

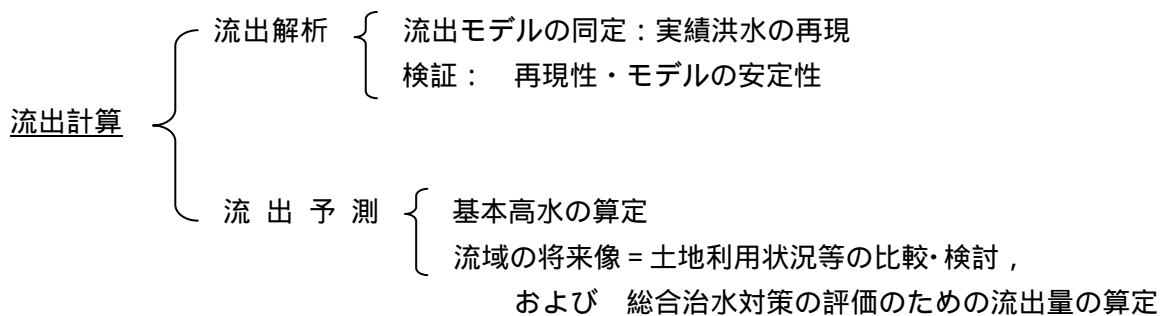
流出モデル（流出計算法）の比較

はじめに

流出モデル（流出計算法）の比較にあたっては、下図に示すとおり、モデルの適用対象が流出解析および流出予測であることを念頭に置き、両者に適用できるモデルを選択・選定するための比較・検討あるいは比較項目の整理を行う。すなわち、以下では実務的、実用的な流出モデルを取り上げ、それらの比較や評価を行うが、その主たる視点は、流出解析および流出予測を一体のものあるいは一連の作業として取り扱える流出モデルであるかどうか、に置くものとする。したがって、個々のモデルについて、特定の流出現象や特定の地域・地目への適用性、また特定の利用目的での優劣などを比較し、評価しようとするものではない。

ここでは、「流出計算」を流出解析と流出予測に分けることとし、前者は流出モデルの同定（モデル定数の同定）と同定したモデルの妥当性の検証に関わる計算に分け、後者は確率雨量による洪水ピーク流量（基本高水）の算定および総合治水対策・土地利用形態の効果・影響評価のための流出量（ハイドログラフ）の算定に分けるものとし、この視点から評価を行うものとする。

なお、上述の趣旨から、以下では主として流域斜面上の流出を対象とする「斜面モデル」の比較を行う。



1. 比較の基本的な視点

流出モデルは、総合治水対策の比較・検討・評価に適用できるかどうか、最も重要な点である。そして、適用するためには、適用に先立って、モデルが実務的な観点から必要とされる精度を満たして実績の洪水を再現できるものであることを確かめておく必要がある。これを、比較の基本的な視点として列挙すれば、以下のとおりである。

- 1) 「総合治水対策の比較・検討と評価」および「流域の土地利用形態（流域の将来像）に即した流出量の比較・検討」に適用できる。（流出予測への適応性）
- 2) 実績洪水（観測洪水）を実用的に要求される再現精度で、モデル定数を同定できる。（同定での再現性）
- 3) 同定されたモデルによって、（同定に利用した以外の）実績洪水が実用的に要求される精度で再現できる。（検証での再現性）

2. 評価項目

上記の基本的な視点の幾つかについて、その内容をさらに分割、列挙し、また実務面・実用面からの適用性に関わる項目を加えると、以下のとおりである。

1) 流出予測への適応性

- 1.1) 治水に関わる貯留施設などの効果の評価に利用できる。(対策評価)
- 1.2) 流域特性・土地利用形態などをモデルに直接的・陽的に導入できる。(流域特性の導入)
[流出モデルの構造や仕組み、モデル定数と流域特性との関係などのわかり易さ]
- 1.3) 基準点(最下流点)および流域内の主要点(主要支川など)で流出量が算定できる。
(部分流域の流出計算)

2) 同定での再現性

- 2.1) 観測誤差等を含む実績洪水データを用いても、実務的、実用的な精度でモデル定数を同定できる。(同定の精度)
- 2.2) 基準点および対象流域内の(複数の)洪水観測地点で、実績洪水を再現できる。
(複数地点での再現)
- 2.3) 同定したモデル定数が安定している。すなわち、モデル定数の小さな変化が、流出量の算定値の大きな違いにつながらない。(解の安定性)

3) 検証での再現性

同定されたモデルによって、(同定に利用した以外の)実績洪水が実用的に要求される精度で再現できる。(検証での再現性)

4) 流出解析・流出予測の実用性と効率

流出モデルが稼働できるレベルにプログラム化されており、プログラムがブラックボックス的パッケージでないこと。また、流出モデルの同定(流出解析)および流出予測の計算処理等が、実務上、効率的である。

(計算の実用性と効率)

5) モデルとデータの整合性

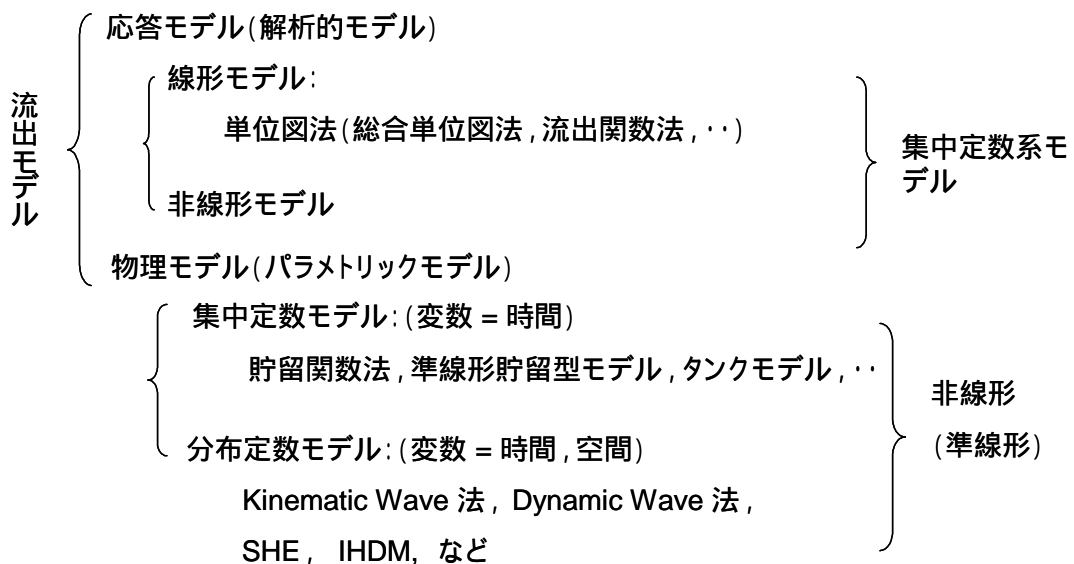
流出モデルの構造・システムと観測データ、流域特性データの質・量との整合性がある。すなわち、モデル構造が複雑・多層であるためデータの質・量が不足する、逆にモデル構造が単純すぎて既存データを十分活用できない。(モデルとデータの整合性)

3. 流出モデル(流出計算法)

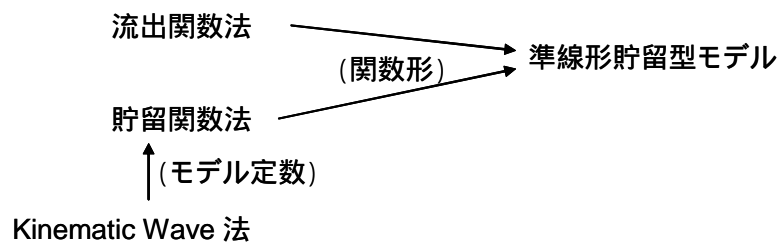
流出モデルとして、一般的、実用的なものを挙げると、

- a) 単位図法 (総合単位図法, 流出関数法)
- b) 合理式法 (合成合理式法 = 単位図法 + 合理式)
- c) 貯留関数法
- d) 準線形貯留型モデル
- e) タンクモデル法
- f) Kinematic Wave 法 (等価粗度法)
- g) Dynamic Wave 法
- h) 上記以外の, 流域情報の導入を考慮した分布型モデル (SHE = Systeme Hydrologique Europeen, IHDM = the Institute of Hydrology Distributed Model, など)

流出モデル(流出計算法)の分類



流出モデルの関係



4. 流出モデルの選択

上掲の流出モデルについて、2. 評価項目 にしたがって評価すると、以下のとおりである。

- a) 単位図法（総合単位図法，流出関数法）は，降雨・洪水の観測データを用いて，単位図（核）を求める方法である。
 - a-1) 流域を分割すれば，各部分流域ごとに単位図を求める必要があるが，この同定に利用できるほどの観測データの蓄積が無い。
 - a-2) 流域特性の変化，貯留施設などの影響をモデルに導入できない。そのため，流出予測，治水対策の検討などができない。
 - a-3) 総合単位図法は，流量観測データの無い流域で，主として地形データから単位図を得る方法であり，精度は期待できない。
 - a-4) 流出関数法は，核を関数形で与える方法であり，基本的には，単位図法と同じである。

- b) 合理式法（合成合理式法）
 - b-1) 合理式そのものは，洪水ピーク流量のみを算定するもので，ハイドログラフは求まらない。
 - b-2) 堤内地，河道，貯留施設などの貯留効果・影響を流出計算に導入できないので，治水対策等の評価に利用できない。
 - b-3) 合成合理式法は，洪水到達時間内の平均降雨強度に基づいて算定される三角形波形のハイドログラフを重ね合わせてハイドログラフを作成するもので，降雨の時間分布が適切に導入できず，また流域分割をする場合，（洪水到達時間の違いのため）不適切である。

- e) タンクモデル法は，表面流・中間流・地下水流等の流出成分を同時に取り扱うために，通常，複数個のタンクを直列（縦列）に並べて流出系を表現する方法である。各タンクには，側面に1つあるいは複数の流出孔，底面に1つの浸透孔が設けられる。同定では，流出孔の係数，浸透孔の係数，また流出孔の底面からの高さなどを，実績洪水が再現できるように決定する。
 - e-1) 流出孔・浸透孔の係数や，流出孔の数や高さを適切に決定すれば，実績洪水をよく再現できる可能性が高い。しかし，各パラメータと流域特性との関係は明確でない。
 - e-2) タンクモデルの構成・構造は一定でなく，また同定すべきパラメータの数も異なるため，対象流域ごとにモデルの同定を行う必要がある。
 - e-3) パラメータの物理的意味が必ずしも明確でないため，土地利用形態等の変化や，貯留施設などの効果・影響をモデルに導入できない。

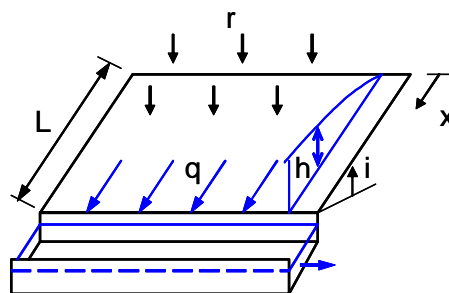
- f) Kinematic Wave 法は，流出現象を力学的に解釈しようとする立場から，斜面上の流れなどを物理的に解析するモデルである。降雨を考慮した連続式と平均流速式に基づく流量式を用いて，一定勾配の斜面上の流れを解析的に解くものである。実績洪水の再現（モデルの同定）は等価粗度の同定によって行う。流速式は，ふつつ Manning 則による。解法は，特性曲線法あるいは数値解析法がよく用いられる。
 - f-1) 流域分割の後，各部分流域を「一定勾配の長方傾斜面」に置き換える。このため，勾配や粗度（等価粗度）の水理学的意味が明確でない。また，等価粗度係数は，分割流域の大きさによって変わる。したがって，土地利用形態等の変化の影響をモデルに導入できない。
 - f-2) 貯留施設の影響・効果を導入できない。

- f-3) 計算処理量が大きくなりがちであり，数値解の収束・安定の面からも計算方法に配慮が必要である．
- g) Dynamic Wave 法は，Kinematic Wave 法の考え方に運動力学的要素も合わせて導入し，流出現象を解析するモデルである．モデルの適用対象は，主として，低平地の河道内流れである．
- h) 分散型モデル（SHE など）は，流出過程および流出に関わる諸要素をできるだけ細分化し，それらを密にモデルに導入して流出計算をしようとするものである．すなわち，流域を 3 次元（水平方向および鉛直方向）に分割し，流出過程については樹冠での降雨遮断，斜面流，河道流，土中への浸透，地下水流などを同時に取り扱うことを意図したモデルである．
- したがって，このモデルを適用するには，細分化された 3 次元空間での植生，地形，粗度，土の透水性等々の情報をモデルに規定する必要がある．しかし，（武庫川流域では）現実にはそのような詳細情報が存在せず，モデルとデータの質・量が整合しない．
- また一般に，このような分散型モデルは，時間スケールのことなる現象を同時に取り扱うものであり，計算手法的にも，計算量的にも多くの対処が必要となる．

5. 貯留関数法と準線形貯留型モデルの比較

Kinematic Wave 法 (等価粗度法)

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \\ h = Kq^p \end{cases} \quad \begin{cases} h = (\text{斜面上の}) \text{水深} \\ q = \text{斜面単位幅流量} \\ r = \text{有効降雨強度} \end{cases}$$



Manning 式を用いると $K = \left(\frac{n}{\sqrt{i}} \right)^p$, $p = 0.6 = \frac{3}{5}$

$n = \text{等価粗度}$
 $i = \text{斜面勾配}$

$$h = Kq^p \Rightarrow q = \alpha h^m$$

層流: $\alpha = \frac{g i}{3\nu}$, $m = 3$ ($p = \frac{1}{3}$)

Manning 則: $\alpha = \frac{\sqrt{i}}{n}$, $m = \frac{5}{3}$ ($p = \frac{3}{5} = 0.6$)

Darcy 則: $\alpha = \frac{\kappa i}{\phi}$, $m = 1$ ($p = 1$)

$g = \text{重力加速度}$
 $\nu = \text{動粘性係数}$
 $\kappa = \text{透水係数}$
 $\phi = \text{土の有効間隙率}$

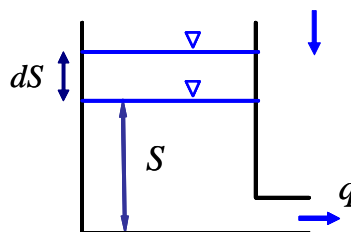
$$s = \int_0^L h(x, t) dx \quad \begin{cases} s = \text{斜面単位幅貯留量} \\ L = \text{斜面長} \end{cases}$$

貯留関数法

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = fr(t - T_\ell) - q \\ S = Kq^p \end{cases} \Rightarrow q = \sqrt[p]{\frac{S}{K}} = \frac{S^{1/p}}{K^{1/p}}$$

$$q = (q - q_i)$$

$fr = \text{有効雨量}$



$S = \text{流域上の(仮想の)雨水貯留高}$

$r = \text{降雨強度}$

$q = \text{流出高(流出量 / 流域面積)} = S \text{ の関数 とする}$

$f = \text{流入係数(=流出係数)}$

$T_\ell = \text{遅れ時間(遅滞時間)}$

$q_i = \text{増水の始まった時の流量}$

同定するモデル定数:

$$K, p, T_\ell, f$$

Kinematic Wave 法との比較などから

貯留関数法のパラメータ K は,

斜面勾配 i , 粗度(等価粗度) n , および
斜面長 L (あるいは流域面積 A)

の関数であると考えられる.

また, 流れの状態が決まるパラメータ p を

固定する(すなわち流域全域で流れの状態
が同じとする)と, それ以外の流れ状態が存
在する場合, パラメータ K は, p の値によ
っても変わる.

モデル定数の値(1次設定値)

$$p = \frac{1}{3} \text{ (層流)のとき, } K = 43.4 \times C \frac{L^{1/3}}{i^{1/3}}$$

C : リザーブ数 $\left\{ \begin{array}{l} 0.12; \text{自然流出} \\ 0.012; \text{人口流出} \end{array} \right\}$ として, それぞれの面積率による加重平均値

$$p = \frac{3}{5} = 0.6 \text{ (Manning 式)のとき, } K = 2.5 \left(\frac{n}{\sqrt{i}} \right)^{0.6} A^{0.24}$$

$\left\{ \begin{array}{l} n = \text{等価粗度} \\ i = \text{斜面勾配} \end{array} \right\}$ 流域の平均値

準線形貯留型モデル

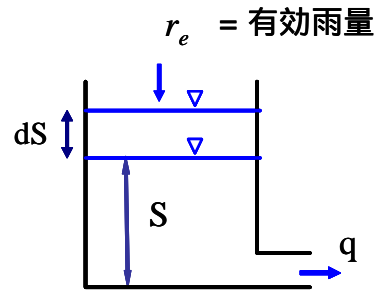
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt} = r_e - q \quad (r_e = f r) \\ S = K q \quad \leftrightarrow \quad \left(q = \frac{S}{K} \right) \end{array} \right.$$

$$K = T_\ell = \frac{T_c}{2} \quad \left\{ \begin{array}{l} T_\ell = \text{遅れ時間} \\ T_c = \text{洪水到達時間} \end{array} \right.$$

$$T_\ell = CA^{0.22} r_e^{-0.35} = C \frac{A^{0.22}}{r_e^{0.35}}$$

地目別に(ある範囲で)既定
(この範囲内の値で同定)

同定するモデル定数: $K (\leftrightarrow C)$, f



(例1)

水田: $C=1000$

山林: $C=290$

畑地: $C=210$

市街地(舗装, 下水): $C=50$

(例2)

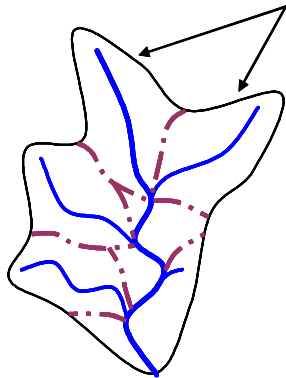
丘陵山林地: $C=290$

粗造成地: $C=90\sim120$

ゴルフ場・放牧地: $C=190\sim210$

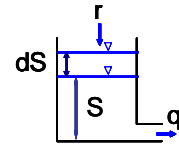
市街地: $C=60\sim90$

流出モデル (流域モデル) (斜面モデル)



部分流域(支流) ごとに,

- (1) 市街地 …… 流出モデル
- (2) 畑 …… 流出モデル
- (3) 水田 …… 流出モデル
- (4) ゴルフ場 …… 流出モデル
- (5) 池(ため池など) …… 流出モデル
- (6) 山林 …… 流出モデル



土地利用状況に応じて
モデル定数が異なる.

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = r - q \\ q = \alpha \times S \end{cases}$$

(ただし,ため池・調整池などの貯留・調整機能はそれらの諸元を与えて計算.)



各モデルで算出されるのは,比流量 $[m^3/(s.km^2)] = q$



$$\text{部分流域の総流出量 } Q [m^3/s] = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{比流量}}}{(q_1 \times A_1)} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{面積}}}{(q_2 \times A_2)} + \dots + (q_6 \times A_6)$$

市街地 畑 …… 山林

貯留関数法と準線形貯留型モデルの比較

評価項目	貯留関数法	準線形貯留型モデル
流域特性・土地利用形態の導入 (流域特性の導入)	貯留関数のK値の設定では,リザーブ定数による方法では流域粗度(自然流域 $C=0.12$ 、都市流域 $C=0.012$)は2区分. (等価粗度を用いた方法では,準線形貯留型と同様に,地目別等価粗度の加重平均値からK値を設定)	土地利用形態等の導入を主眼に作成された流出モデル. モデル定数Cは,全国の流出試験地や検証により,地目別にある範囲内に設定されている.
流域モデル定数の同定 (同定の精度)	モデル定数の一次設定には,流域の勾配,流路延長,リザーブ定数あるいは等価粗度が利用できる.しかし,モデル定数とこれら流域特性値との水理学的意義は必ずしも明確でない. 1次設定値から出発して,モデル定数を任意に調整・調節することで,実績洪水を実用的な精度で再現できる.ただし,この結果,同定された個々のモデル定数の物理的意味が不明確になり,流域特性との関連付けも不明確になる.	地目ごとにモデル定数Cの数値が或る範囲内で設定されている.モデル定数の同定をこの制約のもとで行うと,実績洪水を必ずしも良く再現できない場合がある.したがって,対象流域ごとに,同定における再現結果について,再現性の評価が必要である. 再現精度が満たされていれば,地目ごとのモデル定数の妥当性が確かめられる.

モデル定数（損失特性）の同定 （同定の精度）	損失雨量（あるいは有効雨量）の算定では、一次流出率 f_1 と飽和雨量 R_{sa} を用いる。地目別の損失として算定せず、流出計算地点での流域平均的な損失を表現することになる。	モデルが地目別に構成されるため、損失特性も地目別に導入できる。したがって、地目ごとの損失機能が表現でき、土地利用形態の変化をモデルに直接的に導入できる。
（部分流域の流出計算）	部分流域の最下流端での流量を算定するモデルであり、部分流域内の支川や地目の違いは平均化され、単一の比流量で表現される。 支川や地点での流量算定には流域を細分化する必要があるが、流域特性との関連付けが困難なため、モデル定数の同定値や流量算定値の信頼性は低くなる。	土地利用形態を導入するモデルであるため、流域分割を細分化することによって、流域内の主要地点での流量や、部分流域内の地目別の流出計算を行うことが可能である。 （ただし、同定の過程で、地目ごとのモデル定数の妥当性が確かめられていることが必要である）
貯留施設などの効果の評価 （対策評価）	部分流域ごとの比流量が算定されるため、個々の施設の貯留効果を評価するのは困難である。大規模なダム施設などについては、評価のための対応が可能である。	部分流域内を更に土地利用別に分割するので、地点流量の算定が可能であり、個々のため池や防災調整池についても上流土地利用に対する貯留効果を計算できる。
土地利用形態の変化による影響の評価 （予測への適応性）	モデル定数と流域特性の関係が必ずしも明確でないため、再現によって求めた同定値を、土地利用形態の変化に即して系統的、定量的に求めることは困難。	地目別に、その変化を流出モデルに直接的に導入できる。 （同定過程で、地目ごとのモデル定数の妥当性が確かめられていることが前提）
実績洪水の再現性 （同定での再現性）	（昭和 62 年以降の実績洪水データを用いた同定と再現結果）	
検証での再現性	（台風 23 号の実測洪水データを用いてモデルの検証）	