

山地流出流量の大コントローラについて

Great Controllers on Runoff from Mountain Drainage Basin

新潟大学工学部 正員 岡本芳美

1 はじめに

本研究は、山地流域における降雨による流出現象の解明と数理モデル化、究極的には、新流出計算法の開発を目的とした一連研究のほぼ最終段階に当るものである。著者のこれまでの研究では、数理モデルの組み立ては専ら現象の良好な再現を目指した試行によって行ってきたが、本研究ではこれまでに得た知見にもとずいて理論的な数理モデルの組み立てを試み、日本列島上の30流域に適用して理論の妥当性を検証すると共に、新流出計算法の方法論の確立を計った。

2 本研究の経緯

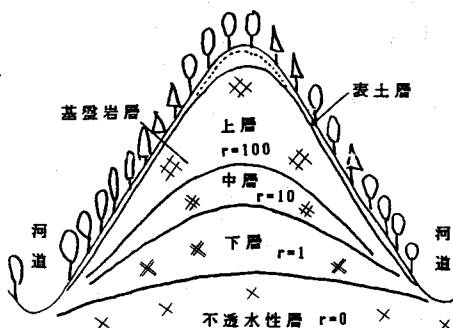
著者は、流出試験地を設けて行った実験的研究から、山林地の土層は、主として永年の樹根の繰り返しの腐食によって生じた大小の孔隙に富み、降雨は皆それら孔隙を通して土層中に浸透して、山林下においては雨水は地表面上を流れることはない。浸透した雨水は、土層中を地表面と並行して長距離流れることなく、さらに基盤岩層の割れ目の中に浸透する、という結果を得ている。そして、以上を受けて行った試行によるモデル計算の結果、基盤岩層に浸透した雨水の内の相当部分が河道に速やかに流出して行っている、と考えるのが妥当であり、山地流出の主要な過程の1つが基盤岩層の中にある、という結論に達した。

本研究は、基盤岩層内の雨水の動きを従来の経験論から転じて『節理の割れ目の開き』という概念の導入により説明することを行って、これまでの成果を総合したものである。

3 基盤岩層中の隙間の分布について

基盤岩層中に雨水が浸みこんで行く隙間は、主として節理による割れ目が開いて出来たものである、と考える。そうすると、節理の割れ目がどの様に開いて、そこをどの様に雨水が動くかを物理的に考えれば良いことになる。しかし、基盤岩層中の節理の割れ目の開き（節理の解放）の状態を目で見ることは一般にむずかしく、想像の世界に住まざるを得ないことが多い。そこで、地球科学的観点でそれを考えれば比較的合理的な節理の解放状態の想定を行うことが出来るのではないか、というのが本論の出発点である。

浸食による河谷の刻み込みによって山地が形成される前の平らで大きな基盤岩層中の節理の割れ目は皆閉じた（閉鎖）状態にあった、と考える。谷の刻み込みの開始と共に節理の解放が起こり、現在の山地の基盤岩層中には図-1において示されている様な節理の解放状態が発生しているものと考えられる。すなわち、おおむね河道を連ねた線より下では、節理は閉鎖状態にあり、ここでは基盤岩層は不透水性層になっている。そして、これから上に発達する透水性層には、テビカルに節理の解放の度合いが違いう上・中・下層の重なり合いが発生している。最下層は、節理の解放の度合いが少なく、そこに到達した雨水を貯水し、ゆっくりと河道に流出させる。中層は、下層より節理の解放の度合いが一桁大きく、中層が満杯の状態の時大量の雨水の降下があれば、層内に貯水し得る層である。上層は、中層より更に一桁解放の度合いが大きく、中層が満杯の状態でもその中に大量に雨水がたまることなく、中層上面を雨水は河道に向かって流れて行き、露岩上を雨水が流れて行くのに近い様な速度の地中流が発生する場所と考える。以上のシステムを考えた時の計算においては、不透水性層上に形成される滞水層に向け雨水が透過して行く速度、中・下層の厚さ、並びに形成された滞水層を河道



r : 節理の解放度

図-1 節理の解放状況

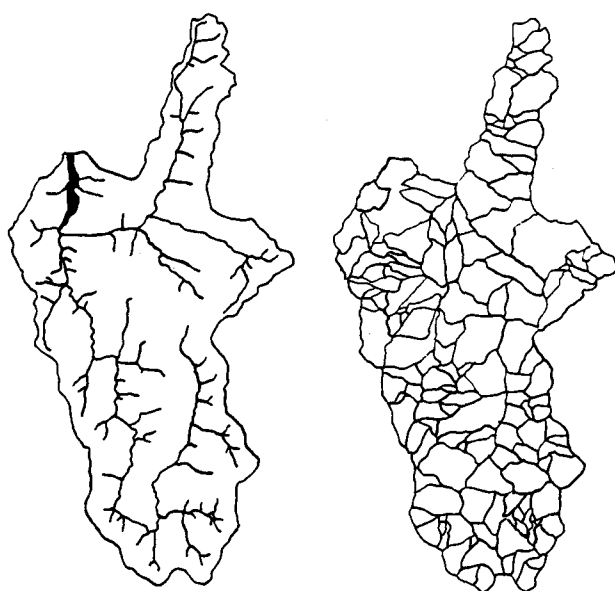
に向け雨水が流れて行く速度に関するパラメータを設定しなければならないが、それらパラメータの値の決定は、システムの持つ理論性から比較的合理的なものになり得る。

上に述べた概念を導入した数理モデルの組み立ては以下の通りである。

4 流域の分割

本モデルの組み立ては、原則として国土地理院発行の 2.5 万分の 1 地形図を用いて、流域を次に述べる性質を持った要素に分割することから始まる。以降の実例は、天竜川水系美和ダム流域について。

地形図に表現されている川を幹川、それ以外の川を全て溪流と呼ぶ。幹川網を合流点で分割し、幹川の分割区間を設ける。次に、各分割区間へ雨水が流出して来る範囲を地形からのみ定めて、これを分割流域と呼ぶ。図-2。こうすると、流域は図-3に示す様な流れ図で構成されることになり、分割流域は中間に位置するものと上流端に位置するものの2種類に分けられる。



(a) 幹川河道網

(b) 分割流域

図-2 流域の分割

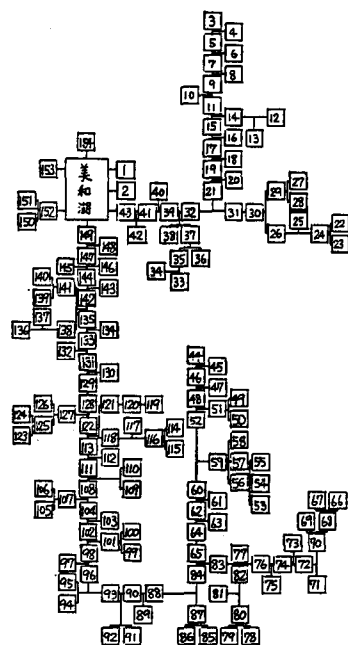


図-3 流れ図

中間に位置する分割流域は、長さが区間距離、面積を距離で商した平均幅を持つ長方形で、その真ん中に幹川が流れ、平均幅の2分の1の長さを持つ溪流が幹川に左右岸均等に合流しているものとする。上流端の分割流域については、幹川沿いに面積の半分、そして残り半分は幹川上流端より上に分布しているものとし、溪流の長さに関しては、幹川沿いの部分で求めた値と皆同じと考える。分割流域の雨水が落下する部分を斜面、雨水が常にまとまって筋になって流れる部分を河道と呼んで、河道は面積の無い線と考える。斜面は、幹川沿いにまとまって分布する底平地（谷）とそれ以外の土地（傾斜地）に分けられるものとし、更に谷の土地利用形態は水面、河岸、水田、畑地、市街地より、傾斜地は溪流と山林より成るものとする。山地流域には以上以外の土地利用形態があるが、それらは以上のどれかによって代表され得るものとする。谷の部分に降った雨は、幹川河道に直接流出するものとする。傾斜地に降った雨は、まず溪流河道に流れ込み、そこを流れ下って幹川河道に流入するものとする。幹川と溪流河道は、共に斜面からの雨水の流入が空間的に起こるのを、溪流河道においては先に述べた長さの半分の地点に集中して流れ込むものとし、幹川河道においては、上半分沿いの部分からの流出量は上流端に、下半分沿いは下流端に集中して流れ込むものとする。

以上の様な性質を持った分割流域を流出の要素と呼ぶ。

5 流出計算の流れ

本モデルにおいては、流出要素の中で斜面は河道に対して独立であるとする。次に、上流にある流出要素は、下流にある流出要素に対して独立であるとする。すなわち、4で述べた図-3の流れ図で、上に位置する流出要素からの流出量を下に位置する流出要素が無条件に受け入れるものとする。

6 流出モデルの組み立て

以上から、本数値モデルは、流出要素において溪流と山林地の2つの土地利用形態の斜面に降った雨が溪流河道に流れ込む過程、溪流河道を雨水が幹川河道に向け流れ下る過程、底平地の水面、河岸、水田地、畑地、市街地の土地利用形態の斜面に降った雨が幹川河道に流れ出る過程、幹川河道を雨水が下流に向け流れ下る過程の各部分モデルに分けることが出来、それ等の部分モデルの全体モデル構成状況を示したのが図-4である。なお、本モデルでは、部分モデルを総合したものを全体モデルと呼ぶ。

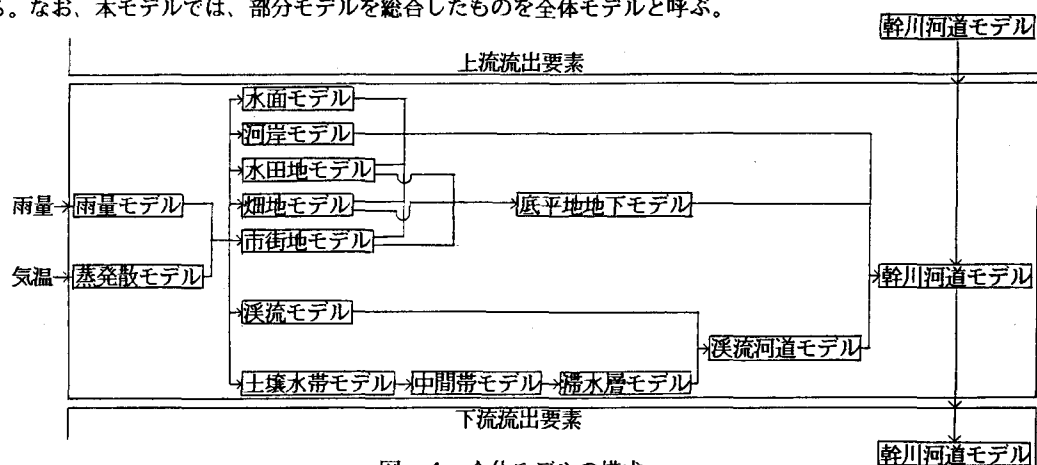


図-4 全体モデルの構成

本モデルは多種・多様なタンクと付属するパイプから構成されており、著者は『MTMモデル』(Multi-Tank-Matrix model)と命名している。図-5参照。ここで、パイプは、前にあるタンクの出力を後のタンクの入力として時間遅れ無しに伝える役目を果たす外は雨水に対しなんの作用も為さない。タンクの右側についている流出孔は、蒸発散を表わす。タンクの底についている流出孔は、雨水の土層中や基盤岩層中における垂直の降下を表わす。タンクに溢流頂がついているのは、満杯状態に達するとタンクからの出力の分岐が起こることを表わしている。タンクの左側についている流出孔は、地表面上、土層中、並びに基盤岩層中を雨水が河道に向け流れて行くことを表わしている。重なったタンクを直接上下に結ぶパイプは、より下層のタンクに空の部分が生じた時には、より上層のタンクに貯水があるか、あるいは入力があれば直ちにそれらによってその空の部分埋める働きをすることを表わしている。

7 部分モデルの説明

- 1) 雨量モデル 流出要素では、観測値のある1番近い雨量観測所の雨量が降るものとする。
- 2) 蒸発散モデル Hamon 式を用いて見掛の日蒸発散量を計算する。これに各土地利用形態毎の蒸発散係数を乗ずることによって、実際の蒸発散量を求める。
- 3) 水面モデル 水面は、地形図上で水面として表わされ、かつ容易に面積が測定出来る場所である。水面モデル(図-5-1)は、1段のタンクで構成され、右側の流出孔が水面からの蒸発、左側の溢流頂からの流出が有効雨量の発生を表わす。タンクは蒸発量に相当する量が斜面の流出量によって常に補充されているので、雨量はすぐに有効雨量になる。水面からの蒸発は、平水時の水面からのみ、しかも夜間も起こるものとする。
- 4) 河岸モデル 河岸は、地形図上で河岸と表わされていて、かつ容易に面積が測定出来る場所である。河岸モデル(図-5-2)は、2段に重なったタンクで構成される。上段のタンクは、蒸発散(右側の流出孔からの

流出)による土の湿りの不足(タンク内の水位の低下)の発生、降雨による土の湿りの回復(タンク内水位の上昇)と有効雨量の発生(溢量頂からの流出)を表わす。下段のタンクは、発生した有効雨量が河岸の土層中や地表面上を流れて(左側の流出孔から流れ出て)幹川河道に流入する状況を表わす。なお、河岸モデルは、平水状態を中心に組み立てられている。

5) 水田地モデル 水田地は、田面だけでなく、農道、用排水路、水田に囲まれた住宅地等を含めた水田地帯を指す。水田モデル(図-5-3)は、上、下層をパイプでつないだ3層の連結タンクで表わされている。上層は、田面の貯水を表わす。左側の流出孔がタンクの底から上っているのは、田面の灌がい時の貯水の水深を意味する。中・下層は、水田土壌層内の2つの水分状態を表わす。中層は土壌層の大孔隙内に水分が抑留されている状態を表わすタンクで、左側の流出孔からの流出は、貯水の地下への漏れ出しを表わす。これは、底平地の地下モデルへの入力になる。下層のタンクは土壌層中に水分が保留されている状況を表わすタンクで、非灌がい期の田面に貯水が無い時はここから蒸発散が起こり、田面に貯水がある時はこの水分は動かない。水田モデルは、灌がい・非灌がい期の別がパラメータになり、灌がい期においては水田の底からの漏水量と田面からの蒸発散量に相当する水量の補充を常に最寄の川から受ける。

6) 畑地モデル 畑地モデルは(図-5-4)、3段のタンクで表わされている。上段のタンクは、蒸発散と有効雨量の発生を表わす。中段のタンクは、有効雨量が地中に浸みこみきれなくなると過剰降雨になって地表面上にたまることを表わしている。下段のタンクは、地表面上にたまった雨水が幹川河道に流出して行く状況を表わしている。中段のタンクの底の流出孔からの流出量は、底平地の地下モデルの入力になる。

7) 市街地モデル 市街地は、浸透地と不浸透地に分けられる。浸透地は、表面が舗装されておらず地中への雨水の浸透が少しでも起こる場所である。図-5-5。

(a) 浸透地 市街地の浸透地モデルは、畑地のそれと全く同じであり、説明を省略する。

(b) 不浸透地 不浸透地モデルは、2段のタンクで表わされている。上段のタンクは、不浸透地の窪みに雨水がたまり、溢れて有効雨量になり、たまった雨水が蒸発して行く状況を示している。下段のタンクは、有効雨量が幹川河道に向け流れて行く状況を表わしている。

8) 底平地地下モデル 底平地の内水田、畑地、市街地の浸透地から地下への雨水の浸透・透過が起こるものと考え。底平地地下モデル(図-5-6)は、雨水が中間帯を通過する過程を省略して、1段のタンクで表わされる。

9) 溪流モデル 溪流は、傾斜地の溪流河道沿いの昔からの山林でなく、山林から雨水が流出して来る場所をいい、基盤岩が露出した部分と主として砂れきが堆積している部分に分けられる。図-5-7。

(a) 基盤岩露出部分 溪流の基盤岩露出部分のモデルは、1段のタンクで表わされ、市街地の不浸透地の上段のタンクと全く同じであるので説明を省略する。

(b) 砂れき堆積部分 溪流の砂れき堆積部分のモデルは、2段のタンクで表わされ、河岸のそれと全く同じであるので、説明を省略する。

10) 山林地モデル 山林地は、山地の中の前述までの土地の利用形態でない残りの部分全部を指す。山林地を垂直方向下に向けて土壌水帯、中間帯、滞水層の3に分け考える。

(a) 土壌水帯モデル 土壌水帯モデル(図-5-8)は、2段のタンクで表わされる。上段のタンクは、蒸発散による土の湿り不足の発生、降雨による土の湿りの回復と有効雨量の発生を表わす。下段のタンクは、有効雨量が土層を通過して、基盤岩層に浸透して行く状況を表わす。

(b) 中間帯モデル 中間帯モデル(図-5-9)は、1段のタンクで基盤岩層中に浸透した雨水が滞水層に向け透過して行く状況を表わしている。

(c) 滞水層モデル 降雨の状況に応じて山林地の地下に滞水層が形成される部分を柱状に分割し、その数を便宜上柱の面積が丁度1%になる様に100とする。そして、これら柱の中で起こる地下水の状況を5層の連結タンクで表わす。図-5-10。この連結タンクの下から上に向け数えて第1層目のタンクは図-1の下層、第2から4層までのタンクは中層、そして第5層目のタンクは上層と中層の境目の上付近に相当する。第1から4層までのタンクは、貯水がある限り一定強度で貯水を流出させる一定流出強度タンクで、その流出強度は第

2, 3, 4層が第1層より1桁大きい。この一定流出強度と半減日数、並びに早い地下水流出地帯と遅い地下水流出地帯という概念（本論文では説明されていない）を用いて第1から4層目までのタンクの深さの分布を決定する。最上層の第5層目のタンクは、流出量が貯水位に比例する線形タンクである。

11) 溪流河道モデル 溪流河道モデル（図-5-11）は、5層の連結タンクで表わされる。この連結タンクは滞水層の連結タンクと違って、各タンクの底から計った水位に流出量が比例する線形タンクで、流出孔の大きさは下から上に向って倍、倍という様な割合で大きくなっていると考えられる。

12) 幹川河道モデル 幹川河道モデル（図-5-12）は、5層連結タンクで表わされ、その性質は溪流河道のそれと全く同じなので説明を省略する。

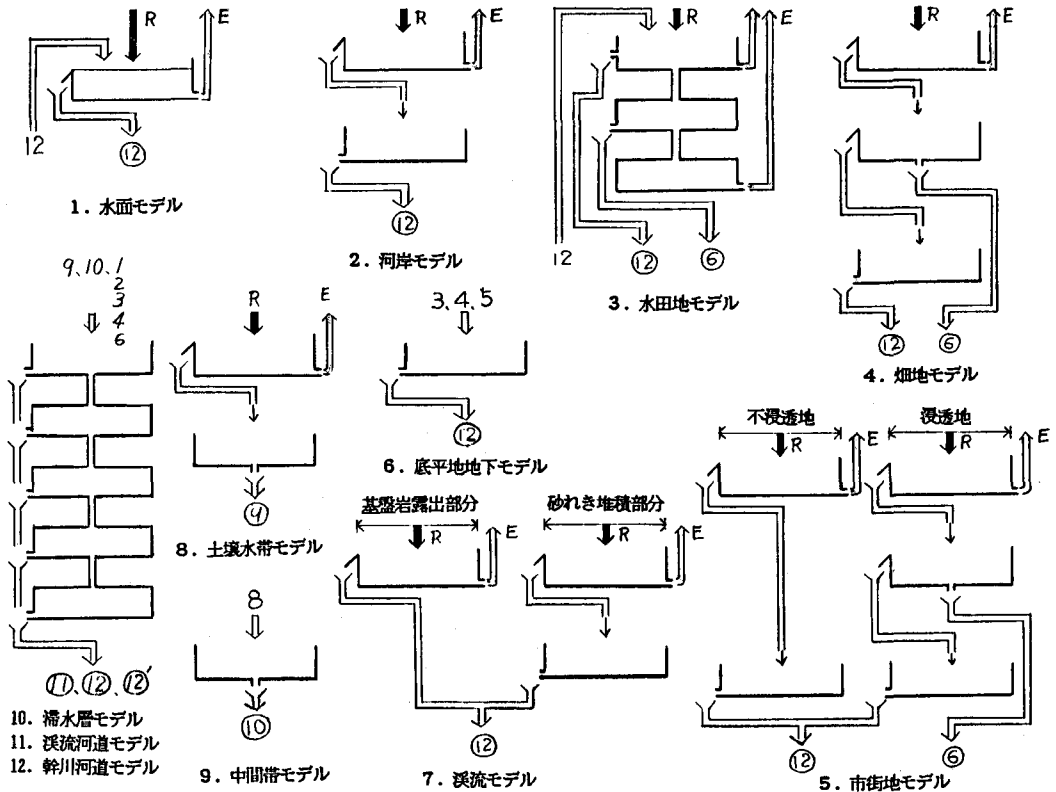


図-5 部分モデル説明図

8 計算開始条件

本モデルでは、無降雨の日が1週間程度以上つづいた後に選んだ計算開始時点の流量と山腹の中腹における土の湿りの不足量を与え、それによって各タンクの初期水位を決定する様になっている。土の湿りの不足量（土層中の空の毛管孔隙量）は、土の湿りの不足を解消した大雨の終了時点を開始点として、計算開始時点までの可能蒸発散量算定式で計算した累加蒸発散量と累加雨量の差として求めることができる。

9 パラメータの値設定規準について

本モデルによる計算においては、[全体モデルの持つパラメータ数×流出要素数]のパラメータの値を決定しなければならない。そこで、パラメータの値設定規準を準備し、膨大な数になるパラメータの個々の値を決める様になっている。パラメータは、その値を直接的に決めるものと地形や地質条件等から間接的に決めるものの2種類に分けられ、山林地の中間帯と滞水層のモデルは後者の例である。

本モデルにおいては、ある流域についてパラメータの値設定規準が作れたならば、それはその流域に関して本モデルが適用出来る、すなわち検証出来たと云うことを意味する。

10 本モデルの実流域への適用

本モデルを検証するため、図-6に示す全国に分布する30山地多目的ダム流域について、①個々の流域の個々の計算期間についてパラメータの値設定規準を作る、②個々の流域の全計算期間を通した規準を作る、③全流域の全計算期間を通した規準を作る、という手順で短期間、並びに中期間流出計算を行った。その結果、①では計算期間の殆ど大部分に関して満足の行く再現度が得られた。②では相当数の計算期間の再現度が実用に耐えうるものになった。この場合、流出規模が大きければ大きいほど再現度が良くなる。③では最低限当らずと云えども遠からずの線は確保出来る、ことが判明した。

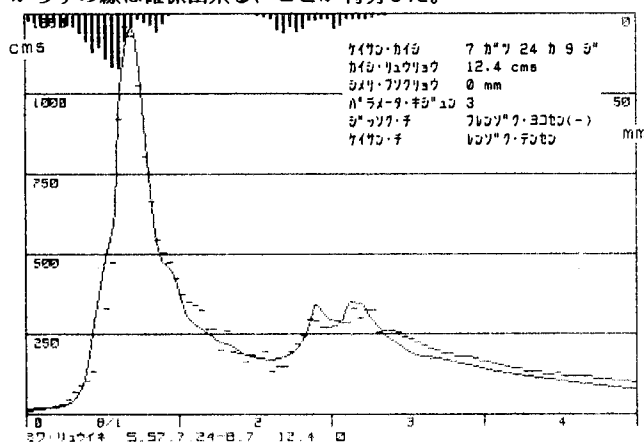
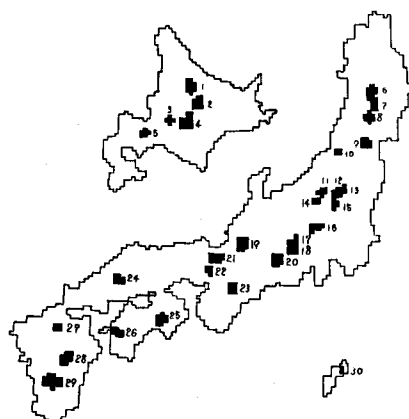


図-7 MTMモデル計算例



- | | |
|-----------|-----------|
| 1. 岩尾内ダム | 16. 下久保ダム |
| 2. 大雪ダム | 17. 美和ダム |
| 3. 桂沢ダム | 18. 小波ダム |
| 4. 金山ダム | 19. 横山ダム |
| 5. 豊平峡ダム | 20. 矢作ダム |
| 6. 湯田ダム | 21. 大野ダム |
| 7. 石淵ダム | 22. 一庫ダム |
| 8. 鳴子ダム | 23. 青蓮寺ダム |
| 9. 釜房ダム | 24. 土師ダム |
| 10. 大石ダム | 25. 永瀬ダム |
| 11. 矢木沢ダム | 26. 野村ダム |
| 12. 川俣ダム | 27. 寺内ダム |
| 13. 五十里ダム | 28. 緑川ダム |
| 14. 相俣ダム | 29. 龍田ダム |
| 15. 草木ダム | 30. 福地ダム |

図-6 MTMモデル適用流域

11 結論

参考文献1を出発点にして山地流出流量の大コントローラ（註）を求める研究を多面的に推し進めて来た結果、図-4と5を構成する要素がそれである、と云う結論に到達した。就中、The Greatest Controller は山林地の基盤岩層である。流出過程の中の目に見えない部分が支配的であると云うことが山地流出流量の計算に限界を与えることになる。

12 おわりに

本モデルで日蒸発散量の計算に用いている Hamon式 の日本列島への適用の検討は充分でない。早急にこれを行い、残された本モデルの長期間流出に対する検証を終え、本一連研究を完成させたいと思う。

なお、本論文では紙数の都合でパラメータの値設定共通規準について報告し得なかった。

参考文献

- 岡本芳美・他、美和小試験地における洪水流出現象についての一考察、土木技術資料第11巻6号(1969年)
- 岡本芳美、日本列島の山林地流域における降雨の流出現象に関する総合的研究、土木学会論文報告集第280号(1978年)
- 水理講演会講演論文集第16～27、29～30回の著者の論文。論文名省略。
- 土木学会年次学術講演会講演概要集第2第24～35、39～41回の著者の講演。講演名省略。

註) 山地流出流量を支配している無数とも云える要素の中で、これだけを取り出して考えれば、残りは実用上無視出来る、と云うことを意味する。