

現地土壌特性の評価に基づく蒸発過程の数値シミュレーション
Numerical Simulation of Unsaturated Zone Moisture Behavior
due to Evaporation, Based on Physical Soil Properties

東京大学生産技術研究所 正員 虫明 功臣 K. MUSIAKE
東京大学生産技術研究所 正員 岡 泰道 Y. OKA

1. はじめに

不飽和帯水分の挙動を追跡するうえで、ポテンシャル理論に基づく数値シミュレーションは一つの有効な方法であり、従来数多くの解析例が報告されている。しかし、数値解析の前提となるパラメータや諸条件については、土壌の物理的特性との関連で議論されている例が少ない。この理由としては現地土壌の不確定性等のために物理的特性の評価が困難である点が挙げられる。本研究では不確定な要素をできるだけ少なくするという観点から、テンシオメータによる現地観測値および比較的精度のよい評価が可能な水分保持特性（水分特性曲線）を用いてこれらのパラメータや境界条件を規定する方法について考察する。さらに得られた結果に基づいて、都市化された試験流域を対象とした蒸発過程の数値シミュレーションを行い、現地観測値の再現性を検討するとともに、土壌特性によるパラメータの相違が蒸発過程に与える影響等について議論する。

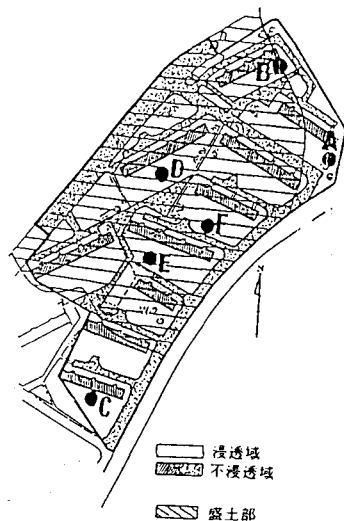


図1 永山試験流域の概要

2. 対象とした試験流域の概要と不飽和帯の水分保持特性

対象とした永山試験流域は都市化されており、浸透域と不透透域が図1のように分布している。さらに、造成前の地形との対比から、盛土部は図中の斜線部と推定されている。この流域内A地点付近にはテンシオメータが設置され、1979年から1984年まで記録が収集された。このテンシオメータ記録および流域内で採取した試料による室内試験結果をもとに以下の議論を進める。

不飽和帯内の吸引圧 (ψ) と含水率 (θ) とは一定の対応関係をもっており、この関係は水分特性曲線と呼ばれる。これらの関係は不飽和帯の水分保持の特性を支配する重要な要素である。水分特性曲線上で $pF0$ は飽和を表し、それに対応する含水率は総間隙を、残りは土壌粒子の体積率すなわち固相を示す。重力水の範囲については議論のあるところであるが、通常言われている $pF2$ とすると、 $pF0 \sim 2$ の間の含水率は重力排水が可能な間隙の割合を表し、気相と呼ばれる。 $pF2$ 以上は重力では移動できない毛管水と吸着水の範囲であり、液相と呼ばれる。

永山試験流域のテンシオメータ設置地点における水分特性曲線から求めた深度方向の三相分布を図2に示す。関東ロームで被覆された自然林地の土壌では、表層25cm付近までは気相が30~40%と大部を占め、深度数十cm以下で10%前後となっている（文献1）。これに

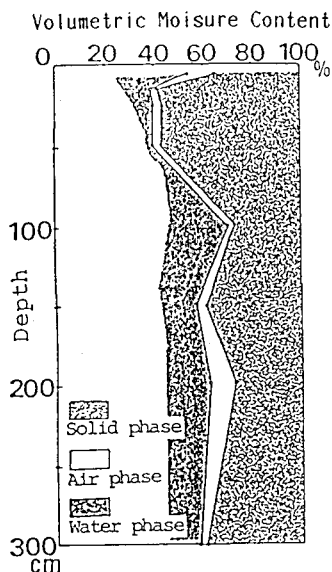


図2 深度方向の三相分布

対して、永山の場合には、表層は転圧やその後の踏固めなどにより固相部分が著しく大きく、深度150cm付近まで気相はほぼ5%以下と、自然林地に比べてきわめて小さい点が注目される。これは、低い吸引圧で保持される水分が少ないこと、言い換えれば、微細な間隙あるいは土粒子から強い拘束を受けて保持されている水分が多いことを示している。すなわち、開発域永山の表層の不飽和帯水分の多くは、ポテンシャルエネルギーの低い水であり、浸透降下あるいは蒸発散などによる水分移動が生じ難いという性質を持つ。いっぽう、永山の1m以深は表土層を剥いだ地山のローム層に相当している。

3. 数値解析上のパラメータの決定

(a) ψ - θ 関係：水分特性曲線は現地土壌サンプルを用いた吸引法等の室内試験で比較的精度よく決定することができる。この曲線を数値計算に組み込む場合、近似曲線を当てはめるという方法がよく用いられるが、広範囲な吸引圧の全体にわたって近似することは難しい。また、本研究ではこの曲線を用いて他の特性値を決定するという方法をとるため、曲線近似の誤差を避ける必要がある。そこで、ここでは比水分容量 $d\theta/d\psi$ を水分特性曲線から多区間の線形近似により直接求める方法を用いた。

(b) K - ψ 関係：水分特性曲線をそのまま用いて K - ψ 関係を決定できる次の Jackson の式を用いた。

$$K_i/K_0 = (\theta_i/\theta_0)^p \left\{ \sum_{j=1}^m (2j+1-2i) \psi_j^{-2} \right\} / \left\{ \sum_{j=1}^m (2j-1) \psi_j^{-2} \right\} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 θ_0 は飽和含水率、 K_0 は飽和透水係数、 p は定数である。現地の小試料を用いた室内不飽和透水係数試験結果に基づき、関東ロームに対する適用性を調べた結果から、土壌が緻密になるほど p の値は大きくなることがわかっている (文献2)。この結果に基づき、永山の水分特性曲線から推定し、 p は表層から下層に向けて 6, 8, 10 とした。図3に深度5cm ($p=6$)、35cm ($p=8$) の例を示す。土層は四層に区分し、境界を深度10, 35, 100cmにとった。また、上式を適用する場合の分割数 m は100とした。

(c) 飽和透水係数 K_0 ：

飽和透水係数 K_0 はテンシオメータ埋設地点付近のボーリングによるサンプルを用いた変水位透水試験結果から決定することができる。本研究で対象としている永山試験流域については、テンシオメータ設置地点の ψ - θ 関係を決定した試料に対する飽和透水係数の試験値がないため、後に流域内 (図1のA~Fの6地点) で採取した試料を用いて検討する。

深度方向の飽和透水係数の分布はそれぞれ図4のようになっており、土壌構造の密な下層ほど低い値を示している。しかし同一深度でもかなりのばらつきがあり、単純に平均的な値を採用するには難がある。これらのばらつきの原因としては透水係数の空間的な分布の相違、言い換えれば土壌構造の相違が考え

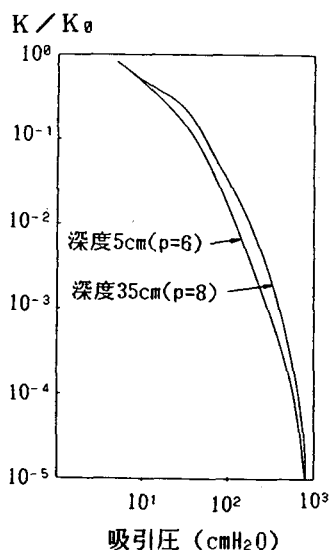


図3 K - ψ 関係の例

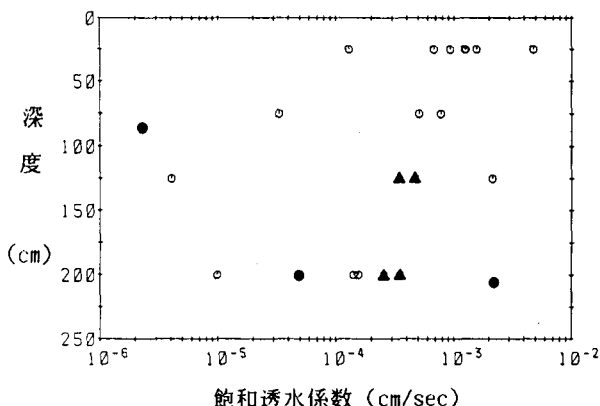


図4 飽和透水係数の深度方向分布

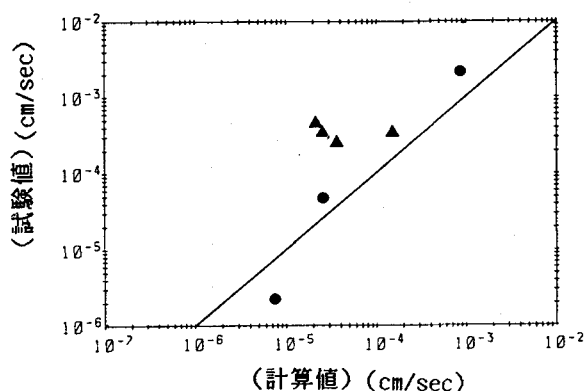


図5 飽和透水係数の試験値と計算値の比較

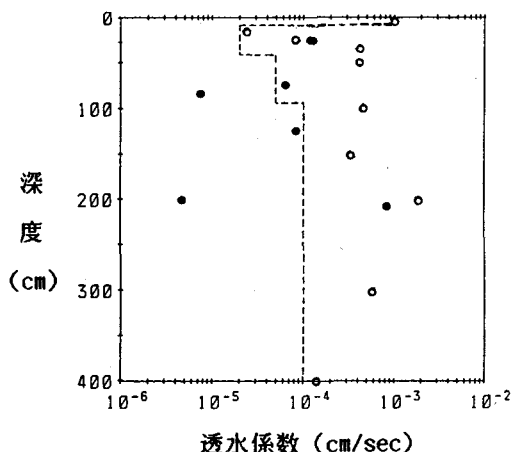


図6 飽和透水係数の推定値

られる。いずれの試料についても pF 試験を行ったため、その試料（土壌）の物理的な特性はある程度把握され、水分特性曲線上に表現されている。水分特性曲線の形状およびサンプリング時の観察からおおまかに土壌タイプ別に分類すると、自然に近い関東ローム（●印）、砂質土に近いと推察される土壌（▲印）、転圧され締固められた盛土土壌（○印）となっている。攪乱された盛土土壌については、ばらつきが非常に大きく、また現段階では試験方法にも問題が残されている。また、今回対象とするテンシオメータ設置地点はごく一部の層を除きほぼ切土土壌となっているため、以下では図4の●印および▲印の試料を用い、水分特性曲線に基づいて飽和透水係数を評価する方法について検討する。

飽和透水係数 K_0 を間隙率と間隙径分布で表現する式として、次のKozenyタイプの式を考える。

$$K_0 = (C \cdot n^3) / (\mu \cdot (1-n)^2 \cdot r_w^2), \quad r_w = \sum r_i \cdot (\Delta \theta_i / \theta_0) \quad \text{----- (2)}$$

ここに μ は動粘性係数、 C は土壌によって変わる補正係数、 n は間隙率で、 r_i は間隙半径である。 r_i あるいは θ_i の区分点としては pF 試験の実験値を用いる。自然林地における関東ローム層に対する上式の適用性については検討済みであり（文献3）、この場合係数 C はほぼ1であることが確かめられている。(2)式を永山に適用して求めた K_0 と変水位透水試験による結果とを比較したのが図5である。砂質土壌（▲印）についてはかなりばらついているが、切土土壌（●印）は計算値＝試験値の直線にほぼ沿っており、自然林地での結果と一致する。

この結果に基づき、テンシオメータ設置地点の $\psi-\theta$ 曲線を用いて(2)式により推定した K_0 の深度方向の分布を図6に○印で示す。 K_0 は深度ごとにかかなり異なっており、透水係数が過大と考えられる層も見られる。そこで、数値シミュレーションにおいては、テンシオメータ設置地点に当たる図1のA地点からのサンプルによる試験結果（●印）も参考にし、両者を平滑化した分布（図6の点線）を用いた。

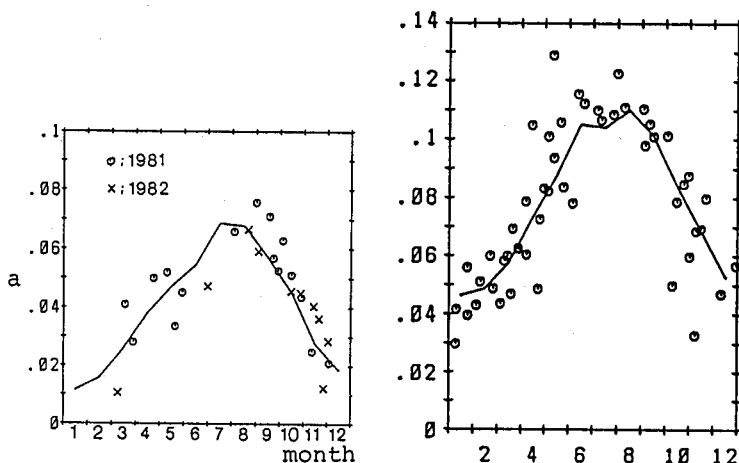
4. 計算上の諸条件

(a) 初期・境界条件

対象領域のテンシオメータ埋設地点は尾根部にあるため、鉛直浸透として取り扱った。深さは地下水面まで10mである。深度方向のメッシュ幅は、地表面～10cmが1cm、10cm～1mが20cmとし、2m以深は粗くした。初期条件は降雨終了後の各深度のテンシオメータ記録をもとにし、それを平滑化して用いた。境界条件は下面が地下水面とした。また、降雨後の地表面の境界条件は以下の手順にしたがって決めた。

(b) 乾燥期における地表面付近の不飽和帯吸引圧の変化

本研究で用いている最も浅い埋設深度のテンシオメータは深度5cmであるが、深度5cm付近の土層は降雨に対して敏感に反応すると同時に排水も非常に速い。したがって吸引圧は降雨終了とともに速やかに回復



(a) 自然林地

(b) 都市化域 (永山)

図7 係数aの季節的分布

し、上方へのフラックスが生じる。吸引圧 $|\psi|$ の増大速度は時間とともに遅くなるが、自然林地流域および永山試験流域の乾燥期のテンシオメータ記録を調べた結果、 $\log |\psi|$ と $t^{1/2}$ の間に直線関係がみられたので、次式を当てはめた。

$$\log(\psi/\psi_0) = a \cdot t^{1/2} \quad \text{----- (3)}$$

ここに、 ψ_0 は降雨終了後の吸引圧値、 a は定数である。

上式を当てはめて得られた a の値をプロットすると季節的には図7(a)、(b)のように分布しており、ばらつきがあるが、夏期は大きく冬季は小さいという傾向がみられる。ばらつきの原因としては、テンシオメータの測定

誤差のような技術的な問題も含まれてはいるが、同じ時期でも気温・日射量等の気象的な条件が異なり、蒸発散過程に影響を及ぼしていることが挙げられる。係数 a と気象因子との関係を検討したところ、対象とした各乾燥期間の日平均気温と係数 a とはかなりの相関関係を示しており(図8)、永山ではやや相関が悪いが回帰式は次式のようになった。

$$a = 0.00284 T + 0.0375 \quad (r = 0.81) \quad \text{----- (4)}$$

図7の中の折線はそれぞれの直線回帰式に基づき、月平均気温から求めた各月ごとの平均的な a の値を示している。(a)、(b)両者を比較してみると、開発域である永山は全体的に値が大きくなっている。つまり、開発域である永山は同じ季節でも可能蒸発強度が自然林地より大きく、開発域の乾燥化傾向を示している。

以下の解析における境界条件は、対象とする季節に応じて(4)式から a の値を求めたうえで、(3)式により規定する。

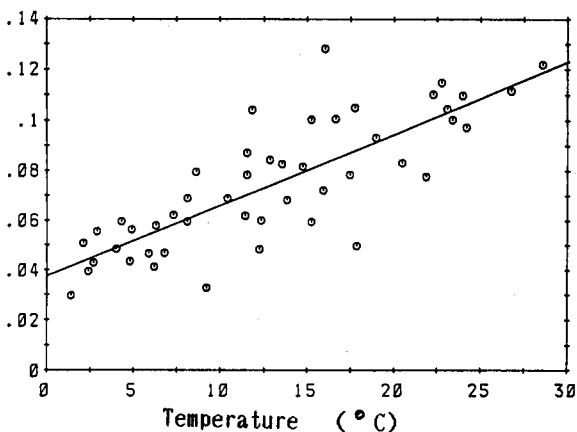


図8 係数aと平均気温との関係

5. 蒸発過程の数値シミュレーション結果

永山における乾燥期の水理ポテンシャル・プロファイルの経日変化を図9(a)、(b)に示す。(a)はテンシオメータによる日ごとの観測記録、(b)は数値シミュレーションによる一日おきの計算結果を示している。計算プロファイルに示されている数字は降雨後からの経過日数である。したがって、実測値の最後のプロファイルが計算値の9日目(8, 10の中間)にあたる。観測記録にはかなりの不確定な誤差等が含まれ、プロファイルが乱れていることも多いため、観測記録をみる場合、ある程度の平滑化が必要となる。ここでもスムージングを施した結果を示してある。経日変化に着目すると、徐々に水理ポテンシャルが減少し脱水が進んでいる。永山では先に図1で示したように深度50cm付近で土壌特性に著しい差があり、蒸発散の影響がその下層へは及びにくい状況を示している。図9(a)(b)を比較すると、水理ポテンシャル・プロファイルの定性的な変化傾向は再現されているが、地表面付近の再現性にやや問題が残っている。この原因としては、地表面付近の飽和透水係数が過大であったこと、および境界条件として用いた(3)式におけるaの推定値が実際よりもかなり小さかったことなどが挙げられる。

次に、無降雨日が一ヶ月近く続いたと想定し、自然林地と都市化域(永山)の水理ポテンシャル・プロファイルの長期変化を、数値シミュレーションにより比較する。結果を図10に示す。降雨後の5日ごとの変化を図示しているが、都市化域では全層にわたってプロファイルが乾燥の方向に進むことがわかる。この点については、現地での実測値も同様な傾向を示しており、シミュレーション結果とよく符合している。また、都市化域ではポテンシャル・プロファイルの変化は大きいものの、水分特性曲線から推察されるように実際の水分変化量は無降雨期間の初期を除いてはかなり小さくなっている。

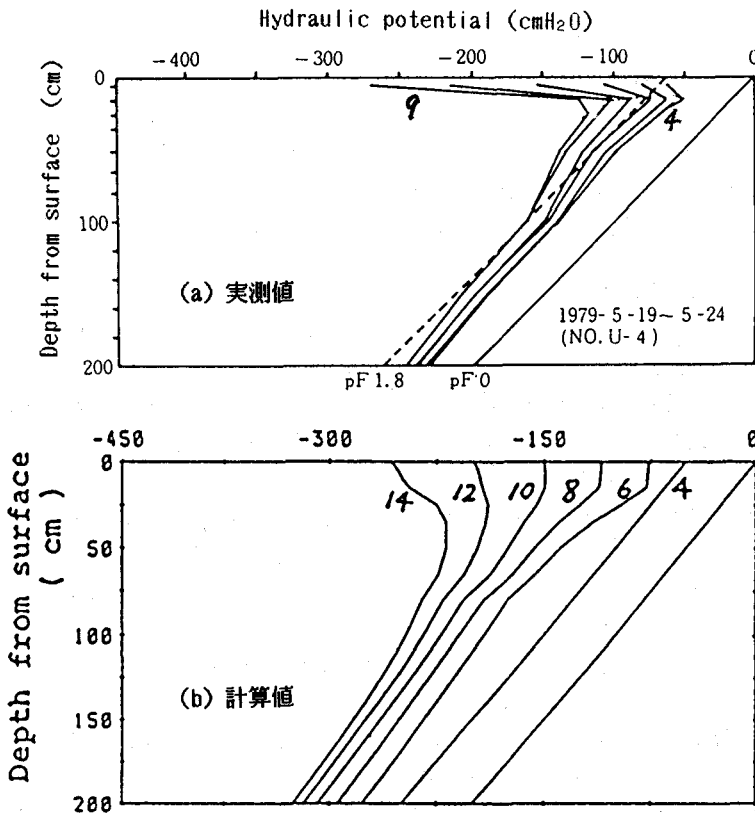


図9 水理ポテンシャル・プロファイルの変化

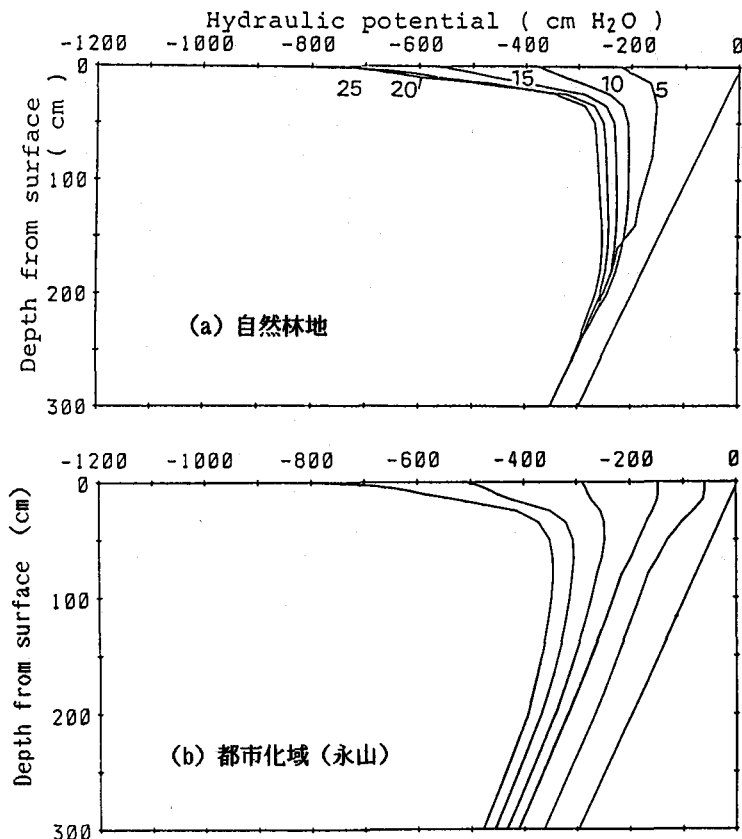


図10 無降雨日が長期間続いた場合の
水理ポテンシャル・プロファイルの変化

6. まとめ : 本研究で得られた成果は以下の通りである。

- (1) 室内試験により得られた現地土壌の $\psi-\theta$ 関係を用いて $K-\psi$ 関係および飽和透水係数を推定する手法を導入することにより、数値計算上の未知パラメータを減ずることができた。
- (2) 蒸発過程における地表の境界条件をテンシオメータによる現地観測値から経験的に定式化した。さらに式中のパラメータが気候条件とかなりの相関関係を持つことを明らかにした。
- (3) 以上の結果に基づいて、不飽和帯水分に関する蒸発過程の数値シミュレーションを行ったところ、現地観測値を比較的良好に再現することがわかった。さらに、土壌特性の相違が不飽和帯水分の挙動に及ぼす影響について、シミュレーションにより比較・考察することができた。

なお、本研究は文部省科研費重点領域研究A02(代表、京都大学教授 高棹 琢馬)の補助を受けている。

引用文献

- 1) 虫明, 岡, 小池 (1987): 流域開発における保全林地の保水機能の評価—土壌特性の変化に着目して—, 第3回水資源に関するシンポジウム, pp.583-588.
- 2) 虫明, 岡, 小池 (1986): 現地土壌特性の評価に基づく数値シミュレーションの再現性 —自然林地における表層不飽和帯水分の挙動—, 第41回年講概要集, pp.165-166.
- 3) 虫明, 岡, 小池 (1987): 数値解析による不飽和帯水分挙動の再現性 —水分保持特性に基づく透水係数を用いた場合—, 第14回関東支部年講概要集, pp.56-57.