

# 街路ネットワークモデルに基づく高潮氾濫時の避難行動解析

井上和也\*・川池健司\*\*・山上路生\*\*\*・戸田圭一\*\*\*\*

## 1. はじめに

都市域において高潮氾濫が生じた場合、住民を安全な場所に避難させることが重要な対策となる。この高潮氾濫時の避難行動については、デカルト座標系を用いた氾濫解析に基づいていくつかの検討が行われてきた。しかし、デカルト座標系を用いた氾濫解析では、都市氾濫に影響を及ぼす道路や建造物を考慮することが難しい。そこで本研究では、道路や建造物の影響を容易に考慮できる街路ネットワークモデルを氾濫解析に用いるとともに、同じ街路ネットワークを避難経路に用いた避難行動モデルと組み合わせ、都市域での避難行動解析の高度化を試みる。

## 2. モデルの概要

### 2.1 街路ネットワークモデル

街路ネットワークモデル(林, 1998)は、都市域での氾濫解析において道路や建造物の影響を考慮することを目的として開発されたモデルである。このモデルは、交差点をノード、交差点間の道路をリンクとして街路網をネットワーク化する。そして、道路(リンク)においてはその間をさらに細かい格子に分割して1次元解析を行い、その他の交差点(ノード)および住区(建造物, 空き地, リンクとして認識されなかった細街路などからなる)はそれぞれを1格子とみなし、連続式のみを考慮した氾濫解析を行うことによって、道路沿いの流れをより重視したモデルを構築している。このモデルを用いれば、図-1に示すように、かなり細かい道路まで考慮に入れることが可能となる。

#### a) リンク内の計算

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = \frac{q_{in}}{B} \dots\dots(1)$$

<運動量式>

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gm^2}{h^3} \dots\dots(2)$$

ただし、リンクは長方形一様断面水路とみなし、始点ノードから終点ノードの向きに  $x$  軸をとる。ここに、 $u, M$  はそれぞれ  $x$  方向の流速, 流量フラックス,  $q_{in}$  は横流入流量,  $B$  はリンク幅である。

#### b) ノードおよび住区の計算

ノードおよび住区においては、それらを1格子とみなし、次に示す連続式から水深を求める。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m Q_k \dots\dots(3)$$

ここに、 $h$  は格子の水深,  $A$  は格子の面積,  $Q_k$  は格子辺からの流入流量,  $m$  は格子を構成する辺の数である。

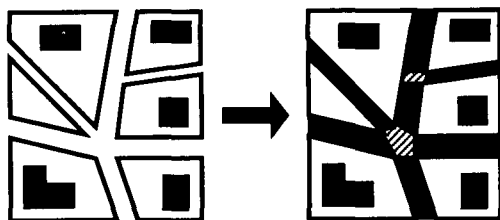
#### c) リンク, ノード, 住区間の流量フラックス

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gm^2}{h^3} \dots\dots(4)$$

つまり、式(2)から移流項  $(\partial(uM)/\partial x)$  を略した関係を用いて、式(1)(3)の  $q_{in}$  と  $Q_k$  を求める。

#### d) 道路, 建造物の影響を考慮した解析

街路ネットワークモデルにおいて、道路や建造物が氾濫水に及ぼす影響を、林(1998)は占有率、通過率の概念と粗度係数を用いて考慮している。まず占有率とは、住区格子面積に対する建造物面積の割合である。したがって、道路格子(リンクおよびノード)の占有率は0となる。通過率は住区格子の各辺長に対して氾濫水が浸入出する隙間の長さの割合と定義する。住区  $j$  の占有率を  $\lambda_j$ 、その辺  $k$  の通過率を  $\beta_k$  とすると、連続式(3)を用いて、



■ 建造物 □ 住区 ■ リンク ▨ ノード

図-1 ネットワーク化の概念図

\* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所  
\*\* 学生会員 工修 京都大学大学院工学研究科  
\*\*\* 学生会員 京都大学大学院工学研究科  
\*\*\*\* 正会員 Ph.D. 京都大学助教授 防災研究所

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{1}{(1-\lambda_j)A_j} \sum_{k=1}^m \beta_k Q_k \dots\dots\dots (5)$$

のように計算する。さらに、式(2)(4)の粗度係数  $n$  の値については、道路格子(リンクとノード)の粗度係数に住区格子の粗度係数よりも小さな値を用いて、道路上を氾濫水が流れる影響を考慮する。

2.2 避難行動モデル

ここでは、武田ら(1997)にならって住民の避難行動をモデル化する。

まず、避難行動モデルを作成するため、以下の仮定を設けた(図-2参照)。

- ・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、避難行動は住民ユニットの点的な移動であるとする。
  - ・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。
  - ・移動は全て徒歩によるとし、浸水深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ユニットの避難は完了した(避難成功)と定義し、それ以後の移動は考えない。
  - ・住民ユニットの存在地点の浸水深が0.5m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(避難失敗)と定義し、それ以後の移動は考えない。
- 氾濫時の避難行動における移動能力低下の要因として、浸水深の増加と避難経路の混雑を考えた。

浸水深の増加に関しては、西原(1983)が提案してい

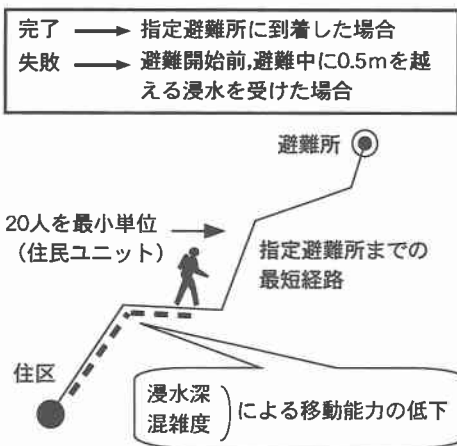


図-2 避難行動モデル

る換算距離の方法を用いた。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  $h$  の関数としてつぎのように定義した。

$$w(h) = \begin{cases} 1-h/h_{fau} & (h < h_{fau}) \\ 0 & (h \geq h_{fau}) \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

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0.5m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した。

武田ら(1997)のモデルでは、図-3(a)のように避難経路が氾濫解析の複数の差分格子にまたがる時、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ている経路の長さが換算されている。本研究で用いるモデルも同様の考え方をを用いて、図-3(b)に示すように避難経路の両端のノードおよびリンクの分割格子の浸水深に応じて、その格子内に含まれる経路の長さを換算した。

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)の関数とすることとし、本モデルでは次式を採用した。

$$v = \begin{cases} 1.42 - 0.241\rho_p & (\rho_p \leq 3.85 \text{人/m}^2) \\ 0.49 & (\rho_p > 3.85 \text{人/m}^2) \end{cases} \dots\dots (7)$$

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。

避難開始の決定は、武田ら(1997)のモデルにしたがい、避難命令などの避難情報を受け取って避難を開始す

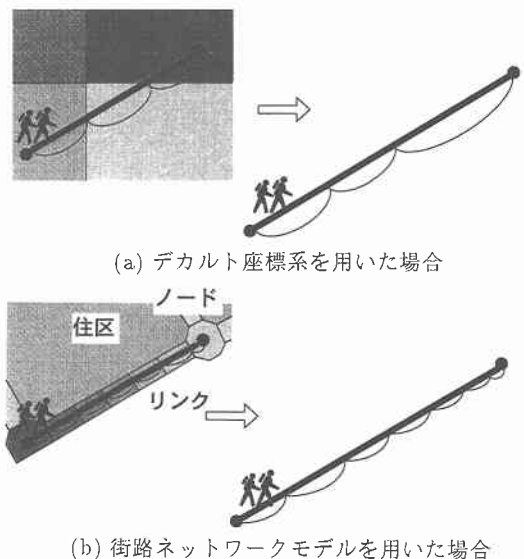


図-3 避難経路の換算距離

る強制避難と、各住民ユニットの存在地点での浸水を認知して避難を開始する自主避難の2種類を考えた。

避難を開始した住民ユニットはそれぞれ指定された避難場所へ向かうが、避難所の指定は地区（おおむね町丁単位ごとで、複数の住区からなる）ごとに行い、その際には以下のような仮定を設けた。

- ・避難所の収容者数はその収容人数を越えない。
- ・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。
- ・平均避難距離をできるだけ短くする。

### 3. 大阪市港区への適用

前章で構築した避難行動解析モデルを、図-4に示すような大阪市港区の大部分と西区の一部からなる領域に適用する。図-4には、この領域に適用した街路ネットワークモデルの解析格子と地盤高をあわせて示している。想定氾濫外力は、大阪市の計画台風（伊勢湾台風規模、室戸台風コース）による高潮とする。また、図-5は本研究で用いた避難所と避難経路である。

#### 3.1 デカルト座標系との比較

まず、避難行動解析の基となる高潮氾濫解析について、デカルト座標系による結果（従来の避難行動解析に用いた）と、道路、建造物の影響を考慮した街路ネットワークモデルによる結果（本研究の避難行動解析に用いた）

を比較する。このときの住区格子の占有率は0.72（道路格子の占有率はつねに0）、通過率は0.2、粗度係数は道路格子（リンクとノード）に0.043を、住区格子に0.067をそれぞれ用いた。図-6は、浸水開始4時間後における両モデルの浸水域の比較を示している。この結果から、デカルト座標系と比較して、街路ネットワークモデルの方が非浸透性の建造物の影響により氾濫水が広範囲に伝播していることや、細かい道路への氾濫水の浸入が現されていることがわかる。

つぎに、デカルト座標系を用いた避難行動解析の結果と、本研究で構築したモデルによる解析結果（地区別避難失敗率）をそれぞれ図-7(a), (b)に示す。両者を比較すると、デカルト座標系を用いたモデルに比べて、街路ネットワークモデルを用いたモデルでは北東部の地域で避難失敗率が現れており、また領域全体にわたって失敗率が上昇していることが確認できる。この原因としては、道路や建造物を考慮したことにより、街路ネットワー

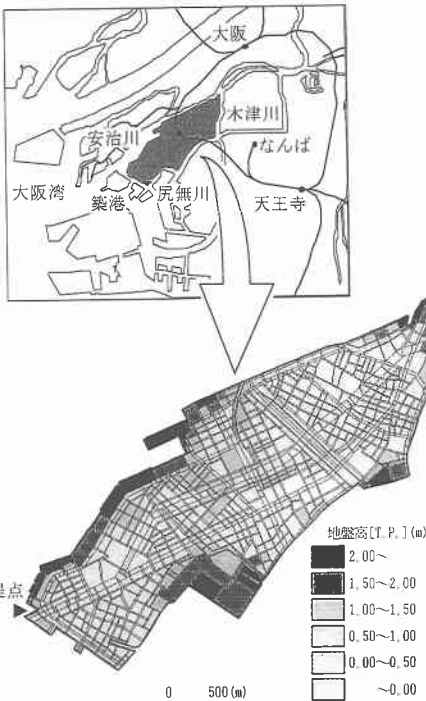


図-4 対象領域



図-5 避難ネットワーク

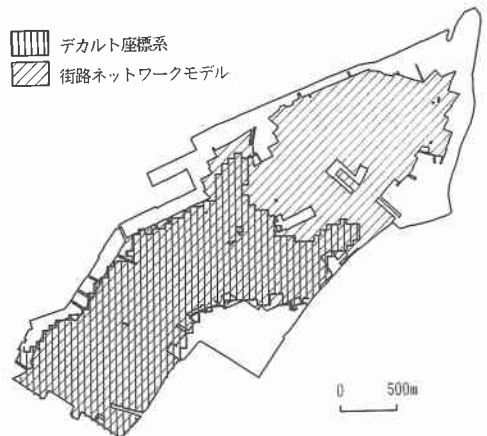
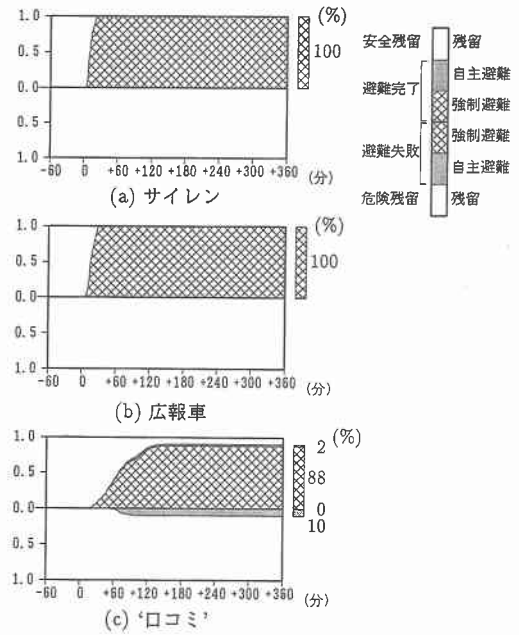
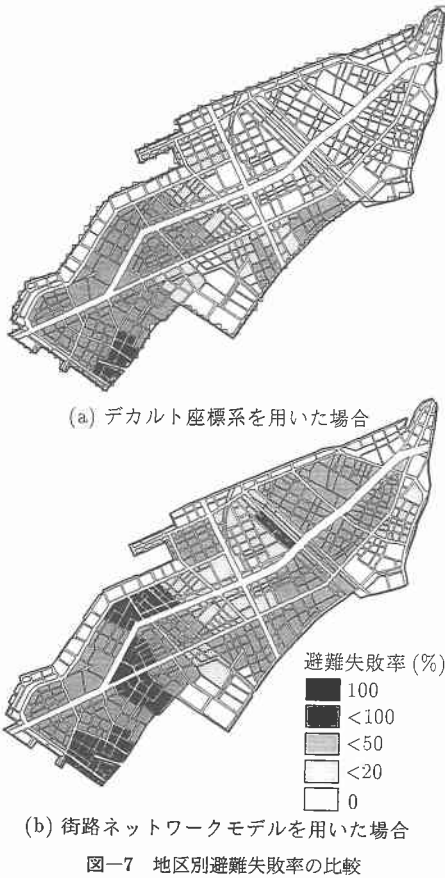


図-6 浸水域の比較（浸水開始4時間後）



クモデルの方が氾濫水が広域にしかも速く伝播していることが考えられる。

街路ネットワークモデルの特徴は、道路や建造物の影響をより詳細にとり入れることができる点にある。このような氾濫解析モデルと避難行動解析モデルを組み合わせることによって、避難行動解析もまた、道路や建造物の影響を考慮したモデルが構築されたことになる。したがって、都市域での避難に関しては、従来のデカルト座標系を用いた避難行動解析モデルと比較して、より詳細な解析が可能なモデルが構築されたといえよう。

3.2 避難対策, 避難行動に関する考察

a) 避難情報の伝達速度を考慮した解析

本モデルを用いて、住民への避難情報の伝達速度が避難状況に与える影響について考察した。情報伝達速度を300 m/分 (サイレン), 85 m/分 (広報車), 10 m/分 (口頭伝達—いわゆる口コミ—) の3通りに変化させて避難状況を比較した。解析結果のうち、避難状況の時間変化を図-8に示す。この結果をみると、サイレンや広報車で情報が伝達された場合、住民はただちに強制避難を開始し、全員が避難に成功している。しかし、'口コミ'で伝達

された場合、伝達速度が遅いために避難完了までに要する時間がサイレンや広報車の場合と比較して長くなっている。また、自主避難を行っている住民が現れていることから、情報が届く前に氾濫水が到達する地区もあるとみられ、しかもそのほとんどは避難に失敗している。以上のことから、避難情報の伝達は迅速に行われることが望ましく、サイレンや広報車などを用いた迅速な情報伝達システムの確立が重要であることが確認される。

b) 住民の避難速度を考慮した解析

住民の避難速度が避難状況に与える影響を考察した。住民の避難速度を、本研究で用いている基本となる速度とした場合、0.5倍の速度とした場合、1.5倍の速度とした場合で避難状況を比較した。図-9は、避難状況の時間変化である。この図から、3者の間でほとんど同じ結果が得られていることがわかる。この原因としては、今回の計算では平均避難所要時間が約10分と短いために、避難速度が変化することによって所要時間が数分間変化したところで、避難失敗率に大きくは反映されなかったものと思われる。したがって、本研究で対象としたような避難所要時間が短い領域では避難速度は避難状況にそれほど影響を及ぼさないことがわかった。

c) 高層住宅を一次避難所とした場合の解析

高層住宅住区を避難中の一次避難場所として用いた場合の効果を考察した。図-10のように3箇所の高層住宅住区を一次避難所として設定し、これらの避難場所には1つの地区のみが避難できるとした。

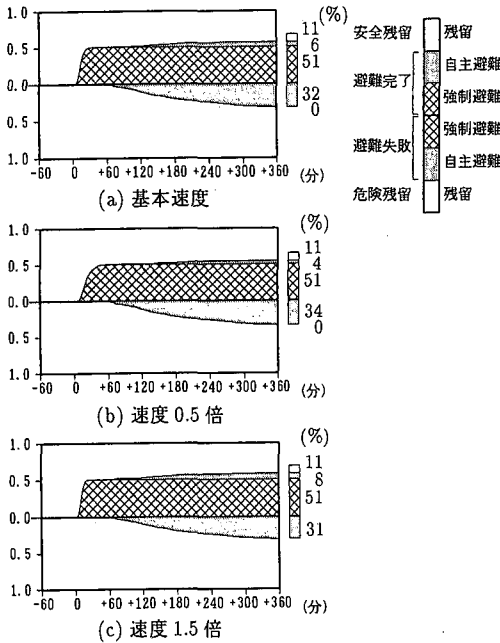


図-9 避難状況の時間変化 (避難速度の比較)

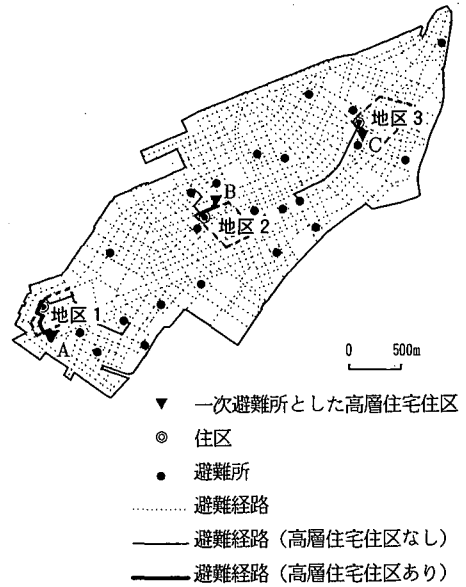


図-10 高層住宅住区と避難経路の変化

図にはこれらの一次避難所に避難する地区のうちの代表的な住区を取り出して、その避難経路の変化をあわせて示している。その結果のうち図-11は、地区1～3について、一次避難所を設定する前後の避難失敗率を比較したものである。地区3は避難失敗率が減少しており、高層住宅の効果が確認される。この地区は、破堤点から遠く、避難距離も大幅に短縮されるために避難状況の改善につながったと思われる。地区1は避難距離が短縮されたにもかかわらず避難失敗率が上昇しているが、これは避難経路が破堤点寄りに変更されるために、かえって避難中に失敗する住民が多くなったと思われる。地区2は一次避難所の設定前後で避難失敗率に変化がみられないが、この地区は一次避難所を考えても避難経路には大きな変化がなく、また地盤が比較的高く浸水深が浅いことからこのような結果になったと思われる。以上の結果から、高層住宅を一次避難所として設定した場合、避難状況の改善につながる場合もあるが、結果は一次避難所までの避難経路の安全性に大きく依存することが確認された。

4. おわりに

計画規模を上回る超過外力や、防潮施設の作動不能などを想定すると、現在の都市域において高潮氾濫が発生するおそれがあり、そのときには構造物による対策以上に避難行動のようなソフト面での対策が重要となる。本研究で構築した街路ネットワークモデルに基づく避難行

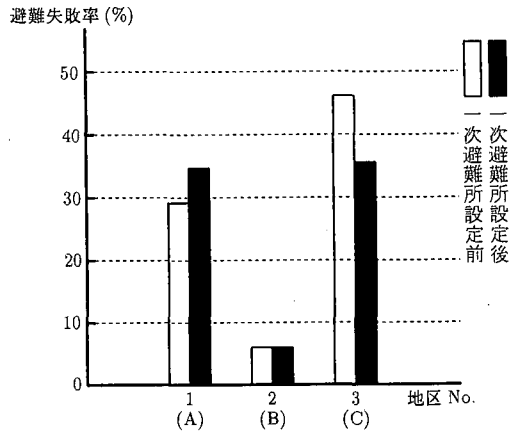


図-11 地区別避難失敗率の変化

動解析モデルは、従来のデカルト座標系の氾濫解析に基づくモデルと比較して、都市域における道路や建造物の影響をとり入れることができ、住民の避難行動をより現実的に即して解析することが可能なモデルが構築できたと考えている。

参考文献

武田 誠・井上和也・戸田圭一・川池健司 (1997): 高潮ハザードマップと避難に関する二・三の検討, 海岸工学論文集 第44巻, pp. 356-360.  
 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, 京大大学学位論文。  
 林 秀樹 (1998): 市街地における氾濫解析法とその応用に関する研究, 京大大学修士論文。