

4. 森林内の放射性物質の移動（下方浸透）の検証

4.1. 目的

過年度に林野庁が実施した「森林施業等による放射性物質拡散防止等検証事業」等において、樹木の伐採等を伴う森林施業が空間線量率に与える影響の検証等を行い、現在、森林内の空間線量率が物理的減衰よりも早く低減していることが明らかとなっている。この主な要因として、森林内の放射性物質の大部分が樹木から林床に移行し、林床の堆積有機物の放射性物質は徐々に土壌側に移行、土壌内でも表層からより深層への移動が進んでいることが考えられる。森林施業を実施することにより、樹木の養分吸収が多いとされる0・5cmの土壌層より下方へ放射性セシウムが移動することにより、林内の空間線量率の低減、あるいは森林内での放射性セシウムの内部循環を減少させることが期待される。

本項目では、主として3つの調査（a:土壌浸透水に含まれる放射性物質濃度の把握（浸透水調査）、b:細根等による放射性物質移動の把握（細根調査）、c:土壌等の放射性物質濃度の測定（深度別土壌調査）、d:空間線量率の変動の把握）を実施することにより、土壌中の深さごとの放射性物質濃度の変化等のモニタリングや、放射性物質の下方移動状況を定量的に把握するとともに空間線量率の変動状況についても把握することを目的とした。これにより、森林土壌中の放射性セシウムの動態を把握するとともに、森林施業が放射性セシウムの下方移動を促進する可能性があることを科学的に示すための基礎資料とする。

今年度（令和4年度）は令和3年度に引き続き、森林施業実施前のデータを取得するとともに、年度後半に森林施業を実施した。なお、森林施業後のモニタリング用機器の設置は令和5年度事業において実施予定である。

4.2. 事業地の概要

本調査は以下の3箇所の国有林の林小班を事業地として実施した（表 4-1、図 4-1～図 4-4）。

表 4-1 事業地一覧

事業地名	市町村 国有林名 林小班	試験区 種別	樹種	林齢	面積※1 (ha)	空間線量率※3 ($\mu\text{Sv/h}$)	初期沈着量※4 (kBq/m^2)
冬住 事業地	南相馬市 和田城 2011ち3	間伐区 及び 対照区	スギ	37	7.50	0.96	720
高倉 事業地	南相馬市 国見 2031い	間伐区 及び 対照区	スギ	54	7.94	0.9	990
飯樋 事業地	飯舘村 花塚山 2336の	間伐区	スギ	55	1.24	0.9～1.1	900
	飯舘村 花塚山 2336ら	対照区	スギ	64	1.00※2		

※1 面積は森林簿上の値

※2 小班面積 10.19ha のうちスギが占める面積

※3 文部科学省 放射線量等分布マップ（令和2年10月29日時点）

※4 文部科学省 放射線量等分布マップ（平成23年7月22日時点）

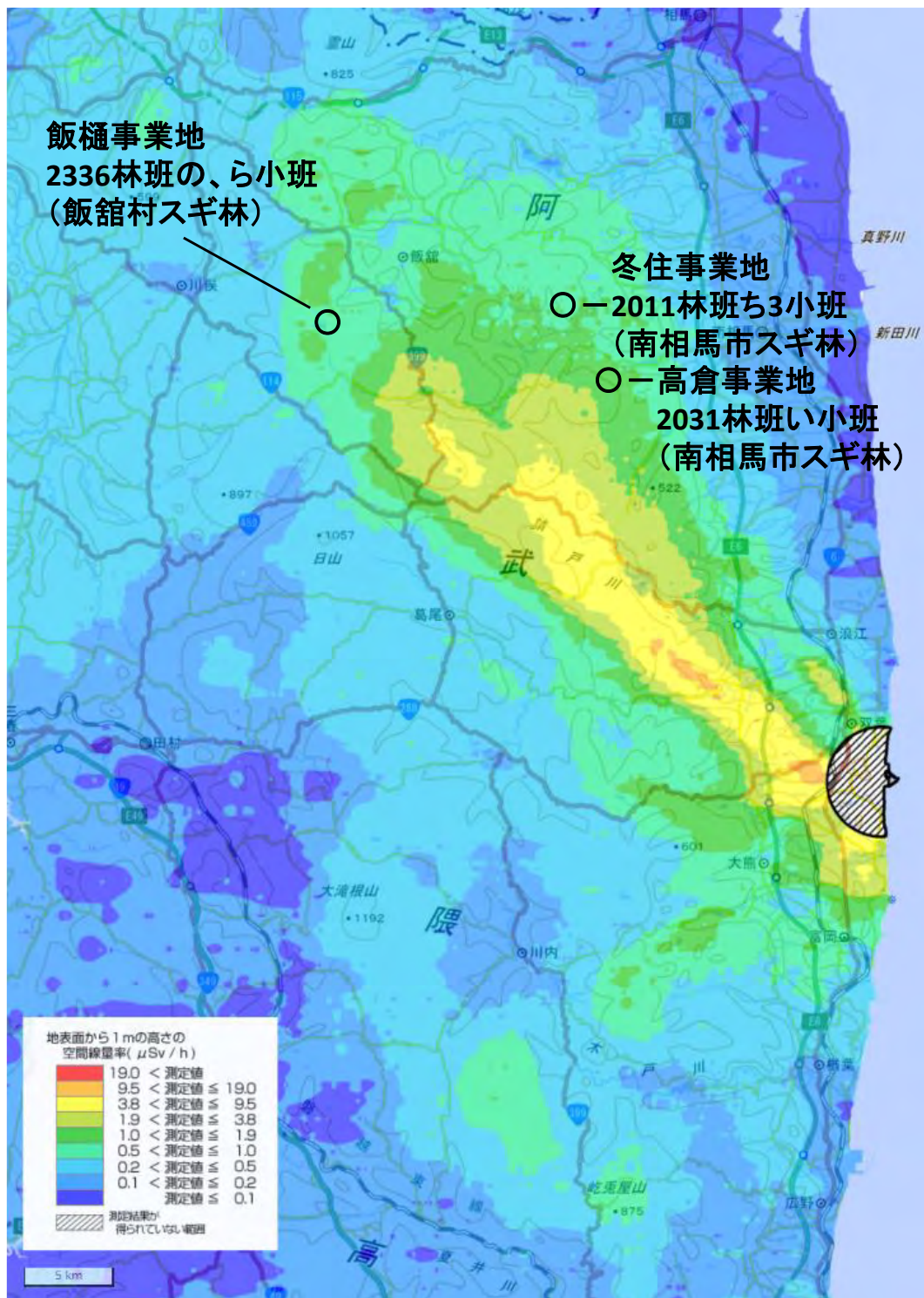


図 4-1 調査対象地の空間線量率(航空機モニタリング)

※ 令和 2(2020)年 10 月 29 日時点の空間線量率マップ(「第 15 次航空機モニタリング」(原子力規制委員会)より作成)

※ ○は事業地位置。

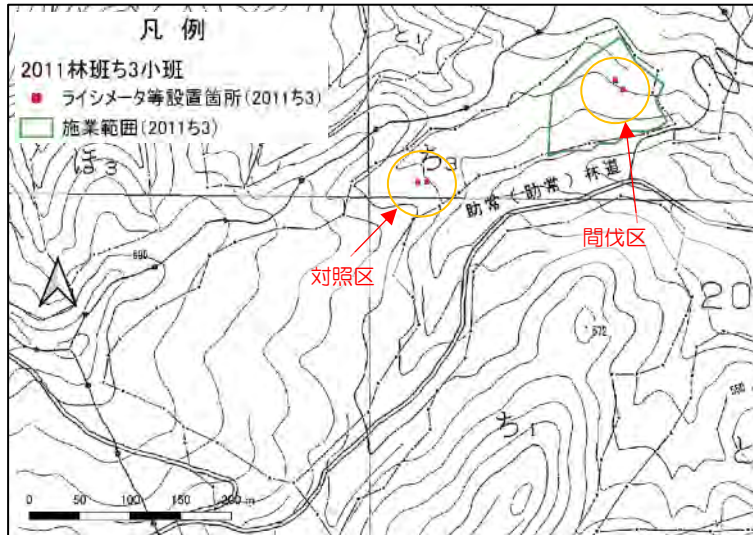


図 4-2 間伐区と対照区 (冬住事業地_2011 林班ち3 小班)

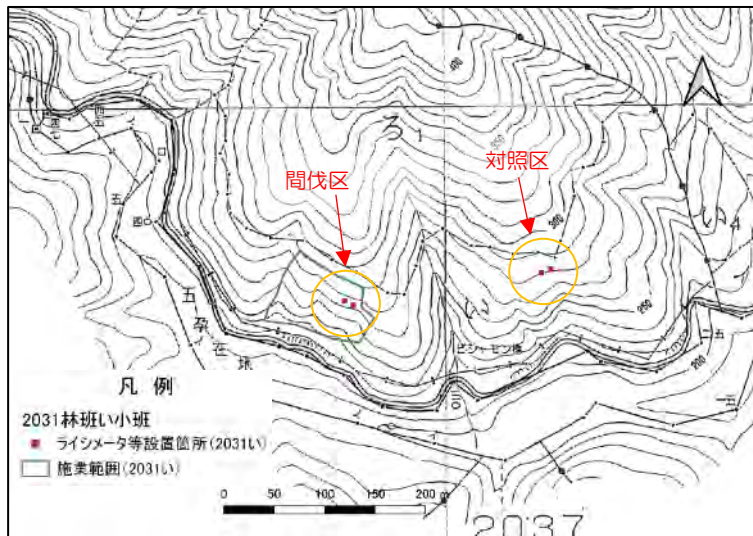


図 4-3 間伐区と対照区 (高倉事業地_2031 林班い1 小班)

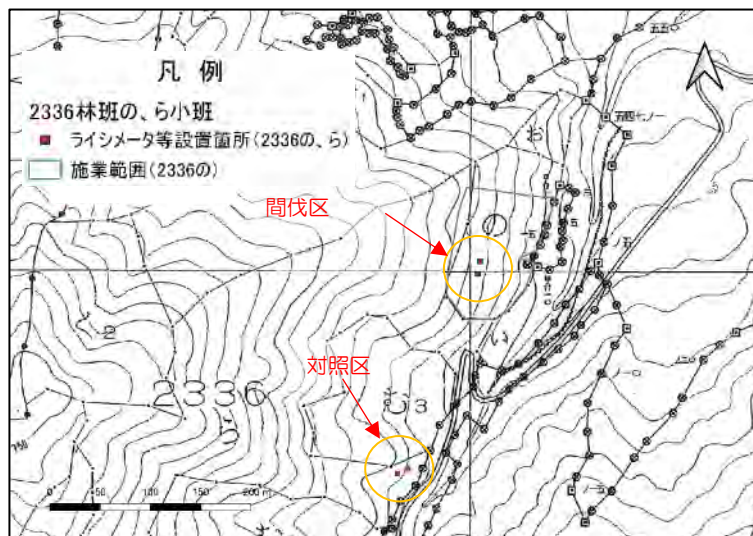


図 4-4 間伐区と対照区 (飯樋事業地_2336 林班の、ら1 小班及びら1 小班)

4.3. 事業地の選定

(1) 事業地選定にあたっての考え方

福島第一原発事故により森林生態系に降下した放射性セシウムは、主に枝葉や樹皮といった植物体の表面や林床の堆積有機物上に付着した。令和4年3月時点で事故から11年が経過したが、その間、放射性セシウムが付着した枝葉・樹皮等はリターフォールとして徐々に林床に降下し、現在ではその多くが林床や土壌中に存在している。林床内でみると、放射性セシウムは堆積有機物から土壌への移行が徐々に進んでいる。さらに、土壌中の放射性セシウムは、土壌の深い層へ移動していると考えられるが、その過程は緩やかであると考えられる。これは、放射性セシウムが土壌中の粘土鉱物に電子的に吸着され、下方への移動が困難になるためである。なお、土壌中の放射性セシウムの一部は植物体中に根から取り込まれるが、このうち枝葉へ移動したものは再度リターフォールとして林床に降下するという循環を繰り返すと推察される。

このように、森林生態系内の放射性セシウムの分布は、この循環を経て平衡状態に向かっていると考えられる一方、森林施業における土壌の攪乱により、少しでも早く土壌の深い層への移動が進めば、森林における空間線量率が低下することが想定される。これにより、林内作業員の被ばく量が低減するとともに、植栽樹木が根から取り込む放射性セシウムの量が減少することで、木材中の放射性セシウム濃度も低下し、材の搬出、利用に繋がることで林業再生に資することが期待される。

放射性セシウムが土壌の下方へ移動する要因としては、主に以下の4つが推測される。

要因①：自然状態の土壌における鉛直下方への物理的移動

要因②：土壌中を移動する水に溶けてイオンとなって移動する溶存態の放射性セシウム

要因③：多少の土壌の攪乱を伴う森林施業による鉛直下方への物理的移動

要因④：毎年2～3トン/ヘクタール程度発生する土壌中の細根の成長枯死に伴う生物的移动

要因①は、粘土鉱物に吸着された放射性セシウムが、粘土鉱物とともに重力による作用で下方へ移動することを想定したものである。

要因②は、粘土鉱物に吸着されていない放射性セシウムが水に溶けた状態で土壌下方へと移動している状態を想定したものであり、ライシメータによる調査で移動量を把握することができる。

要因③は、重機等による森林作業道や土場等の作設、伐採木集材時のウインチ引きなどにより表層土壌と深部の土壌が逆転することを想定したものである。

要因④は、表層土壌に近いところにある細根が土壌深部へ伸長することにより、細根中に含まれる放射性セシウムが細根とともに土壌深部へ移動し、細根が枯死したときにそのまま土壌深部へ残るイメージである。とくに間伐実施後は林内照度が高くなり下層植生が生育しやすくなるため、暗い林内よりは細根量が多くなり、これらの枯死とともに放射性セシウムが土壌深部にとどまることが想定される。

こうした要因を人為的に実現するための現実的な手段として、間伐等による森林施業の実

施が考えられ、森林施業が土壌中の放射性セシウムの下方移動に与える効果を検証することが本調査の目的である。

(2) 試験設計の概要

まず、森林施業箇所と施業を実施していない箇所を比較するため、間伐区と対照区を設定することとした（図 4-5）。設定に当たっては、同一林小班内、もしくは隣接する2小班において、間伐区と対照区を設けることを想定した。また、間伐区は面積 0.5ha 程度以上を想定し、対照区は間伐による影響をできるだけ少なくする必要があることから、間伐区からは数 10～100m 程度離すこととした。これらのセットを福島県原子力被災 12 市町村の林分から選定することとした。

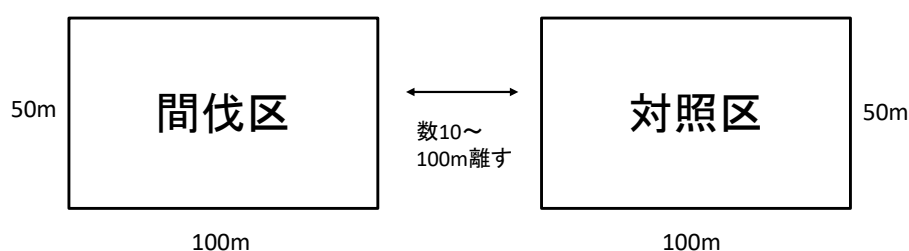


図 4-5 試験区設定イメージ

新規試験では、森林施業を実施する前年度に、間伐区、対照区ともに施業を実施する前の初期値に該当するデータを取得することとした。また、森林施業実施年度とさらにその翌年度から3年程度モニタリング的にデータを取得することとした。

これらを踏まえたスケジュールの概要は、図 4-6 に示すとおりである。

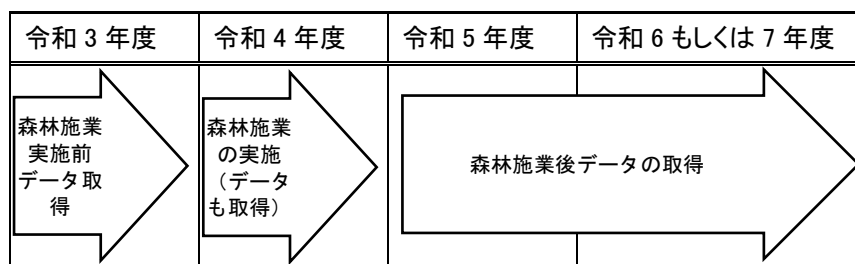


図 4-6 試験スケジュール概要

対象樹種は福島県の人工林の植栽樹種として多くみられるスギを、また森林施業方法は福島県浜通り地方の国有林で主に実施されている列状間伐を想定した。

(3) 事業地選定条件

以上の考え方や調査設計を基に、机上調査により事業地として条件のよい林小班を抽出した後、現地確認を行い、表 4-2 の条件をできるだけ満たす林小班の絞り込みを令和 3 年度に行い、表 4-1 の事業地を選定した。

表 4-2 事業地選定のための条件

条 件	内 容
初期沈着量	学識経験者の意見を参考として 300kBq/m ² 以上を目安とした。第 3 次航空機モニタリング(平成 23 年 7 月 2 日時点)の結果から得られた値を活用した。
一斉林である	現地確認箇所から 360° 見渡して混植もしくは、広葉樹の侵入等が顕著でなければ、一斉林とした。0.5ha 内が単一種であること。
林齢 40～50 年生以上である	40～50 年生以上の林であれば、土壌中の団粒状構造(下層植生にとって生育しやすい条件)が発達していることを見込んでいる。
一様な平衡斜面である	一般的に斜面の傾斜方向の凹凸が少ない斜面のことを平衡斜面というが、ここでは等高線方向の凹凸も含む。目視により小尾根等の微地形で 50m 程度先が見えない場合は、平衡斜面ではないとした。
表流水の有無(地下水が多くない)	表流水がみられるだけでなく、歩行中にぬかるむ場所は不適とした。地下からの水分上昇があるとライシメータ調査の実行が困難となる。
対照区の確保	同一林小班内に対照区を確保可能な面積があるかどうか、もしくは直近に条件に近い小班が存在するかどうかで判断した。また、200～300m が限界距離で、これ以上離れるのは林相やその他の環境条件が異なる可能性があり好ましくない。同一林小班内もしくは隣接する林小班が対照区になる場合は問題ない。
石礫が少なく、ササが密生していない	ライシメータの設置やスクレーパープレートによる土壌調査が可能な事業地であることが必須。
斜面方位	間伐実施後に下層植生が生育しやすくなることを考慮し、南向き斜面が望ましいとした。
傾斜	30° 程度であること。これ以上の傾斜では調査中の移動時等に土壌攪乱が大きくなる可能性がある。
原発事故以降、手が入っていない	放射性セシウム降下後に土壌攪乱や森林施業がされておらず、条件ができるだけ均質であることを必要とするため。
事業地へのアクセス	林小班直近の既設林道まで車でアクセスが可能かどうか。駐車箇所から徒歩5分以内でアクセス可能かどうか。歩きやすさも考慮。試験機器や試料の重量が大きいいため。

4.4. 森林施業の実施

(1) 森林施業内容の概要

図 4-6 に示したように、本事業では令和 4 年度に森林施業を実施し、令和 5 年度以降数年間のモニタリング調査を実施することを想定している。選定した 3 箇所の林小班については、全ての林小班で可能な限り森林施業内容を一致させることとした。

具体的には、以下の方法で実施した。

①間伐方法は列状間伐とする。

②伐採は 3 伐 6 残とし、列が明瞭でない場合は、伐採列幅を 5.4m、残存列幅を 10.8m（1 列を 1.8m として計算）と想定して伐採する。

③森林作業道を作設する。

④伐採はチェーンソーによる人力作業、集材方法は全木集材を基本とし、作業道近くの伐採木はグラップルで、作業道からグラップルが届かない箇所の伐採木についてはウインチ引きで実施する。

搬出型の間伐を実施するにあたっては 2 伐 4 残の列状間伐が一般的に選ばれる方法であるが、本事業の目的に沿ったものとするため、雨水の浸透が進みやすく光量や地温が上昇しやすい環境となるよう、伐採幅が広がる 3 伐 6 残で実施することとした。また、伐採をチェーンソーで実施し、集材をウインチ引きで実施する方法もよく採用されるシステムであり、実際の林業の現場に即した内容であることから、本調査でもこの方法を採用することとした。

(2) 森林施業内容

1) 森林施業範囲

森林施業範囲を設定するにあたっては、図 4-5 の試験区設定イメージを満たすよう 0.5ha 以上の面積を確保するとともに、100m 前後離れた箇所に対照区を設定できるように考慮した。

表 4-3 森林施業実施面積等

市町村名	事業地名	林小班	森林簿面積(ha)	実測施業面積(ha)	林況	備考
南相馬市	冬住	2011 ち 3	7.50	0.85	スギ	土場・作業道含む
	高倉	2031 い	7.94	0.57	スギ	土場・作業道含む
飯館村	飯樋	2336 の	1.24	0.99	スギ	土場・作業道含む
計			16.68	2.41		

これらの条件を基に図 4-7～図 4-9 に示す内容で森林施業内容を検討した。

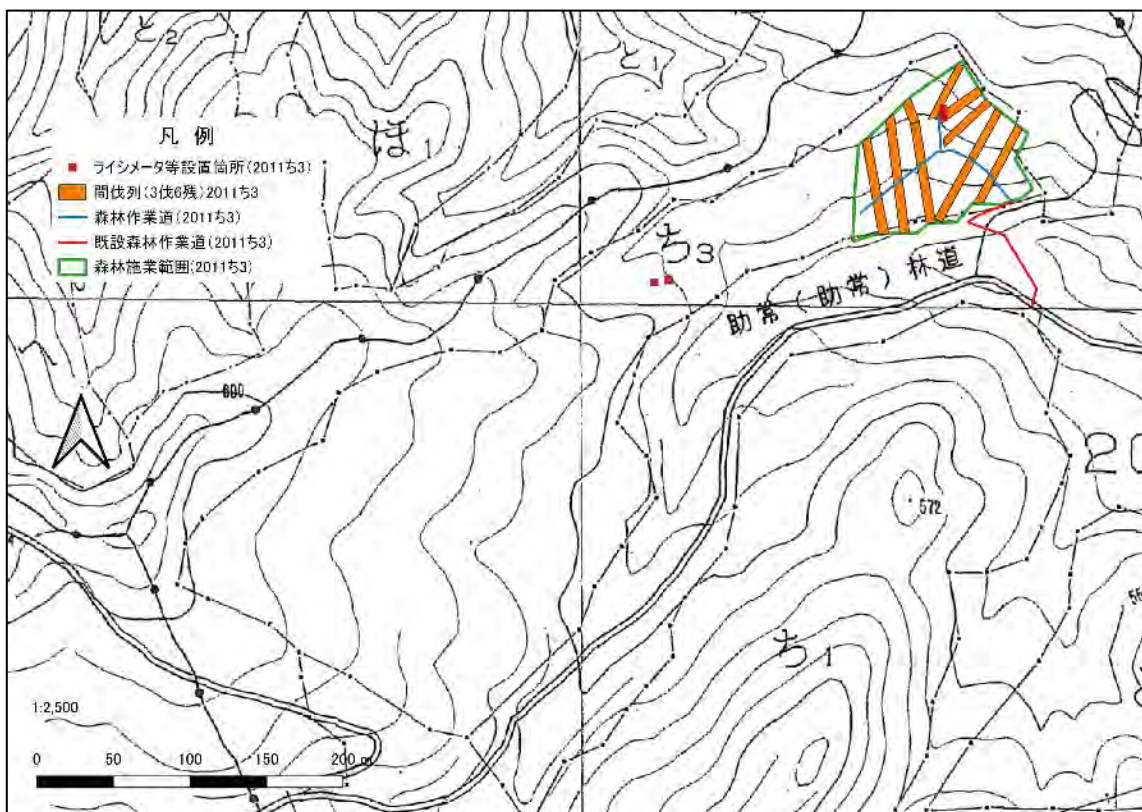


図 4-7 森林施業範囲及び森林作業道 (冬住事業地_2011 林班ち 3 小班)

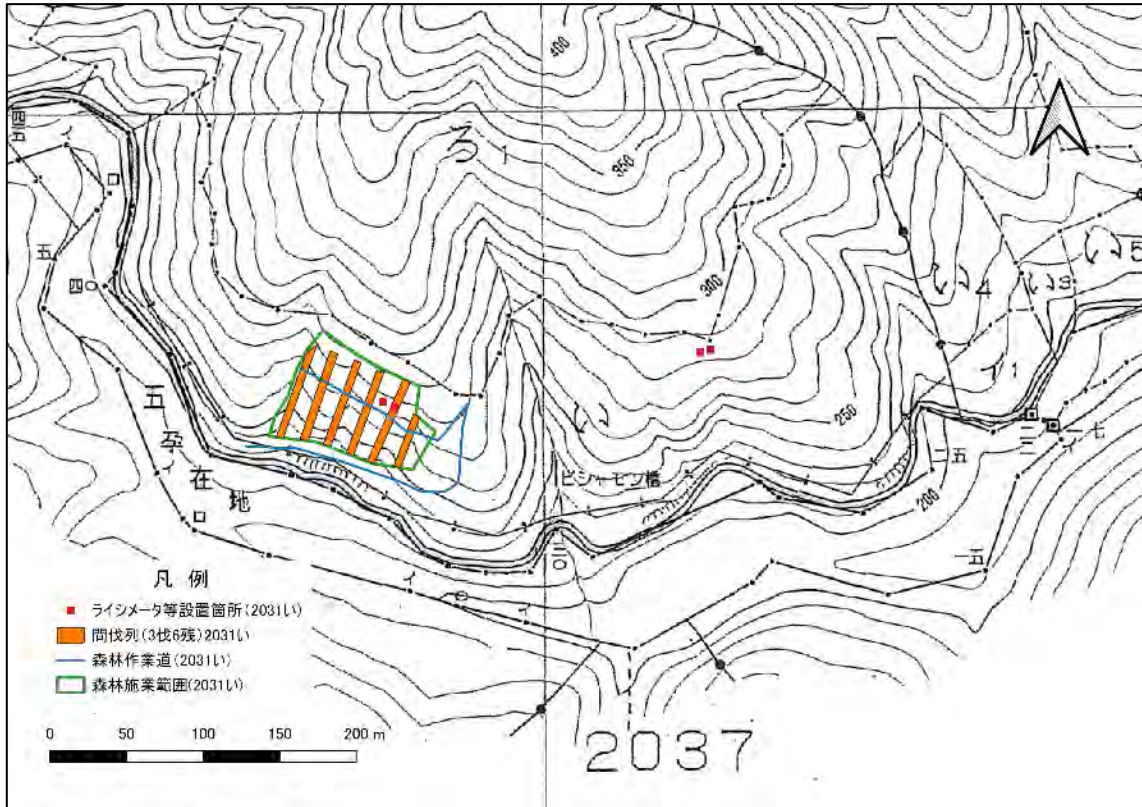


図 4-8 森林施業範囲及び森林作業道 (高倉事業地_2031 林班い小班)

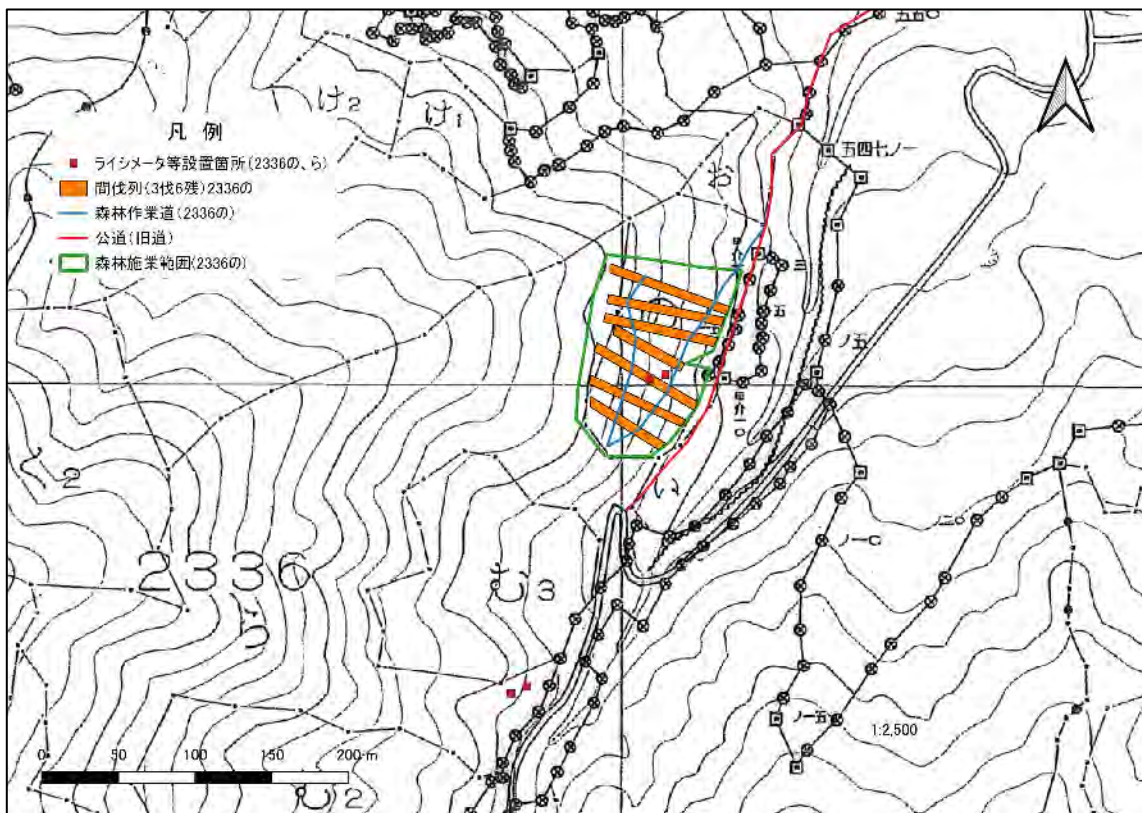


図 4-9 森林施業範囲及び森林作業道 (飯樋事業地_2336 林班の小班)

2) 標準地調査（令和3年度実施内容再掲）

標準地調査は、令和3年度の本事業において、各小班内に0.04haの方形プロットを2箇所設定し実施した（表4-4）。プロットは間伐区域の代表的な林況と考えられる箇所に設定しプロット内の胸高直径5cm以上の立木について、樹種、樹高及び胸高直径（地上高1.2m）を記録した。得られたデータを基に間伐区域内の総材積及び伐採材積を推定した。

標準地調査を基に算定した間伐区域内の本数や材積は表4-5に示すとおりである。併せて、面積当たりの本数や材積等を表4-6に示した。2011林班ち3小班の間伐区域0.85haの総材積は752.7m³となり、列状間伐材積251.2m³を計画した。2031林班い小班の間伐区域0.57haの総材積は346.3m³となり、列状間伐材積114.7m³を計画した。2336林班の小班の間伐区域0.99haの総材積は671.2m³となり、列状間伐材積219.7m³を計画した。

表 4-4 標準地の設定情報

事業地	林小班	林相	面積 (m ²)	区画 (m)	備考
冬住事業地	2011 ち 3	スギ	400	18.5×21.6	2 区画
高倉事業地	2031 い	スギ	400	18.5×21.6	2 区画
飯樋事業地	2336 の	スギ	400	18.5×21.6	2 区画

表 4-5 標準地調査結果（間伐区域の立木本数及び材積等）

事業地名 林小班	樹種	間伐区域 面積 (ha)	作業種	間伐区域 総本数 (本)	伐採予定 本数(本)	森林施業 区域総材積 (m ³)	伐採予定 材積 (m ³)	材積 伐採率 (%)
冬住事業地 2011 ち 3	スギ	0.85	列状間伐 (搬出)	1,849	649	752.7	251.2	33.3
高倉事業地 2031 い	スギ	0.57	列状間伐 (搬出)	1,874	595	346.3	114.7	33.1
飯樋事業地 2336 の	スギ	0.99	列状間伐 (搬出)	903	300	671.2	219.7	32.7

表 4-6 標準地調査結果（ha 当たり立木本数及び材積等）

林小班	樹種	間伐区域 面積 (ha)	作業種	ha 当たり 立木本数 (本)	ha 当たり 伐採予定 本数(本)	ha 当たり 立木材積 (m ³)	ha 当たり 伐採予定 材積(m ³)	材積 伐採率 (%)
冬住事業地 2011 ち 3	スギ	0.85	列状間伐 (搬出)	2,175	763	885.5	295.5	33.3
高倉事業地 2031 い	スギ	0.57	列状間伐 (搬出)	3,287	1,043	607.5	201.2	33.1
飯樋事業地 2336 の	スギ	0.99	列状間伐 (搬出)	912	303	678.0	221.9	32.7

表 4-7 標準地調査結果（立木の平均直径及び樹高等）

事業地名 林小班	樹種	間伐区域 面積 (ha)	作業種	平均直径 (cm)	平均樹高 (m)
冬住事業地_2011 林班ち3 小班	スギ	0.85	列状間伐(搬出)	21.8	18.8
高倉事業地_2031 林班い 小班	スギ	0.57	列状間伐(搬出)	17.2	14.2
飯樋事業地_2336 林班の 小班	スギ	0.99	列状間伐(搬出)	27.1	20.8

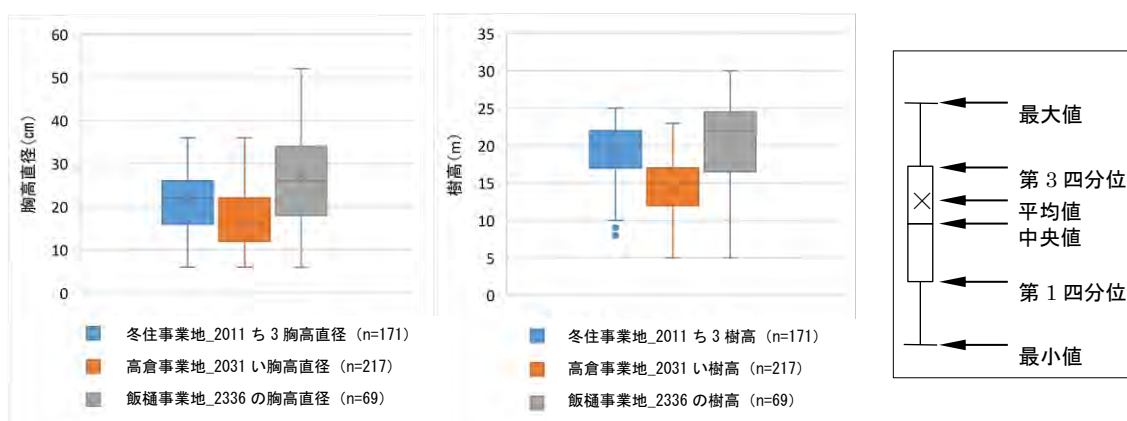


図 4-10 標準地内立木の胸高直径（左図）と樹高（右図）分布

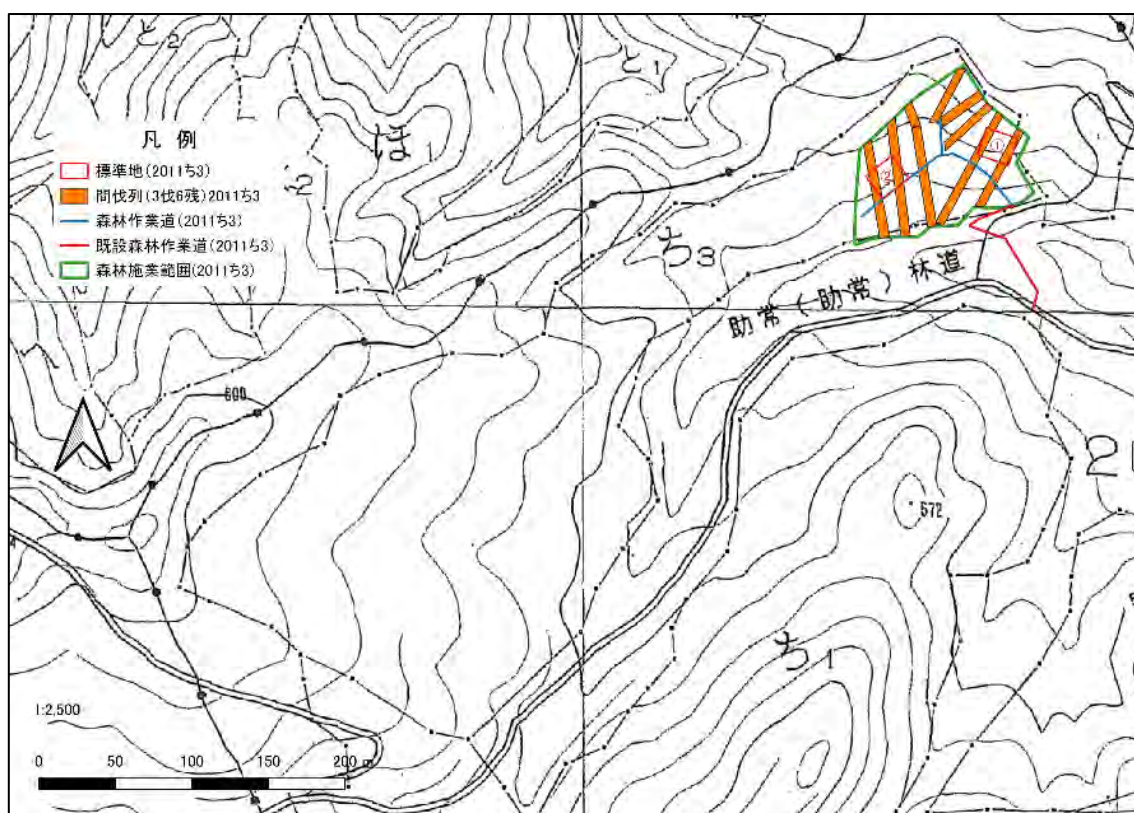


図 4-11 標準地位置図（冬住事業地_2011 林班ち3 小班）

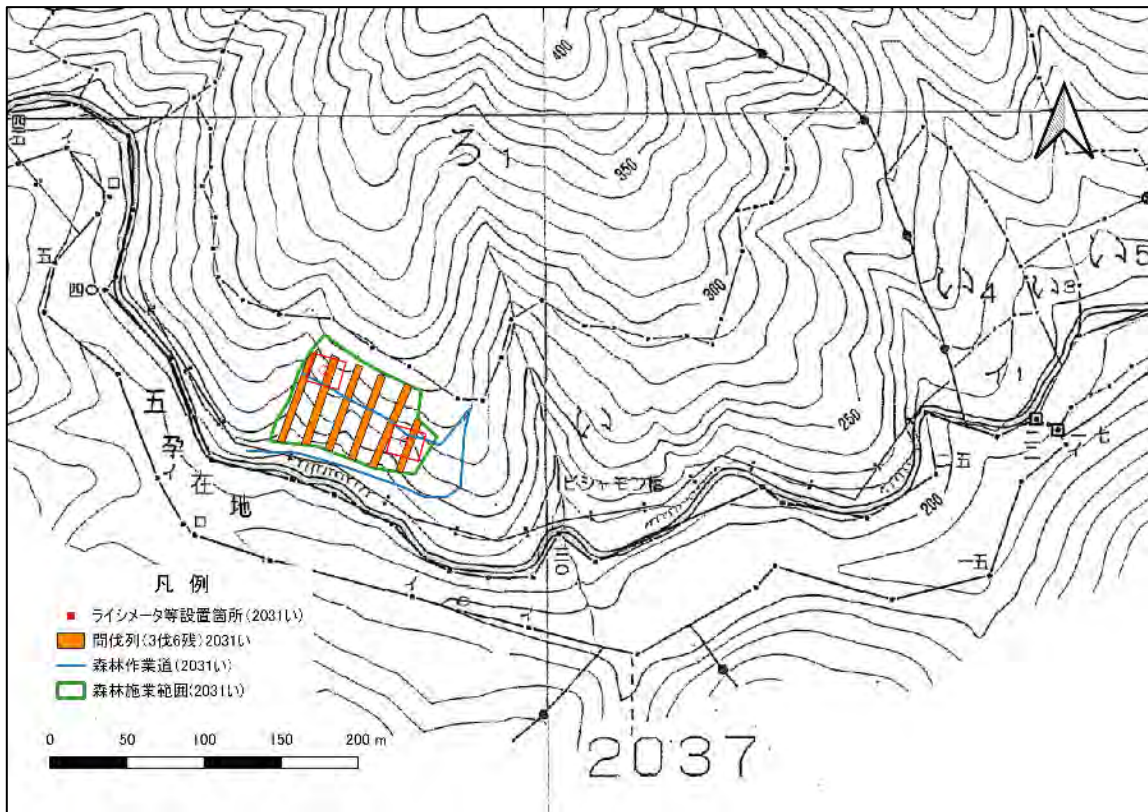


図 4-12 標準地位置図 (高倉事業地_2031 林班い小班)

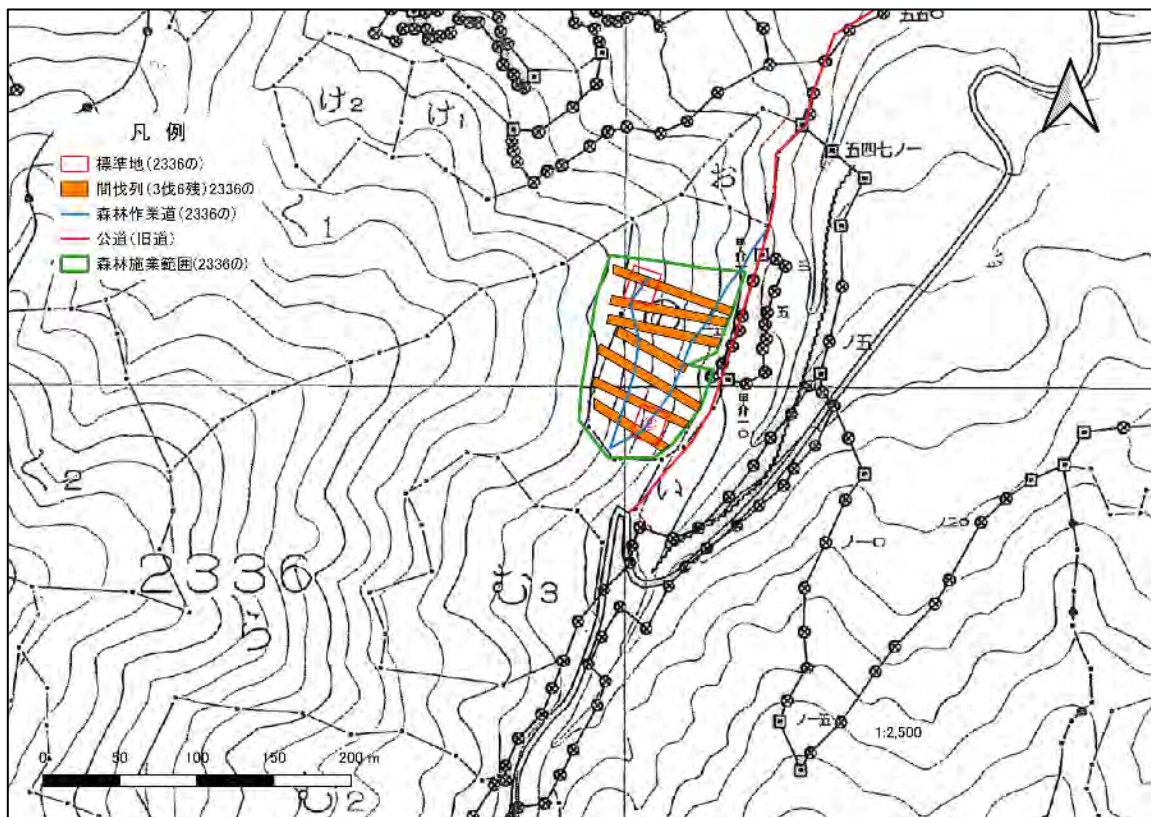


図 4-13 標準地位置図 (飯樋事業地_2336 林班の小班)

3) 森林施業の実施

森林施業は大まかに分けて、①森林作業道の作設、②伐採、③集材、④造材、⑤運材・はい積みの順で実施した。

森林施業の実施にあたっては、写真 4-1 に示す重機を使用した。

森林施業実施期間（作業道作設開始を始まりとして事業地からの運材終了まで）は、飯樋事業地は 2022 年 10 月 4 日～27 日、冬住事業地は 11 月 9 日～12 月 1 日、高倉事業地は 12 月 7 日～12 月 24 日であった。



バケット付バックホー
(ウインチ付き)



グラップル付きバックホー
(ウインチ付き)



フォワーダ

写真 4-1 使用した重機一覧

①森林作業道の作設

森林作業道作設は、チェーンソーを用いた支障木の先行伐倒を行い、その後、バケット機能付きバックホーによる土工作業で天地返しを行い実施した。チェーンソーにより先行伐倒後、路線線形に掛かる伐採木はその場でチェーンソーを用いて枝払い・玉切りの造材作業を行い、林内や路肩等に集積移動した。あわせてバケット付バックホーにより、抜根・掘削・整地作業を行い、森林作業道を作設した。

②伐採

列状間伐は、人力によるチェーンソー伐倒、0.25 m³クラスのグラップル・ウインチ付バックホーで木寄せ・集材し、チェーンソーにより造材作業を行う作業システムを基本とした。伐採列は、植栽列が不明瞭な箇所については幅 5.4mの伐採列に対し幅 10.8mの保残列で、植栽列が明瞭である場合は3列分を伐採列、6列分を残存列として設定した。また、森林施業の実施を正確に効率的に進めることを目的として、標識テープ（白）を伐採木に巻き付け、伐採対象である旨を明示した。

③集材

グラップルの作業機が届く範囲は伐採した材を作業機で掴み集材し、届かない範囲の材については、ウインチ引きによる全木集材を行った。ただし、作業時に枝葉が支障となる際には適宜枝払いを集材前に行った。集材作業の際には荷掛け作業員とオペレーターがペアとなって行った。

④造材

伐倒した材はチェーンソーにより枝払い・玉切りし、丸太は森林作業道沿いに仮置きした。また、枝払いした枝条等は、まとめて作業道沿いに集積した。

⑤運材・はい積み

森林作業道沿いに仮置きした丸太はグラップルでフォワーダに積み込み、土場へ運搬しはい積した。それ以外の残材は作業道脇に集積した。



森林作業道作設



伐採



集材



枝払い・玉切り



運材



はい積み

写真 4-2 森林施業の様子

4) 森林施業実施による森林環境の変化

森林施業（列状間伐）の実施による森林環境の変化について、森林施業前後の写真（林況写真、全天空写真、オルソ写真）による現況把握、全天空写真から得られた開空率、林床被覆率の変化、林床の攪乱状況について調査した内容を参考として示す。

① 間伐実施による森林環境変化の状況

間伐予定列内の2本の立木がなるべく水平に位置する箇所を選定し、間伐列毎に1箇所、調査プロットとして設定した（図 4-14～図 4-16）。なお、一部の調査プロットは間伐後に森林作業道作設に伴い消失した。調査プロットの中心から、伐採列の斜面上部方向と下部方向の林況写真を間伐前後に撮影し、その変化を記録した（写真 4-4）。また、調査プロットの中心において、360°カメラ（RICOH THETA S）により全天空写真を間伐前後に撮影した（写真 4-5）。

オルソ写真は小型無人航空機による空中写真撮影から得られた写真データを用いて作成した。飛行ルートは、GPS プログラミングにより設定した飛行ルート上を自動撮影したほか、必要に応じて適宜マニュアルによる空撮を実施した。撮影時期は、いずれの事業地においても施業前写真が2022年9月、施業後写真が2022年12月である。また、使用した小型無人航空機は、写真 4-3 に示すとおりである。撮影時は、オペレーター以外に1名以上の補助員を配置し、第三者の立ち入りの制限や飛行状態の確認、異常時の対応に備えた。



写真 4-3 使用した小型無人航空機（Mavic 2 Pro）

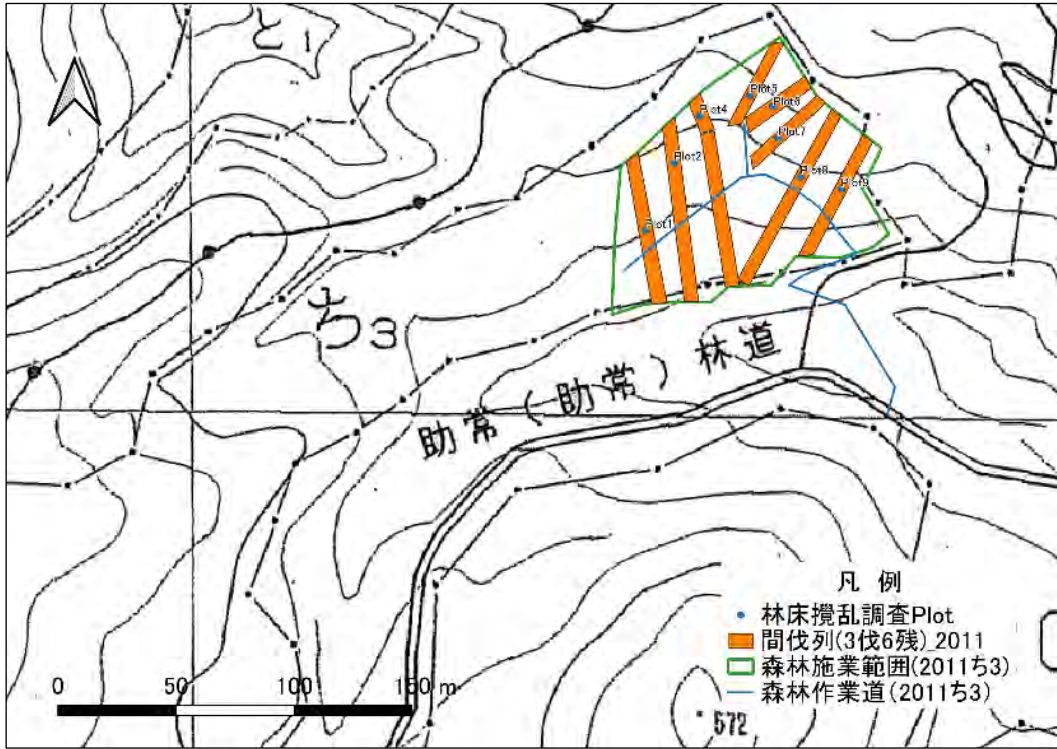


図 4-14 林床攪乱調査プロット位置 (冬住事業地_2011 林班ち3 小班)

※Plot3 は森林作業道作設に伴い消失

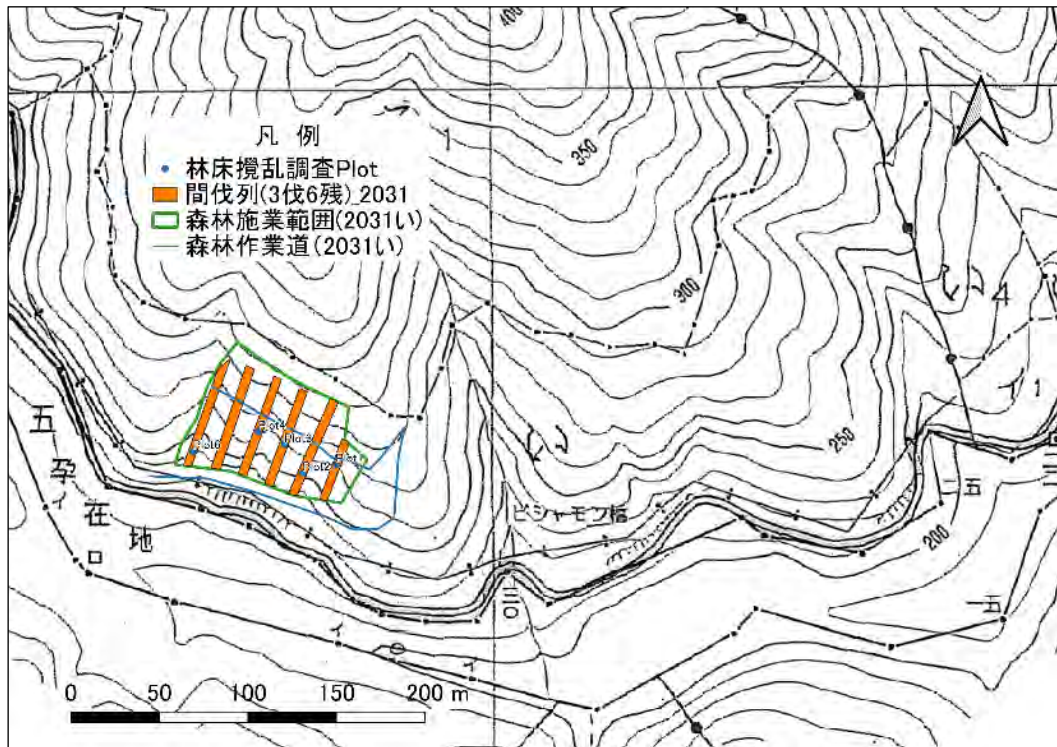


図 4-15 林床攪乱調査プロット位置 (高倉事業地_2031 林班い小班)

※Plot5 は森林作業道作設に伴い消失

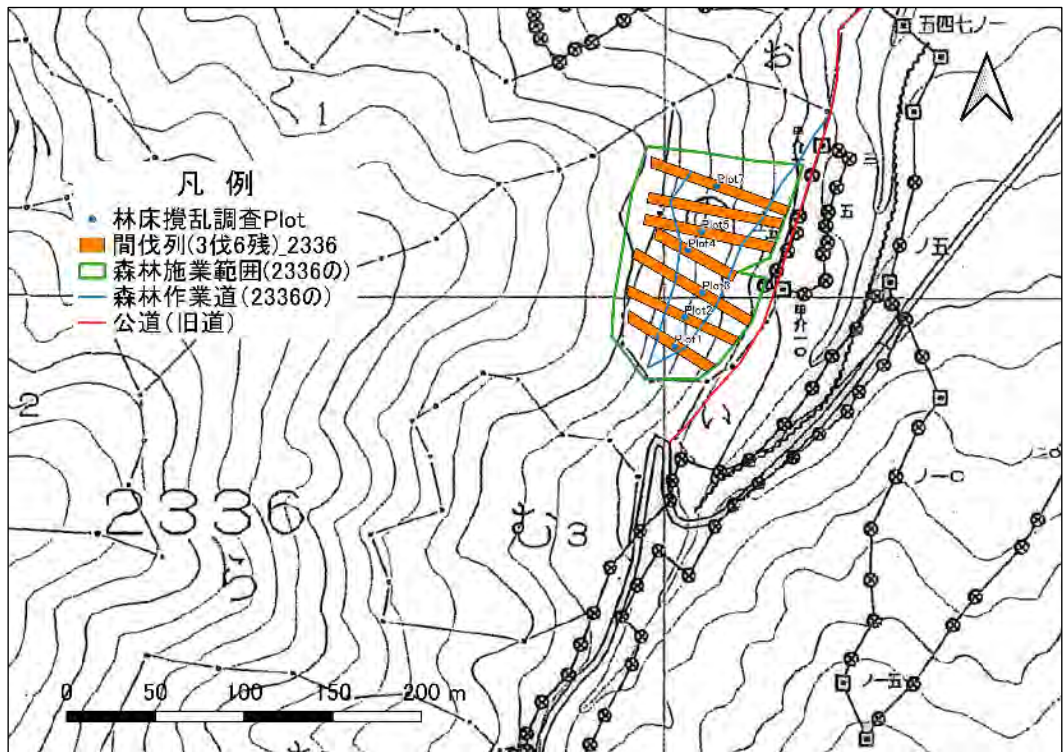


図 4-16 林床攪乱調査プロット位置 (飯樋事業地_2336 林班の小班)

※Plot6 は森林作業道作設に伴い消失



間伐実施前



間伐実施後

冬住事業地



間伐実施前



間伐実施後

高倉事業地



間伐実施前



間伐実施後

飯樋事業地

写真 4-4 列状間伐実施前後の状況



間伐実施前



間伐実施後

冬住事業地



間伐実施前



間伐実施後

高倉事業地



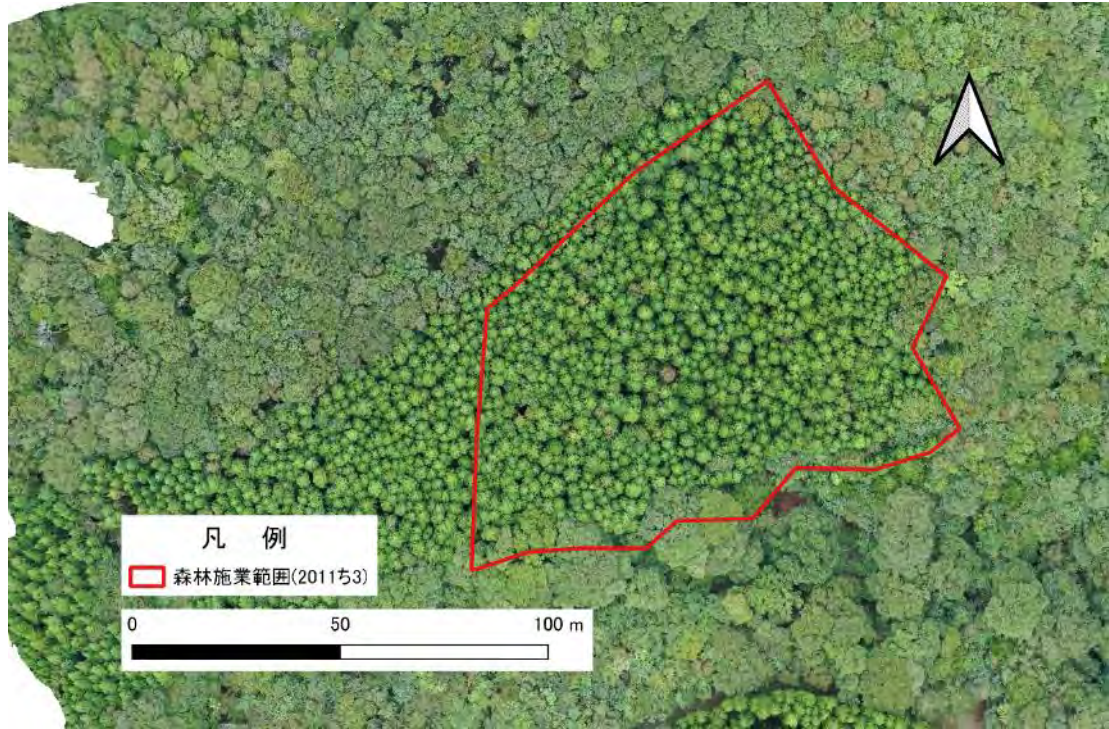
間伐実施前



間伐実施後

飯樋事業地

写真 4-5 列状間伐実施前後の開空状況（全天空写真）



間伐前

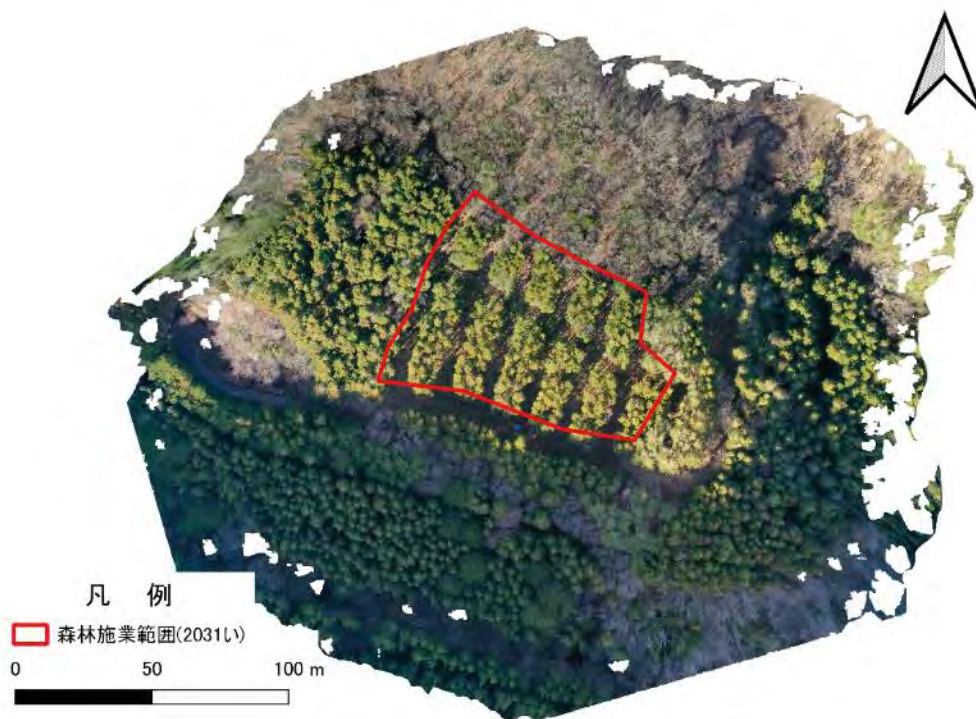


間伐後

写真 4-6 森林施業前後の環境変化 (冬住事業地_2011 林班ち3 小班)



間伐前



間伐後

写真 4-7 森林施業前後の環境変化（高倉事業地_2031 林班い小班）



間伐前



間伐後

写真 4-8 森林施業前後の環境変化（飯樋事業地_2336 林班の小班）

②森林施業実施による間伐列の開空率の変化

得られた全天球写真（画角 360°）を全天空写真（画角 180°）に加工した後（写真 4-9）、ソフトウェアにて開空率を算出した。詳しい算出の手順は次ページを参考にさせていただきたい。なお、一部の調査プロットは森林作業道作設にあたって消失したため、森林施業前に撮影した写真から得られたデータは使用していない。

間伐列における施業前後の開空率の変化を表 4-8 に示す。全ての事業地において、開空率が施業前後で 2 倍程度大きくなり、日光を取り込む量が増えたことが示唆される。

表 4-8 間伐列における施業前後の開空率変化

事業地	開空率±標準偏差(%)	開空率±標準偏差(%)
	森林施業前	森林施業後
冬住事業地 2011 林班ち 3 小班	12.9±0.4(n=8)	24.2±1.6(n=8)
高倉事業地 2031 林班い小班	11.4±1.9(n=5)	22.8±0.8(n=5)
飯樋事業地 2336 林班の小班	13.1±0.7(n=6)	24.2±2.3(n=6)



全天球写真は、RICOH THETA などのソフトウェアを用いると球状の画像をソフトウェア上で回転させることもできる。



全天空写真は、RICOH THETA などのソフトウェアを用いると球状の画像をソフトウェア上で回転させることもできる。

写真 4-9 全天球写真と全天空写真

(参考：開空率算出手順)

①RICOH 製の 360°カメラ THETA で撮影。

②撮影した写真を水平に撮影した全天空写真にする準備

1. フリーソフトウェア「RICOH THETA」を使用。
2. 撮影写真をソフト画面上にドラッグ&ドロップ。
3. 「ファイル」→「天頂補正書き出し」を実施し、保存。

③全天空写真の作成

1. フリーソフトウェア「paint.net」を使用。
2. ②で作成したファイルを開く。
3. 「イメージ」→「キャンパスサイズ」でピクセルサイズの高さを 2 分の 1 にして、OK ボタンを押す。例えば、THETAS の場合は、得られる全天球写真の画像サイズが横 5376×縦 2688 であるが、縦を上半分にしたいため 1344 を入力して処理する。
4. 「効果」→「THETA」→「FishEye」で Y Direction を -90.00、Magnification を 0.50 に設定し、OK ボタンを押す (Projection は Equidistance とする)。
5. 名前を付けて保存するが、ファイルの種類を BMP ファイルにして保存する。
(※)「THETA」の拡張機能である「FishEye」は「paint.net」にリコーシート関連のプラグイン「THETATools1_2」にある 4 つのプラグイン (EqRectLevel、FishEyeProjection、MercatorProjection、PersProjection) を、エクスプローラー上で「Program Files」→「paint.net」→「Effects」に入れると使用できるようになる。プラグイン「THETATools1_2」は以下の URL からダウンロード可能。

<https://github.com/aitech-two/THETATools>

④開空率の算出

1. フリーソフトウェア「CanopOn2」を使用。以下のホームページも参照のこと。ホームページ内では開空率を開空率と表現している。

<http://takenaka-akio.org/etc/canopon2/>

2. 「CanopOn2」の Load Image から③で作成した全天空写真を開く。
3. BW/Color で白黒写真にする。このとき、exposure の値を 0.85 くらいにすると、空が見えている部分と木や枝葉にさえぎられている部分との区別が適切に二値化されることが多いが丁寧な確認が必要。この値の適切な設定が極めて重要。適切に二値化されない場合、RGB の設定を適切に行うとうまくいくこともある。
4. 表示されている青い円をマウスで操作し、全天空写真にぴったり合わせる。
5. 表示画面左の中ほどにある Eval ボタンを押すと表示される Mean open の数値が開空率。

③森林施業実施による林床の攪乱状況

列状間伐時の集材作業にあたっては、グラップルによる集材においてもウインチを使った地曳集材においても、伐採木が地面を引きずられる際に、伐採木の幹や枝葉の部分によって、写真 4-10 に示すような攪乱が生じる。とくに、かかり木となった伐採木の根元にワイヤーを括り付け、ウインチで引き出す際には、伐採木が立った状態で元口部分が林床をえぐることになるため、攪乱が非常に大きい。

ライシメータ等機器の設置に当たっては、攪乱の極端に多い箇所もしくはあまり攪乱されていない箇所は避け、事業地全体を見渡して平均的な攪乱具合の箇所を選定するように留意する必要がある。



グラップルによる集材



ウインチ引きによる集材



ウインチ引き時に梢端部が
林床を引きずった跡



ウインチ引き時に元口部が
林床をえぐった跡



かかり木をウインチ引きし
たときに元口部が林床をえ
ぐった跡



伐採木の枝葉が伐採列を
覆っている状況

写真 4-10 集材時の林床攪乱状況

参考までに、林床の攪乱の程度を簡易的に調査した内容を示す。「①森林施業実施による森林環境変化」で示した調査箇所において、2本の立木の根元に近い部分に洋灯吊りをねじ込み、これに鎖をピンと張り、立木間の距離を計測した。さらに、鎖の左から4分の1(左)、2分の1(中)、4分の3(右)の箇所において、鎖から堆積有機物のA₀層表面までの重心方向距離(深さ)、A₀層表面からA層表面までの重心方向距離(深さ)について、森林施業前後の2回計測した(図 4-17)。なお、森林施業後のA₀層については、森林施業前に堆積していた有機物が森林施業後にも現存していることは少なく、伐採木からの枝葉由来のものが多くを占めた。

森林施業前後における林床の削れ程度について表 4-9 に示す。林床の削れ程度とは、調査内容で示した「鎖から堆積有機物のA₀層表面までの重心方向距離(深さ)」に「A₀層表面からA層表面までの重心方向距離(深さ)」を加えた値であり、鎖からA層表面までの距離を示す。なお、林床の削れ程度を「鎖からA層表面までの距離」で評価するのは、森林施業前

の A₀ 層については A 層の上層部分と併せて森林施業により削れてしまい、新しく上に堆積した A₀ 層の直下に、削れた地表の最上部があると仮定しているためである。

結果として、急傾斜で伐採本数が多い高倉事業地の林床の削れが大きい結果となった。高倉事業地の場合は削られた土砂は斜面下方へ移動した可能性が考えられる。他の事業地は平均としては大きな削れはみられなかった。また、バラツキの指標となる標準偏差は各事業地で大きくは変わらなかった。なお、森林施業によって林床の削れた部分が他の箇所盛られるといった状態を反映したものがバラツキと考えられる。

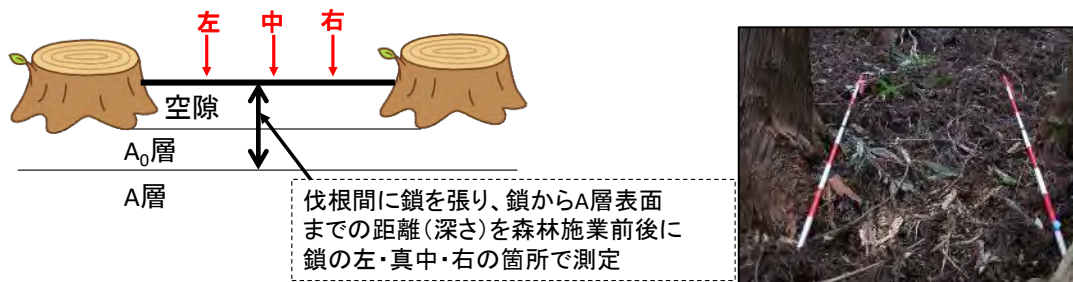


図 4-17 林床攪乱調査箇所設定イメージ

表 4-9 事業箇所別_林床の削れ程度

事業地	鎖から A 層表面までの距離変化 ±標準偏差 (cm)
冬住事業地 (n=8) 2011 林班ち 3 小班	1.5 ± 5.0 (左)
	-1.1 ± 6.0 (中)
	1.8 ± 4.2 (右)
高倉事業地 (n=5) 2031 林班い 1 小班	5.0 ± 5.2 (左)
	9.2 ± 4.4 (中)
	5.0 ± 7.7 (右)
飯樋事業地 (n=6) 2336 林班の 1 小班	0.3 ± 4.2 (左)
	1.7 ± 4.4 (中)
	0.3 ± 4.8 (右)

併せて上記調査と同一の箇所において、2本の立木を中心とする1.8m×1.8mの範囲の林床の被覆率を目視により把握した（写真4-11）。

林床被覆率の森林施業前後における変化について、表4-10に示す。列状間伐により伐採列の林床被覆率は20%前後減少する結果となった。

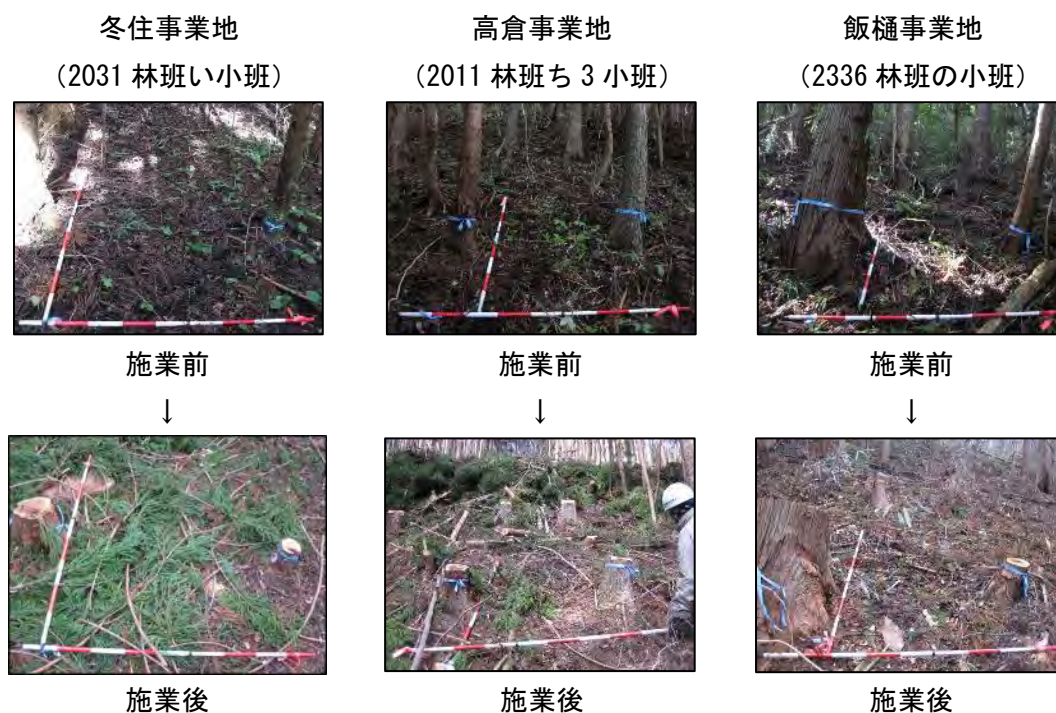


写真 4-11 伐採列の林床変化の状況

表 4-10 伐採列の林床被覆率の変化

事業地	林床被覆率±標準偏差(%) 森林施業前	林床被覆率±標準偏差(%) 森林施業後
冬住事業地(n=8) 2011 林班ち3小班	100±0(n=8)	86±13(n=8)
高倉事業地(n=5) 2031 林班い小班	100±0(n=5)	79±22(n=5)
飯樋事業地(n=6) 2336 林班の小班	98±2(n=6)	77±15(n=6)

4.5. 土壌浸透水に含まれる放射性物質濃度の把握

(1) 試験地と試験方法

土壌浸透水による放射性セシウムの方浸透量を定量化するため、表 4-1 に示す 3 箇所の事業地の施業区及び対照区において試験を実施した。各事業地のゼロテンションライシメータ設置位置を図 4-18、図 4-19、図 4-20 に示す。本年度は、令和 3（2021）年度に設置したゼロテンションライシメータ（図 4-21）を 6 月にメンテナンス・清掃した後に観測を開始した。

堆積有機物層の浸透水を採取するゼロテンションライシメータは、30cm×30cm のプラスチックトレイを穴空け加工し、シリコンで防水処理してホースでタンクと接続した。設置位置の堆積有機物を、立体的構造を崩さずに 30cm ×30cm の面積で掘削し、そのままプラスチックトレイの上に移設し、設置した。

土壌層の浸透水を採取するゼロテンションライシメータは、斜面の等高線方向に掘削して土壌断面を作成し、設定深度（5cm、10cm、20cm）でガルバニウム土台水切り（アルミニウム-亜鉛合金めっき鋼板；以後「めっき鋼板」と呼ぶ。）を斜面傾斜と水平に打ち込み、その打ち込んだ長さを記録した上で、土壌断面から出た部分を 5 cm 程度残して切断した。さらに、土中に打ち込んだめっき鋼板から流れてきた浸透水を集められるよう、トタンで水受けを作り、3D プリントで作成した治具を使用してホースに接続し、45L タンクに接続した。土壌断面は風雨や落枝の影響を受けないよう、ブルーシートで保護した。めっき鋼板は 1 箇所 3 枚、40cm まで打ち込むことを基本とし、支障物で 40cm まで打ち込めない場合は、長さを記録して切断した。各事業地におけるゼロテンションライシメータの観測期間を表 4-11 に、設置状況を写真 4-12、写真 4-13 に示した。

浸透水の試料回収は 1 か月に 1 回を基本として計画し、6 月から間伐施業前の 9 月末までの約 3 か月の観測を予定していたが、期間中の降水量が少なかったため、間伐施業が始まる直前まで延長し、飯樋事業地は 10 月末、高倉および冬住事業地は 11 月末まで観測を実施した。試料回収状況を表 4-11 に示す。

タンクに貯まった浸透水の量を測定した後に攪拌し、均一となった浸透水の一部を 2L のポリビンで採取して試料とした。採取した試料は、観測期間中にタンクに貯まった量を按分し、混合して 1 試料とした。混合した試料は、孔径 0.45 μ m のメンブレンフィルターでろ過し、フィルターに残ったものを残渣、通り抜けた濾液を溶存態の試料として、5 章に記載した方法により核種測定を行った。ここで、溶存態の試料は放射性セシウム濃度が低いことが想定されたため、加熱濃縮を行い、定量下限値を 0.1~0.2Bq/L として測定を行った。

また、下方浸透の調査に併せて、放射性セシウムの方浸透量把握のための環境要因の基礎情報把握のため、自記式の観測機器（気温・湿度、雨量、空間線量率、照度計、土壌水分計、地温計、水位計）による 10 分毎（空間線量率のみ 1 時間毎）の観測を行った。観測機器およびデータ回収状況を写真 4-12~写真 4-14 に示す。なお、間伐施業によりゼロテンションライシメータおよび観測機器が破損するおそれがあったため、間伐区については施業前に機器を撤去し、林内の伐採の影響がない場所に仮置きした。

間伐施業後のゼロテンションライシメータおよび観測機器の設置は、令和 5 年（2023 年）6 月頃を予定している。

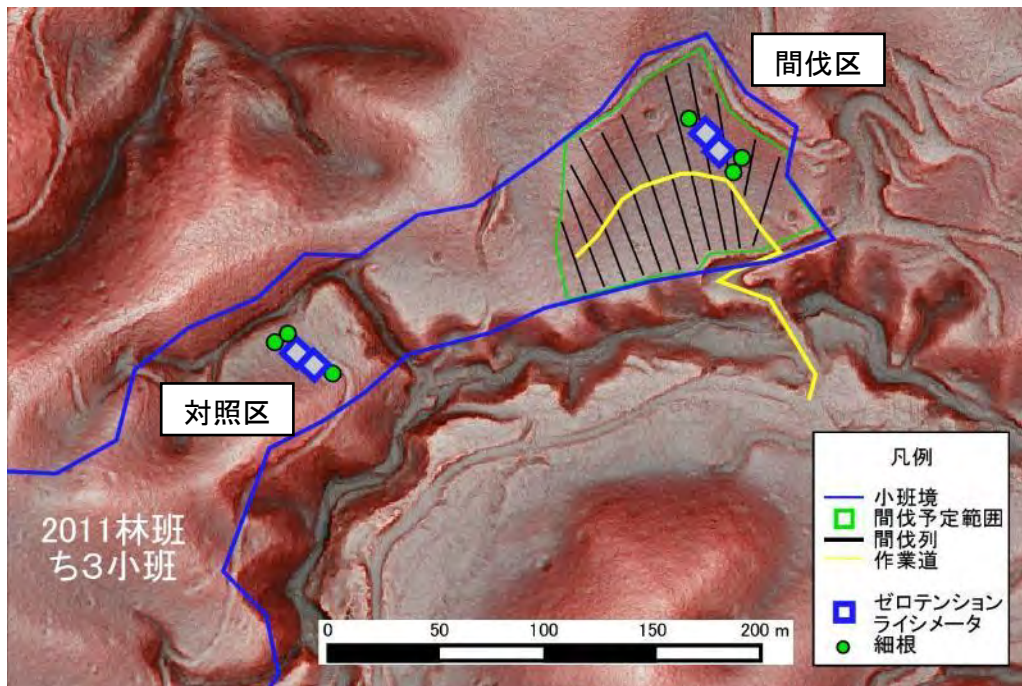


図 4-18 冬住事業地（2011 林班ち 3 小班）配置

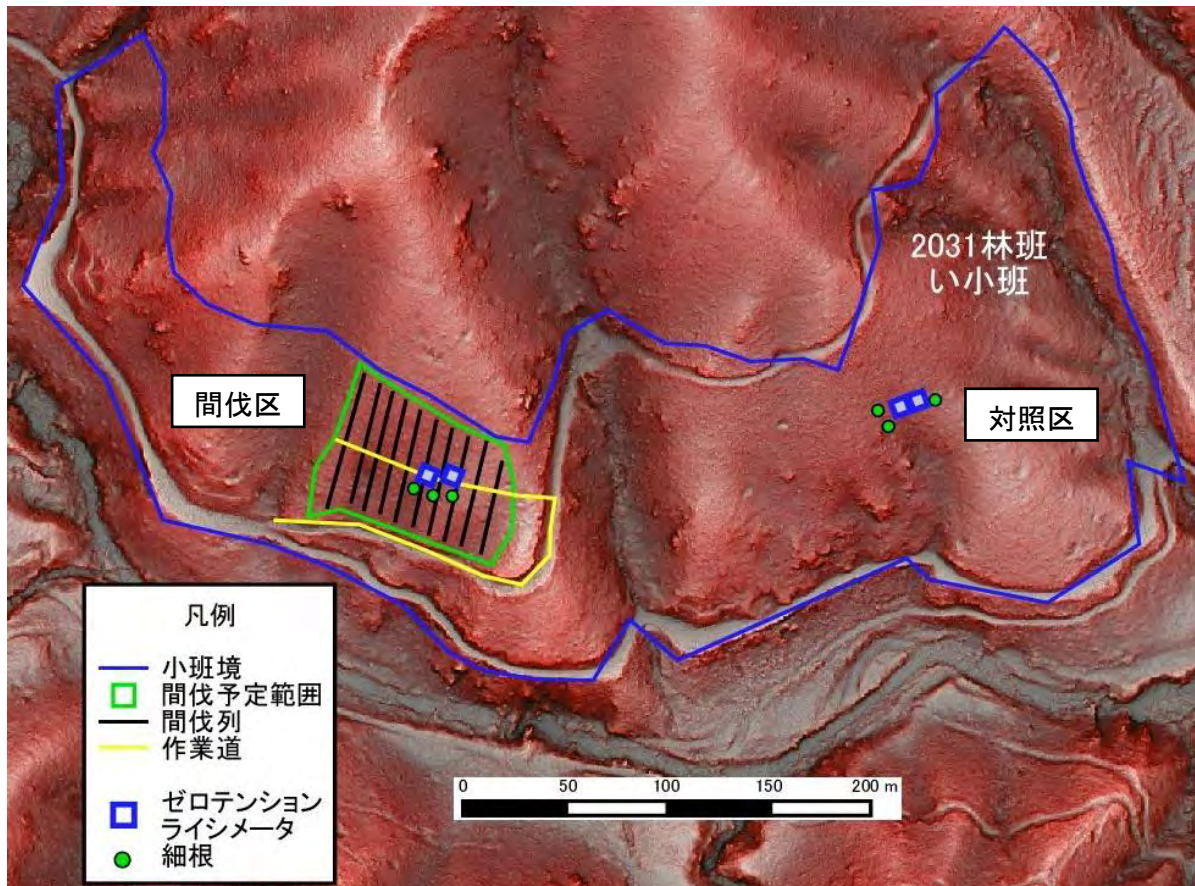


図 4-19 高倉事業地（2031 林班い小班）配置

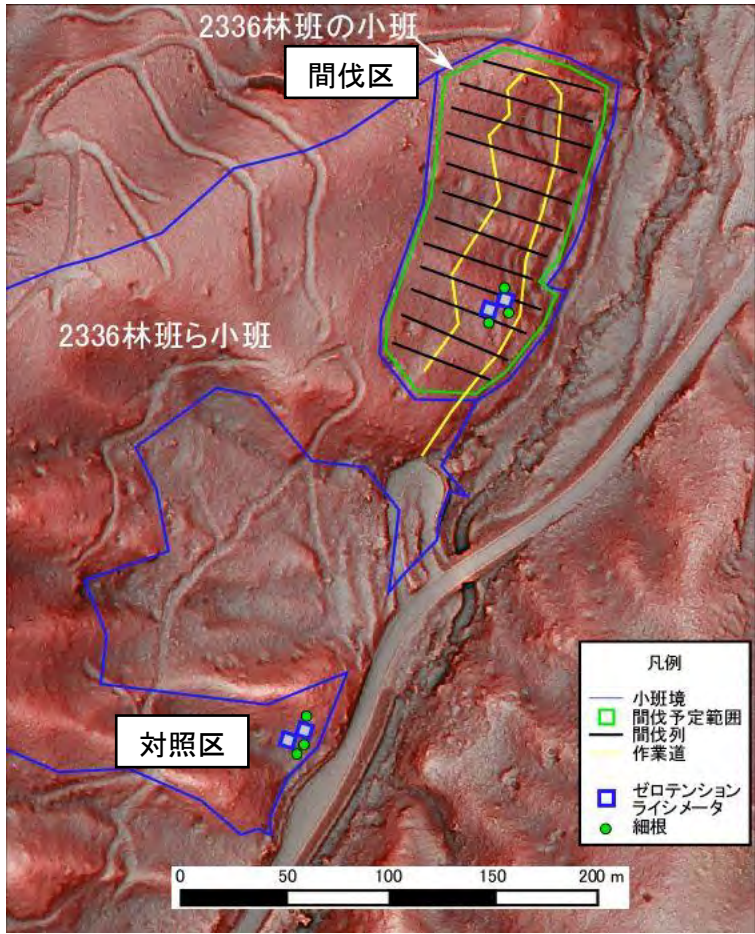


図 4-20 飯館事業地（2336 林班の、ら小班）配置

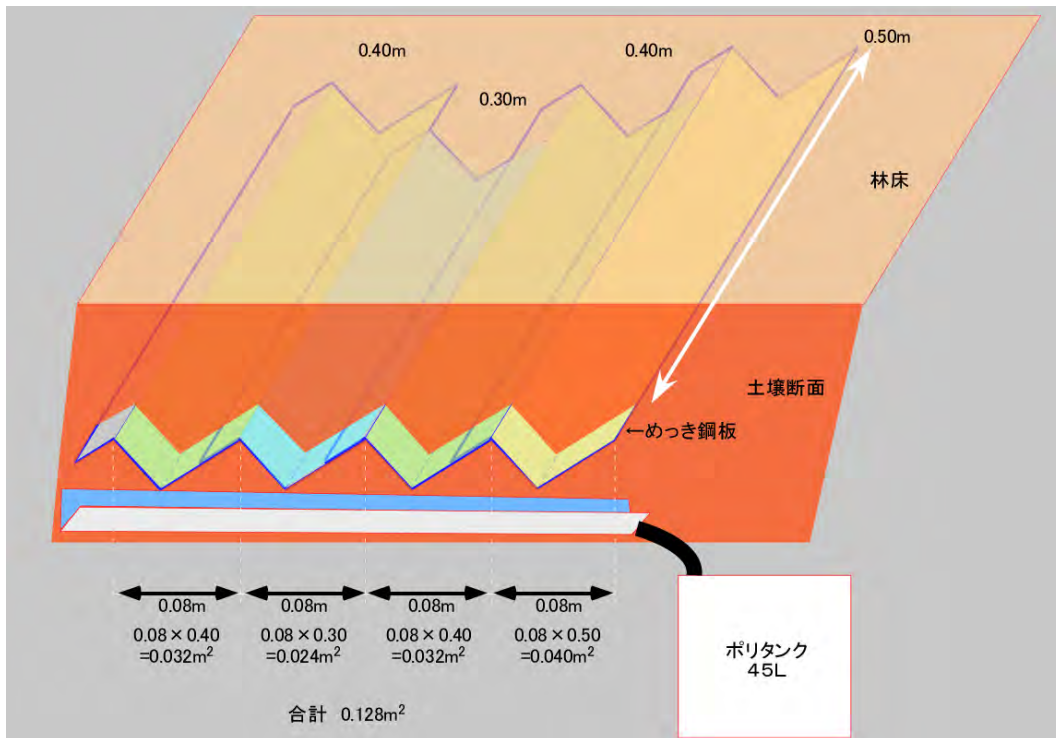


図 4-21 ゼロテンションライシメータ構造図

表 4-11 ゼロテンションライシメータ観測期間

事業地	施業区	林相	傾斜角	設置	令和3(2021)年				令和4(2022)年			
					観測期間	日数	期間雨量 (mm)	年降水量 (mm/年)	観測期間	日数	期間雨量 (mm)	年降水量 (mm/年)
冬住 試験地	間伐区 (施業前)	スギ	13~23°	2021年7月 ~8月24日	2021年 10月21日~ 12月18日	58	183	1,444	2022年 6月15日~ 10月25日	132	497	1,081
	対照区	スギ	13~26°	2021年7月 ~8月25日			192	1,517				
高倉 試験地	間伐区 (施業前)	スギ	25~33°	2021年7月 ~9月29日	2021年 10月22日~ 12月16日	55	157	1,285	2022年 6月14日~ 10月24日	132	393	963
	対照区	スギ	25~40°	2021年7月 ~9月10日			151	1,237				
飯樋 試験地	間伐区 (施業前)	スギ	25~33°	2021年7月 ~9月10日	2021年 10月23日~ 12月21日	59	127	1,053	2022年 6月13日~ 9月26日	105	346	1,054
	対照区	スギ	23~30°	2021年7月 ~9月9日			119	988				

期間雨量は各事業地に設置した雨量計の観測値。令和3年度の年降水量は、試験地の期間雨量と、同じ期間で付近のAMeDAS観測所の雨量で割り、30年間の年間降水量から割り戻して算出した。令和4年度は雨量計目詰まりが多かったため、間伐区対照区の雨量計を平均して観測値とした。



設置状況全景



浸透水集水状況



メッキ鋼板打ち込み状況



トタン水受けと 3D プリントで作成した治具を設置

写真 4-12 ゼロテンションライシメータ設置状況



浸透水採水タンク (45L)



浸透水採水タンク・自記水位計



堆積有機物用トレイ



堆積有機物移設状況



ゼロテンションライシメータ埋設後



ゼロテンションライシメータ浸透水試料回収状況

写真 4-13 ゼロテンションライシメータ設置状況と試料回収状況



ロガーボックス外観



温湿度計設置状況



D-シャトル設置状況



データ回収状況



照度計設置状況近景



照度計設置状況遠景



土壌水分計、地温計設置状況



写真 4-14 ゼロテンションライシメータ周囲に設置した観測装置およびデータ回収状況

(2) 試験結果

土壌及び堆積有機物層浸透水に含まれる放射性セシウム（Cs-134 及び Cs-137）の濃度及び期間中の浸透水量を表 4-12、図 4-22 に、年間の下方向移動量推定値を表 4-13、図 4-23 に示す。

浸透水試料中の放射性セシウムのうち、Cs-137 については全試料で測定下限値以上の濃度が検出されたが、Cs-134 については、全て測定下限値（0.05～0.91Bq/L）未満の濃度であった。

浸透水中の放射性セシウム（Cs-137）濃度は、おおむね堆積有機物層浸透水のほうが、土壌浸透水よりも高かった。放射性セシウム（Cs-137）濃度は、下層に行くほど概ね低下していたが、地点によりばらつきが生じていた。冬住事業地の対照区については、土壌深度 5～10cm、10～20cm の 2 深度で 3.65 Bq/L および 11.7Bq/L であり、上層より高い濃度が確認された。

本年度は目視では異常を確認できなかったが、来年度はライシメータの周辺に表流水の流路や野生生物によるかく乱の痕跡等がないか、より入念な状況確認と、必要に応じてライシメータの移設検討を行うことが望ましい。

土壌等浸透水による放射性セシウム（Cs-137）の 1 年当たりの下方向移動量推定値は、おおむね堆積有機物層で最も大きく、土壌深度が深くなるほど低下する傾向が見られたが、冬住事業地の対照区では、移動量は下層の方が大きくなる傾向が見られた。また、現存量に対する浸透水による下方向移動量推定値は、冬住事業地の堆積有機物層で大きかった他は、事業地間に明瞭な違いが見られなかった

また、伐採前後の間伐区および対照区の条件の違いによる下方向浸透量の差異とその影響を把握するために、林内・林外の降水量と空間線量率の把握とともに、日照量、地温、気温・湿度、土壌水分等の観測を行った。さらに、降雨イベント（降雨強度）毎の雨水の下方向浸透水量（集水タンクへの流入量）を正しく把握するために、タンクに水位計を設置し、より詳細に雨水の下方向浸透状況等の記録を行った。記録したデータは報告書付属のデータ集にまとめた。

表 4-12 土壤等浸透水に含まれる放射性セシウム (Cs-134 及び Cs-137) 濃度、浸透水量
(n=2 平均値)

事業地	作業区	深度	令和3(2021)年度			令和4(2022)年度		
			Cs-134 (Bq/L)	Cs-137 (Bq/L)	浸透水量 (L)	Cs-134 (Bq/L)	Cs-137 (Bq/L)	浸透水量 (L)
冬住 事業地	間伐区 (施業前)	堆積	N.D.(0.19)	1.76	6.1	N.D.(0.52)	1.94	25.1
		0-5cm	N.D.(0.25)	0.55	6.1	N.D.(0.38)	0.53	16.3
		5-10cm	N.D.(0.20)	0.29	5.1	N.D.(0.17)	0.24	9.3
		10-20cm	N.D.(0.26)	0.49	2.2	N.D.(0.14)	0.33	1.4
	対照区	堆積	N.D.(0.74)	2.08	10.1	N.D.(0.58)	1.24	39.1
		0-5cm	N.D.(0.17)	0.33	7.0	N.D.(0.23)	0.38	28.3
		5-10cm	N.D.(0.17)	0.45	3.8	N.D.(0.55)	3.65 *	13.3
		10-20cm	N.D.(0.09)	0.17	0.7	N.D.(0.91)	11.7 *	5.1
高倉 事業地	間伐区 (施業前)	堆積	N.D.(0.09)	0.56	9.4	N.D.(0.09)	0.74	31.0
		0-5cm	N.D.(0.08)	0.39	6.1	N.D.(0.08)	0.56	18.2
		5-10cm	N.D.(0.09)	0.20	4.1	N.D.(0.08)	0.36	18.4
		10-20cm	N.D.(0.09)	0.14	1.8	N.D.(0.08)	0.24	8.0
	対照区	堆積	N.D.(0.09)	0.58	8.9	N.D.(0.07)	0.78	25.2
		0-5cm	N.D.(0.08)	0.36	6.5	N.D.(0.08)	0.43	20.3
		5-10cm	N.D.(0.09)	0.26	4.2	N.D.(0.08)	0.21	16.8
		10-20cm	N.D.(0.09)	0.28	1.8	N.D.(0.08)	0.10	10.2
飯樋 事業地	間伐区 (施業前)	堆積	N.D.(0.42)	0.90	8.5	N.D.(0.30)	1.06	18.7
		0-5cm	N.D.(0.32)	0.41	4.6	N.D.(0.37)	0.61	19.5
		5-10cm	N.D.(0.34)	0.54	3.3	N.D.(0.18)	0.31	15.0
		10-20cm	N.D.(0.14)	0.18	1.8	N.D.(0.14)	0.25	11.8
	対照区	堆積	N.D.(0.39)	0.58	8.7	N.D.(0.22)	0.54	22.8
		0-5cm	N.D.(0.14)	0.15	3.5	N.D.(0.11)	0.13	13.0
		5-10cm	N.D.(0.15)	0.18	2.9	N.D.(0.06)	0.08	8.3
		10-20cm	N.D.(0.29)	0.32	0.7	N.D.(0.05)	0.05	5.1

測定値が不検出(N.D.)の試料については、括弧内に測定下限値を示した。

* 試験地の攪乱が疑われるため、状況について精査中

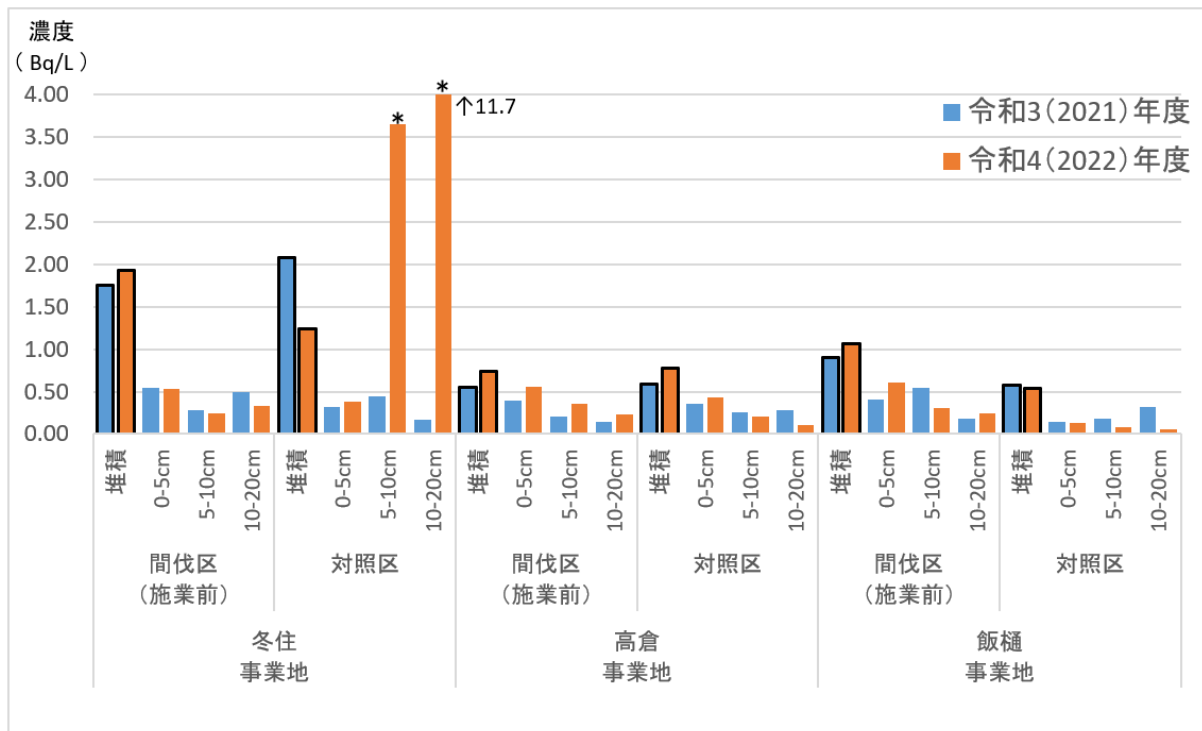


図 4-22 土壤等浸透水に含まれる放射性セシウム (Cs-137) 濃度

* 試験地の攪乱が疑われるため、状況について精査中

表 4-13 土壌等浸透水に含まれる放射性セシウム (Cs-137) 移動量・割合

事業地	作業区	深度	令和3(2021)年度				令和4(2022)年度			
			Cs-137 濃度 (Bq/L)	下方移行量 試算値 (kBq/m ² ・年)	設置箇所 周辺の現存量 (kBq/m ²)	Cs-137 下方移行量 (1年間)	Cs-137 濃度 (Bq/L)	下方移行量 試算値 (kBq/m ² ・年)	設置箇所 周辺の現存量 (kBq/m ²)	Cs-137 下方移行量 (1年間)
冬住事業地	間伐区 (施業前)	堆積	1.76	1.15	1,022	0.11%	1.94	1.42	1,060	0.13%
		0-5cm	0.55	0.35		0.034%	0.53	0.24		0.023%
		5-10cm	0.29	0.15		0.014%	0.24	0.07		0.0064%
		10-20cm	0.49	0.13		0.013%	0.33	0.02		0.0019%
	対照区	堆積	2.08	1.85	678	0.27%	1.24	1.18	633	0.19%
		0-5cm	0.33	0.25		0.037%	0.38	0.36		0.057%
		5-10cm	0.45	0.10		0.015%	3.65 *	0.72 *		0.11% *
		10-20cm	0.17	0.01		0.0021%	11.7 *	2.12 *		0.33% *
高倉事業地	間伐区 (施業前)	堆積	0.56	0.48	735	0.066%	0.74	0.64	734	0.088%
		0-5cm	0.39	0.29		0.039%	0.56	0.41		0.056%
		5-10cm	0.20	0.10		0.013%	0.36	0.33		0.045%
		10-20cm	0.14	0.03		0.0042%	0.24	0.11		0.015%
	対照区	堆積	0.58	0.47	1,015	0.046%	0.78	0.53	1,137	0.047%
		0-5cm	0.36	0.30		0.030%	0.43	0.31		0.027%
		5-10cm	0.26	0.12		0.011%	0.21	0.13		0.011%
		10-20cm	0.28	0.05		0.0052%	0.10	0.05		0.0040%
飯桶事業地	間伐区 (施業前)	堆積	0.90	0.60	758	0.079%	1.06	0.47	693	0.068%
		0-5cm	0.41	0.19		0.025%	0.61	0.42		0.061%
		5-10cm	0.54	0.15		0.020%	0.31	0.17		0.025%
		10-20cm	0.18	0.03		0.0041%	0.25	0.12		0.017%
	対照区	堆積	0.58	0.47	581	0.080%	0.54	0.42	502	0.084%
		0-5cm	0.15	0.05		0.0080%	0.13	0.07		0.013%
		5-10cm	0.18	0.05		0.0088%	0.08	0.02		0.0046%
		10-20cm	0.32	0.02		0.0042%	0.05	0.01		0.0019%

令和 3(2021)年度の年間移動量は「期間降水量÷AMeDAS 期間降水量×AMeDAS30 年平均降水量」より推定した。
* 試験地の攪乱が疑われるため、状況について精査中

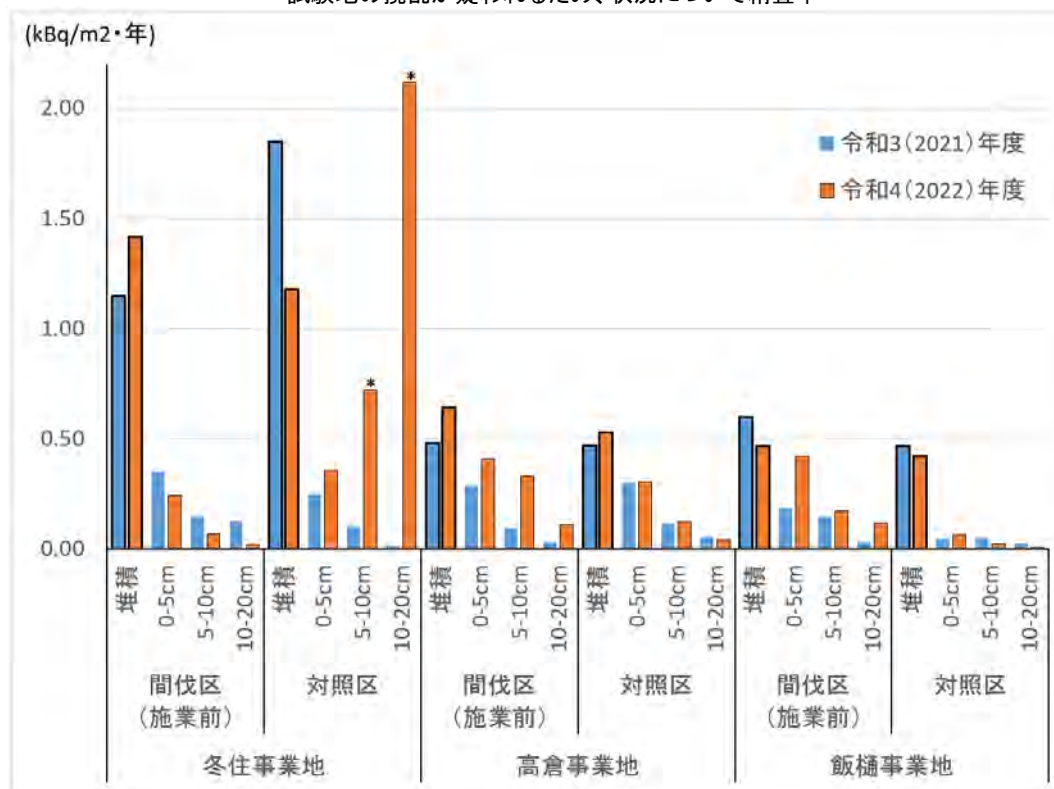


図 4-23 土壌等浸透水に含まれる放射性セシウム (Cs-137) 年間移動量推定値
令和 3(2021)年度の年間移動量は「期間降水量÷AMeDAS 期間降水量×AMeDAS30 年平均降水量」より推定した。
* 試験地の攪乱が疑われるため、状況について精査中

土壌浸透水をメンブレンフィルターでろ過した残渣に含まれる放射性セシウム（Cs-134及びCs-137）の濃度を表 4-14 に示す。

本年度の残渣の放射性セシウム（Cs-137）濃度は、令和 3（2021）年度と比較し、全体的に上昇していることが確認でき、飯樋事業地で最大 158kBq/kg、冬住事業地で最大 739kBq/kg、高倉事業地で最大 105kBq/kg であった。なお、放射性セシウム（Cs-134）濃度は、全て測定下限値未満であった。ただし、残渣重量は微小（1.1mg～123.1mg 程度）であったため、誤差が大きく出ている可能性がある。

なお、本事業で採取された土壌等浸透水の残渣は、土壌浸透水に伴う下方移動だけでなく、ライシメータを設置した土壌断面から落下した土砂に由来するものも多く含んでおり、評価にあたっては注意が必要である。

表 4-14 土壌等浸透水残渣に含まれる放射性セシウム（Cs-134 及び Cs-137）の濃度

事業地	作業区	深度	令和3(2021)年						令和4(2022)年					
			No.1			No.2			No.1			No.2		
			Cs-134 (kBq/kg)	Cs-137 (kBq/kg)	重量 (mg)	Cs-134 (kBq/kg)	Cs-137 (kBq/kg)	重量 (mg)	Cs-134 (kBq/kg)	Cs-137 (kBq/kg)	重量 (mg)	Cs-134 (kBq/kg)	Cs-137 (kBq/kg)	重量 (mg)
冬住 事業地	間伐区 (施業前)	堆積	N.D.	N.D.	5.3	N.D.	76	11.7	N.D.	254	26.4	N.D.	303	10.0
		0-5cm	N.D.	N.D.	12.5	N.D.	N.D.	14.0	N.D.	60	10.6	N.D.	91	12.5
		5-10cm	N.D.	N.D.	10.1	N.D.	N.D.	12.5	N.D.	68	10.0	N.D.	101	10.6
		10-20cm	/	/	/	N.D.	N.D.	11.4	/	/	/	N.D.	N.D.	10.0
	対照区	堆積	N.D.	283	18.4	N.D.	N.D.	11.5	N.D.	392	10.8	N.D.	739	4.7
		0-5cm	N.D.	188	9.4	N.D.	N.D.	5.4	N.D.	194	21.2	N.D.	160	30.8
		5-10cm	N.D.	N.D.	14.1	N.D.	N.D.	12.0	N.D.	130	33.8	N.D.	281	10.6
		10-20cm	N.D.	N.D.	13.0	/	/	/	N.D.	126	36.7	/	/	/
高倉 事業地	間伐区 (施業前)	堆積	N.D.	N.D.	0.7	N.D.	1,350	1.3	N.D.	19	119.4	N.D.	105	34.1
		0-5cm	N.D.	N.D.	10.0	N.D.	N.D.	6.8	N.D.	185	2.1	N.D.	47	21.7
		5-10cm	N.D.	N.D.	3.2	N.D.	79	7.7	N.D.	80	17.6	N.D.	49	11.3
		10-20cm	N.D.	N.D.	0.8	N.D.	N.D.	5.4	N.D.	54	16.3	N.D.	36	17.3
	対照区	堆積	N.D.	N.D.	6.4	N.D.	N.D.	6.7	N.D.	135	4.2	N.D.	110	4.0
		0-5cm	N.D.	37	20.9	N.D.	N.D.	1.1	N.D.	76	19.7	N.D.	37	17.8
		5-10cm	N.D.	N.D.	3.2	N.D.	N.D.	10.2	N.D.	N.D.	1.4	N.D.	31	29.8
		10-20cm	N.D.	N.D.	9.0	N.D.	N.D.	1.1	N.D.	32	15.6	N.D.	N.D.	18.3
飯樋 事業地	間伐区 (施業前)	堆積	N.D.	N.D.	9.1	N.D.	N.D.	6.7	N.D.	60	85.3	N.D.	39	123.1
		0-5cm	N.D.	81	10.8	N.D.	N.D.	10.1	N.D.	122	86.1	N.D.	158	46.5
		5-10cm	N.D.	54	11.5	N.D.	N.D.	15.9	N.D.	159	30.6	N.D.	99	101.7
		10-20cm	N.D.	N.D.	9.9	N.D.	N.D.	8.0	N.D.	50	82.6	N.D.	39	59.1
	対照区	堆積	N.D.	N.D.	9.3	N.D.	N.D.	11.3	N.D.	67	86.0	N.D.	95	21.7
		0-5cm	N.D.	N.D.	5.7	N.D.	N.D.	6.9	N.D.	188	26.1	N.D.	44	30.8
		5-10cm	N.D.	N.D.	63.6	N.D.	N.D.	14.7	N.D.	N.D.	4.9	N.D.	15	98.5
		10-20cm	N.D.	N.D.	11.5	N.D.	N.D.	14.9	N.D.	48	40.6	N.D.	26	23.0

4.6. 細根等による放射性物質移動の把握

(1) 試験地と試験方法

スギ細根の枯死脱落による土壌深部への放射性セシウムの移動を把握するため、表 4-1 に示す 3 箇所の事業地の間伐区及び対照区において、試験を実施した。細根採取位置を図 4-24、図 4-25、図 4-26 に、スギ林における細根分布イメージを図 4-27 示す。細根分別用の採取地点は、図 4-18、図 4-19、図 4-20 に示したゼロテンションライシメータ設置位置周辺で、各区 3 地点、合計 18 地点で行った。試料採取は、後述の「4.7. 土壌等の放射性物質濃度の測定（スクレーパープレートによる深度別土壌調査）」と併せて行った。スクレーパープレート（面積 15cm×30cm）を用いて、堆積有機物層および土壌深度 0～1 cm、1～2 cm、2～5 cm、5～10 cm、10～15 cm、15～20cm の計 7 深度で行った。試料採取日を表 4-15 に、採取状況写真を写真 4-15 に、細根縮分、測定状況写真を写真 4-16 に示す。

採取した試料は、まず、「4.7. 土壌等の放射性物質濃度の測定（スクレーパープレートによる深度別土壌調査）」の測定用の未分別試料「土+細根」として 5 章に記載した方法により核種測定を行った後に、細根調査用試料とした。なお、土壌深度 0～1 cm、1～2 cm については、「土+根」測定後に混合して細根調査用の 1 試料とした。細根分別する試料はバット等に広げ、ピンセットで土塊を崩しながら「粗根（直径 φ 2 mm～20mm の根）」、「細根（直径 φ 2 mm 未満の根）」を分別した。分別した根には土が付着しているため、蒸留水に浸し、超音波ホモジナイザー（BRANSON 250-Advanced）を用いて複数回洗浄を行い、水の濁りが出なくなった後に、105℃で乾燥し、乾重量を測定した。

なお、層厚 5 cm の深度については、細根分別作業量が膨大となり、事業期間内に終わらない可能性があったため、比較試験を行い、検討委員会です承を得た上で、試料を 1/4 に均等案分し（縮分）して細根分別を行うこととした。縮分を行う試料については、「粗根（直径 φ 2 mm～20mm の根）」、「長い細根（直径 φ 2 mm 以下、長さ 1 mm 以上の根）」を分別後、よく攪拌し、重量で 1/4 に均等に案分（縮分）し、縮分した 1/4 の試料について、「短い細根（直径 φ 2 mm 未満、長さ 1 mm 未満）の根」、「土」の分別を行った。「粗根」、「細根」、「長い細根」、「短い細根」と「土」に分別した試料は、それぞれ後段の「調査・分析方法」に記載した方法により核種測定を行った。令和 3（2021）年度事業の細根採取・分別のイメージを図 4-28 に、本年度事業の細根分別のイメージを図 4-29 に、測定フローを図 4-30 に示す。

層厚 5 cm 採取試料の細根分別作業は、1 深度当たり 2 日かかっていたが、縮分を実施することにより、半日から 1 日での仕分けが可能となり、縮分対象となった 54 検体で合計 27 日以上の日数削減を行うことができた。

また、放射性物質の存在量は、水平面の 1m²当たりの放射性セシウム量（Bq/m²）で評価を行うことにより、他の森林や平地の調査結果と比較することが可能となるが、本事業地においては傾斜地となっており、水平面での評価に比べて過小となるため、水平面に投影する傾斜補正を実施した。傾斜補正のイメージを図 4-31 に示す。

ここで、日本のスギ林における細根の年間生産量を $0.157\text{kg/m}^2/\text{year}^9$ として、年当たりの細根により移動する放射性セシウム (Cs-137) 現存量の推計を行った。

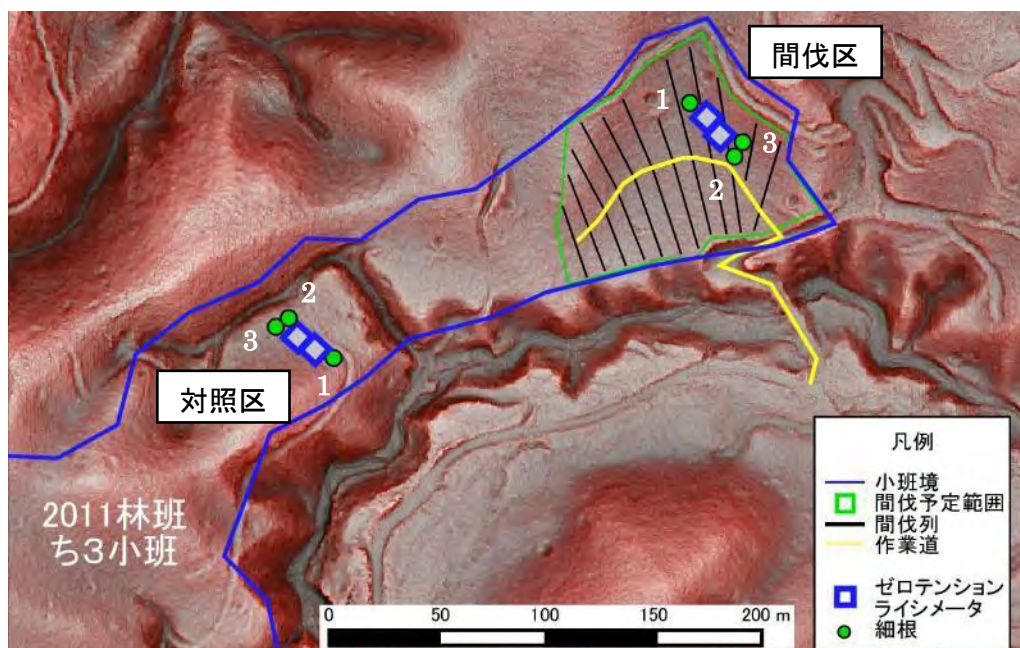


図 4-24 冬住事業地 細根採取位置

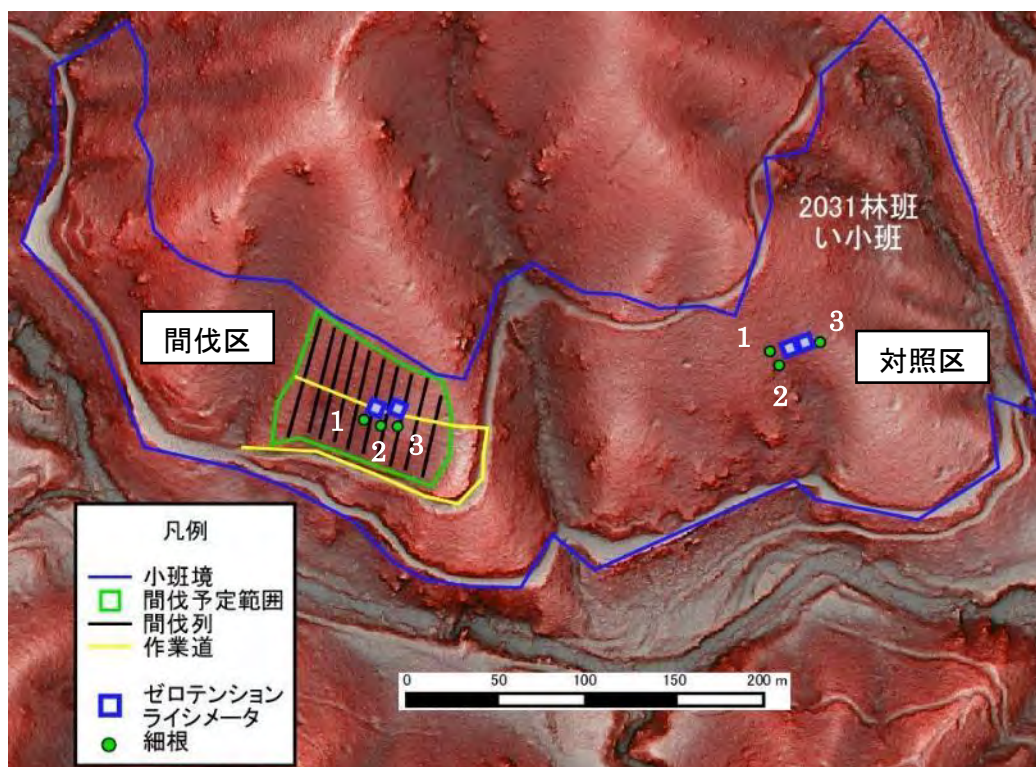


図 4-25 高倉事業地 細根採取位置

⁹ Kyotaro Noguchi et al (2007) : Biomass and production of fine roots in Japanese forests, J For Res (2007) 12:83–95, 2007.

(DATA: DOI 10.1007/s10310-006-0262-3)

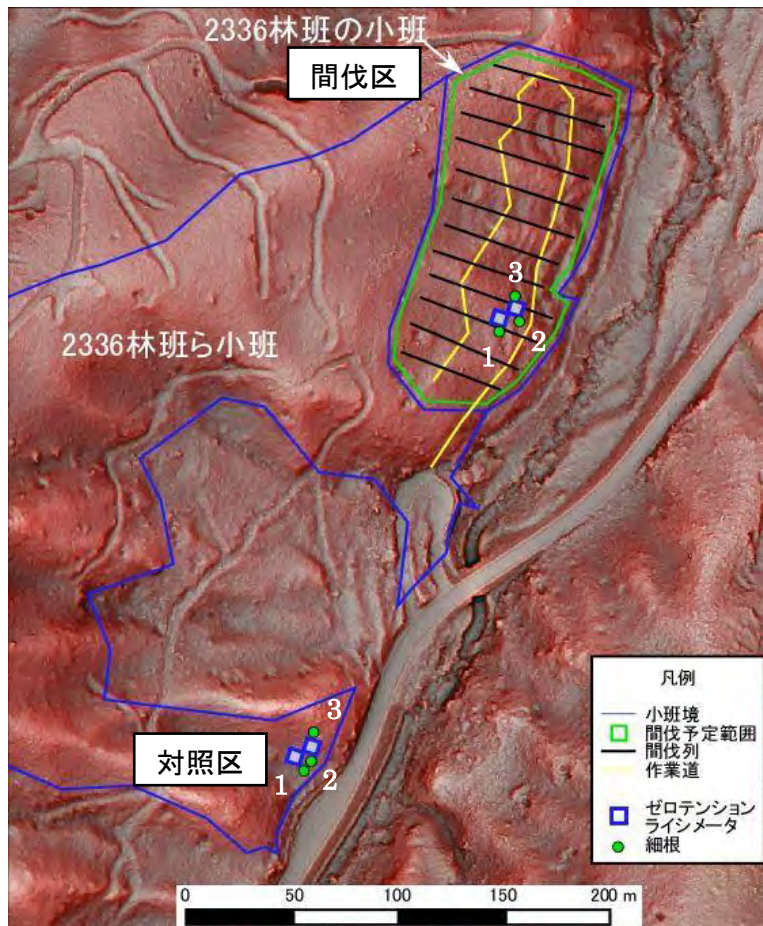


図 4-26 飯樋事業地 細根採取位置

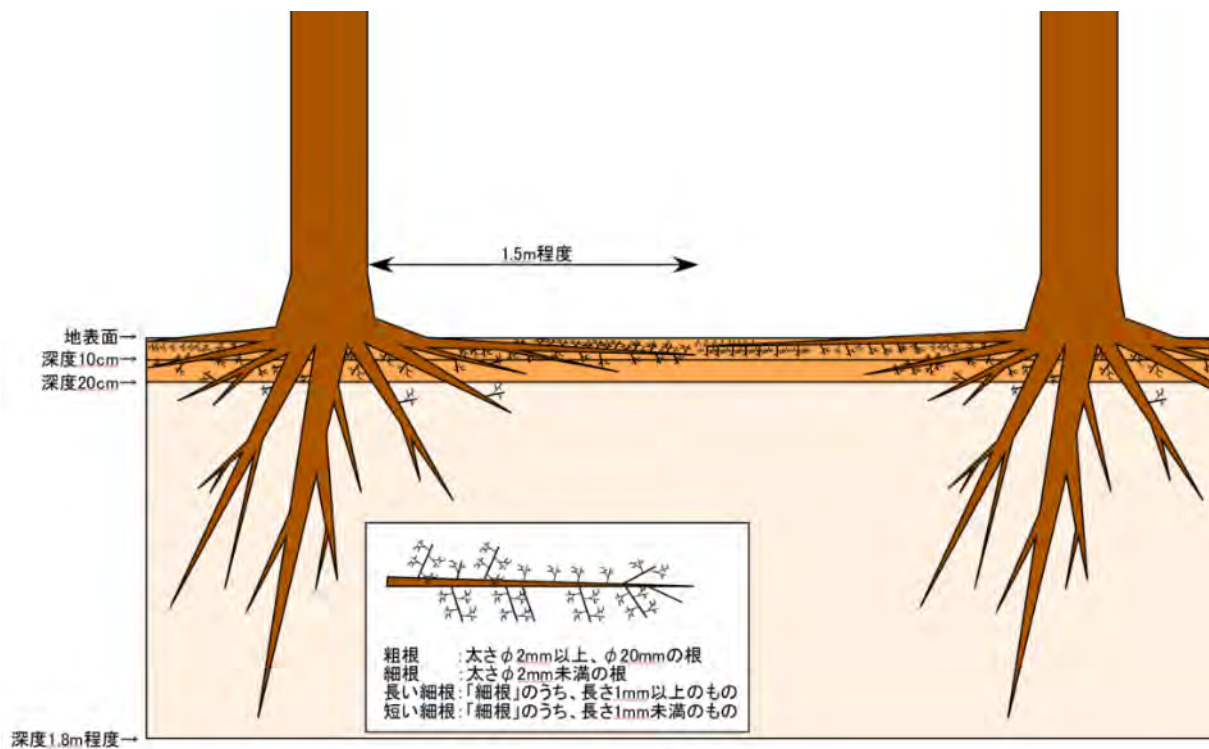


図 4-27 スギ林における細根分布イメージ

表 4-15 各作業区の細根試料採取日

試験地	作業区	地点	令和3(2021)年	令和4(2022)年
冬住 事業地	間伐区 (施業前)	1	9月14日	7月21日
		2	9月14日	7月11日
		3	9月15日	7月11日
	対照区	1	9月15日	7月21日
		2	9月15日	7月20日
		3	9月15日	7月20日
高倉 事業地	間伐区 (施業前)	1	9月29日	7月5日
		2	9月28日	7月5日
		3	9月28日	7月29日
	対照区	1	9月22日	7月12日
		2	9月22日	7月12日
		3	9月28日	7月25日
飯樋 事業地	間伐区 (施業前)	1	9月17日	7月14日
		2	9月17日	7月14日
		3	9月17日	7月1日
	対照区	1	9月17日	7月28日
		2	9月21日	7月4日
		3	9月21日	7月22日

令和3(2021)年度 細根採取・分別イメージ

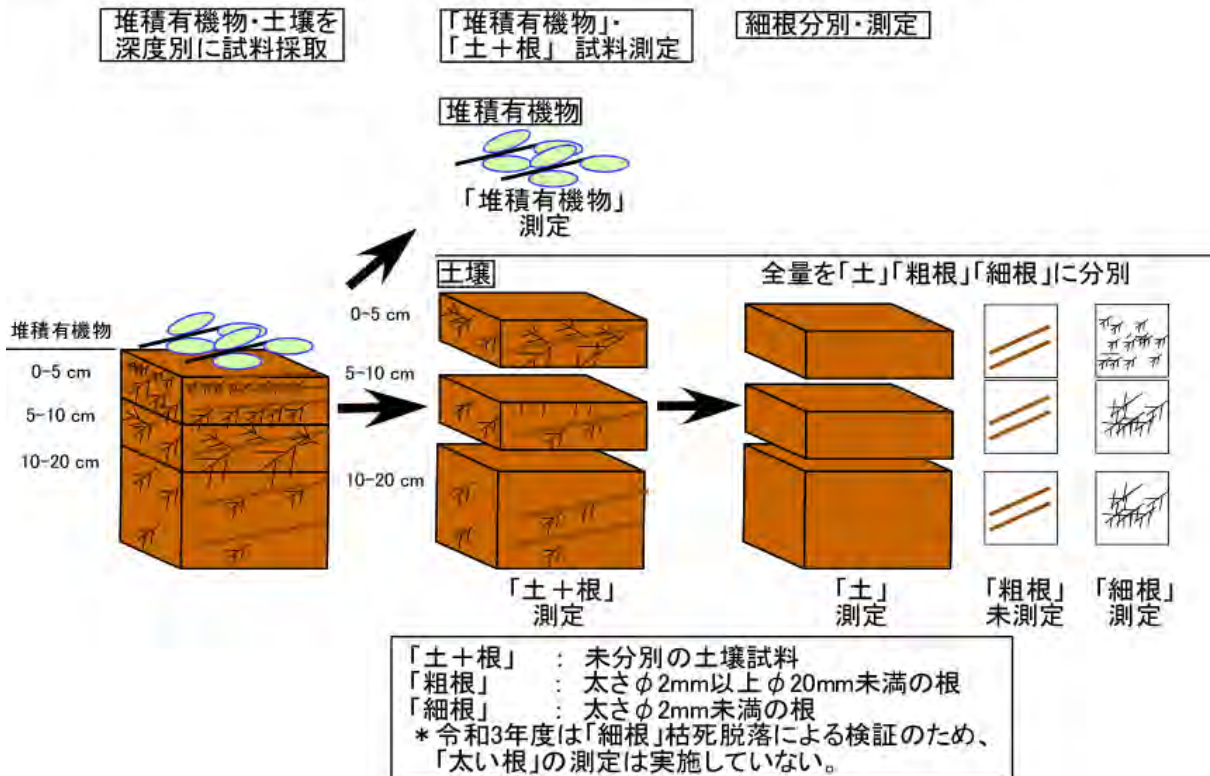


図 4-28 令和3(2021)年度実施 細根採取・試料分別イメージ

本年度実施 細根採取・分別イメージ

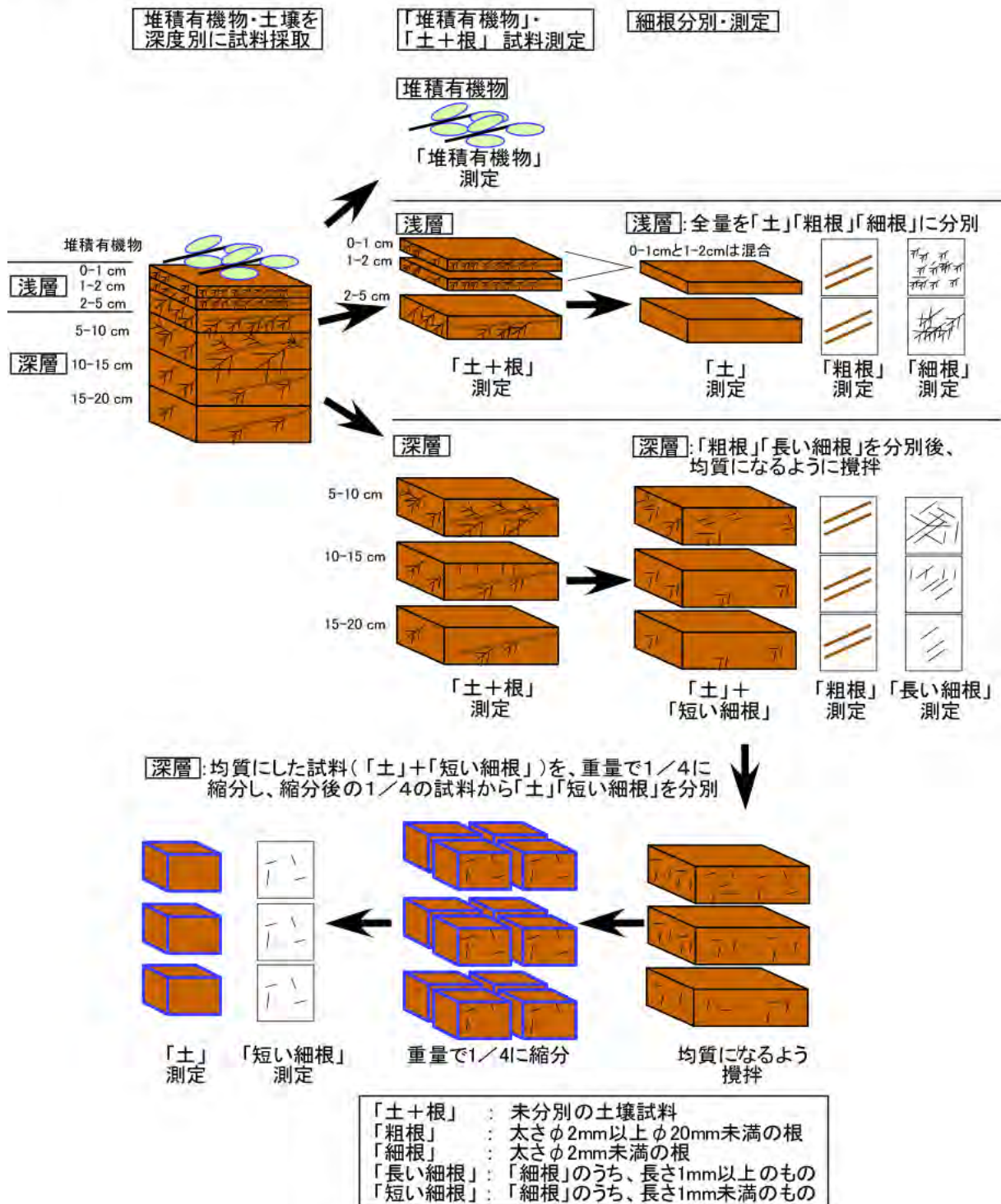


図 4-29 本年度実施 細根採取・試料分別イメージ

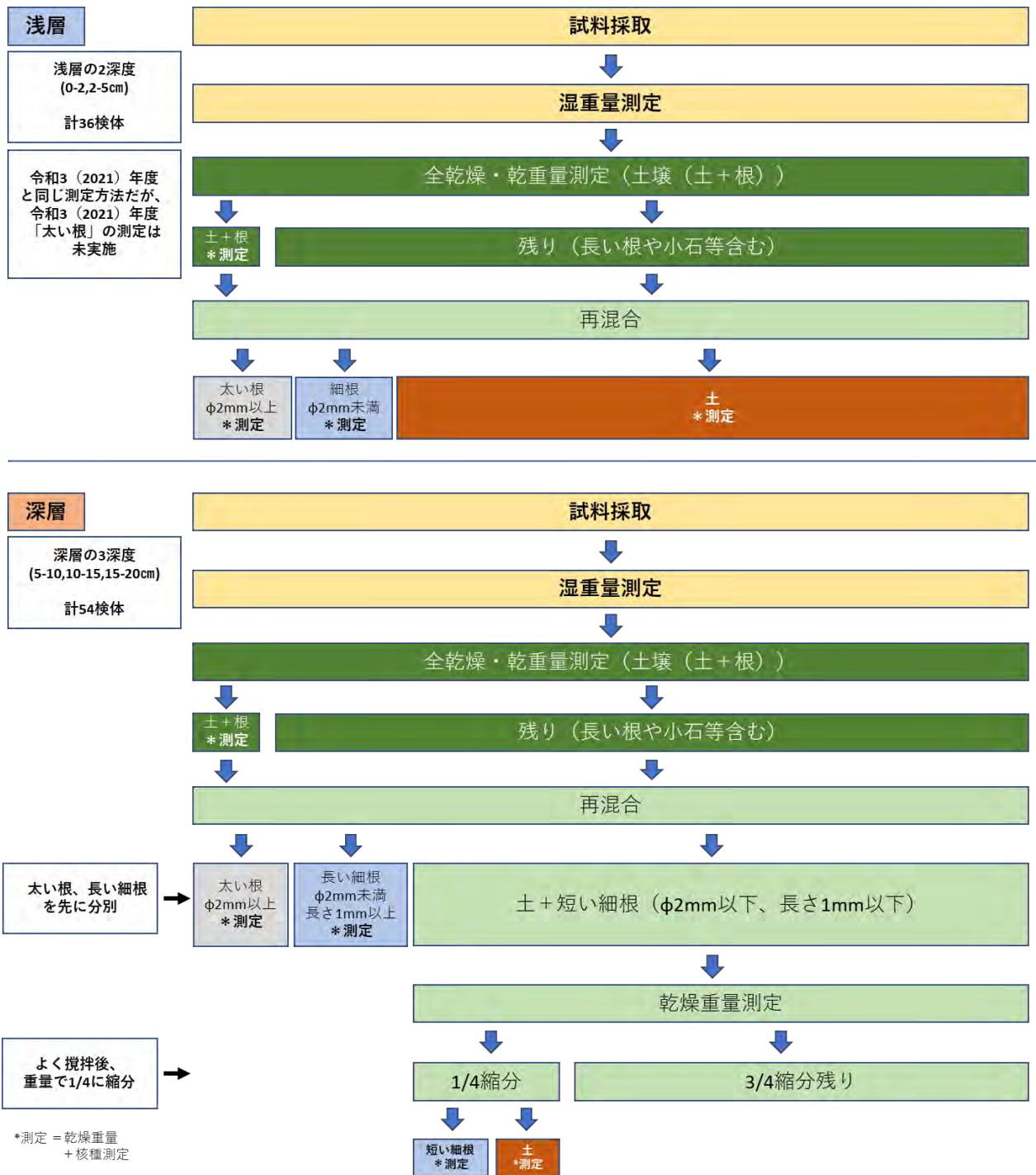
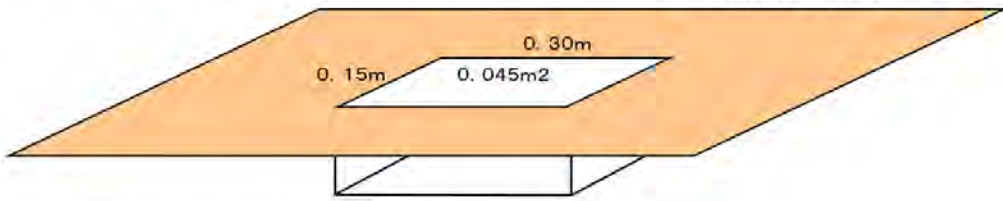


図 4-30 細根分別・測定フロー

①平地におけるスクレーパープレート面積の現存量

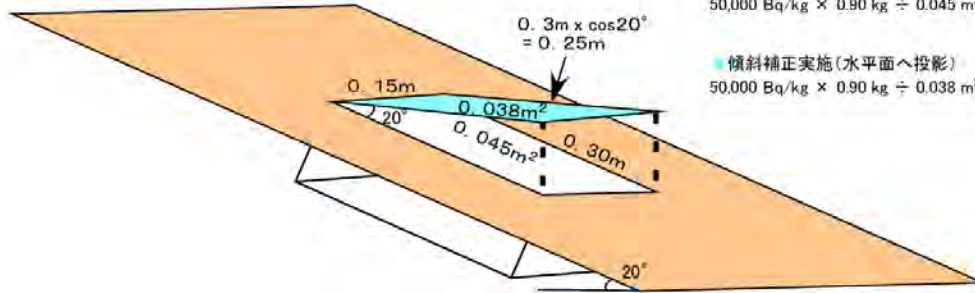
□水平面
 $50,000 \text{ Bq/kg} \times 0.90 \text{ kg} \div 0.045 \text{ m}^2 = 1,000,000 \text{ Bq/m}^2$
 $= 1,000 \text{ kBq/m}^2$



②傾斜20°の斜面におけるスクレーパープレート面積の現存量(傾斜補正による評価)

□傾斜補正未実施(傾斜20°の斜面)
 $50,000 \text{ Bq/kg} \times 0.90 \text{ kg} \div 0.045 \text{ m}^2 = 1,000,000 \text{ Bq/m}^2$
 $= 1,000 \text{ kBq/m}^2$

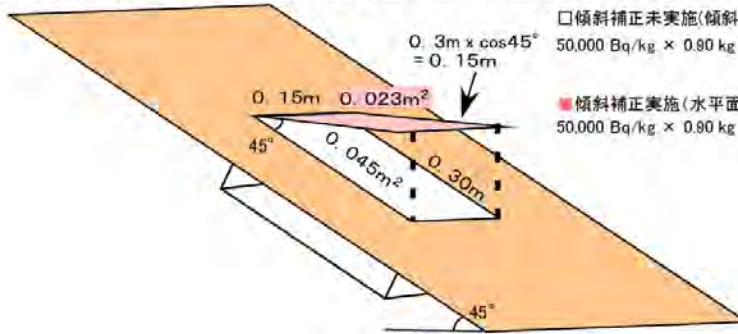
■傾斜補正実施(水平面へ投影)
 $50,000 \text{ Bq/kg} \times 0.90 \text{ kg} \div 0.038 \text{ m}^2 = 1,184,210 \text{ Bq/m}^2$
 $= 1,184 \text{ kBq/m}^2$



③傾斜45°の斜面におけるスクレーパープレート面積の現存量(傾斜補正による評価)

□傾斜補正未実施(傾斜45°の斜面)
 $50,000 \text{ Bq/kg} \times 0.90 \text{ kg} \div 0.045 \text{ m}^2 = 1,000,000 \text{ Bq/m}^2$
 $= 1,000 \text{ kBq/m}^2$

■傾斜補正実施(水平面へ投影)
 $50,000 \text{ Bq/kg} \times 0.90 \text{ kg} \div 0.023 \text{ m}^2 = 1,956,521 \text{ Bq/m}^2$
 $= 1,956 \text{ kBq/m}^2$



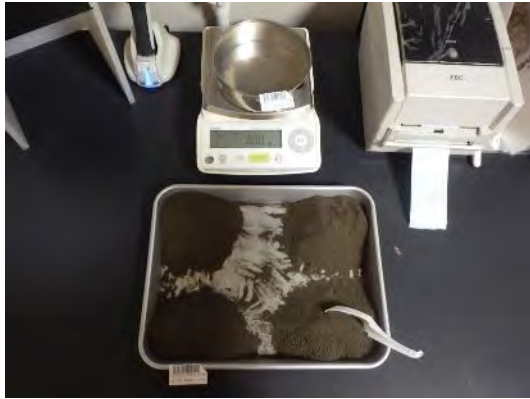
①平地: 1,000 kBq/m²、②傾斜20°: 1,184 kBq/m²、③傾斜45°: 1,956 kBq/m²
 (濃度50,000 Bq/kg、乾燥後試料重量0.90 kgの場合の比較)

傾斜角度が異なる場合、他地点と条件が異なるため、比較が行えない。
 水平面に投影し、水平面でのm²当たりの放射性セシウム量とすることで、他地点との比較を行う。

図 4-31 スクレーパープレート試料採取における傾斜補正イメージ



写真 4-15 細根試料採取状況



縮分状況



細根洗浄状況



粗根



長い細根



短い細根

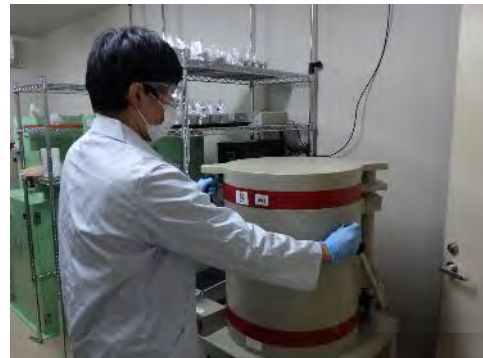


写真 4-16 細根縮分、分別、測定状況

(2) 試験結果及び考察

1) 土壌・細根に含まれる放射性セシウム (Cs-137) 濃度等

堆積有機物、土壌、細根の乾燥重量と、各層における細根の割合を表 4-16 に示す。いずれの地点においても、「短い細根」より「長い細根」の乾燥重量が多く、おおむね「粗根」より、「細根」の乾燥重量が多いことが確認できた。また、各深度における「土+根」乾燥重量に対する「細根」の割合は、0.06~2.7%であり、0~2cm が最も高く、下層の方が低くなる傾向が確認できた。

表 4-16 試料乾燥重量 (3 地点の合計値)

事業地	作業区	深度	令和3(2021)年					深度	令和4(2022)年								
			堆積有機物 (g)	土+根 (g)	土 (g)	細根 (g)	細根の割合 (%)		堆積有機物 (g)	土+根 (g)	土 (g)	粗根 (g)	細根 (g)	長い細根 (g)	短い細根 (g)	細根の割合 (%)	
冬住事業地	間伐区 (施業前)	堆積	390	-	-	-	-	堆積	460	-	-	-	-	-	-	-	-
		0-5cm	-	2,140	2,100	37	1.7%	0-2cm	-	905	897	1.7	6.8	-	-	-	0.75%
		2-5cm	-	-	-	-	-	2-5cm	-	1,640	1,630	2.8	7.8	-	-	-	0.48%
		5-10cm	-	3,840	3,820	16	0.4%	5-10cm	-	3,090	3,080	5.0	8.7	6.2	2.6	0.28%	
		10-20cm	-	7,550	7,540	9.3	0.1%	10-15cm	-	3,990	3,970	6.3	8.0	5.3	2.7	0.20%	
	対照区	15-20cm	-	-	-	-	-	15-20cm	-	4,040	4,030	1.2	3.3	2.4	0.92	0.08%	
		堆積	410	-	-	-	-	堆積	250	-	-	-	-	-	-	-	-
		0-5cm	-	1,180	1,140	31	2.6%	0-2cm	-	230	220	3.8	6.1	-	-	-	2.7%
		2-5cm	-	-	-	-	-	2-5cm	-	833	821	1.5	11	-	-	-	1.3%
		5-10cm	-	2,570	2,540	25	1.0%	5-10cm	-	2,110	2,090	3.4	15	11	4.0	0.71%	
10-20cm	-	6,310	6,300	16	0.3%	10-15cm	-	2,350	2,340	2.9	10	6.8	3.4	0.43%			
15-20cm	-	-	-	-	-	15-20cm	-	2,430	2,420	1.0	4.2	2.4	1.8	0.17%			
高倉事業地	間伐区 (施業前)	堆積	370	-	-	-	-	堆積	330	-	-	-	-	-	-	-	-
		0-5cm	-	2,460	2,400	56	2.3%	0-2cm	-	592	582	0.9	8.8	-	-	-	1.5%
		2-5cm	-	-	-	-	-	2-5cm	-	1,970	1,950	3.7	18	-	-	-	0.91%
		5-10cm	-	3,470	3,430	45	1.3%	5-10cm	-	4,130	4,100	12	27	17	9.9	0.65%	
		10-20cm	-	9,030	8,970	53	0.6%	10-15cm	-	3,640	3,610	23	13	7.5	5.5	0.36%	
	対照区	15-20cm	-	-	-	-	-	15-20cm	-	4,180	4,160	8.5	11	6.2	4.5	0.26%	
		堆積	620	-	-	-	-	堆積	250	-	-	-	-	-	-	-	-
		0-5cm	-	2,380	2,310	69	2.9%	0-2cm	-	893	879	5.2	8.9	-	-	-	1.0%
		2-5cm	-	-	-	-	-	2-5cm	-	1,820	1,810	2.1	7.7	-	-	-	0.42%
		5-10cm	-	4,280	4,260	22	0.5%	5-10cm	-	3,770	3,760	3.2	9.3	4.8	4.6	0.25%	
10-20cm	-	12,400	12,300	19	0.2%	10-15cm	-	4,960	4,950	4.1	4.2	2.6	1.6	0.08%			
15-20cm	-	-	-	-	-	15-20cm	-	4,750	4,750	1.2	2.8	2.0	0.72	0.06%			
飯桶事業地	間伐区 (施業前)	堆積	300	-	-	-	-	堆積	280	-	-	-	-	-	-	-	-
		0-5cm	-	2,260	2,230	25	1.1%	0-2cm	-	640	631	0.7	8.0	-	-	-	1.3%
		2-5cm	-	-	-	-	-	2-5cm	-	1,330	1,320	5.4	6.3	-	-	-	0.47%
		5-10cm	-	3,560	3,550	11	0.3%	5-10cm	-	3,100	3,090	6.2	4.0	2.9	1.1	0.13%	
		10-20cm	-	7,700	7,690	9.9	0.1%	10-15cm	-	3,340	3,330	6.6	1.5	0.6	0.92	0.045%	
	対照区	15-20cm	-	-	-	-	-	15-20cm	-	3,380	3,380	2.0	1.1	0.8	0.32	0.033%	
		堆積	300	-	-	-	-	堆積	350	-	-	-	-	-	-	-	-
		0-5cm	-	1,840	1,760	66	3.6%	0-2cm	-	699	681	4.5	14	-	-	-	2.0%
		2-5cm	-	-	-	-	-	2-5cm	-	1,980	1,950	12	14	-	-	-	0.71%
		5-10cm	-	4,100	4,080	42	1.0%	5-10cm	-	3,850	3,830	9.0	7.6	4.1	3.4	0.20%	
10-20cm	-	10,900	10,900	21	0.2%	10-15cm	-	4,190	4,190	1.0	4.2	2.8	1.4	0.10%			
15-20cm	-	-	-	-	-	15-20cm	-	4,940	4,930	3.8	3.7	2.1	1.6	0.07%			

「土」は、根の洗浄時に流出するため、重量の測定が正確に行えない。そのため、「土+根」から「土」、「粗根」および「細根」を除いた重量で計算している。

本表では数値を丸めているため、合計は一致しない。

「短い細根」は1/4に縮分した試料から分別しているため、重量を測定値から4倍にしている。

令和4(2022)年の5cm以深の「細根」は、「長い細根」、「短い細根」重量の合計値を示す。

放射性セシウム (Cs-137) の濃度を表 4-17 に、本事業の放射性セシウム濃度測定結果を図 4-32 に示す。放射性セシウム (Cs-137) 濃度は、いずれの事業地においても、細根よりも、積有機物や土壌のほうがおおむね高い傾向が見られた。また、堆積有機物及び土壌に含まれる放射性セシウム (Cs-137) の濃度は、南相馬の2事業地 (冬住、高倉) の方が飯桶事業地よりも高かった。また、冬住事業地間伐区 15-20cm、同対照区 15-20cm、高倉事業地

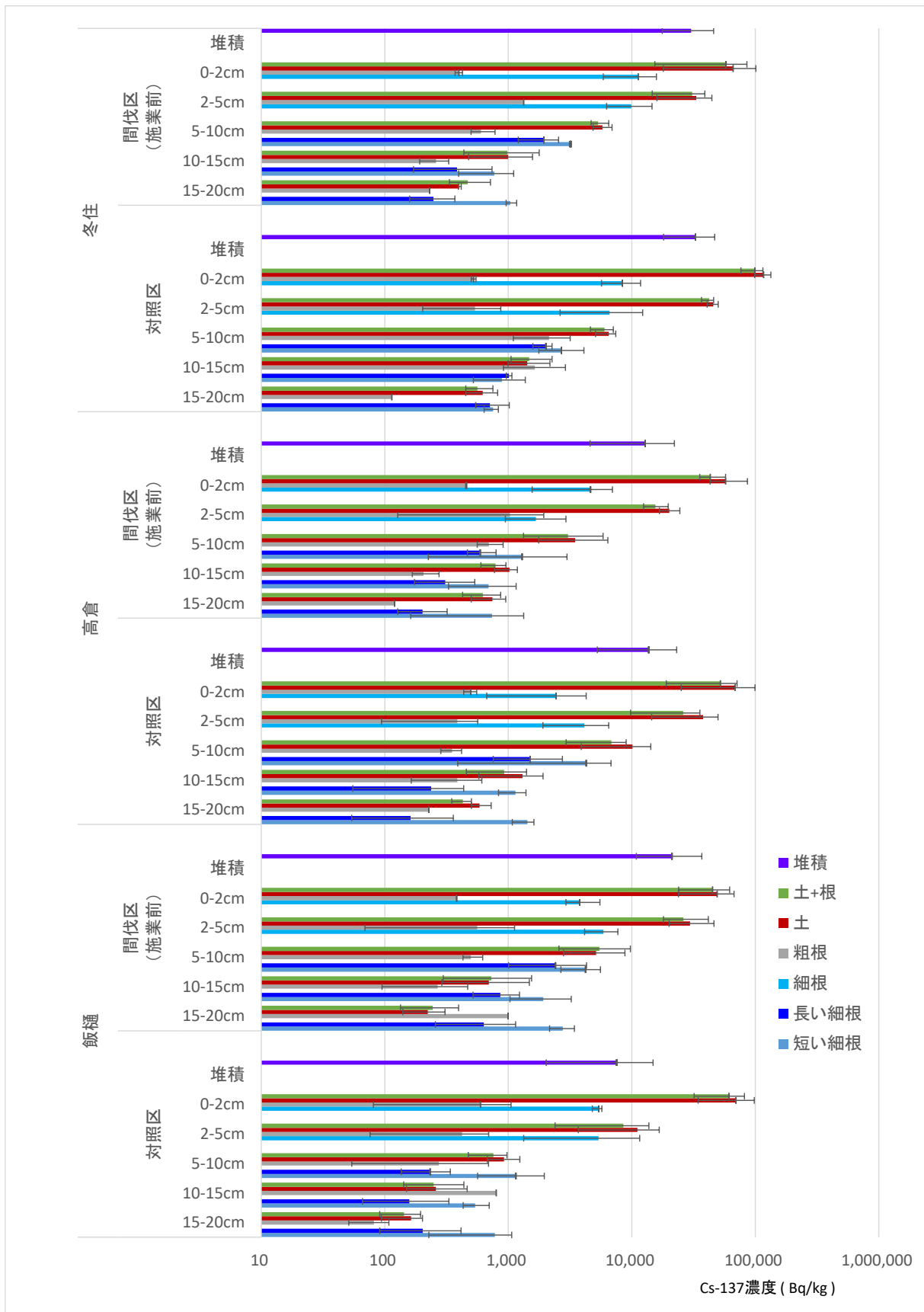
間伐区 15-20cm、同対照区 10-15cm,15-20cm、飯樋事業地間伐区 10-15cm,15-20cm、同対照区 10-15cm,15-20cm の各深度においては、土壌よりも細根の放射性セシウム (Cs-137) 濃度のほうが高かった。これらの深度では、細根の成長と、その後の枯死・脱落が、土壌中の放射性セシウムの下方移動に寄与していた可能性がある。ただし、細根に含まれる放射性セシウム (Cs-137) 現存量 (後述) は、12~1,500 Bq/m²程度であり、堆積有機物 (19,000~100,000 Bq/m²) や土壌 (15,000~1,060,000 Bq/m²) と比較すると極めて小さな値であった。また、本事業では、縮分時に、「長い細根 (太さφ 2 mm 未満、長さ 1 mm 以上)」、「短い細根 (太さφ 2 mm 未満、長さ 1 mm 未満) の測定を行っているが、18 試料中 17 試料 (全体の 94%) の試料で、「短い細根」の放射性セシウム (Cs-137) 濃度が高かったことが確認された。「粗根」については、18 試料中 17 試料 (全体の 97%) が「細根」よりも濃度が低く、「粗根」が「土」よりも濃度が高い地点は 3 試料 (冬住事業地対照区 10-15cm、飯樋事業地間伐区 15-20cm、同対照区 15-20cm) で確認された。

表 4-17 細根等に含まれる放射性セシウム (Cs-137) 濃度 (3 地点の平均値)

(単位: Bq/Kg)

事業地	作業区	層位 (深度)	令和3(2021)年				層位 (深度)	令和4(2022)年						
			堆積 有機物	土+根	土	細根		堆積 有機物	土+根	土	粗根	細根	長い 細根	短い 細根
冬住 事業地	間伐区 (施業前)	堆積	47,000	-	-	-	堆積	30,000	-	-	-	-	-	-
		0-5cm	-	42,000	49,000	21,000	0-2cm	-	58,000	66,000	400	11,000	-	-
		2-5cm	-	-	-	-	2-5cm	-	31,000	33,000	1,300	9,900	-	-
		5-10cm	-	2,500	2,800	1,200	5-10cm	-	5,300	5,800	600	2,900	1,900	3,200
		10-20cm	-	370	390	590	10-15cm	-	980	1,000	260	680	390	770
	対照区	堆積	56,000	-	-	-	堆積	33,000	-	-	-	-	-	-
		0-5cm	-	46,000	41,000	12,000	0-2cm	-	99,000	120,000	520	8,400	-	-
		2-5cm	-	-	-	-	2-5cm	-	42,000	46,000	540	6,600	-	-
		5-10cm	-	5,000	5,000	3,300	5-10cm	-	6,000	6,500	2,100	2,500	2,000	2,700
		10-20cm	-	800	840	2,200	10-15cm	-	1,500	1,400	1,600	900	1,000	890
高倉 事業地	間伐区 (施業前)	堆積	54,000	-	-	-	堆積	13,000	-	-	-	-	-	-
		0-5cm	-	30,000	23,000	11,000	0-2cm	-	43,000	58,000	460	4,600	-	-
		2-5cm	-	-	-	-	2-5cm	-	16,000	20,000	1,000	1,700	-	-
		5-10cm	-	2,600	2,300	820	5-10cm	-	3,100	3,500	700	1,200	590	1,300
		10-20cm	-	650	590	540	10-15cm	-	790	1,000	210	630	310	690
	対照区	堆積	39,000	-	-	-	堆積	14,000	-	-	-	-	-	-
		0-5cm	-	43,000	29,000	20,000	0-2cm	-	52,000	69,000	500	2,400	-	-
		2-5cm	-	-	-	-	2-5cm	-	26,000	38,000	390	4,100	-	-
		5-10cm	-	6,800	4,500	2,700	5-10cm	-	6,800	10,000	350	3,400	1,500	4,300
		10-20cm	-	730	520	510	10-15cm	-	930	1,300	390	1,000	240	1,100
飯樋 事業地	間伐区 (施業前)	堆積	20,000	-	-	-	堆積	21,000	-	-	-	-	-	-
		0-5cm	-	28,000	30,000	3,500	0-2cm	-	45,000	49,000	380	3,800	-	-
		2-5cm	-	-	-	-	2-5cm	-	26,000	30,000	560	5,900	-	-
		5-10cm	-	5,500	6,800	1,900	5-10cm	-	5,500	5,100	500	3,700	2,400	4,200
		10-20cm	-	390	400	390	10-15cm	-	730	700	270	1,400	860	1,900
	対照区	堆積	26,000	-	-	-	堆積	7,600	-	-	-	-	-	-
		0-5cm	-	33,000	30,000	5,100	0-2cm	-	61,000	70,000	600	5,400	-	-
		2-5cm	-	-	-	-	2-5cm	-	8,500	11,000	420	5,400	-	-
		5-10cm	-	1,900	1,600	700	5-10cm	-	760	920	270	810	230	1,200
		10-20cm	-	160	150	350	10-15cm	-	250	260	800	410	160	540
					15-20cm	-	140	160	82	650	200	780		

令和4(2022)年の5cm以深の「細根」は、「長い細根」、「短い細根」の濃度を重量比で案分し、計算した。



誤差線は、最大値及び最小値を示す。

図 4-32 堆積有機物、土壌、及び細根に含まれる放射性セシウム (Cs-137) 濃度の層位・土壌深度ごとの比較 (横軸対数目盛) 令和 4 (2022) 年測定結果

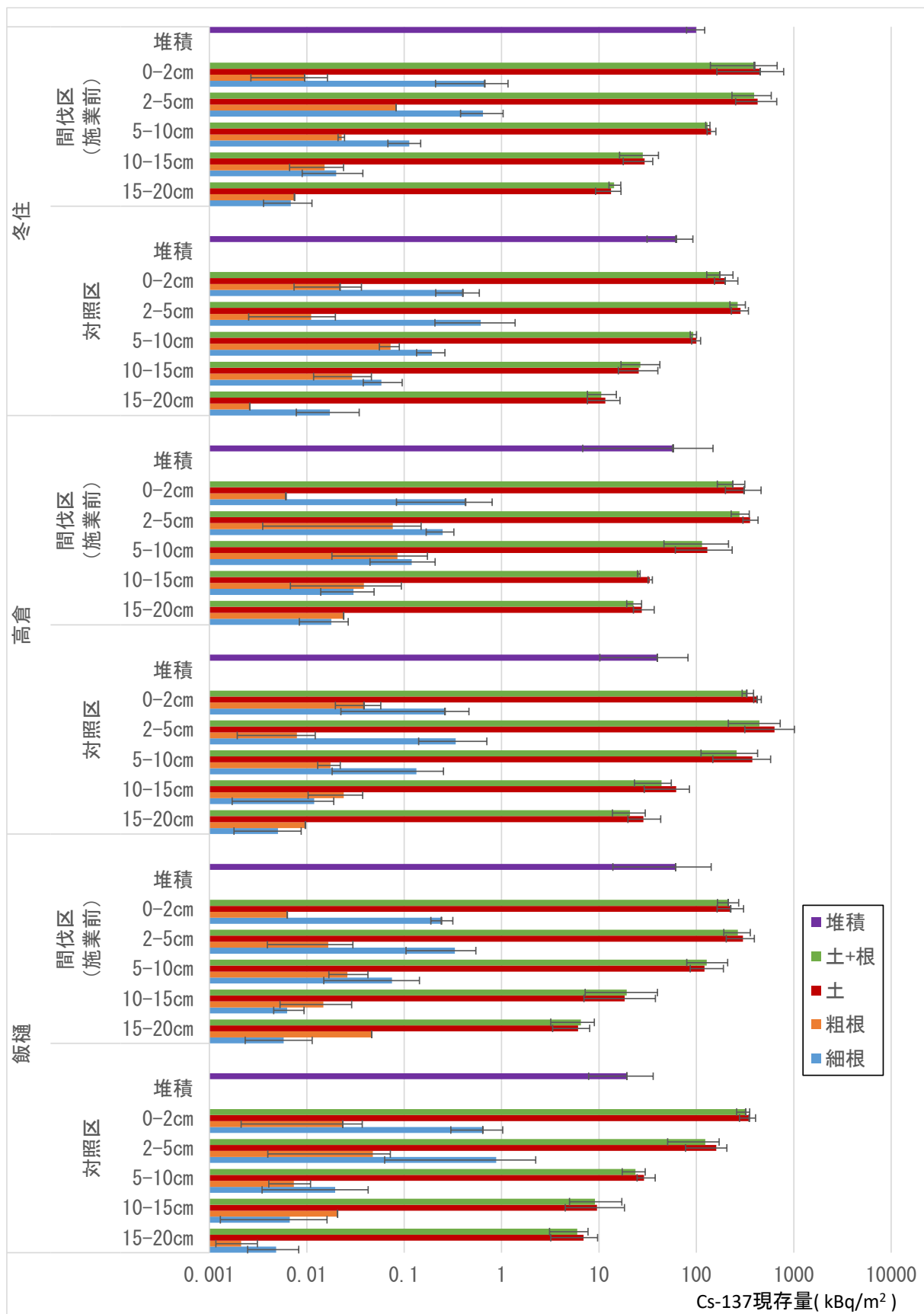
本事業の堆積有機物、土壌、細根に含まれる放射性セシウム（Cs-137）現存量を表 4-18、図 4-33 に示す。いずれの地点においても、土の 0～2 cm、2～5 cm の現存量が高く、下層ほど低下する傾向が確認された。

表 4-18 細根等に含まれる放射性セシウム（Cs-137）現存量（3 点の平均値）

事業地	作業区	層位 (深度)	令和4(2022)年測定結果 Cs-137現存量 (kBq/m ²)							Cs-137 全深度 現存量
			堆積 有機物	土+根	土	粗根	細根	長い細根	短い細根	
冬住 事業地	間伐区 (施業前)	堆積	100	-	-	-	-	-	-	1,052
		0-2cm	-	390	450	0.0095	0.67	-	-	
		2-5cm	-	390	430	0.082	0.64	-	-	
		5-10cm	-	130	140	0.023	0.11	0.097	0.016	
		10-15cm	-	28	29	0.015	0.020	0.016	0.0038	
	15-20cm	-	14	13	0.0075	0.0069	0.0050	0.0019		
	対照区	堆積	62	-	-	-	-	-	-	633
		0-2cm	-	170	200	0.022	0.40	-	-	
		2-5cm	-	270	280	0.011	0.61	-	-	
		5-10cm	-	93	100	0.072	0.19	0.17	0.021	
		10-15cm	-	27	26	0.029	0.058	0.052	0.0065	
15-20cm	-	11	12	0.0026	0.017	0.015	0.0027			
高倉 事業地	間伐区 (施業前)	堆積	58	-	-	-	-	-	-	737
		0-2cm	-	240	310	0.0061	0.43	-	-	
		2-5cm	-	280	360	0.076	0.25	-	-	
		5-10cm	-	110	130	0.086	0.12	0.088	0.032	
		10-15cm	-	26	33	0.039	0.030	0.023	0.0073	
	15-20cm	-	23	27	0.024	0.018	0.010	0.0076		
	対照区	堆積	40	-	-	-	-	-	-	1,135
		0-2cm	-	330	420	0.039	0.26	-	-	
		2-5cm	-	440	640	0.0079	0.34	-	-	
		5-10cm	-	260	370	0.017	0.13	0.082	0.052	
		10-15cm	-	44	62	0.024	0.012	0.0067	0.0052	
15-20cm	-	21	29	0.0096	0.0051	0.0021	0.0029			
飯樋 事業地	間伐区 (施業前)	堆積	61	-	-	-	-	-	-	697
		0-2cm	-	210	230	0.0063	0.24	-	-	
		2-5cm	-	270	300	0.017	0.33	-	-	
		5-10cm	-	130	120	0.026	0.075	0.066	0.0094	
		10-15cm	-	19	18	0.015	0.0063	0.0039	0.0024	
	15-20cm	-	6.5	6.1	0.047	0.0058	0.0040	0.0018		
	対照区	堆積	19	-	-	-	-	-	-	498
		0-2cm	-	320	350	0.023	0.64	-	-	
		2-5cm	-	120	160	0.048	0.88	-	-	
		5-10cm	-	24	29	0.0074	0.020	0.0084	0.011	
		10-15cm	-	9.1	9.5	0.021	0.0067	0.0049	0.0018	
15-20cm	-	6.0	7.0	0.0021	0.0048	0.0025	0.0023			

全深度現存量は、「堆積有機物」と「土+根」の合計値を示す

5cm以深の「細根」は、「長い細根」、「短い細根」現存量の合計値を示す



誤差線は、最大値及び最小値を示す。

図 4-33 細根等に含まれる放射性セシウム (Cs-137) 現存量 (3 点の平均値、横軸対数目盛)
本事業、令和 4 (2022) 年測定結果

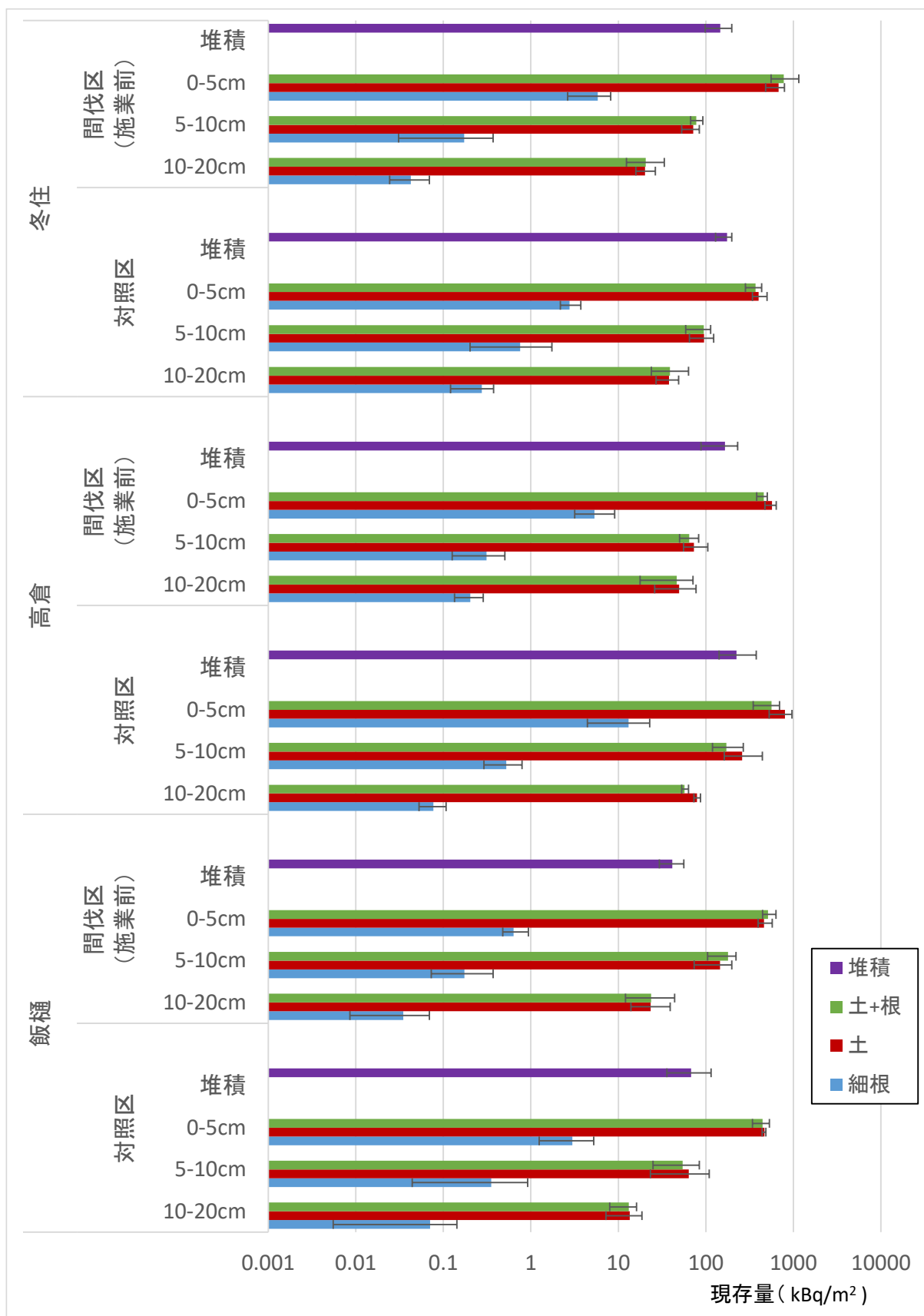
また、令和3年(2021)年事業との比較を行うため、同深度に区分した放射性セシウム(Cs-137)現存量を表4-19に、令和3年(2021)年の測定結果を図4-34に、本事業の測定結果を図4-35に示した。放射性セシウム(Cs-137)現存量は、いずれの点においても、堆積有機物層より土壌0～5cmの方が大きく、深度が深くなるにつれて低下するという令和3(2021)年の調査結果と同様の傾向が見られた。

表4-19 細根等に含まれる放射性セシウム(Cs-137)現存量(3点の平均値)

(単位:kBq/m²)

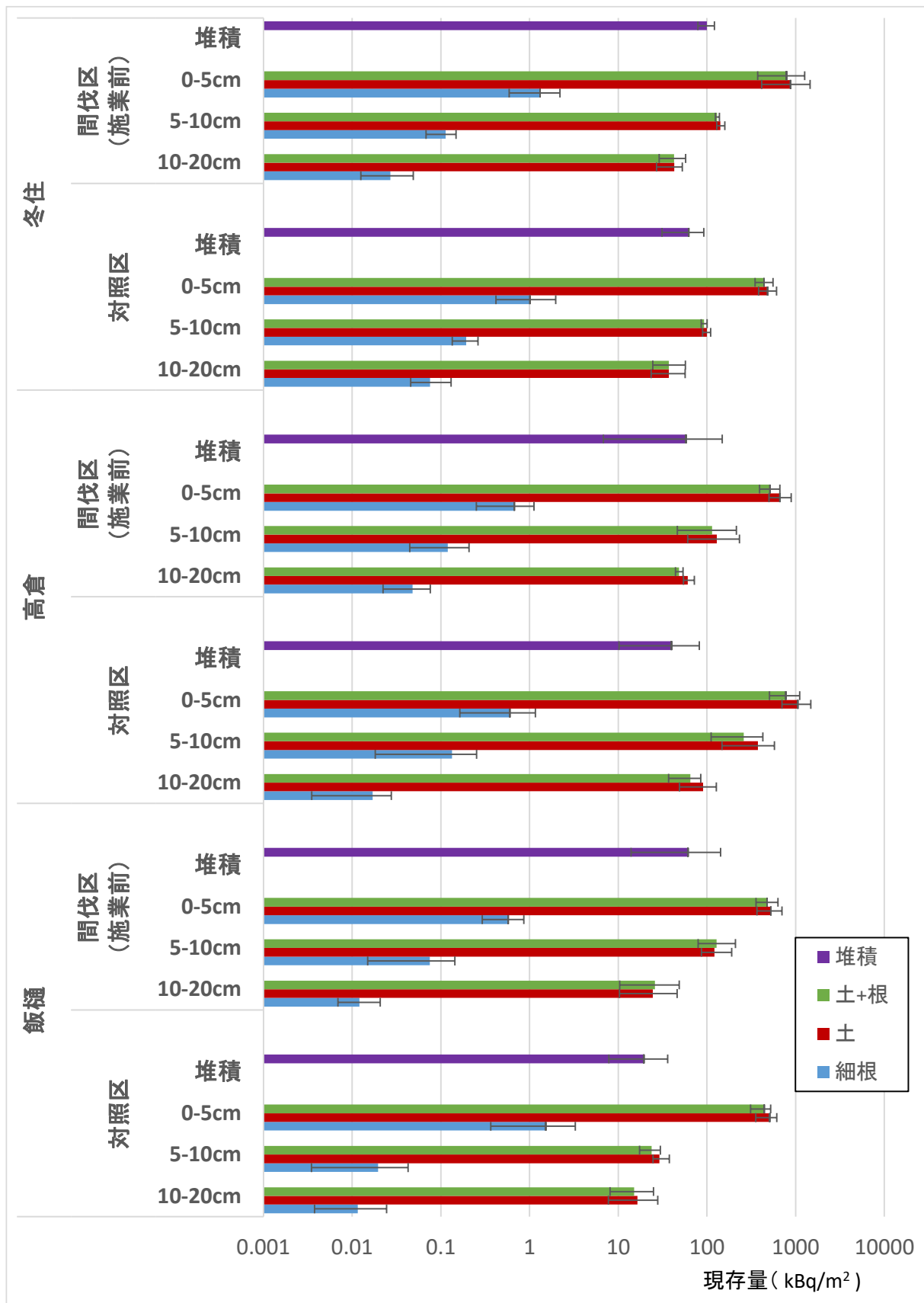
事業地	作業区	層位 (深度)	令和3(2021)年 Cs-137現存量					令和4(2022)年 Cs-137現存量					
			堆積 有機物	土+根	土	細根	Cs-137 全深度 現存量	堆積 有機物	土+根	土	粗根	細根	Cs-137 全深度 現存量
冬住 事業地	間伐区 (施業前)	堆積	150	-	-	-	1,029	100	-	-	-	-	1,052
		0-5cm	-	780	680	5.8		-	780	880	0.092	1.3	
		5-10cm	-	78	72	0.17		-	130	140	0.023	0.11	
		10-20cm	-	21	20	0.043		-	42	42	0.023	0.027	
	対照区	堆積	170	-	-	-	673	62	-	-	-	-	633
		0-2cm	-	370	400	2.8		-	440	480	0.033	1.0	
		2-5cm	-	94	96	0.75		-	93	100	0.072	0.19	
		5-10cm	-	39	38	0.27		-	38	38	0.032	0.075	
高倉 事業地	間伐区 (施業前)	堆積	170	-	-	-	740	58	-	-	-	-	737
		0-2cm	-	460	570	5.3		-	520	670	0.082	0.68	
		2-5cm	-	64.0	73	0.31		-	110	130	0.086	0.12	
		5-10cm	-	46.0	49	0.20		-	49	60	0.063	0.048	
	対照区	堆積	220	-	-	-	1,007	40	-	-	-	-	1,135
		0-2cm	-	560	800	13		-	770	1,060	0.047	0.60	
		2-5cm	-	170	260	0.52		-	260	370	0.017	0.13	
		5-10cm	-	57	79	0.077		-	65	91	0.034	0.017	
飯樋 事業地	間伐区 (施業前)	堆積	41	-	-	-	755	61	-	-	-	-	697
		0-2cm	-	510	460	0.63		-	480	530	0.023	0.57	
		2-5cm	-	180	150	0.17		-	130	120	0.026	0.075	
		5-10cm	-	24	23	0.035		-	26	24	0.062	0.012	
	対照区	堆積	68	-	-	-	585	19	-	-	-	-	498
		0-2cm	-	450	470	3.0		-	440	510	0.071	1.5	
		2-5cm	-	54	64	0.35		-	24	29	0.0074	0.020	
		5-10cm	-	13	14	0.071		-	15	17	0.023	0.012	

Cs-137全深度現存量は、「堆積有機物」と「土+根」の合計値



誤差線は、最大値及び最小値を示す。

図 4-34 堆積有機物、土壌、及び細根に含まれる放射性セシウム (Cs-137) 現存量の層位・土壌深度ごとの比較 (3 点の平均値、横軸対数目盛) 令和 3 (2021) 年測定結果



誤差線は、最大値及び最小値を示す。

図 4-35 堆積有機物、土壌、及び細根に含まれる放射性セシウム (Cs-137) 現存量の層位・土壌深度 (令和3年 (2021) 年と同深度で比較) 本事業、令和4 (2022) 年測定結果

2) 細根による放射性セシウム (Cs-137) 移動量

細根による放射性セシウム (Cs-137) の年間移行量を表 4-20、図 4-36 に、年間下方移行量の割合を図 4-37 に示す。既往の研究では、細根のターンオーバー (1年に成長・枯死を行う回数) の値のばらつきが大きい。そのため、やや過小評価になる可能性があるが、控えめに見積もっても、7月時点の細根量と同量以上の細根成長量があるものと推定されるため、仮にターンオーバーを1とし、年間の細根生産量を、細根の乾燥重量に等しいものと仮定して放射性セシウム (Cs-137) の下方移行量を算定した。ただし、本事業で測定されている単位面積当たりの細根量は、既往研究で報告されているスギ林の年間の細根成長量 (0.157kg/m²) よりも大きいいため、留意が必要である。

放射性セシウム (Cs-137) 濃度と各深度の単位面積・深度当たりの細根乾燥重量を乗ずることにより年間移行量を推計した。年間移行量は、どの作業区においても、0～5cmの深さが高く、5～10cm、10～20cmと深くなるにつれて少なくなる傾向であった。

各地点の Cs-137 全深度の現存量に対する、細根による年間移行量の割合についても0～5cmが高く、5～10cm、10～20cmと深くなるにつれ、少なくなる傾向が確認できた。なお、この割合は、0.020%から0.44%であった。

表 4-20 細根による放射性セシウム (Cs-137) 年間移行量 (3点の平均値)

令和3(2021)年											
事業地	作業区	層位 (深度)	採取 面積 (m ²)	Cs-137 平均濃度 (n=3) (kBq/kg)	乾燥重量 合計 (n=3) (g)	単位面積あ たりの細根 重量 (g/m ²)	単位面積あ たりの 細根重量 (kg/m ²)	細根による Cs-137 下方移行量 (kBq/m ² /年)	Cs-137 全深度 現存量 (kBq/m ²)	全深度現存量に 対する、細根に よるCs-137下方 移行量の割合	
冬住 事業地	間伐区 (施業前)	0-5cm	0.135	20.73	36.97	274	0.27	5.68	1,022	0.56%	
		5-10cm	0.135	1.21	16.19	120	0.12	0.14		0.014%	
		10-20cm	0.135	0.59	9.34	69	0.07	0.04		0.004%	
	対照区	0-5cm	0.135	11.92	30.46	226	0.23	2.69	678	0.40%	
		5-10cm	0.135	3.31	24.80	184	0.18	0.61		0.090%	
		10-20cm	0.135	2.23	15.52	115	0.11	0.26		0.038%	
高倉 事業地	間伐区 (施業前)	0-5cm	0.135	10.73	56.30	417	0.42	4.48	735	0.61%	
		5-10cm	0.135	0.82	44.77	332	0.33	0.27		0.037%	
		10-20cm	0.135	0.54	52.52	389	0.39	0.21		0.029%	
	対照区	0-5cm	0.135	19.64	68.52	508	0.51	9.97	1,015	0.98%	
		5-10cm	0.135	2.69	22.36	166	0.17	0.45		0.044%	
		10-20cm	0.135	0.51	19.26	143	0.14	0.07		0.007%	
飯樋 事業地	間伐区 (施業前)	0-5cm	0.135	3.47	24.89	184	0.18	0.64	758	0.08%	
		5-10cm	0.135	1.90	11.28	84	0.08	0.16		0.021%	
		10-20cm	0.135	0.39	9.92	73	0.07	0.03		0.004%	
	対照区	0-5cm	0.135	5.13	65.62	486	0.49	2.49	581	0.43%	
		5-10cm	0.135	0.70	41.72	309	0.31	0.22		0.037%	
		10-20cm	0.135	0.35	20.55	152	0.15	0.05		0.009%	
令和4(2022)年											
冬住 事業地	間伐区 (施業前)	0-5cm	0.135	21.09	26.80	199	0.20	4.19	1,060	0.40%	
		5-10cm	0.135	2.90	56.60	419	0.42	1.22		0.115%	
		10-20cm	0.135	1.52	53.90	399	0.40	0.61		0.057%	
	対照区	0-5cm	0.135	15.02	16.70	124	0.12	1.86	633	0.29%	
		5-10cm	0.135	2.53	23.00	170	0.17	0.43		0.068%	
		10-20cm	0.135	1.65	13.90	103	0.10	0.17		0.027%	
高倉 事業地	間伐区 (施業前)	0-5cm	0.135	6.31	14.60	108	0.11	0.68	734	0.09%	
		5-10cm	0.135	1.19	16.40	121	0.12	0.14		0.020%	
		10-20cm	0.135	1.17	22.10	164	0.16	0.19		0.026%	
	対照区	0-5cm	0.135	6.56	16.70	124	0.12	0.81	1,137	0.07%	
		5-10cm	0.135	3.43	27.10	201	0.20	0.69		0.061%	
		10-20cm	0.135	2.11	30.20	224	0.22	0.47		0.042%	
飯樋 事業地	間伐区 (施業前)	0-5cm	0.135	9.69	14.40	107	0.11	1.03	693	0.15%	
		5-10cm	0.135	3.69	7.36	55	0.05	0.20		0.029%	
		10-20cm	0.135	2.97	6.37	47	0.05	0.14		0.020%	
	対照区	0-5cm	0.135	10.76	27.50	204	0.20	2.19	502	0.44%	
		5-10cm	0.135	0.81	17.90	133	0.13	0.11		0.021%	
		10-20cm	0.135	1.06	17.20	127	0.13	0.14		0.027%	

単位面積当たりの細根重量を1年間の細根生産量と仮定した。1年間の細根生産量に、Cs-137濃度を乗ずることにより、当該深度の細根によるCs-137下方移行量とした。

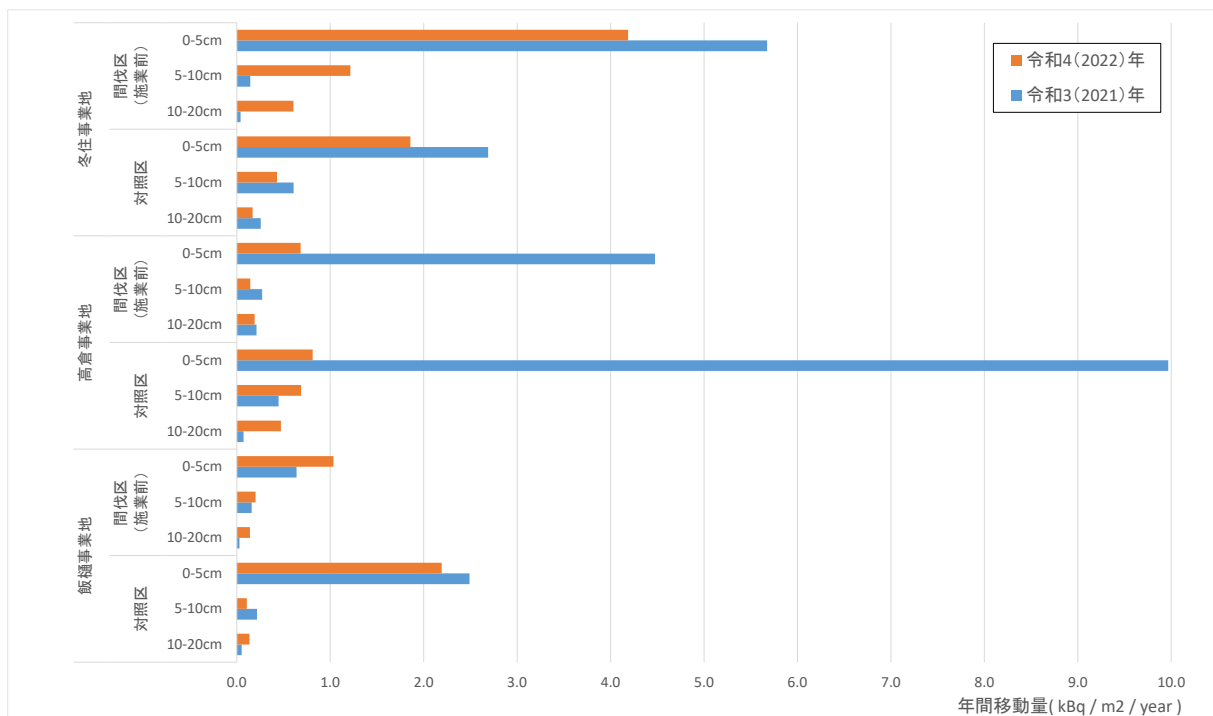


図 4-36 細根による放射性セシウム (Cs-137) 年間移行量 (kBq/m²/year) (3 点の平均値)

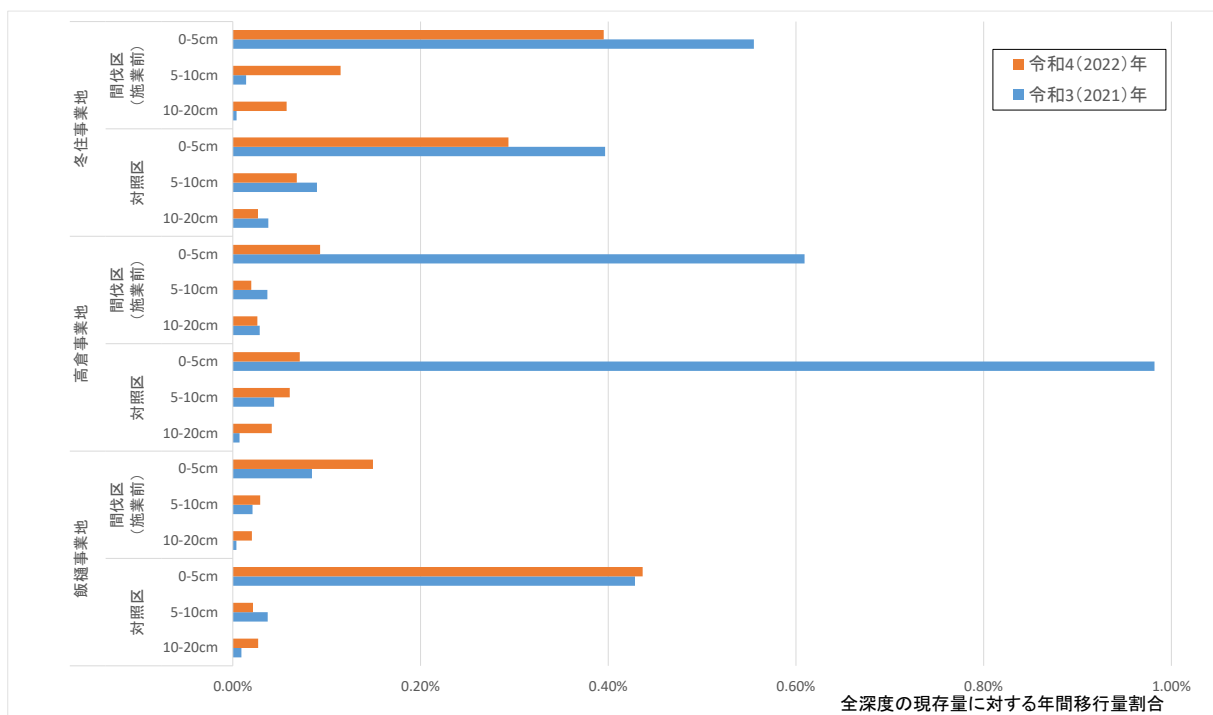


図 4-37 現存量に対する細根による放射性セシウム (Cs-137) 年間下方移行割合 (3 点の平均値)

調査対象林班ごとの細根による放射性セシウム（Cs-137）年間移行量を表 4-21 に示す。飯樋対照区を除き、0～5 cm の深度が最も高く、下層が低下する傾向が見られた。また、年度で比較すると、令和 3（2021）年より令和 4（2022）年のほうが下層で移行量が大きくなっている傾向が確認された。

表 4-21 調査対象林班ごとの細根による放射性セシウム（Cs-137）年間移行量

事業地	作業区	林班	林班面積 (m ²)	層位 (深度)	令和3(2021)年度		令和4(2022)年度	
					細根による 年間下方移行量 (kBq/m ² /年)	林班における 移行量 (kBq/年)	細根による 年間下方移行量 (kBq/m ² /年)	林班における 移行量 (kBq/年)
冬住 事業地	間伐区 (施業前) ・ 対照区	南相馬市 2031林班 い小班	75,000	0-5cm	4.18	310,000	3.02	230,000
				5-10cm	0.38	28,000	0.82	62,000
				10-20cm	0.15	11,000	0.39	29,000
高倉 事業地	間伐区 (施業前) ・ 対照区	南相馬市 2011林班 ち3小班	79,400	0-5cm	7.22	570,000	0.75	59,000
				5-10cm	0.36	28,000	0.42	33,000
				10-20cm	0.14	11,000	0.33	26,000
飯樋 事業地	間伐区 (施業前)	飯舘村 2336林班 の小班	12,400	0-5cm	0.64	7,900	1.03	13,000
				5-10cm	0.16	2,000	0.20	2,500
				10-20cm	0.029	360	0.14	1,700
	対照区	飯舘村 2336林班 ら小班	10,000	0-5cm	2.49	25,000	2.19	22,000
				5-10cm	0.22	2,200	0.11	1,100
				10-20cm	0.053	530	0.14	1,400

冬住および高倉事業地は間伐区と対照区が同一小班であり、施業前であることから、まとめて移行量を計算した。

4.7. 土壌等の放射性物質濃度の測定（スクレーパープレートによる深度別土壌調査）

(1) 試験地と試験方法

本調査は、4.2. に示す3箇所の事業地の間伐区（施業前）及び対照区において試験を実施した。スクレーパープレート調査実施日を表4-22に、各事業地の細根兼土壌試料採取位置を図4-38、図4-39、図4-40に示す。試料採取は図4-18、図4-19、図4-20に示したゼロテンションライシメータ設置位置周辺で、「4.6.細根等による放射性物質移動の把握」と併せて各区3地点、合計18地点でスクレーパープレート（面積15cm×30cm）を用いて、堆積有機物層および土壌深度0～1cm、1～2cm、2～5cm、5～10cm、10～15cm、15～20cmの計7深度で行った。

令和3（2021）年事業では、堆積有機物層および、0～2cm、2～5cm、5～10cm、10～15cm、15～20cm、20～30cmの6層で試料採取を行った。同事業では一部の試料は、下層の土壌を採取する際に上層の土壌がこぼれ落ちて下層土壌試料に混ざるリスクを軽減する目的から、15～20cmや20～30cmの層において円筒缶を用いて採取した。

採取した試料は、後段の「調査・分析方法」に記載した方法により、放射性セシウム濃度等を測定した。

なお、4.6（1）に示した傾斜補正を実施したため、令和3（2021）年度業務報告書で記載されている緩衝深度および濃度、現存量の数値とは一致しない。

表 4-22 スクレーパープレート調査実施日

事業地	施業区	林相	傾斜角	初期沈着量 (kBq/m ²)	令和3(2021)年		令和4(2022)年	
					採取地点数	採取日	採取地点	採取日
冬住 試験地	間伐区	スギ	13～23°	720	2	11月15日	1	7月21日
							2	7月11日
							3	7月11日
	対照区	スギ	13～26°		2	11月19日	1	7月21日
							2	7月20日
							3	7月20日
高倉 試験地	間伐区	スギ	25～33°	990	2	10月7日	1	7月5日
							2	7月5日
							3	7月29日
	対照区	スギ	25～40°		2	10月7日	1	7月12日
							2	7月12日
							3	7月25日
飯樋 試験地	間伐区	スギ	25～33°	900	2	10月8日	1	7月14日
							2	7月14日
							3	7月1日
	対照区	スギ	23～30°		2	10月8日	1	7月28日
							2	7月4日
							3	7月22日

※「初期沈着量」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。）

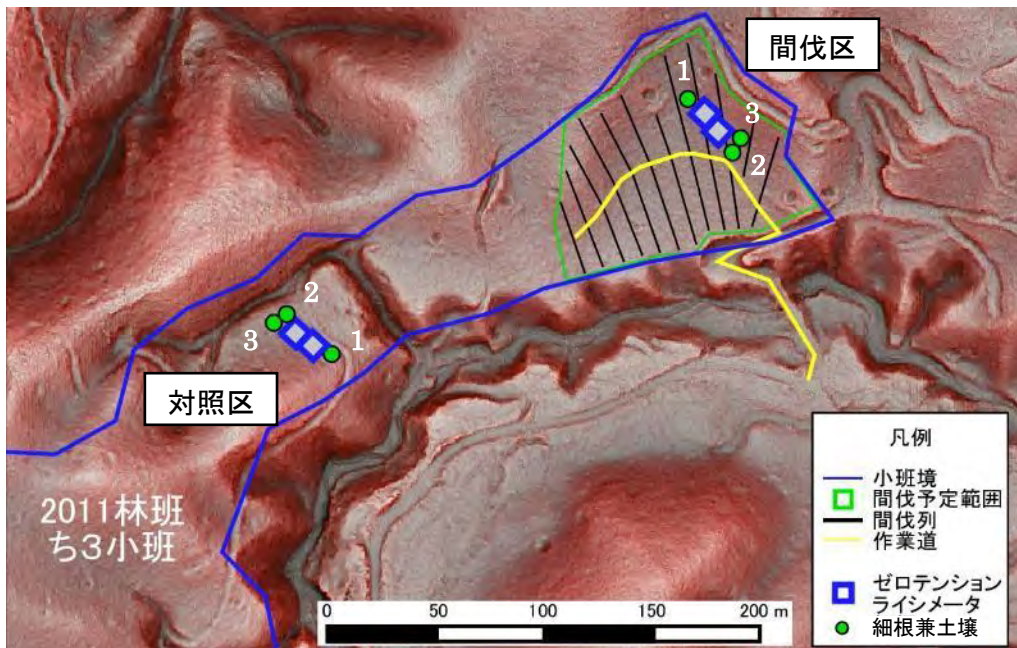


図 4-38 冬住事業地 細根兼土壤試料採取位置

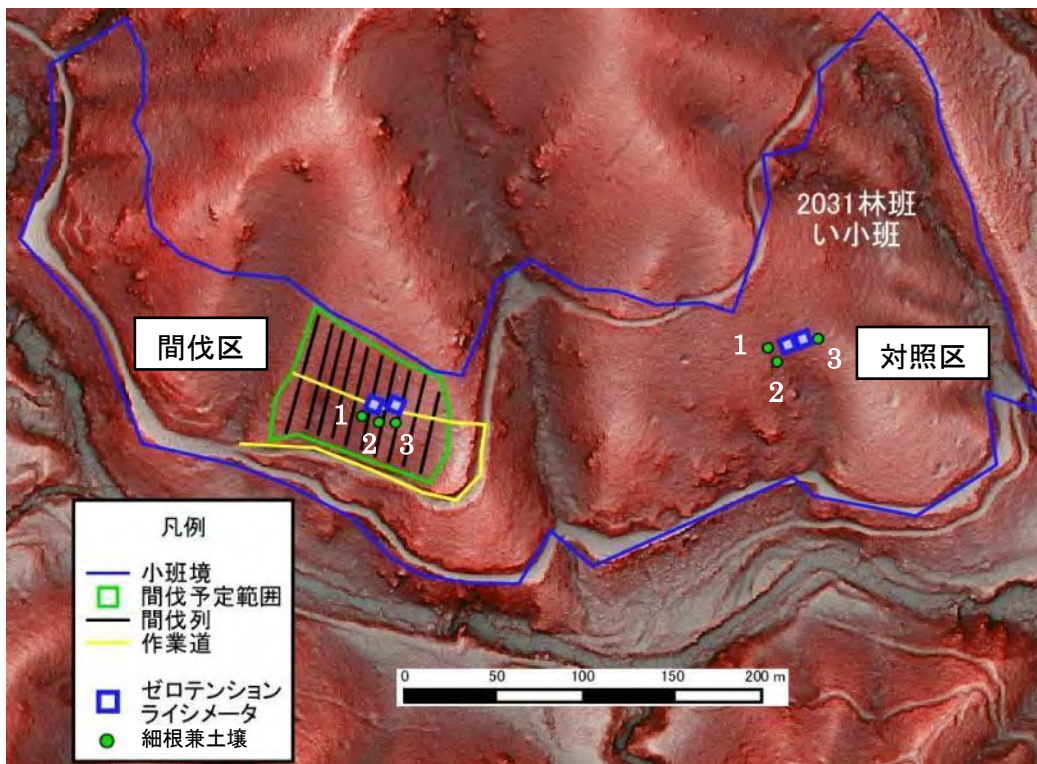


図 4-39 高倉事業地 細根兼土壤試料採取位置

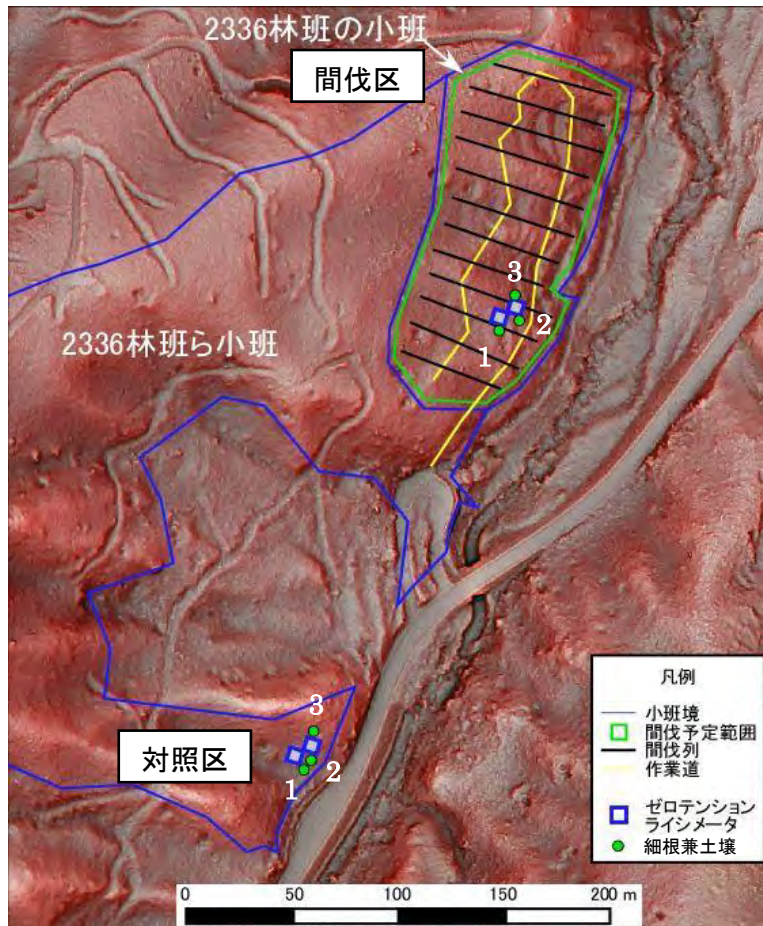


図 4-40 飯樋事業地 細根兼土壌試料採取位置

(2) 試験結果

ライシメータ調査箇所における土壌等調査の結果を図 4-41～図 4-44 に整理した。

また、緩衝深度（緩衝深度については、後段の「解釈に関する補足・用語解説」を参照）を表 4-23 に整理した。緩衝深度は2～4 cm 台の値が多くみられた。

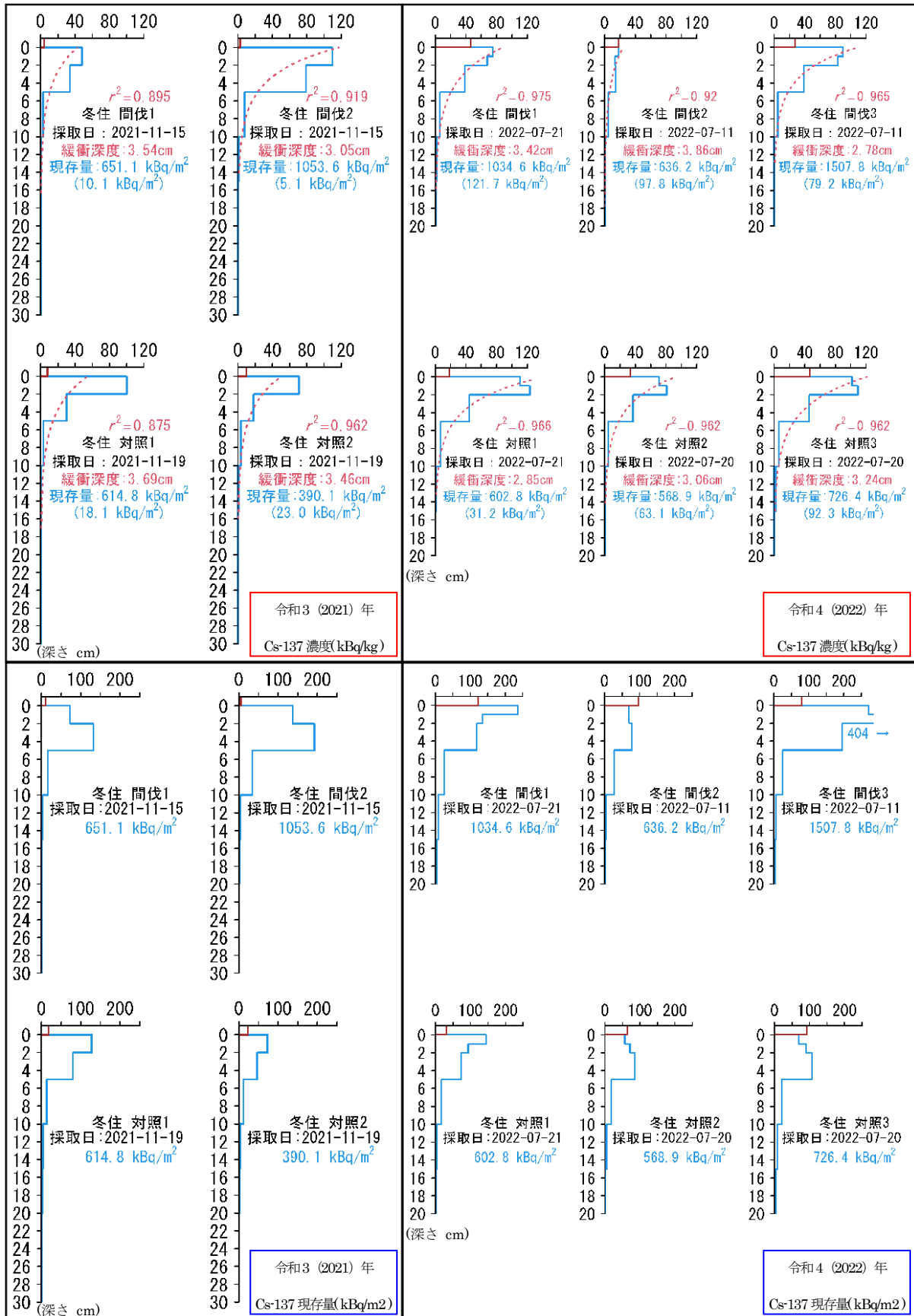


図 4-41 土壤深度別放射性セシウム濃度（上段）及び現存量（下段）（冬住事業地）

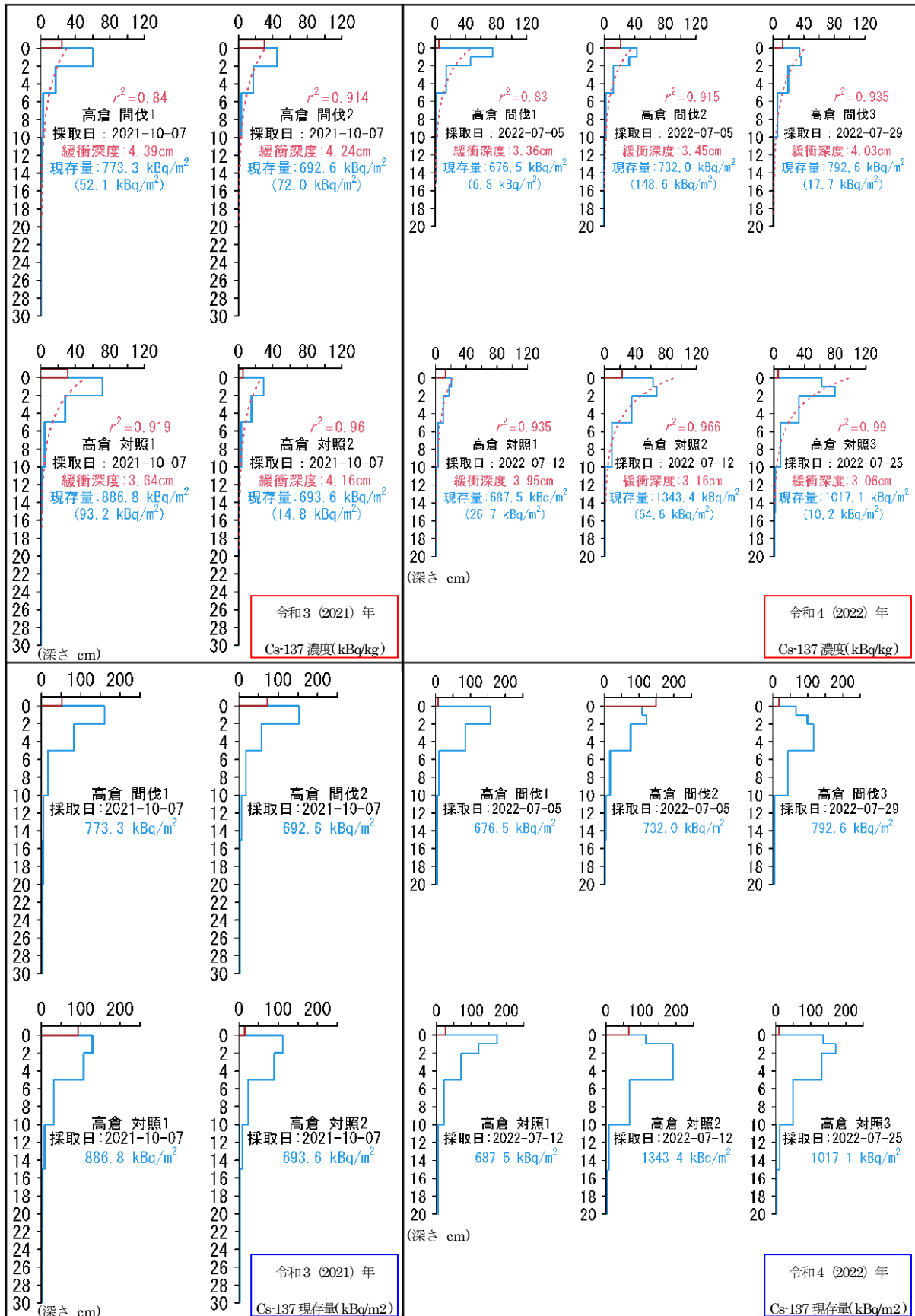


図 4-42 土壤深度別放射性セシウム濃度及び現存量 (高倉事業地)

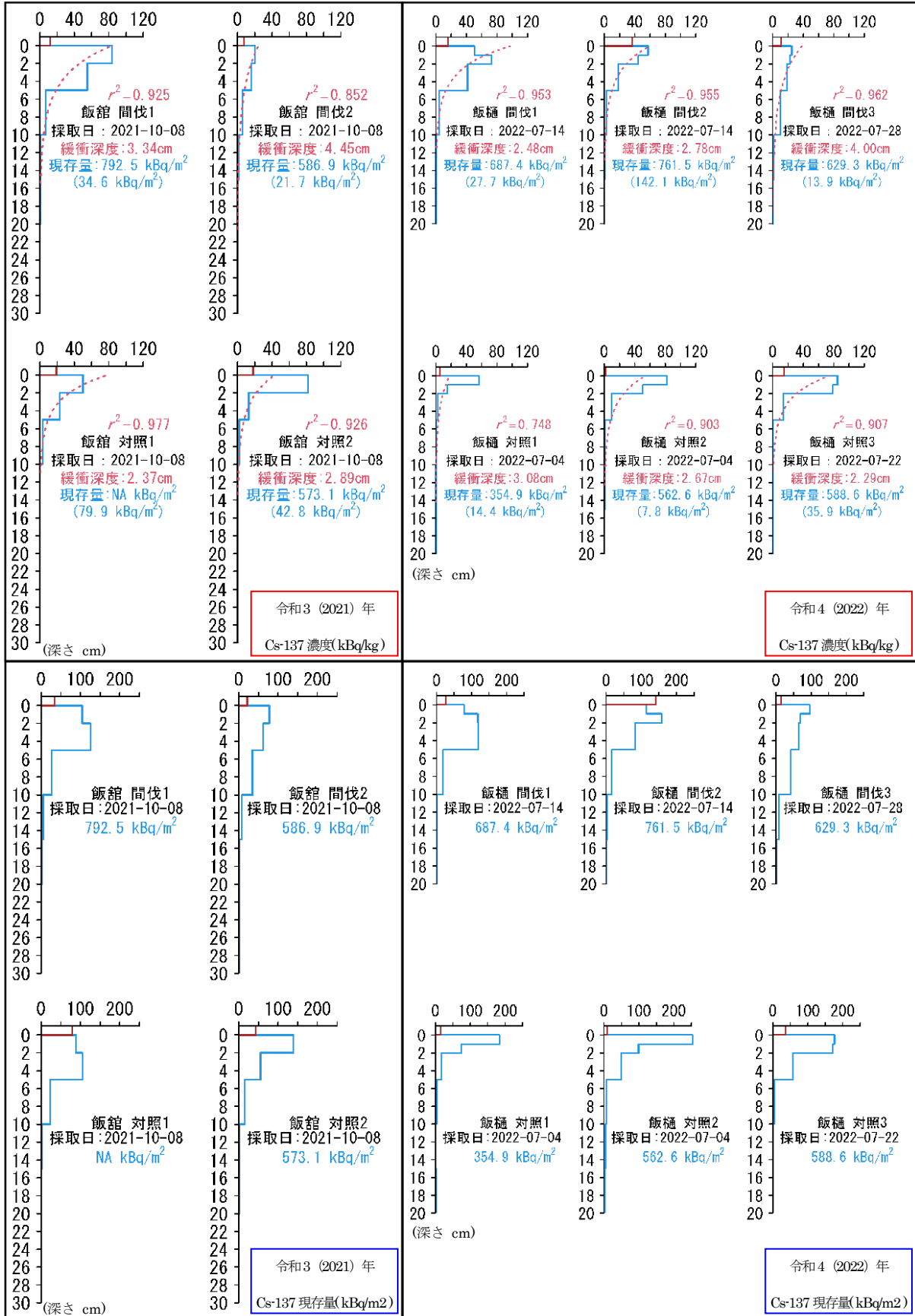


図 4-43 土壤深度別放射性セシウム濃度及び現存量 (飯樋事業地)

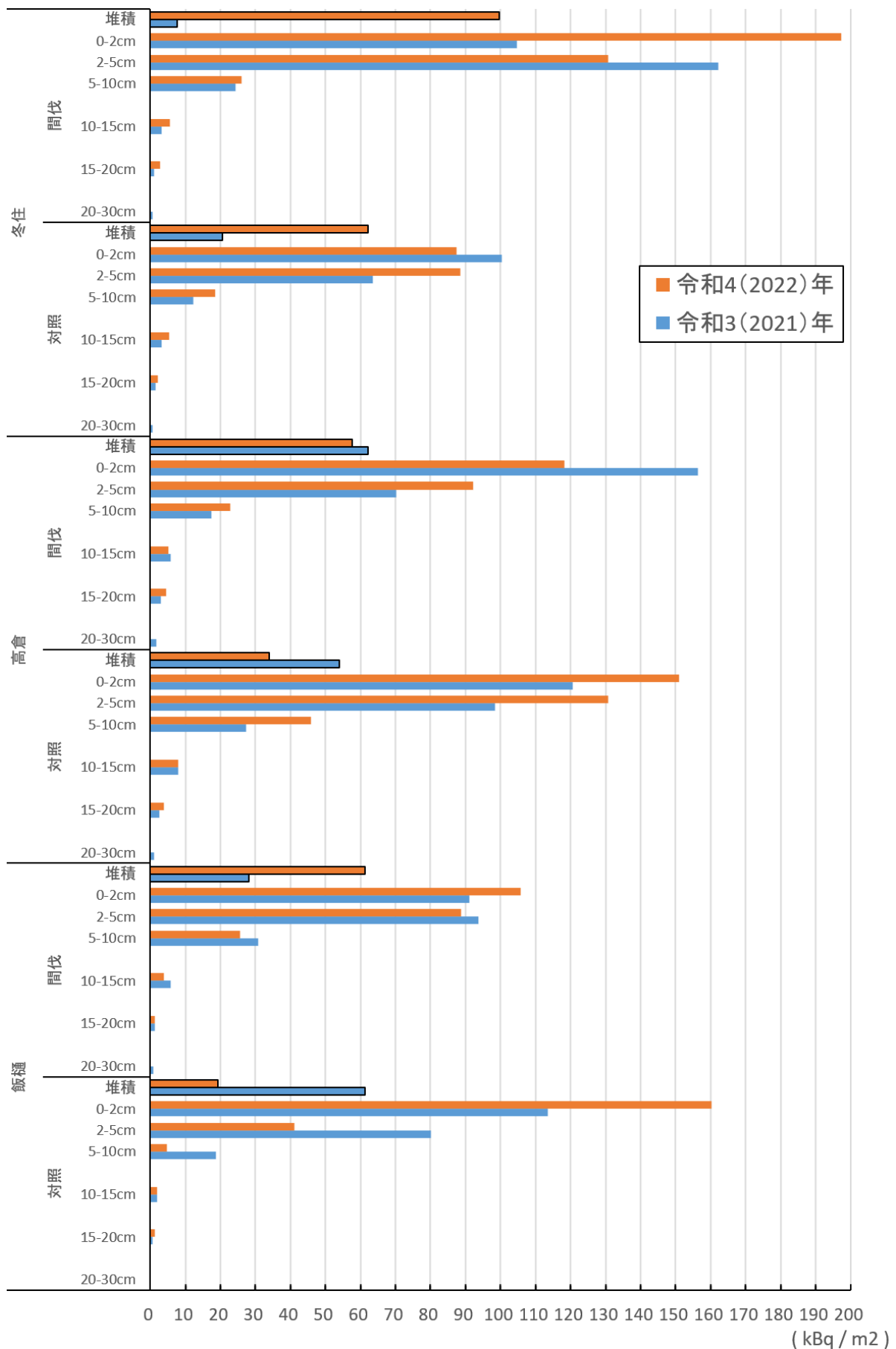


図 4-44 土壤深度別放射性セシウム現存量 (平均値) の比較 (令和3年、令和4年)

表 4-23 間伐区（施業前）及び対照区における緩衝深度

事業地	作業区	令和3年(2021年) 緩衝深度 (cm)	令和4年(2022年) 緩衝深度 (cm)
冬住 事業地	間伐区 (施業前)	3.54	3.42
		3.05	3.86
			2.78
	平均	3.30	3.35
	対照区	3.69	2.85
		3.46	3.06
			3.24
平均	3.58	3.05	
高倉 事業地	間伐区 (施業前)	4.39	3.36
		4.24	3.45
			4.03
	平均	4.32	3.61
	対照区	3.64	3.95
		4.16	3.16
			3.06
平均	3.90	3.39	
飯樋 事業地	間伐区 (施業前)	3.34	2.48
		4.45	2.78
			4.00
	平均	3.90	3.09
	対照区	2.37	3.08
		2.89	2.67
			2.29
平均	2.63	2.68	

4.8. 空間線量率の測定

(1) 試験方法

本調査は、各事業地の間伐区及び対照区で実施した（図 4-45～図 4-50）。令和 3 年度事業時においては、間伐区の空間線量率測定点を試験区内に 20m 毎に設定した格子点とし、対照区については毎木プロット調査の方形区上に 9 点設定した。令和 4 年度は、より空間線量率測定の密度を高めることを目的として、森林施業範囲の林縁部に近い箇所を除いた領域に 10m 格子点を設定するとともに、対照区においてもライシメータ等機器周辺に 10m 格子点を設定した。

いずれも測定点には今後のモニタリングが可能になるよう杭を打設した。また、森林施業後に消失した杭については施業後に復元し、空間線量率の測定を実施した。

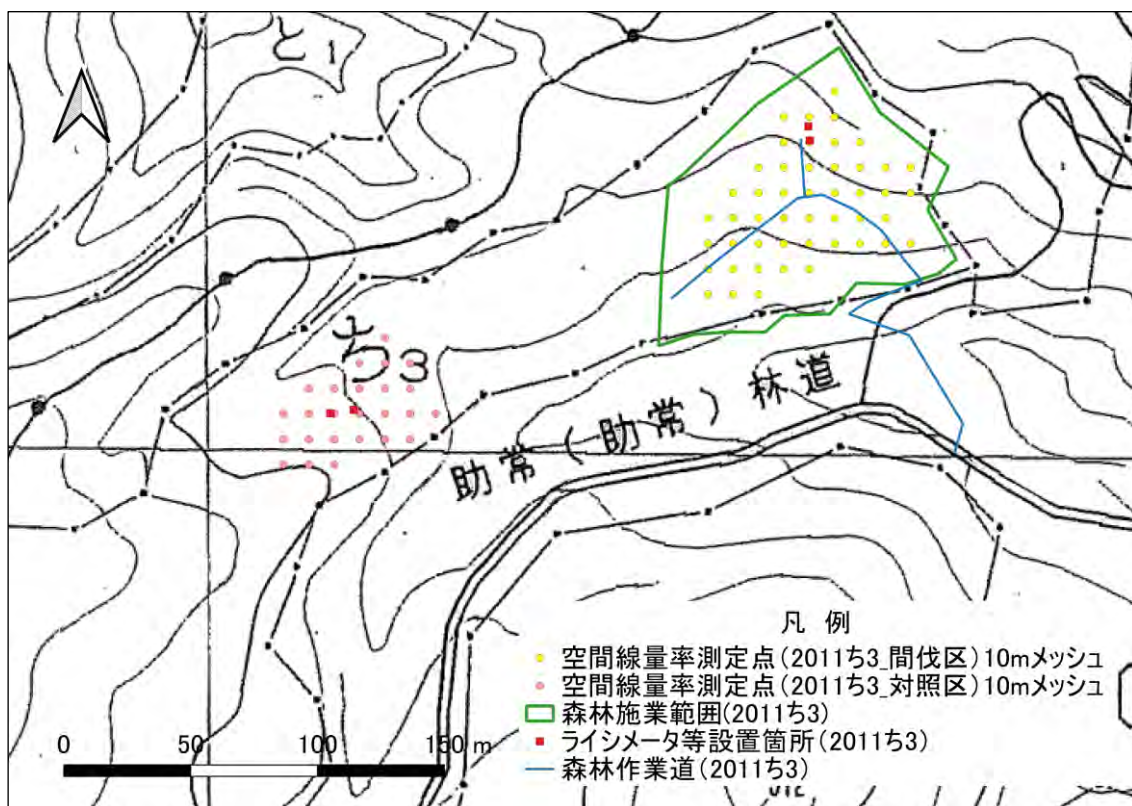


図 4-45 令和 4 年度の空間線量率測定点（冬住事業地_2011 林班ち 3 小班）

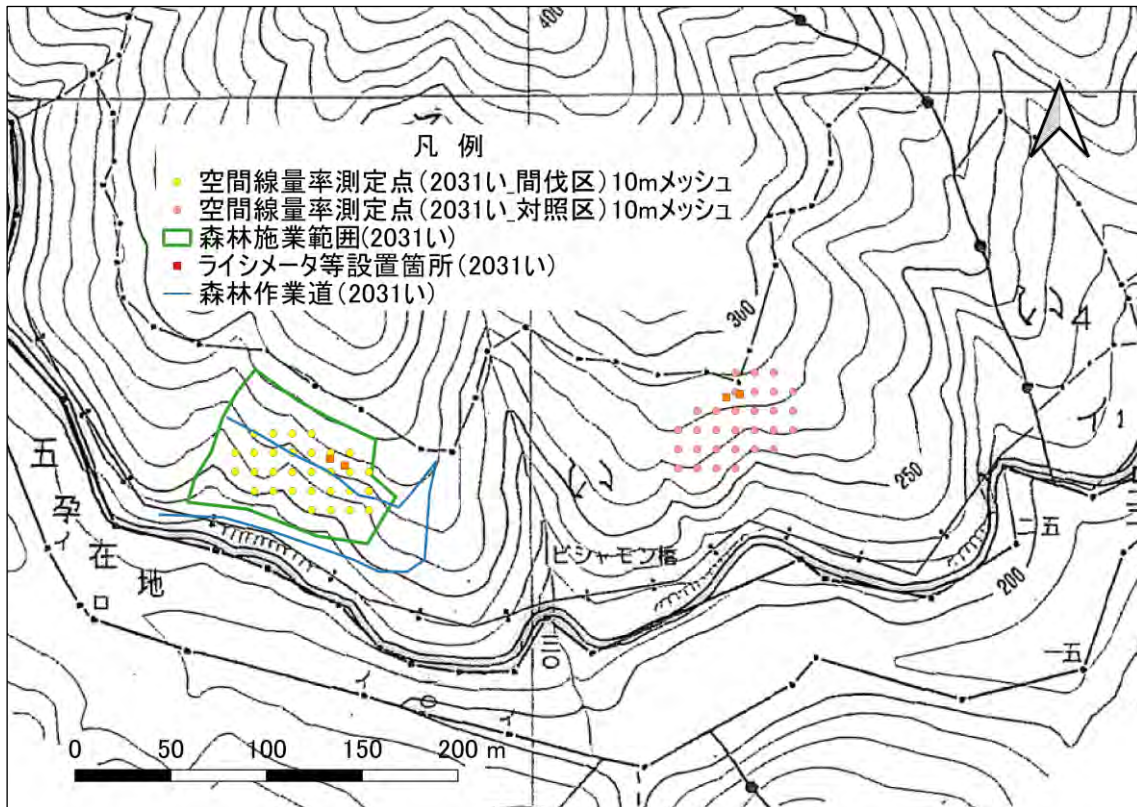


図 4-46 令和 4 年度の空間線量率測定点 (高倉事業地_2031 林班い小班)

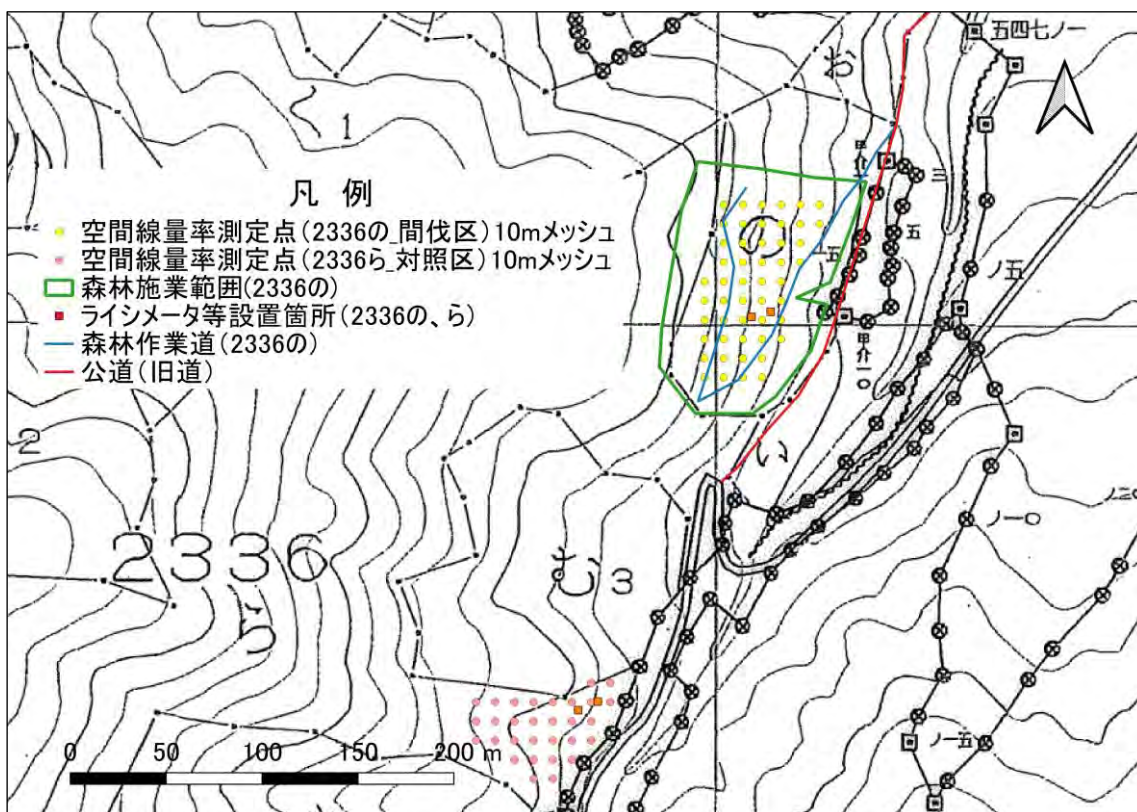


図 4-47 令和 4 年度の空間線量率測定点 (飯樋事業地_2336 林班の小班及びら小班)

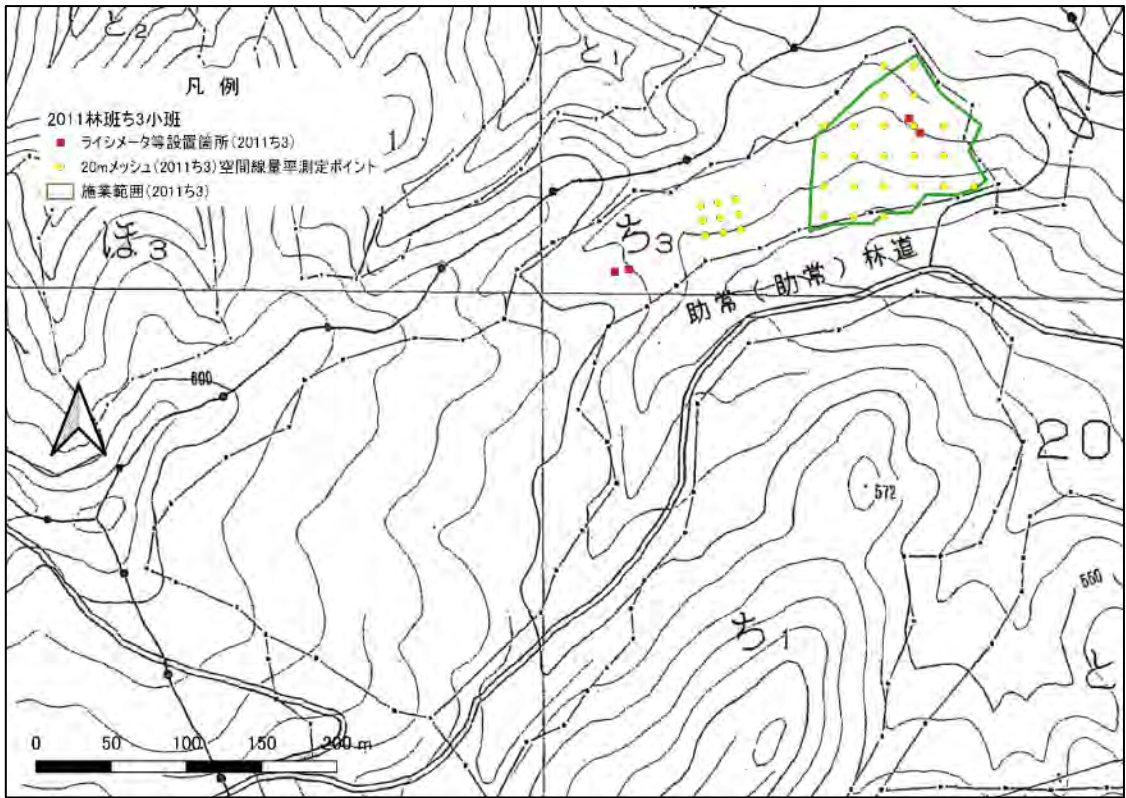


図 4-48 令和 3 年度の空間線量率測定点 (冬住事業地_2011 林班ち 3 小班)

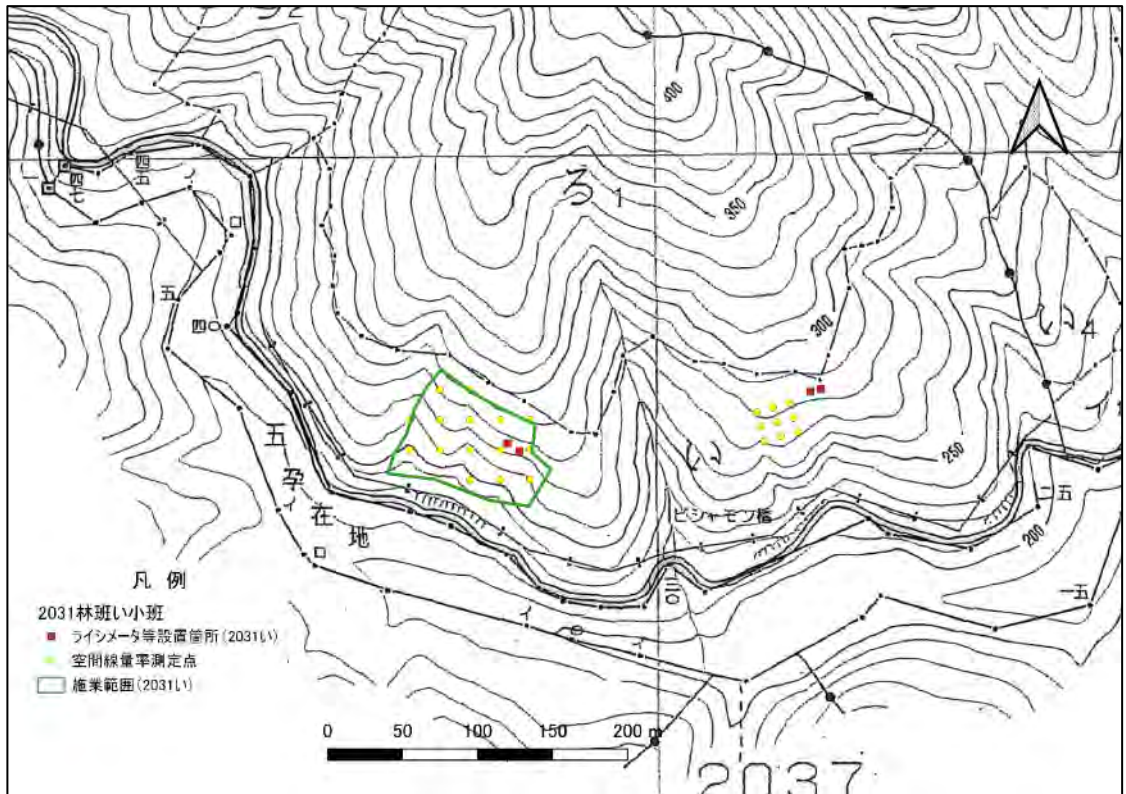


図 4-49 令和 3 年度の空間線量率測定点 (高倉事業地_2031 林班い小班)

(2) 調査結果

試験区別の空間線量率の測定結果を表 4-24、図 4-51～図 4-53 に示す。

試験区別にみると、間伐実施前においては、若干大きく外れた値がみられるものの、概ね平均値の $\pm 0.2\mu\text{Sv/h}$ 以内に測定値が収まっている。間伐実施後は、森林作業道>間伐列>残存列の順で低減の程度が大きかった。

表 4-24 調査地の空間線量率

樹種	事業地名 林小班名	試験区 種別	空間線量率 ^{※1}	空間線量率 ^{※1}	空間線量率 ^{※1}	初期沈着量 ^{※2} (kBq/m ²)
			($\mu\text{Sv/h}$) 2021年12月計測 ^{※3}	($\mu\text{Sv/h}$) 2022年7月計測 ^{※4}	($\mu\text{Sv/h}$) 2023年1月計測 ^{※4}	
スギ	冬住事業地 2011 林班ち3 小班	間伐区	1.03 (n=23)	1.03 (n=48)	0.94 (n=48)	720
		対照区	0.98 (n=9)	0.97 (n=25)	0.99 (n=25)	
	高倉事業地 2031 林班い 小班	間伐区	0.80 (n=15)	0.76 (n=30)	0.72 (n=30)	990
		対照区	0.75 (n=9)	0.77 (n=30)	0.80 (n=30)	
	飯櫃事業地 2336 林班の 小班 2336 林班ら 小班	間伐区	0.87 (n=20)	0.91 (n=50)	0.74 (n=50)	900
		対照区	0.93 (n=9)	0.89 (n=30)	0.87 (n=30)	

※1 空間線量率の値 (1m 高さ) は平均値

※2 文部科学省 放射線量等分布マップ (平成 23 年 7 月 22 日時点)

※3 2021 年 12 月計測のうち間伐区は 20m メッシュで実施。対照区はリタートラップ設定箇所にて測定。

※4 2022 年 7 月及び 2023 年 1 月計測は、間伐区、対照区ともに 10m メッシュ。

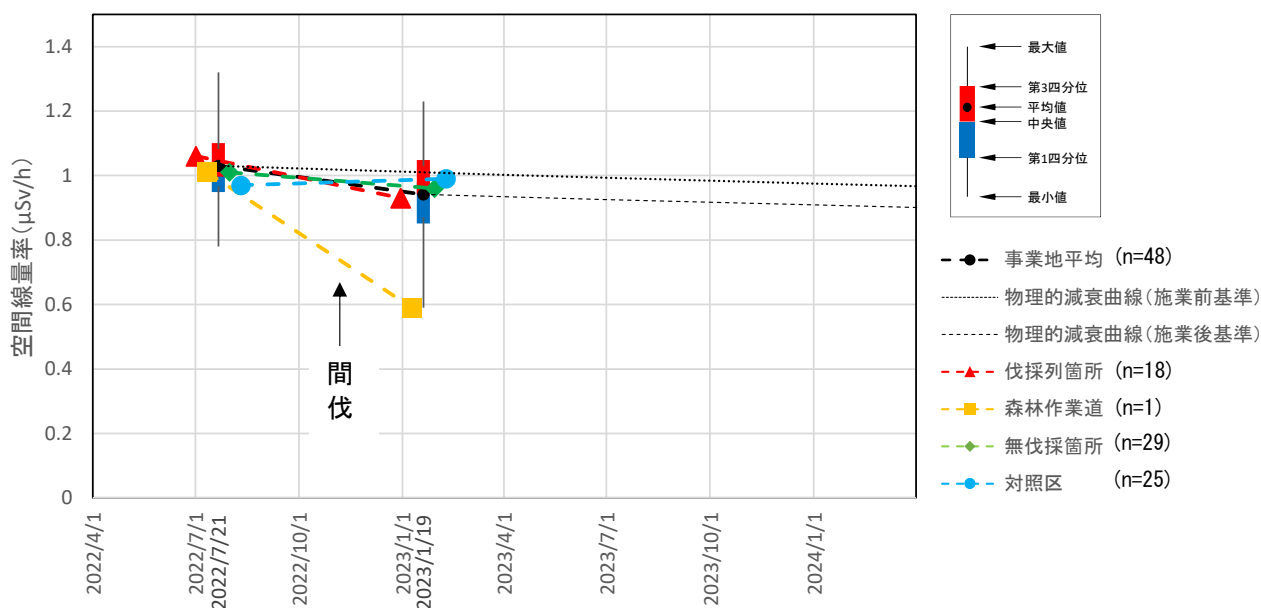


図 4-51 空間線量率推移 (冬住事業地_2011 林班ち3 小班)

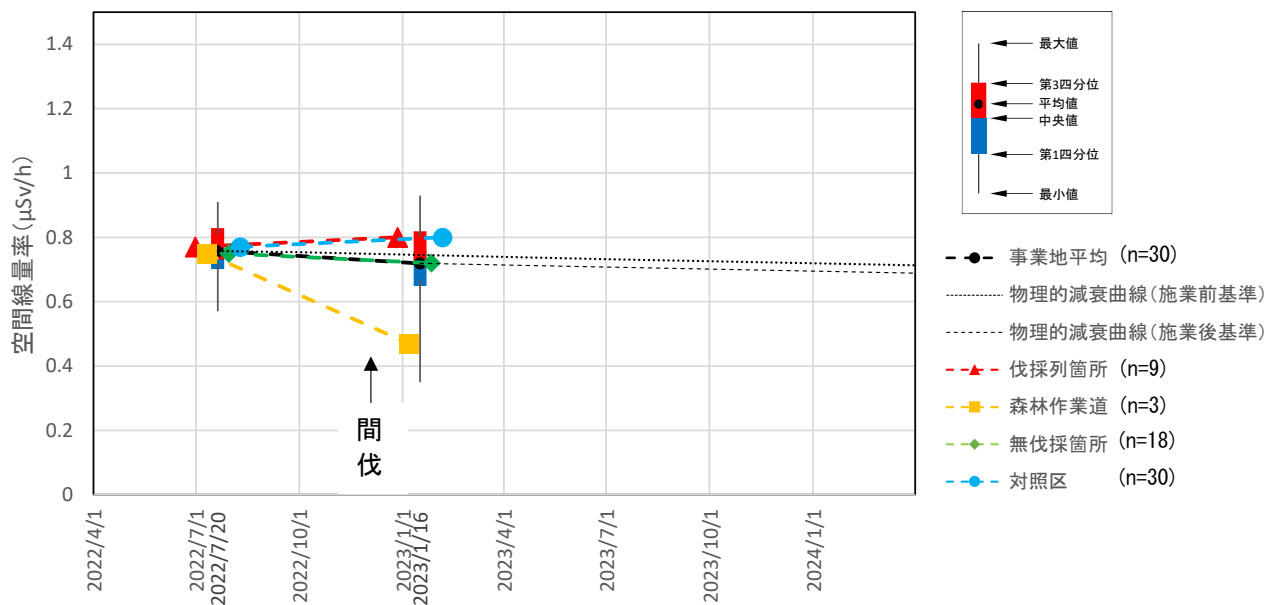


図 4-52 空間線量率推移 (高倉事業地_2031 林班い小班)

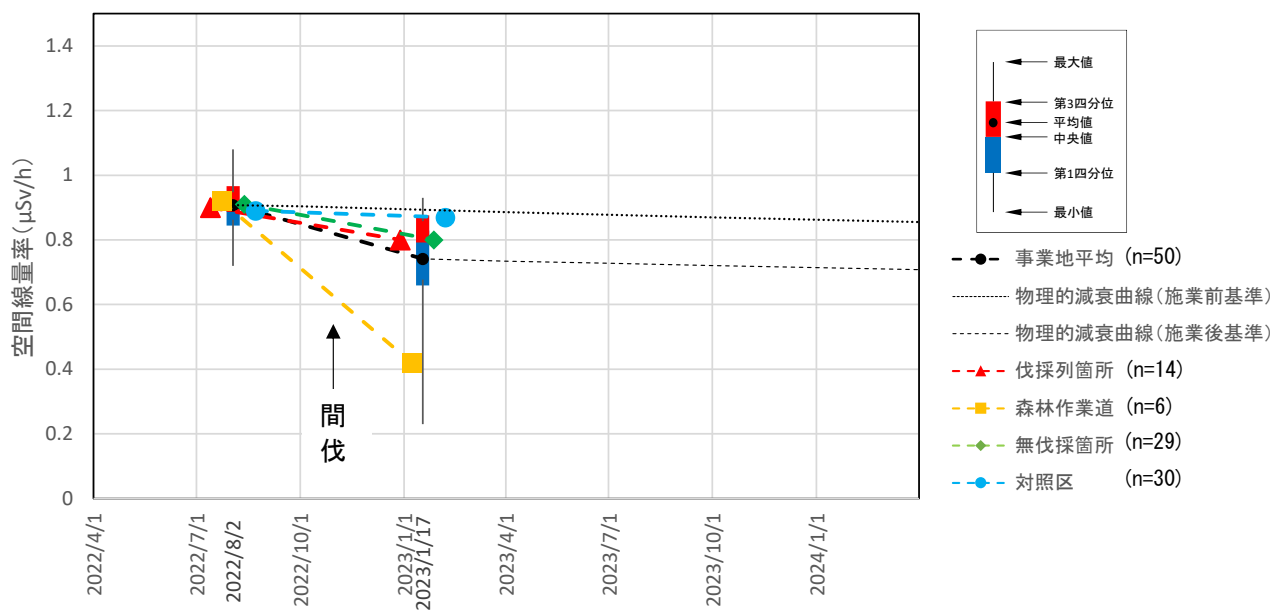


図 4-53 空間線量率推移 (飯樋事業地_2336 林班の小班)

5. 調査・分析方法

調査・分析方法は以下を基本とし、検討委員会の指導・助言を得て実施した。

5.1. 空間線量率等の測定

空間線量率及び放射線量 (cpm) の測定は、「放射線測定に関するガイドライン (文部科学省、日本原子力開発機構 平成 23 年 10 月 21 日)」に基づき、校正済みの NaI (Tl) シンチレーション式サーベイメータ及び GM 管式サーベイメータを用いて行った。なお、測定値の信頼性を確保するため、測定時には、同ガイドラインで定められた時定数 (10 秒) の 3 倍にあたる 30 秒以上はサーベイメータの検出部を静置した。

また、測定時に積雪がある場合及び雨天時には測定を延期した。既設測定点の木杭またはプラスチック杭が消失している場合には、左右前後に残された杭から再計測して測定点を再現し、測定を継続した。その際、杭の再設置も行った。毎回の測定時に各測定点の周囲状況をデジタルカメラで記録し、必要が生じた際にはいつでも確認できるようにした。

空間線量率の測定結果は測定後速やかに整理し、測定値の異常が疑われる場合には現地の状況の再確認等を行った。

5.2. 放射性セシウム濃度の測定

【対象】

固体試料 (堆積有機物・土壌、土砂等、リターフォール、植物体)

【前処理】

試料は、湿重量を計測した後、乾燥機を用いて 105℃で乾燥し、絶乾重量を計測した。次に、粉碎器等で 4mm 以下に粉碎した。破碎した試料は、均質とした後、分取し、専用治具を用いて U-8 容器に充填した後、重量等 (供試重量、充填高さ等) を測定した。

【測定】

ゲルマニウム半導体検出器を用いた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 及び Cs-137) を定量し、単位試料重量当たりの放射性セシウム濃度 (Bq/kg) を求めた。

解釈に関する補足・用語解説

(1). 放射性物質の単位

放射性物質が放射線を出す能力の強さを表す単位をベクレル (Bq) という。

一方、人体が受けた放射線による健康影響と関連づけられた被ばく線量を表す単位としては、シーベルト (Sv) が用いられる。

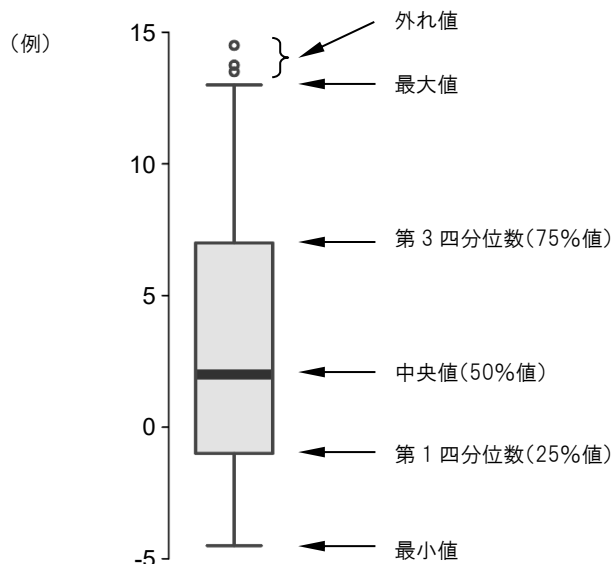
放射性物質の量を扱う上では、「重さとしての情報」と「面としての情報」の2種類の扱いがある。前者は、物質の単位重量当たりの放射エネルギーであり、「放射性物質濃度」を指す。単位は [Bq/kg] を用いる。後者は、単位面積当たりの総放射エネルギーであり、「放射性物質現存量」「放射性物質沈着量」を指す。「インベントリー (Inventory)」と表現することもある。単位は [Bq/m²] を用いる。

(2). グラフ図示方法 (箱ひげ図)

箱ひげ図：データのばらつきをわかりやすく表現するための統計図。データの分布を視覚的に要約し、比較するために用いる (e.g. 箱が大きい=ばらつきが大きい、など)。

四分位：データを大きさの順に並べて、四等分したときの3つの区切りの値を示す。大きさの順に並べたときに下から25%・50%・75%に位置する値のことを第1四分位数・第2四分位数 (中央値)・第3四分位数と言う。

外れ値：統計的に他の値から大きく外れた値。測定ミス等、原因がわかっているものは「異常値」であり、それとは異なる。外れ値であるか否かについて、有意水準を設けて検定した上で取り扱う必要がある。簡便な方法として、 $\mu \pm 3\sigma$ (μ : 平均値、 σ : 標準偏差) より外側の値を外れ値とする方法がある。本報告書 (2章) では、正分布を前提としない基準 (第3四分位数 + (第3四分位数 - 第1四分位数) $\times 1.5$ を上回る値、または、第1四分位数 - (第3四分位数 - 第1四分位数) $\times 1.5$ を下回る値) を用いた。



(3). 平均値

一般的には算術平均値を用いるが、算術平均値は、大きな値があるとそれに引きずられて大きくなりがちである。放射性物質濃度等、データの分布が対数正規分布と見込まれるものについては、幾何平均値を用いる場合がある。IAEA Technical Documents (IAEA-TECDOC)等をはじめとして、本分野においては上記の扱いが多くみられる。

本報告書では、土壌や植物体の試料に含まれる放射性セシウム濃度等の平均値を算出する際に幾何平均値を用いたものがあり、幾何平均値を用いた場合には、図表に注釈を加えた。

一般に平均と呼ばれる算術平均が、和の平均

$$(x_1 + x_2 + x_3 \dots + x_n)/n \quad \text{であるのに対し、}$$

幾何平均は、相乗平均（相乗積の n 乗根）であり、

$$\sqrt[n]{x_1 \times x_2 \times x_3 \dots \times x_n} \quad \text{である。}$$

(4). 緩衝深度

緩衝深度は放射性物質濃度が地表面の $1/e$ ($\approx 1/2.7$) になる深度で、放射性物質の地中への移行の程度を表すパラメータとして用いられるものである。なお、 e はネイピア数と言われ、自然対数の底に用いられる数である。緩衝深度の値が大きいほど地中の深い箇所に放射性物質が存在することを示す。森林土壌中の放射性セシウム濃度分布を指数関数分布と仮定して、各調査箇所の放射性セシウムの深度分布特性（緩衝深度： β ）について、計測された土壌深度分布を基に、各層の放射性物質濃度で重み付けをした最小自乗法により緩衝深度（cm 単位）を算出した。

なお、本事業では、緩衝深度の計算に、落葉層を含めていない。緩衝深度 β を決定するための式は次のとおりである。

$$A(t) = A_0 \cdot \exp\left(\frac{-t}{\beta}\right)$$

A_0 は地表面における放射性物質濃度、 $A(t)$ は深度 t における放射性物質濃度である。