

落葉果樹における部位別放射性セシウムの経年変化と除染の効果

Temporal changes of the radiocesium concentrations in different parts of deciduous fruit trees and effect of decontamination trial to bark with high pressure washers

福島県農業総合センター果樹研究所 湯田美菜子 佐藤 守 阿部和博 額田光彦
 齋藤祐一 山口奈々子¹ 瀧田克典 味戸裕幸
 学習院大学理学部 大野 剛 村松康行
 東北大学電子光理学研究センター 菊永英寿 大槻 勤²

¹現会津農林事務所喜多方農業普及所 ²現京都大学原子炉実験所

福島県における落葉果樹の樹体について、放射性セシウム (Cs) 濃度の経年変化と除染の効果を検証した。いずれの樹種でも満開後 30 日以前の花や幼果が最も高い値を示したことから、成熟果の放射性 Cs 濃度は開花期から細胞分裂期の花または果実よりも低くなることは明らかである。果実の汚染レベルの早期判定を行う上で幼果や葉は有効利用できる。また、経年減衰効果が 1/3 程度であることから、汚染初年の測定値から次年度の果実中放射性 Cs 濃度の推定が可能と考えられた。剪定枝については、原発事故後に発生した 2 年生枝および 1 年生枝 (枝齢は 2012 年次) は低い傾向であった。剪定時には、3 年生枝以上の古い枝を積極的に更新することにより、樹体の放射性物質の除去が可能であるものと推察された。

キーワード：経年減衰効果、幼果、成熟果、早期判定、剪定

1 緒言

東京電力福島第一原子力発電所の事故に伴う放射性物質は、福島県北部を中心とした福島県最大の果樹地帯にも多く降下し、深刻な影響を及ぼしている。チェルノブイリ事故による果樹への影響については、Autonopoulos-Domis ら¹⁾²⁾が報告しているが少ない。そこで、落葉果樹における放射性 Cs の樹体内の動態について、2011 年および 2012 年の 2 か年にわたり調査を行ったので報告する。また、2012 年 3 月までに福島県広域で枝表面に付着している放射性 Cs の濃度低減を図るため、高圧洗浄処理による樹体除染を実施したので、枝齢別放射性 Cs 濃度低減の効果について併せて報告する。

2 試験方法

(1) 試験 1 落葉果樹の葉および果実中放射性 Cs 濃度の経時的推移

果樹研究所内モモ ‘あかつき’ 12 年生、ブドウ ‘あづましずく’ 原木 18 年生、ニホンナシ ‘幸水’ 44 年生、リンゴ ‘ふじ’ 46 年生、伊達市カキ園の 31 年生 ‘蜂屋’ を供試して汚染初年度 (2011 年) および翌年 (2012 年) の葉および果実中放射性 Cs 濃度の経時的推移を調査した。更に 2012 年は果樹研究所内ウメ ‘竜峡小梅’ (樹齢不明)、オウトウ ‘紅さやか’ 5 年生、‘佐藤錦’ 高接ぎ 5 年生、モモ ‘ゆうぞら’ 19 年生を加えた。2011 年は、所内は 5 月 19 日、‘蜂屋’ は 8 月 23 日より完熟期まで葉および果実を定期的に採取した。試料は、ブドウ以外は 3 樹以上から採取し、合わせて分析に供試した。成葉は、ブドウは第 4、5 節、ニホンナシでは不定芽新梢中央葉および最大果叢葉、他は側枝先端新梢中

央部の葉を採取し、放射性 Cs (¹³⁴Cs および ¹³⁷Cs) 濃度を測定した。2012 年は、2011 年に調査した同一樹または同一ほ場の非除染樹の葉および果実中放射性 Cs 濃度を経時的に測定した。放射性 Cs 濃度は、学習院大学および東北大学電子光理学研究センター、材料科学技術振興財団においてゲルマニウム半導体検出器により測定した。

(2) 試験 2 汚染初年度から翌年における成熟果実中放射性 Cs 濃度の経年減衰効果

果樹研究所内ウメ ‘竜峡小梅’、オウトウ ‘紅さやか’、‘佐藤錦’、モモ ‘はつおとめ’ ‘はつひめ’ ‘あかつき’ ‘川中島白桃’ ‘ゆうぞら’、ブドウ ‘巨峰’ ‘あづましずく’、ニホンナシ ‘幸水’ ‘涼豊’、リンゴ ‘ふじ’ ‘三島ふじ’、カキ ‘蜂屋’ (伊達市) ‘平無核’ および現地果樹園のオウトウ ‘紅さやか’ (福島市)、モモ ‘はつひめ’ (桑折町)、ブドウ ‘巨峰’ (伊達市)、リンゴ ‘ふじ’ (福島市)、カキ ‘蜂屋’ を供試し、2011 および 2012 年の成熟果の放射性 Cs を測定した。試料は果樹研究所内モモ ‘あかつき’ ‘川中島白桃’ およびカキ ‘蜂屋’ は 3 樹反復とし、ブドウ ‘あづましずく’ は 1 樹、他は、各品種につき 2 ~ 5 樹から採取混合し調整した。2012/2011 濃度比によりフォールアウト翌年の経年減衰効果を検証した。経年減衰効果は、物理的半減期を考慮し、¹³⁷Cs 濃度で評価した。

(3) 試験 3 新梢および側枝の枝齢別放射性 Cs 濃度の経年変化および除染の効果

2011 年 10 月中旬および 2012 年 11 月下旬の 2 か年において、モモ ‘あかつき’ 19 年生およびブドウ ‘巨峰’ 20 年生を供試し、高圧洗浄処理および無処理樹各 1 樹から新梢 (1 年生枝) および側枝を冬季せん定に準じて切除し、1 年

生枝から4年生枝以上までに枝齢別に区分し試料を採取した。高圧洗浄機による樹体の除染は各樹種とも2012年1～3月にかけて行った。除染は、主幹および主枝、垂主枝等の概ね5cm以上の枝について行なった。なお、今回測定した1～4年生枝以上の結果枝は直接除染していない。枝齢別に採取した試料は、剪定ばさみ等により5mm程度に裁断後V-11容器に充填し、NaIシンチレーションスペクトロメータで放射性Cs濃度を測定した(測定時間60～960分)。

3 試験結果

(1) 試験1 落葉果樹の葉および果実中放射性Cs濃度の経時的推移

2011年の果実中放射性Cs濃度はモモ、ニホンナシ、リンゴでは満開後40日以内(6月1日)の幼果期で72～183Bq/kgFWと成熟果の5～7倍の高濃度であった。しかし、満開後50日頃には少なくとも幼果期の1/3以下まで大幅な濃度の低下が認められた。これに対し、成熟期の濃度の低下は緩やかであった。葉中Cs濃度はモモ、ニホンナシ、リンゴでは果実同様、未成熟葉で449～860Bq/kgFWと高濃度を示した(図1、2)。ブドウでは発芽後29日から増加しベレゾン直前期(7月12日)で最高値を示した。またカキでも着色開始期前の成葉(8月23日)で高濃度を示した。成熟期ではいずれの樹種も減衰傾向を示したが、カキでは他の樹種に比較し成熟期の葉中Cs濃度は高濃度であった。また、生育期間の長いリンゴ、カキでは果実肥大期から成熟期まで一定濃度で維持された(図3、4)。

2012年のウメ、オウトウ、モモの果実中放射性Cs濃度は硬核期前の幼果で高く、収穫期の果実では硬核期前と比較して1/2までに減少した(図6)。ブドウ、リンゴの果実中放射性Cs濃度は、満開後20～40日頃の細胞分裂期で高く、以後は幼果期から低濃度で推移した(図6、10)。ニホンナシ、カキの果実中放射性Cs濃度は、満開後30日以前の花または幼果が最も高い値を示した。細胞分裂期以降では幼果期から緩やかに減少した(図5、9)。葉中放射性Cs濃度は若葉期が高かったが、成葉に達して以後の幼果期から成熟期までの果実肥大期は、樹種により変動が見られた。成熟期では減衰傾向が認められたが、モモ「ゆうぞら」では成熟期で高まった。収穫時の葉/果実濃度比では樹種平均で約5倍であった。特に果実中濃度の低かったモモ「はつひめ」、ニホンナシ「幸水」は10倍以上であった(図7)。

(2) 試験2 汚染初年度から翌年における成熟果実中放射性Cs濃度の経年減衰効果

果実中放射性Cs濃度は汚染初年度と比較して大きく減少し、物理的半減期の長い¹³⁷Cs濃度でも、ほぼ1/3以上の経年減衰効果が認められた(図8～11)。2011年に低濃度であったニホンナシおよびブドウの減衰比は1/3以下であった。また、モモでは品種間差が認められ、早生種「はつひめ」では1/8まで減衰した。これに対し「はつおとめ」および「あかつき」では1/3～1/4であった。また着果不良で大果となった「川中島白桃」の減衰比は1/5で、中晩生種の中では高い値を示した。収穫時の葉中¹³⁷Cs濃度も果実同様に汚染初年度と比較して、ほぼ1/3の経年減衰効果が認められ、特に核果類で大きく減衰した(図12)。

(3) 試験3 新梢および側枝の枝齢別放射性Cs濃度の経年変化および除染の効果

モモの枝の放射性セシウム濃度は、2011年は3年生枝、2年生枝、1年生枝の順に高かった(図13)。2012年は3年生枝、2年生枝、1年生枝の順に高く、4年生枝以上の側枝は3年生枝よりやや低い傾向を示した。原発事故後に発生した2年生枝および1年生枝は低い傾向であった。樹体除染の有無による比較では、原発事故後に発生した枝では除染した樹の方が低く、それ以外の枝齢の枝では除染の有無による差異は認められなかった(図14)。ブドウでは、2011年は2年生枝、1年生枝の順に高かった(図15)。2012年は3年生枝、2年生枝、1年生枝の順に高く、原発事故後に発生した枝は低い傾向であった。樹体除染の有無による比較では1年生枝では差がなく、2、3年生枝では、いずれも除染した樹の方が低かった(図16)。

4 考察

チェルノブイリ事故では、果樹の果実および葉の放射性Csを経時的に測定した事例は報告されておらず、実験による報告も限られている。Carini³⁾は、放射性Csは師部内の移動が容易であり、生育期間中は葉からの転流により果実へ放射性Csが蓄積されるとし、果実生育期は成長に伴う希釈により放射性核種濃度は低下するとしている。またZehnderら⁶⁾はブドウで葉から果実への¹³⁴Csの転流では幼果で高濃度となり、以後、減少したと報告している。本研究でも7樹種すべてにおいてZehnderら⁶⁾の報告と一致した。また直接、花または幼果が汚染されたウメを除く果樹ではオウトウの果実中放射性Cs濃度が高かった。オウトウは1果当たりの重量が他の果樹と比較して著しく少ないことから果実肥大による希釈効果が少ないことが影響していると推察された。また、モモ「はつひめ」の果実中¹³⁷Cs濃度の経年減衰効果は他品種より高かったが、「はつひめ」は新梢の生育が旺盛であることに加え、果実肥大が良好であったためと推察された。

幼果期以降の果実生育に伴う減衰傾向はニホンナシ、カキでは幼果期から緩やかに減少したのに対し、リンゴおよびブドウでは果実肥大初期から低濃度で推移し、樹種により異なった。Zehnderら⁶⁾はブドウでは成熟後期には果実から茎や根への再転流が起きているとしている。このことは放射性Csは葉、果実、根などの器官のシンク活性の強弱に応じて再転流が起きている可能性を示唆している。新梢生育期は新根の成長期でもあり、これらの器官と果実との競合関係が樹種により異なることが、生育に伴う放射性Csの減衰パターンの樹種間差の一因と推察された。

なお、いずれの樹種でも開花前の花または満開後30日以前の幼果が最も高い値を示したことから、成熟果の放射性Cs濃度は細胞分裂期の果実よりも低くなることは明らかで、幼果の放射性Cs濃度が成熟果の汚染レベルの早期判定に活用できると考えられた(高田大輔ら⁵⁾)。

Antonopoulos-Domis²⁾のチェルノブイリ事故による汚染調査によると、リンゴ、モモ、サクランボ、スモモでは長期的には土壌からの吸収は無視してよく、汚染から2、3年は貯蔵された放射性Csの再利用が多かった。また、アンズでは1987から1988年の間で新生器官の¹³⁷Cs濃度が1/3ま

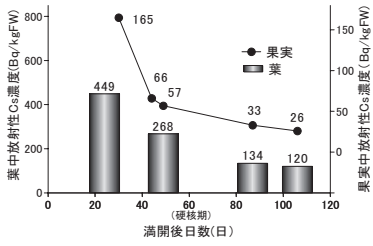


図1 'あかつき'の葉および果実中放射性Cs濃度の経時的推移 (2011年)

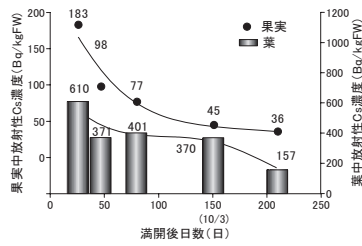


図2 'ふじ'の葉および果実中放射性Cs濃度の推移 (2011年)

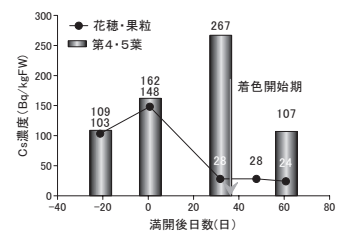


図3 'あぶましずく'の葉および果実中放射性Cs濃度の推移 (2011年)

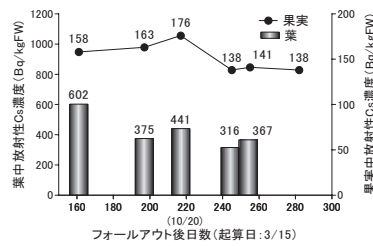


図4 '蜂屋'の葉および果実中放射性Cs濃度の推移 (2011年)

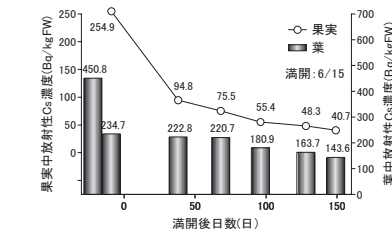


図5 '蜂屋'の葉および果実中放射性Cs濃度の推移 (2012年)

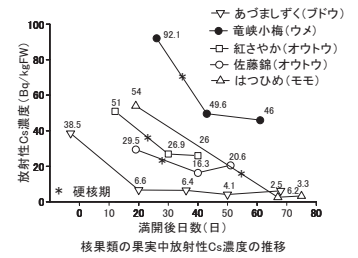


図6 核果類およびブドウの果実中放射性Cs濃度の推移 (2012年)

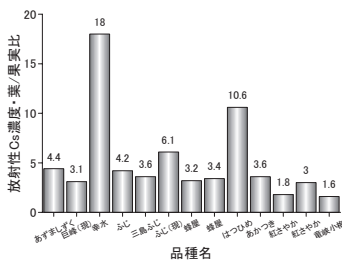


図7 放射性Cs濃度の葉/果実比 (2012年)

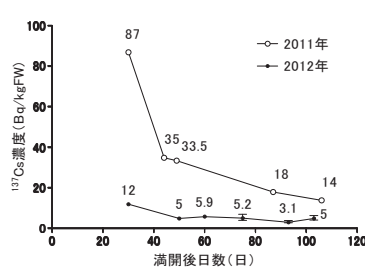


図8 果実中¹³⁷Cs濃度の年次比較

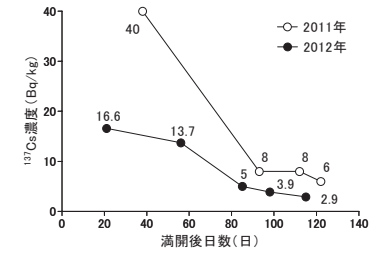


図9 果実中¹³⁷Cs濃度の年次比較 (幸水)

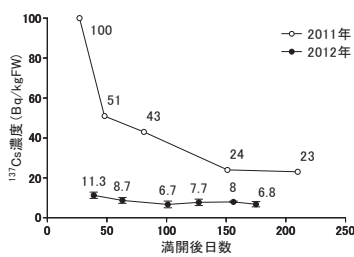


図10 果実中¹³⁷Cs濃度の年次比較 (ふじ)

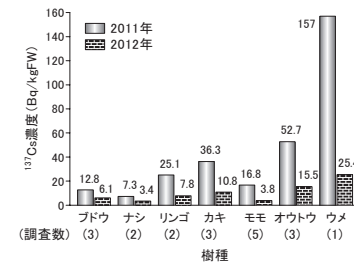


図11 成熟果の¹³⁷Cs濃度の年次比較

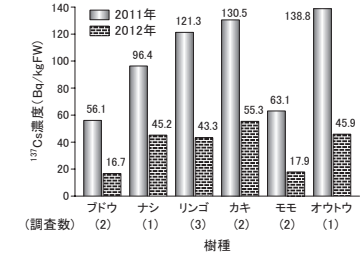


図12 葉(収穫期)の¹³⁷Cs濃度の年次比較

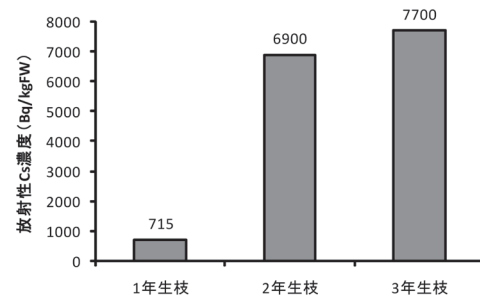


図13 モモの枝齢別放射性Cs濃度 (2011年)

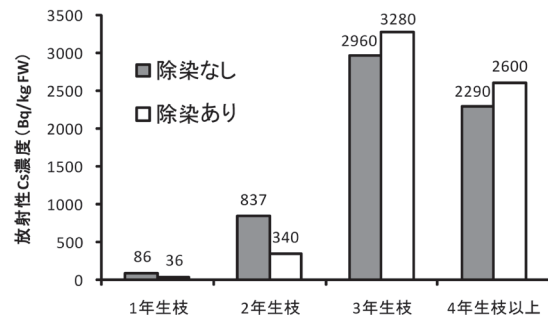


図14 モモの枝齢別放射性Cs濃度 (2012年)

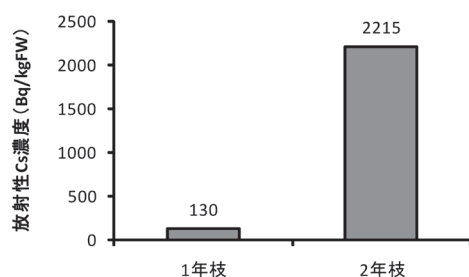


図15 ブドウの枝齢別放射性Cs 濃度 (2011年)

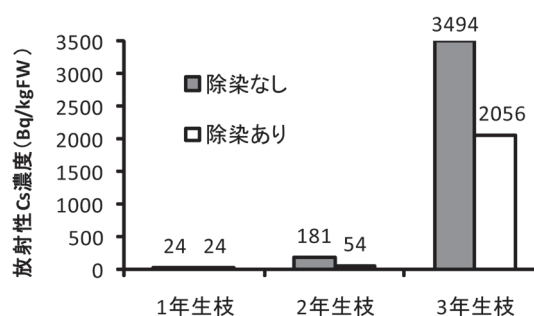


図16 ブドウの枝齢別放射性Cs 濃度 (2012年)

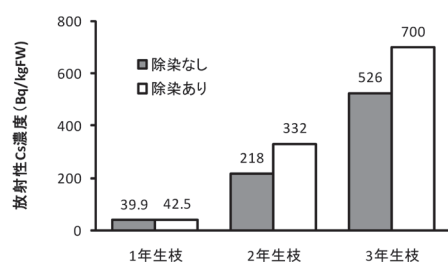


図17 リンゴの枝齢別放射性Cs 濃度 (2012年)

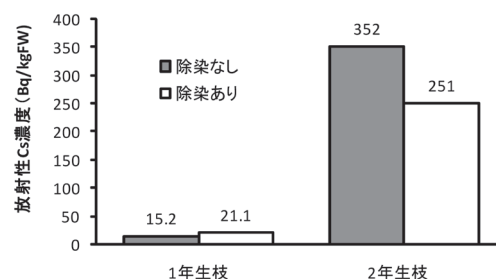


図18 ニホンナシの枝齢別放射性Cs 濃度 (2012年)

での減少が認められている。Madoz-Escandeらのブドウでの実験では、果実中放射性Cs濃度は、汚染翌年には1/3までに、2年目から3年目では更に1/4までに低下し、汚染初年度から3か年で1桁以上低下した。また、年次による減少は茎や葉でも同様であった (IAEA⁴⁾)。本調査結果は、これらの報告と矛盾はなく、また、貯蔵養分による成長期である細胞分裂期で高濃度を示していることから、汚染2年目の新生器官の汚染源は貯蔵された放射性Csと考えられた。

果実中¹³⁷Cs濃度は、汚染初年度と比較して、1/3以下まで減少し、前年対比で60%以上の経年減衰効果が認められた。2011年に低濃度であったニホンナシおよびブドウでは他の樹種より減少率は小さかった。果実中¹³⁷Cs濃度は、経年減衰効果により前年の1/3程度まで減少することが明らかとなったことから、本年の測定値から次年度の果実中放射性Cs濃度の推定が可能と思考された。

新梢および側枝の枝齢別放射性Cs濃度の経年変化については、放射性セシウム濃度は3年生枝で2,000Bq/kg以上あったが、原発事故後に発生した枝は低い傾向がみられ、被曝した枝齢の枝から被曝していない新生部位への放射性Csの転流は少ないことが明らかになった。このことから3年生枝以上の古い枝を積極的に更新することにより、長期的には果実中放射性Csの低減が可能と考えられた。除染の効果についてはモモおよびブドウでは骨格枝の高圧洗浄により1、2年生枝の放射性Cs濃度の低減傾向を示したが、ニホンナシおよびリンゴでは影響は認められず (図17、18)、樹種により異なっていることから更に検証が必要である。

謝辞

東京電力福島第一原子力発電所の事故後、いち早く福島県に駆けつけ、測定指導および無償で分析くださった

東北大学電子光理学研究センター、学習院大学、東京大学大学院農学生命科学研究科および福島大学の皆さんに感謝いたします。

引用文献

- 1) Antonopoulos-Domis, M., A. Clouvas and A. Gagianas. 1990. Compartment model for long-term contamination prediction in deciduous fruit trees after a nuclear accident. Health Physics 58 : 737-741.
- 2) Antonopoulos-Domis, M., A. Clouvas and A. Gagianas. 1991. Radiocesium dynamics in fruit trees following the Chernobyl accident. Health Physics 61 : 837-842.
- 3) Carini, F. 2009. Radionuclide transfer to fruit in the IAEA TRS 364 Revision. Journal of Environmental Radioactivity 100 : 752-756.
- 4) IAEA. 2003. Modelling the transfer of radionuclides to fruit.
- 5) 高田大輔・佐藤 守・阿部和博・安永円理子・田野井慶太郎. 2013. 摘果果実を用いたモモ成熟果の放射性セシウム濃度の予測について. 園学研 12 (別1) : 80.
- 6) Zehnder et al. 1995. Uptake and transport of radioactive cesium and strontium in grapevines after leaf contamination. Radiation Physics and Chemistry 46 (1) : 61-69.