

# GIS を用いた流出解析による雨水貯留浸透施設の設置効果の評価

山崎 亮  
法政大学大学院工学研究科

岡 泰道  
法政大学工学部都市環境デザイン工学科

小寺 浩二  
法政大学文学部地理学科  
法政大学 IT センター

本研究では、地理情報システム (GIS) を用いて、流域の地理情報を分布型流出モデルに組み込み、これを用いて、都市化の著しい鶴見川流域を対象として雨水貯留浸透施設の設置効果を検討した。その結果、雨水貯留浸透施設の設置効果を流出モデルで評価することにより、鶴見川流域における、その流出抑制効果を定量的に評価することができた。さらに、山腹斜面系 kinematic wave モデルの集中化手法に着目して、中間流を考慮したモデルを構築し、その妥当性を検討するため、流域特性の異なる 2 つの小流域に対して、モデルを適用した。その結果、中間流成分を組み込むことで、ハイドログラフの低減部における再現性が改善され、その妥当性が確認された。

## 1. はじめに

流域の都市化による市街地の拡大は、不浸透域の増加、下水道の整備など排水系統の強化によって、降雨後短時間に洪水が発生し、河川に流入する洪水流量が増大してきた。

本研究では、流出解析に必要な分布型の地理情報の管理に有用な手段である GIS を用いて、流域の地理情報を分布型流出モデルに組み込む。さらに、これを用いて、都市化の著しい鶴見川流域を対象とし、都市河川流域での流出抑制対策の一つとして導入が進められている雨水貯留浸透施設の設置効果を検討する。

さらに、山腹斜面系 kinematic wave モデルの集中化手法 [1] に着目して、中間流を考慮したモデルを構築し、その妥当性について検討するため、異なる特性を持つ 2 つの小流域に対して、モデルを適用し、検証をおこなった。

## 2. GIS の活用

### 2.1. GIS の活用と利点

水文流出解析では、土地利用、地形などの、空間的に分布した膨大な地理情報を扱う必要がある。本研究において適用されるモデルは分布型の流出モデルであり、計算に必要とされる土地利用、土壌分布、地形構造などの情報はそれぞれ地理的に分布している。このような地理的に分布した情報はそのまま地理情報を持つデータ (GIS データ) として統一した形式で蓄積されるため、複数の空間的に分布したデータを用いるような分布型モデルにおいては、GIS を用いた方が作業性は格段に向上する。また、土地利用などのデータが更新された場合にも、GIS を用いることにより、容易に対応することができる。

本研究で対象とする雨水貯留浸透施設は分散型の洪水対策であり、流域に散在しているため、その位置情報は重要なものとなる。以上のことから GIS を用いる利点が大いにありと考える。

### 2.2. 細密数値情報の利用

土地利用情報は国土院発行の「細密数値情報 (10m メッシュ土地利用) 首都圏 1994」を用いた。以下にその概要について述べる。

細密数値情報は 1994 ~ 1996 年に行われた第 4 回宅地利用動向調査および 1994 年に撮影された空中写真を基に作成されたものである。データは 15 種類の土地利用に分類されコード化したものであり、平面直角座標系で 3km x 4km が 1 つのファイルに収められている [2]。細密数値情報を利用するにあたり、ベクタ型データ (ここでは部分流域) の対応づけが問題となる。そこで、プログラムを用いて対象となる部分流域をグリッドデータに変換し、流域内の土地利用別の面積を算出した。

## 3. 分布型流出モデルの構造

本研究で用いた分布型流出モデル (図 1) は、有効降雨分離、斜面流、河道流等のサブモデルからなり、土地利用区分ごとに流出計算を行う形となっている [3]。以下に、モデル構造の概要を述べる。

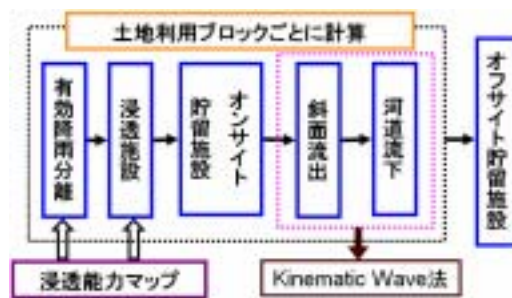


図 1. 分布型流出モデルの概要

### 3.1. 有効降雨分離モデル

有効降雨は土地利用区分ごとに流出係数を与えて推定した。現時点では土地利用区分ごとに損失率を決める方法を採用していないため、便宜的に表1の値[4]を与えることとした。

表1. 各土地利用の不浸透域率・流出率

No	属性	不浸透域率	流出率
1	山林・荒地等	0	0.2
2	水田	0	0.4
3	畑	0	0.1
4	造成中地	0.52	0.3
5	空地	0	0.3
6	工業用地	0.35	0.8
7	一般低層住宅	0.52	0.4
8	密集低層住宅	0.64	0.7
9	中高層住宅	0.35	0.4
10	商業・業務地	0.64	0.8
11	道路用地	1	0.9
12	公園・緑地等	0	0.1
13	公共施設用地	0.52	0.7
14	河川・湖沼等	0	1.0
15	その他	0	0.5

### 3.2. 斜面流および河道流モデル

斜面流モデルおよび河道流モデルは、kinematic wave法に基づき、Crank-Nicolson型4点差分法により離散化した。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r, \quad q = \alpha h^m$$

ここに、 $x$ : 距離,  $t$ : 時間,  $h$ : 雨水流の水深,  $q$ : 単位幅あたりの流量,  $r$ : 横流入量。等流を仮定すると、斜面流および河道流は  $\alpha = \sqrt{I}/N$ , ( $I$ : 斜面または河道勾配,  $N$ : 等価粗度),  $m = 5/3$  である。

### 3.3. 浸透施設モデル

#### 3.3.1. 計算式

浸透施設モデルは以下の連続式に基づく。

$$\frac{dS}{dt} = I - O$$

ここに、 $S$ : 施設の貯留量,  $I$ : 浸透施設の集水面積に降った降雨量または前の施設からのオーバーフロー,  $O$ : 施設からの流出量である。

#### 3.3.2. 浸透能力マップ

浸透施設の設置場所として土地利用、地形区分をGISにより整理し、浸透能力マップを作成した(図2)。1つの地形区分面は、ほぼ同等の土質で構成され、浸透能力も同程度であると仮定する。細密数値情報(10mメッシュ土地利用)から宅地、公共公益用地を抽出し、さらに地形区分として、下末吉面、多摩低位面、立川武蔵野面を

判読し、両者を重ね合わせて浸透施設の設置に適する場所とした。

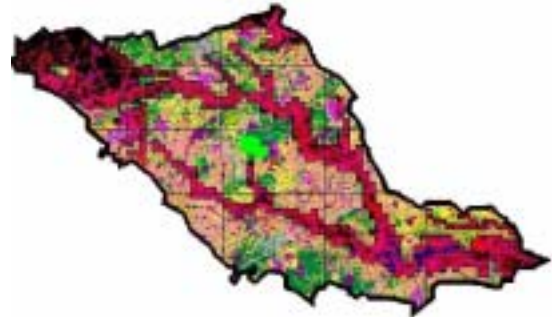


図2. 浸透能力マップ

#### 3.3.3. 現地浸透試験

浸透施設を導入する際に、地形や現地地盤の浸透能力を考慮する必要がある。そこで、現地浸透試験結果から、流域内の表層地盤の飽和透水係数を推定した。ここで、浸透施設の設置場所を転圧地盤と想定し、山林、農地、その他(住宅地、学校、公園など)の土地利用に分類し、各土地利用ごとの  $K_0$  の空間的な分布は対数正規分布に従うと仮定した。土地利用ごとに整理した飽和透水係数を表2に示す。

表2. 土地利用別の飽和透水係数

土地利用	標本数	$\log K_0$ 平均値	標準偏差	$K_0$ (mm/hr)
山林	7	2.00	0.52	101
農地	6	1.83	0.51	68
その他	26	1.81	0.56	64

#### 3.4. オンサイト・オフサイト貯留モデル

オンサイトおよびオフサイト貯留施設は同じ型の式に基づき、以下のような、タンクモデル形式で計算される。

$$S_n = S_{n-1} + I_n - O_{n-1}$$

$$O_n = k\sqrt{S_n}$$

ここに、 $S$ : 時刻  $t$  における施設の貯留量,  $I$ : 時刻  $t$  における施設への流入量,  $O$ : 時刻  $t$  における施設からの放流量,  $n$ : 時間を表す添字である。

### 4. 表面流・中間流統合型流出モデルの構築

今回、構築したモデルは市川らによって示された山腹斜面系流出モデルの集中化手法に基づいている[1]。対象

とする流域を、矩形の小斜面の集合体としてモデル化し、それより得られる地形量を利用して、流量ならびに通水断面積の空間分布を定常状態の降雨 - 流出系として近似する。最後に、通水断面積を空間的に積分することによって、対象とする流域内の貯留量を求め、貯留量と流出量の集中化された関係を得る。この関係を基本として、流出計算をおこなう。本稿では、土地利用の空間的な分布が流出に寄与することを考慮し、貯留量と流出量の関係を土地利用ごとに導出した。また、貯留量と流出量の関係から近似曲線を作り、この関係と近似曲線に一定の差が生じる点を中間流と表面流の境界とし、その境界までの部分のみを用いることにより、中間流成分の定量化をおこなった。また、モデルを適用する上で、いくつかの部分流域に分割する必要があるため、面積がほぼ等しくなるような部分流域に分割して、それぞれにモデルパラメータを割り当てた[7]。

表面流・中間流統合型 kinematic wave モデルの連続式および流量流積関係式を次に示す。なお、A層とは、中間流出に寄与する表層土壌のことをさしている。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r$$

$$q(h) = \begin{cases} ah & (0 < h < d) \\ \alpha(h-d)^m + ad & (h \geq d) \end{cases}$$

ここに、h:水深、q:単位幅流量、t:時間、x:上流端からの距離、r:降雨強度、 $\alpha = \sqrt{\sin \theta} / n$  :斜面勾配、n: Manning の粗度係数、m:流量流積パラメータ、 $\theta$ :いわゆる A 層の空隙率、d(= D):A 層の相当空隙厚、D:A 層厚である。

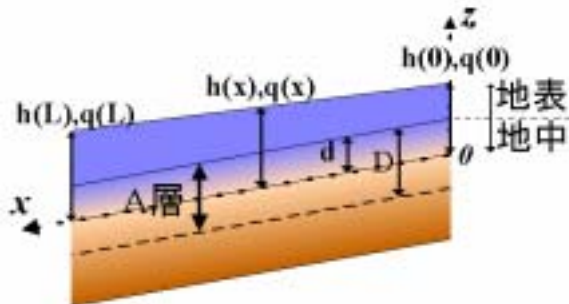


図3. 表面流・中間流統合型モデルの概念

## 5. 対象流域の概要

### 5.1. 鶴見川流域

鶴見川流域は、東京都町田市の北西部、多摩丘陵内の町田市と八王子市の境界を水源とし、途中、恩田川、鳥山川、早淵川、矢上川等を合流して、横浜市鶴見区で東京湾に注ぐ、流域面積 235km<sup>2</sup>、幹線流路延長 42.5km の一級河川である(図4)。解析対象地域は、落合橋より上流

の流域とした。

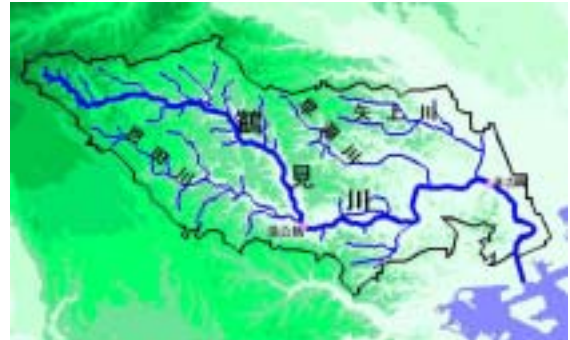


図4. 鶴見川流域

### 5.2. 海老川流域

海老川(流域面積:27km<sup>2</sup>)は船橋市と鎌ヶ谷市にまたがり、海老川本川と前原川などの7つの支川からなる(図5)。流域の市街化率は1993年時点では約60%であったが、将来的には山林や農地が市街地に転換され、都市化が一層進行すると予想されている[5]。なお、本解析では上流部約9km<sup>2</sup>を対象とした。



図5. 海老川流域

### 5.3. 浅川流域

浅川は東京都西部の八王子市の陣馬山と高尾山に水源をもち、扇状地上に開けた八王子市の中心部を流れ、日野市東部で多摩川に合流する一級河川である(図6)。また、台地、丘陵地を含み、比較的起伏が多く、流域の半分は山地が占めている。特に上流部は約83%が山林や農地となっており、一雨の流出率が0.1程度となっている。ここでは都市河川である海老川の解析結果と比較するため、浅川橋より上流部を対象とした。

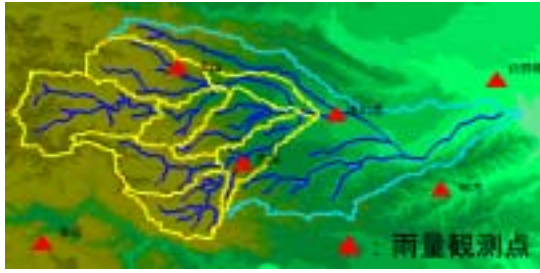


図 6. 浅川流域

## 6. 流出解析

### 6.1. 雨水貯留浸透施設の流出抑制効果

鶴見川流域における、雨水貯留浸透施設の流出抑制効果について、施設を設置した場合と、設置しない場合について、モデルにより検証した 3 つのケースを以下に示す(図 7~9, ならびに表 3~5)。

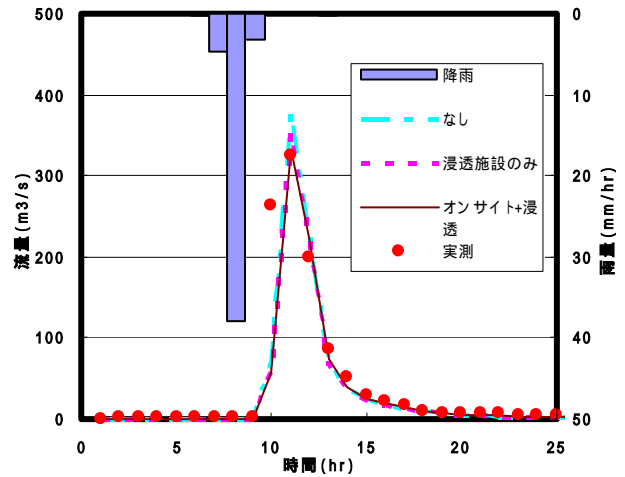


図 8. モデルによる試算結果  
(鶴見川流域 94.7.12)

表 4. 流出量と流出抑制効果  
(鶴見川流域 94.7.12)

	総流出量 (m <sup>3</sup> )	総流出低減率 (%)	ピーク流量 (m <sup>3</sup> /s)	ピーク低減率 (%)
実測値	1067.5		325.1	
施設なし	881.9		380.4	
浸透施設	837.1	5.1%	355.7	6.5%
貯留施設	875.1	0.8%	358.2	5.8%
貯留+浸透施設	827.2	6.2%	334.4	12.3%

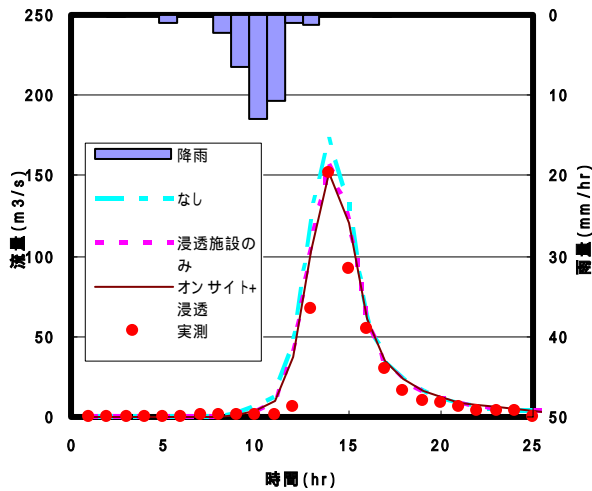


図 7. モデルによる試算結果  
(鶴見川流域 94.5.15)

表 3. 流出量と流出抑制効果  
(鶴見川流域 94.5.15)

	総流出量 (m <sup>3</sup> )	総流出低減率 (%)	ピーク流量 (m <sup>3</sup> /s)	ピーク低減率 (%)
実測値	461.7		152.3	
施設なし	680.4		174.3	
浸透施設	617.8	9.2%	158.5	9.0%
貯留施設	672.0	1.2%	167.1	4.1%
貯留+浸透施設	610.0	10.3%	151.8	12.9%

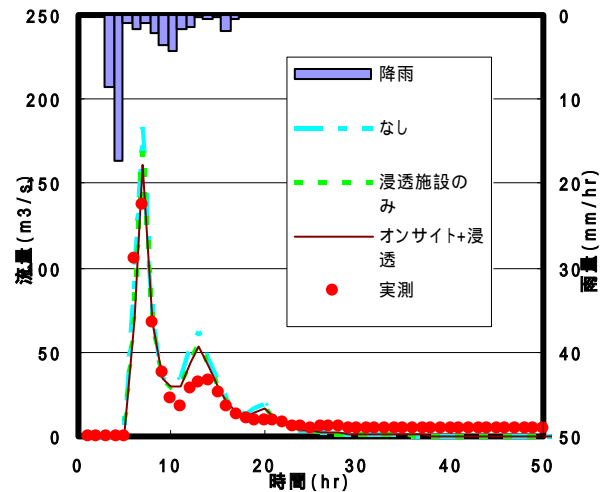


図 9. モデルによる試算結果  
(鶴見川流域 94.7.18)

表5. 流出量と流出抑制効果  
(鶴見川流域 94.7.18)

	総流出量(m <sup>3</sup> )	総流出低減率(%)	ピーク流量(m <sup>3</sup> /s)	ピーク低減率(%)
実測値	726.6		137.0	
施設なし	775.0		183.1	
浸透施設	696.5	10.1%	169.0	7.7%
貯留施設	773.0	0.3%	175.0	4.4%
貯留+浸透施設	694.6	10.4%	161.5	11.8%

### 6.2. 雨水貯留浸透施設の流出抑制効果についての考察

3.3で述べたように、地盤の透水係数の空間的分布が対数正規分布に従うと仮定し、現地試験データを用いて鶴見川流域の転圧地盤の飽和透水係数の代表値を推定した。さらに、それらに基づいて、浸透施設の設計浸透強度を決定した。浸透施設は、浸透能力マップから判読した設置適地の面積の10%に、昭島つつじヶ丘ハイツ地区の設置状況を参考に配置した。一方、オンサイト貯留施設については、実際の配置データをそのまま用いた[6]。

解析結果(図7~9)から、それぞれ表3~5のような流出抑制効果が確認できた。今回の解析で考慮したオンサイト貯留施設の総貯留量は約154万m<sup>3</sup>に達していたにも拘らず、あまり目立った流出抑制効果が確認されなかった。この理由としては、実際のオンサイト貯留施設が施設面積の降雨だけでなく、施設面積外からの降雨を、下水管などを通じて流入させている可能性が挙げられる。

本研究では、浸透施設の設置効果は、浸透施設の設置地盤の影響を強く受けることから、ここでは現地試験結果を用いて、浸透施設の設計浸透強度を算定している。流域スケールを考慮すると、浸透試験のデータ数は少ないと考えられるが、浸透施設の流出抑制効果を、より定量的に評価することができたといえる。

また、実測値と解析値から、両者は符合する結果となり、本モデルの妥当性が確認できた。

### 6.3. 表面流・中間流統合型流出モデルの検証

次に、表面流・中間流統合型流出モデルの妥当性を確認するために、仮想流域、および前節までの昭島とは流域特性の異なる小流域を対象とした計算を試みた。

#### 6.3.1 中間流に影響を与えるパラメータの検討

本モデルでは地中の流れも想定して、中間流成分が計算に組み込まれている。そこで、地中の流れを支配するパラメータである透水係数、A層厚、有効空隙率がそれぞれ流出に及ぼす影響について検討をおこなった(図10~12)。想定した流域は、3つの支流があり、最下流で合流するというものである。その3つの支流をさらに面積が同じになるように3等分し、9つの部分流域となるようにした。1つの部分流域の形状は50×50[m]×9(22500m<sup>2</sup>)の矩形の斜面と仮定し、1(mm/hr)の雨を連続して40時間与えることとした。

各モデルパラメータの変化によって、妥当な解析結果

が得られることが確認された。特に、これらのパラメータは表面流と中間流の割合に大きく影響を及ぼすため、これらのパラメータを設定する際には、流域特性などを考慮に入れて割り当てる必要がある。

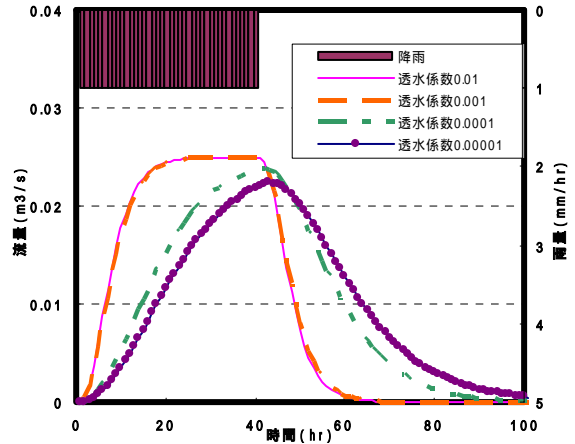


図10. 透水係数が流出に与える影響

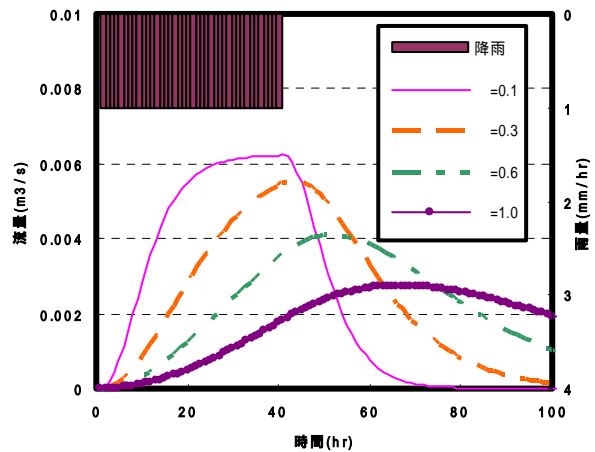


図11. 有効空隙率が流出に与える影響

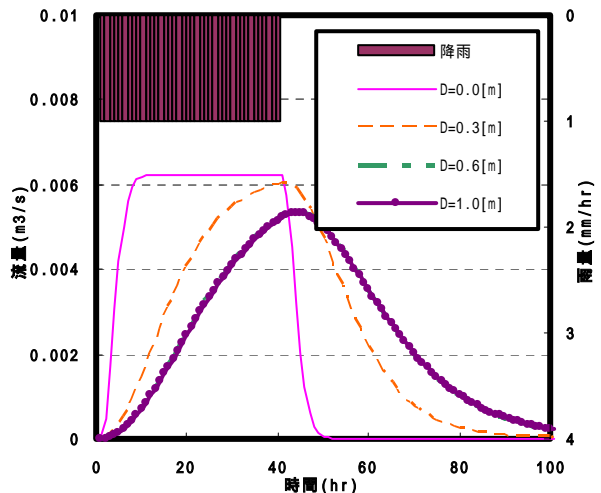


図12. A層厚が流出に与える影響

### 6.3.2 実流域への適用

次に、構築したモデルの実流域への適用性を検証した。以下にその結果を示す(図 13~16)。また、図中の kinematic wave 法は 3.2 で示した方法によるものである。

実流域を対象とした解析結果においては、流域特性に応じたモデルパラメータを割り当てたことにより、いずれも実測流量がほぼ再現されている。モデルに中間流成分が考慮されているため、表面流のみを対象としてきた 3. のモデルに比べて、特に、ハイドログラフの低減部における再現性が改善された。

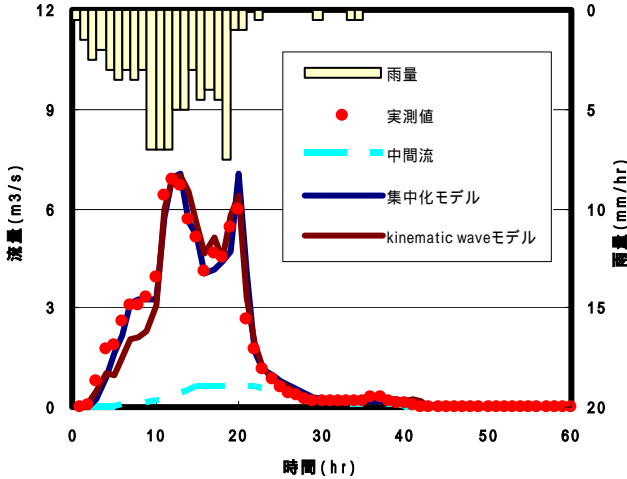


図 13. 計算値と実測値の比較 (海老川流域 94.5.15)

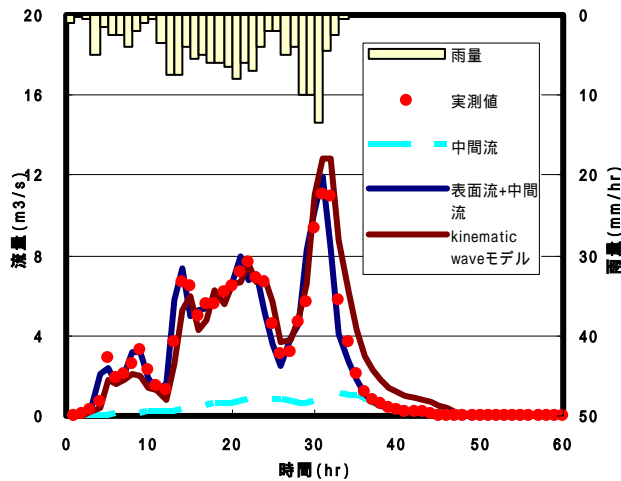


図 14. 計算値と実測値の比較 (海老川流域 94.9.16)

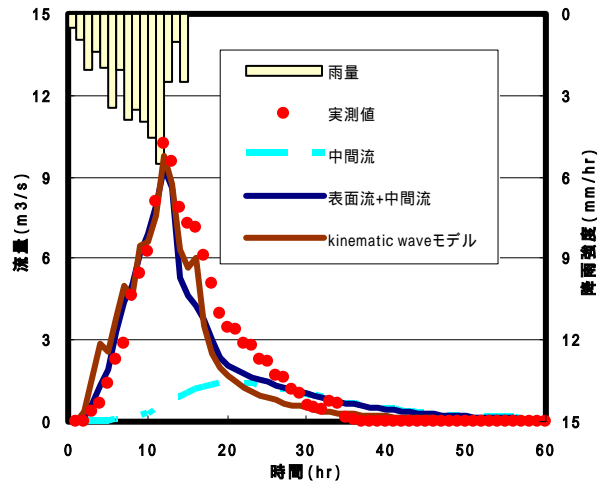


図 15. 計算値と実測値の比較 (浅川流域 95.2.21)

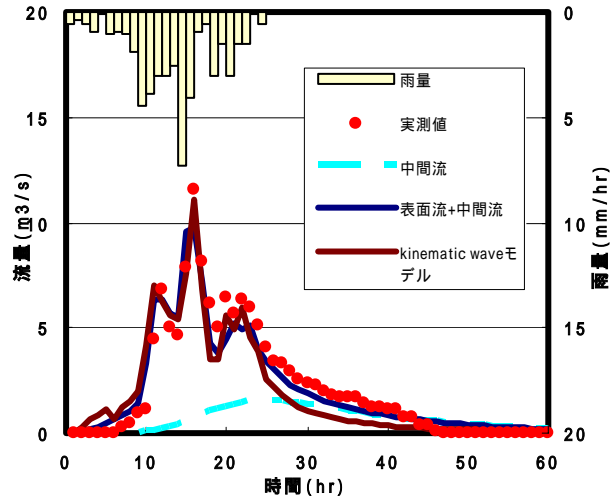


図 16. 計算値と実測値の比較 (浅川流域 95.10.21)

### 6.4. 表面流・中間流統合型流出モデルの妥当性について

以上、3.の kinematic wave モデルと 4.で改良した表面流・中間流統合型流出モデルによる解析結果についての検証をおこなった。

また、中間流成分だけを取り出すことによって海老川・浅川流域におけるこの成分の定量化を行うことができた(表 6.7)。この結果、市街地の比率が高い海老川流域においては中間流成分の占める割合は約 12.5%であったのに対して、浅川流域では、中間流の占める割合は 30%以上と高い値になることが確認できた。これは、中間流出に大きな影響を及ぼすと推定される山林・農地の占める割合が浅川流域で大きいためと推察される。

また、初期の降雨が大きい場合に実測値は小さい値を示しているのにも拘らず、計算結果が過大になる場合があった。これは、初期の損失が考慮されていないことや、Manning の粗度係数に、市川ら[1]が用いている値よりも小さい値を採用したことも原因として挙げられるが、今

後詳細に検討していく必要がある。

[7]山崎亮, 三堀恵, 岡泰道(2004): 中間流を考慮した海老川・浅川流域における短期流出解析, 土木学会第 31 回関東支部技術研究発表会後援概要集 (CD-ROM)

表 6. 流出成分の内訳 (海老川流域)

	94.5.15	94.9.16
総降雨量 (mm)	81.0	151.0
実測流量 (m <sup>3</sup> /s)	86.1	161.0
計算流量 (m <sup>3</sup> /s)	86.0	160.2
中間流 (m <sup>3</sup> /s)	10.8	20.1
中間流の占める割合 (%)	12.6	12.5

表 7. 流出成分の内訳 (浅川流域)

	95.2.21	94.10.21
総降雨量 (mm)	40.0	48.3
実測流量 (m <sup>3</sup> /s)	114.8	130.6
計算流量 (m <sup>3</sup> /s)	107.2	126.1
中間流 (m <sup>3</sup> /s)	35.6	40.0
中間流の占める割合 (%)	33.2	31.5

また、貯留 - 流出関係において表面流と中間流の境界については不明瞭な部分もあり、中間流成分の抽出方法については今後改良を要すると判断される。さらに、ハイドログラフの低減部の再現性に問題が残されている。これは、中間流部分の流出量が過小に見積もられている可能性があるためと推察される。このような点についても、様々な規模の洪水データや他流域に対する解析等も加えて今後検討を加える必要がある。

#### 参考文献

- [1] 市川温, 小椋俊博, 立川康人, 椎葉充晴, 宝馨(2000): 数値地形情報を用いた山腹斜面系流出モデルの集中化手法に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 43 号 B-2, pp.201-215.
- [2] 建設省国土地理院監修 (1992): 数値地図ユーザーズガイド, 財団法人日本地図センター, 471p.
- [3] 三堀恵, 岡泰道(2003): GIS を活用した分布型流出モデルの自然流域への適用性について, 土木学会 第 58 回年次学術講演会講演概要集, -024, pp.47-48.
- [4] 市川新, C. マキシモビッチ (1988): 都市域の雨水流出とその抑制, 鹿島出版会, pp. 217-271.
- [5] 建設省土木研究所 (2000): 土木研究所資料 都市河川流域における水・熱循環の統合解析モデルの開発, pp. 46-69.
- [6] 三堀恵, 宮岡拓, 松浦祐樹, 岡泰道 (2001): 分布型流出モデルを用いた雨水貯留浸透施設設置効果の定量化 (2), 土木学会第 29 回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.260-261.

キーワード.

流出解析, 分布型流出モデル, 地理情報システム, 雨水貯留浸透施設, 中間流, 集中化手法

-----

Summary.

**Estimation of the Effects of Storage and Infiltration Facility Systems  
by Runoff Analysis Based on GIS**

Ryo YAMAZAKI

Civil Engineering Major, Division of Engineering, Graduate School, Hosei University

Yasumiti OKA

Department of Engineering, Faculty of Engineering, Hosei University

And

Koji KODERA

Department of Geography, Faculty of Letters, Hosei University

This study aims to clarify the quantitative effects of storage and infiltration facility systems in urbanized basins, by using a distributed runoff model based on the kinematic wave method. The effects of the storage and infiltration facility systems on flood mitigation were estimated quantitatively. In addition, the authors examined not only the validity of a method to lump a general kinematic wave equation of the slope runoff system by sensitive analysis, but also its applicability to small urbanized basins which have different characteristics. In conclusion, the improved runoff model which incorporates the interflow component in a synthesized manner shows a successful performance.

Keywords.

Runoff Analysis, Distributed Runoff Model, Geographical Information System (GIS), Storage and Infiltration Facility Systems, Interflow