降雨流出現象における土壌地形パラメータの特性に関する基礎的研究

中央大学理工学部　学生員　　　　○　山上　訓広
中央大学大学院　　学生員　　　　　　青木　慶
中央大学理工学部　正会員　　　　　　岡部　真人
中央大学理工学部　フェロー会員　　　山田　正

1．緒言

山地斜面において，復帰流として発生する表面流は土石流や土砂崩れを引き起こす一因となっている．そのため降雨流出経路，表面流発生機構を明らかにする事は喫緊の課題である．著者らは土壌地形特性が流出に与える影響を解明する事は降雨流出現象において有用な知見となると考え研究を行ってきた．そこで本稿は土壌地形特性と降雨流出遅れ時間に着目し研究を行った．

2．単一斜面における降雨流出の基礎式の導出

著者らは従来からKinematic　Wave法に基づき図１に示す様に斜面流下方向流れの単位幅流量に対して集中化を行う事で，単一斜面における降雨流出の基礎式を導出している．以下に導出過程を示す．山地斜面における直接流出は低水時から高水時までの多様な流出形態をとるとし， 一般化された運動則として(1)式に示すように，流下方向流れの流速を水深のべき乗で表現する．また流れの連続式として(2)式が成立する．

$$v = \alpha h^m, q = \alpha h^{m+1} \tag{1}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \tag{2}$$

v：断面平均流速[mm/h]，h：水深[mm]，q：単位幅流量[mm²/h]，r(t)：降雨強度r[mm/h]，α，mは流域特性を表す流出パラメータである．(1)式を(2)式に代入する事で(3)式のKinematic　Wave方程式が得られる．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，実地形における斜面長より十分短い斜面長である考えられ，単位幅流量について(4)式に示す変数分離型の近似式が仮定できる．斜面長Lの末端を考え，$x = L$とする．(3)，(4)式から単一斜面における降雨流出の基礎式(5)を得る．

$$\left(\frac{1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{m+1}} \frac{\partial q^{\frac{1}{m+1}}}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \tag{3}$$

$$q(x,t) = x \cdot q_*(t) \tag{4}$$

$$\frac{dq_*}{dt} = (m+1)\left(\frac{\alpha}{L}\right)^{\frac{1}{m+1}} * q_*^{\frac{m}{m+1}} (r - q_*) \tag{5}$$

ここにq_*：流出高[mm²/h]，L：斜面長[m]表面流から中間流への鉛直浸透流れに関して従来から山田[1)]が提案しているGreen-Ampt理論に基づく(7)式の鉛直浸透流を用いる．(6)式の表面流に関してManningの平均流速公式に基づくとし，m=2/3，$\alpha = \frac{\sqrt{i_0}}{n}$ を与え解析を行う．湛水深に関しては(８)式に示す．ここにh_s：湛水深[cm]，h_k：湿潤線での毛管不圧水頭[cm]．θ_s：土壌中の飽和水分量，θ_i：土壌中の初期水分量である．

$$\frac{dq_s}{dt} = \frac{5}{3}\left(\frac{\sqrt{i_0}}{nL}\right)^{\frac{3}{5}} q_s^{\frac{2}{5}} (r - q_0 - q_s) \tag{6}$$

$$\frac{dq_0}{dt} = (r(t) - q_0) \frac{q_0 - k_s}{h_s + h_k} - \frac{q_0}{\theta_s - \theta_i} \frac{(q_0 - k_s)^2}{k_s (h_s + h_k)} \tag{7}$$

$$\frac{dh_s}{dt} = r - q_s - q_* \tag{8}$$

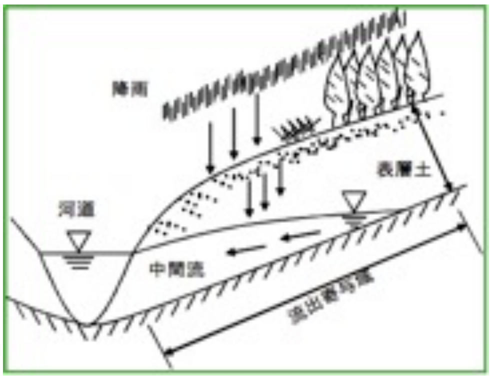

図１　斜面における降雨流出の概念図

3．不飽和浸透方程式とKinematic Wave法の関係

前節で導いた山地流域における流出の基礎式中のパラメータは，Kinematic　Wave法に基づき得られた単一斜面における降雨流出の基礎式と不飽和浸透方程式を比較する事で流域特性を表すパラメータα，mを物理的意味を持ったパラメータで表現することが出来る．以下に理論の概要を示す．不飽和領域での土中水の浸透は(9)式のRichardsの方程式で表される．土層の厚さに比べて斜面の長さが十分に長い時(10)式のようになる．(11)式をz方向に積分し，z方向に平均化した一般的なKozney式と不飽和領域に拡張したダルシー則を用いて単位幅流量について式変形すると(12)式を得る．

$$c\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left\{\left(k\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin\omega\right)\right\} + \frac{\partial}{\partial z}\left\{\left(k\frac{\partial \psi}{\partial z} + \cos\omega\right)\right\} \tag{9}$$

$$c\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial \psi}\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\sin\omega\frac{\partial k}{\partial x} \tag{10}$$

$$k = k_s Se^{\gamma} \tag{11}$$

$$D^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} w k_s^{-\frac{1}{\gamma}} \sin\omega^{-\frac{1}{\gamma}} \frac{\partial q^{\frac{1}{\gamma}}}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \tag{12}$$

$$\alpha = \frac{k_s i_0}{D^m w^{m+1}} \quad , \quad \gamma = m + 1 \tag{13}$$

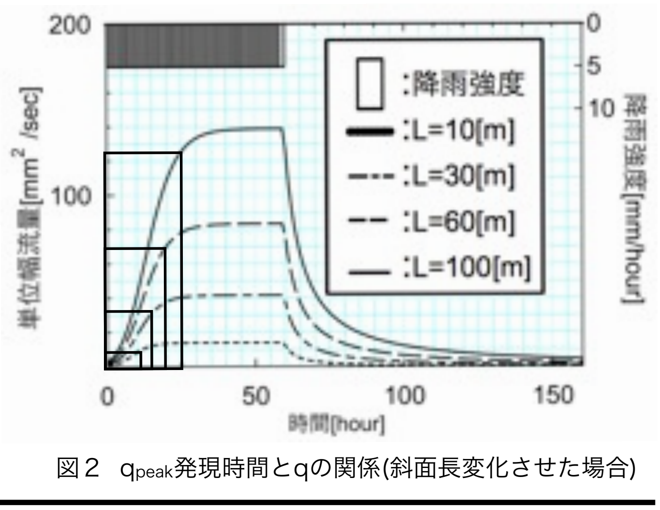

図２　q_{peak}発現時間とqの関係(斜面長変化させた場合)

キーワード：土壌地形特性　降雨流出　q_{peak}発現時間　斜面長
〒112-8551　文京区春日1-13-27　中央大学理工学部　Tel：03-3817-1805　yamagami-kunihiro@civil.chuo-u.ac.jp

Kinematic　Wave法から導いた(3)式と飽和・不飽和浸透理論から導いた(13)式は同一の現象を異なる二つの観点から見た等価な式であり，流出パラメータを土壌特性値より表現可能であることを示した．

S_e：有効飽和度，c：比水分容量，ψ：圧力水頭，ω：斜面勾配，θ：水分量，D：表層土層厚[mm]，γ：透水性の現象を表す無次元パラメータ，w：有効空隙率，ks：飽和透水係数[cm/s]である．

4．土壌特性値が降雨流出現象に与える影響

土壌特性値の変動がハイドログラフに与える影響を検証した．入力降雨として時間降雨強度5[mm/h]，降雨継続時間60時間を与え，土壌特性値である表層土層厚D，斜面長L，流出パラメータmの値を変動させ斜面の計算で得られた単位幅流量の比較を行った．一例として斜面長Lを変動させた結果を図２に示す．この時，土壌特性値の基準値として$D=20$[cm], $ks=0.02$[cm/s]，$\omega=20°$，$w=0.42$，$m=4$を与えた．本研究ではピーク値の９割に到達した時点を流出のピーク値の発現時間と定義しq_{peak}発現時間と呼ぶこととする．図２より斜面長と単位幅流量

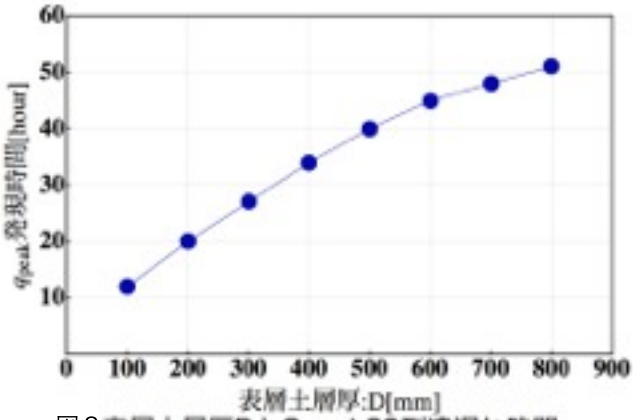

図３表層土層厚DとQpeak90到達遅れ時間

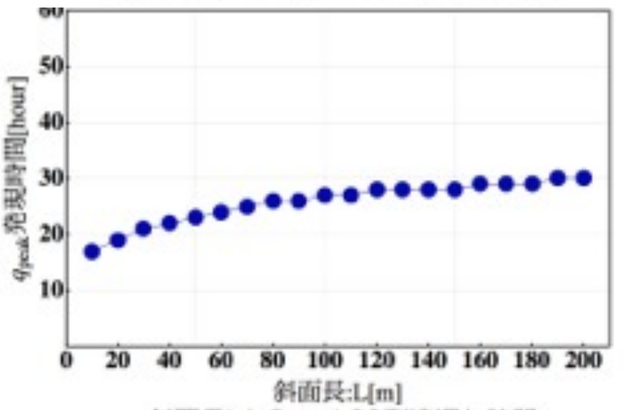

図４　斜面長LとQpeak90到達遅れ時間

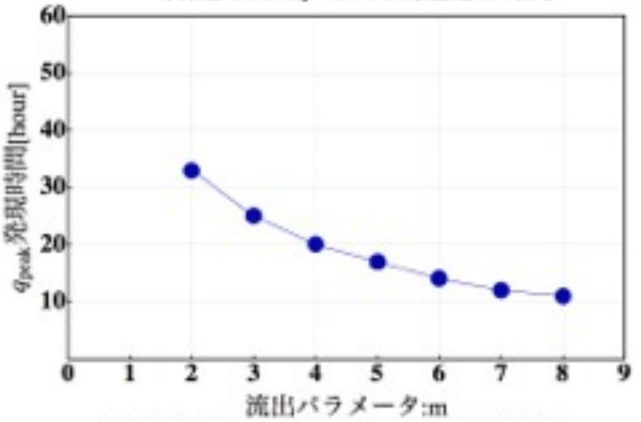

図５ 流出パラメータmとQpeak90到達遅れ時間

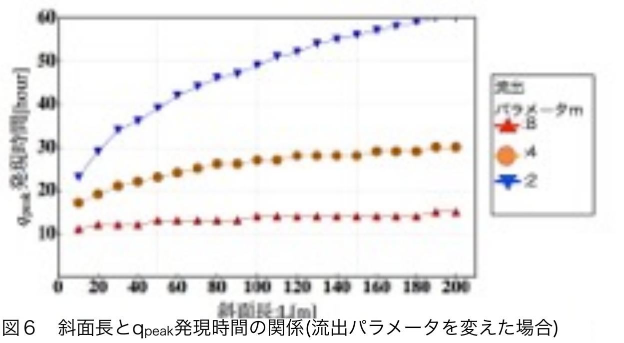

図６　斜面長とq_{peak}発現時間の関係(流出パラメータを変えた場合)

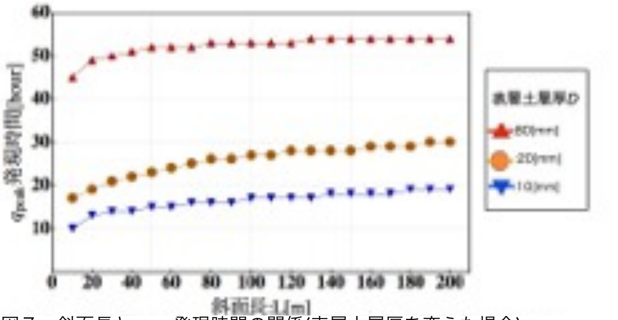

図７　斜面長とq_{peak}発現時間の関係(表層土層厚を変えた場合)

のピーク値は線形関係にあることを示した．次に，q_{peak}発現時間と土壌特性値との関係を図３，４，５に示す．図３より表層土層厚Dが厚くなるにつれq_{peak}発現時間が遅くなり，表層土層厚とq_{peak}発現時間には線形関係にあることを示した．図４より斜面長を長くした場合q_{peak}発現時間に大きな影響は見られず，斜面長がq_{peak}発現時間に与える影響は小さいことを示した．図５より流出パラメータmが大きくなるにつれq_{peak}発現時間は早くなる事を示した．さらに斜面長とq_{peak}発現時間の関係に加え，土壌特性値がq_{peak}発現時間に与える影響を検証した．図６，７に流出パラメータmと表層土層厚Dを変えた場合の斜面長とq_{peak}発現時間の関係を示す．斜面長が長くなるにつれq_{peak}発現時間は流出パラメータが小さな値を取る時を除き，一定の値に収束している事を示した．表層土層厚の変動がq_{peak}発現時間に大きな影響を与える事を示した．

5．まとめ

本研究で，土壌特性パラメータを変動させ，土壌地形特性パラメータと単位幅流量，q_{peak}発現時間を比較する事で得られた知見を以下に示す．

・斜面長と単位幅流量のピーク値は線形関係にあることを示した．

・表層土層厚Dが厚くなるにつれq_{peak}発現時間が遅くなり，表層土層厚とq_{peak}発現時間には線形関係にあることを示した．

・斜面長を長くした場合q_{peak}発現時間に大きな影響は見られず，斜面長がq_{peak}発現時間に与える影響は小さいことを示した．

・流出パラメータmが大きくなるにつれq_{peak}発現時間は早くなる事を示した．

・斜面長が長くなるにつれq_{peak}発現時間は流出パラメータが小さな値を取る時を除き，一定の値に収束している事を示した．表層土層厚の変動がq_{peak}発現時間に大きな影響を与える事を示した．

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，Vol47，pp．259-264，2003．