

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、河川の流出予測等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、及び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、流出部の他、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に硅砂7号(粒径 $\phi = 0.2\text{mm}$)を充填し、下流端20cmには硅砂流出防止用の砂利を配置する。側面の21箇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付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毎にカウントし累積する。また、流出カウンターの精度を検定するために、転倒マス置き、同時に流出量の測定も行った。データ表示・蓄積部はテンシオメーター及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毎に読みとり、パーソナルコンピュータ上の画面に表示すると共に、データはハードディスクに記録した。

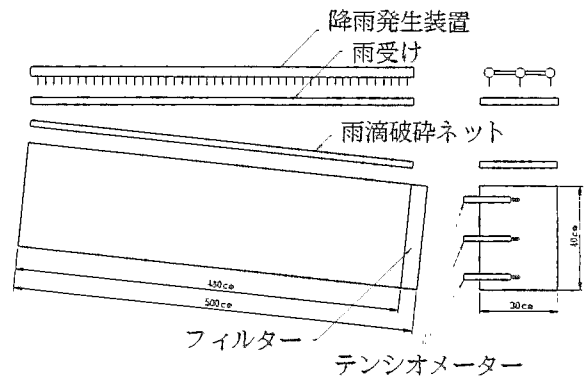


図-1 実験装置概要図

3 実験概要

実験は表-1に示すとおり、降雨強度が10mm/hrと30mm/hrの2種でそれぞれ斜面勾配が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共に、降雨強度をそのケース毎に調整し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1分毎とし、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)21測点(配置は図-2参照)及び流出の累積値である。これらの値は単位時間毎にハードディスクに蓄積され、volt-time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。この場合には計量カップで1分毎に表面流出の計量および記録を行った。降雨停止後、引き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。

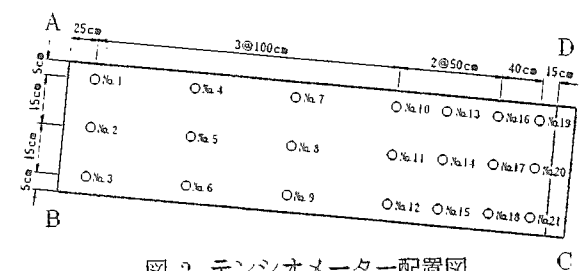


図-2 テンシオメーター配置図

表-1 実験ケースおよび実験条件

ケース 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

A Study of Run-off Model Considering Ground Water Flow
By Yoshiteru Ichikawa, Yasuyuki Shimizu and Toshihito Toyabe

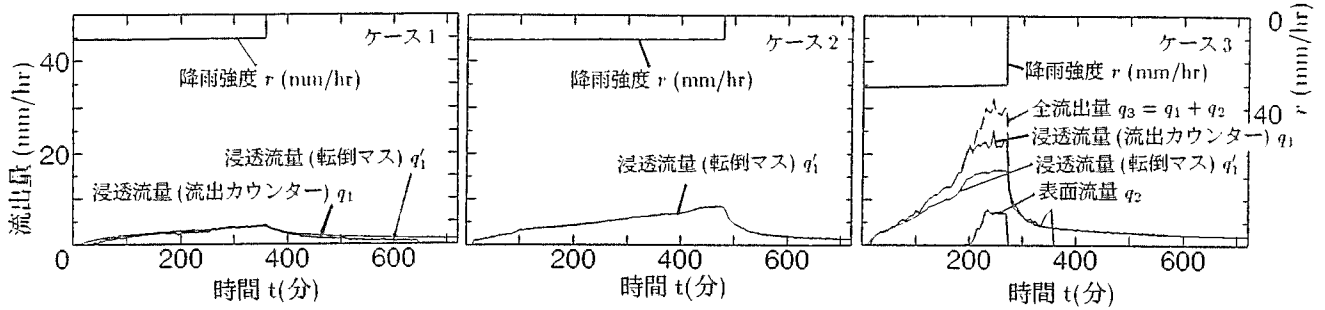


図-3 降雨強度 r および流出量の時間変化 (ケース 1)

図-5 降雨強度 r および流出量の時間変化 (ケース 2)

図-7 降雨強度 r および流出量の時間変化 (ケース 3)

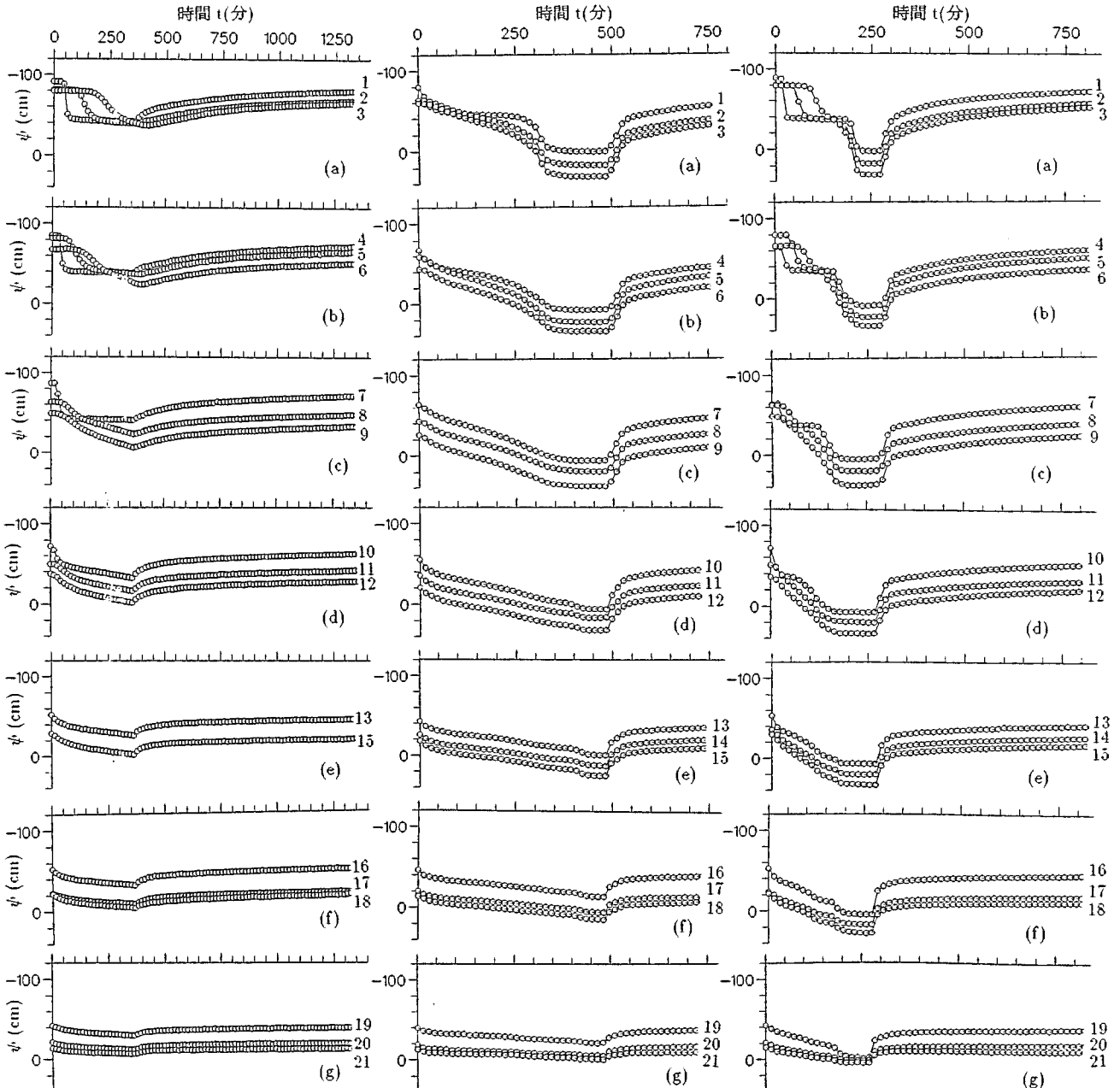


図-4 サクシヨンψの時間変化(ケース 1)

図-6 サクシヨンψの時間変化(ケース 2)

図-8 サクシヨンψの時間変化(ケース 3)

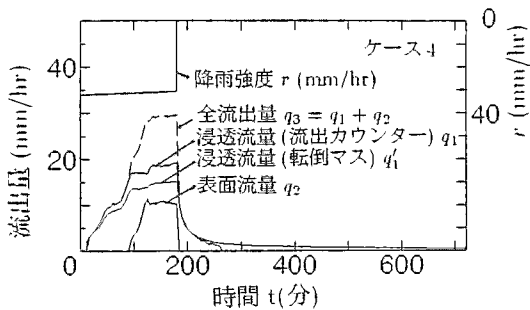


図-9 降雨強度 r および流出量の時間変化 (ケース4)

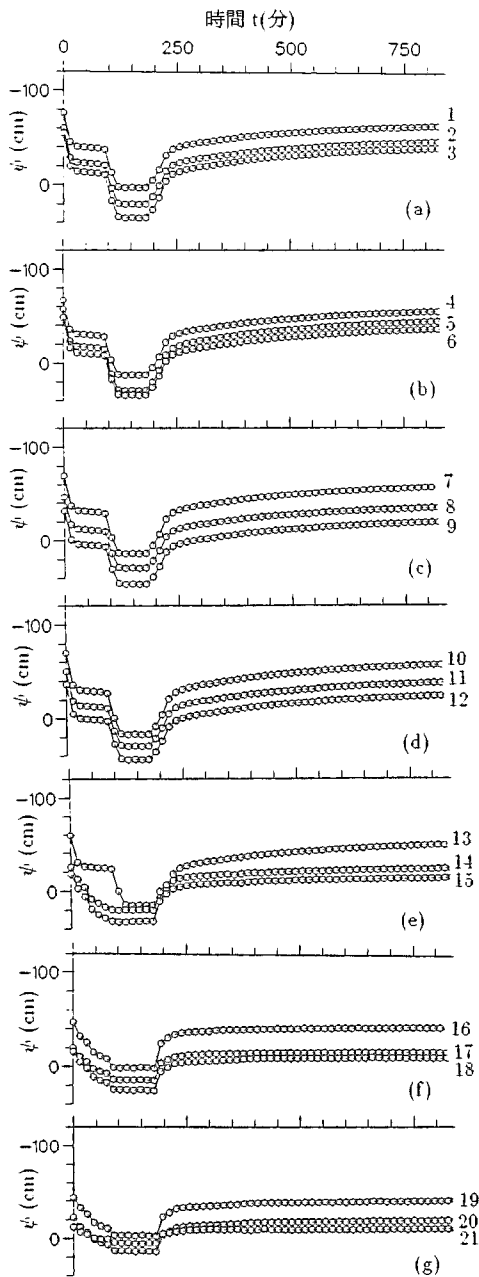


図-10 サクション ψ の時間変化 (ケース4)

4 実験結果と考察

図-3 から図-10 に各ケースの流出量ハイドログラフおよびサクシジョンの時間変化を示す。ここで図-3.5.7.9 における流出量は浸透流量 [流出カウンター q_1 (mm/hr)、転倒マス 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-4,6,8,10 のライン脇の数字は図-2 に示したテンシオメーターの位置を示す。

全ハイドログラフに共通する点は降雨発生直後に流出はなく流出はやや時間がたってから発生し、降雨停止後急激に流出量の減少傾向が見られる。下流端での流出が発生するまでに降雨終了後少し遅れ時間があるのは、土中水が降雨によって押し出されるように流出する為には、ある程度雨水の貯留がなければならず、このため流出発生までに時間要するものと思われる。降雨停止後の流出量の激減については、土中水を押し出すための降雨が無くなったことにより生じたと考えられる。サクシジョン圧の時間変化を見ると降雨停止後どのケースも一様にサクシジョンが急に負の方向に変化している。土中水の挙動がこの変化ほど急激に生じるとは考えにくく、この変化は砂の吸水と排水過程における水分量とサクシジョン圧の違い (いわゆるヒステリシス現象) が関係しているものと思われる。

降雨強度が 30mm/hr のケースでは、定常に達するまでに流出量が段階的に増加する傾向が見られる。またサクシジョンの方でも定常となるまで正圧への変化に段階がある。この双方を比べると、それぞれ次の段階への変化時間に類似性がみられる。また、この現象が降雨のある時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。おそ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良くなり、さらに流出量が増したものと思われる。ただ、流出量が増加すれば逆にサクシジョンの正圧への急な変化は無いはずだが、サクシジョン図での変化は正の方向へ向かっている。これは透水性が良くなったと共に、下流端の流出に引かれて地表面からの流入量も多くなったことを表していると思われる。

降雨強度が 30mm/hr のケースでは斜面勾配が 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。

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ない考察を加える。

土中水分量の連続の式は次式で表される。

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

ここで、 x は地表面に添った斜面方向、 z は x 軸と垂直な下方向を表し、 V_x 、 V_z はそれぞれ浸透流速度の x -および z -方向成分、 θ は体積含水率、 t は時間を表す。 V_x 、 V_z はダルシー則に従い次式で与える。

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

ここで、 ϕ は全水頭、 K は透水係数を表す。(1) 式に (2) 式を代入し、また (1) 式の左辺を

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

とし、比水分容量 $C(\psi) = \partial\theta/\partial\psi$ を導入すると (1) 式は、

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

となる。斜面勾配を α とした時の全水頭 ϕ は、

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

であり、これを用い変数 ϕ を ψ に変換すると、

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

となる。また、 $\psi \sim \theta(\psi)$ および $\psi \sim K(\psi)$ の関係を、以下に示す谷¹⁾の式で表す。

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi}{\psi_0} + 1 \right) \exp \left(- \frac{\psi}{\psi_0} \right) + \theta_r, \quad K = K_s S_e^\beta \quad (7)$$

(6) 式中の C は、(7) 式を ψ で偏微分した次式を用いる。

$$C(\psi) = -(\theta_s - \theta_r) \frac{\psi}{\psi_0^2} \exp \left(- \frac{\psi}{\psi_0} \right), \quad [\psi = \psi' (\psi' \leq 0), \quad \psi = 0 (\psi' > 0)] \quad (8)$$

S_e は、有効飽和度で、

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (9)$$

と定義される。ここで、 θ_s は飽和含水率、 θ_r は移動可能な水がほとんど無いとみなせる含水率、 ψ_0 は比水分容量 C の最大値を与える圧力水頭の値、 K_s は飽和透水係数、 β は不飽和領域における不飽和透水係数の傾きである。

境界条件は、図-2 に示した記号 A, B, C, D を用いて以下の様に与える。AB および BC については、この面を通しての流れが 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。

$$V_x = 0 \quad (\text{AB 面}), \quad V_z = 0 \quad (\text{BC 面}), \quad \frac{\partial V_x}{\partial x} = 0 \quad (\text{CD 面}), \quad V_z = r(t) \cos \alpha \quad (\text{AD 面}) \quad (10)$$

ここで $r(t)$ は、降雨強度である。

6 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 の条件で計算を行ない実験結果との比較を行なう。なお、ケース 1 は表面流出の無いケースであり全ての降雨量が地表面から浸透することとして計算を行なう。

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なった。図-11 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 (7-1) 式中のパラメーターとして $\theta_r = 0.06$ 、 $\theta_s = 0.40$ 、 $\psi_0 = -25 \text{ cm}$ を用いることとし、これらのパラメーターを用いた (7-1) 式を図-11 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毎の透水係数を図-11 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-12 に示す。図-12 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 (7-2) 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-12 に併せて示す。

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。計算は実験斜面を x 方向に 10 分割、 z 方向に 10 分割し (6) 式をクランク-ニコルソン法により差分計算を行なった。

図-13 に浸透流出量 q_i と貯留量 S の関係を示す。図-13 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) 実測のサクシオンより (7) 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回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無く、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僅かでも貯留量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良く再現されている。

図-14 に浸透流出量の時間変化の実測と計算結果の比較を示す。図-14 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

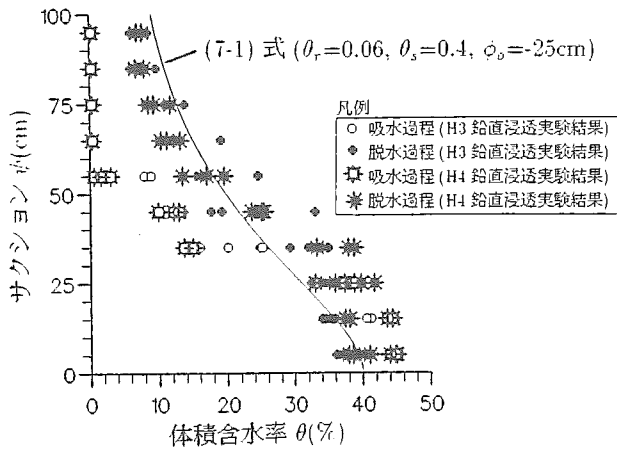


図-11 体積含水率 θ とサクシヨン ψ の関係

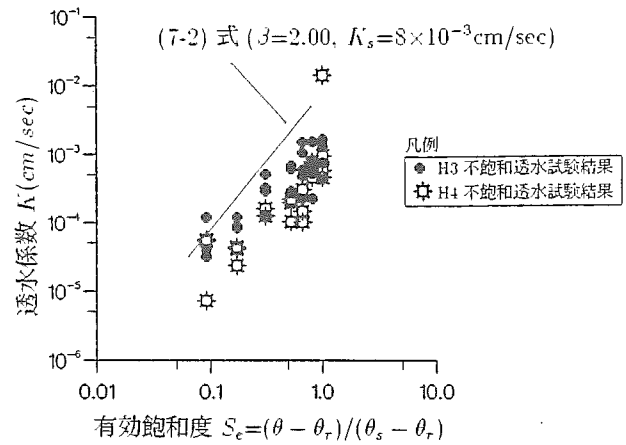


図-12 有効飽和度 S_e と透水係数 K の関係

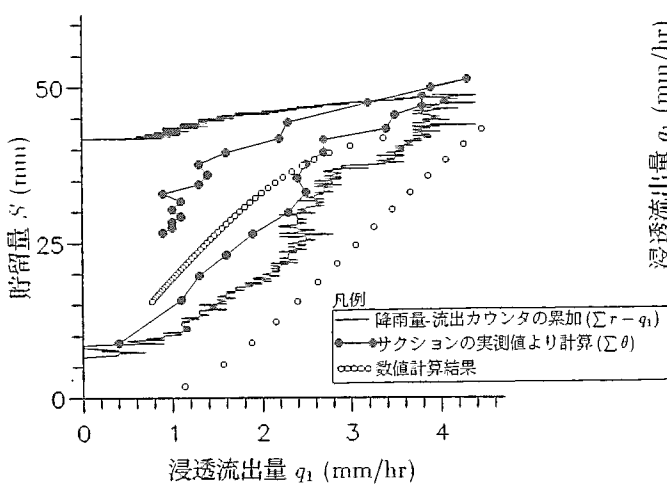


図-13 浸透流出量 q_1 と貯留量 S の関係 (ケース 1)

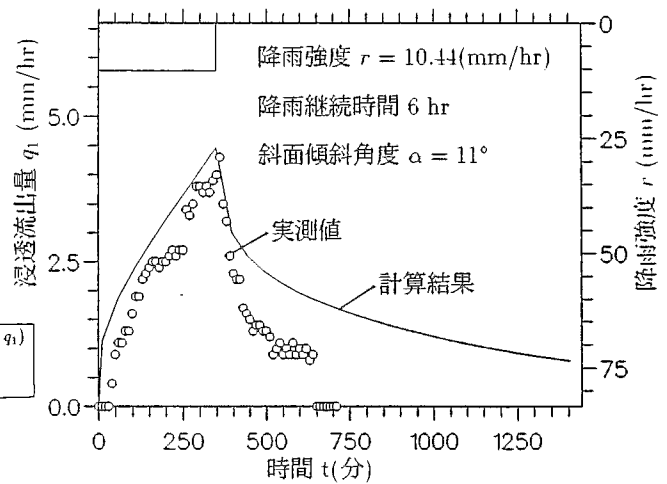


図-14 降雨強度 r および浸透流出量 q_1 の時間変化 (ケース 1)

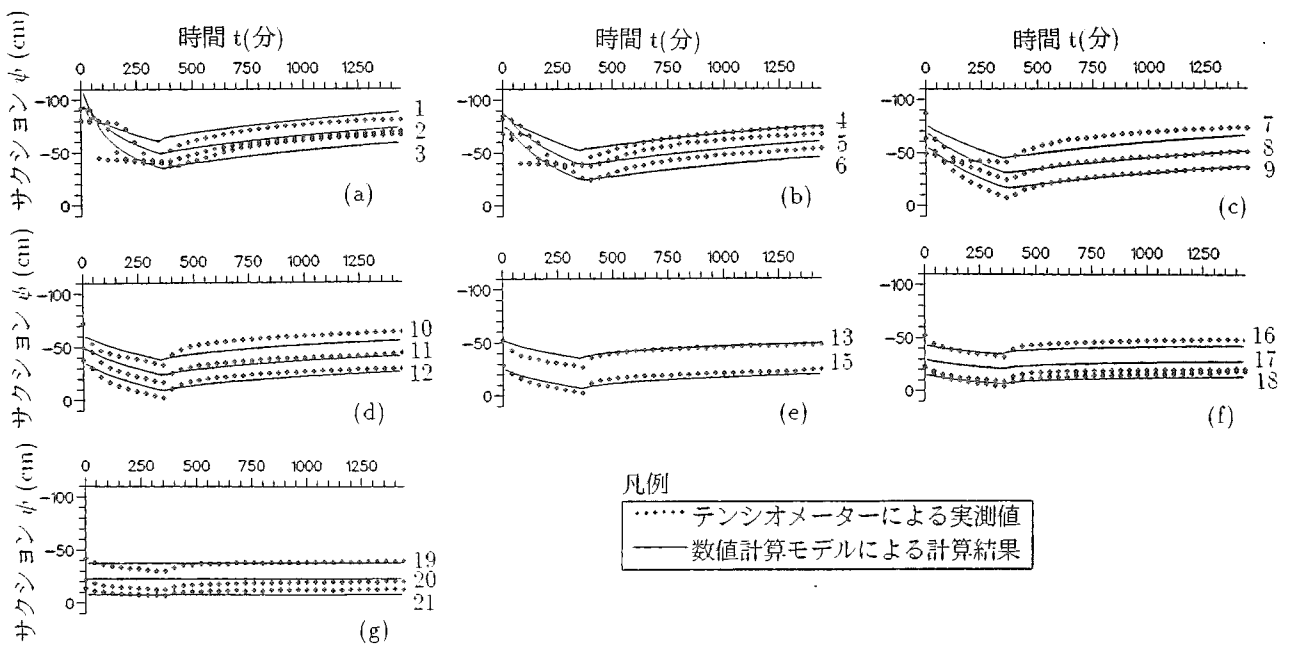


図-15 サクシヨン ψ の時間変化 (ケース 1)

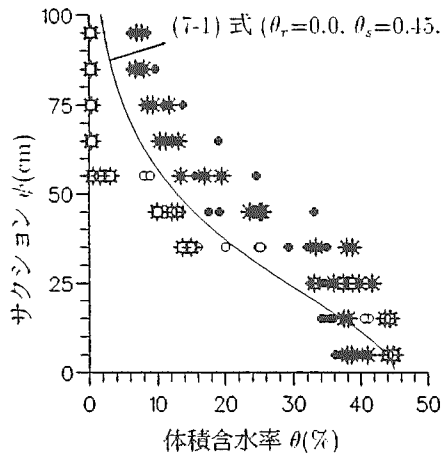


図-16 体積含水率 θ とサクシオン ψ の関係

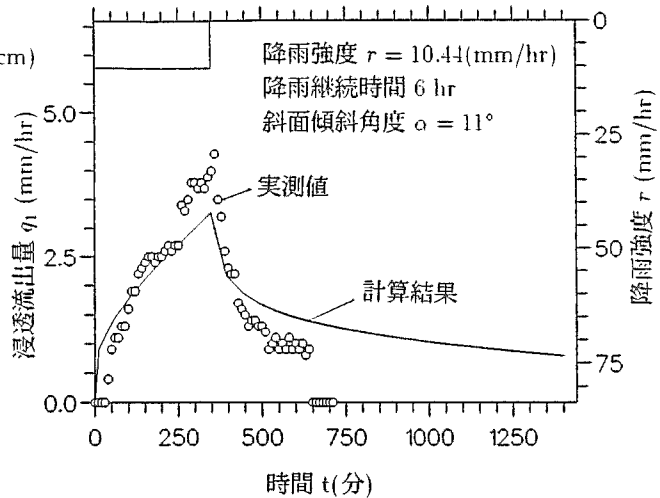


図-17 降雨強度 r および浸透流出量 q_1 の時間変化(ケース1)

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-11に示したような一価関数で表すことの限界とも言える。

図-15にサクシオン 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-13,14,15を総合的に見ると、本モデルはサクシオンの計算は高精度で行なうことが出来るが、サクシオ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式を計算上に取り込んだモデルの再構築を行なうべきではあるが、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-16に示すように変更して再度数値計算を行なってみた。ここでの $\theta \sim \psi$ は図-11に示したものに比べ、より吸水過程を重視したものである。この結果浸透流のヒドログラフは図-17のようになり上昇期(吸水過程)の実測値との適合度は改善された。しかしながら、図-14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、この場合もサクシオンの計算結果は図-15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。

7 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・浸透の実験を行ない斜面勾配や降雨強度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見られたが、特に降雨多く表面流の発生する場合においては流出量やサクシオンが段階的に変化することや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かかわらず流出量のピーク(定常状態)で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なった結果、土中のサクシオ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み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無い場合のみであるが、表面流の発生する場合の地表面での境界条件の扱い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：洪水の数値予報、森北出版株式会社、p120-128、1989。