

洪水氾濫水の動態を考慮した避難システムの評価に関する研究

高橋 保・中川 一・東山 基

ASSESSMENT OF EVACUATION SYSTEM BASED ON THE SIMULATION OF INUNDATION AND ACTION OF RESIDENTS

By *Tamotsu* TAKAHASHI, *Hajime* NAKAGAWA and *Motoi* HIGASHIYAMA

Synopsis

A method to simulate the evacuating actions of the groups of residents linked with a simulation of an overland flood flow due to river bank breach is presented. A selection of the shortest way to the refuges is solved by using the Warshall-Floyd method, in which the effect of informations of river bank breach and/or the depth of water on the way are taken into account. Validity of the simulation method is examined at first for a rather simple case under the several different conditions, i. e., various time lags between the commencement and the bank breach, some topographical conditions of the evacuation route, retardation of walking speed due to inundation and congestion, etc..

Finally, this model is applied to the actual basin (Ogura basin, situated in the south of Kyoto Prefecture), and evacuation in an inundation is simulated for the case of various breach points under several timings of the issue and propagation speed of the advice or order to evacuate. In some cases all the residents can safely arrive at the existing refuges, but in other cases they are trapped by the flood on the way of evacuation. Thus, by the application of this method, the assessment of the evacuation system is possible.

1. 緒 論

洪水災害の軽減を図る上で、河道改修工事、洪水調節ダムの建設、治山工事などの整備水準を向上させることが重要であることは論をまたない。事実、これまでこの種のいわゆるハード対策が大きな防災効果を発揮してきている。しかし、既成市街地においては堤防高上げが困難であったり、用地の確保が困難であったりしてハード対策による治水対策の限界が指摘されつつある。このような現状にあって、予め洪水氾濫の程度を予測して、耐水構造物の建築や土地利用規制および避難システムの確立など、災害を最小限に抑える方策を講じようとするいわゆるソフト対策の重要性が増加している。その方策立案の根拠は言うまでもなく信頼性の高い洪水氾濫危険範囲の予測であり、洪水による犠牲者をできるだけ少なくするという意味で、より安全に避難可能となる避難システムの確立が重要であろう。

本研究では、二次元平面流れの解析に基づいて氾濫水の挙動をシミュレートし、対象とする流域内に避難経路、交差点および避難地からなる避難ネットワークを構成して、氾濫水のダイナミックな挙動を考慮した避難のシミュレーション法を提示する。ついで、この手法を単純化したモデル流域に適用して避難の

シミュレーション手法の妥当性を検討し、実流域に適用して種々の避難条件や破堤条件のもとでの避難の難易をシミュレートして、安全な避難システムのあり方について検討する。

2. 氾濫解析に基づく避難のシミュレーション

2.1 概説

洪水氾濫水の数値シミュレーションによる氾濫規模の予測法を組み込んだ洪水氾濫時の避難システムについてはすでに西原¹⁾によって詳細に検討されている。これは、氾濫水による堤内地の湛水深や湛水区域の時空間分布を氾濫計算によって予測し、この予測値をもとにして、避難システムの構成要素である避難施設、経路の配置や規模および避難誘導方法などを個々に評価した後、住民の避難行動を避難地までの最短経路問題としてモデル化し、その結果を用いて避難システム全体の適正度を評価しようとするものである。この避難システム評価のための住民の避難のシミュレーションモデルに用いられている考え方や手法は本研究を遂行する上できわめて有益な示唆に富むものである。この中では、京都盆地南部の巨椋流域を対象として、破堤点の位置、避難勧告・指示の発令時期、避難命令の伝達速度および避難施設・経路の配置などを種々変化させて避難行動のシミュレーションを実行し、避難完了者数、避難未了者数、避難所要時間などを求めている。ところが、この避難行動のシミュレーションでは氾濫計算のメッシュと避難ネットワークをどの様に対応付けて時々刻々変化する氾濫域や湛水深の情報を避難行動の計算に取り入れているのか若干不明瞭である。避難場所と避難経路の選択に関しても、指定された避難地までの最短経路を最小費用流問題の特殊な場合にあたる最短経路問題として解いているが、この方法では指定された避難地が氾濫水のやってくる方向にあるとか指定された避難地への経路が冠水して通行不可能になるといった場合には別の避難地を状況に応じて選択できないといった問題も生じる。また、避難施設の数が実際よりかなり少ないために、多くのケースについて一人当りの平均避難所要時間が約1時間程度にもなっているなどの問題点も見受けられる。

そこで、ここでは氾濫計算と避難のシミュレーションとをリンクする方法について検討するとともに、氾濫範囲や湛水深の規模に応じて避難場所と避難経路をある程度任意に選択できる方法を採用した住民の避難行動のシミュレーション法を示す。

2.2 洪水氾濫シミュレーション

洪水氾濫や土石流氾濫、火災の延焼、有毒ガスや放射能物質の拡散など、各種の災害の性質によってその拡がり方が異なり、それに応じた避難の時期、方法、手段も異なってくる。避難とはこのような災害から安全な場所に逃れようとする行動であり、住民は災害の拡がり方や方向などを予測しながらそれぞれの災害に対応した避難行動をとる。破堤氾濫を対象とすれば、どこどこが破堤しそうだから、どこへ、どのルートを通して、いつ避難すれば良いかといったことを考えて避難行動をとるであろう。いつ、どこで、どの程度の破堤が生起するかは明らかでないため、対象流域内の破堤箇所および規模を仮定条件として取り扱い、予め氾濫規模や氾濫水の流動方向を予測しておくことは、避難計画を策定する際に重要となつてこよう。このような要件を満たす予測手法には氾濫シミュレーション法がある。

氾濫シミュレーション法については、すでに著者らが検討しており²⁾、その詳細については省略するが、用いた基礎式は以下の二次元平面流れに関する x および y 方向の運動量方程式と水の連続式である。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uM) + \frac{\partial}{\partial y}(vM) = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uN) + \frac{\partial}{\partial y}(vN) = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \quad \frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \dots\dots\dots (4)$$

MおよびN；それぞれxおよびy方向についてM=uh, N=vhと定義した流量フラックス, uおよびv；それぞれxおよびy方向の流速成分, H；水位, ρ；水の密度, n；Manningの粗度係数, g；重力加速度である。

上記の方程式を差分法により計算を実行するが、その詳細については参考文献に詳しく述べられているのでここでは省略する。

2.3 住民の避難行動シミュレーション手法

(1) 避難ネットワークのモデル化

対象とする流域内で避難ネットワークを構成するには、予めどのような範囲の地域住民が避難を要するかを推定する必要がある。さらに、家屋構造によっては避難を要しない場合もあり、避難対象者の設定をどのようにすれば良いかが問題となる。避難対象地域の予測には種々の仮想破堤地点に対して洪水氾濫水の挙動をシミュレートすれば、浸水が予想される地域が把握でき、これにより避難の必要性があるかどうかの判断基準が得られよう。家屋構造による避難の要不要は、木造平屋や2階建て、鉄筋コンクリート構造の高層住宅等で異なってくる。浸水の危険のある平屋建ての家屋の分布や高層住宅の分布等、きめの細かい情報が必要となる。

ここでは、氾濫計算から求まる氾濫域の予測値をもとに避難対象地域内に避難施設（避難地ノード）、避難経路（リンク）、交差点（ノード）からなる避難ネットワークを構成する。その際、避難施設には、各自治体の地域防災計画で指定された小・中・高等学校、公民館等を用いることとし、避難経路は道路幅員、住民の周知度等から国道、主要地方道、堤防上の道路等を採用する。

従来の避難施設や避難経路が適切かどうかは氾濫シミュレーションから得られる湛水深の情報や住民の周知度、避難のシミュレーション結果等から判定されよう。もし、避難施設や避難経路に不備や不都合が存在すれば、新たな避難施設や経路を設定する必要が生ずるが、その際このシミュレーションによって合理的な根拠が得られよう。

さて、氾濫計算から求まる各格子の水深を避難経路の冠水情報として取り入れるために、実際の避難経路を少し調整して Fig. 1 に示すように、2つのノード間を結ぶ避難経路は、実際の避難経路が通過する格子の中央とその格子に隣接する周囲8個のいずれかの格子（複数でもよい）の中央を結んだ直線をつなぎ合わせたものから成るものとする。そして、各避難経路を Fig. 2 に示すように各格子毎の区間に分割し、第n番の避難経路の第m区間として氾濫計算における第(i, j)格子に対応付けることにする。このようにして構成されたネットワークを幹線経路からな

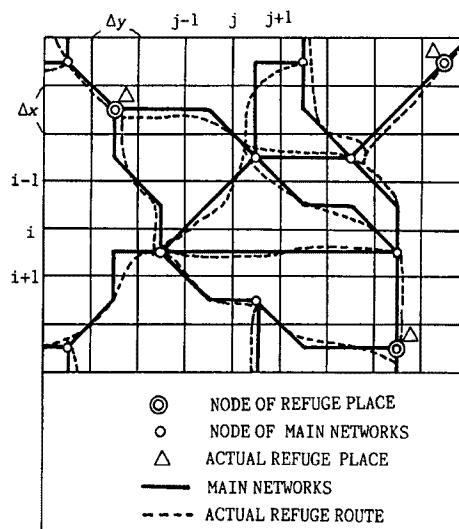


Fig. 1. Arrangement of refuge networks.

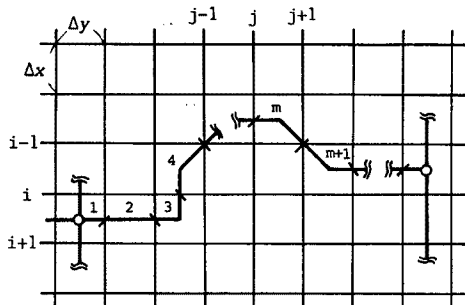


Fig. 2. Elements of a refuge route corresponding to the meshes of inundation calculation.

る避難ネットワークと呼ぶことにする。これに対して、幹線経路上以外に居住する住民は、この幹線経路のノード上に出るまでに住区（地方自治体のいわゆる部落、町内といった集団に近いが厳密には異なる）内に仮想的に設けた街路網を利用することにし、この街路網を細街路から成る避難ネットワークと呼ぶ。これについては、あとで詳細に述べる。

(2) 住民の避難行動のモデル化

(a) 避難行動の最小単位： 実際に避難行動を行なうのは流域内の住民であり、厳密に避難行動のシミュレーションを行なおうとするならば、住民一人一人についてその行動を再現し得ようモデル化する必要がある。しかし、対象とする流域が広範囲である場合、避難住民の数が膨大なものとなり、計算機の演算時間や記憶容量の点からみてもそのような計算を実行するのはきわめて困難であろう。実際、関係機関から住民に対して避難を勧告する場合、各個人に対してではなくたとえば部落とか町内といった集団に対して指示される場合が一般的である。このようなことから、ここでは避難対象者を個人ではなく集団（グループ）として取り扱うこととし、氾濫計算の格子により分割された各格子内に居住する住民を1つの避難対象グループと考える。また、実際の避難の際には集団で行動するとしてもその集団内の住民の歩行速度には個人差があるために、集団はある長さをもって移動すると考えられ、場合によっては格子の幅以上の長さをもって移動したり、他のグループと合流して規模を大きくしたりあるいは分岐して規模を小さくして各々別行動をとったりすることもあると考えられる。しかし、ここでは問題を単純化するために集団の位置は経路上の点により表わされ、合流あるいは分岐によるグループの一体化あるいは分散化は考えないことにする。

(b) 最短経路選択問題としてのモデル化： 一般に複数箇所に存在する避難施設の中から、住民が1つの避難施設を選択する際に考慮すべき要因の中でも、その施設までの距離が特に重要であると考えられる。このような観点から、住民の避難施設選択に関する問題をネットワーク理論の最短経路選択問題としてモデル化する。すなわち、ある格子内に位置する住民グループは避難の各時点で各々の避難施設までの最短経路を避難経路の冠水状況を考慮して計算し、最短距離にある避難施設に向かって避難するものとする。もちろん、避難経路全ての冠水状況を住民が知るすべはないが、モデルとしてはこのような取り扱いが可能であろう。

(c) 避難ネットワーク内での住民の配置： 対象流域内の住民位置は避難ネットワークとの位置関係から大きく2つに分類される。すなわち、i) 幹線経路のネットワーク上もしくはノード上に住民が位置する場合と、ii) このネットワーク上に位置しない場合、である。i) に該当するグループに対しては幹線経路のネットワーク上からの避難とし、直ちに最短経路の選択計算が可能である。ii) の住民に対しては、ある幹線経路のネットワーク上のノードの近傍に位置するいくつかのグループの集合、すなわち前述の住区を設定する。この住区内には、Fig. 3に示すような氾濫計算に用いた格子の中央を直線で結んで形成され

る避難ネットワークと呼ぶことにする。これに対して、幹線経路上以外に居住する住民は、この幹線経路のノード上に出るまでに住区（地方自治体のいわゆる部落、町内といった集団に近いが厳密には異なる）内に仮想的に設けた街路網を利用することにし、この街路網を細街路から成る避難ネットワークと呼ぶ。これについては、あとで詳細に述べる。

(2) 住民の避難行動のモデル化

(a) 避難行動の最小単位： 実際に避難行動を行なうのは流域内の住民であり、厳密に避難行動のシミュレーションを行なおうとするならば、住民一人一人についてそ

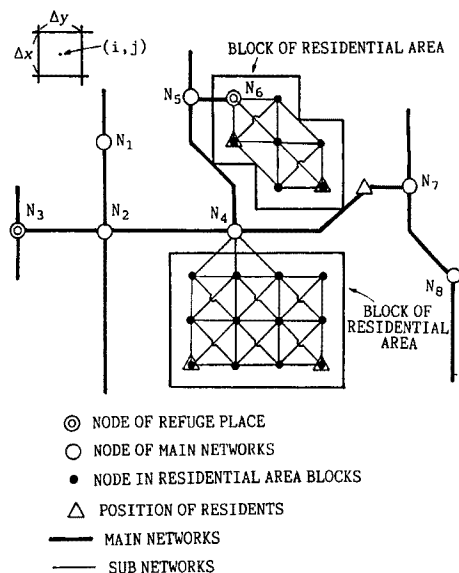


Fig. 3. Relationship between refuge networks and position of residents in a block of residential area.

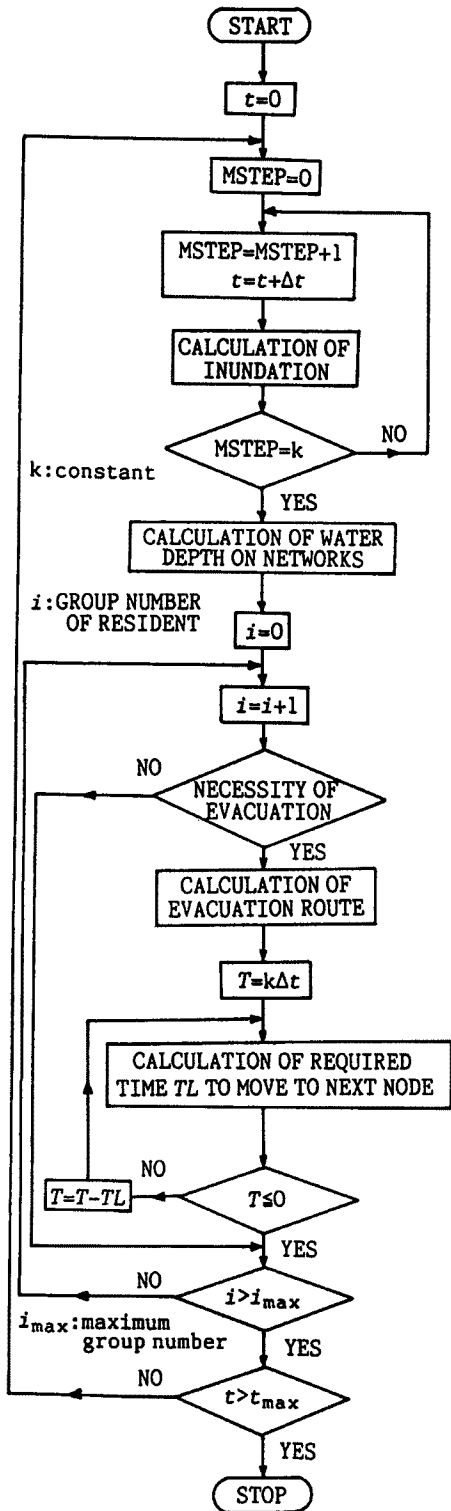


Fig. 4. Flow-chart of simulation method of evacuation linked with an inundation analysis.

る仮想的な細街路網を設定し、住区内のグループはこの細街路を通して指定されたただ1つの幹線経路上のノードにまず移動するものとする。このとき、指定されたノードが通常の交差点ノードの場合と避難地ノードの場合の2通りあって、前者の場合、ノードに出たグループは*i*)と同様、避難地までの最短経路の計算をさらに行なうことになるが、後者の場合にはそのノードに出た時点で避難は完了したものとみなす。住区内の細街路上の避難は、幹線経路上での避難に対して行なう経路の冠水を考慮した最短経路の選択計算と同じ計算を行なうものとする。

なお、一旦住区内の細街路を通して幹線経路上の交差点ノードに出た住民は、その後幹線経路のみを利用し、再びどの住区内の細街路も利用しないという条件を付加する。この条件ははじめから幹線経路上にいた住民に対しても適用される。

(d) 住民の避難行動のモデル化：洪水氾濫解析に基づく避難行動のシミュレーションのフローチャートをFig. 4に示す。このフローチャートをもとに、住民の避難行動のモデル化について検討する。いま、Fig. 5に示すような避難ネットワーク上において、時刻*t*に避難が必要と判断された住民が、交差点ノードN1から距離Z1、N2から距離Z2の地点に位置するものとする。このときの住民の避難行動は西原¹⁾とほぼ同様の考え方をを用い、以下に示す段階を経て行

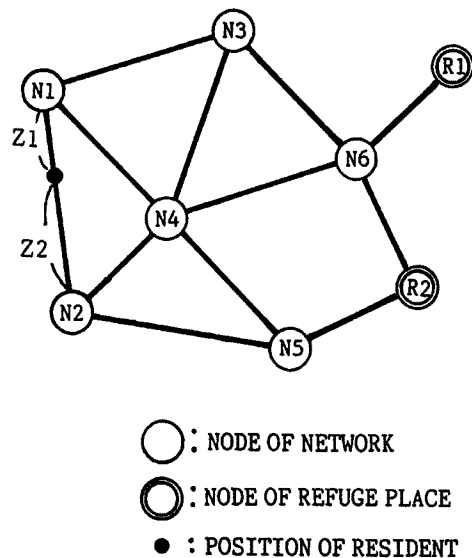


Fig. 5. Relationship between refuge networks and position of a resident on a route of them.

なわれるものとする。

①: 任意の交差点ノード N_i から任意の避難地ノード N_j までの最短距離を $F_{i,j}$ とし, N_1 と N_2 の各ノードから m 個存在する避難地ノードまでの最短距離をそれぞれの避難地に対して避難経路の浸水状況を考慮して求める。 N_1 からの最短経路に対しては Z_1 を, N_2 からの最短経路に対しては N_2 までの距離 Z_2 を加える。

②: ①で計算された各々の避難地ノードまでの距離の中で最小値 $(F_{i,j})_{min}$ を求める。すなわち,

$$(F_{i,j})_{min} = \min \{ F_{N_{1,1}} + Z_1, \dots, F_{N_{1,m}} + Z_1, F_{N_{2,1}} + Z_2, \dots, F_{N_{2,m}} + Z_2 \} \dots \dots \dots (5)$$

である。

③: 時刻 t において, ②で求めた最短距離を仮に $F_{N_{1,R1}} + Z_1$, すなわちノード N_1 を経由して避難地 R_1 が最短経路であるとする。そこでまず, 現在地からノード N_1 を目的地として, N_1 までの所要時間 TL を Z_1 と住民グループの歩行速度から求める。なお, 歩行速度については後述する。

④: $TL > T$, すなわち, 1回の避難計算の中で住民が移動できる時間 T (氾濫計算における時間差分間隔 Δt ではなく, 氾濫計算を n 回行なって避難行動の計算を 1 回行なうとすれば $T = n\Delta t$) 内に, 次に行くべきノードまで到達することができない場合には, T 時間分の移動を行なって移動後の位置を求めてそのステップでの計算を終える。 $TL < T$ の場合, すなわち 1回の避難行動の計算で目的地とするノードに達してしまっ, さらに時間が残っている場合には N_1 までの所要時間 TL を使ってまず N_1 まで移動する。もし, このノードが避難地ノードであればこの住民グループは避難を完了したとし, そうでなければ $T = T - TL$ と置き換えて①に戻り, 残りの時間を用いて移動する。

以上の手順を繰り返すことにより, 住民の避難行動の計算が可能となる。

(e) 湛水深規模に応じた経路長の変換: 避難経路が氾濫水で冠水した場合, その経路は冠水の程度によって歩行速度が低下したり通行が不可能になったりする。ここでは, 西原が行なった方法¹⁾と同様に, 湛水深の程度に応じた歩行割引率とこれを用いた見かけ上の経路長を次のように定義する。

$$W'_{(ij)} = 1 - h_{(ij)} / 0.7, \quad (W'_{(ij)} > 0), \quad (\text{unit: m}) \dots \dots \dots (6)$$

$$d'_{(ij)} = (1 / W'_{(ij)}) d_{(ij)}, \quad (\text{unit: m}) \dots \dots \dots (7)$$

ここに, $W'_{(ij)}$; 時刻 t における格子 (i, j) に対応した区間の歩行割引率, $h_{(ij)}$; 時刻 t での格子 (i, j) の湛水深, $d_{(ij)}$; 格子 (i, j) に対応する区間の距離 (ノード間の距離ではない), $d'_{(ij)}$; 時刻 t での格子 (i, j) に対応する湛水深により換算された区間の距離である。このようにして経路長が湛水深の規模に応じて見かけ上長くなることにし, ある時刻における氾濫水の状況を住民の避難行動に反映させる。なお, 伊勢湾台風の時に大人の男で湛水深が 70 cm 以下のところをやっと脱出できたという事例³⁾をもとに, 経路上の格子の湛水深が 70 cm 以上であれば通行不可能とし, その経路の距離が無限大と置き, もし, 住民の位置する格子の湛水深が 70 cm 以上になった場合, その住民は避難不可能な状態に陥ったとして避難行動を中止し, たとえ湛水が引いても避難行動は再開されないことにする。

(f) 疲労および群集流動による歩行割引率: 一般に歩行速度に影響を及ぼす要因としては, 1) 季節, 天候, 時刻, 明るさ等の環境要因, 2) 性別, 年齢, 健康, 疲労等の肉体的要因, 3) 服装, 携帯品等の付随的要因, 4) 恐怖感, 場の周知度等の心理的要因, 5) グループの人数, 群集密度等の集団的要因, などが挙げられる。洪水時の避難ではこのような要因が複雑に関連しあっているために, 歩行速度を的確に予測することは極めて困難である。ここでは西原¹⁾と同様に, これらの中でも特に重要であると考えられる疲労と群集流動による歩行速度の割引率を考慮する。

西原¹⁾によると, 疲労による歩行速度の割引率 T' は次式のように与えられる。

$$T' = 1.0 / \{ 0.982 + \exp(1.12t - 4.0) \}, \quad (\text{unit: hour}) \dots \dots \dots (8)$$

ここに, T' ; 避難開始からの時間経過にともなう疲労による歩行割引率, t ; 避難開始からの経過時間である。また, 群集流動による歩行速度は次式のように与えられる¹⁾。

$$V_n^t = T^t \cdot P_n^t \cdot c, \quad (\text{unit: m/sec}) \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 V_n^t :時刻 t における経路 n 上での住民の歩行速度、 c :通常時の歩行速度で、 $c = 1.4 \text{ m/sec}$ とする。 P_n^t :時刻 t における経路 n 上での群集流動による歩行割引率で、

$$P_n^t = U_n^t / c, \quad (\text{unit: m/sec}) \dots\dots\dots (10)$$

である。ここに、 U_n^t は時刻 t における経路 n 上での群集流動の速度であり、経路上にいる住民の密度によって次式のように定義される。

$$U_n^t = 1.42 - 0.24\rho_n^t, \quad (\rho_n^t < 3.85) \dots\dots\dots (11)$$

$$U_n^t = 0.49, \quad (\rho_n^t \geq 3.85) \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 ρ_n^t は時刻 t における経路 n 上での群集密度 (人/m²) であり、経路 n の幅員 B_n (m)、経路 n の長さ L_n (m) および時刻 t において経路 n 上に位置する住民の総数 M_n^t (人) を用いて次式のように表わせる。

$$\rho_n^t = M_n^t / (B_n \cdot L_n), \quad (\text{unit: 人/m}^2) \dots\dots\dots (13)$$

(g) 最短距離・最短経路の計算法: 上述したように、住民グループの避難行動はネットワーク上に配置された避難地への最短経路選択問題に定式化される。任意地点のグループと任意地点の避難地(冠水の状況によって最短距離にある避難地が変更されるので任意地点の避難地とした方が都合がよい)という任意の2点間の最短距離、最短経路を求めることとなるので、ここでは最も手間のかからない解法であるWarshall-Floyd法を用いることにする。そこで、このWarshall-Floyd法について若干の説明をおこなっておく。

Warshall-Floyd法の計算手順は以下のようなになる⁴⁾。

- 1) $d_{ij}^{(0)} = d_{ij}$, $p_{ij} = i$ ($i, j = 1, 2, \dots, m$), $k = 1$ とおく。
- 2) $d_{ij}^{(k)} = \min (d_{ij}^{(k-1)}, d_{ik}^{(k-1)} + d_{kj}^{(k-1)})$,
 $(i, j = 1, 2, \dots, m)$ とする。
- 3) $d_{ij}^{(k)} < d_{ij}^{(k-1)}$ である (i, j) に対して、 $p_{ij} = p_{kj}$ とする。
- 4) $k = m$ ならば終了する。 $k < m$ ならば $k = k + 1$ として2)にもどる。

ここに、 $d_{ij}^{(k)}$ はノード番号 n_i から n_j への路で、中間の通過点として n_i, n_2, \dots, n_k だけ許すものの中での最短距離、 p_{ij} は n_i から n_j への最短路における n_j の直前のノード番号、 m はノードの個数である。

いま、簡単な例として Fig. 6 に示すようなネットワークを考えて、任意の2点間の最短距離と最短経路を求めてみる⁴⁾。図中の丸内の数字はノード番号を、経路上の数字はノード間の距離を表わす。まず、初期状態における任意の2点間の距離と経路を表わす行列をそれぞれ(14)式および(15)式のように与える。

$$d_{ij}^{(0)} = d_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 50 & 80 & 20 & \infty \\ 50 & 0 & 20 & 40 & 30 \\ 80 & 20 & 0 & \infty & 30 \\ 20 & 40 & \infty & 0 & 10 \\ \infty & 30 & 30 & 10 & 0 \end{pmatrix} \dots\dots (14)$$

$$p_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \end{pmatrix} \dots\dots (15)$$

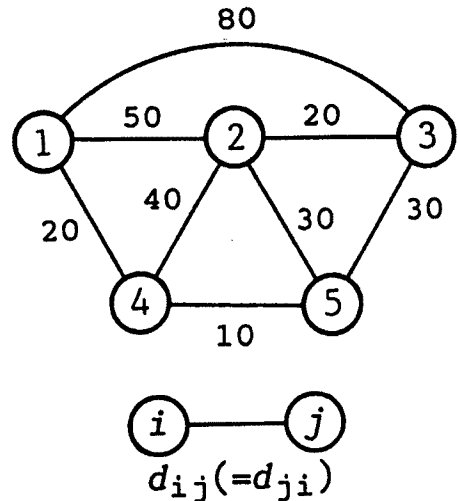


Fig. 6. Example of networks.

このとき、 p_{ij} の初期値の意味は、自分自身のノードから目的地のノードへ行くときに、他のどのノード

も経由することが許されないために、目的地点の直前のノード番号が自分自身のノード番号となるということである。 d_{ij} の初期値も同様の考え方で、ノード間が直接経路で結ばれている場合には Fig. 6 で与えられた距離が入る。なお、自分自身のノード間距離はゼロで、途中他のノードを経由しなければならないノード間距離に対しては無限大の距離を与える。

これらの初期行列をもとに前述の計算を m 回 (この場合 $m = 5$) 行なうと、任意の2点間距離を表わす行列 $d_{ij}^{(5)}$ が (16) 式のように、最短経路を表わす行列 p_{ij} が (17) 式のように求まる。

$$d_{ij}^{(5)} = \begin{pmatrix} 0 & 50 & 60 & 20 & 30 \\ 50 & 0 & 20 & 40 & 30 \\ 60 & 20 & 0 & 40 & 30 \\ 20 & 40 & 40 & 0 & 10 \\ 30 & 30 & 30 & 10 & 0 \end{pmatrix} \dots\dots (16)$$

$$p_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 5 & 1 & 4 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 4 & 3 & 3 & 5 & 3 \\ 4 & 4 & 5 & 4 & 4 \\ 4 & 5 & 5 & 5 & 5 \end{pmatrix} \dots\dots (17)$$

これらの結果から、例えばノード1からノード3への最短経路は次のようにして知られる。すなわち、 $p_{1,3} = 5$ であるからノード3の直前のノードは5である。次に、 $p_{1,5} = 4$ であるからノード5の直前のノードは4、 $p_{1,4} = 1$ であるからノード4の直前がノード1であり、結局 (1, 4, 5, 3) が最短経路である。そしてその距離は (16) 式より $d_{1,3} = 60$ である。このように、最短経路を求めるときの計算は大小比較と加減算であり、Warshall-Floyd法は全最短経路を求める解法の中では最も良いものの1つであると言われている⁴⁾。

この避難行動のシミュレーションでは、距離の行列に前述した経路の冠水を考慮した見かけ上の経路長を与えて計算する。なお、住区内での移動は目的地が指定されたただ1つの交差点ノードあるいは避難地ノードであるために、他のより簡便な方法を用いても最短経路が解けるが、住区内の細街路から構成されるネットワークは比較的小規模なのでこれにも Warshall-Floyd法を用いることにする。

(h) 避難地および避難経路選択の際の付加的条件: 単に最短距離にのみ着目して避難地を決定するとそこへ到達するために浸水深が増してくるにもかかわらずある程度前進することにより、いままで最短経路であった経路が見かけ上長くなって他の避難地へ経路を変更してももはや手遅れになるという事態も生じる。極端な場合は、氾濫水がくる方向へ避難するという実際には考え難い場合も生じる。そこで、住民が避難地を選択する際に以下のような条件を付加する。すなわち、Fig. 7 に示すように任意の住民グループ k の位置から最も近い湛水地点の格子 $P(I, J)$ と破堤地点の代表格子 $P(M, N)$ との距離を L_1 、グループ k のこの時点での最短経路上にある避難地から破堤地点までの距離を L_2 として、 $L_2 < a \cdot L_1$ (a は定数) すなわち、避難地が破堤点を中心とした半径 L_1 の氾濫範囲の a 倍の範囲内に存在するような場合はその避難地はグループ k の避難地としないことにする。ただ、その避難地への最短経路が冠水していなければ避難地に採用する。例えば、図中の PASS A は住民の位置から避難地への最短ルートであるが冠水しているので避難地としてこの時点では不適である。PASS B は冠水していないので避難地となる。PASS B の一部でも冠水した時点で避難地として不適当となるが、これらのルートより経路が長かった PASS C が冠水していなければ、避難地として選択できるものとする。勿論、避難地までの経路が冠水しているかどうかは避難中の住民にとっては未知の情報であるが、全く不案内の場所ならば論外であるが、普段生活している場所から避難地までの経路が例えば山に沿った路で避難地が高台の上にあるとか、冠水しない安全なルートを知っているとか等の知識が避難住民にはあるはず

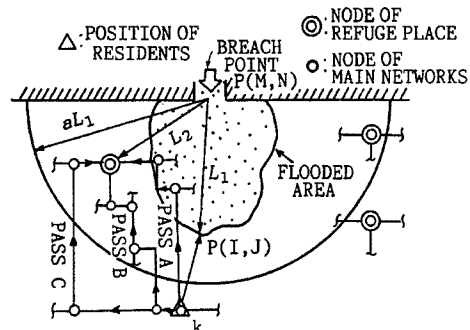


Fig. 7. Definition sketch of additional condition for selection of refuge route and place.

であり、ここで論じている避難地選択の付加条件とはこのようなことをある程度反映させようとしたものである。また、破堤地点がどこであるかも不確定条件であるため、上記の範囲指定は破堤地点が定まらない限り有効ではないが、実際には堤防近傍に位置する住民にはなんらかの破堤に関する情報が入ってくると考えられること、種々の破堤地点を想定した解析を行えばどの様な避難方法が安全であるかが知り得ること等から、本付加条件である程度実際に近い避難行動が再現されるものと思われる。

3. モデル流域における避難シミュレーション

2で述べた氾濫水の挙動を考慮した避難のシミュレーション法を実流域に適用する前に、単純化したモデル流域を想定し、避難のシミュレーションを行なう。そして、住民がどの様に氾濫水に対応した避難行動を行なっているか、2で述べた避難地選択の付加条件やその他の条件が妥当なものか、また、このような条件を正確に再現した計算ができていないかなど、シミュレーションの妥当性の検討を行なう。

3.1 計算条件

モデル流域は Fig. 8 に示すように、 $\Delta x = \Delta y = 125$ m に分割した総格子数が 20×20 の流域である。図中の斜線部分は高台を想定して浸水しないようになっている。避難ネットワークは 34 個の交差点ノードと 2 個の避難地ノード、50 本の経路からなっている。また、2ヶ所に避難命令を発信する基地局を設けている。避難命令はこの基地局を中心に、ある速度をもって同心円状に広がって行き、住民はこの情報が到達すると同時に避難を開始することとする。破堤口から堤内地へ流入する洪水ハイドログラフを Fig. 9 に示す。 $\Delta t = 2$ 秒とし、1 分間氾濫計算を実行して 1 回避難行動の計算をする。計算ケースとして Table 1 に示す 12 通りを考える。すなわち、CASE A は氾濫水の影響を何も考慮せず疲労による歩行割引率のみを考慮し、破堤と同時に一斉に避難を開始する場合である（結局破堤による氾濫水の影響は関係無い）。CASE B は破堤と同時に一斉に避難を開始し、氾濫水の冠水深に応じた経路長の換算を行うが、 $L_2 < a \cdot L_1$ なる範囲にある避難地は選ばない、といった条件を付加しない場合である。CASE C は、破堤 30 分前に避難を開始する点が CASE B と異なるだけである。CASE D は、破堤と同時に一斉に避難し、

$L_2 < a \cdot L_1$ なる範囲にある避難地はいくら最短経路上にあっても最短経路が冠水してなくても避難地には選ばない場合である。CASE E は、CASE D の条件のもとで、避難経路が冠水していなければ避難地を選べるとした場合であり、グループ 24 から DS1 への方向の最短経路ではない別のルートの地盤高を嵩上げて、冠水しないようにしてある。CASE F

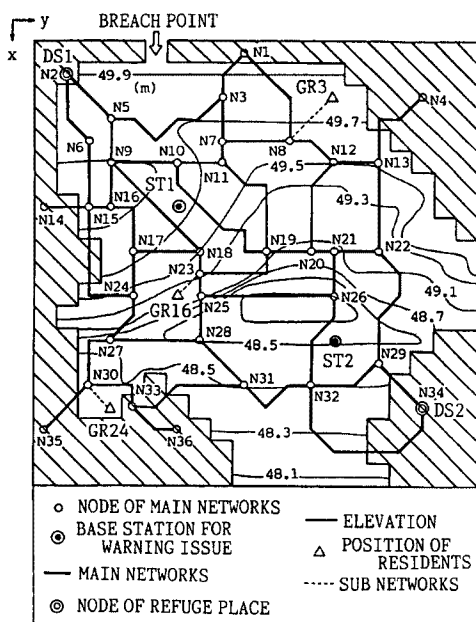


Fig. 8. Simplified model study area.

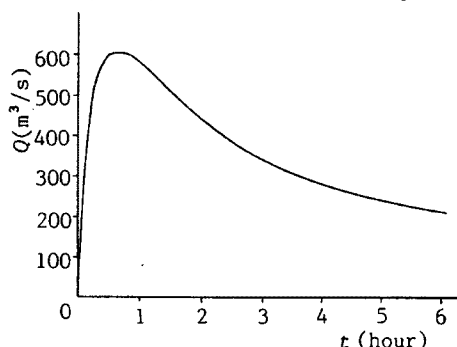


Fig. 9. Hydrograph at the breach point used in calculation.

Table 1. Simulation case in model area

CASE A	Simultaneous evacuation which is no relation with flooding water.
CASE B	Simultaneous evacuation. Eq. (7) and Eq. (8) are considered.
CASE C	Simultaneous evacuation 30 minutes before bank breach.
CASE D	Refuge place existing in the range of $L_2 < aL_1$ can not be adopted as a suitable refuge place. Eq. (7) and Eq. (8) are considered.
CASE E	If evacuation route to the refuge place where $L_2 < aL_1$ isn't flooded, it can be adopted as a suitable refuge place. Eq. (7) and Eq. (8) are considered.
CASE F	Residents do not take refuge until each mesh where they exist is flooded. Eq. (7) and Eq. (8) are considered.
CASE G	Residents do not take refuge until they receive the information of refuge order whose propagation speed is 5 m/s, and it is issued at the same time of bank breach. Eq. (7) and Eq. (8) are considered.
CASE H	Refuge order is issued at 5 minutes before bank breach. Other conditions are equal to CASE G.
CASE I	Refuge order is issued at 10 minutes before bank breach. Other conditions are equal to CASE G.
CASE J	Propagation speed of refuge order is 1.4 m/s and it is issued at the same time of bank breach.
CASE K	Propagation speed of refuge order is 1.4 m/s and it is issued at 5 minutes before bank breach.
CASE L	Propagation speed of refuge order is 1.4 m/s and it is issued at 10 minutes before bank breach.

は、氾濫水がやってきて初めて避難を開始する場合である。CASE G, H, I は、Fig. 8 に示した基地局から避難命令がそれぞれ、破堤 0, 5, 10 分前に出され、その情報の伝達速度が 5 m/s で基地局から同心円状に拡がり、その情報を得て初めて住民が避難を開始する場合である。CASE J, K, L は、伝達速度を 1.4 m/s とした場合である。なお、これらのケースは群集流動の割引率を考慮していないが、群集流動の影響を見るために各グループの人数を 500 人とし、全ての幹線経路の幅員を 5, 9, 及び 13 m と変化させて CASE A と同じ条件下で計算を行なった。

3.2 計算結果とその考察

Fig. 10 は、各ケースにおいて特徴的な避難行動を示すグループとして、図中に示した GR 3, GR 16 および GR 24 を選んでそれらのグループの避難経路を示したものである。なお、図中のドットは破堤開始時刻を $t = 0$ 秒とした時の $t = 300, 900, 1800$ 秒における氾濫水の拡がりの範囲であり、同心円は、破堤時刻を $t = 0$ 秒とした時の避難命令の伝達範囲である。ここでは、特に GR 24 について検討する。CASE A では避難行動が氾濫水とは無関係にできるため、最短経路となる DS 1 を避難地を選んでいる。CASE B では DS 1 に移動するが途中で氾濫水に捕まって移動できなくなっている（別途得た水深の情報から、水深が 70 cm 以上の格子で移動できなくなっている）。CASE C では、破堤 30 分前に避難行動を開始しているので、無事 DS 1 に避難している。CASE D では、避難地 DS 1 が $L_2 < a \cdot L_1$ なる範囲に入っているために別の避難地である DS 2 へ避難している。CASE E ではまず、 $L_2 < a \cdot L_1$ なる範囲に DS 1 が入っているが氾濫初期には DS 1 への最短避難経路が冠水していないので、一旦その経路を利用して DS 1 の方向へ移動するが、時間経過とともに DS 1 への最短避難経路が冠水するので途中から引き返して地盤高を嵩上げて冠水しないようにした別のルート（この時点ではこのルートが最短となっている）を用いて DS 1 へ避難している。なお、引き返した時点で DS 1 の方が DS 2 よりも近かったことをことわっておく。CASE F では、氾濫水がきて初めて避難を開始するので、歩行速度が速いかそれとも氾濫水の進行速度が速いか、また、周囲がすでに冠水しているかどうかで避難ができるか水に捕まってしまうかが決まる。この場合、GR 24 は氾濫水の進行方向を横切る形で DS 2 の避難地へ移動するため、途中で避難不可能な状態に陥っている。Fig. 11 は、このときの破堤 2100, 3000, 3900 および 5100 秒後における湛水深の分布とその時刻における GR 3, GR 16 および GR 24 の位置を示したものである。これより、各グループは避難開始当初は氾濫範囲の中にいるが、GR 3 および GR 16 は歩行速度が氾濫水の拡がる速度よ

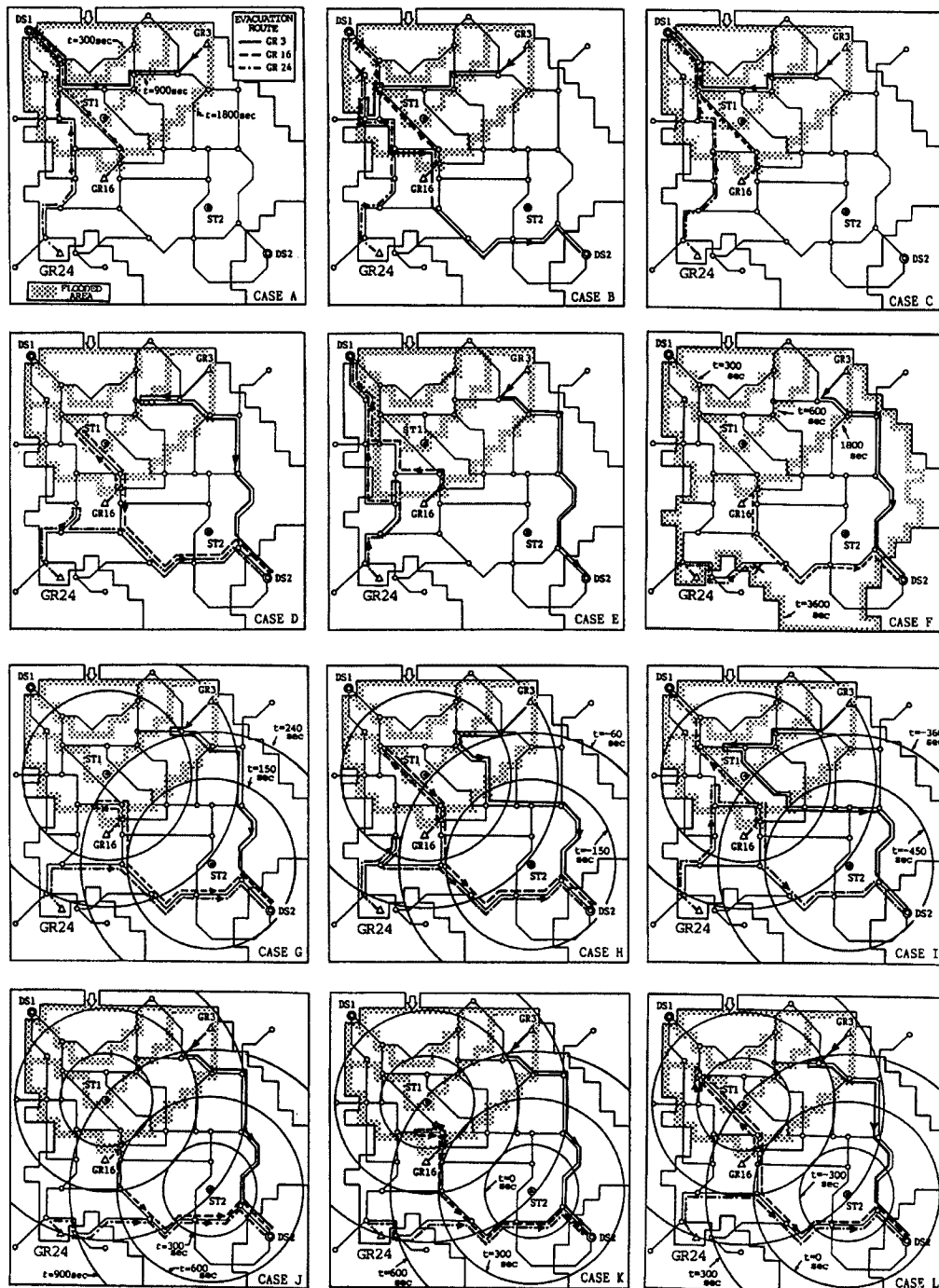


Fig. 10. Calculation results of simulation of evacuation.

りも速いために氾濫域を脱し、その後は氾濫水に捕捉されることなく DS 2 に到着していることがわかる。一方、GR 24 は、5100 秒後には浸水のために移動不可能になってしまう。CASE G では破堤と同時に避難命令が出される場合であるが、情報伝達時間が 240 秒程度で、その後住区から幹線経路上のノードまで出る所要時間を加えると 360 秒程度となり、その間に DS 1 への避難経路が冠水するためにこのノードから一旦 DS 1 へ向かうが、すぐに DS 2 へ避難地を変更するようである。伝達所要時間の有無で CASE D

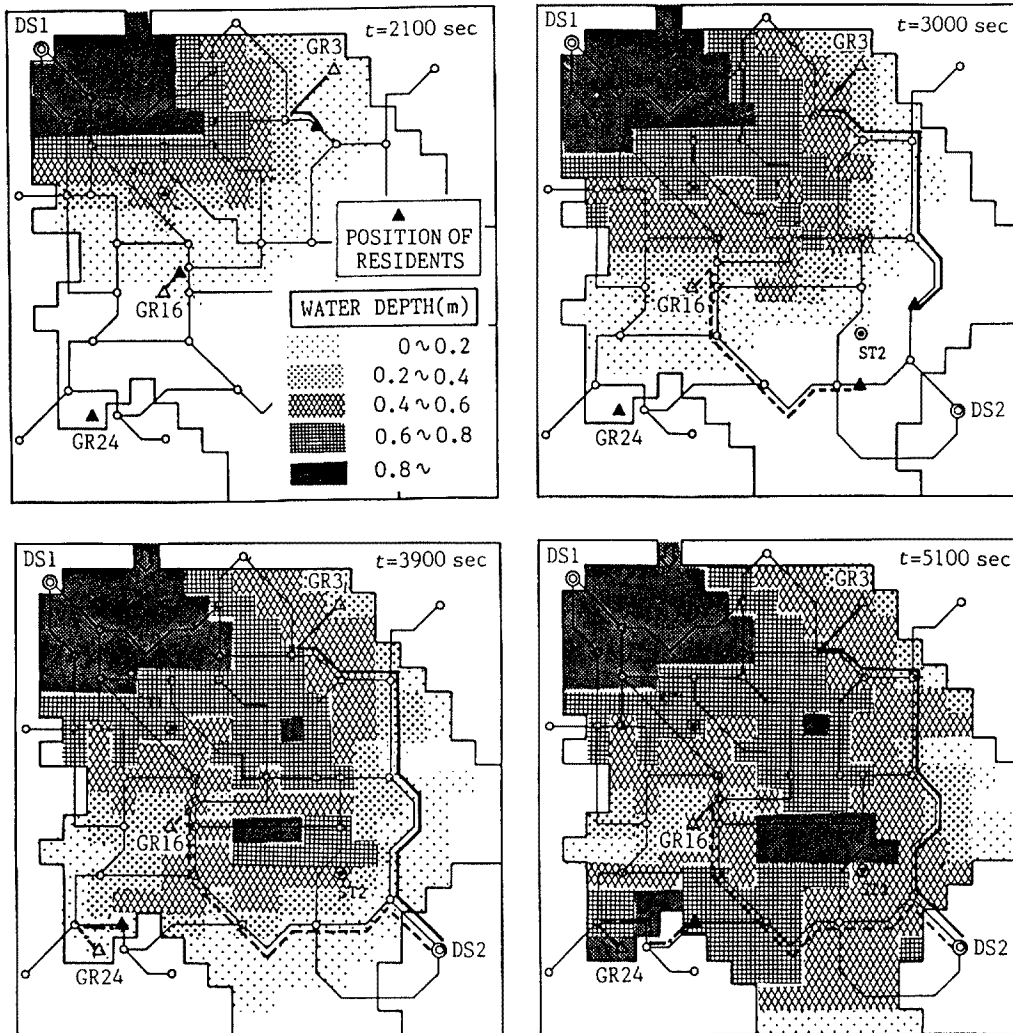


Fig. 11. Relationship between water depth and position of residents in evacuation.

と若干異なった避難となっている。CASE Hでは破堤5分前に避難命令が出されるが、破堤約1分前にこれがGR 24へ伝達されるので、一旦DS 1へ向かって避難し始めるが破堤発生によりDS 1が避難地として不適当となり、CASE Hの場合より少しDS 1に近付いた地点で避難地をDS 2に変更している。CASE Iでは破堤10分前に避難命令が出されて破堤約6分前にこの命令が伝わってくるので、DS 1へさらに近付いてから途中で避難地をDS 2に変更している。CASE J, Kでは、伝達速度が遅いので両ケースとも破堤後の移動となり、DS 1は氾濫により避難地として不適当と判断され、最寄りのノードへ出てすぐ避難地をDS 2に選んでいる。CASE Lでは避難開始時刻が早いので、最初DS 1へ向かうが、すぐにDS 2に避難地を変更していることがわかる。他のグループについてもほぼ同様の結果となっている。

つぎに、群集流動による避難の歩行速度の変化をみてみよう。水深の影響を除外するためにここではCASE Aについて検討する。Fig. 12は、全ての道路幅員を5, 9および13mの3通りに変化させたときのGR 3, GR 16およびGR 24の各グループの歩行速度と経路の人口密度の時間変化および群集流動を考慮しないときの歩行速度の変化(疲労による歩行割引率のみを考慮)を示したものである。この図より、疲労による歩行速度の低下は、避難所要時間が短いこともあって避難中ほとんど変化していない。一方群集流動による歩行速度は、避難グループの同一経路上への合流あるいは別ルートへの流出および経路長の違い等により人口密度が時々刻々変化するためにこれに応じた変化を呈していることがわかる。また、道

路幅員の違いは人口密度に直接反映されるのでこの影響も大きい。避難地近傍では各グループが合流してくるので人口密度が高くなって歩行速度が極端に低下していることがわかる。

以上より、ほぼ妥当な避難のシミュレーション結果が得られているものと思われるが、避難の予警報を出す時期については破堤時刻との関係から、早く出しすぎても、危険な破堤点方向への避難をする場合があり、また遅い方がかえって危険な方向を選ばないといった場合もあって避難命令の発令ないし避難行動の開始時期と破堤時刻との関係はかなり重要であると考えられる。

4. 巨椋流域を対象とした避難行動のシミュレーション

4.1 概説

ここでは、京都盆地南部の木津川と宇治川とで囲まれた旧巨椋池の集水域である巨椋流域を対象として、洪水氾濫計算に基づいた住民の避難行動のシミュレーションを実行する。この流域は木津川の山城大橋より下流および宇治川の天ヶ瀬ダムより下流から両河川と桂川との3川合流地点までの流域面積約 52 km²の領域であって、近年市街化の進行と人口の増加が著しい地域である。1983年当時の人口の分布を Fig. 13 に示す。なお、1987年の各地町村の地区別人口調査結果を1983年現在の家屋戸数の比で125 m × 125 mの各格子に配分したものを1983年の人口分布としている。この地域を地形的にみると、Fig. 14 に示すように平均的な標高が10 m程度の巨椋池干拓地を中心にすり鉢状になっており、木津川右岸堤あるいは宇治川左岸堤のどの地点が破堤しても氾濫水はこの干拓地に向かって進行し、集水、湛水するものと思われる。そこで、種々の破堤条件および避難条件のもとで、氾濫水のダイナミックな挙動を考慮した住民の避難のシミュレーションを行い、各条件に対する避難の難易について検討する。

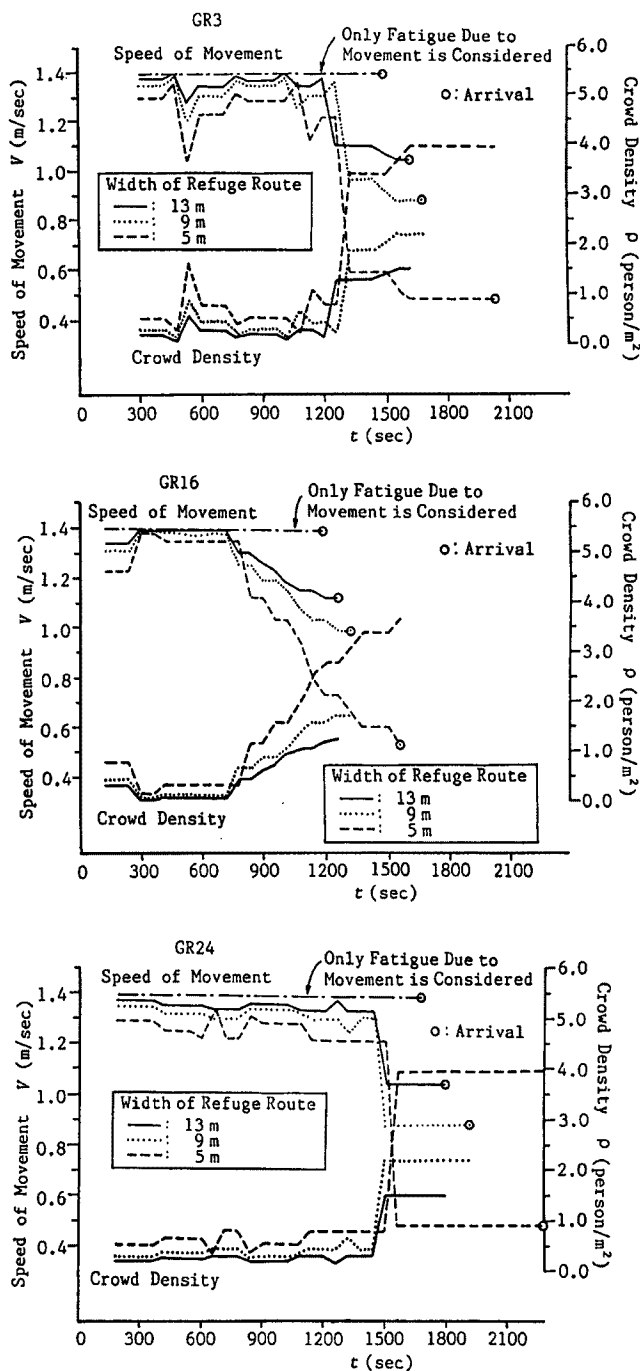


Fig. 12. Relationship between walking speed of residents and density of residents on networks.

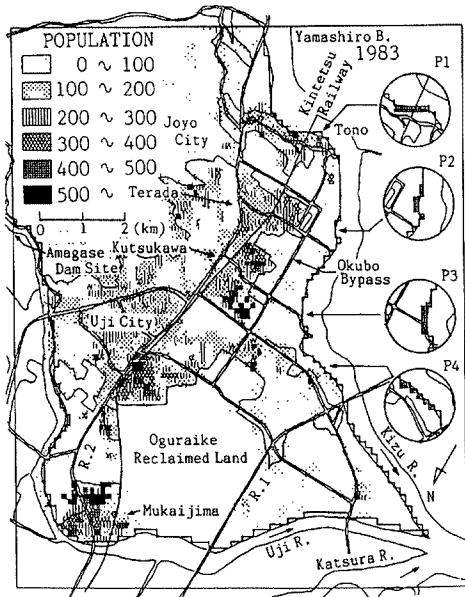


Fig. 13. Distribution of population in the calculation domain in 1983.

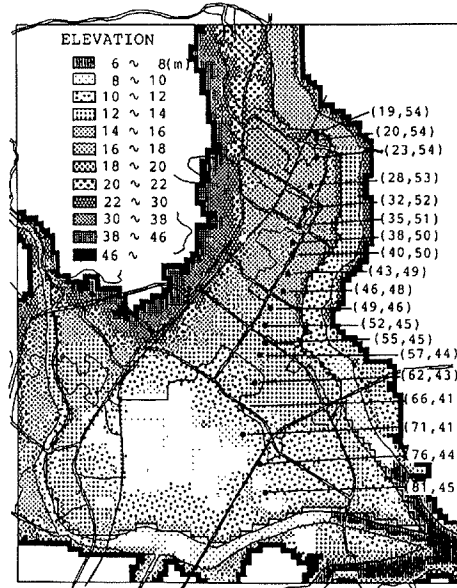


Fig. 14. Distribution of elevation in the study area.

4.2 計算条件

Fig. 13 には、過去の破堤資料⁵⁾を参考にして定めた4つの仮想破堤地点を示している。Fig. 15 に計算で用いた木津川および宇治川の流入境界でのハイドログラフを示す。木津川の流量は山城大橋地点で、宇治川のそれは天ヶ瀬ダム地点で与えている。河床高には最深河床高を河道全幅にわたったものを用いており、実際の平均河床高より低くなっている。そのため、木津川の計画高水流量よりも大きな流量となっている。正確な河床高の分布が知れば、計画高水流量で堤防天端程度の水位になるものと思われる。このように、今回の計算に用いる流量ハイドログラフはモデル流量であって、各河川の計画高水とは直接関係が無い。ちなみに、木津川の計画高水流量は、土師地点で $6,100 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、宇治川のそれは、宇治で $1,500 \text{ m}^3/\text{sec}$ である。

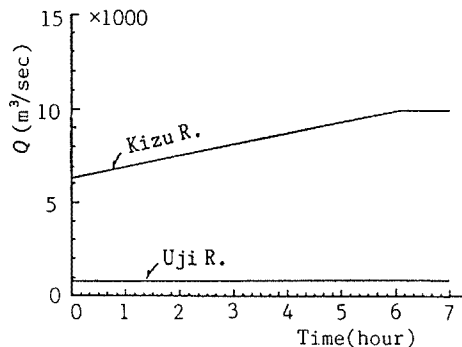


Fig. 15. Test hydrographs at the Yamashiro bridge and the Amagase dam site.

ここで注意しておかなければならないのは、ここで行なう計算の目的はこの巨椋流域といった特定の流域における洪水災害や避難システムのあり方の詳細について議論することではなく、任意の流域における洪水災害危険度の一貫としての避難システムの一般的な評価手法を提案することにある、ということである。したがって用いるハイドログラフと計画高水流量との差異や河床高の違いについては厳密な注意を払っていない。

さて、図中の Time = 0 における流量を定常的に各流入端から与え、流れが定常に達した時点初期条件とし、破堤開始を Time = 0 とした。流出条件については水面勾配で流れるものとしたが、このとき桂川の合流は考慮していない。また、堤内地の排水路網や木津川および宇治川に流入する支川の合流は排水路堤防高や河床高の情報が無かったため、これらを無視した。

破堤条件は瞬間的に想定破堤格子の地盤高が堤内地側の地盤高になるものとし、氾濫計算は河道も含めて行なう。氾濫計算の空間差分間隔は $\Delta x = \Delta y = 125 \text{ m}$ 、時間差分間隔は $\Delta t = 2 \text{ 秒}$ 、Manning の粗度係

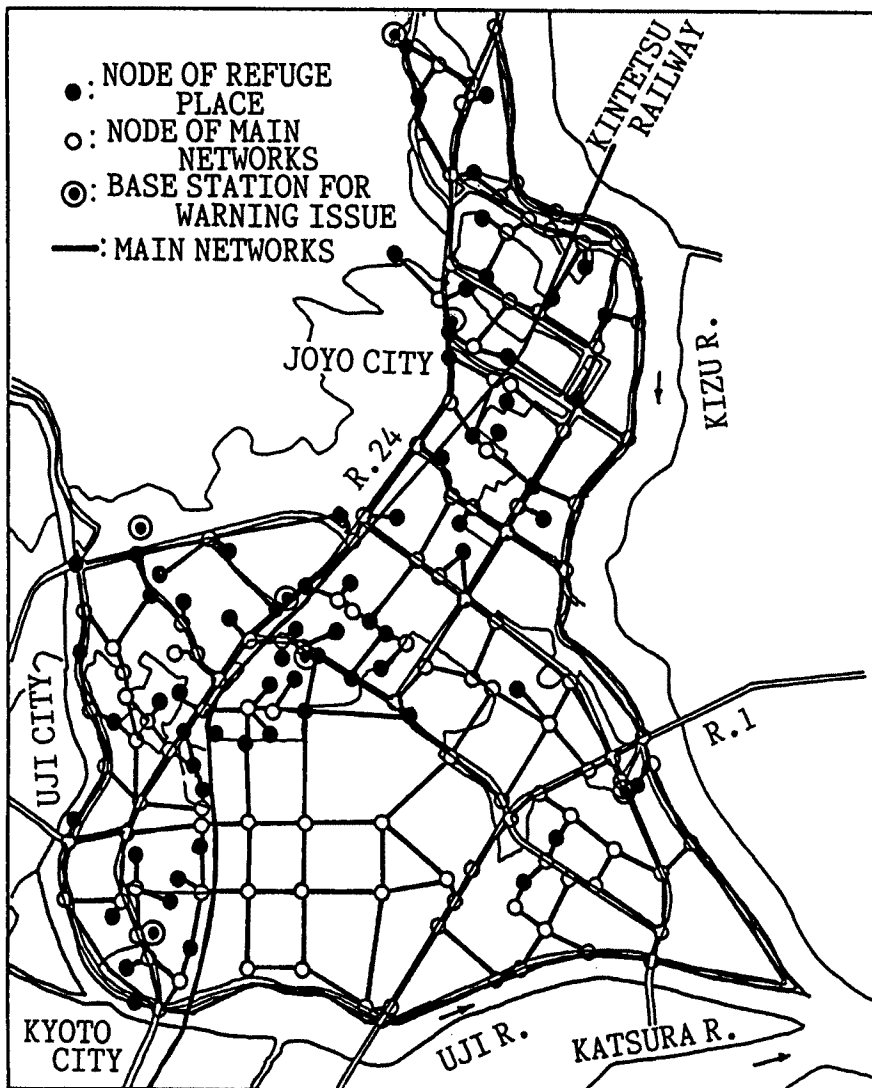


Fig. 16. Refuge networks in study area.

Fig. 16 に避難地および交差点ノード、避難命令発信の基地局および幹線避難経路の配置図を示す。基地局には、各市町の7箇所の消防署を選んだ。交差点ノードは190個で、その内避難地ノードには各市町村の地域防災計画⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾を参考として72個を選んだ。住区の個数は144である。なお、1格子内に複数の避難地があるときはそのうちのどれか1つを選び、収容数の限度はないものとした。道路幅員は、13m、9mおよび5mの3種類とし、13mの道路は国道1号線のみで、国道24号線や主要道路は9m、その他の地方道や堤防上の道路は5mとした。

避難のシミュレーションをTable 2に示す40ケースについて行った。避難予警報の伝達速度 V_i が無制限大、すなわち避難の予警報が発令されると同時に一斉に各住民グループが避難を開始する場合と、サイレン等による伝達速度として $V_i = 300$ m/分あるいは広報車等による伝達速度として $V_i = 85$ m/分を用い⁽⁸⁾、この情報が各格子まで伝播して初めて避難を開始する場合、避難の予警報がそれぞれ破堤0, 15, 30分前に発令される場合および氾濫水が来て初めて避難を開始する場合の10通りと、それぞれについて破堤点をP1, P2, P3およびP4の4通りに選んだ計40通りである。

数は堤内地で $n = 0.04$ 、河道内で $n = 0.025$ とする。また、氾濫水の挙動に対する家屋構造物の影響を考慮するため、通過率を用いた氾濫計算⁽²⁾を行なう。

氾濫計算の30ステップ、すなわち60秒に1回60秒間の避難計算を実行する。避難対象者は各破堤点での氾濫計算から求まる湛水深の分布から、地盤高が50m以下の地域とし、データの整理の煩雑さを避けるため、高層団地など浸水とは無関係なところに居住している人も避難対象者とする。なお、避難地の選択に関する付加条件における係数 a の値は1.0とする。

Table 2. Simulation case in Ogura basin

CASE	Propagation Velocity of Refuge Order V_r (m/sec)	Time of Refuge Order Issue T_r (sec)	Bank Breach Point
1-A	∞	0	P1
1-B	5.0	0	P1
1-C	1.4	0	P1
1-D	∞	-900	P1
1-E	5.0	-900	P1
1-F	1.4	-900	P1
1-G	∞	-1800	P1
1-H	5.0	-1800	P1
1-I	1.4	-1800	P1
1-J	Refuge starts when mesh is inundated		
2-A	∞	0	P2
2-B	5.0	0	P2
2-C	1.4	0	P2
2-D	∞	-900	P2
2-E	5.0	-900	P2
2-F	1.4	-900	P2
2-G	∞	-1800	P2
2-H	5.0	-1800	P2
2-I	1.4	-1800	P2
2-J	Refuge starts when mesh is inundated		
3-A	∞	0	P3
3-B	5.0	0	P3
3-C	1.4	0	P3
3-D	∞	-900	P3
3-E	5.0	-900	P3
3-F	1.4	-900	P3
3-G	∞	-1800	P3
3-H	5.0	-1800	P3
3-I	1.4	-1800	P3
3-J	Refuge starts when mesh is inundated		
4-A	∞	0	P4
4-B	5.0	0	P4
4-C	1.4	0	P4
4-D	∞	-900	P4
4-E	5.0	-900	P4
4-F	1.4	-900	P4
4-G	∞	-1800	P4
4-H	5.0	-1800	P4
4-I	1.4	-1800	P4
4-J	Refuge starts when mesh is inundated		

*) $T_r=0$ (sec) means that evacuation order is issued concurrently with river bank breach.

*) $V_r=\infty$ (m/s) means that refuge starts all together with evacuation order issued.

しかし、両ケースとも破堤口近傍にいたグループは避難不可能な状態に陥っている。CASE 4-A の場合、破堤 10 分後、国道 1 号線付近に多くの避難中の住民がみられる。破堤 20 分後にはその数は減少してはいるものの、氾濫域の拡大により避難不可能となった住民も増加している。CASE 1-A でも破堤 10 分後にはまだ氾濫水の影響が無い国道 1 号線付近に多くの避難中のグループがみられる。その原因としては、Fig. 16 からわかるように、この付近に避難施設が少ないこと、避難経路の選択が限られており、もともと避難地までの所要時間がかかること、とくに CASE 4-A では氾濫域の拡大に伴い、最寄りの避難地が避難地として不適当となるために経路を変更し、国道 24 号線付近の別の避難地に移動すること等が考えられる。

Table 3 は破堤 40 分後（各 A~I のケース）あるいは 4 時間後（各 J のケース）における各ケースの避難完了者数、避難未完了者数（避難中の者は除く）、平均避難所要時間および遭難者平均移動時間（避難不可能となった者が避難開始から避難不可能な状態に至るまでの平均時間）を示したものである。この表より、平均所要時間は各ケースとも 5 分程度で、破堤点や伝達速度および避難開始時刻の違いによってあまり差がないことがわかる。また、遭難者平均移動時間も CASE 4-D が約 1400 秒 CASE 3-D, 4-F, 4-D が 1200 秒程度でその他は 1000 秒以下であり、避難未了者の多くは避難行動開始からかなり早い時期に避難不可能な状態になっていることがわかる。避難未了者数に着目すると、これはケースによりかなりばらつきがある。氾濫水がきてから避難を開始する各 J のケースでは避難中の者も相当数認められ、避

4.3 計算結果とその考察

Fig. 17 は、各基地局から同時に避難命令を発令し、その情報が基地局を中心とした同心円状に広がっていくとしたときの避難開始時刻の分布を示したものである。なお、破堤開始時刻を $t=0$ 秒としている。伝達速度が 5 m/s の場合、10 分以内に情報が全住民に伝達されることがわかる。伝達速度が 1.4 m/s では、場所によって避難開始時刻にかなりの差がみられ、30 分以上かかる場所も存在する。基地局として消防署を用いたため、これが位置する周辺部での情報伝達所要時間が当然短くなっているが、洪水時の警報がどこから発せられるのかは地域防災計画でも明確にはされていない。たとえば火の見やぐらがあるような公民館ではたいていサイレンがあり、こういった所からも避難警報が出されるのか、市役所や警察署からも出されるのか明確でない。避難開始時刻が早いか遅いかで避難がうまくいくかどうかが決まることもあるので避難命令発令の基地局を明確にしておくことが重要となろう。

Fig. 18 および Fig. 19 は、それぞれ破堤と同時に全住民グループが一斉に避難行動を開始する CASE 1-A と CASE 4-A について破堤 10 分および 20 分後の氾濫水の湛水深の分布と避難の状況、すなわちどの位置にいた住民グループが避難を無事完了したか、避難中かあるいは水深が 70 cm 以上の氾濫水に捕捉されて避難不可能な状態になったかを示したものである。破堤と同時に全住民グループが避難を開始するので、破堤 10 分後には大部分のグループが避難を完了していることがわかる。

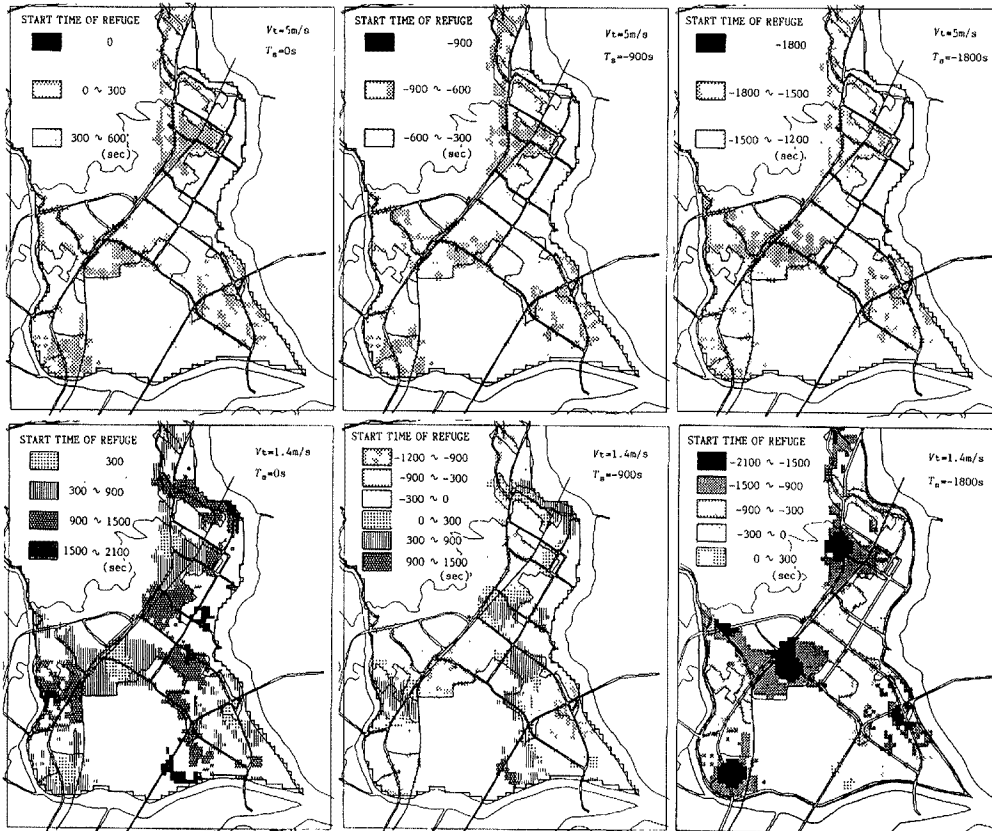


Fig. 17. Distribution of start time of evacuation.

難未了者数が50,000人規模となっている。ついで避難未了者が多いのは破堤と同時に避難命令を発令する場合で、各BとCのケースのように伝達に時間がかかり、破堤後かなり時間が経過してから避難を開始するといった危険な状態での避難となるからである。このときは後出の Fig. 20 や Fig. 21 でもわかるが、破堤口近傍の住民が避難不可能となっている。一方避難未了者数が少ないのは、破堤15分および30分前に一斉に避難する場合である。とくに、各G, Hのケースでは全て避難未了者数がゼロとなっている。したがって、この流域では破堤後40分までに全員が避難を無事完了するには、少なくとも破堤30分前には避難命令を発令し、しかも情報の伝達速度が5.0 m/s以上が必要であることがわかる。破堤点に着目すると、P1地点での破堤が他の場合より避難未了者が多くなっている。これは、P1破堤点の近傍に人口が密集した地域があるため、この地点での破堤が極めて危険なことを物語っている。しかし、CASE 1-G や CASE 1-H のように早期の避難が行われれば、避難完了度はかなり高まると言える。

つぎに、各避難条件のもとでどの地域の住民が避難困難な状態になるのかを見よう。Fig. 20 および Fig. 21 は、それぞれP1とP4を破堤点に選んだときの破堤40分後あるいは4時間後（各Jのケースのみ）における避難の状況を示したものである。なお、破堤後40分までに住民が避難を完了したケースは省略してある。CASE 1-A や 4-A のように破堤と同時に一斉に避難を開始するケースでは避難未了者は破堤点付近の狭い範囲に分布している。これは、破堤と同時に避難を開始するために破堤点付近の住民は避難開始後短時間で避難不可能となるが、破堤点から若干離れた場所の住民は破堤後の開始にもかかわらず、氾濫水の拡がりに対応して水の無い方向の避難地を選択して無事避難できるからだとと思われる。平均避難所要時間はそのため、CASE 1-B, 1-C や CASE 4-B, 4-C では、破堤直後に避難命令が発令されるため、情報伝達に時間がかかり、破堤点から離れた地域での避難開始が遅れ、CASE 1-A や CASE 4-A よりも広い範囲に避難未了者が分布していることがわかる。また、情報伝達速度が5.0 m/s

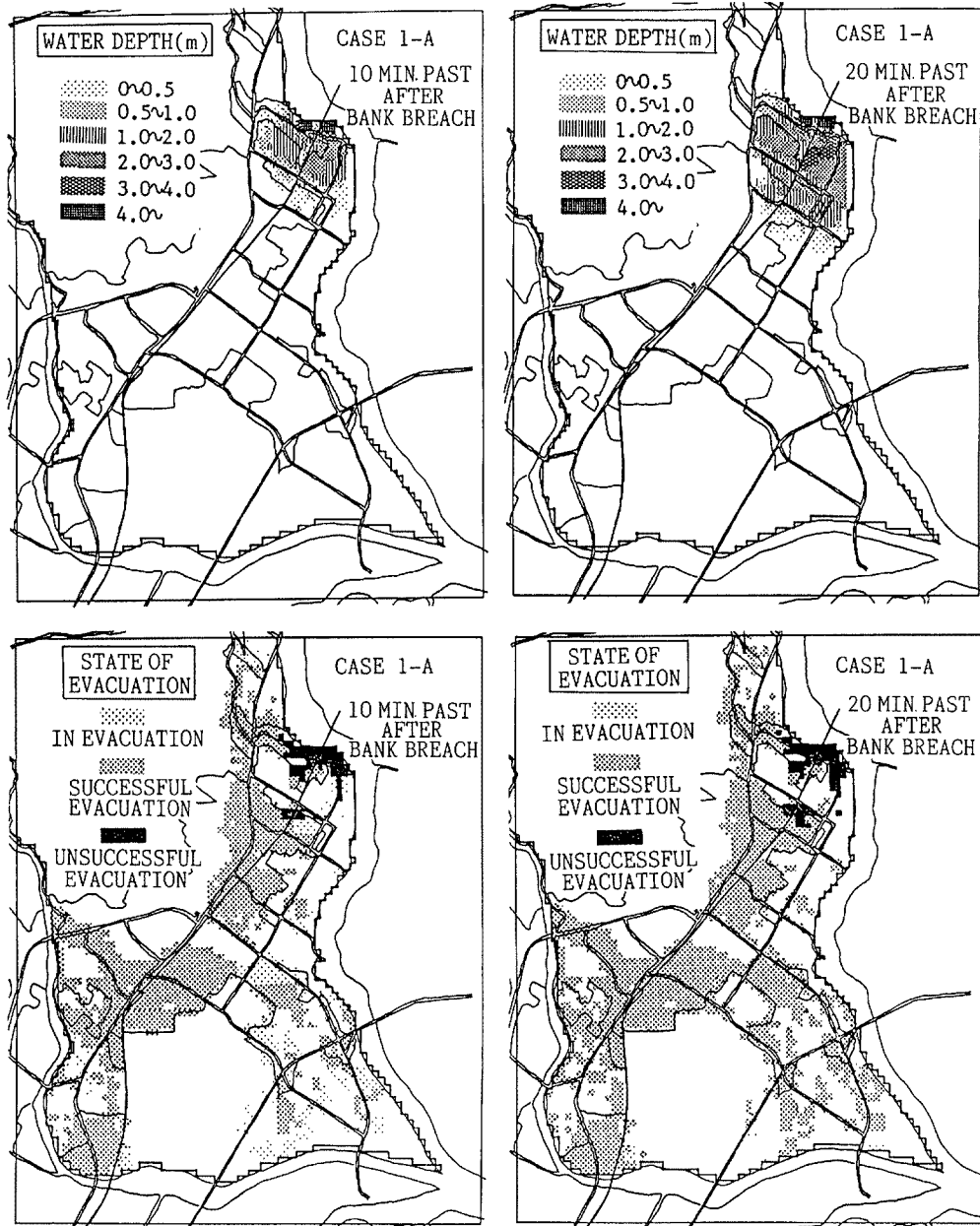


Fig. 18. Distribution of state of evacuation and water depth at 10 and 20 minutes after bank breach in CASE 1-A.

と1.4 m/sとでは情報伝達速度の遅いケースの方が避難未了者が広い範囲にわたって存在し、その数が格段に多くなっていることが **Table 3** からわかる。このことは他のどのケースについても言える。CASE 1-E, 1-FおよびCASE 4-D, 4-E, 4-Fでは、各A, B, Cのケースに比して避難未了者数が激減している。これは、避難勧告の発令時期を破堤15分前にしたためである。ところが、伝達時間を全く要しないCASE 4-Dでも破堤点から離れた地点の住民が避難未了となっている。この原因は以下のように考えられる。すなわち、避難未了となる住民は、破堤点近くの避難地を最寄りの避難地を選択し、破堤前の15分という時間を利用してこの避難地へ向かおうとするが、避難地到着直前ぐらいに破堤が起こり、急激な冠水に見舞われて避難不可能になるからであろう。**Table 3**より、CASE 1-DおよびCASE

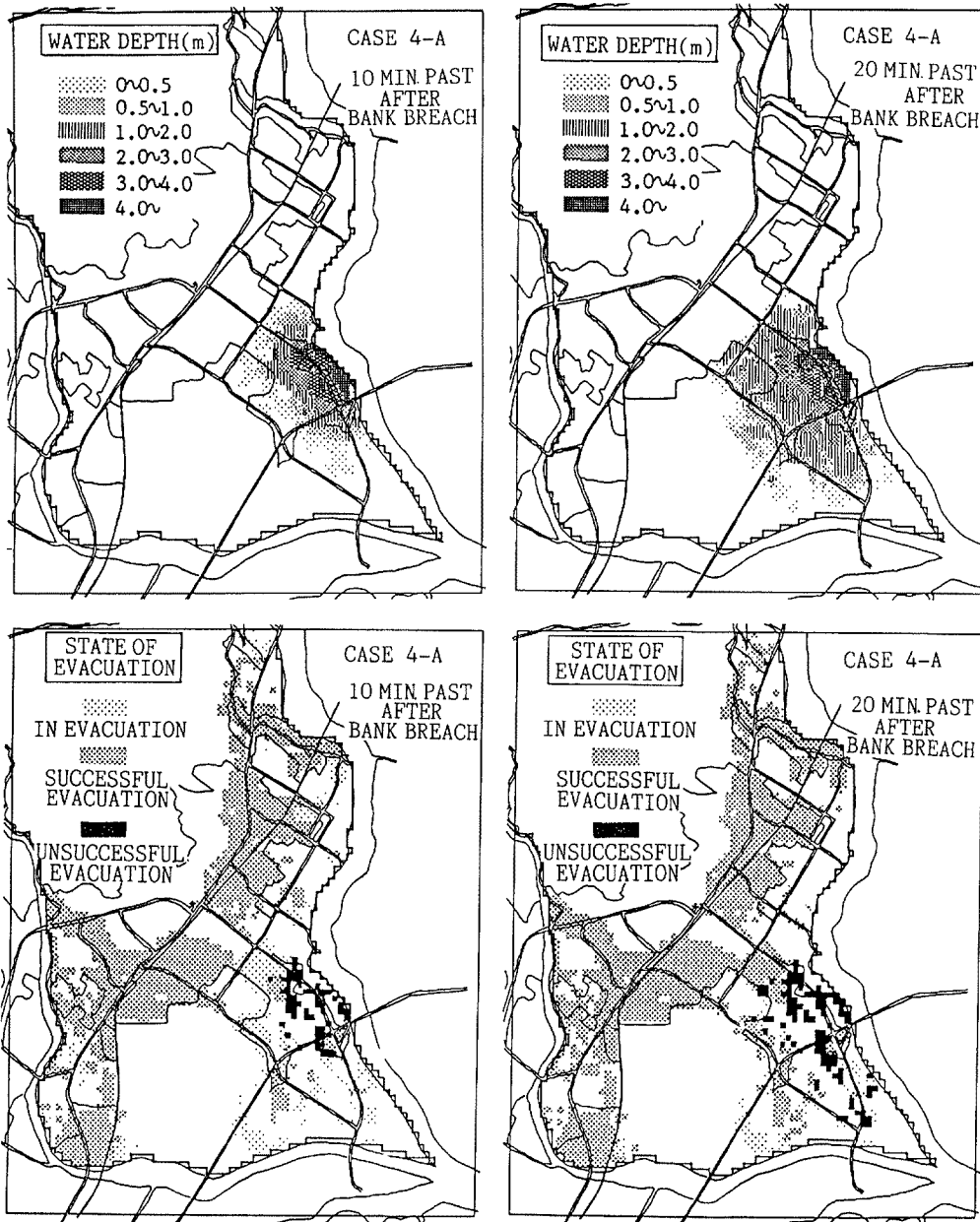


Fig. 19. Distribution of state of evacuation and water depth at 10 and 20 minutes after bank breach in CASE 4-A.

2-Dは全員が避難完了するが、それ以外のCASE 3-DおよびCASE 4-Dでは避難所要時間が他のケースよりかなり長くなっていることがこのことを裏付けている。このように、破堤点から少し離れた地点の住民は破堤前に破堤点に近付くといった避難地の選択方法に問題があったと言え、避難勧告には予想される破堤地点の情報などが含まれていないと危険な方向に避難してしまうという事態も起こり得ることがわかる。このことを回避するために、たとえば破堤点に近付かないような避難ルートをとるようにすると、目前に最寄りの避難地があってもそれが破堤点に近付くことになればこれを見逃して別の避難地を選ぶという現実にはそぐわないことも生ずる。このことから、より安全な状態で最寄りの避難地へ避難すること、すなわち、予想される破堤から十分余裕をもった避難が行われることが望ましく、また、破堤が突

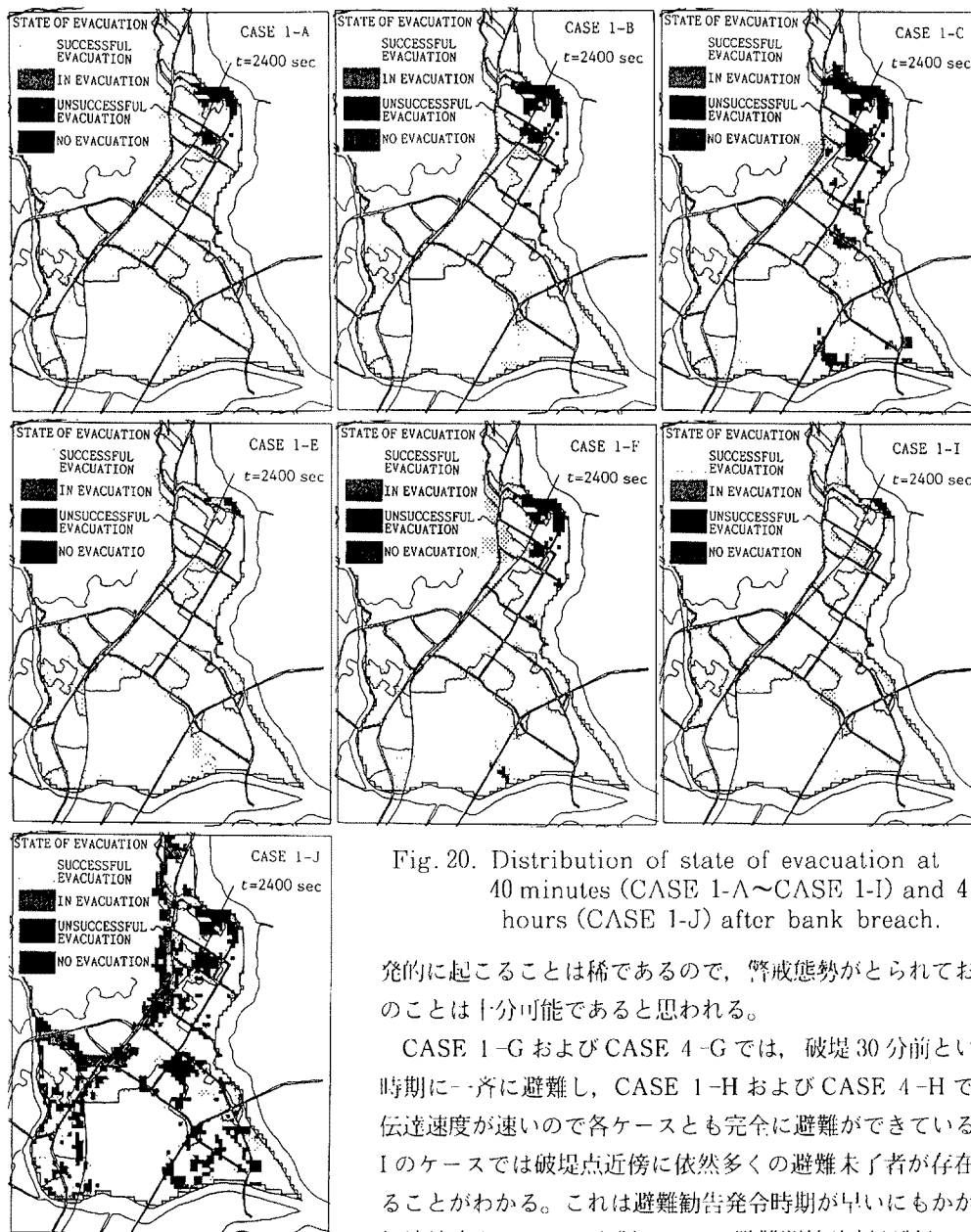


Fig. 20. Distribution of state of evacuation at 40 minutes (CASE 1-A~CASE 1-I) and 4 hours (CASE 1-J) after bank breach.

発的に起こることは稀であるので、警戒態勢がとられておればこのことは十分可能であると思われる。

CASE 1-G および CASE 4-G では、破堤 30 分前という早い時期に一齐に避難し、CASE 1-H および CASE 4-H でも情報伝達速度が速いので各ケースとも完全に避難ができていますが、各 I のケースでは破堤点近傍に依然多くの避難未了者が存在していることがわかる。これは避難勧告発令時期が早いにもかかわらず、伝達速度が 1.4 m/s と遅いので、避難開始時刻が遅れて各 D の

ケースと同じ経緯を辿り避難不可能になるものと推察される。

氾濫水が来て初めて避難を開始する CASE 1-J と CASE 4-J では、避難不可能になったグループと移動中のグループが他のケースに比して極めて多くなっている。浸水が始まってから避難を開始すること自体がかなりの危険を伴うことではあるが、モデル上、住区内の住民は細街路にいくら水深があっても決められたただ 1 つのネットワーク上のノードに出なければならないとしたことも避難未了者を多く出した要因ではあると思われる。

最後に、全員が無事避難を完了した CASE 1-H について、避難所要時間の分布を示したものが Fig. 22 である。これより、国道 1 号線より西の地域で避難所要時間が 20 分～40 分程度のところが多く存在する。したがって、この地域における避難地の配置や避難勧告発令基地局を設置することで、より安全な避難が可能となるものと思われる。

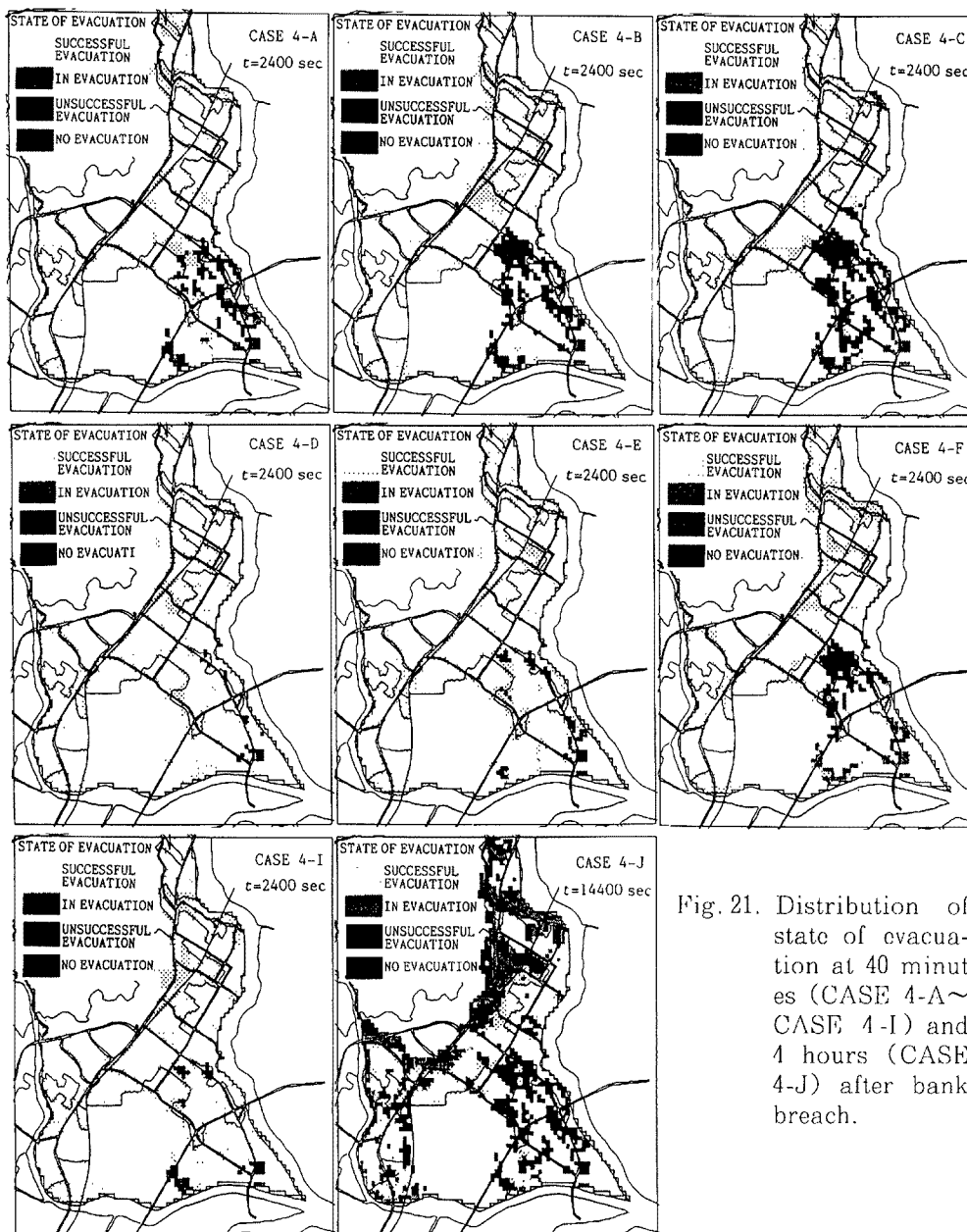


Fig. 21. Distribution of state of evacuation at 40 minutes (CASE 4-A~CASE 4-I) and 4 hours (CASE 4-J) after bank breach.

5. 結 語

以上、ここでは氾濫計算に基づいた避難のシミュレーション法について述べた。特定の流域における具体的な洪水氾濫による死者数の多寡などについて論じようとしたものではなく、あくまで、避難条件や破堤条件に対する避難の難易について考察し、より安全な避難システム構築の基礎となる情報を得るための方法論を議論したつもりである。本研究で得られた主要な結果並びに問題点について以下に列挙し結語とする。

1) 氾濫計算に用いる計算格子と避難行動の計算に用いる避難ネットワークを明確に対応付けることにより、氾濫水の挙動を考慮した住民の避難行動の予測手法を開発した。

Table 3. Calculation results

CASE	Number of Successful Evacuation	Number of Unsuccessful Evacuation	Mean Time Required for Successful Evacuation	Mean Time Required for Unsuccessful Evacuation
1 - A	166,520	11,410	334 (sec)	248 (sec)
1 - B	163,223	14,707	329	131
1 - C	147,793	24,036	296	73
1 - D	177,930	0	335	—
1 - E	175,379	2,051	335	617
1 - F	165,528	11,982	328	149
1 - G	177,930	0	332	—
1 - H	177,930	0	332	—
1 - I	175,325	2,105	334	389
1 - J	81,754	62,576	334	195
2 - A	171,922	6,008	338	564
2 - B	169,497	8,363	339	366
2 - C	146,912	23,524	298	81
2 - D	177,930	0	335	—
2 - E	177,777	132	340	925
2 - F	170,436	6,317	341	281
2 - G	177,930	0	332	—
2 - H	177,930	0	332	—
2 - I	177,708	222	339	1,235
2 - J	86,270	54,578	371	225
3 - A	170,731	7,199	331	461
3 - B	165,177	12,741	321	185
3 - C	149,231	24,812	286	35
3 - D	177,498	432	333	1,202
3 - E	174,553	3,377	326	925
3 - F	164,220	13,300	323	189
3 - G	177,930	0	332	—
3 - H	177,930	0	332	—
3 - I	174,173	3,757	325	802
3 - J	82,890	45,353	345	157
4 - A	169,591	6,061	325	555
4 - B	162,322	12,798	286	317
4 - C	156,455	17,078	272	92
4 - D	175,468	1,599	319	1,451
4 - E	172,672	5,149	312	1,222
4 - F	163,703	11,619	290	348
4 - G	177,930	0	332	—
4 - H	177,930	0	332	—
4 - I	173,468	4,114	318	1,243
4 - J	73,130	42,495	325	205

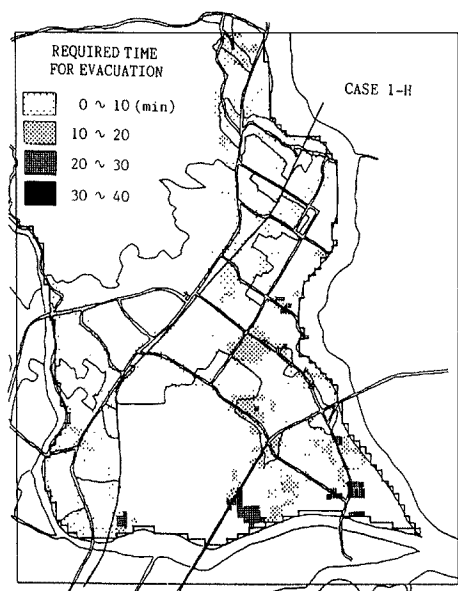


Fig. 22. Distribution of required time for evacuation in CASE 1-H.

2) この手法をまず、単純な仮想のモデル流域に適用して、その妥当性について検討した。その結果、住民の避難行動を単に最短経路選択問題に定式化して考えると、氾濫水のくる方向に住民が避難するといった現実にはそぐわないことも起こり得ることから、避難地、避難経路選択の際に氾濫範囲などを考慮する付加条件を与えることにより、そのような問題を解決し、より実際に近いモデルを考案した。

3) 避難予警報を出す時期については、破堤時刻との関係から早く出し過ぎてもかえって危険な方向へ避難したり、発令が遅い場合よりも避難所要時間が増加したり、かなり微妙な結果となった。

4) この手法を巨椋流域に適用することにより、この流域では破堤後 40 分までにはほぼ全員が避難するには、少なくとも破堤 30 分前には避難命令を発令し、しかも情報の伝達速度が 5.0 m/s 以上必要であることがわかった。

5) 破堤前に避難行動を開始する場合は、破堤点の位置などについて予め情報が入手されないと破堤点付近の避難地に向かうことにより、氾濫水に補足されることも起こり得る。実際の避難時には住民が堤防近くの避難地に避難することは少ないと考えられるので、避難のシミュレーションにはこういった点もさらに考慮する必要があると思われる。

6) 避難勧告の伝達速度は避難のシミュレーション結果を大きく左右する。伝達速度をここでは 1.4 m/sec と 5.0 m/sec とおいたが、実際の情報伝達速度はよくわからないので、これを明確にするともに避難勧告発令の基地局の所在地も避難住民に周知させる必要がある。また、ここでは勧告を受けた住民は全員が直ちに避難を開始することになっているが、シミュレーションをより現実的なものにするためには、住民が避難勧告を受けてから避難を開始するまでの時間、家屋の構造などによって勧告を受けても避難をしない住民、あるいは避難の必要が無い住民の考慮が必要である。

7) 洪水氾濫という緊急時における人間の行動を正確に把握し、再現することは非常に困難で、ここで述べた手法もまだ多くの問題点を有している。今後は、災害時の避難行動についてのアンケート調査結果やそれに関する多くの研究成果を積極的に取り入れた避難のシミュレーション法に改良していく必要がある。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費（重点領域研究（2）課題番号 63601525）の補助を受けた。また、計算は京都大学大型計算機センターのシステムを利用した。関係各位に記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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, pp.166-177.
- 2) Takahashi, T. and H. Nakagawa: Hazard Zone Mapping in Respect to the Damages to Wooden Houses due to Breaking of Levee, Bull. DPRI, Kyoto Univ., Vol.37, 1987, pp.59-90.
- 3) 地域防災データ総覧 地域避難編, 財団法人 消防科学総合センター, 1987, p.15.
- 4) 伊理正夫・古林 隆: ネットワーク理論, OR ライブラリー 12, 日科技連, 1976, pp.47-52.

- 5) 巨椋池土地改良区発行：巨椋池干拓誌, 1981, pp.149 - 160.
- 6) 宇治市防災会議：宇治市地域防災計画, 1985.
- 7) 城陽市防災会議：城陽市地域防災計画, 1985.
- 8) 久御山町防災会議：久御山町地域防災計画, 1985.
- 9) 京都市防災会議：京都市地域防災計画, 1985.