

## 講演要旨

### 原発事故被災地の農業再生に向けた対策技術研究の貢献と課題

信濃卓郎

東京電力福島第一原子力発電所の事故により5年前に数回にわたり飛散した放射性物質は、福島県を中心として周辺各県の農地に降下した。当時の風向きや降雨などの条件によって不均一に降下した放射性物質は広く農地にも沈着をし、その後の農産物の生産に大きな影響を及ぼした。放射性物質が降下した3月中旬は被災地域においては稲作、畑作の開始には至っておらず、主に直接農地土壌の汚染であったが、樹木や牧草はすでに植物体が露出していたため、植物体にも直接の放射性物質の付着が認められた。さらに常緑の樹木、特に茶樹においては葉にも直接の汚染が認められた。震災当初はチェルノブイリ原子力発電所の事故を想定して、様々な核種による汚染が危惧されたが、主に放射性ヨウ素( $^{131}\text{I}$ )とセシウム( $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ )が飛散したことが明らかになり、放射性ヨウ素は短半減期(約8日)であるため、緊急的には汚染地域では摂取を控えることでの対応が行われたが、放射性セシウムに関しては半減期が約2年と30年と長期にわたるため農地の除染と農地から食品への放射性物質の移行の抑制技術の開発が求められ、農研機構においてはこれらの技術の開発と普及を進めてきた。本講演ではこれらの技術の紹介と同時に5年を経過した中で被災農地において残されている問題点と新たに生じた問題点についても紹介をしたい。

放射性物質によって汚染した茶による高濃度の放射性セシウムの検出は震災後の一番茶の収穫から各県で報告が相次ぎ、遠くは被災した原発から約400 km離れた静岡県の茶からも検出が報告された。茶樹における放射性セシウムの分布からは植物群落の上部に集中して存在していることが明らかとなり、茶樹の剪定で利用されている技術である中刈りを行うことで植物体から放射性セシウムを大幅に除去可能なことを野菜・茶業研究所が中心となり明らかにした。その後の放射性セシウムの移行については土壌からの移行を含めて調査を継続しているが、汚染した葉からの移行が主体を占めていたことが明らかとなっている。中刈りの対策は東日本の茶園に広く取り入れられ(約2万ヘクタール)、震災年は大きく茶の生産量が落ち込んだものの翌年からの営農再開に貢献をした(農研機構 2012a)。樹皮に直接付着した果樹においても植物体に付着した放射性物質が樹皮を中心に集積をしていることが明らかとなり、樹皮を除去する試みが福島県農業総合センター果樹研究所を中心に行われて、高圧洗浄機を利用して樹木を洗浄する技術が開発され、広く活用をされた(福島県 2011、農林水産省 2012a)。洗浄し果樹園に降下した樹皮による農地汚染も懸念されたが、樹皮から果実への放射性セシウムの移行が実際に抑制されることが示されている(Sato et al. 2015)。水田、畑、牧草においては農地の放射性物質の汚染程度に応じた対策が検討をされた。チェルノブイリ事故の際の知見で

は水田に関する情報がなく、過去（約50年前）に行われた国内での限定的な実験結果に基づき、土壌からの放射性セシウムの玄米への移行係数（玄米の放射性セシウム濃度/土壌の放射性セシウム濃度）が0.1を超えないと結論づけられた。そのため、初年度の一般食品の暫定基準値である500Bq/kgを超過しないためには農地の放射性セシウム濃度が5,000Bq/kg以下であれば栽培が可能であるとして、平成23年の農地の汚染状況と避難指示の組み合わせから設定された作付け制限区域以外の被災地においても稲作が再開された。しかしながら、平成23年産の玄米においては基準値超えあるいは100Bq/kgを超えて高い数値の玄米が作付け制限区域外においても認められる結果となった（農林水産省2012b）。この年の様々な水田の調査から土壌の放射性セシウム濃度と玄米の放射性セシウム濃度は単純な正の直線関係では示されないことが明らかになり、移行係数は土壌の交換性カリ濃度に強く制御されることが示された（Kato et al. 2015、農林水産省2014a）。平成24年度からは一般食品の基準値が100Bq/kgに引き下げられたが、稲作においては土壌の交換性カリ濃度が25mgK<sub>2</sub>O/100g以上であれば移行係数が0.01以下に抑制される結果が得られたことから、慣行の施肥前にあらかじめ土壌の交換性カリ濃度が25mgK<sub>2</sub>O/100gになるようにカリ資材（塩化カリウム）を投入する必要があることが示され、被災各県の栽培指針として約8万5千ヘクタールの水田に広く活用された。同様の指針は他の作物においても順次策定が進められ、これまでに大豆（25mgK<sub>2</sub>O/100gただし、高濃度になりがちな圃場では50mgK<sub>2</sub>O/100g、（農林水産省2015a）、そば（35mgK<sub>2</sub>O/100gただし、高濃度になりがちな圃場では50mgK<sub>2</sub>O/100g、（農林水産省2014b）、牧草（30-40mgK<sub>2</sub>O/100g、（農林水産省2014c））などにおいて対策技術として示されてきた。また、その他の野菜などについては移行係数が著しく低いことが明らかにされている（農研機構2012b）。

土壌に降下した放射性セシウムの多くは粘土鉱物と強く結合をするため、土壌表層にその殆どが存在している。この放射性セシウムを物理的に除去するために、農研機構では中央農研、農工研、生研センターが中心となり農地土壌の物理的除染技術の開発を進めた。表層5cmの強く汚染した土壌を除去する表土剥ぎ取り技術は環境省の除染マニュアルにも採用されている（環境省2013）。また、汚染レベルが高い場合には除染作業中に飛散する粉塵による内部被曝や圃場での取り残しが懸念されるため、あらかじめ土壌の固化剤を散布する技術も開発している。除染が必要とされる8,500ヘクタールの農地へ適用され、これまでに約6,000ヘクタールの農地の除染が進められている。一方、牧草地においては直接汚染の影響もあり、反転耕を伴う草地更新が広く取り入れられ、これまでに約2万9千ヘクタールの草地に適用されている。反転耕は天地返しとも呼ばれ、高濃度に汚染した表層（牧草、枯れた牧草を含む有機物層、土壌）を約30から40cmの場所に移動させる技術であり（農研機構2012c）、同時に作土層の土壌中のカリ濃度を高めて十分に土壌と混和することが牧草への移行を抑制するために重要である（農研機構2014c）。特に空間線量の低減には高い効果がある上に、表土剥ぎ取りとは異なり汚染している土壌を廃棄する

必要がない利点がある。これらの物理的除染と移行抑制技術によって農産物に含まれる放射性セシウム濃度は著しく軽減されており、特に玄米に関しては平成26年度は2件（抑制対策を取っていなかった）、平成27年度は0件となっている（ふくしまの恵み安全対策協議会 2016）。さらに様々な食品に関しての調理・加工過程での放射性セシウムの動態解析が行われ、例えば玄米においては精白米として炊飯を行った場合には当初の8分の1まで放射性セシウム濃度が低減することが明らかにされた（Hachinohe et al. 2015）。これらの知見は順次公表されており、農産物の安全性を確実にすると同時に消費者への安心も広めている。

残念ながらすべての取り組んだ技術が有効であったとは言えない。特に植物による除染（ファイトレメディエーション）は有望視され、数多くの取り組みが行われた。結果としてはファイトレメディエーションの効果は極めて少量として土壌からの除去できる放射性セシウムの量は1%にも満たないことが明らかにされており（農研機構 2015）、ファイトレメディエーションによる除染は少なくとも粘土の多い日本の土壌においては困難であると考えられる（Kobayashi, 2014, Shinano, 2014）。さらには除去したことにより生じる低濃度の放射性セシウムを含む大量の植物体の処理も必要となる。ただし、ファイトレメディエーションに関しては震災当初では十分に検討する意義はあったと考えられる。それは土壌への固着の速度が不明である中で植物に吸収されやすい放射性セシウムが土壌中の主要形態であったのであれば植物によって選択的に回収できる可能性はあったからである。震災から5年を迎えるにあたり、幾つかの問題点も明らかになった。牧草の根茎が表層10cm程度にルートマットを形成することから草地における反転耕は効果的であると考えられたが、幾つかの草地において除染後に再び基準値超えを起こす事例が報告されている。例えば福島県の場合、平成26年度は除染後草地の基準値超えの事例は0.9%であったが、平成27年度は1.3%と上昇しており（農林水産省 2016）、今後の喫緊の対策が必要である。またあんぼ柿は震災前の7割以上に生産が回復が進んでいるが、幼果検査が必要であり、乾燥をする過程で濃縮がされるリスクもあることから、よりいっそうの低減対策が必要である。果樹ではゆずの放射性セシウム濃度が高く、整枝などによる抑制技術の開発が未だに行われているが、福島県浜通りなどでは改植による対応も進められている。

また、今後営農再開地域が拡充することを想定した場合にはより高濃度に汚染されていた地域も視野に入れた研究を進める必要がある。そのような地域では農地のみならず周辺環境（低濃度でも大量に流入する水や除染されていない土壌など）が農業生産にどのような影響をもたらすのかについても丁寧に解析を進める必要がある。農業用水に関しては直接的な影響としては懸濁態ではなく溶存態の影響が大きいことが明らかであるが、これまでの知見から溶存態の場合も土壌の交換性カリが移行抑制に強く機能することが示唆されている（福島県 2013）。今後は実際の圃場レベルにおいても検証を進めていく必要があるが、これまでの調査では溶存態が多く含まれている河川用水は確認されておら

ず、これまでの試験では懸濁態に比較して溶存態の放射性セシウムの存在量が少ないことが明らかである (Shin et al. 2015)。今後実証栽培試験を通して玄米の放射性セシウム濃度への影響を明らかにする。震災時に飛散して未除染の降下物が再汚染を引き起こす可能性は否定できず、実際に平成25年の玄米の基準値超え28件のうち、27件はそれが原因と考えられる(農林水産省2015b)。周辺の除染状況を見極めながら、農地周辺の降下物のモニタリングを実施するなどを通じた対策を取る必要がある。

農地除染では大量の表土の他にも、雑草(表土剥ぎ取り前に刈り取る)や枝葉も生じている。これらの廃棄物は保管する場所に制限がある上に、植物系の廃棄物は腐敗などの問題もある。農研機構と森林総研が中心となり、バイオマスの減容化に取り組み、その実証装置が川俣町に設置されて約15%程度まで減容化(ペレット化)され、水分含有率も低減可能なことから長期保存に耐えることが可能となっている。現在このようにして生じるペレットを燃焼資材として利用が可能かの検証にも取り組みが行われる。一方廃棄土壌に関しては農研機構、JIRCASなどが中心となり、補助剤を加えることにより高温でセシウムを昇華回収する装置を開発し、飯舘村に実証機が導入されている。

これらの対策の一方で、新たな問題も生じている。一つには営農再開に向けた除染作業と人々の帰還の時間的なズレが生じているため、除染が終了しても農地が利用されずに放置されることになる。表土剥ぎ取りを行った後に投入される客土は周辺の山土(主にマサ土)を用いるために肥沃度は低く、また降雨による土壌流亡にも弱い。さらに震災から年月が経過することにより多年生で深根性の雑草、木本が侵入しているために除染後にも再びこれらの植物が発生しやすい状況にある。いかに省力的に除染後の農地を管理して営農再開を容易にすることができるかという技術が求められている。また、営農が再開されている地域においてはカリによる移行抑制対策をいつまで継続する必要があるのかが明示されていない。これまでの知見から場所によっては移行抑制対策をやめることによって3年目には再び基準値超えを起こすことが明らかになっている(農研機構2015c)一方で、生産者には労働力として作業が多いこと、現在の賠償が終了した場合の対策について早急に決める必要があることからカリの適正化が求められている。

以上のように、東京電力福島第一原子力発電所の事故によって飛散した放射性セシウムは広大な農地を汚染したが、物理的除染と移行抑制対策を組み合わせることにより回復を確実なものとしている。残された農地においてもこれらの対策を的確に進めると同時に、さらなる安全の確保を達成するためには、現場の様々な状況を見極めながら柔軟に対応策を考える必要がある。不幸な事故ではあったが、得られた知見が今後の世界の資産として活用されるために、取られてきた対策とそれを裏付ける理論を構築する必要がある。

## 参考文献

農研機構(2012a)：茶樹における放射性物質対策 <http://www.naro.affrc.go.jp>

/training/files/reformation\_txt2012\_c40.pdf

福島県(2011):放射性関連支援技術情報 果樹の樹体洗浄による樹皮汚染低減技術

[http://www4.pref.fukushima.jp/nougyou-centre/kenkyuseika/h23\\_radiologic\\_seika/h23\\_radiologic\\_35.pdf](http://www4.pref.fukushima.jp/nougyou-centre/kenkyuseika/h23_radiologic_seika/h23_radiologic_35.pdf)

農林水産省(2012):普及活動事例 福島県「果樹の除染技術普及による原子力災害からの復興」[http://www.maff.go.jp/j/seisan/gizyutu/hukyu/h\\_zirei/pdf/7-07fuku\\_shimal.pdf](http://www.maff.go.jp/j/seisan/gizyutu/hukyu/h_zirei/pdf/7-07fuku_shimal.pdf)

Sato, M. et al. (2015), Decontamination effects of bark washing with a high-pressure washer on Peach [*Prunus persica* (L.) Batsch] and Japanese Persimmon (*Diospyros kaki* Thunb.) contaminated with radiocaesium during dormancy. *The Horticultural Journal*, 84(4), 295-304.

農林水産省(2012b):平成23年度食料・農業・農村白書、放射性物質による農畜産物・食品等への影響と対応 [http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w\\_maff/h23\\_h/trend/part1/sp/sp\\_c2\\_2\\_01.html](http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h23_h/trend/part1/sp/sp_c2_2_01.html)

Kato, N. (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 Science and Plant Nutrition*, 61(2), 179-190

農林水産省(2014a):放射性セシウム濃度の高い米が発生する要因とその対策について [http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/pdf/youin\\_kome2.pdf](http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/pdf/youin_kome2.pdf)

農林水産省(2015a):放射性セシウム濃度の高い大豆が発生する要因とその対策について [http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/pdf/youin\\_daizu\\_3.pdf](http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/pdf/youin_daizu_3.pdf)

農林水産省(2014b):放射性セシウム濃度の高いそばが発生する要因とその対策について [http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/pdf/h25soba\\_yoin.pdf](http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/pdf/h25soba_yoin.pdf)

農林水産省(2014c):牧草地における放射性物質移行低減対策の手引き [http://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/shiryo/pdf/josen\\_pamph\\_all.pdf](http://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/shiryo/pdf/josen_pamph_all.pdf)

農研機構(2012b):各種夏作野菜への土壌中の放射性セシウムの移行係数 [http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/tarc/2011/a00a0\\_01\\_77.html](http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/tarc/2011/a00a0_01_77.html)

環境省(2013):除染関係ガイドライン [http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/josen-gl-full\\_ver2.pdf](http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/josen-gl-full_ver2.pdf)

農研機構(2012c):プラウを用いた反転耕による放射性物質に汚染された表層土壌の埋却 [https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/narc/2011/a00a0\\_01\\_69.html](https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/narc/2011/a00a0_01_69.html)

ふくしまの恵み安全対策協議会 2016:玄米 H27年産 放射性物質検査情報 <https://fukumegu.org/ok/kome/> (2016.2.28 現在)

Hachinohe, M. et al. (2015), Distribution of radioactive cesium (<sup>134</sup>Cs plus <sup>137</sup>Cs) in rice fractions during polishing and cooking. *Journal of Food Protection*, 78(3), 561-566.

農研機構(2015):汚染地域で栽培したアマランサス属の放射性セシウム吸収特性 [https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nics/2014/nics14\\_s13.html](https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nics/2014/nics14_s13.html)

Kobayashi, D. et al.(2014), Verification of radiocesium decontamination from farmlands by plants in Fukushima. *Journal of Plant Research*, 127(1), 51-56.

Shinano, T. et al. (2014), Varietal difference in radiocesium uptake and transfer from

radiocesium deposited soils in the genus *Amaranthus*. *Soil Science and Plant Nutrition*, 60(6), 809-817.

農林水産省(2016):永年生牧草地の除染対策について <http://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/shiryo/josentaisaku.html> (2016.2.28 現在)

福島県(2013): 放射性関連支援技術情報 溶存態放射性セシウム濃度が玄米の放射性セシウム濃度に及ぼす影響 [http://www.pref.fukushima.lg.jp/w4/nougyou-centre/kenkyuseika/h24\\_radiologic/h24\\_radiologic\\_30.pdf](http://www.pref.fukushima.lg.jp/w4/nougyou-centre/kenkyuseika/h24_radiologic/h24_radiologic_30.pdf)

Shin, M. et al. 2015, Dynamic analysis of radioactive cesium in decontaminated paddy fields. *Journal of Water and environment Technology*, 13(5) 383-394.

農林水産省(2015b):福島県南相馬市の 25 年産米の基準値超過の発生要因調査について <http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/fukushima/> (2016.2.28 現在)

農研機構(2015c):牧草中放射性セシウム濃度低減のために、草地更新後もカリ施肥継続は必要 [https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nilgs/2014/14\\_079.html](https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nilgs/2014/14_079.html)