

速報

冬の間に凍土を剥ぎ取れ！ 自然凍土剥ぎ取り法による土壤除染

東京大学大学院農学生命科学研究科
溝口 勝

要旨

飯舘村の冬は厳しい。雪が少なく気温が低いために冬季に土壤が凍結する。しかしそれが放射性セシウムで汚染された土壤を除去するのに都合が良い。現場実験により、自然凍結した土壤（凍土）を剥ぎ取ることで地表面の放射線量が $1.28 \mu\text{Sv/h}$ から $0.16 \mu\text{Sv/h}$ に低下することが確認できた。飯舘村の土壤除染は冬季に実施するのが効果的である。

1. はじめに

福島第一原発から放出された放射性セシウムは土壤表層に蓄積されている。福島県郡山市内における未攪乱の水田土壤では、表層 5cm 以内に 90%の放射性セシウムが残存しているとの報告がある。（塩沢ら，2011）こうした現状を踏まえ、これまでマグネシウム系固化剤を土壤表面に吹き付け表土を剥ぎ取る農地除染技術が提案されている。（農工研，2011）しかしながら、飯舘村では雪が少なく気温が低いために冬季に土壤が凍結する。自然凍結した土壤（凍土）はアスファルトのように固いために、数 cm の厚みの凍土であれば地元の農家が所有する重機で容易に剥がすことができる。本論文ではこの方法による現地実験の結果について報告する。

2. 方法

2012 年 1 月 8 日 10:00 から約 1 時間、福島県相馬郡飯舘村佐須字滑の水田土壤で重機（バックホー）による凍土の剥ぎ取り実験を実施した。（写真 1）このとき水田土壤は約 5cm 程度凍結していた。凍土の剥ぎ取り前後の地表面のガンマ線量を鉛コリメータ付のシンチレーションサーベイメータ（Aloka TCS-171）で測定した。（写真 2）また、12 月 4 日から現地の気温と 5cm, 10cm, 15cm 深さの地温・土壤水分量をセンサー（EHT, 5TE; デカゴン社製）とデータロガーにより 1 時間間隔で測定した。

3. 結果

(1) 現地の気温と地温・土壤水分量の変化

図 1 は 12 月 4 日から 1 月 7 日までの実験区の気温変化である。図中には初めて氷点下を記録した 12 月 6 日からの積算寒度の値（F：右軸）も示した。図 2 は 5cm, 10cm, 15cm の地温と土壤水分量（体積含水率）の変化である。センサーの特性上、地温は $\pm 0.5\text{cm}$ の範囲

の温度を $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ の精度、土壌水分は $\pm 2\text{cm}$ の範囲を ± 0.03 程度の精度で測定される。 5cm 深さの地温が1月1日の2:00頃に 0°C に達し、土壌水分量は同日の6:00には0.2程度に低下していることから、少なくとも1月1日には 5cm まで土壌が凍結していたことがわかる。



写真1 飯舘村佐須字滑の水田における凍土剥ぎ取り実証実験（2012 年 1 月 8 日）



写真2 鉛コリメータ付ガンマ線計による地表面の放射線量測定

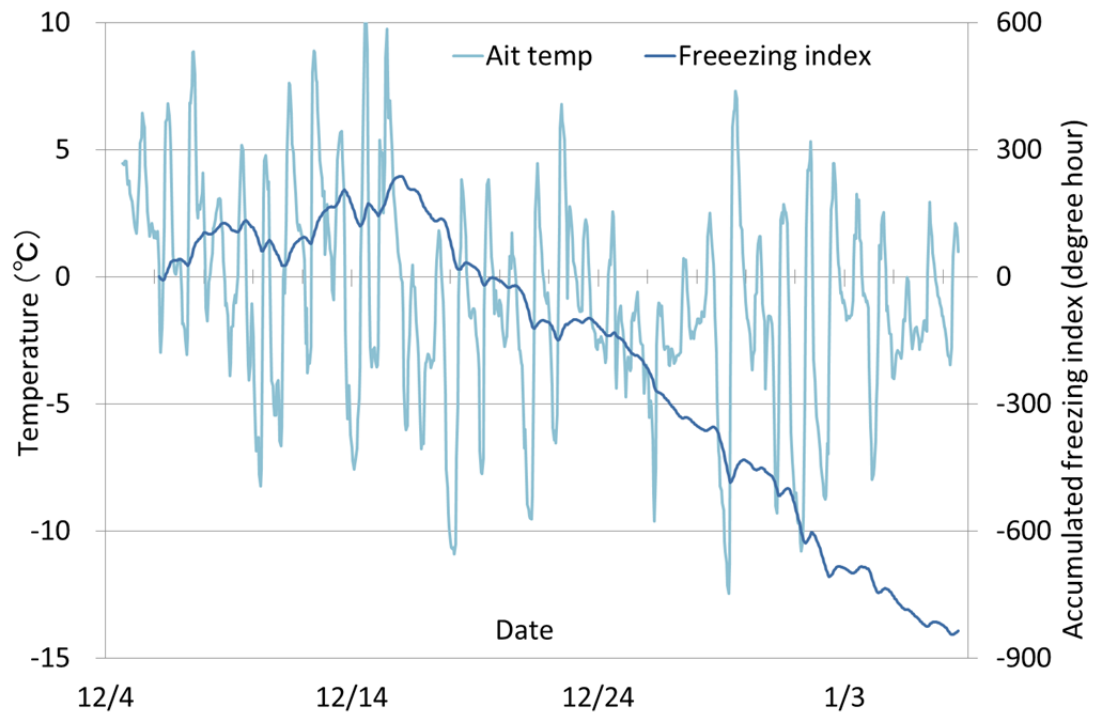


図1 実験区の気温と積算寒度の変化

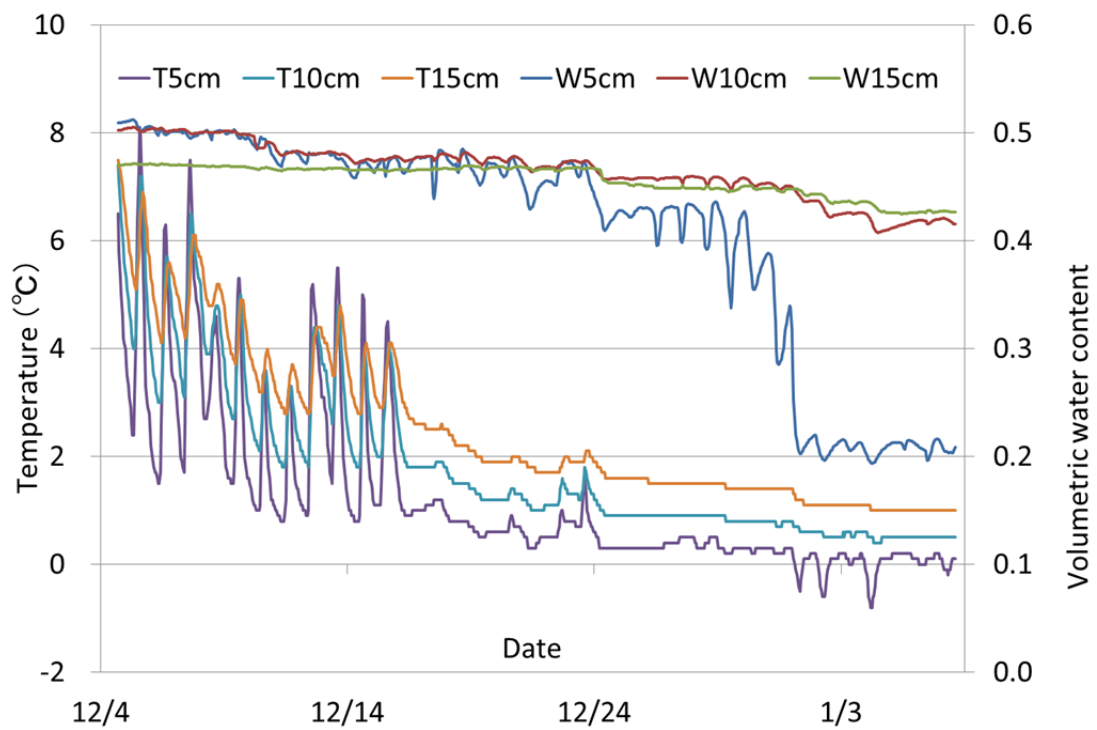


図2 実験区の地温と土壌水分量の変化

(2)凍土の剥ぎ取り前後の地表面のガンマ線量の変化

バックホーにより 20 分程度で 4m x 5m の面積の凍土を効率的に剥ぎ取ることができた。写真 3 は板状の塊のまま重機で剥ぎ取られた凍土である。地表面のガンマ線量は凍土の剥ぎ取り前後で $1.28 \mu\text{Sv/h}$ から $0.16 \mu\text{Sv/h}$ に低下した。剥ぎ取られた凍土と剥ぎ取り後の地表面の未凍土の放射能はそれぞれ 23760 (Bq/kg) と 2670 (Bq/kg) であった。(暫定値；土の乾燥待ち)



写真 3 板状の塊のまま重機で剥ぎ取られた凍土

4. 考察

(1) 凍土剥ぎ取りの効果

地表面の放射線量は劇的な低下は、凍土の剥ぎ取りによって土壌表層の放射性セシウムが除去できたことを意味する。この方法はマグネシウム固化剤等の人工的な前処処理を必要とせず自然の寒さに任せるだけで良いのが特徴である。前処理に伴う作業員の被爆リスクも低減させることができきわめて有効な方法といえる。

(2) 凍土剥ぎ取りのタイミング

問題は凍土剥ぎ取り作業のタイミングである。凍土が厚すぎると肥沃な表土を剥ぎ取りすぎることになる。そのため現地で最適な凍土厚を知る必要がある。これには簡易凍結深度計を農地に埋設することで確認できる。写真 4 はメチレンブルーや食紅を混ぜた水溶液

入りの試験管を現地に埋設した試験例である。凍土の厚みは透明な氷の厚みに一致した。現地気温から大まかな凍土厚を推定することも可能である。ただし、この推定法はやや専門的になるので付録として記載しておく。



写真 4 簡易土壌凍結深度計による凍結深度の測定例

(3) 攪乱した農地土壌の除染

飯舘村には耕耘してしまって表層土壌の放射性セシウムが下層土と混ざってしまった水田もある。こうした水田では凍土剥ぎ取りの効果が低い。しかしながら、春から夏にかけて水田を湛水し、代かきし、水を自然に下方浸透させれば放射性セシウムが吸着した粘土粒子が表層に集積する。（溝口，2011）その状態で次の冬を待って凍土を剥ぎ取れば効率的に放射性セシウムを除去できるものと思われる。

(4) 水田以外の農地の除染

畑地や牧草地に関しても凍土の剥ぎ取り法は有効であろう。ただし、表土の乾燥密度は

水田に比べて小さいので硬い凍土ができにくい。冬前に重機で平らに転圧しておく、凍土が均等に形成され、冬季の凍土剥ぎ取りの作業効率を高めることができる。土壌の凍結過程では地中の土壌水分が自然に凍土中に集積するが、土壌が乾燥しすぎていると適度な硬さの凍土ができない。その場合に冬前に散水して農地を適度な土壌水分にしておくこと良い。

5. おわりに

自然の寒さを利用した凍土剥ぎ取り方法が農地土壌の除染に有効であることを現場実験により示した。この方法は冬季にしか実施できない。春になると地表面の雪や凍土が融解し、放射性セシウムを含んだ表層土壌がドロドロの過剰な土壌水分状態になる。この水分は地中に残る凍土に行く手を阻まれるために春先の降雨により農地から多量に流出するリスクがある。こうしたリスクを回避するためにもこの冬の間における一刻も早い凍土剥ぎ取り法による農地の除染作業が必要である。

謝辞

本実証実験は「ふくしま再生の会（代表：田尾陽一／三吉譲／大永貴規）」のメンバーおよび飯舘村農業委員会委員長の菅野宗夫氏の協力を得て実施した。観測機器の設置は東京大学「福島復興農業工学会議（代表：久保成隆教授）」の西村拓氏に協力してもらった。また、筆者の飯舘村調査旅費は明治大学「早期帰村プロジェクト（代表：登尾浩助教授）」から支援を受けた。これらの方々に記して謝意を表する。

参考文献

- 塩沢昌ら：福島県の水田土壌における放射性セシウムの深度別濃度と移流速度，*RADIOISOTOPES*, 60, 323-328(2011)
- 農林水産省農林水産技術会議：農地土壌の放射性物質除去技術（除染技術）について，<http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/110914.htm>（2011）
- 溝口勝：セシウム汚染緩和に泥の性質を生かせー飯舘村で考える，*季刊地域*，7, pp.87-89(2011)

付録： 気温を用いた土壌凍結深さの推定式

地表から凍結前線までの温度変化が直線的で、凍結前線以下の温度が 0℃の一定温度に保たれていると仮定すると、凍結前線における熱収支は次の微分方程式で表せる。

$$k \frac{T}{x} = \theta L \frac{dx}{dt}$$

ここで、 T ：地表面温度， x ：凍結深， k ：凍土の熱伝導率， θ ：凍土の体積含水率， L ：凍結潜熱， t ：時間 である。（ここで、 θ のないものは **Stephan** 式として知られている）この式は変数分離で簡単に解くことができる。

$$\frac{k}{\theta L} \int T dt = \frac{x^2}{2}$$

したがって、凍結深は次式で表せる。

$$x = \sqrt{\frac{2k}{\theta L} \int T dt}$$

ここで、凍結指数（積算寒度） F を導入すると、

$$F = \int T dt$$

凍結深は次式となる。

$$x = \sqrt{\frac{2k}{\theta L} F}$$

k と θ は凍土の物性値、 L は定数なので、凍結深を単純に凍結指数の平方根だけで推定できることになる。理論的には F は地表面温度 T から求める必要があるが、 T の測定は難しいのでこれを気温で代用し、ある程度の誤差を許容するパラメータ（凍土の乾燥密度や水分量、地表面の熱伝達係数に依存） α を導入すると、凍結深は現場の気温データのみから推定できる。すなわち、

$$x = \alpha \sqrt{F}$$

凍結後の剥ぎ取り作業では、凍土と未凍土の境界が明瞭に分かれ、しかも凍土は適度に板状に破壊できる状態になっている方が良い。通常、土壌凍結が進行する過程では未凍土部の土壌水分が凍土部に移動し凍結前線の直下は乾燥するので、凍土だけを剥ぎ取り際には好都合である。また、 α の定義から考えると、凍結前に適度に均一に踏み固めたり、散水したり、地表面の状態を制御すると板状の硬い凍土を作ることができる。