

5. きのこ原木への放射性物質吸収抑制手法の開発

5.1. ぼう芽枝等に含まれる放射性物質の把握

(1) 目的

福島県は、国内有数のきのこ原木の生産地であったが、福島第一原子力発電所の事故後、生産を停止せざるを得ない地域もあり、このような地域では、生産再開の可能性、再開可能な時期等についての情報が求められている。このため、コナラやクスギのぼう芽更新木等や周辺土壌の放射性セシウム濃度等を測定し、コナラやクスギへの放射性セシウムの移行状況を把握した。

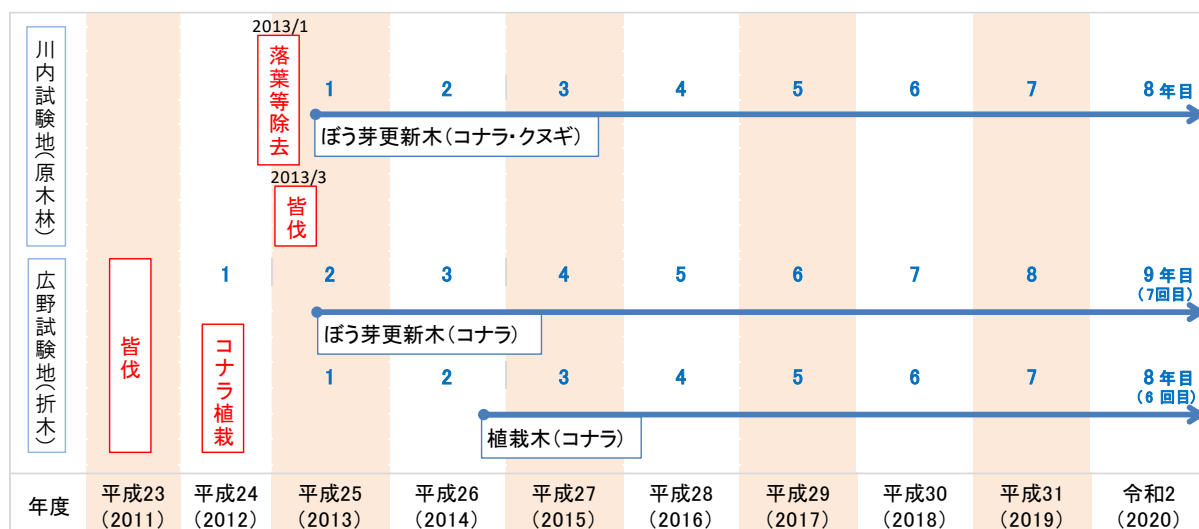


図 5-1 これまでの検証の流れ (ぼう芽枝等に含まれる放射性物質の把握)

(2) 試験地と試験方法

1) 試験地の概要

本調査は、広野試験地の皆伐区及び川内試験地の原木採取林モデル地区で実施した。

広野試験地の皆伐区は、平成 24(2012)年 1 月下旬に 46 年から 63 年生のアカツキ・広葉樹混交林の一部を皆伐して 25m×50m の区画を 4 つ設置し、異なる地拵え(枝条散布、坪刈り、棚積、枝条除去)を実施した試験地である。当該地では、平成 24(2012)年 12 月上旬に低木等の下刈りをした上で九州産のコナラ苗木を植栽した。ここでの第 3 次航空機モニタリング(文部科学省、平成 23(2011)年 7 月)で公表された放射性セシウム(Cs-137)の沈着量は、110kBq/m²(表 5-1)で、平成 24(2012)年 1 月に皆伐を実施しているため、持ち出された量¹⁵を差し引くと、平成 29(2017)年 12 月時点での現存量は 86kBq/m²と推定される。本調査での放射性セシウム(Cs-137)現存量の実測値は、平均 59kBq/m²であった(表 5-2)。

川内試験地の原木採取林モデル地区は、平成 25(2013)年 1 月に 53 年生のコナラが優占した落葉広葉樹林内の一部エリアで落葉等除去を行い、同年 3 月に同エリア及び隣接した落葉等除去を行っていないエリアを皆伐して、落葉等除去の有無で 30m×30m の作業区を 2 つ

¹⁵ 「森林における放射性物質の除去及び拡散抑制等に関する技術的な指針」(林野庁 平成 24 年 4 月)データを参照

設置した試験地である。ここでの第3次航空機モニタリングで公表された放射性セシウム（Cs-137）の沈着量は580kBq/m²（表5-1）で、平成25(2013)年3月に皆伐等作業を実施しているため、持ち出された量¹⁶を差し引くと、平成29(2017)年12月時点での現存量は396～449kBq/m²と推定される。本調査での放射性セシウム（Cs-137）の現存量の実測値は、皆伐+落葉等除去区で平均195kBq/m²、皆伐区で平均215kBq/m²であった。

表 5-1 試験地の概要

試験地	林相 (林齢) ^{*1}	作業内容等	面積	平均 斜度	Cs-137 初期沈着量 ^{*2}
広野試験地	アカマツ・ 広葉樹混交林 (46年-63年)	皆伐区	0.50ha (25m×50m) ×4区画	20°	110 kBq/m ²
川内試験地 原木採取林 モデル地区	落葉広葉樹林 (53年生)	皆伐区	0.09ha (30m×30m)	39°	580 kBq/m ²
		皆伐+ 落葉等除去区	0.09ha (30m×30m)		

*1 林齢は伐採を行った時点(広野試験地平成24(2012)年1月時点、川内試験地平成25(2013)年3月時点)

*2 第3次航空機モニタリング公表値(平成23(2011)年7月2日時点の値)

表 5-2 試験地における放射性セシウム（Cs-137）現存量

試験地		Cs-137 現存量(物理学的減衰補正值 ^{*1}) (kBq/m ²)		
		第3次航空機 モニタリング	伐採等作業後 ^{*2} 推計値	実測値 ^{*3}
広野試験地	皆伐区	93	86	59 (39~85)
	対照区		93	47 (23~59)
川内試験地	皆伐区	489	449	215 (149~265)
	皆伐+ 落葉等除去区		396	195 (105~250)
	対照区		489	319 (259~463)

*1 平成30(2018)年12月18日時点に物理学的減衰補正

*2 持ち出されたCs-137量は、便宜的に作業完了後(広野試験地:平成24(2012)年2月27日、川内試験地:平成25(2013)年3月18日)を基準日として物理学的減衰補正した。

*3 平成30(2018)年12月に採取した堆積有機物及び0-5cm土壌による値。広野試験地は5箇所、川内試験地は各区6箇所の平均値を示す。対照区はスクレーパープレートによる調査結果として、平成25(2013)年~平成28(2016)年の11月または12月に実施した調査結果を同一日(*1)に物理学的減衰補正した値の平均値。

¹⁶ 皆伐等作業によって持ち出した放射性セシウム（Cs-137）量は、広野試験地皆伐区、川内試験地原木採取林モデル地区皆伐区、同皆伐+落葉等除去区で、それぞれ8.24kBq/m²、45.5 kBq/m²、105.3 kBq/m²

「平成24年度森林における放射性物質拡散防止等技術検証・開発事業のうち「森林施業等に係る技術検証・開発」報告書」P.23 表2-8から引用

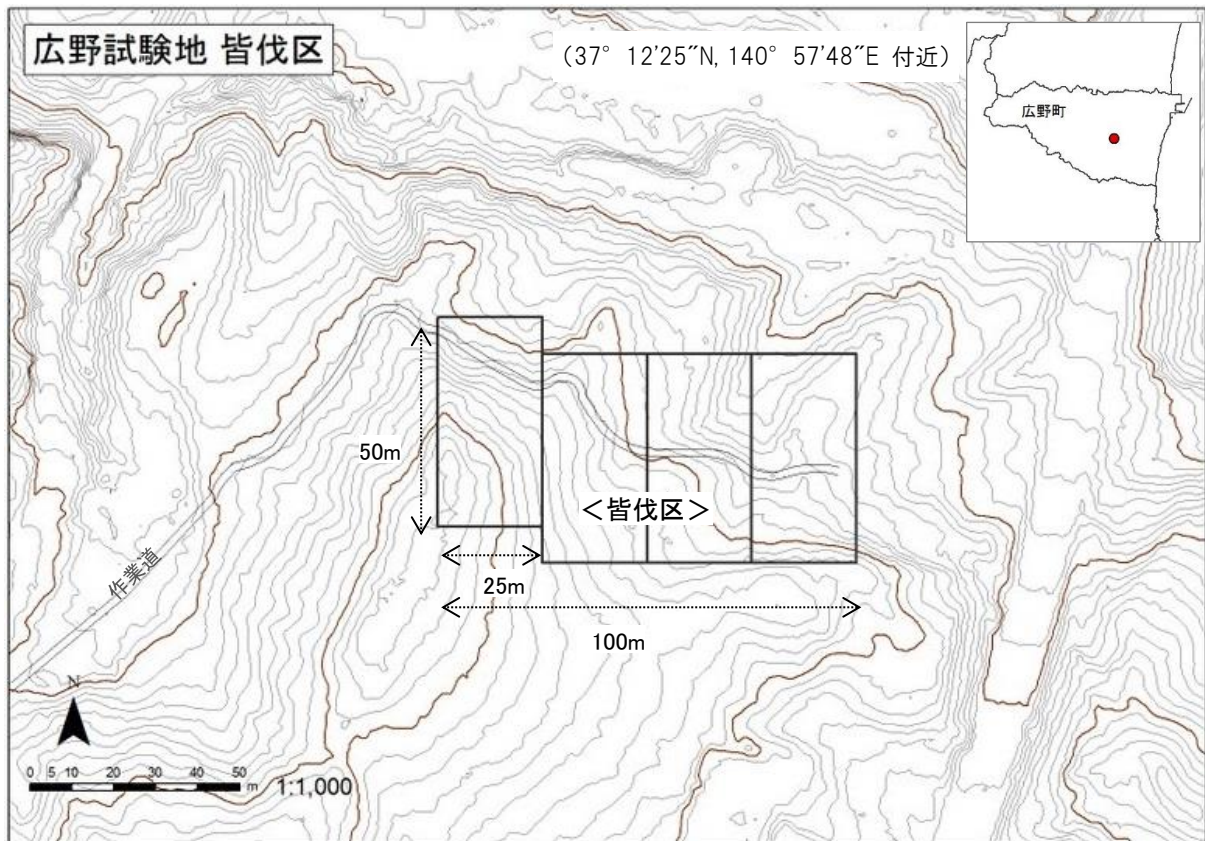


図 5-2 広野試験地の位置及び採取エリア

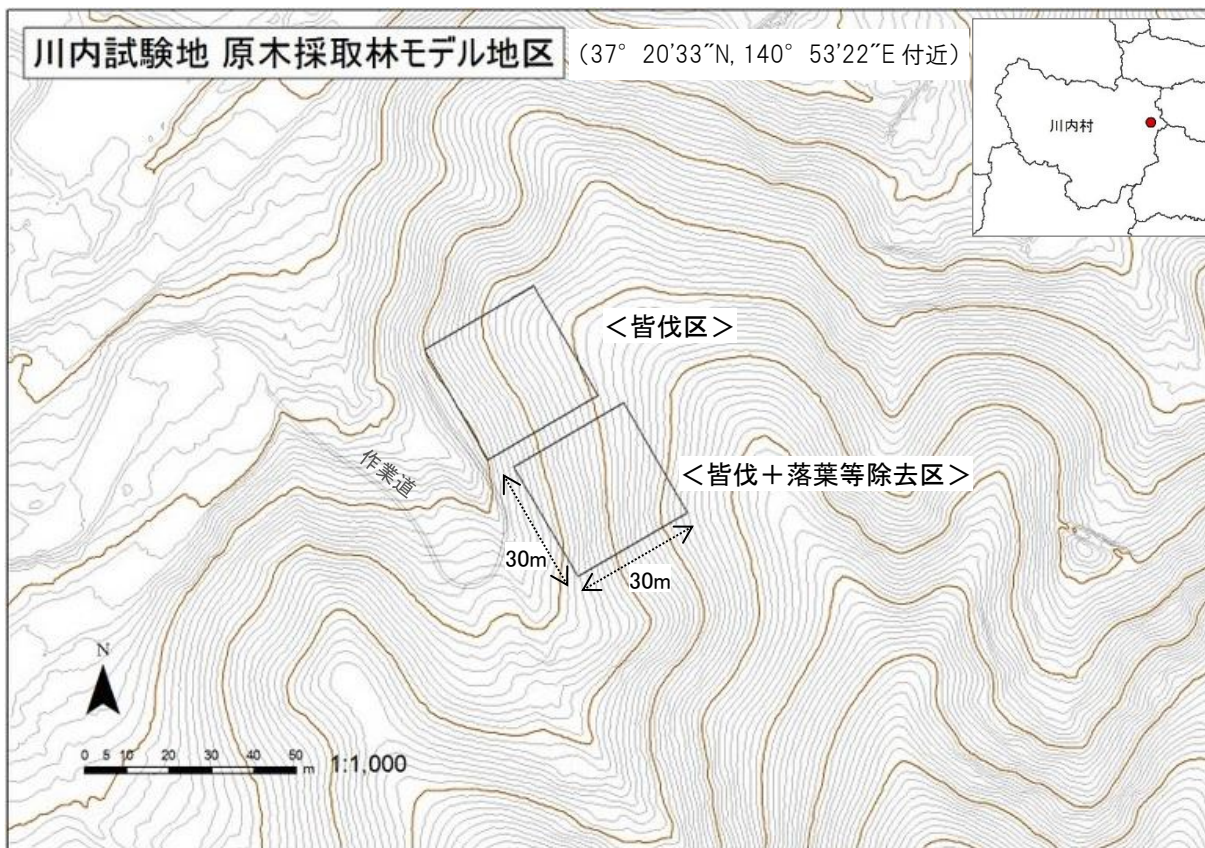


図 5-3 川内試験地 原木採取林モデル地区の位置及び採取エリア



図 5-4 試験地の鳥瞰図



写真 5-1 川内試験地の状況



写真 5-2 広野試験地のぼう芽更新木の状況

2) ぼう芽更新木等の試料採取と放射性物質の測定

① ぼう芽更新木等植物体の試料採取

ア. 試料採取

広野試験地の試料の個体数及び採取日程を表 5-3 に、川内試験地は表 5-4 に示す。

広野試験地では、コナラを対象種とした。川内試験地では、コナラとクヌギを対象種とした。

イ. 器官区分

当年枝は、新しい器官として生理活性が高く、放射性セシウムの濃度が多年枝に比べて高い。平成 29 (2017) 年度事業において、同一個体内では当年枝の放射性セシウム (Cs-137) 濃度と多年枝の放射性セシウム (Cs-137) 濃度との間に相関関係が認められた。φ 2cm までの太さの多年枝については当年枝との関係性が有意であることが確認され、この関係は、異なる試験地でも違いがなかった。そのため、当年枝は本調査における指標となり得ることが明らかとなった。また、他の調査等からも当年枝と木部の放射性セシウム濃度には太さに応じた一定の関係性があることが知見として示されている。植栽木、ぼう芽更新木、立木に共通した放射性セシウム汚染の指標器官として有効であると考えられる。

過年度事業においては、ぼう芽更新木の試料は、葉と枝に器官区分し、枝は図 5-5 に示す方法に準じて、当年枝と多年枝に区分し、さらに多年枝を、直径 1cm を基準とした太さで区分したが、上記のことから平成 30 (2018) 年度事業より、当年枝のみを試料とした。

また、後述する多点調査 (広域調査) においては、今年度新たに立木の内樹皮を試料として採取した。

ウ. 試料採取の時期

試料採取の時期は、以下のとおりとした。

- ・ 落葉から 2 週間以上経ち、物質の転流が落ち着く 12 月 (休眠期)

休眠期に放射性セシウム濃度が低下することが明らかになりつつあることから、休眠期における濃度の把握を重視し、試料採取を行った。

表 5-3 広野試験地（皆伐区）における採取試料木の個体数

採取日	皆伐区									
	コナラ									
	ぼう芽更新木						植栽木			
	葉	当年枝	多年枝				葉	当年枝	枝	根
φ1cm未満			φ1cm以上	2年枝	3年枝					
2012年	(1月下旬 皆伐、12月 下刈り)						(12月 植栽)			
2013年6月19日	3	2	-	-	1*	-	-	-	-	-
11月6日	5	4	-	-	1*	-	-	-	-	-
2014年6月11日	5	4*2	-	-	1*		-	-	-	-
11月5日	5	5	-	-	5	1	2	-	2	-
2015年6月30日	5	5	5	5	-	-	-	-	-	-
11月7・14・15日	5	5	5	5	-	-	3	-	3	3
12月15日	-	4	4	4	-	-	-	-	-	-
2016年6月29日	5	5	5	5	-	-	-	-	-	-
12月22日	-	5	5	5	-	-	3	-	3	3
2017年7月20日	4	4	4	4	-	-	-	-	-	-
12月26日	-	5	5	5	-	-	-	6	6	6
2018年12月27日	-	5	-	-	-	-	-	3	-	-
2019年12月18日	-	5	-	-	-	-	-	3	-	-
2020年12月22日	-	5	-	-	-	-	-	3	-	-

太枠で示す平成26(2014)年6月までの採取試料は、それぞれ異株のぼう芽枝であり、器官区分をしなかった試料である。2年枝・3年枝の試料(*)は、平成24(2012)年12月の下刈の際に切られなかった試験斜面枠内の株のぼう芽枝(当年枝も含んでいる)。当年枝の試料は、器官区分をしなかった平成26(2014)年6月の採取試料(*2)のみ、2年枝も含んでいるが、1年枝扱いとした。

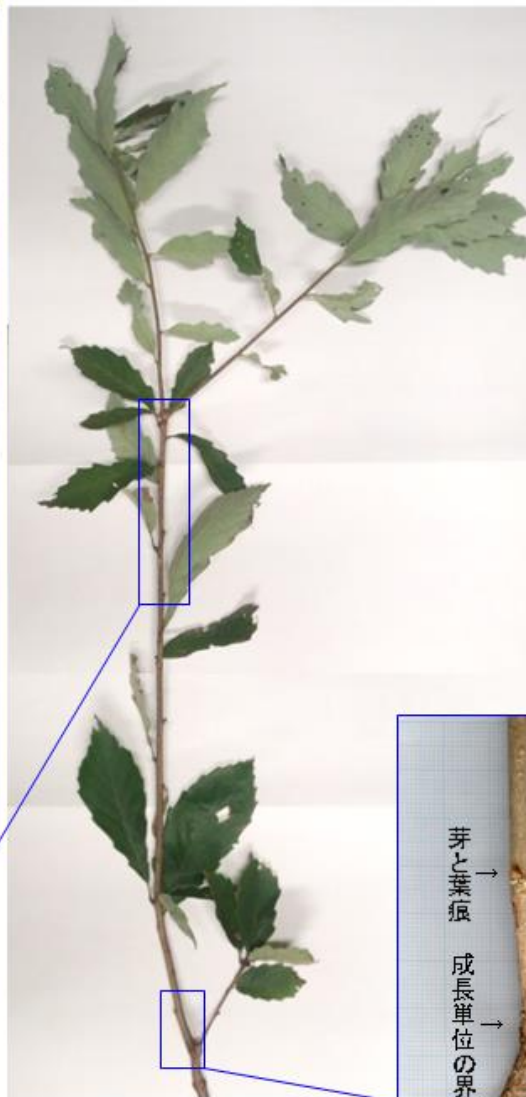
表 5-4 川内試験地（原木採取林モデル地区）における採取試料木の個体数

採取日	区画ごと(皆伐区/皆伐+落葉等除去区)							-	
	樹種ごと(コナラ/クヌギ)							コナラ	
	ぼう芽更新木							立木	
	葉	当年枝	多年枝			根株	当年枝	φ1cm未満	
φ1cm未満			φ1cm以上	2年枝					
2013年	(1月 落葉等除去、3月 皆伐)								
2013年7月3日	3	3	-	-	-	-	-	-	
11月5日	3	3	-	-	-	-	-	-	
2014年6月10日	3	3*	-	-	-	-	-	-	
10月23日	3	3	-	-	3	-	-	-	
12月4日	-	-	-	-	-	-	-	3	
2015年6月24日	3	3	3	3	-	-	-	-	
11月6日	3	3	3	3	-	-	-	-	
12月22日	-	3	3	3	-	3	-	3	
2016年6月29日	3	3	3	3	-	-	-	-	
12月23日	-	3	3	3	-	3	-	-	
2017年12月20日	-	3	3	3	-	-	3	-	
2018年12月20~26日	-	3	-	-	-	-	-	-	
2020年1月14日	-	3	-	-	-	-	-	-	
2020年12月23日	-	3	-	-	-	-	3	-	

太枠で示す平成26(2014)年6月までの採取試料は、器官区分をしなかった試料である。平成26(2014)年6月の採取試料(*)のみ、2年枝も含んでいるが、当年枝扱いとした。

採取部位 = 節に芽のある枝 ≡ 当年枝

節に葉痕らしきものが見えるが芽がないので、細くても前年枝



芽があるので太くても当年枝



(作製者) 益守 昌也
東京大学大学院農学生命科学研究科
森林科学専攻 造林学研究室

図 5-5 コナラ当年枝の見分け方

② 土壌等試料の採取

土壌中の放射性セシウム（Cs-137）濃度及び現存量、土壌化学性の把握のため、土壌等の採取を行った。採取は植物体試料の採取と同時期に行った。

試料木の根元付近から1～2m程度の範囲で、堆積有機物と深度0-5cmの表層土壌（鉍質土壌）を採取した。

堆積有機物は20cm×20cm方形枠を設置して採取し、土壌は採土円筒（直径50mm、容積100mL）を用いて深度0-5cmから採取した。

ぼう芽更新木1株に対し、堆積有機物は1箇所、0-5cm土壌は5箇所採取した上で混合し、1試料とした。

広野試験地におけるコナラ植栽木については、植栽木1本に対し0-5cm土壌を1箇所採取し、斜面位置ごとに植栽木3本分を混合し、斜面上部・中腹・下部それぞれで繰り返した。

ただし、土壌採取は、今年度新規に植物体試料の採取を行った地点（立木等）に限定した。

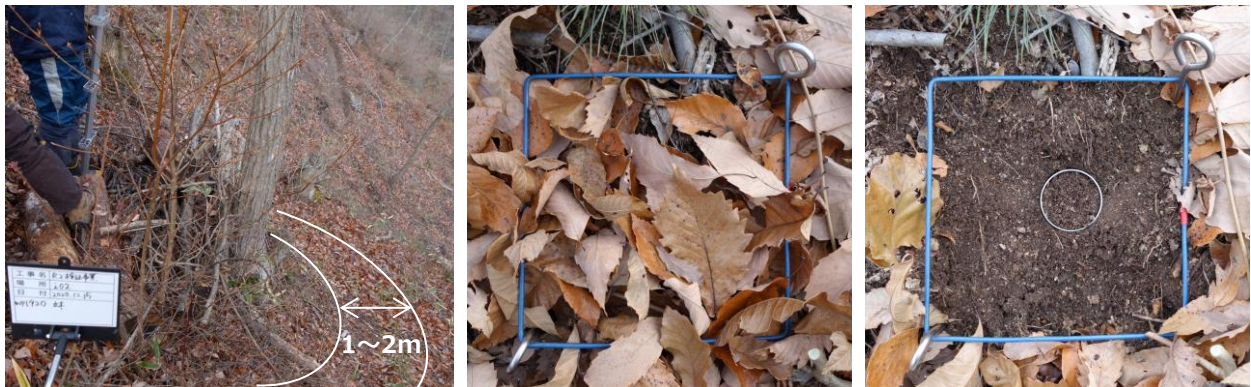


写真 5-3 土壌等採取概要

③ 放射性セシウム濃度の測定とデータ解析

各試料の放射性セシウム（Cs-137）の濃度は、後述（別章）に記載した方法にしたがって、測定した。

森林土壌から植物への移行（し易さ）は、面移行係数(aggregated transfer factor T_{Fag})を算出して評価ができる。面移行係数は下式で定義される。

$$\text{面移行係数 } T_{Fag} [\text{m}^2/\text{kg}] = \frac{\text{植物体中の放射性セシウム濃度 } [\text{Bq}/\text{kg}]}{\text{単位地表面積当たりの放射性セシウム現存量 } [\text{Bq}/\text{m}^2]}$$

なお、放射性セシウム（Cs-137）現存量としては、第3次航空機モニタリングの公表値（平成23(2011)年7月時点）から各作業区の皆伐作業によって持ち出された放射性セシウム（Cs-137）量を減じた値と、②で採取した試料による実測値の2種類を用いた（表5-2）。いずれも令和2(2020)年12月時点における減衰補正值とした。

④ 土壌化学性の調査

ア. 交換性カリウム

②で採取した土壌等試料のうち、0-5cm 土壌について、植物が利用可能な交換性カリウムの濃度を蛍光光度計¹⁷を用いて測定した。

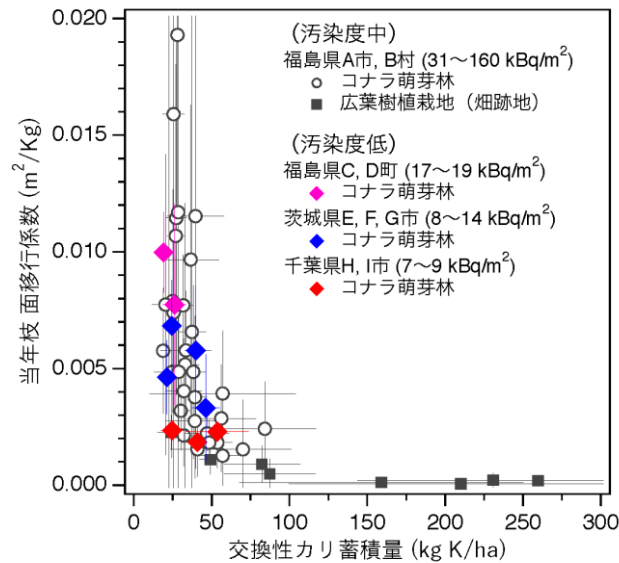
イ. 土壌 pH (H₂O)

ア同様、0-5cm 土壌について、土壌 pH (H₂O) の測定を行った。蒸留水で 30 分振とうした後 30 分静置し、ガラス電極を用いて測定した¹⁸。

3) 多点調査 (広域調査)

コナラぼう芽枝等植物体や土壌等の放射性セシウム濃度は、ばらつきが大きく、ばらつきの要因や地域的な特性を把握することは、原木の利用可能性の検討に資する。近年の調査による知見として、ぼう芽枝等への放射性セシウムの移行には、土壌化学性が大きく影響することが示唆されていることから (図 5-6)、本事業においては、平成 30 (2018) 年度より多点調査を実施している。

今年度は、新たに立木 (直接汚染を受けた残存立木) の調査を試行的に実施した。



(N=3~8, 誤差バーはSD) (三浦ら、未公表資料)

図 5-6 コナラ林等における土壌中交換性カリウムと面移行係数の関係 (中汚染地域)

交換性カリウム蓄積量は 0-5cm 土壌における量。面移行係数は 0-5cm 土壌から算出した値 (本調査は堆積有機物も含めて算出していることに注意)。

¹⁷ 土壌環境分析法 V.7. A. 交換性陽イオン 簡易法・バッチ法-a

¹⁸ 土壌環境分析法 V.1 (5) 2) ガラス電極法. pH (H₂O)

① 調査地

過年度事業において、福島県内の低～中汚染地域のコナラ林のうち、福島第一原子力発電所の事故後に伐採を行い、ぼう芽更新を行った林分を対象とし、18地点を選定した(表 5-5、図 5-7) (ただし1箇所、平成22(2010)年度伐採が含まれる)。今年度は、同地点での継続調査を行った。

また、今年度はコナラ立木の調査を実施するため、これまでの調査結果において、コナラぼう芽更新木の当年枝の放射性セシウム(Cs-137)濃度が200Bq/kgを超える7地点から、調査可能なコナラ立木が確認された6地点を立木調査の対象地として選定した。立木調査は、既存試験地(広野、川内、田村試験地)を加えた合計9地点で実施した。

表 5-5 多点調査の対象とした落葉広葉樹林(コナラ林)一覧

番号	エリア	(森林組合所管別)	所有区分	伐採年度	所在地	空間線量率*1 ($\mu\text{Sv/h}$)	初期沈着*2 (kBq/m^2)	R2年度 立木調査
(H30調査地の継続)								
WK 01	福島県会津地方	会津若松地方	共有林	H23	河沼郡柳津町久保田	(0.08)	25	-
WK 02	〃	会津若松地方	共有林	H27	会津若松市湊町赤井	(0.06)	12	-
N 01	〃	会津北部	個人所有林	H25	耶麻郡北塩原村北山	(0.08)	17	-
C 01	福島県中通り地方	ふくしま中央	個人所有林	H22	田村郡小野町雁股田	0.07	37	-
C 02	〃	ふくしま中央	財産区林	H26 ～27	石川郡石川町湯郷渡	0.07	18	-
C 03	〃	ふくしま中央	個人所有林	不明	石川郡平田村下蓬田	0.08	24	-
(H31調査地の継続)								
t01	福島県中通り地方	田村	個人所有林	28	田村郡三春町富沢	0.24	167	○
t02	〃	田村	個人所有林	29	田村郡三春町富沢	0.20	149	○
t03	〃	田村	共有林	27	田村市船引町船引	0.09	31	-
t04	〃	田村	個人所有林	30	田村市船引町門沢	0.11	35	-
t05	〃	田村	個人所有林	28	田村市船引町船引	0.10	26	-
m01	〃	ふくしま中央 (都路)	個人所有林	26	田村市都路町古道	0.35	221	○
i01	〃	ふくしま中央 (石川)	個人所有林	29	岩瀬郡天栄村牧之内	0.20	218	○
i02	〃	ふくしま中央 (石川)	個人所有林	29	岩瀬郡天栄村牧之内	0.21	168	○
i04	〃	ふくしま中央 (石川)	個人所有林	26	須賀川市畑田	0.22	164	-
i05	〃	ふくしま中央 (石川)	個人所有林	25	須賀川市木之崎	0.19	154	○
i06	〃	ふくしま中央 (石川)	個人所有林		石川郡石川町北山	0.07	24	-
i07	〃	ふくしま中央 (石川)	個人所有林		石川郡石川町湯郷渡	0.04	20	-

*1 空間線量率は初回調査時の値 (H30 調査地:平成30(2018)年12月、H31 調査地:平成31(2019)年12月)

*2 初期沈着は、平成23(2011)年7月2日(第3次航空機モニタリング結果と同一日)時点の放射性セシウム(Cs-137)沈着量。第5次航空機モニタリングによる測定結果も含む。(出典:Kato Onda et al (2019)¹⁹)

¹⁹ Kato Onda et al (2019) : Reconstruction of a Fukushima accident-derived radiocesium fallout map for environmental transfer studies, Journal of Environmental Radioactivity, Volume 210, December 2019, 105996
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.105996> (DATA: doi: 10.34355/CRiED.U.TSUKUBA.0003)

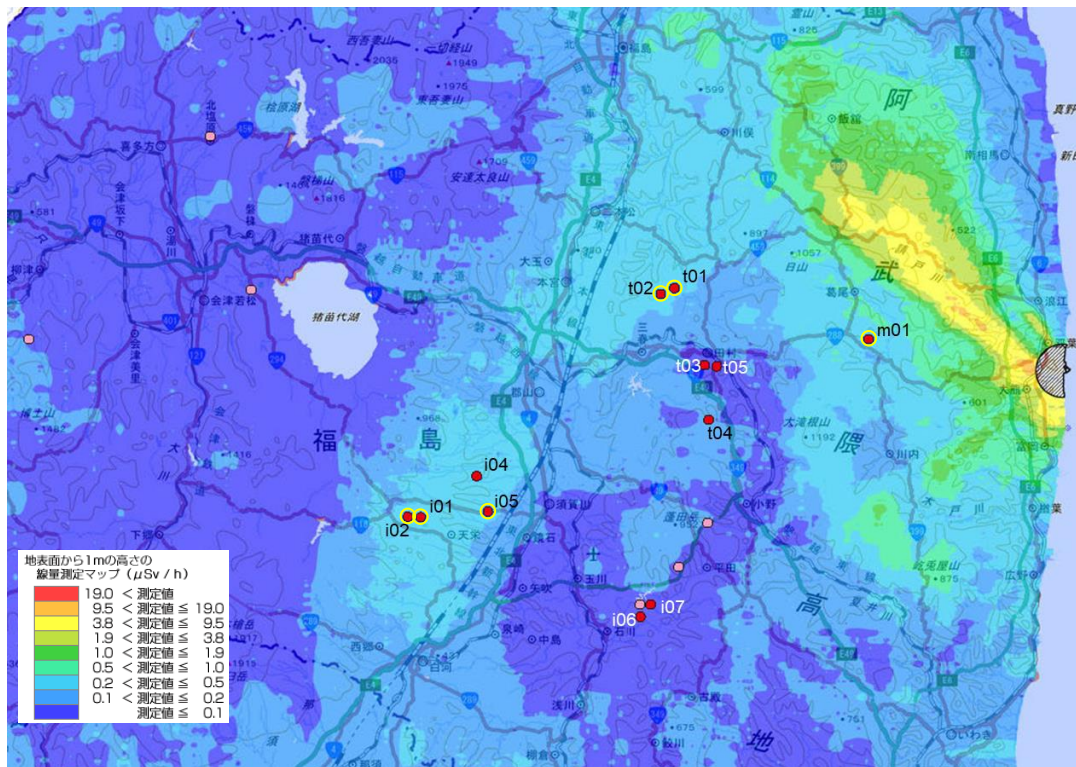


図 5-7 多点調査位置図

黄色○:立木調査地点

平成 30(2018)年 11 月 15 日時点の航空機モニタリングマップ(出典「放射線量等分布マップ拡大サイト/地理院地図」)より作成

② 調査項目

過年度事業においては、1 地点につき、コナラぼう芽更新木を 3 株選定し、試料木とした。今年度は、同株より当年枝の採取を行った。

コナラ立木は、ぼう芽更新木の試料木と同じ林分内で 3 本選定した。コナラ立木の試料木 1 本につき、当年枝、内樹皮、土壌等（堆積有機物、0-5cm 土壌）を採取試料とした。

調査・採取方法、分析項目は、2) ①～④と同様とした。

なお、内樹皮及びその採取部分については図 5-8、写真 5-4 のとおりである。

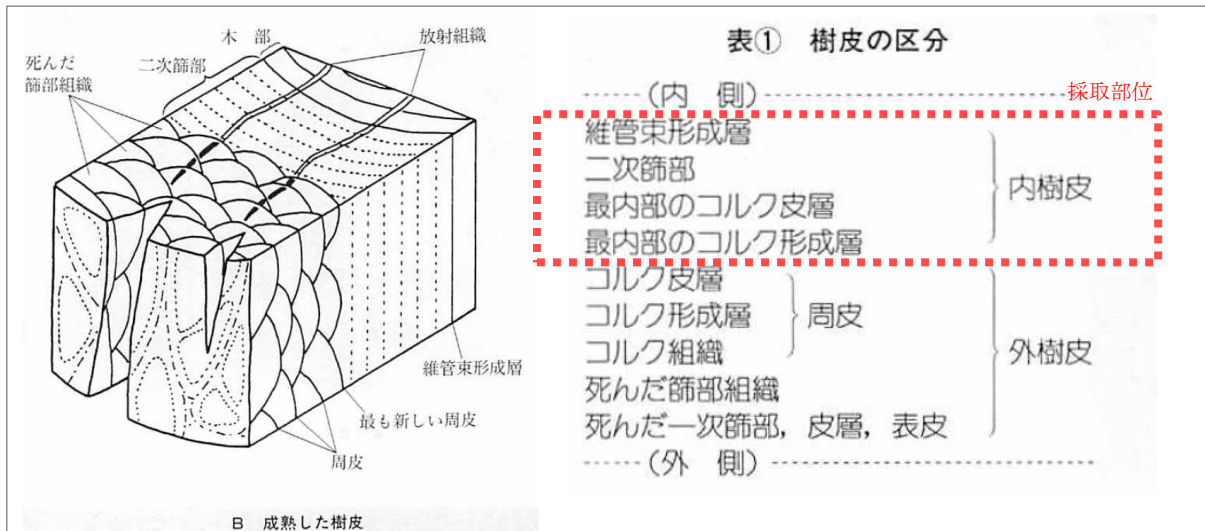


図 5-8 樹皮の構造（模式図）及び採取部位

出典:「林業技術」No.699, 1999年7月, 日本林業技術協会 (執筆: 森林総合研究所 吉田和正)

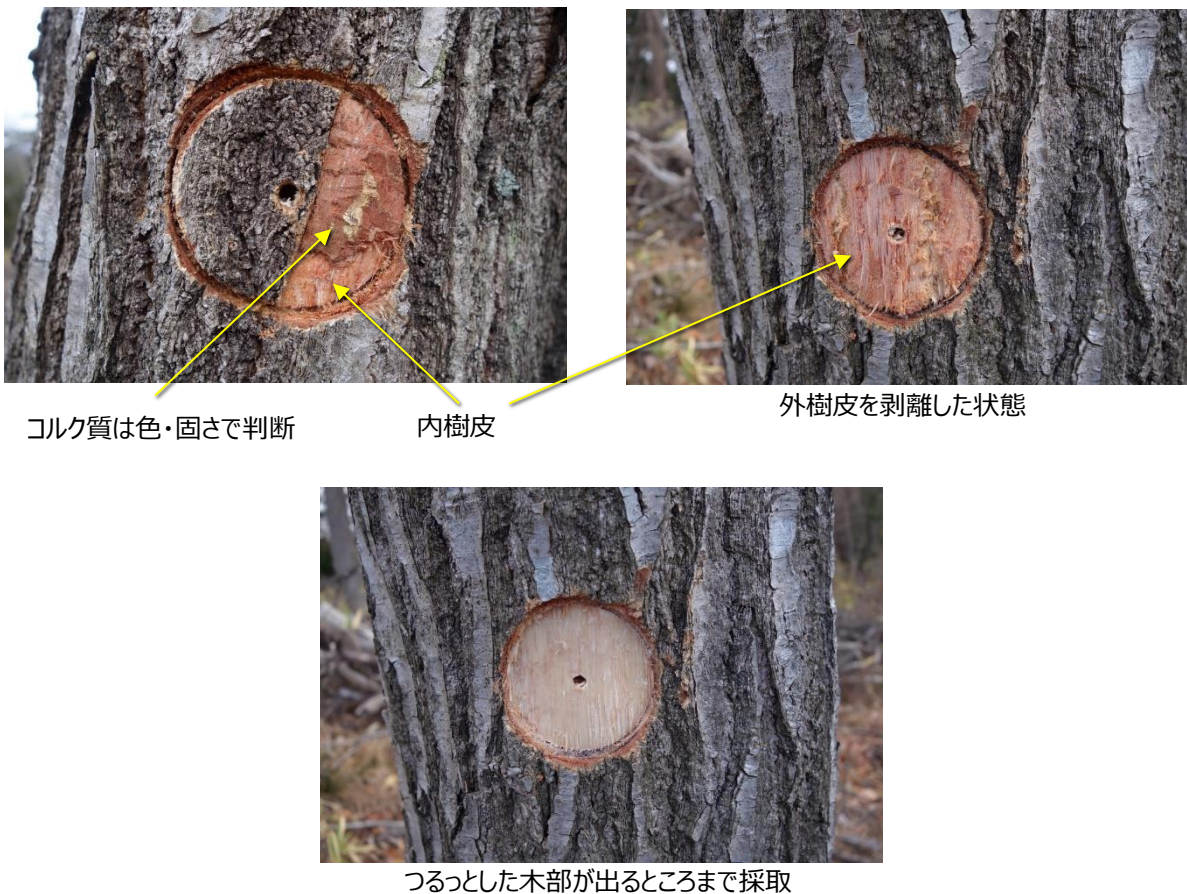


写真 5-4 内樹皮採取概要

(3) 試験結果

1) コナラのぼう芽更新木への放射性セシウム移行状況

コナラのぼう芽更新木の放射性セシウム (Cs-137) 濃度の推移を図 5-9 に示す。

なお、植物体試料の放射性セシウム (Cs-137) 濃度測定においては、試料の採取量が限られ、かつ濃度が低い場合に定量下限値 (DL) を下回り、不検出 (ND) となる場合があった。過年度事業においては、水等の試料で同様に、ND となるケースがみられ、その場合には DL の 1/2 の値を採用した。本試験においては、試料が少ない場合に、ND 時の DL が「きのこ原木及び菌床用培地中の放射性セシウム測定のための検査方法」²⁰で要求している定量下限値である 30Bq/kg を大きく上回る場合もあり、1/2 とした場合に、過小評価となることも考慮し、DL に 0.8 を乗じた値を採用した (以下、同様とする)。

広野試験地、川内試験地における落葉期または、休眠期の当年枝の放射性セシウム (Cs-137) 濃度 (同一日での減衰補正值) の推移を図 5-9 に示す。両試験地ともに平成 25(2013)年から 3 年程度ほぼ横ばい推移を示していたが、平成 28(2016)年 12 月に、広野試験地では、それまでの安定傾向と比較して変動幅の大きい推移を示し、平均濃度が高くなった。これは、特定の個体で濃度が急激に上昇したことが大きく影響していたが、それ以降、他の個体でも濃度が上昇した。川内試験地においては、コナラ当年枝の濃度は平成 29(2017)年 12 月から平成 30(2018)年 12 月にかけては、横ばいで推移した。平成 30(2018)年 12 月以降は、両試験地ともに濃度が横ばい～低下傾向にある。

両試験地では、同一個体での追跡調査を行っている。個体ごとに、前年度の濃度との比較を行い、その度数分布を図 5-10 に示す。また、前年度に多点調査を行った調査地についても、今年度同一個体で継続調査を実施しており、その結果も同図に示した。既存試験地及び多点調査の継続地点 (18 調査地) の計 20 調査地においては、6 割以上 (全 67 株のうち 42) の株で、令和元(2019)年から濃度が (自然減衰より) 増加した。前年の濃度との比の全体平均値は 1.07 であった。

図 5-11 に広野試験地及び川内試験地における面移行係数を示す。両試験地では、面移行係数が 1 オーダー近い開きを示している。コナラへの放射性セシウムの移行のし易さについては、地域間差がある可能性がある。

なお、本試験におけるぼう芽枝等の放射性セシウム濃度の測定結果ならびに面移行係数の算出結果は、一覧にし、本節末に付表 (表 5-8～表 5-11) として掲載した。

²⁰ 平成 23(2011)年 10 月, 林野庁

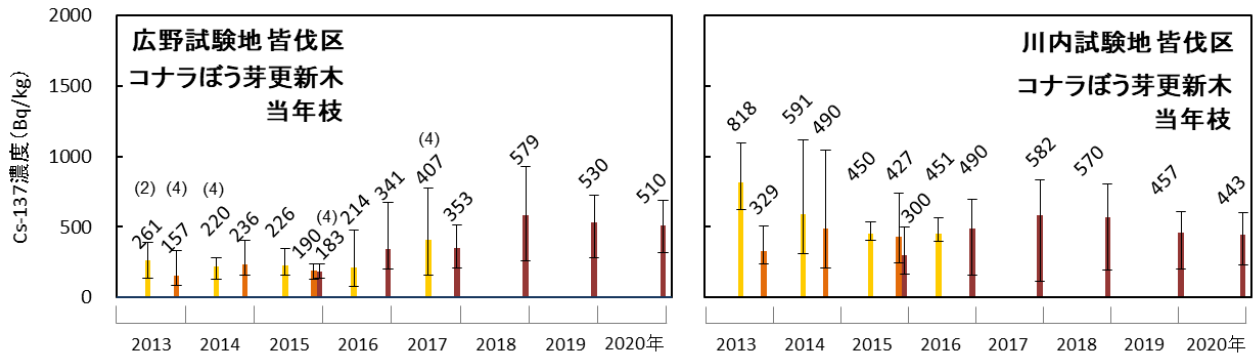


図 5-9 2 試験地におけるコナラぼう芽更新木の放射性セシウム(Cs-137)濃度

放射性セシウム(Cs-137)濃度は、令和 2(2020)年 12 月 15 日時点に物理学的減衰補正した値を示す。エラーバーは最大値、最小値を示す。試料数は、広島試験地が n=5、川内試験地が n=3 で、同じ株での追跡調査を基本とした。ただし、一部試料数が異なるものは、図中に()で n 数を示す。棒グラフの色の色分け(濃淡)は、試料を採取した季節を示す。明色は成長期、暗色は落葉期・休眠期を示す。

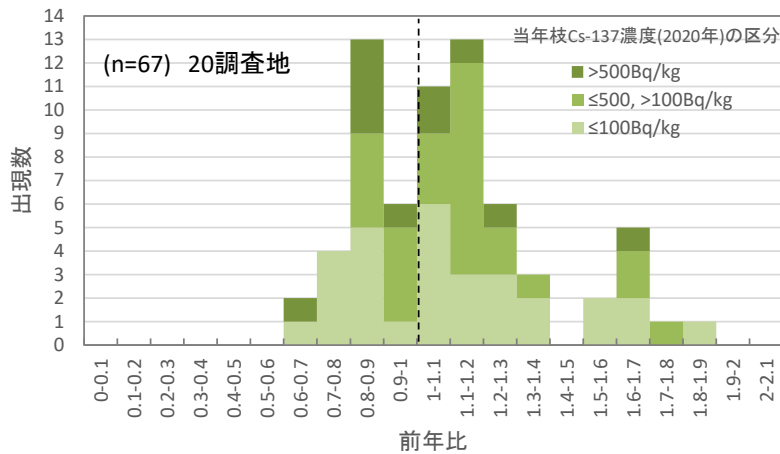


図 5-10 同株から採取したコナラぼう芽枝(当年枝)の放射性セシウム(Cs-137)濃度比較(2019 年-2020 年) 採取時点の放射性セシウム(Cs-137)濃度の比較(物理学的減衰補正なし)。1 年間での自然減衰は 2%(0.98)。

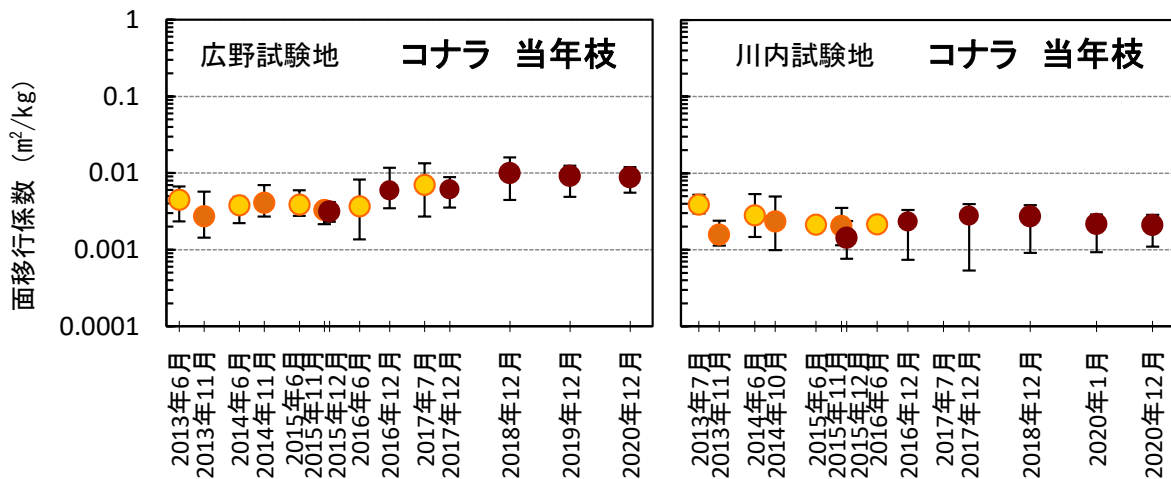


図 5-11 2 試験地におけるコナラぼう芽更新木の面移行係数

面移行係数は、平成 30(2018)年 12 月に採土円筒で採取した土壌による実測値を用いて算出。算出に用いた放射性セシウム(Cs-137)現存量及び濃度は、土壌・ぼう芽枝ともに令和 2(2020)年 12 月 15 日時点に物理学的減衰補正した値を使用。広島試験地は n=5、川内試験地は n=3 を基本とする(各回の n 数は表 5-3、表 5-4 参照)。エラーバーは最大値、最小値を示す。マーカの色分け(濃淡)は試料を採取した季節を示す。明色は成長期、暗色は落葉期・休眠期を示す。

2) 樹種別比較

川内試験地では、コナラ及びクヌギのぼう芽枝を採取しており、その濃度の推移を図 5-12 に示す。

本試験においては、クヌギの方がコナラより放射性セシウム (Cs-137) 濃度が低く、コナラの 1/2 から 1/5 (平均 1/3) 程度の値を示した。

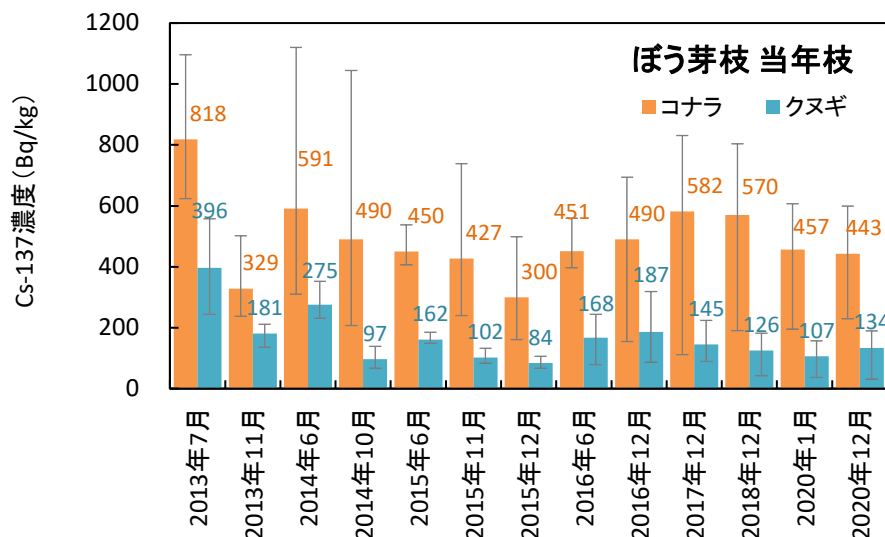


図 5-12 川内試験地におけるコナラ及びクヌギのぼう芽更新木の放射性セシウム (Cs-137) 濃度
放射性セシウム (Cs-137) 濃度は、令和 2(2020)年 12 月 15 日時点で物理学的減衰補正した値を示す。エラーバーは最大値、最小値を示す。試料数は n=3 で、同じ株での追跡調査を基本とした。

3) 落葉等除去の有無による比較

川内試験地では、施業種別に 2 区画設定している。ぼう芽更新木の放射性セシウム (Cs-137) 濃度の推移について落葉等除去の有無別で比較し、図 5-13 に示した。

過年度事業において、コナラ及びクヌギともに、落葉等除去を実施した区画で、全ての器官の放射性セシウム (Cs-137) 濃度が低かったことが示されている。平成 30 (2018) 年度事業以降は、指標として当年枝のみ採取しているが (p.122 (2) 2) ①イ参照)、同様の傾向であった。落葉等除去区におけるぼう芽枝の放射性セシウム (Cs-137) 濃度は、除去を行っていない皆伐のみの区画のぼう芽枝の濃度に対し、直近の数年は、3~5 割程度で推移しており、以前に比べ変動の幅が小さくなっている。事故から年数が経過し、コナラ及びクヌギともに放射性セシウム (Cs-137) 濃度が安定してきたことが要因である。この状況から、本試験においては、落葉等除去の効果として、中長期的には放射性セシウム (Cs-137) 濃度を 3~5 割程度に低下させる効果があったとみられる。ただし、本試験は 1 試験地のみの結果であり、また、事故から 2 年以内 (平成 25(2013)年 1 月) に落葉等除去を行ったことに留意する必要がある。

図 5-14 に川内試験地におけるぼう芽更新木の面移行係数を示す。皆伐区と落葉等除去区

を比較すると、ぼう芽枝の放射性セシウム (Cs-137) 濃度には上記のとおり差がみられたが、面移行係数には顕著な差はみられない。ただし、全体的には落葉等除去区の面移行係数がやや小さい。コナラ等への放射性物質の移行のし易さ (面移行係数) には、土壤化学性 (主に交換性カリウム) が影響することが示唆されているが ((2) 3)、図 5-6 参照)、落葉等除去が土壤化学性に与える影響は大きく、面移行係数の違いに影響している可能性がある。

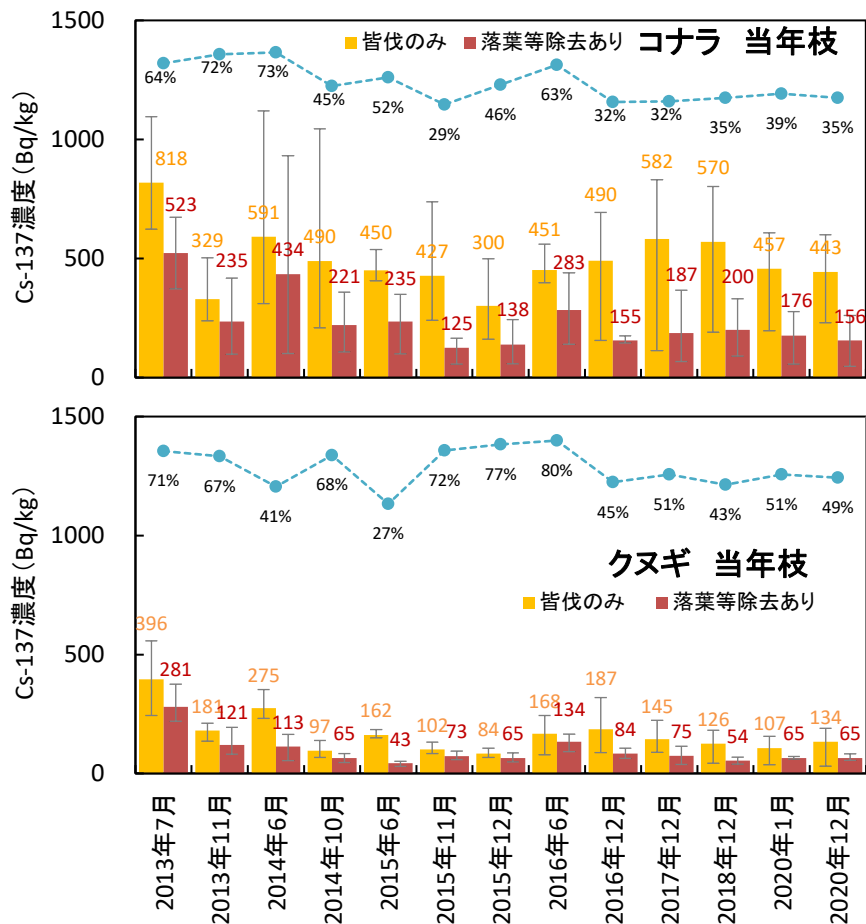


図 5-13 ぼう芽更新木の放射性セシウム (Cs-137) 濃度 (落葉等除去の有無別比較)

放射性セシウム (Cs-137) 濃度は、令和 2(2020)年 12 月 15 日時点で物理学的減衰補正した値を示す。エラーバーは最大値、最小値を示す。試料数は n=3 で、同じ株での追跡調査を基本とした。折れ線及び値 (%) は [落葉等除去あり] / [皆伐のみ] の比 (割合) を示す。

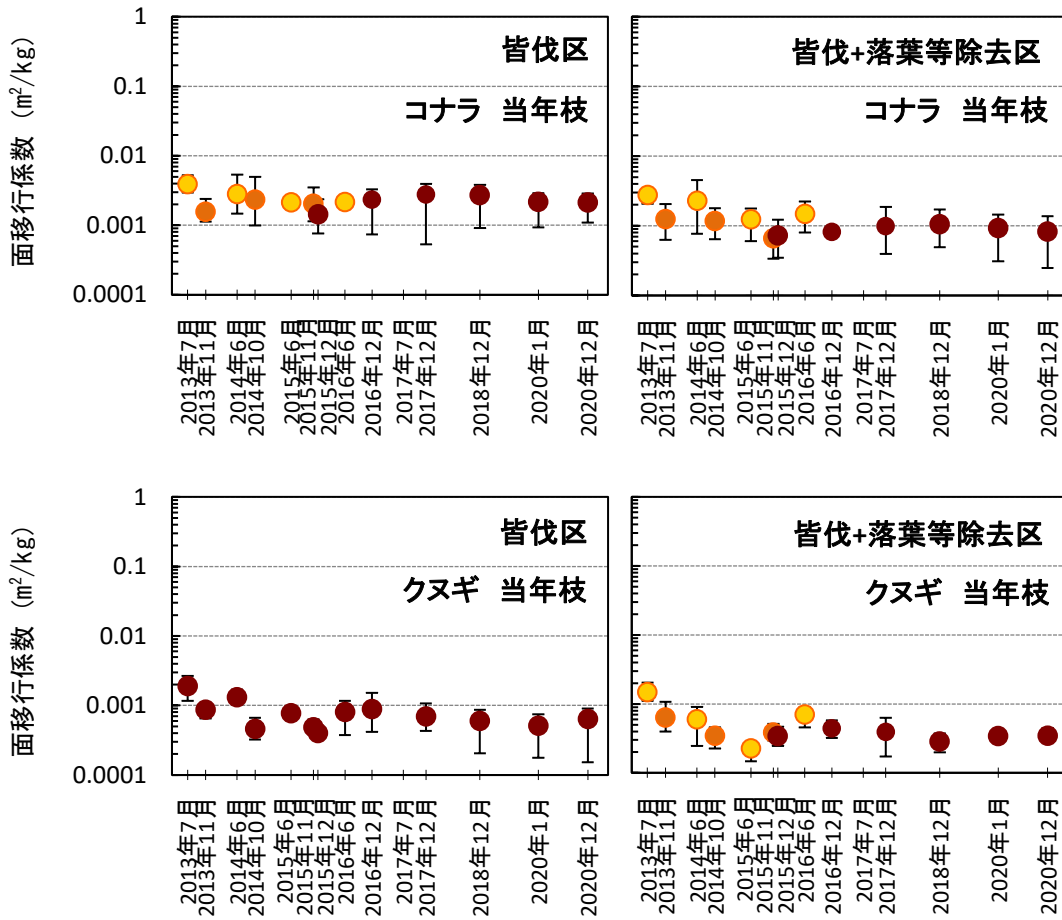


図 5-14 川内試験地におけるぼう芽更新木の面移行係数の推移（落葉等除去の有無別比較）

面移行係数は、平成 30(2018)年 12 月に採土円筒で採取した土壌による実測値を用いて算出。算出に用いた放射性セシウム($Cs-137$)現存量及び濃度は、土壌・ぼう芽枝ともに令和 2(2020)年 12 月 15 日時点で物理学的減衰補正した値を使用。試料数は $n=3$ 。エラーバーは最大値、最小値を示す。

マーカの色分け(濃淡)は試料を採取した季節を示す。明色は成長期、暗色は落葉期・休眠期を示す。

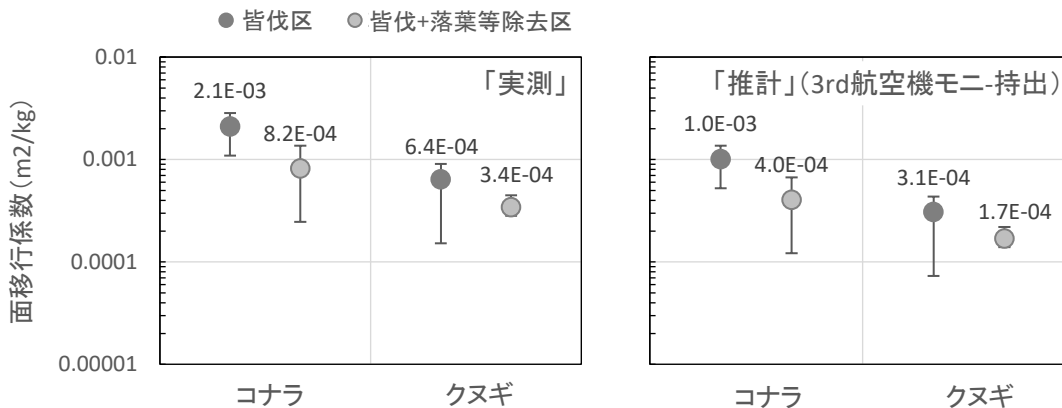


図 5-15 令和 2(2020)年 12 月時点のぼう芽更新木の面移行係数（落葉等除去の有無別比較）

面移行係数は、平成 30(2018)年 12 月に採土円筒で採取した土壌による「実測」と、第 3 次航空機モニタリングの公表値(平成 23(2011)年 7 月時点)から各作業区の皆伐等作業によって持ち出された放射性セシウム($Cs-137$)量を減じた値により算出した「推計」の 2 種類を示す。算出に用いた放射性セシウム($Cs-137$)現存量及び濃度は、土壌・ぼう芽枝ともに令和 2(2020)年 12 月 15 日時点で物理学的減衰補正した値を使用。試料数は $n=3$ 。エラーバーは最大値、最小値を示す。

4) 多点調査

① 各調査地の結果

過年度事業で実施した多点調査の結果を表 5-6、今年度実施したコナラ立木の多点調査の結果を表 5-7 に示す。

調査を実施した地点の空間線量率は、前年度が $0.04\sim 0.35\mu\text{Sv/h}$ で、今年度コナラ立木の調査を実施した地点は $0.20\sim 0.57\mu\text{Sv/h}$ であった。土壌等の放射性セシウム(Cs-137)現存量は、前年度が約 $8\sim 173\text{kBq/m}^2$ 程度で、今年度は約 $52\sim 172\text{kBq/m}^2$ の地域であった。

採取試料による土壌等の放射性セシウム(Cs-137)現存量の実測値と、航空機モニタリングによる初期沈着量から持出量を差し引いた現時点の放射性セシウム(Cs-137)現存量の推計値は、概ね 1:1 の関係性にあり、調査の精度は、担保されたものとみなすことができる(図 5-17)。

② コナラ立木調査

図 5-18 にコナラ立木の部位別放射性セシウム(Cs-137)濃度の関係を示した。同一個体内では、当年枝と内樹皮の放射性セシウム濃度には相関関係が認められる。近似直線の傾きから、内樹皮の放射性セシウム濃度は、当年枝のおよそ 0.5 倍程度とみられる。

次に、地点ごとにコナラ立木とコナラぼう芽更新木の放射性セシウム濃度を比較した(図 5-19)。当年枝を立木とぼう芽更新木とで比較すると、同一地点では立木が高く、関係式の傾きから、平均で約 1.9 倍の違いがあるとみられる。その結果、コナラのぼう芽更新木の当年枝と、コナラ立木の内樹皮の放射性セシウム濃度には、1:1 に近い関係性を示す可能性がある。

③ 土壌の放射性セシウム現存量とコナラの放射性セシウム濃度

図 5-20 に土壌等の放射性セシウム(Cs-137)現存量とコナラぼう芽枝の放射性セシウム(Cs-137)濃度の関係を示す。過年度の結果に、今年度調査を行った立木の内樹皮のデータを重ねた。すでに報告のとおり、コナラぼう芽枝(当年枝)の濃度と土壌等の放射性セシウム(Cs-137)現存量には比較的高い相関性が認められる。コナラ立木の内樹皮の結果も同様のプロットを示した。ただし点数が少ないため関係性を評価するには不十分である。

④ 土壌の放射性セシウム現存量及び交換性カリウム現存量と面移行係数

図 5-21 に土壌等の放射性セシウム(Cs-137)現存量と面移行係数の関係を示した。広域的に、土壌等の放射性セシウム現存量と面移行係数との間に関係性は示されない。内樹皮の結果も同様のプロットを示した。

図 5-22 には、0-5cm 土壌中の交換性カリウム現存量と面移行係数の関係を示した。すでに過年度の調査結果において、面移行係数は、土壌中の交換性カリウム現存量が多いほど小さい関係性(また、ある一定量を境に面移行係数が高くなる傾向)が示されている。内樹皮の結果も同様のプロットを示した。

広域的に関係性が示されたことから、コナラへの放射性セシウムの移行のしやすさには、汚染の程度にかかわらず、土壌中の交換性カリウム現存量が影響していることが示唆されるものの、交換性カリウム現存量が $60\sim 300\text{kg K/ha}$ 程度の場合の面移行係数が確認できていないなど、データ数が不足している部分がある。

なお、③、④の図 5-20～図 5-22 には、参考として、航空機モニタリングによる初期沈着量を用いた推計値及びそれから算出した面移行係数による散布図も示した。

表 5-6 低・中汚染地域のコナラ林におけるぼう芽枝への放射性セシウム移行状況及び土壌化学性等の調査結果（2018～2019 年）

地点	空間線量率 $\mu\text{Sv/h}$	Cs-137現存量		0-5cm土壌			コナラ当年枝 Cs-137濃度 Bq/kg	面移行係数 (実測) m^2/kg
		初期沈着-持出 (推計値) kBq/m^2	(実測) kBq/m^2	交換性K 濃度 mg-K/g	交換性K 現存量 kg-K/ha	pH(H_2O)		
WK 01	0.08	17.3	11.1	0.17	48.8	5.1	23	0.0034
WK 02	0.06	9.9	10.1	0.20	44.6	5.2	15	0.0021
N 01	0.08	14.1	14.5	0.19	51.7	4.3	55	0.0038
C 01 (小野)	0.07	30.9	22.4	0.13	20.3	4.4	290	0.013
C 02 (石川)	-	15.0	12.7	0.18	46.4	5.0	22	0.0017
C 03 (石川)	-	20.6	19.7	0.13	26.5	4.9	60	0.0031
広野	0.21	69.0	59.2	0.13	41.6	4.3	606	0.011
川内 (皆伐区)	0.68	614.6	206.7	0.11	30.6	4.4	597	0.0029
田村 (無施肥区)	0.19	90.1	62.1	0.12	31.0	4.7	158	0.0029
t01	0.24	134.5	68.4	0.11	33.2	4.5	202	0.0029
t02	0.20	121.4	77.5	0.10	17.2	4.3	350	0.0058
t03	0.09	25.0	23.2	0.16	36.3	5.1	69	0.0030
t04	0.11	28.8	33.8	0.10	27.2	5.0	67	0.0022
t05	0.10	21.3	25.6	0.13	28.9	4.2	41	0.0019
m01	0.35	179.6	173.3	0.12	22.8	4.5	1,053	0.0070
i01	0.20	176.5	86.3	0.13	25.8	4.5	126	0.0016
i02	0.21	136.3	124.5	0.08	20.3	4.4	320	0.0026
i04	0.22	131.8	77.3	0.17	40.3	4.8	99	0.0014
i05	0.19	122.6	60.0	0.07	20.1	4.7	266	0.0043
i06	0.07	19.4	17.0	0.13	31.3	4.4	22	0.0013
i07	0.04	16.4	7.6	0.06	18.8	4.2	59	0.0082

各地点 n=3、広野試験地は n=5 の平均値を示す。破線より上段に平成 30(2018)年度の調査結果、下段に令和元(2019)年度の調査結果を示す。

空間線量率は、各年 12 月の調査時に測定した値である。「初期沈着-持出(推計値)」は、第 3 次航空機モニタリング(平成 23(2011)年 7 月 2 日時点)の値(p.125 脚注 19 参照)から、皆伐によって持ち出された放射性セシウム量減じた値(その調査実施時点における減衰補正值)とした。皆伐によって持ち出された放射性セシウム量は、皆伐時期ごとに地上部の放射性セシウム分布割合(出典:林野庁「森林内の放射性セシウムの分布状況調査結果について」)から推計した。

表 5-7 コナラ立木への放射性セシウム移行状況及び土壌化学性等の調査結果（2020年）

地点	空間線量率 $\mu\text{Sv/h}$	Cs-137現存量		0-5cm土壌			コナラ当年枝		コナラ内樹皮	
		初期沈着-持出 (推計値)	(実測)	交換性K 濃度	交換性K 現存量	pH(H ₂ O)	Cs-137濃度	面移行係数 (実測)	Cs-137濃度	面移行係数 (実測)
		kBq/m ²	kBq/m ²	mg-K/g	kg-K/ha		Bq/kg	m ² /kg	Bq/kg	m ² /kg
t01	0.23	134.5	106.1	0.10	21.6	4.3	633	0.0071	267	0.0030
t02	0.21	120.3	52.0	0.09	18.6	4.1	867	0.0168	450	0.0086
m01	0.29	178.1	127.8	0.11	20.5	4.1	1930	0.0148	833	0.0063
i01	0.24	175.1	110.0	0.07	14.9	4.5	420	0.0040	193	0.0018
i02	0.20	135.3	83.4	0.07	15.7	4.5	697	0.0095	363	0.0047
i05	0.23	123.8	98.6	0.06	16.8	4.8	335	0.0034	124	0.0015
広野	0.21	72.6	59.2	0.10	27.3	3.9	713	0.0122	293	0.0051
川内	0.57	625.2	172.0	0.09	21.0	4.2	1107	0.0067	803	0.0048
田村	0.21	82.9	67.0	0.10	18.8	4.1	145	0.0024	94	0.0015

各地点 n=3 の平均値を示す。立木の箇所の「初期沈着-持出(推計値)」は、「持出量なし」とし、初期沈着量の値とした。

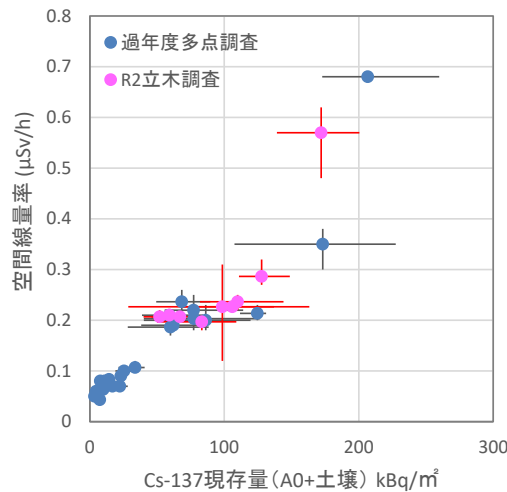


図 5-16 土壌等の放射性セシウム (Cs-137) 現存量と空間線量率の関係

1 地点(プロット)につき、株数 n=3(広野試験地のみ n=5)。エラーバーは最大最小を示す。(以下同様につき、省略する)

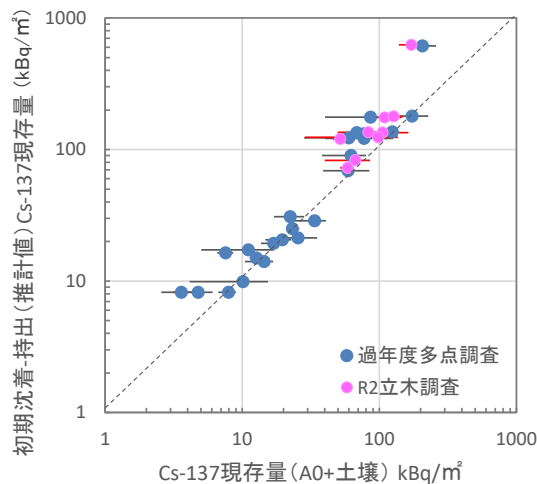


図 5-17 放射性セシウム (Cs-137) 現存量の実測値と航空機モニタリングによる推計値との関係

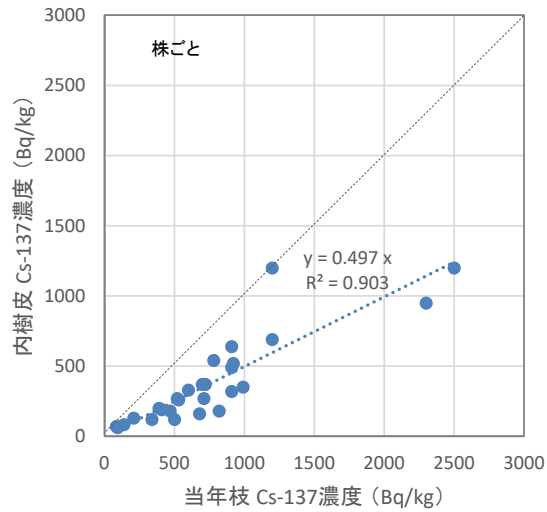


図 5-18 コナラ立木の部位別 Cs-137 濃度の比較

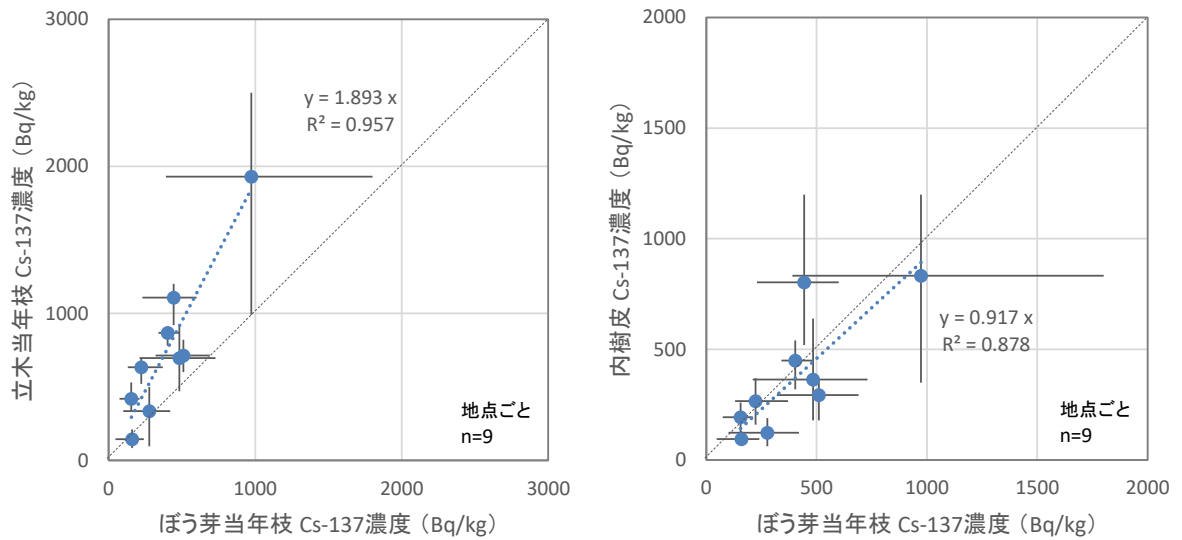


図 5-19 コナラ立木及びコナラぼう芽更新木の Cs-137 濃度比較

左図: 当年枝での比較

右図: コナラ立木の内樹皮とぼう芽更新木の当年枝の比較

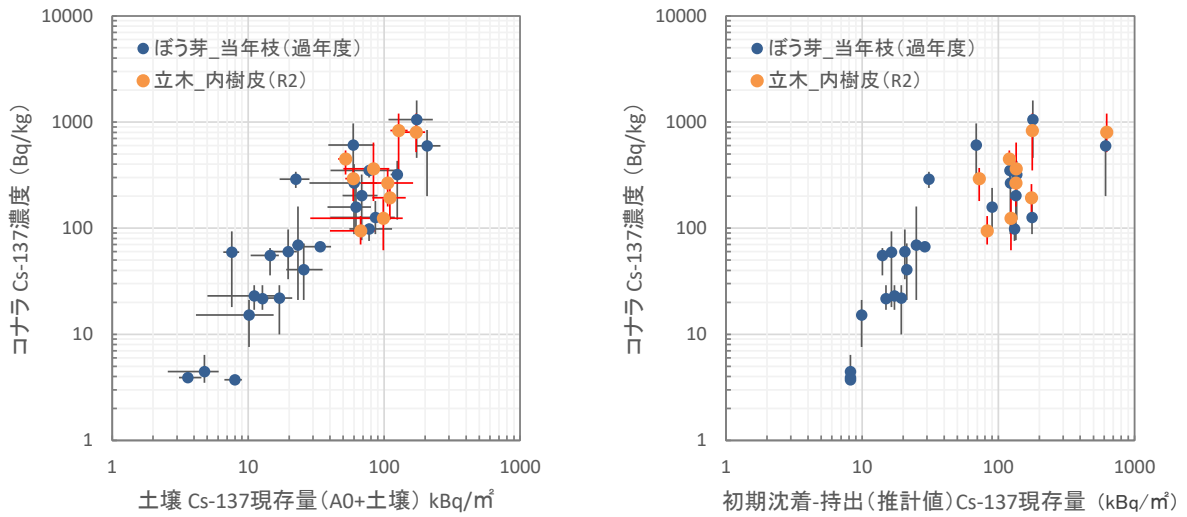


図 5-20 土壤等の放射性セシウム (Cs-137) 現存量とコナラの放射性セシウム (Cs-137) 濃度の関係
 左: 採取した土壤による結果 右: 航空機モニタリングによる初期沈着量 (p.125 脚注 19 参照) を用いた推計値による結果 (以下同様につき、省略する)

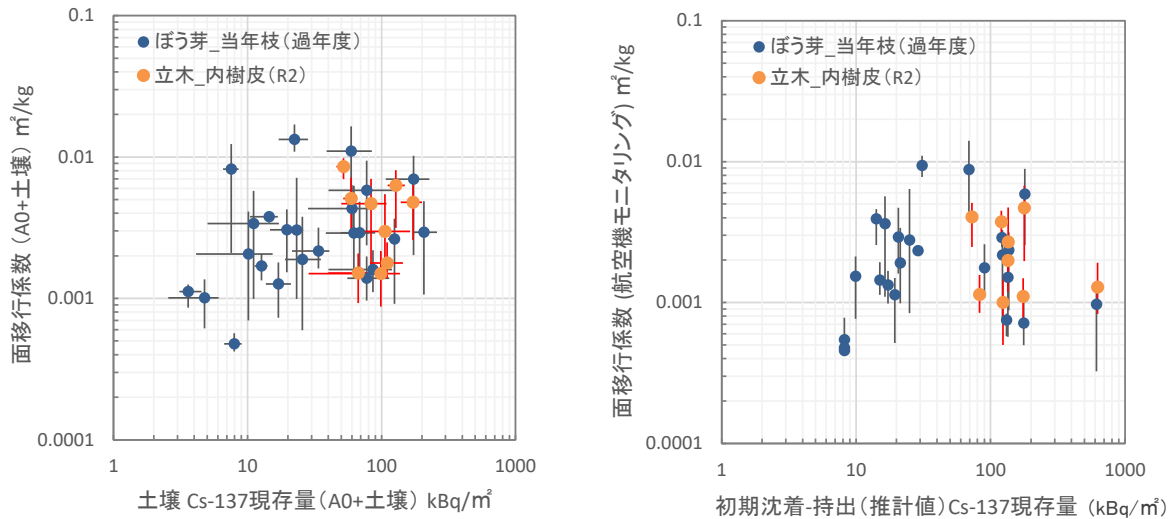


図 5-21 土壤等の放射性セシウム (Cs-137) 現存量とコナラへの面移行係数の関係

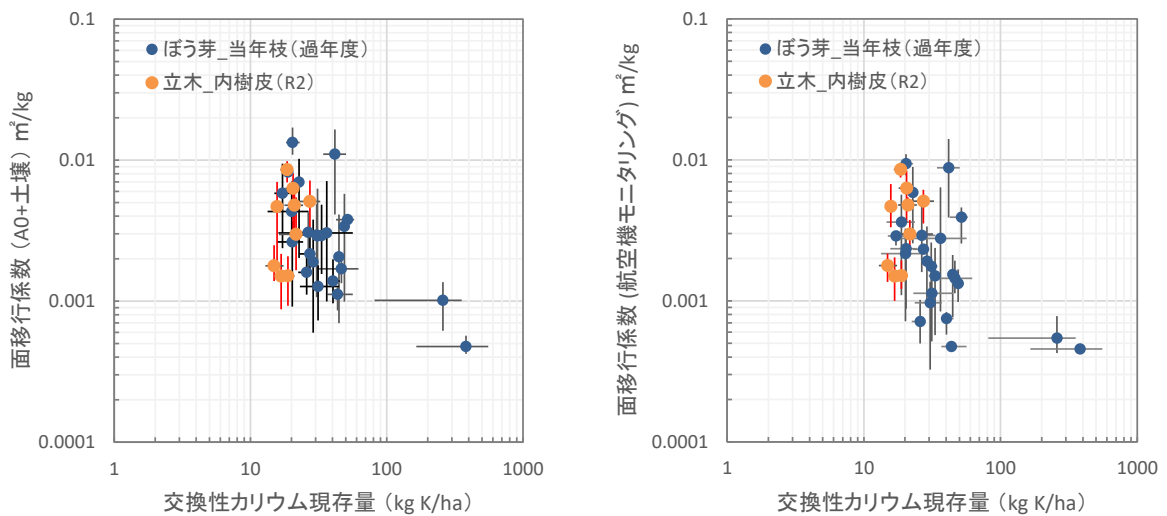


図 5-22 土壤等の交換性カリウム現存量とコナラぼう芽枝への面移行係数の関係

(4) 考察

ぼう芽枝の放射性セシウム濃度は個体によって、大きくばらつくため、ばらつきを含めて、全体傾向を正しく評価できるように同一個体を追跡調査している。広野試験地及び川内試験地における多くのコナラぼう芽更新木で、濃度が上昇している傾向が確認されていたが、平成30(2018)年以降は横ばい～低下傾向にある(図5-9)。多点調査の結果から、広域的には微減～微増が多く、大きな変化はみられていない(図5-10)。濃度の推移の把握や予測は、将来の原木利用再開を検討・判断するための重要な要素である。今後も、広域的かつ継続的に検証していくことが望ましい。

過年度事業において多点調査を実施した結果、コナラぼう芽枝の放射性セシウム濃度は、土壌中の放射性セシウム現存量と相関性を示しており、広域的には、濃度の多寡には汚染の程度が最も影響しているものとみられる。ただし、面移行係数と土壌中の放射性セシウム現存量には、関係性が示されなかったことから、コナラへの放射性セシウムの移行のし易さには関係していないとみられる。面移行係数は、土壌中の交換性カリウム現存量が多いほど小さく(図5-22)、コナラぼう芽枝へ放射性セシウムが移行しにくい傾向にあることが言える。ただし、交換性カリウム現存量が60～300 kg K/ha程度の場合の面移行係数が確認できていないなど、データ数が不足している部分もあり、評価については検討が必要である。

コナラ立木の調査結果より、同一個体内では、当年枝と内樹皮の放射性セシウム濃度に相関関係が認められた(図5-19)。それにより、コナラ立木の内樹皮をモニタリングにおける指標にすることが可能であると考えられる。また、同地点のコナラぼう芽更新木の当年枝の放射性セシウム濃度には、1:1に近い関係性を持つ可能性も示された。このことから、コナラ立木の内樹皮を調査することで、更新後のぼう芽枝の濃度について予測できる可能性がある。また、上述した土壌の放射性セシウム現存量や土壌化学性(交換性カリウム現存量等)との関係性を評価する上で、データが不足している部分があるが、残存立木を調査対象として評価できる場合、立地的に多様なデータが得られやすいと考えられ、特に放射性セシウム濃度の高い地域のデータを得ることが可能となる。

なお、今年度は試行的な実施のため、コナラ立木の調査結果の評価には地点数が十分でない。今後、放射性セシウム濃度の高い地点をはじめ、地点数を増やして評価することが必要である。

<付表>

表 5-8 広野試験地におけるコナラの放射性セシウム(Cs-137)濃度

(単位: Bq/kg)

採取日	コナラぼう芽更新木						コナラ植栽木				コナラ立木	
	当年枝		多年枝<φ1cm		多年枝≥φ1cm		当年枝		幹・枝		当年枝	
	絶乾	12%含水	絶乾	12%含水	絶乾	12%含水	絶乾	12%含水	絶乾	12%含水	絶乾	12%含水
2013/6/19	310	273	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/6	185	162	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014/6/11	255	224	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/5	272	240	-	-	-	-	-	-	170*	150*	-	-
2015/6/30	256	225	142	125	103	90	-	-	-	-	-	-
11/7	214	188	134	118	96	84	-	-	56	50	-	-
12/15	205	180	127	111	103	91	-	-	-	-	-	-
2016/6/29	238	209	182	160	112	99	-	-	-	-	-	-
12/22	374	329	206	181	147	130	-	-	233	205	-	-
2017/7/20	440	387	199	175	158	139	-	-	-	-	-	-
12/26	378	333	242	213	218	192	225	198	101	89	587	516
2018/12/26	606	533	-	-	-	-	263	232	-	-	-	-
2019/12/18	542	477	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2020/12/22	510	449	-	-	-	-	377	331	-	-	713	628

放射性セシウム(Cs-137)濃度(Bq/kg)は、採取時点の濃度を示す(物理学的減衰補正なし)。「絶乾」は、105°C、24時間乾燥させた絶乾重量当たりの濃度「12%含水」は、原木等の放射性セシウム測定の際の乾燥条件²¹である含水率12%条件での濃度を示す。

平成26(2014)年のコナラ植栽木(*)は、試料2個体のうち1個体の試料が極めて高い濃度を示したが、外れ値として除外し、ここでは1個体の濃度を示した。

表 5-9 川内試験地におけるコナラ・クヌギの放射性セシウム(Cs-137)濃度

(コナラ)

(単位: Bq/kg)

採取日	皆伐区 コナラぼう芽更新木						皆伐+落葉等除去区 コナラぼう芽更新木						コナラ立木	
	当年枝		多年枝<φ1cm		多年枝≥φ1cm		当年枝		多年枝<φ1cm		多年枝≥φ1cm		当年枝*	
	絶乾	12%含水	絶乾	12%含水	絶乾	12%含水	絶乾	12%含水	絶乾	12%含水	絶乾	12%含水	絶乾	12%含水
2013/7/3	971	854	-	-	-	-	621	546	-	-	-	-	-	-
11/5	387	341	-	-	-	-	277	243	-	-	-	-	-	-
2014/6/10	687	605	-	-	-	-	504	443	-	-	-	-	-	-
10/23	564	496	-	-	-	-	254	223	-	-	-	-	-	-
12/4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015/6/24	510	449	297	261	207	182	267	235	133	117	120	106	-	-
11/6	480	422	267	235	243	214	141	124	97	85	85	75	-	-
12/22	337	296	213	188	163	143	155	136	101	89	83	73	1160	1021
2016/6/29	500	440	283	249	145	127	313	276	169	148	105	92	-	-
12/23	537	472	250	220	243	214	170	150	112	99	74	65	-	-
2017/12/20	623	549	267	235	192	169	200	176	95	84	92	81	1367	1203
2018/12/20	597	525	-	-	-	-	209	184	-	-	-	-	-	-
2020/1/14	467	411	-	-	-	-	180	158	-	-	-	-	-	-
2020/12/23	443	390	-	-	-	-	156	137	-	-	-	-	1107	974

(クヌギ)

(単位: Bq/kg)

採取日	皆伐区 クヌギぼう芽更新木						皆伐+落葉等除去区 クヌギぼう芽更新木					
	当年枝		多年枝<φ1cm		多年枝≥φ1cm		1年枝		多年枝<φ1cm		多年枝≥φ1cm	
	絶乾	12%含水	絶乾	12%含水	絶乾	12%含水	絶乾	12%含水	絶乾	12%含水	絶乾	12%含水
2013/7/3	470	414	-	-	-	-	333	293	-	-	-	-
11/5	213	188	-	-	-	-	142	125	-	-	-	-
2014/6/10	320	282	-	-	-	-	132	116	-	-	-	-
10/23	111	98	-	-	-	-	75	66	-	-	-	-
2015/6/24	183	161	145	128	83	73	49	43	41	36	31	27
11/6	115	101	90	79	76	67	82	72	56	50	38	33
12/22	94	83	70	62	65	57	73	64	36	32	52	46
2016/6/29	186	163	114	100	75	66	149	131	49	43	31	27
12/23	205	180	97	86	89	78	92	81	50	44	37	32
2017/12/20	155	137	52	46	49	43	80	70	25	22	24	21
2018/12/20	132	116	-	-	-	-	56	50	-	-	-	-
2020/1/14	109	96	-	-	-	-	66	58	-	-	-	-
2020/12/23	134	118	-	-	-	-	65	57	-	-	-	-

放射性セシウム(Cs-137)濃度(Bq/kg)は、採取時点の濃度を示す(物理学的減衰補正なし)。「絶乾」は、105°C、24時間乾燥させた絶乾重量当たりの濃度「12%含水」は、原木等の放射性セシウム測定の際の乾燥条件²¹である含水率12%条件での濃度を示す。コナラ立木の当年枝(*)は、平成26(2014)/12のみ「φ1cm未満の枝」の濃度を示す。

²¹ 「きのこ原木及び菌床用培地中の放射性セシウム測定のための検査方法」(平成23(2011)年10月、林野庁)。原木等の放射性セシウム濃度測定の際に、乾燥機を所持していない検査実施主体のために設定された乾燥条件。

表 5-10 広野試験地におけるコナラの面移行係数

(面移行係数 単位: m²/kg)

採取日	コナラぼう芽更新木						コナラ植栽木				コナラ立木	
	当年枝		多年枝<φ1cm		多年枝≥φ1cm		当年枝		幹・枝		当年枝	
	作業後推計値	実測値	作業後推計値	実測値	作業後推計値	実測値	作業後推計値	実測値	作業後推計値	実測値	作業後推計値	実測値
2013/6/19	0.0030	0.0046	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/6	0.0018	0.0028	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014/6/11	0.0025	0.0039	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/5	0.0027	0.0042	-	-	-	-	-	-	0.0029	0.0052	-	-
2015/6/30	0.0026	0.0040	0.0014	0.0022	0.0010	0.0016	-	-	-	-	-	-
11/7	0.0022	0.0034	0.0014	0.0021	0.0010	0.0015	-	-	0.00061	0.0011	-	-
12/15	0.0021	0.0032	0.0013	0.0020	0.0010	0.0016	-	-	-	-	-	-
2016/6/29	0.0024	0.0038	0.0019	0.0029	0.0012	0.0018	-	-	-	-	-	-
12/22	0.0039	0.0060	0.0021	0.0033	0.0015	0.0024	-	-	0.0026	0.0047	-	-
2017/7/20	0.0046	0.0072	0.0021	0.0033	0.0017	0.0026	-	-	-	-	-	-
12/26	0.0040	0.0062	0.0026	0.0040	0.0023	0.0036	0.0026	0.0047	0.0011	0.0021	0.0062	0.013
2018/12/26	0.0066	0.010	-	-	-	-	0.0031	0.0056	-	-	-	-
2019/12/18	0.0060	0.009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2020/12/22	0.0058	0.0090	-	-	-	-	0.0031	0.0056	-	-	-	-

「作業後推計値」は、第3次航空機モニタリング公表値(平成23(2011)年7月2日時点)による放射性セシウム(Cs-137)沈着量から、皆伐等によって持ち出された放射性セシウム(Cs-137)現存量を減じた値(表5-2)を用いて算出した面移行係数「実測値」は、採土円筒による土壌採取を行った実測値を用いて算出。面移行係数の算出には、令和2(2020)年12月15日時点に物理学的減衰補正した放射性セシウム(Cs-137)現存量及び植物体の濃度の値を用いた。

表 5-11 川内試験地におけるコナラ・クヌギの面移行係数

(コナラ)

(面移行係数 単位: m²/kg)

採取日	皆伐区 コナラぼう芽更新木						皆伐+落葉等除去区 コナラぼう芽更新木						コナラ立木	
	当年枝		多年枝<φ1cm		多年枝≥φ1cm		当年枝		多年枝<φ1cm		多年枝≥φ1cm		当年枝*	
	作業後推計値	実測値	作業後推計値	実測値	作業後推計値	実測値	作業後推計値	実測値	作業後推計値	実測値	作業後推計値	実測値	作業後推計値	実測値
2013/7/3	0.0019	0.0040	-	-	-	-	0.0014	0.0028	-	-	-	-	-	-
11/5	0.0008	0.0016	-	-	-	-	0.00062	0.0013	-	-	-	-	-	-
2014/6/10	0.0014	0.0029	-	-	-	-	0.0011	0.0023	-	-	-	-	-	-
10/23	0.0011	0.0024	-	-	-	-	0.00058	0.0012	-	-	-	-	-	-
12/4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0063	0.011
2015/6/24	0.0010	0.0022	0.00061	0.0013	0.00042	0.00089	0.00062	0.0013	0.00031	0.00063	0.00028	0.00057	-	-
11/6	0.0010	0.0021	0.00055	0.0012	0.00050	0.00105	0.00033	0.00067	0.00023	0.00046	0.00020	0.00041	-	-
12/22	0.00070	0.0015	0.00044	0.00093	0.00034	0.00071	0.00036	0.00074	0.00024	0.00048	0.00019	0.00040	0.0020	0.0034
2016/6/29	0.0011	0.0022	0.00060	0.0012	0.00030	0.00064	0.00075	0.0015	0.00040	0.00082	0.00025	0.00050	-	-
12/23	0.0011	0.0024	0.00053	0.0011	0.00052	0.00108	0.00041	0.00083	0.00027	0.00055	0.00018	0.00036	-	-
2017/12/20	0.0014	0.0028	0.00058	0.0012	0.00042	0.00087	0.00049	0.0010	0.00023	0.00048	0.00023	0.00046	0.0027	0.0045
2018/12/20	0.0013	0.0028	-	-	-	-	0.00053	0.0011	-	-	-	-	-	-
2020/1/14	0.0011	0.0022	-	-	-	-	0.00047	0.00095	-	-	-	-	-	-
2020/12/23	0.0010	0.0022	-	-	-	-	0.00041	0.00084	-	-	-	-	-	-

(クヌギ)

(面移行係数 単位: m²/kg)

採取日	皆伐区 クヌギぼう芽更新木						皆伐+落葉等除去区 クヌギぼう芽更新木					
	当年枝		多年枝<φ1cm		多年枝≥φ1cm		当年枝		多年枝<φ1cm		多年枝≥φ1cm	
	作業後推計値	実測値	作業後推計値	実測値	作業後推計値	実測値	作業後推計値	実測値	作業後推計値	実測値	作業後推計値	実測値
2013/7/3	0.00092	0.0019	-	-	-	-	0.00074	0.00151	-	-	-	-
11/5	0.00042	0.00088	-	-	-	-	0.00032	0.00065	-	-	-	-
2014/6/10	0.00064	0.0013	-	-	-	-	0.00030	0.00061	-	-	-	-
10/23	0.00023	0.00047	-	-	-	-	0.00017	0.00035	-	-	-	-
2015/6/24	0.00038	0.00079	0.00030	0.00062	0.00017	0.00036	0.00011	0.00023	0.000094	0.00019	0.000073	0.00015
11/6	0.00024	0.00050	0.00019	0.00039	0.00016	0.00033	0.00019	0.00039	0.00013	0.00027	0.000089	0.00018
12/22	0.00020	0.00041	0.00015	0.00030	0.00014	0.00028	0.00017	0.00035	0.000084	0.00017	0.00012	0.00025
2016/6/29	0.00039	0.00082	0.00024	0.00050	0.00016	0.00033	0.00035	0.00072	0.00012	0.00024	0.000074	0.00015
12/23	0.00044	0.00091	0.00021	0.00043	0.00019	0.00040	0.00022	0.00045	0.00012	0.00024	0.000089	0.00018
2017/12/20	0.00034	0.00071	0.00011	0.00024	0.00011	0.00022	0.00020	0.00040	0.000062	0.00013	0.000061	0.00012
2018/12/20	0.00029	0.00061	-	-	-	-	0.00014	0.00029	-	-	-	-
2020/1/14	0.00025	0.00052	-	-	-	-	0.00017	0.00035	-	-	-	-
2020/12/23	0.00031	0.00065	-	-	-	-	0.00017	0.00035	-	-	-	-

「作業後推計値」、「実測値」については表5-10の注釈のとおり。面移行係数の算出には、令和2(2020)年12月15日時点に物理学的減衰補正した放射性セシウム(Cs-137)現存量及び植物体の濃度の値を用いた。立木は林縁部から採取しており、対照区とした。

5.2. カリウムによる放射性物質吸収抑制効果の検証

(1) 目的

きのご原木の生産再開に向けては、放射性物質の吸収抑制手法の開発が求められている。このため、水稻等農業分野で効果が確認されているカリウム施肥による放射性物質の吸収抑制効果について、コナラぼう芽更新木等に対する効果を検証した。

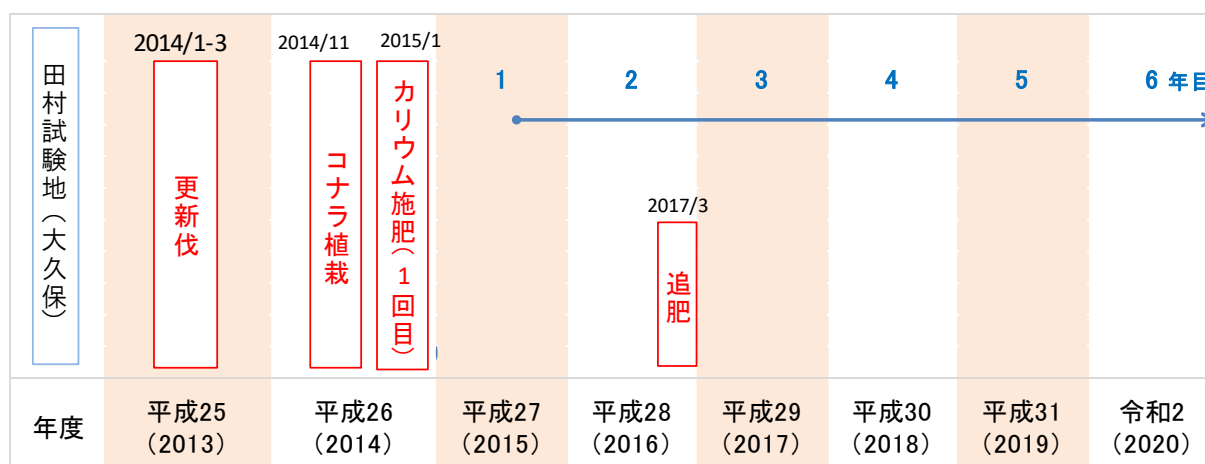


図 5-23 これまでの検証の流れ（カリウム散布によるきのご原木の放射性物質吸収抑制効果）

(2) 試験地と試験方法

1) 試験地の概要

カリウム施肥試験を、田村大久保試験地で実施した。作業区の配置状況を図 5-24 に示す。カリウム施肥区と無施肥（対照区）の 2 区画を 1 セットとして、a, b, c の 3 セット、計 6 区画を設定した（写真 5-5、表 5-12）。いずれの区画も平均斜度 10° ~ 14° の緩斜面で、a 及び b が南西、c が南東に面した斜面に位置する。平成 26(2014)年 11 月に測定した空間線量率は、 $0.31\mu\text{Sv/h}$ ~ $0.35\mu\text{Sv/h}$ であった。

林況は 27 年生の落葉広葉樹林で、平成 26(2014)年 1 月～3 月にコナラ、クリ、サクラ、クヌギを上層木として 30%程度残して更新伐を実施し、同年春にサクラ苗木を植栽した複層林である。ここに、苗木の放射性物質吸収量を把握するために、平成 26(2014)年 11 月 18 日に九州産の 2 年生コナラ苗木を各作業区に 60 本以上植栽した。苗木は、植栽当时には、樹高 50cm ~ 60cm で、平成 29(2017)年 12 月（約 3 年経過）時点では 150 ~ 200cm 超であった（写真 5-7）。



写真 5-5 作業区の状態（過年度）

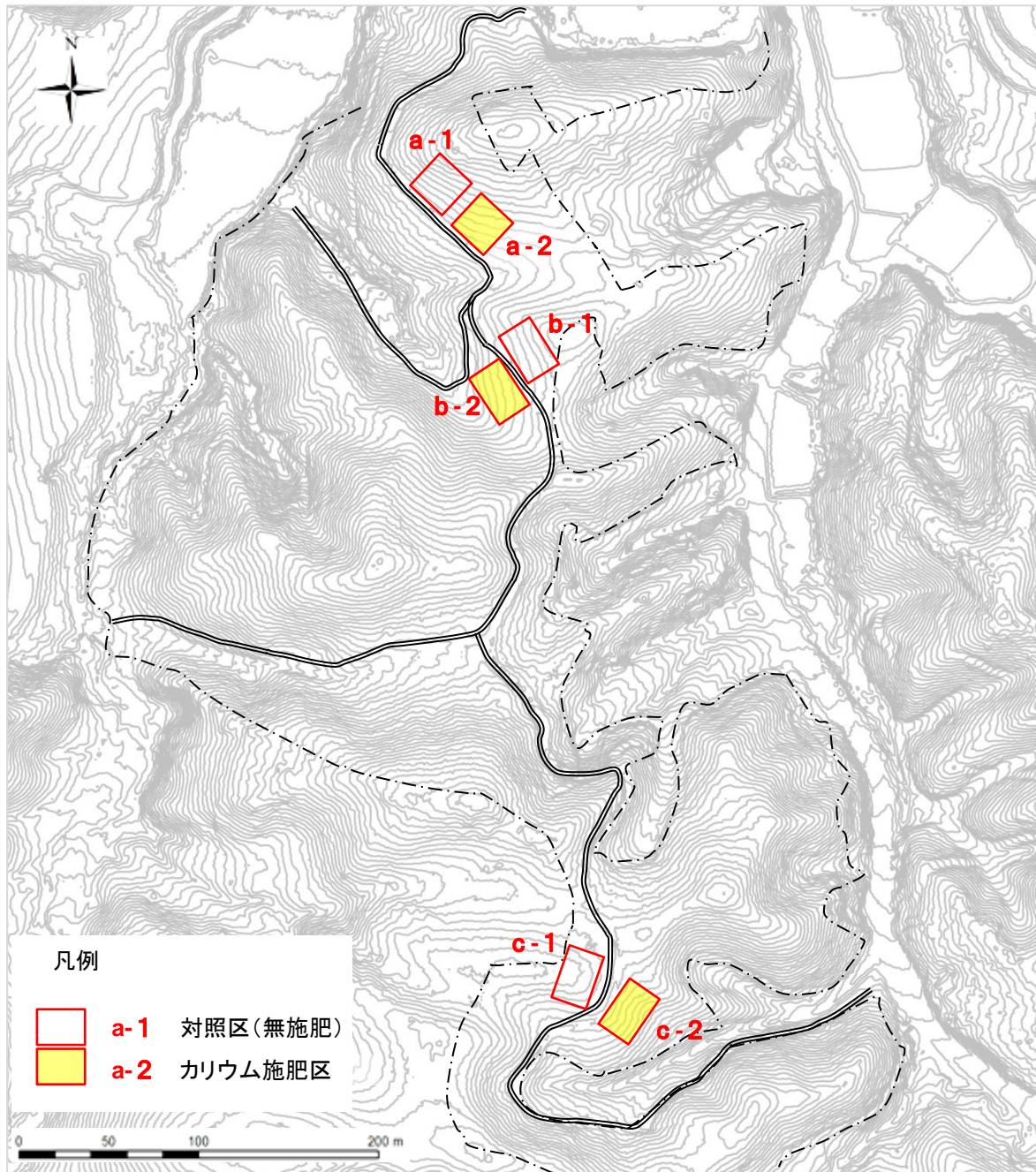


図 5-24 カリウム施肥試験の作業区配置図

表 5-12 作業区の概要

作業区	K 施肥	平均斜度・ 斜面方位	面積	空間線量率(μSv/h)		Cs-137 平均沈着量**
				2014/11 *	2018/12	
a-1	-	14° 南西	各 625m ² (25m×25m)	0.31	0.19	110kBq/m ²
a-2	施肥				0.17	
b-1	-	10° 南西	各 650 m ² (32.5m× 20m)	0.31	0.18	
b-2	施肥				0.18	
c-1	-	10° 南東	各 600 m ² (30m×20m)	0.35	0.20	
c-2	施肥				0.23	

* 植栽時(平成 26(2014)年 11 月測定)の作業区内 5 地点の地上 1mの空間線量率平均値

** 第 3 次航空機モニタリング公表値(平成 23(2011)年 7 月)



写真 5-6 ぼう芽更新木ほか生育状況 (令和元(2019)年 7 月、12 月)



写真 5-7 コナラ植栽木の様子

2) カリウム施肥の概要

本試験地で実施したカリウム施肥の概要を表 5-13 に示す。肥料の種類によってカリウムの吸収作用は異なる。カリウムが土壤中で根から吸収されるイメージを図 5-25 に示す。

表 5-13 カリウム施肥の概要

項目	1 回目	2 回目
施肥実施時期	コナラ苗木植栽後 (平成 27(2015)年 1 月)	1 回目の施肥から 2 年後 (平成 29(2017)年 2 月)
使用肥料	ケイ酸カリウム＝緩効性 商品:「けい酸加里プレミア 34」 (開発肥料株式会社 製造、JA 全農 供給) カリウム(K ₂ O)保証成分:20%	塩化カリウム＝水溶性・速効性 商品:「粒状 くみあい 塩化加里」 (JA 全農 輸入・供給) カリウム(K ₂ O)保証成分:60%
土壌中の交換性カリウム濃度の目標値	酸化カリウム(K ₂ O)20g/m ² (水稻の慣行カリ施肥の 2 倍量 ²²) → 200kg K ₂ O/ha、166kg K/ha	同左 ※1 回目の施肥分は考慮せず追肥
施肥量	100g/m ² (ha 換算:1t/ha) (目標値÷カリウム保証成分割合)	33g/m ² (ha 換算:330kg/ha)
備考	作物用に開発されており、根酸(根から分泌される有機酸)や土壌中の酸によりカリウムが溶出し、植物体に利用可能な交換態となるため、水溶性の塩化カリウム等と比較して時間がかかる。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 過剰施与だと濃度障害(塩害)を引き起こす。 ・ 1 回目同様、均一散布とした。

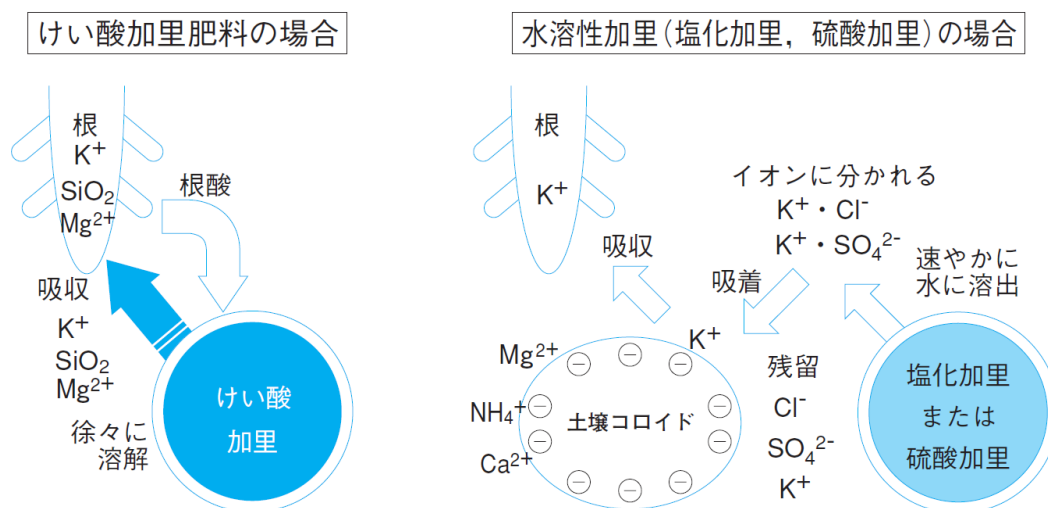


図 5-25 肥料によるカリウムが作物に吸収されるイメージ²³ (参考)

²² 「水稻の放射線セシウム対策としてのカリ施用」(福島県農林水産部 2012)を参考に、慣行カリ施肥量(スギ、ヒノキに対して最大 10g/m²程度: 出典 「林業家必携最新改訂版」林野弘済会 1990)の 2 倍とした。

²³ 全国農業協同組合連合会ホームページ: https://www.zennoh.or.jp/activity/hiryo_sehi/pdf/qa_keisankari.pdf

3) 試料の採取と放射性セシウム濃度及びカリウム濃度等の測定

① 植物体試料の採取

コナラ植栽木等植物体の採取試料数を表 5-14 に示す。

植物体の試料は、平成 27 (2015) 年度以降は、植物体内の物質転流が止まり各器官の物質濃度が安定する休眠期の採取を基本として落葉後 2 週間以上後 (12 月後半) に採取した。

先述 (5.1. (2) 2) ①イ) のとおり、当年枝は新しい器官として生理活性が高くカリウム及び放射性セシウムの濃度が多年枝に比べて高いことに加え、同一個体内では他の器官の濃度と一定の関係性を有するため、平成 30(2018)年度以降、採取は当年枝のみとした。当年枝は、図 5-5 (p.124) に示す方法に準じて区分した。

② 土壌等試料の採取

土壌等の採取試料数を表 5-15 に示す。

今年度は 12 月の 1 回のみ採取を行った。採取方法・試料数は前年度に同じとした。

土壌の放射性セシウム (Cs-137) 濃度等はばらつきが大きいことから、誤差を小さくするため、平成 28 (2016) 年度より作業区当たり 5 地点から採取している。堆積有機物は 20cm × 20cm 方形枠を設置して採取した。土壌層の試料は、直径 50mm、容積 100mL の採土円筒を用いて土壌深度 0-5cm 及び 5-10cm から採取した。

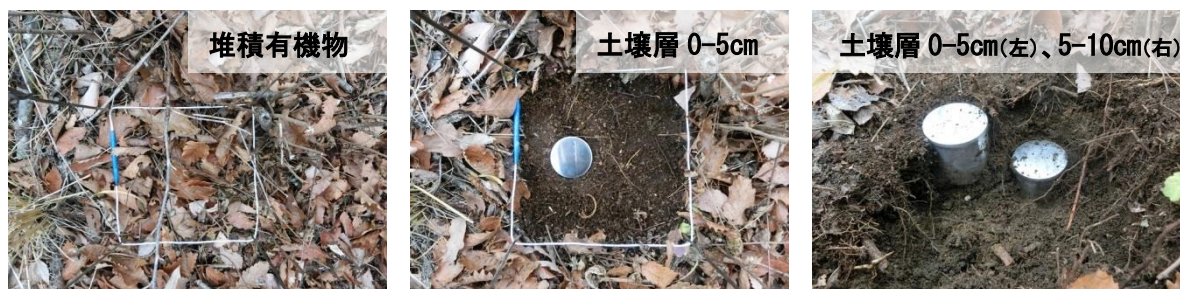


写真 5-8 土壌等試料採取の概況

表 5-14 田村大久保試験地における採取試料木の個体数

採取年度	採取日	区画ごと(施肥3区画、無施肥3区画)								
		植栽木				ぼう芽更新木				
		葉	当年枝	幹・枝	根	幹・枝	当年枝	多年枝		根*1
							φ1cm未満	φ1cm以上		
平成 26(2014)	2014/11	15 (1)	-	15 ⁺ (1)	15 ⁺ (1)	20 (1)	-	-	-	5 (1)
		(施肥前ポット n=1)				(施肥区 n=3、無施肥区 n=3)				
平成 27(2015)	2015/12/14-16	-	-	5 (1)	5 (1)	-	5 (1)	5 (1)	5 (1)	-
		(施肥区 n=3、無施肥区 n=3)								
平成 28(2016)	2016/12/21-22	-	-	5 (1)	5 (1)	-	5 (1)	5 (1)	5 (1)	-
		(施肥区 n=3、無施肥区 n=3)								
平成 29(2017)	2017/12/18	-	3 (1) ×2	3 (1) ×2	3 (1) ×2	-	3 (1) ×2	3 (1) ×2	3 (1) ×2	-
		(施肥区 n=6、無施肥区 n=6)								
平成 30(2018)	2018/12/17-20	-	3 (1) ×2	-	-	-	3 (1) ×2	-	-	-
		(施肥区 n=6、無施肥区 n=6)								
令和元(2019)	2019/12/18-24	前年度に同じ								
令和 2(2020)	2020/12/27	前年度に同じ								

試料数の数値下段()は、濃度分析時の混合検体数を示す。

*1 ぼう芽更新木の根試料は、水平方向に伸びた太根(>10mm)を長さ5cm~10cm程度を採取し、土砂を洗い流した。

+ 平成 26(2014)年度の植栽木試料は、放射性物質測定用として、植栽せずに置いたポット苗から採取。

表 5-15 田村大久保試験地における土壌等採取試料数

採取年度	採取日	区画ごと(施肥3区画、無施肥3区画)			土壌 (ポット)
		土壌等(地点/区画)			
		堆積有機物 (20 cm × 20 cm)	土壌層 0-5 cm (100mL 採土円筒)	土壌層 5-10 cm (100mL 採土円筒)	
平成 26(2014)	2014/11/16-22	2 (1)	2 (1)	2 (1)	15 (1)
平成 27(2015)	2015/12/14-15	3 (1)	3 (1)	3 (1)	-
平成 28(2016)	2016/12/21-23	5 (1)	5 (1)	5 (1)	-
平成 29(2017)	2017/7/19-21 2017/12/13-14	前年度に同じ			
平成 30(2018)	2018/7/18-19 2018/12/18	前年度に同じ			
令和元(2019)	2019/7/9 2019/12/24	前年度に同じ			
令和 2(2020)	2020/12/15	前年度に同じ			

試料数の数値下段()は、濃度分析時の混合検体数を示す。繰返し数は全年度共通で、施肥区 n=3、無施肥区 n=3。

③ 放射性セシウム濃度及びカリウム濃度の測定

ア. 全量カリウム及び放射性セシウム濃度測定（植物体）

【植物体試料：当年枝採取→3株混合→計量・乾燥・粉砕→濃度分析】

コナラ植栽木等の試料は、現地で当年枝を採取し、3株分を混合して測定試料とした。
測定試料は、7章に記載した方法で計量・乾燥・粉砕を行い、濃度分析用の検体とした。

カリウム濃度は、植物体では全量カリウムの濃度を原子吸光測光法²⁴で測定した。
放射性セシウム濃度は、7章に記載した方法にしたがって測定した。

イ. 交換性カリウム及び放射性セシウム濃度測定（堆積有機物及び土壌）

【土壌等試料：採取→計量・乾燥→作業区ごとに混合・粉砕→濃度分析】

土壌等の試料は、採取した試料ごとに計量を行った後に、作業区ごとに混合して、濃度分析用の検体とした。

カリウム濃度は、植物が利用可能な交換性カリウムの濃度を蛍光光度計²⁵を用いて測定した。
放射性セシウム濃度は、7章に記載した方法にしたがって測定した。

²⁴ 肥料分析法 4.3.3：1992

²⁵ 土壌環境分析法「第V章 土壌化学 7.交換性陽イオン・陰イオン A. 交換性陽イオン 簡易法・バッチ法-a」 P216

(3) 試験結果

1) 土壌中の交換性カリウムと放射性セシウムの濃度及び現存量

土壌中の交換性カリウム (K⁺) 濃度と現存量を図 5-26 に示す。

追肥後 1 年目 (平成 29(2017)年) の 12 月までは、施肥区における土壌層の交換性カリウム濃度及び現存量は、上昇が確認され、現存量が目標値とする 166 kg K/ha を超えた箇所もみられた。その翌年の平成 30 (2018) 年 7 月には、交換性カリウム現存量は、平成 29(2017)年 12 月の 141 kg/ha から 93 kg/ha に約 3 割程度減少し、前年度に引き続き今年度は更に濃度、現存量が減少し、令和 2 (2020) 年 12 月の時点で 60 kg/ha であった。ただし、無施肥区との比較では、交換性カリウムが多い状態にあった。

土壌中の放射性セシウム (Cs-137) の濃度と現存量を図 5-27 に示す。

放射性セシウム (Cs-137) 現存量は、平成 26(2014)年 11 月から平成 28(2016)年 12 月にかけて、無施肥区、施肥区ともに堆積有機物で減少、土壌層 0-5cm では、増加する傾向を示したが、平成 29(2017)年以降は顕著な傾向は確認されない。なお、今年度は施肥区において、0-5cm 層の放射性セシウム濃度及び現存量がやや高かった。

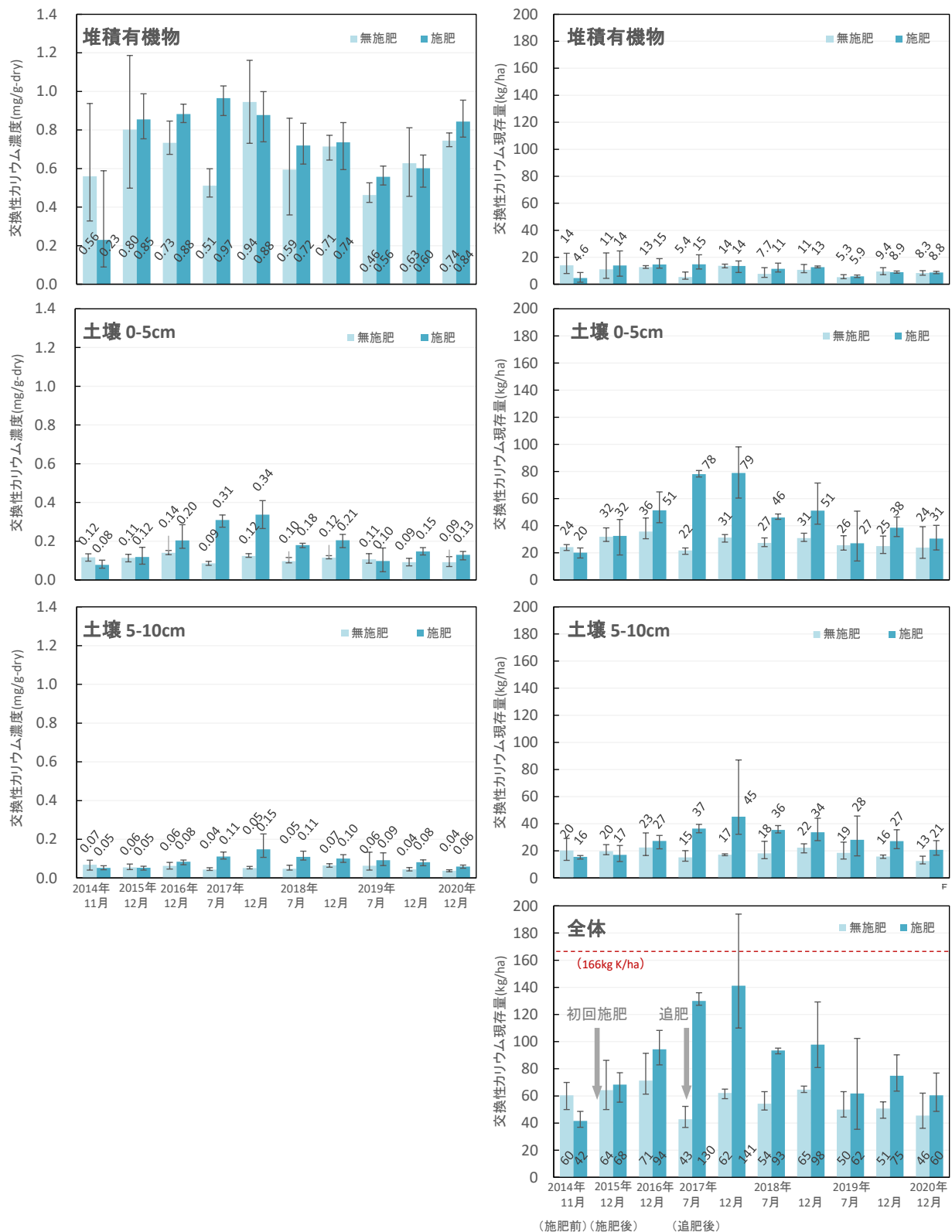


図 5-26 土壌中の交換性カリウム (K⁺) の濃度と現存量

土壌中の交換性カリウム現存量の目標値を 166kg K/ha として、1 回目は平成 27(2015)年 1 月にケイ酸カリウム (K₂O: 20%) を 1t/ha、2 回目は平成 29(2017)年 2 月に塩化カリウム (K₂O: 60%) を 330kg/ha 施与した。試料数は、各年、施肥・無施肥でそれぞれ n=3。値は幾何平均値、エラーバーは最大値と最小値を示す。

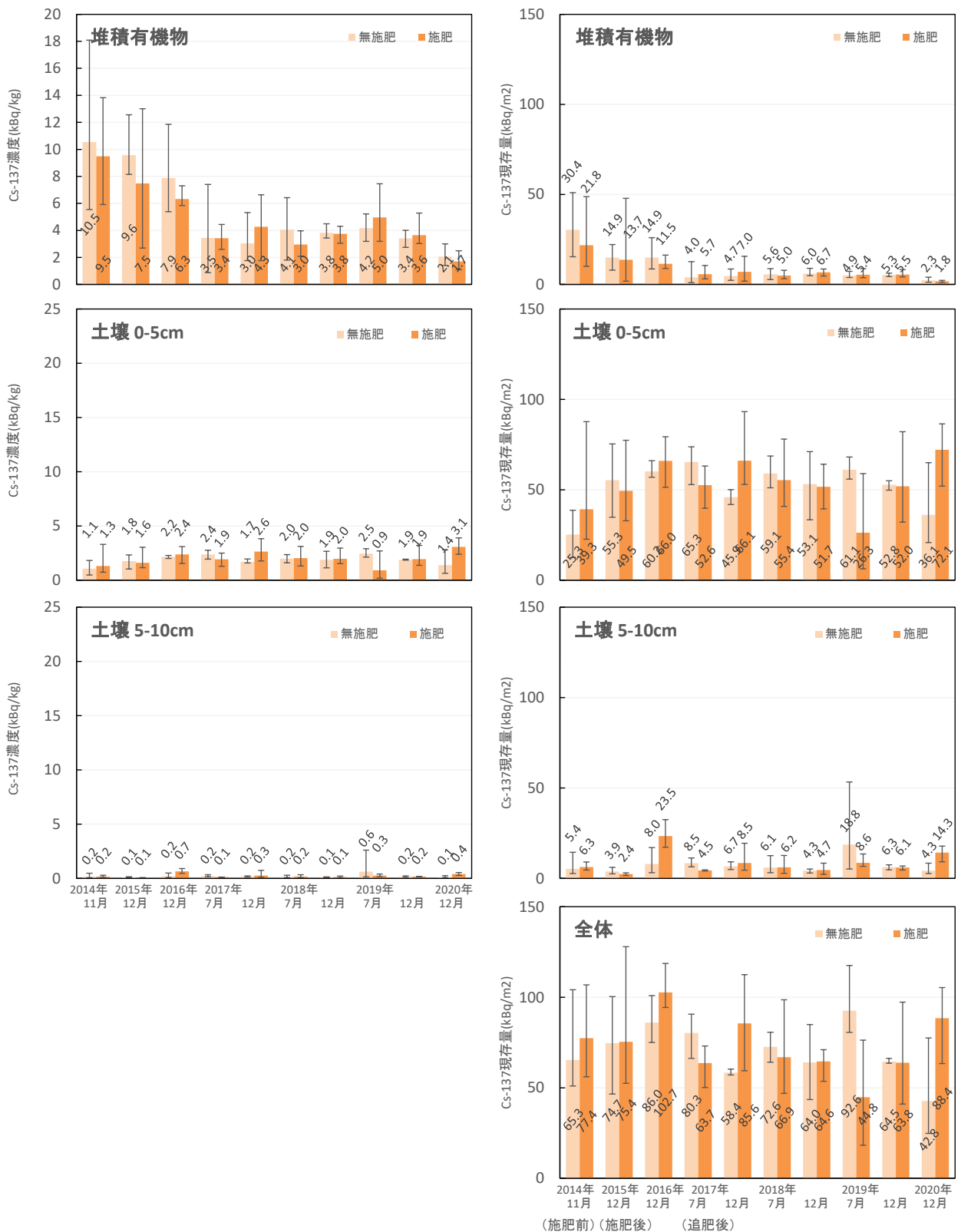


図 5-27 土壌中の放射性セシウム (Cs-137) の濃度と現存量

放射性セシウム (Cs-137) 濃度は、令和 2(2020)年 12 月 15 日時点に物理学的減衰補正した値を示す。試料数は各年、施肥・無施肥でそれぞれ n=3。値は幾何平均値、エラーバーは最大値と最小値を示す。

2) 植物体の放射性セシウム濃度とカリウム濃度

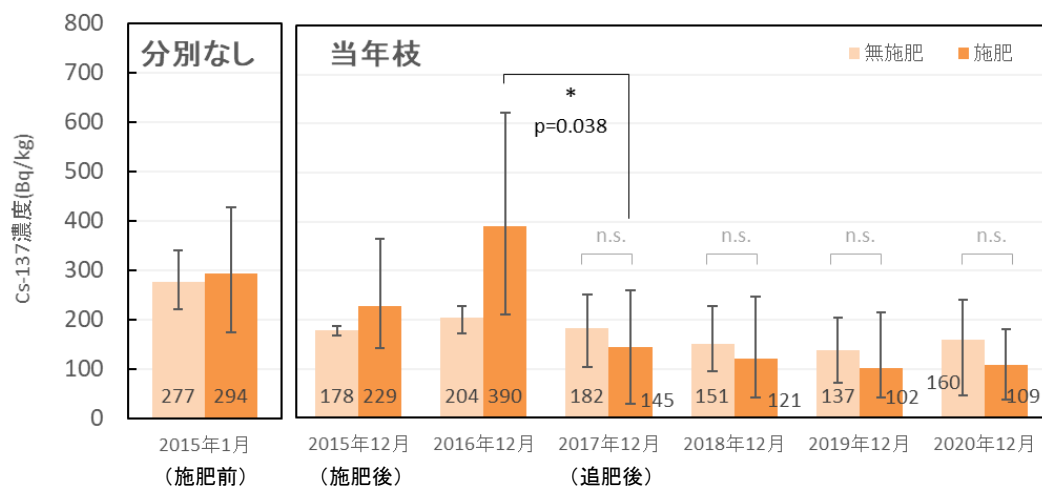
平成 29(2017)年の 12 月までは、施肥区における土壌層の交換性カリウム濃度及び現存量は上昇し(図 5-26)、それに伴い、施肥区のコナラの放射性セシウム(Cs-137)濃度の低下が確認された。

施肥区のぼう芽更新木の放射性セシウム(Cs-137)濃度は、平成 29(2017)年 12 月に 145 Bq/kg で、平成 28(2016)年 12 月と比較して有意に低下した(5%有意水準、図 5-28)。この低下は、これまでの解析から、施肥による効果と解釈できる。平成 29(2017)年 12 月以降は、大きな変化がなく、今年度においても施肥による効果が継続しているとみられる。

植栽木については、平成 28(2016)年 12 月から平成 29(2017)年 12 月にかけて、放射性セシウム(Cs-137)濃度が低下した。また、無施肥区と比較しても、施肥区の植栽木が有意に低い濃度を示した(5%有意水準、図 5-29)。今年度においても、同様に施肥区の植栽木の放射性セシウム(Cs-137)濃度が低く、施肥による効果が継続しているとみられる。

植物体中のカリウム濃度は、グラフからは、追肥後の濃度変化について明らかな傾向や関連性は示されなかった(図 5-28、図 5-29)。放射性セシウム濃度とは異なり、施肥区と無施肥区とで、ほぼ同程度の濃度を示している。

<放射性セシウム (C-137) 濃度>



<カリウム濃度>

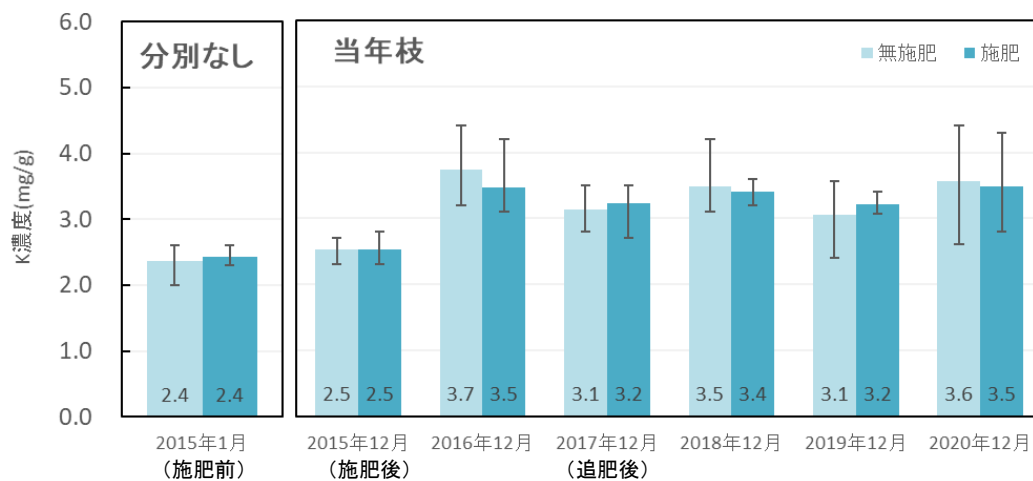
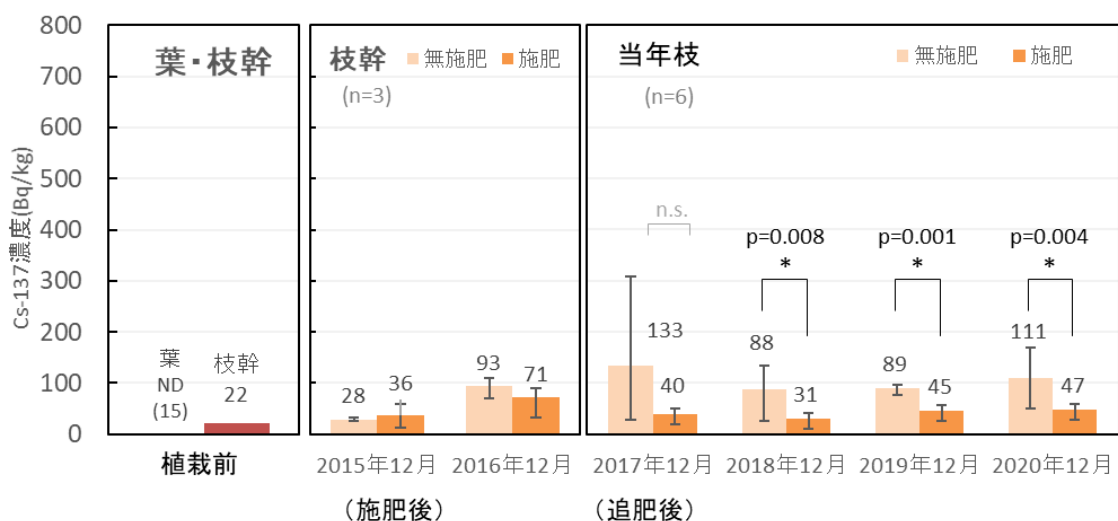


図 5-28 コナラぼう芽更新木の放射性セシウム (Cs-137) 濃度とカリウム (K) 濃度

放射性セシウム (Cs-137) 濃度は、令和 2(2020)年 12 月 15 日時点に物理学的減衰補正した値を示す。試料数は平成 29(2017)年 12 月分以降は施肥・無施肥それぞれ n=6、それ以前は n=3。エラーバーは最大値と最小値を示す。図中「*」は有意差を示す(5%有意水準、スチューデント t 検定)。「n.s.」は検定を行い有意差がなかったことを示す。

<放射性セシウム (C-137) 濃度>



<カリウム濃度>

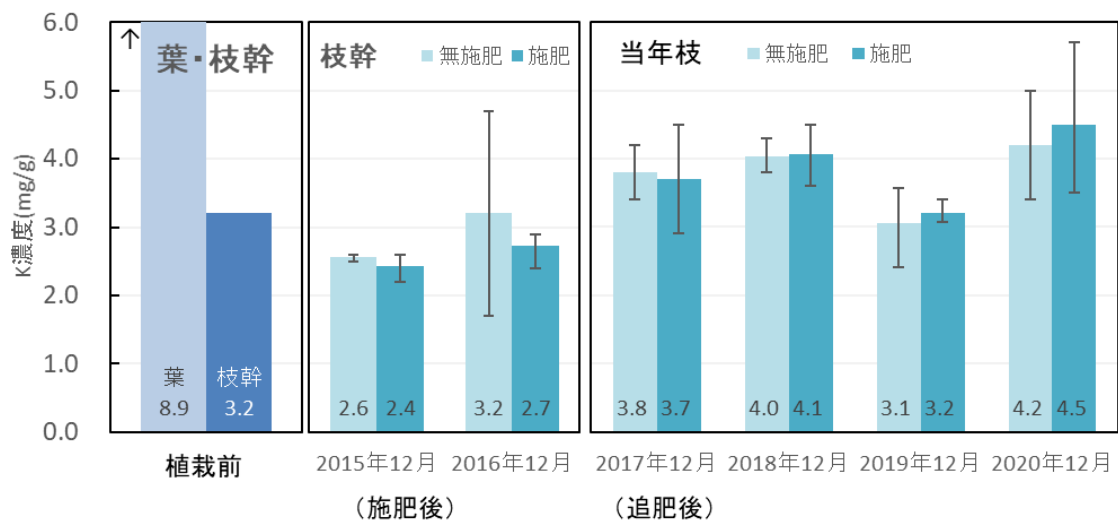


図 5-29 コナラ植栽木の放射性セシウム (Cs-137) 濃度とカリウム (K) 濃度

放射性セシウム (Cs-137) 濃度は、令和 2(2020)年 12 月 15 日時点で物理学的減衰補正した値を示す。N.D.は検出限界未満を、()内の値は検出下限値を示す。試料数は植栽前(平成 26(2014)年 11 月)が n=1、植栽後は平成 29(2017)年 12 月分以降は施肥・無施肥それぞれ n=6 で、それ以前は n=3。エラーバーは最大値と最小値を示す。図中「*」は有意差を示す(5%有意水準、スチューデント t 検定)。「n.s.」は検定を行い有意差がなかったことを示す。

3) 土壌中の交換性カリウムと面移行係数の関係

これまでの試験の結果、土壌中の交換性カリウム濃度・現存量の上昇と、ぼう芽枝等の放射性セシウム濃度の低下がみられた。

コナラへの放射性セシウムの移行状況の指標として、面移行係数の変化を図 5-30 に示す。ぼう芽枝は、追肥後に施肥区の面移行係数が大きく下がった。施肥によりコナラへの放射性セシウムの移行が抑制されたと言える。植栽木は採取部位の分別方法の違いのため、当年枝の面移行係数を追肥前後で確認できないが、追肥後は施肥区の面移行係数が小さかった。追肥後となる平成 29(2017)年 12 月が面移行係数の差が大きく、それ以降、ぼう芽枝及び植栽木ともに、施肥区と無施肥区の面移行係数の差が小さくなる推移を示した。今年度は再度その差が大きくなったが、今年度はばらつきが大きく、傾向は不明瞭である。

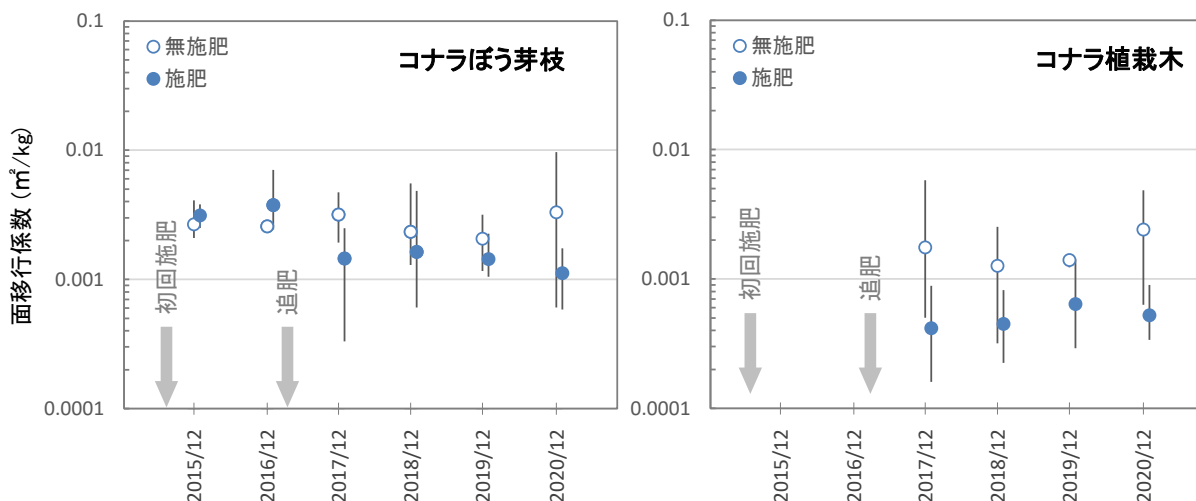


図 5-30 田村試験地におけるコナラ（当年枝）の面移行係数の推移

エラーバーは最大値と最小値を示す。施肥と無施肥の調査日は同じである(グラフ表示上、ずらして表示した)。

(4) 考察

当該試験地においては、水溶性（速効性）の塩化カリウムを用いて平成 29(2017)年 3 月に追肥を行った結果、4 ヶ月後となる平成 29(2017)年 7 月時点で土壌中の交換性カリウム濃度及び現存量は大きく上昇し、平成 29(2017)年 12 月には、区画によっては、目標値（表 5-13）である 166kg K/ha（20g K₂O/m²）を超えるまで上昇した（図 5-26）。それにより、コナラぼう芽更新木及びコナラ植栽木ともに、放射性セシウム濃度が低下した。カリウム施肥による放射性セシウムの吸収抑制効果は、追肥から約 4 年経過時点となる令和 2(2020)年 12 月時点で、コナラぼう芽更新木及びコナラ植栽木ともに継続していたとみられる。

しかしながら、土壌中の交換性カリウム現存量は、低下し続けており、令和 2(2020)年 12 月時点では、無施肥区の現存量との差が小さくなってきている。それによるコナラへの影響がどのように表れるか、今後も継続して調査を実施した上で施肥効果の評価を行う必要がある。

なお、本試験結果は、前年度事業において、多点調査の結果とも比較した上で施肥による効果が得られたことを確認しているが、あくまで 1 地域のみでの実施結果であり、施肥による影響の表れ方には、土壌特性や土地利用履歴等による影響が大きく一定ではない可能性があることに留意する必要がある。