

3. 森林内の空間線量率の変動要因の把握

(1) 目的

森林除染実施箇所等において、除染後の空間線量率の変化と森林環境因子の関連を把握し、森林除染実施箇所、森林施業を計画する際に留意等すべきことの有無等について、確認することを目的として調査を実施した。

(2) 調査地と調査方法

1) 調査対象地の概要

平成 24 (2012) 年度補正事業では、田村市、川内村及び広野町において、除染を実施した森林の空間線量率の変化とその要因把握のための調査を実施した。その後、平成 26 (2014) 年度は、平成 24 (2012) 年度補正事業で森林除染実施後の空間線量率の上昇が比較的大きかった国有林野内の 10 ライン及び低減した箇所又は大きな変化が無かった箇所等 10 ラインの計 20 ラインを抽出し (図 3-1)、調査を実施した。平成 27～29 (2015～2017) 年度事業では、これら 20 ラインに加え、平成 26 (2014) 年度事業で空間線量率の上昇がみられた 1 ライン周辺の 2 ラインを追加し、計 22 ラインで調査を実施した。なお、平成 24 (2012) 年度補正事業の現地調査は、平成 25 (2013) 年 6～9 月に、平成 26 (2014) 年度は 10～12 月、平成 27 (2015) 年度は 11 月に、平成 28 (2016) 年度は 11～12 月、平成 29 (2017) 年度は 10～11 月、平成 30 (2018) ～令和 2 (2020) 年度は 11 月に実施した。

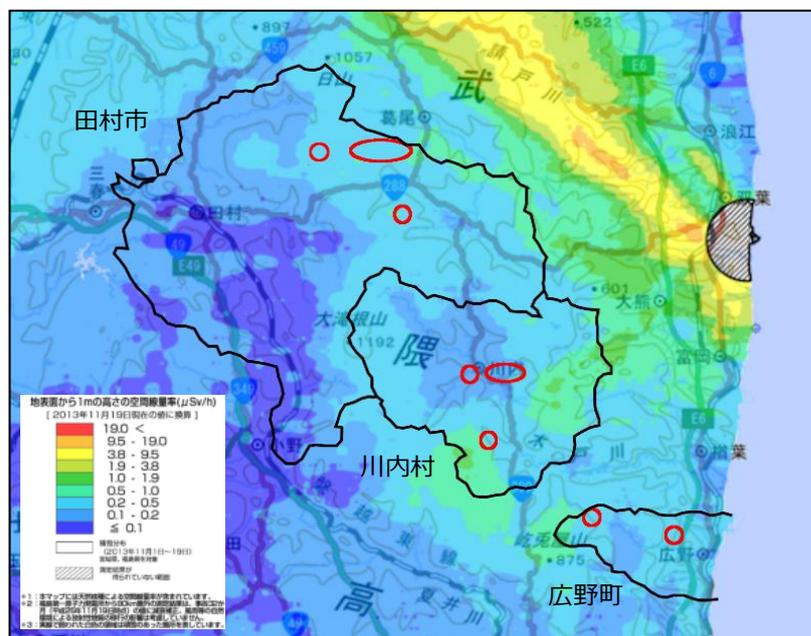


図 3-1 調査地の位置等

※航空機モニタリングによる空間線量率(令和元(2019)年 11 月 2 日時点)

出典: 放射線量等分布マップ拡大サイト

2) 調査箇所の設定

空間線量率測定点の配置イメージを図 3-2 に示す。

平成 24 (2012) 年度補正事業では、除染前後に空間線量率を測定した既測定点をもとに林縁部から林内に測定ラインを設定している。ラインの始点となる既測定点には、基本的に環境省によって、杭が設置されており、これを起点として概ね 5m ピッチで森林内に向かって測定点を 10 点程度設定している。このときラインの方向は、除染範囲内と除染範囲外の境界に垂直になるよう、また、なるべく最大傾斜方向に設定している。

測定点は、22 ライン合計で、227 点となっている。22 の測定ラインのうち、15 ラインには除染前後に空間線量率を測定した点（環境省測定）が 1 ライン当たり 1~2 点あり、除染前・除染直後と本調査で、得られた空間線量率の比較が可能な測定点は 35 点である。

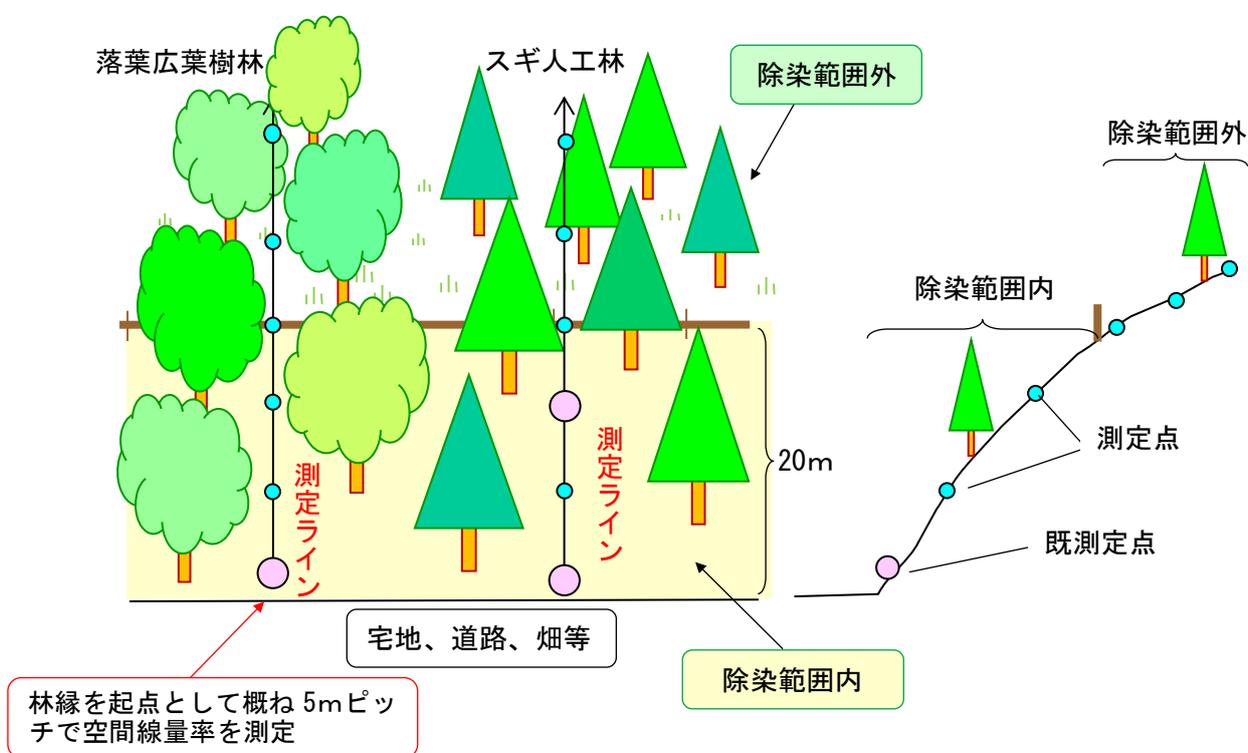


図 3-2 空間線量率測定点の配置イメージ

3) 空間線量率の測定

全測定点において、地表 0.1m 高及び地表 1m 高の空間線量率を測定した。測定は、後述の第 7 章に記載した方法に従った。

4) 堆積有機物及び土壌の放射性セシウム濃度の測定

各測定ラインの除染範囲内の測定点の周辺 1 箇所と同じラインに属する除染範囲外の測定点（林相等から判断してラインを代表すると思われる点）の周辺 1 箇所をセットとし、22 セット計 44 箇所において、堆積有機物及び土壌を採取した。採取箇所は、空間線量率への影響を考慮し、原則として、杭から進行方向に対して、90 度、距離 1m の位置から採取した。岩等で

採取できない場合は、適宜場所をずらして採取した。堆積有機物の試料は、20cm×20cm の方形枠を設置し、この範囲を対象に、鉍質土層が確認される深さまで採取した（図 3-3）。土壌の試料は容積100mLの採土円筒を用いて、堆積有機物の採取と同一の範囲内(20cm×20cm)において、深さ5cmまで5箇所から採取し混合した。



図 3-3 堆積有機物及び土壌の採取

採取した試料は、7章に記載した方法により、単位重量当たりの放射性セシウム濃度(Bq/kg)を求めた。

堆積有機物の放射性セシウム現存量(Bq/m²)は、傾斜地にあつては、傾斜補正(水平距離換算)して、採取した試料から求めた単位面積当たり現存量に放射性セシウム濃度を乗じて算出した。土壌の放射性セシウム現存量(Bq/m²)は、採取した試料から容積重を測定し、深さ5cmの単位面積当たり現存量を求め、放射性セシウム濃度を乗じて算出した。

5) 森林環境因子の調査

測定点の周辺において、空間線量率に影響を与える可能性があると考えられる森林環境因子について、調査した。整理上、植物由来の森林環境因子(植生等情報)とそれ以外の森林環境因子(地形・人為的痕跡等情報)に分けて以下に示す。

① 植生等情報

ア. 優占樹種

各測定点を中心として、5m以内にある高木・亜高木層の樹木のうち、優占する樹種(広葉樹、アカマツ、マツ以外の針葉樹(スギ、ヒノキ、モミ、カラマツ等)、タケの4区分)について記載した。

イ. 高木・亜高木層

各測定点を中心として、5m以内にある高木・亜高木層の平均樹高(10m未満、10m以上～20m未満、20m以上の3区分)と被度(50%未満、50%以上-80%未満、80%以上の3区分)を調査した。

ウ. 低木層

各測定点を中心として、5m以内にある低木層の平均樹高(1.5m未満、1.5m以上の2区分)及び被度(10%未満、10%以上-30%未満、30%以上の3区分)を調査した。

エ. 草本層被度

各測定点を中心として、5m以内にある草本層の被度(10%未満、10%以上-50%未満、50%以上の3区分)を調査した。

オ. ササ

各測定点を中心として、5m 以内にあるササの生育状況について、平均稈高（30cm 未満、30cm 以上-1m 未満、1m 以上の 3 区分）及び被度（10%未満、10%以上-50%未満、50%以上の 3 区分）を調査した。

カ. 立木（測定点から 5m 以内で最大樹高の立木）

各測定点を中心として、5m 以内にある最大樹高の立木一本について、その樹種、樹高（5-10m、10cm 以上-20m 未満、20m 以上の 3 区分）及び胸高直径（10cm 未満、10cm 以上-20cm 未満、20cm 以上の 3 区分）、測定点からの距離（m 単位）を調査した。

キ. 堆積有機物の厚さ

各測定点周辺 3 箇所、堆積有機物に定規を差込み、その厚さを測定した。測定箇所は、空間線量率測定点の位置、測定点から斜面方向左右 1m の 2 箇所とした（図 3-4）。これらの 3 箇所の平均値を測定点の落葉層の厚さとした。

また、各測定点を中心として、5m 以内にある堆積有機物について、種類（樹種）及び被度（70%未満、70%以上-90%未満、90%以上の 3 区分）を調査した。

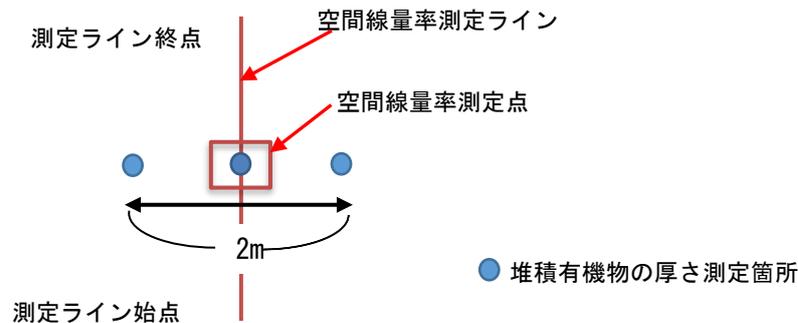


図 3-4 堆積有機物の厚さ測定箇所

ク. 倒木や落枝による被覆

各測定点を中心として、5m 以内にある倒木や落枝による被覆の状況（なし、10%未満、10%以上の 3 区分）について調査した。

ケ. LAI（葉面積指数）

立木の葉のバイオマス量の指標として、LAI⁸（Leaf Area Index、葉面積指数）がある。

本事業では、全天球撮影用デジタルカメラ（THETA リコー製）を用いて、空間線量率測定点の全天球写真を撮影し、これをもとに、画像処理を実施し、LAI を推定した。画像の処理にあたっては、複数のフリーソフトウェアを使用し以下の手順で行った。

[画像処理手順]

1. カメラ前方を北方向、レンズ位置を地上 2m として、全天球写真を撮影。

⁸ 地表の単位面積に対しての、その上方に存在するすべての葉の片側の総面積の比率で定義される指数

2. 全天球写真に、THETA 専用の画像表示ソフトウェア上で天頂補正書き出し⁹を実施したのち、ソフトウェア「paint.net」のプラグイン「THETATools1_2」を用いて、魚眼レンズ撮影画像に変換。
3. 変換した画像から、ソフトウェア「LIA32 for Windows95」を用いて、LAI を算出。

② 地形・人為的痕跡等情報

ア. 斜面位置

各測定点について、尾根、斜面位置（上部、中部、下部）、谷部、溪流、湿地の 7 項目のうち、いずれの 카테고리 区分に該当するか調査した。なお、現地では、谷部、溪流、湿地はみられなかった。

イ. 傾斜角

ウ. 人工的な遮蔽物

各測定点を中心として、5m 以内における人工的な遮蔽物の有無及びその種類を調査した。例としては丸太、人工構造物（太陽熱温水器の枠）、ゴミ（タイヤ、ワイヤー）等がみられた。

エ. 再除染や最近の刈払い

各測定点を中心として、5m 以内における再除染や最近の刈払いの有無を調査した。平成 27（2015）年度に、再除染あるいは刈払われたと考えられる痕跡があれば記入した。最近の刈払いと思われる痕跡が数箇所確認された。

オ. 火の痕跡の有無

各測定点を中心として、5m 以内における火の痕跡の有無を調査した。平成 27（2015）年に火災発生箇所が 1 ライン確認された。

カ. 土壌侵食の有無

各測定点を中心として、5m 以内における土壌侵食の有無を調査した。現地では確認されなかった。

キ. ガリー形成の有無

各測定点を中心として、5m 以内におけるガリー（雨裂）発生の有無を調査した。ガリーが認められた場合には、深さ（cm）も記入した。現地では確認されなかった。

ク. 初期沈着量

第 3 次航空機モニタリング（平成 23（2011）年 7 月 2 日時点）の結果を使用した。分析には放射性セシウム（Cs-137）の値を用いた。

ケ. 空間線量率差分

斜面上下に、隣接する 2 箇所の空間線量率測定点の測定値の差を求めた。空間線量率の測定値の変化に、斜面上部の放射性セシウムの影響があることを想定して設定した。

⁹ 全天球写真の天頂と実際の天頂を一致させるための処理

6) 解析方法

空間線量率については、時点間の空間線量率の散布図を用いて、除染前の平成 24 (2012) 年から、令和 2 (2020) 年にかけての推移、除染実施箇所と除染未実施箇所の比較を行った。また、樹種別にも同様の分析を行った。分析に際しては、各年度間の変化率の分散が等しいとみなせるか否かをバートレット法¹⁰で検定した後、分散が等しいとみなせると判定された場合は、Tukey-Kramer 法¹¹による多重比較検定、分散が等しいとみなせないと判定された場合は、Steel-Dwass 法¹²による多重比較検定を使用し、年度間に差が認められるかを判定した。以上の検定には、「柳井久江 (2015)『エクセル統計』オーエムエス出版」に附属する Excel 用アドインソフト「Statcel4」を用いた。

なお、解析時に物理的減衰補正をした空間線量率や放射性物質濃度の値は、除染を実施した期間の中間時点である平成 24 (2012) 年 11 月 19 日を基準に補正をしたものである。

(3) 調査結果及び考察

1) 空間線量率の推移

① 除染実施箇所の空間線量率の推移 (地表 1m 高)

森林除染前 (平成 24(2012)年) から、継続して測定している比較可能な測定点 35 点について、除染前後及び各年度間の関係を図 3-5 に示す。なお、測定点は、除染直後 (平成 24(2012)年) から平成 25(2013)年にかけて、空間線量率の増減が大きい箇所を中心に、選定しているため、図 3-5-B はばらつきが大きい。

図 3-5-C において、回帰直線の傾きは、ほぼ 1 であり、平成 25(2013)年から平成 26(2014)年にかけては、物理的減衰とほぼ同じ割合で低減し、その後の回帰直線の傾きは、わずかに増減している。

除染前を基準とした回帰直線の傾きの変化を図 3-6 に示す。多重比較検定の結果、年度間の差は認められない程度であるものの、平成 25(2013)年以降は、物理的減衰と同程度の割合かやや下回って低減してきている傾向にある。また、空間線量率の変化のばらつきも小さくなっており、除染直後から、1 年程度の間大きく増減した箇所においても、その後は安定化しているといえる。

¹⁰ バートレット法:あるデータ集団と別のデータ集団の分散が等しいかどうかを検定する手法。

¹¹ Tukey-Kramer 法:データが正規分布であることを前提とした検定。多重比較法の 1 種。母平均について 3 群以上のデータ集団間ですべての対比較を同時に検定するもので、データ集団同士のデータ数が等しくなくても使用できる。

¹² Steel-Dwass 法:データが正規分布であることを前提としない検定。多重比較法の 1 種。Tukey-Kramer 法のノンパラメトリック版。3 群以上のデータ集団間の中央値が互いに異なるかどうかを検定するもので、データ集団同士のデータ数が等しくなくても使用できる。

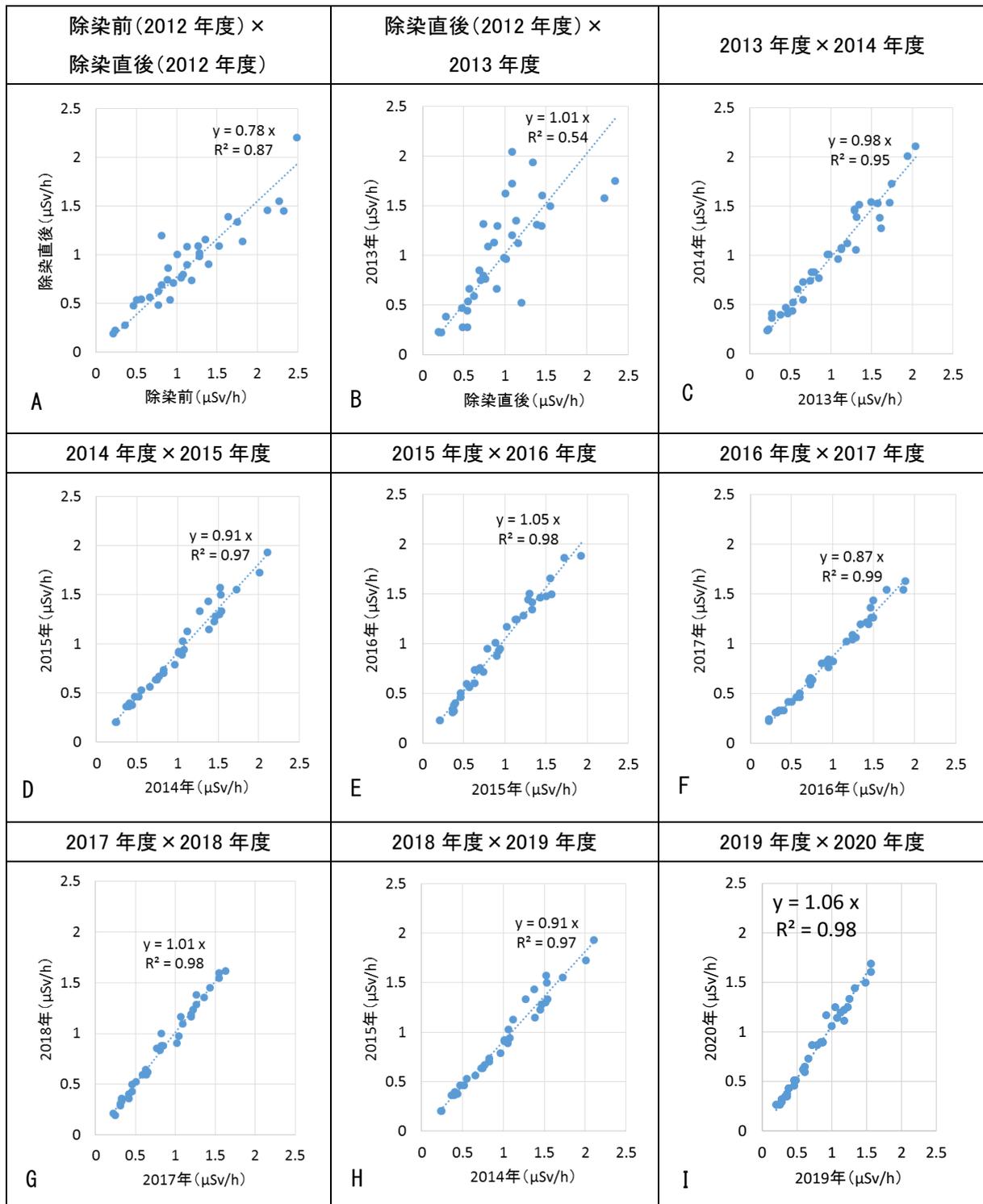


図 3-5 年度間の空間線量率の変化（時期間比較）

※値は平成 24(2012)年 11 月 19 日を基準日として、物理的減衰補正した。回帰直線は、切片を 0 として作成。

※B は、変動要因の把握のため、除染直後からの変動が大きい箇所を選定しているため、ばらつきが大きい。

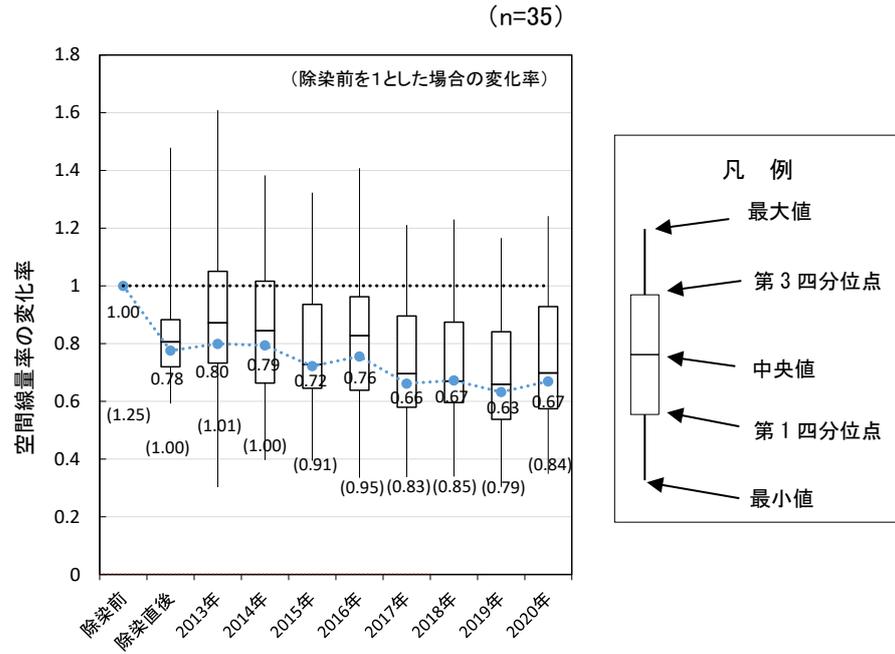


図 3-6 空間線量率の変化の推移

※平成 24(2012)年 11 月 19 日を基準日として物理的減衰補正した値を使用。箱ひげ図の箱は第 3 四分位、第 1 四分位を示し、箱内の横線は中央値、ひげは最大値と最小値を示す。プロットと点線は、除染前の値を基準としてその他の年度の値とから得られた回帰直線の傾きとその推移を示す。()内の数字は除染直後の値を基準としてその他の年度の値とから得られた回帰直線の傾きの値を示す。なお、物理的減衰を考慮した場合の変化の推移は黒点線のように、縦軸=1 を水平移動したものになる。

※平成 26(2014)年以降は 11 月前後に調査を実施。

② 除染実施箇所内外の空間線量率推移の比較

図 3-7 に平成 25(2013)年と令和 2(2020)年の測定値の関係を示す。除染実施区域外と除染実施区域内の 2020 年時点の空間線量率を比較すると、除染実施区域内の方が有意に低かったが、回帰直線の傾きは区域内、区域外とも 0.38 と等しく、推移については差はみられない。

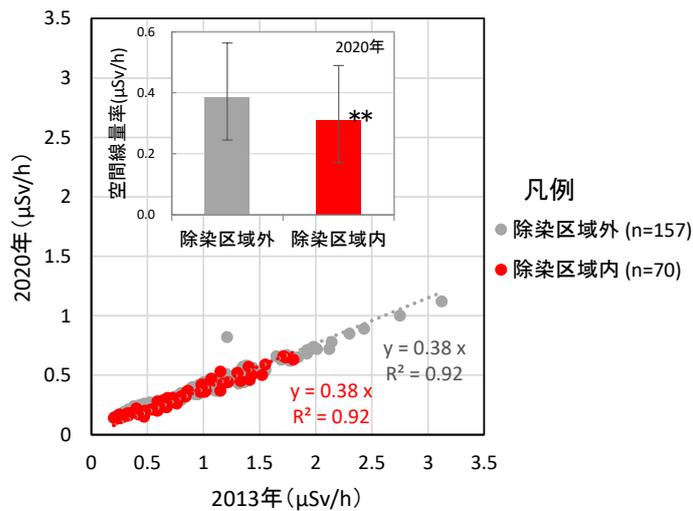


図 3-7 除染区域内外の空間線量率の変化

※値は物理的減衰補正をしていない地上 1m の測定値。**: $p < 0.01$ (t 検定)

※棒グラフ内の誤差棒は標準偏差。

2) 空間線量率の増減要因

① 樹種別空間線量率推移

各空間線量率測定点の測定値の推移について、散布図と回帰直線を用いて、周辺の主要樹種別に示した。回帰直線は、全て切片 0 としている。

ア. 除染未実施箇所の空間線量率の推移

除染未実施箇所における樹種別の空間線量率の変化を図 3-8 に、平成 25 (2013) 年度を基準とした回帰直線の傾きの変化を図 3-9 に示す。空間線量率は、平成 24 (2012) 年 11 月 19 日を起点として、物理的減衰補正した値を使用した。

どの樹種についても、若干の上下はみられるものの、空間線量率は、物理的減衰と同程度かやや下回った低下傾向にある。

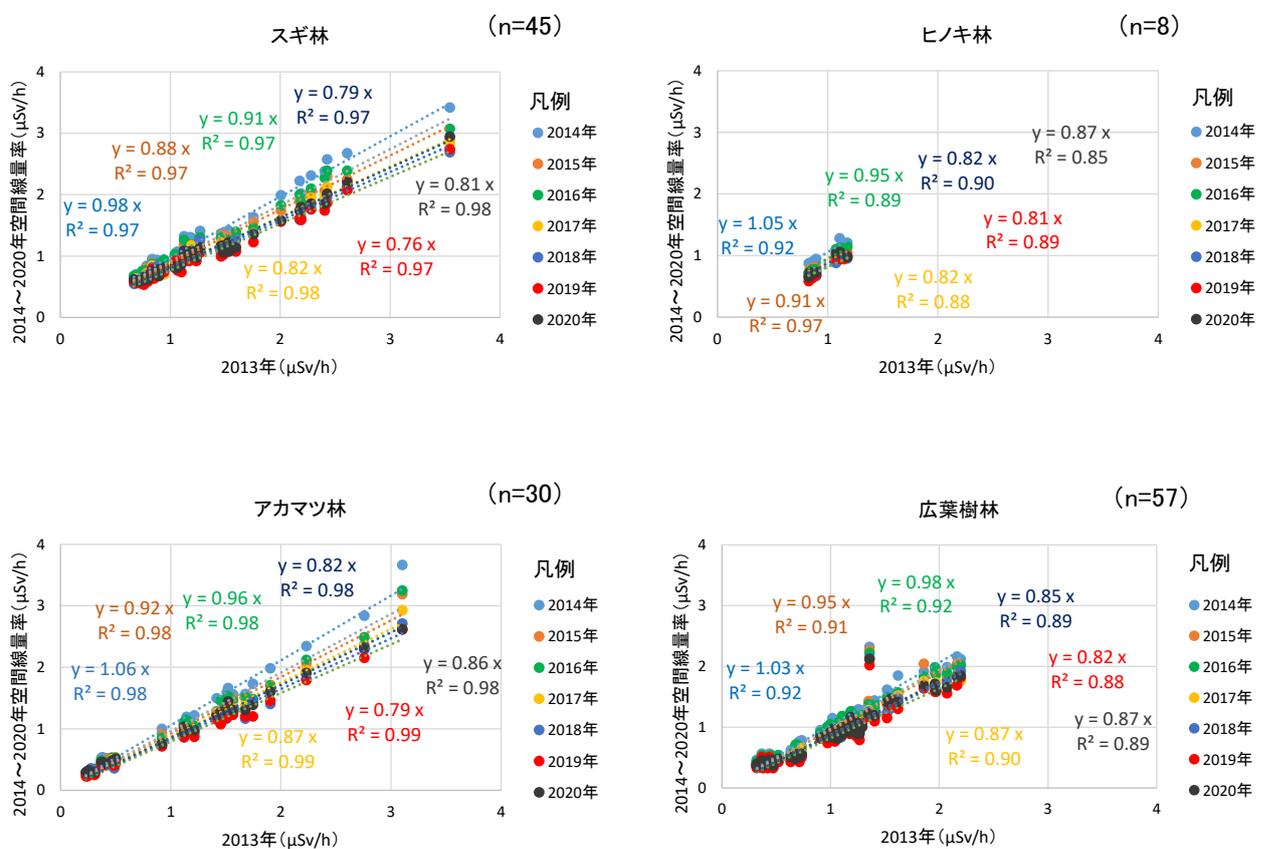


図 3-8 除染未実施箇所の主要樹種別空間線量率の変化

※地上 1m における測定値を、平成 24(2012)年 11 月 19 日を基準日として、物理的減衰補正した値を使用。

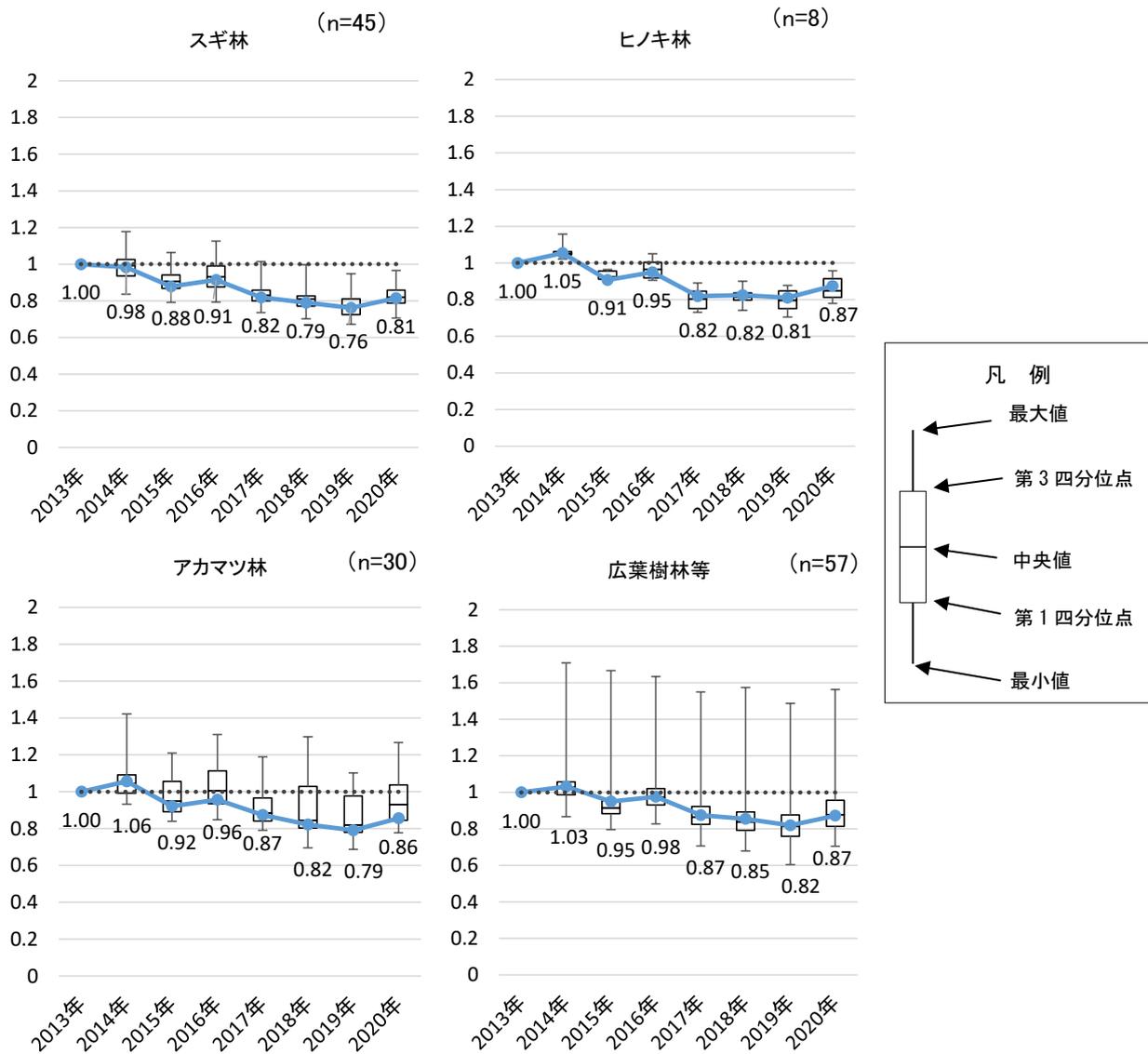


図 3-9 除染未実施箇所の主要樹種別空間線量率の変化の推移

地上 1m における測定値を、平成 24(2012)年 11 月 19 日を基準日として、物理的減衰補正した値を使用。箱ひげ図の箱は第 3 四分位、第 1 四分位を示し、箱内の横線は中央値、ひげは最大値と最小値を示す。プロットと点線は、平成 25(2013)年と平成 26(2014)年-令和元(2019)年の年度間の回帰直線の傾きとその推移を示す。なお、物理的減衰を考慮した場合の変化の推移は黒点線のように、縦軸=1 を水平移動したものになる。

イ. 除染実施箇所の空間線量率の推移

除染未実施箇所と同様に、除染実施箇所における樹種別の空間線量率の変化等を図 3-10、図 3-11 に示す。なお、ヒノキやアカマツはデータ数が少ないため掲載していない。

スギ林では、除染後に空間線量率が上昇した箇所であっても、平成 25(2013)年～令和 2(2020)年にかけては、多少の上下はあるものの物理的減衰と同程度かやや下回った低下傾向にある。広葉樹林についても同様に、物理的減衰と同程度かやや下回った低下傾向にある。

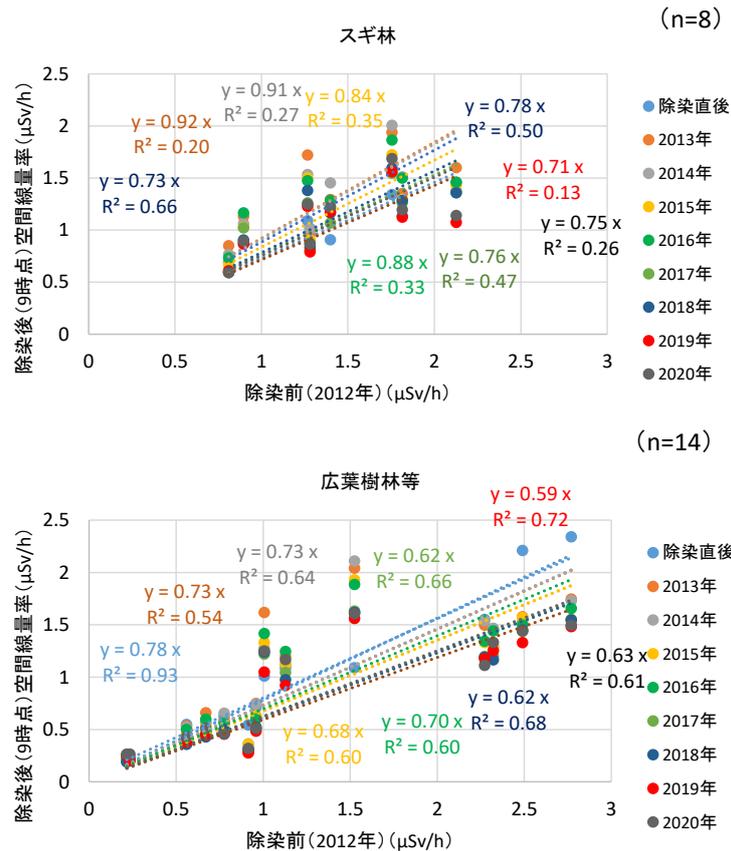


図 3-10 除染実施箇所の主要樹種別空間線量率の変化

※地上 1m における測定値を、平成 24(2012)年 11 月 19 日を基準日として、物理的減衰補正した値を使用

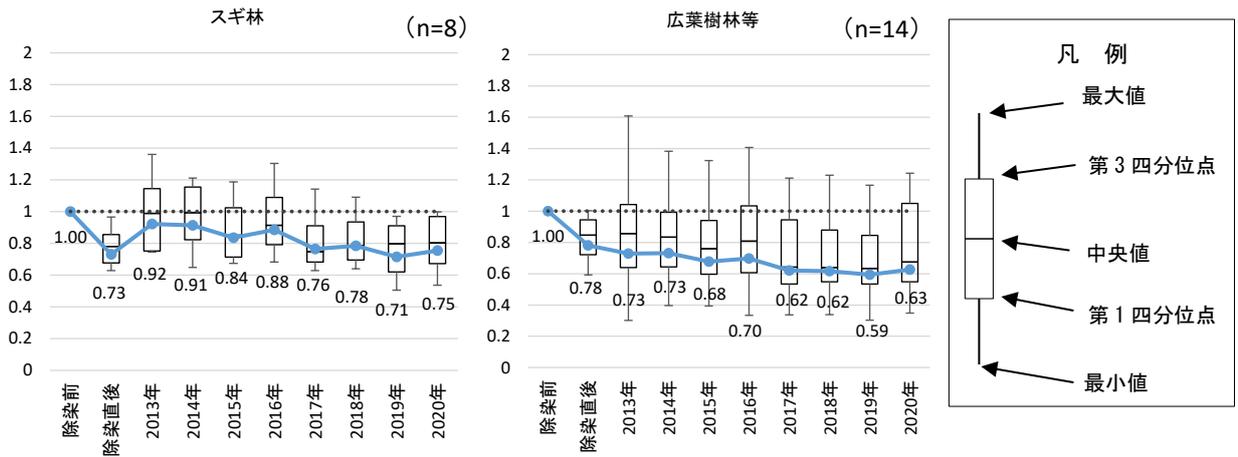


図 3-11 除染実施箇所の主要樹種別空間線量率の変化の推移

地上 1m における測定値を、平成 24(2012)年 11 月 19 日を基準日として、物理的減衰補正した値を使用。箱ひげ図の箱は第 3 四分位、第 1 四分位を示し、箱内の横線は中央値、ひげは最大値と最小値を示す。プロットと点線は、平成 25(2013)年と平成 26(2014)年-令和元(2019)年の年度間の回帰直線の傾きとその推移を示す。なお、物理的減衰を考慮した場合の変化の推移は黒点線のように、縦軸=1 を水平移動したものになる。

3) 堆積有機物及び土壌中の放射性セシウム

① 放射性セシウム濃度の推移

本章調査では、22 ラインを対象に調査を実施しているが、そのうち 13 ラインで、平成 25 (2013) 年から継続して、堆積有機物及び土壌試料を採取し、放射性セシウム濃度等の測定を行っている。堆積有機物及び土壌の放射性セシウム (Cs-137) 濃度を該当箇所の初期沈着量で除した値の平均値の推移を除染実施箇所と除染未実施箇所に分けて図 3-12 に示す。放射性セシウム (Cs-137) 濃度は、平成 24 (2012) 年 11 月 19 日を基準日として物理的減衰補正した値を使用した。

全体的にばらつきがあるものの、除染実施箇所と除染未実施箇所ともに、堆積有機物については多少の上下はあるものの、やや減少傾向である。一方、土壌については多少の上下はあるものの、やや増加する傾向である。

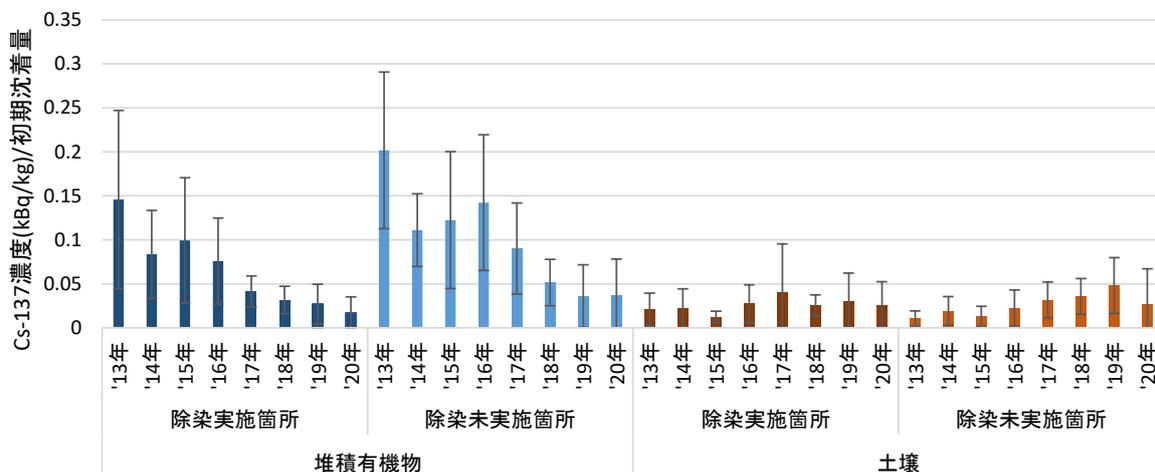


図 3-12 堆積有機物及び土壌の放射性セシウム (Cs-137) 濃度推移 (13 ライン平均値)

※縦軸は濃度を初期沈着量で除した値の平均値

※平成 24 (2012) 年 11 月 19 日を基準日として物理的減衰補正した値を使用。エラーバーは標準偏差。

② 放射性セシウム現存量の推移

放射性セシウム濃度と同様に、13 ラインの放射性セシウム現存量を調査した。堆積有機物及び土壌の放射性セシウム（Cs-137）現存量を該当箇所初期沈着量で除した値の平均値の推移を除染実施箇所と除染未実施箇所に分けて、図 3-13 に示す。放射性セシウム（Cs-137）濃度は、平成 24（2012）年 11 月 19 日を基準日として物理的減衰補正した値を使用した。

全体的にばらつきがあるものの、除染実施箇所と除染未実施箇所ともに、堆積有機物については平成 25（2013）年からやや増加傾向で、平成 27（2015）年にピークを迎えるものの、その後は、やや減少傾向である。一方、土壌については多少の上下があるものの、やや増加する傾向であったが、令和 2（2020）年は減少した。

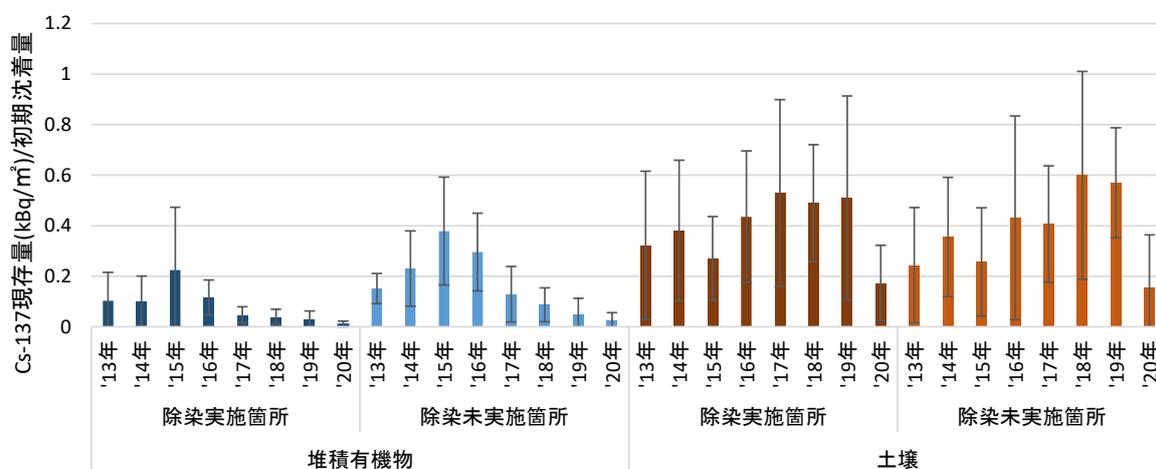


図 3-13 堆積有機物及び土壌の放射性セシウム（Cs-137）現存量推移（13 ライン平均値）
 ※縦軸は濃度を初期沈着量で除した値の平均値
 ※平成 24（2012）年 11 月 19 日を基準日として物理的減衰補正した値を使用。エラーバーは標準偏差。

4) 考察

年度別の空間線量率の値同士には図 3-5 に示すように決定係数 R^2 の値が 1 に近く、強い正の相関があり、不規則な変化はみられない。落葉等除去（森林除染）を実施した箇所については、除染直後からの空間線量率の推移は、年度により多少の変動はみられるものの、物理学的減衰に従う低減よりも若干低減の大きい下がり方を示している。落葉等除去を実施した箇所と実施していない箇所の落葉等除去後の空間線量率の低減状態を比較したところ差異はみられなかった。落葉等除去の有無にかかわらず、森林内の空間線量率は同じような推移で安定して低下しつつあるといえる。樹種別に分けても、若干の樹種による低減割合の相違はみられるものの、同様の傾向がみられる。

堆積有機物と土壌の放射性セシウム濃度や現存量の推移をみると、堆積有機物は減少する傾向にあるが、土壌は増加傾向である。一般的に言われているように、堆積有機物から土壌への放射性物質の移動が徐々に進行していると考えられる。ただし、令和 2（2020）年度の土壌の放射性物質濃度や現存量は低い値を示しており、原因は不明である。