

土壤中放射性セシウムの作物への影響

Effect of contaminated soil on Cs-137 concentration in crops

古田奈津季¹, 住浜水季^{1,2}

Furuta Natsuki¹, Sumihama Mizuki^{1,2}

[キーワード Keyword] 放射線教育, 作物への移行係数

[所属 Institution] ¹〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1 岐阜大学教育学部理科教育講座物理科

²〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 10-1 大阪大学核物理研究センター

e-mail: sumihama@gifu-u.ac.jp

[要旨 Abstract]

我々は毎年行われている環境放射線研修に参加し、福島県大熊町で実地研修を行った。本研究では大熊町の梨園にて土壌と梨を採取し、それぞれの放射能濃度をゲルマニウム半導体検出器を用いて測定した。大熊町で採取した土壌サンプルの¹³⁷Cs放射能濃度は表層5cmで 40732.3 ± 410.9 Bq/kg、2つの梨のサンプルの¹³⁷Cs放射能濃度は 29.3 ± 2.0 Bq/kgと 26.2 ± 2.1 Bq/kgであり、梨は食品の放射性セシウムの基準値(100 Bq/kg)以下であった。梨の根は深さが約60cmであることから土壌から梨への放射性セシウムの移行係数は小さいといえる。また、採取した土壌を用いてコマツナとハツカダイコンを栽培し、土壌と作物の放射能濃度を測定し、土壌から作物への放射能移行(移行係数)を算出した。採取した土壌を肥料の有無、吸着効果の期待できるゼオライトの有無、土壌の放射能濃度の5種類の条件に分けて栽培を行った。栽培したすべての作物が放射性セシウムの基準値以上の値となり、福島の未除染土壌を用いた根の浅い作物の栽培は難しいと感じた。この研究を通して放射線の生活への影響、福島の復興を考えていきたい。

1. はじめに

2011年3月11日に起きた東日本大震災により、福島第一原子力発電所で水素爆発が起これ、大量の放射性物質が放出された。その放射性物質は雨や雪に混じって飛散し、土壌にしみ込んだ。第一原発が所在する大熊町では震災翌日3月12日に全町避難となった。2012年12月から除染が開始されたことにより帰還困難区域は徐々に少なくなってきたが、今もなお、年間20 mSvを超える区域が大熊町全体の3分の1ほど残っている[1]。著者は2022年8月21日からの6日間、大阪大学主催の浜通り環境放射線研修に参加し、帰還困難区域にも足を踏み入れた[2]。この研修では福島県の復興に向けて学生の立場からできることを多方面から考えるため、講義と実習が行われた。講義では放射線に関する物理学、化学、地球物理学、統計学、生物学、医学、社会科学、法律の基本的な知識を学んだ。実習では実際に福島県大熊町に足を踏み入れ、福島第一原発と中間貯蔵施設の見学、住民との交流、学生間で討論を行った。さらに現地でサンプルを採取し、その放射能濃度を測定した。

福島第一原発で飛散した放射性同位体には γ 線を放出する¹³¹I, ¹³⁴Csや¹³⁷Csがある。¹³¹Iは半減期が約8日と短く、現在(2022年)は検出されていない。¹³⁴Csからは主に

605 keV の γ 線が放出され、半減期が約 2 年であり、現在では事故当時の約 40 分の 1 となっているためほとんど検出されていない。 ^{137}Cs からは主に 662 keV の γ 線が放出され、半減期が約 30 年と長く、事故当時の約 100 分の 78 にしかなくなっておらず現在も多く残っている。

2. 目的

本研究では土壌中の放射性セシウムの作物への影響を知るために、帰宅困難区域にある梨園で採取した土壌と梨の放射能濃度を測定した。さらに採取した土壌を用いてコマツナとハツカダイコンを育成し、土壌から作物への ^{137}Cs の移行係数を算出した。

3. サンプル採取

福島第一原発からおよそ 5 km 離れた場所にある梨園にてサンプルを採取した。採取場所では震災前は水はけのよい土壌を生かして梨が栽培されていたが、震災後、梨園全体が放射性物質により汚染された。その後、約 11 年間、人が入っていないため草木が生い茂り、荒れ果てた状態になっていた。採取場所での空間線量は地表から約 5 cm で 4.2 $\mu\text{Sv/h}$ 、約 100 cm で 3.2 $\mu\text{Sv/h}$ であり、通常より約 100 倍高い線量であった。手入れはされていないが梨の木には小さいながら実は実っていた。その実と土壌を採取し、放射能濃度を測定することで放射性セシウムの影響を調べた。

採取したサンプルは直径 5 cm、深さ 30 cm の円筒状に掘削した土壌サンプルと梨サンプルである。土壌サンプルは表層から 2.5 cm 間隔で分け、U9 容器に充填した。梨は地表から約 1 m と約 3 m に実っているものを採取し、測定時にハンマーを用いて実を潰し、U8 容器に充填した。さらに、作物を育てるための土壌は表層から約 10 cm をスコップで採取した。

4. ゲルマニウム半導体検出器を用いた放射能濃度測定

本研究では放射能濃度測定にゲルマニウム半導体検出器を用いた。ゲルマニウム半導体検出器の型番は GEM-20180-P で結晶サイズは直径 53.0 mm、長さ 48.1 mm である。図 1 は梨園の土壌サンプルの γ 線のエネルギー分布である。横軸は γ 線のエネルギー [keV] を、縦軸は計数を片対数グラフで表している。 ^{137}Cs からの 662 keV の γ 線、 ^{134}Cs からの 605 keV、796 keV と 802 keV の γ 線が観測された。縦軸が片対数であることから ^{134}Cs は ^{137}Cs に比べて極端に少ないことが分かる。 ^{137}Cs からの 662 keV の γ 線に対するゲルマニウム半導体検出器のエネルギー分解能は 0.2% で、検出効率サンプルの充填量に依存し、1.46~1.90% である。放射能濃度は以下の式より算出した。

$$x = \frac{N}{m \cdot \varepsilon \cdot Br}$$

x :放射能濃度 [Bq/kg],

N : γ 線の計数率 (バックグラウンドを引いた計数) [count/s]

m :サンプルの質量 [kg], ε :検出効率 (自己吸収補正も含む), Br : γ 線の分岐比

土壤中放射性セシウムの作物への影響

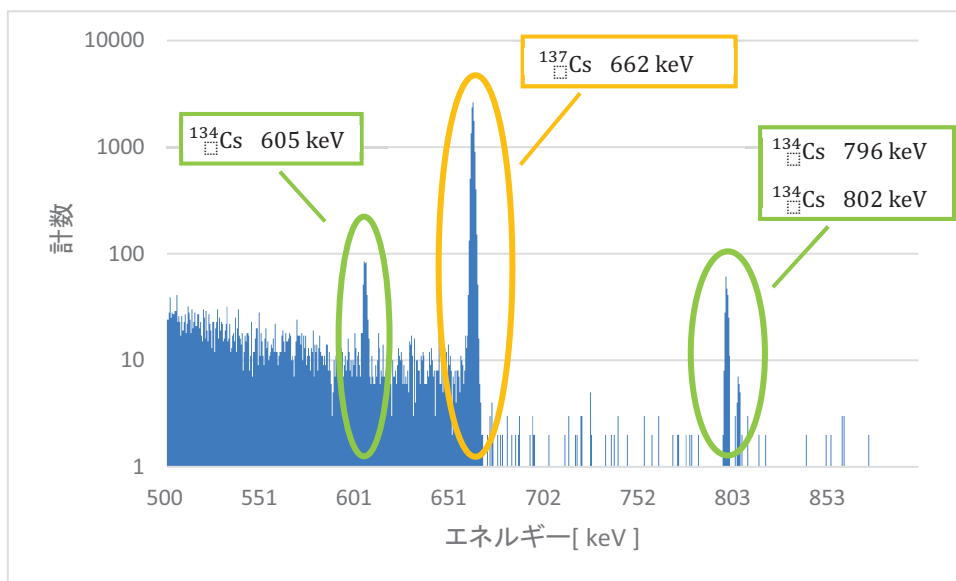


図1 ゲルマニウム半導体検出器による土壌の γ 線のエネルギー分布

5. 土壌サンプルの放射能濃度

図2は梨園で採取した土壌中の ^{137}Cs 、 ^{134}Cs と ^{40}K の放射能濃度の表層からの深さ依存性を表したグラフである。横軸は表層からの深さ [cm] を、縦軸は放射能濃度 [Bq/kg] を片対数グラフで表している。丸が ^{137}Cs 、三角が ^{134}Cs 、正方形が ^{40}K を表している。

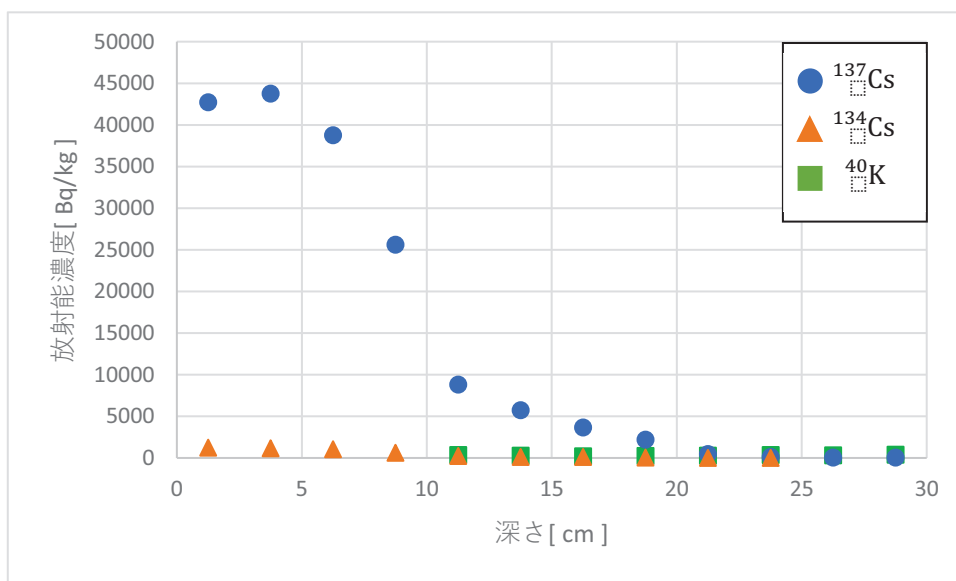


図2 土壌の放射能濃度の深さ依存性

^{40}K からは1461 keVの γ 線が放出される。表層0~10 cmの範囲では ^{40}K の放射能濃度が、25~30 cmの範囲では ^{134}Cs の放射能濃度が検出限界以下であった。 ^{40}K は深さ依存性がなく放射能濃度は約300 Bq/kgであった。 ^{134}Cs は表層から下層にかけて放射能濃度が減衰する結果であり、表層5 cmで約1000 Bq/kgと低かった。 ^{137}Cs の放射能濃度は表層10 cmで約40000 Bq/kgと非常に高い値であることが分かった。さらに、10 cmより深いところでは放射能濃度が減衰していることが分かった。指定廃棄物の基準値が

8000 Bq/kg であり、表層 10 cm の土壌が基準値以上[3]で、表層 10 cm 以下の土壌は基準値以内となっている。大熊町の除染でも表層 10 cm の土壌をはぎ取ったことにより空間線量率が 82% 低減した事実があり、表層 10 cm の土壌を剥ぐ除染方法は有効であると言える[4]。また、作物を栽培する際の土壌の放射能濃度に関して、明確な基準は定められていないが、5000 Bq/kg 以上の土壌では反転耕や表土削り取り、水による土壌攪拌・除去などの対策工法が取られている[5]。今回の結果では表層 15 cm の土壌が対策工法の該当となり、表層 15 cm 以下の土壌は必要に応じて対策工法が取られることになるだろう。

6. 梨の放射能濃度

地表から約 1 m と 3 m の高さに実っていた梨サンプルの ^{137}Cs 、 ^{134}Cs と ^{40}K の放射能濃度を測定した。表 1 は測定結果である。誤差は統計誤差のみである。 ^{134}Cs はどちらも検出限界以下であった。 ^{137}Cs は検出されたが 30 Bq/kg 以下であった。果実の放射性セシウムの基準値は 100 Bq/kg であり[6]、梨の ^{137}Cs の放射能濃度は基準値以下であることが分かる。さらに、天然放射性核種の 1 つである ^{40}K の放射能濃度は 100 Bq/kg 程度であり、 ^{137}Cs の放射能濃度よりも高い値であることが分かる。

一般的に梨の根はおよそ深さ 60 cm であり[7]、本研究で測定した土壌は深さ 30 cm までしか測ってないため、土壌中の放射性同位体が作物に吸収される割合である移行係数を正確に算出することは難しい。土壌の測定結果より、深さ 0~10 cm で約 40000 Bq/kg、25~30 cm で約 40 Bq/kg であったことから 30 cm 以下の放射能濃度はさらに小さいと予想できる。表層の土壌では約 40000 Bq/kg であったにも関わらず梨の放射能濃度が 30 Bq/kg 以下であった事実から梨の土壌からの移行係数は小さいといえる。

表 1 梨の放射能濃度 [Bq/kg]

| サンプル名 | ^{137}Cs | ^{134}Cs | ^{40}K |
|-----------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 梨 (3 m) | 29.3 ± 2.0 | 検出限界以下 | 101.0 ± 15.1 |
| 梨 (1 m) | 26.2 ± 2.1 | 検出限界以下 | 134.2 ± 18.2 |

7. 土壌からコマツナとハツカダイコンへの移行係数

大熊町で採取した土壌を用いてコマツナとハツカダイコンを栽培し、それぞれの放射能濃度を測定し、移行係数を求めた。作物が放射性同位体を吸収する割合は、作物の種類による。今回コマツナとハツカダイコンを選んだ理由は、秋から育てることができ、生育期間が短いこと、先行研究である“はつか大根への放射性セシウムの移行係数 (2021 年西川) [8]”にてハツカダイコンを使用しており、比較を行うことができるためである。本研究では ^{137}Cs の吸収抑制があるとされるゼオライトと、カリウムが含まれた堆肥を土壌に加え、その影響を調べた。

7-1 栽培方法

採取した土壌は ^{137}Cs の放射能濃度が約 40000 Bq/kg と高かったため岐阜大学の土を混ぜて約 20000 Bq/kg と約 10000 Bq/kg の土壌を用意した。約 20000 Bq/kg の土壌は、なにも混ぜなかった土壌 (①②)、肥料とゼオライトをどちらも混ぜた土壌 (③④)、肥料のみを混ぜた土壌 (⑤⑥) と条件を変えた。約 10000 Bq/kg の土壌は肥料とゼオライトをどちらも混ぜた土壌 (⑦⑧)、肥料のみを混ぜた土壌 (⑨⑩) と条件を変え、計 5 種類の土壌で栽培を行った。2022 年 9 月 7 日に種をまいた。奇数番をコマツナ、偶数番をハツカダイコンとした。2 日後の 2022 年 9 月 9 日には⑨以外で発芽が確認された。2022 年 9 月 13 日には①②③⑤⑦が順調に成長していたがそれ以外は枯れてしまう、もしくは成長が見られなかったため、2022 年 9 月 26 日に再度④⑥⑧⑨⑩の種まきを行った。栽培期間中、すべての作物で間引きを行った。2022 年 11 月 14 日にすべての作物の収穫が完了した。コマツナは根元をハサミで切って収穫し、ハツカダイコンは葉の付け根をつまみ、土壌から引き抜いた。収穫後は付着した土を落とすために作物をきれいに洗った。作物の乾燥後の質量が乾燥前の 1/10 になるまで乾燥を行った。乾燥後、ハサミで細かく切り U8 容器に隙間がないように充填した。ハツカダイコンは葉と実を分けて U8 容器に充填した。

7-2 測定結果

土壌の放射能濃度の算出には土壌の検出効率を、作物の放射能濃度の算出には水の検出効率を用いて測定した。

以下の式で移行係数を算出した。

$$\text{移行係数} = \frac{\text{作物中の放射能濃度 (乾燥作物)}}{\text{土壌中の放射能濃度}}$$

表 2 は土壌の種類、土壌の放射能濃度、作物の放射能濃度、 ^{137}Cs の移行係数の測定結果をまとめたものである。すべての条件で作物中の ^{137}Cs 放射能濃度は食品の放射性セシウムの基準値である 100 Bq/kg 以上であった。コマツナとハツカダイコンは梨と比べて根の深さが浅い。福島の前除染土壌を用いて基準値以下の根の浅い作物を育てることは難しいことが分かる。

図 3 はコマツナ、ハツカダイコン葉とハツカダイコン実の ^{137}Cs の土壌の放射能濃度と移行係数の関係性を表したグラフである。横軸は土壌の放射能濃度 [Bq/kg] を、縦軸は移行係数を表している。コマツナ、ハツカダイコン葉、ハツカダイコン実に分けてグラフをまとめた。丸が肥料とゼオライト有りで、三角が肥料有りゼオライト無しで、正方形が肥料無しゼオライト無しで育てたものを表している。3 種類すべてに共通してゼオライト有りの移行係数が高かった。ゼオライトは吸収抑制の効果が期待できるにも関わらず、吸収抑制は見られなかった。原因として、ゼオライトにも様々な種類があり、今回使用したゼオライトは岐阜市内で購入したゼオライトであったため、福島の農協で実際に使われているゼオライトとは異なり、放射性セシウムの吸収抑制に適していなかったと考えられる。準備の段階で適正なゼオライトを調べ、使用するべきであった。その他の原因として、収穫後に土の付着を落とすためにきれいに水洗いしたが、それでもまだ土が残っ

ていた可能性がある。土壌の放射能濃度が低いと移行係数が高い関係性が見られた。作物が放射性セシウムを吸収する量に限度がある可能性が考えられる。その他、肥料の有無、ハツカダイコンの葉と実の関係、土壌の放射能濃度と移行係数の関係を見たが、規則性はなかった。

表2 コマツナ、ハツカダイコン育成用土壌サンプルの放射能濃度、育てた作物の放射能濃度、移行係数

| 土壌の種類 | 土壌中の ¹³⁷ Cs放射能濃度[Bq/kg] | 肥料 | ゼオライト | 野菜 | 作物中の ⁴⁰ K放射能濃度[Bq/kg] | 作物中の ¹³⁴ Cs放射能濃度[Bq/kg] | 作物中の ¹³⁷ Cs放射能濃度[Bq/kg] | ¹³⁷ Csの移行係数 |
|-------|------------------------------------|----|-------|----------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| ① | 19890 ± 195 | × | × | コマツナ | 759.9 ± 72.3 | 18.5 ± 4.0 | 810.0 ± 18.3 | (4.1 ± 0.1) × 10 ⁻² |
| ② | 19890 ± 195 | × | × | ハツカダイコン葉 | 940.9 ± 126.6 | 35.3 ± 8.1 | 1111.0 ± 32.3 | (5.6 ± 0.2) × 10 ⁻² |
| | | | | ハツカダイコン実 | 1430.8 ± 203.1 | 検出限界以下 | 320.1 ± 23.8 | (1.6 ± 0.1) × 10 ⁻² |
| ③ | 20935 ± 209 | ○ | ○ | コマツナ | 544.9 ± 70.8 | 139.5 ± 10.3 | 5497.0 ± 56.1 | (26.3 ± 0.4) × 10 ⁻² |
| ④ | 20935 ± 209 | ○ | ○ | ハツカダイコン葉 | 1002.3 ± 92.1 | 62.9 ± 7.2 | 2557.2 ± 35.9 | (12.2 ± 0.2) × 10 ⁻² |
| | | | | ハツカダイコン実 | 268.3 ± 37.4 | 32.0 ± 3.5 | 1070.5 ± 16.5 | (5.1 ± 0.1) × 10 ⁻² |
| ⑤ | 21657 ± 22 | ○ | × | コマツナ | 740.8 ± 51.7 | 検出限界以下 | 323.1 ± 8.4 | (1.5 ± 0.0) × 10 ⁻² |
| ⑥ | 21657 ± 22 | ○ | × | ハツカダイコン葉 | 1775.2 ± 212.6 | 検出限界以下 | 163.1 ± 17.8 | (0.8 ± 0.1) × 10 ⁻² |
| | | | | ハツカダイコン実 | 988.1 ± 150.3 | 検出限界以下 | 117.8 ± 13.9 | (0.5 ± 0.1) × 10 ⁻² |
| ⑦ | 8345 ± 83 | ○ | ○ | コマツナ | 899.0 ± 86.9 | 73.0 ± 7.4 | 3057.5 ± 38.7 | (36.6 ± 0.6) × 10 ⁻² |
| ⑧ | 8345 ± 83 | ○ | ○ | ハツカダイコン葉 | 1099.7 ± 127.2 | 71.9 ± 9.7 | 2188.7 ± 43.3 | (26.2 ± 0.6) × 10 ⁻² |
| | | | | ハツカダイコン実 | 934.4 ± 97.3 | 50.7 ± 6.5 | 1572.4 ± 29.9 | (18.8 ± 0.4) × 10 ⁻² |
| ⑨ | 9004 ± 89 | ○ | × | コマツナ | 423.5 ± 33.4 | 7.9 ± 1.7 | 403.1 ± 8.0 | (4.5 ± 0.1) × 10 ⁻² |
| ⑩ | 9004 ± 89 | ○ | × | ハツカダイコン葉 | 851.0 ± 87.7 | 検出限界以下 | 290.6 ± 12.8 | (3.2 ± 0.2) × 10 ⁻² |
| | | | | ハツカダイコン実 | 612.0 ± 61.0 | 9.3 ± 2.9 | 297.9 ± 10.4 | (3.3 ± 0.1) × 10 ⁻² |

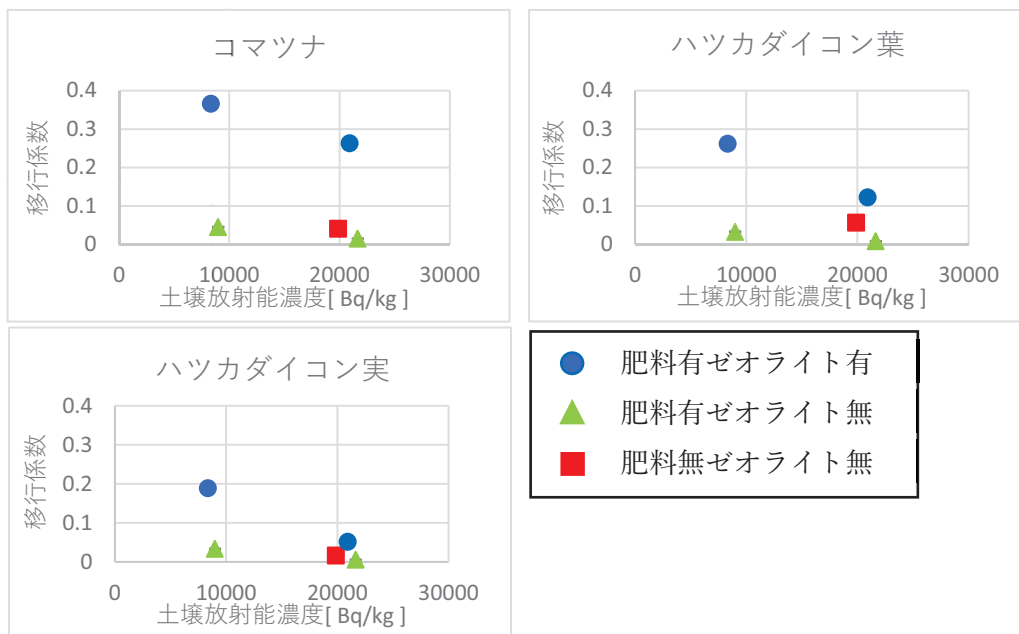


図3 ^{137}Cs の土壤放射能濃度と移行係数の関係

放射性セシウムがどこに分布しているか知るためにハツカダイコンを垂直方向、水平方向にスライスしてIP (イメージングプレート) で測定を行った。画像は14日間露光した。図4は⑧のハツカダイコンの実を水平にスライスしたIP画像である。図5は⑧のハツカダイコンの実を垂直にスライスしたIP画像である。色の濃い部分が放射線を多く放出していることを表している。図4と5よりハツカダイコンは葉よりも根に多く放射性セシウムが分布していることが分かる。ハツカダイコンの実の中の濃淡は均一であったため実の中の放射性セシウムがどのように分布しているのかを知ることはできなかった。放射能が小さく、ハツカダイコンの実が小さいために、濃淡の判別ができなかったと考えられる。

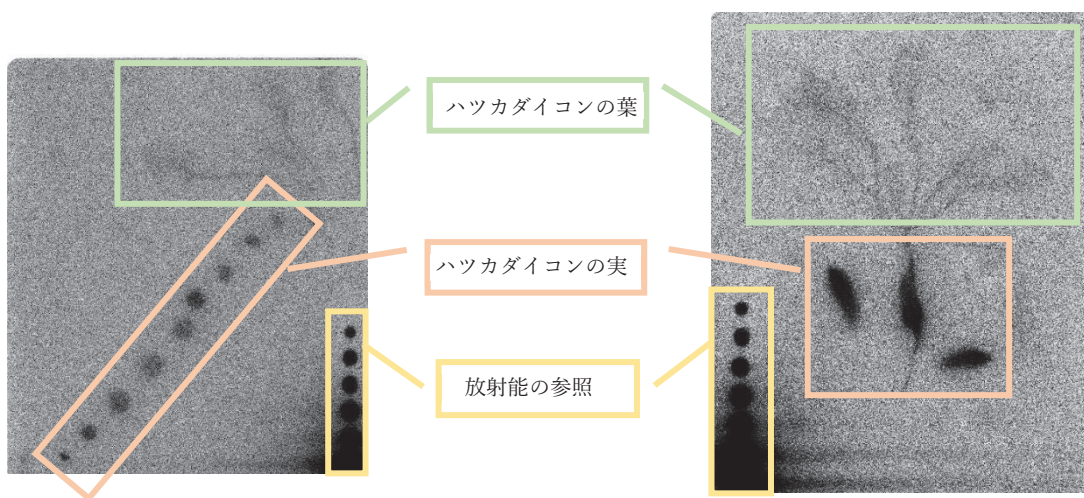


図4 ⑧ハツカダイコンのIP画像
(水平面でスライスした)

図5 ⑧ハツカダイコンのIP画像
(垂直面でスライスした)

作物が放射性セシウムを吸着するメカニズムは明らかになっていない。放射性セシウムは通常土壌に強く吸着されている。作物が放射性セシウムを能動的に土壌から引き離して吸収するとは考えにくい。受動的に吸収されると仮定すると、水に溶けだした放射性セシウムを吸収する場合と、養分や生物、バクテリアに吸着した放射性セシウムを吸収する場合が考えられる。水に溶けだした放射性セシウムを作物が吸収する可能性を調べるために、⑤の土壌を用いて、水やり後のプランターから染み出た水の ^{137}Cs の放射能濃度を測定したが、検出限界以下であった。水には放射性セシウムがほとんど溶け出ていなかった。

8. まとめ

2022年8月に福島県双葉郡大熊町にて環境放射線研修を行い、土壌サンプルと梨サンプルを採取した。採取したサンプル中の ^{137}Cs 、 ^{134}Cs と ^{40}K の放射能濃度をゲルマニウム半導体検出器を用いて測定した。大熊町で採取した土壌サンプルの ^{137}Cs 放射能濃度は表層5cmで $40732.3 \pm 410.9 \text{ Bq/kg}$ 、梨の ^{137}Cs 放射能濃度は $29.3 \pm 2.0 \text{ Bq/kg}$ 、 $26.2 \pm 2.1 \text{ Bq/kg}$ であり、梨は食品の放射性セシウムの基準値(100 Bq/kg)以下であることが分かった。表層5cmでは約40000 Bq/kgであったにも関わらずその土地に実っている梨の実は30 Bq/kg以下であることが分かった。土壌サンプルでは表層10cmが指定廃棄物の基準値以上、それ以下は基準値以下であった。梨の実が食品の放射性セシウムの基準値以下であったことから梨の木の根が深くまで張っており、放射能濃度の低いところから栄養分を吸収していると考えられる。

さらに土壌を用いてコマツナとハツカダイコンを栽培し移行係数を算出した。採取した土壌を肥料の有無、吸着効果の期待できるゼオライトの有無、土壌の放射能濃度の5種類の条件に分けて栽培を行った。栽培したすべての作物で放射性セシウムの基準値以上の値となり、福島の未除染土壌を用いた作物の栽培は難しいと感じた。梨と異なり、根が短い作物は土壌の表層の放射能濃度の影響を多く受ける。作物中の ^{137}Cs の放射能濃度を小さくするためには土壌中の ^{137}Cs の放射能濃度を小さくしないといけない。

9. 謝辞

IPの測定を提供頂いた大阪大学 放射線科学基盤機構 中島裕夫先生に感謝いたします。この研究は福島イノベーションコースト構想推進機構・大学等の「復興知」を活用した人材育成基盤構築事業「福島県浜通り地区環境放射線研修会」および原子力規制人材育成事業「社会との共創による原子力規制人材育成プログラム」の一環として実施しました。

参考文献

- [1] 避難指示区域の概念図
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/img/portal/template02/hinanshijikuiki.pdf>
- [2] 浜通り環境放射線研修
<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/ja/ev/iitate-seminar/2022/index.html>

- [3] 環境省 放射性物質汚染廃棄物処理情報サイト
http://shiteihaiki.env.go.jp/radiological_contaminated_waste/designated_waste/
- [4] 大熊町震災記録誌 福島県大熊町
- [5] 農地除染対策実証事業の結果
<https://www.maff.go.jp/j/nousin/seko/josen/pdf/gaiyou.pdf>
- [6] 原子力発電所外に適用されている放射能に関する主な指標例
https://www.r-info-miyagi.jp/site/wp-content/themes/miyagi/pdf/120427_01a.pdf
- [7] 千葉県ホームページ持続的生産を可能にする土づくり
https://www.pref.chiba.lg.jp/annou/documents/3103sehikijun_8kazyu.pdf
- [8] はつか大根への放射性セシウムの移行係数 (2021年 西川)
<http://hdl.handle.net/20.500.12099/87712>

