

ラスター型空間情報の分解能が 洪水流出解析結果に及ぼす影響

Effect of Resolution of Raster Spatial Data
on Flood Runoff Simulation.

児島利治¹・宝 馨²・岡 太郎³・千歳知礼⁴

Toshiharu KOJIMA, Kaoru TAKARA, Taro OKA and Tomohiro CHITOSE

¹学生会員 工修 京都大学大学院工学研究科 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所水資源研究センター (〒611 宇治市五ヶ庄)

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所水資源研究センター (〒611 宇治市五ヶ庄)

⁴学生会員 工学 京都大学大学院工学研究科 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

In this paper, the authors propose a cell-based distributed runoff model using raster spatial data such as digital elevation models (DEM) and remote sensing images. This paper also describes how the hydrograph simulated by the runoff model changes as the spatial resolution of the raster data becomes coarser. The study area is the Yada River basin (110 km²) in the Shonai River drainage system. The runoff model is evaluated using raster data with 50-m resolution and 250-m resolution. Consequently, the hydrographs simulated by the runoff model with 50-m resolution are not sensitive to the model parameters values than those with 250-m resolution.

Key Words : spatial resolution, cell-based distributed runoff model, DEM, remote sensing image

1. 本研究の背景と目的

近年, リモートセンシング画像は, Landsat/TM(空間分解能 30 m) や SPOT/HRV(20 m) のように非常に高い空間分解能を持つに至っている。民間商業衛星においては, スペース・イメージング社の CRSS, オービタル・イメージング社の OrbView 等のように, ここ 1~2 年のうちにパンクロで 1 m 程度, マルチスペクトルで 3~4 m という極めて高い分解能の画像の提供が開始されようとしている。また, 数値標高データ (digital elevation model; DEM) に関しては, 従来の国土数値情報の分解能 250 m に代わり, 日本全国で分解能 50 m の DEM(数値地図 50 m メッシュ(標高)) が整備されている。

こうしたリモートセンシング画像, DEM 等のラスター型空間情報の高分解能化の動きの一方で, 環境問題, 水・熱収支の問題などを地球規模・大陸規模の観点(すなわち, 粗い解像度, 低分解能) から考慮することの重要性が認識され, いくつもの国際共同研究が実行されつつある。地球規模・大陸規模でそのような問題を考える際, 地点・地域といった比較的狭い範囲の空間情報を如何に広い範囲に拡張するかということが一つの重要な課題となっている。高分解能で得られる情報

を空間的にスケールアップ (aggregate) していく際に, もとの情報がどの程度保存されたり, まるめられたり,あるいは欠落したりするか, ということを定量的に評価しておく必要がある。対象とする物理量やパラメータによっては, スケールアップによって重要な情報が損なわれ, その結果として, 解析・予測結果に大きな誤りを招来するかも知れないからである。

流出解析と DEM の分解能との関係については, DEM から算定された集水面積, 河道長, 落水線の勾配等の流出モデルを作成する上での流域情報と DEM の分解能との関係を調べた研究がなされている^{1),2)}。また, DEM のグリッド交点一つ一つからの流出を全て追跡する新しいタイプの分布型流出モデルの提案もされている³⁾。

しかし, 実際に DEM の分解能が流出解析結果にどの程度影響を及ぼすかについての検討はあまりなされていない。そこで, 本研究では, DEM やリモートセンシング画像等のラスター型空間情報を用いた分布型流出モデルを提案し, ラスター型空間情報の空間分解能が, どの程度流出解析結果に影響を及ぼすかを実際の流域に適用して調べる。対象流域は, 庄内川左支川の矢田川とする。この流域は, 流域面積 110km², 主河道長 42km である。

2. セル分布型流出モデル

(1) セル分布型流出モデルの概要

本研究では、次のような分布型の流出モデルを用いる。

- DEM の分解能を d m としたとき、グリッド交点の周囲 $d \times d$ m の正方形の領域を 1 つの部分流域 (セル) と考え、流域全体が正方形の部分流域 (セル) が多数集まってできているとする。
- DEM から流域の落水線図 ((4) 節参照) を作成し、一つのセルからの流出は、落水線の流下方向のもう一つ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量とし、kinematic wave 法によって流出量を計算する。
- 8 つの流下方向のうち、上下左右方向へ流出するセルでは、斜面長、斜面幅はともに d m とし、斜め方向へ流出するセルでは、斜面長は $\sqrt{2}d$ m とし、斜面幅は $d/\sqrt{2}$ m とする。

kinematic wave 法の基礎式は次式で表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e, \quad q = \frac{\sqrt{I}}{N} h^m \quad (1)$$

ここで、 q : 単位幅流量、 h : 水深、 r_e : 有効雨量、 I : 斜面勾配、 N : 等価粗度、 m : 定数 ($=5/3$) である。

このような、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をセル分布型流出モデルと呼ぶこととする。

(2) 有効雨量の算定

有効雨量は、次のようにして求める。

- 流域内 5 地点の地上雨量計の 20 分雨量 (R_G) とその直上にあるレーダーメッシュ区画のレーダー雨量 (R_R) の回帰関係から、流域内の全てのレーダーメッシュ区画における地上雨量 (R_{RG}) を推定する。
- 各セルへの降雨は、
 - (a) レーダー雨量: 空間的に分布した R_{RG}
 - (b) 流域平均雨量: R_{RG} の面積平均値の 2 通りを考える。
- 有効雨量は、期間中一定率損失を仮定して、総降雨量と総直接流出量の水収支解析により、地上雨量に流出係数 $f = 0.5$ を乗じる。

流域平均雨量に、レーダー雨量の面積平均値を用いた理由は、雨量の空間分布を考慮した場合と考慮しない場合の比較をする際に、2 通りの入力降雨形式間で総降雨量が変わらないようにするためである。

(3) 実河道の近似

落水線図は DEM から作成される。しかし、DEM の分解能と地形の起伏条件によっては、実際とは異なっ

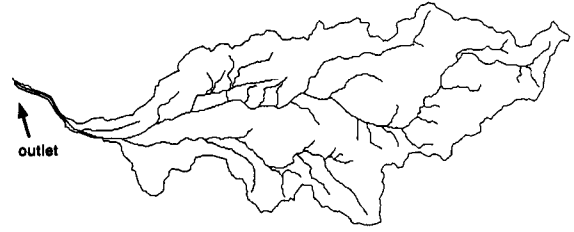


Fig. 1 Approximate channel network with 50-m resolution.

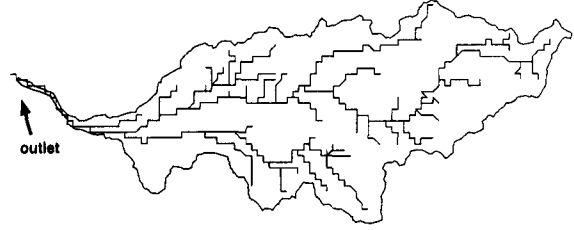


Fig. 2 Approximate channel network with 250-m resolution.

た河道網が形成される事も少なくない。そのため、落水線図を作成する際の事前情報として、実河道の位置データを入力することが必要である。

実河道の位置データは、地形図からデジタイザを用いて取得する。得られた実河道の位置データ (実河道データ) は、DEM のグリッド交点と必ずしも一致しない。そこで、実河道の位置データを、それに最も近いグリッド交点で置き換える。このようにして生成された近似河道データは、落水線図を作成するときや、流域の土地利用を決定する際に使用する。Fig. 1 と Fig. 2 にそれぞれ分解能 50 m, 250 m での近似河道を示す。

(4) 落水線図の作成

落水線図は、DEM と近似河道データを用いて、以下のルールに基づいて作成する。

- DEM の標高値の周囲 8 方向のうちの最急勾配方向を求め、その方向に落水線を描く。
- 最急勾配方向が複数ある場合、周囲 8 方向の先の領域 (例えば、左上ならば Fig. 3 における影の領域) 内のグリッド交点の平均標高値が最も低い方向へ落水線を描く。
- 標高値が周囲の 8 点の全てより低いとき、すなわち窪地となっているグリッド交点では、周囲 24 点の中で最も低いグリッド交点の方向へ落水線を描く。Fig.4(a) で、グリッド交点番号 (1) の標高値が最も低ければ、中心 (グリッド交点番号 (13)) からの落水線は、Fig.4(a) のように、矢印から破線矢印の方向に落水線が描かれることを期待して、グリッド交点番号 (7) の方向へ落水線を描き、グリッド交点番号 (7) において、新たに周囲 8 方向のうちの最急勾配方向を求める。また、グリッド交点

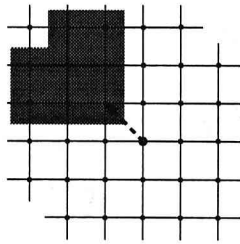


Fig. 3 Illustration of decision about drainage direction.

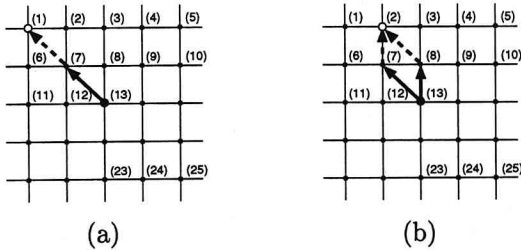


Fig. 4 Illustration of decision about drainage direction.

番号 (2) の標高値が最も低ければ、中心からの落水線は、Fig. 4(b) のように、グリッド交点番号 (7)、(8) のうち、中心からの勾配の急な方向へ描かれ、グリッド交点番号 (7) または (8) において、新たに周囲 8 方向のうちの最急勾配方向を求める。

- (3) 節において近似河道とされた部分では、必ず河道の流下方向へ落水線が描かれる。

本研究では、DEM データに、国土地理院が発行している数値地図 50m メッシュ(標高)を用いる。数値地図 50m メッシュ(標高)は、1/25,000 の地形図に緯線・経線に沿って 200 本ずつ引いたグリッドの交点の標高を読みとって作成されたものなので、正確に 50×50 m の分解能ではない。そのため、まず数値地図 50m メッシュ(標高)を内挿して、平面直角座標系上で正確に分解能 50×50 m の DEM データを作成し、分解能 50 m の DEM を基に分解能 250 m の DEM を生成した。Fig. 5, Fig. 6 に、それぞれ分解能 50 m, 250 m の DEM から生成した落水線図を示す。

(5) モデル定数の決定

各セルの等価粗度 N は土地利用によって決定されるものとする。土地利用情報は、リモートセンシング画像から得られる。リモートセンシング画像は、前節の数値地図 50m メッシュ(標高)と同様に、50 m の分解能を持ってはいない。そのため、DEM の場合と同様に、元のリモートセンシング画像からそれぞれの分解能の疑似リモートセンシング画像を生成する必要がある。

本研究では、1992 年 10 月に取得された、分解能 30 m の Landsat-5/TM 画像を基に、MTF を応用した低分解能化アルゴリズムによって、分解能 50 m, 分解能 250 m の疑似リモートセンシング画像を生成した。その際、疑

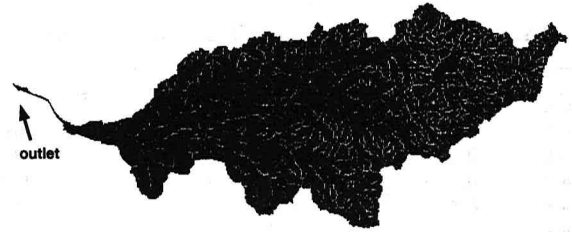


Fig. 5 Drainage paths with 50-m resolution.

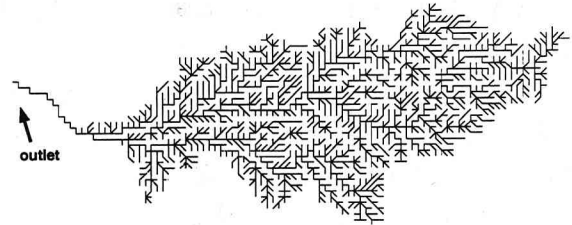


Fig. 6 Drainage paths with 250-m resolution.

似リモートセンシング画像の画素 (pixel) の平面直角座標系における位置座標は、それぞれ対応する分解能の DEM のグリッド交点の位置座標と一致するように生成する。すなわち、セル分布型流出モデルのセルと疑似リモートセンシング画像の画素とは 1 対 1 に対応している。

生成された疑似リモートセンシング画像を、最尤分類法を用いて森林 (Forest)、水田 (Paddy)、草地 (Grass)、都市域 (Urban)、水域 (Water) の 5 クラスに土地利用分類する。また、近似河道データにおいて河道とされているセルは、河道 (River) というクラスに分類する。土地利用ごとの等価粗度は、一般的に kinematic wave 法で用いられる値⁴⁾を参考値とする。

斜面勾配 I は DEM から求める。セル i における標高値 $z_i(m)$ と、落水線図から分かるそのセルからの流出が流入するセル j における標高値 $z_j(m)$ 、セル i, j の中心間の距離 $d(m)$ から、セル i における斜面勾配 I_i

$$I_i = \frac{z_i - z_j}{\sqrt{(z_i - z_j)^2 + d^2}} \quad (2)$$

を求める。ただし、落水線図を生成する際の窪地の処理のため、上り勾配となっている落水線が存在する。そのような場合には、標高差 10cm の下り勾配とみなして計算した。数値地図 50 m メッシュ(標高)での標高値の最小単位が 10cm のためである。

3. 適用

(1) モデル定数 (等価粗度) の感度分析

1987 年 9 月 24 日から 25 日にかけての豪雨に対して計算を行う。観測ハイドログラフは、H-Q 曲線を用いて水位記録から算定した。観測ハイドログラフのピークは、

Table 1 The roughness coefficient of each case

	Forest	Paddy	Grass	Urban	Water	River
Case 1	0.7	2.0	0.4	0.1	2.0	0.05
Case 2	0.7	2.0	0.4	0.05	2.0	0.01
Case 3	0.7	2.0	0.4	0.01	2.0	0.01
Case 4	0.7	2.0	0.4	0.05	2.0	0.005
Case 5	0.5	1.5	0.3	0.05	1.5	0.005
Case 6	0.5	1.5	0.3	0.05	1.5	0.003
Case 7	0.5	1.5	0.3	0.05	1.5	0.001

ピーク流量 $334.4 \text{ m}^3/\text{s}$ と、その 1 時間後に $328.4 \text{ m}^3/\text{s}$ が存在する。

等価粗度を土地利用ごとにそれぞれ変え、計算を行った。各 Case での等価粗度の値は、Table 1 に示す通りである。Case 1 では、等価粗度を参考値の組み合わせとして解析を行った (Fig. 7)。分解能 50 m では、3 時間程度、分解能 250 m では、9 時間程度ピーク時刻に遅れが生じた。そこで、等価粗度を、都市域 0.05、河川 0.01 として解析を行った (Case 2)。分解能 50 m では、2 つの等価粗度をこのように変えただけで、ピーク時刻の遅れは 60 分と、かなり改善された (Fig. 8(a))。しかし、分解能 250 m では、Case 1 に比べれば改善されているが、まだ 2 時間ピーク時刻が遅れていた (Fig. 8(b))。Case 2 の等価粗度に対して、都市域のみ 0.01 と変えて計算を行った (Case 3; Fig. 9) が、分解能 50 m、250 m のいずれにおいても Case 2 に比べてピーク時刻が 20 分早くなったに止まった。同じく Case 2 に対して、河川のみ 0.005 として計算を行った (Case 4; Fig. 10)。分解能 50 m では、観測ハイドログラフとのピーク時刻の遅れは 40 分と Case 3 と同じだが、ピーク流量は Case 3 の $263.3 \text{ m}^3/\text{s}$ から $274.3 \text{ m}^3/\text{s}$ と増え、観測ハイドログラフ ($334 \text{ m}^3/\text{s}$) に近づいた。分解能 250 m では、観測ハイドログラフと比較してピーク時刻の遅れは 40 分程度であり、Case 3 に比べてかなり改善された。Case 3、Case 4 を比較すると、Case 4 の方が等価粗度を変えたことによるハイドログラフの改善が著しい。河川の等価粗度は、都市域の等価粗度を変えることに比べて、解析結果に与える影響が大きいことが分かった。

さらに、Case 1 から Case 4 では、ピーク流量があまり適合していないため、各土地利用クラスの等価粗度を参考値より小さくし、Case 5~7 の計算を行った (Table 1 参照)。Case 5 から Case 7 の結果 (Fig. 11~13) から次のことが言える。

- 分解能 250 m では、河川の等価粗度を 0.005 から 0.001 の範囲で変化させると、0.005 ではピーク流量が少なく、ピーク時刻も遅れていたが、0.001 ではピーク流量は観測ハイドログラフを上回り、ピーク時刻も早くなり、計算ハイドログラフの形状が大きく変化する。

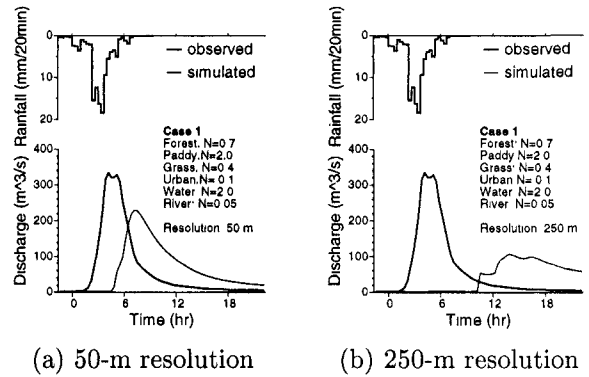


Fig. 7 Observed and simulated hydrographs (Case 1).

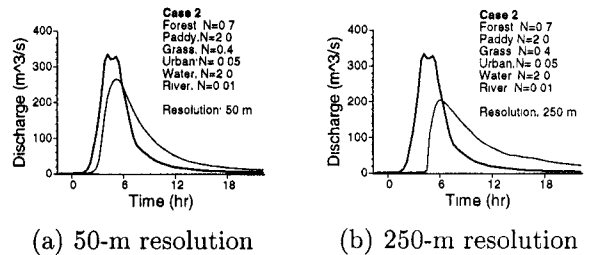


Fig. 8 Observed and simulated hydrographs (Case 2).

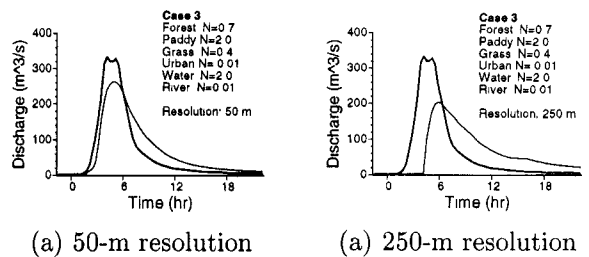


Fig. 9 Observed and simulated hydrographs (Case 3).

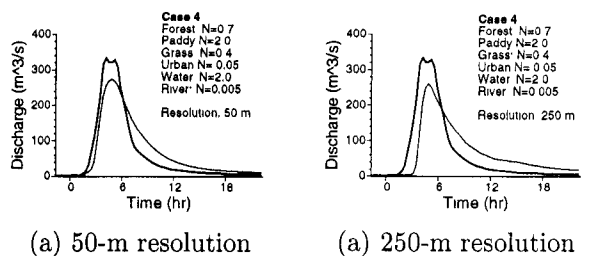


Fig. 10 Observed and simulated hydrographs (Case 4).

- 分解能 250 m では、河川の等価粗度を 0.003 から 0.001 に変えたとき、観測ハイドログラフのピーク流量を追い越し、ピーク時刻も追いついたことから、河川の等価粗度が 0.003 から 0.001 の間でよりよい適合度のハイドログラフが得られると思われる。
 - 分解能 50 m では、河川の等価粗度を 0.005 から 0.001 の範囲で変化させると、徐々に計算ハイドログラフは改善された。しかし、分解能 250 m のような計算ハイドログラフの形状の著しい変化は見られない。
- また、観測ハイドログラフとよく適合した計算ハイド

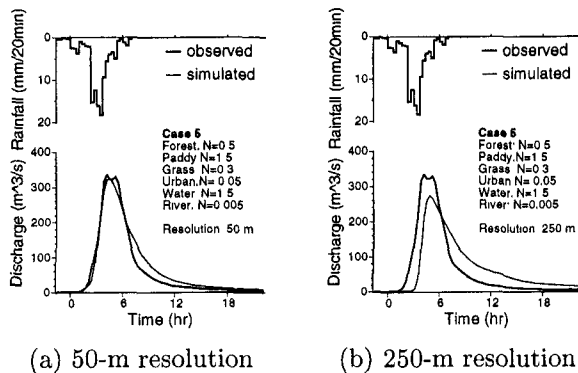


Fig. 11 Observed and simulated hydrographs (Case 5).

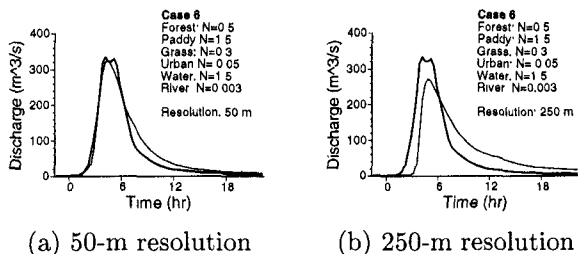


Fig. 12 Observed and simulated hydrographs (Case 6).

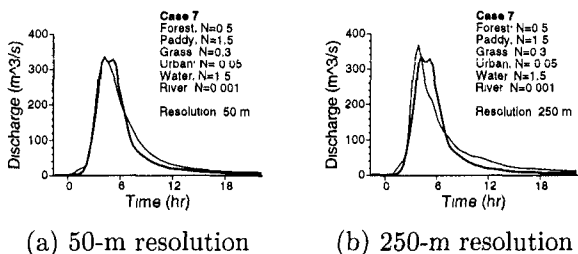


Fig. 13 Observed and simulated hydrographs (Case 7).

ドログラフ (Fig. 12(a), 13(a), 13(b) 等) における河川の等価粗度は、水理公式集における整正断面自然水路の粗度係数の値 (0.03)⁶⁾ とはかなり異なっている。本研究のセル分布型モデルでは、河川と分類されたセルにおいても他の斜面のセルと同様の広幅矩形断面を仮定していることが原因である。矢田川の河道幅は 50 m 以下の箇所が多いため、実際の河道幅よりも広い河道幅を仮定していることとなり、計算ハイドログラフでの流出が遅くなる。そのため、観測ハイドログラフによく適合した計算ハイドログラフを得るために河川の等価粗度の値を小さくすることが必要である。特に分解能の粗い 250 m のモデルでは、その影響が大きい。

(2) 雨量の空間分布の考慮

Case 7 では雨量の空間分布を考慮していたが、これに流域平均雨量を与えた場合の解析結果を Fig. 14 に示す (Case 7')。Fig. 13 と比較すると、分解能 50 m でも分解能 250 m でも Fig. 14 の方がピーク流量が若干多く、観測ハイドログラフのピーク流量を上回っている。Fig. 16 に、ハイドログラフのピーク付近の雨量の空間

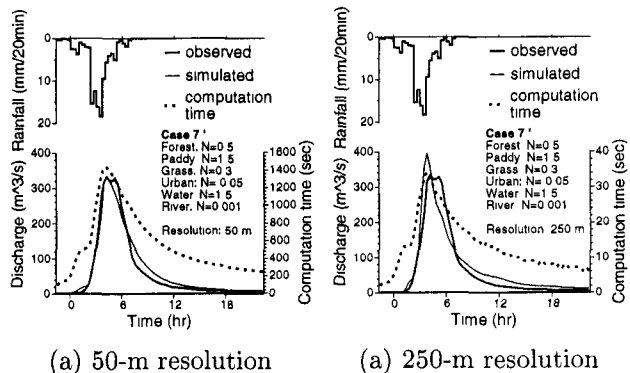


Fig. 14 Observed and simulated hydrographs with spatially averaged rainfall (Case 7'), and its computation times at intervals of twenty minutes.

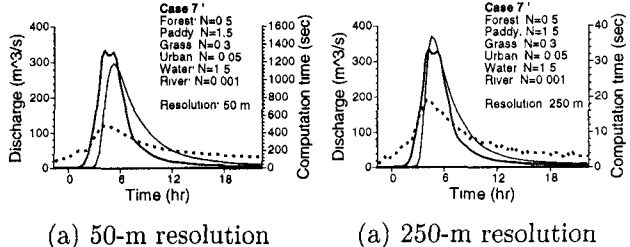


Fig. 15 Observed and simulated hydrographs with spatially averaged rainfall (Case 7'), and its computation times at intervals of twenty minutes using Lu model.

分布の時間変化を示す。(a), (b), (c), (d) の順に 20 分毎の雨量の空間分布を示している。白っぽい方が雨量強度が強く、黒っぽい方が雨量強度が弱い。また、中心付近の対象流域内では、流域外より色を薄くしている。強雨域が下流側から上流側へ移動していく様子が見取れる。

雨量の空間分布を考慮した場合、降雨イベントの初期において、下流域の降雨強度が強いため、流域平均雨量を与えた場合より下流域からの流出が早くなり、また、上流域では、降雨イベントの初期において、降雨強度が弱く、上流域からの流出は遅くなった。そのため、流域平均雨量を与えた場合は、雨量の空間分布を考慮した場合に比べて下流域からと上流域からの流出のピークの時刻が重なり、全体のピーク流量が若干多くなったものと考えられる。

(3) 計算時間について

本研究では、ヒューレットパッカード社の HP712 を用いて計算を行った。ソースプログラムは C 言語で書かれ、UNIX 標準の C コンパイラを用いた。24 時間分の流出を計算するために要した CPU 時間は、Case 7' において分解能 50 m では 40572 秒、分解能 250 m では 959 秒であった。すなわち、雨水の動きを流域のあらゆる場所で逐次計算するセル分布型流出モデルを 50 m の空間分解能で用いると、110km² 程度の領域であれば、

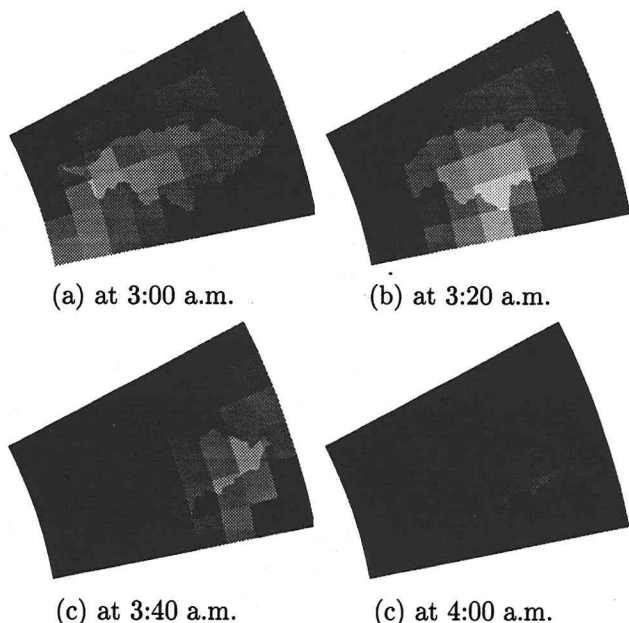


Fig. 16 Distributions of rainfall at intervals of twenty minutes on Sept. 25, 1987. The rainfall rate is greater in the lighter areas (the lightest corresponds to about 60 mm/hr), while less in the darker areas.

24 時間分の計算が 11 時間程度の計算時間を要することが示された。

Fig. 14 に、各計算ステップ (20 分) における計算時間を点線で示す。流量が多いステップほど、計算時間が長い事が分かる。本研究では、kinematic wave 法の基礎式 ((1) 式) を Lax-Wendroff 型の差分スキーム⁵⁾で解き、その計算時間間隔は Courant の条件を満たすように、流量が多いステップほど計算間隔を短くするアルゴリズムとしているので、CPU 時間が長くなる。

(4) 従来のモデルとの比較

Case 7' について陸らのモデル³⁾を用いて計算を行った。(Fig. 15)。陸らのモデルでは横流入を考慮しないため、セルの上流端に入力された上流セルからの流出およびそのセルからの直接流出成分がセルの下流端に到達するまで、そのセルからの流出量は 0 である。そのため、ハイドログラフの立ち上がりの初期の流出量に $0 \text{ m}^3/\text{s}$ が目立ち、またハイドログラフの立ち上がりにおいて計算ハイドログラフと観測ハイドログラフの誤差が非常に目立つ。計算時間は分解能 50 m で 16264sec, 250 m で 512sec と本研究のモデルの計算結果と比較して 1/2 程度である。

陸らのモデルを本研究の対象流域及び対象降雨に適用すると、Fig. 17 の結果が得られた。Case 1 では、分解能が粗い方が流出が遅いが、Case 2 では、分解能が粗い方が流出が早い。本研究のモデルでも、Case 1～6 までは分解能が粗い方が流出が遅いが、Case 7 では、

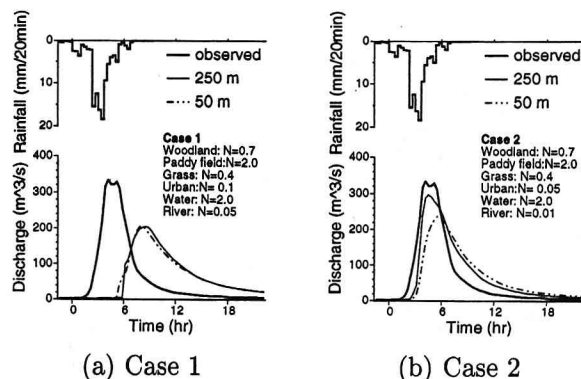


Fig. 17 Observed and simulated hydrographs using Lu model.

分解能が粗い方が流出が早い。すなわち、DEM の分解能と流出の早さの関係は等価粗度の値によって変化し、陸らの報告³⁾にあるとおりに、分解能が粗くなるにつれ常に流出が早くなるとは限らない。

4. 結論

本研究では、DEM のグリッド交点の周囲の正方形の領域を 1 つの部分流域 (セル) と考え、セルが多数集まって流域を構成するセル分布型流出モデルを提案し、さらにそのセルのサイズが、流出解析結果にどう影響するかについて検討を行った。

分解能 50 m では等価粗度の感度が鈍く、多少値を変えてもハイドログラフの形状の変化は小さいが、分解能 250 m では等価粗度の感度が鋭く、少し値を変えただけでハイドログラフの形状が大きく変化した。また、陸ら³⁾は分解能が粗い方が流出が早いと報告しているが、本研究の結果からは、等価粗度の値が大きいときは、分解能が粗い方が流出は遅く、等価粗度の値が小さいときは、分解能が粗い方が流出が早いということが示された。

参考文献

- 1) 高埴琢馬・宝 馨・溝渕伸一・杉原宏章: 国土数値情報を用いた水文地形解析に関する基礎的研究, 京都大学防災研究所年報, Vol. 32, No. B-2, pp.435-454, 1989.
- 2) Sunada, K. and S. Fukui: Study on dependence of runoff model parameters on the scale of catchment element, *International Conference on Water Resources & Environment Research: Towards the 21st Century (Volume I)*, Water Resources Research Center, Kyoto University, Japan, pp. 293-300.
- 3) 陸 旻皎, 小池俊雄・早川典生: 分布型水文情報に対応する流出モデルの開発, 土木学会論文集, Vol.411, No. II-12, pp. 135-142, 1989.
- 4) 建設省河川局 (監): 建設省河川砂防技術基準 (案) 調査編, 山海堂, p. 144, 1977.
- 5) 椎葉充晴: 流出系のモデル化と予測に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, pp. 18-20, 1983.
- 6) 土木学会水理委員会: 水理公式集-昭和 60 年版-, 技報堂, p. 13, 1985.

(1997.9.30受付)