

山地森林域における土壌浸透性の空間的不均一性に関する研究

On the Spatial Heterogeneity of Soil Permeability in a Mountainous Forest Area

森網 健之*, 松林宇一郎**, 高木不折**

By Takeshi Moritsuna, Uichiro Matsubayashi, Fusetsu Takagi

In the field of hillslope hydrology it is very important to understand the spatial characteristics of the soil so as to make accurate lumping representations in modeling. In order to clarify the spatial characteristics of soil permeability in mountainous slope, experiments were made on soil samples taken from the field. In the experiments, 96 undisturbed 10 cm long samples were taken from 35 locations. The spatial variations of parameters of unsaturated permeability $K=K_s(\Psi_{cr}/\Psi)^n$ and void ratio n were examined.

Results show the coefficient of variability of K_s and n are small but large for the unsaturated characteristics Ψ_{cr} and η . The corelogram analysis shows the soil characteristics are independent when they taken more than 1 meter apart.

Keywords: permeability, heterogeneity, mountainous forest soil, semivariogram

1. まえがき

山地流域斜面での水の移動は流出現象の最も基本的な素過程としてのみならず、最近では物質循環に基づく流域水環境を考える素過程としても重要になってきている。そのため、試験流域や実験室での多くの研究が行われてきたが、特に、土壌の持つ不飽和浸透特性を基礎にしたRichardsの式の定式化により、流域内の各地点での水の流れを詳細に解析できるようになった。

しかし、数値モデルの解析結果はしばしば実際の流出現象と一致しないという事が指摘されている。これは、主に、実測で得られる土壌の浸透特性が適切でない事、及び、パイプ流など不飽和浸透理論では扱えない現象が実流域に存在するためであると考えられている。このうち、前者は実流域が不均質な土壌で構成されており、それを数点のサンプルで代表させている事が原因である。すなわち、測定値の代表性の問題といえる。これに関する研究手法は次の2つに分類することができる。1つは、多数のサンプルを測定し、その分布によって透水性のばらつきを捉えようとする手法、もう1つは、測定するサンプルのスケー

* 正会員 工修 千代田化工建設株式会社
(〒230横浜市鶴見区鶴見中央2-12-1)

** 正会員 工博 名古屋大学大学院工学研究科地圏環境工学専攻
(〒464-01名古屋市千種区不老町)

ルを大きくして、対象とする広がりの中での透水性の平均値を得ようとする手法である。

長田¹⁾は、サンプルの数を増やすという手法で、内径47mm、高さ50mmの採土円筒を用いて、0.5haの砂壌土からなる牧草地の飽和透水係数の不均一性を調べた。その結果、100の測定値の最大値と最小値には1オーダー近くの差を認めた。また、Freeze²⁾は、16種類の土についての飽和透水係数の分布を調べ、そのすべてが対数正規分布に従うとの結果を得た。これらの研究は、土壌透水性が極めて不均一であることを示す貴重なものであるが、山地森林域を対象としておらず、また、不飽和透水係数については調べられていない。

一方、サンプルのスケールを大きくするという手法による研究では、太田ら³⁾は、スギ林地内の約6m²の区域で、5種類の大きさのサンプルを用いて飽和透水係数の測定を行った。その結果、スケールが大きくなるにつれて透水係数のばらつきは小さくなり、直径250mmの7つの土壌サンプルからそれぞれ得た測定値の最大値と最小値は、1オーダー程度の差に縮小することを示した。大手ら^{4)・5)}は、山地森林域から採取した直径195mm、高さ780mmの大型サンプルについて、Steady-state methodsによって不飽和透水係数 K -圧力水頭 ϕ 関係を測定し、さらに、同じ大きさのサンプルからInstantaneous profile methodによって算出された体積含水率 θ - Ψ 関係と、大型サンプル採取地点付近で採取した小型サンプル(直径50mm、高さ51mm)や同じ試験流域内の異なる地点での原位置観測から得られた θ - Ψ 関係と比較した。そして、その結果、大型サンプルを用いた測定は、小型サンプルに比べて、原位置での土壌の透水特性を把握する有用な方法であると結論した。大手らの研究は、異なる地点の土壌から得た θ - Ψ 関係を比較したという点で議論の余地を残しているが、サンプルのスケールを大きくすることにより、流域内のある地点を代表する不飽和条件下での透水性を測定することが可能であることを示した。

以上のように、土壌の不均一性に関する研究は行われているが、現時点では、その情報量はまだ不十分といわざるを得ない。そこで、本研究では 1) 対象区域内の土壌透水性の変動性、および 2) 空間的相関性を明らかにすることを目的として、山地森林域内の2ヶ所の区域を対象に土壌サンプルによる不飽和透水係数 K -圧力水頭 ϕ 関係および飽和透水係数、土壌間隙率の測定を行った。

2. 対象区域及びサンプル採取方法の概要

本研究では、兼平試験流域流域内(岐阜県恵那郡)に設置した2ヶ所の採土区域を対象とした。試験流域の植生はスギやヒノキの人工林、土壌母材は花崗岩Gr、土壌型は適潤性褐色森林土Bdである。試験流域付近で行われたボーリング調査によれば、土壌はかなり深部まで風化したマサとなっている。採土区域を図1に示す。採土区域aは平均勾配34°の斜面上、採土区域bは平均勾配26°の斜面上で、共にスギの人工林である。地表は有機質土壌によって覆われており、パイプの存在は確認されていない。

土壌サンプルを採取する場合、原位置代表性を考慮すると、採取する土壌サンプルのスケールは、礫やマクロポアをその中に含むことができる程度以上の大きさが必要となる。しかし、スケールを大きくしすぎると、その採取に多大な労力を必要とする。そこで、本研究では、不飽和浸透試験の代表体積に関する重松ら⁷⁾の研究を参考として、サンプルの直径を108mmとした。

採取に用いるサンプラーは、内径108mm、長さ600mmの塩化ビニール製のパイプで、下端は土壌に差し込みやすいように加工されている。また、ポーラスカップを設置する穴があらかじめ開けてあるが、採取時にはビニールテープで塞がれている。

採取区域aでは、土壌表面から深さ約40cmまでの土壌をサンプルとして採取した。まず、鉛直下方向にサンプラーを土壌に手で押し込み、手で押し込むことが困難になったらサンプラー上端に添木を置き、ハンマーでたたき込んだ。約40cmの土壌サンプルが採取できたら周りをスコップで掘りながらサンプラーを回

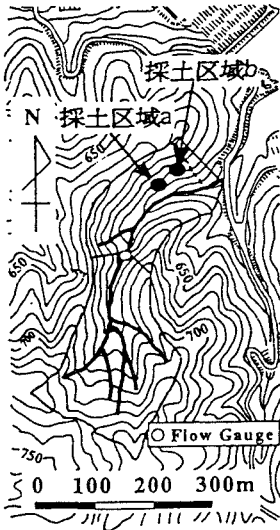


図1 採土区域位置図

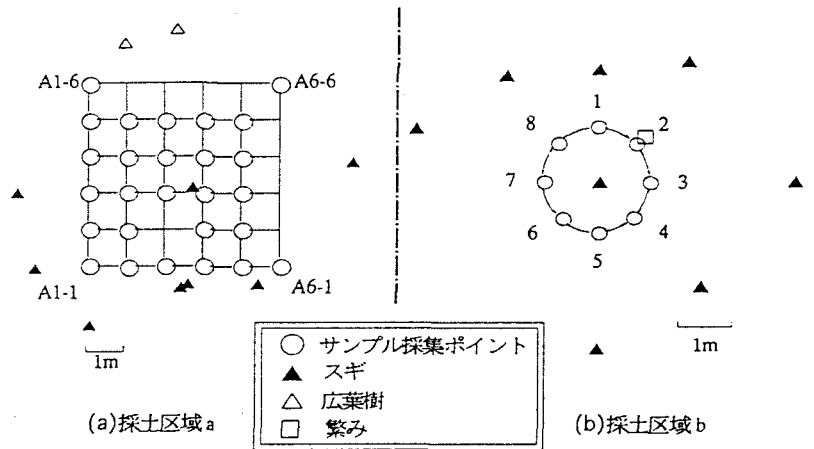


図2 採土区域a, bのサンプル採取地点

収し、サンプルの下端に蓋をし上端には保護のため土を詰めたビニール袋を置き蓋をした。

採取区域bでは、aとほぼ同様であるが、サンプラーの押し込みによる土の圧縮を避けるため、土壌表面から深さ20cmまでの土壌を採取し、さらに別のサンプラーでその下の深さ20cmから40cmまでの土壌を採取した。

採土区域aでは、土壌サンプルを27本、採土区域bでは8地点で計15本採取した。採取地点とその周りの状況を図2(a)(b)に示す。図中の距離は斜面に沿って測定したものである。今後、採土区域aから採取した各サンプルを、ai-j、採土区域bから採取した各サンプルをbiと呼ぶこととする。サンプルb4の20-40cmは、巨大な礫の存在によって、採取できなかった。

3. 透水特性の試験方法および結果

不飽和透水試験方法： 図3に示す2種類の装置によって、採取された土壌サンプルの不飽和透水係数 K -圧力水頭 ψ 関係を測定した。サンプルaを測定する装置Aでは、上端から5cm, 15cm, 25cm, 35cmの位置に、サンプルbを測定する装置Bでは、上端から5cm, 10cm, 15cmの位置に、圧力変換器もしくは水マノメーターに接続されたポーラスカップ(外径8mm, 長さ60mm)を設置した。今後、空間的な議論を行いやすいようにサンプルaの地表から5-15cmをaU, 15-25cmをaM, 25-35cmをaL, サンプルbの地表から5-15cm区間をbU, 25-35cm区間をbLと呼ぶこととする。サンプル上端には、水が均等に浸透するようにガーゼを敷き、また、サンプルの下端とフィルターとが密着するように注意した。

試験ではサンプラー上端に設置した降雨装置から一定強度の降雨を供給し、各地点の圧力水頭が定常になったことを確認した後圧力水頭を計測した。降雨装置への給水は定量マイクロポンプを用いた。装置下端では、サンプルの下端付近に飽和水面ができないように、 $-15\text{cmH}_2\text{O}$ から $-25\text{cmH}_2\text{O}$ の吸引をかけたが、測定時の各ポーラスカップ設置地点での土壌内空気圧は、大気圧と等しいことが計測によって確認されている。各サンプルについて、設定降雨量を変化させて3回から7回行った。1回の測定に要した時間は、約7時間から48時間であった。不飽和透水係数は降雨強度を各サンプルの上下のテンションメータから得られるポテンシャル勾配で除して求めた。これを、上下の毛管吸引圧の平均値に対応づけ、 K - ψ 関係を求めた。

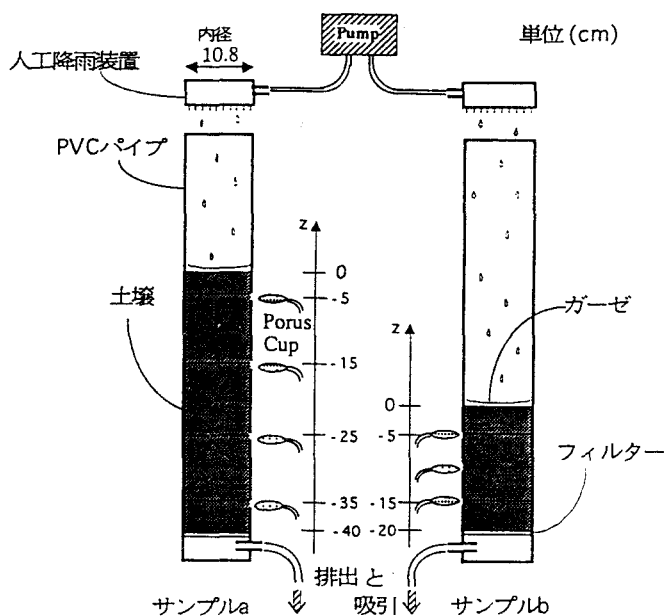


図3 不飽和透水試験装置

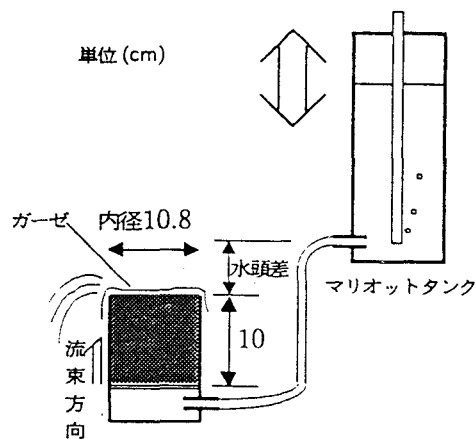


図4 飽和透水試験装置

定水位飽和透水試験方法：不飽和透水試験終了後、サンプルを切断し、aU, aM, aL, bU, bLについて定水位飽和透水試験を行った。図4に試験装置を示す。試験では、試料内に空気が残留しないように上向きの流れとするが、現地での流れの方向と一致するように、各層の上下を逆にして設置した。また、土壌の流出を防ぐため、サンプル上端部にガーゼを張った。

間隙率測定方法：飽和透水係数測定終了後サンプルを解体し、「森林土壌の調べ方とその性質」⁷⁾を参照し層位区分を調べ、含水比試験による間隙率の算出を行った。根系の観察を行い直径1cm以上の根系については記録した。なお、心配したサンプラー内壁と土壌間の間隙は見られなかった。根系の主なものを取り除いた試料について含水比試験（「土の試験実習書」⁸⁾を参照）を行い、得られた乾燥密度から、土粒子の密度 $\rho = 2.65(\text{g/cm}^3)$ を用いて間隙率 n を求めた。

4. 平均・分散からみた土壌透水性の変動特性

K - Ψ 関係を議論するに当たり、本研究では次式のBrooks & Corey式によって関数化し取り扱った。

$$K = K_s(\Psi / \Psi_{cr})^\eta \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 Ψ_{cr} ：限界圧力水頭、 K_s ：飽和透水係数、 η ：指数である。各サンプルについて、まず不飽和の K - Ψ データから η を求め、 K_s から Ψ_{cr} を算定した。すなわち、 Ψ_{cr} は間接的に求めている。図5に試験結果の2例を示す。

サンプル層位区分について、aU, bUは主にA層によって、aL, bLはB層によって占められているが、aMはAB両層を共に含みその割合もまちまちであった。

表1に35地点96サンプルのデータから各層の各パラメータ (K_s, Ψ_{cr} は対数値) の平均・分散・変動係数をまとめて示した。試験から得られた $\log K_s$, $\log |\Psi_{cr}|$, 間隙率 n は、それぞれ、土壌透水性を表現する指標である。したがって、これらにより、山地森林域内の土壌透水性の不均一性を議論することができる。

まず、間隙率 n については全体に非常に大きな値となっているが変動係数は小さい。また、サンプルaについては深さ方向に減少しているが、bについては認められない。これを飽和透水係数 K_s についてみると、 K_s も平均値はaでは深さと共に減少しているが、bでは変化しない。これが透水性の空間的相違か、aでの試料の圧縮の影響かは断定できないが、 $\log K_s$ の変動係数がaU, bU, bLで小さくaM, aLで大きい事は、aMがAB両層を含むため、aLは土壌採取時の圧縮の程度の差が原因と考えられなくはない。

不飽和透水特性については、実測された $K-\phi$ 関係のほとんどがBrooks & Corey式で良く表現された。ただ、 η については一般的にいわれる値(標準砂で5.3-18.5)と比べるとかなり小さな値が多い。 η が小さいことは間隙径の多様性が大きいことを意味しており、兼平流域の表層土には様々な間隙が存在すると考えられる。一方、 Ψ_{cr} については、大手らが森林土壌について求めた値とおおむね近いが、変動係数がきわめて大きくなっている。これは、 Ψ_{cr} が $K-\Psi$ と K_s のフィッティングの結果間接的に得られたものであり、様々な誤差が集積したものと考えられる。

サンプルaとbの相違については全体的に見ると、aLでの土壌の圧縮効果を割り引いても、 K_s , η などに若干の相違が認められる。

表1 土壌透水特性の相加平均・分散・変動係数

		a U	a M	a L	b U	b L
η	平均	2.42	1.42	1.55	3.11	2.11
	分散	1.94	0.54	1.10	5.87	0.31
	変動係数	0.58	0.52	0.68	0.78	0.27
$\log K_s$	平均	-1.57	-2.06	-3.06	-1.53	-1.54
	分散	0.02	0.39	0.61	0.01	0.01
	変動係数	-0.09	-0.30	-0.26	-0.05	-0.06
$\log \phi_{cr} $	平均	-0.28	-0.52	-0.24	-0.52	-0.25
	分散	0.53	0.80	6.35	0.55	0.06
	変動係数	-2.59	-1.72	-10.29	-1.43	-1.02
間隙率 n	平均	0.74	0.69	0.62	0.77	0.73
	分散	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	変動係数	0.06	0.07	0.08	0.05	0.04

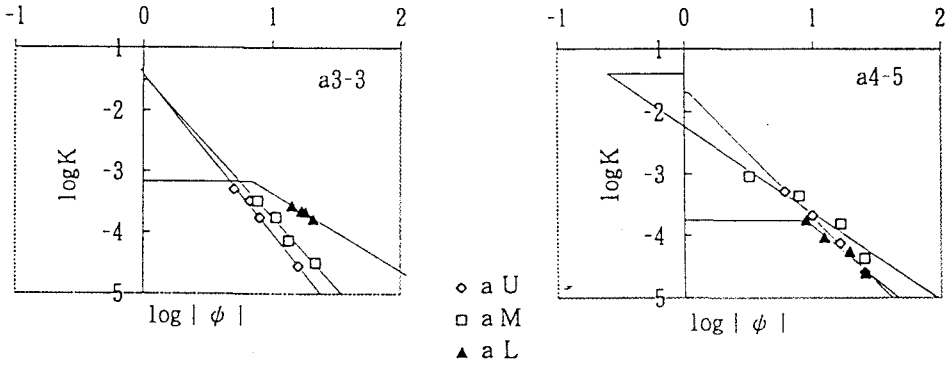


図5 $K-\Psi$ 関係試験結果例

5. セミバリオグラムによる空間相関性の検討

サンプルaに関する物理量について、セミバリオグラムを用いて、水平方向の空間的な相関性を調べた。確率的に二次定常場と仮定できる場で、各地点 u_i ($i=1, 2, \dots, n$) における確率変量を $Z(u_i)$ 、平均値を $m(u_i)$ 、 u_i と u_j の距離をラグ h とする。この時セミバリアンス $\gamma(h)$ は次式で定義される。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \left[\left\{ z(u_i) - z(u_j) \right\}^2 \right] \quad \dots\dots(2)$$

$\gamma(h)$ をプロットした図は、セミバリオグラムと呼ばれる。セミバリオグラムにおいて、 $\gamma(h)$ がラグの増加とともにある一定の値（シル値）に漸近する時、それ以上のラグを持つサンプルは互いに独立であると考えることができる。

図6は例として η のセミバリオグラムを示したものである。図から、すべての層において、 $h=1(m)$ ですでにシル値に達していることがわかる。すなわち、 $1m$ 以上離れた土壌の間には η は互いに独立と考えられる。この傾向は他のパラメータについても同様であった。ただし、今回の測定スケールでは、さらに長い距離における周期性などについては議論することはできない。

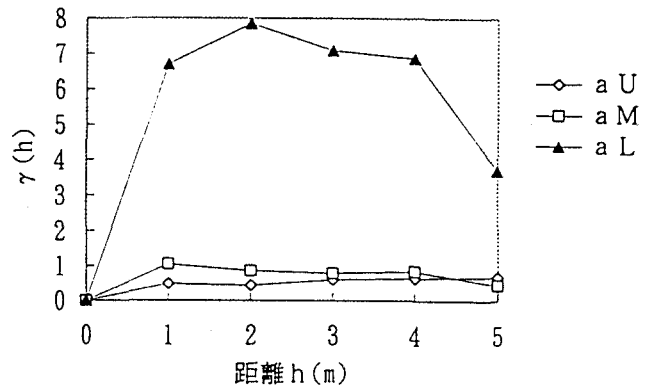


図6 η のセミバリオグラム

6. まとめ

本研究では長さ100mm、直径108mmの円筒形を試料スケールとして、35地点96サンプルの飽和透水係数 K_s 、不飽和透水特性を表す限界毛管水頭 Ψ_{cr} 、 η と間隙率 n のそれぞれの空間的な分布について検討した。

その結果、採取区域や深さ方向に平均値や分散が異なる傾向は存在するが、 n 、 K_s 、 η 、 Ψ_{cr} の順に変動係数は大きくなった。飽和透水係数に関するものが比較的安定しており、不飽和特性に関するもののばらつきが大きいという結果である。誤差の集積する Ψ_{cr} は別としても、変動係数が0.1程度の値を得るためには、同一区域で K_s なら数個、 η なら20~30個サンプルを平均しなければならないことになる。

水平方向の空間相関性については、 $1m$ 離れた土壌間では、すでに相関性が存在せず、互いに独立となっていることが明らかになった。

参考文献

- 1) 長田昇：砂質土壌における通気性と透水性の不均一性，農業論集，No. 36，1971，pp. 60-66.
- 2) Freeze, R.A.: A stochastic-conceptual analysis of one dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media, Water Resour. Res., 11, 1975, pp. 725-741.
- 3) 太田猛彦・片桐真：大型透水試験器による森林土壌の透水係数の測定(I)，日林誌，74，1992，pp. 373-382.
- 4) 大手信人・鈴木雅一・窪田順平：森林土壌の土壌水分特性(I)，飽和-不飽和透水特性の鉛直分布の測定法と2，3の測定結果，日林誌，71，1989，pp. 137-147.
- 5) 大手信人・鈴木雅一：森林土壌の土壌水分特性(II)大型土壌サンプルを用いる飽和・不飽和透水試験による体積含水率-圧力水頭関係の測定法とその適用，日林誌，72，1990，pp. 468-477.
- 6) 重松昌樹・岩田進午：不飽和透水係数のスケール依存性について，農土論集，No. 173，1997，pp. 127-128.
- 7) 森林土壌研究会：森林土壌の調べ方とその性質，林野弘済会，1982.
- 8) 土質工学会：土の試験実習書，土質工学会，1991.