

洪水ハザードマップの作成についての一考察

井上 和也・戸田 圭一・栗原 哲・武田 誠・谷野 知伸

STUDY TO CONSTRUCT A HAZARD MAP FOR FLOODING

By Kazuya INOUE, Keiichi TODA, Satoshi KURIHARA, Makoto TAKEDA and Tomonobu TANINO

Synopsis

By the development of the mathematical modeling for overland flooding flow, inundation flow can be treated in hydraulic manner. A map denoting hazard area due to flood or predicting the distribution of maximum overland flood depth is released by river administration. From these aspects, establishment of refuge system in a sheltered area against flooding has become a new research subject.

This paper deals with a modeling of refuge system at a supposed inundation area in terms of network theory and considers effects of refuge measures and residents behaviour during refuge. First, the distribution of the residents requiring refuge and the allocation of suitable refuges are examined. Next, using the residents behaviour model during refuge, and taking into account of inundation flow characteristics and refuge execution rate by residents, several simulations are conducted which can express the temporal situation of refuge. Based on the above results, the effects of refuge system and some tasks to be solved are discussed.

1. はじめに

降雨の集中度や地形的特性により出水が急なわが国では、過去、豪雨による洪水災害が多く発生した。現在では、河道線形の改修、河床掘削、堤防のかさ上げといった河道整備をはじめとする治水対策の効果により、大規模な洪水被害は減少している。しかし、一方では、都市において、人口、資産、情報、中枢機能などが集中の度合いを増しているため、洪水時の被害ポテンシャルは増大している。

近年、いわゆる氾濫モデルによって氾濫水の挙動を水理的に解析することが可能となりつつある。また、一方、行政的には、主要河川において洪水氾濫危険区域図や浸水予測図が公表されるに至っている。これらの趨勢の当然の結果として、堤内地における氾濫時の避難体制の確立が今後の新しい研究課題として浮かび上がる。しかし、現在の避難体制をみると、個々の地域ごとに独自の基準によって策定されることが多く、氾濫解析という技術手段を体系的に活用した検討は始まったばかりである¹⁾。本研究は、そのような方向の検討の一つである洪水ハザードマップを対象とする。

建設省が示した洪水ハザードマップの作成要項²⁾によれば、その定義は、「破堤、氾濫等の水害時における被害を最小限に食い止めることを目的として、浸水情報、避難情報等の各種情報を分かりやすく図面などに表示したもの」とされている。また、洪水ハザードマップは、洪水防御の最小単位である市区町村ごとに、行政の主導によるだけでなく、住民の参加も伴って作成されるものとする、とされている。つまり、住民の立場に立った防災のあり方の一つを示すものとして評価できよう。

本研究は、ある洪水氾濫想定区域を対象に、避難体制をネットワーク理論を用いてモデル化するとともに、避難対策や避難行動の考察を行ったものである。まず、対象領域内の要避難者の分布や適切な避難場所の指定などを検討し、ついで氾濫水の挙動や住民の避難率を考慮した避難行動モデルを用いて、氾濫時における住民の時間ごとの移動状況を分析し、その結果に基づいて、避難対策の効果やこれからの検討すべき課題を考察する。

2. 洪水ハザードマップと本研究の手法

ここでは、現在検討されている「洪水ハザードマップ」の概念をまとめるとともに、本研究の避難行動モデルによる避難シミュレーションを工学的見地から現実的に検討しておく。

2.1 洪水ハザードマップ

建設省による洪水ハザードマップの定義はさきに述べたとおりである。同省は、これまでに、過去の浸水被害を示す浸水実績図や、計画規模の洪水を対象として氾濫解析より求められる洪水氾濫危険区域図を公表してきた。近年では、浸水に関する情報とともに、さらに避難行動に関わる情報も盛り込んだ洪水ハザードマップの作成をはじめており、住民、行政双方が活用できるようにした形ですでにいくつかの行政単位において公表している。

建設省の示している洪水ハザードマップの要項²⁾より、洪水ハザードマップの特徴、内容および作成手順をまとめると以下のようである。

- 各市区町村ごとに、地域の水防管理責任を有する市区町村長が作成する。
- 作成に関しては、学識経験者や防災担当部局の他に、住民代表や水防関係者等、実際にマップを使用する人を含めて構成する作成委員会を設置し、作成委員会において原案を作る。
- 住民に直接配布することを前提とした地図であり、周知徹底を図る。
- 浸水実績や浸水予想区域等の氾濫現象の表示にとどまらず、避難場所や避難路、避難基準等の情報も合わせて記載する。
- 地図の縮尺は、個人の住宅の浸水の程度を判読しうる 1 万分の 1 程度を標準とする。
- 水防計画、地域防災計画等への反映に努める。

洪水ハザードマップには、氾濫時の避難から平常時に水害の理解を深めるための学習資料まで幅広い内容が含まれており、どの面を強調するかに応じて避難活用型、防災情報型および災害学習型の 3 種類がある²⁾、とされる。

2.2 本研究の立場

避難行動モデルを用いた解析は、解析の実施と実際の氾濫発生との時期の差により、事前、事中、事後の 3 種類に分けられる。「事中」は、従来「リアルタイム」と呼ばれている。この方法は実際に氾濫が発生しているときに避難行動を解析しようとするものであるが、氾濫発生中の行動の把握や情報の伝達などは現状ではきわめてむずかしく、現実的な方法とは考えられない。「事後」は実際に発生した氾濫時の避難行動を、氾濫終了後に解析するという追算の方法であり、避難行動モデルの検証にとって欠かせない。避難行動に関しては、従来より洪水災害後の避難アンケートなどにより資料の集積が行われており後述するモデルではそれらの成果をいくつか取り入れている。ただ、過去の氾濫災害において、氾濫水の挙動と避難行動の同時的資料を用いた追算的検討はほとんど行われていないようである。

本報では、事前的な方法を取り、過去のいくつかの例をもとに単純な避難行動モデルを作成するとともに、氾濫発生時の避難状況の予測的解析を、以下の順にすすめることにする。

まず、洪水ハザードマップの検討項目のうち、要避難地域、要避難者、指定避難所について考察する。実

際の洪水ハザードマップにおいては、要避難地域内を危険度（例えば予想される浸水深の大きさ）に応じて細かく地区分けする方法がとられることがあるが、本報は、対象域がそれほど広くなく、避難開始の決定は要避難地域の全域について一斉に行われるとするので、危険度に応じた地区分けは行わない。つぎに、氾濫の危険は迫っているが氾濫は生じていない（堤内地に浸水はない）という条件のもとで、避難命令によってすべての要避難者が避難するとした計画的な避難シミュレーションを実施し、とくに避難所の指定の有無が避難状況に与える影響を考察する。さらに、氾濫が生じている（堤内地に浸水がある）条件のもとで、避難シミュレーションを実施し、避難情報・命令の伝達や住民の危機意識によって避難の様相がどのように変わるかを検討するとともに、避難状況を改善するための条件などを考察して、避難体制全般に関する分析を行う。

3. 洪水氾濫時の避難行動モデル

3.1 洪水氾濫解析モデル

洪水氾濫は平面2次元モデルを用いて解析する。支配方程式は2次元の浅水方程式であり、これを中川の方法によって差分化する。その詳細は省略する³⁾。

境界条件としては、河道の上流端では対象とする洪水の流量ハイドログラフ、河道および氾濫域の下流端では計算上の反射波が生じないように流れを計算領域外へ透過させる日野⁴⁾、日野・仲座⁵⁾の無反射条件をそれぞれ与えている。

3.2 避難ネットワーク

洪水氾濫解析の結果から設定される要避難地域および行政的に定められている避難所の平面的配置から、当該対象領域の避難ネットワークを構成する。このネットワークは、住区、交差点、避難所（以上はノード）、および主要道路、細街路（以上はリンク）という要素から構成されるものとする。

住区は要避難地域内の住民の居住の最小単位である（ここでは、行政的な町丁の細分割を住区と考えている）。ただし、住区の住民数には互いに大差がないようにしている。また、避難所は、地区（おおむね町丁単位で、複数の住区からなる）ごとに指定されるものとし、避難所の床面積や収容人数などが属性として与えられる。

避難経路は対象領域内の主要道路および細街路に分けてモデル化する（いずれもリンク）。主要道路とは、避難のための幹線道路として選ばれるもので、ネットワーク的にはその両端が交差点（ノードの一つ）である道路であり、細街路とは住区とそれから最短距離にある交差点を結ぶ道路である。いいかえれば、主要道路はループ状の、細街路はツリー状のネットワークをそれぞれ構成する。このように道路を二分したのは、実際の避難において、細街路はその住区以外の住民にとってはあまり関係ないと考えられるからである。細街路をツリー状の構造とすることにより、考えている住区内をその住区以外の住民が通過しないようなネットワークが形成できる。なお、避難経路には、避難行動モデルで必要となる道路の幅員などの資料、および氾濫解析で用いられる差分格子との位置関係を示す資料を与える必要がある。

3.3 避難行動モデル

避難行動モデルを作成するために、以下の仮定を設ける。

- 住区内の住民をさらに細分割した住民 unit を考える。住民 unit は10世帯30人程度の規模である。この住民 unit を避難行動モデルにおける最小単位とみなし、避難行動は住民 unit の点的な移動であるとする。
- 住民 unit は、避難開始決定モデルによって避難を開始するものとし、開始後は速やかに指定の避難所に向かって移動する。

- 移動はすべて徒歩によるとし、浸水深（浸水のある条件のもとでは）および避難経路の混雑に応じた移動能力の低下を考慮する。
- 避難経路は指定避難所に向かう最短経路とする。
- 住民が指定避難所に到達した時点でその住民 unit の避難は完了したと定義し、それ以後の移動は考えない。
- 浸水のある条件のもとでは、住民 unit の存在地点における浸水が 1 m を越えた時点で、その住民 unit は避難できなくなったと定義し、それ以後の移動は考えない。

以下に避難行動モデルの主要な要素を明らかにする。

(1) 避難開始決定モデル

住民 unit の避難の開始について、強制避難（ordered refuge）と自主避難（spontaneous refuge）の二つの動機を考える。ただし、強制避難とは、避難勧告、避難命令、あるいは避難行動のきっかけとなる情報（これらをすべて避難情報とよぶ）によって行われる避難と定義する。また、自主避難とは、いま述べた避難情報からではなく、住区における浸水深の増加を認知することによって行われる避難と定義する。もちろん、これらに加えて、近所の住民や知人の勧誘によって行う勧誘避難も多く見られる^{6),7)}が、本モデルにおいては、勧誘避難のモデル化は困難であること、複数の住民をまとめて取り扱うので間接的に勧誘避難が含まれると考えられることにより、上述のように強制避難と自主避難のみを考える。

さて、避難開始決定モデルでは、避難行動の開始に関わる住民個々の属性を個別的には考えずに、避難開始を選択する状況に置かれた住民のうち何人が避難開始を決定するかという避難開始率によって確率的に考えることにし、それらを以下のように定める。

強制避難では、避難開始率 R は、避難情報発令時刻を t_{ord} 、避難開始時差を Δt_{lag} 、強制避難指数を R_{ord} とするとき、時刻 t の関数として次式で定義する。

$$R(t) = \begin{cases} 0 & (t < t_{ord}) \\ \frac{t - t_{ord}}{\Delta t_{lag}} \cdot R_{ord} & (t_{ord} \leq t < t_{ord} + \Delta t_{lag}) \\ R_{ord} & (t \geq t_{ord} + \Delta t_{lag}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (1)$$

避難情報には、前述のように様々な種類があり、また、地域ごとに伝達状況は異なるであろうが、ここでは簡単のため対象領域全体にわたって一斉に t_{ord} に何らかの命令・情報が発令され、伝達されるものと考ええる。ここで t_{ord} は避難情報発令者である行政に依存するパラメータであるが、 Δt_{lag} は実際には、住民に対する避難情報の伝達までの時間、あるいは情報を受け取ってから住民が行動を開始するまでの時間であるので、住民、行政のいずれにも依存するパラメータである。 R_{ord} は、 $t \geq t_{ord} + \Delta t_{lag}$ （強制避難最終時刻とする）における避難開始率であって、災害に対する啓蒙の程度や住民の災害意識により変化すると考えられ、これも住民、行政のいずれにも依存するパラメータである。

自主避難では、避難開始率 R は、自主避難指数を R_{sp} とするとき、住区の浸水深 h (単位 m) の関数として次式で定義する。

$$R(h) = \begin{cases} \frac{h}{0.5} \cdot R_{sp} & (h < 0.5 \text{ m}) \\ R_{sp} & (h \geq 0.5 \text{ m}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $R(h) > 1$ の場合には、 $R(h) = 1$ とする。上式より、 R_{sp} は浸水深が 0.5 m になったときの避難開始率である。ここで $R = R_{sp}$ になる水深（自主避難水深とよぶことにする）に 0.5 m という値を採用したのは、避難ができなくなる水深を前記のように 1 m としているため、浸水深が 0.5 m を越えてからの避難

では成功する率が低いと予測されるためであるが、明確な根拠はない。本モデルの適用では、自主避難水深が0.5mより小さい場合（浸水深がより小さい段階でより多くが避難を開始するとした場合）についても検討するために、便宜的に自主避難指数を1以上にすることも行っている。すなわち、例えば自主避難指数 R_{sp} を2.0としたとき、(7)式によれば、自主避難水深は実質的に0.25mと変更できる。

避難シミュレーションにおいては避難開始をつぎのようにして求める。すなわち、全ての住民unitに避難動機（強制または自主）別にあらかじめ乱数値(RD_1 , RD_2)を与え、Fig. 1のようにそれらを組み合わせて避難開始決定モデルとする。本報では、避難情報発令時刻 t_{ord} 、避難開始時差 Δt_{lag} 、強制避難指数 R_{ord} 、自主避難指数 R_{sp} を種々に変化させてシミュレーションを行う。

(2) 最短距離問題としての避難経路

避難経路には指定避難所への最短経路がとられるとしている。それを求めるのに本モデルでは最短経路選択問題の解法として最も簡便であり、またよく用いられているWarshall-Floyd法を適用する。すなわち、 n_i を i 番目のノード、 $d_{i,j}$ を n_i と n_j の距離（ただし、 n_i と n_j が隣接しないときは $d_{i,j} \rightarrow \infty$ ）とすると、その計算手順は以下のようである⁸⁾。

a) $d_{i,j}^{(0)} = d_{i,j}$, $p_{i,j} = i$ ($i, j = 1, 2, \dots, m$), $k = 1$ とおく。

b) $d_{i,j}^{(k)} = \min(d_{i,j}^{(k-1)}, d_{i,k}^{(k-1)} + d_{k,j}^{(k-1)})$ ($i, j = 1, 2, \dots, m$) とする。

c) $d_{i,j}^{(k)} < d_{i,j}^{(k-1)}$ である (i, j) に対して、 $p_{i,j} = p_{k,j}$ とする。

d) $k = m$ ならば終了する。 $k < m$ ならば $k = k + 1$ として b) にもどる。

ここで、 $d_{i,j}^{(k)}$ は n_i から n_j への経路のうち、中間の通過点として $n_1, n_2, \dots, n_k$ だけを許す経路の中での最短距離、 $p_{i,j}$ は n_i から n_j への最短経路における n_j の直前のノード番号、 m はノードの総数である。

Warshall-Floyd法では最終的に $d_{i,j}^{(m)}$ と、そのときの $p_{i,j}$ が求められる。 $d_{i,j}^{(m)}$ はすべてのノードが通過点として許されているときの n_i から n_j への最短距離であるから、実際の最短距離と等しい。このときの $p_{i,j}$ を用いて、任意の n_i から n_j への最短経路ネットワークを次式のように構成することができる。

$$\begin{aligned} K_{m'} &= n_j \\ K_{m'-1} &= p_{i, K_{m'}} \\ &\vdots \\ K_k &= p_{i, K_{k-1}} \dots\dots\dots (3) \\ &\vdots \\ K_2 &= p_{i, K_3} \\ K_1 &= p_{i, K_2} = n_i \end{aligned}$$

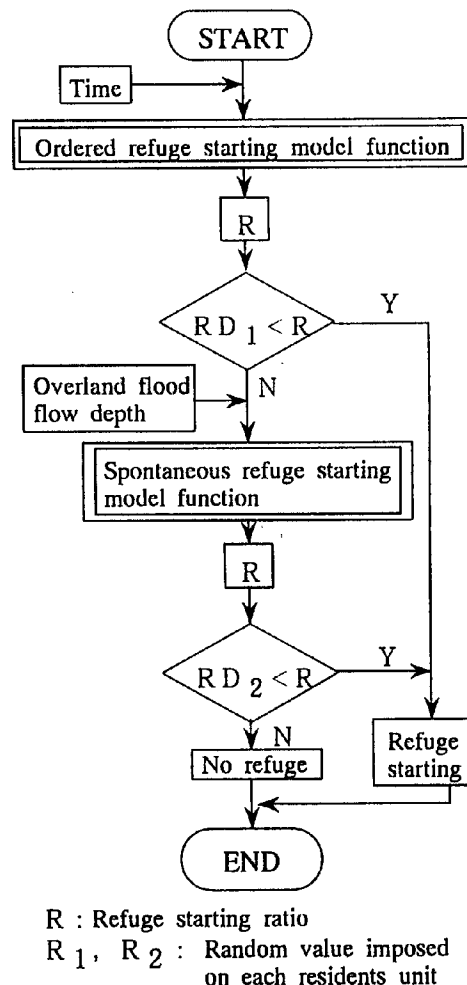


Fig. 1 Determination model for refuge starting

ここで、 m' は n_i から n_j への最短経路ネットワーク上の両者を含めたノード総数であり、 K_k は、 n_i から数えて k 番目のノード番号を示している。

(3) 移動能力の低下

氾濫時の避難行動において移動能力の低下させる要因として、浸水深の増加と避難経路の混雑を考える。

前者（浸水深の増加）に関しては、西原⁹⁾が提案している換算距離の概念を用いる。これは浸水深に対応して避難経路長を増加させることにより、移動能力の低下を間接的に表現する方法である。まず、浸水深による移動能力の低減率 w を浸水深 h の関数として次のように定義する。

$$w(h) = \begin{cases} 1 - h/h_{fau} & (h < h_{fau}) \\ 0 & (h \geq h_{fau}) \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 h_{fau} は、避難行動が不可能になる水深であり、ここでは 1 m としている。この低減率 w より $\alpha = 1/w$ を求め、当該の浸水している避難経路の長さを α 倍に換算することにより、浸水による移動能力の低下をモデル化する。避難経路が氾濫解析の複数の差分格子にまたがるとき、それぞれの差分格子内の浸水深に応じてその差分格子内に含まれる経路の長さを換算する。

後者（経路の混雑）に関しては、住民 unit の移動速度を、避難経路内の住民 unit の密度（群衆密度）の関数とすることにより表現する。群衆密度と歩行速度の関係は、実験より、自由歩行と群衆歩行という二つの状態についてまとめられた例¹⁰⁾がある。これによると、自由歩行の速度には個人差が大きい、密度の増加に伴って群衆歩行に遷移するといわれる。群衆密度と歩行速度について各種関係式が提案されているが¹¹⁾、いずれも決定的ではなく、本モデルでは西原⁹⁾が用いている次式を採用する。

$$v = \begin{cases} 1.42 - 0.241\rho_p & (\rho_p \leq 3.85 \text{ 人/m}^2) \\ 0.49 & (\rho_p > 3.85 \text{ 人/m}^2) \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

ここで v は歩行速度 (m/sec)、 ρ_p は群衆密度 (人/m²) である。

避難シミュレーションにおいては、考えている避難経路内の住民数をその経路面積で除して群衆密度を求める。実際には、歩行が不可能となる最大群衆密度 ρ_{pmax} が存在するが、本シミュレーションでは前述の通り複数の住民をまとめて点の移動として扱っているため、正確な群衆密度の算出は困難である。したがって、本モデルでは ρ_{pmax} は考えず、 ρ_p がいくら大きくなっても最小歩行速度 (0.49 m/s) による移動が可能としている。

(4) 避難行動のシミュレーション

避難を開始した住民 unit は、その住民 unit の属する住区ノード（始発ノード）から目的地である指定避難所へ移動する。この場合、最短経路ネットワークを前述の $p_{i,j}$ より時間ステップごとに求める。ただし、その時間での浸水状況に応じてリンクの長さ（経路長）は換算される。目的地までの距離（換算距離）がその時間ステップ内での移動距離より短くなった場合、その住民 unit は目的地（指定避難所）に到着したとみなし、この時点でその住民 unit の避難が完了したとする。計算の進行中において、住民 unit の位置するリンクの氾濫水深が 1 m 以上に達した場合、この時点でその住民 unit の避難は失敗したとし、以後、その住民 unit の移動は行わない。

3. 4 指定避難所に関する検討

避難シミュレーションを行うには、まず、住民の避難所を指定しなければならない（指定がなく、住民が最寄りの一住区から最も近い一避難所へ避難した場合の結果は後に示す）。そのため、本研究では、ある原則に従って避難所指定を試行錯誤的に繰り返し、評価指標に関して収束させていくという手法により、指定

避難所を設定する。これまでの洪水ハザードマップにならい、ここでも避難所は地区ごとに指定されるとする（地区の代表となる住区の座標および地区内の人口資料が必要）。住区から避難所までの距離は最短経路より算出された距離を用い、避難所の収容能力は、避難所の床面積と一人当たりの必要床面積から求める。

検討手順は、まず始めに、避難所指定の適当な初期案を設定し、以下に示す原則に従って指定の更新を行う。

- 避難所の収容者数はその収容能力を超えない。
- 同じ避難所に指定された地区の間で、避難距離に著しい不均衡が生じない。
- 避難距離の長い地区から優先的に避難所を指定する。
- 互いに近隣する地区の間で、避難所の指定が錯綜しないようにする。

全体の平均避難距離および避難距離の標準偏差を減少させるように、以上の原則に従って避難所の指定を繰り返し、収束したと判断した結果を最終の指定避難所とする。

以上の検討経過において、避難距離、人数、最寄度、平均避難距離、および避難所の収容能力を記載した図を作成する。ここで、最寄度とは、ある地区からみたときにその避難所が何番目に近い避難所であるかを示す指標である。具体的な試行の一例を Fig. 2 に示す。例えば Fig. 2 の指定案 (1) では、A 避難所は収容能力を超過しているが、各地区の避難距離に関してはバランスがとれている。いま、最も最寄度の大きな a 地区の指定避難所をより最寄度が小さく収容能力に余裕のある B 避難所に変更すると、指定案 (2) のように全体の避難距離は減少する。また、指定案 (1) では C 避難所と D 避難所において、地区ごとの避難距離に不均衡が生じている。i 地区をより最寄度の小さい避難所に、k 地区をより最寄度の大きい避難所にそれぞれ変更すると、指定案 (2) のように避難距離の標準偏差が減少し、平等性が増す (i 地区と k 地区を入れ替えると収容人数の条件も満たした結果になっている)。

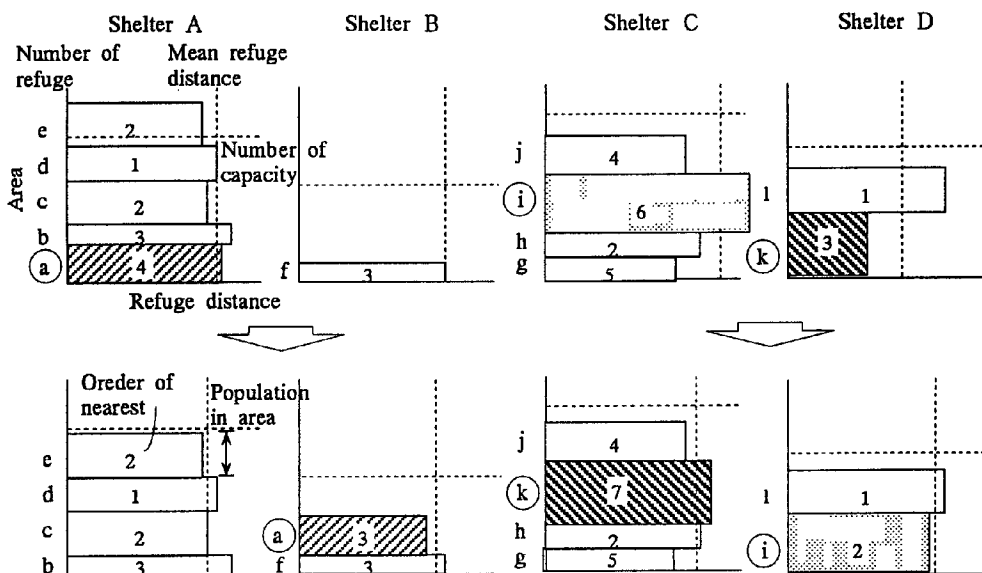


Fig. 2 Example of shelter allocation study

4. 現地の氾濫特性および避難シミュレーション

4.1 氾濫特性

避難行動モデルを適用する地域として、淀川とその左岸に位置する寝屋川市を考える。まず、要避難地域

を設定するために行った氾濫解析の要点を以下にまとめる。

対象領域内の地盤高は国土地理院発行の 1/10,000 の地形図より、堤防高は淀川の横断面図より、それぞれ読みとる。ただし、淀川の左岸側の堤内地で地盤高が 30 m 以下の領域を氾濫計算の対象としている（差分格子の大きさは 100 m）。淀川には 5313 型の洪水を与え、これを上流端境界条件とする。その他の開境界には、前述の無反射境界条件を用いる。適用領域のさらに下流側には、実際には大川（旧淀川）などの堤防があるので、適用領域の下流端で無反射境界条件を適用すると浸水深はやや低めに計算されると思われる。

氾濫計算では、上流端の流量ハイドログラフが最大値を記録する時刻を 0:00 に設定し、この時に想定した破堤点で幅 100 m（1 格子分）の破堤が生ずるとする。破堤後は、1 秒間に 10 cm ずつ堤防高が減少する（ただし、堤内地盤高まで）として破堤過程をモデル化する。破堤点には、寝屋川市内の淀川左岸堤において、3ヶ所をそれぞれ別個に想定する。以上の条件のもとに、破堤 3 時間前の 21:00 から破堤 6 時間後の 6:00 までの 9 時間分の計算を行う。

Fig. 3 は、想定した破堤点ごとの氾濫計算での最大浸水深 ((a)~(c)) の分布、およびそれらを包絡した最大浸水深 ((d)) 分布を示す。浸水域を比較すると、想定した 3 破堤点のうち、最も大きな浸水深をもたらすのは破堤点 A の場合である。

4. 2 要避難地域の設定および避難ネットワークの形成

Fig. 3(d) の結果に過去に内水氾濫の経験のある地域を加えて要避難地域とする。この要避難地域の面積は約 14 km² で、人口は 18 万人である。この要避難者を 310 の住区にそれぞれ分割する。実際の洪水避難においては家屋構造の差異によって避難状況が変わるといわれている^{12), 13)}。寝屋川市では都市化が進んでおり、高層住宅の居住率が高いが、ここでは簡単のため家屋構造の差異は考えずに、これらの高層住宅の住民を含めて要避難地域内の人口をすべて要避難者として考えることにする。

避難経路のネットワークは、310 箇所、住区、31 箇所の避難所および 350 箇所の交差点をそれぞれノードとし、550 本の主要道路、住区あるいは避難所と交差点を結ぶ細道路をそれぞれリンクとして構成する。ただし、要避難地域外では避難経路には主要道路だけを考え、要避難地域に比べ粗くなるように構成した。主要道路の幅員は、実際の道路幅員に応じて 4 m, 8 m, 12 m の種類に区分する。なお、細街路の幅員は全て 4 m とする。なお、上記の避難所 (31 箇所) には寝屋川市の洪水指定避難場所のすべてを採っている。このようにして得られた避難ネットワークを Fig. 4 に示す。

4. 3 指定避難所

まず、避難所指定のための単位として、要避難地域を町丁ごとに 108 の地区 (1 地区には、数個の住区が含まれる) に分ける。

避難所の収容能力は、東京都において洪水時の短期避難所の収容人数算定に用いられている限界密度 1.21 人/m²¹⁰⁾ を採用し、それぞれの避難所の床面積より算出する。対象にした避難所の総収容能力は約 20 万人で、これは要避難者総数 (18 万人) より大きい。

これらの資料を用いて、3. 3 で示した手法により収束したと判断される避難所指定が Fig. 5 である (図中の同一トーンで示されている範囲には複数の地区が含まれている。つまり、複数の地区に対して一つの避難所が指定されている)。また、この場合の避難所ごとの避難者数、避難距離の平均値と標準偏差をまとめたのが Fig. 6 である。比較のため、避難所の指定がなく、最短距離の避難所 (最短避難所一つ、最寄度が 1 の避難所) へ避難すると仮定した場合の同様の結果が Fig. 7 である。両者を比較すると、避難所指定の場合には、最短避難所の場合より避難距離が平均で 1,000 m 以上長くなることが分かる。しかし、最短避難所の場合、特定の避難所に避難者が集中 (例えば避難所 14 や 26) し、収容能力を越す場合のあることが分かる。収容能力および次項で述べる経路の混雑を考えると、避難所の指定は、洪水ハザードマップの中でもとくに徹底して周知しておくべき項目であろう。

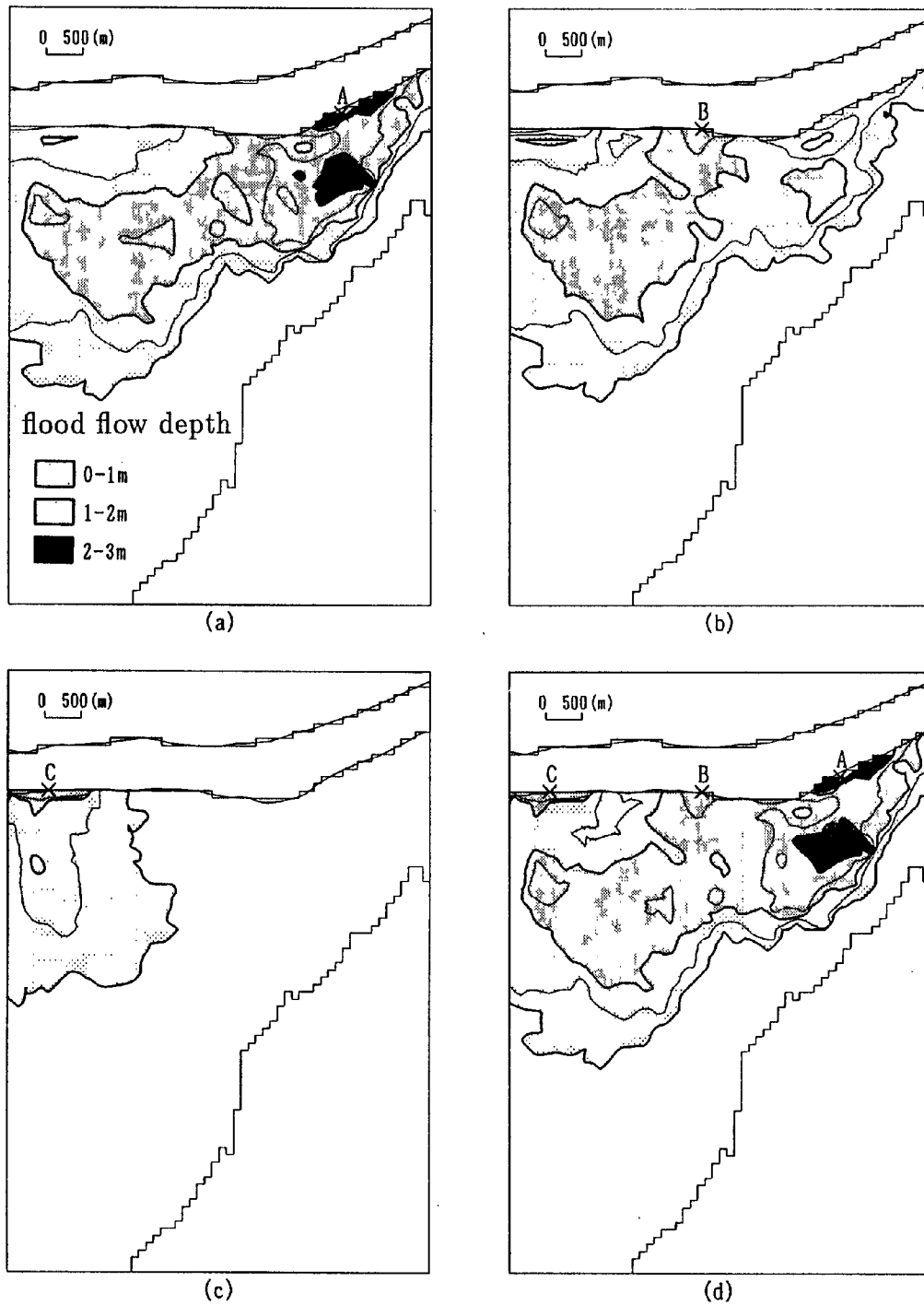


Fig. 3 Maximum inundation flow depth
(a) Break point A (b) Break point B
(c) Break point C (d) Envelope of inundated area

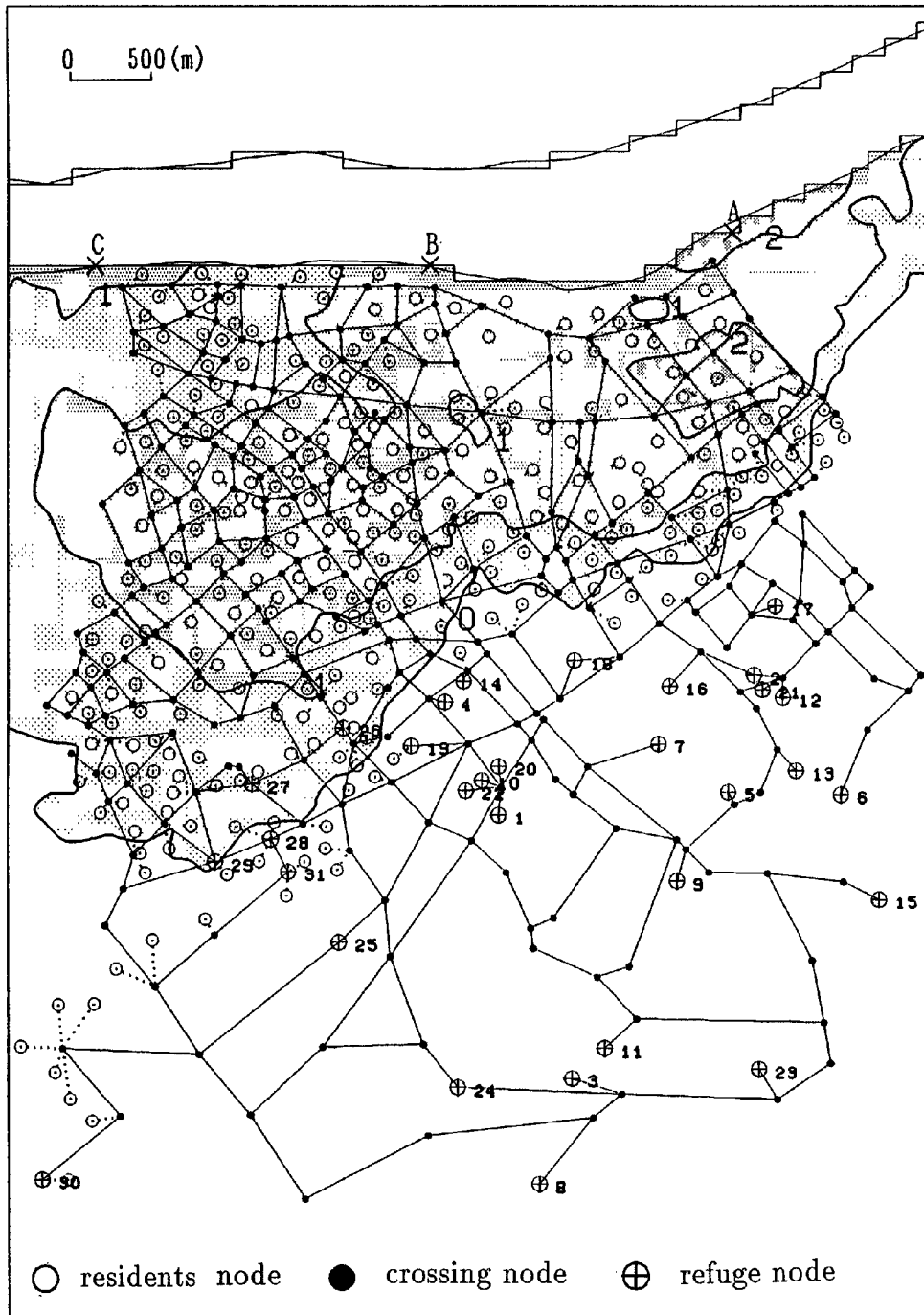


Fig. 4 Refuge network

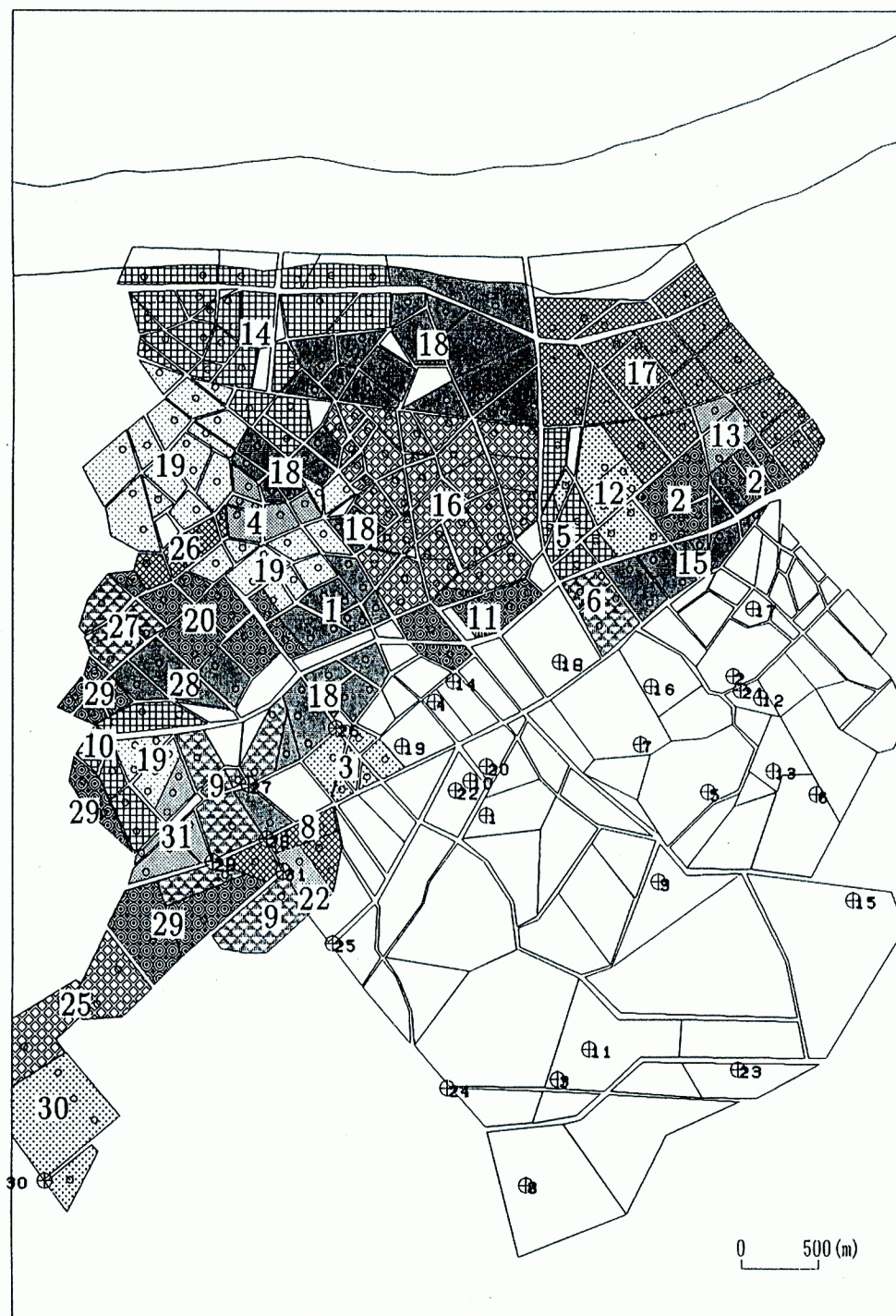


Fig. 5 Allocation of shelters

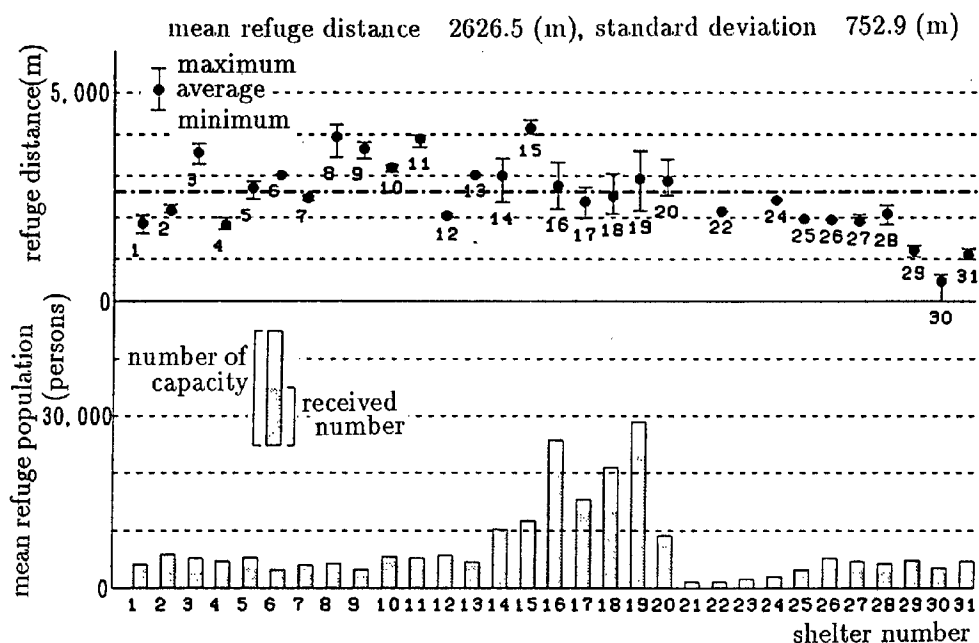


Fig. 6 Capacity of shelters and refuge distance (allocated refugees)

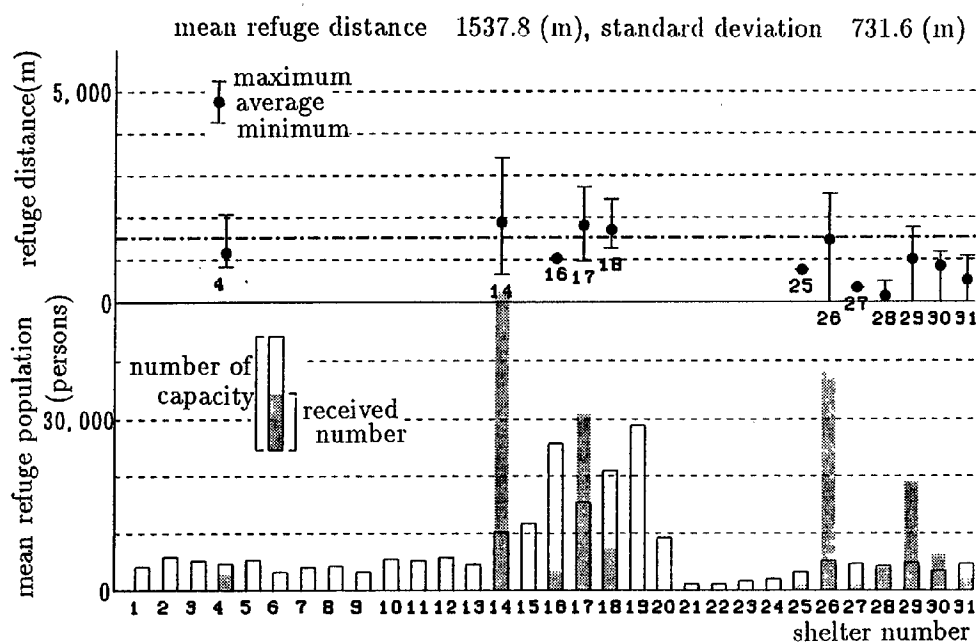


Fig. 7 Capacity of shelters and refuge distance (nearest refugees)

4.4 浸水がないときの避難状況

浸水がまだ発生していないという状況のもとで、要避難者全員が強制避難する場合（避難開始決定モデルで $R_{ord} = 1$ ）について、避難シミュレーションを行う。

Fig. 8 に避難開始時差 (Δt_{lag}) を 10 分、30 分、60 分、90 分の 4 通りに変化させた場合の避難状況の時間的変化を示す。ここで、横軸は避難情報発令時刻からの経過時間 (分)、縦軸は要避難者全体に対する避難者分類の累積比率である。堤内地に浸水はないとしているから、避難未了者（浸水深 1 m に遭遇する者）は現れていない。

この図より、避難開始時差が大きくなると最終的に全住民が避難を完了する時刻は遅くなるが、避難に要する時間は減少していることがわかる。これは、 Δt_{lag} が大きいと避難経路の混雑が緩和されるからと考えられる。

避難経路の混雑は、経路の最大群衆密度でみることができる。Fig. 9(a) は避難所指定の場合、(b) は最短避難所の場合のそれぞれ最大群衆密度の分布である（いずれも、 $\Delta t_{lag} = 10$ 分）。ここでの計算では、避難行動を点の移動として扱っているため、密度の数値そのものはこれまでの研究での値と一致しないが、(b) の場合には局所的に致命的に混雑する箇所が生じているのに対し、(a) の場合には、多くの避難経路に避難者が分散することによりこのような極端な混雑は解消している。 Δt_{lag} を変化させたときの例として、避難所を指定し $\Delta t_{lag} = 90$ 分とした場合の最大群衆密度を Fig. 10 に示す。前述のように避難開始時差が大きくなると群衆密度が相当減少することは明らかである。また、群衆密度の分布を時間を追って表示すれば、とくに避難者の集中する経路を知ることができる。

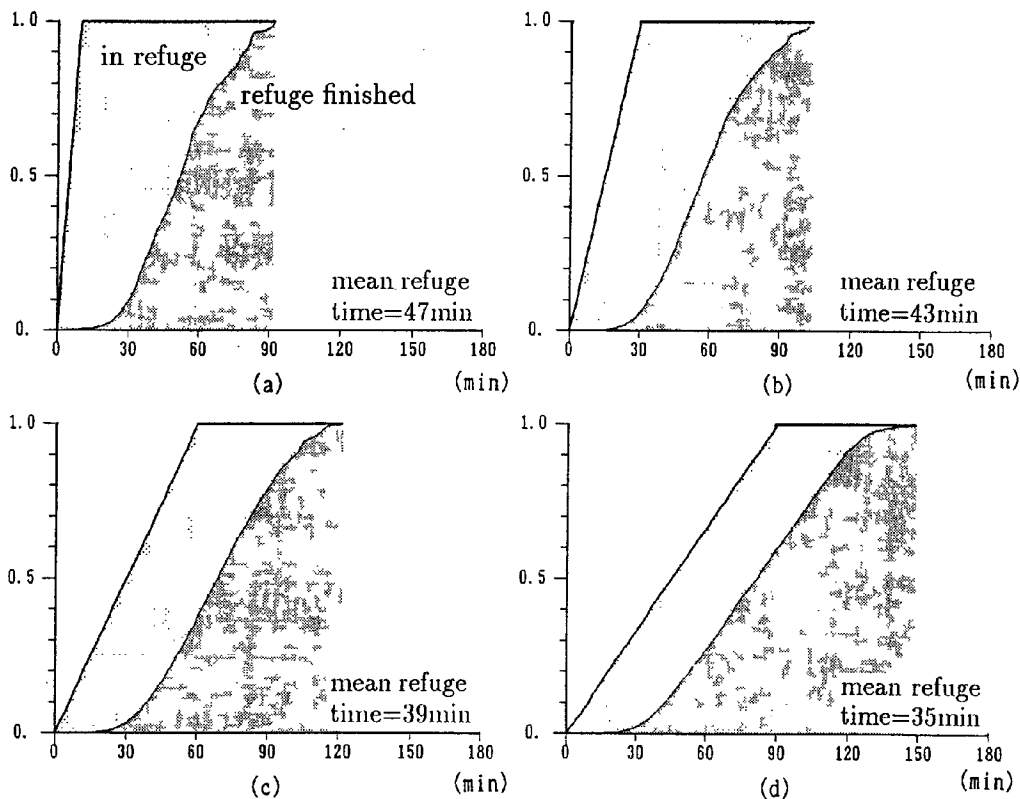


Fig. 8 Temporal change in designed refuge
 (a) $\Delta t_{lag} = 10$ min. (b) $\Delta t_{lag} = 30$ min.
 (c) $\Delta t_{lag} = 60$ min. (d) $\Delta t_{lag} = 90$ min.

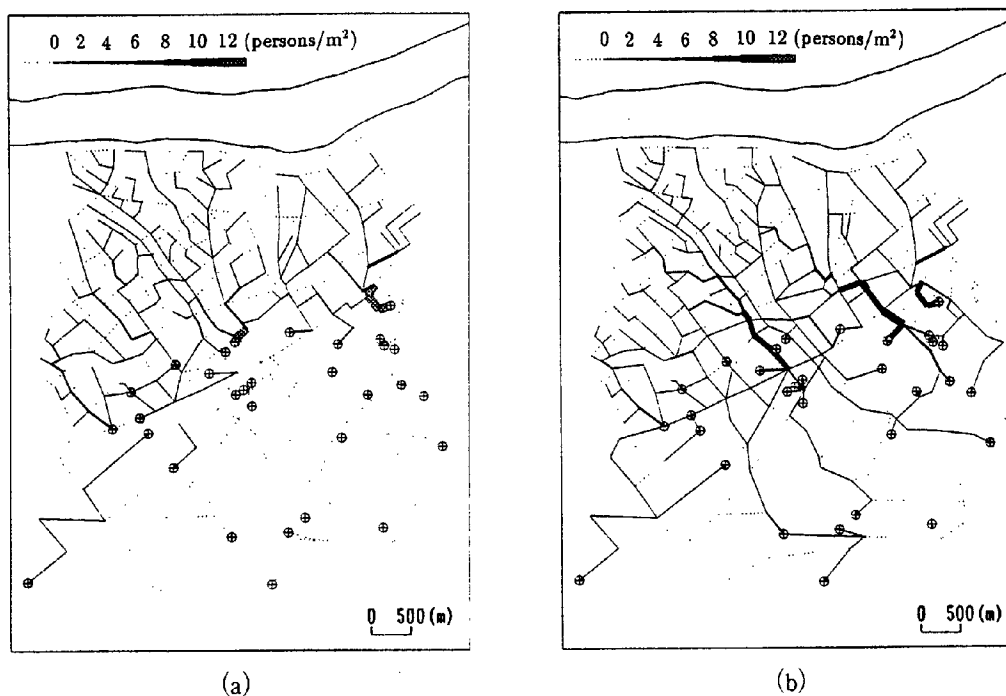


Fig. 9 Density of crowd ($\Delta t_{lag} = 10$ min.)
(a) allocated refuges (b) nearest refuges

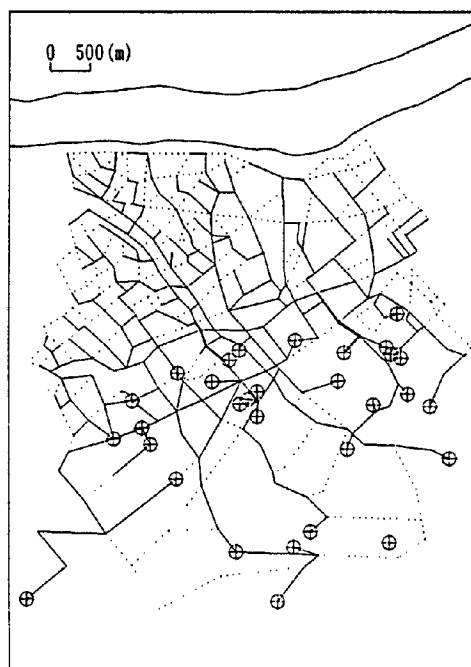


Fig. 10 Density of crowd (allocated refuges, $\Delta t_{lag} = 90$ min.)

5. 浸水下での避難

本節では、前節において設定された避難ネットワークおよび指定避難所をもとに、浸水が堤内地に及んでいるとしたときの避難シミュレーションについて考察する。避難シミュレーションに用いたパラメータ（避難パラメータ）および計算条件を **Table 1** に示す。

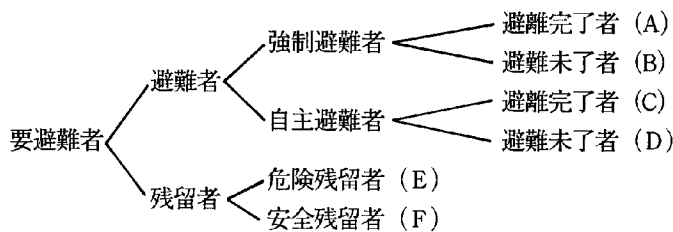
避難シミュレーションは、氾濫解析と同時進行で行われる。計算結果によれば、破堤後6時間で、避難状況は時間的にはほぼ変化しなくなるので、この時刻での状況を最終状況とする。なお、破堤点には浸水域が最も広くなる A 地点を選ぶ。その他のパラメータに関しては、表に示した値を組み合わせ、約 550 通りの解析を行う。

このような避難シミュレーション結果をまとめて、ここでは、領域全体における最終的な避難状況、および避難状況の時間的な変化や地区間の差異について考察する。

5.1 最終的な避難状況

(1) 避難状況を表す指標

まず、要避難者の避難行動の結果を以下のように分類する。



ここで、避難者とは避難行動をとった者で、避難開始決定モデルにおける動機により強制避難者と自主避難者に分けられる。避難者のうち、避難所へ到着できた者を避難完了者（A および C）、避難途上で 1 m を越える水深に遭遇した者を避難未了者（B および D）とする。残留者とは、避難行動をとらなかった者で、そのうち 1 m を越える浸水に遭遇した者を危険残留者（E）、そうでない者を安全残留者（F）とする。避難失敗者とは、B、D、E を合わせた者である。

さて、このような分類をもとに、避難状況を総合的に評価するのに、 $T = A + B + C + D + E + F$ としてつぎのような指標を定義する。すなわち、避難率： $(A + B + C + D)/T$ 、避難完了率： $(A + C)/T$ 、避難失敗率： $(B + D + E)/T$ 、避難未了率： $(B + D)/T$ 、強制避難率： $(A + B)/T$ 、自主避難率： $(C + D)/T$ などである。さらに避難行動の円滑度に関する指標として、避難に要した時間の避難者全体について

Table 1 List of refuge parameters

parameter item	parameter
break time	0 : 00
break point	point A
refuge order time t_{ord}	22 : 30, 23 : 00, 23 : 30, 23 : 50 0 : 10, 0 : 30, 1 : 00
refuge start time difference $\Delta t_{lag}(\text{min})$	10, 30, 60, 90
ordered refuge index R_{ord}	1.0, 0.75, 0.5, 0.25, 0
spontaneous refuge index R_{sp}	2.0, 1.0, 0.75, 0.5, 0.25, 0

の平均値（平均避難時間とよぶ）を考える。

(2) 避難状況に関する考察

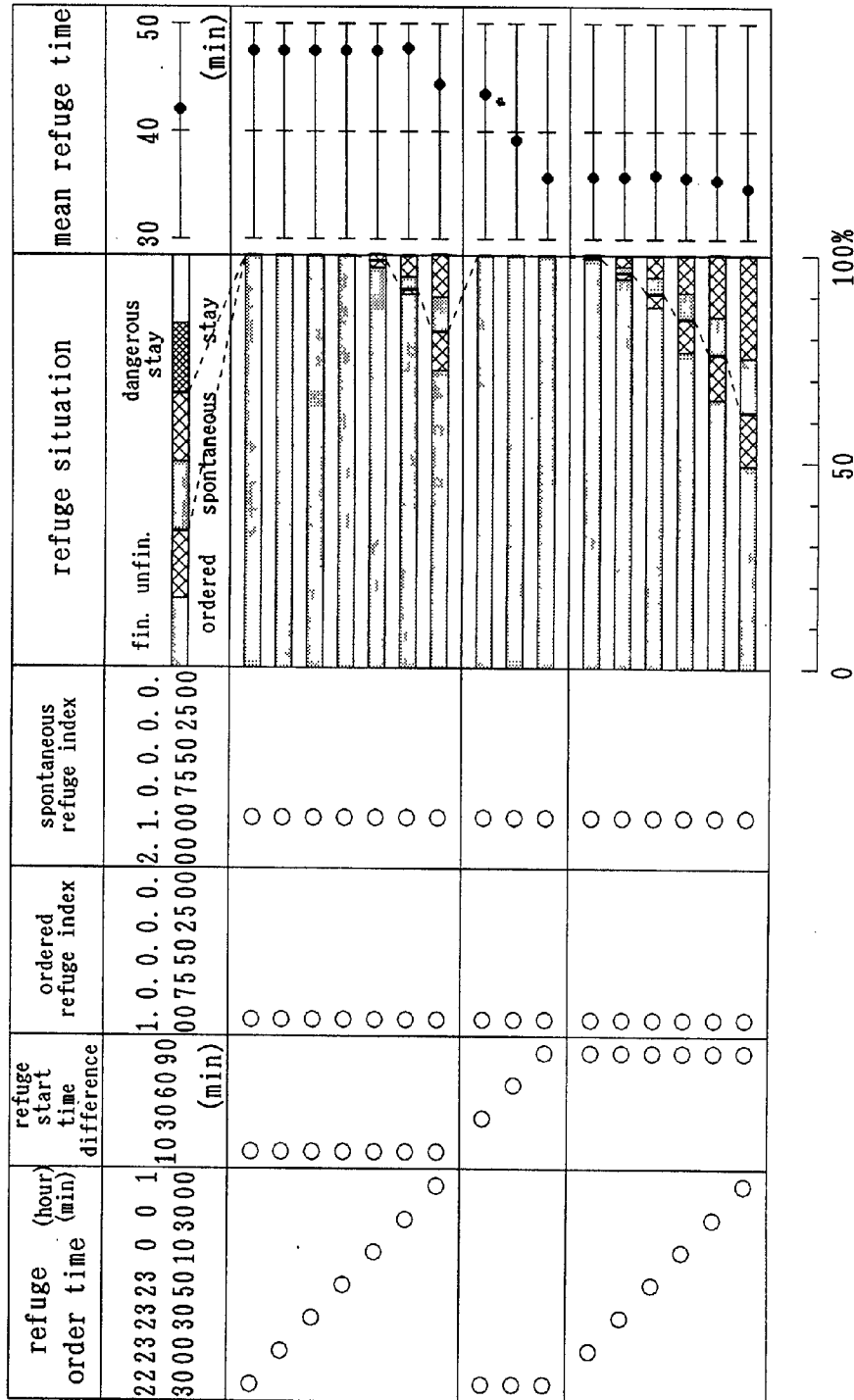
Fig. 11 に、避難命令発令時刻と避難開始時差を変化させた結果を示す。強制避難指数、自主避難指数はともに 1.0 としている。避難開始時差が 10 分の場合、破堤時刻 0:00 以前の発令では避難状況に大差なく、いずれの場合も強制避難率、避難完了率ともに 100 % となっている。しかし、それ以降の発令になると、浸水深の増加に伴う自主避難者が増加し避難未了者が現れている。0:10, 0:30 発令の場合は避難未了者は主に自主避難者であるが、1:00 発令の場合には強制避難者のなかにも未了者がかなり生じていることがわかる。避難開始時差が 10 分と 90 分の場合を比較すると、後者の場合、強制避難完了率が 100 % 以下になる避難命令発令時刻がかなり早くなっている。しかし、発令時刻が早く 22:30 の場合は避難開始時差の違いによって避難状況が悪化することはなく、むしろ避難開始時差が大きいときは前述のように避難行動にも時差が現れ、避難経路の混雑が緩和されて、結果的には避難所要時間の減少につながっている。このように、避難状況には発令時刻と開始時差が互いに影響しあうと考えられる。避難率が下がると平均避難所要時間が減少しているが、これは避難行動の円滑さが増した結果というより、淀川堤防に近く避難距離が長い住民に避難失敗者が多くなるという地域的な避難状況の差が現れた結果と思われる。この点については後にふれる。

Fig. 12 は強制および自主避難指数をそれぞれ変化させたときの避難状況を示す。自主避難指数が 1.0 より小さくなると危険残留者が増加するが、自主避難未了率と危険残留率の合計を非強制避難失敗率と考えると、これに関しては、自主避難指数の違いによる変動は小さい。このことより、自主避難によって避難完了した住民は、結果的に残留していても 1 m をこえる浸水が生じない地域の住民であり、自主避難を行ったことで、危険残留を免れたという住民はわずかであることがわかる。また、自主避難率は強制避難した住民を除いた住民に対して、浸水深から確率的に決定されるため、自主避難指数に加えて強制避難率にも影響される。さらに、自主避難率にかかわらず非強制避難者の失敗率がほぼ等しく、強制避難者の避難完了率が高いことから、避難失敗率は強制避難に関するパラメータの変化による影響が大きいと考えられる。図中の 3 段目の結果は強制避難指数 0 の場合で避難情報が発令されなかった場合に相当し、浸水を認知してから避難行動では完了率は極めて低くなる。また、自主避難指数 R_{sp} が 2.0 の場合（つまり、住民の自主避難水深を 50 cm から 25 cm にした場合）は、 $R_{sp} = 1.0$ の場合と比べて有意な差がみられない。これらのことより、浸水が到達してからの自主避難は、総じて危険であると認識しなければならない。

Fig. 12 の 2, 4, 5 段目の避難状況から、強制避難指数の変化が避難率に大きく作用している様子がうかがえる。また、避難情報発令時刻、避難開始時差を変えた場合については、**Fig. 11** と同様の傾向がみられ、発令時刻の遅れによって強制避難率の低下と自主避難率の増加が生じ、結果的に避難失敗率の増加につながっている。また、避難情報発令時刻の遅れや避難開始時差が長いために強制避難最終時刻が遅れると、強制避難率が下がり自主避難率が増加して、先ほどと同様に、避難失敗率が増加する傾向がうかがえる。

(3) 多変量解析に基づく考察

前述の結果をさらに詳しく議論するために、全てのケースに関して林の数量化理論Ⅰ類^{14), 15)}による多変量解析を行う。この理論は定性的属性の各カテゴリーに適当な数値（スコア）を与えて多変量解析を行うものである。すなわち、ある外的に存在する基準（外的基準）に関して、複数の属性に依存した従属変数（個体）の値をそれらの属性から予測するもので、具体的にはカテゴリースコアの合成値を予測値とし、これと従属変数との相関が最大になるようにスコアを決定するものである。得られたカテゴリースコアそれ自体は絶対的な意味を持つものではないが、所定の属性に関して得られたカテゴリースコアの最大値と最小値の差（レンジ）をもって、外的基準と従属変数の偏相関の代用になることが示されており、各要因ごとのレンジを比較すれば外的基準の決定に関わる要因の影響度を知ることができる。また、ある要因に関



してスコアの相対的な比較を行うことにより、その要因におけるカテゴリーの相対的な影響度の把握が可能である。

この理論を用いて、実行したすべての避難行動シミュレーションを対象に多変量解析を行った。その結果を以下にまとめる。

Fig. 13 は、外的基準として避難完了率をとったときの結果である。要因の大きさは強制避難率、避難率、発令時刻の順となり、避難開始時差の影響は小さい。避難率より強制避難率の影響が大きくなっていることは、避難情報に基づいた避難の重要性を示しており注目すべきことである。また、破堤後の発令は避難完了率を大きく下げる要因として働いていることもわかる。

Fig. 14 は外的基準として避難失敗率をとったときの結果である。ここでも強制避難率が最も大きな要因として働いているが、ついで発令時刻、避難開始時差、避難率となっており避難完了率に関わる要因とは異なる傾向がみられる。各要因のレンジの相対的な大きさに関しても、避難完了率の結果に比べ、発令時刻に関するレンジがより大きくなっている。また避難開始時差に関しても同様に相対的なレンジが大きくなっており、避難開始時差が90分のとき、とくに避難失敗率を高める要因となっている。

5.2 避難状況の時間的変化

Fig. 15 は、避難パラメータをいろいろに設定して、避難状況の時間的変化をみたものである。横軸には時刻、縦軸には避難者分類ごとの比率の累積値を示し、あわせて最終避難状況のうち避難完了率、避難未了率、危険残留率を示している。(a)および(b)はいずれも、避難情報がなく(強制避難指数 $R_{ord} = 0$)、自主避難のみが行われている場合であって、避難失敗率が40%以上と極めて高くなっている。(a)と(b)を比較

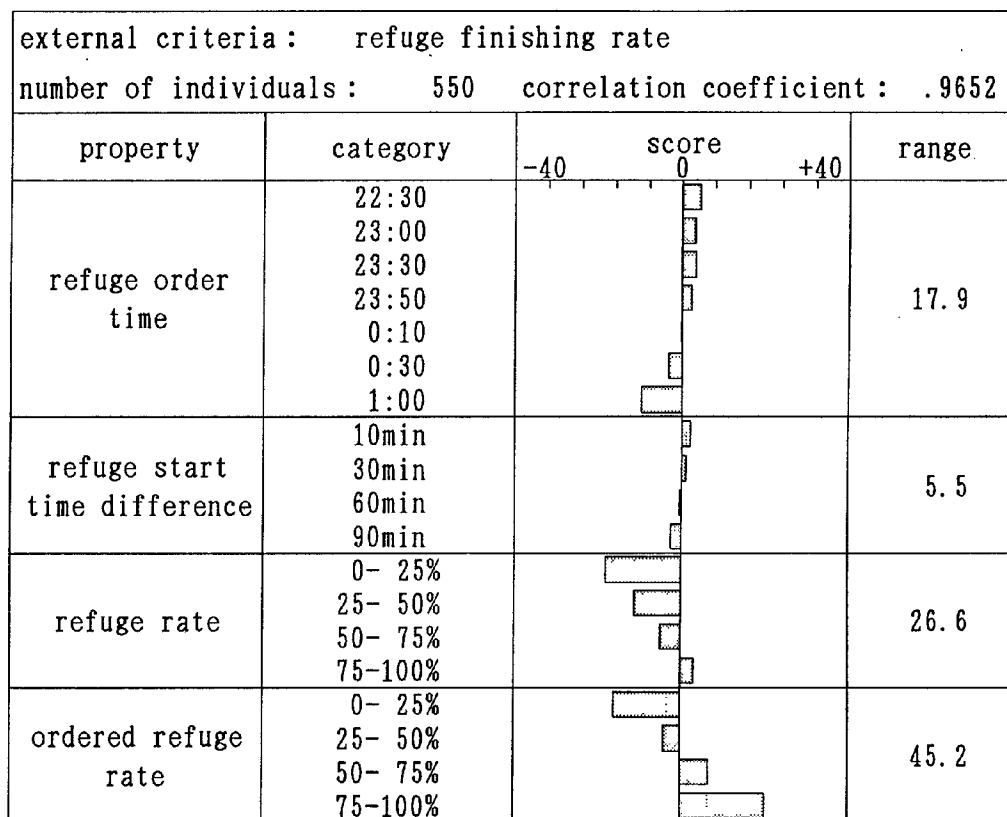


Fig. 13 Refuge finished rate

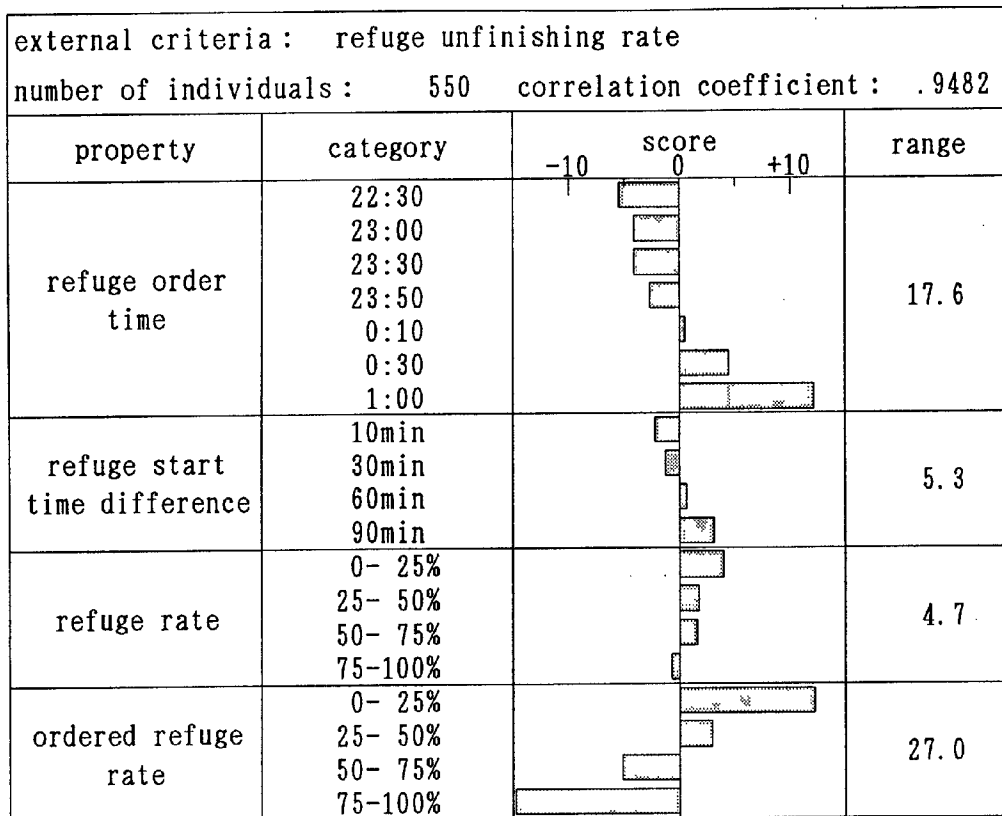


Fig. 14 Refuge unfinished rate

すると、自主避難指数 R_{sp} を増加させても、避難失敗率でみる避難状況はほとんど改善されていない。自主避難率が高くても避難行動開始直後に避難に失敗する者が多いことより、危険残留になる住民の多くは、たとえ自主避難していても、失敗する可能性が高いといえる。また、前に述べたように、自主避難水深を変化させても避難状況はさほど改善されない。これらの結果は要するに自主避難が総じて危険であることを示しているといえる。

(c)は強制避難指数 $R_{ord} = 1$ の場合である。Fig. 8 に示した避難状況とはほぼ一致しており、この場合には氾濫水の影響をほとんど受けずに避難が完了できている。(d)は強制避難率を低下させた場合であって、自主避難率が増加し、結果として避難失敗率が増加している。自主避難者の避難状況は(a)と同様の傾向を示しており、(d)の避難失敗者は全て自主避難者となっている。

(e)および(f)は発令時刻の違いを比較したもので、破堤後に発令された(f)では、強制避難者の中にも未了者がわずかながら現れており、避難失敗率が上昇している。破堤後の発令は避難状況のかなり悪化させているといえよう。

5.3 地区の違いと避難状況

Fig. 16 は、A 地点破堤時の最大浸水深 (単位 m) とともに、地区ごとの避難失敗率を示したものである。(a)および(b)は強制避難指数を変化させた場合の結果であって、最大浸水深が 1 m を越える領域にある地区において、失敗率が相対的に高くなることがわかる。また、強制避難指数が低下して全体の避難失敗率が高くなっても、地域ごとの失敗率の相対的な差は余り変化していない。発令時刻を変化させた(c)と(d)を比較すると、発令時刻が破堤後にずれ込んだ(d)では、破堤点近くの地区に失敗率が増加する傾向が

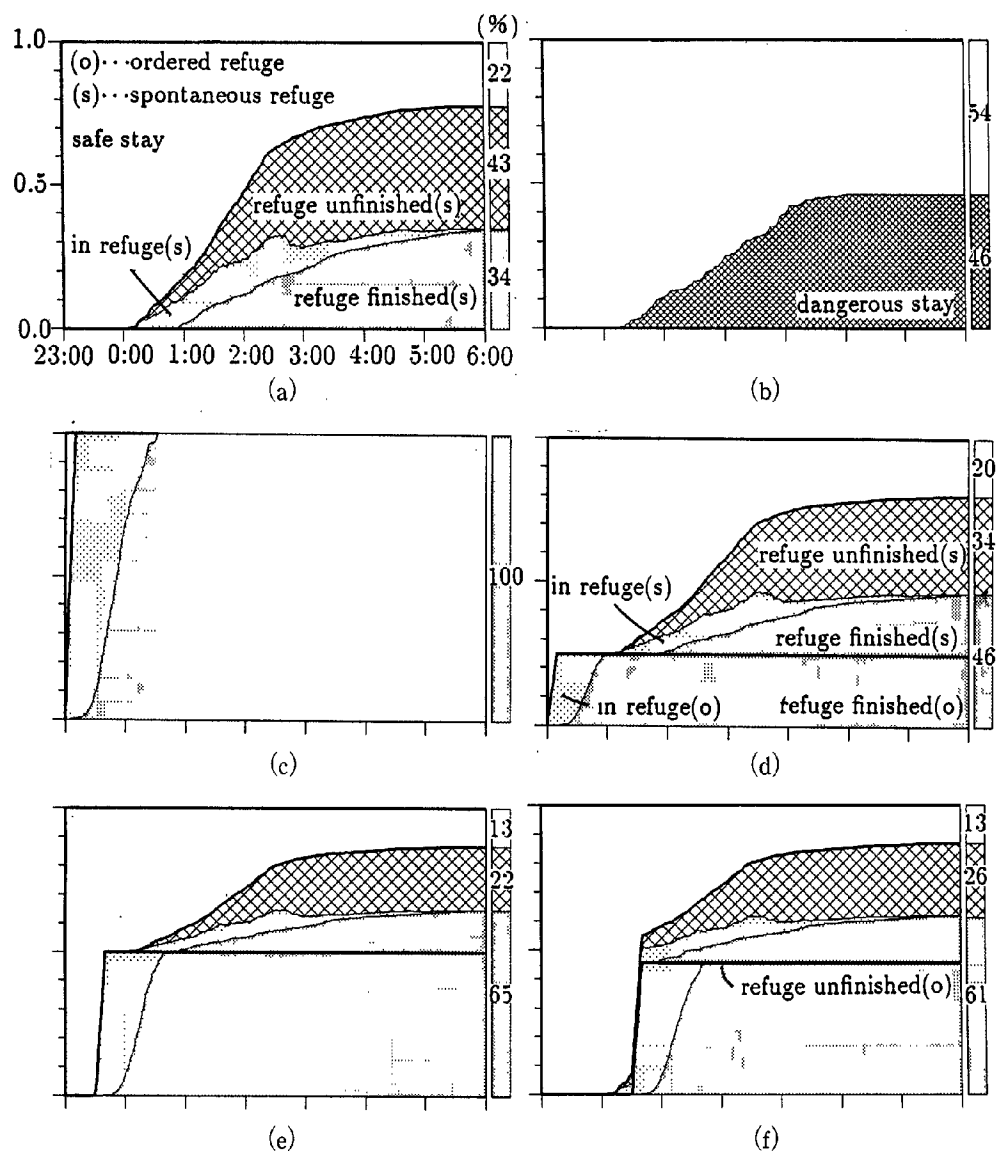


Fig. 15 Temporal change of refuge

(a) $R_{ord} = 0$, $R_{sp} = 2.0$ (b) $R_{ord} = 0$, $R_{sp} = 0$ (c) $t_{ord} = 23:00$, $\Delta t_{ord} = 10$ min., $R_{ord} = 1.0$, $R_{sp} = 1.0$ (d) $t_{ord} = 23:00$, $\Delta t_{ord} = 10$ min., $R_{ord} = 0.25$, $R_{sp} = 1.0$ (e) $t_{ord} = 23:30$, $\Delta t_{ord} = 10$ min., $R_{ord} = 0.5$, $R_{sp} = 1.0$ (f) $t_{ord} = 0:30$, $\Delta t_{ord} = 10$ min., $R_{ord} = 0.5$, $R_{sp} = 1.0$

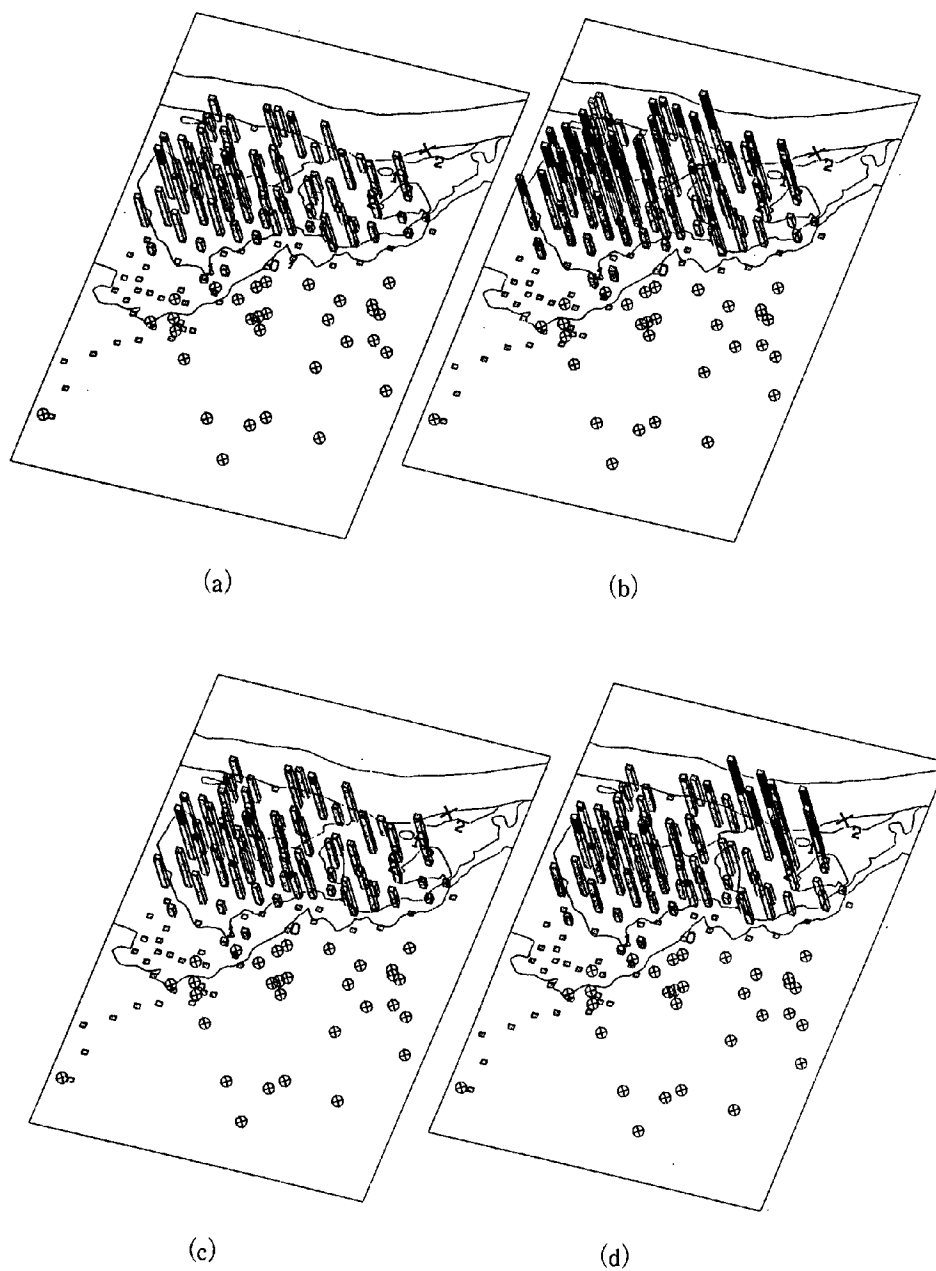


Fig. 16 Refuge unfinished rate at each area

- (a) $t_{ord} = 23:00$, $\Delta t_{ord} = 10 \text{ min.}$, $R_{ord} = 0.5$, $R_{sp} = 1.0$
- (b) $t_{ord} = 23:00$, $\Delta t_{ord} = 10 \text{ min.}$, $R_{ord} = 0.25$, $R_{sp} = 1.0$
- (c) $t_{ord} = 23:30$, $\Delta t_{ord} = 10 \text{ min.}$, $R_{ord} = 0.5$, $R_{sp} = 1.0$
- (d) $t_{ord} = 0:30$, $\Delta t_{ord} = 10 \text{ min.}$, $R_{ord} = 0.5$, $R_{sp} = 1.0$

見られ、破堤点近くの地域の住民にとっては、わずかな発令時刻の遅れが大きな影響を及ぼすといえる。

6. おわりに

本研究は洪水ハザードマップを作成するときに基礎情報の一つになる避難行動に関して、水理学的な氾濫解析に基づいたモデルを提示するとともに、シミュレーション解析によってその特徴を論じたもので、得られた成果を要約すれば以下のようである。

- 1) 洪水氾濫に対する避難を分析する方法論として、避難行動モデルを開発し提示した。
- 2) 避難システム全般を洪水避難の実情に即して分析するため、避難率、避難動機などを考慮して避難シミュレーションを実施した。
- 3) 想定した洪水氾濫区域に適用し、避難ネットワークを構築するとともに、要避難者、指定避難所について検討し、これにより洪水ハザードマップを作成するときの根拠を考察した。
- 4) 浸水が発生していない場合の避難シミュレーションにより、最短避難所に避難する場合と避難所を指定した場合の違いを、避難所の収容能力と避難経路の混雑の面から比較し、避難所指定の必要性を強調した。
- 5) 浸水が発生している場合の避難シミュレーションを、モデルに含まれるパラメータを様々に変化させて実施するとともに、その結果を多変量解析した。避難状況を改善するための要因を検討したところ、強制避難率の向上が効果的なことがわかった。また避難所要時間には、避難開始時差が最も大きく作用する要因であることがわかった。
- 6) 避難シミュレーションの結果より、自主避難では避難未了率が極めて高くなる傾向があることがわかり、自主避難の危険性が知られた。

以上より、避難状況を向上させるには、強制避難率を高めること、また、早い段階で発令することが重要であるといえる。つまり、水工学的技術要因だけでなく、「いつ避難情報を発令すればよいのか」、「どのようにして対象となるすべての人に避難情報を伝えるか」、「避難情報が発令されたとき、どうすればより多くの人が直ちに避難行動をとるようになるか」という行政的要因や水災害に対する一人一人の関心度に依存する要因にも避難状況の向上が大きく懸かっているという結論になろう。

参考文献

- 1) たとえば、高棹琢馬・椎葉充晴・堀 智晴：水害避難行動のマイクロモデルシミュレーションと制御に関する研究，土木学会論文集 No. 509/Ⅱ-30, pp. 15-25, 1995.
- 2) 建設省河川局治水課：洪水ハザードマップ作成要項及び解説書，1994.
- 3) 中川一：氾濫水・土石流の動態とその解析，水工学シリーズ 92-A-9，土木学会水理委員会，1992.
- 4) 日野幹雄：開放境界における波の無反射透過条件の極めて簡単な計算スキームの提案，東京工業大学土木工学科研究報告，No. 38, pp. 33-37, 1987.
- 5) 日野幹雄，仲座栄三：水理境界における新しい“無反射境界”の数値的検討，東京工業大学土木工学科研究報告，No. 38, pp. 39-49, 1987.
- 6) 今本博健・石垣泰輔・大年邦雄：昭 57.7 長崎水害における住民の避難行動について，京都大学防災研究所年報第 26 号 B-2, pp. 127-138, 1983.
- 7) 今本博健・石垣泰輔・大年邦雄：昭 57.8 大和川水害における住民の避難行動について，京都大学防災研究所年報第 26 号 B-2, pp. 139-149, 1983.
- 8) 古林隆：ネットワーク理論，OR ライブラリー 12，日科技連，pp. 47-52, 1976.
- 9) 西原巧：氾濫解析に基づく避難システムの河川工学的研究：京都大学学位論文，1983.

- 10) 東京都市群交通計画委員会：東京 50 km 圏交通調査報告書，技術部会資料，駅前広場編，1972.
- 11) 消防科学総合センター：地域防災データ総覧，地域避難編，1988.
- 12) 建設省土木研究所河川部総合治水研究室：水害時の避難行動に関する調査報告書－緑川水系御船川昭和 63 年 5 月洪水における避難行動－，土木研究所資料 第 2862 号，1990.
- 13) 建設省土木研究所河川部総合治水研究室：水害時の避難行動に関する調査報告書(2)－六角川平成 2 年 7 月洪水における避難行動－，土木研究所資料 第 3098 号，1992.
- 14) 安田三郎・海野道郎：社会統計学 (改訂 2 版)，丸善，pp. 102-109，1977.
- 15) 柳井晴夫・高根芳雄：現代人の統計 2 多変量解析，朝倉書店，pp. 156-161，1984.