

山腹斜面における浸透特性と雨水流出経路への植生の影響

On the Effects of Vegetation on Infiltration and the Flow Path in Mountainous Slopes

松林宇一郎*, 高木不折**

G. T. ベラスケス***, 貴家尚哉***, 鷺見哲也***

by Uichiro MATSUBAYASHI, Fusetsu TAKAGI

G.T.Velasquez, Hisaya SASUGA and Tetsuya SUMI

Abstract

This research observes the effect of vegetation on the spatial rate of infiltration and on the resulting path of flow inside the soil. Aside from infiltration experiments, paint tests and soil potential measurements were made. Results show that (a) the infiltration rates are dependent on the distance from the tree stem, (b) variations in infiltration rates are small for heavily forested areas compared to sparsely vegetated areas. It was also found that (c) the flow in the soil is mainly vertical. Finally it was found that (d) there is bottom-up saturation in the soil even for small rains.

Keywords: Infiltration, vegetation, flow path

1. まえがき

流出過程において植生は流出流速を低下させ、土壤中での滞留時間を長くすると考えられている。(Dunne and Dietrich 1980)しかしながら、植生が浸透能やそれによって最終的に現われる流出の経路に及ぼす影響については、いまだ十分に明らかにされているとは言えない状態にある。

浸透の基本的特性に対していえば、植生により大きな変動があると言う報告(Kinkaid et al. 1963)や、逆に変動は少なく無視するという意見(Dortignac & Love 1961)、植生による雨水の打撃効果の緩和による浸透能の増加(Jarrett & Hoover 1985)、植生の根の活動と枯死によるマクロポアの生成による浸透能の増加、また、植生の種類や樹木からの距離が浸透能に与える影響(Lyford & Qashu 1969, Johnson & Gordon 1988)、植生の発達が地下水位に依存することから、地形が植生分布をひいては浸透能を規定するという報告(Dunne et al 1991)など様々なものがある。しかしながら、これらの研究では本研究で取り扱う樹幹流や樹冠通過降雨に基づく浸透特性の空間的分布については取り扱われていない。

一方、流下経路に対する植生の影響に対する最近の議論は、単に樹木の根の枯死によって生じるマクロポアやパイプ中の流れに関するものが多く、根が実際にどのように流下経路に影響を与えるかについての議論はいまのところ不十分である。しかしながら、流出現象をモデル化する際には単に降雨と流出ハイドログラフの応答からではなくその経路を直接観察し決定することが重要であり、そのためにも植生が浸透や流出経路にどのように影響を与えるかを明らかにする必要がある。

* 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

*** 学生員 工修 名古屋大学大学院 工学研究科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

2. 対象流域

名古屋大学犬山地震観測所内には図-1に示す流域A（流域面積171000m²）とその中に含まれる小流域B（流域面積8800m²）がある。図は流域内の広葉樹と針葉樹（杉）で覆われている範囲を見たものである。この図から、植生分布は、根が浅く地下水面に近い場所が生育適地という杉の特質と植林する際のアクセスの便利さということから決まっていることがわかる。対象とする小流域を含む名古屋大学の借地においては人工の手がはいっていないため広葉樹が生育している。本研究は主に流域Bの広葉樹地域での検討であるが、これは容易に針葉樹林にも適用できる。

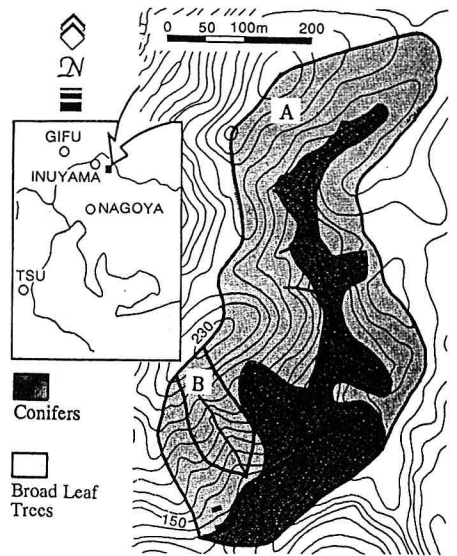


図-1 対象流域の位置と植生

3. 浸透能に対する植生の影響

これまでのところ、浸透の時空間的分布特性は、植生密度や降雨強度を含む多くの要因によること(Dunne et al. 1991)、樹冠や木の幹で降雨特性が顕著な変換を受けること(Johnson 1990, 端野ほか1991,1992,坂本・室田1992)について議論されている。しかしながら、植生の分布と植生による降雨の変換特性の相乗効果、そしてそれが最終的に浸透に及ぼす効果については十分な研究がなされていない。そこで、本研究では、広葉樹林の

表-1 広葉樹の分布と浸透面積

	Big Trees	Medium Trees	Small Trees
(a) Trunk Diameter, 2r [Average Dia.] (cm)	over 12 [24.4]	5 to 12 [7.25]	below 5 [2.6]
(b) Trees	Mountain Cherry Trees Chinese Hackberry Oak	Oak Camellia	Camellia Ligustrum Japonicum
(c) Number of trees per 5m x 5m plot	1, 0, 4, 2, 2, 2	7, 3, 4, 3, 4, 2	35, 80, 42, 53, 45, 34
(d) Percent of total trees (from a 150 m ² area)	.034	.071	.895
(e) Trees per square meter	.0733	.153	1.93
(f) Ring Width (T) for Stem- flow Area computation $A = \pi \{(T+r)^2 - r^2\}$	T = 6 cm	T = 5 cm	T = 4 cm
(g) Ave. Stem Flow area per basin unit area	.00763	.00358	.0170

みについてではあるが、山地森林域での浸透能と植生の関係を明らかにすることを目的とする。

(1) 植生分布植生と浸透能の関係を検討するために、幹の直径が2 cm以上の木を対象として6地点で5 m×5 mの調査区画を設定し樹木の分布を測定した。測定結果は表-1にまとめられている。表で、項目(c)各区画あたりの樹木の数として、“big trees”の欄の“1,0,4,2,2,2”は、6調査区画に“big trees”の木はそれぞれ1,0,4,2,2,2本あったことを意味している。また項目(f)(g)においては樹幹流がどのように広がり浸透するかを水性塗料の痕跡を用い検討したもので、樹幹流の有効浸透面積を表わしたものである。これは浸透水の痕跡の外形を円で近似し樹幹断面積を差し引いて表わしている。樹幹流の浸透強度は樹幹流量を樹幹流面積で除すことにより定義される。

(2) 樹木との距離が浸透能に及ぼす影響

本流域での樹冠通過降雨、および樹幹流の観測結果によると、降雨の約72%が樹冠通過降雨となること、また、残りの28%を占める樹幹流の浸透強度は樹幹流面積が小さいため降雨強度の約22倍の強さになることが分かっている。表-1から分かるとおり、この樹幹流面積は大・中・小の樹木に対し全体として流域面積比で2.8%と小さいが、その強度が強いため山腹土壌深部への速い浸透に対しては重要な役割をしている

と考えられる。こうした、流域内での降雨の分布の不均一性のため、木の周りだけでなく樹木との距離により浸透能が流域内で分布する可能性がある。しかもこの面積は全流域の97%と大きく、検討の意義は高い。Lyford & Qashu(1969)は砂漠地域の、深さ45cmの砂質ロームの土壌について浸透能が灌木からの距離に対して逆比例的に変化することを見出した。彼等の観測は、砂漠での孤立した樹木に対するものであり本流域のような森林ではないという相違点はあるが、樹木との距離と浸透能との関係を明らかにすれば、ここで求められた樹木の分布とあわせ考えることにより浸透能をより詳細に求めることが可能となる。

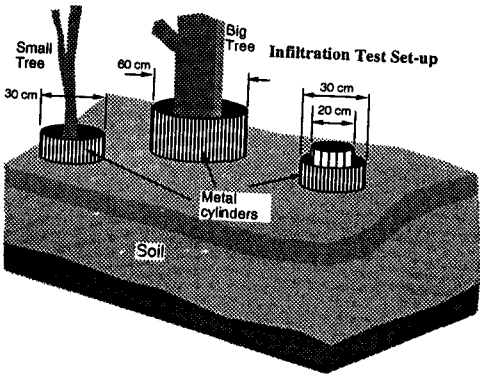


図-2 浸透実験の概要図

そこで、本研究では犬山流域林内の樹木直下（樹幹流地点）で3地点、樹木直下以外の点（樹冠通過地点）で4地点、名古屋大学構内の広葉樹の周りで4地点を選び、浸透試験を行った。犬山試験流域と名古屋大学構内での実験の主な相違点は、前者では樹木が密集（高木は約2.5m間隔、低木は約1～1.5m間隔）しているのに対し、後者では10mの範囲内に他の樹木はないということである。樹幹通過地点では2重円筒冠水型浸透計（内直径：20cm、外直径：30cm、根入れ：10cm）により、樹幹流地点では樹木を取り囲んだ1重円筒冠水型浸透計（太い樹木：60cm、中位の樹木：30cm、根入れ：10cm）により浸透能を求めた。図-2は実験の概念図を示したものである。実験結果は図-3と図-4に示している。図-3は犬山試験流域での実験結果であり、冠水深は3cmとした。図中P1-P4は樹冠通過地点を、T1-T2は樹幹流地点を示している。図から明瞭のように、樹冠通過地点の浸透能は全般にわたり樹幹流地点の浸透能を上回っている。一方、図-4は名古屋大学構内で行った結果であり、冠水深は6cmとした。図から明らかなように、最終浸透能は樹木からの距離が増大するにしたがって大きくなっており、Lyfordらの観測結果とは逆の傾向を示している。そこで、その特性を詳細に見るために、Hortonの最終浸透能を樹木からの距離と関係づけて比較検討した。図-5は図-3のデータについてHortonの浸透能式に当てはめたものであり、図-6はそれぞれ、犬山流域と名古屋大学構内の最終浸透能を樹木からの距離に対してプロットしたものである。図から明らかなように、名古屋大学構内での実験では距離によりほぼ直線的に増加する傾向が認められるが、犬山流域では樹幹流地点と樹冠通過地点との差は明瞭であるが、樹冠通過地点間では差はあまりない。これは、名古屋大学構内での実験では対象とする樹木が他の樹木と離れているためその影響は無いのに対し、犬山流域では樹木が密に生い茂っているため周辺の樹木の影響により平均化されて距離の効果が明瞭とならなかったと考えられる。Lyfordらの

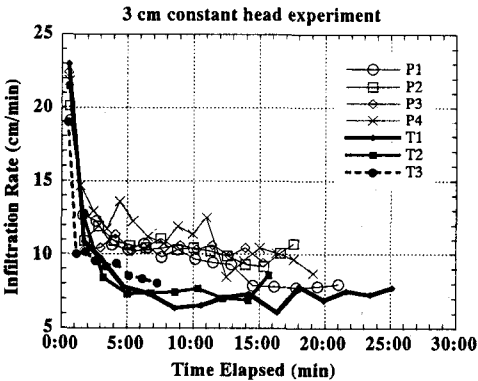


図-3 浸透試験結果（犬山流域）

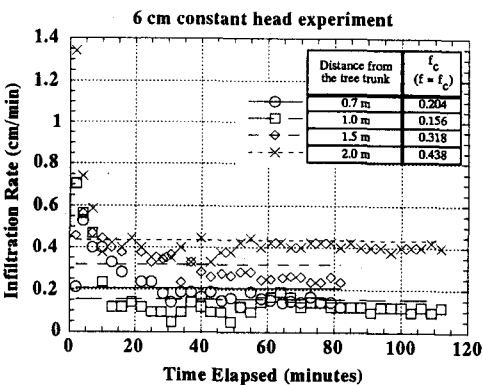


図-4 浸透試験結果（名古屋大学構内）

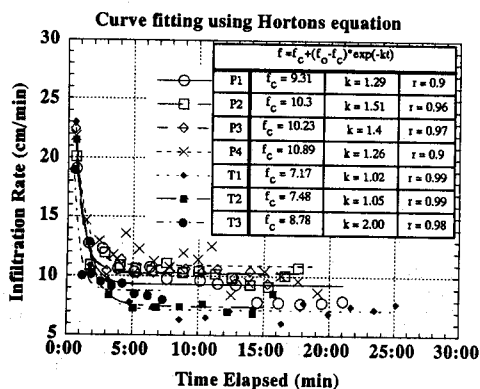


図-5 Horton式への適用結果

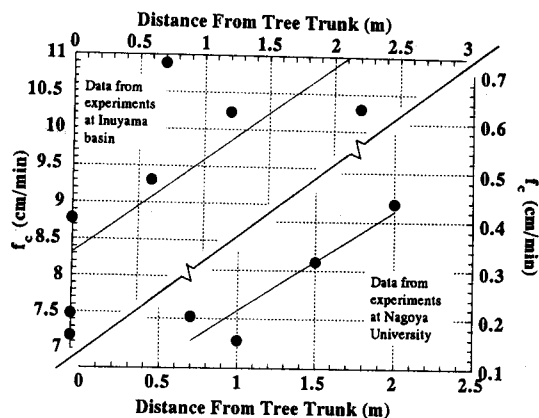


図-6 最終浸透能と樹木からの距離の関係

観測結果との相違については、彼等の対象としたのがサバンナ地域であることが最も大きな原因と考えられる。なぜ、樹木の近くで浸透能が小さくなるかについては今後の研究を待たねばならないが、樹木の根による断面積の減少や根の張力による締め固め効果等が考えられよう。

4. 流出経路の推定

次に土層内での流出経路の推定の問題を考える必要がある。なぜなら土層内の水の流れをモデル化する場合、流れの場をどの様に考えるかで問題の性質が大いに変わってしまうからであり、それ故、実際の流出経路の物理的過程を知ることが土層内の水の流れのモデル化に役立つばかりでなく、地下水質の問題等の把握においても役立つものになるであろう。

現在、マクロポアやパイプ流の発生に流出経路の議論が集中しているが、水みちの形成に対する植生の影響を考慮することも非常に興味深い問題である。植生が降雨の特性を変化させることが著者らによって指摘されており(Matubatahi, 1994)、更に植生によって土壌の浸透能が変化することを考えると、山地流域における土層内の水の流出経路に対しても植生の影響を考慮する必要がある。

本研究では流出経路を大きく二つに分けて考える。まず雨水が土層に浸透し基岩に到達するまでの水の流れの方向を推定し、次に水が基岩に到達した後の流出過程を考えることにした。このため前者については山腹斜面において水性塗料を注入するペンキ注入試験を行い、後者については降雨時において土層深さ毎の毛管ポテンシャルをテンシオメータによって測定した。

(1) ペンキ注入試験による浸透流向の観察

土層内の水の流下方向を確認するために山腹斜面においてペンキ注入試験を実施した。試験では白色の水性塗料を使用し、これをペンキ対水の比率を1:2の割合で希釈した。また注入には5リットルのプラスチック製ボトルを用い、容器内の圧力は大気圧になるように工夫している。ペンキ注入の10分後にその地点を掘り、ペンキ流入域の断面の測定や写真撮影を行った。この様なペンキ注入試験を樹木の影響や土の違いの影響を調べるために複数の地点で行った。それは樹木からの距離を変えたもの、木の根の上で行ったもの、土壌が岩石の少なくなっている場所と岩や小石の多い場所を選んで行った。

この試験の結果を図-8(a)～8(e)に示す。これらの図から本試験流域における土層内の水の流れは殆ど鉛直方向流れであり、木の根の影響は小さい、もしくは殆どないと考えられる。これに対し中型から大型の岩は流れを妨げその流下方向を変化させることや、小礫層は流れを分散させる作用があることがわかった。またこの流域の斜面では土層の最上部に小石や落葉を多く含む腐植土層があり、その下に粘土層があるという土層構造を持つ場所が見られ、そのような場所では土層が変化する場所すなわち粘土層の上部で流れの方向が変化し、粘土層上面に沿って流下していく様子が観察された。この様な試験結果を見ると、特に太い根以外

では根に沿った方向の流れはなく、水は根を回り込んで下に流下してゆく場合がほとんどであり、樹木の根は流れを導くのではなく妨げる役割を果たす場合が多いのではないかと考えられる。また図-8より殆どの試験において鉛直方向の流れが観測されたことから表層土壌内では斜面勾配が流下方向に及ぼす影響はかなり小さいものであることがわかった。

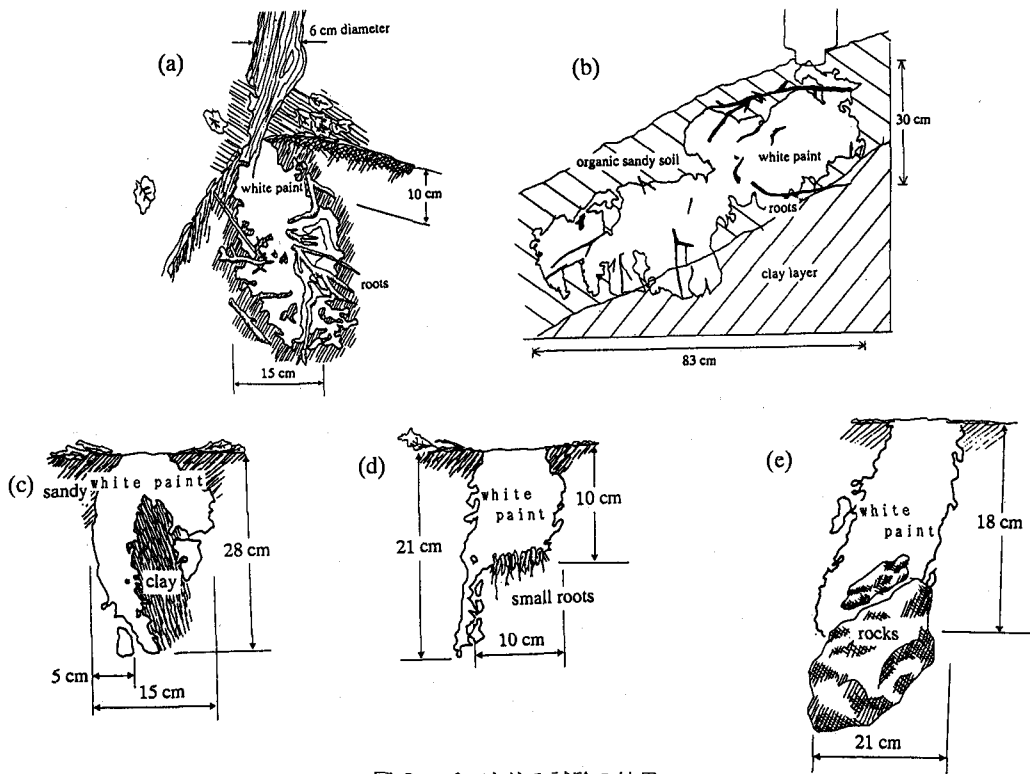


図-8 ペンキ注入試験の結果

(2) 土壌毛管ポテンシャルによる基岩付近の雨水流動場の推定

ペンキ注入試験により山腹斜面土層内では鉛直方向流れが卓越することがわかったが、次に基岩に到達した水の流下過程を考えるために降雨時の土壌毛管ポテンシャルを土壌の深さ毎に測定した。測定には圧力編換器（共和電気製）を接続したテンシオメータを用い、全天候型測定データ記録装置（コーナシステム社製）により毛管ポテンシャルを歪に変換して連続的に測定した。1992年7月17日から19日にかけての測定結果を図9に示す。この時の総降雨量は24.5mm、降雨継続時間は4時間であった。また前降雨は7月14日である。

この図から降雨後の毛管ポテンシャル低減部において測定位置が浅くなる毎に負圧が増加しているのがわかる。また深さ50cmの位置の毛管ポテンシャルはこの期間を通じて、どの時刻でも最も負圧が小さく、降雨終了時にはほぼ飽和状態になって

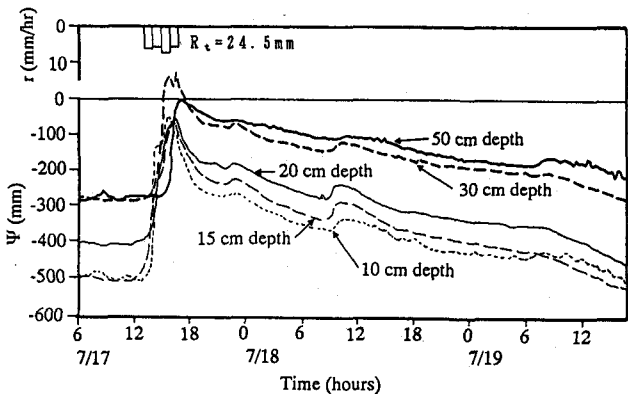


図-9 土壌毛管ポテンシャルの変化

いることが読み取れる。このことは総降雨24.5mmという小さい降雨においても基岩付近は飽和状態になっていることを示す。これは樹幹流によって雨水が集中的に木の根元に供給され、流れの水平方向の分散が小さいため、これが鉛直方向に流下して基岩に到達したものと解釈される。なお、深さ35cmのポテンシャルがピーク時で正となっているが、他の位置での変化と比べたときペンキ注入試験で見られたような局所的に飽和な部分が生じるためであろうと考えられる。

5. 結論

本研究では浸透の空間分布に及ぼす植生の影響と土層内での水の流出経路についての観測を行った。植生の影響については、特に樹木からの距離による浸透能の変化特性を検討するため、山地斜面と平地の地面の2ヶ所において冠水型浸透計による浸透実験を行い、さらに樹幹流の発生する木の幹を円筒内に含む浸透試験も行った。次に流出経路の推定についてはペンキ注入試験と土壌毛管ポテンシャル測定により考察を行った。その結果、

- a) 浸透能は樹木からの距離に依存し、木から離れるにつれて大きくなることが観察された。これは木の根が土壌断面積を減少させるとともに根の張力により土を締固めるためであると言える。
- b) 平地の疎林地に比較して樹木密度の高い森林域では浸透能の空間的な差は小さいが、木の根元と樹木から離れた地面とでははっきりとした違いが現れている。このことから山地森林流域における雨水浸透モデルでは2種類の浸透場を考慮する必要があると思われる。
- c) 土壌内に浸透した水は斜面勾配に関係なく鉛直方向に流下する傾向がある。この場合木の根の影響は小さく、大きい岩や粘土層などが水の流下を遮りその方向を変える。
- d) 植生による雨水の集中化や土層内の鉛直方向流れによって少量の降雨に対しても基岩上には飽和水帯が生じる。

これらの観測結果は森林樹木と土壌層による変換を通じて雨水が河川に流出するプロセスを明らかにするものであり、それは今後の山地小流域における雨水流出過程のモデル化に対しても重要になると思われる。著者らは、別途、タンクモデルを用い雨水の樹冠通過降雨と樹幹流への分離について検討しているが、これらは、(1)土層を異なる特性を持つ二相系として捉える。(2)各々の系を独立な1次元のRichard'sの方程式を基礎式としてモデル化する。(3)基岩上の流れに対する1次元のKinematic Waveモデルの適用。等、山地小流域における雨水流出過程のモデル化に対する様々なアプローチに対する示唆と傍証を与えるものである。

参考文献

1. Dunne, T., and W.E. Dietrich, Experimental ... hydraulics and hillslope hydrographs, Z. Geom. Suppl., 33, 40-80, 1980.
2. Dunne, T., W. Zhang, and B.F. Aubry, Effects of ... and runoff, Water Resources Research, 27, 2271-2285, 1991.
3. Dortignac, E.J., & L.D. Love, Infiltration ... Col., Stn. Pap. 59, Rocky Mt. For. & Range Exp. Stn., US For. Serv., Denver, Colo., 1961.
4. 端野, 吉田, 中谷, 実森林樹幹流データによる降雨遮断モデルの比較検討, 水工学論文集 Vol. 35, 87-92, 1991.
5. Jarrett, A.R., and J.R. Hoover, Evaluating the effect ... of CO₂ on infiltration rate, Trans. ASAE, 28, 179-182, 1985.
6. Johnson, C.W., and N.D. Gordon, Runoff and erosion from ... plots on sagebrush rangeland, Trans. ASAE, 31, 421-427, 1988.
7. Johnson, R. The Interception, throughfall ... with other upland forests in the U.K. Journal of Hydrology, 118, 281-287, 1990.
8. Kincaid, D.R., J.L. Gardner, and H.A. Shreiber, Soil and ... under semi-arid conditions, IASH Publ., 65, 440-453, 1963.
9. Lyford, F.P., and H.K. Qashu, Infiltration rates affected by desert vegetation, Water Resources Research, 5, 1373-1376, 1969.
10. Matsubayashi, U., F. Takagi, G.T. Velasquez, H. Sasuga, and T. Sumi, On the physical and chemical properties of throughfall and stemflow, Proceedings of 1993 Annual Conference, Japan Society of Civil Engineers. (same volume).
11. 坂本, 室田, 樹木下の地上に到達する降雨の水量と水質の分布と変動, 水文学会1992年研究発表会要旨集, 114-117, 1992.