

磁力選別による模擬セシウム汚染土壌の乾式分級試験

Dry Classification Tests of Simulated Cesium-Contaminated Soil by Magnetic Sorting

白石祐彰*

要 旨

除染で生じる放射性セシウム汚染土壌に対して、土壌洗浄プラントを用いて砂を回収する湿式分級には、廃水処理にたいへんな手間や費用が掛かる。そこで、セシウム汚染土壌に金属カルシウム、酸化カルシウム、および鉄粉の粉碎混合物であるナノサイズの混合物を添加し混合することで、全く廃水を出さずに高濃度のセシウム吸着土を優先的に磁着分離する乾式分級試験を実施した。

2mm アンダーの模擬セシウム汚染土壌（マサ土）を対象に乾式分級試験を行った結果、粘土分はほぼ全量磁着したが、シルト分はおよそ 70~80%磁着した。磁着しなかった試料のセシウム濃度は、分級前の濃度に比べおよそ半減した。

キーワード：セシウム汚染土壌、磁力選別、乾式分級、磁性ナノカルシウム法、表面研掃

1. まえがき

東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故で放出された放射性物質の除染作業が本格化してきた。対象エリアはこれまでに例がない生活空間であり、範囲が広大である。除染により生じた土壌は国が処理を担うが、災害復旧工事・建設工事などからの発生土の処理は地方公共団体などの事業者が負うこととなっている。したがって、福島県内では県・市町村などの事業者が道路などの現場内に放射性物質を含む土壌の仮置きスペースをつくって保管している状況がみられる。そのため、維持管理や跡地利用上の課題が指摘されるとともに、復旧工事そのものの実施にも支障が生じる状況である。このような状況下で、保管する土砂の量をできる限り減らすためには土壌洗浄（湿式分級）などの減容化の方法が有効である¹⁾。

セシウム汚染土壌に湿式分級法を適用すると、結果としてセシウムの吸着量が多い細粒分（シルト・粘土成分）から構成される濃縮物と、セシウムの吸着量が少ない粗粒分（礫・砂成分）から構成される浄化土壌に分類される。濃縮物は、土壌洗浄処理後に濁水として発生する。濃縮物を脱水ケーキとして排出するためには、濁水を凝集沈殿処理しなければならない。しかし、シルト以下の細粒分だけの濁水については、ポリ塩化アルミニウム（PAC）と高分子ポリマーによる凝集沈殿処理が難しいため、無機系粉体凝集剤などの高価な薬品を使用しなければ安定した凝集沈殿処理はできない。

そこで、本研究では、全く廃水を出さずに汚染土壌を分級する方法として、磁性ナノカルシウム法を用いた磁力選別を実施した。その結果、模擬セシウム汚染土からセシウムが高濃度であるシルト・粘土成分を優先的に磁着分離した。また、分級処理後の土壌の粒径から磁着性能を評価したので報告する。

2. 磁性ナノカルシウム法

金属カルシウム、酸化カルシウム、および鉄粉を 2 : 5 : 2 の混合比とし不活性ガス雰囲気下、遊星ボールミルを用いて 400rpm で 1 時間粉碎処理を行い、得られた粉碎混合物であるナノサイズの混合物をナノカルシウムと呼んでいる。

セシウム汚染土壌とナノカルシウムを混合攪拌すると、酸化カルシウムが常温常圧で土壌の間隙水や表面付着水と反応して、全ての土粒子に対して一定の厚みの被膜を形成すると同時に、鉄粉が土壌に付着し被膜に取り込まれる（図-1）。金属カルシウムは、酸化カルシウムおよび鉄粉に親和性を有し、酸化カルシウムと鉄粉との結び付きを高める。したがって、磁場における吸引力と土粒子の自重との関係から、乾式処理で比較的重量の小さい土壌微粒子のみを選択的に分離することが可能となる（図-2）。

磁性ナノカルシウム法による乾式分級の流れを図-3に示す。

* 技術研究所

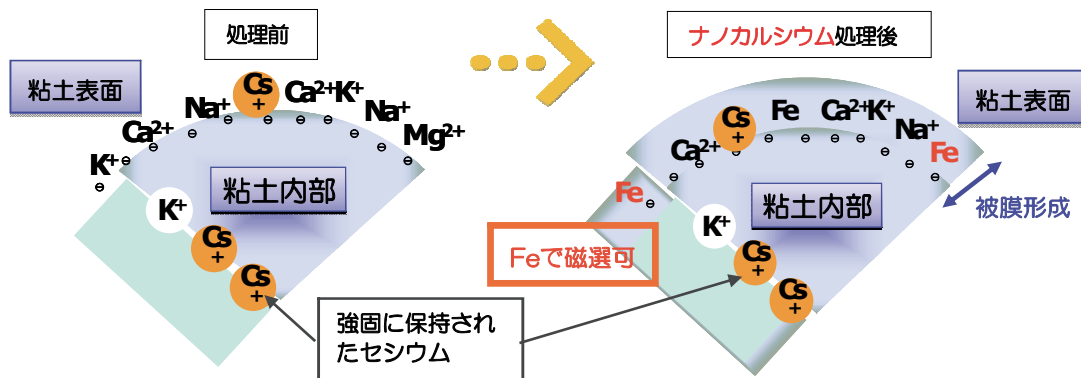


図-1 ナノカルシウムによる粘土表面での被膜形成^{2),3)}

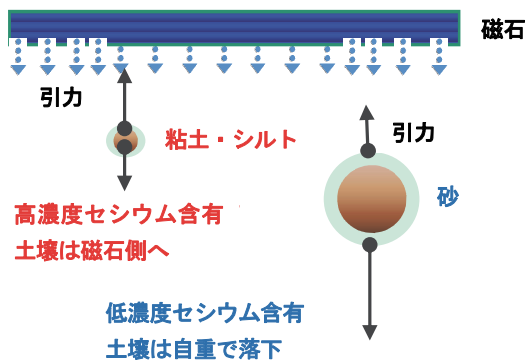


図-2 磁着分離の概念図^{2),3)}

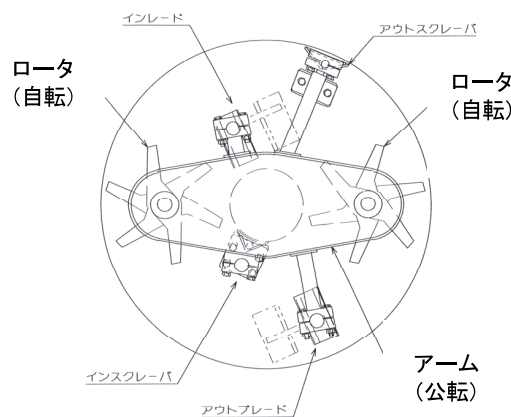


図-4 ドラム内部

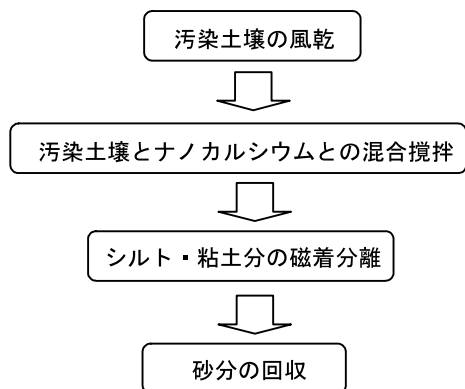


図-3 乾式分級の流れ

3. 使用機材

3.1 攪拌機

パン型ドラムに遊星回転する多段混練羽根を複数軸備えた攪拌ミキサーを用いて、セシウム汚染土壌とナノカルシウムを混合攪拌した。ドラム内部を図-4に示す。公転アームが多段混練羽根の全体を回転させて、自転ロータがせん断混合の働きをする。そのほかの羽根によって材料をドラム内で対流混合させる。

3.2 格子型マグネット

写真-1に示す2段式格子型マグネット(日本マグネティックス株式会社製)を磁力選別に使用した。マグネットの磁束密度は10,000 Gaussである。

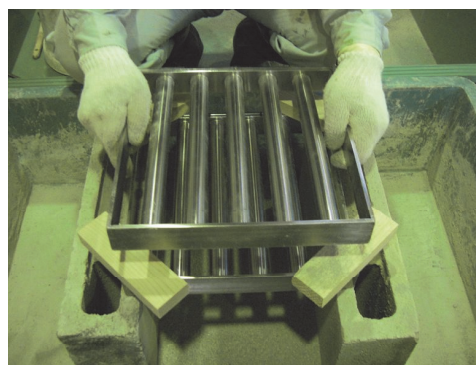


写真-1 2段式格子型マグネット

4. 模擬セシウム汚染土壌の調製

マサ土を風乾し、マサ土 10kg に塩化セシウム水溶液(100mg/500ml)を噴霧器により少量ずつ加えながら、ポッドミキサーを3分間回転させた(写真-2)。その後、模擬セシウム汚染土壌を風乾し(含水率=0.9%)、目開き2mmの篩でふるい、ふるい下の2mmアンダーを試験に用いた。

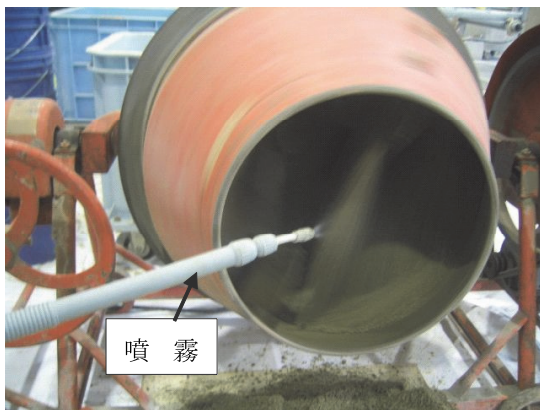


写真-2 模擬セシウム汚染土壌の調製



写真-3 格子型マグネットによる磁力選別

5. 試験方法

攪拌機に模擬汚染土壌 50kg とナノカルシウム 5kg を投入した。ロータを低速 (140rpm) で 3 分間、さらにアームを低速 (13rpm) で 3 分間、両者を同時に運転して攪拌した。攪拌後、試料 10kg を 2 段式格子型マグネットで磁力選別した (写真-3~5)。選別後、磁着した試料、および磁着しなかった残渣試料の重量と、セシウム濃度 (ICP-MS 分析) および粒度分布 (ふるい分析および沈降分析) を計測した。

砂分の土壌粒子の表面に吸着しているセシウムに対しては、土壌粒子表面全体を削り取る (表面研掃) ことによって削り取られた細粒分にセシウムを移行させることを目的に、ナノカルシウム投入前に模擬汚染土壌をアームで高速 (20rpm) 10 分間運転した後、試験を行った。また、自転ロータのせん断混合による表面研掃を目的に、ナノカルシウム投入前に模擬汚染土壌をロータで低速 5 分間、アームで低速 5 分間、さらに両者を同時に運転した後、試験を行った。試験ケースを表-1 に示す。

また、攪拌機の違いによる磁着分離性能を評価するため、写真-2 のポッドミキサーに模擬汚染土壌 50kg とナノカルシウム 5kg を投入した。投入後、ポッドミキサーを 10 分間回転させた試験ケース No.4 と 30 分間回転させた試験ケース No.5 を設けた (表-2)。



写真-4 磁着した試料

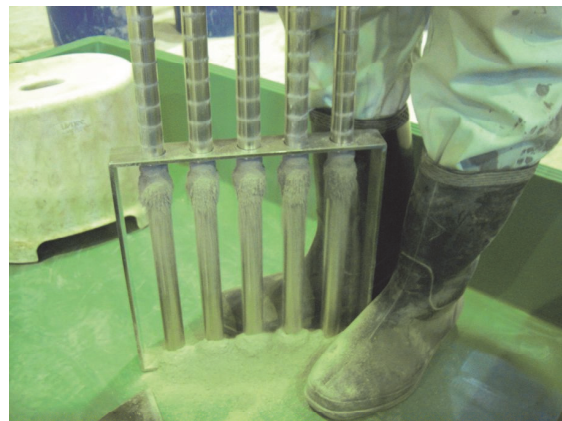


写真-5 脱磁による分級

6. 結果および考察

6.1 磁着した試料、および磁着しなかった残渣試料の重量

表-1 試験ケース (パン型ドラム)

No.	表面研掃		ナノカルシウム	攪拌	
	ロータ	アーム		ロータ	アーム
1	なし	なし	5 kg	低速 3分	低速 3分
2	なし	高速 10分	5 kg	低速 3分	低速 3分
3	低速 5分	低速 5分	5 kg	低速 3分	低速 3分

表-2 試験ケース (ポッドミキサー)

No.	ナノカルシウム	回転時間
4	5 kg	10 分
5	5 kg	30 分

試料 10kg に対し、磁着した試料および磁着しなかった残渣試料の重量を表-3に示す。磁着試料と残渣試料の重量の合計は全てのケースで 9.9kg 以上となり、回収率は 99%以上であった。

パン型ドラムで模擬汚染土壌とナノカルシウムを攪拌した試験ケース No.1~No.3 では、磁着量と残渣量はおよそ 35:65 の割合であった。一方、ポッドミキサーで攪拌した試験ケース No.4、No.5 では、およそ 24 : 76 の割合となった。このことから、パン型ドラムとポッドミキサーとの攪拌機の違いにより磁着性能が異なることがわかった。セシウム汚染土壌とナノカルシウムは、ポッドミキサーでは回転するミキサー内の数枚の羽根によってすくい上げられ、自重(重力)によって落下することで混合された。一方、パン型ドラムでは、攪拌羽根で強制的に動かされて混合された。そのため、ポッドミキサーは攪拌力がパン型ドラムより小さく、全ての土粒子に対して一定の厚みの被膜をナノカルシウムによって形成することができなかつたので、磁着量が少なかったと推察した。

6.2 セシウム濃度

調製された模擬セシウム汚染土壌のセシウム濃度は 7.7mg/kg で、目開き 2mm の篩でふるって、篩に残った 2mm オーバー土壌のセシウム濃度は 3.6mg/kg であった。

試験ケース No.1~No.3 の分級処理前後のセシウム濃度を表-4に示す。分級前の試料のセシウム濃度は 10.5mg/kg 前後であったが、磁着した試料のセシウム濃度は 17~20mg/kg となり、1.7~2 倍の濃度になっていた。磁着しなかった残渣試料のセシウム濃度は 5.3~5.9mg/kg となり、およそ半減していた。

6.3 粒径区分での比較

分級前の試料、および磁着試料と残渣試料の粒度分布から試験ケース No.1~No.3 の試料を粘土 (<0.005mm)、シルト (0.005mm~0.075mm)、砂および礫 (0.075mm~) に区分し、試料 10kg に対しての区分ごとの重量を求めた。粘土分を図-5に、シルト分を図-6に、砂および礫分を図-7に示す。なお、粘土分には、ナノカルシウムが 910g 含まれている。

試料中の粘土分はほぼ全量磁着された。しかし、シルト分は残渣試料に残っており、全量磁着することはできなかった。また、砂分ではおよそ 20%が磁着された。

シルト分では、分級前よりも分級後(磁着試料+残渣試料)の方が重量が大きくなり、砂・礫分では分級前よりも分級後の方が重量が小さかったことから、砂分が表面研掃されたときに発生した微細粉体はシルト分に相当すると推察できる。表面研掃の効果は、試験ケース No.2 で最も大きく現れた。これは、攪拌機の公転アームの回転による多段混練羽根の働きによって砂分の土壌粒子の表面研掃が促進されたためと考えられる。

表-4 分級前後のセシウム濃度

No.	分級前 (mg/kg)	磁着 (mg/kg)	残渣 (mg/kg)
1	9.9	17	5.9
2	10.0	20	5.6
3	11.0	20	5.3

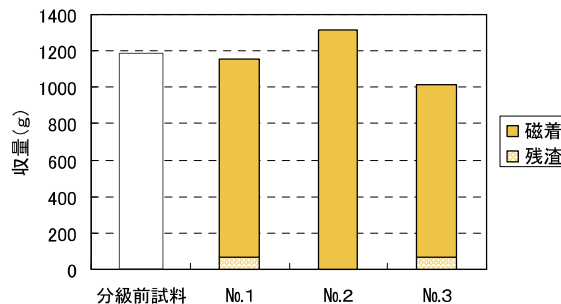


図-5 粘土分(ナノカルシウムを含む)の分級前、磁着、残渣試料の重量

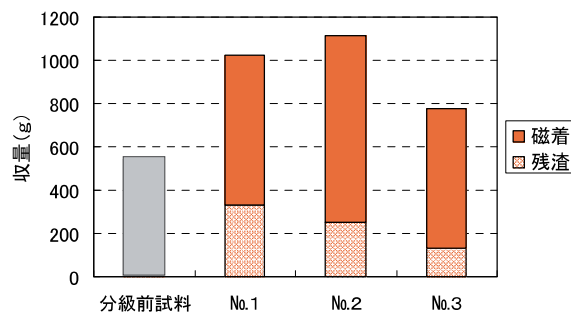


図-6 シルト分の分級前、磁着、残渣試料の重量

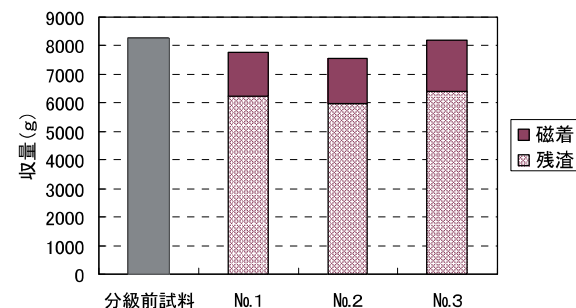


図-7 砂・礫分の分級前、磁着、残渣試料の重量

7. まとめ

磁性ナノカルシウム法を用いた磁力選別により 2mm アンダーの模擬セシウム汚染土壌(マサ土)を対象に乾式分級試験を行った結果、磁着した試料のセシウム濃度は、分級前の濃度の 1.7~2 倍になり、磁着しなかった試料のセシウム濃度は分級前の濃度に比べおよそ半減した。

粘土分はほぼ全量磁着したが、シルト分ではおよそ 70~80%、砂分では 20%程度が磁着した。これらの結果

より、セシウムの平均濃度が低下した礫・砂分をより多量に回収するためには、高汚染濃度であるシルト分の磁着分離の性能向上が課題となった。

8. あとがき

本乾式分級では、土壤の混合資材としてはナノカルシウムのみであるが、その混合割合は土壤の 10%と小さくはない。除染により取り除かれた放射性セシウム汚染土壤の量を考慮すると、ナノカルシウムを廉価に製造する必要がある。

なお、磁性ナノカルシウム法は、県立広島大学の三苦準教授グループが提案された技術であり、三苦準教授からナノカルシウムを提供していただき、本研究を実施している。また、攪拌機のドラム内部の図は、株式会社北川鉄工所から借用した。

【参考文献】

- 1) 勝見 武、「東日本大震災による地盤環境課題への対応」、基礎工、Vol.42、No.3、pp.22-25、2014.3
- 2) 三苦好治、「ナノカルシウムによる放射性セシウムの処理技術」、第 13 回インテレクチャル・カフェ広島講演資料、2011.12
- 3) 白石祐彰、三苦好治、「ナノカルシウムによる模擬セシウム汚染土壤の乾式分級試験」、環境放射能除染学会第 2 回研究発表会 講演資料、2013.6