

分布モデルを中心とする洪水流出解析手法の 高度化に関する研究

STUDY ON IMPROVEMENT OF FLOOD RUNOFF ANALYSIS BASED ON DISTRIBUTED MODELS

児島利治¹・宝 馨²・立川康人³

Toshiharu KOJIMA, Kaoru TAKARA, Yasuto TACHIKAWA

¹正会員 工博 京都大学防災研究所助手 水災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²フェロー 工博 京都大学防災研究所教授 水災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 工博 京都大学防災研究所助教授 水災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

This paper compares three flood runoff models: the storage routing model, the slope-channel system kinematic wave model and the grid-cell based distributed model. Some problems are discussed to improve the precision of the distributed runoff model and to put it to practical use. In the kinematic wave model, the optimum model parameters for any rainfall events are similar to the conventionally recommended values, and it can reproduce the observed hydrographs well. Although the grid-cell based distributed model also can reproduce the observed hydrographs well, it has a tendency to give earlier peak than the observed one. In the storage routing model, the optimum parameters depend on the rainfall event, variations in optimum parameters are greater than other runoff models.

Key Word: storage routing model, kinematic wave model, grid-cell based distributed model, GIS, DEM

1. はじめに

本研究は、河川懇談会によって設置された共同研究(平成8年度から10年度)として、庄内川において行った分布モデルを中心とする洪水流出解析手法の高度化に関する研究の成果である。

河川の流域は、気温・植生・土壌などの季節的变化のほかに森林の伐採・ダム建設・都市化などにより経年的変化を示す。これら流域の変化は、流出予測に大きな影響を及ぼす原因となる。これまで実務現場では貯留関数モデルが多用されてきたが、降雨、土地利用、土地被覆及び数値地形データ等の空間分布情報が容易に利用できるようになった今日、それらの情報を活用し、降雨の空間分布や流域の改変を取り込むことのできる流出モデルとして、分布型の流出モデルの開発が鋭意進められている。しかし、その精度、実用性については今のところ必ずしも十分に検証されているとはいえない。本論文では、庄内川流域において分布型の流出モデルを構築し、既往の出水に対して流出解析を行う。各モデルの解析結

果をいくつかの評価基準を用いて現行の流出モデルと比較検討することにより、分布型流出モデルの実用化および精度向上のための問題点を明らかにする。

比較検討を行う洪水流出モデルは以下の3つである。

- ・ 貯留関数モデル
- ・ 斜面・河道系 kinematic wave モデル
- ・ セル分布型洪水流出モデル

2. 対象地域とデータ

(1) 対象地域

愛知県、岐阜県を流れる庄内川流域のうち、志段味観測所よりも上流域(532km²)を対象域とする。この流域は、現段階では山地森林が全体の70%以上を占める。現在、都市域は全体の15%であるが、将来さらに都市化の進展が予想される。

(2) 水文資料

志段味、多治見、土岐、瑞浪の各地点で水位観測が、

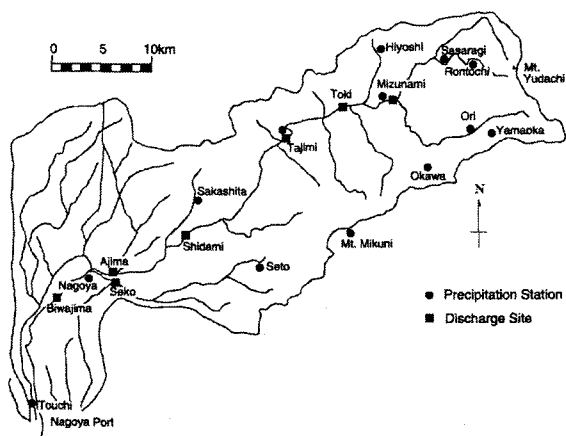


図-1 対象地域における雨量・水位観測所

また、流域内の10箇所において雨量観測が行われている。図-1に対象領域における観測所の位置を示す。本研究で用いる対象洪水を表-1に示す。これらは、過去10年のうちで比較的洪水量の大きかったものを選択している。枇杷島と多治見の水位観測所において、年最大の流量を観測した洪水がほとんどである。

表-1 対象洪水

洪水番号	生起年月日	枇杷島	多治見
Flood 0	1990年9月17日	年最大	年最大
Flood 1	1991年9月18日	年最大	年最大
Flood 2	1993年9月9日	年最大	
Flood 3	1993年9月14日		年最大
Flood 4	1994年9月16日		
Flood 5	1994年9月29日	年最大	年最大
Flood 6	1995年7月2日	年最大	年最大

(3) 有効雨量の算定と基底流出の分離

雨量保留量曲線を用いて有効雨量を算定した。庄内川流域では土地利用別の保留量曲線は存在しないため、都市域、水田、裸地に関しては、既存の研究で得られた京都市、宇治市における土地利用別の保留量曲線¹⁾を用い、山地森林域に関しては高時川流域で得られた保留量曲線²⁾に基づいて有効雨量を算定した。

基底流出成分の分離は、降雨開始後ある時間を経過してから漸増を始め、降雨終了後若干の時間を経てピークとなった後低減するとの考えに基づき、基底流出成分と直接流出成分に分離した。

(4) 土地利用情報

国土数値情報KS-202-1(1/10細分区画土地利用データ)から、各部分流域、斜面、セル内に占める土地利用面積率を求め、(3)で示した有効雨量の算定、3.で示すモデル定数の決定に利用する。国土数値情報では15クラスに分類されている土地利用を、森林、田、草地、都市域、湖沼、河川の6クラスに再分類した。

3. 定数解析によるモデルの評価

各洪水流出モデルを既往の出水に適用し定数解析を行った。その際、モデル定数の最適値を決定するため、観測流量と計算流量の適合度を評価する基準として以下のような5つの客観的基準を用いた。

COR：観測流量と計算流量の相関係数

MRE：洪水期間中の平均相対誤差

R.RMSE：洪水期間中の相対平方根平均二乗誤差

TE：ピーク生起時刻の誤差

RPE：ピーク流量の相対誤差

(1) 貯留関数モデル

貯留関数モデルの基礎式は一般に、以下のように表される。

$$\frac{dS}{dt} = r_e(t - T_l) - q \quad (1)$$

$$S = Kq^P \quad (2)$$

ここで、 S ：みかけの雨水貯留量、 q ：直接流出量、 r_e ：有効降雨、 T_l ：遅滞時間、 K 、 P ：モデル定数である。

庄内川流域では、20の部分流域と6つの河道区分に分け、それぞれに貯留関数法を空間的に配置させた流域モデル（いわゆる工実モデル）が用いられ、各部の K 、 P の値が求められている。有効降雨の算定には、一次流出率と飽和雨量を用いる場合が多く、庄内川の現行の工実モデルでも同様である。また、基底流出の分離も水平分離を用いる場合が多い。本研究では、他のモデルとの比較を行うため、2.で示した有効降雨、基底流量の算出方法を利用し、各部分流域の土地利用面積率に従って、保留量曲線から有効雨量を算定する。

庄内川流域で用いられている現行のモデル定数のうち、河道区分の K 、 P 、部分流域の P の値を固定し、各部分流域の K の値を一律に1.0～0.1倍した値を用いて解析を行った。各評価基準の変化を図-2に示す。COR、MRE、R.RMSEの図から、ハイドログラフの形状の誤差を最小とするのは K の0.2倍程度であることが分かる。ただし、この付近の値では、上流にある瑞浪、土岐におけるピーク流量の誤差が大きくなっていることもRPEの図から見て取れる。宝ら³⁾は、モデル定数 P は固定し、 K の値を2.0～0.05倍して6つの洪水事象について解析を行った結果、誤差を最小にする K の値は、評価基準や対象洪水によって異なることを示した。

有効雨量の決定方法が解析結果にどの程度影響を与えるかについて検討を行った。図-3は、現行の一時流出率、飽和雨量、水平分離基底流量を用いた貯留関数モデルでの結果と、本研究で適用した土地利用ごとの保留量曲線による有効雨量の決定方法を用いた貯留関

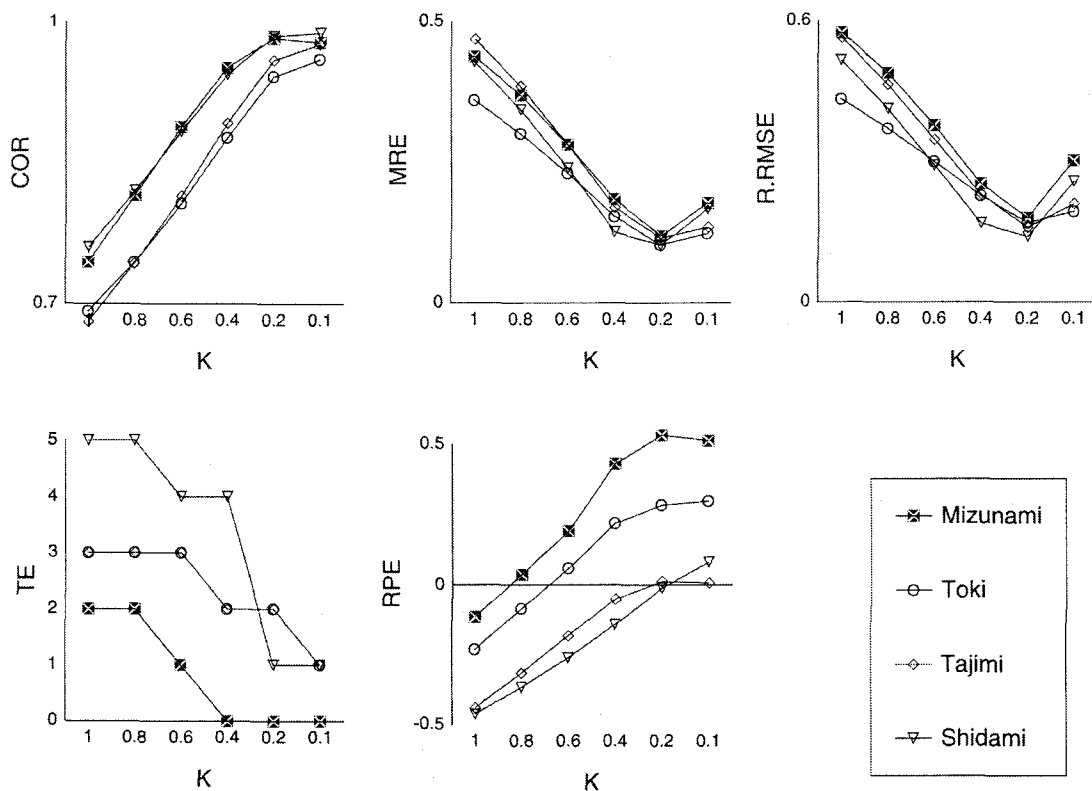


図-2 貯留関数モデルにおける評価基準の変化（横軸の値はKの倍率を示す）

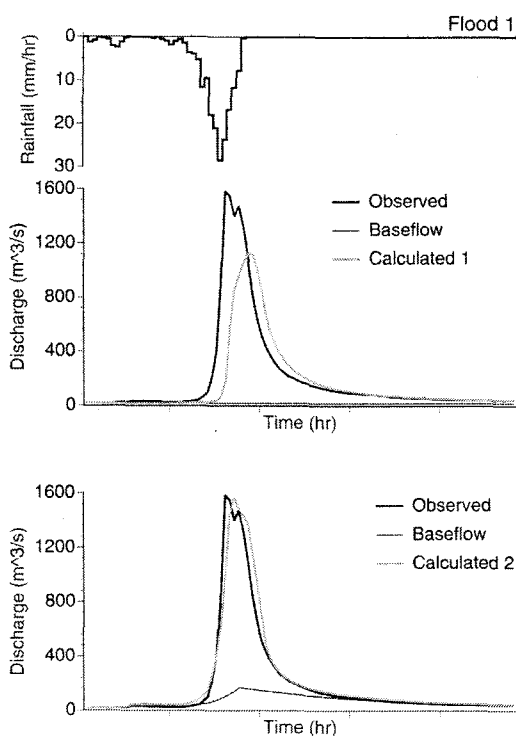


図-3 貯留関数モデルの Flood 1 への適用（上：現行型の有効雨量を用いた場合、下：保留量曲線による有効雨量を用いた場合）

数モデルによる適用結果の一例（Flood1）である。短期集中型の降雨イベント（Flood 1, 2, 3, 5）では、計算流量は過小に評価され、累加雨量が多い降雨イベ

ント（Flood 4）では、ピーク流量を過大評価するという結果が得られた³⁾。貯留関数モデルは、洪水毎に定数を大きく変える必要があることが分かった。

(2) 斜面・河道系 kinematic wave モデル

部分流域を河道とその両側に付随する矩形斜面とし、それぞれに kinematic wave モデルを適用して流出量を計算するモデルである。その際、斜面勾配や斜面長という地形量を測定して、流域モデルをつくる必要がある。本研究では、地形量測定の煩雑さを軽減するため、DEM（Digital Elevation Model）から作成した落水線を流出口から遡上することにより、自動的に勾配、斜面長、斜面幅、河道長等の地形量を測定し、流域モデルをつくった。本研究では、kinematic wave モデルの基礎式における等価粗度の感度分析を行った。

土地利用は6クラスであるため、最適化を行うべき土地利用別の等価粗度は6種類あり、最適値の組み合わせを決定することは困難である。そこで、ハイドログラフの形状に大きく影響を与えと考えられる河道、都市域、森林域の等価粗度を一般に kinematic wave 法で用いられている値⁴⁾を中心に变化させ感度分析を行った。図-4に河道の等価粗度のみを変化させたときの評価基準の変化を示す。

河道の等価粗度を 0.025 以下にした場合、志段味では適合度が下がることが COR, MRE, R.RMSE, RPE から分かる。また、森林域の等価粗度を 1.0 より小さくしていくと河道と同様に志段味の適合度が下がった。

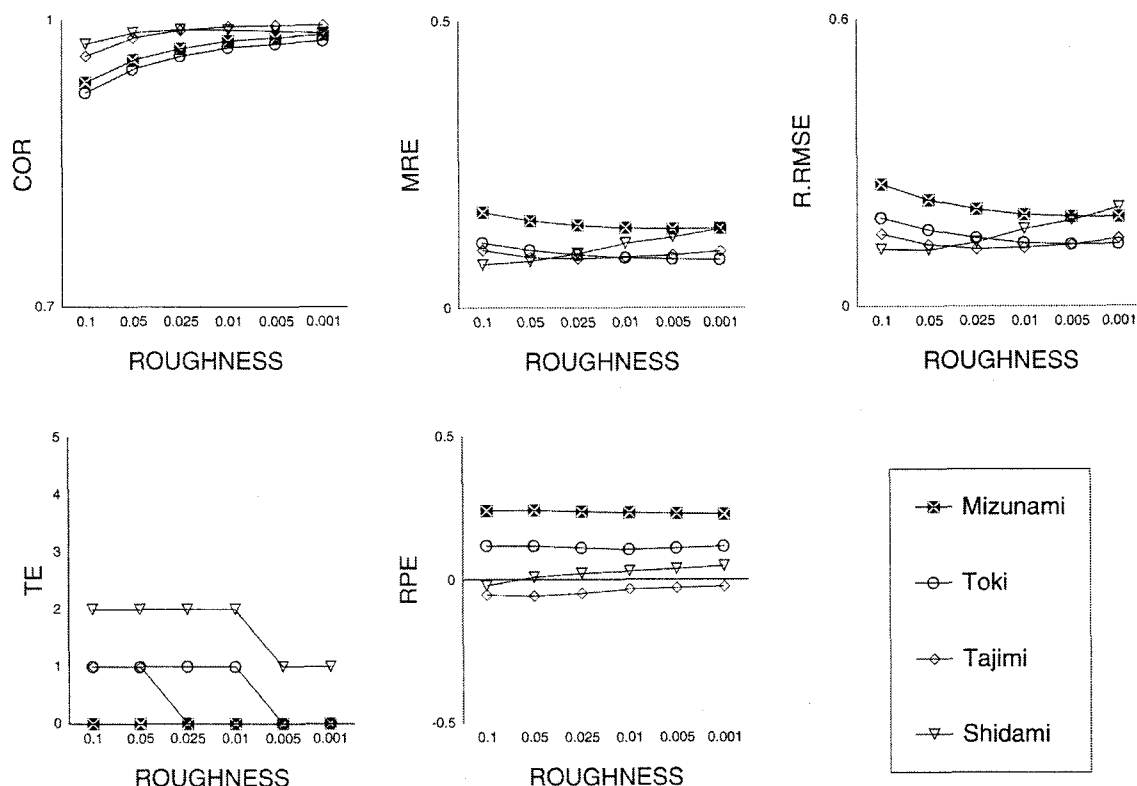


図-4 斜面・河道系 kinematic wave モデルにおける評価基準の変化（河道の等価粗度を変化させた場合）

都市域の等価粗度の変化は評価基準にほとんど影響しなかった。これは都市域の面積率が15%程度であるとともに、山林や田畑の中に点在していることによる。評価基準による検討結果より、土地利用ごとの等価粗度の値は森林（1.0）、都市域（0.05）、草地（0.3）、水田（1.5）、湖沼（1.5）、河道（0.025）とすることとした。

ここでは、全流域一律に等価粗度の値を決定したが、上流のハイドログラフの適合度から順に合わせいき、上流側と下流側で同じ土地利用でも異なる値となるように等価粗度の調整を行えば、各地点でのハイドログラフの適合度が向上するはずである。そうした感度分析的検討のために、図-4のようなダイアグラムが有効に使える可能性がある。

(3) セル分布型洪水流出モデル

セル分布型流出モデルは、筆者らが提案してきた正方形の部分流域（セル）によって流域を構成する流出モデルであり、その概要は次のようである⁵⁾。

- ・ DEM分解能と同じ $d \times dm$ の正方形の領域を1つの部分流域（セル）と考え、流域全体が多数のセルの集合体であるとする。
- ・ DEMを用いて流域の落水線図を作成し、1つのセルからの流出は、落水線の流下方向のセルへのみ起こるとする。
- ・ 各セルでは、セル内で一様な有効降雨を入力とし、上流側セルからの流出を合計して上流端流入と

し、kinematic wave法によって流出量を算出する。

- ・ 8つの流下方向のうち、上下左右方向へ流下するセルでは斜面長、斜面幅はともに分解能と同じ dm とし、斜め方向へ流出するセルでは斜面長は $\sqrt{2}dm$ とし、斜面幅は $d/\sqrt{2}m$ とする。

セル分布型モデルの概念図を図-5に示す。このモデルでは、各セルの等価粗度をそのセルの土地利用から決定する。河道を含むセルは「河道」というクラスにする。土地利用ごとの等価粗度の値は、斜面・河道系 kinematic wave モデルで用いられる値を参考値とし、値を変えて検討を行った。

50mおよび250mのセルサイズで検討を行った³⁾。5つの客観的評価基準で比較したところ、多少の例外はあるものの、50mモデルの方が250mモデルより観測ハイドログラフの再現という点で精度が高かった。また、このモデルでは観測ハイドログラフの形状を比較的よく再現していることがわかった。ただし、

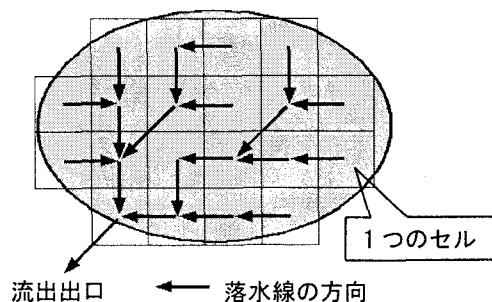


図-5 セル分布型流出モデルの概念図

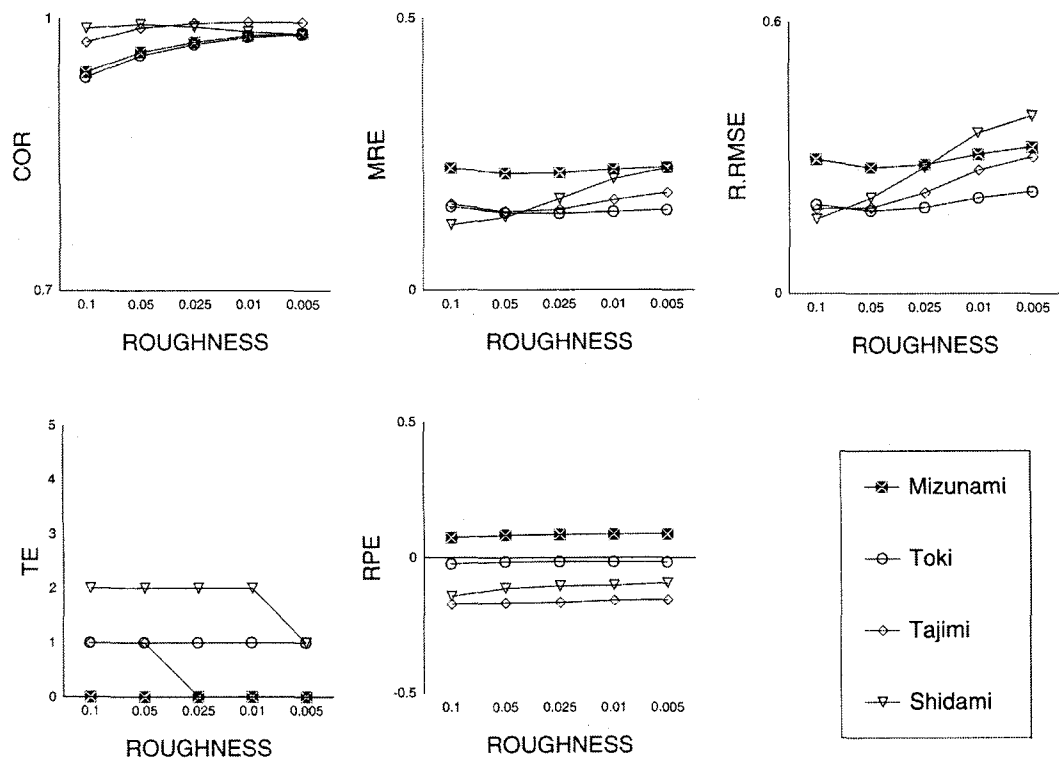


図-6 セル分布型流出モデルにおける評価基準の変化（河道の等価粗度を变化させた場合）

ピーク流量はよく再現されているが、ピーク時刻は早くなる傾向があった。これは河道の等価粗度を調整することにより解決できると考えられる。

kinematic waveモデルと同様に河道、都市域、森林の等価粗度を变えて評価基準の値を調べた。河道、都市域の等価粗度を小さくしてもピーク流量はあまり変化しない（RPEが横ばい）が、志段味ではMRE, R.RMSEが悪くなった。本研究では、土地利用ごとの等価粗度の値は、50mメッシュモデルでは、森林（0.5）、都市域（0.025）、草地（0.15）、水田（1.0）、湖沼（1.5）、河道（0.01）とし、250mメッシュのセル分布型モデルでは、斜面・河道系kinematic waveモデルと同じ値を採用することとした。

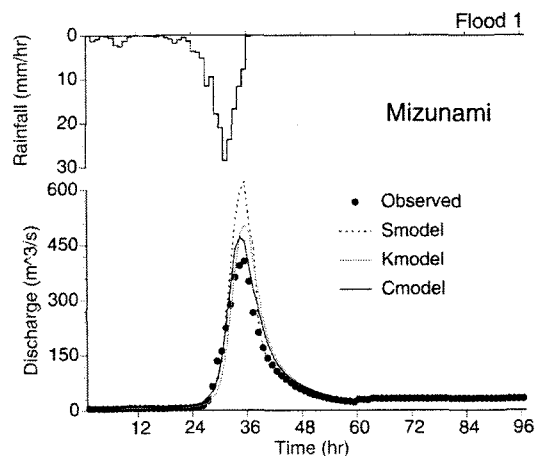


図-7 瑞浪における計算流量と観測流量の比較(Flood1)

4. モデル相互の比較

各流量観測地点における Flood 1 の観測流量と各モデルによる計算流量を比較したところ、最下流の志段味では、どのモデルも洪水の再現は良好であった。しかし、上流域の瑞浪・土岐では、貯留関数モデル（図中では Smodel と表記）の計算値が過大な流量を与えている（図-7 参照）。図-8, 9 に Flood 5 での計算結果を示す。セル分布型モデル（図中 Cmodel）はハイドログラフの立ち上がりが早く、ピーク流量は過小評価気味であった。貯留関数モデルは、志段味では良く適合しているが、それ以外ではピーク流量が過大であった。斜面・河道系 kinematic wave モ

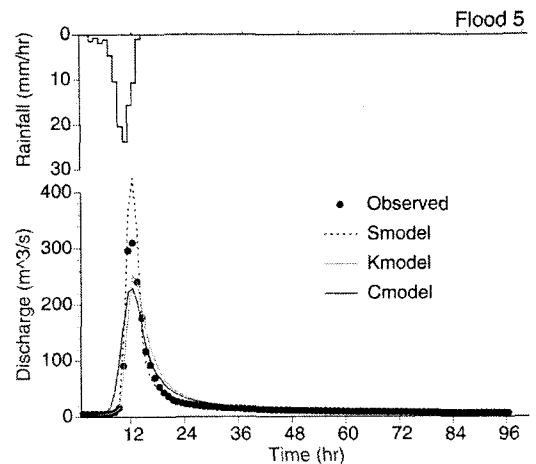


図-8 瑞浪における計算流量と観測流量の比較(Flood5)

デル(図中 Kmodel)は、土岐でピーク流量を過小評価しているが、多治見、志段味では良好であった。

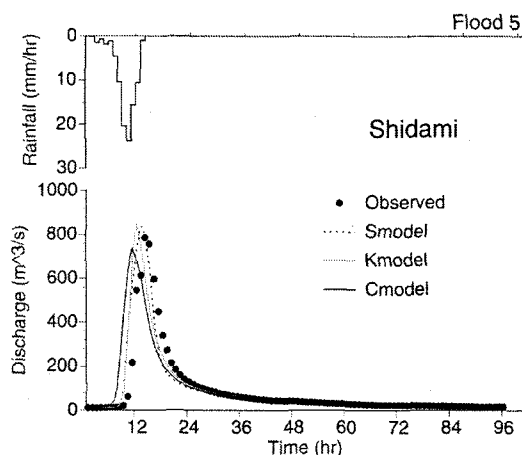


図-9 志段味における計算流量と観測流量の比較(Flood5)

5. おわりに

庄内川流域志段味上流域において、3種の異なる洪水流出モデルを構築し、各モデルのモデル定数のハイドログラフに対する感度を調査した。既往の出水事例に適用し、各モデルにおける解析結果の評価・解析精度の比較評価を行った結果、以下に挙げることが分かった。

- ・貯留関数モデルについては、有効雨量の決定方法とモデル定数の見直しが必要であることが分かった。それらの点を改善したモデルを適用した結果、現行のモデルで問題であった中小洪水での解析精度が向上した。しかし、最適と思われるモデル定数については、降雨イベントごとにかなり異なることが分かった。
- ・斜面・河道系 kinematic wave モデルは、観測ハイドログラフをよく再現できるモデルであることが確認できた。モデル定数は、降雨イベントによらず一般に用いられている値付近で最適値であることが分かった。
- ・セル分布型モデルについては、観測ハイドログラフをよく再現できているが、ピーク生起時刻が早くなる傾向が確認できた。この問題についてはモデル定数の最適化によってある程度解決できると考えられる。

次にモデル間の解析精度の比較評価を行った結果、以下にあげること分かった。

1. 観測ハイドログラフの形状を再現・予測するという観点から、斜面・河道系 kinematic wave モデルが他のモデルと比較して有望なモデルである。
2. セル分布型流出モデルでは、他のモデルと比較してピーク生起時刻を早く計算する傾向があり、ピ

ーク生起時刻に最も影響を与える河道の等価粗度等の取り扱いについて再検討が必要である。

3. 貯留関数モデルと比較すると、他の2つのモデルは降雨イベントごとの最適なモデル定数のばらつきが小さい。

降雨の空間分布や流域条件の空間的・時間的变化を的確に捉えるという意味で、分布型の洪水流出モデルは有望である。しかし、降雨および水位・流量の観測には精度的に問題が多く、土地利用・地形と等価粗度・降雨の損失機構についても不明な点が多く、克服すべき点が少なくない。

これらの問題を解決していくためには、流出モデルを思い切って分布型に置き換え、観測システム・解析システムの改善と一体的に、徐々に上記の問題点を取り払っていくという態度が要求されるのではないだろうか。ここで行った解析は、有効降雨の推定、基底流出の分離という、古くからある問題を解決しないままのやり方にとどまっている。観測降雨を流出モデルにそのまま入力し、流出モデルが自動的に降雨流出成分の分離を行えるようになるのが理想的であり、そうした方向でのモデル構築に取り組んでいきたいと考えている。

謝辞：本研究は、土木学会水理委員会河川懇談会の提唱によって開始された共同研究テーマの一つであり、土木学会、旧建設省と大学との共同により平成8年度から10年度に亘って行われたものである。データの収集、現地調査、研究打ち合わせなどにおいて旧建設省庄内川工事事務所には大変お世話になった。ここに記して謝意を表するしだいである。

参考文献

- 1) 近森秀隆・岡 太郎・宝 馨・大久保豪：流出モデルの構築における GIS の応用に関する研究、GIS—理論と応用、地理情報システム学会、Vol.6, No.1, pp. 19-28, 1998.
- 2) 西海宏則：セル分布型洪水流出モデルの高時川流域への適用、京都大学工学部土木工学科特別研究論文、1998.
- 3) 宝 馨・立川康人・小尻利治・千歳知礼：分布モデルを中心とした洪水流出解析モデルの高度化に関する研究、土木学会水理委員会・河川懇談会共同研究 平成10年度研究成果報告書、pp. 87-104, 1999.
- 4) 建設省河川局(監修)：建設省河川砂防技術基準(案)調査編、山海堂、p. 144, 1998.
- 5) 児島利治・宝 馨・岡 太郎・千歳知礼：ラスタ型空間情報の分解能が洪水流出解析結果に及ぼす影響、水工学論文集、土木学会、Vol. 42, pp. 157-162, 1998.

(2002. 4. 15 受付)