

大都市地震時における避難シミュレーション解析(その2)

堀口 孝男*・小坂 俊吉*

要 約

広域避難計画を策定するうえで、都市構造と住民の避難行動特性を組み込んだ動的な広域避難シミュレーション手法の開発が急務となっている。

この手法に求められる条件として、

- ① 入力データの取扱いが簡単であること
- ② パラメータが少ないこと
- ③ 計算速度が速いこと

等が挙げられる。

著者らが考案したメッシュ分割手法による広域避難モデルは上記の条件をほぼ満足するものであるが、その妥当性を検証するために、関東地震(1923)の東京市本所区および深川区を対象地域として、大震火災時の避難シミュレーション解析を試みた。計算結果は良好であり、この手法が広域避難計画策定のための基礎資料を、提供できることを示した。

また、いくつかの計算条件を与えたことから、次のような住民の避難行動特性の一端を推定しえた。

- ① 延焼域が身近に接近してくることが、避難を開始する主な要因であった。
- ② 自宅が延焼する30分前には、大部分の人々が避難を開始した。
- ③ 多くの人々は、最短距離にある安全地帯に向けて避難を開始した。
- ④ 橋梁周辺で死亡した人々は、避難開始が遅れたことが原因であった。

1 はじめに

行政からみて、大震火災時に都市住民をいかに安全に避難させるかは、地震時という非日常性のみならず、使用火気器具の膨大な数量、木造家屋の稠密な連担、さらにはこのような市街地の拡大を考えれば、かなり困難な事業であることは明らかである。しかもその対策は遅々として進んでいないのが現状であろう。その中には、研究面での立遅れに起因するものも少なくない。地震時における住民の安全性を確保するためには、都市施設の安全性を検討するとともに、住民の避難行動特性を明らかにすることが基本となる。しかしながら、前者はさておき後者に関しては未だ未解明の部分が多く、その多くは住民の避難行動に関する研究方法が、意識調査(一般にアンケート調査)による分析を主体にしていることに因ると思われるのである。と云うのは、この意識調査が常に

抱える問題点として、回答者の「ホンネ」と「建前」のギャップがあるからである。東京都のように広域避難計画が広く知れ渡っている現状では、実際の震災時に「都民が、アンケートに答えたとおりに行動するかは、判然としない」と考えるのは著者だけであろうか。

さらに加えて広域的な避難計画を策定するには、災害の経時的変動(例えば火災の出火、延焼域の拡大)を組み入れて避難上の問題点を検討できる、適切なモデルが必要となってくる。このモデルは、住民の避難行動特性を十分に織り込んだものであることは当然であるが、実用的な側面としては、取り扱うデータが簡単、明瞭であることが求められる。さらに実地震時にも適用可能なように、時々刻々の状況変化を入力データとして与え、短時間のうちに、避難状況を予測できることができれば、なお可であろう。このようなシミュレーションモデルがあって、始めて動的な広域避難計画が検討・立案されるべきであるが、東京を初めとする大都市では、広域避難場所

* 東京都立大学都市研究センター・工学部

の配置と居住人口とを考慮しただけの、いわゆる静的な広域避難計画を策定しているに過ぎない。

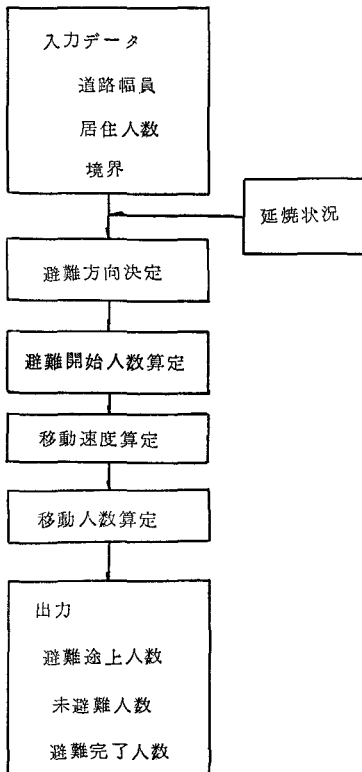
本稿では、このような認識に基づいて、著者らが開発した、メッシュ分割手法による広域避難モデルを、関東地震の東京市本所・深川両区に適用して、そのモデルの妥当性を検証し、その中で若干の避難行動特性についても考察したものである。

2 広域避難シミュレーション手法

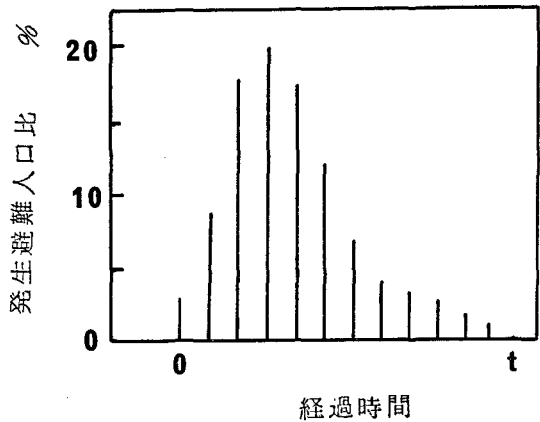
(1) 手法の概略と仮定

広域避難モデルを構成する要素として、①避難を開始する住民の時間分布（発生避難人口比）、②避難する方向、③群集移動速度を考えるが、これらについては、既に発表しているので文献を参照して頂きたい（堀口、小坂、1978）。

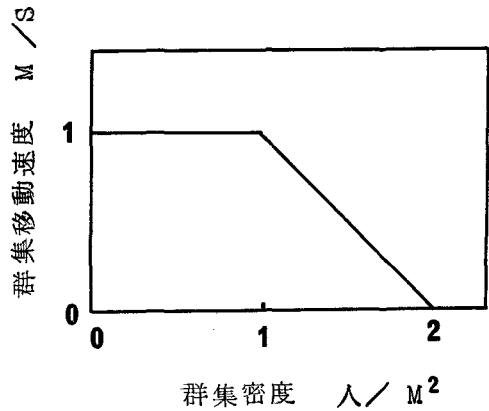
計算のアルゴリズムについて簡単に述べる。まず対象地域を正方形のメッシュに分割する。各メッシュに居住人数、道路巾員、周囲との境界条件（例えば、隣接メッシュとの間が、河川によって分断されている場合は、通行不能となるので不連続の表現をとる）を入力データとして与える。次に単位計算時間毎に、発生避難人口比によ



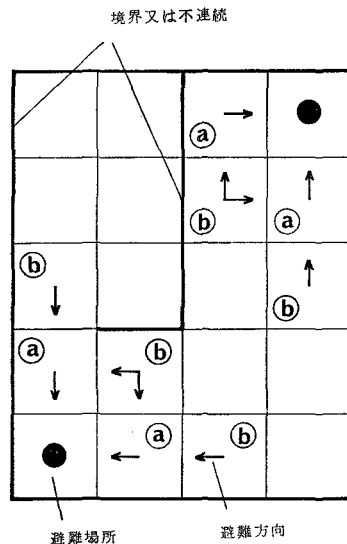
図一 1 計算の流れ



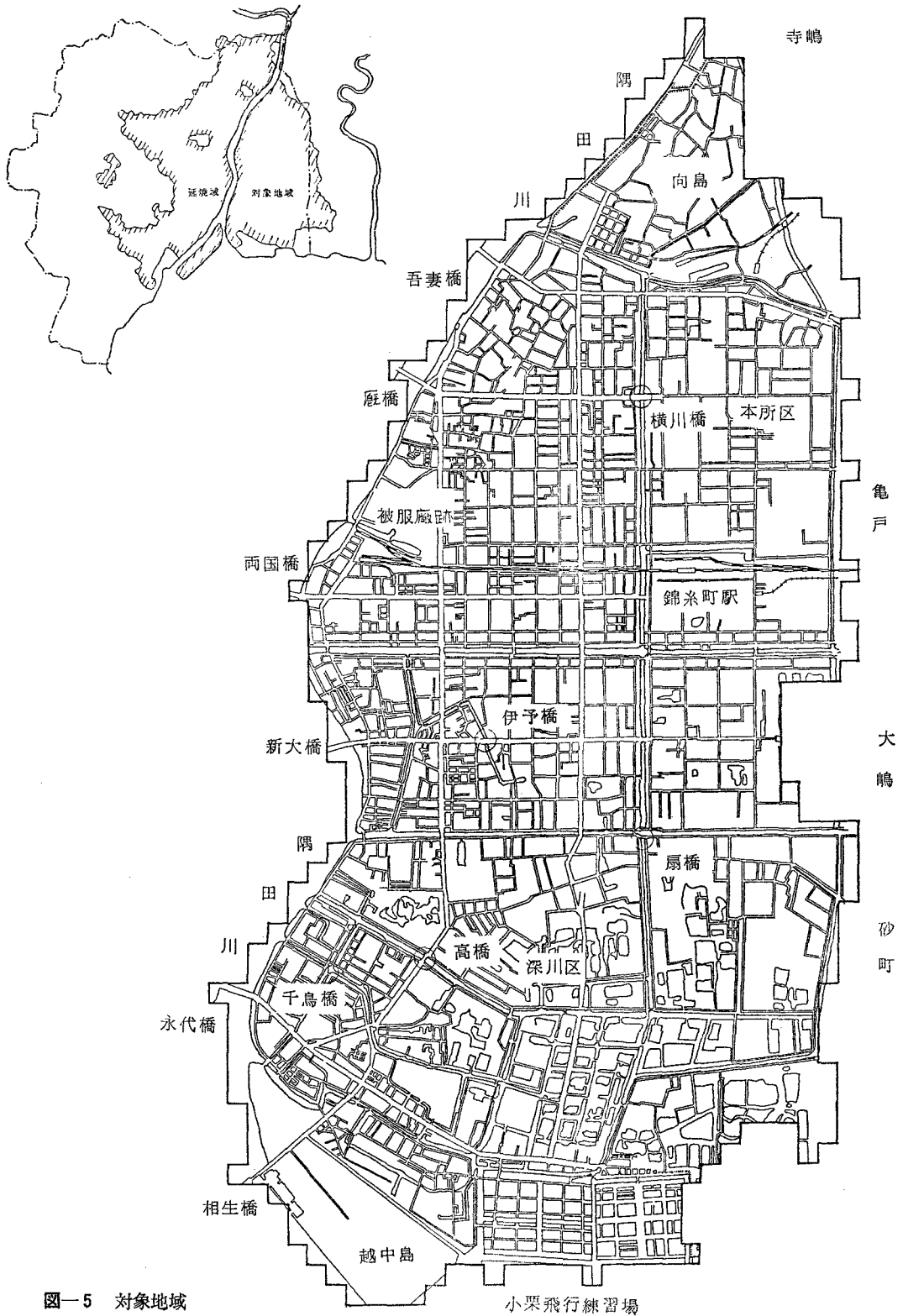
図一 2 発生避難人口分布



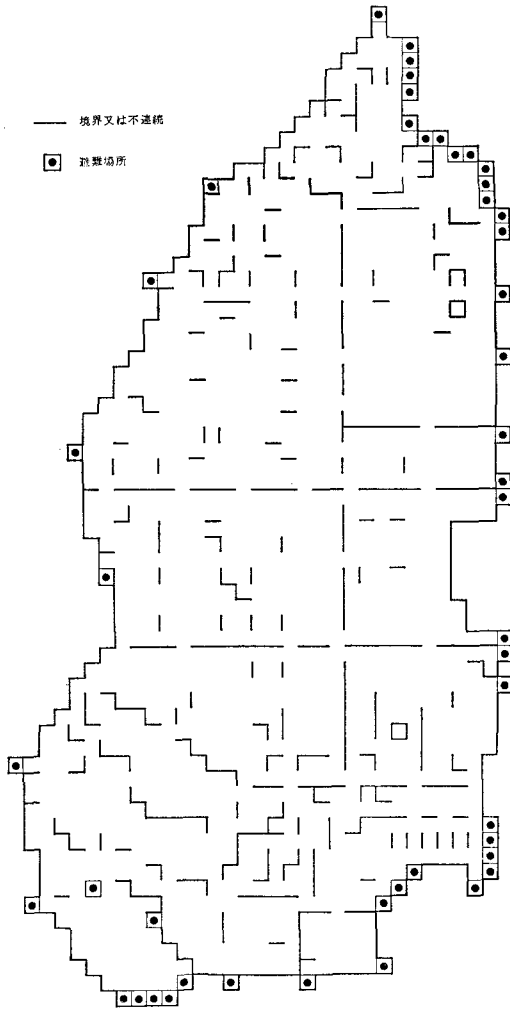
図一 3 群集移動速度



図一 4 避難方向の決定順序



図一五 対象地域

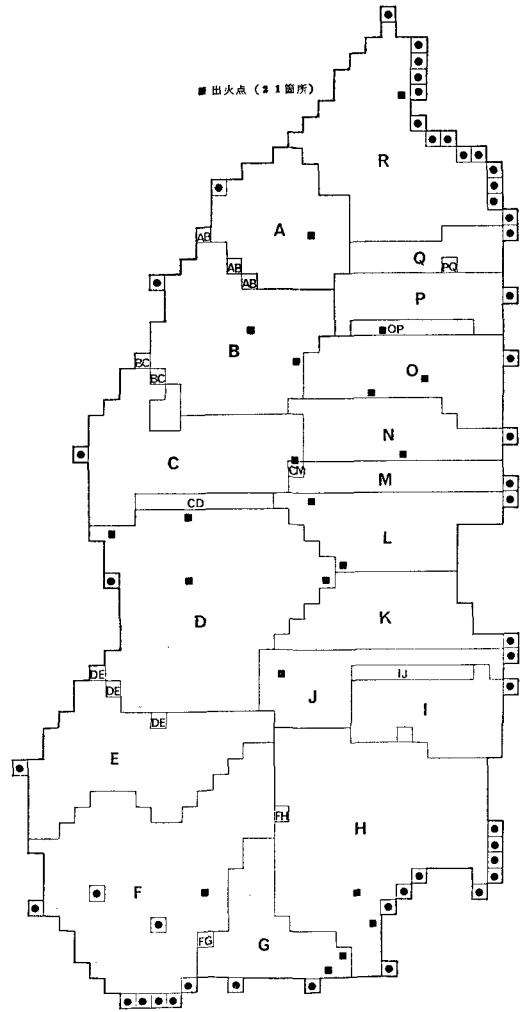


図一6 境界条件と避難場所

る避難人数を発生させ、これらの人々は、延焼状況と周囲との連続性によって、時々刻々変化する最適避難方向の隣接メッシュへ、群集速度に従って移動していく。このようにして全メッシュの避難途上人数および未避難人数（まだ避難を開始していない人数）を求めて、各時刻の広域避難状況を可視化するものである（図1）。

なお今回の計算に際して次のような仮定を設けた。

- ① 避難方向は、対象地域外へ最も早く到達できる橋梁へ、向うものとする（但し越中島は対象地域内で橋梁を経由しない避難場所として設定する）。
- ② 発生避難人口比は全メッシュとも同一とし、その分布形は擬似的な正規分布形を与える（図2）。
- ③ 群集移動速度は、老人・子供の移動速度を限界速度とし、群集密度によって非線形に変動する形状を与える（図3）。



(1) 午後0時（発震時）

図一7 避難場所割と延焼域

図7の付表

記号	避難場所	記号	避難場所	記号	避難場所
A	吾妻橋	G	小栗飛行場	M	旅所橋
B	厩橋	H	砂町	N	松代橋
C	両国橋	I	岩井橋	O	天神橋
D	新大橋	J	三嶋橋	P	栗原橋
E	永代橋	K	大嶋橋	Q	柳島橋
F	相生橋・越中島	L	清水橋	R	寺嶋町

(2) 避難方向を決定するアルゴリズム

避難場所まで最短経路を取るように、避難方向を決定するアルゴリズムは、避難場所に最も近いメッシュから順に、避難方向を定める手法を用いる。すなわち図4の



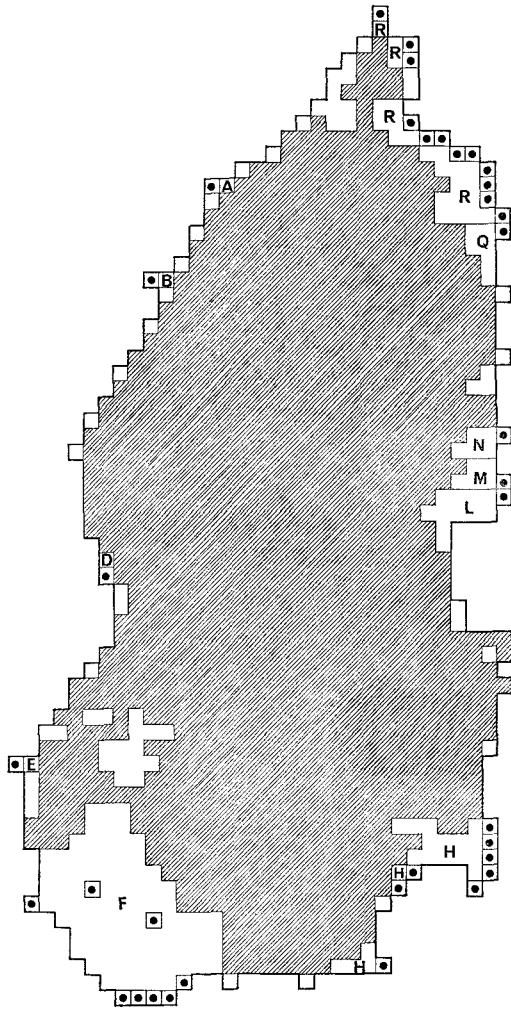
ように、避難場所に最も近いメッシュ④の方向が決定され、次にはその隣接メッシュ⑤というように、全てのメッシュの避難方向は、周囲との連続性によってのみ決定されていく。

この避難方向を求めるには、モンテカルロ法のランダム・ウォークを用いる方法もある。この方法は各メッシュから発した数多くの粒子がランダムな方向に進行し、最も早く避難場所に到達した時、その出発時の方向を避難方向として与えるものである。前に述べた方法と同じく、最短経路が与えられるが、メッシュ数が少ない時には、計算時間もそれ程掛からないが、今回のように、メッシュ数が1000を超えるような広域シミュレーションの場合には、計算時間が級数的に増加するため、あまり実用的ではない。

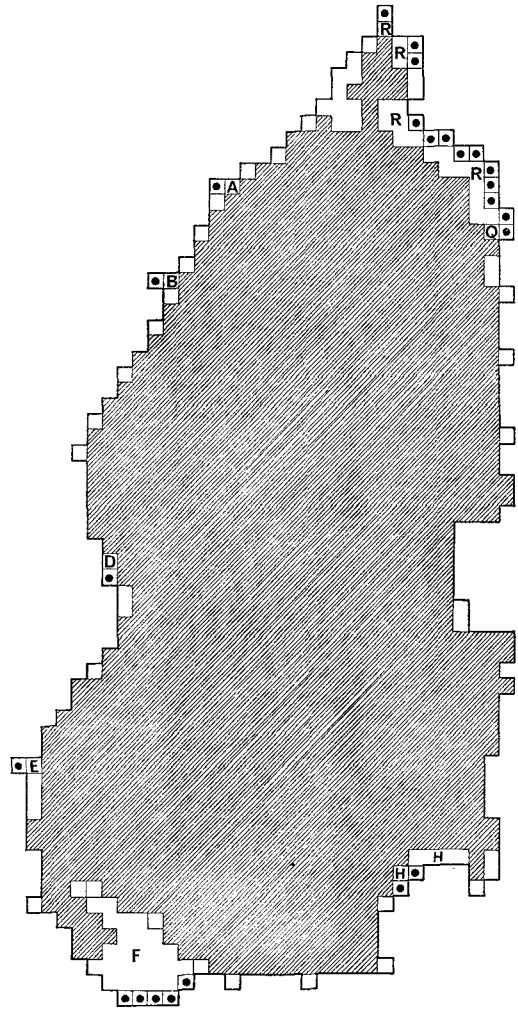
3 関東地震時の避難シミュレーション解析

(1) 対象地域のデータ

関東地震時の東京市本所区および深川区のほぼ全域を対象地域とし(図5)、当時の延焼動態図(震災予防調査会、1925)より100m毎に地域をメッシュに区切り、各メッシュの境界条件(図6)と道路巾員を与える。居住人数は当時の町丁別人口統計(東京市、1920)より各町丁別の居住者数から1ha当たりの平均居住者数を算出し、それを各メッシュに含まれる町丁の割合に乘じ、総和をそのメッシュの居住人数とする。延焼時刻も同様にメッシュ毎に与えるものとする。これも延焼動態図(震災予防調査会、1925)より1時間毎の時刻を与える



(4) 午後9時
図-7



(5) 午後12時
図-7

が、当該メッシュの一部分が燃えていても、避難経路はまだ確保されているものとして延焼とはせず、その大部分が燃えた時刻をもって始めて延焼域に算入する。よってそのメッシュの人々は、その時刻に死亡したものとみなす。図7に各時刻の避難場所割と延焼域を示す。なお、このシミュレーションプログラムでは、延焼域でなくても避難場所が定まらない時（例えば周囲の全メッシュが延焼してしまった場合など）は、そのメッシュの避難方向は与えられない。死亡地点別死者数（焼死・溺死のみ）（震災予防調査会、1925）と町丁名番地入り地図（東京日日新聞、1922）より求めた対象地域内の死者分布を示す（図8）。各地点の死者が一名の場合は省略した。

(2) 避難を開始する要因と計算条件

人々は、大地震発生と同時に、地震動そのものの大きさに比例する衝撃的な恐怖感を抱くであろう。その恐怖感の大きさは、本震をピークとして下降し、余震のたびにより小さなピークを形成すると思われる。このような恐怖感が直接的要因となって、多くの人々は避難を開始するのであろうか。あるいはそうではなくて、この恐怖感がいかに大きくとも避難行動とは直接結びつかずに、実体のある恐怖感、すなわち火災の接近や津浪による浸水などの具体的な危機状況が、主に避難行動を規定しているのであろうか。これらを想定して表1にあるような計算条件を設定した。ケース1～3は、避難開始要因は地震の大きさ（震度）によって起きる恐怖感であるとするものであり、ケース4～12は具体的な危機によるものである。後者のうち、4～6は各メッシュの着火時

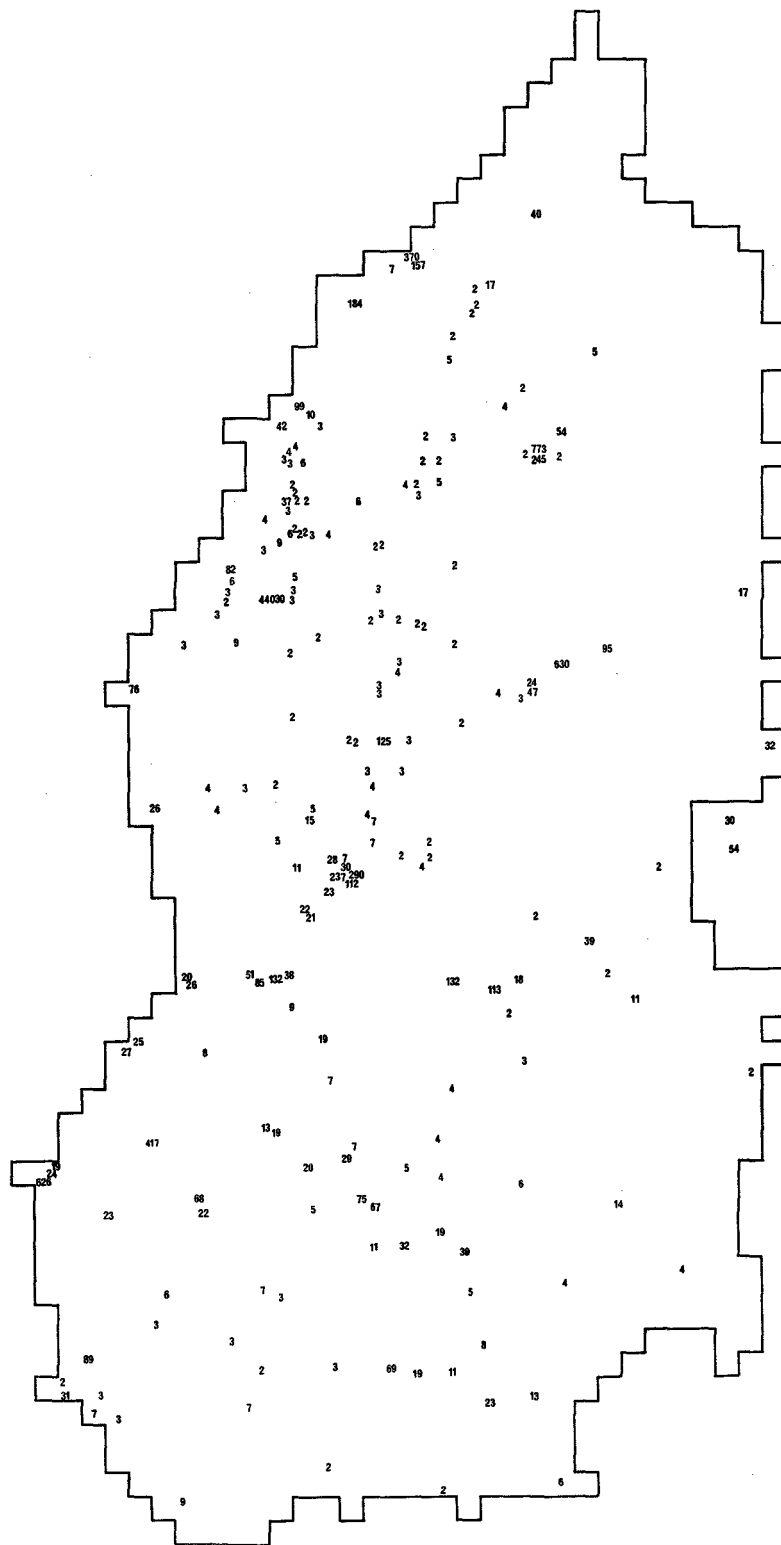


図-8 実死者分布

表-1 計算条件

ケース	避難開始要因	避難開始時～避難開始の終了時	
1	地震々度による恐怖感	発震時	～ 20分
2			～ 40分
3			～ 60分
4	具体的な危機の接近	着火時の20分前	当該メッシュの着火時刻
5		" の40分前	
6		" の60分前	
7		最早着火時の20分前	隣接8メッシュの最早着火時刻
8		" 40分前	
9		" 60分前	
10		" 20分前	
11		" 40分前	隣接20メッシュの最早着火時刻
12	" 60分前		

刻(図9) (=メッシュの一部が炎上し始める時刻)までに、そのメッシュの住民全員が避難を開始とした場合であり、7～9は当該メッシュと周囲にある8メッシュの中で、最も早い着火時刻(最早着火時刻)までに当該メッシュの全住民が避難を開始する場合であり、同様に10～12は隣接する20メッシュの最早着火時刻を考慮した場合である(図10)。これは、群集避難を考える場合に、1メッシュの大きさがどの程度であれば、そのメッシュ内の住民は1集合体とみなすことができるか、ということを検討しているのである。表1で『避難開始時～避難開始の終了時』とは、同一メッシュ内で最も早く避難をする人の出発時刻と最後に避難を始める人の時刻をいい、その時間差は図2の t を意味する。

(3) 広域避難モデル検証のためのチェックポイント

広域避難シミュレーションを行なって、計算手法が妥当であるか否かを判断するには、関東地震時の東京下町地区のように、焼死者あるいは溺死者が多数発生していることが不可欠である。戦後では福井、新潟、68年十勝沖、さらには近年の宮城県沖地震などが、顕著な被害地震として挙げられるが、これらの地震では、避難行動モデルを検討するには、この意味から適当ではない。また関東地震を対象とするにしても、死亡確認地点が道路、広場あるいは公園の場合は、真値(確認地点=死亡地点)として使えるが、溺死の場合は、死者が上流より流されてき

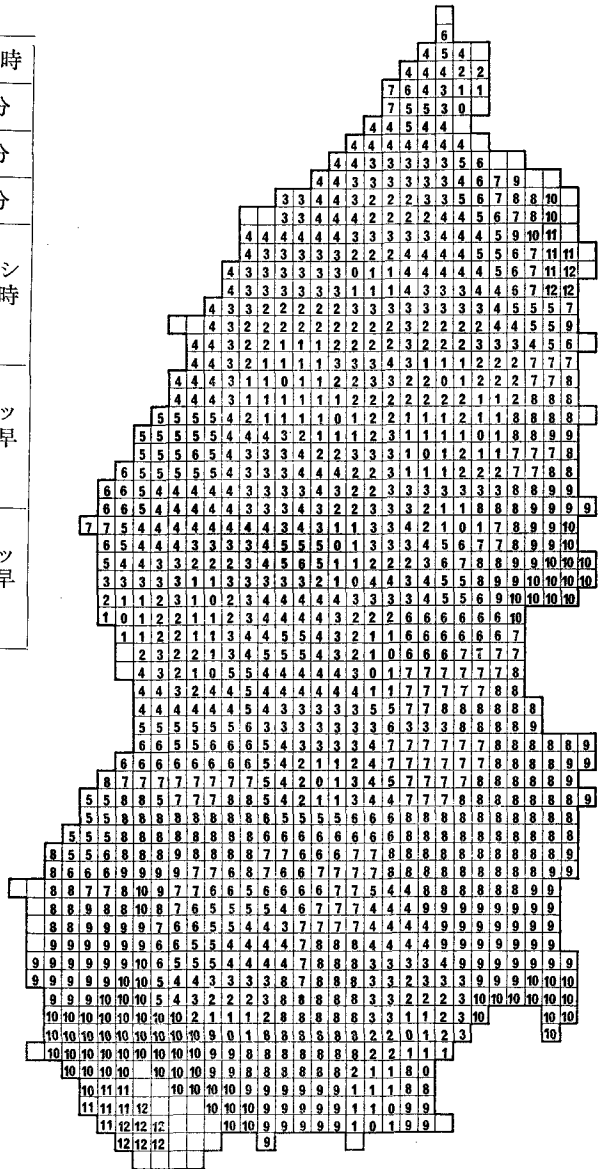


図-9 着火時刻(午後)

たものか、あるいは確認された場所で死亡したものかは判別し難い。それ故、隅田川沿いの死者は、死亡地点と確認地点の不一致や流失を考えると、比較検討する値として不適當である。しかしながら、内水河川では、通常時においても滯水性が大きいゆえに、震災時には、船舶や橋梁の焼失(表2,震災予防調査会,1925)によって、滯水性はさらに大きくなったであろう。しかも人体の流動性は、それよりも低下することを考慮すれば、死亡地点と確認地点は、ほとんど一致しているとみて差し支えない。

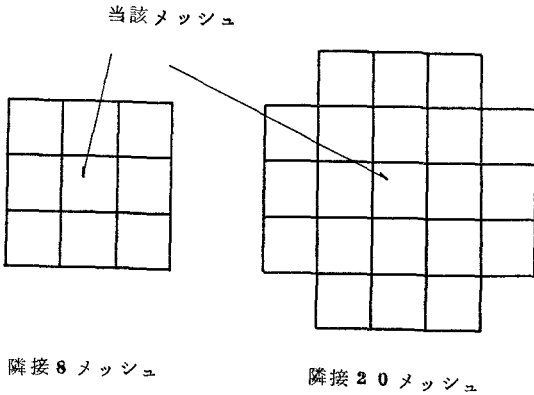


図-10 最早着火時刻

表-2 焼失船舶・橋梁数

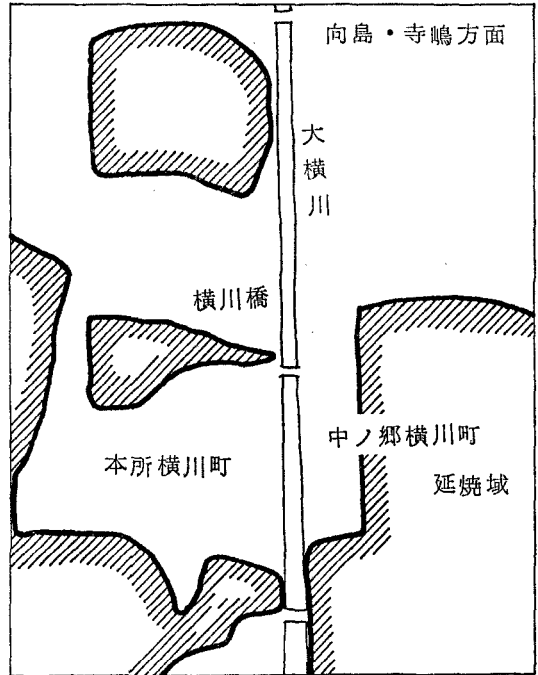
船 舶						
汽 船	帆 船	達摩船	伝馬船	大荷足	小 舟	合 計
5	10	250	700	200	1105	2270

橋 梁			
木 橋	鉄 橋	鉄筋コンクリート橋・他	合 計
271	10	8	289

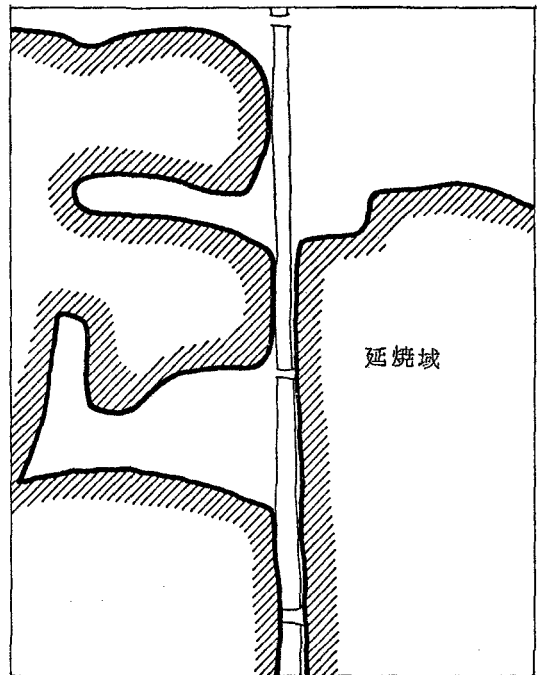
本所・深川区内 183 橋

実死者分布図(図8)の中で、上述した状況にあり、しかも大量の死亡地点を列挙すれば、横川橋周辺(死者数約1080人、以下同様)、伊予橋周辺(約700人)、高橋周辺(約310人)、千鳥橋周辺(約420人)、扇橋周辺(約260人)がある。これらの地点が、検証する時の材料(第1のチェックポイント)となるであろう。なお、被服廠跡でおよそ44,000人、錦糸町駅構内でおおよそ630人の死者が発生しているが、これらのほとんどの死者は、避難場所選択に誤りを犯したことに原因するとして、今回の検討から除外する。すなわち、最短距離にある避難場所を知っていたにもかかわらず、避難を開始するのが遅れたために、迫りくる火災から逃げ出せず、死に至った人々について考察を加えることになる。

まず始めに、横川橋周辺で発生した1,000人以上の死者は、いかなる状況のもとで亡くなったのかみてみよう。午後2時と3時の延焼状況から推測してみると、午後2時頃には本所横川町、中ノ郷横川町近辺に居住するか、あるいは避難途上の人々は、大横川沿いの道を、向島さらには寺島方面へ向けて、歩を進めていたのである。しかしながら、午後3時には、横川橋周辺は完全に延焼域となってしまう(図11)。つまりシミュレーションでは、午後2時から3時の間に、この近辺に所在して

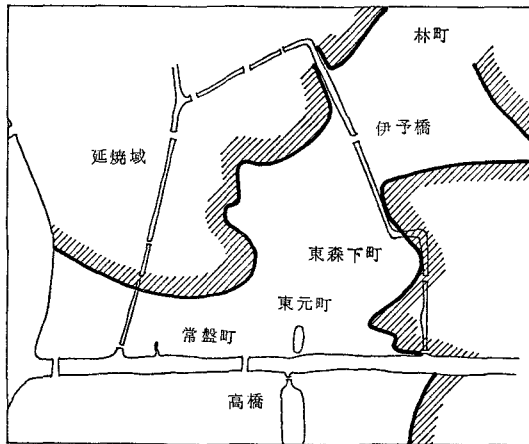


午後2時

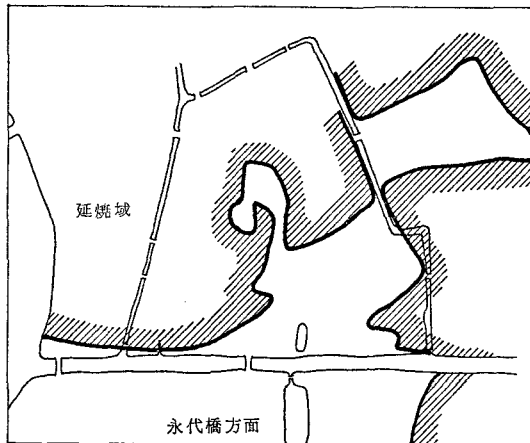


午後3時

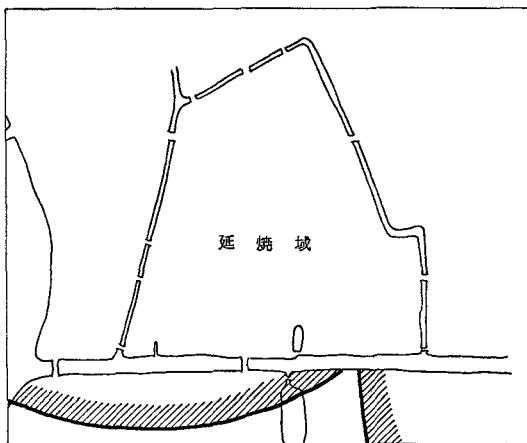
図-11 横川橋周辺の延焼状況



午後4時

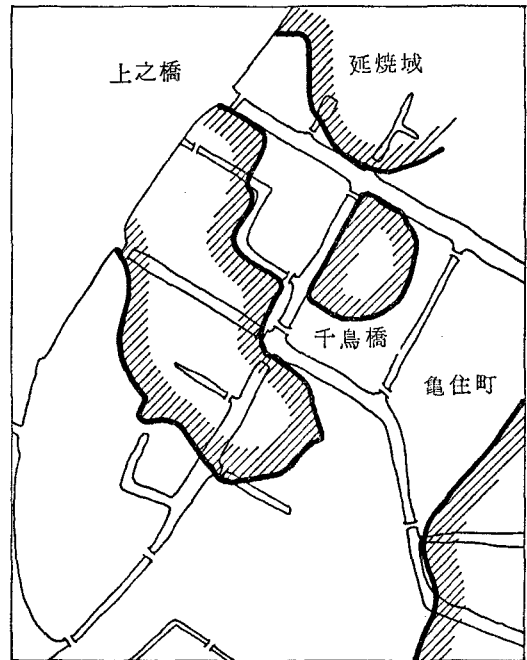


午後5時

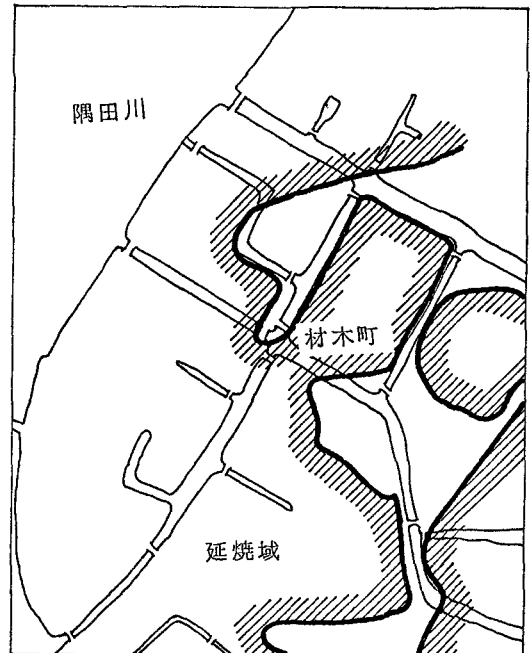


午後6時

図-12 伊予橋、高橋周辺の延焼状況



午後8時



午後9時

図-13 千鳥橋周辺の延焼状況

いた人数の推移が、1,000人前後の数値となるか検討することになる。以下同様に、他の橋梁附近についても、各時刻の延焼状況から推定してみる。

伊予橋周辺についてみると、午後4時頃に林町、緑町に所在していた人々が、東西南北の大火災から逃れんとし、唯一残された伊予橋めがけて殺到したものである。だがこの橋梁も、午後5時前には、西方からの火災により通行不能となったことが推測される(図12)。

高橋周辺について考えれば、伊予橋を通過してきた人々や、東森下町、東元町、常盤町等に住む人々は、伊予橋をひと呑にした火災に追われて、永代橋・越中島方面へ避難をしていたが、午後6時頃には高橋も焼失して、約310人の人々が逃げ遅れたものと思われる(図12)。

千鳥橋周辺では、上之橋を経て避難をして来た人々や、亀住町、材木町等の住民は、午後9時には、隅田川を越

えて飛火した火災、あるいは北や東の大火災に囲まれて逃げ場を失ない、およそ420人がここで命を落したのであろう(図13)。

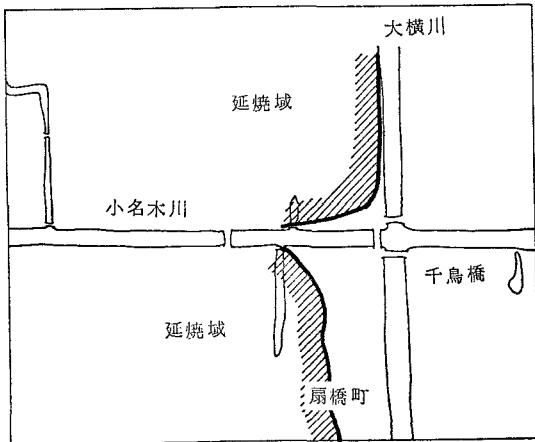
扇橋周辺についてみると、小名木川以南の住民は、南北の大火災や西方の火災から避難しようと、扇橋を経て小名木川沿いに逃げようとしたが、大横川沿いの北からの火災によって午後7時前に橋周辺は焼失しており、このために約260人の人々が死亡したのであろう。(図14)。

以上の5ヶ所について、推定通行不能時刻の1時間以内の残留人数の推移が、実死者数以下となるかを、検討することになる。

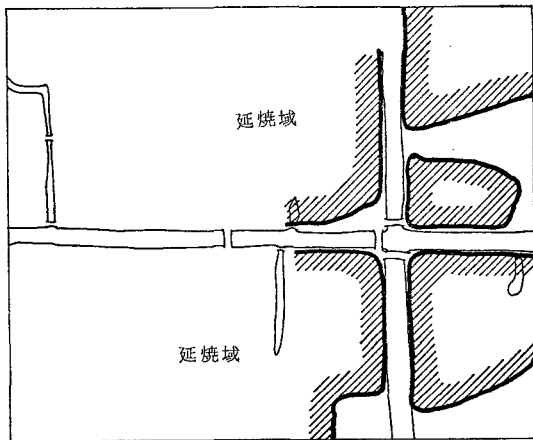
さらに第2のチェックポイントは、死者発生地点以外では大量死がないことと、原データからの制約で、1時間毎の延焼動態しか得られないため、各メッシュの延焼時刻は遅目に設定されるので、算定死者数は、最終計算時刻である発震13時間後の実死者を、越えないことが挙げられる。

(4) 結果および考察

大量死の発生地点である、それぞれの橋梁へ向う人数は、延焼域の拡大につれて減少するのであるが、各橋梁の推定通行不能時刻の30分前、および1時間前におけるその人数は、ケースによって大きな差がある。各橋梁への移動人数の推移が、第1のチェックポイントを満足するケースのみ図示すると(図15~19)、ケース6が全ての地点で条件を満たしていることが判る。ケース1~3はかなり早い時刻にほぼ全居住者が避難を完了してお



午後6時



午後7時

図-14 扇橋周辺の延焼状況

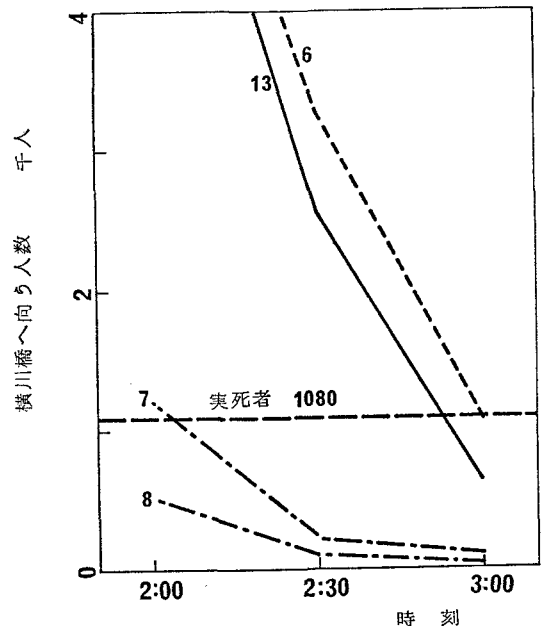


図-15 横川橋へ向う人数

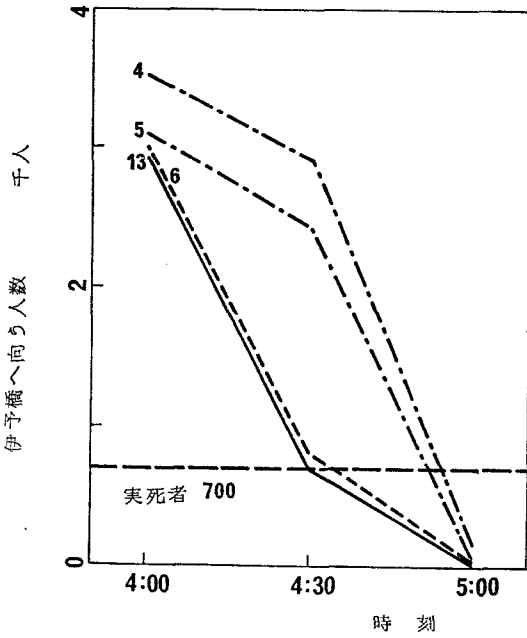


図-16 伊予橋へ向う人数

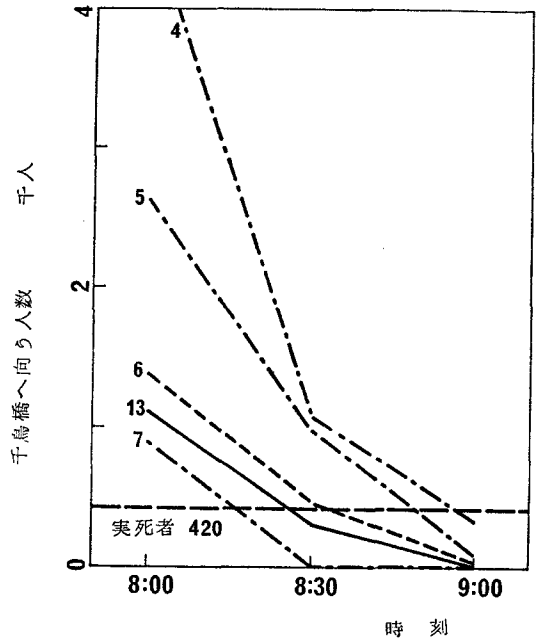


図-18 千鳥橋へ向う人数

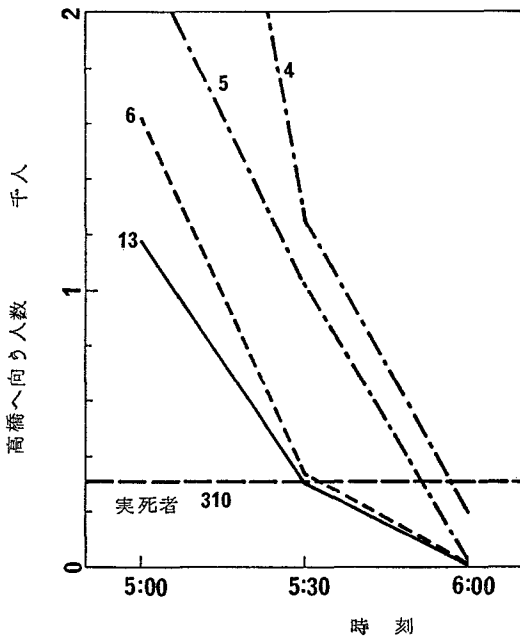


図-17 高橋へ向う人数

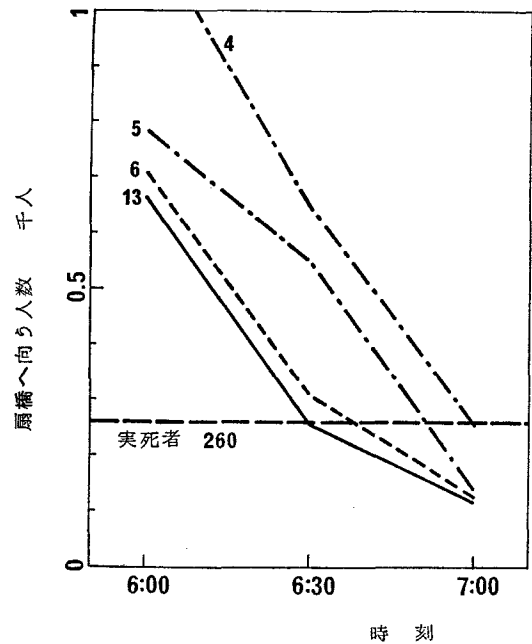


図-19 扇橋へ向う人数

り、またケース7~12も、比較的早く各橋梁を通過しているため、計算死者数は少ない。このことは、地震々度で表わされる、揺れの大きさ、さらには近隣家屋の倒壊、地割れ等による心理的恐怖感よりは、延焼域の接近といっ

た具体的危機状況に基づいて、人々は避難を開始したものであると推察できる。また避難開始から終了時間をみると、当該メッシュが延焼する1時間前に避難を開始し、30分前には大部分の人々が避難行動を起こしたもの

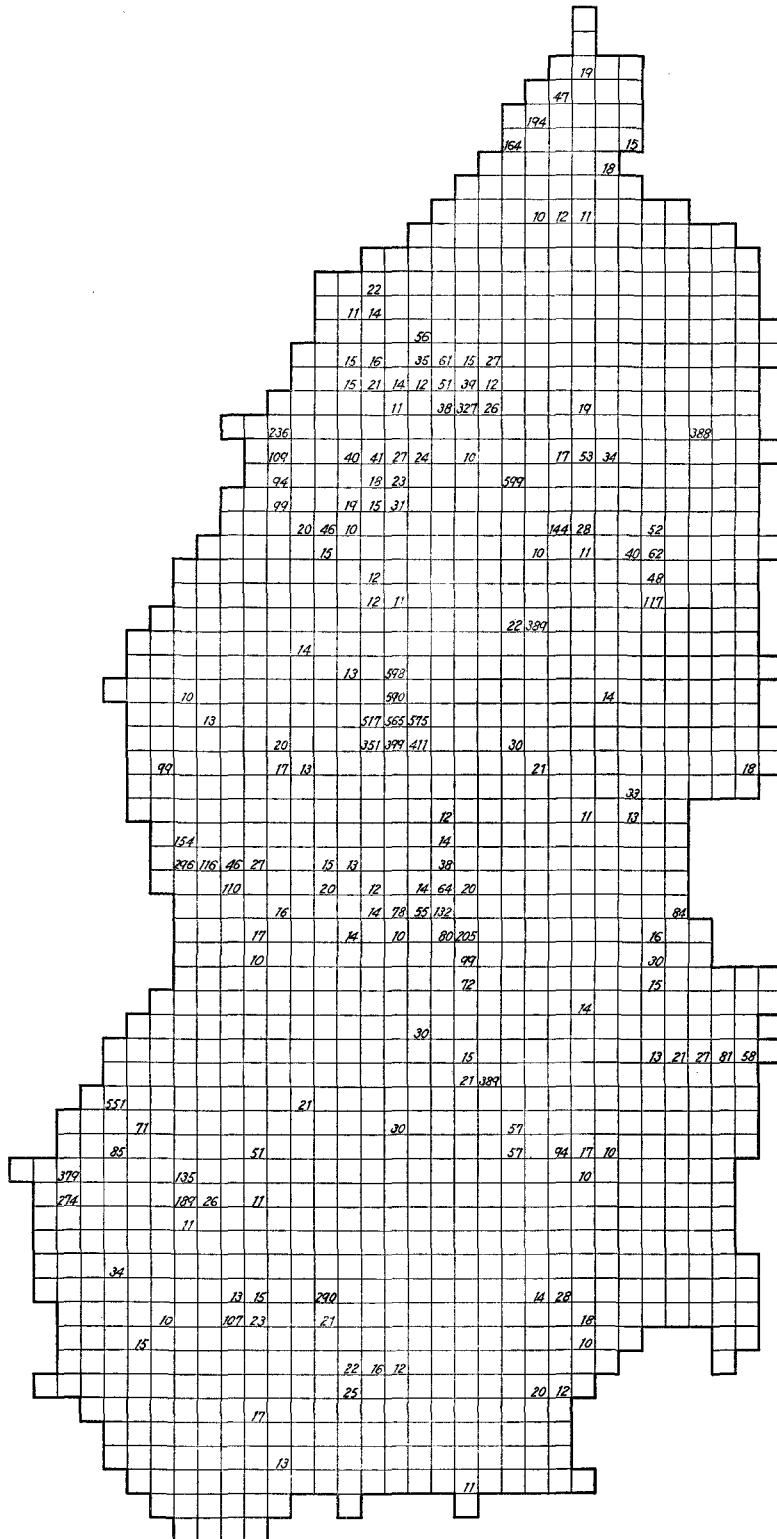


図-20 ケース6の死者分布（発震13時間後）

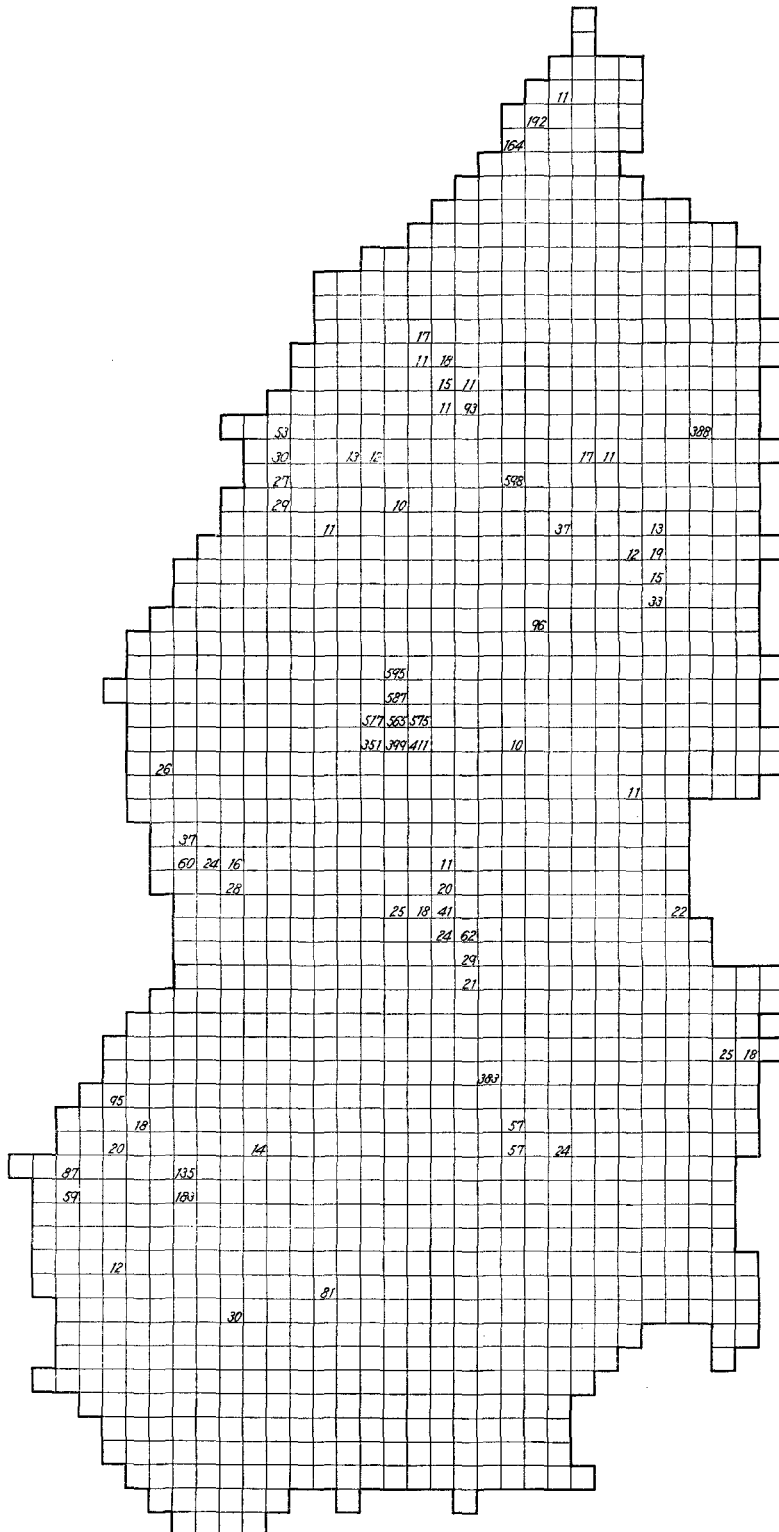


図-21 ケース13の死者分布（発震13時間後）

表一3 死亡地点別の主な死亡者居住町丁

死亡地点	町丁名
横川橋周辺	本所横川町
伊予橋周辺	林町2・3丁目
高橋周辺	東元町, 常盤町, 西元町
千鳥橋周辺	亀住町, 材木町
扇橋周辺	扇橋町2丁目

と思われる。さらにこれらの橋梁附近で死亡した人々の主な居住地を、各時刻の延焼域と着火時刻から推定すれば、表3のように示される。ここに挙げた町内には、近くまでまだ火災が迫っていないために、避難開始が遅くなり、延焼域がかなり接近してから始めて逃げ出したが、安全な場所へ通ずる橋梁は、既に焼失、あるいは火災により通行不能となっていたので、あえなくも死に至った人々が多く住んでいたことを示すものであろう。

以上の結果から、最短避難距離にある安全地域を目指して避難するという計算の仮定は立証されたといえよう。当時の本所区、深川区は亀戸、大島、砂村等の郊外に隣接しており、しかも住民の多くは、かなり居住年数が長く、そのため土地勘が発達して最適な避難経路を熟知していたのであろう。

次に対象域全体の発震13時間後の死者分布を見てみよう（見易くするために二桁以上のオーダーの数値のみ記す）（図20）。全体を概観すれば、実際の死者分布と同様に対象域の西側により多く分布しており、また大量死の発生地点に関しても、避難方向を勘案すれば（計算では周囲が延焼域になると避難群集は移動しない）、比較的

傾向は似ていると思われるが、その数値は全体に大きい。これは、群集移動速度の限界を1 m/secと仮定したためであって、限界速度を早めれば全体の数値も低くなり、計算結果は実際と似てくるであろう。そこで参考までに群集移動速度を、群集密度が1人/m²以下で、2 m/sec, 1~2人/m²で直線的に下降して速度0 m/secとなる形状を与えて、それ以外は全てケース6の条件を代入する（ケース13）と、図21の結果が得られる。この方が、さらに良好な結果となっていることは明らかである。なお、図15~19の中に、ケース13の計算結果を挿入してある。参考までにケース3、6および13の避難完了人数の推移を示す（図22）。

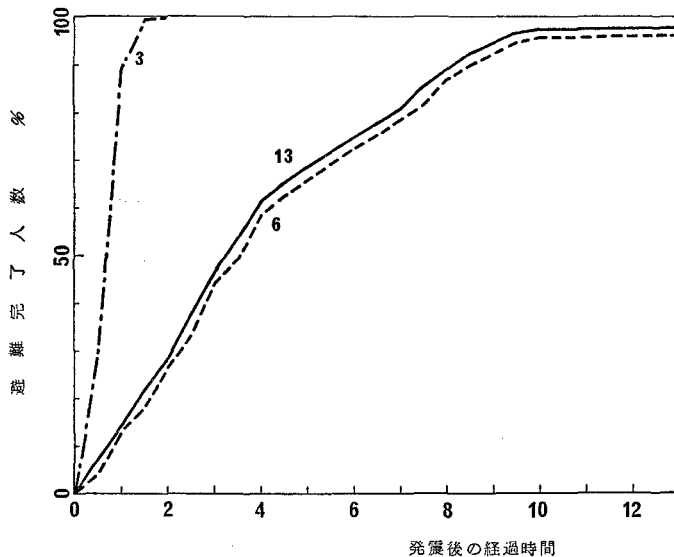
以上の数値計算は、東京大学大型計算機センターのHI TAC-M 200 Hを使用し、1ケース当りのcpu時間は1分30秒程度を要した。

4 おわりに

大震火災時の広域避難計画を策定するうえで、避難場所の安全性とともに避難途上の安全性も重要な柱となる。

時々刻々変化する被害状況の中で、住民は最適な避難経路を選択しなければならないのである。

今回のシミュレーション結果は、避難開始時期の判断を誤った人々が死に至ったことを示したが、関東震災からすでに60年近く経た現在、被災体験を有する人は非常に少なくなっており、その状況判断力に期待することは難しい。しかしながら情報伝達的手段としてトランジス



図一22 避難完了人数の推移

ターラジオや無線が利用できる昨今、被災状況を刻々知らせることは可能となった。そこで浮かび上がってくるのは、誰が被災状況を判断して、いかなる時に避難勧告あるいは命令を出すのが、広域避難からみて重要な意味をもってくるのである。防災行政の担当者の検討を期待したい。

時間々隔の延焼動態図しか得られないという、関東地震の資料ではあったが、かなり良好な計算結果が得られたものと思われる。メッシュ分割による手法は、取扱いが簡単であり、しかも様々な地域データが、1 km, 500m, 250mメッシュで表現され、公表されている現在、最も手軽に利用できる手法である。そのうえ、その計算時間は短いため、費用も多くを要しない利点を合わせ持つものであるから、なおさらであろう。今後は、手法の改良に

取組んでいくとともに、広域避難計画の検討に活用することとする。

文 献 一 覧

震災予防調査会

1925 『震災予防調査会報告』100号戊。

東京市

1920 『東京市勢統計原表』。

東京日日新聞

1922 『最新式大東京地図番地入(第1万6348号附録)』。

堀口孝男, 小坂俊吉

1978 「大都市地震時における避難シミュレーション解析」『総合都市研究』第5号, pp. 145~153。

A SIMULATION ANALYSIS OF REFUGE BEHAVIOUR IN URBAN AREAS AFTER A STRONG EARTHQUAKE (PART 2)

Takao Horiguchi and Shunkichi Kosaka

Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University

Comprehensive Urban Studies, No. 14, 1981, pp. 21—36

For planning urban refuge projects, it is urgently needed to develop a simulation method of dynamic urban refuge. The following conditions are indispensable in such a method.

1. Simple input data.
2. Small number of parameters.
3. Short computer time.

Our simulation model (one of the mesh-divide methods) satisfies all of the above conditions.

Therefore, for an inspection of the propriety, we tried a fire-refuge simulation analysis of downtown Tokyo (Honjo and Fukagawa) at the time of the Great Kanto Earthquake (1923).

The results were comparatively similar to the actual situation. The model proved useful for planning an urban refuge project.

On the other hand, by changing several parameters, the following refuge behaviours were shown.

1. Approaching of the fire domain was the main cause of refuge.
2. Most of the people fled from their homes in thirty minutes before their houses caught fire.
3. Most of the people escaped for the nearest refuge areas.
4. Most of fatalities occurred at the sites of bridges due to a delayed start for the refuge areas.