

# 延焼シミュレーションと群集避難誘導

糸井川 栄一, 梶 秀樹

## 1. はじめに

日本の大都市においては、関東地震のような大規模な地震の時には、非常に多くの出火が同時に発生し、平常時には十分威力を発揮する消防力も、これらの同時多発出火のすべてを消火しきれないだろうと予想されている。消火しきれなかった火災は当然燃え広がり、いわゆる市街地大火となって住宅や都市の重要な施設を焼失させ、さらには尊い人命をも奪い、莫大な被害を与える可能性がある。

このような問題意識から、わが国の都市防災研究では、市街地延焼予測と住民の避難行動予測が防災対策上主要な研究テーマと位置づけられ、数多くの延焼拡大予測モデル（以下、延焼モデルと呼ぶ）並びに広域避難モデル（以下、避難モデルと呼ぶ）が提案されてきた。しかしながら、これまでの延焼モデル、避難モデルについては、以下のような問題点が指摘されてきた。

まず、延焼モデルについては、延焼が広がる速さ（延焼速度と呼ぶ）を計算するために、従来浜田式<sup>[1]</sup>が広く使用されてきた。すなわち浜田式では延焼の単位（建物1棟1棟であったり、街区であったり、メッシュであったりする）の間での延焼速度として、建物の構造、高さ、隣棟間隔、風速等をパラメータとして計算される経験式を用いて延焼拡大過程を記述している。だが、この式は昭和20年～30年代の大火の延焼状況に対しては比較の実態に合致しているといわれるが、最近のように木造といえども不燃化が進んだ建物が立地している市街地では、延焼速度が過大評価される傾向がある。しかし、最近の大火事例は昭和51年の酒田市大火を最後に経験がなく、過去の事例から経験的に延焼速度を捉えることは非常に困難である。そこで現在の通常火災（せいぜい20～30棟の焼失）の延焼拡大過程を説明でき、かつ、それ以降の延焼過程を論理的に説明可能な延焼モデルを構築

し、現在の市街地の実態に即した延焼速度の予測を行なうことが必要となる。

一方、避難モデルについてこれまで開発されてきた種々のモデルの特徴を検討してみると、いずれのモデルも、①群集の避難行動をできるだけ忠実に記述しようとしたモデルであり、どのような誘導方策が最も望ましいかを求めるような規範的なモデルではない。②つまり、誘導対策は外生的に与える必要がある。③特に、群集の避難行動開始に関しては、いつ、何人ぐらいつ避難を開始させるかという誘導条件を恣意的に設定しているか、無制限な群集本性を仮定しているものがほとんどであり、それが、その後の滞留や避難不能率を決定的に左右することになる。等の問題点があり、必要な避難勧告の時刻や誘導人数を対策本部から指示するといった、防災対策の立案のためには適用不能であり、全く別の考えに立った、誘導を目的とした規範型の新たなモデル開発が必要とされてきた。

## 2. 確率的市街地延焼拡大予測モデル

### 2.1 モデルの概要

筆者らは、上記の問題点を考慮して、飛火を考慮した新しい確率的延焼モデルを開発した。このモデルは、延焼拡大過程として2つのプロセス、すなわち、

①逐次燃焼型の延焼（以下、逐次燃焼過程と呼ぶ）

②飛火による延焼（以下、飛火過程と呼ぶ）

を確率的に記述し、延焼計算をシミュレーション手法により行なうものである。その基本とする内容は、逐次燃焼過程については隣棟間隔 $d$ 、隣接する受害側建物高さ $h$ の場合の静的な延焼確率 $p_{stj}(d)$ を、相互の構造組合せ $(t, j)$ とする)別に、

$$(1) \quad p_{stj}(d) = 1 - \exp\left(-A_{ij} \frac{h}{d_{ij}^2}\right)$$

として表現し、一方、飛火過程については受害側建物における火の粉の沈着速度が $B(x, y)$ の場合の静的な着火確率 $r_{stj}(x, y)$ を、構造組合せ別に、

$$(2) \quad r_{stj}(x, y) = 1 - \exp\{-w_{0j} B(x, y)\}$$

と記述することにより、上式から求まる $f_{ij}(t, d)$ 、

いといがわ えいいち 建設省建築研究所

〒305 つくば市立原1

かじ ひでき 筑波大学 社会工学系



を示唆している。

ⅳ 火の粉の影響がある場合、同風速における最終的な延焼速度はケースⅠの方が速い。風速の他に延焼速度比が大きな寄与をしていると考えられる。

ⅳ 火の粉の効果が現われない時間（または現われないケース）の延焼速度の変化はケースⅡの方が延焼速度の増加傾向が大きく、建べい率の影響が大きいと推定される。

上記のケース以外のシミュレーションをくりかえしたところ、以下のことが、明らかになった。

(1) 風速 3 m/sec~6 m/sec の間に延焼速度に影響を及ぼす限界点がある。

(2) 飛火の影響が現われる場合、早い場合には出火後 2 時間程度で現われるが、遅い場合には 6 時間程度後に現われる。

(3) 逐次燃焼型の場合にも、延焼速度は経時的に変化し、その主要な支配的要因は建べい率であり、25~30% の付近に延焼が拡大するか否かの限界点がある。

モデルが複数棟火災時の炎の合流を考慮していない点、建物規模、形状の認識がされない点、十分な知見が得られていないパラメータについては暫定的な値を与えている点、酒田市大火の延焼速度を現代市街地の代表的延焼速度としている点、等モデルの改良の他、今後の調査研究を待たねばならない点も多いが、これまで提案されてきた延焼モデルと比較して、建べい率が非常に大きな延焼要因として浮き彫りにされており、都市計画的な市街地コントロールの重要性を示唆するものとなっている。

### 3. 最遅避難モデル

上述した市街地延焼予測にもとづいて、次に群集避難に関し、さまざまな地区の住民を安全に効率的に避難地に誘導する場合に必要な情報（どの広域避難地に、どこを避難路を通して、いつ）を算出するモデルを構築した[3]。避難を開始すべき時刻とは、それ以前にあわてて避難する必要はないが、それ以降になると確実に危険な、いわば、安全限界としての「最遅の時刻」と考えることができる。

#### 3.1 避難経路選択問題

目的とする避難場所へ避難を行なう場合に、その避難ルートを決定する大きな要因は、①避難場所までの距離、②避難ルートの幅員、③地区の人口、④避難ルートの火災による通行不能時間、⑤他の地区住民との道路

の競合、の 5 点があげられる。避難ルートの決定に際しては、これらの指標を見きわめつつ、最も安全性の高いルートを選定することが重要である。①だけを考慮したものが最短経路による解であるといえる。これに対し、②および③を考慮すると、それぞれの路線を通るために必要な所要時間  $\tau_0$  が得られ、この時刻をそのリンク（避難ルートの要素）上のクリティカルな火災による遮断時刻  $\tau_c$ （その火災を目前に避難路を通過できれば広域避難地に避難可能な火災の避難路の遮断時刻）から引くと、地区ごとに避難を開始しなければならない時刻が得られる（ただし、この場合、他の地区との競合を考慮していない）。この結果、この値が負になればそのリンク（避難ルートの要素）は使えない（火災発生を時刻 0 ともる）ということであるので、避難候補路線からはずされることとなる。この値を“最遅避難開始時刻”と呼ぶ。

$$(5) \quad \tau_* = \tau_c - \tau_0$$

この値  $\tau_*$  の値は、正の値が大きければ大きいほど避難路として“安全”であると考えられる。最短経路問題との対応を考え、 $\tau_*$  の逆数をリンクインピーダンス値として定義する。

$$(6) \quad T = 1/\tau_*$$

各リンクごとにこの値を求め各一時集合場所から最終避難地までのリンクインピーダンス値の最も低くなるルートを選んでいけば、比較的安全な経路となると考えられる。

#### 3.2 最遅避難開始時刻計算

上記の手続きによって避難経路の決定を行ない、この経路にそって各地区の最遅避難開始時刻を計算する場合には、避難路ネットワーク上の避難地に近い地区の住民を優先的に避難させる前方優先避難方式とする。また、合流や前後の住民の道路上の競合によって、それぞれの地区の住民の避難開始時刻を調整する必要がある場合が生ずるので、これについては別途のアルゴリズムによって計算を行なう。

#### 3.3 境界変更問題

出火点の位置、数、気象、等の状況しだいでは、上記による迂回ルートを用いても当初割当ての避難地には避難が不可能となる場合が生ずる。このような場合には、当初割当ての避難地に避難を行なうことが不可能な地区の避難先を変更する必要がある。避難圏域を変更し、避難困難となる状態を解消する基準としては、以下の方法によった。すなわち、「前方避難優先としているので、避難時間に余裕がなくなる可能性があるのは、それぞれ

の避難圏域の周辺部である。そこでこれらの地区において、避難開始時刻の改善が必要とされる一時集合場所（いったんそこに集まってから避難地に避難する集合地）に注目し、これを隣接する安全側避難圏域に編入する」というものである。この方法は、第一義的に、避難困難な一時集合場所に注目し、これを隣接する避難圏域に編入することにより避難困難者の状況の改善を図ることができるかどうかをチェックする方法である。

この場合、編入する相手側の避難圏域がもつ避難地の容量制約を考慮しなければならない。編入する相手側の避難地容量に余裕があれば、最遅避難開始時刻が改善する場合には単純に編入を行なうだけであるが、余裕がない場合については以下の方法をとった。すなわち、その概要は「編入する相手側の周辺部で、最遅避難開始時刻の改善

が必要な一時集合場所のうち、他の避難圏域に編入可能なものを先に編入させ、当該避難圏域の避難地容量に余裕を作り出す」というものである。この手続きを採用することができない場合は、当該一時集合場所の他の避難圏域への編入を断念することとなる。

### 3.3 避難モデルによるシミュレーション分析

ケーススタディーの対象地域としては、東京都世田谷区の北西部分を選定した。地区の範囲は東西 6.6 km、南北 6.4 km（ノード(後述)が位置する範囲)の領域である。地域の避難ネットワークは幹線道路を選定して構成した。また、地区の人口は避難路ネットワークを構成するノードにそれぞれ配分した。住民が張りつくノードの数は152地点、2つのノードで構成されるリンク（避難路）の数は169である。また、地域の避難地は7箇所とした（図3参照）。

延焼予測の設定条件は、以下のとおりである。

市街地条件：木造率	24.9%
防火造率	52.4%
耐火造率	22.7%
全建物平均建ぺい率	39.1%
気象条件：風速	6 m/秒
風向	北北西

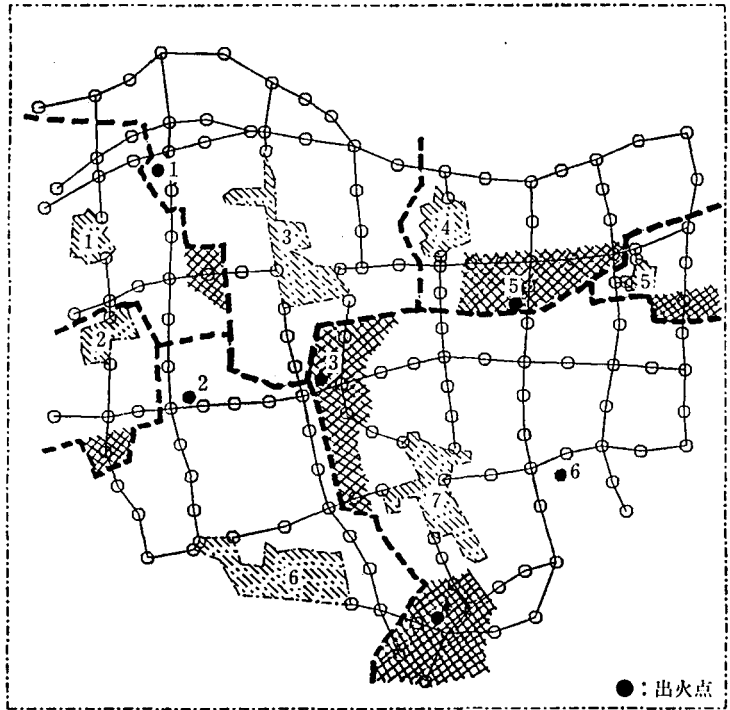


図3 最終避難地割当図

出火点数：6点（すべて同時出火）

各ノードの着火時間の分布をみると、出火後3時間程度後に着火する地区から、2日経過しても着火しないところもあり、多くのところは、出火後6時間～1日程度経過した時点で焼失している。

表2は、避難地の容量と避難人口、ならびに当初割当の場合の最短距離ルートおよび最小インピーダンスルートにもとづき各一時集合場所の最遅避難開始時刻、避難困難者数等を示したものである。同表のうち、避難困難者数については、発災後、避難準備のため表中の時間だけ避難を開始することができないとみなし、その後、所定のルートを通して避難したのでは避難しきれないとみなされる人数を示している。これをみると、No.3, 6, 7等の避難地では避難困難な状況が生じていることがわかる。最小リンクインピーダンスによるルート選択の方法を用いることにより、No.6, 7等では避難困難者数についてかなりの改善がみられるが、No.3は避難ルートを迂回するように変更して最遅避難開始時刻の改善を図ってはいるものの（すなわち、最遅避難開始時刻の平均値、最大値は上昇している）、最小値の改善がみられず、結果として避難困難者数の減少につながっていない。これは、最遅避難開始時刻の最小値を示す一時集合

表 2 避難に関する指標 (当初割出による)

避難場所	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	全体
収容容量(人)	31000	13400	92200	52400	11000	80000	149000	429000
出発地点数	14	5	32	15	7	33	46	152
人口総和(人)	30758	11139	82845	38813	10687	82895	134797	391934
最遅避難開始時刻総和(分)	7394 7394	2413 2413	23117 25276	18187 18188	6368 6368	11279 11684	14713 14869	83471 86192
最遅避難開始平均時刻(分)	528 528	482 482	722 789	1212 1212	909 909	341 354	319 323	534 553
最遅避難開始最大時刻(分)	925 952	909 909	1427 1430	1641 1641	1381 1381	825 825	1138 1138	1641 1641
最遅避難開始最小時刻(分)	293 293	603 603	92 92	895 895	1072 1072	28 28	58 58	28 28
避難困難者	0分～60分	0 0	0 0	0 0	0 0	22258 8479	5000 2161	27258 10640
	60分～120分	0 0	0 0	5934 5934	0 0	0 6147	13686 16525	19620 28606

注) 上段:最短経路,下段:最小リンクインピーダンス値によるルート

場所が、初期割当の一時集合場所に行くためのより安全な代替ルートがないことによる。また、改善がみられたNo. 6, 7の地区についても、すべての住民が避難困難から解消されたわけではない。このように、火災状況によっては、同じ避難圏域のなかでより安全性を確保するために避難ルートを変えようとしても、すべての住民が避難困難とならないようなルートを見つけだすことは困難であり、一部の住民を別の避難圏域に避難誘導することが必要となる。

そこで、次に上記で述べた方法により避難圏域の変更を行なう。図3は、最小リンクインピーダンスをルート選択基準として採用した場合の、最終の避難圏域を示したものである。同図中でハッチを施した部分が避難先の変更がなされた部分である。これをみると、出火点No. 3, 4, 5に近い場所が火災が発生した場合に、その周辺部の一時集合場所が数多く他の避難圏域に編入されていることがわかる。これは、これらの地区では、初期割当ての場合の避難の代替ルートが他になく、その避難ルートの近辺で火災が発生した場合には、指定された避難地とは逆の方向に、すなわち別の避難圏域に避難した方がより安全性を確保できるためである。

また、表3は、上記の最終的な避難圏域と

避難ルートにもとづいて、各避難圏域ごとの避難に関する指標を整理したものである。これをみると、完全に避難困難者をなくすことはできないが、初期割当に比較して、その数はかなり改善されているといえることができる。

#### 4. おわりに

延焼モデル、避難モデルに関して最近の事例を紹介したが、コンピュータ利用の一般化、ダウンサイジングなどを考慮すると、大規模な自治体でなくても実際の防災行政の中で利用されることが一般化する日がくることも考えられる。このためには、これらのモデルの実用性をさらに検討していく必要がある。

#### 参考文献

- [1] 浜田稔,「火災の延焼速度について」, 火災の研究 I (1951), 損害保険料率算定会火災科学研究会, 相模書房
- [2] 糸井川栄一他,「飛火を考慮した市街地火災の確率的延焼モデル」, 日本都市計画学会学術研究論文集 No.23(1988)
- [3] 李載吉「誘導群集の歩行動態ならびに広域群集避難勧告支援モデルの開発」(筑波大学社会学研究科博士論文, 1992)より引用(共同研究者)

表 3 避難に関する指標 (最終割当による)

避難場所	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	全体	
出発地点数	14	6	31	21	7	23	50	152	
最遅避難開始時刻総和(分)	7321	3318	24734	22234	6550	8967	16427	89551	
最遅避難開始平均時刻(分)	522	553	797	1058	935	389	328	585	
最遅避難開始最大時刻(分)	925	909	1427	1644	1386	827	1138	1644	
最遅避難開始最小時刻(分)	293	603	92	230	1072	49	57	49	
避難困難者	60分	0	0	0	0	0	3594	3981	7575
	120分	0	0	5934	0	0	0	7323	13257