

1. はじめに

流域における水理・水文諸量の空間分布が降雨流出現象に対して影響を及ぼしていると考えられる。藤田ら¹⁾は流域における透水係数の分布が浸透能の分布に関連しており、この透水係数の空間分布によって有効降雨の発生機構が大いに異なってくることを示している。また、有効降雨の算定手法として山田ら²⁾は保水能の理論を提案し、流域における保水能の分布が、降雨の流出率や有効降雨に寄与することを示している。

ところで、一般的に流域内には、組成や性質の異なる層位が存在することが知られている。このことから、流域内では保水能の異なる土壌が層を成すために保水能は鉛直方向にも分布を持つと考えられる。そこで本研究は、土壌内における鉛直浸透を考慮し、各層位の保水能を考えた場合に流域の保水能の分布が降雨流出に与える影響を明らかにする。

2. 降雨流出計算式の概要

本研究では、流域を単一斜面に置き換え流出計算を行う。山田³⁾が導出している単一斜面における集中定数系方程式の理論の概要を以下に示す。

2. 1 単一斜面における降雨流出の基礎式の導出

一般化した断面平均流速(1)式を連続式(2)式に代入し単位幅流量 q について整理すると(3)式の表面流に関する Kinematic Wave 方程式が得られる。

$$v = \alpha h^m \quad q = vh = \alpha h^{m+1} \quad (1)$$

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

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

ただし、

$$a = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}} \quad (4)$$

ここで、 h : 水深[mm], $q(t)$: 単位幅流量[mm²/h], $r(t)$: 有効降雨強度[mm/h], m : 流出パラメータ(抵抗則), α : 流出特性を表すパラメータである。

ここで、Hewlett⁴⁾, Betson⁵⁾の部分流出寄与域の考えに基づくと、流出は0次谷流域、1次谷流域の河道及び河道近傍の湿潤領域からの斜面流出と考える事ができ、斜面長は実地形上の斜面長にくらべ十分短いものとする、相似則として(4)式の変数分離形の近似式が成立する。

$$q(x, t) \approx xq_*(t) \quad (5)$$

ここに q_* : 流出高[mm/h]である。斜面長 L の末端で考え $x=L$ とし、(4)式を用い整理すると(3)式は(6)式の流出高に関する常微分方程式に変形できる。

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (r(t) - q_*) \quad (6)$$

ただし、

$$a_0 = aL^{\beta-1} = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}} L^{\frac{-1}{m+1}} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{m}{m+1} \quad (8)$$

(6)式は単一斜面における降雨流出を表す基礎式となる。斜面流下方向流れを表面流として扱う場合は Manning 則をとり、 $m=2/3$ の値を用いる。一方、地下水流として扱う場合は飽和ダルシー則をとり、 $m=0$ の値を用い流出形態の相違を表現する。

2. 2 不飽和浸透方程式と Kinematic Wave 法の関係

流出パラメータ α と土壌特性との関係を検討する。鈴木⁶⁾は飽和・不飽和浸透理論の基礎式を斜面流下方向に対し垂直に積分することで流れの断面水分量

に関する一次元の方程式である(9)式を導き出した.

$$D^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} w k_s^{\frac{1}{\gamma}} \sin \omega^{\frac{1}{\gamma}} \frac{\partial q^{\frac{1}{\gamma}}}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (9)$$

ここに、 D ：表層土層厚、 γ ：土壌の不飽和領域における透水性の減少の程度を表す無次元パラメータ、 w ：有効空隙率、 k_s ：飽和透水係数、 ω ：斜面勾配角度、 q ：単位幅流量、 r ：地表面における有効降雨強度である。次に、一般化した断面平均流速(1)式を連続式(2)式に代入し水深 h について整理すると(3)式の Kinematic Wave 方程式と等価である(10)式が得られる。

$$\left(\frac{1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{m+1}} \frac{\partial q^{m+1}}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (10)$$

飽和・不飽和浸透理論から導出された(9)式と Kinematic Wave 法から導出された(10)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、両式を比較することにより(11)、(12)式が得られ、流出パラメータ α は土壌特性より表現することができる。これは図-1に示すよう斜面流下方向流れを Kinematic Wave 法に基づき(1)式、(2)式で取り扱ったものを飽和・不飽和浸透流として置き換えることを意味する。

$$\gamma = m + 1 \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{k_s \sin \omega}{D^{\gamma-1} w^{\gamma}} \quad (12)$$

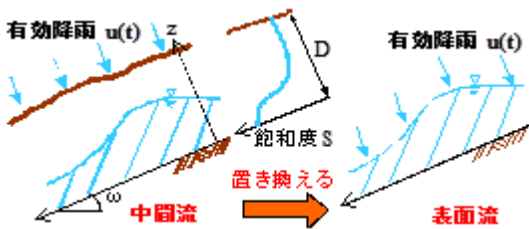


図-1 飽和・不飽和浸透方程式と表面流の置き換えの概念図

また、この比較より基礎式中の β を不飽和領域の透水性の減少を表すパラメータ γ で(13)式に示すよう表現することができる。

$$\beta = \frac{m}{m+1} = \frac{\gamma-1}{\gamma} \quad (13)$$

3. 物理的観点からの準線形貯留型モデルの導出

本研究では鉛直浸透流を、菅原⁷⁾の提案する準線形貯留型モデルを用いて表す。呉ら⁸⁾は下記に示すよう仮定をすることで、単一斜面における斜面流下方向流れを表現する単位幅流量に関する(3)式から準線形貯留型モデルを理論的に導出している。以下にその概要を示す。

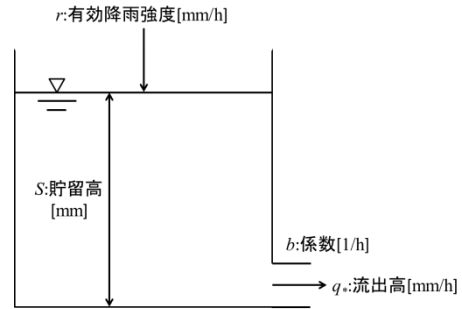


図-2 準線形貯留型モデルの模式図及び記号の定義

図-2のようなタンクを想定した場合、(14)式に示す連続式と(15)式に示す貯留高と流出高の関係から(16)式で示される一段準線形貯留型モデルの基礎式である流出高に関する線形常微分方程式が得られる。

$$\frac{dS}{dt} = r(t) - q_* \quad (14)$$

$$q_* = b \cdot S \quad (15)$$

$$\frac{dq_*}{dt} = b(r(t) - q_*) \quad (16)$$

ここに、 b ：流出パラメータ [1/h] である。

次に、単一斜面における Kinematic Wave 法に基づき導出した(3)式から準線形貯留型モデルを表現する(16)式の導出を行う。(1)式、(4)式の関係より、(17)式の関係が得られる。

$$aq^{\beta} = (m+1)v \quad (17)$$

この(17)式の関係を用いることにより(3)式は(18)式で表現される。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + (m+1)v \frac{\partial q}{\partial x} = (m+1)vr(t) \quad (18)$$

ここで、斜面上流部に対し河道近傍湿潤領域である斜面下流部の斜面流下方向流速が早いことが想像でき、斜面流下方向断面平均流速が斜面流下方向距離に比例すると考えると(19)式の成立を仮定できる。

$$v = a_* x \quad (19)$$

ここに、 a_* ：比例定数[1/h]である。この(19)式を用いることにより、(3)式は(20)式で表現される。

また、(19)式が成立する条件下においては(21)式が成立する。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + a_*(m+1)x \frac{\partial q}{\partial x} = a_*(m+1)xr(t) \quad (20)$$

$$q(x,t) \approx xq_*(t) \quad (21)$$

この関係を用いるとともに(20)式の両辺を x で割り整理することにより(22)式が得られる。

$$\frac{dq_*}{dt} = a_*(m+1)(r(t) - q_*) \quad (22)$$

(22)式は準線形貯留型モデル(16)式と同形である。

3. 1 準線形貯留型モデルにおける貯留高 S の物理的意義

準線形貯留型モデルにおける貯留高 S の物理的意義に関して考察を行う。(1)式、(19)式より流出高は(23)式で表現できる。

$$q_* = a_* h \quad (23)$$

また、準線形貯留型モデルは流出高に関して以下の(15)式で表現している。

$$q_* = b \cdot S \quad (15)$$

ここで、(16)式と(22)式の関係より $b=a_*(m+1)$ であるから(15)式、(23)式より貯留高 S は(24)式で表現される。

$$S = \frac{1}{m+1} h \quad (24)$$

この(24)式より貯留高 S は水深 h と抵抗則 m の関数であることがわかる。また、 $m=0$ のとき、つまり斜面流下方向流れが飽和ダルシー則をとるとき、貯留

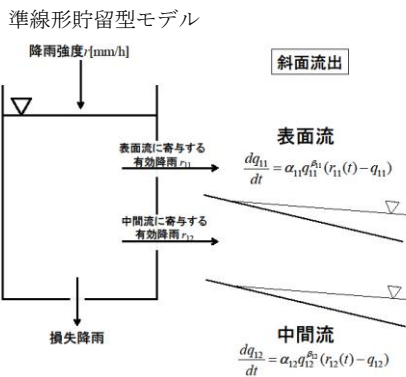


図-3 保水能が鉛直方向に分布する場合の降雨流出計算の概要図

高 S は斜面流下方向流れの水深を意味している。

3. 2 流出パラメータ b の物理的意義

準線形貯留型モデルを斜面流下方向流れとして取り扱うことで、流出パラメータ b を物理的観点、つまりは土壌・地形特性から決定する。(1)式、(5)式より、斜面末端における流出高は(25)式で表現される。

$$q_* = \frac{\alpha}{L} h^{m+1} \quad (25)$$

(25)式と(15)式を(24)を用いて比較することにより、流出パラメータ b は(26)式で表現される。

$$b = (m+1) \frac{\alpha}{L} h^m \quad (26)$$

ここで α は(12)式のように土壌・地形特性で表現できるので、流出パラメータ b は(27)式で表現される。

$$b = (m+1) \frac{k_s i}{w L} \left(\frac{h}{wD} \right)^m \quad (27)$$

ここで、斜面流下方向流れが飽和ダルシー則をとるとし、抵抗則 $m=0$ で考えると流出パラメータ b は(28)式で表現される。

$$b = \frac{k_s i}{w L} \quad (28)$$

(28)式で表現されるよう準線形貯留型モデルにおける流出パラメータ b は斜面勾配 i 、有効空隙率 w 、飽和透水係数 k_s で表現されることがわかった。

4. 流域内における保水能の分布が降雨流出に与える影響

4. 1 研究方法

本研究では、鉛直浸透流は飽和ダルシー則をとるとする。このとき、抵抗則 $m=0$ であり、鉛直浸透流を準線形貯留型モデルで表すことができる。図-3示すよう準線形貯留型モデルの側面孔の高さを保水能

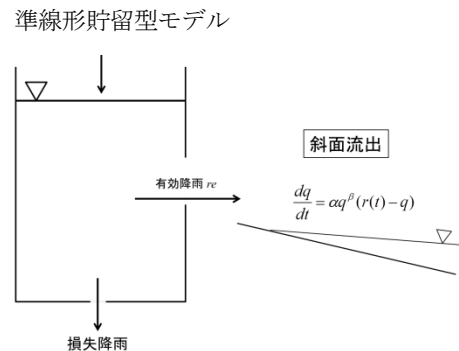


図-4 保水能が鉛直方向に分布しない場合の降雨流出計算の概要図

と定義し、側面上孔からの流出を表面流に寄与する有効降雨、側面下孔からの流出を中間流に寄与する有効降雨、底面孔からの流出を損失降雨とする。

本研究で用いる降雨流出計算のパラメータは、土壌からの流出パラメータ(a_{11} , a_{12} , b_1)、保水能を表すタンク側面孔高さ(h_{11} , h_{12})、単一斜面における流出特性を表すパラメータ(α_{11} , α_{12} , β_{11} , β_{12})の9つである。これらは5つの既往洪水イベントにおいて、(5)式を用い実測流量データに対し Gauss-Newton 法を用いて非線形回帰を行った。推定したパラメータを平均し、再現計算を行った。計算結果を4-2に示す。

本研究では図-4に示すような保水能が鉛直方向に分布していない場合と比較を行うことで、各層位の保水能を考えた場合に流域の保水能の分布が降雨流出に与える影響を明らかにする。なお対象流域を利根川水系渡良瀬川の上流部に位置する草木ダム流域(254[km²])とし、流域内の降雨として流域平均降雨を与える。

4. 2 結果

流出計算結果を図5、図6に示す。本研究における保水能の鉛直分布は hidrograph 及び有効降雨に影響を及ぼしていない事が分かる。これは、本研究で用いた降雨流出計算手法において、表面流の発生機構として高棹タイプのみを扱ったためであると考えられる。

5. まとめ

本研究は、鉛直浸透機構に準線形貯留型モデルを用いた新しい流出モデルを用いて流出計算を行った。その結果、鉛直方向の保水能分布に関して、一段タンクに側方孔が二つある鉛直浸透機構では、流出計算結果に保水能の鉛直分布が与える影響は小さいことがわかった。

参考文献

- 1) 藤田光一, 日野幹雄, 山田正: ダルシー則に基づく降雨鉛直浸透の解析, 第26回水理講演会論文集, 1982.
- 2) 山田正, 山崎幸二: 流域における保水能の分布が流出に与える影響について, 第27回水理講演会論文集, pp.385-392, 1983.
- 3) 山田正: 山地流出の非線形性に関する研究, 土木学

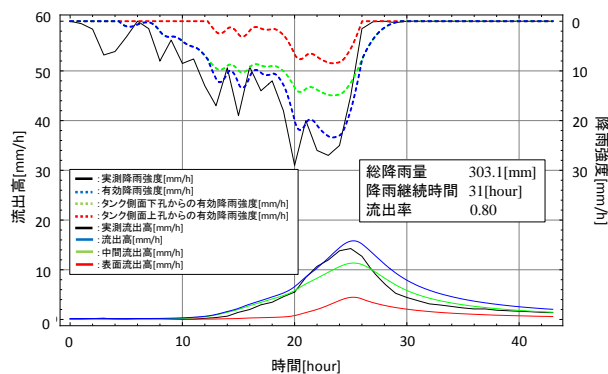


図-5 保水能が鉛直方向に分布する場合の hidrograph

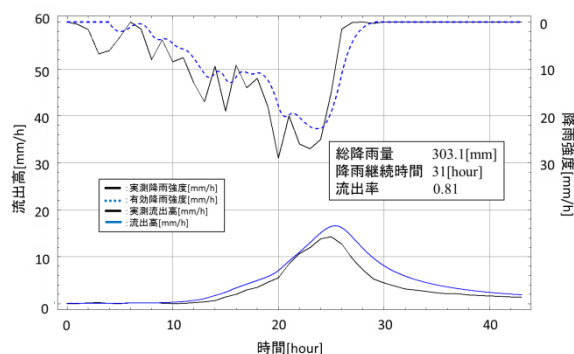


図-6 保水能が鉛直方向に分布しない場合の hidrograph

会水工学論文, 第47巻, pp.259-264, 2003.

- 4) John D. Hewlett: Soil moisture as a source of base flow from steep mountain watersheds, US Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, North Carolina, Station Paper No.132, 1961.
- 5) Roger P. Betson: What is watershed runoff, Journal of Geophysical Research, Vol.69, No.8, pp.1541-1552, 1964.
- 6) 鈴木雅一: 山地小流域の基底流出減滅特性(I) 飽和・不飽和浸透流モデルを用いた数式的検討, 日林誌, 66(5), pp.174-182, 1984.
- 7) 菅原正巳: 準線形貯留型モデル河川の流量を雨量から算出する一つのモデルについて一, 地学雑誌, 94-4, 1985.
- 8) 呉修一, 山田正: 既往概念流出モデルの理論的導出, 水文・水資源学会誌, Vol.22, pp.386-400, 2009.