

ヒノキ人工林および隣接する落葉広葉樹林における 土壌の撥水性の空間分布

小林政広^{*1}・釣田竜也¹・伊藤優子¹・加藤正樹¹

小林政広・釣田竜也・伊藤優子・加藤正樹：ヒノキ人工林および隣接する落葉広葉樹林における土壌の撥水性の空間分布
日林誌 88：354~362, 2006 土壌の撥水性は、地表流や選択的な浸透の発生要因となることから、斜面スケールの水の移動と貯留に影響し得る重要な土壌特性と認識されている。しかし、林地斜面における撥水性の分布や発現強度に関わる要因は十分に解明されていない。本研究では、ヒノキ人工林および隣接する落葉広葉樹二次林の斜面上（各180 m×60 m）で表層土壌を多点採取し（ヒノキ林40地点、広葉樹林39地点）、水滴浸入時間（WDPT）およびエタノール濃度（EP）を指標として土壌の撥水性強度を測定した。ヒノキ林では、夏期の乾燥時には斜面中部を含む全体の4割以上の地点で実際の撥水性を表す生土状態のWDPT（WDPT(f)）が600秒を超え、撥水性を有する土壌は斜面の広範囲に分布していた。冬期の湿潤時には、WDPT(f)がほとんどの地点で60秒以下となり、実際の撥水性は斜面全体で著しく弱まった。潜在的な撥水性と考えられる風乾状態のWDPT（WDPT(d)）は、ヒノキ林では河道近傍を除く8割以上の地点で1時間を超えた。一方、落葉広葉樹林でも斜面全体に潜在的な撥水性が認められたが、WDPT(d)が1時間を超える地点は2割未満であった。同じ全炭素含有率の土壌と比較すると、広葉樹林よりヒノキ林で潜在的な撥水性が強い傾向が認められた。
キーワード：空間分布、森林土壌、撥水性、ヒノキ人工林、落葉広葉樹林

Kobayashi, M., Tsurita, T., Itoh, Y., and Kato, M.: **Spatial Distribution of Soil Water Repellency in a Japanese Cypress Plantation and an Adjacent Deciduous Broad-leaved Forest.** *J. Jpn. For. Soc.* 88: 354~362, 2006
Water repellency is recognized as an important soil property that can affect the flow and storage of water in forest soils at the slope scale, since it causes overland flow or preferential infiltration. However, the spatial distribution of water repellency on forested slopes and the factors that control it have not been investigated sufficiently. We examined the spatial pattern of soil water repellency on slopes (180×60 m in each area) in a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) plantation and a nearby deciduous broad-leaved forest. The water drop penetration time (WDPT) and ethanol percentage (EP) were used as indices of repellency. In the cypress plantation, the fresh-soil WDPT (WDPT(f)), which is thought to indicate the actual water repellency, exceeded 600 sec at more than 40% of the sampling points during a dry period in summer, including those points in the middle slope. During a wet period in winter, the WDPT(f) was less than 60 sec at most of the sampling points. The air-dry WDPT (WDPT(d)), which indicates the potential water repellency, exceeded 1 h at more than 80% of the sampling points in the plantation, except on the lower slope near a stream. In contrast, potential water repellency was observed over the entire slope in the deciduous forest, although fewer than 20% of the sampling points had a WDPT(d) exceeding 1 h. Positive correlations between the total carbon content of the sampled soils and the WDPT(d) and EP were observed. Comparing soils with similar carbon contents, the soil of the cypress plantation had a greater potential water repellency than that of the deciduous forest.

Key words: deciduous broad-leaved forest, forest soil, Japanese cypress plantation, spatial distribution, water repellency

I. はじめに

森林の水源かん養機能の発揮において、森林土壌が雨水を浸透させて一時的に貯留する働きは重要である。この働きは土壌が水によく濡れて土壌孔隙に毛管吸引力が生じることを前提としている。しかし、森林土壌には、乾燥すると水をはじく性質、すなわち「撥水性」を示し、水が浸透しにくくなるものがあることが知られている（宮崎, 1942；大政, 1951；Gilmour, 1968；Scholl, 1971；Singer and Ugolini, 1976；Reeder and Jurgensen, 1979；Richardson and Hole, 1978；仲谷, 1981）。このような撥水性の原因は、土粒子または土壌団粒の表面における土壌有機物（Bond, 1964；Krammes and DeBano, 1965）や菌糸（大政・真下,

1957；Savage, 1969）の存在と考えられている。

撥水性が現れると、浸透能が低下して地表流が発生し（村井・岩崎, 1975；McGhie, 1980）、しばしば土壌侵食につながる（Osborn *et al.*, 1964；Jungerius and Dekker, 1990；Shakesby *et al.*, 2000；DeBano, 2000）。また、撥水性土壌中では地中に雨水が入った場合でも土壌の一部のみを経路とする選択流となることが多く（Raats, 1973；Ritsema and Dekker, 1994；小林, 2002）、不飽和土壌中における水と溶質の移動を複雑にする要因と認識されている。

このような土壌の撥水性が林地斜面で広範囲に発現する場合、斜面スケールの水の移動と貯留にも影響する可能性がある。しかし、林地斜面で土壌の撥水性が現れる範囲に

* 連絡・別刷請求先（Corresponding author） E-mail: kbmasa@affrc.go.jp

¹（独）森林総合研究所（305-8687 つくば市松の里1）

Forestry and Forest Products Research Institute, 1 Matsunosato, Tsukuba 305-8687, Japan.
(2005年11月22日受付；2006年3月24日受理)

については、Crockford *et al.* (1991) による乾燥地域の調査事例に限られ、湿潤地域については調べられていない。日本国内ではこれまで、撥水性は限られた場所に現れる特殊な性質と見なされてきており、既存の研究事例のほとんどが乾燥の著しい尾根部の乾性土壌についてのものである(大政・真下, 1957; 吉岡, 1981, 1987)。一方、伐採後のヒノキ林で尾根部以外の場所で撥水性が現れたことを報告している例もあり(荒木ら, 1987)、撥水性土壌は従来の認識より広い範囲に分布していることも予想される。さらに、撥水性の発現強度は、原因物質である有機物の含有率の分布や、土壌水分の分布に応じて斜面上の位置により異なることが予想される。

本研究では、ヒノキ人工林およびこれに隣接する落葉広葉樹林の尾根から谷までの斜面において A₀ 層直下の表層土壌を多点採取して撥水性の強度を測定し、林地斜面における撥水性の空間分布を明らかにする。また、撥水性強度に影響する要因を明らかにする。

II. 試験地の概要

茨城県桜川市に位置する関東森林管理局笠間森林技術センター管内の天岳良国有林に属するヒノキ人工林(以下、ヒノキ林)および隣接する落葉広葉樹の二次林(以下、広葉樹林)に、180 m×60 m の試験区を尾根から谷にかけて設定した(図-1)。ヒノキ林はほぼ東向き、広葉樹林は北東向きで、平均斜面勾配はいずれも 29° である。ヒノキ林の試験区の下端には、ほぼ年間を通じて水流の認められる河道部が含まれ、広葉樹林の試験区の下端には、降雨時に湧水が生じる場所が含まれる。土壌は両林分とも火山灰(関東ローム)を母材とする褐色森林土である。試験区の大半には適潤性褐色森林土(B_D型)が分布し、表層部には団粒構造と弱い塊状構造が認められ、土性は埴質壤土(CL)が卓越する。尾根部や凸地形部分には適潤性褐色森林土偏乾亜型(B_{D(d)}型)が分布する。試験区付近の露場で測定した1997年の年間降水量は1,426 mmであった。

両林分とも1968~1970年に一代目のヒノキ人工林が皆伐され、二代目のヒノキ(*Chamaecyparis obtusa*)が植栽された。ヒノキ林は1997年において約30年生で、枝打ちおよび間伐が遅れた状態にあり、林内は暗く下層植生がほとんど認められなかった。一方、広葉樹林は不成績造林地化し広葉樹が優占するようになった林分である。

ヒノキ林では傾斜が30°未満の部分が大半を占め、ヒノキの落葉落枝により構成される厚さ約1 cmのA₀層は、ほぼ年間を通じて地表を覆っていた。斜面下部の傾斜が30°を超える部分では、一部鉍質土壌が露出した地表がモザイク状に存在した。この部分では、夏期の多量の降雨後には雨滴侵食を示す土柱が観察された。これよりさらに下方の河道から水平距離10 m以内の部分にはスギ(*Cryptomeria japonica*)が植栽されており、厚さ2 cmを越えるA₀層は主にスギの落葉により構成されていた。尾根部では、コナラ(*Quercus serrata*)などの落葉広葉樹とアカ

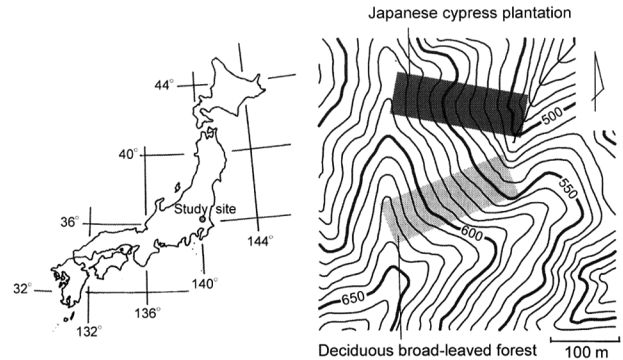


図-1. 試験地の位置と地形

Location and topography of the study site.

マツ(*Pinus densiflora*)の落葉がA₀層を構成していた。この部分では、A₀層の厚さは2~6 cmであった。

広葉樹林にはヤマザクラ(*Prunus Sargentii* subsp. *Jamasakura*), エゴノキ(*Styrax japonica*), アカシデ(*Carpinus laxiflora*), アオハダ(*Ilex macropoda*), リョウブ(*Clethra barbinervis*)等の落葉広葉樹の高木が存在し、これらの落葉により構成されるA₀層が0.5~2.5 cmの厚さで分布していた。斜面上部および斜面下部には下層植生としてササ類が広く分布し、A₀層は1 cm以上であった。斜面中部では下層植生としてササ類に代わりシダ類およびアジサイ類が分布し、A₀層は1 cm未満であることが多く、鉍質土壌が露出している部分も認められた。また、広葉樹林にはヒノキの残存木が点在しており、特に斜面下部にその数多くA₀層にヒノキの落葉が含まれていた。冬季には、A₀層が薄い部分で鉍質土壌の最表面が1 cm程度凍結することがあった。尾根部ではヒノキ林と同様にコナラなどの落葉広葉樹とアカマツの落葉がA₀層を構成していた。

なお、ヒノキ林、広葉樹林ともに尾根部ではA₀層下部および鉍質土壌の最表層に菌糸束が観察されたが、尾根部以外の場所では、肉眼で観察できる菌糸の存在は認められなかった。

III. 研究方法

1. 試料の採取と調整

ヒノキ林において、180 m×60 mの試験区内に節点間隔20 mの格子を設定し、各節点(合計40地点)からA₀層直下の深度0~4 cmの鉍質土壌を攪乱状態で採取した。試料採取は乾燥時(1996年9月3日)と湿潤時(1997年1月7日)の2回行った。攪乱試料と同時に400 mL採土円筒を用いて同深度から非攪乱試料を採取し、体積含水率を測定した。攪乱試料は生土の状態を網目間隔1 mmのふるいにかけて、その通過分を測定および分析の対象とした。広葉樹林では、土壌が比較的湿潤な1998年3月にのみ同様の試料採取を行い(試料数39)、ヒノキ林土壌と同じ方法で試料調整を行った。ヒノキ林と広葉樹林で採取し

た全ての土壌試料について、後述する方法で生土状態および風乾状態の撥水性強度を定量した。

全試料の全炭素含有率（以下 TC）を乾式燃焼法（CNコーダー：ヤナコ社 MT-600）で測定した。

2. 土壌の撥水性強度の定量

土壌の撥水性強度の指標には水滴浸入時間（Water Drop Penetration Time；以下 WDPT）（Watson and Letey, 1970；Dekker and Jungerius, 1990）を用いた。また、風乾試料についてはエタノール濃度（Ethanol Percentage；以下 EP）（Watson and Letey, 1970）も指標として用いた。

WDPT は土壌試料に静置した水滴が試料内に浸入するまでの時間として定義され、撥水性が強いほどこの値が大きくなる。本研究における WDPT 測定では、シャーレ内に平らに詰めた土壌試料に 0.5 mL の水滴を 1 試料につき 3 滴、静かに滴下し、三つの水滴が試料内に浸入するまでの平均時間をその試料の WDPT の値とした。土壌試料を平らにする際には、一回り小さいシャーレの平坦な底面を試料に軽く押しつけ、一定の詰まり方になるようにした。本研究では、生土状態で測定した WDPT（以下、WDPT (f)）を試料採取時の水分状態で発現している「実際の撥水性」の指標とした。土壌の撥水性は水分状態により変化し、土壌が乾燥すると強くなることが知られている（DeBano, 1971）。そのため土壌の撥水性を比較する場合、同一の乾燥状態で撥水性を測定する必要がある。最も簡単に調整可能な水分状態は風乾であるため、旧来から風乾状態の撥水性が測定され、乾燥時に発現しうる「潜在的な撥水性」の指標として広く用いられている（Dekker and Ritsema, 1994）。本研究ではこの慣例に従い、風乾状態で測定した WDPT（以下、WDPT (d)）を潜在的な撥水性の指標とした。ただし、撥水性強度は含水率の減少とともに単調に増加せず、風乾より湿潤な水分状態で最も強い撥水性が発現することもある（仲谷, 1981）。したがってこの潜在的な撥水性は、必ずしも対象土壌が発現し得る最強の撥水性とは限らない。WDPT (f) の測定は 3 時間で打ち切り、この時点で水滴が浸入しない試料の WDPT (f) は一律 3 時間とした。また、WDPT (d) の測定は 24 時間で打ち切り、この時点で浸入しない試料の WDPT (d) は一律 24 時間とした。

一方 EP は、土壌試料に滴下したエタノール水溶液が一定時間で浸入するときのエタノール濃度として定義され、撥水性が強い土壌ほど濃度が大きくなる。本研究では、シャーレに平らに詰めた土壌試料に約 0.02 mL の液滴を静かに滴下して 5 秒で浸入するときの濃度を試料の EP の値とした。設定したエタノール濃度は、0～50%（体積濃度）の 26 段階である。濃度 0% の水溶液が 5 秒以内に浸入してしまう場合には、EP を一律 0 とした。EP の測定は風乾状態の試料についてのみ行った。

3. データの統計処理

全炭素含有率、WDPT、EP などの測定データの大小を

比較する際には、Mann-Whitney の U 検定で有意性を検定した。また、2 変数間の相関係数の有意性の検定は、Pearson の積率相関係数の有意性検定で行った。その他の統計検定については本文の該当箇所に記した。また、危険率 p については、その値が 0.001 以上の場合は値をそのまま示し、0.001 未満の場合には一律 $p < 0.001$ と記述した。すべての検定において、 $p < 0.05$ を有意とした。

IV. 結 果

1. 体積含水率の分布

図-2 に、ヒノキ林および広葉樹林における試料採取時の体積含水率の分布を示した。ヒノキ林における 1 回目の試料採取時は、先行する無降雨期間の影響により土壌は乾燥していた。このときの平均含水率は $0.30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であった。以下、ヒノキ林における 1 回目の試料採取時を「乾燥時」と呼ぶ。尾根に近い斜面上部に含水率の低い部分が認められた。また、斜面中部にも周囲より含水率の低い部分が帯状に存在していた。これに対してヒノキ林における 2 回目の試料採取時は、前日の降雪の影響で土壌がきわめて湿潤な状態にあり、平均含水率は $0.39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ に達していた。以下、ヒノキ林における 2 回目の試料採取時を「湿潤時」と呼ぶ。広葉樹林における試料採取時は、表層土壌が全体として湿っており、場所による含水率の違いは小さく、平均は $0.36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であった。

2. 全炭素含有率の分布

図-3 に、ヒノキ林および広葉樹林における TC の分布を示した。ヒノキ林では、乾燥時と湿潤時の TC に有意な違いは認められなかった ($p=0.79$)。180 g kg^{-1} 以上の高い TC を示す地点が斜面上部に数点存在した。また、斜面中部から下部にかけて TC が周囲より高い部分が帯状に存在した。広葉樹林では、斜面下部で TC が高かった。ヒノキ林では 220 g kg^{-1} を越える地点があったが、ヒノキ林（乾燥時と湿潤時）と広葉樹林の TC には有意な違いは認められなかった ($p=0.54$)。

3. 実際の撥水性

図-4 にヒノキ林および広葉樹林における WDPT (f) の分布を示した。測定した WDPT は、Dekker and Jungerius (1990) に従い、0～5 秒、5～60 秒、60～600 秒、600 秒～1 時間に区分し、1 時間以上をさらに 1～6 時間、6～24 時間、24 時間以上に区分した。ヒノキ林において、乾燥時には、尾根に近い斜面上部に WDPT (f) > 600 秒の強い撥水性を示す部分が帯状に存在した。また、斜面中部の傾斜変換点の上方にも WDPT (f) > 600 秒の部分が帯状に存在し、WDPT (f) が 600 秒を超える地点は全体の 4 割を超えた。さらに全体の約 2 割の地点では WDPT (f) > 1 時間の極めて強い撥水性が現れていた。WDPT (f) < 5 秒で撥水性を示さない地点は、含水率が特に高い河道付近を含む全体の約 2 割に限られ、ヒノキ林では、自然の水分条件で尾根部に限らず斜面中部を含めた広い範囲に撥水性が現れていた。WDPT (f) の大きい地点の分布は、含水率が低い地

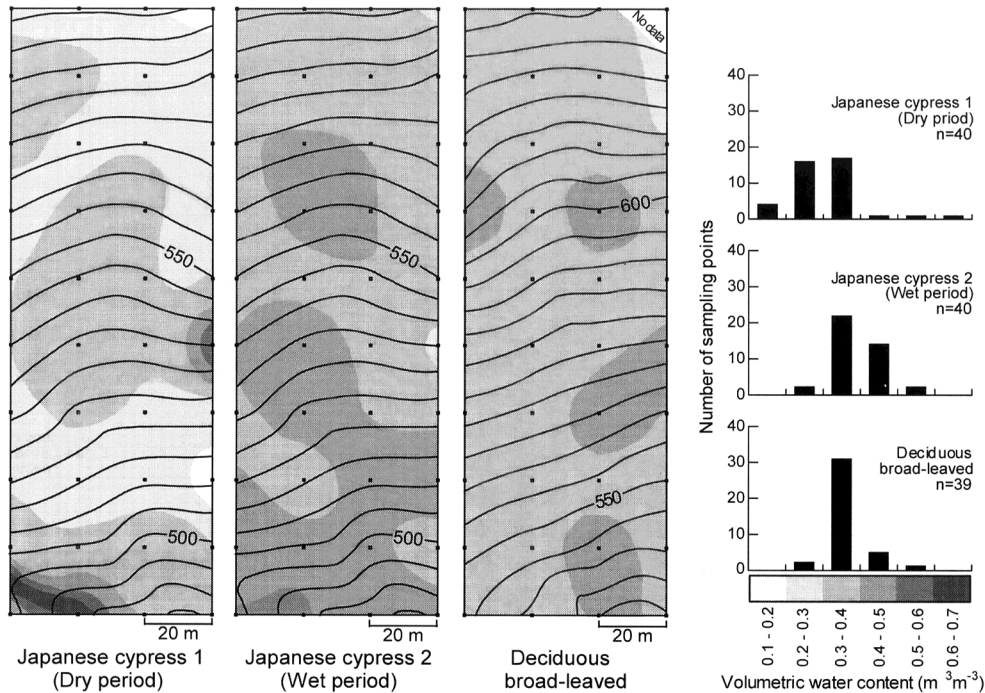


図-2. 試料採取時における表層土壌の体積含水率の空間分布 (等値線は手書き)
 Spatial distributions of volumetric water content of surface soil at sampling (Isolines were drawn manually).

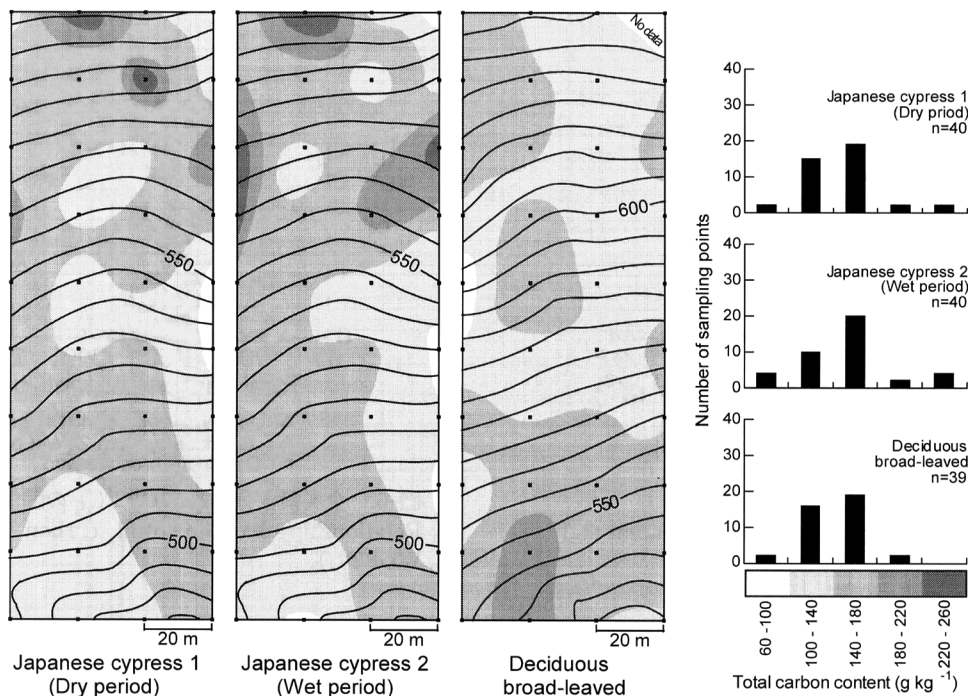


図-3. ヒノキ林および落葉広葉樹林における全炭素含有率の空間分布 (等値線は手書き)
 Spatial distributions of carbon content in Japanese cypress plantation and deciduous broad-leaved forest (Isolines were drawn manually).

点の分布にはほぼ一致した。一方、湿潤時には、試験区のほぼ全域でWDPT(f) < 60秒となり、乾燥時にみられた強い撥水性は著しく弱まっていた。広葉樹林では全地点で

WDPT(f) < 5秒であり、試料採取時の湿潤な水分状態では実際の撥水性が認められなかった。

図-5に、体積含水率とlog WDPT(f)の関係を示した。

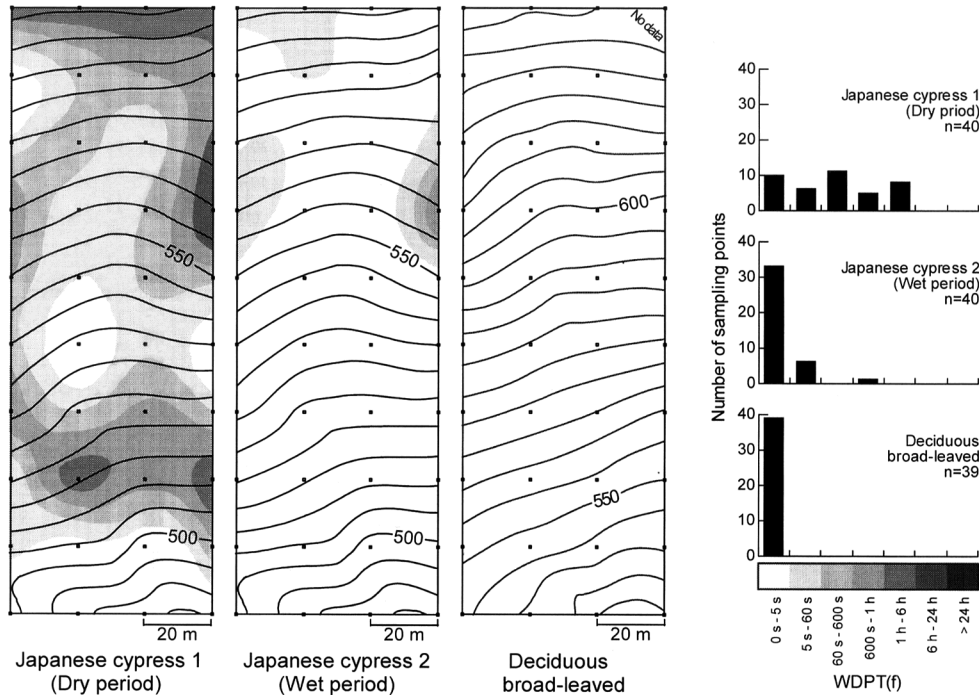


図-4. ヒノキ林および落葉広葉樹林における実際の撥水性の空間分布 (等値線は手描き)
 Spatial distributions of actual water repellency in Japanese cypress plantation and deciduous broad-leaved forest (Isolines were drawn manually).

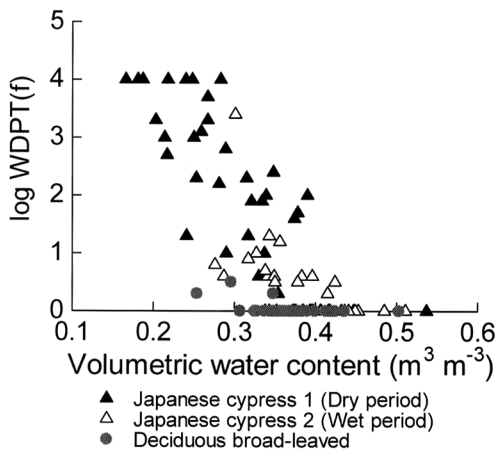


図-5. 体積含水率とWDPT(f)の関係
 Relationship between volumetric water content and WDPT(f).

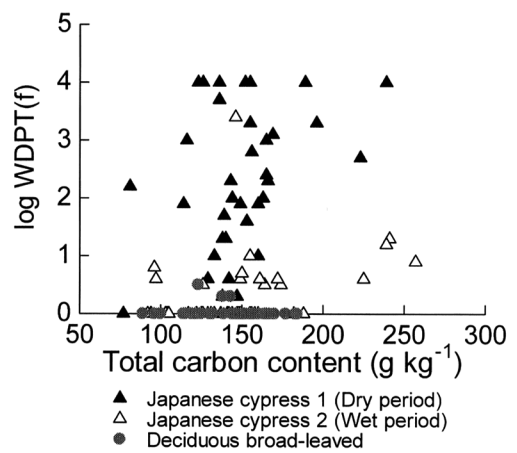


図-6. 全炭素含有率とWDPT(f)の関係
 Relationship between total carbon content and WDPT(f).

両者の間には有意な負の相関が認められた。相関係数は乾燥時のヒノキ林, 湿潤時のヒノキ林, 広葉樹林の順に, $r = -0.68$ ($n = 40, p < 0.001$), $r = -0.58$ ($n = 40, p < 0.001$), $r = -0.46$ ($n = 39, p = 0.0031$)であった。TCとlog WDPT(f)については(図-6), ヒノキ林については有意な正の相関が認められたが, 相関係数は乾燥時が $r = 0.41$ ($n = 40, p = 0.0082$), 湿潤時が $r = 0.32$ ($n = 40, p = 0.044$)であり, いずれも弱い相関であった。広葉樹林については有意な相関は認められなかった ($p = 0.499$)。

4. 潜在的な撥水性

図-7に, ヒノキ林および広葉樹林におけるWDPT(d)の分布を示した。ヒノキ林における乾燥時では, 約8割の地点でWDPT(d) > 1時間のきわめて強い潜在的な撥水性が認められた。すなわち, 乾燥すると撥水性を示す表層土壌はヒノキ林のほぼ全体に分布していた。さらに, WDPT(d) > 24時間の地点も全体の約2割に及んだ。このような特に強い潜在的な撥水性が認められた地点は, 乾燥時にいて含水率が低下して強い実際の撥水性が発現していた斜

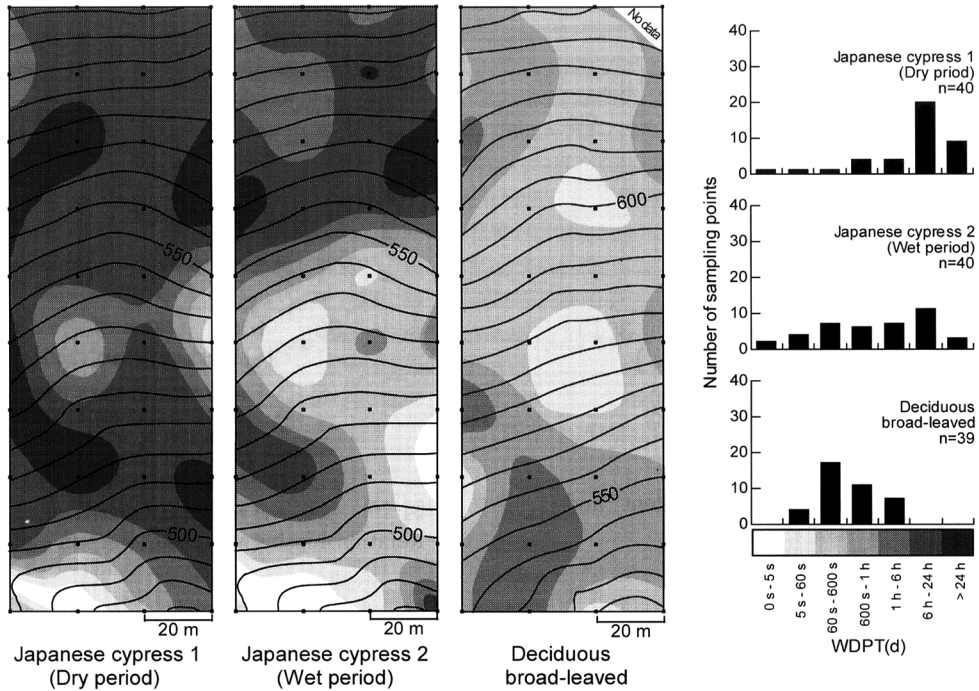


図-7. WDPT(d)を指標としたヒノキ林および落葉広葉樹林における潜在的な撥水性の空間分布(等値線は手描き)

Spatial distributions of potential water repellency in Japanese cypress plantation and deciduous broad-leaved forest represented by WDPT(d) (Isolines were drawn manually).

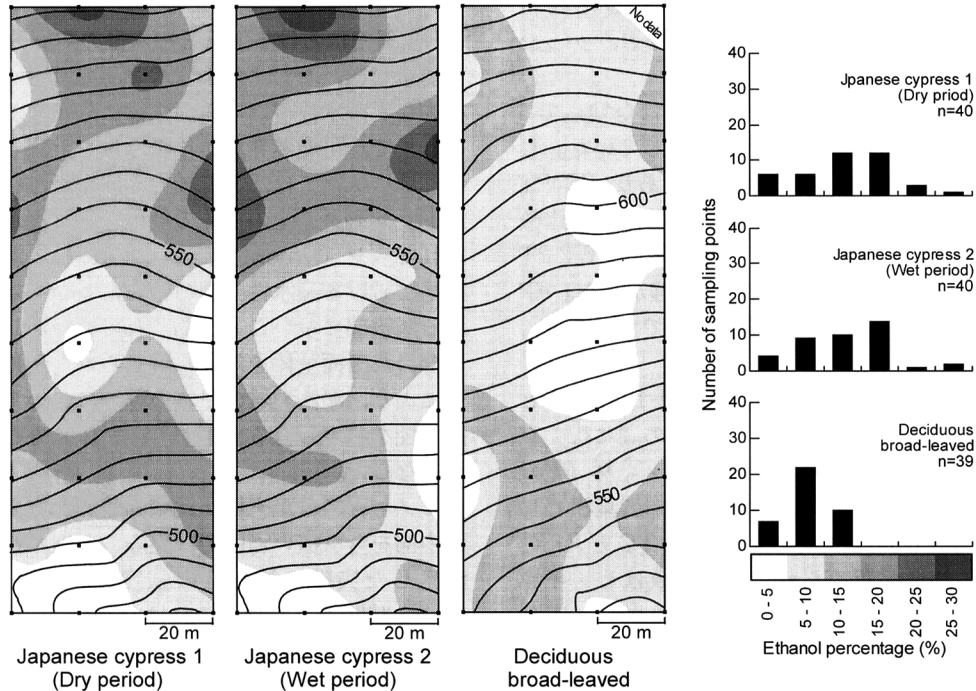


図-8. EPを指標としたヒノキ林および落葉広葉樹林における潜在的な撥水性の空間分布(等値線は手描き)

Spatial distributions of potential water repellency in Japanese cypress plantation and deciduous broad-leaved forest represented by EP (Isolines were drawn manually).

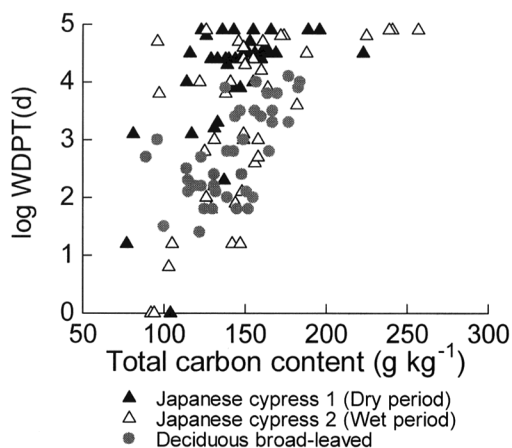


図-9. 全炭素含有率と WDPT(d) の関係
Relationship between total carbon content and WDPT(d).

面上部と斜面中部に多かった。一方、乾燥時でも実際の撥水性が弱かった斜面最下部の河道付近では、潜在的な撥水性が弱かった。潜在的な撥水性が強い地点の分布は EP を指標とした場合でも同様であった (図-8)。

同じヒノキ林の湿潤時では、WDPT(d) > 1 時間の地点は全体の 5 割を越えたが、斜面中部および下部では WDPT(d) が乾燥時より小さい地点が多く、斜面全体で比較した場合も湿潤時の WDPT(d) は乾燥時より有意に小さかった ($p=0.0034$)。一方、EP を指標とした場合は、乾燥時と湿潤時の間に有意な違いは認められなかった ($p=0.79$)。

隣接する広葉樹林においても WDPT(d) は全地点で 5 秒を越え、潜在的な撥水性は斜面全体に分布していた。しかし、WDPT(d) > 1 時間の地点は 2 割未満であり、WDPT(d) > 600 秒の地点も 5 割に満たなかった。両林分の比較では、広葉樹林よりヒノキ林 (乾燥時と湿潤時) で WDPT(d) が大きく ($p<0.001$)、潜在的な撥水性が強かった。EP も広葉樹林よりヒノキ林 (乾燥時と湿潤時) で大きかった ($p<0.001$)。

図-9 に TC と log WDPT(d) の関係を、図-10 に TC と EP の関係を示した。TC と log WDPT(d) の間には、有意な正の相関が認められ、その相関係数はヒノキ林 (乾燥時と湿潤時) で $r=0.52$ ($n=80$, $p<0.001$)、広葉樹林で $r=0.62$ ($n=39$, $p<0.001$) であった。また、TC と EP の間にも有意な正の相関が認められ、相関係数はヒノキ林 (乾燥時と湿潤時) で $r=0.77$ ($n=80$, $p<0.001$)、広葉樹林で $r=0.68$ ($n=39$, $p<0.001$) であった。ヒノキ林については、TC と Log WDPT(d) の相関係数が TC と EP の場合より小さかった。これは、強い撥水性を示すヒノキ林土壌の WDPT(d) の測定値には 24 時間で測定を打ち切り、一律「24 時間」の値を与えたものが多いためと考えられる。

EP については、強い撥水性も連続して定量できている

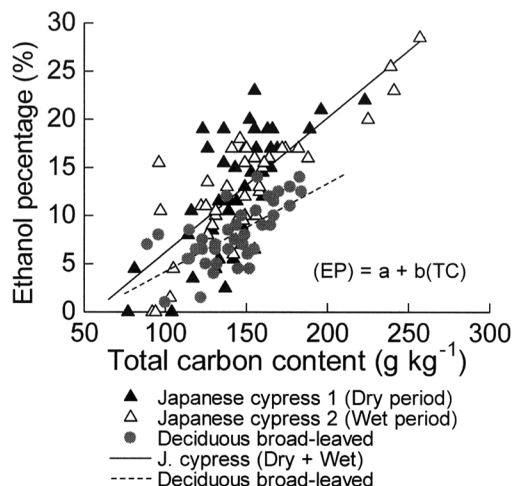


図-10. 全炭素含有率と EP の関係
Relationship between total carbon content and EP.

と考えられるので、EP を説明変数、TC を目的変数とする回帰直線を、ヒノキ林 (乾燥時と湿潤時) と広葉樹林のそれぞれについて求め、潜在的な撥水性の TC に対する依存性の違いを検討した。回帰直線の傾き (回帰係数の絶対値) は、広葉樹林よりヒノキ林で有意に大きかった (回帰係数の差の検定: $p<0.001$)。つまり、同じ TC に対する潜在的な撥水性は広葉樹林よりヒノキ林で強かった。

V. 考 察

1. 斜面における土壌の撥水性の空間分布

前章では、ヒノキ林および落葉広葉樹林において、「潜在的な」撥水性がほぼ斜面全体に分布することを示した。これまで、可能蒸発量が年降水量を上回るような乾燥地域の林地については、小流域内の尾根から谷にかけて設定したトランセクト上の多くの地点で撥水性が現れることが知られていた (Crockford *et al.*, 1991)。湿潤地域の日本の林地における撥水性土壌の分布については、乾性土壌が現れる尾根部に多いことが知られていたが、斜面中部と下部も含めた斜面全体を対象に調べられた例はなかった。本研究により、湿潤地域の日本の林地においても、乾燥すれば撥水性を発現し得る土壌が斜面に広く分布することが明らかになった。

ヒノキ林では、土壌が比較的乾燥した夏期において、斜面中部を含む広い範囲で「実際の」撥水性が現れていた。測定した実際の撥水性の強度は、2 割の地点で WDPT(f) > 1 時間であった。これは Doerr *et al.* (2000) がまとめた世界各地で観測された土壌の WDPT(f) の最大値においても高い値である。

ヒノキ林で強い実際の撥水性が発現していた地点の多くは、潜在的な撥水性が特に強く、かつ試料採取時の含水率が低い地点であった。調査対象としたヒノキ林では、尾根および傾斜変換点上方の凸部がこのような場所に相当した。このような場所では、雨水あるいは土壌水の斜面上方

からの流入より斜面下方への流出が卓越し、特に尾根部では蒸散作用が強いと考えられる。そのためこれらの場所では土壌が乾きやすく、強い実際の撥水性が現れる頻度が高いと考えられる。

2. ヒノキ林と落葉広葉樹林の潜在的な撥水性の違い

同じ TC に対する WDPT(d) および EP は広葉樹林よりヒノキ林で大きく、撥水性は広葉樹林よりヒノキ林で強かった。このことは、土壌の撥水性には有機物の量だけでなく質も強く影響する (Wallis and Horne, 1992) ことを示唆している。単一樹種を用いた人工林において植栽樹種の供給するリターが撥水性の原因物質を多く含む場合、人工林内の土壌に広く撥水性がもたらされると考えられる。このような例はポルトガルのユーカリ造林地などについても報告されている (Doerr *et al.*, 1998)。なお、ヒノキ林の土壌が乾燥時に撥水性を示しやすいことは、土壌分野や水文分野の野外調査を行う者の間では、経験的には知られていた。

ヒノキ林の土壌が強い潜在的な撥水性を示したのは、ヒノキから供給される有機物中に撥水性の原因となる物質が多く含まれるためと考えられる。ヒノキを含む針葉樹は、落葉広葉樹に比べてリター中にエタノールやベンゼンに可溶性成分を多く含むことが知られている (堤, 1956; 河田, 1961)。このような有機溶媒に可溶性成分とは、ワックス、油脂、樹脂、脂肪などであり、いずれの成分も分子構造中に水になじみにくい部分をもち、撥水性の原因物質となり得る。リターから溶脱して鉱質土壌に供給される有機物に含まれるこれら成分の量は、ヒノキ林では多く、広葉樹林では少ないと考えられる。このような地上植生の違いに起因する有機物の成分の違いが、ヒノキ林と広葉樹林の潜在的な撥水性の違いをもたらししていると推察される。

3. 撥水性の水分依存性

乾燥時のヒノキ林では、含水率の低い部分と WDPT(f) が大きい部分は、分布がほぼ一致していた。また、ヒノキ林の土壌最表層で乾燥時にみられた強い実際の撥水性は、湿潤時には著しく弱まった。WDPT(f) は、現地地で得られた含水率の範囲内においては含水率が低い地点ほど大きく、実際の撥水性には水分依存性があった。この傾向はこれまでに調べられた他の撥水性土壌と一致している (DeBano, 1971; Dekker and Ritsema, 1994; Doerr *et al.*, 2000)。

前述したように、実際の撥水性の強度は、潜在的な撥水性が強く、かつ乾燥して含水率が低い場所で強かった。一方、湿潤時のヒノキ林にみられたように、潜在的な撥水性が強い場所でも、含水率が低くない場所では実際の撥水性は弱かった。つまり、潜在的な撥水性が強くても、十分に乾燥しなければ実際の撥水性は強くない。TC と WDPT(f) の間の相関関係が、TC と WDPT(d) より弱かったのも、実際の撥水性にこのような水分依存性があるためと理解できる。なお、潜在的な撥水性が強い場所では、雨の少ない時期に一度撥水性が現れると、水を吸収し

にくくなるためさらに乾燥が強まると考えられる。この意味では、含水率と潜在的な撥水性は独立した要因ではなく、現地での含水率は潜在的な撥水性の影響を受けていると見なすべきであろう。乾燥時のヒノキ林で潜在的な撥水性の強い部分と含水率の低い部分の分布がほぼ一致したのはそのためと考えられる。雨の多い時期には、撥水性の現れた土壌でも繰り返し水と接触することで次第に水になじみ、撥水性が弱まると考えられる。このような撥水性の水分依存性の詳しいメカニズムについては現状では不明の点が多く、今後明らかにすべき点の一つである。

4. ヒノキ林の土壌に強い撥水性が広範囲に現れることの意味

土壌の撥水性が尾根部にしか現れない特性であるならば、斜面スケールの水の動きに及ぼす影響は小さいであろう。しかし、本研究で調査対象としたヒノキ林ではきわめて強い潜在的な撥水性が斜面の大部分に分布していた。このことは、斜面の広い範囲で撥水性の影響による地表流や選択流が生じ得ることを意味し、斜面スケールの水の移動と貯留にも影響する可能性を示唆している。

地表流と選択流のどちらが卓越するかは、Doerr *et al.* (2000) も指摘するように、地表から地中へ連続するマクロポアが存在するか否かにより決まるであろう。つまり、マクロポアがない土壌では、撥水性が現れて土壌マトリックスの吸水が妨げられると、雨水は土壌表面を流下することになり、連続した地表流が生じるであろう。マクロポアがある土壌では、地表流が生じて部分的なものにとどまり、小林 (2002) の実験で示されているようにマクロポアを流れる選択流として雨水が地中に入ると考えられる。また、実際の撥水性には水分依存性があるため、地表流や選択流の発生は撥水性が現れる乾燥時に限られるであろう。これらについては、今後、現地観測に基づき実証する必要がある。

VI. ま と め

1) ヒノキ林では、夏期の乾燥時には尾根部だけでなく斜面中部を含む広い範囲で WDPT(f) が 600 秒を超える実際の撥水性が現れていた。全体の約 2 割の地点では WDPT(f) > 1 時間のきわめて強い撥水性を示した。冬期の湿潤時には実際の撥水性は斜面全体で著しく弱まった。実際の撥水性は体積含水率が低い地点ほど強く、水分依存性が認められた。

2) ヒノキ林では、河道近傍を除く 8 割以上の地点で WDPT(d) > 1 時間のきわめて強い潜在的な撥水性が認められ、約 2 割の地点では WDPT(d) > 24 時間であった。広葉樹林でも潜在的な撥水性はほぼ斜面全体に認められたが、その強度はヒノキ林より弱かった。

3) 全炭素含有率の高い地点ほど潜在的な撥水性が強い傾向が認められた。しかし、同じ全炭素含有率に対する潜在的な撥水性は広葉樹林よりヒノキ林で強かった。この撥水性強度の違いにはヒノキと落葉広葉樹のリターから供給

される有機物の成分の違いが反映されていると推察される。

4) 強い撥水性が斜面の広い範囲で現れるヒノキ林では、地表流や選択流の発生を通じて、斜面スケールの水の移動と貯留にも土壌の撥水性の影響が及んでいる可能性がある。この点については現地観測に基づいて今後明らかにする必要がある。

本研究の遂行にあたり、試験地の使用について関東森林管理局笠間森林技術センターの関係職員の方々にご協力いただいた。本論の作成にあたり、吉永秀一郎博士には草稿を何度も校閲していただき有益な助言をいただいた。ここに記して厚くお礼申し上げる。なお、本研究は農林水産技術会議のプロジェクト「人工針葉樹林における土壌劣化機構の解明」により行われた。

引用文献

- 荒木 誠・宮川 清・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 (II) —今市署管内のヒノキ複層林、上木伐採林およびヒノキ皆伐—新植地における表層土壌の物理性の違い—。日林論 98 : 219-222.
- Bond, R.D. (1964) The influence of the microflora on the physical properties of soils. *Aust. J. Soil Res.* 2 : 123-138.
- Crockford, H., Topalidis, S., and Richardson, D.P. (1991) Water repellency in a dry sclerophyll eucalypt forest: Measurement and processes. *Hydrol. Process.* 5 : 405-420.
- DeBano, L.F. (1971) The effect of hydrophobic substances on water movement in soil during infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35 : 340-343.
- DeBano, L.F. (2000) Water repellency: a historical review. *J. Hydrol.* 231-232 : 195-206.
- Dekker, L.W. and Jungerius, P.D. (1990) Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. *Catena Suppl.* 18 : 173-183.
- Dekker, L.W. and Ritsema, C.J. (1994) How water moves in a water repellent sandy soil: 1. Potential and actual water repellency. *Water Resour. Res.* 30 : 2507-2517.
- Doerr, S.H., Shkesby, R.A., and Walsh, R.P.D. (2000) Soil water repellency: its cause, characteristic and hydro-geomorphological significance. *Earth-Sci. Rev.* 51 : 33-65.
- Doerr, S.H., Shkesby, R.A., and Walsh, R.P.D. (1998) Spatial variability of soil hydrophobicity in fire-prone eucalyptus and pine forests, Portugal. *Soil Sci.* 163 : 313-324.
- Gilmour, D.A. (1968) Water repellence of soils related to surface dryness. *Aust. For.* 32 : 143-148.
- Jungerius, P.D. and Dekker, L.W. (1990) Water erosion in the dunes. *Catena Suppl.* 18 : 185-193.
- 河田 弘 (1961) 落葉の有機物組成と分解にともなう変化について。林試研報 128 : 115-144.
- 小林政広 (2002) 連続する粗大孔隙を含む土層中の水と溶質の移動に関する実験的研究。地形 23 : 659-673.
- Krammes, J.F. and DeBano, L.F. (1965) Soil Wettability: A neglected factor in watershed management. *Water Resour. Res.* 1 : 283-286.
- McGhie, D.A. (1980) The contribution of the Mallet Hill surface to runoff and erosion in the Narrogin of Western Australia. *Aust. J. Soil. Res.* 18 : 299-307.
- 宮崎 紳 (1942) 四国森林植生と土壌形態との関係に就いて。興林会, 東京, 134-146.
- 村井 宏・岩崎勇作 (1975) 林地の水および土壌保全機能に関する研究 (第1報)—森林状態の差異が地表流下、浸透および侵食に及ぼす影響—。林試研報 274 : 23-84.
- 仲谷紀男 (1981) 有機物が関与する土壌の水分特性について—とくに、土壌有機物の存在様式と撥水性を中心に—。農業技術研究所報告 B 32 : 1-74.
- 大政正隆 (1951) プナ林土壌の研究 (特に東北地方のプナ林土壌について)。林野土壌調査報告 1 : 1-243.
- 大政正隆・真下育久 (1957) 森林土壌の吸水性に関する研究。林野土壌調査報告 8 : 25-42.
- Osborn, J.R., Pelishek, R.E. Krammes, J.S., and Letey, J. (1964) Soil wettability as a factor in erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28 : 294-295.
- Raats, P.A.C. (1973) Unstable wetting fronts in uniform and nonuniform soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37 : 681-685.
- Reeder, C.J. and Jurgensen, M.F. (1979) Fire-induced water repellency in forest soils of upper Michigan. *Can. J. For. Res.* 9 : 369-373.
- Richardson, J.L. and Hole, F.D. (1978) Influence of vegetation on water repellency in selected western Wisconsin soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42 : 465-467.
- Ritsema, C.J. and Dekker, L.W. (1994) How water moves in a water repellent sandy soil: 2. Dynamics of fingered flow. *Water Resour. Res.* 30 : 2519-2531.
- Savage, S.M. (1969) Contribution of some soil fungi to water repellency in soil materials. *In Proceedings of Symposium on Water-Repellent Soils.* DeBano, L.F. and Letey, J. (eds.), Univ. California, Riverside, 241-257.
- Scholl, D.G. (1971) Soil wettability in Utah juniper stands. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39 : 344-345.
- Shakesby, R.A., Doerr, S.H., and Walsh, R.P.D. (2000) The erosional impact of soil hydrophobicity: current problems and future research directions. *J. Hydrol.* 231-232 : 178-191.
- Singer, M.J. and Ugolini, F.C. (1976) Hydrophobicity in the soils of Findley Lake, Washington. *Forest Sci.* 22 : 54-58.
- 堤 利夫 (1956) 林木落葉の分解について。京大演報 26 : 59-87.
- Wallis, M.G. and Horne, D.J. (1992) Soil water repellency. *In Advances in Soil Science*, Vol. 20. Stewart, B.A. (ed.), Springer, New York, 91-146.
- Watson, C.L. and Letey, J. (1970) Indices characterizing soil-water repellency based upon contact angle—surface tension relationships. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34 : 841-844.
- 吉岡二郎 (1981) 森林土壌における水環境。ペドロジスト 25 : 39-49.
- 吉岡二郎 (1987) 森林土壌の土壌水分に関する研究 (第5報) 京都府中部および南部山地の水湿状態, 保水量, 水湿指数。林業試験場研究報告 344 : 1-52.