

分布型河川シミュレーションモデルの 適用性向上に関する研究

A STUDY ON THE IMPROVEMENT OF THE APPLICABILITY OF THE DISTRIBUTED RIVER SIMULATION MODEL

山下 三男¹・市川 新²
Mitsuo Yamashita and Arata Ichikawa

¹学生会員 工修 福岡大学大学院 工学研究科 (〒808-0135 北九州市若松区ひびきの2-1)

²フェロー会員 工博 福岡大学大学院教授 工学研究科 (〒808-0135 北九州市若松区ひびきの2-1)

There are several commercial river water simulation models, with the progress of mathematical techniques for hydraulic calculation in open channel and pipeline. As a result, it is getting easier for engineers to model a river basin as a distributed model. But the problems are still left in application, such as, which is suitable for rainfall-runoff model for sub-basins, how to determine parameters with insufficient data, the lack of detailed cross sections of river beds and so on.

With a view to promote the applicability of the distributed model, the authors applied it to the Japanese mountainous river basin for continuous simulation including dry weather condition. The countermeasure for above problems are the application of SCS method for surface runoff model, the adoption of new interflow model, the conversion of hourly rainfall data into 5 minutes intervals, and the presumed triangular river cross sections and falling works. Based on these assumptions, the simulation results fairly agreed with the observed data. It means basic concept of this study is in the right way and applicable to any other basins.

Key Words : distributed model, surface runoff, inter flow, SCS method, continuous simulation

1. はじめに

洪水による被害, 水資源の分配に関する紛争, 湖沼の富栄養化や飲料水源の汚染といった水をめぐる問題を解決するためには, まず水循環に関する詳細な情報が公開され, それらの情報に基づき利害関係者 (stakeholders) の間で共通認識が形成されなければならない。そのため「ハイドロインフォーマティクス」(水管理のための情報工学) というものが必要とされてきている¹⁾。その中で, 水循環の空間的および時間的な変動を情報として伝えるためのツールとして分布型の水理・水文モデルが重要な役割を果たすものとして期待されている。

開水路や管路における水理計算を, 不定流の連続式と運動方程式の連立方程式 (Saint-Venant式) を完全に解く形 (Dynamic wave法²⁾) で, 精度よく迅速に行え, かつ操作が容易となってきたことから, 近年, 欧米においては MIKE11, HECや Infoworks RS といった市販の分布型河川シミュレーションソフトが広く利用されている。その結果, 流域内を小流域に分割する分布型の河川シミュ

レーションモデルの適用は容易になってきている。

しかしながら, これらのソフトを実際の, とくに日本の河川流域に適用するにはいくつかの課題が残されている。降雨流出を計算するサブモデルの選択, パラメータを同定するためのデータの不足, 河道モデルを記述するための横断面測量データの不足などである。とくに, 降雨流出現象は主として表面流出, 植生等による遮断, 土壌への浸透, 浸透した雨水の再流出としての中間流及び基底流出の過程で構成されるが, これらは特定の流域の気候, 地形, 地質, 植生や人的な活動によりその影響度は大きく異なる。市販の河川シミュレーションソフトではこれらの変動に対して, 簡単なモデルの中から選択するか, 独自に構築することになっている。

さらには, 水中における汚濁物質を追跡する水質シミュレーションでは, 雨天時のみでなく晴天時を含めた長期の連続的な解析が必要である。また対象流域が大きい場合にはある地点では雨が降っていても, ほかの地点ではまったく降雨がないというような降雨の分布性を考慮する必要がある。そのため, 無降雨時や低流量時を含めた「連続シミュレーション」が求められている。

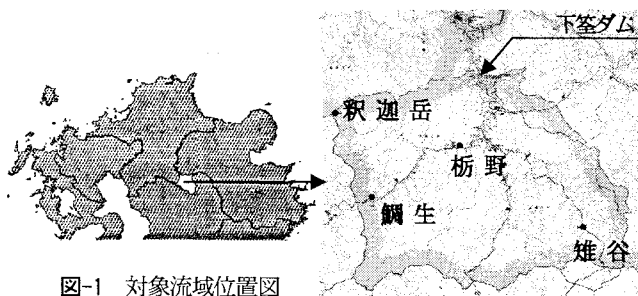


図-1 対象流域位置図

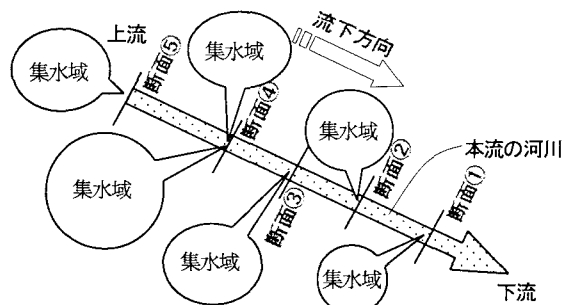


図-2 本研究における分布型モデルの概念

本研究はこれらの問題点を克服しながら、分布型モデルである市販の河川シミュレーションソフトの適用性を高めることを目標としている。そうすることにより、利害関係者により詳細な情報を提供することが可能になると考えている。具体的には人工林に覆われた山地流域に、分布型モデルである英国Wallingford社の河川シミュレーションモデル「Infoworks RS」の適用を試み、汎用的な適用が可能となったので、ここに報告を行う。

2. 適用対象流域

モデル適用の対象は、筑後川の下笠ダム上流域の大分県日田郡上津江村、中津江村である。流域面積は182km²であり、位置を図-1に示す。2001年1月から3年間の鯛生、栃野、雉谷、下笠における時間降雨量と下笠ダムの時間流入量を国土交通省筑後川河川事務所、筑後川ダム統合管理事務所から提供を受けたので解析の基礎資料として使用した。また、釈迦岳における気象庁アメダスデータも使用した。

3. モデルの適用方法

(1) 本研究における分布型モデルの概念

本研究における分布型モデルの概念を図-2に示す。

まず、本流の河川を設定し、それに支流単位の小流域からの流出ハイドログラフを境界条件として入力し、本流における流動追跡を行った。小流域からの流出ハイドログラフの推定については後述する集中型モデルを、本流における流動追跡については、市販の河川シミュレーションモデルのInfoworks RSを使用した。

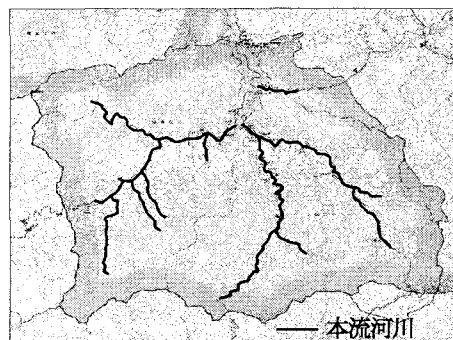


図-3 本流河川の設定

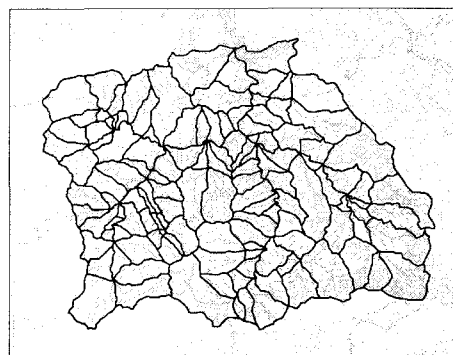


図-4 全体流域の小流域への分割

(2) 本流河川の設定

まず、Infoworks RSを用いて流動追跡を行う対象としての本流河川を設定した(図-3)。

(3) 全体流域の小流域への分割

次に、分布型モデルの基礎として、全体流域を支流をもとに129の小流域に分割した(図-4)。その結果、小流域の平均面積は1.4km²となった。

(4) 小流域からの流出ハイドログラフの推定

各小流域からの流出ハイドログラフは表面流、中間流および基底流量からなるものとして、それぞれと小流域全体のハイドログラフを集中型モデルで推定した。それぞれの集中型モデルについて以下に述べる。

a) 表面流モデル

表面流モデルとして、米国土壌保全局によって考案されたSCS法 (Soil Conservation Service Curve Number Method) ³⁾ を採用した。その理由は、同法を適用するために必要なパラメータが(1)、(2)式に表されるように、許容最大貯留量(S)のみであることと降雨の継続に伴う流出係数の増大を連続的に表現している点にある(図-5参照)。

$$P = P_e + F + I_a \quad (1)$$

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (2)$$

ここで、P：累積降雨量 (mm)、I_a：初期損失 (mm)、F：累積浸透量 (mm) S：許容最大貯留量 (mm)、P_e：累積有効降雨量 (mm)である。

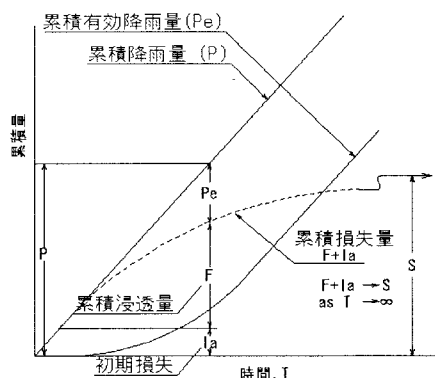


図-5 SCS法における降雨と有効降雨の関係³⁾

(等降雨強度の雨が長時間継続したと仮定した場合の概念図)

表-1 SCS法における先行降雨条件⁵⁾

降雨開始時の 土壌の湿潤状態 の類型 (AMC)	過去5日間の先行降雨の累積量 P ₀₅ :(mm)	
	植物の休眠期 Dormant season	植物の生育期 Growing season
I (乾燥)	13以下	36以下
II (標準)	13~28	36~53
III (湿潤)	28以上	53以上

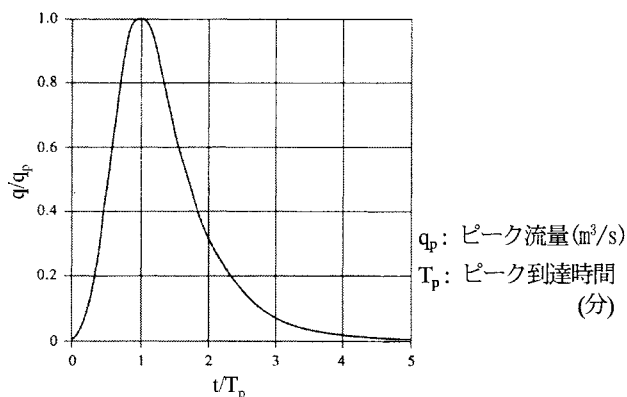


図-6 無次元単位図
(Dimensionless Unit Hydrograph)⁴⁾

土壤保全局では先行降雨条件(表-1)から、土壌の湿潤状態を3段階に分けることとなっているが、このような非連続な値を、連続シミュレーション中の各降雨開始時の値としてとることはできない。

そこで、Hortonの浸透公式を変形した(3)式でその値の変化を近似し⁶⁾、すべての降雨イベントの開始時における先行降雨量を求め、降雨イベント毎の許容最大貯留量を計算して自動的に更新できるようにすることにより、連続シミュレーションに適用した。(図-7)

$$S = S_c + (S_0 - S_c) \cdot e^{-\alpha \cdot P_{05}} \quad (3)$$

ここで、 S_0 : 最大貯留容量 (mm), S_c : 最終貯留容量 (mm), α : 減衰係数, P_{05} : 先行5日間の累積降雨量 (mm) である。

図-7の示すところは、仮に前日まで大量の降雨があったとしても、翌日には S_c だけの浸透が可能になると仮定していることである。SCS法は(1), (2)式を用いて降雨を有効降雨 P_e と損失雨量 $(F+I_a)$ に分離するものであり、求められた有効降雨に無次元単位図

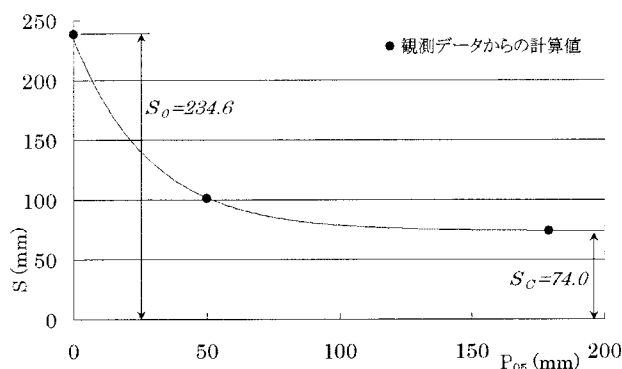


図-7 許容最大貯留量の変化の近似曲線

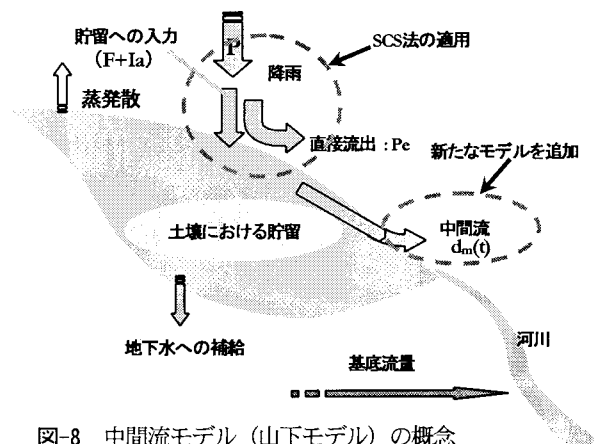


図-8 中間流モデル(山下モデル)の概念

(Dimensionless unit hydrograph⁴⁾ : 図-6) を適用して、流量を求めた。

b) 中間流モデル

わが国の山地流域においては、浸透する雨水が再流出する中間流が、ハイドログラフに大きな影響を及ぼすため⁷⁾、新たな中間流モデル(山下モデル)を導入することとした(図-8)。

このモデルでは、SCS法によって分離された損失雨量 $(F+I_a)$ のうち、地下に浸透した一部が再流出するとし、中間流の「有効再流出量 $d_m(t)$ 」を(4)式を用いて算出した。この「有効再流出量」はLinsleyの式⁸⁾(5)を応用した中間流の単位図(図-9)によって流量に変換した。

$$d_m(t) = k \cdot \frac{S_c}{S} \cdot \Delta(F+I_a) \quad (4)$$

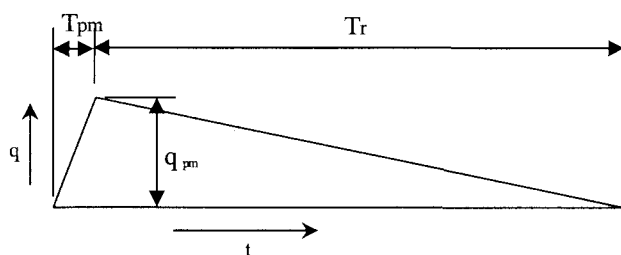
ここで、 $\Delta(F+I_a)$: 累積損失量の変化量 (mm), k : 中間流配分定数, S_c : 最終貯留容量 (mm), S : 許容最大貯留容量 (mm) である。

$$T_r = 0.8 \cdot A^{0.2} \quad (5)$$

ここで、 T_r : 流出の終息時間(日), A : 集水面積 (km^2) である。

なお、中間流のピークは表面流出の終息時に到来するとし、そのピーク到達時間 T_{pm} を表面流のピーク到達時間 T_p との関係から(6)式で仮定した。

$$T_{pm} = 5 \times T_p \quad (6)$$



T_{pm} : 中間流のピーク到達時間
 q_{pm} : 中間流のピーク流量
 T_r : Linsleyの式(5)で定義される流出の終息時間

図-9 中間流の単位図

表-2 全体流域のパラメータ

記号	名称	値
S_o	最大貯留容量	234.6mm
S_c	最終貯留容量	74.0mm
α	減衰係数	0.0352
k	中間流配分定数	0.455

c) 基底流量

基底流量については、観測データの解析から対象流域の比流量を $1.0\text{ m}^3/\text{s}/100\text{ km}^2$ と推定し、シミュレーションに適用した。

(5) シミュレーションに必要な諸係数の推定

a) 集中型モデルのパラメータの推定

本研究の降雨流出モデルにおける4つのパラメータ (S_o , S_c , α , k) は、各小流域ごとに降雨データと流量データの解析から同定すべきであるが、今回は観測流量データが全流域の出口におけるものしか得られなかったため、観測降雨データと全流域の出口における観測流量データからパラメータを推定し⁹⁾ (表-2)、それを全小流域に適用した。

b) 小流域のピーク到達時間 T_p および流出の終息時間 T_r の推定

各小流域からの表面流および中間流のハイドログラフを計算するには、ピーク到達時間 T_p (分)および流出の終息時間 T_r (分)を計算しなければならない。そのため、縮尺5,000分の1の森林基本図をスキャナーでGISに読み込み、幾何補正を行った後、各小流域の流路の記載のない区間の斜面延長 L_1 (m)、平均勾配勾配 I_1 および流路の記載のある区間の延長 L_2 (m)、平均勾配 I_2 を等高線をもとに読み取り、Ramserの式とKerbyの式を組み合わせ (7) 式で流達時間 T_c (分)を求め、(8) 式¹⁰⁾ に代入してピーク到達時間 T_p (分)を求めた。

$$T_c = \left(\frac{2.2nL_1}{\sqrt{I_1}} \right)^{0.467} + 0.02L_2^{0.77} I_2 \quad (7)$$

$$T_p = \frac{D}{2} + 0.6T_c \quad (8)$$

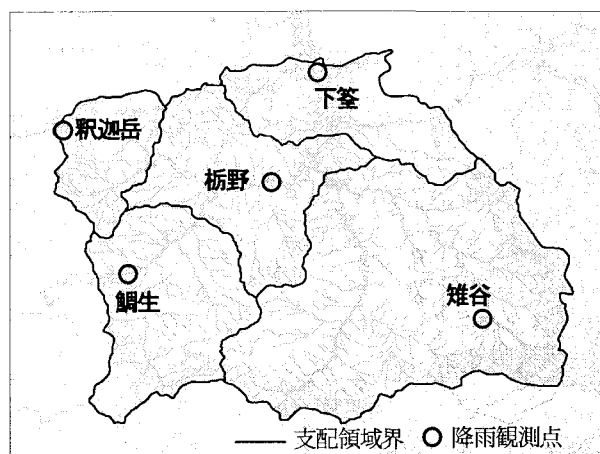


図-10 降雨観測点と支配領域

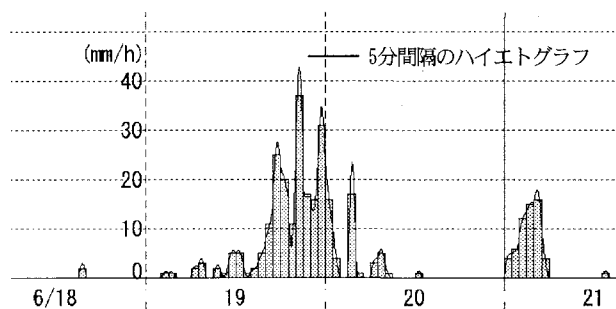


図-11 時間降雨データの変換

ここで、 n : マニングの粗度係数、 D : ハイエトグラフの時間間隔(分)である。

また、GISで地形図から各小流域の集水面積 (A) を読み取り、(5) 式に代入して流出の終息時間 T_r を求めた。

(6) 降雨データの適用

a) 降雨観測点と支配領域

鯛生、栃野、雉谷、下笠および釈迦岳の降雨観測点のデータを採用し、観測点の支配領域をティーセン法を原則として稜線で分割した (図-10)。

b) 時間降雨データの5分間隔データへの変換

小流域の面積が 1.4 km^2 の規模であるとピーク到達時間 T_p は約18分となる。したがって時間降雨データそのまま適用しても小流域の流出特性を十分に表現できない。5分間隔の観測降雨データを用いてシミュレーションを行うことが望ましいが、現時点でそのようなデータは入手できない。そのため、単位時間内の降雨量が保存されるように配慮しながら、2次関数を用いて時間降雨データの連続的な雨量継続式を求め、そこから5分間隔のハイエトグラフを作成した (図-11)。

(7) 河道モデル

Infoworks RSでは、河道の物理的な形状を記述するために、河道の横断面を必要とする。その際、断面の間隔は I を平均河床勾配としたとき、 $1/2I$ (m) 以下にしなければならないとしている。仮に勾配が2%であるなら

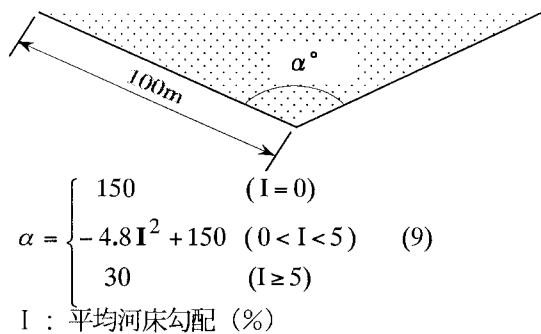


図-12 仮想三角形断面

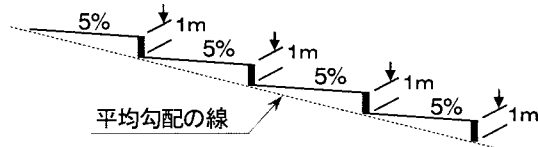


図-13 仮想落差工

ば、25m間隔となるが、そのようなデータを得ることは現時点では不可能である。そこで河道を1km間隔に分割し、その間の河床勾配は一定とし、かつその断面を図-12に示すような三角断面とした。その頂角は侵食と堆積の影響による河道の地形変化に応じて、勾配が緩くなるにつれて頂角が広くなると仮定し、図-12中の式で表した。ただ、このような仮定の場合、1kmおきに、勾配の変化に伴い断面が急変することになるので、勾配変化点の手前100mの地点から勾配変化点まで徐々に断面を変化させる「馴致区間」を設けた。

なお、平均勾配が5%を超えるような区間については、そのような急勾配の滑らかな河道は存在しないと考え、図-13に示すような5%の河床と落差1mの落差工の組み合わせで石と岩で構成された河床を模擬し、適用した。

最後に、(4)で述べた方法で算出された小流域からの流出ハイドログラフを、Infoworks上で各小流域の出口に隣接する本流の河川断面に境界条件として入力することにより、本研究における分布型モデルが完成し、シミュレーションを実施した。

4. シミュレーションの結果

降雨イベント6回を含む、2001年6月29日の正午から同年7月21日零時までの20日間余を対象として連続シミュレーションを行った。シミュレーションの計算に要した時間は約23時間であった。

無降雨時の低流量条件でのシミュレーションを行うために、基底流量を増加しなかった点を除けば、最大17%の勾配をもつ急峻な山地でのシミュレーションに成功した。

結果の中から、特徴的な3つの降雨イベントを抽出し、下笠ダムにおける計算流量と観測流量をグラフ化したもの

のを図-14～16に示す。参考までに総降雨量と土壌の湿潤状態を示す指標としての先行5日間の累積降雨量を付記した。

(1) 7月5日 21時からの降雨

総降雨量 129mm (24時間)
先行5日間の累積降雨量 6mm

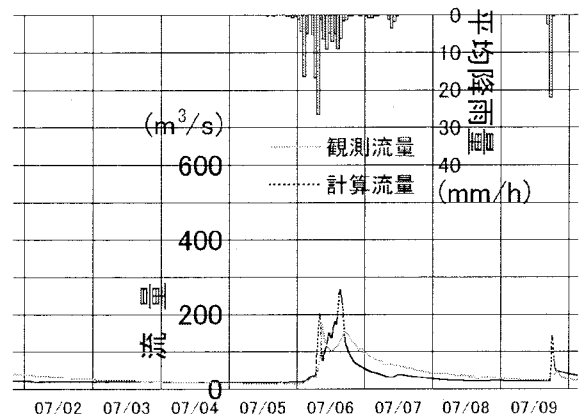


図-14 2001年7月5日付近のシミュレーション結果

(2) 7月11日 3時からの降雨

総降雨量 190mm (63時間)
先行5日間の累積降雨量 156mm

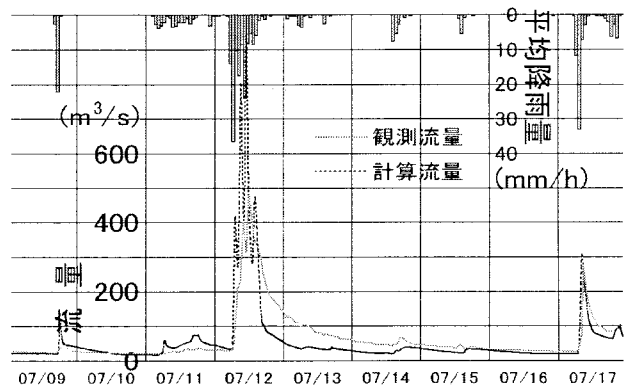


図-15 2001年7月11日付近のシミュレーション結果

(3) 7月17日 6時からの降雨

総降雨量 84mm (25時間)
先行5日間の累積降雨量 179mm

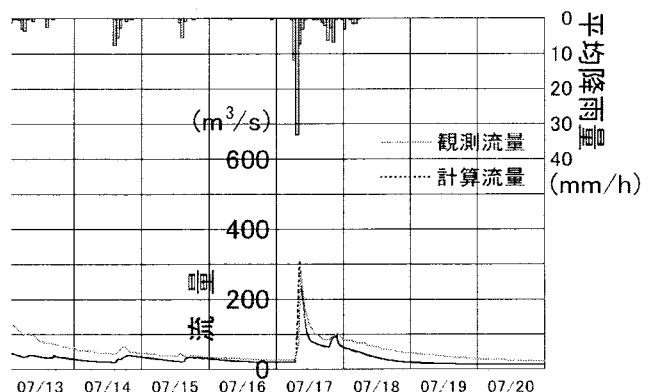


図-16 2001年7月17日付近のシミュレーション結果

5. 考察

モデルのパラメータを変化させずに行ったシミュレーション結果は、降雨形態、継続時間や土壌の湿潤状態の変化に伴う観測流量の変動を、おおむね再現している。このことは本研究の基本的概念に誤りがないことを示しており、また同定すべきパラメータが少ない降雨流出モデルと操作性に優れた市販の河川シミュレーションソフトで全体が構成されているため、他の流域にも十分適用可能であると考えられる。

しかしながら、以下の二つの点において課題を残している。

- (1) ピーク時の流量が過大に計算される傾向がある。
- (2) ピーク到来後の流量の逡減が過早に終息している。

それらの原因としては、以下のことが推定される。

- (a) 182km²の集水面積を持つ本研究の対象流域に対し、5ヶ所の降雨観測点のデータでは、降雨の分布性や雨域の移動の影響をシミュレーションに反映できないこと。
- (b) 時間降雨データを5分間隔のデータに変換してシミュレーションを行ったが、これは近似値に過ぎないこと。
- (c) 流域の水理学的な状態を特定するための詳細な情報が得られなかったことから、全体流域におけるパラメータをすべての小流域に適用したため、各小流域ごとの流出特性を十分に記述できていないこと。

6. 今後の課題

日本の短くてきわめて勾配が急な河川の流域をモデル化するためには、本研究のように小規模の流域に分割せざるをえないが、精度のよいシミュレーションのためには、それぞれの小流域での正確な降雨量を与えてなければならない。

また、パラメータは、それぞれの流域での観測された降雨データと流量データの解析から同定されなければならない。今後はGISを利用して、より個別に小流域の特性を考慮できるように研究を進めていく必要がある。

しかし、そのようなデータを取得するための観測は、個人もしくは単独の研究機関では不可能であり、公的なイニシアティブのもとに、長期間にわたり、1~5km²前後の小流域を試験流域として、少なくとも5分間隔の降雨と流量の観測がなされることが必要であると考え¹¹⁾。

そのような観測データに基づいていろんな条件下でのパラメータが同定され、同定されたパラメータと地形、

地質、植生や土地利用との関係が求められれば、これからの河川シミュレーションの精度は大幅に向上すると考えられる。

なお、低流量時のシミュレーションを発散させることなく行うためには、河床最深部に幅狭の仮想水路（実際の都市河川で見られるような溝をもっと細くかつ深くしたもの）を追加することにより、より実際の流れを再現できるものとする。

謝辞：本研究は、文部科学省科学研究費（基盤研究S）「建設副産物・廃棄物の管理と再利用システムの構築」（課題番号14102027）の成果の一部である。また、本研究を行うに当たり、国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所、筑後川ダム統合管理事務所、下釜ダム管理支所、大分県河川課及び農村整備課の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) ロランド・プライス(市川 新 訳)：ハイドロインフォーマティックス：その社会と市場，月間下水道，Vol.21，No.2，pp.69-76，1997
- 2) Chow, V. T. and D. R. Maidment, L. and W. Mays: Applied Hydrology, International edition, MacGraw-Hill, Inc. p. 281, 1988
- 3) Soil Conservation Service: Urban hydrology for small watersheds Technical release no.55, U.S. Department of Agriculture, 1975
- 4) Chow, V. T. and D. R. Maidment, L. and W. Mays: Applied Hydrology, International edition, MacGraw-Hill, Inc. p. 229, 1988
- 5) Chow, V. T. and D. R. Maidment, L. and W. Mays: Applied Hydrology, International edition, MacGraw-Hill, Inc. p. 149, 1988
- 6) Yamashita, M. and A. Ichikawa: A Study on the Unit Hydrographs with US SCS Method Regarding to Infiltrations, International Symposium on Disaster Mitigation and Basin-Wide Water Management, pp.168-177, 2003
- 7) 鶴口 宗人・恩田 裕一・小杉 賢一朗・斉藤 哲生・森脇 寛：降雨流出における岩盤浸透流の影響に関する実験的研究，水文・水資源学会誌，Vol.17，No.3，pp.252-263，2004
- 8) Linsley, R. K. Jr. and M. A. Kohler and J. L. H. Paulhus: Hydrology for Engineers, Third edition, MacGraw-Hill, Inc. New York. p. 210, 1958
- 9) 山下 三男：US SCS法に基づく分布型雨水流出モデルの構築に関する研究，福岡大学大学院 平成15年度 修士学位論文，pp.12-36，2004
- 10) Chow, V. T. and D. R. Maidment, L. and W. Mays: Applied Hydrology, International edition, MacGraw-Hill, Inc. p. 229, 1988
- 11) 市川 新・山下 三男：モデル論：「水・物質循環モデル・ソフトウェア博覧会2004」に参加して，水文・水資源学会誌，Vol.17，No.5，pp.572-577，2004

(2004.9.30 受付)