

福島第一原発事故による樹園地における樹皮の放射能汚染状況の推移

額田 光彦・佐藤 守・斎藤 祐一¹・阿部 和博・安部 充²

Aging Changes in the Radioactive Contamination on the Bark in Deciduous Fruit Trees
by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident

Mitsuhiko NUKADA, Mamoru SATO, Yuichi SAITO, Kazuhiro ABE and Mitsuru ABE

Abstract

The radiation count rate of the limbs of peach, apple and pear of tree washing doesn't do as decontamination trial of radioactive materials was measured using a Geiger-Mueller survey meter (TGS146). The measuring position was at the top part on each scaffold limb at 30cm, 130cm and 230cm from the bifurcation for the horizontal direction, and was at the top, side, and bottom (ground-facing) sites on two separate scaffold limbs at 30cm distance from the bifurcation for the circumferential direction. Aging changes in the radiation count rate of the bark surface were investigated to establish the technology from April 28, 2011 to about 2 years and a half.

(1) Epidermis was smooth for a peach tree, and stood up overall, and formed a bark into an apple tree, and the point was gentler little than 130cm, and formed a bark into pear, and was in the level state for the most part from 130cm.

(2) When beginning to measure the radiation dose according to the distance, pear > apple > peach saw overall, and had in turn. Higher radiation count rate at 30cm in peach trees and 230cm in apple trees was observed.

(3) Higher radiation count rate at the top, side, and bottom positions in order was observed for the circumferential direction. Small difference of measured value between top and bottom showed in peach trees.

(4) Radiation count rate at the 1m height in orchards and on the trunk decreased in 64~67 and 75~90% respectively during 926 days from May 9, 2011.

(5) Radioactive materials were adherent much at the top on scaffold limb where fallout was received directly, but the difference of movement was judged by the state of the epidermis and the gradient of the scaffold limb, and it was necessary to note these by decontamination trial. It was effective to put high-pressure washing or bark shave surface of a bough into effect politely with decontamination trial. A bough of apple and pear was often covered up by a bark, so It's necessary to put it into effect politely.

Key Words: bark, contamination, deciduous fruit tree, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, radiation count rate

キーワード：樹皮、汚染、果樹、福島第一原子力発電所、放射線量

1 緒言

2011年3月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事故により、環境中に大量の放射性核種が放出され、東日本を中心に大気や土壌は放射性セシウムであるセシウム134およびセシウム137によって汚染された¹⁾。当県で栽培されているモモ、ニホンナシ、リンゴ等の落葉果樹は、主要な大気からの降下が見られた時期にはウメを除きまだ発芽前であり、また、土壌に沈積した放射性核種は地表面下の数センチに限られていて、主要な根域には達していなかったにもかかわらず、2011年の葉や果実で比較的高濃度の放射性セシウムが検出された²⁾。この原因を探るために、放射性セシウムによる樹体の汚染状況を調査したところ、樹皮に多くの放射性セシウムが沈着していることが判明した。また、樹体内への放射性セシウムの移行に関して試験したところ、樹皮に付着した放射性セシウムが樹体内部へ移行し、それが葉や果実に転流・集積したことが考えられた^{3) 4) 5) 6)}。これらから除染対策として樹皮洗浄が有効と考えられ、樹皮の洗浄効果について数々の報告がなされた^{7) 8) 9)}。県内の主要な果樹産地では、2011年から2012年にかけて販売や出荷等に供する果樹を対象に高圧水による樹体洗浄が行われた。一方で販売や出荷等に供しないなどの理由で非洗浄の果樹もわずかながら存在するが、非洗浄の果樹で樹皮上の放射性セシウムの状態など長期的に検証した事例はないことから、今回、非洗浄のモモ、ニホンナシ、リンゴ樹について、約2年半にわたり樹皮表面の放射線計数率等を測定し、汚染状況の推移を検証したので報告する。

2 試験方法

試験には、福島県農業総合センター果樹研究所内のモモはつひめ'6年生（樹齢は試験開始時、以下同）、モモ福島8号8年生、'ふくあかり'6年生、モモ福島12号7年生およびモモ福島14号7年生各1樹を、ニホンナシは'幸水'44年生5樹を、リンゴは'ふじ'46年生3樹を供試した。主枝分岐部からの距離別および位置別の樹皮の放射線計数率を経時的に調査するとともに、樹園地中央部の地上1mの空間線量を調査した。土壌の種類は褐色森林土であり、2011年10月25日における深さ30cmの土壌中のセシウム134とセシウム137濃度の合計値は、平均で12.4 kBq⁻¹kg DWであった。

(1) 主枝分岐部からの距離および位置別の樹皮汚染量

主枝等の骨格枝を対象に、主枝分岐部から30cm、

130cm、230cmの位置の上面（天空側）および主枝分岐部から30cmの位置の周囲方向で上面、側面、下面の位置の放射線量を樹皮から1cm離してGMサーベイメーター（TGS-146：日立アロカメディカル株）により20秒後の計数率を1回で測定した（図1、2）。樹皮の測定か所にはあらかじめビニールテープを巻き、2011年4月28日から2012年1月25日までは30日間隔で、それ以降2013年11月20日までは60日間隔で調査した。なお放射線計数率は、GMサーベイメーターによる樹皮の測定値から空間の測定値を引いたものとした。

(2) 園地内空間線量

NaIサーベイメーター（TCS-172：日立アロカメディカル株）を用いてモモ、リンゴ、ニホンナシ園の中央部各1カ所について地上高1mの空間線量を2012年3月28日から2013年11月20日まで測定した。

3 試験結果及び考察

(1) 主枝分岐部からの距離別の放射線量

本調査は、GMサーベイメーターによる樹皮表面の放射線計数率測定値により樹皮表面の放射性セシウム汚染動態を検証することを目的としたものである。本研究で使用したGMサーベイメーターは身体表面汚染を測定する際に用いられているものである。周辺線量当量を測定するために用いられるNaIシンチレーションサーベイメーターの方向特性が全方位であるのに対し、GMサーベイメーターの方向特性は指向性があり検出される放射線は窓側に限定される。本調査開始に当たっては、ブドウおよびニホンナシの樹皮におけるGMサーベイメーターによる放射線計数率測定値が測定部位の放射性セシウム濃度を反映したものであることを検証済みである（2012、佐藤）。また土壌表面の放射線計数率測定値と土壌表層5cmの放射性セシウム濃度との間に高度に有意な一次回帰を有する（ $R^2=0.979$ $p<0.0001$ ）ことを確認している（2011、未発表）。このことから、GMサーベイメーターにより測定した放射線計数率が樹皮表面付近の放射性セシウム量に依存していることは明らかである。

供試樹については、モモは平均で、樹高3.4m、樹幅7.2m×6.3m、主枝分岐部から距離30cmの位置の直径、仰角はそれぞれ17.4cm、43°、同130cmでは15.0cm、50°、同230cmでは、11.5cm、32°の樹形であった（図1、表1、2）。リンゴは平均で、樹高3.5m、樹



図1 主枝分岐部からの距離別の放射線量測定（2015年12月撮影）

幅8.7 m×10.0 m、主枝分岐部から距離30cmの位置の直径、仰角はそれぞれ28.6cm、23°、同130cmでは28.1 cm、29°、同230cmでは、24.0cm、27°の樹形であった。ニホンナシは平均で、樹高1.8 m、樹幅6.9 m×7.4 m、主枝分岐部から距離30cmの位置の直径、仰角（俯角）はそれぞれ20.4cm、40°、同130cmでは17.5cm、9°、同230cmでは、15.2cm、-3°の樹形であった。

フォールアウト時に真上から樹皮に降下した放射性セシウム量の違いを推計するため、それぞれの樹種で主枝分岐部からの距離30cmから230cmまでの範囲について、距離30cmと130cmの位置の仰角を考慮して地表に対して垂直に投影した面積を計算した。その結果、直径と各位置における仰角に依存して、モモが2,037 cm²、リンゴが4,888 cm²、ニホンナシが3,066 cm²となり、投影面積上はリンゴに最も多くの放射性セシウムが降下したと考えられ、続いてニホンナシ、モモの順であった。

主枝分岐部からの距離別の放射線計数率は、モモ、リンゴ、ニホンナシともに測定開始日の2011年5月8日から経過日数150日頃にかけて誤差は大きかったが、数値は大きく減少し、その後は緩やかに減少する傾向を示した。

樹種別での違いをみると、モモでは、位置別に測定した平均値は前述のRCsの降下量の違いも影響してか¹²⁾ 調査初期からリンゴやニホンナシと比べて放射線計数率は1～3 kcpmと低い傾向にあり、調査初期においては30cm>130cm>230cmの順に放射線計数率は高く、経過日数981日においてもその傾向は続いた（図3）。また、経過日数44日から55日にかけてモモの30cmの位置で放射線計数率に増加がみられ、その後急激に減少している。これらは樹皮が容易に剥離し粗皮化するリンゴ樹やニホンナシ樹に比べて、モモ樹の樹皮は剥離性に乏しく滑らかであったために主枝に付着した放射性物質が流れやすい状態にあったこと、また、モモ樹の主枝は地表面

表1 樹高及び樹幅

	樹高 (m)	樹幅 (m)	
		東西	南北
モモ	3.4 ± 0.1	7.2 ± 1.7	6.3 ± 1.0
リンゴ	3.5 ± 0.2	8.7 ± 0.1	10.0 ± 0.6
ニホンナシ	1.8 ± 0.0	6.9 ± 0.5	7.4 ± 0.4

*2016年1月13日測定 モモ3樹平均、リンゴ2樹平均、ニホンナシ3樹平均
試験時にはいずれの樹も樹形が完成した成木となっており、その後の樹高、樹幅に大きな違いはない。
なお、2015年11～12月に供試樹の一部を伐採したため、調査樹数とは一致せず。

表2 主枝の太さ及び仰角（俯角）

	主枝分岐部の高さ (cm)	主枝直径 (cm)			主枝の仰角（俯角） (°)		
		0.3m	1.3m	2.3m	0.3m	1.3m	2.3m
モモ	61	17.4 ± 1.3	15.0 ± 0.6	11.5 ± 1.3	43 ± 13	50 ± 12	32 ± 9
リンゴ	121	28.6 ± 1.1	28.1 ± 4.4	24.0 ± 2.1	23 ± 13	29 ± 7	27 ± 3
ニホンナシ	80	20.4 ± 1.6	17.5 ± 3.6	15.2 ± 1.6	40 ± 6	9 ± 10	-3 ± 5

*2016年1月12日測定 モモ3樹平均、リンゴ2樹平均、ニホンナシ3樹平均

試験時にはいずれの樹も樹形が完成した成木となっており、その後の主枝分岐部の高さ及び主枝の仰角（俯角）に大きな違いはないが、主枝直径はやや太くなっているものとみられる。

なお、2015年11～12月に供試樹の一部を伐採したため、調査樹数とは一致せず。

*主枝の仰角：水平よりも見上げた主枝の角度

主枝の俯角：水平よりも見下げた主枝の角度、マイナス表示



図2 樹皮の位置別放射線量の測定（2011年8月撮影）

61cm付近から分岐し、水平方向に対して32～50°の角度をもって斜立させた立木であり、それが44日から55日にかけての6.0 mmの降雨により樹の上部より流れ落ちた放射性物質の一部が主枝分岐部付近に集積した可能性が考えられた（図4、5）。なお、その後、同位置においては日数の経過とともに減少がみられた。リンゴでは、調査初期には4 kcpm前後と距離別の放射線量には大きな差は無かったものの、経過日数100日後頃より230cmの距離での放射線計数率の減少に鈍化がみられ、この傾向は調査終了日まで続いた。これは、今回供試したリンゴ樹は立

木栽培で、主枝が地表面121cm付近から分岐し、水平方向に対して23～29°と緩やかに斜立させており、また、樹齢が46年生と高く外皮の粗皮化が進み、主枝に付着した放射性物質が流れにくい状態にあったためと考えられた。230cmの距離で高かったのは、この部位付近では徒長枝の発生が多く、その凸凹状のせん定痕に放射性物質が留まり、雨水による移行を受けにくかったことが影響していると考えられた（図1）。ニホンナシでは、調査初期には5～6 kcpmと放射線計数率はモモやリンゴよりも高い値を示した（図3）。これは、外皮がリンゴよりもさ

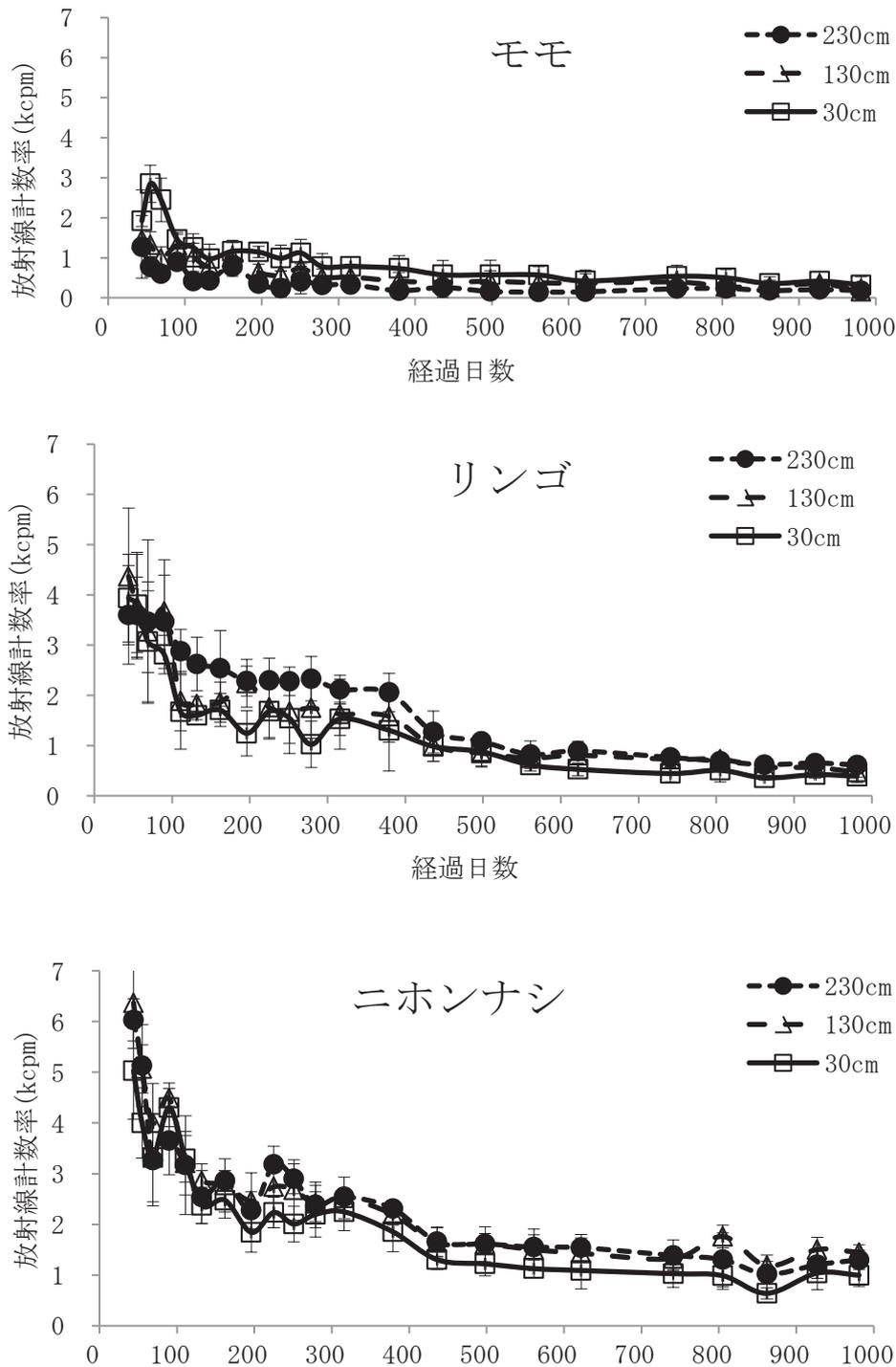


図3 樹皮の主枝分岐部からの距離別放射線量の経時的推移

*経過日数は2011年3月15日起算

*バーは標準偏差

らに粗皮化が進んでいたことが影響していると考えられ、また、今回供試したニホンナシ樹は平棚栽培で主枝が地表面80cm付近から分岐し、30cm付近は40°と主幹の立ち上がり部であることに対して、130cmおよび230cmの位置では概ね水平方向であり、また、

この位置付近では日焼け痕による凸凹の症状がみられ、ここに放射性物質が留まったことが影響していると考えられた。

リンゴおよびニホンナシでは経過日数379日から436日にかけて減少を示しているが、この期間には

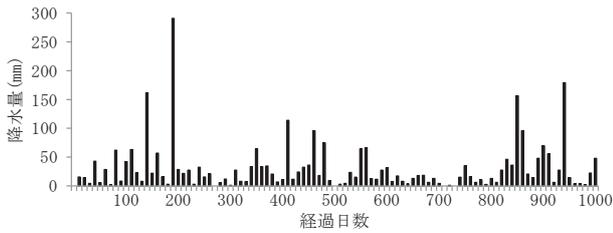


図4 降水量の推移（旬計）

*経過日数は2011年3月15日起算

*調査地点：福島県農業総合センター果樹研究所（福島市）

185.5 mmと多量の降雨があり、これにより傾斜角度の小さいリンゴおよびニホンナシの主枝上に滞留していた放射性物質の流亡が促進されたものと考えられた。

(2) 主枝上の測定部位の違いによる放射線量

主枝上の放射線計数率は、モモ、リンゴおよびニホンナシともに測定開始日の2011年5月8日から上面>側面>下面の順に高く、いずれも時間の経過とともに低下したが、この傾向は調査終了の経過日数981日においても続いた。粗皮の形成が進んでいた

リンゴとニホンナシではフォールアウトを直接受けた上面が4～6 kcpmと高く、側面や下面はこれより低い傾向で推移した。しかし、モモでは、リンゴやニホンナシと比べて上面の濃度が低くその差は小さかった（図6）。これは、モモの樹皮がリンゴやニホンナシよりも滑らかであり、雨水により放射性物質が上面から側面や下面に移動、もしくは地表面に流亡したためと考えられた。また、ニホンナシの上面の放射線計数率がリンゴよりも高かったが、これは樹皮の粗皮化がリンゴよりも進んでいることにより放射性物質が流されにくかったためと考えられた。

(3) 樹園地と樹体における放射線量の経時的推移

樹園地の放射線計数率は、測定開始日の2011年5月9日を100とした場合、2013年11月20日までの約926日間で、モモ園の空間線量は約64%減少したのに対し、モモの主枝上では約86%が減少した（図7）。リンゴ園の空間線量は約65%減少したのに対し、リンゴの主枝上では約90%が減少した。ニホンナシ園の空間線量は約67%減少したのに対し、



図5 各樹種の樹皮の状況（2011年10月撮影）

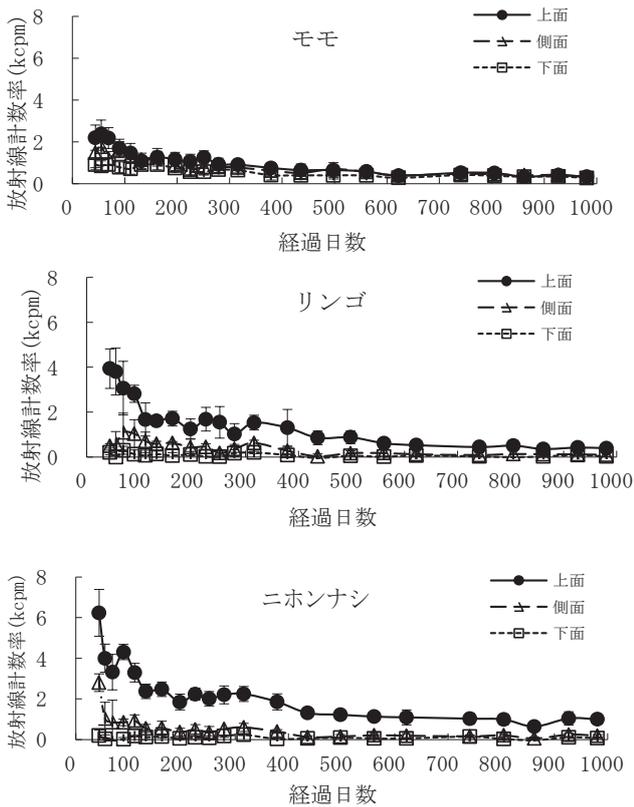


図6 樹皮の位置別放射線量の経時的推移

*経過日数は2011年3月15日起算
*バーは標準偏差

ニホンナシの主枝上では約75%が減少した。セシウム134とセシウム137の空間線量に及ぼす寄与率を1cm線量当量率定数(セシウム134=0.249、セシウム137=0.0927)から試算すると、物理的半減期によるこの期間の空間線量減衰の理論値は約45%の減少であり、主枝上の減少は初期の約130日までが急激であったことが分かる(図7)。これは、主枝上に付着した放射性セシウムの形態を反映したものと推察される。すなわち流れやすい放射性セシウムが早期に流亡し、一方、樹皮に吸着された放射性セシウムは時間が経過しても停滞している可能性を示唆するものである。これについては今後の検証が必要である。

(4) 園地内空間線量

NaIサーベイメーターによる樹園地の平均の放射線量の推移は、2012年3月28日には $1.38 \mu\text{Sv h}^{-1}$ であったのが、2013年11月20日には $0.81 \mu\text{Sv h}^{-1}$ と約41%減少した(図8)。この期間のGMサーベイメーター測定による空間線量の減少は35~42%であり(図7)、ほぼ同様の傾向であった。早い時期に樹皮の放射線量が急激に減少することにより、空間線量の減少が大きいが、1年を過ぎた以降では、物

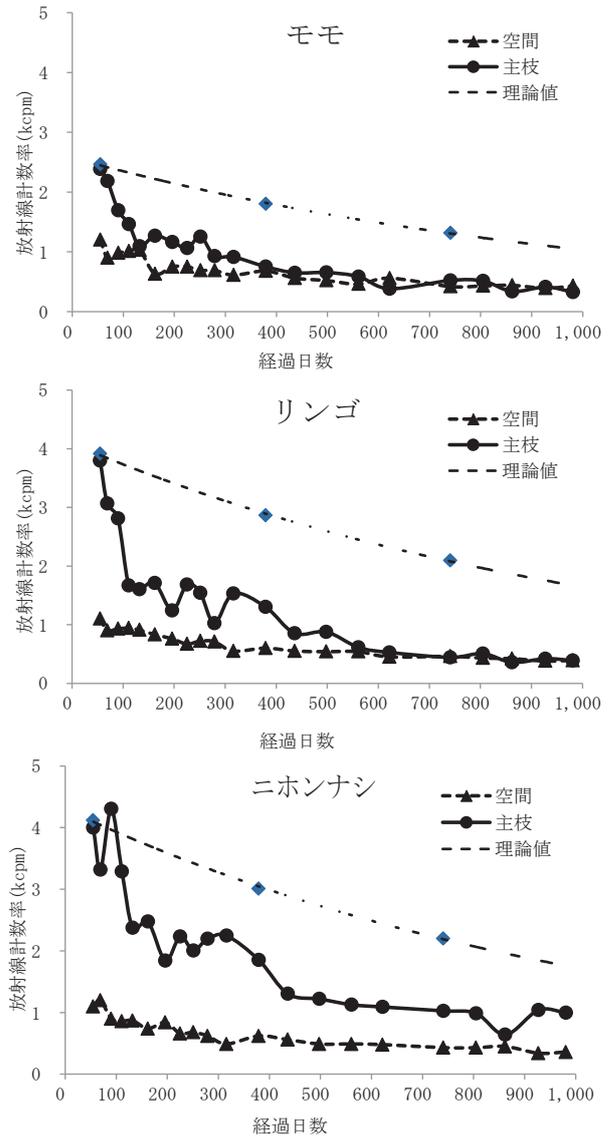


図7 主枝と樹園地における放射線量の推移

*経過日数は2011年3月15日起算
空間：地上1mの測定値
主枝：主枝分岐部から30cmの上部の平均値

理的半減期の理論値にほぼ近似して推移し、経時的に減少パターンが異なった。これは、Pröhlら¹⁰⁾の環境半減期モデルと一致する傾向を示すものと考えられた。

以上のことより、樹皮上の放射性物質は時間の経過とともに減少したが、これは空間線量の減少幅よりも大きく、雨などによる流亡の影響と考えられた。このことから流亡した樹皮上の放射性セシウムが他の果実等に付着することによる影響についても今後検討する必要があると考えられた¹¹⁾。

フォールアウトを直接受けた大枝の上面では、放射性物質が多く付着していたが、表皮の状態(粗・滑の程度)や枝の傾斜度により移動に差が見られたことか

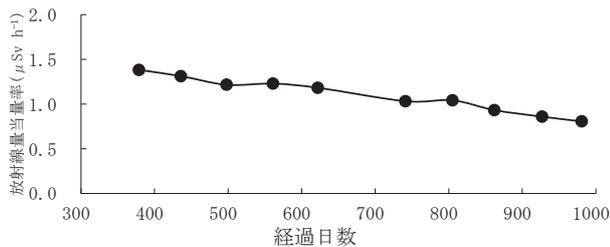


図8 Nalサーベイメーターによる樹園地の放射線量の推移

放射線当量率はNaIサーベイメーターによる高さ1mの測定値(モモ、リンゴ、ニホンナシの平均値)を示す

*経過日数は2011年3月15日起算

ら、フォールアウトを受けた樹皮を対象とした除染作業では大枝の上面を側面や下面よりも丁寧に高圧洗浄もしくは粗皮削りを実施することが有効と考えられた。併せて、リンゴやニホンナシの大枝は粗皮で覆われている場合が多いのでより丁寧に実施する必要があると考えられた。

4 摘要

果樹の放射性物質の除染対策として樹体洗浄が行わないモモ、リンゴおよびニホンナシ樹の主枝を対象に、2011年4月28日から約2年半にわたり、主枝分岐部からの距離別(30cm、130cm、230cm)、位置別(主枝分岐部から30cmの位置の上面、側面、下面)の放射線量をGMサーベイメーターにより経時的に測定し、樹皮表面の汚染状況の推移を検証した。

- (1) 供試樹は、モモ樹は樹皮が滑らかで全体的に樹は立ち上がっており、リンゴ樹は粗皮を形成しており130cmより先はやや緩やかであり、ニホンナシ樹は粗皮を形成しており130cmより先は概ね水平状態であった。
- (2) 距離別の放射線量は測定開始時には全体的にみてニホンナシ>リンゴ>モモの順に高かった。また、モモでは30cmの位置で高く、リンゴでは230cmで高い傾向が見られた。
- (3) 位置別の放射線量は、各樹種とも上面>側面>下面の順に高い傾向を示したが、モモでは、上面と下面の差が小さかった。
- (4) 樹園地の放射線量は、測定開始日の2011年5月9日を100とした場合、2013年11月20日までの926日間で、空間線量は64~67%減少したのに対し、主枝上の放射線量は75~90%が減少した。
- (5) フォールアウトを直接受けた大枝の上面には放射性物質が多く付着していたが、表皮の粗滑の程度や枝の傾斜度により移行に差が見られ、除染作業では

大枝の上面を丁寧に高圧洗浄もしくは粗皮削りを実施することが有効と考えられた。また、リンゴやニホンナシの大枝は粗皮で覆われている場合が多いので丁寧に実施する必要があると考えられた。

謝辞

本研究の実施に当たって多大なるご助言をいただいた京都大学原子炉実験所大槻勤氏(前東北大学電子光物理学研究センター)、故村松康弘氏(前学習院大学)に感謝いたします。

引用文献

- 1) 文部科学省.2011.プレスリリース 文部科学省及び米国エネルギー省航空機による航空機モニタリングの測定結果について.
- 2) 湯田美菜子・佐藤 守・阿部和博・額田光彦・斎藤祐一・山口奈々子・瀧田克典・味戸裕幸・大野剛 村松康行・菊永英寿・大槻 勤. 2014. 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. 福島県農業総合センター研究報告 放射性物質対策特集号:78-81
- 3) Antonopoulos-Domis, M., A.Clouvas and A.Gagianas.1991.Radiocesium dynamics in fruit trees following the Chernobyl accident, Health Physics 61:837-842
- 4) 佐藤守・阿部和博・大野剛・村松康行・高瀬つぎ子・河津賢澄・高田大輔・田野井慶太郎. 2014.休眠期に汚染された落葉果樹の放射性セシウムの樹体内への移行経路の解明. 福島県農業総合センター研究報告 放射性物質対策特集号:70-73.
- 5) 高田大輔・安永円理子・田野井慶太郎・中西友子・佐々木治人・大下誠一. 2012. 放射性降下物に起因した果樹樹体内放射性核種の分布 -低濃度放射性降下物地域における核果類に関する事例的調査-. RADIOISOTOPES, 61 (6), 321-326.
- 6) 高田大輔・安永円理子・田野井慶太郎・中西友子・佐々木治人・大下誠一. 2012. 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2報) -福島第一原子力発電所事故当年における土壌からの放射性Csの移行について-. RADIOISOTOPES, 61 (10), 517-521.
- 7) 阿部和博・佐藤守・瀧田克典・湯田美菜子・味戸裕幸・大野剛・村松康行・菊永英寿・大槻勤. 2014.休眠期に汚染されたカキの葉中および果実中放射性セシウムの挙動および樹体除染処理効果の検

証. 福島県農業総合センター研究報告 放射性物質
対策特集号: 74-77

[http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/
contents/4000/3710/24/305820_20110506.pdf](http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/4000/3710/24/305820_20110506.pdf)

(2014年12月15日現在)

- 8) 佐藤 守.2014. 休眠期に汚染された落葉果樹における放射性セシウム移行メカニズムと吸収抑制対策. 日土肥誌 85: 103-106.
- 9) 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. Horticulture Journal , 84:295 – 304.
- 10) G. Pröhl, S. Ehlken, I. Fiedler, G. Kirchner, E. Klemt, G. Zibold.2006. Ecological half—lives of ^{90}Sr and ^{137}Cs in terrestrial and aquatic ecosystems. Journal of Environmental Radioactivity 91: 41 – 72.
- 11) 関澤春仁、佐藤真理、相原隆志、村上敏文、八戸真弓、濱松潮香.2016. カキ果実におけるヘタを経由した放射性セシウムの移行. RADIOISOTOPES 65:129–135.
- 12) 佐藤 守.2012. 福島のもも、この1年—原発事故初年の放射能汚染対策試験から—。放射化学ニュース,26,21–31.

