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

小野 裕^{*、1}

乾燥と湿潤が繰り返される水分条件の中で、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、ヒノキ林と広葉樹林の A 層から採取した 3, 4, 5 mm 団粒試料を用い、水分条件を変えて培養実験を行った。培養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、14 日間行った。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。

キーワード：森林土壌、団粒破壊、スレーキング、水分条件

Hiroshi Ono^{*、1} (2014) Changes in Forest Soil Aggregates under Repeated Dry-wet Moisture Conditions. J Jpn For Soc 96: 212-220 Three, four, and five millimeters soil aggregate samples were collected from the A horizons of a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endl) and broad leaf stand and incubated for 14 d under three different moisture conditions: dry, repeated dry-wet cycle, and wet. The 3- and 4-mm aggregates from both stands incubated under repeated dry-wet conditions were easily dispersed by slaking, whereas similarly incubated 5-mm aggregates were not as readily dispersed. The 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 stands. Aggregate dispersion was not observed in aggregates incubated under wet conditions.

Key words: forest soil, aggregate dispersion, slaking, moisture condition

I. はじめに

良好な森林土壌では表層部に団粒と呼ばれる土壌構造が発達し、そのため孔隙に富み浸透能や透水性、保水性が高い。真下 (1960) は粒状構造や団粒状構造のような団粒化が進んだ土壌では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。また、小野 (2001) は森林土壌の団粒の発達程度を団粒指数で表し、団粒の発達によって、表層土壌の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が増え透水性が高まることを定量的に示した。一方、森林伐採の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、ヒノキ林の皆伐により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ている。また、荒木・有光 (1984, 1985) はヒノキ林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。さらに小野 (2005) 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を明らかにし、さらに団粒分析試験を行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。

小野 (2005) が明らかにし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

*連絡先著者 (Corresponding author) E-mail: hiroono@shinshu-u.ac.jp

¹ 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, Kamiina, Nagano 399-4598, Japan)

(2014 年 1 月 28 日受付, 2014 年 5 月 19 日受理)

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の、表層土壌 (0~30 cm 深) では減少する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、この伐採-新植地においては前述したように小野 (2005) が土壌調査等を行っており、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単層林では 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、一時的にしろ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; 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、小野 (2005) が指摘し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。

II. 方 法

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 未満の低木層はクブシ、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 (B₀) 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。

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, AS 200 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 個当りの質量範囲を決定した (表-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 (4.0~4.75 mm)、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。

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

表-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

理化学工業, 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。一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 W 39 cm, D 26 cm, H 6.5 cm) の中に 6 個ずつ並べ, 温度 30℃, 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) の三つとした。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。一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 (ニチリョー, 00-NS-S) 装着のディスペンサー (ニチリョー, 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, 4, 5 mm 団粒試料で, 上記の三つの水分条件 (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. 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℃ で 24 時間乾燥させて含水比を求め, 培養試料ごとの三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)。

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℃ 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五つずつ (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 の組ふるいを, 3 mm 団粒試料では 2.8, 2.0, 1.0 mm の組ふるいをを用い, 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。

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, 4.0, 2.8, 2.0, 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, 4, 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, 4, 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)。

さらに, 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; 小野 2001)。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 検定の結果にもと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, 4, 3 mm 団粒残留率、平均質量直径に対して t 検定を行った。

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 のふるいを通したもののから植物根を取り除き、粉碎したものを測定に供した。

III. 結 果

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図-1, 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 $0.0531 \sim 0.0626 \text{ kg kg}^{-1}$ 、広葉樹林試料で $0.0472 \sim 0.0552 \text{ kg kg}^{-1}$ 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 $0.0671 \sim 0.0943 \text{ kg kg}^{-1}$ 、給水後含水比が $0.413 \sim 0.450 \text{ kg kg}^{-1}$ 、広葉樹林試料では給水前含水比が $0.0514 \sim 0.0639 \text{ kg kg}^{-1}$ 、給水後含水比が $0.303 \sim 0.367 \text{ kg kg}^{-1}$ 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

図-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.

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、給水によって湿潤化し、培養期間を通して乾燥と湿潤を繰り返した。

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, 4, 5 mm 団粒残留率を Dunnett 検定の結

図-2. 団粒試料の含水比 (広葉樹林試料)

Moisture contents of aggregate samples (Broad leaf stand).

Bars indicate standard deviation.

果とあわせて図-3~5に示す。これらの図に示した団粒残留率の値は、各培養条件について五つの培養試料の平均値である。3 mm 団粒残留率は (図-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。Dunnnett 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。Dunnnett 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

図-3. 3 mm 団粒残留率

Percent of 3-mm (>2.8 mm) aggregates retained

Bars indicate standard deviation. ** $P < 0.01$; NS, Not significant (Dunnnett's multiple comparison post hoc test).

図-4. 4 mm 団粒残留率

Percent of 4-mm (>4.0 mm) aggregates retained

Bars indicate standard deviation. ** $P < 0.01$; NS, Not significant (Dunnnett's multiple comparison post hoc test).

図-5. 5 mm 団粒残留率

Percent of 5-mm (>4.75 mm) aggregates retained.

Bars indicate standard deviation. NS, Not significant (Dunnnett's multiple comparison post hoc test).

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 (図-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。Dunnnett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。Dunnnett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(図-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、Dunnnett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、Dunnnett検定の結果、培養条件B5Dに対しB5DW, B5W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。

平均質量直径を図-6~8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五つの培養試料の平均値である。3 mm 団粒試料の結果をみると(図-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。Dunnnett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。Dunnnett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。

4 mm 団粒試料の結果においても(図-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。Dunnnett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,

図-6. 3 mm 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 (Dunnnett's multiple comparison post hoc test).

図-7. 4 mm 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 (Dunnnett's multiple comparison post hoc test).

B4Wが3.88 mmとなり、B4DWで最も低い値となった。Dunnnett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(図-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。Dunnnett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。Dunnnett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。

図-8. 5 mm 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。

3. 全炭素・全窒素量

全炭素量と全窒素量の測定結果を表-2 に示す。全炭素量は、ヒノキ林試料では $61.54 \sim 65.10 \text{ g kg}^{-1}$ 、広葉樹林試料では $47.48 \sim 52.61 \text{ g kg}^{-1}$ 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 $5.39 \sim 5.67 \text{ g kg}^{-1}$ 、広葉樹林試料では $2.99 \sim 3.77 \text{ g kg}^{-1}$ 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 $11.0 \sim 11.5$ 、広葉樹林試料では $13.3 \sim 17.6$ となり、広葉樹林試料が高かった。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。

IV. 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, 4, 5 mm 団粒残留率は 100% 未満となった (図-3~5)。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 (図-6~8)。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、三つの水分条件の中で 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、広葉樹林試料ともに 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 (図-1, 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 (表-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 (図-1, 2) が 5 mm 団粒試料では $0.0639 \sim 0.0671 \text{ kg kg}^{-1}$ であり、3 mm 団粒試料 ($0.0539 \sim 0.0675 \text{ kg kg}^{-1}$) や 4 mm 団粒試料 ($0.0514 \sim 0.0943 \text{ kg kg}^{-1}$) とほぼ同程度であり、

表-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

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(図-3, 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(図-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(図-6~8)。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(表-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付けるに留め、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。

ヒノキ林試料と広葉樹林試料で、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(いずれも危険率は 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(表-2)、ヒノキ林試料が 61.54~65.10 g kg⁻¹、広葉樹林試料が 47.48~52.61 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、ヒノキ林試料の方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三つの水分条件の中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

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。

V. 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 団粒試料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 団粒試料や 4 mm 団粒試料と比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。

実験等を進めるにあたっては、信州大学農学部治山学研究室専攻生であった中澤悠美氏に大変なご尽力を頂いた。また、同研究室の北原 曜教授には貴重なご助言と様々なご配慮を頂いた。2名の査読者の方からは有益なコメントを頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。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—, 農文協
- 荒木 誠・有光一登 (1984) 皆伐施業による表層土壌の物理性の変化(I) ヒノキ林皆伐跡地における湿式団粒分析の一例, 日林論 95: 195-198
- 荒木 誠・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, 日林論 96: 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
- 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
- Emerson WW (1954) The determination of the stability of soil crumbs, J Soil Sci 5: 233-250
- 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
- 牧本 博・高木秀雄・宮地良典・中野 俊・加藤禎一・吉岡敏和 (1996) 高遠地域地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所
- 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
- 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, 日林論 98: 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, 日林論 99: 157-160
- 宮崎 毅 (2000) 環境地学, 東京大学出版会
- 永田 靖・吉田道弘 (1997) 統計的多重比較法の基礎, サイエンス社
- 中野秀章 (1973) 森林の水土保全機能とその活用, (財) 日本林業技術協会
- 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 (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
- Panabokke CR, Quirk JP (1956) Effect of initial water content on stability of soil aggregates in water, Soil Sci 83: 185-195
- 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—, 朝倉書店
- 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
- 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 (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, 名古屋大学出版会), 97-114
- 八幡敏雄 (1975) 土壌の物理, 東京大学出版会
- Yoder RE (1936) A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses, J Am Soc 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