

II-12

流出率に関する理論および数値シミュレーション

東京工業大学工学部 学生員 佐藤 昭人
 正会員 瀧岡 和夫
 正会員 日野 幹雄

1. はじめに

山地流域における降雨-流出現象は、降雨特性や降雨開始前の土壌の湿潤状態に大きく依存している。特に流域の湿潤状態を把握することは、流出解析における流出率や有効降雨の算定に不可欠な要素であり、流出発生域変動概念等を実証する上で重要なことと思われる。著者らはすでに、実験により降雨前の土壌の湿潤状態が流出率に大きく影響を及ぼすことを明らかにしている。¹⁾しかしながら、総降雨量に代表される降雨特性や土壌層厚に代表される土壌の幾何学特性の影響については、実験の制約等の関係から十分に検討するに至っていない。そこで本研究では、不飽和浸透式の数値解や近似解析解に基づいて、これらの因子と流出率との関係を具体的に算定し、その重要性を明らかにすることを試みた。なお、ここでは次元鉛直浸透として解析を行ったが、実際の降雨-流出場においても、まず鉛直浸透により降雨が難透水層上面まで降下しそこで側方流となることを考えれば、ここで導かれた結論は実際へ十分適用可能なものと考えられるし²⁾逆に、実データの解析結果を理論付けしているものである。

2. 数値シミュレーション

著者らは、Marquardt 法を用いて土層厚 25 cm のライシメータでの人工降雨実験の降雨時の圧力水頭と流出量の変化から、Brooks-Corey の条件式に含まれている土壌物理パラメータの同定を行なっている。³⁾そこで本研究では、得られた土壌物理パラメータを用いて数値シミュレーションを行ない、先の実験との比較した後、流出率に及ぼす各因子の影響について検討した。

図1は、深さ 10 cm の位置の初期サククション圧と流出率の関係についての数値解を実験結果とともに示したものである。なお、深さ 18 cm の位置の初期サククション圧の値と流出率の関係も同様に良く一致した結果が得られている。図2及び図3は、裸地を想定し、蒸発速度 0.0002 cm/min (2.88 mm/day) の時の、圧力水頭及び体積含水率の鉛直プロファイルの変化を、積算蒸発量 5 mm 増ごとに示したものである。これらの図より、土壌全体が湿っている時は、水理的平衡状態を保とうとして圧力プロファイルは線形的に変化するのに対し、乾燥が進むに従い土壌の透水性が低下し次第に土層下部からの水分の供給量が減少するため、圧力プロファイルは水理的平衡状態を保てなくなってくるのがわかる。なお、異なる蒸発速度での計算も行なったが、積算蒸発量の増加に伴う圧力水頭の鉛直プロファイルの変化はほとんど同じことから、蒸発速度の日変化が季節変化による鉛直プロファイルの形状の違いは小さいと考えられる。

3. 解析解

図2からわかるように、ある程度まで圧力水頭の鉛直プロファイルは線形を保持している。そこで、土壌の初期及び流出終了時

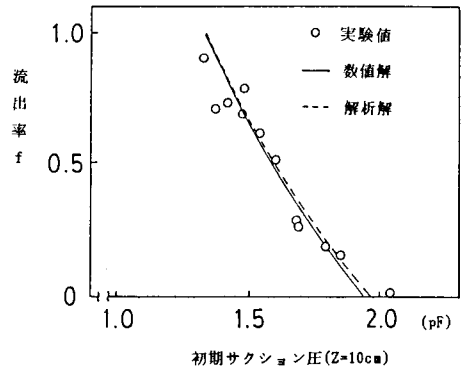


図1. 初期サククション圧と流出率の関係

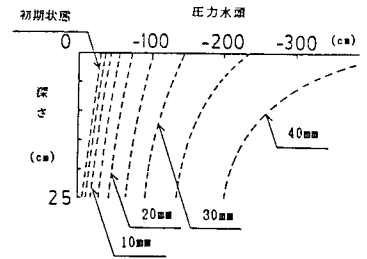


図2. 圧力水頭の乾燥プロファイル

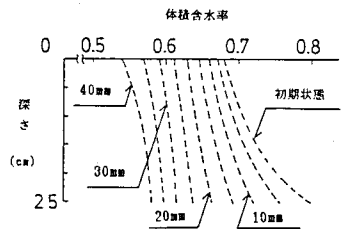


図3. 体積含水率の乾燥プロファイル

の圧力水頭の鉛直プロファイルが、線形であると仮定することにより流出率に関する解析解を求めることを試みた。この仮定のもとでは、任意の深さ z における圧力水頭 $\psi(z)$ は、層厚 H と下端の圧力水頭 ψ_L を用いて式(1)で表わされる。また、土壌特性として、式(2)のBrooks-Coreyの式を用いれば、それを積分することにより全水分量 Θ が求まる。流出率 f は総降雨量 R と損失量 $\Delta\Theta$ を用いて式(3)で定義されるので、 f と $\psi(z)$ の関係は結局式(4)で与えられる。

$$\psi(z) = \psi_L - H + z \quad (1)$$

$$\theta(z) = (\theta_s - \theta_r) (\psi(z)/\psi_{cr})^{-\lambda} + \theta_r \quad (2)$$

$$f = (R - \Delta\Theta) / R \quad (3)$$

$$f = 1 - 1/R * [(\theta_s - \theta_r) \psi_{cr} / (-\lambda + 1) * (1 - (1 - H/\psi_{cr})^{-\lambda + 1} - ((\psi(z) + H - z) / \psi_{cr})^{-\lambda + 1} + ((\psi(z) - z) / \psi_{cr})^{-\lambda + 1})] \quad (4)$$

この式(4)は、土壌特性と任意の一地点の初期サクション圧がわかっていると、総降雨量に対して流出率が定まるということを示している。また、式(4)より土壌物理パラメータの逆推定も可能である。図1には、本解析法で求めた初期サクション圧-流出率曲線(pF₀-f曲線)を合わせて示してある。この図からも上で導いた式(4)は、十分適用性を有することがわかる。ただし、土壌全体が非常に乾燥したり層厚が大きい所では、線形の仮定は成立せず、必ずしも有効でなくなるであろう。

4. pF₀-f 曲線に対するRやHの効果

ここには示していないが、降雨浸透中の蒸発量がほとんど無視できる場合、pF-f曲線は降雨強度に依存しないことが実験及び数値計算により確かめられている。図4には、層厚25cmの先程の土壌に、20mm、30mm及び40mmの総降雨量Rを与えた時の、深さ10cmの位置の初期サクション圧と流出率の関係の計算結果が示されている。この図より、流出率は総降雨量に大きく依存していることがわかる。図5は、図4の結果を流出率のかわりに損失量で整理したものである。損失量で表わす方が総降雨量に依らず、より明確な記述法であることがわかる。図6には、層厚Hが25cm、50cm、75cmの3ケースについて総降雨量30mmを与えたときの、深さ20cm

の位置の初期サクション圧と流出率の関係の計算結果が示されている。この図から、層厚の増大とともにpF₀-f曲線の勾配が急になってくるのがわかるが、これは、層厚が大きい程より深い所からの水分量の供給があるため、層厚全体の水分量変化に対するサクション圧の変化の割合は小さくて済むからである。

参考文献 1) 日野・灘岡・尾高・佐藤：第29回水理講演会論文集，pp127-130，1985
 2) 日野・長谷部：第26回水理講演会論文集，pp349-353，1982
 3) 日野・灘岡・佐藤：第30回水理講演会論文集，pp379-384，1986

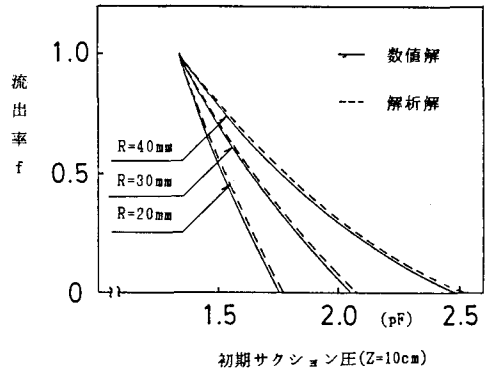


図4. pF₀-f 曲線の総降雨量による相違

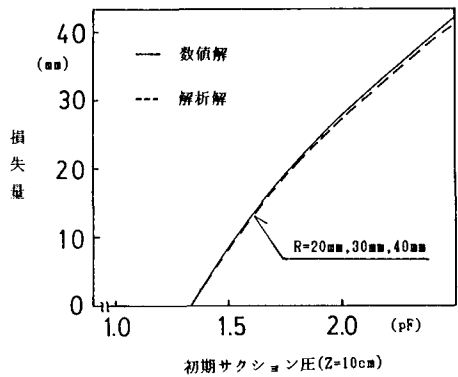


図5. 初期サクション圧と損失量の関係

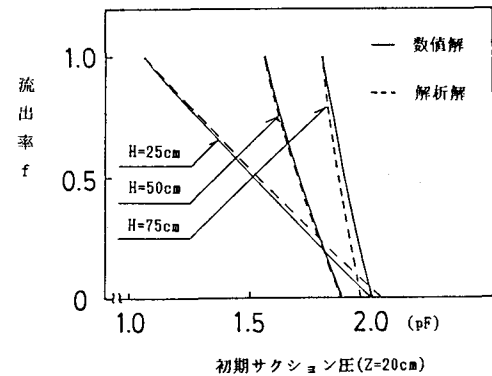


図6. pF₀-f 曲線の層厚による相違