

都市小流域へのSWMMの適用における モデル・パラメータの値について

ON MODEL PARAMETERS OF SWMM
FOR SMALL URBAN DRAINAGE BASIN

神田 徹¹・神吉和夫²・渡辺政広³・前田康宏⁴

Tohru KANDA, Kazuo KANKI, Masahiro WATANABE and Yasuhiro MAETA

¹フェロー会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 工修 神戸大学助手 工学部建設学科 (同上)

³正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

⁴学生会員 神戸大学大学院 自然科学研究科建設学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

This paper deals with a method for estimating the main model parameters of SWMM, i.e. the imperviousness ratio : F , the equivalent roughness coefficient of impervious area : N_i and the depression storage of impervious area : d_{pi} at a small urban basin.

First, by using the single basin model, we optimized the values of the model parameters. The optimum values of F are distributed in the wide range, and they are larger than the value of the imperviousness ratio obtained from the land-utilization map. The optimum values of N_i have also the wide range of distribution according to the hyetograph patterns. On the other hand, the optimum values of d_{pi} are nearly constant for various rainfall events. Second, by using the separated basin model, we examined the optimum values of N_i . The results of runoff simulations showed that the value of N_i optimized for the heavy rainfall was well applicable to runoff forecasting for the other rainfalls.

Key Words : urban runoff, SWMM, parameter estimation, imperviousness, equivalent roughness, depression storage

1. はじめに

流域の都市化に対応して都市河川や下水道雨水排除施設の整備が進んだが、近年、局地的豪雨による河川の氾濫や下水道マンホールからの溢水などの災害が各地で起こっており、都市型水害への対策は今後も一層重要な課題であると考えられる。

市街化が進んだ流域では、下水道の雨水流出と河川の洪水を一体としてとらえ、治水対策を講ずる必要があるが、従来は相互の関係が一貫していない面も残されている。下水道による雨水排除に関しては、雨水貯留施設や放流先河川の洪水計画・管理を考慮するとき、雨水管渠を流下するピーク流出量のみならず流出量のボリュームや流出ハイドログラフが計画・管理の対象となる。この観点より、本研究は下水道(雨水管渠)で雨水排除が行われる小規模な市街化域を対象として、降雨から流出ハイドログラフを予測するための流出モデルについて検討を行ったものである。

都市域の流出解析法としては、修正RRL法、等価粗度係数法などがわが国では慣用されているが、欧米各国ではパソコン画面表示などの点でuser friendlyな流出解析ソフトウェアがよく用いられている。これらのソフトウェアのベースとなる流出モデルにはパラメータが含まれており、それについて標準的な値が示されているが、パラメータの値は一般にモデル構成に依存するはずであるから、土地利用、降雨特性、流域規模等が異なるわが国でこのソフトウェアを用いる場合には、モデル構成やそれに応じたモデル・パラメータの適値について吟味し、知見を集積していく必要がある。

筆者らは、SWMM(Storm Water Management Model)¹⁾のわが国の都市流域への適用性を調べているが^{2)~5)}、本研究では山麓の小規模な(洪水到達時間が数分の程度)住宅地におけるSWMMの適用性に関して、モデル・パラメータの適値を求める実用的方法を示し、得られたパラメータ値と降雨条件の関係、およびモデル構成がパラメータに及ぼす影響について検討を行った。

2. SWMMの概要

本研究では、地表面流出の計算にはSWMMのRunoff Blockを、管渠内における流量の計算にはExtran Blockを使用する。以下に、各Blockの概要について記す。

(1) Runoff Block

降雨量を入力として地表面流がマンホールに流入するまでを取り扱う。流域をいくつかのサブキャッチメントに分割し(図-1)、さらにサブキャッチメントが浸透域・不浸透域、凹地貯留あり・なしによって3つのサブエリアからなるものとする(図-2)。

流出の基礎式は、図-3の概念をもとに式(1)に示す非線型貯留の式を用いる。

$$Q = W \frac{1}{N} (h - d_p)^{3/2} I^{1/2} \tag{1}$$

$$\frac{dh}{dt} = (i - f) - \frac{Q}{A} \tag{2}$$

$$f = f_{\infty} + (f_0 - f_{\infty}) \cdot \exp(-k \cdot t) \tag{3}$$

ここに、 Q :サブエリアの流出量、 W :サブエリアの幅、 N :サブエリアの等価粗度係数、 A :サブエリアの面積、 h :水深、 d_p :凹地貯留量、 I :勾配、 i :降雨強度、 f :浸透能、 f_{∞} :最終浸透能、 f_0 :初期浸透能、 k :低減係数

(2) Extran Block

マンホールから管渠に流入した雨水が下水管渠網を流下して放流口に至るまでの流れを追跡する。基礎式は次式で表される。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -gAS_f + 2V \frac{\partial A}{\partial t} + V^2 \frac{\partial A}{\partial x} - gA \frac{\partial H}{\partial x} \tag{4}$$

$$\frac{\partial H_n}{\partial t} = \frac{\sum Q}{A_s} \tag{5}$$

ここに、 Q :流量、 V :流速、 A :流水断面積、 H :水位、 S_f :摩擦損失勾配、 H_n :ノードの水位、 A_s :ノードの水表面積、 $\sum Q$:ノードでの流入流出の合計

3. 水文観測の概要

対象流域は、神戸市の六甲山の山麓南側に位置する住宅地であり、面積は4.81ha、勾配は2～11%である。図-4の土地利用図に示すように流域のほとんどが住宅団地、一戸建て住宅、駐車場、舗装道路等の不浸透域からなり、この土地利用図から求めた不浸透面積率は約72%である。残りの面積は土地利用図からは通常、浸透域に分類される公園、団地および一戸建て住宅の庭等であるが、この区域には雨水流出の観点からは不浸透の面積が部分的に

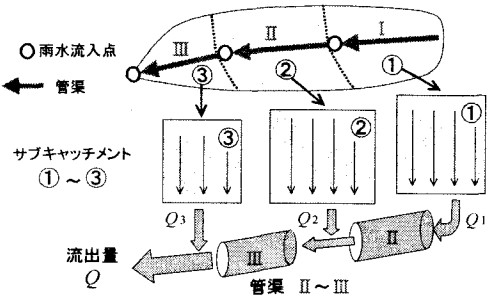


図-1 流域のモデル化

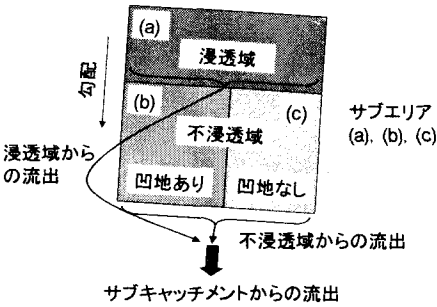


図-2 3つのサブエリアからなるサブキャッチメント

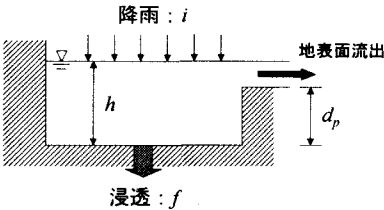


図-3 非線型貯留の概念図

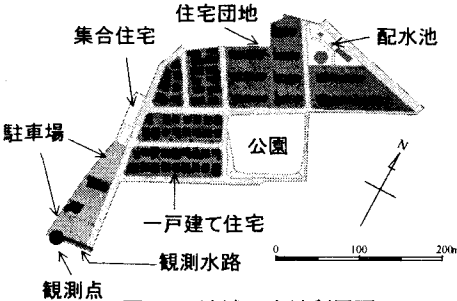


図-4 流域の土地利用図

含まれているので(後述)、ここでは“土地利用図上の浸透域”とよぶこととする。下水排除方式は分流式を採用しており、排水路のほとんどが道路側溝(開渠)である。

水文量の観測のために流域下流端に観測水路を設け、流速、水位、流量を観測し、また同位置で降雨量を観測している。観測時間間隔は各量とも1分間である。

4. モデル・パラメータの実用的推定法と

その適値 — 単一流域モデルについて —

SWMMを特定の流域に適用する際に問題となるのは、前述のRunoff Blockの基礎式中の各パラメータの値である。ここに含まれるパラメータのうち、筆者らの従来の研究⁵⁾

によれば、i) 不浸透面積率、ii) 不浸透域の等価粗度係数、iii) 不浸透域の凹地貯留量、のパラメータがモデル同定に支配的に影響するという結果が得られている。そこで、この3つの主要パラメータについて実用的推定法を検討した。ここで、本研究では以下のような面積を不浸透域としている。

- ①アスファルト舗装の道路・駐車場、宅地等
 - ・土地利用状況から明確に判断できる不浸透域(一定面積)
- ②公園、宅地の庭等の土地利用図上の浸透域のうち、降雨時には浸透能が実質上ゼロである面積
 - ・人々の通行等により地表が締め固められた部分やコンクリート部分など(一定面積)
 - ・地表層内の貯留水の水面が降雨の継続により地表面に現れている部分(降雨条件によりその面積は変化)

(1) モデル・パラメータの実用的推定法

モデル・パラメータのハイドログラフへの影響について、既往の研究結果より次のことがいえる。

- ・不浸透面積率 F は、全ての降雨事象について、ピーク流量および総流出量に影響する。
- ・不浸透域の等価粗度係数 N_i は、その値を大きくするとピーク流出量は減少し、またハイドログラフ形状はフラットになる。一方、 N_i の値を小さくするとピーク流出量は増加し、またハイドログラフはシャープな形状になる。また、 N_i の値はピーク流出量の生起時刻に関係する。
- ・不浸透域の凹地貯留量 d_p は、短時間降雨では総流出量およびピーク流出量に影響する。また、ハイドログラフの立ち上がり部の形状に影響する。

以上のことを考慮に入れて、各モデル・パラメータの適値を求めるための実用的方法を考察した。まず、 F を修正して総流出量について観測値と計算値を合わせる。次に、 N_i を修正してピーク流出量を調整する。最後に、 d_p を修正してハイドログラフの立ち上がり部を適合させる。図-5に、この方法のフローチャートを示す。図において、各ステップの判定基準 J を満たすことにより、次のステップに移行する。この推定法の適用において、浸透域のモデル・パラメータの値は、過去の研究結果から得られた値を参考にして、表-1の値を用いた。

各ステップでのモデル・パラメータの修正方法、判定基準は以下の通りである。

ステップ1: 観測総流出量に比べて計算総流出量が多い場合は F を小さくし、逆に小さな場合は F を大きくする。

$$\text{判定基準: } J_1 = \frac{|Q_o - Q_s|}{Q_o} \leq 0.05 \tag{6}$$

ここに、 Q_o : 観測総流出量(m^3)、 Q_s : 計算総流出量(m^3)

ステップ2: 観測ピーク流出量に比べて計算ピーク流出量が多い場合は N_i を大きくし、逆に小さい場合は N_i を小さくする。判定基準を満足しない場合はステップ1に

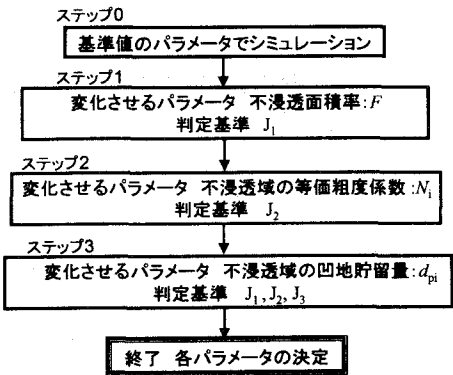


図-5 実用的推定法のフローチャート

表-1 浸透域のパラメータの設定値

等価粗度係数(浸透域) ($m^{-1/3}s$)	0.1
凹地貯留量(浸透域) (mm)	4.0
初期浸透能 (mm/hr)	20.0
最終浸透能 (mm/hr)	5.0
浸透能の低減係数 (sec^{-1})	0.0012

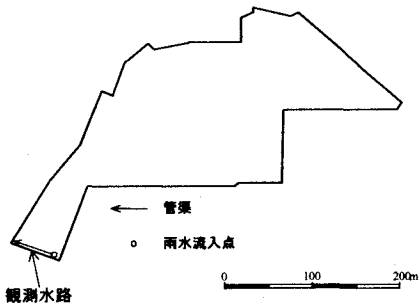


図-6 単一流域モデル

もどり、新たな F を設定し計算を進める。

$$\text{判定基準: } J_2 = \frac{|q_{po} - q_{ps}|}{q_{po}} \leq 0.05 \tag{7}$$

ここに、 q_{po} : 観測ピーク流出量(m^3/s)、
 q_{ps} : 計算ピーク流出量(m^3/s)

ステップ3: 観測ハイドログラフに比べて計算ハイドログラフの立ち上がりが緩やかな場合は d_p を小さくし、逆に急な場合は d_p を大きくする。 d_p の修正によって総流出量、ピーク流出量が変化するので、 F 、 N_i の修正のフィードバックも合わせて、総合的に修正し最適な値を決定する。

判定基準: J_1 (式(6))、 J_2 (式(7))および

$$J_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (q_{oi} - q_{si})^2 \leq 0.001 \tag{8}$$

ここに、 q_{oi} : 観測流出量(m^3/s)、 q_{si} : 計算流出量(m^3/s)

(2) モデル・パラメータの適値

図-4の流域に対して、図-6に示すようにサブキャッチメント分割をせず、単一流域として上述の実用的推定法により、パラメータの適値を求めた。パラメータの適値に達したときの観測ハイドログラフと計算ハイドログラフの適合度を示す例を図-7に示す。この降雨事象に

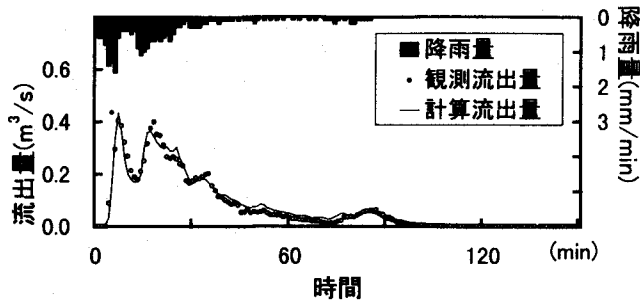


図-7 実用的推定法の適用結果の例

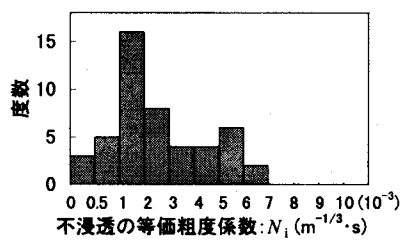


図-10 N_i の適値の度数分布

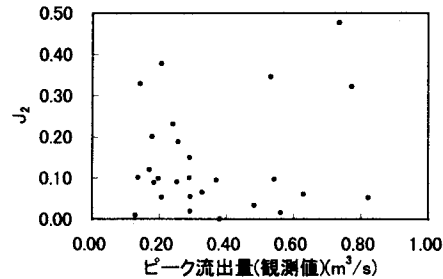


図-11 観測値と計算値($N_i=0.003\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s}$)のピーク流出量の相対誤差

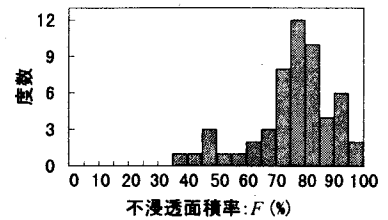
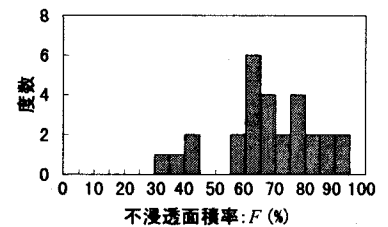
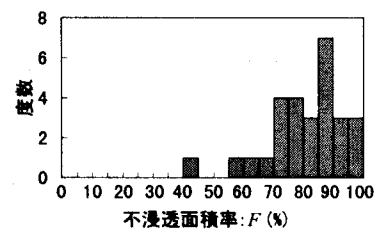


図-8 F の適値の度数分布



(a) 降雨前半部



(b) 降雨後半部

図-9 降雨各部分における F の適値の度数分布

対しては、単一流域モデルでも流出ハイドログラフを良好に再現し得ることがわかる。

a) 不浸透面積率

各降雨事象に対して、実用的推定法により得られた F の適値の度数分布を図-8に示す。 F の適値はある値のまわりに分布するが、その範囲はかなり広い。また、土地利用図から求めた不浸透面積率 F_0 は72%であるから、それよりも大きな値に F の適値が集中している。この F の適値の分布について、以下のように検討した。

全ての観測降雨のうち、ハイドログラフが2山の波形を呈する降雨を対象として、前半の降雨と後半の降雨で別々にモデル・パラメータの適値を求めた。なお、降雨分割は降雨量が0mmかつ流出量が最も小さくなる時刻をもって、前・後半に分ける。

25の降雨事象に対して得られた F の適値を図-9(a), (b)に示す。降雨前半部の F の適値は地図から得られた値 F_0 (72%) 付近に分布しているが、降雨後半部の F の適値は F_0 より大きな値で分布している。この結果は、流域の浸透域が前半部の降雨により湿潤状態となるため、後半部の降雨に対して浸透域の一部を不浸透域として取り扱った方がハイドログラフの適合性がよくなったものと解釈できる。

図-8に示したように、2山のハイトグラフ(またはハイドログラフ)を前半部と後半部に分割せずに一体の降雨として F の適値を求めたときに、その値が広い範囲に分布し、また地図から得られた値 F_0 よりも若干大きな値をとるのは、上述のことから後半の降雨に対する不浸透面積率の増加が関係していると考えられる。

しかし、どのような降雨条件の時に F をいかなる値に設定するかという実用的な問題については、現在検討中である。

b) 不浸透域の等価粗度係数

各降雨事象に対して得られた N_i の適値の度数分布を図-10に示す。 N_i についても降雨事象によってその適値がかなりバラついている。また、図-10の結果から得られた N_i の平均値($0.003\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s}$)を代表値として各降雨事象に適用したところ、図-11に示すように、観測値と計算値のピーク流出量の相対誤差(式(7)の J_2)が40~50%になる場合もある。これは、用いた流域モデルが管渠を一切無視した単一流域モデル(図-6)であるためと考えられる。このように、本研究で対象としたような小規模な流域であっても、単一流域モデルでは、全ての降雨条件に対して等価粗度係数を一定の値に設定することは困難であることが分かった。

c) 不浸透域の凹地貯留量

各降雨事象に対して得られた d_p の適値は、ほとんどの降雨事象について1.5mm前後の値をとる結果となり、単一流域モデルにおける d_p の値は1.5mmとしてよいと考えられる。

5. 分割流域モデルにおける不浸透域の等価粗度係数

流域をできるだけ数多くのサブキャッチメントに分割し、管渠をモデルに組み入れた場合、モデル・パラメータの適値が単一流域の場合とどのように異なるかを調べ

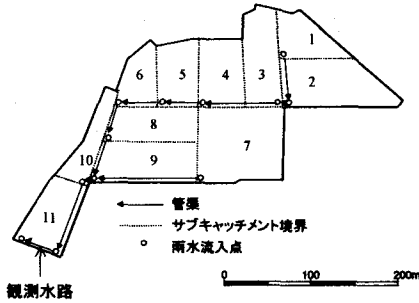


図-12 分割流域モデル

た。本研究では、不浸透域の等価粗度係数を対象とした。ここでは、モデル構成の違いが N_i に及ぼす影響を調べるため、各サブキャッチメントで N_i は同じ値に設定する。用いた流域モデルは、図-12のように11のサブキャッチメントからなる分割流域モデルである。

(1) 計算手順

分割流域モデルは複数のサブキャッチメントからなるため、各サブキャッチメントについてモデル・パラメータを設定する必要がある。ここでは、不浸透域の等価粗度係数以外のパラメータは以下のように設定した。

a) 不浸透面積率の設定

土地利用状況から明らかに不浸透域と判断できるサブキャッチメントの F は100%とする。その他のサブキャッチメントについては、各々の土地利用状況に応じて不浸透面積を配分し、全体の F が単一流域モデルで求めた F の適値と等しくなるように、各サブキャッチメントの F の値(固定)を設定した。

b) 不浸透域の凹地貯留量の設定

単一流域モデルで求めた d_p の適値を、そのまま各サブキャッチメントの d_p の値(固定)として設定した。

c) 浸透域のモデル・パラメータ

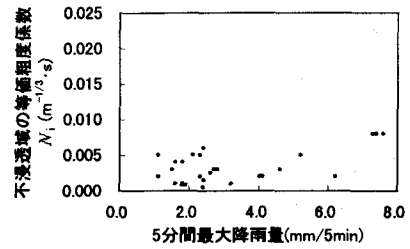
表-1に示す各値を用いた。

a) ~ c) のモデル・パラメータを上述のように設定した後、不浸透域の等価粗度係数 N_i (各サブキャッチメントで同一)の適値を前述の実用的推定法で求める。

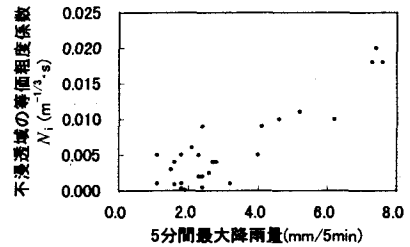
(2) 不浸透域の等価粗度係数の適値の検討

N_i の適値と5分間最大降雨量の関係を、単一流域モデルおよび分割流域モデルについてそれぞれ図-13(a), (b)に示す。降雨強度が小さい場合は、流域分割をしても N_i の値はあまり変化しないが、大きい降雨強度に対しては分割流域モデルの N_i がかなり大きな値をとる。後述するが、分割流域モデルの場合、小さい降雨強度に対しては、図にプロットされている値よりかなり大きな N_i の値を用いてもハイドログラフの適合度はそれほど低下しない。つまり、流域分割を行えば、 N_i の適値は平均的には大きな値となる。これは、単一流域モデルでは管渠が組み込まれていないことによると考えられる。

流域分割を行った場合に N_i の適値が降雨強度によって変化することについて、以下に検討を行った。



(a) 単一流域モデル



(b) 分割流域モデル

図-13 各流域モデルにおける N_i の適値と5分間最大降雨量の関係

分割流域モデルにおいて、大きい降雨強度に対して得られた N_i の適値の最大値 $0.02 \text{ (m}^{-1/3} \cdot \text{s)}$ を種々の降雨強度の降雨事象に用いて、観測値と計算値のハイドログラフの適合度ならびにピーク流出量の誤差を調べた。

a) ハイドログラフの適合度について

図-14はハイドログラフの適合度を表す指標である式(8)の J_3 を示したものである。大きい降雨強度で J_3 は大きな値をとるが、 J_3 の最大値に近い $J_3=0.0022$ のときの計算ハイドログラフが図-15のようであり、観測ハイドログラフとの適合性は良好である。また、小さい降雨強度の場合も J_3 の値は大きくならず($J_3=0.0005$)、図-16に示すように適合性は十分である。

b) ピーク流出量の誤差について

図-17はピーク流出量の相対誤差(式(7))を示す。大きい降雨強度に対する相対誤差は10%以下であり、単一流域モデルで N_i を一定値と設定した場合(図-11)に比べて適合度は大きく改善されている。一方、小さい降雨強度の場合は、相対誤差は単一流域モデルと同程度の値でかなり大きい。しかし、ピーク流出量の差の絶対値はそれほど大きくないので、比較的大きな洪水を対象とする流出予測において、実用上は許容できるものと思われる。

以上の結果から、図-12に示した分割流域モデルにおいては、大きい降雨強度に対して得られる N_i の適値を全ての降雨事象に適用してもかなり良好なハイドログラフが再現できることがわかった。

6. 結 論

本研究で得られた結果を以下に示す。

1) SWMMに含まれる主要モデル・パラメータ：不浸透面積率、不浸透域の等価粗度係数、不浸透域の凹地貯留量

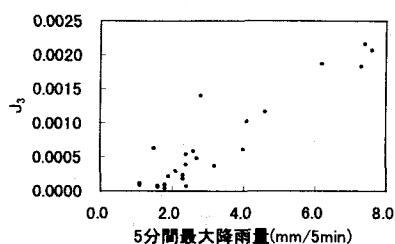


図-14 $N_i=0.02m^{1/3}\cdot s$ のときのハイドログラフの適合性

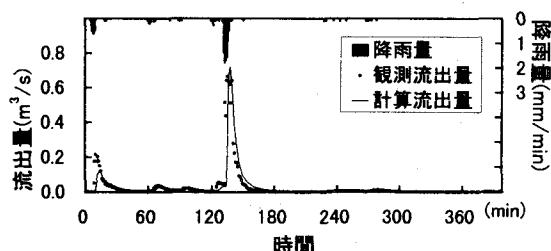


図-15 降雨強度が強い場合の適用結果
($N_i=0.02m^{1/3}\cdot s$, $J_3=0.0022$)

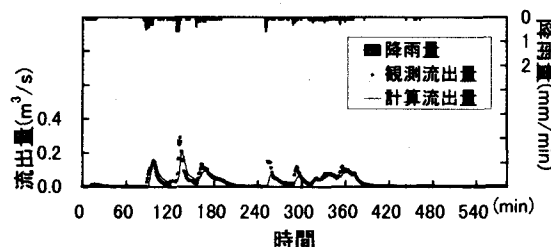


図-16 降雨強度が弱い場合の適用結果
($N_i=0.02m^{1/3}\cdot s$, $J_3=0.0005$)

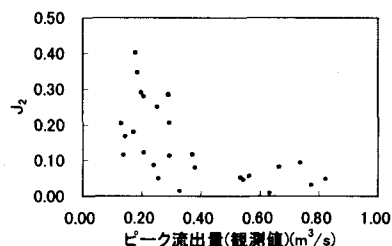


図-17 $N_i=0.02m^{1/3}\cdot s$ のときの観測値と計算値の
ピーク流出量の相対誤差

について、適値の実用的推定法を示した。

2) 不浸透面積率

- ・土地利用図上で浸透域と分類される区域でも、降雨条件等によって浸透量が殆どゼロとなる部分が存在するので、この部分を不浸透面積に含めることにした。したがって、不浸透面積率も値が一定ではないパラメータとして取り扱った。
- ・二山の降雨の場合に、降雨を分割して得られる不浸透面積率の適値は、降雨前半部では土地利用図から求められる不浸透面積率 F_0 付近に分布する。一方、降雨後半部では、 F_0 より大きな値をとる。これは、前半降雨による浸透域の湿潤化によるものと考えられる。
- ・二山の降雨を分割せず一体として扱う場合には、適値は広い範囲に分布する。これは、降雨の前半と後半で

適値の分布の範囲が異なるからである。

3) 不浸透域の等価粗度係数

- ・単一流域モデルでは、不浸透域の等価粗度係数の適値はかなり広い範囲でバラつく。したがって、特定の降雨に対する適値を他の降雨に用いればハイドログラフの適合度は悪くなる。
- ・分割流域モデルでは、単一流域モデルで得られる適値よりも大きな値をとる。
- ・分割流域モデルでは、大きい降雨強度に対する適値を他の降雨に用いても、かなり良好なハイドログラフが得られる。このことから、流域分割を適切に行うことによって、代表的な不浸透域の等価粗度係数を採用することが実用上可能であることが考えられる。

4) 不浸透域の凹地貯留量

- ・単一流域モデルでは、種々の降雨に対してほぼ同程度の適値をとる。

本研究では、本文中のように規定した不浸透面積が、降雨条件によって一つの傾向をもって変化するという結果を得た。しかし、降雨条件と不浸透面積率の定量的な関係については検討の余地を残している。また、分割流域モデルのパラメータの設定において簡略な方法を用いた。今後、不浸透面積率および等価粗度係数の値の設定に際し、各サブキャッチメントごとに土地利用状況や地被状態を考慮に入れる必要がある。

謝辞：本研究の現地観測において、神戸市建設局下水道部の御協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Huber, W. C. and Dickinson, R. E. : Storm Water Management Model, Version 4, Part A ; User's Manual, U. S. EPA/600/3-88/001a, 1988.
- 2) 豊國永次, 渡辺政広, 浜田寛正 : 管渠流出モデルの簡易化について(Ⅱ), 愛媛大学工学部紀要, 第11巻第2号, pp. 195-207, 1987.
- 3) 渡辺政広, 時尾嘉弘, 藤田和博 : SWMM-Runoff・Transportモデルによる汚濁負荷流出シミュレーション, 愛媛大学工学部紀要, 第14巻, pp. 317-328, 1995.
- 4) 神田徹, 神吉和夫, 西山武志 : 下水道台帳データベースを利用した都市下水道の雨水流出解析システム, 水工学論文集, 第39巻, pp. 67-72, 1995.
- 5) Kobkaew Manomaipiboon, 神田徹, 神吉和夫 : 雨水・汚濁負荷流出解析におけるSWMM法のパラメータについて, 神戸大学大学院自然科学研究科紀要, 15-B, pp. 51-58, 1997.

(2000. 10. 2受付)