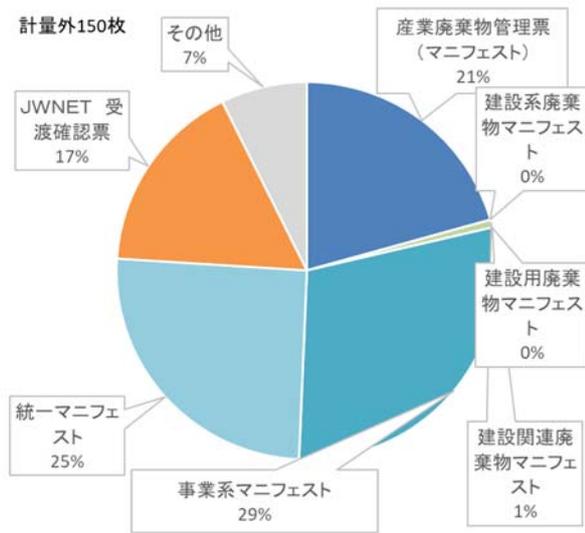


図4.8 マニフェストの種類 (B社)

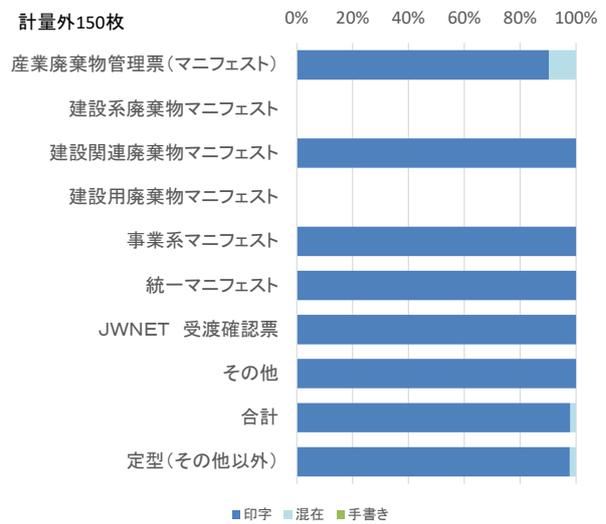


図4.9 マニフェストの印字状況 (B社)

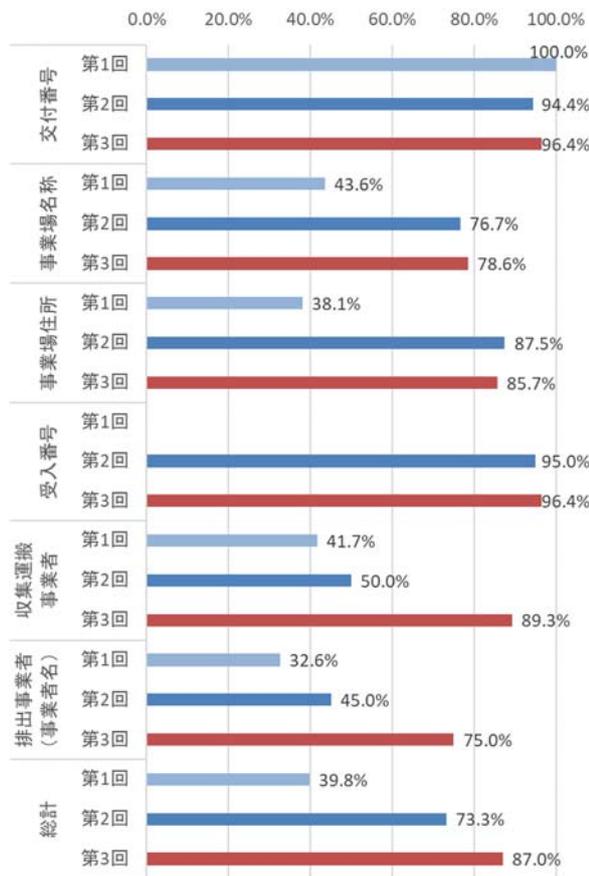


図4.10 項目別正答率 (A社)

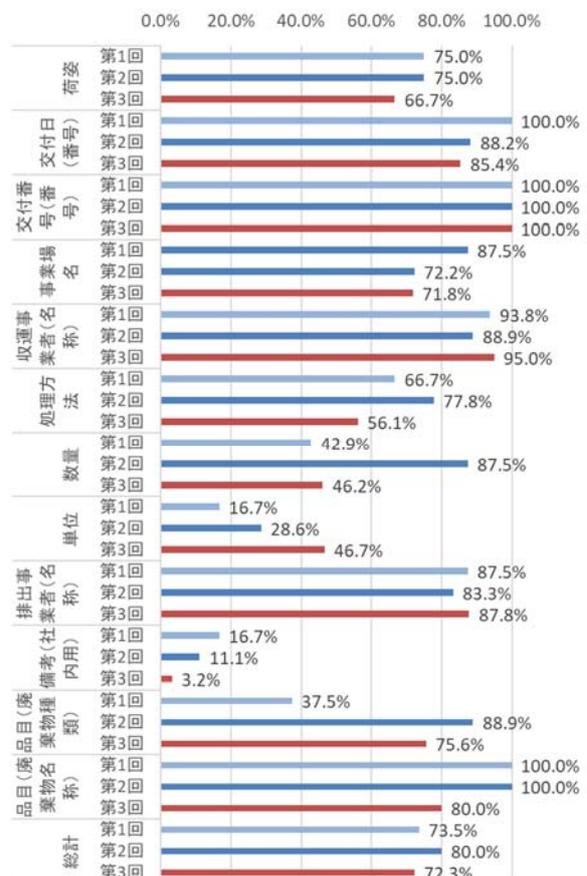


図4.11 項目別正答率 (B社)

(2) AI-OCRによる入力データの作成

図4.10、図4.11に示すように、AI-OCRによる読取結果の正答率は、6項目を対象にしたA社の場合、1回目から3回目にかけて徐々に改善されたものの、全項目合計で87.0%に留まった。また、12項目を対象にしたB社の場合、全項目で1回目の73.5%から2回目は80.0%となり改善されたが、3回目は1回目を下回る72.3%となった。A社、B社とも数値の正答率は100%に近かった。しかし、特に、B社では読取範囲や文字属性の定義等の工夫を行ったものの、手書きで書かれた「数量」、「単位」や、記入パターンや記入位置が多岐に亘る「備考(社内用)」については正答率が低いままとなった。

正答率の低いB社で正答率を向上させるためには、数量や単位、備考欄はB社において記入しているこ

とから、記入する場所の指定や、文字の丁寧な記入を励行することなどが考えられる。

(3) RPA/VBAによる入力・確認作業の効率化

A社の基幹業務システムへの入力作業では、RPA/VBAの導入前の1件当たり時間は52秒/件であったが、導入後は50.2秒/件とわずかに短縮された(図4.12)。一方で、従来通りの手作業が必要な入力パターンが存在するため、その割合を下げるためには複雑な入力判断基準をプログラム化する必要がある。しかし、そのパターンは、「AI-OCRで読取レイアウトを登録しなかった文字情報の読取り」、「基幹業務システムに単価が登録されていない場合」、「表記の仕方が統一されていない住所などの情報を同一情報として認識する場合」の入力などが多い。初めに自動化作業と非自動化作業を振り分け、RPA/VBAを適用する前者の割合を高めることが現実的である。

B社の基幹業務システムへの入力結果の確認・修正作業では、導入前の1件当たり時間17.65秒/件は、導入後でもほとんど変化はなく17.62秒/件であった(図4.13)。これは紙マニフェストの画像取得時間が新たに必要であることに加えて、AI-OCRの項目別の正答率が低く、さらに、1件当たりの全ての読取項目のうち1つでも既にシステムに入力されているデータと一致しないものと、人による確認対象にまわすことになるため、自動で確認済みとなるマニフェストの割合(自動確認率)が16%と低いことが理由である。仮に、自動確認率を50%に上げることができれば、11.60秒/件に短縮される。

AI-OCRの読取精度の向上やRPAによる自動入力パターンの追加などを通じて期待される作業時間削減効果があったと仮定して、情報システムのイニシャル・ランニングコストを賄うための1日当たり作業件数の目安を推計すると、入力作業、確認作業とも500~1,000件/日となった(図4.14、図4.15)。なお、この目安の数値は、各社の業務特性、運用状況によって変化するものである。

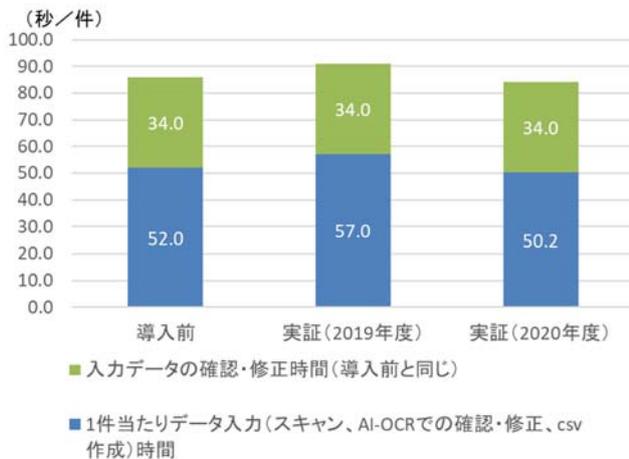


図4.12 1件当たり作業時間 (A社)

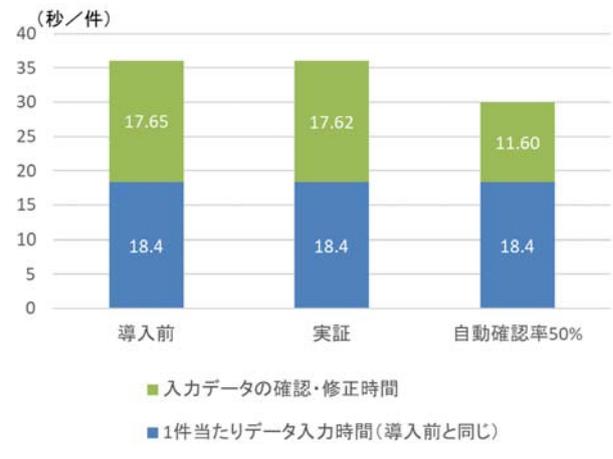


図4.13 1件当たり作業時間 (B社)

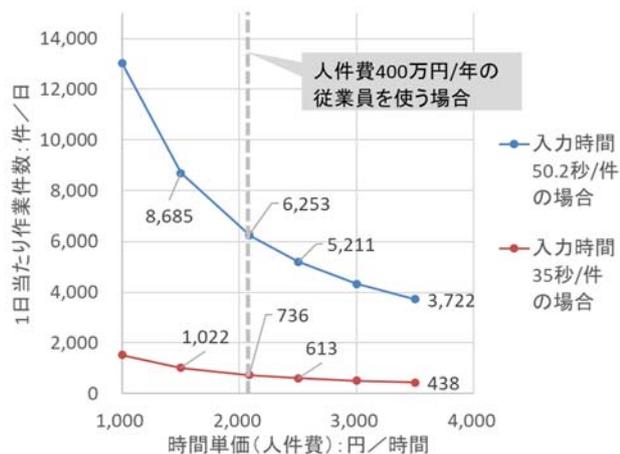


図4.14 導入効果を生む作業件数 (入力作業)

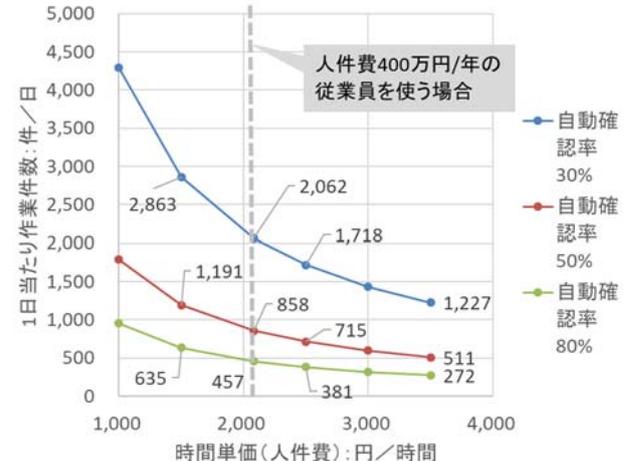


図4.15 導入効果を生む作業件数 (確認作業)

(4) RPA/VBAによる排出事業者向けレポートの作成

排出事業者向けレポート作成・保存までの作業（メール下書き作業なし）の場合、RPA/VBAを用いない手作業での1社当たりレポート作成時間は115秒/社であった。一方、RPA/VBAを用いた場合、1回目が18.5秒/社、2回目が18.3秒/社、3回目が18.4秒/社であった。1か月のレポート送付件数が235社とすると、前者は1か月に7.51時間を要するが、後者は1.20時間と約6分の1に減少した（図4.16）。また、メールの下書き作業まで行う場合、RPA/VBAを用いない手作業では1か月に9.53時間を要するが、RPA/VBAを適用すると1.24時間と約7分の1以下に減少した（図4.16）。

RPA/VBAのライセンス費用を3万円/月、1人当たり人件費を年400万円として、排出事業者の導入基準の目安となる、人件費削減効果を含めたランニングコストを賄うレポート発行料金を計算すると、約43円/社/月となった。

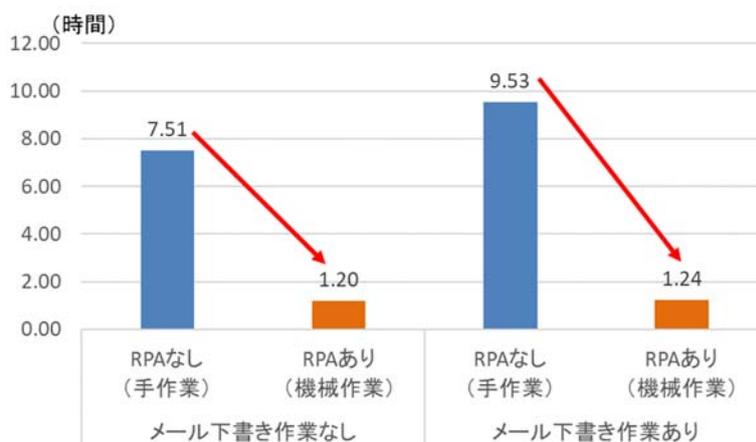


図4.16 RPA有無による作業時間の削減効果

4. 2 適正処理推進のための安全管理の高度化

被験者計148人日（廃棄物処理施設85人日、廃棄物収集運搬63人日）に対し、有効に取得できたデータは計139人日（廃棄物処理施設82人日、廃棄物収集運搬57人日）であった。

(1) 熱中症（及びヒートショック）の危険性の判定

例として、廃棄物処理施設の作業員1名の心拍数と作業エリアのWBGT値を図4.17、廃棄物収集運搬の作業員1名の心拍数を図4.18に示す。

図4.17は、2019年9月6日、京都市内の廃棄物処理施設で業務にあたった63歳の作業員の心拍数と作業エリアのWBGT値である。一日を通してWBGT値が熱中症の嚴重警戒ラインである28℃を超えており、熱中症の危険性が高かったと考えられる。また、心拍数は概ね60～120の範囲を推移しており、熱中症の判定基準である持続心拍数を超える時間帯がいくつか確認された。特に、13:40頃から14:00頃にかけての約20分間は継続して心拍数が持続心拍数を超えており、熱中症の危険性が高かったと考えられる。なお、表4.6に示す基準のうち、持続心拍数以外の基準に該当する心拍数は計測されなかった。

図4.18は、2021年7月16日、草津市内にて廃棄物収集運搬の業務にあたった61歳の作業員の心拍数である。心拍数は概ね60～160の範囲を推移しており、熱中症の判定基準である持続心拍数を超える時間帯がいくつか確認された。その時間帯は約1時間おきであり、約1時間おきに熱中症の危険性が高まっていたと考えられる。なお、表4.6に示す基準のうち、持続心拍数以外の基準に該当する心拍数は計測されなかった。

なお、2020年1月27～29日、豊橋市において収集運搬の業務にあたった48歳の作業員については、周辺の気温変化に対する心拍数の変化が大きく、ヒートショックの危険性をうかがわせる状況を確認した。

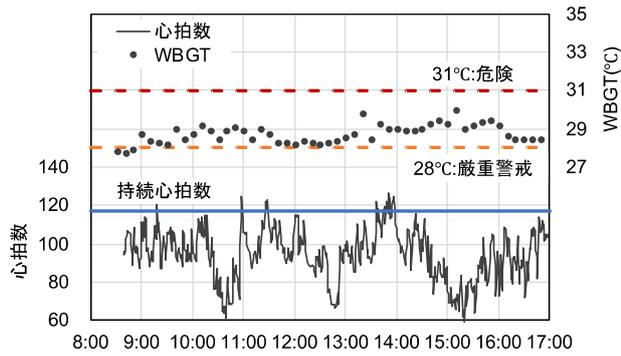


図4.17 心拍数とWBGT値の計測例（2019年9月6日、京都市、廃棄物処理施設、63歳）

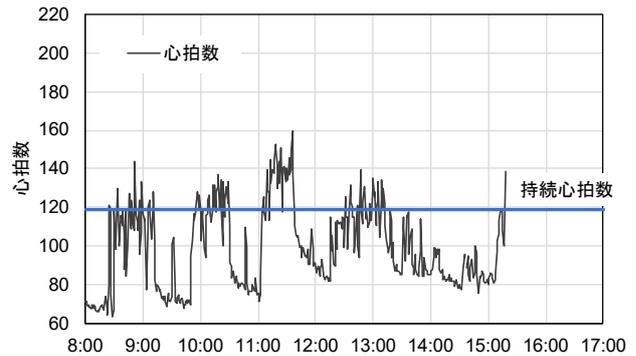


図4.18 心拍数の計測例（2021年7月16日、草津市、廃棄物収集運搬、61歳）

有効なデータが取得できた139人日について、一日の作業時間に対する持続心拍数を超える作業時間の割合、すなわち、熱中症の危険性が高まる作業時間の割合を算出した結果を図4.19、図4.20に示す。図4.19は、廃棄物処理施設の作業員82人日と廃棄物収集運搬の作業員57人日に分けてプロットしたものであり、図4.20は廃棄物処理施設の作業員82人日について作業内容ごとにさらに細分化し、廃棄物収集運搬の作業員57人日と合わせてプロットしたものである。

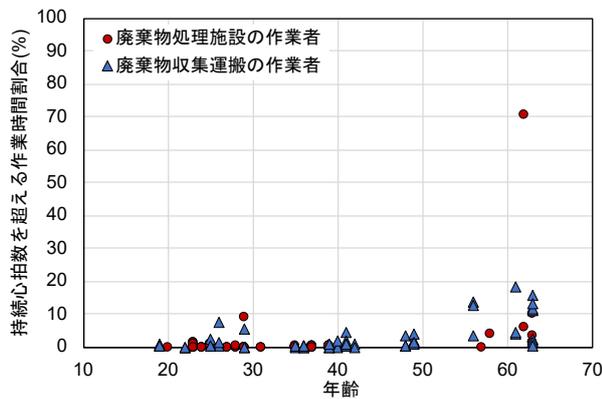


図4.19 持続心拍数を超える作業時間割合（年齢別、廃棄物処理施設・廃棄物収集運搬別）

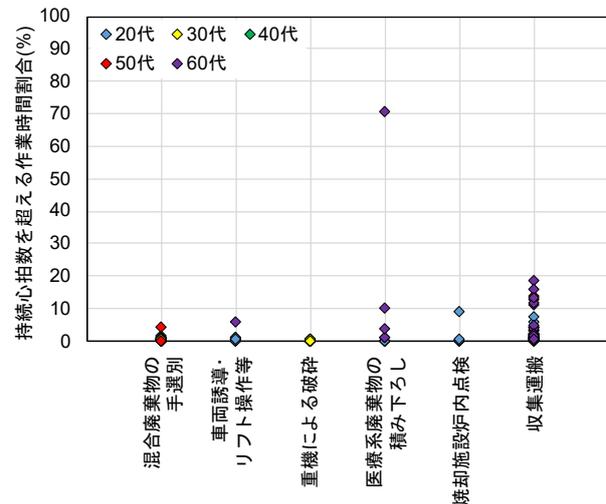


図4.20 持続心拍数を超える作業時間割合（作業内容別、年齢別）

ここで、廃棄物処理施設の作業員82人日のうち、持続心拍数を超える作業時間割合の値が大きく外れていた作業員1人日を除いた廃棄物処理施設の作業員81人日と廃棄物収集運搬の作業員57人日の2つのグループについて（図4.21）、持続心拍数を超える作業時間割合の平均値の差の検定を行ったところ、有意な差があった（ p 値=6.14E-05）。廃棄物処理施設での業務よりも廃棄物収集運搬業務の方が熱中症の危険性は高い傾向にあると考えられる。

また、年齢の低い作業員（10代・20代）、中間層の年齢の作業員（30代・40代）、年齢の高い作業員（50代・60代）の3つのグループに分け（図4.22）、持続心拍数を超える作業時間割合の平均値の差の検定を行った。年齢の低い作業員（10代・20代）、中間層の年齢の作業員（30代・40代）の間では有意な差が認められなかったが、年齢の高い作業員（50代・60代）と年齢の低い作業員（10代・20代）、年齢の高い作業員（50代・60代）と中間層の年齢の作業員（30代・40代）の間では有意な差が認められた（それぞれ、 p 値=1.99E-10、1.85E-11）。年齢の高い作業員のほうが持続心拍数を超える作業時間割合が高く、熱中症の危険性が高まる傾向が確認された。なお、各年代の持続心拍数を超える作業時間割合の標準偏差を比較すると、50代と60代の標準偏差が大きく、個人差が大きいことが示唆された。図4.19、図

4.20では、年齢が高くても問題のない作業員がいることも確認される。これらのことから、熱中症の危険性は作業員の年齢が高いと高まる傾向がある一方で、個人個人の差も大きいことが示唆された。本研究で用いたスマートウェア等によって個人単位で熱中症の危険性を把握することは、廃棄物処理業における安全管理の高度化に向けて、有益であると考えられる。

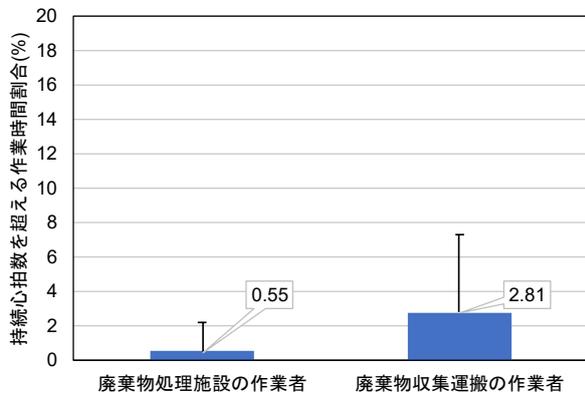


図4.21 持続心拍数を超える作業時間割合の平均値と標準偏差（廃棄物処理施設・廃棄物収集運搬別）

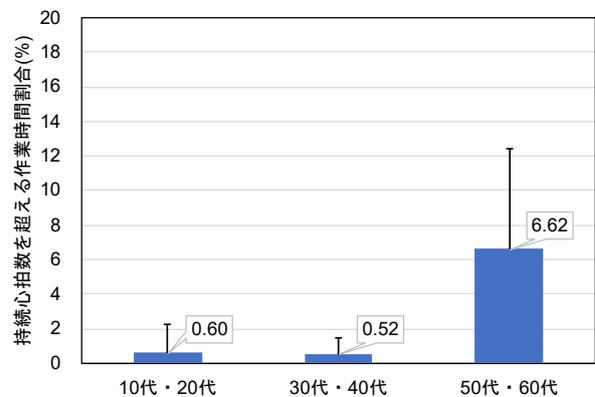


図4.22 持続心拍数を超える作業時間割合の平均値と標準偏差（年齢別）

(2) 労働強度の判定

例として、廃棄物処理施設の作業員1名、廃棄物収集運搬の作業員1名の労働強度をそれぞれ図4.23、図4.24に示す。

図4.23は、2019年9月4日、京都市内の廃棄物処理施設で業務にあたった57歳の作業員の労働強度である。労働強度は概ね0~40%の範囲を推移していた。労働強度が30%、40%を超える時間帯がそれぞれ複数回あり、労働強度が30%以上の作業時間割合は約11%、労働強度が40%以上の作業時間割合は約1.9%であった。特に9:00頃から9:30頃にかけての約30分間は労働強度が継続して30%を超えており、作業員の身体負担は高かったと考えられる。

図4.24は、2021年9月8日、近江八幡市内にて廃棄物収集運搬の業務にあたった41歳の作業員の労働強度である。労働強度は概ね0~60%の範囲を推移していた。12:00頃から13:00頃の約1時間を除き、一日を通して労働強度の変動が大きく、労働強度が30%以上の作業時間割合は約33%、労働強度が40%以上の作業時間割合は約15%であった。一日の作業時間の1/3の時間帯で作業員の身体負担は高かったと考えられる。

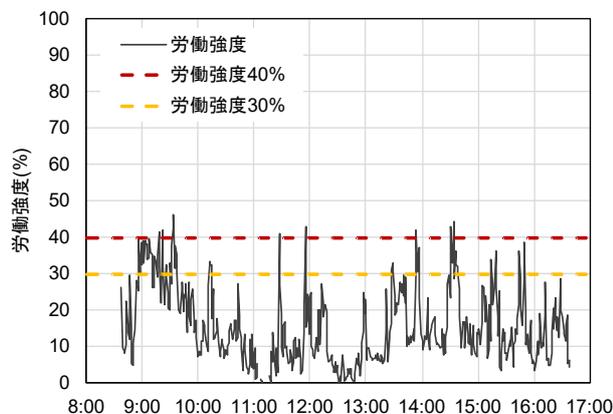


図4.23 労働強度の計測例（2019年9月4日、京都市、廃棄物処理施設、57歳）

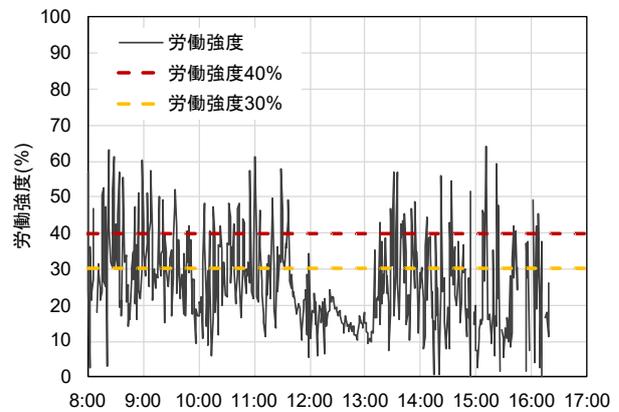


図4.24 労働強度の計測例（2021年9月8日、近江八幡市、廃棄物収集運搬、41歳）

有効なデータが取得できた139人日について、一日の作業時間に対して労働強度が40%以上の作業時間

の割合を算出した結果を図4.25、図4.26に示す。図4.25は、廃棄物処理施設の作業員82人日と廃棄物収集運搬の作業員57人日に分けてプロットしたものであり、図4.26は廃棄物処理施設の作業員82人日について作業内容ごとにさらに細分化し、廃棄物収集運搬の作業員57人日と合わせてプロットしたものである。

ここで、廃棄物処理施設の作業員82人日と廃棄物収集運搬の作業員57人日の2つのグループについて（図4.27）、労働強度が40%以上の作業時間の割合の平均値の差の検定を行ったところ、有意な差があった（ p 値=0.01）。廃棄物処理施設での業務よりも廃棄物収集運搬の業務の方が労働強度は高い、すなわち、作業時の身体負荷が高い傾向にあると考えられる。

また、年齢の低い作業員（10代・20代）、中間層の年齢の作業員（30代・40代）、年齢の高い作業員（50代・60代）の3つのグループに分け（図4.28）、労働強度40%以上の作業時間割合の平均値の差の検定を行った。年齢の低い作業員（10代・20代）の労働強度40%以上の作業時間割合の平均値（15.14%）は、中間層の年齢の作業員（30代・40代）の平均値（9.78%）より大きく、有意な差が認められた（ p 値=0.01）。また、中間層の年齢の作業員（30代・40代）の平均値（9.78%）は、年齢の高い作業員（50代・60代）の平均値（26.95%）よりも小さく、有意な差が認められた（ p 値=7.05E-06）。さらに、年齢の低い作業員（10代・20代）の平均値（15.14%）は、年齢の高い作業員（50代・60代）の平均値（26.95%）よりも小さく、これも有意な差が認められた（ p 値=0.01）。年齢の低い作業員（10代・20代）で身体負荷が高い傾向にある理由としては、若い作業員が重労働を担当している可能性があること、経験が少なく無駄な動きがある可能性があること等が考えられる。また、中間層（30代・40代）の作業員が低い理由としては、経験の蓄積による作業内容への慣れ・適応などが考えられる。図4.25、図4.26では、同じ年齢の作業員であっても労働強度が40%以上となる作業時間割合には違いがみられ、同一の作業員でも日によっても異なることが確認された。こうしたことから、スマートウェアを用いて作業員ごとに心拍数を計測し、個人単位で身体負荷の高まりを常時モニタリングすることは、廃棄物処理業における安全管理の高度化に向けて有効な手段の一つであると考えられる。

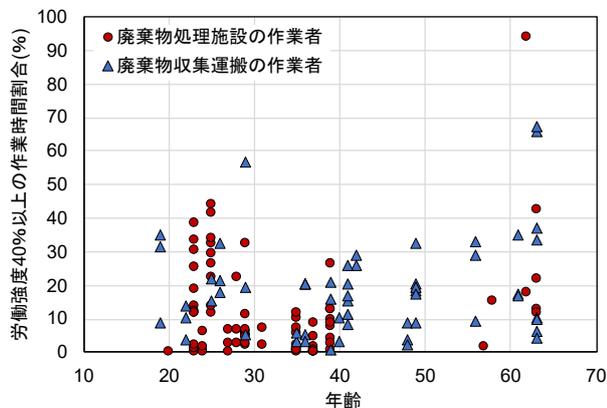


図4.24 労働強度40%以上の作業時間割合（年齢別、廃棄物処理施設・廃棄物収集運搬別）

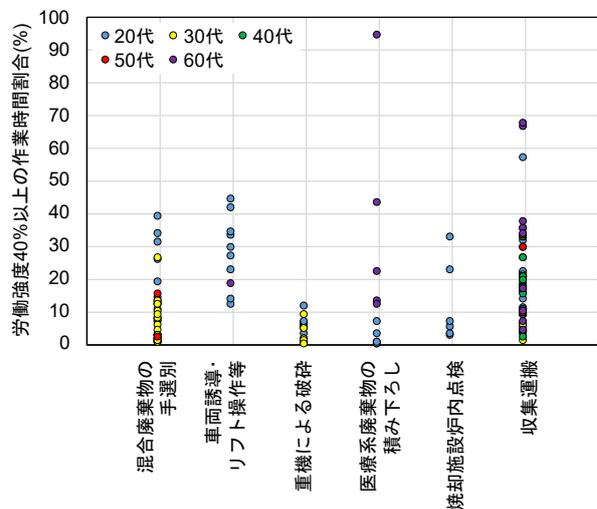


図4.25 労働強度40%以上の作業時間割合（作業内容別、年齢別）

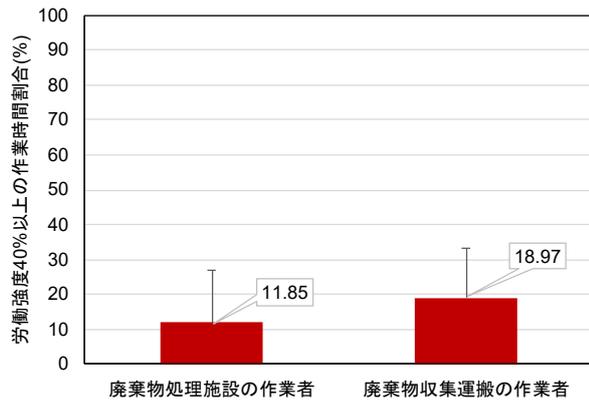


図4.26 労働強度40%以上の作業時間割合の平均値と標準偏差（廃棄物処理施設・廃棄物収集運搬別）

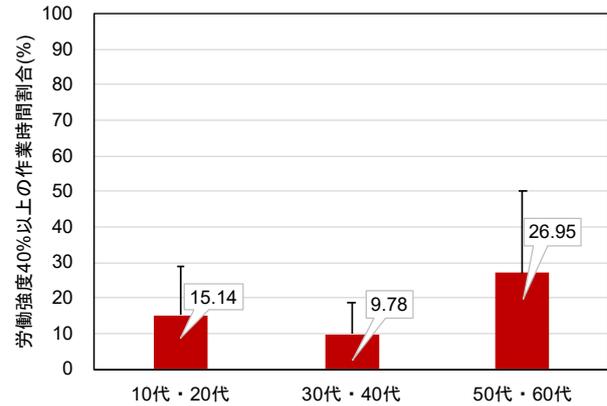


図4.27 労働強度30%、40%以上の作業時間割合の平均値と標準偏差（年齢別）

(3) 労働強度の高まりと作業者の感覚の差異

湖南省の廃棄物処理施設（被験者54人日）では、労働強度の計測とあわせて、作業者に“しんどいと感じた”時間帯を問うアンケートを実施した。アンケートを実施した実態調査のうち、ある作業者の労働強度の一日の時間変化を図4.28に示す。これは、2021年9月1日、湖南省内の廃棄物処理施設で作業にあたった25歳の作業者の労働強度の一日の時間変化である。労働強度は0～70%の範囲を変動しているが、労働強度が30%を超える時間帯がほとんどであり、一日を通して、作業者の身体負荷は高かったと考えられる。一方で、作業者がアンケートに”しんどいと感じた”と回答した時間帯は13:00ごろから15:00頃のみであった。このことから、実際に数値として確認される労働強度（身体負荷）の高まりと作業者の感覚には差異があると考えられる。アンケートを実施した実態調査のデータ54人日のうち、労働強度が継続して40%以上となる作業時間は計約800分であったが、そのうち作業者がしんどいと感じた作業時間は約421分であった。すなわち、労働強度が継続して40%以上となる（危険とされる）作業時間のうち、約47%の時間帯で作業者は身体負荷の高まりを感じていなかったことになる。このことから、スマートウェア等の情報通信技術を用いて、労働強度を心拍数を用いて常時計測することにより、作業者本人が気づかない身体負荷の高まりに対する第三者からの注意喚起・警告などが可能になると考えられる。

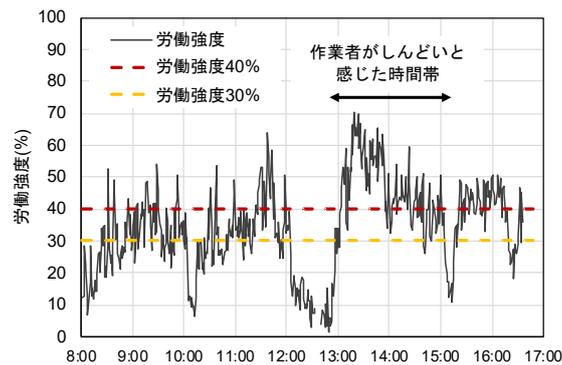


図4.28 労働強度と作業者がしんどいと感じた時間帯（2021年9月1日、湖南省、廃棄物処理施設、25歳）

5. 研究目標の達成状況

研究目標とその達成状況を表4.9に示す。

表4.9 研究目標と達成状況

研究目標	達成状況
紙マニフェスト情報の廃棄物処理業者向けパッケージソフトへの入力作業を自動化するプロトタイプシステムを、RPA(Robotic Process Automation)及びAI-OCRソフトを用いて導入し、紙マニフェストの入力・確認時間の削減効果を計測する。このシステムにより効果が得られる条件を抽出し、廃棄物処理業者のデジタル化方策の一つである当該システムの有効性と適用範囲を示す。	紙マニフェストの入力作業について、プロトタイプシステムを構築・導入し、その効果検証を実施して、必要な条件を提示したことから当初の研究目標は達成した。本研究ではさらに、排出事業者向けレポート作成のシステムも構築し、その効果検証を行ったことから、その点で目標を上回る成果をあげたと言える。
スマートウェアを活用して作業員の生体情報を計測するプロトタイプシステムを廃棄物の処理及び収集運搬プロセスに導入し、40人日程度の作業員を対象に熱中症・ヒートショックの危険性や労働強度の実態を把握する。これにより、作業員の身体的な差異を踏まえた上で、第三者からの注意喚起・警告などが可能になる当該システムの有効性を示す。	スマートウェアを活用したシステムを用いて、廃棄物処理施設及び収集運搬の作業員計139人日を対象に熱中症（一部ヒートショック）の危険性や労働強度の実態を把握し、システムの有効性を示せたことから当初の研究目標は達成した。被験者数の観点では、目標であった40人日程度を大きく越え、目標を上回る成果をあげたと言える。

6. 引用文献

- 1) 公益財団法人日本産業廃棄物処理振興センター：電子マニフェストの加入・登録状況（2022年3月末現在）、<https://www.jwnet.or.jp/jwnet/about/regist/index.html>、2022年4月アクセス
- 2) 富山大学、広島大学、立教大学、インテック、資源循環ネットワーク、国立環境研究所：令和2年度 環境経済の政策研究（今後の高齢社会に対応した産業廃棄物処理業に関する調査・研究）研究報告書、81、2021
- 3) 脇山亮一、恒松圭太：AI-OCR×RPAによる定型業務効率化の検証、令和2年度水道研究発表会、14-15、2020
- 4) 全国産業資源循環連合会安全衛生委員会：産業廃棄物における労働災害の発生状況、2021
- 5) 厚生労働省：令和2年 職場における熱中症による死傷災害の発生状況（確定値）、2020
- 6) 三菱化学テクノロジー：製造業における労働安全及び設備保全 IoT導入等に関する調査報告書、2017
- 7) 建設業労働災害防止協会：労働災害防止のためのICT活用データベース、https://www.kensaibou.or.jp/safe_tech/ict/index.html、2020年6月アクセス
- 8) Hashiguchi, N. et al.: Practical judgment of workload based on physical activity, work conditions, and worker's age in construction site, *Sensors*, Vol.20, 3786, 2020
- 9) 環境省：熱中症予防情報サイト、https://www.wbgt.env.go.jp/wbgt_data.php、2020年6月アクセス
- 10) ISO: IS09886; 2004 - Ergonomics - Evaluation of thermal strain by physiological measurements
- 11) ACGIH: Heat Stress and Strain TLV, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2012
- 12) Tanaka, H. et al.: Age-predicted maximal heart rate revisited, *Journal of the American College of Cardiology*, Vol. 37, No.1, pp. 153-156, 2001
- 13) Borg, G.: Borg's Perceived Exertion and Pain Scales, *Human Kinetics*, Champaign, IL, 1998

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) Richao Cong, Atsushi Fujiyama, and Toru Matsumoto, 環境共生 (38, 1), 46-55 (2022) Collection of Industrial Plastic Waste Under the Pandemic of COVID-19: A Case Study of Wholesale & Retail Trade Sector in Fukuoka Prefecture, Japan
- 2) Richao Cong, Atsushi Fujiyama, and Toru Matsumoto, 環境科学会誌, 印刷中 (2022) AI Techniques Aid for Optimizing the Collection System of Industrial Plastic Waste
- 3) Richao Cong, Atsushi Fujiyama, and Toru Matsumoto, 環境科学会誌, 印刷中 (2022) AI Techniques Aid for Predicting the Collection Demands of Industrial Plastic Waste from Multiple Facilities
- 4) 伊藤友輔、栗栖亜矢美、合澤勝之、古閑宏幸、藤山淳史、松本亨：環境科学会誌, 印刷中 (2022) 中間処理施設における廃棄物処理計画モデルの改良
- 5) 伊藤友輔、安部大輝、古閑宏幸、藤山淳史、松本亨：廃棄物資源循環学会誌, 印刷中 (2022) 中間処理施設における廃棄物処理計画の最適化
- 6) 吉留大樹、横山健太郎、程天驕、石井美也紀、小野田弘士：環境科学会誌, 印刷中 (2022) 排出事業者と収集・運搬事業者のインタラクションを考慮したトレーサビリティシステムの構築－医療廃棄物の小口回収を例として－
- 7) 胡浩、楊文博、程天驕、小野田弘士：環境科学会誌, 印刷中 (2022) 自動車リサイクル部品を対象としたAIによる画像診断システムの構築に向けた実験的検討

【サブテーマ2】

- 1) L. WENJING, L. SUN, Z. LI, M. FUJII, G. YONG, D. LIANG, T. FUJITA: Environmental Science and Pollution Research, 1, 1-13 (2020) Trends and future challenges in hydrogen production and storage research.
- 2) L. SUN, W. LIU, Z. LI, B. CAI, M. FUJII, X. LUO, W. CHEN, Y. GENG, T. FUJITA, Y. LE: Applied Energy, 284 (2021) Spatial and structural characteristics of CO2 emissions in East Asian megacities and its indication for low-carbon city development.
- 3) R. ZHAO, L. SUN, X. ZOU, M. FUJII, L. DONG, Y. DOU, Y. GENG, F. WANG: Energy, 223 (120055) (2021) Towards a Zero Waste city- an analysis from the perspective of energy recovery and landfill reduction in Beijing.
- 4) J. WANG, L. SUN, M. FUJII, Y. LI, Y. HUANG, S. MURAKAMI, I. DAIGO, W. PAN, Z. LI: Frontiers in Sustainability, 645843 (2021) Institutional, Technology, and Policies of End-of-Life Vehicle Recycling Industry and its indication on the circular economy- comparative analysis between China and Japan.
- 5) 藤井実、大西悟、牧誠也、岡寺智大、後藤尚弘：環境科学会誌, 印刷中 (2022) 廃棄物焼却熱の産業での活用を推進するための情報共有と安定需給に関する検討

【サブテーマ3】

- 1) Kamma K. and Wada T. (2019) Reconstruction Error Aware Pruning for Accelerating Neural Networks, Bebis G. et al. (eds) Advances in Visual Computing, ISVC 2019, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 11844, pp.59-72, Springer, Cham. (IF:1.36)
- 2) 大谷隆介、中尾彰文、山田崇雄、吉田登：土木学会論文集G (環境) (76, 6), II_47-II_59 (2020), 産業廃棄物処理炉でのエネルギー回収技術導入によるGHG削減効果の評価－ロータリ

ーキルン・ストーカ炉を対象としてー

- 3) 仮谷有優美、中尾彰文、山本秀一、吉田登：土木学会論文集G（環境）（76, 6）, II_319-II_331（2020）下水処理場へのICT導入時の対象機器やシステム運用の違いが維持管理費用削減に及ぼす影響を評価する分析フレームの提案と基礎的検討
- 4) 中尾彰文、山田崇雄、和田俊和、吉田登：環境科学会誌，印刷中（2022）ICTを用いた産業廃棄物焼却プラント機材の予防保全モニタリング手法の開発とその効果

【サブテーマ4】

- 1) 岡本宗一郎、上鶴喜貴、橋口伸樹、児玉耕太、橋本征二：環境システム計測制御学会誌（25, 2/3）, 1-7（2020）, スマートウェアを活用した廃棄物処理施設における安全管理の高度化
- 2) 秋山浩之、西野京一郎、北井俊樹、橋本征二：環境科学会誌，印刷中（2022）AI-OCRとRPAを活用した紙マニフェストの入力作業効率化に関する計測事例
- 3) 蔭山逸行、橋口伸樹、曹剣飛、塘将典、岡本宗一郎、橋本征二、児玉耕太：環境科学会誌，印刷中（2022）廃棄物処理施設作業員の生体情報を用いたヒューマンリソースマネジメント

<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）>

【全体】

- 1) 松本亨、藤山淳史、藤井実、吉田登、橋本征二、小野田弘士：廃棄物資源循環学会誌，Vol. 32, No. 2, pp.112-121（2021）
「静脈系サプライチェーンマネジメントへの情報通信技術の導入可能性と効果」
- 2) 廃棄物処理・リサイクルIoT導入促進協議会編：環境新聞社（2022.3）
「サーキュラーエコノミーを加速する「情報革命」」

【サブテーマ1】

- 1) 小野田弘士：都市清掃，73, 357, 465-472（2020）
「廃棄物処理・資源循環におけるAI・IoTを活用したソリューション開発（特集 廃棄物分野におけるAI, IoT等のICTの利活用（その2））」
- 2) 松本亨：情報通信技術，環境情報科学センター50周年記念「地域循環共生圏」の実現に向けた研究の推進CEISの提言，pp.50-53（2022）
「地域循環共生圏とデジタルトランスフォーメーション」

【サブテーマ2】

- 1) 藤井実：都市清掃，73（357），459-464（2020）
「廃棄物の効率的な利用の理論と情報技術活用の可能性」
- 2) 藤井実：環境浄化技術，20（1），1-6（2021）
「廃棄物のエネルギー利用の高度化と情報技術の役割」
- 3) 松岡浩史、藤井実：廃棄物資源循環学会誌，32（2），99-105（2021）
「循環経済と脱炭素化を推進する情報技術活用のための産官学連携」
- 4) 藤井実：化学物質と環境，（167），4-6（2021）
「我が国における資源循環の現状と今後」

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ4】

- 1) 橋本征二：都市清掃，Vol. 73, No. 356, pp. 364-368 (2020)
「廃棄物処理における情報通信技術の活用可能性」

(2) 口頭発表 (学会等)

【サブテーマ1】

- 1) 前田桜我、松本亨、藤山淳史：環境科学会2019年会 (2019)
「IoTセンサを用いた生ごみ堆肥化装置内の発酵物堆積状況把握と収集運搬の効率化」
- 2) 前田桜我、松本亨、藤山淳史：第30回廃棄物資源循環学会研究論文発表会 (2019)
「生ごみ堆肥化装置におけるIoTセンサを利用した堆積状況把握と運搬効率化」
- 3) 前田桜我、松本亨、藤山淳史：第15回日本LCA学会研究発表会 (2020)
「IoTセンサを用いた生ごみ堆肥化装置内発酵物堆積状況把握による回収効率化の評価」
- 4) 前田桜我、松本亨、藤山淳史：2019年度廃棄物資源循環学会九州支部研究ポスター発表会・留学生等交流会 (2019)
「IoTセンサによる生ごみ堆肥化装置の発酵物堆積状況把握と物流効率化の可能性」
- 5) 前田桜我、松本亨、藤山淳史：環境科学会2019年会 (2019)
「IoTセンサを用いた生ごみ堆肥化装置内の発酵物堆積状況把握と収集運搬の効率化」
- 6) 前田桜我、松本亨、藤山淳史：第47回環境システム研究論文発表会講演集、162 (2019)
「IoTセンサによる生ごみ堆肥化装置の発酵物堆積状況把握と収集効率化」
- 7) 熊軼凡、吉田未希也、伊藤友輔、古閑宏幸：2019年度電気・情報関係学会九州支部連合大会 (2019)
「リサイクル事業におけるリアルタイムIoTセンサ情報可視化システムの試作」
- 8) 藤山淳史、有本朝香、松本亨：第31回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2020)
「産業廃棄物処理における情報連携のニーズ把握」
- 9) 藤山淳史、松本亨：環境科学会2020年会 (2020)
「廃棄物・資源循環分野でのIoTを活用した排出・処理事業者間インタラクション実現の可能性」
- 10) 藤山淳史、前田桜我、松本亨：第48回環境システム研究論文発表会講演集、pp141, (2020)
「IoTを活用した排出・処理事業者間インタラクション実現による資源循環効率化の可能性」
- 11) T. Matsumoto: The 15th International Conference on Waste Management and Technology (ICWMT15), Beijing, China (2020)
“Solid Waste Management and Society 5.0”
- 12) 鄒亮星、吉留大樹、キンショウセツ、小野田弘士：日本機械学会第30回環境工学総合シンポジウム2020 (2020)
「IoT活用による医療廃棄物の小口回収システムの効率化 (第1報：廃棄物管理の実態把握およびトレーサビリティシステムの構築)」
- 13) 前田桜我、松本亨、藤山淳史：第16回日本LCA学会研究発表会 (2021)
「小売業を対象とした廃プラスチックの排出量予測とそれを用いた収集運搬効率化シミュレーション」
- 14) Richao Cong, Atsushi Fujiyama, and Toru Matsumoto：環境科学会2021年会 (2021)
“Future Prediction of Industrial Plastic Waste Collection Amount: A Case Study in Hospital of Fukuoka”
- 15) Richao Cong, Atsushi Fujiyama, and Toru Matsumoto：日本環境共生学会 第24回 (2021年度) 学術大会 (2021)
“Collection of Industrial Plastic Waste Under the Pandemic of COVID-19: A Case Study of Wholesale & Retail Trade Sector in Fukuoka Prefecture, Japan”

- 16) Richao Cong, Atsushi Fujiyama, and Toru Matsumoto: 第49回環境システム研究発表会 (2021)
“Machine Learning for Future Prediction of the Amount of Industrial Plastic Waste Collection”
- 17) 伊藤友輔、安部大輝、古閑宏幸、藤山淳史、松本亨: 第32回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2021)
「中間処理施設における廃棄物処理計画の最適化に関する研究」
- 18) 横山健太郎、伊藤雄太郎、吉留大樹、小川聡久、小野田弘士: 日本機械学会第31回環境工学総合シンポジウム2021 (2021)
「IoT活用による医療廃棄物の小口回収システムの効率化 (第2報: WCMS (Work Chain Management System) の提案)」
- 19) 李蒙毅、楊文博、小野田弘士: 廃棄物資源循環学会研究発表会講演集 第 32 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2021)
「自動車リユース部品の検査工程におけるAI画像診断技術の導入」
- 20) Richao Cong, Atsushi Fujiyama, and Toru Matsumoto: 第17回日本LCA学会研究発表会 (2022)
“Optimizing Industrial Plastic Waste Collection System Applying AI Technique”
- 21) 谷尾澄葉、叢日超、藤山淳史、松本亨: 令和3年度土木学会西部支部研究発表会 (2022)
「廃棄太陽光パネルの最適回収システムの探索と効果推計」
- 22) Richao Cong, Atsushi Fujiyama, and Toru Matsumoto, The 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (3 RINCs), (2022)
“How to predict the collection demands of industrial plastic waste-challenged from multiple facilities”
- 23) 松本 亨: 公開シンポジウム 第34回環境工学連合講演会 (2022)
「未来社会に向けたデータ駆動型資源循環システム」

【サブテーマ2】

- 1) M. FUJII: The 15th International Conference on Waste Management and Technology (Online Meeting) (2020)
“Smart energy sharing toward de-carbonized eco-industrial park”
- 2) 藤井実、牧誠也、SUN LU、岡寺智大、後藤尚弘: 環境科学会2020年会, 2020年会 講演要旨集, 149-150 (2020)
「廃棄物の高効率なエネルギー利用とそれを支援する情報技術の検討」
- 3) 藤井実、牧誠也、SUN LU、岡寺智大、後藤尚弘: 第48回環境システム研究論文発表会, 同予稿集, 140 (2020)
「廃棄物焼却熱の産業利用と情報技術の活用による安定供給」
- 4) M. FUJII, India-Japan Webinar on Marine Plastic Pollution Prevention and Management (2021)
“Comprehensive solution to prevent marine plastic waste and climate change”
- 5) 藤井実: 第68回環境システムシンポジウム Society5.0時代の環境インフラ-実務者と研究者との対話- (2021)
「廃棄物焼却熱の産業利用とIoTによる安定供給の可能性」
- 6) 藤井実: 令和2年度 産業廃棄物排出事業者・処理業者合同セミナー 「今こそ業務改革! DX時代の資源循環」 (2021)
「資源循環・エネルギー回収の高度化と情報技術活用の可能性」
- 7) 藤井実: NPO法人広島循環型社会推進機構 令和2年度成果発表会・第3回特別講演会 (2021)
「脱炭素社会に向けた廃棄物エネルギーの高効率利用とそれを支える情報技術の活用」
- 8) 牧誠也、大西悟、藤井実、後藤尚弘: 環境科学会2021年年会, 環境科学会2021年年会 講演要旨集 (2021)

- 「収集運搬モデルによる焼却施設の廃棄物組成と家計消費との結合データセットの作成」
- 9) 藤井実：公益財団法人産業廃棄物処理事業振興財団第2回自立・分散型エネルギー研究会 (2021)
「廃棄物エネルギー利用の高度化と脱炭素社会」
- 10) 藤井実：第24回 (2021年度) 日本環境共生学会学術大会 公開シンポジウム, オンライン (2021)
「循環経済とカーボンニュートラルを両立する循環的エネルギー利用」
- 11) Fujii M.: The 16th International Conference on Waste Management and Technology, -オンライン (2021)
“Toward carbon neutral plastic circular economy: Comprehensive solution on plastic waste and climate change”
- 12) 藤井実：Regional Banking Summit, オンライン (2022)
「地域の脱炭素産業エネルギーシステム構築に向けて」

【サブテーマ3】

- 1) 吉田登：環境科学会2020年会 (2020)
「産業廃棄物焼却施設における機器保全のニーズ調査と情報通信技術を用いた予兆診断に関する実証試験」
- 2) 山田崇雄、中尾彰文、吉田登：第48回環境システム研究論文発表会 (2020)
「産業廃棄物焼却施設におけるエネルギー利用, ICT・AIの導入意向及び地域共生に関する調査分析」

【サブテーマ4】

- 1) 上鶴喜貴、橋本征二：第30回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2019)
「IoTを活用した一般廃棄物の収集運搬効率化策の評価」
- 2) 岡本宗一郎、上鶴喜貴、橋口伸樹、児玉耕太、橋本征二：第15回日本LCA学会研究発表会 (2020)
「情報通信技術を活用した廃棄物処理施設における安全管理の高度化」
- 3) 上鶴喜貴、橋本征二：第15回日本LCA学会研究発表会 (2020)
「情報通信技術を活用した廃棄物の収集運搬が有効となる条件の検討」
- 4) 秋山浩之、不破敦、西野京一郎、池田桂太郎、橋本征二：環境科学会2020年大会 (2020)
「紙マニフェストの入力作業の省力化に向けた現状分析」
- 5) 橋本征二、岡本宗一郎、橋口伸樹、児玉耕太：第48回環境システム研究論文発表会 (2020)
「情報通信技術の活用した廃棄物処理業における安全管理の高度化について」
- 6) 岡本宗一郎、上鶴喜貴、橋口伸樹、児玉耕太、橋本征二：第32回環境システム計測制御学会研究発表会 (2020)
「スマートウェアを活用した廃棄物処理施設における安全管理の高度化」
- 7) 岡本宗一郎、J. Cao、橋口伸樹、児玉耕太、橋本征二：第16回日本LCA学会研究発表会 (2021)
「スマートウェアを活用した廃棄物処理業における熱中症の予防と労働強度の管理」
- 8) 岡本宗一郎、曹劍飛、橋口伸樹、児玉耕太、橋本征二：第32回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2021)
「廃棄物処理業における熱中症の危険性と労働強度の計測」
- 9) 湯川力、橋本征二：第32回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2021)
「自治体が提供するごみ分別アプリの機能とその利用実態調査」
- 10) 岡本宗一郎、曹劍飛、橋口伸樹、児玉耕太、橋本征二：第17回日本LCA学会研究発表会 (2022)
「廃棄物処理業における熱中症の危険性及び労働強度の傾向」
- 11) 湯川力、橋本征二：第17回日本LCA学会研究発表会 (2022)
「自治体が提供するごみ分別アプリの利用の状況とその規定因」

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【全体】

- 1) 環境科学会2020年会 シンポジウム「資源循環社会形成のための支援技術と影響評価手法」（主催：環境科学会、2020年9月20日）にて成果紹介
- 2) 土木学会 環境システム委員会 第48回研究論文発表会 企画セッション「Society5.0時代の環境システム研究」（主催：土木学会環境システム委員会、2020年10月18日）にて成果紹介
- 3) 2021年度 廃棄物資源循環学会 春の研究討論会「Society5.0時代の脱炭素資源循環マネジメントセミナー IoT×資源循環マネジメント」（主催：廃棄物資源循環学会、2021年5月28日）にて成果紹介

【サブテーマ1】

- 1) NPO法人廃棄物地盤工学研究会総会・講演会（主催：NPO法人廃棄物地盤工学研究会、2021年6月30日）にて成果紹介
- 2) 北九州環境ビジネス推進会10月例会（主催：北九州環境ビジネス推進会、2021年10月13日）にて成果紹介

【サブテーマ2】

- 1) 令和元年度第1回シンポジウム「地域循環共生圏形成における廃棄物エネルギー利用施設の果たす役割と可能性」（主催：環境省・廃棄物資源循環学会、2020年2月3日）にて基調講演
- 2) 第68回土木学会環境システムシンポジウム「Society5.0時代の環境インフラ―実務者と研究者との対話―」（主催：土木学会環境システム委員会、2021年2月9日、聴講者223名）にて講演、パネルディスカッション

(4) マスコミ等への公表・報道等>

【サブテーマ1】

- 1) 環境新聞（2019年8月7日、全国版、「オープンイノベーションをいかに実現するか？」）
- 2) 環境新聞（2019年12月11日、全国版、「インフラのアセットマネジメントに見るICT導入の動き」）
- 3) 環境新聞（2021年1月13日、全国版、「データ駆動型資源循環の萌芽と課題」）
- 4) 環境新聞（2021年6月9日、全国版、「DXと脱炭素化をいかに進めるか？」）

【サブテーマ2】

- 1) 環境新聞（2019年7月10日、全国版、「廃棄物エネルギー利用のイノベーション」）
- 2) 環境新聞（2020年7月8日、全国版、「時間最小化と等価値化のイノベーション」）

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ4】

- 1) 環境新聞（2019年9月11日、全国版、「3R・資源効率を変革する情報通信技術」）
- 2) 環境新聞（2020年3月12日、全国版、「2025年のマイルストーンに基づく資源循環企業の計画と実行」）
- 3) 環境新聞（2020年10月14日、全国版、「情報通信技術を活用した廃棄物処理業の安全管理高度化」）

(5) 本研究費の研究成果による受賞

【サブテーマ1】

- 1) 環境科学会 学術賞 (2020年9月)
松本亨 (表彰課題: 資源循環社会形成のための影響評価手法・支援技術に関する研究)
- 2) 環境科学会 奨励賞 (2021年9月)
藤山淳史 (表彰課題: 資源循環およびエネルギーの効率的な地域システムに関する研究)

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ3】

- 1) 山田崇雄: 日本地域学会2021年度年次大会 優秀発表賞, 2021

【サブテーマ4】

- 1) 第30回廃棄物資源循環学会研究発表会 優秀講演賞 (2019)
上鶴喜貴、橋本征二: IoTを活用した一般廃棄物の収集運搬効率化策の評価
- 2) 第32回環境システム計測制御学会研究発表会 奨励賞 (2020)
岡本宗一郎、上鶴喜貴、橋口伸樹、児玉耕太、橋本征二: スマートウェアを活用した廃棄物処理施設における安全管理の高度化, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 25, No. 2/3, pp. 1-7 (2020)

IV. 英文Abstract

Feasibility and Effectiveness Analysis of ICT for Reverse Supply Chain Management

Principal Investigator: Toru MATSUMOTO

Institution: The University of Kitakyushu

1-1, Hibikino, Wakamatsu-ku, Kitakyushu, Fukuoka, JAPAN

Tel: +81-93-695-3231 / Fax: +81-93-695-3719

E-mail: matsumoto-t@kitakyu-u.ac.jp

Cooperated by: National Institute for Environmental Studies, Wakayama University

Ritsumeikan University, Waseda University, Toyo University

[Abstract]

The objectives of this research project are to explore the potential uses of information and communication technology in the reverse supply chain, to investigate the feasibility of their implementations, and to clarify their effectiveness through empirical studies.

In sub-theme 1, we proposed an integrated waste management system towards the realization of interactions between the waste generators and disposers by using IoT (internet of thing)/AI (Artificial Intelligence) techniques and evaluated the effectiveness of their implementations. In particular, we proposed an optimized collection system of industrial plastic waste by using machine learning approach and optimization algorithm, a button-type collection request system instead of the telephone-based one, a traceability system based on the WCM (work chain management) system, and an information-sharing platform for medical waste with the cooperation of multiple collection and transportation companies. Moreover, we developed an AI-based image diagnosis system for reuse parts of ELV (end-of-life vehicles) based on the investigated feasibility and evaluated the prototype of it. To implement such system, one of the challenges is establishing an accurate data-collecting method (supervisory data). The system is expected to be upgraded under the assumption that AI will perform the image diagnosis.

In sub-theme 2, we designed a waste-incineration sourced steam-supply system in which it matched the demands well by utilizing information technology, and evaluated its cost-effectiveness. We also made efforts to establish a research system for commercialization.

In sub-theme 3, an effective monitoring system has been constructed with a series of functions e.g., measuring, processing, recording, and remotely transmitting data on blower vibration acceleration and fabric filter differential pressure. Non-linear regression analysis was applied to determine the degree of anomaly based on the monitoring data. Besides that, its effectiveness and the cost-effectiveness of maintenance management by applying this monitoring system for extending the life-span of equipment were verified.

In sub-theme 4, we developed an intelligent system that could input the information from paper manifests automatically by using AI-OCR (Optical Character Reader) and RPA (Robotic Process Automation) techniques. The essential conditions for cost saving in this system were detected. Moreover, the analysis result demonstrated that the risk of heat stroke and the physical load (labor intensity) of workers could be grasped by using smart wearing, and the system could enhance the safety management of workers.

Key Words: ICT and AI Technology, Information Linkage, Supply-demand matching, Preventive maintenance