水文特性の空間分布が降雨流出に及ぼす影響の解明

中央大学大学院　織田　賢太
University of California，Davis　呉　修一
中央大学理工学部　山田　正
中央大学大学院　岡部　真人

1．はじめに

降雨流出機構を明らかにすることは,水資源の確保のみならず洪水･土砂災害を予測する上でも非常に重要である．著者らは物理的観点に立脚した洪水予測システムの構築を目的とし，従来から山地流域における降雨流出計算手法を提案している．本論文は，水文特性の空間分布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，水文特性を空間的に分布させた状態で降雨流出計算を行うことにより，算出される流出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を提案している．一般化された断面平均流速(1)式と，連続式(2)式より(3)式に示す表面流に関する 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，α，m は流域の流出特性を表すパラメータである．ここで，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(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)式は単一斜面における降雨流出を表す基礎式となる．

$$v=\alpha h^m,\quad q=vh=\alpha h^{m+1}\cdots(1)\qquad \frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q}{\partial x}=r(t)\cdots(2)\qquad \frac{\partial q}{\partial t}+aq^{\frac{m}{m+1}}\frac{\partial q}{\partial x}=aq^{\frac{m}{m+1}}r(t)\cdots(3)\qquad q(x,t)\cong xq_*(t)\cdots(4)$$

$$\frac{dq_*}{dt}=a_0q_*^{\beta}(r(t)-q_*)\cdots(5)\qquad a=(m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}},\ a_0=aL^{\beta-1}=(m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}}L^{\frac{-1}{m+1}}\cdots(6)\qquad \beta=\frac{m}{m+1}\cdots(7)$$

(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とともに，(8)式に示す斜面多層流れを考慮した流出計算手法に関しても著者らは従来から提案している．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

$$\begin{cases}\dfrac{dq_s}{dt}=a_sq_s^{\beta_s}(r(t)-q_0-q_s) & \cdots\cdots\cdots\cdots\text{表面流}\\ \dfrac{dq_*}{dt}=a_0q_*^{\beta}(q_0-q_*) & \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{中間流}\\ \dfrac{dq_0}{dt}=(r(t)-q_0)\dfrac{q_0-K_s}{h_s+h_k}-\dfrac{q_0}{(\theta_s-\theta_i)}\dfrac{(q_0-K_s)^2}{K_s(h_s+h_k)} & \cdots\text{鉛直浸透流}\\ \dfrac{dh_s}{dt}=r(t)-q_0-q_* & \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{湛水深}\end{cases}\cdots(8)$$

表現している．また，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ている．表面流の発生機構に関しては高棹タイプとHortonタイプの表面流が考慮されている.(8)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．ここに，k_s：飽和透水係数，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[mm/h]，h_s：湛水深[cm]，h_k：湿潤線での毛管不圧[cm]である．表面流はマニング則をとり，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．以上が著者らのグループが従来から提案している手法の概容である．詳細に関しては文献 1),2)を参照されたい．

３．水文特性の空間分布が降雨流出に与える影響

実流域において水文特性の空間分布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 2621km^2）を対象とし 81 のサブ流域に分割し，各サブ流域において流域全体の平均値は一定のもと，飽和透水係数を対数正規分布に従う乱数で分布させた．分布の

キーワード：　水文特性，空間分布，降雨流出
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

発生パターンは**図－2** に示す 3 種の対数正規分布を用い，各対数正規分布に基づき 1 セットずつ乱数を発生させた. case3 の対数正規分布は 0 に近い値が集中しており対数正規分布よりも極端な分布形であるが，これは飽和透水係数の分布が極端な場合を想定している．また，河道部における洪水追跡に関しては，横流入を考慮した一次元不定流計算を行った．サブ流域の土壌地形特性として斜面長L=30[m]，表層土層厚D=20[cm]，有効空隙率w=0.42, 斜面勾配i=15 °, 抵抗則m=4, 初期流出高 0.1[mm/h] を各サブ流域に一様に与えた.

3．1　飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響

飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響を定量的に評価するため，流域全体の平均値は一定のもと飽和透水係数をサブ流域において対数正規分布に従う乱数で分布させた．**図-3** を見ると分布が極端な場合も含めてハイドログラフは立ち上がり，逓減部ともにほとんど差異は見られず，いずれの場合も流量の差異は無視できる程度少ないことがわかる．これにより飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響は，飽和透水係数の平均値が一定の条件においては小さいことがわかる.

3．2　遅れ時間の分布が降雨流出に与える影響

次にサブ流域における流出計算において飽和透水係数の分布に加え，飽和透水係数の大小に応じて遅れ時間を分布（1 時間～5 時間）させ計算を行った．本論文では，遅れ時間をピーク降雨強度とピーク流量の時刻差として定義している．水文特性の空間分布に応じて生じる各サブ流域におけるピーク流量の遅れ時間の分布が降雨流出に与える影響を定量的に評価しようというものである．ここで本計算では，各飽和透水係数を用いた流出計算で生じる遅れ時間以外の遅れ時間を更に人為的に横流入ハイドログラフに与えている．これは，遅れ時間の大小を簡易かつ明確に表現するためであり，このトータルの遅れ時間は飽和透水係数以外の土壌特性値（例えば，表層土層厚，有効空隙率など）を変化したさいに算定されるものを想定している．遅れ時間の平均値は各計算で一定としている．**図-4** を見ると遅れ時間を分布させて計算した場合，ピーク流量に差が生じていることが分かる．これによりピーク流量のみならず，遅れ時間が各サブ流域において大きく異なるような流域においては水文特性の空間分布が降雨流出に与える影響が大きいことを明らかにした.

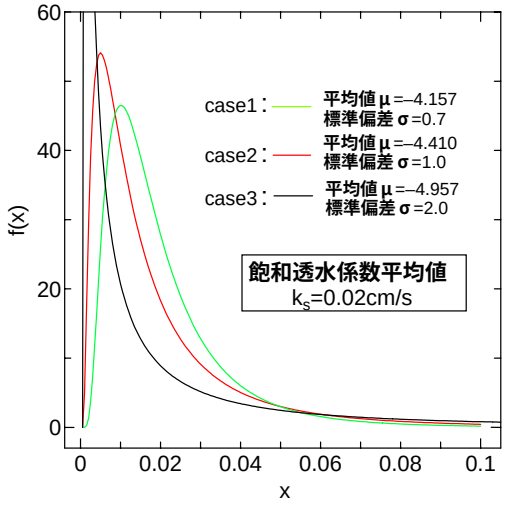

図-2 飽和透水係数の空間分布に用いた対数正規分布

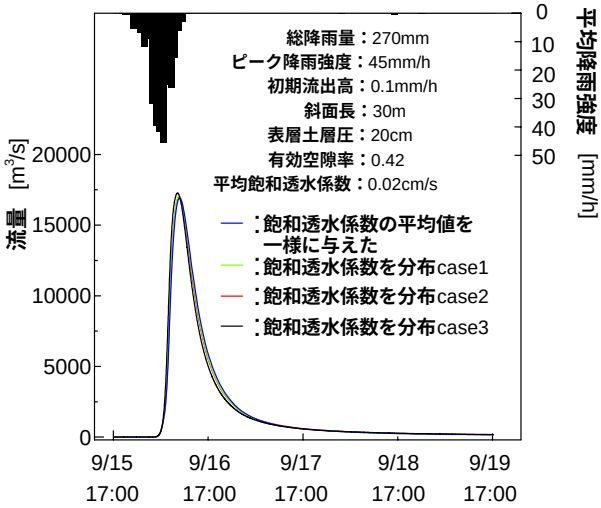

図-3 飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響

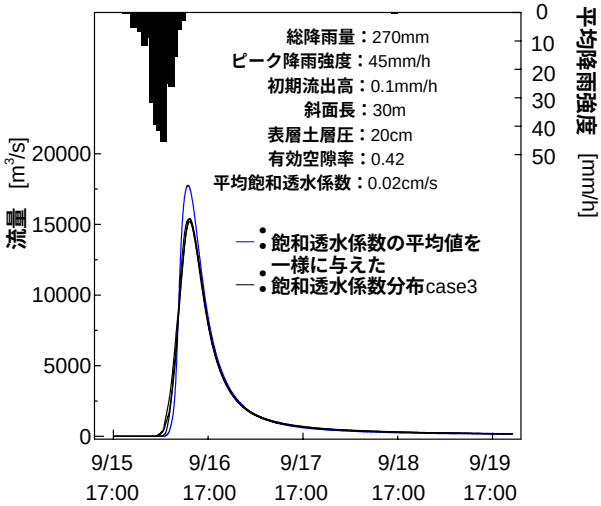

図-4 遅れ時間の分布が降雨流出に与える影響

4．まとめ

渡良瀬川流域程度の空間スケール（流域面積 2621km2）では，飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響は少なく平均値として飽和透水係数を扱えることを示した．しかしながら各サブ流域においてピーク流量の遅れ時間が大きく異なるような流域においては水文特性の空間分布を考慮した流出計算が必要であることを示した.

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