

不飽和層中での水みち形成と水みち流下速度についての実験的研究

Experimental Study on Water Path Flow in Unsaturated Medium

坂本康*・渡辺和彦**

By Yasushi SAKAMOTO and Kazuhiko WATANABE

Water path flow was examined using the unsaturated medium consisted with glass-beads of uniform diameter.

Experimental results showed that the ratio of width of water path to that of the total layer decreased as the glass-bead diameter increased and that the mobile water content was smaller than the total water content in the water path.

These results could be explained more comprehensively by the capillary model presented by Tamai et al.(1987) than by the conventional method using the hydraulic conductivity.

Keywords: water path flow, unsaturated medium, mobile water content

1. はじめに

1.1 水みち研究の意義

土壌中の水の移動量は、単位面積を単位時間に通過する水量、つまり流量フラックスで表現されることが多い。しかし、水による汚染物質の移動、降雨水が滯水層に達する早さを検討するためには、流量フラックスではなく実際の水の移動速度を知る必要がある。水の移動速度は、流量フラックスを有効空隙率で除した値となる。有効空隙率とは、水の流れみちとなる空隙の体積が全体積に占める比率である。飽和層では、有効空隙率と全空隙率の差はない。しかし、不飽和層では全空隙のうちどの程度が有効空隙となるかを推定することは困難である。それは、不飽和層中では均一な流れだけでなく偏った流れも起こりうるためである。

一方、林地のような条件では、樹間降雨、樹幹流による地表面への水の供給は本質的に偏っている。その点、土中でも均一に流れるのではなく水の供給されているところだけを流れると考える方がむしろ自然な考え方ともいえる。土中の流れを均一な流れと仮定するならば、流れを均一とする機構、条件を示す必要がある。

以上のような点から、不飽和層では偏った流れ、つまり水みち流れの生成条件、および水みち流下速度に影響を与える因子について検討する必要がある。本研究では、この点を実験により検討した。

* 正会員 工博 山梨大学講師 工学部土木環境工学科
(〒400 甲府市武田 4-3-11)

** 学生員 工学 山梨大学大学院修士課程 工学系研究科土木環境工学科
(〒400 甲府市武田 4-3-11)

1.2 水みちに関する用語の定義

本研究で用いている水みちに関する用語を、以下のように定義する。

- (1) 水みち：不飽和層が水が流れるとき、実際に水が流れる空間、およびその周辺空間を指す。前者は、可動水の通る空間であり、本研究では、流路と呼ぶ。後者は、流路を形成している固相、非可動水、気相が占める空間である。水みちには、マクロな孔隙、亀裂によるものもあるが、本研究では、均一径粒子層でできる水みちを対象とした。本研究では、トレーサー移動実験により着色した部分を水みちとした。
- (2) 水みち面積率：不飽和層を水平に切ったとき、その断面積のうち水みちに属する面積の占める比率を指す。本研究では、各深さでトレーサーにより着色した部分を写真から読み取り、その幅が層全体の幅に占める比率を、水みち面積率とした。

1.3 本研究の目的

著者ら(1986)は、ガラスビーズで作った深さ15cmの層を用いて簡単な予備実験を行った。その結果、粒子の大きさ、粒径分布、降雨量、降雨前の水分状態が水みち形成に影響することを示した。本研究では、予備実験の結果を参考に、より長い層で、水理条件を明確にした実験により、水みち流れを定量的に検討した。具体的目的は、ガラスビーズの不飽和層に水を滴下したときに、水みちの形成、水みち内の流下速度に粒子の大きさ、降雨強度がどのように影響するかを、実験的に明らかにすることである。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概要を図-1に示す。不飽和層は、アクリル樹脂製の槽に高さ68cm、幅5cm、奥行き0.5cmにガラスビーズを充填した層とした。ガラスビーズ層の物理特性を表-1に示す。層の奥行きは、滴下水が奥行き方向に十分行き渡り、着色水の流れが側面から観測できる大きさに設定した。したがって、自然な三次元流れではなく、実験的に拘束された二次元流れとなった。

ガラスビーズ層は、実験開始前にpre-event water に当たる液で飽和し、重力により排水した。その後、0.5~1時間静置して水分状態が安定してから実験を開始した。実験期間中は、層中の大気圧面、つまり自由水面は、層の底から7cmの高さに設定した。人工降雨は、1cm間隔に置かれた注射針5本から滴下した。一滴の水量は、 0.011cm^3 であった。

2.2 実験条件

実験は、大きく3つに別れる。それぞれを実験-1、2、3として、降雨強度等の条件を表-2に示す。表-2中、層中の液とは、実験開始前に層にあった液で、pre-event waterに相当する。

実験-1、2は、水みち形成条件を調べる実験で、 KMnO_4 で着色した水を人工降雨とし、水みちを可視化した。このとき、水みちの写真を撮影し、水みち面積率を測定した。実験-1では、粒径0.5-0.6mmの層34cmの上に1.00-1.41mmの層34cmを置き、層中にある液を人工降雨より密度の小さい精製水とした。実験-2では、表-1のいずれかの粒径の層で、層中の液を人工降雨の KMnO_4 と同じ濃度の NaCl 液とした。

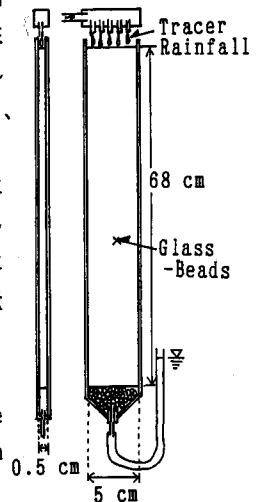


図-1 実験装置

表-1 不飽和層の物理特性

直径 (mm)	空隙率 (-)	飽和透水係数 (cm/sec)
0.71-0.84	0.393	0.304
0.84-1.00	0.390	0.370
1.00-1.41	0.402	0.536
1.41-1.70	0.402	0.622

表-2 実験条件

	層中の液	トレーサー	降雨強度 (mm/h)
実験-1	精製水	KMnO_4 (840mg/l)	314,422,514, 708,888
実験-2	NaCl 液 (2000mg/l)	KMnO_4 (840mg/l)	300,400,664, 800
実験-3	精製水	NaCl 液 (2000mg/l)	300,400,664, 800

実験-1、2の結果を比較して、人工降雨と層中の液の密度差が水みち形成に影響するかどうか検討した。

実験-3では、層内のトレーサー濃度の空間分布からトレーサーの流下速度を推定した。粒子径、降雨強度は実験-2と同じ値に設定した。層中の液は精製水を、人工降雨はNaCl液を用いた。人工降雨を数分間降らせた後、降雨を停止し、その直後に槽を水平にし、層の深さ方向に5cm間隔で設けた直径18mmの試料採取口、11箇所からガラスビーズと間隙水を手早く採取した。この試料に、一定量の精製水を加え、試料水とした。試料水の電気伝導度を測定し、Cl濃度に換算し、その値から各深さでの間隙水のCl濃度を求めた。

3. 実験結果の検討

3.1 水みち形成への密度差、層構造の影響

実験-1、2の水みちの様子を、図-2に示す。図のように、着色した人工降雨水と降雨前に層中にあった液に密度差がある場合（実験-1、白抜き図）とない場合（実験-2、黒塗り図）では実験結果に有意な差は生じなかった。飽和状態では密度差により層中に圧力差を生じるが、不飽和状態では圧力の影響は少なく、密度差の影響が小さいと考えられる。また、図-2によると上層の水みち形成に下層の粒径は影響しないと考えられる。



図-2 水みち形成のようす

3.2 水みち面積率と粒径との関係

水みち面積率は、次式によって求めた。

$$m = W/W \quad (1)$$

ここに、 m :各深さでの水みち面積率、 W :写真で測定した各深さでの水みち幅、 W :層全体の幅(5cm)である。 W は深さの異なる5箇所測定し、平均値を平均水みち面積率、 $m_{ave.}$ とした。実験-2について $m_{ave.}$ と平均粒径との関係を、図-3に示す。図-3によると、粒子径が大きいほど平均水みち面積率が小さくなり、降雨強度が大きいほど平均水みち面積率が大きくなる傾向がある。また、粒径が0.7mm以下になると水みち面積率は1に近づく。つまり、均一な流れになる。

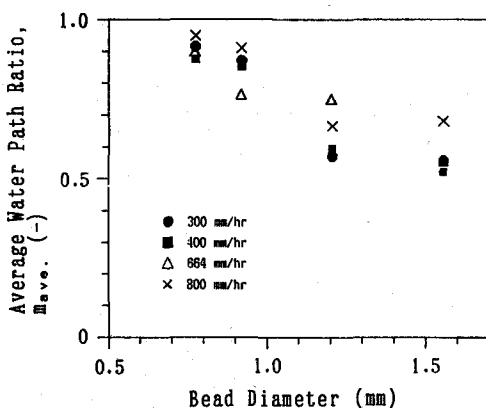


図-3 粒子径と平均水みち面積率

実験時に層を観察すると、最表層は均一に着色しており、水みちはその下にできている。最表層では水滴が粒子と衝突して周辺に飛び散り、水の供給は比較的均一になる。しかし、浸透が起こるときにはミクロな水分量、透水性の相違によって水みちができると考えられる。

3.3 水みち流下速度

実験-2で実測した各時刻での着色水先端の位置を図-4に示す。図-4より、流下速度は深さにより異なることが分かる。図-4の移動位置を説明するために、 v_1 、 v_2 、 v_3 の3つの流下速度を算出した。それらの速度分布を図-5に、それらの速度から推定した着色水先端の位置を図-4に示す。

流下速度、 v_1 (図-4、5の実線)は次式である。

$$v_1 = q/\theta \quad (2)$$

ここに、 q : 流量フラックス [L/T]、降雨強度、 θ : 各深さでの

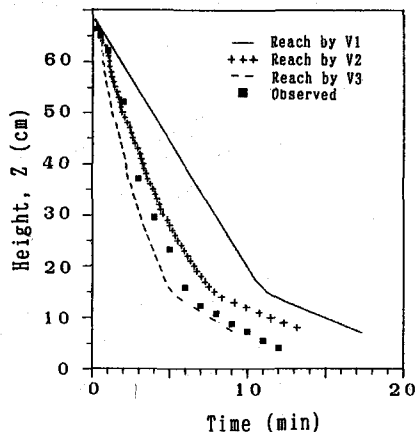


図-4 トレーサー先端位置(1)

不飽和体積含水率 [-]である。各深さでの θ は、Richards(1931)式を解いて得られる水頭分布から求めた。Richards式の解は、大気圧面の位置を境界条件としたルンゲ・クッタ法で算出した。不飽和透水係数と不飽和体積含水率との関係には、Campbell(1974)の式を採用した。Richards式の解によると底部から20cm以上の部分では、不飽和体積含水率はほぼ一定となる。したがって、 v_1 もこの範囲では一定となる。 v_1 は、水みちを作らずに流れたときの移動速度に相当する。

v_2 (図-4の+、図-5の点線) は、次式で表わされる。

$$v_2 = q / \theta / m \quad (3)$$

実測した水みち面積率、 m が深さにより異なるため、 v_2 も深さにより異なる。 v_2 は、水みち部分のみ流れ、しかも水みちに非可動水がないときの流下速度に相当する。

v_3 (図-4,5の破線) は、次式で表わされる。

$$v_3 = q / \theta. \quad (4)$$

ここに、 $\theta.$:有効空隙率、あるいは可動水の体積含水率である。 v_3 は、実際のトレーサの流下速度に相当する。 $\theta.$ は、実験-3の結果から以下のようにして推定した。

実験-3で求めた層中の濃度分布の一例を図-6に示す。本実験条件では移流に比べ拡散等が無視できるとし、間隙水濃度が人工降雨水濃度の半分となる位置をトレーサー到達位置と仮定した。このとき、到達位置までの有効空隙率の平均値を次式とした。

$$\theta. \text{ ave. } = \frac{q}{L/t} \quad (5)$$

ここに、 t :トレーサー降雨継続時間[T]、 L : t 時間後に間隙水濃度が人工降雨水濃度の半分となる位置の深さ[L]、 $\theta. \text{ ave.}$:表面から深さLまでの有効空隙率の平均値である。同じ降雨強度で、実験-2で求めた水みち内水分量と実験-3で求めた $\theta. \text{ ave.}$ との関係を図-7に示す。水みち内水分量は、5箇所での体積含水率の平均値、 $\theta_{\text{ave.}}$ に $m_{\text{ave.}}$ を乗じて求めた。

もし、着色領域として識別した水みちの水がすべて可動水なら、 $\theta. \text{ ave.}$ と $\theta_{\text{ave.}} m_{\text{ave.}}$ は等しくなるはずである。図-7は $\theta. \text{ ave.}$ が $\theta_{\text{ave.}} m_{\text{ave.}}$ よりも小さいことを示している。つまり、水みちには非可動水も存在すると考えられる。

図-7の關係に次式を適用し、最小自乗法により定数 a, b を決定した。各深さでの有効空隙率、 $\theta.$ は各深さでの θ_m を式(6)に代入して算出した。

$$\theta. = a \theta_m + b \quad (6)$$

図-4によると、 v_2 、 v_3 のように水みち面積率、有効空隙率を考慮すると先端の位置がほぼ説明できることが分かる。しかし、なぜこのような水みち面積率、水みち流下速度となるかを理論的に説明することは難しい。それは、不飽和層という気・液・固三相混在に水が滴下されるという条件での水理学が十分で

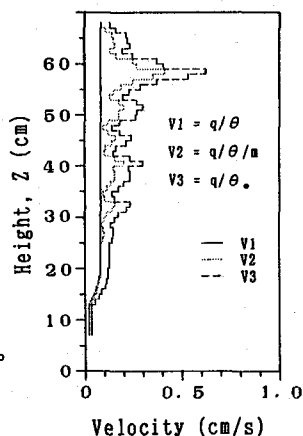


図-5 速度分布計算値

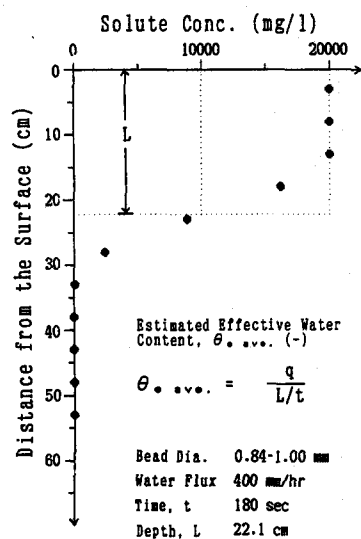


図-6 濃度分布実測値

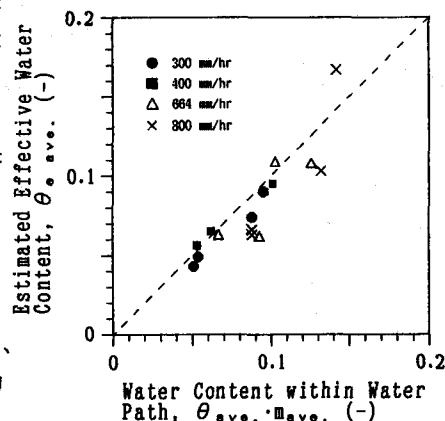


図-7 有効空隙率と水みち内水分量

はないからである。以下では、この分野での先駆的な研究といえる、玉井・浅枝ら(1987)の研究を参考にし、粒子層中の流路を毛細管で置き換える毛管モデルにより、本研究の実験結果を検討する。

4. 毛管モデルによる検討

4.1 毛管モデルの概要

玉井・浅枝ら(1987)が提案した毛管モデルでは、不飽和層の水の流れは、微小な円管内を水柱となって流れると想定する。このとき、円管内平均流速公式として次式が誘導される。

$$V_z = \frac{\rho a^2 g h - 2a\sigma(1-\cos\alpha)}{8\mu h} \quad (7)$$

ここに、 V_z ：水柱の毛管断面内平均速度[L/T]、 a ：流路となる毛管の内半径[L]、 h ：毛管内の水柱の長さ[L]、 α ：水柱下端における水と毛管壁の接触角、 ρ ：密度、 σ ：表面張力、 μ ：粘性係数、 g ：重力加速度である。ただし、上式では、慣性力は無視し、水柱上端の接触角は0と仮定している。また、水柱下端の接触角 α と水柱長さ h の関係は、実験に基づき次式のように定式化している。

$$\alpha/\alpha_s = 0.644 + 0.269h/h_s + 0.084(h/h_s)^2 \quad (8)$$

ここに、 h_s ：鉛直に立てた毛管内で水柱が静止しうる最大の長さ[L]、 α_s ：水柱長さ h_s のときの水柱下端の接触角である。

4.2 流路の仮定

本研究では、実験条件に対応させて、流路の大きさ、本数を以下のように仮定した。

実験では均一粒径のガラスビーズを用いた。そこで、粒子層の構造として、均一球の系統的配列(三輪茂雄(1981))のうち、(1)立方配列と(2)正斜方配列を想定した。配列を図-8に示す。また、毛管内半径はこのとき空隙に入る最大円の半径とした。表-3に、(1)と(2)の場合の空隙率、毛管内半径 a 、単位面積当りの毛管本数を示す。表-1の実測の空隙率は、(2)に近い値であった。流路となる毛管の本数は、一個の水滴が層表面に達したとき、水滴の水が供給される面積を実測し、これに表-3の単位面積当りの毛管本数を乗じて求めた。したがって、水が供給される部分の毛管がすべて流路となると仮定したことになる。

4.3 水みち面積率と粒径との関係

不飽和層中の全流量は、供給水量と等しい。このとき、水みちが飽和状態で、水頭勾配が1と仮定すると、水みち面積率は次式となる。

$$m = q/k_s \quad (9)$$

ここに、 q ：降雨強度[L/T]、 k_s ：透水試験で求めた飽和透水係数[L/T]である。しかし、容器に充填した試料に圧力を負荷して測定する飽和透水係数と、周囲を拘束されていない不飽和層中の水みちでの透水係数が同じになるとは限らない。そこで、毛管モデルで求めた流速を用いて、水みち面積率を次式のように表現した。

$$m = \frac{q}{n(\pi a^2/4)V_z} \quad (10)$$

ここに、 m ：水みち面積率[-]、 n ：単位面積当りの流路本数[1/L²]である。

図-9に、実験結果とともに式(9)、(10)による計算値を示した。ただし、正斜方配列は水みち面積率が1以上となるので省略した。また、毛管モデルによる流速は最大値、つまり $\alpha=0$ のときの値を採用した。

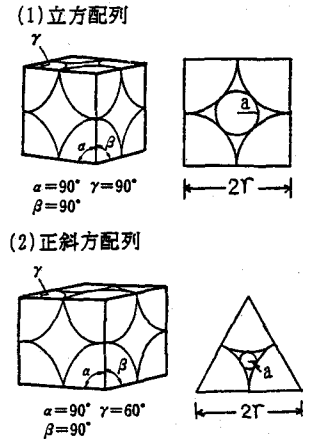


図-8 粒子配列模式図

表-3 粒子配列の特性値

配列名	空隙率 (-)	毛管内半 径 a	単位面積当り の毛管本数 $\cdot$
立方配列	0.4764	$0.414r$	$1/4r^2$
正斜方配列	0.3954	$0.155r$	$1/\sqrt{3}r^2$

* 粒子半径を r としたときの値。

図-9によると飽和透水係数よりも毛管モデルによる流速を用いた方が水みち面積率の傾向がよく示せる。

4.4 水みち流下速度の検討

本実験条件でのトレーサー流下速度を、毛管モデルにより以下のように仮定した。

①水柱の長さ h が h_0 を越えるまでは、水は水滴が表面に落下した瞬間に、水滴の水量を (1本の毛管の断面積) $\times$ (毛管本数) で除した長さ移動する。

②水柱の長さ h が h_0 を越えたときは、式(7)に h を代入して求めた速度 V_z で移動する。

③水柱の長さ h が h_0 を越えたときでも、 V_z が①の速度より小さいときには、①の速度で移動する。

本研究では、玉井らと異なり流下過程での h の変化は考えていない。したがって、流速は①、②のいずれかの速度となる。

図-10 には、結果の一例を示した。計算によると、正斜方配列では流速はほとんど①の速度となった。立方配列では深さ 3 ~ 20cm 程度で①の速度から②の速度になる。実験結果は、立方配列と正斜方配列の間の範囲となっている。さらに正確な流下速度の推定には、毛管のくびれ等の影響を考慮する必要がある。

5. まとめ

本研究では、均一径ガラスビーズで作った不飽和層について水みち流れと水みち流下速度を検討した。主な結論は以下の通りである。

- (1) 均一径粒子の層でも水みちはでき、水みち面積率は粒径が大きいほど小さくなる。また、event water と pre-event water との密度差が水みち形成に与える影響は小さい。
- (2) 実験結果から得られた水みち流下速度は、水みち内に非可動水が存在することを示唆している。
- (3) 水みち面積率、水みち流下速度の検討には、透水係数を用いる方法よりも毛管モデルの流速を用いる方法のほうが有望である。

参考文献

- 坂本康・竹内邦良(1986): 色素トレーサーを用いた不飽和浸透・流出実験、土木学会第14回関東支部年次研究発表会講演概要集、pp.78-79。
- 玉井信行・浅枝隆・田中靖治(1987): 毛管モデルによる不飽和透水係数の評価、土木学会論文集、第381号/II-7、pp.75-81。
- 三輪茂雄(1981): 「粉体工学通論」、日刊工業新聞社、pp.31-33。
- Campbell, G.S.(1974): A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data, Soil Sci., Vol.117, No.6, pp.311-314。
- Richards, L.A.(1931): Capillary conduction of liquids through porous medium, Physics, 1, pp.318-333。

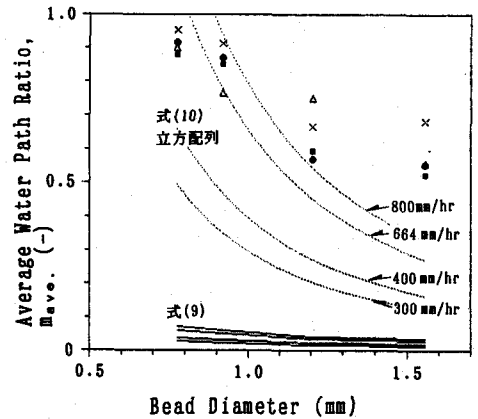


図-9 水みち面積率計算値

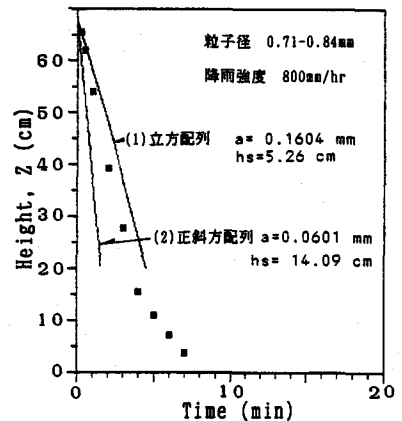


図-10 トレーサー先端位置(2)