

洪水氾濫解析とリンクした避難のシミュレーション

Simulation on Group Evacuation Linked with an Inundation Analysis

京都大学防災研究所 高橋 保 Tamotsu TAKAHASHI

京都大学防災研究所 中川 一 Hajime NAKAGAWA

京都大学大学院 東山 基 Motoi HIGASHIYAMA

A simulation method on evacuation system linked with a simulation method of an overland flood due to river bank breach is presented. A selection of the shortest way to the evacuation site is solved by using the Warshall-Floyd method. Validity of this simulation method is examined at first under the several conditions of evacuation in a model study area. Subsequently, the evacuation of groups can be simulated well by using this simulation method of evacuation linked with an inundation analysis. Finally, this model is applied to the actual basin (Ogura basin, situated in the south of Kyoto Prefecture), and group evacuation is simulated under several conditions.

Keywords: evacuation, inundation, simulation

1. はじめに 本研究は、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、その流域内に避難経路、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dynamic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ものである。まず、仮想のモデル流域を用いてこの手法の妥当性を検討し、ついで近年都市化の進行為顕著な京都盆地南部の巨椋流域に適用して破堤地点の違いや避難の予警報の出し方の違いで避難の難易がどのようになるかを比較検討する。

2. 洪水氾濫解析の基礎式 氾濫計算に用いた基礎式は、以下に示す二次元平面流れに関する運動量式と連続式である。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uM) + \frac{\partial}{\partial y}(vM) = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \dots (1) \quad \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uN) + \frac{\partial}{\partial y}(vN) = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \dots (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \dots (3) \quad \tau_{bx}/\rho = \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \quad \tau_{by}/\rho = \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \dots (4)$$

ここに、MおよびN; 各々xおよびy方向についてM=uh, N=vhと定義した流量flux, uおよびv; 各々xおよびy方向の流速成分, h; 水深, H; 水位(H=h+z_b; z_b; 地盤高), ρ; 水の密度, g; 重力加速度, n; Manningの粗度係数である。

以上の基礎式を差分化して、氾濫水の流動に対する格子内家屋群の影響を考慮するため、通過率による流量fluxの補正を行った数値計算を実行するが、これには著者らが以前に行った方法を用いる¹⁾ことにする。

3. 避難行動のシミュレーションの概要 まず、避難ネットワークのモデル化の方法について述べる。対象とする流域の避難施設、避難経路に基づいて図1に示すようなネットワークを、結節点(ノード、交差点)とそれらを結合する経路(リンク)を組み合わせることにより構成する。その際、避難施設は小・中・高等学校等の避難施設として公的に定められたものを用いることとし、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、堤防上の道路を採用する。避難経路の冠水情報と氾濫計算から求まる各格子の水深とを対応付けるため、避難経路は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(複数でもよい)格子の中央を結んだ直線群から構成されるとする。以後、このネットワークを幹線経路からなる避難ネットワークと呼ぶ。

つぎに、住民の避難行動のモデルについてのべる。一般に、複数箇所に存在する避難施設の中から、住民が一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避難施設の選択をネットワ

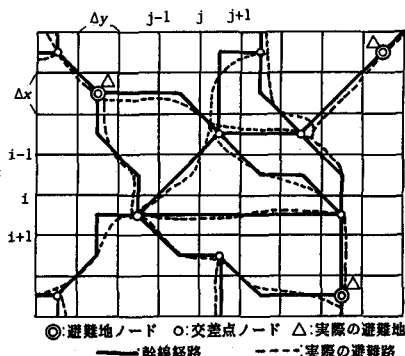


図1 避難ネットワークのモデル例

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、ある格子内の住民は避難の各時点でそれぞれの避難施設までの最短距離を避難経路の浸水状況を考慮して計算し、最短距離にある避難施設へ向かって避難するものとする。この場合図2に示すように、避難経路、避難地および避難対象グループ（氾濫解析に用いる1格子内の住民をグループと呼ぶ）の位置の3つの位置関係から、1)グループが幹線経路上もしくはその交差点上に位置する場合、2)住区（いくつかのグループの集団）内から住区内の街路（以後細街路と呼ぶ）を経由して一旦どこかの幹線経路の交差点に出なければならない場合および、3)住区内に避難施設が存在するため細街路を利用して直接避難地に移動し、幹線経路の避難ネットワーク上に出る必要が無い場合、が存在する。ここでは、1)については幹線避難経路上からの避難とし、2)については全ての住区内に図2に示すような格子点の中央を直線で結んだ仮想的な細街路が存在するものとして、指定されたただ1つの幹線経路上の交差点ノードにまず移動して、その後は幹線経路のネットワークのみを利用し、再び他の住区内の細街路は利用しないこととする。住区内の細街路内の避難は、幹線経路の避難ネットワークで行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してノードに出ることとする。3)については2)と同様に住区内の避難地（2)では交差点ノード）への最短経路問題を解くこととなる。なお、避難対象者は洪水氾濫による湛水が予想される範囲の住民とする。

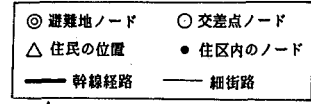
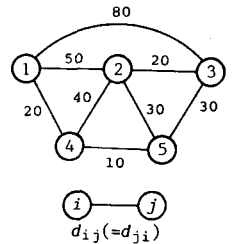


図2 幹線経路、住区、細街路の配置

存在するものとして、指定されたただ1つの幹線経路上の交差点ノードにまず移動して、その後は幹線経路のネットワークのみを利用し、再び他の住区内の細街路は利用しないこととする。住区内の細街路内の避難は、幹線経路の避難ネットワークで行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してノードに出ることとする。3)については2)と同様に住区内の避難地（2)では交差点ノード）への最短経路問題を解くこととなる。なお、避難対象者は洪水氾濫による湛水が予想される範囲の住民とする。

さて、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。なお、住区内の細街路での移動は、目的地が指定された1つのノードか避難地であるため、他の簡便な方法を用いればよいが、住区内のネットワークは小規模であるのでこれにもWarshall-Floyd法を用いることにする。

そこで、Warshall-Floyd法について若干の説明を行っておく²⁾。いま、図3のようなネットワークを考える。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。計算手順は以下のものである。(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 の値を1だけ増して手順(b)にもどる。ここに、 $d_{i,j}^{(k)}$ 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 $n_1, n_2, \dots, n_k$ だけを許すものの中の最短距離である。 $p_{i,j}$ 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である。図3において任意の2点間の最短距離を求めることを考える²⁾。このとき、



$$(d_{ij}^{(0)}) = (d_{ij}) = \begin{pmatrix} 0 & 50 & 80 & 20 & \infty \\ 50 & 0 & 20 & 40 & 30 \\ 80 & 20 & 0 & \infty & 30 \\ 20 & 40 & \infty & 0 & 10 \\ \infty & 30 & 30 & 10 & 0 \end{pmatrix} \dots\dots (5) \quad (p_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \end{pmatrix} \dots\dots (6)$$

なお、 $p_{i,j}$ 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、最短経路における目的地の直前のノード番号が自分自身、すなわち、どの地点ノードも中間地点として許されないとしておく、ということである。(a)~(d)の手順を m 回繰り返すと最終的な $p_{i,j}$ は次のように求まる。

$$(p_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 5 & 1 & 4 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 4 & 3 & 3 & 5 & 3 \\ 4 & 4 & 5 & 4 & 4 \\ 4 & 5 & 5 & 5 & 5 \end{pmatrix} \quad \text{これより、}(n_3, n_5, n_4, n_1) \text{ が最短経路であることがわかる。最短経路を求める時の手間は、大小比較と加減算である。Warshall-Floyd法は全最短経路を求める解法の中では最も良いものの1つであると言われている}^{2)}。$$

避難地までの最短経路を求める際に、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歩行通行困難になったりもする。ここでは、西原³⁾が行った方法と同様に、冠水深の程度に応じた歩行割引率を次式のように定義し、これを用いて経路長が冠水深の規模に応じて見かけ上長くなることとし、計算上冠水した経路の避難地までの経路は長くなるようにする。

$$W_{ij}^t = 1 - h_{ij}^t / 0.7 \quad (W_{ij}^t > 0) \quad (\text{unit:m}) \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$d_{ij}^t = (1 / W_{ij}^t) d_{ij} \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 W_{ij}^t ;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}^t ;時刻tでの格子(i,j)の冠水深、 d_{ij} ;格子(i,j)に対応する区間の距離(ノード間の距離 $d_{i,j}$ ではない)、 d_{ij}^t ;時刻tでの格子(i,j)に対応する冠水により換算された区間の距離である。なお、伊勢湾台風の事例をもとに、冠水深が70cm以上であれば通行不可能とし、その時点で避難行動は中止され、いくら冠水が引いても避難行動は再開されないこととする。また、歩行速度についても、西原³⁾と同様に、避難時間の長さに応じた疲労曲線により、次式を用いることにする。

$$V = T^t \cdot c \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$T^t = 1.0 / \{0.982 + \exp(1.12t - 4)\} \quad (\text{unit:hour}) \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここに、c;通常の歩行速度で、以下1.4m/sを用いる、t;避難開始からの経過時間、 T^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、V;避難開始から時刻tにおける疲労を考慮した歩行速度である。

さて、単に最短距離にのみ目的地を決定すると、そこに到達するために湛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向かって避難を開始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、図4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、避難地が破堤口を中心とした半径 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。たとえば、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。

以上は住民グループの位置がノード上にある場合であるが、経路上にある場合は前後方向のノードまでの距離を加えた最短経路を計算して避難地を選択するものとする。

4. モデル流域における避難のシミュレーション手法の検討 以上の氾濫計算と避難のシミュレーション手

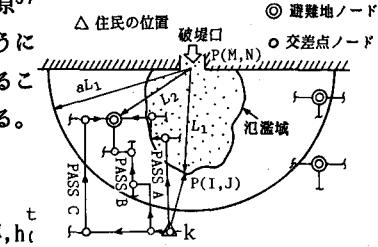


図4 氾濫範囲と避難地の選択

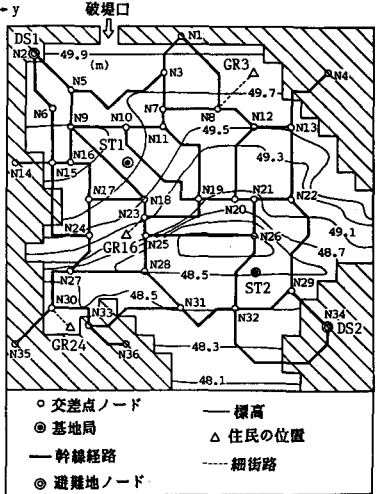


図5 モデル流域の概要と経路

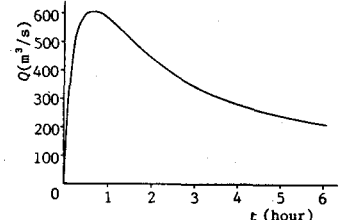


図6 氾濫流量ハイドログラフ

表1 モデル流域での避難計算条件

CASE A	破堤と同時に一斉避難、氾濫水考慮せず
CASE B	破堤と同時に一斉避難、氾濫水考慮
CASE C	破堤30分前一斉避難、氾濫水考慮
CASE D	破堤と同時に一斉避難、 $L_2 < a \cdot L_1$ なる範囲の避難地選択せず
CASE E	CASE Dの条件下で、最短経路が冠水していなければ避難地として選べる
CASE F	CASE Eの条件下で、最短経路の地盤高の嵩上げで経路が冠水しない場合
CASE G	CASE Eの条件下で、それぞれ避難命令が破堤0, 15, 30分前に出され、その
CASE H	伝播速度が5m/sで、この情報を得て初めて避難を開始する
CASE J	それぞれCASE G, H, Iに対応し、避難
CASE K	情報の伝播速度が1.4m/s
CASE L	

法を用いてモデル流域を対象としたシミュレーション手法の検討を行う。モデル流域は図5に示すように、 $\Delta x = \Delta y = 125\text{m}$ に分割した総格子数が 20×20 の流域である。破堤口から堤内地へ流入する洪水ハイドログラフを図6に示す。計算ケースとして表1に示す12通りを考える。図7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GR3、GR16およびGR24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GR24

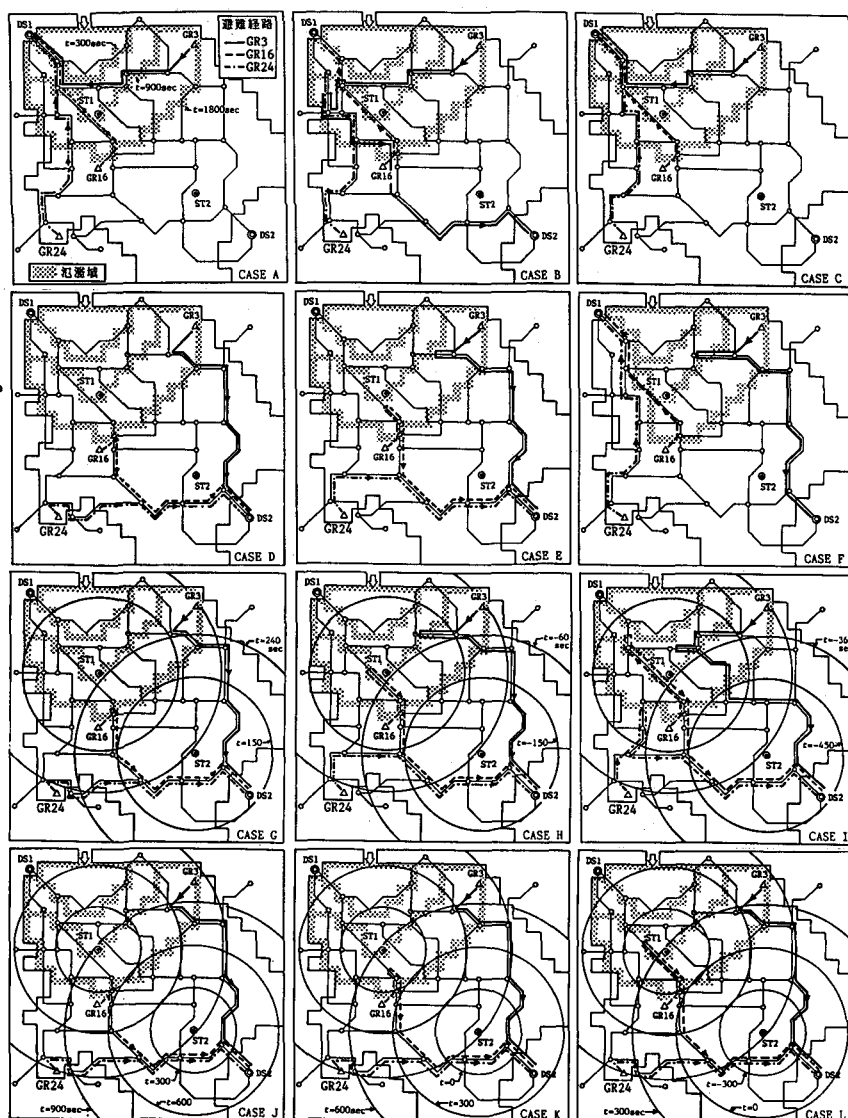


図7 モデル流域での避難のシミュレーション結果

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、最短路となるDS1を避難地を選んでいる。CASE BではDS1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70cm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DS1に避難している。CASE Dでは、避難地DS1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DS2へ避難している。CASE Eではまず、 $L_2 < a \cdot L_1$ なる範囲にDS1が入っているが氾濫初期にはDS1への避難経路が冠水していないので一旦DS1の方向へ移動するが、時間経過とともにDS1への避難経路が冠水するので途中からDS2へ方向を変えている。CASE Fでは、DS1への避難経路の地盤高を高くして冠水しないようにしているため、DS1が $L_2 < a \cdot L_1$ なる範囲に入っているにもかかわらずその方向への避難が許されていることがわかる。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DS1への避難経路が冠水するためにこのノードからすぐにDS2へ避難するようである。伝達所要時間の有無でCASE E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1分前にこれがGR24へ伝達されるので、一旦DS1へ向かって避難し始めるが、破堤発生によりDS1が避難地として不適当となり、避難地をDS2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6分前にこの命令が伝達されるので、DS1へさらに近付いてから途中で避難地をDS2に変更している。CASE J,K,Lでは、伝達速度が遅いのでいずれのケースでも破堤後の移動となり、DS1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DS2に選んでいる。他のグループについてもほぼ同様の結果となっている。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かなり微妙な結果となっていることに注意を要する。なお、ここでは冠水による避難地の範囲指定の定数 a は1.0とした。

5. 巨椋流域を対象とした避難のシミュレーション 図8は、近年都市化の進行が著しい京都南部の旧巨椋池の集水域である巨椋流域の概要とこの流域を125m×125mの格子に分割して1つの格子内に位置する人口(1983年現在)の分布および仮定の破堤地点を示したものである。この流域は、巨椋池干拓地付近が最も標高が低く、すり鉢状になっているためどこが破堤してもこの方向に氾濫水が進行してくる。図9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。破堤条件は瞬間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い、時間差分間隔は2秒、Manningの粗度係数は堤内地で $n=0.04$ 、河道内で0.025、避難地範囲指定の a は1.0とした。

避難のシミュレーションを表2に示す18ケースについて行った。避難予警報の伝達速度 V_t が無限大、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 $V_t=300\text{m/分}$ あるいは広報車等による伝達速度として $V_t=85\text{m/分}$ を用い³⁾、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および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の計20通りである。図10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。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つを選んだ。

表2 計算条件

CASE	V_t	T_s	P
	(m/s)	(sec)	
A	∞	0	P1
B	5.0	0	P1
C	1.4	0	P1
D	∞	-900	P1
E	5.0	-900	P1
F	1.4	-900	P1
G	∞	-1800	P1
H	5.0	-1800	P1
I	1.4	-1800	P1
J	∞	0	P4
K	5.0	0	P4
L	1.4	0	P4
M	∞	-900	P4
N	5.0	-900	P4
O	1.4	-900	P4
P	∞	-1800	P4
Q	5.0	-1800	P4
R	1.4	-1800	P4

図11は、破堤と同時に一斉に避難行動をするCASE AとCASE Kについて、破堤開始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、すなわち最初どの格子にいた人が現在避難中か、避難を完了したかあるいは避難不可能な状態になったかを示したものである。破堤後10分では、両ケースとも破堤口近傍に居たグループは避難不可能な状態となっている。破堤と同時にどのグループも一斉に避難

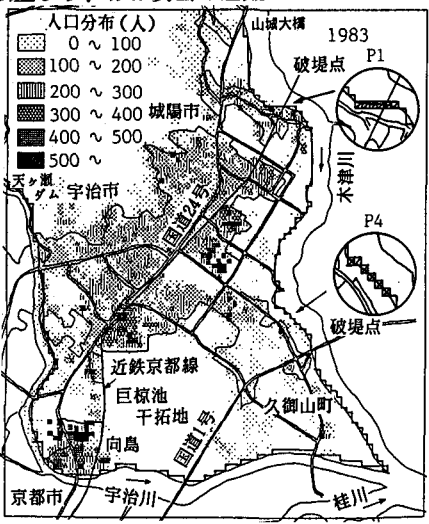


図8 巨椋流域の人口分布と破堤点

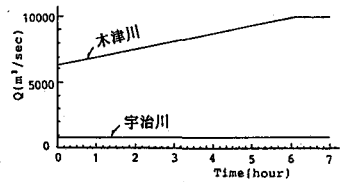


図9 河道の流入境界条件としてのハイドログラフ

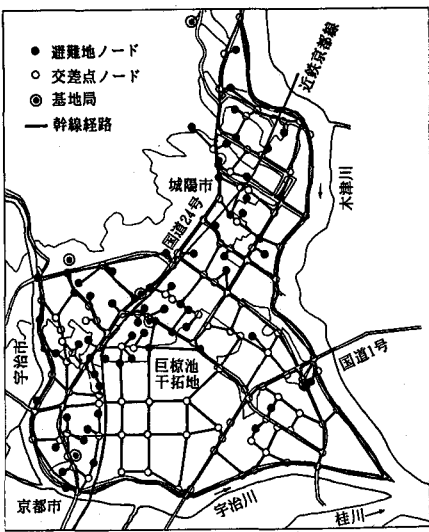


図10 巨椋流域の避難経路図

表3 破堤40分後の各ケースの避難状況

CA	避難完了者数(人)	避難未了者数(人)	平均避難所要時間(秒)	平均避難未了時間(秒)
A	165887	12017	298	288
B	162721	15012	292	92
C	148439	23838	276	107
D	177185	745	331	899
E	174863	3067	316	508
F	164709	12612	307	141
G	177930	0	334	0
H	177733	197	332	1548
I	161203	2786	333	395
J	169075	7950	294	628
K	162089	14577	264	368
L	156471	16427	250	76
M	176959	967	323	560
N	174262	3603	308	787
O	163996	12157	277	216
P	177930	0	334	0
Q	177930	0	334	0
R	172635	4744	310	1168

を開始するため、破堤点からかなり離れた所でも避難しており、特にCASE Aでは破堤点付近と、避難地までの距離が比較的に長い国道1号線周辺では避難中のグループが多い。CASE Jでも同様である。破堤後20分では、避難中のグループがかなり減少し、避難完了のグループが増えているが、破堤点周辺では氾濫域の拡大により移動不可能となっているグループも増加している。

表3は、各ケースについて破堤後40分における避難完了者数、避難未了者数（避難不可能になった者で、避難中の者は省く）、避難完了者のみを対象とした平均避難所要時間、避難不可能となった者のみを対象とした平均避難未了時間をまとめたものである。これより、破堤後40分までに全員が避難地に無事到達するには、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5m/sか、発令と同時に一斉に避難する必要があることがわかる。

6. おわりに 洪水氾濫水のdynamicな動きを考慮した避難のシミュレーションがある程度可能となった。

実際の避難行動は、昼夜の違いによる移動の難易、2階建て以上では避難しないといったような住民の心理状態等もあり、種々の複雑な要因が関連し合っており、ここではこれらがかなり簡略化されているので、これらの要因をも考慮したより現実的な避難のシミュレーション法に改良する必要があるとともに、最適な避難システムを構築するために、さらに種々の条件での計算を行う必要がある。

<参考文献> 1) 高橋・中川・西崎:京大防災研年報,第29号B-2,1986. 2) 西原 巧:京大学位論文. 3) 伊理・古林:ネットワーク理論,日科技連,1976.

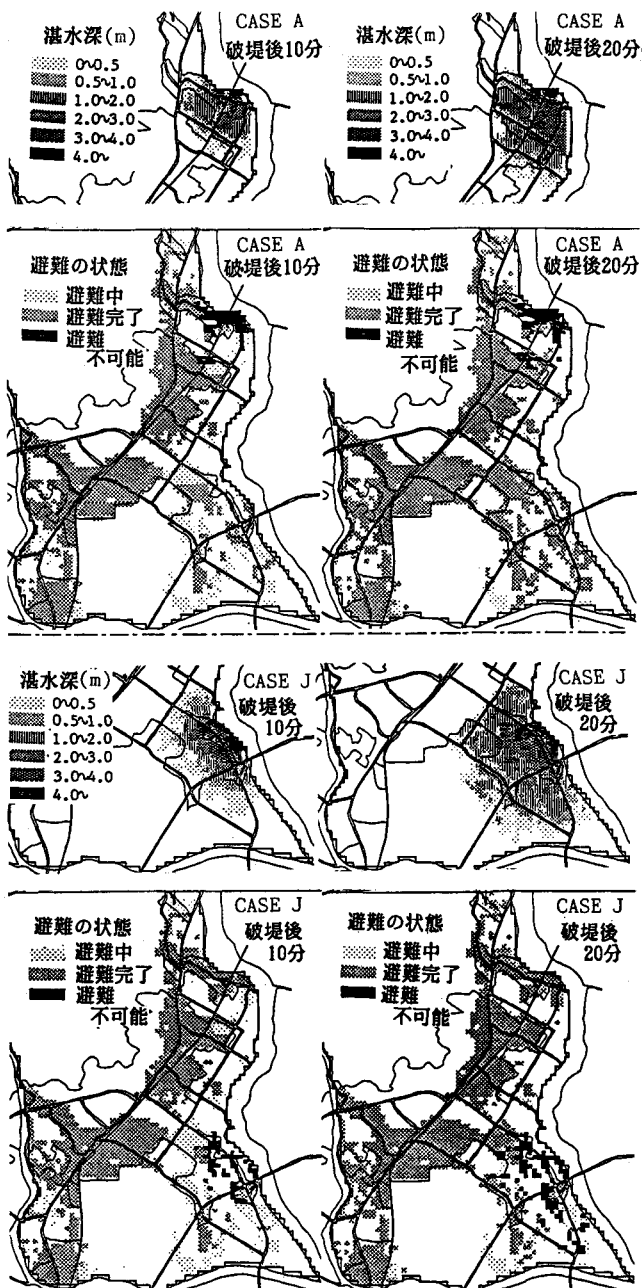


図11 CASE AおよびCASE Jに関する破堤10,20分後の水深分布の計算結果と避難のシミュレーション結果