

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年6月25日現在

機関番号：11601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26511005

研究課題名(和文) 果樹の放射性セシウムの樹体内再分配に関する研究

研究課題名(英文) Study on Redistribution of Radioactive Cesium in Fruit Tree in Tree

研究代表者

高田 大輔 (TAKATA, Daisuke)

福島大学・農学系教育研究組織設置準備室・准教授

研究者番号：80456178

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：モモについて果実発育期間中の放射性CsとK-40について、経時的に8年間調査した。満開15日後の幼果における放射性Cs濃度が高く、いずれの年も共通の現象であった。その後、果実の肥大に伴い、果実中の放射性Cs濃度は大きく低下し、特に満開後60日までの低下が大きかった。経年的な変化を見たところ、収穫果実の放射性Cs濃度は、2011年から2013年までの期間は、1年経過するごとの3分の1程度に減少した。しかしながら、2014年以降2017年まではその低下はほとんどなかった。ブルーベリーを用いてCs-133とCs-137を同時に施用した場合、果実への移行割合は類似であった。

研究成果の概要(英文)：We investigated radiocesium and 40K in peach during the maturity of its fruits chronologically for 8 years. In the investigation during one crop period, the concentration of radiocesium in young fruits 15 days after the full bloom was the highest, and this result was common in all of the investigated years. When looking at a chronological transition, the concentration of radiocesium in harvested fruits decreased by one third in every year from 2011 to 2013. However, such decrease could not be seen from 2014 to 2017. The transfer factor ratio of 133Cs and 137Cs to fruits is likely to be similar when they are applied at the same time to blueberries.

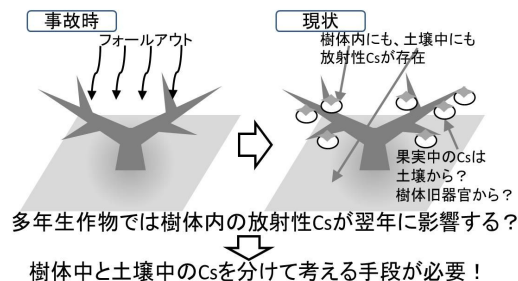
研究分野：果樹園芸

キーワード：果樹 モモ 放射性セシウム 福島第一原子力発電所事故 樹体内動態

1. 研究開始当初の背景

2011年3月の福島第一原子力発電所事故(本事故)以来、放射性Csの降下による農地汚染が問題になっている。放射性降下物の植物に与える影響については、放射性降下物の試験的添加(Rallsら、1971)ピキニ環礁での水爆実験に基づくフォールアウト(三井・天正、1958)やチェルノブイリ事故に伴う放射性降下物に関するIAEA(2010等)など多数の報告がある。特にCsに汚染された土壌から可食部への放射性核種の移行を予測するための移行係数の検討例は多い。しかし、果樹に関して、IAEAレポートなどでは、トマト等の果菜類と併せて果実への放射性核種の移行が論じられているように、単独で評価された例は少ない。本事故を受けて、国内でも数点の移行係数に関する研究が行われているが、概して果樹の移行係数は低いとされている。しかしながら、カキやモモなど一部の果樹において、2012年においても出荷制限にかかるような放射性Cs濃度が果実より検出されており、この実態のすべてを土壌からの移行だけで説明することは極めて困難である。土壌汚染と果実汚染の関連については否定するものではないが、土壌からの移行を主として分析してきた過去の知見だけを、今後も世界中で起きうる可能性を否定できない放射能汚染に対して参考にするわけにはいかない。そこで、福島原発事故に起因する放射性Csの挙動に関して、樹体内に存在する放射性Csに特に重点的に検証試験を行うことで、果実への放射性Csの移行について、正確に判断する材料を得ることができ

る。永年作物である果樹では、幹や枝などの旧器官が年間を通じて存在している。チェルノブイリ事故では、事故時に幼果や葉が存在したため、それら新生器官よりの放射性核種の吸収を再現した試験が多い。実際、葉は数種のイオンを気孔より吸収することが明らかとされており(Ehiken・Kirchner、2002)、果樹でも葉面散布による樹体への吸収が確認されている。しかし、本事故は、落葉果樹では葉のない時期に発生した災害であるにもかかわらず、樹体内に放射性Csが移行している(高田ら、2012)。土壌からの移行に関しては、事故年では樹体内に移行した放射性Cs



第1図. 樹体へのフォールアウトと果樹のセシウム調査に関する概念図

は土壌経由ではなく、地上部から直接吸収されたものがほとんどであることが明らかとなっている(高田ら、2012)。よって、永年性作物では地上部から直接吸収済の樹体内にすでに存在するCsの挙動を明らかとすることが優先されるべきであるが、事故年以降の樹体内Csの挙動に関しては明らかではない。

2. 研究の目的

放射性セシウム(Cs)の果樹樹体内における動態の把握を目的とする。樹種は福島県における主力果樹であるモモを用いることで、現在の汚染環境を把握することも目的の一つとする。土壌中の放射性Csの作物への移行については、チェルノブイリ事故後にも報告があるが、果樹などの永年作物について、フォールアウトにより樹体内に取り込まれた放射性Csの次年度以降の動態を明らかにした報告がないため、この点を土壌からの放射性Csの樹体への移行とは切り離して検討する。そのために、放射性Csを取り込ませた樹体を非放射性Cs豊富な土壌に植え付け、また非放射性Csを取り込ませた樹体を放射性Csが豊富な土壌に植え付けることで、樹体から果実や葉への移行、土壌から樹体への移行をそれぞれ検討する。

さらには、永年作物の栽培学的観点からの解析、例えば、どのような部位にCsが移行しやすいか、その部位は次年度以降存在するのといった中長期的物質循環を視野に入れた解析は行われていない。加えて、放射性Csの葉での濃度は古い葉程高いことが明らかになりつつあるが(高田ら、2012)、これはKのような類似の動態を示すと言われる元素と比べても異なる。このような差異に関しては、他の元素との動きとも絡めて比較する必要があるものの、そもそも、非放射性Csとの挙動との比較も少ない。非放射性Csと放射性Csとの比較を試みる場合、その分析可能性が問題となり、放射性Csが、ゲルマニウム半導体検出器によりごく微量でも検出可能なのに対して、非放射性CsはICP発光分光分析装置などによる総量の分析のため、放射性Csよりも添加濃度を高める必要がある。よって、非放射性Csを多量に添加した際の動態と、量的には少量の放射性Csとの動態の差異も明らかにする必要はある。Csの樹体内での挙動について解析するための手法として、隔離環境下でのRI試験以外に、¹³³Csを用いたオープンフィールドでの試験が主体になることが考えられる。果実中のCs濃度は事故3年後で約10分の1に低下しており、¹³⁷Csの物理的半減期よりも早い。今後、検出が困難になっていく放射性Csと、放射性Csと比べて多量でない¹³³Csとの樹体内における量的違いに起因する移行の差異を明らかとすることは、今後のオープンフィールドでの非放射性Csを用

いた再現試験を事故時の対応策に結び付けるために必須である。

(1) 福島第一原子力発電所事故に起因した放射性 Cs のモモ果実における経年変化

福島県伊達市、福島市の現地園地で栽培されているモモ樹体に関して、放射性 Cs 濃度の経年変化を計測した。

(2) 放射性 Cs と非放射性 Cs の樹体への添加による移行メカニズムの解明

(2-1)(1)の知見を基に、非放射性的の 133Cs と放射性的の 137Cs の動態を樹体内の総量や各部位の濃度・含量と比較する。福島現地園地より採取の汚染樹を温室に移動して、非放射性 Cs を添加した土壌 (CsCl+CsNO₄-Rich) で栽培する。これらにより、土壌中からの非放射性 Cs の樹体への移行の様相と、樹体内の放射性 Cs の再移行の様相を明らかとする。

(2-2) 2-1 とは逆に、2013 年度に樹体・土壌への Cs 噴霧・添加処理により作出済みの、樹体内に 133Cs が豊富に存在する樹体を福島県内より搬入した 137Cs を含む土壌に植え付け、土壌中からの放射性 Cs の樹体への移行の様相と、樹体内の非放射性 Cs の再移行の様相を比較する。

2-1 と 2-2 は対をなす試験であるが、両者を比較することで、量的に異なる Cs の動向を比較する。すなわち、Cs の土壌から樹体への移行と樹体内での再移行の割合を判別する。

(2-3) 放射性 Cs と非放射性 Cs を同部位より添加した場合の動態を明らかとすることを目的に、土壌中に放射性、非放射性 Cs を添加し、植物体への移行の差異を明らかとする。

いずれの調査も天然由来の 40K とも比較を行うことで、K との動態の違いも明らかとする。

(3) 当該分野における本研究の学術的な特色・独創的な点及び予想される結果と意義

現地園地には、土壌、樹体、周囲の森林をはじめとした環境中などにすでに放射性 Cs が含まれているが、本試験では、汚染源が樹体内のみまたは土壌のみの 2 パターンしかないため、樹体内に取り込み済みの放射性 Cs の動態を、周囲の空間からの二次汚染に影響されることなく評価可能である。チェルノブイリ事故後に評価された移行係数は、実際は土壌以外からの直接汚染も含んだ、いわゆる『みかけの移行係数』である。樹体内にすでに存在する Cs の移行を明らかにすることで、移行係数と『みかけの移行係数』を正確に分別・再評価しうる資料となる。

RI 試験と non-RI 試験との結果を比較可能で、放射性 Cs 濃度が低下した後も、様々な試験を非放射性 Cs で行う際の指標となる。例えば、福島での事故やチェルノブイリの事故以外の時期、例えば秋季での Cs の吸収特性などを明らかとするときなど、事故対応の事前資料を得る機会を広げるものであり、事故の事前防止に次ぐ次善の対応を可能とするための基礎資料となる。

K と Cs の土壌からの吸収に関しては類似の

点が多いとされているが、本事故以降、137Cs と K の動態の違いが生じる場合があり、地上部への移行や、地上部での動態には完全に一致しない点が多く報告されつつある。それが、どのような差異に起因するものか、例えば、量的な差異であるならば、133Cs との比較でも明らかとなり、そもそも K と Cs の違いに起因するならば 40K と比較することで判明する。

3. 研究の方法

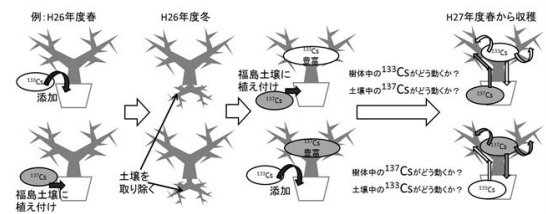
(1) 福島第一原子力発電所事故に起因した放射性 Cs のモモ果実における経年変化

福島県伊達市、福島市の栽培園よりモモ 'あかつき' 選んだ。果実発育期間中の果実の 137Cs 濃度と 40K 濃度を測定した。137Cs と 40K の分析は、東京大学 RI 施設内のゲルマニウム半導体検出器 (ORTEC, セイコー EG&G) で、133Cs の分析は、ICP 発光分光分析装置 (ICPE-9000, Shimadzu) で行った。

(2) 放射性 Cs と非放射性 Cs の樹体への添加による移行メカニズムの解明

平成 25 年度に CsCl と CsNO₃ を添加した土壌で栽培したモモ 'あかつき' 8 樹 (非放射性 Cs+樹) と同数の福島土壌で栽培した別個体 (放射性 Cs+樹) を用いた。平成 26 年に非放射性 Cs+樹を福島土壌に植え替え (試験 2-1)、放射性 Cs+樹を CsCl+CsNO₃ 添加土壌に植え替えた (試験 2-2)。4 月より、その樹体の生育を調査するとともに、収穫時に果実と葉の Cs 濃度を調査した。落葉期には 4 樹を解体し、樹体の部位別 Cs を濃度と総含量の両面から解析した。残りの 4 樹を用いて平成 27 年に同様の試験を行う (樹齢別反復)。なお、別途 2 樹ずつを予備樹とした。

新規に低汚染地域の苗業者より非汚染のブルーベリー苗を温室に搬入し、133Cs ならびに 137Cs を土壌または樹体に散布した。樹体散布用の 137Cs 溶液は福島県内の汚染ゴケを濃縮した溶液を用いた。土壌への 137Cs 処理は、福島市の果樹園より採取した表層土 (137Cs 濃度=6000Bq/kgDW) を用いて栽培することで、樹体に取り込ませた。133Cs は土壌中に CsCl と CsNO₃ それぞれ 25ppm を 2 日間で 2 回添加することで作成した。これらの樹体に関して収穫後に解体し、樹体各部位の 137Cs、133Cs との比較の他に 40K とも比較を行った。



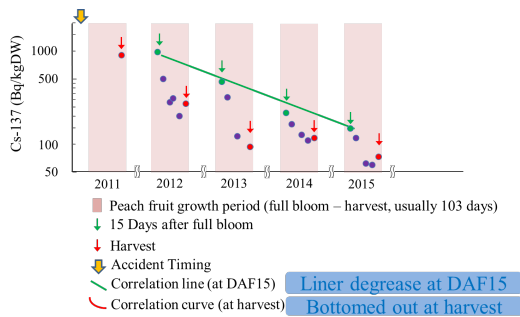
第2図. 試験のイメージ図 葉や果実は省略

4. 研究成果

(1) 福島第一原子力発電所事故に起因した

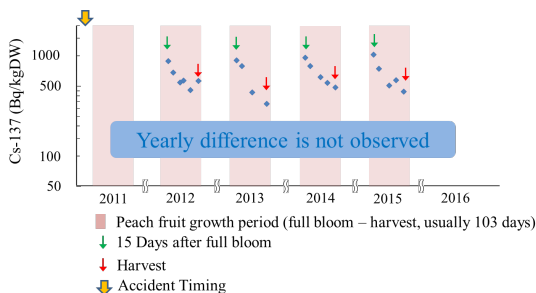
放射性 Cs のモモ果実における経年変化

果実発育期間中の果実の ^{137}Cs 濃度と ^{40}K 濃度を経年的に測定した。1 年間の変化を見たところ、本試験開始前の知見同様、満開後 15 日の果実で放射性 Cs 濃度が最も高かった（第 3 図）。放射性 Cs 濃度は果実発育のステージの進行に伴い減少した（第 3 図）。特に、満開後 60 日までの減少率が大きかった。満開後 60 日以降収穫（おおむね 103 日）までの果実の放射性 Cs 濃度に大きな変化は見られなかった。この変化は、本誌県内で調査した 3 年間に於いて同様の変化を示した。



第 3 図．果実発育期間中におけるモモ果実の放射性セシウム濃度の経年変化 (n=3)

放射性 Cs 濃度でみられた果実発育期間中の濃度変化は、 ^{40}K においてもおおむね同様にみられた。すなわち、満開後 15 日で ^{40}K 濃度が最も高く、果実発育期間を通じて濃度が減少する傾向が見られた（第 4 図）。



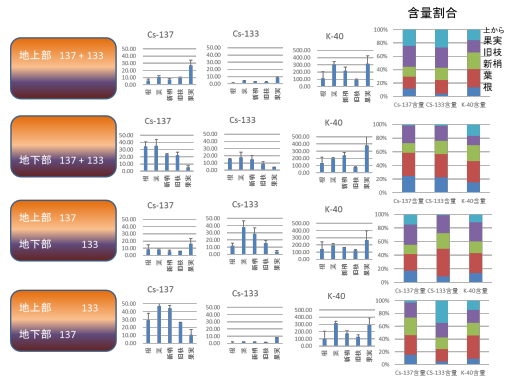
第 4 図．果実発育期間中におけるモモ果実の放射性カリウム濃度の経年変化 (n=3)

年度内の両放射性元素の変化の様相に大きな差異が無かった一方で、経年的な変化には違いが見られた。満開後 15 日における果実の放射性 Cs 濃度は、経年的に減少することが確認された（第 3 図）。その一方で、収穫果実の放射性 Cs 濃度は事故後、3 年目にあたる 2013 年以降は変化がなかった（第 3 図）。放射性 Cs 濃度の変化、特に結実開始直後の濃度に対する収穫果実の濃度に違いがあった一方、 ^{40}K 濃度には年度間の際にはなかった。よって、両元素のモモ果実内における動態には、差異があることが確認できた。

(2) 放射性 Cs と非放射性 Cs の樹体への添加による移行メカニズムの解明

モモ並びにブルーベリーに対して、 ^{137}Cs と ^{133}Cs の施用部位の違いが樹体内のそれぞれの濃度分配に及ぼす影響を調査した。両樹種で類似の結果を得たので、ここではより詳細に調査した、ブルーベリーに関して結果を示す。

まず、地上部 ^{137}Cs 並びに ^{133}Cs を処理した区において、樹体各部位の ^{137}Cs と ^{133}Cs の濃度を見たところ、その濃度分配に優位な差は無かった。地下部に ^{137}Cs 並びに ^{133}Cs を処理した区において、樹体各部位の ^{137}Cs と ^{133}Cs の濃度を見たところ、その濃度分配に優位な差は無かった。この両区における結果から、 ^{137}Cs と ^{133}Cs のブルーベリー樹体内の分配に明確な差異はない事が確認できた。



第 5 図．樹体への ^{133}Cs と ^{137}Cs の施用部位の違いが、樹体各部位の ^{133}Cs 、 ^{137}Cs および ^{40}K 濃度並びに樹体内の含有割合に及ぼす影響 (n=4)

^{137}Cs と ^{40}K は Bq/kgDW、 ^{133}Cs は ppb で表記

地上部に ^{137}Cs を、地下部に ^{133}Cs を処理した区では、地上部に処理された ^{137}Cs は果実に高い割合で分配されていた。地上部に ^{133}Cs を、地下部に ^{137}Cs を処理した区では、地上部に処理された ^{137}Cs は果実に速やかに分配されることが示された。一方で、地上部に ^{137}Cs または ^{133}Cs を処理した場合、いずれの区においてもその割合は低かったが、根への移行が見られた。一方で、地下部に処理された ^{137}Cs または ^{133}Cs は地下部にとどまる割合が高かったが、地上部に移行していた。これらのことから、地上部より吸収された Cs は果実への分配率が高くなるが、経根吸収された Cs は果実への移行割合が低いことが明らかとなった。

この結果から、福島第一原子力発電所事故に起因する果実中の放射性 Cs の由来限は、果樹園に降下した Cs が経根吸収により果実に移行した割合よりも、地上部の樹体に降下した Cs が果実に速やかに移行していたことを指示する結果であった。また、 ^{137}Cs と ^{133}Cs を併用した試験移管してその濃度の差異が大きくはあるが、樹体内での分配の様相

は大きく変わらないことから、今後 133Cs を用いた試験を 137Cs の代用として、あるいは、樹体内のさらなる細部への動態を調査する際の指標として使用することが可能であることを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

Sato, M., Abe, K., Kikunaga, H., Takata, D., Tanoi, K., Ohtsuki, T., and Muramatsu, Y. 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 Horticulture Journal*, 84(4):295-304. DOI:10.2503/hortj.MI-054

Sato, M., Takata, D., Tanoi, K., Ohtsuki, T., and Muramatsu, Y. 2015. Radiocaesium transfer into the fruit of deciduous fruit trees contaminated during dormancy. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61(1):156-164. DOI:10.1080/00380768.2014.975103

高田大輔・佐藤 守・阿部和博・小林奈通子・田野井慶太郎・安永円理子 . 2014 . 放射性降下物に起因した果樹樹体内放射性核種の分布 (第 8 報) - 摘果果実を用いたモモ成熟果実の放射性セシウム濃度の推定について - . *RADIOISOTOPES*, 63 (6) , 293-298 . DOI:10.3769/radioisotopes.63.293

[学会発表](計 件)

Takata, D., M. Sato, K. Abe, K. Tanoi, N. Kobayashi, E. Yasunaga. 2016. Annual changes of Radiocaesium concentration of Peach fruit in Fukushima prefecture AHC2016 China (September 26-29)

高田大輔・市川恭子・小林奈通子・田野井慶太郎・安永円理子・佐藤 守・阿部和博 . 2016 . モモ樹体内における放射性 Cs の再分配について . 第 17 回環境放射能研究会 . 3 月 9 日 .

伊東諒祐・山崎和久・小林奈通子・田野井慶太郎・二瓶直登・高田大輔・益守眞也・中西友子・関谷信人・三浦覚 . 2016 . 福島県田村市都路町の広葉樹林における 137Cs モニタリング . 環境放射能研究会 . 3 月 10 日 .

Sato, M., D. Takata, H. Kikunaga, T. Ohno, T. Takase, K. Tanoi, T. Ohtsuki, Y. Muramatsu, K. Yamaguchi, 2016. Effective half-life of Radiocaesium Derived from Fukushima Nuclear Power Plant Accident in Fruit Trees. AHC2016 China (September 26-29)

市川恭子・高田大輔・佐藤 守・阿部和博・小林奈通子・田野井慶太郎・関谷信人・安永

円理子 . 2015 . 福島県産モモの果実発育期間中における放射性セシウム濃度の経年変化 . 徳島大学 . 園学研 . 15 (別 2) : 144 . 9 月 27 日 .

[図書](計 2 件)

高田大輔・小松知未 (2017) . 中通り県北地域の果樹への影響と販売対策 . 根本圭介編 . 原発事故と福島の農業 . 東京大学出版会 . (9 月)

Takata D. (2016) Translocation of Radiocaesium in Fruit Trees. p. 119-143. In: T. M. Nakanishi and K. Tanoi (eds.). *Agricultural implications of the Fukushima nuclear accident: The first three years*. Springer-Verlag. (Feb.)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高田 大輔 (TAKATA, Daisuke)

福島大学・農学系教育研究組織設置準備室・准教授

研究者番号 : 80456178

(2) 研究分担者

安永 円理子 (YASUNAGA, Eriko)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・准教授

研究者番号 : 00380543

田野井 慶太郎 (TANOI, Keitaro)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・准教授

研究者番号 : 90361576

小林 奈通子 (KOBAYASHI, Natsuko)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・助教

研究者番号 : 60708345

(4) 研究協力者

佐藤 守 (SATO, Mamoru)

福島県農業総合センター果樹研究所

阿部 和博 (ABE, Kazuhiro)

福島県農業総合センター果樹研究所

市川 恭子 (ICHIKAWA, Kyouko)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・修士