

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K19865

研究課題名（和文）土と廃棄物の付着性に関する試行的研究：災害廃棄物の高次な再資源化に向けて

研究課題名（英文）Research on cohesiveness of soil and waste materials towards advanced separation of disaster waste

研究代表者

高井 敦史（Takai, Atsushi）

京都大学・地球環境学堂・准教授

研究者番号：30598347

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究から、含水比が増加するにつれて土の団粒化が促進されるが、ある閾値を超えると土砂分の剥離が進み、土砂のふるい通過分が増加に転じること、改質材を用いることで土の剥離は促進されるが土に混入する微細な木片が増える傾向にあり利活用を阻害する可能性があること、ふるい目の大きさを小さくすることは精度の良い分別に有効であること、振動ふるいより回転ふるいの方が試料の攪乱が大きく固結分の解砕が促進されること、等が明らかとなった。よって、分別効率の確保のためには、細粒分の多寡によらず含水比を極力下げることが有効であると言える。また、団粒化が生じやすい条件では改質材の添加や回転ふるいの採用が効果的である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果から、分別効率の確保のためには、細粒分の多寡によらず含水比を極力下げることが有効であり、団粒化が生じやすい条件では改質材の添加や回転ふるいの採用が効果的である。これらの傾向は、これまでも経験的に示唆されていたものの、論拠となる科学的データは無かったものであり、学術的に価値がある。また、得られた知見を基にすれば、現場や試料の条件に応じた合理的で効率的な災害廃棄物処理計画の立案が可能となり、巨大災害発災後の迅速な復旧・復興にも貢献しうることから、社会的な意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：This study revealed that the soil becomes more aggregated as the water content increases from dry state, but that the sieved fraction begins to increase after a certain threshold. The use of soil modifier could promote separation of soil-waste mixtures but it also let tiny wastes be passed through the sieve. The use of a rotary sieve is more effective than a vibratory sieve in crushing the aggregated mixtures. These results suggest that it is effective to keep the water content ratio as low as possible to ensure sorting efficiency, regardless of the amount of fine particles. In addition, the addition of a modifier and the use of a rotary sieve are effective under conditions that tend to cause granulation.

研究分野：環境地盤工学

キーワード：災害廃棄物処理 土砂混合廃棄物 分別土砂 接着性・付着性 再資源化 リサイクル 選別 ふるい

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、巨大自然災害が多発しており、それに伴い大量の災害廃棄物が発生している。多くの巨大自然災害では、津波や河川氾濫由来で相当量の土砂分が陸域に堆積するため、撤去された土砂分は解体系の廃棄物等とともに混合状態で仮置き・処理される。このような混合状態の災害廃棄物を再資源化するためには、各材料を効率的に精度良く分別することが重要となるが、図-1 に示すように各分別物には細かい夾雑物が混入しており、再資源化を阻む要因となっている。例えば、東日本大震災での災害廃棄物処理では、分別土砂(図-1 右の写真)に木くずが混入していたため地盤材料としての再資源化が進まなかったことや、木チップに土砂が多く残存し、焼却施設での受け入れが拒否された事例も見られた。

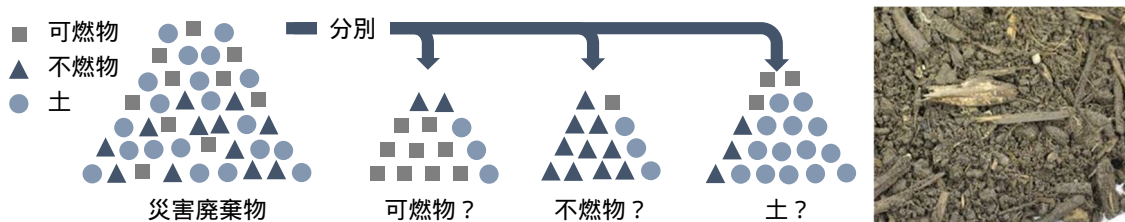


図-1 災害廃棄物の分別における課題(右は、木くずが多く残存する実際の分別土砂)

2. 研究の目的

災害廃棄物の処理効率や処理精度は、使用機材や処理ラインを含むシステムの能力だけでなく、各材料を接着する役割を担う土砂分の特性が分別精度に大きく影響していると考えられるが、この点に着目しメカニズムを詳細に検討した研究は国内外で見られない。南海トラフ巨大地震や首都直下地震等でも膨大な量の災害廃棄物の発生が予想されており、災害廃棄物処理技術を高度化・高精度化することは喫緊の課題である。災害廃棄物の処理は数年以内に完了することが求められるため、一定の処理速度を確保しながら効率的に分別することが肝要であり、廃棄物処理として一般的な「破碎工程」と「分級工程」を組み合わせることで処理ラインを構築するのが現実的である。このうち、最終的な通過分=分別土砂であり、分級の成否が分別土砂の回収率や品質に直接的に影響することから、本研究では分級工程に着目し、その効率を検証することを目的とした。具体的には、各種実験を通して、各材料と土砂の付着性を定量化しうる新たな評価指標を確立し、分別精度を最適化する条件を検討した。

3. 研究の方法

土砂の細粒分含有率と含水比を変えた複数ケースの模擬混合廃棄物を作成し、災害廃棄物の分別処理において実際に使用される規模の処理装置を使用して分別試験を実施した。

3.1 使用材料と模擬混合物

模擬混合廃棄物の作製には、「土砂」、「可燃物」、「不燃物」の3種類の材料を使用した。「土砂」には真砂土と笠岡粘土を使用した(表-1)。「可燃物」にはパーティクルボード用原料としてリサイクルするために破碎処理が行われた木片を使用した。木片の長径は約10cmの細長い形状をしており、複数の木種が混合されたものである。「不燃物」には直径30~40mmのコンクリート骨材用の碎石を使用した。使用した木片と碎石を写真-1に示す。なお、実機試験に用いる各試料は耐候性土のうに入れて、雨水等が侵入しないようシートで覆った状態で屋外にて保管した。

模擬混合物として、土砂と木片を混合した可燃系混合物と、土砂と碎石を混合した不燃系混合物を作製した。

表-1 真砂土と笠岡粘土の基礎物性

項目		真砂土	笠岡粘土
粒度(%)	礫分	42.8	0
	砂分	51.2	0
	細粒分	6.0	100
土粒子密度(g/cm <sup>3</sup> )		2.59	2.68
液性限界(%)		NP	58.5
塑性限界(%)		NP	24.6



写真-1 使用した木片(左)と碎石(右)の外観

3.2 実機試験（別の研究プロジェクトで実施したが、相互比較に利用した）

試料の混合は容量 2 m<sup>3</sup> の鋼製の水槽内で 0.1 m<sup>3</sup> クラスのバックホウを用いて行い、混合後の重量が約 2 t となるように調整した。重量測定は、秤量が 3 t で最少目盛が 1 kg の吊りばかりを用いて行った。実機試験の全景を写真-2 に示す。混合物の配合において土の細粒分含有率と混合物の含水比を変化させており、東日本大震災での災害廃棄物処理実績等を参照し、細粒分含有率は約 10%と約 40%の 2 通りで調整した。また、各混合物の含水比は、可燃系混合物全体では約 10%と約 20%，不燃系混合物全体では約 6%と約 1%の 2 通りとなるよう調整し、いずれの混合物においても土砂分の含水比が 8%，17%となるように設定した。分級装置には、TEREX 製 TTS620T，FORCEBEL 製選別装置を用いた。



写真-2 実機試験全景

### 3.3 室内試験

実機試験と同様の可燃系混合物と不燃系混合物を、室内試験でも用いた。表-2 に各混合物の配合を示す。写真-3 に示すように、風乾状態の各試料をステンレス製のボウルに投入し、霧吹きで含水比を調整しながら約 1.0 kg の混合物を作製した。実機試験の場合と同様に、可燃系混合物と不燃系混合物をそれぞれ振動式ふるいと回転式ふるいで分別し、通過分と残留分をさらに室内において木片や土砂等に湿式比重差選別により分離することで、通過分と残留分の純度を求め、分別精度を評価した。



写真-3 試料作成状況

表-2 室内試験に用いた模擬混合廃棄物の配合

種類	ケース	土砂 (t)	木片 (t)	碎石 (t)	細粒分含有率 (%)	混合廃棄物含水比 (%)	土砂分の液性限界 (%)	土砂分の塑性限界 (%)
可燃系	1	0.90	0.1	-	10	9.9	NP	NP
	2	0.90	0.1	-	10	14.9		
	3	0.90	0.1	-	10	19.9		
	4	0.90	0.1	-	10	24.8		
	5	0.90	0.1	-	40	9.7	42.1	22.8
	7	0.90	0.1	-	40	14.9		
	6	0.90	0.1	-	40	19.9		
	8	0.90	0.1	-	40	24.8		
不燃系	9	0.68	-	0.32	10	5.7	NP	NP
	10	0.68	-	0.32	10	9.0		
	11	0.68	-	0.32	10	12.1		
	12	0.68	-	0.32	10	15.0		
	13	0.68	-	0.32	40	5.7	42.1	22.8
	14	0.68	-	0.32	40	9.3		
	15	0.68	-	0.32	40	12.1		
	16	0.68	-	0.32	40	14.8		
	17	0.68	-	0.32	56	15.0	47.2	33.1
	18	0.68	-	0.32	56	22.5		
	19	0.68	-	0.32	56	30.0		
	20	0.68	-	0.32	56	37.5		
	21	0.68	-	0.32	56	45.0		

## 4. 研究成果

### 4.1 実機試験の結果

可燃系混合物の試験結果を図-2 に示す。なお、縦軸は、分別物合計に対する各画分の質量割合で示している。可燃系混合物のうち含水比を低く調整したケースでは、ほぼ全ての土砂が通過し、ふるい残留物中に占める細粒分含有率の高いケースの方がやや土の割合が多い。これは、木片に付着する細粒分量が増加したためと考えられる。また、両ケースともに混合した木片の半量程度がスクリーンを通過した。含水比を高く調整したケースのうち、細粒分が少ないケースではほとんどの土砂分がふるいを通過しているものの、残留試料中の土砂量が約 3%多くなっている。これは、含水比が高くなることにより木片に細粒分が付着しやすくなったためと考えられる。また、



含水比と細粒分含有率を高く調整したケースでは、写真に示す通り、粘土が団粒化し、スクリーンを通過しなかったため土砂の半量程度が残留した。つまり、実際の災害廃棄物処理の現場でも、津波災害のような細粒分を多く含む場合には、含水比を十分に低下させることが重要であることを示した。

地盤工学の観点からは、より良い分別とはより多くの土砂を回収することであり、土砂の純度（品質）が高く、地盤材料としての利用を促進することが重要である。そこで本研究では、分別特性の判断指標として、以下の2つのパラメータを定義し用いた。

- 土砂回収率（%）： 使用した全土質材料に対する通過土砂の乾燥質量比。全土砂の半分以上を回収する必要があると考え、本研究では60%以上を基準とした。
- 木片混入率（%）： 通過分（通過木片 + 通過土砂）に対する通過木片の乾燥質量比。木片混入土の強度特性を評価した既往研究結果に基づき、10%以下とした。

図-3 に、実機試験で得られた土砂回収率と木片混入率の関係を示す。指標の定義を考慮すると、黄色くハッチングされた右下のゾーンは、通過した原料に含まれる木材チップの割合が小さく（10%未満）、つまり高品質であり、土砂回収率が高いことから、より効率的な分別条件であると判断される。特に、図中の円内に Fc15w10 と Fc40w10 の2点が重複しているが、本研究では最適条件と見なすことができる。細粒分含有率に関わらず、含水比 10%の場合において、通過分中の木片混入率が < 5%、土砂回収率が ~100% となったことから、混合廃棄物の乾燥が最も重要であることを示唆している。

また、全体的に回転式ふるい（Rotary）の方が振動ふるい（Vibrating）と比較し分別効率が良いことが分かる。したがって、津波により発生するような粘土分を含む災害廃棄物の処理には回転式ふるいが有効であり、河川氾濫などで発生する砂質土主体の災害廃棄物の処理には振動式ふるいが適していると考えられる。

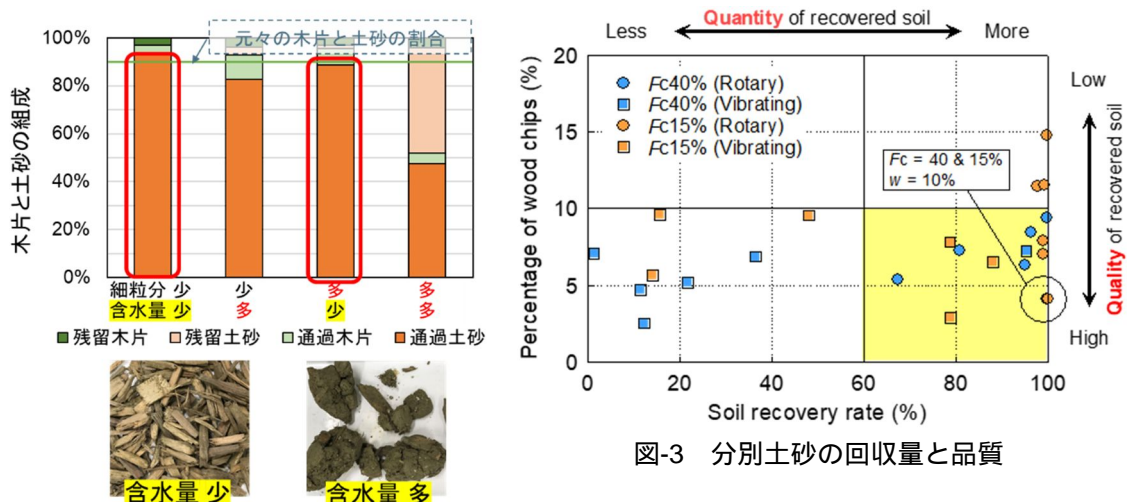


図-3 分別土砂の回収量と品質

図-2 実機試験の結果(可燃系混合物)

#### 4.2 室内試験の結果

実機試験と同様に、土砂の細粒分含有率が低いケースの結果では、含水比の増加に伴って木片の残留割合が増加し、分別効率が低下した。また、ある含水比を超えると分別効率が改善に転じることが明らかとなったため、各配合の土砂分の液性・塑性限界を、JIS A 1205 に評価した。細粒分含有率 40% のケースについて、塑性限界と分別特性の関係を図-4 に示す。設定した含水比が土の塑性限界に近づくにつれて、ふるい上の残留土砂割合が多くなっている。この結果から、混合廃棄物の分別効率が土砂分の組成減相付近で最も低くなることを確認した。実機試験と室内試験の結果は定性的に整合することを明らかにした。

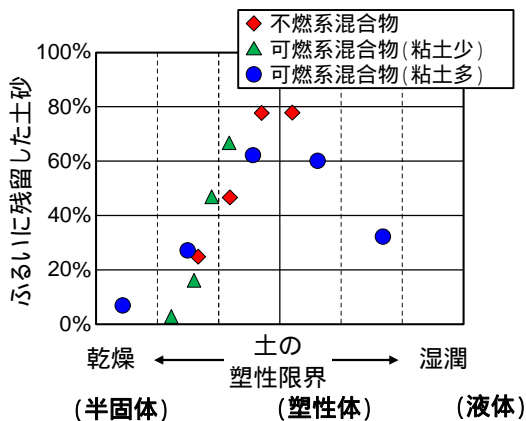


図-4 土の含水比と分別効率の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 塩入潤一郎・中川将吾・高井敦史・清水祐也・勝見 武	4. 巻 -
2. 論文標題 実機試験と室内試験による土砂混合廃棄物の分別特性に及ぼす含水比と細粒分含有率の影響の評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第14回環境地盤工学シンポジウム発表論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A. Takai, Y. Shimizu, T. Kato, and T. Katsumi	4. 巻 -
2. 論文標題 Pilot-scale and laboratory tests for efficient separation and recovery of soil-waste mixtures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 9ICEG	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 石田倫啓・平岡寛星・高井敦史・勝見 武・清水祐也	4. 巻 -
2. 論文標題 回転式・振動式ふるい機を用いた土砂系混合廃棄物の分別特性評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第15回地盤改良シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 699-706
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 清水祐也・塩入潤一郎・中川将吾・高井敦史・勝見武	4. 巻 17
2. 論文標題 土砂混合廃棄物の分別特性に及ぼす含水比と細粒分含有率の影響の評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 地盤工学ジャーナル	6. 最初と最後の頁 319-329
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3208/jgs.17.319	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 石田倫啓
2. 発表標題 回転式・振動式ふるい機による土砂系混合廃棄物の分別特性評価
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石田倫啓
2. 発表標題 回転式ふるい機による土砂系混合廃棄物の分別特性評価
3. 学会等名 2022年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石田倫啓
2. 発表標題 Evaluating the effectiveness of separating soil from simulated mixed waste using rotary and vibrating screens
3. 学会等名 Geo-Environmental Engineering 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三木良実
2. 発表標題 改質材の添加による土砂系混合廃棄物の分別特性の変化
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三木良実
2. 発表標題 Effects of Soil Modifiers on Separation of Soil-Wastes Mixtures on Disaster
3. 学会等名 Geo-Environmental Engineering 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	勝見 武  (Katsumi Takeshi)  (60233764)	京都大学・地球環境学堂・教授   (14301)	
研究分担者	加藤 智大  (Kato Tomohiro)  (80943612)	京都大学・地球環境学堂・助教   (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------