

パラメータの空間分布が流出シミュレーション結果に及ぼす影響について

INFLUENCE OF MODEL PARAMETERS' SPATIAL DISTRIBUTIONS ON RAINFALL-RUNOFF SIMULATION RESULTS

立川康人¹・福満匡高²・市川 温³・椎葉充晴⁴・宝 馨⁵

Y. TACHIKAWA, M. FUKUMITSU, Y. ICHIKAWA, M. SHIIBA and K. TAKARA

¹正会員 博士(工学) 京都大学助教授 防災研究所水災害研究部門 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

²正会員 工修(株) 日輝 (〒 220-6001 横浜市西区みなとみらい 2-3-1)

³正会員 工修 京都大学助手 防災研究所水災害研究部門 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

⁴正会員 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-0011 京都市左京区吉田本町)

⁵正会員 工博 京都大学教授 防災研究所水災害研究部門 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

Influence of spatial distributions of model parameters on rainfall-runoff simulation results is investigated. Values of hydraulic conductivity and thickness of A-layer are generated according to log normal distribution; each value is assigned randomly to each slope element; runoff simulation is conducted by using a distributed rainfall-runoff model. The above procedure is repeated and simulated hydrographs are compared. As a preliminary result, we obtained that spatially lumped distribution information (mean and variance) of hydraulic conductivity and thickness of A-layer is the most important information to form a hydrograph, and spatially explicit information of the parameters is not always needed under spatially uniform rainfall condition.

Key Words : distributed rainfall-runoff model, spatial information, Monte Carlo simulation

1. はじめに

多くの分布型流出モデルは、土壌パラメータとして地表面の粗度係数・土壌層の厚さ・透水係数・土層の空隙率などを必要とするが、これらのモデルパラメータの値を既存のデータから得ることは通常、不可能である。土壌特性の空間分布情報は、日本ではほとんど整備されておらず、米国においても整備・公開されているデータの空間分解能は地形情報に比べて極めて分解能が低い。また、これらのモデルパラメータは物理的な概念の明確なパラメータであるが、モデルの構造や分解能に依存するパラメータであるため、実測のデータがあったとしてもそれをそのまま用いることはできない。したがって、これらのモデルパラメータは、実測の水文データをもとにチューニングせざるを得ない。

この場合、モデルパラメータをどのようにチューニングするかという戦略は、パラメータの空間分布が流出シミュレーション結果にどのような影響を及ぼすかによって異なる。たとえば、流域内部のどの地点のパラメータの値がどれだけであるかということが流出計算結果に重要な効果を持つならば、全ての地点のパラメータを逆推定することを考えねばならない。仮に、モデルパラメータの流域内部での位置は問題ではなく、パ

ラメータが分布していることのみが重要であるとすれば、その分布形とモーメントの値を推定できればよいことになる。極端な場合として、一次のモーメントのみが重要ということになれば、それは、パラメータを流域一様としてよいということになる。

このことは、分布型モデルを集中化できるかどうかを探ることである。流域内でのモデルパラメータの空間配置が流出計算結果に大きく影響するならば、モデルを集中化することはできない。しかし、パラメータ分布のモーメントの情報のみが重要となるならば、モデルを有効に集中化する手法を考えることが可能だろう。また、こういった研究は、従来、経験的に決められてきた流域分割の仕方に理論的な枠組を与える可能性がある。

以上のことを背景として、本研究では、空間分布するモデルパラメータのどのような情報が流出計算結果に支配的な効果を持つかを、透水係数とA層厚に関して数値シミュレーションにより検討した。その結果、降雨分布が空間的に一様という条件のもとでは、モデルパラメータの空間配置情報、すなわちどの位置のモデルパラメータがいくつであるかという情報は重要ではなく、流域内部でのパラメータ分布の平均値、分散の値が流出計算結果に支配的であるという結論を得た。

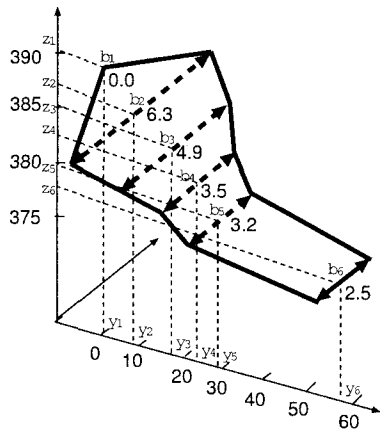


図-1 斜面要素の模式図

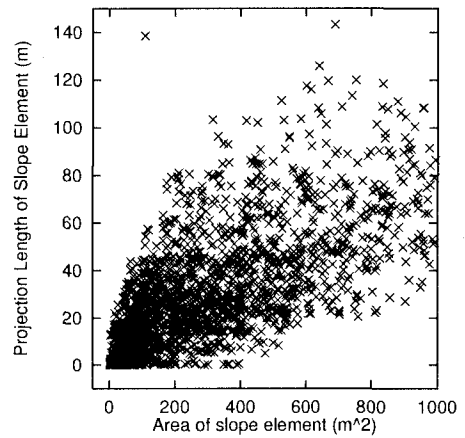


図-2 各斜面要素の面積と斜面長の散布図

2. 使用する分布型流出モデルと対象流域

(1) 流出場のモデル^{1),2)}

東京大学愛知演習林白坂試験地 (0.88km²) を対象流域とする。流出場はメッシュ標高データ (分解能 20m) と河道の点列のデータを情報源として三角形要素の集合体として表現する¹⁾。この流出場の数値表現手法をもとに山腹斜面を最急勾配方向を基本として斜面要素に分割し、斜面要素ごとに斜面上端からの水平距離 y とそれに対する斜面幅 b 、標高 z と斜面要素の面積を自動計測する²⁾。図-1 は白坂試験地内での実際の斜面要素の例であり、その下端は河道に接続している。図-2 は、対象流域を分割して生成した 4796 個の斜面要素の斜面長と面積の対応を表示したものである。流域内には様々な形状をした斜面要素が含まれている。これらの自動計測した値をもとに、斜面勾配・斜面幅の連続的な変化を 3 次スプライン補間関数を用いて表現する。

(2) 流れのモデル²⁾

上述した各斜面要素での流出量を算定するために、斜面勾配・斜面幅の変動を考慮し、中間流と地表面流とを統合的に表す流量流積関係式を用いた kinematic wave モデルを適用する。図-3 は斜面要素での表層付近の流れを模式的に表したものである。図中 x は斜面上端から斜面上での流下方向に沿って計る距離であり、 $b(x)$ は距離 x での斜面幅、 $\theta(x)$ は地表面勾配である。 y は水平面上に投影した水平方向の距離、 H は水深、 L は斜面上端から下端までの y 軸に沿った長さを表す。斜面要素は A 層と呼ばれる一様な深さ D の透水性の高い層に被覆されているとし、A 層が不飽和である場所では雨水は直ちに A 層に浸透して飽和側方流を形成し、水深が A 層厚 D を越えた地点において地表面流が発生すると考える。真の水深を h とすると γ を A 層内の

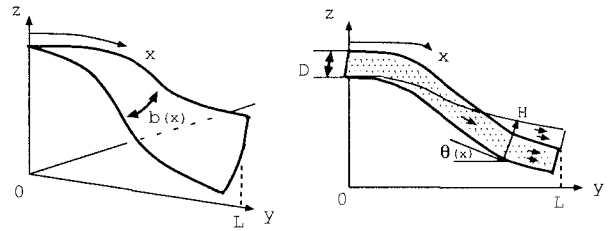


図-3 流れの模式図

有効空隙率として、 $H < D$ のとき $h = \gamma H$ 、 $H \geq D$ のとき $h = H - D + \gamma D$ である。

q を単位幅当りの地表面に沿う流量とすれば、斜面勾配・斜面幅の変化を考慮した斜面上の連続式、運動式は、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{b(x)} \frac{\partial}{\partial x} \{qb(x)\} = r(x, t) \cos \theta(x) \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} q &= \frac{k \sin \theta(x)}{\gamma} h, \quad (0 < h < d \text{ のとき}) \\ q &= \frac{\sqrt{\sin \theta(x)}}{\gamma} (h - d)^m \\ &\quad + \frac{k \sin \theta(x)}{\gamma} h, \quad (h \geq d \text{ のとき}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

で表される。式中、 $r(x, t)$ は位置 x 、時間 t での鉛直方向の降雨強度、 k は A 層の透水係数、 $d = \gamma D$ 、 n は Manning の粗度係数、 $m = 5/3$ である。任意の地点での斜面幅 $b(x)$ 、勾配 $\theta(x)$ はスプライン補間関数から簡単に得ることができる。

すべての斜面要素について上式に基づいて流出量を算定し、それを河道への側方流入量とする。河道流れも斜面と同様に kinematic wave モデルを用いる。ただし、このときは $D = 0$ とする。計算には Beven の差分スキーム³⁾を採用した。

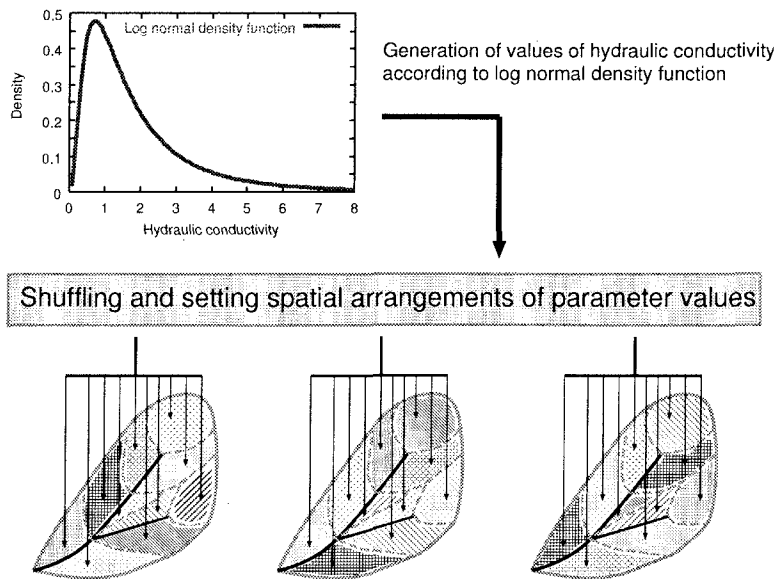


図-4 シミュレーションの手順

3. 透水係数の空間分布が流出シミュレーションに及ぼす影響

透水係数の空間分布に関するどのような情報が流出シミュレーション結果に支配的であるかを調べるために、図-4 に示す手順で数値実験を行った。

- (a) 透水係数の実測値の分布が対数正規分布に従うという報告^{4),5)}をもとに、透水係数の分布は対数正規分布に従うと仮定して、対象流域内の斜面要素数 4796 と同数の透水係数の値を発生させる。
- (b) 上で用意した透水係数の値をランダムに各斜面要素に割り当てる。
- (c) 流出計算を行う。
- (d) (b)に戻り、再度、透水係数の値をランダムに各斜面要素に割り当てて、流出計算を行う。この手順を繰り返してハイドログラフを比較する。

それぞれの流出シミュレーションでは、透水係数の空間的な配置のみが異なる。したがって、流出計算結果を比較することにより、透水係数の空間配置の情報が重要であるかどうかを知ることができる。

表-1 に示す 8 通りのケースについて、上記の手順により得たハイドログラフを 図-5 に示す。この図では、標準偏差が 0.1, 0.5, 5.0, 10.0, 50.0, 100.0 (単位はすべて cm/sec) の場合を示した。各ケースとも 5 回上記の手順を繰り返し、得られた 5 個の流出高ハイドログラフを重ねて示している。透水係数以外のパラメータは、全ケースで A 層厚を 30.0 mm, 有効間隙率を 0.15 とし、降雨強度 5 mm/hr で継続時間 4 時間の一様な降雨を与えた。また、初期損失雨量は 0 mm とした。

表-1 発生させた透水係数の平均値と標準偏差

No.	平均値 (cm/sec)	標準偏差 (cm/sec)
case 1	1.4	0.1
case 2	1.4	0.3
case 3	1.4	0.5
case 4	1.4	5.0
case 5	1.4	10.0
case 6	1.4	30.0
case 7	1.4	50.0
case 8	1.4	100.0

標準偏差 0.1 cm/sec, 0.3 cm/sec, 0.5 cm/sec のケースでは、ハイドログラフはほとんど重なっていた。標準偏差を大きくした場合も、それぞれのケースにおいてハイドログラフはほとんど変わらない。各時刻における流出高の差が最も大きかったのは標準偏差が 100 cm/sec の場合であった。このケースのみ、さらに 5 回上記の手順を繰り返した後、各時刻での流出高の標準偏差を求めたところ、最も大きい値が 0.12 mm/hr であり、最大流出高の 3% 以下であった。透水係数の配置の空間パターンが異なっても得られるハイドログラフに違いが無いということは、透水係数の配置に関する情報が流域下端での流出ハイドログラフの形成に影響していないことを示している。

次に、各ケースでのハイドログラフを一つずつ取り出してまとめて表示したものを 図-6 に示す。標準偏差の値が異なることによってハイドログラフには大きな違いが現れる。基本的には、標準偏差の値が大きくなると、ハイドログラフはなだらかに変化するようになる。標準偏差の値が大きくなると、小さな値の透水

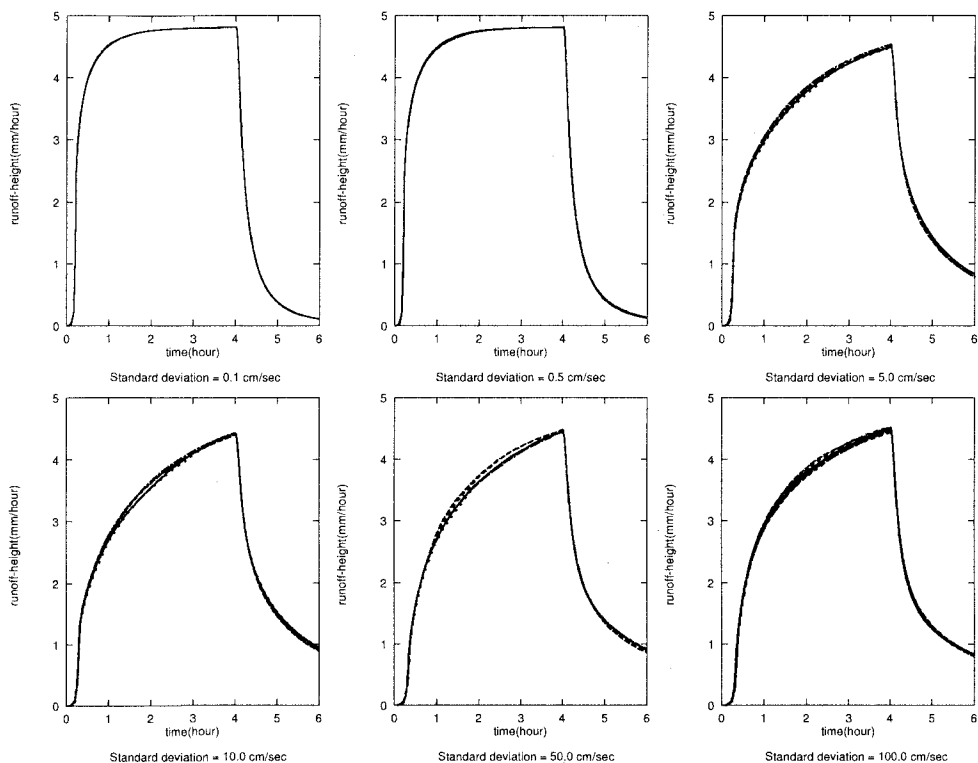


図-5 透水係数の空間分布がハイドログラフの形成に及ぼす影響。それぞれの図中には透水係数の平均値，標準偏差が同じで空間配置が異なる5個のハイドログラフが描かれている。

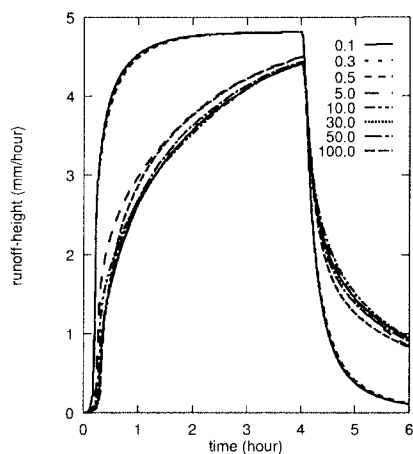


図-6 透水係数の標準偏差の違いによるハイドログラフの違い

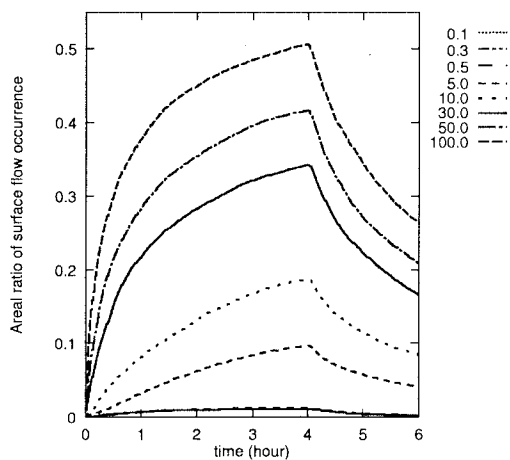


図-7 透水係数の標準偏差の違いによる地表面流発生面積率の違い

係数を持つ斜面要素が多数現れることになるため、ハイドログラフの立ち上がりが遅くなるからである。

ただし、この効果は一方向的に働くわけではない。標準偏差の値を大きくすると、透水係数の小さな値を持つ斜面要素が増加することによって、地表面流の発生率も大きくなる。図-7は、各ケースにおいて地表面流が発生している面積の全流域面積に体する割合の時間変化を示したものである。したがって、標準偏差の値

をさらに大きくしていくと、地表面流の発生率がさらに大きくなり、ハイドログラフの立上りが早くなっていくことが予想される。実際、図-6の標準偏差が100 cm/secの場合のハイドログラフは最も立上りの遅いハイドログラフではない。このことは標準偏差の値をさらに大きくすると立上りが早くなる傾向にあることを示している。この効果は降雨強度を大きく設定すれば、顕著に現れると考えられる。

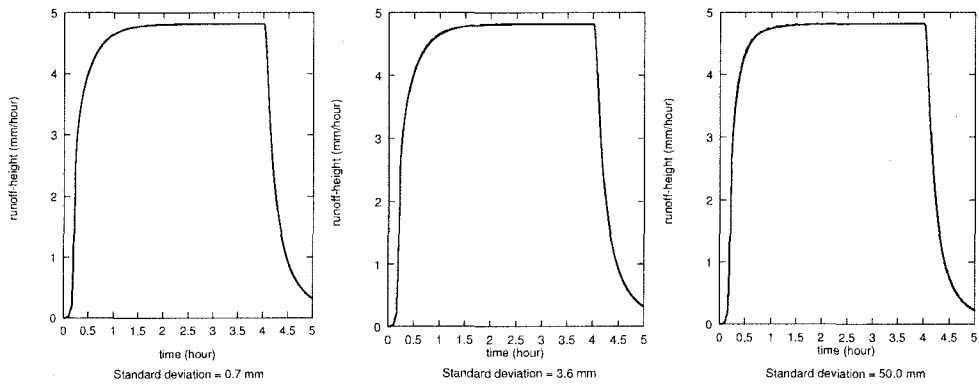


図-8 A層厚の空間分布がハイドログラフの形成に及ぼす影響。それぞれの図中にはA層厚の平均値、標準偏差が同じで空間配置が異なる5個のハイドログラフが描かれている。

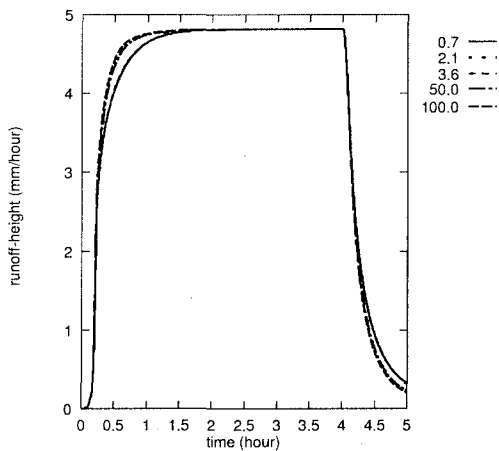


図-9 A層厚の標準偏差の違いによるハイドログラフの違い

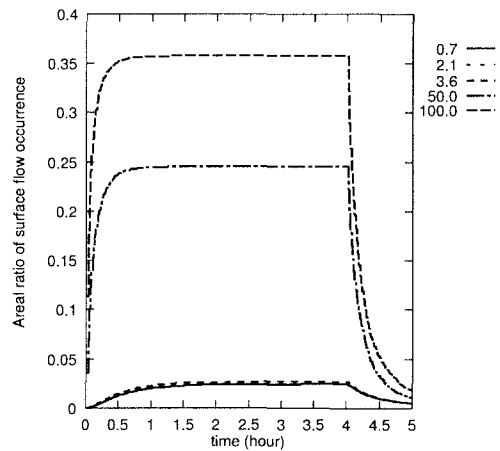


図-10 A層厚の標準偏差の違いによる地表面流発生面積率の違い

4. A層厚の空間分布が流出シミュレーションに及ぼす影響

A層厚についても、それが流域内で対数正規分布に従って分布しているとして、その空間配置が流出シミュレーション結果に及ぼす影響を調査した。調査の方法は透水係数の場合と同様である。表-2に示すケースについて、計算ハイドログラフの違いを調査した。標準偏差が0.7 mm, 3.6 mm, 50.0 mmの場合に得たハイドログラフを図-8に示す。いずれのケースともA層厚の空間配置が異なる5個のハイドログラフを重ねて示している。A層厚以外のパラメータは、すべてのケースにおいて透水係数を1.4 cm/sec, 有効間隙率を0.1とし、降雨強度5 mm/hrで継続時間4時間の一様な降雨を与えた。各ケースとも、ハイドログラフはほとんど重なっている。A層厚の空間配置が変わってもハイドログラフに及ぼす影響はほとんどないことがわかる。各ケースでのハイドログラフを一つずつ取り出して

表-2 発生させたA層厚の平均値と標準偏差

No.	平均値 (mm)	標準偏差 (mm)
case 1	10.0	0.7
case 2	10.0	2.1
case 3	10.0	3.6
case 4	10.0	50.0
case 5	10.0	100.0

まとめて表示したものを図-9に示す。標準偏差の値によってハイドログラフの違いが現れ、標準偏差が大きいほどハイドログラフの立ち上がりが早くなっていることがわかる。これは、標準偏差の値が大きいケースほど、A層厚の小さな斜面要素が増加することによって地表面流が発生しやすくなるからである。図-10を見ると、標準偏差の値が大きいほど地表面流発生面積率が大きくなっていることが確認できる。

図-9では標準偏差の値の違いの割には各ケース間でのハイドログラフの違いは大きなものではない。これ

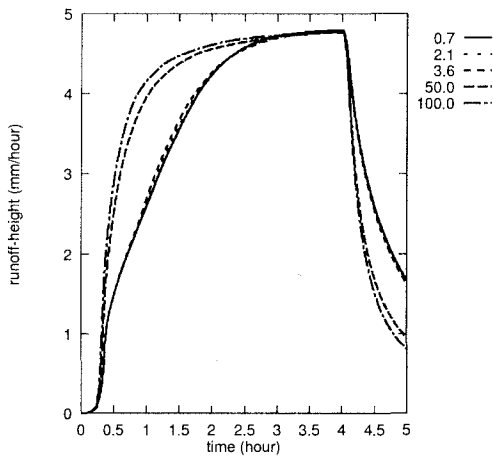


図-11 A層厚の標準偏差の違いによるハイドログラフの違い(透水係数を0.14 cm/secとした場合)

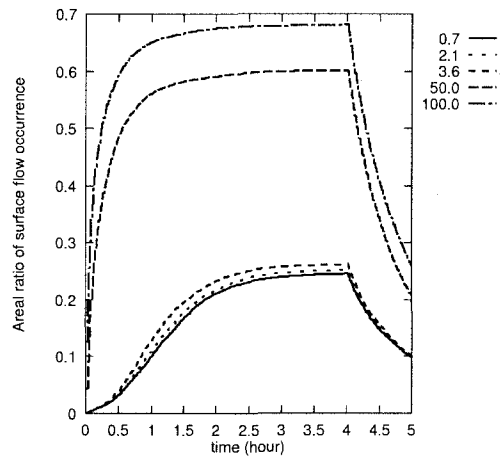


図-12 A層厚の標準偏差の違いによる地表面流発生面積率の違い(透水係数を0.14 cm/secとした場合)

は設定した透水係数の値が大きかったため、地表面流が発生した場合としない場合とで雨水の移動速度に大きな差が無かったためである。そこで、透水係数の値を0.14 cm/secに設定し、他は同じ条件のもとで同様のシミュレーションを行った。この場合もA層厚の配置の違いはハイドログラフの違いとなって現れなかった。各ケースでのハイドログラフと地表面流発生率の時間変化を図-11、図-12に示す。各ケースでのハイドログラフの違いが大きくなっていることがわかる。

5. まとめ

本研究では、空間分布するモデルパラメータのどのような情報が流出計算結果に支配的な効果を持つかを、透水係数とA層厚に関して数値シミュレーションにより検討した。得られた結果を列挙する。

- 降雨分布が時空間的に一様であるという条件のもとでは、透水係数、A層厚ともに空間配置に関する情報が計算ハイドログラフの形成に及ぼす影響はほとんどない。すなわち、どの斜面要素の透水係数、またはA層厚の値がどれだけであるかといった情報は重要ではない。
- 透水係数、A層厚ともに集中化された分布情報(平均値、分散)が計算ハイドログラフの形成に及ぼす影響は大きい。

1km² 弱の流域を対象とした場合に、モデルパラメータの空間配置は流出ハイドログラフの計算結果に影響を及ぼさなかった。したがって、このような流域が多数集まる大きな流域を対象とした場合も、降雨が時空間的に一様という条件のもとではモデルパラメータの空間配置は流出計算結果に影響を及ぼさないことになる。今後、同様の検討をモデルパラメータの空間相関

を考慮した場合、モデルパラメータ間の相互相関を考慮した場合についても行う必要がある。それらの結果、やはりモデルパラメータの空間配置が流出シミュレーションに影響を及ぼさないのであれば、集中化モデルを構成するためには地形の効果を集中化できればよいことになる。実地形を対象とした集中化モデルの構成法は市川ら⁶⁾が検討している。なお、別途、同様と扱ってよい降雨の時空間スケールを検討する必要がある。

謝辞： 本研究は土木学会水理委員会河川懇談会によって設置された土木学会と建設省庄内川工事事務所との共同研究「分布モデルを中心とした洪水流出解析手法の高度化に関する研究(平成8~10年度、代表：小尻利治)」の研究成果の一部である。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 立川康人・椎葉充晴・高棹琢馬：三角形要素網による流域地形の数理表現に関する研究，土木学会論文集，558/II-38，pp. 45-60，1997。
- 2) 立川康人・原口明・椎葉充晴・高棹琢馬：流域地形の三角形要素網表現に基づく分布型降雨流出モデルの開発，土木学会論文集，565/II-39，pp. 1-10，1997。
- 3) Beven, K. : On the generalized kinematic routing method, *Water Resources Research*, 15(5), pp. 1238-1242, 1979.
- 4) Nielsen, D. R., Biggar, J. W. and Erh, K. T. : Spatial variability of field-measured soil-water properties, *Hilgardia*, 42(7), pp. 215-259, 1973.
- 5) Russo, D. and Breler, E. : Soil hydraulic properties as stochastic processes, I. An analysis of field spatial variability, *Soil Science Society of America Journal*, 45(4), pp. 682-687, 1981.
- 6) 市川 温・小椋俊博・立川康人・椎葉充晴・宝 馨：山腹斜面流出系における一般的な流量流積関係式の集中化，水工学論文集，第44巻，投稿中。

(1999. 9. 30 受付)