

## 高潮ハザードマップと避難対策に関する二・三の検討

武田 誠\*・井上和也・戸田圭一・川池健司

\*中部大学工学部

### 要 旨

本研究では、まず、洪水ハザードマップの概念を湾域都市部の高潮氾濫に適用し、浸水予測図としての高潮ハザードマップを作成した。つぎに、高潮氾濫と避難行動を同時に解析する数学モデルを用いて検討し、避難情報の迅速かつ確実な伝達や防災意識の向上の重要性、浸水後避難の危険性などを示した。最後に、避難情報の伝達手段、避難所の設定、住民意識などの避難状況に与える影響を検討した。

キーワード：高潮氾濫、高潮ハザードマップ、避難行動モデル、避難対策

### 1. はじめに

我が国の多くの大都市は湾域部に位置し、人口および資産が集中しており、これらは、言い換えれば、高潮に対する被害ポテンシャルの増大を招いていることを意味する。よって、とくにわが国の都市においては、防災上高潮対策に関して詳細に検討しておくなければならないといえよう。

従来の高潮対策では、市街地の浸水を防ぐことに主眼がおかれてきた。つまり、設計論的には、計画台風によって発生する高潮に対し、防潮堤・防潮水門などの天端高がある基準に従って定められてきた。しかし、高潮が自然災害である以上、その設計を上回る高潮が発生し、浸水・氾濫が生じる場合を考慮しておくなければならない。それらのすべてに対し、構造的対策を講ずることは、財政や生活質などの面からみて適切とはいえず、したがって構造的（ハード的）対策と併せて避難などの非構造的（ソフト的）対策を充実させておくことが今日的な課題といえる。

ソフト的対策として、まず第一に議論すべきは人的被害を最小限に食い止める避難についてであろう。河川の洪水災害に関しては、浸水予測図に大まかな避難経路を重ね合わせた洪水ハザードマップが整備されつつある。本報では、この考えを湾域都市部の高潮氾濫災害に応用することを試みる。ついで、高

潮氾濫と避難行動を同時に計算するモデルを用いて避難状況の定性的な検討を行い、避難情報発令時刻などの避難状況に与える影響について検討する。最後に、避難情報の伝達手段や避難所の設定、住民意識などの避難状況に与える影響について検討する。

### 2. 高潮ハザードマップの構築

建設省が示した洪水ハザードマップの作成要項(1994)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。本章では、避難情報は考えず、浸水情報のみに限って、洪水ハザードマップの考えを高潮災害に適用する。まず、高潮の氾濫解析モデルについて述べた後、それらを用いた高潮氾濫解析の結果から浸水予測図としての高潮ハザードマップの作成を試みる。

#### 2.1 高潮の解析法

##### (1) 支配方程式と離散化

高潮解析に用いた支配方程式は、以下に示す浅水方程式とする。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} \\ &= -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial P_0}{\partial x} \\ &+ \epsilon_h \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{xz}}{\rho_w} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} + fN \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} \\ &= -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial P_0}{\partial y} \\ &+ \epsilon_h \left( \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sy}}{\rho_w} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} - fM \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $h$ : 水深、 $u, v$ :  $x, y$  方向の流速、 $M, N$ :  $x, y$  方向の流量フラックス ( $M = uh, N = vh$ )、 $H$ : 水位、 $\tau_{xz}, \tau_{sy}$ : 自由水面上でのせん断応力の  $x, y$  方向成分、 $\tau_{bx}, \tau_{by}$ : 水底面でのせん断応力の  $x, y$  方向成分、 $g$ : 重力加速度、 $\rho_w$ : 海水の密度、 $P_0$ : 気圧、 $\epsilon_x, \epsilon_y$ :  $x, y$  方向の渦動粘性係数、 $f$ : コリオリのパラメータ、 $t$ : 時間、 $x, y$ : 直交座標の座標値である。

自由水面上でのせん断応力には、一般に用いられている次式を使用する。

$$\begin{aligned} \tau_{xz} &= \rho_a \gamma^2 W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \\ \tau_{sy} &= \rho_a \gamma^2 W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $\rho_a$ : 空気の密度、 $\gamma^2$ : 自由水面上での抵抗係数、 $W_x, W_y$ : それぞれ自由水面上10mでの  $x, y$  方向の風速である。水底面でのせん断応力は、高潮のように自由水面上に大きなせん断応力が作用する場合、次式(岩垣・樫木, 1982)が用いられる。

$$\begin{aligned} \tau_{bx} &= \frac{\rho_w g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} - k\tau_{xz} \\ \tau_{by} &= \frac{\rho_w g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} - k\tau_{sy} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 $n$ : マニングの粗度係数、 $k$ : 定数(ここでは、 $k = 0.25$ )である。

離散化手法として差分法の陽的解法である Leap-Frog 法を用いる。 $x, y$  方向の差分格子の大きさをそれぞれ  $\Delta x, \Delta y$  とし、未知量は staggered に配置する。すなわち、水位  $H$  および気圧  $P_0$  はコントロールボリュームの上面中心、流速  $u, v$  はコントロールボリュームのそれぞれ  $yz$  面、 $zx$  面の中心、流量フラックス  $M, N$  はコントロールボリュームのそれぞれ  $yz$  面、 $zx$  面の中心で定義する。式(1)~式(3)の離散化について、時間項には前進差分、移流項には保存性を考えて Donor スキーム、他の項には中央差分を適用する。

## (2) 開境界条件と気圧場・風速場の設定

### (a) 開境界条件

開境界条件には、陸域からの反射を考慮した二段階の高潮解析手順(武田・井上ら, 1996)を適用する。

### (b) 気圧場の設定

気圧場には、Schloemer の式を適用する。

$$P_r = P_c + \Delta P \exp\left(-\frac{r}{r_m}\right) \quad (6)$$

ここに、 $r$ : 台風の中心からの距離、 $P_r$ : 台風の中心から距離  $r$  の点における気圧であり、式(2)と式(3)の  $P_0$  と等しい、 $P_c$ : 台風の中心気圧、 $\Delta P$ : 台風の中心気圧低下量、 $r_m$ : 風速が最大となる  $r$  の値(本解析では  $r_m = 60\text{km}$ )である。

### (c) 風速場の設定

本研究では、台風移動にともなって発生する風 ( $V_p$ ) と、気圧傾度による傾度風から換算される地表風 ( $V_s$ ) とのベクトル和で風速場を決定する。まず、台風の進行に伴って発生する、台風進行方向と平行に吹く場の風  $V_p$  を次式で与える。

$$V_p = C_1 v_t \exp(-\beta r) \quad (7)$$

ここで、 $v_t$ : 台風の移動速度である。つきに傾度風  $V_{gr}$  を次式により計算し、その後地表風  $V_s$  に変換する。

$$\frac{V_{gr}^2}{r} + fV_{gr} = \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (8)$$

$$V_s = C_2 V_{gr} \quad (9)$$

ここに、 $C_1, C_2, \beta$  はいずれも実測値との比較によって得られる定数であり、 $C_1$  には  $4/7$  を、 $C_2$  には  $0.6$  を用い、 $\beta$  には宇多・前原・牧野(1994)にしたがひ  $\pi/(400 \times 1000)$  の値を用いた。また、 $V_s$  と  $V_{gr}$  の偏角は  $30^\circ$  とする。

## 2.2 氾濫の解析法

高潮氾濫の要因として、ここでは越流を取り上げ解析モデルを構築する。

### (1) 越流流量

越流流量は、岩佐・井上・水鳥(1980)にしたがひ、本間の越流公式(1971)によって算定する。すなわち、外水位を  $H_r$ 、堤防天端高を  $H_0$ 、堤内水位を  $H_f$ 、越流幅を  $L$  とし、 $h_1 = H_r - H_0$ 、 $h_2 = H_f - H_0$  とすれば、 $h_1 > 0$  かつ  $H_r > H_f$  のときの越流流量  $Q_0$  は、次式で与えられる。

$$h_2/h_1 \leq 2/3 \text{ (完全越流) のとき} \\ Q_0 = \mu L h_1 \sqrt{2g h_1} \quad (10)$$

$$h_2/h_1 > 2/3 \text{ (潜り越流) のとき} \\ Q_0 = \mu' L h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (11)$$

ここで  $\mu$  および  $\mu'$  は、完全越流および潜り越流時の流量係数で、長方形の堰の場合、それぞれ  $0.35$  および  $0.91$  とされている。 $h_2 > 0$  かつ  $H_r < H_f$  のときに生ずる堤内地から堤外地への逆越流の場合にも上式を適用する。

## (2) 氾濫水の解析

氾濫水の挙動の解析には、高潮計算と同様に式(1)~式(3)の浅水方程式を用いる。また、氾濫解析の際に問題となる先端条件については、岩佐・井上・水鳥(1980)にしたがい、フロントの移動限界水深( $h_c$ :本研究では0.001m)を用いて取り扱う。ただし、氾濫水の先端部の水深が移動限界水深より小さい場所では式(10)の完全越流式を用い、また、地盤高の異なる格子が隣接して、地盤の低い格子の水位が地盤の高い格子の地盤より低い、すなわち段落ちの場合には、高い方の地盤の水深 $h_h$ を用いて、次式の段落ち式で流量を与える。

$$Q_0 = \mu'' L h_h \sqrt{g h_h} \quad (12)$$

$\mu''$ は段落ち部のエネルギー水頭に依存する値であるが、ここでは井上(1986)にしたがい一定値 $\mu'' = (2/3)^{3/2}$ を用いている。

## 2.3 計算領域と計算条件

本研究の計算領域は、高潮計算を行う計算領域I( $\Delta x = 1431.25, \Delta y = 1153.125$ )と氾濫計算も同時に行う計算領域II( $\Delta x = 286.25, \Delta y = 230.625$ )および計算領域III( $\Delta x = 57.25, \Delta y = 46.125$ )である(Fig.1)。計算は、まず計算領域Iで行い、つぎに計算領域II、IIIと逐次進行する。この際、計算領域Iの開境界値には高潮解析手順で得られた値を用いるが、計算領域IIでの開境界値には、計算領域Iの計算において算出した計算領域IIの開境界部に相当する水理量を用いる。計算領域IIIでの開境界値も同

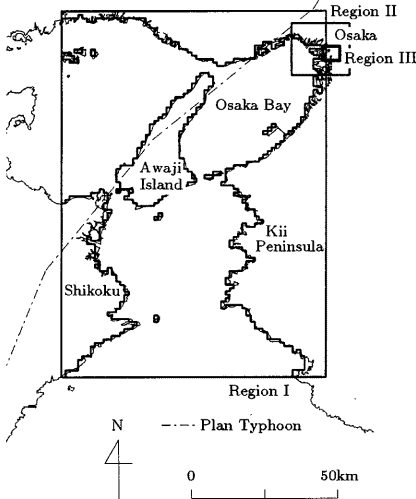


Fig.1 Computational regions

様にして計算領域IIの結果より求める。

対象とした台風は大阪市の高潮対策で想定されている計画台風(室戸台風コース、伊勢湾台風規模(中心気圧929.5hPa))であり、大阪における最大高潮偏差発生時刻と満潮時とが一致するように設定している。ただし、中心気圧については、陸上通過にともなう台風勢力の減衰を考慮して、上陸後は次式に従って中心気圧の低下量を上昇させることとした。

$$\Delta P_a = \Delta P \exp(-a_1 t_1) \quad (13)$$

ここに、 $\Delta P_a$ は上陸後の中心気圧の低下量、 $\Delta P$ は上陸時の中心気圧低下量、 $a_1$ は減衰の割合を示すパラメータで、西日本では $a_1 = 0.084[1/h]$ が平均値とされており(藤井・光田, 1985; 藤井・光田, 1986)、 $t_1$ は上陸後の経過時間(hour)である。上陸時刻は、台風中心が室戸岬付近を通過することから、北緯33°を通過する時刻とした。計算時間は、1996年9月16日0時~17日22時までとした。それによると、大阪の最大潮位発生時刻は17日8時頃となる。

また、堤防高には現在の計画堤防高を与えている。

## 2.4 高潮ハザードマップ

Fig.2にここでの対象領域を示す。この領域は、大阪市港区と西区に属しており、大阪市のなかでも大阪湾寄りに位置する地盤高が低い領域である。ゆえに大阪市が高潮被害を受けるとすれば、かなり高い確率で被害に遭うと考えられる領域である。

まず、計画台風の来襲による高潮潮位をFig.3に示す。これによると、大阪築港における最高潮位はおよそT.P.+4.0mである。以後の検討ではFig.3のような高潮を対象とする。

ハザードマップ作成の計算では、まず、計算領域に存在する防潮堤が、Fig.4のように、ほぼ等間隔に18カ所において破堤すると想定する(18カ所同

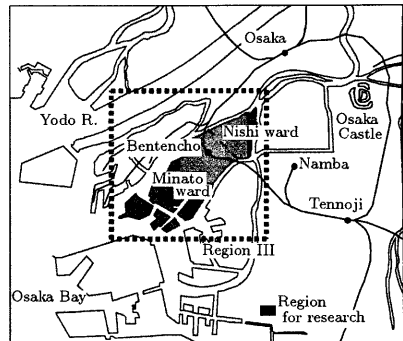


Fig.2 Region III

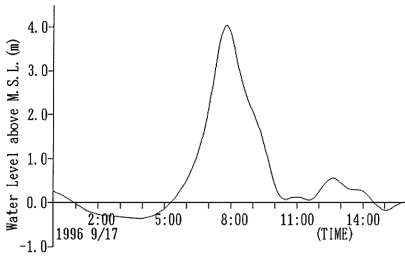


Fig.3 Tide level

時に破堤するのではなく、1カ所の破堤ごとに一回の氾濫解析を行う)。そして、その結果から、それぞれの破堤における氾濫特性を検討するとともに、得られた18ケースの最大浸水深を包絡して高潮ハザードマップとする。

計算結果の例として、Fig.4に3つのケースの最大浸水深図を示す(破堤想定位置の番号とケースの番号は一致させている)。ケース14では、破堤点が大坂湾寄りであるにもかかわらず、取り扱った領域

の北端付近まで氾濫が広がっている。また、ケース18では、氾濫は地盤高が低い北方へ広がっており、その面積はケース14と比べて小さい。つぎに、各ケースにおける氾濫面積および氾濫水量をFig.5に示す。これによると氾濫面積、氾濫水量には解析ケースによるばらつきが見られる。これは、氾濫水量は主に潮位と破堤力所の地盤高との関係に依存し、また、氾濫面積は氾濫域の地盤高の分布に依存しているためと考えられる。このように、氾濫の状況は破堤箇所によりずいぶん異なることが分かる。

つぎに、氾濫水の住民に対する影響という観点から、浸水域の人口(ただし、避難はないとする)を求めたのがFig.6である。これとFig.5とを合わせて見ると、浸水を受ける人口は氾濫面積と比較的高い相関があることが認められる。これは、対象とした領域の人口密度がほぼ同様であることによるものと考えられる。また、1m以上の浸水(危険な浸水)を受ける人数は氾濫水量と強い相関があることも認められる。それは浸水深が大きいということは、流入してくる水量も大きいということであるから、当

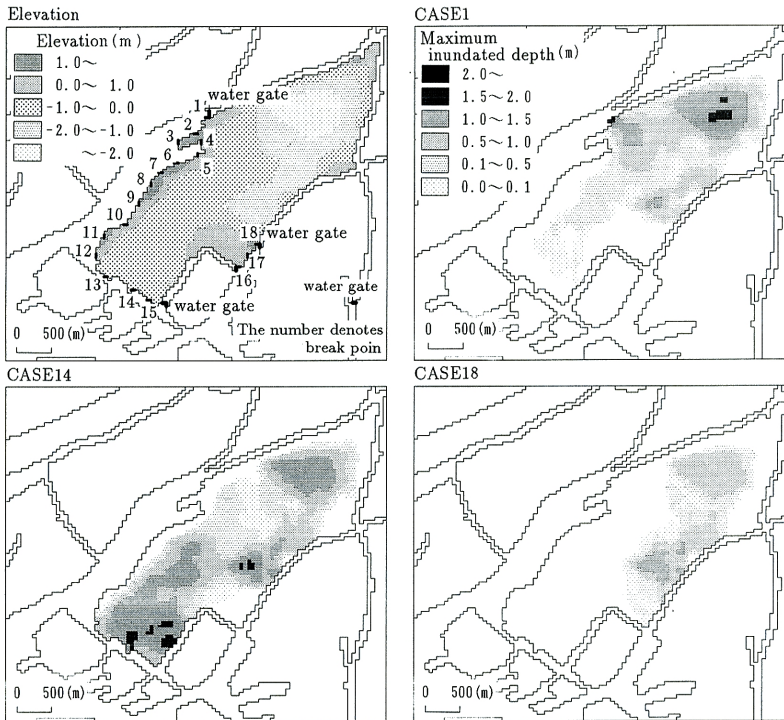


Fig.4 Inundated depth distribution



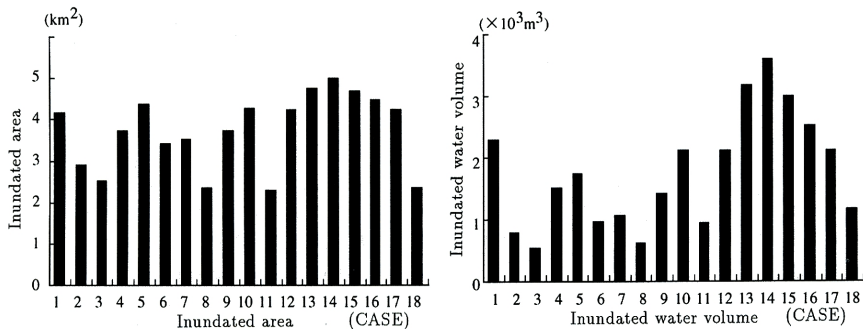


Fig.5 Inundated area and water volume

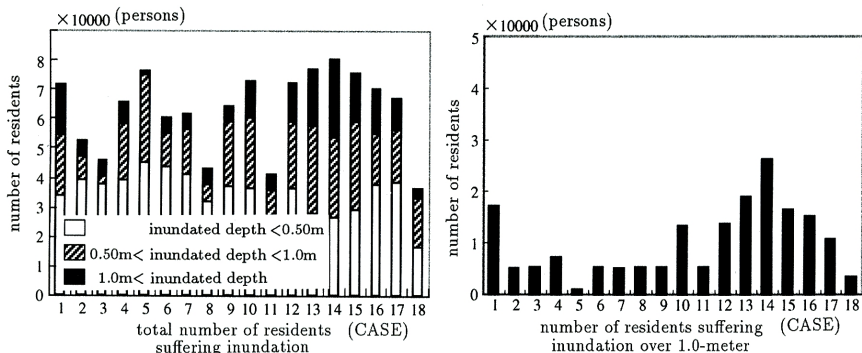


Fig.6 Number of residents suffering inundation

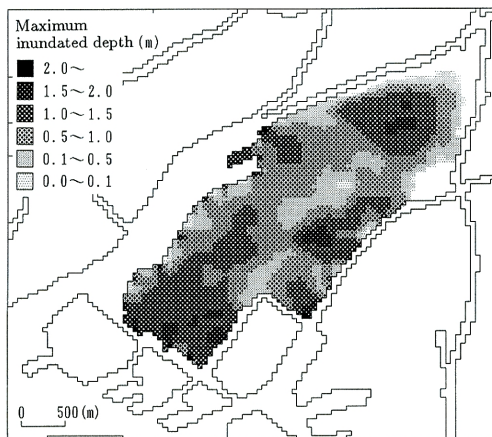


Fig.7 Flood hazard map due to storm surge

然の結果といえる。

最後に、すべてのケースの最大の浸水深を包絡した最大浸水深図が Fig.7であり、これが高潮浸水に関するハザードマップである。この図から、仮に氾濫が生じた場合の危険な箇所が面的に把握でき、高

潮対策の構築にとって有用な情報を得ることができよう。また、同時にこのように防潮堤で囲まれた地域で破堤が起これば、浸水の状況は極めて厳しいものになることも知られる。

### 3. 高潮氾濫と避難

洪水ハザードマップにはおおまかな避難経路が記載されている。しかし、前章では、避難経路については取り扱わなかった。これは、どのような避難場所や避難経路が適切であるかといった問題を取り扱う前に、避難の状況およびその対策について詳細に検討する必要があると考えたからである。そこで、本章では、高潮氾濫と避難行動とを同時に解析する数学モデルを作成し、シミュレーション解析により避難行動や避難対策を考察する。

#### 3.1 避難行動のモデル化

井上ら(1996)にならって高潮氾濫時の住民の避難行動をモデル化する。

##### (1) 避難行動モデル

ここで、以下の仮定を設ける (Fig.8 参照)。

- 住区内の住民をさらに細分割した住民の集団(以下、住民ユニット)を考える。住民ユニットは20人程度の規模である。この住民ユニットを避難行動モデルにおける最小単位とみなし、住民の避難行動は住民ユニットの点的な移動であるとする。なお、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。また、住区の図は後述するノードの一つであり、ここに複数の住民ユニットが配置されていると考える)。
- 住民ユニットは、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ものとし、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。

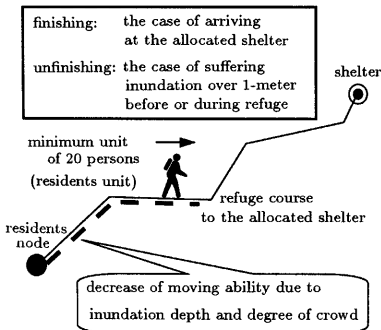


Fig.8 Refuge model

- 住民が指定避難所に到達した時点でその住民ユニット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、住民ユニットの存在地点の浸水が1mを越えた時点で、その住民ユニット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。

つぎに、避難行動モデルを構成するサブモデルを説明する。なお、本研究では、破堤時刻を基準としているので、避難情報発令時刻は破堤時刻からの時間(避難情報発令時差とする)として取り扱う。

##### (a) 最短距離問題としての避難経路

住民ユニットの避難の開始について、強制避難と自主避難の二つの動機を考える。ただし、強制避難とは、避難勧告や避難命令(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、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。

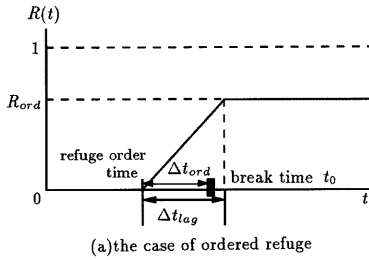
強制避難では、避難開始率  $R$  は、避難情報発令時差を  $\Delta t_{ord}$ 、避難開始時差を  $\Delta t_{lag}$ 、強制避難指数を  $R_{ord}$  とするとき、時間  $t$  の関数として次式で定義する (Fig.9(a))。

$$R(t) = \begin{cases} 0 & (t < t_0 + \Delta t_{ord}) \\ \frac{t - \Delta t_{ord}}{\Delta t_{lag}} \cdot R_{ord} & (t_0 + \Delta t_{ord} \leq t < t_0 + \Delta t_{ord} + \Delta t_{lag}) \\ R_{ord} & (t \geq t_0 + \Delta t_{ord} + \Delta t_{lag}) \end{cases} \quad (14)$$

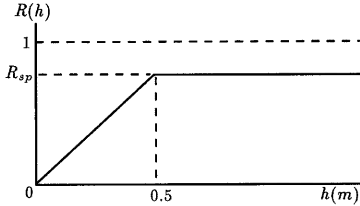
ただし、 $t_0$  は破堤時刻 ( $t_0 = 0$ ) である。ここでは対象領域全体にわたって  $t_0 + \Delta t_{ord}$  の時間に一斉に何らかの命令・情報が発令され、伝達されるものと考ええる。また、 $\Delta t_{ord}$  は避難情報の発令者である行政に依存するパラメータであるが、 $\Delta t_{lag}$  は、情報を受け取ってから住民が行動を開始するまでの時間と考えており、住民に依存するパラメータである。 $R_{ord}$  は、 $t \geq t_0 + \Delta t_{ord} + \Delta t_{lag}$  (強制避難最終時間とする) における避難開始率であって、住民に避難情報が伝わる割合や住民の災害意識により変化すると考えられ、行政、住民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  $h$  (m) の関数として次式で定義する (Fig.9(b))。

$$R(h) = \begin{cases} \frac{h}{h_0} \cdot R_{sp} & (h < h_0) \\ R_{sp} & (h \geq h_0) \end{cases} \quad (15)$$



(a) the case of ordered refuge



(b) the case of spontaneous refuge

Fig.9 Refuge starting function

$R_{sp}$ は浸水深が $h_0$ になったときの避難開始率である。 $h_0$ は $R = R_{sp}$ になる水深(自主避難水深とする)であり、ここでは $h_0$ に0.5mという値を採用する。それは、避難ができなくなる水深を前記のように1mとしているため、浸水深が0.5m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。ここでの検討では、自主避難水深が0.5mより小さい場合(浸水深が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 $R_{sp}$ を1.00以上にすることも行っている。例えば $R_{sp}$ を2.00としたとき、式(15)によれば、自主避難水深は実質的に0.25mと変更できる。ただし、 $R(h) > 1.00$ の場合には、 $R(h) = 1.00$ とする。

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する。すなわち、全ての住民ユニットに避難動機(強制, 自主)別にあらかじめ乱数値( $RD_1$ ,  $RD_2$ )を与え、避難開始率がそれらの値を上回れば避難を開始するとしている。

#### (b) 最短経路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する。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。

#### (c) 移動能力の低下

氾濫時の避難行動における移動能力の低下の要因として、浸水深の増加と避難経路の混雑を考える。浸水深の増加に関しては、西原(1983)が提案している換算距離の方法を用いる。まず、浸水深による移動能力の低減率 $w$ を浸水深 $h$ の関数としてつぎのように定義する。

$$w(h) = \begin{cases} 1 - h/h_{fa} & (h < h_{fa}) \\ 0 & (h \geq h_{fa}) \end{cases} \quad (16)$$

ただし、 $h_{fa}$ は、避難行動が不可能になる水深であり、ここでは1mとしている。この低減率 $w$ から $\alpha = 1/w$ を求め、浸水している避難経路の長さを $\alpha$ 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。

経路の混雑に関しては、住民ユニットの移動速度を、避難経路内の住民ユニットの密度(群衆密度)の関数とすることにより表現し、本モデルでは西原(1983)が用いている次式を採用する。

$$v = \begin{cases} 1.42 - 0.241\rho_p & (\rho_p \leq 3.85 \text{ 人/m}^2) \\ 0.49 & (\rho_p > 3.85 \text{ 人/m}^2) \end{cases} \quad (17)$$

ここで $v$ は歩行速度(m/sec)、 $\rho_p$ は群衆密度(人/m<sup>2</sup>)である。

#### (d) 避難ネットワークと避難行動シミュレーション

避難ネットワークは、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である。避難を開始した住民ユニットは、その住民ユニット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。ただし、リンクの長さ(経路長)はその時間で浸水状況に応じて換算される。目的地までの距離(換算距離)がその時間ステップ内の移動距離より短くなった場合、その住民ユニットは目的地(指定避難所)に到着したとみなし、この時点でその住民ユニットの避難が完了したとする。

### 3.2 要避難地域の設定および避難ネットワーク

要避難地域は、2.4の結果を考慮して、Fig.10で示した領域とする。この要避難地域の面積は約6.4km<sup>2</sup>で、人口は約11万人である。この要避難者を411の住区にそれぞれ配分する。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言われている。ここで対象としている領域(大阪市の港区・西区)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高層住宅に住む人は要避難者には含まないものとする。それゆえ、要避難者は約8.2万人とする。

避難経路のネットワークは、411の住区と22カ所の避難所および571カ所の交差点をそれぞれノード

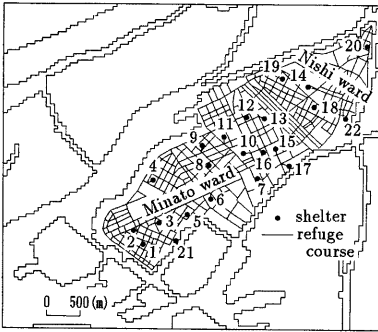


Fig.10 Refuge network

とし、948本の主要道路と住区あるいは避難所と交差点を結ぶ細道路をリンクとして構成する。主要道路の幅員は、1/2500の地図から読みとった値を用い、細街路の幅員は全て4mとする。なお、上記の避難所は大阪市の地域防災計画（1993）で指定されているものを用いている。

また、避難所の指定は、つぎのように実施する。まず始めに、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人数を超えない。
- 同じ避難所に指定された区の間で、避難距離に著しい不均衡が生じない。
- 平均避難距離をできるだけ短くする。

住区から避難所までの距離は最短経路から算出された距離を用い、避難所の収容人数は、大阪市地域防災計画（1993）の一時避難可能人員を用いる。これより、収束したと判断した避難所指定を採用する。

### 3.3 避難行動に関する要因の影響評価

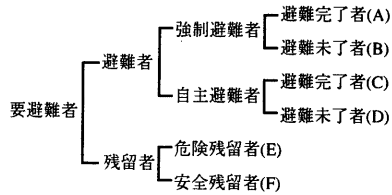
本節では、避難に関係する要因（避難情報発令時差、避難開始時差、住民の危険意識度など）のうちで、避難を安全に遂行するための最も重要なものはどれであるのかを検討する。避難シミュレーションに用いたパラメータおよび計算条件をTable 1に示す。計算は、全ての要避難者が避難を完了した場合か、あるいは破堤後6時間で終了させるものとする。なお、想定破堤点には2.4の検討結果からケース14を選定している。その他のパラメータに関しては、表に示した値を組み合わせて、1015通り（全ての組み合わせのうち、 $R_{ord} = 0.0$ かつ $R_{sp} = 0.0$ のときを除いた組み合わせ）の解析を行っている。

ここで、要避難者の避難行動の結果を以下のように分類する。避難者とは避難行動をとった者であり、

Table 1 Parameters used in the refuge simulation(1)

break time	0
break point	CASE 14
$\Delta t_{ord}$ (min)	-30 -20 -10 0 10 20 30
$\Delta t_{tag}$ (min)	0 5 10 20 30
$R_{ord}$	1.00 0.75 0.50 0.25 0.00
$R_{sp}$	2.00 1.00 0.75 0.50 0.25 0.00

避難の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1mを超える水深を経験したものを避難未了者（BおよびD）とする。また、残留者とは避難行動をとらなかった者とし、1mを超える浸水を経験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。このような分類から、 $T = A + B + C + D + E + F$ として、避難完了率を $(A + C) / T$ 、避難失敗率を $(B + D + E) / T$ と定義する。



これらを詳細に検討するために、すべての避難シミュレーションの結果に林の数量化理論I類を適用して多変量解析を行う。この理論は、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あり、また、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）を比較すれば外的基準の決定にかかわる要因の影響度を知ることができる。

Table 2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。避難完了率に対する影響度の大きさは、強制避難指数、自主避難指数、避難情報発令時差、避難開始時差の順となっている。強制避難指数は、避難情報の伝達の度合いと、情報を受け取った住民のうちの避難行動を起こす割合と関係の深いパラメータと考えられるので、避難完了率を向上させるためには、強制避難指数を高める、すなわち、避難情報の確実な伝達と、住民の危険意識度を向上させるような対策が必要であるといえよう。

つきにTable 3は、外的基準として避難失敗率を

Table 2 Refuge finished rate

external criteria		refuge finished rate		
number of individuals	1015	correlation coefficient	.949	
property	category	score	range	
refuge order time difference (min)	-30		7.6	
	-20			
	-10			
	0			
	10			
	20			
refuge start time difference (min)	0		1.5	
	5			
	10			
	20			
	30			
ordered refuge index	1.00		55.1	
	0.75			
	0.50			
	0.25			
	0.00			
spontaneous refuge index	2.00		25.1	
	1.00			
	0.75			
	0.50			
	0.25			
0.00				

Table 3 Refuge unfinished rate

external criteria		refuge unfinished rate		
number of individuals	1015	correlation coefficient	.941	
property	category	score	range	
refuge order time difference (min)	-30min		7.6	
	-20min			
	-10min			
	0min			
	10min			
	20min			
refuge start time difference (min)	0min		1.5	
	5min			
	10min			
	20min			
	30min			
ordered refuge index	1.00		17.7	
	0.75			
	0.50			
	0.25			
	0.00			
spontaneous refuge index	2.00		5.1	
	1.00			
	0.75			
	0.50			
	0.25			
0.00				

とったときの結果である。避難失敗率に対する影響度の大きさは、強制避難指数、避難情報発令時差、自主避難指数、避難開始時差の順となっている。このことから、避難失敗率を減少させるには強制避難指数の向上が最も有効であることが分かる。また、避難完了率と比較して相対的に避難情報発令時差の影響が大きくなっている。したがって、上記と同様に、確実な情報伝達、住民の危険意識の向上とともに、破堤前に避難情報を発令することによって避難失敗者を減少させることができると考えられる。また、両方の表をみると、浸水してからの避難情報の発令（避難情報発令時差が正の場合）は、避難成功率を減少させ、避難失敗率を増加させている。これらのことから、浸水を見てからの避難は総じて危険であることが知られる。

#### 4. 解析モデルの検証

今本ら（1983a, 1983b, 1989）は、1982年の長崎水害および大和川水害、1988年の島根・広島水害について、被災地の住民を対象にほぼ同一様式のアンケート調査を実施し、避難行動の実態を分析している。ここでは、それらをもとに、本研究の避難行動モデルとの定性的な比較を行う。

まず、強制避難指数に相当する記述を抽出すると、今本らは「避難者の過半数は避難命令によるもので

あり、避難命令の重要性が認識された（1983b）」「避難率が増加した原因についてみると、避難命令による避難の貢献が最も大きく、勧誘避難のものがこれに次いでいる（1983b）」ことなどを見いだしており、これは強制避難指数が避難状況に最も影響を及ぼすとする本研究の結果に相当している。

また、避難伝達に関する記述には、今本らは「水害による人的被害を軽減するうえで最も重要な情報である避難命令については、長崎では発令そのものが遅れたうえに伝達の悪さがみられ、住民の避難行動が大して有効性を発揮していない（1983a）」「住民が水害時に適切な警戒行動を実行するには、平常時から防災意識を高めるとともに、水害情報を早く伝達することが重要である（1989）」「危険地内の住民を水害が発生する前に避難させるには、避難命令を早期に伝達することが最も重要であって、平常時の防災活動により水害への危険性を周知徹底させることも必要である（1989）」ことなどを指摘しており、本研究で得られた避難情報の早期伝達が重要であるという見解と一致する。

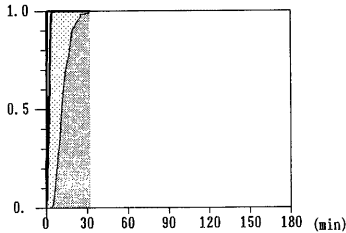
このように、避難解析による結論とアンケート調査の結果は、いずれも当然のこととはいえ定性的に一致している。むしろ、このような当たり前のことが、ややもすれば等閑に付されていることが大きな問題であると言えよう。



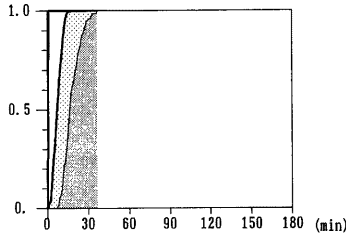
は情報伝達の度合いを表すパラメータであり、 $R_{ref}$ は情報を聞いた住民が避難する割合に関するパラメータである。ここでは情報を受け取った住民はすべて避難すると仮定 ( $R_{ref} = 1.00$ ) し、 $R_{ord}$ は $R_{com}$ のみに依存すると考える。このような避難開始のモデル化はFig.11のように表される。この図の避難情報伝達時間は伝達手段（ここでは、サイレン、広報車、口コミ）によって異なり、 $R_{ord}$ は情報伝達の確実性の度合い ( $R_{com}$ ) によって異なる。これらを変化させて解析を行うことで、情報伝達の速さと確実性とが避難状況に与える影響を検討する。

自主避難については、避難開始率 $R$ を、浸水深 $h$ (m)の関数とし、3.1の自主避難と同様に考える。ただし、建設省土木研究所のアンケート調査(1990)に

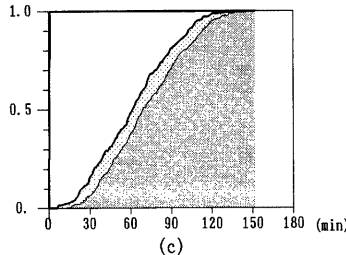
	transmission medium	mean refuge time
(a)	siren	→
(b)	PR car	→
(c)	word of mouth	←



(a)



(b)



(c)

Fig.12 Temporal change in designed refuge

Table 4 Parameters used in the refuge simulation(2)

	transmission medium	refuge index	
		ordered refuge index	spontaneous refuge index
(a)	siren	1.00	0.50
(b)	PR car	1.00	0.50
(c)	word of mouth	1.00	0.50
(d)	siren	0.50	0.50
(e)	PR car	0.50	0.50
(f)	word of mouth	0.50	0.50

より、自主避難指数  $R_{sp}$ は0.50とし、自主避難水深を1.20mとする。

(2) 結果および考察

浸水を考慮しない計画避難の避難状況を Fig.12 に示す。情報伝達の条件は、サイレンのみ、広報車のみ、口コミのみによる伝達手段を考え、対象となる住民に確実に情報が伝達される ( $R_{ord}=1.00$ ) とする。それによると、住民ユニットの平均避難時間(住民ユニットの避難に要した時間の平均値)はそれぞれのケースによってほぼ相違はないことが分かる。しかし、サイレンと広報車による伝達では、最終的な避難の完了時間にそれほど大きな差はみられないのに対して、口コミによる伝達では、サイレン、広報車の場合と比べて最終的な避難完了までにはかなりの時間を要している。

つぎに、浸水がある場合を考える。ここでは破堤箇所は2.4のケース14とし、破堤と同時に避難情報が発令されるとする。計算条件を Table 4 に示す。(a), (b), (c)はそれぞれサイレン、広報車、口コミのみによる伝達であり、対象となる住民に確実に情報が伝達される ( $R_{ord} = 1.00$ ) としている。また、情報を伝達する場合、伝達速度のみが問題になるのではなく、確実性も重要な問題となる。そこで、避難情報が要避難者の50%に相当する住民にしか伝達されなかった場合を想定し、 $R_{ord}$ を0.50にしたときの解析((d), (e), (f))も行っている。

解析結果の避難状況を Fig.13 に示す。まず、 $R_{ord} = 1.00$  の場合には、情報伝達速度の速いサイレンと広報車との間にそれほど大きな避難状況の差はみられないが、口コミの場合には避難完了までに要する時間が長く、最終的な避難状況も他の2ケースと比較して悪くなっている。この結果から、避難情報はなるべく早く住民に伝達されることが望ましいといえる。また、口コミなどにまかせて行政の伝達措置が施されていない場合には危険な状況が予想されるため、サイレンや広報車などの情報伝達方法の確立が必要であろう。

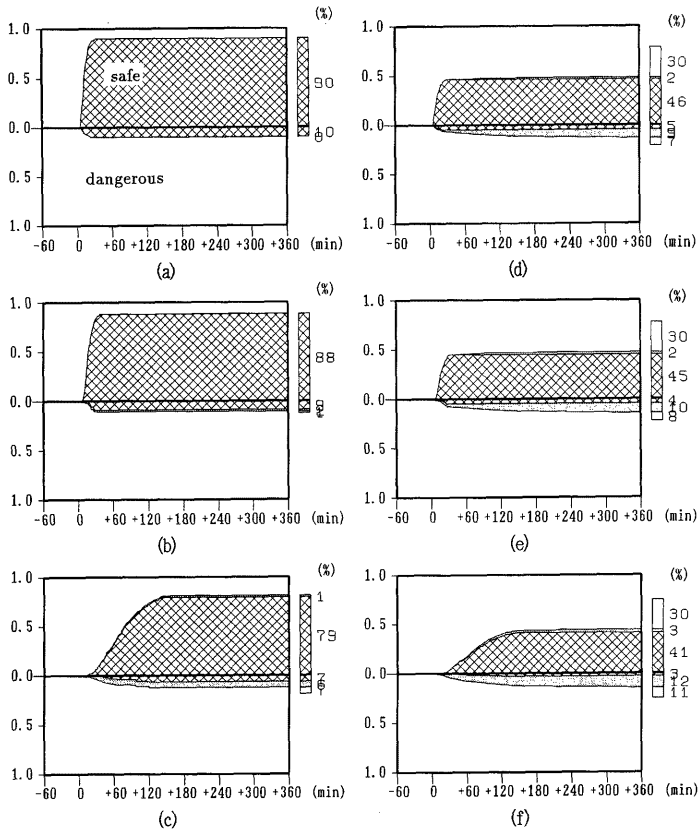


Fig.13 Temporal change of refuge

また、 $R_{ord} = 0.50$ の場合には、サイレン、広報車、口コミの順で避難成功率が減少しているが、それらの差は $R_{ord}$ が1.00のときほど顕著ではない。

つぎに、 $R_{ord}$ の影響について $R_{ord}$ が0.50の場合と1.00の場合とを比較する。 $R_{ord}$ が0.50の場合の避難状況は、 $R_{ord}$ が1.00の場合と大きく異なっているが、これは情報を受けて避難する住民を50%と仮定しているためである。最終的な避難状況を比較すると、 $R_{ord}$ を0.50とした場合は、 $R_{ord}$ を1.00とした場合よりも避難成功率は減少しており、伝達手段の違いによる影響よりも $R_{ord}$ の影響の方が大きいことが分かる。よって、情報伝達の確実性は重要な課題であるといえるだろう。

## 5.2 避難所の設定

避難対策の中で、避難所の設置や指定は重要であると考えられる。これまでの検討においては、「既存の避難所の収容人数が超過しないこと」、「すべての住民ユニットを対象とした平均避難距離が短くなること」、そして「住民ユニットの避難距離に不均衡が生じないこと」に留意して、避難所の指定を行っている。ここで、地区別避難距離をFig.14に示す。この図から、本研究における避難所設定では西区の住民の避難距離が長くなっていることが分かる。本節では、その避難距離を削減するような改善策を考える。

### (1) 避難所設定

改善案として、既存の避難所の収容人数を割増しすることによって拡張する場合と、仮定の避難所を新設する場合を考える。拡張する場合として、



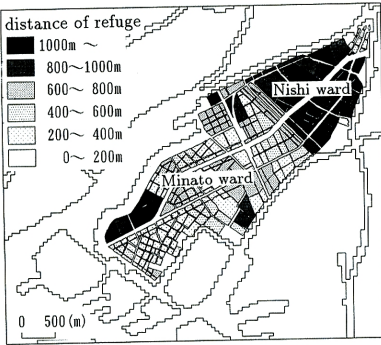


Fig.14 Distance of refuge

- 西区内にある5カ所の避難所の収容人数を5割増(+3753人)
- 西区内にある5カ所の避難所の収容人数を10割増(+7505人)

の2ケースを考える (Fig.10 参照)。また、新設する場合として、

- 西区内に1カ所 (収容規模 3753人)
- 西区内に1カ所 (収容規模 7505人)

の2ケースを考える。よって、解析ケースには、現状の指定避難先に避難する場合、避難所の収容人数を考慮せず最短避難先に避難する場合を加え、避難所の設定には6ケース、破堤箇所には2ケースの組み合わせ (12ケース) を考えている (Table 5 参照)。本節でも 5.1 と同じモデルを使用することとするが、情報の伝達手段は、最悪の状況を想定して、口コミのみによる伝達を考え、情報は途中で障害なく伝わり、かつ情報を受け取った住民は直ちに避難を開始する ( $R_{ord} = 1.0$ ) とする。また、情報の発令は破堤時刻と同時とする。

## (2) 結果および考察

まず、浸水がない場合を考える。Table 5 にそれぞれの平均避難時間を示す。この表より、避難所の収容人数を増設するにしたがい、平均避難時間は減少していることが分かるが、顕著な改善はみられない。Table 5 の傾向から、避難所の数をさらに増やしていけば避難状況は改善する方向に向かうことが予想されるが、そのような事は現実性に乏しい。よって現実には、上記のように避難所の設定の変更による平均避難時間の顕著な改善は見込めないことが分かる。

つぎに、浸水がある場合を考える。破堤箇所は、Fig.4 を参考に最も西区内に浸水の影響を及ぼすと考えられるケース 1 を取り上げる。まず、避難所を拡

Table 5 Cases for analysis

	break point	shelter	mean refuge time
(a)	1	existing	-----●-----
(b)	1	nearest	-----●-----
(c)	1	expansion (50% increasing)	-----●-----
(d)	1	expansion (100% increasing)	-----●-----
(e)	1	newly-established (50% increasing)	-----●-----
(f)	1	newly-established (100% increasing)	-----●-----
(g)	17	existing	-----●-----
(h)	17	nearest	-----●-----
(i)	17	expansion (50% increasing)	-----●-----
(j)	17	expansion (100% increasing)	-----●-----
(k)	17	newly-established (50% increasing)	-----●-----
(l)	17	newly-established (100% increasing)	-----●-----

0 10 20(min)

張した場合を考える。地区別避難失敗率を Fig.15(c),(d) に示すと、西区内の避難状況は現状と比較してほとんど改善されていないどころか、その周辺地域で避難状況の悪化がみられる。したがって、避難距離の短縮が、直接、避難失敗率の低下には結びつかないということが分かり、それは避難経路の問題が絡んでくるためと考えられる。

つぎに、避難所を新設した場合を考える。地区別避難失敗率を Fig.15(e),(f) に示すが、この図より新設 (5割増) の案では現状と比較して全く改善がみられないのに対し、新設 (10割増) の案では、若干の避難状況の改善がみられる。しかし、全体的な傾向としては大きな避難状況の改善とはいえない。

また、ケース 1 のみでは破堤箇所の特徴が影響することも考えられるので、ケース 17 でも同じ解析を行ってみたが、全く同様の結果が得られた。

避難所を拡張あるいは新設しても、破堤箇所の違いにより避難状況が悪化する場合があったことから、避難距離の短縮がすべての場合において避難状況の改善につながるとは限らないことが分かった。また、避難所の拡張あるいは新設により避難状況の改善がみられる場合でも、それほど顕著な効果となっては現れないことも分かった。したがって、避難距離を短くするような避難所の検討は必要であるが、現実の問題として考えるとき、まず第一には、浸水がない場合の避難の完了を目指すべきであることが改めて

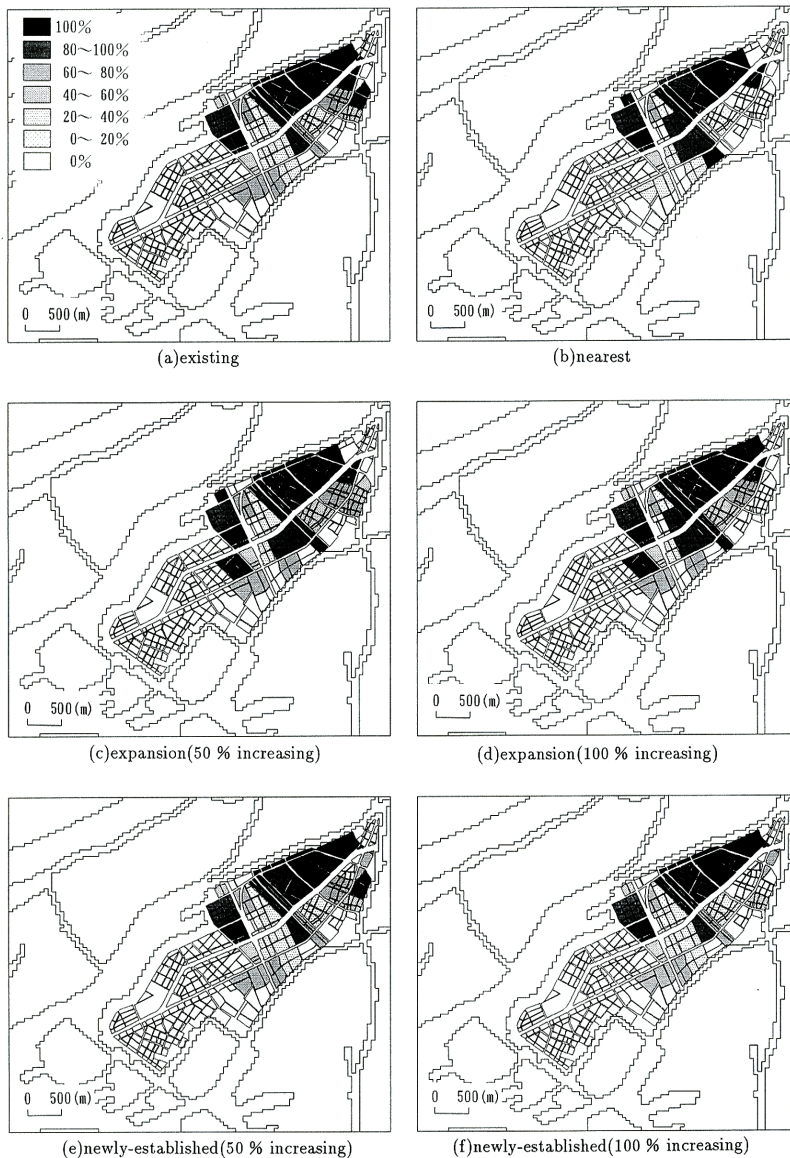


Fig.15 Refuge unfinished rate by residence block

確認される結果となった。

### 5.3 避難行動における住民の危険意識の影響

これまで、行政的な立場から避難対策を検討してきた。しかし、実際の避難時には、行政的対応の

みではなく、住民の危険意識も重要となってくる。そこで、3.1で示された強制避難、自主避難の避難開始率を決定する4つのパラメータのうち、住民の危険意識が関係する強制避難指数、自主避難指数、避難開始時差を取り上げ、それらを住民の危険意識の

関数と再定義して、その大小による避難状況の影響をみることにする。

(1) 危険意識のモデル化

危険意識度  $R_{con}$  は 0.0 ~ 1.0 までの値とし、1.0 に近いほど危険に対する認識が高いとする。そして以下に示す各パラメータを危険意識度の関数として定義する。

(a) 強制避難指数

ここでは、避難情報は確実に要避難者に伝達される ( $R_{com} = 1.00$ ) とし、強制避難指数を、情報を受け取ってから住民が避難する割合のみに関係するパラメータと考える。危険意識度が 0.0 のときの強制避難指数を 0.50 とし、1.0 のときには全員が避難を開始する ( $R_{ord} = 1.00$ ) と仮定する。

$$R_{ord} = 0.50 + 0.50 * R_{con} \quad (19)$$

(b) 自主避難指数

自主避難は浸水から危険を感じて避難を開始するのであるから、全面的に危険意識度に依存すると仮定する。

$$R_{sp} = R_{con} \quad (20)$$

(c) 避難開始時差

危険意識度が 0.0 のときには情報を受けて 10 分後に避難を開始し ( $\Delta t_{lag} = 10$ [分])、1.0 のときには瞬時に避難を開始する ( $\Delta t_{lag} = 0$ [分]) と仮定する。

$$\Delta t_{lag} = 10.0 - 10.0 * R_{con} \quad [\text{分}] \quad (21)$$

避難情報の発令に関しては、避難開始時差が最大で 10 分となることと、平均避難所要時間が約 10 分

となることから、最も浸水の影響が見られると思われる破堤 10 分前に設定した。また、破堤箇所にはケース 14 を考えた。

(2) 結果および考察

最終的な解析結果のみを抜き出したものを Fig.16 に示す。それによると、避難情報を受け取って強制避難を開始した住民はほぼ避難を完了していることが分かる。逆に避難失敗者のなかでは危険残留者の割合が目立つ。これは、危険に対する認識が低く楽観視していたために、避難情報を受け取っても浸水がきて避難を開始せずに残留し、その結果危険残留者となったと考えられる。これらにより、危険意識度が高いケースほど避難状況が良くなっていることは明らかである。このように、安全な避難行動にとって住民の危険意識の向上は重要であり、そのためには行政の活動として住民の危険に対する意識を向上させようとする取組みが望まれる。

6. おわりに

得られた知見をまとめると以下のようである。

- 洪水ハザードマップの概念を高潮氾濫に適用し、浸水予測図としての高潮ハザードマップを作成した。また、氾濫特性についても考察を行い、破堤箇所の相連により、氾濫の様相がかなり異なることが知られた。
- 高潮氾濫時における避難行動の分析を行うために、高潮氾濫と避難行動を同時に計算するモデルを提示した。

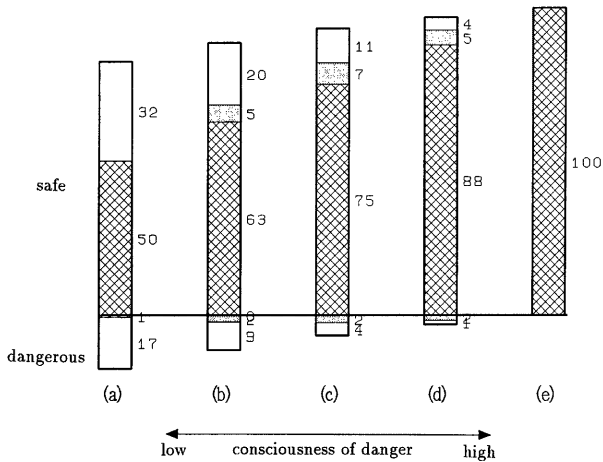


Fig.16 Final refuge result affected by consciousness of danger

- 数量化理論I類を用いた検討より、避難情報の確実な伝達や防災意識の向上の重要性、浸水後避難の危険性などが示された。
- 避難対策のあり方について、詳細に検討した。それによると、まず避難情報を迅速にかつ確実に伝達するシステムの必要性が確認された。また、浸水時の避難では避難所の拡張や新設によって避難状況の改善はある程度見込まれるものの、抜本的な改善にはつながらないことが確認された。さらに、住民の危険意識の向上が避難状況を改善することが、モデルをとって確認された。

#### 参考文献

井上和也(1986):開水路非定常流とその水工学への応用に関する研究, 京都大学学位論文, pp.172-177.

井上和也・戸田圭一・栗原哲・武田 誠・谷野知伸(1996):洪水ハザードマップの作成についての一考察, 京都大学防災研究所年報第39号B-2, pp.459-482.

今本博健・石垣泰輔・大年邦雄(1983a):昭和57.7長崎水害における住民の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.127-138.

今本博健・石垣泰輔・大年邦雄(1983b):昭和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.

今本博健・石垣泰輔・大年邦雄(1989):水害時の災害情報と避難行動に関する研究, 昭和63年科学研究費補助金(重点領域(1))研究成果報告書, 災害情報と避難行動に関する研究, pp.47-62.

岩佐義朗・井上和也・水鳥雅文(1980):氾濫水の水理の数値解析法, 京都大学防災研究所年報, 第23号B-2, pp.305-317.

岩垣雄一・榎木亨(1982):海岸工学, 共立出版, p.224.

宇多高明・前原隆生・牧野一正(1994):伊勢湾高潮の実用的予測モデル, 第41回海岸工学論文集, pp.261-265.

大阪市防災会議(1993):大阪市地域防災計画.

建設省土木研究所河川部総合治水研究室(1990):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.

武田 誠・井上和也・上塚哲彦・松村貴義(1996):高潮解析における数値解析モデルおよびその境界条件に関する検討, 水工学論文集 第40巻, pp.1089-1094.

武田 誠・上塚哲彦・井上和也・戸田圭一・林 秀樹(1996):都市域における高潮氾濫解析, 京都大学防災研究所年報, 第39号B-2, pp.499-518.

土木学会編(1971):水理公式集, 昭和46年改訂版, p.265.

西原 巧(1983):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.

藤井 健・光田 寧(1985):日本本土に襲撃する台風統計的性質について, 京都大学防災研究所年報第28号B-2, pp.463-473.

藤井 健・光田 寧(1986):台風の確率モデルの作成とそれによる強風のシミュレーション, 京都大学防災研究所年報第29号B-1, pp.229-239.

## The Study of the Hazard Map for Storm Surges and the Evacuation System

Makoto TAKEDA\*, Kazuya INOUE, Kei-ichi TODA and Kenji KAWAIKE

\* Faculty of Engineering, Chubu University

### Synopsis

A map denoting hazard area due to flood or predicting the distribution of maximum overland flood depth is released by river administration. This study tries to apply the concept to the hazard due to storm surges in an urban bay area. First, The danger area is shown by the hazard map constructed for storm surge. Next, By the model of refuge system with network theory, the importance of evacuation order and the danger of refuge after inundation is presented. Finally, The way of the transmission of evacuation order and the position of the shelter in the evacuation system is investigated.

**Keywords** :Overland flood flow, Storm surge, Hazard map, Refuge action model, Evacuation system