

2次元斜面流出モデルについて

Two-dimensional Numerical Model of Subsurface Flow

市川 嘉輝* 清水 康行** 鳥谷部寿人*

Yoshiteru ICHIKAWA, Yasuyuki SHIMIZU and Toshihito TOYABE

これまでの流出予測では土中の水分の挙動は未解明な部分が多く、さまざまなパラメータとして簡易的に扱ってきた。本研究においては、可傾斜水路を用いて勾配および降雨条件を変えた室内実験を行い、また Recharde's の式より流出モデルを確立し、数値シミュレーションを行い、実験値と比較した。

〈サクション；表面流；脱水過程；吸水過程〉

In the previous discharge prediction method, it was known how the ground water was being transported, thus it had been treated as several adjustable parameters.

In this study, we conducted experiments using a flume with an adjustable slope under varying conditions. A numerical model using Recharde's equation was run under the same conditions of the experiments. Thereby, experimental and computed values could be compared.

Keywords ; suction, overland flows, desorption, sorption.

1. はじめに

降雨時における雨水の地中への浸透や浸透した雨水の挙動を正確に把握することは、河川の流出予測などにおいて重要な課題である。本研究では2次元斜面に人工降雨を発生させる実験により、地下浸透および流出の特性を土層中の間隙水圧、流出量を測定することにより明確にする。また、斜面の降雨・流出機構を物理的に表現すべく Richards¹⁾ の式を用いて飽和・不飽和浸透流モデルの計算を行い、2次元斜面における降雨・浸透・流出実験との比較を行うことによりモデルの特性を検討する。

2. 実験装置

実験装置は図-1 に示す土層部、降雨発生

部、流出部のほか、データ表示および蓄積部から構成され、その機能、サイズおよび特性は以下のとおりである。

土層部は幅30cm、斜面方向長500cmの可傾斜水路に深度40cm、斜面方向長480cmに珪砂7号(粒径 $\phi=0.2\text{mm}$)を充填し、下流端20cmには珪砂流出防止用の砂利を配置する。側面の21カ所には、圧力測定のためのテンシオメーターを設置する。降雨発生部は塩化ビニール管3本を斜面方向に並べ、それぞれ5cm間隔に直径0.4mmの穴を開け、降雨が雨粒となって落ちるように綿糸を吊るす。土層表面の水滴孔を防止し、広範囲に雨を降らせるために破碎ネットを土層表面よりやや上に取り付ける。降雨の供給法は一定量の降雨条件を保つため一度高水タンクに水道水を溜め、水位を一定

*河川研究室員 **同室長

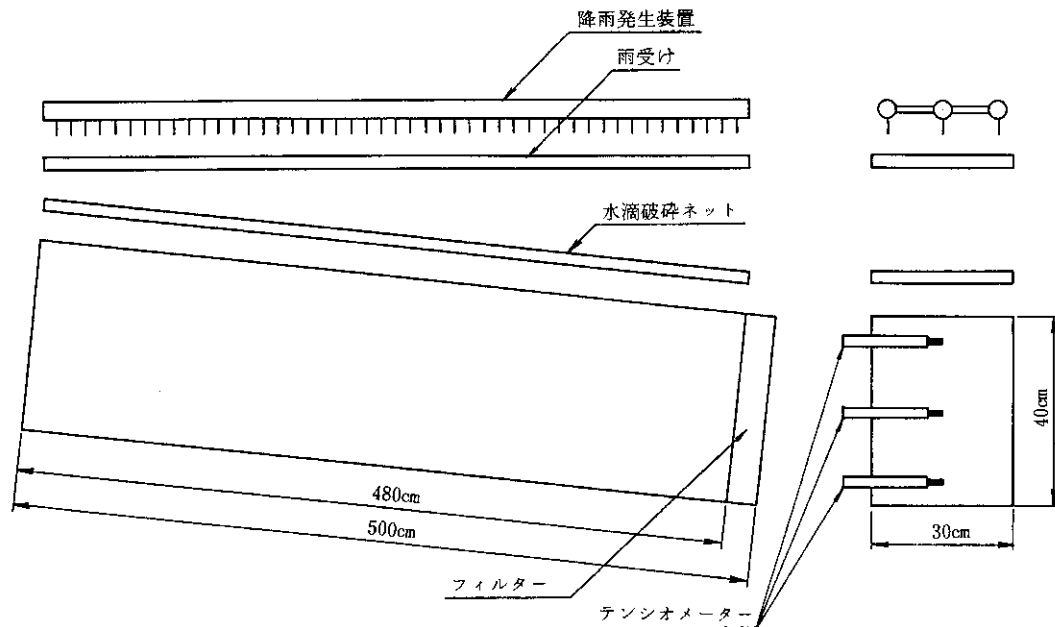


図-1 実験装置概要図

に保ちながら水を送ることとし、降雨強度はそれぞれの塩化ビニール管に取りつけられたバルブで調節する。流出部には流出カウンターを設置し、流出カウントを単位時間ごとにカウントし累積する。データ表示・蓄積部はテンシオメーターおよび流出カウンターからのデータを設定時間まで設定単位時間ごとに読み取り、パーソナルコンピュータ上の画面に表示するとともに、データはハードディスクに記録した。

3. 実験概要

実験は表-1 に示すとおり、降雨強度が10 mm/hr と30mm/hr の2種、斜面勾配が1/5と1/10の2種の計4ケースを行った。実験開始直前にデータ表示・蓄積システムをリセットするとともに、降雨強度をそのケースごとに調整し

3回計った平均値を降雨強度とした。なお、データの読みとり間隔はほぼ1分ごととし、実験終了時間については前年度の実験を参考にして決めた。実験によって得られるデータは、土中負圧（サクション ψ ）21測点（配置は図-2参照）および流出の累積値である。ここで、土中負圧について説明する（図-3参照）。平衡状態で重力と釣り合う単位体積当たりの土中水に働く毛管力 ρg に抗しつつ、 $-\rho g$ の力でこれを平衡的に地下水面から、高さ z の位置に移動させるに要する仕事 $-\rho g z$ が、静的平衡状態での毛管ポテンシャル（capillary potential）ないしはマトリック・ポテンシャル（matric potential） ψ である。これは、高さ z の位置で静水圧に等しい。一般に、不飽和状態に対してもその点での圧力（負圧）を単位体積当たりの毛管ポテンシャル（マトリック・ポテンシャル）と定義し、このときのエネルギーは水頭で表わされる。土中の全ポテンシャル（total potential）は、重力ポテンシャルと毛管ポテンシャルの和として表わされる。ポテンシャルを水頭表示した場合、全水頭 ϕ は、重力水頭 z と毛管水頭 ψ の和である。毛管水頭は不飽和帯では負圧となり、負符号を除いたものをサクション（suction）と定義する。

表-1 実験ケースおよび実験条件

case-no.	勾配	降雨時間 hr	降雨強度 mm/hr	
			開始時	停止時
1	1/5	6.0	10.72	10.44
2	1/10	8.0	10.90	10.26
3	1/5	4.5	30.85	29.63
4	1/10	3.0	32.05	30.46

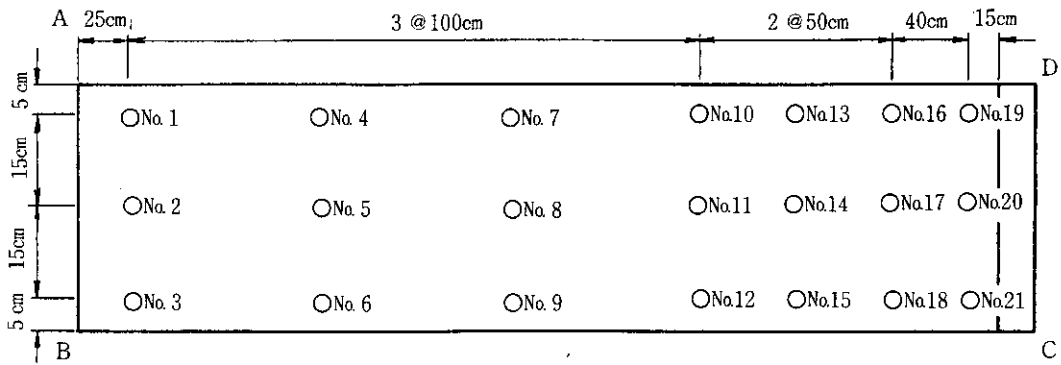


図-2 テンシオメータ配置図

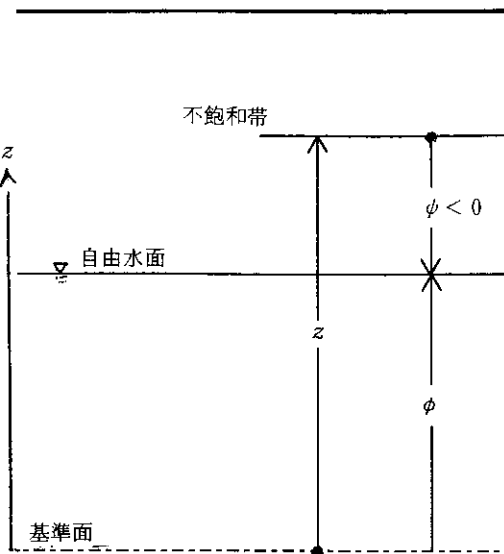


図-3 サクション ψ の説明図

これらの値は単位時間ごとにハードディスクに蓄積され、縦軸に電圧、横軸に時間のグラフとしてモニターに表示される。降雨時間については、流出が定常状態に達した後、実験の様子を見ながら適当と思われる時間に降雨を停止させることによって設定した。

実験ケースによっては表面流が発生する場合もあったので、この場合には計量カップで1分ごとに表面流出量の計量および記録を行った。降雨停止後、引続き負圧と流出量の計測は終了設定時間まで行った。それぞれのケースの実験開始前には、土層内の初期条件を揃えるため2～3日の排水を行った。

4. 実験結果と考察

図-4から図-11に、各ケースの流出量ハイドログラフおよびサクションの時間変化を示

す。ここで、図-4, 6, 8, 10における流出量は浸透流量 [流出カウンター q_1 (mm/hr)], 表面流量 [q_2 (mm/hr)] および全流出量 [$q_3 (= q_1 + q_2)$] であり、図-5, 7, 9, 11のライン脇の数字は、図-2に示したテンシオメータの位置を示す。

各実験ケースのハイドログラフすべてに共通する点は、降雨強度・斜面勾配に関係なく、降雨停止直後から流出量が激減している。特に、その傾向は降雨強度の強いケースである図-8, 10によく現われている。また、サクション ψ の時間変化を見ると降雨停止後に急激な変化がみられる。図-4, 6, 8, 10のハイドログラフでは、降雨停止後流出量が極端に減少し、土中の水分量の変化は少ないが、サクション ψ の値は急激に増加している。この現象は、ヒステリシス現象 (土壌の湿潤過程と脱水過程の関係でサクション ψ と体積含水率 θ との関係曲線を描いたときに、これら二過程は同一曲線をとらない現象) によるものと思われる。

降雨強度が30mm/hrのケースでは、定常に

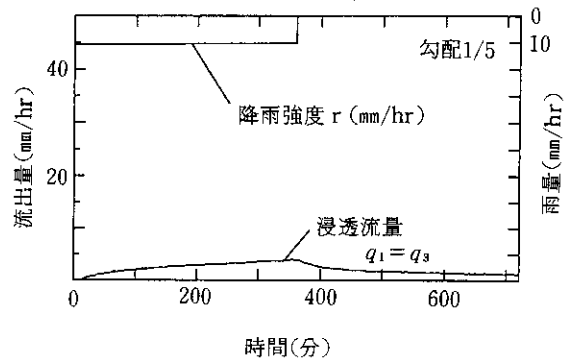


図-4 降雨強度 r および流出量の時間変化 (ケース1)

達するまでに流出量が段階的に増加する傾向がみられる。またサクシジョンの方でも、定常となるまでの値の変化に段階的なものがある。この双方を比べると、それぞれ次の段階への変化時

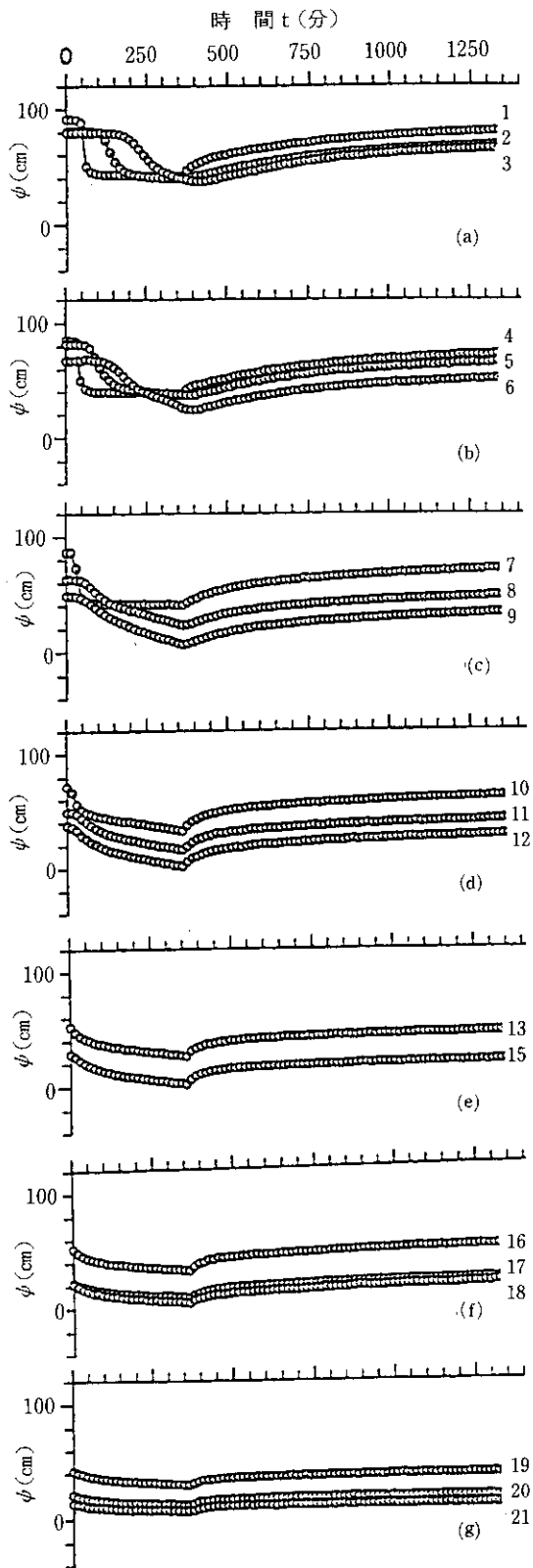


図-5 サクシジョン ψ の時間変化 (ケース1)

間に類似性がみられる。また、この現象が降雨のあるときのみ起こっていることにより、雨水の浸透が原因であると推定される。恐らく降雨により土中の空隙がある程度満たされることにより土層の透水性が段階的によくなり、さらに流出量が増したものと思われる。ただし、流出量が増加すれば逆にサクシジョンの値の急な減少はないはずだが、サクシジョン図での変化は減少の方向へ向かっている。これは透水性がよくなったため、土中水の流速が速くなり土層内の空隙への流入量が多くなったことを表わしていると思われる。

降雨強度が30mm/hrのケースでの斜面勾配が1/5および1/10の両ケースとも全流出量が降雨強度とほぼ等しいことから、定常に達した時点ではこれ以上土中には貯溜できず、土層は飽和状態であると考えられる。定常に達するまでの時間は1/10勾配の方が1/5勾配より速い。これは、初期含水量と斜面勾配の違いによる重力排水量の違いによるものと思われる。また勾配が急なほど浸透流量の割合が高く、これは浸透流出における圧力勾配の影響によるものと考えられる。

表面流発生状況については、土壌表面付近のテンシオメーターが0となった後、土壌表面に水が浮かび、やがて流れだした。初めに水が浮かびはじめたのは、水路中間よりやや下流であったが、図-9、11のサクシジョン ψ の時間変化図にもその傾向(水路中間部の値がより早く0値に達する)が現われている。

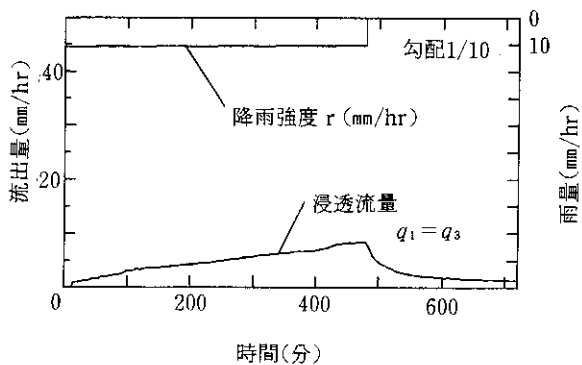


図-6 降雨強度 r および流出量の時間変化 (ケース2)

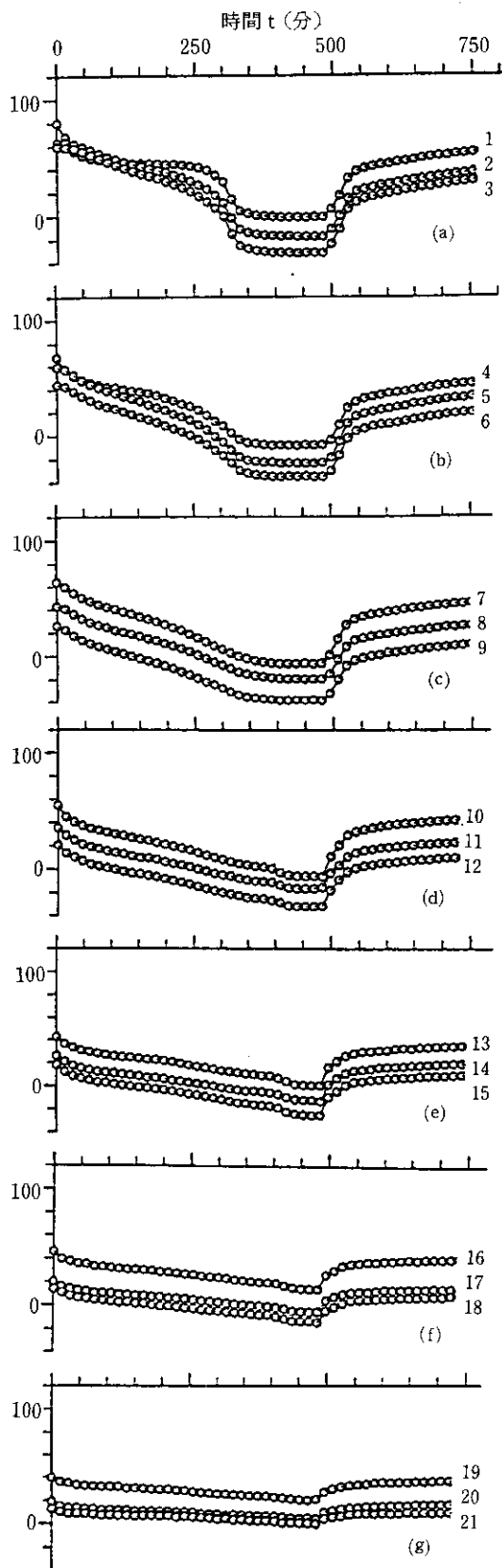


図-7 サクション ψ の時間変化 (ケース 2)

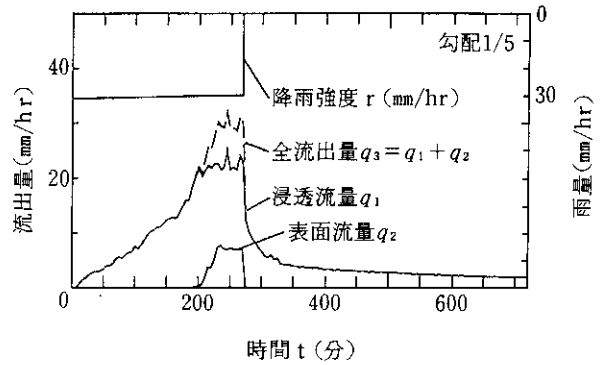


図-8 降雨強度 r および流出量の時間変化 (ケース 3)

5. 飽和・不飽和浸透流モデル

Richards¹⁾による飽和—不飽和浸透理論を用いて、実験結果の再現計算を行い考察を加える。

土中水分量の連続の式は、次式で表わされる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \quad (1)$$

ここで、 x ：地表面に添った斜面方向成分、 z ： x 軸と垂直下方向成分、 V_x 、 V_z ：それぞれ浸透流速の x -および z -方向成分、 θ ：体積含水率、 t ：時間

V_x 、 V_z はダルシー則に従うと仮定し、次式で与える。

$$V_x = -K \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad V_z = -K \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2)$$

ここで、 ϕ ：全水頭、 K ：透水係数
(1)式の左辺を、次式のように変形する。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (3)$$

(1)式に(2)式を代入し、比水分容量 $C(\phi) = \partial \theta / \partial \phi$ を導入すると(1)式は、

$$C \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad (4)$$

となる。斜面勾配を α としたときの全水頭 ϕ は、

$$\phi = \psi - x \sin \alpha - z \cos \alpha \quad (5)$$

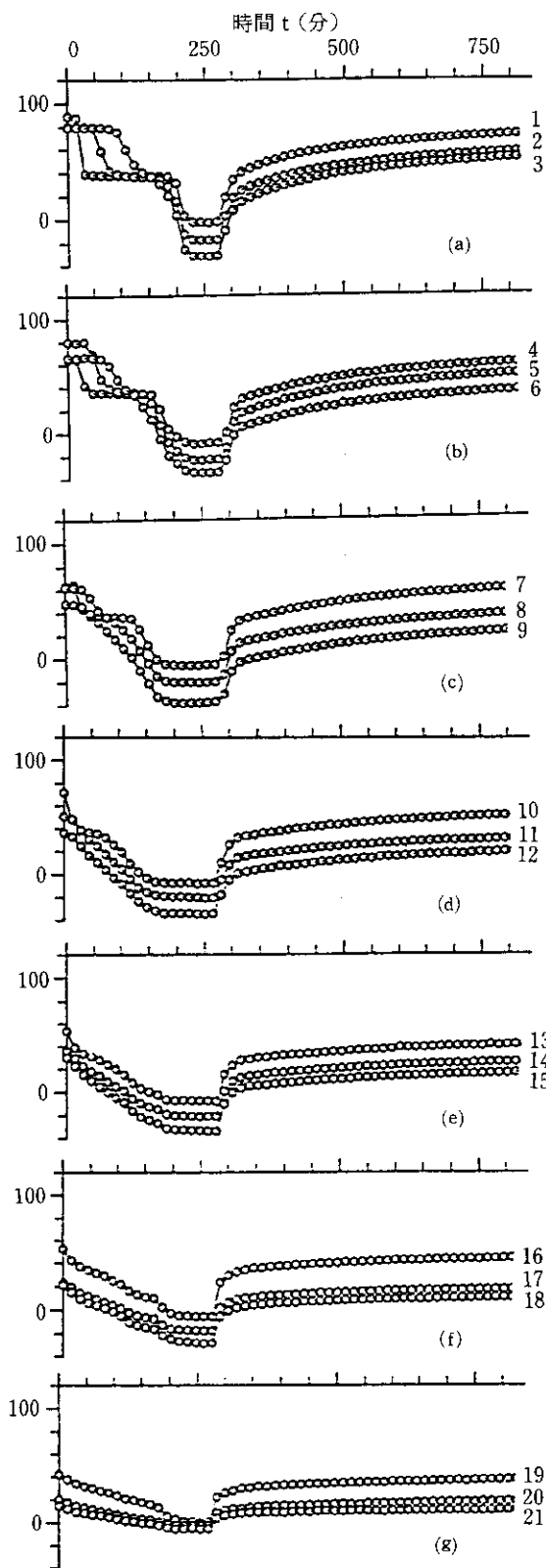


図-9 サクション ψ の時間変化 (ケース 3)

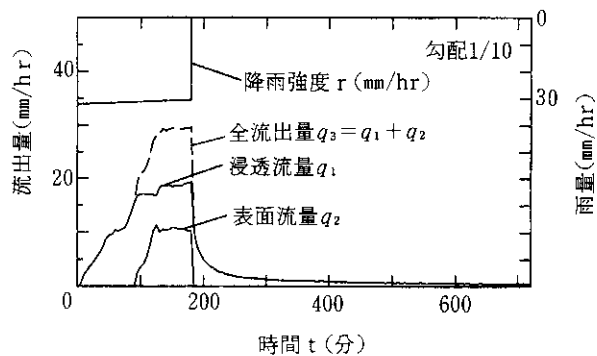


図-10 降雨強度 r および流出量の時間変化 (ケース 4)

で表わされ, (5)式を用いて変数 ϕ を ψ に変換すると,

$$C \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right\} \quad (6)$$

となる。また, $\phi \sim \theta(\phi)$ および $\phi \sim K(\phi)$ の関係を, 以下に示す谷¹⁾の式で表わす。

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\phi}{\phi_0} + 1 \right) \exp \left(-\frac{\phi}{\phi_0} \right) + \theta_r \quad (7)$$

$$K = K_s S_e^\beta \quad (8)$$

(6)式中の C は, (7)式を ϕ で偏微分した次式を用いる。

$$C(\phi) = -(\theta_s - \theta_r) \frac{\phi}{\phi_0^2} \exp \left(-\frac{\phi}{\phi_0} \right), \quad (9)$$

[$\phi = \phi'(\phi' \leq 0), \quad \phi = 0(\phi' > 0)$]

S_e は, 有効飽和度であり, 以下の式により表わされる。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (10)$$

ここで, θ_s : 飽和含水率 θ_r : 移動可能な水がほとんどないとみなせる含水率 ϕ_0 : 比水分容量 C の最大値を与える圧力水頭の値 K_s : 飽和透水係数 β : 不飽和領域における不飽和透水係数の傾き

境界条件は流速により与えられ, 図-2に示した記号 A, B, C, Dを用いて以下のように

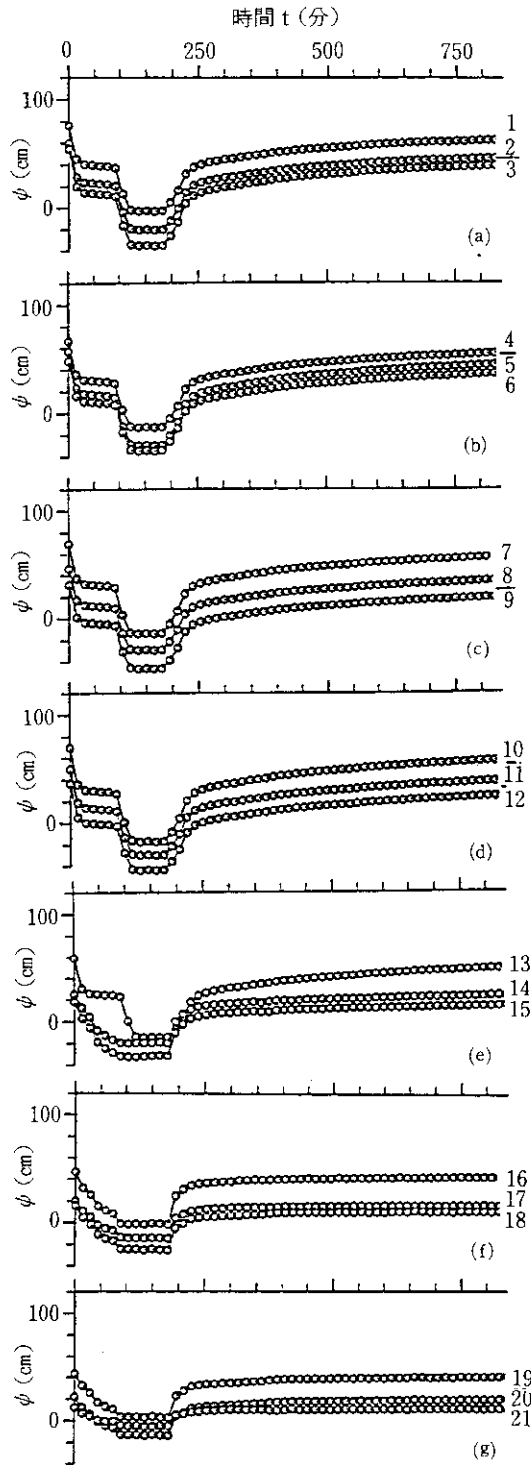


図-11 サクション ψ の時間変化 (ケース 4)

与える。AB および BC については、この面をとおしての流れが 0 の条件、CD 面については自由流出の条件、AD については降雨が吸収される条件を考慮し、次式で境界条件を与える。

$$\begin{aligned}
 V_x=0 \text{ (AB 面)}, \quad V_z=0 \text{ (BC 面)}, \\
 \frac{\partial V_x}{\partial x}=0 \text{ (CD 面)}, \quad V_z=r(t) \cos \alpha \text{ (AD 面)}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

ここで、 $r(t)$: 降雨強度

(6)式を解くことにより、斜面上の任意の地点の任意の時間のサクション ψ が求まり、この結果から、(2)式、(7)式等を用いて、斜面内の水分の移動特性や斜面末端からの流出量が求まる。本モデルでは以下に示す差分法を用いて、この計算を行うものとする。

6. 差分計算の方法

6-1 サクション ψ の推定

(6)式を用いたランクニコールソン法による差分計算を行い、以下にその差分式を示す。分割は x 軸方向を i とし、1 から n_i まで z 軸方向を j とし、1 から n_j までとした。また、サクション ψ および体積含水率 θ 、不飽和透水係数 K の計算点を図-12に示す。

記号右の肩字 0, 1, M は各々、過去値, 未来値, 現在値 (求める値) を意味する。

$$\begin{aligned}
 \frac{C^1(i, j) + C^0(i, j)}{2} \frac{\psi^1(i, j) - \psi^0(i, j)}{\Delta t} = \\
 \frac{1}{\Delta x} \left[K_x^M(i+1, j) \right. \\
 \left. \left\{ \frac{\psi^M(i+1, j) - \psi^M(i, j)}{\Delta x} - \sin \alpha \right\} \right]
 \end{aligned}$$

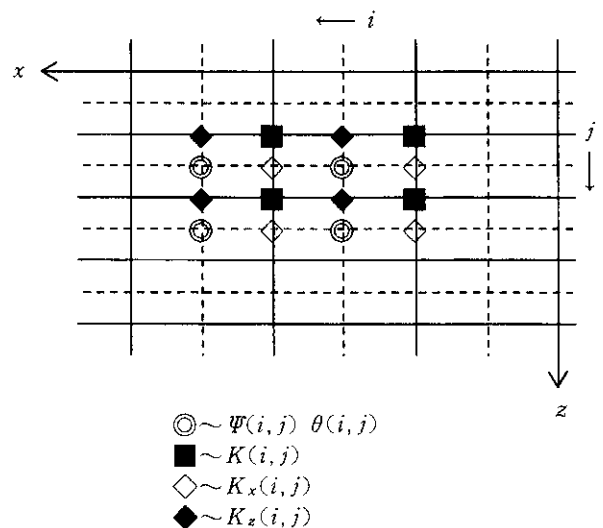


図-12 ψ , θ , K 計算点図

$$\begin{aligned}
& -K_x^M(i, j) \left\{ \frac{\psi^M(i, j) - \psi^M(i-1, j)}{\Delta x} - \sin \alpha \right\} \\
& + \frac{1}{\Delta z} \left[K_z^M(i, j+1) \right. \\
& \quad \left. \left\{ \frac{\psi^M(i, j+1) - \psi^M(i, j)}{\Delta z} - \cos \alpha \right\} \right. \\
& \left. - K_z^M(i, j) \left\{ \frac{\psi^M(i, j) - \psi^M(i, j-1)}{\Delta z} - \cos \alpha \right\} \right] \quad (12)
\end{aligned}$$

ここで $\psi^1(i, j)$ は、次の2式より求められる。

$$\psi^M(i, j) = \frac{\psi^1(i, j) + \psi^0(i, j)}{2} \quad (13)$$

$$\psi^1(i, j) = 2\psi^M(i, j) - \psi^0(i, j) \quad (14)$$

(14)式を(12)式の左辺の後半部に代入すると、

$$\frac{\psi^1(i, j) - \psi^0(i, j)}{\Delta t} = \frac{2\{\psi^M(i, j) - \psi^0(i, j)\}}{\Delta t} \quad (15)$$

となり、左辺の前半部についても次式で表わされる。

$$C^M(i, j) = \frac{C^1(i, j) + C^0(i, j)}{2} \quad (16)$$

(15), (16)式より、(12)式の左辺は次式となる。

$$\text{左辺} = 2C^M(i, j) \frac{\psi^M(i, j) - \psi^0(i, j)}{\Delta t} \quad (17)$$

(12), (17)式により示された差分式を、次の(18)式に変形する。

$$a_1\psi^M(i, j) + b_1 = a_2\psi^M(i, j) + b_2 + a_3\psi^M(i, j) + b_3 \quad (18)$$

ここで、

$$a_1 = 2C^M(i, j) \frac{1}{\Delta t} \quad (19)$$

$$b_1 = -a_1\psi^0(i, j) \quad (20)$$

$$a_2 = \frac{1}{\Delta x^2} \{K_x^M(i+1, j) - K_x^M(i, j)\} \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
b_2 = \frac{1}{\Delta x} \left[K_x^M(i+1, j) \left\{ \frac{\psi^M(i+1, j)}{\Delta x} - \sin \alpha \right\} \right. \\
\left. + K_x^M(i, j) \left\{ \frac{\psi^M(i-1, j)}{\Delta x} + \sin \alpha \right\} \right] \quad (22)
\end{aligned}$$

$$a_3 = \frac{1}{\Delta z^2} \{K_z^M(i, j+1) - K_z^M(i, j)\} \quad (23)$$

$$\begin{aligned}
b_3 = \frac{1}{\Delta z} \left[K_z^M(i, j+1) \left\{ \frac{\psi^M(i, j+1)}{\Delta z} - \sin \alpha \right\} \right. \\
\left. + K_z^M(i, j) \left\{ \frac{\psi^M(i, j-1)}{\Delta z} + \sin \alpha \right\} \right] \quad (24)
\end{aligned}$$

(18)式を $\psi^M(i, j)$ について整理すると、次式となる。

$$\psi^G = \frac{-b_1 + b_2 + b_3}{a_1 - a_2 - a_3} \quad (25)$$

(25)式により求められた ψ^G が採用値 $\psi^M(i, j)$ となるのだが、計算を加速的に行うため加速係数 γ を用いた次式を計算に加える。

$$\psi^M(i, j) = \psi^M(i, j) * (1 - \gamma) + \gamma\psi^G \quad (26)$$

なお、本モデルでは $\gamma = 1.2$ を用いた。(26)式により格子点 (i, j) におけるサクション ϕ が求められ、(18)式を左辺 (cal1) と右辺 (cal2) に分けた次の2式に代入する。

$$\text{cal1} = a_1\psi^M(i, j) + b_1 \quad (27)$$

$$\text{cal2} = (a_2 + a_3)\psi^M(i, j) + b_2 + b_3 \quad (28)$$

ここで、(27), (28)式より $\text{cal1} - \text{cal2}$ が十分0に近い値には、その値が t 時間で採用するサクション ϕ となり、そうでない場合には、再びこの差分計算の初めからの繰返し計算を行う。

6-2 体積含水率 θ の推定

体積含水率 θ を求める方法として、(7)式に上記6-1の方法により求められたサクション ϕ を代入し算出する方法がある。だが、(7)式を繰返し計算すると誤差が大きくなって連続の式が

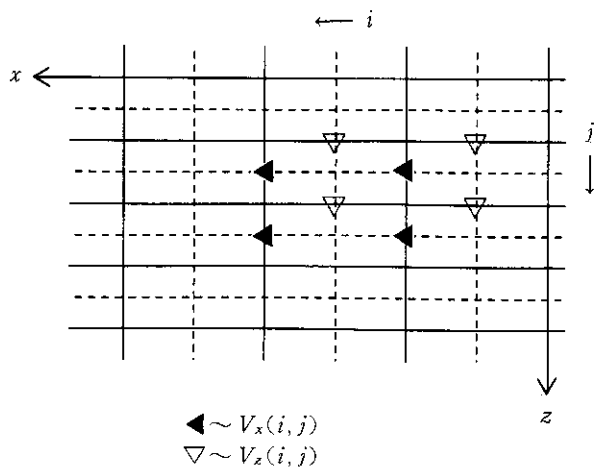


図-13 流速計算点図

合わなくなる。そこで格子上で流速を計算し、流入と流出の関係より単位時間ごとに含水率を計算する。流速の計算点については図-13に示す。流速の計算は(2)式を用る。

• x 軸方向流速

もし、 i が 1 ならば境界条件より流速 $V_x(i, j)$ は 0 である。

上記以外の i ならば、以下の式により求める。

$$V_x(i, j) = -K_x(i, j) \left(\frac{\psi(i, j) - \psi(i-1, j)}{\Delta x} - \sin \alpha \right) \quad (29)$$

• z 軸方向流速

もし、 j が 1 ならば境界条件より流速は降雨強度である次式で与える。

$$V_z(i, j) = r(i) \cos \alpha \quad (30)$$

また j が n_j である場合、境界条件より $V_z(i, j) = 0$ とする。

上記の条件以外の計算点については、次式で求める。

$$V_z(i, j) = -K_z(i, j) \left(\frac{\psi(i, j) - \psi(i, j-1)}{\Delta z} - \cos \alpha \right) \quad (31)$$

• 体積含水率 θ

以上で求められた x 軸および z 軸方向の流速成分 V_x , V_z より、次式で体積含水率 θ を求める。

$$\theta(i, j) = \Delta t \left\{ \frac{V_x(i+1, j) - V_x(i, j)}{\Delta x} + \frac{V_z(i, j+1) - V_z(i, j)}{\Delta z} \right\} \quad (32)$$

6-3 計算手順

計算は、図-14に示すフローチャートに従い行う。

7. 実測値とモデルとの比較および考察

上記のモデルにより、実験ケース 1 の条件で計算を行い実験結果との比較を行う。なお、ケース 1 は表面流出のないケースであり、すべての降雨量が地表面から浸透することとして計

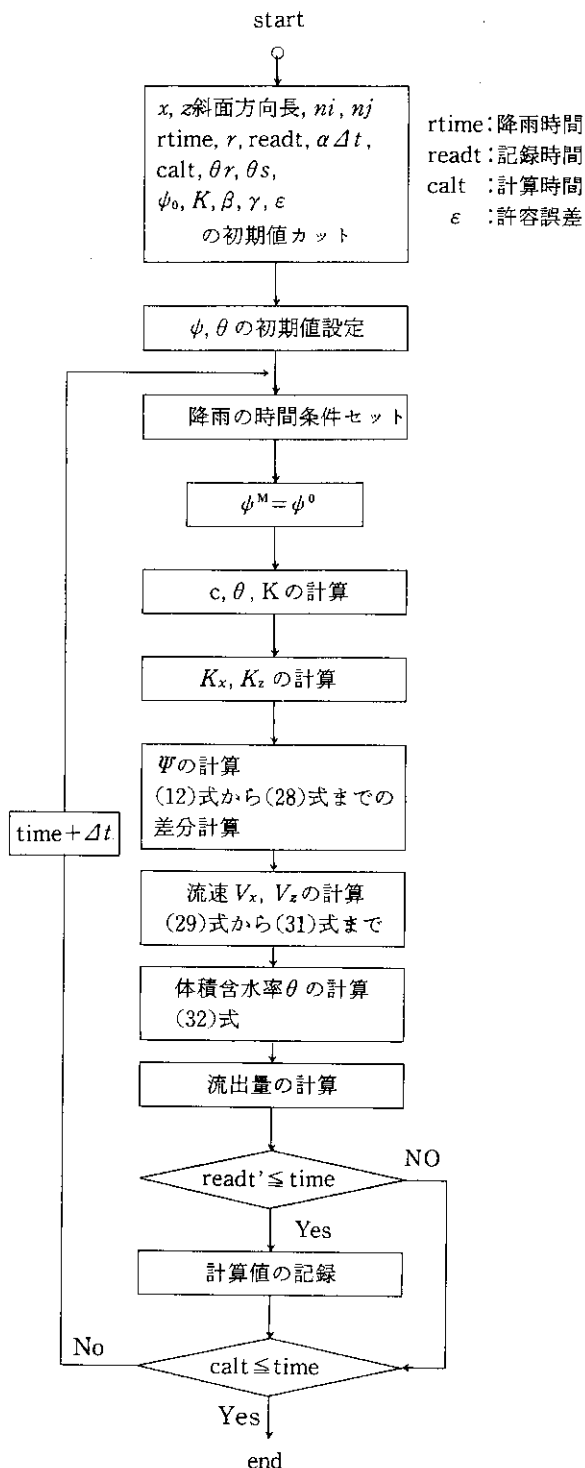


図-14 計算フローチャート

算を行う。

本実験とは別に実験砂の透水特性を調べるため、鉛直浸透実験および不飽和透水試験を行った。図-15に、鉛直浸透実験の結果得られた体積含水率 θ とサクシオン ψ の関係を示す。予備計算の結果、 θ と ψ の関係式(7)式中のパラメーターとして $\theta_r = 0.06$, $\theta_s = 0.40$, $\phi_0 = 25\text{cm}$ を

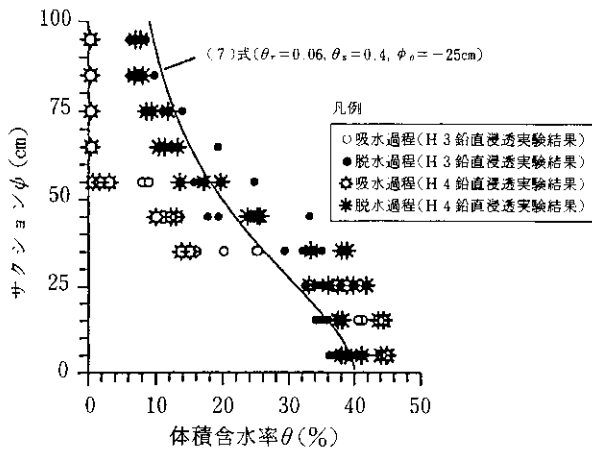


図-15 体積含水率 θ とサクシオン ψ の関係

用いることとし、これらのパラメーターを用いた(7)式を図-15中に示す。また、不飽和透水試験の結果得られたサクシオンごとの透水係数を図-15に示した θ と ψ の関係式を用いて、有効飽和度 S_e と透水係数 K の関係に変換した結果を図-16に示す。図-16の実測値による有効飽和度 S_e と透水係数 K の関係より(8)式のパラメーターとして $\beta=2.00$, $K_s=8 \times 10^{-3}(\text{cm/sec})$ を与えることとし、この関係式も図-16にあわせて示す。

以上のパラメーターを用いて、ケース1の実験条件で数値計算を行なった。計算領域は実験斜面を x 方向に10分割、 z 方向に10分割している。

図-17に、浸透流出量 q_1 と貯留量 S の関係を示す。図-17における3つのラインは、それぞれ(a)実測の降雨・流出の差の累加、(b)実測の

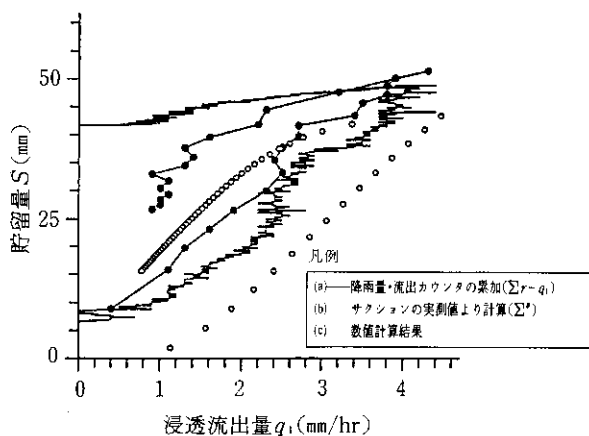


図-17 浸透流出量 q_1 と貯留量 S の関係 (ケース1)

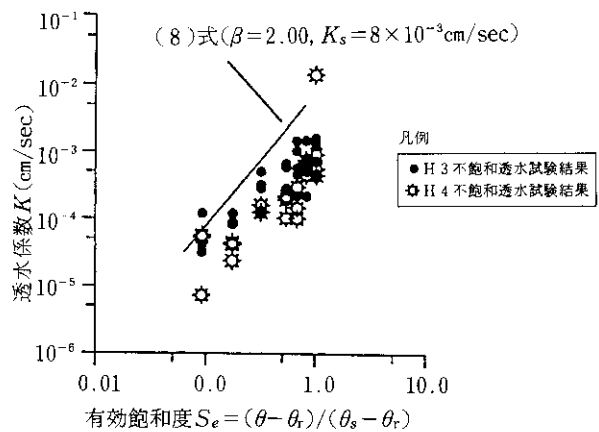


図-16 有効飽和度 S_e と透水係数 K の関係

サクシオンより(8)式を用いて体積含水率に換算し、これを積分したものおよび(c)数値計算モデルにより算出されたものである。これらのラインはいずれも左まわりのループを描いている。実測値に基づく(a), (b)はいずれも降雨の初期には流出がなく、ある程度の貯留量が増えてから流出が開始されている。これに対して、計算値による(c)では降雨開始後すぐに流出および貯留量の増加が始まっている。これは、数値計算モデルでは下流端の境界条件を自由流出としているためわずかでも貯溜があると流出が開始されるためであり、境界条件および θ と ψ の関係式の与え方に問題があると考えられる。ただ、全体的な $S \sim q$ カーブの特性や、ピーク流量およびピーク貯留量の傾向は数値計算モデルでもよく再現されている。

図-18に、浸透流出量の時間変化の実測と計

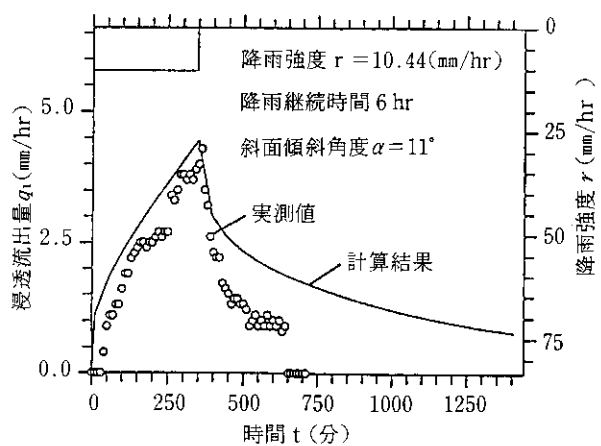


図-18 降雨強度 r および浸透流出量 q_1 の時間変化 (ケース1)

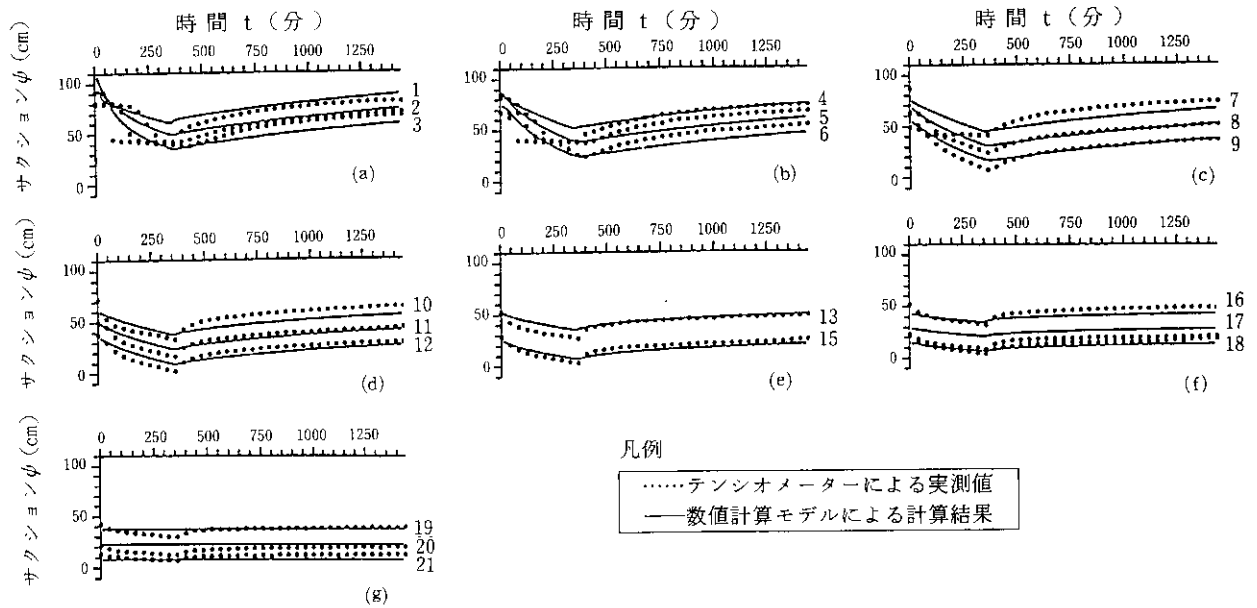


図-19 サクション ψ の時間変化 (ケース 1)

算結果の比較を示す。図-18においても、 $s \sim q$ 図と同様な流出の特性が見られる。特に、降雨終了後に実測と計算の相違が目立つのは、脱水過程における θ と ψ の関係式の与え方に問題があるためと考えられる。これは、もともと一価関数ではない θ と ψ の関係を図-15に示したような一価関数で表わすことの限界ともいえる。

図-19に、サクション ψ の時間変化の計算結果と実測の比較を示す。斜面上流付近 [(a), (b)] で若干の相違が見られるが、全体的には計算結果と実測の適合度は良好である。図-17~19を総合的に見ると、本モデルはサクションの計算は高精度で行うことができるが、サクションを体積含水率に換算する段階で精度が非常に悪くなるようである。これは前述のとおり、 θ と ψ の2価性を十分に考慮していないためである。

本来であれば θ と ψ の2価性を考慮した換算方式を計算上に取り込んだモデルの再構築を行うべきではあるが、ここでは、 $\theta \sim \psi$ の関係式の違いが計算結果に及ぼす影響を調べる目的で、 $\theta \sim \psi$ の関係式を図-20に示すように任意に θ_r , θ_s , ψ_0 のパラメータを変更して再数値計算を行ってみた。ここでの $\theta \sim \psi$ は図-15に示したものに比べ、より吸水過程を重視したもので

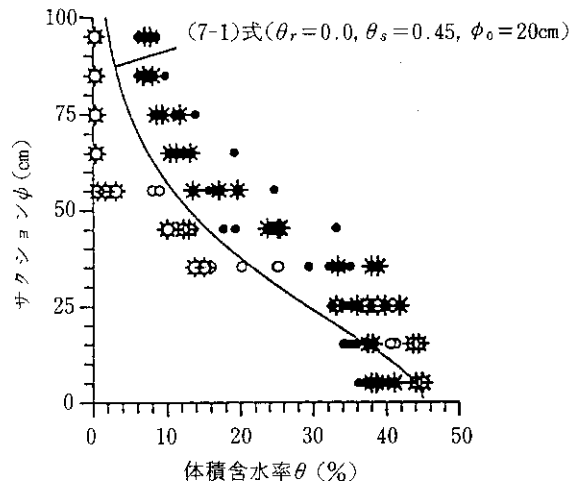


図-20 体積含水率 θ とサクション ψ の関係

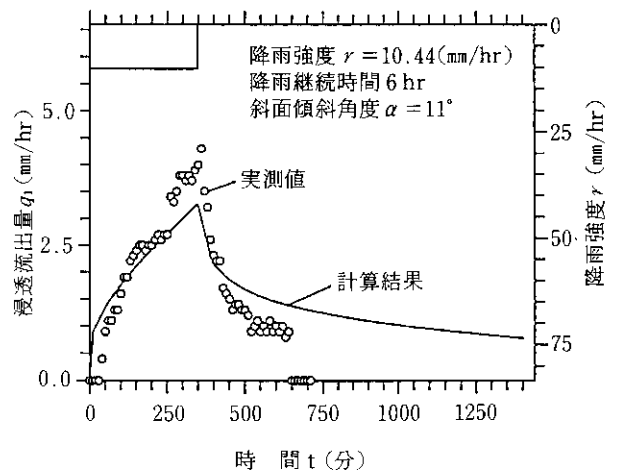


図-21 降雨強度 r および浸透流出量 q_1 の時間変化 (ケース 1)

ある。この結果、浸透流のハイドログラフは図-21のようになり、上昇期（吸水過程）の実測値との適合性は改善された。しかしながら、図-18と比較すると、ピーク流出量の適合度はむしろ悪くなっている。ただし、この場合もサクシジョンの計算結果は図-19と同様にほぼ良好な結果が得られており、このことから $\theta \sim \psi$ の関係式をいかに与えるかが流出量の計算精度の向上のために非常に重要であることが推定される。

次に、計算より求められた流速・サクシジョン・体積含水率をコンター図にして表わす。それぞれ図-22から図-28は、降雨開始直前の重力と毛管力の釣り合った状態から降雨停止後6時間目までを表わす。また、図中の(a), (b), (c)は、流速ベクトル、サクシジョン、体積含水率を示すが、(b)はマトリック・ポテンシャル表示とする。

流速ベクトル図で降雨開始2時間後から6時間後までの降雨時間内にはz軸方向への流速

が見られるが、降雨停止後はx軸方向流速のみ見られる。流出部の流速がこのような表現になるのは境界条件により自由流出としているため、これらの流速を流出量に交換し総和したものが、その計算時間での総流出量となる。サクシジョン圧、体積含水率は各々の値で層をなしている。この状態は、降雨の有無に関係はない。ただし、強降雨で表面流が発生する場合は先に述べたように実験を観察した結果、水路途中より発生していたためこのようなきれいな層になっていないことが予想される。本モデルでの数値計算により、これまでブラックボックスとして扱われてきた土中の様子を表わしたが、実現象とまったく同じとはいえないまでも、図-17~19より、浸透流出過程の傾向は表わせたものと思われる。

8. おわりに

本研究においてはまず、2次元斜面を用いた降雨・浸透の実験を行い、斜面勾配や降雨強度

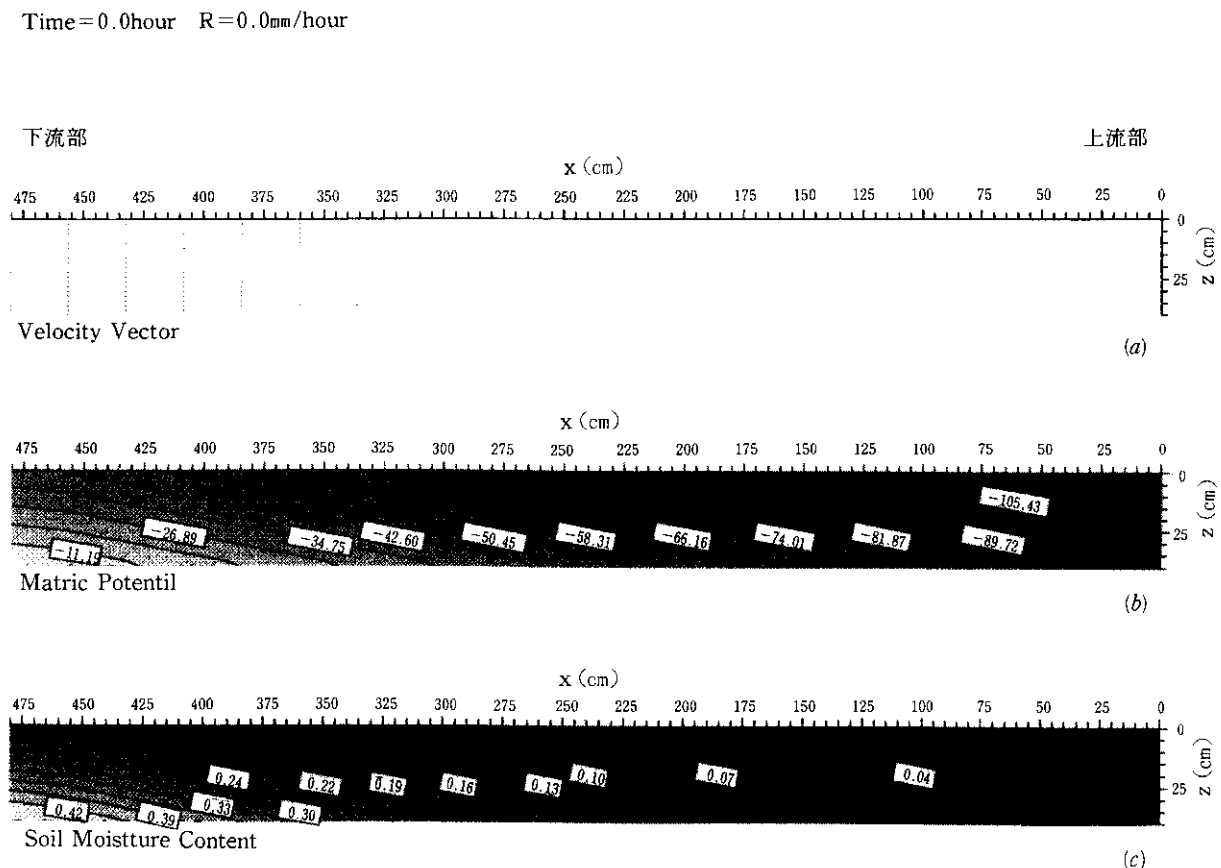


図-22 流速ベクトル・サクシジョン・体積含水率コンター図 (0 hr)

Time = 2.0 hour R = 10.4 mm/hour

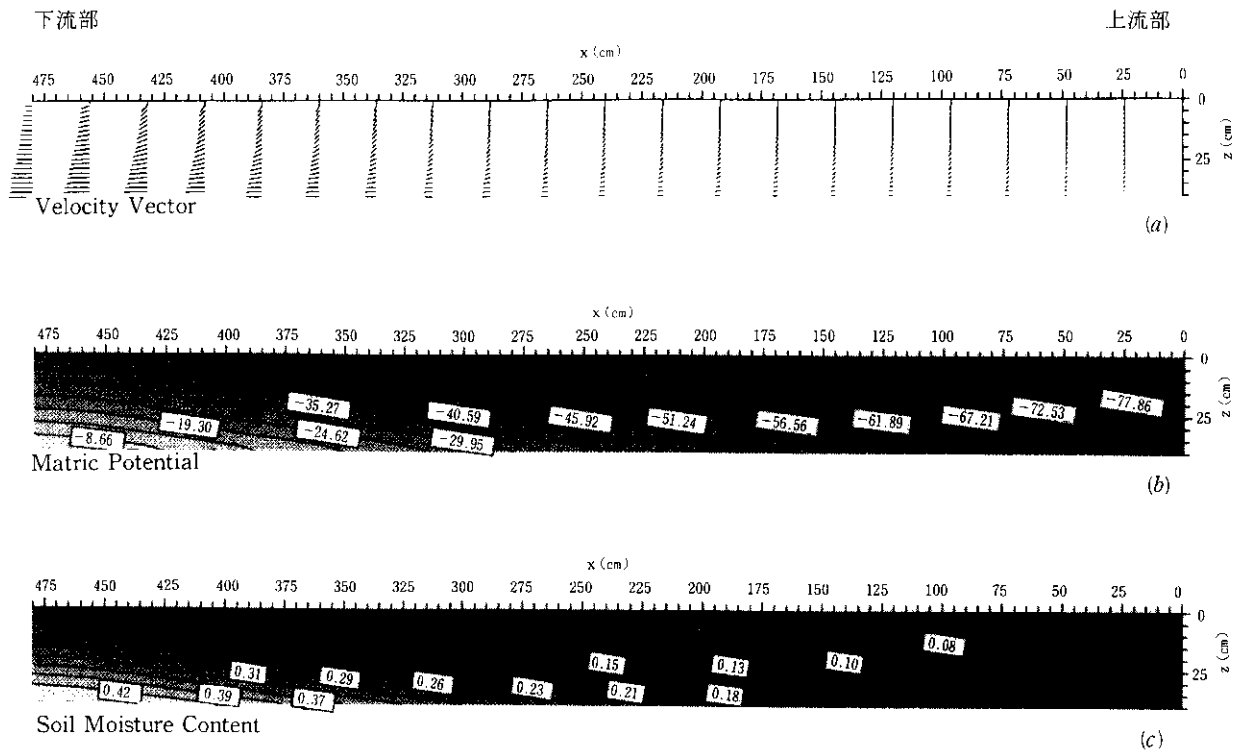


図-23 流速ベクトル・サクション・体積含水率コンター図 (2 hr)

Time = 4.0 hour R = 10.4 mm/hour

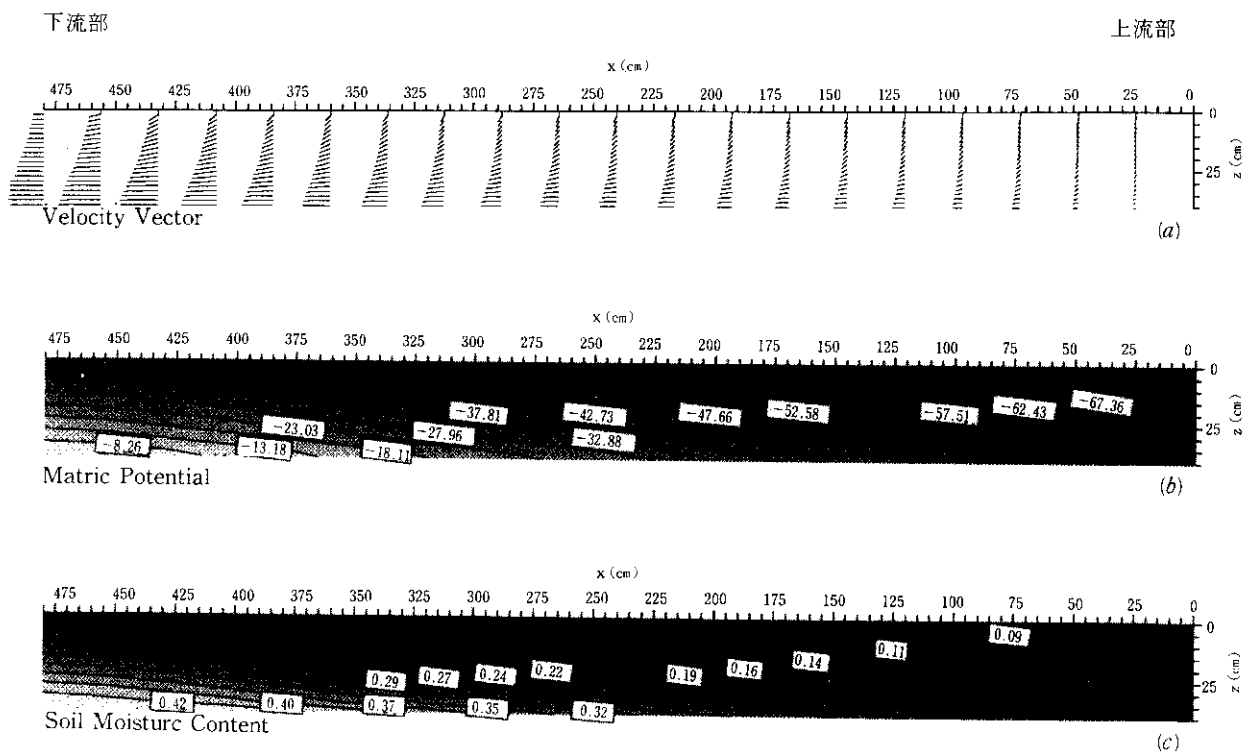


図-24 流速ベクトル・サクション・体積含水率コンター図 (4 hr)

Time = 6.0 hour R = 10.4 mm/hour

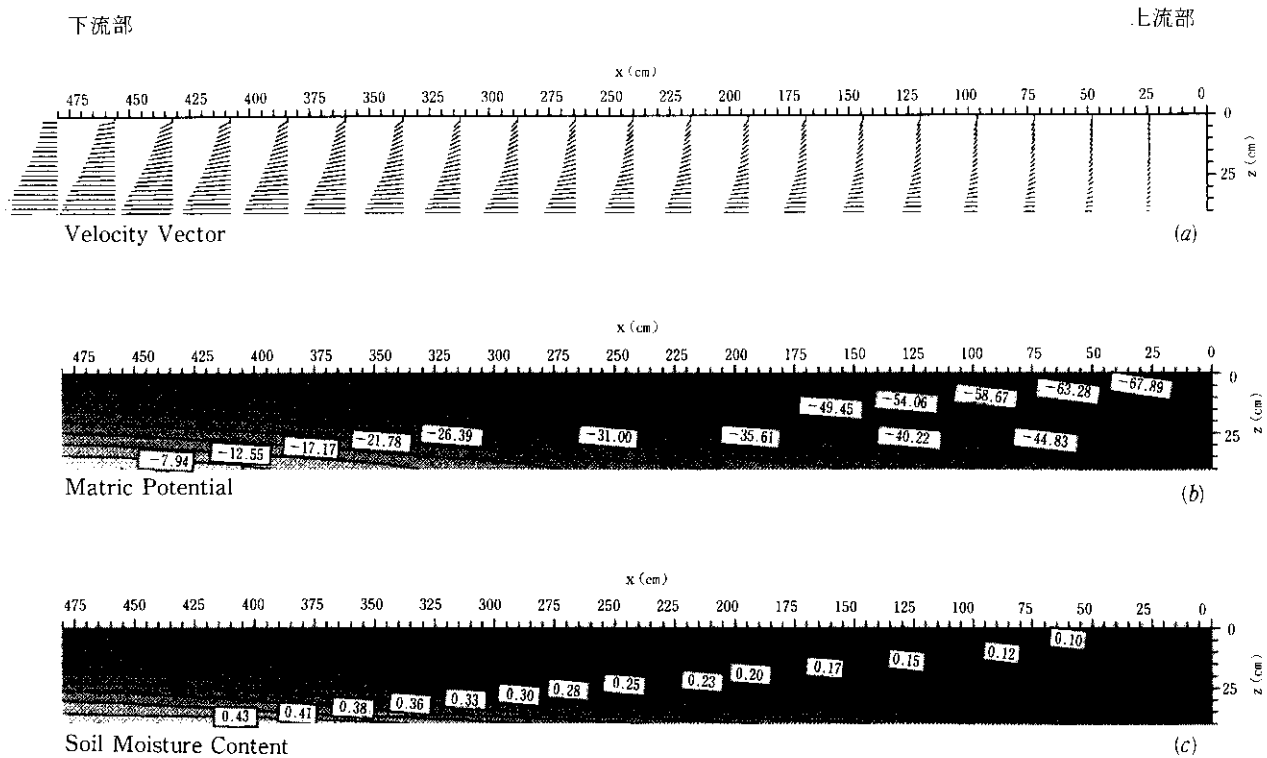


図-25 流速ベクトル・サクション・体積含水率コンター図 (6 hr)

Time = 8.0 hour R = 0.0 mm/hour

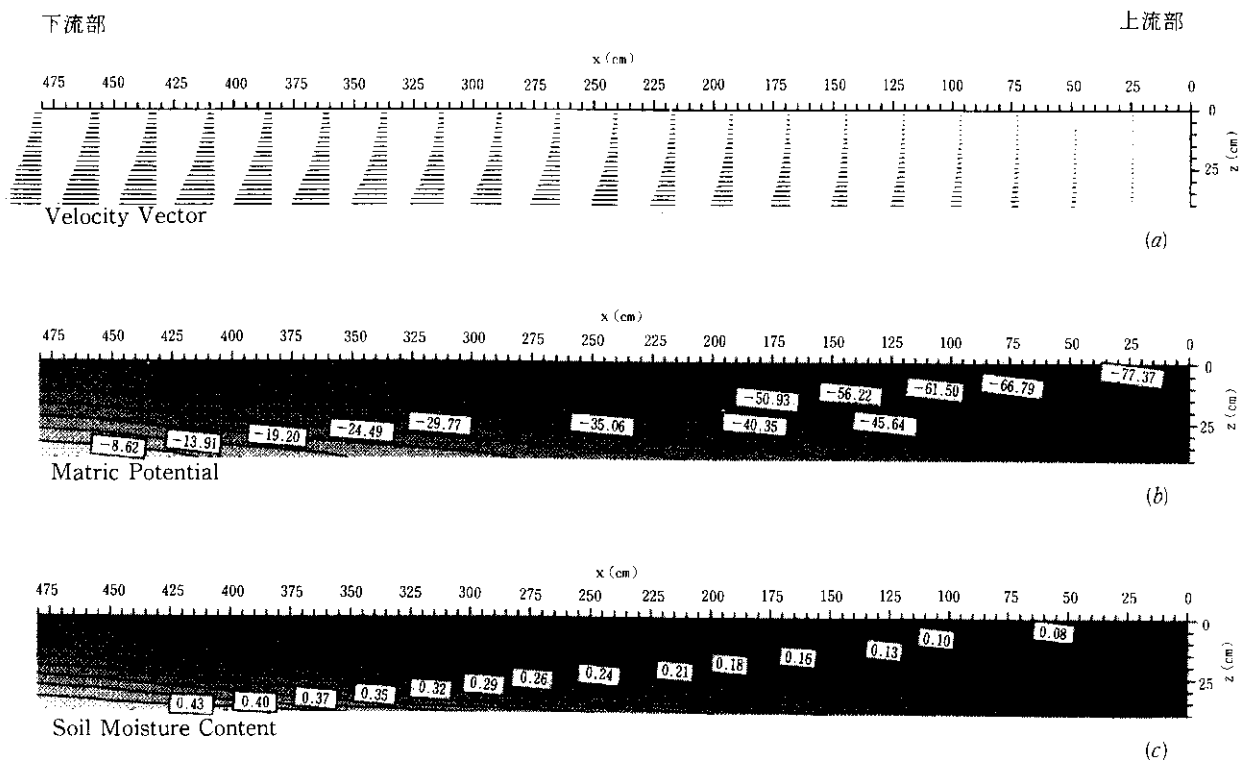


図-26 流速ベクトル・サクション・体積含水率コンター図 (8 hr)

Time = 10.0hour R = 0.0mm/hour

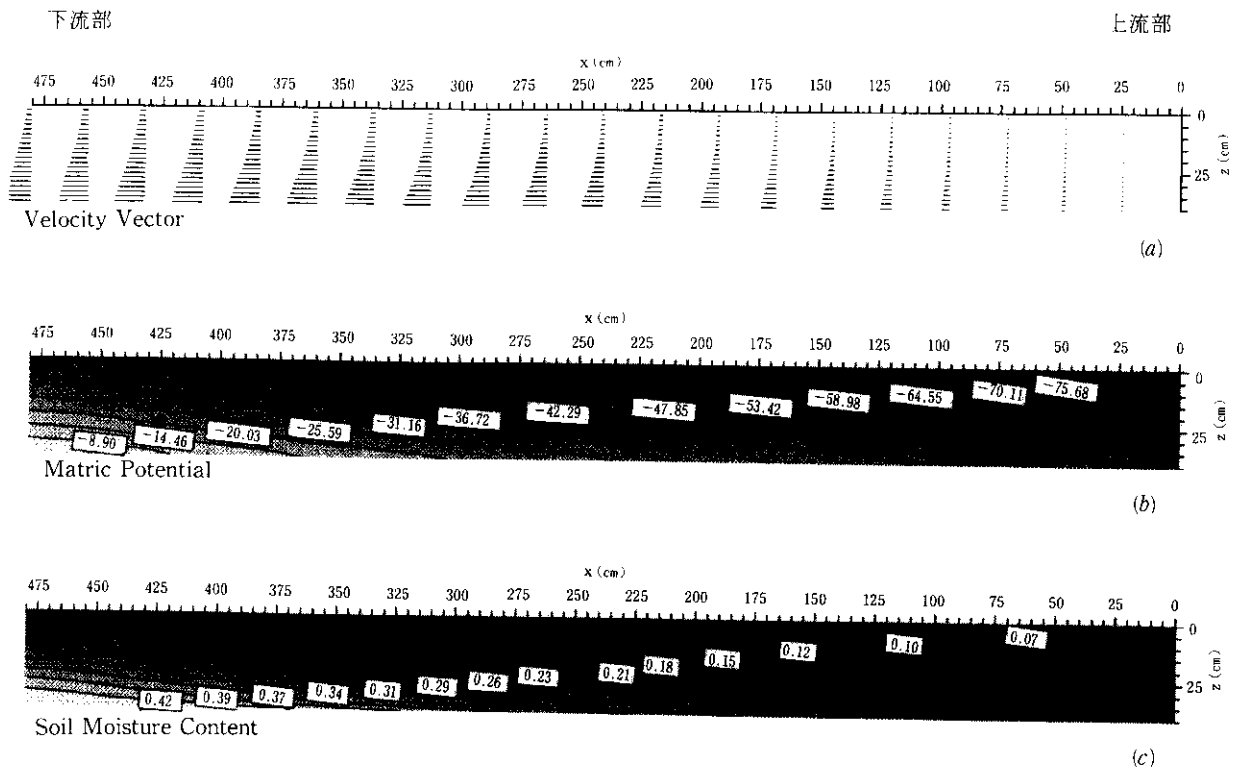


図-27 流速ベクトル・サクション・体積含水率コンター図 (10 hr)

Time = 12.0hour R = 0.0mm/hour

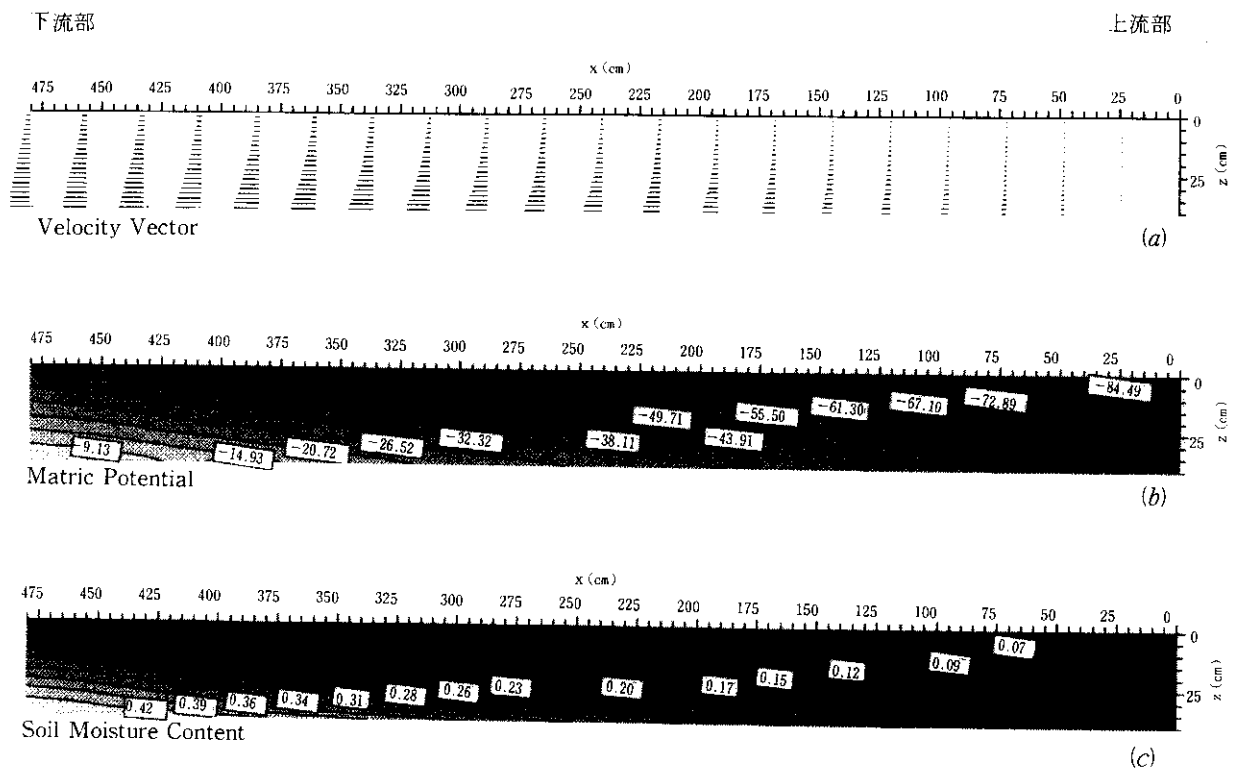


図-28 流速ベクトル・サクション・体積含水率コンター図 (12 hr)

と流出特性の関係を調べた。この結果、降雨量や斜面勾配と流出特性に関してはほぼ常識的な傾向がみられたが、特に降雨が多く表面流の発生する場合においては、流出量やサクションが段階的に変化することが明らかにされた。また、勾配の急な場合の方が流出量の増加率が緩やかであるにも関わらず、流出量のピーク（定常状態）時においては斜面勾配の緩い場合よりも流出量が多いことなどの興味深い現象も見られた。

次に、数値計算との比較を行った結果、土中のサクションについては実験結果の傾向をほぼ再現することが可能であることが確かめられたが、浸透流出量の計算結果は $\theta \sim \psi$ の関係式の与え方により大きく変化することが確かめられ

た。本来、吸水過程と脱水過程で2価性を持つ $\theta \sim \psi$ の関係をモデルに正しく組込む必要性が明らかになったが、時間的、空間的にどの段階で吸水過程から脱水過程への遷移と見るかなどの問題もあり、今後の検討課題としたい。

また、今回数値計算モデルで扱った例は表面流のない場合のみであるが、表面流の発生する場合の地表面の境界条件の扱い方、また植生のある場合なども今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 日野幹雄, 太田猛彦, 砂田憲吾, 渡辺邦夫: 洪水の教値予報, 森北出版株式会社, p120-128, 1989.

*

*

*