

# 分布型流出モデルによる東海豪雨の洪水氾濫シミュレーション

小川 進\* 中村 克行\*\* 宮田 大輔\*

## 1. はじめに

### 1.1 本研究の背景

近年、コンピュータの発展と新しいアルゴリズムの出現で水文現象の高度な数値シミュレーションが可能になり、従来では不可能とされていた計算も省略や簡略化をせずに流れの基礎方程式を直接解くことができるようになってきた。これに伴いモデルの高精度化、計算の高速性などの面で、現実問題への実用化が進んでいる。本研究では、東海豪雨で発生した洪水氾濫を対象にパソコンを用いて、分布型流出モデルによる降雨の進行に伴う氾濫のシミュレーションを実施した。

### 1.2 本研究の目的

降雨はいくつかの物理的素過程を経て流出にいたる。各素過程は水循環の要素である。このうち主要なものは、地上に達した降雨が河川流となるまでの表面流出過程と地上に達したのち地中に浸透し、その後地面から直接あるいは植生の蒸散作用により大気中へ返っていく蒸発散である。しかし1つの洪水期間という短い時間スケールで考える場合には、蒸発散の過程は重要でない(日野ら、1989)。

降雨が発生すると、河川水はまもなく増水を始め、やがてピーク流量に達したのち低減し、降雨停止後も流出は長く続く。このような流出の時間変化(ハイドログラフ)に対して、表面流出(overland flow)、中間流出(interflow)および地下水流出(groundwater flow)の3つの成分に分けられる。このうち表面流出と中間流出はあわせて直接流出(direct runoff)と呼ばれる。流出解析の主要な目的は、降雨から流出ハイドログラフを推定し、流出現象をモデル化することである。これにより、今後発生するであろう災害の規模を推定することができる。ある1つの流域について、与えられた諸条件から流出ハイドログラフを算出する方法を、一般に流出モデルと呼ぶ。これらの降雨から流出の過程は、土地被

覆特性や地形などに大きく影響される。したがって、流出解析や氾濫シミュレーションを行うにあたり、流域の土地被覆や地形などのモデルを得ることが重要となる。本研究における研究目標として以下の2項目を掲げた。第1に分布型流出モデルを構築し、kinematic wave方程式を基礎とした流出計算を行うこと、第2に計算結果をもとにして微小氾濫域での洪水氾濫を視覚化することである。

### 1.3 東海豪雨水害の概要

2000年9月に発生した東海豪雨水害は、新川の決壊や河川からの越水により大量の汚泥が市街地に溢れ、かつ排水能力を超えた降雨により低地が冠水するなど、都市型災害として過去に類を見ないほどの大規模な水害となった(名古屋市、2000)。原因としては台風14号の停滞に伴う前線の活発化が考えられている。名古屋市雨量観測所における雨量データでは、最大1時間降雨量105.5mm(11日2:00-12日16:50, 緑土木事務所)、最大日降雨量499.5mm(11日, 同事務所)、総降雨量647.0mm(11日2:00-12日16:50, 同事務所)を観測し、16区全ての観測所において時間降雨量50mmを越え、うち4箇所において100mmを越えるなど記録的な集中豪雨となった(名古屋市、2000)。災害の状況を図1に示す。

こうした大規模な災害における被害状況を再現することは、今後の災害対策にとって有用であり、現在も盛んに研究が行われている。現在ではコンピュータの開発とその飛躍的な発展に支えられ、数値シミュレーションが主流となっている。またシミュレーションを行う際に、リモートセンシングやGISを用いてモデル定数を決定しようとする試み(近森ら、1998)やkinematic wave流出モデルを応用し、土砂流出量を推定しようとする研究(Takara et al., 2000)も行われており、リモートセンシングによる水文学への応用研究が増加している。

\* 立正大学地球環境科学部

\*\* 東京大学大学院空間情報科学研究センター

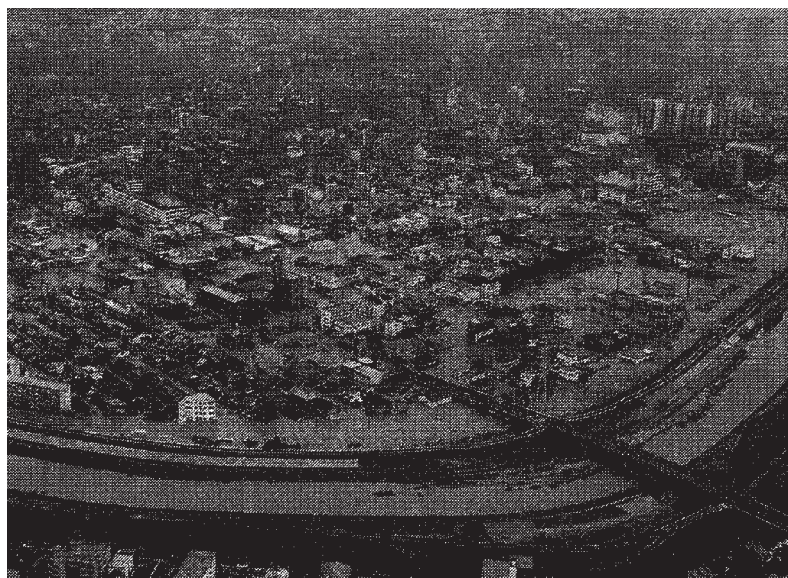


図1 名古屋市天白区野並地区における氾濫状況 (名古屋市, 2000)

#### 1.4 Kinematic wave 法による洪水氾濫シミュレーション

流出モデルには様々なものがあるが、本研究では kinematic wave 法による解析を選択する。さらに Cellular Automaton 法 (CA 法) (加藤ら, 1998) の適用を考える。CA 法とは解析対象を区分領域 (セル) に分割し、近傍のセルにおける状態量の相互作用のみを考慮することで各計算段階での状態量を順次求め、全体の現象を表現する手法である。本研究においては、対象領域を格子 (グリッド) で分割し、格子ごとに kinematic wave 方程式を展開した。

通常、雨水の動きを全格子で計算する分布型流出モデルを kinematic wave 方程式で構築し、差分法で解くと、計算時間が非常に長い。そこで本研究では2つの差分スキームで流出解析を行い、解析時間および解析結果の比較検討を行った。解法は、第1に前進型差分スキーム、第2に Rax-Wendroff 型の差分スキームである。これらは差分法の中でも計算時間やプログラミングの面で比較的簡便であり、試行錯誤的な手順を踏む段階では効率が良いと考えた。

また上記の方法により流出量を計算し、それから得られる氾濫水位をリアルタイムで画像表示し、それらのデータを CSV (Comma Separated Value) 形式で出力するプログラミングを試みた。

#### 1.5 微小氾濫域における洪水氾濫の視覚化

洪水や高潮が破堤や越水などにより氾濫したとき、あるいは排水不良によって内水氾濫が生じたとき、どの程度の流速や水深で氾濫が広がり、湛水し、減水するかを

リアルタイムで知ることが、氾濫災害の防止策、氾濫による被災状況の予測、氾濫時の非難対策、治水事業の経済効果の評価などを考えるときの最も基礎的な情報である (京都大学防災研究所, 2001)。

本研究では、名古屋市天白区野並地区をモデル地域として、微小氾濫域の洪水氾濫の視覚化を試みた。すなわち kinematic wave 法による計算結果をミクロな領域へ展開した。これにより1次元解析でも2次元平面解析と同様な結果が得られたと考えられる。

## 2. 理論と方法

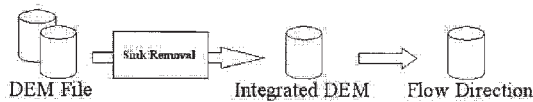
### 2.1 解析前準備

本研究で使用したプログラムの処理フローを以下に示す。処理は大きく分けて2段階ある。すなわち第1段階としてデータ準備であり、第2段階が洪水氾濫シミュレーションである。それぞれについて、以下に述べる。

第1段階であるデータ準備は、解析用のファイルを作成することを目的としている。まず複数の DEM ファイル (国土地理院発行の50m メッシュ標高データ) を合成し、対象とする流域をカバーした DEM ファイルを作成する。その際、sink とよばれる窪地の除去も同時に行う。さらに作成した DEM から、落水線を描画することにより、データ準備は完了となる。

第2段階であるシミュレーションは、データ準備において作成したモザイク合成後の DEM と落水線図を用いて行う。計算は kinematic wave 法を用いた。計算結果はリアルタイムで画像表示され、ビットマップおよび

### Step 1 Data preparation



### Step 2 Simulation

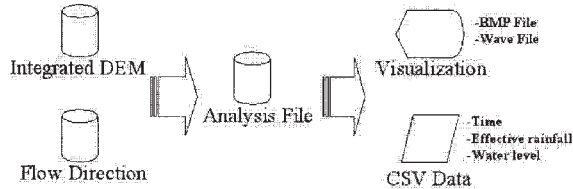


図2 解析手順

CSV (Comma Separated Value) 形式で出力される。

以上が処理の概要である。解析手順を図2に示す。処理の詳細は以下の各項目で論じる。

#### 2.2 Cellular Automaton 法による分布型流出モデルの構築

自然科学や工学あるいは社会科学におけるさまざまな現象は微分方程式等の数式を用いて表わすことができる。Cellular Automaton 法 (CA 法) とは、空間をセルで敷き詰め、隣のセルとの相互作用を繰り返すことで振る舞いを発生させるものである。CA 法の適用は流体解析や生態 (種の増減、種の棲み分け、捕食関係など)、遺伝 (DNA 配列、進化など)、フラクタル自然現象 (結晶成長、凝集など)、災害 (森林災害、地震、地滑りなど)、交通 (高速道路の車の流れ)、経済 (株価、景気の循環) などさまざまな分野で行われている (加藤ら, 1998)。

セルの並びが横一列だけを想定すれば1次元モデルであり、平面に分布するものが2次元モデル、立方体のもを積み上げると3次元モデルとなる。本研究における流出モデルは2次元で構築される。この場合、平面を正多角形で隙間無く埋めることができるのは、正三角形、正方形、正六角形に限定される (加藤ら, 1998)。また CA 法において考慮するセルはノイマン近傍 (4点近傍)、ムーア近傍 (8点近傍) などがある。例をそれぞれ図3、図4に示す。本研究では次のような分布型流出モデル (Kojima *et al.*, 1998) を用いる。

- (1) 1つのグリッドを1つの部分流域 (セル) と考え、流域全体は正方形の部分流域 (セル) が多数集まってできているとする。
- (2) DEM から落水線図を作成し、1つのセルからの流出

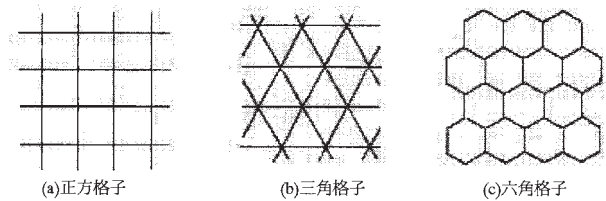


図3 均一な多角形による平面の分割 (加藤ら, 1998)



(a)ノイマン近傍 (b)ムーア近傍

図4 2次元セルオートマトンにおいて考慮する隣のセル (加藤ら, 1998)

- は落水線の流下方向のもう1つのセルへのみ起こる。
- (3)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。

上記のルールにもとづいて構築された分布型流出モデルおよびモデルを構成する DEM のフォーマットをそれぞれ図5、図6に示す。図において、格子は  $z_i$  で示されている。ここで格子は  $x, y$  方向にそれぞれ400、600個ずつ、計240,000個の格子が存在する。各格子には標高値が格納される。格子間の距離は  $x, y$  方向ともに50mとして近似した。また標高値は1m単位で格納されている。ここで、 $z_i$  が標高値を表している。本研究における DEM は国土地理院発行の50m メッシュ標高を用いた。用いた DEM の諸元を表1に示す。

#### 2.3 等価粗度の推定

等価粗度は、土地被覆から算出された面積率の加重平均により決定した。その結果、初期のシミュレーションにおける等価粗度は0.11を採用した。表2に土地利用と等価粗度の関係を示す。

#### 2.4 Sink の除去

連続した水系網を構築するため、途切れる要因である窪地を埋め込んで平地にする。これらの窪地を 'sink' とよぶ。sink が発生する原因は多くの場合、DEM の解像度の粗さに起因する。sink は流下方向をもたないため、解析を行う際には除去しなければならない。ここで



表 1 DEM の諸元

元データ	国土地理院発行数値地図 (50m メッシュ標高)
投影法	等緯度経度
解像度	緯線方向：2.25秒 (約50 m) 経線方向：1.5秒 (約50 m) 鉛直方向：1 m
メッシュ数	600 × 400 (東西約3500m, 南北約2000m)

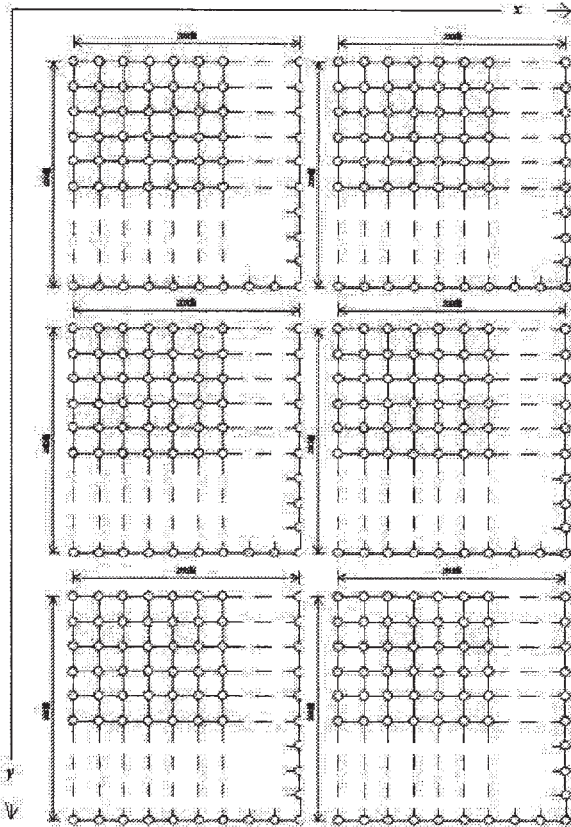


図 5 CA 法に基づいて構築された分布型流出モデル

sink を以下のように定義とした。

点 a が点 b より低い、もしくは等しい場合、a から b は「到達可能」とよび、a から b が到達可能かつ b から c が到達可能であれば、a から c も到達可能であると定義する。DEM の解析領域の境界上のどの点からも到達可能でない点を 'sink' とする。本研究における sink の除去は以下のアルゴリズムで行った。このアルゴリズムの概念図を図 7 に示す。

- (1) sink の外側の境界 (sink と sink でない点の境界で sink でない側の点) のうち、最も低い標高値を  $h$  とする。
- (2) sink 内の各点のうち、 $h$  より低い標高をもつ点の標高を  $h$  に置き換える。
- (3) 再度 sink を抽出する。

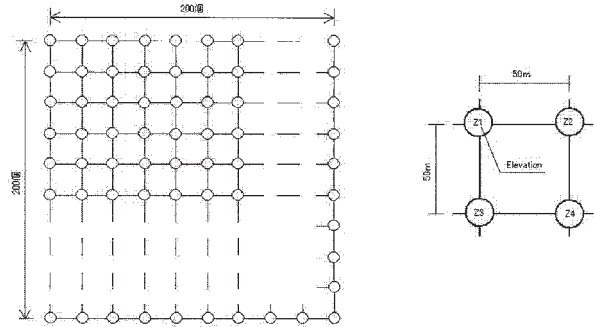


図 6 モデルを構築する DEM のフォーマット

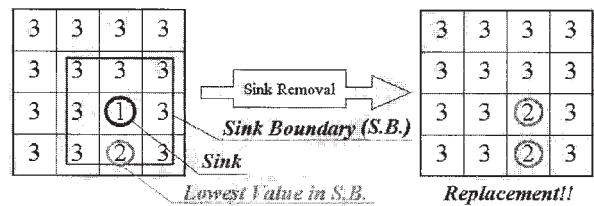


図 7 Sink 除去の概念図

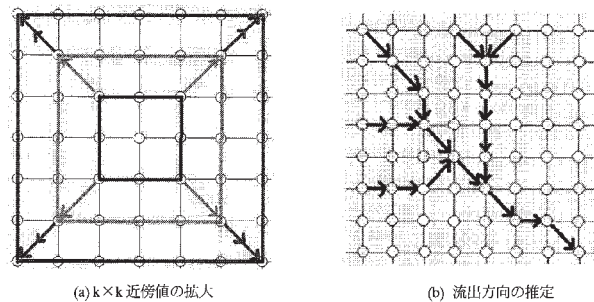


図 8 落水線作成の概念図

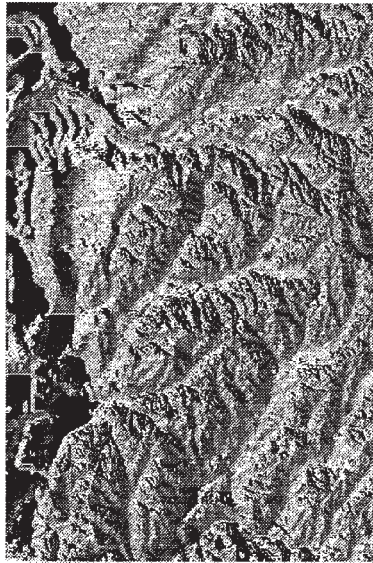
sink がなくなるまで繰り返す。

### 2.5 流出方向の決定

流出方向は50m メッシュの DEM から推定する。流出は隣接 8 点のうち勾配最大方向に起こると仮定した。斜面勾配は DEM を入力として次式 (2.1) で求めた。

$$I_i = \frac{z_i - z_j}{\sqrt{(z_i - z_j)^2 + d^2}} \quad (2.1)$$

ここに、 $I_i$  : セル  $i$  における斜面勾配,  $z_i$  : セル  $i$  における標高値,  $z_j$  : セル  $j$  における標高値,  $d$  : セル  $i, j$  の



(a) 作成された落水線図



(b) 流下方向の余弦をとった画像 (陰影図)

図9 作成された落水線図

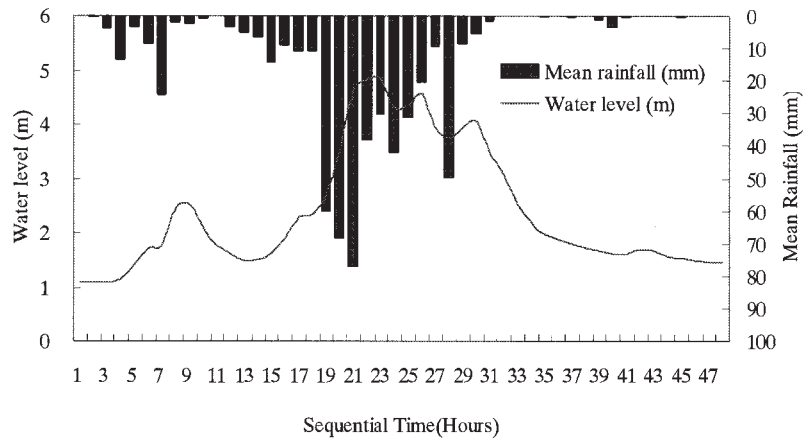


図10 天白川流域における流域平均雨量および最下流点における観測水位 (2000年9月11 - 12日)

中心間の距離である。勾配最大方向が複数の場合、 $k \times k$  近傍の平均斜面方向に最も近いものを選んだ。 $k \times k$  近傍の平均勾配が0の場合には、 $k$ の値を3, 5, 7と順次拡大していく。ただし、勾配最大方向の勾配が0の場合は、そのセルの落水線方向は保留しておく。落水線方向が未決定のセルで、勾配最大方向に落水線方向決定済みセルがある場合は、落水線をその方向に定めるという処理を繰り返す。この際、勾配最大方向の落水線方向決定済みセルが複数ある場合は上記の平均斜面方向を選択する。図8, 9に流出方向推定の概念図および作成された落水線画像を示す。

## 2.6 流出現象の定式化

降雨から流出を算定する方法を述べる。まず、分割を行った流域での平均雨量を求めなければならない。流域

平均雨量の算出法としては、等雨量線図法や支配圏法、ティーセン法、算術平均法などがあげられる。本研究では最も簡便な算術平均法によって流域平均雨量を算出した。算術平均法とは、流域内で観測された降雨量を単純に算術平均したものである。そのさい、天白区および名東区土木事務所の2つの観測所における観測降雨量をもとに流域平均降雨量を算出した。算出された流域平均雨量および実測水位を図10に示す。降雨より初期損失と土中への浸透分を差し引いた成分が直接流出成分を対象とする場合の有効降雨になる(京都大学防災研究所, 2001)。しかし、本研究における有効雨量は国土地理院発行の10mメッシュ土地利用データをもとに流出率を算出し、降雨期間中の流域平均雨量を流出率で評価し、有効雨量とした。それぞれの関係式を以下に示す。

表2 土地利用データと等価粗度の関係

Land Use	Urban	Water	Grass Land	Farm
Area Ratio (%)	67.6	3.7	22.7	6
Area (km <sup>2</sup> )	49.91	2.70	16.75	4.45
N (m <sup>-1/3</sup> ・s)	0.03	0.05	0.3	0.3

表3 土地利用データと土地利用別浸透能の関係

Land Use	Urban	Water	Grass Land	Farm
Area Ratio (%)	67.6	3.7	22.7	6.0
Area (km <sup>2</sup> )	49.9	2.7	16.8	4.5
Infiltration rate (mm/h)	0.03	0.05	0.30	0.30

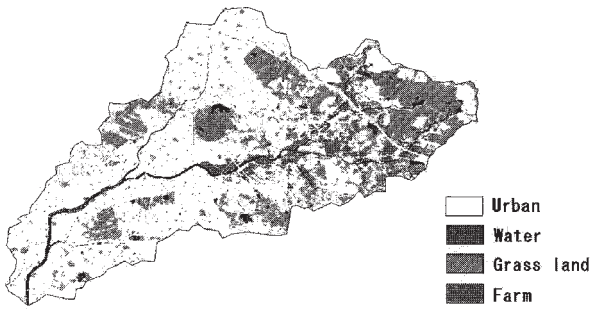


図11 4種類に分類された10mメッシュ土地利用データ

$$R_e = Q = R - R_1, \quad (2.2)$$

$$f = \frac{Q}{R} = \frac{R_e}{R} \quad (2.3)$$

ここで、 $R_e$  : 総有効雨量 (mm),  $Q$  : 直接流出量 (mm),  $R_1$  : 総損失雨量 (mm),  $R$  : 流域平均雨量 (mm),  $f$  : 流出率である。

10mメッシュ土地利用データは4工種に分類した。土地利用図および土地利用ごとの面積率、面積および浸透能をそれぞれ図11、表2に示す。面積率は市街地が67.6%、草が22.7%、田畑が6%、水域が3.7%であるため、不浸透面積率は71.3%となる。それぞれ時間により漸減しないと仮定した表3の浸透能を設定し、流域平均雨量を浸透能から得られる関数により係数倍し、有効雨量とした。計算した結果、流出率は0.76 - 0.77であると推定された。また流域平均雨量をマンニング式によってH-Q換算し、流量とした。算出された有効雨量および流出量を図12に示す。ここで基底流の分離は行っていない。また洪水氾濫シミュレーションにおけるタイムステップが1秒~2.5秒なので、有効降雨は時間を秒へ線形補間したものを用いた。

### 2.7 Kinematic wave 方程式の解法

地表流の基礎方程式は以下の運動方程式 (2.4) および連続の式 (2.5) からなる。

$$-i_0 + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{2g} \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + I_f + \frac{r_e v}{gh} = 0, \quad (2.4)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} - r_e = 0 \quad (2.5)$$

ここで、 $h$  : 水深,  $x$  : 流下距離,  $t$  : 時間,  $v$  : 流速,  $r_e$  : 有効雨量,  $g$  : 重力加速度,  $i_0 (= \sin \theta)$  : 斜面勾配,  $I_f = \frac{\partial h_1}{\partial x}$  : 摩擦損失勾配 (エネルギー勾配),  $h_1$  : 摩擦損失である。また  $I_f$  は Manning の粗度係数  $n$  を用いて、

$$I_f = \left( \frac{2gn^2}{h^{4/3}} \right) \frac{v^2}{2g} \quad (2.6)$$

と書ける。式 (2.4) はいわゆる Saint-Venant (サン・ヴナン) の方程式である。この方程式系を解くのに良く用いられる方法の1つに運動波 (kinematic wave) 近似がある。ただし、この方法が許されるのは、急勾配水路において、式 (2.4) の摩擦損失勾配と斜面勾配がつりあうと仮定しうる場合である (日野ら, 1989)。すなわち、式 (2.7) の場合である。

$$I_f = i_0 \quad (2.7)$$

ここで、式 (2.6) と式 (2.7) を用いて式 (2.8) を得る。

$$v = \frac{i_0^{1/2} h^{2/3}}{n}. \quad (2.8)$$

以上により、連続と運動の式を水深  $h$  と単位幅流量  $q (= vh)$  に関して表し、再記すると以下の式となる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e, \quad (2.9)$$

$$q = ah^m \quad (2.10)$$

ここで式 (2.10) における  $a, m$  の値は以下の式で表

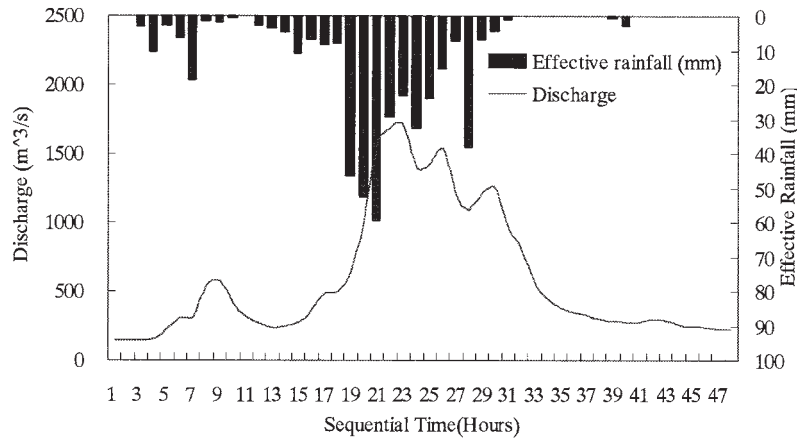


図12 算定された有効雨量および河川流量 (2000 / 9 / 11 - 12)

される。

$$a = \frac{\sqrt{i_0}}{n}, m = \frac{5}{3}. \quad (2.11)$$

これにより、地表流の基礎方程式である kinematic wave 方程式が誘導できた。式 (2.9), (2.10) に表わされるように、kinematic wave 方程式における独立変数は時間  $t$  と流下距離  $x$ 、従属変数は水深  $h$  と単位幅流量  $q$  からなる。また基礎となる数理モデルもほぼ確立されている。すなわち不定流 (非定常不等流) では  $t$  と  $x$  に関する 1 階偏微分方程式が、不等流 (定常不等流) では  $x$  に関する常微分方程式を応用することができる。前者の代表的応用例は洪水の理論であり、後者のそれは水面形追跡法である (岩佐ら, 1995)。

## 2.8 前進型差分法

偏微分方程式の解法の 1 つとして前進差分法がある。前進型差分法による近似式は以下の式で表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{h(x, t + \Delta t) - h(x, t)}{\Delta t}, \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{q(x + \Delta x, t) - q(x, t)}{\Delta x}. \quad (2.13)$$

よって、式 (2.9) はこのように表せる。

$$\frac{h(x, t + \Delta t) - h(x, t)}{\Delta t} + \frac{q(x + \Delta x, t) - q(x, t)}{\Delta x} = r_e(x, t). \quad (2.14)$$

したがって、水位の時間変化は以下の式で表せる。

$$h(x, t + \Delta t) = h(x, t) + r_e(x, t)\Delta t - \{q(x + \Delta x, t) - q(x, t)\} \frac{\Delta t}{\Delta x}. \quad (2.15)$$

## 2.9 Lax-Wendroff 型差分法

微分方程式の様々な差分近似数値解法のうちで、特に衝撃波などの計算に適している陽解法に Lax-Wendroff

法があり、時間に関して 2 次の近次となっている (日野ら, 1989)。式 (2.9) で表される kinematic wave 方程式を Lax-Wendroff の陽解法により差分近似する。

まず水深  $h(x, t + \Delta t)$  を  $t = t$  のまわりに Taylor 展開することにより、式 (2.16) を得る。

$$h(x, t + \Delta t) = h(x, t) + \frac{\partial h}{\partial t} \Delta t + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} \Delta t^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 h}{\partial t^3} \Delta t^3 + \dots \quad (2.16)$$

Lax-Wendroff の陽解法では、式 (2.16) を 2 次の項までで近似する。

$$h(x, t + \Delta t) = h(x, t) + \frac{\partial h}{\partial t} \Delta t + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial h}{\partial t}. \quad (2.17)$$

式 (2.9) および式 (2.17) から、

$$h(x, t + \Delta t) = h(x, t) + (r_e - \frac{\partial q}{\partial x}) \Delta t + \frac{\Delta t^2}{2} \frac{\partial}{\partial t} (r_e - \frac{\partial q}{\partial x}) \quad (2.18)$$

となる。また、

$$\frac{\partial q}{\partial t} = amh^{m-1} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.19)$$

であるから、以下の式を得る。

$$h(x, t + \Delta t) = h(x, t) + (r_e - \frac{\partial q}{\partial x}) \Delta t + \frac{\Delta t^2}{2} \left( \frac{\partial r_e}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t} \left( amh^{m-1} \frac{\partial h}{\partial t} \right) \right). \quad (2.20)$$

## 2.10 Courant による安定条件

以上の計算中の時間間隔  $\Delta t$  は次の Courant の条件を満たすようにする。

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} \geq amh^{m-1}(x, t). \quad (2.21)$$

この条件は流量が多いステップごとに  $\Delta t$  を定義するものであるが、本研究における  $\Delta t$  は固定した。すなわち前進型差分法では  $\Delta t$  を 1 秒とし、Lax-Wendroff 法では 2.5 秒とした。



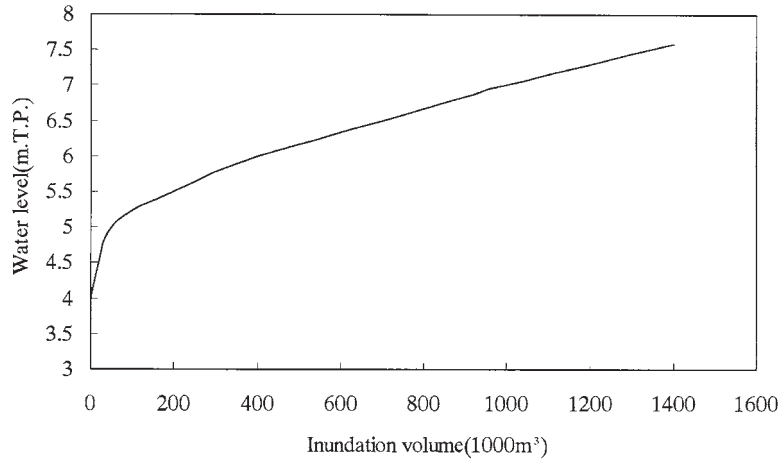


図13 野並配水区における H-Q 曲線 (立川ら, 2001)

### 2.11 微小氾濫域における洪水氾濫の視覚化

微小氾濫域における洪水氾濫の視覚化に関して、国土地理院発行の数値地図50m メッシュ (標高) を用いた。この DEM を元に対象地域の地形を割り出し、モデル化する。それから得られる H-Q 関係により、氾濫時系列を求めた。野並排水区における H-Q 関係を図13に示す。しかしながら、数値地図における標高値は 1 m 単位で記録されており、正確な解析が困難である。そこで、標高値の補間を行わなければならない。補間法としてスプライン補間を用いた。これによって離散的に表現されている DEM を連続的なデータとして扱えるのである。

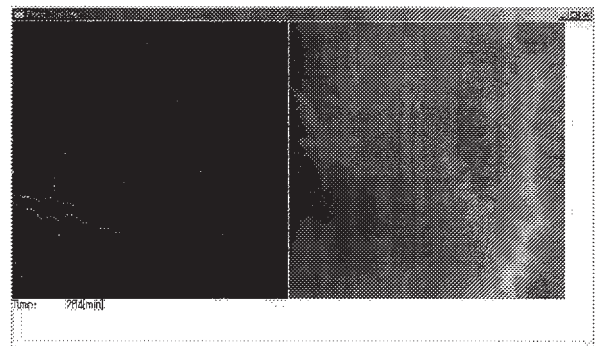


図14 作成した洪水氾濫シミュレーター (計算開始から284分後)

## 3. 解析結果と考察

### 3.1 前進型差分法による洪水氾濫シミュレーション

作成した洪水氾濫シミュレーターを図14に示す。左側が氾濫状況であり、右側が対象とする地域の DEM である。時間は氾濫状況の下に表示される。氾濫箇所は白または赤で表示される。赤は水位が 3 m 以上の箇所である。 $\Delta t$  は 1 秒、等価粗度  $N$  は 0.11、有効雨量は流域平均雨量に流出率 0.77 を乗じて線形補間したものを用いた。凡例の MP は Monitoring Point を示す。1 が下流、以後 2、3 と上流側を示している。出力されたビットマップ画像と MP の位置を図15に示す。

当初、前進差分法における計算を  $\Delta t = 10$  秒として行ったが、ショックウェーブが発生し波形が乱れてしまった。そこで  $\Delta t$  を 1 秒として計算しなおした。これにより波形の乱れはなくなった。洪水の伝播時間も妥当であろう。しかしながら、下流域での水位の値が大きく見積もられる傾向があり、改善が必要である。理由としては有効雨量、等価粗度、基底流量、港湾潮位の設定等が適当でな

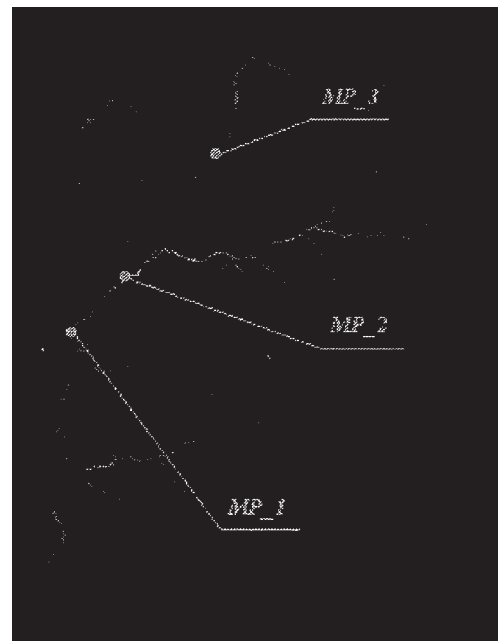


図15 出力されたビットマップ画像と MP (Monitoring Point) の位置

いこと、また前進差分法の精度も考えられる。



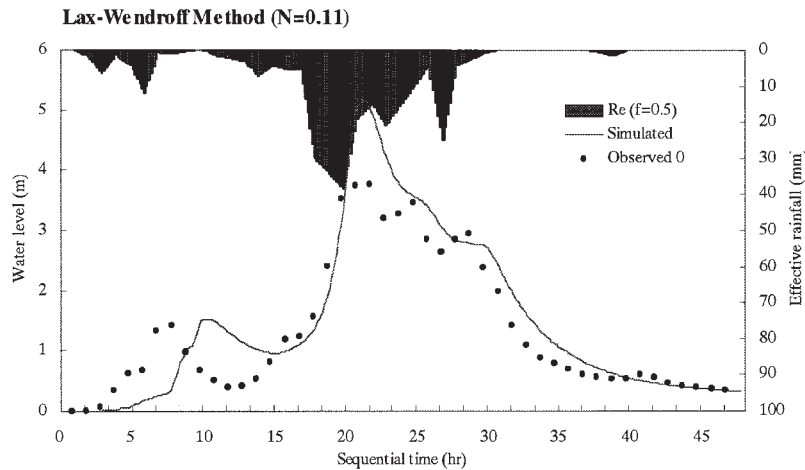


図16(a) Lax-Wendroff 型差分法による解析結果 (N=0.11)

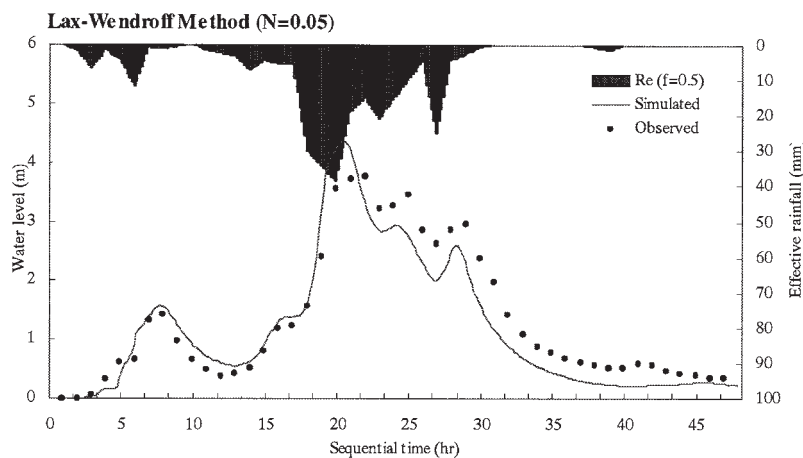


図16(b) Lax-Wendroff 型差分法による解析結果 (N=0.05)

### 3.2 Lax-Wendroff 法による洪水氾濫シミュレーション

Lax-Wendroff 法による計算パラメータとして  $\Delta t$  を 2.5秒、有効雨量は流域平均雨量に流出率0.5を乗じて線形補間したものを用いた。これとともに等価粗度を6種類与えた。等価粗度の値は0.11, 0.06, 0.05, 0.045, 0.04, 0.03である。等価粗度0.11と0.05の結果を図16(a), (b)に示す。

初期の等価粗度を0.11として与え、シミュレーションを行った。この際、試験として、 $\Delta t$  を10秒で行ったが、ショックウェーブが発生し波形が乱れてしまった。そこで  $\Delta t$  を2.5秒として計算しなおした。これにより波形の乱れはなくなった。前進差分法における計算と同様に、下流域での水位の値が大きく見積もられる傾向があり、ピーク時間の遅れがみられることから、等価粗度を小さくすることが必要だと考えられた。

そこで等価粗度を約半分の0.05として解析を行った。これにより最初の立ち上がりが表現でき、実測値の波形へと近づいた。後半の減水部において1 - 2時間の時間

遅れが見られるが、十分な精度と考える。減水部の時間遅れは潮位と基底流の扱いに問題があるのかもしれない。さらに試行錯誤的なパラメータ設定が必要であり、より適切なモデルへ改善されねばならない。

### 3.3 微小氾濫域における洪水氾濫の視覚化

GIS を用いて、湛水深の時系列変化を推定した。被害推定の対象地域として、名古屋市天白区野並地区周辺を選定した。今回、野並排水区における H-Q 関係 (立川ら, 2001) を参考にした。推定された浸水時系列、湛水深推定図および浸水被害をそれぞれ図17、18および表4に示す。床上浸水の面積率は0.71であり、床下浸水の面積率0.29を大きく上回った。特に野並地区における被害が甚大であったことが読みとれる。野並地区周辺は河川に囲まれた低地であるため、河川からの外水氾濫や降雨による内水氾濫により、被害が拡大したと考えられる。

表4 推定された野並地区周辺における浸水被害

Category	Number of households	Flood inundation area (km <sup>2</sup> )	Ratio
In bed	1017	0.40	0.71
The bed lower part	461	0.16	0.29
Total	1478	0.56	1.00

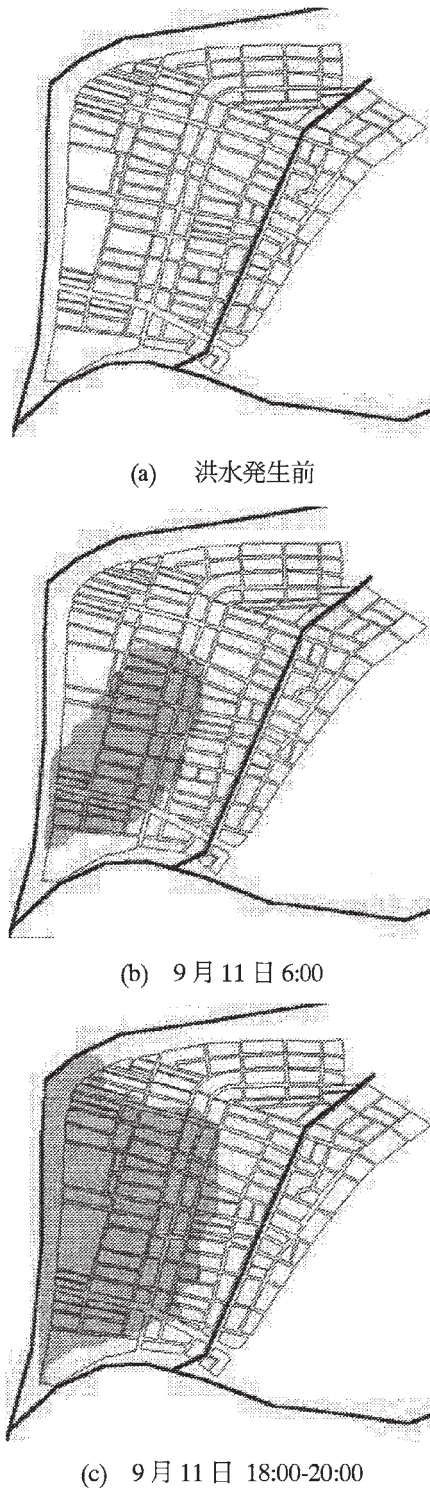
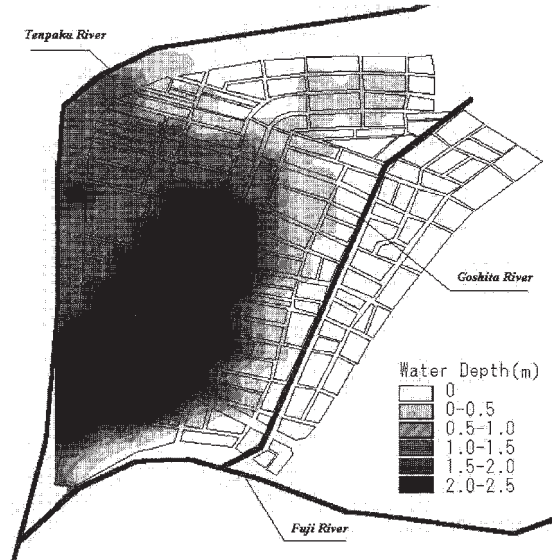


図17 時間ステップにおける湛水状況の視覚化



(最高水深記録時刻：2000年9月12日6:00)

図18 野並地区における湛水深推定図  
(最高水深記録時刻：2000年9月12日6:00)

#### 4. 結論

本研究の結論を以下に述べる。

第1にCA法で分布型流出モデルを構築し、Kinematic wave法によって流出量を推定した。流出率を0.5、等価粗度を0.05としたモデルによって精度よく流出現象を表現できた。さらに計算結果を入力として、洪水氾濫をリアルタイムで表示するプログラムの作成を行った。これにより氾濫状況を視覚的に把握することがおよび任意の地点における河川流量及び水位を得ることが可能となった。

第2に氾濫地区の地形から得られるH-Q関係により、浸水時系列を描き、湛水状況を再現した。これにより、洪水氾濫シミュレーションの結果をミクロな領域へ適用できることを示した。

本研究の主要な適用分野として防災計画が挙げられる。本研究では降雨から流出現象を定量的に推定した。またその結果を視覚化できるため、最大洪水流量よりハザードマップが作成できる。すなわち防災対策を簡便に立案できるため、都市計画への応用が考えられる。今後の課題として、以下の5つが挙げられる。

## (1) 流域特性を表すパラメータ決定のための試行錯誤

降雨-流出過程は各流域で大きく異なる。それらの物理過程を表現するためには、本研究で作成した流出モデルのパラメータを試行錯誤的に同定する必要がある。

## (2) 土地利用ごとの粗度の算定

本研究では、土地利用の面積比率により粗度を決定したが、正確な解析のために土地利用別の等価粗度が必要である。今後プログラムを改良し、リモートセンシングから得られる土地被覆によって、粗度の算定を考えなければならない。

## (3) 厳密な落水線の作成

Cellular Automaton 法を用いた洪水氾濫シミュレーションでは、50m メッシュの DEM から落水線図を作成した。しかし、DEM の分解能と地形の起伏条件によっては、実際と異なる河道網が作成されることも少なくない。そのため、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ろう。これには計算によって得られる河道の位置データと、DEM から得られた位置データを置換すること（加藤ほか、1998）が解決策としてあげられる。

## (4) グリッドベースの被害予測モデルとの結合

本研究で作成した洪水氾濫シミュレーションによって得られた結果をグリッドベースの被害予測モデル（児島、宝、2000）と統合することにより、広域の解析が可能となり、災害の被害軽減に貢献するものと考えられる。

## (5) 陰解法での解析

偏微分方程式を解くための手段として、本研究では陽解法の差分スキームを採用している。だが、正確な計算結果を得るためには、陰解法で計算を行うべきである。しかし陰解法はプログラミングの手間や計算時間の面で劣る。そういった、方程式の解法による計算結果、計算時間の比較検討が必要であろう。

## 謝 辞

本研究をまとめるにあたり、東海豪雨に関する記録を提供していただいた名古屋市消防局防災部の新村氏には大変お世話になり、重ねて厚くお礼申し上げたい。

## 参考文献

- Chow, V. T., R. David, and W. M. Larry eds., Applied Hydrology, McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1988.
- Dutta, D. and S. Herath, An integrated model for flood inundation and damage simulation and its application, INCEDE Report : 2000-04 Oct. 2000.
- Takara, K., Remote sensing and GIS application to modeling of flood and sediment runoff in the Brantas River basin, Indonesia, Second Workshop on Remote Sensing of Hydrological Processes & Applications 2000.
- 岩佐義朗, 数値水理学, 丸善, 1995.
- 加藤恭義, 光成友孝, 築山洋, セルオートマトン法, 森北出版株式会社, 1998.
- 京都大学防災研究所, 防災学ハンドブック, 朝倉書店, 248p. 2001.
- 児島利治, 宝馨, Landsat TM 画像と DEM を用いた Kinematic Wave 洪水流出モデル, 水文過程のリモートセンシングとその応用に関するワークショップ, p149-154, 2000.
- 白沢道生, 相場孝志, 横山隆, 50m メッシュ DEM による広域の水系抽出アルゴリズム, 地理情報システム学会講演論文集 vol.7. p61-65, 1998.
- 高橋大輔, 数値計算, 岩波書店, 1996.
- 立川康人, 宝馨, 大田裕司, 東海豪雨時の野並地区における浸水とその対策に関する考察, 水文・水資源学会2001年研究発表会要旨集, p.78-79, 2001.
- 近森秀高, 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 -, 6(1): 19-28, 1998.
- 名古屋市消防局防災部防災室, 東海豪雨水害に関する記録, 名古屋市, 2001.
- 日野幹雄, 太田猛彦, 砂田憲吾, 渡辺邦夫, 洪水の数値予報, 森北出版株式会社, 1989.



## 要 旨

2000年9月に発生した東海豪雨水害は、新川の決壊や河川からの越水により大量の汚泥が市街地に溢れ、かつ排水能力を超えた降雨により低地が冠水するなど、都市型災害として過去に類を見ないほどの大規模な水害となった。こうした大規模災害を防ぐには、それらを想定した防災計画が近い将来用意されなければならない。そのため本研究では、東海豪雨の洪水流出シミュレーションが実行された。まず、分布型洪水流出モデルは Cellular Automata 方法に基づいて作成され、KinematicWave 法で計算した。さらに、これらの解析結果はリアル・タイムでビットマップ・フォーマットでのイメージで示された。この方法の微小流域への適用が示された。

## Damage Estimation of Tokai Flood Disaster in September, 2000

Susumu OGAWA, Katsuyuki NAKAMURA, and Daisuke MIYATA

Department of Environment Systems, Faculty of Geo-Environmental Science, Rissho University

**Abstract :** Tokai flood disaster occurred in September, 2000. Lowland in this area was flooded by rainfall exceeding drainage capacity, and it brought about a large-scaled urban disaster. To protect such a large-scaled disaster, the protection plan should be prepared near future. Therefore, in this study flood runoff simulation was carried out for the Tokai flood disaster. First, a distributed runoff model was constructed based on Cellular Automata method and calculated with a kinematic wave equation. Furthermore, these analysis results were shown with pictorial images in bitmap format at real time. Finally, inundation images each step were described. The applicability to the micro-scaled area was indicated with this method.

**Keywords:** Flood runoff simulation, Tokai flood disaster, kinematic wave runoff model, Cellular Automata