

中国淮河流域へのマクログリッド型 流出モデルの適用

APPLICATION OF A MACRO GRID BASED HYDROLOGICAL MODEL TO THE HUAIRHE RIVER BASIN IN CHINA

立川康人¹・川上貴裕²・市川 温³・椎葉充晴⁴・宝 馨⁵

Y. TACHIKAWA, T. KAWAKAMI, Y. ICHIKAWA, M. SHIIBA and K. TAKARA

¹正会員 博士(工学) 京都大学助教授 防災研究所水災害研究部門 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

²工修 三井不動産(株) (〒 103-0022 東京都中央区室町 2-1-1)

³正会員 工修 京都大学助手 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴正会員 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁵正会員 工博 京都大学教授 防災研究所水災害研究部門 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

A macro scale grid based distributed hydrological model is applied to the Huaihe River basin in China (140,000km²). In the modeling, a watershed basin is subdivided into grid boxes according to a grid system of a meso-scale atmospheric model to incorporate atmospheric model outputs. Model parameters are determined by using the data sets obtained in the Shigan River basin during the intensive observation period in 1998. Some runoff simulations showed that channel routing has dominant effect on a simulation of river discharge for a large river basin.

Key Words : large river basin, the Huaihe River basin, macro-scale hydrological model

1. はじめに

大河川流域の水移動を表現するためには、河道における水の水平移動を適切に表現する必要があり、このためには河道網データ、河道流追跡モデルが重要な要素となる。こうした点に早くから着目して、沖ら¹⁾は1度グリッドボックスを基にした流路網データセット (TRIP) を完成させてグローバルな水循環研究にそれを用いている。また、菰ら²⁾は3分グリッドの DEM を基に作成した河川網に Muskingum-Cunge 法を用いたモデルをメコン河全体に適用し、河川流量をよく再現できることを報告している。

こうした大河川を対象とした流路網が一般に落水線型の擬似的な河道網で表されるのに対して、筆者らは、流域をメソ気象モデルに合わせたグリッドボックスに分割しつつ、実際の河道網に近い河道ネットワークを河道流追跡モデルに反映させた流出モデル化手法を提案して、タイ国チャオプラヤ川流域³⁾、淮河の部分流域である史灌川流域⁴⁾に適用してきた。このモデルは、

- 大河川流域の水移動は河道による効果が重要となるため、できるだけ実際に近い形で河道網をモデルに反映させたいこと
 - 低平地では流域界がはっきりしないため、メソ気象モデルとのデータの受渡しを考えると実用上グリッド分割が合理的であること
- という考えに基づいている。

本研究では、このモデル化手法を中国淮河流域に適用し、メソ気象モデルによって降水量・蒸発散量が推定された場合に、河川流量を推定する流出モデルを構築した。構築にあたってはまず、河道網データを 1/500,000 地図 Tactical Pilotage Chart から読み取った。また、降雨から河川への流出過程を表すモデルのパラメータは、1998 年の史灌川流域における集中観測データを用いて決定した。このようにして構築したモデルを用いて、大河川流域における河道の計算流量に与える効果を調査した。

2. 淮河流域の水文特性の概要^{5),6),7)}

淮河流域は、北緯 31 度～36 度、東経 112 度～121 度に位置する流域面積約 270,000km² の流域であり、北側を黄河流域、南側を長江流域と接する (Fig. 1)。流域の南部・西部および北東部は山地で囲まれ、中央部から南東部にかけては広大な平地が広がる。平野部と低平地とで流域全体の約 7 割を占め、主河道の中流部以降の勾配は 0.003 と極めて緩やかである。

淮河流域の年平均降水量は約 878mm であり、大きな空間分布を示す。流域南部に位置する山地域の年降水量は約 1500mm、流域中部に広がる平野部では約 650mm である。この年間降水量の半分以上が梅雨期である 6 月～8 月に集中する。また年間の総流出高は約 240mm

Table 1 Historical floods in the Huaihe River basin (Q_p , peak discharge(m^3/sec)).

River	Station	Station no. in Figure 2	date	1954	date	1956	date	1991
				$Q_p(m^3/sec)$		$Q_p(m^3/sec)$		$Q_p(m^3/sec)$
Shigan	Jiangji	6	Jul. 6	4,600	Aug. 4	2,860	Jul. 4	3,730
Huaihe	Xi xian	5	Jul. 22	5,830	Jun. 8	7,270	Jun. 15	5,240
Huaihe	Wangjiaba	4	Jul. 23	9,600	Jun. 9	7,850	Jun. 16	8,000
Huaihe	Runheji	3	Jul. 24	8,300	Jun. 11	7,340	Jun. 16	6,940
Huaihe	Zhengyangguan	2	Jul. 26	12,700	Jul. 6	7,320	Jul. 11	7,450
Huaihe	Bengbu	1	Aug. 5	11,600	Jun. 19	6,940	Jul. 14	7,860

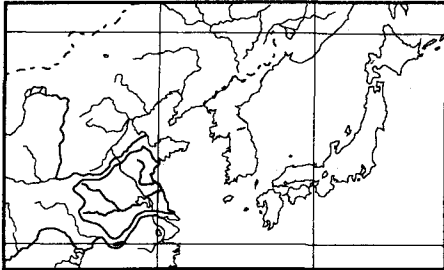


Fig. 1 Location of the Huaihe River basin.

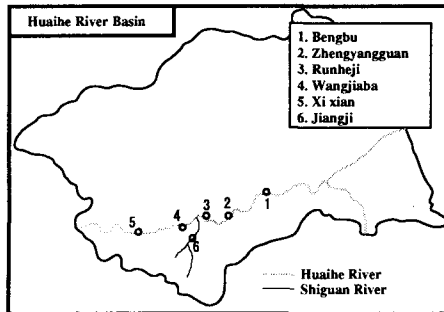


Fig. 2 Locations of discharge stations in Table 1.

であり、大半が7月～9月に発生する。

淮河流域における既往洪水のピーク流量とその発生期日を **Table 1** にまとめる。ピーク流量は我が国における大河川流域のそれとそれほど違わないが、洪水期間が1ヵ月近くにも及ぶ場合があることがわかる。これは梅雨前線が淮河流域上に停滞することによる。表中の流量観測地点の位置を **Fig. 2** に示す。観測点1～5は淮河主河道 (Huaihe River) に位置している。

本研究では、観測点1の Bengbu より上流の約140,000km²を対象としてマクログリッド型流出モデルを構成する。その際、観測点6の Jiangji より上流の史灌川 (Shiguan River, 6500km²) で観測された水文データを用いてモデルパラメータを決定する。

3. マクログリッド型流出モデルの構成

本研究で淮河に適用するマクログリッド型流出モデルは著者らがこれまで構築してきたモデル^{3),4)}と同様であり、モデル化の構成手順は以下のである。

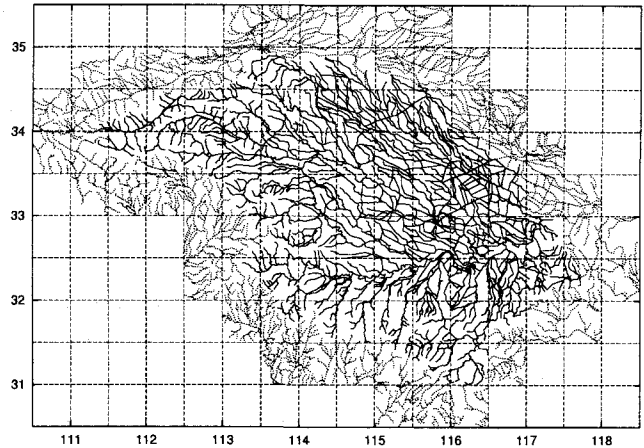


Fig. 3 Generated channel network data of the Huaihe River. Solid lines show the channel reaches within the Huaihe River basin.

- 1) 淮河流域地図および標高データを用いた淮河河道網データの作成
- 2) 流域のグリッド分割 (河道網データのグリッド分割)、および必要に応じて流域の細分割
- 3) 部分流域ごとの水文モデルの構築とその結合による全体モデルの完成

(1) 河道網データの作成

当初、淮河流域の河道網データもチャオブラヤ川で河道データを作成した場合⁸⁾と同様に、DCW(Digital Chart of the World) の河道位置データを利用することを考えていた。これまでに開発してきたtool群 (<http://fmd.dpri.kyoto-u.ac.jp/~flood/geohymos/geohymos.html>) を用いることによって、目的とするデータセットを比較的容易に作成することができるからである。ところが、淮河流域周辺のDCWの河道位置情報は分断されている河道網が非常に多く、それをもとに所定の形式を持つ河道データを作成することは極めて難しいと判断した。そこで、1/500,000 地図である Tactical Pilotage Chart を0.5°四方の図郭に分割してスキャナーで取り込み、画像上の河道位置をトレースして河道網データを作成した。図郭ごとの河道網データを作成した後、それらをを合成して流域全体の河道網データを作成し、GLOBEデータを用いて河道位置の標高情報を導入した。最後に、流域下端

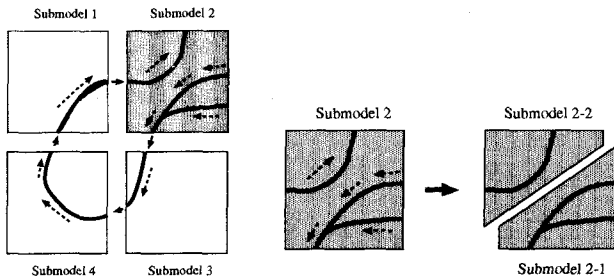


Fig. 4 Decomposition of a grid box which includes more than one channel network.

を指定して各河道区分の流れ方向を決定する。これらの作成手順は、画像から河道位置の平面情報を得るところ以外は筆者らがこれまでに示した手法⁸⁾と同様である。Fig. 3 は作成した河道網データであり、実線が対象とする Bengbu より上流の河道網である。

(2) 流域のグリッド分割

流域はグリッド分割を基本とする。この際、メソ気象モデルの計算格子と位置を合わせて、グリッド各辺の長さは10分(約16km)とした。メソ気象モデルとしては、田中らによって開発が進められている SiBUC-JSM 結合モデル⁹⁾を想定している。対象流域をグリッド分割した結果、グリッドの個数は504個となった。

基本的にはこれを単位としてモデルを構成するが、河道網のグリッド内での存在の仕方によっては、さらに分割処理が必要となる場合がある。たとえば、同一グリッド内に互いに流量のやりとりが無い河道が複数存在する場合 (Fig. 4) や、河道が複数のグリッドを介してループを形成している場合 (Fig. 5) である。このようなグリッドボックスが存在すると、グリッドボックスを一つの流域単位として河道流を追跡することができなくなる³⁾。そこで、このようなグリッドボックスを自動的に検出して分割処理を行う。その結果、部分流域の個数は1478個となった。この部分領域を単位として流出モデルを構成する。

(3) マクログリッド型流出モデルの構成^{3),4)}

流出モデルの構造を Fig. 6 に示す。部分流域ごとに流出要素モデルと河道流要素モデルとからなる部分系モデルを構成し、部分系モデルを相互に接続することで流域全体を表現する全体系モデルを構築する。流出要素モデルへの入力、はその部分流域への降雨量と蒸発散量であり、出力はその部分流域内の河道流要素モデルへの側方流入量である。河道流要素モデルからの出力は、下流側部分系モデルに含まれる河道流要素モデルへの入力となる。

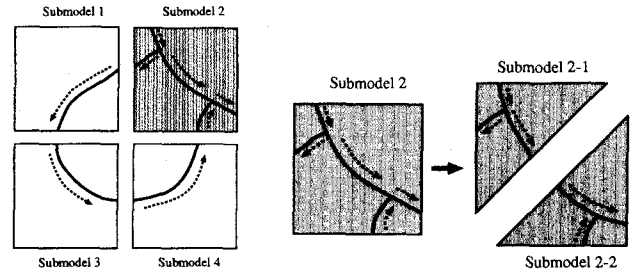


Fig. 5 Decomposition of a grid box which includes a looped channel network.

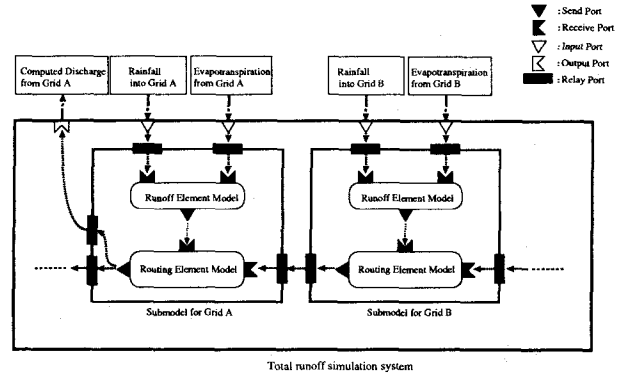


Fig. 6 Structure of macro grid based runoff simulation model.

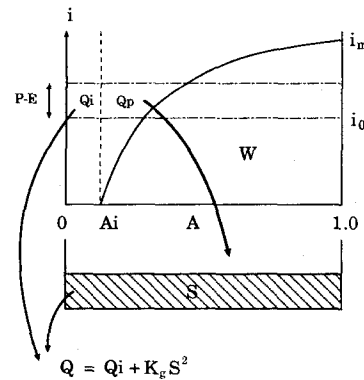


Fig. 7 Schematic drawing of a runoff element model.

流出要素モデルには、新安江モデル¹⁰⁾を簡略化したモデルを用いる。Fig. 7 はそれを模式的に示したものであり、流出はある地点に対する貯水深が貯水容量を越えた場合に発生すると考える。上段のタンク中に示した曲線は貯水容量 i と面積率 A の関係を示している。 i_0 は上段タンクの現在時刻での水深である。このときの単位時間あたりの降水量を P 、蒸発散量を E とするとモデルへの入力は $P - E$ であり、 i と A との関係式および i_0 によって決まる水量 $Q_i + Q_p$ を流出分と考える。この i と A との関係式を

$$i = i_m \left[1 - \left(1 - \frac{A - A_i}{1 - A_i} \right)^{1/b} \right], \quad A_i \leq A \leq 1.0 \quad (1)$$

とする。ここで i_m は貯水容量の最大値、 A_i は不浸透域の面積率、 b は貯水容量の空間分布形状を決定するパラメタである。この分布形状をもとに、不浸透域からは直接流出 Q_i が発生し、浸透域からは間接流出 Q_p が発生すると考える。 Q_p は地下水貯留量 S に加えられ、総流出量 Q は

$$Q = Q_i + K_g S^2 \quad (2)$$

と表すことにする。モデルパラメタは、 A_i, i_m, b, K_g であり、これらの値は史灌川流域での水文データを用いて決定する。

河道流要素モデルには、分流を考慮した河道網集中型 kinematic wave モデル³⁾を用いる。モデルパラメタはマンニングの粗度係数、流量流積関係式のべき数、河道の断面形状である。

4. 史灌川流域におけるモデルパラメタの同定

Fig. 8 に、史灌川の河道位置 (Fig. 2 の 6 番の地点 Jiangji の上流域約 6,500km²)、設定したグリッド位置、水文観測点を示す。降水観測所 (時間雨量) は 48 箇所、流量観測所は 7 箇所、パン蒸発量観測所 (日蒸発散量) は 3 箇所であり、1998 年 5 月 1 日～1998 年 9 月 16 日にかけて水文集中観測が行なわれた。

流域内には 2 つのダムが存在する (Fig. 8 の■印)。右側に位置するのが Meishan ダム、左側に位置するのが Nianyushan ダムである。これらのダムへの流入量、ダムからの放流量が得られているので、ダム上流域と下流域の 2 セットのモデルパラメタを決定する。ダム上流域は山地 (森林域)、下流域は平地 (水田・畑) に対応する。

(1) 観測データの加工

まず、グリッドボックスごとの平均降水量データを作成する。あるグリッドボックスから細分割された部分流域にはそのグリッドと同じ降水量を与える。各グリッドに対する降水量は、各グリッドの中心部から半径 16km 以内に存在する観測地点の降水量の距離による重み付け平均とした。半径 16km 以内としたのは、グリッド中心からこの半径で円を描いた場合、どの中心からの円内にも少なくとも 1 つの観測地点が含まれるからである。作成した各グリッドへの降水量データをもとに作成した両ダムの下流域の 3 流域の流域平均降水量を Fig. 9 に示す。

次に、実蒸発散量を推定することを考える。短期間 (5 日間) ではあるが、この集中観測期間内に田中らは熱収支観測を行い実蒸発散量を得ている¹¹⁾。この実蒸発散量とパン蒸発量の同じ観測期間のデータを用いて両

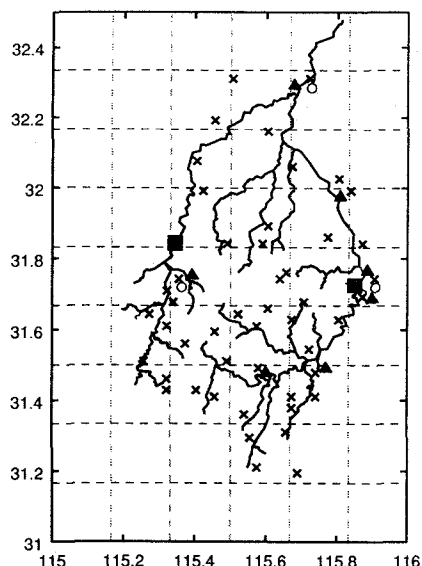


Fig. 8 Channel network of the Shigan River, location of grid boxes, and hydrological observation stations (■: dam site, ×: rainfall station, ○: pan evaporation station, ▲: discharge station).

者の比を求め、その比をパン蒸発量に乗じて実蒸発散量の推定値とした。ダム下流域に属するグリッドでの蒸発散量を Fig. 10 に示す。この値は 3 箇所の観測地点の平均パン蒸発量に 1.02 を乗じた値である。この比率は、対象期間での流域内の土地利用の多くが水田であり、同じ気候帯の国内での観測報告¹²⁾とも合わせて妥当と判断した。

(2) モデルパラメタの同定

以上の準備をもとに流出要素モデルのパラメタ A_i, b, W_m, K_g を決定した。決定にあたっては、各パラメタの値が流出計算結果に与える影響を調べた後、試行錯誤的に決定した。その値を Table 2 に示す。単位は mm-hr 系である。 I, S は Fig. 7 に示す上部の貯留分と下部の地水貯留分の同定された初期水深である。Nianyushan ダム流域における実測流量と計算流量との比較を Fig. 11 に示す。この場合の Nash Sutcliffe 指標は 76 % であり比較的よい結果であった。

このパラメタを下流域にも適用し、実測流量と比較したところ、ハイドログラフの変化傾向は表現できているものの、計算流量が実測流量を大幅に上回る結果となった。この差は両ダム上流域で同定したパラメタが下流域に適さないのではなく、根本的に水収支が取れていないことが原因と考えられる。実際にダム下流において流域外にかなりの河川水が導水されているが、具体的な値は不明なので、各ダムからの放流量に一定の比率を乗じて水収支の整合性が取れるようにした上でパラメタを同定することにした。乗じる比率は

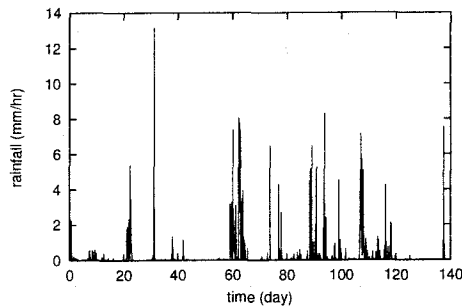


Fig. 9 Areal mean precipitation in the lower part of the dams (from May 1 to Sep. 15, 1998).

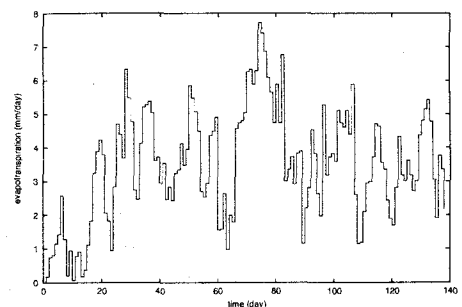


Fig. 10 Estimated actual daily evapotranspiration for lower part of the dams (from May 1 to Sep. 15, 1998).

Table 2 Parameter values of upper part of dams.

A_i	b	$W_m(\text{mm})$	$K_g(\text{mm-hr})$	$I(\text{mm})$	$S(\text{mm})$
0.09	1.9	510	0.00095	1510	70

Table 3 Parameter values of lower part of dams.

A_i	b	$W_m(\text{mm})$	$K_g(\text{mm-hr})$	$I(\text{mm})$	$S(\text{mm})$
0.10	2.1	450	0.0008	800	40

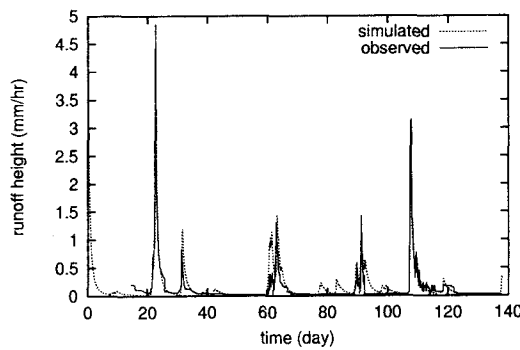


Fig. 11 Comparison between observed and simulated hydrograph at Nianyushan dam site (from May 1 to Sep. 15, 1998).

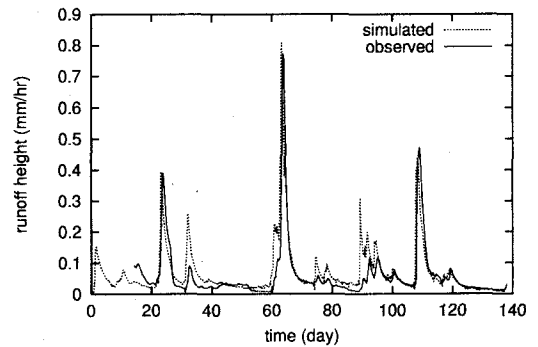


Fig. 12 Comparison between observed and simulated hydrograph at the outlet of the Shigan River basin. In this case, the amounts of dam releases from two dams are multiplied by 0.2 to consider the effect of water taken to the outside of the basin (from May 1 to Sep. 15, 1998).

0.2とした。その結果、求めたパラメータの値を Table 3 に示す。このときの計算流量と実測流量との比較を Fig. 12 に示す。

5. 流量シミュレーションへの河道の効果

3. で述べた分割処理により生成した 1478 個の部分流域を単位として部分系モデルを構築し、これらを結合することで全体のモデルを構成する。流出要素モデルのパラメータは、4. で求めたダム上流域での値を山地の部分流域に、ダム下流域での値を平地の部分流域にそれぞれ設定した。

河道要素モデルのパラメータに関しては、粗度係数 n を 0.05 (m-s 単位)、河道断面を幅広矩形断面とし、流量 Q と水深 h との関係式は $Q = (\sqrt{I}/n)h^{5/3}B$ とした。 I は河道勾配であり、河道網データセットから算定した。ただし、それによって求めた河道勾配が逆勾配となる河道区間に関しては 0.001 とした。また、未知パラメータである川幅 B に関しては流域面積に応じて線形的に変化するものとし、対象流域下端の Bengbu

(140,000km²) での川幅を Landsat TM 画像をもとに 600m とした。

河道のモデルパラメータを決めるためには、淮河流域を対象とした降水・蒸発散量・河川流量のデータセットが必要となるが、現時点ではすべてのデータが揃っていないため、仮想的な降水を与えて河道の効果を見る。Fig. 13 は史灌川流域のある降水観測所で測定された時間降水量データの 30 日分を示している。この降水が淮河流域すべてで発生したとして、河道が流量計算結果に与える効果を調べた。なおこの場合、蒸発はないとして計算を実行した。

Fig. 14 の実線は構築したモデルによって得られた対象流域下端 Bengbu での河川流量、破線は各部分流域からの流出量を単純に足し合わせることで得た流量、つまり河道の効果を考慮しない場合の計算流量である。これによると、河道を考慮する場合、流量のピークが 3 日程度遅れること、ピーク流量が半分程度になることがわかる。実際には、降雨は時間空間的

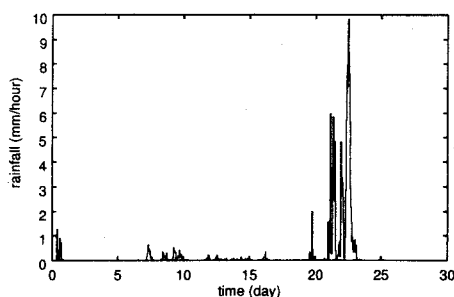


Fig. 13 Precipitation used for runoff simulations at the Huaihe River basin.

に大きく分布するため、河道の効果はさらに大きく現れることになる。

次に未知パラメータである河幅の与え方によってどの程度、計算流量が異なるかを調査した。Fig. 15 は、川幅を上流域面積に応じて変化させた場合と、全河道区分の川幅を一律 500m とした場合との計算流量の比較である。川幅を一律 500m とすると、ピーク流量が半分程度になって、ピーク発生時刻も遅れる。モデルを構築する上で、川幅の与え方が計算結果に大きな影響を与えることがわかる。

ここで採用している河道流追跡モデルは、部分流域ごとに河川流量の空間変化が時々刻々線形的に変化するという仮定のもとに集中化された kinematic wave モデルである。粗度係数は標準的な値を用いることができると思われるが、河道の断面形状のデータは存在しないため、衛星データ等を用いて河道幅の情報を得る必要がある。

6. おわりに

淮河流域の河道網データを作成し、そこでの流出モデルを構築した。流出要素モデルのモデルパラメータの決定には、史灌川流域での集中観測水文データセットを用いた。また、河道のモデルパラメータが計算流量に及ぼす効果を検証し、大河川流域においては、河道の効果が非常に大きいことを確認した。次の課題は、水文データの観測値または推定値を入力としてこのモデルの河川流量の再現性を確認することである。

なお、本研究で用いた中国史灌川流域の水文データセットは 1998 年の HUBUX 特別集中観測において、日中の研究者・実務者によって取得されたものです。データの取得・整理に関係された方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 沖大幹・西村照幸・ポールディルマイヤー：グローバルな河川流路網情報 (TRIP) を利用した年流量による地表面数値モデルの検証について、水文・水資源学会誌, 10(5), pp. 416-425, 1997.

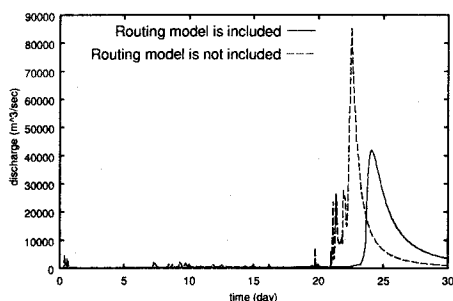


Fig. 14 Effect of flow routing on a simulated hydrograph.

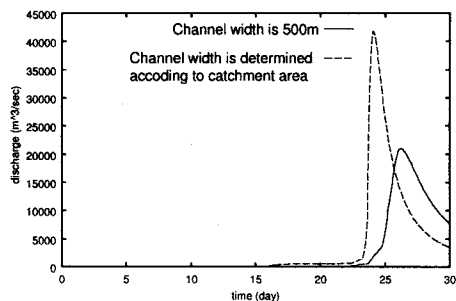


Fig. 15 Effect of channel width on a simulated hydrograph.

- 2) 敖天其・竹内邦良・石平博：分布型モデル BTOPMC を用いたメコン河全流域の流出解析, 水文・水資源学会 2000 年研究発表要旨集, pp. 92-93, 2000.
- 3) 坂井健介・立川康人・市川温・椎葉充晴：大河川流域を対象とした流出シミュレーションモデルの構築とそのチャオプラヤ川流域への適用, 水文・水資源学会誌, 12(1), pp. 395-52, 1999.
- 4) 川上貴裕・立川康人・市川温・椎葉充晴：中国史灌川流域へのマクログリッド型流出シミュレーションシステムの適用, 水工学論文集, 43, pp. 13-18, 1999.
- 5) Cheng, X., Peng, S., Yang, M. and Xu, H.: Formation of torrential rain and flood at the Huaihe River basin in 1991, distributed at the International Symp. on Meso-scale Water Cycle and Heavy Rainfall in East Asia, Feb. 2-4, IHAS, Nagoya University, Japan, 1998.
- 6) Liu, C.: The characteristics of water cycle in Huaihe River Basin, distributed at the International Symp. on Meso-scale Water Cycle and Heavy Rainfall in East Asia, Feb. 2-4, IHAS, Nagoya University, Japan, 1998.
- 7) 淮河水利委員会：1991 年淮河水系暴雨洪涝形成特征, 1992.
- 8) 立川康人・市川温・坂井健介・椎葉充晴：DCW と GLOBE データセットを用いた流出シミュレーションのための河道網データの生成 - タイ国チャオプラヤ川を対象として -, 水文・水資源学会誌, 11(6), pp. 565-574, 1998.
- 9) 田中賢治・中村忠則・山本卓生・椎葉充晴・池淵周一：SiBUC-JSM 結合モデルのテストラン, 京都大学防災研究所年報, 第 41 号, B2, pp. 135-154, 1998.
- 10) Zhao, R. J.: The Xinanjiang model applied in China, J. of Hydrol., 135, pp. 371-381, 1992.
- 11) 田中賢治・椎葉充晴・池淵周一：GAME/HUBEX-IOP の水・熱フラックス観測の速報, 京都大学防災研究所年報, 第 42 号 B2, pp. 121-140, 1999.
- 12) 金子良：農業水文学, 共立出版, pp. 147-148, 1973.

(2000. 10. 2 受付)