# 特集≫ 解体とリサイクル, 廃棄物処理

# 産業用ロボットを応用した建設廃棄物選別システム

# 中村 聡・井上大輔・白井菜月

建物の解体は事前調査,内装解体,躯体解体の順序で行われ,解体時に発生する建設廃棄物を解体作業員によって品目毎に分別しながら解体していく「分別解体」が基本となっている。そのため、コンクリート塊や建設発生木材は高い再資源化率や再資源化等率が保たれ、金属などの売却可能な有価物についても効率的な選別が行われている。一方で、廃棄物の不法投棄や廃棄物処理に対する労働力不足、解体時の作業環境改善など課題も多い。

本編では、解体工事における選別作業の効率化や安全性向上、廃棄物処理コストの削減を目的に、産業 用ロボットおよびロボットビジョンを用いて開発した建設廃棄物選別システムの概要を述べるとともに、 実際の解体現場から採取した建設廃棄物を用いて行った実証実験結果について述べる。

キーワード:解体工事,建設廃棄物,選別作業,ロボット,ビジョン

# 1. はじめに

近年、都市部における再開発事業の増加や高度経済 成長期に建てられた建物の更新時期などの理由から解 体工事が増加している1)。解体現場では、躯体を重機 によって破砕する際に発生する大量のコンクリート塊 から鉄筋やアルミサッシなどの金属くず、木くず、プ ラスチック廃材などを可能な限り重機や人の手により 分離・分別しながら作業を行っている。しかし、作業 の性質上やむを得ず多種多様の廃棄物が混じり合う事 がある。大量のコンクリート塊に他の廃棄物が混入し たものを選別するためには多くの時間と労力を必要と するため不法投棄の要因にもなっている。また、解体 工事や廃棄物中間処理施設において人の手で行われて いる廃棄物の選別作業(写真―1)は粉塵や騒音が発 生する劣悪な環境で行われるだけでなく、重機や大型 車両の周囲で行われる事も多く、重機との接触や挟ま れ、高所からの転落などの災害発生の要因にもなって いる。近年では少子高齢化に伴う将来的な労働力不足 に対応するため、高度な発展を続ける AI やロボット 技術を応用したシステム開発にも期待が高まっている が、廃棄物中間処理施設においても産業ロボットと機 械学習技術を融合した廃棄物選別ロボットシステムが 導入される事例などが出てきている<sup>2)</sup>。

筆者らはこれまで、解体作業の効率化、安全性向上、 廃棄物処理の低コスト化や省人化を目的として、廃棄



解体工事での選別作業

中間処理施設の手選別ライン

写真一 1 廃棄物選別作業



写真―2 建廃選別システム

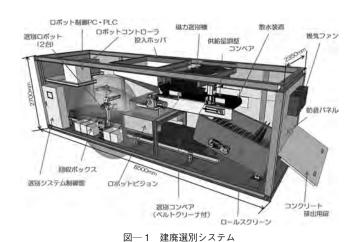
物の画像から種別判定を行い、得られた判定結果を基にロボットアームによって自動選別する建設廃棄物選別システム(以下、建廃選別システム、**写真**—2)の開発を行っている。

本編では、廃棄物が発生する最も上流にあたる解体 現場での選別を目的に開発した建廃選別システムの全 体概要を紹介するとともに、実際の解体現場から採取 した廃棄物を用いて行った建廃選別システムの選別精 度検証実験結果について述べる。さらに、建廃選別シ ステムが周辺環境に与える影響について検討した内容 を紹介する。

# 2. 建廃選別システム

ビルやマンションなどの非木造建物の解体工事から 排出される建設廃棄物(建設副産物を含む)の約 85%がコンクリート塊であり、次いで約10%が鉄く ず、残り約5%の中に木くずやアルミニウムなどの金 属くず、廃プラスチックなどが含まれている<sup>1)</sup>。建廃 選別システムは、上記5品目の建設廃棄物に、「その他」 の廃棄物を加えた6品目を垂直多関節型ロボット(以 下、選別ロボット)と画像から廃棄物種別を判定する ロボットビジョンシステムを使用して選別する。

建設廃棄物を効率的に選別するためには、品目毎に選別する前に廃棄物の大半を占めるコンクリート塊と、混入した他の廃棄物へ大まかに分別する必要がある。また、工事現場では騒音や振動が規制されるため、選別ロボットによる作業の前工程として、磁力選別機やロールスクリーンなど振動による選別や廃棄物の移送を行わない既存選別機器を採用した(図—1)。これらの機器を作業エリアが制限される解体現場で使用



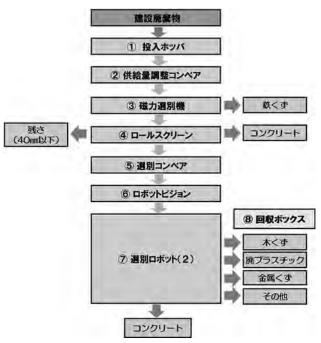
表一1 選別システム仕様

本体寸法 (mm) L 8,500 × D 2,350 × H 2,700 本体質量 (kg) 12,500 コンクリート塊, 鉄くず, 木くず, 金属くず(アルミなど), 廃プラスチック, その他 選別可能寸法 (mm) 40 - 300 処理速度 (m³/h) 1 - 3

するため、トラック 1 台で運搬可能なシステムサイズ、重量に収めた (表-1)。

#### (1) 分別機構

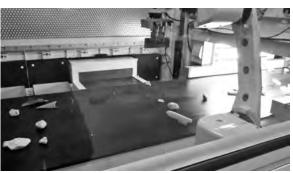
次に建廃選別システムによる選別フローについて説明する(図-2)。システム上部の廃棄物ホッパから投入された混合廃棄物は、磁力選別機を通過して鉄筋などの金属を取り除いた後、傾斜をつけ設置したロー



図―2 システムによる建設廃棄物処理フロー



写真―3 ロールスクリーンから排出されたコンクリート塊



写真―4 選別用コンベアに排出された廃棄物

ルスクリーンによって大量のコンクリート塊と、混入した他の廃棄物に大まかに分別される。適度に傾斜をつけたロールスクリーンを使用する事で比較的質量が大きく、転がりやすい形状のコンクリート塊は建廃選別システム端部から排出され(写真—3)、質量が小さな木材やプラスチックなどは回転するローラによりロールスクリーンの上端部に移送され選別用コンベアに排出される(写真—4)。この前工程を行う事により鉄などの比較的質量が大きくロボットによる選別の支障となる廃棄物を確実に取り除き、解体現場から発生する廃棄物の中で最も割合が多いコンクリート塊を効率的に分別できるためロボットによる選別作業の精度向上が可能になる。

ロールスクリーンによって抽出された廃棄物はロール状のブラシを使用して重なりが無い状態で選別用ベルトコンベアに並べられ、選別コンベアの上部に設置したロボットビジョンのカメラ(写真—5)で撮影される。取得した廃棄物の画像から対象物の色、形状、表面質感の情報を取得し、廃棄物材質の判定と重心位置の推定を行う。得られた判定結果と位置情報を基に2台の選別ロボット(写真—6)を動作させて、ベルトコンベア上の混在する廃棄物を品目毎の回収ボックスに選別する。

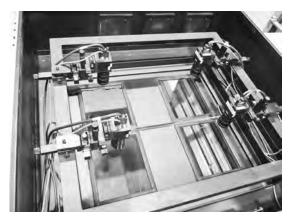


写真-5 ロボットビジョン用カメラ



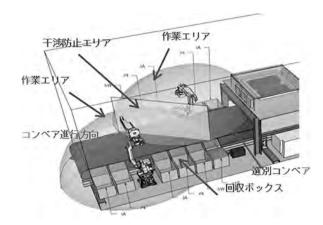
写真一6 選別ロボット

#### (2) ロボットビジョン

解体現場で発生する建設廃棄物は、形状や大きさが 多様であるため撮影範囲を超える可能性がある。撮影 した画像から廃棄物がはみ出しても判定できるよう、 4 台のエリアカメラを撮影範囲が一部重なるように配 置し、一定間隔で撮影する。取得した画像は材質判定 用PCに送られ、材質判定処理を行い、得られた材質 判定結果は重心位置座標などと共に選別ロボットの軌 道計画に使用する。ロボットビジョンはカメラ画像だ けで廃棄物の材質判定を行うため、ベイズ理論に基づ き事象に独立性のある色、形状、表面質感の各パラメー タにより判定された結果および条件付き確率を統合 し、最終的な材質を推定する判定手法を採用すること で判定精度の向上を図っている<sup>3)~6</sup>。

#### (3) 選別ロボット

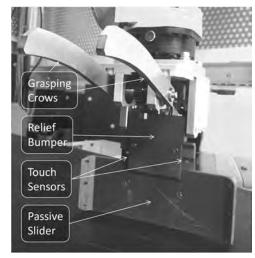
選別コンベア上に並んだコンクリート塊以外の廃棄物は、選別ロボットにより品目毎に用意された回収ボックスに掻き出される。2台の選別ロボットを作業エリアの一部が重なるように選別コンベアの両側面に配置し、作業を優先するロボットを設定した干渉防止エリアを設ける形で選別ロボットの作業エリアを区分した(図一3)。



図一3 選別ロボットレイアウトと作業エリア

選別コンベア上に並んだ複数の廃棄物の選別順位を 決定するパラメータとして廃棄物の品目,回収ボック スまでの距離,掃引経路距離を求め,①選別コンベア 側面に近い廃棄物,②回収ボックスまでの掃引距離が 短い廃棄物,③掃引時の干渉を考慮して比較的小さい 廃棄物,の項目順で選別順位を決定し,選別プランの 策定を行う。

廃棄物を選別するためのエンドエフェクタとして把 持や吸着などの機能が考えられるが、対象とする廃棄 物の大きさや形状が多種多様であるため確実に把持や



図一4 建設廃棄物選別用エンドエフェクタ

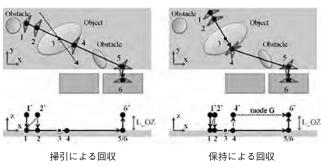


図-5 選別作業経路

吸着することが難しい。そこで、建廃選別システムのロボットアーム先端には廃棄物をベルトコンベア上から回収ボックスにへラによって掻き落とす「掃引」と、物体を完全に把持せずに2本の爪状ハンドと受動スライダで押さえつけて掃引動作を補助するために使用する「保持」の両機能を有するエンドエフェクタ(図―4)が取り付けられ、材質判定された廃棄物の品目と形状によって掃引もしくは掃引と保持を組み合せた選別動作を選択する(図―5)。

「掃引」によって廃棄物を選別する場合、対象物重心と回収ボックスを通る直線経路に沿った押し動作を行う。これにより、「保持」が難しい小さな廃棄物や薄い板状の廃棄物に対してハンドからの逸脱を防ぐことができ、回収成功率が高まる。経路上に障害物があった場合は、図―5の左図の破線のように他の回収ボックスへ経路を切り替えることで回避する。

「保持」によって廃棄物を選別する場合, 爪状ハンドと受動スライダを使って対象物の保持しながら, コンベア上に沿った経路を辿る。これにより, 折れ線や円弧など障害物により複雑になった経路でも高い確率で回収する。

# 3. 分別機構の性能検証実験

選別ロボットの前工程で大量のコンクリート塊と他の廃棄物を分別させる分別機構は、選別ロボットの選別精度向上や負担軽減を目的として導入している。この機構のコンクリート塊と鉄くず、その他の廃棄物の3種類に分別する性能検証を実施した。

性能検証実験では、現場の廃棄物の混合状態に近づけるため約 0.3 m³ のコンクリート塊 (150 個) の中に、形状、大きさの異なるコンクリート塊以外の 5 品目のサンプル (鉄くず、アルミニウム、木くず、廃プラスチック、スレートボード) 各 30 個を混ぜ合わせ (写真一7)、投入ホッパに入れる。選別コンベアまでの処理フローによってロールスクリーンの上端および下端から排出されたサンプル数と磁力選別機から排出されたサンプル数を計測した。実験は同条件で 3 回実施し、分別精度を求めた。



写真-7 混合した廃棄物サンプル

分別機構の性能検証実験を行った結果として、磁力 選別機とロールスクリーンの上端、下端から排出され たサンプル数の品目ごとの集計を表—2に示す。集 計結果から求めた品目ごとの分別率を図—6に示す。

図―6に示した性能検証実験の結果から、分別機構によりコンクリート塊以外の建設廃棄物の98.4%が分別され、73.1%のコンクリート塊がロールスクリーンの下端から排出される事を確認した。しかし、表―2に示した結果から磁力選別機によって全ての金属く

表―2 廃棄物の投入数と回収数

	コンク リート塊	鉄くず	アルミニ ウム	廃プラス チック	木くず	スレート ボード
投入数	450	90	90	90	90	90
磁選機	0	79	0	1	0	0
RS上端	121	10	90	87	88	89
RS下端	329	1	0	2	2	1

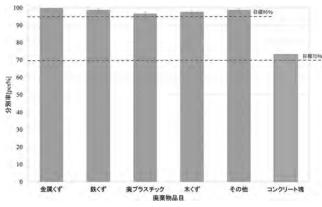


図-6 分別機構の分別率

ず(鉄くず)が取り除かれず、磁性のない廃プラスチックも抽出されている事がわかる。これは、投入されたサンプルが重なり合った状態で供給量調整コンベアによって搬送されているためだと考えられる。また、比較的軽量な廃プラスチックや木くず、スレート材は、その多くがロールスクリーン上端に排出されたが、ロールスクリーンの下端へ転がり落ちる大量のコンクリート塊に巻き込まれる形で下端に排出されるものも1~2%の割合で発生している。

開発する建廃選別システムによる5種類の建設廃棄物選別精度目標は、選別ロボットやロボットビジョンの性能を考慮して60%以上に設定した。これは、自ら設定した廃棄物品目を決定するロボットビジョン単体の判定精度目標と、各品目に回収する選別ロボット単体の選別精度目標が共に80%以上である事が基になっている。建廃選別システムの選別精度目標から、分別機構単体の分別精度目標は各品目95%以上、コンクリート塊70%以上に設定されているが、磁力選別機やロールスクリーンを使用した機構により目標が達成できる事が確認された。

# 4. 選別精度検証実験

建廃選別システムが目標とした選別精度 60%以上で廃棄物選別が可能である事を確認するため、分別機構の性能検証実験で使用した廃棄物サンプルによるシステム全体の選別精度検証実験を行った。この実験で使用した廃棄物サンプルは、以前に行った解体現場における廃棄物排出量調査の結果<sup>1)</sup> に合わせコンクリート 85%、他の廃棄物 15%の割合となるように、0.3 m³のコンクリート塊に木くず、鉄くず(鉄筋など)、金属くず(アルミサッシなど)、廃プラスチック(塩ビ管など)、スレートボード(その他)を各 30 個混入させたものを使用した。建廃選別システムの処理速度が

1 m³/h 相当になるよう約 20 分間で 0.3 m³ の廃棄物サンプルをホッパに投入し、分別機構および選別ロボットによって選別された廃棄物の個数を計測する実験を 3 回実施した (写真—8)。この際、ロールスクリーン下端と選別コンベア端部から排出されたコンクリート塊以外の廃棄物は選別を失敗したものとして扱う。また、選別ロボットが動作する際は、廃棄物選別を確実に行うため選別コンベアを一定間隔で停止させ、選別完了後に選別コンベアを再起動させる間欠運転とした。選別精度検証実験での選別精度を図—7に示す。



写真―8 選別ロボットによる廃棄物選別状況

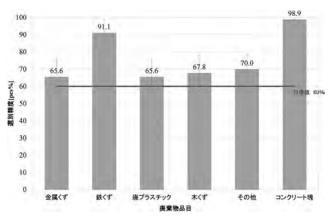


図-7 建廃選別システムの選別精度

選別精度結果から建廃選別システムは選別精度目標である60%以上の精度で廃棄物選別が可能である事を確認した。建廃選別システムにおいて選別ロボットで選別される金属くず(アルミニウム)、廃プラスチック、木くず、その他の廃棄物の平均選別精度は67.2%であった。しかし、3回の実験データを平均した値は全ての品目で目標値を超えているが、金属くずや廃プラスチック、木くずは選別精度にばらつきが大きく、目標値を超えない場合があった。

実験データから選別精度低下の要因分析を行った結果,選別ロボットの選別動作を起因とする回収失敗は15.8%の割合で発生し、その中でも回収経路で他の廃棄物に接触する「巻き込まれ」による失敗が最も高い割合で起こっている事が分かった。今後,更なる選別

精度向上を行うためには経路計画方法の見直しとエン ドエフェクタの改良が必要だと考えている。

# 5. 環境計測

建廃選別システムが現場で使用される場合、敷地境界からどの程度の離隔距離を取れば騒音、振動の規制値を満たし、使用可能となるのかを確認するため、廃棄物の投入も含めた現状の建廃選別システム稼働時の騒音レベルおよび振動レベルを測定した。計測は表一3に示す3種類のパターンで行った。

表一3 騒音,振動計測パターン

計測パターン	廃棄物投入条件	備考	
パターン A	) T II T / / / T   B / / /   / /		
パターン B			
パターンC	パターン C 暗騒音・暗振動		

騒音レベル,振動レベルの測定結果からそれぞれの発生源のパワーレベルを算出し、実際に現場に建廃選別システムを設置した場合の敷地境界における騒音レベル,振動レベルを予測する。なお、評価には騒音規制法,振動規制法に基づき、騒音レベルは L5 値、振動レベルは L10 値で評価を行った。

騒音測定の結果,音源から測定距離が1mの地点におけるL5値は94.0 (dB)であった。この測定値から騒音規制法における特定建設作業の敷地境界の規制値を満足するために必要な音源から敷地境界までの距離を求めると2.8 m以上となる。

また、振動測定の結果、測定距離が1 mの地点におけるL10値は55.5 (dB)であった。この値を基準点として求めた予測点の振動レベルは、振動発生源から1 mの距離でも振動規制法における特定建設作業の敷地境界の規制値以下であった。

今回計測した地盤は表面がコンクリートで覆われていたが、現場で使用する場合は、実地盤での実測に基づき隔離距離を決める等の配慮が必要である。

#### 6. おわりに

近年,増加傾向にある解体工事の効率化,安全性向上,廃棄物処理の低コスト化や省人化を目的に,既存技術である磁力選別機やロールスクリーンなどの選別機器と産業用ロボットを組み合せ,建廃選別システムを開発した。ロボットを使用した建廃選別システムにより,これまで人の手で行ってきた選別作業を自動化できるため,解体工事だけでなく中間処理施設における作業の効率化やコスト削減が期待できる。また,今後発生が予測されている首都圏直下型地震や海外での津波被害などにも有用な基盤技術となるよう処理速度や選別精度の向上によって更に実用性を高める必要がある。なお,本研究開発は,環境省環境研究総合推進費補助事業により実施したものである。

J C M A

#### 《参考文献》

- 1) 中村聡,後久卓哉,柳原好孝 他 2 名, "建物解体現場における廃棄物 選別システムの開発",第 26 回日本ロボット学会学術講演会,2D2-01, 2008,
- 2)「フィンランド発の深層学習技術が産廃処理に革新 AI 搭載ロボで省 人化と速度向上実現したシタラ興産」、Nikkei Robotics 3-11, 2017 年 2 月
- 3) 中村聡,後久卓哉,建設系産業廃棄物選別の要素技術研究 (その2), 東急建設技術研究所報 No. 34, pp. 43-46, 2009.
- 4) 中村聡, 上野隆雄 他 2 名, "建設系産業廃棄物選別システムの精度検証と実用化に向けた課題", 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 1B3-2 2011
- 5) Takuya Gokyuu, Satoru Nakamura and Takao Ueno, "Sorting system for Recycling of Construction Byproducts with Bayes' Theorem-Based Robot Vision", J. of Robotics and Mechatronics (JRM), Vol. 23, No. 6, pp. 1066-1072, 2011.
- 6) 中村聡, 上野隆雄, "建設系廃棄物選別システムの開発―ロボットビジョンを応用した廃棄物判定手法による選別性能検証―", 建設の施工企画 第747号, pp. 62-66, 2012.5.



[筆者紹介] 中村 聡(なかむら さとる) 東急建設㈱ 技術研究所 メカトログループ 主席研究員



井上 大輔 (いのうえ だいすけ) 東急建設㈱ 技術研究所 メカトログループ 主任研究員



白井 菜月(しらい なつき) 東急建設㈱ 技術研究所 メカトログループ 研究員