

資料

壮齡スギ, ヒノキ人工林における林分の炭素貯留量*

渡邊仁志・茂木靖和

キーワード: 針葉樹人工林, スギ, ヒノキ, アカマツ, 現存量, 炭素貯留量

I はじめに

地球温暖化防止のため, 先進国における二酸化炭素など温室効果ガスの排出削減の数値目標を定めた「京都議定書」が, 2005年2月に発効した。これを受けて, 日本では対1990年比マイナス6%の温室効果ガス排出削減目標が定められ, このうちの約2/3を森林の二酸化炭素吸収量で賄うことが認められた。このように, 森林のもつ炭素固定能力への期待がますます高まり, その能力の科学的な評価が求められている。

森林の現存量や炭素貯留量は, 樹種あるいは林齢, 施業方法, 立地条件などによって大きく異なる。国内森林の炭素固定能力を高い精度で推定するため, 様々な種類の森林におけるデータ集積が必要とされている。

岐阜県下呂市にある下呂実験林の適地適木実験林では, 同一斜面上にスギ, ヒノキ, アカマツが植栽され, その施業方法や成長過程が記録されている。この実験林における炭素貯留量が明らかになれば, 同一立地条件下に植栽された針葉樹人工林の炭素貯留量を比較したり, 炭素動態を検討するための有効な資料になると考えた。

この実験林のアカマツ植栽試験地では, 渡邊ら(2004)によって, 植栽試験地全体の現存量と炭素貯留量が推定されている。そこで, これに続き, スギ植栽試験地およびヒノキ植栽試験地を調査し, 現存量と炭素貯留量を推定した。

II 調査地と調査方法

1. 調査地の概要

調査は, 岐阜県下呂市小川の下呂財産区有林内にある下呂実験林の適地適木実験林で行った。適地適木実験林は北向き平衡斜面の下部に位置し, 平均傾斜は39

度, 標高は約450mである。地質は濃飛流紋岩類(溶結凝灰岩), 土壌型はB₀型である(渡邊ら, 2002)。最寄りの宮地地域気象観測所(標高420m)の観測値の平均値(1979~2000年)は, 平均気温11.8°C, 年降水量2410mmである(気象庁Webサイト(<http://www.jma.go.jp/>))。

調査地は, この実験林のスギ植栽試験地(370m²), およびヒノキ植栽試験地(372m²)とした。同一斜面上に, 斜面に向かって左側から順にスギ植栽試験地, ヒノキ植栽試験地, およびアカマツ植栽試験地があり, それぞれが隣接している。また, すべての植栽試験地で, ほぼ同様の施業が行われている。

植栽試験地の前生林分はヒノキ人工林で, 適地適木実験林の設定前に皆伐された。スギ, ヒノキは1965年4月に植栽され, その時の植栽密度はそれぞれ4100本/ha, 3700本/haであった。植栽の翌年に1回と翌々年に2回の下刈りが行われ, その後, 1972年, 1973年, 1978年に枝打ち, 1981年, 1987年, 2002年11月に間伐が実施された。植栽木の炭素貯留量を推定した時点は2002年秋(間伐前)で, このときのスギ, ヒノキの林齢は37年である。

2. 調査方法

(1) 毎木調査

2003年5月に, 植栽試験地内の全立木の胸高直径, 樹高, 枝下高を測定した。また, 2002年11月の間伐により林内に放置されていた切り捨て間伐木の胸高直径を測定した。全立木の胸高直径と樹高の関係をネズレント式で近似して樹高推定式を作成し, 間伐木の樹高を推定した。

(2) 土壌断面調査と土壌試料の採取

2000年6月に, スギ植栽試験地, ヒノキ植栽試験地

* 本報告の一部は第50回日本林学会中部支部大会, 第113回日本林学会大会, 第36回林業技術シンポジウム, 第116回日本森林学会大会において発表した。

のそれぞれ2地点ずつで土壌断面調査を行い、深さ70cmまでの土壌層位を区分した。各土壌層位ごとに土壌円筒試料(100cc)を2点と炭素含有率分析用の試料を約500g採取した。土壌円筒試料からは細土容積重を計算した。炭素含有率分析用の試料から石礫、有機物をより分け、細土のみを風乾した。

(3) 現存量調査

現存量の推定のための試料採取は、堆積有機物(A₁層)、粗大有機物(間伐によって発生した切り捨て木あるいは切り株;2002年11月の間伐により試験地内に残置された間伐木は含まない)、下層植生、植栽木(地下にある根を除く)に分けて行った。

堆積有機物の採取は2000年6月、土壌断面調査を行った地点に0.25m²方形枠を設けて行った。試料はL層、F層、H層に分けて採取し、全量を持ち帰った。下層植生の採取は、2000年8月に、スギ植栽試験地、ヒノキ植栽試験地それぞれの中央に100m²の方形枠を1ヶ所設けて行った。枠内に生育する植栽木以外の植物をすべて掘り取り、木本と草本、地上部と地下部に区分して全量を持ち帰った。持ち帰った堆積有機物、および下層植生試料を80℃、48時間で乾燥させ、乾燥重量を測定した。

粗大有機物の採取は、2000年11月に実施した。下層植生を採取したのと同じ方形枠内に存在する切り捨て木の末口直径、元口直径、長さ、切り株の切り口直径、地際直径、高さを計測し、スマリアン式(梢端の場合は円錐の求積式)から生材容積を計算した。各植栽試験地で10個の粗大有機物から一部分を切り取って持ち帰り、生材容積および乾燥重量(80℃、48時間)を測定した。乾燥試料の容積密度と、算出した粗大有機物の生材容積から、方形枠内に存在する粗大有機物全体の乾燥重量を推定した。

スギは2004年5月、ヒノキは2002年11月に、胸高直径階分布をもとに大きさが偏らないように試料木(スギ5本、ヒノキ6本)を選び伐採した。伐採した試料木は、1mごとの層別刈り取り法により幹、枝葉に区分した。このうち幹については現地で生重量を測定し、1mごとに円板を持ち帰った。枝葉はすべて持ち帰り、緑色部分を葉とみなして、生きた枝、葉、および枯れた枝と葉(以下、枯れ枝葉)に分別し、それぞれ全量を秤量した。各層の円板と各層に属する枝、葉、枯れ枝葉試料からそれぞれ一部をとりだして、乾燥重量(80℃、48時間)を測定した。

試料木の地上部全体、各器官および枯れ枝葉の乾燥重量(W : kg)と $DBH^2 H$ (胸高直径の2乗×樹高: cm²・m)の関係を単純相対成長式(式(1))で近似した。

$$W = a (DBH^2 H)^b \quad (1)$$

この式に毎木調査から算出した各個体の $DBH^2 H$ を代入し、植栽試験地内にある全個体の器官ごとの乾燥重量を算出した。また、根の乾燥重量は、既存文献(原田ら、1969)を参考に、幹の乾燥重量の30%とした。

(4) 炭素含有率の分析・炭素貯留量の推定

堆積有機物、粗大有機物、下層植生の乾燥重量測定後の試料と、風乾状態の鉍質土壌の試料のおのおのから各3点、および植栽木の乾燥重量測定後の試料のおのおのから各1点をミルで粉碎し、炭素含有率(以下、炭素率、%)の分析に供した。炭素率の分析はCNコーダー(ヤナコ社製MT-700)により行った。得られた炭素率の分析値と供試試料の含水率から、試料の乾燥状態での炭素率を求め、部分ごとの平均値をその部分の炭素率とした。植栽木の根の炭素率は幹の炭素率と同じとした。

堆積有機物、粗大有機物、下層植生、植栽木は、先に求めた現存量とここで得られた炭素率から炭素量を算出した。鉍質土壌は、土壌層位の平均層厚、細土容積重とここで得られた炭素率から土壌深70cmまでの炭素量を算出した。

III 結 果

1. 林分概況

調査地の林分概況を表-1に示す。平均樹高を地位別樹高成長曲線(岐阜県林政部、1992a、1992b)と比較して地位級を推定すると、植栽試験地は、スギ、ヒノキとも地位級1の立地に相当していた。林分密度管理図(岐阜県林政部、1992a、1992b)によると、収量比数は、ヒノキ植栽試験地では0.9であり、スギ植栽試験地では1.0を越えていた。

2. 各部分の現存量、炭素率および炭素量

土壌断面調査の結果、深さ70cmまでの鉍質土壌はA₁層、A₂層、B層に区分された。鉍質土壌の平均層厚および層位別の細土容積重、炭素率、炭素量を表-2に示す。ヒノキ植栽試験地のA₁層の厚さは、スギ植栽試験地のそれと比べると薄かった。細土容積重については、樹種による違いは小さく、下の層位ほど大きかった。また炭素率は1.0~6.6%で、下の層位ほど小さかった。深さ70cmまでの鉍質土壌中の炭素量は、スギ植栽試験地で111.6tC/ha、ヒノキ植栽試験地で106.0tC/haと推定された。

堆積有機物と粗大有機物の現存量、炭素率および炭

表一 調査地の林分概況

調査地	林齢* (年)	平均胸高直径 (cm)	平均樹高** (m)	平均枝下高*** (m)	立木密度 (本/ha)	材積 (m ³ /ha)
スギ	37	22.4	21.8	15.9	2180	1093
ヒノキ	37	17.8	17.6	11.7	2050	499

* : 2002年現在

** : 間伐木の樹高は残存木の胸高直径と樹高の関係をネズルト式にあてはめて推定

*** : 残存木のみの数値

表一 2 鈣質土壌(深さ70cmまで)の炭素量

層位	スギ				ヒノキ			
	平均層厚* (cm)	細土容積重 (kg/m ³)	炭素率 (%)	炭素量 (tC/ha)	平均層厚* (cm)	細土容積重 (kg/m ³)	炭素率 (%)	炭素量 (tC/ha)
A ₁	22.5	694.8	3.76	58.8	9.5	583.8	6.60	36.6
A ₂	22.5	735.3	1.83	30.2	31.0	885.5	1.60	43.9
B	25.0	865.7	1.04	22.5	29.5	901.5	0.96	25.5
計	70.0			111.6	70.0			106.0

* : 2地点の断面の平均値

表一 3 堆積有機物および粗大有機物の現存量・炭素量

部分	層位	スギ			ヒノキ		
		現存量 (t/ha)	炭素率 (%)	炭素量 (tC/ha)	現存量 (t/ha)	炭素率 (%)	炭素量 (tC/ha)
堆積有機物	L層	10.7	49.31	5.2	4.9	45.19	2.2
	F層*	9.1	32.88	3.0	4.6	18.96	0.9
	H層	5.4	16.78	0.8			
	計	25.2		9.1	9.5		3.1
粗大有機物		17.8	51.78	9.1	7.8	51.78	4.0

* : ヒノキの堆積有機物F層は、F層およびH層の合計

素量を表一 3 に示した。堆積有機物の現存量は、スギ植栽試験地では25.2t/ha、ヒノキ植栽試験地では9.5t/haであった。炭素率は、16.8~49.3%の値をとり、分解が進んだ下層ほど小さくなった。炭素量はスギ植栽試験地で9.1tC/ha、ヒノキ植栽試験地で3.1tC/haであった。また、粗大有機物の炭素量は、スギ植栽試験地では9.1tC/ha、ヒノキ植栽試験地では4.0tC/haであった。

表一 4 には、下層植生の現存量と炭素量を示した。試料採取時の観察によれば、植栽試験地内には、高さ60cmほどのシキミ、ミヤマハハソ、ウリノキ、コアジサイなどがみられたが、林床は薄暗く、植被率は0%に近かった。下層植生の炭素量はスギ植栽試験地で0.02tC/ha、ヒノキ植栽試験地で0.01tC/haであった。

スギ、ヒノキの試料木の大きさと各器官の重量を表一 5 に示す。試料木の地上部重量は、スギは160.1~383.4kg、ヒノキは72.5~204.6kgであった。スギの試料木のDBH²Hと地上部乾燥重量(W_T:kg)、幹乾燥重量(W_S:kg)、枝乾燥重量(W_B:kg)、葉乾燥重量(W_L:kg)、枯れ枝葉乾燥重量(W_D:kg)は、式(2)~式(6)で表された。

$$W_T = 7.04 \cdot 10^{-2} (DBH^2 H)^{0.857} \quad (R^2 = 0.981; p < 0.01) \quad (2)$$

$$W_S = 9.05 \cdot 10^{-2} (DBH^2 H)^{0.794} \quad (R^2 = 0.996; p < 0.01) \quad (3)$$

$$W_B = 1.46 \cdot 10^{-4} (DBH^2 H)^{1.172} \quad (R^2 = 0.702; ns) \quad (4)$$

$$W_L = 4.42 \cdot 10^{-4} (DBH^2 H)^{1.108} \quad (R^2 = 0.814; p < 0.05) \quad (5)$$

$$W_D = 2.27 \cdot 10^{-4} (DBH^2 H)^{0.117} \quad (R^2 = 0.010; ns) \quad (6)$$

同様に、ヒノキ試料木と地上部、各器官および枯れ枝葉乾燥重量とDBH²Hの近似式を式(7)~式(11)に示す。

表一四 下層植生の現存量・炭素量

部分	スギ			ヒノキ		
	現存量 (t/ha)	炭素率 (%)	炭素量 (tC/ha)	現存量 (t/ha)	炭素率 (%)	炭素量 (tC/ha)
地上部	木本	0.02	45.16	0.01	48.79	0.00
	草本	0.00	39.18	0.00	39.18	0.00
地下部	木本	0.02	46.06	0.01	49.27	0.00
	草本	0.01	36.33	0.00	36.33	0.00
合計		0.04		0.01		0.01

表一五 試料木の大きさと地上部重量

樹種	試料木	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	DBH ² H	地上部重量				地上部 全重量 (kg)
					幹 (kg)	枝 (kg)	葉 (kg)	枯枝葉 (kg)	
スギ	1	21.7	21.8	10265.4	138.5	9.6	11.1	1.0	160.1
	2	23.9	23.3	13309.2	168.1	5.9	14.3	0.4	188.7
	3	27.0	24.3	17714.7	221.6	16.3	31.6	0.6	270.2
	4	30.8	24.0	22767.4	263.9	23.4	33.1	1.4	321.8
	5	34.0	26.5	30634.0	326.1	23.7	33.0	0.6	383.4
ヒノキ	1	15.0	17.5	3937.5	59.5	7.1	4.4	1.6	72.5
	2	15.2	16.6	3835.3	64.1	7.6	3.8	3.1	78.6
	3	17.4	17.5	5298.3	97.2	12.5	6.4	4.6	120.6
	4	17.7	18.9	5921.2	95.9	6.1	4.9	3.1	110.1
	5	21.0	21.4	9437.4	144.3	15.3	8.7	4.2	172.5
	6	24.0	19.7	11347.2	155.4	26.3	14.6	8.3	204.6

$$W_T = 4.43 \cdot 10^{-2} (DBH^2 H)^{0.905}$$

$$(R^2 = 0.961; p < 0.01) \quad (7)$$

$$W_S = 4.94 \cdot 10^{-2} (DBH^2 H)^{0.869}$$

$$(R^2 = 0.959; p < 0.01) \quad (8)$$

$$W_B = 1.24 \cdot 10^{-3} (DBH^2 H)^{1.013}$$

$$(R^2 = 0.703; p < 0.05) \quad (9)$$

$$W_L = 5.99 \cdot 10^{-4} (DBH^2 H)^{1.064}$$

$$(R^2 = 0.892; p < 0.01) \quad (10)$$

$$W_D = 6.63 \cdot 10^{-4} (DBH^2 H)^{0.989}$$

$$(R^2 = 0.645; ns) \quad (11)$$

相対成長関係は、式(2)、式(3)、式(7)、式(8)、式(10) (以上 $p < 0.01$)、および式(5)、式(9) ($p < 0.05$)において有意であった。式(4)、式(11)は有意ではなかったものの、その決定係数は比較的高かった。

表一六には、植栽木の現存量、および炭素率、炭素量を示した。地上部現存量はスギが429.9t/ha、ヒノキが241.5t/haであった。これに根の現存量を加える

と、植栽木全体の現存量はスギが541.3t/ha、ヒノキが300.9t/haであった。炭素率は、50%を少し越える値であり、樹種や部位によって大きな差はみられなかった。植栽木の炭素量はスギで275.5tC/ha、ヒノキで153.6tC/haと推定された。

以上の結果から、堆積有機物、粗大有機物、下層植生、植栽木、および深さ70cmまでの鉾質土壌中に存在する炭素貯留量は、スギ植栽試験地で405.3tC/ha、ヒノキ植栽試験地で266.6tC/haと推定された(表一七)。

IV 考 察

本植栽試験地のスギ植栽木の地上部現存量は、429.9t/haであった(表一六)。スギ林の現存量を調査した11事例(四大学(北大・東大・京大・大阪府立大)および信大合同調査班, 1966; 原田ら, 1972; 西村ら, 1980; 阪上, 1986a; 片桐ら, 1990; 相浦, 1997)によると、林齢20~49年、立木密度975~2800本/haのスギ人工林における地上部現存量は、62.0~349.1t/haであった。これらと比較すると、本スギ植栽木の地上部現存量は非常に大きかった。

また、本植栽試験地のヒノキ植栽木の地上部現存量は、241.5t/haであった(表一六)。既存の9例(只木

表一六 植栽木の現存量・炭素量

部 分	器 官	スギ			ヒノキ		
		現存量 (t/ha)	炭素率 (%)	炭素量 (tC/ha)	現存量 (t/ha)	炭素率 (%)	炭素量 (tC/ha)
地上部	幹	371.2	50.72	188.3	198.2	50.86	100.8
	枝	21.7	51.16	11.1	22.6	50.63	11.4
	葉	35.4	52.99	18.7	13.1	54.32	7.1
	枯枝葉	1.6	55.91	0.9	7.6	52.78	4.0
	計	429.9		219.0	241.5		123.4
地下部	根*	111.4	50.72	56.5	59.5	50.86	30.2
合計		541.3		275.5	300.9		153.6

*：現存量は幹の現存量の30%（原田ら，1969）とした。炭素率は幹の炭素率と同じとした

表一七 スギ，ヒノキ，アカマツ植栽試験地の炭素量

樹 種	炭素量 (tC/ha)						
	植栽木 地上部	植栽木 地下部	下層 植生	堆積 有機物	粗大 有機物	鉍質 土壌	試験地 全体
スギ	219.0 (54.0)	56.5 (13.9)	0.0 (0.0)	9.1 (2.3)	9.1 (2.2)	111.6 (27.5)	405.3 (100.0)
ヒノキ	123.4 (46.3)	30.2 (11.3)	0.0 (0.0)	3.1 (1.2)	4.0 (1.5)	106.0 (39.7)	266.6 (100.0)
アカマツ*	71.3 (34.3)	17.3 (8.3)	1.4 (0.7)	8.7 (4.2)	2.9 (1.4)	106.5 (51.2)	208.0 (100.0)

()は全体に対する割合(%)

*：渡邊ら(2004)

ら，1966；原田ら，1969；西村ら，1980；阪上，1986 b；根岸ら，1988）によると，林齢20～53年，立木密度1431～3400本/haのヒノキ人工林における地上部の現存量は，52.3～254.4t/haであった。本ヒノキ植栽木には，事例中最大の熊本における45年生過密林分（3400本/ha）の値（254.4t/ha；只木ら，1966）に匹敵する地上部現存量があった。

本植栽試験地のスギ林，ヒノキ林は，既存の研究事例と比べて，植栽木の地上部現存量が大きかった。これには，試験地の地位級が高く，両樹種にとって成長に適した立地であることに加えて，林分が過密林分であったことが理由としてあげられる。

このスギ植栽試験地，ヒノキ植栽試験地に隣接し，立地条件や林齢を同じくするアカマツ植栽試験地は，アカマツの地位級1の立地に相当しており，アカマツの成長に適した立地であった。また，林分は収量比数0.9の高密度林分であった（渡邊ら，2004）。このアカマツ植栽試験地における堆積有機物，粗大有機物，下層植生，植栽木，および深さ70cmまでの鉍質土壤中に存在する炭素貯留量は，208.0tC/haであった（表一七）。

植栽試験地全体の炭素量は，スギ植栽試験地>ヒノキ植栽試験地>アカマツ植栽試験地の順であった。部分別の比率をみると，炭素は下層植生や堆積有機物，粗大有機物中には少なく，大部分は植栽木と鉍質土

中に存在した。このうち，鉍質土壤中に存在する炭素量は110tC/ha前後で，3林分とも差がほとんどなかった。また植栽木に含まれる炭素率はほぼ50%であり，樹種による大きな違いはみられなかった。したがって，林分による炭素量の違いは，植栽木の現存量の多少に起因するといえる。

本植栽試験地は，いずれの樹種にとっても成長に適した立地であり，加えて林分は最多密度に近い過密林分である。したがって，植栽木の現存量は，それぞれの樹種がこの林齢で達することができる最大の値に近いことが推測される。このことから，スギ，ヒノキ，アカマツの成長量の違いが，それぞれの植栽試験地における炭素貯留量の差をもたらしたと考えられる。

謝 辞

下呂実験林の維持管理，調査地の貸与など，多岐にわたり下呂財産区の協力をいただいている。現地調査では，岐阜県森林科学研究所（当時を含む）の中川一所長ほか横井秀一氏，井川原弘一氏，大洞智宏氏にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。本研究の一部は，文部科学省科学研究費地域連携推進研究「木曾三川のエコロジカル流域管理計画」（文部科学省科学研究費補助金No.11794029）および独立行政法人

森林総合研究所委託事業「森林吸収源計測・活用体制整備強化事業（平成16年度）」の中で実施したものである。

引用文献

- 相浦英春（1997）氷見市針木地内に成立するカワイダニスギ若齢林の生産力と成育経過. 富林技研報10：69-75.
- 岐阜県林政部（1992a）スギ人工林林分収穫表・林分密度管理図. 21pp, 岐阜県, 岐阜.
- 岐阜県林政部（1992b）ヒノキ人工林林分収穫表・林分密度管理図. 25pp, 岐阜県, 岐阜.
- 原田洸・佐藤久男・堀田庸・只木良也（1969）28年生スギ林およびヒノキ林の養分含有量. 日林誌51：125-133.
- 原田洸・佐藤久男・堀田庸・蜂屋欣二・只木良也（1972）スギ壮齢林の養分含有量に関する研究. 林試研報249：17-74.
- 片桐成夫・金子信博・小島靖（1990）手入れ不足のスギ人工林の物質循環, 地上部および土壌の養分集積量と養分還元量. 島根大学農研報24：21-27.
- 根岸賢一郎・鈴木誠・佐倉詔夫・丹下健・鈴木貞夫・斯波義宏（1988）スギ幼齢林における地上部現存量の経年変化. 東京大学農演報78：31-57.
- 西村武二・徳永秀正・池本彰夫・永森道雄（1980）高知大学農学部附属演習林における森林生産力調査（Ⅲ）, 壮令のスギ造林地およびヒノキ造林地の生産力について. 高知大学農演報8：35-44
- 阪上俊郎（1986a）タテヤマスギ壮齢林の生産力. 富山県林試研報11：18-24.
- 阪上俊郎（1986b）多雪地帯のヒノキ人工林の生産力（Ⅰ）, 丘陵地に植栽されたヒノキ壮齢林の生育状況と生産力. 富山県林試研報11：43-48.
- 只木良也・尾方信夫・長友安男・吉田武彦（1966）森林の生産構造に関する研究（X）, 無間伐の45年生ヒノキ林の生産力. 日林誌48：387-393.
- 渡邊仁志・井川原弘一・大洞智宏・中川一（2002）35年生針葉樹人工林の植栽木が土壌に及ぼす影響. 中森研50：41-44.
- 渡邊仁志・茂木靖和・大洞智宏・中川一（2004）適潤性褐色森林土壌における壮齢アカマツ人工林の炭素貯留量. 岐阜県森林研研報33：13-18.
- 四大学（北大・東大・京大・大阪府立大）および信大合同調査班（1966）森林の生産力に関する研究（第Ⅲ報）, スギ人工林の物質生産について. 63pp, 日本林業技術協会, 東京.