

地質の差異による斜面土層内の雨水挙動に及ぼす樹木根系の影響

宮前 崇*, 平松晋也**, 福山泰治郎**

*信州大学大学院総合工学系研究科山岳地域環境科学専攻

**信州大学農学部森林科学科農山村環境学講座

要約 斜面土層内には様々な不均一性構成要素が存在し、これらは土層内の水文過程のみならず、斜面崩壊に対しても多大な影響を及ぼすことになる。本研究では、土壌構造の不均一性のひとつである樹木根系が土層内での雨水の挙動に及ぼす影響を明らかにするとともに、地質の差異によるその影響の相違を確認するため、砂質片岩地域と風化花崗岩地域の森林斜面において、土層断面にみられる樹木根系の周辺部から流出する水量を計測した。その結果、構成地質の相違に関わらず、土層内部での浸透水の挙動には樹木根系の存在が大きく寄与している事実が明らかになった。表層土層内の透水性が鉛直方向に急激に低下する面である難透水層境界面が明瞭な砂質片岩地域では、境界面付近の樹木根系周辺部からの流出量が卓越したのに対し、深層部まで高い透水性を有している風化花崗岩地域では、すべての深度において樹木根系周辺部からの流出が卓越することが確認された。

キーワード：斜面崩壊，浸透流，樹木根系，土壌の不均一性，水文観測

1. はじめに

森林土壌中には、樹木根系やその腐朽、地中の小動物の活動や雨水の集中により形成される大小の孔隙、土層中に点在する礫、地震に起因したクラック等が多数存在するため、土壌構造の不均一性は極めて大きいことが指摘されている¹⁾。これらの土壌の不均一性は土層内の水文過程のみならず、斜面崩壊に対しても多大な影響を及ぼすことになるため、土層内の水移動を正確に把握し水循環や崩壊発生の予知・予測問題へと展開していくためには、これら土壌構造の不均一性が土層内の雨水の挙動に及ぼす影響を解明する必要がある。

森林に広く一般的に存在する樹木や根系が土層内への雨水浸透に及ぼす影響に着目した研究としては、以下のような事例がある。Durocher²⁾や小林ら³⁾は、平地林において樹木の根元付近の土壌水分吸引圧を空間的に測定し、降雨時に樹幹流を起源とした鉛直下方への速い流れが生じて樹幹直下の不透水層上に部分的な飽和帯が形成され、樹木近傍において鉛直方向に速い流れが生じている事実を指摘している。嶋田ら⁴⁾は、比抵抗探査を用いて浅層土壌水分分布を計測したところ、水収支としては林内雨に比べて樹幹流は量的に少ないにも関わらず、樹幹直下の林

床領域は樹幹外の領域に比べて高い地下水涵養効果があることを示した。Noguchi et al.⁵⁾は、林地内へ白色ペンキで着色した水を散布して土壌断面における染色パターンを観察し、腐朽根とともに生根も土壌との境界部が選択的な水移動経路として機能していることを示した。梁ら⁶⁾は、樹幹流を考慮した斜面土層での雨水浸透モデルを用いた数値実験により、樹幹流による局所的な基岩面飽和帯の形成プロセスを明らかにし、降雨の浸透に対応した素早い飽和帯形成による斜面中上部の崩壊発生の危険性を指摘している。平松・熊沢⁷⁾は、砂質片岩地域の現地斜面内で散水実験を実施し、雨水の浸透に伴って不飽和土壌中で生じる樹木根系部周辺での浸透水の挙動を把握し、樹木根系が降雨時に雨水の選択的な経路として働き、森林内での雨水の挙動に樹木根系が大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。宮前・平松⁸⁾は、樹木根系以外の不均一性要素を排除するために実験水路に敷き詰めた均一土壌に構造を単純化した擬似樹木根を水路底面と平行に埋設して行った地下水位形成実験により、樹木根系が水路内に存在すると水路下流端からの地下水流出量は存在しない場合よりも増加することや、斜面全体の透水係数は水路内への樹木根系の存在により増加することを示した。さらに、宮前ら⁹⁾は、鉛直方向に擬似樹木根を埋設したカラムに散水した鉛直浸透実験を実施し、雨水の鉛直浸透過程においても樹木根系の存在が地下水流出開始時間を短縮させ、地下水流出量の

受付日 2012年12月3日

採択日 2013年2月4日

増加を促すなど、樹木根系が土層内での雨水の挙動に多大な影響を及ぼすことを明らかにした。このように樹木根系が土層内の雨水の移動経路として選択的に働いていることが指摘されているものの、実際の斜面土層内部の樹木根系周辺部における雨水の流出量を定量的に把握した研究事例は少なく、さらには地質の差異による樹木根系が土層内での雨水の挙動に及ぼす影響の相違等、未だ明らかにされていない事象が多い。

本研究では、透水性の異なる変成作用を受けた砂質片岩地域と風化の進んだ花崗岩地域の2地域において自然降雨時に斜面土層断面から流出する浸透水を計測し、斜面土層内の不均一性構成要素のひとつである樹木根系が土層内での水移動に及ぼす影響を明らかにするとともに、地質の差異が土層内に存在する樹木根系周辺部での雨水の挙動に及ぼす影響を比較した。

2. 研究対象地と研究方法

2.1 研究対象地の概要

研究対象地は、愛媛県重信川水系の井内川流域上

宿野谷（以下、上宿野谷試験地と呼ぶ）と長野県天竜川水系の与田切川流域内（以下、与田切川試験地と呼ぶ）に設置した（図1）。上宿野谷試験地は、標高365m、斜面勾配23度の平衡斜面であり、植生はスギの人工林、基岩地質は砂質片岩であり中央構造線の影響を受けた変成岩地帯である。与田切川試験地は、標高1,210m、斜面勾配22度の尾根付近の平衡斜面であり、植生はカラマツの人工林、基岩地質は風化花崗岩である。

上宿野谷試験地の位置する愛媛県重信川流域は瀬戸内海式気候区¹⁰⁾に位置し、試験地近傍の国土交通省表川雨量観測所での1980～2011年の観測結果から年平均降水量は1,380mmである。一方、与田切川試験地は中央高地式気候区¹⁰⁾に位置し、試験地近傍の気象庁飯島観測所での1976～2011年の年平均降水量は1,979mmである。

2.2 土壌物理特性

試験地における斜面土層の透水性と深度方向の土層の状態を把握するため、深度別に採取した100ml森林土壌サンプルによる飽和透水試験と、土層の貫入抵抗を調べる斜面調査用簡易貫入試験（筑波丸東）を実施した。斜面調査用簡易貫入試験は、先端

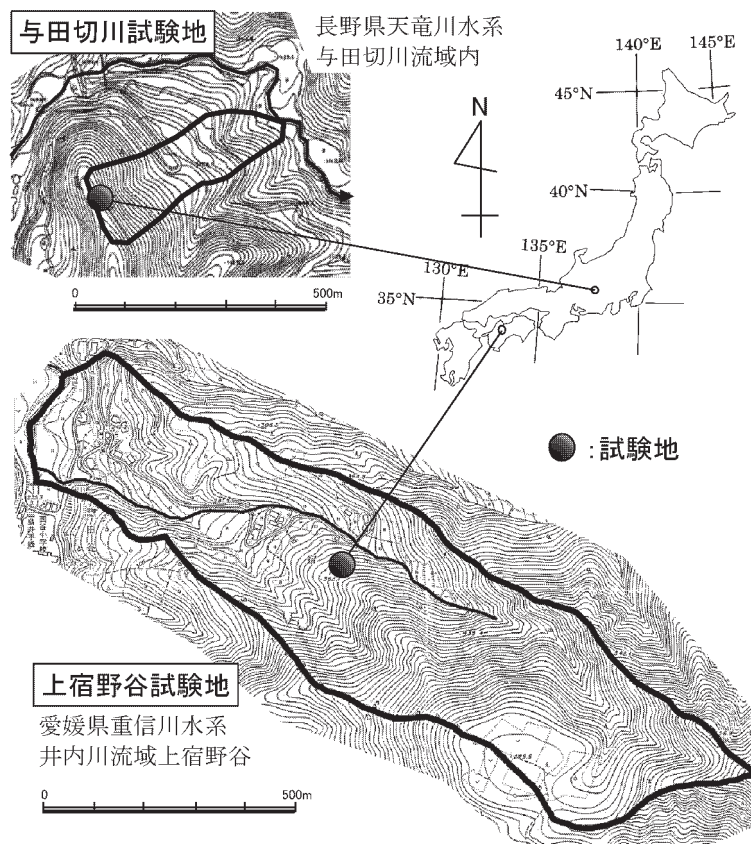


図1 試験地の位置

Fig. 1 Position of the experiment area

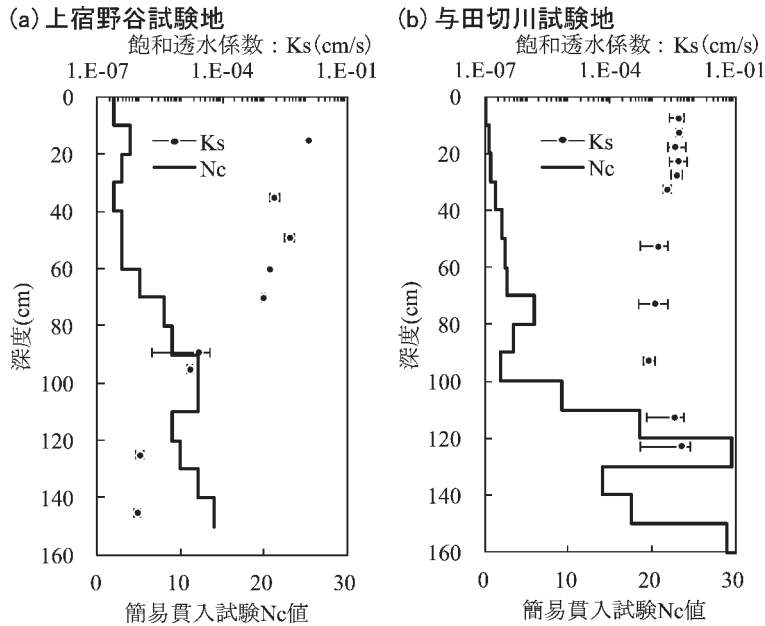


図2 飽和透水係数と簡易貫入試験 Nc 値の深度分布
 Fig. 2 Depth distribution of saturated transmission coefficient and simple penetration test value Nc

に直径25mmの貫入コーンの付いたロッドを重さ5kgのハンマーで50cmの自由落下により打撃し、10cm貫入するのに要する打撃数(Nc)を計測する試験である。逢坂¹¹⁾はNc値10以下を根系の伸長が可能な層とし、日浦ら¹²⁾はNc値10を崩壊時のすべり面にあたる深さ(花崗岩斜面土層の場合)に相当することを示した。また、塚本¹³⁾は、透水係数が 10^{-4} cm/s程度以上の部分が斜面での水移動を考える際の斜面土層となることを指摘し、透水係数が 10^{-5} cm/sのオーダー以下の面が斜面での基盤面(ここでは難透水層境界面と呼ぶ)であるとしている。

飽和透水係数(Ks)とNc値の深度分布を図2に示す。上宿野谷試験地では、深度90cmを境に飽和透水係数が2オーダーも低下して 10^{-4} cm/s以下となり、またNc値が10以上であることから、深度90cmに難透水層境界面が存在するものと考えられる。一方、与田切川試験地では、深度100cmを境にNc値は10以上に増加しているものの飽和透水係数の低下は見られず、100cm以深においても 10^{-3} cm/s以上の高い透水性を示している。与田切川試験地をトレンチ掘削する際に土層断面を観察したところ、深度50cm付近から徐々に小さな礫が土層内に点在し、深度100cmからは直径20cm程度の大径礫が混じる土層であった。礫周辺の土質は、深度の増加とともに無機質な粒の粗いマサ土となり、土層断面内に存在する礫自体も風化花崗岩であった。与田切川試験地の100cm以深において10以上のNc

値を示したのにも関わらず 10^{-3} cm/s以上の高い透水性を示した理由として、貫入試験ではマサ土のみならず風化した礫をも貫いて計測しているのに対し、飽和透水試験に用いる森林土壌サンプルはわずか100mlであり礫を避けてマサ土のみを採取する結果となった事実が挙げられる。

2.3 観測方法

森林土壌中に存在する樹木根系周辺部からの流出量を計測するため、図3～4と写真1に示すように深度100cmまでトレンチ掘削した土層断面にみられた活性根と腐朽根(写真2)を対象に、長さ5cmの円筒を土層断面へと根系を覆うように差し込み、土層断面からの流出水を採水した。使用した円筒の内径は、上宿野谷試験地では5.0cm、与田切川

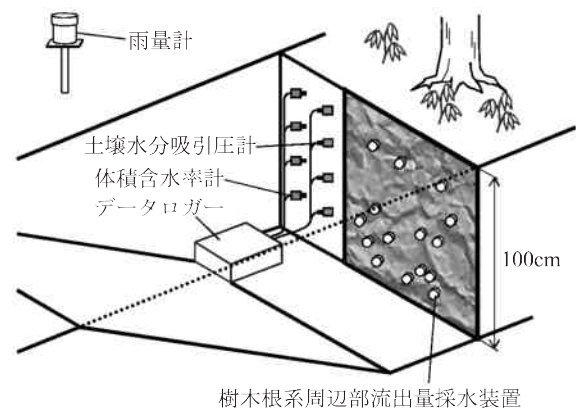


図3 観測施設の模式図
 Fig. 3 Schematic view of observation facilities

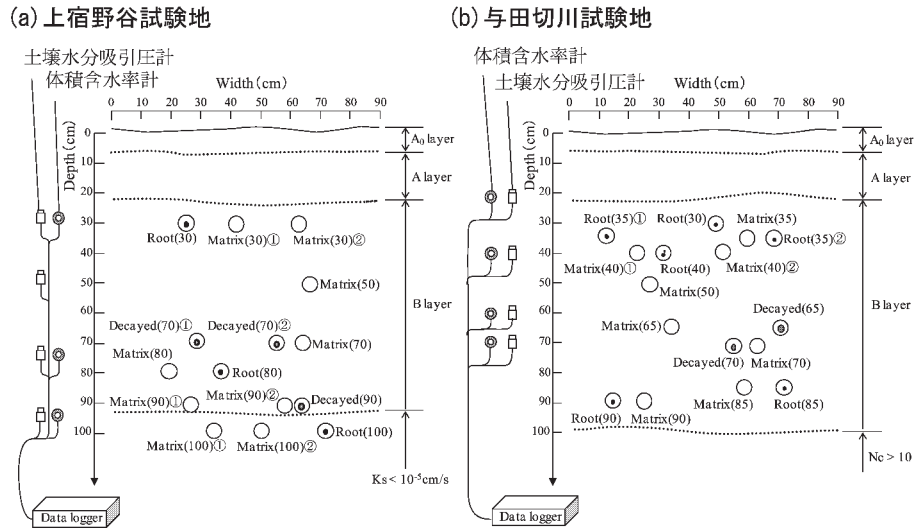


図4 土層断面に設置した観測装置の状況

Fig. 4 Status of observation equipment installed in trench cross section

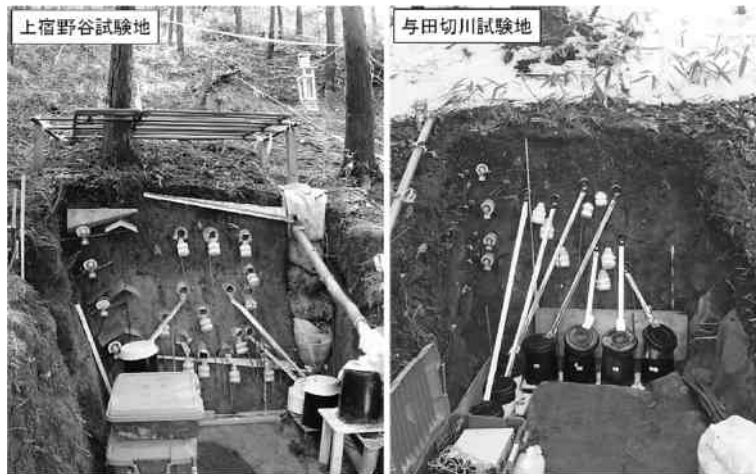


写真1 土層断面に設置した観測施設

Photo 1 Observation facilities placed in cross-sectional soil layer

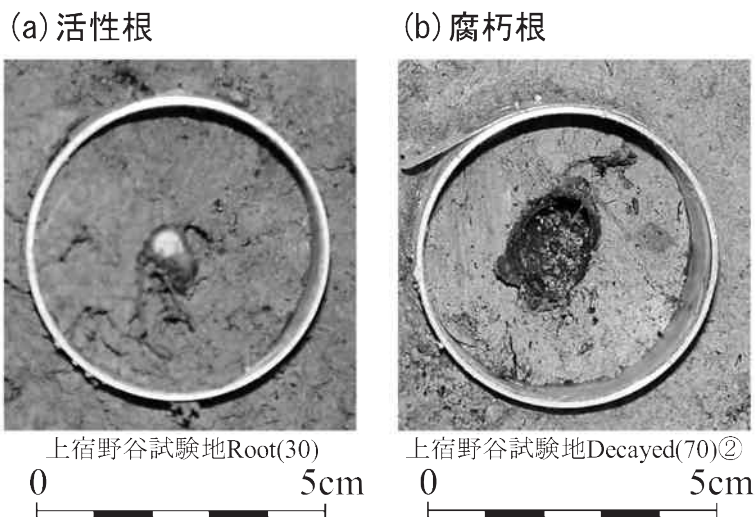


写真2 土層断面に出現した樹木根系

Photo 2 Forest-root appeared to cross-sectional soil layer

試験地では5.3cmである。また、樹木根系の影響を比較するため、根系採水部と同深度のマトリックス (soil matrix) 部にも同様の採水装置を設置した。土層断面に設置した採水装置と樹木根系の形状を表1に示す。なお、与田切川試験地の活性根採水部であるRoot (40) では、活性根が隣接して2本存在したためひとつの円筒で採水した。上宿野谷試験地の活性根採水部と両試験地のマトリックス採水部の採水方法は、流出水をポリ瓶に溜めて計測期間

毎にメスシリンダーで計量し、その期間の総流出量とした。これらの計測間隔 (以下、採水期間とする) は、1降雨毎を原則とした。また、上宿野谷試験地の腐朽根採水部及び与田切川試験地の活性根と腐朽根採水部については、1転倒4mlの転倒マス (Dabis; Rain Collector II) により連続的に自動計測した。さらに、土層断面には土壌水分吸引圧計 (Kadec; ポーラスカップ式土壌水分計 KDC-S5) と体積含水率計 (IKEDA KEIKI; ADR 式土壌水

表1 土層断面に設置した採水装置と樹木根系の形状

Table 1 Water sampling equipment placed in cross-sectional soil layer and shape of forest root

(a) 上宿野谷試験地

深度 (cm)	対象	名称	樹木根系				備考
			長径(mm)	短径(mm)	断面積(cm ²)	円周長(cm)	
30	活性根	Root(30)	11	7	0.41	3.3	
30	マトリックス	Matrix(30)①	—	—	—	—	
30	マトリックス	Matrix(30)②	—	—	—	—	
50	マトリックス	Matrix(50)	—	—	—	—	
70	腐朽根	Decayed(70)①	11	5	0.29	3.0	
70	腐朽根	Decayed(70)②	18	14	1.56	5.9	
70	マトリックス	Matrix(70)	—	—	—	—	
80	活性根	Root(80)	16	9	0.9	4.6	
80	マトリックス	Matrix(80)	—	—	—	—	
90	腐朽根	Decayed(90)	14	8	0.74	4.3	
90	マトリックス	Matrix(90)①	—	—	—	—	
90	マトリックス	Matrix(90)②	—	—	—	—	
100	活性根	Root(100)	7	3	0.13	2.3	
100	マトリックス	Matrix(100)①	—	—	—	—	
100	マトリックス	Matrix(100)②	—	—	—	—	

(b) 与田切川試験地

深度 (cm)	対象	名称	樹木根系				備考
			長径(mm)	短径(mm)	断面積(cm ²)	円周長(cm)	
30	活性根	Root(30)	9	9	0.64	2.8	
35	活性根	Root(35)①	6	6	0.28	1.9	
35	活性根	Root(35)②	9	7	0.49	2.5	
35	マトリックス	Matrix(35)	—	—	—	—	
40	活性根	Root(40)	7, 4	6, 3	0.33, 0.09	2.1, 1.1	2本隣接
40	マトリックス	Matrix(40)①	—	—	—	—	
40	マトリックス	Matrix(40)②	—	—	—	—	
50	マトリックス	Matrix(50)	—	—	—	—	
65	腐朽根	Decayed(65)	13	12	1.23	3.9	
65	マトリックス	Matrix(65)	—	—	—	—	
70	腐朽根	Decayed(70)	10	9	0.71	3.0	
70	マトリックス	Matrix(70)	—	—	—	—	
85	活性根	Root(85)	10	8	0.63	2.8	
85	マトリックス	Matrix(85)	—	—	—	—	
90	活性根	Root(90)	4	4	0.13	1.3	
90	マトリックス	Matrix(90)	—	—	—	—	

分計 Theta Probe type ML2x) を図 4 に示すように設置し、土壌水分吸引圧と体積含水率を10分間隔で自動観測した。上宿野谷試験地では土壌水分吸引圧計を深度30cm, 50cm, 75cm, 95cmの4深度に、体積含水率計を30cm, 75cm, 95cmの3深度に、与田切川試験地では土壌水分吸引圧計と体積含水率計ともに深度20cm, 40cm, 60cm, 70cmの4深度に設置した。降雨量は、土層断面近傍に雨量計 (Onset ; DATA LOGGING RAIN GAUGE RG2-M) を設置し、林内雨を観測した。観測期間は、上宿野谷試験地では2002年11月8日~2004年10月21日の714日間、与田切川試験地では2011年10月29日~2012年8月19日の179日間 (冬期の2011年12月5日~2012年4月5日を除く) である。与田切川試験地の活性根採水部と腐朽根採水部の自動計測及び土壌水分吸引圧と体積含水率の観測は、2012年4月6日から開始した。

3. 観測結果

3.1 樹木根系周辺部からの流出量

観測された各採水部からの流出量と期間内の総降雨量及び最大時間雨量を表2に示す。表中、空欄は採水装置を設置していないことを示し、括弧値は採水時に容器容量以上の水の出水や容器外への漏水、採水装置以外の箇所から容器への水の浸入などにより正確に計測できなかったことによる参考値である。上宿野谷試験地の総降雨量において下線が付いている値は、試験地近傍の表川雨量観測所での値であり、その他の値は試験地に設置した雨量計による値である。与田切川試験地の深度90cmの採水部については、採水装置の落下により2011年12月5日に計測を終了した。採水期間数は、上宿野谷試験地で31回、与田切川試験地で23回である。

観測された各採水部からの総流出量と総降雨量との関係を活性根 (深度30~50cmと深度80cm以深) と腐朽根に分けて試験地毎にとりまとめたものを図5に示す。樹木根系 (活性根, 腐朽根) は土層内で分岐・屈曲しているため同条件での比較とはならないものの、樹木根系周辺部からの流出量 (以下、根系流量と呼ぶ) は、両試験地ともにマトリックス部よりも多い傾向にある。

砂質片岩地域である上宿野谷試験地では、観測期間内の最大総降雨量は386mm (Period. 11) であった。同試験地の活性根周辺部からの流出量 (以下、活性根流量と呼ぶ) とマトリックス部からの流出量

(以下、マトリックス流量と呼ぶ) との関係を見ると、比較的浅い深度30cm~50cmの位置では活性根からの流出はほとんど見られないものの (最大で 1.7×10^1 ml), マトリックス流量は 2.9×10^2 mlまで計測された。深度80cm~100cmになると、流出量が平均 2.3×10^1 mlであるマトリックス部に比べて活性根流量は平均 4.6×10^2 mlとマトリックス流量を1オーダー以上上回るようになる。腐朽根周辺部からの流出量 (以下、腐朽根流量と呼ぶ) は、同深度のマトリックス部に比べて2~3オーダー多く、最大で 1.5×10^4 ml (深度90cm) まで計測された。後述するように、上宿野谷試験地で根系流が発生した降雨イベント時には、深度50cm以深の土壌水分吸引圧が $-0.0\text{cmH}_2\text{O}$ 近くまで低下する傾向にある事実より、土層内が飽和領域に達すると根系流量が卓越する傾向となることが推察される。

一方、風化花崗岩地域の与田切川試験地では、採水期間内の最大総降雨量は174mm (Period. 20) であった。根系流量は平均 3.3×10^1 mlであり、深度に関わらずマトリックス部 (平均 7.9×10^0 ml) よりも1オーダー程度多い結果となったのに対し、活性根流量と腐朽根流量では上宿野谷試験地のような明瞭な差異は認められなかった。この理由としては、与田切川試験地には上宿野谷試験地のような明瞭な難透水層との境界面が見られないため、特定の深度において飽和帯が形成されないことが挙げられる。このため、腐朽根の内部への浸透水の集中が発生しなかったために活性根と同様に根系周辺部の速い流れのみが卓越したものと推察される。

上宿野谷試験地では総降雨量185mm (Period. 25) の降雨 (降雨時間: 52時間) を、与田切川試験地では総降雨量131mm (Period. 3) の降雨 (降雨時間: 20時間) を例として、各採水部からの流出量を深度毎にとりまとめたものを図6に示す。上宿野谷試験地では、マトリックス流量が0~37mlと総じて少なかったのに対し、根系流量は0~1,464mlと多い結果となった。特に、腐朽根流量は144ml, 520ml, 1,464ml (それぞれ深度70cm, 70cm, 90cm) と活性根流量と比べて卓越し、難透水層境界面付近である深度90cmの腐朽根で1,464mlと、流出量は最大値を示した。一方、与田切川試験地では、マトリックス流量は0~180mlと上宿野谷試験地よりも全体的に多いものの、根系流量は44~296mlと観測を実施したすべての深度で流出が確認され、各深度においてマトリックス部よりも増加する結果となった。

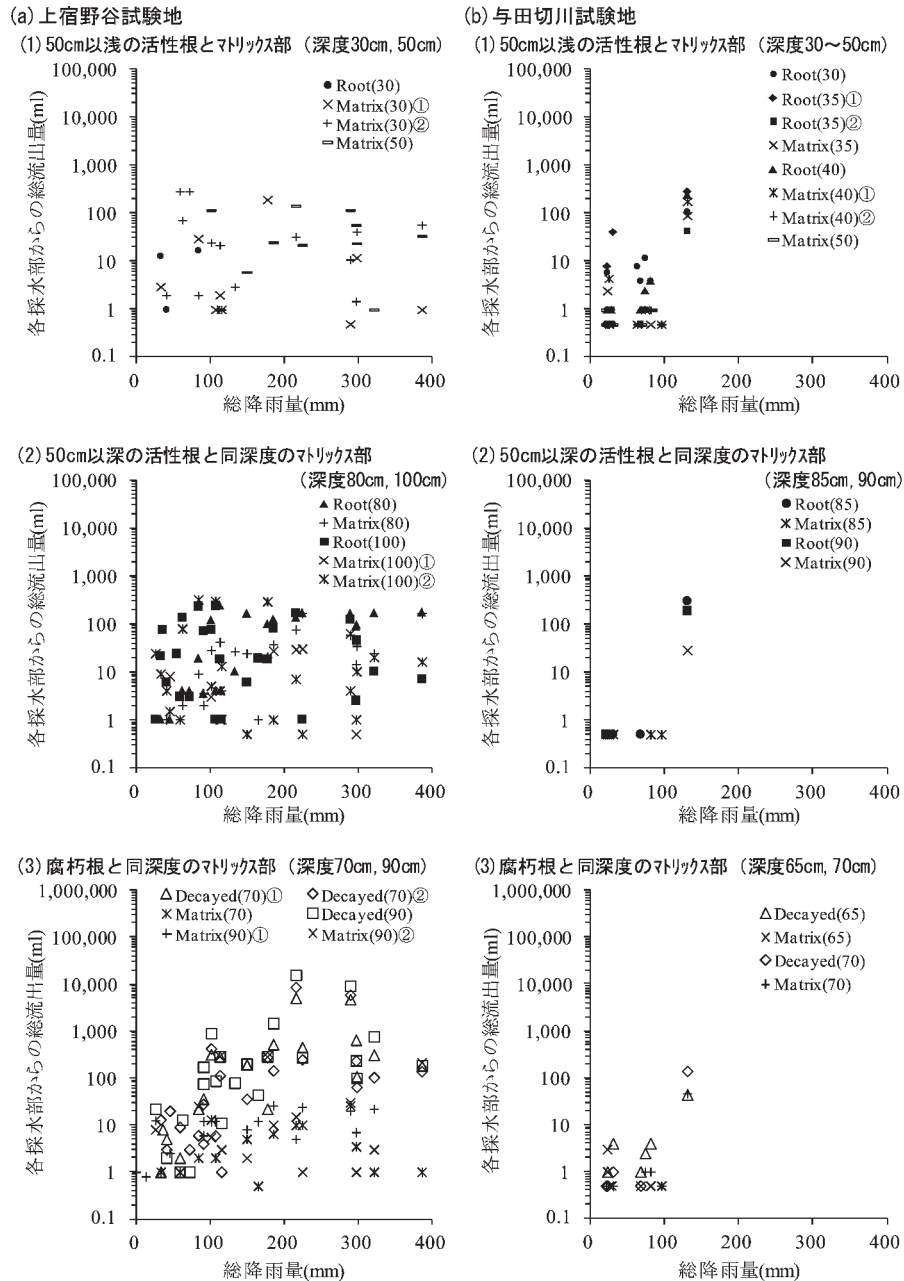


図5 観測された各採水部からの総流出量と総降雨量との関係

Fig. 5 Relationship between total runoff from each of observed samples and total rainfall

上宿野谷試験地での降雨量と腐朽根流量の経時変化を2004年6月19日～6月26日 (Period. 25) を例に図7に示す。図中には、土壌水分吸引圧と体積含水率の経時変化を併記した。期間内の総降雨量は235mm、最大時間雨量は36mm/hrであり、試験地近傍の表川雨量観測所での2002～2011年の年間最大時間雨量は平均34mm/hrであることから、当期間内の降雨は上宿野谷試験地における年間降雨の中でも最大級の降雨イベントとして位置付けられる。腐朽根流量の流出継続時間は、降雨の継続時間に比べて短く、時間雨量が8mm/hr以上になると流出が

開始していることがわかる。腐朽根流量は、特に深度90cmで多く、最大で448ml/hr/1本もの流出がみられた。Period. 25での期間内の活性根流量の総量は0ml, 123ml, 80ml (それぞれ深度30cm, 80cm, 100cm)、マトリックス流量の総量は最大で37ml (深度80cm)であったことから、腐朽根は斜面土層内の雨水の伝達においてバイパスの役割を果たしていると言えよう。土壌水分吸引圧と体積含水率の経時変化に着目すると、腐朽根からの流出開始時の深度75cmと深度95cmの体積含水率は急激に上昇し、土壌水分吸引圧も深度50cmや深度95cmで

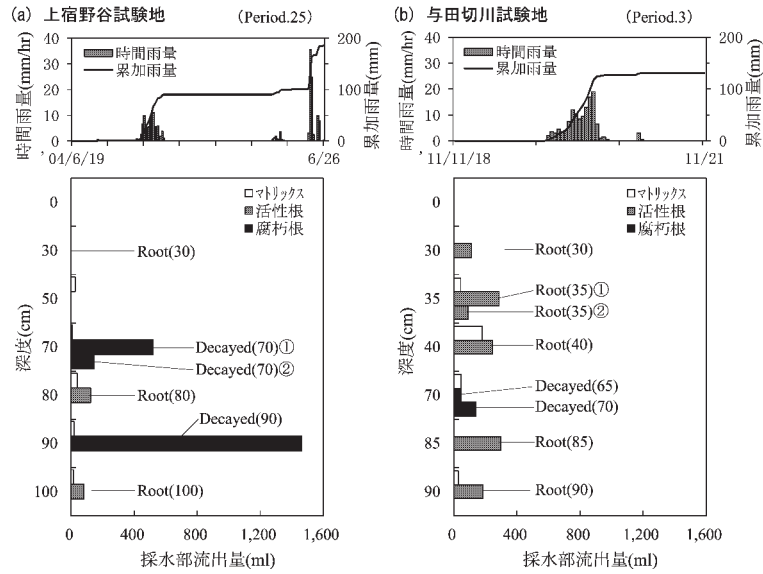


図6 採水された樹木根系周辺部からの流出量
Fig. 6 Sampled water runoff from the around forest root

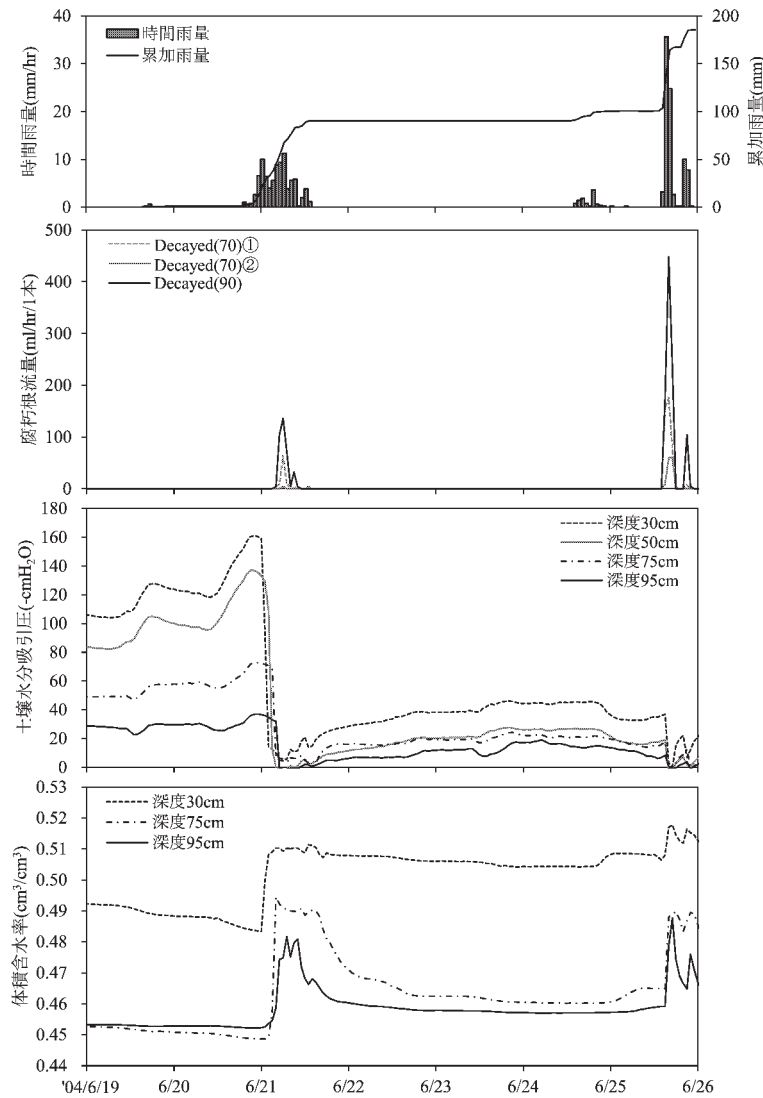


図7 上宿野谷試験地での腐朽根流量の経時変化 (Period. 25)
Fig. 7 Change with time for decayed root flow in Kamiyadono experimental site

-0.0 cmH₂O 近くまで低下していることから、腐朽根からの流出時には難透水層境界面上に飽和帯が形成されていたものと推察される。これらの傾向は、上宿野谷試験地でのすべての観測結果において同様に認められた。一方、与田切川試験地では、活性根採水部と腐朽根採水部の自動計測及び土壌水分吸引圧と体積含水率の観測を Period. 3 (2011年11月12日～2011年11月20日) より後の2012年4月6日から開始したが、その後顕著な流出のあった降雨イベントが発生しなかったため、与田切川試験地での腐朽根流量の経時変化や土壌水分吸引圧と体積含水率の経時変化を示すことは出来なかった。観測を続け、さらに人工降雨実験を実施することにより、飽和領

域からの流出か不飽和領域からの流出かを今後考察していく予定である。

3.2 体積含水率と土壌水分吸引圧との関係

観測期間内に計測された体積含水率と土壌水分吸引圧との関係（湿潤過程の土壌水分特性曲線）を図8に示す。土壌水分吸引圧は、両試験地のいずれの深度においても体積含水率の増加とともに低下するようになる。同一の土壌水分吸引圧に対する体積含水率の値は、深度の増加とともに低下し、土層深度の増加とともに土壌の保水性は低下することがわかる。

粘土分が多い上宿野谷試験地では、土壌水分吸引圧の変化に対する体積含水率の変動幅は少なく、土

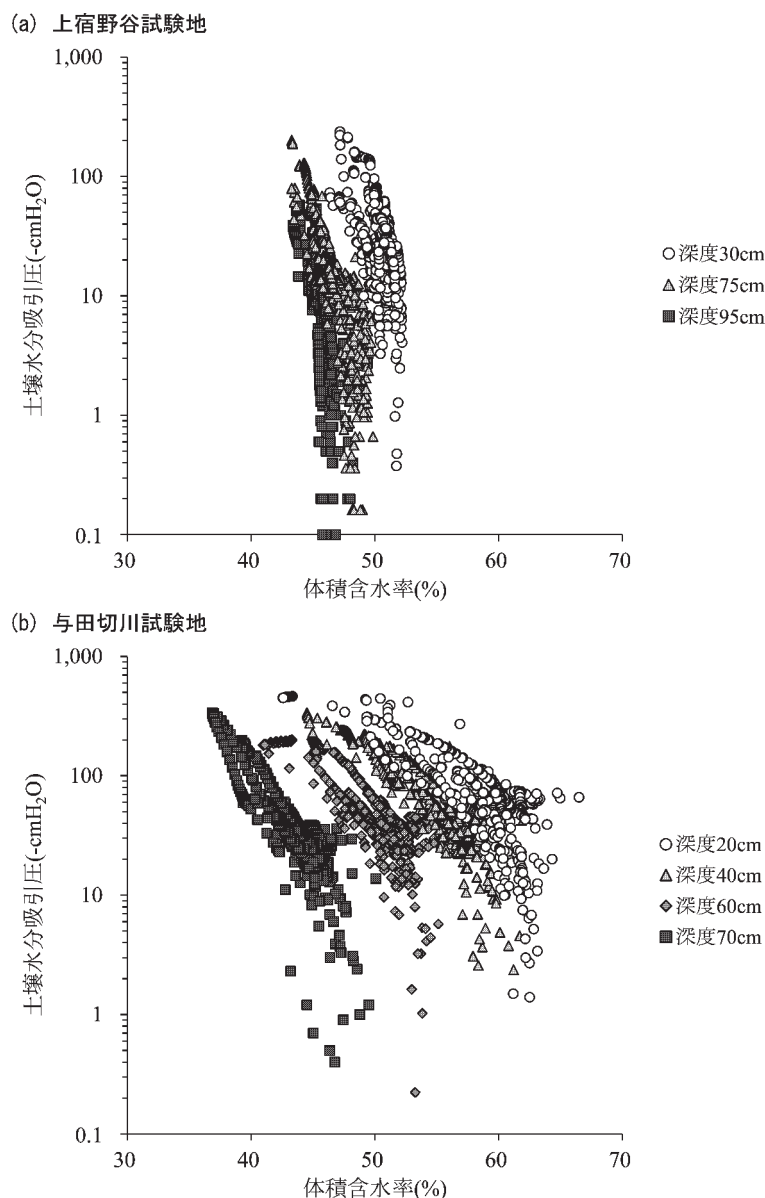


図8 体積含水率と土壌水分吸引圧との関係（土壌水分特性曲線：湿潤過程）

Fig. 8 Relationship between volumetric water content and suction (soil moisture characteristic curve : moist processes)

壤水分特性曲線の傾きは急な形状になっている。湿潤過程における土壌水分吸引圧は、すべての深度で -0 cmH₂O 近くにまで低下している。一方、砂質分が多い与田切川試験地では、土壌水分吸引圧が -10cmH₂O 以上の乾燥状態下においては体積含水率の変動幅は大きいのにに対し、土壌水分吸引圧が -10cmH₂O 以下になると体積含水率の変動幅は急激に小さくなるものの、土壌水分吸引圧の -0 cmH₂O 付近への低下は見られない。このことから、上宿野谷試験地では降雨時に飽和帯を形成しやすいのに対し、与田切川試験地では飽和帯は形成しにくいことがわかる。

Jury and Horton¹⁴⁾は、土壌水分特性曲線の形状の違いを土壌の固相の特徴から、粘質土では大間隙がほとんどなく、粒径分布が幅広いために土壌水分吸引圧が減少すると体積含水率はゆるやかに低下するのに対し、砂質土では間隙が大きく、少ない吸引圧で排水するため土壌水分吸引圧の大きい毛管領域で体積含水率が急激に減少することを指摘している。この指摘を考慮すると、上宿野谷試験地は粘質土、与田切川試験地は砂質土の特徴と一致していることがわかる。

4. 考 察

4.1 樹木根系周辺部における浸透流のモデル化

土層断面からの浸透流出は、樹木根系周辺部に集中することが明らかとなったが、ここでは土層断面に出現した樹木根系のサイズと土層深度に着目し、樹木根系周辺部からの流出量のモデル化を試みた。1本あたりの活性根流量と腐朽根流量を推定するため、採水期間内の総降雨量、土層断面での樹木根系の出現深度、樹木根系の断面円周長を説明変数とし

て重回帰分析を行った。その結果、上宿野谷試験地の活性根流量を除く推定式では、観測数が少なかつたために説明変数のうち樹木根系の断面円周長に高い関連性が認められなかったことから、断面円周長を除いた総降雨量と出現深度のみを説明変数として推定式を構築した。両試験地の活性根流量と腐朽根流量の推定式は、(1)~(4)式でそれぞれ表される。

上宿野谷試験地

$$Q_L = 1.8 \times 10^{-2} \cdot R_s^{0.982} \cdot Z^{0.344} \cdot S^{0.702} \quad (R^2 = 0.19) \dots (1)$$

$$Q_D = 3.0 \times 10^{-7} \cdot R_s^{2.328} \cdot Z^{1.859} \quad (R^2 = 0.49) \dots (2)$$

与田切川試験地

$$Q_L = 9.2 \times 10^{-4} \cdot R_s^{2.210} \cdot Z^{-0.084} \quad (R^2 = 0.48) \dots (3)$$

$$Q_D = 1.5 \times 10^{-2} \cdot R_s^{1.982} \cdot Z^{-0.627} \quad (R^2 = 0.58) \dots (4)$$

ここに、 Q_L ：1本あたりの活性根流量 (ml)、 Q_D ：1本あたりの腐朽根流量 (ml)、 R_s ：採水期間内の総降雨量 (mm)、 Z ：樹木根系の出現深度 (cm)、 S ：樹木根系の断面円周長 (cm)、 R^2 ：決定係数である。

1本あたりの活性根流量： Q_L と腐朽根流量： Q_D について、観測された実測値と(1)~(4)式を用いて再現された計算値とを比較した結果を図9に示す。 Q_L と Q_D の実測値と計算値との間には、少なからずばらつきは見られるものの、ほぼ1：1の関係にあり、両試験地の活性根流量と腐朽根流量は比較的良好に再現されていることがわかる。しかしながらその関係を詳細にみると、計算値は、実測流量が少ないときには1~2オーダー程度過大に、逆に実測流量が多いときには1~2オーダー程度過小に評価されている。特に、上宿野谷試験地において10,000 ml程度もの腐朽根流量を観測した値に対する計算値は、最大2オーダーも過小に評価される結果となった。

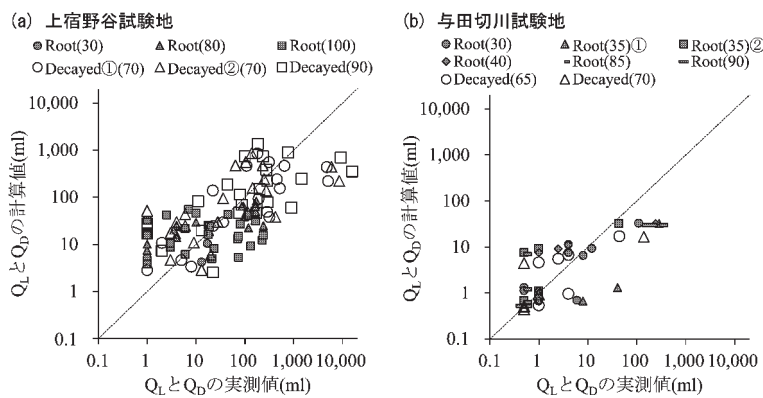


図9 Q_L と Q_D の実測値と計算値との比較

Fig. 9 Comparison between the measured value and calculated value of Q_D and Q_L .

一般に、斜面崩壊は斜面土層内の地下水位が上昇した場合に発生することになるため、本研究により構築した予測式を斜面崩壊予測問題へと展開しようとした場合、流出量が多い場合に実際より流出量を過小評価する恐れがある。斜面崩壊予測モデルにおいて、流出量を過小評価することは計画論上危険側の設定となるため、根系流量予測式の改善の余地は多分に残されているといえよう。本研究で提示した(1)~(4)式は、トレンチ断面に出現した樹木根系を対象とした限られた水文観測データを基にしたものである。より精度の高い推定式を構築することを目的として、人工的に強度を調節した人工降雨実験（散水実験）や、樹木根系以外の不均一性要素を排除するために均一土壌に樹木根を埋設した水路実験⁷⁾や鉛直浸透実験⁸⁾を現在実施中である。今後は、これらの実験結果を用いて、根系流量推定式の精度向上を目指したい。

4.2 構成地質による流出状況の相違

両試験地の活性根流量と腐朽根流量の推定式：(1)~(4)式の説明変数： R_s （採水期間内の総降雨量）のベキ数を比較すると、上宿野谷試験地では、活性根で0.982、腐朽根で2.328であり、流出量に対する総降雨量の影響度合いは腐朽根が活性根の2倍以上となっている。一方、与田切川試験地では、 R_s のベキ数は活性根で2.210、腐朽根で1.982を示し、その差はほとんど認められない。説明変数： Z （樹木根系の出現深度）のベキ数は、上宿野谷試験地では活性根（(1)式）で0.344、腐朽根（(2)式）で1.859と、深度の増加とともに根系流量が増加し、この傾向は腐朽根においてより顕著となっている。この結果は、上宿野谷試験地の根系流量が深層ほど増大することを意味し、斜面土層内の水移動において腐朽根や活性根がバイパスとしての役割を果たしていることを裏付けるものである。一方、与田切川試験地の Z のベキ数は、活性根では-0.084と限りなく0に近い値となり、深度方向への変化が少ないことを示している。腐朽根に関しては、観測事例が少なく、また、その出現深度も近接しているため、確定的な考察を加えるまでには至らなかった。

地表面に到達した雨水は、土層内を鉛直浸透して難透水層境界面付近に集中することになる。樹木根系の表面ではマトリックス部よりも速い流れが発生し、かつ腐朽根では内部に更に早い流れが発生することから、浸透水はこれらを選択的に利用して側方流出している。このため、難透水層境界面の明瞭な上宿野谷試験地では、難透水層境界面付近の樹木根

系、特に腐朽根からの流出が卓越したものと考えられる。一方、深層部まで高い透水性を維持している風化花崗岩地域の与田切川試験地においては、特定の深度に帯水層は発生しないため、腐朽根と活性根の流出量には明瞭な差異が認められなかったものの、土層断面の深度によらず樹木根系が選択的な浸透流の経路として働き、樹木根系周辺部で卓越した浸透流が発生した事実は注目に値する。

5. ま と め

森林土壌中に存在する土壌構造の不均一性の中でも最も一般的に見られる樹木根系（活性根・腐朽根）の存在が土層内での水移動に及ぼす影響を定量的に把握するとともに、将来的には崩壊予測問題へと展開することを目的とし、砂質片岩地域と風化花崗岩地域の森林斜面において、土層断面からの樹木根系周辺部の浸透水の挙動を把握した。その結果、地質の差異に関わらず、土層内部での雨水の挙動には樹木根系の存在が大きく関与している事実が明らかとなった。表層土層内の透水性が鉛直方向に急激に低下する難透水層境界面が明瞭な砂質片岩地域では、境界面付近の樹木根系周辺部からの流出量が卓越し、浸透水の選択的な経路として樹木根系周辺部が機能していることがわかった。一方、深層部まで高い透水性を有している風化花崗岩地域においても樹木根系周辺部からの選択的な流出は確認され、この傾向は特定の深度には発生せず、深度に関わらずすべての樹木根系周辺部においてマトリックス部よりも卓越した流出が確認された。このように、地質に起因する土層構造の相違により流出状況は異なるものの、樹木根系の存在は降雨時における土層内の水移動に大きな影響を及ぼす事実が明らかになった。今後は、降雨開始時の土壌水分状況や根系のサイズ、密度、伸張方向等の相違による根系流量の差異を定量化することにより、本研究で提示した根系流モデル：(1)~(4)式に改良を加え、同モデルの精度の向上を計る予定である。さらに、崩壊発生場所のみならず発生時刻の予測精度を向上させるため、樹木根系の存在を加味した斜面崩壊発生予測モデルの構築を目指したい。

引用文献

- 1) 宮崎 毅 (2000)：環境地水学，東京大学出版会，8章，p.131-149

- 2) Durocher, M. G. (1990) : Monitoring spatial variability of forest interception, *Hydrological Processes*, Vol. 4, No. 3, p. 215-229
- 3) 小林政広・小野寺真一・加藤正樹 (2000) : 樹木の存在が林地土壌中の水分動態に与える影響, *日本林学会誌*, Vol.82, No.3, p.287-294
- 4) 嶋田 純・大角京子・大場和彦・丸山篤志 (2008) : 比抵抗探査法を用いた広葉樹林床土壌における樹幹流の影響評価と地下水涵養効果の評価, *土壌の物理性*, No.108, p.10-28
- 5) Noguchi S., Nik A. R., Kasran B., Tani M., Sammori T. and Morisada K. (1997) : Soil Physical Properties and Preferential Flow Pathways in Tropical Rain Forest, Bukit Tarek, Peninsular Malaysia, *Journal of forest research*, Vol. 2, No. 2, p. 115-120
- 6) 梁 偉立・小杉賢一朗・水山高久 (2010) : 樹幹流に起因する飽和帯の形成が斜面安定に与える影響, *砂防学会誌*, Vol.63, No.1, p.22-30
- 7) 平松晋也・熊沢至朗 (2002) : 樹木根系の存在が森林土壌中の水分移動に与える影響, *砂防学会誌*, Vol.55, No.4, p.12-22
- 8) 宮前 崇・平松晋也 (2012) : 樹木根系周辺部における斜面土層内の雨水の挙動に関する実験的研究, *砂防学会誌*, Vol.65, No.4, p.32-38
- 9) 宮前 崇・渡海勇輝・平松晋也 (2012) : 樹木根系が雨水の鉛直浸透課程に及ぼす影響に関する実験的研究, *砂防学会誌*, Vol.65, No.4, p.39-44
- 10) 関口 武 (1959) : 日本の気候区分, *東京教育大地理学研究報告* 3, p.65-78
- 11) 逢坂興宏 (1994) : 花崗岩斜面土層の発達過程と安定性に関する研究, *静岡大学農学部演習林報告* 18, p.1-44
- 12) 日浦啓全・大手桂二・日置象一郎・村上公久 (1978) : 山地における土砂生産に関する研究 (I), *京都府立大学農学部演習林報告* 22, p.36-53
- 13) 塚本良則 (1992) : *森林水文学*, 文永堂出版, p.134-147
- 14) Jury, W. A.・Horton, R. 著・取出伸夫監訳 (2006) : *土壌物理学—土中の水・熱・ガス化学物質移動の基礎と応用—*, 築地書館, p.64-70

Influence of Tree Roots on Hydrologic Processes in Slope Soil Layers in Forest Regions with Different Geologies

Takashi MIYAMAE*, Shinya HIRAMATSU** and Taijiro FUKUYAMA**

*Department of Mountain and Environmental Science, Interdisciplinary Graduate School of Science and Technology, Shinshu University

**Rural Engineering Course, Forest Science, Faculty of Agriculture, Shinshu University

Summary

Slope soil layers contain a variety of heterogeneities that affect the hydrologic processes within the layer, as well as slope failure. This study sought to clarify the effect that tree roots have on increasing the structural heterogeneity of soil layers and how these changes affect the movement of water within the soil on forest slopes. The effect of geology was assessed by examining the movement of water along roots of trees in a region of metamorphic sandstone and in a region of weathered granite. Direct measurement of water runoff along tree roots using a trench wall revealed that the presence of tree roots had a marked effect on the movement of water within the soil and that this movement was independent of geology. In the region of metamorphic sandstone, where the aquiclude boundary was well defined, runoff along tree roots was greater near the boundary surface. However, in the weathered granite region, the zone of high permeability extended to the deep soil layers and runoff due to the presence of roots was high at all depths.

Key word : Slope failure, Vertical infiltration, Forest roots, Heterogeneity of soil layer, Hydrological observation