

6. 詳細調査Ⅱ（帰還困難区域等の森林における放射性物質分布調査）

6.1. ア 帰還困難区域等の森林における放射性物質濃度の調査

（1）目的

これまでの調査によって、森林に蓄積している放射性セシウムの総量は物理的減衰以上には減少しておらず、渓流水を通じた流出量も微量であるという観測結果が報告されており、森林生態系に沈着した放射性セシウムはその多くが生態系内に留まっていると考えられる。これまで線量が非常に高い地域では立ち入りが制限され、必ずしも十分な実態把握が行えなかった。しかし、汚染度の高い森林を今後どのように取り扱うかを判断するためには、森林生態系に沈着した放射性セシウムの動態を長期的な視点から把握する必要がある。そこで、比較的線量の高い地域（帰還困難区域等）の森林における放射性セシウム濃度の分布調査を2017年度より開始した。ここでは3年目の結果について報告する。

（2）方法

調査地点は昨年度より1地点少ない8地点（福島県浪江町3地点、南相馬市4地点、飯館村1地点）である（図6.1.-1）。南相馬市に位置していた1地点について、台風19号により林道路肩が大規模に崩壊し、調査地点への到達が困難になったため、今年度は調査できなかった。調査地点はいずれも磐城森林管理署管内国有林であり、植生はスギ人工林（林齢29～75年生）である。2019年10月23日～11月8日にかけて、各地点でスギの葉付き枝、樹皮、幹材を採取するとともに、地上高1mの空間線量率を測定した。採取木の選定にあたり、各調査地点でスギ20本の胸高直径を測定し、平均的な5本を選択した。葉付き枝は、採取木1本あたり2本ずつ採取し、これをまとめて1つの試料とした。樹皮はノミを用いて採取木1本につき胸高部の約3cm×3cm×4方向から切り出し、さらにそのうち2方向では、成長錐を用いて、幹材を採取した。落葉層、土壌については2019年6月25～26日、7月10～11日に採取した。落葉層は、調査地内の3箇所の方形枠（25cm×25cm）を用いて枠内のすべての堆積有機物を採取した。土壌（深さ0-5cm）は、落葉層の採取跡において採土円筒（Daiki製、高さ5cm、内径11cm）を用いて採取した。深さ5-20cmの土壌については、採土器（藤原製作所製、HS-25S、φ=50mm）を用いて採取した。

試料は室内に持ち帰り、葉付き枝は葉と枝に分離した後、細片化して測定に供した。樹皮は各個体から採取された4方向試料を1つにまとめ、ハサミで細断した。幹材は辺材と心材に分けた後、個体ごとに部位別に1つにまとめ、細片化した。深部の土壌（深さ5-20cm）については、帰所後いったん冷凍し、その後3等分して、深さ5-10cm、深さ10-15cm、深さ15-20cmの土壌試料とした。表層を含めた全ての土壌は、乾燥後、2mmふるいを通じたものを測定用試料とした。試料調整の結果、表6.1.-1に示すような種類と個数の試料が準備された。すべての試料は100mL容量のU-8容器に充填し、ゲルマニウム半導体検出器を用いてガンマ線スペクトロメトリ法により放射性セシウム（Cs-134とCs-137）の濃度を測

定した。今年度の測定値は、2019年9月1日を基準日として整理した。

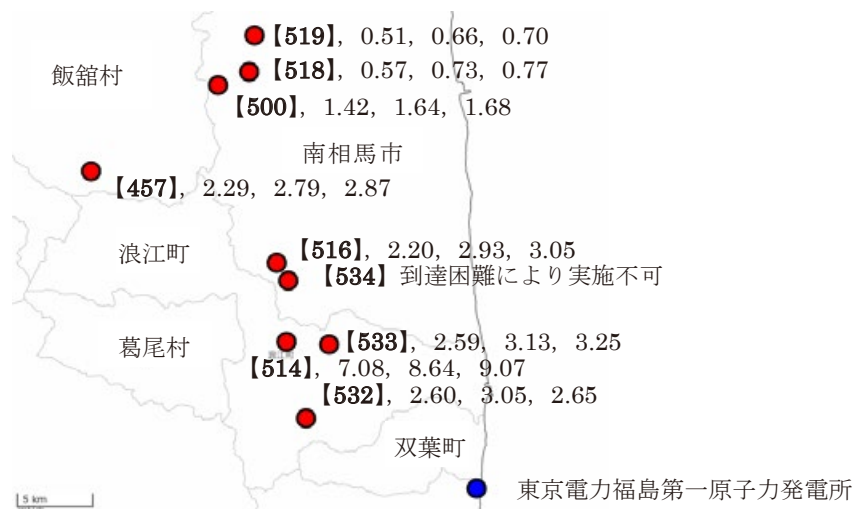


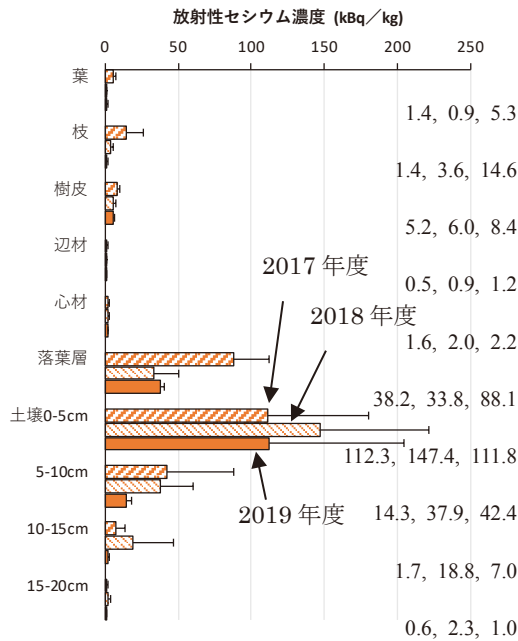
図 6.1-1 調査地点の位置と空間線量率

地理院タイルより作成。括弧内の太字は地点 ID、それより右側の 3 つの数値はそれぞれ 2019 年度、2018 年度、2017 年度の空間線量率 (μSv/h) を示す。

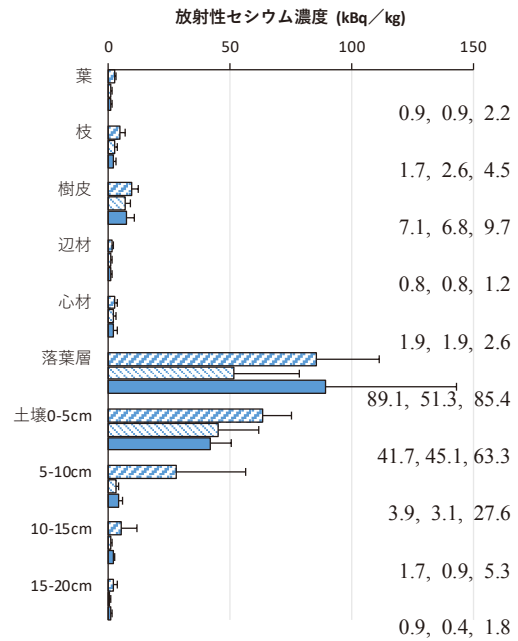
表 6.1-1 1 調査地点の各部位の試料数

| 部位 | 採取木 1 本あたりの試料数 | 1 調査地点あたりの試料数 |
|------------------|----------------|---------------|
| 葉 | 2 | 5 |
| 枝 | 2 | 5 |
| 樹皮 | 1 | 5 |
| 幹材 (辺材) | 1 | 5 |
| 幹材 (心材) | 1 | 5 |
| 落葉層 | — | 3 |
| 土壌 (深さ 0-5 cm) | — | 3 |
| 土壌 (深さ 5-10 cm) | — | 3 |
| 土壌 (深さ 10-15 cm) | — | 3 |
| 土壌 (深さ 15-20 cm) | — | 3 |

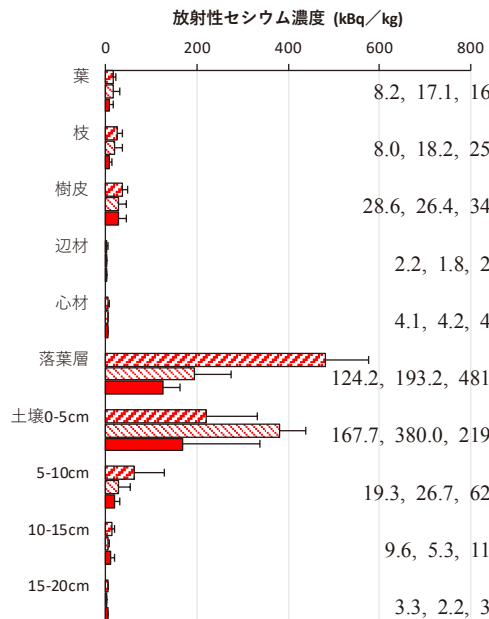
457



500



514



516

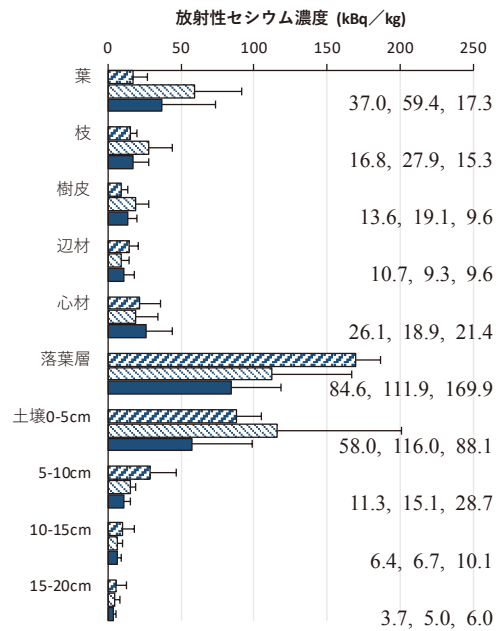
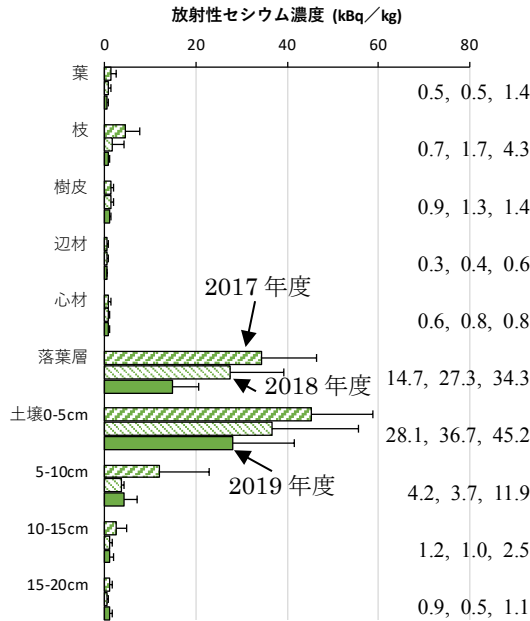


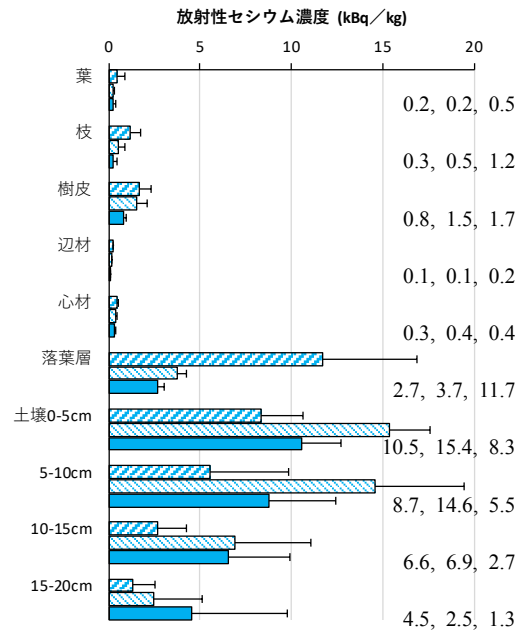
図 6.1-2 地点 ID457、500、514、516 における森林の各部位別放射性セシウム濃度

横軸の値は各地点で異なっている。棒グラフ、エラーバーはそれぞれ各部位の放射性セシウム濃度の平均、標準偏差を示している。斜線（右上がり）、斜線（右下がり）の棒グラフがそれぞれ 2017 年度、2018 年度の値を示している。各グラフの右側の 3 つの数値は左から順に 2019 年度、2018 年度、2017 年度の各部位の放射性セシウム濃度 (kBq kg⁻¹) の平均の値を示す。

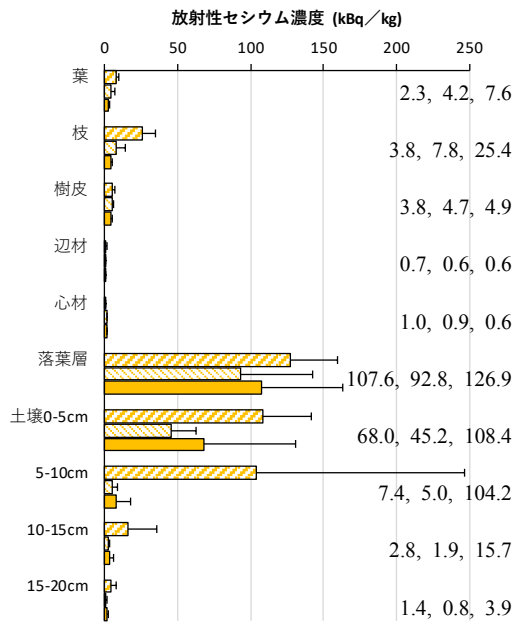
518



519



532



533

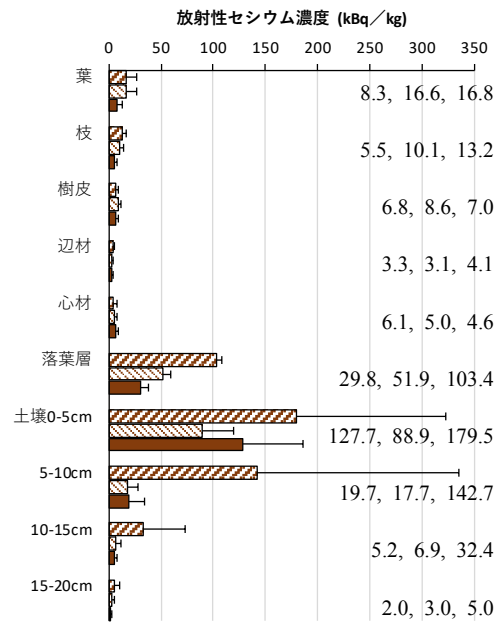


図 6.1-3 地点 ID518、519、532、533 における森林の各部位別放射性セシウム濃度

横軸の値は各地点で異なっている。棒グラフ、エラーバーはそれぞれ各部位の放射性セシウム濃度の平均、標準偏差を示している。斜線（右上がり）、斜線（右下がり）の棒グラフがそれぞれ 2017 年度、2018 年度の値を示している。各グラフの右側の 3 つの数値は左から順に 2019 年度、2018 年度、2017 年度の各部位の放射性セシウム濃度 (kBq kg^{-1}) の平均の値を示す。

(3) 結果及び考察

ここで、放射性セシウム濃度とは、Cs-134 と Cs-137 の合計を表す。Cs-134 濃度が不検出の場合、2011 年 3 月 15 日時点の Cs-134 濃度と Cs-137 濃度の比は 1 : 1 とし (Buessler et al., 2011)、物理的半減期を用いた減衰に基づく理論的な推定式から、計算された Cs-134 濃度と Cs-137 濃度の比を用いて、各年 9 月 1 日時点の Cs-137 濃度から Cs-134 濃度を推定した。

8 地点の空間線量率は 0.5~7.1 $\mu\text{Sv/h}$ の範囲にあった (図 6.1.-1)。空間線量率は 8 地点全てで、前年度より 14~25%低下した。この値は年間 10%程度と考えられる物理的減衰より大きかった。2019 年 10 月 12 日に台風 19 号が北上し、記録的な降雨 (アメダス「浪江」によれば、10 月 12 日の日雨量は 301 mm、観測点史上歴代 1 位) があった。空間線量率の測定はその直後であり、土中に水分が多かったため、放射線の一部を遮へいしたと考えられる。

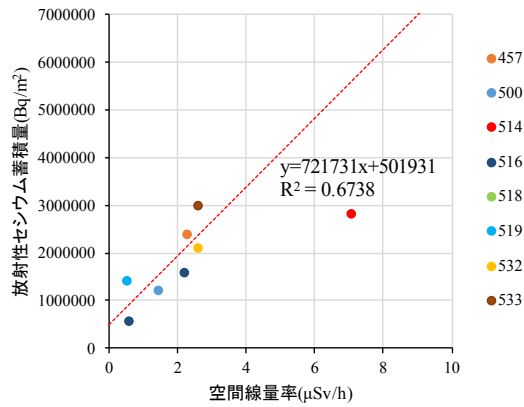
一方、各部位別の放射性セシウム濃度については (図 6.1.-2 及び図 6.1.-3)、いずれの地点においても落葉層および表層土壌 (0-5 cm) において濃度が高い傾向が見られた。落葉層における濃度は多くの地点で昨年度、一昨年度に比べて低下しているのに対し、表層土壌 (0-5 cm) における濃度は増加しているか、減少しているか不明確な地点が多かった。落葉層および表層土壌 (0-5 cm) における放射性セシウム濃度の動向を明確に判断するには、モニタリングの継続が必要である。

地下部の放射性セシウム蓄積量 (落葉層+土壌層) と空間線量率の関係を見ると (図 6.1.-4)、昨年同様に空間線量率が高いほど地下部の放射性セシウム蓄積量が多い傾向が引き続き認められた。ただし、地下部の放射性セシウム蓄積量は、これまでも前年度に比べて 3 倍増加、あるいは前年度に比べて半減した事例があるなど、ばらつきが大きい傾向があり、今回も地点 ID514 の地下部の放射性セシウム蓄積量は、前年度より 58%減少した。そのため、地下部の放射性セシウム蓄積量の変化傾向については、モニタリングを継続したうえで慎重に判断する必要がある。

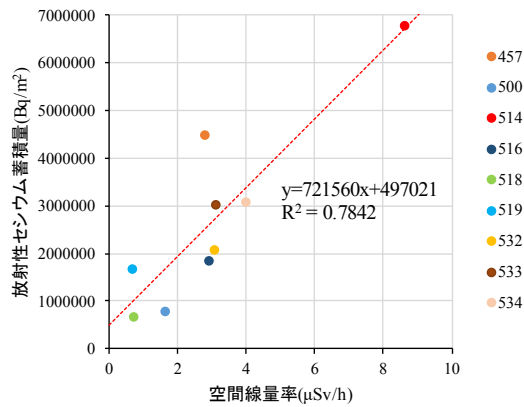
スギの心材と辺材の放射性セシウム濃度の関係を図 6.1.-5 に示す。全ての調査地点で、スギの心材と辺材では心材の放射性セシウム濃度の方が高かった。これまでの福島県川内村、大玉村のスギ林で行われてきた調査や本調査の昨年度の結果と同様であった。スギは辺材から心材へセシウムが移動することが様々な研究で示唆されている。心材の放射性セシウム濃度が辺材よりも高いことは、スギにおける共通の特徴と考えられる。

以上のように、森林内の放射性セシウムの分布は相対的に空間線量率の高い地域の森林においても、本事業の詳細調査 I 及び本調査の昨年と同様の傾向が認められた。

2019 年度の結果



2018 年度の結果



2017 年度の結果

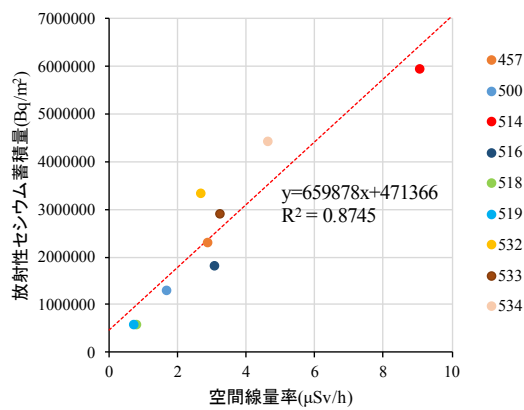
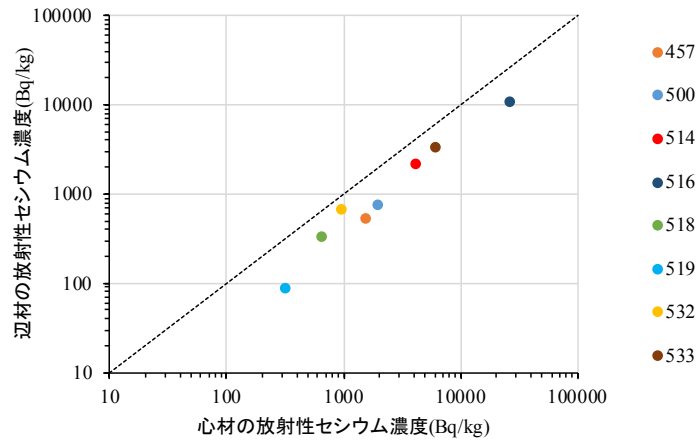


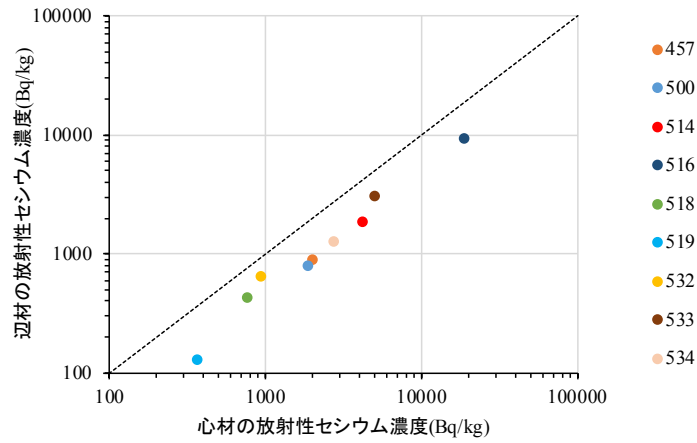
図 6.1-4 空間線量率と地下部（落葉層+土壌）の放射性セシウム蓄積量との関係

点線は回帰直線（2019年度は、地点 ID514 を除いて算定した）。2018年度の地点 ID532 に誤りがあったので、訂正した。

2019 年度の結果



2018 年度の結果



2017 年度の結果

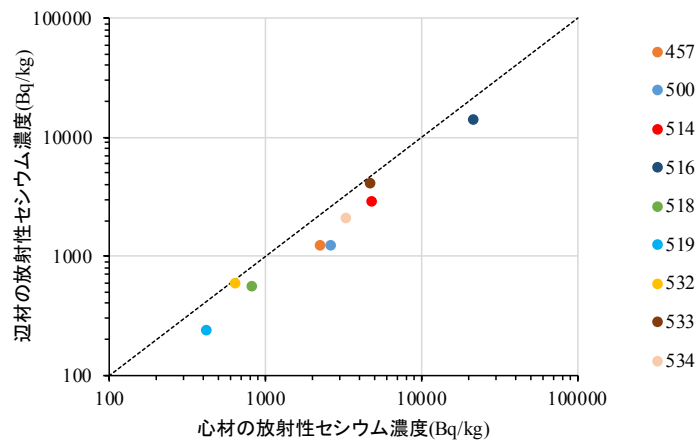


図 6.1-5 スギの心材と辺材の放射性セシウム濃度の関係

点線は 1 : 1 の直線を表す。

6.2. イ 福島県内で生産されるスギ雄花中の放射性セシウム濃度の調査

(1) 目的

森林に降下した放射性物質が、スギ花粉の飛散により再拡散することが懸念されたため、福島第一原発事故直後の2011年度にスギの雄花に含まれる放射性セシウム濃度（単位重量（乾重）当たりのCs-134とCs-137の合計）の調査を実施したところ、最高値は253kBq/kgであった（林野庁，2011a；参考文献1、林野庁，2011b；参考文献2、林野庁，2012；参考文献3）。調査時期（11月）の雄花に含まれる放射性セシウム濃度は翌春に飛散するスギ花粉の放射性セシウム濃度とほぼ同一であると仮定できるので、この調査による雄花の放射性セシウムの最高値をもとに、大気中に飛散したスギ花粉を吸入した場合に受ける放射線量（内部被ばく量）を一定の前提条件の下で推計することができる。2011年度の調査結果から推計した結果（林野庁，2012；参考文献3）では、スギ花粉を吸入した場合の放射線量は、東京都心で受けている放射線量（環境省，2017；参考文献11）の0.3%程度であった。また飛散期間全体の累計では、日本において人が受ける年間放射線量（環境省2017）の0.03%、食物摂取によって人体内部で受ける年間放射線量（環境省，2017；参考文献11）の0.06%、胸部X線検査1回で受ける放射線量（環境省，2017；参考文献11）の1%に満たない値であった。

飛散花粉によって人体が受ける放射線量は福島県周辺のみならず、首都圏を中心に国民の高い関心を集めるため、2012年度以降もスギ雄花に含まれる放射性セシウム濃度を調査し、花粉飛散前に結果の公表を行っている（林野庁，2013；参考文献4、林野庁，2014；参考文献5、林野庁，2015；参考文献6、林野庁，2016；参考文献7、林野庁，2017；参考文献8、林野庁，2018；参考文献9、林野庁，2019；参考文献10）。これまでの調査で、スギ雄花に含まれている放射性セシウム濃度は、全体としては年々低下する傾向を示した。低減割合は年を追うごとに変化しており、2012年度は全体として2011年度の半分まで低下していたが、昨年度（2018年度）は2017年度に対しておおむね横ばいであった（林野庁，2019；参考文献10）。また、空間線量率が高い地点は雄花の放射性セシウム濃度が高い傾向がみられた。さらに、雄花と葉の放射性セシウム濃度について比較したところ、2011年度から2014年度までは事故直後の葉（2011年度以前の葉）の濃度が高かったが、事故直後の葉が枯れ落ちた2015年度以降は雄花の濃度が葉の濃度より高くなった。今年度は昨年度に引き続き、空間線量の高い地域を中心に16地点においてスギ雄花に含まれる放射性セシウム濃度の調査を実施した。

(2) 調査方法

事故直後（2011年度）の調査地点（132地点）のうちから、2012年度には福島県内の空間線量率が高いところから低いところまで均等に分布するように調査地点を31地点選定し、スギ雄花の放射性セシウム濃度を調査した。その後、2016年度まで、このうちの22地点を

継続調査してきた。2017年度は22地点のうち2016年度調査で線量の高かった16地点に地域を絞り込み、うち6地点は調査場所を設定し直した。設定し直した調査場所は、土壌や幹(材)の採取調査(詳細調査Ⅱア)を併せて行える場所や、これまでの場所より線量の高い場所を選定している。本年度は2017年度に絞り込んだ16地点において調査を行う計画であったが、うち1地点は台風19号による土砂災害により到達できなかったため、2016年まで調査を行っていた1地点を代替地点として調査を行った。

スギ雄花の採取は2019年11月に実施した。この時期には雄花の内部には花粉粒が形成されて休眠状態になっており、雄花の放射性セシウム濃度は翌春に飛散する花粉の濃度と同程度であると考えられる(林野庁, 2012; 参考文献3)。したがって、この時期のスギ雄花の放射性セシウム濃度を調査することで、春に飛散する花粉の放射性セシウム濃度を予測することができる。

雄花を採取する木は、調査地点ごとに対象木候補を事前に3~5本設定しておき、着花状況に応じて3本程度から採取するようにした。採取時には、対象地の林内の1箇所において地上高1mにおける空間線量率をNaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータで測定した。空間線量率が高い場合は電離箱式サーベイメータを用いた。空間線量率の測定は、代替地点とした1地点は2016年度と同じ場所とし、その他の地点は昨年度と同じ場所とした。

雄花の採取にあたっては高枝切はさみ等を用いて、雄花付きの枝を数本切り取り、枝から雄花を分離し、実験室で水洗い後乾燥して、分析用試料とした。

また、調査地16地点のなかで空間線量率が比較的高い地域から低い地域にかけて5地点を選び、各地点の雄花採取木の1本を選んで、雄花のついた枝から雄花と針葉(軸を含む)および球果に分け、針葉は当年葉(2019年葉)、1年葉(2018年葉)、2年葉(2017年葉)と年次別に、球果は当年のもの古いものに分けて、放射性セシウム濃度を測定した。これらの5地点のうち4地点は昨年度と同じで、1地点は昨年度と異なる。

試料は、ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリ法により放射性セシウム濃度(Bq/kg)(Cs-134とCs-137の合計)を測定した。今年度の測定値は、2020年2月1日を基準日として整理した。Cs-134濃度が不検出の場合は、2011年3月15日時点のCs-134濃度とCs-137濃度の比は1:1とし(Buesseler et al.,2011; 参考文献12)、物理的半減期を用いた減衰に基づく理論的な推定式から、計算されたCs-134濃度とCs-137濃度の比を用いて、Cs-137濃度からCs-134濃度を推定した。

なお、前述の16地点の調査では、高枝切はさみが届く6~8m程度の枝につく雄花を採取している。この高さで樹冠上部では雄花に含まれる放射性セシウム濃度がどの程度異なるのか、樹冠内における高さ別の濃度の違いがこれまで明らかでなかった。そこで、1地点のスギ3個体につき樹冠の高さ別に採取した試料を分析して、採取高さ別のスギ雄花の放射性セシウム濃度を調査した。今回は2018年度に採取し保管していた予備試料を用いて分析を行い、前述の方法で測定し2019年2月1日を基準日として整理した。採取高は地上から2mおきに、樹冠頂部までとした。

(3) 結果および考察

今年度の調査地点のうち事故直後（2011年度）から調査されている10地点について、事故直後（2011年度）と今年度の空間線量率の関係を図6.2-1に示した。事故直後に空間線量率が高かった地点ほど、今年度の空間線量率が高い傾向がみられた。今年度の値は平均すると事故直後（2011年度）の4分の1程度に低減していた。昨年度に対しては、平均すると9割程度であった。

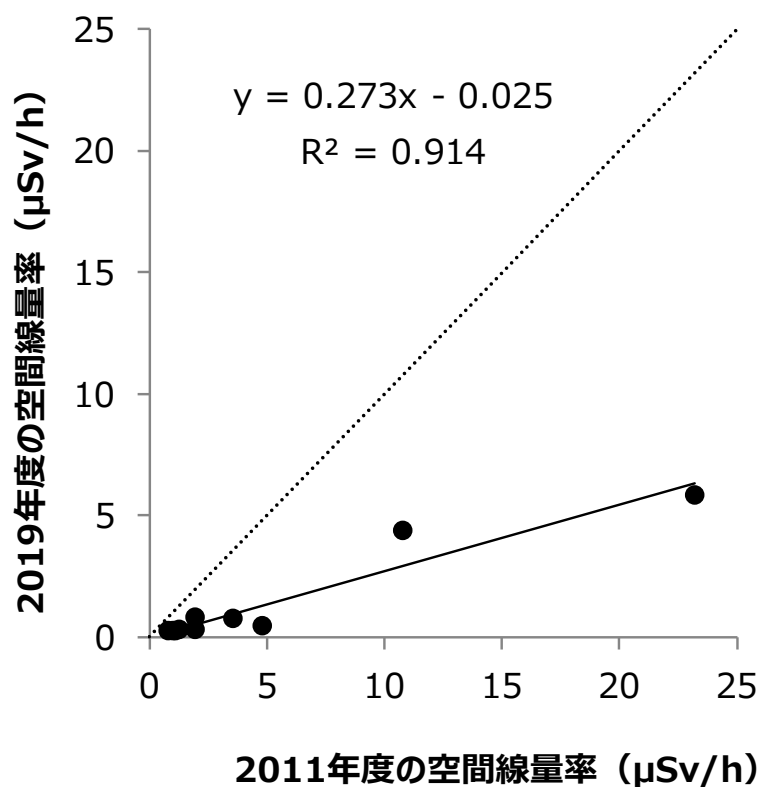


図 6.2-1 継続調査地点（10 地点）の 2011 年度と 2019 年度の空間線量率（μSv/h）

事故直後（2011 年度）から調査されている 10 地点について、事故直後（2011 年度）と 2019 年度のスギ雄花中の放射性セシウム濃度の関係を図 6.2.-2 に示した。2011 年度に雄花中の放射性セシウム濃度が高かった地点ほど、その後の年の濃度も高いという関係が昨年度まで認められていたが、その傾向は今年度も認められた。

今年度のスギ雄花に含まれる放射性セシウム濃度は事故直後に比べて、全体として 2% 程度に低減していた。昨年度に対しては変化が不明瞭であった。

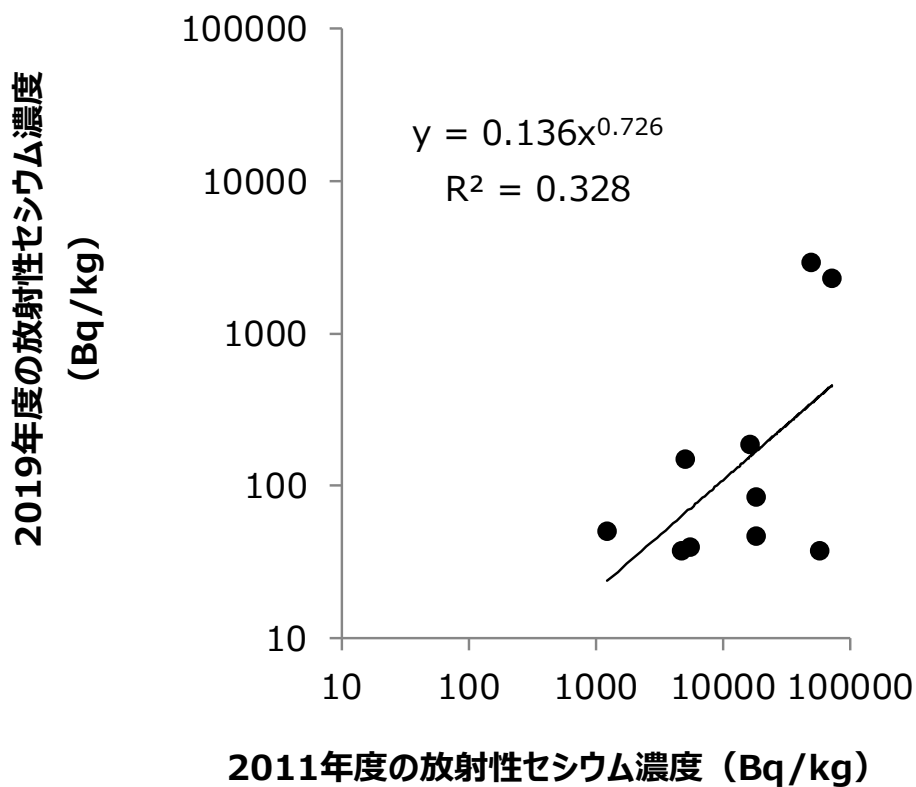


図 6.2.-2. 継続調査地点（10 地点）の 2011 年度と 2019 年度のスギ雄花中セシウム濃度の関係 (Bq/kg)

次に今年度（2019年度）雄花を採取した16地点について空間線量率と雄花中の放射性セシウム濃度の関係を図6.2-3に示した。空間線量率が高い地点で雄花中の放射性セシウム濃度が高い傾向は昨年度までと同様であった。

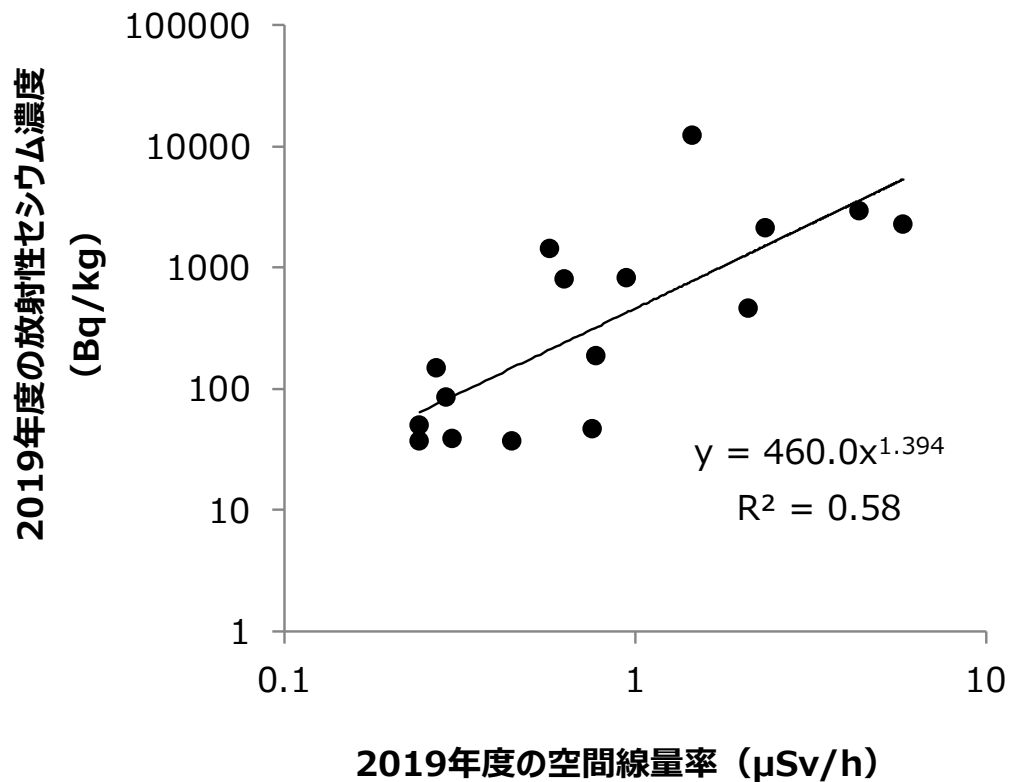


図 6.2-3 空間線量率とスギ雄花中の放射性セシウム濃度（2019年度）

年次別の針葉等の試料を採取した5地点でのスギの部位別の放射性セシウム濃度を図6.2-4と6.2-5に示した。枝が年々成長した結果、今年度採取した枝には事故直後の2011年度以前に作られた葉はなくなっていた。今年度は雄花の着花が少なく、雄花が着花していない枝試料が多く見られた。最も空間線量率の高かった地点1では採取枝に雄花が見られ、昨年度と同様、雄花の濃度が葉の濃度より高かった。地点2と地点5では球果が着生しており、この放射性セシウム濃度はいずれの年次の葉よりも高かった。これらのことから事故後9年を経過した現在においては、葉よりも雄花や球果に含まれる放射性セシウム濃度が高い結果となった。事故直後と以降2年ほどは葉齢が古いほど放射性セシウム濃度が高くなる

傾向が見られていたが、時間の経過とともに各部位の放射性セシウム濃度が減少を続ける中で部位や葉齢によって減少の程度に差がみられた。

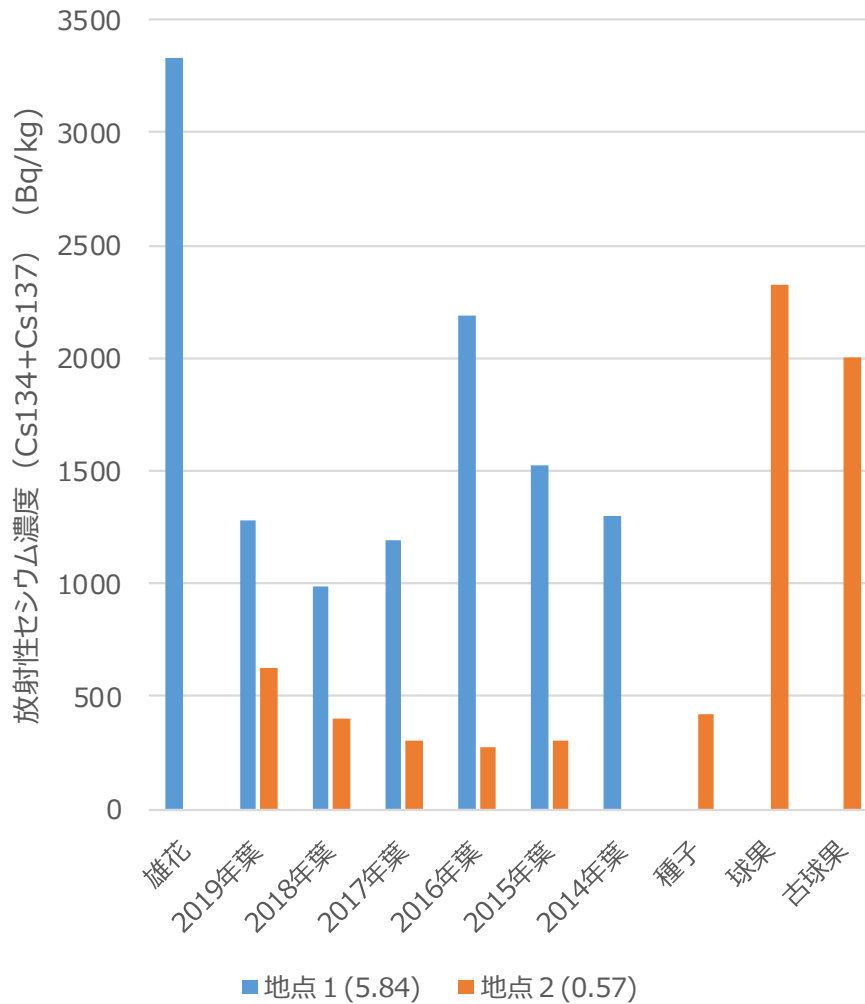


図 6.2-4 5 地点のスギの部位別の放射性セシウム濃度（地点 1～2）

各地点の凡例の数値は 2019 年度の空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) を示す。地点番号について、地点 1 は過年度の報告書とは対応しない。地点 2 は H30 年度報告書と対応するが、H29 年度以前の報告書とは対応しない。

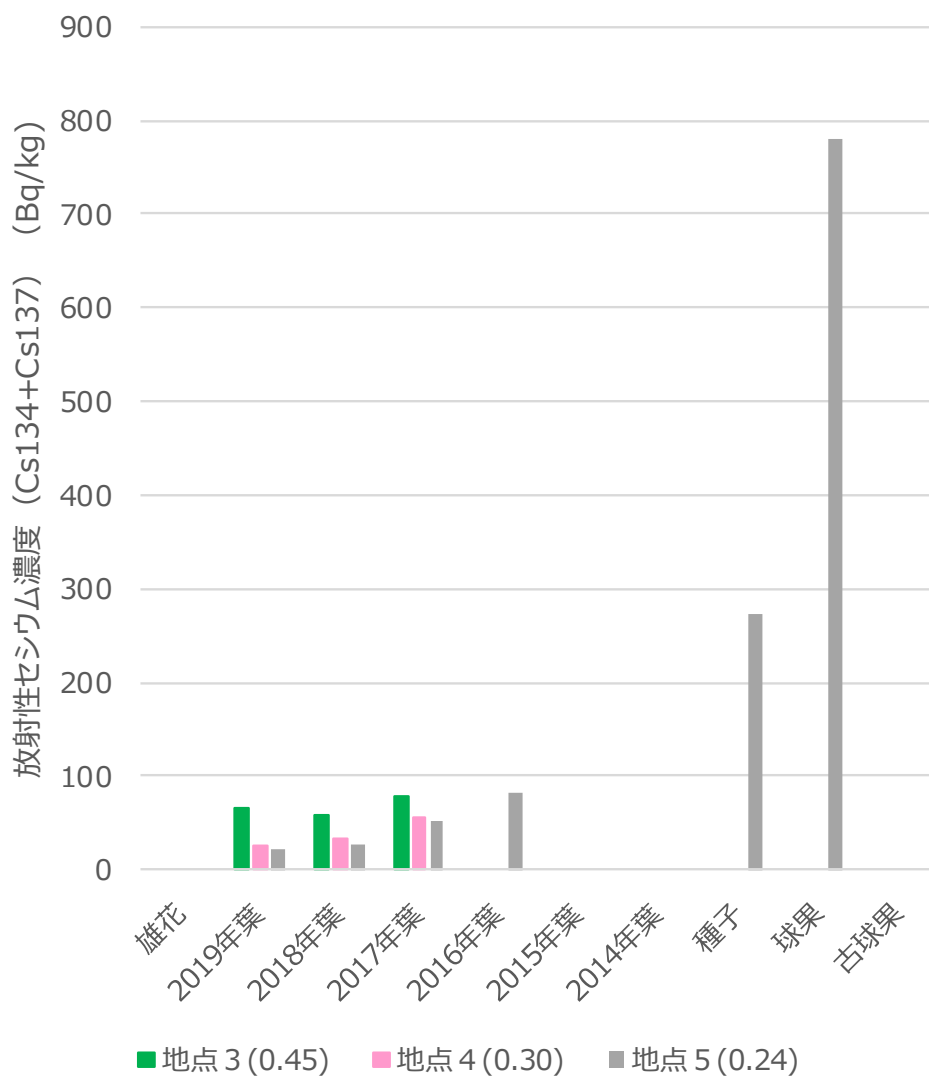


図 6.2-5 5 地点のスギの部位別の放射性セシウム濃度 (地点 3~5)

各地点の凡例の数値は 2019 年度の空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) を示す。地点番号について地点 3~5 は、H30 年度報告書と対応するが、H29 年度以前の報告書とは対応しない。

スギ雄花の高さ別の放射性セシウム濃度について図 6.2.-6 に示した。いずれの個体も着生位置が高くなるほど雄花の放射性セシウム濃度が増加し、樹冠上部で最大に達し頂部ではそれよりはやや低下する関係を示した。各年度の各地点で採取している高さが地上高（根元からの高さ）6～8m であり、8m を基準採取高として考えると、樹冠上部での最大濃度は基準採取高の 2.3～4.3 倍、樹冠頂部では 1.7～3.8 倍であった。雄花の放射性セシウム濃度は樹冠の下部・中部では高さが上がると徐々に濃度が高くなり、樹冠の上部で大きく高まることが明らかになった。これらの関係に基づいてスギ樹冠全体での雄花の放射性セシウム濃度を推定することが可能となるだろう。今後は、年による着花の豊凶により高さ別分布が変化するかどうか、葉に含まれる放射性セシウム濃度も同様の関係を示すのか検証する必要がある。これらの結果は、スギ樹冠に含まれる放射性セシウム濃度の詳細な評価に役立つと考えられる。

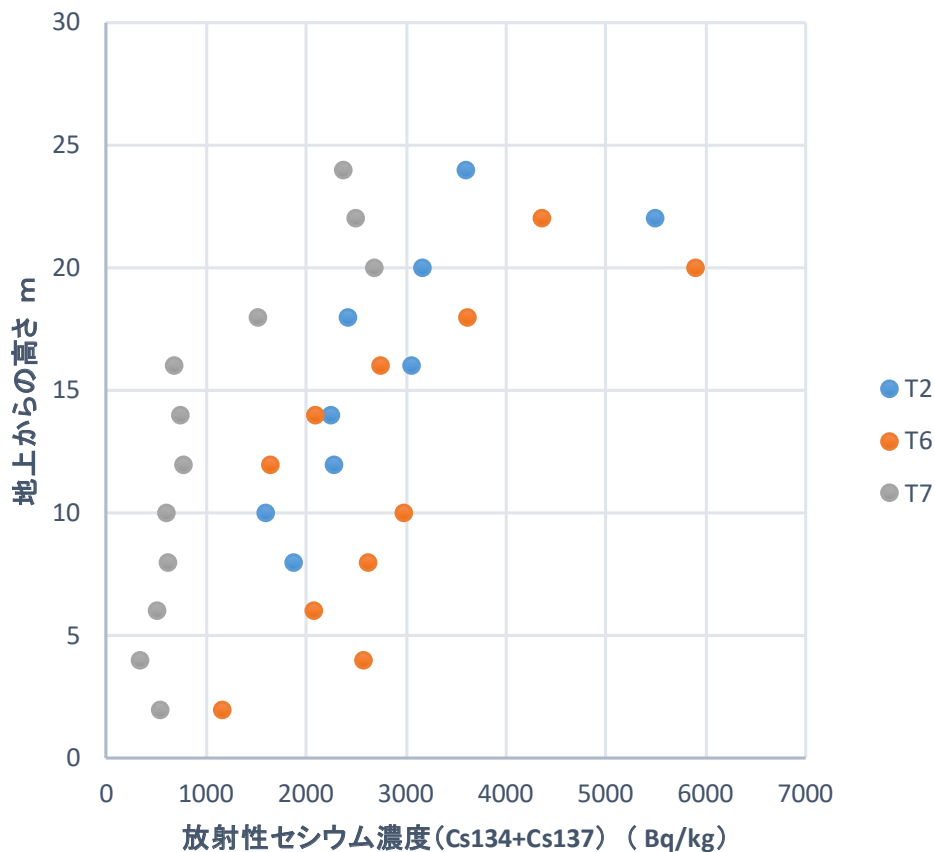


図 6.2.-6 3 個体のスギ雄花の着生する高さ別の放射性セシウム濃度

T2,T6,T7 は個体記号を示す。

参考文献

1. 林野庁 (2011a) 平成 23 年 11 月 22 日付プレスリリース「スギ雄花に含まれる放射性セシウムの濃度の調査の実施について」
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/hozen/111122.html>
2. 林野庁 (2011b) 平成 23 年 12 月 27 日付プレスリリース「スギ雄花に含まれる放射性セシウムの濃度の調査結果について (中間報告)」
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/hozen/111227.html>
3. 林野庁 (2012) 平成 24 年 2 月 8 日付プレスリリース「スギ雄花に含まれる放射性セシウムの濃度の調査結果について」
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/hozen/120208.html>
4. 林野庁 (2013) 平成 25 年 2 月 8 日付プレスリリース「スギ雄花に含まれる放射性セシウムの濃度の調査結果について」
http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/kenho/130208_2.html
5. 林野庁 (2014) 平成 26 年 1 月 31 日付プレスリリース「スギ雄花に含まれる放射性セシウムの濃度の調査結果について」
http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/ken_sidou/140131.html
6. 林野庁 (2015) 平成 27 年 1 月 30 日付プレスリリース「スギ雄花に含まれる放射性セシウムの濃度の調査結果について」
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/kaihatu/150130.html>
7. 林野庁 (2016) 平成 28 年 2 月 1 日付「スギ雄花に含まれる放射性セシウムの濃度の調査結果について」
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/hozen/120208.html>
8. 林野庁 (2017) 平成 29 年 2 月 8 日付 「平成 28 年度スギ雄花に含まれる放射性セシウムの濃度の調査結果について」
http://www.rinya.maff.go.jp/j/kaihatu/jyosen/sugi_yuuka.html
9. 林野庁 (2018) 「平成 29 年度スギ雄花に含まれる放射性セシウム濃度の調査結果について」平成 29 年度 森林内の放射性物質の分布状況調査結果について (資料 3)
http://www.rinya.maff.go.jp/j/kaihatu/jyosen/sugi_yuuka.html
10. 林野庁 (2019) 「平成 30 年度スギ雄花に含まれる放射性セシウム濃度の調査結果について」平成 30 年度 森林内の放射性物質の分布状況調査結果について (【調査 3】: 別添 3)
11. 環境省 (2017) 「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料 (平成 28 年度版)」第 2 章 62 頁* <http://www.env.go.jp/chemi/rhm/h28kisoshiryo.html>
12. Buessler K, Aoyama M, Fukasawa M (2011) Impacts of the Fukushima Nuclear Power Plants on marine radioactivity. Environmental Science & Technology 45 : 9931-9935