

## 降雨流出における流域スケールに応じた河道の効果に関する研究

中央大学大学院 学生員 呉 修一      中央大学大学院 学生員 下坂 将史  
 中央大学大学院 フェロー会員 江花 亮      中央大学理工学部 フェロー会員 山田 正

1. はじめに：著者らは、降雨流出機構の解明および洪水予測手法の確立を目的とし、物理的観点に立脚した降雨流出計算手法の提案を行っている。本論文は、降雨流出における流域スケールに応じた河道の効果の定量的評価を目的とし、利根川流域を対象として流出計算および不定流計算を行うことにより、河道部における不定流計算の必要性に関して流域面積の観点から述べたものである。

2. 単一斜面における降雨流出の基礎式：著者ら<sup>1)</sup>は、土壌・地形特性と降雨強度の関係から表面流、鉛直浸透流、飽和・不飽和側方流に関する多層流れを表現可能な、単一斜面における降雨流出計算手法を提案している。以下にその理論の概要を記す。斜面流下方向流れに関して(1)式に示すよう断面平均流速を水深のべき乗形式で表現するとともに、流れを Kinematic Wave として取り扱いつつ集中化を行うことにより(2)式に示す降雨流出を表現する集中定数系方程式を得る。この斜面流下方向流れを鉛直方向一層として取り扱う集中定数系方程式に関して、断面平均流速式における抵抗則  $m$  を異なる値で表現することにより表面流や中間流等の流れの形態を表現する。表面流と中間流を連結する鉛直浸透流に関しては、山田が従来から提案している Green-ampt 理論に基づく鉛直浸透流を用いる。表面流としては、高棹タイプと Horton タイプの表面流の発生機構を考慮する。以上、(3)式に示す表面流、中間流、鉛直浸透流および湛水深に関する 4 元連立常微分方程式を(4)式の条件のもと解くことにより、土壌・地形特性と降雨強度の関係から表面流の発生を表現可能な降雨流出計算が行える。

$$v = \alpha h^m \quad (1), \quad \frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (r(t) - q_*) \quad (2), \quad a_0 = (m+1)\alpha^{m+1} L^{m+1} \quad (3), \quad \beta = \frac{m}{m+1} \quad (4), \quad \alpha = \frac{k_s i}{D^{\gamma-1} w^\gamma} \quad (5), \quad \gamma = m+1 \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{dq_s}{dt} = a_s q_s^{\beta_s} (r(t) - q_0 - q_s) & \dots \dots \dots \text{表面流} \\ \frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (q_0 - q_*) & \dots \dots \dots \text{中間流} \\ \frac{dq_0}{dt} = (r(t) - q_0) \frac{q_0 - K_s}{h_s + h_k} - \frac{q_0}{(\theta_s - \theta_r) K_s (h_s + h_k)} \frac{(q_0 - K_s)^2}{h_s + h_k} & \dots \dots \text{鉛直浸透流} \\ \frac{dh_s}{dt} = r(t) - q_0 & \dots \dots \dots \text{湛水深} \end{cases} \quad (7), \quad \begin{cases} (h > D): & q_* = q_0 = q_*|_{h=D} \\ (0 \leq h \leq D, \quad r(t) < k_s): & q_0 = r(t) \end{cases} \quad (8)$$

$$q_T = q_s + q_*$$

ここに、 $v$ ：断面平均流速[mm/h]、 $h$ ：水深[mm]、 $r$ ：有効降雨強度[mm/h]、 $m$ ：流出パラメータ(抵抗則)、 $L$ ：斜面長[mm]、 $D$ ：表層土層厚、 $\gamma$ ：土壌の透水性を表す無次元パラメータ、 $k_s$ ：飽和透水係数、 $w$ ：有効空隙率、 $i$ ：斜面勾配、 $q_*$ ：飽和・不飽和側方流に関する流出高[mm/h]、 $q_s$ ：表面流に関する流出高[mm/h]、 $q_T$ ：全流出高[mm/h]、 $q_0$ ：鉛直浸透流、 $h_s$ ：湛水深、 $h_k$ ：湿潤線での毛管負圧[cm]、 $t_p$ ：湛水開始時刻である。  $t_p$  湛水開始時刻に関しては土壌特性から決定される。表面流は Manning 則をとり、抵抗則  $m=2/3, \alpha=i^{1/2}/n$  で表され、表面流に関する流出パラメータ  $a_s$  および  $\beta_s$  が決まる。ここで、 $n$  は斜面表層における Manning の粗度係数である。基本式は全て常微分方程式であり解は瞬時に求まる。

3. 降雨流出における河道の効果：提案する降雨流出計算手法は単一斜面における河道への横流入量の算定に用いるものであり、流域全体への一元的な適用には限界が存在する。流域はサブ流域とそれらを結合する河道とで構成されており、河道部においては流れの形態が異なる。降雨流出における河道の効果は流域スケールと関係し、流域面積、河道勾配、河道長等の各種条件に基づき河道計算の必要性が決まる。

本論文では、河道部を考慮せずに斜面のみを対象とし集中定数系方程式を流域に一元的に適用した場合と、流出計算より算出した流出量を上流端境界条件として不定流計算を行った場合の流出計算結果の比較を行う。これにより、降雨流出における河道の効果、つまりは不定流計算の流域面積に応じた必要性に関して定量的に評価する。

斜面のみを対象とした流出計算とは、(7)式を用い降雨を与え算出した流出高に、検討地点の有する流域面積を乗ずる事により流量として算出したものである。他方、河道計算を考慮した流出計算とは、集中定数系方程式から求めた流量を上流端境界条件として河道部に対して不定流計算を行うものである。

適用流域としては日本最大の流域面積を有する利根川水系全流域に対して流出計算及び不定流計算を行った。対象とした利根川河道網を図-1に示す。土壌・地形特性としては空間的に一様とし、表層土層厚  $D=20\text{cm}$ 、斜面長  $L=10\text{m}$ 、斜面勾配  $i=20^\circ$ 、飽和透水係数  $k_s=0.0035\text{cm/s}$ 、有効空隙率  $w=0.45$ 、湿潤線での毛管不圧  $h_k=30\text{cm}$ 、初期流出高  $0.1\text{mm/h}$  とした。降雨としては総降雨量  $200\text{mm}$ 、ピーク降雨強度  $40\text{mm/h}$  の単峰性降雨を Sine 関数で空間的に一様に与えた。集中定数系方程式から求めた流出高ハイドログラフを図-2に示す。適用した土壌・地形特性では表面流は発生せずに中間流のみで流出高ハイドログラフが構成されている。求めた流出高ハイドログラフに対して各検討地点の有する集水面積を乗ずることにより検討地点における流出計算結果とした。また、各支川の有する流域面積を乗じ上流端境界条件として不定流計算を行い、斜面・河道を対象とした流出計算とした。

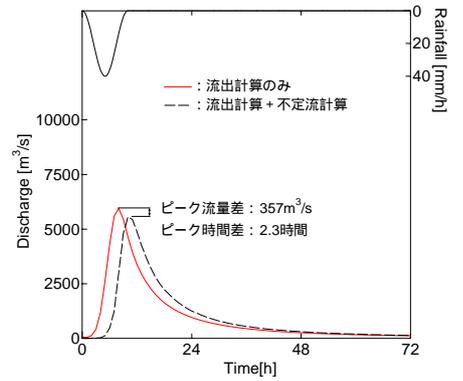
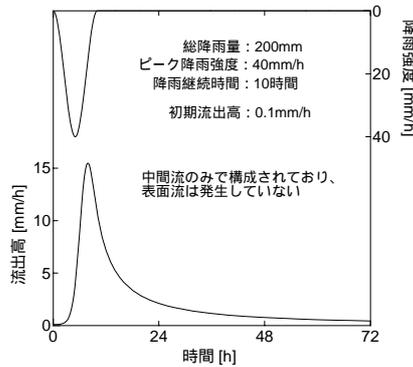
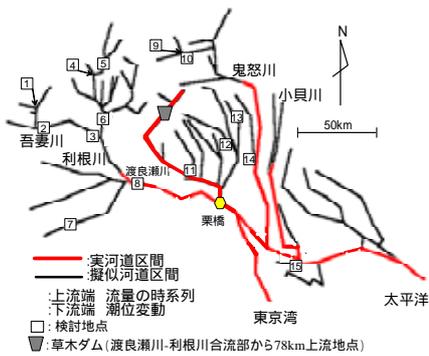


図-1 対象とした利根川河道網および検討地点 図-2 斜面における降雨流出計算結果 図-3 不定流計算の有無が流出計算結果に与える影響（地点：吾妻川下流（1391km<sup>2</sup>））

河道部における洪水追跡計算にはサン・ブナンの式を用い不定流計算を行った。

利根川河道網として国土交通省関東地方整備局の管内図に掲載されている河川（52 河川）を対象とし、1/40 万の地形図上で河川と認識できる最上流地点から河口地点までを対象とする。横断河床形状に関しては、横断形状の実測値が存在する河道部には実測横断河床形状を、実測値が無い河道部には擬似横断河床形状を用いた。擬似横断河床形状とは地形図から読み取った堤防幅と低水路幅をもとに決定した複断面形状のことである。実測横断河床形状、擬似横断河床形状を適用した河道はそれぞれ実河道区間、擬似河道区間として図-1 に示している。河床の粗度係数は、渡良瀬川に関しては 2001 年と 2002 年の洪水の痕跡調査からセグメントごとに算出した値を、渡良瀬川以外の河道には上流部、中流部、下流部の 3 種類に分け、それぞれに 0.03、0.025、0.02 を基準粗度係数として与えた。これら基準粗度係数に 0.005 を増減させ、3 ケースの粗度係数を設定し計算を行った。上流端境界条件としては、集中定数系方程式を用い算出した流出高に各支川の有する集水面積倍した流量ハイドログラフを与えた。下流端境界条件としては、下流端にあたる江戸川河口と利根川河口のそれぞれに芝浦、鹿島で実測された潮位の時系列を与えた。

集中定数系方程式のみを用いた流出計算結果と不定流計算を行った流出計算結果の比較を 15 検討地点（図-1）を対象として行った。1 例として、吾妻川下流地点（地点、流域面積 1391km<sup>2</sup>）にて 2 つの手法から求めた流量ハイドログラフを図-3 に示す。求めた結果より、河道部における洪水追跡として不定流計算を行い算出した流量は、ピークが遅く小さく算出されていることがわかる。次に、検討地点 15 箇所において求めたピーク流量差率、ピークの遅れ時間の関係を図-4,5 に示す。ピーク流量差率とは、流出計算のみを行い算出したピーク流量と不定流計算も行った算出したピーク流量の差を流出計算のみから求めたピーク流量で除することにより求めた差率として本論文では定義する。3 ケースの基準粗度係数で求めた値を同時に示している。粗度係数の増大に伴い、ピーク流量差率および遅れ時間は増加していることがわかる。図-4 に示されるように、ピーク流量差率は流域面積 200km<sup>2</sup> 以内ではほとんど生じないが、流域面積が 1000km<sup>2</sup> 以上から急激に大きくなるのがわかる。ピークの遅れ時間に関しても同様のことが言える。これにより、流域面積の大小関係から不定流計算の必要性が定量的に評価可能であり、流域面積 200km<sup>2</sup> を境界として不定流計算の必要性が生じることがわかった。以上より、集中定数系方程式のみを用い流域を一元的にとらえ流出計算を行うには流域面積 200km<sup>2</sup> 程度までということを示した。200km<sup>2</sup> を超える流域面積を有する流域においては河道効果の影響が大きくなり、不定流計算の必要が生じる。しかしながら、面積が 200km<sup>2</sup> 以内のダム流域程度に対しては集中定数系方程式の一元的な適用が可能となり河道計算は不要ということが示された。

4. まとめ：本論文は利根川流域を対象として降雨流出計算および河道部における不定流計算を行うことにより、降雨流出における河道の効果と流域面積の関係に関して述べたものである。流域面積が 200km<sup>2</sup> 以内のダム流域程度に対しては集中定数系方程式の一元的な適用が可能となり、河道部の影響は小さいということが示された。

参考文献：呉修一，山田正，吉川秀夫：表面流の発生機構を考慮した斜面多層降雨流出計算手法に関する研究，土木学会水工学論文集，Vol. 49, pp. 169-174, 2005.

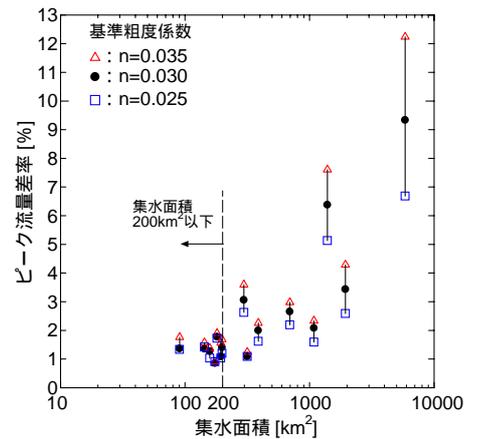


図-4 粗度係数及び流域面積とピーク流量差率の関係

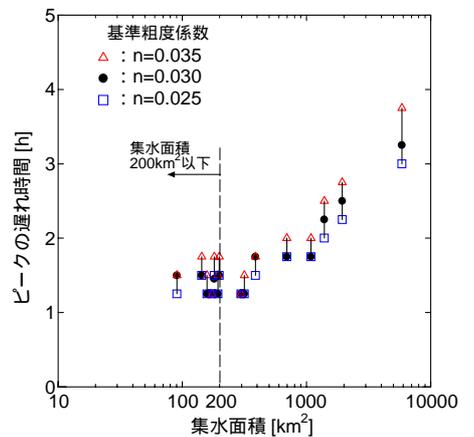


図-5 粗度係数及び流域面積とピークの遅れ時間の関係