

大都市地震時における避難シミュレーション解析

堀口孝男* 小坂俊吉*

要 約

地震時を想定した住民の最適避難について、人間行動と都市の構造的な特質を組み込んだシミュレーション手法を開発し、その基本的なモデルを構成する諸因子、すなわち、

- (1) 避難住民の発生分布
- (2) 避難する方向
- (3) 避難途上の制約

について検討を行なった。

さらに、このモデルを大都市の中心部を想定した地域と1948年の福井地震火災に適用することにより、都市部の避難行動でどのような点が問題となってくるか、その一部を数量的に表現して、選択されるべき対策への一助となることを明らかにした。

1. はじめに

主に木造家屋密集市街地によって構成されている我国の都市においては、大地震発生とともに火災が多発することが、関東地震あるいは福井地震の例を挙げるまでもなく予想される。この地震に起因する多発火災から、いかに住民の安全を確保するかが緊急の課題となっていることは衆知の事実である。住民の安全確保は、言いかえれば、地震火災の危険性を探求することであり、その危険性は、出火危険、延焼危険および避難途上における危険に分類することができる。避難に関する工学的研究は、東京都防災会議の調査研究(1967)が最初であり、また、電子計算機を利用して、実市街地と避難場所をネットワークに置き換えて、住民の最適避難についてシミュレートしたのは防災美化協会(1967)が初めてと思われる。以後、メッシュ分割による延焼過程を組み込んだ避難シミュレーションによる人的被害など、工学的な研究がいくつか発表されている。一方、地震時における住民の心理学的研究は、新潟地震を契機とする「地震と人間行動」と題して、警視庁の研究報告が発表されている。

本稿は、これら工学的、行動心理学的研究の成果を取り入れ、避難住民の動きを比較的明確に表現し得るメッシュ分割手法を用いることにより、人間行動と市街地の両特性を考慮した、地震火災時の最適避難について検討

を行なったものである。

初めに、地震時の人間行動を規定する要因として、避難開始の時期とその後の発生避難人口の推移、避難方向および避難住民の流れとしての制限の三点を取り上げ、基本的な考えを述べる。次に、本来、市街地が持つ構造的な特性が、避難行動にいかなる影響を及ぼすか、模擬避難シミュレーションを行ない考察する。さらに、昭和二十三年の福井地震の都市火災について、新たに得られた知見を述べ、当該地域における、火災の延焼動態に伴う、経時的な最適避難についてのシミュレーションの結果を報告するものである。

2. 避難行動について

(1) 基本的な考え方

災害時の避難行動を規定する要素として、避難開始の時期とその後の発生避難人口の時間特性、避難の方向性、および避難途上の移動特性の三つに分類することができ、地域毎に異なるこれらの特性をもって、より広域的な避難行動を表現することができる。そして、これら三つの要素は、物理的障害要因である火災延焼、水害、建物倒壊、路面破壊、車輛の避難路占有、群集の渋滞等の状況によって時々刻々変化し、その中で最適な避難行動を人間が行なうものと考えられることができる。しかしながら、本研究では避難障害要因として、これらのうちか

* 東京都立大学都市研究センター，工学部

ら影響の大きい火災の延焼および群集の渋滞を第一段階として取り上げることとする。

避難開始時期とその後の発生避難人口の特性は、新潟地震の津浪襲来の際の例をみると、地震発生後津浪の第一波が達した三十分位から、避難行動を起こす人々は急激に増加し、ある時期にピークに至り、以後なだらかに減少する傾向を示している。このような傾向は火災時においても同様であって、発生避難人口は時間経過とともに擬似的な正規分布形を描き、その分布形状は、被災経験の有無、防災意識の程度による行動特性と、火災延焼の接近による緊急避難とによって変化し、三つの変曲点を持つようになっている。地震の発生後まもない時期に、災害情報が余り得られれていないか、または、火災の発生が不明であっても避難行動を起こす人々が漸次増加する初期（図1のAまで）、情報の質、量とも増加、火災の発生を伝えたため、あるいは、火災延焼を確認するか、接近してきたため、急激な避難人口の増加を示す上昇期（同図のAからBまで）そして避難人口が最大となつてのち、家財への執着が最も強い人々、あるいは避難を当初から考えていない人々が、直前の火災から退避するまでの後期（同図のBからCまで）に、分けることができる。

次に避難の方向は、火災の延焼を防ぎ、多数の住民避難を可能にし、かつ状況判断をよりの確に下すことができる幅員の充分に大きな道路上と、その他の市街地の場合とに分け、前者は、比較的余裕のある状態であるので避難場所へ直接向う単一方向をとるものと考え、後者では選択性が生ずるものとして、二方向をもって前者の路線に到達、経由して避難場所に至る過程を取るものと仮定する。

また、避難途上の群集移動特性は、群集移動速度、通行可能幅員、および収容可能限界の要素によって表現されるものと考えられる。移動速度は老人、子供の歩行速度を限界速度とし、路上群集密度が大きくなるにつれて速度の低下をきたし、ある密度（最大群集密度）に至って歩行不能となる。収容可能限界は、通行可能幅員と最大群集密度によって決定する。

このような特性をもとにして、経時的な人口変動を把握するため、電子計算機によるシミュレーションの手法を検討してみよう。

まず始めに地域をメッシュ分割し、メッシュ番号(I, J)における方向別避難人口比(α, β)、道路幅員(WX, WY) (図2)、避難開始時刻、発生避難人口分布形、メッシュの単位長さおよび計算単位時間をデータとして与え、計算単位時間毎に、発生避難人口と収容可能限界を考慮したメッシュ間移動人口を算定する。

この算定方法は、発生避難人口分布から計算単位時間に新たに発生する避難人口を求め、避難方向により移動

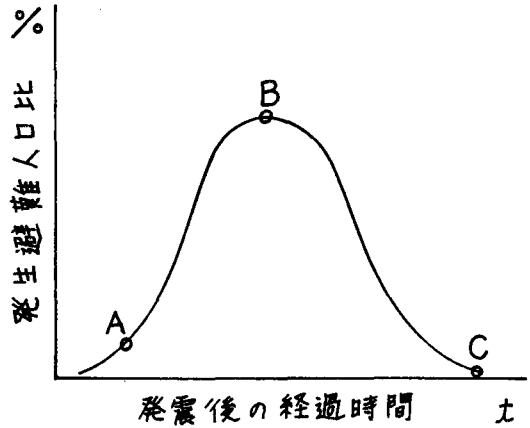


図1 発生避難人口分布型

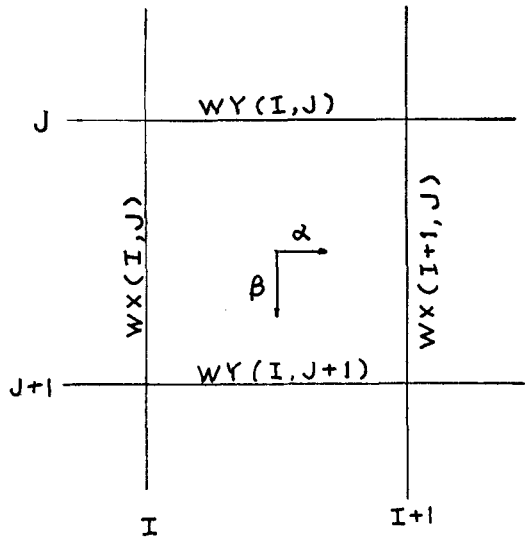


図2 メッシュの表現

先のメッシュを決定し、予定移動人口を計算する。次にそれらのメッシュの境界上の群集密度による移動速度を計算し、移動人口を算定する。この時、流出先のメッシュの収容可能限界による制限を受けて、最終的なメッシュ間の移動人口が算定される。これら一連の計算の流れを図3に示す。これによって、避難途上人口あるいは避難完了人口と未避難人口のそれぞれを求めることができる。

ここで避難方向に関しては、次の関係を満足している。

$$|\alpha| + |\beta| = 1$$

符号の正負によって向きを表現し、方向別避難人口は、 α, β の絶対値に比例する。移動速度は歩行者密度が0

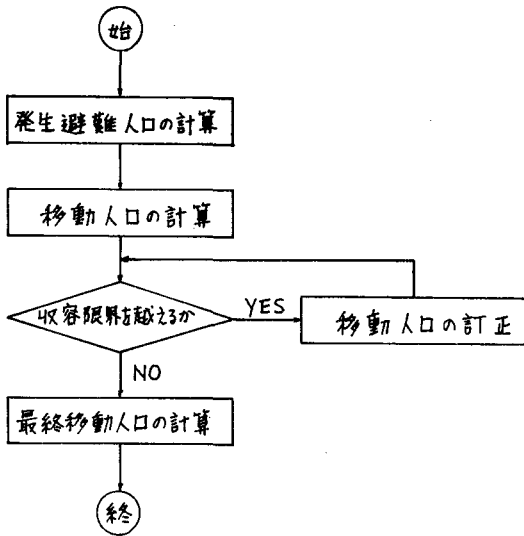


図3 流れ図

～1人/m²までは1m/sec, 1人/m²以上では渋滞が生じ始め, 歩行速度は直線的に減少し, 2人/m²以上では歩行不能とここでは考えることにする。

(2) 模擬避難シミュレーションモデルによる検討

ここでは避難場所へ至る, 選択可能な避難経路が少ない市街地を想定して, 発生避難人口分布の相違による避難途上人口, 避難完了人口の推移を三つのケースについて検討してみる。それによって最適避難方法を求めるための問題点を明らかにしてみよう。

メッシュに分割された市街地の各特性値のうち, 避難方向, 道路幅員は図4に, 全域の発生避難人口分布は図5に示す。居住人口は各メッシュとも500人, メッシュ間隔は100m, 収容可能限界は2人/m²としている。

避難場所における避難完了人口の推移(図6)によれば, 避難を開始した人々が, 早期に集中する分布形を持つケース程, 完了人口は急勾配を描いて急増するが, その勾配がある時刻より低下し始め, 三ケースとも, 75分頃に完了人口は同程度となり, その後逆転する傾向を示す。これは, 各メッシュの収容可能人口の制限に帰因するものであり, ケース1, 2, 3における避難場所直前のメッシュ(20, 12)の収容制限を受けた時刻は, それぞれ, 45～50分, 60～70分, 70～75分である。すなわちほぼ, 図6の変曲点あたりと一致する。次にもう一つの合流地点であるメッシュ(11, 12)(図7参照)周辺の避難途上人口の推移をみよう。避難途上人口が収容可能人口の1/2以上に達すると渋滞が始まると考えれば, ケース1では合流地点の収容制限によって渋滞から通行停止

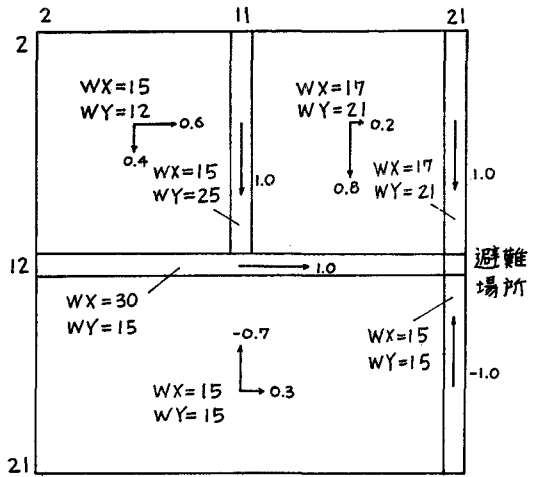


図4 メッシュの特性値

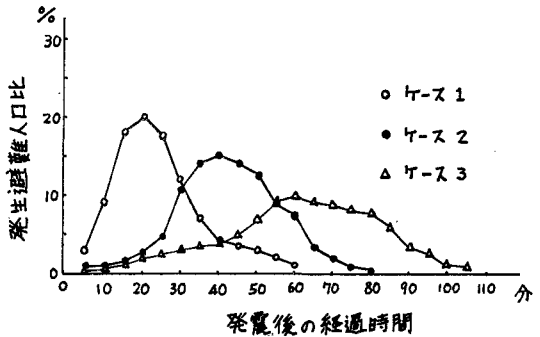


図5 発生避難人口比分布型

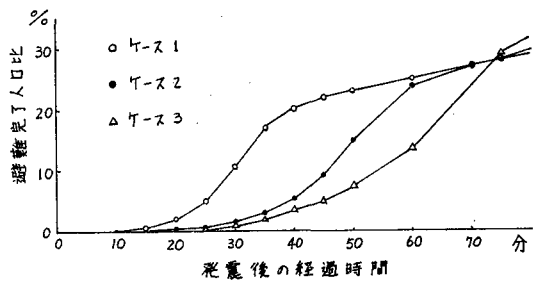


図6 避難特性

へ至るが, ケース3では合流地点より前方, すなわち避難場所に近いメッシュの収容制限の影響を強く受け, そのため渋滞, 通行停止の現象が現われる。そしてケース2では, 合流地点とそれより前方のメッシュの経時的な避難途上人口を検討すると, ほぼ同時期にこれらの現

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

通行停止

上線 避難路上入口
下線 未建出入口

図7(1) ケース1
35分

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図7(2) ケース2
60分

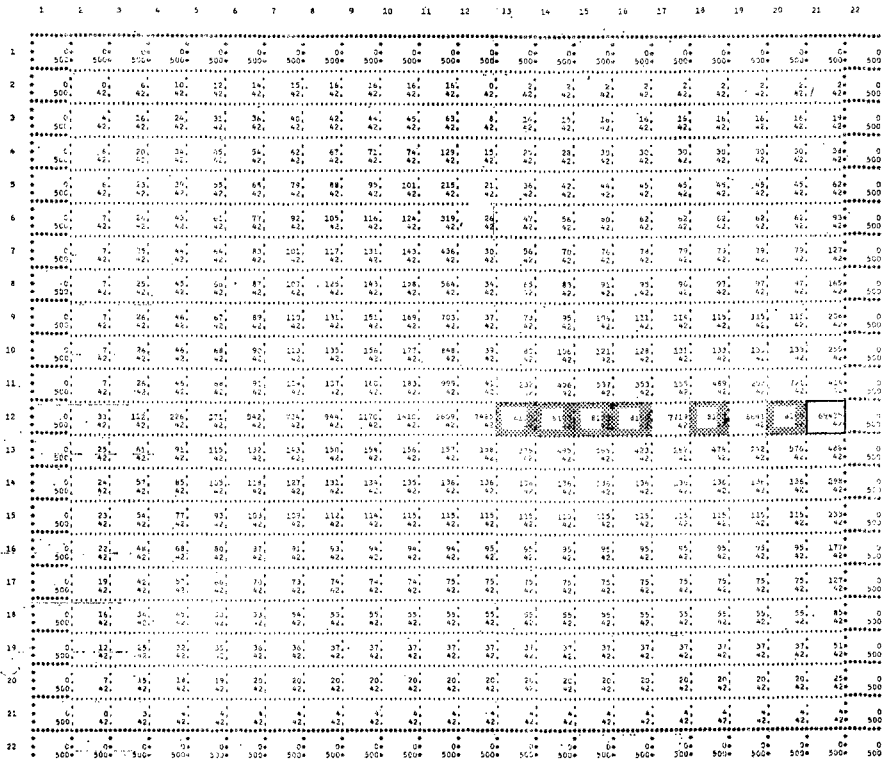


図 7 (3) ケース 3
90分

象を呈示するような結果となっている。

以上のことから、地域が河川、堤防、あるいは鉄道線路などによって分断されている市街地では、避難行動を起こす人々が短時間のうちに急増すると、合流地点で渋滞する可能性が大きく、パニックへつながる危険性を指摘することができよう。このような避難プログラムを用いて実際の市街地に適用すれば、住民行動も含めた市街地特性による避難上の問題点を把握することが可能となり、その地域特有の最適避難を論じるのに有効な方法となりうることを示唆しているといえる。

3. 福井地震の火災避難

福井地震についての調査報告は、当時の関連学会を筆頭に、市から町村に至るまで数多く発表している。しかしながら、避難行動を主題とした報告ないしは資料の存在は伝え聞いていない。この項目では、これまでの文献を検討し、特に福井市中心部の火災延焼と住民避難について考察を加えたものである。

(1) 福井市中心部の火災

地震の1ヶ月前に撮影された福井地方の航空写真から作成した福井市中心部の建物配置の復元図を図8に示

す。当時の調査報告によれば、建物倒壊率はおよそ80%、大部分の建物が板葺、下見板張りであり、また航空写真から、緑地が極めて乏しい市街地であることが推定される。かかる市街地で八ヶ所から出火し、風速およそ3 m/secの南々東の風を受けて、33万㎡の範囲を延焼したのである。延焼動態図から分析して、道路あるいは空地を越えて延焼した場合と、焼け止まった場合の距離を、風向に対する傾きについて表わしたのが図9である。図中の点線は、風速3 m/secにおける浜田博士の延焼限界距離に延焼動態図形が卵形になることを考慮して描いたものであり、図から、風横方向の延焼限界距離は、少なくとも10m以上となることが推定できる。すなわち日本の都市では街路樹として落葉樹を植えるために、福井市と同様に樹木の延焼阻止効果が期待できない冬期で、しかも木造倒壊率の大きい直下型地震を想定する場合には、風速が低くても風横方向の延焼限界距離は10m以上となる可能性を示している。

(2) 延焼避難シミュレーション

復元図を単位長さ50mのメッシュに分割し、最終的な延焼範囲を午後9時の延焼動態図として、メッシュ上にそれを重ね合わせ、メッシュを延焼あるいは非延焼に分ける。この時、延焼メッシュを取り巻く非延焼メッシュ



図8 福井市復元図 (1948年5月21日)

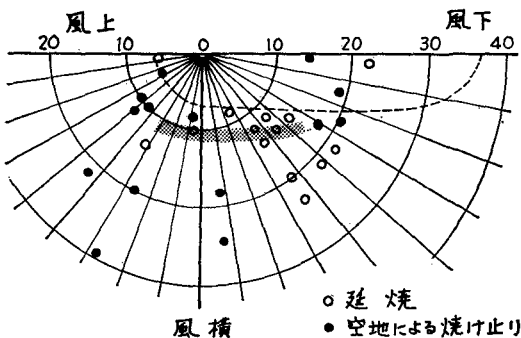


図9 延焼限界距離 (m)

に、避難開始時刻として9時を与え、また避難方向として、避難場所へ近づくか、または道路幅員がより大きい方へ避難する方向を与える。二方向が選択可能であれば、 $|\alpha| = |\beta| = 0.5$ とする。次に時刻を逆進させて、同様の操作を30分ごとに繰返し、全メッシュに避難開始時刻と避難方向を与える。(地震発生午後5時13分)

避難場所は延焼地域の周辺を考慮して、八ヶ所を選定し、避難場所周辺のメッシュは、計算上の制約のために適宜方向の補正を行なう。(図10) 以上の諸数値を第一段階として与え、本来の問題である火災動態に伴う避難のシミュレーションを行ない、充分安全となるまで、避難開始時刻、発生避難人口分布型、避難方向などを変動し

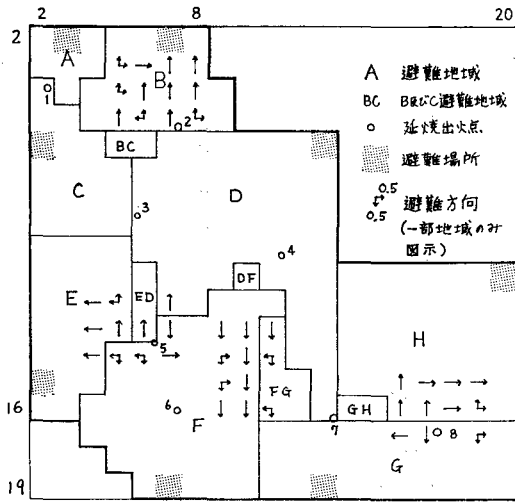


図10 避難地別地域分布

で最適避難を求めていく。

まず初めに、かかる条件のうちで延焼動態によって決定される各メッシュの避難開始時刻を全て同一として、当該市街地の避難特性を求める。すなわち2.(2)で述べたうちで、合流点での欠陥が現われ易い発生避難人口比

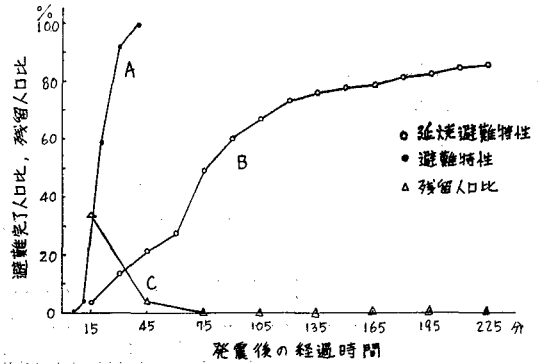


図11 避難特性

を与えて(図5のケース1に相当)避難のシミュレーションを行ない、その避難完了人口の推移を検討してみた。ただし各メッシュの居住人口を70人とし、避難開始時刻は発震5分後とし、終了時刻は35分とする。その結果は図11のA曲線に表わされている。この図は発震10分後から急激な上昇を描き、40分後にはほとんど全員が避難を完了している。これは避難途上の渋滞が1ヶ所もなく、しかも避難場所が数多いうえに、そこに至る直線距離が最大となるメッシュでも500m位であるために、10分も歩

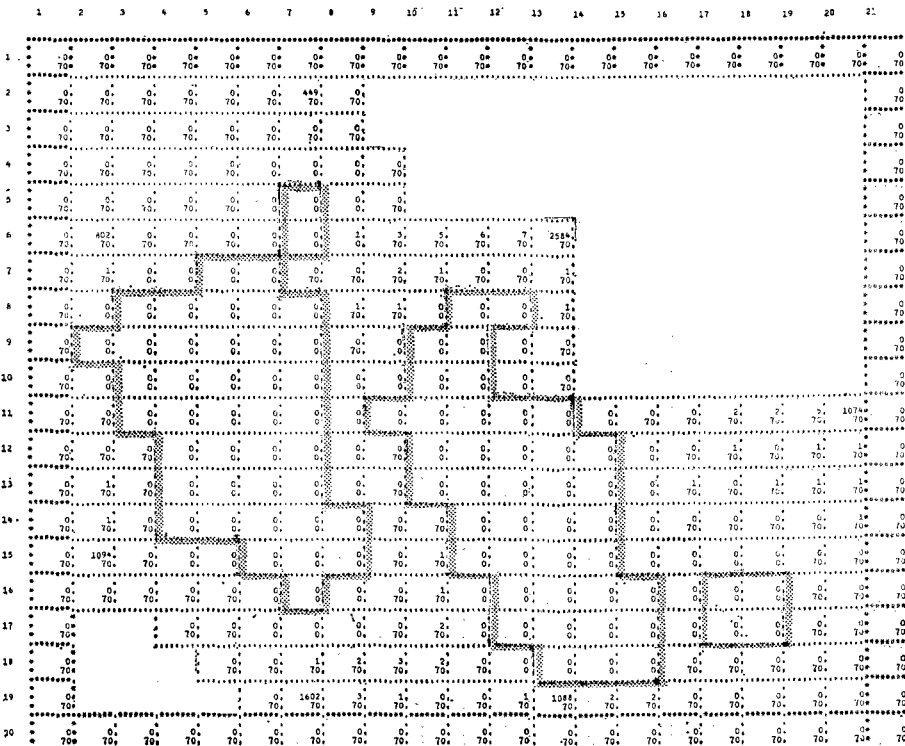


図12(1)発震後35分

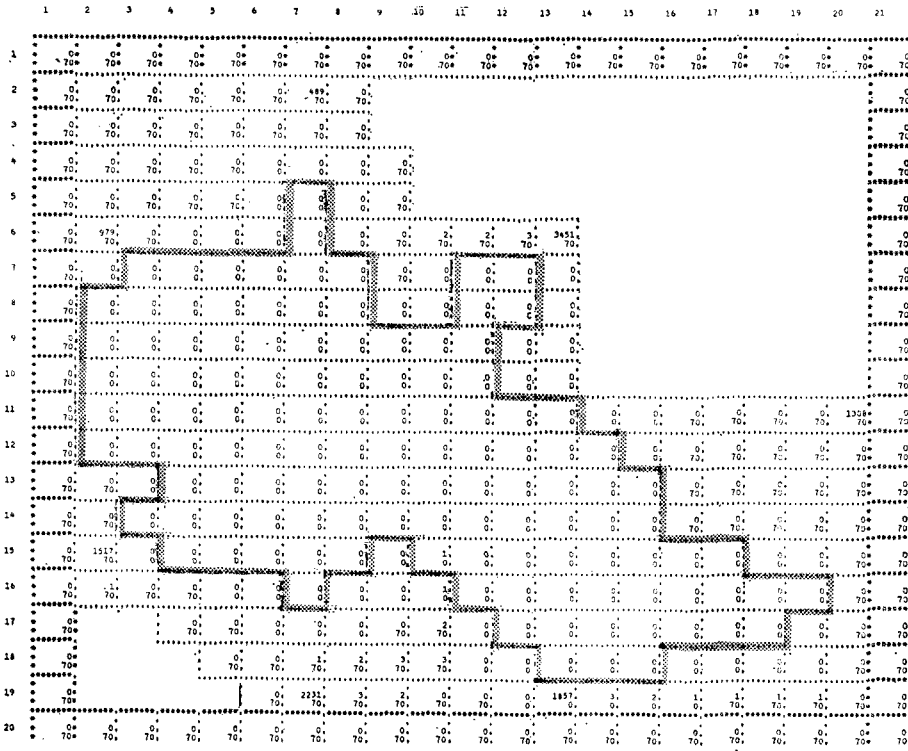


図12(2)発震後105分

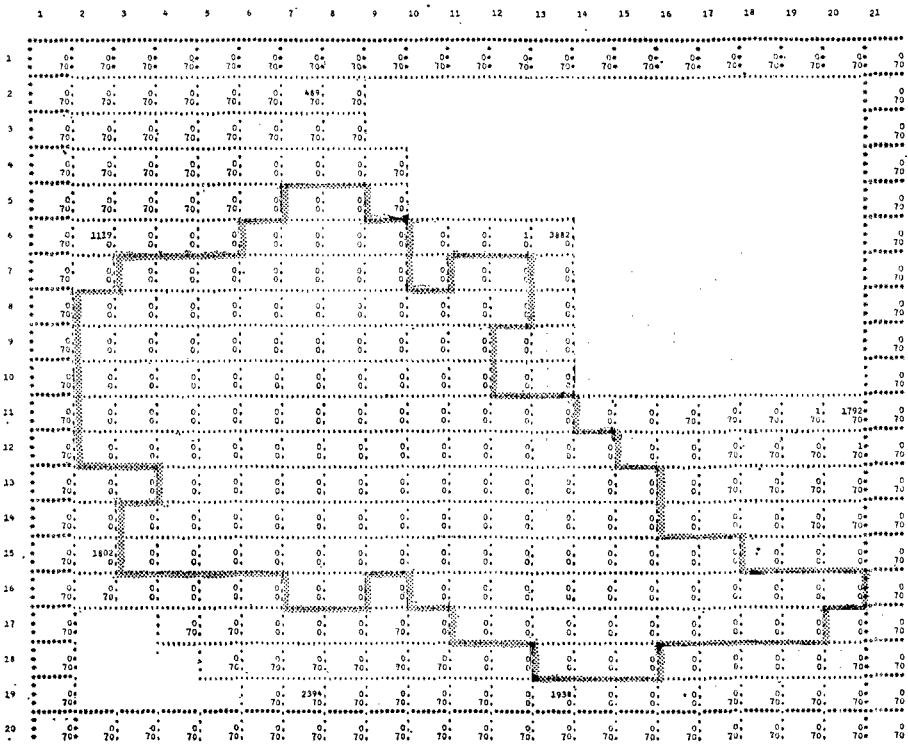


図12(3)発震後135分

けば避難場所に到達するという好条件をもつ市街地であることを、数量的に表現している。

次に、各メッシュに前述したように午後9時、8時30分、8時などを避難開始時刻として、最悪な条件を与えてシミュレーションを行ない、延焼区域とそれに隣接するメッシュの避難開始時刻、あるいは発生避難人口分布型を変動させて避難の最適性を検討した。

得られた結果の一部を図12に示す。他方、図11のB曲線はこの結果の経時変化を表わしており、避難完了人口比からみると、避難は比較的順調に行なわれたことを示しているが、ただ105分から135分にかけて、その割合が低下し始める。これは図12(2)、(3)を見ると、延焼範囲がほとんど拡大しなかったため、これによって避難行動を起す人々が減少したことによる。また、単位面積当たりの居住人口に対する延焼範囲内に残る人数の割合を残留人口比とすれば、この数値が高いことは、避難開始あるいは終了時刻が遅いことを示す。このシミュレーション結果では、C曲線で表わされる15分の時に34%と高い値を示している。したがって、この残留人口比の高いメッシュの避難開始（または終了）時刻を早めることによって、この時刻における安全は満足される。この方法を各時刻に適用していくことにより、除々に最適避難方法が求まっていく。その他の時刻では、残留人口は非常に少ないため、仮定条件による避難方法以外でも問題は生じてこなくなる。以上のシミュレーションの結果からみると、火災延焼が50m先に接近してから退避しても、目的とする避難場所さえ誤らなければ、安全の確保が可能であることを示しているようである。この地域での死亡者は約940人であるが、その大多数が建物倒壊によって逃げ出せずに延焼したものであり、火災そのものによる死者は非常に少なかったものと推定できる。よって、当時の福井市民の多くは、少なくとも安全に避難を完了したのであり、その避難完了人口の推移は図11のA曲線とB曲線の中間にあるものといえよう。

一方関東地震の場合でみると、本所区ではおよそ1km当りの出火点数が12であり、福井市の場合と同程度であるが、被服廠跡における焼死者を除いても、各所でかなりの数の人々が火災によって死亡している。この差異は、それぞれの都市構造と市街地規模の相違が原因しているものと考えられる。すなわち都市構造として、本所・深川区では河川、水路が避難路を減少させ、また、同時に阻止要因になっていることは明らかであり、市街地規模の大きさは、福井市に比べれば歴然とした差がある。

特に市街地規模について考えてみれば、もし同程度の出火延焼規模で、その周辺に空地（建物が散在する場合も含める＝避難場所）があり、しかも避難路上に避難阻止要因がなければ、生命の安全はかなり確保できるであ

ろう。見方を変えれば、現在の東京のように木造家屋の密集した市街地が延々と連なる都市にあっては、周辺の安全地帯に逃げ込める住民は距離ならびに出火点の関係から限られるので、福井市の例からみるように、大体数十haに分割された区域を運命共同体と考え、この単位毎に地域防災計画が立案されるべきものとなるであろう。

4. むすび

メッシュ分割の有利性に着目して、人間行動と市街地特性を織り込んだ地震火災時の最適避難方法、すなわち経時的な最適避難経路の選択を求めるシミュレーションの基礎的な概念を示した。また、この手法を都市内部でしかも避難場所が限定された想定地域と福井地震の多発火災に適用することによって、人間行動と市街地特性の関連について若干の考察を行ない、この種の手法の有用性的一端を明らかにした。

例えば、避難群集の合流地点と発生避難人口の特性による渋滞の危険性について、あるいはまた防災の観点からみた都市の規模と避難場所との関連について、定量的な解釈を可能にすると思われる。今後、このような手法が都市構造と住民行動の危険な点を明らかにして、避難場所の選定及び建設、安全な避難路への改良、動的な避難路の確保と住民誘導等、ハード、ソフト両面の地域防災計画の基礎資料を提供するであろう。

しかしながら、現段階は研究の緒に着いたばかりであり、種々の仮定の検証、メッシュ分割による地域表現の不連続性など、手法の改良点は数多い。今後は、これらの問題を、各方面の研究を取り入れて検討を重ね、一層現実的な手法の開発をめざして努力することとしている。

文献一覧

- 1) 警視庁警備心理学研究会
1971 大震対策のための心理学的調査研究
- 2) 日本都市センター
1971 拠点の安全性の検討に関する調査研究1
- 3) 北陸震災特別調査委員会
1950 昭和二十三年福井地震々害調査報告、II 建築部門。