

研究資料 (Research record)

森林生態系における樹木・木材の放射性セシウム分布と動態の調査法

梶本 卓也^{1)*}、高野 勉²⁾、齊藤 哲¹⁾、黒田 克史²⁾、藤原 健²⁾、
小松 雅史³⁾、川崎 達郎⁴⁾、大橋 伸太⁴⁾、清野 嘉之⁵⁾

要旨

森林総合研究所では、福島第一原発事故により汚染された森林における放射性セシウムの分布や長期的な動態を把握するために、事故直後から福島県内の複数地点のスギ林や広葉樹林など異なる森林に試験地を設けて研究を行ってきた。ここでは、調査林分の概況と、研究手法のうち、樹木地上部、小径木及び下層植生を対象にした放射性セシウム濃度と林分全体の蓄積量の測定及び推定法を紹介する。とくに、幹の各部位（樹皮、辺材、心材）に区別した試料の採取や調整の仕方と、これら幹各部位と枝葉の現存量推定法については、調査林分での推定結果の一部を踏まえながら、方法上の問題点や今後の課題などを検討する。

キーワード：地上部現存量、アロメトリー、容積密度、下層植生、放射性セシウム、容積比

1. はじめに

2011年3月の福島第一原子力発電所の爆発事故で放出された放射性物質の挙動については、水田や河川、森林など様々な生態系を対象に、事故直後から多くの調査や研究が行われている（例えば、Kato et al. 2012, 金子ら 2012, 中西 2013, Yoshihara et al. 2013；他に高橋ら 2014 の文献も参照）。森林の場合、チェルノブイリ原発事故後の研究例が示すように（e.g., Riesen 2002, IAEA 2006）、降下した放射性セシウム（以下、放射性 Cs）は樹木や土壌など生態系内に滞留する傾向にあるため、森林自体が長期にわたって汚染源となることが懸念される。しかし、森林における放射性 Cs の分布や動態は、気候や土壌、地形条件の違いとともに、構成樹種や林齢の違いなどでも異なることが指摘されている（e.g., Nimis 1996, Mamikhin et al. 1997, Thiry et al. 2002, Fesenko et al. 2003, Goor and Thiry 2004, Goor et al. 2007）。チェルノブイリ周辺で汚染された森林は、おもに砂質土壌のヨーロッパアカマツ林だが、福島の事故で影響を受けた東北南部から関東地方には、おもに火山灰を母材とする土壌にスギやヒノキの針葉樹人工林と冷温帯性の落葉広葉樹林が分布するため（Hashimoto et al. 2012）、樹木－土壌間の放射性 Cs 動態はチェルノブイリの場合と大きく違ってくる可能性が示唆されている（金子ら 2013, 小林 2014）。したがって、今回の福島原発事故による放射能汚染の影響を、将来長きにわたって正確に予測するためには、これら主要な森林タイプを対象にした樹木と土壌を含む生態系レ

ベルでの蓄積量に関する継続的な調査が必要とされる。

このような観点から、森林総合研究所では林野庁の委託事業や所内交付金プロジェクトとして、事故直後から福島県内の森林に複数の調査地を設けて、樹木地上部の各部位や低木、下層植生、さらにはリター（堆積有機物または落葉層とも呼ばれる）や土壌も含めて放射性 Cs の濃度や林分全体の蓄積量を推定し、その経年変化を追跡する研究に取り組んでいる（金子ら 2012, Kuroda et al. 2013, 林野庁 2013, 2014）。ここでは、この事業で用いている野外調査や推定手法のうち、とくに林分全体の放射性 Cs 蓄積量推定とその動態把握に必要な樹木の幹（木材）や枝葉など地上部各部位の現存量の推定方法と、それぞれの放射性 Cs 濃度測定用試料の採取や調整方法を中心に手順を紹介する。また、測定及び推定結果の一部を例にして、方法上の問題点や今後の課題について検討する。

2. 林分調査法

2.1 調査地の選定

原発事故が発生した初年度（2011 年）に、汚染程度の違う福島県内の川内村、大玉村及び只見町の 3 ケ所を調査地を選び、県内で最も広く植栽されているスギ林を共通の研究対象樹種として、スギの調査林分（KU-S1、OT-S、TD-S）を各国有林内に設定した（表 1）。各スギ林の林齢は、現在県内のスギ林の齢級構成のほぼピークにあたる 40～45 年生に揃えた。各調査地の位置は、本

原稿受付：平成 26 年 7 月 14 日 原稿受理：平成 26 年 8 月 7 日

1) 森林総合研究所植物生態研究領域

2) 森林総合研究所木材特性研究領域

3) 森林総合研究所きのこ・微生物研究領域

4) 森林総合研究所企画部

5) 森林総合研究所研究コーディネータ

* 森林総合研究所植物生態研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1

表 1. 調査林分の概況

Table 1. Outlines of the research plots established at three study sites in Fukushima Prefecture.

調査地名	位置	標高	森林型	プロット名	面積	林齢	樹種	立木密度	胸高直径	樹高	幹材積
Site	Location	Altitude (m)	Forest type	Plot Name	Plot area (ha)	Stand age (yrs-old)	Species	Tree density (ha ⁻¹)	Diameter DBH (cm)	Height H (m)	Stem volume (m ³ ha ⁻¹)
川内村 Kawauchi village	大津辺山 Mt. Otsupe	660	スギ人工林 <i>Cryptomeria japonica</i> , plantation	KU-S1	0.16	43	スギ <i>C. japonica</i> 広葉樹 (Broad-leaved spp.)	975 (575)	18.9 (17.1)	14.3 (13.9)	246 (72)
		730	ヒノキ人工林 <i>Chamaecyparis obtusa</i> , plantation	KU-H	0.10	26	ヒノキ <i>C. obtusa</i> 広葉樹 (Broad-leaved spp.)	1330 —	17.6 —	16.5 —	278 —
	上川内 Kami-Kawauchi	690	スギ人工林 <i>Cryptomeria japonica</i> , plantation	KU-S2	0.12	56	スギ 広葉樹他* <i>C. japonica</i> (other spp.)*	733 (225)	30.9 (25.8)	19.2 (13.8)	546 (86)
		大玉村 Otama village	730	スギ人工林 <i>Cryptomeria japonica</i> , plantation	OT-S	0.24	42	スギ 広葉樹 (Broad-leaved spp.) <i>C. japonica</i>	1117 —	24.8 —	17.8 —
		750	アカマツ人工林 <i>Pinus densiflora</i> , plantation	OT-P	0.24	43	アカマツ 広葉樹 (Broad-leaved spp.) <i>P. densiflora</i>	938 (375)	18.8 (15.6)	12.6 (11.9)	182 (46)
		760	落葉広葉樹二次林 Deciduous broad-leaved, secondary	OT-Q	0.24	43	広葉樹 アカマツ Broad-leaved spp. (<i>P. densiflora</i>)	546 (658)	17.5 (18.9)	12.3 (12.6)	88 (127)
	只見町 Tadami town	790	スギ人工林 <i>Cryptomeria japonica</i> , plantation	TD-S	0.21	41	スギ 広葉樹 (Broad-leaved spp.) <i>C. japonica</i>	1105 (133)	19.9 (17.2)	14.3 (12.3)	299 (20)

林齢、立木密度、直径、樹高及び幹材積合計は、初年度(2011年)の値。樹高は、直径DBHから推定した各個体の平均値。上段に優先樹種、下段カッコ内にその他樹種の値を示す。*上川内スギ林(KU-S2)のその他樹種は、広葉樹以外にもアカマツとカラマツ(植栽木)が多少混交する。直径分布や樹種構成の詳細は、電子補助資料図1を参照。

The values shown for the stand age, tree density and mean size parameters were obtained in 2011.

The values in the upper line are for the dominant species, and the values in the lower line in parentheses are other species. Tree height was estimated using the site-specific DBH—H regression (see electrical supplementary Fig. 2).

* In the *C. japonica* stand (KU-S2), broad-leaved trees grow together with planted trees of two conifer species (*Pinus densiflora* and *Larix kaempferi*). Details of species composition of each stand are shown in the electrical supplementary Fig. 1.

誌特集号の高橋ら(2014、図2)を参照されたい。

スギ以外の樹種については、樹種間の比較を目的に、大玉村でスギ林(OT-S)の近くのアカマツと落葉広葉樹(コナラやクリなど)がそれぞれ優占する林分をアカマツ林(OT-P)、広葉樹林(OT-Q)として、初年度(2011年)から調査林分に加えた。また、川内村では、初年度は上述のスギ林(KU-S1)のみ調査を行ったが、2年目(2012年)からは、この近く(大津辺山)のヒノキ林(KU-H)と落葉広葉樹林(いずれも村有林)も調査対象に追加した。ただし、この落葉広葉樹林では、後述するような固定プロットはとくに設置せず、樹木と土壌試料の採取のみを行った。さらに川内村では、もう1ヶ所汚染程度がやや低い地域(上川内)の村有スギ林(56年生、KU-S2)を調査林分に選定して、試料木の採取と分析を行った。各調査林分の直径階分布や樹種構成などの詳細は、補足電子資料図1を参照されたい。

2.2 調査プロットの設定

各調査林分には、長方形の固定プロット(面積0.10～0.24 ha前後)を1ヶ所設置した(表1)。プロットの面積と形状は、地形の影響や本数密度、平均樹高の違いなどを考慮して林分ごとに多少異なった。例えば、3調査地共通で設置した各スギ林については、川内村の0.16 ha(20×80 m²)から大玉村の0.24 ha(30×80 m²)と1.5倍の差がある。しかし、いずれのプロットにもスギの個

体が少なくとも150本程度含まれるよう調査面積を確保した。各プロットは、毎木調査や小径木の測定用に10×10 mの格子点に杭を打ち、便宜的にコードラート(方形枠)に区分した。

2.3 毎木調査

各調査林分では、固定プロット内の胸高直径(DBH、地上高1.3 m)が10 cm以上のすべての個体に番号をつけて、樹種を記載後、スチールメジャーを用いてDBH(実際には周囲長)を測定した。立枯れ個体については、一部の林分では同様にDBHを測定したが、後述する林分の現存量と放射性Cs蓄積量の推定では除外した。

各プロットでは、優占樹種の個体10～20本程度を選び、測桿か超音波測定装置(Vertexなど)を用いて樹高(H)と生枝下高(HB)を測定し、DBHから樹高を推定するための関係式を調査林分ごとに導いた。関係式は、一部の林分を除いておおむね対数式で近似した(関係式の例を、補足電子資料図2に示した)。これらの式から推定した各個体の樹高は、個体の幹材積の推定(後述)に用いた。

胸高直径が10 cm未満の小径木については、各プロットの両隅に位置する2つのコードラート(各10×10 m²)を対象に、生存個体すべての樹種を記載してDBHを測定した。同じ個体でも萌芽枝などで多幹の場合は、それぞれの幹を1本ずつ測定した。

3. 部位別現存量の推定法

放射性 Cs の林分蓄積量を求める上で必要となる現存量の推定手順を図 1 にまとめた。林分 Cs 蓄積量は、森林の地上部を (1) 樹木 (DBH が 10 cm 以上)、(2) 小径木 (10 cm 未満)、(3) 下層植生 (草本・木本類、ササ含む) の 3 つに大別し、それぞれ各部位の現存量を推定して、それらに部位別に採取した試料で得た放射性 Cs 濃度を乗じて求めた。樹木の地上部は、幹、枝、葉の 3 つの部位に分けて、また小径木は木部 (幹と枝合計) と葉の 2 つに分けて扱った。さらに、樹木の幹 (木材) については、将来的に利用される際にその汚染状況を詳しく把握しておく必要性から、樹皮・辺材・心材の 3 つの部位に区分して推定した。

森林の樹木の現存量推定には、皆伐法や平均木法など様々な手法がある (例えば、依田 1971, 木村 1976)。この研究では、個体の成長や枯死を反映して放射性物質の動態を長期的に追跡するのに適した方法として、アロメトリー法を用いることにした。アロメトリー法とは、毎年の毎木調査で得られる各個体の直径や樹高 (DBH, H) を変数として各部位の乾重を求める方法で、ふつう樹木の地上部を幹と枝、葉に大別して、それぞれの乾重を計算する場合が多いが、幹についてさらに樹皮や材部を分けて現存量を推定する必要性から、一度幹材積を求めてから各部位の乾重に換算する方法を用いることにした (図 1 の B)。

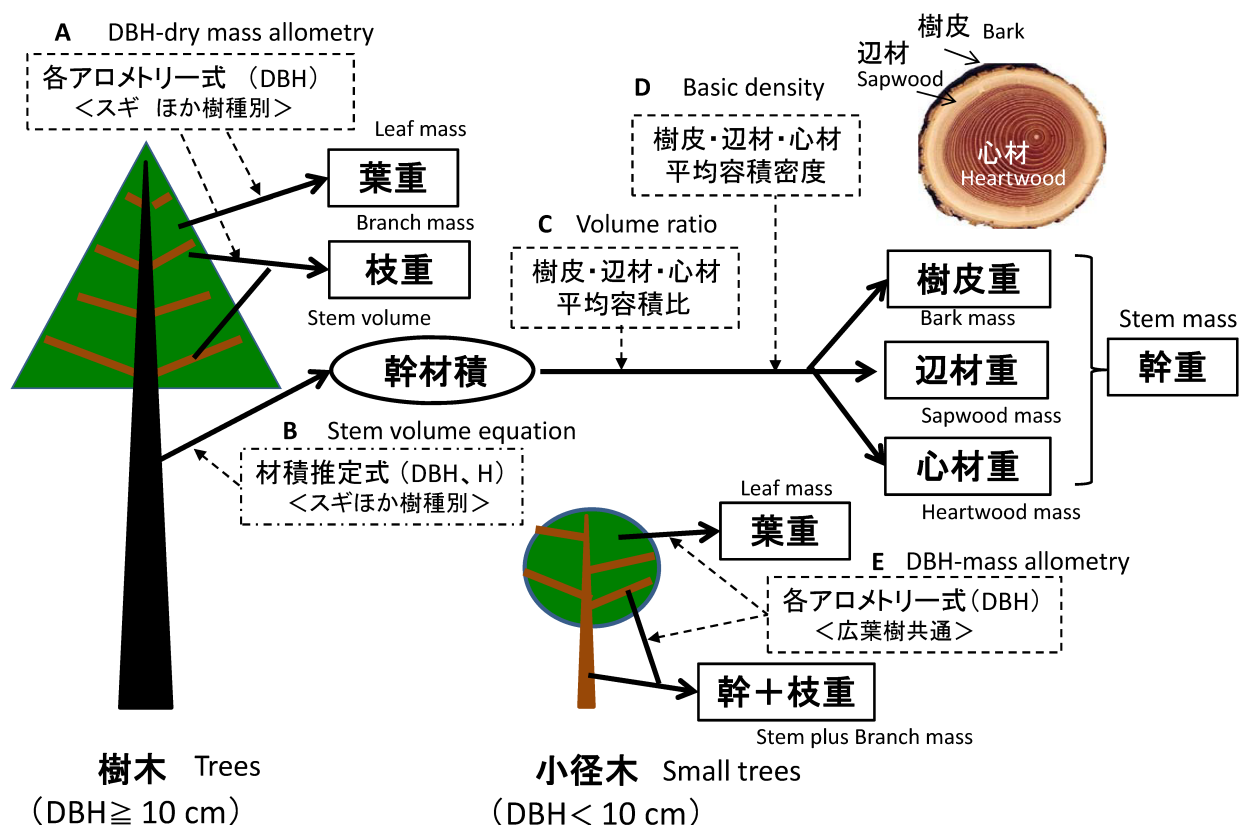


図 1. 樹木地上部の部位別現存量の推定手順

枝と葉の乾重は (A) DBH を変数とする各アロメトリー式から、幹は (B) 総幹材積を計算して、それに樹皮・辺材・心材それぞれの (C) 容積比と (D) 容積密度を乗じて部位別の乾重に換算する方法で求めた。小径木は、木部 (幹と枝合計) と葉の 2 つに分けて、(E) 各アロメトリー式から推定した。

Fig. 1. Method used to estimate biomass in the aboveground tree components.

For each tree (DBH ≥ 10 cm), the dry masses of leaves and branches were estimated by (A) appropriate DBH-based allometric equation (see details of equation in Table 2). The dry mass of stem was estimated by separating it into three parts (barks, sapwoods, and heartwoods): (B) the total stem volume was converted into the dry mass of each part by using the volume ratio, or (C) a relative volume proportion of that part to the whole stem, and (D) basic density. For small trees (DBH < 10 cm), the dry masses of woody parts (stem plus branches) and leaves were estimated separately by applying appropriate DBH-based allometric equation (see details of equation in Table 2).

3.1 樹木の枝葉

枝と葉の現存量は、DBH を変数とする枝及び葉の乾重との相対成長関係式、 $y = a \text{ DBH}^b$ (y は各部位乾重、 a 、 b は係数) を樹種別に作成して推定した (図 1 の A)。推定式の作成には、全国各地で収集された伐倒木データ (林野庁、未公開) の一部を用いた。スギ、アカマツ、ヒノキの針葉樹 3 種については、各調査林分の林齢 (約 40 年生、表 1) に近い各樹種のデータ (地域は複数) を選択して DBH と乾重の関係を調べたところ、図 2 に示すとおり、スギとヒノキについては決定係数 (R^2) が 0.7 ~ 0.9 と比較的良好な相対成長関係式が得られた (式の統計量や試料木の詳細は、表 2 を参照)。また、アカマツについては、DBH と葉重、枝重の関係はかなりデータがばらつくが ($R^2 = 0.4 \sim 0.5$)、いずれの関係も有意 ($p < 0.01$) であった (図 2b)。落葉広葉樹については、コナラとミズナラを中心にクリなど他の 10 数種を含む伐倒木データを用いて推定式を作成したが、枝重も葉重もともに良好な関係 (R^2 が約 0.7) が認められた (図 2c)。

3.2 樹木の幹 (木材)

幹の現存量は、樹皮・心材・辺材の 3 部位に分けて推定するために、まずプロット内の各個体の幹材積を既存の材積推定式を用いて計算し (図 1 の B)、それに樹皮・心材・辺材の容積比 (全幹材積に占める割合、図 1 の C) を乗じ

て部位別の材積を求めた。その値に、各部位の容積密度 (乾重/材積、図 1 の D) を乗じることで乾燥重量に換算した。したがって、幹の各部位の現存量は、[幹材積] × [各部位の容積比] × [容積密度] で計算した。

幹材積の推定には、DBH と H を変数とする地域ごとに樹種別及び直径階別に調整された経験式を利用した (細田ら 2010)。各式の詳細は、この文献の表 2 を参照されたい (スギ、アカマツ、ヒノキ、広葉樹の各式は、番号 29、32、31、35 に対応)。なお、広葉樹以外の各式は、現行の立木幹材積表 (東日本編) で用いられている式と同じである。部位別の容積比と容積密度の値は、後述するように放射性 Cs 濃度の測定用に各プロットで伐倒した個体の幹 (円板) 試料で得られた平均値 (単年 3 本、または 2 年分の 6 本) を用いた。

3.3 小径木

小径木の現存量は、地上部を木部 (幹と枝合計) と葉に分けて、それぞれ DBH を変数とする乾重との巾乗関係式を用いて推定した (図 1 の E)。これらの推定式は、岐阜県の冷温帯落葉広葉樹林の伐倒調査で得られた既存のデータを用いて作成した (小見山ら 2002; 付表「伐倒木のデータその 2」より、DBH < 10 cm の個体のみ 31 本のデータを使用)。図 3 に示すように、地上木部重及び葉重ともに DBH とかなり良好な関係 ($R^2 > 0.84$) が認められた (式の係数等の詳細は、表 2 を参照)。

表 2. 樹木と小径木の枝及び葉の現存量推定に用いた樹種別の相対成長式

Table 2. Allometric equations developed to estimate biomass of branches and leaves in each study stand.

	対象樹種 Species	部位 Component	式の係数 Parameters of equation		決定係数 Coefficients of determination R^2	試料本数 Samples n	試料木の樹種や年齢、採取場所(県)など* Information on original data, sample trees e.g., tree ages, sampling sites (prefectures)
			a	b			
樹木 Trees (10 cm ≤ DBH)	スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	枝 Branch	4.36×10^{-4}	3.17	0.92	25	33~40年生(years)、5林分(5 stands) 茨城、石川、長野、秋田、山形各県
		葉 Leaf	4.37×10^{-3}	2.61	0.86		Samples taken from 5 prefectures (Ibaraki, Ishikawa, Nagano, Akita, and Yamagata)
	アカマツ <i>Pinus densiflora</i>	枝 Branch	7.98×10^{-3}	2.42	0.53	23	28~39年生(years)、4林分(4 stands) 長野、岩手各県
		葉 Leaf	2.52×10^{-2}	1.77	0.39		2 prefectures (Nagano, Iwate)
	ヒノキ <i>Chamaecyparis obtusa</i>	枝 Branch	7.71×10^{-4}	3.22	0.77	20	28~39年生(years)、4林分(4 stands) 茨城、静岡、岐阜各県
		葉 Leaf	4.21×10^{-3}	2.57	0.86		3 prefectures (Ibaraki, Shizuoka, Gifu)
	落葉広葉樹 Broad-leaved spp.	枝 Branch	1.50×10^{-3}	3.24	0.69	49	おもにコナラ、ミズナラ 11林分(樹齢不明)、関東・東北の各県
		葉 Leaf	5.90×10^{-4}	3.04	0.68		mainly two oaks; <i>Quercus serrata</i> , <i>Q. crispula</i> 11 stands (unknown ages), northern Japan
	小径木 Smaller trees (DBH < 10 cm)	幹・枝合計 Stem and branch	2.57×10^{-1}	1.95	0.98	31	ミズナラ、イタヤカエデ、ミズキなど11種 e.g., <i>Quercus crispula</i> , <i>Acer mono</i> , <i>Cornus controversa</i>
		葉 Leaf	1.91×10^{-2}	1.62	0.84		小見山ら(2002)付表より from Komiyama et al. (2002)

各相対成長関係は、すべてDBHを変数とする巾乗式、 $y = a \text{ DBH}^b$ (単位[cm, kg]; y は各部位の乾重) で近似した。

樹木(DBH > 10 cm)の伐倒木データは、林野庁の未公開資料。

Each allometric relationship was given by the equation, $y = a \text{ DBH}^b$ (unit: [cm, kg], y is dry mass of component).

The original data for the sample trees (except for smaller trees) were from the Japanese Forestry Agency (unpublished data).

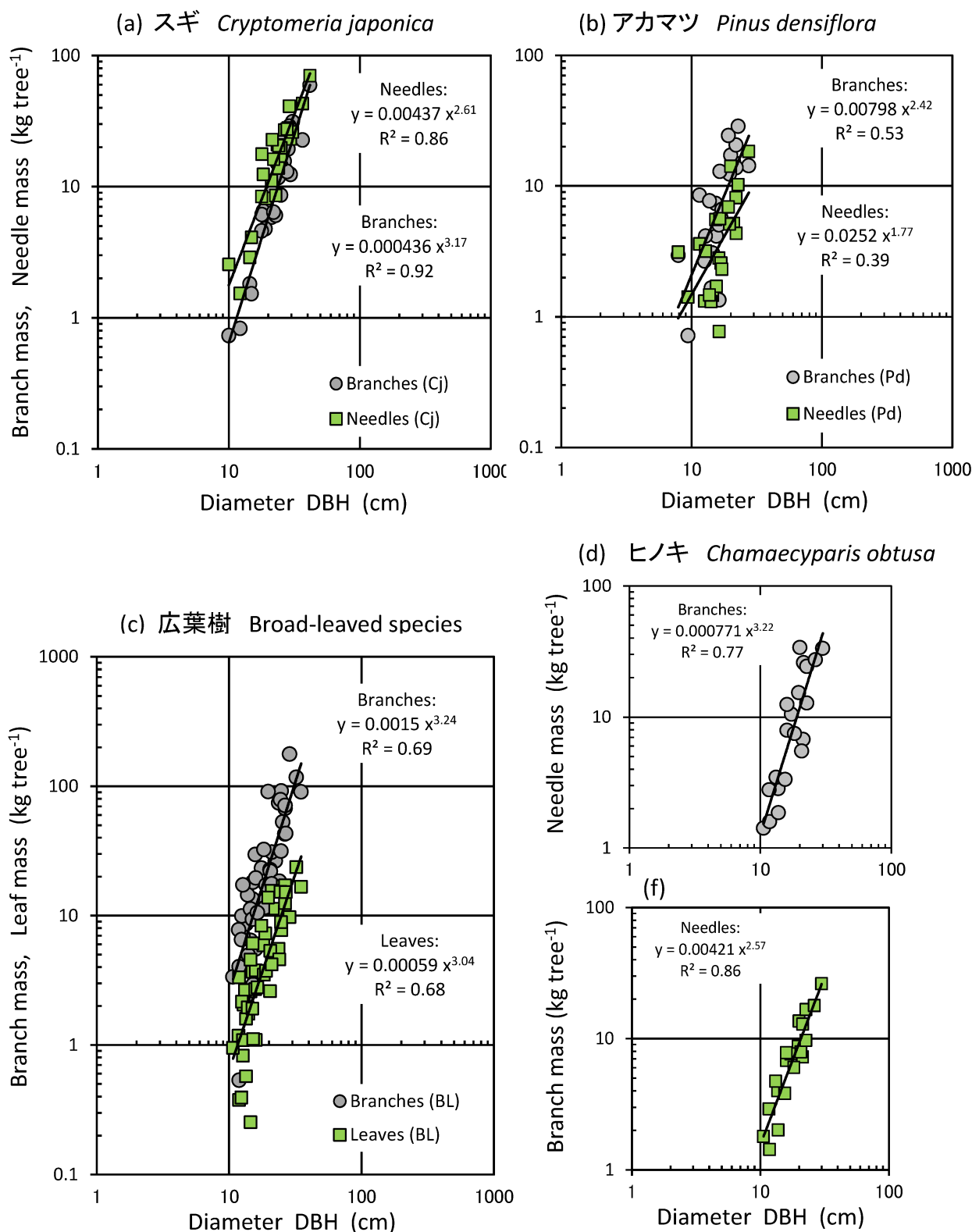


図 2. 枝と葉の現存量推定に用いた直径 (DBH) と乾重のアロメトリー関係

(a) スギの枝、葉 (b) アカマツの枝、葉 (c) 広葉樹の枝、葉 (d) ヒノキの枝 (f) ヒノキの葉
試料木と各式の係数等詳細は表 2 を参照。

Fig. 2. Allometric relationships between the DBH and the dry mass of branches and leaves observed for the sample trees of different species, (a) *Cryptomeria japonica* ($n = 25$), (b) *Pinus densiflora* ($n = 23$), (c) deciduous broad-leaved species (e.g., *Quercus serrata* and *Q. crispula*, $n = 49$), and (d) *Chamaecyparis obtusa* ($n = 20$). The details of the regression equations are summarized in Table 2.

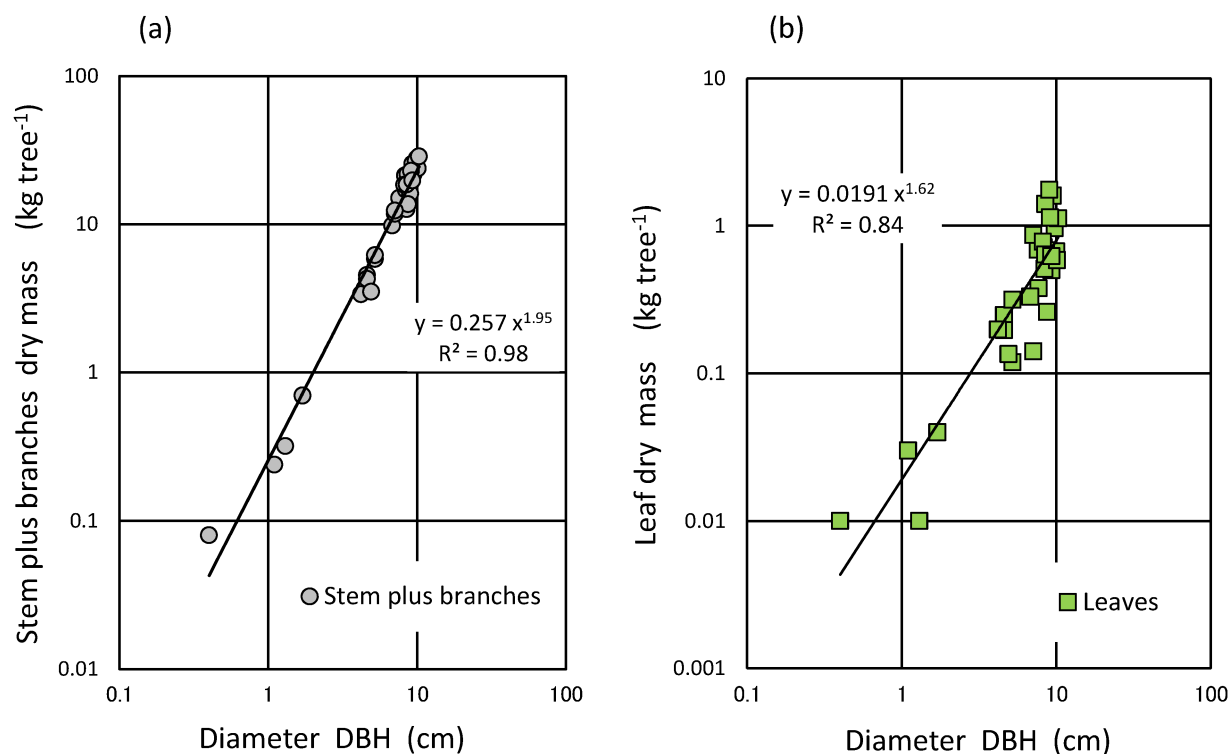


図 3. 小径木（落葉広葉樹）の現存量推定に用いた直径（DBH）と各乾重のアロメトリー関係

(a) 幹・枝合計乾重、(b) 葉乾重。試料木と各回帰式の係数等詳細は表 2 を参照。

Fig. 3. Allometric relationship between DBH and dry mass of branches and leaves found for smaller deciduous broad-leaved trees (DBH < 10 cm, n=32).

The data of sample trees used to derive each regression equation included 11 species, e.g., *Quercus crispula*, *Acer mono*, *Carpinus tschonoskii*, and *Cornus controversa*. (for details, see Table 2).

3.4 下層植生

下層植生の現存量は、いわゆる坪刈り法を用いて推定した。各プロット内で、ランダムに選んだ 5 ケ所に方形枠（各 $1 \times 1 \text{ m}^2$ ）を設定し、その中の刈り取った植物体地上部の乾燥重量を、単位面積当たりに換算して（5 枠の平均値）現存量を計算した。なお、木本や草本（ササも）の幹や茎が長くて先端が枠外にある場合も、地際部が枠内にあればすべて刈り取りの対象とした。この刈り取り試料は、後述するように放射性 Cs 濃度の測定にも用いた。

4. 放射性セシウム濃度の測定用試料の採取と分析

4.1 試料木の選定と伐倒

各調査林分では、固定プロット周辺からサイズが異なる大、中、小の 3 個体（優占樹種）を試料木に選定した。

大玉村の落葉広葉樹林（OT-Q）については、試料木は優占樹種のコナラを対象に、隣接するアカマツ林（OT-P）も含めた両プロット周辺から 3 個体を選定した。これらの試料木は、すべて先枯れや幹の曲がりなどが無い個体で（写真 1a）、林分ごとに毎年選んだ大、中、小の各個体は、それぞれ DBH が 3 年間通じてほぼ同じくらいであった（表 3）。

各試料木は、伐倒の際に放射性物質濃度の高い落葉や土壌の付着を避けるため、あらかじめ立木状態で幹の地上高 50 ～ 300 cm にブルーシートを巻き付けてから、地際より少し上部（20 ～ 40 cm）でチェーンソーを用いて伐倒した（写真 1b, c, d）。切り株の高さ（伐採高）と地際直径、生枝下高と生枝下直径、樹高を測定してから、以下の手順で枝葉の試料と幹の円板試料を採取した。

(a)



(b)



(c)



(d)



写真 1. 試料木の選定と伐倒の様子

- (a) 大玉村スギ林 OT-S (2012 年；赤テープをつけた木)
- (b) 只見町スギ林 TD-S (2013 年；青シートをまいた木)
- (c)、(d) 川内村ヒノキ林 (2012 年、大)

Photo 1. Examples of the trees sampled.

- (a) *Cryptomeria japonica* (small tree, 2012, Ohtama site OT-S)
- (b) *Cryptomeria japonica* (medium tree, 2013, Tadami site TD-S)
- (c) and (d) *Chamaecyparis obtusa* (large tree, 2012, Kawauchi site KU-H)

表 3a. 試料木の諸量と幹各部位の容積比及び容積密度

1) 川内村のスギ林とヒノキ林

Table 3a. Size parameters and estimates of volume ratio and basic density for the stem components of the sample trees in each plot at the Kawauchi site.

調査地名 Site	調査林分 Study stand	プロット名 Plot Name	採取年 Sampling year	試料木 Sample tree	サイズ Size parameters				容積比 Volume ratio			容積密度* Basic density		
					直径 DBH (cm)	樹高 H (m)	生枝下高 HB (m)	生枝下直径 DB (cm)	樹皮 Bark (%)	辺材 Sapwood (%)	心材 Heartwood (%)	樹皮 Bark (g cm ⁻³)	辺材 Sapwood (g cm ⁻³)	心材 Heartwood (g cm ⁻³)
川内村 (KU) Kawauchi village	スギ人工林 <i>C. japonica</i> 大津辺山 Mt. Otsupe	KU-S1	2011	大 Large	36.2	21.4	8.3	27.5	5.8	62.0	32.2	0.234	0.231	0.266
				中 Medium	21.4	17.2	10.7	13.6	9.9	68.2	21.9	0.237	0.328	0.350
				小 Small	14.3	12.1	4.2	9.2	6.4	69.2	24.5	0.248	0.263	0.294
								平均 Mean SD	7.4 2.2	66.5 3.9	26.2 5.3	0.240 0.007	0.274 0.049	0.303 0.043
			2012	大 Large	32.8	21.1	8.8	25.5	4.5	63.5	32.0	0.365	0.252	0.270
				中 Medium	21.5	16.6	4.0	18.1	3.4	77.6	19.0	0.312	0.252	0.342
				小 Small	13.7	16.2	10.1	8.4	6.3	70.7	23.0	0.321	0.344	0.378
								平均 Mean SD	4.8 1.5	70.6 7.0	24.6 6.7	0.333 0.029	0.283 0.053	0.330 0.055
			2013	大 Large	34.5	19.3	4.3	30.9	4.1	59.3	36.5	0.378	0.271	0.302
				中 Medium	23.0	18.0	9.6	16.2	4.4	62.2	33.4	0.345	0.286	0.323
				小 Small	17.4	13.8	5.7	14.4	5.0	74.8	20.1	0.357	0.302	0.344
								平均 Mean SD	4.5 0.5	65.4 8.3	30.0 8.7	0.360 0.016	0.287 0.015	0.323 0.021
			2011	大 Large	50.5	26.0	12.4	33.6	4.6	44.5	50.9	0.318	0.258	0.280
				中 Medium	35.8	22.4	15.1	19.2	3.0	54.8	42.2	0.310	0.281	0.283
				小 Small	28.9	21.4	13.6	17.8	5.7	62.1	32.2	0.354	0.351	0.381
								平均 Mean SD	4.5 1.4	53.8 8.8	41.8 9.4	0.327 0.023	0.296 0.049	0.315 0.058
			2012	大 Large	47.7	26.0	12.6	34.2	2.7	48.0	49.4	0.401	0.325	0.413
				中 Medium	37.2	24.0	11.5	26.7	3.3	58.7	38.0	0.410	0.317	0.322
				小 Small	27.4	21.4	13.7	15.9	4.1	67.0	28.9	0.413	0.335	0.328
								平均 Mean SD	3.3 0.7	57.9 9.5	38.8 10.2	0.408 0.007	0.326 0.009	0.354 0.051
			2013	大 Large	51.0	29.1	13.1	36.5	7.0	44.6	48.4	0.407	0.289	0.283
				中 Medium	37.0	23.9	6.1	31.7	7.0	55.8	37.2	0.378	0.321	0.338
				小 Small	29.5	24.0	8.6	23.3	8.1	62.7	29.2	0.386	0.290	0.350
								平均 Mean SD	7.4 0.6	54.4 9.1	38.3 9.6	0.390 0.015	0.300 0.018	0.324 0.036
ヒノキ人工林 <i>C. obtusa</i> 大津辺山 Mt. Otsupe	KU-H	2012	2012	大 Large	20.7	11.6	4.7	16.2	8.1	64.4	27.5	0.339	0.374	0.435
				中 Medium	17.0	10.8	4.9	12.4	9.8	61.5	28.7	0.329	0.395	0.443
				小 Small	13.7	9.5	4.0	10.2	8.5	70.5	21.0	0.271	0.374	0.421
								平均 Mean SD	8.8 0.9	65.5 4.6	25.8 4.1	0.313 0.037	0.381 0.012	0.433 0.011
			2013	大 Large	19.8	11.5	2.9	18.0	4.3	64.6	31.1	0.317	0.364	0.416
				中 Medium	16.9	10.1	4.4	13.6	5.9	67.3	26.9	0.322	0.319	0.371
				小 Small	14.2	10.4	3.7	12.4	4.4	68.9	26.6	0.313	0.368	0.416
								平均 Mean SD	4.9 0.9	66.9 2.2	28.2 2.5	0.317 0.005	0.350 0.027	0.401 0.026

*部位別容積密度は、各個体、2ヶ所(地上高 2.5 m, 4.5 m)で採取した円板試料の平均値。

*The basic density of each stem component is the mean of two stem disks sampled from 2.5 m and 4.5 m above the ground.

表 3b. 試料木の諸量と幹各部位の容積比及び容積密度

2) 大玉村のスギ林、アカマツ林及び広葉樹林（コナラ）

Table 3b. Size parameters and estimates of volume ratio and basic density for the stem components of the sample trees at the Otama site.

調査地名 Site	調査林分 Study stand	プロット名 Plot Name	採取年 Sampling year	試料木 Sample tree	サイズ Size parameters				容積比 Volume ratio			容積密度* Basic density					
					直径 DBH (cm)	樹高 H (m)	生枝下高 HB (m)	生枝下直径 DB (cm)	樹皮 Bark (%)	辺材 Sapwood (%)	心材 Heartwood (%)	樹皮 Bark (g cm ⁻³)	辺材 Sapwood (g cm ⁻³)	心材 Heartwood (g cm ⁻³)			
大玉村 Otama village	スギ人工林 <i>C. japonica</i>	OT-S	2011	大	31.7	20.9	10.8	22.4	9.1	53.5	37.4	0.253	0.288	0.298			
				中	25.5	21.9	13.8	17.6	8.2	63.0	28.8	0.247	0.303	0.315			
				小	18.9	19.6	13.5	12.0	8.5	66.5	25.0	0.231	0.282	0.284			
				Small													
				平均	Mean	8.6	61.0	30.4	0.244	0.291	0.299						
				SD	0.4	6.7	6.4	0.011	0.011	0.016							
				2012	大	33.5	22.0	11.1	22.1	3.5	63.5	33.0	0.406	0.256	0.269		
					中	31.2	23.7	14.5	19.2	4.5	55.7	39.8	0.361	0.291	0.309		
			小		18.9	21.1	13.3	13.2	3.8	75.9	20.3	0.278	0.339	0.353			
			Small														
			平均		Mean	4.0	65.0	31.0	0.348	0.295	0.310						
			SD		0.5	10.2	9.9	0.065	0.041	0.042							
			2013		大	34.5	23.6	10.1	24.7	3.8	56.1	40.1	0.339	0.296	0.321		
					中	26.4	22.1	13.4	18.1	4.7	57.9	37.4	0.354	0.303	0.327		
				小	20.1	18.5	8.6	14.8	5.1	67.4	27.5	0.308	0.329	0.349			
				Small													
				平均	Mean	4.5	60.5	35.0	0.334	0.309	0.332						
				SD	0.7	6.1	6.6	0.024	0.017	0.015							
				アカマツ人工林 <i>P. densiflora</i>	OT-P	2011	大	31.1	16.5	8.3	22.1	10.7	76.2	13.0	0.312	0.390	0.383
							中	23.0	15.7	8.9	15.9	8.1	84.4	7.5	0.209	0.433	0.374
			小				16.5	13.9	9.5	9.5	9.2	76.4	14.4	0.260	0.371	0.330	
			Small														
			平均				Mean	9.4	79.0	11.6	0.260	0.398	0.362				
			SD				1.3	4.7	3.7	0.051	0.032	0.028					
2012	大	30.7	16.4				8.8	22.0	6.4	87.2	6.5	0.320	0.391	0.363			
	中	23.6	16.0				9.4	15.6	5.0	82.1	13.0	0.300	0.412	0.373			
	小	19.7	15.8			9.5	13.1	4.8	91.9	3.3	0.351	0.475	0.409				
	Small																
	平均	Mean	5.4			87.1	7.6	0.323	0.426	0.382							
	SD	0.9	4.9			4.9	0.026	0.044	0.024								
	2013	大	32.5			15.9	7.7	24.4	6.0	84.7	9.3	0.263	0.405	0.385			
		中	25.5			14.5	6.5	22.3	7.1	89.6	3.4	0.300	0.367	0.359			
小		17.3	13.8			7.2	12.2	6.2	89.1	4.8	0.309	0.440	0.408				
Small																	
平均		Mean	6.4			87.8	5.8	0.291	0.404	0.384							
SD		0.6	2.7			3.1	0.024	0.036	0.025								
落葉広葉樹二次林 コナラ Broad-leaved forest <i>Quercus serrata</i>		OT-Q	2011			大	30.8	16.7	5.1	28.1	16.2	53.5	30.3	0.391	0.615	0.628	
						中	23.2	14.9	4.8	19.4	24.1	53.0	22.9	0.587	0.594	0.641	
	小					13.6	13.1	6.9	9.8	18.9	52.3	28.8	0.411	0.616	0.643		
	Small																
	平均					Mean	19.8	52.9	27.3	0.463	0.608	0.637					
	SD					4.0	0.6	3.9	0.108	0.012	0.008						
	2012			大	27.5	14.5	5.4	22.6	21.7	48.9	29.4	0.421	0.603	0.623			
				中	23.4	15.8	6.6	19.5	12.8	57.9	29.3	0.418	0.655	0.649			
			小	10.8	10.1	5.2	9.4	18.2	51.8	30.1	0.480	0.557	0.649				
			Small														
			平均	Mean	17.6	52.8	29.6	0.440	0.605	0.640							
			SD	4.5	4.6	0.4	0.035	0.049	0.015								
			2013	大	31.2	16.5	5.5	28.4	10.4	62.0	27.6	0.394	0.586	0.606			
				中	22.4	15.8	5.5	18.1	18.4	53.1	28.5	0.460	0.600	0.621			
	小			19.1	15.4	6.8	15.5	12.3	69.1	18.5	0.442	0.634	0.645				
	Small																
	平均			Mean	13.7	61.4	24.9	0.432	0.607	0.624							
	SD			4.2	8.0	5.5	0.034	0.024	0.019								

*部位別容積密度は、各個体、2ヶ所(地上高 2.5 m, 4.5 m)で採取した円板試料の平均値。

*The basic density of each stem component is the mean of two stem disks sampled from 2.5 m and 4.5 m above the ground.

表 3c. 試料木の諸量と幹各部位の容積比及び容積密度

3) 只見町のスギ林

Table 3c. Size parameters and estimates of volume ratio and basic density for the stem components of the sample trees at the Tadami site.

調査地名 Site	調査林分 Study stand	プロット名 Plot Name	採取年 Sampling year	試料木 Sample tree	サイズ Size parameters				容積比 Volume ratio			容積密度* Basic density		
					直径 DBH (cm)	樹高 H (m)	生枝下高 H _B (m)	生枝下直径 DB (cm)	樹皮 Bark (%)	辺材 Sapwood (%)	心材 Heartwood (%)	樹皮 Bark (g cm ⁻³)	辺材 Sapwood (g cm ⁻³)	心材 Heartwood (g cm ⁻³)
只見町 Tadami town	スギ人工林 <i>C. japonica</i>	TD-S	2011	大 Large	34.6	20.9	8.0	28.2	9.5	48.8	41.7	0.241	0.239	0.282
				中 Medium	25.4	16.7	8.4	17.9	9.1	50.5	40.4	0.299	0.271	0.312
				小 Small	19.3	14.7	3.4	17.1	8.9	59.1	32.0	0.296	0.342	0.335
				平均 Mean					9.1	52.8	38.1	0.279	0.284	0.310
				SD					0.3	5.5	5.3	0.033	0.053	0.026
			2012	大 Large	32.6	22.2	6.4	31.7	5.6	59.5	35.0	0.271	0.271	0.312
				中 Medium	23.8	17.4	6.6	17.8	4.6	67.6	27.8	0.323	0.286	0.372
				小 Small	19.4	16.4	8.2	12.7	8.8	58.7	32.5	0.294	0.294	0.345
				平均 Mean					6.3	61.9	31.8	0.296	0.284	0.343
				SD					2.2	4.9	3.6	0.026	0.011	0.030
			2013	大 Large	28.5	22.2	8.2	23.7	5.7	59.4	34.9	0.356	0.293	0.346
				中 Medium	23.7	18.3	12.2	14.6	5.4	68.8	25.8	0.354	0.351	0.368
				小 Small	17.9	14.9	8.6	12.2	6.7	71.1	22.2	0.297	0.321	0.325
				平均 Mean					5.9	66.4	27.6	0.336	0.322	0.346
				SD					0.7	6.2	6.6	0.033	0.029	0.022

*部位別容積密度は、各個体、2ヶ所(地上高 2.5 m, 4.5 m)で採取した円板試料の平均値。

*The basic density of each stem component is the mean of two stem disks sampled from 2.5 m and 4.5 m above the ground.

4.2 樹木の枝葉

枝と葉の試料は、試料木 1 個体からそれぞれ 1 試料を採取した。樹冠の部位や葉齢(スギやヒノキなど針葉樹)により放射性 Cs 濃度が異なることも予想されたが、調査初年度(2011 年)は時間と労力の制約もあり、樹冠をおよそ上、中、下層に 3 等分して、各層から枝を 2~3 本ランダムに採取した(写真 2a)。これらの枝は、伐倒した際に放射性 Cs が付着した可能性のある地面とは反対側の樹冠部にある枝から選択した。層ごとに、ブルーシート上で枝と葉をより分けてから、それぞれ 3 層分を一緒によく混ぜてから試料を適量採取した(写真 2b, c)。試料の分量は、枝も葉も生重で 1 kg 程度を目安とした。試料は、紙袋に入れて森林総研の分析実験棟へ持ち帰り(写真 2d)、乾燥器(70℃)で 72 時間程度乾燥してからカッティングミル(ホーライ社製 UPC-140)を用いて細かく粉碎し、放射性 Cs 濃度(¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs)をゲルマニウム半導体検出器(GEM20-70, セイコー EG&G)により測定した(池田ら 2014)。以下、枝葉以外の各部位試料についても、放射性 Cs 濃度の測定には同じ検出装置を用いた。

4.3 樹木の幹(木材)

(1) 樹皮、辺材及び心材の各容積比の測定

幹については、まず各個体の樹皮・辺材・心材の容積比を求めるために(図 1 の C)、伐採現場で切り株高、地

上高 2.5 m と 4.5 m、さらに上部は 3 m(小個体)あるいは 4 m の間隔(中、大個体)で厚さ 1~2 cm の円板を採取し、切断面の直交 2 方向に沿って定規(精度 0.1 cm)を使って皮付き直径、皮なし直径、心材部の直径を測定した。これら高さ別の平均直径から、樹幹解析でよく用いられる求積法(スマリアン式)を用いて各区分ごとの皮付き材積、皮なし材積及び心材材積を計算し、樹皮(=皮付き-皮なし)と辺材部(=皮なし-心材部)の容積をそれぞれ計算した。図 4 には、この各部位の容積を計算する際にチェック用に作成した樹幹断面図の例として、大玉村のスギ、アカマツ各試料木について示した。

(2) 幹各部位の試料採取

幹の各部位試料は、以下の手順で採取した。まず、辺材と心材試料の採取量を決定するために、伐倒後の切断木口面にて心材直径を測定し、必要な円板の枚数を決定した。円板の厚さは、実験室での作業性を考慮して厚さ 5 cm とした。試料の採取量は、伐倒木の幹直径や樹種によって心材の割合が異なったり、また後述するように木材試料の放射性 Cs 濃度の測定に用いる容器の制約もあるため、辺材と心材それぞれの測定用粉砕物が必要量確保できるように決めておく必要がある。そこで、現場の作業を効率よく行うため、幹の直径と心材径から必要な円板枚数を求めることができる早見表を作成した(補足電子資料表 1)。

(a)



(b)



(c)



(d)



写真 2. 枝と葉の放射性 Cs 濃度測定用試料採取の様子

(a) 伐倒後、樹冠の上、中、下部から、地面に着いてない側の枝を採取。

(b)、(c)、(d) ブルーシート上での枝と葉のより分け作業。よく混ぜてから、枝、葉の各試料を適量（紙袋の半分以下）採取。

Photo 2. Sampling procedures used for branches and leaves.

(a) After the sample tree was felled, the stem size parameters (e.g., DB, HB, and H) were measured, then first-order branches ($n = 2 - 3$) were randomly collected from each layer (upper, medium and lower) in the crown. (b), (c), and (d) These branches were separated into branches and leaves (needles) on a clean blue sheet, then, samples for the measurement of radiocesium content were collected and placed in a paper envelopes.

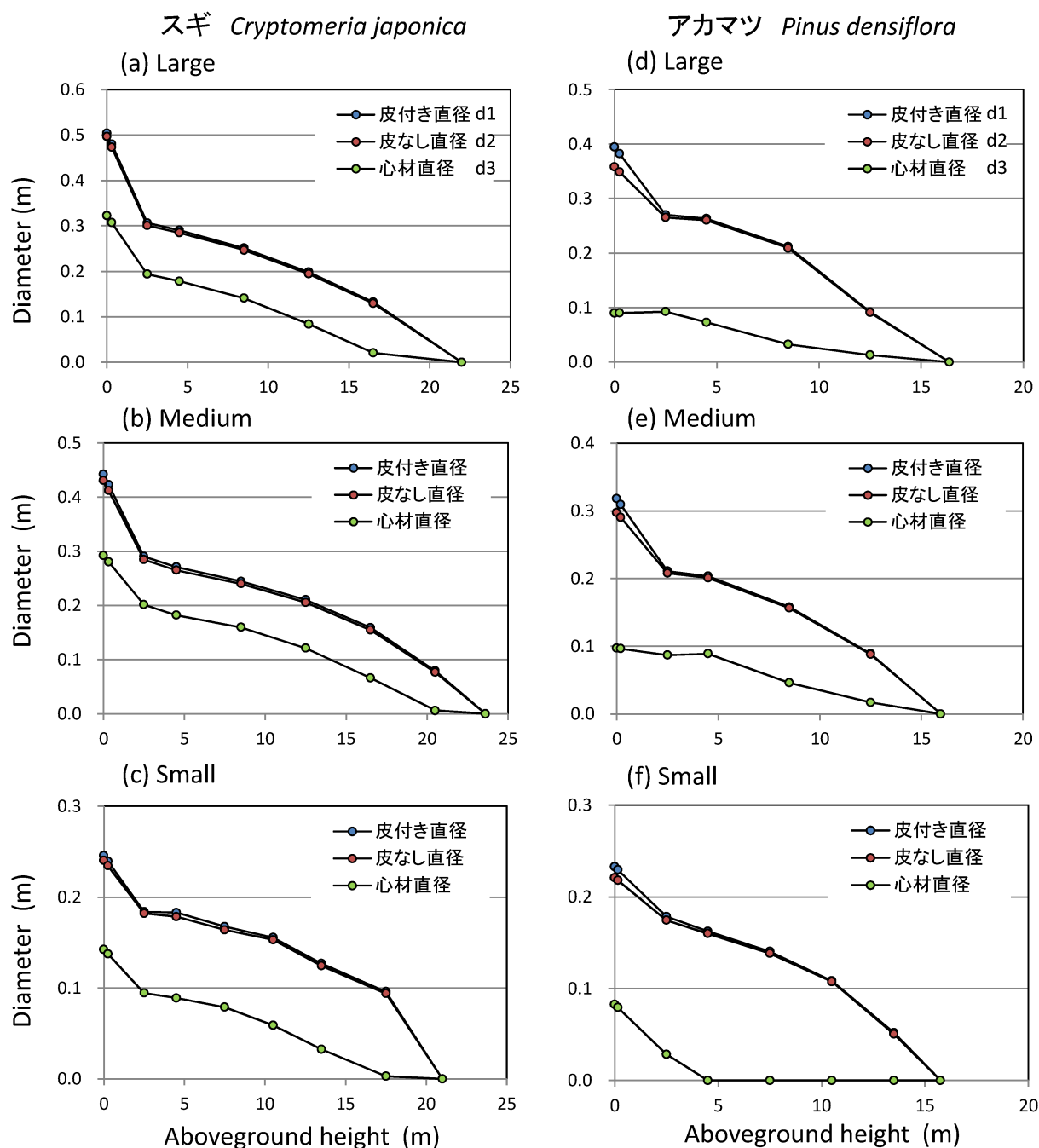


図 4. 幹の円板試料で測定した皮付き、皮なし、心材の各直径 (d1、d2、d3) と地上高の関係例
 (a), (b), (c) : 大玉村スギの試料木、大、中、小個体 (2012 年)
 (d), (e), (f) : 大玉村アカマツの試料木、大、中、小個体 (2012 年)
 各試料木の樹皮、辺材、心材の容積比の詳細は、表 3b を参照。

Fig. 4. Examples of vertical diameter changes in three different stem parts, stem with bark (d1), sapwood (d2), and heartwood (d3), measured for the trees sampled at the Otama site.
 (a), (b), and (c) : Large, medium, and small *Cryptomeria japonica* trees sampled in 2012.
 (d), (e), and (f) : Large, medium, and small *Pinus densiflora* trees sampled in 2012.
 The estimated volume ratios for each stem component are summarized in Table 3a and 3b.

樹皮については、伐倒現場で、剥皮作業用のスクレーパーを用いて試料採取範囲の樹皮をはがして採取し（写真 3a）、ポリエチレン袋に入れて森林総研の実験室へ持ち帰った。その際、必要最小限の部分を剥皮するために、あらかじめ樹皮にのこで切れ目を入れておいたが（写真 3b）、この作業は、とくに樹皮に強い繊維を含むスギやヒノキの場合には、円滑に作業をするのに必要と思われる。また、現場で樹皮を木材試料採取前に剥皮することで、木材試料への樹皮片の混入を防ぐことにもつながった。

辺材と心材の試料については、ブルーシート上の樹皮やゴミを取り除いた後、樹皮を剥皮した部分からチェン

ソーで上のようにして決めた必要枚数の円板を切断、採取し（写真 3c）、樹皮と同様ポリエチレン袋に入れて実験室へ持ち帰った。なお、円板は、節やその他欠点が多い部分は避けて採取した。

前述の樹皮試料とは別に、上述の養生・伐採前に、幹材の採取箇所下部から外樹皮と内樹皮の試料を直接刃物等を用いて削り取った（写真 3d）。両者の境界は色で判断し、茶色の部分を外樹皮、白い部分を内樹皮とした。外樹皮を削り取った後、採取部分の内樹皮の周囲にカッターナイフで切り込みを入れ、手持ちサイズのスクレーパー等を用いて内樹皮試料をはぎ取った。

(a)



(b)



(c)



(d)



写真 3. 幹（木材）各部位の放射性 Cs 濃度測定用試料の採取の様子

- (a) 剥皮作業（樹皮試料の採取）
- (b) 剥皮前の樹皮に切れ目を入れる作業
- (c) 玉切り作業（木材試料の採取）
- (d) 外樹皮、内樹皮別試料の採取

Photo 3. Sampling procedures used for the stem components (bark, sapwood and heartwood).

- (a) Debarking of a tree to collect a bark sample.
- (b) Sawing the bark before debarking.
- (c) Cutting the tree to collect a wood sample.
- (d) Separating the outer-bark and inner-bark to allow samples to be collected.

(3) 辺材と心材の試料調整

採取した各円板からおが屑、残存樹皮や付着物等を除去した。円板試料は分割（ミカン割）した後（写真 4a, b）、木工彫刻用の丸のみを用いて移行材（スギであれば白線帯の中央付近）で割って辺材と心材に分けて（写真 4c）、さらに粉碎機に投入可能な大きさまで細かく割った。測定用の 2L 容器へ充填するために必要な量は、辺心材ともに生重で 1.2 ～ 2 kg 程度を目安とした。ここまでの一連の作業は、ポリエチレンの袋等に長く保管することで水分が袋の内部で結露して試料からのセシウム流出や試料中での人為的な拡散や汚染が生じないように、さらに水分移動によって辺心材境界の確認も難しくなるため、なるべく速やかに行った。試料は、粉碎機で粉碎した後、紙袋に入れて乾燥機（100℃）で 2 日以上乾燥した。

(4) 樹皮の試料調整

試料は、裁断機を用いて長さ約 5 ～ 10 cm 程度に切断した（写真 4d）。樹皮の放射性 Cs 濃度測定には 100 ml 容器を使用し、これに充填するために必要な量として生重で 200 ～ 500 g 程度を目安とした。

試料は、紙袋に入れて乾燥機で 2 日以上乾燥（100℃）した後に粉碎した。乾燥後に粉碎したのは、樹皮に含まれる繊維の切断・粉碎が容易に行えるようにするためだが、乾燥した樹皮を粉碎すると粉じんの発生量が多くなることから、マスクをつけるなどしっかりした防塵対策が必要である。外樹皮、内樹皮別の試料については、粉碎機を使わずにはさみ等で切断した 5 mm 角程度の試料で放射性 Cs の測定を行った。

(a)



(b)



(c)



(d)



写真 4. 幹各部位の放射性 Cs 濃度測定用試料の調整の様子

- (a) ミカン割り作業中のアカマツ円板
- (b) ミカン割りしたスギ円板
- (c) 辺心材に分割したスギ材試料と丸のみ
- (d) コナラ樹皮の切断作業

Photo 4. Preparation of stem components (bark, sapwood, heartwood) samples.

- (a) Splitting a disk of *Pinus densiflora*.
- (b) A split *Cryptomeria japonica* disk.
- (c) Wood sample divided into sapwood and heartwood.
- (d) Cutting *Quercus serrata* bark into small pieces.

(5) 樹皮、辺材及び心材の容積密度の測定

地上高 2.5 m と 4.5 m の円板を容積密度測定のため、森林総研の実験室に持ち帰った。まず、なたの刃を樹皮と木部の境目に入れて野菜のかつらむきの要領で樹皮を分け、適量（円周方向長さ 10 cm 程度）を切り出して重量（生材重量）を測定するとともに、ノギスを用いて 3 方向の寸法（縦、横、厚さ）を測定して体積を求めた。

木材は髄を通る直線に沿ってなたを使ってミカン割りした後、辺材部と心材部に分けて測定用小片とし、重量（生材重量）を測定した。辺材及び心材部の測定用小片は、水中における重量（水中重量）を測定して浮力を求め、浮力から体積（生材体積）を算出した。生材体積は、水の密度を 1 g cm^{-3} として以下の式より求めた。

生材体積 $[\text{cm}^3] = (\text{生材重量} [\text{g}] - \text{水中重量} [\text{g}]) / \text{水の密度} (1\text{ g cm}^{-3})$

水中重量の測定には、つり下げ型の天秤（床下計量可能な機種）を用い、天秤の下側に水を入れたバケツ等の容器を置き、木材が完全に水没して水面上に露出しないよう、木材小片に適当な重さのおもりを付けた状態で測定した。この作業は、木材への水分吸収による影響を小さくするため素早く行った。

樹皮試料、木材小片を乾燥機（100℃）にて全乾状態にして重量（全乾重量）を測定し、次式のように、それを乾燥前の体積（生材体積）で除して容積密度を求めた。

容積密度 $[\text{g cm}^{-3}] = \text{全乾重量} [\text{g}] / \text{生材体積} [\text{cm}^3]$

このほか、乾燥前の重量（生材重量）と全乾重量から含水率を求め、放射能測定結果の考察のための資料とした。

4.4 小径木

小径木の試料採取は、2 年目（2012 年）から実施した。各調査地の固定プロット周辺で、おもな出現樹種（すべて落葉広葉樹）から各林分で 6～8 樹種（各樹種 1 本、ただし一部は 2 本）を試料木に選定した（表 4）。林分によって対象樹種は若干違うが、ウワミズザクラやミズキなど複数の調査地に共通の樹種も選んだ。各調査地とも、一部を除いて、翌年（2013 年）も同じ樹種を対象に試料を採取した。

小径木の各試料個体は、地際部で伐倒した後、幹（枝込み）と葉に分けて Cs 濃度測定用の試料を採取した。葉の試料は、樹冠のどの高さの葉も均等に混じるように採取した。幹の試料は、地際と胸高部位、さらに上部の最低 3 ケ所を含む位置から複数の円板を採取した。枝の試料も、太さが異なる部分を適宜含むように試料を採取し、幹の試料と一緒に混ぜて幹と枝合計の試料とした。試料のうち、幹と枝合計の試料は、樹木の幹試料のように樹皮や心材、辺材には区別せずに実験室に持ち帰り、細かく粉碎してから放射性 Cs 濃度を測定した。測定装置や乾燥温度、時間などの条件は、樹木の枝葉試料の場合と同じにした。

4.5 下層植生

現存量の推定法の項で述べたように、各プロットの 5 つの方形枠（写真 5）で刈り取って持ち帰った植物体試料は、幹（茎）や枝、葉などの各部位には区別せずに乾燥重量を測定した。その後、この試料をよく混ぜてから一部を取り出して粉碎し、放射性 Cs 濃度を測定した。

(a)



(b)



写真 5. 下層植生の試料採取の様子

(a) プロット内の地面に方形枠（ $1 \times 1 \text{ m}^2$ ）を設置（各プロット 5 ケ所）

(b) 枠内に地際がある木本・草本類の地上部を、剪定ばさみ等を使って刈り取り採取

Photo 5. Sampling procedures of forest floor vegetation.

(a) Sampling quadrats (each $1 \times 1 \text{ m}^2$) were fixed in place ($n = 5$ per plot).

(b) All living plants (e.g., woody shrubs and herbs) with basal portions inside each quadrat were clipped using pruning scissors.

表 4. 各調査林分の小径木試料の樹種名、サイズ諸量と部位別放射性 Cs 濃度

Table 4. Size parameters and radiocesium activities measured for the smaller trees sampled at each study forest.

調査地名 Site	調査林分 Study stand	プロット名 Plot Name	採取年 Sampling year	試料No. No.	樹種名 Species	サイズ Size parameters			放射性セシウム濃度* Radiocesium activity*	
						胸高直径 DBH (cm)	樹高 H (m)	生枝下高 HB (m)	Stem & Branch (KBq Kg ⁻¹)	Leaf (KBq Kg ⁻¹)
川内村 Kwauchi village	スギ人工林 <i>Cryptomeria japonica</i>	KU-S1	2012	1	ヤマボウシ <i>Benthamidia japonica</i>	5.5	6.9	2.7	22.81	14.43
				2	オオモミジ <i>Acer palmatum</i>	4.6	6.3	4.3	9.11	7.99
				3	ミズキ <i>Cornus controversa</i>	6.2	9.9	-	14.40	7.41
				4	アサダ <i>Ostrya japonica</i>	11.1	15.1	7.7	8.93	12.7
				5	ハクウンボク <i>Styrax obassia</i>	3.9	5.5	2.9	18.19	18.3
				6	ケヤキ <i>Zelkova serrata</i>	4.6	9.3	5.7	14.75	8.19
				平均 Mean		6.0	8.8	4.7	14.70	11.51
			2013	1	ヤマボウシ <i>Benthamidia japonica</i>	5.8	7.7	3.8	19.32	2.75
				2	オオモミジ <i>Acer palmatum</i>	4.6	6.2	2.7	10.69	2.75
				3	ミズキ <i>Cornus controversa</i>	6.1	8.8	7.3	14.97	2.71
				4	アサダ <i>Ostrya japonica</i>	7.0	10.8	8.6	3.24	6.03
				5	ハクウンボク <i>Styrax obassia</i>	6.9	10.5	6.3	9.53	1.35
				6	ケヤキ <i>Zelkova serrata</i>	5.0	6.6	2.5	7.35	5.62
				平均 Mean		5.9	8.4	5.2	10.85	3.53
大玉村 Otama village	スギ林、アカマツ林 及び広葉樹林* <i>Cryptomeria japonica</i> , <i>Pinus densiflora</i> , and Broad-leaved forest*	OT-S, QT-P, and OT-Q	2012	1	ミズキ <i>Cornus controversa</i>	6.9	7.8	3.0	1.27	0.33
				2	イタヤカエデ <i>Acer mono</i>	4.4	6.2	2.3	1.86	0.55
				3	アズキナシ <i>Aria alnifolia</i>	3.2	5.0	1.4	1.99	0.26
				4	エゴノキ <i>Styrax japonica</i>	4.5	6.5	2.1	0.85	0.35
				5	ウワミズザクラ <i>Prunus grayana</i>	7.9	8.1	3.7	1.61	0.39
				6	クマシデ <i>Carpinus japonica</i>	7.2	7.8	3.4	0.87	0.27
				7	ミズナラ <i>Quercus crispula</i>	6.3	5.9	1.6	0.96	0.25
				平均 Mean		5.8	6.7	2.5	1.34	0.34
			2013	1	ミズキ <i>Cornus controversa</i>	5.9	7.8	3.8	0.68	0.25
				2	イタヤカエデ <i>Acer mono</i>	6.1	6.6	2.8	1.69	0.76
				3	アズキナシ <i>Aria alnifolia</i>	6.2	7.7	4.9	0.89	0.73
				4	エゴノキ <i>Styrax japonica</i>	5.0	7.1	3.4	1.72	1.44
				5	ウワミズザクラ <i>Prunus grayana</i>	6.4	7.4	1.7	1.11	0.71
				6	クマシデ <i>Carpinus japonica</i>	6.0	7.5	1.7	0.89	1.01
				7	コナラ <i>Quercus serrata</i>	6.8	6.8	2.8	0.69	0.54
只見町 Tadami town	スギ人工林 <i>Cryptomeria japonica</i>	TD-S	2012	1A	コシアブラA <i>Eleutherococcus sciadophylloides</i>	5.0	-	-	0.06	0.36
				1B	コシアブラB <i>Eleutherococcus sciadophylloides</i>	7.7	9.3	6.8	0.65	0.19
				2A	ブナA <i>Fagus crenata</i>	8.6	9.1	3.1	0.40	0.17
				2B	ブナB <i>Fagus crenata</i>	9.2	9.8	3.1	0.37	0.20
				3	トチノキ <i>Aesculus turbinata</i>	8.5	10.4	10.1	0.11	0.24
				4	ウワミズザクラ <i>Prunus grayana</i>	6.4	12.2	7.0	0.08	0.25
				5	ホオノキ <i>Magnolia obovata</i>	10.6	7.1	2.0	0.07	0.18
				6	ミズキ <i>Cornus controversa</i>	9.9	8.2	3.4	0.63	0.14
				平均 Mean		8.2	9.4	5.1	0.30	0.22
			2013	1	コシアブラ <i>Eleutherococcus sciadophylloides</i>	7.8	8.1	3.7	0.37	0.05
				2	ブナ <i>Fagus crenata</i>	4.8	6.3	1.3	0.12	0.12
				3	トチノキ <i>Aesculus turbinata</i>	12.1	7.3	4.3	0.33	0.19
				4	ウワミズザクラ <i>Prunus grayana</i>	5.1	4.9	0.9	0.06	0.18
				5	ホオノキ <i>Magnolia obovata</i>	6.3	7.3	4.3	1.09	0.08
				6	ミズキ <i>Cornus controversa</i>	12.7	8.2	3.6	0.08	0.01
				平均 Mean		8.1	7.0	3.0	0.34	0.10

* 放射性Csの値は、¹³⁷Cs、¹³⁴Csの両方を含む。値は、各年の基準日(9月1日)での補正值。

大玉村の小径木試料は、おもに近接するアカマツ林と広葉樹林の周辺で採取した。

The radiocesium activity is the sum of the ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs activities.

These smaller trees at the Otama site were mainly sampled around two neighboring stands (OT-P and OT-Q).

4.6 放射性セシウムの林分蓄積量の推定例

各調査林分の放射性Cs蓄積量は、上述の手順で測定した樹木各部位の放射性Cs濃度（試料木3本の平均値）にそれぞれの現存量を乗じて求めた。小径木についても、各試料個体（n=6～8、表4）の部位別（幹・枝・葉）の放射性Cs濃度の平均値に現存量を乗じて計算した。下層植生は、方形枠内（n=5）の植物体試料の平均Cs濃度に、試料の乾重平均値として求めた現存量を乗じて推定した。

表5は、これら一連の手順による計算例として、事故後1年目（2012年）における川内村スギ林（KU-S1）（表5a）と大玉村アカマツ林（OT-P）（表5b）の現存量と放射性Cs林分蓄積量の推定結果をまとめたものである。樹木については、どちらの林分も優占樹種（スギ、アカマツ）とその他樹種（落葉広葉樹）に分けて現存量と蓄積量を示してある。このうち、その他樹種（落葉広葉樹）の蓄積量は、部位別Cs濃度の値としてそれぞれの調査地のコナラ試料木3本で得られた平均値を、コナラ

以外の広葉樹類も同じ濃度と仮定してその平均値をあてはめて計算した。つまり、大玉村の調査地では、近接する落葉広葉樹林（OT-Q）とアカマツ林（OT-P）の両プロット周辺で採取したコナラ試料木の値を（表3b）、また広葉樹林の調査プロットをとくに設置しなかった川内村では、スギ林（KU-S1）から少し離れた土壌調査を行った落葉広葉樹二次林で採取したコナラ3本（大、中、小）で得られた平均値をそれぞれ用いた（林野庁2013、一部の値は未発表）。なお、樹木の現存量のうち、幹の各部位の推定に用いた容積比と容積密度の値には、スギ林、アカマツ林とも、この調査年（2012年）の試料木3本だけではなく、前年（2011年）の試料木3本も含めて、計6本の平均値を使うことにした。2年分の平均値を用いたのは、各年の試料木3本の平均値を比べてみるとわかるように、とくに樹皮の平均容積比は年によりかなり違ってくるので（表3a, b）、こうした年ごとの試料の個体差による違いが林分Cs蓄積量の推定に及ぼす影響を少なくするためである。

表 5a. 地上部現存量と放射性セシウム蓄積量の推定例（川内村スギ林、KU-S1、2012年）

Table 5a. Aboveground vegetation biomass and amount of radiocesium estimated for a *Cryptomeria japonica* stand at the Kawauchi site (KU-S1) in 2012.

			現存量		放射性セシウム濃度*		放射性セシウム蓄積量 #			
			Biomass (Mg ha ⁻¹)		Radiocesium activity* (Bq Kg ⁻¹)		Radiocesium amount (kBq m ⁻²)			
			スギ	その他樹種	スギ	その他樹種	スギ	その他樹種	割合	
			<i>C. japonica</i>	Other spp.	<i>C. japonica</i>	Other spp.	<i>C. japonica</i>	Other spp.	Total	(%)
1. 樹木	Trees	(DBH ≥ 10 cm)								
葉	Needles		12.01	1.67	5.78 x 10 ⁴	6.91 x 10 ³	69.35	1.15	70.5	40.1
枝	Branches		7.21	7.84	3.71 x 10 ⁴	3.52 x 10 ⁴	26.74	27.63	54.4	30.9
樹皮	Bark		4.41	5.75	1.74 x 10 ⁴	3.11 x 10 ³	7.68	17.89	25.6	14.5
辺材	Sapwood		48.52	21.90	2.69 x 10 ²	6.12 x 10 ²	1.30	1.34	2.6	1.5
心材	Heartwood		20.47	12.40	2.79 x 10 ²	3.49 x 10 ²	0.57	0.43	1.0	0.6
幹計	Stem total		73.40	40.05	—	—	9.55	19.66	29.2	16.6
樹木合計	Tree total		92.62	49.56	—	—	105.64	48.45	154.1	87.5
2. 小径木	Small trees	(< 10 cm)								
葉	Needles		—	0.45	—	1.15 x 10 ⁴	—	0.52	0.5	0.3
幹と枝	Stem & Branches		—	10.77	—	1.47 x 10 ⁴	—	15.84	15.8	9.0
小径木合計	Small tree total		—	11.23	—	—	—	16.36	16.4	9.3
3. 下層植生	Floor vegetation		—	1.38	—	4.03 x 10 ⁴	—	5.57	5.6	3.2
植生地上部合計	Total		92.6	62.2	—	—	—	—	176.0	100.0

* 放射性Csの値は、¹³⁷Cs、¹³⁴Csの両方を含む。値は、各年の基準日(9月1日)での補正值。

各部位の放射性Cs濃度は、樹木は3個体(大、中、小)の、小径木は樹種が異なる6個体の試料で得られた平均値。スギの値は、林野庁(2014)より。小径木は表4参照。コナラの値は未発表データ。

放射性Cs蓄積量は、各部位の現存量に平均の放射性Cs濃度を乗じて計算。

他の樹種は、この調査林分の場合はおもに落葉広葉樹。

* The radiocesium activity is the sum of the ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs activities.

The radiocesium activity of each component is the mean of the individuals sampled; n=3 for trees (Forestry Agency 2014) and n=6 for small trees (Table 4). The values for the broad-leaved trees are from unpublished data.

The amount of radiocesium was calculated by multiplying the biomass by the mean radiocesium activity for each component. Other species are mostly deciduous broad-leaved trees in the study stand.

表 5b. 地上部現存量と放射性セシウム蓄積量の推定例（大玉村アカマツ林、OT - P、2012 年）

Table 5b. Aboveground vegetation biomass and amount of radiocesium estimated for a *Pinus densiflora* stand at the Otama site (OT - P) in 2012.

		現存量			放射性セシウム濃度*		放射性セシウム蓄積量 #			
		Biomass (Mg ha ⁻¹)			Radiocesium activity* (Bq Kg ⁻¹)		Radiocesium amount (kBq m ⁻²)			
		スギ	その他樹種	合計	スギ	その他樹種	スギ	その他樹種	合計	割合
		<i>C. japonica</i>	Other spp.	Total	<i>C. japonica</i>	Other spp.	<i>C. japonica</i>	Other spp.	Total	(%)
1. 樹木	Trees (DBH ≥ 10 cm)									
葉	Needles	4.47	1.34		1.95 x 10 ³	1.71 x 10 ²	0.870	0.023	0.89	14.3
枝	Branches	10.41	6.22		1.39 x 10 ³	1.42 x 10 ³	1.451	0.884	2.34	37.5
樹皮	Bark	3.88	4.03		7.87 x 10 ²	1.23 x 10 ³	0.305	0.494	0.80	12.8
辺材	Sapwood	61.73	15.38		5.12	1.67 x 10 ²	0.032	0.026	0.06	0.9
心材	Heartwood	6.45	8.71		2.51	9.59	0.002	0.008	0.01	0.2
幹計	Stem total	72.05	28.12		—	—	0.338	0.528	0.87	13.9
樹木合計	Tree total	86.93	35.67	122.6	—	—	2.659	1.435	4.09	65.8
2. 小径木	Small trees (< 10cm)									
葉	Needles	—	0.69		—	3.42 x 10 ²	—	0.023	0.02	0.4
幹と枝	Stem & Branches	—	14.85		—	1.34 x 10 ³	—	1.994	1.99	32.0
小径木合計	Small tree total	—	15.53	15.5	—	—	—	2.017	2.02	32.4
3. 下層植生	Floor vegetation	—	0.74	0.7	—	1.34 x 10 ³	—	0.115	0.12	1.8
植生地上部合計	Total	86.93	51.94	138.9					6.2	100.0

* 放射性Csの値は、¹³⁷Cs、¹³⁴Cs の両方を含む。値は、各年の基準日(9月1日)での補正值。

各部位の放射性Cs濃度は、樹木は3個体(大、中、小)の、小径木は樹種が異なる7個体の試料で得られた平均値。アカマツの値は、林野庁(2014)より。小径木は表 4参照。コナラの値は未発表データ。

放射性Cs蓄積量は、各部位の現存量に平均の放射性Cs濃度を乗じて計算。

他の樹種は、この調査林分の場合はおもに落葉広葉樹。

* The radiocesium activity is the sum of the ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs activities.

The radiocesium activity of each component is the mean of the individuals sampled; n=3 for trees (Forestry Agency 2014) and n=7 for small trees (Table 4). The values for the broad-leaved trees are from unpublished data.

The amount of radiocesium was calculated by multiplying the biomass by the mean radiocesium activity for each component. Other species are mostly deciduous broad-leaved trees in the study stand.

5. 測定及び推定方法に関する検討

5.1 放射性セシウム濃度測定用の試料採取と調整

(1) 木材の試料調整

円板の分割前のクリーニングには、必要に応じてウェットティッシュ、なた等の刃物、スクレーパー、野菜皮むき器などを使用した。なお、伐倒現場で樹皮が付いたまま円板を持ち帰った場合は、多数の樹皮小片が木口面に付着したため、汚れた木口面の除去はとくに念入りにクリーニングした。

なお、心材と辺材の区分は以下のように判断した。木材は生理機能を有する辺材部とそれを失い生きた細胞が存在しない心材部に分けられ、辺材から心材に移る領域を移行材と呼んでいる(日本木材学会編 2011)。スギのように心材が着色していて区別が明瞭な樹種が多いが(写真 4b)、不明瞭あるいはほとんど色調で区別できない樹種もあることから、場合によっては辺心材の境界の確認には色調以外の特長も参考にした。辺材は通常心材よりも水分を多く含むことから、水分の違いによる色調

差が認められる場合もある(写真 4a)。また、木口面では境界が不明瞭な場合でも、側面の割裂面(柃目面)で区別しやすい場合もある。

(2) 樹皮の試料採取

試料採取にあたっては、測定値のばらつきをなるべく小さくするため、方位の偏りや樹皮表面と内側など採取部位に偏りが無いよう留意した(写真 3a)。果樹(モモ)における樹体内放射性Cs分布を調べた例では、樹皮の濃度が高く、特に表皮で他の部位よりもきわめて高濃度であったことが報告されている(高田ら 2012)。したがって、汚染後間もない現時点では、樹皮表面の放射性Cs濃度が高いことが予想されるため、表面がはがれやすいアカマツのような樹種では、特に注意する必要がある。また、形成層活動が活発な時期には剥皮は容易であるが、形成層の休眠期となる秋期後半から冬期までの期間は剥皮が難しく、なた等の刃物で削り取る必要がある場合も考えられる。その際には、部位による偏りが生

じないよう、一層の注意が必要であろう。

樹皮は死んだ細胞で構成される外樹皮と生きた細胞を含む内樹皮に分けることができる（日本木材学会編 2011）。外樹皮と内樹皮に分割して測定を行うことは、放射性物質の樹体内循環や濃度の推移を考察する上で重要な要素と考えられ、チェルノブイリ原発事故による影響調査においても分析が行われている（Goor and Thiry 2004）。この林野庁委託事業の研究でも、スギ、ヒノキ、アカマツについて、外樹皮と内樹皮別の分析を行っているが（写真 3d）、外樹皮を採取する際に用いる道具としては、野菜の皮むき器や草刈り用の小さなかまが使いやすく、樹種によって適宜使い分けている。このほか、皮付き円板を採取し、刃物で外樹皮、内樹皮を円板から切り分ける方法もある（Ohashi et al. 2014）。

（3）枝葉の試料採取と調整

枝葉の試料は、樹冠の上、中、下層から幹から直接出ている一次枝を数本ずつ採取して、それらの枝と葉をすべてよくかき混ぜてから測定用試料を 1 つずつ調整した。樹冠を 3 層に分けてミックスする方法をとった理由は、初年度はとくに時間的な制約がある中で、できる限り簡易に個体ごとに平均的な枝と葉の放射性 Cs 濃度の値を得ようとしたためである。この方法が妥当であったか検討するには、樹冠内の位置によって枝や葉に付着した放射性 Cs 濃度がどの程度違うか調べておく必要がある。そこで、事故後 2 年目（2013 年）に、一部調査林分の試料木（スギ）を対象に、上、中、下層からとった一次枝ごとに枝と葉の試料を採取し、樹冠内での Cs 濃度の違いを比較してみた。その結果、枝については、樹冠内での濃度の違いに明瞭な傾向はなかったが、葉については、下層より中層、上層の試料で放射性 Cs 濃度が低くなる傾向が認められた。例えば、川内村スギ林（KU-S1）の 3 個体では、上層の葉の放射性 Cs 濃度は下層の葉の 20 ～ 40% で、大玉村スギ林の 3 個体でもこの割合は約 15% と低かった（未発表データ）。これらの結果からは、葉の場合、少ない試料数で個体の平均的な値を得るためには、層別に試料を採取してからある程度よく混ぜて採取することが重要と思われる。一方、枝については、樹冠内の位置による影響は葉より小さそうだが、枝の太さ（年齢）の違いによる影響、つまり太さ（表面積）が異なれば、表面に付着した Cs 量も当然違ってくるので、試料採取時には太さの異なる枝がまんべんなく含まれるようにすることが重要であろう。

なお、上述のような樹冠内で葉の Cs 濃度に差を生じた原因のひとつには、新旧の葉の入れ替わり方（葉の回転）が樹冠の上～下層で違うことが考えられる。調査林分のスギの針葉の寿命は 4 ～ 5 年くらいで、毎年 2 割程度は古い葉と当年生葉が入れ替わっていく。今回検討したデータは事故後 2 年目の値なので、その間に入れ替わった新しい葉の割合は、葉の回転がより早いとされる樹冠上

層のほうが下層よりも多いと思われる。つまり、事故後に降下した放射性 Cs が付着した古い葉は、樹冠上層ほど早く脱落して少なくなり、その分、上層の葉の平均的な Cs 濃度は下層のよりも低くなった可能性が考えられる。しかし、さらに年数が経過して、古い葉がすべて入れ替わった後は、樹体（幹、枝）の貯蔵分や根からの吸収を介して配分される Cs は、むしろ毎年生産される新しい葉により多くなることが、チェルノブイリ事故後のヨーロッパアカマツ林で調査された多くの報告例をみると予想される（Mamikhin et al. 1997, Fesenko et al. 2003, Goor and Thiry 2004）。常緑針葉樹の調査林分の場合、枝葉の放射性 Cs の挙動については、今後さらに樹冠の位置や葉齢別にデータを収集するなどして詳細に調べる必要がある。

（4）小径木の試料採取

小径木の試料は、樹木の広葉樹の場合と同様、労力の制約もあり各調査地でおもな樹種の 6 ～ 8 種に限って採取した。そのため、各部位の放射性 Cs 濃度の値は、樹種ごとのものを用いずに、これらの試料木の平均値を用いることにした。測定された放射性 Cs 濃度の値を、各林分の同じ年で個体間で比較すると、一部の例を除き木部（幹、枝合計）も葉もおおよそ 2 ～ 3 倍の違いしか認められなかった（表 4）。コシアブラとブナの 2 個体を調べた只見の 2012 年以外は、各樹種 1 本ずつしか試料を採取していないので、この差が樹種の違いによるのか、個体差（大きさや立木位置の違いなど）を反映したものかは不明である。しかし、小径木は、その現存量も比較的小さいので（表 5）、この程度の Cs 濃度の試料間でのばらつきであれば、今回採取した樹種数や試料本数で平均濃度を求めて、林分全体の蓄積量を推定するには大きな問題はないと思われる。ただし、今回推定結果を示した 2 林分の例をみても、小径木はたしかに林分現存量に占める割合がともに 10% 以下と少ないが、小径木が Cs 蓄積量で占める割合では、川内村のスギ林が 9.3%（表 5a）に対して大玉村のアカマツ林では 32%（表 5b）と、現存量から予想される以上に多い蓄積量が推定されている。このように、林分の Cs 蓄積量推定において小径木が重要になる場合もあるので、林分の状況によっては、推定精度を上げるために濃度測定用試料を採取する対象樹種や本数を適宜増やす必要がある。

5.2 各部位の現存量推定法について

（1）幹各部位

現存量の推定では、最終的な放射性 Cs 蓄積量の推定精度に大きな影響を及ぼすステップが幾つか考えられる。とくに、樹木の幹については、この研究では単に現存量（炭素量）を把握することがおもな目的ではないため、方法の冒頭で述べたように通常のアロメトリー法とは異なり、樹皮、辺材、心材の各部の乾重を幹材積から推定する手法を適用した。そこで、ここではこの推定手

順で重要となる幹各部位の容積比と容積密度を求める方法の妥当性についてだけ（図1のC、D）、以下検討しておく。

幹各部位のこれらの値は、毎年伐倒する試料木の平均値として求めた。そのうち、容積密度については、各林分の大、中、小の試料木で値を比べても、その差には個体のサイズと明瞭な関係がみられなかった。したがって、3本と試料数は少ないが、平均値を使うことにはさほど問題はないと考えられる。一方、容積比については、樹種によっては個体サイズと明瞭な関係が認められる場合があることがわかった。

図5は、そうした関係を調べるために、スギ、アカマツ、

コナラ、ヒノキの4樹種について、全調査地のすべての試料個体で測定された3部位の容積比を胸高直径に対してプロットしたものである。スギでは、明らかに大きい個体ほど心材の割合が増加し、その分辺材の割合が減少する傾向がみられた（図5a）。コナラについても、同様な傾向が若干認められた（図5c）。一方、アカマツやヒノキでは、スギに比べて全体の試料本数が少ないせいもあるが、そうしたDBHとの関係は不明である（図5b, d）。スギの心材化の要因や機構はまだ詳しく解明されていないが（Kuroda et al. 2009）、上述の結果を踏まえると、心材と辺材の容積比は、例えば図5に示した関係にある式で回帰して（直線）個体別に計算するか、あるいは直径

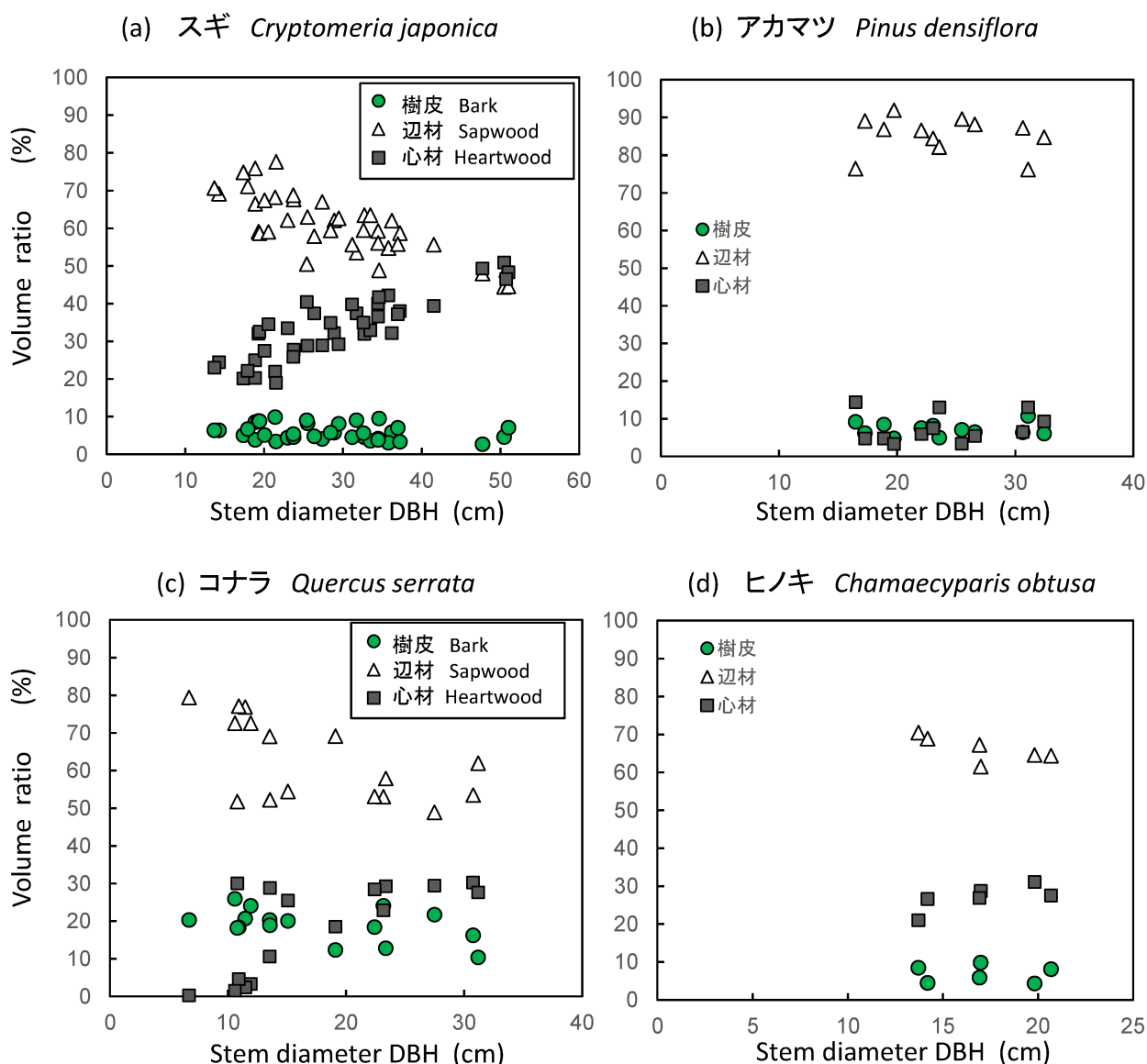


図5. 試料木の胸高直径と幹各部位（樹皮、辺材、心材）の容積比の関係

(a) スギ（全調査地の試料木、n=36） (b) アカマツ（大玉村と川内村の試料木、n=12）

(c) コナラ（大玉村と川内村の試料木、n=16） (d) ヒノキ（川内村の試料木、n=6）

データの詳細は、表3a, bを参照。

Fig. 5. Relationships between the DBH and the volume ratio (%) of each stem component found for the sample trees of four different species. For more detailed data, see Table 3.

階級で幾つかに区分してそれぞれの階級別の平均容積比を使うといった方法をとれば、3本の平均値とした現在の方法よりも両部位の現存量推定の精度は多少よくなることが予想される。とくに調査対象の林分で、直径分布が小さい（あるいは大きい）個体にかなり偏っているような場合は、幹各部位の容積比に試料木数本の平均値を一律にあてはめるよりも、こうした改良法が適していると思われる。

幹部位の容積比と容積密度の推定については、もうひとつ検討すべき点がある。今後も調査を毎年継続していく場合、どの年の試料木の平均値データ（単数年、複数年の平均値）を用いればいいかと言う問題である。今回、事故後2年目（2012年）の推定結果を計算例として示したが（表5）、ここでは、前年（2011年）の試料木も含めた2年間6本分の平均値で求めた容積比と容積密度を推定に使った。複数年の平均値にした理由は、上述のように、とくに容積比の場合、3本の平均値では採取年によってかなり値が違ってくるので（表3）、それらの影響が林分蓄積量の推定値にできるだけ及ばないようにするためであった。こうした観点からは、今後、毎年新たに伐倒する試料木については、幹各部位の容積比や容積密度の測定を省略して、すでにある3年間の試料木（各林分、樹種別に計9本）の平均値に固定してしまうことも一法と思われる。

（2）枝と葉

枝葉の現存量については、今回どの樹種についてもDBHだけを変数とする相対成長関係式（図2）を用いて推定した（図1のA）。樹木個体の枝や葉の重量は、胸高直径よりも生枝下直径（DB）や（Shinozaki et al. 1964、依田 1971）、辺材部断面積（O'Hara 1988）とより良好な関係が成り立つことがよく知られている。しかし、樹冠基部にあたる生枝下高は、今回調査したような30～50年生のスギやヒノキの人工林では、すでに10m近くの高さに達しており、全個体でその直径（DB）を直接測定することはかなり困難である。したがって、精度の上ではやや劣るが、冒頭で述べたように今後も毎年調査を継続していくことを考えれば、枝や葉の現存量を個体ベースで推定できる方法としては、測定が容易な胸高直径だけの式（表2）を用いる方が適切と思われる。

ただし、このDBHだけの推定式では、個体の直径成長に伴って、枝葉の量も単調に増加し続けることになる。今後10～20年とかなり先の段階（各林分の林齢が50～60年生）で調査する時には、枝葉量の推定手法は再考する必要がある。つまり、今回作成した樹種別の枝葉重の推定式は（表2）、林齢の点からはある程度限定して適用すべきと思われる。とくに、高齢な林分を対象に同様な調査を行う際には、その林齢に見合ったデータを用いて新たに推定式を作成するのが望ましい。例えば、スギの高齢林（80～90年生）を対象にする場合だと、

幹や枝葉重のデータ、あるいは直径を変数にした相対成長式が掲載されている既報（丹下ら 1990、西村ら 1992a、1992b、丹下・小島 2010）を活用することができる。

以上、森林における放射性Csの蓄積量やその動態把握の調査法のうち、樹木の樹冠部（枝葉）、木材（幹）、そして下層植生を中心に手法を紹介した。これら3つの部分に土壌のリター・有機物層、鉱質土層を加えた5つの要素は、チェルノブイリ事故後に作成されている森林生態系のCs動態予測モデルの多くで欠かせない基本的な構成要素とされている（Riesen 2002）。今後は、引き続き各要素のデータを調査林分で蓄積し、福島事故により対応したモデル開発なども含めて、将来の放射性物質の正確な動態予測に貢献できればと考えている。

謝辞

試験地の設定及び試料木の採取等現地調査にあたっては、磐城森林管理署、福島森林管理署、会津森林管理署南会津支署および川内村の各関係者に便宜を図って頂いた。アロメトリー式作成のための未公表伐倒データ（森林吸収源計測・活用体制整備強化事業）の利用に際しては、林野庁研究・保全課に便宜を図って頂いた。現地調査や試料分析、データのとりまとめについては、森林総合研究所の植物生態、森林植生、木材特性の各研究領域をはじめ多くの職員のご協力を頂いた。皆様には、この場を借りて厚くお礼申し上げます。

本研究は、林野庁委託事業「森林内における放射性物質実態把握調査事業」、森林総合研究所交付金プロジェクト「森林・林業・木材における放射線影響に関する基礎研究（課題番号 201205）」により実施した。

引用文献

- Fesenko, S.V., Sukhova, N.V., Spiridonov, S.I., Sanzharova, N.I., Avila, R., Klein, D. and Bado, P.M. (2003) Distribution of ^{137}Cs in the tree layer of forest ecosystems in the zone of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Russian Journal of Ecology*, 34, 104-109.
- Goor, F. and Thiry, Y. (2004) Processes, dynamics and modelling of radiocaesium cycling in a chronosequence of Chernobyl-contaminated Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations. *Science of the Total Environment*, 325, 163-180.
- Goor, F., Thiry, Y. and Delvaux, B. (2007) Radiocaesium accumulation in stemwood: Integrated approach at the scale of forest stands for contaminated Scots pine in Belarus. *Journal of Environmental Management*, 85, 129-136.
- Hashimoto, S., Ugawa, S., Nanko, K. Shichi, K. (2012) The total amounts of radioactively contaminated materials in forests in Fukushima, Japan. *Scientific Reports*, 2, 416.

- 細田和夫・光田靖・家原敏郎 (2010) 現行立木幹材積表と材積式による計算値との相違およびその修正方法. 森林計画学会誌, 44, 23-39.
- IAEA (2006) Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience". Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment', Radiological Assessment Reports Series, IAEA, Vienna. 166 pp.
- 池田重人・金子真司・赤間亮夫・高橋正通 (2014) 森林土壌の放射性セシウム分布と動態の調査法. 森林総合研究所報告, 432, 137-145.
- 金子真司・外崎真理雄・清野嘉之・池田重人・黒田克史・田中 浩・川崎達郎・齊藤哲・梶本卓也・阿部真・杉田久志・矢崎健一・太田敬之・三浦 覚・志知幸治・大貫康浩・阪田匡司・篠宮佳樹 (2012) 東京電力福島第一原子力発電所事故による森林放射能汚染の実態調査. 関東森林研究, 63, 97-100.
- 金子真司・池田重人・赤間亮夫・三浦 覚・高橋正通 (2013) 福島第一原子力発電所事故による森林放射能汚染調査地の土壌理化学性. 森林立地, 55, 75-81.
- Kato, H., Onda, Y. and Gomi, T. (2012) Interception of the Fukushima reactor accident-derived ^{137}Cs , ^{134}Cs and ^{131}I by coniferous forest canopies. Geophysical Research Letters, 39, L20403.
- 木村 允 (1976) 陸上植物群落の生産量測定法. 共立出版, 112pp.
- 小林政弘 (2014) 森林における放射性 Cs の動態. 土壌の物理性, 126, 31-36.
- 小見山章・加藤正吾・二宮生夫 (2002) 岐阜県飛騨地方における落葉広葉樹林相対成長関係. 日林誌, 84, 130-134.
- Kuroda, K., Yamashita, K. and Fujiwara, T. (2009) Cellular level observation of water loss and the refilling of tracheids in the xylem of *Cryptomeria japonica* during heartwood formation. Trees, 23, 1163-1172.
- Kuroda, K., Kagawa, A., Tonosaki, M. (2013) Radiocesium concentrations in the bark, sapwood and heartwood of three tree species collected at Fukushima forests half a year after the Fukushima Dai-ichi nuclear accident. Journal of Environment Radioactivity, 122, 37-42.
- Mamikhin, S.V., Tikhomirov, F.A. and Shcheglov, A.I. (1997) Dynamics of ^{137}Cs in the forests of the 30-km zone around the Chernobyl nuclear power plant. Science of the Total Environment, 193, 169-177.
- 中西友子 (2013) 土壌汚染—フクシマの放射性物質のゆくえ. NHK 出版, 224 pp.
- 日本木材学会編 (2011) 木質の構造. 文永堂出版, 313pp.
- Nimis, P.L. (1996) Radiocesium in plants of forest ecosystems. Studia Geobotanica, 15, 3-49.
- 西村武二・吉川 賢・池本彰夫・永森通雄 (1992a) 高齢スギ人工林の現存量と成長経過 (1) 高知県本川村奥南川山国有林 80 年生スギ林の場合. 高知大学農学部演習林報告, 19, 73-81.
- 西村武二・吉川 賢・池本彰夫・永森通雄・安藤 貴 (1992b) 高齢スギ人工林の現存量と成長経過 (2) 岩手大学滝沢演習林 89 年生スギ林の場合. 高知大学農学部演習林報告, 19, 83-97.
- O'Hara, K.L. (1988) Stand structure and growing space efficiency following thinning in an even-aged Douglas-fir stand. Canadian Journal of Forest Research, 18, 859-866.
- Ohashi, S., Okada, N., Tanaka, N., Nakai, W. and Takano, S. (2014) Radial and vertical distributions of radiocesium in tree stems of *Pinus densiflora* and *Quercus serrata* 1.5 y after the Fukushima nuclear disaster. Journal of Environment Radioactivity, 134, 54-60.
- Riesen, T.K. (2002) Radiocesium in forests — A review on most recent research. Environment Reviews, 10, 79-90.
- 林野庁 (2013) 平成 24 年度森林内における放射性物質実態把握調査事業報告書, 113 pp.
- 林野庁 (2014) 平成 25 年度森林内における放射性物質実態把握調査事業報告書, 97 pp.
- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K. and Kira, T. (1964) A quantitative analysis of plant form — the pine model theory. 1 Basic analyses. Japanese Journal of Ecology, 14, 97-105.
- 高橋正通・梶本卓也・高野 勉・池田重人・小林政弘 (2014) 森林生態系における樹木・木材・土壌・溪流水の放射性セシウム動態調査法の利用ガイド. 森林総合研究所報告, 432, 107-112.
- 高田大輔・安永円理子・田野井慶太郎・中西友子・佐々木治人・大下誠一 (2012) 放射性降下物に起因した果樹樹体内放射性核種の分布 (第 4 報). RADIOISOTOPES, 61, 607-612.
- 丹下 健・鈴木 誠・鈴木 保 (1990) 立地条件の異なる 83 年生スギ人工林の枝及び葉現存量. 日本生態学会誌, 40, 179-186.
- 丹下 健・小島克己 (2010) 千葉演習林安野スギ成長測定試験地の地上部現存量. 東京大学演習林報告, 49, 1-6.
- Thiry, Y., Goor, F. and Riesen, T. (2002) The true distribution and accumulation of radiocesium in stem of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Journal of Environmental Radioactivity, 58, 243-259.
- 依田恭二 (1971) 森林の生態学. 築地書館, 331pp.
- Yoshihara, T., Matsumura, H., Hashida, S. and Nagaoka, T. (2013) Radiocesium contaminations of 20 wood species and the corresponding gamma-ray dose rates around the canopies at 5 months after the Fukushima nuclear power plant accident. Journal of Environmental Radioactivity, 114, 60-68.

補足電子資料

以下はオンライン版のみの掲載となります。

補足電子資料図 1 各調査林分の直径（DBH）頻度分布
とその他樹種の構成比

補足電子資料図 2 直径（DBH）から樹高（H）の推定
に用いた関係式の例

補足電子資料表 1 放射能測定に必要な量の辺心材別
粉碎試料を得るために要する円板厚さを求めるための
早見表

URL : [http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/bulletin/432/
documents/432.pdf](http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/bulletin/432/documents/432.pdf)

Methods for assessing the spatial distribution and dynamics of radiocesium in tree components in forest ecosystems

Takuya KAJIMOTO^{1)*}, Tsutomu TAKANO²⁾, Satoshi SAITO¹⁾,
Katsushi KURODA²⁾, Takeshi FUJIWARA²⁾, Masafumi KOMATSU³⁾,
Tatsuro KAWASAKI⁴⁾, Shinta OHASHI⁴⁾ and Yoshiyuki KIYONO⁵⁾

Abstract

We have been studying the spatial distributions and dynamics of radiocesium in forest ecosystems that were contaminated by the Fukushima Daiichi power plant accident in 2011. Three experimental sites, which suffered different levels of contamination, were selected, and permanent research plots in different forest types at each site were established. Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) was the main target species, and a plantation of this species was selected at each site. Plantations of Japanese red pine (*Pinus densiflora*) and Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*), and secondary deciduous broad-leaved forest (dominated by oak, *Quercus serrata*) were also selected at some of the study sites. Here, we describe the study sites, and explain field measurement, sampling and analysis methods used in our research project. We show some examples of the biomass estimates and radiocesium activities, and radiocesium amounts that were observed at the stand-level, and discuss the limitations in our methodology, focusing on the sampling and biomass estimation methods for each of the aboveground tree components (stemwood, branches, and leaves).

Key words : Aboveground tree biomass, Allometry, Basic density, Forest floor vegetation, Radiocesium, Volume ratio

Received 14 July 2014, Accepted 7 August 2014

1) Department of Plant Ecology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Department of Wood Properties, FFPRI

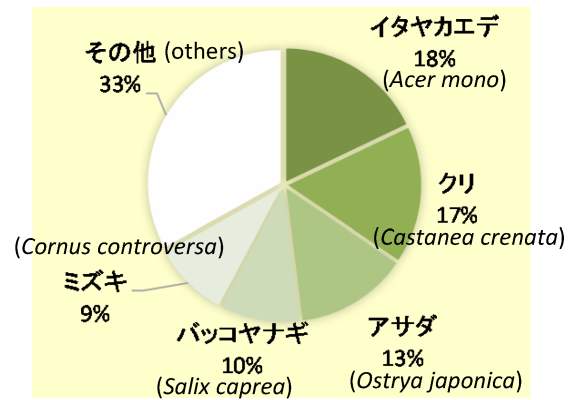
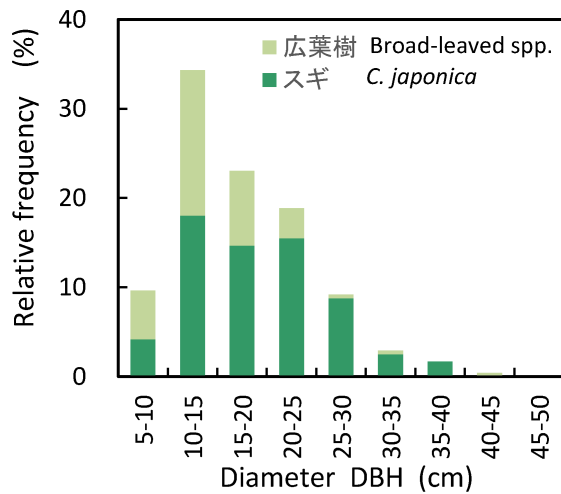
3) Department of Applied Microbiology, FFPRI

4) Research Planning and Coordination Department, FFPRI

5) Principal Research Coordinator, FFPRI

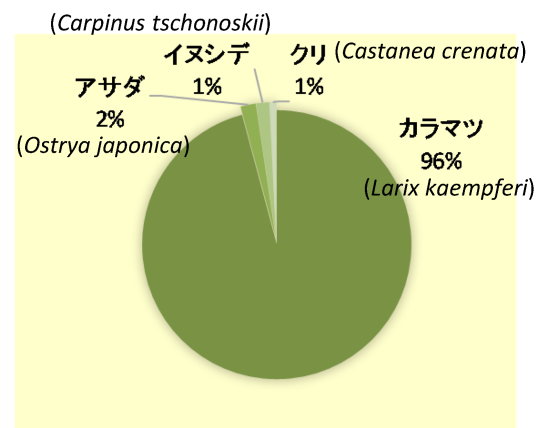
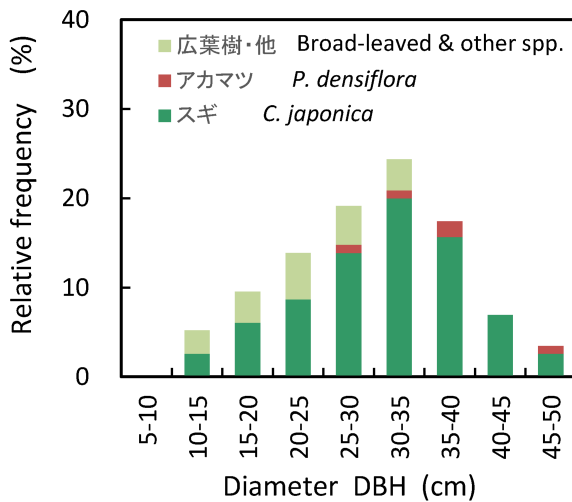
* Department of Plant Ecology, FFPRI, Matsunosato 1, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan; e-mail: tkaji@ffpri.affrc.go.jp

(a) 川内村・大津辺山 スギ林 (KU-S1)



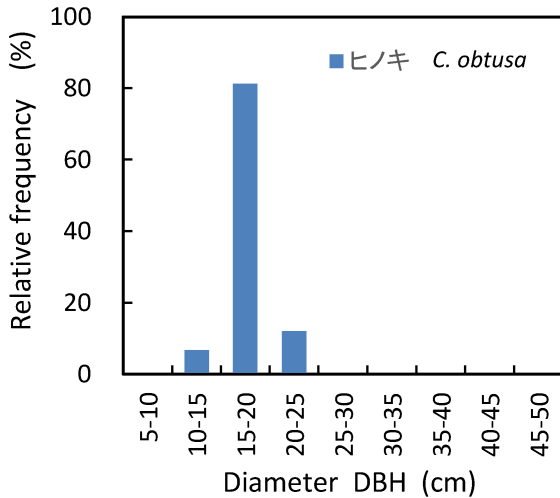
Proportions of other spp. (stem volume %)

(b) 川内村・上川内 スギ林 (KU-S2)

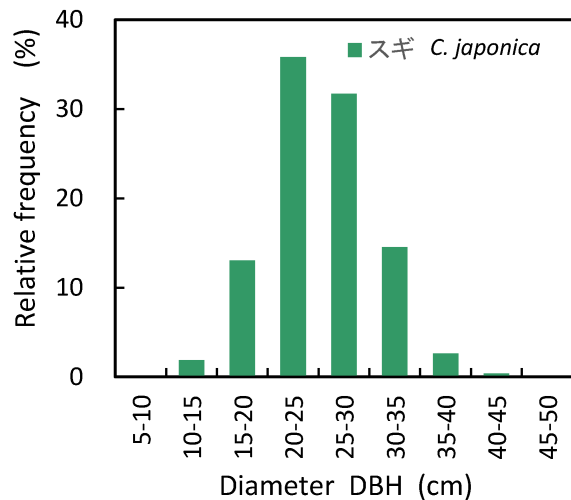


Proportions of other spp. (stem volume %)

(c) 川内村 ヒノキ林 (KU-H)



(d) 大玉村 スギ林 (OT-S)



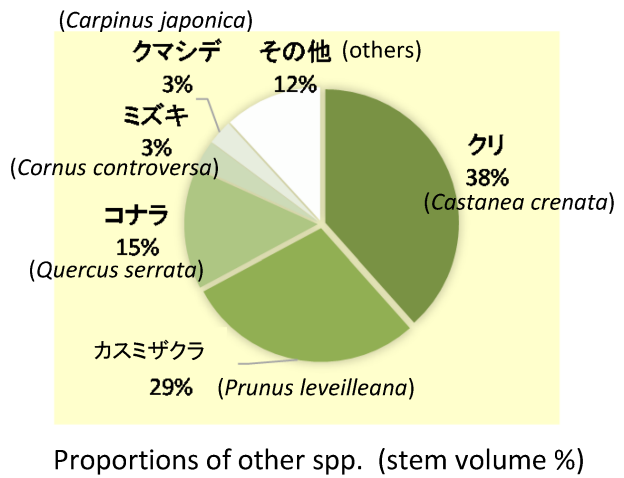
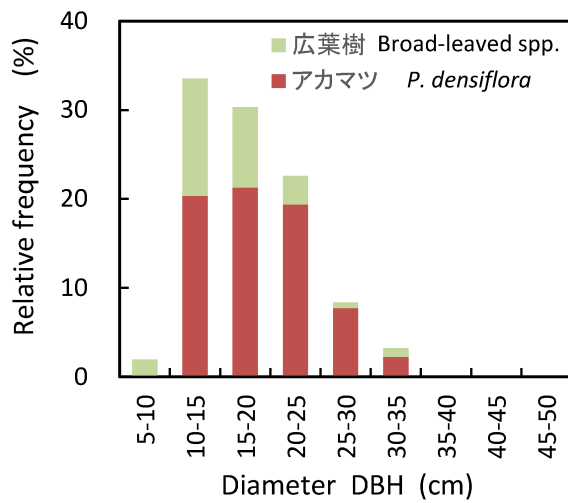
補足電子資料図 1(a)-(d). 各調査林分の (左) 直径 (DBH) 頻度分布と (右) その他樹種の構成比

(a) 川内村スギ林 (b) 川内村・上川内スギ林 (c) 川内村ヒノキ林 (d) 大玉村スギ林

右側の図は、優占樹種以外の種の構成比 (%、幹材積) を示す (KU-H、OT-S は他樹種なし)。

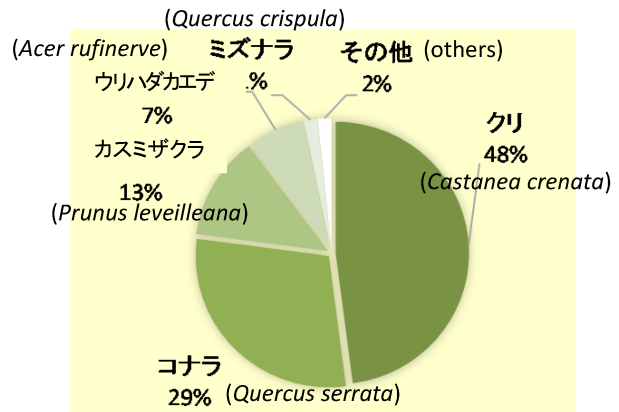
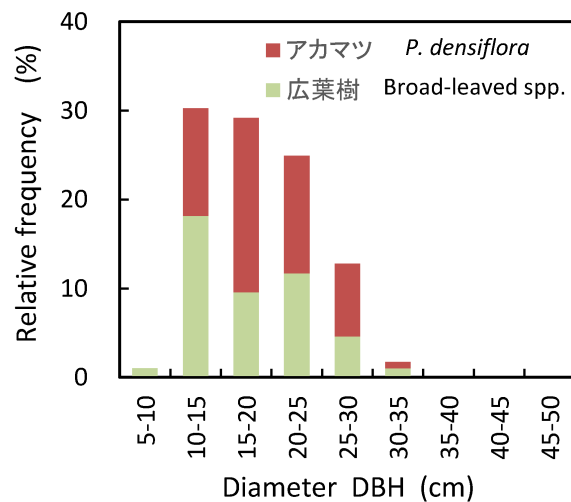
Supplementary Fig. 1(a)-(d). (Left) Relative frequency distribution of stem diameters (DBH) and (right) relative proportions of other species (% on a stem volume basis) in each study stand.

(e) 大玉村 アカマツ林 (OT-P)



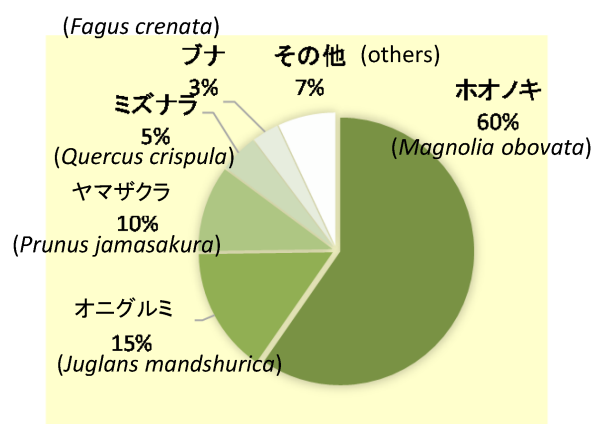
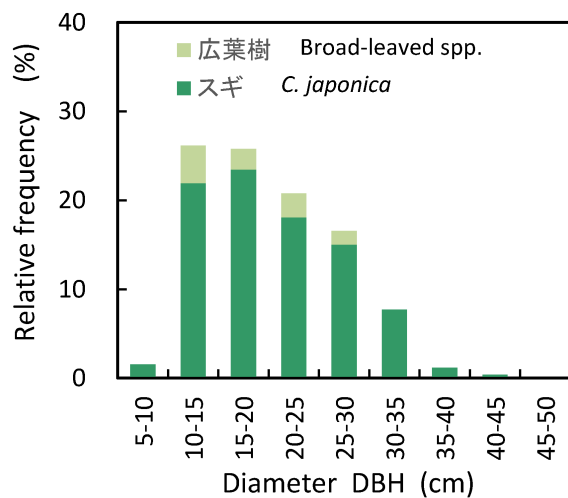
Proportions of other spp. (stem volume %)

(f) 大玉村 広葉樹林 (OT-Q)



Proportions of other spp. (stem volume %)

(g) 只見町 スギ林 (TD-S)



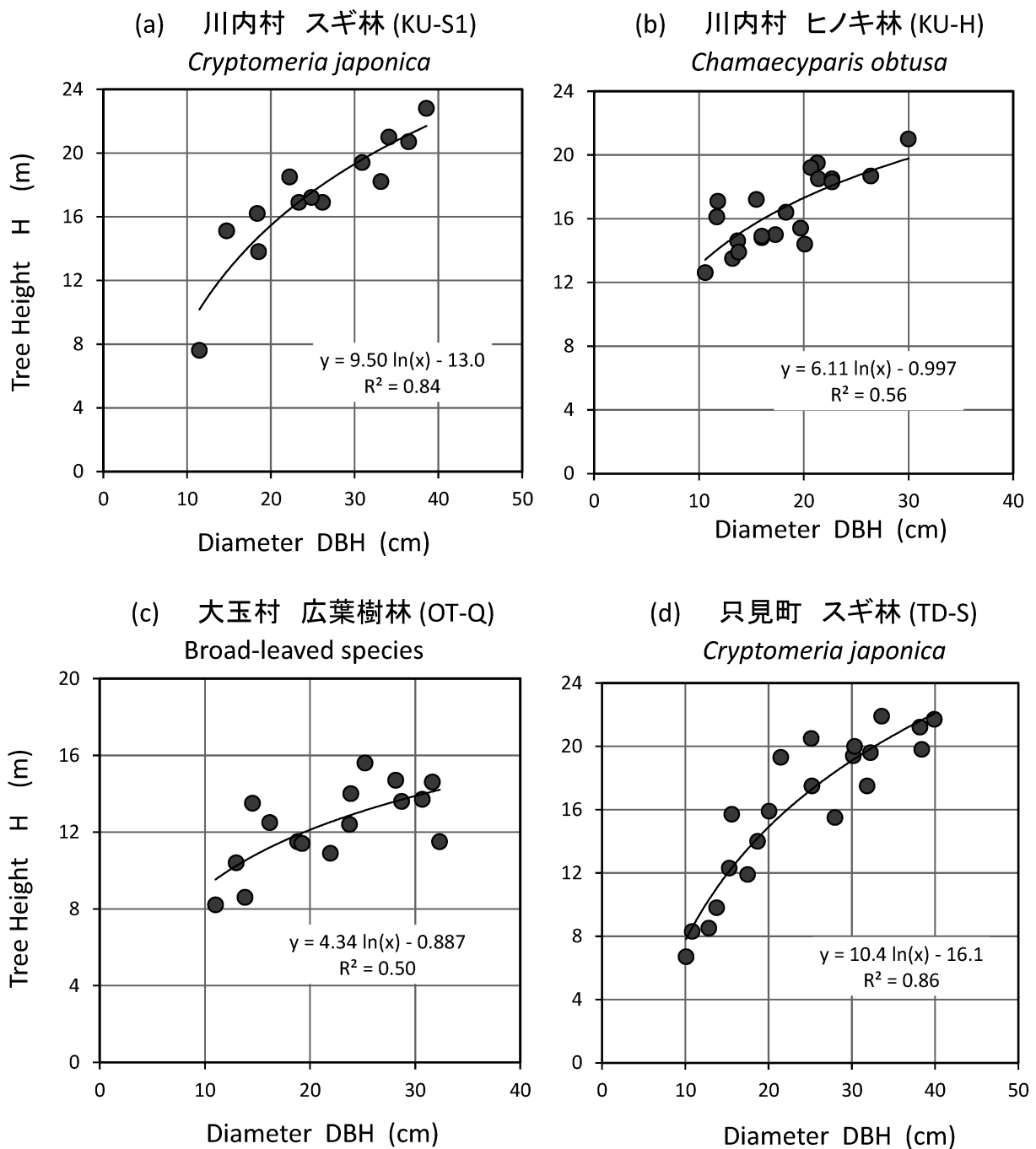
Proportions of other spp. (stem volume %)

補足電子資料図 1(e)-(g). 各調査林分の (左) 直径 (DBH) 頻度分布と (右) その他樹種の構成比

(e) 大玉村アカマツ林 (f) 大玉村広葉樹林 (g) 只見町スギ林

右側の図は、優占樹種以外の種の構成比 (%、幹材積) を示す (KU-H、OT-S は他樹種なし)。

Supplementary Fig. 1(e)-(g). (Left) Relative frequency distribution of stem diameters (DBH) and (right) relative proportions of other species (% , on a stem volume basis) in each study stand.



補足電子資料図 2. 直径 (DBH) から樹高 (H) の推定に用いた関係式の例

(a) 川内村スギ林 (n=13) (b) 川内村ヒノキ林 (n=20) (c) 大玉村広葉樹林 (n=16) (d) 只見町スギ林 (n=13)

川内村ヒノキ林のみ、林野庁データ (未公開) より作成 (試料木は、表 2 に示したヒノキの枝・葉現存量の推定式 (番号 5,6) 作成用に用いた伐倒データと同じ)。

それ以外の林分は、すべて調査プロットで実測したデータから式を作成した。

Supplementary Fig. 2. Examples of site-specific DBH – H relationship.

The regression curves were derived from the data for (a) KU-S1 (n=13), (c) OT-Q (n=16), and (d) TD-S (n=13) from direct measurements in each stand. The regression equation for (b) KU-H (n=20) was taken from unpublished data of Japanese Forestry Agency (detailed information on the data are shown in Table 2).

補足電子資料表 1. 放射能測定に必要な量の辺心材別粉碎試料を得るために要する円板厚さを求めるための早見表

Supplementary Table 1. Approximate thickness of the disks required to obtain enough volume of samples (more than 2 liter) for measuring radio activity of heartwood and sapwood.

心材直径 (cm)	必要な円板の厚さ (cm)		
	辺材幅 1 cm	辺材幅 2 cm	辺材幅 3 cm
4	20 ^{a)}	20 ^{a)}	20 ^{a)}
6	64 ^{b)}	64	64
8	36 ^{b)}	36	36
10	23 ^{b)}	24	23
12	44	20	16
14	38	18	12
16	34	16	10
18	30	14	9
20	27	13	8
22	25	12	8
24	23	11	7
26	21	10	7
28	20	10	6
30	18	9	6
40	14	7	4

心材及び辺材の体積が約 1.8 リットルになるように計算した。木材を粉碎する程度によって粉碎試料の体積は変化するため、粉碎機の篩の径等によって適宜数値を実情に合うように変更することが望ましい。

a) U8 容器(100 ml)を想定した必要量、b) 十分な辺材量が確保できないため、心材のみの試料を採取すると想定した場合の必要量