

短報 (Note)

強度間伐したヒノキ人工林の表層土壌の物理性

篠宮佳樹^{1)*}、稲垣善之¹⁾、野口麻穂子²⁾、奥田史郎³⁾、宮本和樹²⁾、伊藤武治²⁾

Physical properties of surface soils at intensive thinned Hinoki cypress plantations

Yoshiki SHINOMIYA^{1)*}, Yoshiyuki INAGAKI¹⁾, Mahoko NOGUCHI²⁾,
Shiro OKUDA³⁾, Kazuki MIYAMOTO²⁾ and Takeharu ITOU²⁾

Abstract

The physical properties of the surface soil were investigated by comparing adjacent intensive thinning and control plots in hinoki cypress plantations (OKU and KRK) in Kochi Prefecture, Shikoku Island. The percentage of thinning in OKU and KRK were 64 and 57 %, respectively. Surface soil samples at a depth of 0–4 cm were collected using a 400 mL cylindrical sampler after almost 1 year of intensive thinning. Bulk density, total porosity, coarse and fine porosities were not significantly different between the control and intensive thinning plots in OKU and KRK. This result suggests that the influence of intensive thinning under this condition (the non-commercial thinning without extracting and brown forest soil) to bulk density, total porosity, coarse and fine porosities is not as large as that of clear cutting. This may be because the influence of operation was not so strong and the soil type was different from easily eroded one like black soil originated from volcanic ash. The large porosity (0 ~ -0.4 kPa) was significantly lower and medium porosity (-0.4 ~ -6.2 kPa) and maximum water holding capacity were significantly higher in the intensive thinning than in the control. These results would show that soil water condition in surface soils extends to humid after intensive thinning, which may result in the elevation of available water for the remaining trees and for the water conservation function.

Key words : Hinoki cypress plantation, soil physical property, surface soil, intensive thinning, non-commercial thinning

1. はじめに

近年、木材価格の低迷や林業労働者の不足といった社会経済状況のため、集約的でコスト抑制が可能な森林管理方法として、本数で40%を超える強度間伐が注目されている(深田 2006, 渡辺ら 2008, 相浦ら 2010)。また同時に森林を適切に管理し、水資源や土壌の保全などの多面的機能を発揮することが求められている。そのため、強度間伐が土壌の孔隙組成に及ぼす影響を調査、解析することによって、集約的でコスト抑制可能な人工林施業の水源涵養機能に対する有効性を明らかにする必要がある。

森林土壌は大小様々な大きさの孔隙を含む。そのうち、粗孔隙は水を一時的に貯留する役割の他、その良好な透水性により下層へ水を導く役割も果たし、粗孔隙の増加

は結果的に水源涵養機能を向上させると考えられており、水源涵養機能への影響を推察する1つの指標となっている(有光 1987, 小柏ら 1991, 太田・服部 2002 など)。我が国のヒノキ人工林で皆伐施業が土壌物理性に及ぼす影響について、透水性や粗孔隙の減少、容積重や固相率の増加などが報告されている(上田ら 1965, 小林 1982, 荒木・有光 1984, 小野 2005)。こうした変化は地表流の発生や表土流亡を促進している可能性がある。強度間伐では皆伐よりは大きくはないが、通常の間伐よりは土壌に及ぼす影響が大きい可能性もあり、その検証が必要である。強度間伐の影響をヒノキ人工林で検討した事例では、明確な変化が認められなかった場合(古池 1986, 荒木ら 2002)と、透水性の低下傾向(吉田ら 1992)や粗孔隙の減少が認められた場合(篠宮ら 2011)など、結果は

原稿受付:平成24年3月26日 Received 26 March 2012 原稿受理:平成24年7月30日 Accepted 30 July 2012

1) 森林総合研究所立地環境研究領域 Department of Forest Site Environment, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) 森林総合研究所四国支所 Shikoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

3) 森林総合研究所関西支所 Kansai Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* 森林総合研究所立地環境研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1 Department of Forest Site Environment, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan, e-mail: sinomiya@ffpri.affrc.go.jp

様々であり一定の傾向はみられない。なお、スギ人工林においては間伐の結果、土壌の粗孔隙の増加（小柏ら 1991）、表層土壌における容積重の低下・粗孔隙の増加（諫本 1992）が報告され、間伐による森林土壌の水源涵養機能の向上を示唆する結果が得られている。影響が異なるのは、個々の事例における植生・土壌などの立地条件や伐採・搬出などの施業条件の違いが影響したためと予想され、多様な立地条件や施業条件に対応した調査事例を蓄積する必要がある。例えば、強度間伐に伴い林地に多量の枝条が残される場合がある。ヒノキ人工林の間伐地で対照区・枝条放置区の表層土壌の孔隙組成を比較したところ、違いは認められず枝条の有無による表層土壌の孔隙組成への影響はないことが報告されている（荒木ら 2005）。本報では、褐色森林土が分布するヒノキ人工林において強度間伐を実施した後、強度間伐区（枝条の影響のない場所）・対照区の表層土壌の物理性を比較することで、強度間伐がヒノキ人工林の表層土壌の物理性に及ぼす影響について検討した。

2. 研究方法

調査は奥大野試験地（高知県吾川郡いの町奥南川山国有林、以下「OKU」）、辛川試験地（高知県土佐清水市辛川山国有林、以下「KRK」）の2箇所のヒノキ林で行った（Table 1）。年雨量、年平均気温は OKU で 2948 mm、9.8 °C、KRK で 2964mm、14.1 °C であった（気象庁 2002）。両試験地とも土壌型は B_D 型（土じょう部 1976）、北～北西向きの傾斜約 35° の斜面中部にあり、

針葉樹人工林の伐採後に再び植林されたものである。OKU は標高約 900m、KRK は 320m に位置し、それぞれ中間温帯域、暖温帯域に属する（Noguchi et al. 2011）。OKU の間伐時における林齢は 31 年生、KRK は 34 年生、地質は OKU が変成岩、KRK が堆積岩であった。両試験地で年平均気温、標高が異なるが、年降水量、土壌型、斜面方位、傾斜、林齢はほぼ同じであった（Miyamoto et al. 印刷中）。

OKU では 40m×40 m の試験区が 12 箇所、KRK では 20m×20 m の試験区が 6 箇所設定されている（Miyamoto et al. 印刷中）。そのうちの上木や下層植生の生育状況がほぼ等しく、概ね平衡斜面と思われる隣りあう試験区を 2 箇所選定し、一方を強度間伐区、他方を無間伐の対照区とした。OKU では、強度間伐区・対照区のいずれにおいても間伐前の下層植生は非常に少なかった（Table 1）。KRK ではいずれの試験区にも若干の下層植生が認められ、そのおもな種はコバノカナワラビ (*Arachniodes sporadosora*)、ミヤマノコギリシダ (*Diplazium mettenianum*) であった。OKU は 2008 年 5 月に、KRK は 2008 年 1 月に、本数で約 60% の強度間伐を実施した（Table 2）。間伐は定性間伐を基本とし、被圧木や形質不良木を中心とする下層間伐と、高い間伐率を確保するため残存木の配置が不均等にならないよう配慮しつつサイズの大きな個体の間伐も実施し、結果的に全層間伐に近い状態となった。伐採木は搬出せず放置した。間伐実施後の 2009 年 6 月（間伐の概ね 15 ヶ月後）に、対照区・強度間伐区で採土円筒（直径 11.3cm、高さ

Table 1. 試験地の概要
Summary of study sites

	奥大野 Okuohno (OKU)	辛川 Karakawa (KRK)
緯度 Latitude	N33° 41'	N32° 50' 20"
経度 Longitude	E133° 15'	E132° 52' 21"
標高 Elevation (m)	890	320
年降水量 Annual precipitation (mm)	2948	2964
年平均気温 Annual mean air temperature (°C)	9.8	14.1
傾斜 Slope (°)	35	37
斜面方位 Slope aspect	N10°W	N40°W
土壌型 Soil type	B _D	B _D
土壌母材 Parent material	変成岩 Metamorphic rock	堆積岩 Sedimentary rock
林齢（間伐時） Stand age in thinning	31	34
被度（間伐前）* Vegetation cover before thinning (%)	対照区 Control 2	21
	強度間伐区 Intensive thinning 1	45

* 出現したすべての維管束植物種の被度を合計した値

* Vegetation cover summed up for all observed vascular plant species

Table 2. 調査林分における間伐実施概要
Summary of thinning in the study sites

試験区 Plot	立木本数 Tree number (本/ha)			幹材積 Stem volume (m ³ /ha)		
	間伐前	間伐後	間伐割合	間伐前	間伐後	間伐割合
	Before thinning	After thinning	Percentage of cutting(%)	Before thinning	After thinning	Percentage of cutting(%)
OKU 対照区 Control	2050	-	0	337	-	0
OKU 強度間伐区 Intensive thinning	2125	775	63.5	365	185	49.3
KRK 対照区 Control	1775	-	0	326	-	0
KRK 強度間伐区 Intensive thinning	1700	725	57.4	394	201	49.1

4cm, 容積 400mL) を用いて立木と立木との間の深さ 0 ~ 4cm の土壌を 5 個ずつ採取した。強度間伐区では伐採木の幹・枝の影響の無い場所より採取した。試料は実験室に持ち帰り、河田・小島 (1979) および森林立地調査法編集委員会 (1999) に準拠して容積重、全孔隙率、粗孔隙率、細孔隙率、最大容水量、最小容気量、飽和透水係数などを測定した。孔隙解析は加圧板法により行った。孔隙区分について、有光ら (1995)、諫本 (2002) などを参考に Fig. 1 のように分類した。大孔隙率は河田・小島 (1979) の最小容気量を相当させた。採土円筒を飽水処理する際、吸水が十分でなかった 14 試料 (OKU 対照区 5 個、OKU 強度間伐区 3 個、KRK 対照区 3 個、KRK 強度間伐区 3 個) については常法 (森林立地調査法編集委員会 1999) に準拠して試料表面が湿るまでアルコール (エタノール: 水 = 1 : 1 溶液) を噴霧した。統計解析はソフトウェア (JMP6.0, SAS Institute) を用いて、試験地 (OKU, KRK) と処理 (強度間伐区、対照区) による二元配置の分散分析を行った。

3. 結果及び考察

強度間伐前の 2007 年 7 ~ 9 月に円筒 (容積 100mL, n=5) で採取した表層土壌の容積重 (平均値 ± 標準偏差) は OKU の強度間伐区、対照区で $0.49 \pm 0.16 \text{ Mg m}^{-3}$ 、 $0.45 \pm 0.03 \text{ Mg m}^{-3}$ 、KRK では $0.65 \pm 0.04 \text{ Mg m}^{-3}$ 、 $0.67 \pm 0.12 \text{ Mg m}^{-3}$ で、それぞれの試験地で間伐前の容積重に特に違いはみられなかった (稲垣, 未発表)。本調査の結果、OKU は KRK より容積重が軽く、全孔隙率、粗孔隙率、小孔隙率は高かった。最大容水量は OKU、KRK ともに対照区より強度間伐区で約 10%、中孔隙率は 5 ~ 7% 高かった。大孔隙率は対照区より強度間伐区で概ね 8% 小さかった (Table 3)。分散分析の結果、細孔隙率と飽和透水係数 (対数値) には有意差がなかったが、容積重、全孔隙率、粗孔隙率、小孔隙率に試験地 OKU と KRK による有意差が、最大容水量、大孔隙率、中孔隙率に強度間伐の有無による有意差が認められた (Table 4)。

孔隙区分	粗孔隙			細孔隙
	大孔隙	中孔隙	小孔隙	
マトリックス	0.6	1.8	2.7	(pF値)
ポテンシャル	-4	-63	-501	(cmH ₂ O)
	-0.4	-6.2	-49.1	(kPa)

Fig. 1. 孔隙率の分類
Classification of porosity

今回のヒノキ人工林の強度間伐によって表層土壌の容積重、全孔隙率、粗孔隙率、細孔隙率は変化しなかった。ヒノキ人工林の皆伐 (小林 1982, 荒木・有光 1984, 小野 2005) や一部の強度間伐 (篠宮ら 2011) で、表層土壌の容積重の低下、粗孔隙の減少と細孔隙の増加という変化が認められている。OKU、KRK でも同程度の強度間伐を実施しながら変化が表れなかった要因として、第一に施業に伴う地表攪乱が小さかったことが挙げられる。ヒノキ人工林の強度間伐で変化がみられた事例 (篠宮ら 2011) では、間伐木は架線により集材・搬出されているのに対し、OKU、KRK では伐り捨て間伐であった。歩行による踏圧、伐倒木の圧密などの影響が局部的には考えられるが、搬出作業がないので地表が広い範囲で顕著に攪乱された可能性は小さい。そのため、地表の攪乱は限定的であったと考えられる。第二に土壌型の違いが挙げられる。ヒノキ人工林の強度間伐で変化がみられた事例 (篠宮ら 2011) の土壌型は黒色土であったのに対し、OKU、KRK ともに褐色森林土であった。黒色土は膨軟で容積重が軽いいため、施業や雨滴による攪乱などの影響を受けやすいと考えられる。ヒノキ人工林を対象に本数間伐率 40% を超える強度間伐が表層土壌の土壌物理性に及ぼす影響を検討した既往の報告 (古池 1986; 荒木ら 2002; 篠宮ら 2011) でも、明確かつ一定の変化が認められていない事例が大部分であること、我が国の森林土壌の約 70% を褐色森林土が占めること (Morisada et al. 2004) から、ヒノキ人工林の強度間伐に

Table 3. 土壤物理性の分析結果
Soil physical properties of each study site

		OKU		KRK	
		対照区 Control	強度間伐区 Intensive thinning	対照区 Control	強度間伐区 Intensive thinning
容積重	Bulk density (Mg m ⁻³)	0.38 (0.10)	0.35 (0.06)	0.75 (0.05)	0.67 (0.07)
全孔隙率	Total porosity (%)	80.8 (4.0)	82.5 (1.7)	69.2 (1.6)	72.0 (3.3)
粗孔隙率	Coarse porosity (%)	53.5 (3.2)	53.2 (6.2)	41.6 (2.9)	42.3 (5.1)
細孔隙率	Fine porosity (%)	27.3 (4.9)	29.3 (4.6)	27.6 (2.6)	29.7 (4.3)
最大含水量	Maximum water holding capacity (%)	47.5 (10.7)	56.5 (4.8)	41.3 (8.7)	52.2 (2.7)
大孔隙率(最小容気量)	Large porosity (Air minimum) (%)	33.3 (10.4)	26.1 (6.4)	27.8 (8.2)	19.9 (3.4)
中孔隙率	Medium porosity (%)	13.6 (7.1)	18.5 (3.1)	8.7 (4.9)	16.4 (7.0)
小孔隙率	Small porosity (%)	6.6 (1.6)	8.6 (1.5)	5.1 (2.1)	6.1 (1.9)
飽和透水係数	Saturated hydraulic conductivity (m s ⁻¹) ¹⁾	2.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴	1.1×10 ⁻⁴
採取時含水量	Volumetric water content of fresh soil (%)	23.8 (5.0)	32.1 (6.8)	27.0 (4.9)	30.7 (7.1)
レキ率	Volumetric gravel content (%)	2.9 (1.2)	2.8 (1.0)	9.5 (2.3)	8.4 (2.8)

¹⁾幾何平均 geometric mean

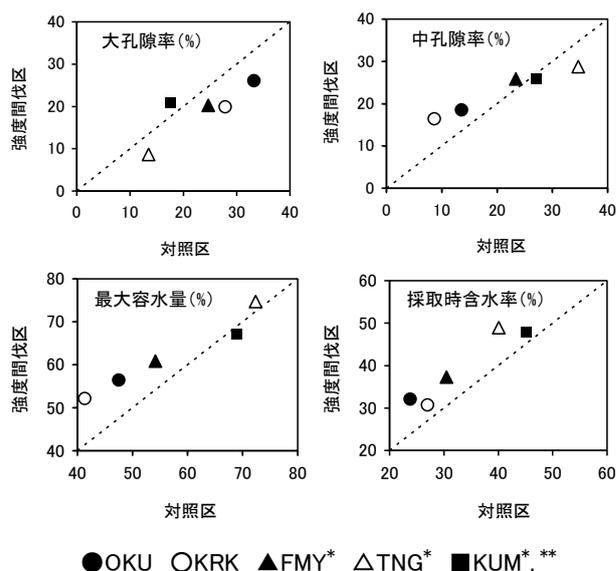
²⁾()内の数値は標準偏差 The numbers in parentheses represent the standard deviation

Table 4. 分散分析の結果
The result of two-way analysis of variance

			F 値	p 値
			F-value	p-value
容積重 Bulk density (Mg m ⁻³)	処理 Operation		3.1	0.10
	試験地 Site		105.0	0.0001>
	交互作用 Interaction		0.6	0.45
全孔隙率 Total porosity (%)	処理 Operation		3.3	0.09
	試験地 Site		76.3	0.0001>
	交互作用 Interaction		0.2	0.66
粗孔隙率 Coarse porosity (%)	処理 Operation		0.0	0.90
	試験地 Site		31.5	0.0001>
	交互作用 Interaction		0.1	0.81
細孔隙率 Fine porosity (%)	処理 Operation		1.2	0.30
	試験地 Site		0.0	0.86
	交互作用 Interaction		0.0	0.97
最大含水量 Maximum water holding capacity (%)	処理 Operation		8.8	0.01>
	試験地 Site		2.5	0.13
	交互作用 Interaction		0.1	0.78
大孔隙率 Large porosity (%)	処理 Operation		5.0	0.05>
	試験地 Site		2.9	0.11
	交互作用 Interaction		0.0	0.91
中孔隙率 Medium porosity (%)	処理 Operation		6.0	0.05>
	試験地 Site		1.9	0.17
	交互作用 Interaction		0.3	0.60
小孔隙率 Small porosity (%)	処理 Operation		3.5	0.08
	試験地 Site		6.4	0.05>
	交互作用 Interaction		0.4	0.53
飽和透水係数(対数値) Logarithm of saturated hydraulic conductivity	処理 Operation		0.9	0.37
	試験地 Site		1.4	0.25
	交互作用 Interaction		1.6	0.23
採取時含水量 Volumetric water content of fresh soil (%)	処理 Operation		4.8	0.05>
	試験地 Site		0.1	0.75
	交互作用 Interaction		0.7	0.41

より表層土壌の物理性に变化が生じる可能性は大きくないといえる。变化が生じる可能性があるのは、集材・搬出時の地表攪乱の度合いが強い場合、攪乱に対する抵抗性が小さい土壌である場合などが考えられ、強度間伐における集材搬出方法の選択は重要である。

本報とほぼ同じ試験設定・測定手法で得られた結果(篠宮ら 2011)を加え、四国地方の5つのヒノキ人工林の強度間伐区・対照区で表層土壌の大孔隙率、中孔隙率、最大容水量を比較した(Fig. 2)。その結果、対照区より強度間伐区で大孔隙率が小さい傾向、中孔隙率及び最大容水量が大きい傾向がOKU、KRK、FMYの3箇所に共通してみられた(Fig. 2)。これらより、ヒノキ人工林の強度間伐で表層土壌の大孔隙率が減少、中孔隙率・最大容水量が増加する場合があることが示唆された。OKU、KRK、FMYの3箇所の共通点から、大孔隙率等の一連の変化は褐色森林土に成立するヒノキ人工林で地表の攪乱が小さい強度間伐施業を行った場合に起こりやすいと考えられる。それらの変化が起きた要因として、強度間伐を実施した際、封入空気の影響や孔隙サイズが大きいため水で満たされない孔隙(森林土壌研究会, 1982)が歩行による踏圧、伐倒木の圧密、林冠からの集中滴下による目詰まりなどで物理的に変化したことが考えられる。ただし、それらの物理的な変化は面的というより局所的であると想像されることから、孔隙自体は変化せず吸水性が改善したという可能性も考えられる。OKU、KRKでアルコール噴霧をした試料数は強度間伐区より対照区で多く、特にOKUの対照区は5試料全てで噴霧したことから、強度間伐区より対照区で撥水性が発現しやすい傾向がみられた。対照区の試料の一部では、アルコール処理をしても撥水性を除去しきれず吸水できなかった孔隙が存在していた可能性が考えられる。なお、TNGの大孔隙率はOKU、KRK、FMYと同様に対照区より強度間伐区で小さいが、これは主に搬出作業による地表攪乱の影響と考えられている(篠宮ら 2011)。大孔隙率の減少、中孔隙率・最大容水量の増加から、表層土壌はより湿潤な水分環境を示しやすくなったと推察される。実際に採取時含水率は対照区より強度間伐区で4~8%ほど有意に高かった(Table 3, Table 4)。この傾向は四国地方の他のヒノキ人工林における強度間伐区・対照区の表層土壌でも観察されている(Fig. 2)。こうした変化に着目し、気候変動で寡雨になった場合の森林の適応策の1つとして間伐が注目されている。寡雨で土壤水分が低下した場合、土壤水分を上昇させ乾燥害を防ぐのに間伐を利用することが検討されている(Wallentin and Nilsson 2011)。また、一般に高含水率のほうが透水係数は大きいので、地表に達した雨水が土層へ浸透しやすくなると推察される。このことは地表流の発生を抑制し、土層マトリクスへ雨水を導き、それがゆっくり流出することで水源涵養機能に資する可能性がある



* 篠宮ら (2011)

** KUMのみ(本数)間伐率は33%、他は48~64%

Fig. 2. 四国地方の5ヒノキ人工林における強度間伐区・対照区の表層土壌の物理性の比較
Comparisons of physical properties of surface soils between intensive thinning and control plots in five Hinoki cypress plantations in Shikoku district

る。間伐に伴い立木本数が減少すると林分あたりの蒸発散量が減少する結果、流出水量が増えると予想されているが(太田・服部 2002, 小松 2010)、ヒノキ人工林ではこうした変化(表層土壌の吸水性の改善)も関与している可能性を指摘できた。

以上より、ヒノキ人工林における強度間伐は、皆伐時に変化がみられた容積重、粗孔隙、細孔隙といった土壌の物理性に関して影響を及ぼすことなく、水源涵養や残存木の成長に対して有効な水分を増やす可能性が示唆された。今後、伐出作業を伴う強度間伐の事例など、さまざまな強度間伐施業についてそれらがヒノキ人工林の土壌に及ぼす影響の実態を明らかにしていくことが必要である。

謝辞

本研究の実施にあたり、四国森林技術センター及び四万十森林管理署および土佐清水市森林組合の皆様にご多大なご協力をいただいた。森林総合研究所大貫靖浩氏、小林政広氏には原稿に有益なご助言とご教示をいただいた。以上の方々に深く感謝の意を表します。本研究は森林総合研究所運営費交付金プロジェクト「管理水準低下人工林の機能向上のための強度間伐施業技術の開発」によって実施された。

引用文献

- 相浦英春・大宮 徹 (2010) スギ林の強度間伐が林内の光環境と下層植生に与える影響. 富山県農林水産総合技術センター森林研究所研究報告, **2**, 1-9.
- 荒木 誠・有光一登 (1984) 皆伐施業による表層土壌の物理性の変化 (I) - ヒノキ林皆伐跡地における湿式団粒分析の一例 -. 日林論, **95**, 195-198.
- 荒木 誠・加藤正樹・宮川 清・小林繁男・有光一登 (2002) ヒノキ林における皆伐と間伐が表層土壌水分状態に及ぼす影響. 森林立地, **44(2)**, 1-8.
- 荒木 誠・加藤正樹・小林繁男・有光一登 (2005) ヒノキ林の間伐による枝条放置が土壌の水分動態に与える影響. 森林立地, **47(1)**, 47-55.
- 有光一登 (1987) 森林土壌の保水のしくみ. 創文, 199pp.
- 有光一登・荒木 誠・宮川 清・小林繁男・加藤正樹 (1995) 宝川理水試験地における土壌孔隙量をもとにした保水容量の推定 - 初沢小試験流域 1 号沢および 2 号沢の比較 -. 森林立地, **37(2)**, 49-58.
- 土じょう部 (1976) 林野土壌の分類 1975. 林業試験場研究報告, **280**, 1-28.
- 深田英久 (2006) 人工林の低コスト育林施業の体系化と環境機能への影響調査. 高知県立森林技術センター研究報告, **31**, 24-91.
- 古池末之 (1986) 保育作業が立地要因の変動に及ぼす影響 (I) - ヒノキ人工林の枝打ち、間伐による土壌、植生の変化と表層土壌の流去および地表流去水の動態 -. 兵庫県立林業試験場研究報告, **30**, 41-52.
- 諫本信義 (1992) 森林の水源涵養機能に関する研究 (第 1 報) - スギ林における間伐 6 年後の土壌理化学的变化. 日林九支論集, **45**, 157-158.
- 諫本信義 (2002) 土壌孔隙組成を用いた森林の保水容量の推定とその要因解析. 森林立地, **44 (2)**, 31-36.
- 河田 弘・小島俊郎 (1979) 環境測定法 IV - 森林土壌 -. 共立出版, 190pp.
- 気象庁 (2002) メッシュ気候値 2000CD-ROM. 気象業務支援センター, 東京.
- 小林繁男 (1982) 森林の皆伐に伴う土壌の変化. ペドロジスト, **26(2)**, 150-163.
- 小松 光 (2010) 森林と水資源. 水利科学, **314**, 1-29.
- Miyamoto, K., Okuda, S., Inagaki, Y., Noguchi, M. and Itou, T. (in press) Within- and between-site variations in leaf longevity in hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*) plantations in southwestern Japan. J. For. Res., DOI 10.1007/s10310-012-0346-1.
- Morisada, K., Ono, K. and Kanomata, H. (2004) Organic carbon stock in forest soils in Japan. Geoderma, **119**, 21-32.
- Noguchi, M., Okuda, S., Miyamoto, K., Itou, T. and Inagaki, Y. (2011) Composition, size structure and local variation of naturally regenerated broad-leaved tree species in hinoki cypress plantations: a case study in Shikoku, southwestern Japan. Forestry, **84**, 493-504.
- 小柏一久・近藤次雄・真下育久 (1991) 数量化 I 類の手法を用いた森林土壌の粗孔隙量の要因解析 (II) スギ林における表層土壌の粗孔隙量と林分密度. 日林誌, **73**, 396-400.
- 太田猛彦・服部重昭 (監修) (2002) 地球環境時代の水と森 どうまもり・はぐくめばいいのか. 日本林業調査会, 222pp.
- 小野 裕 (2005) ヒノキ林皆伐後の土壌の物理性変化. 日林誌, **87**, 36-44.
- 篠宮佳樹・稲垣善之・深田英久・豊田信行 (2011) 四国地方のヒノキ人工林における間伐が表層土壌の物理性に及ぼす影響. 森林応用研究, **20**, 19-25.
- 森林土壌研究会 (1982) 森林土壌の調べ方とその性質. 林野弘済会, 328pp.
- 森林立地調査法編集委員会 (1999) 森林立地調査法. 博友社, 284pp.
- 上田晋之助・堤 利夫・柴田信男 (1965) 吉野林業地帯における地力の維持と増進に関する研究 - 皆伐直後における表層土壌の流亡と、その理化学的性質の変化について -. 京都大学農学部演習林報告, **37**, 102-124.
- 渡辺直史・深田英久・塚本次郎 (2008) ヒノキ強度間伐林分の残存木樹幹表面における樹脂流出と間伐強度および立地要因との関係. 森林立地, **50**, 117-123.
- Wallentin, C. and Nilsson, U. (2011) Initial effect of thinning on stand gross stem-volume production in a 33-year-old Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand in southern Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research, **26**, 21-35.
- 吉田桂子・岩川雄幸・平井敬三 (1992) 間伐が表層土壌の物理性に及ぼす影響 - スギ林とヒノキ林の場合 -. 平成 3 年度森林総合研究所四国支所年報, 11-12.