

## 適潤性褐色森林土壌における壮齡アカマツ人工林の炭素貯留量

渡邊仁志・茂木靖和・大洞智宏\*・中川 一

The carbon storage of the mature *Pinus densiflora* plantation  
afforested in mesic brown forest soil

Hitoshi WATANABE, Yasukazu MOTEGI, Tomohiro OBORA\* and Hajime NAKAGAWA

適潤性褐色森林土壌に植栽された35年生アカマツ人工林において、林分の炭素貯留量を推定した。林分全体の炭素貯留量は、208.0tC/haと推定された。このうち、下層植生や堆積有機物、粗大有機物中に含まれる炭素はわずかであり、炭素の大部分は、鉾質土壌(106.5tC/ha)と植栽木(88.6tC/ha)に含まれていた。この林分では、1年間にリターフォールによって、アカマツの葉に含まれる炭素の50%、枝に含まれる炭素の6%が林地に還元されていると考えられた。また、堆積有機物中の炭素量(8.7tC/ha)は、リターフォール中の炭素量のおよそ3年分に相当した。

キーワード：適潤性褐色森林土壌、アカマツ、針葉樹人工林、炭素貯留量

### I はじめに

わが国における森林の物質生産や炭素固定能力に関する研究には、IBPによる成果(例えば只木ら, 1968; 佐藤, 1973; 吉良, 1976; 只木, 1976)をはじめ多くの例がある。しかし、地球温暖化が問題になっている現在、森林生態系のもつ炭素固定能力に大きな期待が寄せられており、その能力の科学的な評価が国際的に求められている。精度の高い推定を行うためには、なお様々な森林におけるデータの集積が必要である。

下呂実験林適地適木実験林は、岐阜県内における適地適木の指標を検討するために造成され、褐色森林土の土壌型別にスギ、ヒノキ、アカマツの成長過程が継続調査されている。この実験林については、これまでにいくつかの報告がある。植栽17年後の植生や土壌については、中川(1982)によって報告され、植栽樹種によってA<sub>0</sub>層の堆積や土壌の理化学性に違いがみられたことが示されている。ヒノキの成長過程については井川原(2001)が報告している。また、堆積有機物、下層植生の現存量と土壌の形態については渡邊ら(2002a)、土壌中の炭素貯留量については渡邊ら(2002b)、リターフォール量とその炭素量については井川原・中川(2002)の報告がある。しかしこれらの報告では、アカマツ植栽地の植栽木や下層植生には触

れられておらず、これらも含めた林分全体の炭素貯留量については検討されていない。

この試験地の炭素貯留量や炭素の動態が明らかになれば、同一立地環境下に植栽されたスギ、ヒノキ、アカマツ人工林の炭素貯留量を推定するための有効な資料になると考えた。そこで本報告では、このうちのアカマツ植栽地について、既存研究の調査結果とあわせて、現存量と炭素貯留量を推定した。

### II 調査地の概要

調査は、岐阜県益田郡下呂町小川(現下呂市小川)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。試験地は益田川(飛騨川)沿いの北向き平衡斜面の下部に位置し、標高はおよそ450m、平均傾斜は39度、地質は濃飛流紋岩類(溶結凝灰岩)、土壌型はB<sub>0</sub>型である(渡邊ら, 2002a)。気象条件は、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)によると、平均気温11.8°C、年降水量2,410mm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アカマツ植栽試験地内(284m<sup>2</sup>)に設けた。試験地の斜面下に向かって右側にはヒノキ植栽試験地、その右側にスギ植栽試験地が隣接し、本

\* 現勤務先：岐阜県科学技術振興センター

試験地と同様な調査が行われている。また左側と下側にはスギ植栽地、上側には作業道をはさんで外国産マツ植栽試験地が隣接している。

調査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。1965年4月に隣接地にヒノキ、スギが植栽された。続いて1967年3月にアカマツが3,300本/haの密度で植栽され、同じ年に2回下刈りが行われた。その後、1972年、1973年、1978年に枝打ち、1981年、1987年、2002年に間伐が実施された。試料木を伐採した2002年時点のアカマツの林齢は35年生であった。

### Ⅲ 調査方法

#### 1. 林分の継続調査

調査地内の林木を対象に継続調査を行った。調査では1967年11月、1968年10月、1969年11月、1980年9月、1987年5月、1992年3月、1995年7月、2000年4月、2002年11月（一部2003年5月）に樹高（1987年からは加えて胸高直径、1995年からは加えて生枝下高）を測定した。胸高直径は全木を測定したが、1980年から1995年までの樹高と1995年の生枝下高については、サンプリングにより一部の個体を測定した。

#### 2. 土壌調査と土壌試料の採取

2000年6月に、調査地内で2地点の土壌断面調査を行い、土壌層位を区分した。土壌の調査方法と分類は、林業試験場（1955）、土じょう部（1976）の方法に準拠した。土壌層位ごとに細土容積重測定用の100cc土壌円筒を2点と、炭素含有率分析用の試料を500g程度採取した。

#### 3. 堆積有機物および粗大有機物の現存量調査

2000年6月に、土壌断面の斜面上部に隣接して0.5m×0.5m方形枠を設け、堆積有機物（A<sub>0</sub>層）を採取した。試料はL層、F層、H層に分別して持ち帰り、乾燥重量（80℃、48時間）を測定した。乾燥重量をヘクタールあたりに換算して現存量を求めた。

伐り捨て間伐木や株などサイズの大きい有機物（粗大有機物）の調査は、調査地内を対象に、2000年11月に実施した。調査では粗大有機物の末口直径、元口直径、長さを計測し、一部の試料では生重量を測定した。試料を数点採取し持ち帰り、乾燥重量（80℃、48時間）と体積（求積にはスマリアン式、梢端の場合は円錐の体積の公式を用いた）から容積重を計算した。サイズが大きい、埋もれているなどの理由で現地で生重量を秤量できなかったものは、体積と試料から得た容積重

をもとに乾燥重量を推定した。得られた乾燥重量をヘクタールあたりに換算して現存量を求めた。

#### 4. 植栽木の現存量調査

植栽木の現存量を推定するため、2002年11月に、胸高直径の頻度分布を参考に、劣勢木から優勢木までサイズが偏らないよう5本を選び、地際から伐採した。伐採した個体は現地で幹、枝葉、枯れ枝に区分し、1mごとの層別刈り取り法により生重量を測定した。

枝葉は全て持ち帰り、針葉が東生する短枝部分より先端の緑色部分を葉と見なして、生きた枝と葉、枯れた枝と葉（以下、枯れ枝葉）に分別し、全量を秤量した。階層ごとに分別した試料の一部について、乾燥重量（80℃、48時間）を計測した。

試料木の乾燥重量と2002年の毎木調査から算出したD<sup>2</sup>H（胸高直径の2乗×樹高：cm<sup>2</sup>・m）から、相対成長関係式をもとに個体あたりの現存量を算出し、ヘクタールあたりに換算して植栽木の現存量を求めた。

根の掘り取り作業は行わなかったため、根の現存量は、蜂屋ら（1989）に基づいて、地上部現存量をもとに推定した。

#### 5. 下層植生の現存量調査

2000年8月に、調査地内の平均的な下層植生の場所に2m×2m方形枠を3箇所設け、植生調査を行った。続いて枠内の植物をすべて掘り取り、現地で木本および草本に区分した。持ち帰った試料は、地上部、地下部に分けて乾燥重量（80℃、48時間）を測定した。得られた乾燥重量をヘクタールあたりに換算して現存量を求めた。

#### 6. 炭素含有率の測定・炭素貯留量の推定

堆積有機物、粗大有機物、植栽木、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一部をミルで粉碎し、試料ごとに1～3個を炭素含有率（以下、炭素率、%）の分析に供した。

炭素率の測定はCNコーダー（ヤナコ社製MT-700）により行った。得られた分析値と供試試料の含水率から各試料の炭素率を求め、試料の平均値をその部分の炭素率とした。

鉍質土壌を除く部分は、炭素率と現存量に基づいて炭素量を算出した。また鉍質土壌は、層位の平均層厚、細土容積重と炭素率から炭素量を算出した。各層位の炭素量を深さ70cmまで積算したものを鉍質土壌の炭素量とした。

表-1 土壌断面の形態

層位	層厚 (cm) 平均 (範囲)	土色	構造	土性	堅密度
A <sub>1</sub>	20 (17~24)	10YR3/3 暗褐色	団粒状・塊状	埴質壤土	鬆
A <sub>2</sub>	28 (25~30)	10YR4/4 褐色	塊状	埴質壤土	やや堅
B	22+ (16+~28+)	10YR5/6 黄褐色	塊状	埴質壤土	軟

表-2 鈳質土壌中の炭素量

層位	細土容積重 (kg/m <sup>3</sup> )	炭素率 (%)	炭素量 (tC/ha)
A <sub>1</sub>	531.0	4.5	48.0
A <sub>2</sub>	784.9	1.8	38.1
B	1028.4	0.9	20.3
計			106.5

表-3 堆積有機物および粗大有機物の現存量・炭素量

測定部分	層位	現存量 (t/ha)	炭素率 (%)	炭素量 (tC/ha)
堆積有機物	L層	10.2	49.8	5.1
	F層	8.0	35.0	2.8
	H層	2.3	26.8	0.7
	計	20.6		8.7
粗大有機物		5.7	51.8	2.9

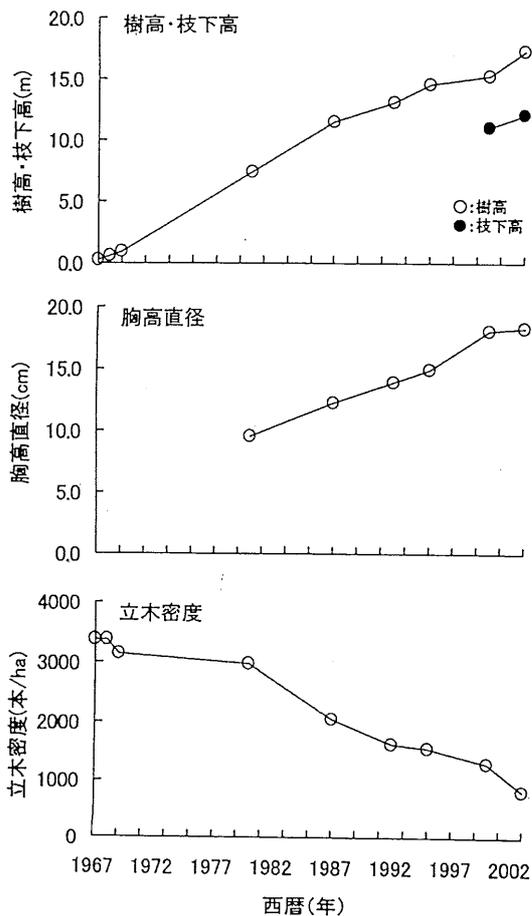


図-1 植栽木の成長と立木密度の推移

#### IV 結果と考察

##### 1. 林分の概況

図-1は、この林分の樹高・枝下高、胸高直径、立木密度の推移を示したものである。2002年の間伐時には、立木密度は、1,280本/haになっていた。またこの時点の平均胸高直径は18.3cm、平均樹高は17.3m、平均枝下高は12.1mであった。平均樹高を地位別樹高成長曲線（岐阜県林政部、1984）にあてはめて地位級を推定すると、1の立地に相当していた。またアカマツの林分密度管理図（岐阜県林政部、1984）と比較すると、収量比数は0.9であり、高密度林分であることがいえる。

##### 2. 各部分の現存量・炭素率・炭素量

###### (1) 鈳質土壌

土壌断面調査の結果を表-1に示す。深さ70cmまでの鈳質土壌はA<sub>1</sub>層、A<sub>2</sub>層、B層に区分された。A<sub>1</sub>層は暗褐色で団粒状構造が発達し、一部塊状構造がみられた。A<sub>2</sub>層はA<sub>1</sub>層に比べて色調がうすく褐色で塊状構造がみられ、B層に漸変した。B層は黄褐色で塊状構造がみられた。各層とも土性は埴質壤土で粘性が強く、母材に由来する角礫～半角礫を多く含んでいた。

鈳質土壌の層位別の細土容積重、炭素率および炭素量を表-2に示す。細土容積重は531.0~1028.4kg/m<sup>3</sup>で、下の層位ほど大きくなっていった。炭素率は0.9~4.5%で、A<sub>1</sub>層、A<sub>2</sub>層、B層の順に低くなっていった。表層から深さ70cmまでの鈳質土壌中の炭素量は、A<sub>1</sub>層では48.0tC/ha、A<sub>2</sub>層では38.1tC/ha、B層では20.3tC/haとなり、全体では106.5tC/haと推定された。

表-4 試料木の大きさと現存量

試料木	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	D <sup>2</sup> H	地上部重量				地上部 全重量 (kg)
				幹 (kg)	枝 (kg)	葉 (kg)	枯枝葉 (kg)	
1	17.0	12.2	2530.3	46.3	1.7	1.2	0.4	49.6
2	17.5	14.8	3833.2	57.6	3.7	1.8	0.4	63.5
3	16.8	16.8	4741.6	60.4	6.0	2.3	0.6	69.3
4	18.3	19.0	6606.3	98.8	5.1	2.9	1.6	108.4
5	20.1	20.7	8612.6	150.7	25.7	6.2	2.5	185.1

表-5 植栽木の現存量・炭素量

測定部分	現存量 (t/ha)	炭素率 (%)	炭素量 (tC/ha)
地上部			
幹	118.5	51.3	60.8
枝	13.5	53.2	7.2
葉	4.3	54.9	2.4
枯枝葉	1.8	53.7	1.0
計	138.2		71.3
地下部			
根	34.5		17.3
合計	172.7		88.6

根現存量は蜂屋ら(1989)に基づいて幹現存量の25%で算出。

表-6 下層植生の現存量・炭素量

測定部分	現存量 (t/ha)	炭素率 (%)	炭素量 (tC/ha)
地上部			
木本	1.1	47.3	0.5
草本	0.0	39.2	0.0
地下部			
木本	1.9	47.7	0.9
草本	0.1	36.3	0.0
合計	3.0		1.4

表-7 アカマツ林の炭素量

調査地	林齢 (年)	立木 密度 (本/ha)	樹高 (m)	胸高 直径 (cm)	炭素量 (tC/ha)							備考
					地上部	根	下層 植生	堆積 有機物	粗大 有機物	大 有機物	鉍質 土壌	
岐阜・下呂	35	1,280	17.3	18.3	71.3	17.3	1.4	8.7	2.9	106.5	208.0	1)
長野・塩尻	35	1,650	18.9	16.9	91.7	11.2		31.8		165.0	299.7	2)

1) 本調査結果。

2) 片倉(2002)より引用。根は幹現存量の15%で算出。鉍質土壌は深さ30cmまでの積算。

(2) 堆積有機物および粗大有機物

試料採取時の観察によると、A<sub>0</sub>層はL層が主体であった。またL層にはアカマツの葉のほかに広葉樹の葉も含まれていた。堆積有機物の現存量は、20.6t/haであった。また炭素率は26.8~49.8%でL層、F層、H層の順に低くなっていた。堆積有機物の炭素量は、L層で5.1tC/ha、F層で2.8tC/ha、H層で0.7tC/haとなり、全体では8.7tC/haと推定された(表-3)。

粗大有機物の現存量は5.7t/ha、炭素量は2.9tC/haとなった。

(3) 植栽木

試料木の大きさと各部分の現存量を表-4に示す。試料木の地上部の現存量は49.6~185.1kgの範囲にあり、そのほとんどが幹に分布していた。試料木のD<sup>2</sup>Hと地上部重量(W<sub>AG</sub>:kg)、幹現存量(W<sub>S</sub>:kg)、枝現存量(W<sub>B</sub>:kg)、葉現存量(W<sub>L</sub>:kg)、枯れ枝葉現

存量(W<sub>D</sub>:kg)は、相対成長関係で近似され、それぞれ、

$$W_{AG} = 1.19 \times 10^{-2} \times D^2 H^{1.0456} \quad R^2 = 0.9140$$

$$W_S = 2.21 \times 10^{-2} \times D^2 H^{0.9365} \quad R^2 = 0.9108$$

$$W_B = 5.52 \times 10^{-7} \times D^2 H^{1.8894} \quad R^2 = 0.8322$$

$$W_L = 6.82 \times 10^{-5} \times D^2 H^{1.271} \quad R^2 = 0.9283$$

$$W_D = 6.94 \times 10^{-7} \times D^2 H^{1.6492} \quad R^2 = 0.8865$$

で示された。

胸高直径、樹高と相対成長関係から算出した植栽木の現存量、および炭素率、炭素量を表-5に示す。地上部現存量は138.2t/haで、この値に根の現存量を加えると、植栽木の現存量は172.7t/haと推定された。炭素率は51.3~54.9%で、各器官とも50%を少し越える値となり、大きな差はみられなかった。これらから植栽木の炭素量は88.6tC/haと推定された。

#### (4) 下層植生

林内には高さ2～3m程度のイタヤカエデ、ヤブムラサキ、ウワミズザクラ、シロモジなどの落葉広葉樹、草本層にはコアジサイ、イヌツゲ等の低木、チヂミザサやミゾシダなどがみられた。被度は低木層で90%程度、草本層で30%程度であった。下層植生の現存量、炭素率、炭素量を表-6に示す。現存量のほとんどが木本によって占められており、草本の重量割合はわずかであった。また草本の炭素率は木本のそれよりも低い傾向があった。下層植生の現存量は3.0t/ha、炭素量は1.4tC/haであった。

#### 3. 林分全体の炭素量

以上の結果から、林分全体の炭素量は、208.0tC/haと推定された(表-7)。このうち下層植生や堆積有機物、粗大有機物中に含まれる炭素の量はわずかであり、炭素の大部分は鉱質土壌と植栽木に含まれていた。

アカマツ林の現存量や炭素量を測定した事例21例(蜂屋ら, 1989; 片倉, 2002; 河原, 1971; 齋藤ら, 1991; 外館, 1978; 外館, 1979; 渡邊, 2003)によると、林齢10～120年生、立木密度529～9,600本/haのアカマツの地上部現存量は、35.5～327.9t/haの間であった。本調査の結果では、地上部現存量は138.2t/haで、この範囲内であった。表-7にこれら調査事例の中で、本調査地のアカマツ林と林齢が同じで、林分全体の炭素量を比較することが可能な事例(片倉, 2002)を示した。

長野県塩尻市のアカマツ天然生林(片倉, 2002)は、本調査地とは林齢が同じで更新方法、立木密度のほか、生育立地(地質、土壌型など)に違いがある。この林分全体の炭素量は299.7tC/haで、本調査地とはおよそ90tC/haの差があった。この理由として、植栽木(立木)と土壌中の炭素量の差をあげることができる。

立木一個体あたりの平均炭素量を比べたところ、両調査地で違いはみられなかった。このことから、立木の炭素量の差は個体の成長差ではなく、立木密度の違いによると考えられる。

また両調査地は土壌型が異なっている(塩尻: 黒色土(Bld)、本調査地: 褐色森林土(Bd))。黒色土は、本調査地の褐色森林土とは生成要因や性質が異なっており、腐植に富んだA層が厚く堆積することが特徴である。本調査地と塩尻の例を比較すると、塩尻の方が、層厚、炭素率とも大きかった。このことは、土壌群の性質の違いが土壌中の炭素量に影響し、林分全体の炭素量にも強く関与していることを示している。

表-8 リターフォール・植栽木の炭素量の比較

部分	リターフォール (tC/ha・yr)	植栽木 (tC/ha)	割合
葉	1.2	2.4	50.4
枝	0.5	7.2	6.1
枯れ枝葉		1.0	
その他	0.3		
合計	2.0	10.6	18.9

#### 4. 林分内における炭素の動態

植栽木や下層植生の枝葉は、リターフォールによって林地に還元される。井川原・中川(2002)によって、この調査地のリターフォール量が報告されている。これによると年間リターフォール量は5.8t/ha・yr、リターフォール中の炭素量は3.1tC/ha・yrであった。

このうちアカマツ由来のリターフォール量は3.7t/ha・yr、炭素量は2.0tC/ha・yrであり、その中で大きな割合を占めていたのは、アカマツの葉(1.2tC/ha・yr)、枝(0.5tC/ha・yr)であった(表-8)。植栽木の葉、枝+枯れ枝葉の炭素量は、それぞれ2.4tC/ha、8.2tC/haであることから、1年間で葉のおよそ50%、枝のおよそ6%、全体ではおよそ19%の炭素が、リターフォールによって林地に還元されていると考えられる。

葉量の50%がリターフォールに相当することは、アカマツやクロマツの葉の寿命は2年前後とした只木(1976)の結果と一致する。またリターフォール中の炭素量が枝、葉、枯れ枝葉の炭素量に占める割合(19%)は、19年生アカマツ林で同時期に測定された例(14%: 井川原・中川, 2002)とほぼ一致した。

またこの林分の堆積有機物の炭素量は、8.7tC/haであった。落下したリター中の炭素の分解過程や落下後の移動を考慮する必要があるが、堆積有機物の炭素量は、リターフォール中の炭素量のおよそ3年分に相当した。これは20年生アカマツ林で現存量を比較した例(約3年: 河原, 1971)と一致した。

#### V 謝 辞

下呂財産区には、下呂実験林の維持管理、調査地の提供など、多岐にわたり協力いただいている。2000年の現地調査には横井秀一氏(岐阜県森林科学研究所)、植栽木の現存量調査には小池昭一郎氏(岐阜県下呂町役場)、井川原弘一氏(岐阜県森林科学研究所)に協力いただいた。片倉正行氏(長野県林業総合センター)からは、データの提供と有益なご助言を得た。ここに記して謝意を表す。

なお本報告の一部は、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15年度)」の中で実  
施したものである。

また本報告の一部は第50回日本林学会中部支部大会  
(渡邊ら, 2002a), 第113回日本林学会大会(渡邊ら,  
2002b), 第36回林業技術シンポジウム(渡邊, 2003),  
第115回日本林学会大会(渡邊ら, 2004)で発表した。

#### 引用文献

- 岐阜県林政部(1984)アカマツ人工林林分材積表・林  
分収穫予想表. 88pp, 岐阜県, 岐阜.
- 土じょう部(1976)森林土壌の分類(1975). 林業試  
験場研究報告280: 1-28.
- 蜂屋欣二・竹内郁雄・羽秋一延(1989)高密度のアカ  
マツ林の一次生産の解析. 林業試験場研究報告  
354. 39-97.
- 井川原弘一(2001)下呂実験林の適地適木実験林にお  
ける植栽樹種の成長過程(I), ヒノキの成長と  
土壌型, 施肥の影響. 岐阜県森林科学研究所研究  
報告30: 9-16.
- 井川原弘一・中川一(2002)針葉樹人工林のリターフォ  
ール量と含有炭素量・窒素量. 岐阜県森林科学研究所  
研究報告31: 7-12.
- 片倉正行(2002)炭素吸収源データ収集システム開発  
事業. 長野県林業総合センター業務報告(平成13  
年度): 30-31.
- 河原輝彦(1971)Litter Fallによる養分還元量につい  
て(II), 有機物量および養分還元量. 日本林学  
会誌53: 231-238.
- 吉良竜夫(1976)陸上生態系, 生態学講座2. 166pp,  
共立出版, 東京.
- 林業試験場(1955)国有林野土壌調査方法書. 47pp,  
林業試験場, 東京.
- 齋藤秀樹・上家祐・竹岡政治(1991)壮齡アカマツ林  
の現存量, 枯死量, リター量およびリターフォ  
ール量. 京都府立大学演習林報告35: 41-47.
- 佐藤大七郎(1973)陸上植物群落の物質生産I a, 生  
態学講座5 a. 95pp, 共立出版, 東京.
- 外館聖八郎(1978)天然生アカマツ放置林分における  
現存量の推移. 日本林学会大会発表論文集89:  
189-190.
- 外館聖八郎(1979)天然生アカマツ筋刈林分における  
現存量の推移. 日本林学会大会発表論文集90:  
319-320.
- 只木良也(1976)森林の現存量, とくにわが国の森林  
の葉量について. 日本林学会誌58:416-423.
- 只木良也・蜂屋欣二(1968)森林生態系とその物質生  
産. わかりやすい林業研究解説シリーズNo.29.  
64pp, 林業科学振興所, 東京.
- 渡邊仁志・井川原弘一・大洞智宏・中川一(2002a)  
35年生針葉樹人工林の植栽木が土壌に及ぼす影響.  
中部森林研究50: 41-44.
- 渡邊仁志・井川原弘一・中川一(2002b)35年生針葉  
樹人工林土壌の有機物と炭素貯留量. 日本林学会  
大会学術講演集113: 52.
- 渡邊仁志(2003)炭素貯留機能からみた針葉樹人工林  
の適地適木. 山林1432: 13-20.
- 渡邊仁志・片倉正行・茂木 靖和(2004)立地条件の  
異なる壮齡アカマツ林の炭素貯留量. 日本林学会  
大会学術講演集115: 印刷中.