放射能の農産物への影響

二瓶直登

農産物の安全性確認の取組み

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発事故により、広大な地域が放射性物質により汚染された。原発から放出された放射性物質のうち、事故当初を除けば、農産物への汚染が懸念されるのは放射性セシウム（セシウム134とセシウム137）である。福島県では農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。筆者は、前職の福島県職員時代、このモニタリング検査の運営を担っており、測定サンプルの調整、検査データの取りまとめ、メディアへの公表等を行っていた。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（100 Bq/kg）を超えた品目は出荷が制限される。2016年3月までの5年間で、約500品目のモニタリング検査を約100,000点（米、牧草等除く）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^{1, 2)}。原発事故後の放射性セシウムによる農産物の汚染被害を捉えるためには、この膨大な数のモニタリングデータの整理が重要と考え、モニタリングデータの解析を行った³⁾。

放射性セシウムによる農産物の汚染は、原発事故直後の三か月間に採取された試料で特に高い。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。100 Bq/kgを越えていた割合は18%で、最大値はクキタチナの82,000 Bq/kgであった。2011年7月以降は、最初の三か月と比較すると試料の放射性セシウム濃度は大幅に低下した。これは、原発事故時に生育していた作物は収穫され、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ためである。この時期、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高く推移していた。モニタリング検査の結果は重量（kg）当たりの放射能（Bq）で示されており、穀類は乾燥した子実を測定しているため、水分の多い野菜に比べて高めの傾向を示すと考えられた。さらに穀類の中でも、放射性セシウム濃度が100 Bq/kgを超えている割合はダイズが明らかに高い⁴⁾。ダイズは福島県内で第2位の生産面積を占める作物であり、福島県の農業復興には欠かせない。そこで、筆者は、これまでもダイズを主な研究対象としてきた経験を活かし、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することで検討を行った。

ダイズの放射性セシウム吸収

まず、生育期間中の放射性セシウム吸収量を求めたところ、ダイズは成熟期間際まで放射性セシウムを吸収し続けていた⁵⁾。イネのセシウ

^{137}Cs を吸収させて生育した子実の切片を作り、イメージングプレートにコンタクトして作成。赤いほど ^{137}Cs の濃度が高いことを示す。イネは文献7)より引用。

専門 放射線環境工学、作物学（主に畑作物）、土壌肥料学

ダイズの蓄積メカニズムとともに、現場の農業に寄与するために、汚染された農耕地で安全にダイズを栽培するセシウムの吸収抑制対策も検討している。作物を栽培する上で最も有効な吸収抑制対策はカリウム施肥である。ダイズに限らず作物は、必須元素であるカリウムを土壤から吸収する際、根表面に輸送体(トランスポーター)を発現して積極的に取り込む。カリウムを取り込む一部の輸送体には、カリウムと同族のアルカリ金属であるセシウムを取り込むことも確認されており⁸⁾、それらの輸送体を通してセシウムも植物体内に取り込まれると想定されている。そのため、根域にカリウム量が高まると、放射性セシウムに対するカリウムの割合が増加し、植物の放射性セシウム吸収が低下する。ダイズでも溶液中のカリウム濃度が高まるとセシウム吸収は急激に低下すること(図2)、溶液のカリウム濃度を変えて栽培したダイズのセシウム吸収速度を比較すると、カリウム濃度が高いダイズほどカリウムと同様にセシウムの

図2 溶液中の各イオン濃度とダイズのセシウム吸収
各イオンが存在しない時のセシウム吸収を100として表示。

図3 異なるカリウム濃度で生育したダイズのセシウム (¹³⁷Cs) とカリウム (⁴²K) 吸収
カリウム濃度0mMで生育したダイズの吸収を100として表示

吸収速度は低下する（図3）などから、ダイズのセシウム吸収も、根域のカリウム濃度と大いに関係していることが示唆された⁵⁾。このようなことから、福島県でダイズ栽培時には、土壤中の交換性カリウム（1M酢酸アンモニウムで抽出されるカリウム）が25~50 mg / 100g（乾土）を維持するように指導が徹底されている⁹⁾。しかし、福島県内にはカリウム施肥が効かない圃場や、土壌からダイズへの放射性セシウムの移行が高いなど問題となる地域もある。筆者ら

は、そのような土壌特性の解明として、粘土鉱物組成、放射性カリウムを用いた施肥したカリウムの挙動解明等もおこなった。その結果、有機物含量が少なく、粘土粒子の中に層状粘土鉱物が多く存在する土壌は、施肥されたカリウムを強く吸着し、ダイズが利用できなくなることを示すなど、土壌の性質によって汚染した地域でのダイズ栽培の危険性が高まるかを明らかにしている⁵⁾。さらに、このような土壌では、養分が徐々に溶出する肥効調節型肥料と呼ばれる肥料を用いて、濃度障害をおこさずにカリウム成分とダイズを接触して施肥するなど、より効果的なカリウム施肥法の開発も行っている。また、カリウムとともにダイズ生育に大きな影響を及ぼす窒素は、土壌に吸着している放射性セシウムをダイズが吸収しやすい形態に変化させることから、ダイズの放射性セシウムの吸収が促進する¹⁰⁾。そのため、適正な施肥量を守るとともに、避難指示解除地域など、数年間作物を栽培していないため圃場に窒素が蓄積していると想定される場での栽培には注意が必要であると呼び掛けている。

米の全量全袋検査

米は福島県の農業生産額の4割を占め、日本人の主食であるため、その安全性を確保するため特に細やかな対策と検査が実施されている。2011年は土壌の放射性セシウム濃度に応じて作付制限が行われたが、秋には福島県知事が米の安全宣言を出した後、500 Bq/kg 近い米が散

見された。そのため、2012年からは県内で生産された全ての米（年間約36万トン）を対象とした検査（以下、全量全袋検査）の実施が決められた。筆者はこの検査のシステム構築にも携わったが、問題となったのは、これまでのゲルマニウム半導体検出器を用いた測定で20～30分かかっていたものを、もっと迅速に判断できる機器を開発することであった。このことについて、各メーカーへ機器の開発を依頼したところ、非常に短期間のうちに、30 kgの米袋を20～30秒で基準値（100 Bq/kg）以下であるかの判断ができるベルトコンベア式の検査器が開発された。現在、県内に約200台設置され、毎年1,000万袋を超える測定を実施している。米の検査結果についてもまとめると、放射性セシウム濃度が100 Bq/kgを超える割合は抽出検査であった2011年には福島県全体で0.8%、全量全袋検査が導入された2012年には1,034万袋中71袋で0.0007%、2013年は1,101万袋中28袋で0.0003%であり、2014年は1,049万袋中2袋で0.00002%であり2015年以降は検出されていない¹¹⁾。100 Bq/kgを超える米の割合が2012年以降大幅に減少した理由として、放射性セシウムの崩壊による物理的な減少、土壌への固定の他、除染作業の進捗、カリウム施肥などが挙げられる。なお、2013年の全量全袋検査で100 Bq/kgを超えた28袋のうち27袋は同一地域で栽培されたものであったが、その要因については、2012年および2014年においてこの地域では玄米の放射性セシウム濃度は100 Bq/kgを超えていないこと、2013年産の玄米に放射性セ

シウムによる汚染スポットが確認されたこと、100 Bq/kgを超えた玄米のセシウム134とセシウム137の比は福島第一原子力発電所第2号機および3号由来に対し、栽培した土壌のセシウム134とセシウム137の比は第1号機由来であることから、2013年に観測された同地域の放射性セシウム汚染の主たる原因は、土壌からイネへの移行ではなく、玄米への放射性物質の直接付着であると推定されている¹²⁾。

一方、カリウム施肥をいつ打ち切るかを見極めるためにも、あえて抑制対策を目的としたカリウム施肥を行わない慣行的な作付で試験栽培が、福島県伊達市で行われている¹³⁾。安全な米を栽培するために、多くの水田で除染やカリウム施肥が行われている現状で、あるがままの栽培を続けているこのような圃場は非常に貴重である。この試験水田で栽培した結果は、イネの放射性セシウム濃度は事故後ほとんど低下していないか、水田によっては放射性セシウム濃度がむしろ上昇している事例もみられている。上昇した理由の一つは、試験水田ではワラを含む収穫物は全て持ち出さなければならないため、年を追うごとに土壌の交換性カリウムが低下しているためである。いずれにしろ、放射性セシウム吸収抑制の目的で土壌中のカリウム濃度を高く維持しなければ、未だに事故直後と同等の米ができる事例があることが示されている。

事故から6年が経過し、今後、避難が解除された地域でも農業が順次再開される。安全な農作物の生産のために、これまで蓄積されたモニ

タリングデータの活用とともに、放射性セシウムの移行しやすい地域の要因解明、放射性セシウムを吸収しないダイズ育成などから原発事故で汚染された地域の農業の復旧・復興に寄与していきたい。

注

- 1) 福島県 : <http://www.new-fukushima.jp/monitoring.php>
- 2) 厚生労働省 : <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001m9tl.html>
- 3) Nihei, N., Tanoi, K., Nakanishi, T.M., Monitoring inspection for radiocesium in agricultural, livestock, forestry and fishery products in Fukushima prefecture. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 2016, 307:2217-2220.
- 4) Nihei, N., 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*, Ed. by Nakanishi, T.M. and Tanoi, K., Springer Japan 2016, 11-22.
- 5) 二瓶直登, 田野井慶太郎, 中西友子 (2016) Proceedings of the 17th Workshop on Environmental Radioactivity. 95-98.
- 6) Nobori T., Kobayashi I. N., Tanoi K., Nakanishi M. T., Effects of potassium in reducing the radiocesium translocation to grain in rice. *Soil Sci Plant Nutrition* 2014, 60:772-781.
- 7) Sugita R., Hirose A., Kobayashi N., Tanoi K., Nakanishi M. T., Imaging Techniques for Radiocesium in Soil and Plants. *Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident: The First Three Years*, Ed. by Nakanishi, T.M. and Tanoi, K., Springer Japan 2016, 247-263.
- 8) Z. Qi, C. R. Hampton, R. Shin, B. J. Barkla, P. J. White, D. P. Schachtman, The high affinity K⁺ transporter AtHAK5 plays a physiological role *in planta* at very low K⁺ concentrations and provides a caesium uptake pathway in *Arabidopsis*. *J Exp Bot* 2008, 59(3):595-607.
- 9) 福島県 : <https://www.pref.fukushima.lg.jp/download/1/ganba24H240410.pdf>
- 10) Nihei N., Hirose A., Mori M., Tanoi K., Nakanishi M.T., Effect of nitrogen fertilization on radiocesium absorption in soybean. *Radiological Issues for Fukushima's Revitalized Future*, Springer 2016, 173-178.
- 11) Naoto Nihei, Keitaro Tanoi and Tomoko M. Nakanishi, Inspections of radiocesium concentration levels in rice from Fukushima Prefecture after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *Scientific Reports* 2015, 5:8653-8658 doi:10.1038/srep08653.

12) Matsunami H., Murakami T., Fujimura H., Shinano T., Evaluation of the cause of unexplained radiocaesium contamination of brown rice in Fukushima in 2013 using autoradiography and gamma-ray spectrometry. *Scientific Report* 2016, 6:20386.

13) 根本圭介. 水田生態系の中の放射性セシウム. 国際土壤年 2015と農学研究. 2016 養賢堂. 111-124.