

## 市街化率の変化が洪水流出特性に与える影響

中央大学理工学部 学生員 赤羽 祐也 中央大学大学院 学生員 呉 修一  
 昆明理工大学 非会員 Feng Yan 中央大学理工学部 フェロー会員 山田 正

**1. はじめに:** 近年, 都市域における集中豪雨により, 都市河川の氾濫が大きな問題になっている. 都市域は地表面がアスファルト舗装や家屋などの不浸透域が多く, 山地流域と比較して降雨の貯留および浸透能力が極めて小さく表面流出が生じる. そのため降雨に対する流出量の応答が早く, 山地や大規模河川とは異なる都市河川特有の流出特性を有している. このような都市化つまり市街化率の上昇により都市域の土地利用形態は急速に変化・複雑化している. 本研究では都市流域の特徴である市街化率に着目し, 市街化率の変化が洪水流出特性に与える影響を定量的に把握することを目的としている.

**2. 対象流域と降雨:** 図-1は本研究で対象流域とした鶴見川流域の概略図であり, 鶴見川は流域面積 235km<sup>2</sup>, 流路長 42.5km の都市河川である. 降雨は, 各Caseともピーク降雨強度 20mm/h, 降雨継続時間 10 時間の単峰性中央集中型の正弦関数の降雨を空間的に一様に与えている.

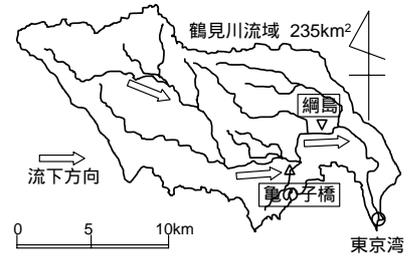


図-1 対象流域とした鶴見川流域 (11 河川・11 サブ流域)

**3. 降雨流出モデルの構造:** 本研究では市街化率の変化が洪水流出特性に与える影響を見ることを目的とし, 地表面流出計算を時間・面積法と非線形貯留法と集中定数系方程式の3通りの手法で計算して定量的に評価した. 河道部の流況再現計算には不定流の基本式であるサン・ブナンの式を用いた. 以下に降雨流出モデルの概要を示す.

**3.1 時間・面積法を用いた地表面流出計算:** 地表面流出計算では1つの河川が1つのサブ流域を持つように流域全体を複数の小流域に分割し, 各河道への流入する地表面流出量を算定する. 時間・面積法において, 降雨は流域内では一様に分布し, 表面流出は不浸透域として特定される地域からのみ流出, 流出速度は一定という仮定の下に降雨の初期損失量及び流出率, 分割された小流域の最遠部から河道での到達時間を与え有効降雨量を算定し, 時間・面積曲線によって流域内の地表面流出量を計算する. 時間・面積法では市街化率の変化を不浸透域面積率のみのパラメータを用いて表現している. 時間面積曲線は Type1: 矩形流域, Type2: 二等辺三角形流域, Type3: 逆二等辺三角形流域の3タイプとする. 本研究では, Type1 の時間面積曲線を用いて計算している.

**3.2 非線形貯留法を用いた地表面流出計算:** 非線形貯留法の地表面流出は開水路の流れとして計算し, 重力と摩擦力のみを考える. 流域の斜面長や勾配を決定し, 流出量は有効流域面積と実降雨からそれぞれの水文損失を差し引いた有効降雨量により支配される. 有効降雨量の算出式は(1)式である. ここで,  $R_{eff}(t)$ : 有効降雨量 [mm/s],  $R(t)$ : 降雨量 [mm/s],  $Q_E(t)$ : 蒸発損失量 [mm/s],  $Q_W(t)$ : 湿潤損失量 [mm],  $Q_I(t)$ : 浸透損失量 [mm/s],  $Q_S(t)$ : 地表面貯留量 [mm] である.  $Q_W$  とは地表面が浸透, 地表面流とともに生じない初期湿潤状態での損失量である. 各河道に流入する地表面流出量は基礎(2), (3)式により求める. ここで,  $Q(t)$ : 流出量 [m<sup>3</sup>/s],  $n$ : 地表面粗度 [m<sup>-1/3</sup>s],  $B$ : 集水域幅 [m],  $I$ : 地表面勾配,  $y$ : 水深 [m],  $A$ : 各小流域面積 [ha] である. 計算に必要な各種パラメータを表-1に示す. 非線形貯留法の土地利用形態は最大で5種類あり, 本研究では2種類の土地利用形態を用い, 表の数値はそれぞれ標準値である.

表-1 各土地利用形態における湿潤, 浸透, 貯留損失量と地表面粗度

	不浸透域	浸透域
	斜屋根	植生地, 非植生地
湿潤損失量 [mm]	0.05	0.05
地表面貯留量 [mm]		2.00
初期浸透損失量 [mm/s]		72
最終浸透損失量 [mm/s]		10.8
土壌特性パラメータ [1/s]		0.0015
地表面粗度 [m <sup>-1/3</sup> s]	0.0125	0.0833

$$R_{eff}(t) = R(t) - Q_E(t) - Q_W(t) - Q_I(t) - Q_S(t) \quad (1), \quad Q(t) = \frac{1}{n} \cdot B \cdot I^{\frac{1}{2}} \cdot y^{\frac{5}{3}} \quad (2), \quad R_{eff}(t) \cdot A - Q(t) = \frac{dy}{dt} \cdot A \quad (3)$$

**3.3 集中定数系方程式を用いた地表面流出計算:** 集中定数系方程式は斜面流下方向流れを対象とした降雨面流出計算手法である. 様々な流出形態に対応させるため一般化された断面平均流速を(4)式とし, 連続式は(5)式で表す. (4)式を(5)式へ代入し  $q$  について整理すると(6)式の Kinematic Wave 方程式が得られる. ここに,  $v$ : 断面平均流速 [mm/hr],  $h$ : 水深 [mm],  $q(t)$ : 単位幅流量 [mm<sup>2</sup>/hr],  $r(t)$ : 有効降雨量 [mm/hr],  $m$  は流域の流出特性を表すパラメータである. 直接流出は流出寄与域(河道及び河道近傍の湿潤領域)のみからの流出と考えると, (7)式の変数分離形の近似式が仮定できる. ここに,  $q_*$ : 流出高 [mm/hr] である. 斜面長  $L$  の末端で考え  $x=L$  とすると(6)式は(8)式の常微分方程式に変形できる.

$$v = ah^m, \quad q = vh = ah^{m+1} \quad (4), \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (5), \quad \frac{\partial q}{\partial t} + aq^{\frac{m}{m+1}} \frac{\partial q}{\partial x} = aq^{\frac{m}{m+1}} r(t) \quad (6), \quad q(x,t) \cong xq_*(t) \quad (7)$$

キーワード 都市流出, 市街化率, 流出解析, 流出特性

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部 TEL 03-3817-1805 FAX 03-3817-1803

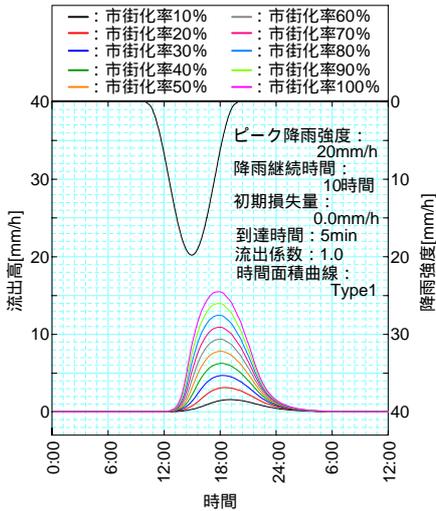


図-2 時間・面積法による流出高ハイドログラフ

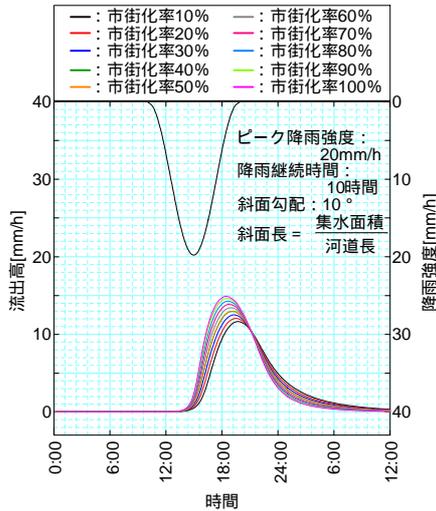


図-3 非線形貯留法による流出高ハイドログラフ

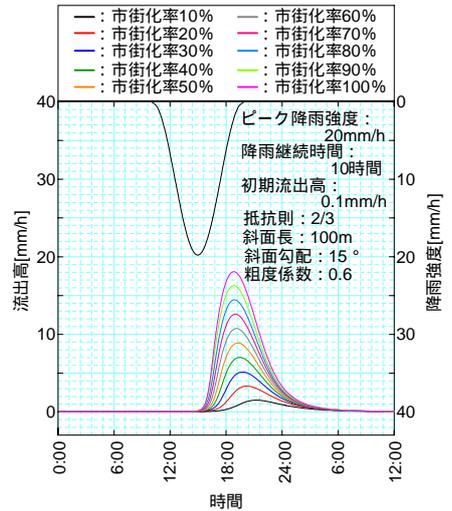


図-4 集中定数系方程式による流出高ハイドログラフ

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (r(t) - q_*) \quad (8),$$

$$a = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}}, \quad a_0 = aL^{\beta-1} = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}}L^{\frac{-1}{m+1}} \quad (9), \quad \beta = \frac{m}{m+1} \quad (10)$$

(8)式は一般化された単一斜面からの降雨流出を表す基礎式である．以後本論文において(8)式を集中定数系方程式と呼ぶ．

**4. 各地表流出手法を用いた計算結果の比較**：本研究では3通りの地表流出計算法を用いて降雨流出計算を行った．(1)時間・面積法を用いた降雨流出計算において，市街化率の変化は不浸透面積率の違いを流域一様に与えて表現し，他のパラメータである到達時間，初期損失，流出率は全流域一様に与えている．(2)非線形貯留法を用いた場合は市街化率の変化を浸透・不浸透面積率を変化させ土地利用形態の違いで表現し，各サブ流域の斜面長はサブ流域面積を河道長で割った値を用い，他のパラメータである斜面勾配，初期損失量，マンングの粗度係数は流域一様に与えている．(3)集中定数系方程式を用いた場合は，市街化率の変化は流出係数の変化を流域一様に与えて表現し，他のパラメータの初期流出高，斜面長，抵抗則，斜面勾配，マンングの粗度係数は流域一様に与えている．この計算で求めた亀の子橋(河口から13.8km)地点の各降雨流出計算結果の流出高ハイドログラフを図-2,3,4に示すとともに市街化率の変化によるピーク流出高と遅れ時間との関係を見るため，市街化率を変化させて計算した結果を図-5に示す．本研究でのピーク流出高は基底流量を引いた直接流出高とし，遅れ時間はピーク降雨時から最大洪水流量が発生するまでの時間と定義している．各降雨流出計算においても，市街化率が上昇するにしたがってピーク流出高は線形に上昇することがわかる．これは市街化率の変化を不浸透面積率で表したことによる地表流出寄与面積の線形性に起因するものと考えられる．市街化率が上昇するにしたがって遅れ時間が非線形に短縮され短くなっていくことがわかる．

**5. 市街化率の空間分布の違いによる計算結果の比較**：時間・面積法において，流域のもつ空間的な市街化つまり空間的な不浸透域の違いが洪水流出特性に及ぼす影響を見るため，(1)不浸透域を全サブ流域に一様に与えた場合(2)不浸透域を下流側のサブ流域から順に割り当てた場合の計算結果を図-6に示す．計算結果より市街化の空間分布に偏りがあると，市街化率が上昇するに伴ってピーク流出高は非線形的に上昇することがわかる．これは河川ごとのピーク流出量が合流による時間差から生じるものと考えられる．遅れ時間は市街化率が上昇してもほぼ一定であるとわかる．これは市街化率が低いときでも流出地点が懸案地点に近いことで早く洪水が到達することから遅れ時間は比較的短く，市街化率が上昇しても遅れ時間の差異は見られないのであろう．

**6. まとめ**：いずれの地表流出計算法においても，市街化率が上昇すると表面流出量が大きくなり，その速度も速くなるため，流出高ハイドログラフは鋭かつピーク値は非常に高くなることがわかった．また，市街化率の空間分布の偏りにより，洪水流出特性の非線形性が表れることがわかった．

**参考文献**：(1)香川有紀，宮本守，海野修司，山田正：都市域における降雨流出機構解明のための解析手法の比較，第30回関東支部技術研究発表会，II-29，2003.(2)山田正：山地流出の非線形性に関する研究，水工学論文集第47巻，pp.259-264,2003.

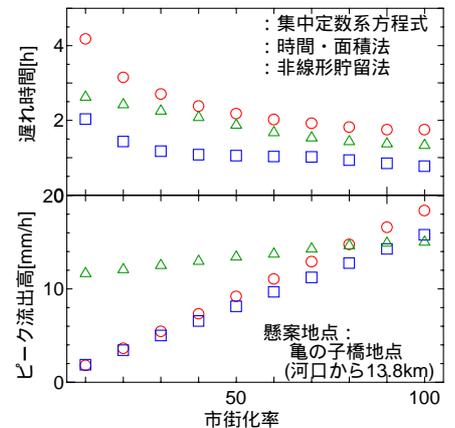


図-5 市街化率と遅れ時間(上)・ピーク流出高(下)の関係

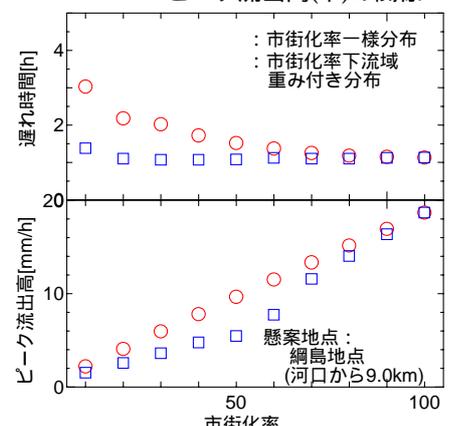


図-6 市街化率と遅れ時間(上)・ピーク流出高(下)の関係

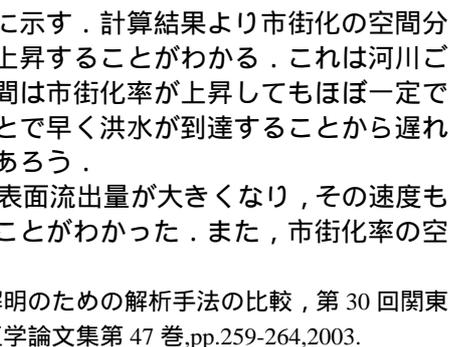


図-6 市街化率と遅れ時間(上)・ピーク流出高(下)の関係