

山地において流出計算を行うためのモデル開発研究

The study on the runoff modeling for mountain basins

新潟大学工学部 正員 岡本芳美

1 はじめに

1 昔前位までの流出計算の目的は専ら計画洪水の算定にあった、といっても過言ではない。しかし、最近では流域管理のための流出計算に力点が移りつつある。ここでいう流出管理のための流出計算とは、流域から刻々雨量を蒐集し、これに予測雨量を加えて、過去から将来にかけて連続的に流出計算を行い、流域管理の基礎データとするものである。このような計算を現在特に必要としているのは洪水調節を行う多目的ダムであり、そこで要求される計算の精度は流量の大小に関係なく10%オーダと極めてきびしいものである。本研究は、以上のための流出モデルの開発を目的としたものである。

2 これまでの研究経緯

本研究は、次に述べる4段階の研究を基礎としている。すなわち、第1段階においては、計画規模の大洪水の流出モデルの開発のための基礎研究として、わが国の山地の代表的状況に近いと思われる利根川水系赤谷川赤谷湖畔の小谷に“相俣試験地”と呼ぶ小流出試験地を設け、そこで洪水流出現象の観測と各種の現地実験を行って、特定流域における現象の解明を行った。そこでの研究で得られた事柄の中の特記すべきものは、山地の成熟した林地においては、地面に落下した降雨はすべて地中に滲透して、表面流出は起こらない。地中に滲透し土の湿りの不足等を満たしたあとの雨水は、中間流出せず、さらに山の本体を形成する基盤岩層の中に節理等の割れ目を通して皆な滲透して行ってしまう。この雨水は、土壤水帯、中間帯を通過して地下水帯に到達するまでの時間を考えなければ、露岩地帯等で発生する表面流出とそんなに変わらない速度の流出の仕方をする極めて早い地下水流出から、年余にわたって雨が降らなくても流出を持続する長期安定地下水流出まで幾種類かの段階的流出の仕方をする、ということである。

第2段階の研究では、全国に散らばる山地多目的ダムを利用して山地流域の洪水データを蒐集し、特定流域すなわち相俣試験地で得られた結果との関連でそれらを解析し、相俣試験地で起こっている現象には普遍性があり、したがって解明された事柄がわが国の一般山地流域に対して十分適用できることを証明する研究を行った。

そこで、第3段階の研究に入り、相俣試験地で得られた結果に基づき、山地における計画規模の大洪水を再現計算するための流出モデルを組み立て、前述の全国に散らばる多目的ダムに適用し、各流域について最適の結果を得るパラメータの値を求めて統計的解析を加え、パラメータの値の設定規則を作ることを試みた結果、一応の成果が得られた。

ここまでの研究は専ら計画規模の大洪水を対象として来たが、第4段階の研究では対象を拡大して低水流出の問題にふみこみ、それまでの流出計算は高水流出計算と低水流出計算に分けられ、同じ流域であっても目的に応じて別々のモデルが用いられて来たのを、1つのモデルで低水と高水を一貫して計算する方法の可能性を検討した。ここでは、前段階で開発した高水流出モデルを原型モデルとした。低・高水を一貫計算する際の問題点は、蒸発散量を如何なる形で算定するかという点にあり、Hamonの可能蒸発散量算定方法を蒸発散の発生をあらわすタンクの計算に応用すると良い結果が得られるという結論に達した。

以上の研究経過から本研究で目的としている流域管理のための流出モデルの組み立ての方向として得られた事柄は、次の3点である。①河道の貯留作用を積極的に取り入れなければならない。②表面流出や中間流出の発生する地帯の面積は、それがたとえ面積率では小さな値を示しても、適格にとらえなければならない。③流域の各部の流出特性を平均化せずに計算結果に反影させなければならない。

3 流出モデル開発研究に関する著者の考え方

流出モデルの開発研究は、主として次の3つの事柄から由来する他分野のモデル開発にあまり例を見ない特質を持っている。まず、第1に、降水の流出現象は未だ十分に解明されていない。このため流出モデルの組み立ては現象の推理にたよらざるを得ない面が強い。第2に、流出現象を支配する要素の数は無数と言って良い位あり、主要な現象をもって全体を代表させざるを得ない。しかし、何が主要な現象であるかについてはなだ論の別かれる所のものであり、しかもそれらの現象を直接数理的に表現することが難しく、比較的似かよった、たとえばタンクという様な理想的な現象に置きかえてモデル化せざるを得ない。第3に、その結果、組み立てたモデルのパラメータの値を観測・測定から直接決めることが難しくなり、再現計算を通して試算で求めざるを得ない。このため、流出モデルの開発研究においては、雨量と流出流量の関係が判明している資料が必須である。すなわち、流出モデルの組み立ては、現状においてはすこぶる経験的で、理論的とはいいがたい面が強いのではないかと思う。

次に、流出モデルの良否の判定は、都合の良い出水に対してだけモデルを適用することで行われていることが往々にしてあるが、1つの流域に関しては、タイプの異なる代表出水全部に適用したあとでなければその良否を論じてはならない。特定の流域について良い結果が得られたからと言って、その他の流域についてそれが通用するという保証は、流出モデルに関する限り無いものといえる。すなわち、特定流域でなく一般流域を対象とした流出モデルの開発に当っては、全国に散らばる相当数、著者の考えでは30オーダの流域に適用して進める必要があり、適用出水数、適用流域数の少ない流出モデルに対してはその価値の判定はつつまれるべきであると思う。

最後に、モデルの良否を論ずる場合、その規準としては一般に再現度だけが用いられることが多い様である。しかし、これは、必要条件であって、十分条件ではない。なんとなれば、モデルのパラメータの値をその物理性を無視して気ままに動かす事によって、個々の出水に対して相当高い再現度を得ることが容易であるからである。モデルの良否の十分条件は、まずパラメータの値の設定規則が作り得たかということと、次にその規則の中で数式であらわし得ない部分がどれだけ少くなっているか、ということであろう。

要するに、流出モデルの組み立ては経験的要素が極めて強いものであって、すなわち現状においては結果論の世界であって、完全に満足すべきモデルが組み立てられた時のその基礎となった流出現象に対する推理が科学としての成果になるのではないかと考える次第である。

4 流域管理のための流出モデルの開発の過程で得られた結論

流域管理のための流出モデルは、出水の状況、すなわち流量の大小に関係なく10%オーダの計算精度が要求される。この要求を満たす最低限のモデル、すなわち必要最低数の要素をとりこんだモデルの開発に取り組んで来た著者の現時点における結論は以下の通りである。

1) 流域の分割 目標の精度で安定して流量を計算するためには、まず地表の状態・地形・地質の流域内における分布状況を計算に適格に反映させる必要がある。次に、大洪水のピーク流量発生前後では河道の貯留作用を無視しても計算結果に対する影響はそう大きくならない。しかし、大洪水のそれ以外の部分、中・小洪水では河道の貯留作用が状況によっては決定的な役割をする。大洪水に対しては、降雨の地域分布を無視して流域平均雨量を用いることができる。しかし、中・小洪水では、広い範囲で雨量を平均することは無意味となる。以上述べた3点をモデル組み立てに生かすためには、例としてかかげた図-1の流域を相当細かく分割して副流域、残流域、川の区間を図-2の様に設け、各分割流域でまず流出計算を行い、それらを川の区間で行う川の流れの計算(streamflow routing)で合成して、流域の出口の流量とする方法を取ることがどうしても必要である。

2) 土地の分類 土地の種類によって流出の仕方は典型的に異なる。そのため流域の土地を如何に分類するかは非常に重要な問題である。しかし、如何に分類して見ても、実際にそれに従って土地を容易に計測でき

なければ意味のない事である。近年 2.5 万分の 1 の地形図の出版が完成し、1.5 万分の 1 のカラー航空写真の普及から次の土地の分類が可能であり、かつ有意である。①川筋の土地 (イ)水面、(ロ)河岸、②山地 (イ)露岩地、(ロ)崩かい地、(ハ)裸地、(ニ)岩屑地、(ホ)草地、(ヘ)山林地、③耕地 (イ)水田地、(ロ)畑地、④市街地、⑤道路

3) 地形の分類 地形の分類の効果が出るのは、上述の分類の山地に対してである。したがって、地形の分類は次により、基本的には山地に対してのみ行う。①大起伏山地、②中起伏山地、③小起伏山地、④山麓地Ⅰ／大起伏丘陵地、⑤山麓地Ⅱ／小起伏丘陵地、⑥台地／段丘、⑦低地（国土庁刊 20 万分の 1 都道府県別土地分類図に準拠）

4) 山地の斜面の状況 山地に関しては前述の分類だけでは不十分で、加えてそこが①一様な大斜面、③谷が細かく刻みこまれた小斜面、②普通の斜面、から構成されているかによる分類を行う必要がある。

5) 地質の分類 地質の分類の効果が出るのは地形分類同様山地に対してで、次の程度の分類であれば一般流域について実行可能であり、かつ有意である。①火成岩、②第 4 紀火山岩 (イ)溶岩、(ロ)溶結火砕岩、(ハ)火砕岩、(ニ)火山砕屑物、③堆積岩 (イ)古生層、(ロ)中生層、(ハ)第 3 紀層、(ニ)第 4 紀層、④変成岩 (イ)変堆積岩、(ロ)その他の変成岩

6) 低次の川の部分の河床の状況 低次の川の部分の河床における土砂礫の堆積状況に対して次の様な分類が必要である。土砂礫の堆積している河道が①多い、②普通、③少ない、④ない

7) 細分割されて出来た副流域・残流域の河道における貯留作用について ここでの河床勾配は一般に相当急であるため、表面流（伏流と対比した）による流れに関しては、貯留作用は無視し得る。したがって、分割流域の河道網においては集中作用だけを考えれば良く、それは河床勾配から一義的に決め得る。

8) 表面流出・中間流出発生域の適格な把握 山地流域の前記分類の山林地を除いた部分が表面・中間流出の発生域で、これら土地の量の把握は、パーセンテージではなく絶対値で行う必要がある。

9) 川の流れの計算方法 細分割された各分割流域からの流出流量の合成は、水文学的方法で十分行える。対象となる川の分割区間の断面が不定形である場合は coefficient method、平均的な断面の想定が可能な場合は粗度係数を想定した kinematic routing を用いると良い結果が得られる。

5 細分割で生じた小流域を対象とした流域モデル

著者が開発している流域管理のための流出モデルは、流域の分割の結果生じた小流域に適用される流域モデルと、同様によって生じた川の区間に適用される川の流れモデルから成り、川の流れモデルは原則的にはどんなモデルを用いても良い。したがって、図-3 で示した流域モデルのみが独自性を持つことになる。

図-3 において、太い線で描いた部分が雨水に対して作用が起こる部分で、それらを結んだ受け口のついた、枝分かれしたり、1 つにまとまったりする管は、前段の部分モデルの出力を後段の部分モデルの入力として時間遅れなしに伝える役目を果すものである。枝分かれしている場合は、後段に対して雨水の強度を伝える。1 つにまとまっている場合は、面積比率で各前段からの出力を後段へ伝えることを意味する。

このモデルは多種多様なタンクが母体となっており（このモデル図では、タンクの深さの分布は原則として表現されていないので、タンクの数はいくらよりもっと多くなる）、そのため Multi-Tank Matrix model と命名されている。限られた紙数でこの複雑な構成のモデルを全部説明することはむずかしいので、山地の林地に関連する部分についてのみ行いたいと思う。

まず、最上段にあるのが樹冠層の遮断作用とそこからの蒸発をあらわす部分モデルで、タンクに雨水が貯ることが遮断作用、流出孔からの流出が遮断された雨水の大気中への蒸発、溢流頂からの溢流が地表面をおおう落葉層への雨水の落下をあらわしている。

第 2 段目にあるのが落葉層の遮断作用とそこからの蒸発をあらわす部分モデルで、その特質は樹冠層の部分モデルと全く同じである。

第 3 段目にあるのが、山林地の土壌が土の湿りとして雨水を保留し、かつそれが大気中の樹木の成長によ

る発散作用で戻って行くことをあらわす部分モデルで、タンクの深さが最大保水量、流出孔からの流出量が発散量、溢流頂からの流出量が山林地で発生する有効雨量となる。なお、土壤層の表面から大気中への土壤水分の蒸発は、殆ど起こらないものとして無視している。

第4段目にあるのが、山林土壤が土壤粒子の表面に水分をひっかけたり、団塊構造の小孔隙の中に水分を貯留したりすることが有効雨水を抑留する作用があるのをあらわした部分モデルで、ここで抑留作用を受けたあとの雨水が山地の本体を形成する基盤岩層の中へ節理の割れ目等を通して滲透して行く。基盤岩層の滲透能を上回る有効雨水が発生した場合は、土壤水帯の大孔隙の中に一時的に抑留されることになるが、この現象はモデルに組み込まれていない。すなわち、基盤層への滲透は無制限と考えている。

第5段目と第6段目が中間帯における現象をあらわしている部分モデルで、この2段については、上下をいれかえても一向にかまわない。第5段目は、土壤水帯から中間帯に移って来た雨水が、岩の表面にひっかかったり、割れ目の間に貯ったりして生ずる抑留作用をあらわしている。その特性は、土壤層の抑留作用をあらわすタンクと全く同じである。第6段目の斜線は、雨水が中間帯を抑留作用を受けずに通過して、地下の帯水層に到達するに要する時間をあらわしている。

第7段目は地下の帯水層で、最上層が地下水を極めて速く、第2層が非常に速く、第3層が速く、第4層がゆっくりと、第5層の最下層が一定強度で地下水を河道に流出させる帯水層に相当し、各層は互いにパイプで連結されている3列に並列したタンク（5層連結タンク）群となっている。各タンクを連結しているパイプは、下の層のタンクに空の部分が生じたり、あるいは生じようとしている時、ただちに上の層の貯水、あるいは最上層への入力をそこへ補給する役割を行うものである。

まず、最上層は、深さが無限大の貯水量と流出量の関係が線形のタンクである。第2層目から4層目までのタンクは、貯水が天井に着くまでは貯水量と流出量の関係が線形で、天井に着いたならば天井水位に相当する一定量を放流する部分線形タンク（第4段目と第6段目のタンクも同様）であり、これらは各層毎タンクの深さは同じである。最下層のタンクは、列毎に深さが異なり、かつ真中の列のタンクは2階に、右側の列のタンクは3階に仕切られ、上から3・2・1階と呼ぶものとする。真中、ならびに左側の列のタンクの各対応する階は同じ名前と呼ばれている。この最下層のタンクは、貯水位が1・2・3階のどこにあるかによって流出孔からの流出強度が段階的に異なって来る一定量流出タンクである。なお、5層連結タンクは、図では3列になっているが、実計算上では100列で構成され（1列が面積1%に相当）、最下層は左から右に向け段々と深くなって行く。

上4層の貯留係数は、4層目を1とすると（基本貯留係数）、第3層目が0.5、第2層目が0.25、第1層目が0.125という様に上に向け顕著に小さくなる。最下層のタンクの一定流出強度は、3階を1（基本流出強度）とすると、2階が0.5、1階が0.25という様に下に向け顕著に小さくなる。

左側の列に相当するタンク群の最下層の3階の深さは、1という単位の半減日数（基本半減日数）で段々と空になって行く深さの分布をする。真中の列に相当するタンク群の最下層の2階の深さは10という単位の、右側の列に相当するタンク群の1階の深さは100という単位の半減日数で段々と空になって行く分布をする。したがって、最下層のタンクが満杯の状態を開始時点として無降雨の日が長期間にわたって発生した場合は、片対数方眼紙上では3本の折れ線であらわされる流量の減衰状況が発生することになる。また、この様な最下層の深さの分布のため、左側の列に相当する地帯（敏感な地下水流出地帯）では、降雨の開始よりわずかな累加雨量で最下層が満杯となり、第4層・第3層のタンクからの流出が起こる。他方、右側の列に相当する地帯（安定した地下水流出地帯）では、余程の大雨でも降らない限り第4層より上のタンクからの流出は起こらず、また一年中安定した地下水の流出状態が発生する。真中の列に相当する部分を普通の地下水流出地帯とよぶ。この様な最下層の構造を考えた事が、本モデルの最大の特徴である。

第1段目から第7段目までが斜面での現象をあらわす部分モデルで、第8段目は斜面から河道に流出した雨水がそこに土砂礫の堆積層がある場合、それによって受ける抑留作用をあらわしており、部分線形タンク

を用いて部分モデル化されている。配水管が2つに分岐している左側は、河床堆積物のないけい流河道の部分であらわしている。

最下段に描かれた斜線は、流域の河道網に流出し、そこで前段の抑留作用を受けたあとの有効雨量が流域の出口へ向け河床勾配に応じた速度で集中して行く過程をあらわしたもので、ここでは河道の貯留作用は無視されている。

6 パラメータの値設定規則について

このモデルの数多いパラメータ全部についてその値設定規則を述べるには紙数が不足するので、山地の地下の帯水層をあらわす部分モデルについてのみ述べることにする。

敏感な・普通の・安定した地下水流出地帯の面積率は、4の3)の地形分類から決められ、大起伏山地では敏感な地下水流出地帯は50%程度、安定した地下水流出地帯は10%程度の値をとる。

一定流出強度の帯水層の流出強度の基本値は10 mm/day程度、その厚さ分布を決める半減日数の基本値は4の5)の地質分類から決められ、火成岩と変成岩で3日、火山岩と堆積岩で3～9日という様な値をとる。

流出速度の非常に速い・速い、ゆっくりとした帯水層は各25 mm程度に相当する厚さを持つ。流出速度が極めて速い帯水層を含めてこれら帯水層の貯留係数の基本値は4の5)の地質分類から決められ、火成岩と変成岩で10 hr、火山岩と堆積岩で10～30 hrという様な値をとる。

上述の一定流出強度、半減日数、貯留係数の基本値は、地形・地質が一樣な流域については次に述べる解析的な方法で値を設定する事が可能である。すなわち、雨が激しく降り続いて突然止んだ計画規模の大洪水のハイドログラフの減退部を片対数方眼紙にプロットしなると、最大流量の発生時点から3～4日間後位の所に曲線から直線に移り変る点が必ず出る。この移り変り点の流量を雨量強度と同じ単位に変換すると一定流出強度の基本値が得られる。移り変り点以降のハイドログラフの通減係数から基本半減日数が求まり、移り変り点の流量を控除したあとの流量の通減係数が基本貯留係数となる。

7 計算開始の時点と初期条件について

本モデルで流域からの流出流量の計算を開始する時点は、雨天でない日が1週間程度続いたあとの時点とする。これは、各部分モデルの初期値の設定から来ている。また、初期条件としては、計算開始時の流域の出口からの流出流量と標準的な山腹の中腹の土層の土の湿りの不足量（野外容水量とその時点の土の湿り度の差額）を与える。土の湿りの不足量は、Hamonの可能蒸発散量計算方法を応用して容易に推定することが出来る。

8 おわりに

本モデルの実際流域への適用は未だ10に満たない。早急に目標としている30流域に近かずけ、モデルではなく流出計算法として報告したいと考えている。また、本モデルに融雪モデルを上をのせすれば、融雪流出モデルを開発することが出来るので、今後の研究の方向をそちらに向けたいと考えている。

本モデルの命名(Multi-Tank Matrix model)に当っては、元建設省河川局長現河川環境財団理事長梅野康行氏、新潟大学加藤皓一理学博士の御助言を得た事を記し、紙面を借りて御礼申し上げる次第です。

9 参考文献

本研究に至る一連研究は本講演会を主体に発表されて来ており、研究の経緯で述べた段階毎にその回数を示せば、第1段階は第16・17回、第2段階は18・19・20回、第3段階は第21・22・24回、第4段階は第26・27回である。また土木学会論文報告集第280号においては、第3段階までの研究のとりまとめが報告されている。