

大学研究者による事業提案制度

廃棄物処理・リサイクルの非接触化・自動化を実現する  
選別ロボットの開発と社会実装に向けたシナリオ構築事業

報告書

令和7年3月

学校法人 早稲田大学

## 目次

<b>第1章 事業の背景と目的</b> .....	1
1-1 事業目的 .....	1
1-1-1 背景となる課題認識 .....	1
1-1-2 事業の目的 .....	1
1-1-3 具体的な達成目標 .....	4
1-2 事業のスキーム・流れ .....	5
1-2-1 東京都と大学・開発事業者とで実施する連携事業 .....	5
1-2-2 連携事業の構築に必要な研究・調査等（令和6年度実施項目） .....	5
<b>第2章 排出現場及び中間処理施設における選別を行うことができるロボット開発に必要な要素技術の研究開発</b> .....	7
2-1 カメラシステムの選定 .....	8
2-2 画像認識 AI モデルの構築 .....	13
2-3 ロボットグリッパーの検討 .....	23
2-4 ロボット制御システムの検討 .....	28
<b>第3章 排出現場で活躍する選別支援システム・ロボットの開発</b> .....	30
3-1 実証フィールドとなる排出現場の処理の実態及びニーズを踏まえた、開発すべきロボットの仕様の検討 .....	31
3-1-1 業務ビル・商業施設における廃棄物取扱状況と廃棄物管理上の課題 .....	31
3-1-2 ロボットシステムの検討対象と課題 .....	45
3-1-3 ロボット開発の方向性と検討課題のまとめ .....	49
3-2 自律走行型ロボットの開発 .....	51
3-2-1 複数台制御に向けた開発 .....	51
3-2-2 LiDAR の汎用性検討 .....	52
3-2-3 フリートコントロールシステムの開発 .....	60
3-2-4 自律走行型ロボットの走行実証 .....	64
3-2-5 今後の実用化に向けた課題 .....	67
3-2-6 社会実装に向けたロードマップ .....	73
3-3 コンパクト型飲料容器自動選別ユニットの高度化開発 .....	74
3-3-1 自動選別ユニットの高度化開発 .....	74
3-3-2 現場における実証実験 .....	88
<b>第4章 ヒト共存型選別ロボットの開発</b> .....	103
4-1 実証フィールドとなる中間処理施設の処理の実態及びニーズを踏まえた、開発すべきロボットの仕様の検討 .....	104
4-1-1 中間処理施設における廃棄物処理の状況と廃棄物管理上の課題 .....	104
4-1-2 ロボットシステムの検討対象と課題 .....	108
4-1-3 ロボット開発の方向性と検討課題のまとめ .....	111
4-2 ハイパースペクトルカメラを活用した廃プラスチック類（塩ビ等）判別システムの開発 .....	111
4-2-1 廃プラスチック類リサイクルの実態調査 .....	112
4-2-2 廃プラスチック類（塩ビ）判別システムの開発 .....	116
4-2-3 実用化に向けた課題 .....	132
4-3 建設混合廃棄物（木くず等）を対象とした自動選別ロボットの高度化開発 .....	133
4-3-1 ロボットユニットシステム全体の設計と開発 .....	133
4-3-2 研究室内での選別実証 .....	148
4-3-3 現場での実証実験 .....	151
4-3-4 今後の実用化に向けたシナリオ .....	160

<b>第5章 社会実装に必要となる要素、プロセス等の検討</b> .....	<b>165</b>
5-1 ロボット利用に対する社会ニーズ.....	165
5-2 選別ロボットの新たな要素技術開発に向けた方向性の検討.....	167
5-2-1 LMMによる新たな画像認識システム.....	167
5-2-2 VLAによる新たなロボット制御システム.....	170
5-3 次世代AI自動選別ロボットの一般化と今後の方向性.....	172
<b>第6章 ロボット等導入の環境負荷削減その他の効果についての研究開発</b> .....	<b>177</b>
6-1 リソースシフト評価.....	179
6-1-1 評価手法の開発背景.....	179
6-1-2 リソースシフト評価の概念.....	179
6-1-3 リソースシフト評価の検証.....	180
6-1-4 リソースシフト評価のまとめ.....	196
6-2 特定空間内のごみ質と分別の合理化に関する調査.....	197
6-2-1 東京都内の公共空間に設置されているごみ箱の実態調査.....	197
6-2-2 研究室におけるごみ分別の合理化・ごみ質に関する調査実験.....	199
6-2-3 分別実験から得られる知見と合理的な分別方法に関する提案.....	204
6-3 ごみ量の自動化監視手法に関する研究開発.....	205
6-3-1 研究室における人流量とごみ量の関連性について.....	205
6-3-2 カメラベースのごみ占有率識別システムの開発.....	208
6-3-3 ごみ量の自動化監視手法に関するまとめ.....	211
6-4 教師データ取得効率化に向けた検討と実験.....	211
6-4-1 既存の教師データ取得・利用について.....	211
6-4-2 教師データの特徴に関する検討.....	217
6-5 エリアマネジメント的なアプローチによる廃棄物回収シミュレーション.....	222
6-5-1 シミュレーションを行う背景とシミュレーション条件.....	222
6-5-2 シミュレーション結果とそのまとめ.....	226
6-6 廃プラスチック類のDB構築について.....	228
6-6-1 吸光度スペクトルデータに関する分析.....	228
6-6-2 反射度スペクトルデータに関する分析.....	229
6-6-3 回収した反射度スペクトルデータを基としたプラスチック選別技術の試み.....	231
6-6-4 プラスチックDB構築作業の結果まとめ.....	234
<b>第7章 総括</b> .....	<b>236</b>
7-1 技術的な観点からの成果と課題.....	236
7-2 ヒト共存型のコンセプト.....	238
7-3 社会実装に向けて留意すべき点.....	239

## 第1章 事業の背景と目的

### 1-1 事業目的

#### 1-1-1 背景となる課題認識

2020年の菅総理によるカーボンニュートラル宣言に始まり、廃棄物処理分野においても、廃棄物発電や熱利用の促進に加えて、マテリアルリサイクルやケミカルリサイクルなどによる資源循環社会の実現ニーズが高まっている。特に、プラスチック削減の社会的要請は非常に高く、「プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律」の成立（2021年6月）を経て、3R推進におけるプラスチック対策の見直しや、廃棄物の循環利用がさらに求められている。加えて、東京都は、東京都資源循環・廃棄物処理計画（2021年9月）において、今後、生産年齢人口の減少が進み、担い手不足が危惧される中で、デジタル化等により廃棄物処理システムの省人化・省力化等を通じて、「廃棄物処理システムの強靱化・高度化」を図ることの必要性を示している。これまで、廃棄物処理業界では、人材確保の困難さ、業界特有の商習慣などの理由からデジタル化が進んでおらず、AIやIoTの活用による業務の効率化や、新たなビジネスモデル創出、すなわちDX実現が強く求められている。加えて、新型コロナウイルスの感染拡大に伴い廃棄物処理における非接触化・自動化ニーズに拍車がかかっている。

これらの資源循環社会×DXの実現に向けて、従来の廃棄物処理事業者によるリサイクル素材の選別といった対応だけでなく、排出事業者からも巻き込んだ新たな取組みやより効率的に高品位（リサイクルしやすい）素材の経済的な回収が可能となる技術が求められている。

#### 1-1-2 事業の目的

資源循環社会の実現には、動脈側（排出側）及び静脈側（受入側）の連携が必要不可欠である。排出側では、受入側の処理方法やリサイクル率を考慮し、ごみ分別の徹底が重要であり、受入側では、排出事業者からの処理ニーズや後工程を考慮した処理とリサイクル率の向上を図ることが重要である。このように動・静脈両方の役割分担と総合連携により、サプライチェーン全体のさらなるリサイクル率の向上が期待できる。

これまで提案者らは、廃棄物処理施設における労働力不足に対応するために、産業廃棄物の中間処理施設の手選別ラインにおいて特定の廃棄物を画像認識AIによりロボットで選別する『自動選別ロボット』の開発を行ってきた（図 1-1）。このロボットは、手選別ラインにカメラを設置し、カメラにて撮影された混合廃棄物の中から、回収対象の廃棄物を画像認識AIにより識別し、ロボットアームにより対象物をピックアップするものであり、人力に頼る選別作業を代替し、かつ、従来の人以上の回収効率を目指すものである。



図 1-1 開発している自動選別ロボット

本事業では、これらの技術を活用し、排出側と受入側における対応として、動脈・静脈連携型の自動選別ロボットによる資源回収率の向上を目指すべく以下 2 つの連携事業のテーマを設定した。連携事業では、東京都と連携し、排出現場・処理現場の協力のもとで、実態調査を踏まえた現場のリアルなニーズに応じて、ロボットソリューションの開発・導入を行う（図 1-2）。

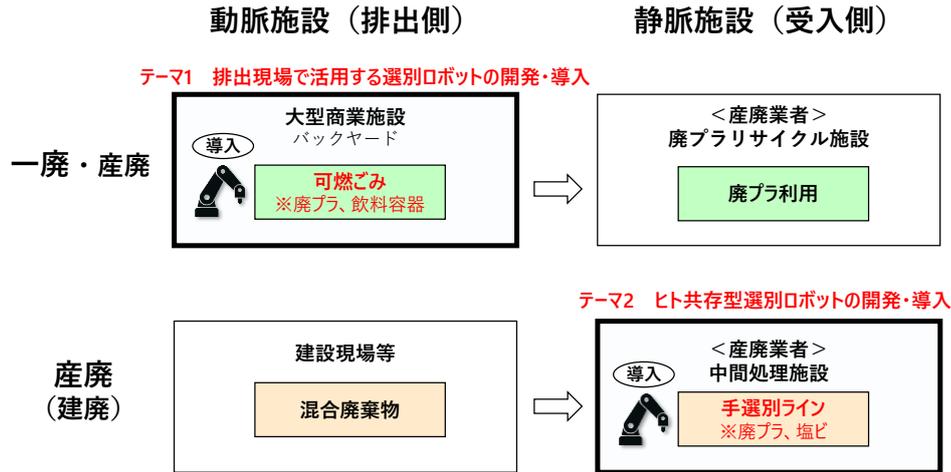


図 1-2 資源循環社会の実現に向けた動静脈連携によるテーマ設定

### テーマ 1：排出現場で活用する選別ロボットの開発・導入

大型商業施設及び業務ビル等の大規模事業用建築物（例：延床面積 3,000 m<sup>2</sup>以上）は、各区で条例や要綱に基づくごみの減量化、分別・リサイクルなどが進められているが、多くは計画提出・管理にとどまっており、自主的なリサイクルの推進にも限界が見られる。とりわけ、分別・リサイクルに熱心なビル、商業施設においても、デベロッパーによるテナント向けの分別・リサイクルの啓発、リサイクルマニュアル作成や分別ボックスの無償提供、分別後の独自リサイクルルートの構築などの具体的な取組を通じて、古紙、飲料容器及び一部の生ごみのリサイクルがなされている。一方、テナントの分別への協力が得にくい可燃物については、紙くずや厨芥ごみ（事業系一般廃棄物）と弁当がらや容器包装などの廃プラスチック類（産業廃棄物、以下「廃プラ」という。）が混合排出されることが多い。それらは、清掃・メンテナンス業者が手作業で廃プラと可燃物に分別せざるを得ず、また、汚れた弁当がらが入ることによって廃プラのリサイクルにも悪影響を及ぼすことになる（図 1-3）。

ちなみに、千代田区、港区、中央区などの都心 3 区では、事業系廃棄物が 8 割～9 割を占めるため、持続可能な資源利用に向けて、事業系廃棄物のリサイクルが重要課題となっている。実際に、行政側の強い誘導（延床面積あたりのリサイクル率目標の統一化（渋谷区）、区部の清掃工場における事業系ごみの受入制限等）を踏まえれば、廃プラのリサイクルの推進による可燃ごみの最小化は今後とも重要なテーマとなる。



（左：ヤードでの廃棄物集積状況、右：混合飲料容器の保管状況）

図 1-3 商業施設などにおける廃棄物（写真）

これらの課題を解決するために、図 1-4 に示すように大型商業施設やオフィスなどのバックヤードで稼働する選別ロボットを開発する。バックヤードで活用することから、コンパクトであり、かつ、安全性・可搬性・設置性に優れており、テナントから持ち込まれごみを特定の場所で開封したのち、主に紙、

プラ、厨芥、飲料容器などの混合廃棄物を対象にロボットがプラスチック、飲料容器などをカメラで検知し選別することで、人の作業を補佐しながらリサイクル率の向上を目指すものである。

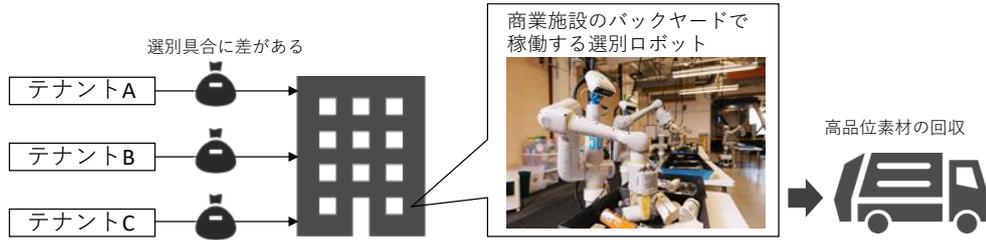


図 1-4 テーマ 1：排出現場で活用する選別ロボットのイメージ

### テーマ 2：ヒト共存型選別ロボットの開発・導入

建設系混合廃棄物は、がれき、金属、木くずなどの重量物であり、大きさ・形が多様、品目ごとに品質成分が異なる複合材などが混合し、表面には土砂分の付着もあるという特徴がある。現在、建設混合廃棄物処理施設では、粗選別、手選別、機械選別を組み合わせ、はじめに爆発物や危険物及び単品化リサイクル物を手選別後、機械処理により重量物、軽量物、微細物に分けられ、品目ごとの特性に応じたりサイクル・処分がされている（図 1-5）。



(a) 搬入時の粗選別



(b) 手選別の様子

図 1-5 建設混合廃棄物の処理の様子（写真）

廃プラに関しては、ブルーシート、梱包材、配管・継手、壁クロス、床タイル等がある。それらは、新築系、解体系廃棄物として様々な形状、性状、かつ素材の種類も多い上、塩化ビニル製品が多く、リサイクルに向けては塩ビ（塩素成分）の除去が重要となっている（図 1-6）。

廃プラ中の塩素成分の除去は、処理の最終段階において、光学センサー（近赤外線）が用いられることもあるが、汚れ、黒色、複合建材などへの反応性に課題があり、回収物の塩ビ濃度にバラツキが多いことから、塩ビ建材を対象に、手選別による事前選別の必要性が高い。



(a) 搬入時の粗選別



(b) 選別後のペール

図 1-6 廃プラの選別の様子（写真）

そこで、本事業では、廃プラのリサイクル率向上に向けて、混合廃棄物中の塩素分を検出できる光学選別機能をもった自動選別ロボットを開発する。なお、設置場所となる手選別ラインでは、処理の安全性の担保、機械選別の安定化、さらには単品化し、品目ごとの品質要求に応じた丁寧なリサイクルが求められるが、現段階の技術にてすべてを自動化することは困難であることが想定される。そのため、人による手選別+ロボットによる自動選別を組合せた、それぞれが得意領域で活躍するヒト共存型選別ロボットを開発コンセプトとする（図 1-7）。



図 1-7 ヒト共存型選別ロボットのイメージ

### 1-1-3 具体的な達成目標

本事業では、2つのテーマそれぞれの目的に沿ったロボットシステムを開発し、導入フィールドでの検証を行うこととするが、このことにより以下の効果が期待できる。

テーマ 1 では、廃棄物の排出現場での回収により、従来は可燃ごみとして焼却されてきたものから、プラスチックや飲料容器を選別回収し、リサイクル素材としての回収率の向上が期待できる。また、ロボットの導入費用に対して、廃棄物処理費用の削減、リサイクル素材の売却益、分別作業にかかる人件費抑制などの効果と照らし合わせた上で、経済性を評価する。

テーマ 2 では、建設混合廃棄物の処理現場においてコンクリート塊や塩素含有率が低い廃プラ等の回収率の向上が期待できる。経済性については、リサイクル素材の価値向上や最終処分量や焼却といった後工程にかかる負荷削減に伴う効果が期待できる。また、光学選別機能+AI ロボット選別機については、革新的な技術開発となる。そのため、建設混合廃棄物特有の廃棄物性状を踏まえた対応や人との共同作業性を踏まえた既存設備への導入など処理システムの見直しと同時に進める必要がある。

また、現時点で設定している導入フィールドや回収対象物以外にも様々なケースが考えられる。そのため、マーケット分析やニーズ確認を調査し、導入による効果検証を踏まえて廃棄物処理・リサイクルの非接触化・自動化を実現する選別ロボットの社会実装に向けたシナリオ構築を行うとともに、オープンイノベーション型のアプローチで社会実装を推進するための体制構築を具体化する。これらの成果を政策へフィードバックすることが可能となる。

## 1-2 事業のスキーム・流れ

### 1-2-1 東京都と大学・開発事業者とで実施する連携事業

- 大型商業施設やオフィスなどの排出現場のバックヤードで自動選別を行う『排出現場で活用する選別ロボット』の開発・評価（2年目）ならびにフィールド実証（3年目）
  - 混合廃棄物の処理現場の選別ラインにて塩素分を判別する『ヒト共存型選別ロボット』の開発・評価（2年目）ならびにフィールド実証（3年目）
  - 各ロボットの開発・製作を伴う具体的な成果に向けては、開発事業者との連携が必須となる。そこで、早稲田大学の下で、開発事業者（㈱イーアイアイ）が協力して行う。
- ※いずれも具体的なフィールドは、東京都および大学双方で候補を選定、協議のうえ決定する。  
※各ロボットシステムは、2年目に開発・評価を完了し、3年目には、改良を行いつつフィールド実証を行う。

得られた開発の成果に基づく、選別ロボットをはじめとする自動化等の社会実装をオープンイノベーション型のアプローチで推進する枠組みを構築する。下図に示すように、アプローチの方法論としては、①選別ロボットそのものの構成部品・要素技術等のサプライヤー、②（中間処理施設等の）プラント・設備等のエンジニアリング・メーカー、③本事業の成果を活用して、サーキュラーエコノミー型の事業の展開を目的とする選別ロボット等の新規ユーザー等に分類される。

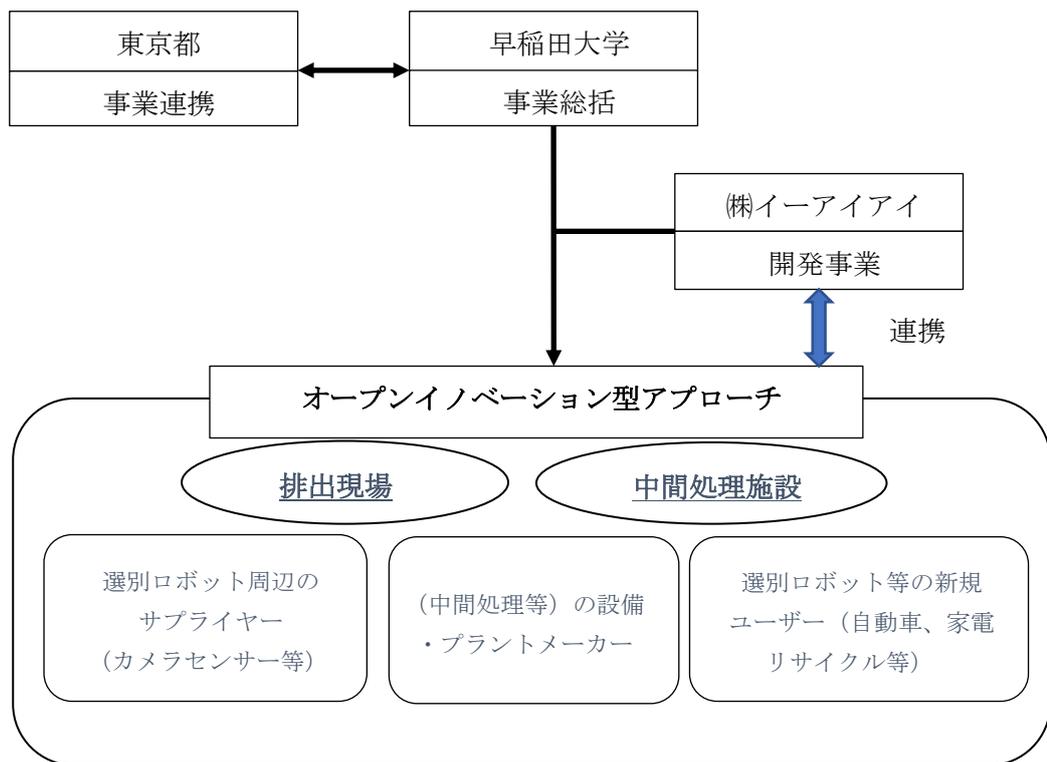


図 1-8 本事業の実施体制

### 1-2-2 連携事業の構築に必要なとなる研究・調査等（令和6年度実施項目）

- 排出現場及び中間処理施設における選別を行うことができるロボット開発に必要な要素技術の研究開発
- 実証フィールドとなる排出現場及び中間処理施設の処理の実態及びニーズを踏まえた実証事業の展開とその評価
- 廃棄物処理・リサイクル分野におけるロボット導入の環境負荷削減その他の効果についての研究調査
- その他前各号の目的を達成するために必要な事項

表 1-1 本事業で提案する連携事業の概要

	既存の研究	調査研究	連携事業	
		1年目 (R4)	2年目 (R5)	3年目 (R6)
研究者等	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 産業廃棄物の手選別ラインを対象とした画像認識 AI 自動選別プロジェクト</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 対象フィールドの排出実態調査、ニーズ確認</li> <li>● 開発するロボットの仕様検討</li> <li>● 要素技術の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ロボットの開発</li> </ul> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 排出現場で活用する選別ロボットの開発</li> <li>2. ヒト共存型選別ロボットの開発</li> </ol> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 自動選別ロボットの本格導入に向けた準備 (2フィールド)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 試験導入を踏まえたロボットの改良</li> <li>● 都の事業実施への支援</li> <li>● 自動選別ロボットの本格導入 (2フィールド)</li> </ul>
東京都			<ul style="list-style-type: none"> <li>● オープンイノベーション型アプローチによる社会実装推進</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● オープンイノベーション型アプローチによる社会実装推進</li> </ul>

## 第2章 排出現場及び中間処理施設における選別を行うことができるロボット開発に必要な要素技術の研究開発

本章における取組の概要を表 2-1 に示す。

表 2-1 排出現場及び中間処理施設における選別を行うことができる  
ロボット開発に必要な要素技術の研究開発に係る取組概要

項目	目的	実施内容	成果	課題・展望
2-1 カメラシステムの 選定	廃棄物を対象に、一定の性能と検知速度を有するカメラシステムの検討を行う。	RGB、3D、LiDAR センサー等の特性を比較し、コンベヤ上の物体認識のシステムを選定する。	飲料容器の色特性や、その他課題を踏まえて iDs カメラ（産業用カメラ：3D ステレオカメラ）を選定した。	実証する現場環境、コンベヤ状態、対象物に応じて、再調整（画質、明るさ等）を行う必要がある。
2-2 画像認識 AI モデルの構築	AI モデルの構築手法の検討を行い、AI 初期モデルの確立を行う。	開発対象別に、画像認識の初歩段階のモデルの確立を行う。	Yolo7 を用いて排出現場、中間処理現場の別に、AI モデルを確立した。	実証する現場環境、コンベヤ状態、対象物に応じて適用性の高いモデル（パラメータ量他）の再構築を行う必要がある。
2-3 ロボットグripperの検討	飲料容器、建設木くずを対象とした選別装置（グripper）を検討する。	対象物の特性に応じたサクション、グripperを検討する。	形状、水濡れ、汚れ等を考慮したシステムを選定した。	実証する現場環境、コンベヤ状態、対象物に応じて詳細調整（把持ポイント、把持角度等）を行う必要がある。
2-4 ロボット制御システムの検討	ロボット制御に向けたシステム及びハードウェア構成の検討を行う。	パラレルリンクロボットの特性を踏まえた制御ポイントと考え方の把握を行った。	対象物別に AI、把持方法が異なる結果、特性に応じたロボット制御が必要となる。	実証する現場環境、コンベヤ状態、対象物に応じて制御（位置、姿勢、力、速度、起動）を行う必要がある。

## 2-1 カメラシステムの選定

画像認識に用いるカメラシステムには、RGB カメラ、3D カメラ、LiDAR センサーの 3 通りがあり、表 2-2 に示すとおり、それぞれ特徴が異なる。

今回は、高解像度の画像認識が可能で、既存の AI 画像認識技術との親和性が高い RGB カメラを採用して検討を行うものとした。

表 2-2 画像認識に用いるカメラシステムの概要

	RGB カメラ (可視光カメラ)	3D カメラ (ステレオカメラ)	LiDAR センサー
原理	<ul style="list-style-type: none"> <li>各ピクセルに色 (RGB 値) を持つ 2D 画像 (グリッド状データ) を生成。</li> <li>画像認識 AI は、主に色・エッジ・模様・形状のパターンを学習する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2 つの RGB カメラを利用し、左右の画像の視差から奥行きを計算する。</li> <li>出力データは 2D 画像ではなく、「視差マップ」または「距離マップ」。</li> <li>輝度の変化で距離が異なる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>レーザー光を発射し、反射光の到達時間で距離を測定する。</li> <li>出力データは「点群」で、3D 座標 (X, Y, Z) が得られる。</li> <li>不規則に分布する 3D 点群データ。</li> </ul>
メリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>高解像度の画像取得が可能</li> <li>低コスト</li> <li>既存の AI 画像認識技術との親和性が高い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>深度情報を取得可能 (物体形状・距離認識)</li> <li>比較的安価</li> <li>動いている物体の距離測定にも強い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高精度な深度情報を取得可能 (±数 cm~mm)</li> <li>透明物や暗所でも正確に測定可能</li> <li>屋外環境や広範囲の 3D マッピングが可能</li> </ul>
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>深度情報 (距離情報) は取得できない</li> <li>環境光の影響を受けやすい。暗所や逆光は不可</li> <li>透明な物体、反射物は困難</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高精度な距離測定には高い計算コストが必要</li> <li>透明・反射物には弱い (ガラス、鏡)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高価</li> <li>点群データの解析アルゴリズムが必要</li> <li>消費電力が比較的大きい</li> </ul>

RGB カメラを用いた画像認識では、物体の色の識別精度を確保するために必要な解像度と、フレームレートのバランスが重要となる。今回、コンベヤ上の選別を行うロボットビジョンとして活用を行うにあたり、色識別の精度を最大限に高めつつ、動的な環境でブレのない画像を取得するため、高速かつ正確な色識別ができる高い解像度とフレームレートを基準に検討を行った。

表 2-3 解像度の特徴と考え方

項目	内容
1. 色識別のためのピクセル数	RGB カメラでは、1 ピクセルは単色 (Red, Green, Blue) しか持たないため、十分な解像度がないと小さな色領域の識別ができない。
2. 細かい色の変化を識別するための解像度	1 ピクセルあたりの色情報の分解能が向上し、色識別精度が向上する。
3. 物体のサイズと距離の関係	カメラと物体の距離が遠い場合、高解像度でないと細部の色を正確に識別できない。

表 2-4 フレームレートの特徴と考え方

項目	内容
1. 動的な環境での色識別	コンベヤ上を流れる物体の色を正しく識別するためには高速なフレームレートが必要。
2. モーションブラーの軽減	より多くのフレームを取得し、ブレの少ないクリアな画像の取得には、高いフレームレートが必要。低フレームレートでは、物体撮影においてブレに繋がり易い。
3. リアルタイム処理の要求	遅滞なく色情報を処理するには、高フレームレートが必要となる。

なお、RGB カメラのスペックは、3種類から選定を行った。

選定のポイント：緑ビン、透明ビン、および茶色ビンの相違点（色）を明確に判断可能なスペックの選定を行った。

課題：コンベヤ表面の色（ブラック）により、透明ビンが茶色ビンと間違えやすいことがわかった。コンベヤの色も重要な要素となる。

- 1.2MP 24fps
- 5.01MP 24fps
- 5.01MP 98fps (選定)



【カメラスペック】  
 2448 x 2048 (5.01 MP)  
 98.0 fps  
 Sony IMX250  
 2/3" CMOS  
 Ethernet 10.0 Gbps



図 2-1 カメラスペック



図 2-2 ビンの色の確認状況

AI は、背景ノイズが課題となる。そのため、様々な背景色（黒、緑、黄、赤など）の他、質感、光の反射、模様・構造など、人工素材（ガラス、プラスチック、金属、紙など）や自然素材を含む多様なデータセットでAIを学習させる必要がある。

なお、コンベヤノイズの除去は、RGB カメラでは深度認識や物体識別に限界があることから対応できない。コンベヤノイズの除去には、ステレオカメラ（ZED カメラ）とAIの組み合わせで実施する必要がある。

画像処理によるコンベアベルトノイズの低減は、「背景差分や閾値処理などの手法」を使用し、コンベアベルトを画像から除去し、物体のみを残す方法がある。なお、その際もカメラの設定や照明条件、汚れの蓄積、その他の環境要因により影響を受ける可能性もあるため、現場環境に応じて、適切な手法を選択し、必要に応じてAIベースの手法も併用するなどが必要となる

- ① カメラ設定を調整して、コンベアベルトが見えなくなる距離を設定
- ② RGB 色情報を 3D データに合わせる (x、y、z、R、G、B)
- ③ 3D ポイントクラウドデータを 2D に変換する

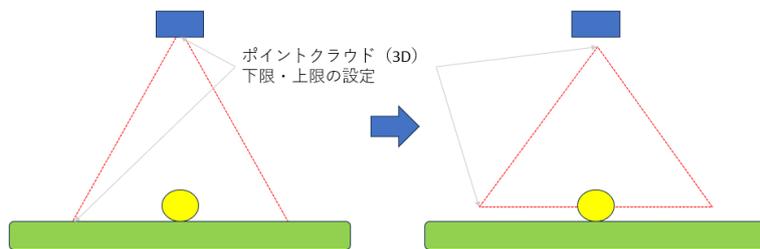


図 2-3 3D ポイントクラウドの最小・最大設定を変更

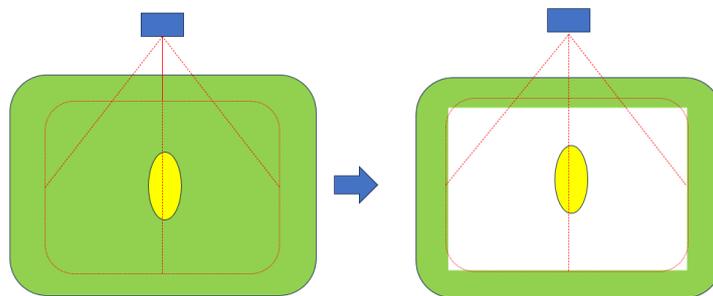


図 2-4 ポイントクラウドを基に画像の奥行きを制限

表 2-5 背景差分と閾値処理の比較

	概要	メリット	デメリット
1. 背景差分	静的な背景を削除し、新しく追加された物体のみを抽出する手法	環境の変化に強く、動的な背景（例えば少し揺れるコンベア）にも対応可能	背景を学習する必要があり、計算コストが高い。影や反射に影響を受けることがある
2. 閾値処理	画像を白黒に変換し、特定の明るさ以上のピクセルのみを前景として抽出する手法	処理が軽く、シンプルな計算で実装可能	照明や色の影響を受けやすく、背景と物体のコントラストがはっきりしていないと誤検出が増える

表 2-6 カメラ設定に伴う精度調整の方法

設定項目	内容
1. 露出とゲインの調整	適切な露出を設定し、背景と前景のコントラストを強調
2. シャッタースピード	コンベアベルトの動きが速い場合、高速シャッターの設定で、ブレが減り、背景差分や閾値処理の精度が向上
3. 照明の統一	安定した光環境により、背景の変化を最小限に抑え、検出精度を向上

具体的には、カメラユニットにバンディングボックス情報を送信すると、自動的に平均の高さ情報を返す機能を開発した。

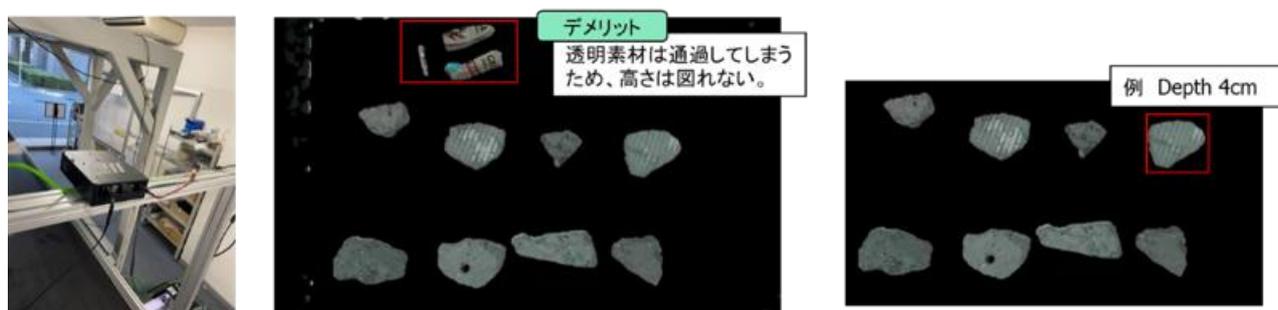


図 2-5 高さ測定状況

また、コンベヤにあるノイズ（異物、キズ、汚れ等）を除去するために、LiDAR を用いて 3D 情報を取得し、コンベヤ上部 1 cm をカットすることが実現できた。（※実装はせず）

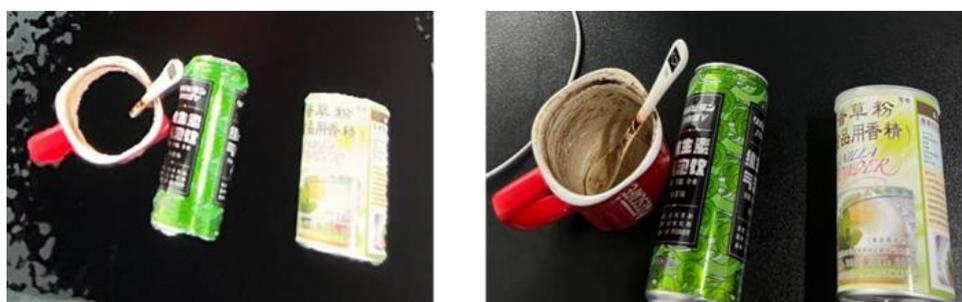


図 2-6 コンベヤの 1 cm カット

既存の 3D カメラでは、品質と検知速度が適合しない場合が多い。そのため、RGB カメラと LiDAR を融合した不規則物専用のカメラセンサーの新規開発を行った。RGB データおよび高さデータをリアルタイムに収集することが可能であり、高さ情報を必要とするシステムに適していると考えられる。（※但し、成果物の精度が低いため、実装はせず）

<b>レーザーセンサ部</b>	
駆動方式	面発光 VECSEL レーザ-MEMS 駆動 ToF 式
計測レンジ	0.25m~9m
計測視野角	70°x55°
計測解像度	1024x768 (RGB 画像とキャリブレーション済)
計測フレームレート	30FPS
計測誤差	~5mm
出力ストリーム	H.264 / JSON ROI 計測コマンド
<b>RGB センサ部</b>	
解像度	1920x1080
フレームレート	30FPS
視野角	70°x43°
シャッター形式	ローリングシャッター
出力ストリーム	H.264 ストリーム
<b>組み込み GPU/SoC 部</b>	
システムボード	NVIDIA Jetson Nano/Xavier NX(オプション)
GPU	128 コア Maxwell アーキテクチャ
CPU	クアッドコア ARM A57 1.43GHz
メモリ	4GB 64bit LPDDR4
内蔵ストレージ	32GB
インターフェース	CSIx2, USB3.0x4, RJ-45 LANx1, GPIO, UART, SPI, I2C
通信プロトコル	TCP/UDP/WebSocket JSON
シャシー	アルミニウム A6061, CNC 削り出し、アルマイト処理
材質	アルミニウム A6061, CNC 削り出し、アルマイト処理
放熱効率	最大 35W、パッシブ式放熱
マウント穴	M4x0.7 ねじ、最大深さ 15mm x 2 か所

既存の 3Dカメラは、品質と検知速度が、合わない場合が多いため、弊社では、RGBカメラとLidarを融合した不規則物専用のカメラセンサーを自社で開発

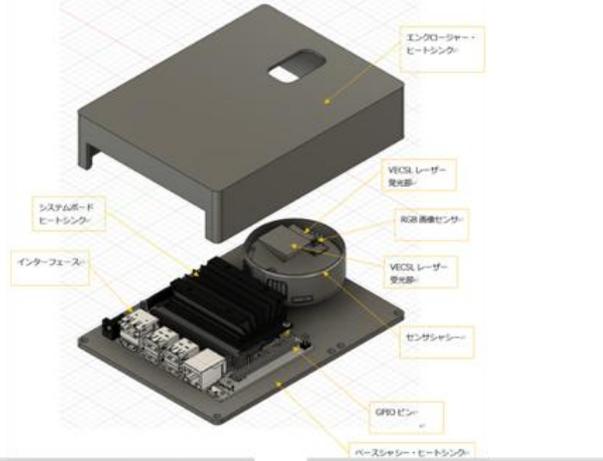


図 2-7 RGB カメラと LiDAR カメラの組み合わせ



ステレオカメラにより取得可能なデータ  
 ・RGBデータ  
 ・3Dデータ

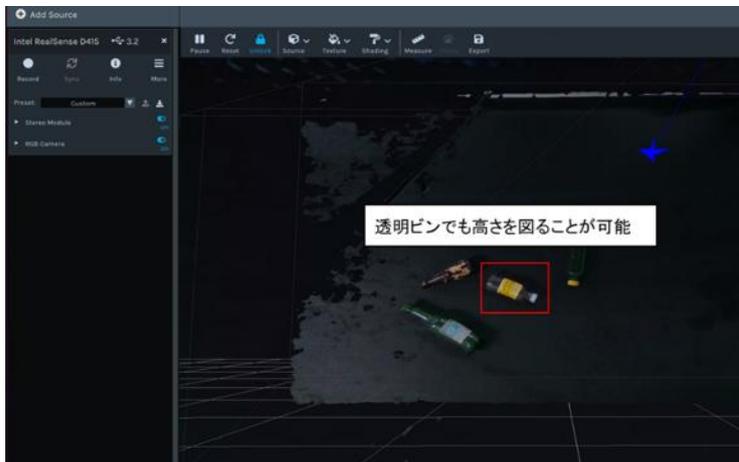


図 2-8 ステレオカメラの高さ測定状況

## 2-2 画像認識 AI モデルの構築

飲料容器および建設混合廃棄物の自動選別を実現するためには、対象物を正確に検知することが重要である。そこで、カメラの映像情報をリアルタイムで処理し、物体検出する AI 画像認識モデルの検討を行う。

カメラからの画像を入力して、物体位置の検出及び物体分類を同時に実行し、制御機能へ結果を出力する機能を実現する。現場と同じコンベヤ環境を研究開発室で再現し、学習データの作成を行う。

さらに、作成したデータが有効かどうかを目視で確認し、AI が正確にラベリングできているか否かを確認する。その後、機械学習を通じて、モデルの学習結果の検証を行う。

認識精度が目標に達しない場合には、必要に応じて、学習データの作成方法を変え、再度機械学習を試みる。

画像認識 AI モデルの構築の流れは、次のようになる。

### ① 画像認識 AI モデルの検討

### ② データセットの準備

分類・検出したい対象物（例：ペットボトル、缶、茶色びんなど）の画像を集める。

- 動画撮影 or 公開データセットを使用
- 可能な限り、さまざまな角度・光の条件で撮影する。

アノテーション（ラベル付け）を行う。具体的には、画像中の対象物にラベルとバウンディングボックスを付ける。

### ③ AI モデルの学習

環境準備を行い、学習を実行する。学習中に自動でチェックポイントを保存し、ベストモデルの選定を行う。

### ④ 評価とチューニング

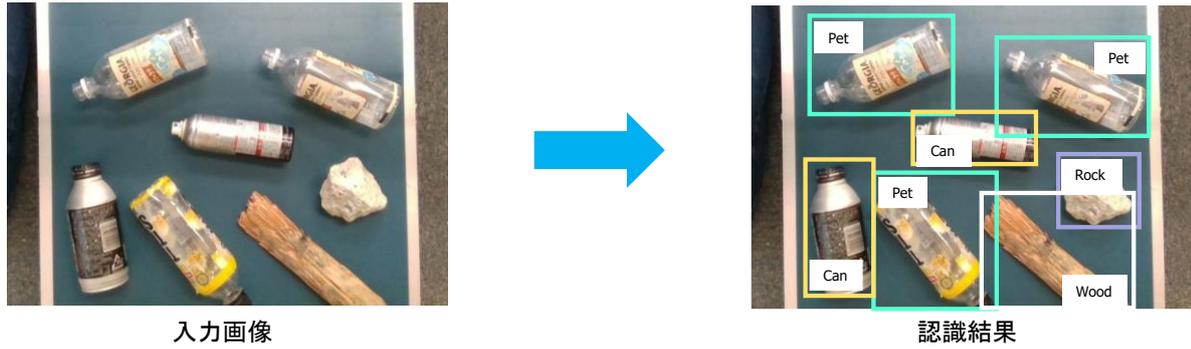
精度の確認として、平均適合率の平均（mAP/mean Average Precision）やクラス別の検出精度を出力し、確認を行う。

表 2-7 精度が不十分な場合の対処法

改善項目	方法例
1. データが少ない	画像を追加・拡張（回転・明度変更など）
2. 背景が複雑すぎる	前景だけを増やす or 背景を工夫
3. クラスのバランス	クラス数を均等にする or 重みを調整
4. モデルが軽すぎる	AI モデルのバージョンをアップグレードする

### (1) 画像認識 AI モデル

画像認識は、①検知対象物の領域を定め、②検知対象物と背景の領域を個別に判断し、③検知対象物の領域に含まれる画像の特徴を解析し、物体を推測して抽出した特徴をもとに検知対象物を分類するものである。ロボット制御を行う際に重要な役割を果たすことになるが、処理プロセスが多く、完成までに時間を要する。



入力	出力
RGB画像	(x, y, width, height, 種類)

図 2-9 AI 画像認識システムの入出力

AI 画像認識の手法には、表 2-8 示すように様々であるが、今回はベルトコンベヤ上を流れる廃棄物を対象に、自動で物体検出を高精度な認識で行うようにするため、ディープラーニング（深層学習）を採用するものとした。

表 2-8 AI 画像認識の手法

分類	手法	特徴
伝統的手法	エッジ検出 (Sobel, Canny)	画像の輪郭を強調
	特徴量ベース (SIFT, SURF, ORB)	画像の特徴点を抽出
	色・ヒストグラム解析	色分布を利用
機械学習	サポートベクターマシン (SVM)	特徴量を使って分類
	ランダムフォレスト (RF)	決定木の集団学習
	k 近傍法 (k-NN)	距離ベースで分類
ディープラーニング	畳み込みニューラルネットワーク (CNN)	自動で特徴抽出
	物体検出 (YOLO, Faster R-CNN)	画像内の物体を検出
	画像セグメンテーション (U-Net, Mask R-CNN)	ピクセル単位の分類
マルチモーダル	画像+テキスト (CLIP, BLIP)	テキストと画像を関連付ける

さらに、ディープラーニング手法において、画像内の「物体検出」に着目して AI モデルの選定を行う。

なお、物体検出の手法は、表 2-9 に示すとおり 4 種類ある。

一般に、高精度（高 AP）のモデルは計算コストが高く、推論時間も長いというトレードオフがある。そのため、選定のポイントとしては、次のように言われている。

- リアルタイム処理が必要なら → YOLO（低遅延，AP はやや低め）
- 高精度を優先するなら → Faster R-CNN, Mask R-CNN（推論は遅い）
- バランスを取りたいなら → EfficientDet

検討の結果、画像内の物体をリアルタイムに検出する場合には、YOLO（You Only Look Once）が望ましいと考えた。YOLO は、ニューラルネットワークを利用し、画像データをインポートするだけで画

像に含まれる物体の領域を出力できるようになり、より短時間で物体を検出できる。原理は、ニューラルネットワークを使用した分析がしやすいように画像を正方形にリサイズ作業を行い、バウンディングボックスの特徴をもとに、物体の種類を推定し、それぞれの推定が的中する確率を考慮しながら画像解析を行う手法である。

表 2-9 物体検出に係るディープラーニング手法

手法	主な用途	特徴	mAP	推論時間	メリット	デメリット
YOLO	高速物体検出（リアルタイム用途）	1回のCNN処理でバウンディングボックスとクラスを予測	50-55	5-10ms	推論時間が短く、リアルタイム処理可能	精度がやや低い（特に小さい物体）
Efficient Det	精度と速度のバランスを重視	物体のサイズに関係なく高精度に分類	52-57	20-50ms	高精度+速度のバランスが良い	YOLOより推論が少し遅い
Faster R-CNN	画像内の物体検出・分類	領域候補を提案する方法	55-60	100-200ms	高精度、複数物体の識別が可能	計算負荷が高く、推論速度が遅い
Mask R-CNN	物体の領域を正確に識別する必要あり	物体検出+セグメンテーション	55-60	150-250ms	領域ごとの分類が可能	推論時間が長く、計算負荷が高い

（注）mAP：精度。物体検出モデルの精度を示す指標で、高いほど精度が良い。推論時間（V100 Batch 1 Inference Time）：数値が小さいほど高速で、リアルタイム性に優れる。

機械学習の結果、同等の適合率（precision）を獲得する際の推論（inference）時間について、令和4年度開発開始当時はYOLOv7が最も速いため、本事業ではYOLOv7のモデルを選定し、機械学習を開始した。

- カメラ画像を入力し、物体位置の検出及び物体分類を同時に実行し、制御機能へ結果の出力を行う。
- 作成データは、始めに目視にて、AIが正確にラベリングできているか否かを確認する。その後、機械学習を通じて、モデルの学習結果の検証を行う。認識精度が目標に達しない場合には、学習データの作成方法を変え、再度機械学習し改善を試みた。
- 機械学習は、同等の適合率を獲得する際の推論時間に優位性の高いYOLOv7を採用して行った。高速性、優れた精度、注釈が容易等の特徴がある。但し、ノイズの発生に留意が必要となる。

表 2-10 作成した学習データ

作成ビデオ	6本
フレーム抽出	1 out of 30
画像の切り取り	a. Height 480px from (0, 480px) - (Original height 1080px) b. Width 640px from (200, 640px) - (Original width 1920px)
ラベリング	a. トレーニング用 - 3100枚 b. 検証用 - 400枚
テストビデオ	2本



図 2-10 飲料容器の分類

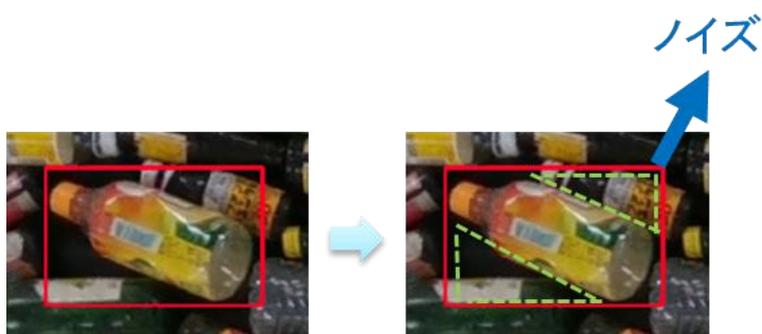
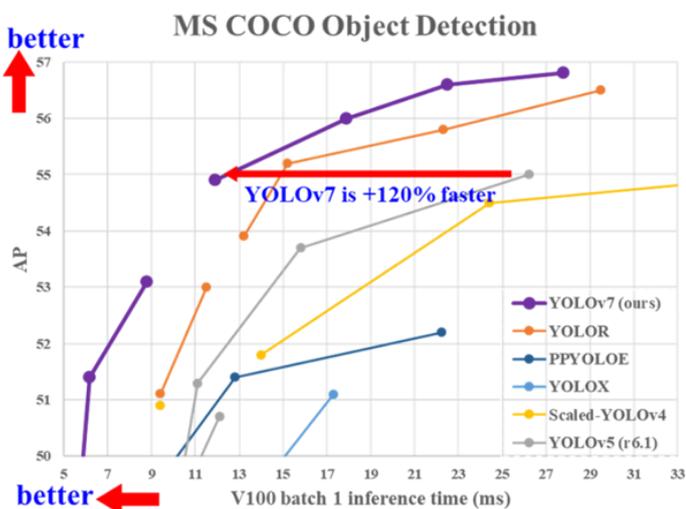


図 2-11 バウンディングボックスの状況



出典: Chien-Yao Wang, YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors  
<https://arxiv.org/pdf/2207.02696.pdf>

図 2-12 画像認識モデルの選定理由

【用語解説】

①AP (平均適合率: Average Precision)は、物体検出や画像分類モデルの精度を測る指標であり、APが高いほど、物体検出・分類の精度が高いことを示す。

(AP の計算方法)

1. Precision (適合率) = 正しく分類された物体数 / モデルが検出した物体の総数
2. Recall (再現率) = 正しく分類された物体数 / 実際に存在する物体の総数
3. Precision-Recall 曲線を作成し、その面積 (AUC) を求める → AP 値

(AP 判定基準)

- AP@IoU=0.5 → 物体検出時に、IoU (Intersection over Union) が 0.5 以上のものを正解とみなす。
- AP@IoU=0.75 → IoU が 0.75 以上で評価。より厳しい基準。
- mAP (mean Average Precision) → 複数のクラスに対する AP の平均値。

② V100 Batch 1 Inference Time (ms) (推論時間, ms) は、NVIDIA Tesla V100 GPU を使用した際に、1 枚の画像 (Batch Size = 1) を処理するのにかかる時間を示す。

- 「Batch 1」 → 1 つの画像 (単体のデータ) を入力したときの処理時間。
- 「Inference Time (ms)」 → モデルが推論 (推測・認識) を行うのにかかる時間 (ミリ秒単位)。
- 「V100」 → 測定に使われる NVIDIA Tesla V100 GPU (データセンター向け高性能 GPU)。

(V100 で測定する理由)

- V100 は、多くの研究機関や企業で標準的なベンチマークとして使用されている。
- 他の GPU (A100, RTX 4090 など) と比較する際の基準として利用できる。
- モデルの推論速度を客観的に評価するため。

なお、分類対象ごとの特性について把握すると、表 2-11 に示すとおり、建設廃棄物は難易度が高いため、現場実証においては、工夫を行う必要がある。

表 2-11 分別対象ごとの特性

対象	分類の難易度	考慮すべき事項
① 飲料容器 (ペットボトル、缶、びん (茶・白・ミックス))	中～高	透明な容器 (ペットボトル) や反射の影響 (缶・びん) を考慮する必要あり
② 建設廃棄物 (木くず、コンクリート塊)	高	形状・質感のばらつきが大きい、汚れや破損があるため一般的な分類モデルでは難しい

実験室のコンベヤを用いて、排出現場 (飲料容器)、中間処理施設 (建設混合廃棄物) の別に、学習データを作成し、YOLOv7 を用いて AI モデルを確立した。

AI モデルは、変更する場合のデータセットの互換性を把握しておく必要がある。YOLO のデータセットの互換性等は、問題なく実施できる。さらに、YOLO シリーズは、表 2-12 に示すとおり、リアルタイム物体検出の分野で高い性能と柔軟性を提供し続けており、優位性も高い。

- 基本的にデータセットは使い回せる  
YOLOv8 等はバウンディングボックス付きの教師データを使用するため、フォーマットを変換すれば同じデータセットで異なるモデルを学習可能。
- ただし、一部の前処理やアノテーション形式が異なるが、変換ツールを使えば簡単に変換可能であるため、データを廃棄する必要はない。

表 2-12 YOLO モデルの進化

AI モデル	YOLOv5	YOLOv7	YOLOv8
リリース時期	2020 年 6 月	2022 年 7 月	2023 年 1 月
主な進化点	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PyTorch 実装</li> <li>• 高速な推論速度</li> <li>• モデルサイズの軽量化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• アーキテクチャの最適化</li> <li>• 新しいトレーニング手法</li> <li>• 拡張性の向上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 最先端の性能</li> <li>• アンカーフリー設計</li> <li>• 多様なタスク対応</li> </ul>

YOLOv7は、高速、優れた精度、注釈が簡単などの特性がある。

一方、ノイズが発生しやすいことが課題である。

(使用法)

- YOLOv7を利用し、予測をpt拡張ファイルで保存する。
- pt拡張ファイルからバウンディングボックス予測を取得し、X、Y座標を取得してロボットに送信する。

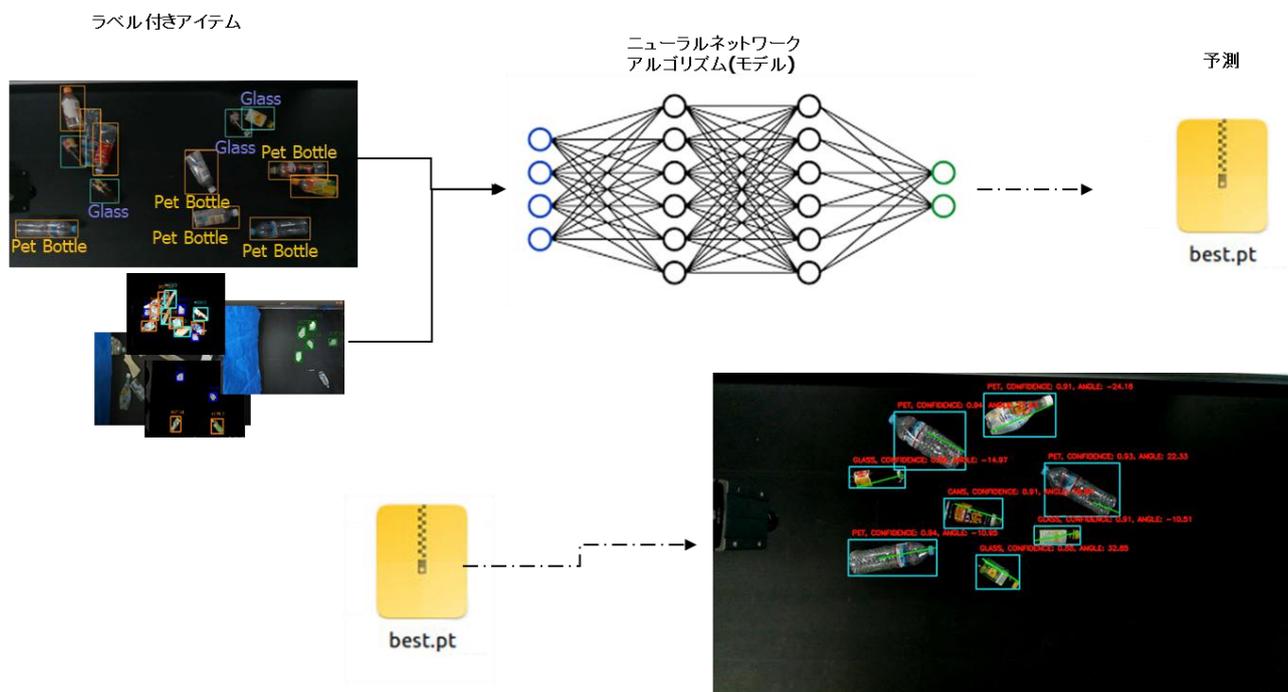


図 2-13 学習のしくみ

また、アノテーション形式の互換性や、データ管理方針の明確化も重要となる。

アノテーション形式は、画像中の物体が、どこに何があるか（位置とラベル）を記述するデータの書き方のルールとなる。YOLO形式（txt形式・正規化座標）は、軽量かつシンプルである。

さらに、データ管理方針として、データセット（画像・ラベル）の運用ルールの明確化が必要となる。学習・評価・改良を繰り返す中で、画像の追加やアノテーションの修正などが頻繁に発生します。このとき、整理されていないと混乱することになり、かつ、再学習に支障が出たりする。適切な形式と管理方法を選ぶことで、将来のモデル変更がスムーズにできることや、再学習・検証・改善を効率的に進めることができる。

#### ①排出現場（飲料容器）に適用するAIモデルの確立

Deep Learning モデル： Yolo7

学習データ（画像）： 約 600 枚



図 2-14 学習結果 (バウンディングボックス)

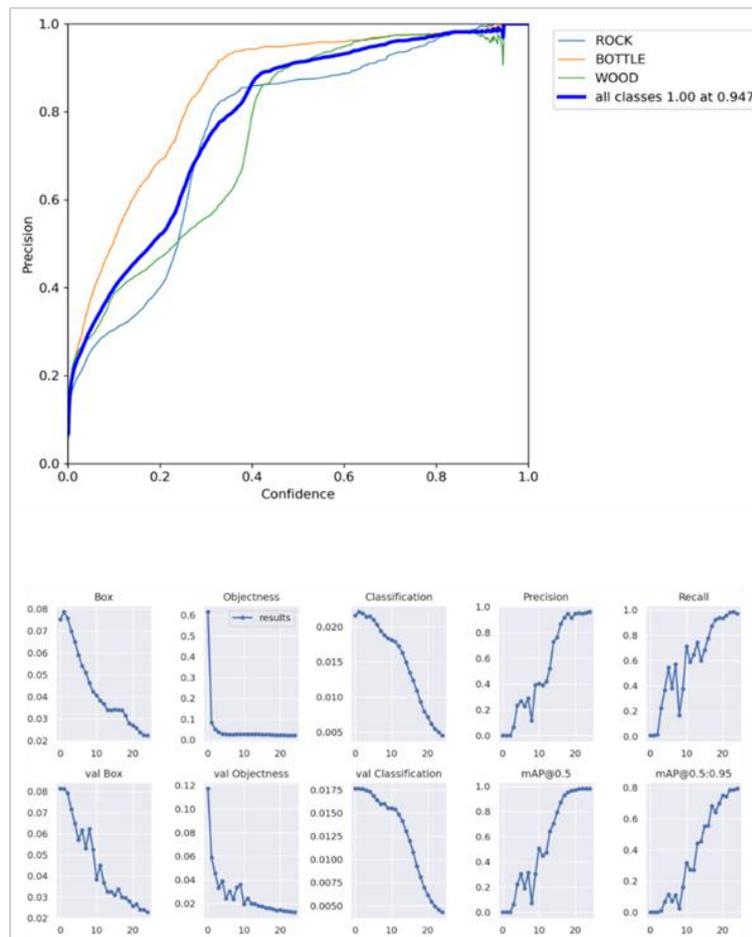


図 2-15 学習結果 (精度)

②中間処理現場（建設混合廃棄物）に適用する AI モデルの確立

Deep Learning モデル： Yolo7

学習データ（画像）： 約 27,000 枚



図 2-16 学習結果（バウンディングボックス）

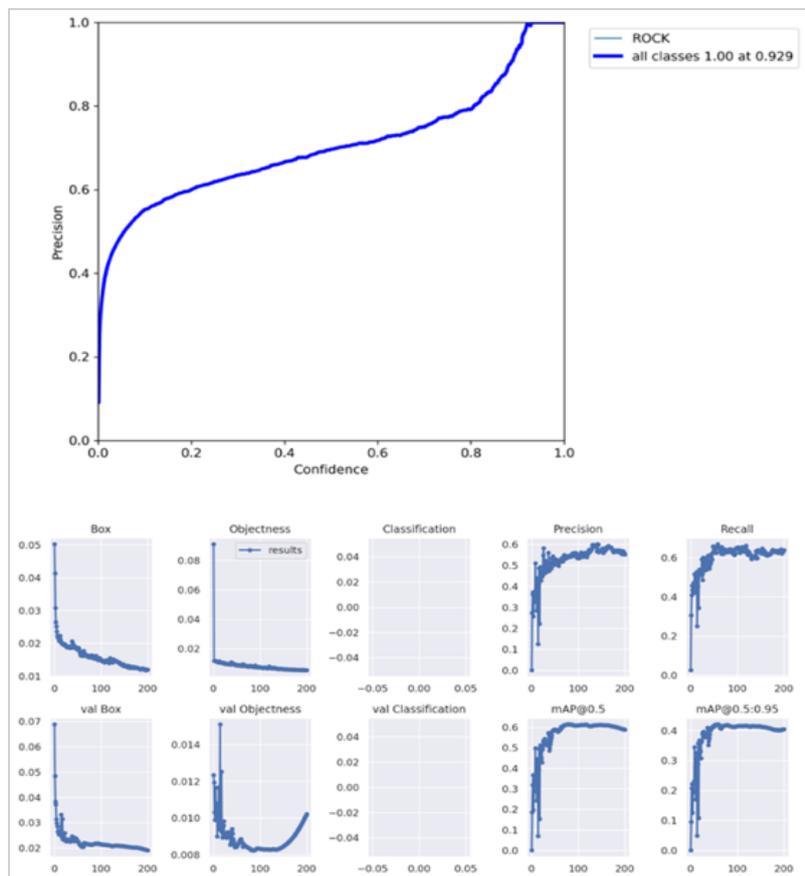


図 2-17 学習結果（精度）

(2) 学習モデルの選定

学習データを用いて、検知モデルのトレーニングを行い、検知結果の評価を行った。  
 プロトタイプモデルとして、平均的な認識精度は、約 81.36% (mAP) となった。

※トレーニング : 事前に構築したディープラーニングモデルに学習データ (ラベリング済みの画像データ) を読み込み、機械学習させること。

※検知モデルのトレーニング : 学習データを用いてパソコンに覚えさせる (バウンディングボックス内の認識・ラベリングデータをパソコンで読み込んで学習すること) をパソコンが実行すること。

表 2-13 構築したモデルと精度

Yolo Model	Accuracy
YoloV7 Small	Accuracy 55-65%
YoloV7 Medium	Accuracy 68-75%
YoloV7 Large	Accuracy 80-92% a. Best confidence threshold 0.55 b. Image size - 640 c. Batch Size - 20 d. Time Required: 20 Hours for 500 epochs

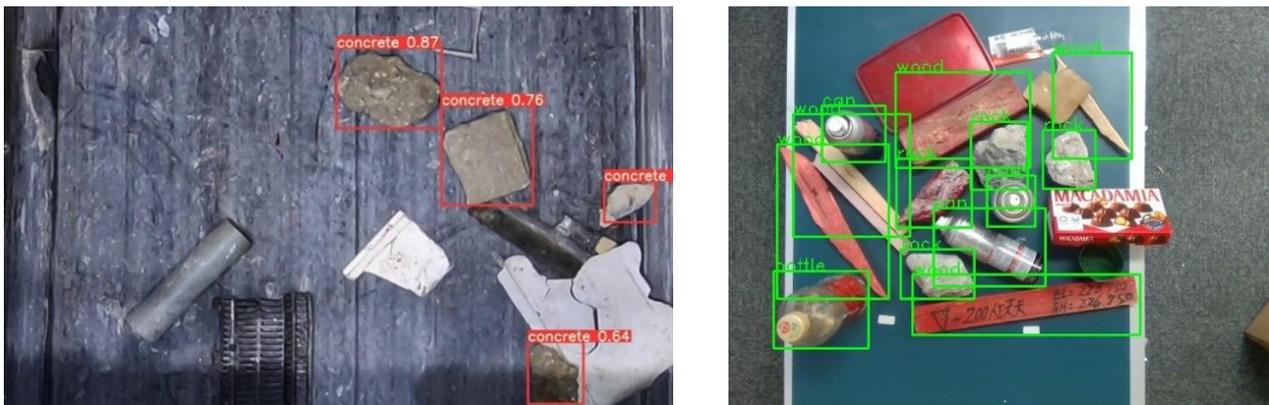


図 2-18 検知結果の例

表 2-14 評価結果

Rock	Wood	PET	Can	mAP
97.23%	86.65%	43.19%	98.54%	81.36%

(3) モデルの検知結果の評価・チューニング

構築したモデルについて、以下の方法で評価を行う。

位置検出と分類の結果により、認識を TP (正解) か FP (不正解) に分ける。検出のボックス (位置検出) が ground-truth のボックスの IOU が閾値以上及び分類結果が正しい場合は、TP と判定され、異なる場合には FP と判定される。認識結果は正解な値との合致によって、4 種類に分けられる。認識結果が TP と FP の場合は、ロボットのピッキング対象となる。

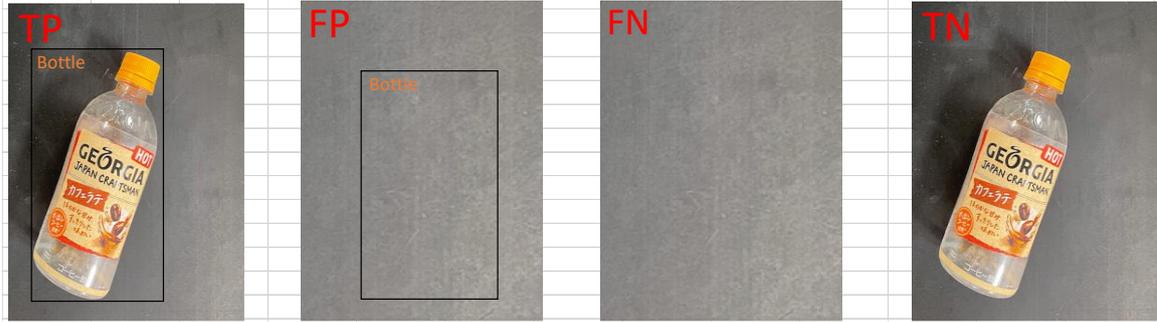


図 2-19 認識結果の分類 1

表 2-15 認識結果の分類 2

		認識結果	
		True	False
正解な値 (ground-truth)	True	True Positive (TP)	False Negative (FN)
	False	False Positive (FP)	True Negative (TN)

クラス毎の Recall (再現性) と Precision (適合率) を計算する。Recall と Precision から各クラスの AP (平均) を計算する。Recall を 0.1 の区間で最大な Precision をとって平均値を計算すると、AP (平均適合率) が得られる全クラスの AP 値の平均値を計算すると、mAP が得られる。評価用の式を以下に示す。

$$\begin{aligned}
 recall &= \frac{TP}{TP + FN} & AP &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \\
 precision &= \frac{TP}{TP + FP} & mAP &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AP_i
 \end{aligned}$$

図 2-20 AP 平均値の計算式

トレーニングした後のモデルに対して、上記方法に基づき、モデルの検知結果の評価を行う。

その結果を改善する必要がある場合、エポック数等のパラメータの調整、または画像処理方法等を調整し、再度トレーニングを行う。このような作業を繰り返すことにより、目標精度に到達するまでチューニングを行う。

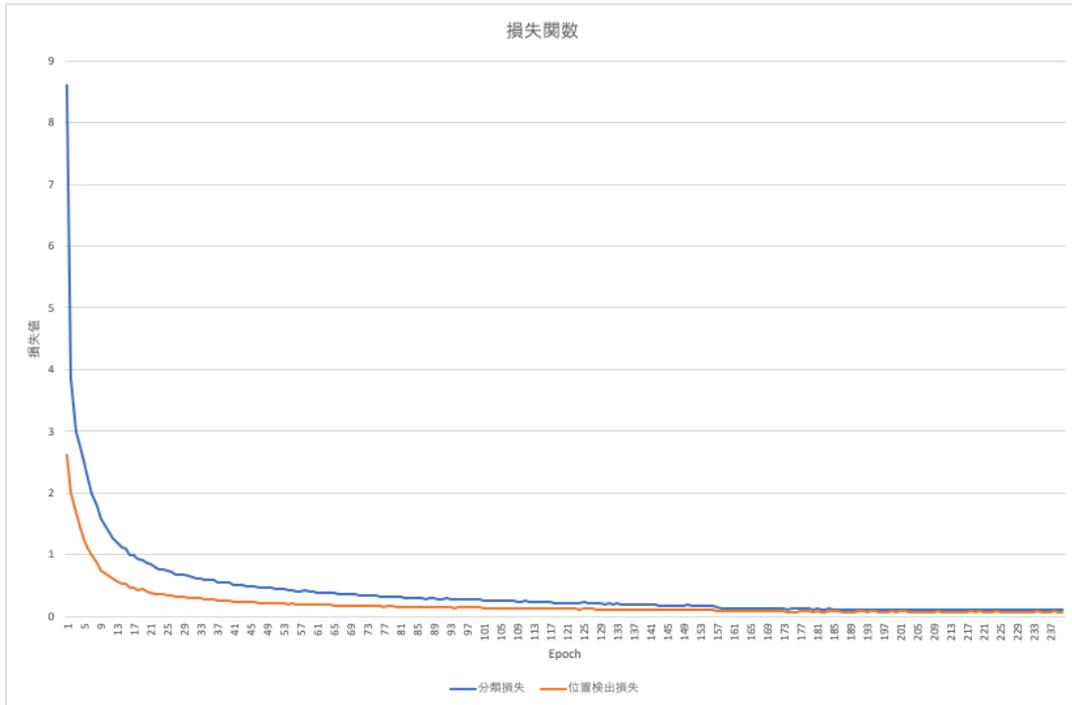


図 2-21 240 エポックでの損失関数

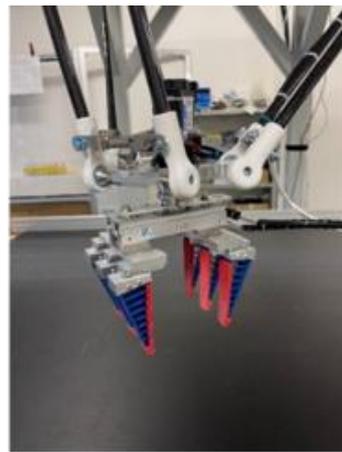
※エポック：学習データの全部を1回学習させること。学習過程では、数多くのエポックも繰り返す必要があるが、うまく学習させるには、多すぎず少なすぎないエポック数の指定が重要となる。

### 2-3 ロボットグリッパーの検討

ロボットグリッパーは、圧縮空気を用いて物体を吸い上げる「サクション」と、物体をつかみ取る「グリッパー」の2種類がある。



サクションの取り付け



グリッパーの取り付け

図 2-22 ロボットグリッパーの種類

表 2-16 2方式のしくみとメリット、デメリット

項目	サクシオン (吸引)	グripper (機械爪)
しくみ	圧縮空気を利用し、吸盤 (サクシオンカップ) を介して物体の表面に負圧を発生させることで、物体を吸着し保持する方法	エアシリンダー、電動モータ、サーボモータなどを利用し、爪やパッドで物体を挟んで保持する方法
メリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>形状の自由度が高い</li> <li>接触面のダメージが少ない</li> <li>高速動作が可能</li> <li>軽量でコンパクトな構造が可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>多様な形状の物体を扱える</li> <li>強固な把持が可能</li> <li>材質に依存しにくい</li> <li>負圧供給が不要</li> </ul>
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>吸着できる材質が限られる</li> <li>負圧供給が必要</li> <li>位置決め精度に依存</li> <li>動作中の把持力低下</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>対象物に応じた設計が必要</li> <li>表面に圧力がかかる</li> <li>制御が複雑になることがある</li> <li>重量が増加しやすい</li> </ul>

(注) 吸着とグripperを組み合わせたハイブリッド方式もある。

なお、2方式の適用性は、表 2-17 に示すようになる。

表 2-17 2方式の適用性

項目	サクシオン (吸引)	グripper (機械爪)
適用性	<ul style="list-style-type: none"> <li>表面が平坦で、吸着しやすいもの</li> <li>比較的軽量で剛性があるもの</li> <li>形が安定しているもの (変形しにくい)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>形状が不規則でもしっかり掴めるもの</li> <li>吸着しにくい多孔質・柔軟な素材のもの</li> <li>重さがあるものや硬いもの</li> </ul>
不向きな廃棄物	<ul style="list-style-type: none"> <li>多孔質のもの (スポンジ、布、繊維くず、粉塵など)</li> <li>小さすぎるもの (吸着力が発生しづらい)</li> <li>重すぎるもの (負圧では支えられない)</li> <li>形状が不安定で変形しやすいもの (ぐにゃぐにゃするビニール袋など)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>薄くて壊れやすいもの (新聞紙、ラップフィルム)</li> <li>バラバラに散らばった小さなゴミ</li> <li>重量が極端に軽いもの</li> </ul>
対象廃棄物のまとめ	<ul style="list-style-type: none"> <li>平らで剛性のある紙、プラスチック、ガラスなど (吸着可能な表面を持つ)</li> <li>ダンボール、プラスチックシートなど (軽量なもの)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>スクラップ、破碎プラスチック、食品廃棄物など (形状が不規則なもの)</li> <li>布、ゴミ袋、衣類など (柔らかく変形するもの)</li> <li>金属廃棄物、食品の塊など (重量があるもの)</li> </ul>

#### (1) サクシオン (真空グripper) の検討

サクシオンは、次の手順で検討を行った。

- ① サクシオンは、2023年3月に、把持のスピードアップを目的に詳細検討を開始した。
- ② 吸引方式は、真空吸引を想定したものの、飲料容器が液体で湿った状態であり、かつ、ガラスの破片が割れて吸い込まれる可能性もある等を考慮する必要があったため、ベンチュリスタイルのインライン真空発生器を活用することとした。

【気圧装置の選定】

- ・利用済飲料容器を対象とする場合、水分に影響されないエアコンプレッサー、プラス Vacuum Generator の構成を検討する必要がある。



図 2-23 ピッキングテストの状況

- ③ 把持する場所によっても、精度が異なることから、飲料容器の部位別にテストを行い、望ましい把持場所の特定も行った。例えば、びんの形状や、凹凸の有無で吸着箇所（①、③、④）別に、漏れ流量による真空圧力の低下が確認される等、ワークの相性や吸着環境・条件によって吸着状態が異なる。

試験条件は、吸着箇所（①～④）、各種真空パッド、供給圧力（0.4MPa）、設定真空圧力（-80kPa）である。



図 2-24 把持場所による比較検討

表 2-18 検討ケース別の到達真空圧力

吸着箇所 真空パッド	①		②		③		④	
	吸着可否	到達真空圧[kPa]	吸着可否	到達真空圧[kPa]	吸着可否	到達真空圧[kPa]	吸着可否	到達真空圧[kPa]
ZP20UN	○	-51	○	-80	○	-66	×	-
ZP20BN	○	-64	○	-80	○	-79	○	-57
ZP2-16JN	○	-65	○	-80	○	-78	○	-67
ZP2-B20ZJS	○	-75	○	-80	○	-79	○	-73

- ④ 把持の際、6cm の圧縮できるバネ仕掛けのサクシオンを用いることとしたが、ガラス瓶（重量物）の吸引力不足や、残留真空に伴うドロップオフステーションでの放出がうまくできない課題があったことから、マイクロ電気バルブを含む、強力なベンチュリスタイルの真空発生器を用いて対応することとした。
- ⑤ サクシオンの種類と形状は、ペットボトル、アルミ缶、ガラス瓶に対して全体的に最も効果的なサクシオンを採用することとした。ボトルの落下や、吸引能力の不足への対処として、グリップーの設計変更（空気の流れを増加）や、ロボット全体の速度（基準：緑色のガラス瓶 77%）を落とす等の対応を行った。

- ⑥ 最終的な設計変更の結果、効果的な吸引グripperと、10cm のストロークを可能にする吸引グripperホルダーを採用し、ロボット全体の速度も 85%で確実に動作できるようになった。その結果、つぶれたペットボトルやアルミ缶のピッキングもできることとなった。



図 2-25 サクシヨンの種類



図 2-26 サクシヨンの状況（採用状況）

## (2) グリッパー（空気圧アクチュエータグリッパー）の検討

グリッパーは、次の手順で検討を行った。

- ① グリッパーは、より大きな把持力と、操作中の接触などにも耐え得る耐久性を考慮して検討が必要となる。
- ② はじめに、全閉から全開までの合計ストロークが 6cm の空気圧アクチュエーターを使用したグリッパーを調達した。
- ③ グリッパーの爪部は、3D プリントされたウレタン「フィンガー」を採用したが、特定のサイズと形状(ピラミッドのような形をした石や急なエッジ角度の形状)の場合、落下する課題があったことから、指の中央列を離して配置し、適切に掴めるように変更した。
- ④ また、繰り返し対象物を掴み、拾い上げることで生じたほこりにより、接触面の摩擦が減少し、うまく把持できない課題を踏まえて、ゴム製の作業用手袋を用いてウレタングリッパーの指にフィットするように適合させることにより、グリップ力の増加に結びついた。
- ⑤ なお、形状面についても、より湾曲したものに变更し、握る指が斜めとなるよう調整した。
- ⑥ 最終的には、大きな物体も把持できるようストローク 8cm の大型のグリッパーを調達し、手袋全体がグリップフィンガーにフィットする調整を行い、グリッパーフィンガーの間に薄い破片が詰まるのを防ぎ、グリップ能力の向上を図った。



図 2-27 グリッパーの種類

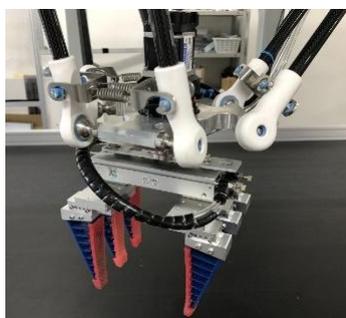


図 2-28 グリッパーの採用状況（右：カバーあり）

グリッパ (ドイツ製)

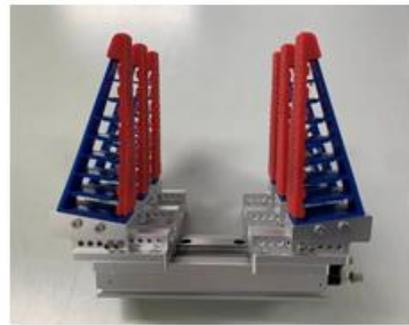
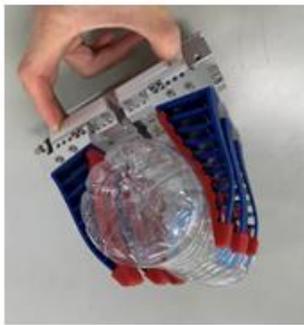
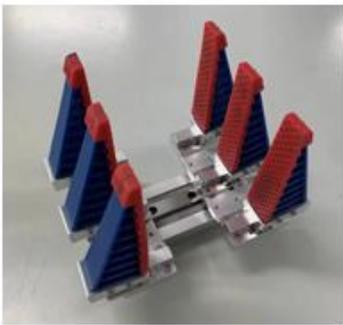


図 2-29 グリッパーの外形

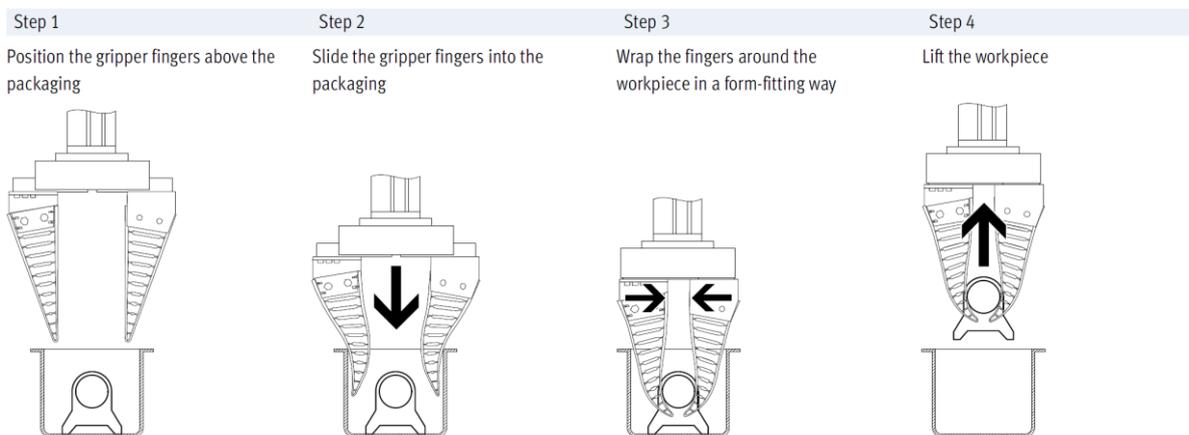


図 2-30 グリッパーの原理



図 2-31 グリッパーの実験状況

## 2-4 ロボット制御システムの検討

本事業では、パラレルリンクロボットの使用を前提に、コンプレッサー及び気圧式グリッパー又は、サクションを採用し、下図（図 2-32）に示すハードウェアの構成を設計した。

X 軸、Y 軸、Z 軸、 $\theta$  軸及びグリッパーの制御システムは、ROS（ロボット用のソフトウェアプラットフォーム）を用いて、以下のように、機能を各ノード（結び目）に割り振りを行う。

a. カメラの読み取りのノード

カメラから連続にフレームを読み取って、画像データのリサイズ処理した後、発行する。

b. 物体認識のノード

a. で発行されたフレームにて、物体認識を行った後、結果を発行する。

c. ピックアップ対象選択のノード

b. で発行された検出結果でアームがピックアップできるものを選択して、ピックアップアイテムとして発行する。

d. ロボット制御クライアントのノード

c. で発行されたピックアップアイテムを踏まえて、ロボット制御サーバーが動ける状態であることを確認した上で、制御サーバーにピックアップ命令を出す。

e. ロボット制御サーバーのノード

d. からのピックアップ命令を受領後、ロボットアームを動かし始める。作動中は新しい命令を拒否する。

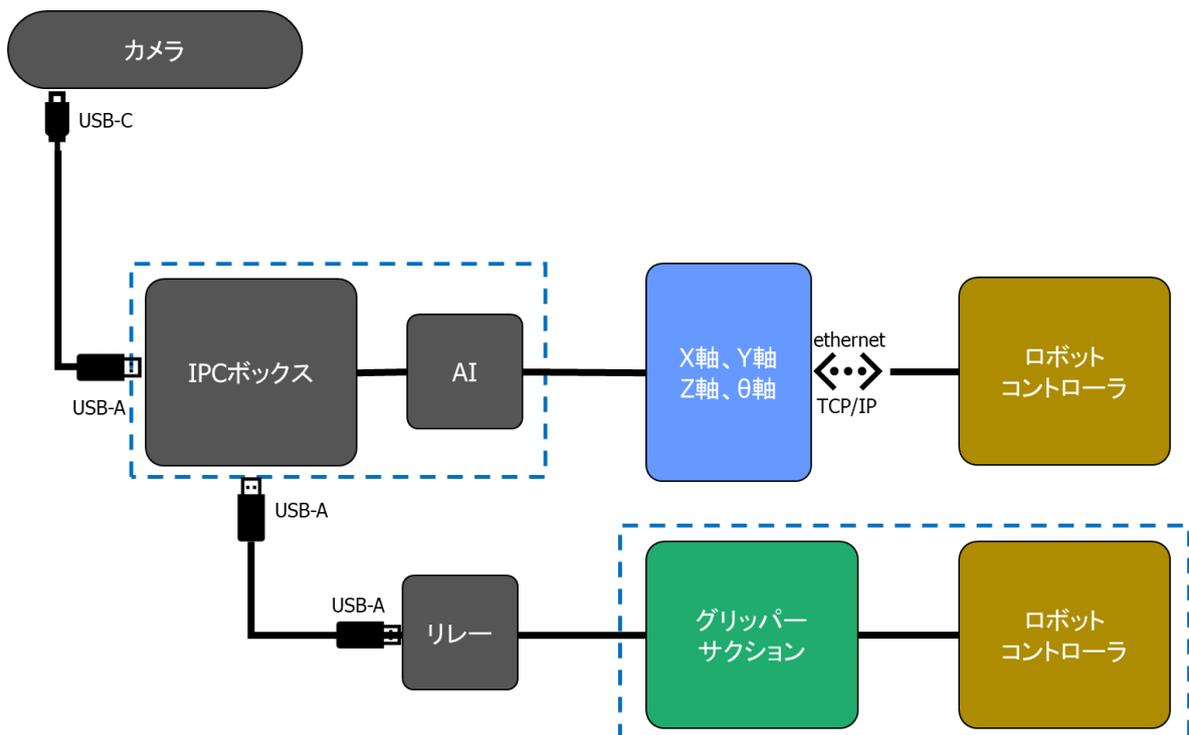


図 2-32 ハードウェアの基本構成

タイプ	スカラ (4軸)	アクチュエータ (5軸)	アーム型 (6軸)	パラレルリンク型 (4軸)
画像	 <p>コンパクトで据付が容易。</p> <p>所有</p>	 <p>コストが高い特注品</p> <p>所有</p>	 <p>コストが高い。現時点ではオーバースペックと考えている。6軸の動きが必要ない。</p>	 <p>特長：高速、軽量物</p> <p>開発対象</p>
対象物	建設混合廃棄物 (コンガラ、木くず)	建設混合廃棄物 (コンガラ、木くず)	選定対象外	飲料容器 (瓶、缶、PETボトル)
速度	1.3sec/pick	スカラ型より早い	0.5sec/pick	0.3sec/pick
負荷	5/10kg (定格/最大)	他同程度	5/7kg (定格/最大)	3kg (定格)
重量	32kg	重い (100kg前後)	45kg	95kg
サイズ	小さい	大きくなる	小さい	大きい
設置性	・ 門型フレーム不要	・ 門型フレームが必要	・ 門型フレーム不要	・ 門型フレームが必要
開発性	・ 取れない部分がある	・ これまでの開発蓄積あり ・ 制御が容易	・ 軸が多く制御が複雑	・ 制御が容易
コスト/LT	・ 標準品のため安価でLT短い	・ 特注品のためコスト高、LT長 (3か月以上のLT)	・ 標準品だが、若干高価	・ 標準品 ・ LTが短い

※速度：すべて上下方向250mm往復+水平方向300mm往復時の時間 LT：リードタイムの略

図 2-33 利用するロボットの選定

ピックアップテスト・チューニングは、カメラの位置と角度の調整、コンベヤとカメラの座標システムの調整、安全距離を考慮した調整を経て、アームが正常動作する確認（座標精度）、及びピックアップの精度（把持精度）を考慮し、各パラメータを変更し、システムのチューニングを行う。

ロボットの正常動作を実現するために、一体で動かなければならないが、問題が生じた場合、何が問題であるのか特定できなければならない。

問題を特定し、どのような改善方策をとればよいのかについて、逐次考え、対応する必要がある。物質のピックアップにおいても、数センチ、数秒のずれが生じる要因は、ソフトウェア面及びハードウェア面にわたり、多数の可能性が考えられる。例えば、ソフト面に関しては、画像認識、各ハードウェアの制御、システム環境等があり、ハード面に関しては、グリッパー、ロボット、カメラ、制御PC等があり、原因としては、堅牢性の問題、ソフトウェアのバグ、ハードウェアの故障、異常等、数多くの可能性が考えられる。原因を特定するためには、通常長時間の調査、テストを重ねる。

今回、パラレルリンクロボットを使用することにより、下記の制御項目を踏まえたシステム開発が必要となる。

表 2-19 パラレルリンクロボットの制御項目と内容

制御項目	内容
1. 位置制御	ロボットハンドのXYZ位置を正確に動かすこと
2. 姿勢制御	三次元空間での姿勢角を制御すること
3. 力制御	物体を扱う際の接触力（押す、把持する）の制御
4. 速度制御	移動速度や加速度を調整しスムーズな流れを制御
5. 軌道制御	空間上の連続的な動きを滑らかに進行

表 2-20 対象物別に必要となるロボット制御

対象物	把持方法	特徴	必要となるロボット制御
1. 飲料容器	サクシヨン	軽量、表面平滑、形状一定	高速動作、正確な位置決め、吸着確認
2. 建設廃棄物 (木くず等)	グリッパー	重量あり、不定形、剛体	柔軟な姿勢制御、力・トルク制御、衝突回避

### 第3章 排出現場で活躍する選別支援システム・ロボットの開発

本章における取組の概要を表 3-1 に示す。

表 3-1 排出現場で活躍する選別支援システム・ロボットの開発に係る取組の概要

項目	目的	実施内容	成果	課題・展望
3-1 実証フィールドとなる排出現場の処理の実態及びニーズを踏まえた、開発すべきロボット仕様の検討	業務ビル、商業施設を対象に、排出現場の廃棄物取扱状況と課題を踏まえて、ロボットの導入ニーズと選別対象を明確化する。	①業務ビル、商業施設等の廃棄物取扱状況と廃棄物管理上の課題整理 ②ロボットシステムの検討対象と課題の整理 ③ロボット開発の方向性と検討課題のまとめ	業務ビル2カ所、商業施設2カ所のヒアリング結果を踏まえて、バックヤード等におけるコンパクトな飲料容器の自動選別ロボットを開発対象とした。	実証現場（バックヤード等）に応じたロボット用途や、狭小スペースでの設備構成の検討が必要となる。
3-2 自律走行型ロボットの開発	複数台の自律走行型ロボットによる動静脈連携タスクを実行するフリーコントロールシステム（複数台制御）の一部機能の開発とその評価、ならびに社会実装に向けた検討を行う。	①LiDARの種類やロボットの構造に関わらず1つの地図データで走行可能かを検証する。 ②フリーコントロールシステムの一部機能の開発と実証により、社会実装に向けた課題を抽出する。	①基本的には1つの地図で複数台ロボットの制御が可能であることを確認した。 ②大学キャンパスでの夜間走行や障害物判定評価、交通制御の課題などを抽出し今後の開発の方向性を明確にした。	・LiDARによっては、一部のアルゴリズムの微調整が必要である。 ・ごみ箱、コンテナやセンサー等と連携した実証を積み重ねていく必要がある。
3-3 コンパクト型飲料容器自動選別ユニットの高度化開発	ロボットユニットシステムの全体設計、技術システム構築及び、現場実証を通じて、プロトタイプモデルを構築し、今後の開発方向を明確とする。	①自動選別ユニットの高度化開発 ②現場における実証実験 ③今後の実用化に向けたシナリオ	システムは、ループラインコンベヤによるコンパクト設計（4m×2.5m×高さ2.1m）。現場ニーズを踏まえて選別対象（8種類）のデータセットにLMM（大規模マルチモーダルモデル）を利用した画像収集、ファインチューニングの自動化システムを取り入れ、取組みを革新した。	認識精度（85～90%）の向上に向けた技術開発のほか、現場ニーズに応じた様々なロボット活用法の具体化（特定機能、24h利用の想定）が必要である。

### 3-1 実証フィールドとなる排出現場の処理の実態及びニーズを踏まえた、開発すべきロボットの仕様の検討

#### 3-1-1 業務ビル・商業施設における廃棄物取扱状況と廃棄物管理上の課題

排出現場として、業務ビル、商業施設を対象に、現場ヒアリングを行い、廃棄物管理の現状と課題などについて検討を行う。

現場ヒアリングは、大手デベロッパーの協力のもとで、業務ビル 2 カ所、商業施設 2 カ所で行った。また、各現場とも、清掃管理者が異なり、バックヤード管理及び廃棄物収集運搬・処理業者が異なるため、追加のヒアリングとして、現場における再分別の現場確認及び処理施設への訪問を行った。

表 3-2 ヒアリング先リスト（日時：R4年度）

カテゴリー	現場	日時	備考
業務ビル	A ビル	7/5	9/30、10/24 再分別の実態把握（追加調査）
	B ビル	9/13	
	C ビル	7/5	×専用エリアの情報提供不可のため対応終了
商業施設	D 施設	7/28	9/26 再分別の実態把握（追加調査）
	E 施設	7/27	
処理施設	F 業者	8/10	
	G 業者	8/23	

表 3-3 各施設の廃棄物回収、バックヤード管理者の関係性

カテゴリー	現場	廃棄物回収・再分別者	バックヤード管理者
業務ビル	A ビル	H 社（清掃関連子会社）	F 業者
	B ビル	H 社、他社	F 業者
	C ビル	H 社（共用部のみ）、他社	G 業者
商業施設	D 施設	H 社	F 業者
	E 施設	H 社、他社	I 業者

#### (1) 業務ビルにおける廃棄物取扱の概要

##### ①A ビル

業務ビルにおける廃棄物取扱の概要は、次のようになる。

- 専用部（業務テナント）、共用部（業務フロアのトイレ、給湯室）、物販（9 店舗）・飲食（16 店舗）から排出。

（廃棄物回収）

- 専用部、共用部：清掃管理業者（H 社（清掃関連子会社）が対応）。23 時～7 時、5 班計 13 名で、2～3 フロア/班の廃棄物回収と清掃を実施。
- 物販・飲食：分別排出、各自持込み。

（再分別）

- 専用部、共用部（のみ）：各班で時間調整の上で、清掃倉庫に集めて手選別（各 1 時間×5 班）を実施。各班 1～3 人が対応。
- 作業内容は、可燃物、不燃物が対象。
  - 1) 可燃物中の「弁当がら」を、不燃物に移動
  - 2) 飲料容器（ペットボトル、缶、ビン）は、回収
  - 3) 可燃物中の「廃プラ」は、不燃物に移動

（計量・保管）

- 計量後は、種類別に保管。F 業者が現場管理を行い、翌朝搬出。

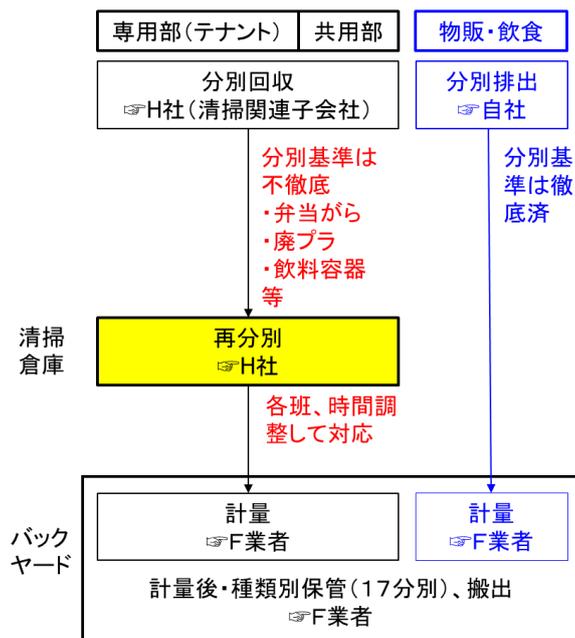


図 3-1 廃棄物回収の流れ (A ビル)



清掃倉庫動線



テナント回収ごみ(可燃ごみ)



回収廃棄物(清掃倉庫内)



再分別の状況(立ち膝)

図 3-2 清掃倉庫内における再分別の状況 (A ビル)

(専用部・共用部における廃棄物回収と分別作業(清掃倉庫内))

- 廃棄物の再分別は、他班と重ならない時間を実施。倉庫内にて、各班1時間程度、立ち膝等の姿勢で手選別作業を実施。
- 手選別は、正しい分別、異物・金属類の除去を中心に実施
- コロナ検査キットは、感染性廃棄物としてBOX保管

表 3-4 清掃管理者の作業スケジュール (A ビル)

	23時	1時	3時	4時	6時	7時
1班	床清掃等 (1フロウ) 廃棄物回収 → 清掃倉庫作業	床清掃等 (1フロウ)	休憩	床清掃等 (1フロウ)	片付け	
2班	床清掃等 (1フロウ)	床清掃等 (1フロウ) 廃棄物回収 → 清掃倉庫作業	休憩	床清掃等 (1フロウ)	片付け	
3班	床清掃等 (1フロウ)	床清掃等 (1フロウ) 廃棄物回収 → 清掃倉庫作業	休憩	床清掃等 (1フロウ)	片付け	
4班	床清掃等 (1フロウ)	床清掃等 (1フロウ)	休憩	床清掃等 (1フロウ) 清掃倉庫作業	片付け	
5班	床清掃等 (1フロウ)	床清掃等 (1フロウ)	休憩	床清掃等 (1フロウ) 廃棄物回収 → 清掃倉庫作業	片付け	
清掃倉庫	手選別作業	(1班)	(2班)	(3班)	休憩	(4班)
						(5班)

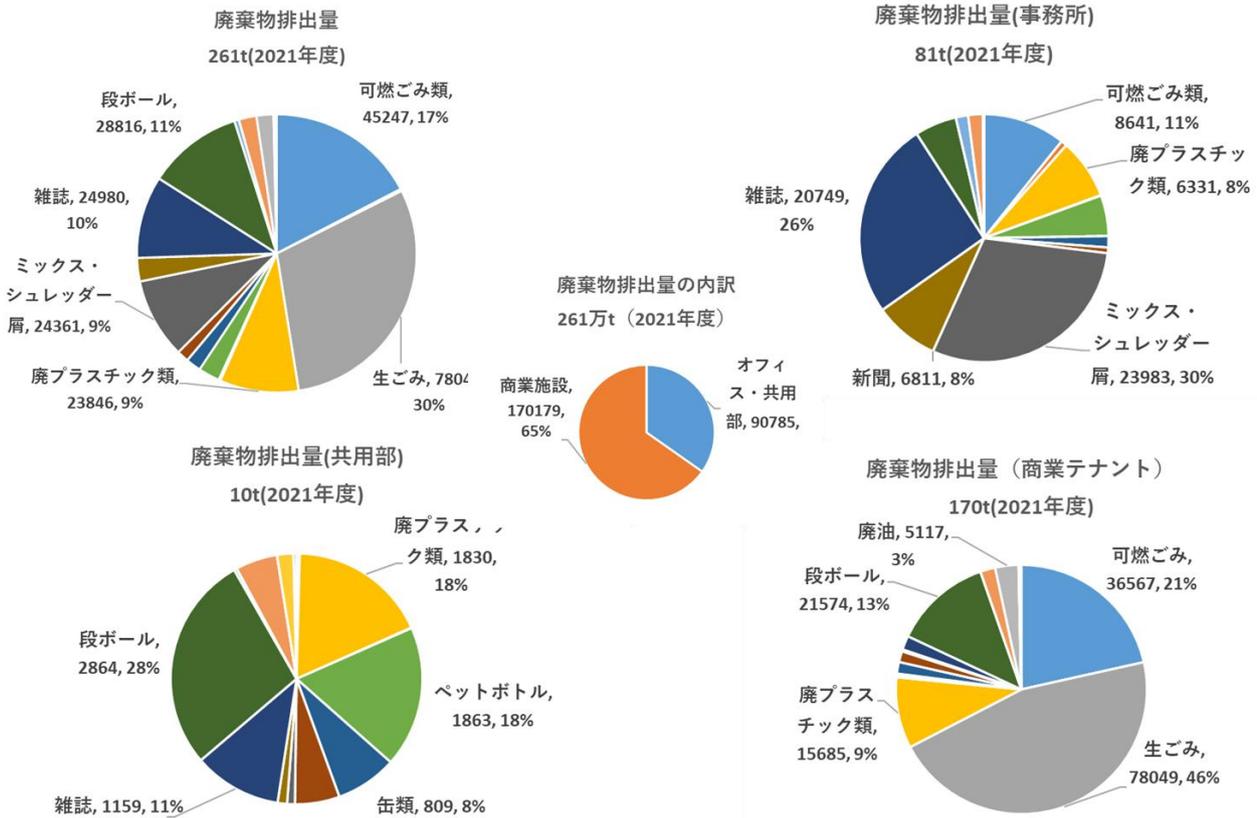


図 3-3 業務ビルにおける廃棄物排出量 (A ビル)

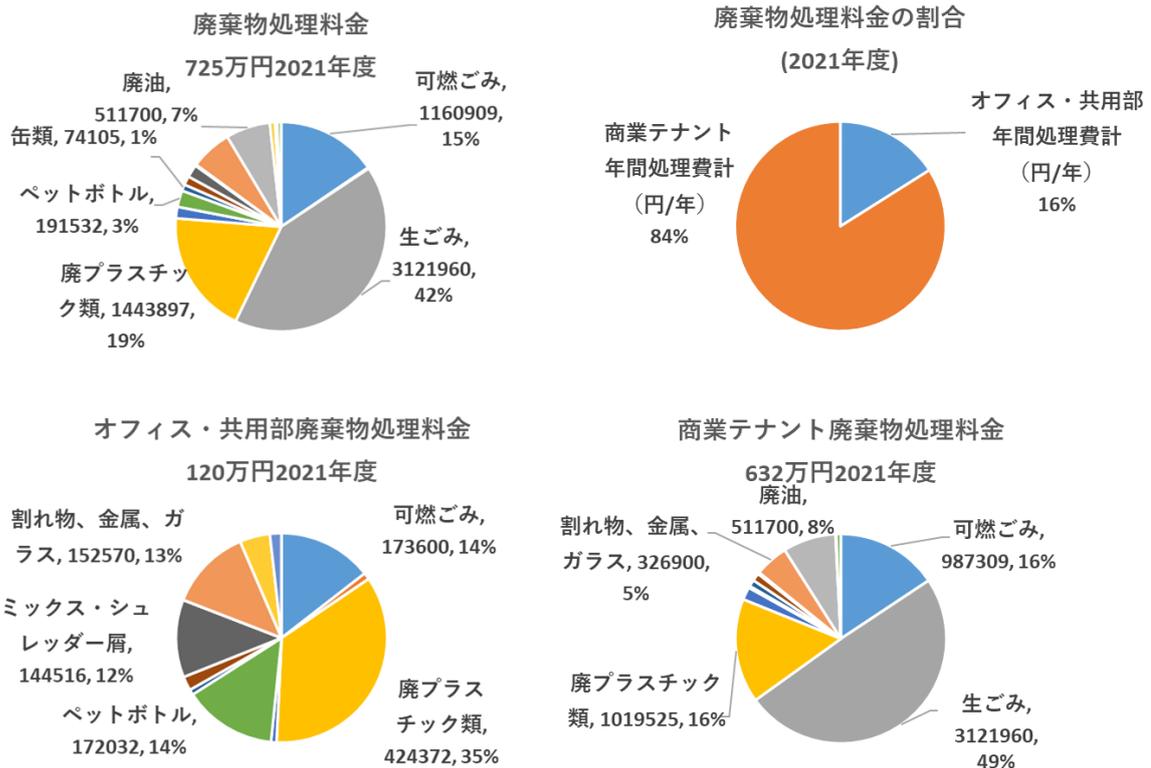


図 3-4 業務ビルにおける廃棄物処理費用 (Aビル)

②Bビル

- 専用部（業務テナント）、共用部（業務フロアのトイレ、給湯室）、物販（34店舗）・飲食（18店舗）から排出。

（廃棄物回収）

- 専用部、共用部：清掃管理業者（H社が対応）。
- 物販・飲食：分別排出、各自持込み。

（再分別）

- 専用部、共用部（のみ）：各班で時間調整の上で、バックヤードの一角で手選別を実施。
- 作業内容は、可燃物、不燃物が対象。
  - 1) 可燃物中の「弁当がら」の生ごみ、割りばし・楊枝、廃プラに区分して各選別
  - 2) 飲料容器（ペットボトル、缶、ビン）は、回収
  - 3) 可燃物中の「廃プラ」は、不燃物に移動

（計量・保管）

- 計量後は、種類別に保管。F業者が現場管理を行い、翌朝搬出。

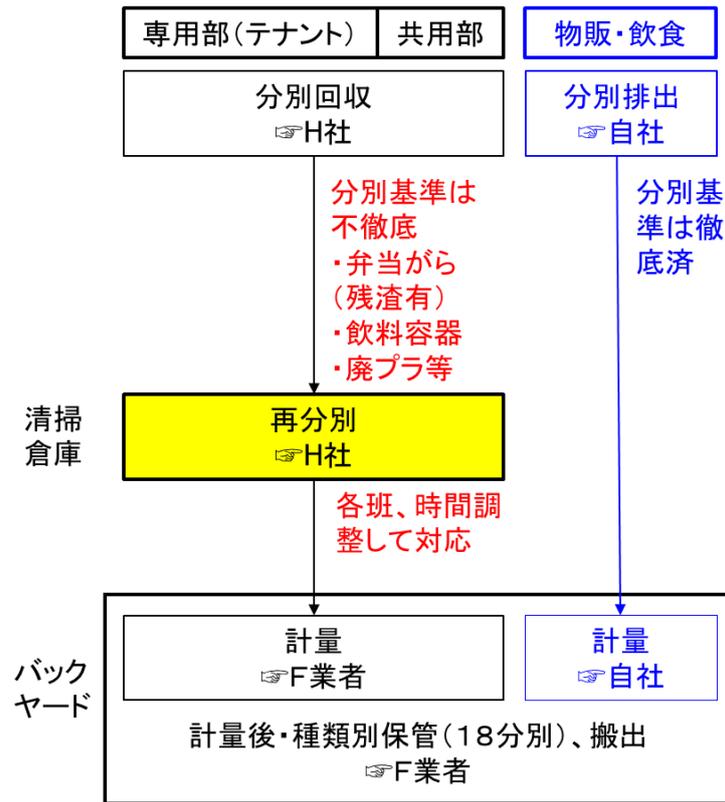


図 3-5 廃棄物回収の流れ (Bビル)



再分別の場所(バックヤード内)



再分別の状況



再分別の状況(2名; 座り/立ち作業)

図 3-6 清掃倉庫内における再分別の状況 (Bビル)

表 3-5 清掃管理者の作業スケジュール (Bビル)

ゴミ分別時間調査票(1日平均)				単位(分)			
				2022			
氏名	共用部	専用部	専用部1社	氏名	共用部	専用部	専用部1社
清掃員1				清掃員28	20		
清掃員2		30	30	清掃員29	5		
清掃員3			40	清掃員30	15		
清掃員4		30		清掃員31			60
清掃員5			40	清掃員32	30		60
清掃員6			40	清掃員33	20		
清掃員7				清掃員34	5		
清掃員8		30		清掃員35	20		
清掃員9		30		清掃員36			
				清掃員37		30	
清掃員10	5			清掃員38	10		
清掃員11	5			清掃員39	10		
清掃員12	15			清掃員40			
清掃員13	5			清掃員41			
清掃員14	20			清掃員42			
清掃員15	5			清掃員43			
清掃員16	5			清掃員44		40	
清掃員17	20			清掃員45	20	40	
清掃員18	80			清掃員46		40	
清掃員19	10			清掃員47		40	
清掃員20	10			清掃員48		40	
清掃員21	10			清掃員49		40	
清掃員22	5			清掃員50		40	
清掃員23	5			清掃員51		40	
清掃員24	10			清掃員52		20	
				清掃員53		20	
				清掃員54		20	
清掃員25	15						
清掃員26	15						
清掃員27	15						
				合計(分)	410	530	270
					6.8	8.8	4.5
				ゴミ分別トータル時間 : 毎日約20時間			

(2) 商業施設における廃棄物取扱の概要

①D 施設

- 共用部 (ごみ箱、トイレごみ、かさ袋-雨天時)、物販 (320 店舗)・飲食 (50 店舗) から排出。

(廃棄物回収)

- 共用部：清掃管理業者 (H 社、他社が対応)。14 時、17 時、19 時の 3 回 (平日。5 回土日祝日) 各階 1 名で廃棄物回収と分別を実施。
- 物販・飲食：分別排出、各自持込み。

(再分別)

- 共用部 (のみ)：清掃倉庫に集めて手選別 (各 15 分×3~5 回)×3 階分を実施。
- 作業内容は、飲料容器の回収・3 選別が主体。
  - 1) 可燃物・不燃物中の飲料容器を、回収。一部、可燃ごみ、不燃ごみ間を移動
  - 2) 飲料容器 (混合) は、ペットボトル、びん、缶に 3 選別

(計量・保管)

- 計量後は、種類別に保管。I 業者が現場管理を行い、翌朝搬出。

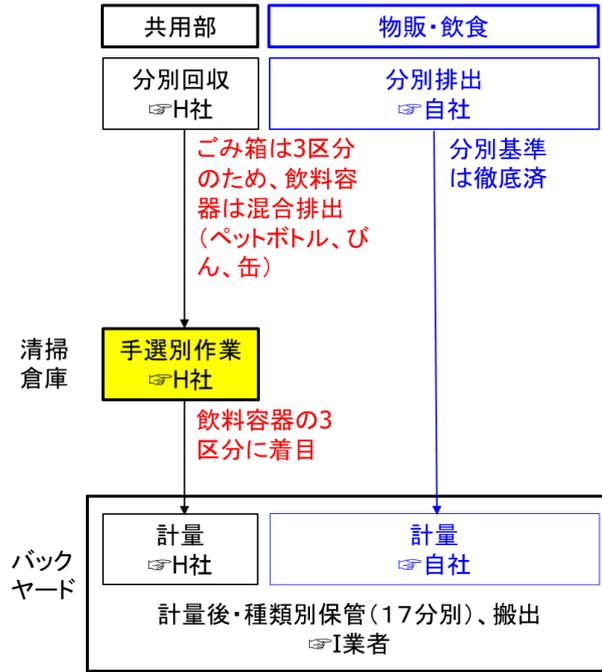


図 3-7 廃棄物回収の流れ (D施設)



共用部のごみ箱(エスカレータ横等) トイレごみ(オムツ等) 傘袋(雨天時のみ)



廃棄物回収状況(共用部)

図 3-8 廃棄物の回収状況 (D施設)



再分別の状況(清掃倉庫内)

1階分のごみ量(平日・晴天)

図 3-9 廃棄物再分別の状況 (D施設)

(対応状況)

- 共用部の廃棄物回収は、平日 3 回 (13、16、19 時)、休日 5 回実施している。
- 各階の廃棄物回収は、2 人対応、各 30 分程度を要する。
- 各階の再分別は 2 人対応、各 15 分程度 3 階分を要する。このうち、飲料容器の 3 種分別は 6 割程度を占める。

(集計結果)

- 廃棄物回収及び再分別では、平日 13.5h/日、休日 22.5h/日の作業が行われている。
- 飲料容器の再分別 (3 種分別) は、平日 2.7h/日、休日 4.5h/日の作業が行われている。

表 3-6 商業施設における混合飲料容器の再分別状況

項目	概要	延べ時間	備考
①廃棄物回収	2 名/班階×30 分/回階 ×3 階×3~5 回/日	540 分 (9h) 900 分 (15h)	平日 3 回 (13, 16, 19 時) 休日 5 回 (13, 16, 19+随時)
②再分別	2 名/班階×15 分/回階 ×3 階×3~5 回/日	270 分 (4.5h) 450 分 (7.5h)	平日 休日
③廃棄物回収 +再分別 (合計)	①+②	810 分 (13.5h) 1350 分 (22.5h)	平日 休日
④再分別 (飲料容器の 3 種分別/び ん、缶、ペットボトル)	②×60%	162 分 (2.7h) 270 分 (4.5h)	平日 休日

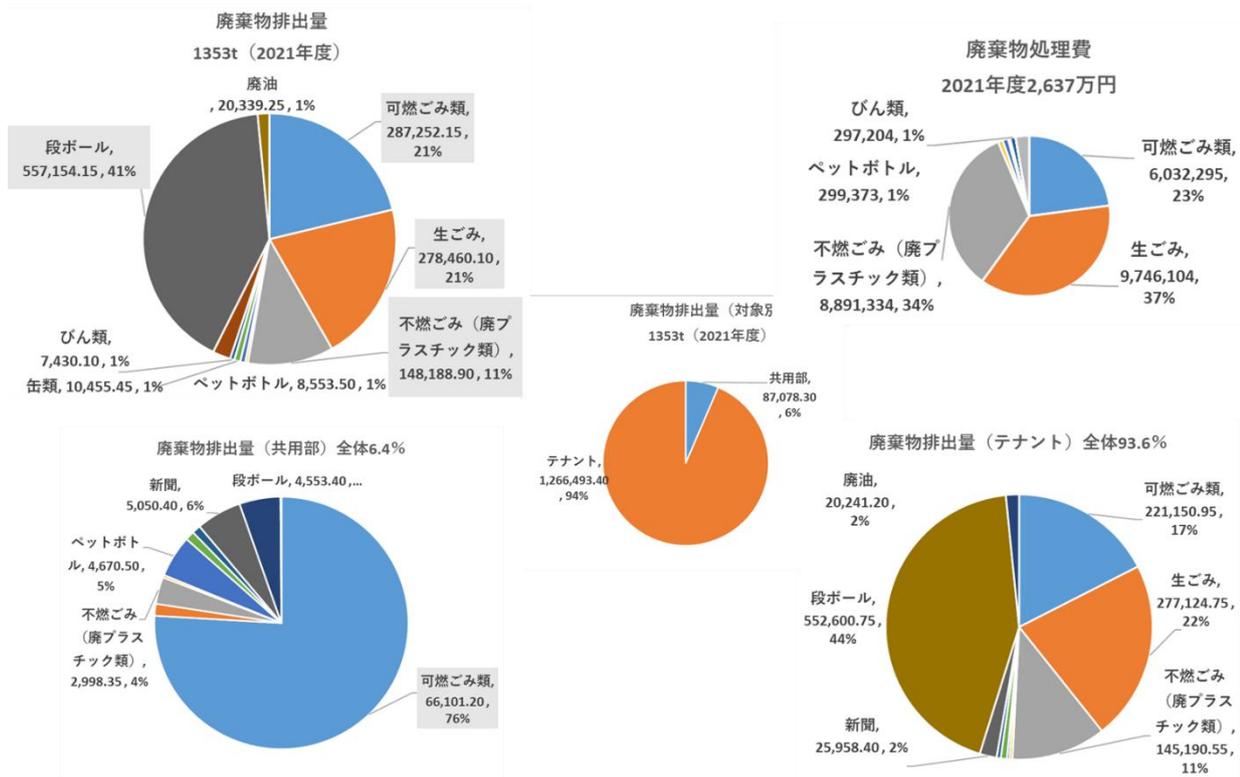


図 3-10 商業施設における廃棄物排出量（D施設）

②E 施設

- 共用部（ごみ箱、トイレごみ、かさ袋－雨天時）、物販（91 店舗）・飲食（42 店舗）から排出。

（廃棄物回収）

- 共用部：清掃管理業者（H 社が対応）。日中 3 回、深夜 1 回（平日。6 回土日祝日）各階 2～3 名（休日 4～5 名）で廃棄物回収と分別を実施。
- 物販・飲食：分別排出、各自持込み。

（再分別）

- 共用部（のみ）：清掃倉庫に集めて再分別を行う。
- 作業内容は、飲料容器の 3 選別が主体。
  - 1) 可燃物・不燃物中の飲料容器を、回収。一部、可燃ごみ、不燃ごみ間を移動
  - 2) 飲料容器（混合）は、ペットボトル、びん、缶に 3 選別

（計量・保管）

- 計量後は、種類別に保管。F 業者が現場管理を行い、翌朝搬出。

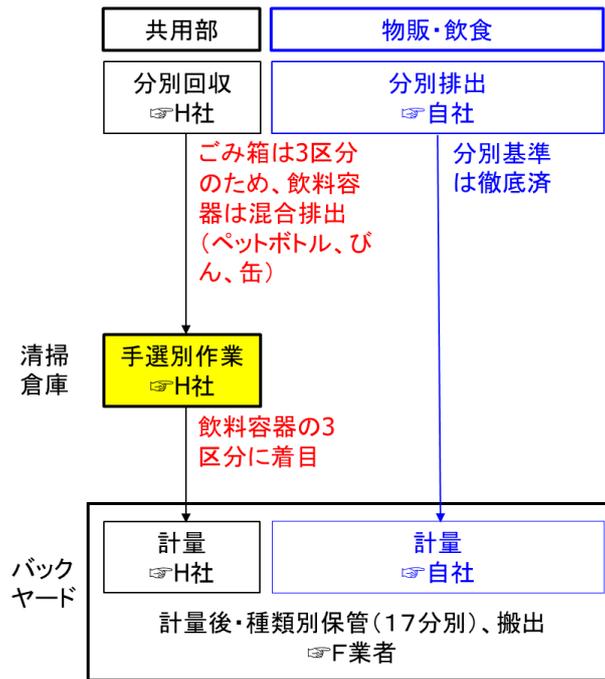


図 3-11 廃棄物回収の流れ（E施設）



共用部のごみ箱(エスカレータ横)



共用部のごみ箱(フードコート)



再分別の場所(清掃倉庫)



再分別後の廃棄物保管(バックヤード)

図 3-12 廃棄物の回収と再分別（E施設）

(3) 処理施設における廃棄物処理（2カ所）

- 業務ビル・商業施設の廃棄物処理は、大手4社のシェアが圧倒的に多い。
- 処理対象は、不燃ごみ（廃プラ）、紙類、飲料容器が主体で、可燃ごみ、生ごみ、危険物は外部搬出。

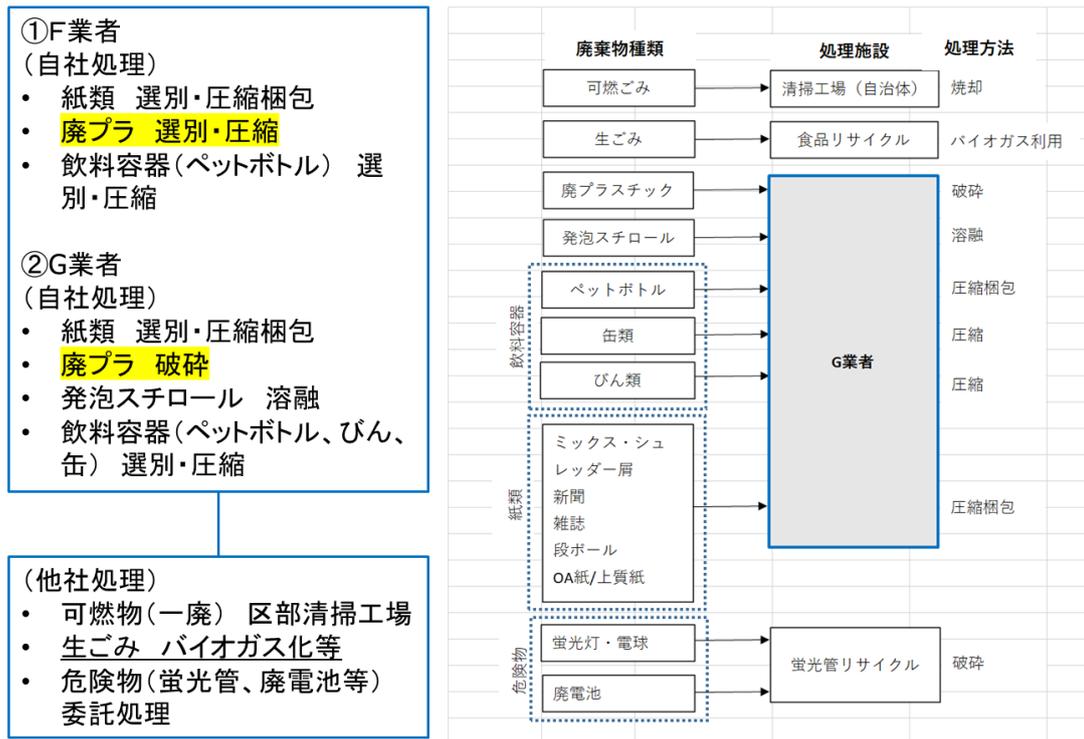


図 3-13 処理施設における廃棄物処理 (2カ所)

- 廃プラ処理後の出荷物の品質は、生ごみ、金属くず、危険物が含まれてないことが第一条件。
- RPF 原料 (固形燃料化) としての利用の場合、紙ごみ、木くずの混入は問題なし。

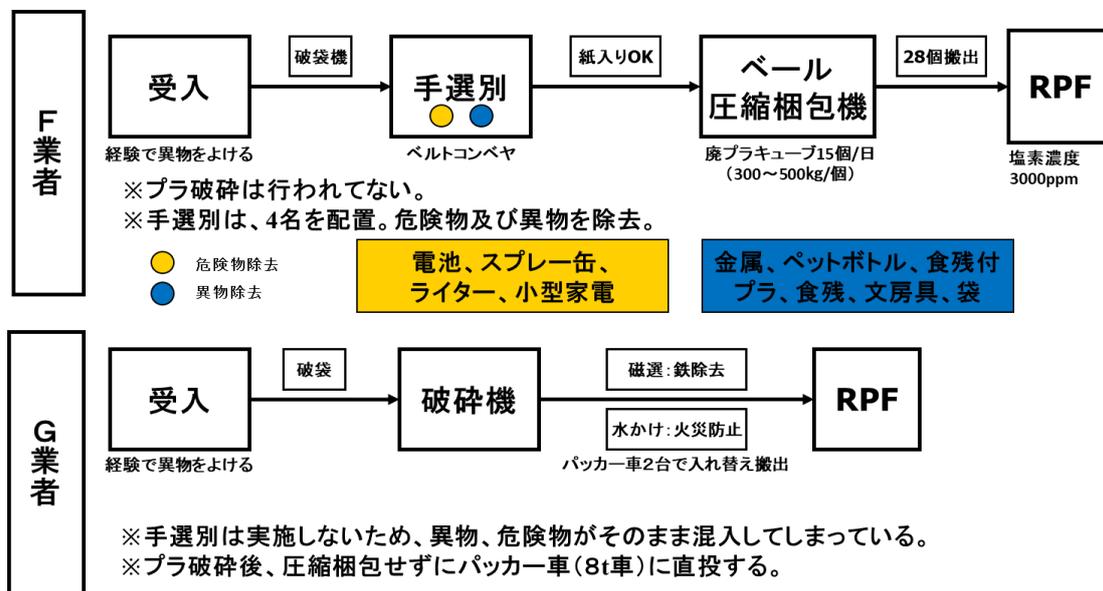


図 3-14 処理施設における廃プラ (軟質系) の処理



廃プラ選別設備(F業者)



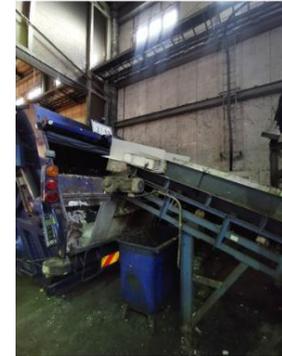
廃プラ手選別の状況(同左)



廃プラ投入コンベヤ(G業者)



廃プラ処理ライン(2軸破碎)(同左)



廃プラ搬出(同左)

図 3-15 廃プラ処理の概況 (2社)

#### (4) 廃棄物管理に関する現場状況のまとめ

廃棄物管理に関する現場状況のまとめは、次のようになる。

- ①外販・飲食等のテナントからの廃棄物は、業務ビル・商業施設の双方で、テナント自ら「分別」、「(バックヤードへの)運搬」、「計量管理」、「(所定の場所での)保管」、「(従量料金による)請求管理」がされており、ビル管理における分別品目、分別基準の指示に基づく対応がなされている。
  - 各テナントにおける運搬・計量手間はあるものの、清掃管理側への負担はほぼない(一部、分別内容に関する指導等は実施)。
- ②専用部(事務所・テナント)、共用部のごみの「再分別」には、該当する人員手間・費用は考慮されておらず、また、清掃員の多くが、ごみへの接触対応を回避したいと考えているにもかかわらず、リサイクル推進の観点から「再分別」の対応が行われている。
- ③「再分別」は、バックヤード内又は清掃倉庫・部品置き場などの空きスペース(狭小)において、相互に時間調整の上で、立ち膝等のスタイルで行われている実態がある。なお、「再分別」の方法は、専用部(事務所・テナント)における廃棄物の分別品目、基準に相違がない場合でも、ビルディングごとに清掃員による「再分別」の対応内容(より精緻に選別)が異なる場合がある。特に、弁当ごみの取扱い(中身を開き、残飯(生ごみ)、割り箸・楊枝、紙くずを精選別する対応等)が異なる。
- ④バックヤードにおける廃棄物保管・搬出は、多様な分別品目の種類別の管理を考慮したスペースの効率的な利用や、毎日・収集会社による一人回収等を背景に、荷姿(袋)・かご台車保管、収集はパッカー車、平ボディ車が基本となっている。一部、異なる荷姿や、アームロール車の利用なども見られるものの、方法論の見直しなどについては、「現場側の条件」の考慮が重要で、テナントによる廃棄物管理を含め、容易には見直しできない。
- ⑤廃棄物管理を搬出時点に遡り、分別方法(品目、回収方法)から見直しを行うことについて、対応が必要だと思われる事項は、次の事項が考えられる。

- 「弁当ごみ」の分別品目の追加⇒弁当ごみの適正な取り扱いに関する課題大
- 共用部に設置する飲料容器のごみ箱の変更⇒ごみ箱内で飲料容器の3種類分別ができれば効果大

(参考：廃棄物管理に係る情報(9/22 H社より))

- テナントからのごみの分別状況について、適切な分別は25%(13物件)のみであり、75%は適切に分別されていない状況(一部又は全部)にある。
- バックヤードに搬入前に、約80%でクリーンスタッフによる「再分別」が実施されている。

⇒(アンケート集計担当者より)

再分別の内容については、新型コロナ以降は、飲料容器を対象に適正分別(3区分:ペットボトル、びん、缶)が多い。弁当ごみ、廃プラの再分別の方法(2通り/①可燃ごみ→不燃ごみへの移動、②弁当ごみを開き、生ごみ、割り箸、廃プラごとに適正に区分等)については、対応は統一されていない。



※アンケート調査結果/H社(清掃管理子会社)が、管理53物件の「廃棄物管理の状況」を把握したものの、調査対象;53物件のクリーンリーダー(53名)及び、クリーンスタッフ(564名/63物件)

図 3-16 廃棄物管理に係る情報

表 3-7 建物タイプ別にみた廃棄物管理の特徴と課題

タイプ	特徴	課題
業務ビル	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 専用部のテナントは、社員数百名を擁する場合がある等のため、社員個々の分別の指導・徹底は困難。</li> <li>■ 弁当ごみが多いが、可燃ごみ・不燃ごみの分別不適合や、生ごみの分別対応等が課題。(専用部→共用部へのごみ移動は不可)</li> <li>■ ごみの分別は、清掃管理の一環であり、建物ごとに対応が異なる。ごみ回収サービスの一環との認識もあるため、個々に状況が異なる。</li> <li>■ 物販・飲食は、分別排出、自社持込・計量の対応のため、<u>適正管理が容易</u>。(分別不徹底には、持ち帰りや、罰金等で対応)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 新型コロナ禍以降、物件ごとに再分別等の対応内容に統一感が</li> <li>■ ない。(弁当ごみ対応、処理施設の受入基準を上回る再分別等)。</li> <li>■ 専用部・共用部のごみの再分別がほとんどのケースで必要であるが、<u>ごみ再分別費用はごみ回収費用に含まれていない</u>。</li> </ul> <p>※アンケート:物件の8割で清掃スタッフが再分別を実施</p>
商業施設	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 共用部は、<u>ごみ箱が3区分(可燃物、不燃物、飲料容器)しかないため、飲料容器は必然的に混合排出</u>となる。</li> <li>■ 物販・飲食は、分別排出、自社持込・計量対応のため、<u>適正管理が容易</u>。(店舗内は10数名のため指導も容易。また、分別不徹底には、持ち帰りや罰金等で対応。)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 共用部の飲料容器は、<u>処理業者の受け入れ基準に合わせた再分別が必要</u>となる場合がある。</li> <li>■ 来客のごみ捨て区分の指導は困難。</li> </ul>

※アンケート調査結果:H社(清掃管理子会社)がJ社(デベロッパー)の物件での廃棄物取扱対応を調査

表 3-8 廃棄物再分別の対応と課題のまとめ

タイプ	再分別の対応	課題	備考
業務ビル	<ul style="list-style-type: none"> <li>■専用部（テナント）及び共用部の可燃ごみは、廃プラ、弁当ごみ、飲料容器を取り出す。<u>廃プラ、弁当ごみは不燃ごみに移動。</u>（弁当ごみの扱いが多い）</li> <li>■同不燃ごみは、飲料容器を取り出す。</li> <li>■飲料容器は、ペットボトル、びん、缶の3区分を徹底する。</li> <li>※弁当ごみは、<u>容器中の残渣（生ごみ）、割り箸・楊枝・紙類、廃プラに3区分する現場あり。</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■作業は、清掃倉庫・バックヤードの余裕スペースで、立ち・しゃがみ・座わり姿勢で行われ、作業環境が悪い。</li> <li>■コロナ検査キットの混入</li> <li>■同作業は、1時間/フロワ分でチームごとに3フロワ分を対応している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■テナント（物販・飲食）は、バックヤードでの分別作業なし。</li> <li>■袋搬出⇒パッカー車、平ボディ車回収</li> </ul>
商業施設	<ul style="list-style-type: none"> <li>■共用部の可燃物、不燃物から飲料容器を取り出し、可燃物・不燃物にまとめて排出。</li> <li>■同上、<u>飲料容器（混合）は、ペットボトル、びん、缶に選別して</u>排出。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■再分別は、清掃倉庫の余裕スペースで、立ち・しゃがみ姿勢で行われ、作業環境が悪い。</li> <li>■同作業は、3回（平日）～5回（土日祝日）/日×階高分、各メンバーにて繰り返し対応される。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■共用部のごみ箱は、「可燃ごみ」「不燃ごみ」「飲料容器」の3区分しかないため、<u>飲料容器の3選別は必須。</u></li> <li>■袋搬出⇒パッカー車、平ボディ車回収</li> </ul>

### 3-1-2 ロボットシステムの検討対象と課題

業務ビル、商業施設における廃棄物管理及び再分別等の課題を踏まえて、ロボットシステムの検討対象として考えられる事項についての整理を行った。

表 3-9 ロボットシステムの検討対象と課題

項目	廃棄物再分別の課題	想定されるテーマ	対応課題
1. 大規模・業務ビル	① 専用部、共用部の可燃ごみ中の廃プラ、弁当ごみなどの分別が必要（弁当ごみ中の残渣の分別） ② 可燃・不燃ごみ中の飲料容器の分別が必要。	① 可燃ごみ中の廃プラ、弁当ごみの選別回収・不燃ごみへの適正区分 ② 飲料容器の選別回収、3種分別、異物除去	① 廃棄物投入～ロボットシステム～排出荷姿、課題が多く現状では実証に移行できない。分別方法の見直しなど排出段階からの措置が重要。 ② 同上
2. 大規模・商業施設	① 共用部の飲料容器ごみは混合排出（ペットボトル、びん、缶）されており分別が必須。 ② 共用部の可燃ごみ中の廃プラ等の分別が必要。	① 共用部の飲料容器の選別回収、3種分別、異物除去 ② 可燃ごみ中の廃プラ等の選別回収・不燃ごみへの適正区分	① 必須ニーズであること、また、技術開発を含め実証フェーズでの実現が可能 ② 課題が多く現状では実証に移行できない。
3. 中小規模	① 専用部、共用部の可燃ごみ中の廃プラ、弁当ごみなどの分別が必要。（弁当ごみ中の残渣の分別） ② 可燃・不燃ごみ中の飲料容器の分別が必要。	① 可燃ごみ中の廃プラ、弁当ごみの選別回収・不燃ごみへの適正区分 ② 飲料容器の選別回収、3種分別、異物除去	① 現場が狭小で、ロボット整備等の可能性が低い。 ② 廃棄物投入～ロボットシステム～排出荷姿、課題が多く現状では実証に移行できない。分別方法の見直しなど排出段階からの措置が重要。

(注) 建物の規模の大小で、取組内容や、新たな取組可能性が相違するため、3区分とした。

表 3-10 再分別の効率化に着目した場合の現場ニーズと詳細課題

検討ケース	対象廃プラ	ロボットによる選別方法	制約・調整課題	ロボット選別の難易度
可燃ごみ中のプラスチック、弁当ごみの回収 (不燃物に移動)	廃プラ、弁当プラ容器(残飯有は不可)	可燃ごみを破袋し、ごみ中のプラスチックを判別し、吸引・選別	荷姿変更後、コンテナ保管の対応他、現状条件を考慮した機械システム要件	軟質プラの選別方法の具体化に向けた試行が重要
可燃ごみ、不燃ごみ中の飲料容器の選別回収	飲料容器(ペットボトル)	可燃ごみ、不燃ごみを破袋し、ごみ中に飲料容器(ペットボトル、びん、缶)を選別	同上	軟質プラが、選別対象を覆うことで選別効率に難あり
弁当ごみ(容器:廃プラ)中の生ごみ、割り箸・楊枝、包み紙(可燃物)、廃プラ(包装含む)の適正区分	包装プラ(弁当包み)、弁当容器(フタ、割り箸包みプラ)	ロボット選別は困難(包装プラを開梱し、生ごみ他の選別はロボットではできない。)	ロボット選別は困難	ロボット選別は困難
混合状態の飲料容器の3種分別(ペットボトル、びん、缶)	飲料容器(ペットボトル)	飲料容器をペットボトル、びん、缶の3種類に選別	現場条件を考慮した機械システム要件	コンパクトなユニットが重要

- 飲料容器の他、廃プラ、弁当ごみの適正区分化(可燃ごみ→不燃ごみへの移動)のニーズへの対応は、業務ビル、商業施設でも対応されているが、対象数量が多く、開袋後の荷姿の変更(アームロール等)が廃棄物収集に及ぼす影響などを考慮すると、現場条件に伴う制約課題が多い。

飲料容器の再分別による3区分(ペットボトル、びん、缶)は、特に商業施設において必須の作業となるため、合理化ニーズは高い。但し、設置スペース、合理化効果などの検証を行う必要がある。

表 3-11 対応ニーズと課題のまとめ

対応方法	内容	ニーズ	課題
①可燃ごみ・不燃ごみの適合化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・分別が不適合な「廃プラ」、「弁当ごみ」、「飲料容器」を対象に、手選別による回収行為を機械で代替する。</li> <li>※弁当ごみ中の生ごみ等分別作業は検討外</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・業務ビルにおける可燃ごみ（一廃）、不燃ごみ（産廃:廃プラ、弁当ごみ）、飲料容器の区分の再分別は、手作業にて80%の物件で実施中</li> <li>・同上、商業施設でも実施中</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・可燃ごみ、不燃ごみ等のため対象規模が大きい。（作業環境・スペース確保）</li> <li>・廃棄物収集では、パッカー車、平ボディ車が利用されており開袋後の荷姿の変更など条件調整が必要となる。（容易には対応できない）</li> </ul>
②飲料容器の3区分	<ul style="list-style-type: none"> <li>・混合状態の飲料容器を対象に、手選別によるペットボトル、びん、缶への再分別を機械で代替する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・特に、商業施設では、共用部の飲料容器は、必ず手作業による3分別が必要で、代替効果は高い。（但し、商業施設全体に占める対象廃棄物の割合は小さい）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・主として、商業施設が対象</li> <li>・設備に設置スペース（現状は、清掃倉庫内）の確保</li> <li>・合理化効果に係る検証（一人作業の場合、人員削減には結びつかない）</li> </ul>

排出現場については、「分別回収」に係る機械化のテーマと一次評価は次のとおりである。

①可燃物中の廃プラ・弁当くずの機械選別による区分の適正化

一次評価の結果、現時点では現場の制約、廃棄物回収方法の見直しに伴う影響等、運用上の課題は見られるものの、将来の効率的なシステム化や、焼却抑制による廃プラ等のリサイクル化の可能性の検討を行うため、共同研究先の研究開発室を活用の上で、ロボットシステム（画像認識、ロボットアームによる選別）の適用性や、排出時の分別品目の変更に伴う影響の検討を行う。

- 分別の不徹底により、可燃ごみ中の「廃プラ」、「弁当ごみ」→不燃ごみの適正区分（但し、厨芥残渣がないもの）が必要。可燃ごみの焼却抑制に向けて廃プラ等の適正区分・リサイクルの効果は大きい。
- 可燃ごみは最も排出量が多い上、処理には破袋を伴い、処理後物の荷姿変更（バラ）に伴う廃棄物回収方法（袋回収→コンテナ回収）の見直し、コンテナ保管スペースの確保等、変更に伴う影響範囲が大きい。そのため、ロボットの適用性や、分別品目の見直しによる可能性の検討を行う。

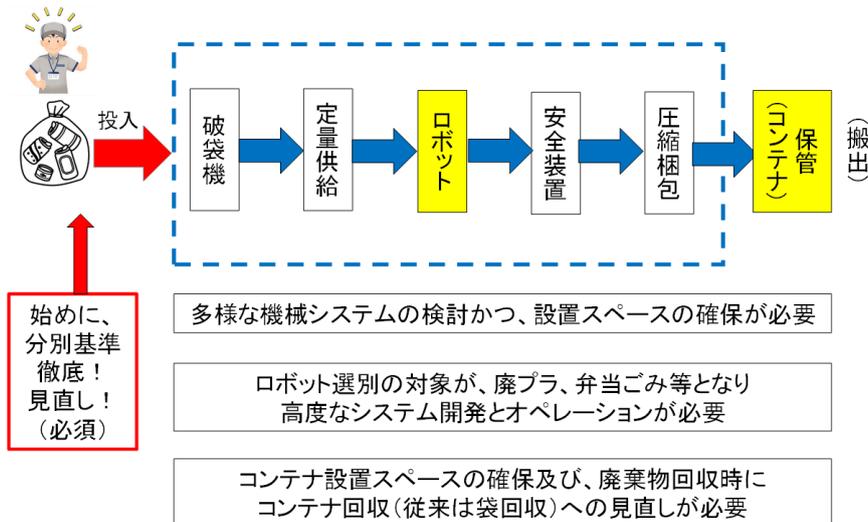


図 3-17 可燃物中の廃プラ・弁当くずの機械選別のイメージ

②飲料容器混合物のコンパクトな3種（容器別）分別処理システム

商業施設の規模の大小に関わらず、共用部から排出する飲料容器混合物はペットボトル、びん、缶の3種類の分別を人手により行われていることから、この改善に向けて、コンパクトなユニット開発が求められている。

- 主として商業施設の共用部の飲料容器ごみが対象➡3種分別は必須作業
- 簡易テーブルでの自動選別により、選別作業の簡易化が可能

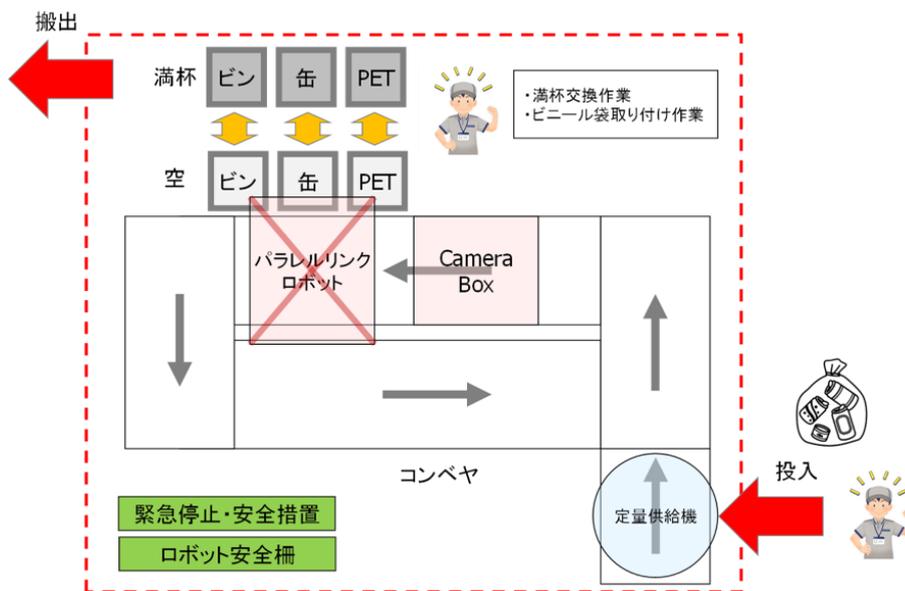


図 3-18 飲料容器混合物のコンパクトな3種（容器別）分別処理のイメージ

表 3-12 建物管理者サイドのメリット

タイトル	最終目標	建物管理者のメリット	備考
廃プラ等の選別支援システムの開発	業務ビルにおける要素技術・システムの実証・評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>■排出～回収～再分別～搬出の категорияについて、総合的な見地からの検討ができる。</li> <li>※「再分別」対応のみでは、解決に至らない。</li> <li>■廃プラ等の具体的な KPI 目標の設定に寄与する</li> <li>■AI・ロボティクスを用いた最先端の取組みによる利便性・効率性の向上は、テナントへのアピールにも寄与する。</li> </ul>	各カテゴリーにおける詳しい課題整理と、要素技術の具体的な適用性の検討が必要となる。
コンパクト型飲料容器自動選別ユニットの設計と開発	商業施設におけるロボットの実用化研究	<ul style="list-style-type: none"> <li>■商業施設において、再分別作業の過半数を占める作業の効率化に寄与する。</li> <li>※飲料容器手選別作業時間一延べ平日 2.7h、休日 4.5h 相当分</li> <li>■AI・ロボティクスを用いた最先端な取組みを通じて商業施設利用者へのアピールに寄与する。</li> <li>※ごみ箱の見直し（消費者意識に任せた3種分別の徹底）では、問題解決に結びつかない。</li> </ul>	施設の対象化と、施設内における一定規模の設備の設置スペースの確保が必要となる。

### 3-1-3 ロボット開発の方向性と検討課題のまとめ

排出現場における廃棄物管理の効率化、合理化に向けて、「業務ビル」、「商業施設」を対象に、計4か所のヒアリング調査を行い、排出段階、回収・再選別段階、保管・処理段階の各フェーズにおける課題整理を行い、開発すべきロボットのテーマについて対象化した。

#### (1) 廃プラ等の選別支援システムの開発

現場ニーズから抽出された廃プラ等の選別支援システムのアプローチとして重要な点を整理した。これらのうち、ごみ収集・運搬を行う自律走行型ロボットを検討テーマのひとつとして位置付けた。それ以外のテーマに関しては、第6章に個別の研究テーマとして展開した。

表 3-13 廃プラ等の選別支援システムのテーマ

カテゴリー	対応メニュー	項目	業務	商業	内容	備考
排出段階	分別品目の追加 (弁当がら)	分別基準	◎	-	分別基準を改め、弁当がらは別品目として回収。その際、残飯は生ごみ容器、割り箸は可燃物として処分する。	専用部（テナント）-共用部間で生ごみ等移動（※従来は×）
	ごみ箱の変更 (飲料容器)	回収容器	-	○	びん、缶、ペットボトルの3種分別ができる形状及び格納法に変更	現在は3種混合のため手選別が必要
	ごみ計量の効率化 (遠隔管理)	計量システム	◎	○	飲食・外販を対象に、排出元でごみ計量ができる遠隔システム	バックヤードでの混雑解消
回収・再分別段階	ごみ量の管理	スマートごみ箱	◎	○	ごみ箱のごみ数量を管理し、効率的な回収を支援する	ごみ量が多くなると自動通知、ごみ圧縮機能
	ごみの自動運搬 (支援)	自律走行型ロボット	◎	△	専用部・共用部、飲食・外販を対象とした自律走行型ロボット（生ごみ、段ボール等の重量物等）	搬送行程ルートの段差解消等要
保管・処理段階	廃プラのリサイクル高度化	保管区分	◎	△	不燃物（廃プラ）のMR、CR 物販の梱包プラ（PE）のMR、CR	例：プラパレット製造 例：ペレット製造他

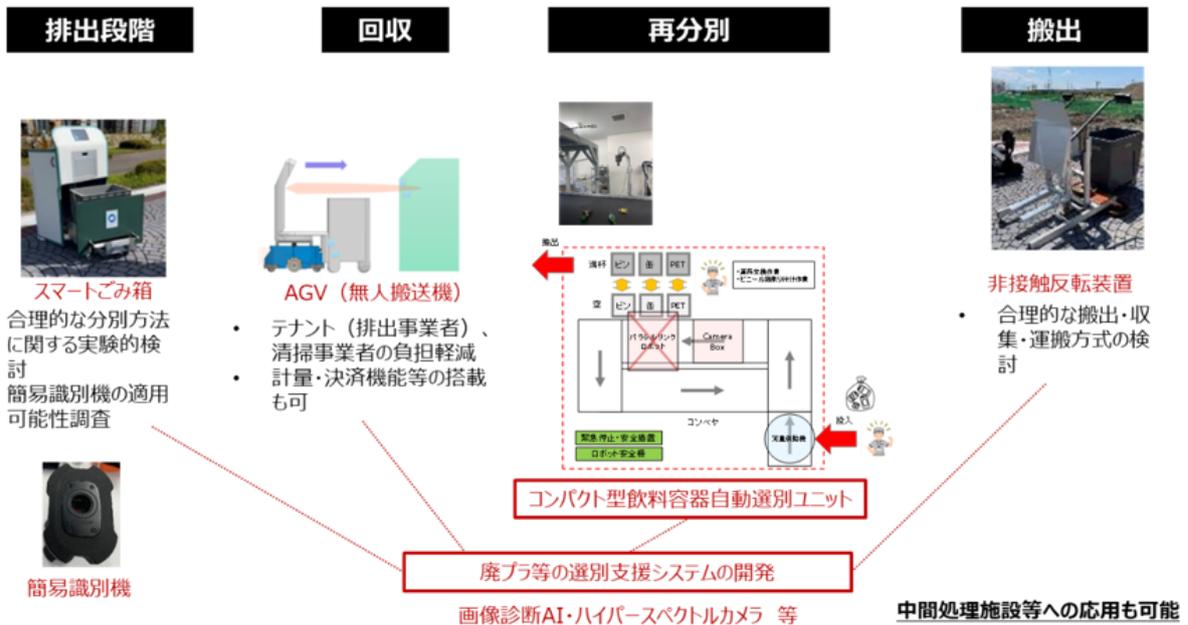


図 3-19 廃プラ等の選別支援システムの開発イメージ

(2) コンパクト型飲料容器自動選別ユニットの設計と開発

コンパクト型飲料容器自動選別ユニットの設計と開発は、飲料容器の手選別作業が再分別作業の過半数を占める「商業施設」を対象に、設計及び開発を行う。

本件は、ロボットの実用化研究を実施するテーマである。主として商業施設におけるテーマと位置付け、実証フィールドでの実証を行う。

1. ロボットユニットシステム全体の設計
2. コンベヤの設計と開発
3. 簡易型定量供給装置の設計と開発
4. ロボットユニットの設計と開発
5. AI自動選別ロボットの設計と開発
  - 5-1 ロボット仕様に基づくカメラの選定
  - 5-2 画像認識システムの開発
  - 5-3 空間特定システムの開発
  - 5-4 ロボット制御システムの開発
  - 5-5 気圧式グリッパーとピッキングシステムの開発
  - 5-6 エンコーダー追跡システムの開発
  - 5-7 安全対策機能の設計と開発
  - 5-8 ユーザーインターフェースの設計と開発
6. システムインテグレーション

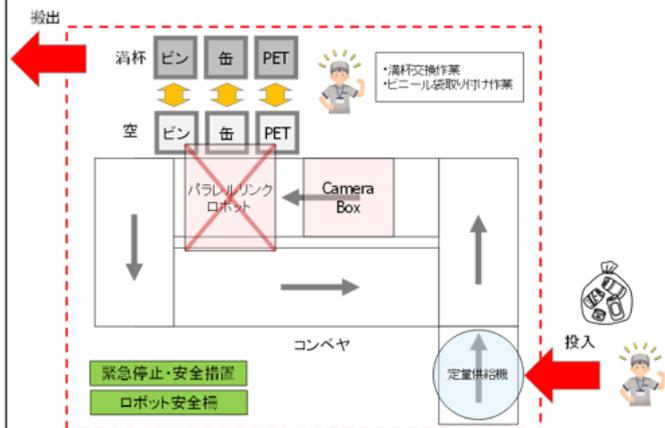


図 3-20 コンパクト型飲料容器自動選別ユニットの設計と開発イメージ

### 3-2 自律走行型ロボットの開発

これまで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・システム化を行ってきた。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、センサー機能・圧縮機能を搭載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（以下「自律走行型ロボット」という。）を要素技術と位置付け、これらの要素技術を様々なフィールド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ってきた。その結果、ごみの収集・運搬に加えて荷物の運搬など様々な機能を有した自律走行型ロボットにより、費用対効果の高い非接触化、自動化ニーズへ対応できることが実証されるとともに、ショッピングモールやテーマパークなどの公道走行を伴わない特定空間におけるビジネス利用が初期マーケットとして有望なことがわかった。

一方で、将来の課題としては、宅配等のラストワンマイルの物流等の連携、複数台による自律走行型ロボットの制御、公道走行への対応などが課題として示された。本件では、複数台の自律走行型ロボットを制御するフリートコントロールシステムの一部機能の開発とその評価、ならびに社会実装に向けた検討を行う。

#### 3-2-1 複数台制御に向けた開発

##### (1) 自律走行型ロボットについて

本事業で利用するロボットは、LiDAR および 3D カメラにより自律走行が可能である。後部には牽引機構を搭載しており、ごみ箱などの回収場所でごみ箱の設置場所を特定する反射材の位置を自動で読み取り、自動で回収対象物に対して合体・挿入動作を行うことができる。

表 3-14 自律走行型ロボットの仕様

項目	仕様
サイズ	高さ810×幅650×長さ1200mm
重量	147.2kg
走行速度	ロー:0.1m/sec、ノーマル:0.5m/sec、ハイ:0.7m/sec
防水性能	IPx3 相当
牽引能力	約350N（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）
牽引軸可動角度範囲	±100deg
電池容量	597kWh(24V)×2
自動走行機能	・LiDARおよびGNSSによる自己位置認識 ・3Dカメラによる障害物回避
ソフトウェア	事前にソフトウェア上で走行・作業内容の自動設定が可能例) 出発・到着地点登録、走行エリア設定、モード設定など
牽引機構	モビリティと牽引物間の自動把持、解除が可能



図 3-21 自律走行型ロボットの概観

また、本ロボットは、自律走行に必要な地図作成、ロボット制御、システム管理機能を備えたシステムを搭載している。地図作成では、人による手動走行での LiDAR からの情報をもとに 3 次元地図を作成する。その後、取得した地図を 2 次元に置き換え、走行エリアや地点登録、走行ルールを設定する機能を有している。ロボット制御機能として、走行シナリオの作成・実行機能のほかに、自律走行中のロボットの位置情報、ステータスを表示することができる。



機能	内容
地図作成機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地図作成機能</li> <li>・地図保存機能</li> <li>・手動操作機能</li> </ul>
地図編集機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>・エリア追加削除編集機能</li> <li>・エリア登録形状選択機能</li> <li>・エリア種別設定機能</li> <li>・地点編集機能</li> <li>・状態確認</li> <li>・編集した地図の保存、削除機能</li> </ul>
ロボット制御設定機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モビリティの位置確認</li> <li>・登録地点移動機能</li> <li>・シナリオの選択、実行機能</li> <li>・手動操作機能</li> </ul>
管理機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>・遠隔操作（LTE通信によるVPN接続）</li> <li>・パスワード変更</li> <li>・地図データのダウンロード、アップロード</li> </ul>

図 3-22 自律走行システム画面と機能

自律走行システムはロボットの内部のローカルサーバーにインストールされており、遠隔通信により手元の PC から遠隔接続して利用する。通信は、LTE 接続に加えて、特定の狭い空間では WiFi 接続（通信距離数百メートル程度）での接続も可能である。また、ロボットが自己位置を把握するにあたり、地図情報、ロボットに搭載したセンサー情報をもとに自己位置推定を行っているが、遠隔通信による GNSS（GPS）信号による補正を行っている。

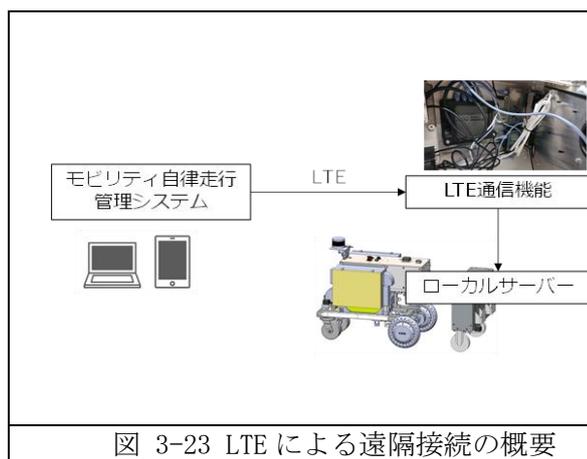


図 3-23 LTE による遠隔接続の概要

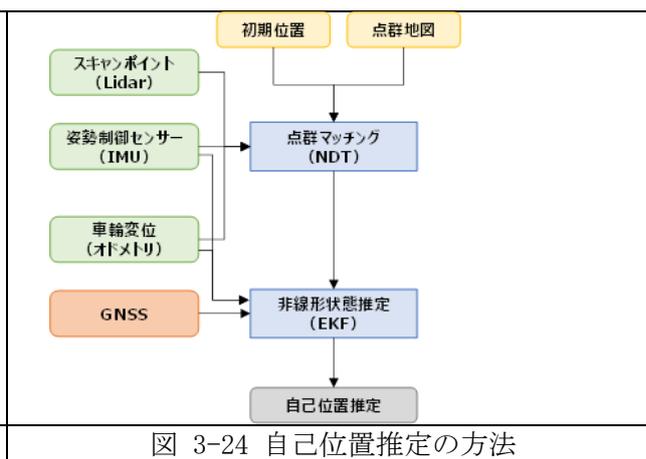


図 3-24 自己位置推定の方法

### 3-2-2 LiDAR の汎用性検討

開発した自律走行型ロボットは、Velodyne 社製の LiDAR を搭載しており、これを用いて高精度な地図作成および自律走行を実現している。LiDAR から取得したデータをもとに、周囲の環境をリアルタイムで認識し、安全かつ効率的な走行を行うことが可能である。しかし、現状のシステムは特定の LiDAR お

よびロボットに依存しているため、異なる LiDAR やロボットを導入するには大幅なシステム改修が必要となる。このようなアプローチは費用対効果の観点からも非効率であり、また規格の統一性も損なわれる。したがって、将来的な技術発展を見据えた統一的な自律走行システムの構築が求められる。また、技術の進展に伴い、今後はさまざまなメーカーから多様な LiDAR が提供されることが予想される。自律走行型ロボット自体も、現在の構造から大きく変化する可能性がある。異なるロボットを複数台同時に制御するニーズも増加すると考えられる。このような状況に対応するためには、LiDAR やロボットの種類に依存しない統一的なシステムの構築が必要である。

本項では、複数の LiDAR およびロボットの構造変化に対して、開発した自律走行システムがどの程度対応可能かを検証する。具体的には、異なる LiDAR からのデータをもとに現在の自律走行システムの機能が問題なく実行できるか、1 つのロボットで作成した地図情報をもとに他の LiDAR を搭載したロボットで自律走行が可能か、LiDAR の設置場所を変えても同じシステムで走行が可能かを検証する。

### (1) 検証内容と方法

現行品とは異なる 3 種類の LiDAR を用意した。LiDAR は、表 3-15 に示す既存よりもチャンネル数の多い高精度のもの、既存同等性能、測定方式が異なるものを選定している。測定方式の違いは、velodyne 社製、Ouster 社製、Hesai 社製の LiDAR は、メカニカル LiDAR で垂直チャンネルベースの繰り返しパターンで空間の走査を行うのに対して、Livox はソリッドステート式による非繰り返しパターンで空間の走査を行うものである。また、ロボットの構造的な変更を想定し、LiDAR の取付位置を現行の 775mm に加えて、1000mm の 2 パターンで検証する。

表 3-15 検証を行う対象 LiDAR

	Velodyne (アメリカ)	OUSTER (アメリカ)	HESAI (中国)	Livox (中国)
イメージ写真				
サイズ	Φ103×71.7mm	Φ90×60mm	Φ103×76mm	65×65×60mm
重さ	830g	495g	800g	265g
チャンネル数	16チャンネル	32チャンネル ※16チャンネルはラインナップなし	16チャンネル	4チャンネル
測定距離	0.05 ~ 100m	90m	0.05 ~ 120m (80m@10% ref)	40m
垂直方向の視野角	30° (-15° to +15°)	±22.5deg	30° (-15° to +15°)	-7~52deg (下方向はあまり見えない)
測定誤差	±3cm	±0.5cm	±2cm	±2cm
概算金額 ※為替レートにより変動	約100万円～ ※販売停止予定	約120万円～	約40万円～	約10万円～
参考URL	<a href="https://velodynelidar.com/products/puck/">https://velodynelidar.com/products/puck/</a>	<a href="https://ouster.com/products/hardware/os1-lidar-sensor">https://ouster.com/products/hardware/os1-lidar-sensor</a>	<a href="https://www.hesai.com/XT32-Mid-Range-Mechanical-Lidar-HESAI-Technology">XT32   Mid-Range Mechanical Lidar   HESAI Technology</a>	<a href="https://www.livoxtech.com/jp/mid-360">https://www.livoxtech.com/jp/mid-360</a>

#### < 検証項目 >

##### ① 地図作成機能

現行機で使用している地図作成アルゴリズムを使用して調査ルートを走行し、問題なく地図作成が完了するかどうかを評価する。通常位置と高い位置でのセンサーデータを各 3 回ずつ取得し、そのデータを用いて地図作成を行い、測定データのずれ、真値との差異を検証する。

## ②自己位置推定

現行機で使用している自己位置推定アルゴリズムを使用して、調査ルートを走行し、自己位置推定が破綻せずに動作するかを評価する。評価指標は、参照点と測定点のマッチングの差を表すマッチングエラーで評価を行う。マッチングに用いる地図は現行機のLiDAR (Velodyne) で作成した地図を使用する。また、LiDARの高さを通常位置 (755mm) と高い位置 (1000mm) の高さの2つのパターンで検証する。

## ③障害物判定

現行機で使用している障害物判定アルゴリズムを使用して、調査ルートを走行し、障害物判定 (地面・非地面判定) が問題なく動作するかを評価する。

## ④合体挿入操作

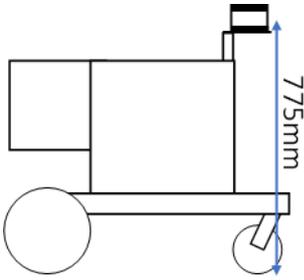
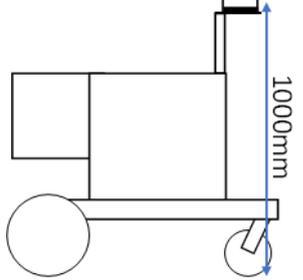
検証機を動作させずに、合体挿入に必要なごみ箱ステーションの反射材の位置を特定するアルゴリズムにより問題なく認識するか検証する。検証機を約 2.5m ごみ箱ステーションから離し、5分間動作させずに取得した点群データを用いて評価する。室内で平坦な道に設置して実験を行う。評価指標は、認識距離の制度とその標準偏差、候補点の検出数 (正解は1つ) を評価する。

本検証は、早稲田大学本庄キャンパスの外周を周回し LiDAR データを収集する。検証には、LiDAR 以外は現行機と同じ仕様のシステムを搭載し、LiDAR の高さ違いをセットできるロボットを用いる。LiDAR 高さは現行機と同じ 775mm と、1000mm の2パターンとする。ただし、Livox を使用する場合は、地面点群の確保のため、上下を逆さに設置することから、Livox は設置の都合上、死角が生じる。



図 3-25 検証を行う走行ルート

表 3-16 検証機：LiDAR の高さ違いの様子

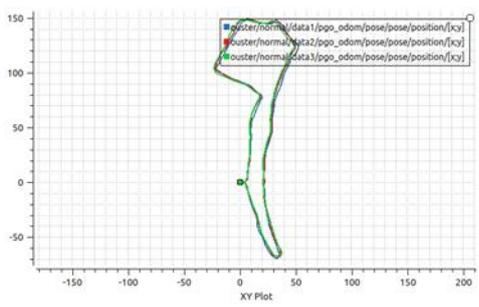
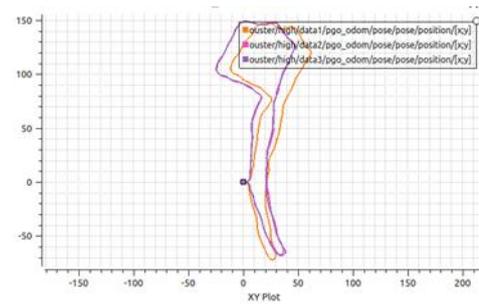
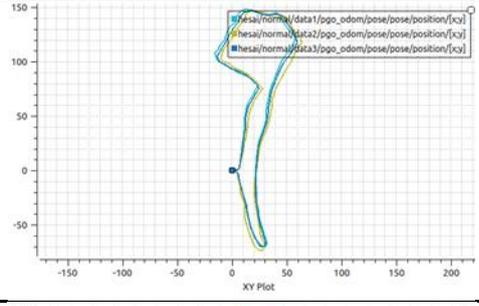
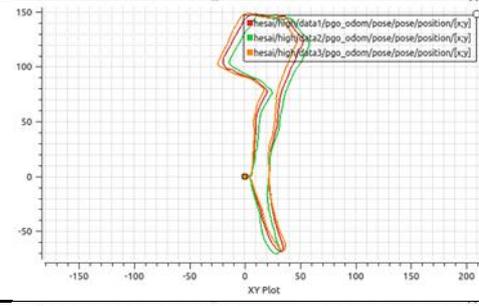
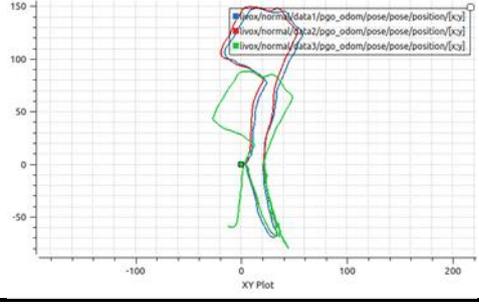
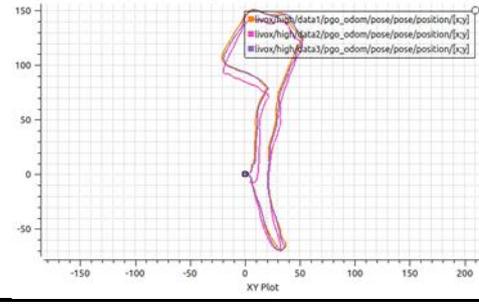
高さ	LiDAR 高さ：775mm	LiDAR 高さ：1000mm
イメージ		
Livox 以外の設置の様子		
高さ	LiDAR 高さ：775mm	LiDAR 高さ：1000mm
Livox 設置の様子		

(2) 検証結果について

① 地図作成機能の検証結果

各 LiDAR での地図作成を実行した結果、Ouster と Hesai の LiDAR は、LiDAR 高さ違いであっても問題なく地図を作成することができた。ただし、LiDAR の高さが高いほど、XY 平面でのずれが大きくなっていることがわかる。これは、LiDAR の位置が高いことで走行時の振動などにより姿勢、ならびにノイズが増加傾向になることから作成される軌跡が測定 3 回それぞれでずれが大きくなると考えられる。Livox については、LiDAR の高さ違いの影響は同様であったが、どの高さにおいても地図作成ができないケースが 1 回ずつ発生した。1 つは、通常高さのときに大きく地図がずれってしまう事態が起こっている。これは、走行時に退化しやすい環境（左：植生・右：地面）を移動している時、つまり特徴点がないような場合に、スキャンデータとサブマップ間の mismatching が発生して大きく軌道がずれていると考えられる。これは、Livox の検出距離（Ouster：90m・Livox：40m）や FOV（視野角）などが影響していると考えられる。もう 1 つは、LiDAR の高さが高い時には、スタート地点とゴール地点のループが閉じない事象が発生した。これらも、上記と同様の理由と考えられる。

表 3-17 各 LiDAR の地図作成結果 (XY 平面、3 回測定)

水準	LiDAR 高さ : 775mm	LiDAR 高さ : 1000mm
Ouster		
Hesai		
Livox		

次に、各 LiDAR の真値との比較検証を行った。XY 平面の結果では、どの LiDAR も概ね走行ルートに近い走行を行っているが、Ouster 社の走行ルートが最も精度が高いことが確認できる。Z 平面の真値との比較においても同様に Ouster 社が最も精度が高いことが確認できた。これは、Ouster 社の LiDAR は検出距離が長いこと、チャンネル数が多いためであると考えられる。このように、3つのLiDARの地図作成機能については、Ouster社が最も精度が高く、次いでHesai、Livoxについては退化が起こりうる環境では場合によって失敗することがわかった。



図 3-26 各 LiDAR の XY 位置 (青 : Ouster ・ 赤 : Hesai ・ 緑 : Livox)



図 3-27 各 LiDAR の Z 位置の真値と測定結果 (青 : Ouster ・ 赤 : Hesai ・ 緑 : Livox)

## ②自己位置推定の検証結果

現行機の Velodyne 社の LiDAR を用いて作成した地図をもとに、高さ違いの 3つの検証機の LiDAR により自己位置推定結果を検証した。その結果、いずれの高さ違いの LiDAR を用いても破

綻することなく自己位置推定が確認できた。マッチング率は、Livox が最も低い結果となったが、大きな影響はないレベルと考えられる。

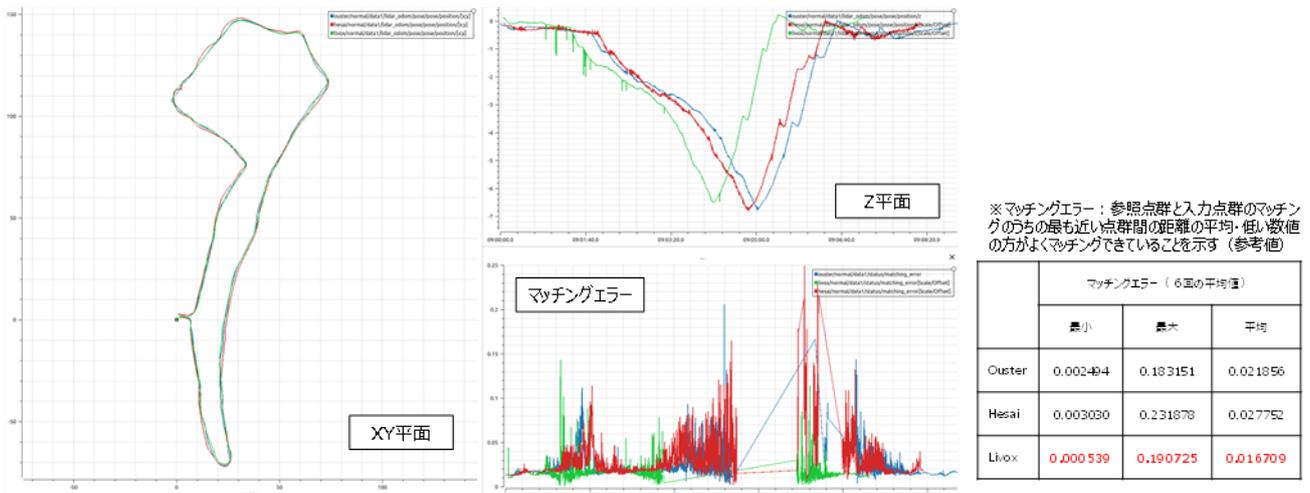


図 3-28 各 LiDAR での自己位置推定結果（青：Ouster、赤：Hesai、緑：Livox）

### ③障害物判定の検証結果

現行機の障害物判定アルゴリズムを用いて、走行できない障害物なのか、走行可能な地面なのかを判定できるか検証した。その結果、Ouster と Hesai は、現行機と同様の点群のデータが入力されるため正しく障害物判定（地面・非地面判定）できることが確認できた。一方で、Livox は図 3-29 に示すように道路を障害物と誤検知が多く発生することが確認できた。パラメータの追い込みで改善する見込みはあると考えられるが、現行機と同様の精度で動作させるためにはプログラムの改良等を行う必要がある可能性があることがわかった。LiDAR の高さによって大きな性能の違いはみられなかった。

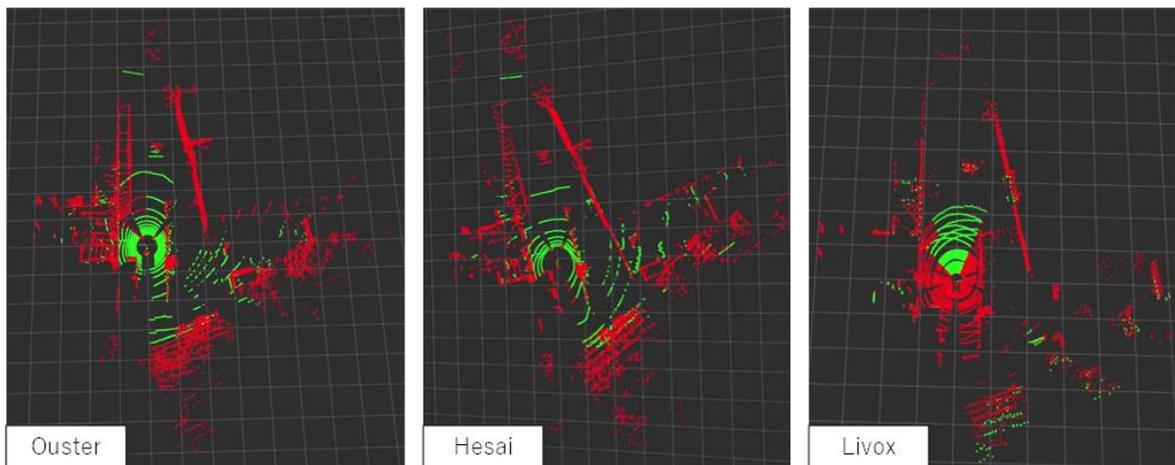


図 3-29 各 LiDAR の障害物判定結果

### ④合体挿入動作の検証結果

本ロボットは、ステーションに張り付けた反射材までの距離や中央点を識別するアルゴリズムにより、牽引のための合体挿入動作を行う。本検証では、アルゴリズムによる制御に必要な反射材までの距離（真値 2.5m）、また反射材に対して中央点の抽出結果（真値 1 個）を算定した。

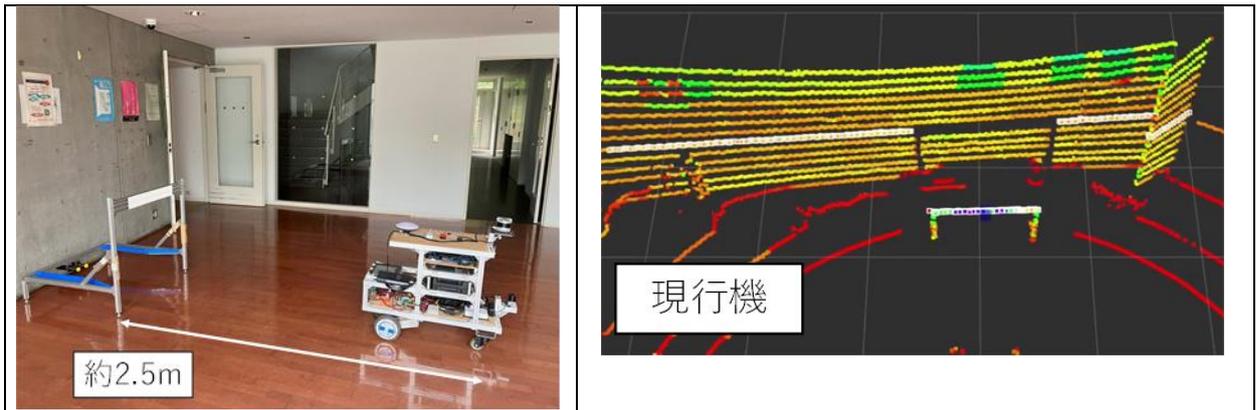


図 3-30 合体挿入の検証イメージ

各 LiDAR により測定した結果、Ouster は反射材テープを検出させると距離が短く計測される、Hesai は現行機と同等の性能、Livox は測定データ (ring) の出力構造が異なるためデータ (ring) の抽出がうまく動作していないことが確認された。また、Ouster と Livox は、candidate 率 (候補点が 2 個以上検出された率・今回の場合はごみ箱ステーションが 1 つのため低い値が好ましい) が大きくなっているため、点群抽出のアルゴリズムの改修が必要になることが予想される。

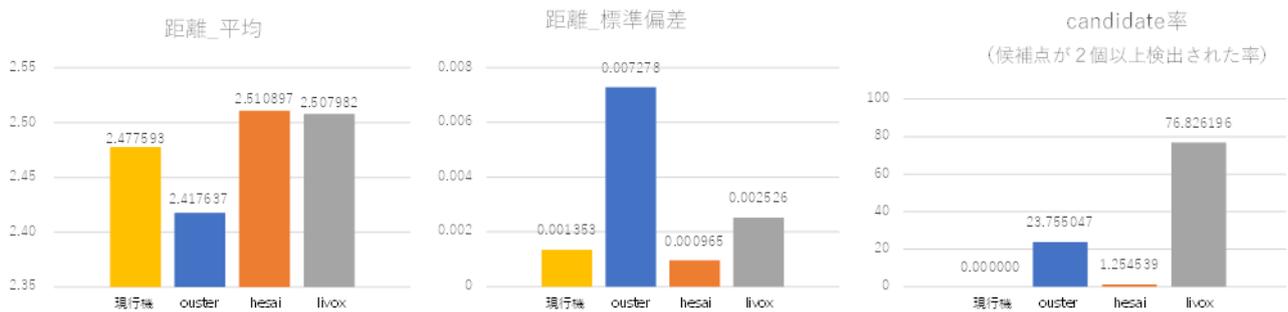


図 3-31 各 LiDAR の反射材までの距離測定結果と候補点検出数結果

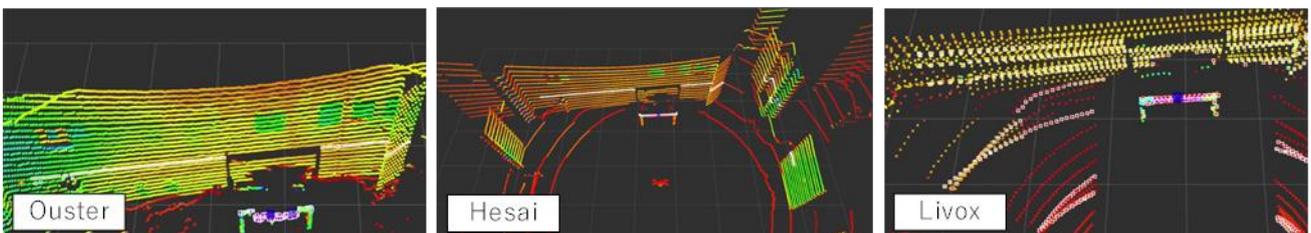


図 3-32 各 LiDAR による反射材識別の様子

以上の測定結果より、ouster 社は、チャンネル数が多いため地図作成で最も精度が良い結果を得られたが、合体挿入に関しては点群処理の改良が必要である。Hesai 社は、現行機とよく似た性能であるため、どの項目でも問題なく使用できる結果であった。Livox 社は、出力点群が他の LiDAR と異なるため障害物判定や合体挿入ではうまく動作しないという結果が得られ、障害物判定はプログラムの変更改良、合体挿入に対しては点群処理の改良が必要であることがわかった。ま

た、全体を通して LiDAR の高さについては、高いほど走行時などの振動などにより地図作成においては誤差の影響を受けやすいことがわかったが、それ以外の検証においては大きな影響はなかった。対策として、取付位置を高くしても振動などの影響が受けにくいような構造にすることで影響を小さくすることができると考えられる。

このように、将来的に様々なロボットを統一的に制御するシステムを目指すにあたり、LiDAR を変えることの影響や構造の変化に対する影響を把握することができた。センサーの精度によっては、障害物判定や合体挿入のアルゴリズムの微調整が必要であるが、基本的には 1 つの地図で複数のロボットを走行させることができることが確認できた。

表 3-18 比較表

	OUSTER	HESAI	Livox
概算金額	約 120 万円～	約 40 万円～	約 10 万円～
地図作成	○	○	△
	3 つの中で最も精度が良い		退化が起こりうる環境では場合によっては失敗する
自己位置推定	○	○	○
	どの LiDAR を使用しても大きな性能差は発生しないと考えられる		
障害物判定	○	○	×
			プログラムの変更・別アルゴリズムの開発が必要
合体挿入	×	○	×
	点群処理の改良が必要		点群処理の改良が必要

### 3-2-3 フリートコントロールシステムの開発

これまで 1 台の自律走行型ロボットの開発により、ロボット単体でのごみ収集自動化の実証、ならびに動脈連携の可能性を示すことができています。一方で、より具体的な初期マーケットの創出に向けて、動静脈連携タスクや複数交通ルールなどを加味した複数台のロボット制御、つまりフリートコントロール、ならびに周辺の他システムとの連携を含めてマルチベネフィット機能の充実、およびシステムのプラットフォーム化など様々な技術開発が必要になる。

本事業では、特に複数台のモビリティを制御するための基本的なシミュレーションシステムを開発・検証し、社会実装に向けた課題を抽出する。具体的には、単純な移動のみを行うことを想定したロボット管理、タスク管理、シミュレーターの開発を行う。

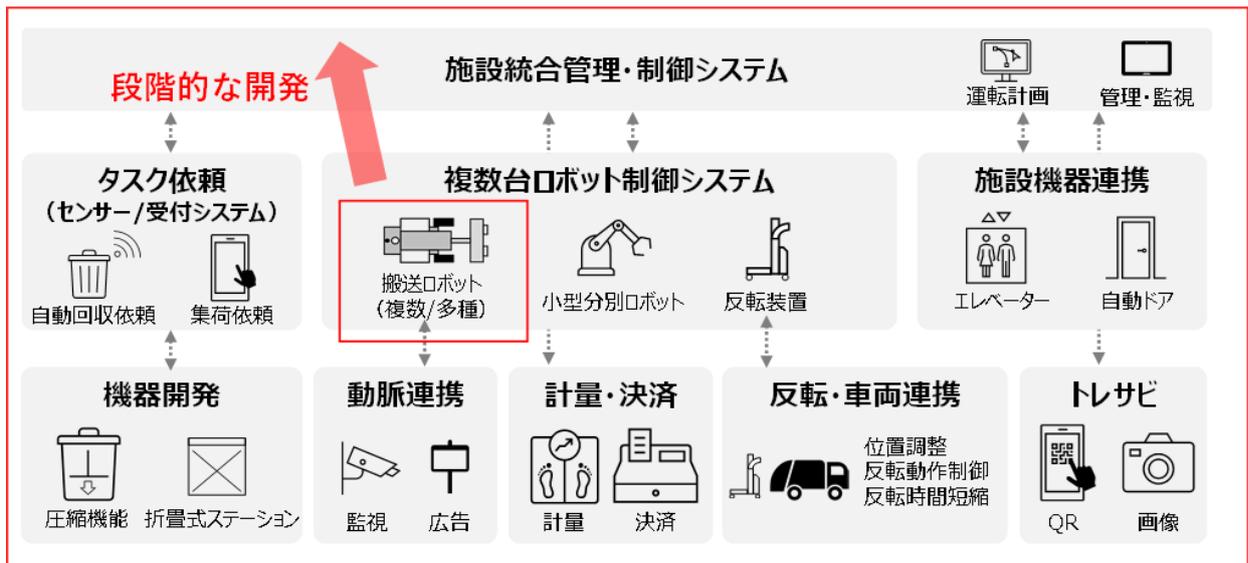


図 3-33 排出現場で活躍する選別支援システム・ロボットの将来像

(1) 開発範囲

フリートコントローラのシステムは、クラウド（AWS）内で下図の機能を実装し、シミュレーションや実際のロボットへの指示を行う。ユーザーは WEB ブラウザでクラウドにアクセスしてフリートコントローラを利用する。本システムは、①ユーザーが web ブラウザからシステムを操作するためにフロントエンド、②システムに入力された情報をもとにクラウド上で仮想的に制御を行うシミュレーターを含むバックエンド、③シミュレーターの結果とロボットの状態情報をもとに実ロボットを制御するロボット管理・指令の 3 つから構成される。本開発では、①フロントエンド、②バックエンドをクラウド環境に実装する。

(2) 開発機能

① ロボットの登録、編集機能

シミュレーションを行うロボットの登録、編集する機能を実装した。

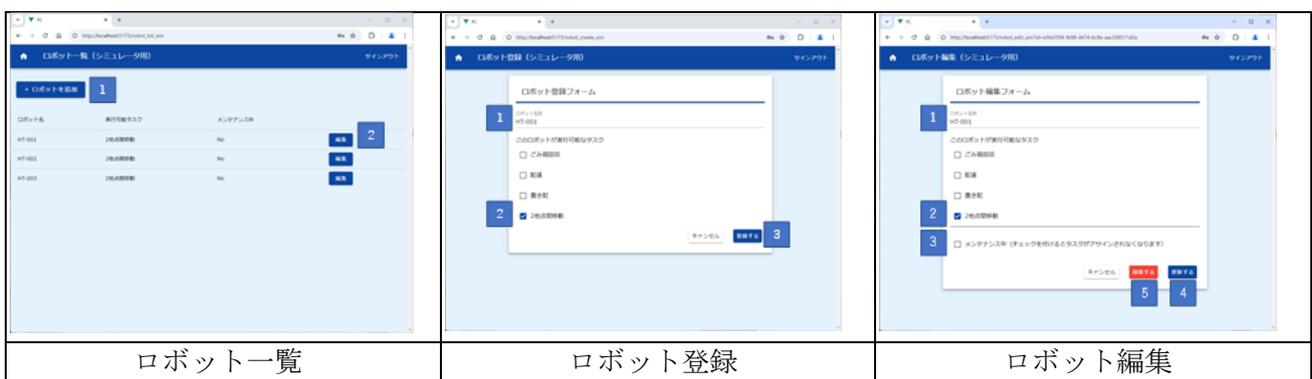


図 3-34 ロボットの画面

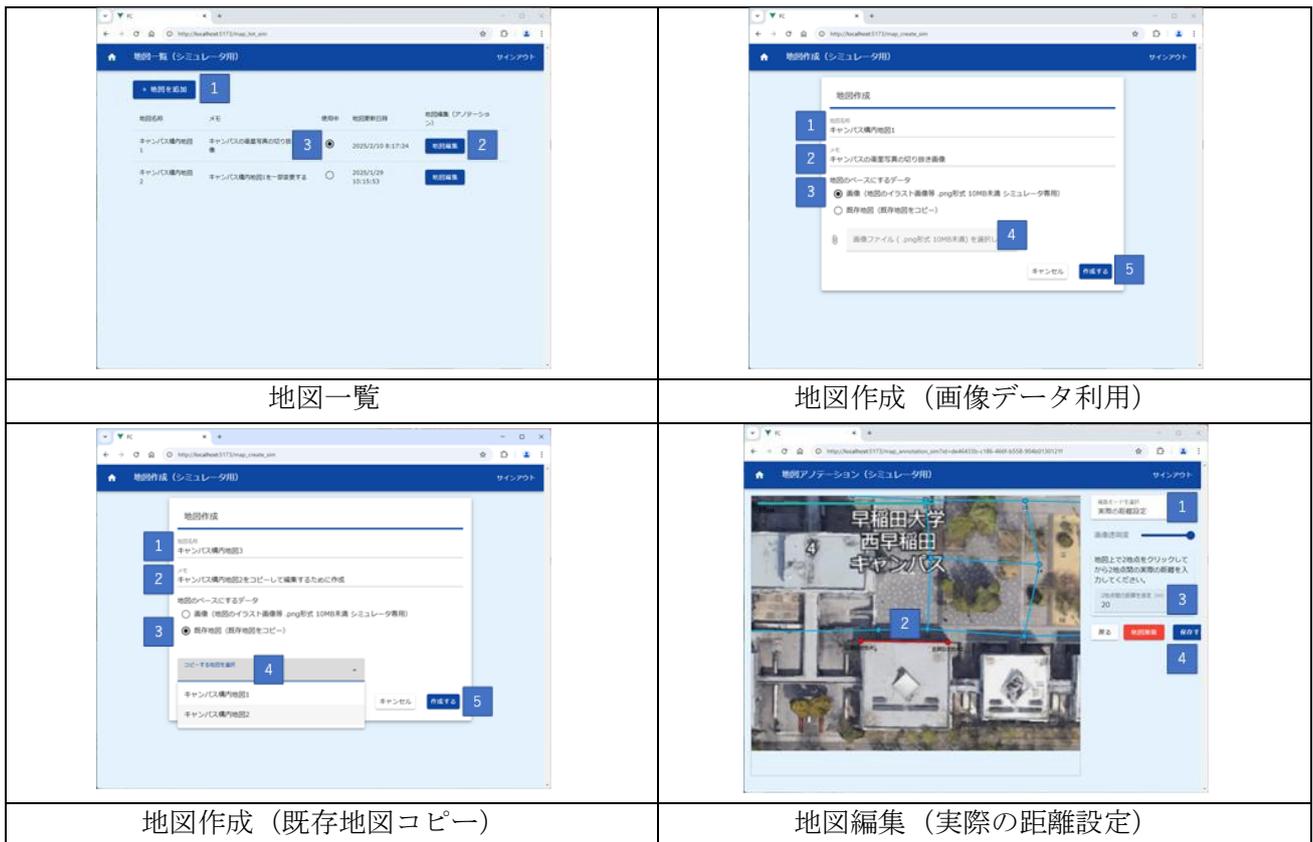
② 地図アノテーションについて

ロボットを地図上でシミュレーション、または実空間で走行させるには、地図データにおいて通過点や走行ルートなどを設定し、それらに対して可能な作業内容、走行可能なロボット、速度制限、

一方通行、優先順位など走行に必要な情報を追加する必要がある。これをアノテーションと呼び、地図データに点として情報を付加するノード、線として情報を付加するエッジを登録・編集する機能を実装した。

●地図の登録、編集

シミュレーションを行う地図データとして、画像データなどを取り込む機能を有する。実走行時には、LiDARにより3次元的に取得したデータをもとに加工編集性作成した2次元地図を用いる。地図データは、透明度の変更が可能。



地図一覧

地図作成（画像データ利用）

地図作成（既存地図コピー）

地図編集（実際の距離設定）

図 3-35 ロボットの画面

●ノード、エッジの追加、編集

走行ルートにおける通過点、またロボットの作業場所に設置する点（ノード）を設定する。本開発では、移動点、単純走行のみのアノテーションが可能であるが、将来的にはノードは、ごみ箱の設置場所、資材の回収拠点、交差点、ロボット同士のすれ違い拠点などとして設定できるようにし、エッジは、一方通行、歩道、制限速度付き、通行止めなどの走行に必要な情報を設定できるようにする。これらのアノテーション情報をもとにロボットが走行する。



図 3-36 ロボットの画面

### ③複数台制御アルゴリズム

本事業で開発を想定する制御アルゴリズムのユースケースは以下とし、これによりロボット同士がコンフリクトを発生させないルートによるシミュレーションが可能となる。

#### ●ロボット選択（タスクアサイン）方法

1. アサイン可能なロボット（条件：メンテナンス中ではない・2 地点間移動タスクを実行可能・現在タスクがアサインされていない）をリストアップする。
2. 1. でリストアップしたロボットについて現在位置がタスクのスタート地点と同じロボットが存在するか確認する。存在する場合はそのロボットにタスクをアサインする（アサイン完了）。存在しない場合は(3)に進む。
3. 1. でリストアップした各ロボットについてタスクのスタート地点までの最短経路を求める。
4. 3. で求めた各ロボットの最短経路についてタスク実行中のロボットの移動予定経路とコンフリクトするか確認する。コンフリクトする場合はコンフリクトする部分（エッジ）を使用しない場合の最短経路を求める。
5. 3. 4. で求めた各ロボットの経路（コンフリクトしない経路）の中で最も短い経路を持つロボットにタスクをアサインする（アサイン完了・タスクのスタート地点まで移動開始）。コンフリクトしない経路が存在しない場合は一定時間間隔（約3秒間隔）で手順(1)から繰り返す。

#### ●タスクのスタート地点からゴール地点までの経路決定方法

1. ロボットがタスクのスタート地点に到着後（あるいはスタート地点に元々いる場合もある）、タスクのゴール地点までの最短経路を求める。求めた最短経路がタスク実行中のロボットの移動予定経路とコンフリクトしない場合はその最短経路に決定する（タスクのゴール地点に向かって移動開始）。コンフリクトする場合は(2)に進む。
2. (1)で求めた最短経路でコンフリクトする部分（エッジ）を使用しない場合の最短経路を求める。経路が存在した場合はその経路に決定する（タスクのゴール地点に向かって移動開始）。コンフリクトしない経路が存在しない場合は一定時間間隔（約3秒間隔）で手順(1)から繰り返す。

### ④タスク発行機能によるシミュレーション機能

稼働ロボット、地図のアノテーションが完了後、タスクを発行しロボットがタスクを処理するシミュレーションが可能となる。本事業では、2 地点間移動のみのタスクをこなすことができる。スタート地点、ゴール地点を設定したタスクを発行すると、制御アルゴリズムによりロボットが割り当てられ、ノード、エッジなどの地図アノテーション情報に従ってシミュレーションが開始される。画面上では、ロボットの走行ルートや、現在地点が表示される。タスクは、複数個発行することができ、発

行順に従ってロボットが動作する。具体的な動作イメージは以下のとおり。

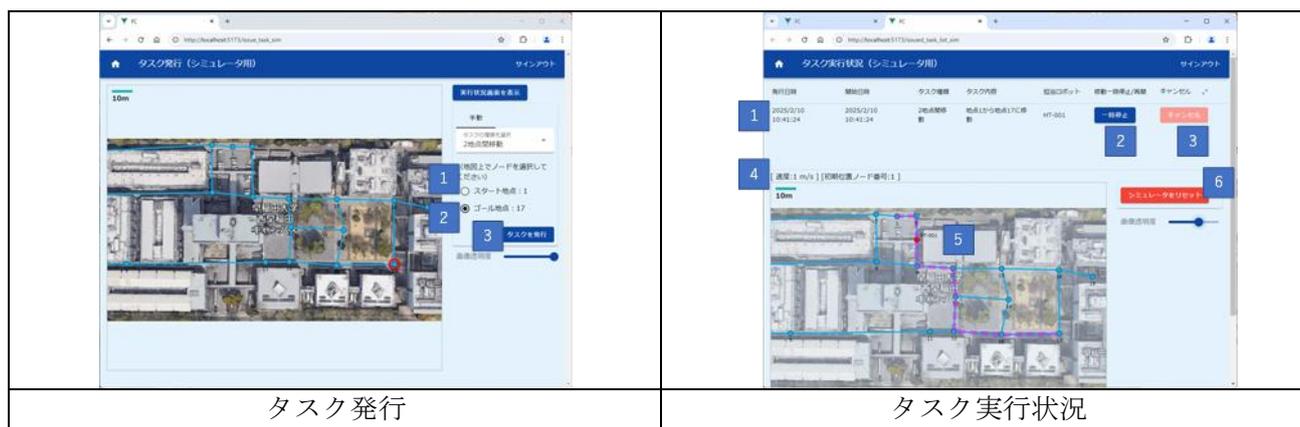


図 3-37 ロボットの画面

### 3-2-4 自律走行型ロボットの走行実証

ここからは、自律走行型ロボットを用いた検証内容をまとめる。自律走行型ロボットを屋内外それぞれで走行可能か検証するために、早稲田大学のキャンパスにて検証を行った。また、その走行検証に加え運搬と同時に計量が可能か検証した。それぞれの検証についてまとめていく。

#### (1) 屋内での走行実証

まず、自律走行型ロボットが屋内で走行可能か、またロボットが自律走行可能な廊下の幅やロボットが旋回する際に必要な広さなど、自律走行型ロボットを導入した際に必要となる寸法の調査を行った。早稲田大学本庄キャンパスの94号館1階の地図データを作成し、以下の図 3-38 の二点間で自律走行を行った。その結果、通路の幅が 1.4m より狭い箇所に差し掛かったときに自律走行ができなかった。これは、自律走行型ロボットが突然 90° 向きを変えた際に、壁などにぶつからないようにするためのアルゴリズムが組まれているからである。また、ガラスのような透明な素材は認識しないため、自律走行型ロボットが透明な素材に向かって直進した。これは地図データを作成するために使用している LiDAR からのレーザー光が透過するためである。一方で、カーペットやフローリングのような屋内にある床の素材の多くで走行できた。従って、通路の幅が広く、ガラスなどで囲われた部屋が無い屋内環境においては自律走行型ロボットによって自律走行によって運搬可能であることがわかった。また、そうでない箇所においてプログラムによる走行を活用することで運搬できる可能性がある。

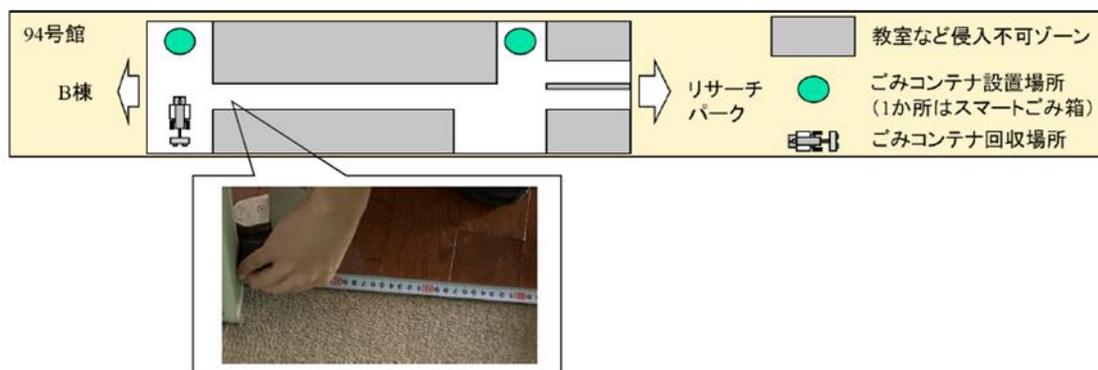


図 3-38 本庄キャンパスで自律走行型ロボットを走行した場所と進行不可部

次に、走行と計量を同時に行う検証を行った。商業施設では従業員がごみ集積所までごみを運搬した後、計量する作業をしていたため、自動で運搬するロボットに計量機能も搭載する利点があると考えたため、自律走行型ロボットに計量機能を付けることで、非接触ごみ収集に加え計量も行うことが可能であると考えた。ここでは、自律走行型ロボットに計量システムを搭載した時、計量システム側に与える影響を調査した。検証方法として、自律走行型ロボットが牽引するごみ箱の中に重量を計測できるスマートマットを入れた。図 3-39 にスマートマットの搭載の様子を示す。ごみを新たに入れた際の重量に変化があり、かつ走行中は重量の変化がないことを検証した。ごみを投入する前後のスマートマットの重量の変化を以下の図 3-40 に記載する。

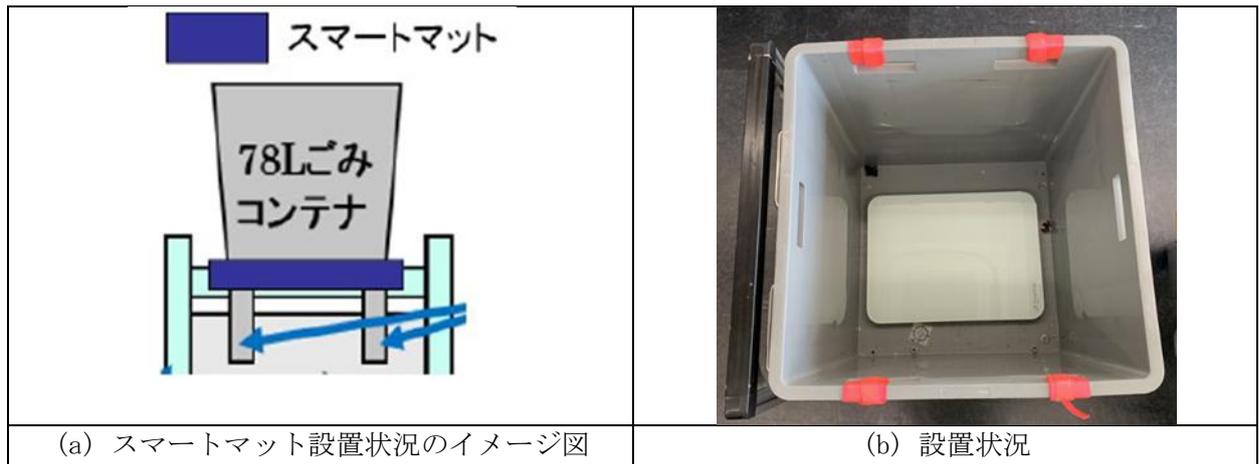


図 3-39 実験装置の設置状況

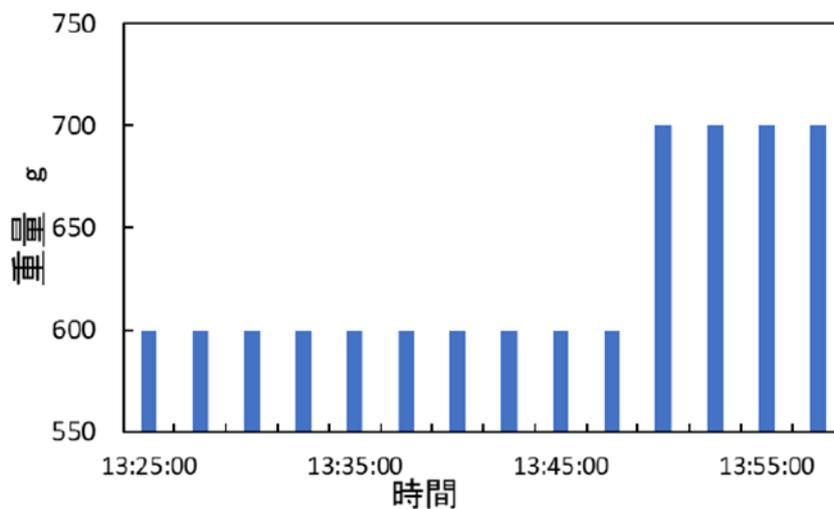


図 3-40 時間経過と重量の測定データ

この結果より、走行によって重量が変化することなく、またごみコンテナ内でも正しく計量できたことがわかった。従って、自律走行型ロボットに計量機能を積載できることがわかった。しかしながら、ごみコンテナ内にスマートマットを搭載したため、反転装置などでごみを取り除く際に計量器も同時に取り除かれてしまう。ごみコンテナの下部分に計量機能を取り付けた場合、現在ある

自律走行型ロボットとごみコンテナを接続するためのステーション上部にひっかかってしまうため、ハード面で改良が必要であると考える。

## (2) 屋外での走行実証

自律走行型ロボットを屋内で活用できる環境は限られていることがわかった。そこで、屋外で活用を進めるために、検証を行った。ここでは、早稲田大学西早稲田キャンパスの中庭で検証を行った。

まず屋内での検証同様、自律走行型ロボットの走行可能な幅など、自律走行型ロボットを導入した際に必要となる条件の調査を行った。早稲田大学西早稲田キャンパスの中庭の地図データを作成し、55号館前から57号館前まで自律走行を行い、自律走行型ロボットが停止する場所や障害物として認識しない場所をパソコンの画面から確認した。その結果、高さが40cmを下回る障害物は認識せず、直進しようとした。この条件を満たす障害物は西早稲田キャンパスにあるベンチや芝に人が侵入しないようにする囲いが当てはまる。また、高さ約2mのところにある木についている葉っぱを障害物として認識した。そのため、その葉っぱの下の部分にはよけるような走行をした。従って、屋外での走行時には40cmより低い障害物がある場合は、事前に自律走行しないように設定をする。また、2m近辺の高さのある障害物は自律走行型ロボットが認識しないよう取り除くか、その障害物付近を通らなくても済むようなルートや障害物を事前に取り除くことを検討する必要があると考える。



図 3-41 西早稲田キャンパスでの走行ルート

次に、夜間での自律走行型ロボットの走行を行った。これは、ごみを自動で回収するニーズは夜間に多い。そこで、自律走行型ロボットを夜間のような日光の無い時間帯に走行できるか検証した。走行可能な場合、走行に影響を与える要因を調査した。ここでは、先ほどと同様のルートで自律走行を行った。その結果、日中の自律走行と大きな違いはなく、自律走行することができた。しかしながら、図 3-42 のような看板を障害物として認識しなかった。これは日中走行したときも、ロボットは看板付近でよけ始め、夜間に人が確認しようとしても十分近づかなければ認識することが難しかった。従って、自律走行型ロボットを新しい場所で走行される場合、日中に自律走行型ロボットと共に地図データ作成を行い、障害物を概ね確認する必要がある。



図 3-42 夜間走行時に障害物として認識しなかった様子

これらの検証結果を基に、自律走行型ロボットの活用方法を検討する。

### 3-2-5 今後の実用化に向けた課題

本事業では、2地点間移動のタスクを複数台のロボットで処理するフリートコントロールシステムを開発した。本開発により、基本的なユーザーインターフェースの構築、また実証による今後の課題点を抽出した。また、将来的にはごみの運搬に加えてユーザーの荷物などを運搬する機能や置き配のような使い方が想定される。そこで、将来の使い方（ユースケース）、および実証から想定される交通ルールへの対応事項を抽出した。

#### a. 想定するユースケースと課題点の抽出

##### 1) 想定するユースケース

###### ①ごみ箱改回収・設置のタスク処理

1. 人間が UI (Web ブラウザ) でごみ箱 1 を空にするタスク (反転装置がある場所も指定する) を発行する。
2. ロボットが待機場所からごみ箱ステーションまで移動してごみ箱 1 にドッキングする。
3. ロボットが反転装置のある場所まで移動する。
4. 人間が UI でロボットに対してごみ箱 1 を反転装置に挿入する指示を出す。
5. ロボットが反転装置にごみ箱 1 を挿入する。
6. 人間が反転装置のボタンを押してごみ箱 1 を反転する (空にする)。
7. 人間が UI でロボットに対してごみ箱 1 にドッキングする指示を出す。
8. ロボットがごみ箱 1 にドッキングする。
9. ロボットが元の場所 (ごみ箱ステーション) に移動してごみ箱を設置する。
10. ロボットが待機場所に戻る。(実行待ちタスクがある場合は待機場所に戻らずに実行する。)

###### ②荷物の置き配

→荷物を送る側

1. 人間 A が配達元地点 (台車ステーション) の台車に荷物を載せる。

2. 人間 A が UI (Web ブラウザ) で配達タスク (配達元地点と配達先地点を指定する) を発行する。
3. ロボットが待機場所から配達元地点に移動する。
4. ロボットが台車にドッキングする。
5. ロボットが配達先地点に移動する。
6. ロボットが配達先地点の台車ステーションに台車を挿入する。
7. ロボットが待機場所に戻る。(実行待ちタスクがある場合は待機場所に戻らずに実行する。)

→荷物を受け取る側

1. 初期状態として配達先地点 (台車ステーション) に荷物が載っている台車 (置き配された台車) がある。
2. 人間 B が台車に乗っている荷物を受け取る (台車を空にする)。
3. 人間 B が空台車回収タスク (移動元と移動先地点を指定する?) を発行する。
4. ロボットが空台車回収地点に向かう
5. ロボットが空台車にドッキングする。
6. ロボットが配達元地点 (台車ステーション) に戻る。
7. ロボットが台車を台車ステーションに挿入する。
8. ロボットが待機場所に戻る。(実行待ちタスクがある場合は待機場所に戻らずに実行する)

### ③荷物の配達

1. 人間 A が UI (Web ブラウザ) で配達タスク (配達元地点と配達先地点を指定する) を発行する。
2. ロボットが待機場所から配達元地点に移動する。
3. 人間 A がロボットに荷物を載せる。(フェーズ3では実際には荷物は載せずに載せたことにする)
4. 人間 A が UI で荷物を載せたことをシステムに伝える。
5. ロボットが配達先地点に移動する。
6. 配達先地点で人間 B が荷物を受け取る。(フェーズ3では実際に荷物は受け取らずに受け取ったことにする)
7. 人間 B が UI で荷物を受け取ったことをシステムに伝える。
8. ロボットが待機場所に戻る。(実行待ちタスクがある場合は待機場所に戻らずに実行する)

## 2) 交通ルールへの対応

公道走行の場合、道交法 (遠隔操作小型車) への対応が必要である。加えて、実証フィールドにおいてロボットの実走行を想定した場合の課題も抽出した。

- 通行場所は歩行者に同じ (歩道、路側帯、道路の右端) →歩道優先対応
- 歩行者相当のルールに従う (信号、道路標識等に従う、横断歩道の通行など)
- 歩行者に進路を譲らなければならない。
- 道幅が狭い箇所での交通ルール→一方通行とするか、すれ違い制御とするか、待機とするか

## b. 今後の開発課題

以上の課題に対して想定するシステム開発内容は以下のとおり。ただし、あくまで想定であることに留意。

### ●タスク発行について

- 想定タスクの拡大：ごみ箱回収（反転と再設置を含む）、配達・置き配
- タスクのスケジュール機能（曜日や時間帯ごとに実行するタスクを変更）
- タスクは発行した順番で実行する（発行日時が古いタスクから実行する）ことを基本とするが、未実行のタスクについては削除や順番入れ替えができる。
- 道路を横断する際等のタスク進行許可（信号など）
- 配達、置き配タスクの荷物積載完了入力（システムに荷物を積載したことを伝えることでロボットが配達先に移動を始める。）
- 配達・置き配タスクの荷物受け取り完了入力（システムに荷物を受け取ったことを伝えることで配達の場合はロボットが戻る。置き配の場合は、受け取り完了通知後、台車回収に向かう。）
- 反転装置によるごみ箱反転完了入力（システムにごみ箱を反転して空になったことを伝えることでロボットがごみ箱再設置のために動き出す。）
- タスクの履歴管理

### ●ノード・エッジのタグ情報

- デフォルトの制限速度（エッジに制限速度タグが付加されていない場合の制限速度を指定する）
- 制限速度の種別設定として、低/中/高 タグの値（速度を指定）、またはタグに値を付加する。
- 交通整理パラメータ（後述の交差点制御の距離設定や経路選択における移動コストの上限値等）
- 歩道走行を車道に優先させる場合は、エッジに歩道であることを示すタグを付けて、移動コスト計算の際に歩道は実際の距離の半分のコストにする等の処理を追加することで歩道が優先的に選択されるなどの対応が必要（コストを下げる度合いは要検討）
- 歩道がない道路では右側通行になるように一方通行タグを付加すべきであるが、一方通行タグを付加できない状況でなるべく右側通行にさせる必要がある場合は、単純に往路の右側のエッジの移動コストを低くすると復路でも同じ経路（左側通行）の経路が選択されてしまうので、同じエッジでも移動方向によって移動コストが変わるようなタグとタグ付け方法。

### ●シミュレーション

- 各種所要時間目安（ごみ箱ドッキング、反転装置による反転、荷物の積載、受け取りに要する時間等）
- シミュレーション時間経過速度の変更（例：実時間の1秒経過を2秒経過とみなして倍速でシミュレートする）
- タスク進行に必要なシステムへの入力の自動化 ON/OFF（タスク実行中の進行許可や荷物受け取り等を自動で行うか否か）

- タスクの自動発行機能
  - －タスクの発行件数
  - －タスクの発行間隔（時間）
  - －タスクの種別指定
  - －各種地点指定（ごみ箱ステーションの場所や反転装置の場所を指定）
  - －障害物があったと仮定して一定時間停止する（時間あたりの発生頻度や停止時間を指定）
  - －上記項目のランダム指定や範囲指定（指定した範囲内の数値や複数の地点からランダムで選択等）
  
- 他システムとの連携
  - ごみ箱センサーとの連携（ごみ箱の状態に従って自動でタスクを実行する。）
  - 反転装置との連動（反転動作との自動連携、反転動作の完了を自動認識し完了入力）
  - バッテリー残量に応じた充電場所への移動と充電（手動充電の場合は充電場所に到着したら担当者に通知）。
  - 荷物配達タスクにおける荷物到着通知（メールや SNS で利用者に伝える等）。
  - 荷物配達タスクにおける荷物受け取り方法（QR コードで荷物入れのロックを解除する等。ロボットに荷物入れのロック機構が必要。置き配時のセキュリティの検討も必要）
  - 荷物配達のためのショッピングサイト等と連携
  
- ユーザーインターフェース
  - 自己位置推定度合いの表示（走れない原因の判断材料）
  - 回線状況の表示
  - GPS の位置情報取得状況（特に屋内）
  - ステータスとして走行中、停止の種類を表示（すれ違いのための待機なのか、充電で止まっているのか、障害物により止まっているのか等の判別）
  - 台車の合体中などの実行作業の表示。
  - 地図の画面とステータスが同時表示（同一画面）
  - 緊急停止ボタン
  - ロボットのデッドロックの表示
  
- 一元管理
  - システムの管理者・運用担当者・エンドユーザー等のユーザー登録、認証、認可の仕組み。ユーザーの種別や運用方法の検討が必要。
  - 道交法に対応した遠隔監視システム
  - 遠隔操作（ロボットのカメラ画像を見ながら遠隔操作）や遠隔通話（ロボットのスピーカーとマイクを介して通話）
  - 地図や地点（ノード）、経路（エッジ）の世代管理機能
  - データバックアップ機能
  - セキュリティ対策
  
- ロボットの改良
  - 目的地に到着後にロボットに音声再生指示
  - 緊急時の遠隔操作、また周辺環境を把握するためのカメラ機能と、それらのデータ送受信システム
  - 信号の判断（自動認識の場合）

## ●交通ルールの設定

実際の走行ルートでは、1台のロボットしか通れないルートの通り方や、交差点での制御などを考慮する必要がある。現時点で想定される、以下3つのパターンのアルゴリズム案を検討した。

### ①迂回制御

<条件>

- ロボットが1台しか通れない通路幅
- ロボット1はAからDに移動したい。最短経路はA→B→C→D
- ロボット2はGからEに移動したい。最短経路はG→C→B→E
- B-C間の経路がコンフリクトしている。
- ロボット1は既に移動を開始している。

<交通整理方法>

- B-C間のエッジを削除したグラフ構造データ（経路データ）から再度ロボット2の最短経路を求める。図3-43ではG→F→Eが見つかる。見つからなかった場合はコンフリクトがなくなるまで待機する。
- ロボット1はG-F-Eの経路で移動を開始する。G-F-Eの経路の移動コストが非常に高い（長時間を要する。コンフリクトがなくなるのを待った方がよい。）場合もあるので移動コストの上限値を設定し、経路が見つかったとしても使用しないようにする等の処理が必要になると考えられる。
- 迂回経路の移動コストの上限値設定は最短経路に対して2倍以上の場合は使用しないようにする等のルールを想定。
  - 最短経路が直線距離に比べて非常に長いケースもあるが、その場合は閾値等は設けずにその経路を使用して移動する。

### ②すれ違い制御

<条件>

- ロボットが1台しか通れない通路幅
- ロボット1とロボット2の移動予定経路はエッジ単位でコンフリクトしている（D-B間）
- ノードAには「すれ違い待機地点」タグが付いている（Aは長時間停車可能）
- ロボット2は既にDからBに向かって移動中
- ロボット1は移動開始前だが交通整理なしで移動を始めるとB-Dの通路でデッドロックが発生する。
- ロボット1は必ずB-Dを通る必要がある（別経路がない）

<交通整理方法>

- ロボット1の移動予定経路でコンフリクトする通路から遡って「すれ違い待機地点」タグが付いているノードを探す（Aが見つかる）。
- ロボット1がフリーコントローラにAでの停車権限を求める。
- 他のロボットに権限が付与されていなければロボット1に権限を与える。他のロボットに付与されている場合は与えない（もしAより前にすれ違い待機地点がある場合は同様に確認する。なければロボット1は移動できないのでコンフリクトがなくなるまで待機する。）
- ロボット1に権限が与えられた場合はAまで移動して停止する。
- ロボット2がBを通過して経路のコンフリクトがなくなったらロボット1が移動を開始する。

### ①交差点制御

<条件>

- ロボットが1台しか通れない通路幅の通路が交差する交差点B
- ロボット1とロボット2の移動予定経路はエッジ単位ではコンフリクトしないので交差点Bに向かって移動をしている。
- Bに同時に進入すると互いに障害物とみなして停止してしまう可能性がある。

- グラフ構造データから B が交差点であることは自動検出可能（エッジが3本以上接続されているノードは交差点）。

<交通整理方法>

- ロボットが B から一定距離以内（例：半径2メートル以内）に到達したら B への進入権限をフリートコントローラに求めるようにする（早く到達したロボットが先に求める。同時に求めたとしてもシステム側で分離可能）
- B への進入権限が他のロボットに付与されていない場合は権限を求めてきたロボットに付与する。既に他のロボットに付与されている場合は与えない（付与待ちになる）。
- 権限を与えられたロボットは B に進み、B から一定距離離れたら権限を破棄する。
- 権限付与待ちのロボットに権限を与える。（T字路、十字路、五差路等の多差路にも適用可能）
- A→B→C と C→B→A といったエッジ単位のコンフリクトは別の制御（優先度の低いタスクのロボットを出発させない等）によって交通整理する。

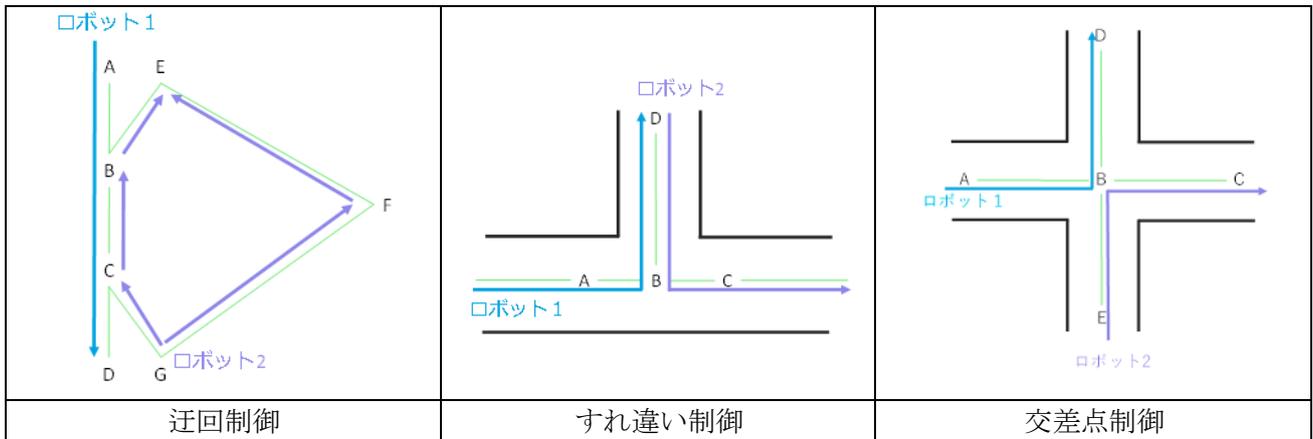


図 3-43 アルゴリズム案

以上の検討内容について、今後の開発ステップを検討した。次のステップとして、実ロボットへの適用を目指すとともに、ごみ箱の運搬と荷物の運搬といった動静脈連携、交通ルールなどを加味した制御アルゴリズムの構築を、その次に、他システムとの連携や遠隔監視を含めたフリートコントロールシステムを構築する。

機能大分類	機能小分類	PoC検証 (FY2024)	複数台制御 (FY2025)	ごみ収集自動化PF (FY2026~)
		複数台モビリティの移動走行シミュレーション結果に対する実走検証	複数台モビリティでのタスク管理、交通整理を踏まえたシミュレーターと実ロボット制御への実装	他ロボット、他システムとの連携を含めた自動ごみ収集に向けたプラットフォーム化
ロボット管理	ロボット登録/編集	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ シミュレーターロボットの登録/編集</li> <li>✓ ロボ可能タスク設定：移動タスクのみ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 実ロボットの登録/編集</li> <li>✓ ロボ可能タスク設定：ごみ回収/配達/置き配など</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ システム管理（ユーザー種別登録、許可）</li> </ul>
	ロボット一覧表示・地図共有	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 画像などによるシミュレーション用地図の適用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 実ロボによるLidar地図を実ロボへ適用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 他モビリティとの連携</li> </ul>
タスク管理	タスク発行	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 手動発行</li> <li>✓ 移動タスクのみ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ シミュレーション用タスク自動発行</li> <li>✓ ごみ回収/配達/置き配など複数種のタスク発行/タスク完了入力</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 充電タスク発行</li> <li>✓ スケジュールタスクの登録</li> </ul>
	タスク実行状況表示	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ タスク実行状況一覧</li> <li>✓ 地図上でのロボット位置の表示</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ タスク実行途中のタスクの変更</li> <li>✓ 進行手動許可</li> <li>✓ タスク履歴</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 進行許可自動判定</li> </ul>
シミュレーター	地図アノテーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 移動タスクに必要な項目のみ設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 優先経路設定</li> <li>✓ 地図の世代管理</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 必要に応じて高度化</li> </ul>
	交通ルール	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ コンフリクト発生時の回避経路の算出</li> </ul> <p style="text-align: center;">今回の開発範囲</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 迂回制御</li> <li>✓ すれ違い制御</li> <li>✓ 交差点制御</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 必要に応じて高度化</li> </ul>
実ロボット制御		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ シミュレーション結果を各モビリティのシステムで実走させて検証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 上記を踏まえた実ロボットとの通信/制御の実装</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 遠隔操作</li> </ul>
システム間連携		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 他システムの単体での有効性検証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 要件定義</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ごみ箱センサー/ステーション連携</li> <li>✓ 施設連携</li> <li>✓ 配達・集荷サービスとの連携</li> </ul>

図 3-44 今後の開発ステップ

#### ●屋外走行に対応したロボット

本事業では、屋外の実環境で自律走行型ロボットの能力を把握することを中心に実証実験を行った。しかし、屋外の実環境では、雨や雪、風などの天候による外部環境からの影響があり、それらに対応する必要がある。

- 雨、雪による影響として、降水量によるが、雨や雪がLiDARに映り込む場合、障害物として認識される可能性が高く、その場合走行不可となることが考えられる。
- 風による影響として、地図作成時にどの程度、木々や草花が映り込むのか次第であるが、影響は大きくないと考えられる。ただし、公園のような環境を想定した場合、木などが唯一の特徴量となってしまうことが推測されるため、木の伐採や極端に伸びるといった場合自己位置推定に影響を及ぼすことが考えられる。影響がある場合は、周囲の状況把握に時間がかかるといよりは、自己位置を見失って走行が困難になるという形で影響が出ることが想定される。
- これらへの対策としては、LiDAR表面の雨粒はエアパーズやカサをつけることである程度は対応可能である。ただし、空間上の雨、雪そのものを認識してしまう場合は、反射強度やマルチエコーを確認し分類する（透明体を通過したレーザー光とその奥にある実物体からのレーザー光の2つの反射レーザー光の距離を測定し、例えば近い方を雨として認識させるなど）といった対応の検討が必要である。もしくは、環境の影響を受けにくい、ミリ波レーダーで障害物回避を行うなどの対策が考えられる。

#### 3-2-6 社会実装に向けたロードマップ

なお、本事業で取り上げた自律走行型ロボットは、環境研究総合推進費「(3G-2101)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(JPMEERF20213G01)」の成果をもとに複数台制御(フリートコントロール)を開発したものである。当該事業の成果として、下記のようなロードマップを提示している。本事業では、このうちパターン①「現実シナリオ」に沿った検討のひとつと位置付けられる。すなわち、大学キャンパスや大規模商業施設等の敷地構内であれば、活用することが可能となる。社会実装に向けては、複数台制御等を踏まえた実証を積み重ねていく必要があるが、このロードマップにしたがって、検討を進めていく計画である。



環境研究総合推進費「(3G-2101) 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(JPMEERF20213G01)」

図 3-45 非接触ごみ収集の社会実装シナリオの全体像

### 3-3 コンパクト型飲料容器自動選別ユニットの高度化開発

#### 3-3-1 自動選別ユニットの高度化開発

##### (1) ロボットユニットシステム全体の設計

ロボット選別は、実機スケールでの選別システム（プロトタイプ）の設計と開発を行った。開発に必要な設備・機器の調達、共同実施先の㈱イーアイの研究開発室において、準備又はセッティングを行い、実証フィールドでの活用に向けた開発を行うこととした。

今回、排出現場として商業施設等の共用部で発生する混合飲料容器ごみを対象に 3 種選別（PET ボトル、缶、びん。びんの 3 種選別も可能）を行うロボットシステムの開発を行った。利用現場は、狭小エリアとなるため、次の項目をポイントに、コンパクトで一体型の設備となるようシステム全体の概略設計を行った。

- ①主として商業施設の共用部の飲料容器ごみが対象（3 種分別）
- ②簡易テーブルでの自動選別で選別作業を簡易化できること。
- ③コンベヤは、ループラインコンベヤを用いてコンパクトに仕上げること。
- ④原料供給は、ヒトが袋の内容物を排出する方法を採用すること。
- ⑤効率的な自動運転が実現できるよう、設備の起動、停止の自動化を実現すること。
- ⑥ロボットアームは、飲料容器の形状、重量、選別スピード等を考慮して採用すること。

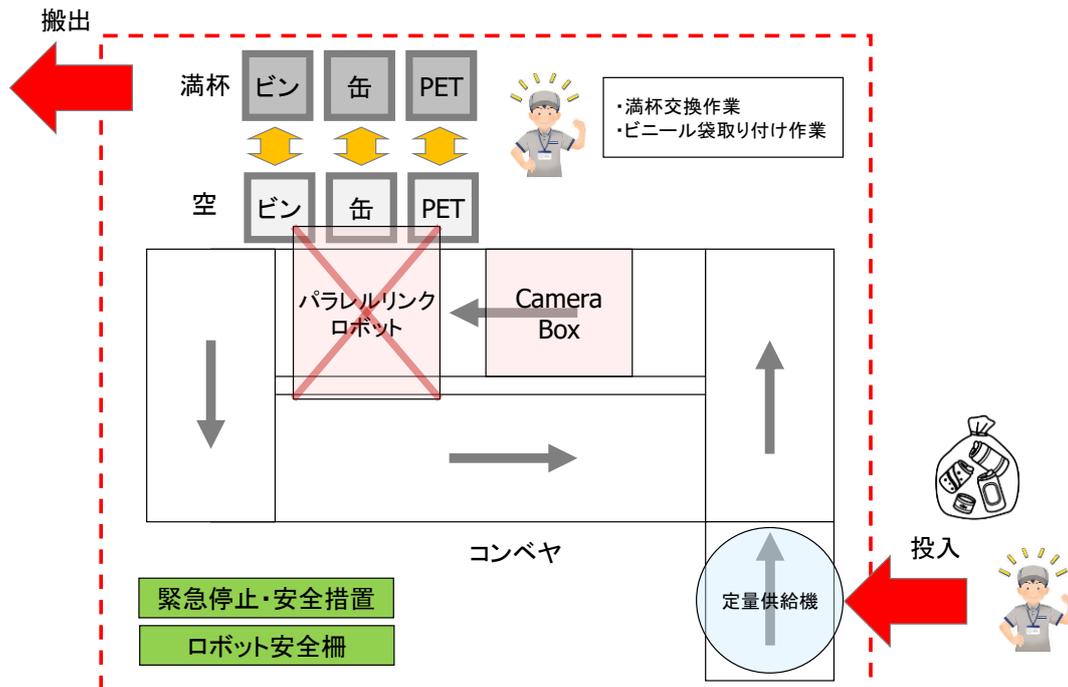


図 3-46 コンパクト型飲料容器自動選別ユニットの設計と開発

(2) コンベヤの設計と開発

狭小な現場条件を踏まえつつ効率的な飲料容器の選別のため、簡易テーブルを用いた循環システムを構想し、設備メーカーと連携の上で、コンベヤの設計と開発を行った。  
検討ポイントは下記のとおり。

- ①ループラインコンベヤは、直線 2 本、カーブ 4 本の計 6 本で構成。いずれも、キャスタ付きで移動可。
- ②コンベヤを全て接続し、1 ボタンで起動、停止ができるようハードウェア調整を行う。
- ③ロボット選別エリアのコンベヤは、帯電防止黒色ベルトを採用し、他は、白、緑を採用する。なお、帯電防止黒色ベルトは、ベルト表面に通電性に優れたポリウレタンを使用しているため、汎用ベルトと比較してベルトの表面電気抵抗が低い特徴を有することから選定した。
- ④使用電源は、200V 単相とする。
- ⑤各コンベヤは、乗り移り用シュート及び、同傾斜を設けて物体のスムーズな移動が行えるものとする。
- ⑥門型プラケットを付設し、飲料容器の流れ方向を縦列に調整することで、選別が容易になるよう工夫する。

導入した設備概要は、下記のようになる。



図 3-47 ループラインコンベヤの構成図



図 3-48 ループラインコンベヤ(写真)

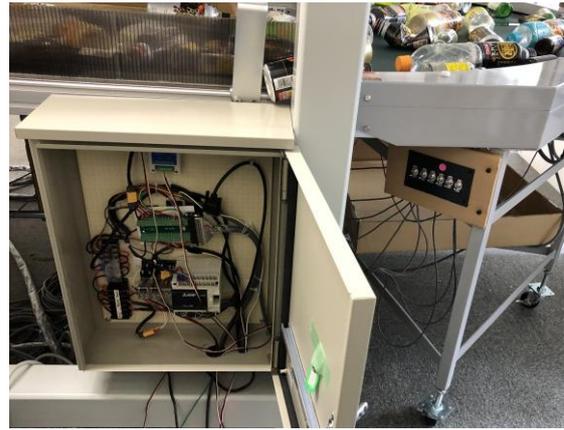


図 3-49 コンベヤの起動・停止の連携システム(写真)

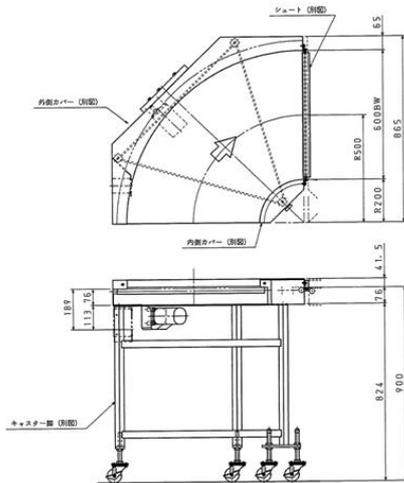


図 3-50 コンベヤ曲線部

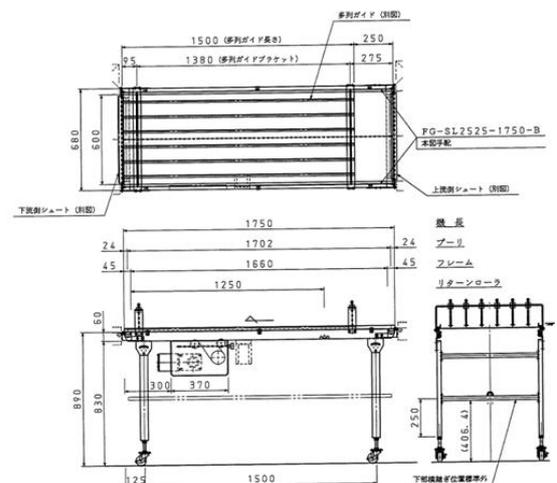


図 3-51 コンベヤ直線部

(3) 簡易型定量供給装置の設計と開発

混合飲料容器を袋から取り出し、投入を行うことで、選別ラインに流れ込む簡易型の供給装置の開発を行った。

- ① 混合飲料容器が投入されると、センサーに触れ、自動でコンベヤが起動する。
- ② センサーに一定時間（調整可）、混合飲料容器が触れない状態となると、自動でコンベヤが停止する。



図 3-52 起動センサー(写真)



図 3-53 停止センサー(写真)

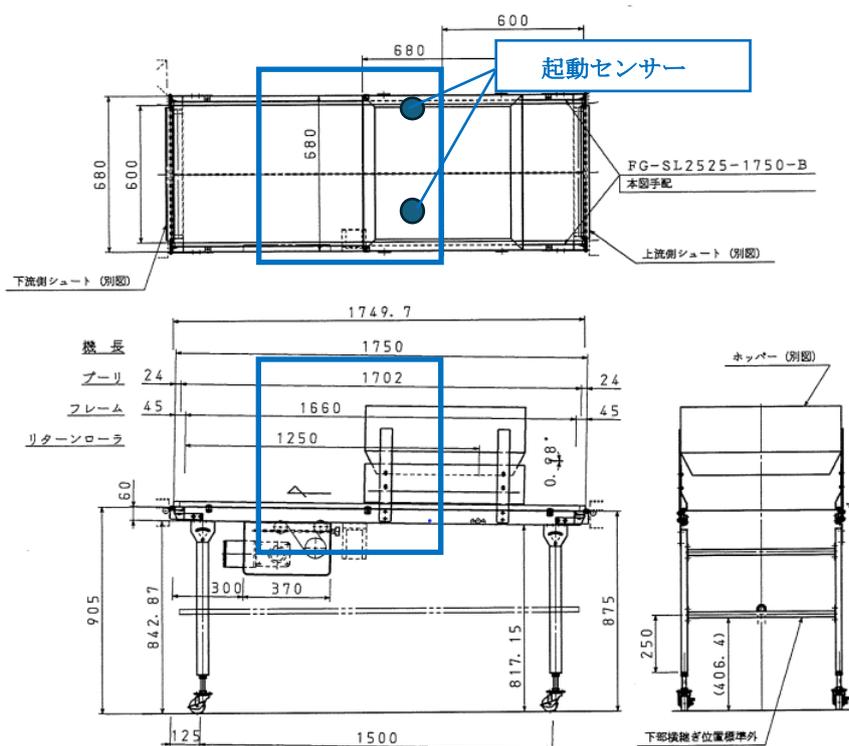


図 3-54 簡易型供給装置の例

#### (4) AI 自動選別ロボットの設計と開発

##### A. ロボット仕様に基づくカメラシステムの選定

選別対象物、ベルトコンベヤの仕様（色、幅、高さ）、現場条件（照度、コンベヤ上の廃棄物の積層等）をもとに、対象物の位置情報を特定できるカメラをロボットに実装し、その性能評価を行った。

ロボット仕分けプロジェクト用のカメラは、2つの観点での選定を行い USB カメラよりもイーサネット機能を搭載し、IP 機能を備えたカメラを選定した。

USB カメラでは、イーサネットカメラが提供する堅牢性が欠けている。また、接続の喪失などの USB 関連の問題により、カメラの誤動作が発生することが見られた。さらに、USB カメラの帯域幅に限られるため、高品質の画像を処理するときシステムが低速化する状況も見られた。今回、イーサネット IP カメラの採用は、こうした問題を効果的に解決することができると判断した。

イーサネット/IP カメラは、USB カメラと比較して次のようなメリットがある。

- ①より高い帯域幅：イーサネットインターフェース、特にギガビットイーサネット (GigE) 以上のインターフェースは、USB インターフェースと比較してより高いデータ転送速度をサポートできる。これは、リアルタイムまたは高速のデータストリーミングを必要とするアプリケーションにとって非常に重要となる。
- ②長いケーブル長：イーサネットケーブルは、USB ケーブルと比較して、信号を大幅に劣化させることなく、より長い距離をカバーできる。このケーブル長の柔軟性は、さまざまなセットアップで有利となる。
- ③干渉の低減：イーサネット接続は USB 接続よりも電磁干渉の影響を受けにくく、産業環境でより信頼性の高いデータ伝送を提供する。
- ④より高画質な撮影：画質の重要性を認識し、類似した物体をより正確に区別できるカメラを目指す。例えば、ボトルのラベルと形状やサイズが類似するガラス瓶を仕分ける場合、カメラの性能が低いため、透明、茶色、緑色のボトルを区別するのが困難であった。しかしながら、高品質のカメラを使用すれば、実際のガラスの微妙な色の違いがより明確になり、類似

するラベルに頼った判定ではなく、ガラスの色に基づいたより正確な分類ができるようになる。



図 3-55 イーサネットカメラ本体

## B. 画像認識システムの開発

新たに製作した自動選別ユニット型の一連のシステムを用いた取得画像をもとに、ディープラーニングモデルの確立や学習データの作成・機械学習を通じた画像認識システムのロボットへの実装を行った。

これまでの研究開発を通じて、画像認識システムの開発方法とその流れの確立はできたものの、検知対象物、コンベヤ実態等の環境変化のたびに、データ収集から学習データ作成、トレーニング、パラメータ調整等、一連の開発フローを手動で実施する必要がある。さらに、実施するエンジニアにより、採用方法が異なることで、安定した成果が得られない可能性もある。

そこで本事業では、これまでの研究成果を踏まえて、開発フローの標準化と自動化を図ることとした。これにより、異なる環境での新たな開発においても安定した認識精度が得られ、かつ、コーディングを不要とし、開発エンジニアに頼ることなく作成できる画像認識システムの開発フローを構築した。具体的には、利用するラベリングソフトウェア (Supervisely) に対して、2 次開発を行い、データの標準化およびトレーニングの自動化を図ることとした。

本事業により、画像認識システムの開発プロセスの作業効率化と安定的な認識精度の実現に寄与することになる。

また、AI ソフトウェアのアップデートを図ることとした。AI は、Yolo8 を利用することで、推論速度は6~40 ミリ秒と、Yolo7 (150~320 ミリ秒) の4~12%に短縮化が図られた。システム効率の最適化や、認識能力の向上に寄与できる。なお、Yolo7 では、ビンの色 (白、茶、ミックス) の判別に時間を要し、性状向上のため別エンジンを活用する対応が必要であった。

- AI を Yolo8 に更新 : Yolo8 の利用で、推論速度は6~40 ミリ秒と、Yolo7 (150~320 ミリ秒) の4~12%に短縮化が図られた。システム効率の最適化や、認識能力の向上に寄与。
- Yolo7 で見られた課題 : ビンの色 (白、茶、ミックス) の判別に、マスキングとビジョン技術を使用したため、速度が遅く、画像処理に約 150~320 ミリ秒を要していた。その後、性状向上を図るため、別エンジンと連携し、画像処理速度を 80~110 ミリ秒に改善が図れた。

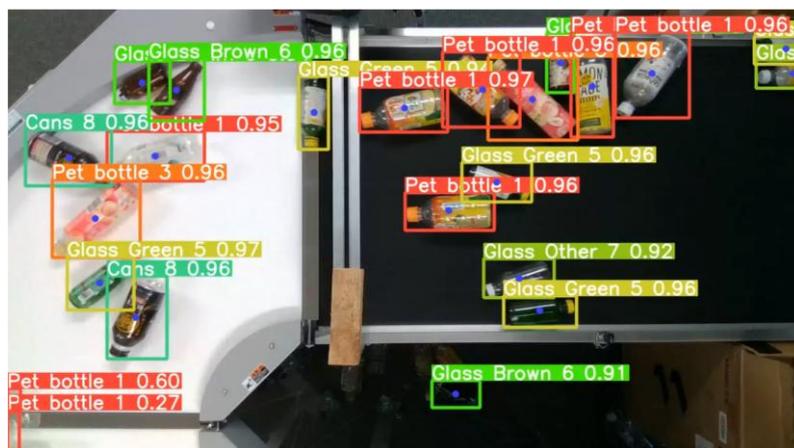


図 3-56 画像認識の状況

さらに、形状、サイズ、または色に関係なく、画像を類似性に基づいて分類する新しい方法を導入。例えば、PET ボトルとして一様にタグ付けするのではなく、誤認識の抑止のため、細分化するもの。コーヒーボトルや缶など、微妙な色の違いを持つ類似のアイテムを区別するために、特に効果が高い。

- ▶形状、サイズ、または色に関係なく、画像を類似性に基づいて分類する新しい方法を導入
- ▶例えば、PET ボトルとして一様にタグ付けするのではなく、誤認識の抑止のため、細分化するもの。
- ▶コーヒーボトルや缶など、微妙な色の違いを持つ類似のアイテムを区別するために、特に効果が高い。



図 3-57 カテゴリーの分類方法（ペットボトル）

### C. 空間特定システムの開発

新たな自動選別ユニットを用いて、対象物の正確な座標情報として、X, Y 軸のみではなく、Z 軸の情報をリアルタイムで収集できる空間特定システムの開発を行う。特に、廃棄物の形状や色が一定ではない特徴に鑑み、カメラセンサーシステム（アルゴリズム）の改良を行った。

3D 機能を搭載した RGB カメラは、通常、2D 画像と 3D 画像の間の位置合わせを保証することができる。このアライメントの活用には、視錐台投影アルゴリズムを使用する。本アルゴリズムは、RGB ピクセルと 3D 点群データ (PCD) をシームレスに関連付け、両方のデータセットが同じ空間方向を共有することができる。PCD データから  $x$ ,  $y$ ,  $z$  の値を直接抽出することで、正確なグリッパー座標を得ることができる。

一方、RGB 画像のみでは、現実世界の座標を忠実に表示する精度が欠けている。点群データ (PCD) はこの点で優れており、PCD に重点を置くことで、物理的な空間におけるグリッパーの位置決めと方向の精度が大きく向上する。

この方法を実装することで、精度の向上のみならず、時間の節約にも結び付く。ピクセル座標をロボットの座標系に変換するために必要な RGB キャリブレーションプロセスとは異なり、点群データ (PCD) の  $x$ ,  $y$  座標を利用することでワークフローが合理化できる。また、ロボットの  $x$ ,  $y$  位置がカメラの  $x$ ,  $y$  位置と揃っている限り、追加のキャリブレーションは不要となる。このメリットは、カメラの高さ調整などを行う場合にも当てはまり、キャリブレーションプロセスをさらに簡素化することができる。

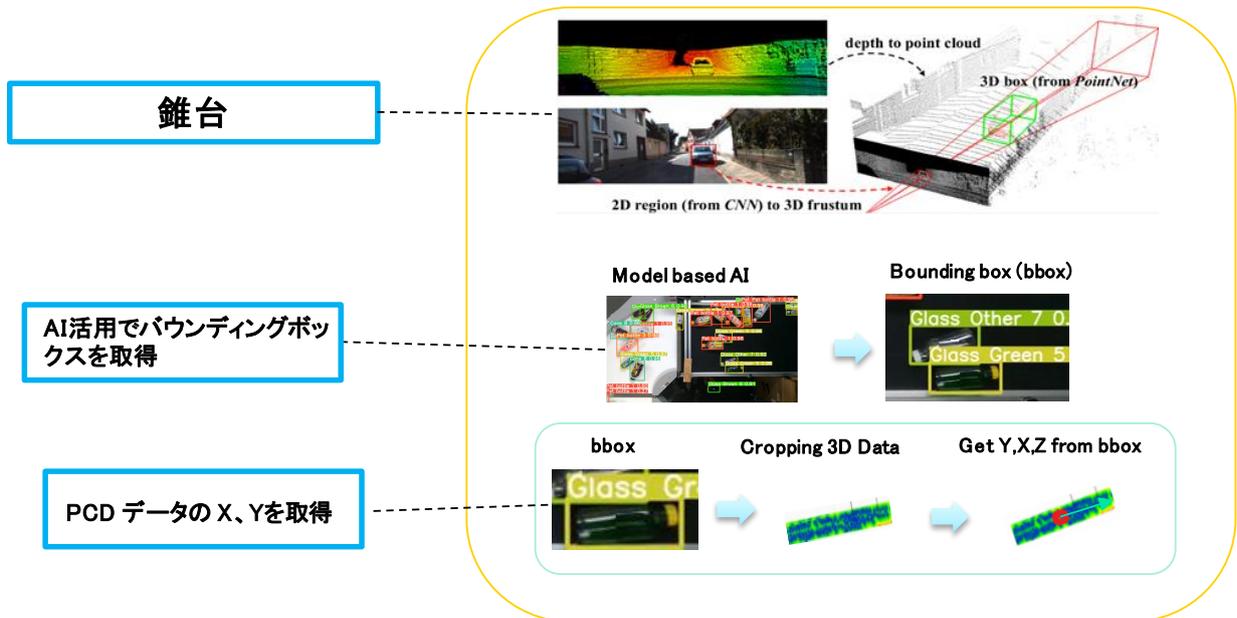


図 3-58 空間特定プロセスの構築

#### D. ロボット制御システムの開発

新たな自動選別ユニットを用いて、ロボットの選定（パラレルリンク式）及び組立て後、選別対象物の座標情報をもとに、ロボットを制御して正確にピックアップさせるための制御システムの実装を行った。具体的には、PC との通信、ロボット軸の動作ルールの作成、制御プログラムの作成等を行い、要求される処理能力を達成するための性能評価を行った。

ロボットの制御システムの開発において、これまでに必要な動作を実現する制御はある程度の成果をあげている。一方で、開発プロセスにおける各パラメータの変更や、現場での利用プロセスにおけるピッキング対象物の変更等に対し、現時点では、エンジニアによるコーディングで実現する必要がある。そこで、ロボットのカスタマイズ開発を効率的に実施するために、以下に示す項目を実施することとした。

- ①AI アルゴリズムおよび制御に関する各パラメータを可視化する UI を開発し、開発と現場におけるロボット調整の効率化を図った。
- ②画像認識結果およびピッキング結果に対して、統計データを分析し、UI で可視化を行った。



図 3-59 飲料容器のロボット選別(写真)



図 3-60 システム開発状況(写真)

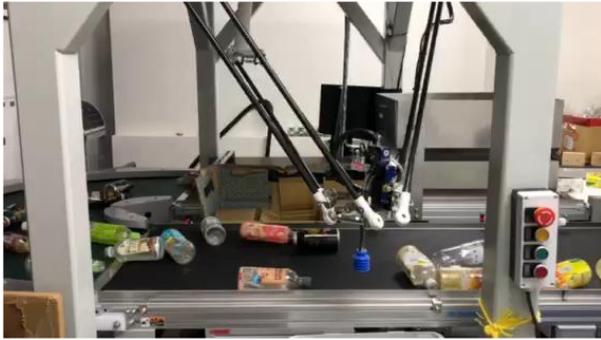


図 3-61 飲料容器のロボット選別 (側面)



白びん 茶びん ミックスびん 缶 PET

図 3-62 飲料容器の回収物の状況 (写真)

#### E. ピッキングシステムの開発

新たな自動選別ユニットを用いて、パラレルリンク式のロボットに気圧式のサクシオンを取り付け、ロボット制御システムと連動させた。さらに、要求される処理能力を達成することを目的とした性能評価を行った。

真空ポンプの活用実証は、研究の初期段階で検証を行った。その結果、ボトルと真空吸盤の間の強力な吸引接続が容易になり、ロボットの動作中に利用される吸引力により、アイテムを落とさずに素早い動きが可能となった。しかしながら、次の課題として、指定されたポイントへのドロップオフ操作を実行する際、真空ポンプに課題が生じる結果となった。つまり、ポンプの開放により、残留真空力がボトルの効率的な放出を妨げるという課題が見られ、解決策として、吸引力に対抗するエア噴出機構を導入したが、切り離しに時間を要することで検証が得られない状況となった。

さらに、真空ポンプでは、汚れに対する相応性や、吸引時の水分の浸入の可能性の考慮が必要であったため、この軽減に向けて、ベンチュリ効果を利用したエアコンプレッサーを選択したことで、空気排出を使用したボトルの開放や、システムの損傷リスクの最小限に結びついた。

つまり、リリース速度の見直しができる上、さらに、真空ポンプとは異なり、発電機の電気制御バルブによるシステムへの制御と応答性の向上が図れ、運用効率の向上に結びついた。

ベンチュリ効果において、真空の力は発生源からの空気圧と相関して増減する。そのため、エアコンプレッサーの低減実験や空気圧源の追加導入、さらに様々な発生源を組み合わせた評価を行い、この発生源強化のための試験や、空気発生器の高出力化の検討を行った。

テストの結果、残留水分を含むボトルを拾うことができる最適な吸引力が明確化できた上、最適化プロセスにより、システムにおいて多様なシナリオを効率的に処理するのに十分な力を生み出すことができた。



図 3-63 ピッキングに係る機器

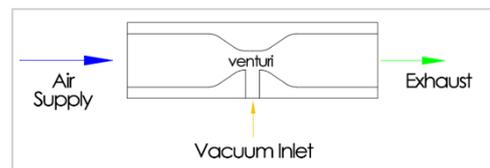


図 3-64 ピッキングシステムの機構

#### F. エンコーダ追跡システムの開発

コンベヤ上の対象物をカメラで検知し、ロボットでピックアップするタイミングを、リアルタイムに情報収集し、トレースできるようエンコーダを用いて対象物を追跡するシステムの開発を行った。

この対応のため、本事業では HIWIN ソフトウェアをシームレスに統合し、その機能を活用してシステム内にエンコーダトラッキングを実装することとした。

プロセスは、HIWIN ソフトウェアがカメラの位置とロボットのアイテムピッキング操作の指定開始点を結びつける最初のキャリブレーションステップから行い、キャリブレーションを通じて、HIWIN ソフトウェアがカメラとロボットの両方の基準点を確立できるようにした。エンコーダ追跡システムは、この校正した情報を利用して、コンベア上の物体をリアルタイムに正確に追跡を行うことができる。

初期キャリブレーションでは、カメラの視点をロボットの操作空間に合わせて、同期した正確な追跡を行う。エンコーダは、構成されたデータと連携し、リアルタイムに物体検出を行うこと、さらに、コンベア上を移動中の物体のシームレスなトレーサビリティを促進することができる。

カメラとロボットソフトウェア (HRSS) の同期では、以下の 3 段階のキャリブレーションプロセスが行われる。

➤ ステップ 1: カメラ/ロボットによるエンコーダ値のキャリブレーション

はじめに、キャリブレーションシートを使用して、カメラのポイントを 0,0 に指定する。その後、シートがコンベアに沿って移動し、ロボットがさまざまなポイントでアイテムに到達してピックアップできるようにする。各ステップにおいて、エンコーダは、エンコーダ値を保存し、ロボットとカメラの間の距離に関するデータを提供する。

➤ ステップ 2: ピクセルから mm への変換

AI システムでは、オブジェクトを識別し、その座標をピクセル単位で提供できる。ロボットの効果的な情報交換のためには、座標をミリメートルに変換することで、正確かつ標準化された測定単位とすることができる。

➤ ステップ 3: ロボット座標 (0,0) の場合、カメラ座標 (0,0) をゼロとする

最後に、カメラ (0,0) をロボットの新しい (0,0) として設定することで、共通の基準点を確立する。内部的には、HRSS はカメラの (0,0) に合わせるために x, y オフセットを組み込んでいる。例えば、ピクセル座標 (50, 50) で AI が識別したアイテムを拾おうとすると、ミリメートルへの変換を実行した後、座標が「{Cam: x, Cam: y}」として HRSS に送られることになる (x = 50 ピクセル → mm, y = 50 ピクセル → mm)。

システムの特徴は、座標変換の適応性となる。視錐台投影アルゴリズムでは、ピクセルおよび点群データ (PCD) の 3D 座標をロボット座標に変換できることになる。この柔軟性は、タスクの特定の要件に応じて、ロボットの座標変換プロセスに PCD (3D データ) または RGB (2D データ) のいずれかを選択できることになる。

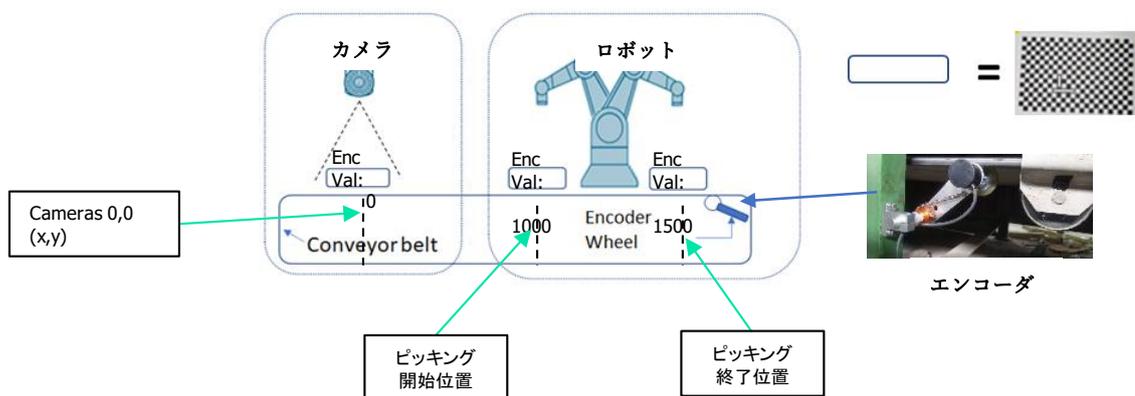


図 3-65 エンコーダの利用方法

### G. 安全対策機構機能の設計と開発

安全にロボットシステムの活用を図るため、ロボットの架台内部にヒトの手が入らないよう抑止する機構や、安全センサー、さらに、防塵と散熱を考慮した制御盤の設計と開発を行う。

なお、詳細は、現場実証のための準備段階において、検討を行う。



図 3-66 制御盤の格納容器(写真)

#### H. ユーザーインターフェースの設計と開発

エンドユーザーが利用しやすいように、制御ボタンと PC 画面の GUI の設計と開発を行った。

##### ① 制御ボタン

ロボットには、安全対策として、(ア) 起動 (緑ボタン)、(イ) 停止 (赤ボタン)、(ウ) エラー解除 (黄色ボタン) および (エ) 緊急停止ボタン (赤矢印ボタン) を設けた。



図 3-67 制御ボタン(写真)

##### ② GUI の作成

PC モニターには、AI 検知対象の選択、エラー解除、ロボットのステータス確認等をユーザーの立場で分かり易い GUI の開発を行った。

具体的には、ペットボトル、缶、ビン (茶)、ビン (白)、ビン (ミックス) の 5 種類の選別アイテムを簡単に選択できる GUI (グラフィカルユーザーインターフェース) の開発を行った。

また、GUI を活用することで、プログラミングスキルを必要とせず、コードを動的に調整できることになる。例えば、カメラが振動により移動してしまい、ロボット制御において物体を把持するタイミングが早すぎるか遅すぎる場合、GUI を介して単に 'x オフセット' を変更することで問題解決が図れることになる。

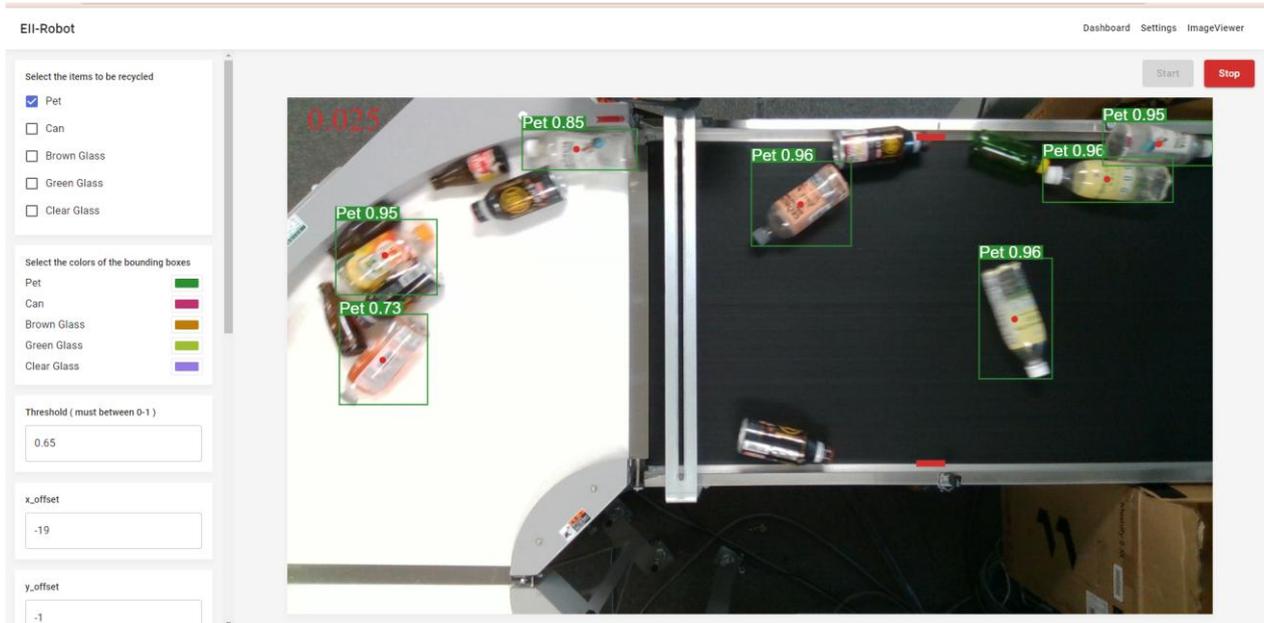


図 3-68 GUI の作成(写真)

### I. システムインテグレーション

画像認識～ロボット制御まで一連のフローを繋ぎ合わせ、ロボットシステムを有効に機能させるために、システムインテグレーションを行った。

システムインテグレーションの全体像は、図 3-69 に示すようになる。

#### ❖ システム

##### ❖ カメラ

- USBカメラの使用
- RGB

##### ❖ パソコン

- OSのUbuntuサーバー
- Dockerの使用

##### ❖ リレー

- USBリレーがロボットコントローラに24vを出力します

##### ❖ ロボットコントローラ

- 受信したピッキング情報
- PCからロボットに送信します

##### ❖ ロボット

- 情報を受信後、ロボットコントローラとpicsが、オブジェクトを指示

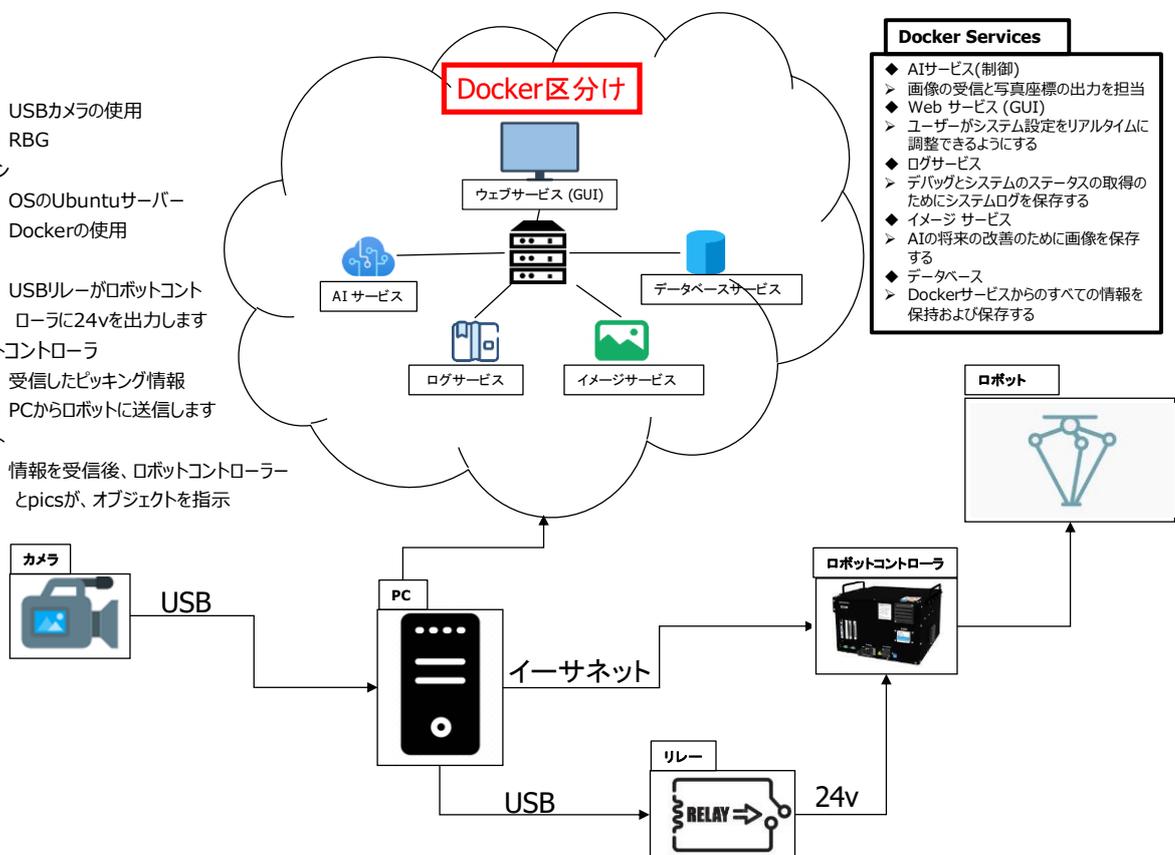


図 3-69 システムインテグレーションの全体図

このうち、AI とロボットを結びつける AI システム統合は、次のように実施した。

- ▶ ロボットコントローラは、PC からピックアップするアイテムと、ピックアップするタイミングに関する情報を受け取る。
- ▶ 上記の接続を確立するため、特定のシーケンスを作成した。
  1. 任意の言語 (Python) で、TCP/IP サーバーを実行する
  2. AI の結果をラッチ信号とともに HRSS (24v) に送信

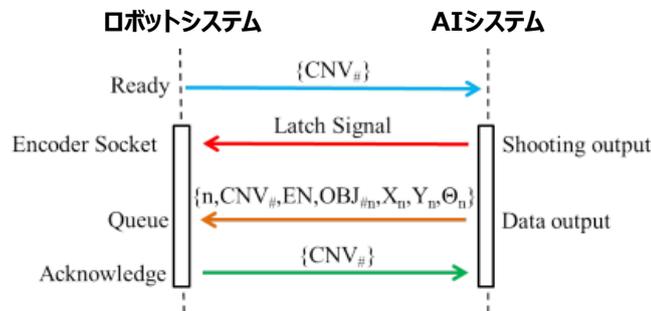


図 3-70 パソコンとロボットの連携方法

- ▶ ラッチ信号 (デルタロボットがアイテムを拾うタイミングを知るためにエンコーダカウントをトリガーする 24v 信号) の発見には、解读に時間を要する。

なお、電気信号は次のように送信する。(図 3-71)

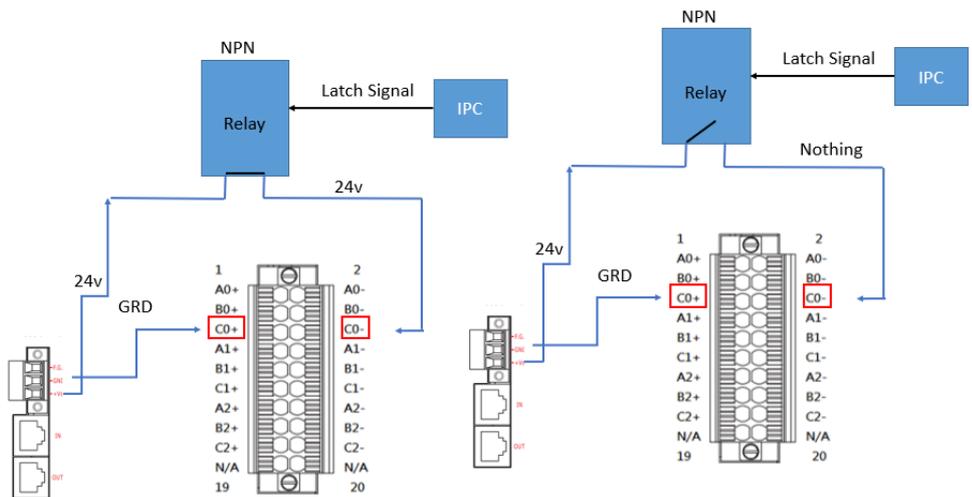


図 3-71 電気信号の送信方法

また、AI の検出の分野では、Python のクラスベースのコントロールで、シームレスなデバッグ (デバックング: バグを探索しプログラムコードを修正し取り除くこと)、開発、保守、およびクラスの独立したアップグレードが可能となる。このアプローチにより、コードを維持しながら、カメラのアップグレードや様々な AI モデルの組み込みができるため、将来の機能強化が容易になる。

- ①カメラ  
カメラから画像をキャプチャし、AI に送信する。
- ②モデル  
画像を取得し、オブジェクトを検索するための推論を行う。

③決定

天候やルールに基づき決定し、アイテムの選択、撮影場所、角度、ロボットに送信する時間を作成する。

④コントロール

ロボットへの TCP/IP 接続を作成し、ロボットの画像情報を Web ベースの GUI に送信する。

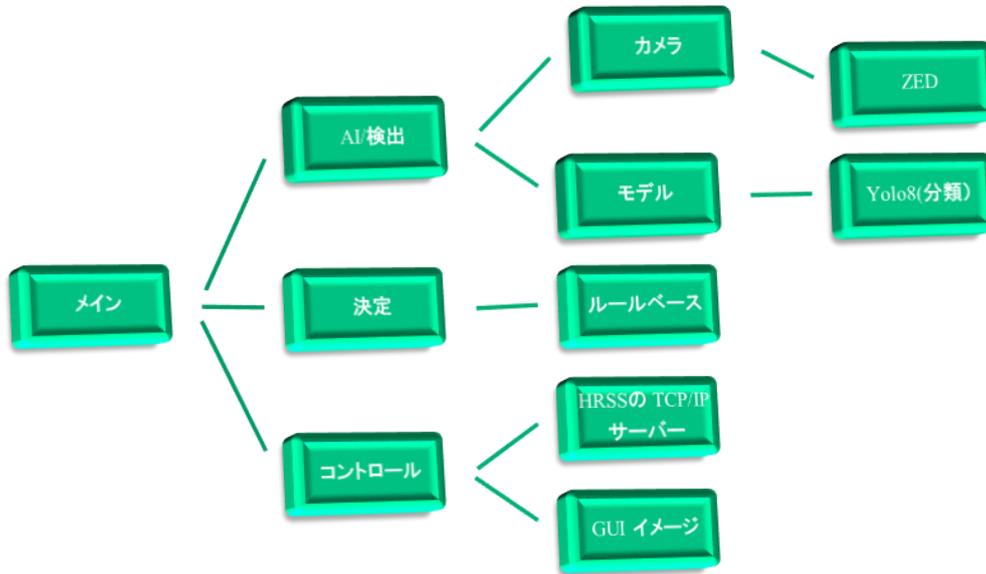


図 3-72 システムインテグレーションの全体像

J. プロトタイプによる性能試験

一連の技術開発を経たのち、簡易なシステムを用いて、プロトタイプモデルとしての選別試験を行い、見直しに向けた調整課題を明らかとした。

ラベルリングされたペットボトル・瓶・缶の飲料容器を複数のパターンに分けてベルトコンベヤに流し、流した回数に対するロボットアームが動く取得動作、ロボットアームで回収できた把持成功、正しく選別できた正解の回数を実験した。以下が実験の結果であり、2022 年度以前に実施した AI 自動選別ロボットにおける選別精度の検証結果と比較するために、2022 年度分の結果も併記している。

表 3-19 年度別 AI 自動選別ロボットの性能比較（流した数に対する結果の割合）

項目	2022 年度		2023 年度		算出方法
	個数	割合 (%)	個数	割合 (%)	
取得動作	413	83%	573	110	取得動作/識別数
把持成功	322	78%	434	75.7	取得数/取得動作
正解	299	60%	410	76.6	正解数/投入数
取得ミス	168	34%	69	12.9	取得ミス数/投入数
識別ミス	23	6%	16	2.99	識別ミス/投入数
取得・識別ミス	5	1%	24	4.49	(識別・取得ミス)/投入数

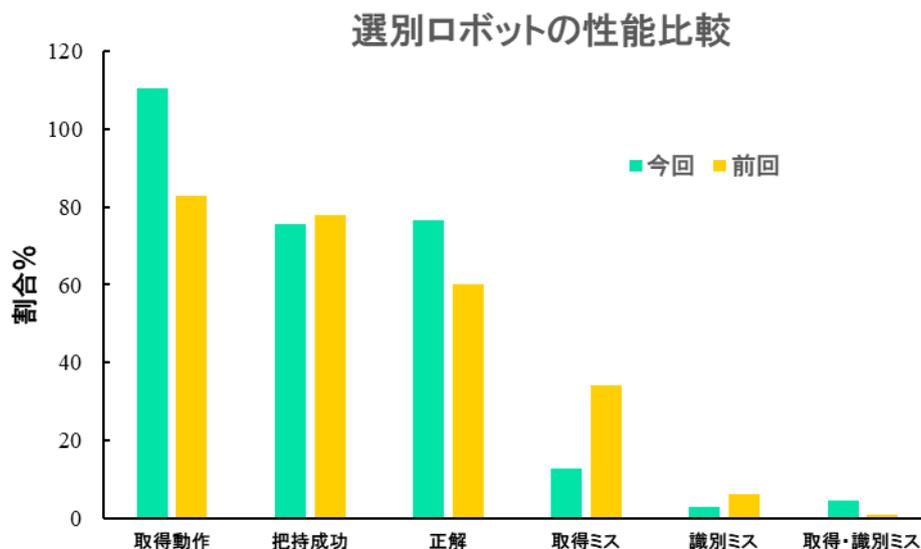


図 3-73 AI 自動選別ロボットの選別精度に対する実験結果

この結果より、2022年度と比較して成功の割合が高くなっていることから、選別精度が向上していることがわかる。2022年度と比較して、飲料容器のラベリング方法の変更の効果が確認できた。また、取得動作が100%を超えていることは、一つの飲料容器に対して取得の有無にかかわらず複数回動作することがあるため、使用した飲料容器の本数よりも取得動作の回数が多くなったためである。

ビンに対しては、画像認識が正しく行われているか示す認識率をビンの色ごとに算出し、結果をまとめた表を以下に記載する。

表 3-20 ビンの色ごとの画像認識率

ビンの色	認識率 %
透明	60
緑	100
茶色	100

他のビンと比較して透明なビンの場合、認識率が低いことがわかり、中でも白色のベルトコンベヤより黒色のベルトコンベヤ上で認識率が悪くなることが観測された。

また、ベルトコンベヤやロボット以外の外的要因が選別精度にもたらす影響を実験した。ここでは、光による影響を調査した。室内照明を用いる場合と日光のみで行う場合で比較検証した結果、選別精度は約10%と大きくないことがわかった。

以上の点を踏まえ、次年度に向けて、性能評価の方法等を整理したうえで、実証試験を通じた有効性の検証および課題の抽出を行うこととした。

#### K. コンパクト型飲料容器自動選別ユニットの設計と開発のまとめ

ロボット選別については、実機スケールでの選別システム（プロトタイプ）の設計と開発を行った。

なお、開発に必要な設備・機器の調達（購入・リース）は、共同実施先の研究開発室において、準備又はセッティングを行い、実証フィールドでの活用に向けた評価を行った。

- ロボットユニットシステム全体の設計
- コンベヤの設計と開発
- 簡易型定量供給装置の設計と開発
- AI 自動選別ロボットの設計と開発
- システムインテグレーション
- プロトタイプによる試験実証

今後は、現場発生（未学習）の飲料容器を対象とした実証利用などを通じて、画像認識、汚れ、水分、連続運転、休止時の復旧等に対する検証を行う必要がある。

なお、開発にあたり、下記事項の対応の検討を進めていることから、対応終了後に、ロボットシステムの比較評価を行う。

- 画像認識精度の向上：ペットボトルのデータセットの見直し（4分類）
- 選別速度の向上：ディプラーニングシステムのバージョンアップ、コード言語の見直し（C++の利用）、サクション（把持方法）対応システムの見直し
- 選別精度の向上：サクションによる吸引力・方法の見直し、重量特性を踏まえた品目別（特に、びんの色別）のロボット制御システムの導入

### 3-3-2 現場における実証実験

R6年度は、R5年度に実施したロボットの開発を継続的に実施し、対象物のAI検知から自動ピックアップまで、さらにユーザーインターフェース付きのロボットシステムのプロトタイプの開発を完了した。さらに、プロトタイプのロボットシステムを協力先の排出現場に試験的に導入し、実証実験を通して効果の検証を行った。

実証実験では、現場環境にタウンテーブルを含めた自動選別ユニットを導入・設置し、実際の処理対象である使用済み飲料容器をユニットに投入し、①ロボットの機能と性能の評価、②「導入しやすさ」、「実用性」と「経済性」の評価、③ユーザー視点の省人化・省力化の効果検証、の3点を中心に評価・検証を行った。

#### (1) 実証実験の概要

##### 1. 趣旨

商業施設の規模の大小に関わらず、共用部から排出する飲料容器混合物はペットボトル、びん、缶の3種類の分別を人手により行っていることから、この改善に向けて、コンパクトなユニット開発が求められている。そこで、ループラインでの自動選別により、選別作業の簡易化が可能な機能を実装する等の開発を継続的に行ってきた。

R6年度は、ロボットの開発の成果を踏まえて、対象物のAI検知から自動ピックアップ、さらにユーザーインターフェース付きのロボットシステムのプロトタイプの開発を完成させる。

##### 2. 実施内容

プロトタイプのロボットシステムを協力先の排出現場に試験的に導入し、実証実験を通して効果の検証を行う。

- 現場環境にループラインコンベヤを含む自動選別ユニットを導入・設置
- 実際の処理対象物となる使用済み飲料容器をユニットに投入し、以下の3点を中心に評価・検証を行う。
  - ①ロボットの機能と性能の評価
  - ②「導入しやすさ」、「実用性」と「経済性」の評価
  - ③ユーザー視点の省人化・省力化の効果検証

##### 3. 実証場所

高嶺清掃株式会社（東京都葛飾区）

4. 実証期間

2024年6月～11月

5. その他

- 実証スペース及び電源利用。（※東京都環境局向け変更届提出）
- 11月関係先に対する見学会を開催

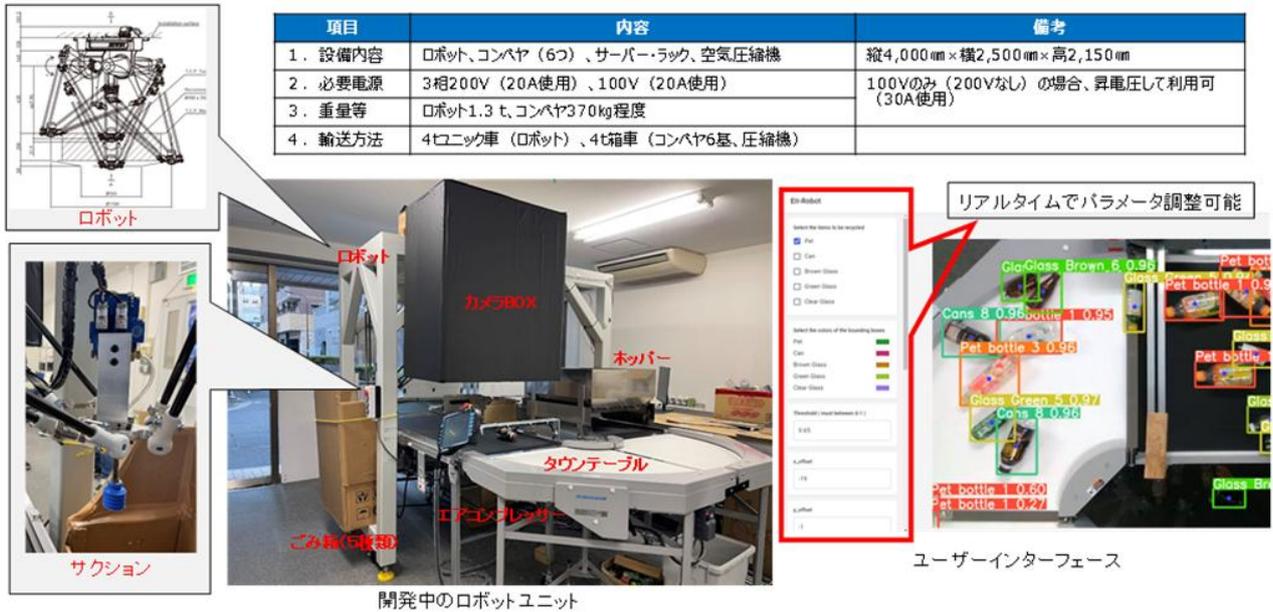


図 3-74 コンパクト型飲料容器自動選別ユニットの設計と開発（R6年度）

(2) 実証事業ととりまとめスケジュール

実証事業ととりまとめスケジュールは、表 3-21 に示すとおり、現場搬入時期の6月を見据え、それまでに自動選別ユニットの高度化開発を進めた。

表 3-21 実証事業ととりまとめスケジュール

項目	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
<b>1. 自動選別ユニットの高度化開発</b>	←											
1-1 画像認識用カメラの変更												
1-2 学習データ作成とAIモデルの構築												
1-3 オペレーション自動化を考慮したセンサーシステムの構築												
1-4 実用化に向けたハードウェアパッケージの検討												
<b>2. 現場における実証実験</b>	←								→			
2-1 導入計画作成												
2-2 現場搬入・設置												
2-3 ユニット組み立て、動作確認												
2-4 現場データを用いたAIモデルの訓練												
2-5 実験計画の作成												
2-6 実証実験の実施												
2-7 評価・検証												
<b>4. ロボットシステムの見直し</b>												
<b>5. 今後の実用化に向けたシナリオ構築</b>												
<b>6. 報告書作成</b>												



表 3-22 実証事業の経過

日程	項目	概要
5月17日 9時	都産廃課審査係との 事前協議 ※計画課松本氏陪席	高嶺清掃に、ロボット設置・実証を行う際に必要となる手続き等の確認 ➡変更申請書の提出要（葛飾区との協議、騒音推計値算出、周辺住民同意）
5月21日 17時	騒音測定、騒音推計 値の算出	ロボット稼働に係る騒音測定（非使用・使用）、敷地境界における騒音推計値の算出 ➡高嶺清掃に提出
5月27日	都産廃審査係と変更 申請書の協議	変更申請書を条件付き「受理」。引き続き継続対応（残：葛飾区との調整） 現場検査日時：『6月17日10時半』に決定
6月1日 までに	現地配線工事終了	200Vの必要アンペア工事を終了（高嶺清掃現場内）
6月6日	現場確認	イーアイアイ技術者を伴い事前の現場確認を実施（設置場所等）
6月11日	ロボット等の移動・ 荷降ろし	現場にロボットを運搬(6/11)。その後、現場での技術対応を経て、コンベヤ、ロボット等の設置、稼働確認を行う。
6月17日 10時半	都産廃課審査係による 現場検査	一連のロボットシステムの稼働確認・検査を実施（変更申請書に基づく再配置状況含む）
6月17日 ～7月26日	画像認識・学習データ の収集と構築	高嶺清掃の飲料容器サンプルを録画し、学習データを構築
7月19日	現場PCの回収	新規AIモデルのセットアップ
7月25日 ～8月2日	PCの設置	新規AIモデル、選別ロボットの機構確認
8月5日 ～10月31日	画像認識・学習データ の収集と構築	新規AIモデルを用いたロボット選別の機械学習とファインチューニング（約3か月）
11月1日 ～11月15日	実証研究	選別精度の検証、選別作業の比較（一般化/リソースシフト）
11月20日 ～11月29日	関係者向けお披露目	高嶺清掃他、関係者からの推薦先企業団体（高嶺清掃様関係）周辺住民（連携想定先）サントリー/アサヒ飲料/全容協事務局/関連メーカー等
12月5日	設備撤収	高嶺清掃から搬出、イーアイアイに搬入

(注) 9月上旬、コンベヤベルトを交換（表面凸凹：びん等転がらないもの）



図 3-76 現場の様子

(4) 高嶺清掃の処理方法

高嶺清掃では、事業系廃棄物（小中学校、デパート等）を受入れ、主に手選別によりペットボトル、缶、びんの3種類に分け、ペットボトルのラベル除去を行っている。その際、飲料以外のペットボトルや、色付きボトル、スプレー缶などを選別回収している。

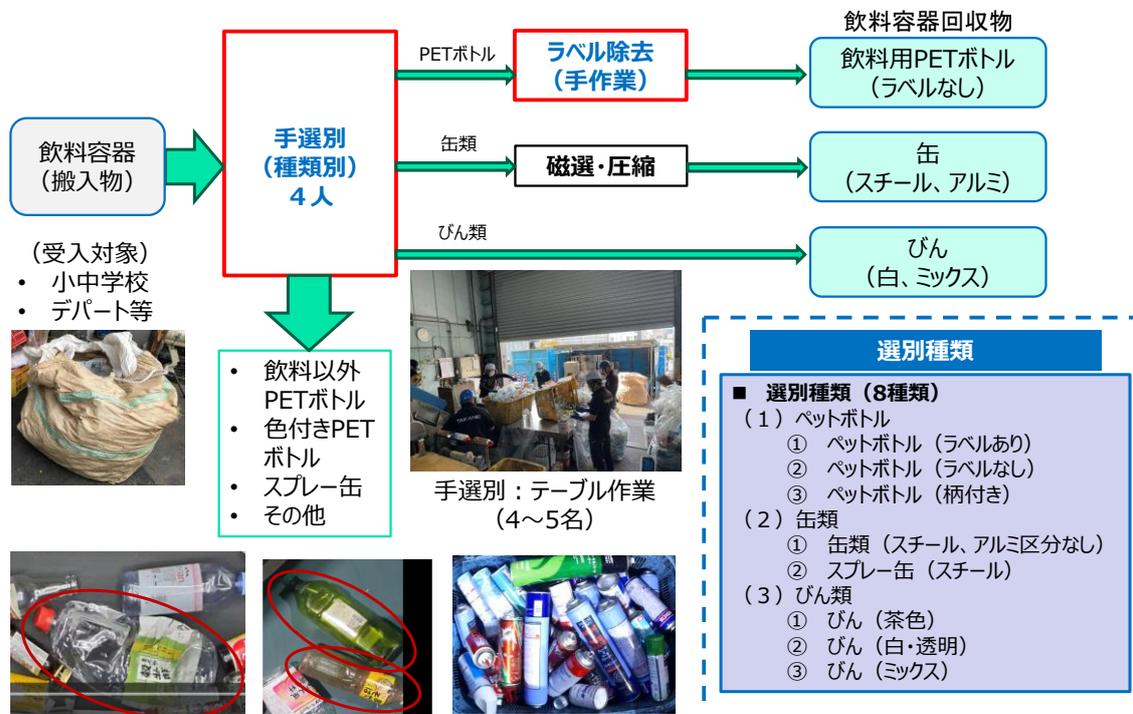


図 3-77 高嶺清掃社における飲料容器の手選別作業概要



図 3-78 高嶺清掃社における手選別作業の様子

#### (5) 技術開発の推進

高嶺清掃の現場（余裕スペース）に、ループラインコンベヤを配置し、従来の処理作業の障害とならずに、処理支援に繋がるシステム構築を検討し、それに向けた以下の開発を進めることとした。

具体的には、飲料容器の判別対象が現場発生物への対応を進める必要があること、さらに、従来、研究開発室で機械学習を進めた5カテゴリーから、8カテゴリーに変更（ペットボトル：ラベル有無、把手あり。缶：スプレー缶）された結果、短期間に、機械学習の方法論の見直しを行い、かつ、追加学習を行う必要に迫られることとなった。

##### 1. 機械学習の方法論の見直し

- AI モデルを変更（yolov8n⇒yolov8x）
- 高解像度（1920×1080）で学習←720
- Chat GPT を活用したデータ判別・効率利用
- 現場条件に規定（コンベヤ色、表面状態）されずに利用できる AI モデルを構築

##### 2. 機械学習・追加学習

- 飲料容器動画撮影（現場）計13回
  - ・排出元別（小中学校、飲食店、デパート等）
  - ・びん類（大びん：白・透明びん）
  - ・選別対象品目（把手付きペットボトル、スプレー缶）
- 飲料容器取り込み（web データ）
  - ・ペットボトル（飲料系）
  - ・ペットボトル（飲料系以外、しょうゆ、酒、みりん、その他）
  - ・びん類（色、形状）
  - ・缶（スプレー缶など）

##### 3. 飲料容器のオブジェクト変更（GUI）

- 8カテゴリーに拡大（従来：5カテゴリー）

※ペットボトル：高嶺清掃社の運用を考慮

■ 飲料容器のオブジェクト（5種類）：従来

- (1) ペットボトル
- (2) 缶類
- (3) びん類
  - ① びん（茶色）
  - ② びん（白・透明）
  - ③ びん（ミックス）



■ 飲料容器のオブジェクト（8種類）：今回

- (1) ペットボトル
  - ① ペットボトル（ラベルあり）
  - ② ペットボトル（ラベルなし）
  - ③ ペットボトル（柄付き）
- (2) 缶類
  - ① 缶類（スチール、アルミ区分なし）
  - ② スプレー缶（スチール）
- (3) びん類
  - ① びん（茶色）
  - ② びん（白・透明）
  - ③ びん（ミックス）

※大びんは、今後検討予定（グリップ把持）

図 3-79 飲料容器の判別カテゴリーの追加

(6) データ収集とプロセス開発の方法

データ収集とプロセス開発は、図 3-80 の方法で対応し、効率化のため、アノテーションプロセスの自動化を実現し、大量に効率的に高品質なデータセットを構築した。

具体的には、①データ収集、②データクレンジング、③ラベリングの工程に区分し、各自動化プロセスを構築した。

①データ収集

データ収集は、現場で実際に選別を行う多様な飲料容器に対応した画像認識の精度向上に向けて、圧倒的多数の飲料容器のデータセットを必要としたことから、web と現場の両方でのデータ取得を行った。このうち、web については、Open Source DB や、WEB Crawling（web サイトから収集したデータ）等について、当時（2024 年 8 月）の LLM（大規模言語モデル）の最新モデルである ChatGPT4<sub>v</sub> を活動して画像データの格納を行ったものである。

②データクレンジング

データクレンジングは、データの品質を向上させる重要な工程であり、誤りや不完全なデータを修正・削除し、データ分析の精度向上、機械学習モデルの性能向上、意思決定の正確性向上を進めるプロセスとなる。具体的には、欠損データ処理（分析精度を下げない対応）、重複データ除去（分析結果の偏りの回避）、データ形式の標準化（統一フォーマットで一貫性を担保）、不要なデータ削除（データセットをクリーンに保つ）等を行うものである。

③ラベリング

ラベリングは、データの適切なタグやカテゴリーを付与するプロセスとなり、機械学習やデータ分析では、正確なラベリングがモデルの精度を左右することから、重要なプロセスとなる。具体的には、GPT 自動ラベリング（LLM を用いた自動ラベル付与）、手動 Check（自動ラベリング結果を人が確認・修正するプロセス）、ラベル自動変換（異なるフォーマットのラベルを統一）などを行い高品質なデータラベリングを実施する。



図 3-80 データ収集とプロセス開発の手法

**欠損データ(例)**

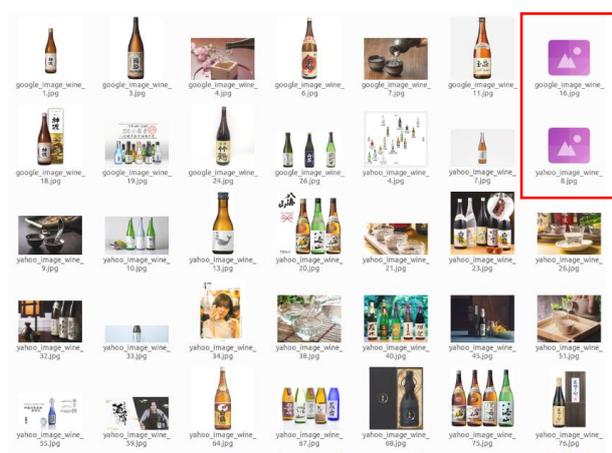


図 3-81 欠損データの処理の例

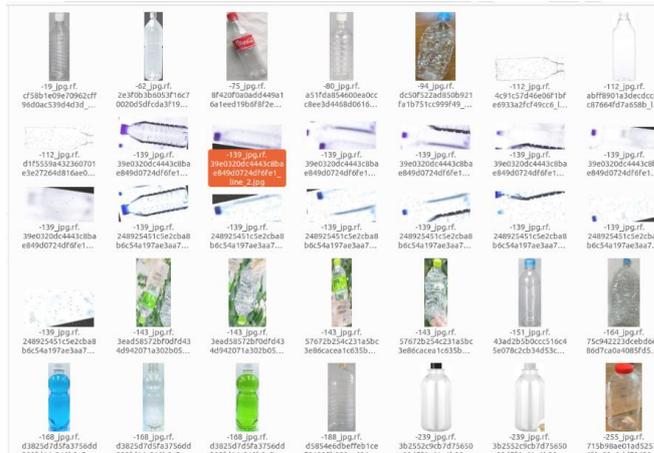


図 3-82 ラベリングの例

(7) データセットの作成結果

データセットの構築は、飲料容器（8 分類）と、飲料容器以外（80 分類）に分類して行い、クレンジング作業を行った結果、短期間に 23 万枚（うち有効データ 15 万枚）のデータセットの構築が図れたことから、実証現場においても 85%の認識精度を保持することができた。

※認識精度が低い対象は、ラベリング数が少ない「把手付きペットボトル、スプレー缶、大びん（透明）の 3 種類であり、その他の認識精度は 90～95%を保持している。

<b>&lt;データ収集方法&gt;</b>	
飲料容器のみ（8 分類）	
■Open Source DB	： 10 万枚
■WEB Crawling	： 1 万枚
※うち、クレンジング済み 3 万枚	
■現場データ収集	： 1 万枚
■AI 自動生成	： 100 枚 ※テスト作成中
■合計	約 12 万枚 ※クレンジング済み 3 万枚
飲料容器以外（80 分類）	
■COCODB	： 11 万枚
データ合計	
■合計	23 万枚 ※うち、有効データ 15 万枚

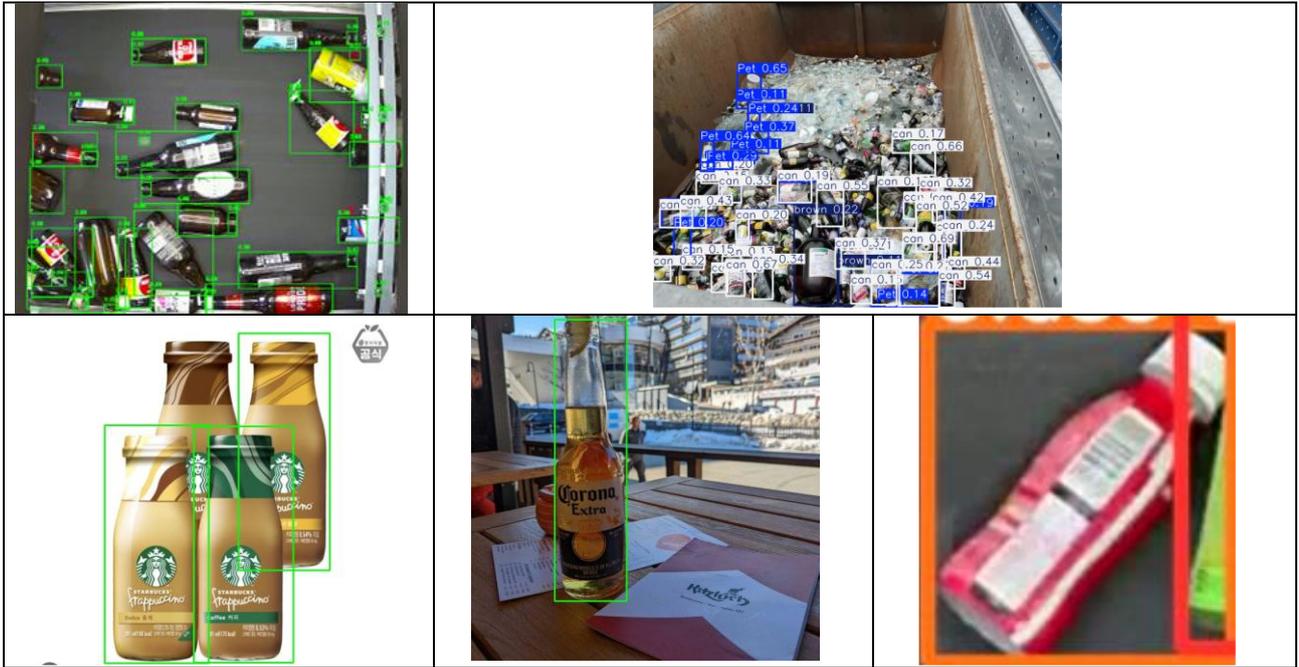


図 3-83 アノテーションの自動化結果の状況（画像認識・ラベリング）

(8) AI 画像認識モデルの構築フロー

次に、AI 画像認識モデルの構築方法の標準化を行った。AI 画像認識モデルを構築するには、①データ、②AI モデル、③インフラ、④評価の 4 要素が重要となる。

高品質なデータはモデルの性能を決定します。次に、AI モデルの選択・設計が認識精度に影響します。次に、インフラは学習推論のための計算環境の役割となり、最後にモデルの性能を測定し改善点を特定する評価を行うことになる。

今回は、①データに付随して、データ収集とアノテーションプロセスの自動化を経て、②～④の手法を確立した結果、AI 飲料容器ロボットのプロトタイプモデルが完成するに至った。

但し、今後の実用化に向けては、現場での取組拡大や、長期間での稼働実績などを踏まえた最終段階の実用化開発を推進する必要があると考えている。

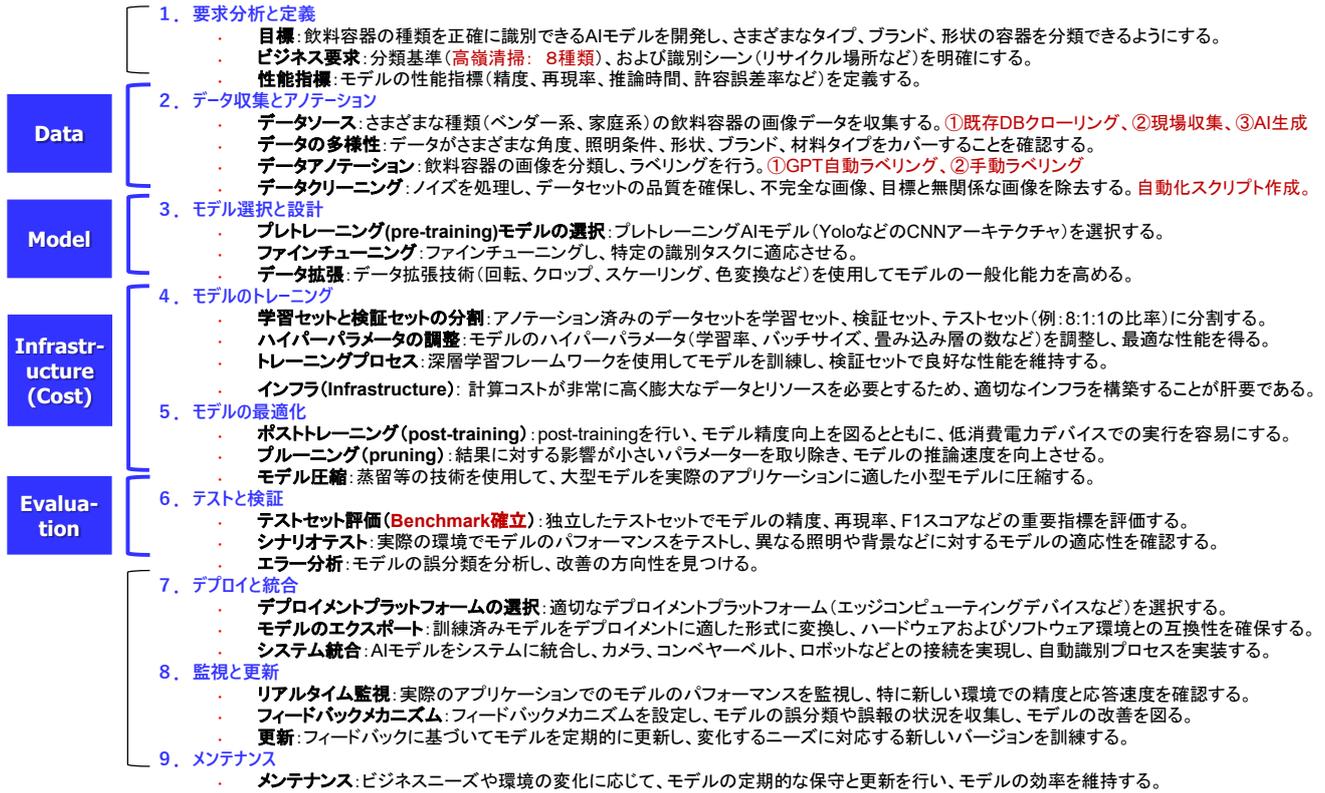


図 3-84 フロー図

データ収集とアノテーションプロセスの自動化の結果、大量の飲料容器について、同時にラベリング判定ができるようになった。



図 3-85 AI 画像認識結果 (Yolo8x) ※2024年10月1日時点

### 3-3-3 今後の実用化に向けたシナリオ

#### (1) ロボット選別のニーズ

今回、高嶺清掃(手選別作業が中心)におけるロボット選別では、図 3-79 に示すとおり、従来のペットボトル、缶、びん(3種選別: 茶、白、ミックス)の5種選別ではなく、ペットボトルのラベル有/無、ペットボトル(飲料以外・把手あり)や、スプレー缶を追加した8種選別等のデータセットの構築を行った。

一方、機械選別が進んでいる処理施設においても、処理フローとして、破袋・除袋の後、磁力選別、アルミ選別、光学選別機等を行うものの、機械処理で賄えない処理対象として、びんの色選別（茶、白、ミックス）などの対応に手選別が行われている。

加えて、前段の機械処理においても、表 3-23 に示すとおり課題があり、回収した再生原料の品質品位（グレード）を保持するために、追加で手選別対応が必要となるなどの状況も見られる。つまり、処理施設の現場では、「磁力選別」の際に混入してしまうスプレー缶や、「アルミ選別」の際に混入してしまう LiB もアルミ選別時に混入してしまうため、AI 選別であれば、特定の品目を認識し、選別する/選別しないの対応を行うことで、たまにしか流れてこない不適物の選別対応に従事する人の負担を軽減することができることになる。

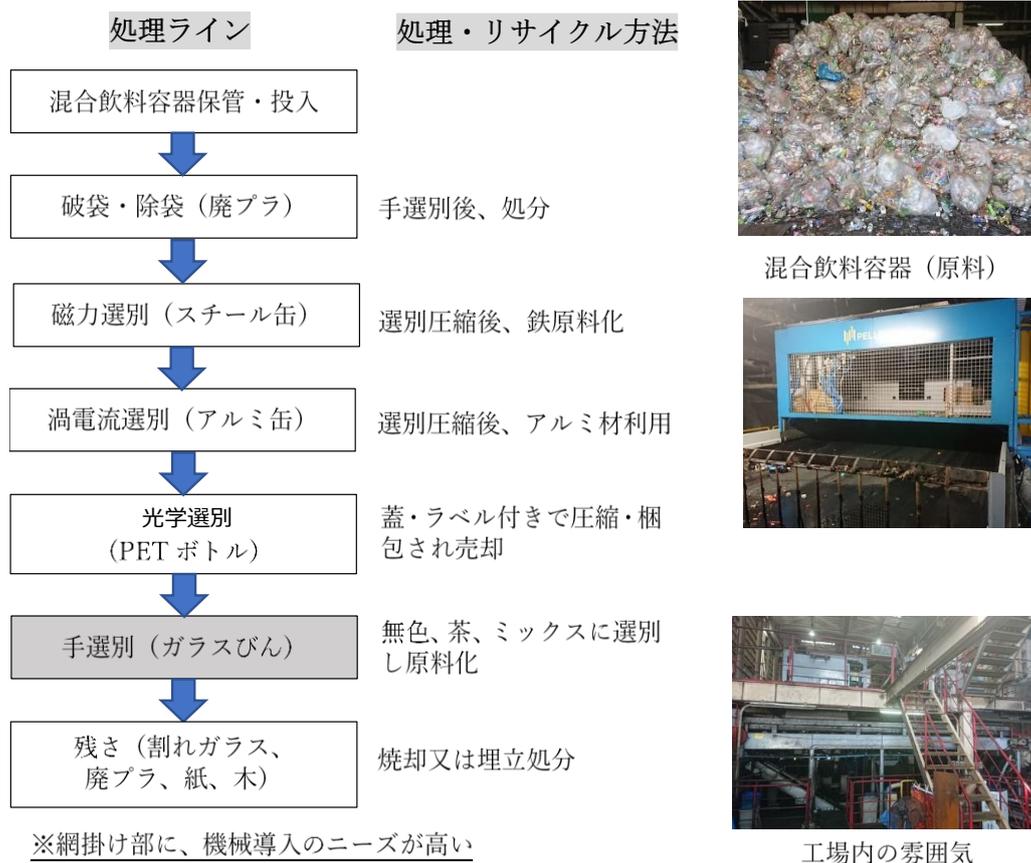


図 3-86 飲料容器リサイクル施設の処理フロー例（機械選別が進んでいる事例）

表 3-23 飲料容器処理で通常使用される選別機器と利用課題

選別機器	用途	利用課題
磁力選別機	鉄スクラップの回収	・スチール缶と、スプレー缶（危険物）の区分ができず、手選別対応が必要。
渦電流選別機	アルミニウムの回収	・アルミ缶と LiB の選別ができず、手選別対応が必要
光学選別機	PET ボトルの素材選別	・PET ボトル（色付き、柄付き）の選別ができない。 ・PET ボトル中の残液、タバコ吸殻等の内容物がある場合、手選別が必要となる。 ・1 回通しでは、選別精度が低い、縦方向の複数設備の配置は難しい（広い工場スペース要）
高磁力選別機	ステンレス、LiB の回収	・廃棄物が積層（3 cm 以上）する場合、除去できない。

以上、飲料容器の選別施設においては、いずれの対象施設においても、ロボット導入ニーズが存在していると考えられる。

## (2) ロボット選別の対象拡大の可能性

全国には、飲料容器処理を行う施設が、自治体分野では約 700 カ所、民間の産業廃棄物分野では約 800 箇所、計 1500 箇所存在すると言われており、人の役割（素材選別）の一部を担うロボットの導入が求められていると考えられる。

具体的には、表 3-24 に示すとおり、飲料容器の排出元別の性状特性が異なるため、処理の留意事項が異なる。その上、処理施設の別に処理フローが異なることや、回収する再生資材の種類分けや、目標品質等の異なるため、個々の現場ニーズを踏まえた技術システムの構築が必要となる。

表 3-24 飲料容器の排出元別の性状特性

	排出元	飲料容器の分別状況	性状等の特性
1	自治体・資源物	ペットボトル：飲料用はラベル無し。但し、飲料以外の把手付き他、各種容器あり。 びん：日本酒、ワイン等の大型瓶あり。化粧びん、ドレッシング等の飲料以外もあり 缶：スプレー缶あり。	飲料用ペットはラベル無くきれいだが、飲料以外の混入大 (分別排出)
2	事業系廃棄物・業務ビル、大型商業施設	ペットボトル：ラベル有。 びん：日本酒、ワイン等の大型瓶あり。ドレッシング等の飲料以外もあり	ごみ等の異物は少ないが、一部商業施設では、異物、残飲料もある。 (業務ビル：分別排出、商業施設：混合排出)
3	事業系・学校、飲食店等	ペットボトル：ラベル有。 びん：日本酒、ワイン等の大型瓶あり。ドレッシング等の飲料以外もあり 缶：スプレー缶あり。	ごみ等の異物は少ない。 (混合排出)
4	ベンダー・自販機	ペットボトル：ラベル有。	ごみ状態の異物や、残飲料が多い。 (混合排出)
5	小売店舗・拠点回収	ペットボトル：ラベル無し。 びん：日本酒、ワイン等の大型瓶あり。	ごみ状態の異物や、残飲料も一部あり。 (分別排出)

なお、飲料容器の選別対象については、表 3-25 に示すとおり、現場ニーズに応じた追加学習により、対象拡大を図ることは可能である。

一方、今後は、ロボットの 24 時間稼働や、手選別ラインの無人化を想定した処理フローの検討や、選別回収物の品質高度化への要求として、ペットボトル内に留まる残液や、タバコ等の異物の有無の判別、さらには、LiB の判別・自動選別などに対する選別が求められつつある。こうした分野は、既存の深層学習技術の活用では難易度が高く難しい状況にある。

表 3-25 飲料容器のロボット選別の対象

種類	初期モデル (通常)	高嶺清掃モデル (同様：機械選別との共存)	課題 (できないこと)
種類数	5 種	8 種	
ペット ボトル	1 種 (ペットボトル)	3 種 (ラベル有無、把手付き) ※色付き、飲料容器外等も可能	①残飲料、タバコ等の異 物あり回収
缶	1 種 (缶：スチール、 アルミ混合)	2 種 (缶、スプレー缶)	②LiB の回収
びん	3 種 (茶、白、ミック ス)	3 種 (茶、白、ミックス) ※化粧びん等も可能	③割れびん回収

(注) 現場ニーズに応じて、選別対象の追加学習は可能 (課題内容は除く)

### (3) 飲料容器ロボット開発の今後の方向性

飲料容器の選別は、対象物の容器形状が定形化しており、選別を行うコンベヤ状態も低層厚で、積層しない流れの構築ができることから、ロボット導入に向けたシステム開発において、最も取組易い対象であると考えられる。

しかしながら、現在までに、自治体におけるロボット導入事例はなく、産廃分野においても数例の導入事例があるのみとなっている。その理由は、導入されたロボットの選別精度が低いことや、費用対効果を考慮した価格が高いこと、さらには自治体では AI システム自体の導入に向けた事前評価ができない (ロボット選別に対するベンチマーク等が存在していない) ことなど、ロボットの導入に対するハードルが総じて高いことが要因となっている。

今回の開発実証した飲料容器選別ロボットは、様々な開発手法を活用した結果、85%の精度での判別に至ったが、処理施設での実用化には、更なる精度向上、つまり 95~98%程度の精度向上が求められている。そのため、選別精度の向上に向けて更なる技術開発を行う必要があり、LMM を組み合わせた精度向上の新たな手法を見出すなどを通じて、こうしたボトルネックの解消に務める必要がある。

なお、実用化に向けた技術開発を引き続き推進する一方、現時点でも人と協働した取組みを通じて、「素材回収」については一定の貢献が図れる状況に至ることとなったため、今後は、実施施設での長期間の利用実証などを通じて、実用化に向けた下記課題の明確化と対応を進める必要がある。例えば後工程で人がチェックする等、人との協働による取組みを通じて、自動運転技術でありがちなゼロイチの評価にならないような視点で着地点を探るなどが必要であると考えている。

#### (従来型のロボット (深層学習タイプ) 実用化に向けた対応課題)

##### ① ロボットを活用する処理ライン全体の構成の標準化や、理想的なあり方の検討

飲料容器の処理施設は、処理対象物の区分内容、処理方法、処理フローの構成 (他の機械設備や、人との協働)、回収物の再生資材の品質目標など様々なケースが想定される。今後は、既存施設への導入を含むロボット設備の導入に向けては、処理ライン全体の構成の標準化や理想的なあり方なども含めた検討が必要となる。

##### ② ロボットシステムの比較評価を客観的に行う指標の検討 (ベンチマーク)

ロボット選別は、各種の要求ニーズに対応する場合、AI モデルの適用性を考慮した柔軟なモデル選択が必要であると考えている。現状では、AI システムの実力を計測するベンチマーク (標準化した AI モデルの評価尺度) が存在しないが、事業検討段階において、事業者やベンダーが容易に相互評価ができるベンチマークが求められている。それらは、ロボットの普及拡大のフェーズにおいて大きな機能を担うことから、AI 画像認識の精度について比較評価が行えるベンチマークの作成 (業界団体が主体となることが望ましい) など必要であると考えられる。

##### ③ 処理現場で具体的なロボット活用についてコーディネートする技術者の養成

生成系 AI に代表される AI や、ロボティクス技術の進化の一方、そうしたロボットの処理現場への適用性や、カスタマイズ使用のあり方について、柔軟に捉えて、関係主体との具体的な

連携協議（各ニーズを踏まえたプレゼン協議等）ができる専門性の高いコーディネーター人材の養成が必要であると考えられる。

④ロボットの導入に向けた体制整備（営業、マーケティング、全国規模のアフターサービス）

飲料容器のリサイクル施設は、自治体 700 カ所、民間 800 カ所の合計 1500 カ所存在する。ロボット実用化の後には、早期の普及に向けて営業、マーケティングが必要となる。さらに、導入以降も、日常的又は機械故障等の個別対応に向けた対応体制として、全国規模のアフターサービスが必要となる。

⑤低コストでの量産システム

飲料容器のリサイクル施設におけるロボットニーズに対し、生産性向上や、長時間作業、人を代替する「素材選別」対応に係る費用対効果による検証が重要となる。そのためには、ロボット機能の高度化と同時に、処理フローの構成見直しによる調整なども含めたロボット導入による全体経費の低減（低コスト化）も重要な要素となる。ロボット導入によるコストは、初期導入コスト、設備改造、日常的な管理体制、設備メンテナンスなどすべてに対する見える化と、標準的な導入フローに基づく費用対効果の試算が必要となる。そのため、今後は、ロボットの低コスト化のための量産システムと合わせた総合的なアプローチが必要となる。

⑥初期導入が進みやすいレンタル・リース等のしくみの構築

AI 選別ロボットの活用は、飲料容器、建設廃棄物分野で複数の事例はあるものの、いずれも導入効果は満足のものではなく、導入事業者の信頼を必ずしも得られていない状況にある。各メーカーが、経験を積み上げる中で、課題をクリアする努力をされている段階にあると容易に想像できるものの、生成 AI に代表される AI 新時代におけるロボティクスの進化は早い中であって、ロボット利用に対する投資リスクを軽減したり、一定期間のお試し等の柔軟な対応ができるようなレンタル・リース等のしくみの構築が求められている。それらは、ロボット開発主体のみで実現するものではなく、様々な主体が関与しながら、全体として導入が進む方向での取組みとして推進する必要がある。

なお、前記した課題内容と対応の区分を表 3-26 に示す。

表 3-26 課題内容と対応の区分

項目	対応区分	理由
①ロボットを活用する処理ライン全体の構成の標準化や、理想的なあり方の検討	ロボットメーカー	個々の施設ニーズを踏まえて、効率的な活用ができる方法論の一環として実施することが望ましい。
②ロボットシステムの比較評価を客観的に行う指標の検討（ベンチマーク）	業界団体	施設の利用ニーズを踏まえた各種AIの適用性について、客観的な立場での指標作成が望ましい。
③処理現場で具体的なロボット活用についてコーディネートする技術者の養成	民間（スペシャリスト）	AI、ロボット技術の現場利用の適用性については、現場環境、処理フロー、成果評価等に関する分析、企画、マネジメント等が必要となるため、双方に精通する民間コーディネーターが必要。
④ロボットの導入に向けた体制整備（営業、マーケティング、全国規模のアフターサービス）	民間（アフターフォロー）、ロボットメーカー連携	ロボット利用前、利用時の各種課題に、即時、丁寧な対応が必要となり、体制構築を含めて民間主体で行う必要がある。
⑤低コストでの量産システム	ロボットメーカー、行政連携	ロボットの製造、利用に関する基本データを構築し、普及しやすい改善を進める必要がある。 依然、ロボット普及に必要となる標準化や、利用効果の最大化に係る開発に対し、当分の間、財政支援や、社会実装の具体化に向けたスピード感を持った行政支援が望ましい。
⑥初期導入が進みやすいレンタル・リース等のしくみの構築	民間（商社と連携）、ロボットメーカー連携	初期段階のロボット導入において、信用性、信頼性を担保するために需要家にやさしい、柔軟な方法論を試行する等が求められる。

## 第4章 ヒト共存型選別ロボットの開発

本章における取組の概要を表 4-1 に示す。

表 4-1 ヒト共存型選別ロボットの開発に係る概要

項目	目的	実施内容	成果	課題・展望
4-1 実証フィールドとなる中間処理施設の処理の実態及びニーズを踏まえた、開発すべきロボットの仕様の検討	建設混合廃棄物処理施設における廃棄物取扱状況と課題を踏まえて、ロボットの導入ニーズと選別対象を明確化する。	①中間処理施設における廃棄物処理の状況と廃棄物管理上の課題整理 ②ロボットシステムの検討対象と課題の整理 ③ロボット開発の方向性と検討課題のまとめ	連携先の株式会社クマクラの現場状況と利用ニーズを踏まえて、ロボット設置場所（二次手選別ライン）、選別対象物（木くず）を明確とした。	実証の際は、廃棄物の積層や、密集状態を回避したコンベヤ状態が望まれることから、現場協力による調整を行う必要がある。
4-2 ハイパースペクトルカメラを活用した廃プラ（塩ビ等）判別システムの開発	廃棄物中の塩ビ（PVC）判別・除去を行い、廃プラのリサイクルを向上する方法を明確化し、実用化に向けた課題整理を行う。	①廃プラリサイクルの実態調査 ②廃プラ（塩ビ）判別システムの開発 ③実用化に向けた課題整理	ハイパースペクトルカメラとRGBカメラを組み合わせる類似法による塩ビ判定とコンベヤ上の物体を着色（赤）する一体化システムを構築した（ラボスケール）。	複雑なシステムであり、実運用に向けては、可視化、バッファ管理、現地対応（設備設置・調整）等の課題を踏まえて、引き続き現場レベルでの具体的な取組検討が必要となる。
4-3 建設混合廃棄物（木くず等）を対象とした自動選別ロボットの高度化開発	ロボットユニットシステムの全体設計、技術システム構築及び、現場実証を通じてプロトタイプモデルを構築し、開発の今後の方向性を明確とする。	①ロボットユニットシステム全体の設計と開発 ②研究室内での選別実証 ③現場での実証実験 ④今後の実用化に向けたシナリオ構築	ロボット利用環境の調整による実証（株式会社クマクラ（令和6年10月～令和7年2月））を踏まえて、実用化に向けた課題と、今後の開発方向を明確とした。	実運用に向けては、ロボットの利用制約を踏まえた処理フローの見直しや、高度作業ロボットによる技術開発による問題解決の可能性について提示した。

## 4-1 実証フィールドとなる中間処理施設の処理の実態及びニーズを踏まえた、開発すべきロボットの仕様の検討

### 4-1-1 中間処理施設における廃棄物処理の状況と廃棄物管理上の課題

中間処理施設における廃棄物処理の状況と廃棄物管理上の課題の検討を行う。

対象とする事業分野については、東京都の産業廃棄物として大量に発生・処理を行い、かつ、処理工程において、手選別などに対する事業負荷が高い分野として、建設混合廃棄物に着目し、ヒト共存型のロボット選別の検討を行うものとした。

#### 1. 建設混合廃棄物におけるロボット化の検討の背景

- ① 「手選別」作業を代替。
  - ② 高機能化(人では判断しにくい「塩ビ」、「危険物」を検知)の対応を行う。
  - ③ 上記①、②を低廉かつ汎用性のあるシステムとして開発すること。
- 【既存ロボットメーカーの課題】
- ・一体型ロボットシステムとして設備導入時にユニットまるごとの大規模改造が必要となる。
  - ・ユニットシステム全体の費用が高額である。

#### 2. 開発目標

既存施設の活用を前提に、現状の処理フロー、選別ニーズ、人の配置等を考慮した上で、ロボットが作業しやすい環境の整備(雑多な廃棄物の積層防止)、人とロボットの共存による機能分担などのあり方を提示し、将来の「ロボット選別の導入」に係る施設変更の検討を行う際に参考となるよう、処理業者と実際に連携し、社会実装を行う。

※令和3年度「建設混合廃棄物処理の効率化に向けたAI・ロボティクス導入の検討(事業系廃棄物3Rルート多様化に向けたモデル事業)」のロードマップの検討結果を踏まえたものとする。

#### 3. 進め方

連携企業の処理方式を考慮の上で、「ロボット選別」の方法と課題を明確化  
➡全国の建設混合廃棄物処理施設に対するロボット選別導入モデルのサンプル

図 4-1 検討の進め方

### (1) 建設混合廃棄物の施設概要

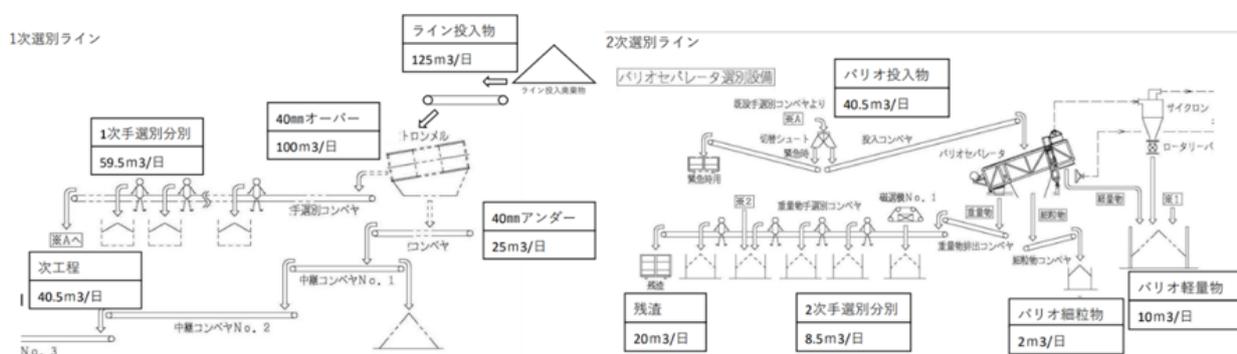
実証先の対象施設の選定は、都内の建設混合廃棄物処理施設の既存ラインへの設備導入を優先したものの、設備設置場所、場内搬送方法、実証期間における設備稼働への影響の考慮等の課題が生じたため、隣県にある建設混合廃棄物処理施設も含めて再度検討することとした。既存ラインの柔軟な運用の可能性、実証に係る研究者の移動効率等を考慮して施設選定を進めた結果、(株)クマクラ(埼玉県三芳町)に協力いただき実施することとした。

#### ① 協力先の調整時に留意した事項

- 今回の実証の取組みを協働するにあたり、経営者による課題認識や、それを踏まえた実証への協力意識が明確であったこと。
- 処理対象の建設混合廃棄物が、現場直送のものであり、標準型の処理施設であること。(同業他社の一次処理物を対象に処理を行う等、特殊な処理ラインではないこと)
- ロボット、カメラBOX、サーバーラック等の諸設備の設置が、作業員の邪魔にならずに、手選別処理ラインで行えること。
- ロボット設置のコンベヤエリア(画像認識～把持エリア)は、廃棄物の積層状態が回避できること。(予め機械選別等が行われ、重量物(木くず等)のみが流動する状態を保持)

② 施設概要

- 建設混合廃棄物の処理施設では、混合廃棄物と、単品物の2種類を受入れ。混合廃棄物は、手選別ライン（1次選別+機械選別+2次選別）を経て、単品回収を行い、単品物とともに、リサイクル、再生資源、処分物（焼却、埋立）として全量を出荷する。
- 年間搬入量は9.5万m<sup>3</sup>（2021年）、処理後の搬出量は3.1万tとなる。搬入量のうち、混合廃棄物は4.7万m<sup>3</sup>（50%）で、その中から廃プラ、木くず、紙くず、がれき類を手選別による回収や、機械処理を組み合わせた後、2.3万t（搬出量の75%）はリサイクル、有償売却などとなる。
  - ➡手選別における廃プラ塩ビの除去、危険物の除去、リサイクル向けの品質確保が重要となっている。
- 搬出量において、焼却0.1万t（3%）、埋立処分0.7万t（22%、主として安定型）。
  - ➡手選別における廃プラ塩ビの除去、木くず、紙くず等の有機分の除去（安定型埋立の基準：熱しゃく減量5%以下）の徹底が重要となっている。



手選別二次ラインの状況1



手選別二次ラインの状況2



手選別一次ラインの状況1



手選別一次ラインの状況2

図 4-2 建設混合廃棄物処理施設の手選別の概況

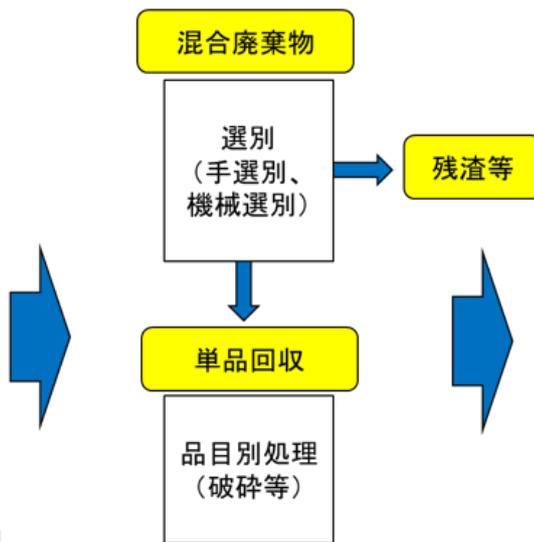
### 搬入(受入れ)

2021年 (単位: m <sup>3</sup> /年)		
項目	数量	割合
搬入量計	94,716	100%
自社搬入	54,383	57.4%
外部持込	40,333	42.6%

	品名	数量	割合
混合	混合廃棄物	47,262	49.9%
	単品物		
単品物	廃プラスチック	15,082	15.9%
	がれき類	6,675	7.0%
	木くず	5,844	6.2%
	可燃系混合物	5,743	6.1%
	廃石膏ボード	5,262	5.6%
	紙くず	4,080	4.3%
	ガラス陶磁器くず	2,836	3.0%
	金属くず	1,660	1.8%
	繊維くず	216	0.2%
	その他	56	0.1%
合計	94,716	100.0%	



### 中間処理



品目	名称	処理方法
木くず	チップ	破碎、磁選
廃プラ、紙くず、繊維くず(畳)	RPF	破碎、混合成形
コンクリート、アスファルト	再生砕石	破碎、磁選
廃プラ(軟質系・非塩素)	フラフ燃料	破碎、磁選

### 搬出・出荷

表 搬出量(t/年)		
項目	数量	割合
リサイクル	18,760	61%
有価売却	4,262	14%
単純焼却	975	3%
埋立処分	6,817	22%
合計	30,814	100%

表 リサイクルと有価売却(内訳)			
分類	品目	数量	割合
リサイクル(逆有償)	がれき類	6,708	29%
	焼却・熱回収	4,561	20%
	残渣、ダスト等	4,243	18%
	石膏ボード	1,753	8%
	廃プラ	637	3%
	金属くず	562	2%
	木くず	204	1%
有価売却	繊維くず(畳)	24	0%
	その他	67	0%
	金属くず	1,717	7%
	木くず	1,646	7%
	紙くず	390	2%
有価売却	再生砕石	264	1%
	廃プラ	180	1%
	RPF	65	0%
合計	23,023	100%	

(注)その他は、蛍光管、電池、断熱パネル、太陽光パネル等

図 4-3 選別処理に伴うマテリアルバランス

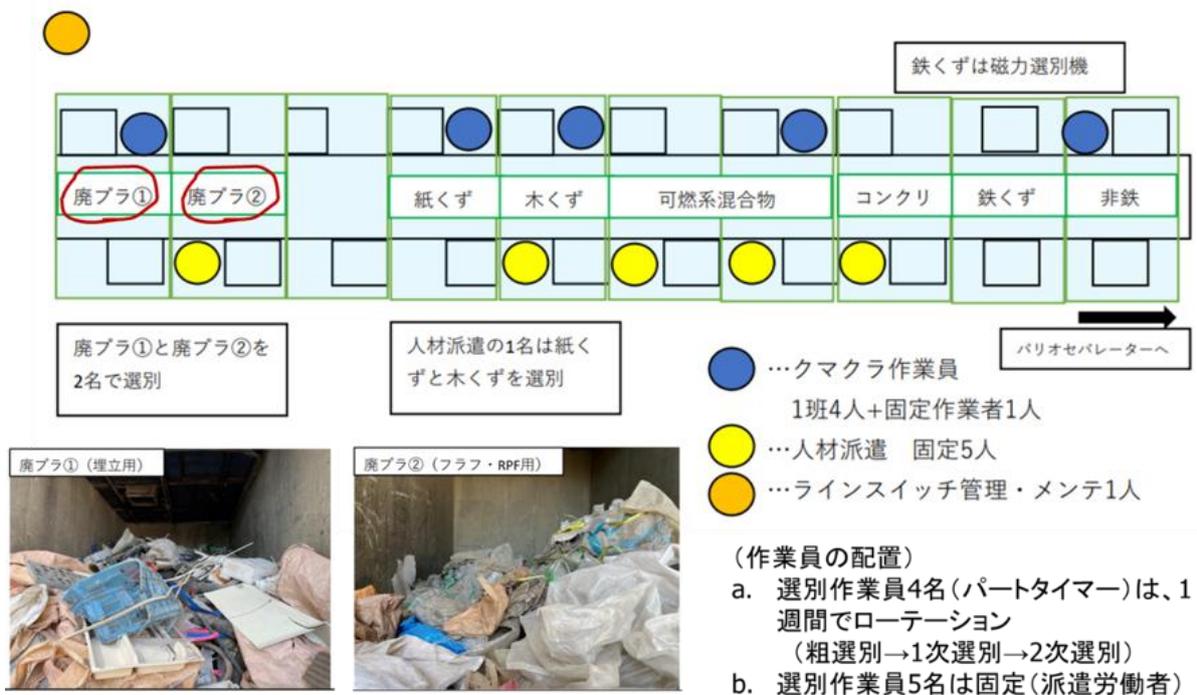


図 4-4 一次選別ライン(選別作業員10名)

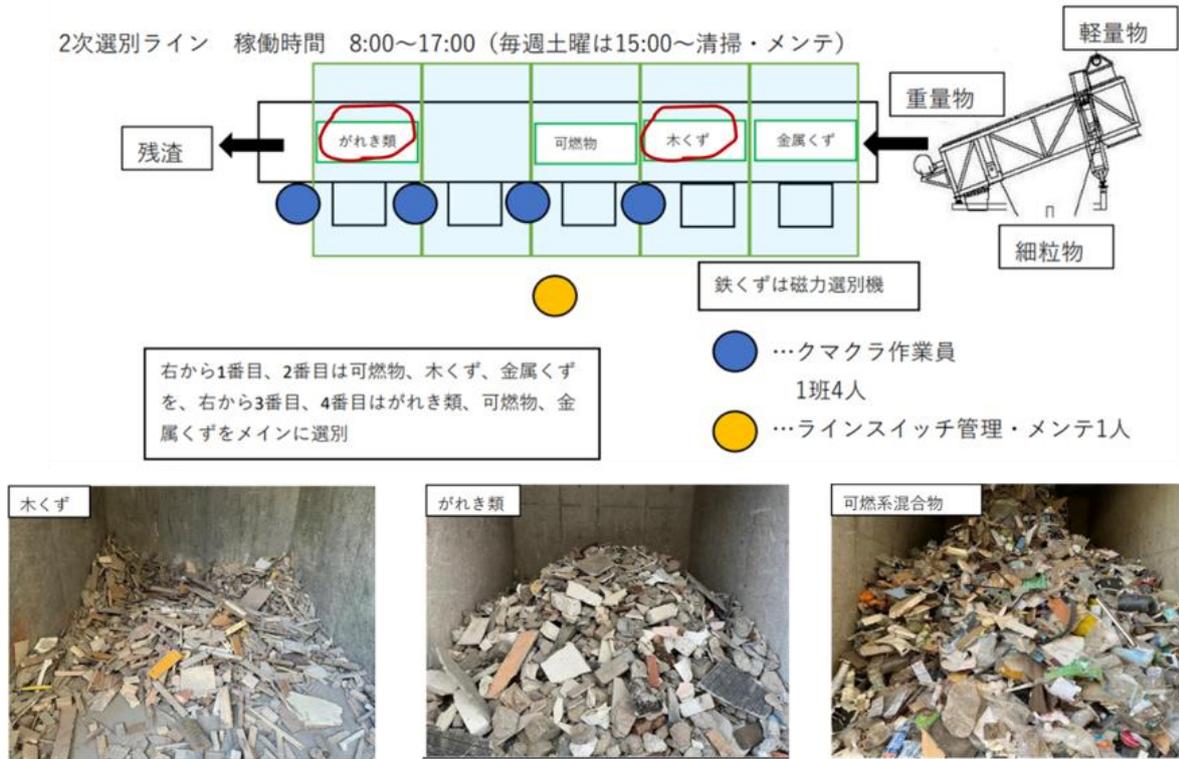


図 4-5 二次選別ライン (選別作業員 4名)

(2) 選別関連業務の運営状況

- 運営管理の区分は、「粗選別」、「選別ライン」、「単品処理 (廃プラ破碎、木くずチップ、碎石破碎)」等として対応している。
- 工場運営は、全 35 名。そのうち、粗選別は 9 名、選別ラインは 18 名と、選別関連業務に約 8 割が従事している。
  - ✓ 粗選別・・・査定・誘導、重機オペレーター、選別作業員(4)
  - ✓ 選別ライン・・・重機オペレーター、ライン管理・メンテ、1次ライン選別作業員 (10)、2次ライン選別作業員(4)
- 年間売上 (2021 年) のうち、労務費は 27.9% を占める。

表 4-2 建設混合廃棄物処理施設における選別作業員の勤務状況

作業内容	選別作業員	勤務時間	休憩時間	備考
粗選別	4名 (パートタイマー)	8:00~17:00	11:30~13:30 に昼休憩 (シフト制)。 12:00~13:00 も受入継続	選別作業員各 4 名 (パートタイマー) は、1 週間ごとに場所をローテーションして、公平性を担保。
1次選別	10名 (パートタイマー4名+固定1名+固定派遣5名)	同上	10:00 (15分)、 12:00 (1時間)、 15:00 (15分)	
2次選別	4名 (パートタイマー)	同上	同上	

(3) 手選別による課題及び AI 選別ロボットの技術システムへの期待

- ① 手選別した選別回収物は、単品物の各処理工程で処理され、リサイクルもしくは 再生資源として売却される。

- ※廃プラ、紙くず、木くずチップ、再生砕石（コンクリート、がれき）  
 ② 手選別後の残渣は、安定型埋立処分が可能となること。

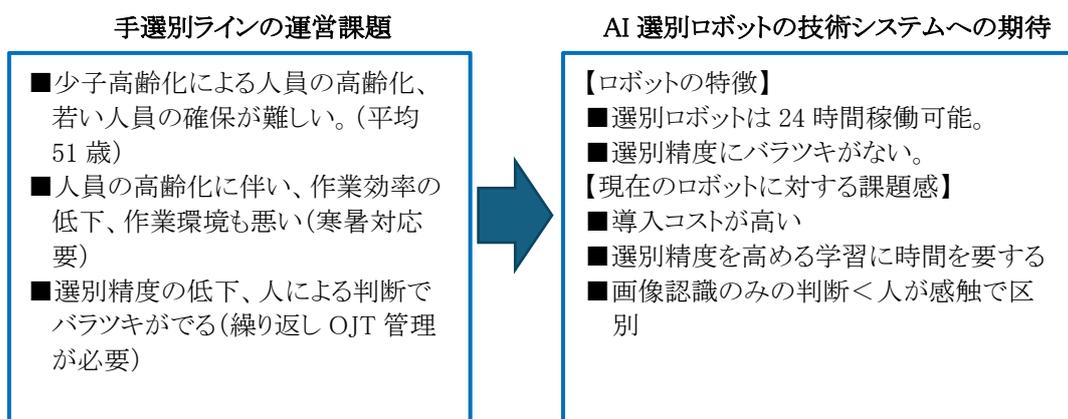


図 4-6 手選別の課題と AI 選別ロボットへの期待

#### 4-1-2 ロボットシステムの検討対象と課題

建設混合廃棄物処理施設の課題を踏まえて、ロボットシステムの開発テーマの見極めを行う。

実証は、(株)クマクラの 2 次ラインで行う。1 次選別ラインでは粗選別の後に高層厚として重量物、軽量物、微細物が混合で流れてくる。その後、手選別及び機械選別（バリオセパレーター）を経て、重量物のみ流れてくるのが 2 次選別ラインである。2 次選別後は、安定型埋立処分を行うため、コンクリート塊、木くず等のリサイクル材の選別の他、紙類等の有機物を全て手選別で取り除いている。

初期段階におけるロボット開発の実力を踏まえると、重量物、軽量物、微細物が全て混合する混合廃棄物の状態では、積層、廃棄物同士の密着、泥等の汚れ状態等の点で、難易度が高いと判断された。そうした中であって、(株)クマクラでは、手選別を一次ライン、二次ラインと 2 回実施していること、両ライン間にバリオセパレータを設置し、重量物、軽量物、微細物の 3 分別を行い、二次ラインには機械選別後の重量物が流れてくるというものとなっている。

その結果、ロボット開発と実証は、(株)クマクラの二次選別ラインを用いて行うことに決定した。また、ロボット選別の対象物は、リサイクル対象及び有機物として必須回収対象とする「木くず」を対象として選定することとした。コンクリート塊についても、選別対象としうるが、安定型埋立処分の基準（熱しゃく減量 5%以内）を満足するために必要となる有機物（木くず）を対象とした。さらに、コンベヤ状態についても、低層厚で廃棄物がバラケタ状態を対象に行うこととした。こちらも、二次選別ラインは、2 巡回させており、高層厚、低層厚のコンベヤ状態が生じるが、ロボット選別で難易度の低い、低層厚、廃棄物がバラけたコンベヤ状態でおこなうものとした。

■建設混合廃棄物のリサイクルは、「破碎」前に単品ごとの選別回収を行い、その後単品破碎等により品質調整とリサイクルを行う。

➡単品回収したコンクリート塊、木くず、紙くず(段ボール)、廃プラ、鉄くず、非鉄くずは、各破碎などを施すことでリサイクル材として出荷可能となる。特に、コンクリート塊、木くず等は単品化によるリサイクルニーズが高い。

■単品回収できない混合物は、破碎等を施し、不燃物、可燃物に種分けされる。その際に、処理の安全確保のため「危険物除去」が必要。さらに、可燃物の品質確保のため「塩化ビニル除去」が必要となる。

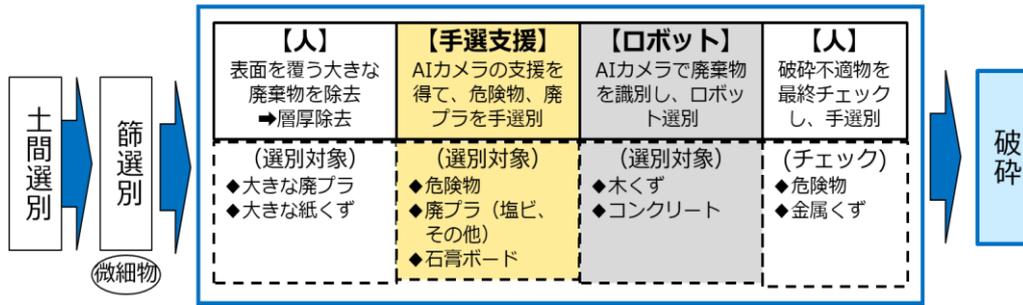
■なお、建設混合廃棄物の大量処理を行う場合には、工場内の設置スペース(大小)、設備投資の規模(大小)、処分・リサイクル方法(処理物の要求品質)などを考慮の上で、破碎後に機械選別施設として、不燃物精選機(振動、風力)、光学選別機(硬質プラ等)の設置が行われる場合がある。また、処理後に、可燃物のセメント燃料化を行う場合には、ある程度の処理ロットを確保できる施設に限定されるなど、施設の特性が異なる。



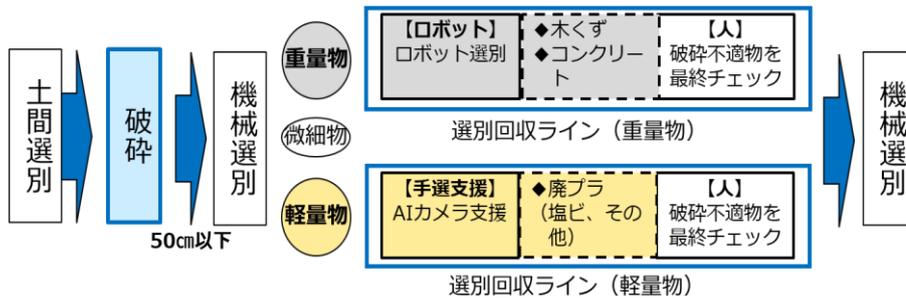
- ・ ロボット選別の活用は、ロボットに仕事がしやすい作業環境の整備が最も重要。
- ・ 今回の「手選別＋機械選別＋ロボット選別」という組み合わせは、ロボット選別の障害となる課題が少ない(想定)。

※ロボット選別の十分条件;廃棄物の積層防止、廃棄物の重量・形状等がロボットアーム(耐重量)、グリップ形状(耐形状)に収まること

(1) 選別回収ライン（1ライン）の配置構成見直し（重量物、軽量物混合処理）



(2) 事前破碎—機械選別（重量物、軽量物、微細物）—選別回収ライン（2ライン；重量物/軽量物）



(3) 事前機械選別（重量物、軽量物、微細物）—選別回収ライン（2ライン；重量物/軽量物）

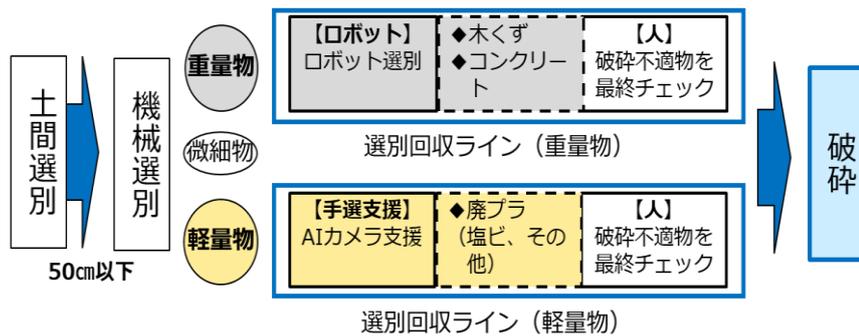


図 4-7 処理フローのパターンとロボット利用案

表 4-3 ケース別の特徴と課題

ケース	特徴	課題	備考
(1) 従来型 ケース	1ライン。篩選別のみ。 選別回収ラインの大きな 変更は不要。	廃棄物の層状の解消が必 須。 混合状態のため、ロボッ トによる選別回収の難易 度は大	ヒトとの共存が前提（効 率性：小）
(2) 事前破碎 +機械選別	重量物、軽量物の2ライ ン化。破碎後は形状が安 定。	2ラインへの改造要。 土間選別への負担大（破 砕前に危険物除去が必 要）	ロボットによる選別回収 は容易（効率性：大）
(3) 事前機械 選別のみ	重量物、軽量物の2ライ ン化。	2ラインへの改造要。 土間選別への負担中（50 cm大は、事前選別要）	ロボットによる選別回収 は容易 （効率化：大）

#### 4-1-3 ロボット開発の方向性と検討課題のまとめ

ロボット開発の方向性と検討課題は、次のようになる。

##### (1) 1次選別ラインにおける、「廃プラの材質選別」の選別の検討

廃プラは、埋立用、フラフ・RPF用、可燃系混合物の3種類に選別。人が材質判別し、選別している。

- 1) 埋立用: 廃プラの硬質系及び塩素が混入しているもの(長尺シート、Pタイル、タイルカーペット、FRP等)。汚れているものも回収し、安定型埋立を行う。
- 2) フラフ・RPF: 軟質系のビニール(ブルーシート、養生シート、がら袋等)などの軽量物。破碎・圧縮後に、リサイクル向け出荷を行う。
- 3) 可燃系混合物(サーマルリサイクル): 壁紙、廃プラ複合物(分別できないもの)、木、紙くず。危険物は、ガスボンベ、ライター、リチウムイオン電池等で、破碎等に伴う発火の危険がある。

→塩ビ等の検知による手選別支援システムの開発は、「カメラシステムを用いた廃プラ中の塩ビの判定、危険物検知と手選別支援システムの開発」を主題とする。

##### (2) 2次選別ライン(1次選別+機械選別後)における木くず又はがれき類の選別回収

- 1) 木くず: 1次選別ラインで選別しきれなかった小さな木くず(20cm以下程度がメイン)

※選別課題/木の模様のあるプラ、木のような見た目の合成ゴムが間違えやすい

- 2) がれき類: B級砕石の原料になる瓦、サイディング、ALC、モルタル、タイル、メッシュ付きがら、タイル付きがら、レンガ等。(スレート、ケイカル板はNG/石綿の混入の恐れ)

※選別課題/多岐にわたる。汚れた木くず、汚れたアルミが間違えやすい

→建設混合廃棄物の自動選別ロボットの開発は、「既存の選別ラインに適用できる効率的な木くず、コンクリート塊選別ロボットの開発」を主題とする。

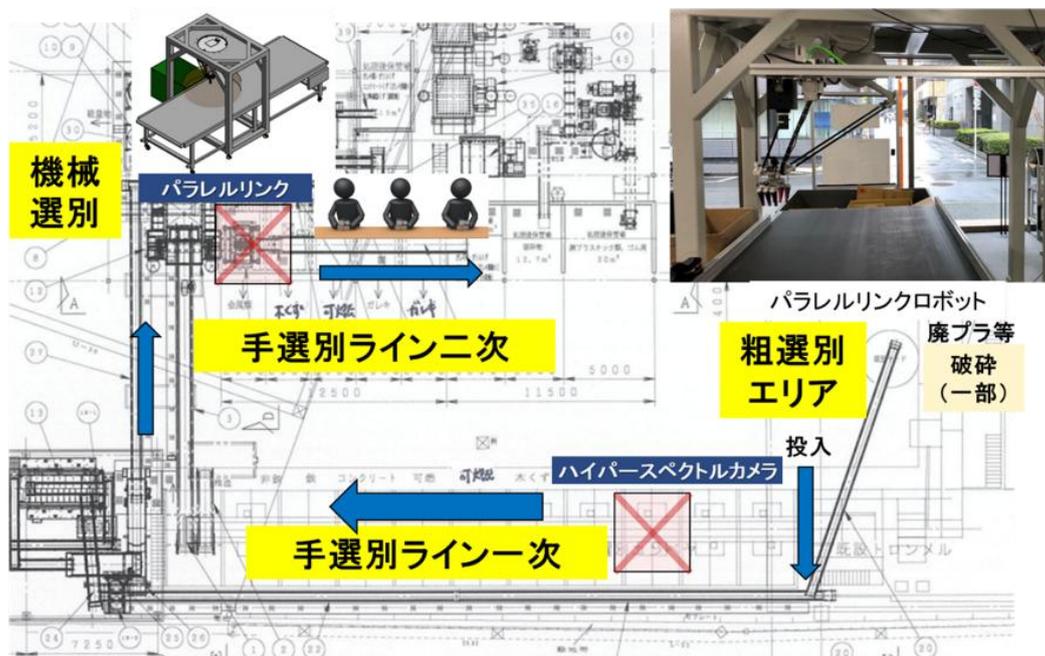


図 4-8 AI 選別ロボット等の配置計画案

#### 4-2 ハイパースペクトルカメラを活用した廃プラスチック類(塩ビ等)判別システムの開発

建設混合廃棄物処理施設では、廃プラとして、PVCほか、様々な素材が流れてくる。PVCのみ判別して選別できれば、その他プラをRPFに使えると考えている。大きさ、形状等から、ロボット選別には課題が多いため、ハイパースペクトルカメラとRGBカメラを用いてモニター画像に物体に赤色をつけ、人が

識別して取れるようにするシステムを開発した。素材選別は、楕クマクラの収集試料と、メーカー提供の純正品との類似度でPVC等の判別を行った。

#### 4-2-1 廃プラスチック類リサイクルの実態調査

資源循環ニーズが向上している中、排出されている廃プラの実態把握が不足している現状に対して、本調査は処理現場で収集できるプラスチックごみの実態を把握し、研究室等事業所、建設混合廃棄物処理工場、事業系一般廃棄物処理工場、RPF・PCFR生産工場、4つの現場における廃プラ分別の需要確認と、プラスチック資源循環全体的の効率向上の方法論を検討するためにデータ収集を行った。

##### (1) サンプル調査の方法について

本調査では事業所、中間処理工場、リサイクル施設に渡り、リサイクルへ搬出するプラスチックの種類把握と同時に、未利用プラスチックの実態調査は建設混合廃棄物処理工場を中心に調査を行った。回収されるサンプルデータの信頼性を確保するために、各現場の実態に合わせて搬入の日付、搬出先、回収者をランダムに選定し、同等の体積からサンプル回収を行った。表 4-4 に調査現場と目的を示す。

現地で採取したサンプルは、全体の計量と樹脂判別ハンディセンサーに基づいたプラスチック種類の分類を行った後に、スペクトルデータ収集に使用するプラスチックサンプルを抽出し、現場から回収した後、研究実験室にて反射度スペクトルデータを回収する。表 4-5 にサンプリング作業の詳細を示し、

表 4-6 にサンプル調査に使用した器材を示す。

表 4-4 調査現場と目的

現場分類	事業者名	調査目的
研究室等事業所	研究室	リサイクルへ搬出するプラスチックの種類を把握する。
建設混合廃棄物処理工場	建設混合廃棄物中間処理施設	リサイクルへ搬出するプラスチックの種類と、未利用プラスチックの実態を把握する。
事業系一般廃棄物処理工場	事業系一般廃棄物中間処理施設	リサイクルへ搬出するプラスチックの種類を把握する。
RPF・PCFR生産工場	プラスチック再資源化工場	リサイクルされているプラスチックの品目と実態を把握する。

表 4-5 サンプリング作業の詳細

日付	場所	調査内容	サンプル数
2024/08/05	建設混合廃棄物中間処理施設	プラスチックサンプル収集・吸光度スペクトルデータ収集	138
2024/08/27	建設混合廃棄物中間処理施設		
2024/09/26	建設混合廃棄物中間処理施設		
2024/09/20	研究室		60
2024/10/13	研究室		70
2024/10/30	プラスチック再資源化工場		

日付	場所	調査内容	サンプル数
2024/07/23	事業系一般廃棄物中間処理施設	プラサンプル収集・吸光度スペクトルデータ収集	35
2024/11/15	事業系一般廃棄物中間処理施設		35
2024/08/22	協力事業者	反射度スペクトルデータ収集	321
2024/08/23			
2024/08/29			
2024/11/21			
2024/11/25			

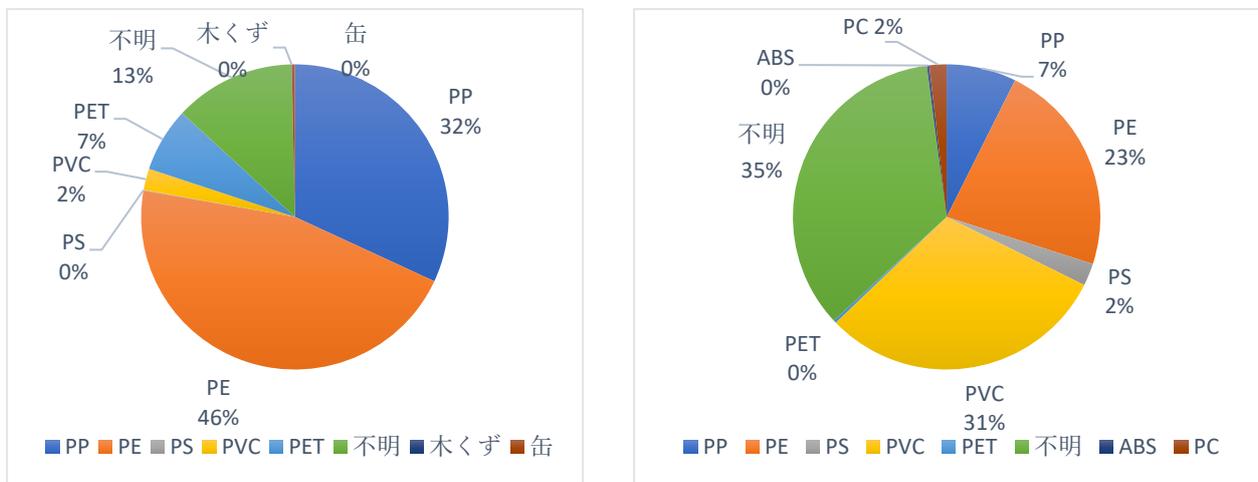
表 4-6 サンプル調査に使用した器材

器材名	写真	用途
電子計量器		プラスチック廃棄物の計量
プラスチック箱		サンプル体積統一用回収容器
樹脂判別ハンディセンサー		プラスチック廃棄物の種類判定 吸光度スペクトルデータの収集
ハイパースペクトルカメラ		反射度スペクトルデータの収集

(2) 建設混合廃棄物中のプラスチック調査について

調査先である建設混合廃棄物中間処理施設にてヒアリング調査を行った結果、建設混合廃棄物の中間処理施設ではプラスチック類を軟質系プラスチックと硬質系プラスチックに分けて処理されていることを把握した。その内、軟質系プラスチックとはごみ袋やブルーシートを始めとした変形しやすいプラスチックシートと解釈し、硬質系プラスチックとはパイプやバンパーなどの変形しにくいプラスチック製品と解釈している。この分類は“硬い”プラスチックにリサイクル材として扱いにくい塩素系プラスチックが入っている可能性が大きい視点から、塩ビを除去することを目的として設置されている。

本分別手法の分別効果を把握し、未利用プラスチックの有無を検証するために、現場の選別結果に対してサンプリング調査を行った。集まったサンプルから分析すると、軟質系プラスチックでは PVC の含有量が 2%と示しており、効率的にリサイクル原料を分別できていると思われる。一方、硬質系プラスチックの約 34%の素材は、技術導入によって正確に分別できればリサイクルできる PVC 以外のプラスチックであることを把握した。図 4-9 に樹脂判別ハンディセンサーによる建設混合廃棄物中のプラスチック調査結果を示す。



(a) 軟質系プラスチック (b) 硬質系プラスチック  
図 4-9 樹脂判別ハンディセンサーによる建設混合廃棄物中のプラスチック調査結果

硬質系と軟質系のプラスチック分別は塩素系プラスチックの除外に効率的と思われるが、硬質系プラスチック中に塩素系プラスチック以外プラスチックと分別できなかった可燃系混合廃棄物中のプラスチックを未利用プラスチックとして量的分析を行った。図 4-10 に可燃系混合廃棄物のサンプル内訳を示す。

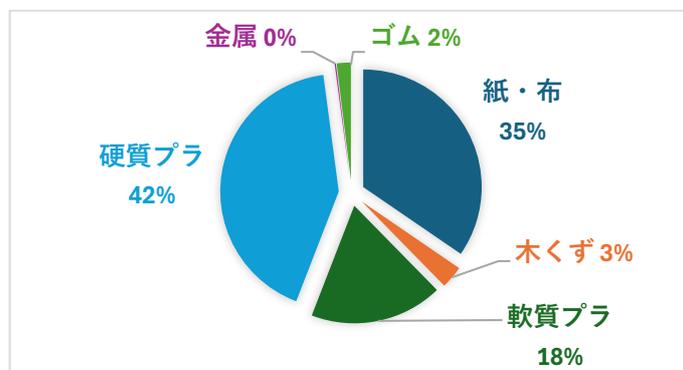


図 4-10 可燃系混合廃棄物のサンプル内訳

埋め立て処分では体積を単位に見ていることが多いが、リサイクルの視点から見ると重量の方が元素の量を測れて適切と思われるため、未利用プラスチックの分析では重量を単位としている。同じ体積で3箱ずつサンプリングした硬質系プラスチック(16.9kg)は軟質系プラスチック(3.1kg)より約5.4倍の重量であることも把握した。建設混合廃棄物処理施設から提供していただいたプラスチックの搬出量とサンプル調査で把握した未利用プラスチックの割合(34%)を基準に分析すると、現在の建設混合廃棄物の中で埋め立て処分されている硬質系プラスチックの中にはリサイクルされているプラスチックの約1.8倍の未利用プラスチックが存在している。表4-7に建設混合廃棄物処理施設からのプラスチック搬出量を示す。表4-8に未利用プラスチックの重量分析の詳細を示す。

表 4-7 建設混合廃棄物の中間処理施設からのプラスチック搬出量 (m<sup>3</sup>)

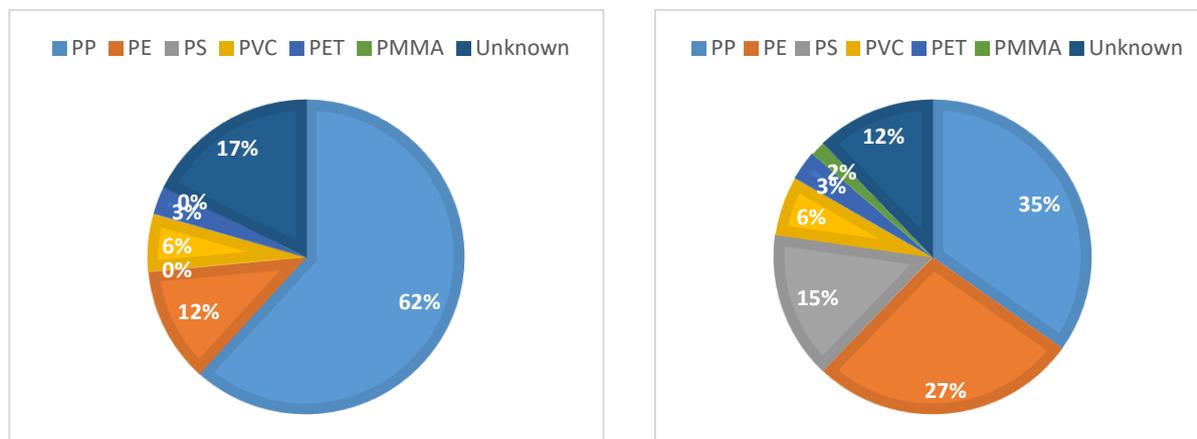
プラスチック全体搬出量(2022)	粗選別	1次手選別	合計	
埋立用(硬質系・塩素系)	15	9	24	62%
フラフ・RPF用(軟質系・非塩素系)	5	4	9	23%
マテリアルリサイクル用(PP・PE容器)	4	0	4	10%
マテリアルリサイクル用(塩ビ管)	2	0	2	5%
合計	26	13	39	100%

表 4-8 未利用プラスチックの重量分析

1次選別後の未利用プラ計算	量 m <sup>3</sup>	未利用率 %	未利用プラ m <sup>3</sup>	重量比 (X/軟質プラ)
埋立用(硬質)	9	0.34	3.06	1.86
可燃系混合廃棄物(硬質)	5.4	0.34	1.836	1.11
可燃系混合廃棄物(軟質)	12.6	0.87	10.962	1.22
合計	27		15.858	4.19

(3) 研究室と事業系一般廃棄物処理施設でのプラスチック調査について

本調査でサンプルを採取した研究室と事業系一般廃棄物処理施設では排出日と排出者によって発生する個体差が多いため、重量による比例調査は適切ではないと判断し、それぞれの現場にてプラスチックサンプルを採取した後、研究室(60個)、事業系一般廃棄物(70個)のサンプルで素材の個数分析を行った。事業系一般廃棄物処理施設において、PSは個別に回収しているため、サンプルとして採取していない。図4-11に研究室と事業系一般廃棄物処理施設でのサンプル調査の結果を示す。



(a) 事業系一般廃棄物サンプル

(b) 研究室サンプル

図 4-11 研究室と事業系一般廃棄物処理施設でのサンプル調査の結果

本調査によって、研究室と事業系一般廃棄物処理施設には塩素系プラスチックがごく少数しか流れていない事を把握した。Unknown として記録しているプラスチックは基本食品包装であり、色と汚れが影響して、樹脂判別ハンディセンサーでは判定できなかった物を記している。

#### (4) 再資源化工場のプラスチック調査について

現在再資源化工場にてリサイクルされているプラスチックの詳細を把握するために、協力事業者の生産原料となるプラスチックに対してサンプリング調査を行った。RPF 原料と PCFR 原料をそれぞれ 21L サイズのプラスチック箱を 2 箱分回収し、樹脂判別ハンディセンサーで素材判定した後に素材別の計量と分析を行った。素材別の個数から見ると材質が「不明」であるプラスチックが多く見えるが、実物から分析すれば不明になっている対象物は汚れている食品包装であり、塩素系プラスチックではないと思われる。その結果を図 4-12 に示す。

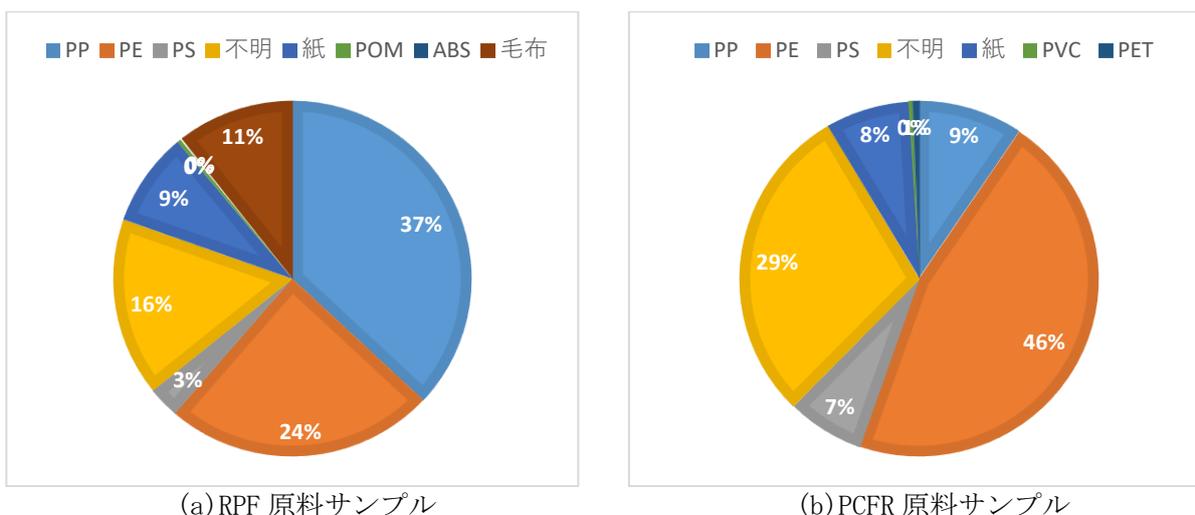


図 4-12 再資源化工場のプラスチックサンプリング調査結果

#### (5) 使用済みプラスチックリサイクルの実態調査の結果まとめ

- プラスチック類廃棄物の分類に建廃の分別方法（硬質系・軟質系）を活用するとシンプルに現在のリサイクル対象物を抽出できると思われる。
- 事業系一般廃棄物、建設混合廃棄物の違いにかかわらず、現在リサイクル施設に搬出されている廃プラは基本「容器包装」と「梱包材」（軟質系）であった。
- リサイクル原料として確認できた「製品プラ」（硬質系）はバケツ、ハンガー、シートのような単一素材で作られている一体化製品である。
- 重量から見ると、手選別ラインで抽出した硬質系プラの中には軟質系プラの約 1.8 倍の非塩素系プラスチックが存在している。
- 建設混合廃棄物中の廃プラを見ると PVC は、硬質系プラの 15%程度を占めている。さらに、判別不明な 41%を PVC の可能性と考えた場合、総計の 56%程度が PVC の可能性と考えられる。(株)クマクラは、硬質系プラスチックは PVC 割合が多いため、硬質系プラ全体を全て安定型の埋立処分とする対応を行っている。PVC の選別ができれば、RPF 化の活用可能性が生まれる。

#### 4-2-2 廃プラスチック類（塩ビ）判別システムの開発

廃プラ（塩ビ）判別システムの開発は、ハイパースペクトルカメラを用いた素材判別システムとして要素技術（識別法）の構築を行った。

廃プラは、形状や色の特徴からほかの廃棄物と区別しにくい。そのため、ハイパースペクトルカメラを用いて反射する波長の特徴の分析結果を利用し、廃プラの素材（塩ビ、PE、PP 等）を判別し、他の廃棄物と区別するための材料判別システムの開発を行った。

ハイパースペクトルカメラは、多くの波長画像を撮影し、ヒトの目では実現しにくい材質の分類等を行うため、建設廃棄物中の廃プラを対象に、PVC（ポリ塩化ビニル）の有無等の検知に活用できるものとなる。システムの原理として、データ取得方法や、データ取得結果の確認を行い、選別ロボットにおけるセンシングカメラとしての活用可能性の検討を行う。カメラ取得後は、メーカーと連携の上で、使用法の確認、構成機器の組み合わせの後、性能検証試験を行う予定としている。

#### (1) 方法論の検討

ハイパースペクトルカメラを用いて、リアルタイムに廃プラ（塩ビ）判別を行う方法論の確立とシステムの開発を行った。

内容は、次のとおり。

- ①ハイパースペクトルカメラと RGB カメラを組み合わせた材料判別システムの検討
- ②リアルタイムで材料判定を行うためのアルゴリズムの開発
- ③モニターを用いて作業員向け塩ビ（PVC）の着色画像を提示し、手選別支援を検証

#### 【実施工程】

(ア)ハイパースペクトルカメラの発注

(イ)ハイパースペクトルカメラとソフトウェアの使い方の研究

(ウ)ハイパースペクトルカメラの専用光源発注

(エ)検知対象物 PVC および PVC 以外のスペクトルデータの収集

※データ種類：ピクセル毎に 800 のデータ収集可能、波長範囲 900～1700nm

(オ)データのプレ処理

※黒白バランスの調整、ノイズ除去。

(カ)PVC 検知モデルの構築

※SVM（サポートベクトルマシン）を利用し、PVC と PVC 以外の 2 種類のプラスチックの選別を試みた。



図 4-13 ハイパースペクトルカメラ



図 4-14 光源

表 4-9 ハイパースペクトルカメラの仕様

○ハイパースペクトルカメラの仕様
モデル: Pika IR
測定波長範囲: 900~1700 nm
波長分解能 FWHM: 8.8 nm
波長チャンネル数: 168
空間分解能: 1*320 px
最大フレームレート: 508 fps
レンズ: NIR -6.0mm
○光源: PS-FUL250
○サンプルステージおよび制御装置: コンベヤ
○ソフトウェア
データ収集ソフトウェア: Spectronon 3.5.5, Vimba SDK
データ分析ソフトウェア: numpy, scikit-learn, matplotlib



図 4-15 ハイパースペクトルカメラによる廃プラ判別システム

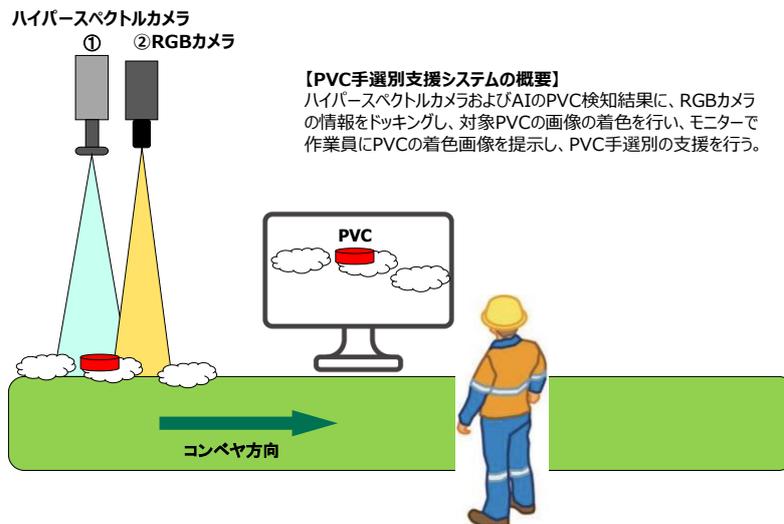


図 4-16 PVC 手選別支援システムのイメージ図

ハイパースペクトルカメラの原理は、光がスリットを通過し、回折格子で反射し、デジタルカメラセンサーに到達したものを、スペクトルデータ及び空間データ（ピクセルデータ）として取得するものとなる。

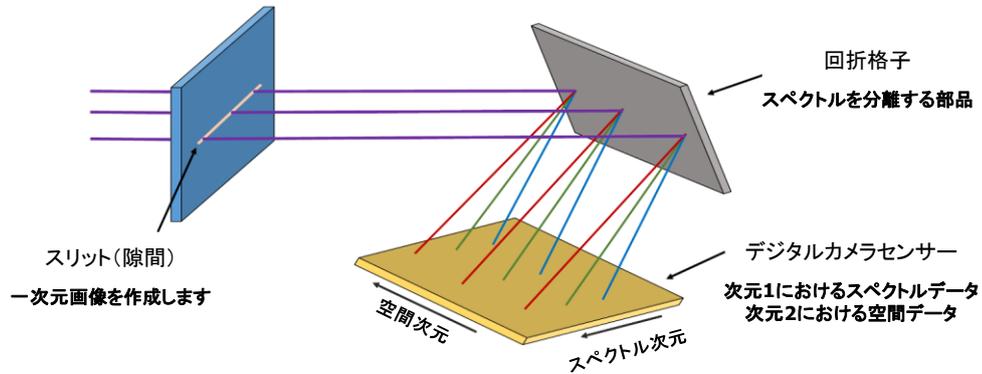


図 4-17 ハイパースペクトルカメラの原理

各ピクセルデータには、各波長で読み取られた強度値が含まれており、図 4-18 のとおり、二次元波形を構築できる。

この材料の波形特性に基づいて、機械学習で AI モデルを作成した。

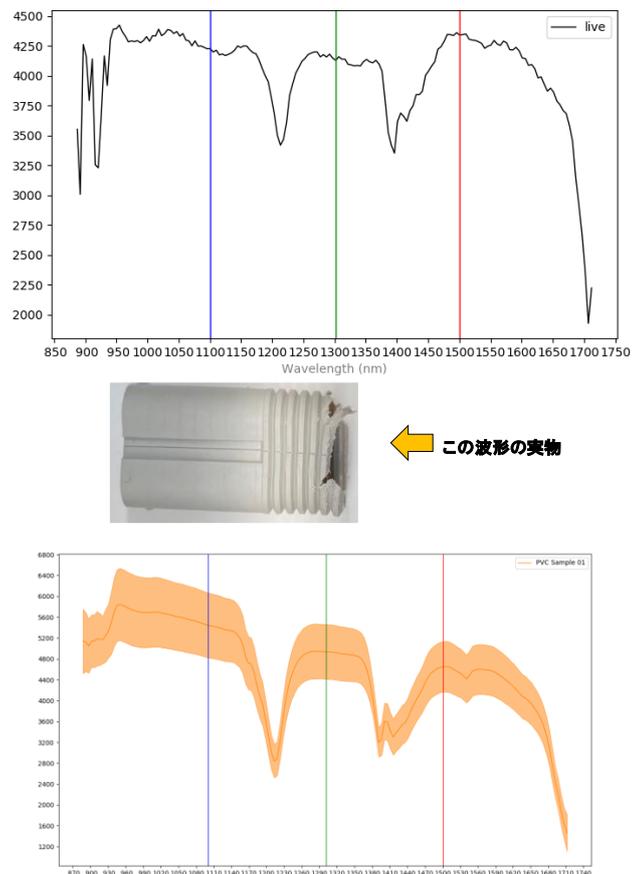


図 4-18 二次元波形のイメージ図

## (2) 種類別のプレ学習

PVC のサンプルは、建設混合廃棄物から収集を行った。具体的には、処理業者から選別後の硬質系廃プラを提供いただき、PVC、PVC 以外に分けてスペクトルデータ (DB) を作成した。



図 4-19 PVC 材料 (建設混合廃棄物)

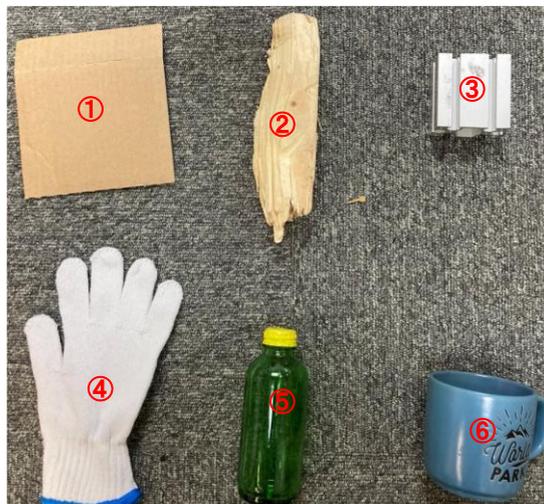


図 4-20 非 PVC 材料

様々な対象物 (PVC) とそれ以外 (プラ以外) を比較すると、PVC は、谷部が 2 カ所存在する等、一目瞭然となっている。こうした特性を踏まえて、PVC の即時判定、カメラシステムとの連携等のシステム開発を行った。

なお、同じ PVC 材料であっても、塗装などの外装要因、混合物の組成などの内部要因により、特定の波長の強度に差異が生じている。

ただし、形状の特性に基づいた素材判定を行うことができる。

なお、PVC 以外の材料であれば、PVC 材料とははっきりと異なる波形を示すことから、こうした混合材料を使用して素材判定を行うことにより、精度の向上が図れることになる。

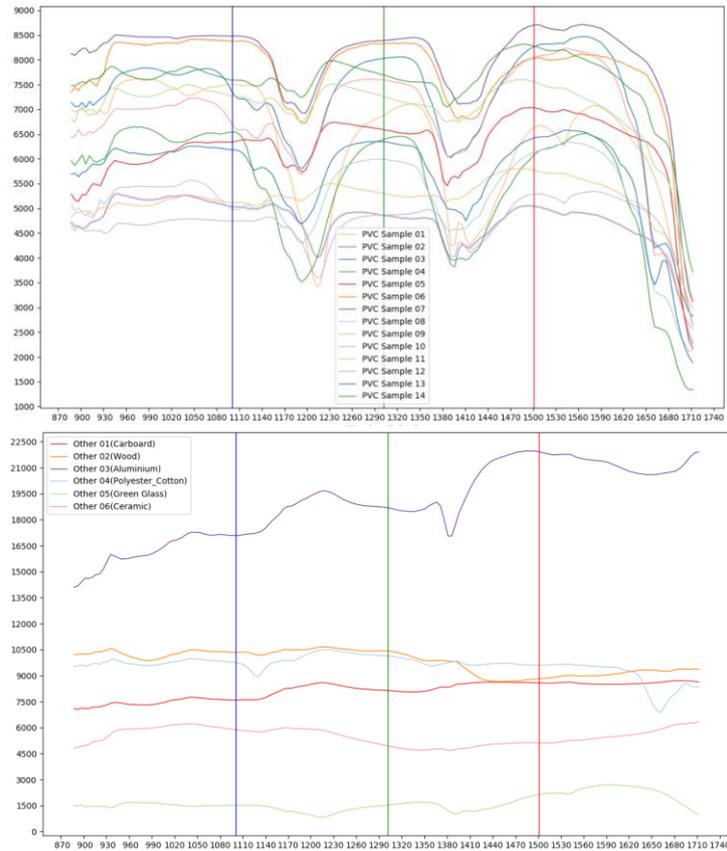
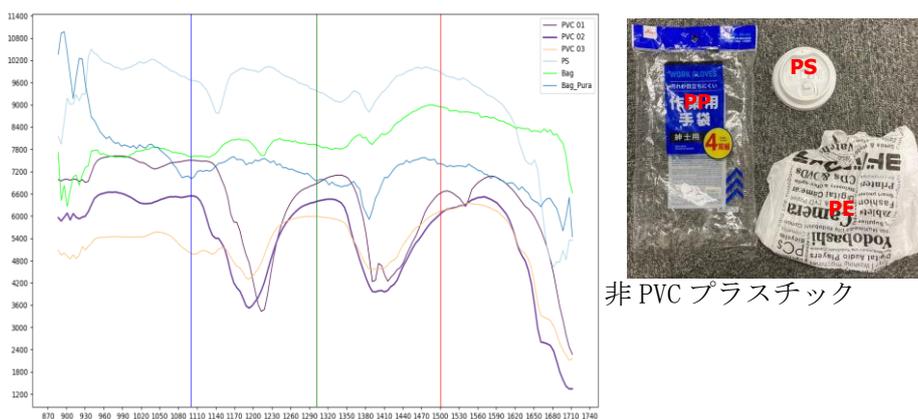


図 4-21 物質別・材料別のスペクトル（波形）の特徴

※スペクトル：光や信号等の波を成分に分解し、成分ごとの大小（強度）を見やすく配列したもの

PVC とその他プラ素材（PP、PE、PS）とを比較しても、図 4-22 のように違いは明確となっている。



非 PVC プラスチック

図 4-22 PVC とそれ以外のプラスチック素材の波形比較

### (3) 画像認識精度の向上

画像認識精度の向上には、次の 2 課題をクリアする必要がある。

### A. ハイパースペクトルカメラのノイズ

ハイパースペクトルカメラから取得されるデータにはノイズが含まれており、アルゴリズムを使用してフィルタリングする必要がある。

ノイズ源は、次の3項目となる。

#### ①量子ノイズ (Quantum Noise)

光子の数の固有のランダム性によって生じるもので、光子ノイズとも呼ばれる。低照明条件下では特に顕著で、センサーに到達する光子の数が減少し、信号強度のランダムな変動を引き起こす。

#### ②熱ノイズ (Thermal Noise)

カメラセンサーの温度によって引き起こされ、電子のランダムな動きが増加する。長時間露光や高温環境下のカメラで一般的な課題となる。

#### ③読み出しノイズ (Readout Noise)

センサー上の電荷をデジタル信号に読み取り、変換する過程で生じるノイズで、増幅器のノイズ、アナログ・デジタル変換器 (ADC) のノイズなどがある。

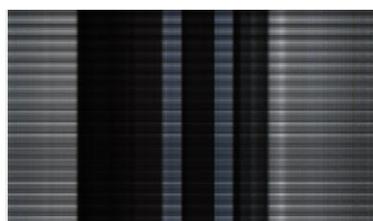


Fig 1.ノイズを含む擬似RGB画像です

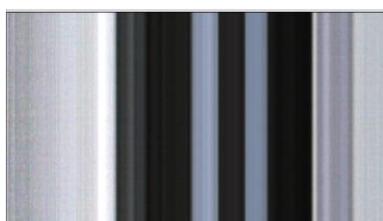


Fig 2.ノイズを含まない擬似RGB画像です。

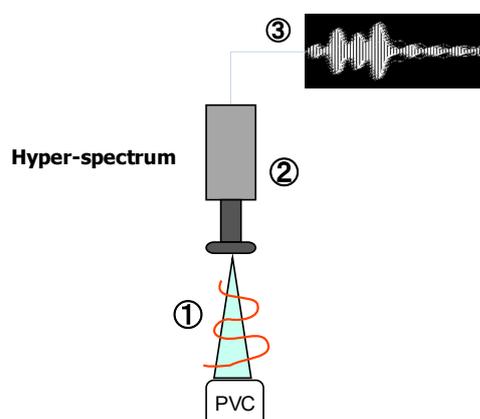


図 4-23 ノイズによる影響

### B. RGB 画像の歪み

検出結果の相対位置を RGB カメラが撮影した画像と組み合わせて出力する際、相対位置が不正確となる。そのため、設置場所の変更、あるいは歪みのないレンズを採用する必要がある。

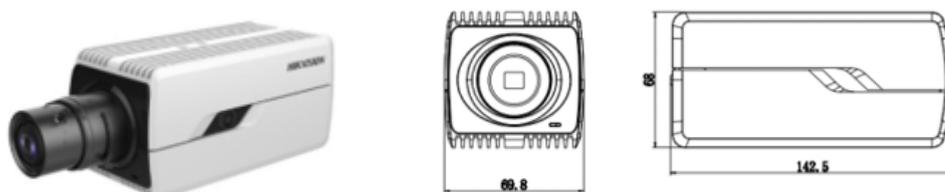


図 4-24 RGB カメラの外形

表 4-10 RGB カメラの仕様

○カメラの仕様	
300 万画素	
焦点距離 2.7~10 mm	
最短検出距離 10cm	
フレームレート 25fps (50Hz) 、30fps (60Hz)	
シャッター 1/3s~1/100,000s	
画像サイズ 1920×1080	

なお、歪みの原因は、レンズが光線を均一に曲げられないことにある。具体的には、レンズの形状や光学素材の特性によって、レンズの中心と周辺部で光線の屈折率が異なるため、画像が歪んで表示されることになる。

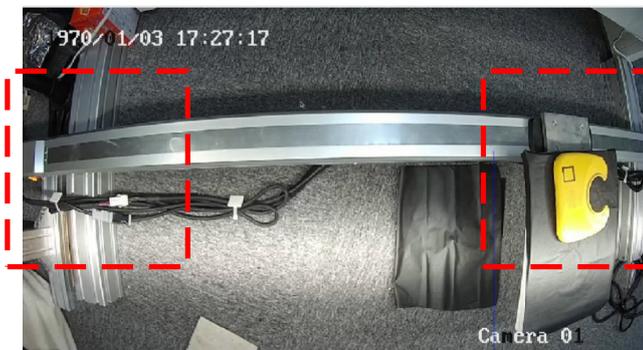


Fig 1.魚眼レンズを付けているカメラは画像歪みのあることが判明しました。

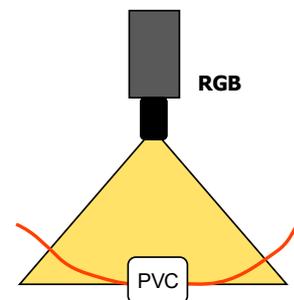


図 4-25 RGB 画像の歪みの状況

(4)ハイパースペクトルカメラを用いた廃プラ（塩ビ等）判別システムの実証

1. 方法論の確立

ハイパースペクトルカメラを用いた廃プラ（塩ビ等）の判定方法は、様々な手法の試行錯誤の結果、対象物と、基準データとの比較において、スペクトルデータをもとに類似度から素材判定を行う類似度法を用いて、実施することとした。

ハイパースペクトルカメラの波長範囲（900~1700nm）は、プラスチックの分光特性を活かした識別に適しており、今回は、類似度法を用いた検討を行うこととした。類似度ベースの手法は、特定のスペクトル特徴を基準にして、未知の試料を既知の PVC スペクトルと比較することで判定するアプローチとなる。

類似度による判定において、一般的であるコサイン類似度を用いて判定を行う。

コサイン類似度の特徴は、表 4-11 に示すようになる。

表 4-11 コサイン類似度の特徴

項目	内容
概要	スペクトルベクトル間の角度を用いて類似度を評価。0 に近いほど類似
メリット	スペクトルのスケール（光量の違い）に影響を受けにくい
適用	PVC の既知スペクトルと未知サンプルのスペクトルのコサイン類似度を計算し、閾値以上であれば PVC と判定

類似度 (Cosine) とは、光スペクトル角マップ (SAM, Spectral Angle Mapper) といわれており、2つのスペクトルベクトルの間の角度を計算して、波形の相似性を評価する手法となる。

主として、高分解能のハイパースペクトルデータの材質識別に実際に使用されており、以下の判定方法により、光スペクトルの形状 (波形) を比較するための標準的な手法となる。  
(類似度の判定方法)

- $SAM \leq 0.1$  以下 : 2つの材質の光スペクトルは非常に類似している。
- $SAM = 0.1 \sim 0.5$  : 2つの光スペクトルは似ているが、部分的に異なる。
- $SAM > 0.5$  : 光スペクトルの相似度は低く、異なる材質の可能性が高い。

標準サンプル品の PVC-2 を用いて、他の PVC や、別素材との比較を行った結果、下図に示すとおり、PVC との類似度判定を行うことができた。

表 4-12 中の緑色に図示した材料が、「 $SAM \leq 0.1$  以下」として PVC としての判定結果を示している。

PVC 判別において、基準データの数量で、プラスチックのバリエーションに対応し、類似した PP・ABS 等が PVC と判定されないよう基準データを増やしたり、類似度の相対比較を行う等を考える必要がある。

- PVC・PP・ABS の純正品を複数収集し、代表スペクトルを作成
- 各素材のスペクトルライブラリを作成し、類似度の相対比較を実施

表 4-12 廃プラサンプル (PVC) の判定結果

Sample /	Image	Category	Category
□□-ABS-1			Other
□□-ABS-2			Other
□□-ABS-3			Other
□□-PA-1			Other
□□-PC-1			Other
□□-PC-2			Other
□□-PE-1			Other
□□-PET-1			Other
□□-PMMA-1			Other
□□-PP-1			Other
□□-PP-2			Other
□□-PS-1			Other
□□-PVC-4			PVC
□□-PVC-1			PVC
□□-PVC-2			PVC
□□-PVC-3			PVC
eco Chem 24 unknown			Other
eco Chem 30 unknown			Other
□6 PVC			PVC
□60 PVC			PVC
□8 PVC			PVC

標準サンプルを用いて類似度判定を行った結果データの一部を、表 4-13 に示す。

これをみると、ABS-2, PP-1, PE-1 についても類似度の判定上 ( $SAM \leq 0.1$ ) となっており、PVC とも類似している状況にある。つまり、センサーとしての正確性の観点からは、実験環境や、光源などによる影響についても十分な考慮が必要であると理解できる。

表 4-13 標準サンプルの類似度判定結果

サンプル	類似度
ABS-1.bip	0.25906
ABS-2.bip	0.08252
ABS-3.bip	0.17002
PP-2.bip	0.18355
PP-1.bip	0.07220
PS-1.bip	0.15217
PVC-4.bip	0.09304
PET-1.bip	0.18840
PMMA-1.bip	0.22506
PE-1.bip	0.09081
PVC - 2.bip	0.00000
PA-1.bip	0.23449
PC-2.bip	0.21121
PVC - 3.bip	0.07161
PVC - 1.bip	0.03501
PC-1.bip	0.19734

(注) PVC-2 との類似度を判定したもの

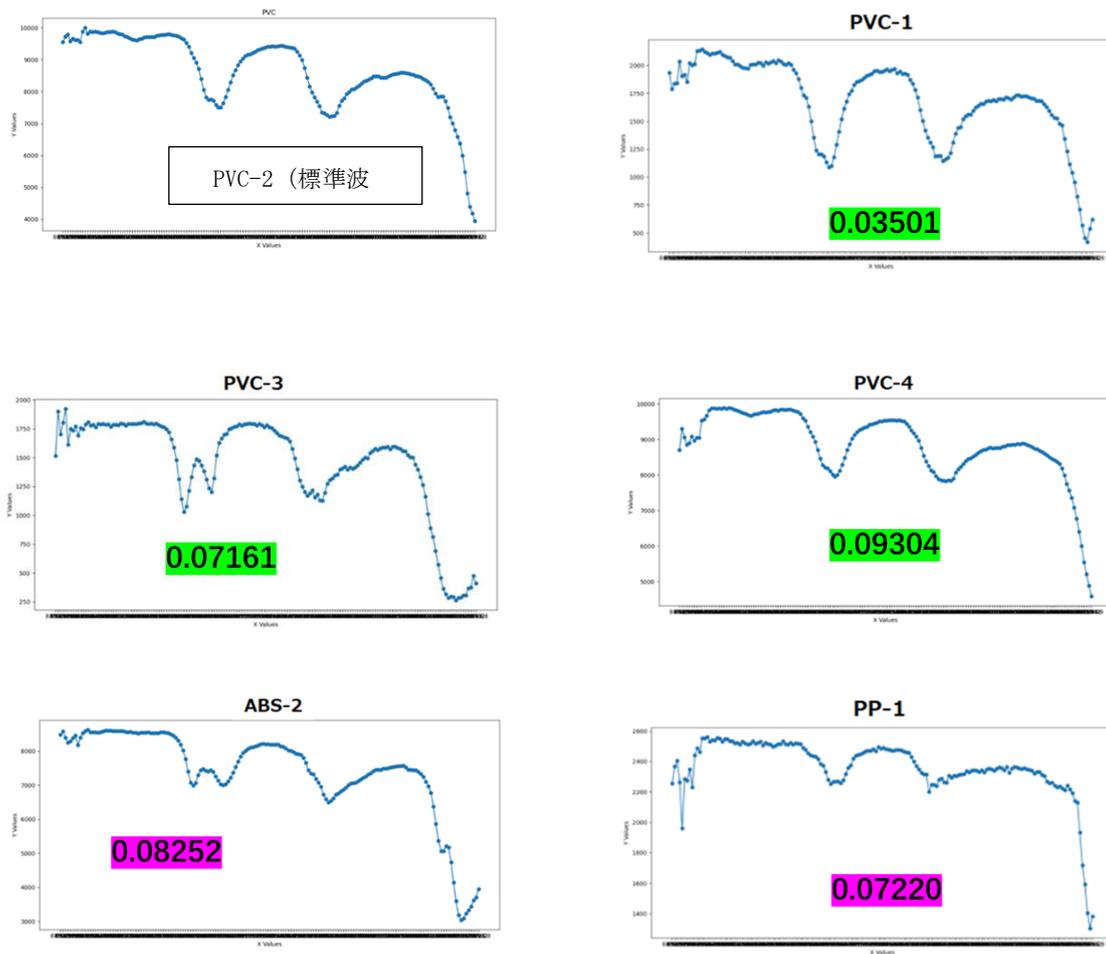


図 4-26 PVC-2 との比較において類似度判定 (PVC) を行った結果

## 2. プラスチック純正品の活用

プラスチック素材の判別用素材として、プラスチック純正品の素材を入手し、基本とするスペクトルデータの取得を行った。なお、純正品の提供は、各メーカーの協力によるものとなる。

プラスチック種類は、合計9素材18種類 (PVC4種類、その他14種類) からなる。

- ①PVC (4製品)、②PP (2製品)、③PE (2製品)、④PS (1製品)、⑤ABS (3製品)、⑥PMMA (2製品)、⑦PC (2製品)、⑧PA (1製品)、⑨PET (1製品)



(a)PVC (4製品) : プラスチック純正品



(b)PVC 以外(8素材14製品):プラスチック純正品

図 4-27 プラスチック純正品素材

表 4-14 サンプル概要表

種類	サンプル番号	樹脂	色	色名称	形状(縦×横×厚み)	添加剤					製品名	会社名	提供元		
						顔料	難燃剤	可塑剤	無機物	有機物					
1	PVC-1		白	スノーホワイト	150×200×5	あり	なし	あり	なし	なし	カイダックSKDG1400	住友ベークライト	日置		
2	PVC-2	塩ビ88%	白	白色不透明	210×295×5	あり	なし	錫系安定剤、MBS、DINP等10%	酸化チタン (IV) <2、2,6-シーターシャリーブチル-4-クレゾール<0.15	なし	エスピロンプレート I-311-H	積水成型工業	フラット合成		
3	PVC-3	塩ビ92%	グレー	—	210×295×5	あり	なし	錫系安定剤、MBS、アクリル系加工助剤、高分子エステル系滑剤等8%	なし	なし	エスピロンプレート S-101-E	積水成型工業	フラット合成		
4	PVC-4	塩ビ88%	透明	透明(自然色)	210×295×5	あり	なし	ジブチル錫系安定剤、MBS、DINP等13%	2,6-シーターシャリーブチル-4-クレゾール<0.15	なし	エスピロンプレート I-500-TR	積水成型工業	フラット合成		
5	PP	PP-1	—	透明	—	210×300×0.4	—	—	—	—	FL03H	ノバテック	アイテック		
6		PP-2	—	青	—	50×90×2	—	—	—	—	488637	-	共和薬品		
7	PE	PE-1	—	透明	—	210×300×0.129	—	—	—	—	LF129	ノバテック	アイテック		
8		PE-2	—	赤	—	50×90×2	—	—	—	—	474464	-	共和薬品		
9	PS	PS-1	—	ピンク	ピンク(透明)	50×90×2	—	—	—	—	495924	-	共和薬品		
10	ABS	ABS-1	—	ナチュラル	—	150×200×4	あり	なし	あり	なし	なし	なし	タフエースR EAR003	住友ベークライト	日置
11		ABS-2	—	白	—	210×305×5	あり	なし	あり	なし	なし	なし	F71079	住友ベークライト	日置
12		ABS-3	—	オレンジ	—	50×90×2	—	—	—	—	—	503162	-	共和薬品	
13	PMMA	PMMA-1	—	透明	—	100×150×5	あり	なし	あり	なし	なし	なし	—	住友ベークライト	日置
14		PMMA-2	—	透明	黒(透明)	50×90×2	—	—	—	—	—	—	AC505979	-	共和薬品
15	PC	PC-1	—	透明	—	150×200×5	あり	なし	あり	なし	なし	なし	ポリカエース ECK100UU	住友ベークライト	日置
16		PC-2	—	黄白色	—	50×90×2	—	—	—	—	—	482562	-	共和薬品	
17	PA	PA-1	—	白	—	50×90×2	—	—	—	—	467751	-	共和薬品		
18	PET	PET-1	—	透明	—	150×200×5	あり	なし	あり	なし	なし	なし	サンロイドベットエース EPG100	住友ベークライト	日置

3. 現場試料を用いた検証

現場で収集した廃プラのうち、建設資材の起源から明らかに「PVC」であると想定されるサンプルを対象にスペクトル図を作成し、各類似度判定を行った結果を、表 4-15 に示す。

その結果、類似度判定の結果は、いずれも SAM ≤ 0.1 以下となっており、PVC であると判定できた。

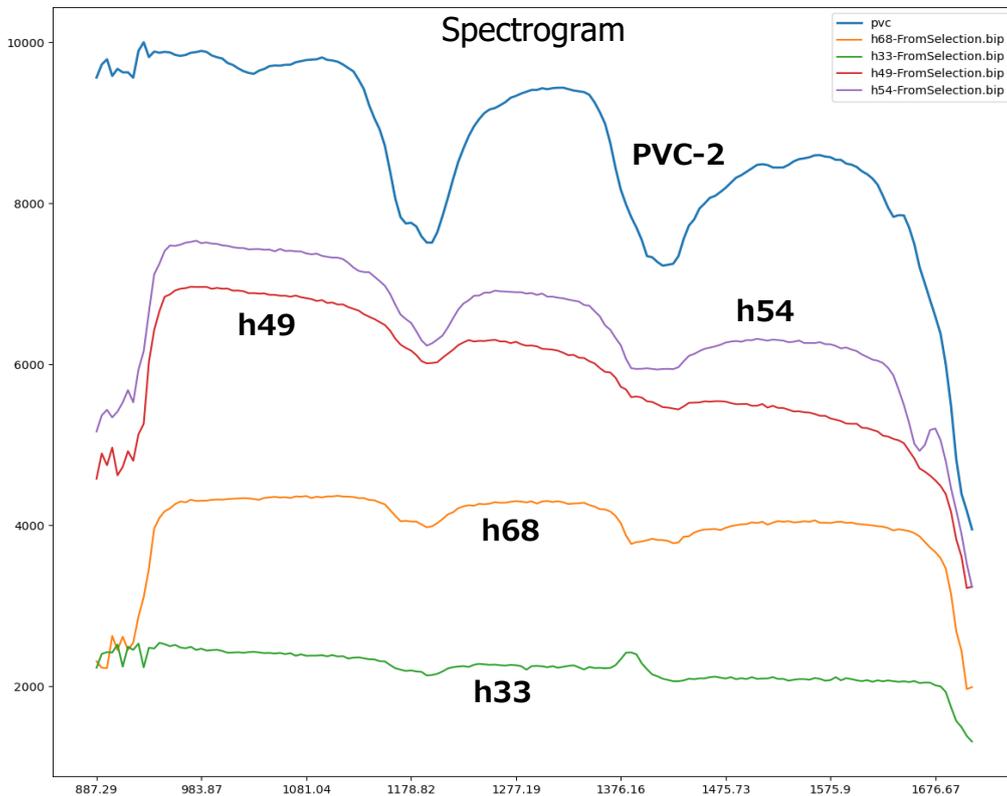


図 4-28 スペクトル図

表 4-15 対象試料の類似度判定結果 (PVC-2 純正品との比較)

サンプル	類似度
h54	0.0771
h49	0.0952
h68	0.136
h33	0.0695



図 4-29 類似度判定に用いた試料

#### 4. PVC 手選別支援システムの実証

ハイパースペクトルカメラおよび AI の PVC 検知結果に、RGB カメラの情報をドッキングし、対象 PVC の画像の着色を行い、モニターで作業員に PVC の着色画像を提示し、PVC 手選別の支援を行う。

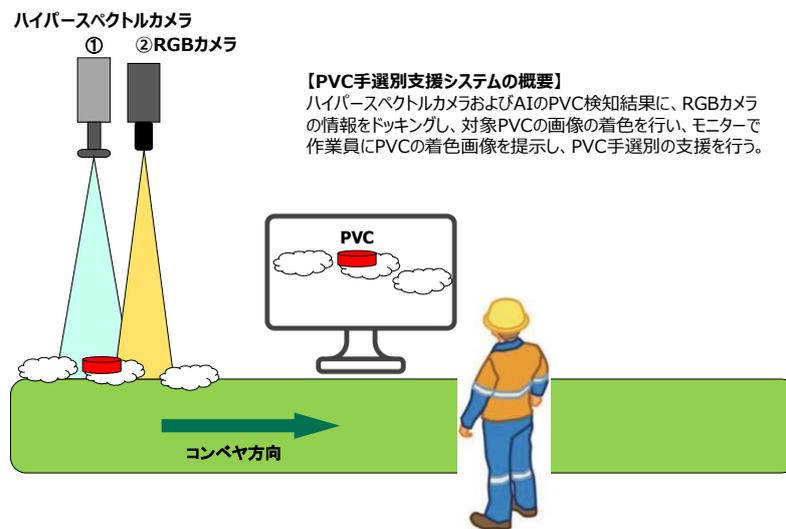


図 4-30 PVC 手選別支援システムのイメージ図

詳細のシステム構成は、図 4-31 に示すとおりとなる。

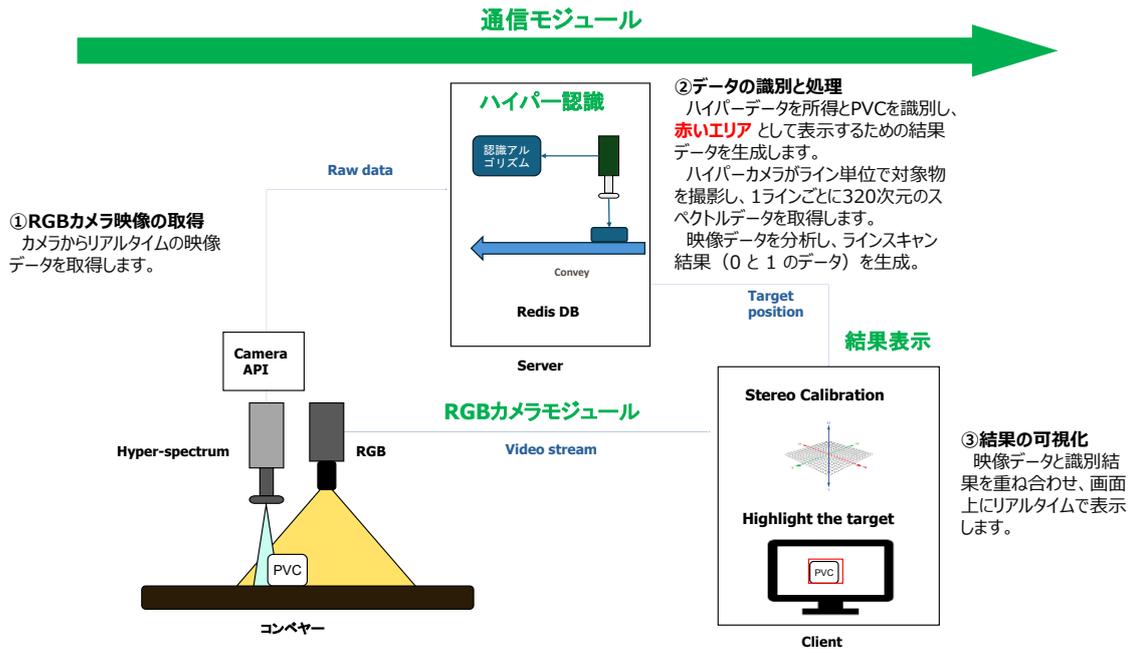


図 4-31 システム構成図

PVC 判定の表示方法は、下記に示すとおり、現場設置に係る調整作業の困難さを踏まえて、研究開発室内に設定するものとして実証を行った。

- ①ハイパースペクトルカメラから取得した認識結果（例：線スキャンデータ）は、背景の RGB 映像にリアルタイムで重ね合わせて表示を行う。
- ②PVC 判定結果は、透明度のある赤色のオーバーレイとしてモニター上に可視化し、廃プラ試料との重ね合わせを行うことで、対象物を直感的に確認できるようにしている。

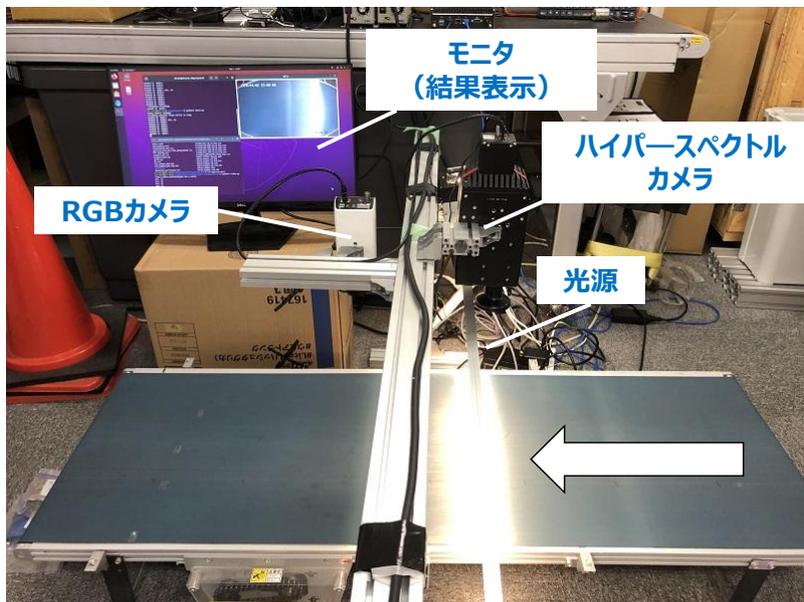


図 4-32 ハイパースペクトルカメラシステムの設置状況

(※現場設置の課題)

ハイパースペクトルカメラの現場設置については、下記の対応課題がある。

①「反射光」の制御等、精緻な光源調整が必要

対象物の「表面反射度」、「凹み具合」、「透明度」、「スペクトルカメラとの距離」、汚れ具合で回収できるスペクトルデータの精度・判別結果に影響

②設備設置及び画像合成に係る課題

現地のコンベヤ高、幅、コンベヤ材質、コンベヤ汚れ、コンベヤスピード等を踏まえた設置、画像合成に伴うタイミング調整が必要

【参考】

可視化の方法（技術情報）

①透明バッファの生成（データ保持）

識別結果（0/1 データ）を透明度付きの赤色バッファ（RGBA）に変換する。

✓0（PVC 以外） → 透明色。

✓1（PVC 判定） → 半透明の赤色（例：[255, 0, 0, 128]）。

判定にあたり、光源による影響（光源位置、方向、高さ、強度）が大きいいため、現場環境の調整が重要となる。

②廃プラ試料の背景情報との重ね合わせ

OpenCV（可視化ライブラリ）を用いて、透明バッファを背景の RGB 映像に重ね合わせる。

廃プラ試料の背景情報を保ちつつ、PVC 判定箇所を強調して表示する。

③バッファ管理

識別結果バッファと映像フレームバッファの管理を別々に行い、表示するタイミングを見て合成を行う。その際、カメラ位置、コンベヤスピード等を踏まえてタイミングを調整することが必要で、現場条件により異なる。

最新のデータのみを使用とし、古いデータは自動的に上書きを行うものとする。

研究開発室内における実際のデモの状況

（デモの方法）

① コンベヤ上を無作為にプラスチック建材が流動する状態を再現

② コンベヤ状態を見るモニター上で PVC 判定を行う（赤色マーキング）



図 4-33 廃プラ（7 品目）の判別対象（PVC4 品目、PVC 以外 3 品目）



PVC と判定されるサンプル (6 品目)



PVC 以外と判定されるサンプル (3 品目)

図 4-34 サンプル(写真)

コンベア上をモノが流れる中で、光源を当てた線上でハイパースペクトルカメラが認識し、判別結果をモニターに映し出す仕組みである。モニター上でのデータ重ね合わせのしくみが非常に難しく、モノを取る以上に研究開発が困難な印象であった。

コンベア上に7種類のPVC、PVC以外の廃プラがあり、4つのPVCに赤いマーキングがつくこと、PVC以外にはマーキングがつかないことである。

実証の結果、モニターに4つ赤いマーキングがでる正解が得られた。

コンベアスピードの調整自体は難しいものがあるものの、作業者にモニターで赤いマークの物質のみを手で選別してもらうことはできると考えている。



図 4-35 廃プラ (7 品目) の PVC 判別状況 (試料：現場から採取した試料)



図 4-36 PVC 判別に係るデモ動画（モニター画面）

### 4-2-3 実用化に向けた課題

#### (1) 仕様課題

ハイパースペクトルカメラを用いた判定において、形状の違いによる影響は大きな課題になる。特に、板状以外の対象（凹凸のある部材や、丸みを帯びた物）では、以下のような問題が発生する可能性があることに留意が必要となる。板状の試料と丸みを帯びた試料で測定したスペクトルの違いを比較し、どの程度の影響があるか評価を行い、補正手法を検討する必要がある

- 板状の試料が最も理想的な測定対象であり、丸みを帯びたものや凹凸のある部材では、反射光のばらつきが問題になる。
- 照明条件の調整、偏光フィルターの使用、影補正、形状別のスペクトル補正による対応が必要となる。
- コーティングや塗装の影響がある場合は、追加の解析が必要となる。

#### (2) 可視化における課題

可視化は、「パイパースペクトルデータの処理」 → 「結果生成」 → 「可視化」という一連の流れを、リアルタイムで実行する必要があり、現場条件で異なるカメラ位置、コンベヤスピード等を踏まえたタイミング調整が重要となる。

フレームレートの調整が重要。現在は、1回/秒の認識を考慮して合成を行うが、詳細表示には回数を増加させるなどの対応が必要となる。

ハイパースペクトルカメラ（320次元）と、RGBカメラ（2000次元）のデータ処理による調整（リサイズ）や、PVCのみを判別するためのフィルタリング処理の現場調整が重要となる。

PVC判別結果を廃プラ試料の背景情報との重ね合わせ処理に係る画像処理・マトリックスの計算/組み合わせ等の対応がIPC負荷となる。

#### (3) バッファ管理の課題

識別結果データ（0/1）と廃プラ試料の背景情報の合成において、下記を考慮の上で、タイムラグなく同期し、安定表示を行う必要がある。

古いデータの残存は、新たな表示の遅延に結びつくことから、ユーザーの誤認識に至る可能性がある。

データ量が多い場合には、バッファがオーバーフローの状態となり、不整合が生じるリスクがある。そのため、以下の2点の管理が重要となる。

- ①データキューの管理（映像フレームと識別結果を一対一で管理すること）
- ②フレーム落ち（システム負荷が高いと、映像やデータの一部が欠損するリスクがある）。

#### (4) 現地対応の課題

今回、研究開発室での実証に留めた理由は、現場設置の課題が想定以上に大きかったからである。具体的には、非常に反射光の精度が繊細であり、対象物の表面反射、歪み具合、透明度やハイパースペクトルカメラとの距離、対象物の汚れなどでデータの精度が変わってくる。PVCでも色が違うと異なるスペクトルが出るため、類似判定の基準が重要となる。さらに、画像合成時の課題としてコンベアの幅、高さ、汚れ、スピードなどを複合的に考慮する必要がある。短期間に実現場での状況の再現が難しかったためである。

ハイパースペクトルカメラシステムの繊細性から、研究開発室での設備を現場に移動し、設置・調整を行うにあたり、事前の想定を上回る対応が必要であることが判明した。

##### ① 光源調整が重要

ハイパースペクトルカメラに利用する「反射光」の制御（光度、高さ、方向）が重要である。カメラハウジングを設けて、研究開発室での構築システムに近い環境を作成し、光源調整を行う必要がある。

特に、対象物の「表面反射度」、「凹み具合」、「透明度」、「スペクトルカメラとの距離」、汚れ具合で回収できるスペクトルデータの精度・判別結果に影響が生じることへの考慮が必要となる。

##### ② 設備設置及び画像合成に係る課題

現地のコンベヤ高、幅、コンベヤ材質、コンベヤ汚れ、コンベヤスピード等を踏まえた設置・タイミング調整が必要となる。しかしながら、現場設置は、作業時間の制約（昼休憩等に限定）も多く、実現には困難を伴う。

#### (5) まとめ

ハイパースペクトルカメラを用いたプラスチック素材判定は、従来の光学選別機に見られるような破碎済み、形状が小さい物質のみならず、破碎前の試料であっても、対象物に対してプラスチックの素材別に選別するシステムとなることから、素材別回収のツールとしての有効活用が十分に考えられる。その際は、現場利用の課題を踏まえて、精緻なシステム構築が必要となる。

また、別用途として、例えばアスベスト入りの P タイルを波長で判別することができれば、現場の人の健康を守る物質管理にも役立てられる可能性もある。実際の可能性については、引き続きプラスチックのシステム検討が必要となるが、各種ニーズを踏まえた具体的な検討がさらに求められている。

### 4-3 建設混合廃棄物（木くず等）を対象とした自動選別ロボットの高度化開発

建設混合廃棄物を対象とした『ヒト共存型選別ロボット』は、実証先のプロセスとニーズに鑑みて、選別対象物にフォーカスしたロボットシステムの設計と開発を行った。

現場状況を踏まえた選別システムの設計と開発と、実際の現場における画像認識状況の確認を行った。

（技術開発の内容）

- 木くず（4種類）の判別・強化学習データの構築（二次選別ライン、低層厚・高層厚）
- 廃棄物中の「木くず」の回収システムの構築（コンベヤ状態を考慮）

#### 4-3-1 ロボットユニットシステム全体の設計と開発

##### (1) ロボットユニットシステム全体の設計

処理業者の協力会社と連携し、ロボットシステムの想定設置場所を特定し、さらに、カメラ BOX、ロボット（パラレルリンク式）、選別物の投入方法を考慮の上で、システム全体の概略設計を行った。

対象物（木くず）、コンベヤ仕様（色、幅、高さ）、現場条件（照度、廃棄物の積層等）などの考慮も行った。



図 4-37 ロボット搬入 (7/19)  
(写真)



図 4-38 ロボット搬入・据付  
(写真)

(2) カメラ BOX の設計と開発

画像データの取得にあたり、最適な環境（光方向、照度等が安定）を構築し、遮光による影響や、水濡れ、粉塵等からカメラを保護するために、現場に応じたカメラ保護 BOX の設計と開発を行った。さらに、現場にカメラ BOX を設置して、現場の情報を録画して、機械学習及び深層学習を行った。



図 4-39 カメラ BOX の製作 (写真)



図 4-40 カメラ BOX の設置 (写真)



図 4-41 車両からの積降し (写真)



図 4-42 カメラ BOX の移動作業 (写真)



図 4-43 カメラ BOX の移動作業 (写真)



図 4-44 カメラ BOX の配置・据付 (写真)



図 4-45 カメラ BOX 据付 (写真)



図 4-46 画像認識カメラの調整作業 (写真)

### (3) AI 自動選別ロボットの設計と開発

#### A. ロボット仕様に基づくカメラの選定

ロボット仕様に基づくカメラシステムとして、カメラ（ZED カメラ/RealSense などのカメラの種類）の品質と AI モデルの精度には直接の相関がある。例えば、コンクリート塊検出の場合、特定のカメラはコンクリート塊をうまく検出できたとしても、白いフォームに埃のカバーがある場合には、コンクリート塊と白いフォームの区別が困難な状況となる。つまり、カメラでは両者が類似して見えてしまう。この経験を踏まえて、アプリケーションでは高品質なカメラの選択を行うこととした。特に視覚的な違いが微妙なオブジェクトを効果的に区別できるように、AI モデルの構築を進めた。特に、埃の多い環境や雨などの外部要因に影響を受けやすいコンベアベルトを扱う場合には、カメラシステムの堅牢性を考慮することが重要となる。例えば、木片が濡れると黒くなるが、カメラの品質が高いことで、厳しい環境条件であっても効果的にオブジェクトを検出および識別できることになる。

検討の結果、3D 機能を追加できる比較的高価な IDS カメラを採用することとした。



図 4-47 カメラ種類 (ZED)



図 4-48 カメラ種類 (Reaisence)



図 4-49 カメラ種類 (IDS)

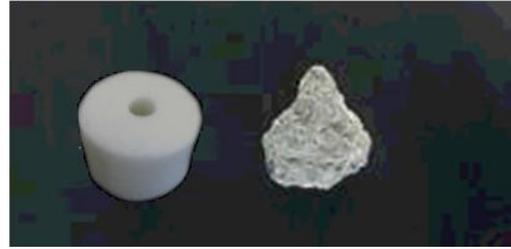


図 4-50 写真サンプル

## B. 画像認識システムの開発

現場にカメラとカメラ BOX を持込み、画像データを取得した後、ディープラーニングモデルの確立や学習データの作成・機械学習を通じた画像認識システムのロボットへの実装を行った。

なお、今回、実証フィールドの現場に基づいた機械学習を行うことを主眼とし、低層厚での実践を考慮して機械学習を行うこととした。

### ①低層厚

木くずの画像認識については、以下の3種類に区分してバウンディングボックスを作成して学習を行った。

- ▶ Wood Rod (木くずの棒材、塊材)
- ▶ Wood Board (合板等の薄板材)
- ▶ 瓦 (木くずとの判別を明確とするため)



図 4-51 木くずの深層学習 (低層厚)

### ②高層厚

高層厚についても、機械学習のための材料収集を行ったが、積層程度の問題もあり、取組みを断念することとした。



図 4-52 木くずの深層学習（高層厚）

### ③モデル精度の検証

AI 画像認識モデルに関し、本研究では、1206 枚の有効画像を用いてモデルのトレーニングを行った。

構築したモデルの精度は図 4-53 に示す。3 種類の選別対象に対して、それぞれの精度が、Wood Rod（木棒）63%、Wood Board（木板）54%、Kawara（瓦）100%の結果となった。引き続き、現場における検証を行うものとする。

また、誤検知の精度（Precision, 100%に近いほど誤検知が少ない）および見逃しの精度（Recall, 100%に近いほど見逃しが少ない）を図 4-54 と図 4-55 に示す。自信度（Confidence）が 0.4~0.8 の範囲に、誤検知と見逃しのバランスが取れる結果が得られた。今後、現場の実態に応じてパラメータを調整して実験を行う予定である。

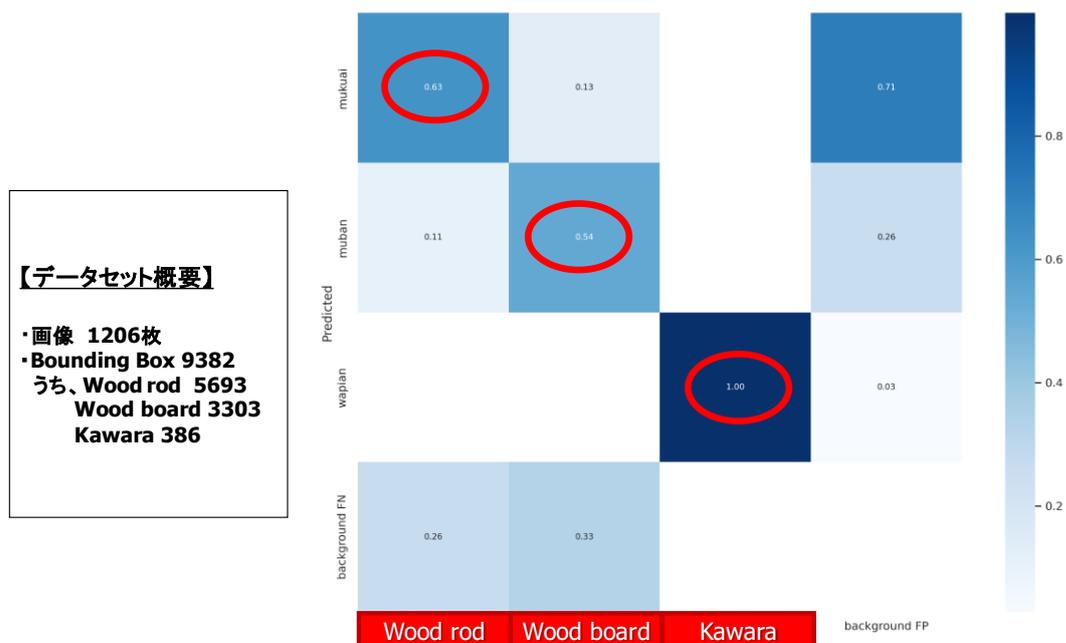


図 4-53 トレーニングしたモデルの精度

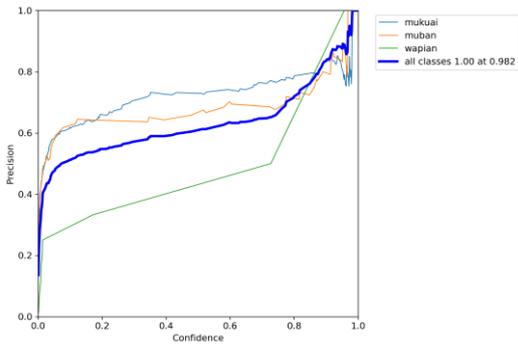


図 4-54 トレーニングしたモデルの精度 (Precision)

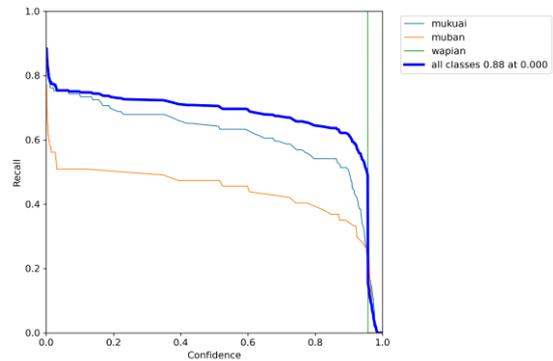


図 4-55 トレーニングしたモデルの精度 (Recall)

### C. 空間特定システムの開発

現場条件を踏まえた対象物の正確な座標情報として、X, Y 軸のみではなく、Z 軸の情報をリアルタイムで収集できる空間特定システムの開発を行った。特に、廃棄物の形状や色が一定ではない特徴に鑑み、カメラセンサーシステム（アルゴリズム）の改良を行った。

3D 機能を搭載した RGB カメラは、通常、2D 画像と 3D 画像の間の位置合わせを保証することができる。このアライメントの活用には、視錐台投影アルゴリズムを使用する。本アルゴリズムは、RGB ピクセルと 3D 点群データ (PCD) をシームレスに関連付け、両方のデータセットが同じ空間方向を共有することができる。PCD データから x、y、z の値を直接抽出することで、正確なグリッパー座標を得ることができる。

一方、RGB 画像のみでは、現実世界の座標を忠実に表示する精度が欠けている。一方、点群データ (PCD) はこの点で優れており、PCD から導出された x、y 座標に頼ることで、実世界の座標により正確な変換を実現することができる。また、PCD に重点を置くことで、物理的な空間におけるグリッパーの位置決めと方向の精度が大きく向上する。

この方法を実装することで、精度の向上のみならず、時間の節約にも結び付く。ピクセル座標をロボットの座標系に変換するために必要な RGB キャリブレーションプロセスとは異なり、点群データ (PCD) の x、y 座標を利用することでワークフローが合理化できる。ロボットの x、y 位置がカメラの x、y 位置と揃っている限り、追加のキャリブレーションは不要となる。このメリットは、カメラの高さ調整などを行う場合にも当てはまり、キャリブレーションプロセスをさらに簡素化することができる。

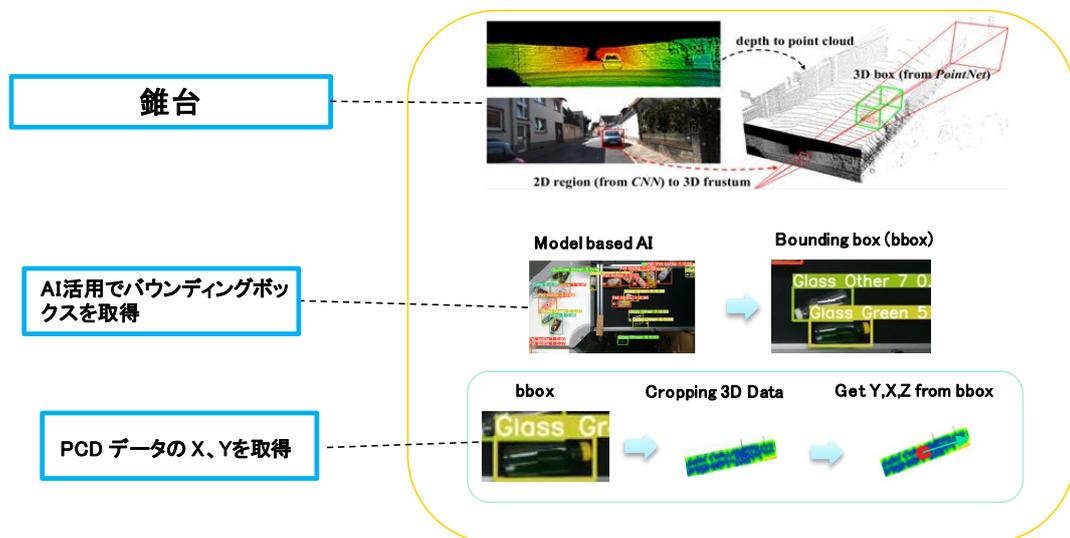


図 4-56 空間特定プロセス構築

#### D. ロボット制御システムの開発

新たな自動選別ユニットを用いて、ロボットの選定（パラレルリンク式）と組立て後、選別対象物の座標情報をもとに、ロボットを制御して正確にピックアップさせるための制御システムの実装を行う予定とする。具体的には、PC との通信、ロボット軸の動作ルールの作成、制御プログラムの作成等を行い、要求される処理能力を達成するための性能評価を行う予定とする。

現在開発中の手法は、エッジ検出アルゴリズムを利用して  $\theta$  を計算することとなる。結果の絞り込みのために、検出されたエッジをフィルタリングして、画像に存在するノイズを除去する。さらに、ルールベースのアルゴリズムを採用し、コンベヤベルトの小さなオブジェクトとセグメントの除外を行う。画像がクリーニングできると、シーン内のオブジェクトの角度を正確に決定できることになる。画像内の最も長い線を利用したり、すべての組み合わせ角度の平均が得られるまで同様の角度の線を追加したりするなど、いくつかのルールを実装できる。

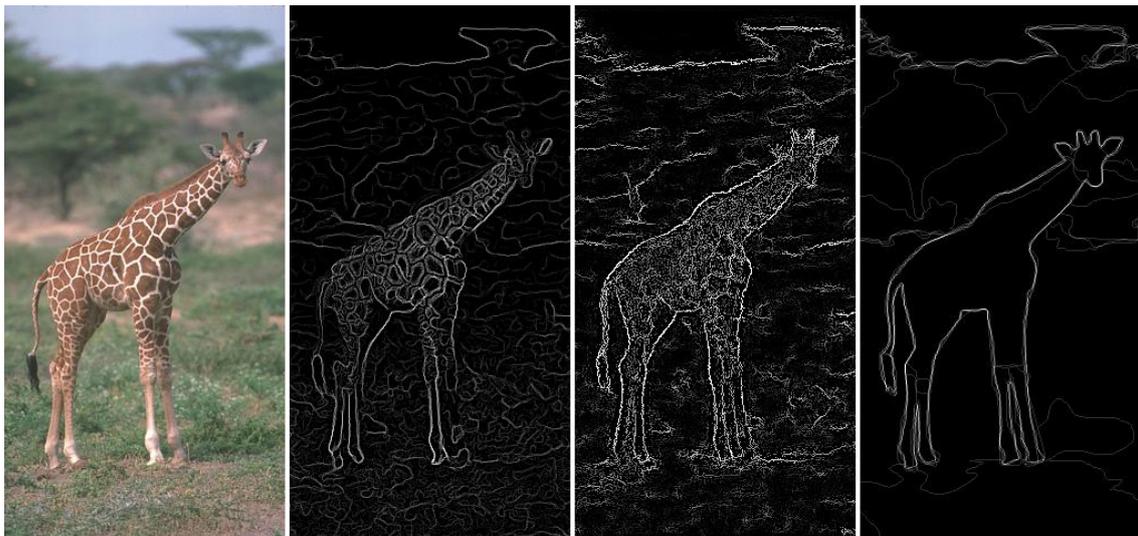


図 4-57 画像中のノイズ除去の方法例

#### E. 気圧式グリッパーによるピッキングシステムの開発

選別対象とする廃棄物性状を考慮の上で、パラレルリンク式のロボットに気圧式のグリッパーを取り付け、ロボット制御システムと連動させる。具体的には、要求される処理能力を達成するための性能評価を行う。

グリッパーの選択は、耐久性を最優先に考えることとした。グリッパーは、交換が容易であり、かつ、曲げ可能なプラスチック製のフィンガーを備えている。この指の柔軟性は、さまざまなサイズの木材を扱うときに非常に重要であり、大きく輪郭を曲げて適応させることで、硬い材料の場合に発生する可能性がある潜在的な損傷を防ぐことができる。

さらに、柔軟性に加えて、グリッパーの指に硬化済みの柔軟な素材が組み込まれているため、十分な力で木材をしっかりとグリップし移動中の落下を防ぐことができる。

一方、グリッパーは大きな木材の把持には優れるが、1cm 未満の木材を扱う場合には限界がある。具体的には、グリッパーの指と指の間隙から、小さなアイテムを落とす傾向があるため、薄い木材などは十分な強度のシールが得られない状況にある。

標準の可動域は、0~6 cm程度となっている。また、パラレルリンクロボットの把持重量は、アームごとに 3 kgが上限となるため、グリッパー重量を除いた約 2 kg程度までの物質の把持が可能となる。



図 4-58 グリッパーの状況(写真)

#### F. エンコーダ追跡システムの開発

コンベヤ上の対象物をカメラで検知し、ロボットでピックアップするタイミングを、リアルタイムで情報収集し、トレースできるようエンコーダを用いて対象物を追跡するシステムの開発を行う。

この対応のため、当社は HYWIN ソフトウェアをシームレスに統合し、その機能を活用してシステム内にエンコーダトラッキングを実装することとした。

プロセスは、HYWIN ソフトウェアがカメラの位置とロボットのアイテムピッキング操作の指定開始点とを結びつける最初のキャリブレーションステップから行った。キャリブレーションを通じて、HYWIN ソフトウェアがカメラとロボットの両方の基準点を確立できるようにした。エンコーダ追跡システムは、この校正した情報を利用して、コンベア上の物体をリアルタイムに正確に追跡を行うことができる。

初期キャリブレーションでは、カメラの視点をロボットの操作空間に合わせて、同期した正確な追跡を行う。エンコーダは、構成されたデータと連携し、リアルタイムに物体検出を行うこと、さらに、コンベア上を移動中の物体のシームレスなトレーサビリティを促進することができる。

カメラとロボットソフトウェア (HRSS) の同期では、以下の3段階のキャリブレーションプロセスが行われる。

▶ ステップ 1: カメラ/ロボットによるエンコーダ値のキャリブレーション

はじめに、キャリブレーションシートを使用して、カメラのポイントを 0,0 に指定する。その後、シートがコンベアに沿って移動し、ロボットがさまざまなポイントでアイテムに到達してピックアップできるようにする。各ステップにおいて、エンコーダは、エンコーダ値を保存し、ロボットとカメラの間の距離に関するデータを提供する。

▶ ステップ 2: ピクセルから mm への変換

AI システムでは、オブジェクトを識別し、その座標をピクセル単位で提供できる。ロボットの効果的な情報交換のためには、座標をミリメートルに変換することで、正確かつ標準化された測定単位とすることができる。

▶ ステップ 3: ロボット座標 (0,0) の場合、カメラ座標 (0,0) をゼロとする

最後に、カメラ (0,0) をロボットの新しい (0,0) として設定することで、共通の基準点を確立する。内部的には、HRSS はカメラの (0,0) に合わせるために x、y オフセットを組み込んでいる。例えば、ピクセル座標 (50, 50) で AI が識別したアイテムを拾おうとすると、ミリメートルへの変換を実行した後、座標が「{Cam: x, Cam: y}」として HRSS に送られることになる (x = 50 ピクセル → mm、y = 50 ピクセル → mm)。

システムの特徴は、座標変換の適応性となる。視錐台投影アルゴリズムでは、ピクセルおよび点群データ (PCD) の 3D 座標をロボット座標に変換できることになる。この柔軟性は、タスクの特

定の要件に応じて、ロボットの座標変換プロセスに PCD（3D データ）または RGB（2D データ）のいずれかを選択できることになる。

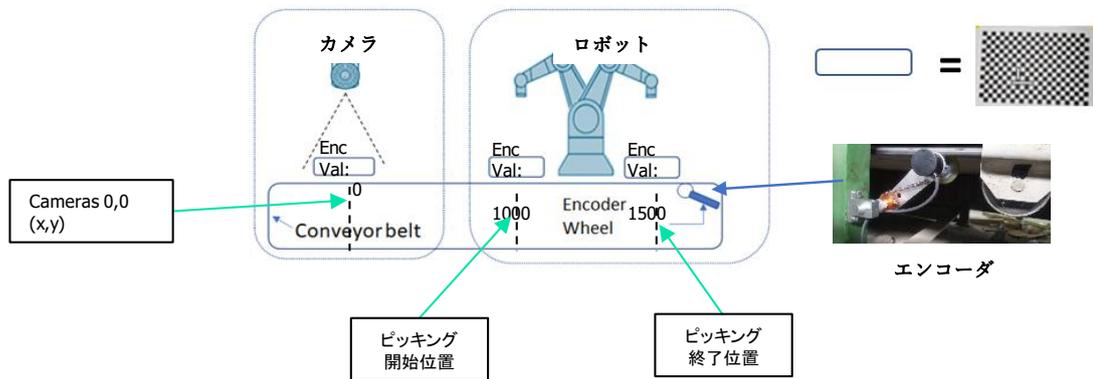


図 4-59 エンコーダの利用方法

### G. 安全対策機構の設計と開発

安全にロボットシステムの活用を図るため、ロボットの架台内部にヒトの手が入らないよう抑止する機構や、安全センサー、さらに、防塵と散熱を考慮した制御盤の設計と開発を行った。



図 4-60 制御盤の格納容器 (写真)

### H. ユーザーインターフェースの設計と開発

エンドユーザーが利用しやすいように、制御ボタンと PC 画面の GUI の設計と開発を行った。ロボットの①起動、②停止、③エラー解除、及び④緊急停止ボタンは、飲料容器 1 ロボットと同様の対応とした。

さらに、遠隔管理を行う際に必要となる①安定性、②リモート管理が容易であることを考慮し、OS システムの構築のための概念整理を行った。

概要は、①アプリケーションと依存関係のある自己完結型の環境を提供することで、インストールの迅速化ができること、②バージョン管理ができ再現性があることで、ソフトウェア開発プロセス全体で一貫性を保証できること、③プログラムエラー発生時に簡易なリスタートが可能（自動的に再起動）であることなどである。

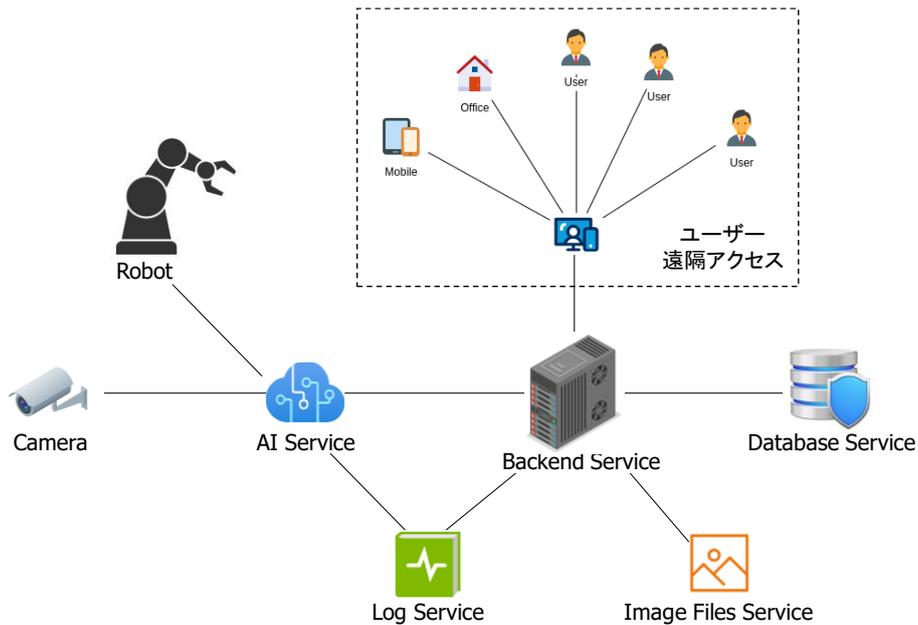


図 4-61 OS システムの開発

### ①OS システムの特徴

Docker と統合された Loki や、Grafana などの「ミドルウェアソリューション」の活用により、システムエラーとログをリアルタイムで監視し、オンラインでアクセスすることができる。その結果、エラー発生時に技術者に警告を発し連動することで、プログラムとロボットがシームレスに機能し続けることができる。

Grafana はシステムログへのリモートアクセスを提供するもので、どの場所からでも確認ができるようになる。その際、タイムスタンプの使用により、エラー発生時期を正確に特定できる。また、エラー場所に関する画像を保存、および表示することができるため、デバッグ作業にも役立つことになる。

- ▶ システムのエラーやログをリアルタイムにオンラインで監視できるため、プログラムとロボットがシームレスに動作し続けることが可能となる。（エラー発生時は、技術者にアクティブにアラートを送信）
- ▶ タイムスタンプを使用することにより、エラー発生時の正確なタイミングの特定が可能。
- ▶ エラー位置に対応するイメージを保存および表示する能力があるため、修復作業の支援が行える。

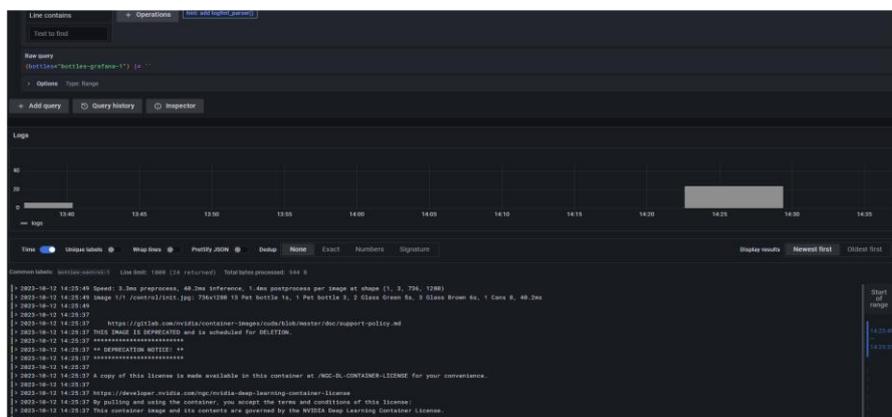


図 4-62 管理画面 1

## ②システムの変更 (Docker の使用)

Grafana には、「エラー」、「表示メッセージ」、「警告」など、端末に表示された全てのメッセージの履歴が保存されている。それらは、オンラインでアクセスできるログとして機能する。

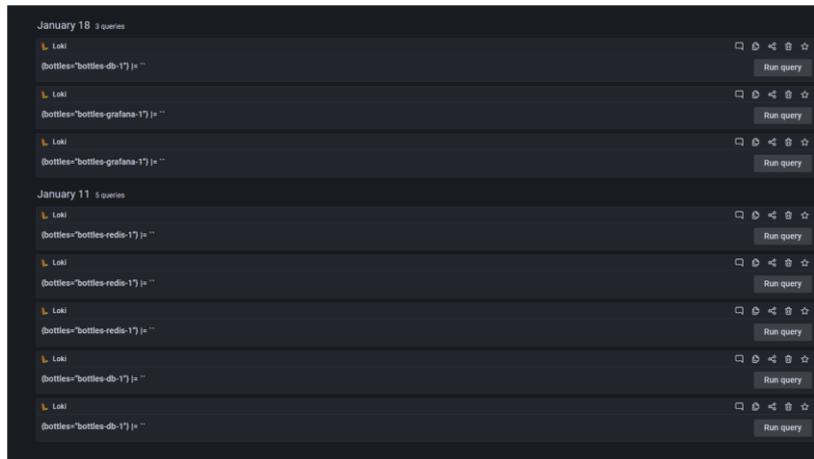


図 4-63 管理画面 2

## ③システム機能

アラート、システムで発生した警告またはエラーは、ログにアクセスすることで、問題(バグ含む)を素早く解決することができる。また、個人に通知するか、プロジェクトに関与するすべての関係者に警告することもできる。

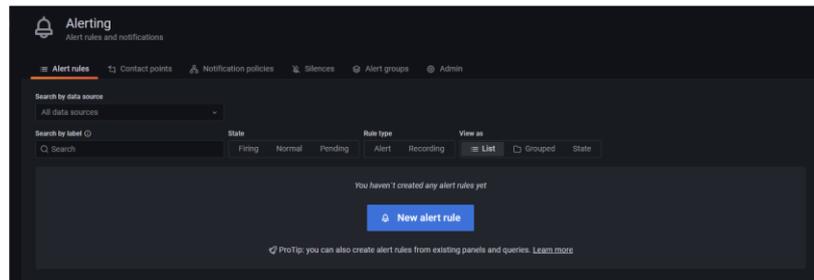


図 4-64 管理画面 3

## ④自動タグ付け

- (ア)顧客のコンベヤ状態を動画で撮影する。
- (イ)スクリプトを使用して、数フレームごとにビデオ画像を変換する。
- (ウ)AI 自動アノテーションシステムを使用して、バウンディングボックスを作成する。
- (エ)AI が作成したバウンディングボックスを確認の上で、エラーを修正する。
- (オ)AI を更新して、エラーを減らし、データ作成時間を短縮する。

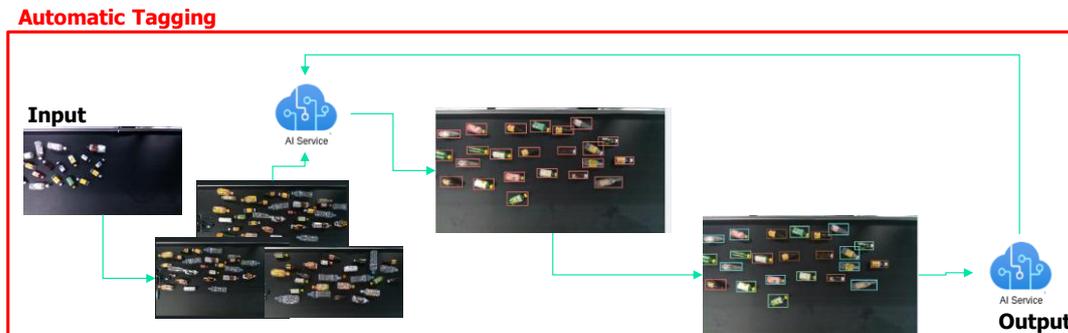


図 4-65 遠隔管理のしくみ 1

顧客の画像の保存ができる機能を保有すれば、シナリオを使用して顧客の AI を改善するための新しいデータセットを自動的にタグ付け/作成することが可能となる。

- 新しいアイテムが導入された場合
- AI モデルを改善する必要がある場合

### Automatic Tagging



図 4-66 遠隔管理のしくみ 2

## I. システムインテグレーション

画像認識～ロボット制御まで一連のフローを繋ぎ合わせ、ロボットシステムを有効に機能させるために、システムインテグレーションを行った。

システムインテグレーションの全体像は、図 4-67 に示すようになる。

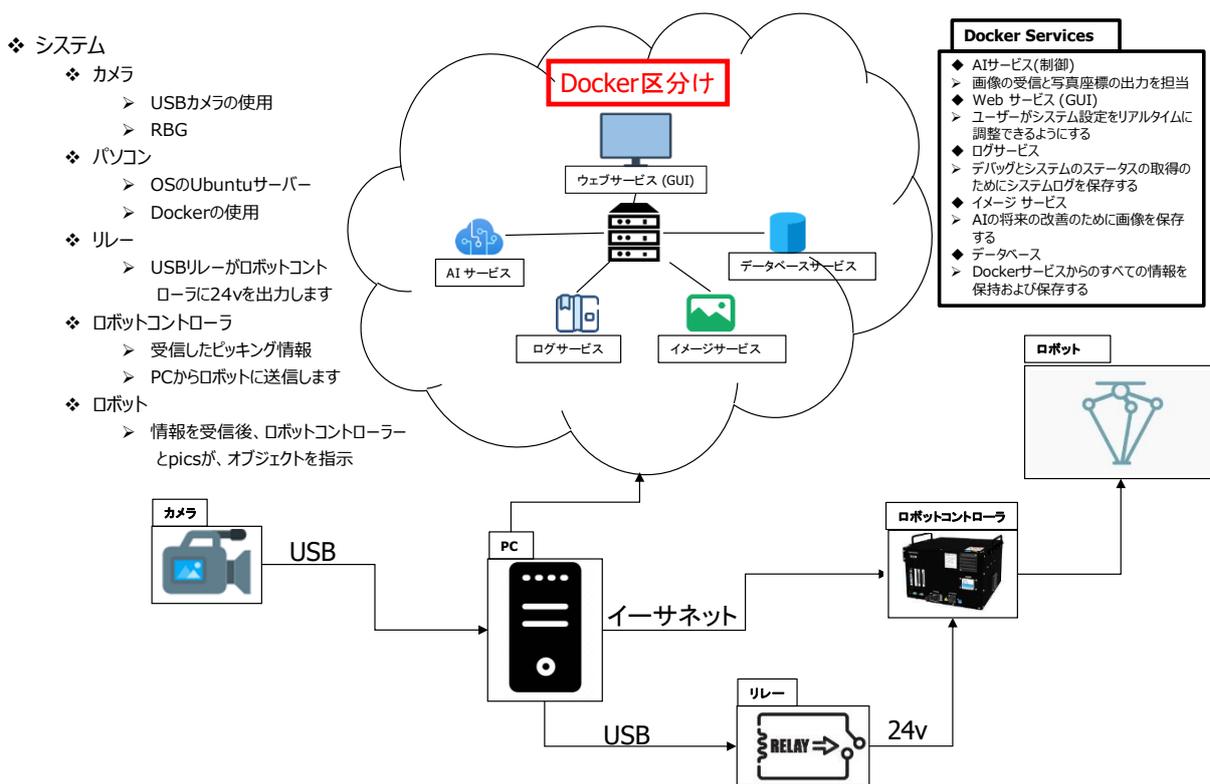


図 4-67 システムインテグレーションの全体図

このうち、AI とロボットを結びつける AI システム統合は、次のように実施した。

- ロボットコントローラは、PC からピッキングするアイテムと、ピッキングするタイミングに関する情報を受け取る。
- 上記の接続を確立するため、特定のシーケンスを作成した。

1. 任意の言語(Python)で、TCP/IP サーバーを実行する
2. AI の結果をラッチ信号とともに HRSS (24v) に送信

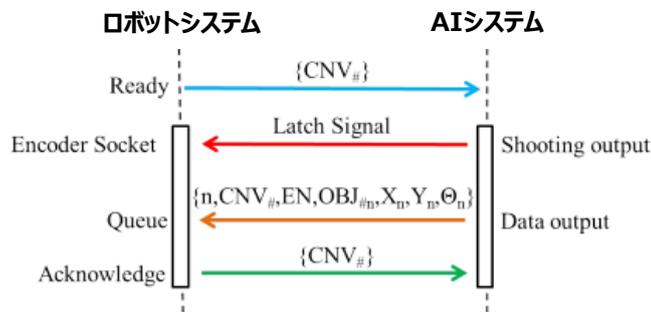


図 4-68 パソコンとロボットの連携方法

- ▶ ラッチ信号（デルタロボットがアイテムを拾うタイミングを知るためにエンコーダカウントをトリガーする 24v 信号）の発見には、解読に時間を要する。
- ▶ なお、電気信号は次のように送信する。

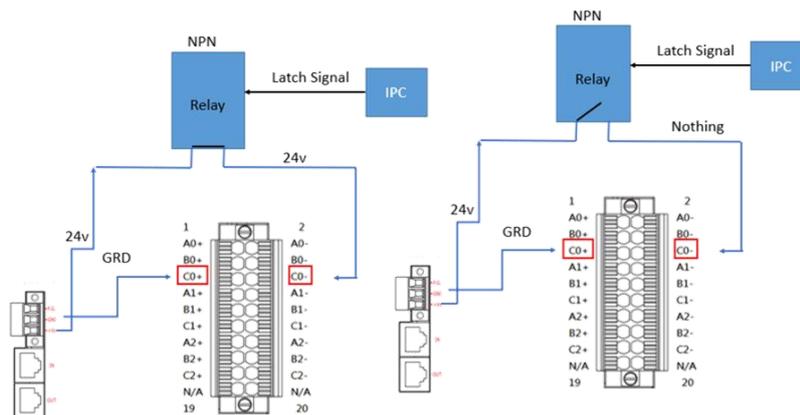


図 4-69 電気信号の送信方法

また、AI の検出の分野では、Python のクラスベースのコントロールで、シームレスなデバッグ（デバッキング：バグを探索しプログラムコードを修正し取り除くこと）、開発、保守、およびクラスの独立したアップグレードが可能となる。このアプローチにより、コードを維持しながら、カメラのアップグレードや様々な AI モデルの組み込みができるため、将来の機能強化が容易になる。

- ▶ カメラ
  - カメラから画像をキャプチャし、AI に送信する
- ▶ モデル
  - 画像を取得し、オブジェクトを検索するための推論を行う
- ▶ 決定
  - 天候やルールに基づき決定し、アイテムの選択、撮影場所、角度、ロボットに送信する時間を作成する
- ▶ コントロール
  - ロボットへの TCP/IP 接続を作成し、ロボットの画像情報を Web ベースの GUI に送信する

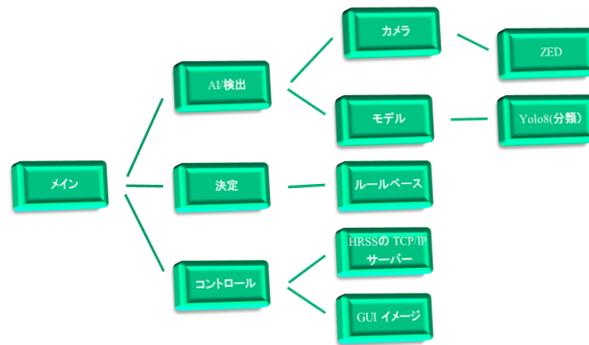


図 4-70 システムインテグレーションの全体像

(4) プロトタイプによる画像認識に関する試験実証

㈱クマクラでは、人員の高齢化や作業効率の低下、寒暖対応、選別精度の低下といった手選別ラインの運営課題に対し、AI 選別ロボットによる対応支援が期待されている。

画像認識の結果について実際のコンベヤの流動を用いて検証を行い、関係者による現場視察及び協議・意見交換を実施した。

日時：2024年2月9日（金）14:30～17:00

場所：㈱クマクラ（所沢エコプラント）

参加：㈱クマクラ、東京都環境局、早稲田大学、㈱イーアイアイ、スマートシティ企画㈱

スケジュール：

- ▶午前中 事前準備（EII が対応）
  - 設備設置と稼働確認:カメラ、ハブ、ケーブル、PC、モニター画面など
- ▶14時半～ 二次選別ライン現場における AI 画像認識の状況【低層厚】
- ▶15時～ 協議&意見交換
- ▶16時半～ 同上 AI 画像認識【高層厚】



図 4-71 現場視察の状況（低層厚）  
（写真）



図 4-72 現場視察の状況（低層厚）  
（写真）



図 4-73 AI 画像認識の状況（写真）



図 4-74 現場視察の状況（低層厚）  
（写真）



図 4-75 手選別ラインの状況（低層厚）  
（写真）



図 4-76 手選別ラインの状況（低層厚）  
（写真）

画像認識結果は、モニターを通して視覚での確認がなされ、想定通りの成果が得られた。また、 $\theta$ の角度（木くずを把持する角度）についても同様に、視覚での確認ができた。

協議・意見交換では、ごみ排出業者の分別不徹底による禁止物の混入や人手不足という廃棄物処理業界全体が抱える問題に対し、ロボット導入やオープンイノベーション推進の意義を再確認する事ができた。また、ロボット導入の技術的課題としては安全性や耐久性の確保が挙げられ、「人間とロボットの共存」という取組みテーマが参加者間で改めて共有された。

#### (5) 建設混合廃棄物（木くず等）を対象とした自動選別ロボットの開発

建設混合廃棄物を対象とした『ヒト共存型選別ロボット』は、実証先のプロセスとニーズに鑑みて、選別対象物にフォーカスしたロボットシステムの設計と開発を行った。

- ロボットユニットシステム全体の設計
- カメラ BOX の設計と開発
- AI 自動選別ロボットの設計と開発
- システムインテグレーション
- プロトタイプによる試験実証

今後は、現場状況（低層厚）の木くずを対象とした実証利用などを通じて、変化する積層状態、画像認識、汚れ、水分、連続運転、休止時の復旧等に対する検証を行う必要がある。

表 4-16 R5 年度までの成果

項目	内容
ロボットユニットシステムの構築	●想定設置場所を特定し、対象物（木くず）、コンベヤ仕様（色、幅、高さ）、現場条件（照度、廃棄物の積層等）に応じたシステムの設計を行った。
AI 自動選別ロボットの設計と開発	●カメラ BOX を設置し、データ収集。取得画像をもとに、木くずに関するデータセットの作成と深層学習を実施。 ●ロボット選別の「性能向上」に向けた設計と開発を経てシステムインテグレーションを実施 ●OS システムの構築と、遠隔管理の方法論を検討
プロトタイプによる試験実証	●現場において、画像認識状況の確認と課題抽出を行った。 ●実験室内において、木くず選別実験を行い、各種の精度確認を行った。 ●評価結果をもとに、性能向上に向けた対応の取組み



図 4-77 コンベヤ状態の情報取得 (カメラ BOX 内カメラより・写真)

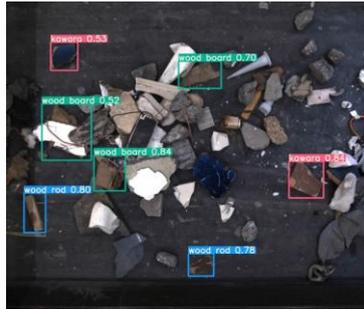


図 4-78 データセットの作成 (3区分・写真)



図 4-79 プロトタイプロボットの開発 (写真)

### 4-3-2 研究室内での選別実証

ここでは、実証を行う前段階として木くず選別ロボットを研究室内で稼働した際、選別精度などを実証した。

#### (1) 実証目的

本実証は、木くず選別ロボットの実証を行う前段階として、研究室内での選別精度の調査を行い、選別精度に与える要因を明らかにすることを目的としている。具体的には、連続で取得可能な幅の計測や木くずの配置する向きや木くずの被覆率による識別精度を検証することで明らかにする。

#### (2) 実証方法

本実証では4つの検証を行った。

##### A. 間隔の試験

木くず同士の間隔を変化させて、選別ロボットが連続で取得可能な幅を計測する。実証方法は3つの木くずを連続でベルトコンベヤに流し、すべて回収できた場合の最小の幅を計測する。ここでは、木くずをベルトコンベヤの流れ方向に対して垂直と水平方向それぞれで実証を行った。木くずを並べる間隔は5 mm 間隔で広げていき、連続で取得できなかった場合は5 mm 広げる作業を繰り返す。木くずの配置は以下の図 4-80 のように行った。



図 4-80 間隔の試験の配置

## B.向きを試験

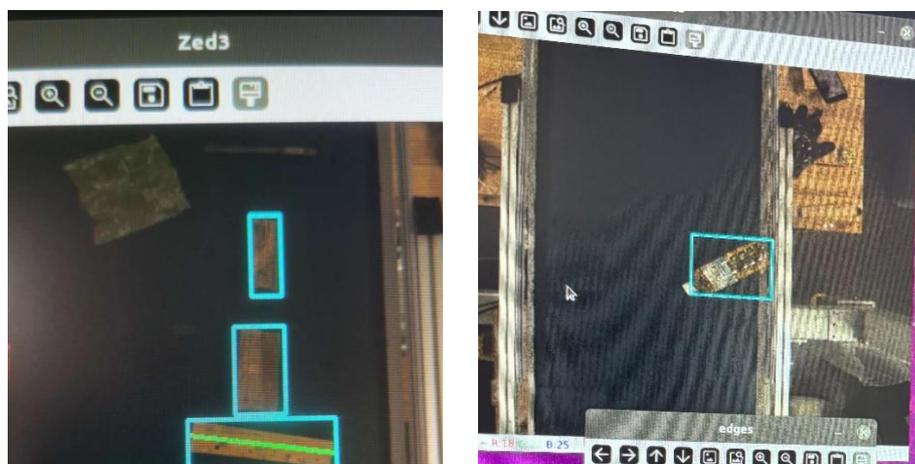
木くずの向きによって連続取得できる間隔が変化するか実証によって検証する。きくず同士の間隔を2-1の試験で得られた幅で設置し、その設置したすべての木くずの向きを30度ずつ変化させ、取得可能か試験する。30度の場合の配置方法を以下の図 4-81 に記載する。



図 4-81 向きを試験の配置

## C.画像認識を試験

ベルトコンベヤに木くず以外のものを流し、画像認識の精度を検証する。ベルトコンベヤに携帯電話・空のペットボトル・飲料容器が入ったペットボトル・スマートフォンケース・段ボール・パソコンを流し、木くずと認識しないか検証する。また、木くずの識別精度を訓練済み木くずと異なる状態で投入し、AIが認識した回数から算出する。



(a)ペンと木くず

(b)ペットボトル

図 4-82 画像認識の試験イメージ

## D.被覆率を試験

木くずに木くず以外のものが覆いかぶさっていた際に認識可能か検証する。検証方法は、木くずに白色・黄色・黒色の布又はビニール片をかぶせて被覆率を変える。木くず全体の長さに対して、覆いかぶせる長さを10%ずつ変動させて認識できる被覆率を検証する。

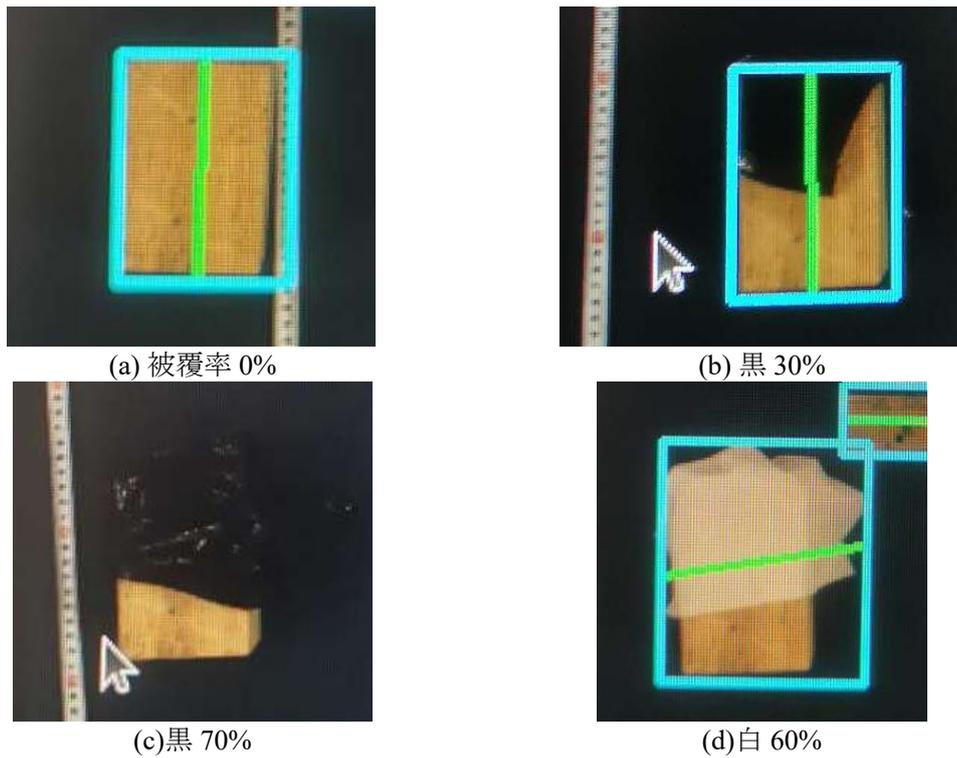


図 4-83 被覆率の試験のイメージ

(3) 実証結果

それぞれの実証結果を記載する。まずは 1.間隔の試験の結果を以下の表 4-17 に記載する。

表 4-17 間隔の試験の結果

間隔	縦方向	横方向
10mm	×	×
15mm	×	×
20mm	×	×
25mm	×	×
30mm	×	×
35mm	×	×
40mm	×	×
45mm	×	○
50mm	×	○
55mm	○	○
60mm	○	○
65mm	○	○
70mm	○	○
75mm	○	○
80mm	○	○

縦方向に配置した場合、55 mm、横方向に配置した場合は 45 mm となった。次に、向きの試験の結果を以下の表 4-18 に記載する。

表 4-18 向きの試験の結果

角度	1回目	2回目	3回目
0°	○	○	○
30°	○	○	○
60°	×	×	○
90°	○	○	○

60度以外では、連続して取得し続けることが可能であるとわかった。次に、画像認識の試験の結果を記載する。ここでは、木くずとして認識したものを“○”、認識しなかったものを“×”とした。

表 4-19 画像認識の試験の結果

流したもの	識別
携帯電話	×
空のペットボトル	×
飲料入りペットボトル	○
スマフォケース	×
段ボール	○
パソコン	×
ペン	×

飲料容器が入ったペットボトルと段ボールが認識した為、似た色であると処理したといえる。また、木くずのみでの識別は投入数 55 本の内 2 本しか識別できていないことによって、訓練した木くずに対する認識精度は 96.4%と把握した。

最後に、被覆率の結果を以下に示す。

表 4-20 被覆率の試験の結果

被覆率	白色	黄色	黒色
10%	○	○	○
20%	○	○	○
30%	○	○	○
40%	×	×	×
50%	×	×	×
60%	×	×	×
70%	×	×	×
80%	×	×	×
90%	×	×	×

どの色においても木くずの 30%が木くず以外のもので覆われた時に木くずとして認識できなくなる。

#### 4-3-3 現場での実証実験

R5 年度は、ロボットの導入先として手選別の二次処理ラインを選定し、現地調査を通して、ロボットとカメラ BOX の設計と製作を行った。ロボットの開発に関して、画像認識の部分は、選別対象物である木くずとコンクリート塊を高精度に検知するために、導入現場にデータ収集するための設備一式（カメラ BOX、カメラ、サーバー、通信機器等）を導入し、データ収集を行った。また、データセットを作成

し、現場における初期的な画像認識システムの構築と現場における検証を行った。対象物のピッキングにおいては、グリッパーを用いたピッキングシステムの開発を行った。

R6年度は、継続的に研究開発を行い、一体化した自動選別ロボットのプロトタイプの開発を完了し、中間処理事業者の現場に試験導入し、実証実験を通して効果検証を行った。

(1) 実証実験の概要

1. 趣旨

- 建設混合廃棄物処理施設における自動選別ロボットのプロトタイプの開発を完了
- リアルな現場コンベヤに導入し、実証実験を通して効果検証
- 「低層厚」中の木くずを対象に実施（対象物の密度や層厚など、通常の運転条件を変更しない）

2. 実施内容

【柵クマクラ】に試験導入し、効果を検証。

- ロボットシステムの設置
- ロボット利用の評価・検証
  - ①ロボットの機能と性能の評価
  - ②「導入しやすさ」、「実用性」と「経済性」の評価
  - ③ユーザー視点の省人化・省力化の効果検証

3. 実証期間

2024年10月～2025年2月

4. 担当

研究統括：早稲田大学大学院 環境・エネルギー研究科 教授 小野田 弘士

ロボット開発：株式会社イーアイアイ

事業主体：境局資源循環推進部 計画課

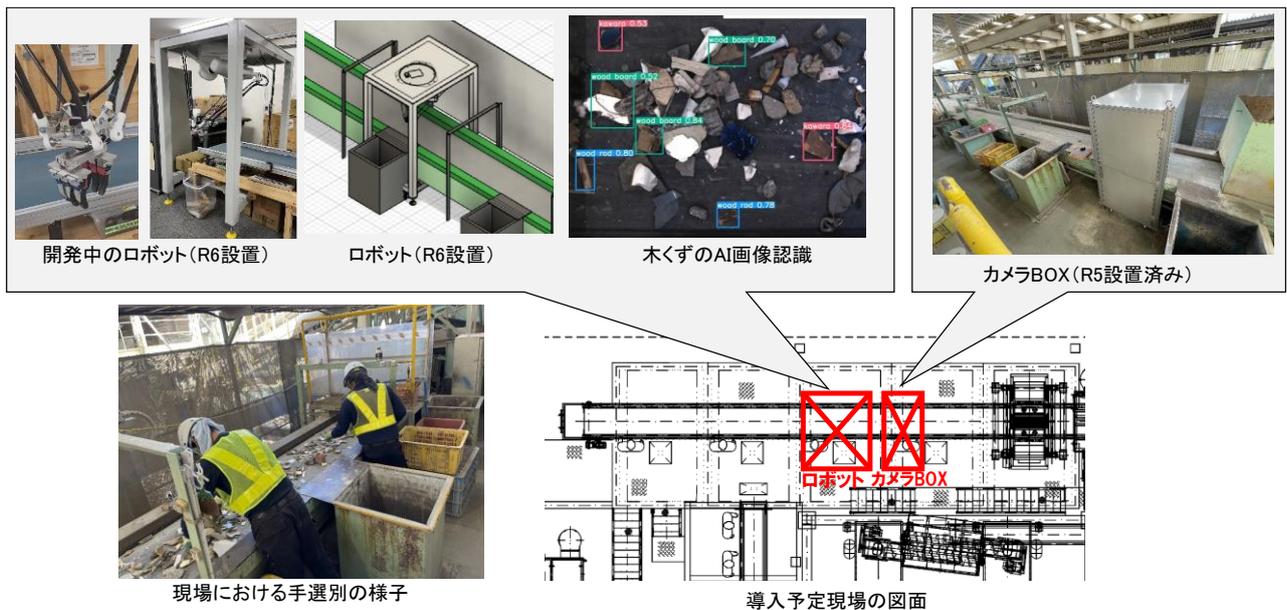


図 4-84 実証事業における設備配置図（二次選別ライン）

(2) 実証事業ととりまとめスケジュール

実証事業ととりまとめスケジュールは、表 4-21 に示すとおり、現場搬入時期の 10 月を見据え、それまでに自動選別ユニットの高度化開発を進めた。

表 4-21 実証事業ととりまとめスケジュール

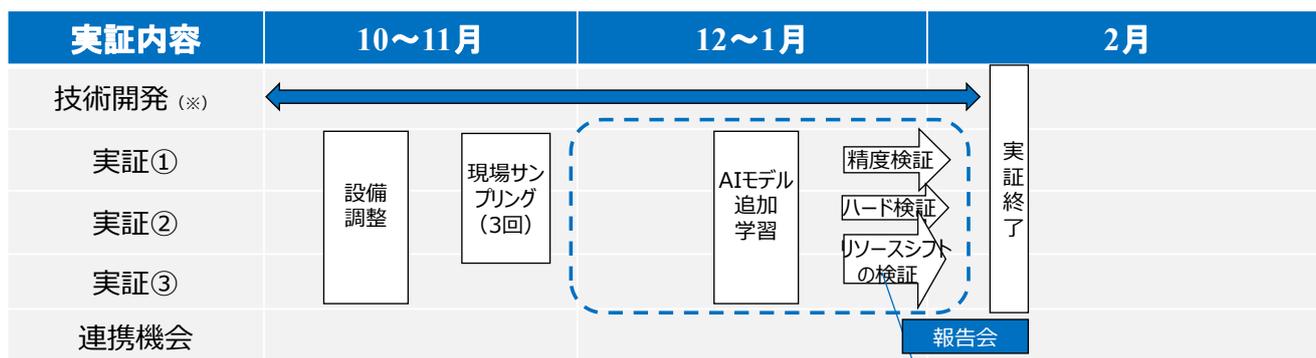
項目	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
1. 自動選別ロボット・ハイパースペクトルカメラの高度化開発												
2. 実証実験 (木くず自動選別ロボット)				←—————→								
2-1 導入計画作成												
2-2 現場搬入・ユニット組立 ・動作確認							搬入					
2-3 実験計画の作成												
2-4 実証実験の実施												
2-5 評価・検証											撤去	
3. 実証実験 (ハイパースペクトルカメラを活用した塩ビ判別システム)							←—————→					
3-1 導入計画作成												
3-2 現場搬入・ユニット組立 ・動作確認									搬入			
3-3 実験計画の作成												
3-4 実証実験の実施												
3-5 評価・検証											撤去	
4. ロボットシステムの見直し												
5. 今後の実用化に向けたシナリオ構築												
6. 報告書作成												

(3) 実証全体の流れとスケジュール

実証全体の流れとスケジュールについては、10月設備搬入後に、実証協議、設備調整、現場サンプリングを経て技術開発を行い、実証終盤1月には実証試験による設備性能評価等も行った。

実証全体の流れ

現場実証期間(2024年10月～2025年2月)



(※) 技術開発(詳細)は、機械学習・追加学習、AIモデル変更、オブジェクトの修正を実施

**■ 実証目的と検証 【低層厚で実験】**

実証①: 選別精度の検証

実証②: 選別作業の比較(木くずのみ)

実証③: 選別作業の比較(混合廃棄物)

図 4-85 実証全体の流れ

表 4-22 実証事業の経過

日程	項目	概要
5月中旬	埼玉県西部環境事務所との協議	ロボット設置・実証を行う際に必要となる手続き等の確認 ➡変更届の提出要、設置後10日以内に提出。(株クマクラ)
7月29日	現場ヒアリング及びサンプル調査に係る協議	10月からの実証事業に向けた事前準備として、ヒアリング、サンプル調査及び、スケジュールについての協議(株クマクラ)
8月～10月	現場ヒアリング及びサンプル調査の実施	廃プラ(一次手選別ライン回収物)、木くず(2次手選別ライン状態)、可燃系混合物(バリオセパレータ⇒軽量物)が対象
	システム開発と試行(★ロボット)	①コントロールシステムの再構築 ②簡易なGUIの作成 ③研究室内での選別実証
	DB構築と試行(★ハイパースペクトルカメラ)	①プラスチック試料のDB構築と塩ビ(PVC)判定精度の向上 ②判別システムの構築
10月20日	ロボット等の移動・荷降ろし	現場にロボットを運搬。その後、現場での技術対応を経て、コンベヤ、ロボット等の設置、稼働確認を行う。
11月設置後	変更届書の提出(設置後、10日以内)	変更届に係る概要及び、図面 ➡埼玉県西部環境事務所に提出(株クマクラ)
10月21日～2月1日	AI画像認識に係る追加学習	さらなるAI画像認識の向上に向けて現場データをもとに追加学習を行う。

●ロボットの設置 (10月20日)

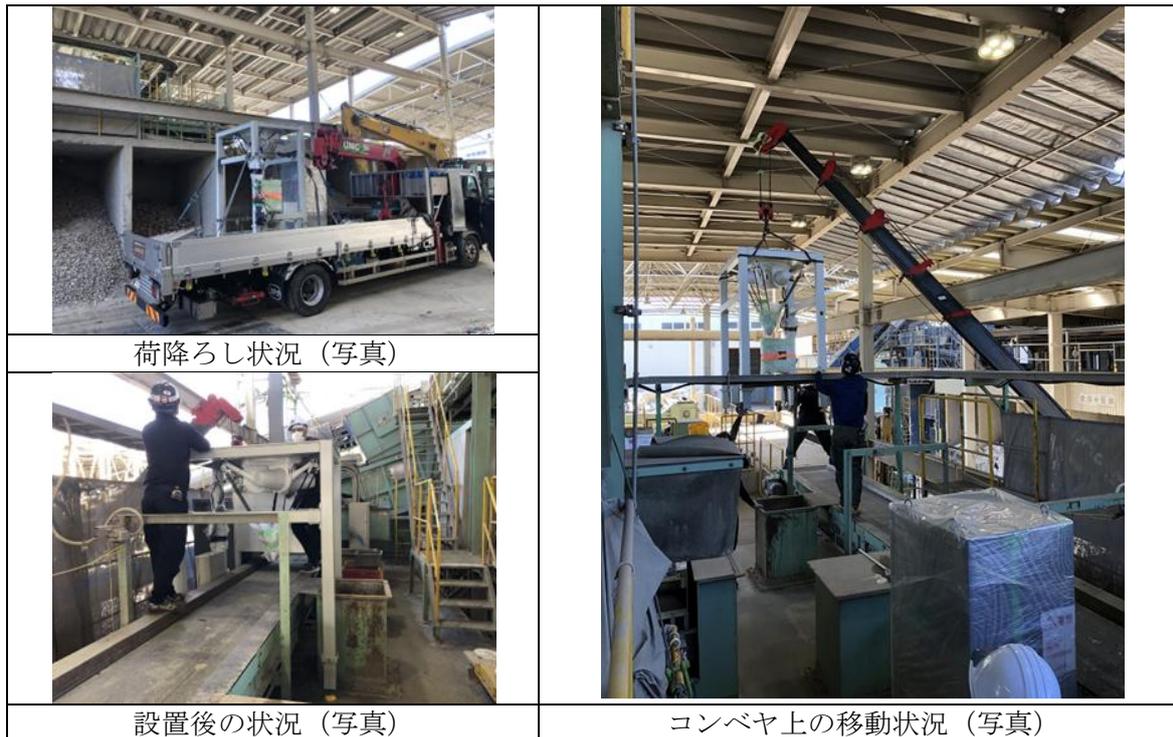


図 4-86 ロボットの設置

●ロボット設置状況 (カメラ BOX、ロボット)

設備は、バリオセレータを経て、重量物が流れる二次選別ラインの始まり部に設置



図 4-87 ロボット設置状況 (二次選別ライン)

#### (4) ㈱クマクラの現場状況

建設混合廃棄物は、「粗選別（ヤード展開）＋破碎＋一次選別＋比重差選別（バリオセパレータ）＋二次選別」を経て、リサイクル対象物、危険物（リチウムイオン電池、ボンベ類）等を回収し、残りは安定型埋立で処分される。（可燃物は焼却処分）

通常、一度流し（1回転）では、安定型埋立の処分基準（熱しゃく減量 5%以下）をクリアできないため、2度流しを行い、木くず、紙くず等の有機分の除去を徹底して行っている。

今回のロボット設置対象は、二次選別ラインでは、バリオセパレータで軽量物、微細物を除去後の重量物を対象に、手選別で木くず、紙くず等の有機分の除去（安定型埋立の基準：熱しゃく減量 5%以下）を徹底して行っている。

二次選別ラインの選別作業は、4名で、回収物の優先順位は、木くず、可燃物（いずれも有機物）、金属くず、コンクリート塊の順で回収を行っている。



二次選別ラインの状況（写真）



コンベヤ状態（高層厚）



廃棄物の流れ（写真）



コンベヤ状態（低層厚）

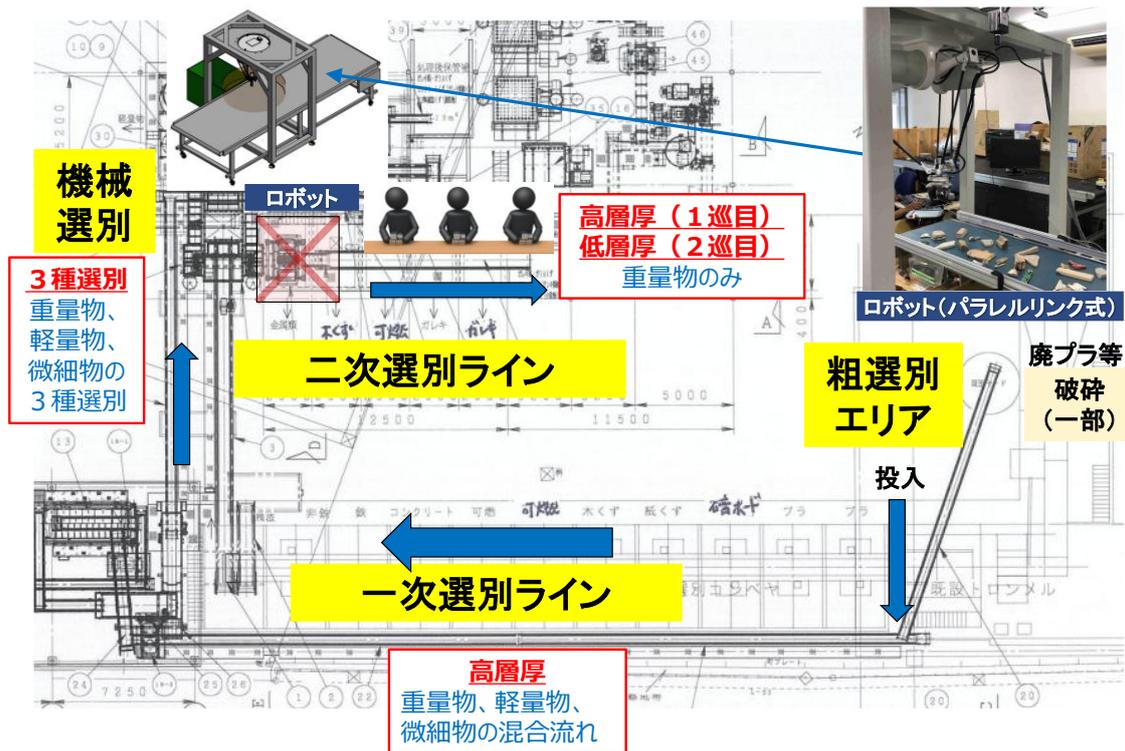


図 4-88 ロボットの設置場所（二次選別ライン）

#### (5) 技術開発の推進

㈱クマクラの現場に、ロボット及びカメラ BOX を配置し、処理支援に繋がるシステム構築を検討し、それに向けた以下の開発を進めることとした。

具体的には、木くずの画像認識精度の向上のため追加学習を行うとともに、コントロールシステムの機能追加、簡易な GUI の作成の 3 点を行った。

##### 1. 機械学習・追加学習

- 廃棄物中の「木くず」の回収システムの構築（低層厚のコンベヤ状態、事前破碎の有無等を考慮）
- 現場のコンベヤ状態を録画し、機械学習を実施
- 木くず（3 種に分類）の判別・追加学習データの構築（低層厚、明るさ等も考慮）

##### 2. コントロールシステムの機能追加

- グリッパー回転方向（ $\theta$ ）の明確化

##### 3. 簡易な GUI の作成

- ボタン設計：START/STOP

##### ① 機械学習・追加学習

機械学習は、コンベヤ状態の動画を撮影し、3 種類のラベリングを作成して行った。

（3 種類：木片（ロボット回収対象）、平板（グリッパーで把持できない）、瓦（類似品））



図 4-89 木くずの機械学習（低層厚）

さらに、建設混合廃棄物処理施設で特に想定される現場環境を考慮した追加学習として、木くずが濡れているパターンや、明暗など見え方に関するパターン等について学習を行った。

- AI モデルの追加学習として、動画データをもとに、データセットの数量を増やし、AI の性能向上を図ることとした。
- さらに、データセットについて、雨天時等にコンベヤベルトが暗く見える等による認識精度の低下を防止するため、照明シナリオを追加することとした。
- 具体的には、ダストが多い時、汚い物（ベルトの汚れ）、雨（雨水が付いている）等を想定し、照明シナリオとして、「明るい」、「うす暗い（真ん中）」、「暗い」の3種類のデータセットを作成した。その結果、現場環境に関わらず認識精度を安定させることができるようになった。



図 4-90 明るいパターン

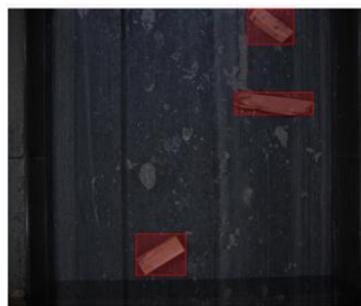


図 4-91 うす暗いパターン

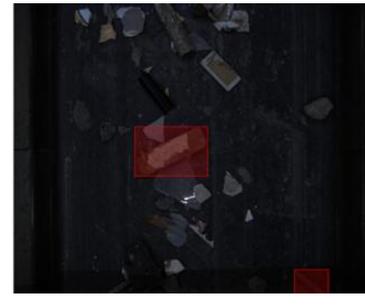


図 4-92 暗いパターン

## ②コントロールシステムの追加機能

グリッパーによる木くずの把持は、グリッパーの回転角度（ $\theta$ ）が重要となる。そこで、木くずのバウンディングボックス内に、グリッパーの角度方向を認識する緑色の線（グリッパーが緑線と直角に把持する）を書き込む作業を行った。

なお、何度も繰り返し現場対応を行い、さらなる木くずの認識精度の向上に向けては、サーバー交換（高性能化）や、追加学習を繰り返し行い対応した。

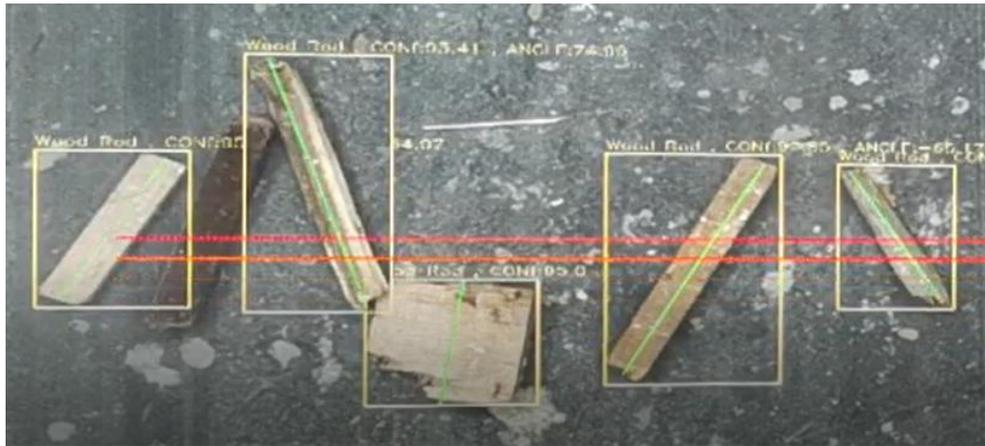


図 4-93 グリッパーの角度 ( $\theta$ ) 方向を認識 (緑色の線)

#### (6) 木くず選別の結果と今後の対応課題

##### ①実証結果

ロボットの画像認識は、ほぼ全ての対象木くずについて行うことができた。

一方、実際にロボットで選別できたものは、その中の一部に留まる。これは、作業スピードが追い付いていないことによる。ロボットは作業終了後に、次の作業に入ることから、画像認識結果に比べて選別結果は低い状態に留まっている。

なお、混合状態で流れるコンベヤ状態と、木くずが流れるコンベヤ状態での選別状況の比較を行った結果、木くずのみでは高い割合で選別できたが、混合状態の場合には、選別確率が多少低くなっている。これは、密着する廃棄物の把持も同時に行うために生じる結果であり、そのためにもコンベヤ状態が重要であるということになる。

今回、実証時のロボットスピードは、稼働範囲外でのワークを原因として、途中停止するリスクを回避するため 65%と遅く設定した。ロボットの利用には、ロボット可動域と、コンベヤ幅 (コンベヤ幅の方がロボット可動域を上回るため) との調整が必要となる。

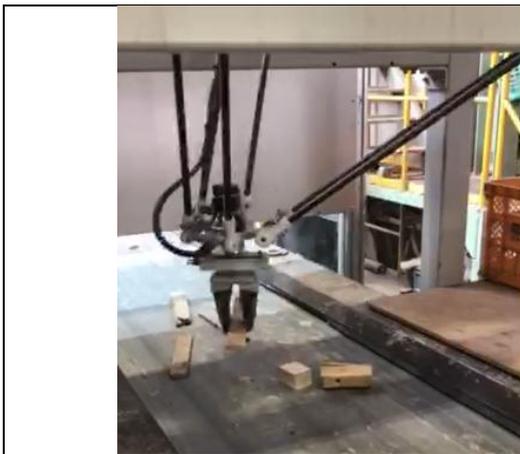


図 4-94 木くずのみ選別したもの



図 4-95 木くずの選別を行ったもの

##### ②実用化の課題

実証を経て、今後の実用化に向けては、現場の過酷な条件を踏まえつつ、下記のとおり、精度の高い設備対応が必要となる。

#### 1) 現場環境を踏まえた対応課題

建設混合廃棄物の処理施設の現場条件は、色々な面で過酷であり、ロボット設置においてはこうした条件の克服が必要となる。

##### 1. ロボットインターフェイスのスペース確保（適正配置）

本来の手選別のラインでは、作業員がコンベヤに張り付き、流れてくる品物を一緒に取りったり、山になっているモノを崩しながら取るなどを行っているが、ロボット選別では、複数種類の選別は可能ではあるが、1秒1ピック程度のスピードとなるため、1台のロボットでは人の機能の一部支援を行うことを前提に検討を行う必要がある。

そのため、現状の選別能力を考えるとコンベアの前半にロボットシステムを配置する形でヒトと連携をすることも一案である。なお、配置計画において、カメラBOXは、実証のため固定していないが、作業員がぶつかると精度が変わってしまうことから、現場条件に合わせたカリブレーション精度の向上を考慮した配置計画が必要になる。

##### 2. 防塵対策

現場では、コンプレッサー、ロボットコントローラ、サーバーラック等、電気設備内に粉塵が入り込み、機械故障を引き起こすため、精度の高い防塵対策が重要となる。実際に、コンプレッサーは2台故障し、実証時に3台目を使用する等の結果に至った。なお、圧縮空気は工場内のものを活用する等が望ましい。

##### 3. 適切なケーブル配線

ロボットは200V、その他は100Vの電圧であるが、配線方法によりAIに不具合が生じる現象が生じた。そのため、適切なケーブル配線が必要となる。

#### 2) 選別精度の向上に向けた対応課題

実証成果を踏まえて、実用化に向けた対応案としては、下記の対応が必要であると考えられる。

##### 1. 高性能コンピューティング

選別は、高性能なコンピューティングによりスピードや精度が向上する。

具体的には、高性能GPU、CPU、十分なRAMの導入を検討する必要がある。

##### 2. ネットワークインフラの強化

ネットワークインフラの強化も重要である。

具体的には、10Gbポートを複数搭載したスイッチの採用を行う必要がある。

##### 3. 3Dカメラ

RGBカメラでなく、3Dカメラの導入を行い、点群データ方式を採用することで、高さ方向の認識、把持の正確性を向上する事ができれば、正確な判別と選別に結びつく可能性がある。

##### 4. 最適なグリッパー

グリッパーは、今回の仕様では6cm幅、重量2kgを用いたが、ストロークの変更(8cm)も可能となる。対象物により変更を必要がある。

#### 4-3-4 今後の実用化に向けたシナリオ

##### (1) ロボット選別のニーズ

建設混合廃棄物の手選別ラインでは、表4-23に示す様々なニーズがある。

近年、人手不足が深刻化しており、同作業は派遣、アルバイト等を中心としたチーム編成とし、高給待遇によるベースロードの維持が重要となっている。さらに、廃プラリサイクル、サーキュラーエコノミー等をはじめ、回収後の再生資源の品質向上への要求の高まりもあり、粗選別、コンベヤライン及び、ライン通過後の機械選別の見直しや、高度化への対応が求められている。

今回開発を行った選別ロボットは、コンベヤラインにおいて、「単一素材（木くず）の選別回収」のみを担うものに過ぎないものの、ロボットの初期導入を通じて、人とロボットとの機能分担や、ロボットの進化を想定した高度化ニーズへの対応への期待なども含めて、処理施設の概念を見直し、人

に易しい処理方法への改善への契機となる可能性がある。

なお、現状の選別ロボット（深層学習型）は、物体のラベリングと、取得座標をもとに、物体の選別を行うという単一機能を担うものであり、複数の作業を担うこともできるが、ロボットスピードは、最大1秒1ピックの制約を踏まえて、利用方法を検討する必要がある。

表 4-23 建設混合廃棄物の手選別ニーズ

対象	内容	特性
粗選別ライン	人手又は重機等を用いて、破袋、内容確認を行い、種類別の分別や、重量物、危険物の除去等を行う	<ul style="list-style-type: none"> <li>受入確認を兼ねる重要な作業。</li> <li>粉じんなどで現場環境が悪い中、立ち・しゃがむ等の姿勢での対応が必要。</li> <li>重機と連携するなど危険を伴う。</li> </ul>
コンベヤライン	コンベヤ脇に立ち、複数名で手選別により危険物、リサイクル物、廃プラ、破碎禁忌品（塊状）等を選別回収する	<ul style="list-style-type: none"> <li>常時かつ、積層して流れるコンベヤを均らして、機能分け複数品目の選別回収を継続して行う。</li> <li>複数名のチーム編成で常時の立ち仕事（休憩時間除く）</li> <li>ライン通過後の処理基準をクリアする必要がある（危険物、破碎禁忌品の除去、安定型品質確保/熱しゃく減量）。</li> </ul>

(2) 実用化に向けたロボット利用環境の整備

ロボットシステムの実用化・現場導入にあたり、基本となるロボットシステムをもとに、現場環境や様々なニーズへの対応（顧客ごとの特異性）、現場データの収集（追加）、AI データセット構築（追加）、AI 画像認識精度向上（追加）、遠隔監視システム（通信環境、監視システム活用法）等と対応事項は多い。

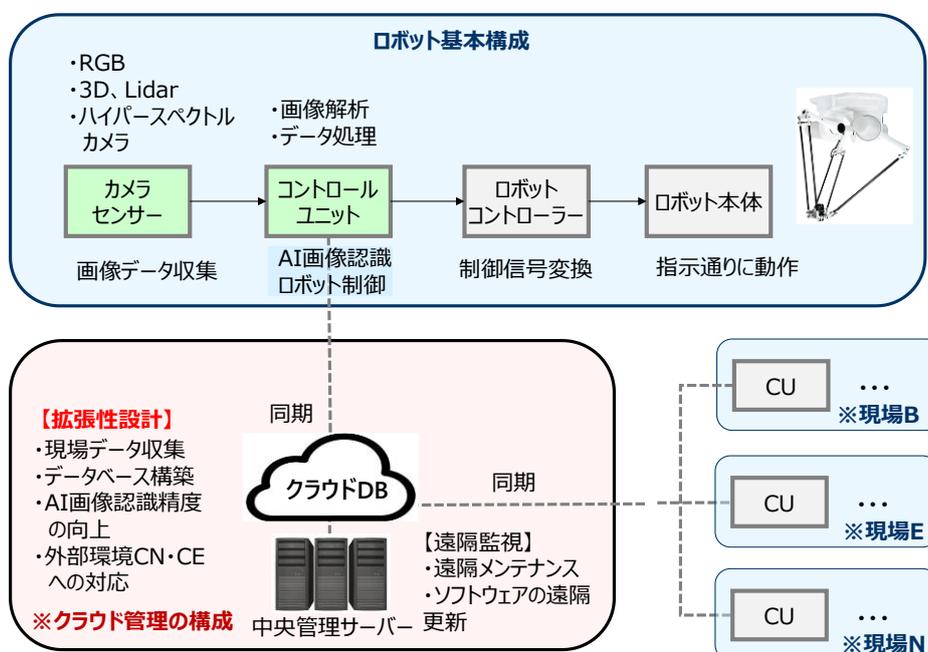


図 4-96 ロボットシステムの構成

一方、現場側の調整事項を考慮すると、ロボットの利用にあたり、ロボットの可動範囲（X, Y, Z,  $\theta$ ）、画像認識の方法（2D、3D）を踏まえて、ロボット選別に必要なコンベヤ状態に調整（ヒト、機

械による) する必要がある。つまり、ロボットが掴みやすい状態に調整したり、ライン後の処理基準（危険物、破碎禁忌品の除去、安定型品質確保/熱しゃく減量）をクリアする必要があることを踏まえて、全体フローを見直すなども必要となる。

特に、建設混合廃棄物は、飲料容器と比べて、表 4-25 に示すように、機械学習のためのデータ収集や、ラベリング等においても難易度が高いことから、優先順位を設けてロボット選別の作業対象を見極めるなどが必要となる。

表 4-24 建設混合廃棄物のロボット選別に必要なコンベヤ状態

状態	利用環境の調整	理由
廃棄物の積層がないこと	分散対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>安定した画像認識と、正確なロボット動作（把持）が実現できる</li> <li>積層内部の廃棄物は、画像認識ができず、選別不可能</li> </ul>
廃棄物同士がバラケタ状態	少量対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>ロボットは、密着する廃棄物は把持の障害となってしまう</li> </ul>
コンベヤ幅がロボット可動域内であること	ロボット稼働圏内の環境設定	<ul style="list-style-type: none"> <li>ロボットハンドは、可動域を越えた場合、安全装置が働き停止してしまう。</li> </ul>

表 4-25 建設混合廃棄物と飲料容器別のラベリング容易性

項目	建設混合廃棄物	飲料容器
種類	発生源は新築、改築、解体、土木等。各建設資材の種類、起源は多様	ペットボトル、缶、びんが主体（3種のみ）
形状	廃棄物の形状は不定形である	主として定形の形状が多い
色	色（多様）に加え、汚れ、経年劣化等	飲料ペット（白）、びん（茶、白、ミックス）が分別の基本
汚れ・濡れ	雨天時や回収時の機械作業を通じた雨濡れや泥汚れ	ラベル外しや、事前洗浄等、分別への協力もあり汚れは比較的少ない
素材変化	長期利用による経年劣化	飲料容器包装に該当
データ収集容易性	建設資材の「廃材」は特異性が高く、web上の情報は少ない	web上に製品情報が多数。廃棄物も形状、品質に大きな差異なし
ラベリング容易性	木くず、コンクリート塊等、色、形状に特徴があるもの以外は難易度が高い	アノテーションの自動化で、ラベリングは容易

### (3) 建設混合廃棄物ロボット開発の今後の方向性

建設混合廃棄物のうち、木くずの選別は、その形状からラベリングも比較的容易であり、選別を行うコンベヤ状態が低層厚で、積層しない流れが構築できれば、ロボット導入に向けたシステム開発において、取組易い対象であると考えられる。

しかしながら、楸クマクラのように、機械選別（比重差選別）後の二次選別ラインのように条件が整った処理施設は多いわけではないため、ロボット導入に向けた条件整備が必要である。

実用化開発に向けては、そうした条件整備と、ロボットの活用機能を十分に考慮した上で、採用を進める必要がある。

次章で詳述するが、現在、世界的にロボットの AI（頭脳）を担う生成系 AI 分野の目覚ましい進化や、ロボット本体（目、手、体）の開発を統合したヒト型ロボットの目覚ましい進化が加速しており、

ロボットのソフトウェアの更新を通じて、ロボットが担いうる内容の拡充が図りうるものと考えられるため、ヒト型ロボットは、グripperの大きさ等の制約なく、両手で物を抱えたり、コンベヤの積層を崩して積層内から危険物等を取り出したり、人に近い作業ができる可能性がある。そのため、改めてロボット導入のあり方についても同時並行で検討を進める必要があると考えられる。

(従来型のロボット (深層学習タイプ) 実用化に向けた対応課題)

① ロボットを活用する処理ライン全体の構成の標準化や、理想的なあり方の検討

建設混合廃棄物 (木くず) のロボット選別では、コンベヤ状態の事前調整が欠かせない。現状のロボットの実力 (人と比べた現状の作業能力) では、選別対象物の取りこぼしを少なくするという観点で、人が選別した後にロボットが取れる分だけを取るなどの運営方法も考えられる。

② 処理現場で具体的なロボット活用についてコーディネートする技術者の養成

ロボットの処理現場への適用性や、カスタマイズ使用のあり方について、柔軟に捉えて、関係主体との具体的な連携協議 (各ニーズを踏まえたプレゼン協議等) ができる専門性のありコーディネーター人材の養成が必要であると考えられる。

③ 低コストでの量産システム

建設混合廃棄物のリサイクル施設におけるロボットニーズに対し、生産性向上や、長時間作業、人を代替する「素材選別」対応に係る費用対効果による検証が重要となる。そのためには、ロボット機能の高度化と同時に、処理フローの構成見直しによる調整なども含めたロボット導入による全体経費の低減 (低コスト化) も重要な要素となる。ロボット導入によるコストは、初期導入コスト、設備改造、日常的な管理体制、設備メンテナンスなどすべてに対する見える化と、標準的な導入フローに基づく費用対効果の試算が必要となる。そのため、今後は、ロボットの低コスト化のための量産システムと合わせた総合的なアプローチが必要となる。

④ 初期導入が進みやすいレンタル・リース等のしくみの構築

AI 選別ロボットの活用は、飲料容器、建設廃棄物分野で複数の事例はあるものの、いずれも導入効果は満足のいくものではなく、導入事業者の信頼を必ずしも得られていない状況にある。初期の導入段階においては、一定期間のお試し等の柔軟な対応ができるようなレンタル・リース等のしくみの構築が求められている。それらは、ロボット開発主体のみで実現するものではなく、様々な主体が関与しながら、全体として導入が進む方向での取組みとして推進する必要がある。

なお、前記した課題内容と対応の区分を表 4-26 に示す。

表 4-26 課題内容と対応の区分

項目	対応区分	理由
①ロボットを活用する処理ライン全体の構成の標準化や、理想的なあり方の検討	ロボットメーカー	個々の施設ニーズを踏まえて、効率的な活用ができる方法論の一環として実施することが望ましい。
②処理現場で具体的なロボット活用についてコーディネートする技術者の養成	民間（スペシャリスト）	AI、ロボット技術の現場利用の適用性については、現場環境、処理フロー、成果評価等に関する分析、企画、マネジメント等が必要となるため、双方に精通する民間コーディネーターが必要。
③低コストでの量産システム	ロボットメーカー、行政連携	ロボットの製造、利用に関する基本データを構築し、普及しやすい改善を進める必要がある。依然、ロボット普及に必要となる標準化や、利用効果の最大化に係る開発に対し、当分の間、財政支援や、社会実装の具体化に向けたスピード感を持った行政支援が望ましい。
④初期導入が進みやすいレンタル・リース等のしくみの構築	民間（商社と連携）、ロボットメーカー連携	初期段階のロボット導入において、信用性、信頼性を担保するために需要家にやさしい、柔軟な方法論を試行する等が求められる。

## 第5章 社会実装に必要となる要素、プロセス等の検討

ロボット導入の社会実装に必要となる要素、プロセス等についての検討を行う。

これまでは、生成系 AI の進化による AI、ロボティクスに対する影響などを踏まえ、新しい技術システムの利用可能性などについて、取組を進めるとともに、各方面に事業展開に係る影響などについてサウンディング調査を行ってきた。その結果、さまざまな潜在的ニーズは存在しているものの、それらは、この間開発を進めた深層学習型のロボティクスと、新たに LMM（大規模マルチモーダルモデル）を活用したもので、可能性やニーズが異なる。特に、LMM の活用に向けた具現化については、要素技術開発からの段階的なステップが必要となることが考えられる。

本章では、事業期間後半時に、取組みの深化や、新たな可能性などを中心にそれらを明確とし、両者の違いや、今後の技術開発の方向性、ロードマップなどについて整理を行うこととした。本来、オープンイノベーションの場の形成を含めた各方面との討議を予定してきたが、そうした方針転換に基づき、まずは新たな技術開発の可能性を含めた提言を行うものとする。

本章における取組の概要は表 5-1 のとおり。

表 5-1 社会実装に必要となる要素、プロセス等の検討に係る取組の概要

項目	目的	実施内容	成果	課題・展望
5-1 ロボット利用に対する社会ニーズ	廃棄物処理分野でのロボット利用に係る意義を再整理する。	①社会ニーズ（施策上の位置付け含む）の整理 ②廃棄物処理業界特有のニーズの整理	一連の研究開発を通じて、産官学連携で集約してきた社会的意義を再整理した。	AI、ロボティクスを用いた廃棄物処理分野の問題解決の可能性についての検討がさらに求められる。
5-2 選別ロボットの新たな要素技術開発に向けた方向性の検討	プロトタイプモデルの開発課題を踏まえた解決方向として、新たな要素技術に着目した検討方向を明確化する。	①LMMによる新たな画像認識システムの方向性検討 ②VLAによる新たなロボット制御システムの方向性検討	LMM、VLA 技術が日々進化する中で、廃棄物処理分野への応用利用に向けた特化研究がさらに求められることを明らかにした。	現場特性に応じたロボットの適用性の拡大に向けて、様々な事業分野・用途を考慮した具体的な検討が引き続き求められる。
5-3 次世代 AI 自動選別ロボットの一般化と今後の方向性	定型作業と、高度利用に区分して、ロボット特性や、今後の開発方向に加えて、現時点でのロボットと人との共存の考え方を明確化する。	①定型作業の実用化ロボットの一般化と方向性検討 ②高度利用ロボットの要素技術開発の方向性検討 ③ロボットと人との共存等についての検討	ロボットは未だ普及段階には至らないが、利用環境や、最新の技術開発の方向性を示し、ロボットと人との連携や、処理現場での活用方法のイメージ化を進めた。	生成 AI、ロボット開発の進化スピードを踏まえて、間断なく技術開発を継続する必要がある。今後、現場導入の適用性や、最適な利用法をコーディネートする人・機能が必要となる。

### 5-1 ロボット利用に対する社会ニーズ

図 5-1 に示すとおり、様々なシーンでの社会課題や、CE 実現にあたっての新たな要求ニーズを満たすシステムとしての期待がある中で、AI/ロボティクスの技術開発や普及検討に向けた政策的な後押しがある上、近年、生成系 AI の驚異的な進化が見られることから、廃棄物処理の現場での活用可能性が広がっている。



政策的 動向	第五次 循環基本計画	廃棄物再資源化への機械化・AI導入等による高度化・供給拡大 【資源循環領域重点課題】トレーサビリティ確保や効率性向上の観点からのデジタル技術やロボティクス等の最新技術の徹底活用

●第五次循環型社会形成推進基本計画～循環経済を国家戦略に～



図 5-1 ロボット利用に対する社会ニーズの拡がり

【環境基本計画】（2024年5月）  
 重点戦略：環境・経済・社会の統合的向上の高度化のための6つの戦略【第2部】  
 5. 「新たな成長」を支える科学技術・イノベーションの開発・実証と社会実装  
 □（中略）AI、IoT（Internet of Things）等のデジタル技術の活用  
 【第五次循環型社会形成推進基本計画】（2024年8月）  
 重点分野2：資源循環のための事業者間連携によるライフサイクル全体での徹底的な資源循環  
 「製造業・小売業などの動脈産業と廃棄物処理・リサイクル業など静脈産業との事業者間連携（動脈連携）を通じて活用」を推進  
 □事業者間連携により、（中略）中長期的にレジリエントな資源循環市場の創出を支援  
 重点分野4：資源循環・廃棄物管理基盤の強化と着実な適正処理・環境再生の実行  
 □（中略）トレーサビリティ確保や効率性向上の観点からデジタル技術・ロボティクス等の最新技術の徹底活用による資源循環・廃棄物管理基盤の強化と資源循環分野の脱炭素化を促進  
 【再資源化事業等高度化法】（2024年5月29日公布）  
 第3章2節 再資源化事業等の高度化に関する認定制度  
 ②高度分離・回収事業  
 □最先端の技術を用いた再資源化  
 ③再資源化工程の高度化  
 □廃棄物処理施設への先進的な高性能の設備導入

さらに、廃棄物処理業界が直面する諸課題から、以下のとおりロボット活用の重要性が考えられる。  
 ① 新型コロナの当時、廃棄物処理業界も、リサイクル業界も人手不足の状況が発生しており、社会インフラとしての廃棄物処理システムの機能維持に対する危機感があつた。また、既に生産年齢人口は減少しており、今後も静脈産業では新たな働き手を得にくい傾向が顕著になる見込みである。この人手不足の危機に対応するためには、早急に機械化を推し進める必要があると考えられる。

- ② 世界的に資源循環を巡る議論がますます活発になる中で、廃棄物処理業界には新たな社会的役割が期待されている。しかしながら、3K、5K ともいわれる廃棄物処理業界が現状のままでは、若い人材が魅力を感じる対象にならず、新たな人材を獲得できない恐れがある。廃棄物処理技術のブラッシュアップ及び新たな技術開発の対象としてロボット技術を位置付けることで、廃棄物処理業界の新たな可能性を見出すことが可能になると考えられる。

## 5-2 選別ロボットの新たな要素技術開発に向けた方向性の検討

前章までに、排出現場、中間処理施設（建設混合廃棄物）において、あらゆる場面で手選別による危険物（LiB 等）の除去や、再生資源の回収対応の必要性が高まっていることについて、人手不足の中でのリサイクルの高度化ニーズ等といった厳しい状況の中にあって、ロボット導入のニーズは見られるものの、現状の処理フローとの関係整理や、人との連携のあり方が重要である中で、ロボット側においても普及段階の認識精度等の結果が得られていない状況が見受けられる。そのため、改めて、ロボット技術がどのようなもので、利用可能性はどうかなどについて示し、今後の方向性の検討を行った。

### 5-2-1 LMM による新たな画像認識システム

2024 年 9 月に、メタ社 Llama3.2 のオープンソース化を契機に、廃棄物分野のロボット選別においても、LMM の活用可能性が広がった。元来、廃棄物は不定形なものが多い中であって、従来の深層学習では、認識精度の向上を抜本的に高めるための難易度が高く、その活用は現場における定型作業の一部に限られてきた。しかしながら、LMM の登場で、人が目で見て考えて動くように、ロボットの頭脳として活用することで従来にない精度向上への期待が高まっている。

概念を図示すると、図 5-2 に示すようにカメラ（眼）、サーバー（脳）、7 軸アームロボット 2 本（腕・手）、マイク（耳）、スピーカー（口）を統合化し、LMM を中核に据えた次世代型の Embodied Intelligence を実現する AI リサイクルロボット（選別+α）の実現可能性が生じているということになる。

なお、選別+α とは、単なる種類の選別にとどまらず、+α としてヒトの現場作業も実施できる点が重要である。さらに、人の代替にとどまらず、人の保有能力を超える多種多様な選別ニーズに応じ、LMM によるリアルタイムの大量の情報収集と個別の対応処理が可能となる。

この技術の確立により、人手不足が顕著な廃棄物リサイクルの現場において、第 5 次循環基本計画で明示する CE 化を実現する動静脈連携の革新的な技術システムとなると考えられる。

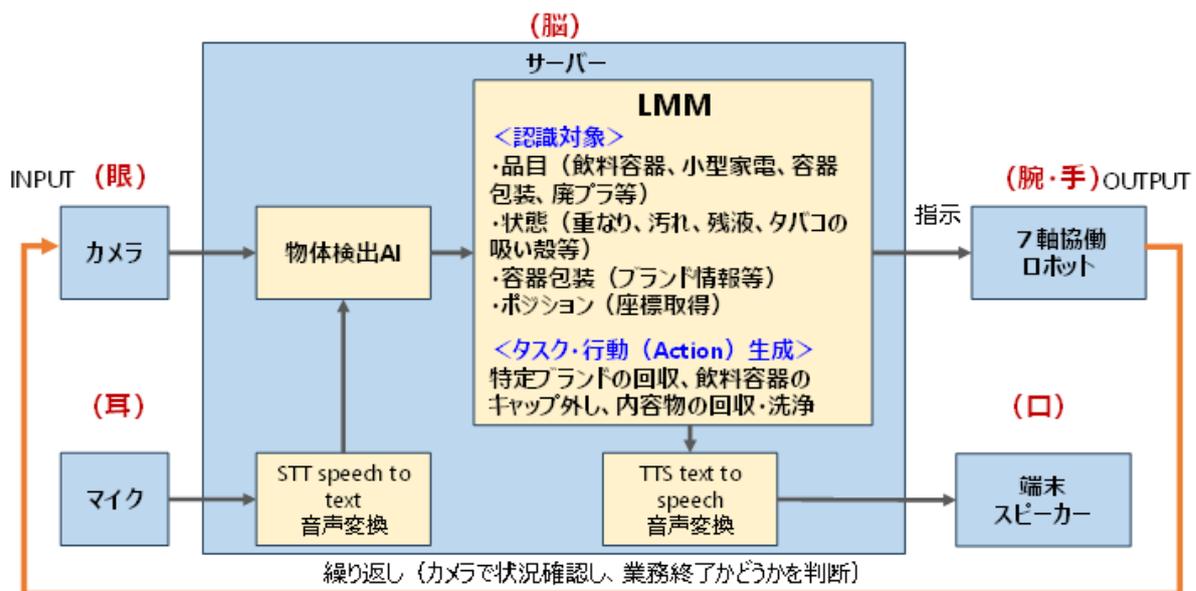


図 5-2 次世代 AI リサイクルロボットの構成

LMM の拡張性については、図 5-3 のようにあらゆる対象物に対し、どのような推論が可能となるのか、今後の技術開発が必要となるが、例えばライオン社が開発した「積層した材質別に再利用が可能な

パウチ包装」のブランドを判別して選別ができれば、現在は、容器包装プラスチック処理の選別基準（不純物10%以内程度の基準）のためにプラスチックパレットにしかならないような状況を見直し、再度容器包装材としての活用可能性が生じる。その際、分別回収を進めるための革新的なコア技術としてLMM活用の可能性があると考えている。他のLMM活用例としては、洗浄が必要なタバコの吸い殻入りのペットボトルの認識、価値の高い基盤を判定するようなシステム、家電では作業環境や工程変化により既存ロボットが対応できなくなるケースへの対応や、LiB利用製品の判定による小型家電選別作業の効率化等が考えられる。

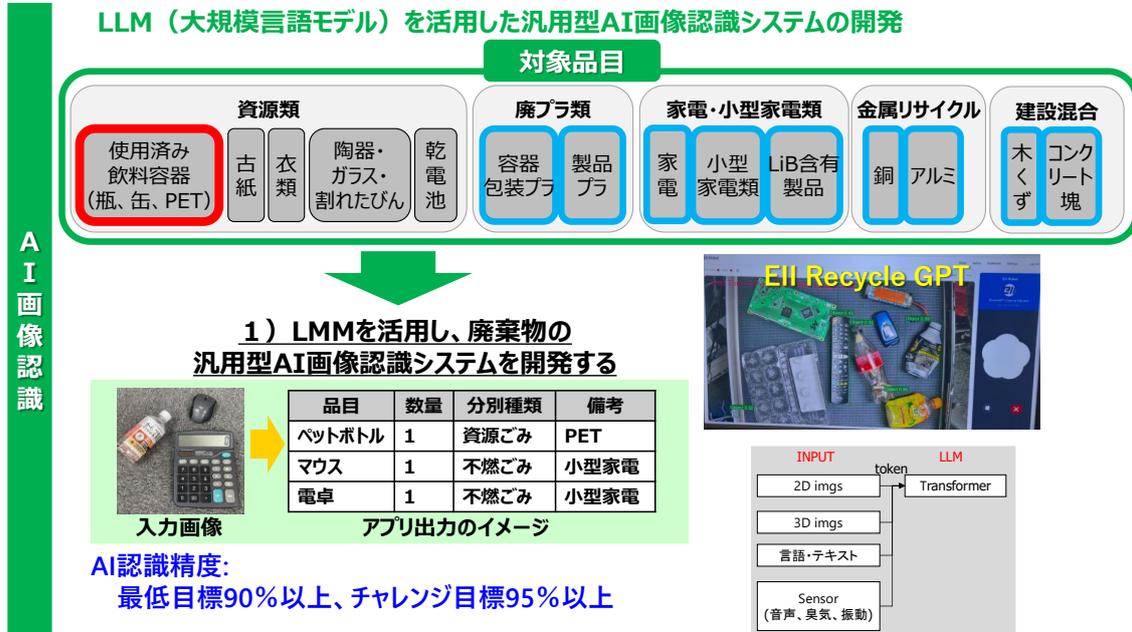


図 5-3 LMM 活用の検討対象

表 5-2 LMM 活用で広がる可能性

リサイクル工場フローの自動化・CE対応に向けた対応要望		LMM+ヒト型ロボットでできること	
領域	自動化・CE対応に向けた対応要望	LMM	ヒト型ロボット
飲料容器リサイクル	ペットボトル内のタバコ、残液等の判別・除去 ペットボトル（柄付き、色付き）、缶（スプレー缶）の判別・除去	・タバコ、残液の判別 ・PET（柄付き、色付き）、スプレー缶判別 ・写真で新ボトル登録	・PETの蓋を開け、タバコ、残液を排除し、洗浄する
容器包装リサイクル（廃プラ）	メーカー開発の新パッケージ素材（「表層PA+溶ける接着剤+内層PE」）をブランド別に回収したい	・ブランド別に絵柄、文字を読み取り判別	・積層状態を手で馴らして判別を容易化
家電リサイクル	ネジ回収・分解作業の自動化に取り組むが、表面汚れ、ネジ穴の不一致等で効率が低い。作業工程の見直しへの柔軟な対応が難しい	・機械学習に比べて学習量が豊富なため、自動化領域が拡大	・汚れを自ら除去し、ネジの場所を判定し、自律して行動
小型家電リサイクル	LiB内蔵の小型家電の判別。 ・粗く解砕後、LiB、廃プラ（素材別）、金属（鉄、非鉄）を回収して、原料別にリサイクル	・LiB利用製品の登録 ・LiB判定を高精度で実施	・積層中の対象物から、LiBだけを把持して除去する
建設リサイクル	積層を馴らして、中にあるモノを判別し回収。積層している下のモノを回収 ・LiB、金属（鉄、非鉄）、破砕できないもの等	・積層状態を認識 ・積層した下にあるモノを認識（LiB等）	・積層を馴らして、取り出す

① LMM モデルの利用

この間、Chat-GPT はプラットフォームがオープンではないのでチューニングができないという問題があった。2か月前にリリースされたMeta社のLlama3.2のリリースによりこの問題が解消され、技術面で更なる進歩を見せることができています。

日本語で質問し、日本語で回答するようなシステムを組みこんでいる。最初からプロンプトによる指示を明確にすることで10程度の判別を同時並行で実施する事ができる。



図 5-4 新たな AI モデルの取組経緯

**LMM (Large Multimodal Model) :**

- 大規模なデータを用いて視覚・音声・テキストなどを統合的に処理する AI モデル
- 画像キャプション生成、動画理解、音声理解、対話型 AI 等に応用が可能

**LMM の有用な活用方法 :**

- 対象物別に、様々な認識ができ、「選別」分野の革新的なコア技術となる。

分野	LMM による認識
飲料容器 R	タバコ、残液の判別 PET (柄付き、色付き)、スプレー缶判別写真のみで新ボトル登録が可能
容器包装 R	ブランド別に絵柄、文字を判別
家電 R	機械学習に比べて学習量が豊富なため、選別の自動化領域が拡大
小型家電 R	LiB 利用製品の登録 LiB 判定を高精度で実施
建設廃棄物 R	木くず、がれき等を認識 LiB 等の認識

図 5-5 LMM による新たな画像認識システムの可能性

## ② LMM を活用した建設混合廃棄物の判定

LMM は文字を読んで回答するだけでなく、現場環境を伝えることで領域を特定し、木くずやコンクリートというモノを認識ができる。プラスチックを金属と見間違えたりする部分はまだあるが、ファインチューニングによって改善が可能である。



図 5-6 建設混合廃棄物処理施設のコンベヤ上で採取した試料の判別

### 5-2-2 VLA による新たなロボット制御システム

VLA (Vision Language Action) モデルは、視覚、言語、行動を統合するモデルであり、ロボットやエージェントが物理的な環境で意思決定を行うために設計されたものである。AI が視覚情報を理解し、言語指示を処理し、それに基づき物理的な行動を実行する。VLA モデルを構築するには、ロボットの軌跡データ収集システムを構築し、VLA モデルをチューニングすることで、高度な作業をロボットによって再現することが可能になる。

#### (1) 遠隔操作データ収集システム構築

遠隔データ収集システムは、無線通信技術を活用して、離れた場所にあるセンサーや機器からリアルタイムでデータを収集・管理するシステムである。高度作業ロボットの開発にあたり、VLA (Vision-Language-Action) モデルのチューニングには大量のロボット軌跡データが必要となり、高効率でデータ収集を実施するため、遠隔操作データ収集システムを構築する。本システムには、7軸協働ロボット、グリッパー、ステレオカメラ3台、コントロールサーバー、遠隔操作ハンドルによって構成される。

本システムを複数のエンドユーザーの現場に設置し、エンドユーザーによって操作することで、大量の現場のリアルのデータを収集することが可能となる。

#### (2) OpenVLA-OFT モデルチューニング

高度作業ロボットの機能を実現するためには、ヒトの動きを再現するために、最先端のロボット制御システムである OpenVLA-OFT (Optimized Fine-Tuning) モデルを大量の現場データを用いてチューニングを行い、実験等を通して有効性を検証する。

OpenVLA は、視覚、言語、行動を統合し、ロボットが複雑なタスクを実行できるように設計された技術である。97万件以上のロボットエピソードで訓練されており、多様な状況に対応するロボット操作を実現している。また、Llama 2 7B パラメータモデルを基盤とし、視覚エンコーダとして DINOv2 と SigLIP を使用している。これにより、高精度な視覚情報処理と行動選択が可能となっている。

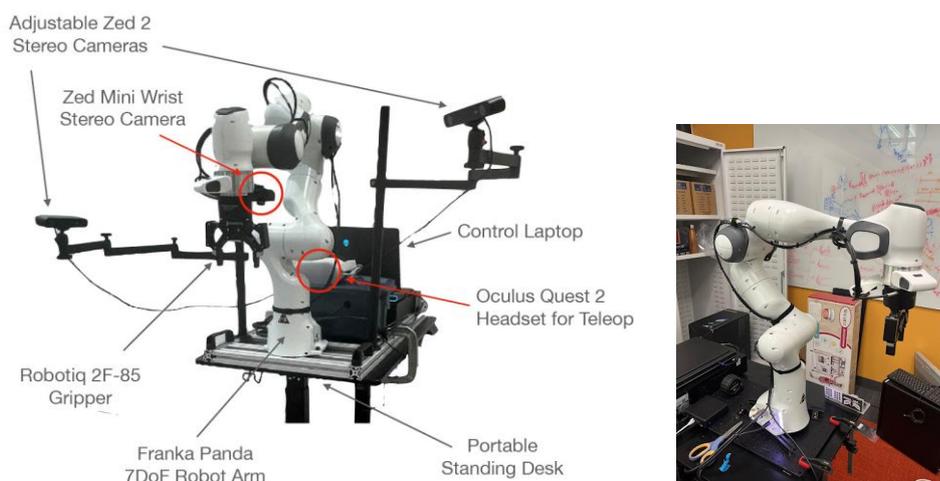


図 5-7 遠隔操作データ収集システム (Franka 7 軸協働ロボット、今後の研究対象)

将来的には、ヒト型ロボットを用いて、LMM と VLA (Vision Language Action) の技術を組み合わせ、人と同様の動きができるようになる。ロボット分野において LMM と VLA が革新的なコア技術となる。

例えば、建設混合廃棄物のコンベヤ上で積層しているモノを精度高く取れない今のロボットに対し、コンベヤ上を均す作業をさせる積層物の中から特定のモノだけを取るといったことが可能。重なっているものを均すだけでもよく、後段にロボットが使えれば良い。

或いは重量等の制約がある今のグリッパーに対し両手で対応する等の活用方法。さらに、認識においては、危険物も Lib を学習したデータがあるため判定ができる可能性や、混廃のように不定形であっても予測ができる可能性がある。



図 5-8 ヒト型ロボットの代表例 (テスラ社オプティマス)

### 5-3 次世代 AI 自動選別ロボットの一般化と今後の方向性

LMM の登場を踏まえて、AI ロボットの研究開発は、定型作業と、高度作業に分けて、技術開発を展望し、区分して考えた結果を示す。

それぞれ技術の成熟度観点から、実現可能な AI ロボットと、今後要素技術開発から進めるべきロボットとしてそれぞれ整理を行った。

#### ①定型作業の実用化ロボット

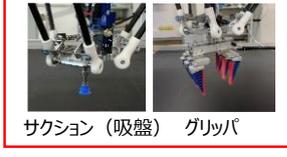
<p><b>【提案施策①】定型作業 AI (DL) +ロボット (産業用)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 定型作業 + 速度重視</li> <li>• ヒトとの共存が前提</li> <li>• 技術成熟度：高</li> </ul>	<p>AI ロボットの特性 (従来：深層学習型)</p>
<p>【特徴】①速度が速い (1秒/1ピック) ②一般品目のみ対象 (特殊品目対象外)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■AI：モノの座標と物体認識があるのみ</li> <li>■ロボット：指定された座標のモノを掴むのみ</li> </ul> <p>※隣り合うモノも、誤って掴んでしまう。</p>
<p><b>プロトタイプ完成</b></p> 	<p>得意領域</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 飲料容器 (PET ボトル、缶、びん)</li> <li>② 白色トレイ等</li> <li>③ 家電リサイクル (冷蔵庫、洗濯機⇒モーター、コンプレッサー (形状判定可能))</li> <li>④ 建設廃棄物 (限定：木くず、コンクリート塊)</li> <li>⑤ 古紙</li> </ol>
<p><b>実用化実現 AI認識精度 チャレンジ目標95%</b></p>  <p>サクシオン (吸盤)    グリッパ</p>	<p>ロボット利用環境と対象</p>
<p><b>1年以内⇒実用化 (量産化に向けた検討)</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>①画像認識がしやすい状態 コンベヤ上が積層状態でなく、バラけている状態</li> <li>②把持は、小型・軽量であるもの。 (サクシオン：800g、グリッパ：2kg・幅8cm)</li> <li>③色や形状に特徴があり、ばらつきが少ない対象。 (飲料容器、白色トレイ、コンプレッサー、モーター等)</li> </ol>

図 5-9 提案施策①

②高度利用ロボットの要素技術開発

<p><b>【提案施策②】高度作業</b>  <b>AI (LMM) + ロボット (ヒト型・協働型)</b></p>	<p>AI ロボットの特性 (高度 : LMM+VLA)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>複雑作業の人型ロボットの視覚として活用</li> <li>今後の技術開発が必要</li> <li>技術成熟度 : 低</li> </ul>	<p>AI : 人の脳に近いプレ学習データ活用          ロボット : 視覚、言語、行動の統合モデル          ※人同様 (それ以上) に、多様な認識情報の活用と、高度な選別作業が可能となる。</p>
<p>【高度な作業】重なり状態、汚れ、ブランド、キャップ外し、残液回収・洗浄、素材・用途の認識等</p>	<p>可能性のある行為</p>
<p><b>&lt;次世代Embodied Intelligence搭載AIリサイクルロボット&gt;</b></p>	<p>飲料容器 (内容物の残液・タバコ判定、洗浄) プラスチック (パウチ、日用品ボトルのブランド別回収)          家電リサイクル (手解体・解砕後に素材別回収)          建設廃棄物 (積層を均らして、対象を選別回収)          LiB 又は LiB 搭載製品の判別と回収</p>
<p><b>実用化に向けた要素技術開発</b></p>	<p>ロボット利用環境と対象</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>①コンベヤ状態等は、自ら調整。積層を崩して回収、汚れを拭きとり確認して推論できる。</li> <li>②把持は、両手、抱え込んで回収が可能。(重量、大きさ、硬軟はハードウェア、力覚センサー等による)</li> <li>③LMM データのカスタマイズ利用で柔軟に対応可能。</li> </ol>

図 5-10 提案施策②

なお、LMM については、トレーニングには通常サーバーではスペックが不足するため、最先端のハードウェアの複数使用や、大容量データの保存やコピー全てに技術力が必要となる。そうした技術力、ハードウェア、データの有無が課題解決に向けて必須となるが、AI による自動選別において、LMM のファインチューニングができ、成果方向を見通す企業を目指した取り組みを進めていく必要がある。

LMM とロボットの一体化は VLA (Vision-Language-Action) の枠組みで実現するが、資金面の充足ができれば数年で成果に結びつくテーマであると考えられる。

今後、互いの特性を踏まえて、実用化に向けた開発が急がれるものと考えている。

表 5-4 実用化に向けた開発スケジュール

テーマ名	R7年度	R8年度
<p>①定型作業ロボットの実用化開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・認識精度の向上にLMMを活用</li> <li>・統合・実用化モデルの構築</li> </ul>	<p>VisionLLMモデルの選定、Prompt設計、テスト (ChatGPT4o, Llama3.2 90B, その他)</p> <p>反応速度を重視する物体検出モデルとLLMを統合するアーキテクチャの構築</p> <p>統合化システム開発 (AIモデルの切り替え機能搭載)</p> <p>実証実験</p>	<p>実証実験</p>
<p>②高度利用ロボットの要素技術開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・LMMの活用可能性</li> <li>・VLA技術の活用可能性</li> <li>・AIアーキテクチャーによる現場利用モデルの構築</li> </ul>	<p>各ハードウェアを統合化するソフトウェアの開発</p> <p>ロボット制御システム開発</p> <p>Human-Robot Interaction (HRI) の開発</p> <p>実証実験</p>	<p>実証実験</p>

### ③ロボットと人との共存

ロボットと人間の共存については、ロボットのハード、ソフトで自動化が、働いている方といかに共存できるかも重要である。自動化に向けた取組みを通じて、作業員による疎外感という結果ではなく、ロボットをマネジメントする新しい技術活用のあり方に向けて、働き甲斐をもって協働できることが望ましい。

人とロボットの協働の取組みの進化過程、いわゆるトランジションのデザインが重要で、「リソースシフト」を徐々に進めていく必要があり、その結果、費用対効果の向上も図りうるものとなる。また、工場作業における作業員の安全を優先し、まずは危険が伴う工程をロボットに積極的に代替させ、安全が担保された作業を人間にシフトする等の考え方もできる。また、繊細な感覚が必要とされる作業を対象に機能区分を行うなどの考え方もできる。いずれにしても、ロボットの実用化の過程において、更なる検討が必要となると考えている。

本事業を通して、ロボットやAIの導入が、産業のデジタルシフトを促し、作業員が単純作業から解放され、創造性や対人スキルを活かす仕事へとシフトすることができる。リスクリングによってロボットのオペレーションといった新たなスキルを習得し、デジタル社会に適応することで、働き方の柔軟性や生産性の向上が期待される。ロボットとの共生により安全性や効率も高まり、より人間らしく、やりがいのある働き方の実現が期待される。

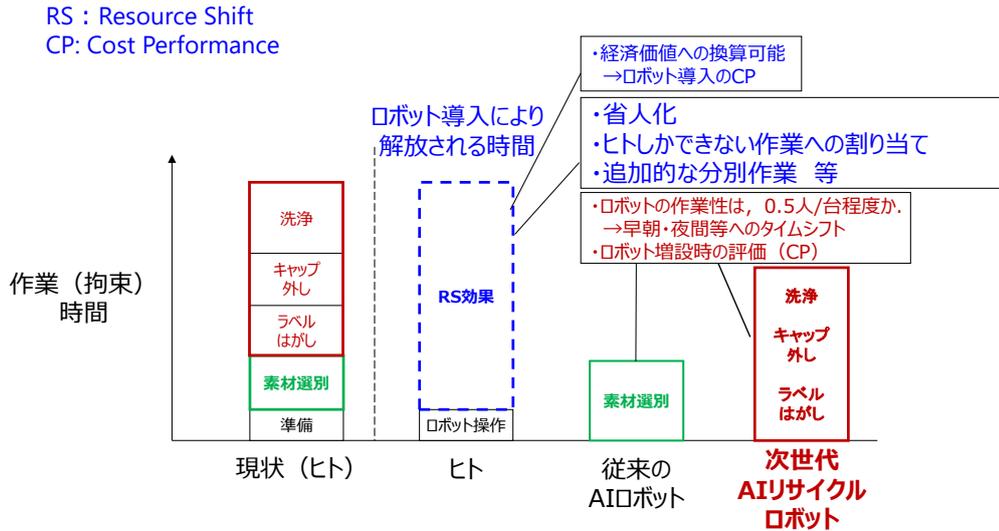


図 5-11 ロボットの導入による機能分担と費用対効果の検討

④ロボットの標準化

ロボット開発は、将来は「こういう形がベスト」と想定されるスタンダードモデルを作り、そのシステムを導入すると選別の効率化が達成されるという形が望ましい。なお、需要家の個別ニーズに対しては、一種の「モジュール化」により、柔軟に対応できるシステム構築が求められている。

飲料容器の選別ロボットにおいては、今回のループラインコンベヤを用いた一体型システムは、中小規模の自治体向けのパッケージとして、人手不足への対応、作業員の負担軽減、収集運搬コストの低減を一体的に進められる可能性がある。

⑤現場協議の実施

関係団体、企業を交えて、LMM 活用によるロボットのあり方等についての現場協議を実施した。

表 5-5 飲料容器選別ロボット及び LMM 活用によるロボットの進化系協議 (参加リスト 28 社)

業種	社数	属性	テーマとの関係性
廃棄物処理	7	ロボット需要先	・LMM 活用による AI ロボットの進化系
メーカー (飲料、容器包装、 電機、設備)	8	飲料メーカー	・容器包装、プラスチック、家電・小電 CE 推進 ・LMM 活用による AI ロボットの進化系
商社 (設備、環境機器)	3	協業先候補	・販売代理、アフターサービス
シンクタンク	2	廃プラケミカルリサ イクル	・CE 推進 ・LMM 活用による AI ロボットの進化系
関連業界	2	ロボット需要先、産 廃業界	・LMM 活用による AI ロボットの進化系
周辺住民	1	市民、自治会	・住民理解
環境マスコミ	1	マスコミ	・媒体を通じた PR
リース事業者	1	連携	・LMM 活用による AI ロボットの進化系
国・環境政策	1	スタートアップ支援	・LMM 活用による AI ロボットの進化系
市・環境事業	1	ロボット需要先	・LMM 活用による AI ロボットの進化系

## ⑥まとめ

静脈産業は、処理の対応が個々に異なり、誰も知識を持っていなかったり、言語化できていなかったりする領域も大きい。静脈分野に何があるか分からないという人も多く、そのため、ロボット開発を通じた見える化が重要で、それを通じて、ゼロからイチにする対応を進める必要がある。

飲料容器は形も分かりやすくインターネットにも情報があるが、建設廃棄物は人間が見ても良く分からない。一定期間現場に協力してもらい、LMMにデータを取り込みができればそれがロボットに転送されるようなイメージもあり得る。ローカルでどんな情報が必要で、大きなデータとどのように連携するかが分かれば、現場にどんな協力を求めればよいかという次のステップの参考になる

静脈産業での解が得られれば、あらゆる分野への応用も可能性があると考えられるため、日本のロボット技術、世界のロボット技術へと導くリーディングカンパニーを創出する役割を、この分野では見て取れる可能性があると考えている。なお、こうした展望は、工学の面白さを示してもらおう事で日本の若者を育てることに繋がるため、大いに推進すべきである。

## 第6章 ロボット等導入の環境負荷削減その他の効果についての研究開発

本章における取組の概要は表 6-1 のとおり。

表 6-1 ロボット等導入の環境負荷削減その他の効果についての研究開発に係る取組の概要

項目	目的	実施内容	成果	課題・展望
6-1 リソースシフト評価	技術導入の促進に向けて、より正確にAI・ロボティクスの能力を評価できる評価手法を開発する。	①リソースシフト評価手法の開発 ②廃棄物資源循環分野のAIロボティクスに対する評価	成果①：技術導入で解放できる人工は、複数の作業の一部であることを示した。 成果②：同じ時間内にロボットが実行できる作業量は作業員の約1/3人であることを示した。 成果③：開発したロボットの実証（運搬、飲料容器の選別、木くずの選別）を通じて、リソースシフト効果を算定するための基礎データを取得し、ケーススタディを行った。	・リソースシフト評価を行うためには導入現場別に作業プロセスの分析と評価が必要である。 ・技術導入によって作業員の作業内容が変化する事も技術導入の効果として正確に評価するためには積み重ねて実証を行う必要がある。 ・ロボットの能力を引き出すためにはロボットの作業しやすい環境の整備から考える必要がある。
6-2 特定空間内のごみ質と分別の合理化に関する調査	ごみ箱単位の分別基準とごみ質を把握する。	①東京都内の公共空間に設置されているごみ箱の実態調査 ②研究室におけるごみ分別の合理化・ごみ質に関する調査	成果①：排出現場によって、複数のごみ分別区分が混在している実態を確認した。 成果②：積極的に忌避物質を回収することが効率よくリサイクル原料を回収することができる可能性を示した。	・後段のリサイクルプロセスを考慮した合理的な分別区分の設定が必要と思われる。 ・積極的に忌避物質を回収することで得られる効果の実証的な検証が必要である。
6-3 ごみ量の自動化監視手法に関する研究開発	ごみ収集作業の効率化に向けて、社会実装が容易なごみ量監視手法の開発。	①人流量とごみ量の関連性分析 ②自律走行型ロボットや監視カメラに搭載することを前提とした、ごみ箱内の占有率を識別する画像識別AIシステムの開発と検証	成果①：飲食系廃棄物の排出量は人流量によって予測することが可能であるが、紙・プラの排出量は人流量で予測できないことを示した。 成果②：動くごみ箱の配置位置を人流量で判断できることを示した。 成果③：画像認識技術をベースに、半透明ごみ箱とカメラによるごみ量の監視方法を提案した。	・人流量とごみ量の関連性をより多くの現場で検証し、一般化する必要がある。 ・画像認識技術をベースとしたごみ量監視システムの有効性を実証実験で検証する必要がある。 ・自律走行ロボットと組み合わせたソリューション開発が期待できる。

項目	目的	実施内容	成果	課題・展望
6-4 教師データ取得効率化に向けた検討と実験	建設混合廃棄物を例として、教師データに求められるパラメータを明確化することで、画像認識 AI 訓練用教師データの取得効率を向上させる。	①実際のラベリング作業に対する調査 ②教師データのパラメータを影、数、輪郭線の3種類に限定して同現場で採取した教師データを持った AI 訓練実験	成果①：教師データ作成時にヒューマンエラーが避けられないことを確認した。 成果②：教師データ作成作業の効率が低いことを確認した。 成果③：建設混合廃棄物の選別ラインにおいて好ましい教師データの特徴は「影あり」と「全体が映っていること」であることを示した。	・AI・ロボティクスの実用化に向けて、効率的に高品質の教師データを取得することが課題と思われる。 ※本課題に関しては、飲料容器の学習プロセスにおいて、撮影環境の整備とヒューマンエラーの解消が重要であることを示した。
6-5 エリアマネジメント的なアプローチによる廃棄物回収シミュレーション	既存の収集運搬作業をエリアマネジメントの視点で調整した時の効果を、AI 配車を用いたシミュレーションにて検証する。	都内の 100 か所の回収場所から合計で 20 万 t の廃棄物を合計 20 台のパッカー車で回収するシミュレーションを行った。	成果①：シミュレーションにより、リサイクル重視と収集運搬効率重視の違いでもたらず CO2 排出量とリサイクル量の変化を定量的に示すことができた。 成果②：シミュレーションの結果によって、分別方法を統一することの有効性を確認した。	・引き続き静脈物流全体のフローを考慮したシミュレーションが必要である。 ・シミュレーションで使用するパラメータをより現実的にするためには収集運搬事業者との連携が必要である。
6-6 廃プラの DB 構築について	使用済みプラスチック類のサンプルから光学データを吸光度と反射度の側面でスペクトルデータを収集し、データベースを構築する。	①吸光度スペクトルの分析 ②反射度スペクトルデータに関する分析 ③回収した反射度スペクトルデータを基としたプラスチック選別技術の試み	成果①：廃プラの素材判定を目的としてスペクトルデータ(吸光度・反射度機械学習・反射度類似度)による判定結果を検証したところ、294 サンプルの内 38 サンプルのみにとどまり、十分な精度は得られないことを確認した。 成果②：4 種の排出現場(研究室、事業系一般廃棄物の中間処理施設、建設混合廃棄物の中間処理施設、再資源化工場)から計 294 個の廃プラサンプルから、実物、吸光度・反射度スペクトルデータがマッチングできるデータベースを構築した。	・廃プラの光学選別技術の開発と選別精度の判明に向けて、特定のプラスチック製品の生産から廃棄までの過程を追跡できるスペクトルデータ収集作業を動静脈連携で行う必要がある。 ・スペクトルデータ収集時の対象物位置、高さ、折れ目、透明度、表面の反射程度によって回収したデータに影響が現れる事を把握したが、各パラメータからの影響を具体的に把握するためには引き続き調査研究が必要と思われる。

## 6-1 リソースシフト評価

### 6-1-1 評価手法の開発背景

近年、人工知能(AI)とロボットの発展と共に、スマートシティやソサイエティ 5.0 を始めとする都市機能の DX・自動化が進められてきた。しかし、少子高齢化による労働力不足と技術伝承困難な課題に対して、自動化へのニーズが増えている一方、自動化技術の導入が必ずしも順調に進んでいるわけではない。技術導入を検討している事業者にとっては、「導入すべき技術がわからない」、「技術導入の効果がはっきり見えない」という理由により、本格的な技術導入が始められないのだと考えられる。したがって、技術導入の促進に向けて、より正確に AI・ロボティクスの能力を評価できる評価手法の開発が求められている。

技術導入が容易な業界と困難な業界の違いを分析するために、生産工場と廃棄物中間処理施設の作業ラインを比較し、分析を行った。事実上、生産工場において I・ロボティクスは問題なく流れライン上の作業員と同じ作業ができていて、廃棄物処理工場の手選別作業ラインでは期待されている効果が発揮できない状況となっている。技術導入者の視点から見ると「AI・ロボティクスは作業員と同じ作業ができないと技術レベルが低い」と評価するのは自然に思われる。しかし、その評価では生産工場の作業員と廃棄物処理工場の作業員が担当している作業自体の難易度が異なっている事実が見えていないことになり、流れライン作業で実現できる自動化が手選別ラインで実現できない解釈とはならない。作業員の作業内容を分析すると、流れライン作業は一人の作業員につき一つの作業(品質チェック、梱包など)を行うのと比べて、手選別ライン作業では一人の作業員につき対象物を処理する一連の作業(素材取り出し、品質向上、異物対応等)をこなしている。言い換えると、AI・ロボティクスに対して、生産工場では部分労働者(単純作業)、廃棄物処理工場では完全労働者(独立生産)の役割を期待している。

カール・マルクスは資本論の中に労働形態の変遷を①完全労働者、②部分労働者、③機械で部分労働の一部を代替する流れを予測したが、生産工場における作業内容は確実にこの順番をたどって 100 年かけて作業員の仕事を独立手工業者から流れライン作業員へ移転し、今はロボットによる自動化を順調に進めている。それに対して、廃棄物資源循環分野は 1987 年にサステナビリティが提起され、1990 年代から排出抑制とリサイクルが提唱され、2000 年以降から循環型社会の構築を始めて 35 年弱の発展しかない新たな業界である。その為、廃棄物資源循環にかかわる工場においては完全労働者と部分労働者の区分が明確に確立されていないまま、いきなり機械と AI・ロボティクスによって作業を代替しようとしている。完全労働者の作業内容は複数の部分労働者の作業を組み合わせたものであり、AI・ロボティクスで完全労働者を代替するためには複数の技術を導入する必要があると思われる。

よって、AI・ロボティクスの技術導入によってもたらす効果は単純な作業員と技術の比較では不公平であり、AI・ロボティクスの能力を正確に把握するためには先ず導入先の作業を分解し、その中から AI・ロボティクスが行う作業と一致する部分労働を抽出することが必要である。また、技術導入によって一部の労働内容から作業員を解放できる事も評価に入れなければならない。

本事業では、廃棄物資源循環分野の AI・ロボティクスの導入を例として、ロボット導入によって作業現場にもたらす効果として作業内容の変化と技術導入によって代替できる人工の二つの側面が分析できるリソースシフト評価を開発し、3つの技術導入を検討している現場で実証実験による評価を行った。

### 6-1-2 リソースシフト評価の概念

リソースシフトとは本来ある場所に拘束されている資源を解放し別の作業に活用する事であり、技術導入の場合では、本来の作業内容に拘束された人工を技術導入によって解放し、今まで出来なかった作業や労働力が不足していた作業に人手を回せる様にする事である。よって、リソースシフト評価とは技術導入によって本来の作業に拘束されていた人工を的確に把握し、その自動化によって解放されたリソースを作業時間・人件費として算出する評価方法である。

リソースシフト評価の実行には下記2つの評価を行うことが前提となる。

- 導入する技術に対する評価
- 本来の作業工程に対する評価

導入する技術に対する評価は従来、技術開発者が生産した製品の能力を把握するために行われている。その代表の一つとして知られている評価手法は技術成熟度評価(TRL)である。この評価手法では新技術が理論的に発揮できる能力を把握できる。

本来の作業工程に対する評価は既存の作業工程を細かく細分化し、各作業段階にかけられた労力を明確化する事によって、技術導入を検討している現場の方に導入すべき技術の種類と既存の技術を導入した時、現場作業にもたらす効果を分析できるようにする。また、技術開発者に対しても、より正確な現場作業の実態を把握し、開発すべき技術のターゲットを明確化することができる。

### 6-1-3 リソースシフト評価の検証

#### (1) 自律走行型ロボット

##### ① 自律走行型ロボットに関する実証実験

まず、自律走行型ロボットにおけるリソースシフトの評価を行う。そのためにまずロボットの性能評価を行う。ロボットの性能評価は2回検証を行ったため、それぞれの結果を示す。

1 つ目は、早稲田大学本庄キャンパスにて検証した際の結果をまとめる。検証方法は、作業員に見立てた学生が、図 6-1 の緑丸に設置したごみ箱を回収する。同様のルートでロボットが自律走行を行い回収する。それぞれの回収にかかる時間を測定し、作業時間を比較する。なお、ごみ箱には2kgの錘が含まれていて、以下の図のルートで学生とロボットで回収作業を行った。その結果を以下の表 6-2 に記載する。

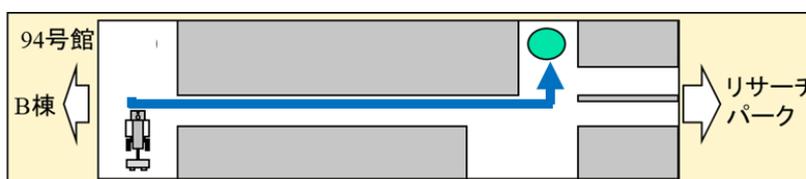


図 6-1 早稲田大学本庄キャンパスにおける実証の走行ルート

表 6-2 作業員とロボットの作業時間の比較

回収者	回収時間 s/回
作業員	190
ロボット	518

この結果、自律走行型ロボットで回収した場合と人が回収を行った場合とを比較して約3倍時間がかかることがわかる。

2 つ目に、同様の検証を早稲田大学西早稲田キャンパスにて行った。西早稲田キャンパスでの回収作業は清掃作業員の回収作業に同行したため、そちらを参照する。検証内容は、自律走行型ロボットで以下の図 6-2 の右下の黒枠で囲った位置に設置したごみコンテナを回収し、中央上の黒枠にあるごみ集積所まで運搬を行う。その時間と走行距離を計測し、1mあたりの運搬時間を算出する。その後、中庭のごみ箱のごみを回収する清掃作業員の回収ルートと同様のルートで回収を行った際にかかる時間を算出する。検証方法は、西早稲田キャンパスの55号館前にごみコンテナを設置し、その中に1.5kgの錘をいれ、57号館裏にあるリサイクルセンター前まで運搬を行う。全体の走行時間からドッキングなどの時間を除き運搬にかかる時間のみを算出し、計測開始地点から計測終了までの距離によって1mあたりの時間を算出する。その後、作業員と同様の運搬を行った際の時間を算出する。個々での走行ルートを以下の図 6-2 に示す。

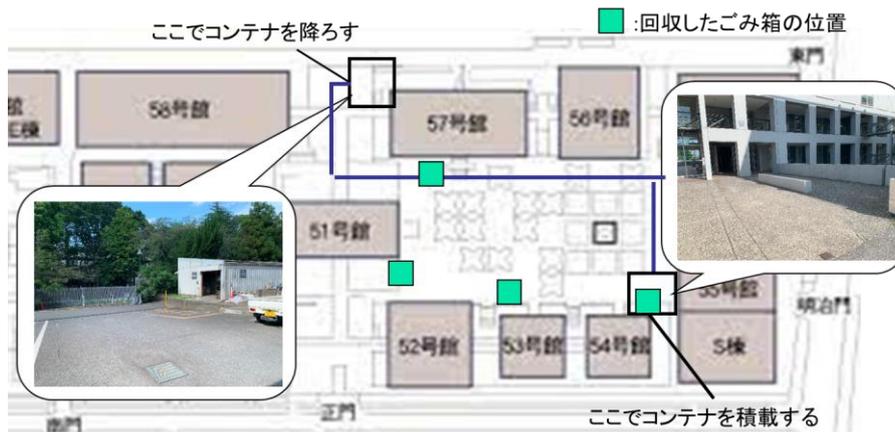


図 6-2 西早稲田キャンパスの実証の走行ルート

走行した結果、運搬に 10 分 16 秒要した。また、計測開始地点から終点まで 178.7m ある。従って、自律走行型ロボットを西早稲田キャンパスで収集運搬した場合、3.447s/m で収集運搬を行える。これは、自律走行を行う最高速度である 0.3 m/s に近い値であることから、この値は適当であるといえる。作業員の回収ルートは 2 章に記載した 4 か所のごみ箱を回収する。その合計の距離は 219.2m であったため、先ほどの走行速度の結果を基に、自律走行型ロボットが回収を行った場合と作業員が回収を行った場合を比較した結果を表 6-3 に記載する。

表 6-3 作業員と自律走行型ロボットの運搬時間の比較

作業員	運搬時間 s/回
作業員	270
ロボット	893

この結果から、自律走行型ロボットは既存の作業現場において清掃作業員の約 1/3 倍の作業能力があるといえる。また、本庄キャンパスとの結果からいずれの結果も約 1/3 倍であることから自律走行型ロボットの作業能力の結果に適しているといえる。そのため、自律走行型ロボットは運搬を代替した際に、作業員の約 1/3 倍の能力があるといえる。ただ、此度の事業で行った実証実験は実環境で自律走行型ロボットの能力を把握することを中心に取り込んでいたため、天候による影響は今後の課題として実証実験を行う必要がある。

## ② 自律走行型ロボットのリソースシフト評価

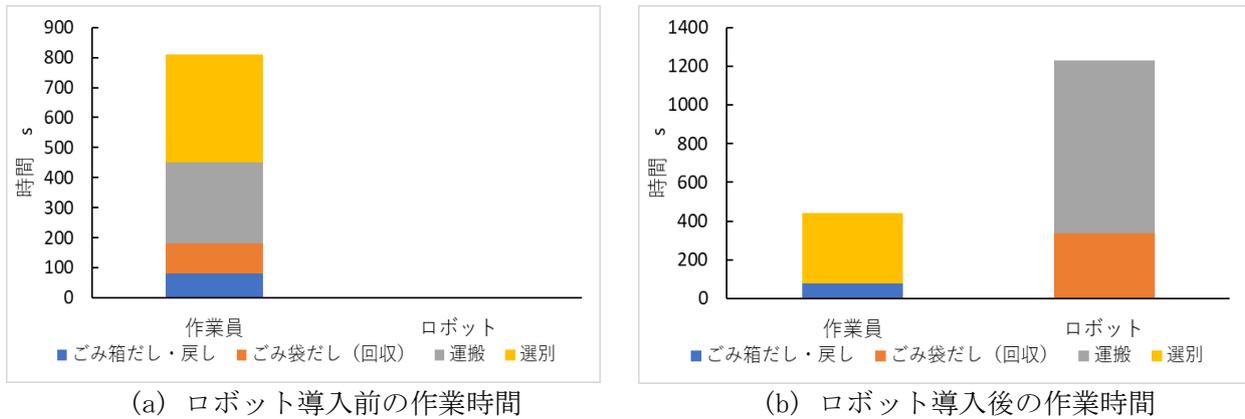
次に、作業工程に対する評価を行う。ここでは、早稲田大学西早稲田キャンパスでの回収作業を基に作業プロセスの理解を行う。第 3 章で記載したような回収作業を行っていて、作業工程を詳細に分解し、同行した際の動画データからそれぞれの作業にかかる時間を測定した。その結果を以下の表 6-4 にまとめる。

表 6-4 西早稲田キャンパス中庭での作業プロセスとその時間

作業内容	作業時間 s
ごみ箱から容器を出す・戻す	80
ごみ箱からごみを出す・戻す	100
運搬	270
選別	360

この結果から、自律走行型ロボットが代替可能である運搬作業は、収集運搬の全体の作業の約 33%を占めることがわかる。よって、自律走行型ロボットは作業員の作業の 33%を代替可能である。

これらの結果から、リソースシフトの評価を行う。自律走行型ロボットを導入する前の人とロボットの作業時間と、自律走行型ロボットを導入した後の人とロボットの作業時間を比較した図を以下に記載する。(図 6-3)



この結果から、作業員は一度の回収作業で 370 秒(ごみ袋だし・戻し+運搬)分の作業時間を削減できる。これは、自律走行型ロボットにごみコンテナとドッキングする機能があるため、既存のごみ箱からごみを出す作業のみ残るため、運搬以外の作業も代替可能であることから算出した。以下では、西早稲田キャンパスの中庭のごみ回収はごみ量が多い日でも一日に一度だけであるため、午前と午後の 2 回の回収作業を平日の日のみ行うことを前提に、経済性を評価する。ここでは、作業員の時給を 2000 円と仮定し、算出をする。その結果を以下の表 6-5 にまとめる。

表 6-5 自律走行型ロボット 1 台を導入した場合の削減効果

削減単位	削減時間 (h/ロボット)	削減額 (円/ロボット)	回収作業の頻度
1 日当たり	0.21	¥411	1 日 2 回行う
1 月当たり	4.11	¥8,222	20 日行う
1 年当たり	49.33	¥98,667	12 か月行う

この削減した時間と金額を、従来行っている他の作業に充てることが可能である。

(2) 飲料容器自動選別ロボット

① 飲料容器選別の作業工程に対する評価分析

作業工程の評価を行う。実証を行った中間処理施設での処理作業を基に、作業プロセスの理解を行う。作業員に一連の処理作業を行ってもらい、その作業工程を詳細に分解する。その後、分解した作業単体を作業員に行ってもらい全体の時間を計測し、その動画データから通常状態でペットボトル 1 本を処理する時間を測定した。その結果を以下のエラー! 参照元が見つかりません。表 6-6 にまとめる。

表 6-6 作業員の処理プロセスとその時間

作業内容	作業時間 s/本
素材選別	1.0
ラベル外し	3.8
キャップ外し	1.2
洗浄	4.0

AI 自動選別ロボットが代替可能な作業は素材選別作業である。したがって、全ての対象物が全プロセスを経て処理される時に AI 自動選別ロボットは全作業の 10%を代替可能である。しかし、実際の作業現場では既にキャップ・ラベルが外れている物と洗浄する必要がないボトルも一括に回収されるため、現場実験で作業別の出現頻度を把握して加重計算する必要がある。表 6-7 に現場実験で把握した作業別の出現頻度を示す。

表 6-7 現場実験で把握した作業別の出現頻度

作業種類	回数	飲料容器のみ選別	ビン・缶
素材選別	244	164	80
ラベルはがし	133	133	0
キャップ外し	128	128	0
洗浄	83	83	0
合計	588	508	80

表 6-6 で把握したプロセス別の作業時間と表 6-7 で把握した作業量を掛け算で計算すると、作業時間割合は表 6-8 に示す素材選別 (20%)、ラベル外し (41%)、キャップ外し (12%)、洗浄 (27%) となる。上記によって、作業量の比率を算出できたが、この数値は現場のトラブルや作業の前準備等を全て取り除いた理論値であり、実作業時にははがしにくいラベルや一度の洗浄で対応しきれない対象物も混入している。

表 6-8 加重作業時間割合

作業種類	秒/回	回数	加重作業時間	割合
素材選別	1	244	244	20%
ラベルはがし	3.8	133	505.4	41%
キャップ外し	1.2	128	153.6	12%
洗浄	4	83	332	27%
合計	10	588	1235	

リソースシフト評価をより現場の実環境に近い結果を算出できるように、実証実験で入手した実作業の作業時間を基に計算すると、素材選別作業は処理運搬の作業の約 14.6%を占めることとなる。よって、AI 自動選別ロボットは作業員の作業の 14.6%を代替可能とする。表 6-9 に実環境で把握した作業プロセスとその割合の詳細を示す。

表 6-9 実環境で把握した作業プロセスとその割合

作業種類	作業時間	割合
準備	95	7.0%
素材分別	198	14.6%
ラベルはがし	499	36.7%
キャップはずし	131	9.6%
洗浄	437	32.1%
合計	1360	

## ② 飲料容器自動選別ロボットに関する実証実験

次に、AI 自動選別ロボットにおけるリソースシフトの評価を行う。まずは固定量の飲料容器を全て選別する時のロボットの性能評価を行う。中間処理施設にて検証した際の結果をまとめる。実

験で使用した2種類のかごの飲料容器を選別ロボットと作業員がそれぞれ選別作業のみを行い、作業時間を比較した。その結果を以下の表 6-10 にまとめる。

表 6-10 作業員と AI 自動選別ロボットの素材選別の時間の比較

作業員	作業時間 s/かご
作業員	98
ロボット	245

この結果から、固定量の飲料容器を全て選別する時の AI 自動選別ロボットは作業員の 2.5 倍の時間を要することが分かった。そのため、AI 自動選別ロボットは素材選別を代替した際に、作業員の 0.4 倍の能力があるといえる。

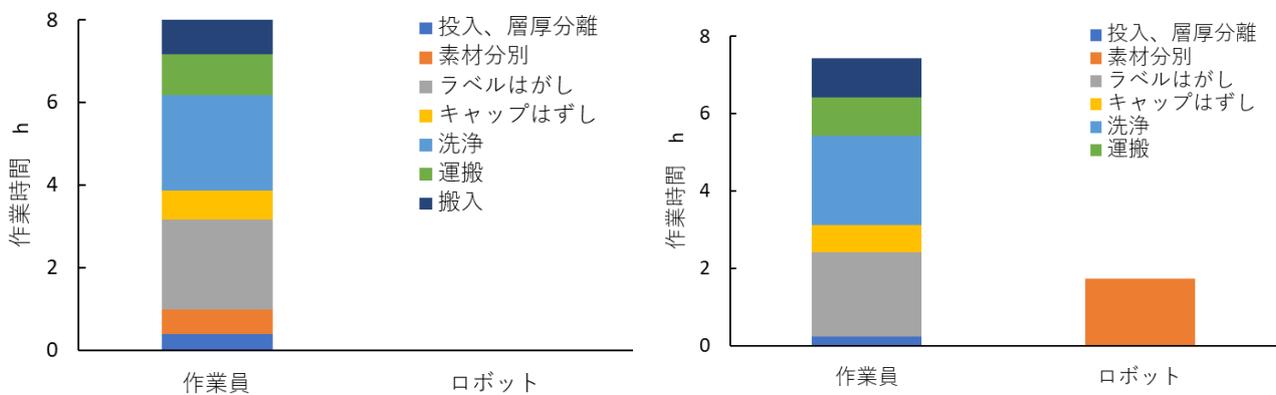
実環境で把握した作業プロセスの時間から、素材分別以外の作業プロセスで残された作業時間(1162s)と素材分別時間(198s)を比較すると、ロボット選別に利用可能な時間は手選別でかかる時間の 5.87 倍ある。故に、ロボットの選別速度が作業員の 0.4 倍であったとしても、自動選別ができることにより素材選別プロセスにある時間的な不利を十分吸収することができて、全作業工程の 14.6%を代替することが可能と思われる。また、現場実証の選別結果を基に、ロボットの選別性能を表 6-11 に示す。

表 6-11 ロボットの選別性能

結果	回数	割合
投入数	244	100%
取得動作	293	120%
把持成功	242	82.6%
正解	221	90.6%
取得ミス	57	19.5%
識別ミス	16	5.5%
取得・識別ミス	16	5.5%

### ③ 飲料容器自動選別ロボットのリソースシフト評価

次に、これらの結果から、リソースシフトの評価を行う。AI 自動選別ロボットを導入する前の人とロボットの作業時間と、AI 自動選別ロボットを導入した後の人とロボットの作業時間を比較した結果を図 6-4 に示す。



(a) ロボット導入前の作業時間

(a) ロボット導入後の作業時間

図 6-4 AI 自動選別ロボット導入前後の人とロボットの作業時間比較

この結果から、作業員はペットボトル一本を処理する作業で1秒分の作業時間を削減できる。現地調査の結果から、実際の作業ではペットボトルの中にビンと缶も混在していることから、1日の処理作業における素材選別が占める時間は増えるが、この作業時間から経済性を評価する。ここも同様に、作業員の時給を2000円と仮定し、算出をする。この中間処理施設では8時間、週6日作業を行っている。搬入作業と処理が終わった飲料容器をコンテナに運搬する作業をそれぞれ1時間かかるとし、それ以外の勤務時間は処理作業のみを行うと仮定した場合の経済効果を算出する。その結果を以下の表6-12にまとめる。

表 6-12 AI 自動選別ロボットを導入した場合の削減効果

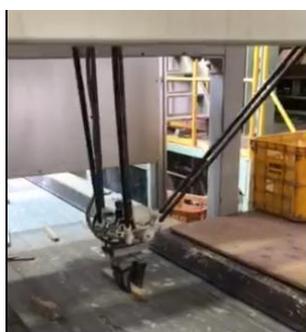
削減単位	削減時間 (h/ロボット)	削減額 (円/ロボット)
1日当たり	0.9	¥1,800
1月当たり	21.6	¥43,200
1年当たり	259.2	¥518,400

この削減した時間と金額を、従来行っている他の作業に充てることが可能である。

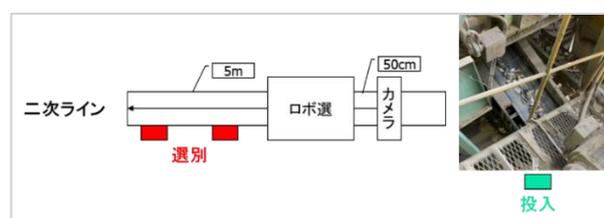
### (3) 木くず自動選別ロボット

#### ① AI 自動選別ロボット (木くず)に関する実証実験について

廃棄物分野におけるAI自動選別ロボットの普及を目指して、実地環境でロボットが発揮できる能力を把握するために、実地環境での試験を行った。現場の環境に合わせて、本事業では建設混合廃棄物の中に存在している木くずの自動選別ロボットを使って実証実験を行った。図6-5に建設混合廃棄物処理施設でのAI自動選別ロボットの設置状況と配置図を記載する。



(a) AI 自動選別ロボットの設置状況



(b) 実証実験の配置図

図 6-5 中間処理施設での実証実験の様子

ここでは、既存の選別ラインに自動選別ロボットを導入し、ロボットの選別精度を検証した。AI自動選別ロボットの性能を発揮しやすくするために、下記実験は全て選別ラインに流れる廃棄物の層厚が低く、重なりが少ない状態で行った。評価方法は選別ラインに流れる建設混合廃棄物に対して、AI判定画面、ロボット選別、作業員選別(3名)の3つの視角から同時に撮影し、それぞれ選別できた対象物と異物の数を計測して割合を算出した。建設混合廃棄物処理施設において、同じサンプルを複数回同一ラインに投入する事が困難であるため、本事業では作業時間を統一し①同時間内の作業量、②データから算出した作業効率原単位をもってロボットの性能評価とリソースシフト評価を行った。

#### 1) サンプル調査による対象物分布状況の把握

実証実験を行う選別ラインにおいて作業員が選別した木くずから、4箱分のサンプルを採取し、分析を行った。データの集計は集まったサンプルの量を数えて、分類した品目につき釣

り計りで計量する。「棒・ブロック」、「板」、「不規則」の内、「棒・ブロック」は自動選別ロボットの選別対象である。図 6-6 にサンプル調査のイメージを示す。表 6-13 にサンプルの分布状況を示す。



図 6-6 サンプル調査のイメージ

表 6-13 サンプルの分布状況

	個数	割合	重量(kg)	割合
棒・ブロック	70	63%	7.63	44%
板	19	17%	4.65	27%
不規則	22	20%	4.95	29%
合計	111	100%	17.23	100%

サンプル調査によって、ロボット選別の対象になる棒・ブロックの数は全体の 63%になるが、重量から見ると全体の 44%に過ぎないことと、板と不規則な対象物は数が少ないが、リサイクルの視点から見ると質量が多いことを把握した。また、選別作業の作業量から見ると、取得回数から人工を計算し、ロボットの導入効果を評価する方が妥当と思われる。

## 2) 木くず自動選別ロボットの性能評価

サンプル調査の結果を踏まえて、ロボットに対して①選別対象物である棒・ブロックの木くずに対する「性能評価実験」と②選別ラインに流れる木くず全体に対する「実証実験」を行った。図 6-7 にロボット選別精度の検証結果を示す。

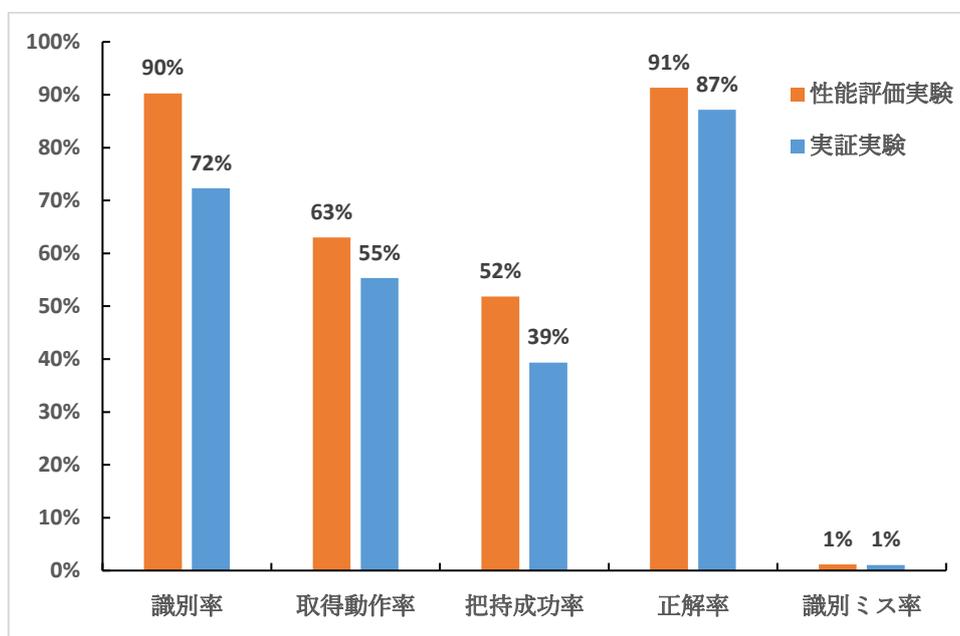


図 6-7 ロボット選別精度の検証結果

この結果より、木くず全体に対するロボットの性能の内、識別ミス以外全ての結果に選別対象物より精度が落ちているため、選別対象ではない「板」と「不規則」の木くずに対する追加学習と対応が必要と思われる。また、ペンキが付いた木くずを認識しない事が多い。識別ミスが 1%に収まっていることから、AI 画像認識によって木くず選別を行うことが有効であること

を証明した。木くずとして間違えて認識した物は画面上木くずに似たような形状と色であった。一方、AIの認識精度が高いにもかかわらず、ロボット選別の正解率が90%前後にとどまっている原因はAIではなく、把持動作を務めるグリッパーが対象物の取得時に近辺の異物を同時に掴み取った事が原因である。

画像認識の結果を細かく分析すると、実証実験時にロボットが取得対象物の大きさを間違えて認識する比率は約8%である。性能評価実験時に大きさ判定のミスが16%で通常より多く見えるが、対象物の重なりが大きさ判定ミスの主要原因と思われる。表 6-14 に大きさ判定ミスの詳細を示す。

表 6-14 大きさ判定ミスの詳細

選別実験	木くず判定(個)	大きさミス(個)	大きさミス率
実証実験	1061	81	8%
性能評価実験	343	55	16%

### 3) 木くず選別ロボットのリソースシフト評価

本事業の協力先の建設混合廃棄物の処理現場は選別ラインが長く、一度処理した対象物をそのまま回収する事が不可能であり、同密度な物をラインに流す事も困難である。ロボットの能力と協力先の需要に合わせて、ロボットは木くずの選別のみを行い、作業員は3名同時に通常通り木くず、可燃系混合物、忌避物質の選別を行う。そのため、本評価ではデータ収集は10分以上の継続的作業を録画し、動画をもって作業員とロボットの選別動作を1回行うために必要とする時間と、一度の選別動作で分別する対象物の数量を計測し、選別速度の原単位を算出した。選別ライン上に流れる対象物の数量による影響を除去するために、原単位の計算時には作業員の手(グリッパー)が待機位置から動き出し、取得した対象物を手放すまでの期間を切り取って計算を行っている。

作業員の選別動作速度は人・ロボット共同作業と人のみ選別の2つのパターンで計測し、ロボットの選別動作速度は性能評価実験によって計測した。表 6-15 に作業員の選別速度の原単位を示す。原単位算出時には、異物処理や戸惑いによる選別動作速度への影響を除外して、通常作業の速度を記録している。表 6-16 にロボットの選別動作速度の原単位を示す。

表 6-15 作業員の選別動作速度の原単位

選別速度(個/s)	人のみ作業(個/s)
作業員①	0.60
作業員②	0.97
作業員③	0.46
作業員平均	0.61

表 6-16 ロボットの選別動作速度の原単位

ロボット通常	性能評価実験
使用時間(s)	193.5
選別個数(個)	112
動作速度(個/s)	0.58

動作速度のみを見ると、既存のロボットは建設混合廃棄物の分別作業員とほぼ同じ速度で行動できるが、ロボットの選別動作の成功率は実証実験によって35.8%であることを把握した。

これに対して、作業員の選別成功率は 100%である。ロボットの導入効果を評価するために人とロボットの選別速度は以下の式で計算してから評価を行う。

$$\text{選別速度} = \text{動作速度} \times \text{選別成功率} \quad (1)$$

$$\text{選別成功率} = \text{正解数} / \text{動作数} \quad (2)$$

よって、本事業のロボット選別速度(個/秒)の原単位は 0.21 (個/秒) と算出できる。

作業員別の選別動作速度の原単位より、作業員の間で動作速度に個人差が大きく存在している。協力事業者の話によると、作業員①の方が一般的な作業速度であることを把握している。また、ロボット導入によって、比較的サイズが小さく形状が整っている木くずはロボットで取り出し、作業員に残された木くずは比較的サイズの大きい物や形が不均一な対象物になる傾向があると思われる。



(a) 作業員



(b) ロボット

図 6-8 人とロボットの共同作業時に取った木くずの例

既存のロボットが代替できる人工を計算するために、以下の式で計算し、その結果を表 6-17 に示す。

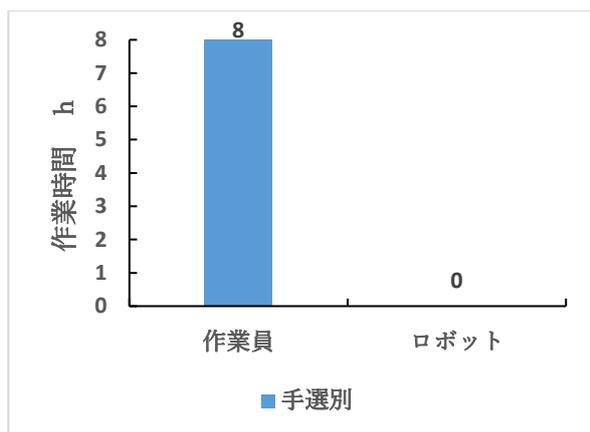
$$\text{ロボットで代替できる人工} = \text{ロボット選別速度の原単位} / \text{作業員選別速度の原単位} \quad (3)$$

表 6-17 ロボットによる代替率

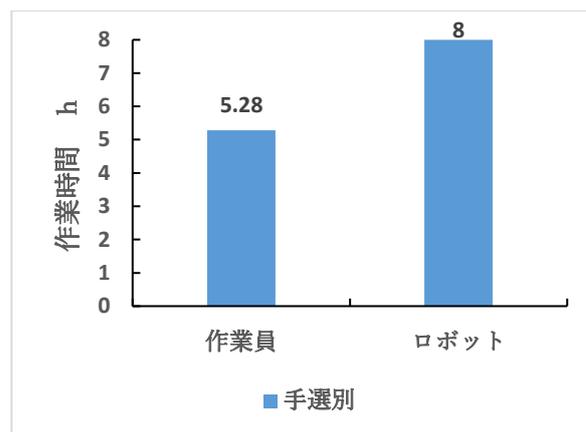
	人のみ (ロボット/人)
作業員①	34.2%
作業員②	21.4%
作業員③	45.0%
作業員平均	34.0%

作業員別の作業効率に対して、ロボットが代替できる人工が異なってくる。作業員平均が通常効率であるとき、既存のロボット一機は低層厚の選別ライン上で行われる手選別作業員の 34% 人分(約 1/3 倍)の作業を代替することができると思われる。

建設混合廃棄物処理施設の選別ラインにおいて、選別対象物の品目が多い(金属、プラスチック、木くず、など)ことに対して、作業内容自体は選別ラインから対象物を取り出す単一作業であるため、ロボット導入によって作業内容の変化はないと思われる。よって、建設混合廃棄物処理施設にロボットを導入する時に解放されるリソースは代替分の作業員の労働時間となる。



(a) 自動選別ロボット導入前の作業時間



(b) 自動選別ロボット導入後の作業時間

図 6-9 AI 自動選別ロボット導入前後の人とロボットの作業時間比較

この結果から、同じ作業量をこなす前提として、現在のロボットを一機導入すると、ロボットに8時間選別作業させると、作業員1名の作業時間を2.72時間解放できる。ここも同様に、作業員の時給を2000円と仮定し、算出をする。この中間処理施設では8時間、週6日作業を行っている。勤務時間は手選別作業のみを行うと仮定した場合の経済効果を算出する。その結果を以下の表6-18にまとめる。

ロボットを24時間稼働させた時には作業員1名の8時間選別量と同等の作業量が選別できると算出できるため、低層厚ライン上にロボット一機を24時間稼働させると、作業員1名分の人件費が削減できると思われる。

表 6-18 AI 自動選別ロボットを導入した場合の削減効果

削減単位	削減時間 (h/ロボット)	削減額 (万円/ロボット)
1日当たり	2.72	¥0.544
1月当たり	65.28	¥13.1
1年当たり	783.36	¥157

## ②AI 自動選別ロボット (木くず) 検証のまとめ

実証実験によって、現在の木くず選別ロボットの能力向上に向けて、下記4つの課題に対する研究開発が必要と思われる。

- (1) 画像認識の結果を取得動作に転換する効率向上。
- (2) 把持成功率の向上。
- (3) 対象物の遮蔽・接触によるミス軽減。
- (4) 板・不規則の形をしている木くずの選別方法の開発。

建設混合廃棄物の中間処理施設にAI自動選別ロボットを導入することは、ロボットが正確に分別できる廃棄物の選別から作業員を解放することを意味する。また、建設混合廃棄物の選別ラインには作業効率と人手不足の問題によって、木くずやプラスチック類に対する選別は徹底できていないのが現状である。ロボット導入により作業員の業務時間が解放されることによって、建設混合廃棄物のリサイクル高度化につながる可能性があると思われる。

本事業の実証実験は低層厚の状態で行われたため、選別作業員の実際の作業速度は計測できた速度より速く作業できる可能性は存在している。また、木くず以外の選別対象物の選別作業においては作業員の選別速度とロボットの能力に対して個別に計測する必要がある。

#### (4) ヒトとロボットの共存モデルの提案

ここでは、人共存モデルであるロボットを活用する際の使用方法や作業内容をまとめたモデルを検討した。モデルの検討に当たって検討項目を最初に述べる。検討方法は、現状の作業内容を改めて定義を行った後、既存の施設にロボットを導入した場合と新規で施設を建設する段階からロボット導入を検討した場合それぞれでロボットの活用方法と作業員の作業内容を提示する。ここで、導入するロボット技術の技術成熟度によって作業員の作業内容が異なってくる。そこで、参考 25)を基に、自動化レベルというものを提示する。自動化レベルは、導入する技術成熟度ごとに合計 5 段階で検討した。レベル 1 では、ロボット技術の導入をしていない現状の作業内容であり、レベル 2 では、ロボット技術を導入した場合、レベル 2.5 ではその導入するロボット技術の技術成熟度が高くなった状態である。レベル 3 では、複数の技術成熟度が高い技術を導入した場合で、レベル 4 は完全に自動化をした場合である。それぞれのレベルにおける作業員の作業内容・作業員の人数・作業員の配置・他の技術導入の内容についてまとめた。その自動化レベルを自律走行型ロボット・AI 自動選別ロボットでそれぞれまとめ、表 6-19、表 6-20 に示す。

表 6-19 自律走行型ロボットを導入するにあたり検討した自動化レベル

レベル	概要	作業員の作業内容	作業員の人数	作業員の配置	他導入技術	
1.0	従来の作業内容	回収 運搬 選別 計量	2	回収・運搬・計量 を行う	1	—
				選別を行う	2	
2.0	現時点での自律走行型 ロボットを導入した場合	回収 選別 計量	2	ロボットを 操作する	1	—
				選別を行う	2	
2.5	技術が改良した(回収時 間が短縮し、自動で回収 を行う)自律走行型ロ ボットを導入した場合	ロボットの監視 選別 計量	1.5(1)	ロボット監視	0.5	—
				選別を行う	1	
3.0	複数の高度な技術が実 現した社会で自律走行型 ロボットを2台以上導入し た場合	一部選別 監視	1	・ロボットの監視 ・飲料容器以外 の選別	1	・選別ロボット ・計量器(スマートごみ箱) ・エレベーターとの連携
4.0	完全自動化が可能に なった社会	(監視)	0(1)	ロボットの監視 (複数の現場を1人が監 視)		・選別ロボット ・計量器(スマートごみ箱) ・エレベーターとの連携 ・監視カメラ

表 6-20 AI 自動選別ロボットを導入するにあたり検討した自動化レベル

レベル	状態	作業員の作業内容	作業員の人数	作業員の配置	人	他の導入技術
1.0	従来の作業内容	素材選別・ラベル外し キャップ外し・洗浄	4	一連の処理作業を行う	4	磁選機
2.0	現時点でのAI自動 選別ロボットを導入 した場合	回収(素材選別) ラベル外し キャップ外し・洗浄	4	飲料容器を回収	1	磁選機
				一連の処理作業を行う	3	
2.5	技術が高度化した (選別精度が100%) AI自動選別ロボッ トを導入した場合	(回収)・ラベル外し キャップ外し・洗浄	3.5(3)	飲料容器を回収	0.5	磁選機
				ラベル外し	1	
				キャップ外し	1	
				洗浄	1	
3.0	高度な技術が実現 した社会でAI自動 選別ロボットを2台 以上導入した場合	ラベル外し キャップ外し・洗浄	3	ラベル外し	1	・磁選機 (・自律走行型ロボット)
				キャップ外し	1	
				洗浄	1	
4.0	完全自動化が可能 になった社会	(点検・監視)	0(1)	ロボットの監視 (複数の現場を1人が監視)		・磁選機 ・破砕機 ・洗浄機 (・自律走行型ロボット)

以降では、この自動化レベルに基づき自律走行型ロボットは商業施設に、AI 自動選別ロボットは中間処理施設に導入した場合を検討する。

まずは自律走行型ロボットの人共存モデルを検討する。商業施設における現状の作業状況についてまとめる。ここでは、現場調査を行ったららぼーと横浜をモデルに検討する。自動化レベルは 1.0 である。現場調査の結果、共用部のごみは 2 人の清掃作業員が回収しバックヤードで計量後保管する。土日など人が多い時は回収作業の回数が増える。また、テナントのごみはテナントの従業員がバックヤードまで運搬し計量と保管を行う。バックヤードまで遠いテナントは中継場所などなく、時間をかけてバックヤードまで運搬する。この回収頻度と距離の問題を自律走行型ロボットの導入によって解決することを狙う。以下に現状の回収作業のイメージ図を図 6-10 にまとめる。

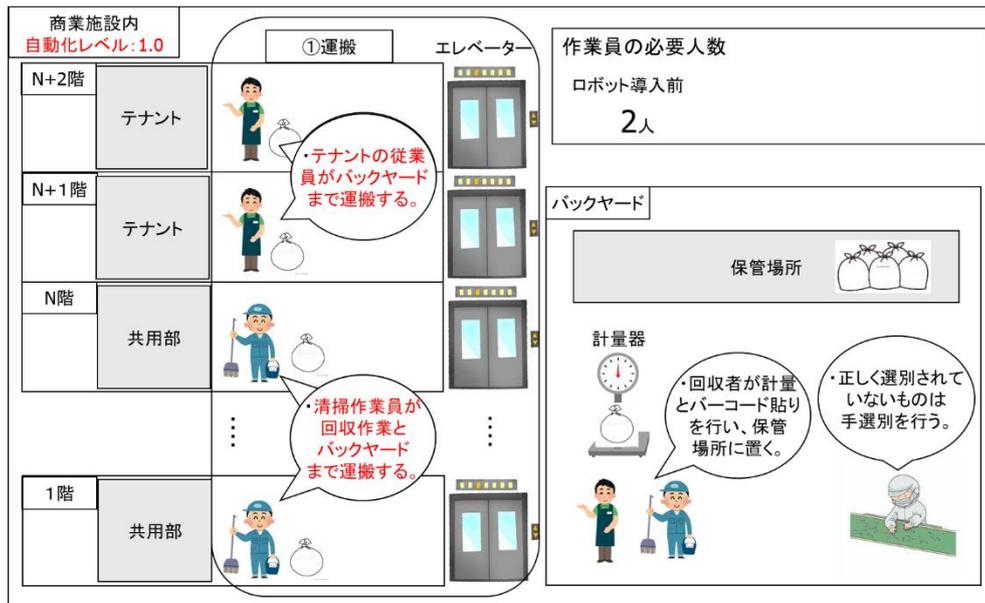


図 6-10 商業施設等における現状の回収作業のイメージ

既存の施設にロボットを導入した場合を検討する。ここでは、自動化レベル 2.0 の場合を検討した。既存の施設では、段差や道幅が狭い箇所があり、またエレベーターなど他技術と自律走行型ロボットの連携ができないため、回収作業は各フロアで行うことを想定する。自律走行型ロボットを活用した場合のモデルは、各フロアの共用部のごみやテナントからでるごみを自律走行型ロボットがそのフロアのエレベーター前まで運搬する。作業員は運搬に行く指示を出すこととロボットの監視や周囲の安全確認に加え、エレベーター前にあるごみをバックヤードに持っていき、計量と保管を行う。現状の作業と比較して、回収作業に向かう距離がテナントの従業員はエレベーター前まで、作業員はエレベーター前からバックヤードまでと距離が短くなっている。以下に、既存の施設に導入した後の作業イメージ図を図 6-11 にまとめる。

ロボットを導入することで必要になる作業員の人数と作業の代替に必要なロボットの導入台数を検討する。ここでは、西早稲田キャンパスでの実証結果を基に必要な人数を算出し、ららぼーと横浜で活用した場合に現状の回収回数と同様になるような作業人数の比較検討を行う。以下の式をベースに必要な要素を算出する。

$$\text{ロボット導入後の削減可能な作業員の人数} = \text{元の作業員の人数} \times \frac{\text{削減可能な時間}}{\text{全体の作業時間}}$$

午前と午後の 1 日 2 回中庭のごみ箱の回収作業を行う。その作業は選別作業と合わせて 2 人で行っている。現場調査の結果、回収作業は全体で 28 分かかることがわかった。しかしながら、ごみ箱一か所当たりの回収時間が不明であったため、西早稲田キャンパスでの作業員が回収にかかる時間である 3 分を用いて、1 度の回収作業で 5 か所のごみ箱を回収するのにかかる時間を算出する。その結果、

一度の回収作業にかかる運搬が占める時間は13分であると算出できる。また、手選別作業は17分かかっていた。従って、運搬が占める時間は回収・選別作業全体の約28.9%を占めるため、自律走行型ロボットを導入することで、回収作業に必要な作業員を2人から1.42人に削減出来る。

次に、ロボットの必要台数を算出する。ららぽーと横浜における各フロアのごみ箱からごみ集積場までの距離を測定できなかつたため、西早稲田キャンパスでのロボットが回収にかかる時間を用いる。西早稲田キャンパスの中庭の各ごみ箱からごみ集積場までの距離の平均は122.5mであり、ららぽーと横浜の敷地面積と西早稲田キャンパスの敷地面積は大きく異なっていないため、122.5mを往復で移動にかかる時間を算出すると、844.5秒かかることがわかる。この結果を用いて1度の回収に回る5か所のごみ箱の運搬にかかる時間を算出すると、5か所の回収にはドッキングの時間を考慮すると155.9分必要になる。これは、通常の回収頻度である3時間を下回っているがららぽーと横浜は3フロアあり、かつ1か所のごみ箱に3分別あることから3往復必要であるため、1フロア・1分別に対して1台の自律走行型ロボットが必要になる。従って、大規模商業施設に自律走行型ロボットを導入し、運搬の作業を自動化するにはロボットを27台導入する必要がある。

ここでの人共存モデルについてまとめると、自律走行型ロボットは各フロアのテナントや共用部のごみをエレベーター前に運搬することを行い、作業員は各フロアにあるごみをバックヤードまで運搬したうえで、計量や手選別を行う。その際に、自律走行型ロボットを27台導入することで作業員の必要人数を2人から1.42人に削減できる。

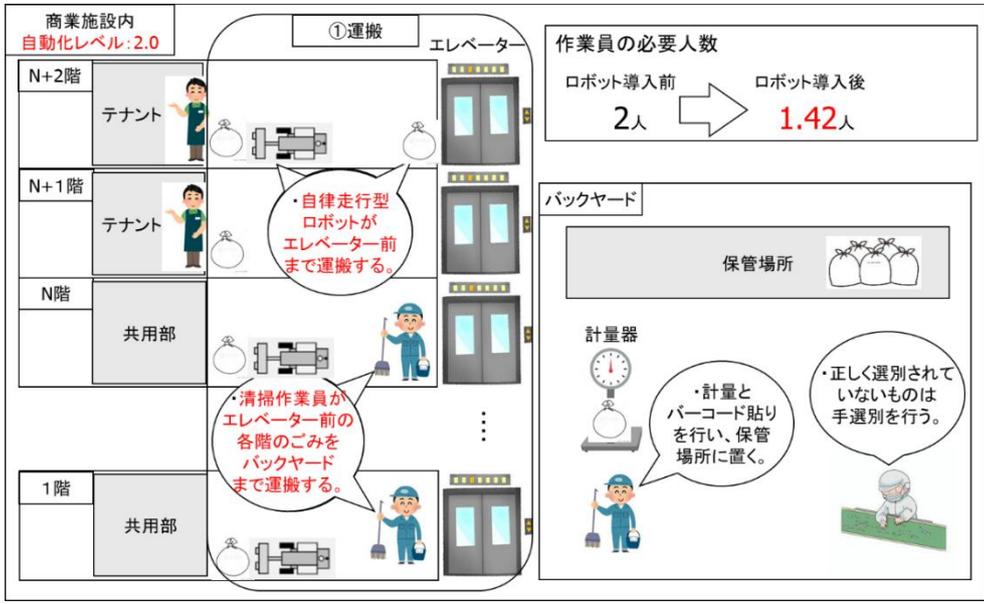


図 6-11 既存の商業施設等に自律走行型ロボットを導入した回収作業のイメージ

新設の商業施設にロボットを導入した場合を検討する。ここでは、自動化レベル 3.0 の場合を想定した。新設の施設では、段差や道幅を広く設計することや、エレベーターなど他技術と自律走行型ロボットの連携ができるよう設計することで、回収作業を自律走行型ロボットのみで完結することができる。自律走行型ロボットを活用して各フロアの共用部のごみやテナントからでるごみをその場所からバックヤードまで運搬する。作業員は運搬に行く指示を出すのみの作業になる。自律走行型ロボットに計量器を積載することで、計量も同時に行えることから計量作業も削減可能である。また、AI 自動選別ロボットを導入することで、手選別作業からも解放される。現状の作業と比較して、回収作業と選別作業を人の作業から解放でき、作業時間を削減可能である。以下に、新設の施設に導入した後の作業イメージ図を図 6-12 にまとめる。

同様に式(1)を用いてロボットを導入することで必要になる作業員の人数と作業の代替に必要なロボットの導入台数を検討する。自律走行型ロボットの走行速度は安全面の観点から、技術成熟度が向上してもこれまでの速度と変わらないとする。また、自律走行型ロボットは回収作業において運搬以外の機能を追加しないとする。そのため、回収作業に必要な人数をさらに減らせる要素は既存の施設に導入した場合から変化ない。また、既存の施設に導入した場合と比較して、AI 自動選別ロボットを

導入することから、バックヤードでの選別を行う。従って、複数の分別を自律走行型ロボットが同時に運搬可能になるとする。そのため、運搬と選別に必要な作業員を削減できるため作業全体の削減可能時間は全体の 66.7%であり、その削減可能人数は 0.67 人になる。また、担当する 1フロアに対して 1 台の自律走行型ロボットが必要になる。従って、ららぽーと横浜に自律走行型ロボットを導入し、運搬の作業を自動化するにはロボットを 9 台導入する必要がある。また、現状の作業員の回収頻度である 3 時間に 1 度回収を行う場合を考慮せず、1 日の回収回数である 5 回を達成する場合のみを検討すると、それに必要な自律走行型ロボットは 4 台まで少なくすることができる。

ここでの人共存モデルについてまとめると、自律走行型ロボットはテナントや共用部のごみをバックヤードまで運搬し、作業員は自律走行型ロボットの手配と監視を行う。また、AI 自動選別ロボットを導入することにより、手選作業からも解放される。その際に、自律走行型ロボットを 9 台導入することで作業員の必要人数を 2 人から 0.67 人に削減できる。

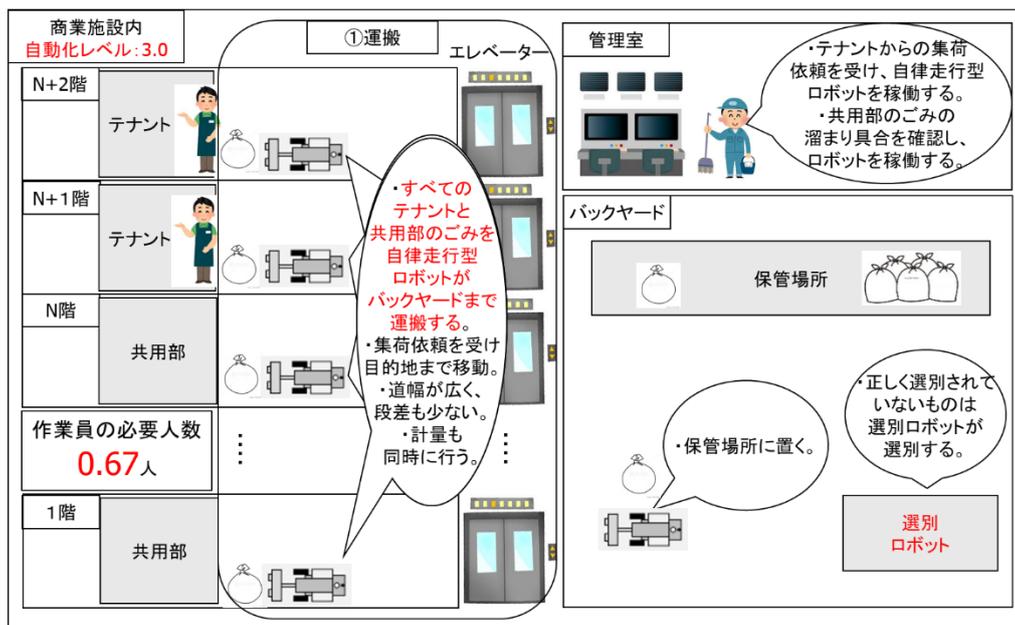


図 6-12 新設の商業施設に自律走行型ロボットを導入した回収作業のイメージ

これらの結果は現時点の自動化レベルによるモデルであり、さらに自律走行型ロボット自身の技術成熟度が上がった場合やほかの技術の進歩によって削減できる作業や人員が変化する。また、仮定を行うにあたり考慮可能な要素をいくつか除いている。具体的には、自律走行型ロボットを動かすにあたり操作や監視など新たに増える業務、自律走行型ロボットが運搬するごみコンテナを戻す作業、自律走行型ロボットを遠隔で監視するオペレーターの人数などを考慮していない。

次に AI 自動選別ロボットの人共存モデルを検討する。中間処理施設における現状の作業状況についてまとめる。ここでは、現場調査・実証実験を行った中間処理施設をモデルに検討する。ここでの自動化レベルは 1.0 である。現場調査の結果、搬入作業をはじめ、処理作業である素材選別、ラベル外し、キャップ外し、洗浄の一連の作業を作業員が行っている。また、処理が終わった後の飲料容器も作業員が保管場所まで運搬している。この一連の処理内容における一部作業の代替を AI 自動選別ロボットの導入によって解決することを狙う。以下に現状の回収作業のイメージ図を図 6-13 にまとめる。

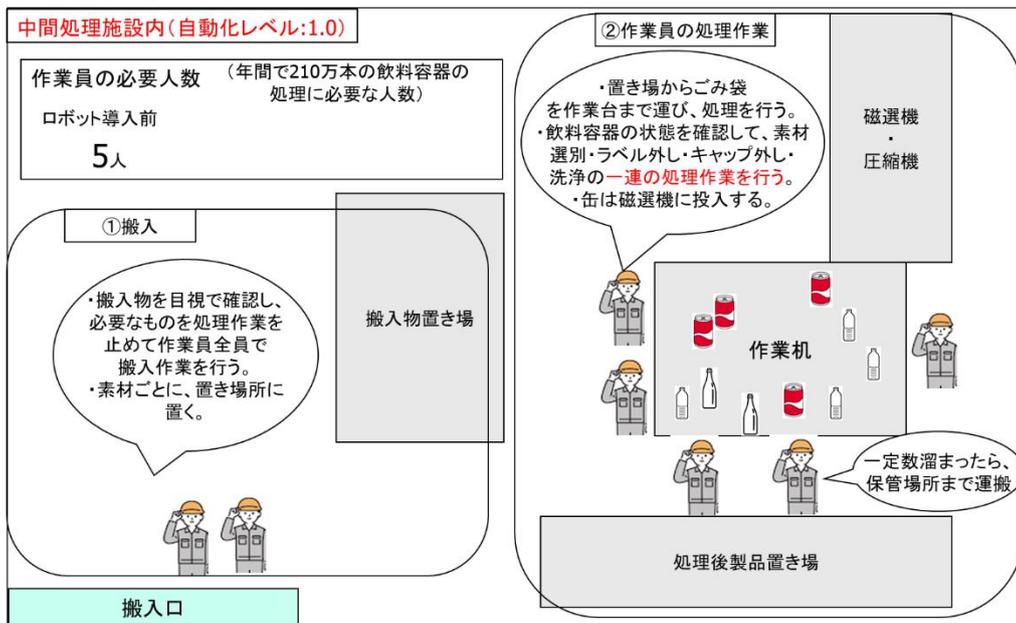


図 6-13 中間処理施設における現状の処理作業のイメージ

既存の施設にロボットを導入した場合を検討する。ここでは、自動化レベル 2.0 を想定した。既存の施設では、ロボットを設置する場所に限りがあるため、搬入したものをそのままロボットに投入することやロボットが選別を終えたものをそのまま保管することは難しい。搬入作業と AI 自動選別ロボットに飲料容器を投入、回収する作業は作業員が行い、素材選別をロボットが行う。また作業員の作業内容はこれまでの一連の作業とは異なり、ラベル外し、キャップ外し、洗浄の作業をそれぞれ専門で行う作業分担にすることで、作業効率の効率化が狙える。現状の作業と比較して、素材選別の作業がなくなることで作業員が行う作業を減らすことができ、作業員の能力による作業量の差を減らすことができる。また、AI 自動選別ロボットが缶と瓶を選別するため、缶と瓶はそのまま保管できる。一方で、作業員はペットボトルのみを処理することになり、作業時間の短縮も目指せる。以下に、既存の施設に導入した後の作業イメージ図を図 6-14 にまとめる。

ロボットを導入することで必要になる作業員の人数と作業の代替に必要なロボットの導入台数を検討する。中間処理施設において、一日の飲料容器の処理本数が不明であるため、年間の処理重量から一日の飲料容器処理本数を導き、それに必要な作業人数を求める。この中間処理施設の年間の廃プラの処理重量(26)27)は 2023 年 10 月から 2024 年 9 月までの一年間の合計から 1,262t である。ここで、この中間処理施設では飲料容器以外にもビニールなど事業系廃棄物を処理していることから、重量の 50%をペットボトルが占めているとする。そのため、年間で 600t 分のペットボトルを処理しているとする。この仮定と週 6 日営業していることから、1 日に 2.1t 処理していると算出した。また、研究室でペットボトルは 1 本あたり 33g であることがわかっているので、この中間処理施設では 1 日に 63,742 本ペットボトルを処理していると仮定する。AI 自動選別ロボットを導入することで作業員の削減可能な作業時間は 14.6%を占めるが、処理作業を一日行っていない。ここでは、1 時間搬入作業、1 時間処理後の製品をコンテナに運搬すると仮定し、残りの 6 時間を処理作業に充てると仮定する。この仮定を基に、削減可能な作業員の人数を検討すると、素材選別作業割合(0.146)×ロボット選別正解率(0.906)=0.13 の有効数字を使用し、削減可能人数=0.13\*導入前作業員人数の式で計算した結果、5 人から 4.35 人に削減可能である。

次に、ロボットの必要台数を算出する。AI 自動選別ロボットは 245 秒で 120 本選別できる。従って 1763 本を 1 時間で選別できる。一日(8 時間)では 14000 本選別できる。これは、作業員が 1 日で処理するペットボトルの本数の約 1.1 倍になるため、この中間処理施設に必要な AI 自動選別ロボットの台数は 4.5 台である。ここでの人共存モデルについてまとめると、AI 自動選別ロボットは搬入された飲料容器の選別作業を行い、作業員は選別されたペットボトルに対してラベル外し・キャップ外し・洗浄を行う。その際に、AI 自動選別ロボットを 4.5 台導入することで作業員の必要人数を 5 人から 4.35 人に削減できる。

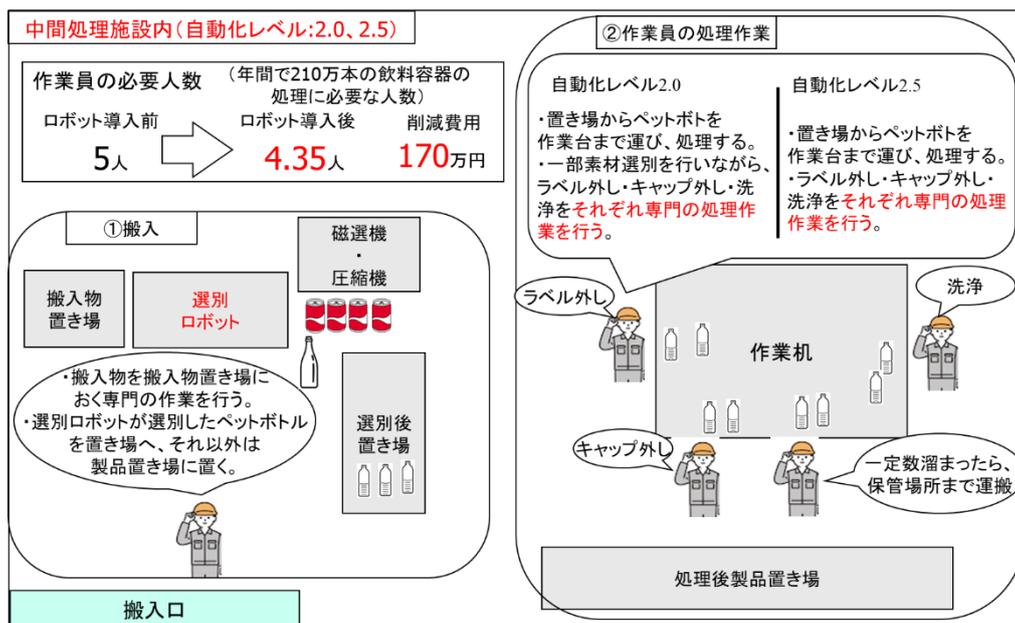


図 6-14 既存の中間処理施設に AI 自動選別ロボットを導入した処理作業のイメージ

新設の施設にロボットを導入した場合を検討する。ここでは、自動化レベルを 3.0 とした。新設の施設では、ロボットを設置する場所や広さを設計できるため、複数台選別ロボットを導入できる。そのため、従来の AI 自動選別ロボットにあるループ式のベルトコンベヤから直線式のベルトコンベヤに変更できる。複数台導入することで、素材選別する品目と量を増やすことができ、作業効率を向上できる。作業員は搬入したものをベルトコンベヤに流す前の粗選別を行う。また、処理作業については、既存の施設と同様にそれぞれ専門の作業を行える。ビンと缶については素材選別の直後に、ペットボトルは処理を行う台の直後に保管する場所を設置することで、運搬作業を削減できる。既存の施設の導入効果と同様であるが現状の作業と比較して、さらに作業内容の削減が狙える。以下に、新設の施設に導入した後の作業イメージ図を図 6-15 にまとめる。

同様にロボットを導入することで必要になる作業員の人数と作業の代替に必要なロボットの導入台数を検討する。AI 自動選別ロボットの選別速度と作業内容は変わらないとする。また、自律走行型ロボットを導入することで作業員が行っていた保管場所や搬出まで自動で運搬する。そのため、運搬と選別に必要な作業員を削減できるため作業全体の削減可能時間は全体の 21.5%(準備+素材分別)であり、その削減可能人数は 3.92 人になる。また、全体の作業人数が変わらないため、全体の作業量は変化しないと仮定すると AI 自動選別ロボットは既存の施設に導入した場合と同様に 1 台導入することによって従来の作業量と同様になる。ここでの人共存モデルについてまとめると、1 台の AI 自動選別ロボットは素材選別の作業を行い、作業員はロボットが選別した飲料容器に対してラベル外し・キャップ外し・洗浄を行う。また、自律走行型ロボットを導入することで運搬を行わなくなることで、作業員の必要人数を 5 人から 3.92 人に削減できる。

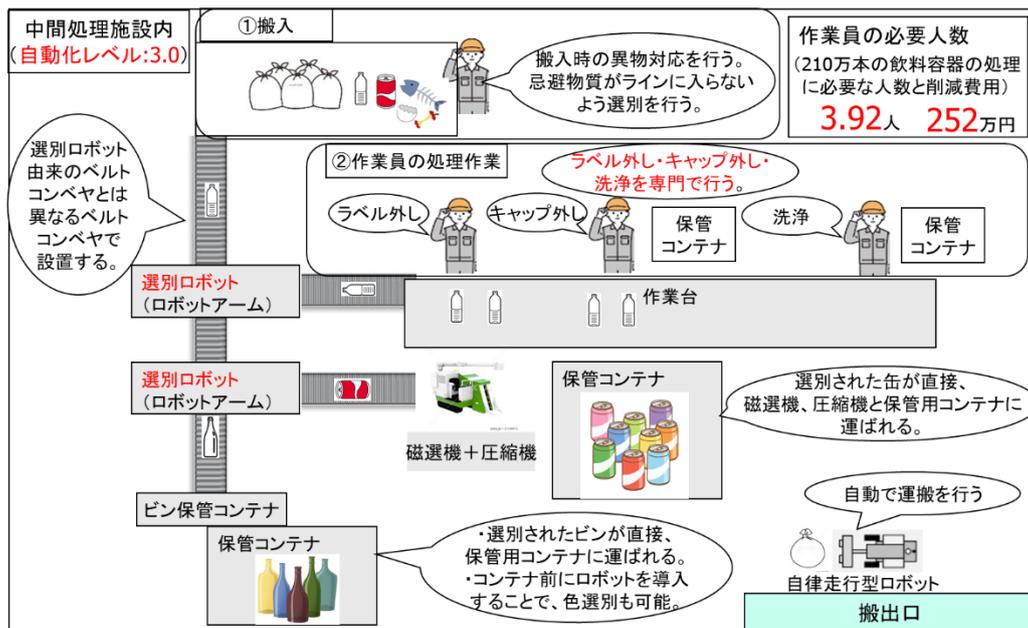


図 6-15 新設の中間処理施設に AI 自動選別ロボットを導入した処理作業のイメージ

自律走行型ロボットのモデル検討の際と同様に、これらの結果は現時点の自動化レベルによるモデルであり、ロボット自身の技術成熟度が上がった場合やほかの技術の進歩によって削減できる作業や人員の数もある。また、仮定を行うにあたり考慮可能な要素をいくつか除いている。具体的には、AI 自動選別ロボットを点検や修理するような新たに増える業務、専門の作業を行うことで効率化を狙うことによる作業内容の変化、異物の混入などを考慮していない。

#### 6-1-4 リソースシフト評価のまとめ

本事業では廃棄物資源循環分野に導入できる AI・ロボティクス技術を自律走行型ロボット、飲料容器自動選別ロボット、木くず自動選別ロボットの3つの事例を使い、リソースシフト評価によって各技術が該当する作業現場で解放できる人工とそれによって節約できる人件費を算出することができた。また、廃棄物資源循環分野において、既存の処理作業は労働力と技術の制約でリサイクルの高度化が推進しにくい状態にあるが、本評価手法を基に技術導入を積極的に実行できれば、技術導入によって解放された労働力により、本来労働力不足で実行できなかった作業を実行できる可能性が見えてくる。

本評価手法によって、廃棄物資源循環分野の自動化を実現するために必要とする技術開発の方向性を示した。ごみ箱から廃棄物を回収する段階ではごみ箱の出し戻しと、集積場での選別作業を行える技術が必要である。飲料容器の中間処理では引き続き、ラベルはがし、キャップはずし、洗浄、投入・層厚分離の4種類の技術が必要と思われる。木くず選別作業においては、ロボットの能力が発揮できる準備作業を整える技術が必要と思われる。

技術導入を検討している作業は労働形態によって完全労働と部分労働で分割できる。部分労働の自動化に向けては相応の技術を直接用いればできるのに対して、完全労働の自動化では作業を分解してから複数の技術をもって自動化を図るべきと思われる。

リソースシフト評価の視点から、現在作業の分解が出来ていない業界は技術評価を行うために分業後の作業形態を熟知する必要はあるが、AI・ロボティクスが迅速に発展している今、実際に作業員の分業を行う必要はないと思われる。その代わりに、自動化技術の開発を促進するためには、作業現場に積極的な技術導入を行うと共に、技術が対応できない部分は作業員に補ってもらう方向で検討すべきと思われる。

## 6-2 特定空間内のごみ質と分別の合理化に関する調査

### 6-2-1 東京都内の公共空間に設置されているごみ箱の実態調査

リサイクルの高度化に向けて、ごみ箱の分別基準とごみ質に関する調査が不足し、分別基準の設定においてはリサイクル先の知見を活かせていない現状に対して、都内の公共空間と研究室内のごみ箱を一例として調査を行い、分別の合理化に対して提案する。

リサイクル高度化の目標に向けて、一般市民が利用する公共空間(電車駅、商業施設、公園、コンビニ、イベント、その他)におけるごみ分別方法の実態把握(分別方法、配置位置)を目的とした調査を行った。表 6-21 は調査した施設名および分別方法を示す。ごみ箱に使用されている表示が場所や設置者によって多様になるため、表内では明確で一貫性のある命名へと改めた。具体的には、「もえるごみ」は「可燃ごみ」に、「燃えないごみ」は「不燃ごみ」に、そして「ビン・カン・ペットボトル」は「飲料容器」として統一した。電車駅の調査はごみ箱の撤去が行われていないJR 駅を研究対象としている。

- 都内 19 施設を調査した結果、計 15 種類のごみ分別方法を確認し、現行の分別方法の内、ごみ箱の数量と分別精度の関連性は「飲料容器」>「可燃ごみ」>「不燃ごみ」である。

表 6-21 調査した施設と分別方法

公共施設種類	施設名	ごみ箱分別方法	
電車駅	JR 上野駅内	①可燃ごみ ②プラスチック ③ビン・カン ④ペットボトル ⑤新聞・雑誌	
	JR 飯田橋駅内	①新聞・雑誌 ②飲料容器 ③その他	
	JR 秋葉原駅内	①新聞・雑誌 ②飲料容器 ③その他	
	東京駅駅内	①新聞・雑誌 ②ビン・カン ③ペットボトル ④その他	
商業施設	東京ドームシティラクーア	①可燃ごみ ②不燃ごみ ③飲料容器	
	ダイバーシティ東京プラザ	①紙類 ②プラスチック ③飲料容器	
	有明ガーデン	①可燃ごみ ②不燃ごみ ③ビン・カン ④ペットボトル	
公園	上野動物園	①可燃ごみ ②不燃ごみ ③ビン・カン ④ペットボトル	
	上野恩賜公園	①可燃ごみ ②不燃ごみ ③ビン・カン	
	代々木公園		①可燃ごみ ②不燃ごみ ③ビン・カン ④ペットボトル
			①紙類 ②プラスチック ③ビン・カン ④ペットボトル
		①可燃ごみ (2つ) ②不燃ごみ ③プラスチック (2つ) ④ビン ⑤カン ⑥ペットボトル	
日比谷公園	①紙類・その他 ②プラスチック ③ビン・カン ④ペットボトル		
コンビニ	ローソン小石川一丁目店	①紙類 ②プラスチック ③ビン・カン ④ペットボトル	
	セブンイレブン新宿東店	①紙屑・割り箸 ②プラスチック ③ビン・カン ④ペットボトル	
	セブンイレブン高田馬場3丁目店	①紙屑・割り箸 ②プラスチック ③ビン・カン ④ペットボトル	
	セブンイレブン新川一丁目中央店	①可燃ごみ ②プラスチック ③ビン・カン ④ペットボトル	
	ファミリーマート新川二丁目店	①可燃ごみ ②ビン・カン ③ペットボトル	

公共施設種類	施設名	ごみ箱分別方法
イベント	上野恩賜公園開園 150 周年総合文化祭	①紙類 ②箸・串 ③PET・缶 ④食べ・飲み残し ⑤ビン
	早稲田大学早稲田祭	①可燃ごみ ②不燃ごみ ③ビラ・冊子類④ビン ⑤カン ⑥ペットボトル
その他	早稲田大学リサーチイノベーションセンター (121号館)	①可燃ごみ (2つ) ②不燃ごみ ③ビン・カン ④ペットボトル

従来の分別方法として、「可燃ごみ」11 施設、「不燃ごみ」8 施設、「飲料容器」4 施設に設置されている。

「可燃ごみ」に相当する分別は「紙類」4 施設、「新聞・雑誌」4 施設、「紙屑・割り箸」2 施設、「紙類・その他」1 施設、「ビラ・冊子類」1 施設の 5 種類で行われている。

「不燃ごみ」に相当する分別は「プラスチック」9 施設、「その他」3 施設の 2 種類で行われている。

「飲料容器」に相当する分別は「ペットボトル」15 施設、「ビン・カン」14 施設、「ビン」2 施設、「カン」1 施設、「PET・缶」1 施設の 5 種類で行われている。



図 6-16 「可燃ごみ」, 「不燃ごみ」, 「飲料容器」の 3 分別(写真)



図 6-17 「新聞・雑誌」, 「飲料容器」, 「その他」の 3 分別(写真)



図 6-18 「可燃ごみ」「不燃ごみ」「ビン・カン」「ペットボトル」の 4 分別(写真)



図 6-19 「紙類」「プラスチック」「ビン・カン」「ペットボトル」の 4 分別(写真)



図 6-20 イベントにおける 6 分別(写真)

- 1 施設(公園)内で、複数の分別基準が存在していることも確認できた。
- ごみ箱の設置場所は主として人が集まる場所(出入口、飲食店周辺、トイレ)に設置されているが、施設面積が大きい公園や大学には休息エリアに追加の設置も確認している。ごみ箱の設置は人が集まる場所や通路および利用者の行動パターンを配慮していると考えられる。表 6-22 にごみ箱の設置場所を示す。

表 6-22 ごみ箱の設置場所

	出入口	エスカレーター	飲食店 周辺	休憩エ リア	トイレ	道端	その他	合計
電車駅	3	0	0	0	0	0	0	3
商業施設	5	7	5	1	1	0	0	19
公園	0	0	3	2	6	2	1	14
コンビニ	5	0	0	0	0	0	0	5
イベント	0	0	3	0	0	0	0	3
その他	0	0	0	1	0	0	0	1

### 6-2-2 研究室におけるごみ分別の合理化・ごみ質に関する調査実験

リサイクル高度化に向けて、ごみ箱の分別方法に対して数多くの試みがされてきた。東京都内の公共空間に設置されているごみ箱の実態調査結果によって 19 施設内に計 15 種類のごみ分別方法を確認し、リサイクルできる物を意識して分別方法を細かく構築している事が分かる。調査によって可燃ごみや廃プラの多くが RPF としてリサイクルされることがわかったため、分別段階でリサイクル品目に対応した分別方法の検討を行った。検証する前段階として RPF を製造している中間処理施設を訪問し、RPF を製造するうえで忌避物質になりうるものと搬入されてくる廃棄物の現状をヒアリングした。しかし、各分別手法によって回収できるごみ質に関する調査が不足しているため、実際の分別効果が不明となっている。回収できるごみ質を把握し、排出段階における合理的な分別方法を検討するため、研究室のごみ箱を対象として、設置できる空間が限られていることを想定した実験の設計・データ収集・評価を行った。

#### ① 中間処理施設での調査

合理的な分別方法を検討するうえで、ごみ集積場やリサイクル先で再び手選別を行う手間を省ける分別方法を探るべく、RPF を製造している中間処理施設にヒアリングを行った。今回訪問したのは RPF 製造事業者（以下、同社）で、まず訪問先の作業内容をまとめる。

同社では、廃プラのリサイクルとして RPF とケミカルリサイクル向けのフラフを製造している。製造工程は、搬入されてきた廃棄物の中からプラスチックと可燃物の配合を日ごとに計算する。計算した配合によって選別ラインに廃棄物を流す。破碎機に通された後、風力選別機によって重量選別を行う。金属類を磁気選別によって除いてのち、熱を加えて熔融して型に流し込む。そこで成形をして RPF 等が製造される。製造能力は、60t/日である。

次に、搬入される廃棄物と搬入される廃棄物が RPF 製造に適合しているかヒアリング調査を行った。搬入される廃棄物の中で RPF 製造に対する忌避物質がいくつかある。コードやボールペンのような金属が付属した製品や塩化ビニル製のホースやパイプが挙げられる。加えて、食品などの塩分、水分を含んだものは忌避物質に該当する。これらが廃棄物の中に交じって搬入された場合、少量であれば RPF の性能に影響が少ないため手選別により取り除いている。重量として 5kg 以上の忌避物質が搬入された場合、搬入先の企業に廃棄物を送り返す対策を行っていることを確認した。これまでも、いくつか事例があり、特に年末など短期で食品を製造する場合に食品付きの廃棄物が大量に廃棄されたこともあった。同社では、該当の会社に啓発資料を送ることで改善に向けた対応をとっている。

以上の調査結果に基づき、実験内容を以下にまとめる。

#### ② 実験目的

現在、大学研究室内で廃棄されている廃棄物を調査し、廃棄物からごみ集積場や中間処理施設で手選別の作業量を減らすための分別品目を考える。いくつかの分別方法を実施した後、RPF を製造

する際に有効な分別方法を導く。そして、その有効な分別方法を促進するために効果的な分別品目の表示方法を検討する。

### ③実験方法

実験において、ペットボトル・ビン・缶の分別はすでに機械による選別が可能と思われるため統一した「飲料容器」箱で回収する。実験は計5段階で実施し、その内第一から第四段階までは3分別を基準として設定し、第五段階では4分別をすることで、分別品目の増加による影響を分析する。その内、第一、第二段階では既存のごみ分別方法の検証を目的とし、第三段階以降は再資源化工場の忌避物質を積極的に1つの箱に集める様に設計した分別方法を使用している。研究室内のごみ排出量は出席者の数が不安定であるため、データ収集はごみ箱が満杯になった時点で行う事で、回収量を統一している。表6-23に各段階のごみ箱の名称を示し、表6-24には各段階の回収間隔を示す。

表 6-23 各段階のごみ箱の名称

段階 (分別目標)	第一段階 (現在の分別品目)	第二段階 (再生可能プラを集める)	第三段階 (RPF 原料を集める)	第四段階 (RPF 原料を集める)	第五段階 (RPF&ケミカル原料を集める)
焼却対象物	可燃ごみ	可燃・食残付き	食品ごみ	食品の汚れが付着するごみ	食品の汚れが付着するごみ
リサイクル対象物	プラスチック	プラスチック	可燃ごみ+プラスチック	紙類+プラスチック	紙類+プラスチック
飲料容器	飲料容器	飲料容器	飲料容器	飲料容器	飲料容器
ケミカル原料	—				キャップ・ラベル・プラスチックシート

表 6-24 各段階の回収間隔

回収間隔(日)	第一段階	第二段階	第三段階	第四段階	第五段階
第一回	13	15	33	31	19
第二回	7	23	73	38	50
第三回	—	26	19	56	51
第四回	—	58	—	51	131
合計	20	122	125	176	251

本実験に使用するごみ箱の名称は分別の目標に対して調整しているが、研究室から排出する廃棄物の中身は「食品残差が付着するごみ」、「紙類」、「汚れてないプラスチック」の3種類に分けられる。「食品残差が付着するごみ」は汚れによってリサイクルの忌避物質になるため設置している。「汚れてないプラスチック」は概ねレジ袋、ごみ袋、飴袋のような「食品に直接接しない」、又は「食品残渣が付着し無い」プラスチックである。「紙類」と「汚れてないプラスチック」はリサイクル原料として扱っている。図6-21に食品残渣が付着するごみのイメージを示し、図6-22に694日間研究室から排出した廃棄物の全体的なごみ質を示す。



図 6-21 食品残渣が付着するごみ(写真)

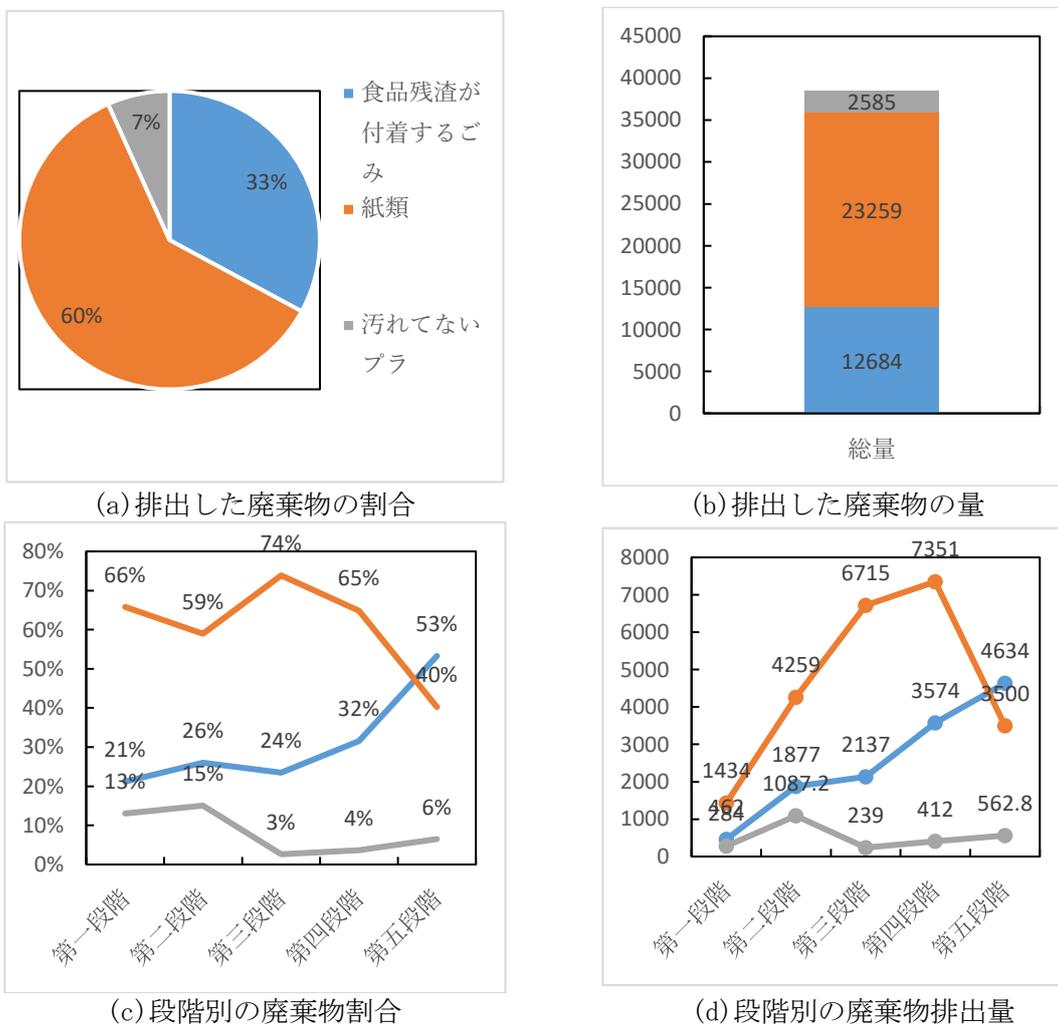


図 6-22 全体的のごみ質

本実験を通じて研究室のごみ箱から発見した忌避物質は食品残渣のみであり、残りの紙類と汚れてないプラをRPF原料として扱うことが可能となる。食品残渣が付着しているプラスチックは実質上程度によって再資源化できる物もあるが、ごみ捨てには個人の汚れに対する尺度を統一す

ることが困難であるため、本実験では食品残渣が付着するプラスチックは全て忌避物質として扱っている。図 6-23 に分別手法別のごみ箱内訳を示す。

**第一段階: 介入なし。**

実験段階	ごみ箱	粗分別	内訳						
第一段階 (研究室内の実態)	可燃ごみ	紙類	コピー用紙	ティッシュ	段ボール	紙コップ	ミックスシュレータ	加工紙	
		弁当ガラ	割り箸	弁当トレー	プラ食器	食べ残し			
		プラ類	食品包装	ビニール袋	PETコップ	ゼリー飲料			
	プラスチック	汚れてないプラ	シート	ビニール袋	ラベル	一般包装紙	発泡スチロール	防振シート	プラローフ
		食残付きプラ	食品包装	ゼリー飲料	コップ蓋				
		紙類	ティッシュ	ティッシュ箱					

**第二段階: 食品残渣を可燃ごみにまとめる。**

実験段階	ごみ箱	粗分別	内訳						
第二段階 (研究室内の実態)	可燃ごみ	紙類	コピー用紙	ティッシュ	段ボール	紙コップ	ミックスシュレータ	加工紙	
		弁当ガラ	割り箸	弁当トレー	プラ食器	食べ残し			
		プラ類	食品包装	ビニール袋	PETコップ	ゼリー飲料			
	プラスチック	汚れてないプラ	シート	ビニール袋	ラベル	一般包装紙	発泡スチロール	防振シート	プラローフ
		食残付きプラ	食品包装	薬品包装					
		紙類	ティッシュ	ティッシュ箱					

**第三段階: 既存の表示方法で最終的に燃やされる廃棄物を一箇所に収束する。**

実験段階	ごみ箱	粗分別	内訳						
第三段階 (研究室内の実態)	可燃・プラスチック	紙類	コピー用紙	ティッシュ	段ボール	加工紙	ミックスシュレータ		
		弁当ガラ	割り箸	弁当トレー	プラ食器	食べ残し			
		プラ類	食品包装	ビニール袋					
	食品ごみ	汚れてないプラ	ビニール袋						
		弁当ガラ	割り箸	弁当トレー	プラ食器	食べ残し	紙コップ	食品包装	
		紙類	ティッシュ	ティッシュ箱					

**第四段階: 新たな表示方法で食品の汚れが付いているごみを個別に集める。**

実験段階	ごみ箱	粗分別	内訳						
第四段階 (研究室内の実態)	紙類・プラスチック	紙類	コピー用紙	ティッシュ	段ボール	加工紙	ミックスシュレータ	食品包装	
		プラ類	食品包装	ビニール袋					
	食品の汚れが付着するごみ	汚れてないプラ	ビニール袋						
		弁当ガラ	割り箸	弁当トレー	プラ食器	食べ残し	紙コップ	食品包装	油拭きティッシュ

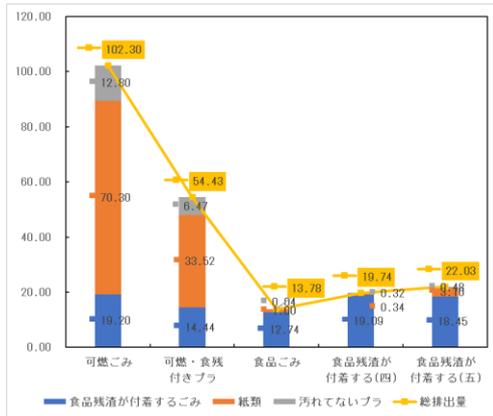
**第五段階: ケミカルリサイクル原料とRPF原料を同時に集める。**

実験段階	ごみ箱	粗分別	内訳						
第五段階 (研究室内の実態)	紙類・プラスチック	紙類	コピー用紙	ティッシュ					
		プラ類	菓子包装紙	ビニール袋					
	食品の汚れが付着するごみ	汚れてないプラ	菓子包装紙						
		弁当ガラ	割り箸	弁当トレー	弁当蓋	チルド飲料容器	食品付き紙	食品付きプラ	弁当付属ビニール袋
			ガムが付いたキャップ	PETコップ					
		紙類	ミックスシュレータ						

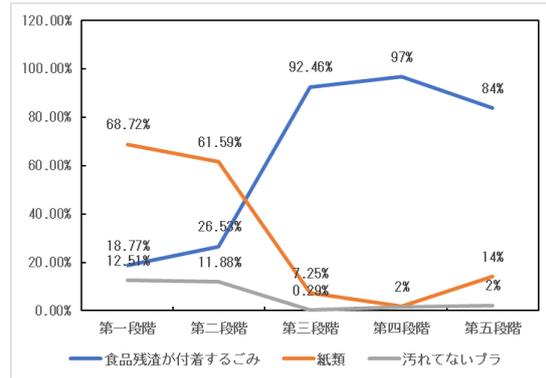
■ RPF原料になれない ■ RPF原料になれる

図 6-23 分別手法別のごみ箱内訳

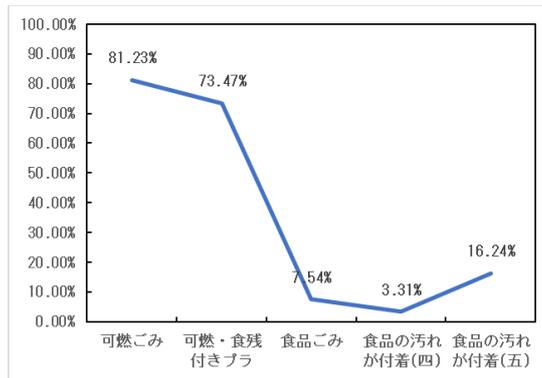
実験の各段階に置けるごみ箱内の組成成分の変化量を以下の図 6-24 と図 6-25 に示す。



(a) 廃棄物の量 (g/日)

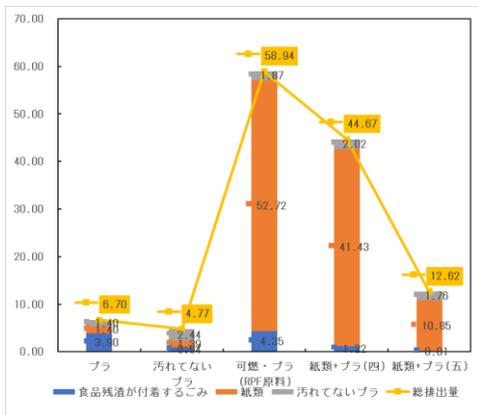


(b) ごみ質の変化 (%)

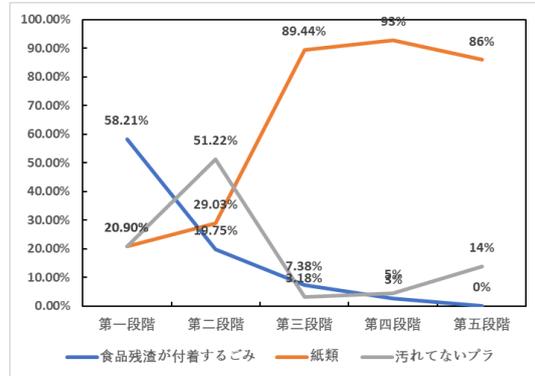


(c) RPF 原料含有率

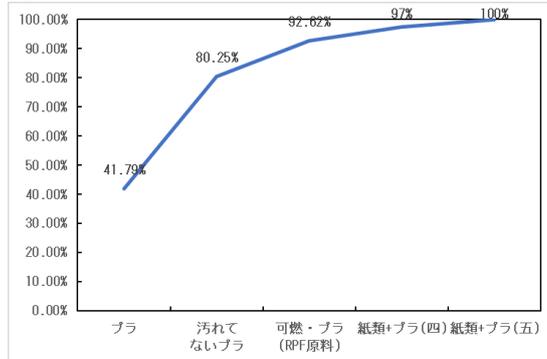
図 6-24 焼却対象物のごみ箱内の組成分析



(a) 廃棄物の量 (g/日)



(b) ごみ質の変化 (%)



(c) RPF 原料含有率

図 6-25 リサイクル対象物のごみ箱内の組成分析

- ごみ箱から回収される紙類は複数種類の紙が混合しているため、「雑がみ」に該当し、RPF の原料として多く利用されている。「紙類・プラスチック」の品目を設置することで RPF 原料含有率 100% 近くの廃棄物を回収できた。
- 資源循環の効率化に向けて、「食品の汚れが付いているごみ」の分別品目を設置することで約 100% の食品残渣が付着するごみを一つのごみ箱に集約することができた。「食品の汚れが付いているごみ」の標記は食品残渣が付着するごみを集めるために有効と思われるが、偶然性を排除するためには研究室以外の排出現場における実験が必要と思われる。
- 「紙類+プラスチック」のごみ箱に回収した廃棄物は清潔で、再分別し易い状態である。
- 第五段階にて 3 分別を 4 分別に切り替えたことによって一定量のケミカルリサイクル原料(飲料容器のキャップ・ラベル、プラスチックシート)の回収には成功しているが、キャップ上に残る微量の飲料残液を「食品残渣が付着する」と認識し、外したキャップ・ラベルを忌避物質箱に投入する現象を確認した。
- 第五段階で一部の紙類が「食品の汚れが付着するごみ」に投入された現象に対しては、分別品目の増加と共に、紙類のごみ箱にミックスシュレータを投入する事が困難となっていることが原因と思われる。

### 6-2-3 分別実験から得られる知見と合理的な分別方法に関する提案

- リサイクル対象物の集約を意識して設置した分別手法では、利用者は確実に当てはまると判断できる物を該当箱に投入しているが、プラスチックごみは「可燃」、「不燃」、「プラスチック」類の全てに当てはまることによってリサイクル効率が低下している。
- 紙類の回収に向けて、「可燃ごみ」と「紙類」の分類は共に有効であるが「可燃ごみ」では一部の食品ごみを同時に回収してしまうのに対して、「紙類+プラスチック」と「食品の汚れが付いているごみ」を併用すると、食品残渣が付着するごみの混入をふせぐことができる。
- 可燃ごみの品目を設置すると、紙類はすべてそこに分類され、リサイクルに回さないようになる。
- 忌避物質の除去を意識して設置した分別方法によって、食品の汚れが付着するごみを 1 つのごみ箱に集約することに成功し、リサイクル率の向上を確認できた。
- 分別品目の増加によってプラスチックの分別に影響が出ている現象からごみ分別は品目の数が多ければよいのではなく、リサイクル手法の忌避物質を考慮したうえで分別の品目を設置する必要がある。
- リサイクル専門者の判断基準（汚れの程度）を一般者に示すナッジの導入についての検討が必要と思われる。

現行の廃棄物の分別方法は、リサイクルのために分別しているのであるが、集めた廃棄物の処理は中間処理施設で決められているため、排出現場と中間処理の分別基準が異なり、作業の効率が低下している。一例として、首都圏の廃プラは RPF の原料として扱われることが多いが、排出現場では RPF 生産の異物である食品包装プラスチックも同じ区分で分別しているため、中間処理施設では食品残渣が付着したものを除去することが必要となっている。

- 資源循環フロー全体的の効率化に向けて、リサイクル手法を基準にごみ分別方法を作成することを提案する。
- プラスチックリサイクル手法において、集めた廃棄物の品質に対する要求は「熱回収」→「RPF 化」→「ガス化」→「高炉・コックス」→「油化」→「原料モノマー化」→「マテリアル」の順に高くなるため、分別作業にかかる労力も増えていく。

本実験によって、研究室の様な業務系排出現場の飲料容器以外のごみ組成は「紙類」「汚れてないプラ」「食品汚れが付着するごみ」の三種類であることを把握した。本提案はリサイクル手法のニーズに合わせて、現場分別の制度を設計する。一例として下記 3 つの現場に使用するごみの 3 分別を示す。

- 業務系排出現場：「食品残渣が付着するごみ」、「紙類・プラスチック」、「飲料容器」

- 飲食系排出現場：「プラスチック」、「紙類・食べ飲み残し」、「飲料容器」
- 公園・イベント会場：「食品残渣が付着するごみ」、「紙類・食べ飲み残し」、「飲料容器」

その内「紙類・プラスチック」廃棄物は RPF 生産工場に、「紙類・食べ飲み残し」はメタン発酵施設に、飲食系排出現場からの「プラスチック」はケミカルリサイクルに、「食品残渣が付着するごみ」はごみ焼却施設へ搬入するように提案する。

### 6-3 ごみ量の自動化監視手法に関する研究開発

近年、ごみ収集作業の効率化に向けて、センサーベースのごみ箱による容量管理や回収ルートの自動計算に関する研究が進んできた。しかし、ごみ箱の量が多いことにより、全てのごみ箱にセンサーを付けると①コストが高く、②膨大なデータを統括的に管理し分析することへのハードルが高いことから、社会実装は困難と見られている。

本事業では上記二つの課題につき①人流量とごみ量の関連性分析と②自律走行型ロボットや監視カメラに搭載することを前提とした、ごみ箱内の占有率を識別する画像識別 AI システムの開発と検証を行った。

#### 6-3-1 研究室における人流量とごみ量の関連性について

人流量とごみ量の関連性を検証するために、本事業では研究室を特定空間として選択し、研究室内の在室人数をカメラベースでカウントするために画像認識 AI モデル Yolo5 を使用し、人流量計数ソフトウェアを開発し、歩行速度(1.5m/s 以下)に基づいた在室人数の計測に成功した。図 6-26 に人流量計数ソフトウェアのイメージを示す。

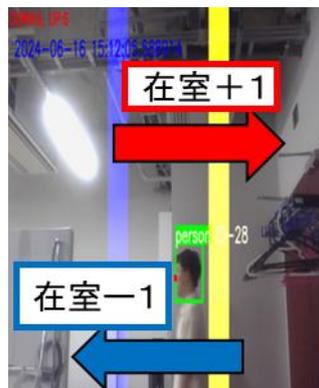


図 6-26 人流量計数ソフトウェアのイメージ

ごみ箱内のごみ質によって、重量と体積が異なることに対して、正確にごみの量を計測するために、本事業では重量センサー「スマートマット」と超音波高さセンサー「ToF センサー」で検証を行った。図 6-27 にごみの量を計測する設備を示す。



(a) スマートマット



(b) ToF センサー



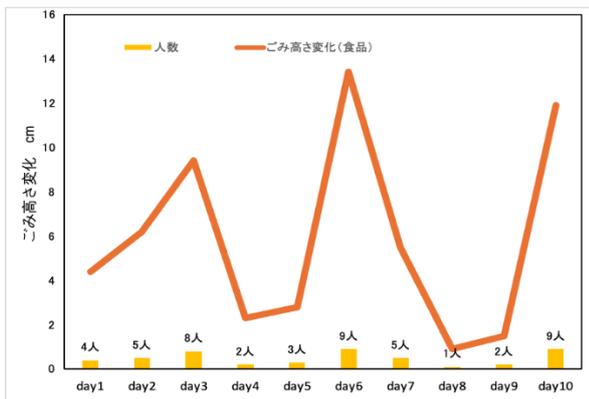
(c) スマートマット設置の様子



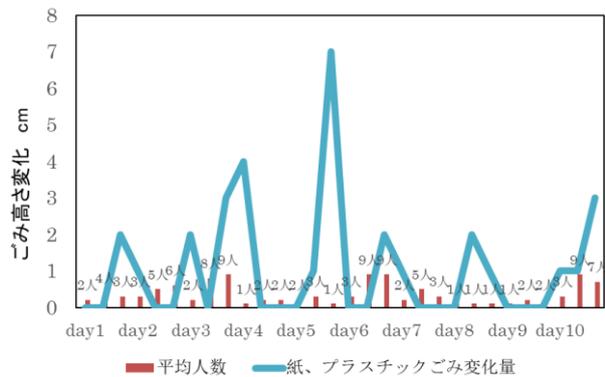
(d) ToF センサー設置の様子

図 6-27 ごみの量を計測する設備

人流量とごみ量のデータを10日間収集し、可視化・分析を行った。その結果、毎日昼の時間帯では、食品汚れが付着したごみの変化量は人の流れが増えるにつれて増加し、相関係数0.97で正の相関関係があり、紙類やプラスチック類のごみは人の流れとは相関係数-0.18で相関関係が低いことがわかる。図6-28に人流量とごみの高さの関係性を示す。



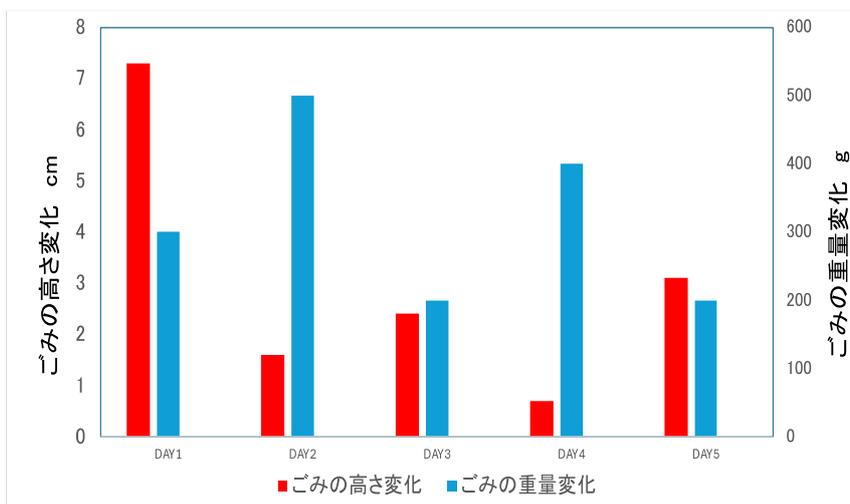
(a) 昼時間帯における食品汚れが付てるごみの変化量と人流量の関係



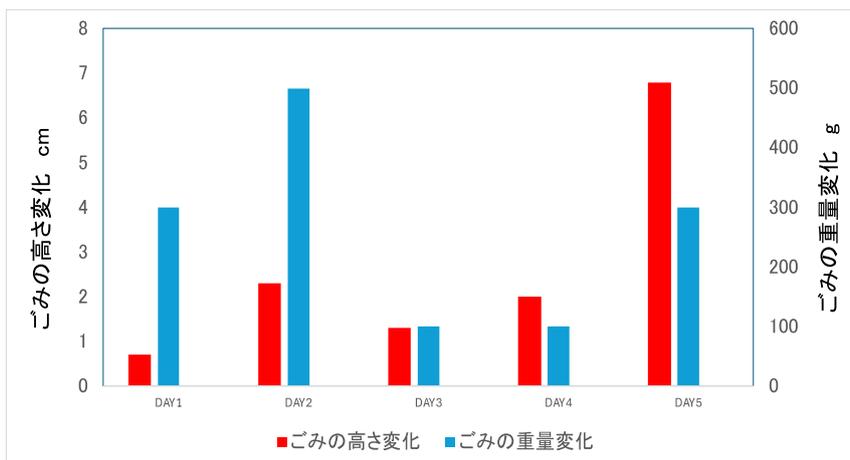
(b) 紙、プラスチックごみ高さ変化量と人流量の関係

図 6-28 人流量とごみの高さの関係性

ごみ高さ変化量と重量変化量の関係性を把握するために、研究室のごみ箱のごみの高さや重量を同時に測定し、分析を行った。実験により、ごみの高さが大きく変化しても重量の変化が小さい場合と、逆にごみの高さの変化が小さいにもかかわらず重量が大きく増加する場合も観察された。その原因は投入されたごみの種類によって廃棄物の密度が異なっていると思われる。図 6-29 にごみ高さ変化量と重量変化量の関係性分析を示す。



(a) 食品汚れが付てるごみ重量変化とごみ高さ変化の推移



(b) 紙、プラスチックのごみ重量変化とごみ高さ変化の推移

図 6-29 ごみ高さ変化量と重量変化量の関係性分析

この結果によって、ごみの高さや重量の比較は、ごみの中に異常な物体や不適切に廃棄された物が含まれているかどうかを判断するための指標として有効である可能性が示唆された。

人流量とごみ量の関連性をより細かく分析するために、一日中ごみ高さ変化量と人流量の関係を計測し、分析を行った。回収できたデータによると、飲料容器のごみ量は人数の増加に伴って増加していることが確認できる。一方で、食品汚れが付着したごみは、昼と夕方の特定の時間帯に急激な増加が見られるが、これらのごみ量と人数の間には明確な相関関係は見られない。同様に、紙やプラスチックのごみも夕方に突然大きく増える傾向があり、この増加が特定のイベントや行動に起因している可能性が考えられるが、人数の増減とは直接的な関係がない。図 6-30 に 1 日のごみ高さ変化量と人流量の関係を示す。

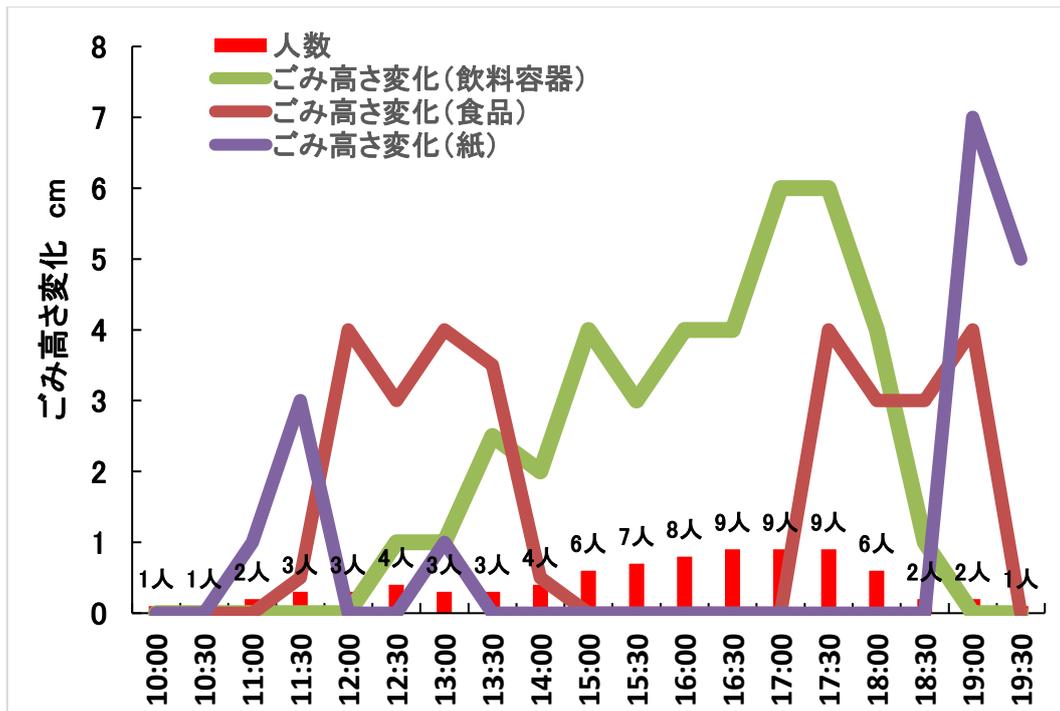


図 6-30 1 日のごみ高さ変化量と人流量の関係

この結果から、飲料容器のごみ量は主に人数によって影響を受ける一方で、食品や紙、プラスチックのごみ量は人数以外の要因、例えば特定の時間帯における活動内容や行動パターンに強く依存していることが示唆される。

本検証の結果をまとめると、研究室から排出される廃棄物に対して以下の知見が得られる。

- 紙パック、お菓子の包装、弁当ガラを代表とする「食品の汚れが付着するごみ」の排出量に対しては人流量による予測は可能であり、排出量が増える時間も予測できる。
- 「飲料容器」の排出量に対しては人流量による予測は可能であるが、排出する時間帯は予測できない。
- 「紙・プラスチック」の排出量に対しては人流量と排出する時間帯に対して、共に予測できない。

### 6-3-2 カメラベースのごみ占有率識別システムの開発

カメラベースでごみの占有率を計測するには、ごみ箱内の可視化が必要となるため、本事業では半透明のごみ箱を利用することにした。全透明のごみ箱は、強い光や特殊な照明の下で光を反射したり散乱させたりする可能性があるのに対して、半透明のデザインは反射や光の散乱を軽減することで、環境光の変化によるシステム性能の不安定化リスクを低減し、異なる照明条件でも安定した教師データ画像を取得できる。よって、本事業では半透明のごみ箱を使用することにした。使用した半透明ごみ箱の様子を図 6-31 に示す。

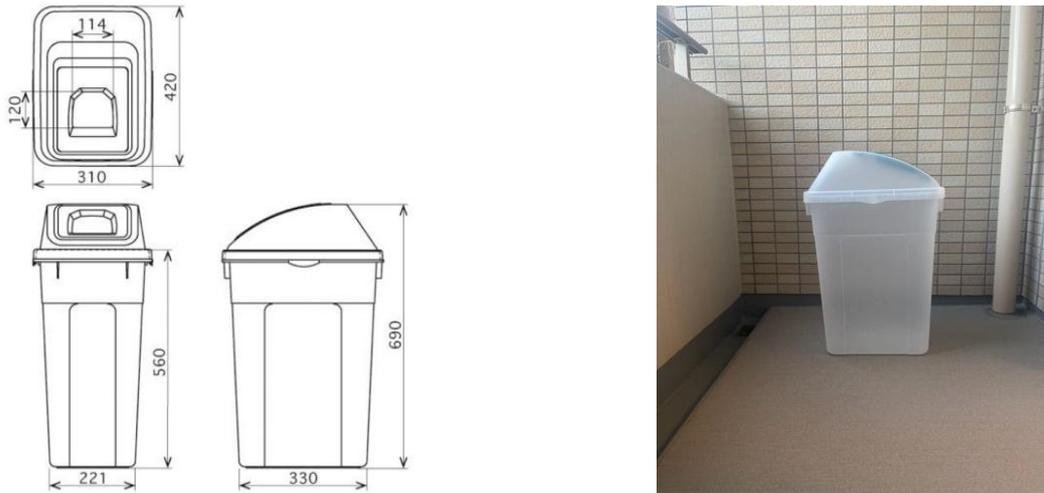
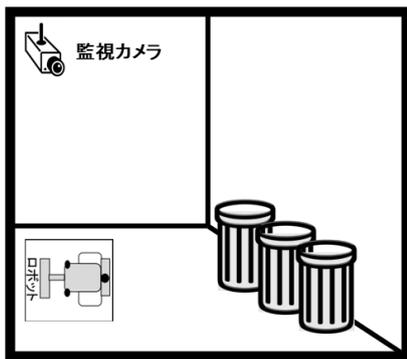


図 6-31 半透明ゴミ箱の様子

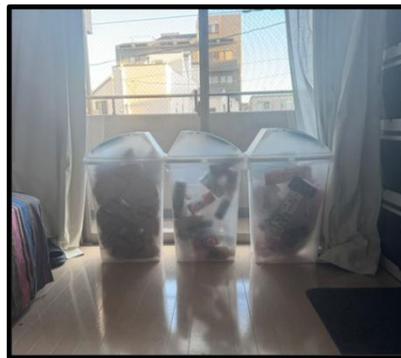
システム開発には統合開発環境 (IDE) PyCharm と画像認識 AI モデル YOLOv8 を使用し、自律走行型ロボットにカメラを搭載する場合と監視カメラを利用する場合それぞれに対してゴミ箱内にごみを入れた状態を水平角度と天井 45° から撮影し、ラベリング作業によって教師データを作成した。教師データの作成時のパラメータはゴミ箱に当たる光源、ゴミ箱を撮影する時のカメラ距離、ゴミ箱内の占有率の 3 種類に選定した。光源の種類は自然光、混合光 (室内照明を点灯)、撮影距離を近 (1-1.5m)、中 (1.5-3m)、遠 (3-5m)、ゴミ箱内の占有率に関してはごみの品目 (食品の汚れが付着するごみ、紙・プラスチック、飲料容器) につき、ごみの占有率を 0 から徐々に投入し、撮影を行った。撮影で取れたゴミ箱の写真に対して、ゴミ箱全体を赤枠で囲み、その内のごみの量が見える部分では水色で囲み、教師データを作成し



た。図 6-32 にゴミ量監視システムの監視画面のイメージを示す。図 6-33 に教師データのイメージを示す。



(a) カメラによるごみ量監視のイメージ



(b) ロボット視線の監視画面



(c) 監視カメラ視線の監視画面

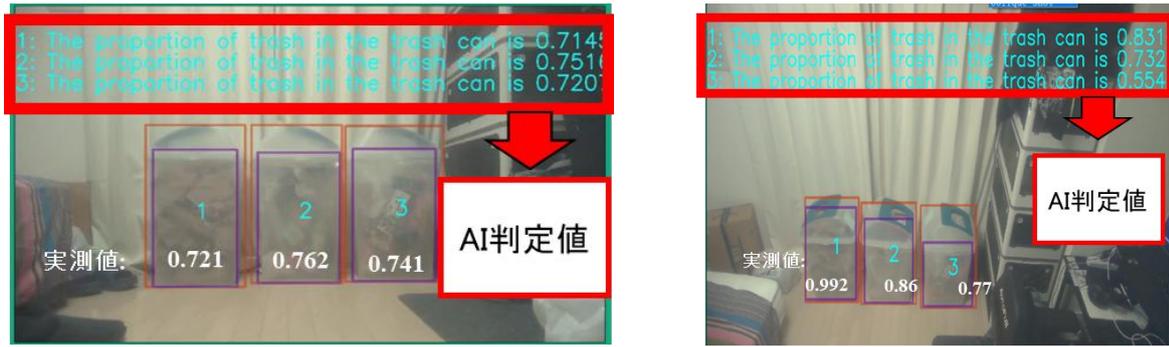
図 6-32 ごみ量監視システムの監視画面のイメージ



図 6-33 教師データのイメージ

計 6 千枚以上の教師データ写真を AI 訓練に使用し、得られた画像識別 AI によってごみ箱内のごみ占有率を計測するように実験を行った。ごみ箱内の占有率は「占有率=ごみ面積/ごみ箱面積」の式で算出している。水平角度で AI がごみ箱内のごみ占有率を認識した結果を図 6-34 に示す。紙類ごみを収集する 1 号ごみ箱に対する AI の認識結果は 71.4%、瓶や缶を収集する 2 号ごみ箱は 75.1%、食品汚れが付着したごみを収集する 3 号ごみ箱は 72.1%となった。実際の占有率（実測値）は、それぞれ 72.1%、76.2%、74.1%である。

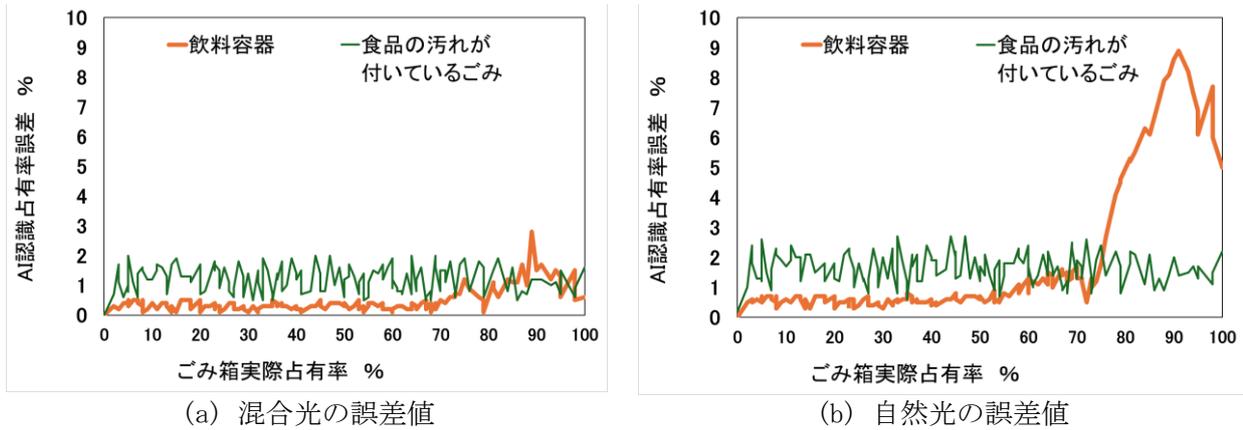
次に、これらの認識結果を評価するため、飲料容器と食品の汚れが付いているごみに対して誤差=実測値-AI 認識結果を計算した。図 6-35 に水平角度からの AI 認識結果の誤差分析を示す。自然光ベースによるごみ占有量判定の誤差が大きく、特に飲料容器の占有率が 75%以上の場合の誤差率が急上昇し、最大約 10%の誤差があることを示した。混合光（自然光+照明光）ベースによるごみ占有量判定の誤差は 3%以下に収まっていた。誤差率の低減は、照明光が加わったことにより、室内に設置した監視画面に写るごみ箱内のごみ占有量が自然光照射時より明確に把握できたことによると推察される。これにより、水平角度から画像認識 AI を駆使したごみ量を把握する手法は室内環境においてごみ回収作業における回収員の空振り防止に有効であると考えられるが、自然光ベースにおける室外環境における運用は引き続き研究が必要と思われる。



(a) 水平角度からの判定結果

(b) 天井 45° からの判定結果

図 6-34 AI 判定実験の結果



(a) 混合光の誤差値

(b) 自然光の誤差値

図 6-35 水平角度からの AI 認識結果の誤差分析

AI が天井 45° から認識した 3 つのごみ箱内のごみの割合はそれぞれ 83.10%、73.24%、55.44%である。一方、実際の測定結果では、ごみの割合はそれぞれ 99.2%、86%、77%となっている。この結果を比較すると、AI の認識結果と実際の修正後の値との誤差は、それぞれ 16.1%、12.76%、21.56%であり、天井 45° からのごみ箱占有率の判定精度を引き続き検証する必要があると思われる。

### 6-3-3 ごみ量の自動化監視手法に関するまとめ

本事業では人流量とごみの量的な関連性を把握することによって AI と人流量をつなげるとある程度のごみ排出量が予測できることを示した。提案者らは、過去にイベントごみの回収において、人追従型のロボットを活用した「動くごみ箱\*」の実証を行ってきた。本研究の成果と従来を連携させることで、より高度化が実現できると考える。

また、画像識別 AI によるごみ箱の占有量解析ソフトの開発検証により、外部からごみ量を検知可能なごみ箱の実現可能性を確認した。これにより低コストで、社会実装し易いごみ量監視の DX 化を実現できる方向性を示した。

しかし、現在の検証では特定空間内にしか行われていないため、当手法の実用性に関しては引き続き、異なる利用環境で検証することが必要と思われる。

\*小野田弘士. (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—. 情報処理, 65(5), d1-d10.

## 6-4 教師データ取得効率化に向けた検討と実験

### 6-4-1 既存の教師データ取得・利用について

#### (1) 教師データ取得段階の分析

従来の教師データ取得方法はデータの種類から見ると、写真データとビデオデータの2種類に分類されているが、取得場所の違いによって更に研究室内と選別現場で取得されたものに分類される。各取得方法のメリットとデメリットは以下のとおりである。

表 6-25 教師データの分類

データ種類	取得場所
写真	実験室内
ビデオ	選別現場

#### (a) 種類別のメリットとデメリット

- 写真データは必要な画面のみを一枚ずつ撮影するため、対象物の特定に有効であるが、撮影に時間が掛かり、一枚ずつラベリング作業を行う必要があるため、教師データの作成に必要な人工が膨大である。
- ビデオデータは所定位置で継続的に画像データを取得しているため、半自動的なラベリング手法が使え、撮影に取り込む人工も少ないが、画面に映る全ての物を撮影することから、画面上に混入してくる異物も同時に撮影してしまい、対象物の特定が困難となる。

#### (b) 取得場所別のメリットとデメリット

- 実験室内で取得した画像データは背景に異物が少なく、対象物の特徴もある程度把握でき、教師データに加工しやすいが、選別現場の混雑した背景や同時に複数の対象物が出現する可能性などの違いが大きく、実用段階のAI識別率が低下するリスクが存在している。
- 選別現場で取られた教師データは作業の実態をそのまま記録しているため、実用化に向いているが、画面内に映る対象物の出現状態・影の有無の様な性状が混雑しているため、ラベリングを行う作業員が画面上から対象物を特定する能力へ依存する課題が存在している。

#### (c) 撮影時の設定について

一見、画像識別AIは対象物の写真であれば教師データとして使えると思われやすいが、実際は、AIのトレーニング効果を安定させるためには固定した外部状況で撮影しなければならない。

画像識別AIは画像情報を数値として処理しているため、撮影時の明るさと画像の解像度を統一しないと、AIの学習に影響を及ぼすため、教師データに加工できない。これまで廃棄物分野では、撮影された選別対象物の写真が多く実在しても、統一した環境で撮影されている物は限られ、AIトレーニングに利用できる物はごく一部である。

上記の理由により、AIトレーニング用教師データの取得は開発者が各自で行わざるを得ない状況にある。しかしながら、AI開発者が取得する教師データでも、自社用では十分であるが、他者と連携を取る際には改めて写真データを取得する必要がある。こうした課題に対して、より効率的な教師データ取得方法を探索し、画像識別AIの発展に合う取組を模索する必要がある。図6-36には外部光源による影響を減少するための画像収集用BOXを記す。

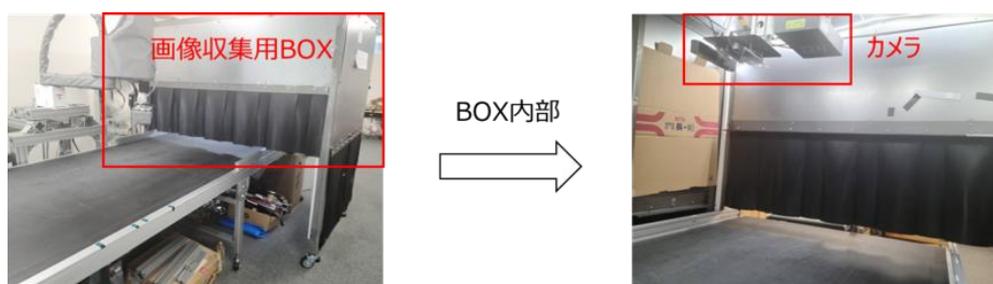


図 6-36 画像収集用 BOX

(2) 教師データ作成段階の分析

教師データ作成時に多く使われているラベリング手法は、バンディンボックスとキーポイントの二種類である。バンディンボックス手法は画面上から AI に教えたい対象物を四角形によって囲み、対象物の材質も同時にマークする方式である。キーポイント手法は画面上に映している対象物を点線でマークする方式である。図 6-37 にラベリング作業の実例を示す。

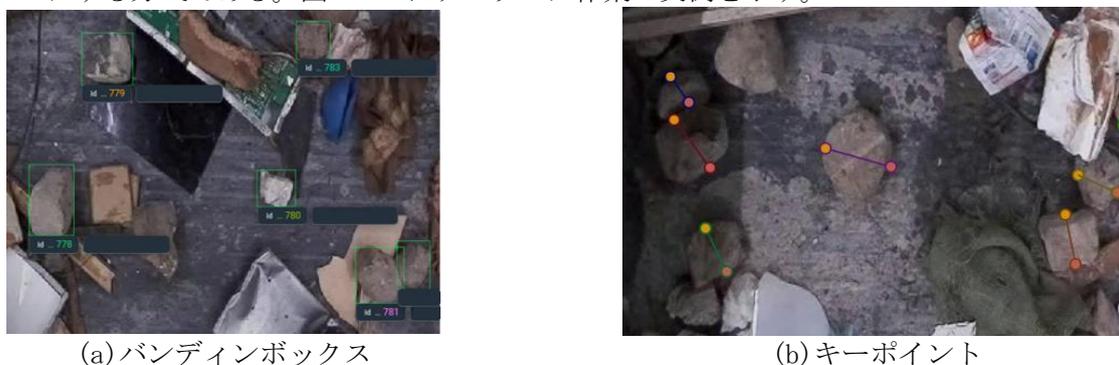


図 6-37 ラベリング作業例

廃棄物分野のラベリング作業実態と作業に伴う課題を把握するために、本研究は某建設廃棄物処理施設で取得したビデオデータを用いてコンクリート塊選別 AI のトレーニング用教師データの作成を実施し、データ分析を行った。これにより把握した課題は、2種類に大別できる。すなわち、それぞれ作業員のスキルへの依存と作業効率が低いことである。

(a) ラベリング作業員のスキルに依存すること

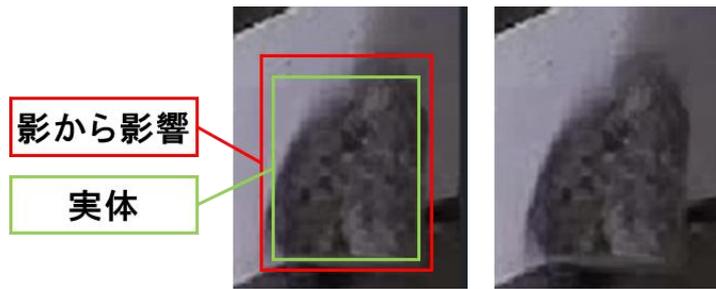
- 現在、自動選別ロボットのメーカーで行われているラベリング作業そのものは誰にでもできる簡単な作業であるが、マーキングする対象物の特定は作業員の判断に基づいて行われている。廃棄物分野におけるラベリングは生産工場と違って、廃棄物の品目が多く、似たような画面情報を持つ異なる品種が同一画面上に映し出されているため、作業員のミスによるヒューマンエラーは避けられない。



(a) 作業員によるラベリング対象物の誤認識の例



(b) 光線変化の対応ミス例



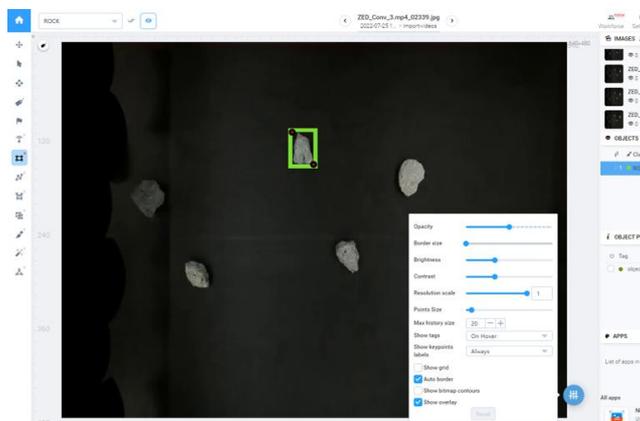
(c) 輪郭線の見分けミス例

図 6-38 廃棄物選別 AI 用教師データ作成時の難点例

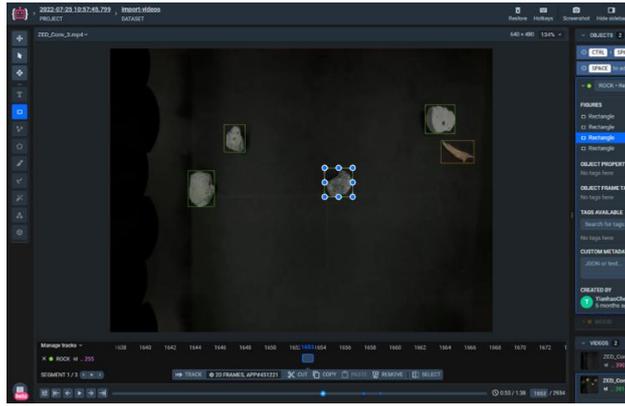
- 図 6-38 に記載しているのはラベリング時に把握した対応困難な例である。その内、赤色はミスの例で、緑色は正解例である。(a)に記載されているのは対象物の認識困難問題である。3つの画像例を全部コンクリート塊としてラベリングされる事が多く発生したが、実際は(イ)のみがコンクリート塊であり、(ア)はフォームで、(ウ)はベルトコンベヤ上の汚れである。(b)に記載しているのは撮影時の光線変化によるラベリング作業への影響であり、対象物が影の中に移動した場合では全体の一部が見にくくなり、光に当てている部分だけをラベリングする例である。(c)は対象物がよく取れている例であるが、対象物の影と実物の輪郭線は画像上で見分けが困難なために発生したミスを書いている。
- 廃棄物等の中間処理施設で取得した現場写真を教師データに転換するためのラベリング作業は、画面上で手選別作業が行われている内容と近いが、ラベリング作業員には選別作業員の知見を持たないことの方が多く、廃棄物の材質を把握する為の情報も見た目だけに限定されているため、作成した教師データの質・量が保証できない。

(b) 作業効率が低いこと

- 現在のラベリング作業によく使われている手法は先に示した写真データを用いた作業とビデオデータを用いた作業の2種類であり、ラベリング作業を実際に3か月間実施し、体験人数10名の合計作業時間418hで取得したデータを基に作業速度を firm/min・人の単位で計算した。その結果、写真へのラベリング作業は平均的に 1.2firm/min・人の速度であり、ツールを利用したビデオへのラベリング作業も 13.2firm/min・人の速度である。図 6-39 にラベリング作業例を記している。写真ラベリングは写真ごとに映している対象物をひとつずつ手作業でマークすることで、映している対象物の数と画面の質量によって作業速度が大きく影響される。ビデオラベリングは画像が連続的な形になるので、作業自体は対象物が出現する時点の手動マークとそれ以降の自動ラベリングになる。ビデオラベリングは主にツール作業になるため、作業速度はツールの作動状況で大きく影響される。



(a) 写真ラベリング

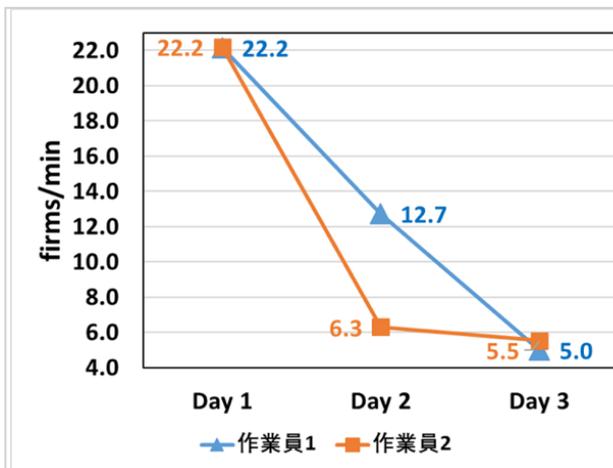


(b) ビデオラベリング

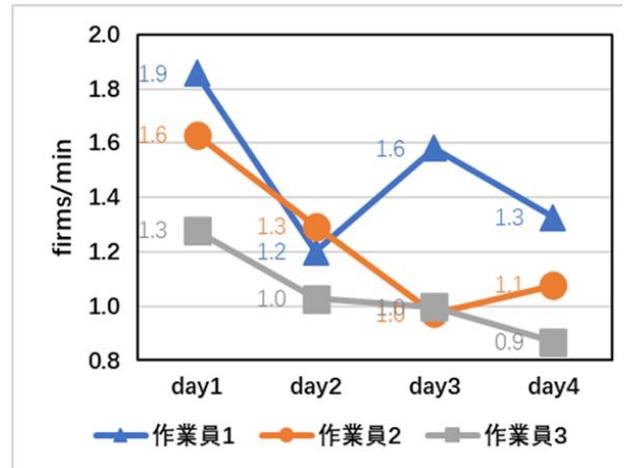
図 6-39 ラベリング作業例

AI 識別率を向上させるにはできるだけ多くの教師データを作成する必要があるが、1 万点の写真データをラベリングするには約 139 時間の作業が必要となる。

- 下記図 6-40 にラベリング作業の速度推移を記している。作業員が同時にラベリングを行われている日のデータのみを抽出しているため、日数が少なくなっている。各作業員の作業速度は経験による変化が少なく、担当する画像の質(写真)と利用するラベリングツールの稼働状況(ビデオ)によって作業速度が大きく変動する。
- 上記の現状を踏まえ、作業員のミスによって、教師データとして利用できないフレームも混入しているため、最終的に教師データの作成速度は更に低下している。データセットに混入した利用できないフレームの削除は技術者が基準を設定し、1 枚ずつ各フレームをチェックする以外に方法がない。



(a) ラベリング作業速度(ビデオ)



(b) ラベリング作業速度(写真)

図 6-40 ラベリング作業速度

### (3) 作成された教師データによるコンクリート塊選別 AI モデルの構築

#### (a) AI トレーニング効果

教師データによるトレーニング効果を適合率(Precision)と再現率(Recall) によって評価を行う。

- 適合率とは AI が行った複数の予測のうち、正解する物と適合する比率。
- 再現率とは AI が行った予測は画面上にある正解の対象物を何パーセント表現できているかを現す。
- 実験により取得した従来の作成方法で作られた教師データを基にトレーニングした AI は図 6-41 のグラフに記している様に、適合率約 55%、再現率約 63%の結果を得られた。

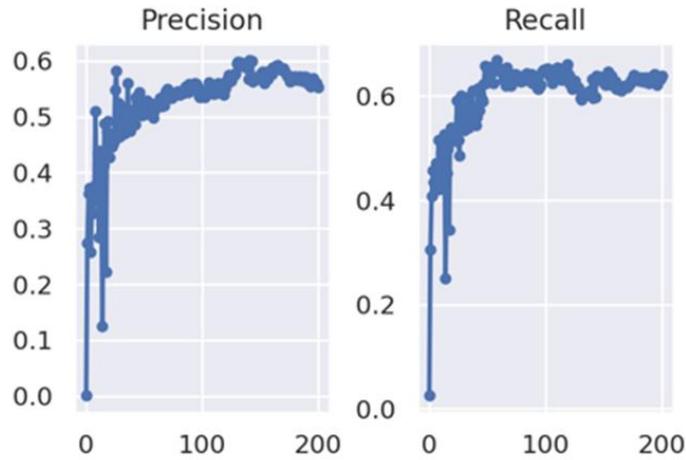


図 6-41 AI トレーニング実験結果

(b) AI のトレーニング効果が良くない原因

- ラベリング作業時に発生したヒューマンエラー(コンクリート塊ではない物を誤ってラベリングした、対象物の輪郭線をよく見極めていなかった等)が AI に学習された。
- トレーニングに利用した教師データが不足している。今回のトレーニングには 2.7 万フレームのコンクリート塊教師データを利用したが、AI トレーニングにとっては少ないデータ数であり、さらなる精度向上には 10 万フレーム単位の教師データが必要と思われる。
- AI に識別させる画面が複雑過ぎる可能性もある(図 6-42)。今回の AI トレーニング効果を評価するために利用したテスト画像は建廃処理工場の選別ライン上で撮影した画像で、画面上に映している廃棄物の品目は複数存在し、対象物の出現も重なりが多い状態にある。AI にとっては背景の違いによって判断ミスする可能性もある。



図 6-42 AI 識別画面例

(4) 画像診断 AI を廃棄物選別に活用するための考察

現状、廃棄物選別作業への画像診断技術の導入は推進されているが、教師データそのものへの検討は不足していると思われる。生産工場や医学部の画像 AI 教師データは背景が清潔で、画面上に記す対象物も固定した性状で流れてくる状況と異なり、廃棄物の画像データは廃棄物の性状を統一す

る事は不可能と思われる。そこで、廃棄物選別 AI に適合する教師データの取得方法に関する研究が必要と思われる。

教師データ取得段階においては、データの違いによるメリットとデメリットは把握できているが、AI のトレーニング効果に対するデータは取得されていない状態であり、今行われている画像データの取得方法が適切である保証ができない。また、画像データ取得後の教師データ作成作業においても、作業自体は作業員の判断によって行うことであるが、画面上からの材質識別が困難であり、ラベリングした物が対象物である保証ができない。そこで、廃棄物選別 AI の教師データ作成作業にマニュアルや実物による作業員教育が必要と思われる。

AI トレーニング効果については、引き続き適合率と再現率の向上を目指す必要があり、それを達成するには教師データの質と量を総合的に考慮する必要があると思われる。

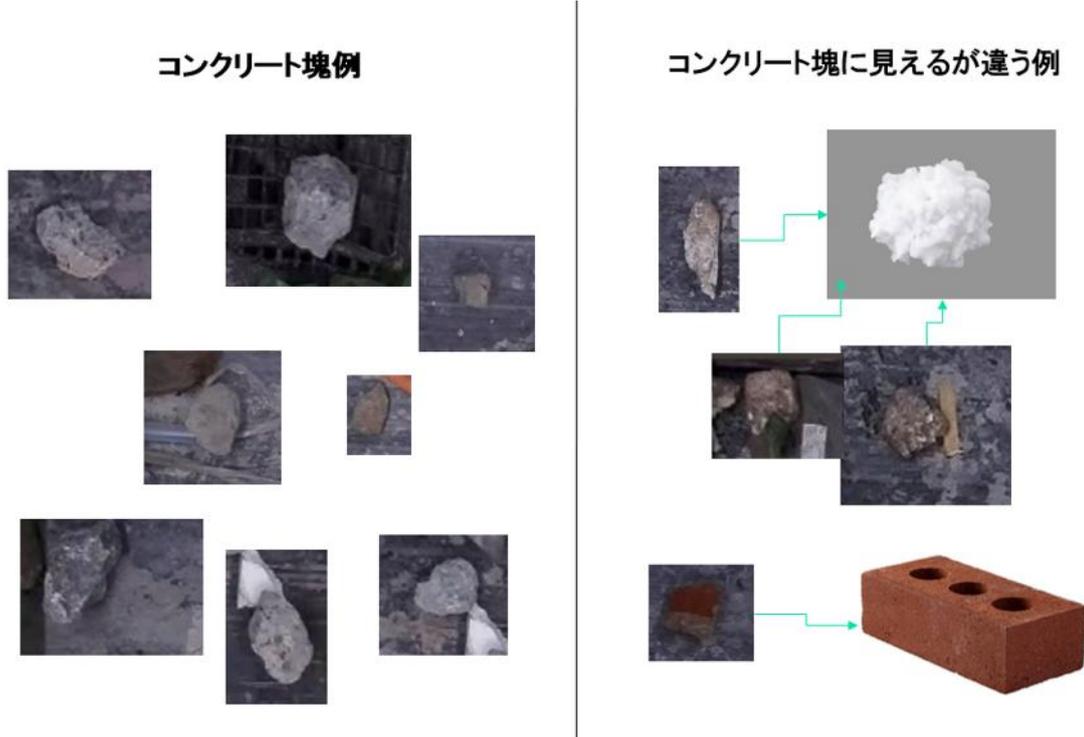


図 6-43 コンクリート塊の画像マニュアル例

#### 6-4-2 教師データの特徴に関する検討

廃棄物処理分野に AI 画像識別技術を活用するための課題を把握し、2.7 万フレームの教師データを作成した。今後、画像識別 AI の教師データ取得・作成作業をより効率的に行うため、教師データの特徴が AI のトレーニングに与える効果を分析する必要があると考え、実験を行った。

##### ①教師データ分類実験

###### (a) 教師データ分類の概要

本研究では、コンクリート塊教師データの作成時に直面した問題を踏まえ、今回取得した教師データを基に、「画面上に映している対象物の数量」、「教師データとなる画面上の対象物が影の下にあるか否か」、「画面上の対象物は輪郭線を全部目視できるか否か」の特徴によって分類を行った。各特徴について、データサンプルを以下の基準により 1000 枚ずつ抽出することで、本来の教師データの組成を把握することができた。また、サンプル抽出後には、各サンプルを教師データとして使い、基準ごとに画像識別 AI モデルをトレーニングした。

画面上に映している対象物の数量に関する基準分けはラベリングした対象物の数量を「一つのみ」、「2～5 個」、「6 以上」の 3 ランクに分類した。教師データとなる画面上の対象物が影の下にあるか否かについては、画面上に映しているラベリングした対象物が一つでも影に入っていれば「影あり」と分類し、画面上の全ての対象物が影の外にある時のみに「影なし」と分類される。画

面上の対象物は輪郭線を全部目視できるか否かについては、画面上の対象物の全体像が目視で確認できる物を「全貌が映っている」に分類し、全対象物の内に一つでも輪郭線が一部でも他の物にかぶられていたら「全貌の一部が映っている」に分類される。

表 6-26 教師データ分類と元データに占める比率

データ特徴	分類	基準	比率
対象物数量	ア	一つのみ	0.25
	イ	2～5	0.57
	ウ	6以上	0.18
影の有無	①	影あり	0.46
	②	影なし	0.54
出現状態	a	全貌が映っている	0.60
	b	全貌の一部が映っている	0.40



(ア) 対象物一つ



(イ) 対象物 2～5



(ウ) 対象物 6以上

図 6-44 対象物数量の分類イメージ



① 影あり



② 影なし

図 6-45 影の有無の分類イメージ



(a) 全貌が映っている



(b) 全貌の一部が映っている

図 6-46 出現状態の分類イメージ

分類後 AI トレーニングは各分類を教師データとして扱い、テスト用データは分類していない元データ 2.7 万から収集したものである。また、各 AI モデルのテストに利用するテストデータは全て同一セットに限定することで、本実験の有効性を確保した。

(b) 分類後の実験結果

画面上の対象物数量分類の実験結果：

ア：画面上に一つだけ対象物を映している教師データでトレーニングした AI モデルは平均的に適合率 35%、再現率 38%となった。

イ：画面上に 2-5 個の対象物を映している教師データでトレーニングした AI モデルは平均的に適合率 39%、再現率 49%となった。

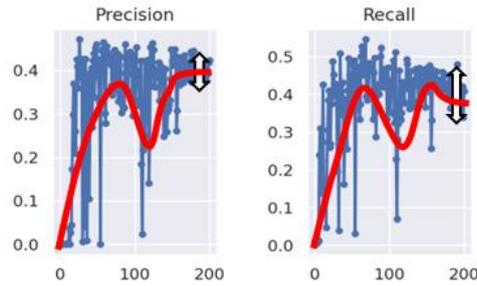
ウ：画面上に映している対象物が 6 個以上の教師データでトレーニングした AI モデルは平均的に適合率 38%、再現率 37%となった。

画面上に 2-5 個の対象物を保有している教師データの訓練効果が一番安定して、高い適合率と再現率を保有している。



(ア) 対象物一つ

(イ) 対象物 2~5



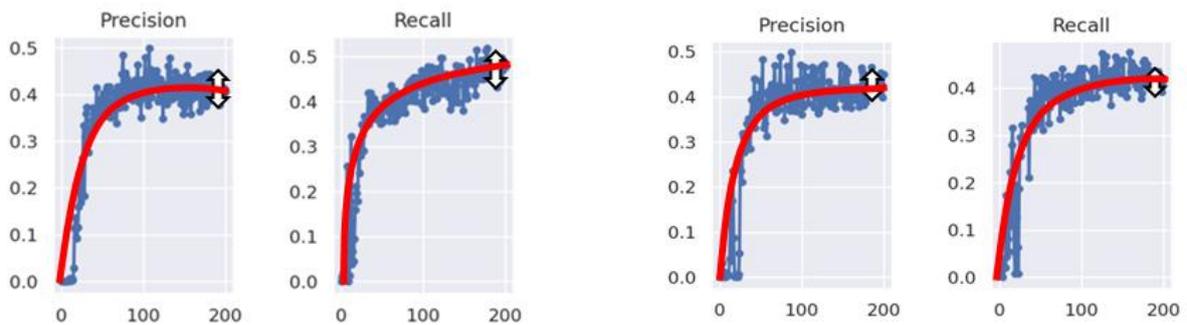
(ウ) 対象物 6 以上

図 6-47 対象物数量分類の AI トレーニング結果

#### 影の有無分類の実験結果

- ①：影ありの教師データ分類でトレーニングした AI モデルは平均的に適合率 40%、再現率 48%の結果となった。
- ②：影なしの教師データ分類でトレーニングした AI モデルは平均的に適合率 40%、再現率 40%の結果となった。

影の有無は訓練効果の安定性に影響が小さいが、影ありの教師データを使うことで、より高い再現率を取得できた。



①：影あり

③：影なし

図 6-48 影の有無分類の AI トレーニング結果

#### 対象物の出現状態の実験結果

- a：画面上に対象物の全貌を映している教師データでトレーニングした AI モデルは平均的に適合率 40%、再現率 50%の結果となった。
- b：画面上に対象物の一部を映している教師データでトレーニングした AI モデルは平均的に適合率 35%、再現率 39%の結果となった。

対象物の全貌を映している教師データの訓練効果がより高い適合率と再現率を得られた。

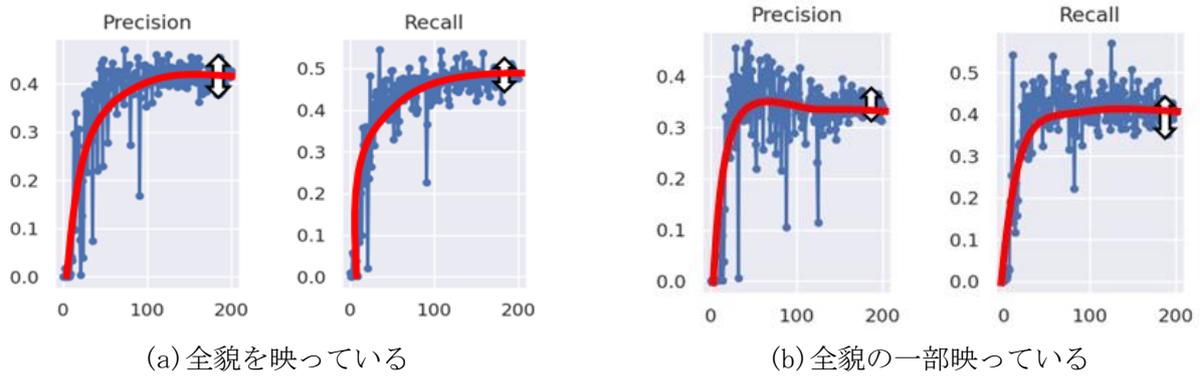


図 6-49 出現状態分類の実験結果

## ②データセットを組み合わせた AI モデル訓練実験

### (a) データセット組み合わせの概要

本研究は教師データ分類実験を基に、各種データセットの組合せが AI モデルのトレーニング効果に与える影響を判断するため、上記のデータセットを 50 : 50 の比率で教師データを再構築し、各特徴による AI トレーニング効果を検証する。トレーニング効果の評価は、組み合わせ前に好ましい結果を取得できた「イ」、「①」、「a」と比較する。

対象物数量分類の組み合わせ : 「ア+イ」、「ア+ウ」、「イ+ウ」

影の有無分類の組み合わせ : 「①+②」

出現状態分類の組み合わせ : 「a+b」

### (b) 教師データ組み合わせの実験結果

#### ○対象物数量分類の組み合わせの訓練結果 :

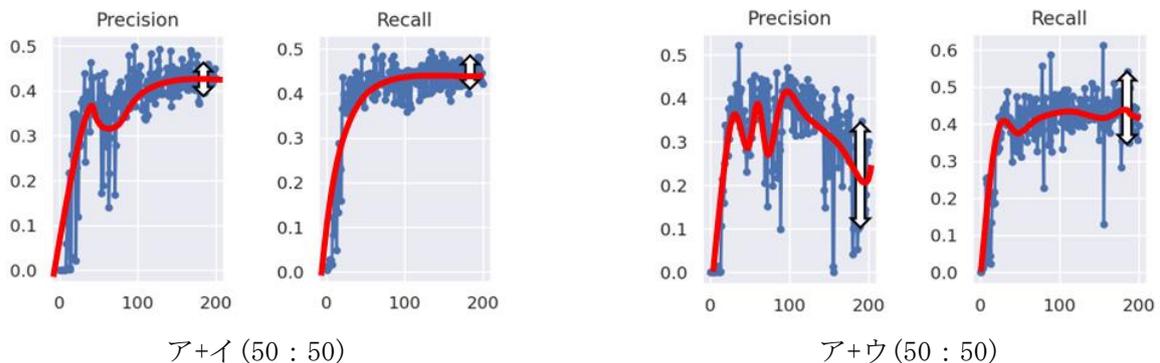
ア+イ : 組み合わせ後の AI モデルは適合率 42%、再現率 42%の結果となった。

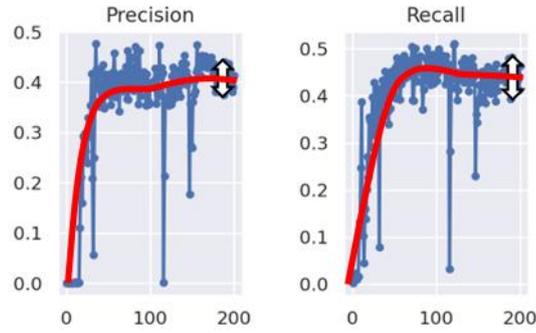
組み合わせ後の訓練効果は安定性と適合率を改善していて、再現率は(イ)のみより少し悪化した。

ア+ウ : 組み合わせ後の AI モデルは適合率 24%、再現率 40%の結果を記した。

組み合わせ後の訓練効果は安定性と適合率が単独訓練より悪化していて、再現率は影響が小さい。

イ+ウ : 組み合わせ後の AI モデルは適合率 39%、再現率 44%の結果を記した。組み合わせ後の訓練効果は安定性が(イ)の単独訓練より悪化している。



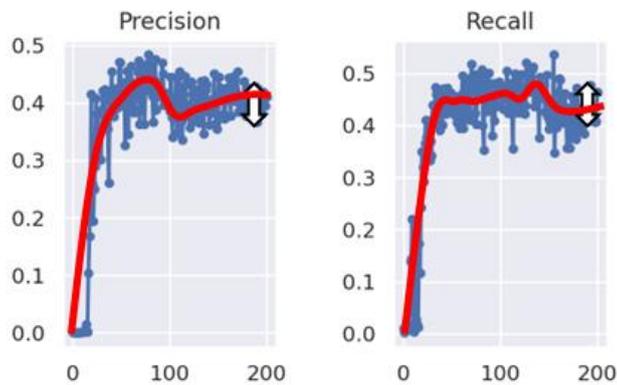


イ+ウ (50 : 50)

図 6-50 対象物数量分類の組み合わせ訓練結果

○影の有無分類の組み合わせの訓練結果

①+②：組み合わせ後の AI モデルは適合率 42%、再現率 42%の結果となった。  
組み合わせ後の訓練効果は再現率と安定性が単独訓練より少し悪化した。

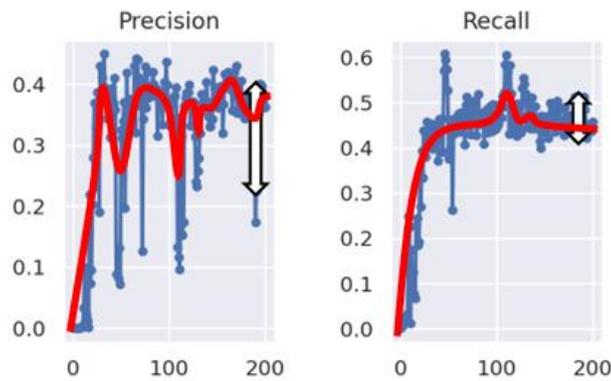


①+② (50 : 50)

図 6-51 影の有無分類の組み合わせの訓練結果

○出現状態分類の組み合わせの訓練結果

a+b：組み合わせ後の AI モデルは適合率 38%、再現率 42%の結果を記した。  
組み合わせ後の訓練効果は適合率・安定性が悪化、再現率は(a)の単独訓練より少し悪化した。



a+b (50 : 50)

図 6-52 出現状態分類の組み合わせの訓練結果

教師データ分類後の 50:50 比率での実験結果から見ると、最も好ましい教師データの特徴は画面上に 2-5 個の対象物を映し、対象物の一部が影に入っていて、全体が映っている教師データと思われる。

### ③教師データ分類実験による考察

本実験により、廃棄物処理分野の選別ラインにおいて好ましい教師データの特徴は「影あり」と「全体が映っている」と確認された。画面上に映している対象物の数量については、「2~5 個」が最も良い訓練結果が確認されたが、「一つのみ」分類との比較は教師データのフレーム数を同一したものであり、教師データ内の対象物の数量を把握できていないため、引き続き検討が必要と思われる。しかし、同一画面上に 6 個以上の対象物を表しているものは教師データとして効率が悪いことを把握できた。

また、本実験で行われた特徴の分別は、画像識別 AI トレーニング用教師データが保有する特徴のごく一部であり、引き続き、「背景の違い」や「汚れの有無」などの特徴を中心とするトレーニング実験が必要と思われる。

## 6-5 エリアマネジメント的なアプローチによる廃棄物回収シミュレーション

### 6-5-1 シミュレーションを行う背景とシミュレーション条件

合理的な分別を行っただけではリサイクル率の向上につながらない。これは都内の業務ビルにて現場調査を実施した際に、テナント内部で複数に分別を行った後、回収する際に複数の分別をまとめて 1 台のパッカー車で回収している事例があった。また、テナントごとで異なる分別を実施していた。そこで、パッカー車の搬出品目を変更することで、全体のリサイクル率の変化を算出する。加えて、パッカー車の走行による温室効果ガスの排出量の変化と掛け合わせて算出することで、総合的に環境負荷の低減に貢献できる分別品目を算出することを目的としている。ここでは、シミュレーションによってその効果を算出する。シミュレーションについて、Waste Force という自動配車ソフトを使用して行う。

シミュレーション条件：

- 本事業では排出現場からの搬出からリサイクル工場までの運搬を評価対象とする。
- 本シミュレーションによる評価方法を以下に示す。
  - 分別方法とごみ質の変化が運搬作業に与える影響を回収時間で評価する。
  - 分別方法の変更がリサイクル量に与える影響を重量ベースで評価する。
- 都内 100 か所の排出現場から計 20 万 t の廃棄物を回収する。  
(年間に排出される事業系の廃棄物の総量から全国の事業所の数と年間の日数で割った数から算出)
- 各事業所で排出される廃棄物の量は協力事業者から提供したごみ排出量を基に、表 6-27 に記載した分別品目ごとの割合で、総排出量 20 万 t に拡大推計した。この割合は 2023 年度に調査した事業所から排出された廃棄物・循環資源の容積割合から算出したものである。
- 計 20 台のパッカー車で廃棄物を回収し、出発点と終点は全車両同じとし、リサイクル施設への運搬が完了した後、終点に全車両を集めることとする。
- 本シミュレーションに使用する用語の解釈：
  - 施設設定：実際の住所を入力しているが、施設の立地は仮想である。
    - ◆ 排出現場(100 施設)：  
ある事業者が提供した東京 23 区内 100 か所の事業所の住所を使用する。
    - ◆ 選別施設(1 施設)：  
浮間舟渡にあるソーティングセンターとして、廃プラと飲料容器を受入れる。
      - 廃プラの選別：RPF 原料の適合物と不適合物を分別する。
      - 飲料容器の選別：PET・ビン・缶に分別する。

- ◆ リサイクル施設：循環資源の処理工場であり、運搬作業の最終目的地。
    - RPF 製造施設(1 施設)：
      - 新木場にある RPF 製造施設として、RPF 原料に適するもののみを受入れる。
    - PET リサイクル施設(1 施設)：
      - 竹ノ塚にある PET リサイクル施設として、PET のみを受入れる。
    - ビンリサイクル施設(1 施設)：
      - 赤羽にあるビンリサイクル施設として、ビンのみを受入れる。
    - 缶リサイクル施設(1 施設)：
      - 越谷にある缶リサイクル施設として、缶のみを受入れる。
  - ◆ 処理施設(1 施設)：
    - 川崎にある焼却施設として、可燃ごみと RPF 原料に適さないものを受入れる。
- 分別品目設定：
- ◆ 可燃ごみ：RPF 原料適合物の有無にかかわらず、全て焼却処理される前提で回収するもの。
  - ◆ 廃プラ：RPF 原料適合物と不適合物が混在している状態で回収するもの。
  - ◆ 飲料容器：PET・ビン・缶が混合状態で回収されるもの。
  - ◆ 可燃ごみ中の RPF 不適合物：RPF 原料に適さないものであり、全て焼却処理される前提で回収するもの。
  - ◆ 可燃ごみ中の RPF 適合物+廃プラ：RPF 原料に適するものとして、RPF 生産工場に搬入されるもの。
  - ◆ PET：ペットボトルのみを分別したもの。
  - ◆ ビン：ビンのみを分別したもの。
  - ◆ 缶：缶のみを分別したもの。
- リサイクル工場の受け入れ条件に達していない分別品目は選別施設で選別作業を行ってから品目別に該当するリサイクル施設へ搬出する。
  - 最終搬出先は品目別に 5 施設(処理施設(焼却)、リサイクル工場(RPF 生産、PET、瓶、缶))とする。全条件における搬出先工場の住所は同じ場所に固定する。
  - 温室効果ガスの排出量とリサイクル可能割合の変化を総合的に示すスコア(C)を検討した。このスコアが高いとリサイクル可能なごみの割合が高くかつ温室効果ガスを輩出しにくいことから好ましい回収方法になると考える。そのスコアの算出方法は以下の式である。

$$C = \frac{B}{A} \quad (1)$$

A:温室効果ガスの排出量[t] B:リサイクル可能割合[%]

- 図 6-53 に本シミュレーションに使用する 5 つのパターン別の運搬ルートを示し、矢印の色は排出現場の分別品目で分けている。
- シミュレーションに使用した変数：
  - 5 種類の搬出条件を表 6-28 に示す。
    - ◆ 条件①、②は現在の一般施設に使用されている分別手法で搬出する時の条件である。
    - ◆ 条件③④⑤は 6-2-2 節に紹介した研究室内で検証を行った合理的な分別で用いた分別手法で分けたものを搬出する時の条件である。

- リサイクル可能割合
  - ◆ 処理施設に運搬する場合：60%。
  - ◆ 選別施設からリサイクル施設に運搬する場合：80%。
  - ◆ 直接リサイクル施設に運搬する場合：100%。

表 6-27 事業所の廃棄物の分別ごとの廃棄割合

分別品目	可燃ごみ	廃プラ	ペットボトル	ビン	缶
割合	50%	11%	22%	11%	6%

次に、シミュレーションする変数である。以下の表 6-28 にある 5 種類の分別で回収を行った際の搬出先と手選別を必要としない廃棄物の量を算出する。

表 6-28 比較検証する分別内容

パターン	搬出品目	搬出先	パッカー車の台数 台	回収量の 割合 %
①	可燃ごみ	処理施設	10	50
	廃プラ + 飲料容器	選別施設→リサイクル施設(4 施設全部)	10	50
②	可燃ごみ	処理施設	8	50
	廃プラ	選別施設→RPF 製造施設	8	11
	飲料容器	選別施設→PET、ビン、缶リサ イクル施設	4	39
③	可燃ごみ中の RPF 不適合物	処理施設	8	15
	可燃ごみ中の RPF 適合物+廃 プラ	RPF 製造施設	8	46
	飲料容器	選別施設→PET、ビン、缶リサ イクル施設	4	39
④	可燃ごみ	処理施設	4	50
	廃プラ	選別施設→RPF 製造施設	4	11

	ペットボトル	PET リサイクル施設	4	22
	缶	缶リサイクル施設	4	11
	ビン	ビンリサイクル施設	4	6
⑤	可燃ごみ中の RPF 不適合物	処理施設	4	15
	可燃ごみ中の RPF 適合物+廃 プラ	RPF 製造施設	4	46
	ペットボトル	PET リサイクル施設	4	22
	缶	缶リサイクル施設	4	11
	ビン	ビンリサイクル施設	4	6

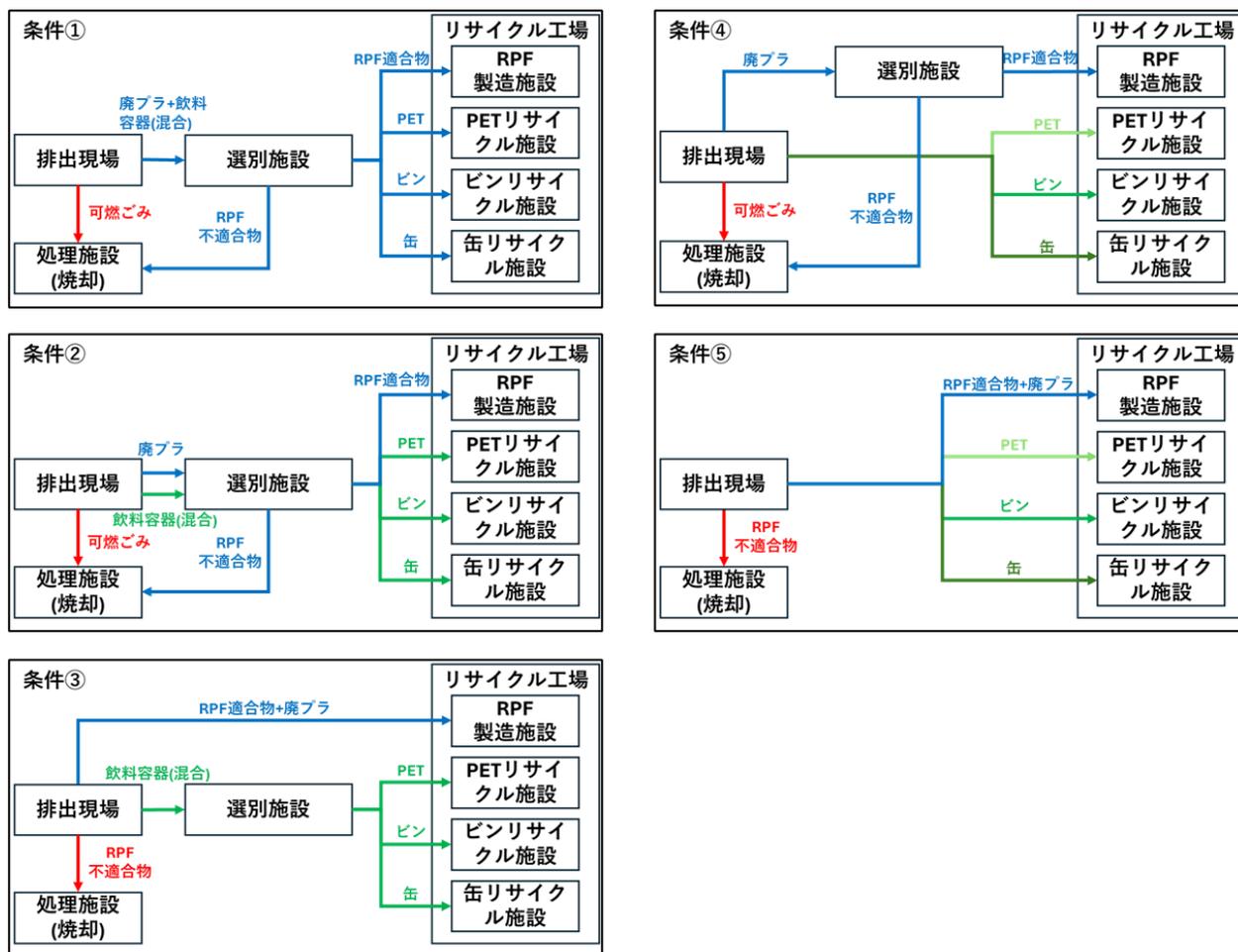


図 6-53 5条件別の運搬ルート

### 6-5-2 シミュレーション結果とそのまとめ

以上の条件から算出した結果を示す。まずは、分別表示ごとのリサイクル率と温室効果ガスの排出量の算出結果を以下の表 6-29 に示す。

表 6-29 分別表示の変更によるシミュレーション結果

条件	搬出品目	総回収時間 時間	走行距離 km	A: 温室効果 ガス排出量 t	B: リサイクル 可能割合 %	スコア B/A	条件合計 スコア
①	可燃ごみ	26 時間 10 分	617.2	306.2	60	0.1960	0.5557
	廃プラ + 飲料容器	19 時間 08 分	448.2	222.4	80	0.3598	
②	可燃ごみ	25 時間 45 分	599.9	297.6	60	0.2016	1.050
	廃プラ	17 時間 23 分	428.2	212.4	80	0.3766	
	飲料容器	17 時間 59 分	442.3	211.9	100	0.4718	

条件	搬出品目	総回収時間 時間	走行距離 km	A:温室効果 ガス排出量 t	B:リサイクル 可能割合 %	スコア B/A	条件合計 スコア
③	可燃中のR P F 不適合物	25 時間 03 分	602.0	298.7	60	0.2009	1.065
	可燃のR P F 適 合物+廃プラ	20 時間 30 分	514.2	255.1	100	0.3920	
	飲料容器	17 時間 59 分	442.3	211.9	100	0.4718	
④	可燃ごみ	25 時間 28 分	627.4	311.3	60	0.1928	1.648
	廃プラ	17 時間 37 分	434.4	215.5	80	0.3712	
	ペットボトル	20 時間 18 分	500.5	248.3	100	0.4027	
	ビン	23 時間 04 分	562.5	279.0	100	0.3584	
	缶	25 時間 49 分	624.4	309.8	100	0.3228	
⑤	可燃注のR P F 不適合物	24 時間 58 分	609.3	302.3	60	0.1985	1.657
	可燃のR P F 適 合物+廃プラ	20 時間 42 分	538.5	267.2	100	0.3743	
	ペットボトル	20 時間 18 分	500.5	248.3	100	0.4027	
	ビン	23 時間 04 分	562.5	279.0	100	0.3584	
	缶	25 時間 49 分	624.4	309.8	100	0.3228	

表 6-29 を整理し、以下の結果を得た。

表 6-30 条件ごとの総リサイクル

条件	回収時間	リサイク ル可能量 t	廃棄量 t	リサイク ル量 t (飲料容 器抜き)	リサイク ル可能重 量割合 % (飲料容 器を除 く)
①	45 時間 18 分	14	6	6.2	50.82
②	61 時間 7 分	15.56	4.44	7.76	63.61
③	63 時間 32 分	19.2	0.8	11.4	93.44
④	112 時間 17 分	15.56	4.44	7.76	63.61
⑤	114 時間 51 分	19.2	0.8	11.4	93.44

表 6-29 と表 6-30 に示した結果から、総廃棄量・回収場所・パッカー車の台数を固定した場合、以下の知見を得た。

分別品目の数が制限される場合(3 分別以下) :

- ①と②を比較すると飲料容器を別の搬出品目として分けることで回収時間が 40%ほど増加したが、10%ほどのリサイクル可能な重量が増えた。
- ②と③を比較することで、可燃ごみや廃プラに含まれるリサイクルに適した素材を適切に分別することで回収時間を変えず、リサイクル可能な重量を 20%増加できる。

- ①と③を比較すると、「可燃ごみ」と「それ以外」の搬出品目から「RPFに適するもの」、「RPFに適しないもの」と「飲料容器」に変更しそのまま回収することで回収時間と、リサイクル可能な重量はともに40%近く増加することがわかる。

分別品目の数が制限されない場合：

- 飲料容器を「PET」、「ビン」、「缶」ごとに回収する効果分析：
  - ②と④を比較すると、リサイクル可能な重量は変化しないが、品目ごと搬出の運搬時間が84%増加する。
  - ③と⑤を比較すると、リサイクル可能な重量は変化しないが、品目ごと搬出の運搬時間が81%増加する。
- 飲料容器はAI自動選別ロボットで選別できるとすれば、「PET」、「ビン」、「缶」を「飲料容器(混合)」として排出現場から搬出すると、リサイクル量を維持したまま、回収効率を高めることができる。
- しかしながら、中間処理施設を経由せず直接リサイクル施設に運搬できる観点から、飲料容器を種類ごとに回収する場合、回収作業全体のコストが低くなる可能性があるため、今後の課題として、パラメータに選別作業の負荷とコストを追加して検証することが必要と思われる。

## 6-6 廃プラスチック類のDB構築について

プラスチックの光学選別が発展している中、廃棄物由来のプラスチックを実物データと光学データが照会できるデータベースが不足しているため、本事業では使用済みプラスチックリサイクルの実態調査と共に廃プラのサンプルを採取し光学データを吸光度と反射度の側面でスペクトルデータを収集し、データベースを構築した。

データベースには各調査現場から集めた廃プラを実物、吸光度スペクトルと反射度スペクトルの結果を現場と樹脂判別ハンディセンサーの判定結果を元に分類し、データ記録と分析を行った。

### 6-6-1 吸光度スペクトルデータに関する分析

本事業で取得した吸光度スペクトルデータは樹脂判別ハンディセンサーを利用し、センサーの判定結果と分析に使用した吸光度データを可視化して、集まったデータをPP、PE、PS、PVC、Unknown、その他の6種類に分別した後、排出現場別に回収したプラスチックの吸光度スペクトルデータの波形分析を行った。その結果、サンプリング調査で入手した全種類の廃プラにおいて複数種の吸光度波形が確認された。この結果により、既存の光学選別技術を廃棄物分野に活用するためには判断結果の精度を分析する必要があると思われる。一例として、図 6-54 に硬質系 PVC 判定を得られたプラスチックの吸光度スペクトル波形を示す。

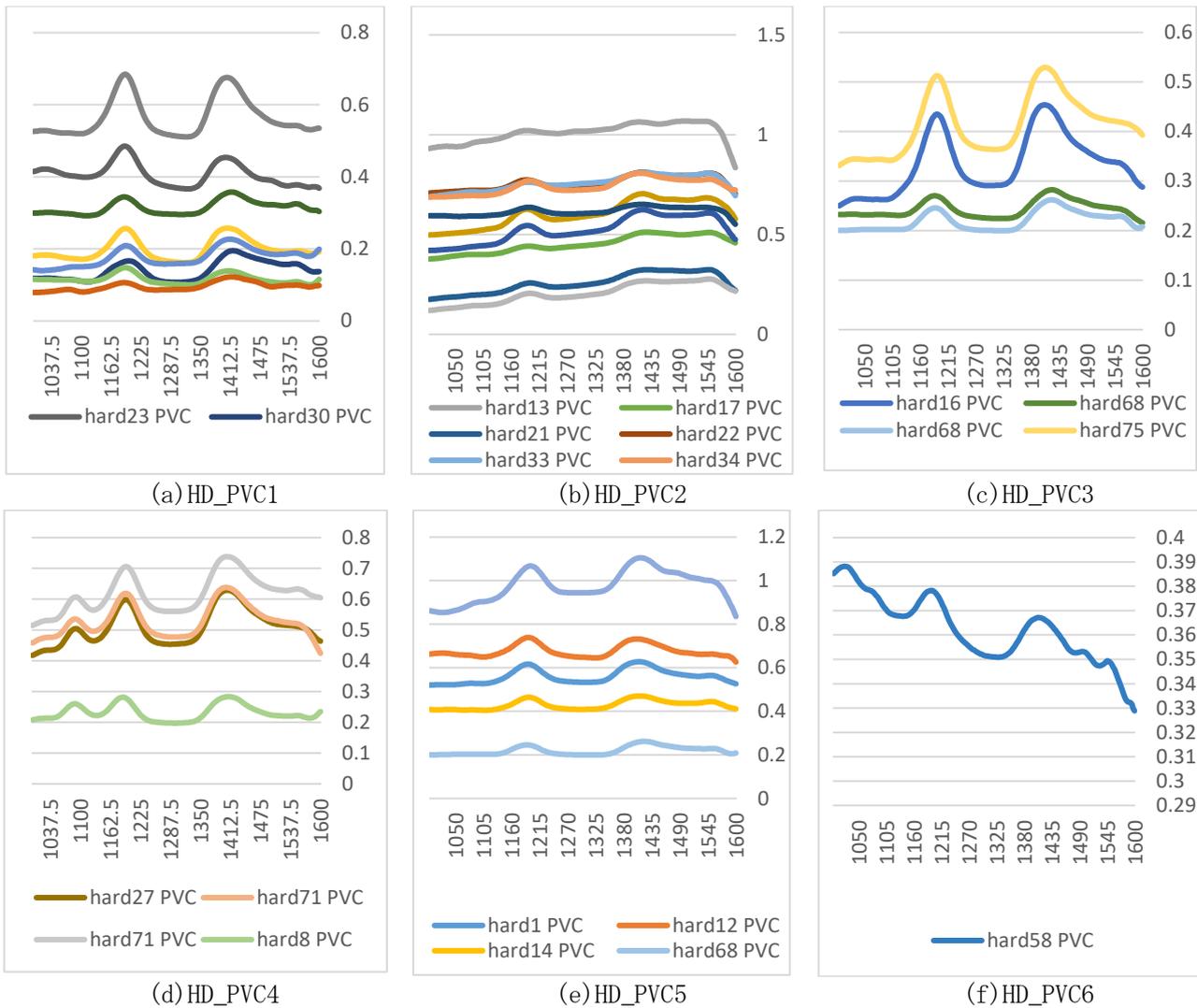
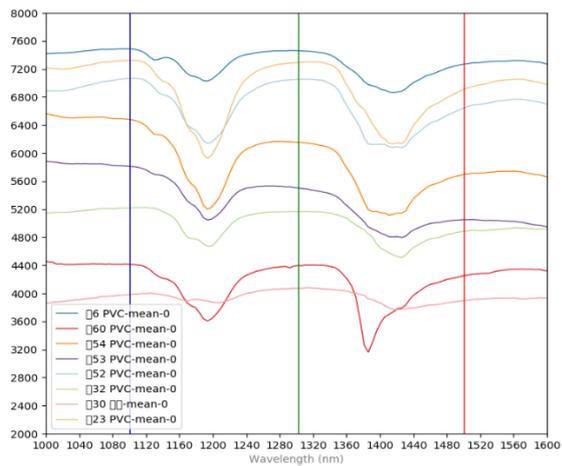


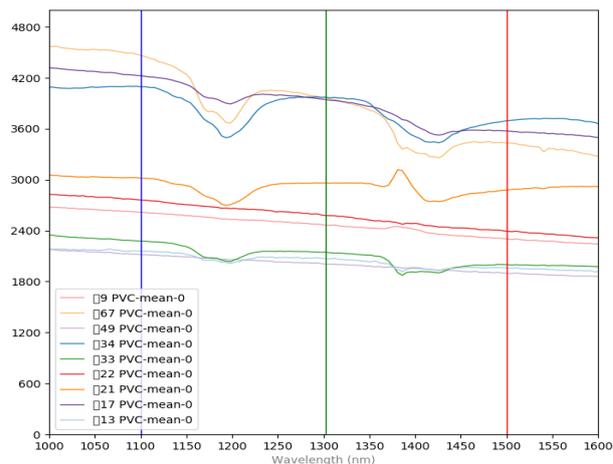
図 6-54 硬質系 PVC 判定を得られたプラスチックの吸光度スペクトル波形

### 6-6-2 反射度スペクトルデータに関する分析

本事業で回収した反射度スペクトルデータはハイパースペクトルカメラを用いて、実験開発室にて回収したプラスチックサンプルに対してデータ収集を行った。反射度スペクトルデータを吸光度スペクトルデータと比較検証ができるように、回収したスペクトルデータを吸光度スペクトルで分類できたプラスチックサンプルの反射度波形が見えるように可視化した。その結果、吸光度スペクトルで同じ波形を示しているプラスチックサンプルにおいても、複数種の反射度スペクトルの波形を確認できた。図 6-55 に硬質系 PVC の内類似した吸光度波形の判定を得られたプラスチックの反射度スペクトル波形を示す。



(a)HD\_PVC1 の反射度スペクトル波形



(b)HD\_PVC2 の反射度スペクトル波形

図 6-55 硬質系 PVC の内類似した吸光度波形の判定を得られたプラスチックの反射度スペクトル波形

回収できたサンプルの実物とスペクトルデータを比較すると、対象物の色が深くなるほど反射度の幅が小さくなることと、曲面から採取したスペクトルデータは平面で採取したスペクトルデータと異なってくる事を把握した。図 6-56 に HD\_PVC2 に分類された実物の写真を示す。



HD13



HD17



HD21



HD27



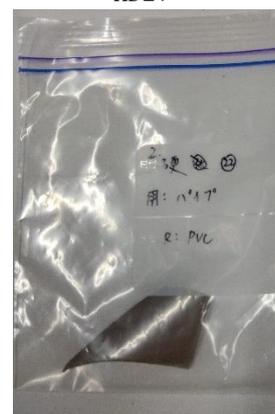
HD33



HD34



HD67



HD22

図 6-56 HD\_PVC2 に分類された実物の写真

### 6-6-3 回収した反射度スペクトルデータを基としたプラスチック選別技術の試み

反射度スペクトルデータを使用し、回収できた廃プラサンプルの材質を購入した標準サンプルを基準に機械学習及びAIによる類似度判定を行った。機械学習に使用した教師データは表 6-31 に示している計 17 個の標準サンプルから採取したスペクトルデータである。機械学習の訓練は Prediktera 社の Breeze を使い実施した。類似度判定では協力事業のエンジニアによって類似度判コードを作成し、PVC の分別に特化して、標準サンプル PVC2 を基準に設定した。図 6-57 に標準サンプル PVC2 の実物写真と反射度スペクトル波形を示す。

表 6-31 標準サンプルの詳細

プラスチック標準サンプル	サンプル数
ABS	3
PA	1
PC	2
PE	2
PET	1
PMMA	1
PP	2
PS	1
PVC	4

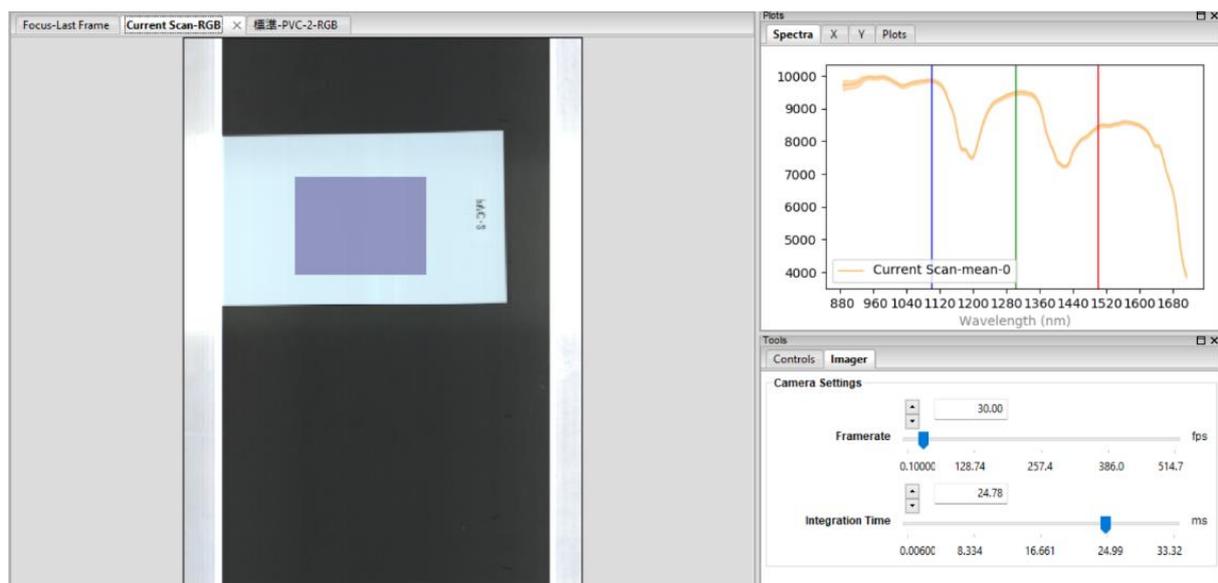


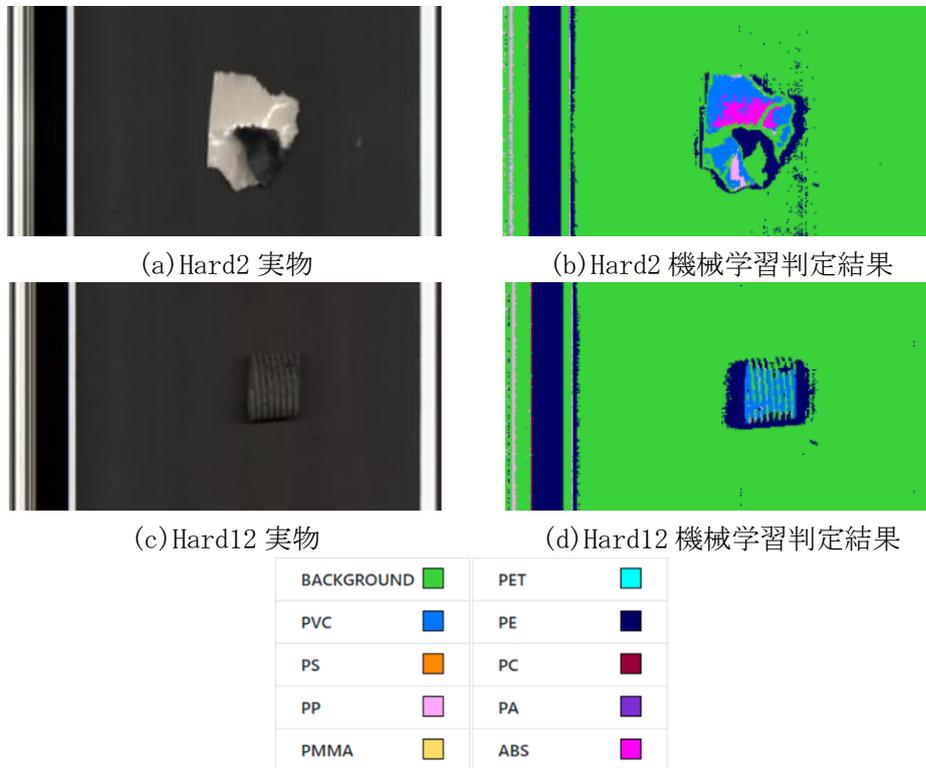
図 6-57 標準サンプル PVC2

機械学習は与えられたスペクトルデータを学習されたサンプルと比較し、ピクセル単位でスペクトルの判定結果を出力し、最終的には画面上により多く出現している判定結果を識別結果として対象物全体の判定結果を出力している。その結果、機械学習による判定結果と樹脂判別ハンディセンサーとの素材判定結果の違いが大きいことを把握した。図 6-58 に実物の一部を示すスペクトルデータを機械学習に判定させた結果を示す。図 6-58 に記している sample の名称は「採取現場+サンプル番号\_樹脂判別ハンディセンサーの判定結果」のフォーマットで記しており、最右列に機械学習の判定結果を記している。

Sample	Group	Image	Classification m...	Classification m...
Hard10_Unknown-...	PT_HD			PE
Hard11_Unknown-...	PT_HD			PP
Hard12_PVC-From...	PT_HD			PP
Hard13_PVC-From...	PT_HD			PP
Hard14_PVC-From...	PT_HD			PP
Hard15_PE-FromS...	PT_HD			PP
Hard16_PVC-From...	PT_HD			PVC
Hard17_PVC-From...	PT_HD			PP

図 6-58 実物の一部を示すスペクトルデータを機械学習に判定させた結果

より正確に機械学習手法によるプラスチック素材判定の結果を把握するため、対象物の全体が映っているスペクトルデータを使用し、再判定を行った。図 6-59 に実物のスペクトルデータを機械学習に判定させた結果の例を示す。ソフトの判定結果は画面上に記されている色の多さで出力されているため、背景であるベルトコンベアが多く映っている実物全体データではすべて Background に出力してしまうが、対象物のみを切り取ってみれば実物に対する判定結果は分析できる。



(e) 凡例

図 6-59 実物のスペクトルデータを機械学習に判定させた結果の例

Hard2 と Hard12 に対する判定結果から分析すると以下の知見が得られる：

- 均質で同じプラスチック対象物であっても機械学習では異なる判定結果が同時に出現する。
- 全体の一部を切り取って光学選別機で廃プラの素材判定を行うと判定結果の誤差が大きく見られる。
- 対象物と光源&カメラの距離が回収したスペクトルデータの精度に影響があって、形が多様な廃棄物から制度の高いデータを回収することが困難と思われる。

樹脂判別ハンディセンサーによる吸光度スペクトル判定と機械学習による判定結果が異なっている状況を踏まえ、よりシンプルに対象物のスペクトルデータの一部を純正品であるサンプルデータと類似度判定を PP, PE, PS, PVC, Unknown, ABS, PC, PET の 8 品目に対してそれぞれ類似度判定を行い、判定スコアが最も類似する純正品サンプルを最終的な判定結果とする。5 類似度では類似度判定結果が 0.08726 以下、10 類似度では類似度判定結果が 0.17 以下の物を PVC に判定する。ML\_Pure は純正品を教師データとしての機械学習判定である。プラスチックサンプルの手法別判定結果を表 6-32 に示す。

表 6-32 プラスチックサンプルの手法別判定結果

	Ricoh	ML_Pure	5 類似度	10 類似度
PP	88	235	103	128
PE	95	33	72	90
PS	19	1	0	0
PVC	40	10	21	52
Unknown	29	6	92	11
ABS	3	6	6	13
PC	3	1	0	0
PET	7	0	0	0
その他	10	2	0	0
計	294	294	294	294

手法別にデータ収集が不足しているものを除外した結果、採集したサンプルの内 294 サンプルに対して吸光度、反射度、機械学習の分析結果の横比べが実行できた。「その他」はサンプル数が少ない PLA, PMMA, PETG, PA, PBT, POM の合計である。Unknown 判定は対象物を検知できているが、材質が判断できないものを意味する。3 つの判別手法で PVC 判定が得られた対象物の一致性を分析するために、表 6-33 に 2 つ以上の手法の判定結果が一致する数を示す。

表 6-33 2つ以上の手法の判定結果が一致する数

	R:ML	R:5	ML:5	R:ML:5	R:10	ML:10	R:ML:10
PP	80	34	91	33	50	112	47
PE	4	26	18	2	31	26	2
PS	0	0	0	0	0	0	0
PVC	9	6	2	2	6	2	2
Unknown	1	13	3	1	0	0	0
ABS	0	0	5	0	1	6	0
PC	1	0	0	0	0	0	0
PET	0	0	0	0	0	0	0
その他	0	0	0	0	0	0	0
計	95	79	119	38	88	146	51

その結果を分析すると、全3つの分析方法のすべてにPVC判定を出している対象物は2つしかないことが判明し、廃プラのリサイクルに既存の光学選別が発揮できる効果は限られていると思われる。また、廃プラの排出現場から確実にプラスチックの種類を判定することができない。PVCの特定にはX線を利用した蛍光分析法と、焼いた銅線とプラスチックを接触した後に再度火にあてて炎色反応の有無を観察する手法が2つ存在しているが、どの手法も判定効率が低く、廃プラのリサイクル高度化への貢献は限られていると思われる。本事業に使用した教師データは限られているため、教師データを大量に導入することによってスペクトルデータに基づいた判別精度が向上する可能性はあるが、廃棄物から材質の特定ができる教師データの収集は困難であり、教師データの取得には動静脈連携が必要と思われる。スペクトルデータ収集時の対象物位置、高さ、折れ目、透明度、表面の反射程度によって回収したデータに影響が現れることを把握したため、リサイクル高度化に向けた検証にはこれらの数値をパラメータとして考慮することが必要と思われる。

#### 6-6-4 プラスチック DB 構築作業の結果まとめ

本事業で作成できたデータベースを使用し、実物、吸光度スペクトル、反射度スペクトルを横並びに分析すると下記結果を得られた。

- 廃プラの素材を確実に知っている者は生産者しかいない。
- 廃プラ中間処理施設において、確実にPVCを抽出できる手法はX線を利用した蛍光分析法と、焼いた銅線とプラスチックを接触した後に再度火にあてて炎色反応の有無を観察する手法が2つ存在しているが、どの手法も判定効率が低く、廃プラのリサイクル高度化への貢献は限られていると思われる。
- 既存のプラスチック識別装置は対象物と訓練されているサンプルとの比較で、学習済みサンプルとの類似度を判定しているが、学習の「正解率」を判断できる基準データが不足している。

- 廃棄物として集まるプラスチックは形、汚れ、サイズの変化が多く、本来の使い道を判別することも困難で、確実な素材判定をできる手段がないと思われる。
- 廃棄物の現場から採取したサンプルのみでプラスチック選別技術の開発は出来ないと考えられ、選別精度の高いAIを訓練するためには、動脈産業から材質判断ができるプラスチック製品のライフサイクルに辿って廃棄物として排出するまでのスペクトルデータを採取し、使用状況、汚れ、形の変化がスペクトルデータに対する影響を判明する必要があると思われる。
- 廃棄物資源循環分野の側面からプラスチックの光学選別手法を検証したところ、破碎・洗浄を実施しない限り、マテリアルリサイクルとケミカルリサイクルに必要とする単品化を実現できる、確実かつ効率よく廃プラの種類を識別できる手法はないと思われる。プラスチック燃料化に向けて、PVCのみを抽出する目標にたいして、基準値に対する検討は必要であるが「避けた方が良い」程度の判定であれば光学選別手法の使用は可能と思われる。
- 本事業で作成したDBはプラスチックの実物情報、吸光度・反射度スペクトルデータ、手法別の判定結果をまとめているため、今後のプラスチック判定技術の比較検証に活用できる。

## 第7章 総括

以下、本事業を通じて、得られた知見のうち、重要な点を要約して述べる。

### 7-1 技術的な観点からの成果と課題

本事業では、東京都の協力のもと、現場ニーズに立脚したロボット開発、実環境における実証試験及びそれらに基づく社会実装シナリオの検討を行った。

#### (1) 自律走行型ロボット

非接触型ごみ収集に関する独自の知見から、ごみ箱を運搬する機能を有する自律走行型ロボットの開発と実証を行った。実証試験を行った大学キャンパス、大規模商業施設、イベント施設、テーマパーク等の大型施設や公共施設等では、ごみ箱の「運搬」に伴う負荷が小さくなく、一定のニーズがあることを確認した。本事業を通じて、自律走行型ロボットの複数台制御に向けた基礎技術と知見を得ることができた。今後、自律走行型ロボットの開発のみならず、周辺システムとの連携も含めた技術開発と実証を順次進める計画である（図 7-1）。

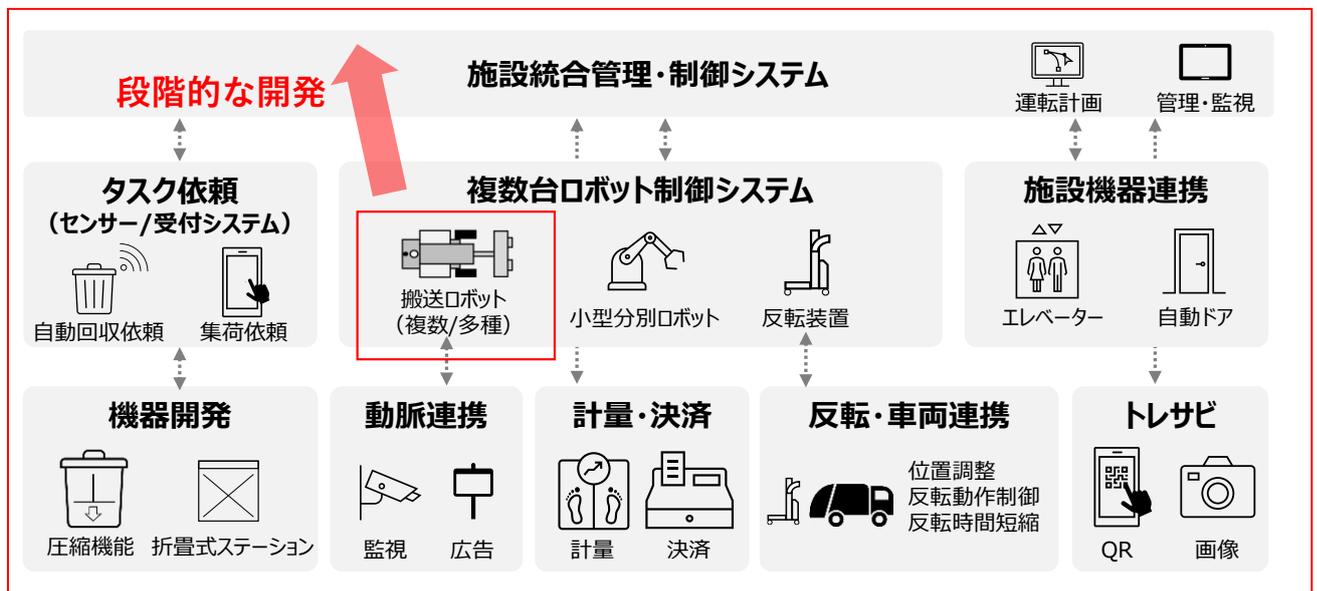


図 7-1 排出現場で活躍する選別支援システム・ロボットの将来像（再掲）

#### (2) AI を活用した選別ロボット

飲料容器と建設混合廃棄物を対象としたが、共通して言えるのは、高い認識精度を有する AI モデルと学習の方法論を構築できたのは、特筆すべき成果である。また、2024 年 9 月以降、検討に着手した LMM の導入可能性により、従来の DL 方式との差別化の方向性を見出すことができた点も成果といえる（図 7-2）。

今回、実証試験を行ったモデル別の成果と課題は下記のとおりである。

##### ●飲料容器自動選別ユニット

本事業では、大規模商業施設等のバックヤードに設置する想定で、コンパクトな飲料容器自動選別ユニットの開発を行ってきた。結果として、排出現場における実証を行うことはできなかったが、「コンパクト化」を念頭においた開発を行ってきた結果、既存の中間処理施設でも設置できる仕様のロボットを開発することができた。また、飲料容器の選別は、全国的にもニーズがあることが確認でき、今後、1 年以内での事業化の目途をたてることができた。DL 方式による選別ロボットのフラッグシップとして、実用化開発を進めていく計画である。

●建設混合廃棄物自動選別ロボット

さまざまな処理パターンが存在する建設混合廃棄物の中間処理のなかで、「二次選別ラインにおける木くずの選別」に焦点をあて、建設混合廃棄物自動選別ロボットの開発を行ってきた。結果として、現場での実証試験を行うところまで到達し、一定の成果を得ることができた。しかしながら、「量的」な能力が要求される建設混合廃棄物の選別ラインにあたっては、ロボットの選別能力（精度、処理能力）の不足がボトルネックとなり、社会実装に向けては、さらなる検討が必要であることが確認できた。また、PVCを選別するための手段として期待されていたハイパースペクトルカメラは、当初の想定よりも制約要因が多く、ラボスケールの実証にとどまる結果となった。

社会実装に向けては、後述するヒト共存型のコンセプトを定着させることや LMM やヒト型・協働型を含めた活用可能性を検討することが必要である（図 7-2、図 7-3）。



図 7-2 AI 選別ロボットの開発の方向性

テーマ名	R7年度	R8年度
① 定型作業ロボットの実用化開発 ・認識精度の向上にLMMを活用 ・統合・実用化モデルの構築	<ul style="list-style-type: none"> <li>VisionLLMモデルの選定、Prompt設計、テスト (ChatGPT4o, Llama3.2 90B, その他)</li> <li>反応速度を重視する物体検出モデルとLLMを統合するアーキテクチャの構築</li> <li>統合化システム開発 (AIモデルの切り替え機能搭載)</li> <li>実証実験</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実証実験</li> </ul>
② 高度利用ロボットの要素技術開発 ・LMMの活用可能性 ・VLA技術の活用可能性 ・AIアーキテクチャによる現場利用モデルの構築	<ul style="list-style-type: none"> <li>各ハードウェアを統合化するソフトウェアの開発</li> <li>ロボット制御システム開発</li> <li>Human-Robot Interaction (HRI) の開発</li> <li>実証実験</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実証実験</li> </ul>

図 7-3 本事業終了後の開発計画

## 7-2 ヒト共存型のコンセプト

LMM の活用可能性によって、本事業開始時点よりも AI 選別ロボットの可能性は広がったものの「ヒト共存」の重要性・必要性は変わらない。本事業では、リソースシフトの考えに基づく効果測定を試み、ロボット導入の効果測定の方法論の考え方を提示した (図 7-4)。今後、この考え方を定着させるためには、さらなるデータ収集やケーススタディを積み重ねていく必要がある。また、ロボット導入を念頭においた選別ラインの設計の方法論等も、今後、検討すべき課題である。

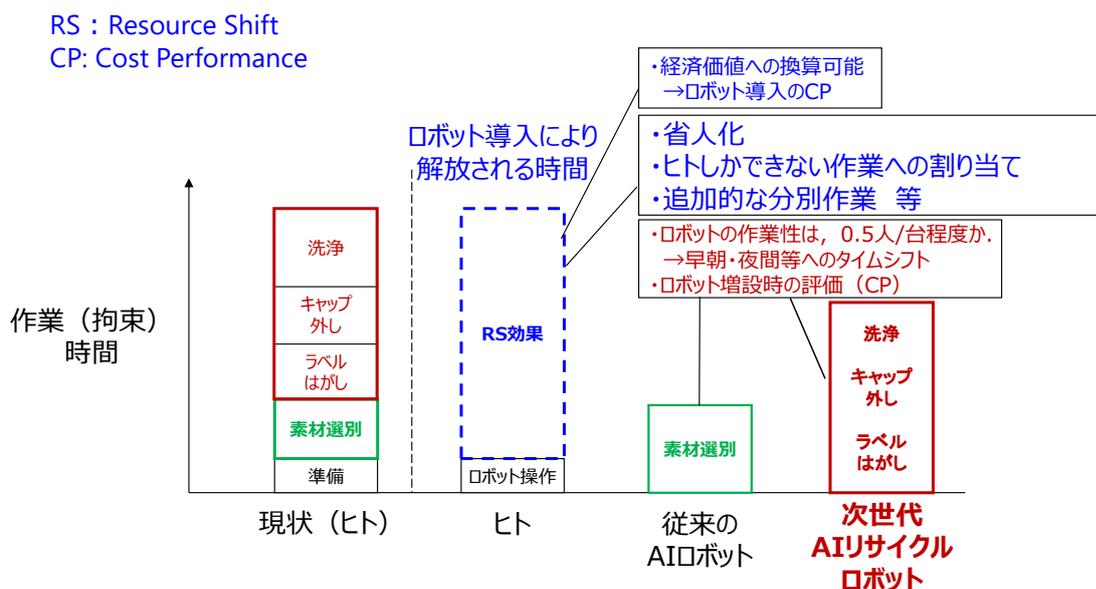


図 7-4 リソースシフトのコンセプト

### 7-3 社会実装に向けて留意すべき点

本事業で対象とした廃棄物・資源循環分野におけるAI選別ロボットは、成功といえる事例があるとは言い難く、業界内でもネガティブな評価が散見される。さらに、ロボットへの過度な期待もあり、現状の技術成熟度とのギャップも存在する（本事業の実証試験時に実施した意見交換会でもこうした場面があった）。本事業の取り組みによって、こうしたギャップを埋めるだけの成果が得られたとは言い難い。しかしながら、そのギャップを埋めるために必要なアプローチや視点・今後の方向性を提示できたことは重要な成果であると考えます。

近年のAIに関する技術の発展は目覚ましく、これまで不可能だと考えられていた作業も実現できるようになってきた。近い将来、最も自動化が難しいと考えられていた廃棄物・資源循環分野においてAIロボットが導入され、廃棄物処理・資源循環の現場における作業の効率化及び作業員の負担軽減、更には資源循環の高度化に貢献できる日が来ることを期待したい。