

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

公 募 区 分	:	環境問題対応型研究（技術実証型）
研究予定期間	:	令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度
課題番号	:	【3G-2101】
体系的番号	:	（JPMEERF20213G01）
研究課題	:	「非接触型ごみ収集システムの開発と社会実装に向けたシナリオ構築」
Research Title	:	Development of Contactless Garbage Collection Systems and Scenarios Construction for Social Implementation
研究代表者	:	小野田 弘士
研究代表機関	:	早稲田大学
研究分担機関	:	株式会社大栄環境総研
研究協力機関	:	特になし
研究領域	:	資源循環領域
キーワード	:	非接触、ごみ収集、自動化・省人化、モビリティ

令和6（2024）年5月

目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書	1
I. 成果の概要	4
1. はじめに（研究背景等）	6
2. 研究開発目的	6
3. 研究目標	6
4. 研究開発内容	7
5. 研究成果	8
5-1. 成果の概要	8
5-2. 研究目標の達成状況	9
5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	11
6. 研究成果の発表状況の概要	13
6-1. 成果の件数	13
6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果	13
7. 国際共同研究等の状況	14
8. 研究者略歴	14
II. 成果の詳細	15
II-1 サブテーマ1「非接触型ごみ収集システムの要素技術の開発と性能評価」	15
〔サブテーマ1要旨〕	15
1. サブテーマ1研究開発目的	15
2. サブテーマ1研究目標	15
3. サブテーマ1研究開発内容	15
4. サブテーマ1結果及び考察	16
（1）現在のごみ収集と非接触型ごみ収集のイメージ	16
（2）【開発①】非接触型ごみ自動投入システム	17
（3）【開発②】自動搬出に対応したスマートごみ箱	18
（4）【開発③】自動搬送用モジュール式モビリティシステム	19
（5）【実証①】既存のごみ収集車に適合した非接触型ごみ自動投入システムの実証	22
（6）【実証②】特定空間内における非接触型ごみ収集システムの実証	23
（7）【実証②-1】南栗橋駅前街区における実証	23
（8）【実証②-2】テーマパークにおける実証	25
（9）【実証③】I市の公営住宅団地における非接触型ごみ収集システムの実証	26
（10）開発した要素技術の技術的課題の整理	27
（11）サブテーマ1のまとめ	27
5. サブテーマ1研究目標の達成状況	28
II-2 サブテーマ2「非接触型ごみ収集システムの社会実装に向けたシナリオ構築と評価」	29
〔サブテーマ2要旨〕	29
1. サブテーマ2研究開発目的	29
2. サブテーマ2研究目標	29
3. サブテーマ2研究開発内容	29
4. サブテーマ2結果及び考察	30
（1）一般廃棄物のごみ収集形態の類型化	30
（2）社会実装に向けた市場分析	31
（3）社会実装シナリオの構築	35
5. サブテーマ2研究目標の達成状況	46
III. 研究成果の発表状況の詳細	47

(1)	成果の件数	47
(2)	誌上発表	47
(3)	口頭発表	49
(4)	知的財産権	51
(5)	「国民との科学・技術対話」の実施	51
(6)	マスメディア等への公表・報道等	51
(7)	研究成果による受賞	52
(8)	その他の成果発表	52

I. 成果の概要

<課題情報>

公募区分：	環境問題対応型研究（技術実証型）
研究実施期間：	令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度
課題番号：	【3G-2101】
研究課題：	「非接触型ごみ収集システムの開発と社会実装に向けたシナリオ構築」
研究代表者：	小野田 弘士（早稲田大学 教授）
重点課題（主）：	【重点課題⑫】社会構造の変化に対応した持続可能な廃棄物の適正処理の確保に関する研究・技術開発
重点課題（副）：	【重点課題⑩】地域循環共生圏形成に資する廃棄物処理システムの構築に関する研究・技術開発
行政要請研究テーマ（行政ニーズ）：	（3-3）廃棄物収集の安全性確保のためのAI・IoTによる自動ごみ収集技術の高度化・効率化に関する研究
研究領域：	資源循環領域

<キーワード>

非接触
ごみ収集
自動化・省人化
モビリティ

<研究体制>

サブテーマ1「非接触型ごみ収集システムの要素技術の開発と性能評価」

<サブテーマ1リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
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	教授	小野田弘士	2021年度～2023年度

<サブテーマ1研究協力者>

機関名	部署名	役職名	氏名
特になし			

サブテーマ2「非接触型ごみ収集システムの社会実装に向けたシナリオ構築と評価」

＜サブテーマ2リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
株式会社大栄環境 総研		取締役	壺内良太	2021年度～2023 年度
株式会社大栄環境 総研		チームリーダー	吉留大樹	2022年度～2023 年度
株式会社大栄環境 総研			菊池亮	2021年度～2023 年度

＜サブテーマ2研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
特になし			

＜研究経費（間接経費を含む）＞

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	28,516千円	7,325千円	35,842千円
2022	28,358千円	6,870千円	35,228千円
2023	28,688千円	6,084千円	34,772千円
合計	85,562千円	20,279千円	105,842千円

1. はじめに（研究背景等）

ごみ収集の作業員の感染リスクの低減を図ることを目的とした非接触型のごみ収集システムの構築が社会的な要請となっている。人口減少・高齢化に伴う諸課題への対応から、AI・IoT等のテクノロジーを駆使することにより、行政サービスを維持しながらごみ収集システムのイノベーションを実現することが目標となる。本研究では、自治体や収集・運搬事業者との連携体制を構築し、既存のごみ収集システムとの接続性を重視し、非接触化・自動化に向けた要素技術の開発・システム化を目的とする。具体的には、現存する傾斜式ごみ収集装置の非接触化・自動化を図るアタッチメント（開発①）、センサ機能・圧縮機能を搭載したスマートごみ箱（開発②）およびそれを非接触・自動搬出するモジュール式モビリティシステム（開発③）を要素技術と位置付ける。これらの要素技術を収集・運搬事業者のフィールド（実証①）およびショッピングモール・テーマパーク等の特定空間内（実証②）で性能検証を行う。さらに、自治体との連携により、高齢化した住宅団地における1st 10yardsの拠点内のごみ収集を自動走行により行い、開発した技術をシステムとして適用する実証事業を行う（実証③）。本提案は、「環境問題対応型研究（技術実証型）」に該当する。本研究では、事業化を担う事業者との共同提案となっており、技術開発と社会実装に向けた検討を同時並行で行う。本研究において、要素技術の開発と小規模な実証を完了し、わが国のごみ収集の実情に合わせた社会実装に向けたシナリオを提示する。具体的には、本研究で連携先となる自治体を中心に大規模な実証事業や実用化の展開に向けた方策を検討する。さらに、各地の地域循環共生圏やスマートシティプロジェクトおよび2025年の関西万博や2027年のリニア開業等での社会実装をターゲットとした事業化も検討する。

2. 研究開発目的

本研究では、非接触型のごみ収集を実現する要素技術の開発とシステム化および社会実装に向けたシナリオ構築を行うことを目的とする。具体的には、既存のごみ収集システムとの連携を念頭においた非接触型のごみ投入システム、ごみの搬送の非接触化・自動化を実現するスマートごみ箱および自動搬送モビリティを開発する。さらに、自治体および収集・運搬事業者との連携により、「非接触・自動化」のコンセプトとなる実証モデルを提案し、特定コミュニティにおける実証試験を行うことを本事業のターゲットと位置付ける。

3. 研究目標

全体目標	● 現存する傾斜式ごみ収集装置の非接触化・自動化を図るアタッチメント（開発①）、センサ機能・圧縮機能を搭載したスマートごみ箱（開発②）およびそれを非接触・自動搬出するモジュール式モビリティシステム（開発③）を非接触化・自動化に向けた要素技術と位置づけ、これらの開発・システム化を行うこと。 ● 収集・運搬事業者のフィールド（実証①）およびショッピングモール・テーマパーク等の特定空間内（実証②）で性能検証を行う。さらに、自治体との連携により、高齢化した住宅団地における1st 10yardsの拠点内のごみ収集を自動化する。開発した要素技術をシステムとして検証する実証事業を通じて、社会実装に向けた課題を明らかにすること（実証③）。本研究では、<u>フルスケール（機種は限定）での試作機器・システムが実際の使用環境で実証することを到達目標とする（「環境問題対応型研究（技術実証型）」に該当）</u>。 ● 以上の開発と実証と並行して、わが国のごみ収集の実情に即した非接触化・自動化の社会実装に向けたシナリオを提示すること。
------	--

サブテーマ 1	「非接触型ごみ収集システムの要素技術の開発と性能評価」
サブテーマ 1 実施機関	早稲田大学
サブテーマ 1 目標	現存する傾斜式ごみ収集装置の非接触化・自動化を図るアタッチメント（開発①）、センサ機能・圧縮機能を搭載したスマートごみ箱（開発②）およびそれを非接触・自動搬出するモジュール式モビリティシステム（開発③）を非接触化・自動化に向けた要素技術と位置づけ、これらの開発・システム化を行うこと。 <u>1年目に、要素技術の開発と検証および実証試験案をサブテーマ 2 と並行して具体化する。2年目に、小規模な実証および性能評価を行い、3年目に実証試験を行う。</u>

サブテーマ 2	「非接触型ごみ収集システムの社会実装に向けたシナリオ構築と評価」
サブテーマ 2 実施機関	株式会社大栄環境総研
サブテーマ 2 目標	自治体、収集・運搬事業者等のニーズを把握したうえで、非接触型ごみ収集システムの社会実装に向けたシナリオを提示する。具体的には、わが国のごみ収集の実態を把握したうえで、サブテーマ 1 で開発する技術・システムの社会実装に向けた方策を明らかにする。また、連携する事業者や自治体との協議により、本研究での実証モデルを具体化する。社会実装に向けては、収集・運搬事業者および廃棄物処理・リサイクル事業者の立場から事業化シナリオを提示する。また、早期の事業化が可能と考えられるショッピングモール・テーマパーク等の特定空間内での活用に加え、2025年の大阪万博が現時点で明らかになっているターゲットとなる。その他、各地のスマートシティプロジェクトでの社会実装を想定する。

4. 研究開発内容

【サブテーマ 1】非接触型ごみ収集システムの要素技術の開発と性能評価

サブテーマ 1 では、現存する傾斜式ごみ収集装置の非接触化・自動化を図るアタッチメント（【開発①】非接触型ごみ自動投入システム）、センサ機能・圧縮機能を搭載したスマートごみ箱（【開発②】自動搬出に対応したスマートごみ箱）およびそれを非接触・自動搬出するモジュール式モビリティシステム（【開発③】自動搬送用モジュール式モビリティシステム）を非接触化・自動化に向けた要素技術と位置づけ、これらの開発・システム化を行った。開発①としては、700Lの大型ごみコンテナを反転できる大型反転装置、開発③の自律走行型ロボットと連携することで、小型ごみコンテナをパッカー車に反転できる移動式反転装置を開発した。開発②としては、開発③の自律走行型ロボットと連携することで、格納されている台車付きのごみコンテナを自動搬出することができるスマートごみ箱を開発した。開発③としては、LiDAR(Light Detection And Ranging)を搭載し、自律走行による小型ごみコンテナの運搬が可能な自律走行型ロボットを開発した。

そして、これらの要素技術を用いた実証を3つ行った。既存のごみ収集車に適合した非接触ごみ自動投入システムに関する実証は事業所内で行い（実証①）、特定空間内における非接触型ごみ収集システムの実証は南栗橋駅前街区のイベントやテーマパークにおいて実施した（実証②）。また、自治体連携型の実証として、I市の住宅団地において実際に発生するごみを用いた非接触型ごみ収集の実証を行った（実証③）。これらの実証を行うことで、開発した要素技術を活用することでごみ収集の非接触化・自動化を図ることができ、人による回収作業を代替するリソースシフトを達成した。また、非接触型ごみ収集システムの社会実装に向けた技術的な課題を整理した。

【サブテーマ2】非接触型ごみ収集システムの社会実装に向けたシナリオ構築と評価

サブテーマ2では、まず初めに一般廃棄物のごみ収集の実態を調査し、類型化を行った。また、収集・運搬事業者、自治体職員、地域住民に対し、非接触型ごみ収集システムに対するニーズについてアンケート・ヒアリング調査を実施し、ごみ収集の非接触化・自動化によって作業負荷低減、住民サービスの向上に寄与することにニーズがあることが確認できたほか、早期の事業化が見込めるフィールド等に関する知見を得た。この知見を基に、自治体および収集・運搬事業者との連携を念頭においた実証モデルの計画を具体化し、サブテーマ1において実証①から③を行った。実証の評価項目としては非接触性、作業効率、要素技術を安全に活用するうえで必要とする環境等について着目し、サブテーマ1の実証内で評価結果をまとめた。

上記の調査結果および実証結果を基に、非接触型ごみ収集システムの社会実装シナリオを特に課題となる法規制・制度の面から3つのパターン（①現実シナリオ/②地域連携シナリオ/③イノベーションシナリオ）に分け、XRL(X Readiness Level)の視点から社会実装に向けたロードマップを作成した。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

全体として、非接触型ごみ収集システムを実現するための要素技術を開発①から③に分け、開発・システム化を行った。また、開発した要素技術の性能検証およびシステムとして活用し、社会実装することが可能かどうか検証する実証事業を行うことで、技術的・社会的課題を明らかにした。さらに、非接触型ごみ収集システムに関する市場分析を行うことで、わが国のごみ収集の実情に即した非接触型ごみ収集システムの社会実装シナリオを提示し、社会実装に向けたロードマップを作成した。

サブテーマ1では、非接触型ごみ収集システムの3つの要素技術として、【開発①】非接触型ごみ自動投入システム、【開発②】自動搬出に対応したスマートごみ箱、【開発③】自動搬送用モジュール式モビリティシステム（自律走行型ロボット）の開発・システム化を行った。【開発①】では、700Lの大型コンテナを自動反転することができ、3tパッカー車に取り付け可能な大型反転装置を開発した。事業所内での実機スケールでの【実証①】を経て、その有効性を確認した（成果番号1、31）。一方、この方式では、パッカー車の安全基準の見直し等が必要であり、社会実装に向けて課題があることを示した（成果番号14、50）。そこで、【開発③】の自律走行型ロボットと連携することで、110L程度の小型ごみコンテナをパッカー車に反転することができる移動式反転装置を実機スケールで開発した。【開発②】では、【開発③】の自律走行型ロボットによって、ごみコンテナを自動搬出することが可能で、ごみ量測定機能も有したスマートごみ箱を開発した（成果番号2、5）。【開発③】としては、150kg程度のごみコンテナや荷物を牽引しながら自律走行することができる自律走行型ロボットを開発した（成果番号3、36）。これらの開発成果を用いて、また、南栗橋駅前街区のイベントやテーマパーク内等の公道走行を含まない「特定空間」において、スマートごみ箱で回収したごみを目標地点まで非接触で運搬し、反転投入する【実証②】を通じて、非接触でのごみ収集を実現することができた（成果番号3）。さらに、自律走行型ロボットの開発と実証②の結果から、社会実装に向けての技術的な課題を抽出し、今後必要とされる技術開発要素を整理した。また、自治体との連携により、I市の住宅団地で実際に発生したごみを対象とした【実証③】を通じて、実環境における非接触ごみ収集の一連のシステムの実証を行い、非接触でのごみ収集が実現できることとリソースシフトの実現可能性を確認することができた。自律走行型ロボットを住宅団地で運用するために必要とされる具体的な環境整備の内容を整理した（成果番号36）。

サブテーマ2では、家庭系一般廃棄物の収集・運搬事業を行っているA社の作業に同行し、ごみの排出状況を把握することで、一般廃棄物のごみ収集の類型化を図った。また、非接触型ごみ収集システムによるごみ収集の所要時間について、グリッドシティモデルを用いて算出し、自律走行型モビリティを複数台活用する効果について評価した（成果番号46）。さらに、一般廃棄物の収集・運搬事業者、I市の自治体職員・南栗橋駅前街区におけるイベントに参加した地域住民に対し、非接触型ごみ収集システム

に関するニーズについてアンケート・ヒアリング調査を実施し、一定のニーズがあることを確認した（成果番号50）。そして、サブテーマ1の実証結果をも踏まえ、非接触型ごみ収集システムの社会実装シナリオを特に課題となる法規制・制度の面から「①現実シナリオ、②地域連携シナリオ、③イノベーションシナリオ」の3つのパターンに分け、XRLの視点から社会実装に向けたロードマップを提示した。本ロードマップ内で、各パターンの現状の技術的課題・社会的課題を整理し、今後必要とする実証内容・車両規格の見直しや公道走行・公道作業の実現に向けた政策提言等に関する内容を整理した。

5-2. 研究目標の達成状況

<全体の達成状況>・・・・・・・・・・・・・・・・ 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「非接触型ごみ収集システムの開発と社会実装に向けたシナリオ構築」

全体目標	全体の達成状況
● 現存する傾斜式ごみ収集装置の非接触化・自動化を図るアタッチメント（開発①）、センサ機能・圧縮機能を搭載したスマートごみ箱（開発②）およびそれを非接触・自動搬出するモジュール式モビリティシステム（開発③）を非接触化・自動化に向けた要素技術と位置づけ、これらの開発・システム化を行うこと。 ● 収集・運搬事業者のフィールド（実証①）およびショッピングモール・テーマパーク等の特定空間内（実証②）で性能検証を行う。さらに、自治体との連携により、高齢化した住宅団地における1st 10yardsの拠点内のごみ収集を自動化する。開発した要素技術をシステムとして検証する実証事業を通じて、社会実装に向けた課題を明らかにすること（実証③）。本研究では、<u>フルスケール（機種は限定）での試作機器・システムが実際の使用環境で実証することを到達目標とする（「環境問題対応型研究（技術実証型）」に該当）</u>。 ● 以上の開発と実証と並行して、わが国のごみ収集の実情に即した非接触化・自動化の社会実装に向けたシナリオを提示すること。	1. サブテーマ1において、全ての開発および実証を当初の計画通りに実施することができた。また、実証①と実証②については前倒しで実施できており、南栗橋駅前街区の取り組みに関しては、本事業開始時点では、具体化していなかった案件ではあるが、スマートシティと一体となった実証を行うことができたため、サブテーマ2において社会実装に向けた具体的なビジネスモデルを考察することができた。 2. サブテーマ1を計画通りに進めることができたため、開発や実証結果を踏まえたうえで、サブテーマ2において現状の技術的課題・社会的課題を具体的に抽出することができ、社会実装に向け、今後実施する必要がある実証モデルを提示することができた。これにより、社会実装シナリオに向けたロードマップをより詳細に提示することができた。 3. さらに、南栗橋駅前街区における次世代のまちづくりプロジェクト「BRIDGE LIFE Platform 南栗橋」は、久喜市、東武鉄道、トヨタホーム、イオンリテール、早稲田大学小野田研究室による5者間協定に基づくプロジェクトとなっており、今後も非接触型ごみ収集システムを含めた環境政策を久喜市と連動した形で進める体制が整っており、本事業で得られた知見を活用する予定となっている。

<【サブテーマ1】達成状況>・・・・・・・・・・・・・・・・ 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「非接触型ごみ収集システムの要素技術の開発と性能評価」

サブテーマ1目標	サブテーマ1の達成状況
現存する傾斜式ごみ収集装置の非接触化・自動化を図るアタッチメント（開発①）、センサ機能・圧縮機能を搭載したスマートごみ箱（開発②）およびそれを非接触・自動搬出するモジュール式モビリティシステム（開発③）を非接触化・自動化	1. 開発①として、図 3に示す大型反転装置と図 5に示す移動式反転装置を開発することができた。開発②として、図 7に示すスマートごみ箱を示すことができ、開発③としては、図 9に示す自律走行型ロボットを開発することがで

に向けた要素技術と位置づけ、これらの開発・システム化を行うこと。<u>1年目に、要素技術の開発と検証および実証試験案をサブテーマ2と並行して具体化する。2年目に、小規模な実証および性能評価を行い、3年目に実証試験を行う。</u>	きた。自律走行型ロボットは、当初の想定より高機能なモデルを開発することができ、図 11 や図 20に示すような社会実装に向けた課題を具体的に把握することができた。 2. 実証①は図 14に示す方法で実施され、大型反転装置を用いることで、ごみ収集の非接触化につながることを示すことができた。 3. 実証②はテーマパーク内や南栗橋駅前街区のイベント等の特定空間において実施され、物資の運搬やごみ収集の非接触化・自動化が可能なことを確認できた。また、テーマパークにおける非接触型ごみ収集システムの実装に向け、表 1に示すニーズを把握することができた。 4. 実証③は図 21や図 22に示すように移動式反転装置や自律走行型ロボットを用いてI市の公営住宅団地にて実施され、実際に発生するごみを対象とした非接触型ごみ収集を行い、人による作業をモビリティが代替するリソースシフトを達成することができた。
---	---

< 【サブテーマ2】達成状況> 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「非接触型ごみ収集システムの社会実装に向けたシナリオ構築と評価」

サブテーマ2 目標	サブテーマ2 の達成状況
自治体、収集・運搬事業者等のニーズを把握したうえで、非接触型ごみ収集システムの社会実装に向けたシナリオを提示する。具体的には、わが国のごみ収集の実態を把握したうえで、サブテーマ1で開発する技術・システムの社会実装に向けた方策を明らかにする。また、連携する事業者や自治体との協議により、本研究での実証モデルを具体化する。社会実装に向けては、収集・運搬事業者および廃棄物処理・リサイクル事業者の立場から事業化シナリオを提示する。また、早期の事業化が可能と考えられるショッピングモール・テーマパーク等の特定空間内での活用に加え、2025年の大阪万博が現時点で明らかになっているターゲットとなる。その他、各地のスマートシティプロジェクトでの社会実装を想定する。	1. 社会実装に向けたシナリオ構築は当初の計画通りに進み、図 28に示す社会実装シナリオと図 38に示す社会実装に向けたロードマップを示すことができた。 2. 表 3のようにわが国のごみ収集の実態を類型化することができ、図 23から図 27に示す住民、収集・運搬事業者、自治体職員のニーズを把握したことで、サブテーマ1で開発した要素技術の社会実装に向けた方策を明確化できた。 3. 社会実装シナリオを3つのパターンに分けて提示し、図 29から図 31のような具体的な今後の開発項目や実証モデルを示すことができた。特に、当初の計画では既存のごみ収集との接続を前提とした社会実装シナリオの構築を予定していたが、パターン③ではコンテナ自体を回収する新しいモデルを提案した。 4. 2025年の大阪・関西万博においてもスマートごみ箱を活用した企画を実施予定となっており、今回提示したロードマップに沿って今後も南栗橋駅前街区やテーマパーク等の特定空間における事業化に向けた検討が進行中である。 5. 非接触型ごみ収集システムの社会実装に向けた法規制や車両規格の見直しについては今後政策提言につなげる予定となっている。

5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

＜得られた研究成果の学術的意義＞

【サブテーマ1】非接触型ごみ収集システムの要素技術の開発と性能評価

- 日本国内で利用されているごみコンテナとパッカー車との接続性を考慮した大型反転装置や移動式反転装置を活用した非接触型ごみ自動投入システムは、コロナショックによりニーズが急増したごみ収集の非接触化を実現することに寄与するとともに、従来の人によるごみ収集よりも作業負荷を低減することができるポテンシャルがある。しかしながら、日本のごみ収集に即したロボティクスや自律走行の取り組みに関しては、取り組まれた先行研究が存在しない。廃棄物・資源循環分野のみならず、機械工学、情報工学、都市計画の観点からも新たな知見を含んでいるといえ、学際的な要素を含んでいる点に特徴がある。
- とりわけ、開発した成果のなかで、屋外での走行とごみ収集機能を搭載した自律走行型ロボットは、当初の見込みよりも高機能かつ実用性の高い成果を得ることができ、情報処理学会の査読付論文として採録された（成果番号3）。現在は、特許出願を優先しているが、【実証③】の成果も併せて、成果発表を検討している。

【サブテーマ2】非接触型ごみ収集システムの社会実装に向けたシナリオ構築と評価

- 一般廃棄物のごみ収集の類型化結果や非接触型ごみ収集システムに関するニーズについて収集・運搬業者・自治体職員・住民へアンケート・ヒアリングした結果は、一般廃棄物の収集・運搬の非接触化・自動化を図るうえでの市場を把握するために有用な情報を得ることができた。これらの情報は、廃棄物・資源循環分野における政策面・学術面の双方で有益である。
- 社会実装シナリオの3つのパターン（①現実シナリオ/②地域連携シナリオ/③イノベーションシナリオ）に細分化し、パターンごとの具体的な技術的課題・社会的課題を明らかにしたため、非接触型ごみ収集システムの普及に向けて有用な情報を得ることができる点から発展性があるといえる。本件の成果は、現時点で未発表のため廃棄物マネジメントに関連する論文誌への投稿を計画している。
- サブテーマ2に関しては、具体的な政策提言につながる成果が得られた点に特筆すべき点がある。非接触型ごみ収集システムの普及に向けた車両規格の見直しや統一コンテナの普及に向けた提案や現場ニーズと現行の法体系に基づく社会実装シナリオは、具体的な政策提言につながっている。

＜行政等に既に貢献した成果＞

- 小野田は、環境省デジタル技術の活用等による脱炭素型資源循環システム創生実証事業委託業務における検討会の座長を務めた（令和3～5年度）。同検討会では、電動パッカー車の自動運転に関する技術開発・実証を検討内容のひとつとしている。その検討のなかで、自動運転等に関するノウハウを提供している。なお、本研究は、狭い路地で利用可能な小型のごみ収集モビリティをターゲットとして、棲み分けが図れるものと考えている（図 1）。
- 小野田は、下記の自治体における一般廃棄物に関する審議会に携わっており、どの自治体でのごみ収集の改善は、課題となっている。そのなかで、本研究の取り組み内容を紹介し、ごみ収集の将来像に関する情報提供を行っている。また、ある自治体では、本研究の取り組みの成果を観光地のごみ問題に応用したいとのニーズが存在することが確認できている。
 - ・新宿区リサイクル・清掃審議会（会長）、羽村市廃棄物減量等推進審議会（会長）、中央区清掃・リサイクル推進協議会（委員）、荒川区清掃審議会（副会長）、横浜市廃棄物減量化・資源化等推進審議会（会長代理）等
- 本研究の実証フィールドのひとつである南栗橋駅前街区における南栗橋駅前街区の次世代のまちづくりプロジェクト「BRIDGE LIFE Platform 南栗橋」は、久喜市、東武鉄道、トヨタホーム、イ

オンリテール、早稲田大学小野田研究室による5者間協定に基づくプロジェクトである。久喜市の環境政策と連動した形で本研究を進めている。



図 1 環境省が進めるパッカー車の自動運転と本研究開発の棲み分け

＜行政等に貢献することが見込まれる成果＞

本研究は「行政養成研究テーマ：（３－３）廃棄物収集の安全性確保のためのAI・IoTによる自動ごみ収集技術の高度化・効率化に関する研究」の内容に合致する研究テーマである。サブテーマ1において開発した非接触型ごみ自動投入システム・自動搬出に対応したスマートごみ箱・自動搬送用モジュール式モビリティを用いた実証により、「AI・IoTによる自動ごみ収集技術」に関する知見を獲得することができた。この知見は、自治体等におけるモデル事業の設計等の政策にフィードバックすることが可能である。また、これらの知見は高齢者等の分別・回収への支援方策と組み合わせる政策展開も期待できる。さらに、プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律が成立して以降、プラスチック使用製品の分別ニーズは上昇傾向にあり、今後新しくプラスチック使用製品のみを分別回収する必要があるなかで、本要素技術を活用したシステムを構築することで、それにかかる作業負担を低減することができると考えられる。

モビリティは地域循環共生圏の構築のなかで重要なテーマのひとつであり、本研究における実証③のフィールドであるI市はRE100の工業団地や宅配ロボットに関する実証を進めている自治体である。こうした動きのなかに非接触型ごみ収集システムを取り込むことで、地域循環共生圏の付加価値を高めることができる。また、これらの内容を収集・運搬事業者を含む廃棄物処理・リサイクル事業を展開する事業者と連携することにより、静脈産業からのイノベーションを誘発することが可能となり、地域のごみ問題をきっかけとして、高齢化等の地域課題に対応した地域循環共生圏に代表される自律・分散型の社会システムの実現に向けたソリューションのひとつとして提示することができる。

実証②のフィールドである南栗橋駅前街区は産学官連携による「BRIDGE LIFE Platform構想」という環境配慮型・次世代型のスマートタウンの実現に向けたプロジェクトのなかで、次世代型モビリティを活用したMaaS(Mobility as a Service)との連携を念頭においた非接触型ごみ収集を行う街づくりが推進している。そのため、本街区における実証から得られた知見等を基に、要素技術の改良を進めていくことで、サブテーマ2において提示した社会実装シナリオの「地域連携シナリオ」パターンに沿った社会実装を図ることができると考えられる。

6. 研究成果の発表状況の概要

6-1. 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	5
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	10
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	0
口頭発表（学会等・査読なし）：	36
知的財産権：	0（出願準備中）
「国民との科学・技術対話」の実施：	9
マスコミ等への公表・報道等：	4
研究成果による受賞：	1
その他の成果発表：	0

6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果

成果番号	主要な成果（10件まで）
1	Ogawa A., Pandyaswargo, A. H., Tsubouchi, R., & Onoda, H. (2023). Demonstration of contactless waste collection system: A Japanese case study. IET Smart Cities, 5(4), 303-316. https://doi.org/10.1049/smc2.12065
2	Shan, C., Pandyaswargo, A. H., Ogawa, A., Tsubouchi, R., & Onoda, H. (2024). Japanese public perceptions on smart bin potential to support PAYT systems. Waste Management, 177, 278-288. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.02.003
3	小川聡久, 久保田耕介, Pandyaswargo Andante Hadi, 壺内良太, 小澤健, 澤田真, & 小野田弘士. (2024). 非接触型ごみ収集システムにおける自律走行型ロボットの開発と社会実装に向けた検討. In 情報処理学会論文誌デジタルプラクティス58号, 5(2). 一般社団法人情報処理学会.
4	小野田弘士. (2023). Circular Economy (CE) に貢献するデジタル技術の現状と展望. 日本LCA学会誌, 19(2), 79-84. 日本LCA学会

5	Chaoxia SHAN, Andante Hadi PANDYASWARGO, Hiroshi ONODA. (掲載決定) Readiness Status of Smart Waste Collection and Processing Technologies for Plastic Waste Recycling, Ecodesign2023, Springer.
14	小野田弘士：都市清掃77(377)，13-20 (2024)，非接触型ごみ収集システムの要素技術の開発と社会実装に向けたシナリオ構築.
31	小川聡久，加藤浩瑞，久保田耕介，山本純太，壺内良太，& 小野田弘士. (2023). 非接触型ごみ自動投入システムの要素技術の開発と PoC (Proof of Concept). In 第44回全国都市清掃研究・事例発表会 (p. 168). 公益社団法人 全国都市清掃会議.
36	小川聡久，久保田耕介，壺内良太，& 小野田弘士. (2024). 非接触型ごみ収集システムにおける自律走行型ロボットの開発と機能検証. In 第45回全国都市清掃研究・事例発表会 (p. 121). 公益社団法人 全国都市清掃会議.
47	小川聡久，加藤浩瑞，久保田耕介，壺内良太，菊池亮，& 小野田弘士. (2022). 非接触型ごみ収集システムの要素技術の開発と評価. In 環境工学総合シンポジウム講演論文集 (pp. 2205-08). 一般社団法人 日本機械学会.
50	壺内良太，菊池亮，小川聡久，& 小野田弘士. (2023). 非接触型ごみ収集システムの社会実装シナリオの構築に向けた検討. In 第44回全国都市清掃研究・事例発表会 (p. 171). 公益社団法人 全国都市清掃会議.

※この欄の成果番号は「Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細」と共通です。

7. 国際共同研究等の状況

＜国際共同研究等の概要＞

＜相手機関・国・地域名＞

機関名	国・地域名（本部所在地等）
特に記載すべき事項はない。	

8. 研究者略歴

＜研究代表者略歴＞

代表者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
小野田弘士	2006年3月早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。博士（工学）。2006年4月より早稲田大学環境総合研究センター講師、2008年4月より同准教授、2014年4月より早稲田大学大学院環境・エネルギー研究科准教授、2017年4月同教授（現職）。2022年9月より、早稲田大学大学院環境・エネルギー研究科長（現職）。研究分野は、環境配慮設計、LCA、資源循環技術・システム、エネルギーマネジメントシステム、再生可能エネルギー熱利用技術・システム、未利用バイオマス利活用技術・システム、次世代モビリティシステム、スマートコミュニティ等

＜研究分担者（サブテーマリーダー）略歴＞

分担者氏名	略歴（学歴、学位、現職、研究テーマ等）	参画期間
壺内良太	最終学歴：早稲田大学環境・エネルギー研究科修了 修士（工学） 現在の役職：株式会社大栄環境総研 取締役 専門分野：環境エネルギー、廃棄物処理	2021年度 ～ 2023年度

Ⅱ． 成果の詳細

Ⅱ－１ サブテーマ１「非接触型ごみ収集システムの要素技術の開発と性能評価」

[サブテーマ１ 要旨]

サブテーマ１では、ごみ収集作業員の感染リスクの低減を図るために、既存のごみ収集システムとの接続性を重視した非接触型ごみ収集システムの構築に向けた要素技術を開発した。具体的には、3つの要素技術として【開発①】非接触型ごみ自動投入システム、【開発②】自動搬出に対応したスマートごみ箱、【開発③】自動搬送用モジュール式モビリティシステムを開発した。また、開発した要素技術を用いて、事業所内での実証①、特定空間内での実証②、自治体と連携した住宅団地での実証③を行い、各要素技術について性能評価を行った。これにより、非接触型ごみ収集システムの社会実装に向けた課題を把握することができた。さらに、開発③で開発した自律走行型ロボットは当初の想定よりも高機能なモデルを開発でき、今後事業化に向けた展開が期待できることから、計画時の目標を大きく上回る成果を挙げる事ができた。

１． サブテーマ１ 研究開発目的

サブテーマ１では、ごみ収集作業員の感染リスクの低減を図るために、AI・IoT等のテクノロジーを駆使することにより、行政サービスを維持しながらごみ収集システムのイノベーションを実現することを目標として、既存のごみ収集システムとの接続性を重視した非接触型ごみ収集システムの構築に向けた要素技術を開発する。また、これらの要素技術を用いて、収集・運搬事業者のフィールド、イベントやテーマパーク等の特定空間内、自治体と連携した住宅団地等で非接触型ごみ収集システムのPoC(Ploof of Concept)を行い、性能評価しながら各実証フィールドで開発した要素技術が運用可能であることを確認するとともに社会実装に向けた技術的な課題を整理する。

２． サブテーマ１ 研究目標

サブテーマ１	「非接触型ごみ収集システムの要素技術の開発と性能評価」
サブテーマ１ 実施機関	早稲田大学
サブテーマ１ 目標	現存する傾斜式ごみ収集装置の非接触化・自動化を図るアタッチメント（開発①）、センサ機能・圧縮機能を搭載したスマートごみ箱（開発②）およびそれを非接触・自動搬出するモジュール式モビリティシステム（開発③）を非接触化・自動化に向けた要素技術と位置づけ、これらの開発・システム化を行うこと。 <u>1年目に、要素技術の開発と検証および実証試験案をサブテーマ２と並行して具体化する。2年目に、小規模な実証および性能評価を行い、3年目に実証試験を行う。</u>

３． サブテーマ１ 研究開発内容

サブテーマ１では、現存する傾斜式ごみ収集装置の非接触化・自動化を図るアタッチメント（【開発①】非接触型ごみ自動投入システム）、センサ機能・圧縮機能を搭載したスマートごみ箱（【開発②】自動搬出に対応したスマートごみ箱）およびそれを非接触・自動搬出するモジュール式モビリティシステム（【開発③】自動搬送用モジュール式モビリティシステム）を非接触化・自動化に向けた要素技術と位置づけ、これらの開発・システム化を行った。開発①としては、700Lの大型ごみコンテナを自動反転することができ、3tパッカー車に取り付け可能な大型反転装置を開発した。また、開発③として開発した自律走行型ロボットと連携することで、110L以下程度の小型ごみコンテナをパッカー車に反転できる移動式反転装置も開発した。開発②としては、自律走行型ロボットにより、格納されているごみコンテナを自動搬出することが可能な形状で、ごみ量測定機能を有したスマートごみ箱を開発した。開発③としては、LiDAR(Light Detection And Ranging)および牽引機構を搭載することで、ごみコンテナや物資の自動運搬が可能な自律走行型ロボットを開発した。

そして、これらの要素技術を用いた3つの実証（【実証①】事業所内、【実証②】特定空間内、【実証③】自治体連携）を行い、性能評価を行った。事業所内で実施した実証①では、開発①の非接触型ごみ自動投入システムの性能検証を行い、実機スケールで大型ごみコンテナの非接触型ごみ収集が可能であることを確認できた。実証②では、南栗橋駅前街区のイベントで発生したごみを対象とした実証やテーマパーク内での運用を想定した実証を行い、スマートごみ箱や自律走行型ロボットを活用したごみ収集の一連の動作を非接触で行うことが可能であることを確認できた。I市の公営住宅団地で実施した実証③では、本住宅団地で実際に発生したごみを対象として、ごみ集積所に置かれているごみをパッカー車まで運搬し、反転投入する一連の動作を非接触で行うことができることを確認し、人による回収作業を自律走行型ロボットが代替するリソースシフトを達成した。また、本要素技術の開発と実証結果を基に、現状の技術的課題を把握することで、非接触型ごみ収集システムの社会実装に向けて必要とされる技術開発や改良の方向性を整理することができた。

4. サブテーマ1 結果及び考察

（1）現在のごみ収集と非接触型ごみ収集のイメージ

現在のごみ収集の状況に対し、非接触型ごみ収集システムの要素技術の開発を行う場合のイメージを図2に示す。現在のごみ収集では排出現場から発生するごみを住民等がごみ集積所に運搬した後、収集・運搬事業者の作業員が手作業でパッカー車に投入するため、非接触とはなっていない。そこで、各排出現場に統一規格のコンテナが格納されたスマートごみ箱を設置し、ごみコンテナごとモビリティが運搬し、集積場所へ集める方式に変更することで、住民のごみ出しの負担軽減を図ることができる。また、反転装置を用いて、集めたごみコンテナをパッカー車に投入することで、収集・運搬作業員の作業の非接触化・自動化が可能となる。このように、従来、人が行っていた作業をロボットに代替させることで、夜間や早朝での回収も可能となり、リソースシフトにつながるといえる。

本研究事業における非接触型ごみ収集システムの要素技術は図2に示すイメージを前提とし、パッカー車にごみを自動投入するためのシステムを開発①、ごみ集積所までモビリティがごみを自動搬出することができる形状となっているスマートごみ箱を開発②、各地点間を非接触で運搬するためのモビリティを開発③として開発を進めた。

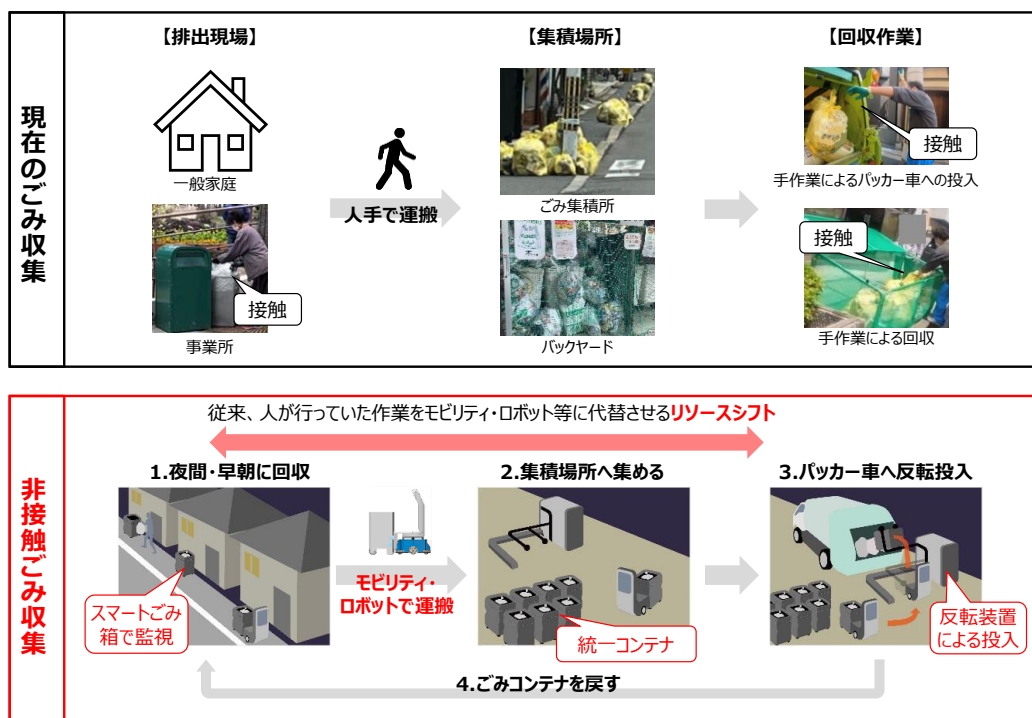


図2 現在のごみ収集と非接触型ごみ収集のイメージ

(2) 【開発①】非接触型ごみ自動投入システム

一般に普及している大型ごみコンテナ（700L）と小型ごみコンテナ（70～110L 程度）を対象とし、それぞれ反転させることができる非接触型ごみ自動投入システムとして、大型反転装置と移動式反転装置を開発した。小型ごみコンテナ用の移動式反転装置については、まずプロトタイプモデルを開発し、機能検証を行った後に改良モデルとして開発した。

(1) 大型反転装置：大型ごみコンテナに対応した非接触型ごみ自動投入システム

一般に普及している 700L の大型ごみコンテナ（図 3（a））を用いて非接触にてごみの自動投入が可能なシステム（同図（b）、以下、大型反転装置という）を開発し、パッカー車に取り付け性能評価を行った。パッカー車は、3t パッカー車の試験車両となっている。大型反転装置は、700L ごみコンテナの側面上部に取り付けられている金属のバーを大型反転装置の把持機構で把持し、ごみコンテナを持ち上げ、反転させることで、ホッパー内にごみを投入する仕組みとなっている。爪を閉じる際は、車両後方側面にある操作ボタンを押すと、油圧により爪をロックすることでごみコンテナを把持する（同図（c））。以上より、ごみコンテナに積載されたごみをホッパー内に取り込むまでの流れを非接触で行うことを可能とした。



(a) 反転装置に対応した 700L ごみコンテナ



(b) パッカー車に取り付けられた大型反転装置



(c) 反転装置用のレバーおよび動作時の様子

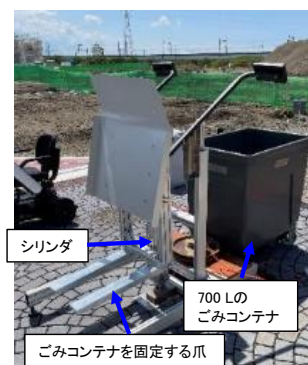
図 3 非接触型ごみ自動投入システム（大型コンテナ：700L、3t車）

(2) 移動式反転装置：小型ごみコンテナに対応した非接触型ごみ自動投入システム

70～110L 程度の小型ごみコンテナに対応した非接触によるごみの自動投入が可能なシステムとして、まずプロトタイプの反転装置（図 4(a)、以下、小型反転装置という）を開発した。このシステムは、開発②と開発③で記述するスマートごみ箱およびモジュール式モビリティと連携し、非接触により別のごみコンテナにごみの自動投入を実現するものである。本反転装置は固定式となっており、70L～100L 程度の小型ごみコンテナに捨てられたごみを大型ごみコンテナやごみ収集車に反転投入することができる。小型反転装置は、シリンダ、ごみコンテナを固定する爪で構成され、コンプレッサーを用いて活用するモデルとなっており、同図(b)に示すように小型のごみコンテナを載せた台車に反転装置の爪をはめ込み、空圧シリンダの上下伸縮運動を反転装置の回転運動に変化させる反転動作により人の手を介さず別のごみコンテナにごみを投入することができることが機能検証によりわかった。

上記に示すプロトタイプの小型反転装置の機能検証結果から、小型ごみコンテナ内のごみを大型ごみコンテナに投入することは可能となったが、固定式のため停車位置が変化のごみ収集車に直接反転することは難しい点が課題であることがわかった。また、コンプレッサー式の場合、騒音の問題も発生す

ることが予想されたため、新たにキャスターを取り付け、開発③で記述する自律走行型ロボットにより、運搬可能にした移動式反転装置を改良モデルとして開発した（図 5）。本装置は電動でモーターを回転させることでコンテナを昇降・反転・下降させることができ、静音性が高いモデルとなっている。図 5 のコンテナを把持する爪の部分に、開発③で新たに開発した自律走行型ロボットが把持しているごみコンテナを自動で挿入することができる形状となっており、コンテナが挿入された後にリモコンや操作パネルを操作することで、ごみコンテナの反転ができる仕様となっている。図 5 のスライダー部分に開発③で示す自律走行型ロボットと連携するための再帰性反射材が貼られている。



(a) 小型反転装置の外観



(b) ごみコンテナと小型反転装置の接続

図 4 非接触型ごみ自動投入システム（小型コンテナ：78L）

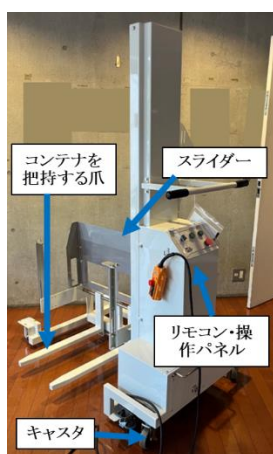


図 5 移動式反転装置

（３）【開発②】自動搬出に対応したスマートごみ箱

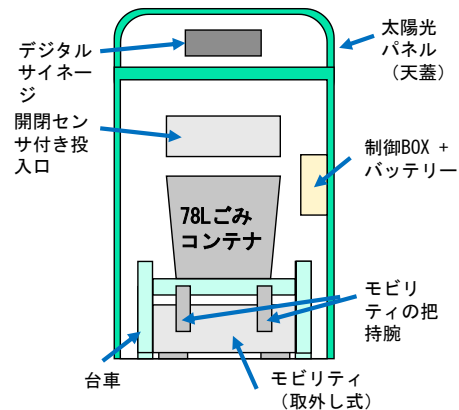
開発③のプロトタイプとして開発したモビリティに対応した形状となっており、格納されている小型ごみコンテナの自動搬出が可能なスマートごみ箱をプロトタイプのモデルとして開発した（図 6）。開発したスマートごみ箱は、上部のフレームと下部にコンテナを載せた台車部分により構成されている。ごみの投入口の扉には開閉センサがついており、手を近づけると自動で開閉できるようになっており、ごみ箱に手を触れずにごみを捨てることができるため、ごみを捨てる人が非接触でごみを捨てることができるように配慮されている。ごみ箱の上部には、太陽光パネルが取り付けられており、充電が可能となっている。フレーム部分の内部には、制御 BOX と給電用のバッテリーが取り付けられている。台車には 78L ごみコンテナが付属しており、開発③に示すモビリティを活用することで、モビリティが台車を固定し、自動搬出することができる。

図 6 に示すスマートごみ箱はプロトタイプのモビリティに対応した形状となっており、開発③として開発した自律走行型ロボットに対応するためには形状を変更する必要があったため、改良版として新たなスマートごみ箱を開発した（図 7）。改良モデルは、自律走行型ロボットの牽引機構に対応したご

みコンテナが格納可能となっている。さらに、上部にToF測距センサを取り付けることで、コンテナ内に積載しているごみ量の高さを数分間隔で測定することができ、クラウド上からごみコンテナが満載になっているかどうかをモニタリングすることができる機能を搭載させた。



(a) スマートごみ箱の外観

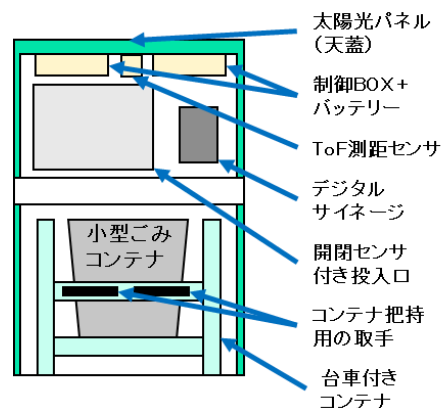


(b) スマートごみ箱の内部構造

図 6 自動搬出に対応したスマートごみ箱 (プロトタイプ)



(a) 改良したスマートごみ箱の外観



(b) 改良したスマートごみ箱の内部構造

図 7 改良したスマートごみ箱

(4) 【開発③】自動搬送用モジュール式モビリティシステム

大型コンテナおよび小型コンテナの運搬に対応したモビリティとして、まず初めに非接触によるごみ収集の動作の検証を行うためのプロトタイプのモデルをそれぞれ開発した(図 8)。これらのモビリティはごみ以外の荷物を積んだコンテナの運搬も可能であり、上部の形状を変更することで、ごみ収集以外の用途での活用なマルチベネフィット型のモデルであり、本研究事業においては自動搬送用モジュール式モビリティと呼称する。大型タイプは、700 L ごみコンテナの下に潜り込んだのちにコンテナを把持し、大型反転装置付きのパッカー車まで運搬する機能を有している。小型タイプは、スマートごみ箱内などに格納されている小型ごみコンテナを対象としている。いずれも、基本的な構造は同じで、バッテリーとモーターによる 4 輪駆動で、ラジコンによる近接操作が可能なものである。モビリティがコンテナの下に潜り込んだのちに同図(c)に示す前方の把持アームが 90 度立ち上がることでコンテナ(小型の場合は台車)を固定することができる。

図 8 に示した自動搬送用モジュール式モビリティは、コンテナの下に潜り込む仕様の場合、高さ制約が大きく、付加機能が限定的になるという課題が確認できた。そこで、コンテナの運搬方法を牽引型に変更し、LiDARを搭載することで、自律走行を可能にした自律走行型ロボットを開発した(図 9(a))。さらに、小型ごみコンテナを積載することができる台車とその台車を設置する場所となるごみステーションのフレームも開発した。ロボットの牽引力は350Nとなっており、傾斜2deg以内の平坦な道であれば150kg程度の重量物を牽引することが可能となっている。ロボット前方の上部に3D LiDAR、下

部に2D LiDARが取り付けられている。また、ロボット本体の後方車輪に駆動輪モーターがあり、LiDARによる情報を基に後輪を制御することで自律走行することができる。さらに、ロボットの後方は台車の牽引機構があり、爪が上下することで台車についている取手の把持または切り離しを行うことができる。この機構により、ごみステーションに設置された台車付きごみコンテナとロボットの合体、またはごみステーションへのごみコンテナの挿入が可能となっている。牽引機構は可動角度範囲が $\pm 95\text{deg}$ で特定の角度になった際に電磁ブレーキで向きを固定することができるため、台車の正確な位置調整が可能である。また、牽引機構の下部にも後方用2D LiDARが取り付けられており、後方の障害物を検知できる。巡行する場合は、前方の2D LiDARおよび3D LiDARで周辺情報を取得し、障害物を避けながら自律走行を行う（同図(b)）。ごみコンテナとの合体やごみステーションへのごみコンテナの挿入を行う場合は、ごみステーションの上部に再帰性反射材を貼り、3D LiDARがその反射強度を測定することで、合体・挿入動作を行うことができる位置まで正確に移動する仕組みである（同図(c)）。

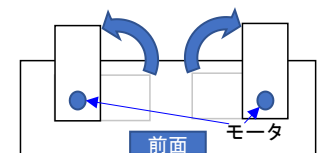
本ロボットは最小1.6mの道幅の自律走行が可能となっており、3cm以下の段差であれば走行可能となっている。また、一般的に普及しているスロープを設けることで、最大11cmまでの段差であれば、自律走行が可能であることを確認している。さらに、最大10度の傾斜の坂道の自律走行が可能となっており、100kgの牽引物を牽引した状態での自律走行が可能であることを性能検証により確認している。しかし、旋回時に横転する可能性があるため、傾斜が強い地点での走行方向の変更は避ける運用を行う必要がある。また、本ロボットは障害物を検知し、避けながら走行する機能を有しており、実証②のテーマパーク内の人混みがある環境下での運用を見据え、人ごみがある状況を再現した環境下を模擬的に再現し、適切な自律走行が可能である確認する性能検証を行った（図 10）。その結果、人が密集している状態や人が移動している状態であっても走行可能なルートを自動計算し、安全に自律走行できることを確認した。しかし、雨天時の場合、本ロボットに搭載しているLiDARが雨を障害物として認識してしまい、自律走行することができない課題があることを確認した（図 11）。また、本ロボットがごみステーションに設置されたごみコンテナを合体、およびごみステーションにごみコンテナを挿入するために必要なスペースは幅1.7m×奥行3.2mとなっている（図 12）。さらに、合体・挿入時にごみステーションが設置されている場所に2cm以上の段差がある場合や3度以上の傾斜がある場合は、適切な動作をすることができないため、段差および傾斜が可能な限り少ない平坦な場所にごみステーションを設置する必要があることが性能評価から確認できた。



(a) 大型タイプ (700L)



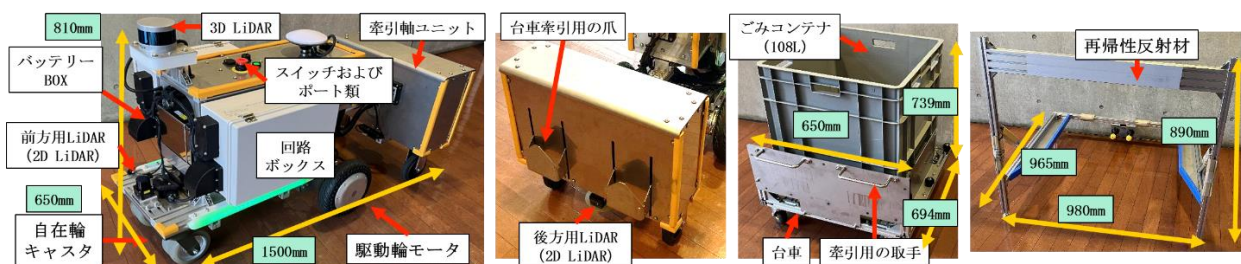
(b) 小型タイプ (78L)



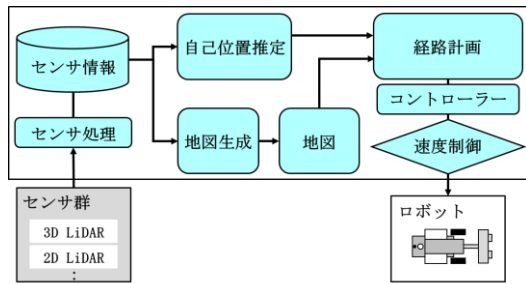
アームが90° 回転し、台車を把持する（モータ制御）

(c) 把持機構

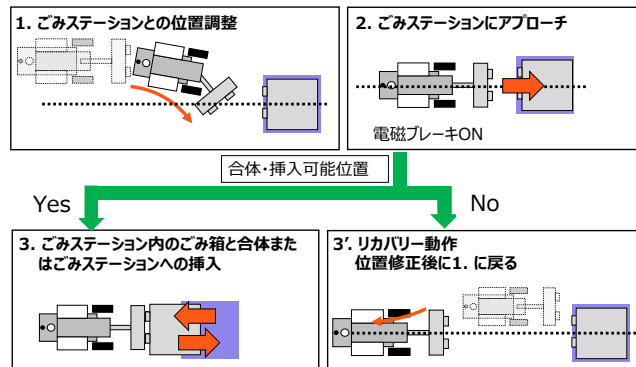
図 8 自動搬送用モジュール式モビリティ



(a) 自律走行型ロボットの外観



(b) 自律走行のシステム構成



(c) 合体・挿入を行う場合のモビリティの動作

図 9 自律走行型ロボットの概要

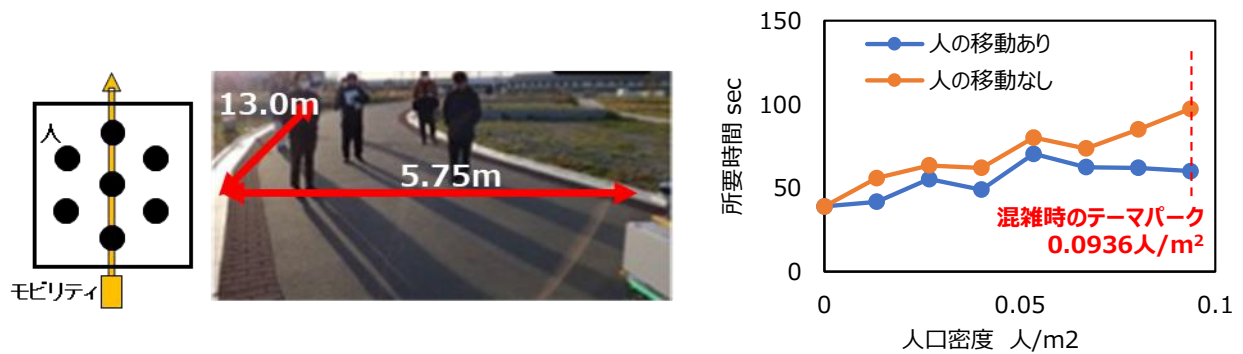
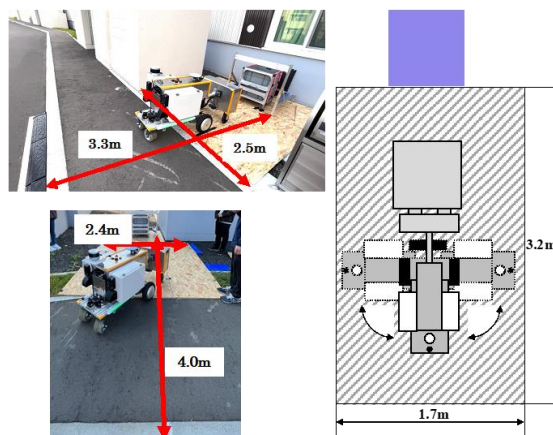


図 10 人ごみにおける自律走行型ロボットの自律走行テストの様子と走行結果



図 11 雨天時における自律走行型ロボットの様子



- ・ (A) の場合は挿入時の位置調整のためのスペースが不足。
- ・ 合体・挿入に必要な必要最小のスペースは幅**1.7m**×奥行**3.2m**
- ・ 傾斜および段差が可能な限りない平坦な場所が適切である。

図 12 自律走行型ロボットが合体・挿入するために必要なスペース

(5) 【実証①】既存のごみ収集車に適合した非接触型ごみ自動投入システムの実証

図 3 のパッカー車に取り付け可能な大型反転装置、ならびに図 8(a)に示す大型モビリティを用いて、大型ごみコンテナの非接触ごみ投入の実証を事業所内で行い、既存のごみ収集車に適合した非接触型ごみ自動投入システムの性能評価を行った。

(1) 実証方法

実証にあたって、実際のごみ排出実態の調査結果に基づいて 20L および 45L のごみ袋にそれぞれ 5～14kg の疑似ごみを入れ、合計で 700L ごみコンテナが満載になる量である合計 212kg 用意した(図 13)。

また、パッカー車の投入までの流れは実際のごみ回収環境（配置や距離感、路面環境）を模擬的に再現した。具体的には、投入口から離れた位置に 700L ごみコンテナを 2 台、大型モビリティを 1 台配置し、モビリティが投入口までごみコンテナを運搬し、自動反転装置で反転後に、元の位置まで運搬するという動作を検証した(図 14)。なお、各コンテナには 100kg 程度の疑似ごみを投入している。また、比較対象として同じ条件で 2 人の作業員によるコンテナ移動、反転動作の実証も行った。



図 13 実証に使用した疑似ごみ(約212kg)と700Lごみコンテナに全てのごみ袋を積込んだ状態の様子

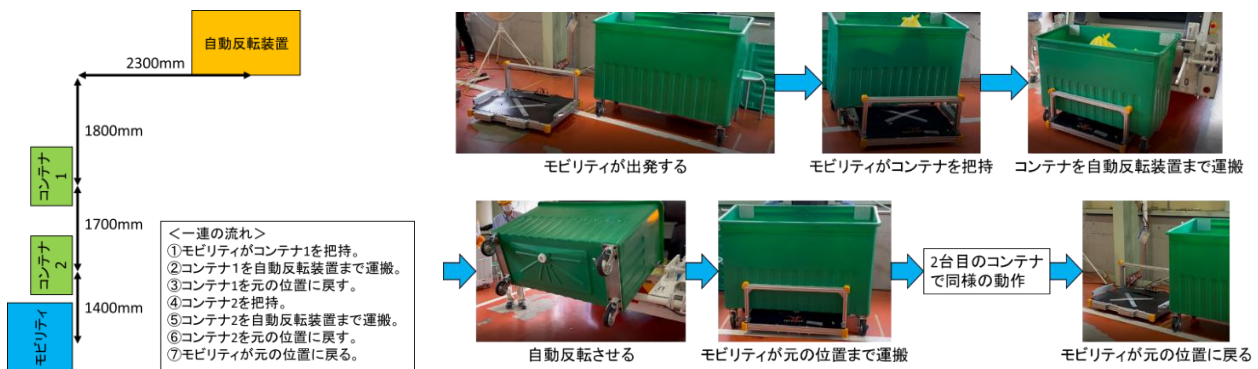


図 14 事業所内における非接触型ごみ自動投入システムの実証方法

(2) 実証結果

手積みや手動による反転動作の際には、ごみ袋またはごみコンテナに接触するが、本システムによる実証においては、1 度もごみおよびごみコンテナに接触することなく運搬から積み込みまで非接触で行うことができた。

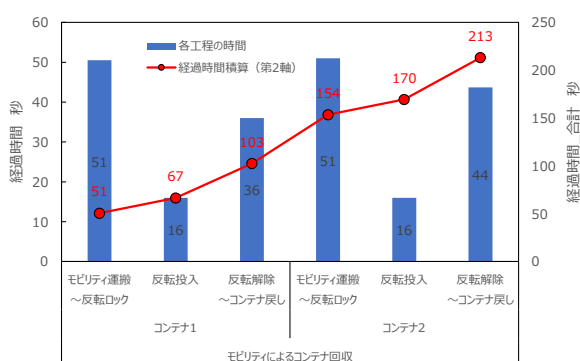
また、自動化の効果として、作業時間ならびに、作業負荷を評価した。作業時間は、同様の作業を作業員 2 名で行った場合と比較して、コンテナ 2 台分のごみを回収する時間が 63 秒から 213 秒まで時間がかかってしまうことが判明した(図 15)。今回、モビリティは安全性を考慮し速度を落としていたものの、今後、効率的な反転を行うためには、複数のモビリティでの連続的な動作が必要である。一方、作業負荷については、合計 212kg 分の疑似ごみが入った 2 つのコンテナの移動、反転装置への装着、空コンテナの移動などの作業負荷が大幅に低減できる優位性があるといえる。人手の場合、コンテナ移動、反転装置への装着、反転・積み込み操作、コンテナ戻しの作業を通常 2 名で行う。本システムの

場合、1名でモビリティの操作および反転・積込み操作等の一連の作業を行うことができ、作業負担を1人分減らすことが可能となることが示唆された。

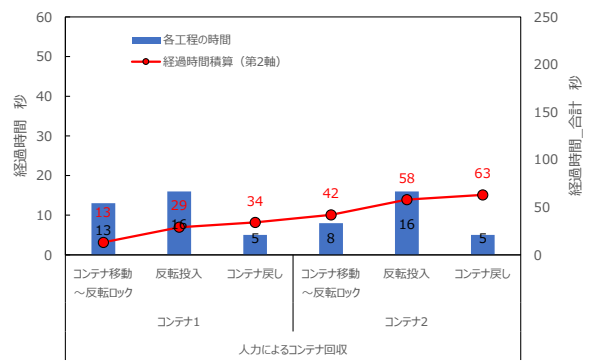
さらに、社会受容性の観点から、実際のごみ収集実態を踏まえて以下の点についても検証した（制度面などの課題は除く）。

- ごみコンテナにごみが満載されているケースがある。そのため、満載想定負荷 212kg の疑似ごみを 1 つのごみコンテナに入れた状態での運搬、反転動作が問題なくできることを確認した。また、さまざまなごみ袋の数、大きさ等を変化させた条件でも問題なく運搬・反転・積込みできることを確認した。
- 生ごみ等の水分を多く含むごみが入ったごみ袋はごみ袋表面が濡れていることも多く、コンテナ内壁に張り付き、反転が正常に行うことができない場面があることから、水に濡れているごみ袋の反転が可能か検証した。水分を多く含んだ疑似ごみをごみ袋内に入れるとともに、ごみ袋の表面を水で濡らした状態のごみ袋を用意し、これらのごみ袋が自動反転装置を用いて反転させた際に、反転動作を 1～2 回程度ごみコンテナを上げ下げすることで問題なくごみ袋が落ちることを確認した。
- さまざまな路面環境が想定されることから、凹凸の少ない平坦な道だけでなく、アスファルト道や軽い傾斜（2 度）での運搬が可能かどうかについても検証した結果、最大想定負荷 212kg のごみを積載した状態でも運搬可能であることを確認した。
- 非接触型ごみ収集システムの運用時でも、既製品の AI カメラによるパッカー車への巻き込まれ軽減装置の検知に問題がないことを確認した。
- 狭い道での作業を想定し、効率的な運搬になるようコンテナの動線に関する知見を得た。

上記に示す評価結果から、大型反転装置は実機スケールでパッカー車への接続が可能であり、非接触型ごみ自動投入システムをも活用することで、ごみ収集の非接触化・自動化を図ることができることが明らかになった。



(a) 自動搬送モビリティによるコンテナ回収



(b) 人手によるコンテナ回収

図 15 非接触型ごみ収集に要する所要時間の計測結果

(6) 【実証②】特定空間内における非接触型ごみ収集システムの実証

実証②では特定空間内における非接触型ごみ収集システムの実証として、テーマパークにおける実証を計画していたが、プロトタイプの要素技術も活用することで、南栗橋計前街区のフィールドでの実証も追加的に行うことができた。

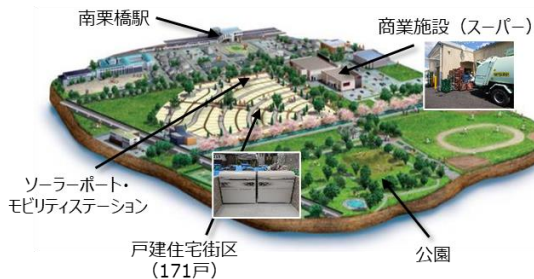
(7) 【実証②-1】南栗橋駅前街区における実証

図 8 の自動搬送用モジュール式モビリティや図 9 の自律走行型ロボットを用いて、非接触型ごみ収集システムのマルチベネフィットのユースケースを南栗橋駅前街区において実証した。本街区はグリーンフィールドにおける次世代型モビリティ (MaaS: Mobility as a Service) との連携を念頭においた非接触型ごみ収集を行う街づくりが推進しており、動脈産業との連携も含めた地域サービスの高度化を目指している地域となっている (図 16)。そこで、本街区において非接触型ごみ収集システムの実現に向けた実証を行った。

2023年6月10日に対象街区の戸建住宅街区で街びらきから1周年が経過したことを記念し、「街びらき1周年記念感謝祭」が開催された。本イベントは住宅団地内の公道部分をイベント会場として貸し切る形式で行われた。さらに、キッチンカーが4台出店し、地域住民が飲食できるエリアが設置され、実際にゴミ箱にごみが捨てられる環境であった。そこで、本イベントで実際に発生するごみを対象とし、非接触型ごみ収集が可能かどうか確認するための実証を行った。具体的には、スマートゴミ箱を用いてごみ量をモニタリングし、満載になるタイミングで自律走行型ロボットを用いて、非接触でごみ集積所まで自動搬出する実証を行った。

本イベントにおけるごみステーションの設置場所や自律走行型ロボットの移動場所および移動距離を図 17(a)に示す。また、過去に実施した南栗橋駅前街区のイベントから本イベントで発生するごみ量を予測し、本イベントで設置するごみコンテナのサイズと数を設定した。その結果、イベント開始から昼時まで可燃ごみの袋が100Lのごみ袋換算で2袋、昼時からイベント終了時までで1.4袋発生することが予想できたため、「①イベント開始から昼過ぎ/②昼過ぎからイベント終了」の2つの時間帯に分けたうえで、108Lのごみコンテナを1個ずつ、図20のB地点とC地点に設置することにした。そして、実際にごみ量を測定しながら運用した結果、各時間帯で1回ずつの計2回のごみ収集でごみコンテナが溢れることなく本イベントで発生した全ての可燃ごみを収集することができた（同図 (b)）。また、自律走行型ロボットを用いることで、ごみ袋の交換以外の全ての動作の非接触化・自動化が可能であることがわかった。本実証にかかった時間は図 18(a)のようになり、1回目の所要時間は30.9分、2回目は26.4分かかることがわかり、AB間のインターロッキング舗装は、CD間のアスファルト舗装よりも凹凸が激しく（同図(b)）、自律走行型ロボットの位置調整の指令と実際の動きに誤差が生じてしまうため、平均で合体時間が100秒、挿入時間が96秒長くなることが課題として明らかになった。そのため、凹凸が激しい場所での合体・挿入は難しく、ごみステーションの設置場所はできるだけ平坦な場所にする必要があるという知見を得た。

南栗橋駅前街区における産学官連携による『BRIDGE LIFE Platform構想』



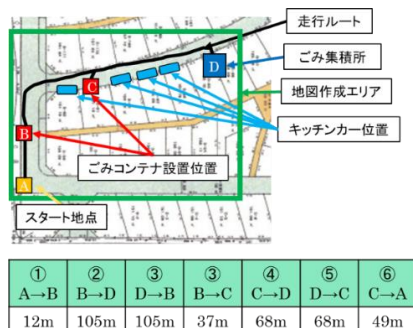
▼グリーンフィールドにおける非接触ごみ収集システムのデモを実施



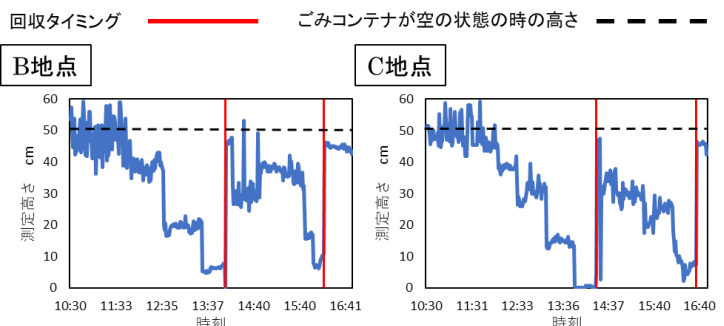
▼MaaSのプラットフォームにごみ収集システムを接続し地域サービスを高度化を目指す →今後、公道走行が課題



図 16 南栗橋駅前街区の実証フィールド

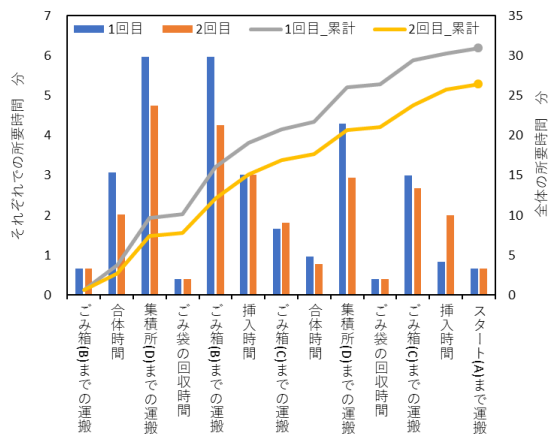


(a) 本イベントにおける地図



(b) 本イベントにおけるごみ量の測定

図 17 南栗橋駅前街区のイベントにおける非接触型ごみ収集の地図とごみ量のモニタリング結果



(a) 本イベントの非接触型ごみ収集にかかった時間

(b) 本イベントの非接触型ごみ収集の様子

図 18 南栗橋駅前街区のイベントの非接触型ごみ収集にかかった時間とその様子



インターロッキング舗装(扇状の模様がある)



(8) 【実証②-2】テーマパークにおける実証

坂道が多く物資の運搬や遠方のごみ収集が負担になっているテーマパークにおいて、スマートごみ箱からのコンテナの自動搬出、屋外走行、反転装置との連動等の一連のごみ収集の非接触化が可能か実証を行った。また、ごみ収集に加えてテーマパーク内で販売する飲料物（約100kg）の運搬が可能かどうかについても確認し、動脈連携が可能かどうかについても実証した。（図 19）

- ① 自律走行型ロボットが約100kgの飲料物を牽引した状態で、傾斜10度の上り坂を移動する。
- ② 飲料物をステーションに挿入後、スマートごみ箱の位置まで移動する。
- ③ スマートごみ箱内のごみコンテナと合体し、目標地点まで移動する。
- ④ 移動式反転装置を用いて、運搬したごみコンテナを大型コンテナに反転する。

上記の①から④に示す一連の動作を連続的に行うことができたことから、テーマパークにおいてごみ収集および物資の運搬の非接触化・自動化が可能であることを確認できた。

しかし、本実証中に傾斜のある路面において、自律走行型ロボットが移動式反転装置にごみコンテナを挿入する場合、ごみコンテナを切り離す直前に、傾斜方向にごみコンテナが移動してしまうため、横方向の傾斜がある地点での反転の成功率が低くなることが課題として明らかになった（図 20）。そのため、自律走行型ロボットと移動式反転装置を用いた合体・挿入を行う場所は横方向の傾斜が少ない平坦な地点とする必要があるといえる。

また、テーマパーク職員に対し、本要素技術の実装に向けたニーズをヒアリングした結果、表 1に示す展望を把握することができた。これによって得られた知見も踏まえ、今後も技術開発を進めていく。



図 19 テーマパークにおける非接触型ごみ収集システムのPoCの概要



(a) 実証の様子



(b) 挿入失敗時の様子

図 20 自律走行型ロボットを用いた移動式反転装置へのごみコンテナの挿入の様子

表 1 テーマパークにおける非接触型ごみ収集システムの実装に向けたニーズ

マルチベネフィット利用例	スマートごみ箱の機能向上	施設との連携機能
● 定点の監視カメラに映らない範囲をカバーできるパトロール機能 ● テーマパークに溶け込むための音楽・光等を活用した演出機能 ● ゲストからお金を徴収できるレベルのアトラクション的な要素	● ごみが多い場所や繁忙期での活用を想定したごみの圧縮機能 ● デジタルサイネージによる広告機能 ● 長時間運用に耐えられる電源の確保	● バックヤードへの移動時の扉や保管庫扉との連携

(9) 【実証③】I市の公営住宅団地における非接触型ごみ収集システムの実証

ブラウンフィールド型の特定空間にあたるI市自治体が運営する公営住宅団地において、実際に発生するごみを用いた非接触型ごみ収集システムの実証を行った。実証方法としては、住宅棟間の実際に住民がごみを捨てる2か所の地点にごみステーションと台車付きごみコンテナを設置し、ごみ収集車が実際に停車する地点までごみコンテナ2個を運搬し、パッカー車に反転投入することができるか実証した（図 21）。実証の際は、住民に実証を行う旨を伝えるためのチラシを配布し、本実証で使用する図 9 の台車付きごみコンテナにごみを捨ててもらうように周知させた。その結果、実証当日はごみ袋9袋の計100Lのごみが捨てられており、このごみを対象として一連の動作の実証を行うことができた（図 22）。このとき、地元の収集運搬業者の作業員に移動式反転装置を操作してもらい、ヒアリングを実施した。このヒアリング結果についてもサブテーマ2で示す。

本実証のなかで、従来型のごみ収集と非接触型ごみ収集の比較を行った結果を表 2に示す。この結果から、本開発物を用いることで人にごみを触れる回数が0回となり、非接触型ごみ収集が可能であることを確認できた。また、現状では作業員は3人必要であるが、収集作業員の作業負担を1人分減らすことができ、計2名で対応できることがわかった。本来、人がごみを運搬する場合はごみ収集車が到着後に収集作業員が下車してごみを回収しに行くが、自律走行型ロボットはごみ収集車が到着する前段階で事前にごみ収集車が停車する場所にごみコンテナを運搬することができるため、車両到着後の作業時間を大幅に削減でき、作業員の移動距離の削減にも寄与するため、自律走行型ロボットが人の回収作業を代替するリソースシフトを達成することができたといえる。しかし、現状の非接触型ごみ収集システムでは移動式反転装置がごみ収集車に反転する際に、衝突が起きないようにするためには移動式反転装置とごみ収集車の投入口の距離を20cmにする必要があり、正確な位置調整が求められるという課題があることが明らかになった。そのため、今後、位置調整に余裕を持たせる改良を加える必要があるといえる。

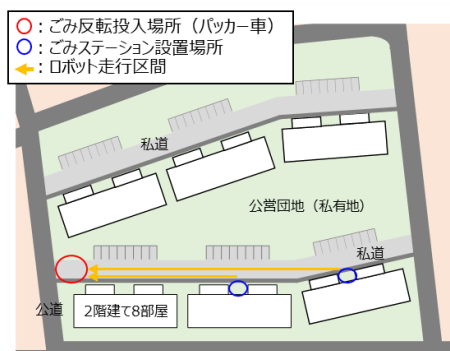


図 21 I市の公営住宅団地における実証

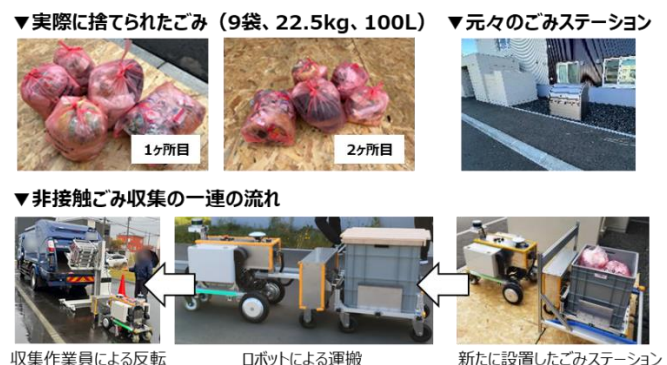


図 22 実際に捨てられたごみと一連の動作の様子

表 2 非接触型ごみ収集と現状のごみ収集の比較

	作業員の非接触性		作業員の作業負荷	
	人が触れる回数	人が触れる時間 s	ごみ重量 kg	必要な人数 人
現状	4	60	1.5	3※ ¹
非接触	0	0	0	2※ ¹

※1: ドライバー1名+収集作業員2名→ドライバー1名+ロボット操作員1名

(10) 開発した要素技術の技術的課題の整理

開発した要素技術を用いた実証結果から得られた知見を基に、現状の要素技術の技術的課題を整理した。

現状、大型反転装置や移動式反転装置は人手によるごみ収集と比較すると、図 15や図 18に示すように多くの時間を要しているため、実運用を見据えるためには反転時間の短縮を図る必要がある。同様に、自律走行型ロボットにおいても凹凸のある場所における合体・挿入には多くの時間を要するため、様々な道路状況に対応するための改良を進める必要があるといえる。これらの要素技術は人が作業しない時間帯（夜間や早朝等）での活用も可能なため、活用場所によって求められる所要時間は異なるが、人の作業をこれらの要素技術が代替するリソースシフトを達成するための技術開発は必要と考えられる。また、現状の自律走行型ロボットは雨天には対応しておらず、屋外での運用に課題がある状況であり、屋根を設ける等の環境整備も必要ではあるが、屋外での運用も可能にするための技術開発も必要といえる。さらに、本研究事業で開発した開発物はデータ連携が行われていないため、連続的な動作を行うことができない状況となっているが、非接触型ごみ収集システムを社会実装するためには各開発物のデータ連携や複数台の自律走行型ロボットの制御等の技術開発を進め、連続的な動作を可能とする必要があると考えられる。そして、ここに示した技術開発を進めるとともに、今後も南栗橋駅前街区等の実証フィールドにおいて実証を行い、課題解決していくことで社会実装に寄与するといえる。技術的課題以外にも様々な課題が考えられるが、具体的な今後の方針についてはサブテーマ2において考察した。

(11) サブテーマ1のまとめ

サブテーマ1の研究により、下記に示す成果を得ることができた。

○要素技術の開発

開発①：非接触型ごみ自動投入システム（反転機能）

- 700Lのごみコンテナを反転することができるパッカー車との接続型反転装置を開発し、実機スケールでパッカー車との接続を確認した。本反転装置を用いることで、212kgのごみの反転が可能である。
- 100L程度の台車付きのごみコンテナを反転することができる移動式反転装置を開発した。本反転装置を活用することで、小型ごみコンテナを直接パッカー車に反転することが可能となる。

開発②：自動搬出用モジュール式モビリティ（運搬機能）

- LiDARによる自律走行機能を搭載した自律走行ロボットを開発した。障害物検知機能が搭載され、人混みの中でも安全に走行できる。
- 本ロボットは牽引機構が搭載され、台車付きのごみコンテナをスマートごみ箱や反転装置に自動で脱着することができる。また、牽引物を様々なものに変更することで宅配などの動脈連携などのマルチベネフィット活用が可能である。
- 自律走行ロボットの性能評価として、走行可能な道幅・段差・傾斜・路面環境などを明らかにした。

開発③：自動搬出に対応したスマートごみ箱（監視機能）

- 高さセンサーを用いてごみ量を測定する機能があり、自律走行型ロボットでごみコンテナを運搬することができるスマートごみ箱を開発した。

- ・ 飲食店付近等のごみ量が溜まりやすい場所にスマートごみ箱を設置することで、時間帯ごとのごみ量をモニタリングすることができ、回収タイミングを把握することができた。

○非接触ごみ収集の実証

テーマパークにおけるマルチベネフィット型のユースケースの実証

- ・ ごみ量の監視機能により遠方のごみ回収の空振りを防ぐことができることが確認できた。
- ・ ごみの回収と物資の資材運搬を合わせた動静脈連携モデルを提示した。今後の課題としてモビリティの多様な活用やシステム間連携などを抽出した。

戸建住宅開発街区での実証成果（グリーンフィールド）

- ・ グリーンフィールドにおける次世代型モビリティ（MaaS）との連携を念頭においた非接触ごみ収集モデルを提案した。
- ・ 対象街区のイベントにおいて非接触ごみ収集を実証し、開発システムの性能と非接触ごみ収集に必要な環境を明確にした。

公営団地における非接触ごみ収集システムの実証（ブラウンフィールド）

- ・ 公営住宅団地の実ごみとパッカー車にて回収～運搬～反転の一連の流れを実証し、非接触でごみ収集ができること、収集作業員の人数を1名減らせることを確認した。

5. サブテーマ1 研究目標の達成状況

サブテーマ1では、現存する傾斜式ごみ収集装置の非接触化・自動化を図るためのアタッチメント（開発①）、センサ機能・圧縮機能を搭載したスマートごみ箱（開発②）およびそれを非接触・自動搬出するモジュール式モビリティシステム（開発③）を非接触化・自動化に向けた要素技術と位置づけ、これらの開発・システム化を行うことを研究目標とした。1年目に、要素技術の開発と検証および実証試験案をサブテーマ2と並行して具体化し、2年目に、小規模な実証および性能評価を行い、3年目に実証試験を行う計画とした。本テーマにおける要素技術の開発はプロトタイプのモデルを開発しつつ進めたため、1年目の時点でプロトタイプの要素技術を用いた実証を前倒しで一部実施することができ、2～3年目に計画通りに3つ全ての実証（【実証①】事業所内、【実証②】特定空間内、【実証③】自治体連携）を行うことができた。

開発①としては、大型ごみコンテナを反転可能で、3tパッカー車に取り付けることができる大型反転装置と自律走行型ロボットと連携することで小型ごみコンテナをパッカー車に反転することが可能な移動式反転装置を開発することができ、実証を通じた性能評価の結果から、当初の計画通りのものが開発できたといえる。また、格納されている台車付きのごみコンテナを自律走行型ロボットによって自動搬出することが可能な形状となっているスマートごみ箱を開発②として開発した。このスマートごみ箱にはセンサ機能が搭載され、ごみ箱内に捨てられたごみ量を測定する機能を有しており、適切なごみの回収タイミングを把握することが可能となったことを実証②によって確認できたため、当初の計画通りのものが開発できたといえる。そして、LiDARを搭載し、障害物を避けながらごみコンテナを牽引する機構が搭載され、自律走行することができる自律走行型ロボットを開発③として開発した。本ロボットを用いて、南栗橋駅前街区のイベントやテーマパークにおける実証②やI市の公営住宅団地における実証③を行うことで、ごみ収集の非接触化・自動化が可能となり、人による回収作業をロボットが代替するリソースシフトが達成できた。また、ごみの運搬だけでなく、100kg程度の物資の運搬も可能であることを確認できたため、自律走行型ロボットは当初の計画よりも高機能なモデルを開発することができたといえる。また、本要素技術の開発と実証結果を基に、現状の技術的課題を把握することで、非接触型ごみ収集システムの社会実装に向けて必要とされる技術開発や改良の方向性を整理することができた。上記に示す成果を得ることができたため、サブテーマ1は目標を大きく上回る成果をあげることができたといえる。

Ⅱ－２ サブテーマ２「非接触型ごみ収集システムの社会実装に向けたシナリオ構築と評価」

〔サブテーマ2要旨〕

サブテーマ２では、家庭系一般廃棄物収集・運搬事業者の業務に同行することによるわが国におけるごみ収集実態の類型化を行うとともに、収集・運搬事業者、自治体職員、地域住民に対し、非接触型ごみ収集システムに関するニーズを調査することで、非接触型ごみ収集システムの市場分析を行った。そこで得られた知見とサブテーマ１の非接触型ごみ収集システムの要素技術の開発と性能評価によって得られた知見を踏まえ、ごみの道置き回収は統一規格のコンテナ回収に置き換えていくことが重要であることがわかった。そして、非接触型ごみ収集システムを社会実装するうえで特に課題となる法規制・制度面を踏まえ、社会実装シナリオを３つのパターンに分けて提示した。パターン①は「現実シナリオ」として、早期の事業化が可能と考えられる特定空間内での社会実装を見据えたパターンとなっており、公園・住宅団地内や事業系一廃等を対象とした展開を想定し、必要とされる技術開発要素を整理した。パターン②は「地域連携シナリオ」として、公道走行・公道作業を伴う非接触型ごみ収集の実現に向けた検討を行っており、南栗橋駅前街区を実証モデル地域としたときに必要とされる技術開発と実証モデルを提案した。そして、パターン③では「イノベーションシナリオ」として、統一規格のコンテナ自体を回収するための新規格車両の提案、ならびに技術開発や関連する法規制への対応事項等について整理した。

これら３つの社会実装シナリオに対し、XRL(X Readiness Level)の視点から今後の展望を見据えることで、社会実装に向けたロードマップを作成した。

また、2025年の大阪・関西万博でスマートごみ箱を用いた実証を行う予定となっているほか、今後南栗橋駅前街区等の実証フィールドにおいて、社会実装に向けた実証を行う計画が進んでいる。さらに、社会実装に向けた法規制や車両規格の見直しについても具体的な政策提言内容を整理することができたため、サブテーマ２は目標を上回る成果を挙げることができたといえる。

１． サブテーマ２研究開発目的

サブテーマ２では、わが国のごみ収集の実情に即した非接触型ごみ収集システムを社会実装することを目標として、サブテーマ１で開発した要素技術を用いた実証結果を踏まえた社会実装シナリオを提示する。具体的には一般廃棄物収集運搬事業者の業務に同行することによる現状のごみ収集の実態調査や収集・運搬事業者・自治体・地域住民等のニーズを調査したうえで、非接触型ごみ収集システムの実証結果を踏まえた制度障壁や技術開発課題を明らかにし「非接触・自動化」のコンセプトとなる実証モデルの提案といった社会実装シナリオを検討する。

２． サブテーマ２研究目標

サブテーマ２	「非接触型ごみ収集システムの社会実装に向けたシナリオ構築と評価」
サブテーマ２実施機関	株式会社大栄環境総研
サブテーマ２目標	自治体、収集・運搬事業者等のニーズを把握したうえで、非接触型ごみ収集システムの社会実装に向けたシナリオを提示する。具体的には、わが国のごみ収集の実態を把握したうえで、サブテーマ１で開発する技術・システムの社会実装に向けた方策を明らかにする。また、連携する事業者や自治体との協議により、本研究での実証モデルを具体化する。社会実装に向けては、収集・運搬事業者および廃棄物処理・リサイクル事業者の立場から事業化シナリオを提示する。また、早期の事業化が可能と考えられるショッピングモール・テーマパーク等の特定空間内での活用に加え、2025年の大阪万博が現時点で明らかになっているターゲットとなる。その他、各地のスマートシティプロジェクトでの社会実装を想定する。

３． サブテーマ２研究開発内容

サブテーマ２では一般廃棄物収集・運搬事業者の業務に同行することで、一般廃棄物のごみ収集の

実態を調査し、ごみ集積所の数や形状等に関する特徴を整理し、類型化した。また、非接触型ごみ収集システムの社会実装に必要な方策として、道置きのごみ収集をコンテナに置き換えていくことが重要であるという知見を得た。また、収集・運搬事業者、自治体職員、地域住民に対し、非接触型ごみ収集システムに対するニーズについてアンケート・ヒアリング調査を実施し、ごみ収集の非接触化・自動化による作業負担低減、住民サービスの向上に寄与することにニーズがあることが確認できたほか、早期の事業化が見込めるフィールド等に関する知見を得た。この知見を基に、自治体および収集・運搬事業者との連携を念頭においた実証モデルの計画を具体化し、サブテーマ1において実証①から③を行った。実証の評価項目としては非接触性、作業効率、要素技術を安全に活用するうえで必要とする環境等について着目し、サブテーマ1の実証内で評価結果をまとめた。

上記の調査結果および実証結果を基に、非接触型ごみ収集システムの社会実装シナリオを特に課題となる法規制・制度の面から3つのパターン（①現実シナリオ/②地域連携シナリオ/③イノベーションシナリオ）に分け、XRLの視点から社会実装に向けたロードマップを作成した。①現実シナリオでは、サブテーマ1の実証によって明らかになった技術的課題を踏まえながら、特定空間における社会実装に向け、施設統合管理・制御システムや複数台ロボット制御システム等の開発が必要であることを提示した。②地域連携シナリオでは、公道走行・公道作業をするための法規制の整理や必要とする環境整備の内容をまとめ、具体的な実証モデルを提案した。③イノベーションシナリオでは、統一規格のコンテナの活用を前提としたうえで、新規格車両の開発や社会受容性の向上に向けた法規制の見直し内容等について整理し、提示した。

4. サブテーマ2 結果及び考察

（1）一般廃棄物のごみ収集形態の類型化

非接触型ごみ収集の社会実装に向けて、ごみ収集実態の把握を行うため家庭系一般廃棄物の収集・運搬事業を行っているA社の作業に同行した。調査は、ごみ収集作業員がウェアラブルカメラを装着し、作業の様子、ごみの排出状況などを撮影する方法で行った。

本調査の結果、主に表3に示すとおり集積方法は大きく3つに分類される。1つは、道置き、路上、囲いタイプである（タイプ①）。一軒家が並んでいる道で多くみられ、道の一角に間隔を開けてごみ袋が集積されているタイプで回収方法の大半を占めるものである。また、集積所によってはネットがある場合もある。2つ目のタイプは、ボックス、小屋タイプである。集合住宅などでよくみられ、ボックスや籠にごみ袋を入れて集めている。また、ボックスなどは住民が捨てやすい向きに並んでおり、ドアや小屋の中に入っている場合もある（タイプ②）。3つ目は反転装置に対応したコンテナタイプである。住民の多い集合住宅などでよく見られ、反転装置専用のごみコンテナにごみ袋を入れて集めている。また、パッカー車に反転しやすい向きに縦列されており、蓋が付いている場合もある（タイプ③）。

また、1カ所あたりのごみ袋の数、回収時間についても調査した結果、タイプ①、②では、人手による積込み作業が必要なため、1カ所あたりの回収数はコンテナタイプと比べると少ないが、並走しながらの作業になることが多く負担が大きいことがわかる。また、コンテナタイプでは、1カ所あたりの総作業時間はかかるものの、大量のごみを一度に反転できることから、1個あたりの回収時間が短いことがわかった。

ごみの回収タイプは、地域コミュニティ（住民などから構成される自治会や町内会）と自治体の協議により決まることが多く、特にタイプ①②はその自治会の特性（住民間の親密度や置ける場所など）を踏まえて決定され、マンションなど大量に発生するタイプ③は事前に自治体と協議のうえコンテナの利用が指定されて、ごみの捨て方が決まっていることが確認できた。

当初より非接触型ごみ収集のシナリオとして、タイプ③のコンテナによる反転へ置き換えていくシナリオを想定していた。タイプ①の道置きは、後述の政策提言にも記載しているとおりコミュニティ単位でタイプ③のコンテナに置き換えていくような実証を提案している。タイプ②については、既にコンテナが用いられているが反転装置に対応していないことから、反転装置に対応したコンテナに置き換えることも想定されるが、パッカー車側が対応していないケースも想定される。そのため、小型のコンテナを

用いてモビリティ側での反転動作による積込みを行う実証③を最終年度に行った。また、タイプ③については大型コンテナの非接触型ごみ収集を実証①で実現したが、実際のごみ回収現場では、モビリティなどによる運搬の際は路面状況やスペース、蓋の取付けなどの課題があることが想定できる。このように、いずれのパターンも課題はありつつも、非接触型に転換しやすいフィールドから置き換えていくことが現実的である。

表 3 ごみの排出形態の類型化

ごみ集積所のタイプ	タイプ① 道置き、路上、囲い	タイプ② ボックス、籠、小屋	タイプ③ 反転装置コンテナ
イメージ			
特徴	戸建て住宅街など	集合住宅など	住人が多い集合住宅など
場所の数	90%	2%	8%
1 か所あたりのごみ袋の数	約 1～20 個	約 5～40 個	約 30～50 個
1 個あたりの回収時間	約 1～2 秒	約 1～4 秒	約 0.5～1 秒
今後の提案課題	✓ コミュニティ単位での実証を提案(ex.コンテナ回収への移行) ✓ 自動走行の場合、道交法上の制約が課題	✓ 2023 年度に公営団地で PoC 実証(実証③)	✓ 開発①、実証①に対応 ✓ ただし、スペースの確保などが課題

(2) 社会実装に向けた市場分析

(a) 住民ニーズの把握

南栗橋駅前街区でのイベント来場者へのアンケート調査を実施した結果、「曜日と時間の指定がないこと」、「ごみ集積所までの距離が短くなること」への期待が高いことがわかり、裏を返せば、これらが不満要因になっている実態が把握できた(図 23)。例えば、筆者らが別途、構築を予定している MaaS (Mobility as a Service) のプラットフォーム等と接続し、通勤の時間帯にあわせて、スマートごみ箱を移動させる等のサービスの潜在的なニーズがあるといえる。

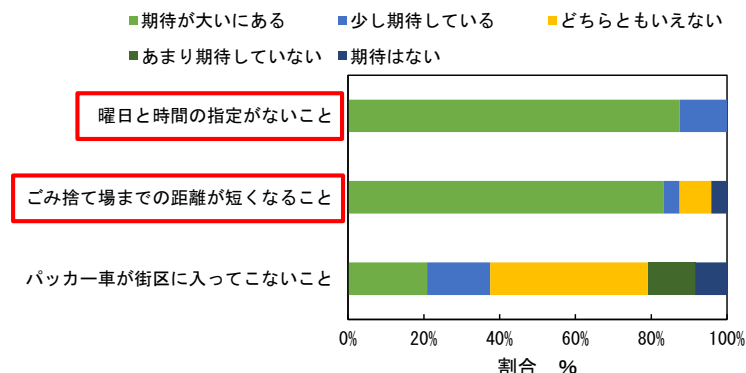


図 23 自動ごみ収集が導入された時に期待する項目 (N=24)

(b) 収集・運搬事業者のニーズ

ごみの収集・運搬事業者 2 社に対して非接触化・自動化に関するヒアリング調査を行った。1 社は家庭系一般廃棄物をメインに、もう 1 社は事業系一般廃棄物の収集・運搬をメインに行っている。両社ともに共通するのは、コロナ禍に伴う非接触化ニーズはもちろんのこと、若手のアルバイトの積込作業員の大量確保や、収集作業員の高齢化など収集作業員の人材確保が課題であり、本研究の成果により「収集作業員が 3 人から 2 名になるだけでも十分ありがたい。」等の意見が抽出できた。また、これまで反転装置付きのパッカー車は保有していないが排出量の多い事業者のみを反転装置付きの車両に変更し非接触型ごみ収集を行う専用ルートの設定も十分考えられるとのことであった。本研究の成果の社会実装に向けては、収集・運搬事業者に対しては、自動化によりどれだけ人員削減や人材確保につながるかという視点が重視されると考えられる。

(c) パッカー車のサイズ別地域別台数

非接触型ごみ収集システムの普及に向けて、パッカー車のサイズ別地域別の普及状況をメーカーにヒアリング調査した。ちなみに、大型コンテナ向けの反転装置の装着可否については、中型（4t 車）以上のパッカー車であれば装着可能であり、2t 車の場合は小型コンテナのみ、3t 車についてはホイールベースの長いロング車であれば反転装置の装着が可能である。なお、筆者らの提案では小型車の場合でもモビリティ側に反転装置を装着することで非接触型ごみ収集システムが運用可能なシステムを提案している。

ヒアリング調査の結果、北海道では道路の幅が大きく拠点間移動距離が長いことからおよそ 9 割程度が中型以上のサイズの車両であることがわかった。次いで、九州や中部、東北地方では 4 割程度、それ以外の地域では 1-2 割程度が中型車である。このような結果を踏まえて、大型コンテナの場合は、北海道や東北地域などから展開することが容易で、都市部ではモビリティ側に反転装置を備えた小型タイプから社会実装を進めることが有効であると考えられる。

(d) パッカー車における制度面の見直し

サブテーマ 1 にて実施した実証①の結果を踏まえて、パッカー車における非接触・自動ごみ収集の社会実装には反転操作の遠隔操作化、コンテナの規格統一化といった制度面の見直しを提案する。ただし、2 つの提言は、非接触ごみ収集の実現にあたって必須の条件ではないが、普及に向けて望ましいものとして提案する。

《提案①：積込み操作ボタンの安全基準見直し》

昭和 62 年に労働省労働基準局（基発第 60 号）にて通達された「機械式ごみ収集車による労働災害の防止対策の強化について」の中で、昭和 62 年 4 月以降の製造車両については、「機械式ごみ収集車の構造等に関する安全指導基準（別紙 1）」に適合したものを製造することが定められている。本安全指導基準において、積込操作ボタンスイッチについては、車両の後部に操作盤を設けることやボタンの順序、構造などが指定されている。そのため、積込み操作を行う際には作業員 1 名が車両後方にいなければならない。

一般的に、コンテナなどによるごみ回収の際には、運転手 1 名、車両後方でコンテナの移動や反転・積込み操作を行う収集員 2 名の合計 3 名で作業を行っている。今回の実証では、コンテナの移動をモビリティが代替することで、車両後方でモビリティの操作とコンテナの反転・積込み動作を行う 1 名だけで対応可能なことが確認できた。

今後、さらなる人員削減に向けてこれらの安全基準の見直しを提案する。具体的には、反転や積込みを行う操作をタブレットなどにより運転席からでも操作できる方法などが考えられる（図 24）。この方法により、塵芥車が到着したことを自動認識したモビリティがコンテナ運搬を開始し、コンテナが反転装置に装着されたことを認識する信号などを受けて、運転席のドライバーによりタブレットから反転・積込みの操作をすることが可能となり、ドライバー 1 名だけによるコンテナによる一連のごみ収集作業

の実現が期待できる。当安全基準は、作業員の巻き込まれ防止の目的で目視にて確認できる位置に設置されているが、タブレット操作時は後方の積み込みボタンが作動しない（重複操作ができない）仕組みや、近年の塵芥車では AI カメラにより積み込み場所に人が入ったことを検知して機械動作が非常停止する商品も販売されており、これらの技術を応用することで安全確保につながると考えられる。

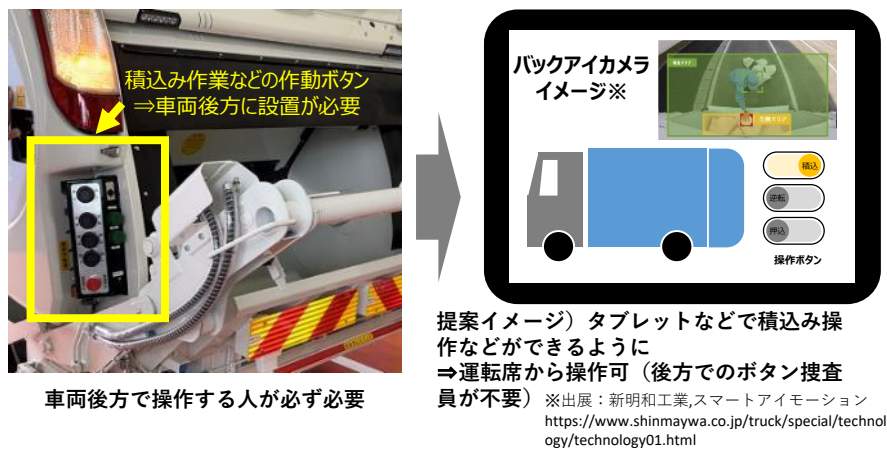


図 24 タブレットなどによる積み込み操作のイメージ

《提案②：大型ごみコンテナ仕様の統一化》

本研究の調査の一環で、反転装置に対応したごみコンテナは、サイズや規格が複数ある。中でも、今回の実証でも利用した大型コンテナは、一般に普及しているものでも、反転用に把持するバーの高さが自治体ごとに異なることが判明した（図 25）。

また、塵芥車の車両規格の保安基準として、車両のホイールベース（前輪と後輪の水平距離）に対して、2/3 以内のリアオーバーハング（最後輪から車両後端の水平距離）が認められている（図 26）。このリアオーバーハングに反転装置も含まれる。

今回の問題点は、コンテナのバーの高さが高い場合、反転時の回転半径が大きくなるため反転装置の後方への突き出しを長く取る必要が生じ、リアオーバーハングを超えてしまう車種（3t ショート車にてのみ発生）が存在することがわかった。そのため、コンテナのバーの高さによって、ある地域では非接触に対応した反転装置が装着可能であるが、ある地域では装着不可といった事態が生じてしまう。

社会実装シナリオを検討するうえで、台数の多い 2t クラスの小型車においては、モビリティ側で反転装置対応することや、リアオーバーハングが問題にならない 3t ロング車以上は普及率の高い北海道や東北エリアや、事業系から普及展開を図るといった対応も可能である。そのため、本問題点は解決が必須の制約条件にはならないものの、非接触型ごみ収集の普及を考えた場合は、非接触ごみ収集に対応したバーの高さになるようごみコンテナの規格の統一化が望ましいと考えられる（表 4）。



図 25 大型ごみコンテナのバー高さの違い

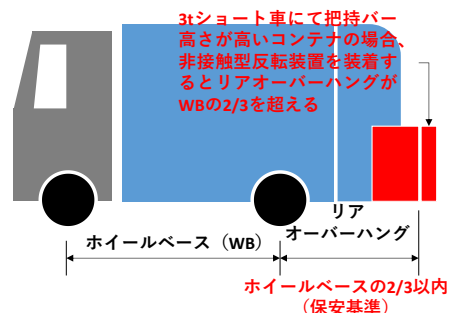


図 26 車両規格の保安基準（リアオーバーハング）

表 4 非接触型ごみ収集に対応した大型コンテナ用反転装置の装着可否

塵芥車		コンテナの把持バーの高さ		普及に向けて
車両サイズ	普及割合	標準	高い	
2t車以下	約75%	×	×	モビリティ側で反転対応
3t車ショート		○	×	コンテナの規格統一化
3t車ロング		○	○	北海道など普及割合の高い地域&事業系から展開
4t車以上	約25%	○	○	

※2t/3t車の場合、小型コンテナ用（90L前後）の反転装置は装着可

※バー高さ：標準685mm、高い（例）985mm

(e) 実証を踏まえた関係者へのヒアリング

《テーマパークにおける活用について》

テーマパークにおける実証において関係者に対しアンケートを行い、自律走行型ロボットのニーズを調査した結果、下記に示す意見を得ることができた。

- 定点の監視カメラに映らない範囲をカバーできるパトロール機能があると良い。
- テーマパークに溶け込む音楽・光等を活用した演出機能があると良い。
- ゲストからお金を徴収できるレベルのアトラクション的な要素があると良い。

これらの意見を踏まえ、自律走行型ロボットのマルチベネフィットな利用方法を検討していく予定である。また、スマートごみ箱はごみ量が多い場所や繁忙期に活用することを想定し、圧縮機能を新たに設ける等の対応を行っていく。

《公営団地における活用について》

サブテーマ1における実証③を行った際に、I市の家庭系一般廃棄物を収集運搬する業者の代表者に実際に開発物の操作を行ってもらったうえで、非接触型ごみ収集を実現することによる効果に対するニーズについて5件法でアンケートを実施した（図 27）。その結果、「作業人数の削減」以外の「重量物の運搬の作業負荷軽減」、「移動距離の削減」、「非接触化効果」について「メリットに感じる」、「とてもメリットに感じる」と回答した割合が高く、ニーズがあることを確認した。「作業人数の削減」について否定的な意見が多い点は、既存の雇用の削減や地元雇用の創出の減少につながることに對しては慎重な姿勢であり、既存の雇用は維持しつつ、業務の負担軽減を図りたいとする意見が強いことが起因している。また、本アンケート結果を基により詳細なヒアリングを行った結果、下記に示す意見や要望を抽出することができた。

- ごみ量を事前に確認可能となることで、空振りを減らせるため、ニーズがある。
- 非接触化効果は医療系廃棄物を収集する場合においてはニーズがある。
- 業務内容をロボットに合わせることで作業時間が長くなることは避けたい。現在は20世帯が住む集合住宅1棟につき、2～3分でごみを回収しているため、これと同等の作業時間になることが望ましい。

上記に示すように、ごみ量を事前に把握することにニーズがあることを意見として抽出できたため、サブテーマ1で開発したスマートごみ箱に搭載されているごみ量の測定機能にニーズがあることが確認できた。また、非接触化効果については医療系廃棄物を収集する現場において、特に有効であることが確認できた。現時点では医療系廃棄物を対象とした実証は行っていないが、医療系廃棄物が発生する病院等のフィールドも今後の実証の候補場所として検討していく予定である。しかし、これらのニーズを確認した一方で、現状の開発物の作業時間が人手による作業時間よりも長い点や点検・清掃等の業務が追加的に発生することに対しては課題があることが明らかになった。そのため、今後、開発物の改良を行うとともに、収集運搬業者側で行う必要がある点検・清掃作業を整理し、許容できる作業量に抑えるための検討を進めていく。

さらに、収集運搬業者へのヒアリングだけでなく、I市のごみ・リサイクル課に所属する自治体職員

に対してもヒアリングを行うことができた。自治体職員からは住民の立場を含めた意見として、下記に示す意見が挙げられた。

- ごみコンテナの設置場所が自宅から近い場合、臭気の苦情が入るため、住宅から近すぎではならない。しかし、遠すぎても移動距離が長くなるため、理解を得られる適切な位置に設置する必要がある。
- 本実験は住宅団地の敷地内で行っているが、I市は戸別収集の場所も多く、戸別収集の場所では各自でゴミ箱を用意してもらうルールとなっている。そのため、複数の戸別住宅から発生するゴミを集積するためのゴミコンテナを設置することについては管理の問題が考えられるため、置き換えていくことはハードルが高いと考えられる。
- 可燃ゴミについては、捨てて良い時間を長く設けてしまうと、臭気の問題があるため、可燃ゴミ収集日の朝8時までに捨ててもらう運用にする方が良い。仮に、いつでも捨てて良い運用になった場合、住民の分別意識もルーズ化していくことが予想される。

これらの意見は地域住民の理解を得るうえでの課題も含んでいるため、今後、これらの意見を取り入れながらゴミコンテナの設置場所や運用方法を検討していく予定である。

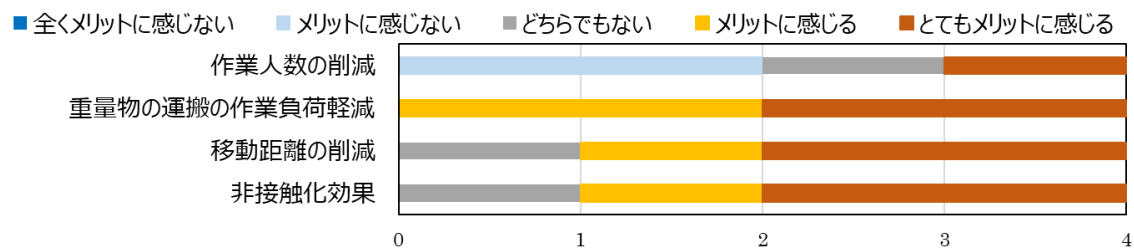


図 27 I市の家庭系一般廃棄物収集運搬業者の非接触型ゴミ収集に対するニーズ (N=4)

(3) 社会実装シナリオの構築

(a) 社会実装シナリオの全体像

非接触ゴミ収集の社会実装のシナリオ構築にあたり、特に課題となる法規制・制度面から以下3つのシナリオに分類した。分類したシナリオごとに本研究で明らかになった課題や社会実装に向けた提案を行った。(図 28)

《パターン①：現実シナリオ》

テーマパークやショッピングモール、公園や公営住宅などの私有地内は、公道走行などに係る法規制・制度上の制約がない特定空間における社会実装シナリオ

《パターン②：地域連携シナリオ》

公道にて一般廃棄物などのごみを自律走行型のモビリティによる運搬やパッカー車への自動反転積込み作業を行うにあたり道路交通法などへの対応が必要な空間における社会実装シナリオ

《パターン③：イノベーションシナリオ》

現在のパッカー車などによるゴミ収集ではなく、公道上で車両のサイドから統一コンテナを回収する新たな収集運搬車両の開発を伴う非接触ゴミ収集を行うモデルの社会実装シナリオ



図 28 社会実装シナリオの全体像

(b) パターン①：現実シナリオの社会実装について

《技術開発課題》

本研究の特定空間における実証により非接触ごみ収集を実現するうえで開発した各要素技術の連携などの課題が示された。例えば、ごみの監視機能をもつスマートごみ箱からの信号を受けてロボットが回収に向かうといった監視機能と運搬機能の連携、テーマパークなどでロボットがバックヤードにある集積所に向かう途中にある扉の開閉動作との連携、パッカー車への反転投入の際の反転装置とパッカー車間の信号のやり取りによる位置調整や反転動作制御、反転時間の短縮などが示された。

そこで、現実シナリオにおける非接触ごみ収集の実現にあたって、各開発物を横につなぐ統合システムや動脈システムとの連携の技術開発（図 29）により、初期のマーケット創出が期待できると考えられる。実際に特定空間での非接触型ごみ収集システムの商品化を進めるためには、スマートごみ箱に取り付けられたごみ量測定機能により、タスク依頼がなされた後、ロボット制御システムが動作を開始するとともに、計量・決済管理が進められ、ごみの運搬および反転がなされるという流れを構築する必要がある。また、施設機器との連携により、エレベーターやテーマパークにおけるバックヤードの扉等が自動開閉するようになるとともに、管理者がトレーサビリティシステムにより、ごみ収集の状況を管理可能とする運用が求められる。現在、ごみ箱メーカーやバックヤードシステムメーカーとの協議を進めており、今後、ニーズの深堀り、費用対効果を踏まえた優先順位付け等の検証を進めていく予定である。

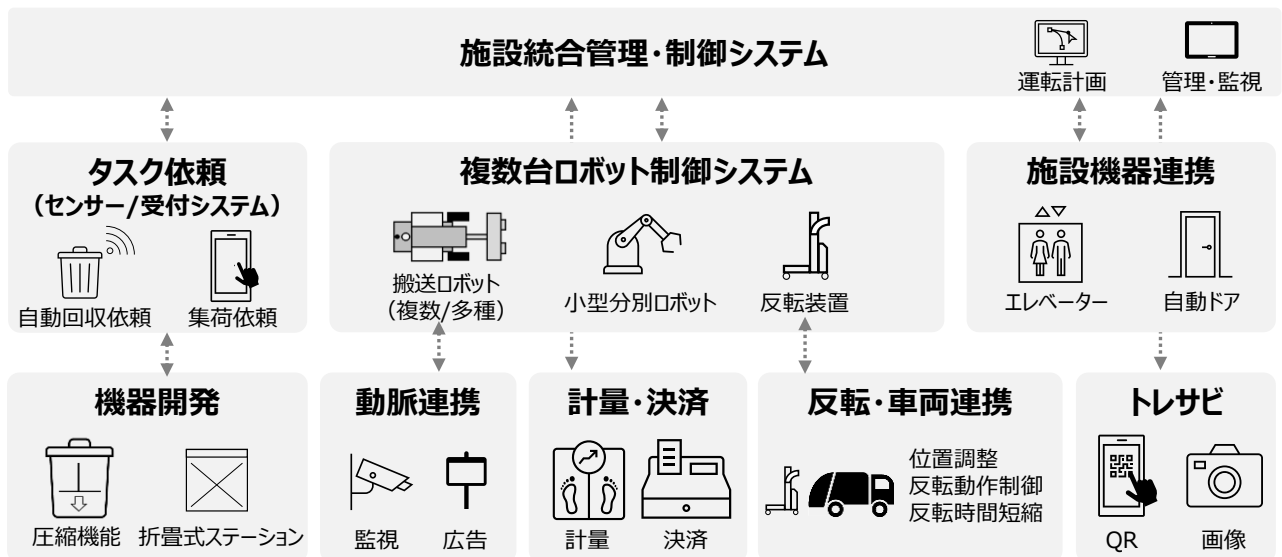


図 29 非接触ごみ収集システムの高度化に向けた開発課題

《初期導入モデルの提案》

特定空間では、機器単体でも利用ニーズが確認され、費用対効果があれば民間の投資により導入が進む領域である。EXP02025大阪・関西万博では、筆者らが提案する監視機能をもったスマートごみ箱を用いて『資源循環に貢献したくなるスマート回収箱とスマートフォンアプリ』の実証を行う予定となっている。本実証は、スマート回収箱とスマートフォンアプリを用いることで、使用後の資源循環可能な資源を適切に捨ててもらうための行動変容を促すことを目指し、万博会場内の一部エリアにおける来商社を対象に、特定の資源の収集管理を実施する予定である。

ユーザーのヒアリングを経て道交法への配慮が不要な特定空間での初期導入モデルを以下のとおり提案する（図 30）。

- 公園や公営団地、テーマパーク、住宅団地での利用

サブテーマ①でも実施した公園・テーマパーク・住宅団地の敷地内は道交法への配慮が不要な特定空間であり、比較的導入が容易なフィールドである。

- 一般廃棄物処理施設での利用（プラントメーカー）

一般廃棄物処理施設（焼却施設など）では住民の持ち込みごみの対応が必要となっており、作業員が配置されていることが多い。今後は持ち込みごみの受付後、統一コンテナに持ち込みごみを投入し、処理設備までロボットが運搬し、ごみピットへ反転投入するという対応を行うことで、作業員の負担軽減、渋滞緩和、ごみピットへの転落事故の防止に寄与することが考えられる。また、一般廃棄物処理施設の設備の巡回点検の際に自律走行型ロボットに搭載したカメラ等によって遠隔で設備を点検することで、点検作業の負担軽減を図る等の展開も考えられる。

- 事業系一般廃棄物を対象とした展開

収集運搬業者へのヒアリング結果から、事業系一般廃棄物の収集現場は、コンテナが既に設置されていることが多く、私有地内での収集が主となっていることから非接触型ごみ収集システムの展開が比較的容易であることが考えられる。また、医療系廃棄物の収集に対して非接触化を図ることに對し、ニーズが高かったことから、病院の敷地内での実証も有効である。

●自治体へのヒアリング

⇒公園・住宅団地における利用

《公園のごみ収集》 《公営団地のごみ収集》



本事業で実証を行った道交法への配慮が不要で導入が容易な特定空間から利用
例) 公園、住宅団地など

●プラントメーカーへのヒアリング

⇒一般廃棄物処理施設での利用

《住民の持込みごみ対応》



✓ 持込みごみを受付後、統一コンテナに投入
✓ 処理設備までロボットで運搬+反転投入
⇒渋滞回避

《設備の保守点検巡回》



●収運事業者へのヒアリング

⇒事業系一廃からの利用

《事業系一廃のごみ収集》



収集・運搬事業へのヒアリング結果から、事業系一廃の回収では、コンテナ回収+私有地回収が多く初期展開が容易

図 30 特定空間における官民ニーズのヒアリングを踏まえた導入モデルの提案

(c) パターン②：地域連携シナリオの社会実装について

《公道走行への対応》

パターン①は公道走行を含まないエリアでの実証を想定したが、より対象とするエリアを拡大する場合、公道走行・公道作業を可能とすることは必須条件といえる。公道上で自律走行型のロボットによる運用を行うには、道交法の特定自動運行または遠隔操作小型車としての対応が必要になる。特定自動運行においては、人又は物の輸送を目的とするものが対象として定められておりごみ収集車は対象外として認識されており、ロボットによるごみ運搬について法解釈の協議が必要なる。一方の遠隔操作小型車においては、今回開発したロボットが牽引によりごみを運搬するが、牽引を伴う場合は自動車扱いになり適用不可とされているため制度変更などが必要である（表 5）。

表 5 ロボットの公道走行にあたっての道路交通法の整理

要件	特定自動運行	遠隔操作小型車
対象	自動車のレベル4に相当する（運転者がいない状態での自動運転）を行うとする者	法により歩行者が通行すべき場所として規定されている場所を通行させるロボットであって、自動運転技術または遠隔操作により通行させるロボット ※車体構造・電動車 ※車両サイズ：L1200×W700×H1200以下等 ※最高速度：6km/h
許可・届出	都道府県公安委員会の許可が必要 ※流れ）特定自動運行計画を都道府県公安委員会に提出⇄特定自動運行の経路区域を含む市町村の長等から意見を聴取	都道府県公安委員会への事前届け出を義務化 ※届け出事項：使用者の氏名等、通行する場所、遠隔監視を行う場所、非常停止装置の位置、ロボットの型式・仕様等
遵守事項	● 特定自動運行計画に従って特定自動運行を実施 ● 遠隔監視装置を設置し、遠隔監視を行うものを配置（特定事項運行主任者が乗車している場合を除く） ● 特定自動運行主任者等に対する教育を実施	● 基準に適合した非常停止ボタンの設置 ● 標識の設置 ● 業界の自主基準に適合することを証する書面、遠隔操作型小型車の構造および性能を示す書面等の提出

《公道作業への対応》

公道上で一時的にコンテナを公道に出して回収作業を行う行為について、道路交通法の道路使用許可、道路法の道路占有許可など管轄警察署や道路管理者と法的根拠、解釈、対応策の協議が必要である（表 6）。加えて、自治体や住民らとの周辺環境の整備、コンテナの運用管理方法といった社会受容性

の向上に向けた検討が必要である。

また、南栗橋の開発街区において、公道上で非接触ごみ収集を実現するのに必要な環境として、道幅や必要なスペース、設備などを整理した。今後、新たな街づくりなどにおいて非接触・自動ごみ収集を行うためにはロボットの導入を前提とした環境整備としてバリアフリーのような、ロボットフリー基準の策定などが必要であると考えられる。なお、これらの環境整備については地域住民らとコストとリターンについて協議を重ねることで理解を醸成し、現実的に導入・受入れできるような社会受容性の向上も必要である。

表 6 公道作業を行うための協議内容

対象作業	公道での車両への積み込み作業
関連する法制度	道路交通法：道路使用許可 道路法：道路占有許可
協議者	管轄警察署（道路使用許可） 道路管理者（道路占有許可）
協議内容	一時的にコンテナを公道に出して回収作業を行う法的根拠、解釈、対応策の協議



公道（道路）で必要な環境

●必要な走行環境

- ✓ 走行幅：1.6m
- ✓ 段差：11cm以下
- ✓ 道路傾斜：7度程度
- ✓ 牽引重量：150kg以下（7度登坂：100kg）
- ✓ 極端な悪路でないこと
- ※現時点では、雨天、信号は未対応

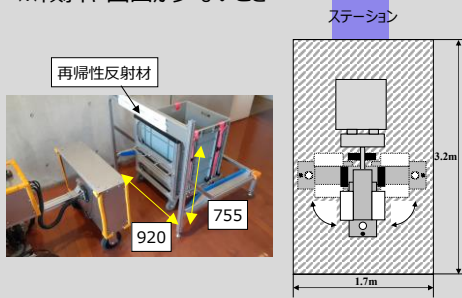
住宅などで必要な環境

●必要なもの

- ✓ ステーション（反射材付き）
- ✓ 統一ごみ箱

●必要な環境

- ✓ ロボットの動作スペース3.2×1.7m
- ※傾斜や凸凹が少ないこと



ごみステーション（塵芥車との接続部）などで必要な環境

●必要なもの

- ✓ 反転装置（操作は手動）
- ✓ 塵芥車（2-4t車）

●必要な環境

- ✓ 反転装置置場
- ✓ 反転作業スペース
- ※傾斜や凸凹が少ないこと

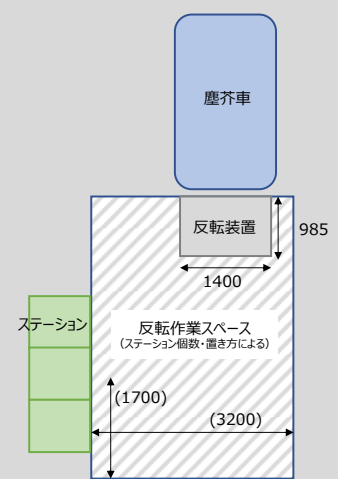


図 31 開発したシステムの利用に必要な環境を一般化

《技術開発課題》

公道走行を含む地域単位でロボットなどを活用した非接触ごみ収集システムの実現には、以下の公道走行への技術的対応に加えて、ユーザーの利便性などを考慮すると複数台でのロボット運用や様々な種類のロボットでの運用が想定される（図 32）。

- 公道走行対応：法規制定められる非常停止やサイズに合わせた改良、遠隔監視システム、非常時の動作などの技術開発など
- 共通マップ走行：ロボットごとにシステムが異なると使い勝手や費用対効果が悪化するため、1つのプラットフォームでの運用が望ましい。そこで、共通マップで仕様の異なるロボットが走行するための開発と検証（Lidarによる地図データの共用、仕様の異なるロボットの制御方法の確立な

ど)を行う必要がある。

- 複数台運用：複数のロボットが指定した路側帯等の道幅が狭いエリアを走行するときの交通ルールの開発と検証や複数タスクをこなすロジックの開発と検証が必要である。



図 32 公道走行の指定エリア、複数台走行のイメージ

《動静脈連携モデルの実証》

公道走行による非接触ごみ収集に合わせて、動静脈連携によるシステムの稼働率向上が欠かせない。マルチベネフィット型の特性を生かして、ごみの収集、宅配、警備、清掃などの機能（サービス）を街区の管理会社経由で提供し、利用料に応じてサービス料を受け取るビジネスモデルの検討や動静脈併用運用における課題抽出（時間帯別活用、コンテナの必要台数、安全・衛生面等への配慮など）と対応案の検討が必要である。

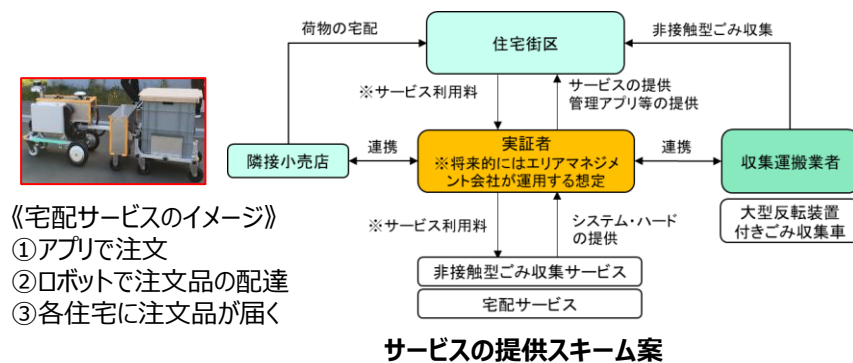


図 33 マルチベネフィットに対応したサービスモデルのイメージ

《地域連携モデルによる展開》

今後、南栗橋のようなグリーンフィールドにおいて非接触ごみ収集を展開するには公道走行・作業が必須である。南栗橋での公道実証のモデルができれば、様々フィールドで公道を含む広範囲の地域単位で非接触ごみ収集が可能となる。本グリーンフィールドにて、様々なロボットを運用するMaaSのプラットフォームに非接触ごみ収集システムを接続し地域サービスの高度化を目指した実証を進める予定である。

地域連携モデルによる社会実装シナリオとして、本実証フィールドのような新技術が導入しやすい開発街区やスマートシティとの連携、既にある集団回収との連携、近隣の動脈企業との連携など、導入のしやすい小さな地域単位からモデル実証を積み重ねた展開を提案する。ある地域では、コロナ後の観光回復に伴いたばこのポイ捨てが地域で問題になっている。解決策として、ごみ箱の設置や喫煙所の設置を避け、ナッジや歩くごみ箱での解決を模索している。また、地域連携モデルとして、地域で既に行われている拠点回収との連携も有望である。今後、プラの分別回収により収運コストや回収手間が発生することを見据えて、圧縮機能をもったスマートごみ箱や、自宅から拠点回収場所までロボットで搬送する高齢者のごみ出し支援、筆者らが別で開発を進めている排出現場などで活用する飲料容器の自動選別ロボットとの連携（東京都事業に採択）により、コンテナによる混合回収+ロボット運搬+排出現場での選別により、住民サービスの向上と収集運搬コストの削減が期待できる。

(d) パターン③：イノベーションシナリオの社会実装について
《潜在ニーズの発掘》

本実証フィールドである戸建住宅の開発街区において、現在のごみ収集モデル、既存のパッカー車との接続を前提とした非接触ごみ収集モデル、コンテナ自体を回収する新たな車両による回収モデルのパターンにて住民メリットや収集運搬コストの評価を行った結果、新たな車両による回収モデルにより回収頻度の削減や住民のごみ出し手間の削減といった有意性の仮説を提示した。

具体的には、統一コンテナ（1m³または0.5m³）をそのまま積載することができる車両（12m³）の活用を提案する（図 34）。評価は、実証フィールドである戸建住宅街区の171世帯から発生するごみを計10か所のサブステーションに集積し、ごみ収集車が巡回することで収集している現状を1つ目の評価パターンに設定し、2つ目から4つ目の評価パターンとして非接触型ごみ収集システムを実装し、「ロボットが家からステーションへ運搬してくれる&ごみ収集車が街区区内に入る必要がなくなる」要素、「住民がいつでもごみを捨てて良くなる」要素、「必要なスペースを削減し、収集運搬業者の回収頻度を削減できる」要素が実現できた場合のパターンを設け、必要とされるロボットの台数・ごみコンテナの大きさ・数を算出し、比較評価を行った（図 35）。サブステーションは171世帯から発生するごみを10個のエリアに分け、17～18世帯ごとに分けて集積する場所とし、メインステーションは171世帯から発生するごみを1ヶ所に集積する場所として定義し、評価を行った。また、評価するうえでの条件を表 7に示す。ごみ量は各世帯から発生する1日当たりの可燃ごみ、不燃ごみ、缶・ビン・ペットボトルの量と比重を参考文献に基づき設定した。

これらの条件を基に評価した結果を表 8に示す。パターン①から③において、8時間/回・台以下とするためには、ロボットが4台または9台必要となることがわかった。また、パターン①から③において、各住宅に設置するコンテナは30L×1個となり、このサイズのコンテナを設置することで、住民は自宅前にごみを捨てることが可能となり、ステーションまで移動する必要がなくなることがわかった。パターン②ではサブステーションに設置するごみコンテナのサイズが可燃ごみ用500L、不燃ごみ用300L、缶・ビン・ペットボトル用500Lであり、それぞれ1個ずつ設置することで、住民が曜日に関係なくごみを捨てることが可能となる。しかし、必要なスペースが26,300Lとなり、現状のスペースよりも2倍以上のスペースを要することが明らかになった。パターン③では図 34に示す車両を活用することで、異なる種類のごみを一つの車両で回収でき、可燃ごみを回収する日に不燃ごみ、缶・ビン・ペットボトルも回収できるため、収集運搬員が本住宅団地に来る合計の回数を削減することが可能となる。さらに、不燃ごみと缶・ビン・ペットボトルの回収頻度は週2回となり、メインステーションに設置する必要があるコンテナはパターン①と②の半分で良くなるため、必要なスペースの削減も可能となる。そのため、必要なスペースの合計容量は9,100Lとなり、現状よりもスペースを4,900L削減することができることがわかった。

また、今後の社会情勢に伴い、プラスチックの分別等を行う場合は新しくコンテナを1個以上設置する必要があり、回収頻度が増加することが考えられるが、パターン③であれば現状よりも回収頻度を削減できる分、回収品目の増加にも対応可能である。さらに、図 34に示すコンテナに圧縮機能を搭載することで、より必要なコンテナを削減することができると考えられる。しかし、パターン③のコンテナ回収車はピストン回収であり、パッカー車による曜日回収よりも本住宅団地における回収頻度は減らせるが、他の収集場所を含めた場合、エリアによっては総移動距離の優位性は変化するため、市全体の収運コストは別途検証が必要といえる。



図 34 統一コンテナとそれを積載できる車両

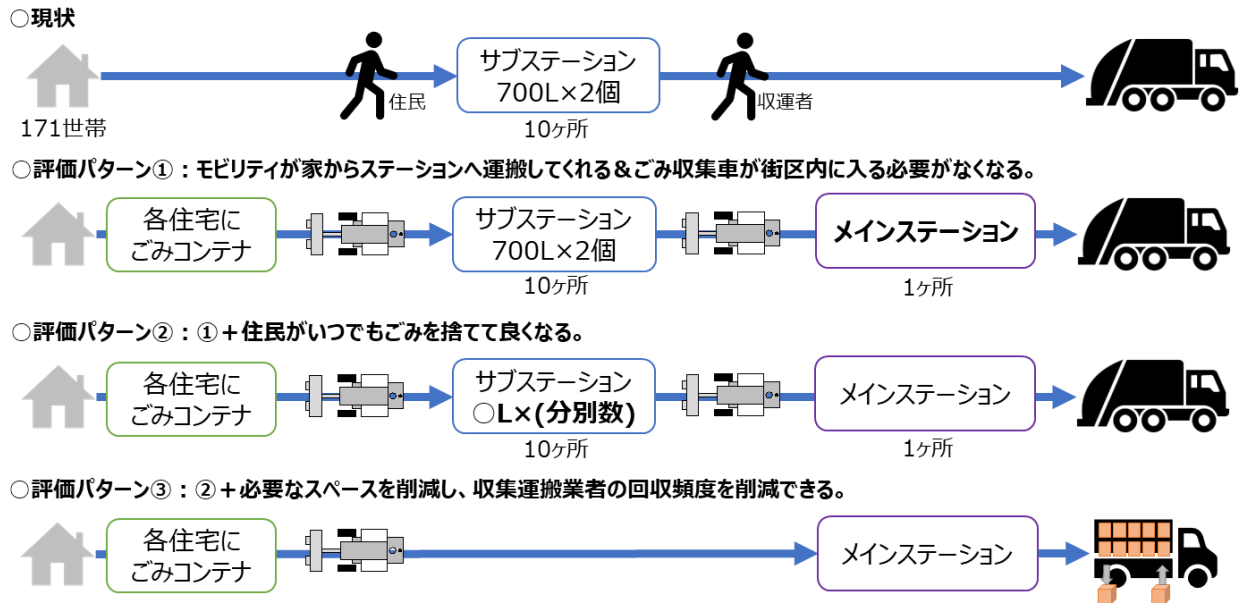


図 35 南栗橋駅前街区における非接触型ごみ収集の実装モデルの評価パターン

表 7 評価するための条件

住宅数	171世帯
サブステーションの数	10ヶ所
回収頻度	可燃ごみ：週2回 不燃ごみ：週1回 缶・ビン・ペットボトル：週1回 ※各ごみコンテナが満載になるタイミングで回収することを前提としたうえで、上記の回収頻度を想定してロボットの必要台数を算出する。
ロボットの稼働時間	8時間/回・台以下
ロボットの移動速度	4km/h
ロボットとごみコンテナや反転装置との合体・挿入時間	2分/回
参考文献	1世帯当たりの人数
	1日の1人当たりのごみ排出量
	ごみの重量組成割合
	各ごみの比重

表 8 南栗橋駅前街区における非接触型ごみ収集の実装モデルの評価結果

		現状	評価パターン①	評価パターン②	評価パターン③
回収頻度	可燃ごみ	週2回			週2回
	不燃ごみ	週1回			週2回 (可燃ごみと同時 に回収)
	缶・ビン・ペットボトル	週1回			週2回 (可燃ごみと同時 に回収)
ロボット台数			4台	4台	9台
ロボット稼働時間			6.2時間/回・台	6.3時間/回・台	7.7時間/回・台
メインステーションのコンテナ (1ヶ所)	可燃ごみ		700L×7個		
	不燃ごみ		700L×4個		700L×2個
	缶・ビン・ペットボトル		700L×8個		700L×4個
サブステーションのコンテナ (10ヶ所)	可燃ごみ	700L×2個		500L×1個	
	不燃ごみ			300L×1個	
	缶・ビン・ペットボトル			500L×1個	
各住宅に設置するコンテナ	可燃ごみ		30L×1個		
	不燃ごみ 缶・ビン・ペットボトル		(可燃ごみ：27L、不燃ごみ：14L、缶・ビン・ペット ボトル：29L発生し、最大値に合わせて設置)		
合計容量		14,000L	27,300L	26,300L	9,100L (各住宅に設置するコンテナは含まない)

《技術開発提案と法規制対応、社会受容性の向上》

既存市場においてコンテナそのものを回収するごみ収集システムの調査を踏まえて、車両の保安基準を満たしたうえで、公道上にてステーションに横付けしてサイドからアームやパワーゲート、ロボット等により安全に短時間でコンテナの入替え作業ができる新たな規格車両と、それに合わせた統一コンテナやステーションの開発を提案する。

コンテナ自体を回収するごみ収集事例と非接触ごみ収集への展望を表 9にまとめる。図 34に示す産業廃棄物の分別用コンテナとしての活用のほかに、海外では普及しているサイドローダー式のごみ収集車が挙げられる。サイドローダー式は、日本国内では積載量が小さくなること、路地が狭いこと、ガードレールが多いエリアでは活用することが難しいという点から普及していないが、日本の環境に合わせたサイドローダー式の新規格車両によりコンテナ回収実現すると公道での作業性は非常に高い。また、I市の収集運搬業者へのヒアリングから得られた「医療系廃棄物の収集運搬の非接触化に関するニーズが高い」という意見からも、医療系廃棄物の収集運搬がマーケットとして有望といえる。現状の医療系廃棄物は主にプラスチックコンテナやダンボールに入れた状態で排出され、手積みによる荷積み・荷降ろしで接触工程が存在するのに加えて、重量物であることから作業負担が高いという課題がある。今後、統一コンテナに対応した車両やサイドローダー式の車両を活用することで、作業負担の軽減が見込める一方で、積載効率が悪化する可能性がある。なお、車両の開発において関連する法規制としては、道路運送車両法（国交省運輸局）が車両の保安基準のほかに、機械式ごみ収集車に係る安全管理要綱については厚労省労働基準局が示している。そのため、こうした関連法規制への対応や見直しや、新たな法規制の設定を視野に入れた技術開発が求められる。

また、新規格の車両の開発に伴って、対応するコンテナやステーションの開発も同時に求められる。新規格車両との安全で短時間で入替え作業が行うことができること、ガードレールへの対応、ロボットとの連携や運用環境に合わせた仕様が求められる。例えば、積載効率を高めるために圧縮できるコンテナ、複数のごみコンテナを棚に並べて設置できるステーション、公道への設置性を加味した折畳可能なタイプのステーションなどが想定される。

加えて、地域連携シナリオと同様に、一時的な公道設置・作業に対する道交法、道路法における法解釈や協議が必要であるとともに、実際に使用環境周辺の住民や自治会と現実的な運用方法の協議とそれに伴う周辺環境整備といった社会受容性の向上に向けた検討も必要である。（図 36）

表 9 非接触型ごみ収集システムの実現に寄与する車両・ロボットの展望

コンテナによる ごみ収集事例	概要	非接触・自動ごみ収集への展望
統一規格コンテナ運搬（図 34）	● 産廃の分別用回収コンテナとして利用 ● 1m³のコンテナ12個または0.5m³コンテナ24個を積載することができ、合計12m³のごみの運搬が可能 ● テールリフターが付いており、コンテナは人が運搬している。 ※2tパッカー車：積載量4m ³ /2t	● 反転装置による投入ではなく、テールゲートによりロボット+コンテナで車両に乗り込む等の方法により接続性向上が期待（反転時間の短縮等）される。 ● コンテナ圧縮機能を搭載することで、積載率向上が望める。
サイドローダー式（海外）	● サイドからアーム等によりコンテナを回収 ● 国内では、積載量が小さくなること、路地が狭いことやガードレール等の問題により普及していない（現状、社会受容性が低い状態）	● サイドからの反転でなくコンテナ積込型も選択肢。 ● 社会受容性（新型コンテナの道置きルール、車両規格、道路交通法上の整理など）を高めれば公道での作業性は非常に高い。
医療系廃棄物の運搬	● 医療系廃棄物をプラコン、段ボールに入れて回収（圧縮不可） ● 容器の手積みによる荷積み、荷降ろし ● 非接触ニーズが高い	● 初期マーケットとして有望である。 ● 車両の非接触化・自動化対応により積載効率が悪化する可能性がある一方で、周辺の作業負荷の削減に寄与できる可能性あり。

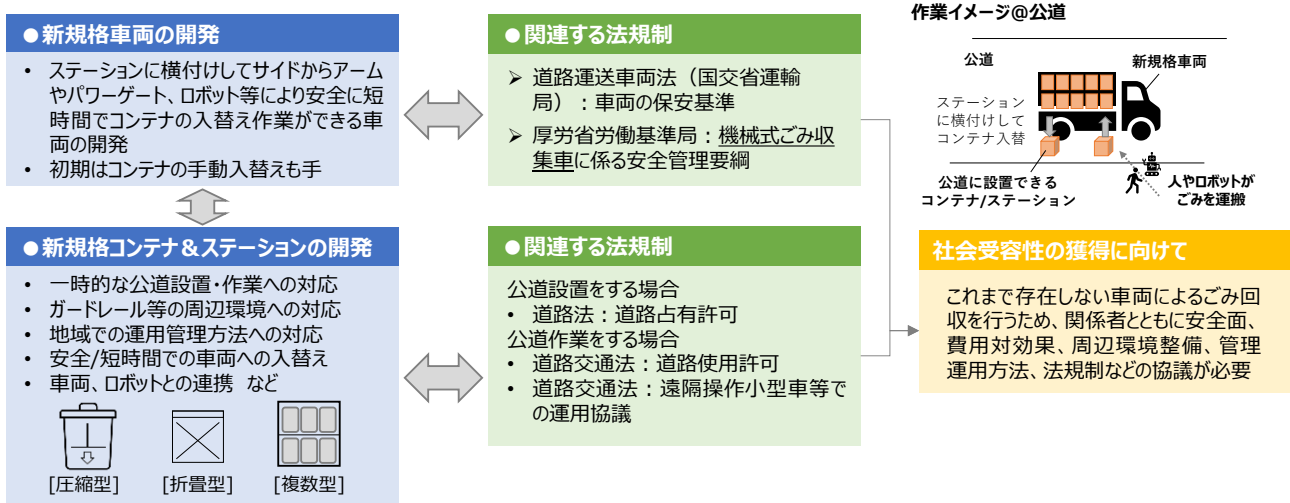


図 36 新規格車両によるごみ収集のイメージと開発課題、法規制対応について

《政策提案》

車両規格の見直しを含むイノベーションシナリオの社会実装には、新たなごみ収集システムの構築に向けてマーケットや政策メリットがある程度明らかになるまでは、民間だけで開発や実証を進めること困難であることから、技術開発支援や実証など、官による政策の初期主導が必要と考えられる。

また、新たなごみ回収システムの展開に際しては、インフラ更新や都市開発などに合わせて、都市開発計画や建築基準の中に規制などとして織り込み、徐々に置き換えていくといった公共政策として展開していく必要があると考えられる（図 37）。

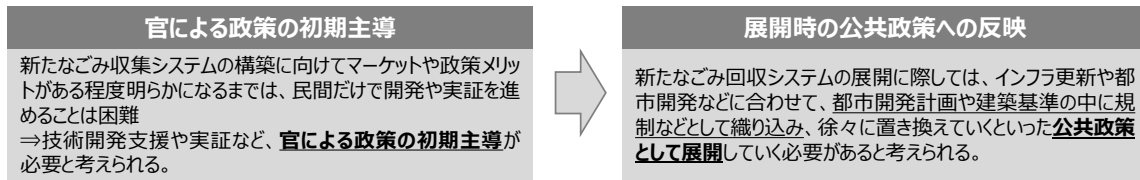


図 37 イノベーションシナリオの政策提案

(e) 社会実装シナリオのロードマップ

以上の検討結果をもとに、社会実装に向けたロードマップを作成した（図 38）。

パターン①の現実シナリオでは、まず民間マーケットを精査するとともに公共での活用検討も行いながら費用対効果について仮説を立てることで、特定空間における非接触型ごみ収集システムに対し、ニーズがあることを精査する。そして、各システム間、動脈産業、施設との連携を図り、プラットフォームシステムを開発することで、非接触型ごみ収集システムに関する実証を行うことができる状態にする。その後、費用対効果に関する仮説の検証や技術の改良を行いながら、マーケット拡大を図っていく流れが考えられる。技術開発進展や人手不足といった外部環境の変化も相まって、比較的ニーズが高い空間内で行うことを想定しているため、社会受容性が最も高く2030年を目途に一定程度の社会実装が可能な地点に達すると考えられる。

パターン②の地域連携シナリオは、公道走行・公道作業を行う必要があるため、まず初めに公道走行・公道作業に関する協議をステークホルダーと行う必要がある。また、パターン①における検証だけでなく、自治体に対してもニーズの精査を行う必要があり、動脈産業との連携についても視野に入れながら自治体の政策として展開する可能性について検討する。これらの検討がなされた後、反転装置の反転時間の短縮、統一コンテナの開発、実施環境の対策を進め、南栗橋駅前街区等のグリーンフィールドでの実証を行いながら、自治会との協議・住民理解の醸成・管理方法の協議を進める。そして、各ステークホルダーの理解を得たうえで公道走行・公道作業の実証を行い、街づくりの段階から非接触型ごみ収集システムを取り入れたモデル地域が構築されていくことが考えられる。非接触型ごみ収集システムを取り入れたモデル地域は動脈産業との連携やスマートシティとしての役割を持ったモデル等、様々な派生型が展開され、拡大していくと想定している。このように、関係者との協議や法規制へ対応した実証などが必要であることから2030年を目途に複数のモデル的な実証と展開を目指す。

パターン③のイノベーションシナリオは、新しい回収方法に対応するための技術開発と法規制改革が必要となるため、他パターンと比較して社会受容性が低く、2030年頃における社会実装は難しいと考えられ、2040～2050年頃における社会実装を想定し、ロードマップを作成した。まず、車両規格協議、車両メーカーとの協議、車両開発を進める段階で2030年頃になると想定し、そこから新規格の車両に対応するための統一コンテナ・ステーションの見直しを行い、コンテナ管理方法の協議を進める。そして、新規格車両と統一規格コンテナを活用した実証を行うことで、都市計画や建設基準等の公共政策への反映がなされることが考えられる。このように新たな技術開発を伴い、かつ長期的なインフラ更新に合わせた展開を想定していることから2050年あたりの導入を目標に掲げる。

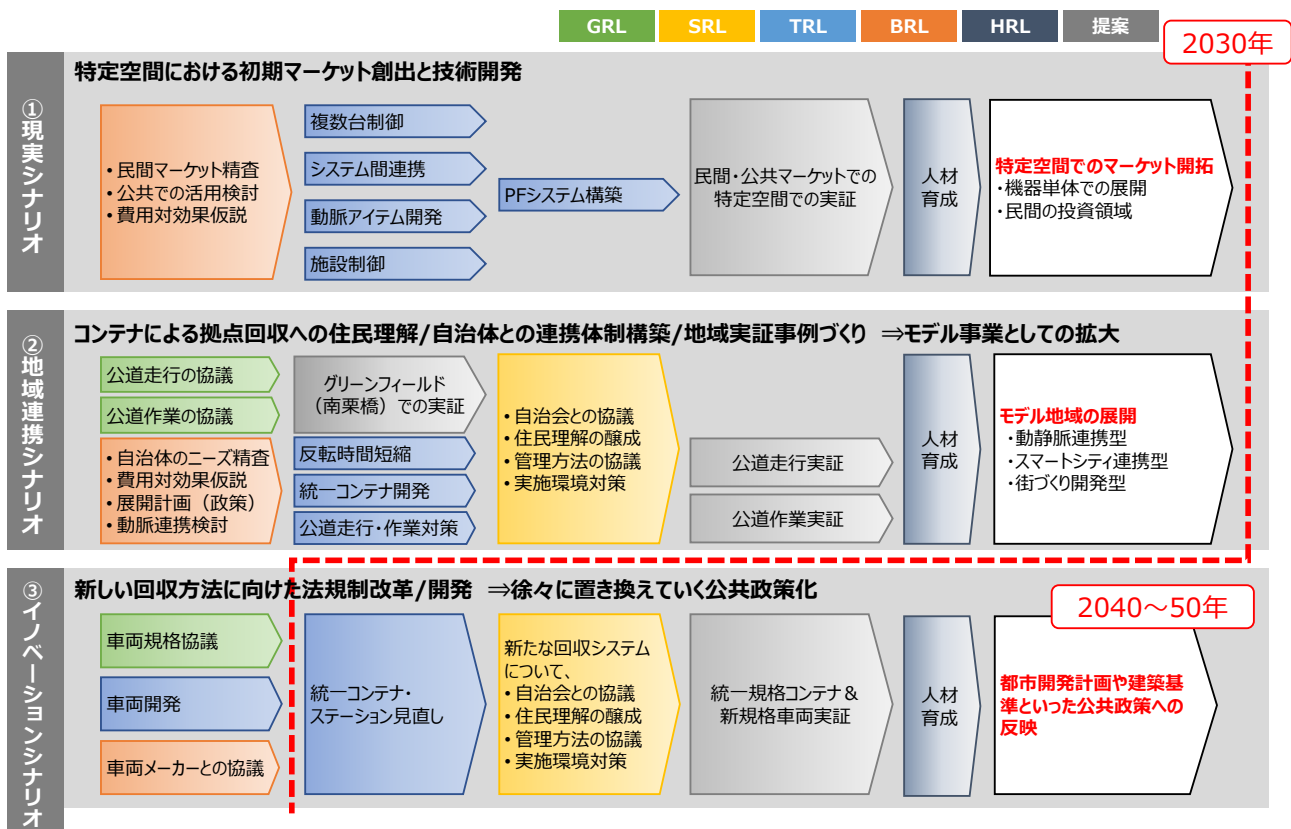


図 38 社会実装シナリオのロードマップ

5. サブテーマ2 研究目標の達成状況

サブテーマ2では、自治体、収集・運搬事業者等のニーズを把握したうえで、非接触型ごみ収集システムの社会実装に向けたシナリオを提示することが目標となっている。具体的には、わが国のごみ収集の実態を把握したうえで、サブテーマ1で開発する技術・システムの社会実装に向けた方策を明らかにし、連携する事業者や自治体との協議により、本研究での実証モデルを具体化することとしていた。社会実装に向けては、収集・運搬事業者および廃棄物処理・リサイクル事業者の立場から事業化シナリオを提示し、早期の事業化が可能と考えられるショッピングモール・テーマパーク等の特定空間内での活用に加え、2025年の大阪万博が現時点で明らかになっているターゲットとしていた。

この研究目標の達成に向け、ごみ収集実態の類型化や地域住民、収集・運搬事業者、自治体職員へのニーズ調査を行い、非接触型ごみ収集システムの市場分析を行った。そこで得られた知見とサブテーマ1で得られた知見を基に、社会実装シナリオを3つに分けて提示することができた。このなかで、早期の事業化が可能と考えられるテーマパークや事業系一廃を対象としたパターン①「現実シナリオ」を提示し、今後の具体的な実証提案や技術開発提案することができた。また、2025年の大阪・関西万博において、『資源循環に貢献したくなるスマート回収箱とスマートフォンアプリ』に関する実証に採用された。さらに、パターン②「地域連携型シナリオ」において、南栗橋駅前街区を実証モデル地域として、公道走行・公道作業を伴う非接触型ごみ収集の実現に向けた実証モデルを提示した。そして、当初既存のパッカー車との接続を前提とした技術開発や社会実装シナリオを検討してきたが、新たにパターン③として統一規格コンテナ自体を回収する新規格車両の技術開発を提案し、社会実装に向けた政策提言につながる成果をあげることができたため、サブテーマ2は目標を上回る成果をあげることができたといえる。

Ⅲ．研究成果の発表状況の詳細

※この項目の成果番号は通し番号です。

(1) 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	5
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	10
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	0
口頭発表（学会等・査読なし）：	36
知的財産権：	0（出願準備中）
「国民との科学・技術対話」の実施：	9
マスコミ等への公表・報道等：	4
研究成果による受賞：	1
その他の成果発表：	0

(2) 誌上発表

<査読付き論文>

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
1	Ogawa A., Pandyaswargo, A. H., Tsubouchi, R., & Onoda, H. (2023). Demonstration of contactless waste collection system: A Japanese case study. IET Smart Cities, 5(4), 303-316. https://doi.org/10.1049/smc2.12065
2	Shan, C., Pandyaswargo, A. H., Ogawa, A., Tsubouchi, R., & Onoda, H. (2024). Japanese public perceptions on smart bin potential to support PAYT systems. Waste Management, 177, 278-288. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.02.003
3	小川聡久, 久保田耕介, Pandyaswargo Andante Hadi, 壺内良太, 小澤健, 澤田真, 小野田弘士. (2024). 非接触型ごみ収集システムにおける自律走行型ロボットの開発と社会実装に向けた検討. 情報処理学会論文誌デジタルプラクティス (TDP), 5(2), 1-9. 一般社団法人情報処理学会.

4	小野田弘士.(2023). Circular Economy (CE) に貢献するデジタル技術の現状と展望. 日本LCA学会誌, 19(2), 79-84. 日本LCA学会
5	Chaoxia SHAN, Andante Hadi PANDYASWARGO, Hiroshi ONODA.(掲載決定) Readiness Status of Smart Waste Collection and Processing Technologies for Plastic Waste Recycling, Ecodesign2023, Springer.

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文
-	特に記載すべき事項はない。

＜査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）＞

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

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

＜その他誌上発表（査読なし）＞

成果 番号	【サブテーマ1】のその他誌上発表（査読なし）
6	小野田弘士：都市清掃75(365)，11-15（2021），廃棄物処理・資源循環分野の脱炭素化に向けて必要な視点（特集 脱炭素化社会実現のための各分野における取り組み）。
7	小野田弘士：環境浄化技術21(4)，29-34(2022)，非接触型ごみ収集システムの要素技術の開発。
8	小野田弘士：いんだすと37(5)，2-7（2022），進化する廃棄物処理技術-非接触化・脱炭素化へのアプローチ。
9	小野田弘士：いんだすと37(8)，30-36（2022）非接触型ごみ収集システムの要素技術の開発とPoC（Proof of Concept）。
10	小野田弘士：建設マネジメント技術，(532)，79-86（2022），次世代モビリティとまちづくりへのアプローチ。
11	小野田弘士：日本エネルギー学会機関誌えねるみくす101(6)，669-674（2022），カーボンニュートラル・循環経済を見据えた AI・IoT の活用事例。
12	小野田弘士：画像ラボ34(5)，31-37（2023），廃棄物処理・資源循環分野におけるAI画像診断ソリューションの開発。
13	小野田弘士：いんだすと38(7)，2-8（2022）資源循環業が目指すべきDXの課題と展望。
14	小野田弘士：都市清掃77(377)，13-20（2024），非接触型ごみ収集システムの要素技術の開発と社会実装に向けたシナリオ構築。
15	小野田弘士：情報処理65(5)，d1-d10(2024)，人とロボットが共存し協調して働く社会のプラクティス：まちづくりと一体となったマルチベネフィット型モビリティの社会実装に向けた試み—南栗橋駅前街区「BRIDGE LIFE Platform」構想を例として—。

成果 番号	【サブテーマ2】のその他誌上発表（査読なし）
----------	------------------------

-	特に記載すべき事項はない。
---	---------------

(3) 口頭発表

<口頭発表(国際学会等・査読付き)>

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

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表(国際学会等・査読付き)
-	特に記載すべき事項はない。

<口頭発表(学会等・査読なし)>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表(学会等・査読なし)
16	加藤浩瑞, 小川聡久, 壺内良太, & 小野田弘士. (2021). 非接触型ごみ収集システムの要素技術の開発. In 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 (p. 77). 一般社団法人廃棄物資源循環学会.
17	小野田弘士: 脱炭素化・循環経済・Society5.0等を見据えた動向とAI・IoT活用事例, 一般社団法人日本機械工業連合会循環型社会研究委員会, 2021年11月1日.
18	小野田弘士: スマートシティ・カーボンニュートラルに対応した地域連携型のプロジェクトの創出の可能性～モビリティ開発, AI・IoT, ロボット開発等を例として～, 小野田弘士, 相模原技術交流研究会オンライン講演会, 相模原技術交流研究会, 2022年1月11日.
19	小野田弘士: マルチベネフィット型モビリティに関する研究紹介, 埼玉県北部地域AI・IoTセミナー, 2022年1月20日.
20	小野田弘士: マルチベネフィット型モビリティに関する研究紹介, オンライン彩の国ビジネスアリーナ2022, 2022年1月25日 - 2月14日.
21	小野田弘士: マルチベネフィット型モビリティの実証報告～岡崎スマートコミュニティでの実証と他地域での展望, 岡崎スマートコミュニティ推進協議会総会, 2022年3月4日.
22	小野田弘士: マルチベネフィット型モビリティに関する研究紹介, 早稲田オープン・イノベーション・フォーラム2022, 2022年3月8日-15日(オンライン).
23	小野田弘士: 都市生活を再構築する里山, 早稲田大学AEON TOWAリサーチセンター 2021年度研究・活動報告会, 2022年3月16日.
24	小野田弘士: 脱炭素化・循環経済を見据えた動向とAI・IoT活用事例, 日本エネルギー学会【リサイクル・バイオマス・ガス化】三部会(RGB)シンポジウム, 2022年5月19日.
25	小川聡久, 加藤浩瑞, 久保田耕介, 山本純太, 壺内良太, 菊池亮, & 小野田弘士. (2022). 非接触型ごみ収集に対応したごみの排出・反転プロセスの開発と PoC. In 廃棄物資源循環学会研究発表会講演集 第33回廃棄物資源循環学会研究発表会 (p. 103). 一般社団法人廃棄物資源循環学会.
26	小野田弘士: カーボンニュートラル・デジタル化を見据えたAI・IoTの活用事例と展望～廃棄物処理・資源循環分野およびスマートシティ等における取り組みを中心として～, JEITA CPS/IoT研究会, 2022年11月1日.
27	小野田弘士: カーボンニュートラル・デジタル化を見据えた廃棄物処理・資源循環システムの展望, 第56回化学工学の進歩講習会「脱炭素社会に向けて進化するリサイクル技術の現在と未来」, 公益社団法人化学工学会東海支部, 2022年11月18日.
28	小野田弘士: 地域ニーズに立脚した次世代モビリティ, 第2回CASE研究会技術セミナー, 公益財団法人埼玉県産業振興公社, 2022年12月19日.

29	小野田弘士：資源循環分野におけるDX活用, 第4回サーキュラー・エコノミーに関するWG, (一社)日本経済団体連合会環境エネルギー本部, 2022年12月22日 (オンライン)。
30	小野田弘士：ライフサイクル全体の脱炭素化を見据えた循環関連産業の目指すべき方向性, 三重県資源循環セミナー, 三重県, 2023年1月11日。
31	小川聡久, 加藤浩瑞, 久保田耕介, 山本純太, 壺内良太, & 小野田弘士. (2023). 非接触型ごみ自動投入システムの要素技術の開発と PoC (Proof of Concept). In 第44回全国都市清掃研究・事例発表会 (p. 168). 公益社団法人 全国都市清掃会議。
32	小野田弘士：カーボンニュートラル・デジタル化を見据えたAI・IoTの活用事例～地域等と連携したプロジェクトを中心として～, 第101回機器・部品メーカー懇談会, JEITA関西支部, 2023年6月15日。
33	小野田弘士：製造業におけるサステナブル・トランスフォーメーションの実現に向けたアプローチ～環境に配慮したものづくりのこれまでとこれから～, 製造業の未来 SX時代における「日本のものづくり」を考えるワークショップ, ダイヤモンドクオリタリー, 2023年9月21日。
34	小野田弘士：廃棄物処理・資源循環分野におけるDXに関する現状と展望, 令和5年度環境セミナー, 公益財団法人宮城県環境事業公社, 2023年9月22日。
35	小野田弘士：カーボンニュートラル・デジタル化を見据えた廃棄物処理・資源循環技術の展望, 日本機械学会講習会「低炭素社会実現に向けた最新技術」, 日本機械学会環境工学部門, 2023年11月21日。
36	小川聡久, 久保田耕介, 壺内良太, & 小野田弘士. (2024). 非接触型ごみ収集システムにおける自律走行型ロボットの開発と機能検証. In 第45回全国都市清掃研究・事例発表会 (p. 121). 公益社団法人 全国都市清掃会議。
37	小野田弘士：カーボンニュートラルに向けた政策動向と地域等における取り組み事例, 私立大学環境保全協議会第40回総会・研修研究会, 2024年3月15日。
38	小野田弘士：廃棄物処理・資源循環分野からみたカーボンニュートラルへのアプローチ, 公益社団法人化学工学会第89年会, 2024年3月17日。

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表（学会等・査読なし）
39	小野田弘士, 脱炭素社会・循環経済・Society5.0の実現に向けたアプローチ, 2021年度第2回環境ビジネスオンラインセミナー, 資源循環ネットワーク・三機化工建設, 2021年7月15日。
40	小野田弘士：地域ニーズに立脚したスマートシティを目指して, アイフォーコム, 2021年7月10日。
41	小野田弘士：CEに対応したビジネスモデルのあり方, 小野田弘士, 理想の空気を持続するサーキュラーエコノミービジネスモデル連携研究ユニット (IFI-CEM連携研究ユニット) 設立記念シンポジウム, 東京大学未来ビジョン研究センター・ダイキン工業株式会社, 2021年12月10日。
42	小野田弘士：都市（地域）のゼロカーボン化への進展と関係する技術、注目すべき動き, 小野田弘士, 一般社団法人安心R住宅推進協議会, 2022年1月19日。
43	小野田弘士：話題提供～オープンイノベーション・DX・GX～, 埼玉県北部地域AI・IoTセミナー, 2022年2月28日。
44	小野田弘士：脱炭素化・循環経済・Society5.0等を見据えた動向 ～地域での事例を中心に～, 株式会社奥村組, 2022年3月30日。
45	小野田弘士：カーボンニュートラル・循環経済に向けたアプローチ～各地域でのプロジェクトと企業に求められる対応～, 天城サステナビリティフォーラム, 日本IBM, 2022年6月17日。
46	小野田弘士：脱炭素化に対応したこれからの廃棄物処理システム～施設整備に求められる視点と対応～, 上智大学, Sophia Ecology Law Seminar 2022 資源循環戦略の最前線 (Aセミナー), 2022年7月6日。
47	小川聡久, 加藤浩瑞, 久保田耕介, 壺内良太, 菊池亮, & 小野田弘士. (2022). 非接触型ごみ収集システムの要素技術の開発と評価. In 環境工学総合シンポジウム講演論文集 (pp. 2205-08). 一般社団法人 日本機械学会。

48	小野田弘士：産学官連携によるオープンイノベーションの現状と展望～環境・エネルギー分野における事例を中心に～，天城経営革新フォーラム，日本IBM，2022年6月17日．
49	小野田弘士：カーボンニュートラル・循環経済・Society 5.0に関連する最新動向～廃棄物処理・資源循環分野での取り組みを中心として～，経営戦略セミナー，産廃振興財団，2022年11月15日．
50	壺内良太，菊池亮，小川聡久，& 小野田弘士．(2023)．非接触型ごみ収集システムの社会実装シナリオの構築に向けた検討．In 第44回全国都市清掃研究・事例発表会 (p. 171)．公益社団法人 全国都市清掃会議．
51	小野田弘士：CE実現に資するソフトとハードの整備に向けたアプローチ，令和5年度第3回CARDワーキンググループ，高度資源循環・デジタル化推進協議会，2024年1月25日．

(4) 知的財産権

成果番号	発明者	出願者	名称	出願以降の番号	出願年月日
-					出願予定*

*学内のTL0での審査期間が必要となるため，現時点で報告できるものはないが，サブテーマ1の成果を基に出願を予定している．

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果番号	実施年度	【サブテーマ1】の実施状況
52	2021	「岡崎スマートコミュニティ推進協議会」における一般市民向け公開イベントにおける実証，2021年11月13日．
53	2022	オンライン彩の国ビジネスアリーナ2022，2022年1月25日～2月14日．
54	2022	埼玉県におけるデジタル田園都市構想と今後の地域づくり，2022年2月22日～2月14日．（パネルディスカッションのコーディネータとして本研究の成果を報告）
55	2022	早稲田オープン・イノベーション・フォーラム2022，2022年3月8日～3月15日．
56	2022	南栗橋8丁目周辺地区のまちづくり ～BRIDGE LIFE Platform構想～，街びらきイベント，2022年5月28日，29日．
57	2022	2022年度ユニラブ（早稲田大学理工学術院が主催する小中学生のための科学実験教室），2022年8月9日．
58	2023	南栗橋8丁目周辺地区のまちづくり ～BRIDGE LIFE Platform構想～，街びらき1周年記念感謝祭，2023年6月10日，11日．
59	2023	南栗橋8丁目周辺地区のまちづくり ～BRIDGE LIFE Platform構想～，BLPイルミネーション2023，2023年12月3日-2024年1月8日．
60	2023	「岡崎スマートコミュニティ推進協議会」総会における成果発表，2024年2月20日．

成果番号	実施年度	【サブテーマ2】の実施状況
-	-	特に記載すべき事項はない．

(6) マスメディア等への公表・報道等

成果番号	【サブテーマ1】のメディア報道等
------	------------------

61	南栗橋8丁目周辺地区のまちづくり ～BRIDGE LIFE Platform構想～，記者発表，2022年11月10日（図 39(a)）。
62	南栗橋8丁目周辺地区のまちづくり ～BRIDGE LIFE Platform構想～，街びらきイベント，2022年5月26日（記者発表および開発品を展示）（図 39(b)）。

成果 番号	【サブテーマ2】のメディア報道等
63	日本経済新聞（2023年12月9日，会員限定記事，「大栄環境、ごみ回収ロボを「ひらパー」で実験」）
64	大阪・関西万博(Team Expo 2025 共創チャレンジ)にて実施予定，2023年3月15日公表，【CO-Design Challenge】資源循環に貢献したくなるスマートごみ箱とスマートフォンアプリ



(a) 2021年11月10日 5者間協定



(b) 2022年5月26日

図 39 南栗橋8丁目周辺地区のまちづくり ～BRIDGE LIFE Platform構想～に関する記者発表

(7) 研究成果による受賞

成果 番号	【サブテーマ1】の研究成果による受賞
65	2023グッドデザイン賞 産官学5者連携による地域活性化モデル事業「BRIDGE LIFE Platform構想」

成果 番号	【サブテーマ2】の研究成果による受賞
-	特に記載すべき事項はない。

(8) その他の成果発表

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

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

Abstract

[Research Title]

Development of Contactless Garbage Collection Systems and Scenarios Construction for Social Implementation

Project Period (FY) :	2021-2023
Principal Investigator :	Onoda Hiroshi
(PI ORCID) :	ORCID0000-0002-6766-0682
Principal Institution :	WASEDA UNIVERSITY, Graduate School of Environment and Energy Engineering 513 Wasedatsurumaki-cho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-0041, Japan Tel: +81-3-6457-3972 E-mail: onoda@waseda.jp
Cooperated by :	Daiei Kankyo Research Institute Co., Ltd.
Keywords :	Contactless, Waste collection, Automation • Manpower-saving, Mobility

[Abstract]

This study aimed to construct a contactless garbage collection system to reduce the risk of infection among garbage collection workers, develop elemental technologies, systemise them, and build scenarios for their social implementation. The processes involved in a contactless garbage collection system were classified into monitoring, transport, and reversing functions. The following elemental technologies were developed for each: “Contactless automatic refuse input system”, “Smart garbage bin for automatic removal”, and “Modular mobility system for automatic transport.” Demonstration tests of the contactless garbage collection system using actual garbage were conducted in a theme park, a detached housing development block, and a public housing estate. Results showed that contactless garbage collection is possible and that the number of garbage collection workers can be reduced by one.

After typifying the forms of garbage collection in Japan, scenarios for the social implementation of the contactless garbage collection system were studied. The interview survey on the needs of municipal employees, collection and transport operators, and residents confirmed a need for contactless workload reduction through the automation of garbage collection and the improvement of resident services. Based on the results of this survey and demonstration, the social implementation scenarios of the contactless garbage collection system were divided into three from the perspective of legal regulations and systems, which are particularly problematic: (1) Real scenario, (2) Regional cooperation scenario, and (3) Innovation scenario, each of which was implemented from the perspective of X Readiness Level (XRL). A roadmap for the social implementation of these scenarios was drawn up from the XRL perspective.

The results of this study indicate that in addition to further technological sophistication, it is essential to review the safety standards for refuse collection vehicles and standardise the specifications of large refuse containers, which differ from one refuse collection point to another, to promote the spread of non-contact refuse collection systems.

[References]

Ogawa A., Pandyaswargo, A. H., Tsubouchi, R., & Onoda, H. (2023). Demonstration of contactless waste collection system: A Japanese case study. *IET Smart Cities*, 5(4), 303-316.

<https://doi.org/10.1049/smc2.12065>

Shan, C., Pandyaswargo, A. H., Ogawa, A., Tsubouchi, R., & Onoda, H. (2024). Japanese public perceptions on smart bin potential to support PAYT systems. *Waste Management*, 177, 278-288.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.02.003>

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

別添

【参考資料】 終了研究成果報告書 公募審査・中間評価結果への対応

指摘等	対応状況・非対応理由等
(公募審査)	
目的、ステップなどが明確であるうえ、バックグラウンドの蓄積があり、フイービリティが高い。社会的ニーズが高いことと対応して、近い将来における社会実装を前提とした計画となっている。	本提案にご理解いただいたものと解釈。
野心的な挑戦だが、実現可能な計画と理解した。	
研究に地域性を反映して進めていただくようお願いする。成果を期待している。	「地域性」に関しては、実証フィールドごとに深化させる方向性で検討した結果、法規制の難易度別に類型化し、それぞれで具体的な実証モデルの提案を含めた社会実装シナリオを構築した。
今回の研究を通して将来のごみ収集のあり方を提案できると良いと思う。わが国ではスマートシティの考え方の導入に関して廃棄物処理系が議論されていないのは、残念なところなので、アピールすることをして欲しい。後は、地域の特性を利用してどの収集タイプがいいのかも指針を出して欲しい。	
適用する地域や社会の特性に合った多様なバリエーションの中での開発システムの位置づけを計画にしてほしい。モデルやパイロット性が高いと導入可能なエリアが限られるので、類型ごとにソリューションを複数示すアウトプットイメージを示すこと。	
スマートごみ箱の機能についてはいろんなアイデアが合うと思うが、装置の導入購入費等のコストの抑制もよく考える必要がある。	本研究で開発したスマートごみ箱は万博での実証に採用された。将来的には、具体的なニーズに対して費用対効果を見極めたソリューションに仕上げていく。
新しいごみ収集システムについて、フィールドとする団地やスーパー等での排出側の受け止め方を把握しつつ、人が行動を変えることで相乗効果を発揮することがないかを考えてみるという視点もあればと思う。また、開発されるモジュールはごみ収集だけに留まらず、物の配送にも応用できる（併用できる）し、さらには配送と排出対応を合わせたものも出来ると思う。検討して欲しい。	排出側へのヒアリングや実証などを踏まえて、新たな回収システムによるメリットと運用管理や周辺環境の整備のコスト面の課題抽出といった社会受容性を評価した。 ごみ収集に加えて動脈連携のニーズを確認し、一部機能を実証することができた。

(中間評価)	
ごみ収集のイノベーションにつながる大変興味深い取り組みで、社会への実装化に極めて近い研究である。適切な計画の下で社会実装に向けての適切な実証試験や検討が実行されている。非接触型ごみ収集システム(反転装置)のコンセプト実証として進んでいると判断できる。屋外条件や地域特性、ゴミ特性は今後の課題と思われるが、回収に関わる人員削減への貢献を大いに期待したい。	本提案にご理解いただいたものと解釈
一方、モビリティを使って、コンテナをパッカー車に輸送するのは現実的なのか、パッカー車に積載するモビリティの充電はどうするのか、といった検討が求められる。自治体との連携を進め、そのニーズを積極的に取り入れてもらいたい。	本研究のターゲットとしては、代表的なユースケースを提示し、PoC・実証を行い、その結果を踏まえた社会実装シナリオを提示することにある。充電インフラに関しては、ご指摘のような配慮が必要なため、スマートシティプロジェクト等と連携したアプローチが必要と考えている。
実用的で、社会展開性のある成果を数多く挙げておられ、実現性の高い社会システムとして期待できる分野である。一方、推進費にふさわしい学術的な新規性がどの程度あるのかについての検討が必要である。希少な学術成果として訴えることのできる工学分野であるとのことでもあり、学術研究成果を期待したい。	中間評価までは、ハードウェアの開発・実証を完了させることを優先していたが、最終的には、別記のとおり査読付き論文、知的財産等に関しては、随時、成果を発信している。