

# 水循環解析モデルに基づく野川流域における水収支および流出特性に関する検討

山崎 亮 田鎖 秀明  
法政大学大学院工学研究科建設工学専攻(都市系)

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

本研究では、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、野川流域に対してモデルを適用した。また、地中水分の動態を定量的に把握するために、土壌水分・地下水を考慮した物理的なモデルも導入した。その結果、野川流域において適用性の高い集中化モデルパラメータが得られ、さらに、両者を用いることにより、流出特性ならびに水収支を明らかにした。

## 1. はじめに

分布型流出モデルは河川流域における降雨流出過程を定量的に評価する有用な手段となりうる。筆者らが構築した集中化モデルは都市化流域において比較的高い適用性を示すことがすでに検証されている[1]。しかし、その際用いたモデルパラメータは妥当性にやや問題のある値を採用していたこともあり、検証がまだ不十分となっている。そこで、本稿では集中化モデルにおけるパラメータの有効範囲、流域内の地質や土地利用等の条件に適合する値を推定し、その妥当性について検討した。

また、集中化モデルには含まれていない地中水分の動態を定量的に把握するためには、土壌水分・地下水を考慮した物理的なモデル[2]を導入する必要がある。

本研究では、この両者のモデルを使用し、対象流域における流出特性ならびに水収支を明らかにすることを目的としている。

## 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する流出モデルは分布型であり、計算に必要な土地利用、土壌分布、地形構造などの情報はそれぞれ空間的に分布している。このような分布情報を扱う場合の作業性は GIS の利用により格段に向上する。また、土地利用などのデータが更新された場合にも、GIS により、容易に対応することができる。

### 2.2. 細密数値情報の利用

土地利用情報は国土地理院発行の「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されたものであり、平面直角座標系で 3km × 4km が 1 つのファイルに収められている[3]。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. 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[4]。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。なお、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は土地利用ごとに導出する。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た。

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。

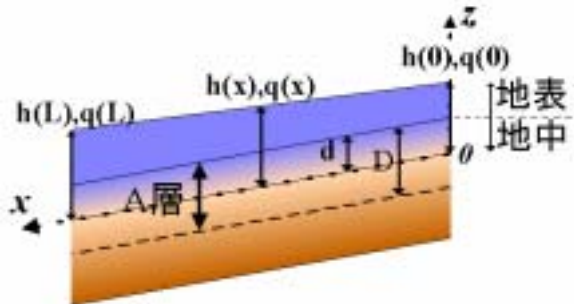


図1 表面流・中間流統合型モデルの概念

#### 4. 飽和・不飽和浸透流解析モデル

地中水分の動態を定量的に把握する目的で、土壌水分・地下水を考慮した物理的なモデルを導入する。本研究では飽和・不飽和浸透流解析プログラム( UNSAF )を用いた。以下に、本モデルの解析手法等について述べる。

##### 4.1 支配方程式

以下に支配方程式を示す。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( K_r \left( K_{xx}^s \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_{yy}^s \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_{zz}^s \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_r \left( K_{yx}^s \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_{yy}^s \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_{yz}^s \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_r \left( K_{zx}^s \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_{zy}^s \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_{zz}^s \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) \right) - q = (\beta S_s + c) \frac{\partial \psi}{\partial t} \end{aligned}$$

ここで、 $\beta=0$ なら不飽和領域、 $\beta=1$ なら飽和領域とする。また、 $c$ :比水分容量、 $S_s$ :比貯留係数。上式は不飽和領域においてそのまま適用でき、飽和領域においては、 $c=0$ となり、飽和浸透の支配方程式となる。

##### 4.2. 初期条件および境界条件

上式は非定常の非線形偏微分方程式であり種々の初期条件、境界条件によって無数の解が得られる。したがって、それぞれの問題に対応して条件を設定する必要がある。

###### 4.2.1 初期条件

非定常問題では、計算開始段階での水頭分布を設定する必要がある。

$$\psi(x, t = 0) = \Psi_0(x)$$

ここで、 $\psi_0$ : 既知圧力水頭である。

###### 4.2.2 境界条件

降雨条件は、降雨強度より算定した降雨境界面上での浸入流量を与える流量境界として考える。しかしながら、注入流量に応じて地表面水頭が上昇し、極端に大きな水圧が地表面にかかってしまうことがある。そのため、以下のような条件設定をおこなう。

$$\begin{aligned} r < Q_{in} & \quad \text{なら} \quad Q = I \\ r \geq Q_{in} & \quad \text{なら} \quad \psi_b = 0 \end{aligned}$$

#### 5. 野川流域の概要

野川は多摩川の東京都側に流れる左支川の一つである。源を国分寺市の恋ヶ窪の「姿見の池」に発し、武蔵野台地南端、国分寺市崖線下を東南に流下し、小金井市、三鷹市、調布市を貫流して狛江市に入り世田谷区との境界付近で人間川を合流させ世田谷区鎌田 3 丁目で仙川と合流した後、玉川 3 丁目で多摩川に合流する一級河川である。流路延長は約 18.3km、流域面積は約 69.6km<sup>2</sup>であり、本研究で対象とするのは水道橋地点より上流域の野川本川に沿った約 42.7km<sup>2</sup>とする。

野川流域を地形地質の面から見ると武蔵野台地の南部に位置し、表面には関東ローム層と呼ばれる赤土層が深さ 5~10m に分布している。ローム層を浸透した水は、その下の武蔵野礫層の中に滞水する。武蔵野礫層は井戸水源として古くから発達し、その下位は第三紀層となっている。図2に野川流域の概要を示す。



図2 野川流域

#### 6. 流出解析

##### 6.1 モデルパラメータの検証

野川流域は武蔵野台地で覆われており、地質としては武蔵野ローム層と立川ローム層が大部分を占めている。この地域一帯の土壌は水を通しやすく、浸透した雨水は礫層へ達する。

表1に流域地質条件を勘案して設定したモデルパラメータの有効範囲を示す。これは既往の研究[5]~[7]に基

づいたものである。土地利用区分は細密数値情報の大分類に従い、各区分に表1の範囲で土地利用形態に矛盾が無いようパラメータを割り当て、感度分析をおこなうことにより決定した。算出したパラメータ分布を表2に示す。また、この条件による計算結果を図3に示す。

表1 モデルパラメータの有効範囲

粗度係数	0.005 ~ 0.05
透水係数(m/s)	$10^{-5}$ (m/s)のオーダー
有効間隙率	0.05 ~ 0.15
A層厚(m)	0.05 ~ 0.15(m)

表2 モデルパラメータ

	山林農地等	造成地	市街地	公共公益用地
粗度係数	0.006	0.005	0.005	0.005
透水係数(m/s)	$5 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
有効間隙率	0.12	0.1	0.05	0.07
A層厚(m)	0.1	0.08	0.05	0.06

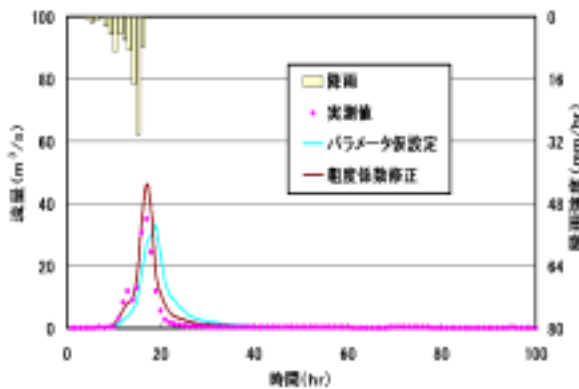


図3 試算結果 (2004/12/4)

図3は試算値を示しているが、表2の条件を適用しても良好な再現性は得られないことがわかる。この条件における計算流量は中間流成分の影響が強すぎるうえに、実測値と比較すると流出のピークにかなりの遅れが見られる。

そこで、粗度係数に着目する。粗度係数は貯留効果を表すパラメータであり、表面流においては特に遅れ時間に影響を及ぼす。他のパラメータは固定し、粗度係数を変化させたところ、多くの降雨パターンで0.001~0.003の範囲において流出波形の再現性が向上した(図3)。

この設定範囲が流域条件に適合している確証は現段階ではないが、実測値との整合性からいえば妥当なものと推察される。他のパラメータに関しては、表1は流域条件に適したものであり、種々の試算からも有効であることを確認した。

### 6.2. 流出率・浸透域率の検証

次に、流出率、浸透域率に着目し、再現性の改善を試みる。流出率、浸透域率は有効降雨分離時に用いる。上の計算では、市川ら[8]の値を参考にしてきた。しかし、この値を用いると良好な再現性が得られない。そこで、今回の解析対象域の土地利用形態に整合する形に修正を加えた。表3に変更前後の値を対比して示す。新たに設定したパラメータによる試算結果の一例を図4に示す。そ

の結果、これまで再現性に問題が見られた比較的強い降雨パターンにおいて全体的に再現結果が改善されている。粗度係数のみを修正する方法では、過大となる計算ピーク流量が十分に改善できなかったのに対し、流出率と浸透域率を修正することで、計算値を実測値とほぼ符合させることができた。以上のことから、比較的強い降雨に対して表3の修正値は良い適用性を示したといえる。また、土地利用別で見てもその利用形態に適した値となっている。

表3 計算に用いた流出率と浸透域率

		山林農地等	造成地	市街地	公共公益
文献参考	流出率	0.13	0.3	0.49	0.7
	浸透域率	1	0.9	0.47	0.36
修正	流出率	0.1	0.2	0.6	0.5
	浸透域率	0.9	0.65	0.3	0.5

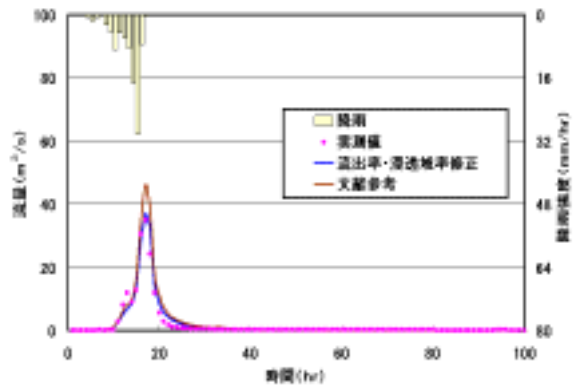


図4 試算結果 (2004/12/4)

### 6.3. 実用的推定法による検証

ここまでで得られた結果を考慮に入れてモデルパラメータの適性を推定するための実用的な方法[9]について考察を加えた。

まず、流出率、浸透域率を修正して総流出量で計算値と実測値を合わせる( $J_1$ )。計算値が大きい場合は流出率、浸透域率を小さくし、小さい場合は両パラメータを大きくする。次に、ピーク流量を比較し、粗度係数の増減により、計算値の適合性を向上させる。この一連の操作の後においても下記の判定基準( $J_1, J_2$ )を満足しない場合には、新たにパラメータの設定をやり直す。最終的には誤差が最も小さいケースを最適値とする。

$$J_1 = \frac{|Q_0 - Q_s|}{Q_0} \leq 0.05, \quad J_2 = \frac{|q_{p0} - q_{ps}|}{q_{p0}} \leq 0.05$$

ここに、 $Q_0$ : 実測総流量( $m^3$ ),  $Q_s$ : 計算総流量( $m^3$ ),  $q_{p0}$ : 実測ピーク流量( $m^3/s$ ),  $q_{ps}$ : 計算ピーク流量( $m^3/s$ )

このようにして各降雨に対して求めた流出率、浸透域率、ならびに粗度係数をそれぞれ平均したものを最終的な流域パラメータとして設定した(表4)。図5はこれらの値に基づく試算結果の一例を示す。このように総雨量、

最大降雨強度とともにそれほど大きくない降雨に対しては比較的良好な結果を得ることができている。

表 4 実用的推定法によるモデルパラメータ

	山林農地等	造成地	市街地	公共公益
粗度係数	0.002			
流出率	0.05	0.1	0.4	0.3
浸透域率	1	0.7	0.35	0.4

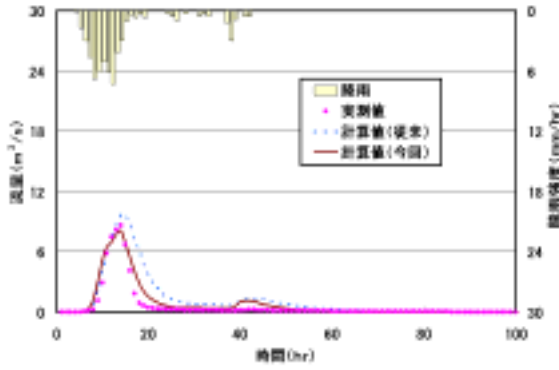


図 5 試算結果 (2004/11/18)

#### 6.4. 考察

本稿では分布型流出モデルのパラメータの決定方法について考察と試算を試み、比較的弱い降雨に対しては、良好な再現性を得た。また、実用的な推定法によって見積もった粗度係数の値は 0.002 となっており、これは 6.1 節の、粗度係数に関する感度分析結果 0.001~0.003 と符合する。以上により、野川流域の流出特性にかかわるパラメータの一部が推定できた。

しかし、降雨強度、総雨量ともに大きくなるとモデルの適合度に問題が生ずる結果となった。これは、降雨規模や降雨継続時間に大きく影響を受ける流出率を一定値として扱っていることも大きな要因のひとつ考えられる。また、中間流を支配する A 層厚の流域内分布についての検討が不十分である点も課題として残されている。

### 7. 飽和・不飽和浸透流解析

#### 7.1. 浸透流解析

前章で推定したパラメータより野川流域では流出率が小さいことがわかる。これは降雨の大部分が地中に浸透し、流域内の土層に貯留されることを示唆している。そこで 4 章で示した飽和・不飽和浸透流解析モデル (UNSAF) を用いて、流域内への浸透量を計算した。図 6 に要素分割の概略を、表 5 に土壌パラメータを、さらに、図 7 に試算結果の一例を示す。要素分割は GIS により得られた斜面勾配等を用いて 2 次元断面場を想定し、土壌パラメータは現地浸透試験から筆者ら [10] が関東ローム層を対象として推定したパラメータに基づいている。また、  
- 関係式、k - 関係式には Haverkamp 式と Irmay 式を用いた。

図からもわかるように浸透量の時間的変化の波形は降雨波形とよく対応している。さらに総量で見ると、

対象降雨全てのパターンにおいて総雨量の 95% 以上が浸透する結果となった。このため、野川流域内における直接流出では表面流より中間流のほうが卓越していると判断される。また、野川では一般的な都市化流域に比して流出率が低い傾向を示すことが予測されるが、これも降雨の大部分が浸透し、流出が生じにくいと推察される。

さらに、このときの不浸透分を表面流出量と仮定すると、その値は、ほとんどの降雨について、流出成分分離後の直接流出量の実測値や 6 章での計算流出量の 15% 以下であった。このように表面流の比率が小さいのは、後者(実測流出量など)に含まれる中間流出成分がかなり多いことに起因する。

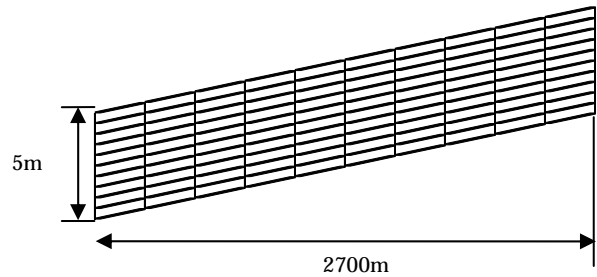


図 6 要素分割の概略

表 5 土壌パラメータ

土壌パラメータ				初期条件 (吸水圧分布)	飽和透水係数 (推定結果より)
0	r	定数	定数	-100cmH <sub>2</sub> O (一様分布)	$7.5 \times 10^{-6}$ (m/s)
0.75	0.45	4000	5		

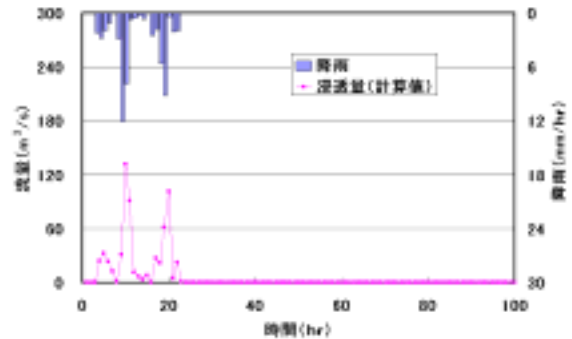


図 7 試算結果 (2004/10/12)

#### 7.2. 地中流解析

次に、7.1.より得られた結果および同じ条件より、関東ローム層を透過する地中流(中間流)の試算をおこない、流出成分分離後の直接流出量の実測値と比較した結果の一例を図 8 に示す。計算による中間流の波形は実測値よりもかなり遅れており、ピーク値も含め、実測値との整合性はあまり良くない。このことから、中間流の発生場として、地表面に近いごく表層とそれより下層を分けて考える必要があると判断される。

ここで、この計算値(中間流)と 6 章で求めた計算結果(表面流+中間流)を比べると中間流の占める割合は概

ね 90%前後となることを確認できた。これは、前節で得られた直接流出に対する表面流の割合が 15%以下であることと符合する。また、試算段階であるので断言はできないが、野川における洪水流出の約 9 割が中間流成分となる可能性があることが今回の解析で明らかとなった。

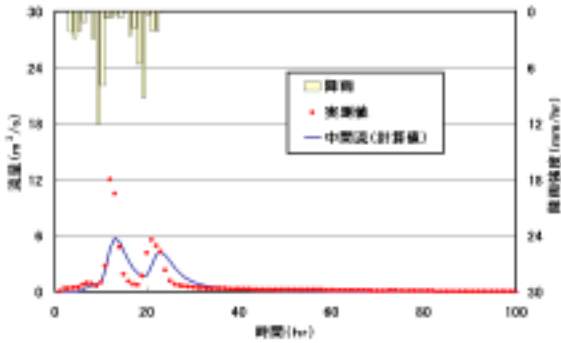


図 8 試算結果 (2004/10/12)

### 7.3. 考察

前節までの試算結果をまとめたものを表 6 に示す。表中の UNSAF による表面流出量としては「不浸透分」として得られた値をあてている。両者は多くの降雨パターンにおいて近い値をとることが確認されている。また、流出率はおよそ 0.1~0.15 の範囲内に収まり、直接流出に占める中間流の割合はほとんどの降雨において 90%前後であることなど、浸透場の卓越する野川流域に特徴的な流出特性をある程度明らかにすることができた。また、流出解析に UNSAF を導入した場合の有効性についても検討し、ある程度妥当な結果を得ることができた。

ただし、UNSAF において、初期水位、水頭変化等の考慮がなされていないといった計算上の問題点が残っている。また一方で、計算結果は一応得られているものの、地下水流出の動態についての検証がなされていない点など、流域レベル検討すべき余地が多く残されており、今後の課題としたい。

### 【謝辞】

東京都土木技術研究所より、野川流域の各種水文データを提供していただきました。ここに記して謝意を表します。

### 【参考文献】

- [1] 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講演概要集 (CD-ROM)
- [2] 西垣誠, 進士喜英 (2005): 有限要素法による飽和・不飽和浸透流解析 AC-UNSAF2D プログラム解説およびユーザーマニュアル, 岡山地下水研究会, 116p.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 建設省関東地方建設局京浜工事事務所多摩川誌編集委員会企画・編集 (1987): 多摩川誌, 河川環境管理財団
- [6] 柳瀬川流域水循環マスタープラン検討会事務局 (2001): 柳瀬川流域水循環マスタープラン 第 2 回検討会資料, p.27.
- [7] 安藤義久, 高橋裕, 田口隆男 (1984): 台地の小試験流域における地下水流動を含む地下水流出解析, 第 28 回水理講演会論文集, pp.515-520.
- [8] 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.
- [9] 神田徹, 神吉和夫, 渡辺政広, 前田康宏 (2001): 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, 水工学論文集, 第 45 巻, pp.79-84.
- [10] 岡泰道, 松井準 (2001): 簡易な現地浸透試験に基づく地盤の浸透能力の評価方法について, 水工学論文集, 第 45 巻, pp.325-330.

表 6 両モデルにおける試算結果

	総降雨量(mm)	流出モデル(m³/s)		UNSAF(m³/s)			流出率	直接流出における中間流出量の占める割合(%)
		表面流出量+中間流出量	表面流出量	表面流出量	中間流出量	表面流出量+中間流出量		
5月19日	195.8	268.2	8.8	249.4	258.2	0.12	93~97	
6月21日	56.0	74.2	5.0	65.3	70.3	0.11~0.12	88~93	
7月28日	71.6	98.0	6.2	90.4	96.6	0.12	92~94	
8月15日	53.5	73.2	4.7	67.3	72.0	0.12	92~94	
8月29日	80.4	110.1	7.1	101.7	108.7	0.12	92~94	
9月4日	88.2	120.8	7.6	111.4	119.1	0.12	92~94	
10月8日	524.8	1065.9	217.9	646.6	864.6	0.15~0.18	61~80	
10月12日	57.1	78.2	31.8	69.4	101.2	0.12~0.16	59~89	
10月19日	339.2	689.4	36.8	429.7	466.5	0.12~0.18	62~95	
10月26日	19.7	27.0	1.7	24.9	26.7	0.12	92~94	
10月30日	150.3	205.9	13.0	190.7	203.8	0.12	93~94	
11月10日	56.0	76.6	4.9	70.7	75.5	0.12	92~94	
11月14日	34.0	46.6	2.9	43.1	46.1	0.12	93~94	
11月18日	60.8	83.3	5.4	76.8	82.2	0.12	92~94	
12月4日	93.9	128.6	8.1	119.2	127.4	0.12	93~94	
1月15日	103.2	141.3	8.9	130.7	139.7	0.12	92~94	

キーワード.

分布型流出モデル, 地理情報システム, 中間流, 浸透流, 野川, 粗度係数, 流出率

-----

Summary.

**Study on the Water Balance and Runoff Characteristics in Nogawa Basin  
Using Analytical Hydrological Models**

Ryo YAMAZAKI

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

Hideaki TAKUSARI

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 paper discusses the applicability of a distributed runoff model considering interflow process with lumped storage-discharge functions, to an urbanized study area, Nogawa basin. In addition, a physically-based model considering soil moisture and groundwater is introduced to grasp the subsurface water movement phenomena. As a result, estimated model parameters are consistent with the basin geological database and land use conditions. Also, through water balance and runoff analyses using above two models, basin characteristics relevant to surface and subsurface flow during rainfall are quantitatively evaluated to some extent.

Keywords.

Runoff Analysis, Lumped Model, Geographical Information System (GIS), Interflow,, Nogawa Basin , Equivalent Roughness, Runoff Ratio , Impervious Area