

信州大学審査学位論文

森林伐採後の団粒破壊に伴う
土壌物理性変化に関する研究

2014年9月

小野 裕

森林伐採後の団粒破壊に伴う土壌物理性変化に関する研究

小野 裕

Changes in the physical properties of forest soil
due to aggregate destruction after forest cutting.

Hiroshi ONO

目 次

第1章 序論.....	1
1.1 緒言.....	1
1.2 既往研究の概要と課題.....	3
1.2.1 団粒研究の概要.....	3
1.2.2 森林土壌に関する団粒発達程度の定量的評価と土壌物理特性との関連.....	4
1.2.3 森林伐採による団粒破壊と土壌物理性の変化.....	6
1.2.4 伐採後の土壌水分環境変化に伴う団粒破壊.....	6
第2章 森林土壌における団粒の発達が土壌物理性に及ぼす影響.....	10
2.1 はじめに.....	10
2.2 方法.....	11
2.2.1 調査対象地.....	11
2.2.2 試料採取ならびに実験方法.....	13

2.2.3	団粒分析の結果の表示方法	14
2.3	結果	16
2.3.1	土壌の層位構成について	16
2.3.2	土壌構造について	16
2.3.3	全炭素・全窒素の測定結果	20
2.3.4	団粒分析試験の結果	22
2.3.5	孔隙解析の結果	25
2.3.6	飽和透水係数の測定結果	25
2.4	考察	29
2.4.1	構造と団粒指数との関係	29
2.4.2	全炭素量と団粒指数との関係	29
2.4.3	団粒指数と孔隙組成との関係	31
2.4.4	孔隙組成と飽和透水係数との関係	33
2.4.5	団粒指数と飽和透水係数との関係	34
2.5	まとめ	35
第3章	森林皆伐後の団粒破壊と土壌物理性変化	36
3.1	はじめに	36
3.2	方法	37
3.2.1	調査対象地	37
3.2.2	土壌断面調査と試料採取ならびに実験方法	39
3.3	結果と考察	41
3.3.1	土壌断面	41
3.3.2	土壌構造	42
3.3.3	全炭素量・全窒素量	45
3.3.4	団粒指数と団粒百分率	45

3.3.5 孔隙組成	49
3.3.6 飽和透水係数	55
3.4 まとめ.....	60
第4章 乾燥と湿潤が繰り返される水分条件下における森林土壌の団粒破壊	61
4.1 はじめに.....	61
4.2 方法.....	63
4.2.1 試料採取地の概要	63
4.2.2 団粒試料の採取と調整	64
4.2.3 培養実験	65
4.2.4 団粒試料の含水比測定	66
4.2.5 ふるい分け試験	66
4.2.6 ふるい分け試験の結果の整理と統計処理.....	66
4.2.7 全炭素・全窒素量の測定	68
4.3 結果.....	68
4.3.1 団粒試料の含水比	68
4.3.2 ふるい分け試験結果と培養中の団粒試料の変化.....	72
4.3.3 全炭素・全窒素量	77
4.4 考察.....	77
4.5 まとめ.....	81
第5章 総括.....	83
謝 辞.....	90
引用文献.....	91
Summary	96
写 真.....	99

第1章 序論

1.1 緒言

我が国の国土の約6割を占める森林は、その大部分が水源域である山地帯に存在している。古くから、森林には洪水を防ぎ、渇水を和らげるような働きがあることが経験的に言われており、明治時代以降にはこのような森林の働きが森林の水源涵養機能として認識されるようになった。その後、国内外における数多くの研究の成果によって、森林による樹冠遮断や蒸散などが森林の水源涵養機能のなかの洪水防止作用に大きく関わっていることが明らかになった。一方、森林の地上部に対して、森林土壌も洪水防止と渇水緩和の両方の作用に大きく関わっていることが明らかにされてきている。

森林土壌の洪水防止、渇水緩和作用は団粒と呼ばれる土壌構造が担っていると考えられている。団粒とは土壌粒子が結合してできる集合体であり、畑地や草地の表層土壌においても発達する。団粒の形成には土壌中のカルシウムイオンなどの陽イオンや有機酸、多糖類、鉄やアルミニウムの酸化物、微生物の菌糸や代謝生成物などが関与し、これらの物質によって砂や粘土などの一次粒子が結合され、団粒が形成される。団粒構造と単粒構造の模式図を Fig. 1.1 に示す。団粒が発達した団粒構造の土壌では、団粒間に比較的大きな孔

隙が形成され、孔隙量が多く、透水性や通気性が高い。一方、団粒内では小さな孔隙が発達し、水分や養分の保持を行う。そのため、団粒が発達した土壌は、透水性や通気性が高い一方で、水分や養分の保持力も高いという2つの相反する性質を併せ持ち、古くから植物の生育に適した肥沃度の高い土とされてきた。また、団粒間と団粒内では異なった種類の土壌微生物が生息するなど、多様な土壌微生物相の維持にも関わっている。

森林土壌は他の土壌と比べ団粒が発達して孔隙に富み、かつ細～粗の様々な大きさの孔隙が存在する。そのため森林土壌は浸透能や透水性、保水性が高いとされる。森林土壌がこのような水文的特徴を有しているため、森林地帯にもたらされた降水のほとんどは土壌内に浸透し、地表流の発生とこれに伴う土壌侵食が抑制されている。また、土壌内へ浸透

した水分の一部は、森林を構成する樹木等の生育に利用されるが、残りの部分はさらに深部へと移動し地下水を涵養する。このように、森林土壌は樹木等の成育基盤としての役割だけでなく、地表流や侵食の抑制、地下水涵養を通して、森林の水源涵養機能や災害防止機能に大きく寄与しており、とくに水源涵養機能に関しては、「森林の水源涵養機能の本質は森林土壌にある」ことが以前から指摘されてきた。

しかしその一方で、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。この物理性変化は、伐採・搬出作業時の土壌の攪乱や、伐採後の環境変化による団粒の破壊などが原因であることが指摘されている。このような森林伐採に伴う土壌特性の変化は、森林斜面での水循環過程に変化をもたらす可能性があり、森林の水源涵養機能の低下が危惧される。また、かつて我が国においては、建築用材や燃料の確保のために森林伐採が繰り返され、そのために土壌が荒廃し、豪雨時の洪水発生や土砂流出など、人々の生活を脅かすような事態が生じていた。したがって、土壌保全の観点から、森林伐採に伴う団粒の破壊とそれに起因する土壌物理性の変化について、そのメカニズムを含めて明らかにする必要があると考えられる。

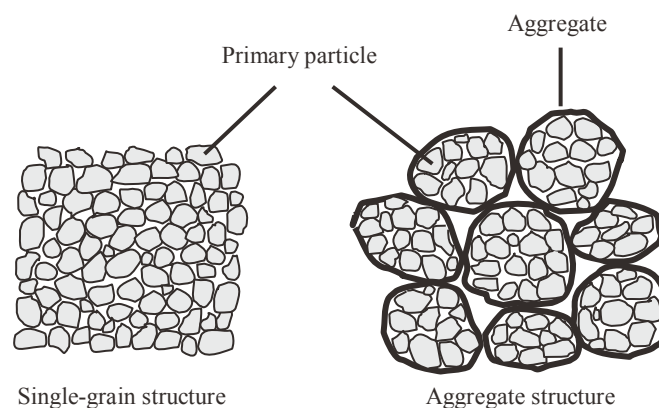


Fig. 1. 1. 単粒構造と団粒構造
Single-grain structure and aggregate structure.

本論文では、森林土壌の団粒に着目し、まず、団粒の発達程度を定量的に評価する方法について検討を行い、団粒の発達程度を定量的指標によって表したうえで、孔隙組成や透水性などの土壌物理性との関係を明らかにしていく。次に、森林伐採地において3年間の土壌の継続調査を行い、伐採後の団粒破壊について、前述の評価方法によって定量的にとらえる。そのうえで、伐採後の団粒破壊が、孔隙組成や透水性などの土壌物理性の変化にどのように影響しているのか、その実態を明らかにすることを試みる。さらに、団粒破壊の一因であるスレーキング現象に着目し、森林土壌の団粒試料を用いた室内実験によって、森林土壌のスレーキング特性について明らかにしていく。

そして、これらの検討結果に基づき、森林伐採に伴う団粒の破壊と、それに起因する土壌物理性の変化を定量的に示し、そのメカニズムについて考察を行う。この結果をふまえ、森林が土壌保全に果たす役割や、森林管理を通しての土壌保全の在り方について考察する。

1.2 既往研究の概要と課題

1.2.1 団粒研究の概要

本研究は森林土壌の団粒を対象とするものであるが、まず、畑地や草地などの土壌に関する団粒研究について概観することとする。なお、スレーキングによる団粒破壊に関する研究については第4章において述べる。

畑作中心であったヨーロッパやアメリカにおいては古くから団粒に関する研究が数多く行なわれてきたが、1950年ころまでは、土壌団粒の形成と安定に関する研究が主体であった (Six 2004)。とくにヨーロッパではミミズによる団粒形成が重視され、これに関する研究が盛んに行われていた (青山 2010)。「種の起源」で知られる Darwin (1881) は40年以上にわたってミミズの団粒形成に関する研究を行い、その成果を1881年に「The formation of vegetable mould, through the action of worms, with observations on their habits.」として出版している (邦訳「ミミズと土」, 渡辺弘之訳, 1994)。また、本研究とも関わりがある団粒の安定度の評価に関して、Yoder (1936) は、団粒試料を水中でふるい分ける方法を確立さ

せた。この方法は後に改良が加えられ、現在では湿式団粒分析法（水中ふるい分け法）として広く用いられている。

1950年以降の研究について、Six (2004) らは4つの節目があったと述べている。まず、Emerson (1959) が、接合した粘土とケイ素の粒子からなる土壤団粒のモデルを提案し、土壤有機物がこの粒子同士を結合させることによって団粒の安定度が高まるとした。次にEdwards and Bremner (1967) がマイクロ団粒理論を提示した。マイクロ団粒理論においては、土壤有機物、多価金属、粘土粒子の結合によりマイクロ団粒が形成されると考えられた。さらに、Tisdall and Oades (1982) が、土壤団粒がマクロ団粒とマイクロ団粒から構成されるという団粒の階層構造概念を提示し、これは重要な理論的進歩となった。その2年後、Oades (1984) はこの団粒の階層構造概念に対し、のちにその重要さが認識されることになる小さな修正を加えた。Tisdall and Oades (1982) は、まずマイクロ団粒が形成され、これらが集合してマクロ団粒を形成すると考えたのに対し、Oades (1984) は、マクロ団粒内に含まれる根や菌糸が分解される際に生成される粘着性物質が、周辺の土粒子を結合させ、マクロ団粒の内部においてマイクロ団粒が形成されると考えた。のちにこの考えが正しいことが確認され、現在では団粒形成のメカニズムとして認識されている。

一方、我が国においては、水田耕作が主流であったことから団粒に関する研究は欧米に比べ少なかった。そのなかでも服部による団粒と土壤微生物に関する一連の研究は重要なものであった(青山 2010)。とくに、マイクロ団粒の内部には細菌が多く、マイクロ団粒の外部には糸状菌が多いことを明らかにした研究(服部・宮下 1996)は、マイクロ団粒の内部と外部で微生物が棲み分けをしていること示すものとして注目された。

1.2.2 森林土壌に関する団粒発達程度の定量的評価と土壤物理特性との関連

現在のわが国の林野土壌分類(土じょう部 1976)では、土壤型や土壤亜型を区分する際には土壤構造が分類基準の1つとなっている(八木 1993)。この分類方法の基礎となったのが大政によるブナ林土壌を対象とした一連の研究であった。大政(1951)は、A₀層の

堆積様式と土壌構造の種類が水分条件の違いを反映していることに着目し、土壌水分条件に基づいて乾性～湿性の土壌の分類基準を確立した。この分類に準拠した国有林野の土壌調査では、形態観察により土壌構造の種類を判別し、さらにその発達段階を「強度・中度・弱度」の3段階に区分して表すことになっている(農林省林業試験場 1955;八木 1993)。このような形態観察に基づく土壌構造の発達程度の評価は、1947年以降の国有林野土壌調査事業や民有林適地適木調査でも行われ、多くの成果が得られている。しかし、この評価方法はあくまでも肉眼観察などに基づくものであって、定性的な評価の範囲に留まるものである。

一方、団粒の発達程度を定量的に表すためには、団粒分析試験により団粒の粒径分布等を求めるのが一般的である。団粒分析試験により森林土壌の団粒化を定量的に評価したうえで、土壌構造の種類・発達程度や土壌特性と比較検討した事例としては、真下(1960)や伊藤(1985)の研究があげられる。真下(1960)は、土壌型の異なる森林土壌で土壌物理性の測定を行い、粒状構造や団粒状構造のような団粒化が進んだ土壌でマトリックポテンシャル $pF 1 \sim 2$ ($-0.98 \sim -9.8 \text{ kPa}$) に相当する孔隙量が多く、とくに団粒状構造の土壌で透水性が高いことを明らかにした。さらに湿式団粒分析(水中ふるい分け法)によって、粒状構造や団粒状構造では直径 $1 \sim 5 \text{ mm}$ 程度の団粒が多いことを明らかにした。伊藤(1985)は、団粒状構造の場合には細粒状構造や粒状構造に比べ 1 mm 以上の大型団粒の割合が大ききことを明らかにした。

このように、団粒の発達程度と土壌構造・土壌特性との関連については検討事例が少ない。そこで本研究では、まず、森林土壌における団粒の発達程度を定量化したうえで、土壌構造の種類やその発達程度との関連について検討し、団粒の発達が孔隙組成や透水性などの土壌物理性にどのような影響を及ぼしているのかについて検討する。これらの結果については第2章において述べる。

1.2.3 森林伐採による団粒破壊と土壌物理性の変化

前述したように、団粒の発達した森林土壌は孔隙に富み、細～粗の様々な大きさの孔隙が発達し、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し、かつ、森林の洪水防止機能や渇水緩和機能に大きく影響する。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。さらにその原因として、伐採や搬出、地拵えなどに伴う土壌表層部の攪乱や、伐採後の環境変化に伴う団粒の破壊をあげている。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。また、荒木・有光（1984, 1985）はヒノキ林皆伐後の林地等で表層土壌の物理性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、団粒分析試験の結果では孔隙組成の違いを明瞭に説明できないと述べている。

以上のように、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は検討事例が少なく、データの蓄積とその関連性の解明が必要と考えられる。そこで、伐採1～3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ことを試みた。これらの結果については第3章において述べる。

1.2.4 伐採後の土壌水分環境変化に伴う団粒破壊

前述したように、森林伐採後の土壌物理性の変化には団粒の破壊が大きく関わっていると考えられている（山谷 1962；小林 1982；八木 1997）。この団粒破壊の原因としては、まず、伐採・搬出作業に伴う地表面の攪乱があげられる（小林 1982；八木 1997）。さらに、伐採後の土壌環境変化によって、団粒破壊が長期的に進行することも指摘されている。

すなわち、伐採によって樹冠部が消失すると、土壌への有機物供給量が減少する一方で、日射量増加によって地温が上昇する。そのため土壌有機物の供給—分解の動的平衡が変化し、団粒形成に深く関わわる腐植の量が減少して団粒が崩壊するとされる（小林 1982；八木 1997）。また、伐採後に下層植生や落葉層が失われた場合には、雨滴衝撃によって団粒などの土壌構造の破壊が進行することが指摘されている（中野 1973；小林 1982）。

一方で、伐採後の土壌環境変化の一つとして、表層土壌で乾燥が進むことを示した研究事例がある。荒木ら（2002）はヒノキ林の皆伐地や間伐林、対照林において表層土壌のマトリックポテンシャルを測定し、皆伐地において最も土壌が乾燥する傾向があることを明らかにした。浦川ら（2005）は、スギ・ヒノキ人工林の斜面下部伐採によって、表層土壌（0～30 cm 深）で土壌水分量が減少したことを明らかにした。富沢ら（2005）は、ヒノキ林皆伐—新植地と隣接するヒノキ林において土壌水分張力の測定を行い、伐採 5 年後程度までは伐採—新植地において表層土壌の乾燥が進み、乾燥・湿潤の変動が大きいことを明らかにした。また、宮川ら（1987）は、隣接するヒノキ複層林やヒノキ林皆伐地などで土壌を調査し、皆伐地の A 層の土壌構造がヒノキ複層林では団粒状構造および塊状構造であるのに対し、皆伐地では乾性型の堅果状構造が支配的になることを明らかにしている。さらに宮川ら（1988）は、皆伐後約 8 年経過したヒノキ林皆伐—新植地において、最表層に粉状および堅果状構造の粗しょうな薄い A₁ 層が形成され、A₂ 層と A₃ 層には乾性型の土壌構造が出現していたことを明らかにした。そして、隣接するヒノキ複層林とヒノキ—斉林では A₁ 層が団粒状構造、A₂ 層が堅果状構造であったことから、皆伐跡地の表層土壌は、一時的にしる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。

以上のように、伐採後には土壌表層部において、土壌構造が乾性型に変化するほど乾燥が進むと考えられる。しかし、我が国のような温暖湿潤気候条件下では、通常は一定の間隔で降水がもたらされ、乾燥状態が恒常的に保たれることはない。伐採地の表層土壌は、通常の林地よりも乾燥が進んだ状態で降雨によって湿潤化し、乾燥と湿潤を繰り返すことが考えられる。この一事例として、前述の富沢ら（2005）の報告があげられる。

乾燥した土壌が急激に湿潤化した場合、スレーキングによる団粒破壊が起こることが知られている。スレーキングとは、乾燥した土壌に急激に水分が加わったときに団粒が破壊される現象で（八幡 1975；宮崎 2000）、畑地土壌などを対象に数多くの研究事例がある（例えば、Yoder 1936；Emerson 1954；Chan and Mullins 1994；Tanaka 1997；Chenu et al. 2000；Cosentino et al. 2006；Zaher and Caron 2007）。国内の森林土壌について団粒のスレーキング特性等を検討した事例としては、小川（1981）や渡辺ら（1982）の研究があげられる。しかし、国内の森林土壌を対象にして、乾燥と湿潤を繰り返す野外環境下で団粒にどのような変化が起こるのかを検討した事例はほとんどない。そこで、乾燥と湿潤を繰り返す環境下における森林土壌の団粒の変化について明らかにすることを目的とし、団粒試料を用いた室内での培養実験を行った。この結果については第4章において考察を進める。以上述べてきた第2章から第5章における研究の概要と検討事項、各章の関連性は Fig. 1.2 に示すとおりである。

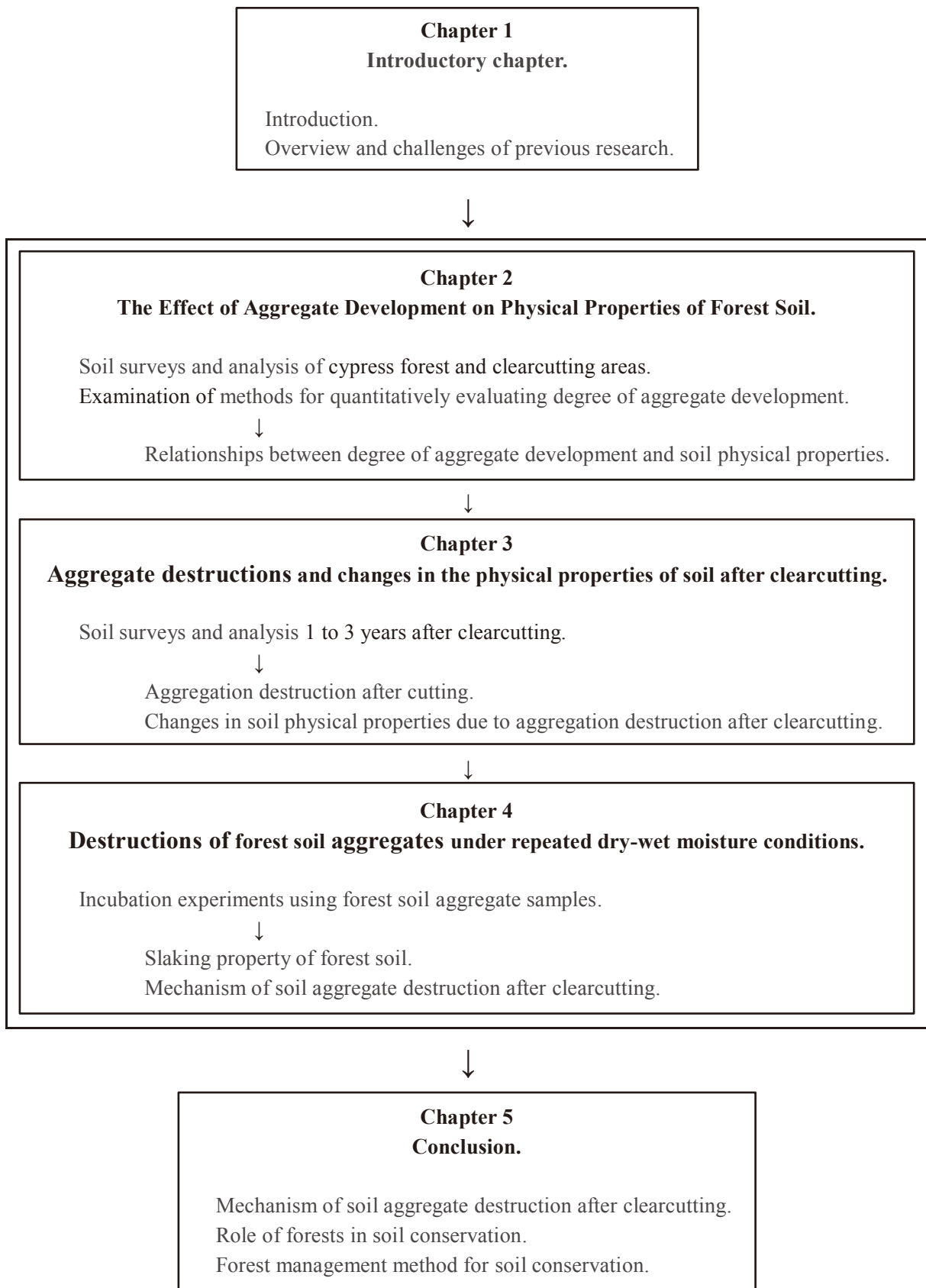


Fig. 1. 2. 研究の流れ
Flow chart of the study.

第2章 森林土壌における団粒の発達が生土壌物理性に及ぼす影響

2.1 はじめに

森林土壌には団粒状・塊状など様々な土壌構造が発達し、構造の種類や発達程度によって、孔隙組成や透水性などの土壌物理性が異なることが知られている。真下（1960）は森林立地的な観点から、土壌型の異なる森林土壌について孔隙組成や透水性などの土壌物理性の測定を行い、粒状構造や団粒状構造のような団粒化が進んだ土壌でマトリックポテンシャル pF 1~2（ $-0.98 \sim -9.8$ kPa）に相当する孔隙量が多く、とくに団粒状構造の土壌で透水性が高いことを明らかにした。さらに湿式団粒分析（水中ふるい分け法）によって、粒状構造や団粒状構造では直径 1~5 mm 程度の団粒が多いことも明らかにしている。一方、小杉（1999）は表層土内の鉛直浸透過程に関する雨水貯留量指標 S を提示し、団粒状構造とかべ状構造の森林土壌の水分特性を用い、表層土内の鉛直浸透過程の数値シミュレーションを行った。 S は一定強度の降雨が続いたときに土層内に貯留される水分量という物理的意味を持つ。その結果、より大きな S を持つ団粒状土壌が、降雨中により多くの雨水を土層内に貯留し降雨終了後に徐々に流出させハイドログラフをより緩やかにすることを確かめた。このように、森林土壌における団粒の発達は林木生育の観点からも、森林地帯での水循環においても重要な意味を持つと考えられる。

一般に、団粒の発達程度を定量的に表すためには団粒分析試験が行われ、その結果の表示方法もいくつか提案されている（例えば、川口 1957; 佐藤 1972; 土質工学会 1991）。一方、現在のわが国の林野土壌分類（土じょう部, 1976）では、土壌型や土壌亜型を区分する際には土壌構造が分類基準の1つとなっていて（八木 1993）、土壌調査においては形態観察により土壌構造の種類を判別し、さらにその発達段階を「強度・中度・弱度」の3段階に区分している（農林省林業試験場, 1955; 八木 1993）。このような土壌構造の分類方法は1947年以降の国有林野土壌調査事業・民有林適地適木調査でも行われ、多くの成果が得られている。

ところが、団粒分析試験により森林土壌の団粒化を定量的に評価したうえで、土壌構造の種類・発達程度や土壌特性と比較検討した事例は少ない。上述の真下（1960）の研究はその1事例であり、これ以外では、伊藤（1985）が団粒状構造の場合には細粒状構造や粒状構造に比べ1 mm以上の大型団粒の割合が大きいことを指摘している。両者とも団粒分析試験によって団粒の粒径分布を求め、団粒の大きさと土壌構造との関連を検討しており、団粒の発達程度と土壌構造・土壌特性との関連について定量的解析へと踏み込んでいる。しかし真下（1960）は上述のような成果をあげながらも、団粒の大きさでは土壌の孔隙状態は判断できず、また、団粒分布だけでは明瞭に土壌構造を表すことができないとしている。荒木・有光（1984, 1985）はヒノキ林皆伐後の林地等で表層土壌の物理性測定や団粒分析試験を行ったが、団粒分析試験の結果では孔隙組成の違いを明瞭に説明できない部分があり、これは試料採取時の土壌の状態や性質によるもので、分析方法についての検討が必要だとしている。このように、団粒の発達程度と土壌構造・土壌特性との関連については検討の余地が残されていると考えられる。

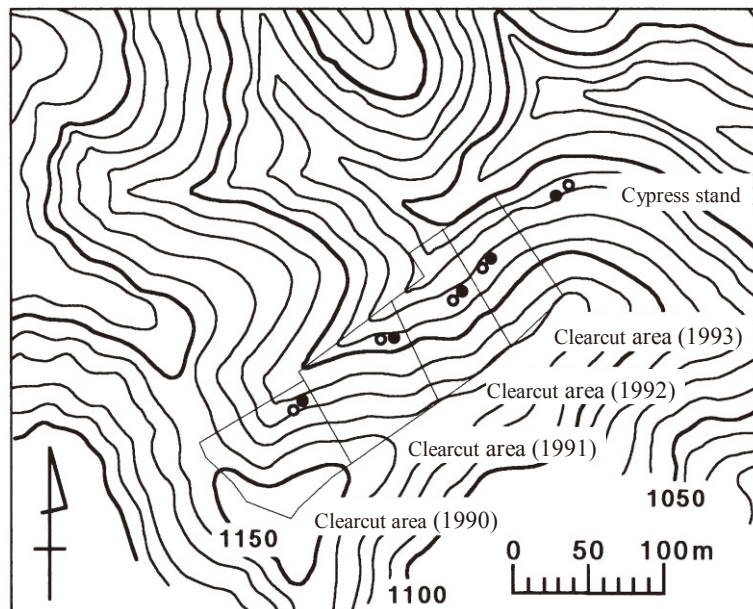
そこで本章においては、森林土壌における団粒の発達程度を定量化したうえで、土壌構造の種類やその発達程度との関連について検討し、団粒の発達が孔隙組成や透水性などの土壌物理性にどのような影響を及ぼしているのかについて検討する。

2.2 方法

2.2.1 調査対象地

調査対象地は信州大学農学部手良沢山演習林（現信州大学農学部アルプス圏フィールド科学教育研究センター手良沢山ステーション演習林）内の野田ヶ沢流域の北西向き斜面である（Fig. 2. 1）。この斜面には60年生前後のヒノキ人工林が成立していたが、1990年から1993年にかけて毎年11月頃に0.30~0.33 haずつ皆伐された。各伐採区域とも、伐採翌年の4月下旬から5月にかけてヒノキが植林され、以後定期的に下刈り等の保育作業が行われている。これらの各伐採区域は、後述するように地質・土壌母材・標高・斜面方位・

傾斜がほぼ同一で、気温・降水量にも大きな差異はないと考えられるが、予備調査によって、土壌表層部の土壌構造や団粒の発達程度に差異が認められた。したがって、本調査対象地は、土壌構造の差異や団粒の発達段階の違いと土壌物理性との関連を検討するのに適すると考えられたので、これらの各伐採区域と隣接する約 60 年生のヒノキ林内にそれぞれ調査区を設定した。以下これらの調査区をヒノキ林区，93 年伐採区，92 年伐採区，91 年伐採区，90 年伐採区と呼ぶ。調査区付近は領家帯に属する花崗岩地帯（角閃石黒雲母トナール岩）である（牧本ら 1996）。1971 年から 1972 年にかけての土壌調査では、いずれの調査区とも適潤性褐色森林土（B_D）に分類されている（中村・林 1974）。各調査区内でそれぞれ 2 地点を選定して土壌断面調査を行い、このうち一方の土壌断面で土壌試料を採取した。土壌断面調査と土壌構造の分類は農林省林業試験場（1955）と八木（1993）にしたがって行った。調査地点の標高は 1,065～1,120 m，ほぼ北西向きの斜面で傾斜は 32～38°である。調査ならびに試料採取は 1994 年に行い、この時点で 93 年伐採区では伐採 1 年後，92 年伐採区では 2 年後，91 年伐採区では 3 年後，90 年伐採区では 4 年後であった。



●: Soil survey and sampling profiles (Profile A), ○: Soil survey profiles (Profile B)

Fig. 2. 1. 調査対象地
Study site.

2.2.2 試料採取ならびに実験方法

それぞれの調査区において、各層位と深さ 50 cm の位置から土壌試料を採取し、全炭素・全窒素の測定と孔隙解析・飽和透水係数の測定を行った。さらに、B 層もしくは B₁ 層以浅の各層から団粒分析試験用の試料を採取した。しかし 93 年伐採区では、土壌試料採取時点では A-B 層・B 層をそれぞれ B₁ 層・B₂ 層と判断したため、この時点で B₂ 層と判断された B 層からは団粒分析試験用の試料を採取しなかった。

全炭素・全窒素の測定には CN コーダー（柳本 MT-500）を用いた。2 mm ふるいを通過した風乾試料から植物根を取り除き、粉碎して 740 μm ふるいを通過させたものを測定に供した。孔隙解析は 100 mL 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）によって行った。測定前に試料を十分に飽水させた。加圧板装置内に試料を置いて、所定の圧力値に設定し、試料からの排水が終了した時点で試料質量を測定した。圧力の設定値は 3.1, 6.2, 12.3, 24.6, 49.1, 98.0, 155.3 kPa である。すべての圧力値での測定が終了した試料は、定水位法による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 3 試料の測定を行った。飽和透水係数の測定値はバラツキが大きかったので、Scheffe 法による多重比較検定（石村 1992）を行った。団粒分析試験は 100 mL 採土円筒で採取した不攪乱試料を用い、水中ふるい分け法により行った。試験方法は、土質工学会（1991）による団粒分析試験の方法を基本としたが、以下の理由により試料の調整方法を一部改変した。水中ふるい分け法では試料を飽和させてから測定に供するが、急激に試料を飽和させるとスレーキングによって団粒が崩壊し、試験結果に影響を与える（川口 1957；佐藤 1972；土質工学会 1991）。スレーキングを防ぐためには噴霧や飽和した砂柱上での毛管湿潤などによってゆっくりと試料を飽和させる必要がある（川口 1957；佐藤 1972）。そこで本研究では試料を採土円筒ごと飽和砂柱上に置いて毛管湿潤させ、さらに噴霧によって完全に飽和させた。飽和した試料は 9.5 mm ふるいを通過させ、2, 1, 0.5, 0.25, 0.1 mm の組ふるいで水中ふるい分けを行った（分散前ふるい分け）。各ふるいに残留した試料と 0.1 mm ふるいを

通過した試料の絶乾質量から耐水性団粒の粒径分布を求めた。さらに各ふるいに残留した試料を1次粒子の状態に分散させ、攪拌してから再び組ふるいによって水中でふるい分け（分散後ふるい分け）、1次粒子の粒径分布を求めた。A層とA₁層については5試料の測定を行い、それ以外の層位については3試料の測定を行った。団粒分析試験の結果の表示方法については後述するが、結果にばらつきがみられたので Scheffe 法による多重比較検定を行った。

2.2.3 団粒分析の結果の表示方法

団粒の発達状態を定量的に表示する方法がいくつか提案されている。例えば真下(1960)や伊藤(1985)、荒木ら(1984;1985)は分散前ふるい分けの結果から、団粒の粒径階級ごとに質量百分率(ある粒径階級の団粒の質量を全試料の質量に対する百分率で示したもの)を求めて議論を進めている。この値は団粒分析の結果を表示する最も基本的な指標であるが、各粒径階級ごとに求められるので、試料間の比較や土壌特性との比較が煩雑となる。また、どの粒径階級の値を用いたとしても、単独では団粒の粒径分布の全体的な特徴を表現できない。van Bavel(1949)は団粒発達の状態や団粒の粒径分布の全体的特徴を単一の物理量で表示する方法として、平均質量直径を提示した。分散前ふるい分けの結果から横軸に団粒径(粒径階級の上限値をとる)、縦軸に質量百分率の累積度数をとると Fig. 2.2 のような累積度数曲線を得る。ここで、団粒径を x 、質量百分率の累積度数を $F(x)$ 、 x の密度関数(団粒径に対応する質量百分率)を $f(x)$ とすると、

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx \quad (1)$$

密度関数 $f(x)$ の平均 \bar{x} を平均質量直径と定義すると、平均質量直径は次式で表される。

$$\bar{x} = \int_0^{9.5} xf(x) dx = [xF(x)]_0^{9.5} - \int_0^{9.5} F(x) dx = 950 - \int_0^{9.5} F(x) dx \quad (2)$$

Fig. 2.2 において、(2)式は全体の面積(AとBの面積の合計)とBの面積との差に等しく、平均質量直径はAの面積で与えられる。すべての団粒の直径が9.5 mmの場合、平均質量直径は9.5 mmとなり、Aの面積は9.5×100=950平方単位面積になる。したがって1

平方単位面積は平均質量直径 0.01 mm に相当することになる。よって平均質量直径は、 A の面積 $\times 0.01$ mm によって求められる。分散前ふるい分けの結果からは団粒の平均質量直径が求められ、この値が大きければ団粒発達が進んでいることを表す。一方、分散後ふるい分けの結果からは 1 次粒子の平均質量直径を求めることができる。van Bavel (1953) は団粒の平均質量直径と 1 次粒子の平均質量直径の差を団粒指数と定義した。団粒指数が大きければ団粒が発達していることになるが、団粒指数は 1 次粒子の粒径分布の影響が取り除かれているので、試料間で 1 次粒子の粒径組成が異なっても、団粒の発達状況を比較できる。団粒指数によって、分析前の土壌の状態や前処理の差異、あるいは分析時の操作の影響が正確にとらえられた (van Bavel 1953) こと、他の表示法では判別できないような差異が明らかになった (川口 1957) ことが報告されている。以上の理由から、本研究では団粒指数によって団粒分析試験の結果を表すこととした。

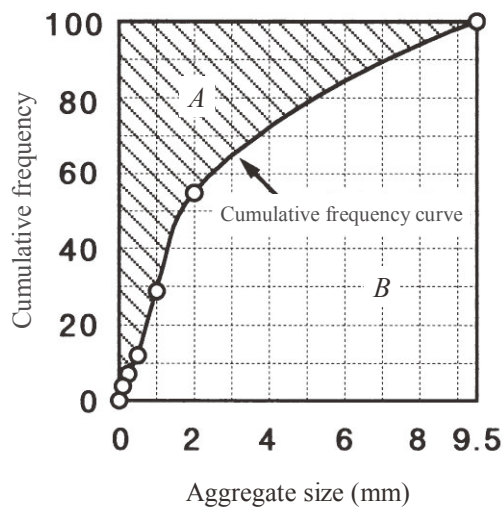


Fig. 2.2. 累積度数曲線
Cumulative frequency curve.

2.3 結果

2.3.1 土壌の層位構成について

Fig. 2. 3 に各調査区の土壌断面の模式図を示す。ヒノキ林区では A_0 , A_1 , A_2 , B_1 , B_2 という層位構成になっているが, 93 年伐採区では B_1 と B_2 の層位区分がなくなり A-B 層が発達する。また 93 年伐採区では A_0 層が厚いが, これは伐採・搬出作業に伴って枝葉や樹皮が落とされ堆積したためである。92 年伐採区ではさらに A_2 層が欠落し, 91 年伐採区では A_0 , A, A-B, B という層位構成と L・F, H-A, A, A-B, B という層位構成とが現れた。H-A 層が形成されている土壌断面では L・F 層も厚く, 比較的乾燥した条件下にあることが推察される。90 年伐採区では A-B 層も欠落し, もっとも単純な層位構成になっている。以上から, 調査区全体としては伐採年が早い調査区ほど層位構成が単純になる傾向が認められる。

2.3.2 土壌構造について

各調査区の土壌構造について Table 2. 1 にまとめた。同一の層位内でも異なる土壌構造が認められたので, 層全体に発達する構造と, 根の周辺部やその他の部分で発達する構造とに分けて示した。また, 採取した不攪乱試料の土壌構造もあわせて示した。団粒状構造はヒノキ林区の A_1 層・ A_2 層と 93 年伐採区の A_1 層で層全体に発達し, 粒状構造は 92 年伐採区の A 層で層全体に発達していた。このように団粒状構造や粒状構造はおもに A 層・ A_1 層・ A_2 層などで発達する傾向が認められた。一方, B 層・ B_1 層以深では塊状構造が発達するか, 特に構造が発達していないという傾向がある。堅果状構造は部分的に発達するのみで, 層全体での発達はみられなかった。91 年伐採区では各層とも層全体に発達する構造はなく, 92 年伐採区の A-B 層では単粒状の構造となっていた。各調査区の鉍質土壌の最上層, つまり A 層・ A_1 層で層全体に発達する構造に着目すると, ヒノキ林区・93 年伐採区で中度の団粒状構造, 92 年伐採区で弱度の粒状構造が発達しているのに対し, 91 年伐採区・90 年伐採区では特に発達する構造がみられず, 伐採後の経過年数によって構造の種類

に差異が認められる。

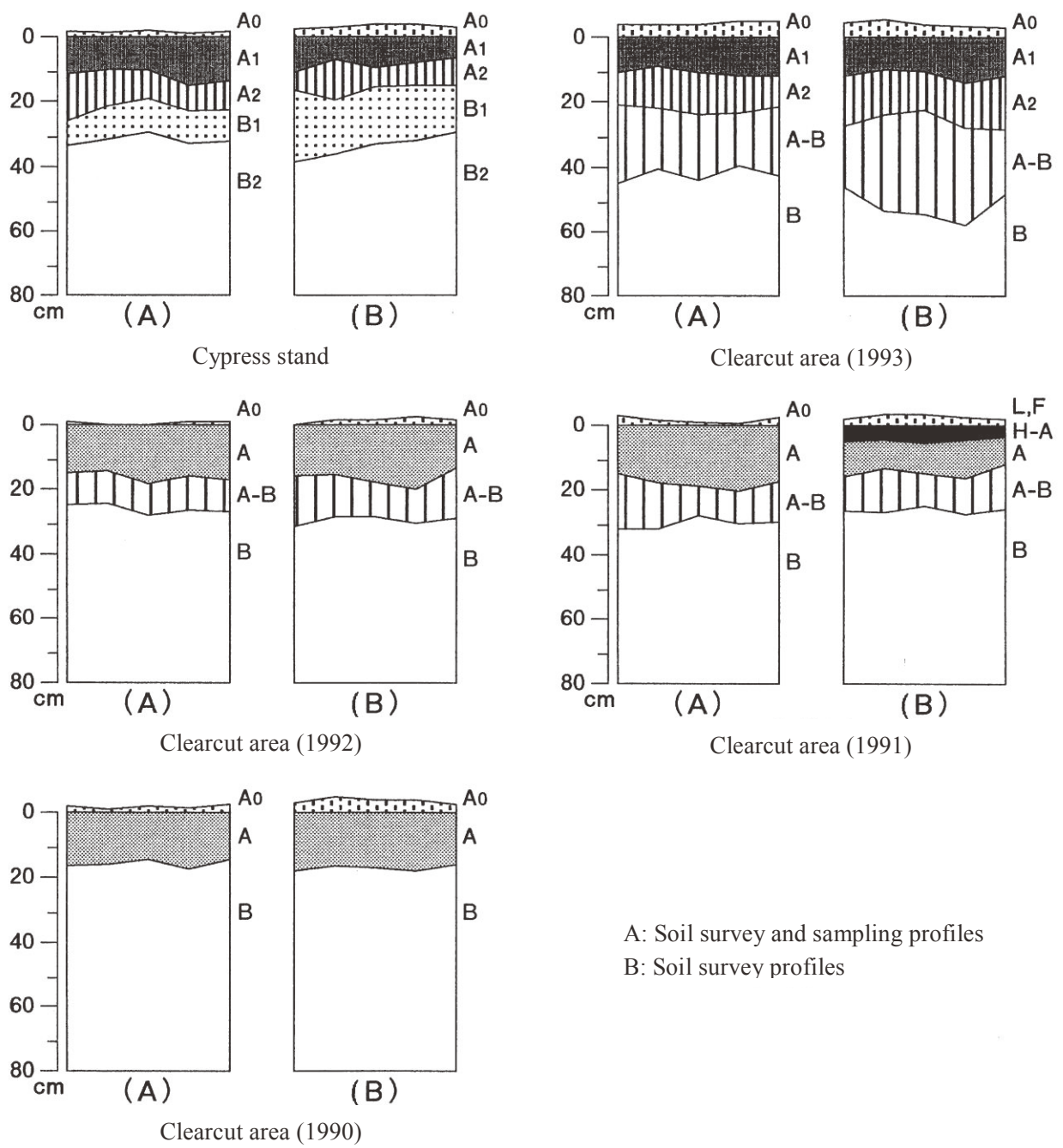


Fig. 2.3. 各調査区の土壌断面
Soil profile of each stand.

Table 2. 1. 各調査区の土壌構造
Soil structures of each plot.

Stand	Horizon	Soil structure		
		Observed in entire horizon	Observed near roots	Observed in part of the horizon
Cypress stand	A ₁	Crumb (MO)	Granular (MO), Nutty (ST)	Crumb (ST) (Just below A ₀) Crumb (MO), Crumb (ST)
	A ₂	Crumb (WE)	Nutty (ST)	Crumb (WE)
	B ₁	Structureless		Structureless
	B ₂	Structureless		Structureless
	50 cm depth	Structureless		Structureless
Clearcut area (1993)	A ₁	Crumb (MO)		Granular (MO) Crumb (MO), Granular (MO)
	A ₂	Crumb (WE)		Crumb (WE)
	A-B	Crumb (WE)		Blocky (MO)
	Upper of B (50 cm depth)	Blocky (WE)		Blocky (WE)
Clearcut area (1992)	A	Granular (WE)		Granular (WE)
	A-B	Single grain		Granular (MO), Nutty (WE) Single grain, Granular (MO), Nutty (ST)
	B	Blocky (WE)		Granular (WE), Nutty (MO) Blocky (WE)
	50 cm depth	Blocky (MO)		Blocky (MO)
Clearcut area (1991)	A	Structureless		Crumb (WE) Structureless
	A-B	Structureless		Crumb (WE) Structureless
	B	Structureless		Blocky (WE) Structureless
	50 cm depth	Structureless		Blocky (WE) Structureless
Clearcut area (1990)	A	Structureless	Crumb (WE)	Structureless Structureless
	B	Blocky (WE)		Blocky (WE)
	50 cm depth	Blocky (WE)		Blocky (WE)

2.3.3 全炭素・全窒素の測定結果

全炭素・全窒素の測定結果を Table 2. 2 に示す。全炭素量・全窒素量は各調査区とも上層から下層に向けて減少する傾向がある。とくに炭素については A 層・A₁ 層では 44.8 g kg⁻¹ 以上, A₂ 層・A-B 層では 26.4 g kg⁻¹ 以上, B 層・B₁ 層では 24.4 g kg⁻¹ 以下と, 層位による差異が明瞭である。A 層と A₁ 層に着目すると, 全炭素量・全窒素量ともに伐採後 1・2 年目の 93 年伐採区と 92 年伐採区で高い値を示す。森林伐採後には土壌表層部では全炭素量・全窒素量がともに減少する (山谷 1965 ; 小林 1982, 1991) のが一般的傾向であるが, 逆に伐採後に有機物が土壌に混入して全炭素量・全窒素量が増加した事例も報告されている (小林 1991)。93 年伐採区・92 年伐採区においては伐採時に枝葉や樹皮などの新鮮有機物が加わったことや, 伐採後に草本類が侵入した (馬場・川崎 1993) ことにより全炭素量・全窒素量が増加したと考えられる。

Table 2. 全炭素・全窒素の測定結果
Total carbon and total nitrogen of soil samples.

Stand	Horizon	Soil depth (cm)	Total carbon (g kg ⁻¹)	Total nitrogen (g kg ⁻¹)	C/N ratio
Cypress stand	A ₁	0.0-5.1	44.8	2.78	16.1
	A ₂	12.5-17.6	31.1	1.98	15.7
	B ₁	22.4-27.5	24.4	1.64	14.9
	B ₂	31.9-37.0	18.4	1.33	13.9
	50 cm depth	50.0-55.1	13.5	0.95	14.2
Clearcut area (1993)	A ₁	0.0-5.1	59.7	4.50	13.3
	A ₂	11.6-16.7	36.6	2.93	12.5
	A-B	22.4-27.5	30.4	2.47	12.3
	Upper of B (50 cm depth)	50.0-55.1	17.0	1.41	12.0
Clearcut area (1992)	A	0.0-5.1	58.2	4.49	13.0
	A-B	16.2-21.3	40.0	2.98	13.4
	B	26.2-31.3	22.4	2.00	11.2
	50 cm depth	50.0-55.1	10.5	0.77	13.6
Clearcut area (1991)	A	0.0-5.1	45.8	2.95	15.5
	A-B	18.0-23.1	26.4	1.93	13.7
	B	30.5-35.6	16.1	1.05	15.4
	50 cm depth	50.0-55.1	11.2	0.74	15.1
Clearcut area (1990)	A	0.0-5.1	49.5	3.69	13.4
	B	15.8-20.9	20.8	1.71	12.2
	50 cm depth	50.0-55.1	12.0	1.03	11.7

2.3.4 団粒分析試験の結果

各調査区の団粒指数を Fig. 2.4 に示す。全体にばらつきがみられるが、ヒノキ林区や93年伐採区、92年伐採区では団粒指数の平均値が各層位とも0.93 mm以上であるのに対し、91年伐採区・90年伐採区では各層位の平均値は0.91 mm以下となっている。また、92年伐採区ではB層の団粒指数が高く、ばらつきが大きい。これは分散前ふるい分けの際に粒径の小さな団粒が細根に絡まって2 mmふるいに残留したため、団粒指数が高くなったものである。Scheffe法による多重比較検定の結果をTable 2.3に示す。有意差があるのは、ヒノキ林区・93年伐採区・92年伐採区の層位と91年伐採区・90年伐採区の層位とを比較した組み合わせのみに限られる。以上のことから、ヒノキ林区・93年伐採区・92年伐採区に比べ、91年伐採区・90年伐採区では全体に団粒指数が低く、団粒の発達程度が低いと考えられる。A層とA₁層に着目すると、91年伐採区のA層はヒノキ林区のA₁層・93年伐採区のA₁層・92年伐採区のA層と有意差がある。また、90年伐採区のA層はヒノキ林区のA₁層と有意差があり、さらに93年伐採区のA₁層との間では p 値が0.056と比較的低い値を示した。したがって、A層とA₁層についても、ヒノキ林区・93年伐採区・92年伐採区に比べ、91年伐採区・90年伐採区では団粒指数が低いと考えることができる。以上のように、伐採後の経過年数が長い91年伐採区・90年伐採区で団粒指数が低い傾向があることがわかった。山谷(1965)はヒバ林皆伐後に伐採の影響によって2.4~1.0 mmの団粒が減少したことを明らかにしている。本調査地で得られた結果もこれと同様の傾向を示すことから、91年伐採区・90年伐採区では伐採の影響によって団粒指数が低いと考えることが可能である。森林伐採が団粒の発達程度に及ぼす影響については第3章において検討を加えていきたい。

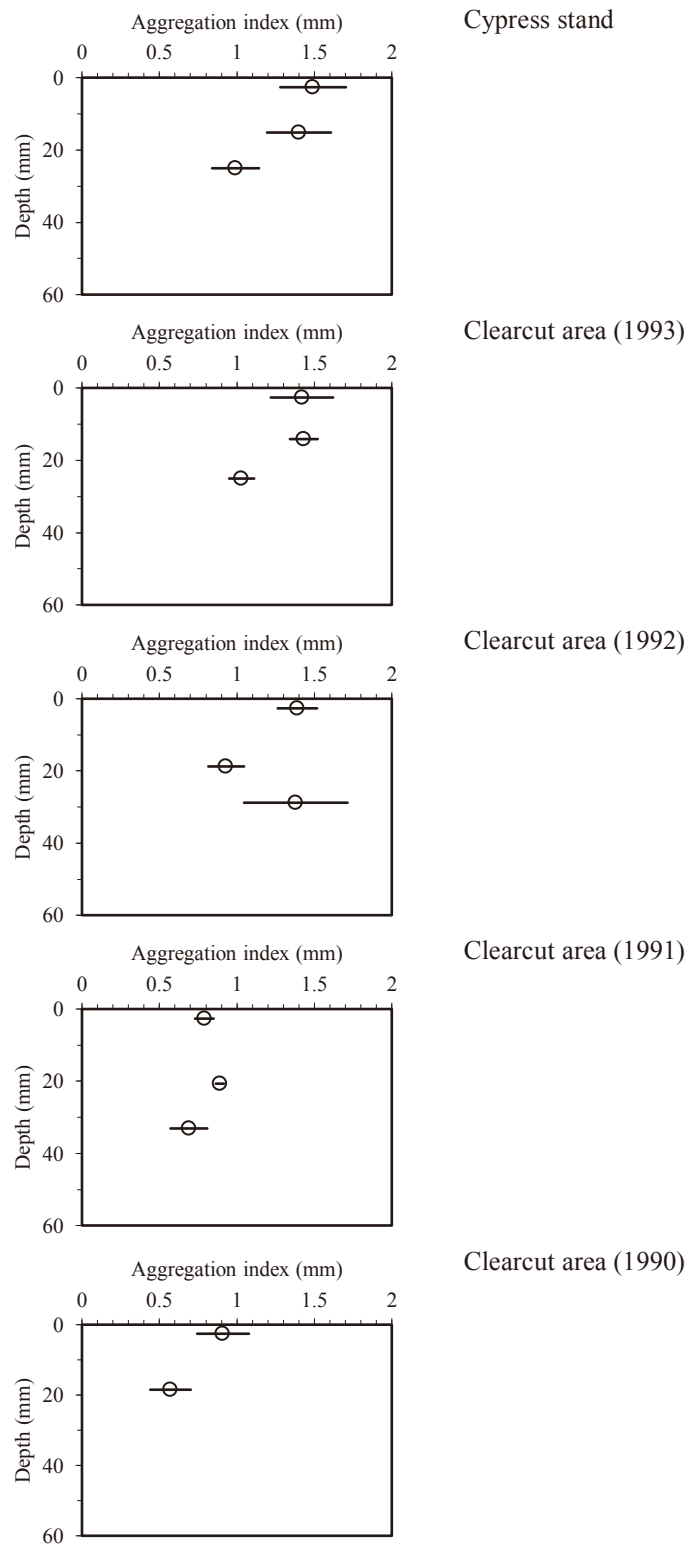


Fig. 2.4. 各調査区の団粒指数
Aggregation index of each stand.
Bars indicate standard deviation.

Table 2. 3. 多重比較檢定結果
Result of Sheffe's F test.

	Cypress stand			Clearcut area (1993)			Clearcut area (1992)			Clearcut area (1991)			Clearcut area (1990)	
	A ₁	A ₂	B ₁	A ₁	A ₂	A-B	A	A-B	B	A	A-B	B	A	B
Cypress stand	A ₁	0.093	0.500	0.066	0.063	0.463	0.098	0.560	0.110	0.698	0.597	0.797	0.582	0.923
	A ₂		0.407	-0.027	0.030	0.370	0.005	0.467	0.017	0.605	0.503	0.703	0.489	0.830
	B ₁			-0.434	-0.437	-0.037	-0.402	0.060	-0.390	0.198	0.097	0.297	0.082	0.423
Clearcut area (1993)	A ₁			-0.003	0.397		0.032	0.494	0.044	0.632	0.531	0.731	0.516	0.857
	A ₂				0.400		0.035	0.497	0.045	0.635	0.533	0.733	0.519	0.860
	A-B						-0.365	0.097	-0.353	0.235	0.133	0.333	0.119	0.460
Clearcut area (1992)	A						0.462	0.012	0.600	0.499	0.699	0.699	0.484	0.825
	A-B							-0.450	0.138	0.037	0.237	0.237	0.022	0.363
	B						0.588	0.487	0.687	0.487	0.687	0.687	0.472	0.813
Clearcut area (1991)	A									-0.101	0.099	0.099	-0.116	0.225
	A-B										0.200	0.200	-0.015	0.327
	B												-0.215	0.127
Clearcut area (1990)	A													0.341
	B													

** : $P < 0.01$, * : $P < 0.05$, none: Not significant.

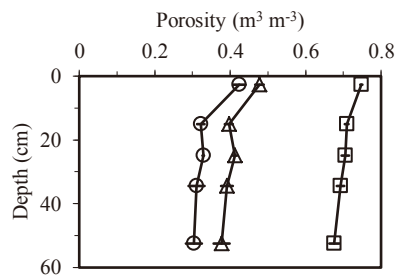
2.3.5 孔隙解析の結果

孔隙解析の結果から各試料の孔隙組成を求め、調査区ごとにまとめて Fig. 2.5 に示す。団粒指数に比べると全般的にばらつきが少なく、各調査区とも全孔隙量は表層から下層に向って減少している。マトリックポテンシャル -6.2 kPa 以上 (pF 1.8 以下) に相当する孔隙の量は、ヒノキ林区・93 年伐採区・92 年伐採区では表層から下層に向って減少する傾向があるが、91 年伐採地では A 層の値が下層の B 層よりも低く、90 年伐採地では表層と下層の差が小さい。また、ヒノキ林区・93 年伐採区・92 年伐採区に比べ 91 年伐採区・90 年伐採区では全般に全孔隙率が少ない傾向があり、とくに A 層で顕著である。小林 (1982) は森林伐採後に表層土壌の粗孔隙量が減少したことを明らかにしているが、本調査地でも伐採後の経過年数の長い 91 年・90 年伐採区の A 層でマトリックポテンシャル -6.2 kPa 以上相当の孔隙率が少なく、このことが全孔隙率にも影響していると考えられる。

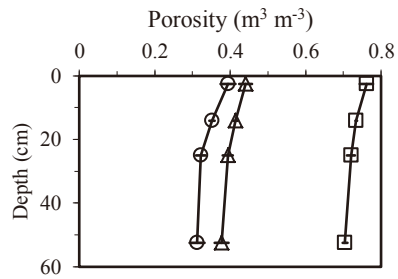
2.3.6 飽和透水係数の測定結果

飽和透水係数の測定結果を Fig. 2.6 に示す。各調査区とも表層部ではばらつきが大きい傾向がある。平均値に着目すると、ヒノキ林区・93 年伐採区・92 年伐採区では表層から下層に向って飽和透水係数が減少するが、91 年伐採区では表層と下層の差が小さくなっており、90 年伐採区では A 層の値が下層の B 層よりも低い。また、91 年伐採区と 90 年伐採区ではすべての層で平均値が 1×10^{-4} m/s⁻¹ より低い値を示し、とくに最上層にあたる A 層の値はヒノキ林区・93 年伐採区・92 年伐採区の最上層 (A₁ 層・A 層) に比べ明らかに低い。しかし Scheffe 法による多重比較検定の結果では、93 年伐採区の A₁ 層と 93 年伐採区の B 層上部 (深さ 50 cm) の間で危険率 5% で有意差が認められたのみであった。小林 (1982) は森林伐採後に表層土壌の粗孔隙量の減少に伴って透水性が低下したことを明らかにしている。本調査地の場合は平均値では同様の傾向を認めるが、有意差は得られていない。これは測定値のばらつきが大きかったためと考えられる。孔隙解析と飽和透水係数の測定には同じ試料を用いており、孔隙組成では試料間のばらつきは小さかったのに対し、飽和透水

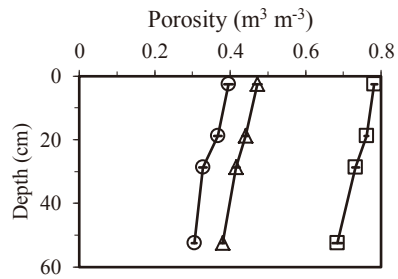
係数はばらつきが大きい。したがって飽和透水係数には孔隙組成以外に，孔隙の連続性なども影響していると考えられる。



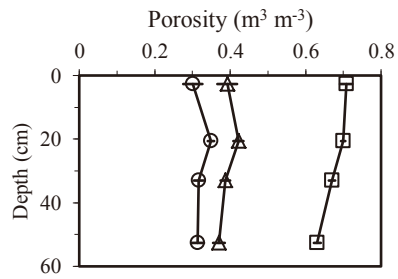
Cypress stand



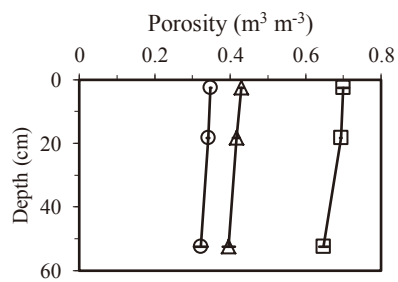
Clearcut area (1993)



Clearcut area (1992)



Clearcut area (1991)



Clearcut area (1990)

○: $-6.2\text{kPa}\leq$, △: $-49.1\text{kPa}\leq$, □: Total porosity

Fig. 2. 5. 各調査区の孔隙組成
Soil pore composition of each stand.
Bars indicate standard deviation.

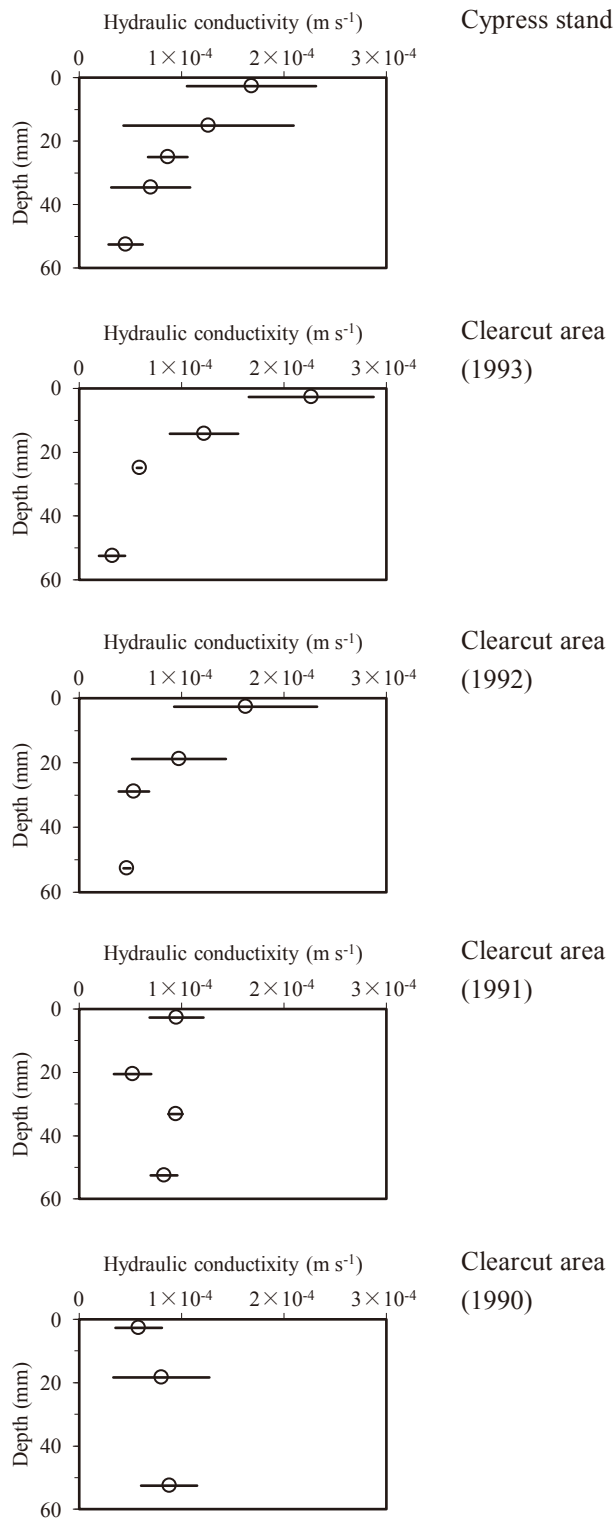


Fig. 2. 6. 各調査区の飽和透水係数
Hydraulic conductivity of each stand.
Bars indicate standard deviation.

2.4 考察

2.4.1 構造と団粒指数との関係

本調査地における土壌構造と団粒指数との対応関係を Fig. 2. 7 に示した。土壌構造は Table 2. 1 の採取試料の構造により分類し、おもに発達する構造（主構造）と部分的に発達する構造（副次構造）をあわせて示した。主構造が弱度の塊状構造となっている試料では団粒指数が 1.68, 1.44, 1.02 mm と高い値を示すものがある。これらは 92 年伐採区の B 層試料で、すでに述べたように小団粒が細根に絡まっていたもので、団粒指数が高いのは塊状構造の発達によるものではない。そこで、これらの試料を除外すると、主構造が団粒状・粒状の試料は団粒指数が 1.75~1.18 mm の範囲に、それ以外では 1.12 mm 以下となり、主構造の違いによって 2 グループに区分できる。また、主構造ごとの団粒指数の平均値は、構造の差異をある程度反映している。団粒指数の値は副次構造の影響も受けていると考えられ、また、構造によっては試料数が少ないものがあり、とくに主構造が細粒状構造・堅果状構造・かべ状構造となっているものがないが、団粒指数によってある程度構造の違いを表すことが可能だと考えられる。

2.4.2 全炭素量と団粒指数との関係

Fig. 2. 8 に全炭素量と団粒指数との関係を示す。団粒指数は各層位で 3 ないしは 5 試料の測定を行ったが、それらの平均値を求めて全炭素量との関連を検討した。全体に全炭素量が多ければ団粒指数が高いという傾向が認められるが、相関係数は有意ではなかった。B 層・B₁ 層試料のなかで、全炭素量が 22.4 g kg⁻¹ と低いにもかかわらず団粒指数が 1.38 mm と高い値を示すものがある。これは 92 年伐採地の B 層試料で、すでに述べたように、これらの試料で団粒指数が高いのは小団粒が細根に絡まった状態になっていたため、構造の発達によるものではない。伊藤（1985）は炭素含有率と土壌構造の種類との関係について、炭素含有率 8%（80 g kg⁻¹）以上では団粒状構造が、4%（40 g kg⁻¹）以下では粒状～堅果状構造が形成される傾向があると述べているが、本調査地の場合は団粒状構造・粒状構

造・塊状構造の3者について、全炭素量 31.1 g kg^{-1} 以上では団粒状構造と粒状構造、 30.4 g kg^{-1} 以下では塊状構造となっている。しかし、A層・A₁層の試料のなかには、全炭素量が多いのに構造発達認められず団粒指数もやや低い値を示すものがある。これは91年伐採区・90年伐採区のA層試料で、伐採後の経過年数が長い表層土の試料にあたり、森林伐採の影響を受けている可能性がある。すなわち、全炭素量が多いのに構造発達がみられずに団粒指数が低いのは、森林伐採後に雨滴衝撃などによる団粒の機械的破壊が起ったためと考えられる。また、A-B層試料のうち単粒状構造となっているもの(92年伐採区A-B層試料)も、同様の理由によって全炭素量が比較的高いのに単粒状構造で団粒指数が低くなっていると考えられる。

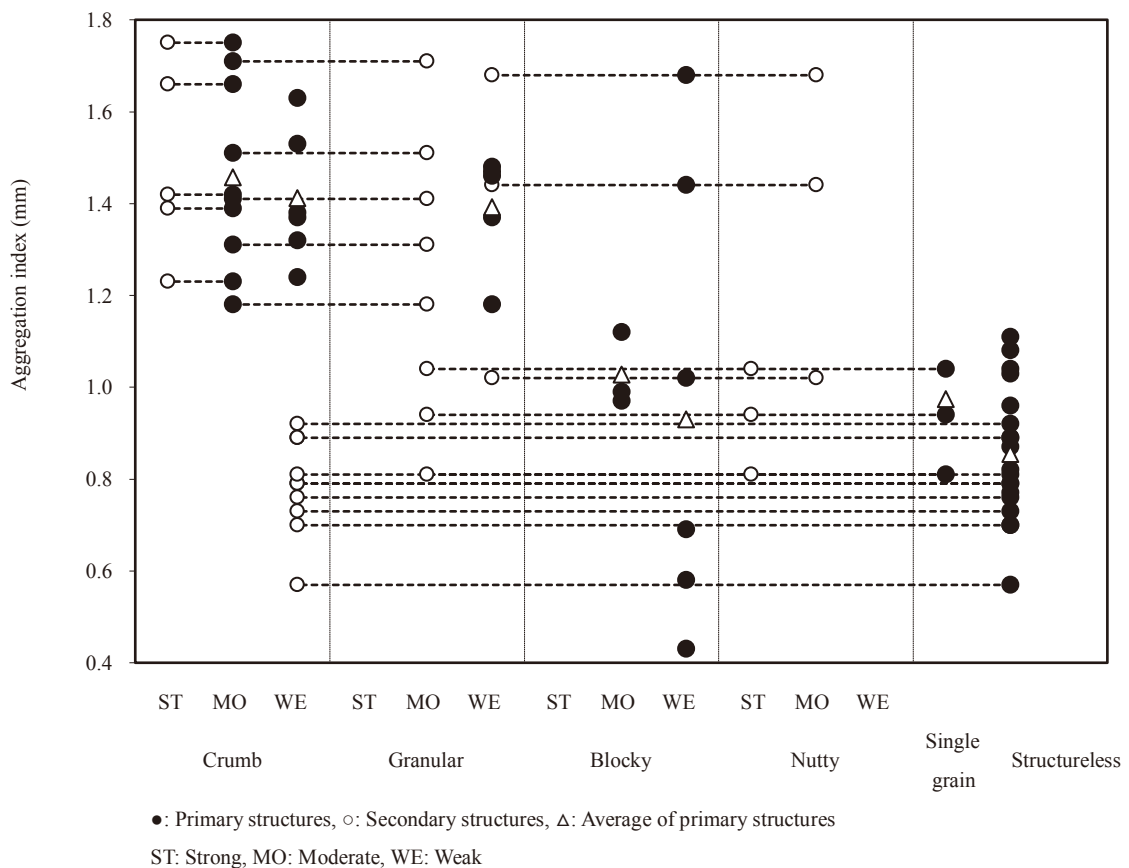
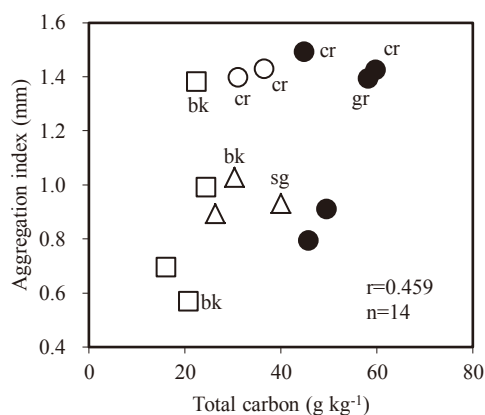


Fig. 2.7. 土壤構造と団粒指数との関係
Relationship between soil structure and aggregation index.



●: A, A₁, ○: A₂, △: A-B, □: B, B₁
 cr: crumb, gr: Granular, bk: Blocky, sg: Single granular,
 None: Structureless

Fig. 2.8. 全炭素量と団粒指数との関係
 Relationship between total carbon and aggregation index.

2.4.3 団粒指数と孔隙組成との関係

団粒指数と孔隙組成についてそれぞれ層位ごとの平均値を求めて両者の関係を検討した (Fig. 2.9)。まず、団粒指数とマトリックポテンシャル -6.2 kPa 以上 (pF 1.8 以下) に相当する孔隙率との関係を見ると、全体に団粒指数が高いと孔隙率が高く、団粒の発達によって粗大な孔隙の量が多くなる傾向がある。とくに A 層・A₁ 層の試料でこの傾向が顕著である ($r=0.96^{**}$, $n=5$)。逆に A₂ 層の試料は団粒指数が高いのに孔隙率は低い。これらはいずれも弱度の団粒状構造が発達しているが、A 層・A₁ 層に比べ採取位置が深く、土壤が圧密されている可能性がある。また、B 層・B₁ 層試料のなかで団粒指数が 1.38 mm と高いのに孔隙率が 0.3279 m³ m⁻³ と低い試料があるが、これは 92 年伐採区の B 層試料である。この試料で団粒指数が高くなっている理由についてはすでに述べたが、小団粒が細根に絡まったような形態では、粗大な孔隙の量には影響しないと理解できる。次に団粒指数と全孔隙率との関係を見ると、正の相関が認められる。団粒指数とマトリックポテンシャル -6.2 kPa 以下に相当する孔隙率とにはとくに相関がみられないことから、団粒指数と全孔隙率との関係は -6.2 kPa 以上相当の孔隙率の影響を強く受けたものと推察される。以上のこ

とから、団粒の発達状態を団粒指数で表すことによって、層位によって異なるものの、団粒発達が、マトリックポテンシャル -6.2 kPa 以上に相当する粗大な孔隙の量の増加に関与し、これが全孔隙量にも影響していることが明らかになった。

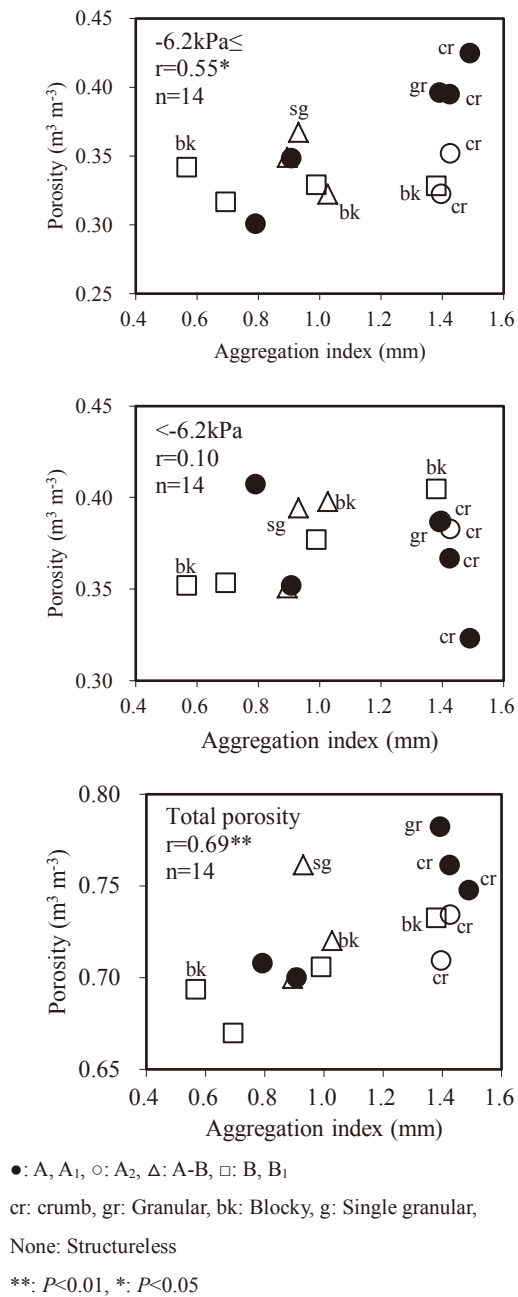
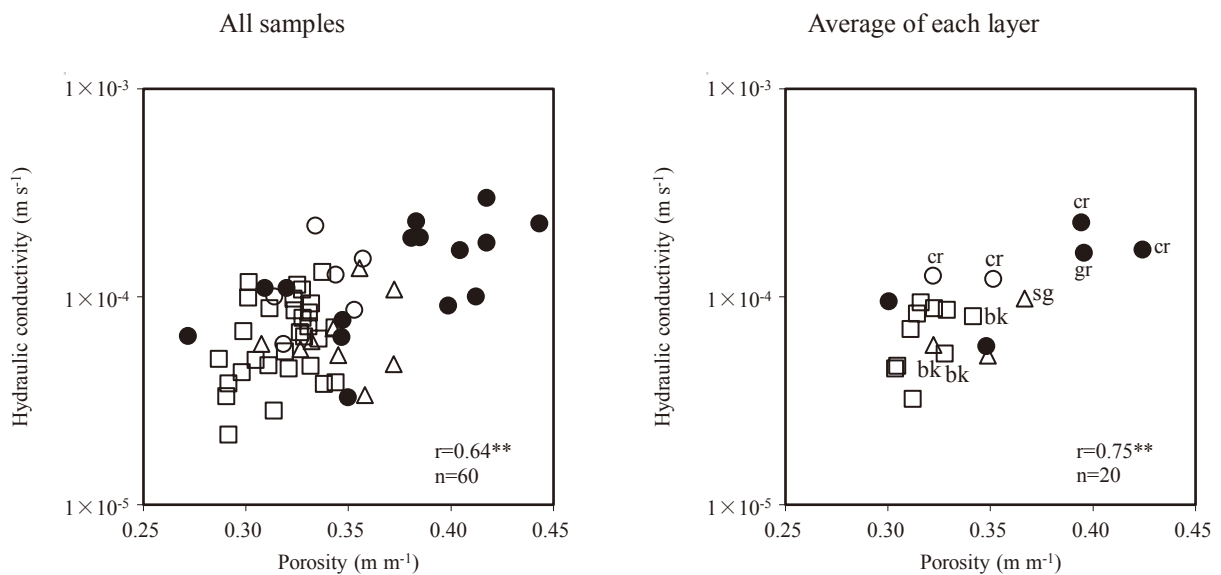


Fig. 2. 9. 団粒指数と孔隙率との関係
Relationship between aggregation index and porosity.

2.4.4 孔隙組成と飽和透水係数との関係

マトリックポテンシャル -6.2 kPa 以上 ($\text{pF } 1.8$ 以下) に相当する孔隙率と飽和透水係数との関係を Fig. 2.10 に示す。孔隙解析と飽和透水係数の測定は同一の不攪乱試料で行ったので、ここでは全試料の測定値を用いた散布図と層位ごとの平均値を用いた散布図の両者を示した。両者とも -6.2 kPa 以上の孔隙率が高ければ飽和透水係数が高くなるという傾向を示し、粗大な孔隙の量が透水性に影響することを示している。層位ごとの平均値では、飽和透水係数が $1 \times 10^{-4}\text{ m s}^{-1}$ より大きくなるのは団粒状構造と粒状構造のみとなり、構造の違いが透水性に影響することがわかる。 A_2 層試料は、孔隙率は低いが飽和透水係数は比較的高い。これら試料は団粒状構造が発達し団粒指数も高かったことから、団粒間のある特定の連続した孔隙が水移動の経路となっている可能性が考えられる。



●: A, A₁, ○: A₂, △: A-B, □: B, B₁

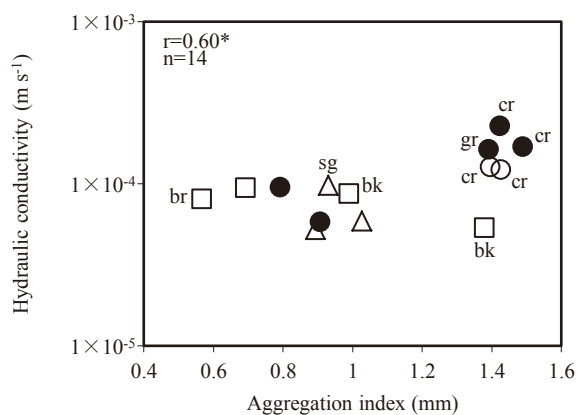
cr: crumb, gr: Granular, bk: Blocky, sg: Single granular, None: Structureless

** : $P < 0.01$

Fig. 2.10. 孔隙率と飽和透水係数との関係
Relationship between porosity and hydraulic conductivity.

2.4.5 団粒指数と飽和透水係数との関係

団粒指数と飽和透水係数との関連を Fig. 2. 11 に示す。92 年伐採地の B 層試料（団粒指数 1.38 mm，飽和透水係数 $5.33 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ ）を除くと団粒指数が高ければ飽和透水係数も高くなる傾向がある。団粒指数が高ければ粗大な孔隙の量が多くなることと，粗大な孔隙の量が多ければ透水性が高くなることはすでに述べてきた。この両者の関係から必然的に，団粒指数が高ければ飽和透水係数が高くなることが予測できるが，Fig. 2. 11 はこのことを明瞭に示している。土壌構造との関連についてみると，92 年伐採地の B 層試料を除くと，団粒状構造や粒状構造は団粒指数が高く透水性も高く，塊状構造・単粒状構造や，特に構造が発達していないものは団粒指数が低く透水性が低い。このように，構造の違いや団粒指数によって大きく 2 グループに区分できる。



- : A, A₁, ○: A₂, △: A-B, □: B, B₁
- cr: crumb, gr: Granular, bk: Blocky, sg: Single granular,
- None: Structureless
- *: $P < 0.05$

Fig. 2. 11. 団粒指数と飽和透水係数との関係
Relationship between aggregation index and hydraulic conductivity.

2.5 まとめ

本章では団粒の発達程度を定量的に示す方法として、団粒分析試験の結果をもとに得られる団粒指数に着目した。そして団粒指数と土壤構造との関連について検討し、構造の違いによって団粒指数の値が異なり、団粒状構造・粒状構造では団粒指数が高く、塊状構造・単粒状構造や、特に構造が発達していない場合には団粒指数が低いことを明らかにした。ただし、本研究の調査地から採取した試料では堅果状構造は部分的にしか発達しておらず、また細粒状構造やかべ状構造の発達はみられなかったため、堅果状構造・細粒状構造・かべ状構造についての情報は得られなかった。

さらに、団粒指数と孔隙組成・飽和透水係数との関連を検討し、団粒指数が高いと粗大な孔隙の量が多く透水性が高いという傾向を得た。このことは、団粒の発達により粗大な孔隙の量が増え、それによって透水性も高まることを示している。また土壤構造との関連では、団粒指数が高い、すなわち団粒の発達した団粒状構造や粒状構造で粗大な孔隙の量が多く透水性が高いことを示すことができた。

このように、本研究においては、団粒の発達程度を団粒指数として単一の物理量で示したことにより、団粒発達と土壤物理性との定量的関連をかなり明瞭に示すことができた。とくに鈹質土壤の最上層にあたる A 層・A₁ 層の試料では団粒指数とマトリックポテンシャル-6.2kPa 以上 (pF1.8 以下) に相当する孔隙率の間には極めて強い正の相関が認められた。今後、データ数を増やすなどの必要があるが、団粒指数を用いることによって、団粒発達の状態と他の物理量との関係を定式化する可能性も開かれたと考えられる。さらに、全炭素量と団粒指数との関係からは、森林伐採後に土壤表層部で機械的な団粒破壊が起った可能性が示された。このことから、団粒の発達程度を単一の物理量で表示することの意義は大きいと考えられる。またこのように、今回得られたデータのなかには、森林伐採の影響を受けたと推察されるものが含まれていたが、森林伐採が団粒発達や土壤物理性に及ぼす影響については、第 3 章における検討課題とする。

第3章 森林皆伐後の団粒破壊と土壌物理性変化

3.1 はじめに

第2章においては、ヒノキ林とヒノキ林伐採1~4年後の隣接した調査区から採取した土壌試料について、団粒分析試験と土壌物理性測定を行った結果について検討した。団粒分析試験の結果から団粒指数を求め、団粒の発達程度を定量的に評価した。その結果、団粒指数と粗大な孔隙 ($\geq -6.2\text{kPa}$) の量との間に有意な正の相関関係が認められた。さらに粗大な孔隙の量と飽和透水係数との間にも正の相関関係が認められ、団粒の発達によって粗大な孔隙の量が増え、透水性も高まることが定量的に示された。一般に、森林土壌は粗大な孔隙の量が多く、そのため浸透能や透水性が高いことが知られているが、第2章においては、このような森林土壌の水文的特徴が団粒の発達と深く関連することが定量的に示された。

粗大な孔隙の量が多く浸透・透水性が高いといった森林土壌の特性は、森林の洪水防止機能や渇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る、分析手法の検討が必要だとしている。また、前述したように、第2章においては、ヒノキ林とヒノキ林伐採1～4年後の隣接した調査区から採取した土壌試料について、団粒分析試験と土壌物理性測定の結果について検討した。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が明らかになった。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。そこで本章では、第2章での調査対象地のなかのヒノキ林伐採1年後の調査区（93年伐採区）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。

3.2 方法

3.2.1 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（現信州大学農学部アルプス圏フィールド科学教育研究センター手良沢山ステーション演習林）野田ヶ沢流域内の北西向き斜面である（Fig. 3.1）。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0.3 haずつ皆伐され、それぞれ伐採翌年にヒノキが植栽された。第2章において述べたように、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（93年伐採区）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（角閃石黒雲母トナール岩）の分布地帯で（牧本ら 1996）、標高は約1,080 m、傾斜は約36°である。皆伐前のヒノキ林は平均樹高18.7 m、平均胸高直径18.9 cm、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。

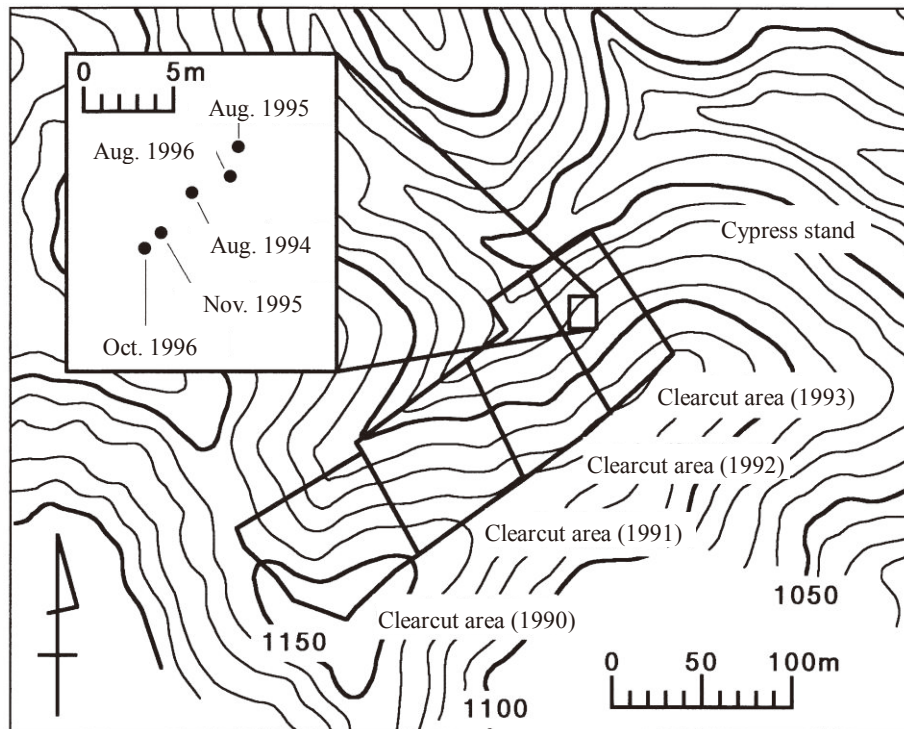


Fig. 3. 1. 調査対象地
Study site.

3.2.2 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（伐採9カ月後）と、1995年8月（同21カ月後）、11月（同24カ月後）、1996年8月（同33カ月後）、10月（同35カ月後）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70 cm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B₁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B₁層、B₂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B₂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。2 mm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 μmふるいを通過させ測定に供した。孔隙解析は100 mL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, 155.3 kPa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、定水位法による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100 mL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）を一部改変した方法により行った（第2章参照）。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、9.5 mmふるいを通過させた。9.5 mmふるい通過分を2, 1, 0.5, 0.25, 0.1 mm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A₁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、第 2 章において団粒発達程度の定量的指標として有効であることが確認された団粒指数 (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の詳細は第 2 章において述べた。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、2 mm 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、2 mm ふるい残留分に対する団粒百分率とは、2 mm 以上の耐水性団粒の質量から 2 mm 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・A₁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 Dunnett 法による多重比較検定 (永田・吉田 1997) を行った。Dunnett 法は 1 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・A₁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) は第 2 章で得られたデータを用

い、検討を行った。

3.3 結果と考察

3.3.1 土壌断面

各調査断面の模式図を Fig. 3.2 に示す。伐採翌年の 1994 年 8 月には A₀, A₁, A₂, A-B, B という層位構成だったが, 1995 年 8 月以降は A₁, A₂ 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 A₁ 層, A₂ 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に由来する主として F 層と H 層からなる A₀ 層が認められた。これらの A₀ 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 A₀ 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 A₁ 層の攪乱は比較的軽度であったと考えられる。

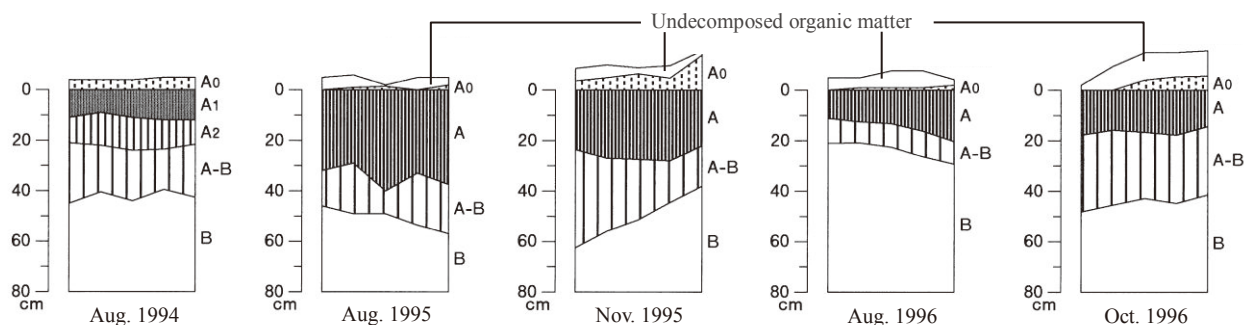


Fig. 3.2. 土壤断面
Soil Profiles.

3.3.2 土壤構造

各調査断面における土壤構造を Table 3.1 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（副次構造）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 A₁ 層と A₂ 層にそれぞれ中度和弱度の団粒状構造が発達し、A₁ 層の一部に中程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、土壤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的特徴から中程度の堅果状構造と判断した。A-B 層では、1994 年 8 月には中程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程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。このような土壤構造の変化について宮川ら (1988) は、皆伐跡地の表層土壤は土壤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。

Table 3. 1. 各土壌断面における土壌構造と全炭素量・全窒素量
Soil structure, total carbon and total nitrogen of each soil profile.

Soil profile	Horizon	Primary structure	Secondary structure	Soil depth (cm)	Total carbon (g kg ⁻¹)	Total nitrogen (g kg ⁻¹)	C/N ratio
Aug. 1994	A ₁	Crumb (MO)	Granular (MO)	0.0-5.1	59.7	4.50	13.3
	A ₂	Crumb (WE)		11.6-16.7	36.6	2.93	12.5
	A-B	Blocky (MO)		22.4-27.5	30.4	2.47	12.3
	B	Blocky (WE)		50.0-55.1	17.0	1.41	12.0
Aug. 1995	A	Crumb (WE)	Granular (WE)	0.0-5.1	64.8	4.55	14.2
	A-B	Structureless		34.3-39.4	35.9	2.89	12.4
	B	Structureless		50.0-55.1	26.5	2.28	11.7
Dec. 1995	A	Structureless	Nutty (WE)	0.0-5.1	48.4	3.66	13.2
	A-B	Structureless		25.6-30.7	28.2	2.22	12.7
	B	Structureless		56.0-61.1	18.6	1.53	12.2
Aug. 1996	A	Nutty (MO)		0.0-5.1	74.7	5.43	13.8
	A-B	Nutty (MO)	Blocky (WE)	14.7-19.8	46.0	3.63	12.7
	B	Blocky (WE)		24.0-29.1	29.3	2.33	12.6
Oct. 1996	A	Structureless	Nutty (WE)	0.0-5.1	54.3	4.19	13.0
	A-B	Nutty (WE)		16.4-21.5	36.0	2.74	13.1
	B	Structureless		50.0-55.1	17.5	1.45	12.0

3.3.3 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 Table 3.1 に示す。全炭素量・全窒素量は、A・A₁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_D型土壌では全炭素量が漸減し、B_B型、P_{DII}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；小林 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。

3.3.4 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 Fig. 3.3 に示す。また Fig. 3.3 には Dunnett 法による多重比較検定の結果も示した。

A・A₁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

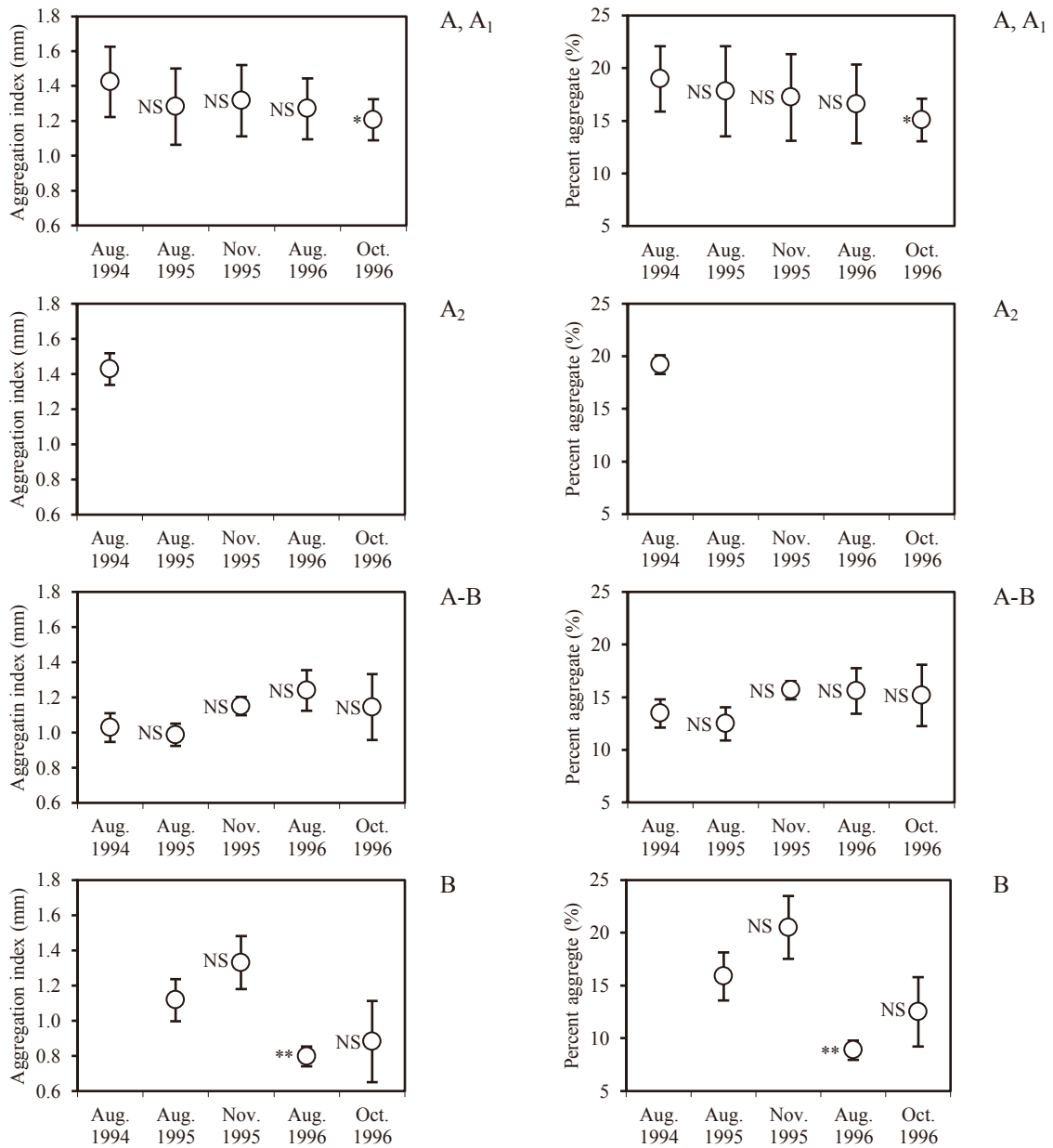
構造の発達は見られなかった。このように、団粒指数と団粒百分率は伐採に伴う団粒状構造の発達程度の低下と消失に伴って漸減した。また、1996年8月には層全体に中度の堅果状構造が発達していたが、これは堅果状構造としては小型で、分散前ふるい分けでも大きな団粒が少ないことが認められ、団粒指数や団粒百分率には反映されなかったと考えられる。団粒百分率の低下は2 mm以上の団粒の減少、すなわち小団粒化を意味する。この小団粒化に伴う団粒の粒径組成の変化により、団粒の発達程度を表す団粒指数も低下したと考えられる。以上のことから、A・A₁層では伐採後の団粒破壊により小団粒化が進んだと考えられる。さらに、団粒状構造の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・A₁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。

A₂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A₁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・A₁層やA₂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・A₁層やA₂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みると、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のにもかかわらず、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・A₁ 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。



Bars indicate standard deviation.

**: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$, NS: Not significant (Dunnett's multiple comparison post hoc test).

Fig. 3.3. 各調査断面の団粒指数と団粒百分率
Aggregation index and percent aggregate of each soil profile.

3.3.5 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 Fig. 3.4 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・A₁層では, マトリックポテンシャル -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, マトリックポテンシャル -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マトリックポテンシャル -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, とくにマトリックポテンシャル -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, 全体としてマトリックポテンシャル -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・A₁層では団粒指数・団粒百分率は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(Fig. 3.5, 3.6), 団粒指数と各孔隙率との間には有意な相関はないが, 団粒百分率とマトリックポテンシャル -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

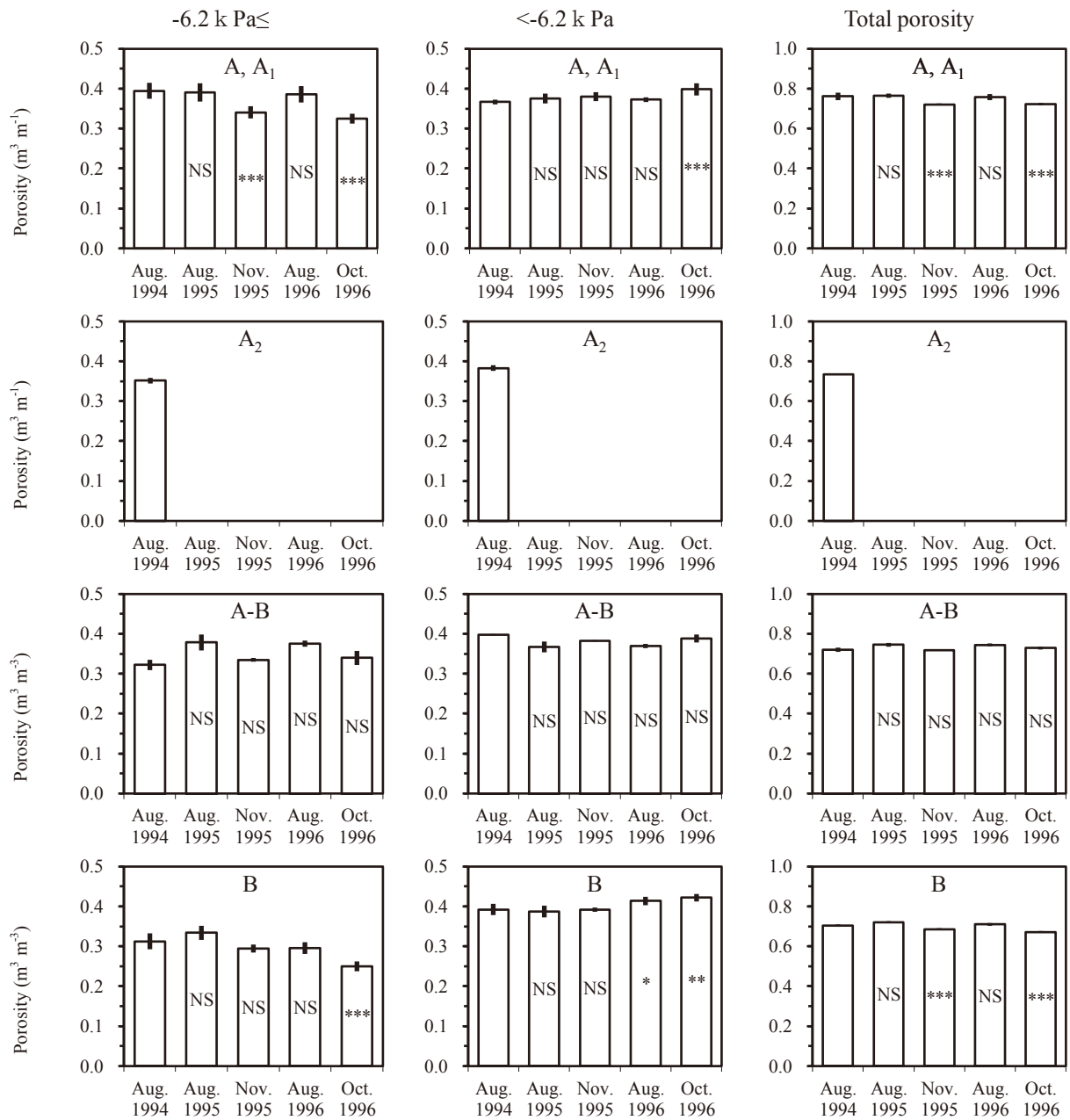
量が減少し、逆に微細な孔隙の量が増加すると考えられる。したがって、伐採後に小団粒化が進んだことによりマトリックポテンシャル -6.2 kPa 未満相当の孔隙率が増大したと考えられる。さらに団粒百分率とマトリックポテンシャル -6.2 kPa 以上相当の孔隙率については、1996年8月のデータ（団粒百分率16.6%、孔隙率38.6%）を除くと団粒百分率が低下すると -6.2 kPa 以上相当の孔隙率も低下し、小団粒化の進行と -6.2 kPa 以上相当の孔隙率の低下とに対応が認められる。また、この団粒百分率とマトリックポテンシャル -6.2 kPa 以上相当の孔隙率との関係からも、1996年8月の孔隙率が過大であると考えられる。以上のことから、マトリックポテンシャル -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、マトリックポテンシャル -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時点においてはマトリックポテンシャル -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A₂層では、マトリックポテンシャル -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。

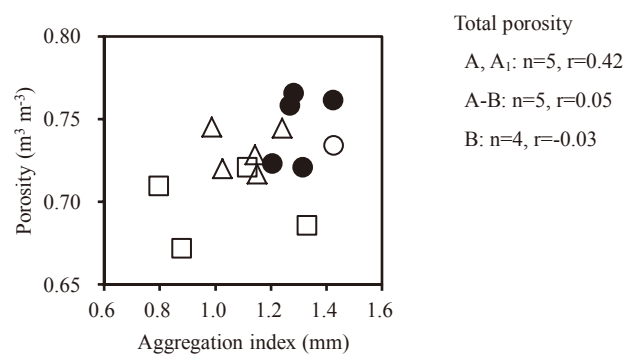
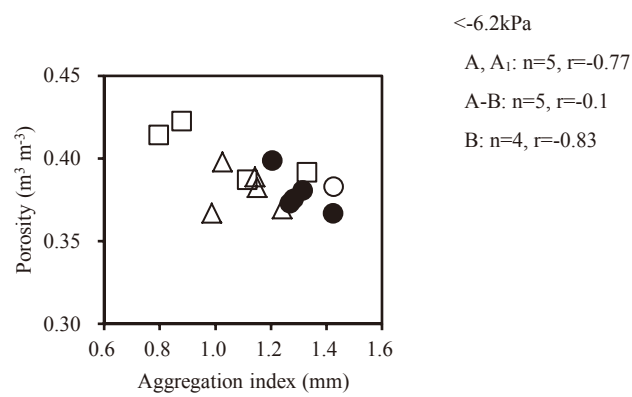
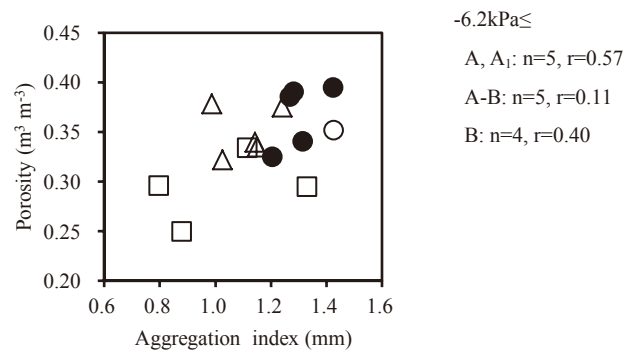
B層では、マトリックポテンシャル -6.2 kPa 以上相当の孔隙率は1996年10月で最も低く、危険率1%で有意差があった。マトリックポテンシャル -6.2 kPa 未満相当の孔隙率は1996年8月と1996年10月で高く、それぞれ危険率10%と5%で有意差があった。また、全孔隙量は1995年11月と1996年10月で高い値となり、危険率1%で有意差があった。このようにB層では、伐採後の経過時間が長いほど各孔隙率で有意差が認められるようになった。A層では土壌構造の変化と小団粒化によって孔隙組成の変化が起こったと考えら

れたが、B層では伐採による土壌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。



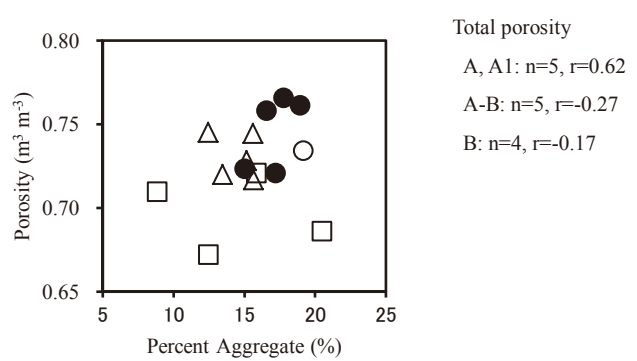
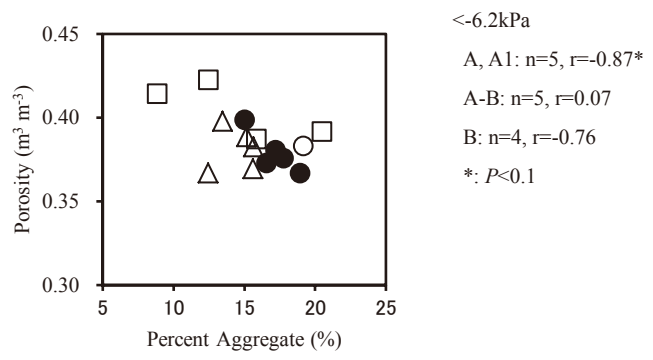
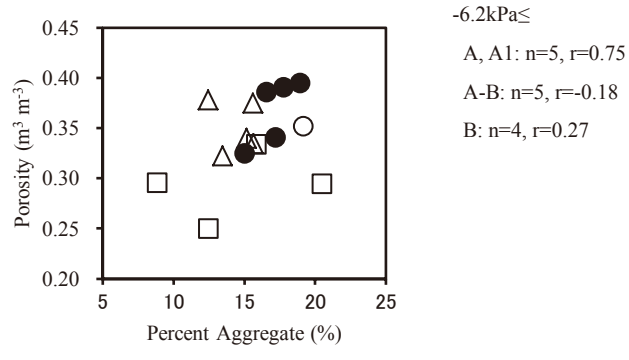
Bars indicate standard deviation. ***: $P < 0.01$, **: $P < 0.05$, *: $P < 0.1$, NS: Not significant (Dunnett's multiple comparison post hoc test).

Fig. 3. 4. 各調査区の孔隙組成
Soil pore composition of each plot.



●: A, A₁, ○: A₂, △: A-B, □: B

Fig. 3. 5. 団粒指数と孔隙率との関係
 Relationship between aggregation index and porosity.



●: A, A₁, ○: A₂, △: A-B, □: B *: P<0.05

Fig. 3. 6. 団粒百分率と孔隙率との関係
 Relationship between percent aggregate and porosity.

3.3.6 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 Fig. 3.7 に示す。

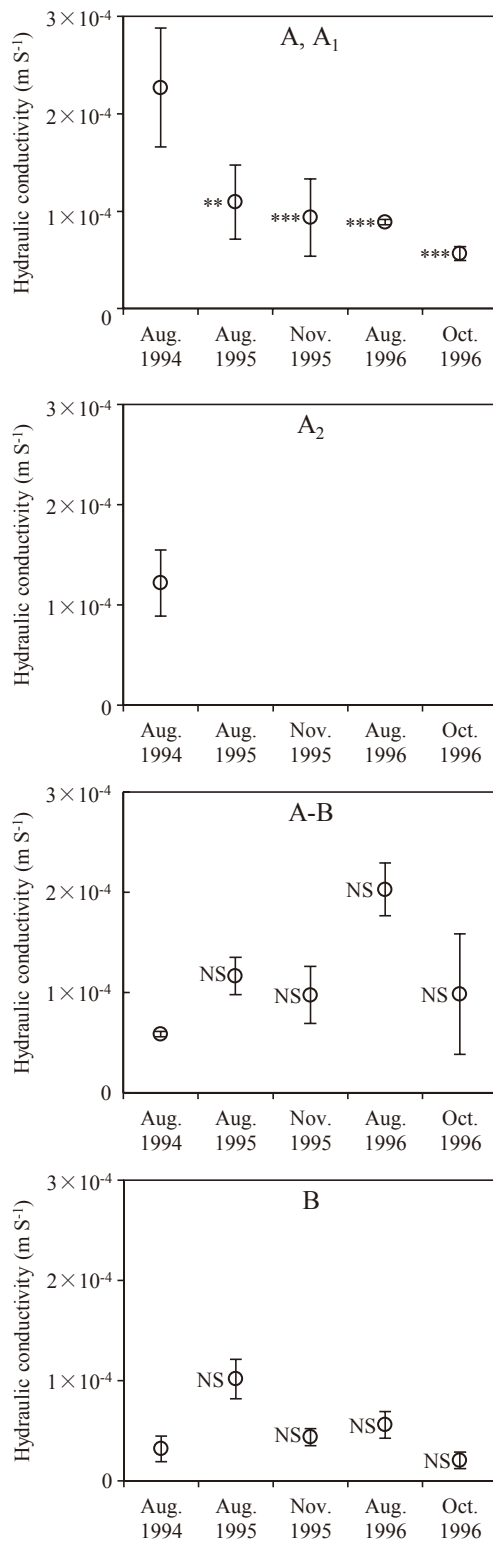
A・A₁層では、飽和透水係数の平均値は1994年8月で $2.27 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ と最も高く、1995年8月以降は漸減してばらつきも小さくなり有意に低い値となった。1996年10月には飽和透水係数は $5.66 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ と1994年8月に比べ1オーダー程度低い値となり、この値は後述の各調査断面のB層と同程度であった。以上のように、飽和透水係数は伐採後の経過時間が長くなるにしたがい低下した。伐採に伴うA層土壌の透水性の低下については山谷(1962)や小林(1982)も報告しており、本調査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。森林土壌の透水性には土壌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壌では透水性が高く、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壌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、土壌構造や団粒指数・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・A₁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・A₁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、伐採後の土壌乾燥の影響により、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壌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(Fig. 3.8, 3.9)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月を除くとマトリックポテンシャル -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見ると (Fig. 3.10), マトリックポテンシャル -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、相関係数は有意ではないが、1996年8月 (孔隙率 38.6%, 飽和透水係数 $8.87 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$) 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・A₁層における飽和透水係数の低下は、土壌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、伐採後の土壌構造の変化と、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・A₁層では、伐採後の土壌構造の変化と、団粒破壊に伴う小団粒化により、マトリックポテンシャル -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こり、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A₂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層では土壌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・A₁層より低く、概ね 10^{-5} m s^{-1} 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層では土壌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。



Bars indicate standard deviation.

***: $P < 0.01$, **: $P < 0.05$, NS: Not significant (Dunnett's multiple comparison post hoc test).

Fig. 3. 7. 各調査断面の飽和透水係数
Hydraulic conductivity of each soil profile.

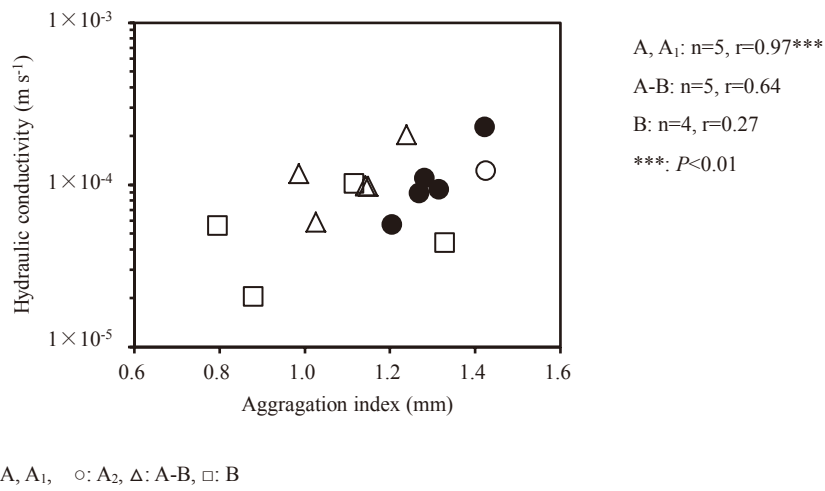


Fig. 3. 8. 団粒指数と飽和透水係数との関係
 Relationship between aggregation index and hydraulic conductivity.

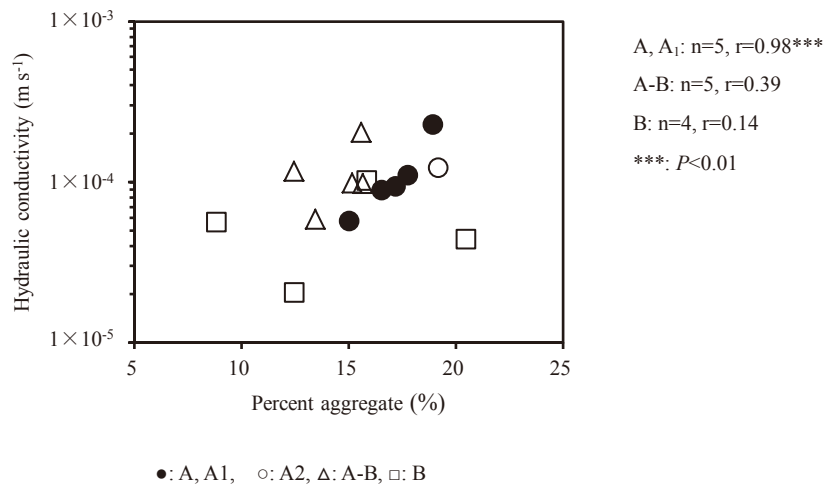
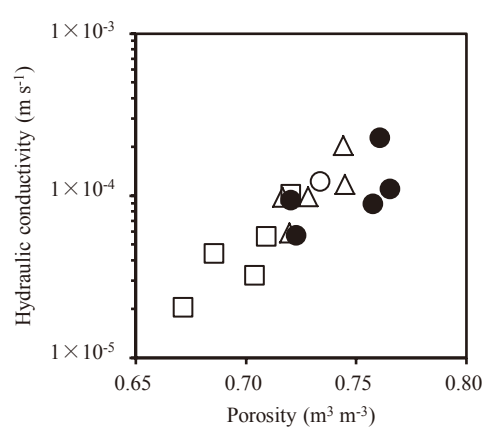
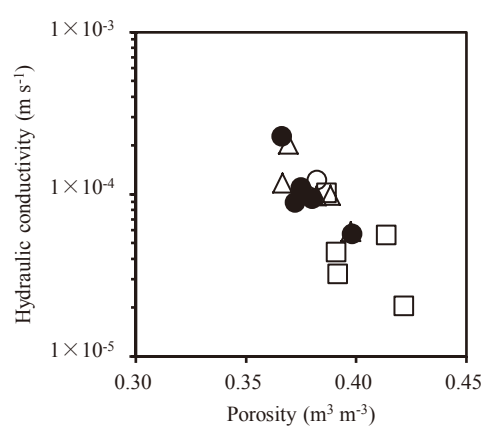
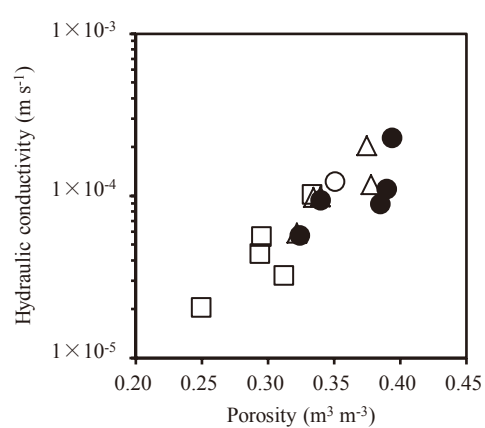


Fig. 3. 9. 団粒百分率と飽和透水係数との関係
 Relationship between percent aggregate and hydraulic conductivity.



●: A, A₁, ○: A₂, △: A-B, □: B

Fig. 3. 10. 孔隙率と飽和透水係数との関係
Relationship between porosity and hydraulic conductivity.

3.4 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A₁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こり、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、本研究においては鈹質土壤の最上層にあたるA層やA₁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。

第4章 乾燥と湿潤が繰り返される水分条件下における森林土壌の団粒破壊

4.1 はじめに

第3章では、ヒノキ林皆伐—新植地において伐採1~3年後の土壌変化を追跡調査し、その結果、A・A₁層でマトリックポテンシャル-6.2 kPa以上相当の粗大な孔隙が減少する一方で-6.2 kPa未満相当の微細な孔隙が増加し、これに伴って透水性が低下したことを明らかにした。また、A・A₁層では伐採後に乾燥の影響により団粒構造が消失して堅果状構造が出現したことが明らかとなり、さらに、団粒分析試験によって団粒指数と団粒百分率を求め、A・A₁層では伐採後に団粒の破壊により小団粒化が進んだことを示した。そして、このような土壌構造の変化と団粒破壊による小団粒化が孔隙組成と透水性の変化をもたらしたと結論付けた。

第3章において明らかにされたような森林伐採に伴う団粒破壊について、その原因としては、まず、伐採・搬出作業に伴う地表面の攪乱があげられる(小林 1982;八木 1997)。さらに、伐採後の土壌環境変化によって、団粒破壊が長期的に進行することも指摘されている。伐採による樹冠部の消失は、土壌への有機物供給量の減少と、日射量増加による地温上昇をもたらし、これによって土壌有機物の供給と分解の動的平衡が変化し、その結果として、団粒形成に深く関わっている腐植の量が減少し団粒が崩壊するとされる(小林 1982;八木 1997)。また、通常の林地では下層植生や落葉層が雨滴の衝撃力を緩和させているが(塚本 1998)、伐採後にこれらが失われた場合には、雨滴衝撃によって団粒などの土壌構造の破壊が進行することが指摘されている(中野 1973;小林 1982)。一方で、伐採によって土壌表層部の乾燥化が進むことと、これが土壌構造の変化や団粒破壊と関連することを示した事例がいくつかある。荒木ら(2002)はヒノキ林の皆伐地や間伐林、対照林において表層土壌のマトリックポテンシャルを測定し、皆伐地において最も土壌が乾燥する傾向があることを明らかにしている。浦川ら(2005)は、スギ・ヒノキ人工林小流域における斜面下部伐採によって、下層土壌(30~60 cm深)では体積含水率が増加するも

の、表層土壌（0～30 cm 深）では減少したことを明らかにした。富沢ら（2005）は、ヒノキ林皆伐—新植地と隣接するヒノキ林において土壌水分張力の測定を行い、伐採 5 年後程度までは伐採—新植地においてヒノキ林よりも表層土壌の乾燥が進み、乾燥・湿潤の変動が大きいことを明らかにしている。一方、第 3 章で述べたように、この伐採—新植地においては土壌調査等が行われ、伐採後に乾燥の影響により団粒状構造が消失して堅果状構造が出現するとともに、団粒の破壊により小団粒化が進んだことが示されている。また、宮川ら（1987）は、隣接するヒノキ複層林やヒノキ林皆伐地などで土壌を調査し、皆伐地の土壌最表層部において、乾燥が進み生成されたと考えられる粉状ないし細粒状の構造をもつ乾燥した薄層が認められたこと、A 層の土壌構造が、ヒノキ複層林では団粒状構造および塊状構造であるのに対し、皆伐地では乾性型の堅果状構造が支配的になることを明らかにしている。さらに宮川ら（1988）は、皆伐後約 8 年経過したヒノキ林皆伐—新植地において、最表層に伐採時に生じたとみられる粉状および堅果状構造の粗しょうな薄い A₁ 層が形成され、A₂ 層と A₃ 層には乾性型の土壌構造が出現していたことを明らかにした。そして、隣接するヒノキ複層林とヒノキ—齊林では A₁ 層が団粒状構造、A₂ 層が堅果状構造であったことから、皆伐跡地の表層土壌は、一時的にしる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。以上のように、伐採後には土壌表層部において、土壌構造が乾性型に変化するほど乾燥が進むと考えられる。しかし、我が国のような温暖湿潤気候条件下では、通常は一定の間隔で降水がもたらされ、乾燥状態が恒常的に保たれることはない。伐採地の表層土壌は、通常の林地よりも乾燥が進んだ状態で降雨によって湿潤化し、乾燥と湿潤を繰り返すことが考えられる。この一事例として、前述の富沢ら（2005）の報告があげられる。

乾燥した土壌が急激に湿潤化した場合、スレーキングによる団粒破壊が起こることが知られている。スレーキングとは、乾燥が進んだ土壌に急激に水分が加わったときに団粒が破壊される現象で（八幡 1975；宮崎 2000）、畑地土壌などを対象に数多くの研究事例がある（例えば、Yoder 1936；Emerson 1954；Chan and Mullins 1994；Tanaka 1997；Chenu et al.

2000 ; Cosentino et al. 2006 ; Zaher and Caron 2007)。宮川ら (1987, 1988) が伐採地の表層土壌において認めた粉状あるいは細粒状の乾燥した薄層の出現や、第 2 章において明らかにされた伐採後の小団粒化の進行も、スレーキングによる団粒破壊が一因となった可能性がある。また、雨滴衝撃に伴う団粒破壊に関しても、降雨開始時の土壌水分条件によってはスレーキング作用の影響が大きいことが指摘されている (Panabokke and Quirk 1956 ; Bresson and Cadot 1992 ; 田中 1995)。国内の森林土壌について団粒のスレーキング特性等を検討した事例としては、北海道内の褐色森林土などを対象とした小川 (1981) や、山梨県下の褐色森林土など対象にした渡辺ら (1982) の研究があげられる。しかし、国内の森林土壌を対象にして、乾燥と湿潤を繰り返す野外環境下で団粒にどのような変化が起こるのかを検討した事例はほとんどない。そこで本研究においては、乾燥と湿潤を繰り返す環境下における森林土壌の団粒の変化について明らかにすることを目的とし、団粒試料を用いた室内での培養実験を行った。

4.2 方法

4.2.1 試料採取地の概要

信州大学農学部アルプス圏フィールド科学教育研究センター手良沢山ステーション演習林内のヒノキ人工林と落葉広葉樹を主とした林分 (以下、それぞれヒノキ林、広葉樹林とする) から実験に用いた土壌試料を採取した。両林分は隣接しており、基岩は領家帯の高遠花崗岩 (角閃石黒雲母トナール岩) である (牧本ら 1996)。ヒノキ林は標高 1,018 m, 傾斜 28°, 斜面方位 SW であり、広葉樹林は標高 1,020 m, 傾斜 34°, 斜面方位 W である。ヒノキ林はヒノキの単層林で、平均樹高 16.6 m, 平均胸高直径 23.7 cm, 立木密度 1,019 本/ha であり、林床にはスズタケが侵入している。広葉樹林は、平均樹高 5.3 m, 平均胸高直径 8.8 cm, 立木密度は 1,990 本/ha である。樹高 10 m 以上の高木層を優占しているのはコナラで、ミズキ、クリ、アカマツなどが点在する。高木層全体では平均樹高 14.7 m, 平均胸高直径 34.6 cm, 立木密度 332 本/ha で、広葉樹のみでは平均樹高 14.5 m, 平均胸高直径

21.6 cm, 立木密度 241 本/ha である。一方, 樹高 10 m 未満の低木層はキブシ, ツリバナ, ヤマザクラ, クロモジなどの落葉広葉樹によって構成され, 林床にはスズタケが侵入している。土壌型は両林分とも適潤性褐色森林土 (B_D) で, A 層の厚さはヒノキ林では約 16 cm, 広葉樹林では約 17 cm である。両林分とも A 層では団粒状構造が発達している。

4.2.2 団粒試料の採取と調整

ヒノキ林, 広葉樹林それぞれにおいて, 土壌の攪乱がない場所を選定し, A₀ 層を除去して A 層の深さ 0~5 cm の土壌を採取した。採取した土壌試料は風乾させた後, 5.6, 4.75, 4.0, 3.35, 2.8 mm の組ふるいで電磁式ふるい振とう機 (Retsch 社, AS200 BASIC) を用いて 30 秒間ふるい分け, 5.6 mm 通過 4.75 mm 残留, 4.75 mm 通過 4.0 mm 残留, 3.35 mm 通過 2.8 mm 残留の画分を得た。それぞれの画分から団粒を 20 個ずつ抽出してその平均質量を求め, これをもとに培養実験等に用いる団粒試料 1 個あたりの質量範囲を決定した (Table 4.1)。この基準に従ってそれぞれの画分から団粒試料を選定し, それぞれ 5 mm 団粒試料 (4.75~5.6 mm), 4 mm 団粒試料 (4.0~4.75mm), 3 mm 団粒試料 (2.8~3.35 mm) とした。以下, これらを樹種別にヒノキ林試料 (H), 広葉樹林試料 (B) とする。

Table 4.1. 団粒試料の粒径と質量
Size and mass of aggregate samples.

Aggregate samples		Size (mm)	Mass (g)
Japanese cypress site	H3	2.80-3.35	0.014-0.034
	H4	4.00-4.75	0.035-0.075
	H5	4.75-5.60	0.070-0.110
Broad leaves site	B3	2.80-3.35	0.014-0.034
	B4	4.00-4.75	0.043-0.083
	B5	4.75-5.60	0.085-0.125

4.2.3 培養実験

内径 11.3 cm, 高さ 4.0 cm の金属製の試料円筒 (大起理化工業, DIK-1506) の底面に網蓋 (目開き 1 mm 金網) を取り付けて濾紙 (東洋濾紙 No. 1) を敷き, 石英砂 (80~150 mesh) を充填した (高さ 2 cm, 質量 295.7 g)。さらにその上に濾紙 (東洋濾紙 No. 1) を敷き, そこに同一粒径の団粒試料のみを等間隔に並べて置き, これを培養試料とした。1 つの培養試料について, 3 mm 団粒試料は 30 個ずつ, 4 mm 団粒試料と 5 mm 団粒試料は 20 個ずつとした。培養試料はプラスチック製バット (内寸 W39 cm, D26 cm, H6.5 cm) の中に 6 個ずつ並べ, 温度 30°C, 湿度 75% に設定した恒温恒湿器内で 14 日間培養した。培養中の水分条件は, 乾燥状態を保つもの (水分条件 D), 乾燥と湿潤を繰り返すもの (水分条件 DW), 湿潤状態を保つもの (水分条件 W) の 3 つとした。水分条件 D では風乾状態のまま培養を行った。水分条件 DW では, 1 日おき (培養開始日と培養開始後 2, 4, 6, 8, 10, 12 日目) に団粒試料に蒸留水を給水した。1 つの団粒試料に対する 1 回の給水量は, 3 mm 団粒試料では 60 μ L, 4 mm 団粒試料と 5 mm 団粒試料では 80 μ L とした。なお, 給水量は予備実験により決定し, 後述の給水操作により風乾状態の団粒試料がほぼ飽和し, それ以上水分を吸収しなくなる量とした。決定した給水量は, 団粒を球体と仮定した場合の体積と比較すると, いずれの団粒径でも団粒試料が飽和するのに十分な量になっていた。給水には分注量を 20 μ L に設定した 0.5 mL シリンジ (ニチヨー, 00-NS-S) 装着のディスペンサー (ニチヨー, 00-NSTP) を用い, シリンジ先端に生じた水滴を団粒試料に衝撃が加わらないよう接触させて給水した。水分条件 W では, プラスチック製バットの底に水深 1 cm となるように蒸留水を補給し, 試料円筒内の石英砂が飽和に近い状態を保ち, 団粒試料が常に湿潤な状態となるようにし, さらに, 水分条件 DW と同様の給水操作を行った。

ヒノキ林, 広葉樹林それぞれの 3 mm, 4 mm, 5 mm 団粒試料で, 上記の 3 つの水分条件 (D・DW・W) を設定した。したがって, 培養条件は樹種別 (2), 団粒径別 (3), 水分条件別 (3) の組み合わせで合計 18 となり, 各培養条件につき培養試料を 6 個 (水分条件 D) または 7 個 (水分条件 DW・W) 用意した (培養試料は合計 120 個)。以下では, 各培養条

件を樹種・団粒径・水分条件を表す記号の組み合わせによって、培養条件 H3D（ヒノキ林試料・3 mm 団粒・乾燥条件）のように表記する。

4.2.4 団粒試料の含水比測定

水分条件 DW と W については、培養 2 日目の給水直後に培養試料 1 個ずつを団粒試料の含水比測定に供した（供試培養試料は合計 12 個）。各培養試料の団粒試料（3 mm 団粒試料は 30 個、4 mm 団粒試料と 5 mm 団粒試料は 20 個）をほぼ 3 等分し、それぞれを 110°C で 24 時間乾燥させて含水比を求め、培養試料ごとの 3 つの測定値の平均を給水後含水比とした。さらにすべての水分条件で、14 日間の培養終了直後に培養試料 1 個ずつについて給水直後と同様に団粒試料の含水比を測定し、これを給水前含水比とした（供試培養試料は合計 18 個）。

4.2.5 ふるい分け試験

14 日間の培養を終えた培養試料は、速やかに 35°C に設定した恒温器内に静置して乾燥させ、風乾状態となつてからふるい分け試験を行った。18 の培養条件それぞれについて培養試料 5 つずつ（5 繰り返し）ふるい分け試験を行った（供試培養試料は合計 90 個）。5 mm 団粒試料に対しては 4.75, 4.0, 2.0, 1.0 mm の組ふるい、4 mm 団粒試料では 4.0, 2.0, 1.0 mm の組ふるい、3 mm 団粒試料では 2.8, 2.0, 1.0 mm の組ふるいを用い、振動を加えずにふるいを通過させて、各ふるいに残留した試料と 1.0 mm ふるいを通過した試料の質量を求めた。

4.2.6 ふるい分け試験の結果の整理と統計処理

各ふるいに残留した試料の全試料に占める質量割合を求め、それぞれ 4.75 mm 残留率、4.0 mm 残留率、2.8 mm 残留率、2.0 mm 残留率、1.0 mm 残留率とした。また、1.0 mm ふるいを通過した試料の質量割合を 1.0 mm 通過率とした。5 mm, 4 mm, 3 mm の各団粒試

料はそれぞれ 4.75, 4.0, 2.8 mm のふるいに残留したものの中から抽出している。したがって、培養中もしくはその後のふるい分け操作等で団粒試料が破壊されなかった場合には、これらのふるいの残留率は 100%を示し、逆に破壊が進むほどより低い値となる。そこで、5 mm 団粒試料では 4.75 mm 残留率（以下、5 mm 団粒残留率）、4 mm 団粒試料では 4.0 mm 残留率（以下、4 mm 団粒残留率）、3 mm 団粒試料では 2.8 mm 残留率（以下、3 mm 団粒残留率）によって団粒の破壊程度を評価することとした。このとき、水分条件 D の残留率を対照群（基準群）として水分条件 DW と W の残留率を比較することによって、培養期間以外の実験操作に伴う団粒破壊の影響を排除し、培養中の水分条件の違いによる団粒破壊を評価できる。そこで、ヒノキ林試料、広葉樹林試料それぞれについて、5 mm 団粒残留率、4 mm 団粒残留率、3 mm 団粒残留率に対して水分条件 D を対照群とした Dunnett 検定を行った。Dunnett 検定は一つの対照群と他の群との対比較を同時に行うものである（永田・吉田 1997）。

また、ふるい分け試験の結果をもとに平均質量直径を求め、培養による粒径組成の変化を検討した。平均質量直径とは、ふるい分け試験により得られた団粒の粒径分布をもとにした質量で重み付けされた平均直径である（van Bavel 1949）。なお、第 2 章、第 3 章においては団粒発達程度の指標として団粒指数を用いたが、本章における培養実験では、団粒試料の粒径範囲が粒径ごと調整されているため、団粒指数ではなく平均質量直径で粒径組成変化の検討を行うこととした。平均質量直径についても団粒残留率と同様に水分条件 D を対照群とした Dunnett 検定を行った。なお、培養実験に用いた団粒試料の平均質量直径は、5 mm 団粒試料（4.75～5.6 mm）で 5.18 mm、4 mm 団粒試料（4.0～4.75 mm）で 4.38 mm、3 mm 団粒試料（2.8～3.35 mm）で 3.08 mm である。

また、団粒試料の粒径範囲（最大粒径と最小粒径の差）は 5 mm 団粒試料で 0.85 mm、4 mm 団粒試料で 0.75 mm、3 mm 団粒試料で 0.55 mm であり、粒径ごとに異なっている。そのため、各粒径の団粒残留率には粒径範囲の差異が反映されることが予想される。しかし、その影響を定量的に把握することは困難である。また、団粒残留率の値は平均質量直径の計

算に用いられることから、粒径間での団粒試料の粒径範囲の差異は、平均質量直径にも反映される。したがって、粒径が異なる団粒試料の団粒残留率や平均質量直径を比較する際には、これらの数値の直接比較だけでなく、それぞれの団粒試料の粒径範囲が異なっていることを前提とした考察が必要であると考えられる。そこで、異なる粒径間での団粒残留率や平均質量直径の比較については、上述の Dunnett 検定の結果に基づいた考察も行うこととした。

さらに、樹種の違いによって団粒の破壊程度に差があるのかをみるために、同一の団粒径、同一の水分条件で、ヒノキ林試料と広葉樹林試料の 5 mm 団粒残留率、4 mm 団粒残留率、3 mm 団粒残留率、平均質量直径に対して *t* 検定を行った。

4.2.7 全炭素・全窒素量の測定

有機物含有量と団粒の安定度との関連を検討するため、団粒試料の全炭素・全窒素量の測定を行った。全炭素・全窒素量の測定には CN コーダー（柳本 MT-500）を用いた。ヒノキ林試料、広葉樹林試料それぞれの各粒径の団粒試料を軽く解きほぐし、2.0 mm のふるいを通したのから植物根を取り除き、粉碎したものを測定に供した。

4.3 結果

4.3.1 団粒試料の含水比

団粒試料の含水比測定結果を樹種別に Fig. 4. 1, 4. 2 に示す。水分条件 D では給水前含水比がヒノキ林試料で 0.0531~0.0626 kg kg⁻¹、広葉樹林試料で 0.0472~0.0552 kg kg⁻¹ となり、ともに低い値を示した。水分条件 D では給水操作を行っていないので、培養中は常に乾燥状態が保たれたと考えられる。水分条件 DW では、ヒノキ林試料の給水前含水比が 0.0671~0.0943 kg kg⁻¹、給水後含水比が 0.413~0.450 kg kg⁻¹、広葉樹林試料では給水前含水比が 0.0514~0.0639 kg kg⁻¹、給水後含水比が 0.303~0.367 kg kg⁻¹ となった。このように水分条件 DW では給水により急激な含水比の変化が起こっており、培養中に団粒試料が乾燥

と湿潤を繰り返していたことがわかる。水分条件 W では、ヒノキ林試料の給水前含水比が $0.557\sim 0.684\text{ kg kg}^{-1}$ ，給水後含水比が $0.664\sim 0.687\text{ kg kg}^{-1}$ ，広葉樹林試料の給水前含水比が $0.501\sim 0.586\text{ kg kg}^{-1}$ ，給水後含水比が $0.462\sim 0.616\text{ kg kg}^{-1}$ となり，飽和させた石英砂上で培養したことにより，団粒試料が常に湿潤状態を保っていたことがわかる。また，すべての水分条件において，ヒノキ林試料，広葉樹試料ともに粒径の違いによる傾向は認められなかった。以上のように，水分条件 D は培養期間を通して乾燥状態を保ち，水分条件 W は湿潤状態を保った。その一方で，水分条件 DW は給水直前には乾燥していたが，給水よって湿潤化し，培養期間を通して乾燥と湿潤を繰り返した。

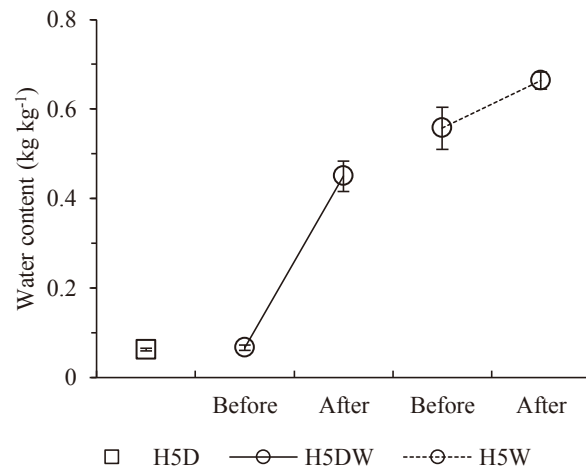
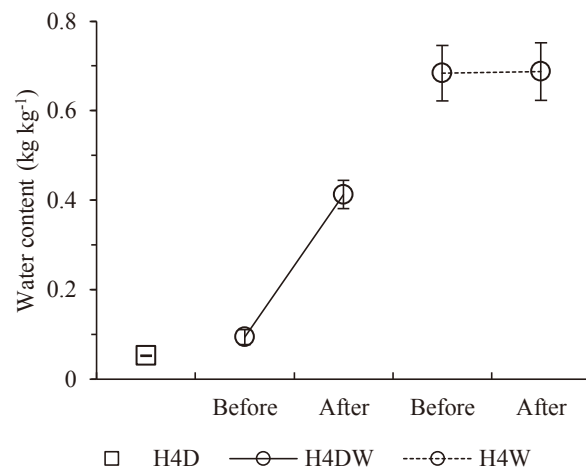
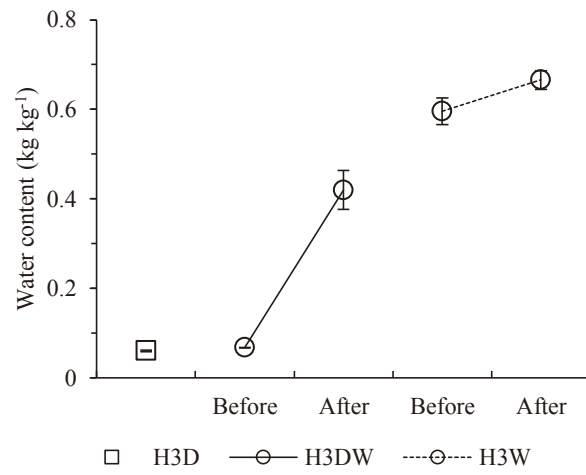


Fig. 4. 1. 団粒試料の含水比 (ヒノキ林試料)
 Moisture contents of aggregate samples (Japanese cypress site).
 Bars indicate standard deviation.

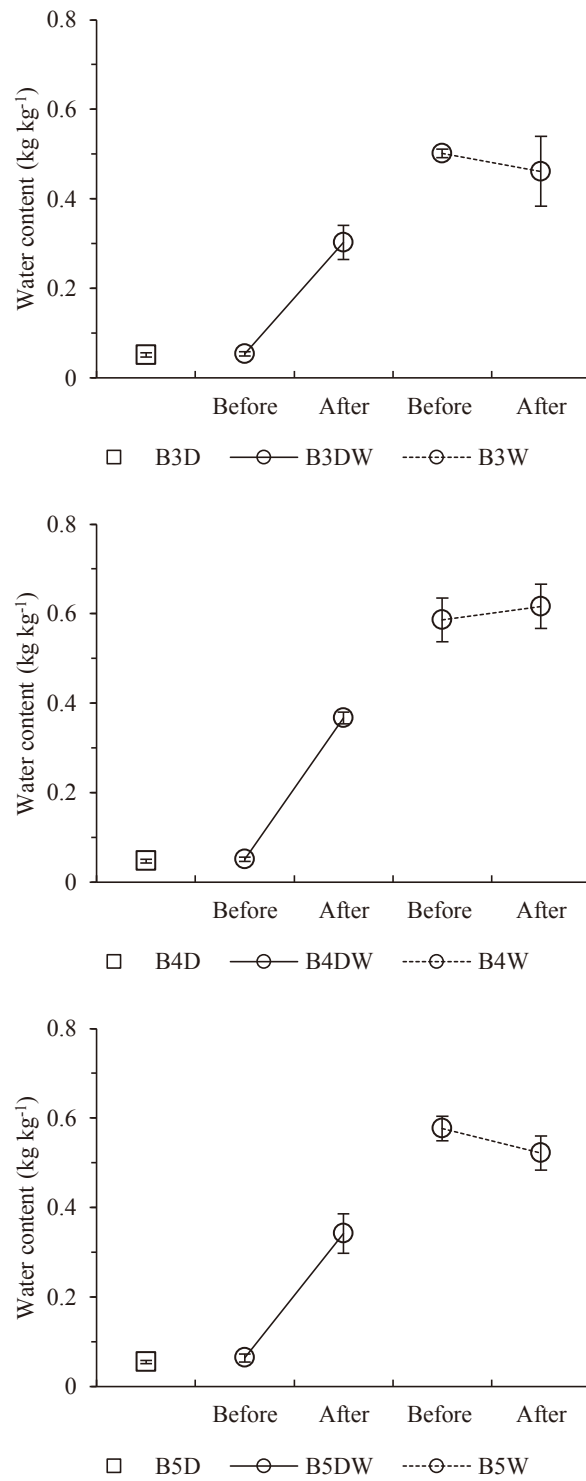


Fig. 4.2. 団粒試料の含水比 (広葉樹林試料)
 Moisture contents of aggregate samples (Broad leaf site).
 Bars indicate standard deviation.

4.3.2 ふるい分け試験結果と培養中の団粒試料の変化

ふるい分け試験結果について、培養中の団粒試料の変化を肉眼で観察した結果とともに述べる。ふるい分け試験の結果得られた 3 mm 団粒残留率、4 mm 団粒残留率、5 mm 団粒残留率を Dunnett 検定の結果とあわせて Fig. 4. 3~4. 5 に示す。これらに示した団粒残留率の値は、各培養条件について 5 つの培養試料の平均値である。3 mm 団粒残留率は (Fig. 4. 3), ヒノキ林試料では培養条件 H3D で 95.4%, H3DW で 83.8%, H3W で 96.9%となり、H3DW で最も低い値となった。Dunnett 検定の結果、培養条件 H3D に対して H3DW では危険率 1%で有意差が認められたが、H3W では有意差が認められなかった。広葉樹林試料では、培養条件 B3D で 94.9%, B3DW で 85.3%, B3W で 91.2%となり、B3DW で最も低い値となった。Dunnett 検定の結果、培養条件 B3D に対し、B3DW では危険率 1%で有意差が認められたが、B3W では有意差が認められなかった。一方、肉眼観察では、培養条件 H3DW と B3DW において給水時に団粒試料が大きく分割されるような変化が確認された。

4 mm 団粒残留率は (Fig. 4. 4), ヒノキ林試料の培養条件 H4D で 69.8%, H4DW で 54.6%, H4W で 74.2%となり、H4DW で最も低い値となった。Dunnett 検定の結果、培養条件 H4D に対し H4DW では危険率 1%で有意差があったが、H4W では有意差がなかった。広葉樹林試料では、培養条件 B4D で 61.7%, B4DW で 48.7%, B4W で 65.6%となり、B4DW で最も低い値となった。Dunnett 検定の結果、培養条件 B4D に対し B4DW では危険率 1%で有意差があったが、B4W では有意差がなかった。また、ヒノキ林試料、広葉樹林試料ともに、すべての水分条件で 4 mm 団粒残留率は 3 mm 団粒残留率や 5 mm 団粒残留率よりも低い値となった。肉眼観察では、H4DW で団粒試料が大きく分割される変化が、B4DW で団粒試料の一部が分散して小片が周囲に散らばるような変化が、それぞれ給水時に確認された。

5 mm 団粒残留率は (Fig. 4. 5), ヒノキ林試料の培養条件 H5D で 84.2%, H5DW で 80.1%, H5W で 86.7%となり、H5DW で最も低い値となった。しかし、Dunnett 検定の結果、培養条件 H5D に対し H5DW, H5W ともに有意差は認められなかった。広葉樹林試料では培養

条件 B5D で 87.3%, B5DW で 85.3%, B5W で 89.2%となり, B5DW で最も低い値となった。しかし, Dunnett 検定の結果, 培養条件 B5D に対し B5DW, B5W とともに有意差は認められなかった。また, 肉眼観察では, いずれの培養条件とも団粒試料に大きな変化は観察されなかった。

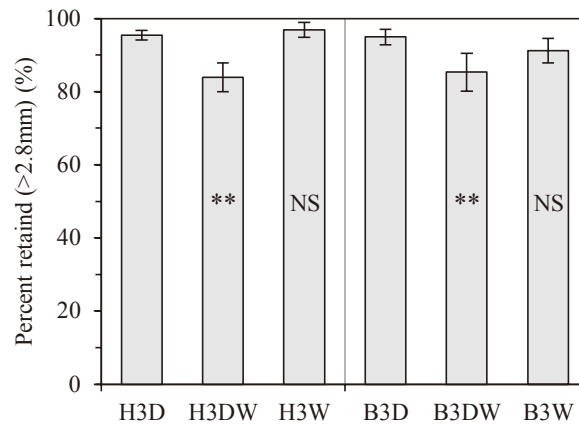


Fig. 4. 3. 3mm 団粒残留率
 Percent of 3-mm (>2.8 mm) aggregates retained.
 Bars indicate standard deviation.
 **: $P < 0.01$, NS: Not significant (Dunnett's multiple comparison post hoc test).

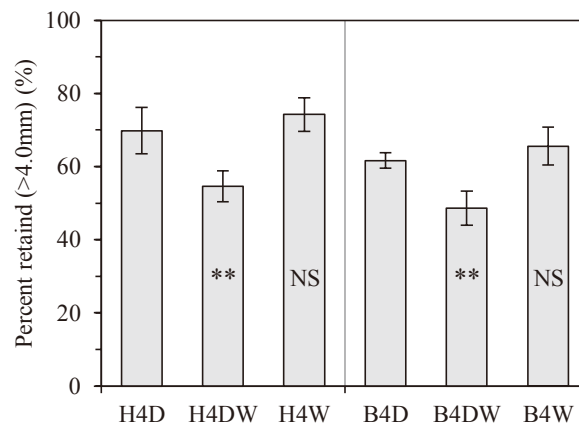


Fig. 4. 4. 4mm 団粒残留率
 Percent of 4-mm (>4.0 mm) aggregates retained.
 Bars indicate standard deviation.
 **: $P < 0.01$, NS: Not significant (Dunnett's multiple comparison post hoc test).

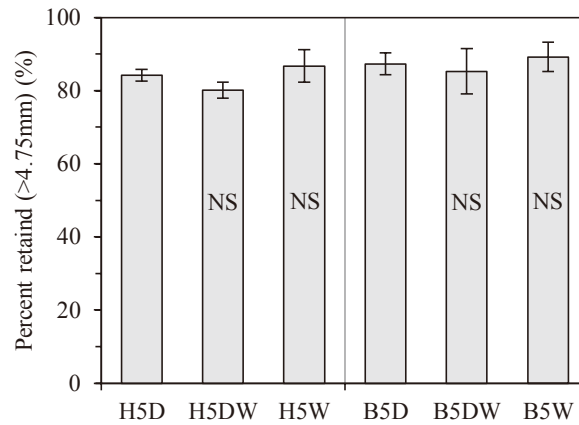


Fig. 4.5. 5mm 団粒残留率
 Percent of 5-mm (>4.75 mm) aggregates retained.
 Bars indicate standard deviation.
 NS: Not significant (Dunnett's multiple comparison post hoc test).

平均質量直径を Fig. 4.6~4.8 に示す。これらの図に示した平均質量直径は、各培養条件について5つの培養試料の平均値である。3mm 団粒試料の結果をみると (Fig. 4.6)、ヒノキ林試料、広葉樹林試料ともに、すべての培養条件で平均質量直径が培養前の値 (3.08 mm) よりも 0.04~0.19 mm 低下していることがわかる。樹種別にみると、ヒノキ林試料では培養条件 H3D が 3.02 mm, H3DW が 2.89 mm, H3W が 3.04 mm となり、H3DW で最も低い値となった。Dunnett 検定の結果、培養条件 H3D に対し H3DW では危険率 1% で有意差が認められたが、H3W では有意差が認められなかった。広葉樹林試料では、培養条件 B3D が 3.04 mm, B3DW が 2.90 mm, B3W が 2.98 mm となり、B3DW が最も低く、B3W も B3D に比べるとやや低い値となった。Dunnett 検定の結果、培養条件 B3D に対し B3DW では危険率 1% で有意差が認められたが、B3W では有意差が認められなかった。

4mm 団粒試料の結果においても (Fig. 4.7)、ヒノキ林試料、広葉樹林試料ともに、すべての培養条件で平均質量直径が培養前の値 (4.38 mm) よりも低下していた。その低下量は 0.45~0.78 mm で、他の粒径の団粒試料よりも大きかった。樹種別にみると、ヒノキ林試料で培養条件 H4D が 3.93 mm, H4DW が 3.60 mm, H4W が 3.93 mm となり、H4DW で最も低い値となった。Dunnett 検定の結果、培養条件 H4D に対し H4DW では危険率 1% で有意差があったが、H4W では有意差がなかった。広葉樹林試料では、培養条件 B4D が 3.82

mm, B4DW が 3.62 mm, B4W が 3.88 mm となり, B4DW で最も低い値となった。Dunnett 検定の結果, 培養条件 B4D に対し B4DW では危険率 1%で有意差があったが, B4W では有意差がなかった。

5 mm 団粒試料の結果においても (Fig. 4. 8), 他の粒径と同様に, ヒノキ林試料, 広葉樹林試料ともに, すべての培養条件で平均質量直径が培養前の値 (5.18 mm) よりも低下し, その低下量は 0.12~0.25 mm であった。樹種別にみると, ヒノキ林試料では培養条件 H5D が 5.02 mm, H5DW が 4.93 mm, H5W が 5.03 mm となり, H5DW で最も低い値となった。Dunnett 検定の結果, 培養条件 H5D に対し H5DW で危険率 1%で有意差があったが, H5W では有意差がなかった。広葉樹林試料では, 培養条件 B5D が 5.06 mm, B5DW が 4.97 mm, B5W が 5.06 mm となり, B5DW で最も低い値となった。Dunnett 検定の結果, 培養条件 B5D に対し B5DW で有意差が認められたが, 危険率は 5%であった。一方, B5W では有意差が認められなかった。

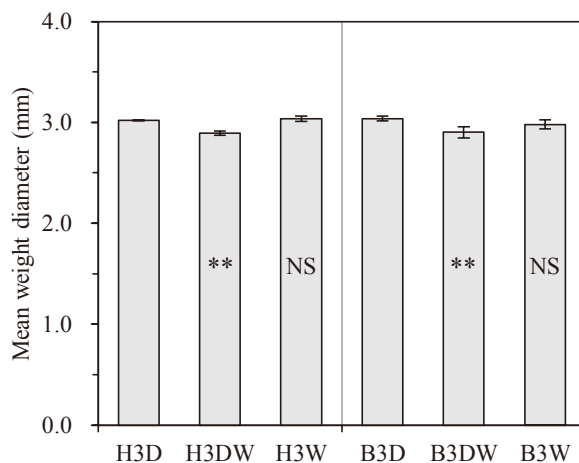


Fig. 4. 6. 3mm 団粒試料の平均質量直径
Mean weight diameter of 3-mm aggregate samples.
Bars indicate standard deviation.
**: $P < 0.01$, NS: Not significant (Dunnett's multiple comparison post hoc test).

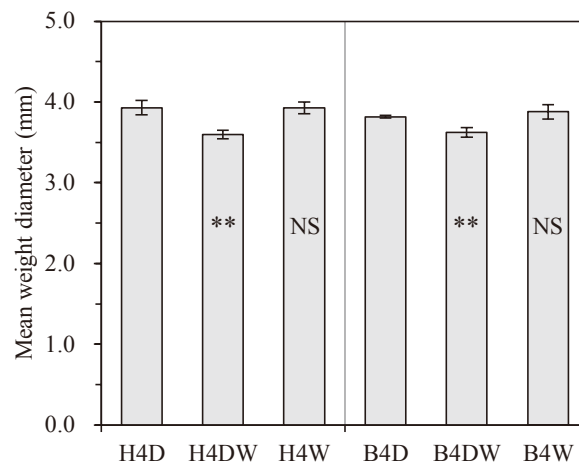


Fig. 4. 7. 4mm 団粒試料の平均質量直径
Mean weight diameter of 4-mm aggregate samples.
Bars indicate standard deviation.
**: $P < 0.01$, NS: Not significant (Dunnett's multiple comparison post hoc test).

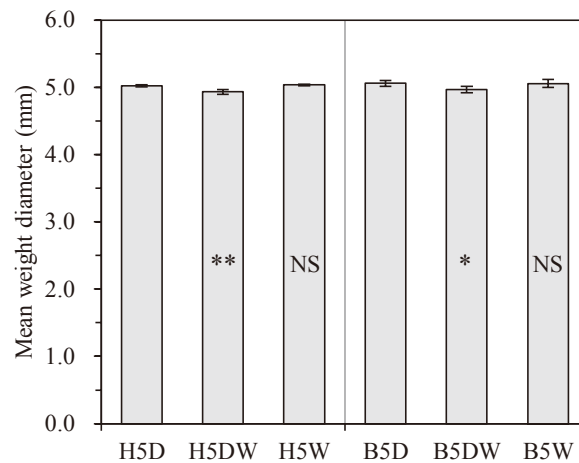


Fig. 4. 8. 5mm 団粒試料の平均質量直径
Mean weight diameter of 5-mm aggregate samples.
Bars indicate standard deviation.
**: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$, NS: Not significant (Dunnett's multiple comparison post hoc test).

同一の団粒径，同一の培養条件でヒノキ林試料と広葉樹粒試料の団粒残留率について t 検定を行った結果，有意差があったのは 3 mm 団粒試料の水分条件 W ($H3W > B3W$)，4 mm 団粒試料の水分条件 D ($H4D > B4D$) と水分条件 W ($H4W > B4W$) のみで，危険率はいずれも 5%であった。また同様の t 検定を平均質量直径について行った結果，有意差があっ

たのは 3 mm 団粒試料の水分条件 W (H3W>B3W), 4 mm 団粒試料の水分条件 D (H4D>B4D) のみで, 危険率はいずれも 5%であった。

4.3.3 全炭素・全窒素量

全炭素量と全窒素量の測定結果を Table 4.2 に示す。全炭素量は, ヒノキ林試料では 61.54~65.10 g kg⁻¹, 広葉樹林試料では 47.48~52.61 g kg⁻¹ となりヒノキ林試料が高かった。全窒素量はヒノキ林試料では 5.39~5.67 g kg⁻¹, 広葉樹林試料では 2.99~3.77 g kg⁻¹ となり, やはりヒノキ林試料が高かった。CN 比はヒノキ林試料で 11.0~11.5, 広葉樹林試料では 13.3~17.6 となり, 広葉樹林試料で高かった。また, ヒノキ林試料, 広葉樹林試料とも, 全炭素量, 全窒素量, CN 比のいずれにおいても, 粒径の違いによる傾向はみられなかった。

Table 4.2. 団粒試料の全炭素・全窒素量
Total carbon and total nitrogen of aggregate samples.

Aggregate samples		Total carbon (g kg ⁻¹)	Total nitrogen (g kg ⁻¹)	C/N ratio
Japanese cypress site	H3	61.54	5.62	11.0
	H4	65.10	5.67	11.5
	H5	61.85	5.39	11.5
Broad leaves site	B3	48.64	3.67	13.3
	B4	52.61	2.99	17.6
	B5	47.48	3.45	13.8

4.4 考察

ふるい分け試験の結果から, ヒノキ林試料, 広葉樹林試料ともに水分条件にかかわらず 3 mm 団粒残留率, 4 mm 団粒残留率, 5 mm 団粒残留率は 100%未満となった (Fig. 4.3~4.5)。また同様に, 平均質量直径も両樹種のすべての粒径, 水分条件で培養前の値より低くなっていた (Fig. 4.6~4.8)。これらのことは, すべての培養条件で培養期間中とその後

のふるい分け操作等の際に、団粒の破壊とそれに伴う小団粒化が進行したことを示すものである。このうち、ヒノキ林試料、広葉樹林試料ともに培養中に給水操作を行わなかった水分条件 D では、DW や W と比較すると団粒残留率と平均質量直径は高い値を示しており、団粒の破壊は主として培養後のふるい分け操作の際に起こったと推測される。一方、水分条件 DW と W では、培養後のふるい分け操作に加え、培養期間中の水分条件の違いが団粒残留率と平均質量直径に影響したと考えられる。そして、ヒノキ林試料、広葉樹林試料ともすべての粒径において、団粒残留率と平均質量直径は、3 つの水分条件のなかで DW で最も低い値となった。さらに Dunnett 検定の結果では、両樹種の 3 mm 団粒試料、4 mm 団粒試料の団粒残留率と平均質量直径は、水分条件 D に対し DW で危険率 1% で有意差があった。以上のように、ヒノキ林試料、広葉樹試料ともに 3 mm 団粒試料と 4 mm 団粒試料では、培養後に水分条件 DW の団粒残留率と平均質量直径が水分条件 D よりも有意に減少していることから、培養期間中に団粒の破壊と小団粒化が進行したと考えられる。水分条件 DW では、培養期間中に給水操作を行っており、団粒試料は乾燥と湿潤を繰り返した。両樹種の団粒試料の給水前含水比 (Fig. 4. 1, 4. 2) は、3 mm 団粒試料で $0.0539 \sim 0.0675 \text{ kg kg}^{-1}$ 、4 mm 団粒試料で $0.0514 \sim 0.0943 \text{ kg kg}^{-1}$ であり、低い水分状態の団粒試料に給水操作によって急激に水分が加わったことにより、スレーキングによる団粒破壊が起こったと考えられる。さらに、両樹種ともに水分条件 DW では給水時に団粒試料の分割や分散が肉眼観察によって確認されており、これらも給水時にスレーキングが発生したことを示すものである。

5 mm 団粒試料においては、団粒残留率についての Dunnett 検定では、ヒノキ林試料、広葉樹林試料ともに水分条件 D に対し DW で有意差がなかった。平均質量直径についての Dunnett 検定では、両樹種ともに水分条件 D に対し DW で有意差があったが、ヒノキ林試料で危険率 1% であったのに対し、広葉樹林試料では危険率 5% にとどまった。これらのことから、5 mm 団粒試料では、3 mm 団粒試料や 4 mm 団粒試料と比べ培養期間中の団粒破壊が緩やかであり、スレーキングに対する安定度が高かった可能性が考えられる。団粒の

形成や維持には土壌中の有機物が大きく関与することが知られており（青山 2010）、Chan and Mullins（1994）は耕作地や草地などの土壌の団粒試料についてスレーキング特性を測定し、有機炭素量が多い土壌ほどスレーキングに対する安定度が高かったことを明らかにしている。全炭素量の測定結果をみると（Table 4.2）、ヒノキ林試料、広葉樹林試料ともに4 mm 団粒試料で全炭素量が最も高くなっており、5 mm 団粒試料で安定度が高かったことは有機物量だけでは説明できず、他の要因が影響したと推察される。その要因として考えられるのは団粒の粒径の違いであり、5 mm 団粒試料は3 mm 団粒試料や4 mm 団粒試料よりも粒径が大きいため、団粒内部まで乾燥が進まずスレーキングが起きにくかったことや、団粒の内部に水分が到達するまでの時間が長かったことが影響したと考えられる。前者については両樹種の給水前の乾燥時含水比（Fig. 4.1, 4.2）が5 mm 団粒試料では0.0639～0.0671 kg kg⁻¹であり、3 mm 団粒試料（0.0539～0.0675 kg kg⁻¹）や4 mm 団粒試料（0.0514～0.0943 kg kg⁻¹）とほぼ同程度であり、今回の実験の範囲では粒径の違いが給水前の団粒試料の水分状態の差異に影響したとは考えにくい。一方、団粒内部への水分の到達時間の影響については、Panabokke and Quirk（1956）やChan and Mullins（1994）が急激な水分供給がスレーキングによる団粒破壊を引き起こすことを指摘しており、今回の実験では、団粒の粒径の違いが団粒内部への水分の到達時間に影響したことが考えられる。団粒試料が球体だと仮定し、団粒の半径を r とすると、その体積は $(4/3)\pi r^3$ 、表面積は $4\pi r^2$ となるので、団粒径が大きくなるほど団粒の表面積よりも体積の増加割合の方が大きくなる。団粒試料に水分が与えられたとき、水分は団粒表面から内部へと侵入していくため、粒径が大きいほど、団粒表面から侵入した水分が団粒を表面から湿潤化させながら内部へ到達するまでの時間は長くなる。スレーキングによる団粒破壊の原因は、乾燥した団粒に水分を加えたときの団粒内部の空気圧の上昇であるとされている（八幡 1975, 宮崎 2000）。すなわち、乾燥した団粒の表面から内部に水分が侵入していくと、団粒の内部に空気が封入されて団粒内の空気圧が高まり、この圧力の高まりによって団粒の崩壊が起こる。このとき、前述のような理由で、団粒径が大きい場合には団粒内部への水分の到達時間が長くなるため、

団粒内部の空気圧の高まりが緩やかになると考えられる。さらに、団粒径が大きい場合には団粒の体積も大きくなるので、水分侵入に伴う団粒内部での空気圧の急激な上昇が抑えられることも考えられる。以上のように、5 mm 団粒試料では給水時の団粒内部の空気圧の上昇が緩やかであったため、スレーキングによる団粒破壊が3 mm 団粒試料や4 mm 団粒試料ほど進行しなかったと推察される。

一方、スレーキングによる団粒破壊が進行したと考えられた3 mm 団粒試料や4 mm 団粒試料について両者の団粒残留率を比較すると (Fig. 4. 3, 4. 4), ヒノキ林試料, 広葉樹林試料ともにすべての水分条件で4 mm 団粒残留率が低い値となっている。さらに, 5 mm 団粒残留率と比較しても (Fig. 4. 5), 両樹種のすべての水分条件で4 mm 団粒残留率が低い値を示す。また平均質量直径も, 4 mm 団粒試料では両樹種ともすべての水分条件で他の粒径に比べ培養後の低下量が大きかった (Fig. 4. 6~4. 8)。このように, 団粒残留率や平均質量直径の数値のみから判断すると, 4 mm 団粒試料は団粒の安定度が低く, すべての水分条件で培養期間中の団粒破壊が他の粒径よりも進行したと考えることが可能である。しかし, 団粒の安定度に影響すると考えられる全炭素量は (Table 4. 2), ヒノキ林試料, 広葉樹林試料ともに4 mm 団粒試料で最も高くなっており, 有機物量の面からみると, 4 mm 団粒試料で団粒残留率が低かったことなどと整合しない。また, 4 mm 団粒試料では, ヒノキ林試料, 広葉樹林試料ともに水分条件 D や W でも団粒残留率が他の粒径と比較して低くなっている。4 mm 団粒試料の水分条件 D や W では, 肉眼観察では団粒の破壊は認められなかったことから, 4 mm 団粒試料で団粒残留率が低かったことなどにはスレーキングによる団粒破壊以外の要因が影響している可能性が考えられるが, 詳細は不明である。このように, 4 mm 団粒残留率が他の粒径と比べ低く, 平均質量直径の低下量が大きかった理由には不明な点が残された。しかし前述したように, 異なる粒径間での団粒残留率や平均質量直径の直接比較には問題が含まれることから, 今回の結果に関しては, Dunnett 検定の結果から判断したように, 3 mm 団粒試料と4 mm 団粒試料では水分条件 DW においてスレーキングによる団粒破壊が進行したと結論するに留め, 3 mm 団粒試料と4 mm 団粒試

料で団粒の破壊程度に差があったかどうかの判断は保留することとする。

水分条件 W では、ヒノキ林試料、広葉樹林試料ともにすべての粒径において、団粒残留率と平均質量直径についての Dunnett 検定で、水分条件 D に対して有意差はなかった。水分条件 W では、培養期間中に団粒試料は湿潤条件を保っていたことから、団粒試料が乾燥しなければ、水分が加えられても団粒破壊はほとんど進行しないと考えられる。

ヒノキ林団粒試料と広葉樹林団粒試料で、同一団粒径、同一水分条件において団粒残留率と平均質量直径それぞれで t 検定を行った結果、有意差が認められたのは 3 mm 団粒試料の水分条件 W の団粒残留率と平均質量直径 ($H3W > B3W$)、4 mm 団粒試料の水分条件 D の団粒残留率と平均質量直径 ($H4D > B4D$)、4 mm 団粒試料の水分条件 W の団粒残留率 ($H4W > B4W$) のみで (いずれも危険率 5%)、どの組み合わせにおいてもヒノキ林試料で団粒残留率が有意に高いという結果となった。全炭素量の測定結果をみると (Table 4. 2)、ヒノキ林試料が $61.54 \sim 65.10 \text{ g kg}^{-1}$ 、広葉樹林試料が $47.48 \sim 52.61 \text{ g kg}^{-1}$ であり、ヒノキ林試料の方が高い値を示している。有機炭素量が多い土壌ほど団粒のスレーキングに対する安定度が高かったとする Chan and Mullins (1994) の事例と、 t 検定の結果からは、ヒノキ林試料のほうが安定度が高いととらえることもできる。しかし、ヒノキ林試料、広葉樹林試料とも、すべての粒径において 3 つの水分条件のなかで最もスレーキングが進行したのは DW であり、この水分条件 DW においては、 t 検定の結果ではヒノキ林試料と広葉樹林試料で団粒残留率に有意差はなかった。また、平均質量直径についての t 検定の結果でも、水分条件 DW においてはヒノキ林試料と広葉樹林試料で有意差がなかった。これらのことから、今回の実験においてはスレーキングによる団粒破壊には樹種による差異はなかったと考えられる。

4.5 まとめ

乾燥と湿潤が繰り返される条件の中で、森林土壌の団粒がどのような影響を受けるのかを明らかにする目的で、ヒノキ林と広葉樹林の団粒試料を用いた培養実験を行った。その

結果、3 mm 団粒試料と 4 mm 団粒試料では、ヒノキ林試料、広葉樹試料ともに乾燥と湿潤を繰り返す水分条件下でスレーキングによる団粒破壊が進行したことが明らかになった。5 mm 団粒についてはヒノキ林試料、広葉樹試料ともにスレーキングによる団粒破壊の進行が 3 mm 団粒や 4 mm 団粒試料とくらべ緩やかであることが示され、このことからスレーキングによる団粒破壊には団粒の大きさが影響し、団粒径が大きいと団粒破壊の進行が緩やかになる可能性が示された。一方、樹種による違いについては、今回の実験結果からは認められなかった。また、湿潤状態を保つような水分条件下では団粒破壊は進行しないことも明らかとなった。

今回得られた結果は、あくまでも室内での培養実験によるものであり、実際の林地とは条件が大きく異なるものである。しかしながら、伐採後の林地において観察されたような乾燥した粉状ないし細粒状の薄層の出現や、乾性型の土壌構造の出現とともに進行した小団粒化などが、スレーキングによる団粒破壊の影響を受けたものである可能性が示された。また、今回の培養実験では雨滴衝撃などの影響を排除し、スレーキングによる団粒破壊のみを抽出して評価した。このことによって、森林土壌の団粒が、雨滴衝撃を受けなくても、単に乾燥と湿潤を繰り返すだけでスレーキングによって破壊されることが示された。このような現象は、団粒の破壊だけでなく、団粒の形成時にも何らかの影響を及ぼすことが推察される。例えば、乾性型土壌でみられる細粒状構造の形成にスレーキング現象が影響していることなどが示唆される。以上のようなことから、今回得られた結果は、森林管理を通しての土壌保全の面から重要な知見となるものと考えられる。今後は、通常の林地や伐採地での土壌水分の観測データに基づき、両者の水分変動の違いを明らかにしたうえで、その差異が団粒の形成や破壊にどのように影響しているかを明らかにする必要があると考える。また、スレーキングによる団粒破壊が土壌の物理性にどのような影響するのかを明らかにしていくことも重要な課題であると考えられる。

第5章 総括

本研究では、森林伐採に伴う団粒の破壊と、それに起因する土壌物理性の変化を定量的に示し、そのメカニズムについて考察を行うことを目的とし、土壌調査ならびに室内実験等を行った。

まず、第2章において、団粒の発達程度を定量的に評価する方法について既往研究を参照して検討した。そのうえで、団粒発達と孔隙組成や透水性などの土壌物理性との定量的関係を明らかにする目的で、ヒノキ林とヒノキ林伐採後の林地から土壌試料を採取し、団粒分析試験ならびに土壌物理性測定を行った。団粒分析試験の結果は団粒指数によって定量的に表した。団粒指数と土壌構造との関連について検討したところ、団粒状構造や粒状構造では団粒指数が高く、塊状構造、単粒状構造や、特に構造が発達していない場合には団粒指数が低いことが明らかになった。また、団粒指数と粗大な孔隙 ($\geq -6.2\text{kPa}$) の量、粗大な孔隙の量と飽和透水係数との間にそれぞれ正の相関関係が認められ、団粒の発達によって粗大な孔隙の量が増え、透水性も高まることが定量的に示された。このように団粒の発達程度を団粒指数として単一の物理量で示したことにより、団粒発達と土壌物理性との定量的関係をかなり明瞭に示すことができた。このことから、団粒発達程度の定量的指標として団粒指数がきわめて有効であることが確認できた。

さらに、全炭素量と団粒指数との関係からは、森林伐採後に土壌表層部で機械的な団粒破壊が起った可能性が示された。このように、今回得られたデータのなかには、森林伐採の影響を受けたと推察されるものが含まれていた。しかし、これらの結果は、伐採年が異なる隣接した調査区を対象としたものであり、伐採後の土壌物理性の変化等を検討するためには、同一の林分における伐採後の変化を明らかにする必要があると考えられた。

そこで第3章においては、第2章の研究対象地であるヒノキ林伐採一新植地(93年伐採区)において伐採後1~3年にわたる継続調査を行い、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。団粒分析試験の結果については、団粒発達程度の定

量的指標として第2章においてその有効性が確認された団粒指数を用いた。また、既往研究から伐採後には粒径の大きな団粒が消失することが示されていたことから、2mmふるい残留分に対する団粒百分率も指標として用いた。その結果、A層やA₁層では伐採後に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壌構造の変化と、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こり、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、土壌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、鈳質土壌の最上層にあたるA層やA₁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が示された。

また、A層やA₁層では伐採後に堅果状構造が出現したことから、伐採後には表層部で土壌の乾燥が進むことが推察された。このような伐採後の表層土壌の乾燥についてはいくつかの報告例があり（荒木ら 2002, 浦川ら 2005, 富沢ら 2005）、一般的な傾向ととらえることができる。しかし我が国のような温暖湿潤気候条件下においては、通常は一定間隔ごとに降雨がもたらされるため、伐採地においては、表層土壌は強度の乾燥状態と降雨による湿潤化が繰り返されることが推察され、この際にスレーキングによる団粒破壊が起こることが考えられた。

そこで、第4章においては、乾燥と湿潤が繰り返される水分条件のなかで、森林土壌の団粒がどのように変化するかを明らかにする目的で、室内での培養実験を行った。ヒノキ林と広葉樹林のA層から採取した3mm, 4mm, 5mm団粒試料を用い、水分条件を変えて14日間培養した。培養中の水分条件は、団粒試料が乾燥状態を保つもの、乾燥と湿潤を繰り返すもの、湿潤状態を保つものの3条件とした。その結果、3mm団粒試料と4mm団粒試料では、ヒノキ林試料、広葉樹林試料ともに乾燥と湿潤を繰り返す水分条件下で団

粒破壊が進行し、これはスレーキングによるものと考えられた。5 mm 団粒試料についてはヒノキ林試料、広葉樹林試料ともに団粒破壊の進行が 3 mm 団粒試料や 4 mm 団粒試料と比べ緩やかであった。このことからスレーキングによる団粒破壊には団粒の大きさが影響し、団粒径が大きいと団粒破壊の進行が緩やかになる可能性が示された。一方、樹種による違いについては、今回の実験結果からは認められなかった。また、湿潤状態を保つような培養条件下では団粒破壊は進行しないことも明らかとなった。この結果は、あくまでも室内での培養実験によるものであり、実際の林地とは異なった条件下で得られたものである。しかしながら、伐採後の林地において観察されたような乾燥した粉状ないし細粒状の薄層の出現や(宮川ら 1987, 1988)、第 2 章において述べた乾性型の土壌構造の出現とともに進行した小団粒化などが、スレーキングによる団粒破壊の影響を受けたものである可能性が示された。また、今回の培養実験では雨滴衝撃の影響が排除されているので、森林土壌の団粒破壊が、雨滴衝撃を受けなくても、単に乾燥と湿潤を繰り返すだけでスレーキングによって崩壊することが示された。

前述したように、本研究では伐採に伴う団粒破壊にスレーキング現象が関わっている可能性を示したが、森林伐採に伴う土壌の変化については、伐採・搬出作業に伴う土壌攪乱などによるものと、伐採後に長期的に進行するものに分けて考える必要がある。伐採・搬出時における土壌保全の重要性については以前から指摘されており、中野(1973, 1976)は林地の浸透能維持の観点から、伐採や集材作業時の土壌の攪乱や圧密を防ぐことが重要だと述べている。また、太田(1991)も表層土壌が流亡・破壊されないような慎重な伐出を行う必要があることを指摘している。第 4 章では、スレーキングによる団粒破壊には団粒の大きさが影響し、団粒径が大きいと団粒破壊の進行が緩やかであったが、粒径の小さい団粒ではスレーキングによる団粒破壊が進行したことが明らかになった。このことから、伐採・搬出時の土壌攪乱などによって粒径の大きな団粒が破壊されて小団粒化すると、その後スレーキングによる団粒破壊が加速されることが推察される。この点からも伐採・搬出作業の際の土壌保全の重要性が指摘できる。

一方、第3章では伐採後の団粒破壊が長期的に進行することが明らかになった。すなわち、団粒状構造の消失は伐採後2年目以降であり、さらに、団粒指数や団粒百分率は伐採後3年間で漸減した。このことは、仮に伐採・搬出作業の際に土壌攪乱が防がれたとしても、伐採後の環境変化のなかで団粒破壊が長期的に進行する可能性があること示している。つまり、森林伐採と土壌保全の問題に関しては、伐採・搬出時の土壌保全に加え、長期的な視点からの対策が必要であると考えられる。第4章においては、団粒が湿潤な状態下におかれていれば、水分が加わってもスレーキングによる団粒破壊が進行しないことが明らかになった。したがって、スレーキングによる団粒破壊を防ぐためには土壌の乾燥化を抑制することが重要であると考えられる。

伐採後に表層土壌の乾燥が進む主な原因としては、伐採により樹冠部が失われ、地表面への直達日射量が増加することがあげられる。そのため地表面での気温や表層土壌の地温が上昇し、地表面からの蒸発量が増加して表層土壌の乾燥が進むことが考えられる。さらに、樹冠部による降雨遮断がなくなることにより、初期降雨の遮断損失がなくなるため、地表面へ到達する雨水の量が増加して土壌が急激に湿潤化し、スレーキングによる団粒破壊が進行しやすくなることが推察される。一方、伐採後にも下層木や下草、 A_0 層が残されていれば、その被覆効果により表層土壌の乾燥がある程度緩和されることが期待できる。

下層木や下草などの下層植生、 A_0 層の役割として、一般的には雨滴衝撃の緩和が知られている。通常の林地においては、上層木（主木）の樹冠から滴下する雨滴は、その直径が林外雨よりも大きくなるため、雨滴衝撃力も林外雨よりも大きくなる。そのため、樹冠下において雨滴衝撃による土壌構造の破壊、土粒子の飛散、雨滴浸食が進むことが指摘されている（塚本 1998）。しかし、下層植生や A_0 層などが樹冠下に存在していれば、その被覆によって雨滴衝撃力が緩和され土壌構造の破壊や雨滴浸食などが防がれる（塚本 1998, 三浦 2012）。また、伐採地においても下層植生や A_0 層が同様に雨滴衝撃を緩和し、団粒などの土壌構造の破壊や雨滴浸食を防ぐことが指摘されている（中野 1973; 小林 1982）。伐採地においては、下層植生や A_0 層には、雨滴衝撃の緩和に加え、前述のように表層土壌

の乾燥を緩和する働きが期待される。下層植生や A_0 層は、この二つの働き、すなわち雨滴衝撃の緩和と表層土壌の乾燥の緩和を通して伐採後の土壌を保全する役割を果たしているといえる。

加えて、 A_0 層には降雨遮断の作用があることも知られている。中野（1978）はこれを林床物遮断と定義し、いくつかの測定例に基づき現場の遮断雨量を 2~4 mm 程度と推定している。また、小野・中野（1986）はアカマツ、カラマツ、ヒノキのリター層の保水量を測定し、5.6~9.4 mm という測定結果を得ている。このような A_0 層による降雨遮断は、降雨開始時の表層土壌の急激な湿潤化を緩和し、スレーキングによる団粒破壊を防ぐと考えられる。つまり A_0 層は、雨滴衝撃力緩和に加え、表層土壌の乾燥と急激な湿潤化を防ぐことによって団粒を保護しているといえる。今後は A_0 層による土壌保全の働きについて、総合的に検討していく必要があると考えられる。

以上のことから、伐採後にも下層植生や A_0 層が残存し、土壌の乾燥と急激な湿潤化が防がれ、加えて雨滴衝撃力が緩和されることは、土壌保全の観点から極めて重要であるといえる。伐採後にも下層植生や A_0 層が残存するような作業計画と施業の実施が求められる。また、森林整備などに伴う間伐作業においても、間伐率が高い場合などには皆伐と同様に土壌の乾燥が進む可能性があり、これに対する対策が必要となろう。

また、近年では間伐遅れのヒノキ人工林における土壌侵食が問題視されている。間伐等の適切な管理が行われていないヒノキ人工林では、林内照度が低いため下層植生が侵入せず、また、鱗片状のヒノキの落葉は小片化して流亡しやすいため A_0 層が形成されず、樹冠から滴下する雨滴の衝撃力によって土粒子が飛散し浸食が進行するとされている（三浦 2012）。このように下層植生が乏しく A_0 層も未発達な状態では、土壌の乾燥が進みやすいことも推察される。雨滴衝撃に伴う団粒破壊に関しては、降雨開始時に土壌が乾燥している場合にはスレーキング作用の影響が大きいことが指摘されている（Panabokke and Quirk 1956 ; Bresson and Cadot 1992 ; 田中 1995）。したがって、間伐遅れのヒノキ人工林における土壌侵食にもスレーキング現象が関わっている可能性が考えられる。

本研究では、伐採後の土壌の乾燥に起因するスレーキング現象が、森林伐採地における団粒破壊の一因となっている可能性が示された。加えて、前述したように伐採地に限らず土壌の乾燥が進みやすいような条件下では、スレーキングに伴う団粒破壊が進行することが考えられる。一方で、第4章では湿潤条件が保たれば団粒破壊は進行しないという結果が得られており、これは土壌の乾燥化を防ぐことが土壌保全にとって重要であることを示すものである。このことは森林管理を通しての土壌保全方法を検討するうえで重要な知見になるものと考えられる。

伐採地等での土壌の乾燥を防ぐ具体策の一つとして、林地への枝条散布があげられる。三浦ら（1988）は、伐採後の枝条散布により土壌の乾燥が緩和したことを報告しており、ややコストと手間がかかるものの、土壌保全の方法として有効であると考えられる。また、下刈り等についても一律に行うのではなく、植栽木周辺にとどめるなどして下草を保存するような保育作業を行うことも土壌の乾燥防止に有効であると考えられる。土壌保全上重要な場所に関しては、このような対策が必要であり、今後は枝条散布を含め、土壌の乾燥防止による土壌保全方法について検討していく必要があると考えられる。

また第3章では、伐採後に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が、その後植栽が行なわれて林木が生育していけば、再び団粒が発達することが予想される。その団粒の再発達までの期間を明らかにすることや、また逆に、伐採後の状態で放置した場合の土壌の変化について知見を得ることも重要な課題であると考えられる。

以上述べてきたように、本研究では、まず、団粒の発達によって粗大な孔隙の量が増え、透水性が高まることが定量的に示された。一方、ヒノキ林伐採—新植地における3年間の土壌の継続調査から、伐採度の団粒破壊と小団粒化に伴って粗大な孔隙の量が減少し透水性が低下したことが明らかになった。さらに、伐採後の土壌の乾燥化に着目した室内実験によって、森林土壌の団粒が、乾燥と湿潤が繰り返される水分条件下でスレーキングによって破壊されることが明らかになり、スレーキングが森林伐採後の団粒破壊の一因となって

いることが示された。従来は、森林伐採による団粒の破壊や土壌物理性の変化の原因として、伐採や搬出作業等に伴う土壌表層部の攪乱や、伐採後の腐植減少による団粒の結合力低下、雨滴衝撃力の増大などによる団粒の破壊などがあげられていた（小林 1982；八木 1997）。しかし、本研究では、伐採後の乾燥した土壌水分条件下において、団粒が単に乾燥と湿潤を繰り返すことによりスレーキングによって破壊される可能性があることが示された。

このように、本研究によって森林土壌が環境変化のなかで容易に変化し得ることが明らかとなった。今後、森林管理を通しての土壌保全を考えるにあたっては、「土壌は変化する」という視点が重要になるものと考えられる。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、信州大学農学部教授、北原 曜先生より多大なるご教示と適切なご助言を頂きました。また、学位取得へ向けて様々なご配慮を賜りました。心より御礼申し上げます。静岡大学農学部教授、土屋 智先生、信州大学農学部教授、平松晋也先生、岡野哲郎先生、植木達人先生からは適切なご助言を頂きました。ここに謹んで感謝の意を表します。

信州大学ならびに信州大学大学院在学中は、故中野秀章先生、北澤秋司先生、山村列也先生にご指導頂きました。中野先生から、森林の水源涵養機能にとって森林土壌が重要な役割を担っていることをご教示頂いたことが、本研究の端緒となりました。名古屋大学大学院在学中は、片岡 順先生、故竹田泰雄先生、故戸松 修先生、田中隆文先生、故沓名重名先生、故川上日出國先生からご指導頂きました。先生方に衷心より御礼申し上げます。

CN コーダーによる土壌分析に関しては、元信州大学農学部、故相馬 潔先生、吉田利男先生にご指導頂くとともに、様々なご便宜を図っていただきました。ここに謹んで感謝の意を表します。本論文にかかわる調査・実験を進めるにあたっては、信州大学農学部治山学研究室卒業生の皆様のご協力を仰ぎました。とくに中澤悠美氏には大変なご尽力を頂きました。心より感謝の意を表します。

なお、本研究の一部は科学研究費補助金（12660130）によって行われた。

引用文献

- 青山正和 (2010) 土壌団粒—形成・崩壊のドラマと有機物利用—. 173pp, 農文協, 東京
- 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. 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壌の物理性の変化 (II) ヒノキ新植地における表層土壌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壌水分状態に及ぼす影響. 森林立地 44 : 1-8
- 有光一登 (1987) 土壌の構造と孔隙組成. (森林土壌の保水のしくみ. 有光一登編, 199pp, 創文, 東京). 101-108
- 馬場多久男・川崎圭造 (1993) 林齢の異なる手良沢山ヒノキ人工林の林床植生. 日林論 104 : 597-598
- Bresson LM, Cadot L (1992) Illuviation and structural crust formation on loamy temperate soils. *Soil Sci Soc Am j* 56: 1565-1570
- Chan KY, Mullins CE (1994) Slaking characteristics of some Australian and British soils. *Eur J Soil Sci.* 45: 273-283
- Chenu C, Le Bissonnais Y, Arrouays D (2000) Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci Soc Am J.* 64: 1479-1486
- Cosentino D, Chenu C, Le Bissonnais Y (2006) Aggregate stability and microbial community dynamics under drying wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biol Biochem.* 38: 2053-2062
- Darwin C (1881) The formation of vegetable mould, through the action of worms, with observations on their habits. (渡辺弘之訳, ミミズと土. 317pp, 平凡社, 東京)

- どじょう部 (1976) 林野土壌の分類 (1975). 林試研報 280 : 1-28
- 土質工学会 (1991) 土の試験実習書. 261pp, 土質工学会, 東京
- Edwards AP, Bremner JM (1967) Microaggregates in soils. J Soil Sci. 18: 64-73
- Tisdall JM, Oades JM (1982) Organic matter and water-stable aggregates in soils. J Soil Sci. 62: 141-163
- Emerson WW (1954) The determination of the stability of soil crumbs. J Soil Sci 5: 233-250
- Emerson WW (1959) Stability of soil crumbs. Nature 183: 538
- 服部 勉・宮下清貴 (1996) 土の微生物学. 170pp, 養賢堂. 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)
- 石村貞夫 (1992) 分散分析のはなし. 373pp, 東京図書, 東京
- 伊藤忠夫 (1985) 腐植と土壌構造の関係からみた森林の理水的施業について. 森林立地 27 (2) : 27-32
- 川口桂三郎 (1957) 粒団分析法. (農芸化学実験書 第3巻. 京都大学農学部農芸化学教室編, 1424 pp, 産業図書, 東京). 1027-1038
- 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 : 150-163
- 小林繁男 (1991) 森林の皆伐に伴う土壌の変化. 森林計画誌 16 : 159-170
- 小杉賢一郎 (1999) 森林土壌の雨水貯留能を評価するための新たな指標の検討. 日林誌 81 : 226-235
- 牧本 博・高木秀雄・宮地良典・中野 俊・加藤禎一・吉岡敏和 (1996) 高遠地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅). 地質調査所, 茨城
- 真下育久 (1960) 森林土壌の理学的性質とスギ・ヒノキの成長に関する研究. 林野土壌調査報告 11 : 1-182
- 三浦 覚・田中永晴・荒木 誠 (1988) スギ林皆伐後の枝条除去および散布の効果 (II) —理化学性—. 日林論 99: 209-210

- 三浦 覚 (2012) 林地における土壌侵食. (森のバランス. 300pp, 森林立地学会編, 東海大学出版会, 神奈川). 49-63
- 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壌保全効果 (I) 今市署管内複層林, 上木伐採林およびヒノキ皆伐-新植地における地床状態および表層土壌の比較. 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壌保全効果 (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壌の比較. 99 回日林論 : 157-160
- 宮川 清・荒木 誠 (1990) ヒノキ複層林施業の土壌保全効果 (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壌の変化. 101 日林論 : 61-64
- 宮崎 毅 (2000) 環境地水学. 196pp, 東京大学出版会, 東京
- 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
- 中村 健・林 博道 (1974) 手良沢山演習林の土壌と林木の生育に関する調査研究. 信大農演報 11 : 1-17
- 中野秀章 (1973) 森林の水土保全機能とその活用. 72pp, (財) 日本林業技術協会, 東京
- 中野秀章 (1976) 森林水文学. 228pp, 共立出版, 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) 国有林野土壌調査方法書. 47pp, 林野共済会, 東京
- Oades JM (1984) Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. Plant Soil 76: 319-337
- 大政正隆 (1951) ブナ林土壌の研究 (特に東北地方のブナ林土壌について). 林野土壌調査報告 1 : 1-243
- 太田猛彦・新井雅夫 (1991) 森林斜面の雨水流と森林施業のあり方. 東京農工大学演習林報告 29: 55-71

- 小川和夫 (1981) 土壌団粒の安定性 (崩落率・分散率) の測定法, および安定性と土壌型との関連. 土壌の物理性 43: 14-20
- 小野 裕・中野秀章 (1986) リター層の保水機能について. 日林中支論 34 : 189-190
- Panabokke CR, Quirk JP (1956) Effect of initial water content on stability of soil aggregates in water. Soil Sci 83: 185-195
- 佐藤雄夫 (1972) 団粒分析. (土壌物理性測定法. 土壌物理性測定法委員会編, 505pp, 養賢堂, 東京). 59-65
- Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K (2004) A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil and Tillage Res. 79: 7-31
- 田中 樹 (1995) 土壌クラストの形成機作とそれに影響を及ぼす諸条件. 土壌の物理性 71: 17-21
- Tanaka U, Yokoi Y, Kosaki T, Kyuma K (1997) Mechanisms and processes of crust formation on artificial aggregates. I. Effect of initial moisture conditions on aggregate stability and crusting. Soil Sci Plant Nutr 43: 99-107
- 富沢 亮・小野 裕・北原 曜 (2005) ヒノキ林と伐採地における土壌水分・地温の違いについて. 中部森林研究 53: 225-228
- 塚本良則 (1998) 森林・水・土の保全—湿潤変動帯の水文地形学—. 138pp, 朝倉書店, 東京
- 浦川梨恵子・戸田浩人・生原喜久雄 (2005) 高齢化したスギ・ヒノキ人工林小流域の斜面下部伐採が土壌および溪流の水質に及ぼす影響. 日林誌 87: 471-478
- van Bavel CHM (1949) Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. Soil Sci Soc Am Proc 14: 20-23
- van Bavel CHM (1953) Report of the committee on Physical analyses 1951-1953. Soil Sci Soc Am Proc 17: 416-418
- 渡辺 実・板川秀雄・寺沢四郎 (1982) 山梨県下の火山灰土壌と褐色森林土の団粒の安定

性について. 土壌の物理性 45: 48-54

八木久義 (1993) 野外における土壌および生成環境の調べ方. (森林土壌の調べ方とその性質. 森林土壌研究会編, 334pp, 林野弘済会, 東京). 28-64

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. 林野土壌調査報告 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.

八幡敏雄 (1975) 土壌の物理. 181pp, 東京大学出版会, 東京

Yoder RE (1936) A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. J Amer Soc of Agron 28: 337-351

Zaher H, Caron J (2007) Aggregate slaking during rapid wetting: Hydrophobicity and pore occlusion. Can J Soil Sci 88: 85-97

本学位論文の基礎となった論文

小野 裕 (2001) 森林土壌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.

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.

小野 裕 (2014) 乾燥と湿潤が繰り返される水分条件下における森林土壌の団粒の変化. 日林誌 96: 212-220

Summary

Changes in the physical properties of forest soil due to aggregate destruction after forest cutting.

Hiroshi ONO

Soil structures known as aggregates develop in the surface soil of forests that are properly managed. Forest soils with well-developed aggregates are rich in pores and, thus, exhibit high infiltration capacity, permeability and moisture retention. Such hydrological properties of forest soil significantly affect the public benefit function (which includes water conservation) of forests. However, several reports have indicated that the physical properties of soil change after forest cutting and that such changes are due to the disturbance of soil during harvesting operations or the destruction of aggregates resulting from changes in the soil environment after clearcutting. In this study, I conducted soil surveys and laboratory experiments to quantify and identify the mechanism involved in the destruction of aggregates after forest cutting and the changes in physical properties of soil resulting from the destruction of aggregates.

First, I examined methods for quantitatively evaluating degree of aggregate development with reference to previous research. Next, I measured the physical properties of soil samples collected from Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) stands and former (i.e. clearcut) Japanese cypress stands and quantitatively assessed aggregate development using an aggregation index. Aggregation index score was high for soils with crumb or granular structure and low for soils with blocky structure, single-grain, or no apparent structure. I observed positive correlations between aggregation index score and number of large pores (≥ 6.2 kPa) and between number of large pores

and saturated hydraulic conductivity. It was thus demonstrated quantitatively that aggregate development was accompanied by increases in number of large pores and permeability. The relationship between degree of aggregate development and the physical properties of forest soil can be expressed by a single quantitatively determined value, the aggregation index score. In other words, I was able to identify a consistent relationship between degree of aggregate development and other physical properties. Based thereupon, it was confirmed that the aggregation index score is an effective quantitative measure of degree of aggregate development.

Next, I examined the relationship between destruction of aggregate structure after clearcutting and changes in soil physical properties such as pore size distribution and permeability. Soil samples were collected from a clearcut Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) stand 1-3 years after clearcutting. Soil physical properties were measured and water-stable aggregates analyzed by the wet-sieving method. It was found that, after clearcutting, the soil structure of A or A₁ horizons changed. Specifically, it was found that aggregate diameter decreased, indicating a destruction of aggregate structure. This change in aggregate size distribution was accompanied by a change in soil pore size distribution, i.e. a decrease in large pores and increase in fine pores, which resulted in a reduction of permeability. In A-B horizons, although I observed changes in soil structure, pore size distribution and permeability remained unchanged. In B horizons, I observed no change in soil structure, pore size distribution and permeability. In conclusion, it was found that changes in soil pore composition and permeability after clearcutting were closely related to changes in soil structure and destruction of aggregates only in the near-surface A and A₁ horizons. Furthermore, in A and A₁ horizons, nutty (subangular blocky) structure appeared after clearcutting, indicating that drying of the surface soil had occurred in clearcut areas. In Japan, which has a temperate humid climate, periods of precipitation usually occur at regular intervals. Thus, it is likely that the surface soil of clearcut areas repeatedly undergo intense drying and wetting cycles and, consequently, that

aggregate destruction occurs as a result of slaking.

Next, I conducted aggregate incubation experiments to clarify changes in aggregation resulting from repeated drying and wetting cycles. 3-, 4-, and 5-mm soil aggregate samples were collected from the A horizons of a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endl) stand and a broad leaf stand. The samples were incubated for 14 d under three different moisture regimes: dry, repeated drying-wetting cycle, and continuously wet. The 3- and 4-mm aggregate samples from both stands subjected to repeated drying-wetting cycles were easily dispersed by slaking, whereas similarly treated 5-mm aggregates were not as readily dispersed. Degree of aggregate dispersion varied by aggregate size, with larger aggregates being less readily dispersed than smaller aggregates. Moreover, there was no clear difference in degree of aggregate dispersion between samples from the two stands. Aggregate dispersion was not observed in aggregates incubated under wet conditions.

Based on the results above, I believe that the decrease in aggregate size observed in clearcut areas is at least partially due to aggregate destruction caused by slaking. Furthermore, I suggest that retention of understory vegetation and the A₀ layer after clearcutting will reduce the rapid wetting and intense drying of surface soil, which in turn will reduce slaking, and also prevent aggregate destruction due to splash impact. Thus, I believe that the retention of understory vegetation and A₀ layer is important to the preservation of the soil after clearcutting.

写 真



Photo. 1. ヒノキ林区
Cypress stand.



Photo. 2. 93年伐採区 (1994年8月)
Clearcut area (1993). Aug. 1994 photo shoot.



Photo. 3. 93年伐採区 (1995年10月)
Clearcut area (1993). Oct. 1995 photo shoot.



Photo. 4. 93年伐採区 (1996年5月)
Clearcut area (1993). May 1996 photo shoot.



Photo. 5. 伐採区全景 (1996年6月)
Panoramic view of Clearcut areas. Jun. 1996 photo shoot.



Photo. 6. 伐採区全景 (1996年9月)
Panoramic view of Clearcut areas. Oct. 1996 photo shoot.



Photo. 7. ヒノキ林区土壌断面 A
Soil profile A of cypress stand.



Photo. 8. ヒノキ林区土壌断面 B
Soil profile B of cypress stand.



Photo. 9. 93年伐採区土壌断面 A
Soil profile A of clearcut area (1993).



Photo. 10. 93年伐採区土壌断面 B
Soil profile B of clearcut area (1993).



Photo. 11. 92年伐採区土壌断面 A
Soil profile A of clearcut area (1992).



Photo. 12. 92年伐採区土壌断面 B
Soil profile B of clearcut area (1992).



Photo. 13. 91年伐採区土壤断面 A
Soil profile A of clearcut area (1991).



Photo. 14. 91年伐採区土壤断面 B
Soil profile B of clearcut area (1991).



Photo. 15. 90年伐採区土壤断面 A
Soil profile A of clearcut area (1990).



Photo. 16. 90年伐採区土壤断面 B
Soil profile B of clearcut area (1990).



Photo. 17. 土壤断面 (1994 年 8 月)
Soil profile (Aug. 1994).



Photo. 18. 土壤断面 (1995 年 8 月)
Soil profile (Aug. 1995).



Photo. 19. 土壤断面 (1995 年 11 月)
Soil profile (Nov. 1995).



Photo. 20. 土壤断面 (1996 年 8 月)
Soil profile (Aug. 1996).



Photo. 21. 土壤断面 (1996 年 10 月)
Soil profile (Oct. 1996).



Photo. 22. 団粒試料採取林分（ヒノキ林）
Japanese cypress site.



Photo. 23. 団粒試料採取林分（ヒノキ林）
Japanese cypress site.



Photo. 24. 団粒試料採取林分（広葉樹林）
Broad leaves site.



Photo. 25. 団粒試料採取林分（広葉樹林）
Broad leaves site.



Photo. 26. 培養試料
Incubation samples.



Photo. 27. 培養試料
Incubation samples.