

平成 2 5 年度
環境研究総合推進費補助金 次世代事業
総合技術開発報告書

アスベスト含有建材対応型
建設系廃棄物選別システムの開発
(3J113003)

平成 2 6 年 3 月

東急建設株式会社 柳原 好孝

補助事業名 環境研究総合推進費補助金次世代事業(平成23年度～平成25年度)

所管 環境省

総事業費 83,181,403 円 (平成23年度～平成25年度の総計)

国庫補助金 37,163,762 円 (平成23年度～平成25年度の総計)

研究課題名 アスベスト含有建材対応型 建設系廃棄物選別システムの開発
(3J113003)

研究事業期間 平成23年6月1日～平成26年3月31日

研究代表者名 柳原好孝 (東急建設株式会社)

研究分担者氏名 中村聡、上野隆雄、井上大輔、中村宗隆、高橋悠輔、後久卓哉
(東急建設株式会社)

目 次

総合技術開発報告書概要	1
本文	
1. 事業の目的と目標	12
2. 開発した技術の詳細	14
2.1 近赤外カメラによるアスベストスクリーニング装置	14
2.1.1 アスベスト検出手法	14
2.1.2 アスベスト含有建材検出ソフトウェアの開発	18
2.1.3 アスベスト含有建材検出システムの検証実験	21
2.1.4 アスベスト含有建材スクリーニング実験	28
2.1.5 アスベスト含有建材自動検出装置の開発	33
2.2 建設廃棄物選別システム	39
2.2.1 廃棄物選別システムの概要	39
2.2.2 廃棄物分別機構	41
2.2.3 廃棄物分別機構の性能検証実験	44
2.2.4 選別用ロボットアーム	48
2.2.5 ロボットアームによる廃棄物選別実験	59
2.2.6 環境計測	73
3. 検証実験	78
3.1 アスベスト含有建材自動検出装置の性能評価実験	78
3.2 作業性・実用化検証	81
3.3 廃棄物サンプルを使用した選別精度評価実験	83
4. まとめ	86
5. 事業概要図	87
6. 論文・新聞発表等	88
7. 知的財産権の取得状況	89
8. 英文概要	89
巻末資料	1

環境研究総合推進費補助金 次世代事業 総合技術開発報告書概要

研究課題名：アスベスト含有建材対応型 建設系廃棄物選別システムの開発

研究番号：3J113003

総事業費：83,181,403 円（平成23年度～平成25年度の総計）

国庫補助金：37,163,762 円（平成23年度～平成25年度の総計）

研究期間：平成23年6月1日～平成26年3月31日

研究代表者名：柳原好孝（東急建設株式会社）

研究分担者：中村聡、上野隆雄、井上大輔、中村宗隆、高橋悠輔、後久卓哉
（東急建設株式会社）

事業の目的

建物の解体は①事前調査、②内装解体、③躯体解体の順序で行われ、解体工事では発生する建設廃棄物を品目別に分別しながら解体していく「分別解体」が多く採用されている。そのため、コンクリート塊、アスファルトコンクリート塊、建設発生木材は高い再資源化率や再資源化等率を保っている。また、有価物として売却可能な鉄筋、鉄骨などに使用される鉄鋼、サッシ枠などに使用されるアルミニウムは解体作業員によって効率的に選別されている。

しかし、プラスチックや木くず、紙など様々な建設廃棄物が混入してしまった混合廃棄物は選別や処理に時間と費用が必要になるため、現場で分別を行わずに排出され、焼却や埋立て処分される事で再資源化率を低下させるだけでなく、不法投棄の要因にもなっている。また、解体作業時に人の手によって行われている廃棄物の選別作業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。

また、老朽化などを理由に解体する建築物にアスベスト含有建材が使用されている事が多く、悪いことにはこれらの建築物には設計図などが残っていない物件もある。このため、アスベスト含有の建材がどこに使用されているか全てを把握できない場合があり、アスベスト含有建材と知らずに破碎、選別することで作業員への暴露や大気中への飛散の恐れが指摘されている。更には解体工事のコンクリート塊を利用した再生砕石にアスベスト含有の廃棄物が混入する事例[1]も明らかになっている。

本事業の目的は、解体工事における選別作業の効率化や廃棄物処理コストの削減、選別作業や有害物質処理の安全性向上、混合廃棄物の再資源化率の向上、廃棄物処理の上流側である解体工事におけるアスベスト混入防止対策を目的とした実用的なアスベスト含有建材対応型建設廃棄物選別システムを開発

することである。また、将来的には処理能力を向上させて、選別精度を更に高め、選別可能な廃棄物の種類を増やすことで、解体工事だけでなく中間処理場や災害廃棄物選別での実用化を目指すことにある。

以下に本事業における達成目標と開発する選別システム、アスベスト含有建材検出装置の性能目標を示す。

○本事業における達成目標

開発する実証設備において、解体工事から排出されたコンクリート、アルミニウム、プラスチック、木材、鉄鋼の5種類の建設廃棄物に混入したアスベスト含有建材の選別精度を70%以上、5種類の建設廃棄物についても60%以上の精度で選別することを目標とする。また、実際の解体工事を想定した検証実験を1回以上行い、解体現場における選別精度検証や装置の可搬性、作業性を確認する。
※選別精度とは、対象となる廃棄物を材質毎に選別する確率を表す。

○性能目標

【性能】

選別システム処理能力：1 m³/h

アスベスト含有建材検出装置検出率：90%以上

【処理の対象とする廃棄物の種類】

建設廃棄物におけるコンクリート塊、建設発生木材、廃プラスチック類、金属くず（鉄くず、アルミニウム、有価物としての鉄鋼材料を含む）およびアスベスト含有建材

【処理の対象とする廃棄物の性状】

形態：固体（解体工事等から排出された廃棄物であるため形状は多様）

最大径：30 cm

異物の混入：コンクリート塊、木くず、廃プラスチック類、金属くず（鉄くず、アルミニウム、有価物としての鉄鋼材料を含む）が混在

有害物質の混入：アスベスト含有建材の混入あり

【システムサイズ】

10～15 t 低床トラックの荷台（長さ 9,600 mm、幅 2,350 mm、高さ 2,700 mm 以内）に積載可能な大きさおよび質量

開発した技術の詳細

1. 近赤外カメラによるアスベストスクリーニング装置

(1) アスベストスクリーニング装置の概要と原理

図-1 は、アスベストに使用される鉱石（角閃石、蛇紋石）が特定波長の近赤外線を吸収する特性を利用し、近赤外分光フィルタと近赤外カメラによって撮影した特定波長の近赤外画像を基に、建材に含まれるアスベストを検出する装置である。例えば、蛇紋石族のアスベストであるクリソタイル（構造式： $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ）は $1.4\mu\text{m}$ 付近に吸光ピークがある。この吸収ピークを検出するためピークに該当する波長、ピークの裾野にあたる波長およびピークと裾野の中間の波長における反射強度を計測する。具体的には、光を照射した対象物が反射する近赤外光を、液晶チューナブルフィルタで複数の設定波長に切り替えながら透過する近赤外光を近赤外カメラで撮影する。撮影した複数の近赤外画像に対して画素ごとに微分処理を行い、特定波長にピークのある画素を識別し、アスベスト検出を報知すると共に、設定したしきい値以上の吸光がみられたピクセルに対して吸光ピークの高さに応じた色付けを行い（図 2）、建材に含まれるアスベストの位置を特定する。

実際の解体現場から採取したアスベスト含有建材の特定断面を検出システムで繰り返し測定してアスベスト検出精度を求める実験を行った結果、アスベスト（クリソタイル）含有率が 2.1wt% 以上の建材について 94% 以上の精度で検出可能であることを確認した（図 3）。しかし、現状はアスベストの種類のうちクリソタイルのみ検出可能であり、建材表面にアスベストが露出していない場合は検出ができない。

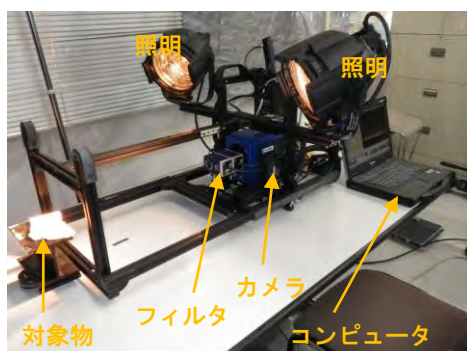


図 1 アスベストスクリーニング装置

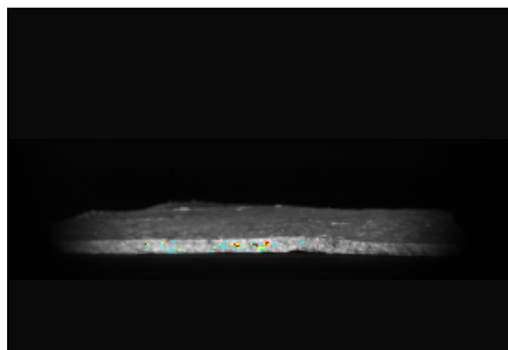


図 2 アスベスト検出画像

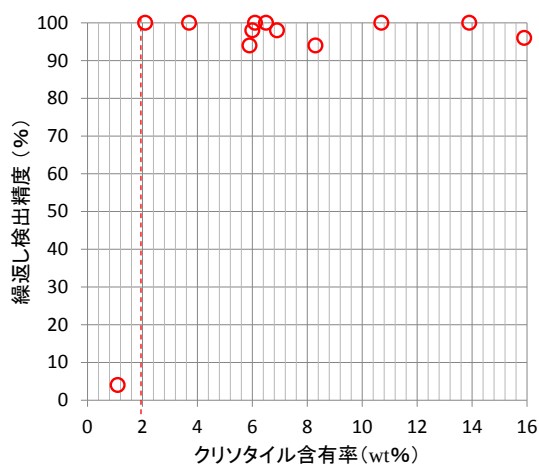


図 3 解体現場のアスベスト含有建材を使用した検出精度実験結果

(2) アスベスト含有建材スクリーニング実験

検出システムの実用性を高めるため、アスベストスクリーニング装置を選別システムから切り離し、現場での迅速なアスベスト検査（図4）も可能なソフトウェアを開発した。開発したアスベストスクリーニング装置は最短約4秒でアスベストの検出が可能であり、既存のアスベスト分析方法に比べ大幅に検査時間を削減できる。また、開発した検出システムは近赤外カメラの画像としてデータ取得するため非接触で広範囲な検査が可能であり、大量の廃棄物や再生砕石に混入したアスベスト含有建材のスクリーニングに適した技術である。

アスベストスクリーニング装置の実用性を検証するため災害廃棄物に混入したアスベスト含有建材を現地でスクリーニングする実験を行った結果、アスベストを含有していない廃棄物も含め32試料中25試料を正しく検出（正解率＝検出精度78%）できた。その内、偽陽性（不含なのに反応がある）が4試料、偽陰性（含有なのに反応が無い）が3試料あった（表1）。この検証実験により現場でのスクリーニングにおいてもアスベスト（クリソタイル）含有率が2.1wt%以上のアスベスト含有建材であれば90%の精度で検出可能であることを確認した。

ただし、偽陰性の判定が出た試料は、含有率が2.0wt%台の比較的低い建材で、スクリーニングを行った建材表面にアスベスト繊維が露出していないために検出できなかった可能性があり、スクリーニング装置を使用する際に建材表面を剥ぎアスベスト繊維を確実に露出させる事で検出精度が向上できると考えられる。



a) 壁材検査



b) 床材検査

図4 現場でのアスベストスクリーニング実験

表1 災害廃棄物スクリーニング結果および
公定法（JIS A 1481）分析結果比較

試料No.	JIS定性分析結果	JIS分析結果 (wt%)	アスベスト検出装置による スクリーニング結果 (クリソタイル有無)	JISとの整合 性	偽陽性 (不含なのに 反応)	偽陰性 (含有なのに 反応無)
1	不含	-	○	×	✓	
2	クリソタイル	1.6	○	○		
3	クリソタイル	1.6	○	○		
4	クリソタイル	4.9	○	○		
5	不含	-	—	○		
6	不含	-	—	○		
7	クリソタイル/角閃スフェイト	2.6	○	○		
8	クリソタイル	1.4	○	○		
9	クリソタイル	6.9	○	○		
10	クリソタイル	4.8	○	○		
11	不含	-	○	×	✓	
12	クリソタイル	4.3	○	○		
13	不含	-	—	○		
14	クリソタイル	2.0	○	○		
15	不含	-	—	○		
16	クリソタイル	6.0	○	○		
17	クリソタイル/角閃スフェイト	5.9/0.5	○	○		
18	不含	-	—	○		
19	クリソタイル/角閃スフェイト	2.6	—	×		✓
20	クリソタイル	2.0	—	×		✓
21	不含	-	○	×	✓	
22	クリソタイル	4.9	○	○		
23	クリソタイル	2.3	—	×		✓
24	不含	-	—	○		
25	クリソタイル	4.9	○	○		
26	クリソタイル	3.1	○	○		
27	不含	-	—	○		
28	不含	-	○	×	✓	
29	クリソタイル	4.6	○	○		
30	クリソタイル	3.9	○	○		
31	クリソタイル	4.8	○	○		
32	不含	-	—	○		
正解数				25	4	3
正解率				78%	13%	9%

2. 建設廃棄物選別システム

(1) 選別システムの概要

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%はコンクリート塊であり、木くず、金属くず（鉄くず、アルミニウムなどの非鉄金属）、廃プラスチックを含めた5品目が95%以上を占める[2]。上記5品目の建設廃棄物に、アスベスト含有建材を含む「その他」の廃棄物を加え、6品目をベルトコンベア上で効率的かつ正確に選別するため、ロボットアーム用のビジョンシステムとして既に開発した技術である画像処理を応用した材質判定装置を使用し、出力される廃棄物判定品目や位置情報を基にロボットアームを動作させて廃棄物選別する建設廃棄物選別システム（以下、選別システム）を開発した(図5)。

選別システムに投入された廃棄物を効率的に選別するため、廃棄物選別を行う産業用ロボット（以下、選別ロボット）の前工程として、磁力選別機やロールスクリーンなどの既存選別機器による分別を行うシステム構成とした(図6)。選別システム上部の廃棄物投入口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、傾斜をつけて設置されたロー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。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適度に傾斜をつけたロールスクリーンを使用し、選別システム端部から排出され、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コンベアに排出される（図7）。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量が多いコンクリート塊を効率的に分別でき、ロボットによる選別作業の精度向上が期待できる。今回製作した選別システムの概要を表2に示す。



図5 選別システム

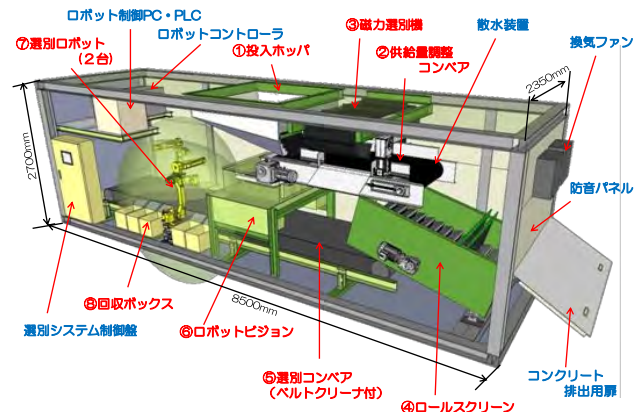


図6 選別システム概要図

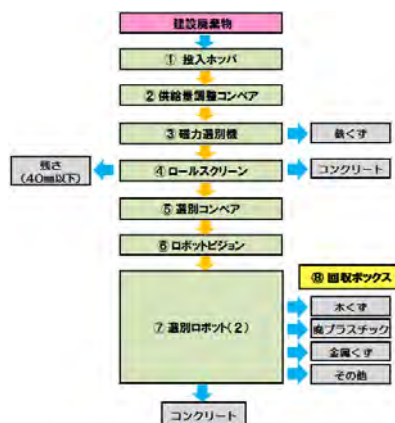


図7 システムの選別フロー

表2 選別システム仕様

システム寸法 (mm)	L 8,500 × D 2,350 × H 2,700
本体質量 (kg)	12,500
選別品目	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
最大消費電力 (kW)	18
選別可能寸法 (mm)	40 - 300
処理能力 (m³/h)	1(1/10スケールプロトタイプ機での値)

(2) 選別ロボット

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コンベアに並べられ、ベルトコンベア上部に設置した廃棄物の材質を判定するロボットビジョンのエリアカメラ(図 8)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(図 9)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。この際、コンクリート塊、木くず、金属くず(鋼材やアルミニウム)、プラスチック廃材以外の品目(以下、その他)として選別された廃棄物は、本選別システムに接続可能なアスベスト含有建材自動検出装置(図 10)によってアスベスト含有を検査する事ができる。アスベストが検出された場合はアラームで報知したうえで別途回収し、飛散防止対策を講じる。

ロールスクリーンによって分別されずに残ったコンクリート塊がコンクリート塊と判定された場合は、選別ロボットを使用せずに選別コンベアの端部から排出される。

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ロボットビジョンにより廃棄物の品目、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。選別ロボットが動作する際は、廃棄物選別を確実にを行うため選別コンベアを一定間隔で停止させ、ロボットによる選別作業完了後に選別コンベアを再起動させる間欠運転とした。

廃棄物を選別するためのロボットの手(ハンド)として把持や吸着などの機能が考えられる。対象とする廃棄物は、大きさや形状が多様多様であり確実に把持や吸着することが難しいため、当該システムのロボットアーム先端で廃棄物をベルトコンベア上から回収ボックスに掻き落とす「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」と、完全に把持して空中搬送する「把持」の3つの機能を有するハンド(図 11)を採用した。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わせた選別動作を選択する。

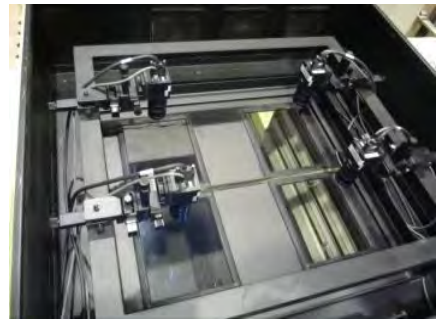


図 8 ロボットビジョンカメラ



図 9 選別ロボット



図 10 アスベスト含有建材自動検出装置



図 11 ロボットハンド

(3) アスベスト含有建材自動検出装置の性能評価実験

選別システムにアスベスト含有建材自動検出装置（以下、自動検出装置）を接続した状態（図 12）で、アスベスト含有建材が混入した建設廃棄物を投入した際、目標である 70%以上の精度でアスベスト含有建材が選別可能である事を確認するため、アスベスト含有建材を使用した選別精度評価実験を行った。実験では解体現場から採取した 5 品目の廃棄物サンプル（コンクリート塊、木くず、鉄くず、金属くず：アルミニウムなど、廃プラスチック）0.3m³の中にアスベスト含有建材 30 個を混入させ、選別システムによって「その他」の品目として選別された廃棄物に対し、自動検出装置によってアスベスト含有の有無を判定する方法で行った。この際、選別システムに投入したアスベスト含有建材の個数に対して、アスベスト含有建材自動検出装置が含有と判定したアスベスト含有建材の個数を選別精度と定義し、同様の実験を 2 回実施した。実験結果を表 3 に示す。



図 12 接続した自動検出装置

実験の結果、投入された 30 個のアスベスト含有建材が選別システムによって「その他」の品目として選別した数は 24 個、選別システムによって選別された 24 個のアスベスト含有建材が自動検出装置によって含有と判定された数は 21 個であった。これにより、アスベスト含有建材の選別精度は 70%である事が確認できた。また、自動検出装置のみの判定精度は 88%であることが分かった。

表 3 アスベスト含有建材選別精度実験結果

回	投入個数 ①	判定個数 ②	選別システム 選別率 (②／①)	自動検出装置 検出個数③	自動検出装置 検出率 (③／②)	全体選別率 (③／①)
1	30	24	80%	21	88%	70%
2	30	24	80%	21	88%	70%

(4) 作業性・実用化検証

選別システムおよび自動検出装置は建設廃棄物処理の上流に位置する解体工事での使用を優先すべき目的としているため、システムの可搬性、騒音・振動の対策、アスベスト飛散防止対策、作業性の良さを有している事は、システムの実用化にとって重要である。これらの課題に対応した装置である事を確認するため選別システムの運搬と重機を使用した作業検証、選別作業時の騒音・振動に加え空气中アスベスト粉じん測定の実験を行った。

i. 可搬性および作業性

近年件数が増加している都市部での解体工事は狭隘な場所で行われる事が多く、大型車両が通行する搬入路や、システム組立のための広い作業スペースを確保するのが困難である。そこで、トラック 1 台で運搬でき、現場間の移設が容易な選別システムを製作し、実際の 15 t トラック、35 t ラフタークレーン、0.45m³ バックホウを使用して解体現場での運搬、設置、選別作業を模擬した検証実験を行った。

実験の結果、選別システムが一般的な 15 t 低床トラックに車載可能（図 13）であり、運搬した選別システムを 35 t ラフタークレーンで吊り上げ、所定の位置に設置し（図 14）、電源ケーブルを配線するまでの所要時間を計測した結果、2 時間程度で実施できることがわかった。また、選別システム上部にあ

る投入ホッパに廃棄物をバックホウで投入する際に、廃棄物のこぼれや詰まりなどの問題が無く行える事を確認した（図 15）。

ii. 環境計測

解体工事などの建設現場で選別システムを使用するためには、騒音規制法や振動規制法を順守しなければならない。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選別作業中の騒音および振動を計測した。また、選別システムに投入する廃棄物の中にアスベスト含有建材が混入した場合を想定し、アスベスト含有建材を選別する際の空气中アスベスト粉じん測定を選別システムの換気ファンおよび自動検出装置の排気ファンの付近で行った（図 16）。

選別システムの騒音・振動を計測した結果、騒音は特定建設作業の規制値 85dB 以下にするため敷地境界から 2.8m 以上の離れた場所、振動は特定建設作業の規制値 75dB 以下にするため敷地境界から 1.0m 以上離れた場所に選別システムを設置すれば工事現場での使用が可能である事を確認した。

選別システムおよび自動検出装置稼働中の空气中アスベスト粉じん測定を行った結果、選別システムの換気ファンの前では繊維は計測されず、自動検出装置の排気ファン周辺では採気量 2,400L に対して 1 本の繊維が計測された。計測された 1 本の繊維についても敷地境界基準値である 1L あたり 10 本以下の基準を満たしているため、選別システムと自動検出装置でアスベスト含有建材を選別しても問題が無い事を確認した。



図 13 運搬状況



図 14 設置作業



図 15 選別作業の検証状況



図 16 粉じん測定状況

(5) 廃棄物サンプルを使用した選別精度評価実験

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ことを確認するため、解体現場から採取した廃棄物サンプルを使用した廃棄物選別実験により、設定した6品目（コンクリート塊、木くず、鉄くず、金属くず：アルミニウムなど、廃プラスチック、その他：内装材など）の選別精度検証を行った。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、0.3m³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）、内装材を各 30 個混入させたものを使用した[3]。また、処理量 1 m³/h の速度で選別システムに廃棄物を投入した。この実験によって求めた選別システムの選別精度を図 17 に示す。

図 17 から選別システムの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ことを確認した。しかし、廃棄物形状が複雑であるためハンドによって保持できずに確実に廃棄物を回収できないことや、コンベア上で重なり合った廃棄物については誤判定により取り違える事象が発生した。また、選別ロボットによって回収ボックスへ掻き出される際に、他の廃棄物と接触して廃棄物の位置が移動してしまう場合もあり、正しく材質判定されていても掻き出し装置によって正確に選別できないケースもあり、選別精度にばらつきが生じる要因となっている事が分かった。処理量についても目標とする 10 m³/h を実現するため、現在は間欠運転を行っている選別コンベアを連続運転に切り替えて選別する事が重要である。今後、更なる実用化に向けた取り組みの中でこれらの課題に対応し、選別精度および処理速度を安定的に向上させる事が必要である。

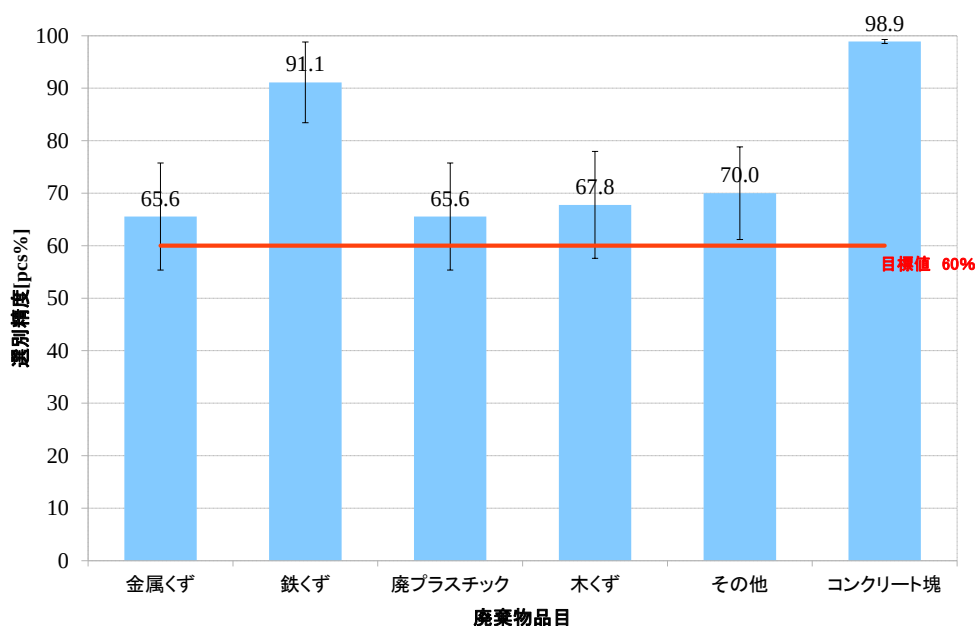


図 17 選別システムの選別精度

開発した技術がもたらす効果

1. アスベストスクリーニング装置

古い建築物には設計図などが残っていない物件もあり、アスベスト含有の建材がどこに使用されているか全てを把握できない場合がある。また、アスベスト含有建材データベースなどによって多くの建材

の石綿含有状況に関する情報を得られるが、すでに廃業している建材メーカーの製品や現場でモルタル等に直接混入されたアスベスト含有の建材について把握する事は難しい。一方、建設廃棄物処理の川上に位置する解体現場でアスベストを発見する事が重要であるが、アスベスト分析の費用は高額で、建物に使用されている全ての建材を分析するような事は施工者の負担が大きく、現実的な方法ではない。

そこで、解体工事などのフィールドにおいて、近赤外カメラによるアスベustosクリーニング装置を使用したアスベスト検査を行う事で、事前調査段階でアスベストの含んだ建材を迅速かつ安価にスクリーニングする事ができる。

また、アスベustosクリーニング装置を選別システムに組込む事で、アスベスト建材を使用した建築物の解体に際し、予期せずに廃棄物へ混入してしまったアスベストを効率的に検出する事ができるだけでなく、現場作業におけるアスベストばく露防止対策としても期待できる。

このアスベustosクリーニング装置が持つ短時間に広範囲のアスベスト検出が可能である特長を生かし、再生砕石に混入するアスベスト含有建材や、東日本大震災で発生した災害廃棄物に混入したアスベスト含有の廃棄物の検出に適用可能な技術である。

2. 建設廃棄物選別システム

ロボットアームを使用した廃棄物選別システムを開発する事により、これまで人の手で行ってきた選別作業を自動化でき、解体工事における廃棄物選別作業の効率化や廃棄物処理コストの削減が期待できる。また、劣悪な環境で行われる事の多い解体工事や廃棄物中間処理施設における廃棄物選別作業（図18）を削減するだけでなく、重機との接触や有害物質のばく露などのリスクから解体作業従事者を解放する技術である。今後さらに選別精度や処理能力を向上させる事で、将来的には中間処理施設などで実用化され、混合廃棄物の再資源化率向上も可能になると考えられる。

加えて、東日本大震災で発生した災害廃棄物の選別や混入したアスベスト等の有害物質処理だけでなく、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適用可能な技術である。特にロボットアームによる廃棄物選別技術は今後長期に渡り対応が必要とされる放射性物質により汚染された廃棄物の処理を無人化するために有効な基盤技術になり得るものである。



a) 解体工事における選別作業



b) 中間処理施設の手選別ライン

図 18 廃棄物選別作業

環境政策への貢献

解体工事などで発生したコンクリート塊に鉄筋や配管材等の破片が混入した混合廃棄物の分別や処理には時間と費用が必要となるため再資源化率が低く、全産業の約7割を占める建設廃棄物の不法投棄および廃棄物排出量の削減を阻害する要因となっている。また、アスベストが使用されている建築物が老朽化などを理由に解体される数は年々増加し、2028年のピーク時には年間約10万棟と推計されていて[4]、近年では再生砕石にアスベスト含有の廃棄物が混入する事例も明らかになっている。

アスベストスクリーニング装置は、大気汚染防止法の改正により建設廃棄物処理の川上に位置する解体現場で今後増加すると思われる事前調査（スクリーニング）を迅速かつ安価に行う事ができる。加えて、短時間に広範囲のアスベスト検出が可能である特長を生かし、再生砕石に混入するアスベスト含有建材や、東日本大震災で発生した災害廃棄物に混入したアスベスト含有の廃棄物の検出に適用する事ができる。

建設廃棄物選別システムは、建設廃棄物処理指針に準ずる建設廃棄物の排出抑制だけでなく、解体時等の石綿飛散防止や混入防止対策、作業者のばく露防止対策に寄与する。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適用可能な技術である。特にロボットアームによる廃棄物選別技術は今後長期に渡り対応が必要とされる放射性物質により汚染された廃棄物の処理を無人化するために有効な基盤技術になり得るものである。

開発した技術の事業化の可能性

アスベスト含有建材対応型の選別システムを自社の大規模解体現場で使用し、選別作業に係わる費用を削減するだけでなく、毎年数千万円規模で費やしている建設廃棄物処理費用についても削減できる。また、設置スペースやコストなどの問題から選別システムを導入できない現場に対し、車載型選別システムが複数現場を巡回して廃棄物を回収する仕組みを検討しているが、現行法では想定されていない移動式中間処理施設としての課題などがあり、当局と協議を行っている。将来的には中間処理施設での実用化も考慮し、収集運搬や中間処理会社との連携を強化しながら自社の解体工事以外でも使用可能な選別システムを目指している。

一方、アスベストスクリーニング装置を選別システムから切り離し、解体現場の事前調査等で使用可能な可搬型システムを構築したことにより、解体前の建材をスクリーニングする事業や、再生砕石などに混入しているアスベスト含有の廃棄物を除去する工事の受注などに使用可能となる。例えば解体現場でのスクリーニングを行い、アスベストの分析を行う建材を絞り込む事で1検体3～5万円かかる分析費用を削減する事ができる。

【参考文献】

- [1] 「再生砕石にアスベスト」『東京新聞』 2010年8月8日朝刊 1面
- [2] 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.
- [3] Takuya Gokuyu, 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.
- [4] 国土交通省：社会資本整備審議会アスベスト対策部会第5回配布資料，国土交通省ホームページ (<http://www.mlit.go.jp/common/000044765.pdf>)，2009.

1. 事業の目的と目標

建物の解体は①事前調査、②内装解体、③躯体解体の順序で行われ、解体工事では発生する建設廃棄物を品目別に分別しながら解体していく「分別解体」が多く採用されている。そのため、コンクリート塊、アスファルトコンクリート塊、建設発生木材は高い再資源化率や再資源化等率を保っている。また、有価物として売却可能な鉄筋、鉄骨などに使用される鉄鋼、サッシ枠などに使用されるアルミニウムは解体作業員によって効率的に選別されている。

しかし、プラスチックや木くず、紙など様々な建設廃棄物が混入してしまった混合廃棄物の選別や処理には時間と費用が必要になるため現場で分別せずに中間処理施設へ排出される。中間処理施設へ運搬された混合廃棄物の約60%が焼却や埋立て処分される事で再資源化率を低下させている。また、悪質な処理業者などによる不法投棄の要因となり、建設廃棄物の不法投棄は全産業の中でも約7割を占める。加えて、解体作業時の廃棄物選別作業の多くが粉塵や騒音が発生する劣悪な環境下において人の手で行われているだけでなく、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原因にもなっている。

また、老朽化などを理由に解体する建築物にアスベスト含有建材が使用されている事が多く、これらの建築物には設計図などが残っていない物件もあり、アスベスト含有の建材がどこに使用されているか全てを把握できない場合がある。他の廃棄物にアスベスト含有建材が混入した状態で現場から排出される事や、アスベスト含有建材と知らずに破砕、選別することで大気中への飛散やばく露の可能性がある。近年では、解体工事のコンクリート塊を利用した再生砕石にアスベスト含有の廃棄物が混入する事例[1]も明らかになっている。

本事業は、解体工事における選別作業の効率化や廃棄物処理コストの削減、選別作業や有害物質処理の安全性向上、混合廃棄物の再資源化率の向上、廃棄物処理の上流側である解体工事におけるアスベスト混入防止を目的として、既開発技術である画像処理を応用した独自の材質判定装置（※1）を基に、より実用的なアスベスト含有建材対応型建設廃棄物選別システム（図1-1）を開発し、新たに開発する近赤外カメラ画像によるアスベスト含有建材検出機能を付加するものである。また、アスベスト含有建材検出機能を選別システムから切り離し、解体現場の事前調査等でアスベustosクリーニング行う可搬型アスベスト検出システムや、再生砕石などに混入しているアスベスト含有の廃棄物を検出するシステムとしての技術展開についても検討する。将来的には選別システムの処理能力を向上させ、選別精度を更に高め、選別可能な廃棄物の種類を増やし、解体工事だけでなく中間処理場や災害廃棄物選別での実用化を目指すものである。

※1：NEDO 技術開発機構からの委託研究として平成18年度～平成22年度に実施



図1-1 車載型建設廃棄物選別システムのイメージ

○本事業における達成目標

【事業全体】

開発する実証設備において、解体工事から排出されたコンクリート、アルミニウム、プラスチック、木材、鉄鋼の5種類の建設廃棄物に混入したアスベスト含有建材の選別精度を70%以上、5種類の建設廃棄物についても60%以上の精度で選別することを目標とする。また、実際の解体工事を想定した検証実験を1回以上行い、解体現場における選別精度検証や装置の可搬性、作業性を確認する。

また、各事業年度における目標を以下のように設定した。

【平成23年度】

近赤外分光フィルタおよびイメージングセンサによるアスベスト含有建材の判定に必要な各パラメータを決定し、判定手法を確立させる。

【平成24年度】

アスベストの飛散を防止する選別機構および飛散防止機構、建設廃棄物の管理方法を確立し、アスベスト含有建材対応型建設系廃棄物選別システムを完成させて性能評価を行う。

【平成25年度】

アスベスト含有建材対応型建設系廃棄物選別システムを使用してコンクリート、アルミニウム、プラスチック、木材、鉄鋼の5種類の建設廃棄物の選別精度を60%以上、混入したアスベスト含有建材の選別精度を70%以上であることを確認する。

実際の解体工事を想定した検証実験を1回以上行い、解体現場における選別精度検証や装置の可搬性、作業性を確認する。

※選別精度とは、対象となる廃棄物を材質毎に選別する確率を表す。

○実施施設の設置場所、設置規模および設置基数

【実証施設の設置場所】

東急建設株式会社 技術研究所（神奈川県相模原市中央区田名3062-1）

【設置規模】

設置面積：約140m²

処理能力：1m³/h

【システムサイズ】

10～15t低床トラックの荷台（長さ9,600mm、幅2,350mm、高さ2,700mm以内）に積載可能な大きさおよび質量

【設置基数】

1基

【処理方式】

磁選機、ロールスクリーン、画像廃棄物選別システム、近赤外センサによる建設廃棄物の分別

○処理対象廃棄物

【処理の対象とする廃棄物の種類】

建設廃棄物におけるコンクリート塊、建設発生木材、廃プラスチック類、金属くず（鉄くず、アルミニウム、有価物としての鉄鋼材料を含む）およびアスベスト含有建材

【処理の対象とする廃棄物の性状】

形態：固体（解体工事等から排出された廃棄物であるため形状は多様）

最大径：30cm

異物の混入：コンクリート塊、木くず、廃プラスチック類、金属くず（鉄くず、アルミニウム、有価物としての鉄鋼材料を含む）が混在

有害物質の混入：アスベスト含有建材の混入あり

【参考文献】

[1] 「再生砕石にアスベスト」『東京新聞』 2010年8月8日朝刊 1面

2. 開発した技術の詳細

2.1 近赤外カメラによるアスベスト含有建材スクリーニング装置

2.1.1 アスベスト検出手法

アスベストを分析する技術には、位相差顕微鏡とX線回折装置を用いる公定法であるJIS法(JIS A1481)、実体顕微鏡と偏光顕微鏡を用いるISO法(ISO22262-1)などがあるが、前者では建材を粉碎し、後者では酸処理等によって試料を作成する必要があるため、専門機関に分析を依頼し数日間を要する。ここではアスベストを迅速にスクリーニングする方法として「近赤外分光法」に着目した。これは近赤外域の光を当てると、対象物の分子構造によってある特定の波長の光を吸収するという性質[1]を利用したもので、農作物の成分調査や化学工業のプロセス管理などに利用されている[2]。

蛇紋石族のアスベストであるクリソタイル(構造式： $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)標準試料および角閃石族の一種であるクロシドライト($\text{Na}_2(\text{Fe}^{2+}>\text{Mg})_3\text{Fe}_2^{3+}\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$)標準試料を近赤外分光分析計(表2.1.1-1)で測定したところ、図2.1.1-1、図2.1.1-2のような吸光度を示した。2種のアスベストとも $1.4\mu\text{m}$ 、 $2.3\mu\text{m}$ 、 $2.7\mu\text{m}$ 前後に吸光ピークがみられる。次に解体現場において排出量が多いコンクリート、木材、鉄鋼、アルミニウム、プラスチックの5種類について近赤外分光分析計で吸光度を計測した(図2.1.1-3)。また、米国地質研究所(USGS)[3]の近赤外分析データを用いて建設廃棄物として排出量の多い、コンクリート、アスファルト、レンガ、瓦、軽量ブロック、ガラス繊維、石膏、合板、木材、段ボール、これに加えてアスベストと原料が同じアンチゴライト(蛇紋石)とリザルダイト(蛇紋石)および角閃石、鉍物である錐輝石、明晩石、鉄ばん柘榴石、石灰石、石英のスペクトルデータを検証した(図2.1.1-4)。

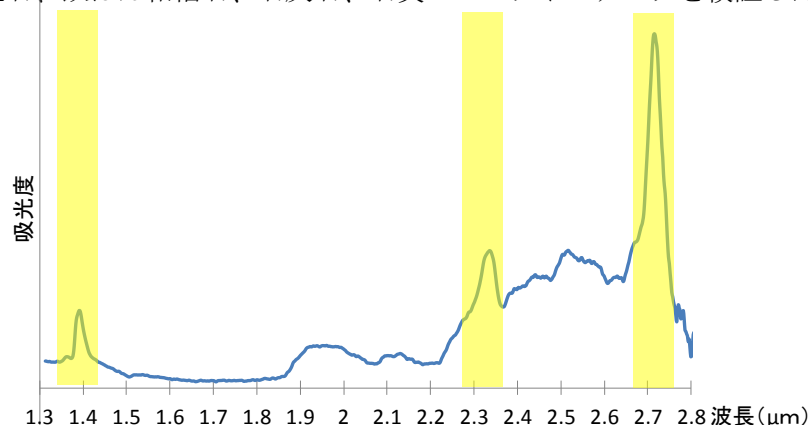


図 2.1.1-1 クリソタイル標準試料の近赤外スペクトル例

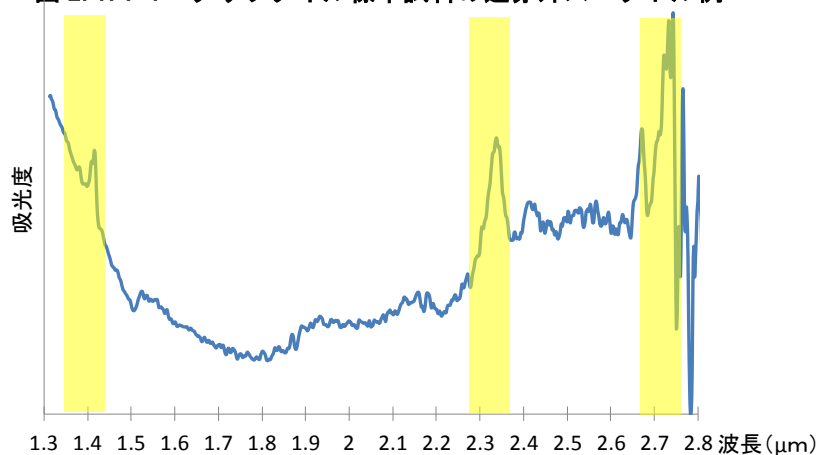


図 2.1.1-2 クロシドライト標準試料の近赤外スペクトル例

表 2.1.1-1 近赤外分光分析計仕様

項 目	仕 様
形 式	PlaScan-W (オプト技研製)
波長範囲(mm)	1, 250-2, 800 (可変)
分解能(nm)	10
検 出 器	PbS

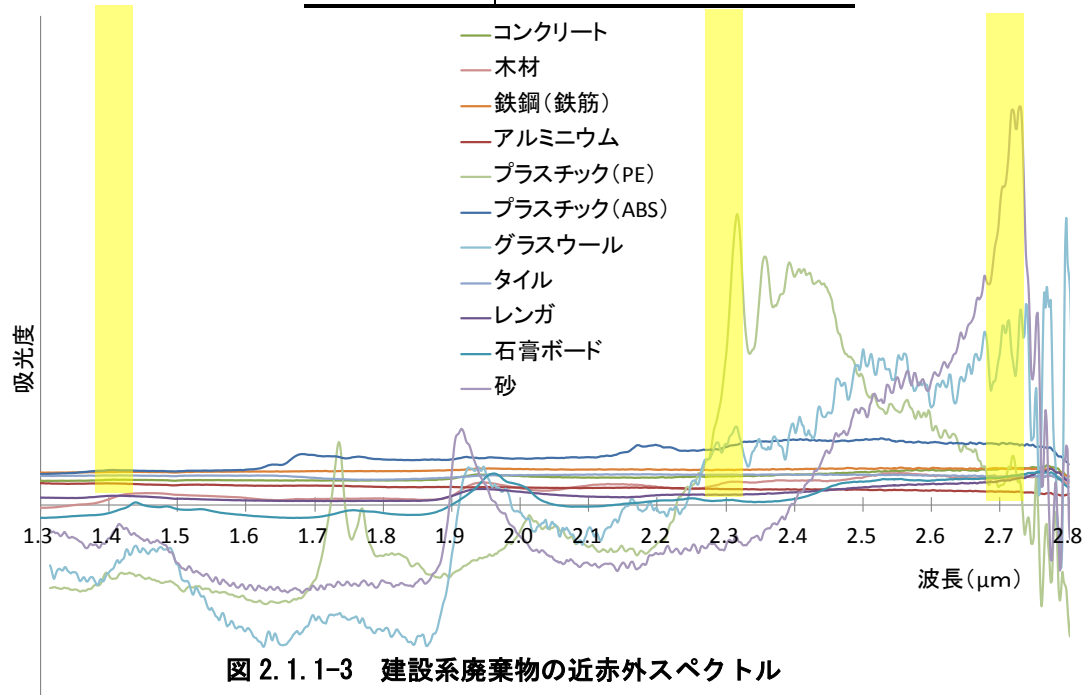


図 2.1.1-3 建設系廃棄物の近赤外スペクトル

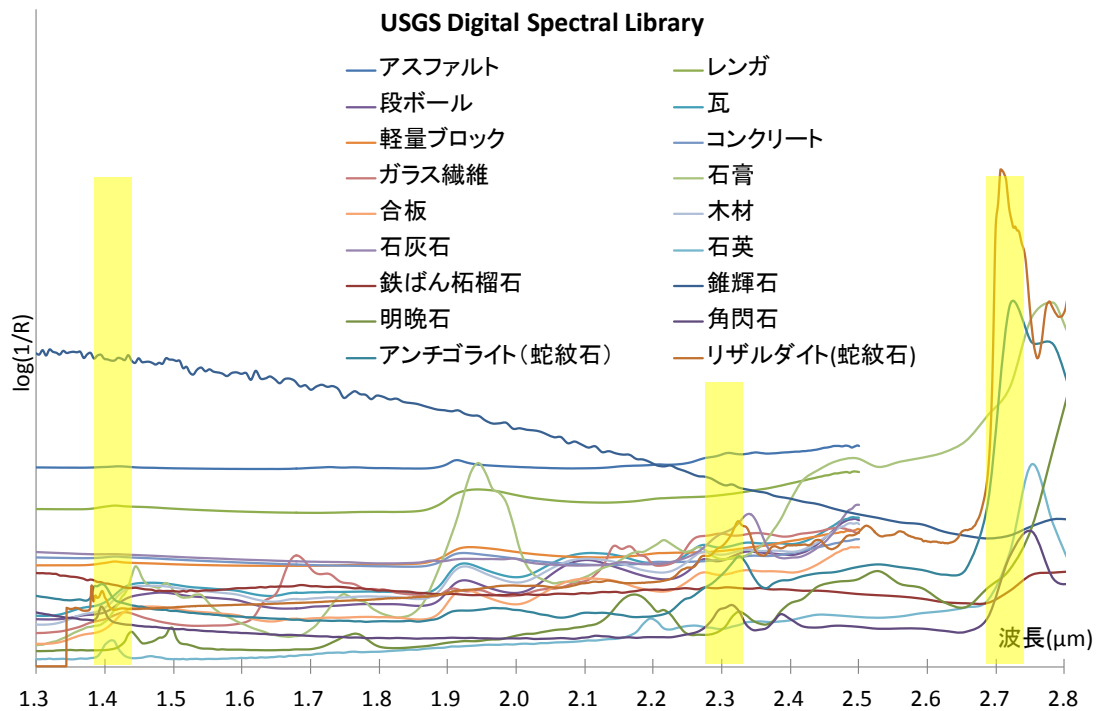


図 2.1.1-4 USGS スペクトルデータ [3]

建設系廃棄物の近赤外スペクトル（図 2.1.1-3）および USGS のスペクトルデータ（図 2.1.1-4）にはクリソタイルのピーク波長の一つである $1.4\mu\text{m}$ 付近に他の材料のピークがないことがわかる。USGS のデータにはアンチゴライト（蛇紋石）、リザルダイト（蛇紋石）にクリソタイルと同じピークがあり、繊維か粒状かを問わず同じ反応を示すことがわかった。一方、クリソタイルの別の吸光ピークである $2.3\mu\text{m}$ 付近および $2.7\mu\text{m}$ 付近にはプラスチックや砂などに含まれる成分によるものと思われる近赤外吸収ピークがあるため、高い分解能をもつ近赤外分光機器を用いなければ区別することが困難と考えられた。

建設廃棄物に含まれる建材を多数スクリーニングするには広い面積を短時間で処理する必要があるため、ある程度の面積の画像に対し画素毎の反射強度を一度に測定できる近赤外カメラを候補とし、近赤外域のフィルタと合わせて市販の機器を調査した。その結果、候補とした 3 つの帯域（ $1.4\mu\text{m}$ 付近、 $2.3\mu\text{m}$ 付近、 $2.7\mu\text{m}$ 付近）から $1.4\mu\text{m}$ 付近の帯域を選択した（表 2.1.1-2）。

この帯域で感度の高いインジウムガリウムヒ素（InGaAs）素子を用いかつ素子の温度安定化能力の高い近赤外カメラを選定した。さらに透過波長をコンピュータによって切り替え可能で半値幅が 6nm と狭い液晶フィルタ、近赤外領域の波長をもつ照明、演算処理用のパーソナルコンピュータを組み合わせアスベスト含有建材検出システムを構築した（図 2.1.1-5）。主な仕様を表 2.1.1-3 に示す。なお近赤外光は建材の内部に侵入する性質はないため、検出にあたってはアスベスト繊維が建材の表面に露出している必要がある。

表 2.1.1-2 近赤外帯域の選択

項目\波長（ μm ）	1.4 付近	2.3 付近	2.7 付近
他材質のピークの存在	少ない	あり	あり
熱による影響	受けにくい	中位	受けやすい
市販品の有無	あり	高感度カメラなし	対応フィルタなし



図 2.1.1-5 アスベスト含有建材検出システム

表 2.1.1-3 アスベスト含有建材検出システム仕様

項 目	仕 様 等
近赤外カメラ	InGaAs 素子，画素数 320×256 ，波長 $0.9 \sim 1.7\mu\text{m}$
フィルタ	種類：液晶チューナブルフィルタ，透過波長： $0.85 \sim 1.8\mu\text{m}$ ，半値幅： 6nm
レ ン ズ	焦点距離 50mm ，F2.0
撮影距離・範囲	撮影距離 550 で 100×80 (0.3×0.3 ／画素)程度
1 画素あたりの範囲 (mm)	撮影距離 $1,060$ で 200×160 (0.6×0.6 ／画素)程度
照 明	$575\text{W} \times 2$ 灯

建材中に含まれるアスベストの吸光度は、アスベストの吸光ピークが小さいこと、建材の他の材料のスペクトルが重なっていること、建材の断面や表面の凹凸（図 2. 1. 1-6）により光が散乱すること、照明出力やフィルタ透過率およびカメラ出力に揺らぎがあることなどがスペクトルに影響を及ぼす。また画素が多いため、近赤外分光分析計のようにスペクトルを採取して判定を行うことをすべての画素で実行すると処理時間が非常に大きくなる。そこでピークの検出にはピーク波長、裾野の 2 波長およびピークと裾野の中間の 2 波長の合計 5 波長における反射強度データのみを用いることにした。アスベストに由来する近赤外吸収のピークを正確に検出するため以下の手順でデータ処理を行うことにした。

- 1) 近赤外カメラによる撮影で 5 波長における画素毎の反射強度を取得する（図 2. 1. 1-7：反射強度をグレースケールに置き換えて表示したもの）（反射強度を $A(\lambda_i)_{xy}$, $i=1\sim5$ とする）
- 2) 各波長における撮影した反射強度データ群から、事前の計測結果から得られた撮影環境や近赤外の反射や散乱などによるノイズレベル以下の画素（図 2. 1. 1-8）をその後の処理から除外する
- 3) 2) で除外されずに残った範囲（対象物範囲）の反射強度データをアスベストの吸光がある画素を特定するため波長毎に正規化する

$$An(\lambda_i)_{xy} = \frac{A(\lambda_i)_{xy} - \min(A(\lambda_i)_{xy})}{\max(A(\lambda_i)_{xy}) - \min(A(\lambda_i)_{xy})} \quad (\text{式 2. 1. 1-1})$$

- 4) 吸収ピーク波長の反射強度と、傾きの中間に該当する 2 点の反射強度から一次微分処理（近似）を行い、各画素における近赤外吸収のピークを検出する

$$dAn(\lambda_i)_{xy} = An(\lambda_{i+k})_{xy} - An(\lambda_{i-k})_{xy} \quad (\text{式 2. 1. 1-2})$$

- 5) 4) でピークを検出した画素について、近赤外の吸収ピーク波長の反射強度とピークの裾野に該当する 2 点の反射強度から二次微分処理（近似）を行い、ピーク波長における近赤外吸光レベルを求める

$$d^2An(\lambda_i)_{xy} = An(\lambda_{i+2k})_{xy} - 2An(\lambda_i)_{xy} + An(\lambda_{i-2k})_{xy} \quad (\text{式 2. 1. 1-3})$$

- 6) ピーク波長における近赤外吸光レベルがしきい値以上である場合、アスベストの近赤外吸収ピークを検出したとして該当する画素を特定し色付けする（図 2. 1. 1-9）（強度に応じ 2 段階：赤、黄で表示）

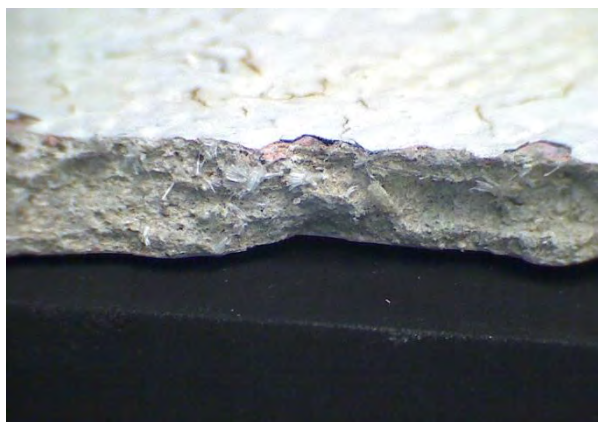


図 2. 1. 1-6 アスベスト含有建材の断面



図 2. 1. 1-7 対象物の反射強度取得（グレースケール）



図 2.1.1-8 除外する撮影環境等

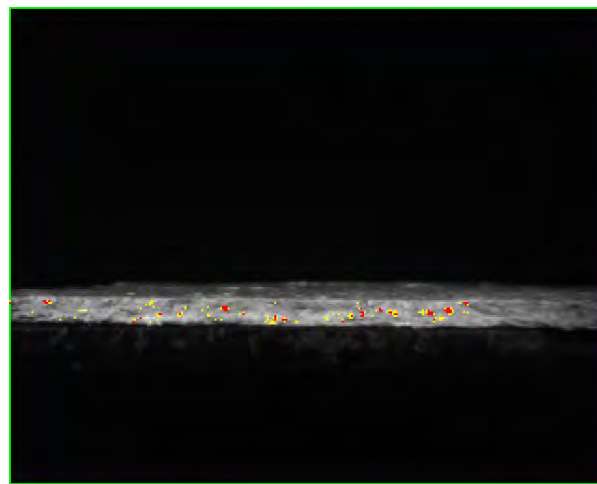


図 2.1.1-9 検出箇所の色付け

2.1.2 アスベスト含有建材検出ソフトウェアの開発

平成 23 年度に開発した「アスベストの近赤外吸収ピーク検出フロー」を用いて廃棄物選別システムに組み込んでアスベストを自動検出するためのソフトウェアを制作した（表 2.1.2-1）。当該ソフトウェアは、①カメラのキャリブレーション、②各種パラメータの設定、③背景撮影、④対象物撮影、⑤アスベスト検出のための演算、⑥検出結果の画面表示、⑦データファイルの保存までを行うものである。判定を行うには、まず近赤外線カメラと検出ソフトウェアの準備と設定を行い、次に「手動判定モード」によって 1 クリックし④～⑦まで実施する（図 2.1.2-1）。

ソフトウェアの準備・設定のための画面を図 2.1.2-2 に示す。検出ピークは 6 個まで設定できるようにした。現在は最も多く使用されたクリソタイルについてピーク波長を特定し実験により検証したが、アモサイト、クロシドライト、トレモライト、アクチノライト、アンソフィライトについてもピーク波長を検証し、ソフトのパラメータ設定・実験を進める。次にソフトウェアの操作・結果表示画面を図 2.1.2-3 に示す。画面にはカメラで撮影された建材断面が表示され、アスベストが検出された箇所に検出強度に応じた色が重ねて表示される（図では赤色および黄色）。これにより、建材断面のアスベスト位置が特定できる。さらにアスベストが検出されると画面左上に警告表示が現れ、警告音が鳴るようにした。なおアスベストの検出精度を高めるため、平成 23 年度の技術開発報告書提出以降、「対象物範囲の正規化」の式の変更を行った。含有率の異なる 7 種類のアスベスト含有建材の断面を 30 回ずつ繰り返し撮影し、クリックから判定までに要する時間を計測した結果、約 4 秒であった（図 2.1.2-4）。この時使用したコンピュータは Panasonic 製 CF-52、OS は Windows Vista である。

アモサイトについては近赤外分光分析計で吸光スペクトルを採取し（図 2.1.2-5）、ピーク波長を特定したが、当該システムでまだ検出に成功していない。1.4 μm 付近に見られるようなピーク波形が、近赤外カメラでは明確に得られていないためである。アモサイトの吸光ピークはクリソタイルのピーク（図 2.1.1-1）と比較して、大きなベースラインの中腹に乗っていることがわかる。また、クリソタイルよりも反射強度自体が小さい。これらの事実が検出を難しくしている一因である可能性がある。今後この問題を解決し、全 6 種の検出を目指す。

表 2. 1. 2-1 ソフトウェア仕様

項 目	仕 様
対応 OS	Windows XP, Vista, 7
データ保存形式	判定画像：BMP 判定結果：CSV 反射強度データ：CSV
通信方式	カメラ-PC 間：GbE フィルタ-PC 間：USB 自動検出装置-PC 間：RS232C

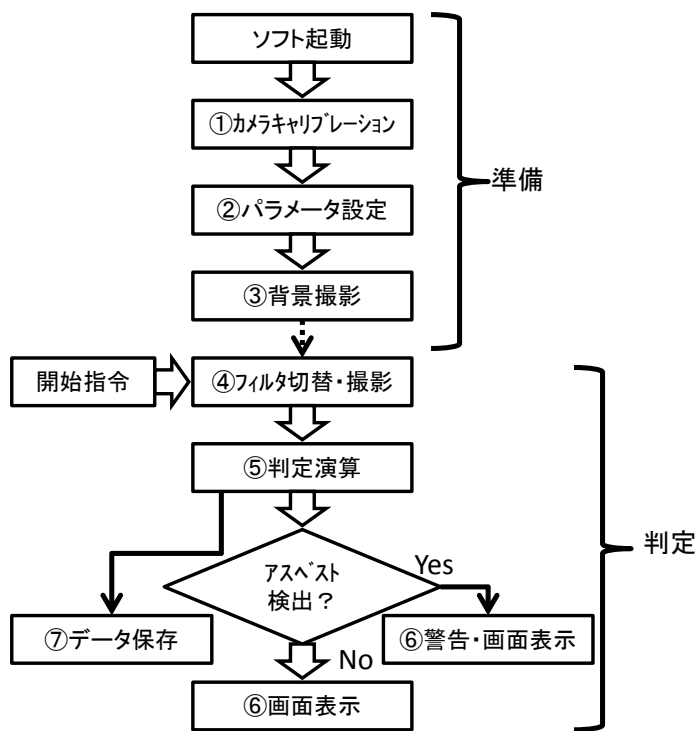


図 2. 1. 2-1 ソフトウェアのフロー概要

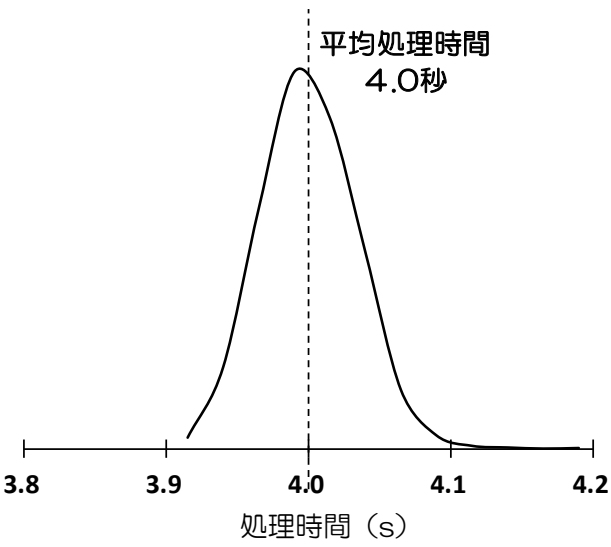


図 2. 1. 2-4 検出処理時間例 (ヒストグラム)

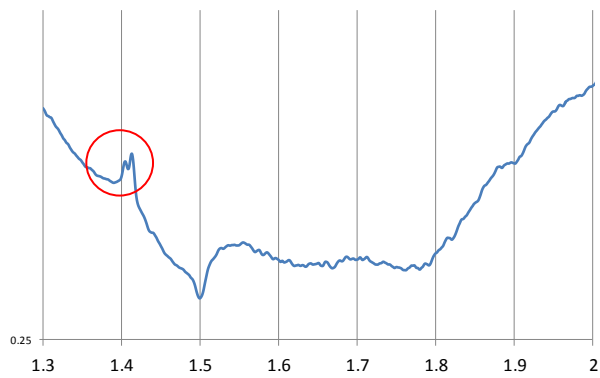


図 2. 1. 2-5 アモサイトの吸光スペクトル
(近赤外分光分析計)



図 2.1.2-2 準備・設定画面



図 2.1.2-3 操作・判定結果表示画面

2.1.3 アスベスト含有建材検出システムの検証実験

廃棄物選別システムに組み込む「アスベスト含有建材自動検出装置」(2.1.5 参照)を開発するにあたり、各種条件およびパラメータを設定する必要がある。そこで検出ソフトウェアを用いて表 2-1-5 に示す各種検出精度検証実験を行い評価した。これとは別に今後の応用可能性を探るため、当該検出装置で検出したアスベストの画素数を計数することでアスベスト含有率が推定できないか基礎実験を行った。

表 2.1.3-1 アスベスト含有建材スクリーニング装置の精度検証実験項目

精度検証実験の項目	目 的
1) 含有率の違い	基本性能の確認
2) 撮影距離の違い	撮影距離の仕様決定
3) 撮影角度の違い	撮影角度の仕様決定
4) 含有率と検出画素密度の相関	検出点の密度から含有率推定の可能性検討

1) 各種アスベスト含有建材の検出精度検証実験

アスベスト(クリソタイル)含有率の異なる 12 種のアスベスト含有建材(表 2.1.3-5 の試料 No. 1~12、巻末資料①参照)を用い、サンプルの辺に相当する特定の断面をカメラ正面に置き、左右から照明を当てた(図 2.1.3-1)。使用機器を表 2.1.3-2 に、設定条件を表 2.1.3-3 示す。サンプル、カメラ、照明の位置関係は図 2.1.3-2 の通りである。アスベスト含有建材検出ソフトの手動モードにより 50 回繰り返し撮影し、検出精度を検証した。その結果、クリソタイル含有率 2.1wt%以上の建材について 94%以上の確率で検出可能であることを確認した(図 2.1.3-3)。

表 2.1.3-2 実験使用機器(実験 1~5 共通)

項 目	名 称	メーカー・型式・仕様等
装 置	近赤外線カメラ	FLIR SC7100
	レ ン ズ	Kowa JC 2/3 インチ用 固定焦点レンズ f50mmF2.0
	フ ィ ル タ	CRI LNIR-06-20
	ソ フ ト ウ エ ア	VariSpec、CIRRUS、ALTAIR (フィルタ、カメラ設定用)
	ソ フ ト ウ エ ア	アスベスト検出ソフトウェア(特注)
機 器	照 明	Stage Evolution CP575B (定格 575W ハロゲンライト) × 2 台
	調 光 器	ELATION Uni pak II
	回 転 ス テ ー ジ	シグマ光機 KSC-606
	コ ン ピ ュ ー タ	Dell Precision M90



図 2.1.3-1 実験装置構成(実験 1~5 共通)

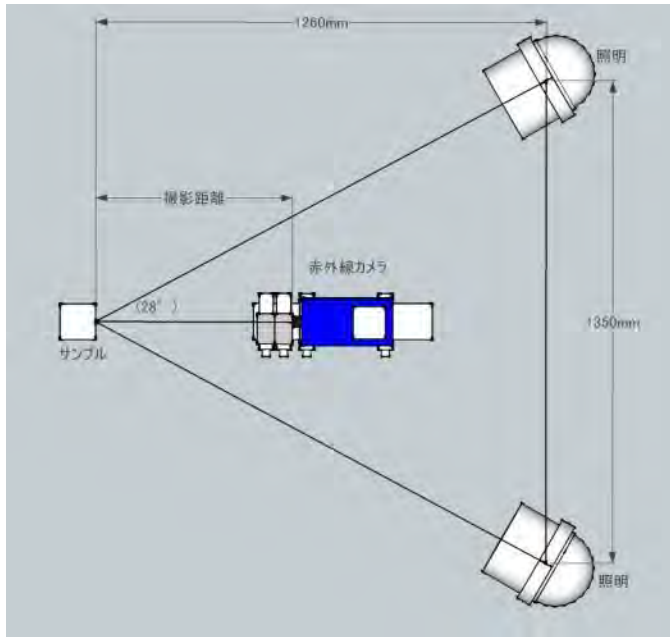


図 2.1.3-2 実験装置配置（実験 1～5 共通）

表 2.1.3-3 実験設定条件

項 目	設定値等
フレームレート (Hz)	50
積算時間 (μ sec)	550
カメラ絞値 (F)	2.8
カメラ冷却モード	2 段階 ON
撮影範囲設定 (ピクセル)	320×256
サンプリング回数	10

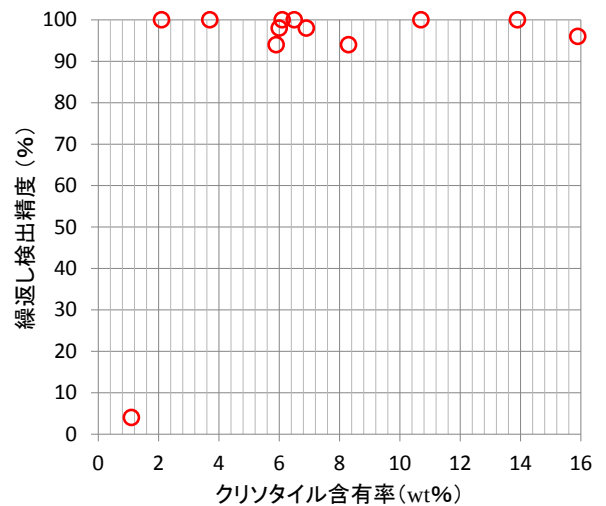


図 2.1.3-3 アスベスト含有建材検出精度

2) 撮影距離による検出精度検証実験

アスベスト含有建材検出システムの処理能力を高くするには、検出精度が高い条件で一度に広範囲を撮影・判定できることが望ましい。また撮影範囲はレンズ焦点距離が小さいほど、撮影距離が大きいほど広いが、レンズ前方に装着するフィルタの口径の関係から焦点距離が 50mm 未満では画面の四隅が欠けて判定に使用できない部分ができるため、50mm とした。

アスベストの検出精度は近赤外線カメラの撮像素子 1 画素あたりに占めるアスベスト繊維の割合が大きいほど高いと予想される。そこで同じアスベスト含有建材のサンプルに対し、撮影距離を 3 段階に変えて検出精度を求めた。その結果を撮影距離と近赤外線カメラ 1 画素あたりの撮影幅、画面全体の撮影幅の関係として表 2.1.3-4 に示した。

サンプルはアスベスト（クリソタイル）含有率の異なる 7 種のアスベスト含有建材（表 2.1.3-5 のハッチングされたもの）を用い、サンプルの辺に相当する断面をカメラ正面に置き、サンプルと照明、カメラの関係をそのままにカメラのみを移動して撮影距離を変えた。1 断面あたり 30 回連続して撮影・判定を繰り返し、アスベスト検出がなされた回数を 30 で除すことにより検出精度%とする。撮影距離 550mm では 7 種のサンプルのすべての断面（辺とみなせる面）を撮影し、検出された演算値を断面毎に合計した。演算値の合計が最大だった断面および最小の断面について撮影距離 1,065mm、1,565mm でも計測・評価した。ただし、塗装されているなどしてアスベストが検出されなかった面は除外している。実験結果グラフを図 2.1.3-4～7 に示す。また検出画像例を図 2.1.3-8 に示す。

表 2.1.3-4 撮影距離と撮影幅の関係

撮影距離 (mm)	1 画素あたりの撮影範囲 (水平×鉛直) (mm)	1 画面の撮影範囲 (水平×鉛直) (mm)	画素数 (水平×鉛直)
550	0.3×0.3	96×76	320×256
1,065	0.6×0.6	192×153	
1,565	0.9×0.9	288×230	

表 2.1.3-5 アスベスト含有建材サンプルリスト

試料No	クリソタイル 含有率 (wt%)
1	1.1
2	2.1
3	3.7
4	4.2
5	5.9
6	6.0
7	6.1
8	6.5
9	6.9
10	8.3
11	10.7
12	13.9
13	15.9
14	18.3

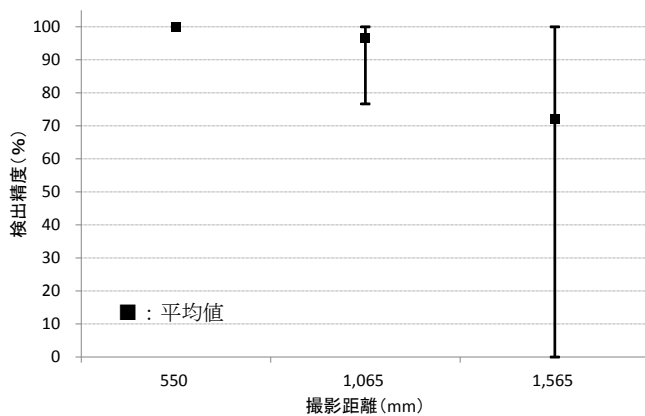


図 2.1.3-4 撮影距離と検出精度
(7 サンプルの演算値最大面)

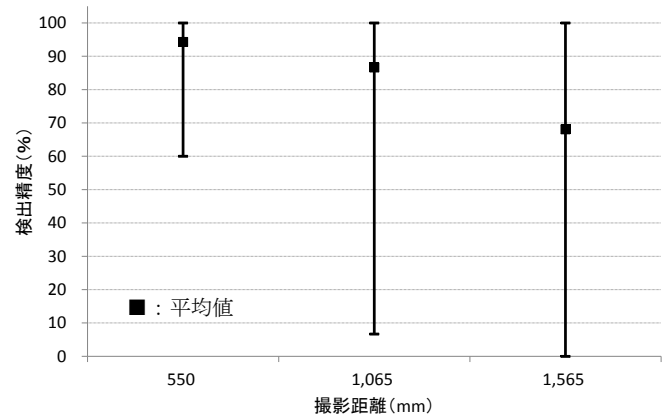


図 2.1.3-5 撮影距離と検出精度
(7 サンプルの演算値最小面)

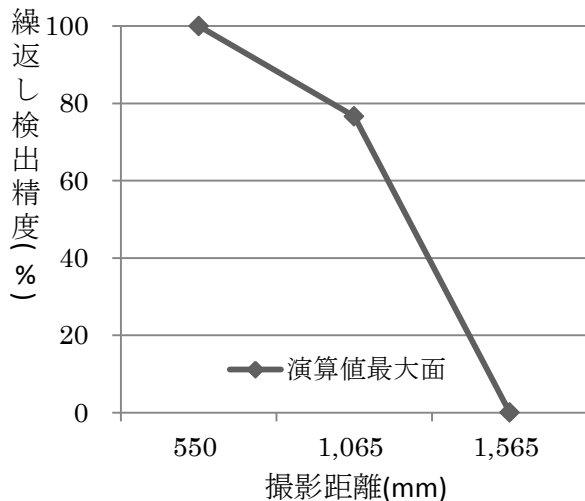


図 2. 1. 3-6 撮影距離と検出精度
(2. 1wt%含有建材)

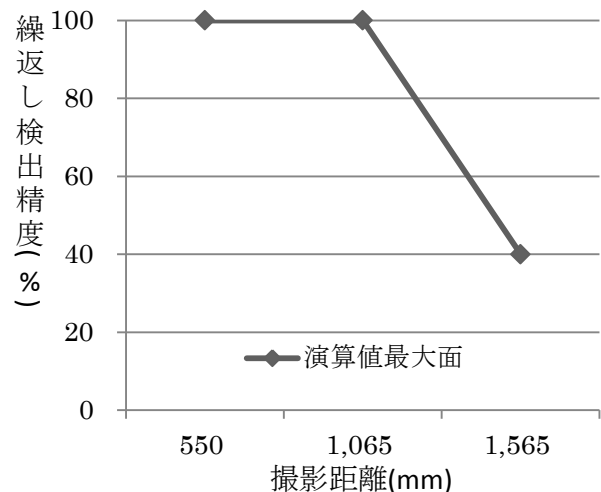
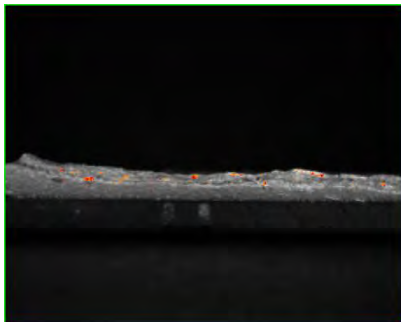


図 2. 1. 3-7 撮影距離と検出精度
(10. 7wt%含有建材)



撮影距離 550mm



撮影距離 1, 065mm



撮影距離 1, 565mm

図 2. 1. 3-8 検出画像例 (10. 7wt%含有建材断面)

【実験結果と考察】

クリソタイル含有率 2. 1wt%の建材を除いて 1 画素あたりの撮影距離が 550mm および 1, 065mm において繰返し検出率は 100%であった。ただし図 2. 1. 3-7 のように検出率は撮影距離に比例して減少する。1, 565mm になると繰返し検出率が低下する建材が現れ、データのばらつきの幅が広がっている (図 2. 1. 3-4, 5)。また 2. 1wt%含有建材では検出される画素数も少なく、検出される撮影幅に比例して検出率が低下し、1, 565mm では検出できなくなっている。2. 1wt%含有建材以外は撮影距離 1, 065mm、1 画素あたりの撮影幅 0. 6mm、1 画面の撮影範囲 192×153mm で繰返し 100%検出できることから、アスベスト含有建材自動検出装置ではこの撮影距離を採用することにした。ただし別の用途でより詳細に調査する際には距離 550mm、撮影範囲 96×76mm を採用する。

3) 対象物の撮影角度と検出精度との関係

アスベスト含有建材の検出は、廃棄物選別システムの中で選別、搬送されてきた建材を近赤外線カメラで自動的に撮影・判定することによって行う。撮影にあたっては建材の辺にあたる断面がカメラ正面を向いていることが望ましいと考えられる。機械的・自動的に建材をカメラ正面に向かせるにあたり、正面に対する許容角度を実験により求める必要がある。そこでアスベスト含有建材7サンプルを回転ステージに載せ（図 2.1.3-9）、それぞれ正面、正面から時計回りに 15° および 30° 、反時計回りに 15° および 30° に向けて（図 2.1.3-10）撮影し、検出精度を検証した。1 サンプルにつき判定演算値が最大の面と最小の面についてそれぞれ行った。1 画素あたりの撮影距離は 550mm、照明強度は 1,160W とした。検出画像例を図 2.1.3-11 示す。



図 2.1.3-9 回転ステージ上のサンプル

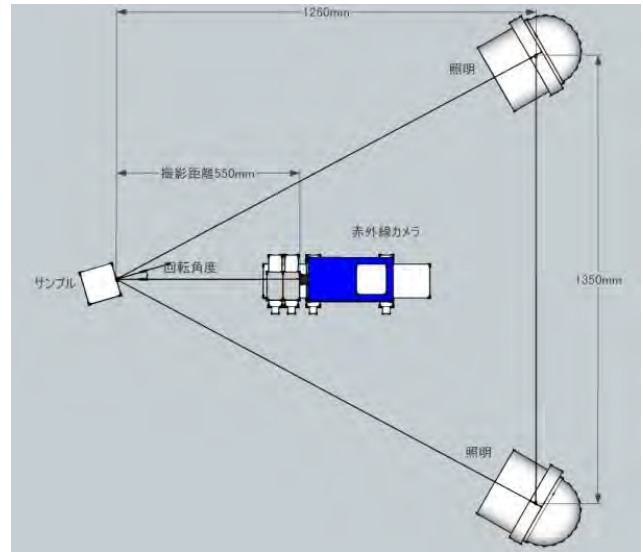
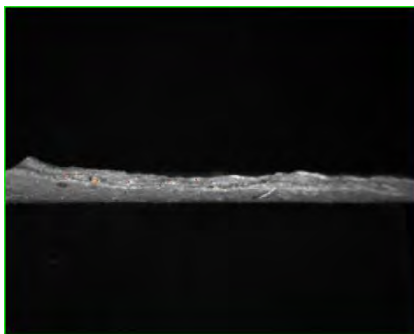


図 2.1.3-10 撮影条件



(反時計回 15°)



(0° 正面)



(時計回 15°)

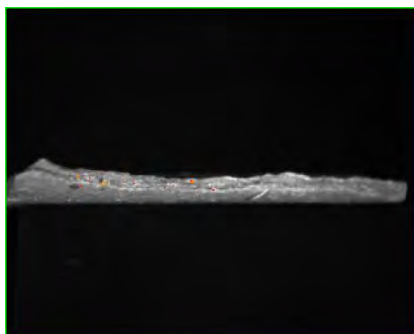


図 2.1.3-11 検出画像例 (10.7wt%含有建材)

【実験結果と考察】

10. 7wt%含有の演算値最大面では図 2. 1. 3-11 のように正面から右に回転させるとサンプル左側の検出画素数が減少した。しかし左回転では検出画素数は減少しない。このことは検出精度にも現れている。こうした個々の現象についてはまだ明確ではないが、以下の複数の原因が考えられる。①本来検出すべき繊維の画像が被写界深度を超えた（15° では画像左右端が、30° ではさらに広い範囲が合焦範囲外）、②サンプル断面の凹凸で繊維が隠れた（オクルージョン）、③サンプル断面の凹凸で影が生じ照明強度が不足した、などである。解決にはサンプル断面をカメラ正面に置いて撮影することが最善と考え、アスベスト含有建材自動検出装置（後述）ではサンプル断面を方向制御する機構を取り入れることにした。

4) アスベスト含有率と検出画素密度との関係

アスベスト含有建材検出システムは、建材の表面に露出するアスベスト繊維の吸光ピークを検出し、検出箇所（画素）を特定することができる。アスベスト繊維がもし均一に混ぜられている建材であれば、含有率が大きい建材ほど、表面に露出するアスベスト繊維が増え検出される画素数が増えると予想される。そこで、アスベスト含有率とアスベスト含有建材検出システムによって検出される画素数との関係について、実験を行うこととした。

クリソタイルの含有率の異なる 7 種類の建材（試料 2, 4, 9, 11, 12, 13, 14（表 2. 1. 3-5 参照））を用意し、アスベスト含有建材検出システム（図 2. 1. 3-1）を用いて検出された画素数をそれぞれ計数した。なおソフトウェアに設定する中心波長は、クリソタイルの吸光ピーク波長とした。

アスベスト繊維の分布にむらがあることを考慮し、それぞれの含有建材について辺とみなせるすべての断面を判定し合計した。さらに判定は 1 つの断面に対して 20 回繰り返し行い平均した。

検出される画素数の算出において検出される画素数は同じ含有率でも、断面の大きさが大きい建材ほど大きくなると考えられる。実験に用いる建材は断面の面積がそれぞれ異なるため、検出される画素数を建材の断面にあたる画素数で除して密度で評価する。なお建材の断面にあたる画素数の算出では、吸光ピークの裾野（短波長側）の波長における反射強度データを使用し、反射強度が 2,500（無単位：使用カメラ固有のもの）以上となった画素を建材の断面とすることにした。断面にあたる画素を水色で、クリソタイルが検出された画素（断面の画素数に含める）は黄色または赤色で示した（例：図 2. 1. 3-13）。また比較のため、試料の判定画像を図 2. 1. 1-12 に示す。

【実験結果と考察】

アスベスト含有率とアスベスト検出点の画素密度の相関を図 2. 1. 3-14 に示す。試料 2, 4, 9, 11, 12（含有率昇順）までは含有率と検出点画素密度とに比例関係にあるようにも見えるが、さらに含有率が高くなると（試料 12, 13, 14）比例関係があるとはいえない。試料 12 の画素密度が高過ぎ、試料 13, 14 が低過ぎるように見える。一試料につき一サンプルを用いて計数したため（試料によっては一サンプルしかない）、断面に露出している繊維のむらの影響が大きい可能性がある。複数サンプルもしくはサンプルを割って新しい断面を出すなど、データを増やす必要があると考えられる。



図 2.1.3-12 判定画像（赤点、黄点：クリソタイル検出）

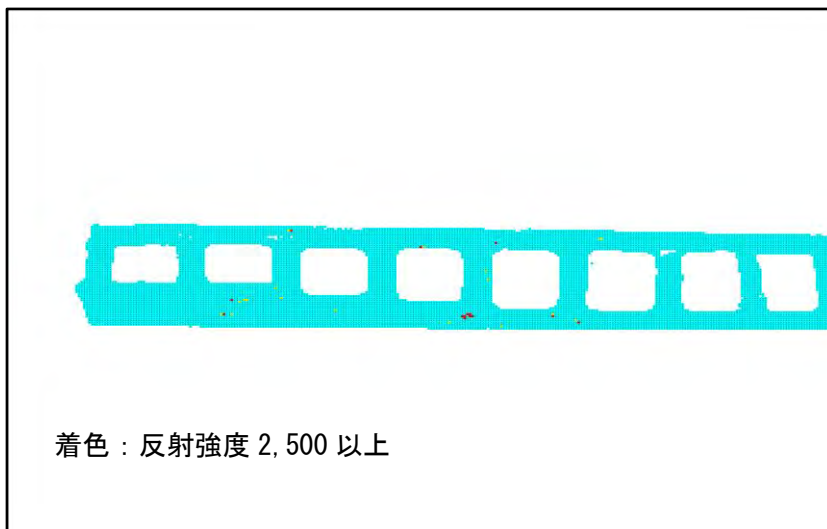


図 2.1.3-13 断面（水色）および検出点（赤・黄）画像

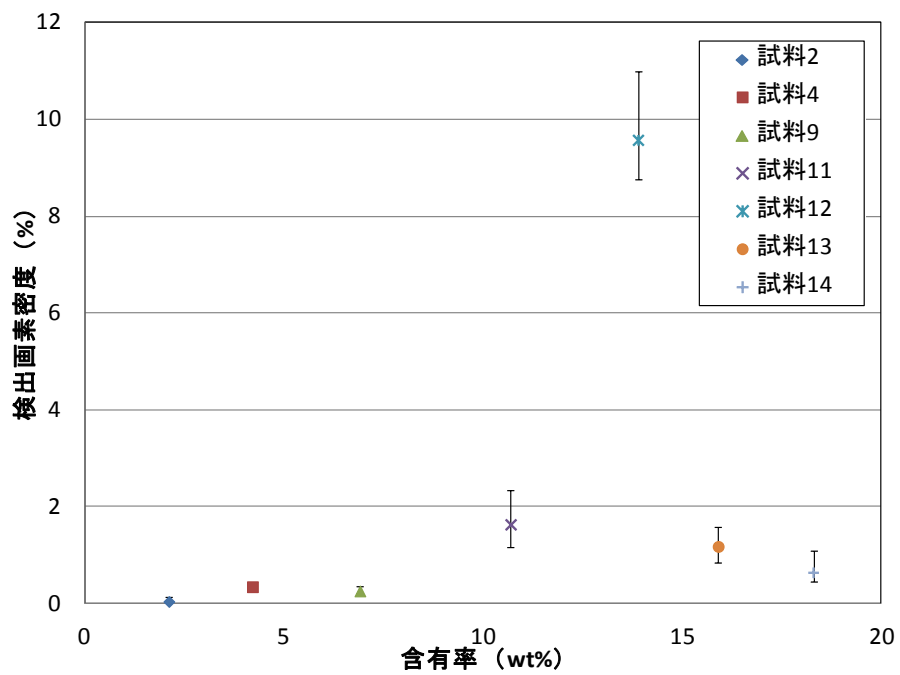


図 2.1.3-14 アスベスト含有率と検出点画素密度

2.1.4 アスベスト含有建材スクリーニング実験

アスベスト含有建材検出システムは建設廃棄物選別システムと組み合わせて、解体廃棄物中に混入したアスベスト含有建材を検出・回収すること以外に、例えば以下のように単体でも活用できると考えた。

- (1) 解体工事の事前調査においてアスベスト含有が疑われる建材のスクリーニングに用いる。現地でスクリーニングが一回あたり最短約4秒で行えるため、目視判定の際の見落としを低減できる。
- (2) 再生砕石中のアスベスト含有建材の有無調査に用いる。敷設された再生砕石を現地でスクリーニングすることができる。

そこで赤外線カメラ、照明、ノートパソコンを一体化し、運搬と設置が容易なフィールド調査用のユニット「アスベustosクリーニング装置」を制作した（図2.1.4-1、表2.1.4-1）。アルミフレームにより建材からカメラまでの距離が一定（550mm）に保てるので、建材を置いて撮影するだけでなく、床に立てた状態や壁に押し当てた状態で撮影することも可能である。また、コンピュータは振動や衝撃に比較的強いとされるタイプを採用した。本装置を複数の現場に持ち込みスクリーニング実験を行った。



図 2.1.4-1 アスベustosクリーニング装置

表 2.1.4-1 アスベustosクリーニング装置仕様

項 目	仕 様 等
近 赤 外 カ メ ラ	InGaAs 素子, 画素数 320×256, 波長 0.9~1.7[μm]
フ ィ ル タ	種類: 液晶チューナブルフィルタ 透過波長: 0.85~1.8[μm], 半値幅: 6[nm]
レ ン ズ	f50[mm], F2.0
撮影距離・範囲, 1 画 素あたりの範囲(mm)	距離 550、範囲 100× 80 程度、1 画素あたり 0.3
照 明	575W×2 灯
コ ン ピ ュ ー タ	Panasonic ToughBook CF-52
外形寸法 (mm)	L930, W900, H570 (突起含む)
質 量 (kg)	約 16

1) 解体前建物のアスベスト調査（現場1）

解体前の建物内でアスベスト含有が疑われる床、壁、天井の計6種の建材をスクリーニングした。床はPタイルを一部切り欠き、真上に装置を立てて撮影した（図2.1.4-2）。また壁は切り欠いた部分に装置を押し当てて撮影した（図2.1.4-3）。後日、公定法（JIS A 1481）で分析した結果と比較した（表2.1.4-2）。

【実験結果と考察】

床材は重ね貼りされていたが、クリソタイルを含有する層を特定することができた（図2.1.4-4, 5）。公定法による分析結果と比較したところ、クリソタイルが含有しているのに検出されないこと（偽陰性）はなかったが、含有していないのに検出すること（偽陽性）が2例あった。見落とし（偽陰性）がなかったのは望ましい。偽陽性の原因はまだ明らかでないが、今後精度向上を図り解決したい。



図 2.1.4-2 床のスクリーニング状況



図 2.1.4-3 壁のスクリーニング状況



図 2.1.4-4 重ね貼りされた床材

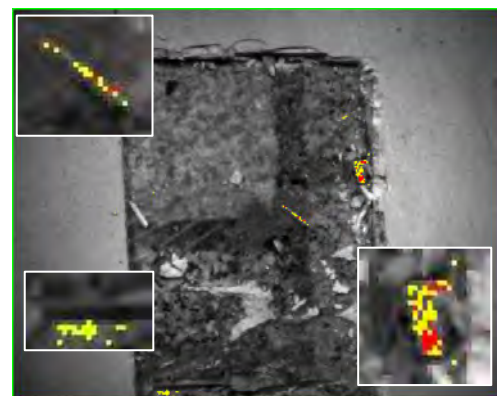


図 2.1.4-5 検出画像（黄、赤点はクリソタイル）

表 2.1.4-2 スクリーニング結果および公定法による分析結果

部位\方法	スクリーニング結果	公定法（JIS A 1481）	
		クリソタイル含有	含有率(wt%)
床 1（P タイル）	○	○	5.6
床 2	△*	×	－
床 3	○	×	－
壁 1	○	○	10
壁 2	○	○	10
天井 1	○	○	0.7

*) 複数回撮影で検出が微弱で安定しなかった

2) 災害廃棄物仮置場の建材スクリーニング（現場2）

（独）国立環境研究所と連携し、東日本大震災により損壊した建物の内外装材等が仮置きされた場所からアスベスト含有が疑われる 32 個の建材を採取した。1 ボックス車の中に仮置きしたアスベストスクリーニング装置によりスクリーニングした（図 2. 1. 4-6, 7, 8）。

後日、（独）国立環境研究所が公定法（JIS A 1481）による分析を行い、スクリーニング装置によるクリソタイルの検出結果と比較した（表 2. 1. 4-3）。

【実験結果と考察】

公定法（JIS A 1481）による分析結果では、アスベスト含有建材は 32 試料中 20 試料であった。スクリーニング結果は 32 試料中 25 試料が正解（78%）で、含有にもかかわらず検出できなかった（偽陰性）が 3 試料、不含にもかかわらず検出した（偽陽性）ものが 4 試料あった。32 試料の写真および判定結果画像は巻末の【資料②】に掲載する。

今回、偽陰性の理由ははっきりしていないが、いずれも含有率が 3 wt% 以下と比較的低い建材であることから、たまたま撮影断面にクリソタイル繊維束が露出していなかった可能性もある。一方、不含なのに検出した（偽陽性）ケースが 4 件あった。散乱等の影響なのか不明であるが、今後明らかにして解決し精度向上を図る。

また今回、電源を発電機から供給し屋外に近い環境（高温多湿）でもスクリーニングができたことから、スクリーニング装置の応用範囲の拡大が期待できる。



図 2. 1. 4-6 災害廃棄物スクリーニング状況



図 2. 1. 4-7 建材例（試料 No. 16）

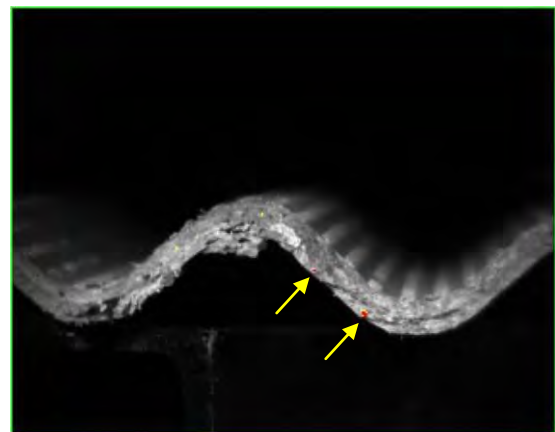


図 2. 1. 4-8 クリソタイル検出画像例（試料 No. 16）

表 2.1.4-3 アスベストスクリーニング結果と公定法（JIS A 1481）分析結果との比較

試料No.	JIS定性分析結果	JIS分析結果 (重量%)	アスベスト検出装置による スクリーニング結果 (クリソタイル有無)	JISとの整合 性	偽陽性 (不含なのに反応)	偽陰性 (含有なのに反応無)
1	不含	-	○	×	✓	
2	クリソタイル	1.6	○	○		
3	クリソタイル	1.6	○	○		
4	クリソタイル	4.9	○	○		
5	不含	-	—	○		
6	不含	-	—	○		
7	クリソタイル/ウオラストナイト	2.6/	○	○		
8	クリソタイル	1.4	○	○		
9	クリソタイル	6.9	○	○		
10	クリソタイル	4.8	○	○		
11	不含	-	○	×	✓	
12	クリソタイル	4.3	○	○		
13	不含	-	—	○		
14	クリソタイル	2.0	○	○		
15	不含	-	—	○		
16	クリソタイル	6.0	○	○		
17	クリソタイル/クロソライト	5.9/0.5	○	○		
18	不含	-	—	○		
19	クリソタイル/ウオラストナイト	2.6/	—	×		✓
20	クリソタイル	2.0	—	×		✓
21	不含	-	○	×	✓	
22	クリソタイル	4.9	○	○		
23	クリソタイル	2.3	—	×		✓
24	不含	-	—	○		
25	クリソタイル	4.9	○	○		
26	クリソタイル	3.1	○	○		
27	不含	-	—	○		
28	不含	-	○	×	✓	
29	クリソタイル	4.6	○	○		
30	クリソタイル	3.9	○	○		
31	クリソタイル	4.8	○	○		
32	不含	-	—	○		
			正解数	25	4	3
			正解率	78%	13%	9%

※ウオラストナイトは管理対象外のため定量値なし

3) 再生砕石のスクリーニング実験

再生砕石が敷設された場所にあったというアスベスト含有が疑われる建材を 30 個入手した。またこれとは別に砕石を入手し、洗浄・乾燥させた (121 個)。これらを室内にてアスベストスクリーニング装置により複数個まとめて撮影・判定した。

【実験結果および考察】

アスベスト含有が疑われる建材については、1～6 個ずつ撮影・判定したところ、30 個中 6 個にクリソタイルの検出反応がみられた (図 2.1.4-9)。このうち 3 個を公定法 (JIS A 1481) にて分析したところ、クリソタイルの含有が確認された (表 2.1.4-4、図 2.1.4-10)。また、砕石は 6～28 個ずつまとめて撮影・判定したところ、121 個中 1 個にクリソタイルの検出反応がみられた (図 2.1.4-11)。しかし表面が水に濡れた状態では検出ができなかった。これは水の吸光スペクトルが判定の妨害をしているためと考えられる。以上から本スクリーニング装置は、表面が乾いていれば砕石に混入したアスベスト含有建材を検出できることがわかった。

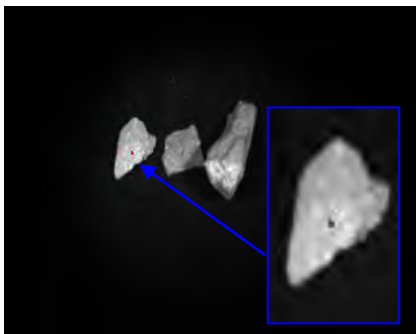


図 2.1.4-9 判定画像例



図 2.1.4-10 公定法で分析した建材 (左から A, B, C)

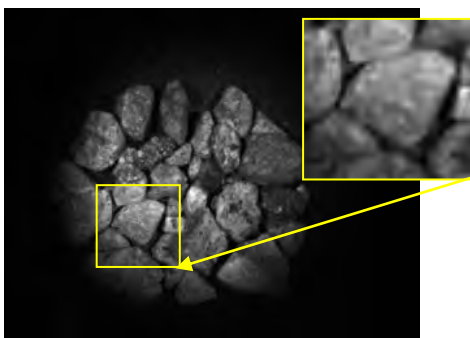


図 2.1.4-11 砕石中アスベスト含有建材検出画像

表 2.1.4-4 公定法 (JIS A 1481) 分析結果

	アスベスト種類	含有率 (wt%)
建材 A	クリソタイル	5.1
建材 B	クリソタイル	6.6
建材 C	クリソタイル	7.8

【アスベスト含有建材スクリーニング実験のまとめ】

災害廃棄物仮置き場における建材スクリーニング実験結果からアスベストスクリーニング装置の検出精度を評価すると、含有率 3 wt% 以下では検出精度 62.5% であったが、含有率 3 wt% 以上では検出精度は 100% であった。アスベスト含有建材スクリーニング装置の目標精度は 9 割であることから、これらの建材に関しては目標を満足している。

2.1.5 アスベスト含有建材自動検出装置の開発

1) アスベスト含有建材自動検出装置の仕様と製作

アスベスト含有建材自動検出装置（以下「自動検出装置」と略す）（図 2.1.5-1、2）は建設廃棄物選別システムと合体し、ロボットアームにより掃引されてきた「その他」の廃棄物を受け入れ、これがアスベストを含有しているかどうかを判定し、回収する（図 2.1.5-3）。検出ソフトウェアはこれに対応する「自動判定モード」を使用する（図 2.1.5-4）。2.1.3 の精度検証実験結果に基づき、1 画素あたりの撮影幅、照明強度を決めた（表 2.1.5-1）。また対象物断面がカメラの正面を向くよう「面出し機能」（図 2.1.5-5）を設けた。アスベスト含有建材はすべての断面にアスベスト繊維が露出しているとは限らない。そこで2本の搬送コンベアを互いに反対方向に作動させて建材を旋回させ検出率を高める撮影断面変更機能を設けた（図 2.1.5-6、7）。また、アスベストが検出された場合には当該装置は一旦停止し、廃棄物選別システム本体に通知する。アスベスト含有建材は、アスベストを含まない廃棄物とは隔離して回収するため、専用の蓋付回収容器に手で差し替えて含有建材を回収・隔離する。自動検出装置の機能を表 2.1.5-2 に示す。

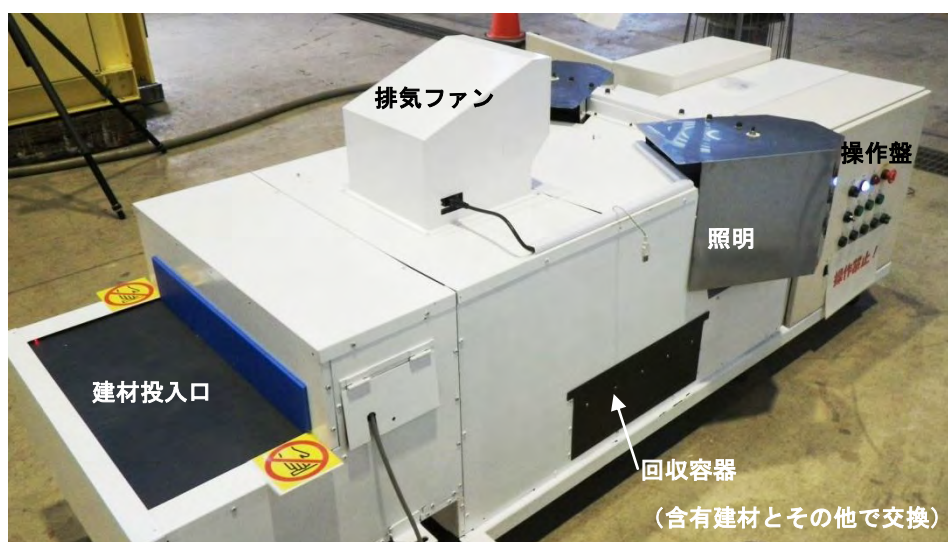


図 2.1.5-1 アスベスト含有建材自動検出装置

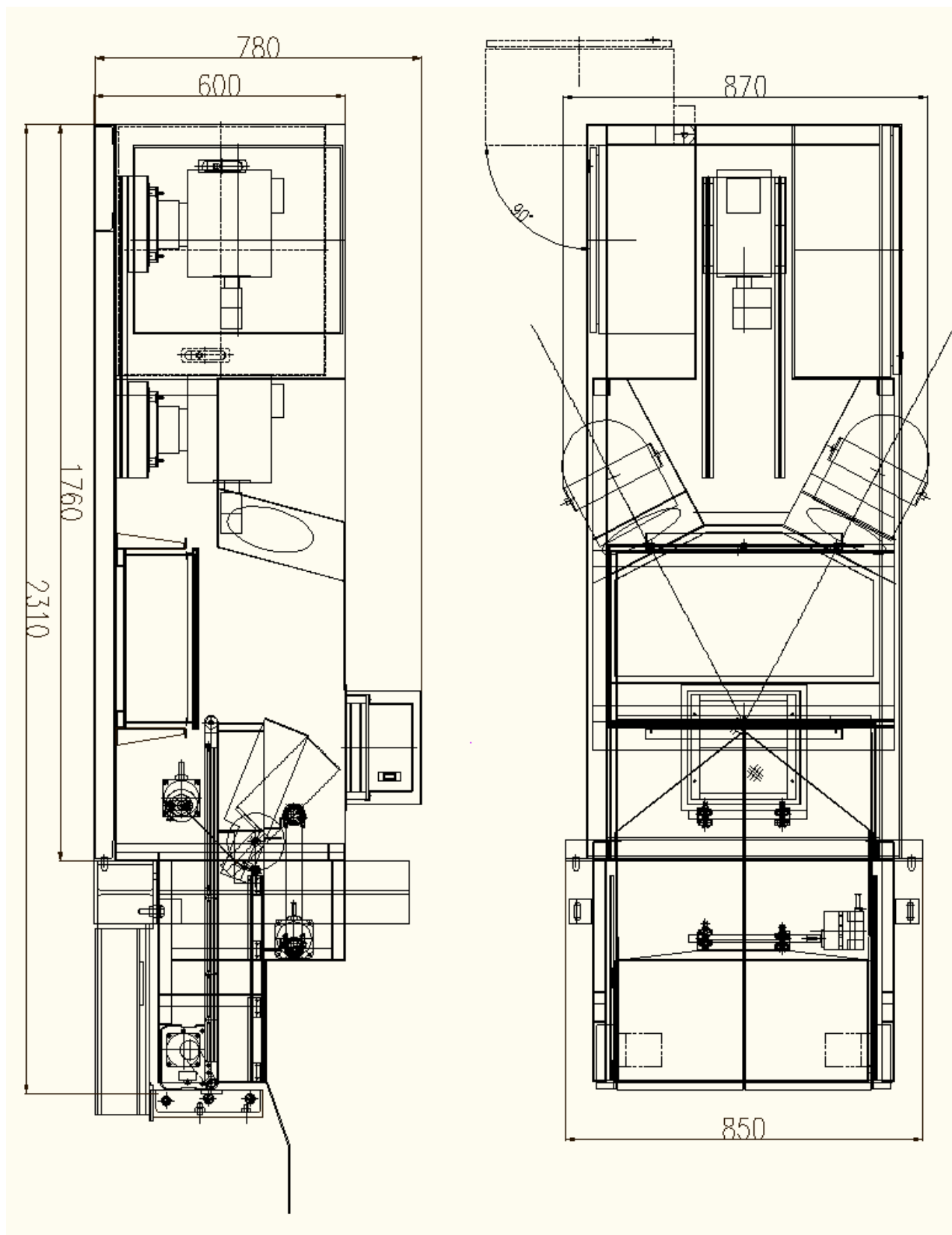


図 2. 1. 5-2 自動検出装置組立図

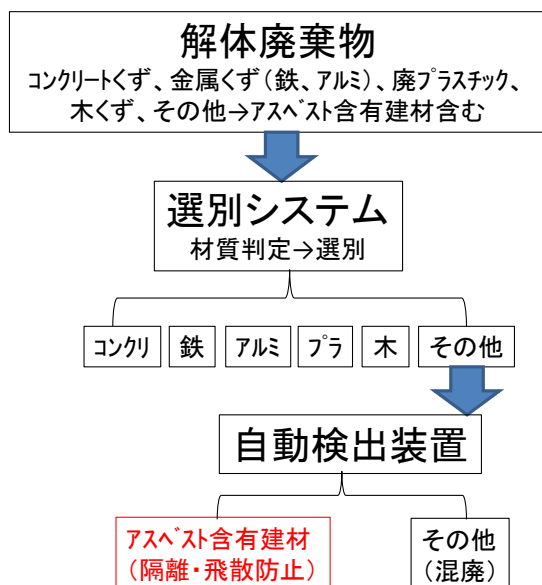


図 2.1.5-3 アスベスト含有建材検出のフロー

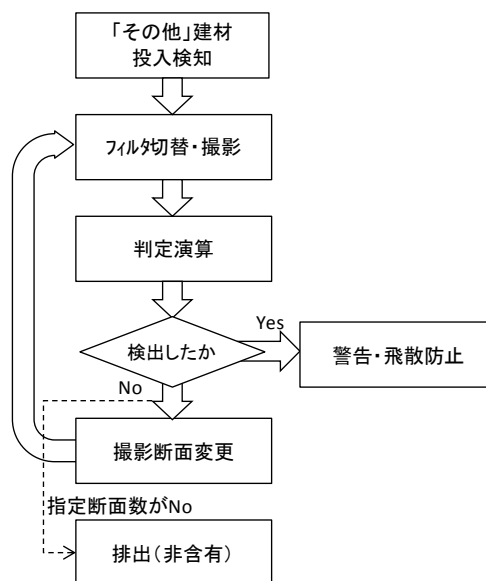


図 2.1.5-4 検出ソフトウェア自動判定フロー

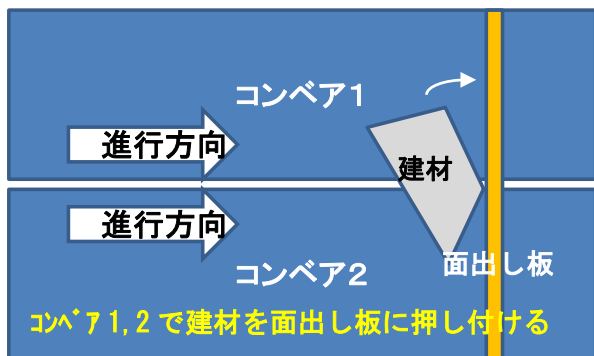


図 2.1.5-5 面出し機能

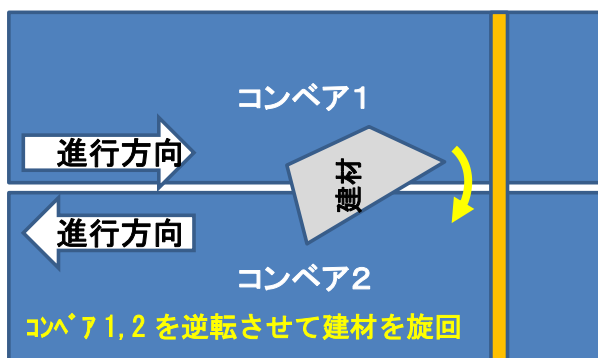


図 2.1.5-6 撮影断面変更機能



図 2.1.5-7 撮影断面変更状況（右辺がカメラ正面）

表 2.1.5-1 アスベスト含有建材自動検出装置仕様

項 目	仕 様
撮影幅/画素, 撮影距離(mm)	0.6 1,065
使用照明	575[W]ハロゲン×2
外形寸法(mm)	L2,130 W850 H780
質 量(kg)	約 200

表 2.1.5-2 自動検出装置の機能

機能	機 能 詳 細	説 明
ア ス ベ ス ト 検 出	1) 建材の受入と検知	コンベア上から落とされた建材を受入れる、受入れたことを検知する
	2) 撮影距離・方向の制御	建材とカメラの距離を一定に保ち、一断面をカメラ正面に向ける
	3) 撮影と判定	アスベスト検出ソフトウェアを用いて自動的に撮影・判定する
	4) アスベスト検出通知	アスベストが検出されたら廃棄物選別システム本体に通知する
	5) 撮影断面変更	初めの断面で検出なしなら建材を旋回させ、他の断面に変更する
	6) バッファ	撮影中は投入口を閉じ次の建材を受入れず、次の建材は蓋の上に仮置く
飛 散 防 止 ・ 貯 蔵	7) 飛散防止	運転中は常時排気ファン（HEPA フィルタ付）で内部を負圧に保つ
	8) 貯蔵	判定を終了した建材を回収容器に貯蔵する
	9) 容量検知	貯蔵した建材の容量が一定以上になったらシステム本体に通知する
	10) 回収容器交換	アスベスト含有建材と非含有建材の回収容器を交換する（手動）

2) アスベスト含有建材自動検出装置の性能評価実験

建設廃棄物選別システムと組み合わせた時のアスベスト含有建材の検出率の目標は7割（システム全体）である。さらにその内訳を、建設廃棄物選別システム側で選別精度目標8割、自動検出装置側の目標を9割とした。自動検出装置の単体の検出率を次の方法で検証した。

(1) アスベスト含有建材のみでの検出精度実験

試料 14（クリソタイル含有率 18.3wt%）のアスベスト含有建材を 10 個用意し（図 2.1.5-8）、自動検出装置の建材投入口から 1 個ずつ投入し自動モードによる判定を行った。投入の際は同じ断面が連続して出ないようにランダムに投入した。実験はそれぞれ 10 回繰り返した。また、第 1 面で検出されなかった場合の断面変更回数は 1 回（第 2 面目まで判定する）に設定した。



図 2.1.5-8 アスベスト含有建材（試料 14）
（このうち 10 個を使用）

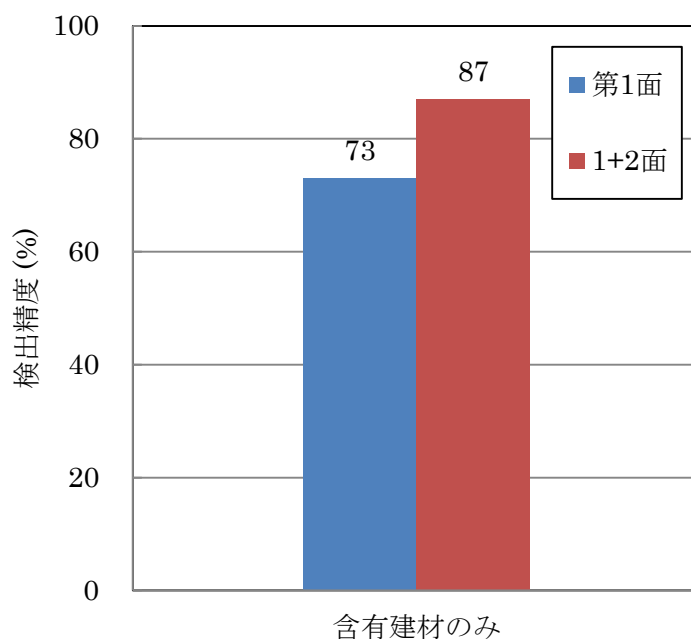


図 2.1.5-9 アスベスト含有建材（単体）の検出率

【実験結果と考察】

含有建材単体の検出率を図 2. 1. 5-9 に示す。第 1 面では 73%と目標の 9 割に届かないが、2 面目まで判定すると 87%まで向上し、9 割をほぼ達成した。3 面目まで判定すればさらに検出率が向上すると考えられるが、時間を要し処理能力が低くなるため 2 面目まで（投入から排出まで約 30 秒間）とした。

(2)他の廃棄物と同時に投入された場合の検出精度実験

自動検出装置を建設廃棄物選別システムに組み込む場合、アスベスト含有建材だけでなく、他の種類の廃棄物も同時に投入される可能性がある。そこで 3 種類の廃棄物（コンクリート塊、木くず、金属くず）（図 2. 1. 5-10～12）をそれぞれ 5 個用意し、アスベスト含有建材と共に投入することで、アスベストの判定性能に与える影響についても検証することとした。実験は、選択した 5 個のアスベスト含有建材（図 2. 1. 5-8）と、他の廃棄物を 1 個ずつ組み合わせて投入して行った。なお、アスベスト含有建材と廃棄物の組み合わせについては、すべてのパターンに対して 1 回ずつ判定を行った。



図 2. 1. 5-10 コンクリート塊



図 2. 1. 5-11 木くず



図 2. 1. 5-12 金属くず（アルミニウム）

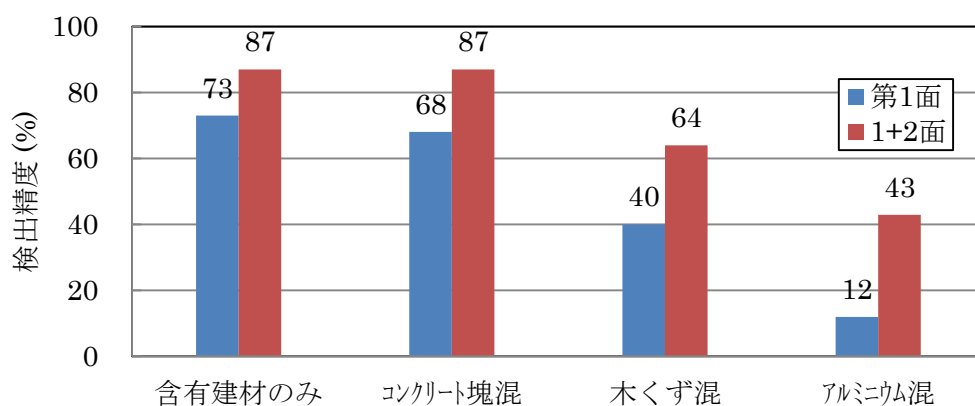


図 2. 1. 5-13 含有建材と他の廃棄物を同時に 1 個ずつ投入した場合の検出精度

【実験結果と考察】

コンクリート塊、木くず、金属くず（アルミニウム）が含有建材と共に投入された場合の検出精度を図 2.1.5-13 に示す。比較のため図 2.1.5-9 のデータも再掲載した。含有建材のみの時と比較すると、他の廃棄物がカメラに対して含有建材を隠したり（図 2.1.5-14）、含有建材を画面の端に寄せたり（図 2.1.5-15）などして検出精度を低下させる傾向があった。アルミニウムが特に低いのは、金属の光沢部の反射強度が高く、アスベストの判定に影響を与えた（図 2.1.5-16）ためである。これは反射強度が一定値以上になった画素のみ演算・判定を行わないように判定ソフトウェアを一部改良すれば解決すると考えられる。

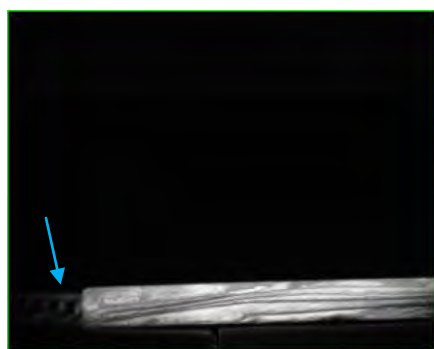


図 2.1.5-14 木くずに隠された含有建材



図 2.1.5-15 コンクリート塊に押し出された含有建材



図 2.1.5-16 アルミニウムの強い反射がある判定画像

【参考文献】

- [1] 岩元他：近赤外分光法入門，pp. 40-45，幸書房，1994.
- [2] 尾崎他編：近赤外分光法，pp. 136-172，学会出版センター，1996.
- [3] 米国地質調査所：USGS Digital Spectral Library 06，米国地質調査所ホームページ (<http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/>)，2008.

2.2 建設廃棄物選別システム

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[1]。上記5品目の建設廃棄物に、アスベスト含有建材を含む「その他」の廃棄物を加えた6品目を効率的かつ正確に選別するため、既に開発した技術である画像処理を応用した材質判定装置[2] [3]をロボットアーム用のビジョンシステムとして使用し、出力される廃棄物判定品目や位置情報を基にロボットアームを動作させてベルトコンベア上の廃棄物を選別する建設廃棄物選別システム（以下、選別システム）を開発する。

また近年、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都市部における解体工事が増加傾向にある。しかし、建物が密集する都市部での解体工事は、狭隘なスペースでの作業が要求されるため、大型の重機、機械装置の搬入や導入が困難な場合がある。本事業で開発する選別システムは解体工事で発生する混合廃棄物の効率的な選別を主目的としているため、現場への搬入が容易でなければならない。そこで、トラック1台に積載可能なサイズ、重さをコンセプトとした選別システムを検討した(図2.2-1)。

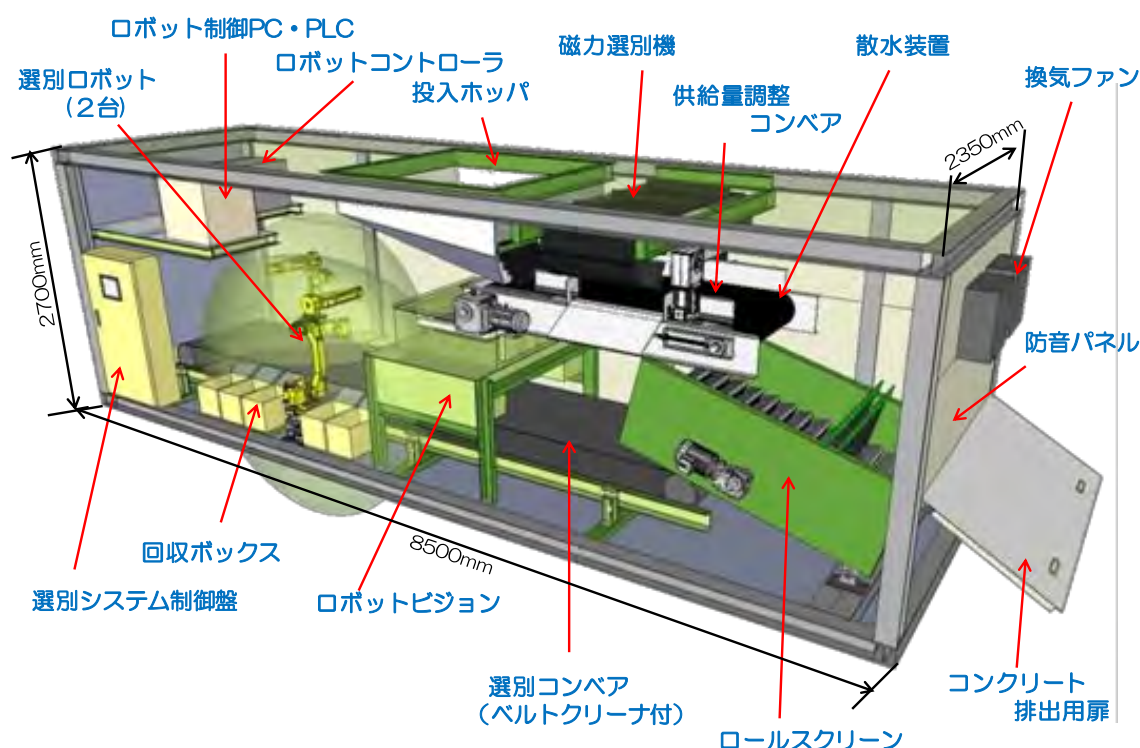


図 2.2-1 選別システムの構成

2.2.1 廃棄物選別システムの概要

以前に開発を行った建設系廃棄物選別システム（図2.2.1-1）は廃棄物を品目毎に選別するため、コンクリート塊とそれ以外の廃棄物を大別するための粗選別工程と、大別された廃棄物を品目毎に選別する精選別工程の2つのシステムから構成され、2つのシステムを中継する形でコンベアが設置されている。しかし、2つのシステムに組込まれた選別機構は同じものが多く、解体工事に設置困難なサイズのシス

テムであった。また、振動ふるいや振動フィーダなどの装置を採用した事により、騒音や振動の規制により狭隘な現場での使用ができないシステムであった。

本事業で開発した選別システム（図 2. 2. 1-2）では投入された廃棄物を省スペースかつ効率的に選別するため、廃棄物選別を行う産業用ロボット（以下、選別ロボット）の前工程として、磁力選別機やロールスクリーンなどの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使用して分別を行うシステム構成とした。また、稼働時の騒音を低減するためシステムの外壁には吸音パネルや吸音材を選別システム内部の全面に設置し、アスベストを含む粉じんの拡散防止のために 50 m³/min の HEPA フィルタ付き大型換気ファンを設置して選別システム内を常に負圧に保っている。

選別システム上部の廃棄物投入口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、傾斜をつけて設置されたロー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する。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選別システム端部から排出され、質量が小さな木くずや廃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ベルトコンベアに排出される。この前工程を行う事により鉄くず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量が多いコンクリート塊を効率的に分別でき、ロボットによる選別作業の精度向上が期待できる。

ロールスクリーンによって分別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



図 2. 2. 1-1 旧選別システム



図 2. 2. 1-2 新選別システム

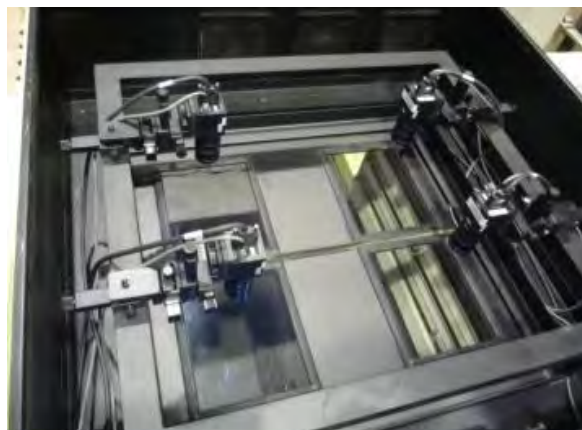


図 2. 2. 1-3 ロボットビジョンカメラ



図 2. 2. 1-4 選別ロボット

コンベアに並べられ、ベルトコンベア上部に設置した廃棄物の材質を判定するロボットビジョンのエリアカメラ(図 2. 2. 1-3)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(図 2. 2. 1-4)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(図 2. 2. 1-5)。この際、コンクリート塊、木くず、金属くず(鋼材やアルミニウム)、プラスチック廃材以外の品目(以下、その他)として選別された廃棄物は、開発した選別システムに接続可能なアスベスト含有建材自動検出装置(図 2. 2. 1-6)によってアスベスト含有を検査する事ができる。アスベストが検出された場合はアラームで報知したうえで別途回収し、飛散防止対策を講じる。また、選別ロボットが動作する際は、廃棄物選別を確実にを行うため選別コンベアを一定間隔で停止させ、ロボットによる選別作業完了後に選別コンベアを再起動させる間欠運転とした。ロールスクリーンによって分別されずに残ったコンクリート塊がコンクリート塊と判定された場合は、選別ロボットを使用せずに選別コンベアの端部から排出される。今回製作した選別システムの仕様を表 2. 2. 1-1 に示す。

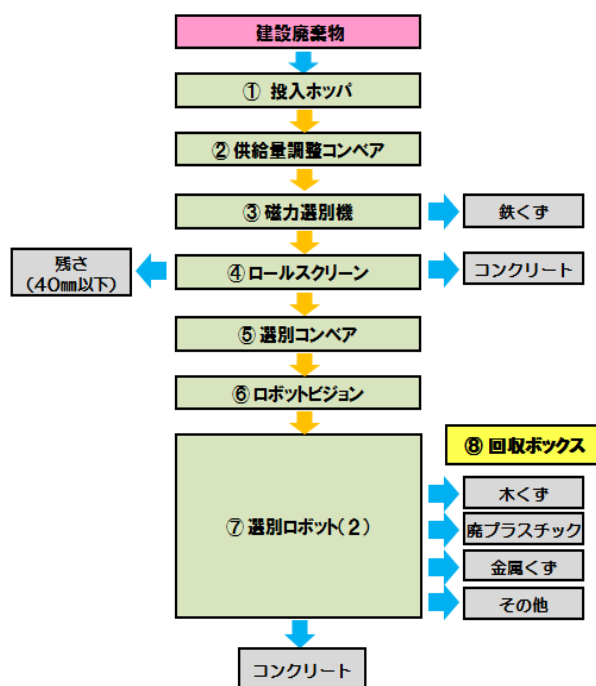


図 2. 2. 1-5 選別フロー



図 2. 2. 1-6 アスベスト含有建材自動検出装置

表 2. 2. 1-1 選別システム仕様

システム寸法 (mm)	L 8,500 × D 2,350 × H 2,700
本体質量 (kg)	12,500
選別品目	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
最大消費電力 (kW)	18
選別可能寸法 (mm)	40 - 300
処理能力 (m³/h)	1(1/10スケールプロトタイプ機での値)

2. 2. 2 廃棄物分別機構

選別システムに投入する廃棄物は、大量のコンクリート塊に他の廃棄物が混入した状態であると想定し、効率的にコンクリート塊と他の廃棄物するために傾斜したロールスクリーンを採用した(図 2. 2. 2-1)。ロールスクリーンは並列配置されたディスクが列ごとに回転して廃棄物を跳ね上げながらディスク回転方向に搬送し、同時にディスク間の隙間から残さをふるい落とす機能を持つ(図 2. 2. 2-2)。ロールスクリーンを使用した解体工事から発生する建設廃棄物の分別に最適な傾斜角度について実験を行った所、19°の角度で設置すると最も精度よくコンクリート塊と他の廃棄物を分別できる事が分かっている[4]。

また、ロールスクリーンに使用されている回転ディスクのふりい目に鉄筋などの鉄くずが挟まると装置の故障につながるため、磁力選別機をロールスクリーンよりも上流に配置し、供給量調整コンベア上の廃棄物から鉄くずを取り除く（図 2. 2. 2-3）。傾斜をつけたロールスクリーンを転がり落ちるために分別しづらい塩ビ管などの円筒形の廃棄物を選別コンベア上へ直接落下させるため、供給量調整コンベアからロールスクリーンに廃棄物が落下する際にチャンネルブラシ（図 2. 2. 1-4）を経由させる。ロールスクリーンによって分別された廃棄物は選別コンベア上に落下し、一定のトルクがかかる事で回転するロールブラシ（図 2. 2. 1-5）によってロボットによる選別作業がしやすい廃棄物の重なりが無く、間隔の空いた状態で選別コンベアに並べられる（図 2. 2. 1-6）。選別システムに使用した選別用機械などの名称と仕様を表 2. 2. 2-1、分別機構の処理フローを以下に示す。

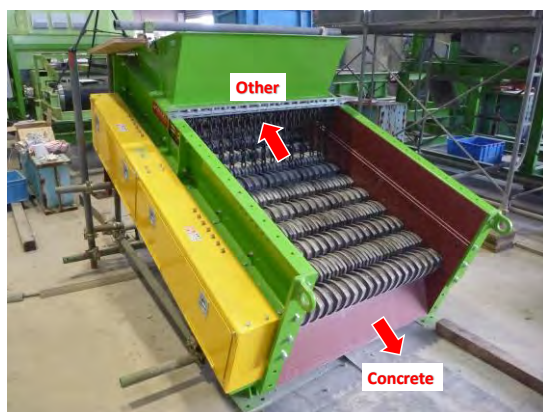


図 2. 2. 2-1 ロールスクリーン

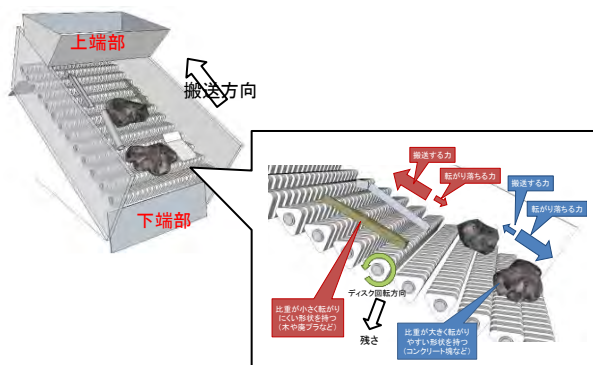


図 2. 2. 2-2 ロールスクリーン概要図

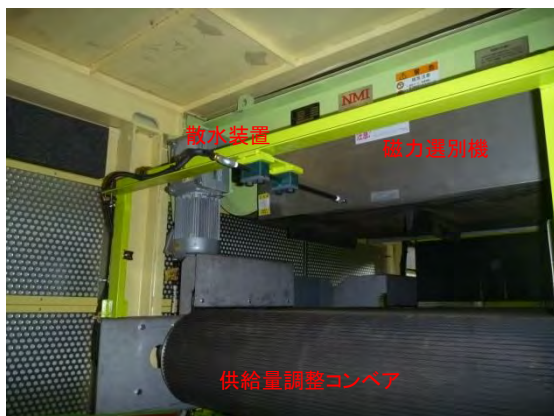


図 2. 2. 2-3 磁力選別機



図 2. 2. 2-4 チャンネルブラシ



図 2. 2. 2-5 ロールブラシ

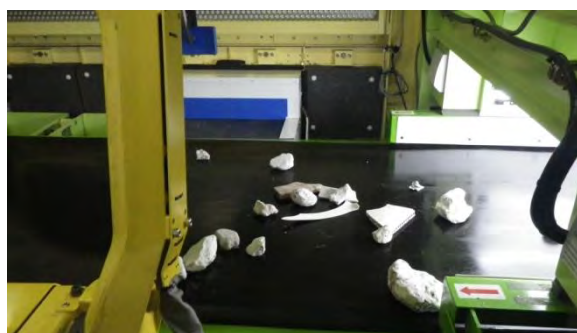


図 2. 2. 2-6 散在する廃棄物

【廃棄物分別機構の処理フロー】

- ① 投入された廃棄物を投入ホップの下部から供給量調整コンベアに供給
 - ※供給量調整コンベアはロボットの選別作業時に間欠運転する選別コンベアに合わせ停止する
 - ※ロボットビジョンによって選別コンベア上の廃棄物数が多いと判断された場合は供給量調整コンベアが停止する
- ② 供給量調整コンベアで搬送中に磁力選別機で「鉄くず」を除去
- ③ 供給量調整コンベア上に残った廃棄物が落下する際、水平に設置したチャンネルブラシを潜らせ、比較的軽く、長い廃棄物はロールスクリーンに落下せずに選別コンベアに直接落下させる（塩ビ管などの円筒形の廃棄物対策）
- ④ チャンネルブラシを経由しても傾斜したロールスクリーンに落下した廃棄物はロールスクリーンの下端から排出される「コンクリート塊」と、ディスクの回転により上端から選別コンベアに移送される「コンクリート塊以外の廃棄物」に分別
 - ※ロールスクリーンのふるい目から 40 mm アンダーの「残さ」を回収
- ⑤ 選別コンベアに落下した廃棄物が重ならず間隔を開けた状態で並べるため、選別コンベア上の廃棄物を回転するロールブラシを通過
- ⑥ 間欠的に駆動する選別コンベアによりロボットビジョンおよび選別ロボットのエリアに廃棄物を順次移送

表 2.2.2-1 選別システム構成機器仕様

名 称	仕 様	備 考
投入ホップ	サイズ：1,890×1,548×890 (mm) 容量：1.3 m ³	
磁力選別機	ベルト速度：47 m/min 重量：1,350 kg	
供給量調整コンベア	ベルト幅：1,000 mm、機長：2,610 mm ベルト速度：2～12 m/min	ラフトップベルト
チャンネルブラシ	長さ：1,100 mm、ブラシ高さ：410 mm サイズ：#13、ブラシ：PP φ2 mm	
ロールスクリーン	サイズ：1,429×2,100×760 (mm) ふるい目幅：19×35 (mm) 処理量：30～70 m ³ /h	アンダー物目安：40～45 mm
ロールブラシ	全長：1,200 mm、ブラシ長さ：950 mm ブラシ径：φ650 mm、軸径：φ48.6 mm ピッチ：25 mm、ブラシ：PP φ1.5 mm	
選別用コンベア	ベルト幅：1,000 mm、機長：6,400 mm ベルト速度：3～10 m/min	ベルトクリーナ付
ロボットビジョン	カメラ：Pantera 2M30 4台 カメラ画素数：1600×1200 FAPC：AVAL ASI-1320-i7-4G 1台	
ロボットアーム	型式：M-10iA 2台、軸数：6軸 可搬質量：10 kg 最大動作速度：190～600° /s	最大動作速度は軸によって異なる
回収ボックス (選別ロボット用)	サイズ：@370×335×250 (mm) 個数：8個	廃プラスチック、木くず、金属くず、その他

2.2.3 廃棄物分別機構の性能検証実験

選別システムの最終年度（平成25年度）における達成目標は、コンクリート塊、木くず、金属くず（鉄くずおよび、アルミニウムなどの非鉄金属）、廃プラスチックの5品目の建設廃棄物の選別精度（該当品目に選別される確率）が60%以上であり、アスベスト含有建材の選別精度は70%以上となっている。この目標を達成するためにはロボットアームを使用した廃棄物抽出システムの精度だけでなく、選別ロボットで選別を行う前に、既存の選別用機械を組み合わせた分別機構の性能も重要である。この分別機構とは、投入ホッパからロールスクリーンまでの処理工程（処理フロー①～④）に使用される機器構成（投入ホッパ、供給量調整コンベア、磁力選別機、チャンネルブラシ、ロールスクリーンおよび附帯する設備）であり、大量のコンクリート塊と他の廃棄物を分別させて選別ロボットによる廃棄物選別動作の負担を軽減する事を目的としている。

分別機構の性能を検証するため、解体現場から採取したコンクリート塊、金属くず（鉄くず、アルミニウム）、木くず、廃プラスチック、の5品目の建設廃棄物（建設副産物）に、アスベスト含有建材として多く使用されていたスレート材の代替品として、市販されているスレートボード（アスベスト非含有）を加えた6品目のサンプル（図2.2.3-1）を分別機構に投入し、投入ホッパから選別コンベアまでの処理フローによってコンクリート塊と他の廃棄物に分別する精度を求める実験を行った。実験は、現場の廃棄物の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品目のサンプル各30個を混ぜ合わせたもの（図2.2.3-2）を投入ホッパに入れる。そして、処理フロー①～⑥に従い分別され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（図2.2.3-3）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回行い、3回分のサンプル数の計測結果から、ロールスクリーンの下端から排出されたコンクリート塊の割合をコンクリート塊の分別精度、ロールスクリーンの上端および磁力選別機で分別された各サンプルの割合をそれぞれの分別機構の分別精度として求める。



1) コンクリート塊



2) 金属くず（鉄くず）



3) 金属くず（アルミニウム）



4) 木くず



5) 廃プラスチック



6) スレートボード

図 2.2.3-1 6品目の廃棄物サンプル



図 2. 2. 3-2 混合した廃棄物サンプル



図 2. 2. 3-4 ゴムカーテン



a) ロールスクリーン上端から排出された廃棄物



b) ロールスクリーン下端

図 2. 2. 3-3 分別後の廃棄物サンプル

実験に際し、投入された廃棄物の供給量を一定に保つために投入ホップの排出口部分にゴムカーテンを設置した（図 2. 2. 3-4）。また、供給量調整コンベアの速度を 1m/min、ロールスクリーンの回転数を 65. 9rpm(32Hz)とした。

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を品目ごとの集計を表 2. 2. 3-1 に示す。表に記載されている値は、3回の実験を合計したものである。

表 2. 2. 3-1 分別機構の性能検証結果

	コンクリート塊	金属くず (鉄くず)	金属くず (アルミニウム)	廃プラスチック	木くず	スレート材
投入数	450	90	90	90	90	90
磁力選別機	0	79	0	1	0	0
ロールスクリーン 上端	121	10	90	87	88	89
ロールスクリーン 下端	329	1	0	2	2	1

集計結果から、磁力選別機によって全ての金属くず（鉄くず）が取り除かれず、磁性の無い廃プラスチックも抽出されている事がわかる。これは、ゴムカーテンの効果が十分に得られず、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

較的軽量の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%の割合で発生した。

過去に行ったロールスクリーンの最適傾斜角度に関する検証実験結果[5]では、19°が混合廃棄物分別に最適な角度であり、この際の廃棄物の挙動によりコンクリート塊の分別精度目標を70%以上に設定した。また、選別システムによる5種類の建設廃棄物選別精度目標60%以上を達成するために、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を共に80%以上とした。これにより選別システムの目標達成に必要な分別機構単体の分別精度目標は95%以上に設定した。

表2.2.3-1の結果を分別率のグラフにしたものを図2.2.3-5に示す。これらの実証実験結果から、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。製作した分別機構を使用する事で、選別システムの選別精度目標達成のために自ら設定した個別の数値目標であるコンクリート塊の70%以上、コンクリート塊以外の廃棄物の95%以上を達成できる事が分かった。ただし、処理速度の大きさに比例してロールスクリーンの下端に転がり落ちるコンクリート塊の量も増加するため、巻き込まれて下端に転落する廃棄物の量が目標値を下回らない処理速度を設定する必要がある。

分別後、ロボットビジョンによりコンクリートと判定された選別コンベア上のコンクリート塊は、選別ロボットで回収されずに選別コンベア端部から排出される事になっている。そのため、ロールスクリーンによるコンクリート塊の分別精度は、選別システムの選別精度に対し直接的な影響は無い。しかし、選別コンベア上でコンクリート塊が他の廃棄物に接触することで、ロボットビジョンによって形状等が誤って判断されて正しい材質に回収されない事がある。また、選別コンベア上のコンクリート塊が選別ロボットによる選別動作の支障となるため、選別システムに投入するコンクリート塊を100mm以下の大きさに破砕せず、確実にロールスクリーン下端から排出させコンクリート塊の分別精度を向上させる事が望ましい。

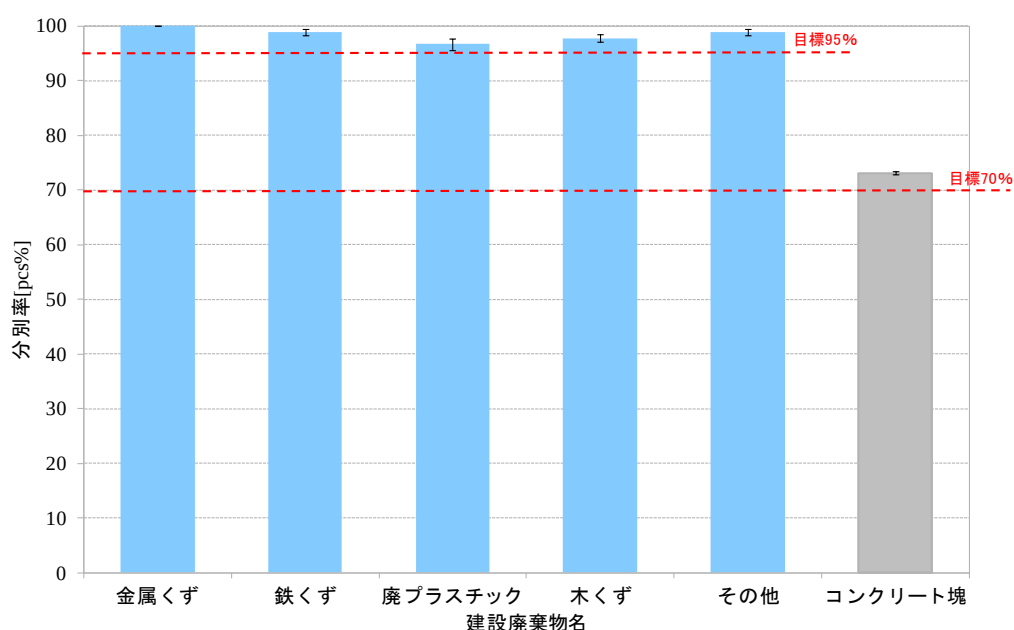


図 2.2.3-5 分別機構の分別率

選別コンベアにおける廃棄物の接触や重なりはロボットビジョンの廃棄物材質判定に影響するだけでなく、選別ロボットによる選別時に実施するロボットハンドの保持動作や掃引経路計画などに悪影響を与え（図 2. 2. 3-6）、選別システムの選別精度を大きく低下させる。ロールスクリーン上端から排出された分別後の廃棄物は選別コンベアに落下し、ロールブラシによって可能な限り廃棄物の重なりが無く、間隔の空いた状態で選別コンベアに並べられるように調整されているが、廃棄物の形状や落下のタイミング等により複数廃棄物の接触や重なりが発生する（図 2. 2. 3-7）事がある。

前述した分別機構の性能検証実験において、選別コンベア上の廃棄物に接触や重なりが発生した回数と廃棄物の種類を記録し、ロールブラシの効果を確認すると共に、廃棄物の品目が接触や重なりに影響するかを調べた。選別コンベアにおける品目ごとの選別対象数と接触率を図 2. 2. 3-8 に示す。図 2. 2. 3-8 に示す接触率は選別コンベア上に搬送された選別対象となる各品目の廃棄物数から接触した割合を求めたものであり、磁力選別機で除去された鉄くずの数は考慮しない。

図 2. 2. 3-8 から、選別コンベア上で鉄くず以外の廃棄物が接触する確率は約 2%程度であり、目標とした選別システムの選別精度に大きな影響を与えるレベルではない事を確認した。しかし、磁力選別機によって取り除かれ選別コンベア上に搬送される数が少ない鉄くずは、搬送された数の 50%が接触している。これは、廃棄物に混入させたものの中に複雑な形状の鉄筋などが含まれていて、これらが他の廃棄物と絡み合う様に接触するケースが多く発生した事が原因である。

この性能検証実験により、選別コンベア上の廃棄物を散在させるためにロールブラシが有効である事が分かった。しかし、折れ曲がった鉄筋などの複雑な形状の廃棄物は接触などの原因になるため、供給量調整コンベアで搬送する前に敷均しを十分に行い、磁力選別機で可能な限り取り除く事が必要である。



図 2. 2. 3-6 掃引時の干渉



図 2. 2. 3-7 廃棄物の接触・重なり

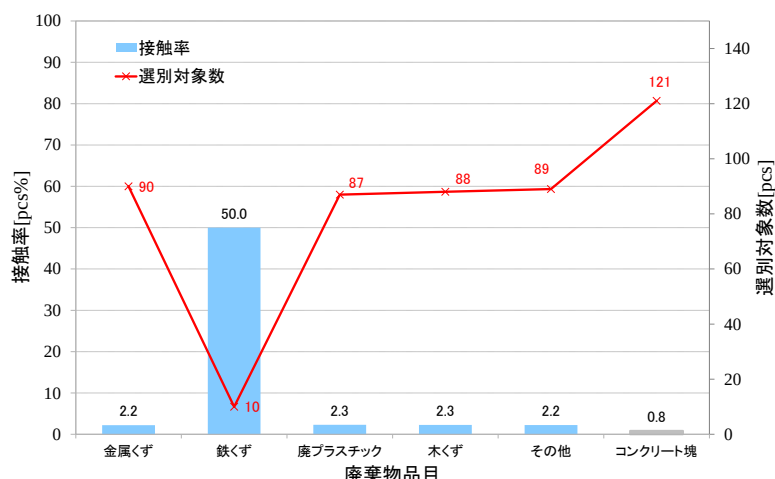


図 2. 2. 3-8 選別コンベア上の廃棄物接触率

2.2.4 選別用ロボットアーム

建設廃棄物（建設副産物）を解体現場オンサイトで安全かつ効率よく選別するため、弊社で開発したロボットビジョン（画像処理を応用した建設廃棄物判定装置[1]）および産業用ロボットアームを組み合わせた、建設副産物回収システムを開発した。

1) 要求仕様

本システムで回収する対象物の仕様を表 2.2.4-1 に示す。対象物のサイズについては、ビルなどの解体工事から排出される建設廃棄物（建設副産物）の約 80%はコンクリート塊である。これに木くず、金属くず（鉄くず、アルミニウム）、廃プラスチックを加えた 5 品目では 95%以上を占める。これにその他の建材（アスベスト含有建材など）を加えた 6 品目をロボットアームによる回収対象とした。ただしコンクリート塊についてはコンベア終端でも回収するため、他の廃棄物を回収する際に妨げになる場合にのみ回収対象とする。

ロボットアームによる操作対象物である廃棄物は、形状や大きさが千差万別であるものの、一定の傾向がある。これを定量的に把握するため、実際の解体現場から排出された廃棄物のサイズ分布について、過去の調査データに基づいた統計分析を試みた。分析対象はコンクリート構造物の解体現場 2 ヶ所とした。図 2.2.4-1 にコンクリート塊、図 2.2.4-2 はそれ以外についてのサイズ分布を示す。横軸はふるい目の一辺の大きさ、縦軸はふるいを通過した質量分率である。その結果、廃棄物の最大長さは 300 mm 以下であった。さらにロールスクリーンによって 40 mm 以下の対象物がふるい落とされることを考慮し、対象物の想定サイズは 40～300 mm とした。全体の 50 wt%が通過するふるい目の大きさ（d50）を平均サイズと考えると、コンクリート塊は 120 ± 40 mm、それ以外は 75 ± 15 mm であった。対象物の最大質量については、コンクリート塊の平均サイズよりも大きいコンクリート塊はロールスクリーンによって取り除かれると仮定し、直径 120 mm のコンクリート塊を想定する。その形状を仮に球とすると質量は 2.1 kg であることから、2 kg を最大質量と想定した。

表 2.2.4-1 廃棄物選別用ロボットアームの回収対象物

品目	木くず、金属くず（鉄くず、アルミニウム）、廃プラスチック、その他の建材、（コンクリート塊）
形状	不定形、40～300（mm）
質量	2 kg 以下

これらの対象物を 80%の成功率（個数率）で回収することを目標として、ロボットアームの要求仕様を表 2.2.4-2 にまとめた。可搬重量は、対象物の最大質量に加えてロボットハンドの質量を 3 kg 程度と想定すると、5 kg は必要である。水平可動範囲は、道路交通法に規定された車幅が 2.35 m であることから、その半分の 1.2 m 以上は必要である。垂直可動範囲は、廃棄物の最大サイズである 0.3 m 以上は必要である。動作速度は、可動範囲内を 1 秒程度で往復できる必要があるため、2 m/s 以上とした。耐環境性は、廃棄物の投入に伴って発生する粉塵や、粉塵を抑えるための散水によって故障しないように、全ての機器を IP54*以上にする必要がある。

* IP (International Protection)は、IEC 規格 529 にて規定される機器の保護等級を記号で示したもの。IP54 の「5」は「粉塵が内部に侵入することを防止する。若干の粉塵の侵入があっても正常な運転を阻害しない。」を意味し、「4」は「いかなる方向からの水の飛沫によっても有害な影響を受けない。」を意味する。

表 2.2.4-2 廃棄物選別用ロボットアームの要求仕様

可搬重量	水平可動範囲	垂直可動範囲	動作速度	耐環境性
6 kg 以上	1.2 m 以上	0.3 m 以上	2 m/s 以上	IP54

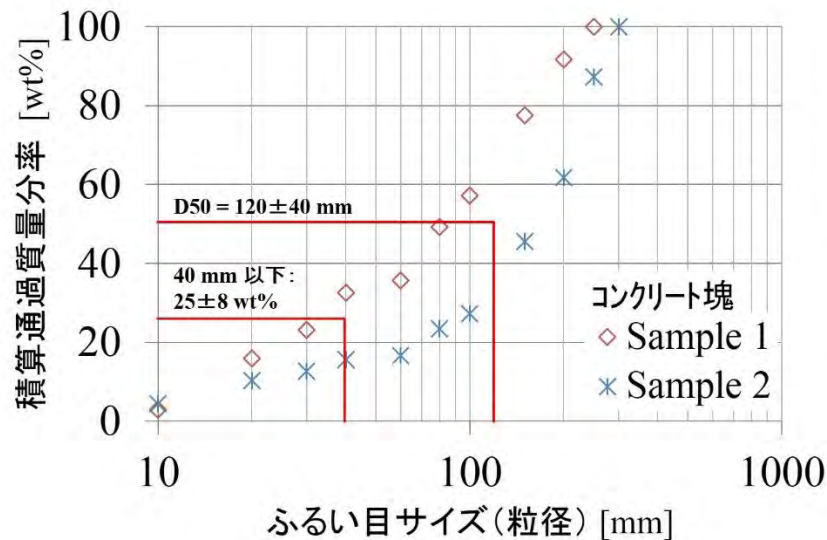


図 2.2.4-1 実際の解体現場におけるコンクリート塊のサイズ分布

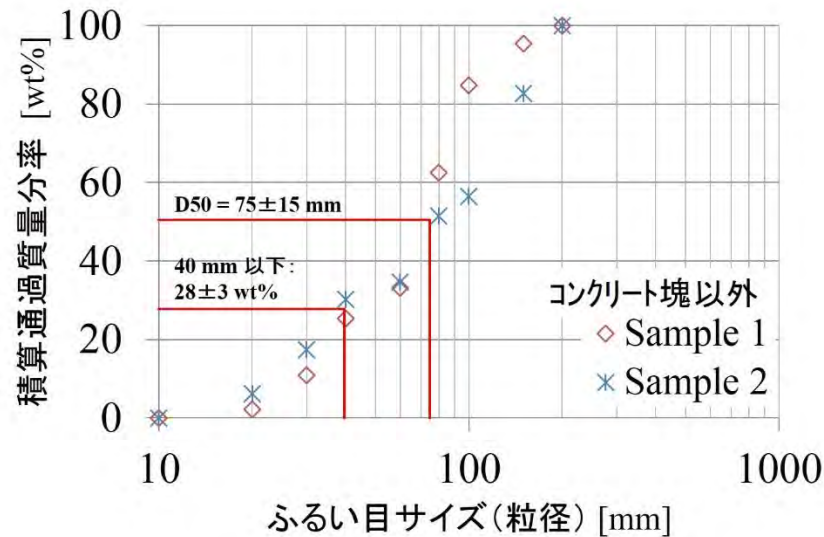


図 2.2.4-2 実際の解体現場におけるコンクリート塊以外のサイズ分布

2) システム構成

上述の要求仕様に適合するロボットアームを選定するため、現在市場に流通しているロボットアームのうち代表的な4種類について比較し、表 2.2.4-3 にまとめた。直交軸型は可動範囲が広いが、走行レール上が汚れるような環境では一般に故障しやすく、本システムに適していない。水平多関節型は垂直

方向への剛性が高いため可搬重量が大きい、万が一対象物上にロボットハンドが乗り上げたときの機構的な逃げがなく、また垂直可動範囲も狭いため適していない。垂直多関節型は可動範囲が広く耐環境性も高いため、本システムに適している。並行リンク型は動作速度が速いが、垂直可動範囲が狭いため適していない。以上の比較結果から、垂直多関節型のロボットアーム M-10iA を採用した。採用したロボットアームの外観と可動範囲を図 2.2.4-3 に、仕様の抜粋を表 2.2.4-4 に示す。このロボットの関節配置は PUMA 型と呼ばれ、運動学計算が比較的容易である。という特徴をもつ。

表 2.2.4-3 ロボットアームの比較

	可搬重量	水平可動範囲	垂直可動範囲	動作速度	耐環境性
直交軸		○	○		
水平多関節	○	○	×		○
垂直多関節		○	○		○
並行リンク			×	○	○

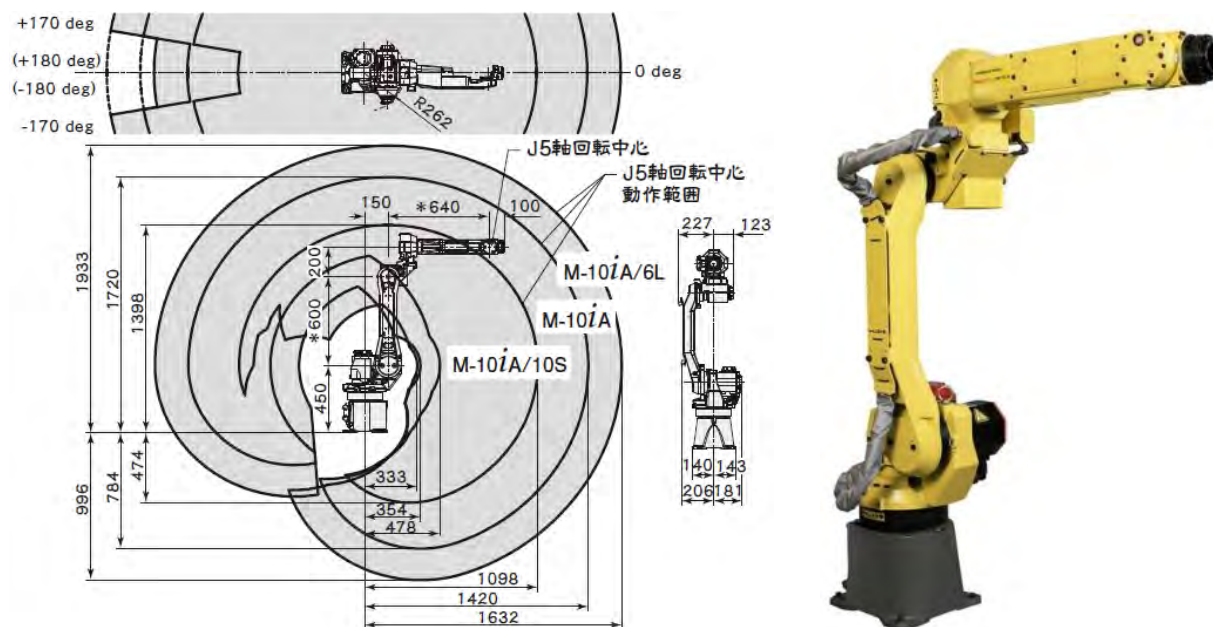


図 2.2.4-3 採用した垂直多関節型ロボットアームの外観と可動範囲（FANUC 製 M-10iA）

表 2.2.4-4 採用した垂直多関節型ロボットアームの仕様抜粋（FANUC 製 M-10iA）

可搬重量	水平可動範囲	垂直可動範囲	動作速度	耐環境性
10 kg	1.42 m	1.27 m	> 3.0 m/s	手首 IP67、胴体 IP55 制御部 IP54

このロボットアームを用いた廃棄物選別システムのレイアウトを図 2.2.4-4 に示す。図の右側がベルトコンベアの上流であり、ロボットビジョンによって撮影された廃棄物が、ベルトコンベアによってロボットアームの可動範囲内に移送される。ロボットアームはベルトコンベアの両脇に 1 台ずつ配置し、合計 2 台を搭載した。2 台の配置間隔は、1 m 幅のベルトコンベア上にくまなくロボットアームが届き、かつ可動範囲の被りを極力減らすように配慮し、コンベア進行方向に 1612 mm、その直角方向に 1710 mm

とした。廃棄物回収ボックスは、ロボットの両脇および正面に配置した。ボックスには数字の ID を割り当て、偶数 ID はロボット 1（上流側）専用、奇数 ID はロボット 2（下流側）専用とした。ボックス番号ごとに設定した廃棄物品目を表 2.2.4-5 に示す。ロボットの対岸に配置した回収ボックスの位置はロボットアームの可動範囲限度に近い、比較的回収しやすい「金属くず」用のボックスを配置した。「その他の建材」については、ロボット 2 台ぶんのアスベスト判定を 1 台の近赤外カメラで行うため、隣接した位置に配置した。

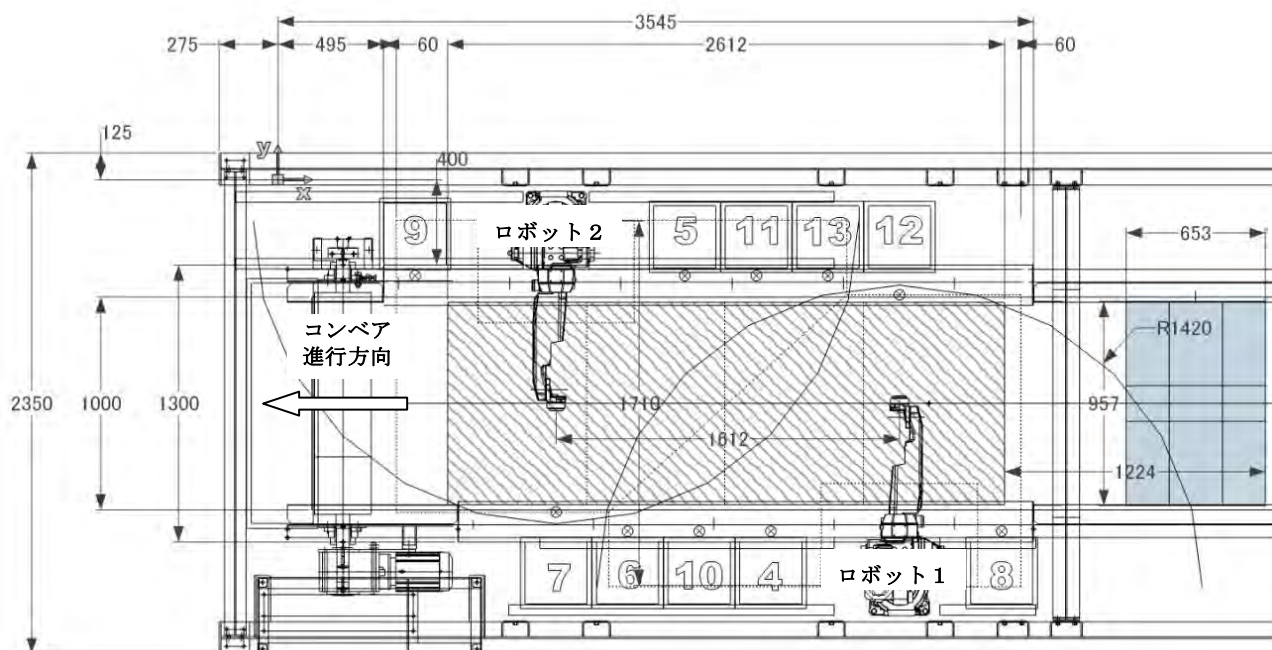


図 2.2.4-4 垂直多関節型ロボットアームを用いた廃棄物選別システムのレイアウト

表 2.2.4-5 廃棄物回収ボックスの番号と品目

廃棄物品目	木くず		金属くず		コンクリート塊		廃プラスチック		その他	
ボックス番号	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ロボット番号	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2

廃棄物選別ロボットアームの制御システムの構成を図 2.2.4-5 に示す。ロボットアームとロボットビジョンの制御、回収ボックスの容量監視、および選別用ベルトコンベアの位置計測は、ロボットアーム制御盤で統括して行うこととした。選別用ベルトコンベアはサブmm単位での位置計測を行うため、1回転 600 パルスのロータリーエンコーダを搭載した。選別用ベルトコンベアを含む全体の制御を統括するメイン制御盤との通信は、定時性が保証されており、かつ最大 10 Mbps の高速通信が可能な CC-Link 方式を採用した。

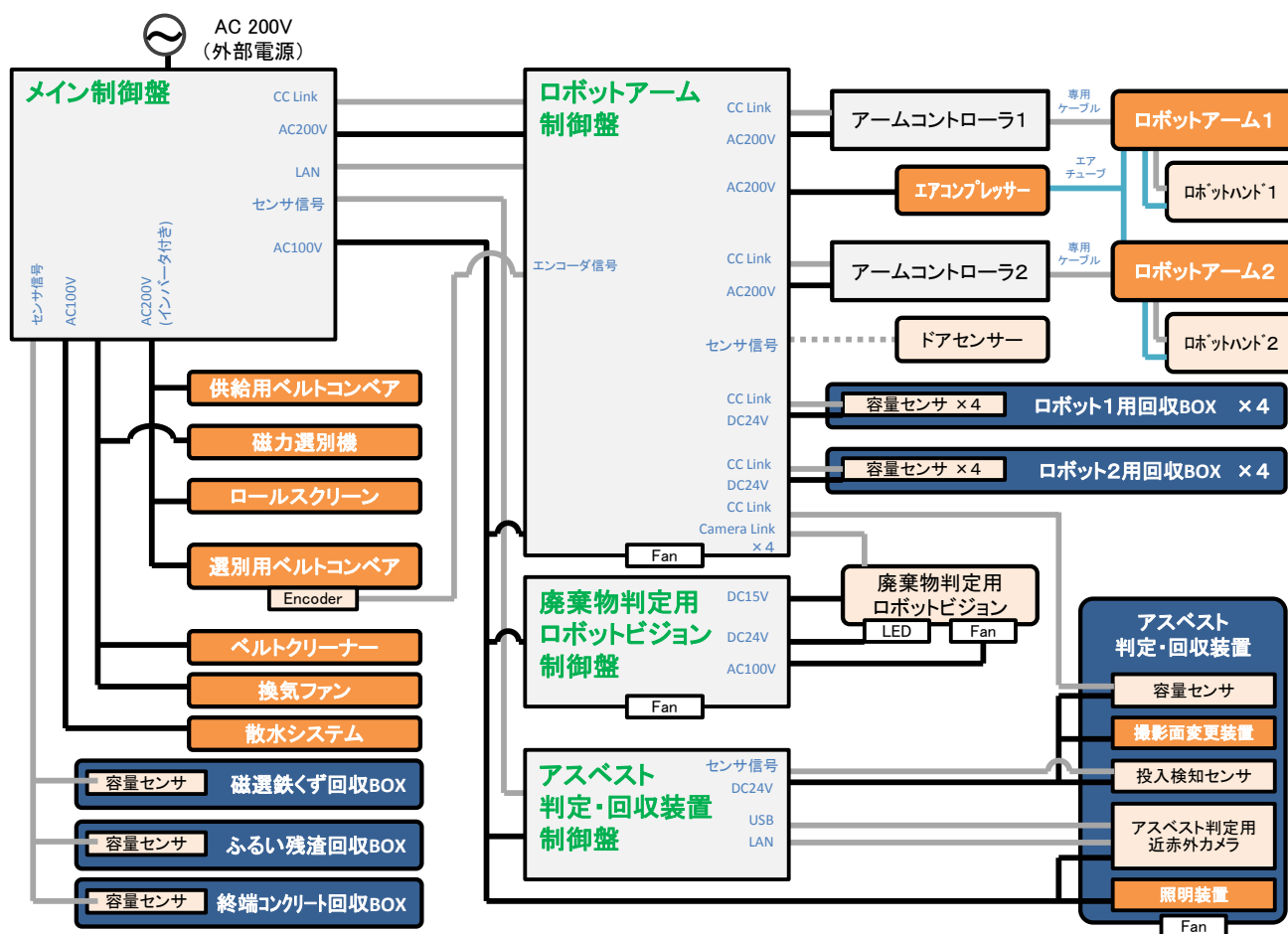


図 2.2.4-5 廃棄物選別ロボットアームの制御システム構成

3) 建設廃棄物抽出用ロボットハンドの開発

選定した垂直多関節ロボットアームの手先に取り付ける、建設廃棄物抽出用の3指ロボットハンドを図 2.2.4-6 のように設計した。建設廃棄物は表 2.2.4-1 のように不定形かつ多品種であり、かつコンクリート塊や鉄筋くずのような重量物を大量に含む。このため、掴んで持ち上げることを前提とした汎用のロボットハンドでは取り扱いが難しい。設計したハンドは次に示すバンパ、ツメ、スライダ、接触センサを組み合わせ構成したことを特徴とする。この構成によって、ベルトコンベア上に展開された不定形廃棄物を、比較的簡単な制御で品目ごとに自動選別することが可能となる。

(1) 板状のバンパ

外力に応じて受動的に回転する板状の部品からなる機構である。対象物を押して動かし、ツメとの間に挟んだりするために用いる。バンパが外力に応じて傾くことによって、動作制御なしに対象物との接触時の衝撃を緩和し、対象物の跳ね返りを減らすことで捕捉・回収の成功率を高めることができる。またロボットアームのモータへの負荷を軽減する機械的な安全装置としても作用し、対象物が重すぎる場合は、バンパの傾きの大きさを検知してロボットの動作をキャンセルできる。

(2) 2本の回転ツメ

回転関節を有しスライダに接触可能な2本の円弧状の部品からなる機構である。図 2.2.4-7 のように多様な形状の対象物を捕捉することが可能である。対象物をコンベアやバンパとの間に挟んで、

重機に用いられるフォークグラブのように把持 (Grasping) することが可能である。また、ツメ先端にゴム板を取り付けることも可能であり、ツメ先端長さを接触力に応じて受動的に変化させることが可能となる。ツメによる把持が難しい物に対しても、ツメでコンベアに抑えつける動作 (保持 : Holding) や、回転ツメを上げた状態でバンパを使った押し動作 (掃引 : Pushing) が可能である。

(3) 受動スライダ

バンパの先端長さを受動的に調整するためにバンパの先端に取り付けられた、樹脂性の部品からなる機構である。これによって、押し動作における以下の2つの課題を解決する。1つめは、対象物設置面の不陸に沿って押す経路の制御が必要であり、制御方法が複雑となることである。なぜなら、対象物の転がりや噛みこみを防ぐためにはできるだけ低い位置から押すことが望ましい。2つめは、捕捉装置と設置面との間に摩擦力が生じるためにロボットアームへの負荷が大きくなることである。該スライダが環境との接触に応じて受動的に動くことによって、力制御をせずに押し動作の摩擦力を減らすことができる。また高さの位置制御を行わずに捕捉装置先端と対象物設置面との隙間を無くすことができ、薄板状の対象物に対しても乗り越えることなく捕捉することが可能となる。コンベアの起伏が最大で約 15 mm であることから、スライダの可動長さはこれよりも大きい 22 mm とした。スライダの側面にはリブを取付けることもでき、押し動作中に対象物が左右に逸れるのを防ぐことができる。またスライダそのものを交換することで幅を調整できる。例えば図 2.2.4-6 では 200 mm だが、最小で 100 mm まで縮めることが可能である。

(4) 接触センサ

スライダの位置変化を検出することで、スライダと外部環境との接触状態を認識する機構である。センサが反応した時に反射的な動作経路変更をすることによって、ロボットアームへの負荷を減らすことが可能となる。スライダが障害物に乗り上げて限界まで縮められたときに反応するように、スライダ可動範囲の端部に取り付ける。スライダが斜めにスライドしても反応するように、左右に合計2つのセンサを配置する。強い接触や繰返し接触によるセンサの損傷を防ぐため、スライダの位置を検出する光学センサなどの非接触方式を採用する。

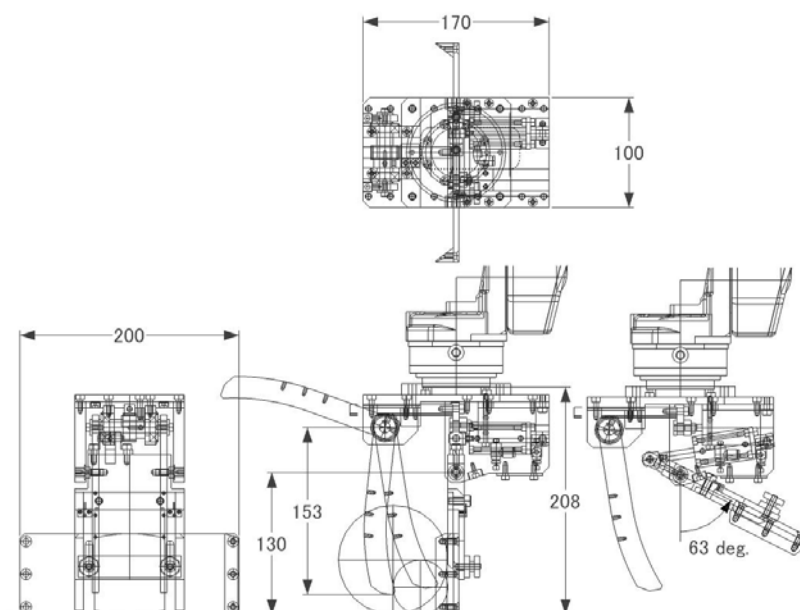


図 2.2.4-6 建設廃棄物選別用ロボットハンドの設計

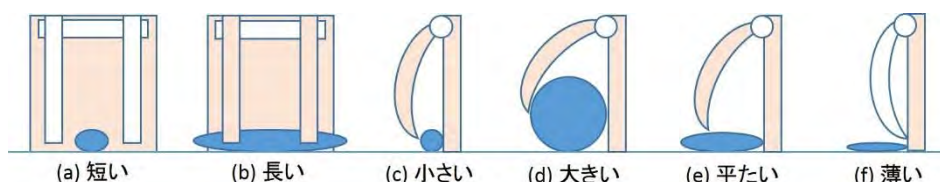


図 2.2.4-7 設計したロボットハンドによる不定形廃棄物の捕捉方法
(青：対象物、赤：捕捉に使用する部分)

この設計に基づいて製作した建設廃棄物抽出用ロボットハンドの外観を図 2.2.4-8 に、仕様を表 2.2.4-6 に示す。接触センサは小型化と軽量化のため、光ファイバ式の赤外線センサを採用した。受動スライダの可動長さは 22 mm とした。スライダの素材は、コンベアやバンパとの摩擦を減らすために MC ナイロン製とした。その他の構造材は全てアルミニウムで構成した。ツメの駆動系にはエアシリンダとラックピニオンを採用した。バンパの傾きに対するコンプライアンスは、エアシリンダへの供給圧力で調整できるようにした。傾きは最大で約 63 度とした。ツメの位置やバンパの傾きを検知するため、各エアシリンダには位置センサを取り付けた。センサの防塵防水性は IP67 であり、要求を満たしている。

製作したハンドのバンパを使った押し動作の性能を確認するため、実験によってエアシリンダの発生トルクを求めた。その結果、発生トルクは入力空気圧に対してほぼ正比例し、例えばエアシリンダに 0.7 MPa の空気圧を入力した時に発生トルク $T = 2.8 \text{ N}\cdot\text{m}$ を得られることが確認できた。このときバンパ先端では（回転支点から最大 130 mm であることから）22 N 以上の掃引力が得られる。したがって、最大の対象物として想定している質量 2 kg のコンクリート塊に対しても押し動作が可能であることが確認された。

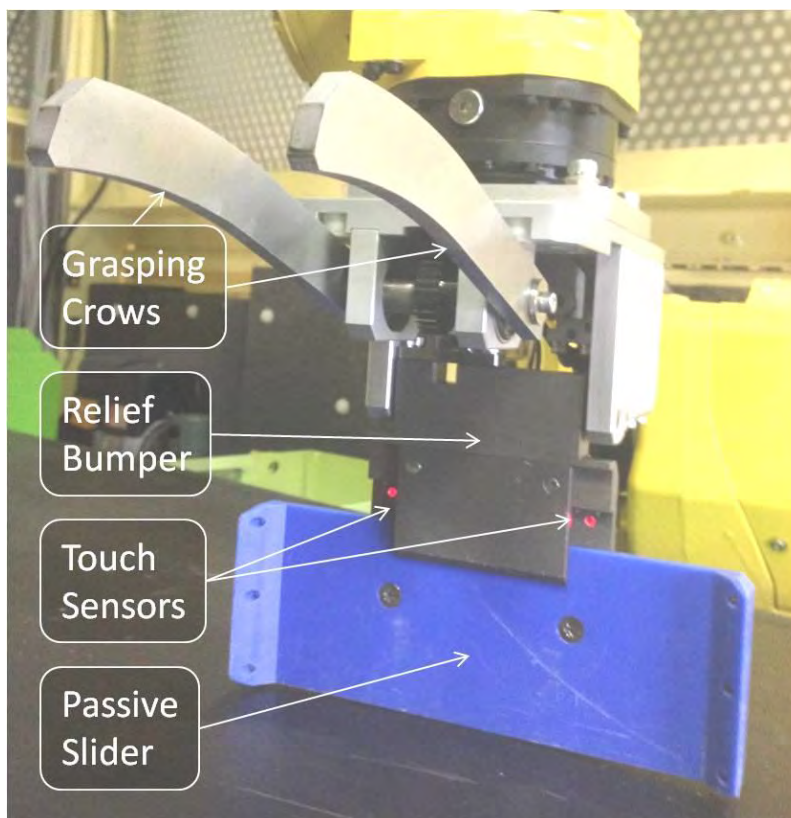


図 2.2.4-8 製作した建設廃棄物選別用ロボットハンドの外観

表 2.2.4-6 建設廃棄物選別用ロボットハンドの仕様

サイズ	高さ 208 × 幅 200 × 長さ 170 (mm)
質量	2.3 kg (端子台を除く)
防塵防水性	IP67 (センサ部)
アクチュエータ	複動エアシリンダ $\phi 16$ mm × 2 最大供給圧力： 1.0 MPa
センサ	シリンダスイッチ × 3 反射型赤外線センサ × 2 電源： 直流 24 V
ツメ	長さ 153 × 幅 10 × 肉厚 5 (mm)
スライダ	幅： 100 ～ 200 (mm) スライド長： 22 mm
バンパ	最大トルク： 3.2 N・m 最大発生力： 25 N (@スライダ先端) 長さ： 108 ～ 130 (mm) 最大逃げ角： 63 deg.

4) ロボットハンドの経路計画アルゴリズムの開発

未知形状の対象物を把持するための計画手法はいくつか研究されており、その有効性が示されている[3][4]。これらの手法では対象物の3次元形状を円柱や直方体などの単純な形状(形状プリミティブ)の組み合わせとして抽象化したうえで、ハンドのアプローチ方向などの把持計画を行う。

著者らの選別システムで用いる手法では、対象物の二次元画像から得られたエッジを1つの楕円にあてはめて抽象化し、その向きや短軸径や長軸径を特徴量としてリアルタイムに把持計画を行う。既開発技術であるロボットビジョン[1]によって取得される廃棄物の品目、外形の近似楕円、位置、向きなどの情報に基づいて、図 2.2.4-9 に示すフローにしたがって3つの回収動作モードの中から適切な動作モードを選択する。動作モードはH(保持)を基本とし、把持しにくい小物や薄物はモードP(掃引)とする。経路に障害物がある場合は、モードG(把持)による空中搬送に切り替える。

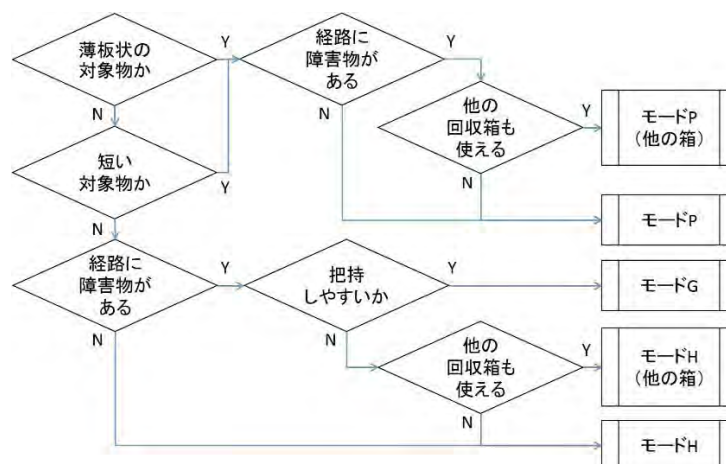


図 2.2.4-9 動作モード決定フロー

(1) モード H (Holding : 保持)

このモードは3つのモードの中でも主として使用する。このモードでは把持と押し動作（掃引）を同時に行う。回転ツメを使って対象物の把持を試みつつ、コンベア上に沿った経路を辿る。これにより、完全には把持できなかった場合でも、ツメによる抑えつけ（保持）や押し動作[2]で補完することができる。ツメによる把持や保持の成功率を高めるため、経路は図 2. 2. 4-10 のような折れ線型とする。楕円が対象物を、実線が経路を示す。対象物の短軸方向からハンドを接近させ、保持した後は回収箱に向かって直線経路を辿る。さらに、回収箱の直前でも折れ線経路とすることで、把持できていない場合に隣の回収箱に落としてしまうことを防ぐ。また、廃棄物の量が多く密接している場合には、捕捉装置が対象物付近の別の廃棄物への乗り上げによる捕捉失敗やロボットアームへの負荷増大が懸念される。これを防ぐため、点 1' から点 1 への動作中に他の対象物に乗上げたことを接触センサで検知した場合は、即座に点 2' への経路に切り替える（乗上げ回避動作）。

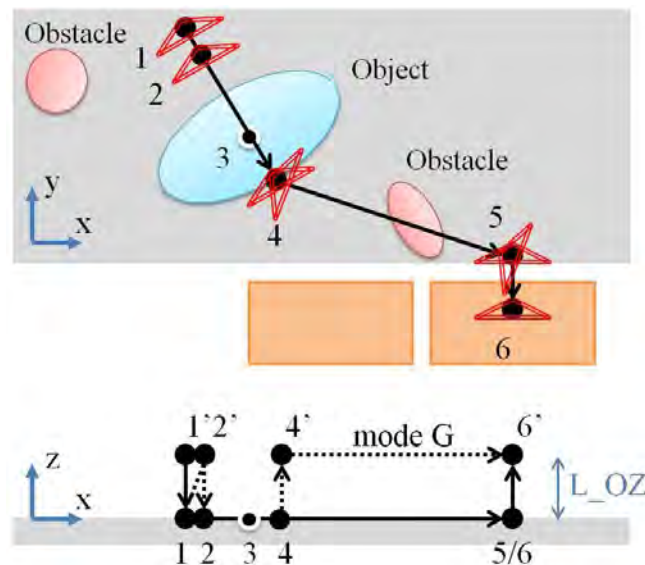


図 2. 2. 4-10 動作モード H/G のイメージ（赤い三角はハンドの向き r ）

(2) モード G (Grasping : 把持)

このモードでは対象物をツメで挟み、空中搬送することで干渉を防ぐ。モード H はコンベア表面に沿った経路であるため、対象物が複数密接していると、移送中に他の廃棄物を巻込んで選別精度を低下させる恐れがある。このようなケースではモード G が有効である。図 2. 2. 4-10 の下側に示すように、対象物を把持するまではモード H と同様の経路をとり、そこから回収箱までは点 4' から点 6' への経路を辿ることで空中に持ち上げて移送する。特に把持しやすい長物や厚物に対して有効なモードである。

(3) モード P (Pushing : 掃引)

常にツメを上げた状態で、対象物重心と回収箱を通る直線経路に沿った押し動作を行う。これによって、ツメによる保持の成功率が比較的低い物（ツメの間隔よりも小さい物や、ツメ先端の突起幅よりも高さが低い薄物等）に対して、経路上のカーブにおける対象物の逸脱を防ぐことができ、回収成功率を

高めることができる。図 2.2.4-11 に示すように、回収箱の正面までは直線経路をとり、そこから回収箱までは回収箱の正面から投入する経路にすることで、隣の回収箱への落下を防ぐ。経路上に障害物があった場合は、図 2.2.4-11 上段の破線のように他の回収箱候補への経路に切り替えることで回避する。またモード H と同様に、点 1' から点 1 への動作中に他の対象物に乗上げたことを接触センサで検知した場合は、図 2.2.4-11 下段の破線に示すような乗上げ回避経路に切り替える。

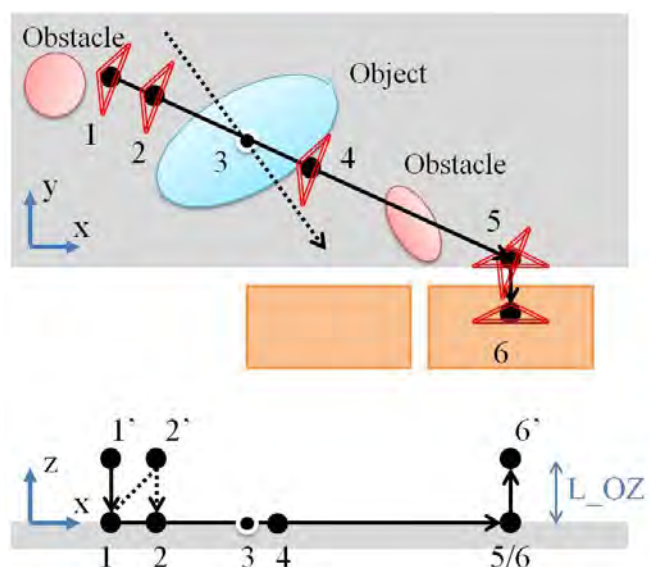


図 2.2.4-11 動作モードPのイメージ（赤い三角はハンドの向き r ）

以上の各動作モードにおける各経路点の座標は、以下の前提に基づいて計算する。

【前提条件】

- ・経路データは点の集合として表現する。
- ・経路上の各点は、三次元位置座標 x 、 y 、 z およびこれらの軸回り角度 p 、 q 、 r の合計 6 つのスカラ値をもつベクトルとする。
- ・座標系は右手直交系とし、重力逆方向を Z 、ベルトコンベア進行逆方向を X とする。
- ・複数台のロボットアームを同時に動かすことを可能とする。

【対象物の状態】

- ・対象物はベルトコンベア上に複数混在する。
- ・対象物が停止した状態で回収動作を行う（ベルトコンベアをバッチ運転とする）。
- ・対象物は高さ方向の重なりが無いものと仮定する。
- ・対象物の高さは最大で L_{OZ} ($= 300 \text{ mm}$) とし、使用者の判断により設定する。
- ・他の品目に比べ質量の大きいコンクリート塊は、経路上で障害物にならないければロボットアームでの回収は行わず、選別用ベルトコンベアの端部から排出する。

【対象物の回収順序】

- ① 回収箱の近くにある対象物が障害物にならないように、まずは対象物重心位置の y 座標が回収ボックスの y 座標に近い物から回収
- ② 動作経路上にある他の廃棄物をできる限り巻き込まないように、回収ボックスまでの経路長が短い物から順に回収

以上の条件に基づき、動作経路は、点 P_1' 、 $P_1 \sim P_6$ 、 P_6' の計 8 点で構成する。点 P_1 の位置は対象物近似楕円の表面から少しだけ離れた位置とし、対象物重心 P_0 、回収箱上の目標点 P_6 、対象物の短軸角度 A_{OS} 、短軸長 L_{OS} 、長軸長さ L_{OL} をもとに算出する。モード H/G とモード P では異なる算出方法を採用する。z 軸回りの角度 P_{1R} は、対象物の短軸角度や、対象物重心からみた目標点の方位角をもとに算出する。

$$\vec{P}_1 = \begin{pmatrix} P_{1X} \\ P_{1Y} \\ P_{1Z} \\ P_{1P} \\ P_{1Q} \\ P_{1R} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(\vec{P}_O, \vec{P}_G, A_{OS}, L_{OS}, L_{OL}) \\ f(\vec{P}_O, \vec{P}_G, A_{OS}, L_{OS}, L_{OL}) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ f\left(A_{OS}, \tan^{-1} \frac{P_{GY} - P_{OY}}{P_{GX} - P_{OX}}\right) \end{pmatrix} \quad (\text{式 2-2-1})$$

点 P_1' は、 P_1 を Z 軸方向に対象物の最大高さ L_{OZ} だけずらした点とする。

$$\vec{P}_1' = (P_{1X} \quad P_{1Y} \quad L_{OZ} \quad 0 \quad 0 \quad P_{1R})^T \quad (\text{式 2-2-2})$$

点 P_2 は、 P_1 よりも楕円表面に近い位置とする。角度 P_{2R} は、 P_{1R} と同じとする。

$$\vec{P}_2 = (f(\vec{P}_O, \vec{P}_G, A_{OS}, L_{OS}, L_{OL}) \quad f(\vec{P}_O, \vec{P}_G, A_{OS}, L_{OS}, L_{OL}) \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad P_{1R}) \quad (\text{式 2-2-3})$$

点 P_3 は、対象物重心 P_0 とする。角度 P_{3R} は、直後の経由点に向かう方向とする。

$$\vec{P}_3 = \left(P_{OX} \quad P_{OY} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \tan^{-1} \frac{P_{4Y} - P_{3Y}}{P_{4X} - P_{3X}} \right)^T \quad (\text{式 2-2-4})$$

点 P_4 の位置は、対象物重心 P_0 、目標点 P_6 、第 1 経由点 P_1 をもとに算出する。角度 P_{4R} は、直後の経由点に向かう方向とする。

$$\vec{P}_4 = \left(f(\vec{P}_O, \vec{P}_G, \vec{P}_1) \quad f(\vec{P}_O, \vec{P}_G, \vec{P}_1) \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \tan^{-1} \frac{P_{5Y} - P_{4Y}}{P_{5X} - P_{4X}} \right)^T \quad (\text{式 2-2-5})$$

点 P_5 は、目標点 P_6 から任意距離 Δy だけ重心側の点とする。角度 P_{5R} は目標点に向かう方向とする。

$$\vec{P}_5 = (P_{GX} \quad f(\Delta y, P_{OY}, P_{GY}) \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad f(P_{OY}, P_{GY}))^T \quad (\text{式 2-2-6})$$

点 P_6 は、目標点 P_G とする。

$$\vec{P}_6 = (P_{GX} \quad P_{GY} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad f(P_{OY}, P_{GY}))^T \quad (\text{式 2-2-7})$$

点 P_6' は、目標点 P_G の直上とする。

$$\vec{P}_6' = (P_{6X} \quad P_{6Y} \quad L_{OZ} \quad 0 \quad 0 \quad P_{6R})^T \quad (\text{式 2-2-8})$$

以上のアルゴリズムに基づいて、ロボットの動作経路を計画する。

【参考文献】

- [1] T. Gokyyu, S. Nakamura, T. Ueno, M. Nakamura, D. Inoue, Y. Yanagihara, “Sorting system for Recycling of Construction Byproducts with Bayes’ Theorem-Based Robot Vision,” J. Robotics and Mechatronics, Vol. 23, No. 6, pp. 1066-1072, 2011.
- [2] M. T. Mason, “Mechanics and Planning of Manipulator Pushing Operations,” Int. J. Robotics Research, Vol. 5, No. 3, pp. 53-71, 1986.
- [3] A. T. Miller, S. Knoop, H. I. Christensen, P. K. Allen, “Automatic Grasp Planning Using Shape Primitives,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 14-19, 2003.
- [4] T. Tsuji, K. Harada, K. Kaneko, F. Kanehiro, K. Maruyama, “Grasp Planning for a Multifingered Hand with a Humanoid Robot,” J. Robotics and Mechatronics, Vol. 22, No. 2, pp. 230-238, 2010.

2.2.5 ロボットアームによる廃棄物選別実験

先述した垂直多関節型ロボットアーム、3指ロボットハンド、および軌道計画アルゴリズムを組み合わせ、ロボットによる廃棄物の回収成功率の検証実験を行った。

1) ロボットによる回収成功率の目標値

選別システム全体としての目標性能を改めて確認すると、アスベスト含有建材の選別精度 70%、およびそれ以外の選別精度 60%（いずれも個数率）である。これらを達成するためには、磁力選別機とロールスクリーンによる分別精度、ロボットビジョンによる品目判定精度、およびアスベスト回収装置の判定精度がそれぞれ 96%であると仮定すると、ロボットによる回収成功率はその他の建材について 80%、それ以外について 68%以上である必要がある。このため、5品目全てについて成功率 80%を目標とする。

2) 予備実験： ツメを使わない直線経路による回収成功率の検証

まず、ハンドのツメとリブを取り除いた状態で、どの程度の回収成功率になるかを検証した。実験のレイアウトを図 2.2.5-1 に示す。直線的な経路にするため、対象物の短軸を回収箱の方向に向けて配置した。コンベア上を 8つのエリアに分類し、そのうちの 1つを毎回ランダムに選択し、そのエリア内における任意の場所に配置した。対象物の配置密度は、1つのエリアにつき 1つまでとした。対象物の角度は、短軸がおおよそゴールに向くように配置した。対象物はコンクリート塊以外の 5品目とし、鉄くずは 3種類、それ以外は 6種類ずつ用意した（詳細は付録に示す）。その他の建材としては、アスベスト含有建材と同様の形状であり、アスベストを含有しないスレート材などを代用した。

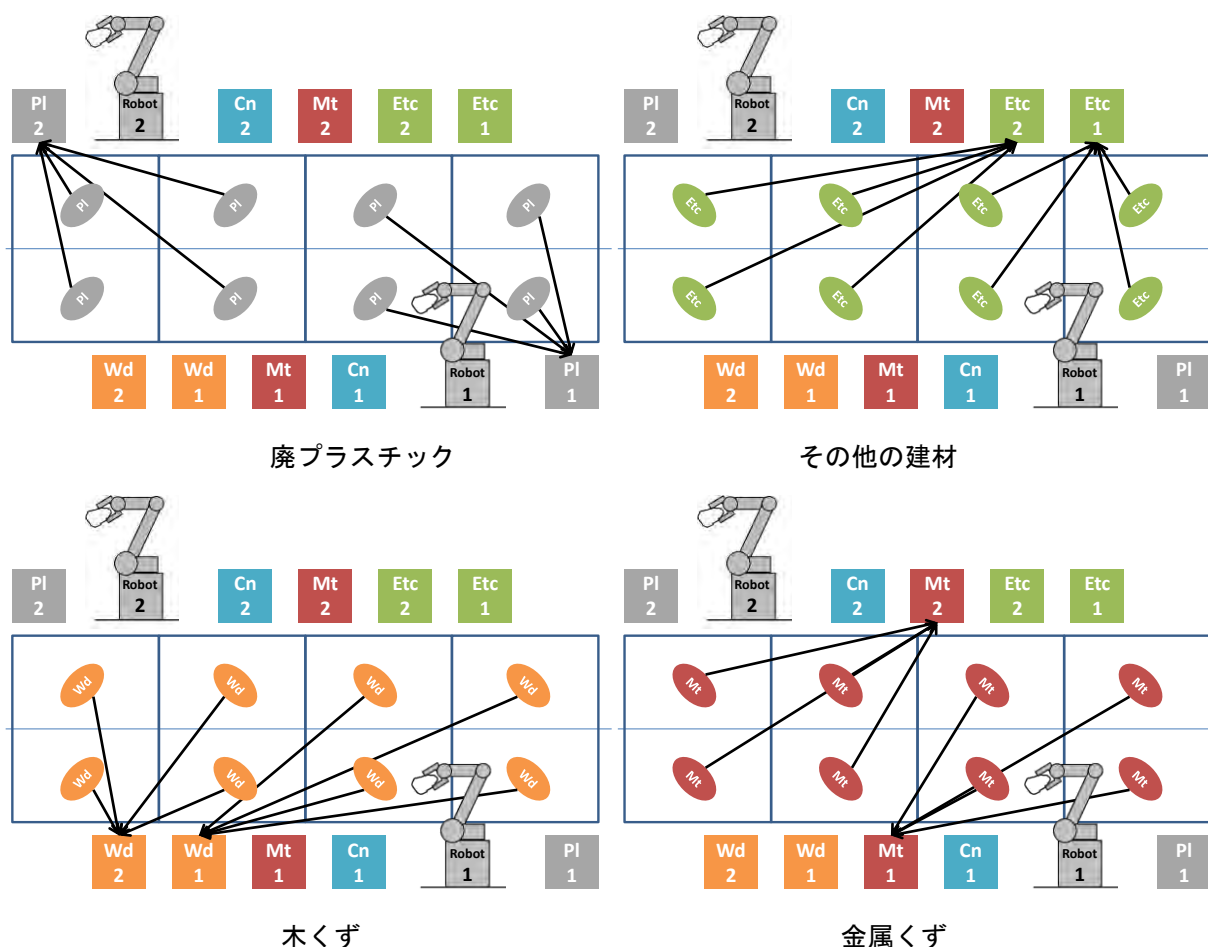


図 2.2.5-1 ツメを使わない直線経路での回収成功率検証実験における対象物レイアウト
(Wd : 木くず、Mt : 金属くず、PI : 廃プラスチック、Etc : その他の建材、数字 : 味ット ID)

以上の実験条件において、ツメを使用しない動作モード P による抽出実験を全ての品目に対して各々 7 回以上（全品目の合計で 50 回以上）試行し、抽出率を求めた。回収箱の正面での折れ線経路も使わず、対象物重心から回収箱まで一直線の経路とした。実験の様子を図 2.2.5-2 に示す。抽出率の定義は、全試行の中で抽出に成功した回数を、品目ごとに割合で表した値とした。

実験結果を図 2.2.5-4 に示す。その他の建材以外の 4 種類について平均すると約 61%の抽出率（個数率）であり、目標である 85%を達成できなかった。この中で最も回収成功率が高かったのは木くず（約 86%）、最も低かったのは廃プラスチック（約 50%）であった。木くずは比較的平坦な形状であるためコンベア表面との接触状態が安定していたと考えられる。一方、廃プラスチックや金属くずは形状が複雑であり接触状態が安定しないため、回収成功率が低くなったと考えられる。このような対象物の抽出率を向上させ、全品目において 85%の回収成功率を達成するためは、ツメを使用したモード H やモード G のような、ハンドに対象物を保持するような機能が必要であることが明らかとなった。

一方、その他の建材のみに注目すると約 88%の抽出率であり、こちらは目標を達成した。これは 5 品目の中でも最も回収成功率が高かった。その他の建材として主に使用したスレート材は、木くずと同様に平坦な形状であり摩擦力が安定していたためであると思われる。このため、スレート材についてはモード P による押し動作も積極的に使っていくことが望ましいと言える。



図 2.2.5-2 ツメを使わない直線経路での回収成功率検証予備実験の様子

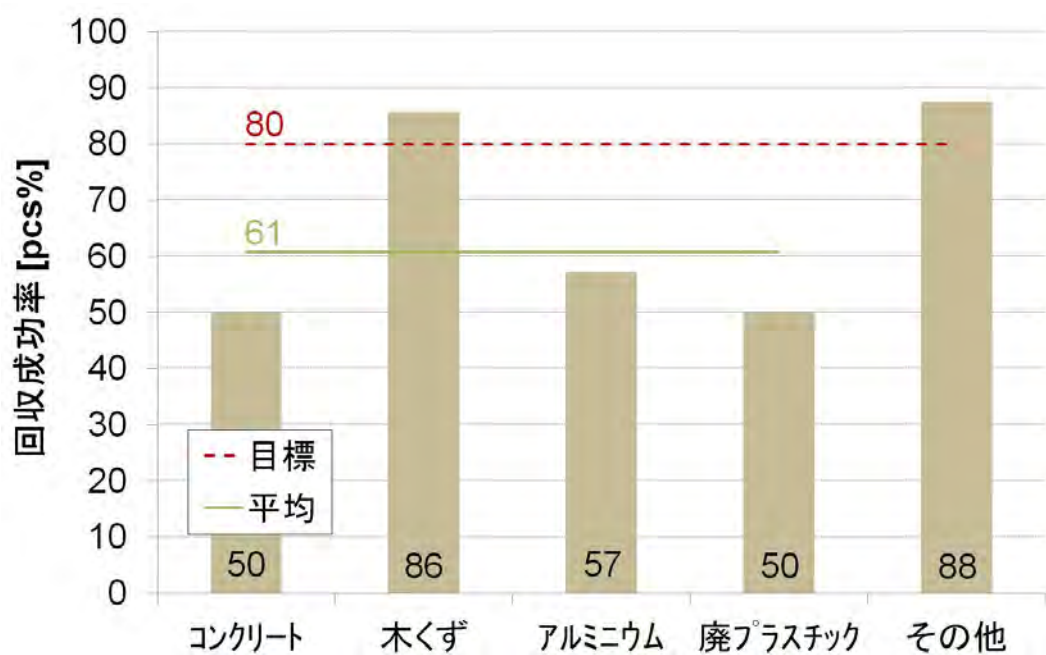


図 2.2.5-3 ツメを使わない直線経路による回収成功率の予備実験結果（短軸方向）

3) ツメを使った動作モードHの検証実験

開発したロボットハンドおよびロボットアーム制御ソフトウェアの、モードHにおける性能評価実験を行った。その様子を図 2.2.5-4 に示す。対象物のサンプルは、図 2.2.5-5 および図 2.2.5-6 に示す物を用いた。解体現場で採集したコンクリート塊、木くず、アルミニウム片、プラスチック管、その他（スレートおよびアスベスト含有建材）、これら5品目をそれぞれ30個ずつ用意した。スレートおよびアスベスト含有建材は15枚ずつ用意した。鉄筋は磁力選別機で比較的容易に取り除くことができるため対象外とした。これらをベルトコンベア上にランダムに配置して搬送し、ロボットの可動範囲に到達したらモードHによる回収動作を行なわせた。この動作によって回収箱への投下成功した個数を、動作回数で割った値とした。動作回数は品目毎に30回以上ずつ試行した。対象物の位置と向きは、弊社で開発した建設廃棄物用ロボットビジョン[1]を用いて計測した。また受動スライダの幅は200 mmとした。

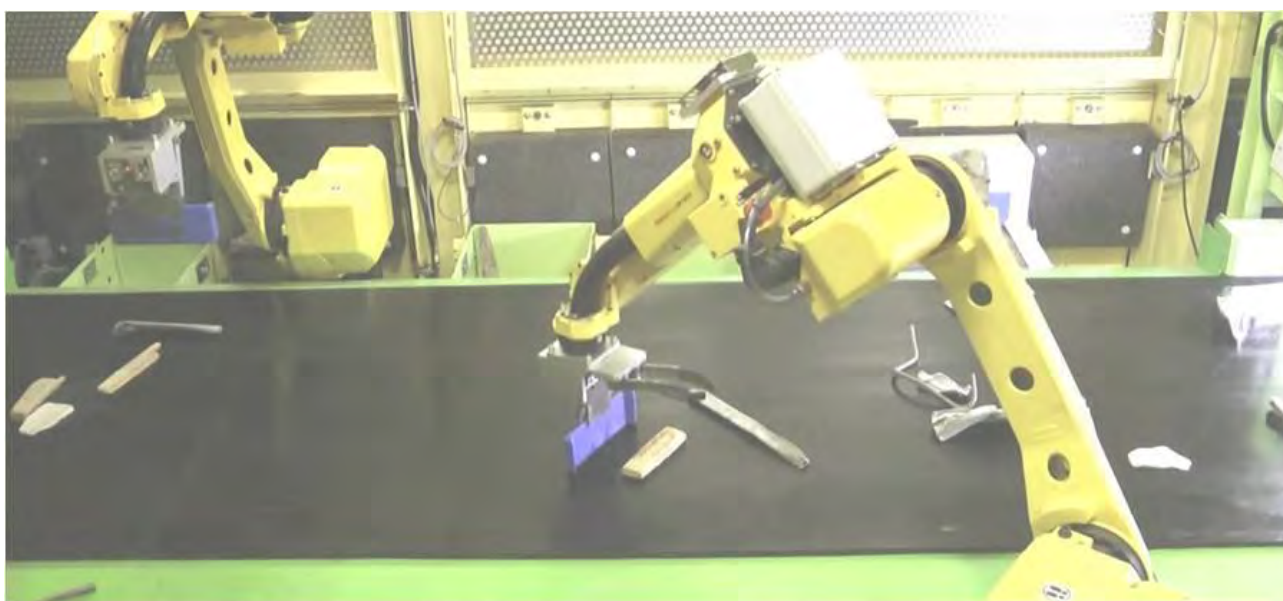


図 2.2.5-4 モードHにおける回収動作実験の様子



図 2.2.5-5 実験で使用了建設副産物のサンプル
(左上：廃プラスチック、右上：木くず、左下：アルミニウムくず、右下：その他)



図 2.2.5-6 実験で使用了コンクリート塊のサンプル

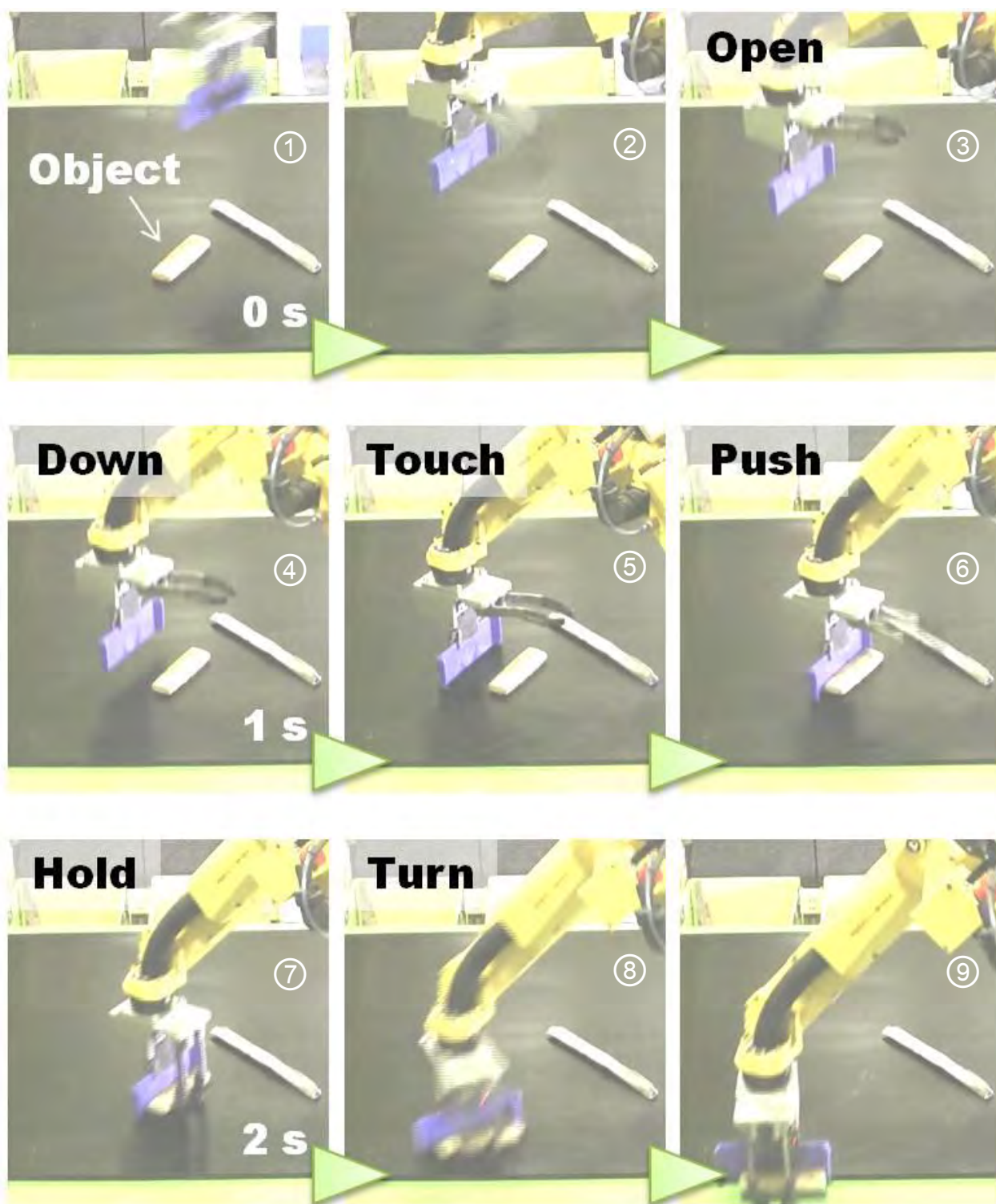


図 2.2.5-7 モードHにおける木くずの回収動作例

図 2.2.5-7 に、モードHによるロボットアームの動作例を連続写真で示す。対象物である木くずの短軸が回収箱を向いていないため、2 秒時～3 秒時にかけてハンドの向きが大きく変化している。このような場合においてモードHによる回収動作を成功させるためには、対象物をツメでしっかりと把持できている必要がある。また、一連の回収動作はおよそ 3 秒で完了することが確認できた。

実験結果を図 2.2.5-8 に示す。全品目で 88%以上の成功率となり、目標性能を満たした。木くずとアルミニウムの成功率が特に高かった。その理由は、細長く掴みやすい形状の対象物が多かったためと考えられる。また、成功率の低下要因として 1) 他の対象物による障害、2) 薄物の乗り越え、3) 小物の逸脱、4) 隣の回収箱へ落下、等があった。要因 3 の動作事例を図 2.2.5-9 に、要因 4 の動作事例を図 2.2.5-10 に示す。要因 1 についてはモード G を、要因 2 と 3 についてはモード P を使うことで、さらに成功率を向上できる可能性がある。また、ツメの形状や間隔にも工夫の余地が残されている。要因 4 についてはボックス前の直線経路をもう少し長くする等の調整によって改善できると考えている。

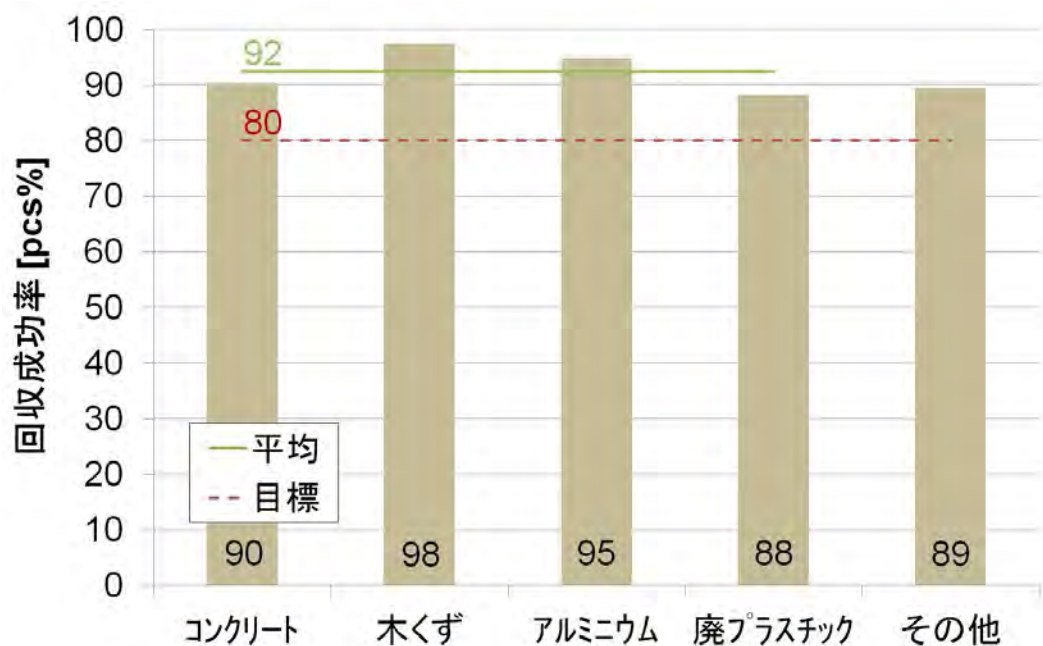


図 2.2.5-8 モード H での回収成功率

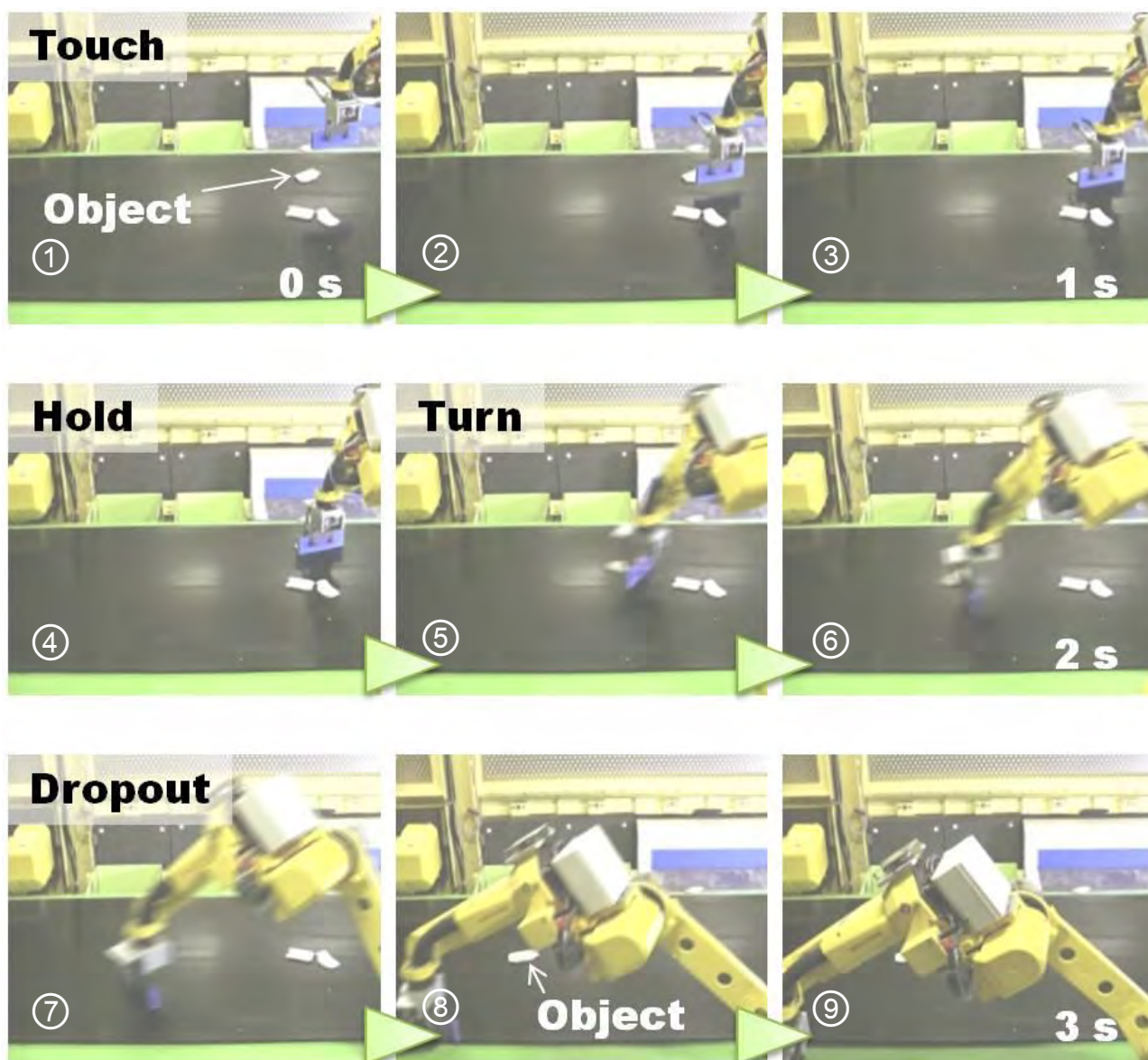


図 2.2.5-9 手首回転時の薄物の把持逸脱による回収動作失敗例

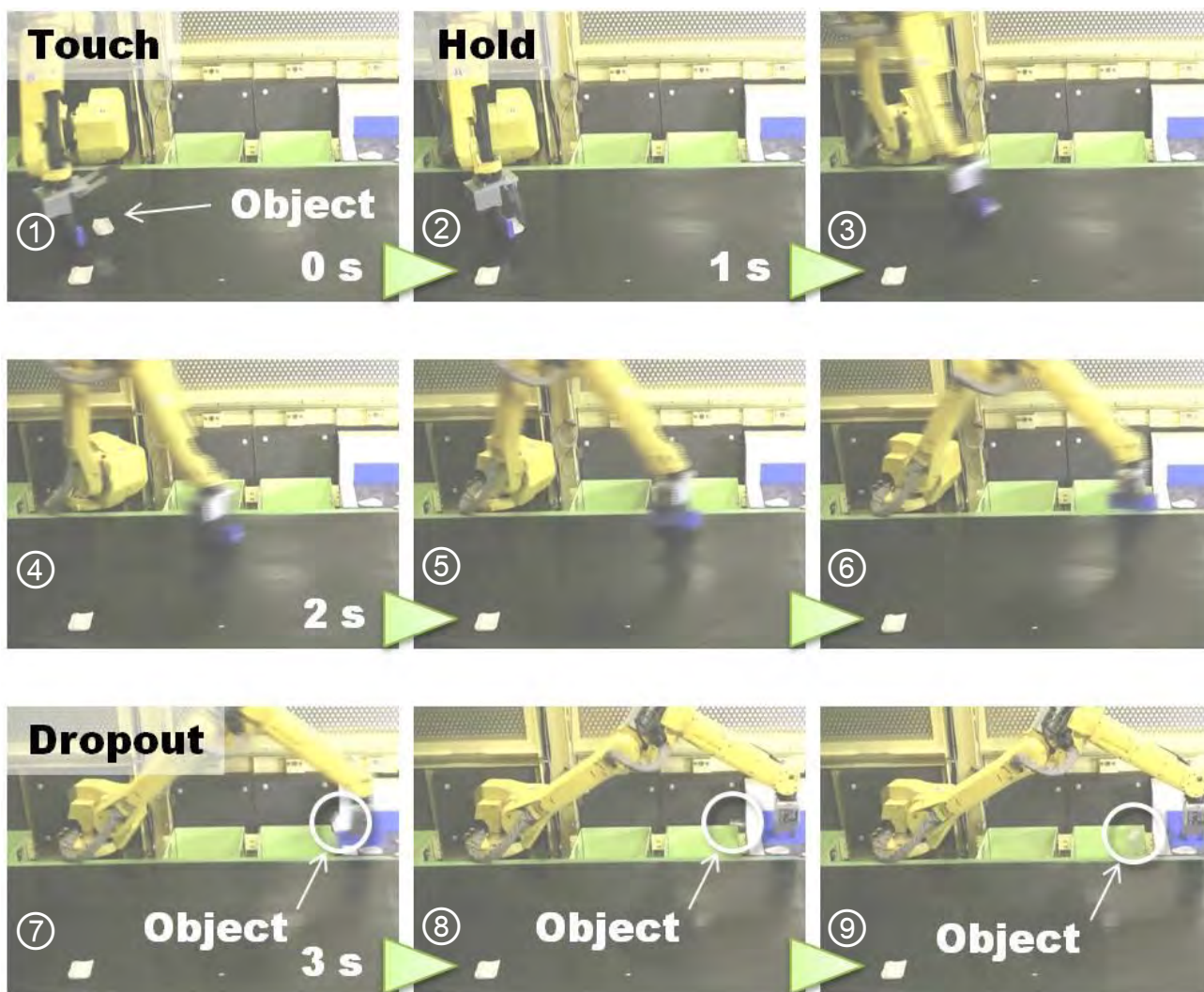


図 2. 2. 5-10 薄物の不完全把持によって隣の回収箱に落下した失敗例

4) ツメを使った動作モード G の検証実験

開発したロボットハンドおよびロボットアーム制御ソフトウェアの、モード G における性能評価実験を行った。対象物のサンプルは図 2. 2. 5-6 に示す物を用いた。その他の実験方法についても、動作モード H の検証実験と同様とした。図 2. 2. 5-11 に、モード G によるロボットアームの動作例を示す。金属くず（アルミニウム）をツメで把持して持ち上げることで、経路上の 2 つの廃棄物を巻きこまずに、対象物を回収箱へ投下できることが確認できた。また、一連の動作は約 4 秒で完了することが確認できた。

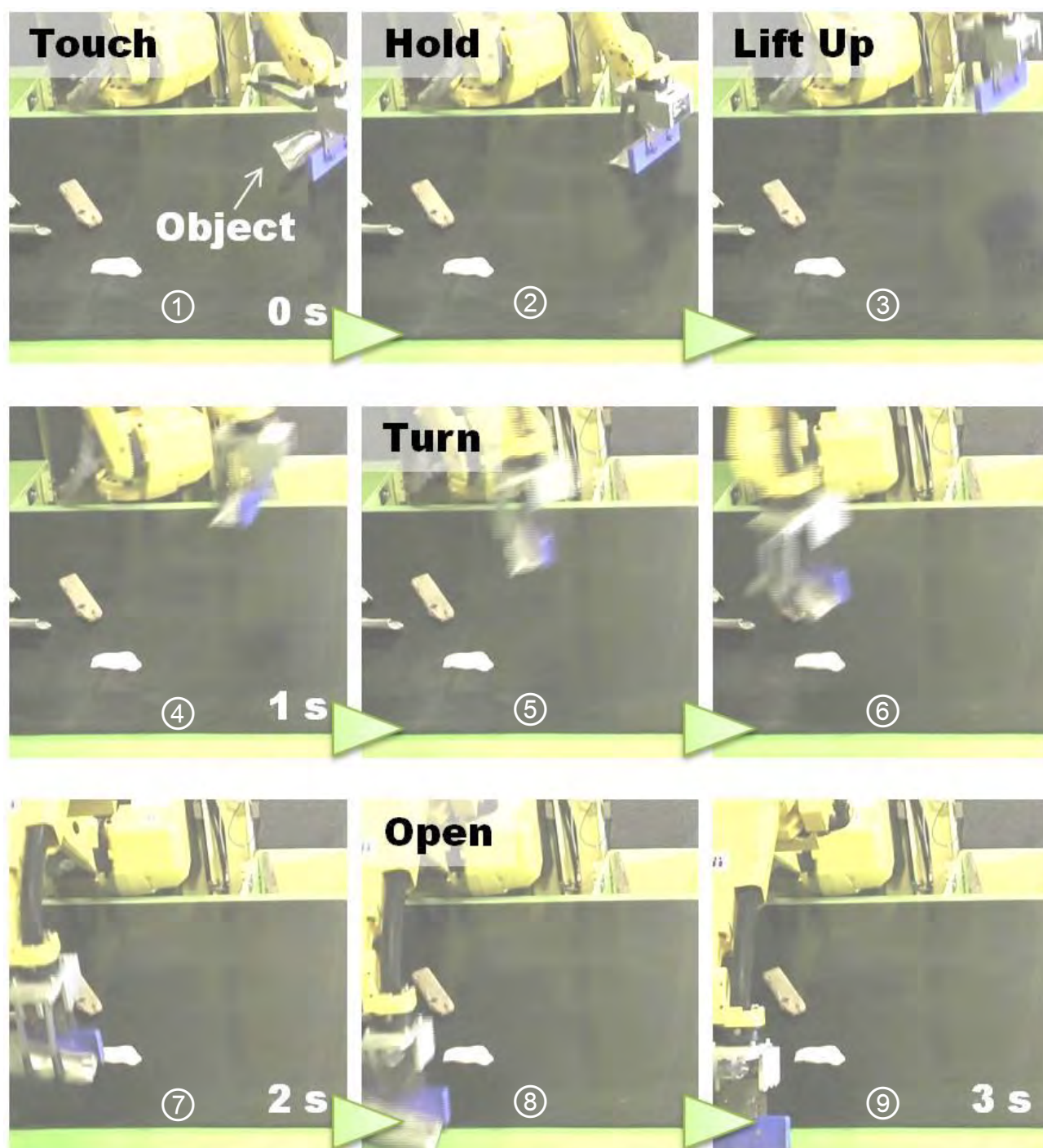


図 2. 2. 5-11 モード G における金属くず（アルミニウム）の回収動作例

実験結果を図 2. 2. 5-12 に示す。その他の建材以外の 4 品目を平均すると 39% の成功率となった。また、その他の建材は一度も回収に成功しなかった。この結果から、現状では積極的にモード G による回収動作を行う戦略は得策でないと言える。モード H による回収動作を基本とし、巻き込みたくない物が経路上にあった場合に、モード G に切り替えるといった戦略が望ましい。モード H と同様に木くずとアルミニウムの成功率が高かったのは、細長く掴みやすい形状の対象物が多かったためと考えられる。その他の建材の成功率が極端に低かったのは、薄くて広い形状が多かったためと考えられる。改善点として、ツメの形状や配置を変更することで、成功率を高められる可能性がある。

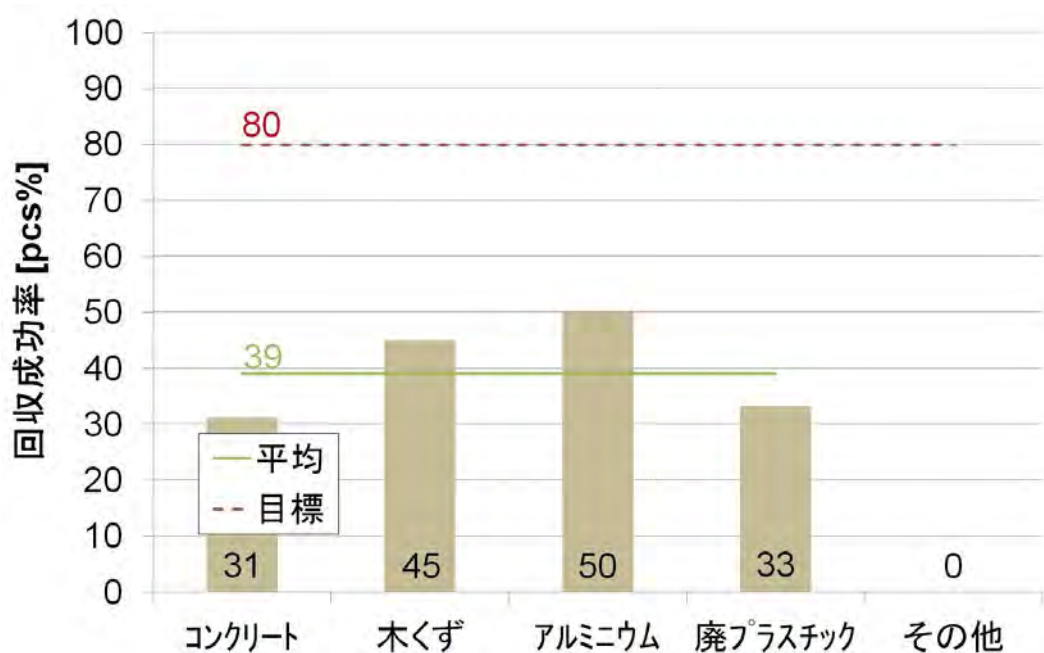


図 2. 2. 5-12 モード G での回収成功率

5) ツメを使わない動作モード P の検証実験

開発したロボットハンドおよびロボットアーム制御ソフトウェアの、モード P における性能評価実験を行った。実験条件は動作モード H の検証実験と同様とした。ツメを使わない直線経路による予備実験との違いは、対象物の短軸の向きをゴール向きに限定しないことと、回収箱の正面で折れ線経路をとることである。図 2. 2. 5-13 に、ロボットアームの動作例を示す。金属くず（アルミニウム）をバンパで押すことで、最小限のハンド旋回量で対象物を回収箱へ投下できることが確認できた。動作モード H において旋回時に逸脱してしまうようなケースでは、この動作モード P が有効であると考えられる。また、一連の動作はおよそ 4 秒で完了することが確認できた。

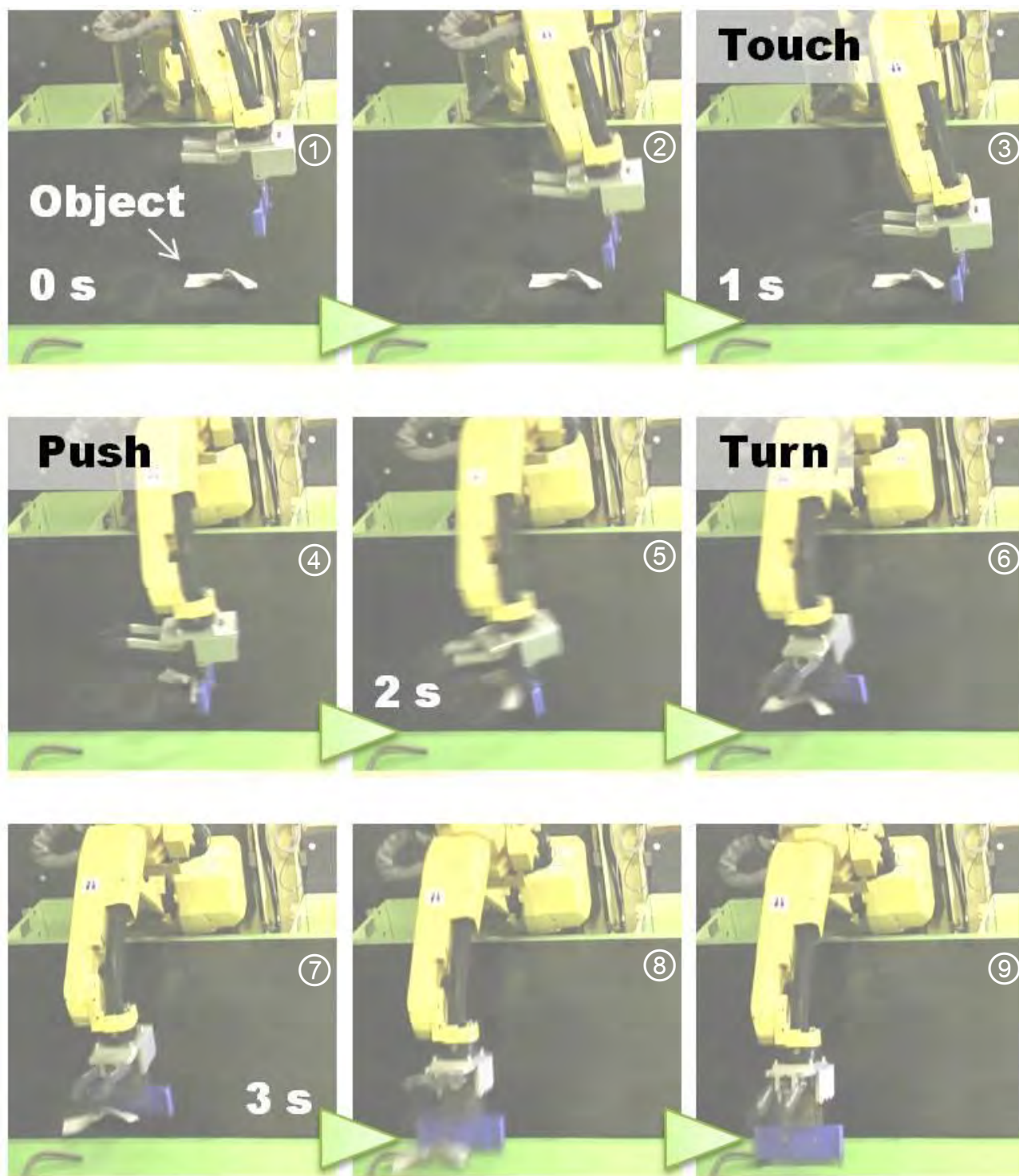


図 2.2.5-13 モードPにおける金属くず（アルミニウム）の回収動作例

6) 乗上げ回避動作の検証実験

開発したロボットハンドおよびロボットアーム制御ソフトウェアの、乗り上げ回避動作について検証実験を行った。実験条件は動作モードHの検証実験と同様とした。図 2.2.5-14 に乗上げ回避動作の成功例を示す。廃プラスチックを回収する動作の途中で、付近のコンクリートに 0～1 秒の間で乗上げたが、接触センサが正常に働き、動作をキャンセルできている。さらに、1～2 秒の間で少し対象物側にハンドの位置を修正してリトライしている。2～3 秒の間ではコンクリートに乗上げずに把持に成功し、対象物を回収箱へ投下できている。このように乗上げ回避動作を成功させるためには、経由点 PV2 の位置をできるだけ対象物に近づけることが重要である。しかし近づけすぎると今度は対象物に乗上げてしまうため、トレードオフの関係となる。

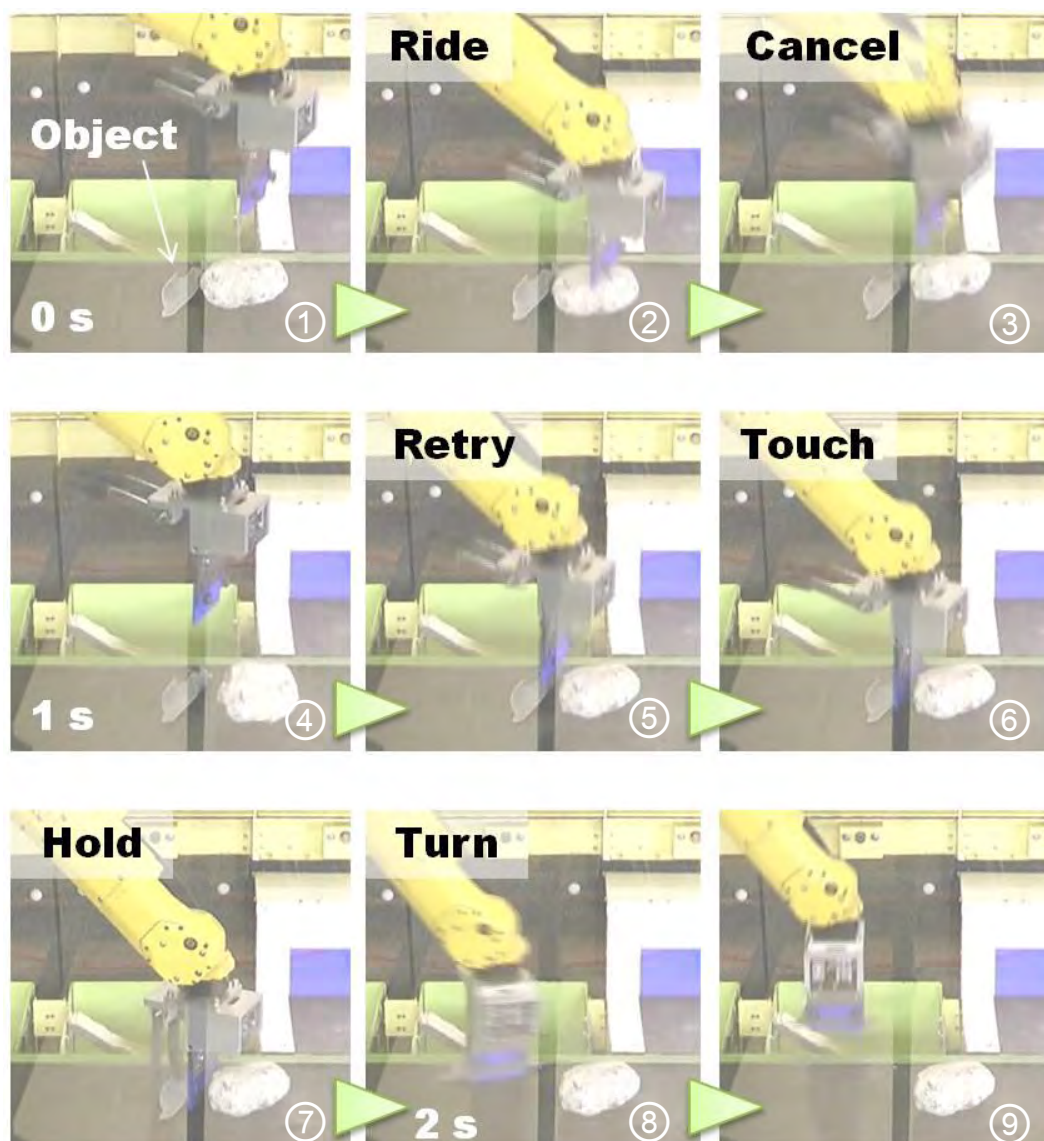


図 2.2.5-14 動作モードHにおける乗り上げ回避動作の例（廃プラスチック）

7) まとめと考察

ロボットアームを用いて木くず、金属くず（アルミニウム）、廃プラスチック、その他の建材（アスベスト含有建材を含む）を回収するシステムを開発し、その性能評価を行った。成果の要点を以下に示す。

- （１）建設廃棄物の回収に適したロボットアームを選定し、その制御システムを構築した。
- （２）建設廃棄物の回収に適した３指ロボットハンドを設計、製作した。
- （３）上記のハンドを用いた３つの動作モード（掃引、保持、把持）を考案した。
- （４）上記の動作を実現するためのロボットアームの経路計画アルゴリズムを開発した。
- （５）上記のロボットアーム、ロボットハンドおよび経路計画アルゴリズムを用いて、実際の解体現場から採集した建設廃棄物に対する回収成功率を検証した結果、全ての品目において目標である個数率 80%を達成可能であることを確認した。

回収成功率をさらに高めるためには、ツメやスライダの形状、動作モードの使い分け方、経路計画アルゴリズム等について、さらなる検討を加えていくことが考えられる。

2.2.6 環境計測

解体工事などの建設現場で選別システムを使用するためには、騒音規制法や振動規制法を順守しなければならない。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選別作業中の騒音および振動を計測した。また、選別システムに投入する廃棄物の中にアスベスト含有建材が混入した場合を想定し、アスベスト含有建材を選別する際の空气中アスベスト粉じん測定を選別システムの換気ファンおよび自動検出装置の排気ファンの付近で行った。以下に、各項目の計測方法を示す。

1) 騒音・振動計測

解体工事に選別システムを設置した際に発生する稼働騒音・振動を推定するため、現状の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する。

① 計測項目および方法

i. 騒音レベルの把握

JIS Z 8731「環境騒音の表示・測定方法」に準じて、選別システム稼働時の騒音レベルを測定する。

ii. 振動レベルの把握

JIS Z 8735「振動レベル測定方法」に準じて、選別システム稼働時の振動レベルを測定する。

騒音レベルおよび振動レベル計測に使用した機器の設置位置を図 2.2.6-1、計測状況を図 2.2.6-2 に示す。

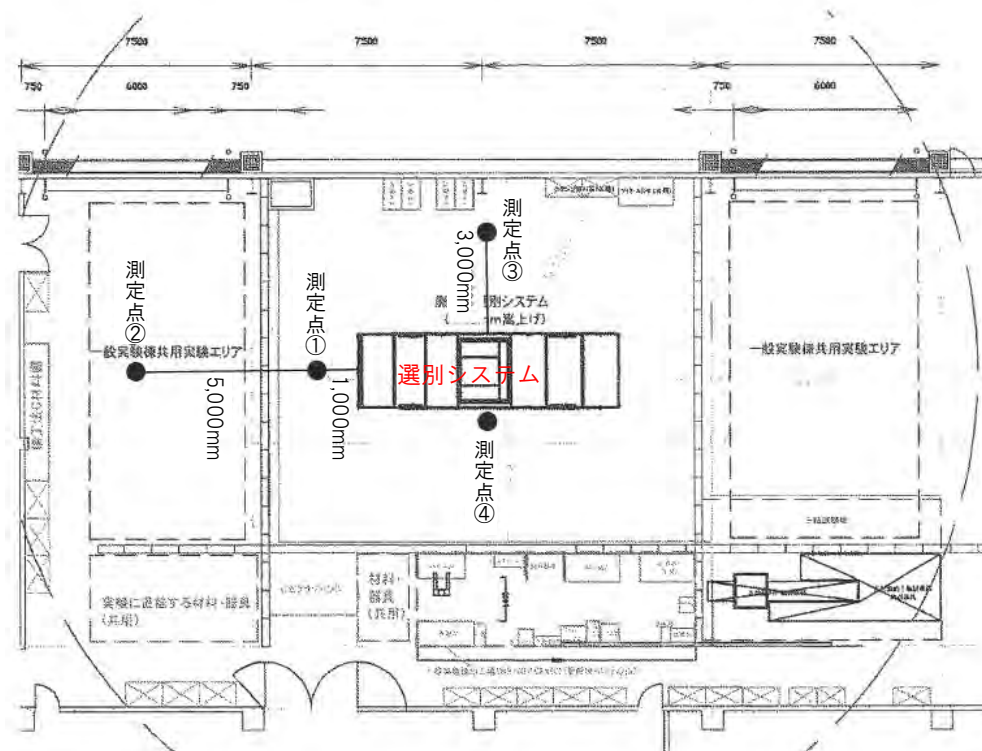


図 2.2.6-1 騒音・振動測定位置



測定点①



測定点③

図 2.2.6-2 騒音・振動計測状況

② 計測機器

騒音・振動計測には表 2.2.6-1 の計測機器を使用した。

表 2.2.6-1 計測機器

項 目	メーカー	型式
精密騒音計	RION	NA-28
振動レベル計	RION	VM-53A
データレコーダ	RION	DA-20

③ 計測パターン

計測は表 2.2.6-2 の 3 パターンで行った。なお、パターン C の条件は、パターン A と同じ測定点①のみ測定箇所を測定点④に変更した。

表 2.2.6-2 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	コンクリート+他の廃棄物	
パターンB	コンクリートのみ	
パターンC	コンクリート+他の廃棄物	測定点①→測定点④
パターンD	暗騒音・暗振動	

④ 測定結果

騒音レベル・振動レベルの測定結果を表 2.2.6-3～表 2.2.6-6 に示す。

表 2.2.6-3 パターン A の測定結果

	騒音レベル (dB)				振動レベル (dB)			
	Leq	L5	L50	L95	Leq	L10	L50	L90
測定点①	90.0	94.0	89.6	77.8	47.0	50.1	44.8	35.7
測定点②	79.4	83.0	79.2	68.3	39.4	42.4	37.8	30.4
測定点③	76.2	80.3	75.8	64.0	37.7	40.5	35.8	28.1

表 2.2.6-4 パターン B の測定結果

	騒音レベル (dB)				振動レベル (dB)			
	Leq	L5	L50	L95	Leq	L10	L50	L90
測定点①	90.8	93.7	90.9	84.0	52.6	55.5	52.5	42.5
測定点②	80.2	83.0	80.2	73.8	44.2	46.8	44.2	35.6
測定点③	77.1	80.0	77.3	70.0	42.6	45.4	42.7	34.1

表 2.2.6-5 パターン C の測定結果

	騒音レベル (dB)				振動レベル (dB)			
	Leq	L5	L50	L95	Leq	L10	L50	L90
測定点①	88.2	92.7	86.6	78.4	56.7	60.0	55.3	49.2
測定点②	78.2	82.5	77.0	69.6	39.7	43.4	37.4	29.8
測定点③	74.9	79.5	73.3	65.2	38.2	41.8	35.6	27.6

表 2.2.6-6 パターン D の測定結果

	騒音レベル (dB)				振動レベル (dB)			
	Leq	L5	L50	L95	Leq	L10	L50	L90
測定点①	49.0	49.6	49.0	48.4	25.7	27.2	25.5	23.7
測定点②	49.1	49.8	49.0	48.4	24.8	26.3	24.6	22.9
測定点③	49.7	50.4	49.6	49.0	22.7	24.3	22.5	20.7

⑤ 騒音・振動レベルの評価方法

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。

i) 騒音レベルについての評価

騒音レベルの予測計算の式を以下に示す。

$$\text{SPL} = \text{PWL} - 20 \log r - 8$$

ただし SPL: 受音点での音圧レベル (dB)、PWL: 音源のパワーレベル値 (dB)、r: 音源と受音点の距離 (m)、である。表 2.2.6-3 のパターン A の測定結果のうち測定点①の L5 値 = 94.0 (dB) を SPL とする。音源から測定点①までの距離は 1 m であるから、音源のパワーレベルは以下ようになる。

$$\text{PWL} = \text{SPL} + 20 \log r + 8 = 94.0 + 20 \log 1 + 8 = 102.0 \text{ (dB)}$$

よって、騒音レベルの予測計算の式は以下ようになる。

$$\text{SPL} = 102.0 - 20 \log r - 8 \quad \text{(式 2.2.6-1)}$$

騒音規制法における特定建設作業の敷地境界の規制値は 85 dB 以下である。式 2.2.6-1 より騒音規制法を満足するために必要な音源から敷地境界までの距離 r は 2.8 m 以上となる。

ii) 振動レベルについての評価

振動レベルの予測計算の式を以下に示す。

$$\text{Lvr} = \text{Lvr0} - 15 \log(r/r_0) - 8.68 \alpha (r - r_0)$$

ただし Lvr: 受音点での振動レベル (dB)、Lvr0: 基準点での振動レベル (dB)、r: 振動発生源と受音点の距離 (m)、r0: 振動発生源と基準点の距離 (m)、 α : 地盤減衰定数、である。

測定点①を基準点とし、表 2.2.6-4 のパターン B の測定結果のうち測定点①の L10 値 = 55.5 (dB) を Lvr0 とする。また、基準点の測定点①までの距離は 1 m であるから、振動レベルの予測計算の式は以下ようになる。

$$\text{Lvr} = 55.0 - 15 \log r - 8.68 \alpha (r - 1) \quad \text{(式 2.2.6-2)}$$

振動規制法における特定建設作業の敷地境界の規制値は 75 dB 以下である。式 2.2.6-2 に予測したい点から振動発生源までの距離 r と選別システムの設置場所の地盤減衰定数 α を代入すれば予測点の振動レベルを求めることができる。地盤減衰定数 α を表 2.2.6-7 に示す。

しかしながら、今回の測定結果では振動発生源から 1m の距離の振動レベルも 75dB 以下であり、値だけみると敷地境界直近でも問題ないが、今回の地盤面はコンクリートであるため、実際の現場の地盤とは一概に比較することはできないと考えられる。

表 2.2.6-7 地盤減衰定数

地層	地層地盤減衰定数 α
シルト層	0.03~0.02
粘土層	0.02~0.01
関東ローム層	0.01

2) 空気中のアスベスト粉じん

選別システムに投入する廃棄物の中にアスベスト含有建材が混入した場合を想定し、アスベスト含有建材を選別する際の空気中アスベスト粉じん測定を行った。この際、選別するアスベスト含有建材として、解体現場から採取した外装材（クリソタイル 18.3wt%、トレモライト/アクチノライト 1.3wt%含有）を使用した。

① 試料採取方法および分析方法

i. 試料採取方法

平成 22 年環境省水・大気環境局「アスベストモニタリングマニュアル 第 4.0 版」に準拠

ii. 分析方法

平成 22 年環境省水・大気環境局「アスベストモニタリングマニュアル 第 4.0 版」に準拠

② 測定方法

空気中アスベスト粉じん測定に使用した機器の設置位置を図 2.2.6-3 に、計測状況を図 2.2.6-4 に示す。



図 2.2.6-3 粉じん測定位置



図 2.2.6-4 粉じん測定状況

③ 測定結果

空気中アスベスト粉じん測定の結果を表 2.2.6-8 に示す。

アスベスト含有建材を選別システムに投入し、選別時の空気中アスベスト粉じん量を測定した結果、敷地境界基準である 10 本/L 以下（大気汚染防止法施行規則 第 16 条の 2）である事を確認した。

表 2. 2. 6-8 空気中アスベスト粉じん測定結果

No.	測定区分	測定位置名	測定日	測定時間	採気量 (L)	温度 (℃)	湿度 (%)	天候	風向	風速 (m/s)	視野数 n	計測繊維数 N	濃度 (本/L)
1	現状	選別システム換気ファン前	H26 1/30	8:39～ 12:39	2400	9.1	55	晴	-※	-※	100	0	0.15未満
2		アスベスト含有建材自動検出装置脇	H26 1/30	8:42～ 12:42	2400	9.1	55	晴	-※	-※	100	1	0.15未満

※実験棟建屋内で計測

3) 考察

選別システムの騒音・振動を計測した結果、騒音は特定建設作業の規制値 85dB 以下にするため敷地境界から 2.8m 以上の離れた場所、振動は特定建設作業の規制値 75dB 以下にするため敷地境界から 1.0m 以上離れた場所に選別システムを設置すれば工事現場での使用が可能である事を確認した。ちなみに、以前に開発を行った建設系廃棄物選別システム（図 2. 2. 1-1）では規制値 85dB 以下にするために必要な敷地境界からの離隔距離は 7.9m 以上であり、本事業で開発した選別システムの騒音に対する性能は確実に向上している。

選別システムおよび自動検出装置稼働中の空気中アスベスト粉じん測定を行った結果、選別システムの換気ファンの前では繊維は計測されず、自動検出装置の排気ファン周辺では採気量 2,400L に対して 1 本の繊維が計測された。計測された 1 本の繊維についても敷地境界基準値である 1L あたり 10 本以下の基準を満たしているため、選別システムと自動検出装置でアスベスト含有建材を選別しても問題が無い事を確認した。

3. 検証実験

3.1 アスベスト含有建材自動検出装置の性能評価実験

自動検出装置を建設廃棄物選別システムと組み合わせて（図 3.1.1-1）、以下の要領でアスベスト含有建材の選別精度実験を行った。選別精度の目標は7割である。

1) 実験条件

投入する建設廃棄物の種類と量（図 3.1.1-2）、投入速度、実験回数等を表 3.1.1-1、2 に示す。

表 3.1.1-1 投入建設廃棄物

投入廃棄物種類	量（個）	備 考
コンクリート塊	不明	径 40～300 (mm) 未満
金属くず（鉄くず）	30	長さ 300 (mm) 未満
金属くず（アルミニウム）	30	同上
木くず	30	同上
廃プラスチック	30	同上
アスベスト含有建材	30	同上、試料 13 （クリソタイル 18.3 (wt%) トリモライト/アチライト 1.3 (wt%)）
	計 0.3 (m ³)	以上を混ぜ合わせる

表 3.1.1-2 投入速度、実験回数

投入方法	ベッセルからの投入（人力）
投入速度 (m ³ /h)	1
実験回数 (回)	2



図 3.1.1-1 建設廃棄物選別装置および自動検出装置



図 3.1.1-2 投入廃棄物（矢印が含有建材）

2) 評価方法

投入されたアスベスト含有建材の個数に対し、建設廃棄物選別システムが自動検出装置に投入した含有建材の個数、当該装置がクリソタイルを検出した個数をそれぞれ計数し、自動検出装置単体での検出率とシステム全体での選別率を求める。システム全体での選別率（選別精度）が7割に達しているかどうか評価する。

3) 実験結果

自動検出装置に投入されたアスベスト含有建材と廃棄物を図 3.1.1-3 に示す。含有建材のみで判定が行われるバッチ（投入から第一面、第二面の判定と排出）は約 7 割で、残りの 3 割はコンクリート塊や木くず、廃プラスチック、鉄くずが混入したバッチ（赤枠）と含有建材のないバッチ（黄枠）であった。

選別精度結果を表 3.1.1-3 に示す。まず廃棄物選別システムがアスベスト含有建材の 80%を正しく選別し、自動検出装置に投入し、当該装置が 88%の精度でクリソタイルを検出したことによって全体として 70%を達成した。なお自動検出装置単体の検出率も目標の 9 割をほぼ達成した。

なお第 1 回目の実験においてアスベスト含有建材でない廃棄物 3 個にクリソタイルを検出した（偽陽性）（図 3.1.1-4、表 3.1.1-4）。実験第 2 回目では偽陽性は現れなかった。

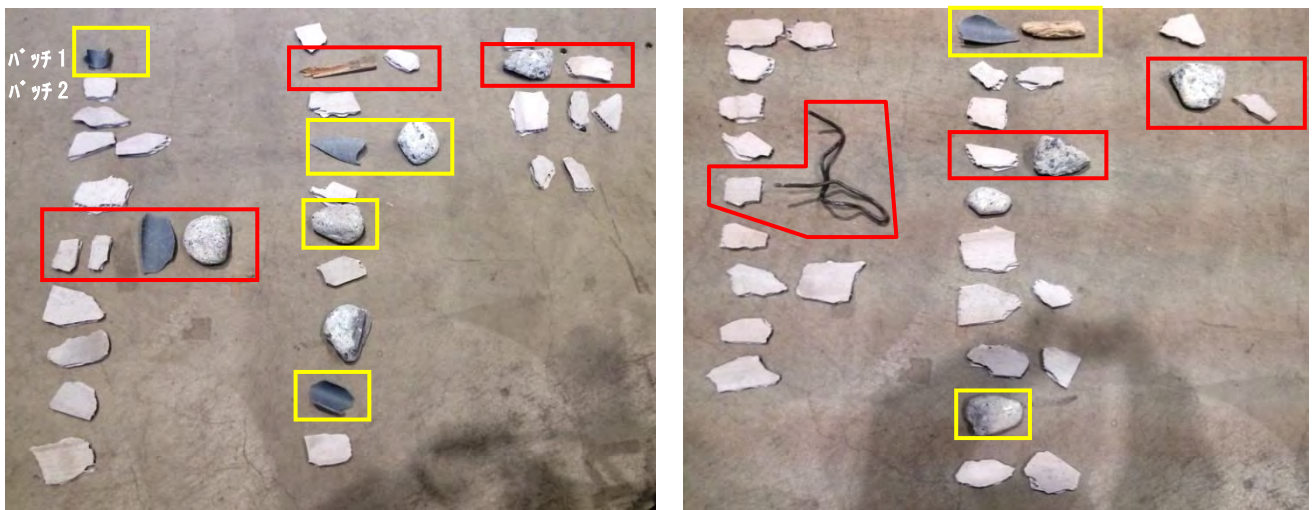


図 3.1.1-3 自動検出装置に投入された廃棄物

表 3.1.1-3 アスベスト含有建材選別精度実験結果

回	投入個数 ①	判定個数 ②	選別システム 選別率 (②／①)	自動検出装置 検出個数③	自動検出装置 検出率 (③／②)	全体選別率 (③／①)
1	30	24	80%	21	88%	70%
2	30	24	80%	21	88%	70%

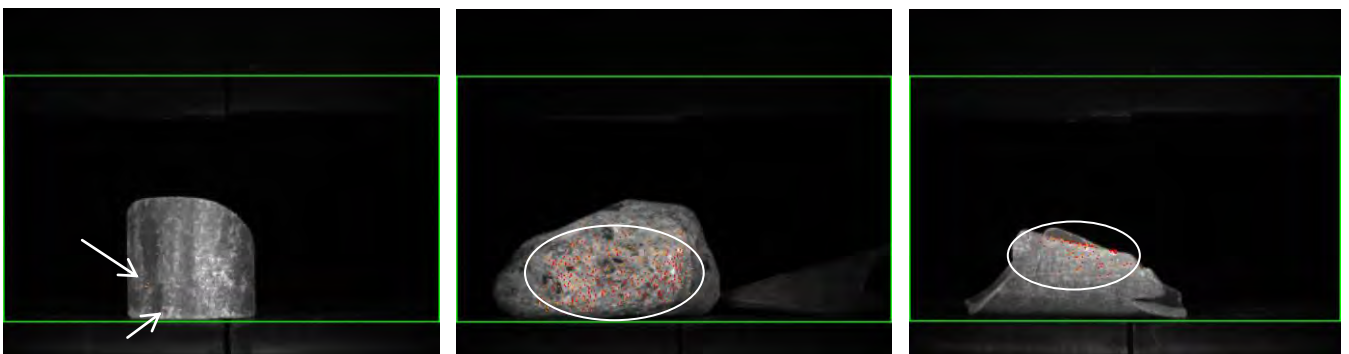


図 3.1.1-4 偽陽性の現れた廃棄物判定画像（左から廃プラスチック、コンクリート塊、廃プラスチック）
（白矢印または楕円：クリソタイルを検出した箇所）

表 3. 1. 1-4 偽陽性の現れた廃棄物とその原因

廃棄物種類	原 因
廃プラスチック	クリソタイル繊維が付着した可能性
コンクリート塊	判定中に移動（転がり）
廃プラスチック	判定中に移動（転がり）

4) 考 察

アスベスト含有建材が自動検出装置に正しく投入されても、24 個中 3 個（12%）を検出し損なった。その原因は以下のとおりである。

- (1) アスベスト含有建材と共に投入された他の廃棄物が含有建材を隠した（含有建材が有効に撮影・判定されなかった）
- (2) アスベスト含有建材と共に投入された他の廃棄物が含有建材を押しつけた（同上）
- (3) 撮影した断面にアスベスト繊維が露出していなかった、また撮影面変更の失敗により再び同じ断面が撮影された

判定中に移動した廃棄物に偽陽性が現れた理由について説明する。アスベストの検出にあたっては「2. 1. 1 アスベスト検出手法」で述べた通り、フィルタの透過中心波長を複数切り替えながら同一対象物の各画素の反射強度を取得して吸収ピークを検出している。もし撮影中に対象物が移動するとある波長の反射強度が低下し、これを吸収ピークとして捉えてしまうことにより発生する。これを防止するには、対象物（廃棄物）を撮影中に移動しないように物理的に安定化させるか、もしくは異なる波長を同時かつ瞬時に取得する手段が必要である。

3.2 作業性・実用性検証

近年件数が増加している都市部での解体工事は狭隘な場所で行われる事が多く、大型機械を導入するために大型車両が通行する搬入路や、システム組立のための広い作業スペースを確保する事が困難である。また、選別システムおよび自動検出装置は、建設廃棄物処理の上流に位置する解体工事での使用を優先すべき目的としているため、システムの可搬性、騒音・振動の対策、アスベスト飛散防止対策、作業性の良さを有している事は、システムの実用化にとって重要な課題である。これらの課題に対応した装置である事を確認するため選別システムの運搬と重機を使用した作業検証を行った。選別作業時の騒音・振動、空气中アスベスト粉じん測定の実験計測結果については「2.2.6 環境計測」に記載した。

【可搬性および作業性】

選別システムは設置や現場間の移設が容易な装置とするためにトラック 1 台で運搬でき、現場での組立作業を必要としない一体型システムとした。選別システムの大きさは、一般的な 10 t 低床トラックの荷台に積載可能な範囲内（全長：9,600 mm、幅：2,350 mm、高さ 2,700 mm）とした。しかし、選別システムをクレーンで揚重するために本体フレームの強度を向上させた事や、防音性を高めるための防音パネルを採用した事で本体質量が 13.5 t まで増大し、一般的な 10 t トラックの最大積載量を超えたため選別システムの運搬には 15 t 低床トラックを使用する事とした。

現場での組立作業を無くすため吊上げポイントを製作し、一体化した選別システムを 1 台のクレーンで揚重できるようにした。この際、選別システムの質量や大きさ、クレーンの作業半径を考慮すると選別システムの揚重には最低でも 35 t 以上の能力が必要となる。現場設置後は、電源ケーブル（CT 4C 22 mm²）を接続するだけで選別システムを稼働できるようにした。

選別システムの上部に設置した投入ホップにバックホウを利用して直接廃棄物を投入するためには、バックホウのブーム長さ等を考慮すると最低でも 0.4 m³ 級のバックホウが必要となる。このサイズのバックホウは一般的なものであり、解体工事においても多く利用されているため新たに選別システム専用の重機を用意しなくても運用可能である。また、バックホウを使用する場合は選別システムの側方からホップに投入する事になるが、バケット容量が大きなバックホウを使用してもホップからのこぼれ等が発生しづらくするために投入ホップの容量は約 1.3 m³ とした。

解体工事における選別システムの運搬、設置、選別作業を考慮して実施した対策について実行性を確認するため、実際の 15 t トラック、35 t ラフタークレーン、0.45m³ バックホウを使用した解体現場での運搬、設置、選別作業を模擬した検証実験をおこなった（図 3.2-1、図 3.2-2、図 3.2-3）。この検証実験において選別システムの設置作業を 3 名で行い、バックホウを使用した選別作業はバックホウ操縦者が 1 名と選別システム操作者 1 名の 2 名体制で行った。選別システムの処理速度は 1 m³/h 相当とし、0.45 m³ バケットにすり切りで入る廃棄物量（約 0.30 m³）を 1 杯投入し（図 3.2-4）、選別する実験を 4 回繰り返し行った。

実験の結果、選別システムは一般的な 15 t 低床トラックに搭載して運搬が可能であり、運搬した選別システムを 35 t ラフタークレーンで吊り上げ、所定の位置に設置し、電源ケーブルを配線するまでの所要時間を計測した結果、約 2 時間（115 分）で実施できることがわかった（表 3.2-1）。また、選別システム上部にある投入ホップに廃棄物をバックホウで投入しても廃棄物のこぼれや詰まりなどが無く、選別作業が行える事を確認した。



図 3. 2-1 運搬状況



図 3. 2-2 設置作業



図 3. 2-3 選別作業の検証状況



図 3. 2-4 バックホウ投入廃棄物

表 3. 2-1 選別システム設置・選別作業サイクル

No	作業項目	使用機械	作業人数	作業時間 (min)
1	運搬車輛搬入	15 t 低床トラック	1	5
2	玉掛け	35 t ラフタークレーン	2	15
3	揚重・設置	15 t 低床トラック 35 t ラフタークレーン	3	35
4	調整	—	3	40
5	配線	—	2	20
Total				115
6	選別システム起動		1	2
7	廃棄物投入	0.45m ³ バックホウ	1	1
8	選別		1	20
9	回収、片付け		2	15
10	選別システム停止		1	1

3.3 廃棄物サンプルを使った選別精度評価実験

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ことを確認するため、解体現場から採取した廃棄物サンプルを使用した廃棄物選別実験により、設定した6品目（コンクリート塊、木くず、鉄くず、金属くず：アルミニウムなど、廃プラスチック、その他：内装材など）の選別精度検証を行った。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[2]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、0.3m³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）、内装材を各 30 個混入させたものを使用した（図 2.2.3-2）。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（図 3.3-1）、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。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。選別ロボットによる廃棄物選別状況を図 3.3-2、実験によって求めた選別システムの選別精度を図 3.3-3 に示す。

選別精度結果から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ことを確認した。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。

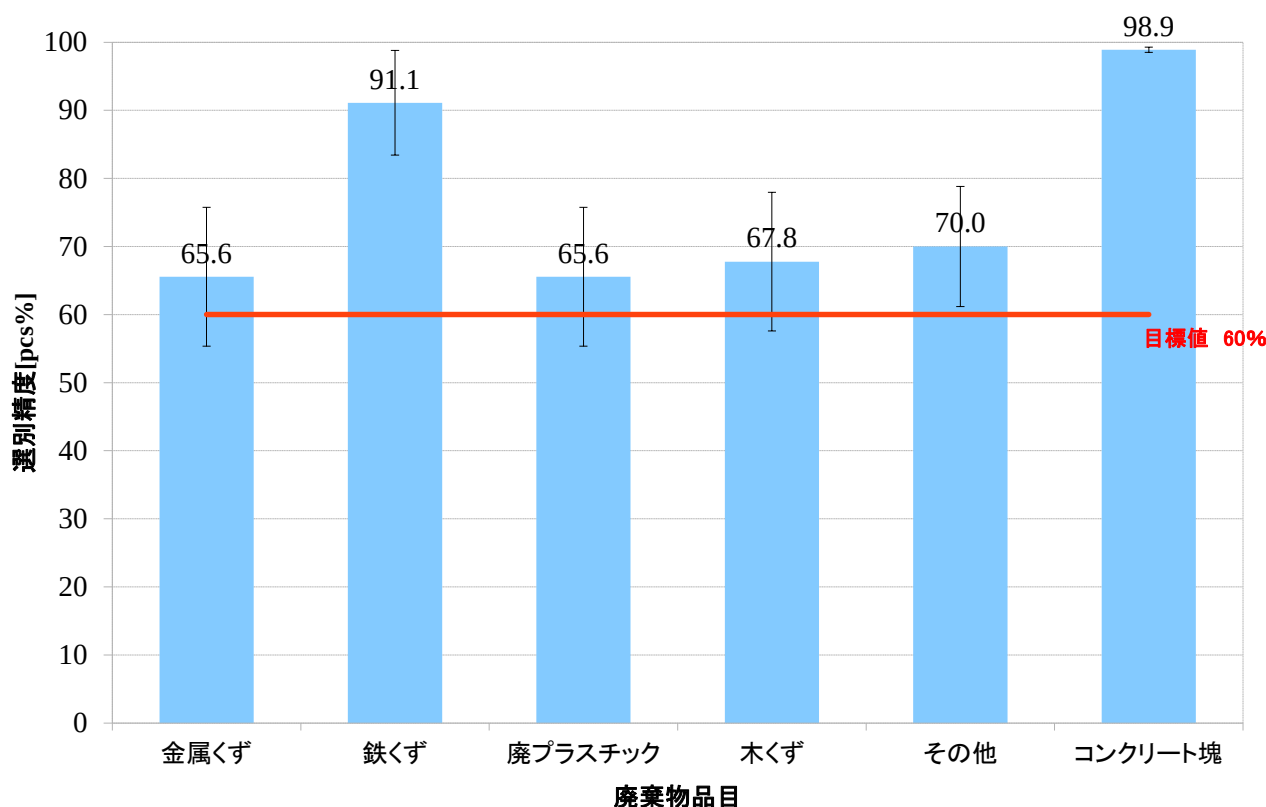


図 3.3-3 選別システムの選別精度結果



図 3. 3-1 廃棄物サンプル投入状況



図 3. 3-2 選別ロボットによる廃棄物選別

今回の実験では廃棄物形状や配置が複雑であるためハンドによる把持を失敗し確実に廃棄物を回収できない事象(図 3. 3-4) や、コンベア上で重なり合った廃棄物については誤判定により取り違える事象が発生した。また、選別ロボットによって回収ボックスへ掻き出される際に、他の廃棄物と接触して廃棄物の位置が移動してしまうケースや、ハンドが廃棄物に乗り上げ選別できないケース(図 3. 3-5)もあり、選別精度にばらつきが生じる要因となっている事が分かった。

そこで選別精度評価実験における選別ロボットの動作記録をもとに、選別精度低下要因の分析を行った。その結果、主な要因として次の7つを抽出した。但し、ここでは選別ロボットの動作をのみを検証するため、ロボットビジョンによる材質判定結果の間違えは要因に加えていない。

- ① 巻き込まれ：他の対象物の選別動作によって、異なる品目の回収ボックスにまとめて回収された
- ② 乗上げ：ハンドが廃棄物に乗り上げ、回収できなかった
- ③ 把持逸脱：モードHでの把持に失敗し、ハンドの回転時に対象物が左右に逸れた
- ④ 乗越え：選別コンベアの起伏でハンドが傾き廃棄物上をハンドが通過した
- ⑤ ずらされ：他の対象物の選別動作時に接触し、廃棄物の位置や向きが移動した
- ⑥ 障害物：経路上の物にハンドのツメが接触し、把持に失敗した
- ⑦ 逸脱：モードPによる直線押し動作中に、対象物が左右に逸れた

これら7つの要因が起こった回数を記録し、投入した個数で割った値を選別失敗率と定義し、その結果を図 3. 3-6 に示す。選別ロボットの選別動作を起因とする選別失敗は 15. 8%の割合で発生し、その中でも「巻き込まれ」による選別失敗が最も高い割合で起こっていることが伺える。ちなみに、同じ実験でロボットビジョンによる材質判定結果の間違えは 4. 4%の確率で発生した。



図 3. 3-4 把持失敗

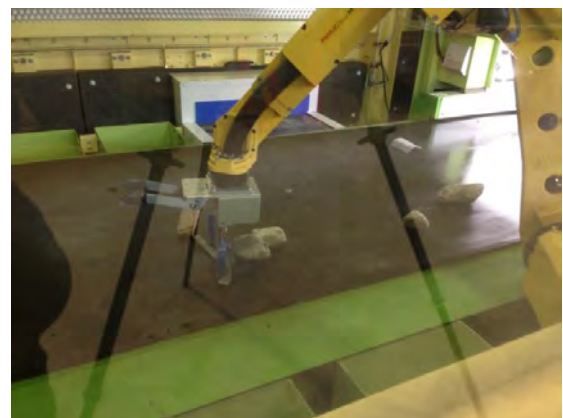


図 3. 3-5 乗上げ

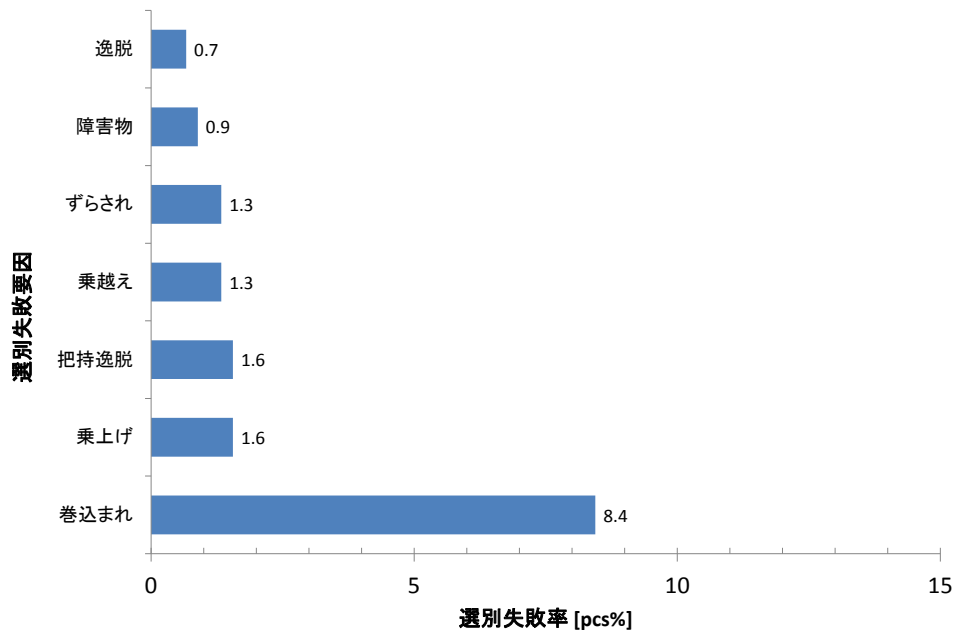


図 3.3-6 選別ロボットによる選別失敗要因

今回の精度評価実験において選別ロボットの選別失敗の他に、選別コンベア上で廃棄物の接触が原因と思われる材質判定間違いが発生していた。廃棄物の接触を減らすためにも現在は間欠運転を行っている選別コンベアを連続運転に切り替えて選別動作を行わなければ、現状の選別精度を維持した状態で処理速度の目標値である 10 m³/h の実現は困難であると思われる。今後、更なる実用化に向けた取り組みの中で掃引動作やハンドを改良し、選別精度および処理速度を安定的に向上させる事が課題となる。

【参考文献】

- [1] 中村聡，後久卓哉，柳原好孝 他 2 名，“建物の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] 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.
- [3] Takuya Gokuyu, 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.
- [4] 中村宗隆，上野隆雄，井上大輔，後久卓哉，中村 聡，柳原好孝，“ロールスクリーンを用いた解体時に発生する建設系産業廃棄物の選別方法”，第 23 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (CD-ROM)，B3-1，2012.
- [5] 中村 宗隆，後久 卓哉，上野 隆雄，中村 聡，柳原 好孝，“建設系産業廃棄物選別システム実用化研究”，第 13 回建設ロボットシンポジウム，pp. 123-128，2012.

4. まとめ

アスベスト含有建材対応型建設系廃棄物選別システムの開発により開発技術ごとに下記に示す成果を得た。

1. 近赤外カメラによるアスベスト含有建材スクリーニング装置

近赤外カメラおよび液晶チューナブルフィルタを使用したアスベスト含有建材判定手法を確立し、約4秒でアスベストを自動検出できるソフトウェアを備えた可搬形フィールド調査用のアスベストスクリーニング装置を製作した。この装置を災害廃棄物仮置き場や解体工事などの複数の現場に持ち込みスクリーニング実験を行い、アスベストスクリーニング装置の検出精度を評価した結果、含有率3wt%以下では検出精度62.5%であった。また、含有率3wt%以上では検出精度は100%であった。

このアスベストスクリーニング技術を応用し、選別システムに接続する事で選別ロボットによって選別された「その他」の廃棄物を受け入れ、その廃棄物がアスベストを含有しているかどうかを判定し、適切な回収を行う「アスベスト含有建材自動検出装置」を製作した。このアスベスト含有建材自動検出装置で選別システムに投入された建設廃棄物に混入したアスベスト含有建材を選別した結果、選別システム全体としてのアスベスト含有建材選別率は70%、アスベスト含有建材自動検出装置単体でのアスベスト含有建材検出率は88%であった。

この結果から事業全体の達成目標の1つである「解体工事から排出されたコンクリート、アルミニウム、プラスチック、木材、鉄鋼の5種類の建設廃棄物に混入したアスベスト含有建材の選別精度を70%以上で選別する」の達成を確認した。

また、アスベスト含有率とアスベスト検出点の関係性を検討した結果、断面に露出しているアスベスト繊維の数が均一でないため、特に含有率が高い場合は含有率と検出点画素密度に相関性があまり見られなかった。しかし、含有率が低い場合は2つの値に比例関係が見られるため、今後もサンプル数を増やし、計測データを補強する必要があると考えられる。

2. 建設廃棄物選別システム

近年、増加傾向にある建物が密集する都市部での解体工事に対応するために、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わせ、現場での搬入や組立が容易で、トラック1台に積載可能な大きさと質量の選別システムを開発した。この選別システムは「アスベスト含有建材自動検出装置」と接続する事で廃棄物に混入したアスベスト含有建材の検出が可能になり、HEPAフィルタ付きファンを装備して飛散防止対策も施されている。また、選別システムのベルトコンベア上に展開した不定形な建設廃棄物をロボットアームで確実に選別するために、建設廃棄物抽出用3指ロボットハンドとロボットアームの経路計画アルゴリズムを開発した。

選別システムの選別精度を検証するため、解体現場から採取した6種類（コンクリート塊、木くず、鉄くず、金属くず：アルミニウムなど、廃プラスチック、その他：内装材など）の廃棄物サンプルを混ぜ合わせ、選別システムによって品目ごとに選別する実験を行った。

この選別精度検証実験により、事業全体の目標である5種類の建設廃棄物を60%以上の精度で選別可能である事を確認した。また、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。今後、更なる実用化に向けた取り組みの中で掃引動作やハンドを

改良し、選別精度および処理速度を安定的に向上させる事が課題となる。

実際の解体現場での運搬、設置、選別作業を模擬した検証実験を行った結果、選別システムを一般的な15t低床トラックに積載し、運搬した選別システムを35tラフタークレーンで吊り上げ、所定の位置に設置して電源ケーブルを配線するまでの作業を約2時間で完了できる事が分かった。また、選別システム上部にある投入ホッパに廃棄物を0.45m³バックホウを使用して投入する際に、廃棄物のこぼれや詰まりなどの問題が無く行える事を確認した。

以上の成果によって、建設廃棄物処理の川上に位置する解体現場での迅速かつ安価なアスベストスクリーニングだけでなく、再生碎石に混入するアスベスト含有建材や、東日本大震災で発生した災害廃棄物に混入したアスベスト含有の廃棄物の検出に適用可能な技術に展開できる可能性を見出す事ができた。また、ロボットアームを使用した廃棄物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されている。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。

5. 事業概要図

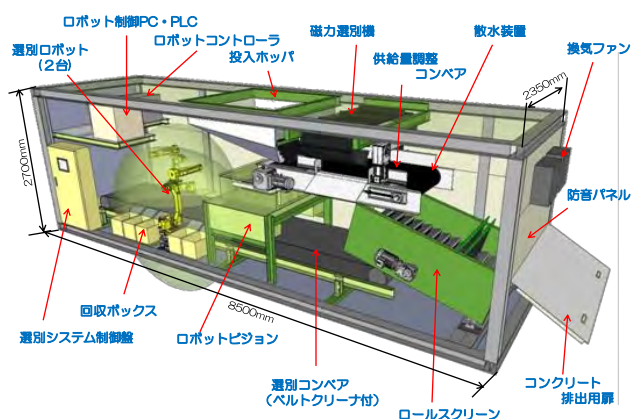


図 5-1 選別システム概要図



図 5-2 選別システム

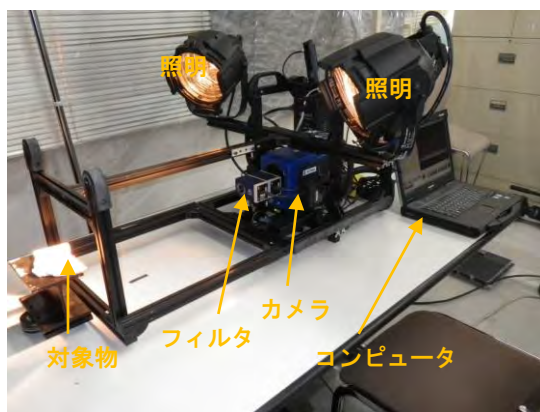


図 5-3 アスベストスクリーニング装置



図 5-4 自動検出装置と選別システムの接続

6. 論文・新聞発表等

【国内論文】

- [1] 中村宗隆, 上野隆雄, 井上大輔, 後久卓哉, 中村 聡, 柳原好孝, “ロールスクリーンを用いた解体時に発生する建設系産業廃棄物の選別方法”, 第23回廃棄物資源循環学会研究発表会(CD-ROM), B3-1, 2012.
- [2] 中村 宗隆, 後久 卓哉, 上野 隆雄, 中村 聡, 柳原 好孝, “建設系産業廃棄物選別システム実用化研究”, 第13回建設ロボットシンポジウム, pp.123-128, 2012.
- [3] 中村聡, 井上大輔, 上野隆雄, 中村宗隆, 後久卓哉, 柳原好孝, “ロボットアームを使用した建設系廃棄物選別システムの開発”, 日本ロボット学会 第30回記念学術講演会, 4G1-6, 2012.
- [4] 中村聡, 井上大輔, 柳原好孝, “RT技術を応用した建設系廃棄物選別システムの開発(その1)ー建設業におけるロボットアームの可能性ー”, 東急建設技術研究所報 No. 38, pp. 57-60, 2012.
- [5] 上野 隆雄, 中村 聡, “アスベストスクリーニング技術の開発”, 第24回廃棄物資源循環学会研究発表会(CD-ROM), E2-6, 2013.
- [6] 上野 隆雄, 中村 聡, “アスベストスクリーニングシステムの開発”, 計測自動制御学会第14回システムインテグレーション部門講演会 (SICE2013), pp. 493-496, 2013年12月
- [7] 中村聡, 井上大輔, “産業用ロボットを使用した建設廃棄物選別システムの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演概要集, 1P1-K01, 2014年5月(投稿済み).
- [8] 井上大輔, 中村聡, “建設廃棄物選別用3指ハンドの構成と動作モード”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演概要集, 1P1-M02, 2014年5月(投稿済み).
- [9] 上野隆雄, 中村聡, “建材中アスベストの可視化技術の開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演概要集, 1P1-K05, 2014年5月(投稿済み).

【プレスリリース】

- [1] 日刊建設産業新聞, “東急建設: ロボット技術(RT)活用し現場作業安全に アスベスト建材を自動選別”, 2014年1月23日.
- [2] 日本経済新聞, “がれき自動分別装置 東急建設 トラックに搭載可能”, 2014年1月4日.
- [3] 建築技術, “広範囲を数秒で調査可能な「アスベストが見えるカメラ」を開発”, TECHNICAL VIEW, 2013年12月.
- [4] ワールドビジネスサテライト, “危険なアスベスト防げ”, テレビ東京, 2013年10月9日.
- [5] 日刊建設工業新聞, “東急建設/廃棄物中の石綿見える化/画像から4秒で判定、選別システムも開発中”, 2013年9月18日.
- [6] 建設通信新聞, “東急建設/4秒で石綿「見える化」/効率的にふるい分け”, 2013年9月18日.
- [7] 日刊建設産業新聞, “東急建設/石綿ふるい分け装置開発/廃棄物選別システムへ応用”, 2013年9月18日.
- [8] 建設通信新聞, “東急建設の環境・技術展/「安心」「快適」技術紹介”, 2013年11月8日.
- [9] 日刊建設工業新聞, “東急建設が環境・技術展/顧客ら70人参加”, 2013年11月8日.
- [10] 日刊建設産業新聞, “東急建設/技研で先端技術など紹介”, 2013年11月8日.
- [11] 東急建設株式会社, “アスベストが見えるカメラ 実用化に向け開発～広範囲を数秒で調査可能な「アスベストスクリーニング装置」～”, 2013年9月17日.

7. 知的財産権の取得状況

- 1) 名称：特定物質検出装置及び方法

出願番号：特願 2012-202758

出願日：2012 年 9 月 14 日

- 2) 名称：側面位置制御装置、物体の側面撮影システム及び物体の側面撮影方法

出願番号：特願 2013-218475

出願日：2013 年 10 月 21 日

8. 英文概要

・ 研究課題名

「Development of the Sorting System for Recycling Construction Byproducts and Asbestos-Containing Building Materials」

・ 代表研究者名及び所属

Yoshitaka Yanagihara (Tokyu Construction Ltd.)

・ 研究分担者名及び所属

Satoru Nakamura (Tokyu Construction Ltd.)

Takao Ueno (Tokyu Construction Ltd.)

Daisuke Inoue (Tokyu Construction Ltd.)

Munetaka Nakamura (Tokyu Construction Ltd.)

Takuya gokyuu (Tokyu Construction Ltd.)

・ 要旨

In demolition sites, the construction byproducts are selected as much as possible from the construction wastes by mankind or heavy machines. However, wide variety of the construction wastes are mixed which is not able to avoid because of the nature of the demolition work. Even requires lot of time and effort to selection work of the mixed waste by mankind, there is a problem to avoid risks for workers due to risk of accidental contact with the heavy machines, and exposure to hazardous substances.

The purpose of this project is development of the sorting system for construction byproducts and asbestos-containing building materials. How efficiently demolition work can be achieved is through automation with safety improvement, improvement of recycling rate of the waste, and preventing the asbestos mixed into the construction by products in the demolition work. The goal of this project is to use disaster waste sorting and intermediate treatment facilities practically in demolition work, also improvement of the sorting speed in the future.

・ キーワード

Construction Byproducts, Sorting-system, Robot Arm, Near-Infrared, Asbestos Screening

巻末資料

【資料①： アスベスト検出精度検証実験で使用したアスベスト含有建材】



試料 1 クリソタイル 1.1wt%
アモサイト 8.6wt%



試料 5 クリソタイル 5.9wt%



試料 2 クリソタイル 2.1wt%



試料 6 クリソタイル 6.0wt%



試料 3 クリソタイル 3.7wt%



試料 7 クリソタイル 6.1wt%



試料 4 クリソタイル 4.2wt%



試料 8 クリソタイル 6.5wt%

【資料①： アスベスト検出精度検証実験で使用したアスベスト含有建材】



試料 9 クリソタイル 6.9wt%



試料 12 クリソタイル 13.9wt%



試料 10 クリソタイル 8.3wt%



試料 13 クリソタイル 15.9wt%



試料 11 クリソタイル 10.7wt%



試料 14 クリソタイル 18.3wt%
トレモライト/アケチノライト 1.3wt%

【資料②： 災害廃棄物仮置場の建材写真および判定結果画像】

＜公定法（JIS A 1481）分析結果＞

＜スクリーニング装置判定結果＞



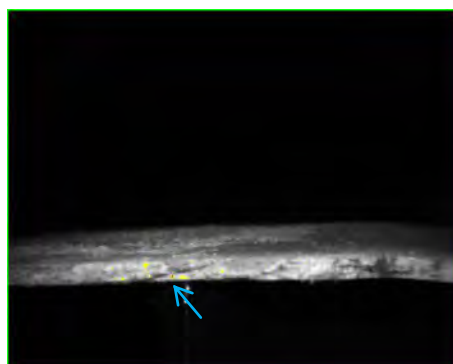
試料 1 不含



試料 1 クリソタイル検出



試料 2 クリソタイル 1.6wt%



試料 2 クリソタイル検出



試料 3 クリソタイル 1.6wt%



試料 3 クリソタイル検出



試料 4 クリソタイル 4.9wt%



試料 4 クリソタイル検出

<公定法（JIS A 1481）分析結果>



試料5 不含



試料6 不含

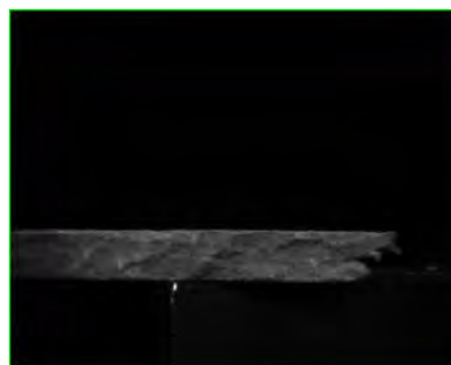


試料7 クリソタイル 2.6wt%



試料8 クリソタイル 1.4wt%

<スクリーニング装置判定結果>



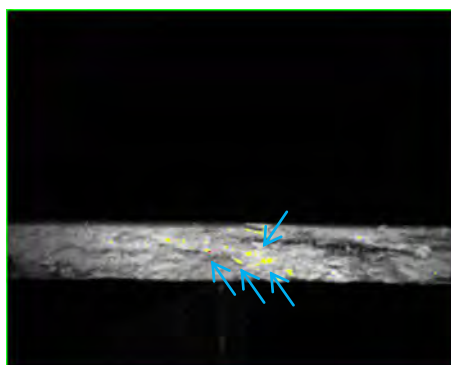
試料5 非検出



試料6 非検出



試料7 クリソタイル検出



試料8 クリソタイル検出

<公定法（JIS A 1481）分析結果>



試料9 クリソタイル 6.9wt%



試料10 クリソタイル 4.8wt%

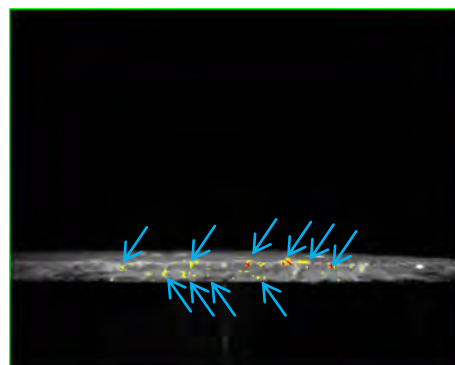


試料11 不含

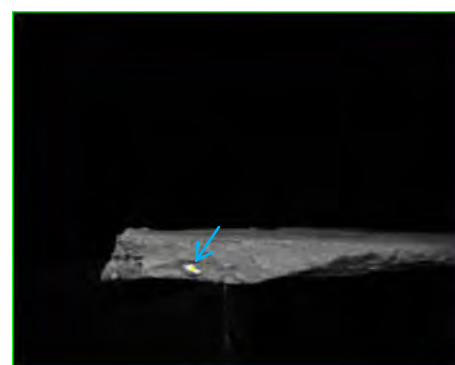


試料12 クリソタイル 4.3wt%

<スクリーニング装置判定結果>



試料9 クリソタイル検出



試料10 クリソタイル検出



試料11 クリソタイル検出



試料12 クリソタイル検出

<公定法（JIS A 1481）分析結果>



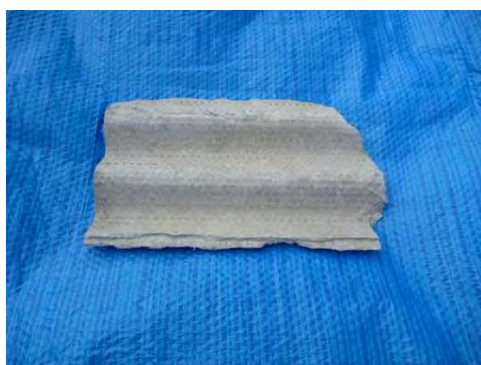
試料 13 不含



試料 14 クリソタイル 2.0wt%



試料 15 不含

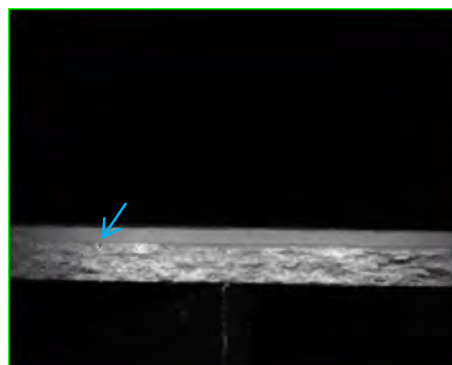


試料 16 クリソタイル 6.0wt%

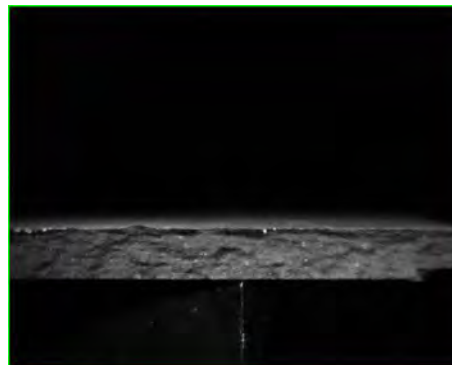
<スクリーニング装置判定結果>



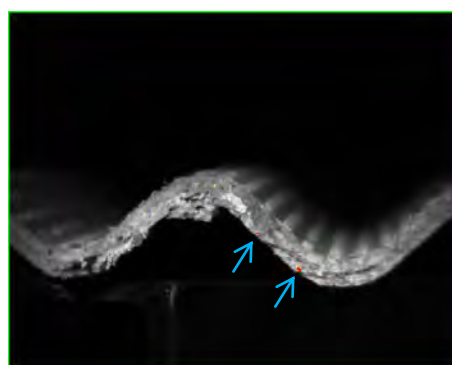
試料 13 非検出



試料 14 クリソタイル検出



試料 15 非検出



試料 16 クリソタイル検出

＜公定法（JIS A 1481）分析結果＞



試料 17 クリソタイル 5.9wt%／クロシトライト 0.5wt%



試料 18 不含



試料 19 クリソタイル 2.6wt%

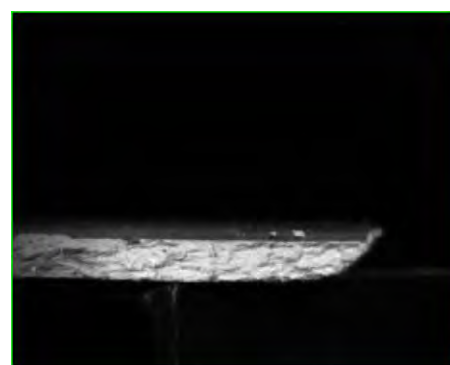


試料 20 クリソタイル 2.0wt%

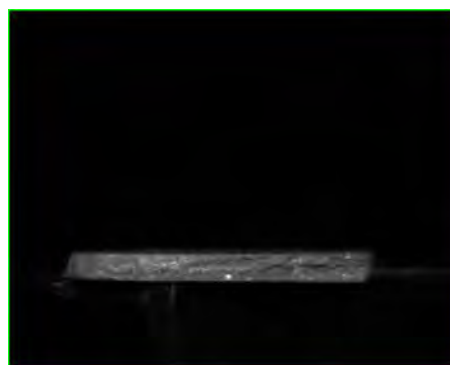
＜スクリーニング装置判定結果＞



試料 17 クリソタイル検出



試料 18 非検出

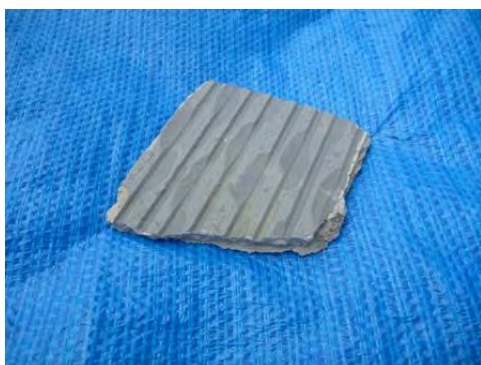


試料 19 非検出



試料 20 非検出

＜公定法（JIS A 1481）分析結果＞



試料 21 不含



試料 22 クリソタイル 4.9wt%



試料 23 クリソタイル 2.3wt%



試料 24 不含

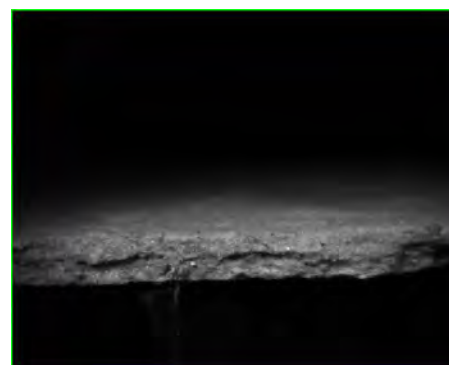
＜スクリーニング装置判定結果＞



試料 21 クリソタイル検出



試料 22 クリソタイル検出

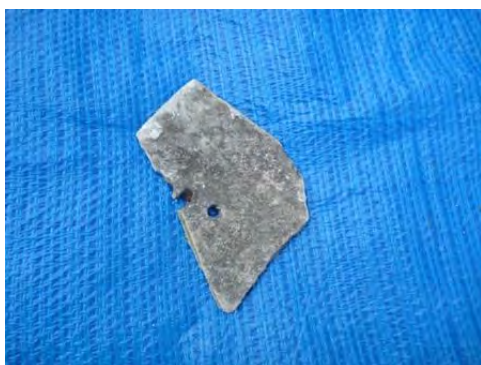


試料 23 非検出



試料 24 非検出

<公定法（JIS A 1481）分析結果>



試料 25 クリソタイル 4.9wt%



試料 26 クリソタイル 3.1wt%



試料 27 不含



試料 28 不含

<スクリーニング装置判定結果>



試料 25 クリソタイル検出



試料 26 クリソタイル検出



試料 27 非検出



試料 28 クリソタイル検出

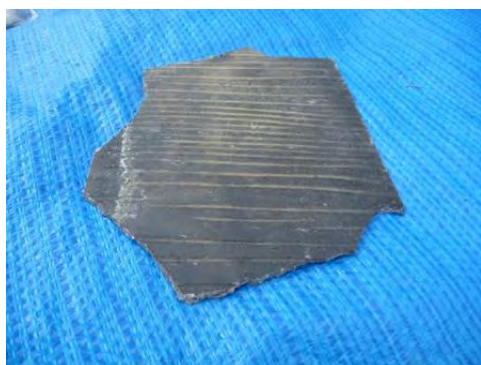
<公定法（JIS A 1481）分析結果>



試料 29 クリソタイル 4.6wt%



試料 30 クリソタイル 3.9wt%

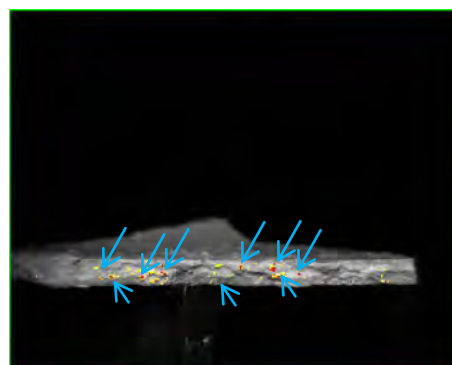


試料 31 クリソタイル 4.8wt%



試料 32 不含

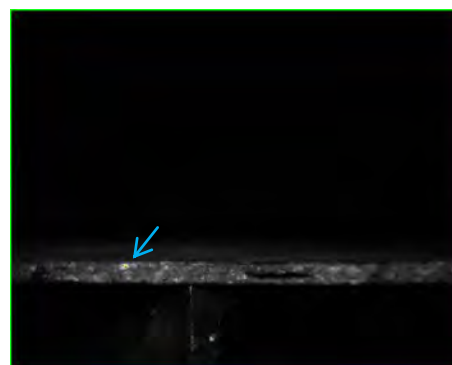
<スクリーニング装置判定結果>



試料 29 クリソタイル検出



試料 30 クリソタイル検出

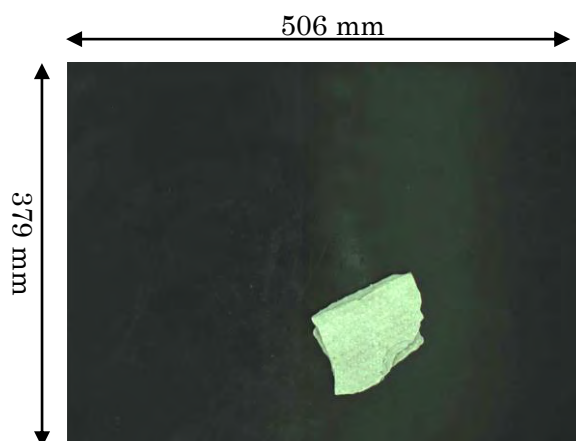


試料 31 クリソタイル検出

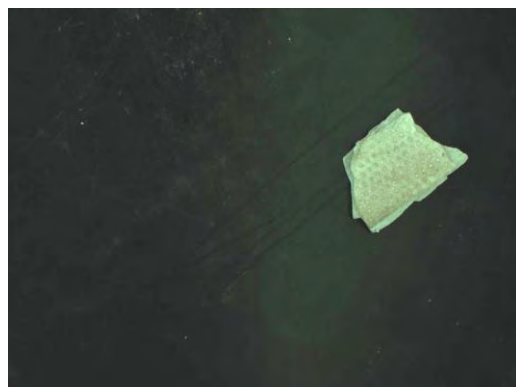


試料 32 非検出

【資料③： ロボットアームの直線経路による回収成功率検証実験で使用した廃棄物サンプル】



その他の建材 # 1



その他の建材 # 4



その他の建材 # 2



その他の建材 # 5



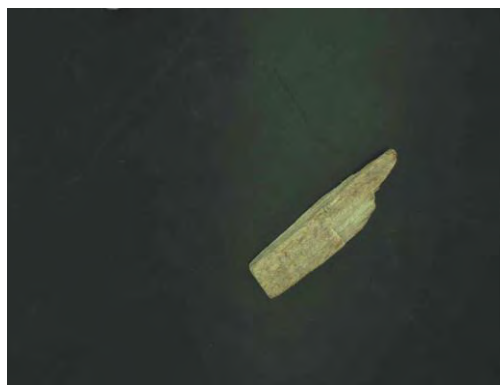
その他の建材 # 3



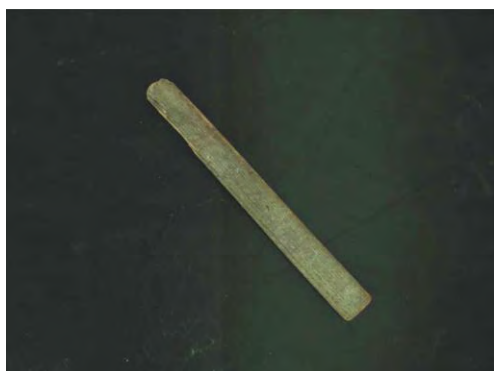
その他の建材 # 6



木くず# 1



木くず# 4



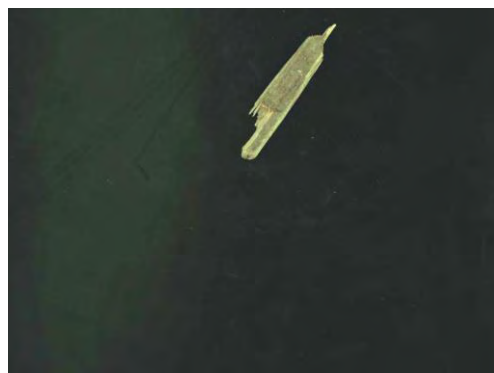
木くず# 2



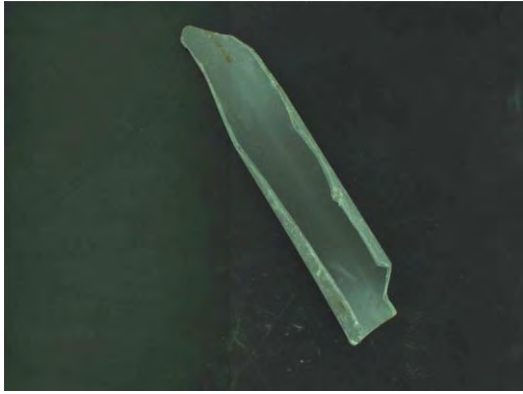
木くず# 5



木くず# 3



木くず# 6



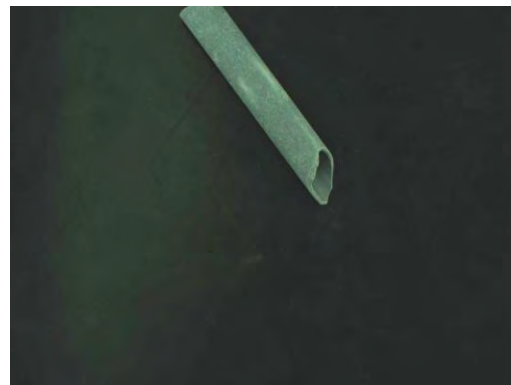
廃プラスチック # 1



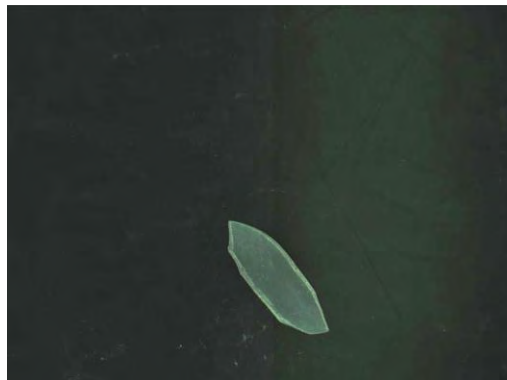
廃プラスチック # 4



廃プラスチック # 2



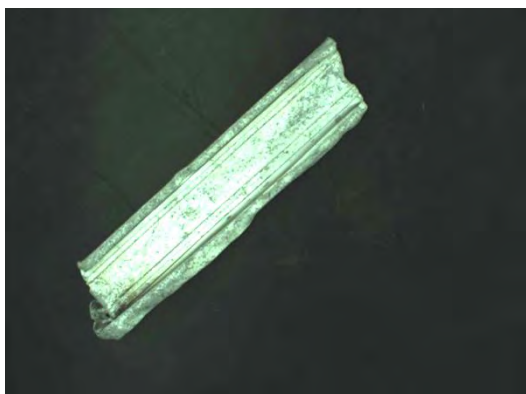
廃プラスチック # 5



廃プラスチック # 3



廃プラスチック # 6



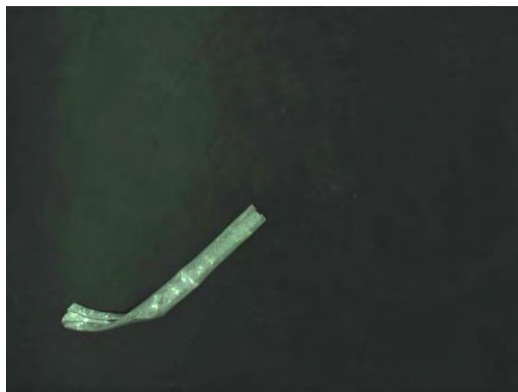
金属くず（アルミニウム）# 1



金属くず（アルミニウム）# 4



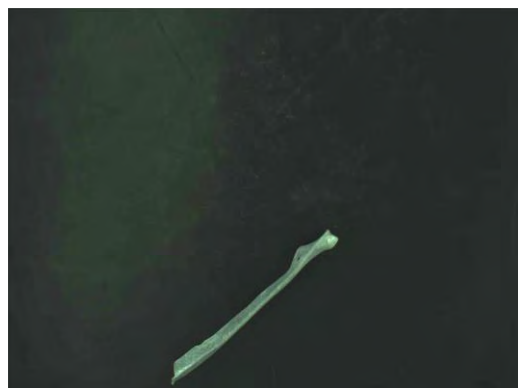
金属くず（アルミニウム）# 2



金属くず（アルミニウム）# 5



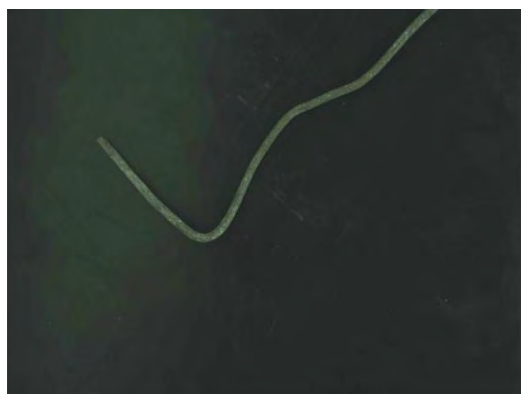
金属くず（アルミニウム）# 3



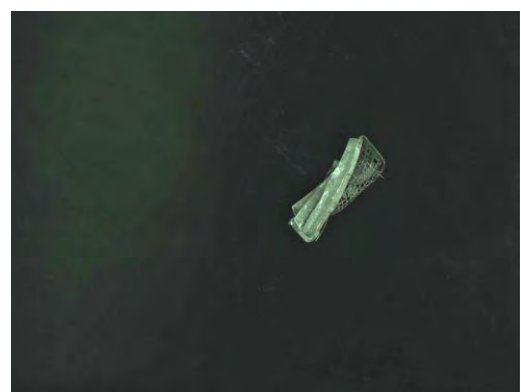
金属くず（アルミニウム）# 6



金属くず（鉄くず） # 1



金属くず（鉄くず） # 2



金属くず（鉄くず） # 3