

大都市における災害時の避難路確保に関する研究*

A Study on the Planning of Refuge Pass in the Metropolitan Area for Disasters

加藤 晃**

By Akira KATO

It is necessary to take measures to lead inhabitants to the refuge safely and speedily, when the earthquake or big fire takes place in the metropolitan area. Moreover, the so-called "life-lines" such as water supply systems, energy supply networks and transportation systems for emergency have to be secured and reinforced. The importance of these problems due to disasters has been well recognized from the view of the planning of metropolitan area.

In this paper, the inhabitants' selection of refuge paths at the time when the disasters attack them is analyzed by means of computer simulation. Further, the results analyzed are applied to the development program of refuge path in the north-west district of Nagoya-City, and discussion on this application is done.

1. まえがき

大都市では、地震や大火などの災害が起きた場合に、人命の損傷を少なくできるだけ安全に避難させる対応策と、水・ガス・電力・交通路等のライフラインの強化を図ることを、都市構造の中に組み込んでおかねばならない。この報告は、災害が起きた場合、市民は都市の中に存在する公園・緑道・広幅員街路等を利用して避難するものとして、その現象をシミュレーションで分析したものである。これらの避難路は、非常時以外は日常的な機能を果たすものであるが、災害時には避難のネットワークと避難拠点となるものであり、都市の日常的施設の中にこのような避難路を組み込んでおくことが、わが国のように災害の心配がある都市の安全保障でもある。

* キーワード：都市、災害、避難路

** 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部建設工学科 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

2. 避難シミュレーションの概要

本報告のシミュレーションは、市街地における災害時の人々の避難状況をモデル的に再現しようとするものである。多くの大都市では広域避難地とそこに至る避難路の指定と整備を行い、地震等の大規模な災害時に市民がすみやかにかつ安全に避難できるよう政策当局は計画を行っている。本シミュレーションモデルは、これら政策が市民の避難行動の政策評価のチェックをすると共に、効果的な避難路を計画的に都市施設の中に組み込ませるための基礎的な分析を行ったものである。本研究では、各住区の人々が、避難開始後、どれくらいの時間で避難地に到達できるか、また、避難地への到着速度や、混雑する避難路を明らかにすることができる。これらの結果から、避難方法の改善、新しい避難路の整備、避難地の整備、そしてこれら政策の優先順位等を細かく分析することを可能にしている。

本モデルの対象は、徒歩により避難路上を避難地に向かう人々の流れである。人々は各住区から出発し、まず指定された避難路あるいは避難地に向けて徒歩により避難を開始する。その結果、時間とともに人々は避難路上に避難をしていく。すべての避難路は避難方向が決められており、避難路に到着した人々は、その方向に向かって歩き出す。当然避難路は避難する人々で混雑し、歩行速度は歩行速度は低下することになるであろう。また、避難路から避難路に移る交差点を人々は通過することになる。この場合、人々は、これから流入する避難路の物理的条件と、人々の混雑度合に制限を受けて交差点を通過していく。あるいは、上記の制約から人々は避難路に流入することができずに、待たされることになるかもしれないし、また、別の避難路があれば迂回することになる。このような経過を経て、人々は目的地である避難地に到着することになる。

この避難の間に、人々の流れのパターンは、どのような影響を受けるであろうか。各住区の人々が、軍隊の行進のように隊列を組んで移動するとは考えにくい。歩行速度の遅い老人、子供もいれば、荷物を持って行く人もいであろう。それ故、人々の流れは、隊列を組むというよりは、ある分布をもって表現されるであろう。

このようなプロセスを表現するために、本モデルは、一連の差分方程式体系を用いて、人々の流れを一方方向に方向づけられた連続流体のように取り扱う。このことにより、計算システムが極めて単純され計算時間も短くなると同時に、分析システムのフレキシビリティも大きくなる。したがって、システムの変更、改良が容易になる。

本システムの入力データおよび出力の結果次のようである。

(1) 入力データ

- a 避難路の接続関係、長さ、幅員
- b 住区の人口と最初の避難する避難路とそこまでの距離
- c シミュレーション時間等の制御情報

(2) 出力結果

- a 各住区から避難地までの平常時の歩行時間
- b 各住区から避難地までの災害時の歩行時間
- c 各住区の50%の人口が避難完了する時間(平

均值)

- d 各住区の90%の人口が避難完了する時間
- e 各住区の時間ごとの避難状況
- f 避難路の時間ごとの混雑状況
- g a, b, cの全地区の平均、加重平均値

3. モデルの選択と歩行パターンの分析

(1) モデルの選択

人が集団で歩行する場合、その全体の挙動をコンピュータの中でシミュレートする方法には、各種のタイプが考えられる。特にネットワーク上を人々が集団で歩行する場合は、幅を限られた道路を複数の人々が歩行するパターンをどのように表示するのか、また、その場合に道路内での混雑あるいは障害により歩行速度が低下する状態をどのように表示するのかは、この解析の重要なポイントとなる。ここでは、人々を等質な主体とみなし、集団の動きを時間とともに変化する実体とし、各時点ごとにシミュレーションを繰り返す方法を採用した。具体的には、多次の指数遅れを採用し、遅れ定数が歩行時の人口密度によって左右される、非線形フィードバックをもった非定常差分方程式体系により、モデルを作成した。

(2) 歩行パターンの定式化

① 単純基本モデル

今、仮に図-1のような通路R上で部分Aの人々が右方向に歩行速度Vで歩行しているとすると。部分A内の人口密度 ρ_0 は均質であり、総人口をX人、道路の幅をwメートル、Aの部分長さをLメートルとする。またAの右に隣接する任意の大きさをもった部分Bを考えその長さをlとする。BとAの境界

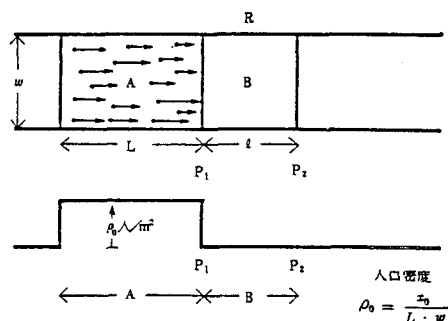


図-1

の点を P_1 、Bの部分の右端を P_2 とし、それぞれBの入口、出口とする。

この場合、地点 P_2 を通過する人数は、時間的にどのようなになるであろうか。隊列を組んで行進の場合は図-2のようになるであろう。

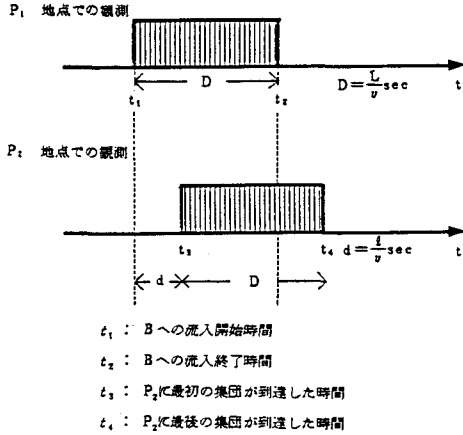


図-2

この場合、 t_1 から始めて、Bを先頭の人通過する時間 T は、

$$T = (d + \frac{D}{2}) - \frac{D}{2} = d \quad (1)$$

しかし、避難する人々は、一方向に向かって歩行しようとしている一群の自由な集団であり、歩行速度 V は、結果としての平均速度と考えたほうが妥当である。この人々は、避難という心理から進行方向への集団の圧力が存在すると考えることができる。具体的に考えると、流入開始時点では急激にB内に入々が流入するが、部分A内の人口が少なくなるにつれ、Bへの流入が減少していくと考えることができる。これは電車のドアが開いたときの人々の降車パターン等、現実観測できるものに近いと思われる。

この考えにもとづいて、歩行パターンを定式化する。いま、部分B内で t 時間後の人数を $X(t)$ とし、平均歩行速度 v は密度に関係なく一定とする。前述の仮定から、 Δt 時間内にAからBに流入する人数は、時間 $[t_1, t_2]$ では、 $v \rho \Delta t (= t_2 - t_1)$ 人であり、 (t_2, ∞) では0人である。一方、Bから流出して地点 P を Δt 時間内に通過する人数は、 $v \rho \Delta t$ 人である。ただし ρ はBの密度で、

$$\rho = X(t) / w l \quad (\text{人} / \text{m}^2) \quad (2)$$

である。したがって、

$$v \rho \Delta t \rightarrow \frac{X_0}{L/v} \rightarrow \frac{X_0}{D} \quad (\text{但し、} t_1 \rightarrow 0)$$

$$v \rho \Delta t \rightarrow \frac{X(t)}{L/v} \rightarrow \frac{X(t)}{d} \quad (\text{但し、} t_2 \rightarrow D)$$

故に、 t 時点から $(t + \Delta t)$ 時点になったときのB内の人数は、

$$\begin{aligned} X(t + \Delta t) &= X(t) + \Delta t (I(t) - v \rho) \\ &= X(t) + \Delta t (I(t) - \frac{X(t)}{L/v}) \\ &= X(t) + \Delta t (I(t) - \frac{X(t)}{d}) \end{aligned}$$

$$\text{したがって、} I(t) = \begin{cases} X_0/D & 0 \leq t \leq D \\ 0 & D < t \end{cases}$$

この差分方程式を連続化して微分方程式として解くと、

$$X(t) = \begin{cases} (d/D) \cdot X_0 \cdot (1 - e^{-t/d}) & 0 \leq t \leq D \\ (d/D) \cdot X_0 \cdot (e^{D/d} - 1) e^{-t/d} & D < t \end{cases} \quad (4)$$

この結果から地点 P_2 を通過する人口 $Y(t)$ は、

$$Y(t) = \begin{cases} X_0/D (1 - e^{-t/d}) & 0 \leq t \leq D \\ X_0/D (e^{D/d} - 1) e^{-t/d} & D < t \end{cases} \quad (5)$$

(5)式を流入状況(地点 P_1 での観測)と比較して図に書くと図-3のようになる。

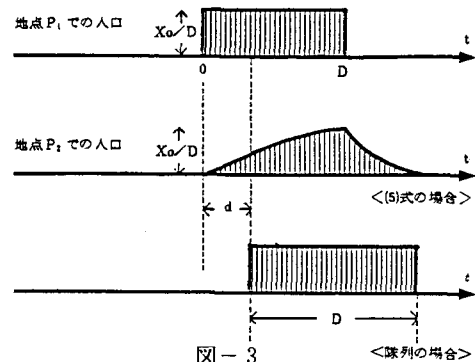


図-3

(5)式の図と隊列によるパターンはかなり異なってくる。特に次の点が大きな特色である。

a 流入を開始してすぐに地点 P_2 に到達してしまう人がある。

b 流入が終ると地点 P_2 の通過人数は減少を始める。

また、平均通過時間 T は以下になる。

$$T = (1/x_0) \left\{ \int_0^D t \cdot (x_0/D) (1 - e^{-t/d}) dt + \int_D^\infty t \cdot (x_0/D) (e^{D/d} - 1) e^{-t/d} dt \right\} - D/2 \quad (6)$$

(6) 式を計算すると、

$$T = (1/D) \left\{ \int_0^D t dt + e^{D/d} \int_D^\infty t e^{-t/d} dt - \int_0^\infty t e^{-t/d} dt \right\} - D/2 = d \quad (7)$$

となり、(1) 式と同じで、隊列を組んだ場合と同じ平均時間となる。すなわち、平均的には、 B の長さ l を V で歩行する時間となっている。

このパターンでは平均歩行速度は V で平均遅れ d であるが、速い人と遅い人の分散が大きすぎ、人の流れが平滑されすぎて現実的でない。このようなパターンは、混雑により歩行速度が低下し、しかも道路幅が狭くなるところでは、現実には起こると考えられる。しかし、いま平均歩行速度 V は人口密度とは無関係に一定としてモデルを解いたのでこのパターンではあまり適切でないことになる。すなわち、通過人口の時間的変化は当初増加するが、増加の仕方が不自然である。2 回微分が負で、上に凸な形で増加する。現実には図-4 のような増加仕方をするものと思われる。

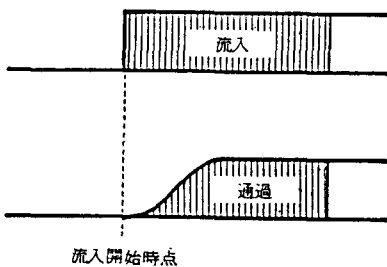


図-4

②基本モデル

図-1 において、 B の部分を 3 つの等しい部分 B_1 , B_2 , B_3 に分割し、各部分 B_1 , B_2 , B_3 は、前述の単純基本モデルとして定式化する。すなわち、 i ($i =$

1, 2, 3) 部分の人数を $x_i(t)$ とすれば、

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + \Delta t \left(I_i(t) - \frac{x_i(t)}{(d/3)} \right) \quad (8)$$

(ただし、 $i = 1, 2, 3$ で、 $I_i(t)$ は部分 i に入ってくる人数)

すなわち、

$$I_i(t) = \frac{x_{i-1}(t)}{(3/d)} \quad (i=2, 3)$$

$$I_i(t) = \begin{cases} x_0/D & 0 \leq x \leq D \\ 0 & D < t \end{cases} \quad (9)$$

いま、前述の地点 P_2 、すなわち部分 3 の出口での通過人数 $y(t)$ を調べてみる。ここで $y(t) = x_3(t)/(d/3)$ であるから、(8) の連立差分方程式を $x_i(t)$ について解けばよい。

(8) 式より、

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= I(t) - \frac{x_1(t)}{(d/3)} \\ \frac{dx_2}{dt} &= \frac{x_1(t)}{(d/3)} - \frac{x_2(t)}{(d/3)} \\ \frac{dx_3}{dt} &= \frac{x_2(t)}{(d/3)} - \frac{x_3(t)}{(d/3)} \end{aligned} \quad (10)$$

(9) 式より、

$$I(t) = (x_0/D) u(t) - (x_0/D) u(t-D)$$

$$\text{ただし、} u(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases}$$

(10) 式をラプラス変換して、 x_3 について解くと、

$$\begin{aligned} x_3(s) &= \frac{1}{(d/3)^2} \cdot \frac{1}{[S + \frac{1}{(d/3)}]^3} \cdot \frac{x_0}{D} \left(\frac{1}{S} - \frac{1}{S} e^{-Ds} \right) \\ \therefore x_3(s) &= \frac{x_0}{D} \cdot \frac{1}{(d/3)^2} \cdot L \left\{ \frac{1}{[S + \frac{1}{(d/3)}]^3} - \frac{1}{S} \cdot \frac{e^{-Ds}}{[S + \frac{1}{(d/3)}]^3} \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

いま、上式で、

$$f(t) = \frac{1}{(d/3)^2} L \left\{ \frac{1}{S} \cdot \frac{1}{[S + \frac{1}{(d/3)}]^3} \right\} \quad \text{とおくと}$$

$$\begin{aligned} f(t) &= (d/3) \left\{ 1 - e^{-\frac{t}{(d/3)}} - (d/3)^2 t e^{-\frac{t}{(d/3)}} \right. \\ &\quad \left. - (d/3)^2 \cdot (t^2/2) e^{-\frac{t}{(d/3)}} \right\} \quad (12) \end{aligned}$$

よって(11)式は、

$$x_3(t) = \frac{x_0}{D} \cdot \frac{d}{3} \{f(t) - f(t-D) \cdot u(t-D)\} \quad (13)$$

すなわち、 $y_3(t) = x_3(t)/(d/3)$ は、

$$y_3(t) = (x_0/D) \{f(t) - f(t-D) \cdot u(t-D)\} \quad (14)$$

あるいは、

$$y_3(t) = \begin{cases} (x_0/D)f(t) & 0 < t \leq D \\ (x_0/D)\{f(t) - f(t-D)\} & D < t \end{cases}$$

となる。この(14)式を図に表わせば図-5のようになる。

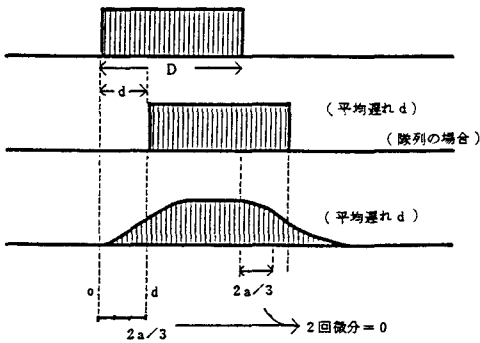


図-5

図-5の特徴は、初期時点から成長曲線のように通過する人口が増加しBへの流入が止まると逆のパターンで減少する傾向である。(左右対象ではない。特にdがDに比較的小さいときは対象としない。式(14)を見よ)この場合、平均通過時間はやはり、dとなり、平均歩行速度はVとなる。このパターンは基本単純モデル、あるいは隊列モデルより現実的であると考えられよう。

いま、上記の例では $n=3$ として部分Bを3分割したが、一般にn分割した場合(n次指数遅れ)は、以下のように表すことができる。

$$y_n(t) = (x_0/D) \{f(t) - f(t-D) \cdot u(t-D)\} \quad (15)$$

$$\therefore f(t) = 1 - e^{-\frac{t}{(d/n)}} \sum_{k=0}^{n-1} \left\{ \frac{t}{(d/n)} \right\}^k / k!$$

nのいろいろな値について観察してみると図-6のようになる。nが大きくなるにつれ、隊例行進とパターンがにってくるが、 $n=\infty$ とすると隊例行進の

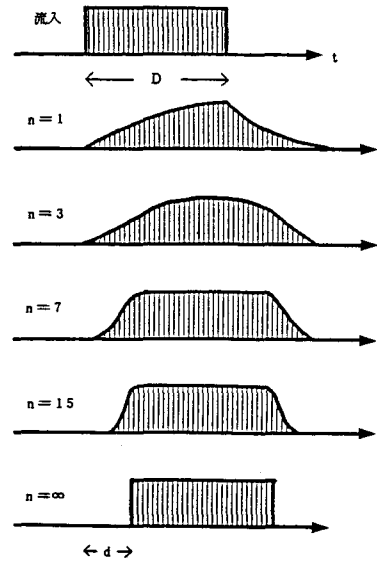


図-6

パターンと一致することがわかる。いずれも平均遅れはdであり、平均歩行速度はVである。

さて、いままでは、平均歩行速度Vは一定と仮定したが、現実には人口密度ρによって平均歩行速度は変化すると考えられる。いまρとVの関係を、

$$v = g(\rho)$$

$$(\text{ただし、} \frac{dg}{d\rho} \leq 0, \min(g) > 0, \max(g) < \infty)$$

と仮定すると、基本モデルでは図-7のようなパターンになるであろう。

基本モデル ρは一定

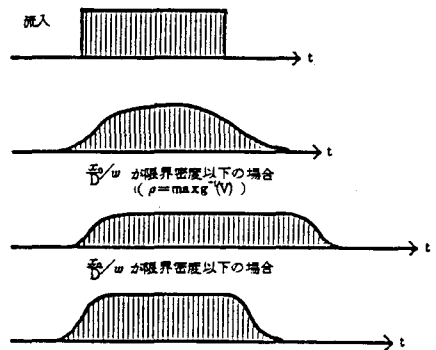


図-7

この図からわかるように、初期にはρが低くVが大きいいため、平均遅れdが小さく、立ち上がりは急

になる。しかし、ある程度時間が経過すると、 ρ が大きくなり V が小さくなるため、通過人数の増加は小さくなる。この結果、 V が一定の場合より、分散は小さいパターンになる。

4. モデルの構造

今、対象地区は n ヶ所の地区に分れており、それぞれの地区の人々は、災害発生後 $t_k(k$;地区番号)時に、避難地に向けて避難を開始する。避難地には複数の避難口があり、それら避難口には、避難路が接続されている。避難路は地区内にネットワークとして構成されており、人々はこの避難路ネットワーク上を避難地に向けて歩行する。この場合、人々の流れ方には二通りあり、

a 居住地区→もよりの避難路(避難路ネットワーク)→避難口

b 居住地区→避難地

である。bは避難地に隣接した地区の人々の一部がとる行動であり、ほとんどの人々はaの方法で避難する。

人々の歩行パターンは、地区内では3次の指数遅れ、1本の避難路では5次の指数遅れで表現されるとする。避難路内の歩行速度は、その避難路の人口密度により変化し、その関係は関数として表現されている。また、避難路と避難路の交点(交差点)において流入してくる人数と、その交差点から避難路へ流出していく人数はそれぞれの流入、流出容量によって制限される。この場合、流出しようとしている避難路が容量に達しており、かつ迂回避難路がある場合、自動的に迂回するものとする。

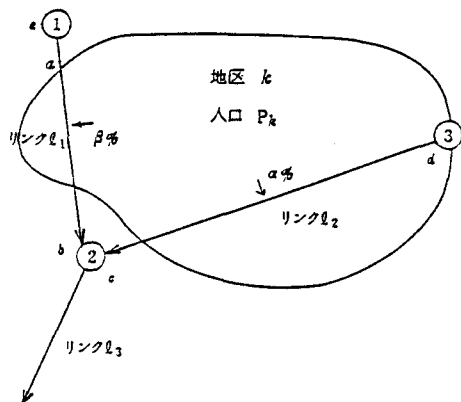


図-8

いま、図-8のような地区 k を考える。この地区は災害発生後、 t_k において一斉に避難を開始し、総人口 P_k のうち $\alpha\%$ はリンク ℓ_2 へ、 $\beta\%$ はリンク ℓ_1 に向かうものとする。避難パターンは定常の3次指数遅れで表現し、遅れ定数は地区の人口重心から、各リンク上に現われる人口をプロットすると図-9のようになる。

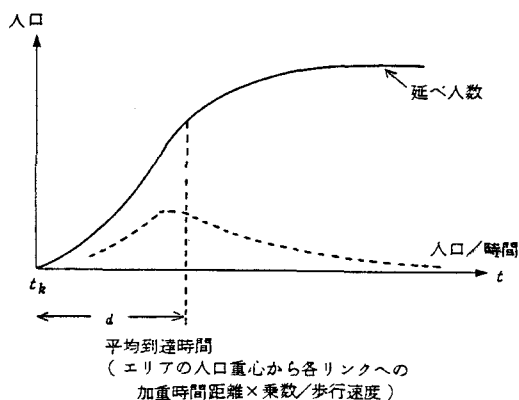


図-9

また、避難地に近い地区の人々は、避難路を使用しないで地区内の細街路を使って、直接避難する場合もある。特に避難地に隣接した地区の人々のある割合は、このようにして避難するであろう。

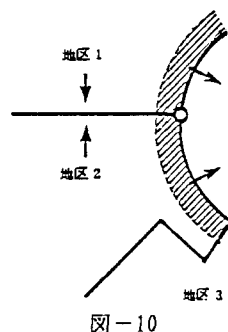


図-10

これらの人々の動きもシミュレーションするために、地区の何%の人々が直接避難地に向かうかをデータとして与えて、これらも人々が3次の指数遅れのパターンで避難地に流入するようにする。このとき平均到達時間は、この地区から人々が、避難路へ避難する平均時間と同じとする。この場合、直接避難地へ流入するのは避難口からではなく、避難地の

境界すべてから流入可能とする。

リンクへの流入は、流入ノード*i*からの流入と、エリアからリンクへの直接流入と2通りある。前者については、当該リンクの流入容量と、上流のリンクからの流入人数によって決定される。流入容量はリンクの幅だけでなく、リンク上の人密度によって左右される。すなわち、当リンクが限界密度以上に混んでいると流入できないことになる。またエリアから当リンクに流入する場合は、リンクに人口密度に関係なく流入できるものとする。

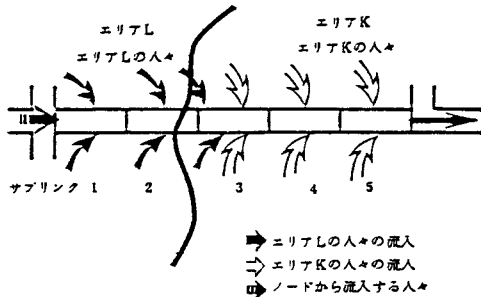


図-11

いま図-11のように、エリアL, Kを考えると、エリアLの人々は、当リンクのサブリンク1～3を指し、またエリアKの人々はサブリンク3～5を指して行動すると考える。それ故、避難開始当初、当リンクでの人口密度のパターンは、図-12のようになるであろう。

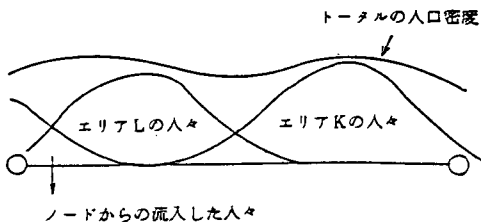


図-12

本システムでは、上記のような、避難パターンを簡潔に表現することが可能であり、図-12のように、避難した3種類の人々は、各指数遅れをもって右の方へ移動していくことになる。

この他、避難路交点での人の流れの分析が必要となるが、ここでは紙面の都合で省略する。

(2) シミュレーションの基本パラメーター

本システムは連続型シミュレーションであるため、ある一定時間ごと現象を追跡する方法をとる。このためサイクルタイムをどのように設定するか、また

人の密度と歩行速度の関係をどう設定するかが第一に問題となる。

① サイクル・タイム

歩行速度、流入、流出容量等は計算を行うサイクルタイムを与えて、その時間ごと計算を行う。このモデルでは非定常の非線形差分方程式体系により構築されており、*t*時点での状態*X(t)*とすると、

$$X(t+\Delta t)=F(X(t),t,\Delta t)$$

と表される。そしてこの Δt を、サイクルタイムとして設定する。 Δt を大きくすれば、精度は落ちるが、シミュレーションの時間が短縮できる。ただし Δt には以下の制約がある。

$$\Delta t \leq \min(\min D(J)/5, \min AD(K)/3)$$

(但し、*J*:すべてのリンク *K*:すべてのエリア)

右辺は、すべてのリンク、エリアの1次指数遅れの最小値以下にサイクルタイムを設定しなければならないことを意味している。

② 人口密度と歩行速度の関係

道路上の人密度が高くなると平均歩行速度が低下することは経験的事実であるが、どのような関係で低下していくか実証的なデータは乏しい。本モデルでは大阪市で開発されたモデル、 $\rho V=78$ を使用する。

また、最高平均歩行速度は基準として1.11m/sec 限界密度は3.8人/m²とした。

③ 歩行距離乗数

地区から避難路に向かう細街路は、本モデルでは明示的に扱っていないので、地区の中心から避難路への距離を直線距離として扱うのは無理があるために、地区の中心から避難路への直線距離に1.3倍を乗じて実距離として扱うことにする。

5. ケース・スタディ

このシミュレーションモデルを、実際の名古屋市の市街地状況に当てはめて、妥当性があるのかどうかを検討した。

- ①対象地域:名古屋市内において、要避難地Iに該当し、人口密度が比較的高く、又、火災発生及び延焼危険度も高いエリアとして、図-13に示した地域をケース・スタディ対象地域として設定する。
- ②人口:昭和75年推定人口(290,108人)の値を採用した。
- ③延焼速度:浜田式を用いて延焼速度を計算した。

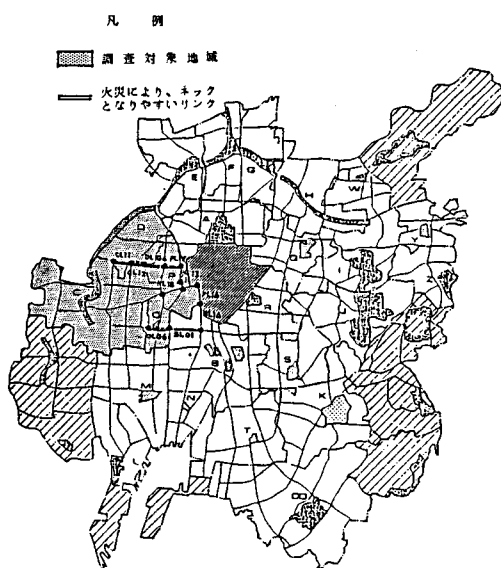


図-13 ケース・スタディ対象地域
及び主要リンク

④避難開始：各避難単位(小学校区)のメッシュのうち、最も早く炎上を始めるメッシュの時刻をその避難単位の避難開始時刻とする。

⑤炎上しないリンク：道幅が30m以上のリンクは、周辺不燃化を進めることを条件として、炎上しないこととする。ただし、現状では炎上する箇所も考えられるため、より詳細に検討刷るためには、実態調査等を行う必要がある。

⑥シミュレーション時間：基本モデルによるテストシミュレーションの結果から、火災による避難用を除けば、ほぼ全員が避難できる時間である「4時間」の値で作業する。

(2) ケース・スタディの検討

対象地区は、昭和55年時点では広域避難地として、P(笹島操車場)、O(松公園)及び一部の避難路が未整備である。したがって、遠距離避難等が余儀なくされている。これに対して、この対象地域に対し

て、2km避難圏域の設定…PとOの整備、避難路の1km間隔での整備を行った場合に、どれだけの避難人口が増大するか、また、対象地域での避難計画上、火災到達時間が速く、かつ大量の避難者が逃げるリンクとしてのBL01,OL06,PL17,BL06,CL12,CL11,の沿道不燃化を行った場合にはどうなるかをシミュレーションで分析する。

以上のケースを次のように名づける。

ケース1：PとO及び避難路が未整備

ケース2：PとO整備(2km圏域)と避難路整備(1km間隔)

ケース3：ケース2に、さらに一部重要リンクの不燃化

このシミュレーション結果は表-1のようになる。

したがって、対象地域1の地区特性に対して、2km圏域での広域避難地の設定と避難路の整備を行えば、避難率が8.1%も上昇することが明らかになった。また、避難率の絶対値も96.7%と、かなりの高い値を示している。

故に、要避難地1に対応する名古屋市のケース・スタディ地区においては、今回設定した整備基準である程度妥当であることが推定できよう。更に、広域避難地、避難路のみでなく、火災によりネックとなりやすいリンクの沿道不燃化促進等により、避難率が99.8%と、ほぼ全員に近い避難が可能となることが推定される。このことから、重要リンクの沿道不燃化も重要であることが明らかとなった。

このように、シミュレーション分析をすることにより、都市の避難路の確保をどのように整備すべきかの検討ができる。

本研究では、このシミュレーションモデルを基礎に名古屋市の防災緑地等を中心に避難路を都市構造の中にどのように組込むかの検討を行っている。

なお、この研究に対して、国土庁、名古屋市、および都市科学研究所(当時)等から研究援助を頂いたことを付記し、感謝の意を捧げるものである。

表-1

	イ 圏域内人口	ロ 要避難人口	ハ 避難人口 (4時間)	避難率 (ハ/ロ)	(注1) セービング	(注2) セービング率
ケース1	290,108	260,628	231,046	88.6%	—	—
ケース2	290,108	260,628	252,074	96.7%	21,028	71.1%
ケース3	290,108	260,628	260,222	99.8%	29,176	98.7%

(注1) ケース1の避難人数に対して、政策を行なったことにより増加する避難人数

(注2) ケース1で避難できなかった人数(ロ-ハ)に対して、政策(ケース2、3)を行なったことにより増加する避難人数の割合。