

公開シンポジウム

「原発事故から10年－これまで・今・これからの農業現場を考える」

講演要旨集

2021年11月5日（金）

パルセいいざか

主 催：（一社）日本土壌肥料学会、日本学術会議土壌科学分科会・IUSS 分科会
共 催：国際土壌科学連合（IUSS）
後 援：福島県、福島大学、農研機構

2021 年度日本土壌肥料学会主催シンポジウム
「原発事故から 10 年—これまで・今・これからの農業現場を考える」

2021 年 11 月 5 日(金)パルセイイざか

◇プログラム:

10:20-10:21 開会の案内;矢内純太(京都府立大学)

10:21-10:26「日本土壌肥料学会・日本学術会議からの挨拶」;

波多野隆介(北海道大学・日本土壌肥料学会前会長)

10:26-10:30 来賓 ご挨拶; 武田信敏(福島県農業総合センター所長)

10:30-11:00「はじまりは地震と共に—成果を繋ぐ研究の進展」;塚田祥文(福島大学)

11:00-11:30「農地土壌の放射性物質濃度分布図の作成について」;

前島勇治・高田裕介・神山和則(農研機構)

11:30-12:00「除染後農地の問題点と農業復興に向けた取り組み」;

齋藤 隆(福島県農業総合センター)

12:00-12:50 昼食

12:50-13:20「動きにくいセシウムの3つのかたち」;山口紀子(農研機構)

13:20-13:50「作物を放射能汚染から守る黄砂の力」;中尾 淳(京都府立大学)

13:50-14:20「カリウム肥料を撒くことの効果—水稲—」;藤村恵人(農研機構)

14:20-14:30 休憩

14:30-15:00「ダイズの放射性セシウム濃度が高い理由」;二瓶直登(福島大学)

15:00-15:30「水稲におけるセシウムの吸収と体内での動き」;古川 純(筑波大学)

15:30-15:55「これから歩む道—日本土壌肥料学会・日本学術会議の役割」;

信濃卓郎(北海道大学)

15:55-16:25「総合討論(パネル形式)」;司会 信濃卓郎・中尾 淳

16:25-16:30「閉会の言葉」;妹尾啓史(東京大学・日本土壌肥料学会会長)

対面式でのシンポジウム参加にあたって

2021年11月5日、福島市「パルセいいざか」において対面式で開催いたします。
開催にあたっていくつか注意事項があります。

1) 会場へのアクセス

公共交通機関をご利用になる場合は福島駅(東口)より飯坂電車をご利用いただき、終点の飯坂温泉駅で下車。徒歩8分程度で会場に到着いたします。由緒ある温泉街を経由して歩くため、歩道が狭い事にお気を付けてください。なお終点にはあまりタクシーは待機しておりません。タクシーを利用される場合は事前に予約等をされると良いと思います。

2) 昼食について

会場周辺には200m程の距離にいくつか食事を取ることが可能な場所があります(そば、ラーメン、餃子など)。ただし、いずれも大きな店舗ではなく、また休業をされている場合も多いことをご承知おきください。今回のシンポジウムではゴミを確実に片付けるということで会場での飲食の利用が可能です。事前に昼食を購入し持参していただく事を推奨いたします。なお、周辺のコンビニエンスストアは駅前にファミリーマートがあります。

3) ゴミについて

施設内および会場周辺へのゴミの放置は厳禁です。会場内に適宜ゴミ袋を設置いたしますので、確実に廃棄をしていただくようお願い致します。また、昼食後、シンポジウム終了後にはゴミの回収も行いますので、ご協力をお願い致します。

4) 感染対策

会場入り口において体温測定を行います。明らかに発熱されている場合は入館をご遠慮いただく事になりますのでご了解をお願い致します。入館時には手指の消毒をお願い致します。消毒液は入り口に配置いたします。

会場への入館時および会場内においてはマスクの着用をお願い致します。会場内での大きな声での会話はお控えください。また、着席については必ず一席以上の間隔を開けてのご着席をお願い致します。会場は広く用意しておりますので、ご協力をお願い致します。質問される場合は着席にて挙手をお願いいたします。スタッフがマイクをお持ちいたします。

イベント終了後2週間以内に新型コロナウイルス感染症を発症した場合は、保健所が実施する行動履歴等の調査にご協力をお願いします。

なお、講演者に関しては音声を明瞭に伝えるため、アクリル板の衝立の後ろでマスクを外している場合があります。この点をご理解をお願い致します。

5) 会場内での問い合わせについて

シンポジウム運営スタッフはそれがわかるような名札をつけております。お声掛けください。

オンラインでのシンポジウム参加にあたって

本シンポジウムは「パルセいいざか」においての対面式での開催と致しますが、オンラインでの視聴の希望も複数寄せられたため Youtube ライブ配信によるオンライン配信も行う予定にしております。ただし、オンライン配信はあくまでも補助的に行うため、以下の点にご注意の上、ご参加ください。

オンライン配信においては会場から公演の様子をそのまま撮影して公開する手法を取るため、画質等は不鮮明になる可能性が高いことをご了解ください。オンライン視聴者からの質問に関しては Youtube 上のメッセージを利用してください。ただし、いただいたメッセージに関しては全てをシンポジウム中にご紹介できるとは限りません。

なおメッセージの入力に関しては Youtube へのログインが必要となりますが、その方法に関してのお問い合わせにはお答えすることはできません。各自で設定をお願い致します。

同様にオンライン接続に関しての技術的な問い合わせなどに関しては一切お受けすることはできません。大変申し訳ございませんが、PC の設定等に関しては各自で行っていただきたく思います。

Youtube ライブ配信のアクセス先は

<https://youtu.be/8uKUvCJP9N0>

となります。当日 10 時頃にはオープンを予定しております。

このアクセス先は限定配信のため、不特定多数への拡散はお控えください。

はじめりは地震と共に：成果を繋ぐ研究の進展

○塚田 祥文（福島大学 環境放射能研究所）

1. はじめに

2011年3月11日14:46, 当時勤務していた環境科学技術研究所(青森県六ヶ所村)でも, これまでに経験したことのない大きな揺れを感じた(日本の観測史上最大のマグニチュード 9.0)。かろうじてラジオで情報を収集するも, 思いうような状況がつかめず, 津波が襲来している恐れのある沿岸を避けて帰宅した。停電のため家電製品が一切使えず暖もとれず, 物置から小さなポット式ストーブを運び出し家族で囲んで 2 日間を過ごした。その頃は生活の回復にいっぱい他なことに気が回らなかった。電気が復旧してからテレビを見て愕然とした。3月12日15時に東電福島第一原発が水素爆発し, 大量の放射性物質が環境に放出されたと報道があった。その時に, これまでのスリーマイル島原発やチェルノブイリ原発事故から, 放射性希ガスや揮発性の高い放射性ヨウ素や放射性セシウムが揮散していたことが脳裏を過った。原子力施設周辺では災害に備えた防災訓練を定期的実施しているが, この時複合災害時における対処の難しさを感じた。東電福島第一原発では, 13 m の津波が押し寄せ, 非常用発電機にも海水が浸り全ての電源を喪失した。また, 外部電源の供給も絶たれ, 原子力発電所にとって致命的な事故となる最も大切な冷却機構を失った。放水や電源確保など懸命な対応も及ばず, 最も深刻な原子力事故(国際原子力事象評価尺度で最上位のレベル 7:深刻な事故)となった。

6.7 m の津波が押し寄せ 2 名がなくなった青森県三沢市の漁港での復旧作業に, 若手同僚と 2 日間参加した。木造家屋は跡形もなくなり, 鉄筋コンクリートの建屋もスチール入りの窓ガラスまでも散在し, ただ無残な状況で津波の威力を思い知った。その頃, 当時日本土壌肥料学会長の南條正巳先生(現東北大学名誉教授)から環境放射能研究関係者に「放射性物質拡散によって農業分野において甚大な被害が想定される。環境放射能に関する正しい知見を, 学会としていち早く周知するので協力して欲しい。」と強い打診があった。3月でまだ本格的に作物が栽培されていなかった時期であったが, 各地の環境放射線(能)モニタリング結果が報道され, 静岡県のお茶からも放射能汚染が報告された。土壌肥料学会からの発信は, 迅速性と, 一過性ではなく長期に亘る科学的な知識を正確に発信することが重要視され, 学会ホームページを通じて 2011年3月28日に原発事故関連情報(1)を公表し, その後概ね 2 週間毎に 6月6日の原発事故関連情報(7):提言まで, これまでの知見を集約して掲載した(日本土壌肥料学会)。その後も, 日本土壌肥料学会では継続して様々な対策や知見に関する情報発信を継続している。これまでに蓄積してきた環境放射能に関する知識がまさか社会で直接利用されることになるとは夢にも思っていなかった。

今では一般にも知られている「放射性セシウムは土壌中では移動しにくい。」と言う事実にしても, テレビで化学の専門家と称する教授が「セシウムはナトリウムと同じような性質で, 土壌から地下水へ移動し, 汚染は拡散する。」と報道され驚愕した。環境放射能の研究者は, 化学的な知識のみならず環境に関する十分な知識を備えていることの重要性を痛感すると同時に, マスコミの報道のあり方に違和感を憶えた。

2. 食品基準値と作物濃度の低減化

事故を受けて厚労省は、2011年3月17日に原子力安全委員会により示された指標値を暫定基準値とした。その後、食品安全委員会の食品健康影響評価を受け、放射性セシウムについて食品から許容することのできる線量を年間5 mSv から1 mSv へ引き下げるとする基本的な考え方が提案され、半減期が1年以上の¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ¹⁰⁶Ru, ²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Puを考慮した、放射性Csの飲食物の基準値(100 Bq/kg)が2012年4月1日から施行された。

農業分野でも、作物中放射性Csの低減に向け様々な対策が取られた。特筆したい効果的な対策として、1)カリウムの施肥(福島県)と、2)表土剥ぎ取り除染(環境省)、がある。表土の剥ぎ取りは、放射性Csが土壌中では強固に結合し移動しにくく表層に留まっていることから、攪乱される前に物理的に剥ぎ取り除去する方法である。一方、カリウムの施用については2011年の事故以前から世界中で多くの知見が出されていたが、施用するカリウムの量を規定した基準値までは出されていなかった。作物中放射性Cs濃度の低減化に向けた積極的なカリウム施用量の設定は、世界で初めてでありイネの放射性Cs濃度を基準値以下に抑えることに繋がった。それらの対策によって、2015年以降イネの全袋検査において基準値を超える値は報告されていない。

3. 新たな課題：灌漑水

作物への放射性物質の移行は、葉面と土壌からの吸収が主な経路であり、2011年の事故前から世界中で多くの研究が行われていた。一方、灌漑水から作物への放射性物質の移行研究成果は、充分でなかった。主食となるイネの栽培には大量の灌漑水を利用し、福島県内には3700のため池があり、灌漑水からイネへの放射性Csの移行についての成果が急がれた。まずは、灌漑水中放射性Csの存在形態と濃度(e.g. Tsukada & Ohse, 2016; Tsukada et al., 2017)、灌漑水からの放射性Cs移行に関する成果(e.g. Myttenaere et al., 1969; Suzuki et al., 2015; Uematsu et al., 2017)が報告され、その結果灌漑水からイネへの移行は限定的であることが明らかになった。

4. 世界を繋ぐ研究成果

これまで、環境の広い範囲に放射性物質が放出されたのは、1950および1960年代に行われていた大気圏核実験、1986年のチェルノブイリ原子力発電所事故と2011年の東電福島第一原子力発電所事故などであった。このような事態に備えて作物中放射性物質の濃度を予測することは、人の被ばく線量を予測するうえで大変重要な課題であり、室内実験による土壌から作物への移行に関する多くの成果も併せて、IAEA等の世界的な機関でも様々な情報を取りまとめている(IAEA, 2010; IAEA, 2020)。また、土壌から作物への移行モデルについても多くの成果が報告されている(e.g. Absalom et al., 1999; Amano et al., 2003; Takahashi et al., 2003)。

モデルを用いた作物中放射性物質の濃度予測に用いる移行パラメータは、比較的大きな変動範囲を持ち合わせている場合が多く、そのため作物の予測濃度も移行パラメータに依存した変動を含んでいる。一方で、いくつかの測定の組み合わせによって、大気圏核実験由来による比較的低い濃度からチェルノブイリ原発や東電福島第一原発事故による高い濃度まで、土壌の汚染濃度が6桁以上に互る条件で、しかも様々な土壌の種類であっても、高い精度で作物中濃度を予測可

能であることが明らかになってきた。

5. 事故における営農対策からの教訓

表土剥ぎ取り除染によって農地土壤中放射性 Cs 濃度が 5000 Bq/kg 以下となり、カリウム施用など適切な営農管理によって作物への放射性 Cs 移行低減化は、継続してきたモニタリングの結果からも十分に可能であることがあらためて示されている。しかしながら、放射性 Cs の強固結合を期待してゼオライトの施用が実施されたが、直接的な効果は得られていないことが報告されている (e.g. Yamaguchi et al., 2019)。また、新聞報道にもあったように、ヒマワリにセシウムを吸収させて土壌を除染しようとした試みも失敗に終わった。未だに風評など、根拠のない情報によって過剰な対策が取られている現状も事実である。

6. 残された課題

2011 年から 10 年を経過し、急を要する課題は解決された。一方で、残された課題には時間を要する難しい課題が残されている。例えば、1) 帰還困難区域と周辺地域の営農再開、2) 廃炉に伴う原発周辺での営農再開、3) 自生植物・キノコと野生動物の活用、4) 帰還困難区域における野生動物の増加 (Lyons et al., 2020) と営農再開への影響などである。更に、低線量・低線量率における生物影響は、難しい問題で不明な点が多く残されている。

謝辞

本研究は、厚生労働行政推進調査事業費補助金、および SATREPS (JPMJSA1603) の支援を受けて実施した成果の一部である。

引用文献

- Absalom, J. P., Young, S. D., Crout, N. M. J., Nisbet, A. F., Woodman, R. F. M., Smolders, E., Gillett, A. G. 1999. Predicting soil to plant transfer of radiocesium using soil characteristics. *Environ. Sci. Technol.*, 33, 1218-1223.
- Amano, H., Takahashi, T., Uchida, S., Matsuoka, S., Ikeda, H., Hayashi, H., and Kurosawa, N. 2003. Development of a code MOGRA for predicting the migration of ground additions and its application to various land utilization area. *J. Nucl. Sci. Tech.*, 40, 975-979.
- 福島県．農作物の放射性セシウム対策に係る除染及び技術対策の指針 第3版．
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/61508.pdf>.
- IAEA, 2010. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. IAEA Technical report series No. 472. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2020. Environmental Transfer of Radionuclides in Japan Following the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. IAEA-TECDOC-1927. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- 環境省．除染情報サイト. <http://josen.env.go.jp/>.
- Lyons, C. P., Okuda, K., Hamilton, M. T., Hinton, T. G., Beasley, J. C. 2020. Rewilding of Fukushima's human evacuation zone. *Front. Ecol. Environ.* 18, 127-134.
- Myttenaere, C., Bourdeau, P., Masset, M. 1969. Relative importance of soil and water in the indirect

- contamination of flooded rice with radiocaesium. *Health Phys.*, 16, 701–707.
- 日本土壌肥料学会. 原発事故・津波関連情報. <http://jssspn.jp/info/nuclear/index.html>.
- Suzuki, Y., Yasutaka, T., Fujimura, S., Yabuki, T., Sato, M., Yoshioka, K., Inubushi, K. 2015. Effect of the concentration of radiocesium dissolved in irrigation water on the concentration of radiocesium in brown rice. *Soil Sci. Plant Nutri.*, 61, 191–199.
- Takahashi, T., Tsukada, H., Uchida, S., and Amano, H. 2003. An analysis for migration of cesium from a paddy field to rice plant by using a code MOGRA. *Proceedings of the International Symposium on Radioecology and Environmental Dosimetry, Rokkasho, Aomori, Japan*, 480–483.
- Tsukada H., Ohse, K. 2016. Concentration of radiocaesium in rice and irrigation water, and soil management practices in Oguni, Date, Fukushima. *Int. Environ. Assess. Manage.*, 12, 659–661.
- Tsukada, H., Nihira, S., Watanabe, T., Takeda, S. 2017. The ^{137}Cs activity concentration of suspended and dissolved fractions in irrigation waters collected from the 80 km zone around TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. *J. Environ. Radioact.*, 178–179, 354–359.
- Uematsu, S., Vandenhove, H., Sweeck, L., Hees, M. V., Wannijn, J., Smolders, E. 2017. Foliar uptake of radiocaesium from irrigation water by paddy rice (*Oryza sativa*): an overlooked pathway in contaminated environments. *New Phytol.*, 214, 820–829.
- Yamaguchi, N., Hikono, A., Saito, T. 2019. Effects of zeolite and vermiculite addition on exchangeable radiocaesium in soil with accelerated ageing. *J. Environ. Radioact.*, 203, 18–24.

農地土壌の放射性物質濃度分布図の作成について

○高田裕介, 前島勇治, 神山和則 (農研機構農業環境研究部門)

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災後に発生した東京電力福島第一原子力発電所(以下、福島第一原発)の事故により、大気中に大量の放射性物質が拡散し、福島県を中心に放射性物質汚染が広範囲に及んだ。放射性物質により汚染された農地の除染や営農上の対策を進めるためには、事故後10年以上が経過した現在でも「どの程度の放射性物質がどこにあるのか」を経時的に把握することが重要である。

農林水産省は広域での農地土壌中の放射性物質濃度分布の現況を早期に把握すべく福島第一原発の事故直後から、文部科学省、宮城県、福島県、栃木県、群馬県、茨城県、千葉県等と連携・協力して、平成23年度科学技術戦略推進費「放射性物質による環境影響への対策基盤の確立」により、農地土壌の放射性物質濃度分布図を作成し、平成23年8月30日に公表した(農林水産省2011a)。同年9月14日には、農林水産省がこの農地土壌放射性物質濃度分布図を基に、「農地土壌の放射性物質除去技術(除染技術)について」を公表し、放射性物質濃度分布図で地図凡例として用いられた土壌中の放射性物質濃度区分ごとに農地土壌除染技術適用の考え方を示した(農林水産省2011b)。それ以降、農林水産省は毎年度、農地の除染や現場での営農対策への活用を目的に農地土壌中の放射性物質濃度のモニタリングを実施し、放射性物質濃度分布図を公表してきた(表1)。さらに、農林水産省(2020)は、福島県における農地土壌中の放射性物質濃度分布図等の経年変化をまとめ、農林水産省HP上で公開している。

表1 農地土壌の放射性物質濃度分布図の概要^{1), 2)}

公表日	対象地域	調査地点数				分析対象 核種	濃度範囲 表示 (段階)	基準日 ³⁾
		都県 (数)	総計 (点)	福島県 (点)	福島県以外 (点)			
令和2年12月25日	福島県	1	307	307	0	Cs ¹³⁷ , Cs ¹³⁴	6	令和元年11月2日
令和元年10月11日	福島県	1	368	368	0	同上	6	平成30年11月15日
平成30年12月7日	福島県	1	348	348	0	同上	6	平成29年11月16日
平成30年3月30日	福島県	1	344	344	0	同上	6	平成28年11月18日
平成29年1月19日	福島県	1	384	384	0	同上	6	平成27年11月4日
平成27年11月30日	福島県	1	417	417	0	同上	6	平成26年11月7日
平成26年10月17日	福島県	1	341	341	0	同上	6	平成25年11月19日
平成25年8月9日	福島県	7	446	360	86	同上	7	平成24年12月28日
平成24年3月23日	福島県	15	約3,400	約2,200	約1,200	同上	7	平成23年11月5日
	岩手県、宮城県、茨城県、栃木県、群馬県、千葉県							
平成23年8月30日	福島県	6	約580	約360	約220	同上	5	平成23年6月14日
	宮城県、栃木県、群馬県、茨城県、千葉県							

1) 農林水産省HP (<https://www.affrc.maff.go.jp/docs/map/R2/20201225.htm>) より作成

2) 平成27年11月30日以降に公表した分布図間の比較は可能。それより前に公表した分布図は作成方法が異なるため比較はできない。

3) 原子力規制委員会が実施した航空機モニタリングデータの基準日と同じ

本シンポジウムでは、農林水産省から委託を受け、2011年から現地調査、分析及び放射性物質濃度分布図の作成を行ってきた旧(独)農業環境技術研究所(農研機構農業環境変動研究センター)を経て、現在、農研機構農業環境研究部門)の取組について紹介する。

2. 放射性セシウム濃度測定・放射性濃度分布図作成について

1) 現地調査・放射性セシウム濃度測定

現地調査は、調査ほ場の現況確認(耕うん状況, 除染状況)を行った後, 土壌試料採取(深さ 15 cm若しくは作土層)及び放射線量測定(地上高 1 cm及び 1m)については, 調査ほ場に対角線を引き, その交点 1 点, 対角線の交点と各頂点との中点 4 点の計 5 箇所で行った(図 1)。5 箇所から採取した土壌試料は風乾後, 良く混合して 2 mmふるいを通し, ゲルマニウム半導体分析装置等を用いて放射性セシウム(Cs137, Cs134)の濃度を測定した。年度ごとの調査地点数及び放射性セシウムの減衰量を考慮した基準日の設定について, 表 1 に記載した。なお, 各調査年度の基準日は, 原子力規制委員会等が実施した航空機モニタリングデータの基準日と同じ日に設定した。

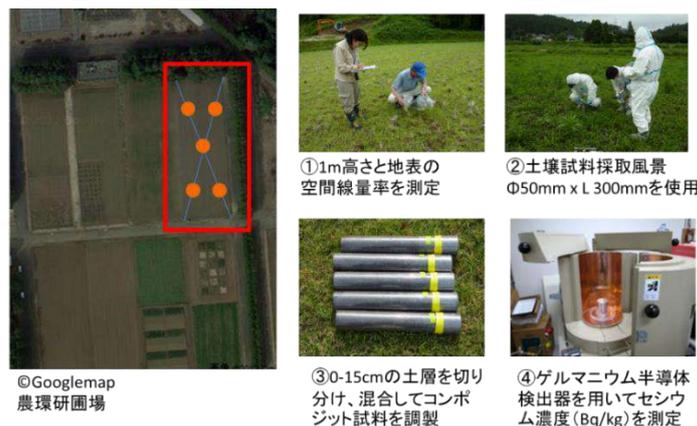


図 1. 現地調査及び放射性セシウム濃度測定

2) 空間線量率からの農地土壌の放射性物質濃度の推計

現地調査で測定した空間線量率(地上高 1m)と土壌中の放射性セシウム濃度との関係性を解析したところ, 土壌の種類, 耕耘状況, 地目の違いにより一定の相関関係があることが明らかとなり, 空間線量率から放射性物質濃度をより精緻に推計するための予測式(回帰式)を類型化した(図 2)。この予測式と農研機構が公開しているデジタル土壌図及び航空機モニタリングデータによる空間線量率分布図(原子力規制委員会等)を用いて, 調査地点以外の農地土壌の放射性物質濃度分布図を作成した。

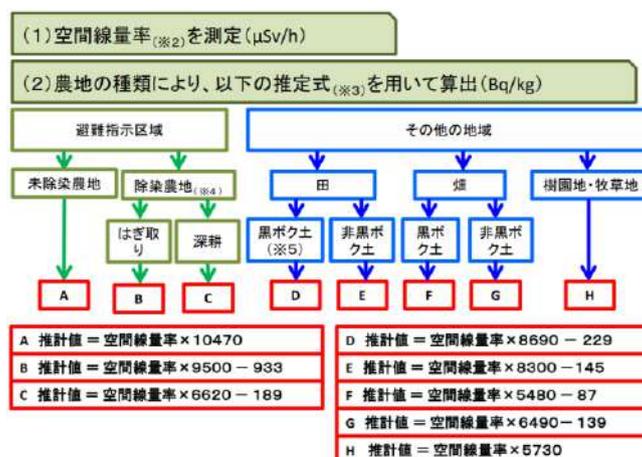


図2. 空間線量率(地上高 1m)からの農地土壌の放射性物質濃度の推計するための予測式(農林水産省 HP より:令和2年 12月 25日)

3) 農地土壌の放射性物質濃度分布図の作成方法

農地土壌の放射性物質濃度分布図の作成方法については調査地点数や調査時期により、次の手法で地図化した。

平成 24 年 3 月公開図：福島県で約 2,200 地点、他の 14 都県では計約 1,200 地点の総計約 3,400 地点を調査地点とした。また、空間線量率と放射性物質濃度の関係性を示した予測式を土壌の種類、耕転状況、地目の違いから 10 区分に類型化し、それぞれの調査地点と各予測式から得られる予測値(空間線量率分布図とデジタル土壌図を用いて算出)との差(予測誤差)の地理的分布状況を解析し、予測式の誤差を補正して放射性物質濃度分布図を作成した(農林水産省 2012; Takata et al., 2014)。

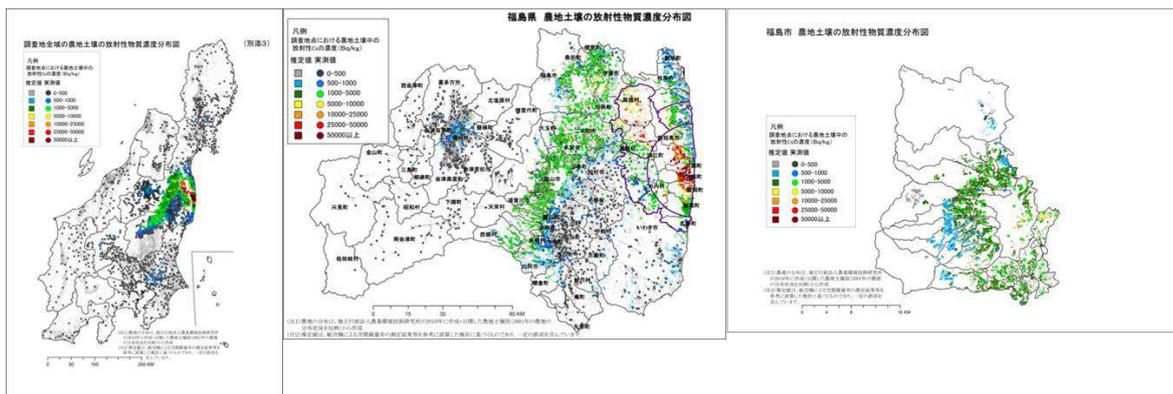


図 3. 農地土壌中の放射性物質濃度分布図(農林水産省 HP より:平成 24 年 3 月 23 日)

平成 25 年 8 月及び平成 26 年 10 月公開図：放射性セシウム濃度測定においては、1)の地図作成時に行った調査地点と同一地点(平成 25 年;福島県で 360 地点、他の5都県では 86 地点、平成 26 年;福島県で約 340 地点)で実施した。1)の調査時から放射性物質濃度が変化していることから、土地利用の違いや避難指示区域の違いごとに放射性セシウム濃度の低下率を算定して、1)の放射性物質濃度分布図に掛け合わせることで放射性物質濃度分布図を作成した(農林水産省 2013, 2014)。

平成 27 年以降の公開図：放射性セシウム濃度測定においては、過去の地図作成時に行った調査地点とほぼ同一地点(福島県で約 300~400 地点)で実施した。また、空間線量率からの農地土壌の放射性物質濃度の推計については、調査地の農地除染が進んだことから、空間線量率(地上高 1m)と放射性物質濃度の関係性を示した予測式を土壌の種類、除染状況、地目の違いから 8 区分に類型化した(図 2)。それらの予測式を用いて空間線量率分布図(原子力規制委員会)とデジタル土壌図を用いて放射性物質濃度分布図を作成した(農林水産省 2015, 2017, 2018a, 2018b, 2019, 2020)。なお、表 1 脚注に示したとおり、平成 26 年以前に公表した放射性濃度分布図とは作成方法が異なるため、比較することはできない(農林水産省 2020)。

3. まとめ

福島第一原発の事故が発生してから 10 年以上が経過した現在も、農林水産省は福島県や関係機関と協力して、放射性物質の影響を受けた農地にかかる除染や営農上の対策を進めるための基礎的な知見として、毎年度、農地土壌中の放射性濃度分布図を作成しており今後も引き続き、農地土壌の放射性セシウム濃度の推移を把握するための調査を進めることとしている。

謝辞

本研究は、平成 23 年度科学技術戦略推進費「放射性物質による環境影響への対策基盤の確立」及び「放射性物質測定調査委託事業」等で実施した。

引用文献

農林水産省 2011a. 農地土壌の放射性物質濃度分布図の公表について(平成 23 年 8 月 30 日)

農林水産省 2012. 農地土壌の放射性物質濃度分布図の公表について(平成 24 年 3 月 23 日)

農林水産省 2013. 農地土壌の放射性物質濃度分布図の公表について(平成 25 年 8 月 9 日)

農林水産省 2014. 農地土壌の放射性物質濃度分布図の公表について(平成 25 年 10 月 17 日)

農林水産省 2015. 農地土壌の放射性物質濃度分布図の公表について(平成 27 年 11 月 30 日)

農林水産省 2017. 農地土壌の放射性物質濃度分布図の公表について(平成 29 年 1 月 19 日)

農林水産省 2018a. 農地土壌の放射性物質濃度分布図の公表について(平成 30 年 3 月 30 日)

農林水産省 2018b. 農地土壌の放射性物質濃度分布図の公表について(平成 30 年 12 月 7 日)

農林水産省 2019. 農地土壌の放射性物質濃度分布図の公表について(令和元年 10 月 11 日)

農林水産省 2020. 農地土壌の放射性物質濃度分布図の公表について(令和 2 年 12 月 25 日)

上記、農林水産省 2011a～農林水産省 2020 の閲覧先は農林水産省 HP にリンクが張られている。

(<https://www.affrc.maff.go.jp/docs/map/index.htm>)

農林水産省 2011b. 農地土壌の放射性物質除去技術(除染技術)について(平成 23 年 9 月 14 日付け農林水産省プレスリリース)

Takata Y., Kohyama K., Obara H., Maejima Y., Ishitsuka N., Saito T., Taniyama I. 2014. Spatial prediction of radioactive Cs concentration in agricultural soil in eastern Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 60, 393-403

除染後農地の問題点と農業復興に向けた取り組み

○齋藤隆（福島県農業総合センター浜地域農業再生研究センター）

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故により、福島県浜通り地方を中心とした12市町村に避難指示が出され、多くの住民が避難を余儀なくされた。避難指示区域となった市町村は川俣町(山木屋地区)、田村市(都路地区)、南相馬市(小高区)、浪江町、双葉町、大熊町、富岡町、楡葉町、広野町、飯舘村、葛尾村、川内村である。2013年8月には年間積算線量の水準に応じて帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域の3地域に区分された。これらの地域は広範囲かつ高濃度の放射性物質により汚染され、農業者が避難したことから、それまでの農業生産が全面的に停止した。現在は、避難指示区域は市町村毎に段階的に見直しが進められ、帰還困難区域の一部、居住制限区域、避難指示解除準備区域の除染が実施され、多くの地域では営農再開・農業再生が進みつつあるが、一部の地域では帰還が進まず、長期間にわたり営農が中断している状況にある。

福島県では避難指示区域を対象に営農再開・農地再生を加速するため、2016年3月に「浜地域農業再生研究センター」を開所し、各市町村や生産者等の意向を踏まえ、現地実証試験に取り組んでいる。作物、野菜特産、花き、畜産、放射線防護、鳥獣害対策等の各専門分野を担当する研究員が農業者や市町村等の意見等を踏まえて、避難地域等の農業者が直面する様々な課題の解決に向けた実証研究を実施している。また、課題解決の加速化・高度化に向けて、国の研究機関や大学などの関係機関・団体等と連携し、共同研究等に取り組んでいる。2021年度現在、実施している実証研究は図1のとおりである。本報告では、これまで実施してきた実証試験を中心に、除染後農地における緑肥作物を活用した地力回復に関する研究を紹介する。

2. 除染後農地における緑肥作物を活用した地力回復効果

福島県内の避難指示区域等では、表層に降下した放射性セシウムを除去するため、農地除染(表土剥ぎ・客土)が実施されている(図2)。このような除染後農地は、肥沃な表土が除去され、山砂等が客土されることが多いことから、一部の地域では土壌肥沃度の低下が懸念されている。また、避難指示区域では大部分の畜産業が未だに営農再開されておらず、地域内での堆肥の生産・流通が少ないことから、良質な堆肥施用による土壌肥沃度の回復は期待し難い。さらに、農地除染の際、重機作業により、土壌が踏み固められ、土壌の排水性や透水性の悪化が懸念されている。

このため、福島県双葉町および富岡町の除染後水田において各種緑肥作物の栽培・すき込みが後作物の生産性に及ぼす影響を評価するとともに、土壌物理性に及ぼす影響も併せて評価した。

(1) マメ科緑肥作物の栽培・すき込みによる後作物の生産性評価

双葉町の除染後水田において、マメ科緑肥作物のクロタラリアおよびセスバニアの栽培・すき込み後にイタリアンライグラスを栽培し、イタリアンライグラスの生産性を比較した(表1)。この結果、セスバニアおよびクロタラリアの栽培・すき込み後のイタリアンライグラスの乾物重は無栽培後のイタリ

アンライグラスと比べ多くなることが示された。除染後水田においてマメ科緑肥作物の栽培による土壌肥沃度の向上効果が示された。

(2) マメ科緑肥作物の栽培・すき込みによる土壌物理性改善効果

富岡町の除染後水田において、クロタリヤおよびセスバニアを栽培後、栽培前後の土壌の容積重および三相分布を測定し、無栽培区と比較した(表2)。この結果、播種前の各処理区における土壌の容積重や固相率には差が見られなかったが、すき込み前の各処理区における土壌の容積重や固相率は無栽培区で高い値を示した。除染後農地においてマメ科緑肥作物の栽培による土壌の物理性改善効果が示された。

3. 今後の課題

除染後農地では、ほ場内の土壌肥沃度が低下するとともに、土壌肥沃度のばらつきが見られ、農作物生産への影響が懸念されている。これまでの研究では、農作物の生産性から間接的に土壌肥沃度のばらつきを評価する手法が開発されているが、避難指示区域において、農作物の作付前に土壌肥沃度のばらつきを迅速かつ精度良く把握する技術は展開されていない。浜通り地方における農業生産性の回復・増強において、土壌肥沃度のばらつきや地力低下の実態を把握し、安価かつ簡易的な土壌肥沃度改善策を実現する技術は、先導的技術として期待されている。

このような状況の下、農林水産省の福島イノベーション・コースト構想に基づく先端農林業ロボット研究開発事業では、京都大学が中心となり、福島県と連携し、放射性物質や土壌肥沃度のばらつきを可視化するトラクタ搭載型のロボットを開発した(図3)。この技術により、農地除染により生じた土壌肥沃度のばらつきを「見える化」技術で可視化し、深耕することで土壌肥沃度のばらつきを改善できることが示されたが、下層土に多くの礫が含まれる農地では、これらの技術を適応することが難しいことが示された。このため、効果的な改善技術が期待されている。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 基盤研究(A)(課題番号:19H01169, 代表:北海道大学 信濃卓郎)で実施した。

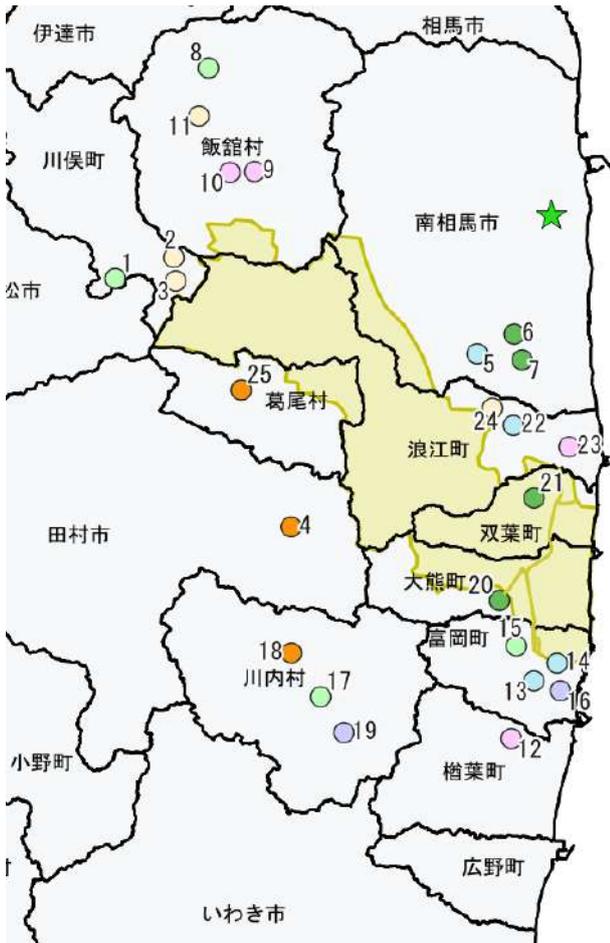
引用文献

齋藤隆・松木伸浩.2016 排水不良の除染後農地では地力増進作物としてセスバニアが適する,平成 28 年度営農再開実証技術情報

齋藤隆・松木伸浩.2016 雑草を含む地力増進作物のすき込みは土壌中の可給態窒素を増加させる,平成 28 年度営農再開実証技術情報

Inoue, Y., Saito, T., Iwasaki, A., Nemoto, T., Ono, T. 2020. Hyperspectral assessment of soil fertility in farm fields in Fukushima decontaminated after the radioactive fallout.

Soil Science and Plant Nutrition, 66, 820-827



帰還困難区域

市町村	番号	試験研究課題
川俣町	1	山木屋在来ソバの栽培実証
	2	牧草の生産性向上技術実証
	3	除染後農地における牧草と飼料用トウモロコシ二毛作栽培体系の実証
田村市	4	カンショ栽培の効果的な除草と鳥獣害対策の実証
南相馬市	5	マメ科緑肥作物すき込みによる水稻高密度播種苗栽培の実証
	6	保全管理期間中のスギナ防除の実証
	7	園芸品目の栽培に向けた緑肥作物の選定
飯館村	8	ソバ品種「にじゆたか」の安定生産技術の確立
	9	阿武隈中山間地域におけるカラーの栽培実証
	10	阿武隈中山間地域におけるキンギョソウの栽培実証
	11	水田放牧に適した牧草の選定と栽培体系の実証
楢葉町	12	浜通り平坦地域におけるユウカリ栽培の実証
富岡町	13	除染後水田におけるふくひびきの湛水直播栽培の実証
	14	除染後農地における水稻有機栽培に向けた栽培実証
	15	晩生品種の導入による秋ソバの作期拡大の実証
川内村	16	水稻湛水直播栽培における鳥害の実態把握
	17	ソバ栽培における排水対策の実証
	18	有機栽培に向けたフェネル栽培の実証
	19	ワイヤーメッシュ柵による防護柵管理労力削減の実証
大熊町	20	緑肥作物の組合せによる農地保全管理技術の実証
双葉町	21	特定復興再生拠点区域における緑肥作物による生産性向上の実証
浪江町	22	籾殻くん炭を活用した塩化カリ代替効果の検証
	23	営農再開地域におけるトルコギキョウ斑点病に対する防除体系の実証
	24	緑肥作物すき込みによる飼料用トウモロコシの収量確保技術の実証
葛尾村	25	中山間地域に適したピーマンかん水技術の実証

図1 令和3年度避難指示区域等における営農再開のための実証研究



図 2 農地除染（表土剥ぎ＋客土）の様子

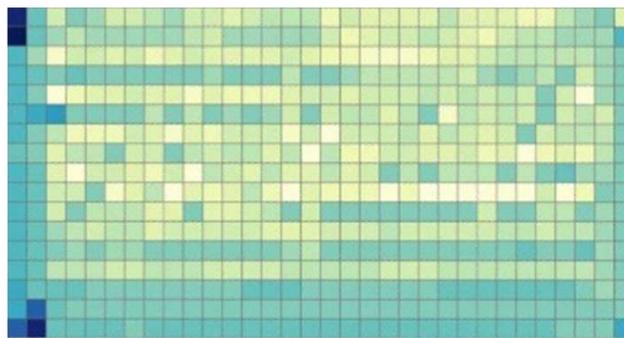


図 3
トラクタ搭載型の計測機と土

壤肥沃度測定結果のイメージ

表1 各区のイタリアンライグラスの乾物重

前作	年次	乾物重 (kg DW /10a)
セスバニア	2017	461 ± 124
	2018	441 ± 113
クロタリア	2017	236 ± 71
	2018	166 ± 5.7
無栽培	2017	80 ± 11
	2018	14 ± 6.0



表2 耕起前・すき込み前の土壌の容積重および三相分布

採取時期	区名	容積重	気相率	液相率	固相率
		(g/100mL)	(%)		
耕起前	クロタリア	155 ± 3.8	31.7 ± 1.9	20.1 ± 0.6	48.2 ± 2.1
	セスバニア	149 ± 7.5	35.3 ± 2.9	18.5 ± 1.4	46.2 ± 3.5
	無栽培	152 ± 7.1	32.5 ± 1.3	20.5 ± 0.8	47.0 ± 1.8
すき込み前	クロタリア	162 ± 3.0	23.0 ± 2.7	28.1 ± 2.1	48.9 ± 1.1
	セスバニア	158 ± 3.9	25.4 ± 2.9	26.9 ± 3.6	47.6 ± 1.6
	無栽培	173 ± 6.7	16.1 ± 4.9	32.4 ± 4.0	51.5 ± 1.7

動きにくいセシウムの3つのかたち

○山口紀子（農研機構農業環境研究部門）

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故（以後、福島原発事故と略）により放出された放射性セシウムの大部分は水に溶けやすい形態、あるいは水に溶けた状態で土壌や植物の表面に沈着した。もともとは水に溶ける状態にあったにもかかわらず、いったん土壌に入った放射性セシウムのほとんどは、容易に溶け出すことができなくなる。それは、土壌中に含まれる鉱物の一種である風化雲母が放射性セシウムを固定し、閉じ込める特性を持つためである。植物の表面に沈着し放射性セシウムは、一度植物に取り込まれた後で土壌に戻るが、すぐには風化雲母に固定されずに植物遺体由来の有機物中にとどまる場合がある。また、福島原発事故で放出された放射性セシウムのごく一部は、ガラスに閉じ込められた動きにくい形態で地表に沈着したこともわかってきた。本講演では、これらの水に溶けだしにくく動きにくい放射性セシウムの形態について、最近の研究成果も交えて紹介する。

2. 土壌中の鉱物がセシウムを動きにくくする

プラス電荷を持つ陽イオンであるセシウムイオン(Cs^+)は、マイナス電荷を持つ鉱物に吸着する。土壌中でマイナスの電荷を持つ主要成分は粘土鉱物と腐植物質である。土壌中には、植物の養分となるカリウムイオン(K^+)やカルシウムイオン(Ca^{2+})などの陽イオンが、 Cs^+ よりも多量に存在している。腐植の持つマイナスの電荷は、放射性 Cs^+ よりも Ca^{2+} のような多価イオンと親和性が高く、土壌中で放射性 Cs^+ を吸着する能力はほとんどない。

土壌中には構造や特徴の異なるさまざまな鉱物が存在するが、放射性セシウムを吸着する能力が高いのは、2:1 型層状ケイ酸塩とよばれる種類の粘土鉱物である。2:1 型層状ケイ酸塩鉱物は、図 1 に示すように、負電荷を持つシートが重なりあった層状構造をもち、層間に陽イオンを吸着する。層間の陽イオンは別の陽イオンに置き換わることが可能であり、このような反応をイオン交換反応という。放射性 Cs^+ はこのイオン交換反応により、2:1 型層状ケイ酸塩鉱物の層間にもともとあった陽イオンと入れ替わることで吸着する。いったん層間に吸着した放射性 Cs^+ は再びイオン交換により他の陽イオンと入れ替わることで、溶出する。このように一時的に保持されている放射性 Cs^+ は、交換態放射性 Cs とよばれる。

2:1 型層状ケイ酸塩の一種に、雲母とよばれる鉱物がある。2:1 型層状ケイ酸塩の層間に面した部分には、 K^+ の大きさに近い空洞があるが、雲母の層間は、空洞にちょうどはまりこむ K^+ によって占有され、層間が閉じている。このため雲母の層間の K^+ は、他の陽イオンと入れ替わることができず、イオン交換反応はおこらない。ところが風化した雲母では、貼り合わせた紙の端や破れた部分がめくれあがるように、雲母のシートどうしが離れ、層間が広がる。 K^+ が存在し層間が開かない領域と、層間が広がった領域の境目にあたる部分は、フレイドエッジサイト(Frayed edge site:FES)とよばれる。FES は層間の一部であり、イオン交換反応が可能である。しかし、空間的制約からイオン交換反応により吸着できるイオンは、空洞の大きさにイオンサイズの近いイオンに限られる。 Cs^+ は

この条件を満たすため、他の陽イオンに妨害されることなく FES を占有できる。また、FES に放射性 Cs⁺ が吸着後に層間が閉じると、放射性 Cs⁺ が固定され、容易に溶出されなくなる。

FES は、バーミキュライトやイライトなど雲母が風化した粘土鉱物の一部に存在するだけで、土壤のマイナス電荷の 1% にも満たない場合が多い。それにもかかわらず、土に沈着した放射性 Cs の大部分が土にとどまるのは、放射性 Cs と比較して十分な量の FES が存在するからである。土壤がどの程度 FES を持つかは、放射性 Cs 捕捉ポテンシャル (Radiocesium Interception Potential: RIP) という指標で評価できる。RIP は、土壤中有機物含量が多いほど低い傾向があったが、粘土含量とは関係がなかった (Yamaguchi et al., 2017)。これは、FES をもつ風化雲母が、土壤中粘土画分の主要構成成分ではないためであるが、詳しくは中尾氏の講演で解説する。

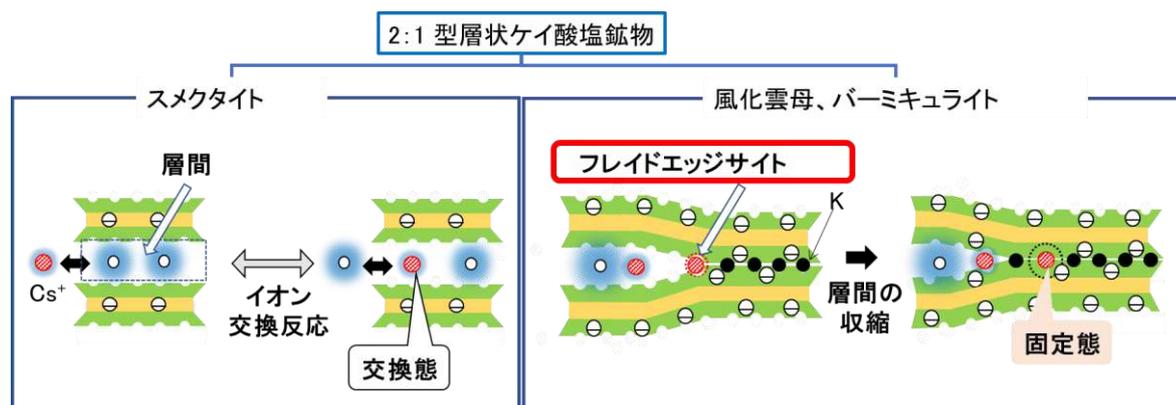


図 1. 土壤中の負電荷部位と放射性セシウムの関係

3. 有機物がセシウムを閉じ込める？

土壤中の有機物の大部分は、植物や微生物を構成していた有機物から二次的に生成し、長期間安定に存在する腐植物質である。分解過程の生物遺体や生体構成分子は腐植物質には含まれないが、土壤有機物の構成成分として重要である。2011 年 3 月の福島原発事故により放出され、地表に沈着した水溶性放射性セシウムの一部は、植物の表面に付着し、植物体内に取り込まれた。枯れた植物は放射性セシウムを含んだまま分解し、土壤有機物の構成成分となった。畑地や水田では、枯死した作物残渣は耕起などにより土壤とよく混合され、比較的早く分解される。一方で耕起をおこなわない牧草地や森林では、表層に十分に分解のすすんでいない有機物が蓄積する。ヨーロッパの森林では、表層に蓄積した有機物中の放射性セシウムが有機物から溶出し、土壤鉱物に吸着される前に植物に吸収され、再び枯死して土壤表層に戻る、という有機物を介した放射性セシウムの循環がおきている (Kruyts and Delvaux, 2002)。一方、日本の森林では福島原発事故後 1～2 年で表層有機物に含まれる放射性セシウムの大部分が、下層の鉱質土壤に移行し、鉱物に固定されることが明らかにされた (Imamura et al., 2020)。このように有機物の多い土壤環境下では、有機物の分解されやすさが、放射性セシウムの動態に影響をおよぼしている。

枯死した植物は、土壤生物や微生物により細断、分解される。そして微生物が分泌する代謝産物が糊の役割をし、有機物と鉱物が複合体を形成した団粒が形成される。Mukai et al. (2014) は、福島県内の森林で採取した土壤粒子をイメージングプレートで感光させ、放射性セシウムを濃縮し

ている粒子を単離して電子顕微鏡で観察した。単離した粒子は、風化雲母、粘土の凝集体と有機物-粘土複合体であった。また、Tsukada et al. (2021)は、福島原発事故から8年後の草地土壌では、有機物と鉍物からできた団粒画分の放射性セシウム濃度が、土壌鉍物画分よりも高いことを見出した。事故当時に作物に沈着した放射性セシウムが、有機物と鉍物からなる団粒内に残留していることを示唆している。この結果は有機物が団粒内に隔離されることで微生物分解を受けにくくなり、比較的長期間保存されることと整合性がある。団粒内に保存された放射性セシウムがどのような環境下でどの程度の期間保存されるのかは不明であり、継続的なモニタリングが必要である。

4. ガラス微粒子に閉じ込められて放出された放射性セシウム—放射性微粒子

Adachi et al. (2013)は、福島原発事故由来のプルームが到達した2011年3月14日に大気降下物を回収したフィルターから、1粒子あたり0.4~4 Bqの放射性セシウムを含む直径2 μmの不溶性の球状粒子を発見した(図 2A)。この球状粒子は、発見当初はセシウムボールと呼ばれていた。セシウムボールは、放射性セシウムを含むケイ酸ガラスであり、原子炉内で生成して飛散したものである(Igarashi et al., 2019)。しかし球状ではない不定形の粒子(図 2B)も発見されたことから、最近では放射性微粒子という呼称が使われている。放射性微粒子は溶けにくい粒子ではあるが、湿潤環境下で徐々に溶解し、放射性セシウムを放出すると考えられる。酸性条件下よりもアルカリ条件下で溶解しやすく、水温13°Cでは、純水では70年、海水では10年程度で半径1 μmの放射性微粒子が完全に溶解すると見積もられた(Okumura et al., 2019)。福島原発事故で放出された放射性セシウムに放射性微粒子由来の放射性セシウムが占める割合は、現在のところ明らかになっていない。しかし、数 Bq の粒子が少量土壌に混入しても土壌中放射性セシウム濃度は大きく変動しないこと、放射性微粒子の溶解により放出された放射性セシウムは鉍物に固定されることから、土壌への放射性微粒子の混入が作物による放射性セシウムの吸収におよぼす影響は極めて小さいといえるだろう。

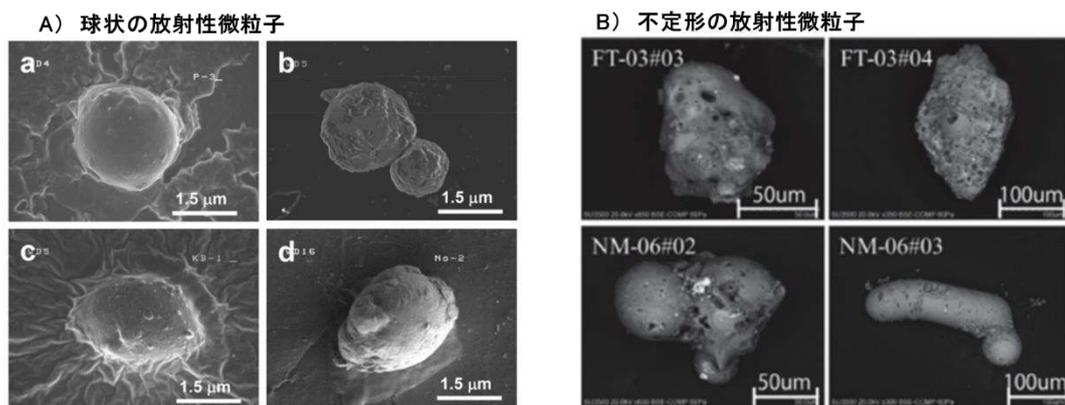


図2 放射性微粒子の電子顕微鏡写真(Igarashi et al. 2019 図8, 図17より抜粋)

5. まとめ

福島原発事故により土壌に沈着した放射性セシウムの大部分は、風化雲母に固定され、動きにくい形態で存在している。しかし、新たな研究から、有機物と鉱物から構成される団粒やケイ酸塩ガラス微粒子に閉じ込められた放射性セシウムが存在することが明らかになってきた。これらを放射性セシウムの動態を考えるうえでどの程度考慮する必要があるかについては、今後の研究で明らかにしていく必要がある。

謝辞

本研究は、平成 24 年度科学技術戦略推進費「ほ場環境に応じた農作物への放射性物質移行低減対策確立のための緊急調査研究」、農林水産省委託プロジェクト「農地等の放射性物質の除去・低減技術の開発－農地土壌における放射性セシウム動態予測技術および拡散防止技術の開発（平成 25-26 年度）」、平成 31 年度放射能調査研究委託事業「農林生産環境中における、放射性核種の濃度変動の要因と動態の解明」、科学研究費補助金 基盤研究 A(課題番号:19H01145, 代表:東京大学 小暮敏博, 課題番号 26252009:, 代表:愛知大学 小崎隆)の一部で実施した。この研究を実施するにあたり、ご協力いただいた県試験場担当者の皆様、共同研究者の皆様に心より感謝申し上げます。

引用文献

- Adachi, K., Kajino, M., Zaizen, Y. et al. 2013. Emission of spherical cesium-bearing particles from an early stage of the Fukushima nuclear accident. *Sci Rep* 3, 2554.
- Igarashi, Y., Kogure, T., Kurihara, Y. et al. 2019. A review of Cs-bearing microparticles in the environment emitted by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.* 205-206, 101-118.
- Imamura, N., Komatsu, M., Hashimoto, S., Fujii, K., Kato, H., Thiry, Y., Shaw, G. 2020. Vertical distributions of radiocesium in Japanese forest soils following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident: A meta-analysis. *J. Environ. Radioactiv.*, 225. 106422.
- Kruyts, N. and Delvaux, B. 2002. Soil organic horizons as a major source for radiocesium biorecycling in forest ecosystems. *J. Environ. Radioact.* 58, 175-190.
- Mukai, H., Hatta, T., Kitazawa, H., Yamada, H., Yaita, T., Kogure, T. 2014. Speciation of Radioactive Soil Particles in the Fukushima Contaminated Area by IP Autoradiography and Microanalyses. *Environ. Sci. & Technol.*, 48, 13053-13059.
- Okumura, T., Yamaguchi, N., Dohi, T. et al. 2019. Dissolution behaviour of radiocaesium-bearing microparticles released from the Fukushima nuclear plant. *Sci Rep* 9, 3520.
- Tsukada, H., Yamada, D., Yamaguchi, N. 2022. Accumulation of ¹³⁷Cs in aggregated organomineral assemblage in pasture soils 8 years after the accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant. *Sci. Total Environ.* 806, 150688
- Yamaguchi, N., Tsukada, H., Kohyama, K. et al. 2017. Radiocesium interception potential of agricultural soils in northeast Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* 63, 119-126.

作物を放射能汚染から守る黄砂の力

○中尾 淳（京都府立大学）

1. はじめに

自然には様々な顔があります。普段何気なく接しているものにも見過ごされている良い面があり、人や社会に恩恵をもたらしています。

黄砂に放射能汚染から「作物を守る力」があることは、これまで完全に見過ごされてきましたが、福島原発事故が起きたことで、初めてその重要性が認識されました。ここで、「作物を守る力」と表現したのは、黄砂の主成分として含まれる鉱物が、放射性セシウムを強く吸着し作物による吸収を抑える力のことです。その鉱物とは、風化雲母やバーミキュライトなどの雲母系鉱物であり(詳しくは山口氏の講演で解説)、これを含む黄砂が地球史を通じて日本に降下・堆積し続けたことで、日本の土壌が放射性セシウムを吸着する力は大きく向上している実態が最近の研究から明らかになってきました(Nakao et al., 2015)。

本演題では、まず黄砂の発生源や成分、および土壌に混じった際の見分け方について紹介します。続いて、黄砂の交じりが少なく放射性セシウムが動きやすい土壌が分布する場所の見分け方とその根拠についてお話しします。そして最後に、作物を放射能汚染から守る黄砂の力を福島の農業復興にどう生かすのかについて、考えを述べていきます。

2. 黄砂の発生源、成分、および土壌に混じった際の見分け方

黄砂とは、ゴビ砂漠やタクラマカン砂漠などの大陸内陸部の乾燥地帯で巻き上げられ、偏西風によって広域輸送された土壌・鉱物粒子が、空中に飛揚しながら徐々に沈降する気象現象のことであり、古くから春の風物詩として身近な存在でした。黄砂の一部は、降雪の氷晶核として主に日本海側の陸地に速やかに沈降し、一部は空中に飛揚しながら日本列島のほぼ全域に徐々に沈降します。その堆積速度は概ね $5\sim 10 \text{ g m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ ですが、最終氷期最盛期には現在の数倍の堆積速度であったことが知られています(吉永, 1998)。

黄砂は、主に数マイクロから数十マイクロメートル程度の粒径を示す微細な鉱物粒子の集合体であり、石英、長石、緑泥石、方解石、カオリナイト、酸化鉄などとともに、イライトやバーミキュライトなどの雲母系鉱物も含んでいます。微細で部分的に風化した雲母系鉱物は、放射性セシウムを吸着する高い機能を備えているため(Sawhney, 1972)、この鉱物が多く混じった土壌では作物による放射性セシウムの吸収は起こりにくくなります(Kurokawa et al., 2020)。ただし、土壌中の微細な雲母系鉱物が常に黄砂を起源とするとは限りません。なぜなら、日本列島を形成する主な基岩である花崗岩や頁岩にも黒雲母やイライトなどの雲母系鉱物が含まれており、これらが風化を受け細粒化した可能性も十分考えられるためです。雲母系鉱物以外の黄砂成分も、土壌鉱物としてありふれたものばかりなので、これらが含まれること自体は、黄砂の混入を示す手掛かりにはなり得ません。

土壌への黄砂の混入を示す有力な証拠となるのが、微細石英の酸素同位体比です。全酸素の0.2%ほど存在する ^{18}O が鉱物に含まれる割合 ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) は、鉱物が結晶化した際の温度が高いほど少なくなり、標準海水の $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 値との千分率で表す $\delta^{18}\text{O}$ の値は火山岩では 10‰以下となり、

堆積岩の多くでは 20%以上となります。これに対して日本に飛来する黄砂に含まれる微細石英の $\delta^{18}\text{O}$ 値は 15~17‰というかなり狭い範囲の値を取ることが分かっています(溝田・井上, 1988)。そこで演者らは、土壌から微細石英を単離し、レーザーフッ化システムと接続した安定同位体比測定用質量分析装置(Tanaka and Nakamura, 2013)を用いて $\delta^{18}\text{O}$ 値を求めることで土壌への黄砂の混入の有無を確かめることにしました。

3. 放射性セシウムが動きやすい土壌とは？

福島県東部に広く分布する花崗岩帯の土壌には、花崗岩に元々含まれる黒雲母などの雲母系鉱物が豊富に存在しますので、黄砂の混じり具合を考慮する必要性は低いでしょう。それに対して、畑地や牧草地として広く利用される黒ボク土の場合、主な母材とされる火山灰には雲母系鉱物がほとんど含まれません。そのため、黒ボク土に黄砂が混じることの意義は大きく、逆にその割合が減少する程、雲母系鉱物の量が減少し、放射性セシウムが動きやすくなるはずですが、黄砂が混じる割合が小さい黒ボク土はどこに分布しているのか？その情報を正確に把握することは作物を放射能汚染から守るために非常に重要です。演者らの研究グループは、火山に近い場所ほど火山灰の降下量が増加するため、過去に累積した黄砂が希釈されると仮定し(図 1)、これを検証するためのモデル実験を熊本県阿蘇山周辺に分布する黒ボク土を用いて実施しました。

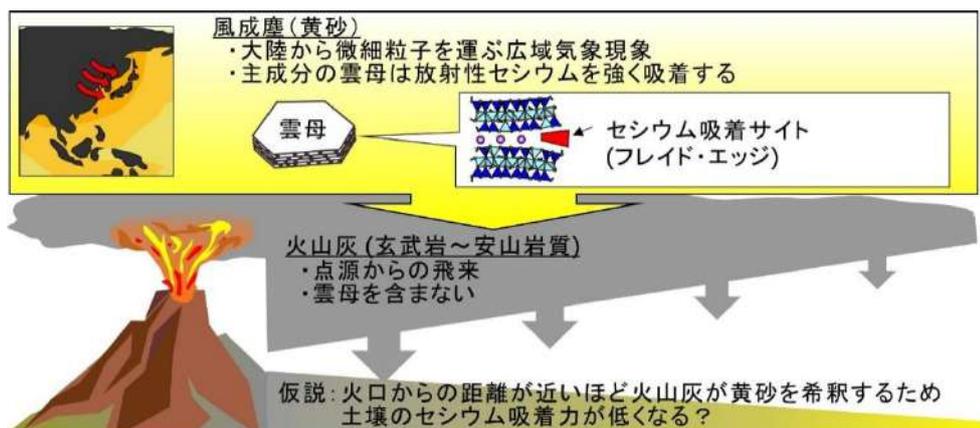


図 1. 火口から離れるにつれて火山灰に対する黄砂の混入割合が増加するイメージ。

阿蘇山の試料を用いた理由は、中岳火口から約 10, 14, 16, 32 km に位置する 4 地点 (Site 1, Site 2, Site 3, Site 4) の安定地形面に火山灰の累積層の露頭があり(図 2)、それぞれ異なる深さに年代が判別されている火山灰層(鍵層)が確認されていたためです。Site 1, Site 2 の場合は鬼界アカホヤ層(K-Ah: 7,300 年前)がそれぞれ、285~300 cm と 107~127 cm の深さにあり、Site 3, Site 4 では草千里ヶ浜軽石層(Kpfa: 3 万年前)がそれぞれ 383~431 cm と 140~150 cm にあり、火口から離れるほど古い年代の鍵層が浅い位置にあることが分かります。各地点の累積層から土色や固さなどに基づいて細分化した識別層ごとに土壌を採取し、 $<2\ \mu\text{m}$ および $2\text{--}20\ \mu\text{m}$ 粒子を分画しました。粘土、シルトと呼ばれるこれらの粒子画分は、日本に飛来する黄砂とほぼ同じ粒径範囲です。この分画粒子に含まれる雲母系鉱物および石英量を求めるとともに、石英の $\delta^{18}\text{O}$ 値を測定しました。さらに、これらの分画粒子の持つ放射性セシウムを吸着する力を知るために、放射性

セシウム捕捉ポテンシャル(RIP)の測定を行いました。



図 2. Site 1～4の火山灰累積層の露頭の様子。

その結果、各層の粘土・シルト画分に含まれる雲母系鉱物および石英量と RIP は、相互に高い相関関係を示すとともに、火口から離れた場所ほど (Site 1→4) 値が増加する傾向を示しました。石英の単離量が多かった Site 3 と Site 4 について $\delta^{18}\text{O}$ 値を求めたところ、それぞれ $15.8 \pm 0.4\text{‰}$ 、 $16.3 \pm 0.2\text{‰}$ と狭い範囲の値となり、石英の起源がほぼ黄砂由来で間違いないことが確認できました。さらに、表層から K-Ah 層または Kpfa 層までの累積層の総量自体は地点ごとに大きく異なるにもかかわらず、その中に含まれる雲母・石英の総量は地点間でほぼ同量であることが分かりました。これらの結果は、黒ボク土の粘土・シルト画分に含まれる雲母系鉱物がほぼ全て黄砂に由来し、黒ボク土の放射性セシウムを吸着する力のほとんどが黄砂由来の雲母系鉱物量のみで決定されることを示しています。

さらに重要なこととして、火口から 32 km 離れた Site 4 では、RIP の値がほぼ全ての層位で 1 mol kg^{-1} を超えることが分かりました。先行研究の結果から、RIP が 1 mol kg^{-1} 以上あれば作物への放射性セシウムの移行は大きく抑制されることが分かっています (Takeda et al., 2015)。つまり、主となる母材に雲母系鉱物が全く存在しない場合でも、黄砂がある程度 (概算で 20 wt% 程度) 混入していれば、その土壤は放射能汚染から作物を守る力が十分あることが分かりました。

ただし、このモデル実験のように主な火山灰の供給源が 1 つの場合と比べると、複数の火山が連なる東北地方では、火口からの距離と黄砂の混じる度合いの関係は、より複雑で分布則の解明がやや困難です。本講演では東北地方の黒ボク土に含まれる黄砂に関する研究の進捗状況についても紹介する予定です。

5. まとめ

黄砂は安定地形の表層に時間をかけて蓄積します。今回紹介したような雲母系鉱物を含まない火山灰の堆積という自然現象だけでなく、造成の際に表層土壌を剥ぎ取り、代わりに雲母系鉱物を含まない客土材を加えるような人為的改変によっても、作物を放射能汚染から守る土壌の力は低下するでしょう。この力が小さい土壌については、放射性セシウムの移行抑制対策としてカリウムの追加的な施用が推奨されます(詳しくは藤村氏の講演で解説)。放射性セシウムを強く吸着する土壌の力の源を知り、その力の大きさが土壌ごとに異なる法則を理解していくことは、対策の使い分けや無駄遣いを回避するために重要です。今後の特定復興再生拠点における除染や営農再開に向けて、こうした土壌情報が有効活用されることを期待します。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金 若手研究 A(課題番号:16H06188, 代表:京都府立大学 中尾 淳), 科学研究費補助金 基盤研究 A(課題番号 26252009:, 代表:愛知大学 小崎隆)の一部で実施しました。この研究を実施するにあたり、ご協力いただいた共同研究者の皆様にご心より感謝申し上げます。特に岡山大学惑星物質研究所の田中亮吏氏には、微細石英の酸素同位体比分析に関して、農研機構の久保寺秀夫氏には阿蘇山における土壌調査において多大なるご協力をいただきました。

引用文献

- Kurokawa, K Nakao, A., Wakabayashi, S., Fujimura, S., Eguchi, T., Matsunami, H., Yanai, J. 2020. Advanced approach for screening soil with a low radiocesium transfer to brown rice in Fukushima based on exchangeable and nonexchangeable potassium. *Sci.Total Environ.*, 743, 140458
- 溝田智俊・井上克弘 1988. 風成石英粒子の酸素同位体組成— そのトレーサーとしての意義—. *粘土科学*, 28, 38-54.
- Nakao, A., Nakao, A., Tanaka, R., Ogasawara, S. and Yanai, J. 2015. Aeolian-dust-derived micaceous minerals control radiocesium retention in Andosols in Japan. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 79, 1590-1600.
- Nakao, A., Uno, S., Yanai, J., Kubotera, H., Tanaka, R., Root, R.A., Kosaki, T. 2021. Distance-dependence from volcano for Asian dust inclusions in Andosols: a key to control soil ability to retain radiocesium. *Geoderma*, 385, 114889.
- Sawhney, B.L. 1972. Selective sorption and fixation of cations by clay minerals : A review. *Clays Clay Miner.*, 20, 93-100.
- Takeda, A., Tsukada, H., Yamaguchi, N., Takeuchi, M., Sato, M., Nakao, A. and Hisamatsu, S. 2014. Relationship between the radiocesium interception potential and the transfer of radiocesium from soil to soybean cultivated in 2011 in Fukushima Prefecture, Japan. *J. Environ. Radioact.*, 137, 119-124.
- Tanaka, R., Nakamura, E., 2013. Determination of ^{17}O -excess of terrestrial silicate/oxide minerals with respect to Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW): ^{17}O -excess of terrestrial silicate/oxide minerals. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 27, 285-297.
- Yamaguchi, N., Tsukada, H., Kohyama, K. et al. 2017. Radiocesium interception potential of agricultural soils in northeast Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* 63, 119-126.
- 吉永秀一郎 1998. 日本周辺における第四紀後期の広域風成塵の堆積速度. *第四紀研究*, 37, 205-210.

カリウム肥料を撒くことの効果－水稲－

○藤村恵人（農研機構東北農業研究センター）

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所において 2011 年 3 月に事故が発生し、福島県を中心とした広い範囲に放射性物質が沈着した。沈着した放射性物質のうち放射性セシウム(Cs-134 および Cs-137)は半減期が比較的長く、また、作物に比較的吸収されやすいため、内部被曝要因として注意を要する。今回の原発事故により放射性セシウムが沈着した地域では、農産物の放射性セシウム濃度を抑制するために通常よりも多くのカリウム肥料が撒かれてきた。本稿では、カリウム肥料の施用による放射性セシウム吸収抑制対策の科学的根拠を紹介するとともに、吸収抑制対策の今後の方向性について論じる。

2. カリウム施用による放射性セシウムの吸収抑制

セシウムはカリウムと同じアルカリ金属であり、化学的性質がカリウムと似ている。そのため、セシウムはカリウムの輸送経路により植物に吸収され(Qi et al., 2008)、カリウムとセシウムの吸収は拮抗する。したがって、植物にとって利用可能なカリウムが土壤中に存在することにより、植物によるセシウムの吸収は効果的に阻害される(Shaw and Bell, 1991)。このことは今回の原発事故以前から知られていたことではあるが、今回の原発事故被災農地での農産物栽培におけるカリウム施用の効果は、当然ながら、検証されていなかった。

2011 年に玄米の放射性セシウム濃度が暫定規制値(500Bq/kg)を超過した水田を含む、福島県内の隣接した水田 5 筆の調査により、玄米の放射性セシウム濃度は収穫時の土壤中交換性カリウム含量と負の相関関係にあることが明らかとなった(Saito et al., 2012)。Kato et al.(2015)は福島県、栃木県、茨城県および群馬県の水田における調査結果を解析し、土壌から玄米への移行係数(玄米中放射性セシウム濃度/土壤中放射性セシウム濃度の比)は収穫時の土壤中交換性カリウム含量と負の相関関係にあることを明らかにした。また、玄米への放射性セシウムの移行を抑制するために、通常の施肥や稲わら・堆肥施用に上乗せしたカリウム施用(カリウム上乗せ施用)の実施を提言した。さらに、福島県内の水田土壌を供試したポット栽培試験により、カリウム施用による水稲の放射性セシウム吸収抑制効果が確かめられた(Fujimura et al., 2013)。これらの知見に基づいて、2012 年から福島県等では通常施肥前の土壤中交換性カリウム含量を 25mg/100g 以上とする指導が行われるようになった。なお、Suzuki et al.(2015)のポット栽培試験により、灌漑水に含まれる放射性セシウムの吸収に対してもカリウム施用が抑制効果を持つことが明らかとなっている。

3. カリウム施用の効果

福島県においては 2011 年に玄米で暫定規制値を超過するリスクが高いと考えられた一部地域において抽出検査と全袋検査が行われた(藤村ら, 2021)。その結果, 39 検体(全 26,464 検体)で暫定規制値の超過が確認された。2012 年からは出荷前の全袋検査(1 袋 30kg, 約 1,000 万袋)が開始された。一般食品の基準値(100Bq/kg)を超過した検体の割合は 2012 年の 0.0008%から 2014

年の 0.00002%まで低下し、2015 年以降は基準値を超過した玄米は検出されていない。水田で生産される玄米の放射性セシウム濃度が低下した要因としては、カリウム施用による放射性セシウムの吸収抑制、放射性セシウムの土壌粒子への固定(Sawhney, 1966)および放射性セシウムの物理的・環境的減衰が考えられる。

カリウム施用による放射性セシウムの吸収抑制効果には上述した吸収における拮抗作用以外に、土壌中の交換性放射性セシウム濃度の低下および玄米への放射性セシウム分配率の低下が含まれる(Ishikawa et al., 2021)。土壌中の交換性 Cs-137 濃度は交換性カリウム含量とともに、玄米の放射性 Cs-137 濃度の説明変数として有効であり、交換性 Cs-137 濃度の減少に伴い玄米の放射性 Cs-137 濃度が減少することが報告されている(矢ヶ崎ら, 2019)。カリウム施用による交換性放射性セシウム濃度の低下は水田土壌を供試したポット栽培試験で観察されている(Ishikawa et al., 2018)。また、カリウム施用の増加に伴い可食部である子実への放射性セシウムの分配(子実の放射性セシウム濃度/植物体の放射性セシウム濃度の比)が低下することが玄米で報告されている(Ishikawa et al., 2018)。

4. 交換性カリウム含量の維持

福島県では、カリウム上乗せ施用をせずに玄米を栽培する 1 年の実証試験が 2015 年に市町村単位で開始された。これらの実証試験により玄米の放射性セシウム濃度が 25 Bq/kg(全量全袋検査の検出下限値)を超過しないことが確かめられた後に多くの市町村で一律のカリウム上乗せ施用のための肥料配布が中止された。しかし、今後の栽培管理においては交換性カリウム含量を減少させないことが引き続き必要であると考えられる。すなわち、不十分なカリウム施用条件で 2014 年に栽培試験が実施された水田では 500Bq/kg を超過する玄米が生産されたこと(Ishikawa et al., 2017)や 2019 年においても土壌中の交換性カリウム含量が少ない条件では移行係数が高まりやすいこと(農研機構, 2021)が報告されている。さらに、カリウム上乗せ施用中止後に、カリウム施用が十分でない栽培管理が続けられた場合には、交換性カリウム含量が減少し、玄米の放射性セシウム濃度が増加する事例が報告されている(藤村ら, 2020)。交換性カリウム含量を減少させないためには、栽培指針に基づくカリウム施肥や稲わらの還元、堆肥施用が有効である(農研機構, 2021)。

5. 今後の放射性セシウム吸収抑制対策

カリウムの無施用栽培を数年継続しても交換性カリウム含量の減少や玄米中放射性セシウム濃度の増加が生じない水田もある(藤村ら, 2020)。このことから、これまでのように、広い地域で一律の放射性セシウム吸収抑制対策を講じるのは労力やコスト、環境保全の面から好ましくなく、それぞれのリスクに応じた対策を講じるのがよいと考えられる。不十分なカリウム施用を継続した場合に玄米の放射性セシウム濃度が増加するリスクを、個々の水田において評価する手法として、筆者らは水田に埋め込んだポットにおいて根域を制限した状態で水稻を栽培することが有効であることを報告した(藤村ら, 2020)。しかしながら、全ての水田についてこの手法を実施することは現実的ではない。そこで筆者らは、土壌から玄米への放射性セシウムの移行に関与する土壌の交換性放射性セシウム濃度や非交換性カリウム含量(Kurokawa et al., 2020)、カリウム溶脱等から玄米中放射性セシウム濃度の基準値超過リスクを評価し、リスクに合わせた対策を提示するためのツール開発

に取り組んでいる。

引用文献

- 藤村恵人・石川淳子・新妻和敏・若林正吉・信濃卓郎 2020, 玄米中の放射性セシウム濃度上昇リスク評価法の開発. 土肥誌, 91, 237-244.
- 藤村恵人・久保堅司・松波寿弥・八戸真弓 2021. 国内主要農産物に関する放射性セシウムの低減技術. 食品と容器, 62, 436-443.
- Fujimura, S., Yoshioka, K., Saito, T., Sato, M., Sato, M., Sakuma, Y., Muramatsu, Y., 2013. Effects of applying potassium, zeolite and vermiculite on the radiocesium uptake by rice plants grown in paddy field soils collected from Fukushima Prefecture. *Plant Prod. Sci.* 16, 166-170.
- Ishikawa, J., Fujimura, S., Kondo, M., Murai-Hatano, M., Goto, A., Shinano, T., 2018. Dynamic changes in the Cs distribution throughout rice plants during the ripening period, and effects of the soil-K level. *Plant Soil* 429, 503-518.
- Ishikawa, J., Fujimura, S., Murai-Hatano, M., Baba, K., Furuya, M., Goto, A., Kondo, M., 2021. Changes in cesium distribution in field-grown rice plants throughout the cultivation period. *Plant Soil*, 受理.
- Ishikawa, S., Hayashi, S., Abe, T., Igura, M., Kuramata, M., Tanikawa, H., Iino, M., Saito, T., Ono, Y., Ishikawa, T., Fujimura, S., Goto, A., Takagi, H., 2017. Low-cesium rice: mutation in OsSOS2 reduces radiocesium in rice grains. *Sci Rep* 7:2432.
- Kurokawa, K., Nakao, A., Wakabayashi, S., Fujimura, S., Eguchi, T., Matsunami, H., Yanai, J., 2020. Advanced approach for screening soil with a low radiocesium transfer to brown rice in Fukushima based on exchangeable and nonexchangeable potassium, *Sci. Total Environ.* 743, 140458.
- 農研機構 2021, 稲作におけるカリ施肥の重要性－放射性セシウム濃度の基準値超過ゼロを続けるために－
- Qi, Z., Hampton, C.R., Shin, R., Barkla, B.J., White, P.J., Schachtman, D.P., 2008. The high affinity K^b transporter AtHAK5 plays a physiological role in planta at very low K^b concentrations and provides a caesium uptake pathway in Arabidopsis. *J. Exp. Bot.* 59, 595-607.
- Saito, T., Ohkoshi, S., Fujimura, S., Iwabuchi, K., Saito, M., Nemoto, T., Sato, M., Sato, M., Yoshioka, K., Tsukada, H., 2012. Effect of potassium application on root uptake of radiocesium in rice. In: *Proceedings of International Symposium on Environmental Monitoring and Dose Estimation of Residents after Accident of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Stations*. Kyoto University Research Reactor Institute, Osaka, 165-169.
- Shaw, G., Bell, J.N.B., 1991. Competitive effects of potassium and ammonium on caesium uptake kinetics in wheat. *J. Environ. Radioact.* 13, 283-296.
- Suzuki, Y., Yasutaka, T., Fujimura, S., Yabuki, T., Sato, M., Yoshioka, K., Inubushi, K., 2015. Effect of the concentration of radiocesium dissolved in irrigation water on the concentration of radiocesium in brown rice, *Soil Sci. Plant Nutr.* 51, 191-199.
- Sawhney, B.L., 1966. Kinetics of cesium sorption by clay minerals. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 30, 565-569.
- 矢ヶ崎泰海・齋藤隆・新妻和敏・佐藤睦人・太田健 2019, 水稻への放射性セシウム移行に対する土壤化学性の違いに応じたリスク管理のための統計モデル I. 統計モデルの選択. 土肥誌, 90, 123-130.

ダイズの放射性セシウム濃度が高い理由

○二瓶直登(福島大学)

1. 農産物のモニタリング検査

東日本大震災に伴う東京電力福島第一原発事故により、広大な地域が放射性物質(主に放射性セシウム)により汚染された。農畜水産物の安全性を確認するために、原子力災害特別措置法に基づく緊急時環境放射線モニタリング検査(以下、モニタリング検査)が実施されている。モニタリング検査では、各地域、各品目別から抽出された試料の放射性セシウム濃度を測定しており、食品衛生法に定める放射性セシウムの基準値(100Bq/kg)を超えた品目は出荷が制限される。福島県では2021年3月までの10年間で、約500品目、約200,000点(米、牧草等除く)を実施しており、検査結果は福島県および厚生労働省のホームページ等で公表している(福島県 HP <https://www.new-fukushima.jp>)。

本検査結果によると、原発事故直後の三か月間に採取された試料で放射性セシウム濃度は特に高い。これは、原発事故時に生育していた作物に、降下した放射性セシウムが直接葉等に付着したからである(最大値はクキタチナの82,000Bq/kg)。2011年7月以降は、事故後に作付された作物が検査対象となり、土壌を介した間接汚染が主な放射性セシウムの吸収経路となった試料の放射性セシウム濃度は大幅に低下し、2015年度以降基準値を超えるサンプルはほとんど検出されていない。

2. モニタリング検査におけるダイズの傾向

基準値以下であるものの放射性セシウムが検出される場合がある。一般にダイズ、小麦、ソバなどの穀類は、トマト、キュウリ、キャベツなどの野菜よりモニタリング検査では基準値以下ではあるが高く推移する。これはモニタリング検査では重量(kg)当たりの放射能(Bq)で示されており、乾燥した子実(水分10~20%)で流通する穀類と、水分が90%程度で水々しい状態で出荷する野菜、果実では、全体(1kg)に対する実の割合が多いため、穀類全般は高めの傾向を示す。さらに、穀類の間では、ダイズが明らかに高い傾向がみられる(Nihei 2016)。ダイズは世界第4位の生産量を占めており、福島県内で約3000haの生産面積があるため農業復興には欠かせない。そこで、ダイズの放射性セシウム吸収の特徴を研究事例の多いイネと比較検討した。

3. セシウムの吸収期間

生育期間中の放射性セシウム吸収量経過では、イネは約90%以上が出穂期前で、主に生育前半のステージでしかセシウムを吸収しない(Nobori et al. 2014)。一方ダイズは開花期期までに約50%、開花期から子実肥大期までに約50%を吸収する(図1, 二瓶 未発表)。このように、ダイズは生育期間の全範囲に渡ってセシウムを吸収し、イネよりセシウムの吸収期間が長い。特に生育中期から後期に当たる生育ステージで吸収されたセシウムが子実のセシウム蓄積量に寄与する。また、体内に取り込まれたセシウムのうち子実(粒)に蓄積する割合は、イネではわずか約10%であるのに対し、ダイズでは40%以上も蓄積し、吸収したセシウムを子実に蓄える割合が多い(図2)。

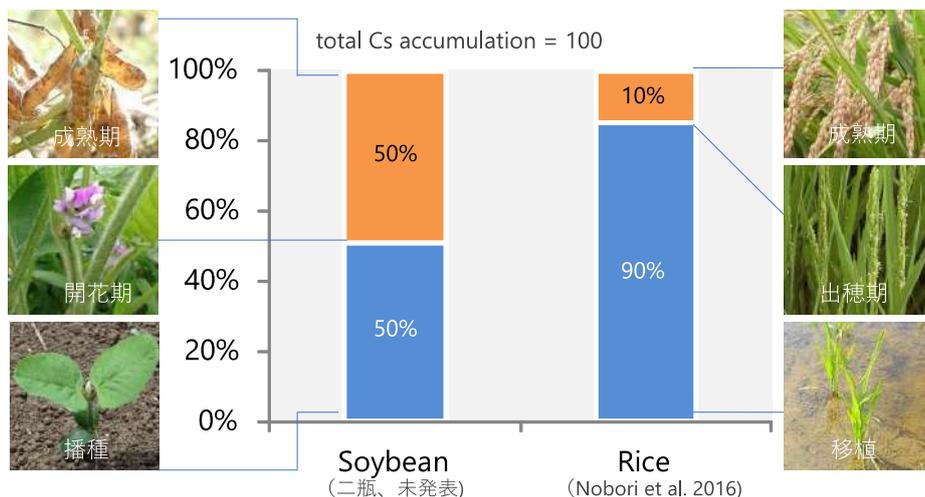


図1 生育時期別のセシウムの吸収割合

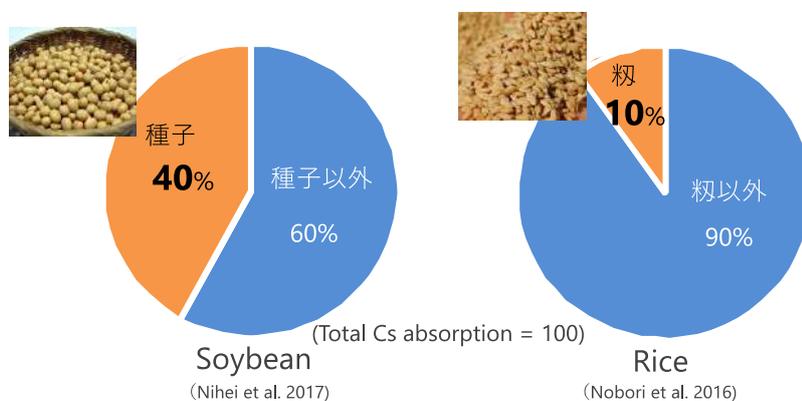


図2 吸収したセシウムの作物体内での分布

4. 子実への放射性セシウム蓄積

なぜダイズとイネでこのように子実に蓄積するセシウム量に差が生まれるのであろうか？その理由を解明するため、人工的に放射性セシウムを添加して栽培したダイズとイネについて、子実内の放射性セシウム分布をオートラジオグラフィで検討した。その結果、ダイズでは子実全体に均一に分布し(Nihei et al. 2017)、イネでは胚と糊粉層など局所的に蓄積しているに過ぎなかった(図3)。つまり、ダイズの放射性セシウム濃度が高い理由の一つは子実構造にあるといえる。玄米はデンプンやタンパク質を蓄積する胚乳が多くを占め、カリウムなどの栄養成分を貯める胚はわずか一部である。これに対し、ダイズの子実は胚乳を持たない無胚乳種子で、子実内の大部分を占める子葉にデンプンやタンパク質とともに栄養成分を蓄積する。

植物体内でカリウムとセシウムの挙動が全く同じかどうかについては検討の余地があるが、一価カチオンとしてある程度同じ挙動をすると仮定すると、その化学性から栄養成分(特にカリウム)を蓄積する組織に貯まると考えられる。そのため、可食部(ダイズの場合子実)を検査対象とするモニタリング検査では、セシウムの吸収期間が長いことに加え、子実内にセシウムを蓄積する容量が多いことがダイズの放射性セシウム濃度が高くなる要因と推定された。なお、ダイズと同じ無胚乳種子

のクリも果樹の中では高い傾向を示す。

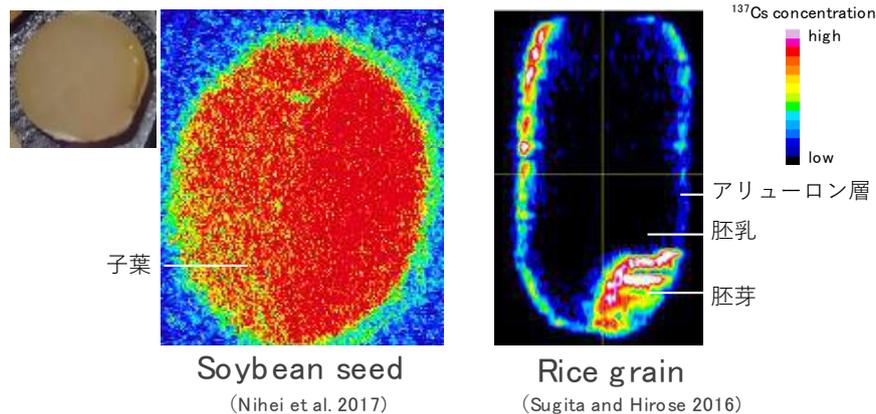


図3 ダイズとイネの子実中の放射性セシウム分布

5. まとめ

ダイズはイネと比較すると約5倍のタンパク質、8倍のカリウム、20倍のカルシウムを含む。日本ではダイズの食文化が根付いており、食卓にはダイズを原料とした品は必ずといっていいほど存在する。我々はこれまで日常的にダイズの恩恵を受けてきたが、これは種子に多量のミネラル、タンパク質を貯蔵できる種子構造のおかげである。残念ながらダイズの放射性セシウム濃度が高い理由も、高栄養を生み出すこの子実構造が要因の一つと考えられた。種子構造は変えることができないため、カリウム施肥等の低減対策により安全なダイズ栽培は十分可能である。さらに、セシウム吸収機構のメカニズムを明らかにすることで、将来的にはセシウムを吸いにくいダイズの育成も可能となると予想される。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金「ダイズの放射性セシウム吸収に関する包括的研究」(課題番号:21H02325, 代表:福島大学 二瓶直登)、京大大学生存圏ミッション研究「ダイズ体内のセシウム挙動に関する候補遺伝子の探索」(代表:福島大学 二瓶直登)の一部で実施した。また、この研究を実施するにあたり、多大なご協力をいただいた大久保金一氏、菅野宗夫氏(飯館村)に心より感謝申し上げます。

引用文献

- Nihei, N. 2016. Monitoring Inspection for Radioactive Substances in Agricultural, Livestock, Forest and Fishery Products in Fukushima Prefecture. Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident: The First Three Years, Springer Japan, 11-22
- Nobori T., Kobayashi I. N., Tanoi K., Nakanishi M. T., 2014. Effects of potassium in reducing the radiocesium translocation to grain in rice, Soil Sci Plant Nutrition, 60 772-781
- Nihei N., Akifumi Sugiyama, Yoshiaki Ito, Takeshi Onji, Koji Kita, Atsushi Hirose, Keitro Tanoi, Tomoko M.Nakanishi, 2017, The concentration distributions of Cs in soybean seeds, Radioisotope, 66, 235-242
- Sugita R., Hirose A., Kobayashi N., Tanoi K., Nakanishi M. T., 2016, Imaging Techniques for Radiocesium in Soil and Plants, Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident: The First Three Years, Springer, 247-263

水稲におけるセシウムの吸収と体内での動き

○古川純（筑波大学）

1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故により環境中に拡散した放射性セシウムが農作物によって吸収されるという現象は、社会的に大きな関心事となりました。特に我々の主食であるコメに含まれる放射性セシウム含量は報道でも大きく取り上げられることとなり、土壌中に存在する放射性セシウムがどのように根で吸収され、また可食部である種子まで輸送されていくのかという過程を理解することは、農作物という生活に直結した食品の汚染を最小限に抑えるために極めて重要な課題です。この問題に取り組むにあたり、品種間や突然変異体のセシウム吸収量を比較することでセシウム低吸収品種を獲得しようとする植物の持つ機能に着目した研究と、施肥法や栽培環境の把握からセシウムが吸収されにくい栽培法を確立し、その原因を理解しようとする研究の、2つのアプローチによって解決策の探索がなされました。それぞれ大きな成果が上がっていますので、本発表ではその一部をご紹介しますと思います。

2. イネにおけるセシウム吸収の品種間差

事故後の早い段階において、イネのセシウム吸収に品種間差が存在するか否かについての検証実験がなされました。世界中のイネから代表的な品種を選抜し、茨城県つくば市の実験圃場で栽培したサンプルを用いて玄米中の非放射性セシウム量を測定したところ、最大で約 9 倍の差があることが示されました(山口ら, 2012)。非放射性セシウムは長期にわたって安定的に土壌に固定されたセシウムであると考えられることから、土壌との相互作用がまだあまり進んでいない原発事故に由来する放射性セシウムの吸収はまた異なる傾向にある可能性も考えられました。そこで藤原らは 2011 年に福島県の水田を用いて放射性セシウムの吸収量を調査し、品種間で 20 倍以上の差があることを明らかにしました(Ohmori et al., 2014a)。これらの結果は、イネのセシウム吸収には品種間差があり、その差を生み出す何らかの原因遺伝子が存在していることを示唆しました。原因遺伝子を同定し、その機能を明らかにすることでセシウム低吸収イネの作出が期待できることを示すデータとなりました。

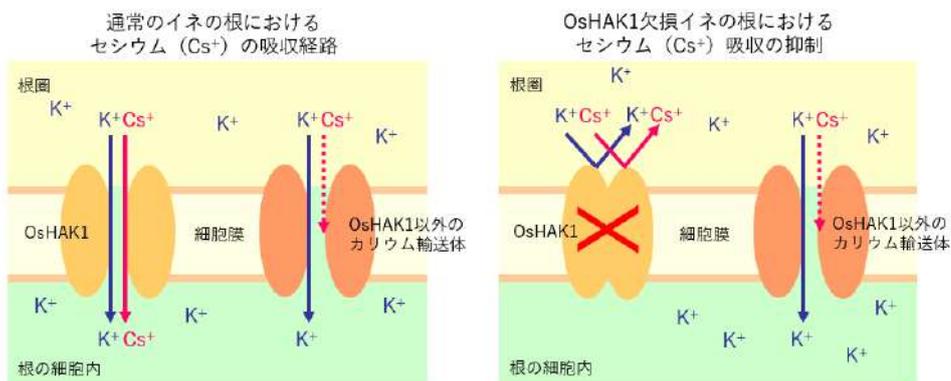
3. イネにおけるセシウムの吸収を担う輸送体の同定

イネのセシウム吸収が何らかの遺伝子によって制御されていると示唆されたことから、遺伝子の機能が破壊された突然変異体を用いた研究が進められました。頼らは突然変異誘発剤で処理された 8027 種の変異体を水田で栽培し、玄米中の非放射性セシウム濃度が野生型の 10%未満となった変異体を 3 系統獲得しました。これらの変異体を交換性カリウム濃度が低く、セシウムが吸収されやすくなっている水田(約 3,500 Bq/kg)で栽培したところ、野生型の玄米の放射性セシウム濃度が 44 Bq/kg であったのに対し、突然変異体のセシウム濃度は検出限界以下となりました(Rai et al., 2017)。また、これらの変異体はセシウムの吸収量が低下しているにも関わらず、収量ならびに玄米中のカリウム量には影響がないことが確認され、将来の品種化に向けて極めて有望であることも明

らかになっています。

これらの突然変異体を対象に分子生物学的な解析が行われ、セシウムの吸収が低下した原因となる遺伝子が特定されました。獲得された3つの変異体は、独立して突然変異が起こった系統であるにも関わらず、すべて OsHAK1 という根圏のカリウム濃度が低い時に機能する、高親和性カリウム輸送体と呼ばれるタンパク質をコードする遺伝子が破壊されたものでした。このことはイネにおける主要なセシウム吸収の経路は OsHAK1 を介したものであり、その他のカリウム輸送体はセシウムの吸収にあまり関与していないこと、また OsHAK1 以外の輸送体によってカリウムの吸収が補われており、成長への影響が抑えられたことを示しています(図1)。

図1.イネの根における根圏から細胞内へのセシウム吸収経路



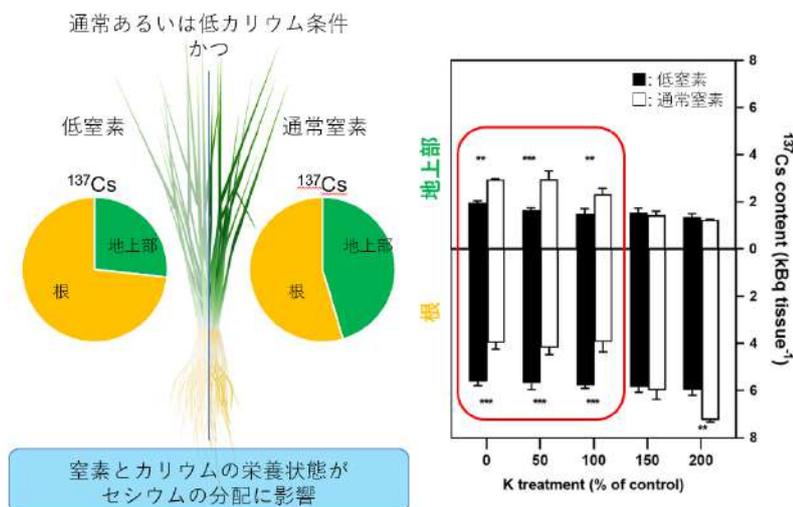
OsHAK1 のセシウム吸収への関与は同時期に逆遺伝学的手法によっても検証がなされました。CRISPR-Cas によるゲノム編集手法によって作出された OsHAK1 破壊株は、電気生理学的解析からセシウムの取り込みが抑制されていることが示され、また放射性セシウムを含んだ土壌で栽培すると、その取り込み量が野生型よりも大幅に少ないことが明らかになっています (Nieves-Cordones et al., 2017)。

4. セシウム吸収に対する施肥・根圏イオン環境の影響

1960年代に実施されたグローバルフォールアウトに含まれる放射性セシウムの吸収抑制に関する研究や、チェルノブイリ原発事故後に実施された多くの研究から、カリウム肥料の施肥が植物の放射性セシウム吸収を抑制することが示唆されていました。そこで、現地水田を対象に植物が利用可能な交換性カリウム濃度と、そこで栽培されたイネが蓄積した放射性セシウム濃度の相関解析が行われ、カリウム濃度が高くなるにつれて、イネ玄米中の放射性セシウム濃度が明瞭に減少することが示されました (Kato et al., 2015; 神山ら, 2015; Kondo et al., 2015)。一方で窒素肥料の施用は、土壌条件によっては植物によるセシウムの取り込みを促進することが報告されていました。現地水田における窒素施肥の影響を評価するために、2011年と2022年に施肥条件を変えて栽培されたイネが収穫され放射性セシウム濃度が測定されました。その結果、玄米の放射性セシウム濃度は、カリウム無施肥+窒素施肥条件下で慣行施肥の約2倍に達することが明らかになりました (Ohmori et al., 2014b)。この結果は、日本の水田においてカリウム肥料だけでなく窒素肥料もイネの放射性セシウム濃度に影響を与えることを示しています。

我々は窒素がイネの放射性セシウム蓄積を制御するメカニズムに興味を持ち、水耕栽培での検証を行いました。対象区に比べて窒素の供給量を下げた実験区を用意して放射性セシウムを吸収させたところ、通常窒素区に比べて地上部へ輸送されるセシウム量が低下していることが示されました (Kinoshita et al., 2021)。個体全体での取り込み量には大きな変化がなかったことから、根から地上部への移行が抑制されていることを示唆する結果であり、窒素の栄養状況がイネ体内でのセシウム挙動にも影響を及ぼしていることが示されました (図 2)。

図 2. 窒素とカリウムの栄養状態を変化させたイネのセシウムの分配



セシウム吸収を制御するもう一つの根圏環境要因として、ナトリウムの関与が報告されています。イオンビーム照射により作出された突然変異体集団から、玄米中の放射性セシウム蓄積を野生型の約半分にまで減らすことができる変異体が得られました (Ishikawa et al., 2017)。この変異体の原因遺伝子は OsSOS2 という、細胞内に取り込まれた過剰なナトリウムを排出するためのメカニズムに必要なタンパク質をコードしており、変異体では細胞からのナトリウム排出に異常が生じていると考えられます。石川らは細胞内ナトリウム濃度の増加によるストレスが、OsHAK1, OsHAK5, OsAKT1, OsHKT2などのカリウム輸送体の発現を抑制することを明らかにしており、特にセシウム吸収の主要な経路である OsHAK1 の抑制によって根のセシウム吸収が減少したと考えられます。

我々は現在ナトリウム濃度依存的に根から地上部へのセシウム輸送が阻害されるという現象に着目した解析を進めています。石川らの研究では、根圏ナトリウム濃度が増加するにつれて根と地上部の両方でセシウム濃度が減少していますが、我々の設定した実験環境では、地上部のみでセシウム濃度が減少します。根からのセシウム移行の制御にナトリウムが関与していることを示唆する結果であり、イネのナトリウムストレスへの応答機構は放射性セシウムの吸収抑制だけでなく、体内での輸送も制御していることが予測されています。

5. まとめ

本発表ではイネの根におけるセシウムの取り込みと、吸収されたセシウムが地上部へ輸送される過程について、カリウムや窒素、ナトリウムが及ぼす影響について報告しました。しかしながら、可食部であるコメへのセシウム蓄積を理解するためには、地上部組織の中でどのようにセシウムが転流して種子へと運ばれるのかについても詳細に検証する必要があります。放射性セシウムの濃度が

制御された安全な品種あるいは栽培法の確立に向けて更なる研究が求められています。

謝辞

この研究を実施するにあたり、ご協力いただいた大森良弘博士(東京大学), 頼泰樹博士(秋田県立大学), 木下奈都子博士(筑波大学), 菅野里美博士(名古屋大学), 藤村恵人博士(農研機構), ナタリー レオナルド博士(フランス原子力代替エネルギー庁)に心より感謝申し上げます。

引用文献

- 山口紀子・高田裕介・林健太郎・石川 覚・倉俣正人・江口定夫・吉川省子・坂口 敦・朝田 景・和穎朗太・牧野知之・赤羽幾子・平舘俊太郎 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.
- Ohmori, Y., Inui, Y., Kajikawa, M., Nakata, A., Sotta, N., Kasai, K., Uruguchi, S., Tanaka, N., Nishida, S., Hasegawa, T., Sakamoto, T., Kawara, Y., Aizawa, K., Fujita, H., Li, K., Sawaki, N., Oda, K., Futagoishi, R., Tsusaka, T., Takahashi, S., Takano, J., Wakuta, S., Yoshinari, A., Uehara, M., Takada, S., Nagano, H., Miwa, K., Aibara, I., Ojima, T., Ebana, K., Ishikawa, S., Sueyoshi, K., Hasegawa, H., Mimura, T., Mimura, M., Kobayashi, N.I., Furukawa, J., Kobayashi, D., Okouchi, T., Tanoi, K., Fujiwara, T. 2014a. Difference in cesium accumulation among rice cultivars grown in the paddy field in Fukushima prefecture in 2011 and 2012. J. Plant Res. 127, 57-66.
- Rai, H., Yokoyama, S., Satoh-Nagasawa, N., Furukawa, J., Nomi, T., Ito, Y., Fujimura, S., Takahashi, H., Suzuki, R., Yousra, E., Goto, A., Fuji, S., Nakamura, S., Shinano, T., Nagasawa, N., Wabiko, H., Hattori, H. 2017. Caesium uptake by rice roots largely depends upon a single gene, *HAK1*, which encodes a potassium transporter. Plant Cell Physiol. 58, 1486-1493.
- Nieves-Cordones, M., Mohamed, S., Tanoi, K., Kobayashi, N.I., Takagi, K., Vernet, A., Guiderdoni, E., Périn, C., Sentenac, H., Véry, A. 2017. Production of low-Cs⁺ rice plants by inactivation of the K⁺ transporter OsHAK1 with the CRISPR-Cas system. Plant J. 92, 43-56.
- Kato, N., Kihou, N., Fujimura, S., Ikeba, M., Miyazaki, N., Saito, Y., Eguchi, T., Itoh, S. 2015. Potassium fertilizer and other materials as countermeasures to reduce radiocesium levels in rice: results of urgent experiments in 2011 responding to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. Soil Sci. Plant Nutr. 61, 179-190.
- 神山和則・小原 洋・高田裕介・齋藤 隆・佐藤睦人・吉岡邦雄・谷山一郎 2015. 2011 年高濃度放射性セシウム汚染玄米発生の土壌要因. 農環研報, 34, 63-73.
- Kondo, M., Maeda, H., Goto, A., Nakano, H., Kiho, N., Makino, T., Sato, M., Fujimura, S., Eguchi, T., Hachinohe, M., Hamamatsu, S., Ihara, H., Takai, T., Arai-Sanoh, Y., Kimura, T. 2015. Exchangeable Cs/K ratio in soil is an index to estimate accumulation of radioactive and stable Cs in rice plant. Soil Sci. Plant Nutr. 61, 133-143.
- Ohmori, Y., Kajikawa, M., Nishida, S., Tanaka, N., Kobayashi, N.I., Tanoi, K., Furukawa, J., Fujiwara, T. 2014b. The effect of fertilization on cesium concentration of rice grown in a paddy field in Fukushima prefecture in 2011 and 2012. J. Plant Res. 127, 67-71.
- Kinoshita, N., Irving, L.J., Lustig, B., Furukawa, J. 2021. Effects on nitrogen on cesium allocation in rice plants

(*Oryza sativa*). Plant Biol. 13279.

Ishikawa, S., Hayashi, S., Abe, T., Igura, M., Kuramata, M., Tanikawa, H., Lino, M., Saito, T., Ono, Y., Ishikawa, T., Fujimura, S., Goto, A., Takagi, H. 2017. Low-cesium rice: mutation in *OsSOS2* reduces radiocesium in rice grains. Sci. Rep. 7, 2432.

これから歩む道-日本土壤肥料学会・日本学会議の役割

○信濃卓郎（北海道大学大学院農学研究院）

1. これまで

震災から10年が経過し、政府からは2020年代中の希望者の帰還困難区域への居住が可能になるように除染を進めるとのアナウンスが行われた。広大な農地への放射性物質の飛散は想定をはるかに超えるものであり、その対策に利用できる現場の知見としては土壌や気候、栽培植物などが大きく異なるチェルノブイリでの事例、あるいはグローバルフォールアウトによって広く(薄く)汚染された国内での知見に基づくしかなかった。土壌の汚染レベルに基づいて栽培の可否を決める必要があったが、チェルノブイリ的事例に基づく移行係数(土壌から作物への放射性物質の移行割合)のリストと管理された全国の農地で取得された移行係数のデータに依存した。特に放射性セシウムが問題となったが、セシウムの吸収は震災以前の研究からカリウムによって拮抗的に制御されることが生理的には明らかではあったが、震災から1年が経過する中で、移行係数が土壌中のカリウムの有効度(交換性カリ)によって大きく影響を受けることが圃場レベルでも明確に示された。福島県を中心に精力的に収集されたデータからは土壌タイプや他の土壌養分、植物種に関わらず交換性カリの効果が際立っていた。そのため、さまざまな作物の栽培において必要とされる交換性カリの量が設定され、被災地において広範に追加のカリウム施肥として投入された。この効果は著しく、例えば水稲の例を見れば2011年には約1.5%の玄米が基準値超過をしたが、2012年には大幅に低下し0.0007%となった。2012年の作付け状況を考えれば除染の効果というよりはこれはカリウム施肥の効果であることは明らかである。チェルノブイリにおいても施肥(カリウム、リン、石灰)による放射性セシウムの農作物からの低減効果は報告されているが、カリウムに特化してここまで大きな成果をあげられることは当初予想されていなかった。結果として震災後に行われたマーケットバスケット方式での調査からも食品への放射性セシウムの混入は極めて少ないことが示されている。チェルノブイリの事故後では体外被曝よりも体内被曝が問題となったこととは異なり、福島での事故は体内被曝の問題は極めて小さく、主に体外被曝を考慮した対策に注力可能にした。

2. 今

表1は福島県で生産された玄米の検査結果をまとめたものである。2011年度はモニタリング、2012年度から2019年度までは全量全袋検査が行われ、5年以上基準値超過が認められなかった地域かつ避難指示特別区域外であった場合には2020年度からはモニタリング検査に移行している。2013年の基準値超過は土壌からの吸収には基づかないことが示されており(Matsunami et al. 2016)、2014年の基準値超過は施肥管理をしていない自家消費用の玄米であったことから、水稲の場合は基本的にはカリウムによる移行抑制対策が極めて効果的であり、その結果2015年度以降の基準値超過が認められなかったことから明らかであり、現時点でもその成果が認められている。

表 1. 福島県内の特定の地域で生産された玄米の検査結果(福島県)2021.9.18

		≤ 50 Bq/kg	51-75 Bq/kg	76-100 Bq/kg	100 Bq/kg <	Monitored number
FY 2011	actual no.	20,295	364	219	311	21,189
	(%)	95.78%	1.7179%	1.0336%	1.4677%	100%
FY 2012	actual no.	10,343,548	1678	389	71	10,345,686
	(%)	99.98%	0.0162%	0.0038%	0.0007%	100%
FY 2013	actual no.	10,951,351	492	323	28	10,952,194
	(%)	99.99%	0.0045%	0.0029%	0.0003%	100%
Fy 2014	actual no.	11,014,636	1	1	2	11,014,640
	(%)	100%	0.00001%	0.00001%	0.00002%	100%
Fy 2015	actual no.	10,496,518	4	0	0	10,439,072
	(%)	100%	0.00004%	0	0%	100%
Fy 2016	actual no.	10,264,859	0	0	0	10,264,859
	(%)	100%	0%	0%	0%	100%
Fy 2017	actual no.	9,976,522	0	0	0	9,997,652
	(%)	100%	0%	0%	0%	100%
Fy 2018	actual no.	9,251,056	0	0	0	9,251,056
	(%)	100%	0%	0%	0%	100%
FY 2019	actual no.	9,492,611	0	1	0	9,492,612
	(%)	100%	0%	0%	0%	100%
FY2020	actual no.	320,381	0	0	0	320,381
	(%)	100%	0%	0%	0%	100%

ただし、このような状況は土壌中のカリウムの有効度がきちんと維持されているからであることを忘れてはいけない。残念ながら土壌中に残存する放射性セシウムを完全に除去することはできず、また、土壌中のセシウムは土壌の粘土鉱物や有機物と安定的に結合をするために、被災地では長期に渡って移行抑制対策を徹底する必要がある。実際牧草ではカリウムによる管理を怠った場合に数年で再び暫定許容値を引き起こした事例も報告されており(岩手県農業研究センター畜産研究所ら, 2019), このことは他の作物でも同様である。

また、福島県は中山間地が多く、いわゆる栽培作物ではない山菜などを利用する消費者が多かったという。圃場と異なり栽培管理が困難な山菜ではいまだに基準値超過をする品目も認められ(図1)、これらに関しては今後も地域による放射性セシウム含有量の推移を注視する必要がある。

	2011			2012			2019		
	Inspected No.	>100	%	Inspected No.	>100	%	Inspected No.	>100	%
Cultured products									
Other grains	352	2	0.6	1,823	0	0.0	176	0	0.0
Vegetables	5,104	167	3.3	12,159	6	0.0	3,443	0	0.0
Legumes	965	18	1.9	7,333	39	0.5	283	0	0.0
Fruits	1,250	73	5.8	3,606	15	0.4	712	0	0.0
Tea (10Bq/L as extract)				771	13		12	0	0
Meat	69,836	261	0.4	149,716	7	0.0	203,905	0	0.0
Egg and Milk	1,527	3	0.2	2,733	0	0.0	625	0	0.0
Fungi (wethered log)	1,494	286	19.1	1,854	235	12.7	1,841	0	0.0
Fungi (fungal bed)	288	7	2.4	1,301	0	0.0	739	0	0.0
Wild plants	120	2	1.7	275	6	2.2	337	2	0.6
Non-cultured products									
Wild fungi	286	36	12.6	449	82	18.3	615	28	4.6
Wild plants	121	28	23.1	1,405	185	13.2	1,947	58	3.0
Wild games	611	373	61.0	1,241	491	39.6	2,089	69	3.3
Fish (Salt water)	4545	744	16.4	13,927	830	6.0	9,211	0	0.0
Fish (Fresh water)	918	161	17.5	3,435	240	7.0	2,170	4	0.2
Honey	10	1	10.0	73	0	0.0	48	0	0.0
Processed food	3121	1578	50.6	2,016	139	6.9	921	2	0.2

図1. 東日本 17 県でのモニタリング結果

(https://www.maff.go.jp/j/syouan/seisaku/radio_nuclide/attach/pdf/200731_kekka.pdf より作成)

このような状況に加えて、長期的な農地管理を考えた場合には土壌特性による放射性セシウムの移行のしやすさについての知見も必要である。水稻に関しての福島県内の多数の農地のモニタリ

ング結果を取りまとめた結果からは、大きく地域的に交換性カリと移行係数の関係には違いがあることが示唆されている(Yamamura et al. 2018)(図2)。

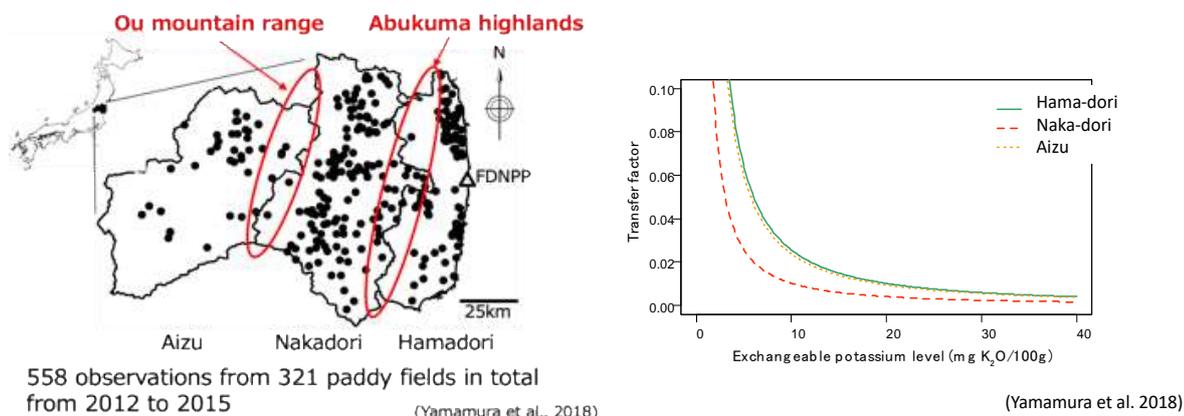


図2. 交換性カリと移行係数の関係の地域間差

この傾向は水稲で認められている結果であるが、同様の傾向は大豆においても観察されている(図3)。

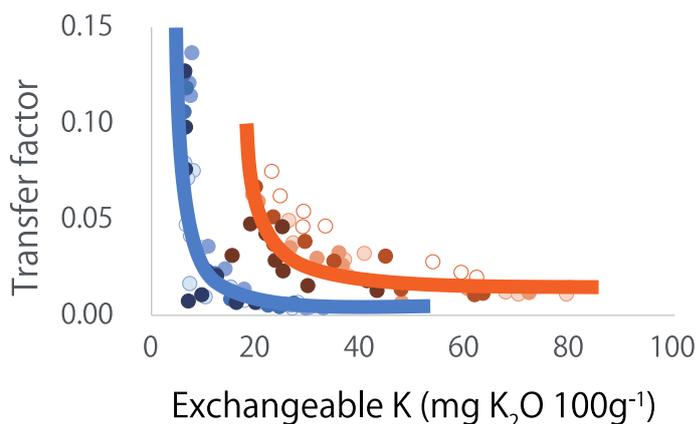


図3. 大豆における交換性カリと移行係数の関係の地域間差。青色は伊達市、赤色は南相馬市の代表的な圃場での結果。移行係数は地上部全体の数値を示している(Suzuki et al. unpublished data)

そもそも水稲に比べて大豆、そばなどでは同様に穀実を収穫部位としているにも関わらず、同じ交換性カリでの移行係数が高いことが詳細なデータが示している(図4)。この理由としては水田と畑作という違いが関与している可能性もあるが、畑作でも小麦では移行係数が低いことが示されており(Kubo et al. 2020)、一部の作物の特有の性質と考えている。同様の比較的高い移行係数は一部の野菜類でも観察されている(信濃他 2021)。特に野菜に関しては震災直後の2011年と2012年に福島県農業総合センターと東北農業研究センターに

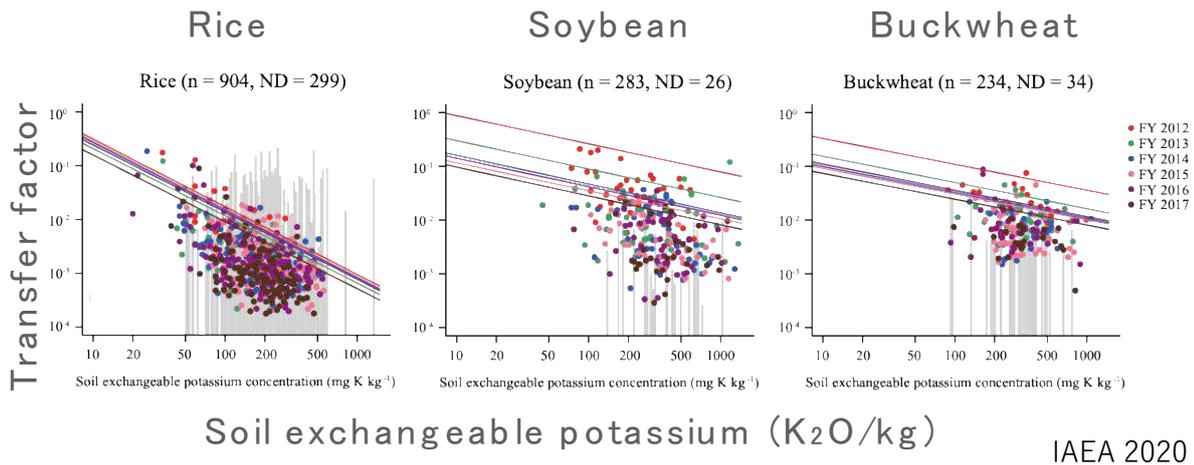


図4. 水稲, 大豆, そばの交換性カリと移行係数の関係

においてわずかに検証されたのみであり, 特にカリウムに対しての反応についての十分な検証がなされていなかった。そこで, 浜通り内の圃場(営農再開可能圃)において複数の野菜を栽培して土壌の交換性カリウムに対しての放射性セシウムの吸収の関係をみたものが図5である(信濃他 2021)。乾物率で考えているため葉菜類であるコマツナ, カブの葉でも比較的高めの数値を示すが, 特にカボチャのように 30mg と比較的高い交換性カリにおいても移行係数が高いことが示され, 今後これらの野菜の栽培においてメカニズム解明と適切な移行抑制対策が求められる。

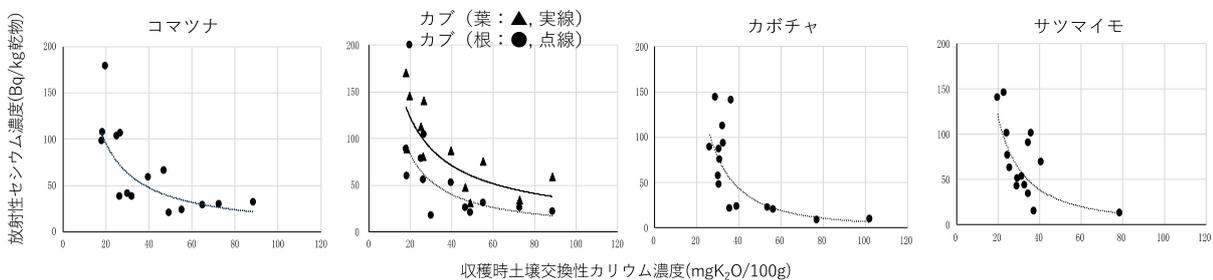


図5. コマツナ, カブ, カボチャ, サツマイモの交換性カリと放射性セシウム濃度の関係
(放射性セシウムは乾物当りで算出, 土壌の放射性セシウム濃度は 2500-3000Bq/kg)

3. これから

震災前は土壌肥料学分野は, 近年の高度に発達した分析化学や分子生物学の分野に比べると, 一見その科学分野における重要性は低いかに思われていたかもしれない。しかし, 震災後の多くの方々の生産基盤を迅速に復興させるためにはこの分野の貢献が必須であったことはこの10年を振り返っても明白である。対策を確立するためには地道な研究, データの積み重ねが必要であったことも事実である。その一方で, 全てを完全に制御できたのかと言われればその答えは否である。私たちは, この10年間に得られた核事故に対しての知見を正確に後代に引き継ぐ必要

があり、それは国内に止まらず国外の研究者のみならず、ステークホルダー、生産者にも伝わるように情報発信を今後も続けていく必要がある。

2021年8月31日に第30回復興推進会議及び第55回原子力災害対策本部会議において帰還困難区域内の特定復興再生拠点区域外の帰還・居住に向けた避難指示解除を2020年代に希望する住民が戻れるように進める方針が決定され、営農についても住民の意向と地元自治体の調整の上で可能にするとされた。帰還困難区域は震災から10年が経過しても環境中の放射能は高い場所が多く残されており、また、10年間の間に環境中に放出された放射性セシウムがどのように存在しているのかについての知見に基づいた対策を構築する必要があると考えられる。その一方で、例え復興といえども資源を有効に活用し、さらには地球温暖化への影響を最小限にする取り組みも今後は重要となる。そのためには、例えば精緻な農地のカリウム供給能の評価手法の開発などが喫緊に求められている。また、帰還困難区域は農地除染が終了して営農が再開されても、農地周辺に比較的高濃度の汚染が残された森林などが残されることが想定される。環境中からの農地への放射性セシウムの流入とその影響は小さいことはこれまでの研究から示されている一方で、流入の仕方によってはその影響が無視できないこともあることから(Matsunami et al. 2016)、今後も十分に周辺環境の放射性セシウム動態を解析し、農作物に与える影響について正確に評価を継続する必要がある。

4. 終わりに

核事故の影響は長期に亘り、積極的な除染と移行抑制対策が取られてきた東京電力福島第一原発事故においても、震災当初に比較して大きく状況は改善したものの、いくつかの問題はいまだに残っていることが示されている。農地での対策だけを考えても、土壌肥科学のみならず農業工学、作物学、育種学、環境科学、気象学、水文学等々の様々な分野が総合して取り組む必要があり、実際現場で対策に取り組む研究者やそのように取り組んできた(取り組まざるをえなかった)。国内の研究でも1950年代に行われた土壌肥科学雑誌内での報告が実際に参考になったりしたことを考えると(ex.天正 他 1959)、一見すぐに実用的とは考えられなくても基礎的な研究の継続が実用的な研究の理論的な裏付けに結びついていた。これからも日本土壌肥科学会・日本学術会議が幅広く、長期的な視野に立って研究を支持することの重要性が改めて認識されたと同時に、何を研究として行うべきなのかに真摯に向き合う事が強く求められる。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金 基盤研究(課題番号:19H01169, 代表:北海道大学 信濃 卓郎), 農林水産省委託研究 特定復興再生拠点区域の円滑な営農再開に向けた技術実証(代表:農研機構 渡辺 満), 飯島藤十郎記念財団学術研究助成金(放射性セシウム濃度低減のための野菜栽培と調理加工, 代表:北海道大学 信濃 卓郎)の一部で実施した。この研究を実施するにあたり、ご協力いただいた農研機構東北農業研究センター・農業放射線研究センター, 食品総合研究部門, 農業環境研究部門, 畜産研究部門, 中央農業研究センターの放射能研究に取り組

んだ皆様, 渡部敏裕氏(北海道大学), 丸山隼人氏(北海道大学), 尹永根氏(量研機構), 海野祐介氏(環境科学技術研究所)に心より感謝申し上げます。

引用文献

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. 2020. Environmental Transfer of Radionuclides in Japan following the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA-TECDOC-1927, IAEA, Vienna.

岩手県農業研究センター畜産研究所, 宮城県畜産試験場, 福島県農業総合センター畜産研究所, 栃木県畜産酪農研究センター, 農研機構畜産研究部門. 2019. 草地における放射性物質対策のためのカリ施肥. 農研機構畜産研究部門技術レポート 21 号

Kubo, T., Kobayashi, H., Nitta, M., Takenaka, S., Nasuda, S., Fujimura, S., Takagi, K., Nagata, O., Ota, T. and Shinano, T. 2020. Variations in radioactive cesium accumulation in wheat germplasm from fields affected by the 2011 Fukushima nuclear power plant accident. *Sci. Rep.*, 10, 3744.

Matsunami, H., Murakami, T., Fujiwara, H. and Shinano, T. 2016, Evaluation of the cause of unexplained radiocaesium contamination of brown rice in Fukushima in 2013 using autoradiography and gamma-ray spectrometry. *Sci. Rep.*, 6, 20386.

信濃卓郎・八戸真弓・齋藤隆・鈴木芳成・根本知明 2021. 放射性セシウム濃度低減のための野菜栽培と調理加工 飯島藤十郎記念財団 2020 年度年報第 36 巻 298-303.

天正清・葉可蹂・三井進午 1959. 水稻及び陸稲による土壌よりの ^{134}Cs 及び K の吸収と作物体内の分布. *土肥誌*, 30, 253-258.

Yamamura, K., Fujimura, S., Ota, T., Ishikawa, T., Saito, T., Arai, Y. and Shinano, T. 2018. A statistical model for estimating the radiocesium transfer factor from soil to brown rice using the soil exchangeable potassium content. *J. Environ. Radioact.* 195, 114-125.