

水による土壌攪拌・除去

牧野知之

キーワード 放射性セシウム、除染、土壌攪拌

1. はじめに

東京電力福島第1原子力発電所の放射能漏れ事故に伴い、放射性セシウムで汚染された農用地が広範囲に発生し、汚染地における除染が大きな社会的課題となっている。放射性セシウムは土壌コロイドのフレイドエッジサイトやケイ素六員環に強く吸着する性質を持つため（山口ら, 2012）、農耕地に降下した放射性セシウムは、土壌の極表層に留まり、梅雨を経てもほとんど下層に移行しない（Matsunaga *et al.*, 2013）。このため、放射能漏れ事故以来、未耕起の圃場では、土壌の最表層（0~2cm程度）に放射性セシウムが集積しているため表土のはぎ取りが有効と考えられる。1986年に起きたチェルノブイリ原子力発電事故後には表層はぎ取りが行われ（Vovk *et al.*, 2004）、環境省による除染ガイドラインでも未耕起圃場における主要な除染法の一つとして記載されている（環境省, 2013）。しかし、表層はぎ取りは既耕作の圃場には適用困難であり、環境省の除染対策事業では、反転耕や深耕による除染が既耕作圃場における助成対象とされる。しかし、作土層の厚さが不十分、作土直下に礫がある場合など、反転耕や深耕の適用困難な事例もある。既耕作ほ場に適用できる新たな除染対策が求められている。

2. 土壌洗浄技術

理化学的な放射性セシウム除染技術の一つとして、土壌洗浄技術があげられる（日本原子力技術協会, 2012；山口ら, 2012）。土壌洗浄による有害化学物質の除染プロセスは粒径別分級と汚染物質の抽出処理の2つに大きく分けられる。前者は水を使って汚染土壌を洗浄しながら、土壌粒子のサイズによって分級して、清浄土壌と汚染土壌に分け、減容する方法である（Anderson, 1993）。一般的にサイズの小さな土壌粒子ほど、相対的な汚染物質の濃度が高く、微粒子を分離することで汚染除去が可能となる。装置としては、スクリー分離機、液体サイクロンなどが使われる（Anderson, 1993）。後者は、汚染土壌に洗浄資材を

加え液状で混合して土壌から液相に有害化学物質を浸出除去し、浄化システムで排水処理する修復技術である。

粒径別分級を用いた土壌洗浄システムの一例を図1に示す（Anderson *et al.*, 1999；山口ら, 2012）。その処理プロセスは以下のように多段階から成る。①土壌粒子を粗分級するためにトロンメル（回転篩）内で脱凝集し、粗大粒子から土壌粒子を分離する。数mm以上の粗大粒子は、高圧スプレーで洗浄され、清浄土として排出シュートに送られる。②数mm以下の土壌粒子は、1段階目のスクリー分離機に送られ、ストークスの法則により砂とそれ以下のサイズの微粒子に分類される。この段階で、微粒子は、オーバーフローして、排水だめに溜まり、砂はアトリッションミル（摩擦粉砕器）に送られる。砂同士を摺り合わせて、砂に付着している微粒子を除去する。除去された微粒子は②の微粒子と合一させる。④微粒子は2番目のスクリー分離機に移され、粒径0.25mmで粒子分画が行われ、0.25mm以上は清浄土として回収、0.25mm以下の画分は、液体サイクロンに送り出される。⑤液体サイクロンは懸濁液に分散している微粒子を、遠心力によって沈降分離させて粒径別に分級する機械で、粒径75 μ mで粒子分画と脱水を行う。⑥水力分級器では、75~45 μ mの微粒子の分画が行われる。水力分級器は、ストークスの法則と干渉沈降を利用した装置である。水力分級器で集められた微粒子は、液体サイクロンから出た微粒子と合一する。⑦最終的に得られるCsを高濃度に含む45 μ m以下の微粒子は、高分子凝集剤を使って凝集、回収する。対象とする粒子径は工程によって変化する。上記と類似した工程を小型化して4トントラックに搭載できる装置も開発されている（椿, 2013）。なお、液体サイクロンなどの連続遠心分離の原理は牧野ら（2011）を参照されたい。

除染技術探索サイト（環境省, 2014）では、土壌粗粒子の表面研磨と浮上気泡分離の組み合わせ、乾式分級と表面研磨の組み合わせ、高圧ジェット水流洗浄とマイクロバブル浮上分離濁水処理や可搬式吸引洗浄機等、様々な洗浄技術が登録されている。一方、より簡易な方法を目指し、電磁式実験用ふるい振とう機を利用して、水田、畑、グラウンドから採取した3種類の土壌の分級洗浄試験が行われた（伊藤ら, 2012）。土壌に含まれる放射性セシウムの63~85%は最も細粒の0.075mm以下の粒度画分に含まれ、簡易分級による除染の可能性が示された。しかし、水田や畑のような細粒分の多い土壌では、サイクロンなどの精度

Tomoyuki MAKINO: Radioactive decontamination using soil puddling with water

(独) 農業環境技術研究所 (305-8604 つくば市観音台3-1-3)

日本土壌肥科学雑誌 第85巻 第2号 p.132~135 (2014)

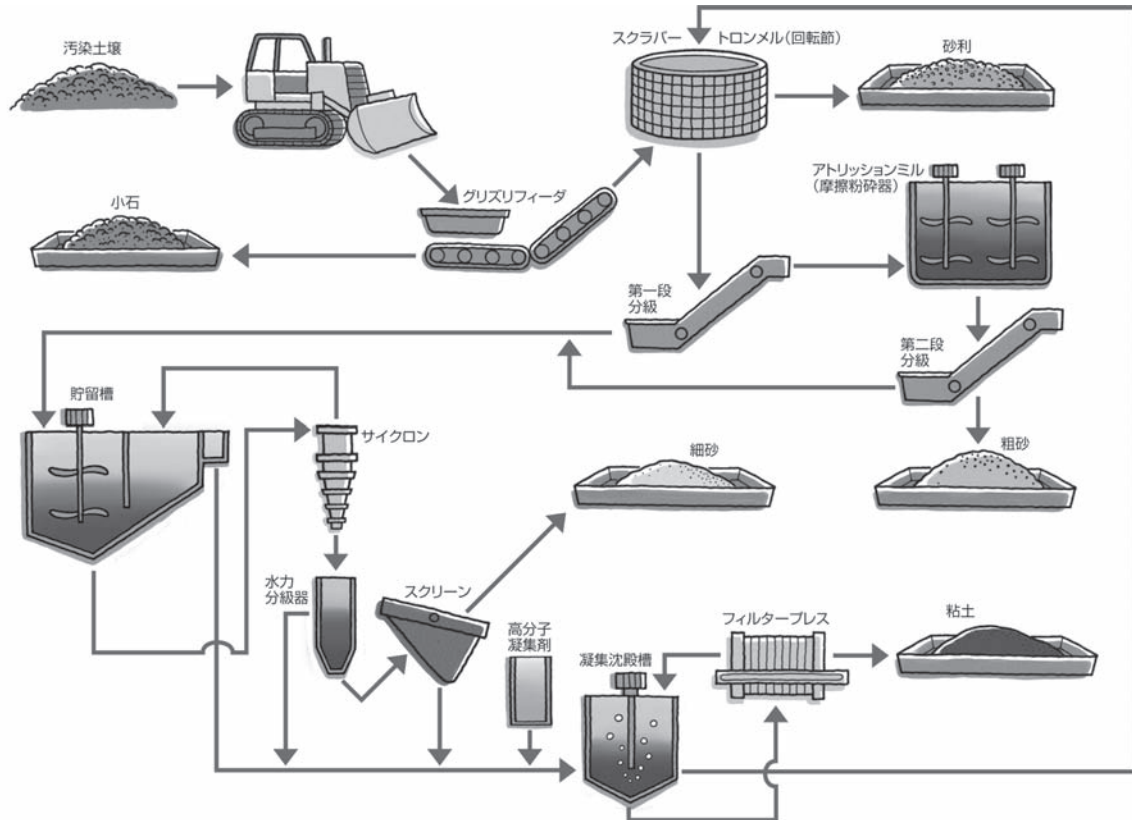


図1 土壌分級洗浄システムの一例 ((Anderson *et al.*, 1999) を改訂)

の高い分級洗浄機器を用いてさらに分級する必要性も指摘されている。

3. 水田の貯水機能を利用した水による土壌攪拌・除去

我が国では農地の多くが土壌の表層に水を貯める事のできる水田となっている。このため、水田に水を貯めて直接圃場で土壌攪拌を行い、放射性セシウム濃度が相対的に高い土壌微粒子を排出する手法が可能となる。奥島ら(2012)は、放射能汚染された未耕起の水田圃場を湛水した後に表層土壌を攪拌して微粒子を水中に浮遊させ濁水を強制排水(浅代かき強制排水)し、放射性セシウム濃度が高い微粒子を選択的に排出することにより、水田圃場における効率的な除染に寄与できる可能性があるとの仮定をたて、コンテナ試験で検証した。コンテナ内に土壌を5cmの厚さで充填して、土壌表面から水深10cmとして土壌を攪拌し、濁水を排水した。その結果、土壌の放射性セシウム濃度($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$)は処理前の $25,900 \text{ Bq kg}^{-1}$ から処理後には $15,700 \text{ Bq kg}^{-1}$ と低減率39%に達した。本法は圃場でも検証され、農林水産省(2013)の農地除染対策の技術書概要に引用されている。技術書における、現地での具体的な工程は、①表層土壌の攪拌段階(浅代かき)、②オイルフェンスを利用した速やかな濁水の排出、③濁水処理からなる。トラクター走行による放射性セシウムの深部への拡散を防止するために、土壌攪拌は1回としている。オイルフェンスは、本来水面に浮いた油の拡散防止に用いるものであるが、濁水の排出に利用している。濁水処理は凝

集沈殿法や沈砂池などにより行っている。

一方、溝口(2013)は、水による土壌攪拌+強制排水と天地返しを組み合わせた工法を提示している。圃場の一部に穴を掘り、代かき後に上記のオイルフェンスと似た器具を用いて泥水を穴に流し込む事で、水田土壌の浄化と排出土の処理を原位置で行うというユニークな考え方である。

農業環境技術研究所を中心とした研究チームでは、アルカリ条件で一般的な水田土壌が分散しやすくなることに着目し、水酸化ナトリウムを土壌分散剤として添加して土壌攪拌を行った(牧野ら, 2013; 環境省, 2014)。水酸化ナトリウムはpHを上昇させて、土壌微粒子同士の電気的な反発力を高めて土壌微粒子を高度に分散させる。

福島県内の試験水田(灰色低地土)において実施した工程を以下に示す(図2)。

- ①水田内に約 100 m^2 の試験区を設定し、レーザーレベルセンサー付きのトラクターで土壌深さ0~7cm程度を耕起した。
- ②用水を導水、耕盤から水深25cmとして水酸化ナトリウム粒剤を加え、代かき車輪(通称:籠車輪)で攪拌、pH8~9とした。
- ③攪拌後、直ちにポンプで水田表面の土壌懸濁水の排水を開始し、凝集沈殿槽に懸濁水を貯留した。
- ④凝集沈殿槽にポリ塩化アルミニウムおよび高分子凝集剤を添加し攪拌、土壌微粒子が主体の懸濁物質(SS)を凝集沈降させた。
- ⑤凝集沈降したSSの沈殿物をタンク等に一時貯留後、フィルタープレスで固液分離して汚泥として回収した。
- ⑥排水後、再度用水を導水し、攪拌



図2 土壌攪拌-吸引排水法による浄化工程

排水の工程を合計4回実施した。⑦攪拌-排水処理終了後の圃場に塩化鉄(Ⅲ)溶液を施用して攪拌し、pHを約6に復した。

試料採取および分析は以下のとおり行った。①排水ポンプから懸濁水を採水し、SS量および ^{137}Cs 濃度測定用に供試した。②土壌カラムサンプラーを用いて、除染前後に圃場の5か所から土壌深30cmの土壌カラムサンプルを採取した。カラムを切断(土壌表面から0~2, 2~5, 5~10, 10~15, 15cm以下)、深さ別の土壌試料として用いた。③除染前後の空間線量率をシンチレーションサーベイメーターで、土壌およびSSの放射性セシウムをそれぞれNaIシンチレーション検出器、ゲルマニウム検出器を用いて測定した。

試験圃場における地上1mの空間線量率は、除染前の $1.77\ \mu\text{Sv h}^{-1}$ から除染後の $1.24\ \mu\text{Sv h}^{-1}$ に減少、低減率は30.1%となった。土壌中の ^{137}Cs 放射能濃度(土壌深0~15cmの総計)は $3.06\ \text{kBq kg}^{-1}$ から $1.17\ \text{kBq kg}^{-1}$ に減少、低減率は61.7%に達した。セシウム由来の放射能が検出されなくなる深さ30cmまでの土壌を対象に算出した ^{137}Cs 低減量は、試験区(約 $100\ \text{m}^2$)全体で31.3MBqである。攪拌排水処理4回で試験区から3.05tのSSが排出された。これは容積重を1とした場合、約3cmの土厚に相当する。排出SS量とSSの ^{137}Cs 放射能濃度から算出した試験区当たり ^{137}Cs 排出量は34.9MBqで、上記②の ^{137}Cs 低減量とほぼ一致、圃場における ^{137}Cs 収支の整合性を確認した。④粘土を凝集処理した上澄み排水および、凝集粘土をフィルタープレスで脱水した排水中の放射性セシウム濃度は、検出下限以下($1\ \text{Bq L}^{-1}$ 以下)となった。代かき除染後の水田に「まいひめ」を栽培したところ、代かき除染を行わずに栽培した場合と比較して、玄米収量は15%の減収(目標収量 $600\ \text{kg } 10\ \text{a}^{-1}$ と比べて10%減収)になったが、資材・肥料の施用で収量は回復可能であった。また、玄米中の放射性セシウム濃度は60%低減の $17\ \text{Bq kg}^{-1}$ となった(太田ら, 2013)。

本法は、攪拌深度を調整することで耕起済みの水田に適用可能である。

4. 終わりに

水による土壌攪拌・除去は、除染関係ガイドライン(環境省, 2013)や農地除染対策の技術書概要(農林水産省, 2013)に除染法の一つとして記載されている。一般的に農耕地は工場跡地などと比べ細粒の粘土($\phi\sim 2\ \mu\text{m}$)、シルト画分($2\sim 20\ \mu\text{m}$)を多く含むため、微粒子の分離が難しい場合が多い。特に、腐植質土壌では腐植物質による粒子間の架橋が進んで、比較的強い凝集体を形成しているため、粒子を完全分散させることが困難である。水による土壌攪拌・除去を適用するには凝集体の凝集構造を壊し、分散させることが重要となる。

謝辞: 本稿における現地試験の一部は、太平洋セメント株式会社、農業・食品産業技術総合研究機構・東北農業研究センターおよび福島県農業総合研究センターとの共同研究として実施したものである。また、農林水産省委託プロジェクト研究「農地・森林等の放射性物質の除去・低減技術の開発」の一部として行われた。記して感謝する。

文 献

- Anderson, R., Raser, E., and Ryn, F. V. 1999. Particle size separation via soil washing to obtain volume reduction. *Journal of Hazardous Materials*, 66, 89-98.
- Anderson, W. C. 1993. Innovative site remediation technology, Soil washing/Soil flushing, American academy of environmental engineers.
- Vovk, I. F., Blagoyev, V. V., Lyashenko, A. N., and Kovalev, I. S. 1993. Technical Approaches to Decontamination of Terrestrial Environments in the CIS (former USSR). *Science of the Total Environment*, 137, 49-63.
- 伊藤健一・宮原秀隆・氏家 享・武島俊達・横山信吾・中田弘太郎・永野哲志・佐藤 努・八田珠郎・山田裕久 2012. 湿式分級洗浄および天然鉱物等による農地土壌等に含まれる放射性セシウム除去方法の実践的検討. 日本原子力学会和文論文誌, 11, 255-271.
- 日本原子力技術協会 2012. 福島環境修復有識者検討委員会による除染技術等の調査検討, II土壌修復技術, p.11-14.
- 環境省 2013. 除染関係ガイドライン. <http://josen.env.go.jp/material/>
- 環境省 2014. 除染技術探索サイト. <https://www2.env.go.jp/>

- dtox/
牧野知之・神谷 隆・太田 健・高野博幸・赤羽幾子・齋藤 隆・江口哲也・村上敏文・山口紀子・藤原英司・木方展治 2013. 水田における土壌攪拌-排水処理による放射性セシウム除去技術の開発-土壌浄化効果の検証-. 土肥要旨集, 59,156.
- Makino, T., Inada, M., Kato, T., Adachi Y., and Morita, M. 2011. Size fractionation of clay and soil microparticles by continuous-flow ultracentrifugation, *Clay Science*, 15(2), 83-88.
- Matsunaga, T., Koarashi, J., Atarashi-Andoh, M., Nagao, S., Sato, T., and Nagai, H. 2013. Comparison of the vertical distributions of Fukushima nuclear accident radiocesium in soil before and after the first rainy season with physicochemical and mineralogical interpretations, *Science of the Total Environment*, 447, 301-314.
- 溝口 勝 2013. 農家自身のできる農地除染法の開発. 三輪睿太郎, 宮崎毅, 金子真司, 坪山良夫, 大谷義一, 佐藤睦人, 根本圭介, 塩沢昌, 森敏, 中尾淳, 宮下清貴, 溝口勝, 松本聡, 大西隆. 放射能除染の土壌科学 - 森・田・畑から家庭菜園まで-, (学術会議叢書 (20)), p.135-151. (財) 日本学術協力財団, 東京. 農林水産省 2013. 農地除染対策の技術書概要. <http://www.maff.go.jp/j/nousin/seko/josen/pdf/gaiyou.pdf>
- 太田 健・石川哲也・江口哲也・村上敏文・牧野知之・神谷 隆・高野博幸・赤羽幾子・齋藤 隆・山口紀子・藤原英司・木方展治 2013. 水田における土壌攪拌-排水処理による放射性セシウム除去技術の開発-水稲における放射性セシウム低減効果の検証-. 土肥要旨集, 59,157.
- 奥島修二・塩野隆弘・石田 聡・吉本周平・白谷栄作・濱田康治・人見忠良・樽屋啓之・今泉眞之・中 達雄 2012. 浅代かき強制排水による水田土壌中の放射性物質除染法の有効性に関する事前検討. 土壌の物理性, 121,43-48.
- 椿淳一郎 2013. 放射能汚染土壌減容化のキーテクノロジーは固液分離技術. 粉体技術, 5,789-793.
- 山口紀子・高田裕介・林健太郎・石川 覚・江口定夫・吉川省子・坂口 敦・朝田 景・牧野知之・赤羽幾子・平館俊太郎 2012. 土壌-植物系における放射性セシウムの挙動とその変動要因. 農環研報, 31,75-129.