

8. 調査結果の吸収・排出量算定報告への反映方法の検討

8.1. 算定関連の動向と今後のスケジュールについて

第四期の枯死木・堆積有機物・土壌有機物の炭素 3 プール（以下、土壌 3 プールと略す）の吸排量算定に関するスケジュールについて記載する。土壌 3 プールの炭素蓄積量の実態は、2006 年から続いている本調査で明らかになってきたが、現時点では国家インベントリ報告に使用されていない。現在、2023 年 4 月に行われるパリ協定下での最初の算定に向けて、土地利用分野からの見直しが進んでおり、その改定の方向性としては「大規模調査データに基づく推定値」が主題となっている。そのため、令和 4 年度までの最初 2 年間はそのための作業に集中し、3 年目の令和 5 年度からはその改定後を見据えての作業を中心とする計画である。第四期においては、①CENTURY-jfos の見直し、②土地利用変化関連の見直し、③新たなモデルによる算定の検討、④最適地点数の検討 を予定している。①については 8.2. に詳述されるため、本章では②を 8.1.1 に、③を 8.1.2 に、④を 8.1.3 に、それぞれ動向とスケジュールについて記載する。

8.1.1. 土地利用変化関連の見直しについて

8.1.1.1. 見直しに至った背景

インベントリ第一期で得られた森林の平均土壌炭素量は、現行の国家インベントリ報告における数値（約 85 tC/ha）よりかなり小さく（70.6 tC/ha⁷⁾）、この調査データに基づく値が平均値として採用された場合、各土地利用における全国平均値を比較する Tier2 による計算では、森林から農地あるいは開発地になった場合炭素蓄積が増加することになり、これは過去の知見とは矛盾する。このような土地利用ごとの全国平均値の利用には以下の問題がある。例えば農地・草地は平地に多く、森林は傾斜地に多い。従って、蓄積している土壌の性質や炭素の起源が土地利用によって大きく異なり、それぞれの土地利用の平均炭素量の違いは地形的位置に起因するこれらの違いに大きく影響を受け、土地利用による違いだけを反映しないと考えられる。このような状況下において、それぞれの土地利用の平均土壌炭素量の比較によって、実際に土地利用変化が起こった場合の動態を表すことはできないと考えられる。さらに、開発地の土壌炭素蓄積量には現在 80 tC/ha が適用されており、これは高すぎる設定と考えられるが、開発地の土壌炭素蓄積量に関してはほとんど研究例がなく、この数値の修正も含めたなんらかの新たな計算方法が必要とされていた。

8.1.1.2. 土地利用変化係数の採用の提案

IPCC の 2006 年ガイドライン 2019 改訂版においては、土地利用変化の係数を求める場合には、Equivalent Soil Mass 法を用いたペアサンプリングによる比較が推奨されている。環境省環境研究総合推進費 2-1601 および 2-1909 において、この方法に基づく調査が行われた。その結果、2 つの論文（Koga et al., 2020³⁾ および Ishizuka et al., 2021²⁾）が発表され、その論文中的数値から、土地利用の変化後の移行期間を 40 年とし、土地利用変化係数は森林から農地への転用では 0.77、農地から森林への転用では 1.21 という値が提案されることとなった。

8.1.1.3. 森林土壌の平均炭素蓄積量の更新についての提案

8.1.1.2.で提案された係数を算定に適用するためには、土地利用変化前の土地利用の土壌炭素蓄積量が必要となる。現行の土壌炭素蓄積量は Morisada et al. (2004)⁵⁾の論文中的土壌型別炭素蓄積量を基準として調整された CENTURY-jfos モデルの出力値から計算されており、約 85 tC/ha となっている。一方で、本インベントリ調査（第一期）による全国平均値は、70.6 tC/ha (Ugawa et al., 2012⁷⁾) である。さらに、Ugawa et al.に用いられたデータを基に、地形や気候、火山からの距離などを考慮に入れた土壌炭素蓄積量空間推定モデルが作成され (Yamashita et al., 2022⁸⁾)、これによると全国の森林の平均土壌炭素蓄積量は 76 tC/ha と計算されている。Yamashita et al.では、全国 2300 点余のサンプリング位置による推定バイアスをキャンセルできており、全国の森林の平均土壌炭素蓄積量としては Yamashita et al.の 76 tC/ha が現時点で最も現実の値に近いと考えられる。

枯死木および堆積有機物についても、現在の平均炭素蓄積量は CENTURY-jfos から計算された値が使用されている。これに関しても、Ugawa et al.における調査データに基づく値に変更することが有力であり、堆積有機物が 4.9 tC/ha、枯死木が 4.2 tC/ha となっている。但し、第一期の枯死木調査は倒木についてのみの値になっており、現在調査が行われている根株および立枯木が含まれていない。第二期の調査により、倒木：根株：立枯木=42：33：25 であることがわかっており、従って第一期の倒木 4.2 tC/ha に 100/42 を乗じた 10.0 tC/ha が枯死木の平均炭素蓄積量として計算される。

以上をまとめ、土壌は 76 tC/ha、堆積有機物は 4.9 tC/ha、枯死木は 10.0 tC/ha の平均炭素蓄積量に変更することが提案されている。

8.1.1.4. 他の土地利用についての変更について

枯死木および堆積有機物に関しては他の土地利用では蓄積なしで取り扱われているため、土壌炭素蓄積量のみの変更が予定されている。農地および草地の土壌炭素蓄積量については、農研機構のグループが全国の土壌炭素蓄積量を推定するモデルを開発 (Matsui et al., 2021⁷⁾) しており、このモデルから推定される数値に変更される見込みである。開発地については、環境省のプロジェクト（環境研究総合推進費 2-1909）において計算されており、38 tC/ha 程度（暫定値）となる見込みである。

8.1.2. 新たなモデルによる算定の検討

インベントリ事業のデータを組み込み、算定にも柔軟に対応できる新たなモデルの検討を行う。R4 年度から検討を開始し、R6 年度に新モデルによる試算が提供できるスケジュールを予定している。現在用いている CENTURY-jfos では、樹木成長も含むオリジナルの CENTURY モデルの土壌部分のプログラムを切り出して利用している。利用例の多い土壌炭素モデルは他に英国で開発された RothC モデルや、フィンランドで開発された Yasso モデルがある。RothC モデルは開発から 25 年以上が経つ。Yasso は 2005 年に開発されて以降、バージョンアップが続けられ、現在は Yasso07、Yasso15 と進み Yasso 20 が準備中とのことである。Yasso モデルは欧州を中心に使用例が増えている。また CENTURY モデルは開発から 35 年が経過する。開

発者自身によるバージョンアップは行われていないが、CENTURY モデルをベースにした改良型 CENTURY モデルが新たに開発されている(例えば: Millennial モデル: Abramoff et al., 2018¹⁾)。来年度以降、昨今の土壌モデル研究の進展を調査しながら、インベントリ事業のデータおよび我が国の算定との親和性を考慮し新モデルの検討を開始する。

8.1.3. 最適地点数の検討

現在 2400 点ほどの調査地点で行われている調査点数が、これで十分なのか、それとも地点数を減少させても目的を達成できるのかについて、第四期の後半3年間で検討する。4年目には、最適点数の提示ができるように作業を進める。検証の方法はこれからの検討となるが、調査の目的の整理と、その目的に対する精度と点数の関係を、コンピューターシミュレーションによって明らかにする予定である。

8.2. CENTURY-jfos 改定に向けた取り組みについて

8.2.1. これまでの経緯

我が国の土壌 3 プールの吸排量算定は CENTURY-jfos により算出される吸排係数に基づいて行われている。CENTURY-jfos は、森林など陸域生態系における有機物の動態をシミュレーションすることのできる CENTURY モデルを日本の森林用に調整したもので、47 都道府県・8つの森林タイプ(それぞれ施業あり、なし)・各林齢(1~100 年)における 3 プールの吸排係数を計算し、これを林野庁に提供している。この吸排係数に国家森林資源データベース(林野庁)により毎年集計される各都道府県、各森林タイプの面積データと掛け合わせることで、土壌 3 プールの吸排量を見積もることができる(図 8-1)。

CENTURY-jfos は 2007 年 5 月に調整を終えたが、当時は日本の森林土壌炭素変化量の予測に必要な全国規模の枯死木、堆積有機物、土壌の炭素蓄積量に関する情報が乏しい中での調整作業とならざるを得なかった。その後、森林吸収源インベントリ情報整備事業の一環として 2006 年から取り組まれてきた本事業(土壌等調査)が進むにつれて、枯死木、堆積有機物、土壌の炭素蓄積量に関する全国規模のデータ整備が進んできた。また、国家森林資源データベースの完成、気候メッシュ平年値 2010 の発表、そして、温室効果ガスインベントリ報告ガイドラインの変更(樹木の炭素含有率が日本独自の値に見直された)などのこともあり、2011 年以降、これらの状況を踏まえた CENTURY-jfos の改定について検討を進めてきた。この検討状況の詳細については、令和 2 年度の報告に記した。今年度は、現在も検討中である枯死木量予測に関するパラメータ見直しについての経過報告をする。

8.2.2. 枯死木量の予測に関するパラメータ見直し

2006 年以降、インベントリデータの収集が進み、第一期(2006~2010)の調査ではラインインターセクト法により倒木の枯死木量の実態が明らかとなった。また第二期、第三期ではベルトトランセクト法による調査が追加されることにより、立枯木、枯死根株のデータも得ることができ、全枯死木量としての評価が可能となった。この結果、課題として浮かび上がってきた

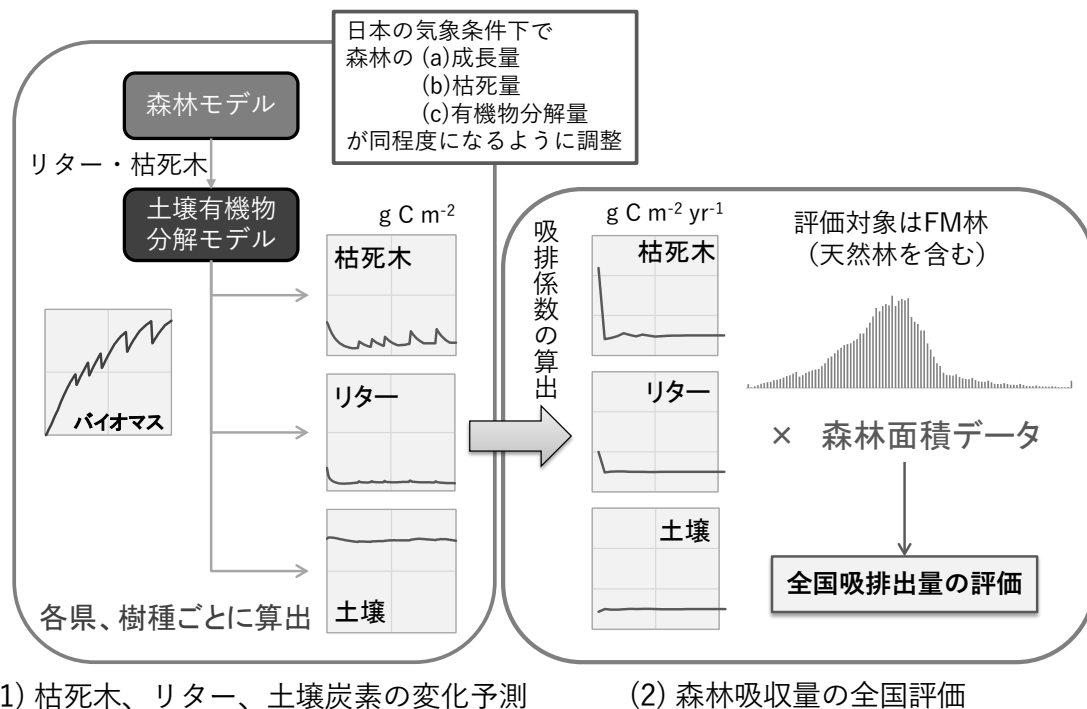


図 8-1 CENTURY-jfos による吸排量評価の手順

のが、インベントリデータの枯死木量の平均値に比べて、CENTURY-jfos により予測される枯死木量の方が明らかに高いことであった。

森林生態系における枯死木量は、枯死木発生量と分解量の収支バランスにより決まるため、原因を究明するためには CENTURY-jfos の森林モデルと分解モデルの両方を検討する必要がある。すなわち、a) 森林モデルの枯死木発生量の見積もりが高い、b) 分解モデルの枯死木の分解率の見積もりが低い、という 2 つの要因が考えられ、令和 2 年度より詳細な検討を開始した。

森林における枯死木発生量の実データについては、近年、西園ら (2019)⁶⁾ によって公表された収穫試験地のデータに、測定期間ごとに発生した枯死木について、生木と同様に材積として記載されていることがわかった。ここでは、スギ林の各測定期間 T (y 年) における材枯死量 V_D (m³) と期末の材現存量 V_L (m³) を用いて、年枯死率 ($\%y^{-1}$) = $100 \times V_D / (V_D + V_L) / T$ を算出した。このようにして得られた年枯死率の平均値 (95%信頼区間) は、間伐林分全体で $0.22\%y^{-1}$ ($0.15 \sim 0.29\%y^{-1}$)、無間伐の林分全体では $0.38\%y^{-1}$ ($0.23 \sim 0.52\%y^{-1}$) であった。スギ人工林における材枯死率はそれほど高くないと推定された。この材枯死率を参考にして、CENTURY-jfos の材枯死率を $0.2\%y^{-1}$ と $0.5\%y^{-1}$ 用いて、材の成長と枯死のバランスを調整すると、図 8-2 のように、林地の枯死木量は、インベントリデータから得られる枯死木量の平均的な値と同等のレベルになることがわかった。今後は、今回検討した値を参考にして、他の樹種についても検討を進めていく予定である。

8.2.3. CENTURY-jfos2007 で枯死木量の予測値が高かった原因について

これまでの検討から、jfos2007 の枯死木量の予測値が高かった理由は、モデルで設定した成長量が大きかったことと枯死率の設定が高かったことによると考えられた。

成長量については、2007 年当時、モデル調整のために参照したデータは、新収穫表（スギ、ヒノキ、カラマツ）の調整に使われた元データから無間伐林と考えられる収量比数 $R_y > 0.9$ のデータを抽出して作成された収穫表（無間伐収穫表）を用いていたことに起因する。無間伐収穫表を用いた本来の目的は CENTURY モデル側で間伐による林地への材供給量をシミュレーションするためであった。しかし、この処理が成長量を高く見積もることにもつながっていた。この理由は、後の解析で、成長が良い林分ほど収量比数が高くなる傾向があったためということが判明した。

材枯死率については、参考にした CENTURY のデフォルト値が $1\%y^{-1}$ に近い値であったことや、高齢林ほど成長が遅くなる収穫表を参照したことにより、材枯死率を高く設定しないとモデルを収穫表の成長曲線に近づけることができなかったことが枯死率を高く設定する原因となった。

なお、今回検討した材枯死率は、スギのもつ樹種特性というだけでなく、人工林として除伐、間伐されることにより個体間の競争が軽減された影響が含まれており、さまざまな森林生態系への適用を想定した値ではない。今後は、8.2.2 での取り組みをさらに進め、日本の人工林の枯死木量予測が適切に行えるようにする予定である。

8.3. 参考文献

- 1) Abramoff et al. (2018) The Millennial model: in search of measurable pools and transformations for modeling soil carbon in the new century. *Biogeochemistry* 137: 51–71.
- 2) Ishizuka et al. (2021) Soil carbon stock changes due to afforestation in Japan by the paired sampling method on an equivalent mass basis. *Biogeochemistry* 153: 263–281, <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00786-8>.
- 3) Koga et al. (2020) Assessing changes in soil carbon stocks after land use conversion from forest land to agricultural land in Japan. *Geoderma* 377, 114487, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114487>.
- 4) Matsui et al. (2021) Soil carbon and nitrogen stock of the Japanese agricultural land estimated by the national soil monitoring database (2015–2018). *Soil Science and Plant Nutrition*, DOI:10.1080/00380768.2021.2000324
- 5) Morisada et al. (2004) Organic carbon stock in forest soils in Japan. *Geoderma* 119, 21–32
- 6) 西園朋広ら (2019) 平成 23～27 年度に調査した収穫試験地等固定試験地の経年成長データ（収穫試験報告 第 26 号）. 森林総合研究所研究報告 18: 231–273.
- 7) Ugawa et al. (2012) Carbon stocks of dead wood, litter, and soil in the forest sector of Japan: general description of the National Forest Soil Carbon Inventory. *Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute* 11: 207–221.

- 8) Yamashita et al. (2022) National-scale 3D mapping of soil organic carbon in a Japanese forest considering microtopography and tephra deposition. *Geoderma* 406, 115534
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115534>.

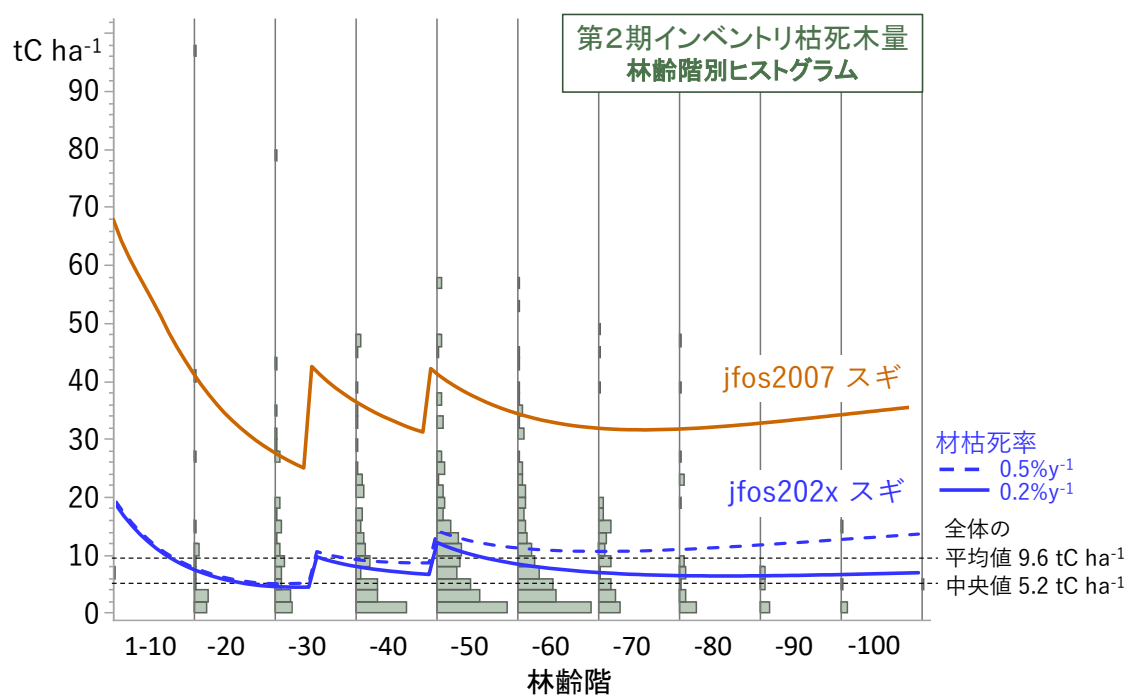


図8-2 全国スギ林の林齢階別枯死木量の実態とモデル調整の試み

9. 火山灰影響の検討

9.1. 土壌母材への火山灰混入の実態把握の必要性

我が国において土壌炭素蓄積の地理空間分布の決定への寄与が大きいと考えられる土壌母材への火山灰混入の実態把握について検討する。

土壌母材への火山灰の混入は、土壌炭素蓄積を増加させる要因の有力な一つである(図9-1)。火山灰は風化しやすく、多量の金属イオンを土壌へと供給し、非晶質酸化物を二次的に形成するほか、土壌に供給された有機物の分解産物と結合し、有機-無機複合体を形成することで、土壌への炭素蓄積を促進する。

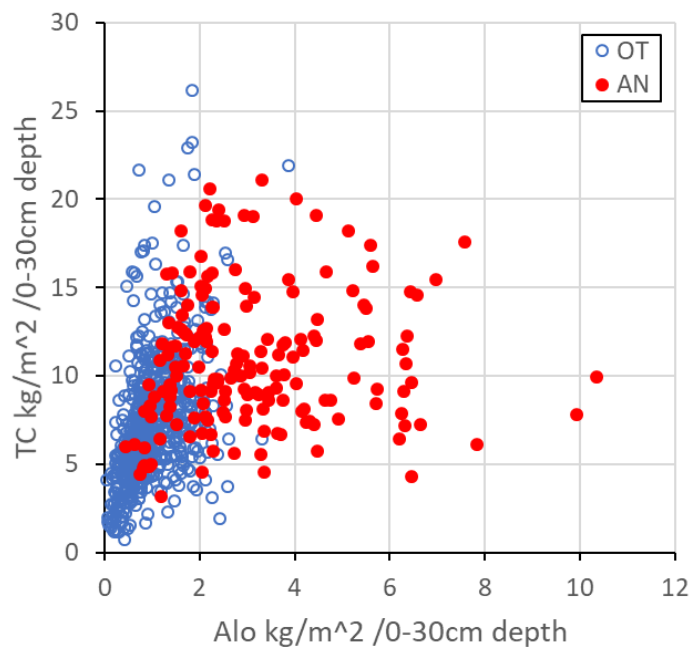


図 9-1 火山灰土壌の指標であるシュウ酸可溶アルミニウム (Alo) の 30 cm 深までの含量と土壌炭素蓄積量 (TC) との関係
(第一期調査代表土壌断面データ。AN：火山灰土壌、OT：それ以外の土壌)

当事業において調査された各調査地点における土壌炭素蓄積量に基づき日本全国の森林における土壌炭素蓄積量として集計するためには、地点データを面的に拡張する必要がある。Yamashita ら (2022) ¹⁾ は機械学習により 10 m メッシュの解像度にて全国の森林土壌の炭素蓄積量を明らかにしている。このとき、地形や気候因子に加え火山との距離情報を与えることでモデルの推定性能が大きく向上することが報告されている。上図の第一期調査代表土壌断面データにおいても同様の結果が確認され、火山との距離情報によるモデル性能の向上がみられる。これに対し、土壌母材への火山灰混入をより直接的に表す指標として上述したシュウ酸可溶アルミニウム含量が挙げられる。火山との距離情報に代替してこの指標値を用いることで土壌炭

素蓄積の推定性能をより向上することができる（表 9-1）。土壌母材への火山灰混入の実態、ひいてはシュウ酸可溶アルミニウム含量を広域情報として整備することにより、より高精度に土壌炭素蓄積量を広域評価できると考えられる。

表 9-1 土壌炭素蓄積量推定モデルにおける適用する説明変数の違いによる推定性能の差異

モデルの因子	学習			検証		
	rmse	r^2	p	rmse	r^2	p
基本（地形＋気候）	3.52	0.184	<0.0001	4.52	0.062	0.0042
基本＋火山との距離	3.30	0.286	<0.0001	4.41	0.108	0.0001
基本＋Alo	3.17	0.349	<0.0001	2.96	0.295	<0.0001

*第一期代表断面データから算定した 0-30 cm 深におけるデータによる。モデルには勾配ブースティング決定木（LightGBM）を使用

9.2. 土壌母材への火山灰混入実態の把握方法の検討

我が国では土壌母材としての火山灰は、植栽された林木の成長に関わる因子として重要な位置を占めるものとは認識されておらず、そのため、これらの情報は体系的には収集されていない。そのため、広域にて利用可能な情報をあらためて整備することにより、土壌炭素蓄積量の面的な推定精度の向上を図ることに寄与する。

本事業の第二期および第三期期間に測定された保管土壌試料の酸性シュウ酸塩可溶アルミニウム含量データを活用し、その地形や気候条件といった広域情報との関係を明らかにすることにより、広域での土壌中のアルミニウム含量を推定する。地形やそれに伴う気候の複雑性に対応するためには土壌調査地点数が不足していることから、地形や気候条件等のパターン化による方法ではなく、機械学習等による探索的な推定手法を用いた手法を検討する。

9.3. 参考文献

- 1) Yamashita et al. (2022) National-scale 3D mapping of soil organic carbon in a Japanese forest considering microtopography and tephra deposition. *Geoderma* 406, 115534. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115534>.

10. 検討会での指摘事項

調査の実施状況に関して、調査の不実施地点が生じることはやむを得ないが、不実施地点が炭素蓄積量の低い場所に偏っているなど等があれば平均値の代表性に影響するので、平均値の代表性に対する不実施地点の影響の有無を確認する必要があるとの指摘があった。不実施地点の代表性への影響について確認し、バイアスが生じていた場合の対応を検討する必要がある。

土壌試料に堆積有機物が混入した疑いがあるため集計から除外された地点が生じたことに関して、調査精度を維持するためには毎年の現地講習会が重要であり、特に H 層の判定は現場での説明が必要であると指摘された。現地講習会は毎年実施しており、第三期から堆積有機物層と鉍質土壌の境界判定も重点的に説明しているが、判定は難しく、また新規に参加する調査者もいるので引き続き講習会での丁寧な説明に努めたい。

結果の表示方法について、今年度の土壌炭素蓄積量調査結果は調査地点がほぼ同一である第二期 2011 年度と比較するべきであり、調査地点が異なる第三期との比較や年度毎の変動には意味がなく、データの説明では表示方法を工夫する必要があると指摘された。年度毎の変動は調査結果のばらつきの目安として表示しているが、結果の説明では比較対象が明確になるよう表示方法を検討する。

枯死木調査の検証調査では根株の見落としに言及したが、同じプロットの 5 年毎の調査結果を追跡し、見落としによる調査毎の変動を把握しておく必要があると指摘された。また、地際直径の測定者によるずれは測定部位がずれることが原因と考えられるので、測定方法の明確化と指導の徹底が必要であると指摘された。根株の数については第二期、第三期の結果と比較し、第四期終了時には見落としによる変動を確認する。地際直径の測定は精度が保てるよう講習会での指導に努める。また、根株の見落としを防ぐため、過去の調査における根株数の調査事業受託者への提供について提案があった。前期においても同様の指摘を受けていたが、必ずしも前回の調査結果が正しいとも限らないことなどもあり、調査者が先入観にとらわれないよう過去の情報は提供してこなかった経緯があるため、過去の調査結果の提供は難しいと判断している。

ベンチマーク調査の試験地の情報と調査項目に関して、造林地が 2 代目か 3 代目かの履歴を確認すること、炭素蓄積には土壌型のみならず母材の影響が大きいため火山灰の混入程度も考慮する必要があることが指摘された。また、20 年後、40 年後の再調査に備えて位置の特定が可能となる工夫をすることの重要性が指摘され、土壌有機物の動態に影響する温度と水分のモニタリングについても検討すること、ベンチマーク調査では気候、土壌、施業条件を網羅する必要があることから、既存の調査地の活用だけでなく、新規に試験地を設定することも可能であれば検討するよう提案があった。ベンチマーク調査の実施にあたっては、これらの指摘や提案を踏まえて取り組みたい。