

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

Building of a Large Grid Based Runoff Simulation System and
its Application to the Shiguang River Basin in China

川上貴裕¹・立川康人²・市川 温³・椎葉充晴⁴

Takahiro KAWAKAMI, Yasuto TACHIKAWA, Yutaka ICHIKAWA and Michiharu SHIIBA

¹学生会員 京都大学大学院工学研究科 修士課程学生 (〒 606-0011 京都市左京区吉田本町)

²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)

³正会員 工修 京都大学助手 防災研究所 水災害研究部門 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

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 (〒 606-0011 京都市左京区吉田本町)

A runoff simulation system for a large river basin is applied to the Shiguang River Basin (6,000km²) in China. The watershed basin is subdivided into grid boxes with about 225km² in which rainfall and evapotranspiration are assumed to be obtained by a numerical mesoscale atmospheric model. Runoff from each grid box is calculated and routed along channel networks. The system works well and it will be applied to the Huaihe River Basin (10,000km²) where HUBEX Project is going.

Key Words : channel networks, large river basin, distributed rainfall-runoff model, macro-scale hydrological model

1. はじめに

本研究の目的は、大河流域における洪水を予測するための流出予測システムを構築することである。大河流域を対象として将来の洪水発生の可能性を検討する場合、特に考えなくてはならないことは、

- 洪水が長期間にわたって継続するため蒸発散の時間的、空間的分布を考慮せねばならないこと
- 将来、大洪水を引き起こす可能性のある物理的根拠のある降雨予測値を入力とする必要があること

であり、水循環を考える中で洪水を捉える必要があるという点である。このためには、陸面での水文過程を十分に考慮したメソスケール気象予測モデルを用いて降水・蒸発散量を推定する必要があり、またその推定された水文量を直接、流出過程と結び付けることができるように、気象予測モデルと整合性のある流出システムを構築する必要がある。

こういった点を念頭におき、坂井ら¹⁾は流域を、メソ気象モデルの計算格子を想定した数 10km を 1 辺とするグリッドボックスに分割し、そのグリッドボックスごとに流出モデルと河道網モデルを構成して、それらを相互に結び付ける流出システムを構築した。この流出システムは、流域を気象予測モデルと整合性が取れるようなグリッドボックスに分割しつつ、実際の河道網データを重視して河川流量を予測しようとするところに特徴がある。

本研究は、この流出システムを中国史灌川流域に適用し、将来的にメソ気象予測モデルの出力を用いて淮河流域を対象とした洪水予測の可能性を検討することを目的としている。本研究の全体構想を以下に示す。

- 1) 淮河流域の支流域である史灌川流域においてグリッドボックスを基本とする流出システムを構成する。
- 2) GAME 研究プロジェクトの一環として史灌川流域を対象とした詳細な水文観測が 1998 年に行なわれている。このデータを用いて史灌川流域のモデルパラメータを同定する。
- 3) 淮河流域全体を対象とした水文データは入手できないので、2) で得られるモデルパラメータを用いて淮河流域全体を対象とした流出システムを構築する。この場合の流出システムへの入力には、田中らによって開発の進められている Japan Spectral Model 88 (メソ気象予測モデル) に陸面モデル SiBUC を組み込んだモデル²⁾の出力結果を用いる。

本論文はこのうち 1) について報告するものである。

2. 河道網データの作成

(1) 河道網データの作成手順

流出システム構築のためには河道網の位置情報が必須となる。この河道情報を得るための一連の作業のフローチャートを 図-1 に示す。今回対象とする流域は地形図

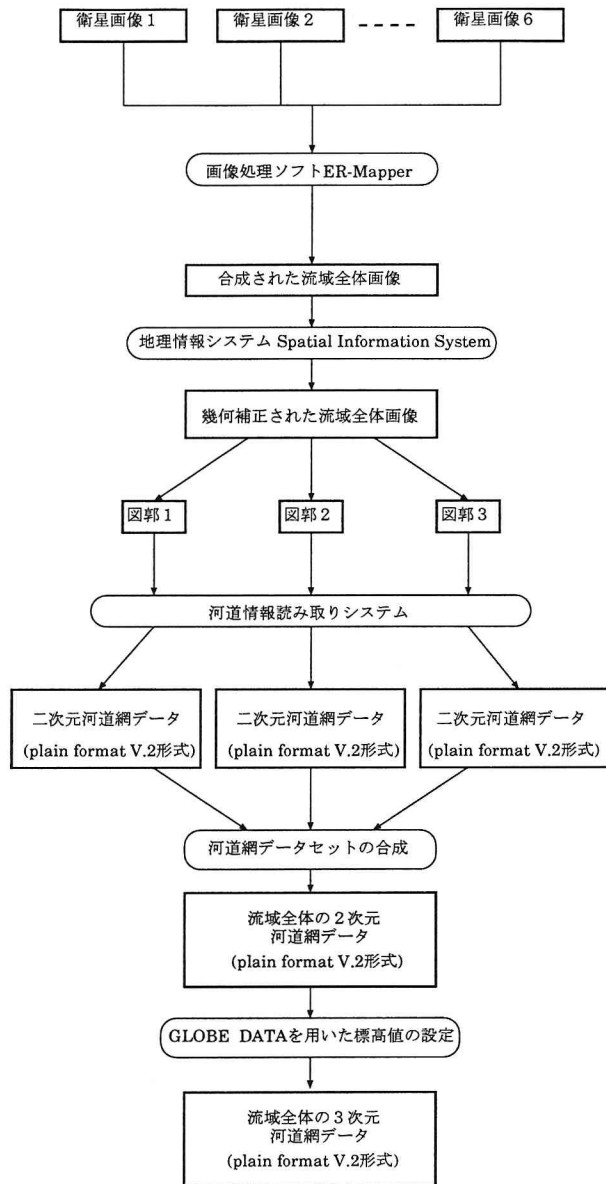


図-1 河道網データの作成手順

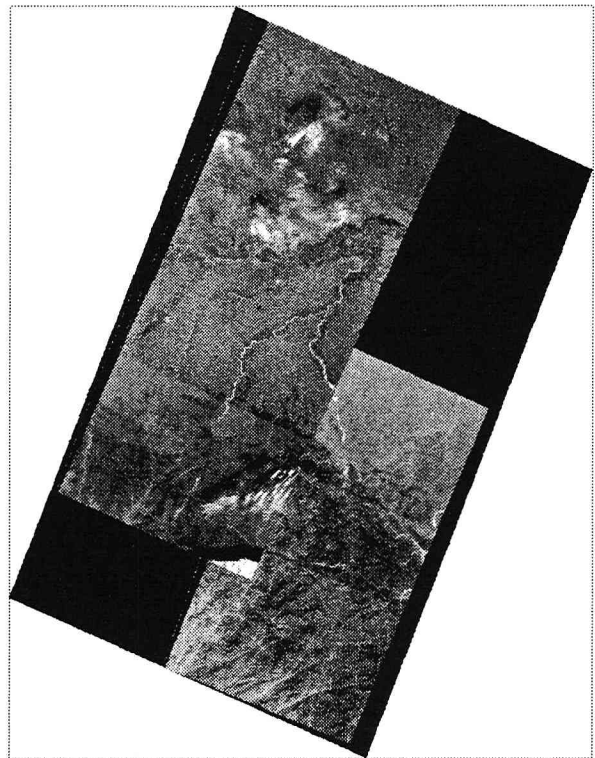


図-2 幾何補正されたモザイク画像

を入手することできなかったため、人工衛星 ADEOS³⁾ に搭載された高解像度光学センサ AVNIR によるパンクロマティック画像を用いて河道網データを作成した。地表分解能は約 8m と高く、河道位置を読み取るには十分である。利用した画像は 6 枚で、画像 1 枚の面積は約 75km×75km である。これらの画像を合成してモザイク画像を作成し幾何補正を行った。幾何補正後の画像を図-2 に示す。

この衛星画像から南らにより開発された河道網データ生成システム^{4),5)}を用いて河道網データを作成する。このシステムは WindowsNT または Windows95 の上で動作し、画像化された地図情報をもとに流路の位置を画面上でトレースすることにより、ベクター形式の河道網データを作成できるようになっている。

ここでは、幾何補正後のモザイク画像を約 25km 四方

の正方形の図郭に分割し、図郭ごとに目視で河道上端を判断して河道網データを生成した後、これらの河道網データを合成して流域全体の二次元河道網データを作成した。ここで言う二次元という意味は、生成したデータが河道位置の標高値を持っていないという意味である。河道網データ生成システムは標高データも入力することができるように設計されているが、今回、元データとしたのは衛星画像であるため、それから標高に関する情報を得ることはできない。そこで河道位置の標高は GLOBE (Global Land One-km Base Elevation) データセットを用いて設定した。このデータセットは地球上のあらゆる位置の標高データを 30 秒 (約 1km) グリッドの空間分解能で記録しているもので、そのグリッド内の最高値・最低値・標高の平均値およびグリッド四隅の標高値が格納されている。ここでは、河道は最も低い場所を流れると考え、河道上の頂点が属しているグリッド内の最低の標高値をその河道位置の高さとした。

(2) データ形式^{5),6)}

最終的に作成した河道網データの例を図-3 に示す。河道網データはある図郭を単位として記録する。図郭の大きさは目的に応じて定めて良いが、図郭間の位置関係がわかるように、上下左右に 1 だけ異なる図郭番号をつけることにする。以下、この形式を plain format

```

[Comment]
This is a sample dataset.
[Data Format Name]
plain format V.2
[Coordinate System]
UTM 53
[Map Number]
1 2
[Reference Coordinates]
200.0 0.0
[Vertices of the Map]
300.0 0.0
800.0 0.0
800.0 500.0
300.0 500.0
[Number of End Points]
10
[Data of End Points]
1 300.0 210.0 345.0 4
2 400.0 170.0 330.0 0
3 550.0 60.0 425.0 0
4 330.0 0.0 365.0 1
5 710.0 270.0 369.0 0
6 500.0 500.0 382.0 3
7 550.0 300.0 410.0 0
8 580.0 500.0 403.0 3
9 640.0 400.0 397.0 0
10 800.0 320.0 381.0 2
[Number of River Segments]
8
[Data]
# 河道区分 1
1 2 1 1 4 300.0 210.0 345.0 0.0
1 2 0 1 -1 340.0 180.0 9999.0 10.0
1 2 -2 1 0 400.0 170.0 330.0 0.0
# 河道区分 2
1 2 2 2 0 400.0 170.0 330.0 0.0
1 2 0 2 -1 410.0 120.0 9999.0 0.0
1 2 0 2 -1 483.0 85.0 9999.0 12.0
1 2 -3 2 0 550.0 60.0 425.0 0.0
# 河道区分 5
1 2 3 5 0 550.0 60.0 425.0 0.0
1 2 0 5 -1 420.0 15.0 9999.0 15.0
1 2 -4 5 1 330.0 0.0 365.0 0.0
# 河道区分 3
1 2 -2 3 0 400.0 170.0 330.0 0.0
1 2 0 3 -1 410.0 200.0 9999.0 11.0
1 2 0 3 -1 450.0 320.0 9999.0 0.0
1 2 0 3 -1 475.0 470.0 9999.0 0.0
1 2 6 3 3 500.0 500.0 382.0 0.0
# 河道区分 4
1 2 5 4 0 510.0 270.0 369.0 0.0
1 2 0 4 -1 535.0 120.0 9999.0 7.0
1 2 -3 4 0 550.0 60.0 425.0 0.0
# 河道区分 7
1 2 7 7 0 550.0 300.0 410.0 0.0
1 2 -9 7 0 640.0 400.0 397.0 0.0
# 河道区分 6
1 2 8 6 0 580.0 500.0 403.0 0.0
1 2 -9 6 0 640.0 400.0 397.0 0.0
# 河道区分 8
1 2 9 8 0 640.0 400.0 397.0 0.0
1 2 0 8 -1 710.0 360.0 385.0 0.0
1 2 -10 8 2 800.0 320.0 381.0 0.0

```

図-3 河道網データ plain format V.2 の例

V.2形式と呼ぶことにする。データの内容は次の通りであり、#で始まる行はデータに関するコメントである。

- [Comment] データに関するコメント
- [Data Format Name] データフォーマット名
- [Coordinate System] 河道位置を示す地図座標系
- [Map Number] 図郭番号(列番号, 行番号)
- [Reference Coordinates] 座標系原点からのオフセット値
- [Vertices of the Map] 図郭四隅の座標
- [Number of End Points] 図郭内の端点数
- [Data of End Points] 各端点のデータ(端点番号, 端点の座標, 端点の位置情報)

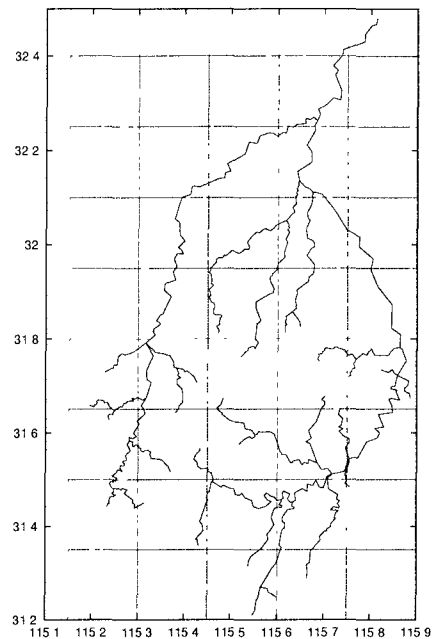


図-4 グリッド分割

号, 端点の座標, 端点の位置情報)

- [Number of River Segments] 図郭内河道区分数
- [Data] 流路位置データ(図郭番号, 端点番号(マイナス記号が付されている場合はそれが下流側であることを示す), 河道区分番号, 端点の位置情報, 各点の位置座標, 河道幅)

河道網は河道区分が繋がったものとする。ここで河道区分とは上下流端・合流点または図郭境界と河道との交点で区切られる一つの河道区間を意味する。また、端点とは河道区分の上下流端であり、端点の位置情報とは端点が図郭のどの位置にあるか(図郭内部かまたは図郭線上のどの辺上にあるか)を記録したものである。作業の効率化を図るため、前述した25km四方の図郭ごとに1つの河道網データを作成して、最後にそれらを合成して流域全体の河道網データを完成させた。

3. 流出シミュレーションシステム

(1) 流出シミュレーションシステムの基本的枠組み

全流域を緯経度各々0.15度(約15km)四方のグリッドに分割して流出シミュレーションシステムを構成する。流域をグリッド分割した様子を図-4に示す。図中の実線は史灌川の河道位置、点線はグリッドボックスを表し、横軸は経度、縦軸は緯度を表す。各グリッドボックスごとに流出モデルには新安江モデルを簡略化したモデル⁷⁾を採用する。河道流れは、計算負荷を考慮してまずkinematic waveで表現できるものと考えて河道網集中型kinematic waveモデル⁸⁾を用いる。これらのモデルを要素化し、構造的モデリングシステム⁹⁾

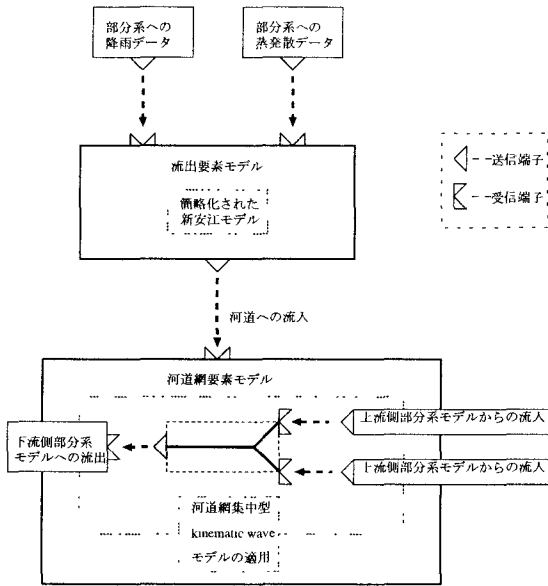


図-5 部分系モデル

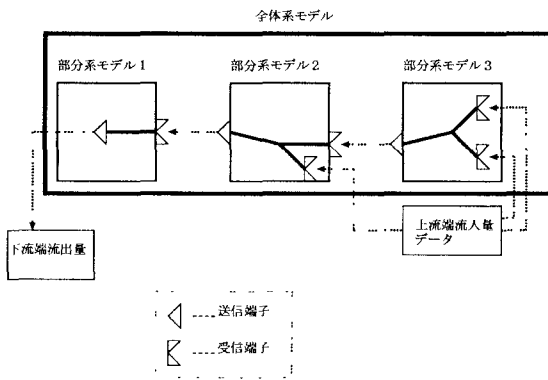


図-6 全体系モデル

(OHyMoS) を用いて全体の流出系をモデル化する。

実際のモデル構成の手順として、まず 2. で生成した史灌川全体の河道網データを、ここで設定したグリッドボックスを一つの図郭単位として分割する。新たに設定した図郭の四隅の緯経度を与えれば、その図郭に対する plain format V.2 形式のデータを自動生成できるようにしている。このデータを河道モデルの構成に用いる。また分割時に各グリッドボックス間での河道網の接続状況を記したデータが作成されるので、この情報をもとにグリッドボックス間の河道流れが接続される。このようなモデル化手法を取っているため、メソ気象モデルの計算格子の大きさや位置が変わった場合も柔軟に対応することができる。

(2) 構造的モデリングシステム⁹⁾

構造的モデリングシステムとは、ある流域の水文モデルを構成する場合に、流域やそこでの水文過程をいくつかの要素に分割し、それらに対応する要素モデル

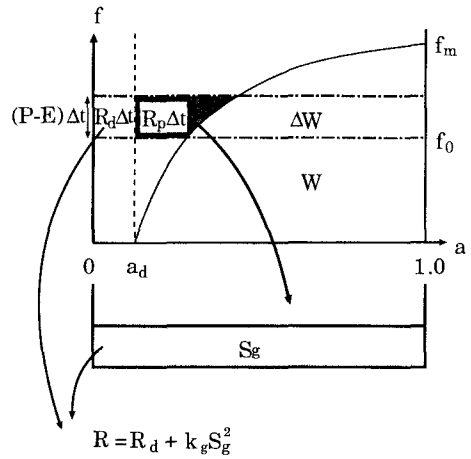


図-7 流出モデルの概念図

をその相互関係に応じて結合することにより、水文過程内部の構造を反映させて水文モデルを構成する方法である。ここでは、基本的にグリッドボックスごとに河道網要素モデルと流出要素モデルからなる部分系モデル(図-5)を構成し、それらの部分系モデルを相互に結合することにより全体系モデル(図-6)を構築する。構造的モデリングシステムでは、要素モデル間および、部分系モデル間での情報伝達的手段として端子という概念を用いる。ここで構成する水文モデルでは、部分系モデル間ではグリッドボックス間の河川流量が端子を介して受け渡される。また、部分系内部の要素モデル間では、降雨量、蒸発散量、および部分流域から河道網への流出量が端子を介して受け渡される。

(3) 流出要素モデル⁷⁾

土層は貯留することができるある最大の貯水高(貯水能力)を持っていると考え、この貯水能力 $f(\text{mm})$ は対象流域内で図7のように分布していると考え。ここで a_d を不浸透域の面積率、 a を面積率として、不浸透域 ($0 \leq a \leq a_d$) では $f = 0$ 、浸透域 ($a_d \leq a \leq 1.0$) では

$$f = f_m \left\{ 1 - \left(1 - \frac{a - a_d}{1 - a_d} \right)^{1/b} \right\} \quad (1)$$

とする。式中、 f_m は貯水能力の最大値、 b は貯水能力の空間分布形状を決定するパラメータである。 a_d は土地利用状況をもとに設定するため、貯水能力 f の分布形状は f_m と b によって決定される。降雨強度を $P(\text{mm/hr})$ 、蒸発強度を $E(\text{mm/hr})$ として $P > E$ のとき、単位時間 Δt 当たりの正味の入力 $(P - E)\Delta t$ をこの分布関数をもとに不浸透域からの流出 $R_d\Delta t(\text{mm})$ 、浸透域からの流出 $R_p\Delta t(\text{mm})$ 、浸透域の貯水量の増加 $\Delta W(\text{mm})$ に分配する。不浸透域からの流出は

$$R_d\Delta t = a_d(P - E)\Delta t \quad (2)$$

である。浸透域からの流出は現在時刻での貯水高を f_0 として $f_0 + (P - E)\Delta t \geq f_m$ のとき

$$R_p \Delta t = (P - E)\Delta t(1 - a_d) - W_m + W \quad (3)$$

$f_0 + (P - E)\Delta t \leq f_m$ のとき

$$R_p \Delta t = (P - E)\Delta t(1 - a_d) - W_m \quad (4)$$

$$+W + W_m \left(1 - \frac{f_0 + (P - E)\Delta t}{f_m}\right)^{1+b}$$

となる。 $E \geq P$ のときは流出は発生せず、 $(E - P)\Delta t$ を W から差し引く。ここに、 W は現在時刻での浸透域に蓄えられている貯水量 (mm) であり、 ΔW を加えたものが次時刻の貯水量となる。 W_m は浸透域に貯水される最大の貯水量であり、 (1) 式を積分して

$$W_m = \frac{f_m}{1+b}(1 - a_d) \quad (5)$$

である。また、

$$W = W_m \left\{1 - \left(1 - \frac{f_0}{f_m}\right)^{1+b}\right\} \quad (6)$$

となる。浸透域からの流出 R_p に時間遅れの効果を導入するため R_p を一旦、貯留させて

$$\frac{dS_g}{dt} = R_p - R_g \quad (7)$$

とし、貯留量 S_g とそれからの流出量 R_g との関係式を k_g をモデルパラメータとして次式で表す。

$$R_g = k_g S_g^2 \quad (8)$$

結局、部分流域から河道網への流出高 R (mm/hr) は

$$R = R_d + R_g \quad (9)$$

となり、グリッドボックス内の河道網への流出を表す。

(4) 河道網要素モデル⁸⁾

河道モデルに河道網集中型 kinematic wave モデルを用いる。このモデルは以下の二つの仮定を基礎としている。

【仮定 1】河道区分 i の上流から x の距離にある河道地点の通水断面積 $A_i(x, t)$ と流量 $Q_i(x, t)$ の間には、

$$A_i(x, t) = K_i Q_i(x, t)^{P_i} \quad (10)$$

なる関係があるとする。ただし、 K_i 、 P_i は河道区分 i に固有の定数とする。

【仮定 2】河道網内の流量の分布は河道に沿う距離とともに直線的に変化するものとする。

この流量の空間的な変化率を $q_0(t)$ と書くことにすると、 $Q_i(x, t)$ は次のように書ける。

$$Q_i(x, t) = Q_i(0, t) + q_0(t)x \quad (11)$$

このとき、河道区分 i の区分長を L_i と書くことにすると、 $q_0(t)$ は次のように表せる。

$$q_0(t) = \left(O(t) - \sum_{i=1}^M I_i(t)\right) / \sum_{i=1}^N L_i \quad (12)$$

ただし、 $O(t)$ は流出量、 $I_i(t)$ は上流端からの流入量、 M は上流端数、 N は河道区分数である。仮定 1 より、通水断面積 $A_i(x, t)$ は、

$$A_i(x, t) = K_i(Q_i(0, t) + q_0(t)x)^{P_i} \quad (13)$$

と書ける。河道区分 i の河道内貯留量 $S_i(t)$ は、(13) 式で与えられる $A_i(x, t)$ を x について積分して

$$S_i(t) = \int_0^{L_i} A_i(x, t) dx \quad (14)$$

となる。 $S_i(t)$ をすべての河道区分について足し合わせたものが河道網内貯留量 $S(t)$ である。

$$S(t) = \sum_{i=1}^N S_i(t) \quad (15)$$

$A_i(x, t)$ は $q_0(t)$ の関数なので、 $S_i(t)$ も $q_0(t)$ の関数である。一方、河道網内貯留量 $S(t)$ に関する連続式は、

$$\frac{dS(t)}{dt} = \sum_{i=1}^M I_i(t) + Q_L(t) - O(t) \quad (16)$$

である。ただし、 $Q_L(t)$ は流出要素モデルによって計算される河道網への流出量であり、(9) 式で得られる R に部分系の面積を乗じた値である。ここで、流出量 $O(t)$ は(12) 式を変形して、

$$O(t) = \sum_{i=1}^M I_i(t) + q_0(t) \sum_{i=1}^N L_i \quad (17)$$

と書けるので、これを(16) 式に代入すると、

$$\frac{dS(t)}{dt} = Q_L(t) - q_0(t) \sum_{i=1}^N L_i \quad (18)$$

となり、こちらも $q_0(t)$ の関数となる。よって(15)(18) 式からなる微分方程式を解くことにより $q_0(t + \Delta t)$ が得られ、時刻 $t + \Delta t$ での流出量 $O(t + \Delta t)$ が求まる。

つまり、グリッドボックスで区切られる河道上端での流量が与えられれば、グリッド内部での河道流量の分布を仮定することによって、流れの追跡計算を行うことなく下端での流量を求めることができる。

(5) グリッドボックス内の複数水系の取り扱い

集中型 kinematic wave モデルでは、計算単位ごとに上下流の関係が定まらなければならない。そこで、流域をグリッドに分割した際、図-8 の部分系 2 のように同一グリッド内に複数の河道が存在する場合は、これらの河道を水系ごとに図-9 のように分け、それを一つの部分系モデルとする。各部分水系の流域面積はその河道長さに応じてグリッドボックスの面積を配分することにする。

(6) 流出システムの動作確認

図-10 に示す仮想降雨を与えて流出シミュレーションを行なった結果を図-11 に示す。モデルは正常に動

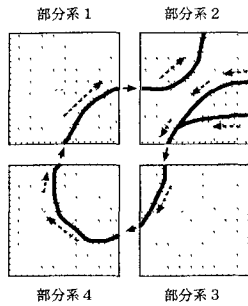


図-8 グリッド内に複数の水系があるケース

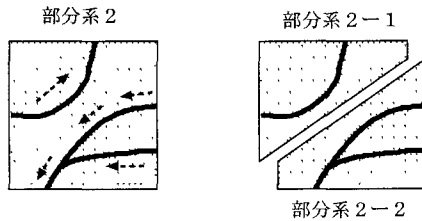


図-9 部分水系への分割

作しているので、今後、同流域で得られる水文データを用いてモデルのキャリブレーションを行うことになる。

4. まとめ

現在、地球上の水・熱循環の実態を明らかにすることを目的としてGEWEX という研究プロジェクトが進行している。そのうち、アジアモンスーン域を対象とした GAME 研究が日本を始めとして東南アジア各国との共同研究という形で進められている。本研究はその一環として、中国淮河流域を対象とした洪水予測の可能性を検討するために、史灌川を対象とする河道網データを衛星画像を用いて作成し、そこでの洪水流出シミュレーションシステムを構築した。今後の課題として、同流域を対象としたモデルパラメータの同定、淮河全体における河道網データの生成と流出システムの構築、さらにメソ気象予測モデルのモデル出力を用いた流出予測シミュレーションがある。

謝辞：本研究は GAME 研究プロジェクトの一環として進められたものであり、平成 10 年度科学研究費補助金(国際学術研究)「湿潤アジアにおける水循環の大気陸面過程と水資源・水災害の変動の研究」(代表：武田喬男, 名古屋大学)の補助を受けた。また本研究で利用した衛星データは、宇宙開発事業団 ADEOS-JRA 解析研究プロジェクト「河川流域における高分解能情報の抽出とその水文学的応用」(代表：宝馨, 京都大学)において宇宙開発事業団より提供されたものである。ここに記して謝意を表します。

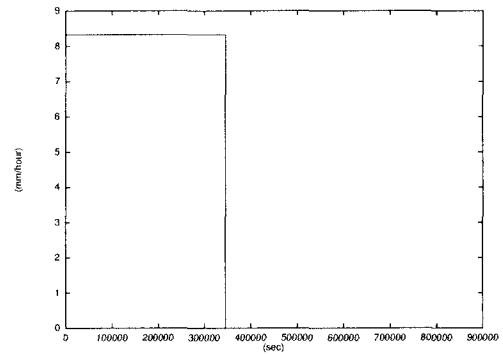


図-10 4日間の矩形降雨

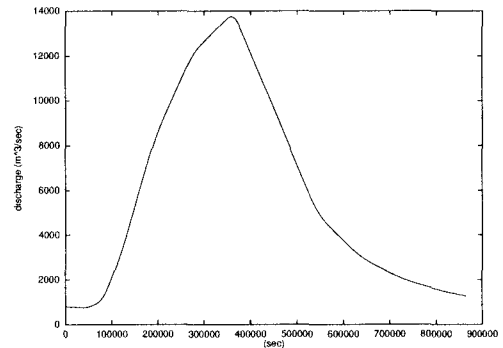


図-11 最下流端における流出量

参考文献

- 1) 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システムの構築とそのチャオブラヤ川流域への適用, 水文・水資源学会誌, 投稿中.
- 2) 田中賢治, 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, 1998, 印刷中.
- 3) 宇宙開発事業団: 地球観測プラットフォーム技術衛星(ADEOS).
- 4) 南裕一, 立川康人, 椎葉充晴, 市川温: 河道網データの新たな表現形式とその生成手法について, 土木学会第 52 回 年次学術講演会講演概要集第 2 部, II-164, 1997.
- 5) 椎葉充晴・立川康人・市川温: 流域地形の新たな表現形式とその流出モデリングシステムとの統合, 京都大学水文研究グループ研究資料, no. 1, pp. 19-36, 1998.
- 6) 立川康人, 市川温, 坂井健介, 椎葉充晴: DCW と GLOBE データ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作成 -タイ国チャオブラヤ川を対象として-, 水文・水資源学会誌, 1998, 印刷中.
- 7) Nirupama, Y. Tachikawa, M. Shiiba and T. Takasao : A Simple Water Balance Model for a Mesoscale Catchment Based on Heterogeneous Soil Water Storage Capacity, *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, vol.45, pp. 61-83, 1996.
- 8) 高棹 琢馬, 椎葉 充晴, 市川 温: 分布型流出モデルのスケールアップ, 水工学論文集, 第 38 卷, pp. 141-146, 1994.
- 9) 高棹 琢馬, 椎葉 充晴, 市川 温: 構造的モデリングシステムを用いた流出シミュレーション, 水工学論文集, 第 39 卷, pp. 141-146, 1995.

(1998. 9. 30 受付)