

降雨流出計算における河道の効果の検討

中央大学理工学部	学生員	田名辺 剣児
中央大学理工学部	学生員	織田 賢太
中央大学理工学部	フェロー会員	山田 正
中央大学理工学部	学生員	岡部 真人

1. はじめに:

流出解析の目的は、治水の面では洪水，土砂災害対策，利水の面では有効な水資源の活用である．従来から短時間で正確な流量を求める手法が提案されているが，水文特性の空間分布や河道をどの程度詳細に考慮すべきかという問題がある．本論文では，支川による河道の効果が降雨流出に与える影響を明らかにすることを目的とし，降雨流出計算の際に考慮する河道長を変化させて降雨流出計算を行うことにより算出される流量ハイドログラフの比較検討を行ったものである．

2. 単一斜面における降雨流出の基礎式:

著者らは従来から単一斜面における降雨流出の基礎式の導出を行っている．以下に著者らの理論の概要を記す．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(1)式とし，連続式は(2)式で表す．(1)式を(2)式へ代入し単位幅流量 q について整理することにより (3)式で示される表面流に関する kinematic wave 方程式が得られる．ここに， v : 断面平均流速 mm/h, h : 湛水深 mm, $q(t)$: 単位幅流量 mm²/h, $r(t)$: 有効降雨強度 mm/h, 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斜面長は実地形上の斜面長より十分短いものと考えられ，(4)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/h である．斜面長 L の末端で考え $x=L$ とすると(3)式は(5)式で示される流出高に関する常微分方程式に変形できる．(5)式は斜面流下方向を対象とし一般化された単一斜面からの降雨流出を表す基礎式となる．

$$v = \alpha h^m, q = vh = h^{m+1} \quad (1), \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (2), \quad \frac{\partial q}{\partial t} + aq^{\frac{m}{m+1}} \frac{\partial q}{\partial x} = aq^{\frac{m}{m+1}} r(t) \quad (3), \quad q(x,t) \cong xq_*(t) \quad (4), \quad \frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (r(t) - q_*) \quad (5)$$

$$a = (m+1)^{\frac{1}{m+1}}, a_0 = aL^{\beta-1} = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}} L^{\frac{-1}{m+1}} \quad (6), \quad \beta = \frac{m}{m+1} \quad (7), \quad \alpha = \frac{k_s i}{D^{\gamma-1} w^\gamma} \quad (8), \quad \gamma = m+1 \quad (9)$$

(5)式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相違を表現する．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．表面流に関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，(10)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(11)式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．

$$\begin{cases} \frac{dq_s}{dt} = a_s q_s^\beta (r(t) - q_0 - q_s) & \dots \dots \dots \text{表面流} \\ \frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (q_0 - q_*) & \dots \dots \dots \text{中間流} \\ \frac{dq_0}{dt} = (r(t) - q_0) \frac{q_0 - K_s}{h_s + h_k} - \frac{q_0}{(\theta_s - \theta_i) K_s (h_s + h_k)} & \dots \dots \text{鉛直浸透流} \\ \frac{dh_s}{dt} = r(t) - q_0 & \dots \dots \dots \text{湛水深} \end{cases} \quad (10), \quad \begin{cases} (h > D): & q_* = q_0 = q_s|_{h=D} \\ (0 \leq h \leq D, \quad r(t) < k_s): & q_0 = r(t) \\ & q_T = q_s + q_* \end{cases} \quad (11)$$

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, γ : 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 β_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

キーワード 降雨流出，河道，不定流計算，位数

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

り解は瞬時に求まる。

3. 渡良瀬川流域における降雨流出計算：

本論文では実流域において河道の効果が降雨流出に与える影響がどの程度かを解明することを目的として降雨流出計算を行った。実流域として利根川水系渡良瀬川流域（流域面積 2621km²）を対象とし、81 のサブ流域に分割し河道効果を考慮し横流入を考慮した次元不定流計算を行った。対象流域を図-1 に示す。サブ流域の土壤地形特性として斜面長 $L=30m$ ，表層土層厚 $D=20cm$ ，有効空隙率 $w=0.42$ ，斜面勾配 $i=15^\circ$ ，抵抗則 $m=4$ ，初期流出高 $0.1mm/h$ を各サブ流域に一様に与えた。

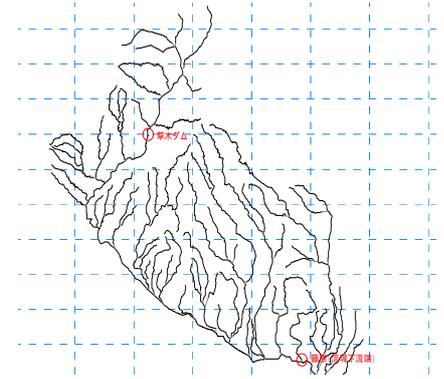


図-1 渡良瀬川流域河道網

3.1 河道の効果が降雨流出に与える影響

河道の効果が降雨流出に与える影響を定量的に評価するため次元不定流計算を行い、河道効果を考慮した流出計算結果と次元不定流計算を行わずサブ流域における流出計算結果を重ね合わす事で河道効果を考慮しなかった場合の比較を行う。求めた結果を図-2 に示す。流域面積が 1000km² を越えるとピーク流量の差率が大きくなる。これにより、流域面積 1000km² 以上では河道の効果が降雨流出に与える影響は大きいことを示した。ここでピーク流量差率は $(Q - Q_{不})/Q_{不} \times 100$ と定義した。Q 流：流出計算のみを行い算出したピーク流量，Q 不：不定流計算もを行い算出したピーク流量である。

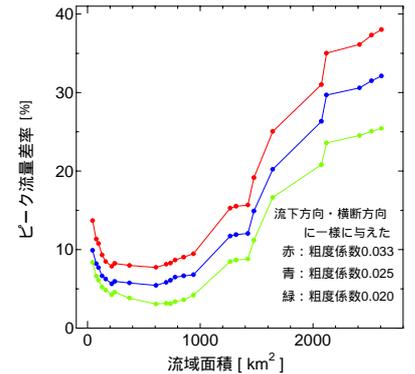


図-2 流域面積が降雨流出に与える影響

3.2 位数を指標とした河道の効果の評価

図-2 より流域面積の増加に伴いピーク流量差率が増加することから、河道の効果は流出計算の際に考慮する河道長に起因すると仮定した。本章では河道長を指標として河道の効果の評価するため、位数の概念を用いて計算を行った。本流出計算に用いた河道網である渡良瀬川流域の最大位数は 4 次であり、この流出計算では 1 次河川から 4 次河川までを考慮した場合、2 次河川から 4 次河川を考慮した場合、3 次河川と次時河川を考慮した場合と、4 次河川のみ考慮した場合の 4 パターンの流出計算を行った。求めた結果を図-3, 4 に示す。図-3 より降雨流出計算の際に考慮する支川の数を増やすことで河道の効果が卓越し、ピーク流量が減少していることがわかる。図-4 より 2 次河川まで含めた場合と 1 次河川まで含めた場合のピーク流量差率が同程度であることから、対象流域スケールでは 1 次河川による河道の効果が無視できることが示された。また、河道長の増加によりピーク流量差率が増加していることから、河道の効果は河道長の増加に伴い卓越することが示された。これにより、流出計算の際に考慮する支川は渡良瀬川流域スケールでは、2 次河川まででよいことから総河道長の 80% 以上を考慮すればよいことを示した。

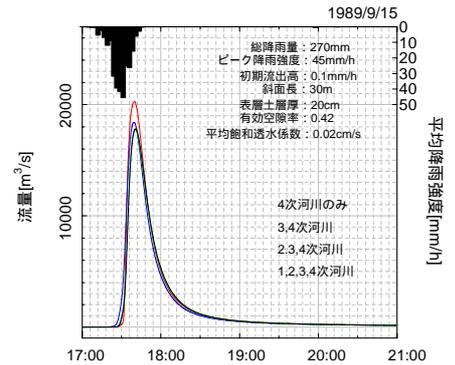


図-3 対象流域における流量ハイドログラフ

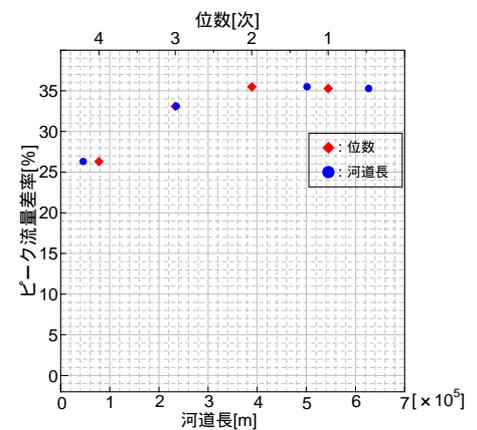


図-4 位数-河道長-ピーク流量差率の関係

4. まとめ：

流域面積，位数，河道長を変化させて流出計算を行い河道の効果と比較検討した結果，流域スケールが大きいほどピーク流量差率が大きくなるということが示された。また流出計算の際に考慮する支川は渡良瀬川流域スケールでは 2 次河川まででよいことから総河道長の 80% 以上を考慮すればよいことを示した。

参考文献：1)山田正：山地流出の非線形性に関する研究，土木学会水理講演会論文集，Vol .47，pp .259-264，2003。

2)呉修一，山田正：降雨流出における斜面と河道の効果に関する研究，土木学会水工学論文集，Vol .50