

## ヒノキ林皆伐後の土壌の物理性変化

小野 裕<sup>\*1</sup>

小野 裕：ヒノキ林皆伐後の土壌の物理性変化 日誌 87：36~44, 2005 森林伐採後の団粒破壊と孔隙組成や透水性といった土壌物理性の変化との関連について検討する目的で、ヒノキ林伐採後1~3年経過した林地から土壌試料を採取し、水中ふるい分け法による団粒分析試験と土壌物理性の測定等を行った。その結果、伐採後にA層やA<sub>1</sub>層では土壌構造が変化し、また団粒破壊による小団粒化が進み、これらに伴って粗大な孔隙が減少し微細な孔隙が増加するといった孔隙組成の変化が起こり、透水性が低下したことが明らかになった。A-B層では土壌構造が変化したが、孔隙組成や透水性には変化が認められなかった。B層では土壌構造や孔隙組成、透水性には変化がなかったと考えられた。このように、鉍質土壌の最上層にあたるA層やA<sub>1</sub>層について、伐採後の孔隙組成や透水性の変化が、土壌構造の変化や団粒破壊と深く関連することを示すことができた。

キーワード：孔隙組成, 団粒, 透水性, 土壌構造, 伐採

Ono, H.: Changes in Physical Properties of Soil after Clearcutting of Japanese Cypress. J. Jpn. For. Soc. 87: 36~44, 2005 The relationship between the destruction of aggregate structure and changes in soil physical properties such as pore size distribution and permeability after clearcutting was examined. Soil samples were taken from a clearcut area of Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) 1~3 years after clearcutting. Soil physical properties were measured and water-stable aggregates were analyzed by the wet-sieving method. After clearcutting, the soil structure changed in A or A<sub>1</sub> horizons, and the aggregate diameter became smaller with the destruction of aggregate structure. This changed the soil pore composition, namely large pores decreased and fine pores increased, consequently reducing permeability. In A-B horizons, although the soil structures changed, the pore size distributions and permeability remained unchanged. In B horizons, no changes were found in soil structure, pore size distributions or permeability. In conclusion, in top soil such as A or A<sub>1</sub> horizons, the changes in soil pore composition and permeability after clearcutting were closely related to the changes in soil structure and destruction of aggregate structure.

**Key words:** aggregate structure, clearcutting, permeability, soil pore composition, soil structure

## I. はじめに

森林土壌は孔隙に富み、とくに団粒の発達した土壌では細~粗の様々な大きさの孔隙が存在し、そのため浸透能や透水性、保水性が高い。このような森林土壌の特性は植物の生育に適するだけでなく、森林の洪水防止機能や湯水緩和機能に大きく影響するとされる(塚本, 1998)。しかし、森林伐採などの人為的影響により土壌表層部の物理性が変化することが報告されている。小林(1982)は、ヒノキ林の皆伐に伴って表層土壌の粗孔隙量が減少して細孔隙量が増加し、透水性が低下したことを明らかにした。森林伐採による孔隙組成や透水性の変化は、伐採や搬出、地拵えなどに伴う土壌表層部の攪乱や、伐採後の腐植減少に伴う団粒の結合力低下、植被を失ったことによる雨滴衝撃力の増大などに起因する団粒の破壊によるものとされている(小林, 1982; 八木, 1997)。しかし、森林伐採後の団粒破壊と孔隙組成や透水性の変化との関連を検討した事例は少ない。山谷(1962)は、ヒバ林皆伐後2年目に1.0~2.4 mmの団粒が減少し透水性が悪化したことを明らかにしたが、孔隙組成の変化については言及していない。荒木・有光(1984, 1985)はヒノキ林皆伐後の林地等で表層土壌

の孔隙組成の測定や団粒分析試験を行い、皆伐跡地では対照林地に比べ粗孔隙量が少なく細孔隙量が多いことなどを明らかにした。しかし、団粒分析試験については、試料の前処理方法や、試料採取時の土壌の状態や性質などが結果に影響し、団粒の粒径分布では孔隙組成の違いを明瞭に説明できない部分が残し、分析手法の検討が必要だとしている。一方、小野(2001)は、ヒノキ林とヒノキ林伐採1~4年後の隣接した林地に調査区を設けて土壌試料を採取し、団粒分析試験と土壌物理性の測定を行った。その結果、伐採後3~4年経過した調査区で、伐採の影響による団粒破壊が起こった可能性があり、粗大な孔隙の量が少なく飽和透水係数が低いことを明らかにした。しかしこの結果は、伐採後経過年数の異なる隣接した調査区を比較したもので、さらに詳しい検討を行うためには同一調査区における追跡調査により伐採後の経時変化を明らかにする必要がある。そこで本研究では、上述の調査区のうち伐採1年後の調査区を対象として、団粒の発達程度や孔隙組成、透水性の経時変化を明らかにし、森林伐採後の団粒破壊と孔隙組成や透水性の変化との関連について検討する。

\* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: hironoo@gipmc.shinshu-u.ac.jp

<sup>1</sup> 信州大学農学部 (399-4598 長野県上伊那郡南箕輪村 8304)

Faculty of Agriculture, Shinshu University, 8304 Minamiminowa, Nagano 399-4598, Japan.  
(2003年12月25日受付; 2004年11月30日受理)

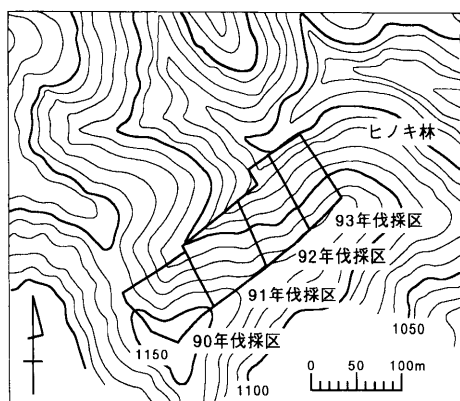


図-1. 調査対象地

## II. 方法

### 1. 調査対象地

調査対象地は信州大学農学部附属手良沢山演習林野田ヶ沢流域内の北西向き斜面である(図-1)。この斜面には60年生程度のヒノキ人工林が成立していたが、その一部が1990年から1993年にかけて約0.3haずつ皆伐され、それぞれ伐採翌年にヒノキが植栽された。上述したように、小野(2001)はこれらの伐採区域と隣接するヒノキ林において1994年に団粒の発達程度と土壌物理性との関連を明らかにするための調査を行った。今回はこのうち1993年に伐採を行った区域を調査地とした。本調査地は領家帯に属する高遠花崗岩類の分布地帯で、標高は約1,080m、傾斜は約36°である。皆伐前のヒノキ林は平均樹高18.7m、平均胸高直径18.9cm、立木密度1,342本/haの一斉林で、林床にはスズタケや草本類がわずかにみられた。皆伐は1993年11月に行われ、伐木は架線による全幹集材で搬出され、末木枝条は巻落しによって処理された。伐採翌年の1994年4月にヒノキが植栽され、植栽時の立木密度は2,432本/haで研究期間内には枯損木などはなかった。ヒノキ植栽後に落葉広葉樹や草本類の侵入がみられたが、毎年1回夏期に下刈りが行われたため、落葉広葉樹は定着していない。

### 2. 土壌断面調査と試料採取ならびに実験方法

調査地において、皆伐翌年の1994年8月と、1995年8月、11月、1996年8月、10月に土壌断面調査と土壌試料の採取を行った。土壌断面調査は農林省林業試験場(1955)にしたがって行った。それぞれの調査断面において、深さ70cmまでの範囲で各層から土壌試料を採取し、全炭素量・全窒素量の測定、孔隙解析、飽和透水係数の測定を行った。さらに、B層もしくはB<sub>1</sub>層以浅の各層から団粒分析試験用の試料を採取した。なお、1994年8月では、A層より下の土層を現地でB<sub>1</sub>層、B<sub>2</sub>層と判断したが、全炭素量の測定結果などからこれらをA-B層とB層に変更した。そのため、現地でB<sub>2</sub>層と判断されたB層からは団粒分析試験用の試料は採取しなかった。

全炭素量・全窒素量の測定にはCNコーダー(柳本

MT-500)を用いた。2mmふるいを通過させた風乾試料から植物根を取り除き、粉碎して740 $\mu$ mふるいを通過させ測定に供した。孔隙解析は100mL採土円筒で採取した不攪乱試料を用い、加圧板法(中野ら、1995)により行った。圧力の設定値は3.1, 6.2, 12.3, 24.6, 49.1, 98.0, 155.3kPaとし、試料からの排水が終了した時点で試料質量を測定した。すべての圧力値で測定が終了した試料は、飽和透水係数の測定を行ってから絶乾試料質量を測定し、各圧力値に対応する容積含水率を求めた。孔隙解析・飽和透水係数ともに各層で3試料の測定を行った。団粒分析試験は100mL採土円筒で採取した不攪乱試料を用い、土質工学会(1991)による団粒分析試験の方法(水中ふるい分け法)を一部改変した小野(2001)の方法により行った。試料は飽和砂柱上での毛管湿潤などによりゆっくりと飽和させ、9.5mmふるいを通過させた。9.5mmふるい通過分を2, 1, 0.5, 0.25, 0.1mmの組ふるいにより水中でふるい分け(分散前ふるい分け)、耐水性団粒の粒径分布を求めた。さらに、組ふるいに残留した試料を1次粒子に分散させて再び水中でふるい分け(分散後ふるい分け)、1次粒子の粒径分布を求めた。A層とA<sub>1</sub>層では各層で5試料を測定し、それ以外の層では各層で3試料を測定した。

団粒分析試験の結果を表示する方法はいくつか提案されているが、ここではまず団粒指数(van Bavel, 1953)によって団粒の発達程度を検討することとした。団粒指数は耐水性団粒と1次粒子それぞれの平均質量直径(van Bavel, 1949)の差と定義される。平均質量直径とは、団粒分析試験により得られる耐水性団粒や1次粒子の粒径分布をもとにした質量で重み付けされた平均粒径である。団粒指数によって団粒発達の状況を単一の物理量として表現することができ、団粒指数が高ければ団粒が発達していることになる。また、1次粒子の粒径組成が異なる試料間の比較も可能である。団粒指数の定義や求め方は小野(2001)が詳細に述べている。一方、山谷(1962)が指摘したように、伐採に伴う団粒破壊により粒径の大きな団粒が減少すると考えられたので、2mmふるい残留分について団粒百分率を求めて検討することとした。団粒百分率とは、水中ふるい分けにおいて分散前と分散後に各ふるいに残留した試料質量の差をふるいごとに求め、これらを粒径別の団粒の質量とみなして全試料質量に対する百分率で表したものである(土質工学会, 1991)。すなわち、2mmふるい残留分に対する団粒百分率とは、2mm以上の耐水性団粒の質量から2mm以上の1次粒子の質量を差し引き、これが試料全体に対して占める割合を質量百分率で表したものである。

A・A<sub>1</sub>層、A-B層、B層の孔隙解析、飽和透水係数測定、団粒分析試験の結果についてはDunnnett法による多重比較検定(永田・吉田, 1997)を行った。Dunnnett法は一つの基準群(対照群)と他の群との対比較を行うものである。基準群は、A・A<sub>1</sub>層とA-B層では1994年8月のデータとし、B層では1995年8月のデータとした。団粒

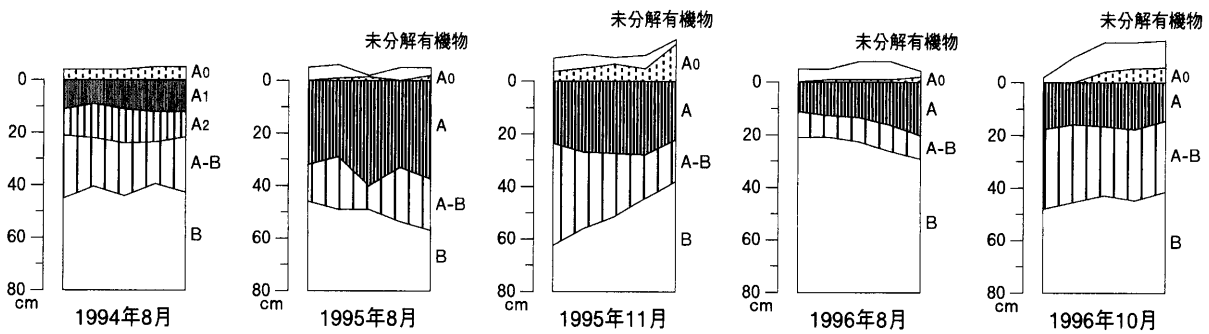


図-2. 土壌断面

ここでは、A<sub>0</sub>層のうち、伐採前に形成されたヒノキ落葉由来のF層、H層をA<sub>0</sub>層とし、伐採時や下刈り時に堆積したヒノキ枝葉や樹皮、草本起源有機物を未分解有機物として区分した。

指数、団粒百分率、 $-6.2$  kPa 以上相当の孔隙率、全孔隙率、飽和透水係数については基準群に対し有意に低い値であるかを検定し、 $-6.2$  kPa 未満相当の孔隙率については有意に高い値であるかを検定した。飽和透水係数は、分散を均質化するために対数変換を行った。

なお、以下の本文中や図表においては引用を示さないが、1994年8月のデータの一部（全炭素量、全窒素量、孔隙組成、飽和透水係数、団粒指数）は既報（小野、2001）のデータを用い、検討を行った。

### III. 結果と考察

#### 1. 土壌断面

各調査断面の模式図を図-2に示す。伐採翌年の1994年8月にはA<sub>0</sub>、A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A-B、Bという層位構成だったが、1995年8月以降はA<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>の亜層の分化が認められず、A、A-B、Bという層位構成となった。宮川ら（1987）はヒノキの皆伐-新植地においてA<sub>1</sub>層、A<sub>2</sub>層といった亜層の分化が不明瞭になったことを報告しているが、本調査地でもこれと同様の傾向を示しており、伐採の影響によりA層の層位構成が単純化したと考えられる。また1995年8月以降は、表層に未分解有機物が粗に堆積していた。未分解有機物は伐採・搬出作業の際に地表面に落とされたヒノキの枝葉・樹皮や、下刈り作業に伴う草本起源のものであった。この層には単粒状の鉍質土壌の混入が認められたことから、地拵えや下刈り作業などの際に鉍質土壌が部分的に攪乱されて未分解有機物に混入し、このような層が形成されたと考えられる。また、攪乱を受けた部分から雨滴衝撃により鉍質土壌が飛散し、未分解有機物に混入した可能性も考えられる。各調査断面とも、これらの層の下にはヒノキの落葉由来する主としてF層とH層からなるA<sub>0</sub>層が認められた。これらのA<sub>0</sub>層には鉍質土壌の混入が認められず、ヒノキ林伐採前に形成されたものと考えられる。このA<sub>0</sub>層は1995年8月と1996年8月ではごく薄く、また1996年10月では一部を欠いているものの、すべての調査断面で認められたことから、各調査断面とも、地拵えや下刈り作業によるA層やA<sub>1</sub>層の攪乱は比較的軽度であったと考えられる。

#### 2. 土壌構造

各調査断面における土壌構造を表-1にまとめた。ここで、各層において層全体に発達する構造（主構造）と根の周辺など部分的に発達する構造（副構造）とを分けて示した。まずA層についてみると、1994年8月ではA<sub>1</sub>層とA<sub>2</sub>層にそれぞれ中度和弱度の団粒状構造が発達し、A<sub>1</sub>層の一部に中度の粒状構造が発達していた。1995年8月では弱度の団粒状構造がみられ、一部に弱度の粒状構造がみられた。両者において、土壌構造の種類には差異がないが、1995年8月の方が構造の発達程度が低かった。1995年11月と1996年10月では層全体に発達する構造はなく、一部に弱度の堅果状構造がみられた。1996年8月には2~4 mm程度の構造が発達しており、稜角が先鋭で界面が明瞭であるという形態の特徴から中度の堅果状構造と判断した。A-B層では、1994年8月には中度の塊状構造が発達していたが、1995年8月と1995年11月ではとくに発達する構造がなかった。1996年8月では、A層と同様の構造が発達しており中度の堅果状構造と判断した。また、一部に弱度の塊状構造がみられた。1996年10月では弱度の堅果状構造がみられた。B層については、とくに構造が発達していないか、弱度の塊状構造が発達するのみであった。宮川ら（1987, 1988）、宮川・荒木（1990）は、皆伐後にA層やB層では団粒状構造や塊状構造がみられなくなり、粒状構造や堅果状構造が出現することを明らかにしているが、本調査地でも伐採後の時間経過に伴って、A層では団粒状構造が消失して堅果状構造が出現し、A-B層でも堅果状構造が出現した。このような土壌構造の変化について宮川ら（1988）は、皆伐跡地の表層土壌は土壌構造の構成が変わるほどに乾燥に傾くと述べている。また、荒木ら（2002）は、皆伐跡地の地表面下10 cmと30 cmでは間伐林や対照林に比べ土壌が最も乾燥する傾向を示すこと明らかにしている。本調査地においてもA層やA-B層では伐採後に土壌の乾燥が進み、堅果状構造が出現したと考えられる。一方、B層では堅果状構造などの乾性な構造の出現が認められないことから、伐採後の土壌乾燥の影響は及ばなかったと考えられる。

表-1. 各調査断面における土壌構造と全炭素量・全窒素量

調査断面	層位名	主構造	副次構造	試料採取深さ (cm)	全炭素量 (%)	全窒素量 (%)	C/N 比
1994年8月	A <sub>1</sub> 層	中度の団粒状	中度の粒状	0.0~5.1	5.97	0.450	13.3
	A <sub>2</sub> 層	弱度の団粒状		11.6~16.7	3.66	0.293	12.5
	A-B層	中度の塊状		22.4~27.5	3.04	0.247	12.3
	B層	弱度の塊状		50.0~55.1	1.70	0.141	12.1
1995年8月	A層	弱度の団粒状	弱度の粒状	0.0~5.1	6.48	0.455	14.2
	A-B層	特になし		34.3~39.4	3.59	0.289	12.4
	B層	特になし		50.0~55.1	2.65	0.228	11.7
1995年11月	A層	特になし	弱度の堅果状	0.0~5.1	4.84	0.366	13.3
	A-B層	特になし		25.6~30.7	2.82	0.222	12.7
	B層	特になし		56.0~61.1	1.86	0.153	12.2
1996年8月	A層	中度の堅果状		0.0~5.1	7.47	0.543	13.8
	A-B層	中度の堅果状	弱度の塊状	14.7~19.8	4.60	0.363	12.7
	B層	弱度の塊状		24.0~29.1	2.93	0.233	12.6
1996年10月	A層	特になし	弱度の堅果状	0.0~5.1	5.43	0.419	13.0
	A-B層	弱度の堅果状		16.4~21.5	3.60	0.274	13.1
	B層	特になし		50.0~55.1	1.75	0.145	12.0

### 3. 全炭素量・全窒素量

各調査断面における全炭素量・全窒素量を表-1に示す。全炭素量・全窒素量は、A・A<sub>1</sub>層、A-B層、B層のいずれにおいても一定の変化傾向が認められなかった。また、C/N比はほぼ一定の値を示し、変化はなかった。伐採に伴う全炭素量・全窒素量やC/N比の変化について、本調査地のように伐採後の表層土壌における経時変化を追跡した事例(山谷, 1965)では、伐採1~5年後の間にB<sub>D</sub>型土壌では全炭素量が漸減し、B<sub>B</sub>型、P<sub>DH</sub>型土壌では全炭素量・全窒素量が一時的に増加した後に減少したことが報告されている。また、伐採の前後を比較した事例では伐採後に全炭素量・全窒素量やC/N比が減少したという報告例が多いが(山谷, 1965; 小林, 1982, 1991)、一方で有機物が混入して増加したとの報告もある(小林, 1991)。本調査地では調査期間が伐採後1~3年間であり、伐採前後の変化や、山谷(1965)の報告のような長期的な変化がとらえられていない。また、伐採・搬出や下刈り作業に伴って、枝葉・樹皮や草本起源の有機物が土壌に供給されていた。これらの理由により、本調査地においては全炭素量・全窒素量やC/N比に減少傾向が認められなかったと考えられる。

### 4. 団粒指数と団粒百分率

各調査断面における団粒指数と団粒百分率それぞれの平均値を図-3に示す。また図中にはDunnett法による多重比較検定の結果も示した。

A・A<sub>1</sub>層では、団粒指数は全体にばらつきが大きい、平均値は全体として伐採後の経過時間が長くなるにしたがい漸減する傾向が認められ、1996年10月で最も低くなり危険率10%で有意差があった。団粒百分率の平均値は伐採後の経過時間が長くなるにしたがい漸減し、1996年10月では危険率10%で有意差があった。主構造との関係をみると、団粒指数や団粒百分率の平均値が5時点中で最も高い1994年8月では中度の団粒状構造が発達していたのに対し、1995年8月では弱度の団粒状構造となって構造

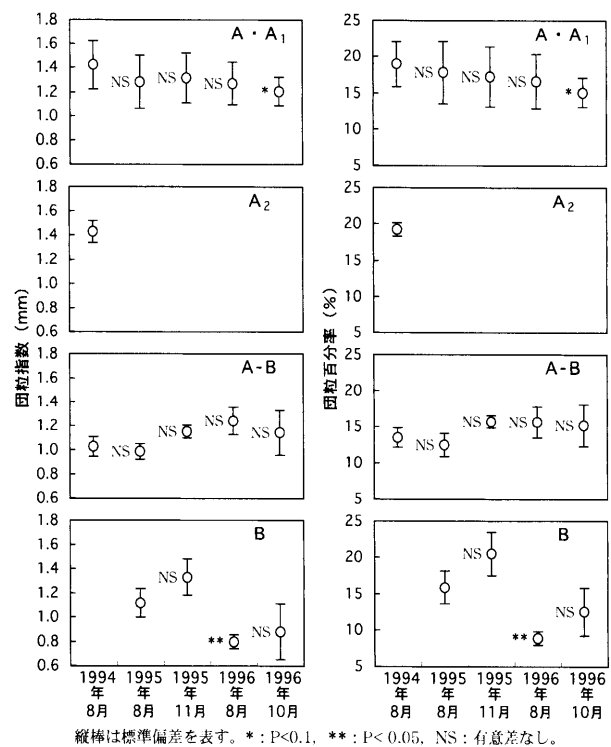


図-3. 各調査断面の団粒指数と団粒百分率

の発達程度が低下し、1995年11月以降は構造が発達していないか中度の堅果状構造が発達するのみで、団粒状構造の発達はみられなかった。このように、団粒指数と団粒百分率は伐採に伴う団粒状構造の発達程度の低下と消失に伴って漸減した。また、1996年8月には層全体に中度の堅果状構造が発達していたが、これは堅果状構造としては小型で、分散前ふるい分けでも大きな団粒が少ないことが認められ、団粒指数や団粒百分率には反映されなかったと考えられる。団粒百分率の低下は2mm以上の団粒の減少、すなわち小団粒化を意味する。この小団粒化に伴う団粒の粒径組成の変化により、団粒の発達程度を表す団粒指数も低下したと考えられる。以上のことから、A・A<sub>1</sub>層

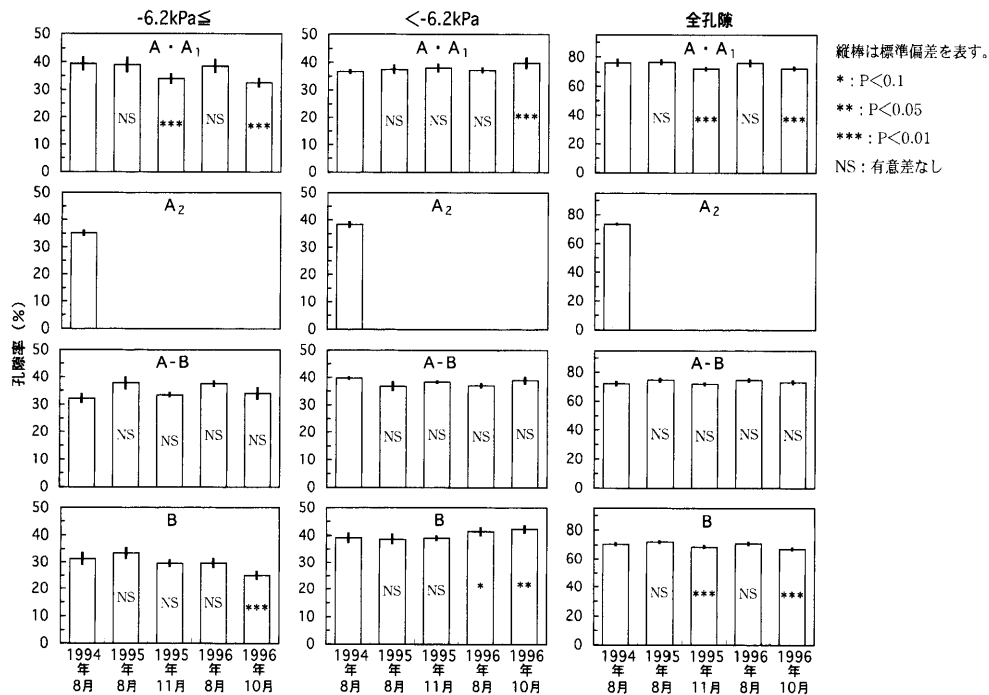


図-4. 各調査断面の孔隙組成

-6.2 kPa の水分張力を相当する孔隙を境に粗大な孔隙と微細な孔隙とに区分した。

では伐採後の団粒破壊により小団粒化が進んだと考えられる。さらに、団粒状構造の発達程度の低下と消失も伐採後の団粒破壊に起因するものと考えられる。また、伐採後の腐植減少が団粒破壊に影響するとされているが（八木, 1997), A・A<sub>1</sub>層では全炭素量・全窒素量ともに減少傾向はなく、団粒破壊との関連は認められなかった。

A<sub>2</sub>層は1994年8月のみで現れているが、団粒指数・団粒百分率の平均値はA<sub>1</sub>層と同程度の値となった。

A-B層では団粒指数・団粒百分率の平均値が各調査断面ともA・A<sub>1</sub>層やA<sub>2</sub>層と比べると概ね低かった。また、団粒指数・団粒百分率ともに有意差はなく、変化は認められなかった。A-B層では5時点すべてで団粒状構造がみられず、このためA・A<sub>1</sub>層やA<sub>2</sub>層よりも団粒指数や団粒百分率が低い値になったと考えられる。また、1996年8月には層全体に中度の堅果状構造が認められたが、この構造はA層と同様の小型のもので、団粒指数や団粒百分率には反映されなかったと考えられる。

B層では、団粒指数・団粒百分率の平均値はともに1996年8月に最も低い値となり危険率5%で有意差があった。しかし団粒指数・団粒百分率ともに一定の変化傾向は認められなかった。土壌構造との関係を見ると、1996年8月では層全体に弱度の塊状構造が発達していたが、構造の発達が認められなかった1995年8月に対し団粒指数や団粒百分率が有意に低い値となった。さらに、1995年11月でも構造の発達が認められなかったが、団粒指数・団粒百分率が4時点中で最も高い値を示した。1995年11月でこのように高い値となったのは、分散前ふるい分けにおいて、9.5 mmふるいを通過させた土塊があまり分散せずに

2 mmふるいに残留したためである。この理由は不明であるが、真下（1960）はA-B層のカベ状構造の土壌を試料採取時に数cmの土塊に砕いてから水中ふるい分けを行ったところ、団粒がほとんどみられなかったにもかかわらず、試料の96.4%が5 mmのふるいに残留したと述べており、今回の結果との類似性を指摘できる。しかし一方で、A・A<sub>1</sub>層では団粒状構造の発達程度の低下や消失を団粒指数・団粒百分率の漸減としてとらえることができた。以上のことから、団粒指数や団粒百分率はA層などの表層土においては団粒状構造の発達程度をよく反映するが、B層などの下層土では構造発達の指標として有効でない場合があることを考慮する必要があると考えられる。

### 5. 孔隙組成

各調査断面における-6.2 kPa以上相当の孔隙率、-6.2 kPa未満相当の孔隙率、全孔隙率それぞれの調査断面ごとの平均値を図-4に示す。また以下に述べる各孔隙率の値はすべて調査断面ごとの平均値である。

A・A<sub>1</sub>層では、-6.2 kPa以上相当の孔隙率は1995年11月と1996年10月で低い値となり、危険率1%で有意差があった。一方、-6.2 kPa未満相当の孔隙率は1996年10月で最も高い値となり、危険率1%で有意差があった。森林土壌の孔隙組成には土壌構造の種類や発達程度が影響することが認められており（有光, 1987), 団粒状構造や粒状構造が発達する土壌では-4.9 kPa以上相当の非毛管孔隙量が多く、堅果状構造が発達する土壌では非毛管孔隙量が少ないことが明らかにされている（真下, 1960）。上述したように、1994年8月では団粒状構造や粒状構造が発達し、1995年11月や1996年10月では団粒状構造がみ

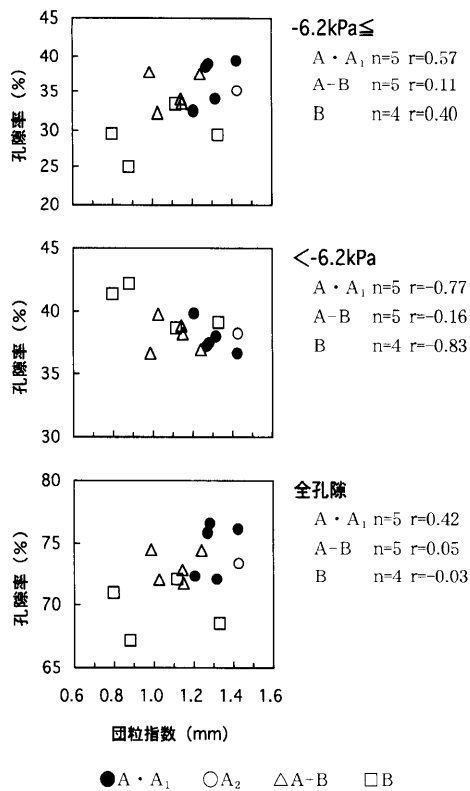


図-5. 団粒指数と孔隙率との関係

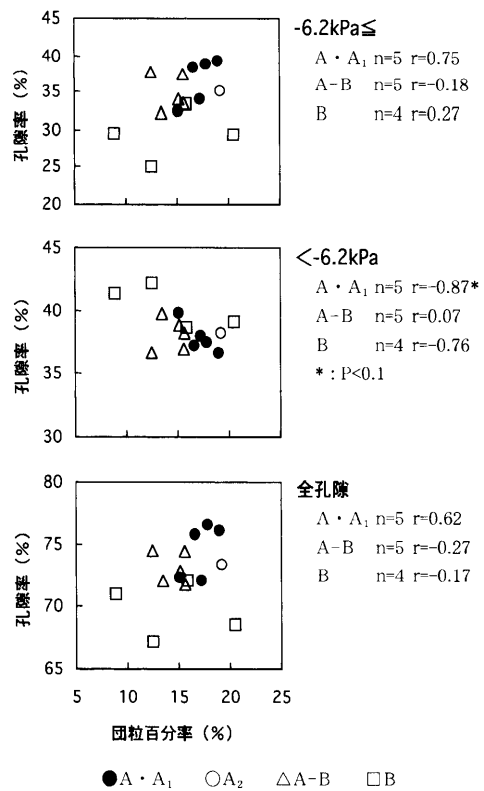


図-6. 団粒百分率と孔隙率との関係

られなくなり堅果状構造が発達していたが、このような伐採に伴う土壌構造の変化は孔隙組成にも反映されている。一方、1996年8月では堅果状構造が発達していたが各孔隙率において有意差はなく、土壌構造との対応からみると、とくに-6.2 kPa以上相当の孔隙率が過大であると考えられる。しかし1996年8月を除くと、全体として-6.2 kPa以上相当の孔隙率には低下傾向が、-6.2 kPa未満相当の孔隙率には増大傾向が認められ、伐採後に粗大な孔隙が減少する一方で微細な孔隙が増加したという報告例(小林, 1982; 荒木・有光, 1984, 1985)と一致する。とくに伐採後の経過時間が最も長い1996年10月ではこの傾向が明瞭に現れており、伐採により孔隙組成が変化したと考えられる。また、A · A<sub>1</sub>層では団粒指数・団粒百分率とともに漸減傾向を示したが、これらと各孔隙率との関係を見ると(図-5, 6)、団粒指数と各孔隙率との間には有意な相関はないが、団粒百分率と-6.2 kPa未満相当の孔隙率との間に有意な負の相関が認められた。団粒が発達した土壌では団粒間に粗大な団粒間孔隙が形成されるが(Hillel, 1998)、団粒径が小さくなれば団粒間孔隙は小さくなって粗大な孔隙の量が減少し、逆に微細な孔隙の量が増加すると思われる。したがって、伐採後に小団粒化が進んだことにより-6.2 kPa未満相当の孔隙率が増大したと考えられる。さらに団粒百分率と-6.2 kPa以上相当の孔隙率については、1996年8月のデータ(団粒百分率16.6%, 孔隙率38.6%)を除くと団粒百分率が低下すると-6.2 kPa以上相当の孔隙率も低下し、小団粒化の進行と-6.2 kPa以上相当の孔隙率の低下とに対応が認められる。また、こ

の団粒百分率と-6.2 kPa以上相当の孔隙率との関係からも、1996年8月の孔隙率が過大であると考えられる。以上のことから、-6.2 kPa未満相当の孔隙率は伐採後の土壌構造の変化と小団粒化に伴い増大したと考えられる。また、-6.2 kPa以上相当の孔隙率は1996年8月を除くと全体としては低下傾向が認められ、これも伐採後の土壌構造の変化と小団粒化の影響によるものと考えられる。全孔隙率は1995年11月と1996年10月で低い値となり有意差があった。この2時点においては-6.2 kPa以上相当の孔隙率が有意に低く、-6.2 kPa以上相当の孔隙率の低下により全孔隙率も低下したと考えられる。

1994年8月のA<sub>2</sub>層では、-6.2 kPa以上相当の孔隙率と全孔隙率はA層よりも低く、-6.2 kPa未満相当の孔隙率はA層よりも高い値を示した。これらはA層と次に述べるA-B層とのほぼ中位の値となっている。

A-B層では、各孔隙率とも有意差がなかった。A-B層では、伐採の影響により1996年8月以降に堅果状構造が出現したが、孔隙組成には変化が認められなかった。

B層では、-6.2 kPa以上相当の孔隙率は1996年10月で最も低く、危険率1%で有意差があった。-6.2 kPa未満相当の孔隙率は1996年8月と1996年10月が高く、それぞれ危険率10%と5%で有意差があった。また、全孔隙量は1995年11月と1996年10月で高い値となり、危険率1%で有意差があった。このようにB層では、伐採後の経過時間が長いほど各孔隙率で有意差が認められるようになった。A層では土壌構造の変化と小団粒化によって孔隙組成の変化が起こったと考えられたが、B層では伐採に

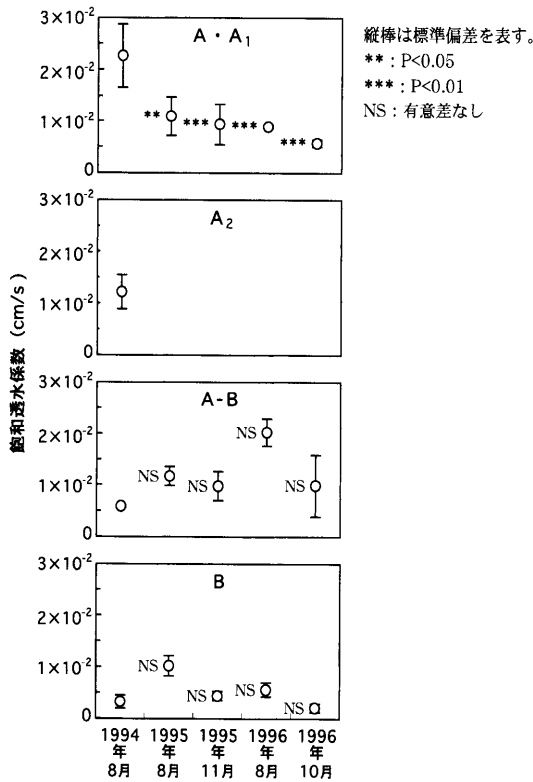


図-7. 各調査断面の飽和透水係数

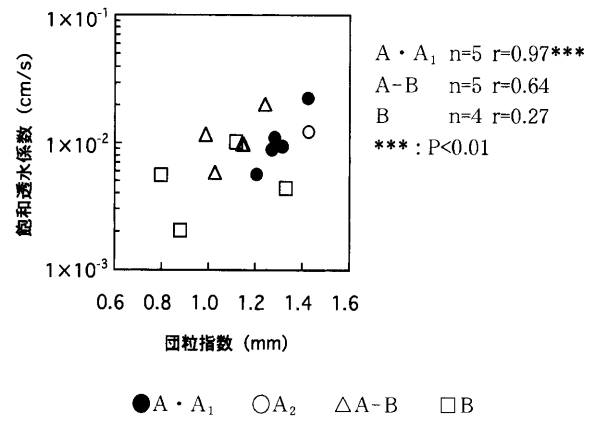


図-8. 団粒指数と飽和透水係数との関係

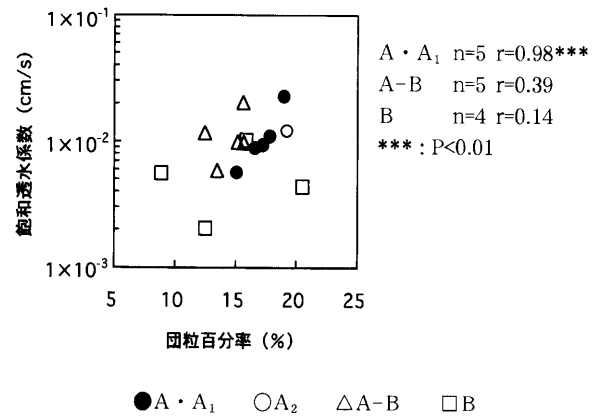


図-9. 団粒百分率と飽和透水係数との関係

よる土壤構造の変化が認められず、団粒指数や団粒百分率にも一定の低下傾向が認められなかった。また A-B 層において伐採の影響による孔隙組成の変化が認められなかったことも考慮すると、より下層に位置する B 層で伐採の影響による孔隙組成の変化が起きたとは考えにくい。したがって今回の結果からは、B 層では伐採による孔隙組成の変化は起こらなかったと判断した。

6. 飽和透水係数

各調査断面における飽和透水係数の平均値を図-7 に示す。

A・A<sub>1</sub> 層では、飽和透水係数の平均値は 1994 年 8 月で  $2.27 \times 10^{-2}$  cm/s と最も高く、1995 年 8 月以降は漸減してばらつきも小さくなり有意に低い値となった。1996 年 10 月には飽和透水係数は  $5.66 \times 10^{-3}$  cm/s と 1994 年 8 月に比べ 1 オーダー程度低い値となり、この値は後述の各調査断面の B 層と同程度であった。以上のように、飽和透水係数は伐採後の経過時間が長くなるにしたがい低下した。伐採に伴う A 層土壤の透水性の低下については山谷 (1962) や小林 (1982) も報告しており、本調査対象地においても伐採の影響により飽和透水係数が低下したと考えられる。森林土壤の透水性には土壤構造や孔隙組成が影響し、団粒状構造のように団粒が発達して粗孔隙が多い土壤では透水性が高く、堅果状構造やカベ状構造などのように粗孔隙が少なく細孔隙が多い土壤では透水性が低いことが認められている (真下, 1960)。また、伐採後に粒径の大きな団粒が減少して透水性が悪化したことも報告されている (山谷, 1962)。そこでまず、土壤構造や団粒指数・団

粒百分率との関係について検討する。上述したように、A・A<sub>1</sub> 層では伐採後の団粒破壊によって小団粒化が進み、団粒指数や団粒百分率が漸減したと考えられた。また、この団粒破壊は団粒状構造の発達程度の低下と消失をもたらし、A・A<sub>1</sub> 層の主構造は、1994 年 8 月では中度の団粒状構造であったが、1995 年 8 月には弱度の団粒状構造となり、1995 年 11 月以降は団粒状構造がみられなくなった。その一方で、伐採後の土壤乾燥の影響により、1996 年 8 月には主構造が中度の堅果状構造となり、1995 年 11 月と 1996 年 10 月にも一部で弱度の堅果状構造が認められた。飽和透水係数の低下はこのような土壤構造の変化とよく対応している。また、団粒指数・団粒百分率と飽和透水係数との関係をみると (図-8, 9) それぞれ有意な正の相関が認められ、小団粒化の進行と飽和透水係数の低下とがよく対応し、山谷 (1962) の報告とも一致することがわかる。次に、孔隙組成と飽和透水係数との関係について検討する。上述のように、1996 年 8 月を除くと -6.2 kPa 以上相当の孔隙率には低下傾向が、-6.2 kPa 未満相当の孔隙率には増大傾向が認められ、伐採後に粗大な孔隙が減少し、微細な孔隙が増加するという孔隙組成の変化が起こったと考えられた。各孔隙率と飽和透水係数との関係をみると (図-10)、-6.2 kPa 未満相当の孔隙率と飽和透水係数との間には有意な負の相関があり、一方、-6.2 kPa 以上相当の孔隙率と飽和透水係数については、相関係数は有意で

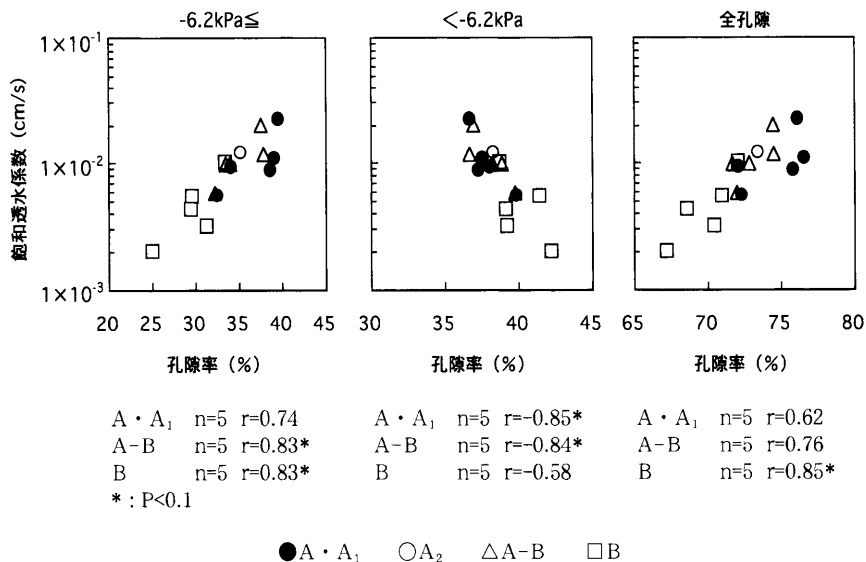


図-10. 孔隙率と飽和透水係数との関係

はないが、1996年8月（孔隙率38.6%，飽和透水係数 $8.87 \times 10^{-3}$  cm/s）を除くと-6.2 kPa以上相当の孔隙率が低下すると飽和透水係数も低下するという関係が認められる。このように、孔隙組成の変化と飽和透水係数の低下との間にも対応があることがわかる。以上述べたように、A · A<sub>1</sub>層における飽和透水係数の低下は、土壤構造の変化と団粒破壊に伴う小団粒化、孔隙組成の変化と対応していた。また上述したように、孔隙組成の変化は、伐採後の土壤構造の変化と、団粒破壊に伴う小団粒化によるものと考えられた。したがって、A · A<sub>1</sub>層では、伐採後の土壤構造の変化と、団粒破壊に伴う小団粒化により、-6.2 kPa以上相当の孔隙率の低下と-6.2 kPa未満相当の孔隙率の増大という孔隙組成の変化が起り、その結果として飽和透水係数が低下したと考えられる。

1994年8月のA<sub>2</sub>層では、飽和透水係数の平均値はA層と次に述べるA-B層とのほぼ中位の値となった。

A-B層においては、飽和透水係数の平均値は調査断面ごとにばらついたが、有意差はなく飽和透水係数は低下しなかったと考えられる。A-B層では土壤構造の種類が変化した、孔隙組成には変化がなく、そのため透水係数にも低下傾向が認められなかったと考えられる。

B層では、飽和透水係数の平均値はいずれの調査断面でもA · A<sub>1</sub>層より低く、概ね $10^{-3}$  cm/sのオーダーとなった。また、有意差はなく、B層では飽和透水係数は低下しなかったと考えられる。B層では土壤構造に伐採の影響による変化がなく、孔隙組成も変化しなかったと考えられ、そのため飽和透水係数も低下しなかったと推察される。

#### IV. ま と め

ヒノキ林伐採後の団粒破壊と孔隙組成や透水性の変化との関連について検討したところ、A層やA<sub>1</sub>層では伐採後の土壤乾燥の影響により堅果状構造が出現し、また団粒破壊による小団粒化が進み、団粒状構造は発達程度が低下し

て消失したことが明らかになった。このような伐採後の土壤構造の変化と、団粒破壊に伴う小団粒化により、粗大な孔隙の減少と微細な孔隙の増加という孔隙組成の変化が起り、その結果として透水性が低下したことが明らかになった。また、A-B層では伐採後に堅果状構造が出現したが、孔隙組成や透水性には変化が認められなかった。B層では、土壤構造や孔隙組成には伐採の影響による変化はなかったと考えられ、透水性にも変化が認められず、伐採の影響は及ばなかったと推察された。このように、本研究においては鉍質土壤の最上層にあたるA層やA<sub>1</sub>層について、伐採後の孔隙組成や透水性の変化が土壤構造の変化や団粒破壊と深く関連することを示すことができた。森林伐採後の土壤変化は伐採方法や立地条件などに大きく影響されるため、さらなるデータの蓄積が必要ではあるが、本研究により得られた結果は、伐採や間伐を含む適切な森林管理手法を検討するにあたって重要な知見となるものと考えられる。

本研究を進めるにあたって、信州大学農学部附属演習林の職員の方々、信州大学農学部林 博道助教授、元信州大学農学部相馬 潔助教授には様々なご便宜をはかっていただいた。本稿の取りまとめに際しては信州大学農学部北原曜教授に有益なご助言をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

#### 引用文献

- 荒木 誠・有光一登 (1984) 皆伐施業による表層土壤の物理性の変化 (I) ヒノキ林皆伐跡地における湿式団粒分析の一例. 95 回日林論: 195-198.
- 荒木 誠・有光一登 (1985) 皆伐施業による表層土壤の物理性の変化 (II) ヒノキ新植地における表層土壤の孔隙組成と耐水性団粒の組成について. 96 回日林論: 233-234.
- 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および間伐が表層土壤水分状態に及ぼす影響. 森林立地 44: 1-8.



- 有光一登 (1987) 土壤の構造と孔隙組成. (森林土壤の保水のしくみ. 有光一登編, 199pp, 創文, 東京). 101-108.
- 土質工学会 (1991) 土の試験実習書. 261pp, 土質工学会, 東京.
- Hillel, D. (1998) Environmental Soil Physics. (岩田進午・内田善兵衛監訳, 環境土壌物理学 I 土と水の物理学. 318pp, 農林統計協会, 東京).
- 小林繁男 (1982) 森林の皆伐に伴う土壤の変化. ペドロジスト 26: 150-163.
- 小林繁男 (1991) 森林の伐採に伴う土壤の変化. 森林計画誌 16: 159-170.
- 真下育久 (1960) 森林土壤の理学的性質とスギ・ヒノキの成長に関する研究. 林野土壤調査報告 11: 1-182.
- 宮川 清・荒木 誠 (1990) ヒノキ複層林施業の土壤保全効果 (VIII) 今市署管内ヒノキ複層林における上木伐採後の地床状態および表層土壤の変化. 101 回日林論: 61-64.
- 宮川 清・荒木 誠・小林繁男・加藤正樹・有光一登 (1987) ヒノキ複層林施業の土壤保全効果 (I) 今市署管内複層林, 上木伐採およびヒノキ皆伐-新植地における地床状態および表層土壤の比較. 98 回日林論: 215-218.
- 宮川 清・荒木 誠・加藤正樹・小林繁男・有光一登 (1988) ヒノキ複層林施業の土壤保全効果 (IV) 富士山麓ヒノキ複層林, 同一斉林, 同皆伐-新植地の地床状態および表層土壤の比較. 99 回日林論: 157-160.
- 永田 靖・吉田道弘 (1997) 統計的多重比較法の基礎. 187pp, サイエンティスト社, 東京.
- 中野政詩・宮崎 毅・塩沢 昌・西村 拓 (1995) 土壌物理環境測定法. 236pp, 東京大学出版会, 東京.
- 農林省林業試験場 (1955) 国有林林野土壤調査方法書. 47pp, 林野共済会, 東京.
- 小野 裕 (2001) 森林土壤における団粒の発達が土壌物理性に及ぼす影響. 日林誌 83: 116-124.
- 塚本良則 (1998) 森林・水・土の保全. 138pp, 朝倉書店, 東京.
- van Bavel C.H.M. (1949) Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 14: 20-23.
- van Bavel C.H.M. (1953) Report of the committee on physical analyses 1951-1953, Soil Science Society of America. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 17: 416-418.
- 八木久義 (1997) 森林伐採に伴う土壌生態系の劣化とその復元の方策. (土壌圏と地球環境問題. 木村真人編, 277pp, 名古屋大学出版会, 名古屋). 97-114.
- 山谷孝一 (1962) ヒバ林地帯における土壌と森林生育との関係. 林野土壤調査報告 12: 1-155.
- 山谷孝一 (1965) ヒバ林伐採跡地土壌の経年変化について (I) 落葉層の形態変化および土壌有機物の動態. 日林誌 47: 199-204.