

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21994

研究課題名(和文)除去土壌の再資源化のための試行的研究：分離・混合技術の適用基準確立に向けて

研究課題名(英文) Trial study for recovery of radioactively contaminated soil: Establishing framework of separation and mixing techniques

研究代表者

勝見 武 (Katsumi, Takeshi)

京都大学・地球環境学堂・教授

研究者番号：60233764

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)：土砂混合廃棄物の選別処理において最も主要な構成要素となる「分級(ふるい)処理」に着目し、模擬混合廃棄物を対象として振動ふるいによる室内分別試験を行った。土砂分の細粒分含有率と含水比を変えて検討した結果、1) 乾燥状態から含水比を高めた場合、ふるい上に残留する割合が大きくなるが、ある閾値を境に残留する割合が小さくなること、2) その閾値は試料によって異なるが、接着剤として振る舞う土砂分のコンシステンシー限界で統一的に表現できる可能性があること、等を明らかにした。乾式での混合廃棄物分別処理を適用する場合、極力含水比を低下させてから分別することで、土の剥離を促進できると言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、2011年の福島第一原子力発電所事故で発生した約1400万m³にもよる除去土壌を土木資材として活用するため、土砂混合廃棄物の分別しやすさに及ぼす土砂の性状の影響を評価したもので、極力含水比を低下させてから分別することで、土の剥離を促進できることを明らかにしている。含水比の制御は現場で容易に実施できる事項であり、追加費用を抑制しつつ混合状態の災害廃棄物・除去土壌から各材料を精度良く分別し取り出すための重要な知見と言える。また、混合廃棄物の分離しやすさを土砂分の基礎物性で統一的に表現できたことは、土砂分の物性を評価することで分別効率や処理速度を予測できる可能性を示唆している。

研究成果の概要(英文)：This research focuses on "sieving process", which is a main component of waste treatment system, mainly for recovering soils contained in disaster wastes. Laboratory sieving test using a vibration screen was conducted for soil-waste mixtures with different fine contents and water contents. The results indicate that: 1) The fractions remained on screen increases with an increase in water content, while decreasing after a threshold water content, and 2) While varying with the type of mixtures, the threshold water content may be possibly expressed with consistency limits of soil contained in the waste mixtures. These observations can imply that sun-drying before separation should be done for more effective segregation of soil.

研究分野：環境地盤工学

キーワード：災害廃棄物 津波堆積物・堆積土 分別土 分級 付着性 コンシステンシー

1. 研究開始当初の背景

2011年の福島第一原子力発電所事故を受け、放射能を低減するため除染事業が進められてきたが、その結果として約1,400万m³にもよる除去土壌が発生し、その対応が国家的課題となっている。除去土壌は、土を主体とするものの、除染作業時に発生した廃棄物等も混入した状態となっており、そのほとんどがフレコンパックに詰められた状態で「仮置き場」にて仮置きされた後、現在建設中の「中間貯蔵施設」への運搬・保管が目下進められつつある。ここで、コスト削減と総作業の実現性から保管の総量を減らすことが求められており、そのためには放射性物質濃度が低い土（土壌）は土木資材として活用することが有効と考えられ、環境省の検討会でもその方針が示されている（図1参照）。

除去土壌は大きく分けて、主に市街地から発生する粒度が良い土壌と、粘性土（細粒分）主体の農地からの土壌とがある。土壌の放射性物質濃度を低下させるのに効果的な方法として、セシウム濃度の高い細粒分を粗粒分から分離する分級処理があるが、この方法は粘性土主体の農地土壌へは適用が難しい。一方、農地土壌は粘性土主体であるため工学的特性の観点から単独では土工材としての適用が難しいため、農地土壌を適切に市街地土壌と混合することで再生利用を図ることが有効と考えられる。つまり、放射性物質に対しては「分離する」ことで、土工材としての適性は「混合する」ことで改質を目指すことになり、どのような条件であれば「分離する」技術、あるいは「混合する」技術を採用すべきか、実務者が適切に意思決定するための判断指標を早急に整備する必要がある。除去土壌の活用上のもう一つの課題として、図1中段の石系材料の取り扱いがある。混入している廃棄物等には木片などの他に自然石やコンクリート塊、レンガなどが含まれるが、除去土壌にはこれらが相当量含まれることが明らかになっており、その活用が課題である。石系材料は土とともに地盤材料として活用するのが適切と考えられるが、そのためには石系材料を他の廃棄物と適切に分離した上で活用する方向性の提示が必要である。

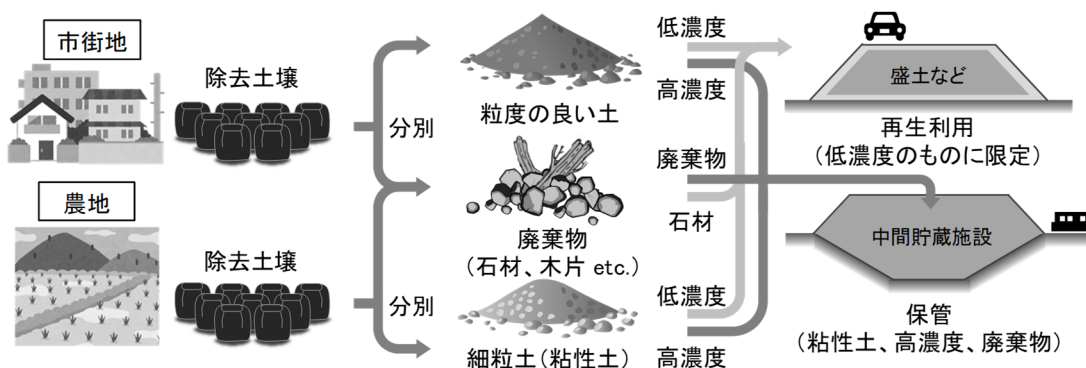


図1 除去土壌の発生、処理、保管、再生利用の流れ

2. 研究の目的

本研究は、雑多な土砂系混合物から有効に「土」を救い出すことで、保管・処分される廃棄物量を減らすことを最終目的とし、土砂系混合物から分離された石系材料や粘性土の取り扱いの方向性を示すものである。土砂系混合物の利用は、東日本大震災における災害廃棄物の処理と再生資材の利用で一定の成果がみられ、世界最先端の技術としても認知された。しかしながらこれらのほとんどは、それぞれの現場の制約条件下での個別対応の成果であり、科学的に体系化された処理技術の確立（特に、混合物をどれくらい精密に分別すべきか）までには至っていない²⁾。市街地の除去土壌を想定した粒度の良い土と、農地の除去土壌を想定した粘性土とをそれぞれ複数種取り上げ、混合比を変えた混合土質材料について、道路盛土や堤防など土質材料としての適性を評価する。時間経過による放射能の減衰の効果も考慮し、除去土壌の再資源化を実現するための分級/混合の組み合わせの最適解を学術的に探索し、技術の適用指標の提案を行う。

3. 研究の方法

本研究では、土砂混合廃棄物の選別処理において最も主要な構成要素となる「分級（ふるい）処理」に着目した検討を行った。東日本大震災の災害廃棄物の組成に基づいて配合を決定した模擬混合廃棄物を対象とした。

土質材料として真砂土を主に使用し、細粒分含有率の調整のために笠岡粘土を使用した。可燃物には、長径が約100mmの細長い木片を使用した。木片には短辺と長辺があり、短辺が上を向いた際には19mm



写真-1 使用した木片（左）と碎石

のふるいを通過するような木片を材料とした。また、不燃物には碎石を使用した。19 mm 以上の径を有した粒状体のものを使用し、粗粒材への付着性を評価した。コンクリートが由来の化学物質やアルカリによる影響を排除するため、天然の岩石を破碎した碎石を使用した。使用した木片と碎石の外観を写真-1 に示す。

上記の材料を、写真-2 に示すように、乾燥質量比で 9:1 となるように土砂と木片を混合した「可燃系混合物」と、2:1 となるように土砂と碎石を混合した「不燃系混合物」の 2 種類を作製した。各材料を 110°C で炉乾燥させた後に所定量分取し、所定の含水比になるように蒸留水を加えながら混合を行った。含水比は二次仮置き場での保存期間や保存環境、降雨等によって変化するため、10~30%の範囲で含水比を変化させ、その影響を評価した。また、細粒分含有率 (F_c) が約 10, 34, 40, 56%となるように試料を作製し、細粒分含有率の影響を評価した。表-1 に、本研究で実施した実験条件の一覧を示す。

表-1 実施した実験条件一覧

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 (%)
可燃系混合物	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		
不燃系混合物	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		

室内分別試験は、目開きが 19 mm の鋼製ふるいを用い、写真-3 に示す電磁式振動ふるい機（レッチェ社製，AS200）によって、振幅約 1.2 mm，振動数 3600 回/min で模擬混合物の分級を行った。分別後の残留試料，通過試料についてそれぞれ乾燥試料の質量を計測することで、量的評価を行った。可燃系混合物には通過試料，残留試料の両方に木片，土が混在するため，それぞれの質量を調べるために水中で分離させる比重差選別を行うことにより



写真-2 試料作成状況



写真-3 振動式ふるい機

木片と土の質量を算出した。不燃系混合物については、全ての碎石がふるいに残留することから、通過試料の土の質量を算出し、投入した試料量から通過した土の質量を差し引くことで、残留試料中の土の質量を算出した。また、JIS A 1205: 2020 と JIS A 1209: 2009 に準拠して液・塑性限界と収縮限界を測定し、土のコンシステンシー特性と分別特性の関係について考察した。

4. 研究成果

「3. 研究の方法」に示した実験的検討を行い、土の再生利用の基準策定につながりうる以下の基礎的知見を得た。

(1) 可燃系混合廃棄物の分級

試験結果を図-2 に示す。土砂の細粒分含有率が低いケース 1, 2, 3, 4 の結果を比較すると、含水比の増加に伴って木片の残留割合が増加しているが、土砂の残留割合はケース 3 の混合廃棄物の含水比 19.9 %を境に減少に転じている。この結果から混合廃棄物の含水比 19.9 %以上 24.8 %以下の間で混合廃棄物に含まれる土砂の含水比が液性限界に近づくことで土砂の流動性が高まり、木片への付着量が減少したためと考えられる。また、土砂の細粒分含有率が高いケース 5, 6, 7, 8 の結果を比較すると、細粒分含有率が低いケースと同様に含水比が高まるにつれて通過土砂量が減少する傾向が見られた。これらの結果から、土砂分の基礎物性と分別特性には大きな関係があることが示唆される。

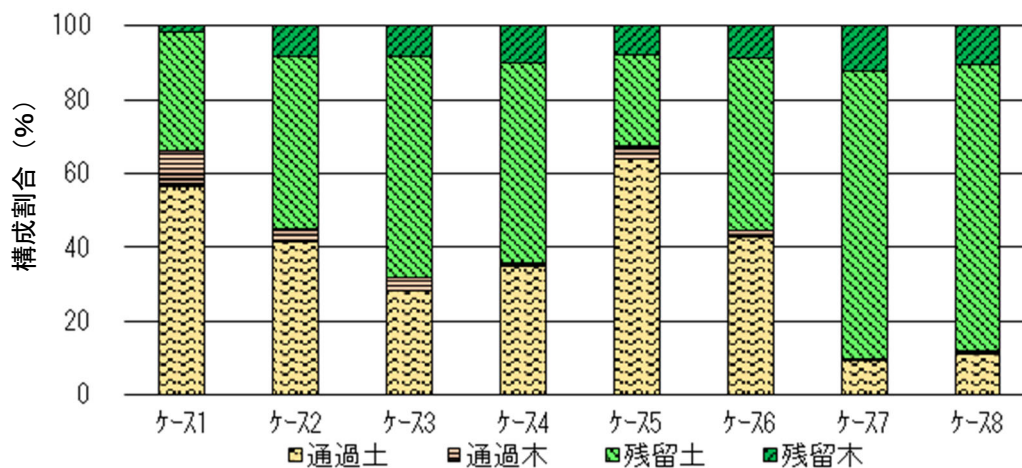


図-2 室内分別試験の結果 (可燃系混合廃棄物)

(2) 不燃系混合廃棄物の分級

碎石と土砂の混合物である不燃系混合物を対象とした分別試験の結果を図-3 に示す。土砂の細粒分含有率が低いケース 9, 10, 11, 12 の結果を比較すると、残留碎石への土砂の付着量はケース 11 の混合廃棄物の含水比 12.1 %を境に減少に転じている。一方で、土砂の細粒分含有率が高いケース 13, 14, 15, 16 を比較すると、残留碎石への土砂の付着量はケース 16 の混合廃棄物の含水比 14.8%まで増加傾向にあった。細粒分含有率の増加によって土砂の塑性指数が大きくなり、同じ含水比であっても液性限界に対して低い値となったと考えられる。

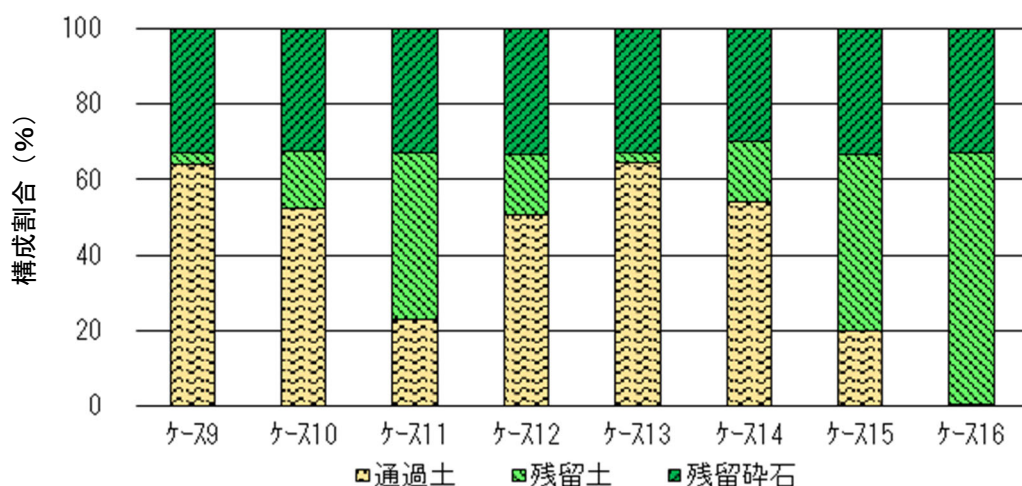


図-3 室内分別試験の結果 (不燃系混合廃棄物)

(3) 土砂分のコンシステンシー限界と分別しやすさの関係

混合廃棄物において土砂分は接着剤のように振る舞い、各材料をつなぎ合わせる役割を担い、その程度は土砂分のコンシステンシーと関係があると推察される。そこで、土砂分の各配合における JIS A 1205 の試験方法に従い液性限界・塑性限界を調べ、分別試験結果と比較・検討した。可燃系混合物のうち細粒分含有率 40 %のケース 5~8 と、不燃系混合物の細粒分含有率が 40%, 56%のケース 13~16, ケース 17~21 について、液性指数と分別特性の関係を図-4 に示す。液性指数は、対象試料の含水比が、液性限界と塑性限界に対して相対的にどの位置にあるかを示す指標で、液性指数が 1 であれば試料の含水比が液性限界と同じであり、0 であると塑性限界と同じ

であることを意味する。この結果から、液性指数が0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おり、土砂と廃棄物の団粒化が顕著となることが分かる。この傾向は、土砂の細粒分含有率によらず、また混入する廃棄物が木チップあるいは碎石のいずれの場合であっても、確認される。この結果から、混合廃棄物の分別効率が土砂分の塑性限界付近で最も低くなり、含水比が塑性限界より高くなると土砂分の流動性が高くなるためふるいで分級しやすくなることが明らかとなった。このことから、加水・散水を伴わない乾式での混合廃棄物分別処理を適用する場合、極力含水比を低下させてから分別することで、土の剥離を促進できると言える。

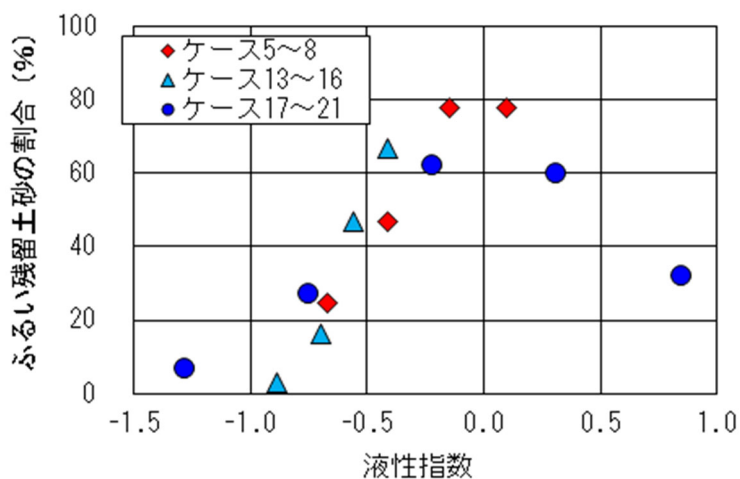


図-4 液性指数と残留土砂の関係

<参考文献>

- 1) 環境省：中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会(第4回)資料, 2016.
- 2) 勝見武(2020): 廃棄物が廃棄物でなくなる時—社会基盤分野における資源循環の方向性—, 土木学会誌, Vol.105, No.11, pp.42-43.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 S. Jonokuchi, A. Takai, T. Inui, and T. Katsumi	4. 巻 Session 5
2. 論文標題 Hydraulic characteristics and cesium sorption performance of zeolite amended clay liner against alkaline solution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Geo-Environmental Engineering 2019	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 勝見 武	4. 巻 105(11)
2. 論文標題 廃棄物が廃棄物でなくなる時 - 社会基盤分野における資源循環の方向性 -	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会誌	6. 最初と最後の頁 42-43
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 無
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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 城ノ口卓・高井敦史・乾 徹・勝見 武
2. 発表標題 ゼオライト添加型粘土ライナー のセシウム遮蔽性能に及ぼすアルカリ溶液の影響
3. 学会等名 2019年度土木学会関西支部年 次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 城ノ口卓・高井敦史・乾 徹・勝見 武
2. 発表標題 ゼオライト添加型GCLのセシウム遮蔽性能に及ぼすアルカリ性溶液の影響
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中川将吾・塩入潤一郎・高井敦史・勝見 武・清水祐也
2. 発表標題 土砂混合廃棄物の含水比と細粒分含有率が分別特性に及ぼす影響
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kansei Hiraoka, Junichiro Shioiri, Shogo Nakagawa, Atsushi Takai, Takeshi Katsumi
2. 発表標題 Effect of fine and water contents of soil on effective separation of mixed wastes generated by huge disasters
3. 学会等名 Geo-Environmental Engineering 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高井敦史・塩入潤一郎・中川将吾・勝見 武・清水祐也
2. 発表標題 実機を用いた模擬災害廃棄物の分別処理特性に及ぼす影響要因の評価
3. 学会等名 令和2年度京都大学防災研究所研究発表講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>京都大学大学院地球環境学堂 社会基盤親和技術論分野 http://geotech.gee.kyoto-u.ac.jp/</p>

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	高井 敦史 (Takai Atsushi) (30598347)	京都大学・地球環境学舎・准教授 (14301)	

	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 協力者	城ノ口 卓 (Jonokuchi Suguru)	京都大学・地球環境学舎・大学院生 (14301)	
研究 協力者	塩入 潤一郎 (Shioiri Junichiro)	京都大学・地球環境学舎・大学院生 (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