

都市火災の延焼確率と延焼シミュレーション

自治省消防庁消防研究所 佐々木 弘 明
" 神 忠 久

(1979年3月 受付)

Probability of Fire Spread in Urban Fires and their Simulation

Hiroaki Sasaki and Tadahisa Jin

(Fire Research Institute, Ministry of Home Affairs)

The probability of fire spread between buildings plays an important role in simulations of urban fires as an application of probabilistic "Percolation Theory".

By classifying the Fire Incident Reports in Tokyo by building constructions (wooden construction, slow burning construction, fire-proof construction) and wind conditions (velocity, direction), the probability of fire spread was obtained as a function of distance between buildings.

The simulations applying the probability to the actual residential area in Tokyo can estimate the number of burnt buildings per fire incident there, which is found to largely depend upon the building construction ratio.

1. 延焼と延焼確率

家屋内で火が出て、初期消火の失敗などから火が廻り、遂には隣り近所の家屋へ火が移る現象が延焼である。後者の立場からすれば、これは貫い火であり、類焼ということになる。ボヤ程度では当然延焼はしないが、出火家屋の焼失面積が相当程度例えば 50 m^2 (通常 3DKの広さ) の火災が起きた時、周囲の家屋へ延焼するかどうかは周囲の状況に依る。この延焼可能性を表わすのに、家屋間距離を変数とする延焼確率を用いることが出来る。延焼確率は、一定の家屋間距離にある、一对の家屋に対して定まるもので、一旦火災が発生した時、出火家屋から或る一定の家屋間距離*)にある任意の家屋に延焼する確率である。これを求めるには、条件を満たす家屋中、何軒の家屋に延焼したかを調査すればよい。

延焼の物理的原因として、接炎・炎からの輻射・飛び火があり、夫々家屋間の至近距離・近距離・遠距離で支配的である。延焼し易さに多少でも影響を及ぼす要因としては、家屋間距離の他に

- 家屋の造り (建物構造)
- 家屋の大小, 形状
- 内装材
- 家具
- 塀
- 庭
- 気象

等が挙げられる。これらは更に細かく分けられるから、延焼という現象を完全に記述するには

*) ここで家屋間距離とは二軒の家屋の最短距離をいう。

非常に多数のパラメータが必要であり、このことは一般に火災が一過性の現象で再現性に乏しい事実と無関係ではない。現場の消防署員が実際に家屋の前に立てば、延焼するか否かを判断出来ると言われるが、これは経験から直観的に延焼に関する多数のパラメータを把握する結果であろう。仮に二軒の家屋の組合わせと周囲の状況が完全に判れば、一方の家屋から出火した時、他方の家屋へ延焼するかしないかは決まることであるが、延焼に関するパラメータを全て網羅することは出来ないし、指定できないパラメータもあるから、延焼の可能性の有無を決めることは難しい。従って、延焼という現象は統計的に取扱わねばならない。その為に延焼に関するパラメータの中、指定できる主要なものを変数とする延焼確率を導入するわけであるが、変数として採用しなかったパラメータが変域又は分布を持つ故に、延焼の可能性を確率で示す必要があるとも言える。この確率は変数が等しいような場合に広く適用できるので、各地域の火災危険度の相対的比較等都市の防災計画に役立つことが期待される。

樋口を中心になされた昭和48年度試験研究“災害の伝播に関する統計的研究”[1]の一環として、確率論的パーコレーション理論[2]を用いて、火災の伝播モデルを作ることが試みられ、実際の延焼確率を求めることになった。我々は東京都火災調査書に記載されている建物火災事例を分類整理して、一定気象条件の下で、家屋の造りをパラメータに、家屋間距離の関数として延焼確率を求めることが出来た[3]。

なお、これ以前の延焼確率に関する研究としては、1955年から1968年にかけてアメリカで発表された一連の核攻撃による都市部の被害予測[4]があり、その中に核爆発時にできるフェア・ボールからの輻射によるビルの着火、ビル内の火災拡大、ビル間の延焼の取扱いに確率を用いたものが見い出される。就中、Takata は、大戦中の広島と Darmstadt (西独) の大火の空中写真で焼け止り線(焼失区域と非焼失区域の境界線)を分析して、家屋間距離の関数として上記二市における延焼確率を求めているが、これらのものは、我々のものとは異なり、爆撃によって発生した大規模火災の延焼確率であり、一つの事例として、前記予測の目安に用いられている。

2. 延焼確率の推定方法

1) 気象条件

東京消防庁統計書(昭和47年)[5]によると、東京における建物火災件数・罹災棟数は共に冬期に圧倒的に多い。前者について言えば、12, 1, 2, 3月の4ヶ月で1年の43%を占める。理科年表(昭和49年度版)によって、東京の月平均温度・湿度をみると、これら4ヶ月は、平均温度で4°C、平均湿度で5%の範囲に収まり、気象的に同等と見做せる。扱う火災事例数を多くする為に、この期間の火災事例を昭和46, 47, 48年の3年間に亘り、東京都火災調査書で調べた。

2) データの採用条件

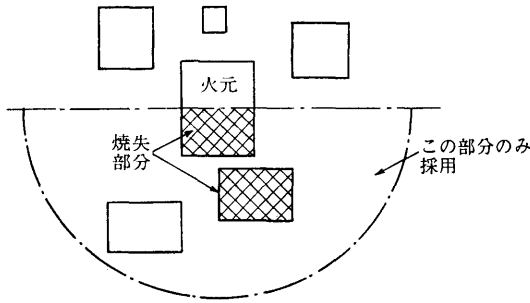
火災調査書に記載されている建物火災の事例中、下記の条件を満たすものをデータとして採用した。

(イ) 出火家屋が全焼で焼失面積が50 m²以上のもの

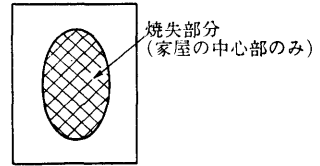
(ロ) 出火家屋が半焼或いは部分焼で焼失面積が50 m²以上のものは、状況に応じて採用した(例1, 例2)。例1の上半分と例2の場合は、周囲の家屋への延焼可能性は0と見做して採用しない。

(ハ) 火災調査書本来の性格から、燃えなかった家屋が省略される傾向があることを考慮して、火元に最近接の家屋群にのみ、データの採用を限った。火元から遠ざかるにつれ、焼失を免かれた家屋が増え、それらが記載されないからである(例3)。

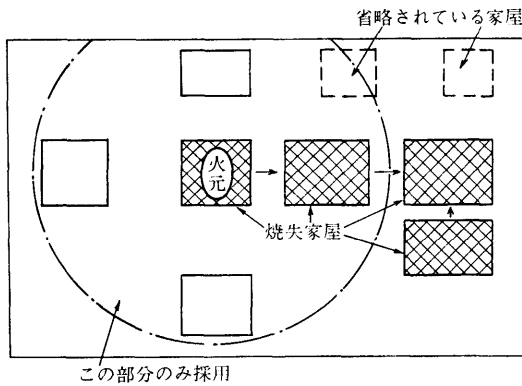
例1. 一部分だけ採用



例2. 不採用



例3. 火元に最近接の家屋群のみ採用



例4. 同種構造の家屋を1棟とする

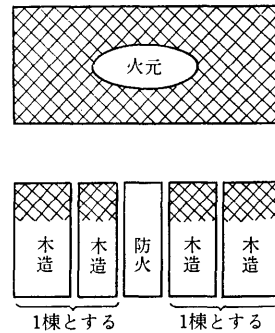


図1. データの採用条件

(ニ) 火元の家屋が、建築面積が大きい為、道路を隔て、数棟の延焼家屋と向かい合っている事例では、後者のうち隣り合っている同種建物構造の家屋を1棟として処理した(例4)。

(ホ) 建物構造は、木造、防水造(モルタル)、耐火造(コンクリート)の3種類とした。耐火造の火災事例は少ない上、延焼した事例は殆んどないので、耐火造についての延焼確率は0とした。

(ヘ) 火災時の風速を、0~2.5m/s、2.6~5.0m/sに分け、前者については延焼に方向性がないものとし、後者については、風上・風側・風下と分けてデータを処理した。風速が5.1m/s以上のものについては、事例数が十分でないので、調査の対象から外した。なお、風速5m/s未満の時の建物火災は全建物火災の約73%[3]である。

3. 調査結果

前述の条件に合う火災事例を火災調査書から拾い出して整理し、求めた延焼確率の推定値の一部を表1と図2に示す。表2に採用した火災事例数を挙げる。

家屋間距離は1m刻みで分け、事例数が少ない場合は2m又は2m以上に上げた。

延焼確率 P を家屋間距離 d の関数として表わすのに、至近距離での延焼の原因は主に接炎と輻射で $d=0$ で $P=1$ であると考えられること、火災による輻射は家屋間距離の二乗の逆数

表1 風速 (0~2.5 m/s) 時の延焼確率

		隣接家屋までの距離 (m)						
		0~1.0	1.1~2.0	2.1~3.0	3.1~4.0	4.1~5.0	5.1~6.0	6.1~8.0
木造 ↓	延焼棟数	95	51	30	26	15	11	8
	不延焼棟数	19	25	24	14	16	13	22
木造	延焼確率	0.83	0.67	0.56	0.65	0.48	0.46	0.27
木造 ↓	延焼棟数	31	21	11	15	6	3	7
	不延焼棟数	10	8	8	9	9	11	15
防火造	延焼確率	0.76	0.72	0.58	0.63	0.40	0.27	0.32
防火造 ↓	延焼棟数	15	8	5	3	1		—
	不延焼棟数	9	11	10	8	11		—
木造	延焼確率	0.63	0.42	0.33	0.27	0.09		—
防火造 ↓	延焼棟数	38	18	10	3	1	0	—
	不延焼棟数	17	22	11	10	14	7	—
防火造	延焼確率	0.69	0.45	0.48	0.23	0.07	0.00	—

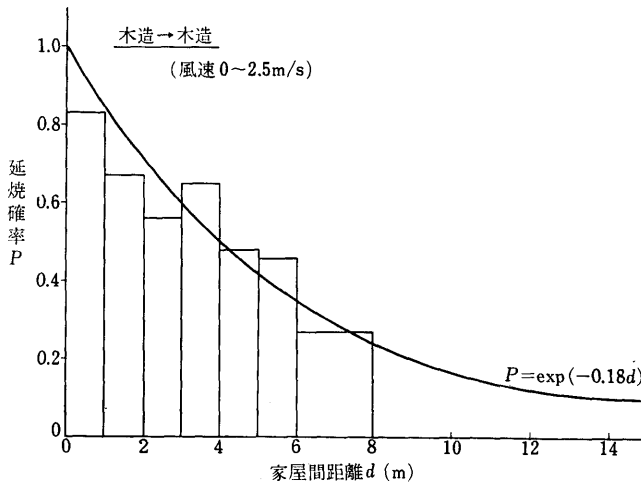


図2. 延焼確率のグラフ例

表2 採用した火災事例数

年 月	46.1	46.2	46.3	46.12	47.1	47.2	47.3	47.12	48.1	48.2	48.3	合計
件 風速 0~2.5m/s	21	19	23	19	11	7	17	17	21	17	16	194
数 風速 2.6~5.0m/s	18	32	17	19	24	11	10	10	18	17	24	215

で減少して、受熱体の温度が発火の閾値以下になれば、輻射による延焼は0になること、もう一つの延焼原因は飛火であるが、これについては相当遠距離まで飛来することを考慮して、確率関数を近似的に最も簡単な指数関数 $\exp(-cd)$ とおき、パラメータ c の値は最小二乗法で求めた。こうして求めた c 値を建物構造別及び風速別に分けて、表3に示した。

表 3 建物構造および風速別の c 値

建物構造	風速	2.6~5.0 m/s			
		0~2.5 m/s	風 下	風 側	風 上
木 造 → 木 造		0.18	0.11	0.14	0.19
木 造 → 防 火 造		0.19	0.11	0.15	0.20
防 火 造 → 木 造		0.50	0.19	0.40	0.62
防 火 造 → 防 火 造		0.46	0.16	0.36	0.58

これによると、木造から木造への延焼と木造から防火造への延焼、防火造から木造への延焼と防火造から防火造への延焼は、延焼確率の点から言えば、夫々同等である。

つまり、防火造は、火元になった場合は木造が火元の場合より隣家へ延焼しにくい、類焼の時は、即ち貫い火の時は木造と余り変わらないと言える。

このように c 値は、二軒の家屋の建物構造の組合わせに依存する意味で、パーコレーション理論でいうボンド*)的色彩の濃いパラメータである。

4. 延焼確率の推定値の特徴

このようにして求めた延焼確率の推定値は、気象条件・建物構造をパラメータに、家屋間距離を変数として表わされ、それ以外の延焼に影響する要因を確率の名の下に包含している。従って、その求め方、基となった火災調査書により次の特徴を備えている。

1) 平均的性格

延焼確率の推定値は、その求め方から、次の諸点で平均的性格を有している。まず、火災発生時の気象状況が冬期間の4ヶ月という以外不定なので、気象条件的に平均されている。次に東京都といった広い地域で発生した火災事例から求めたものであるため、全域で平均され都内の地域特性は現われない。又、採用した火災事例が3年間に亘っているから、時間的に平均されている。更にデータの採用条件(イ)、(ロ)にみられるように出火家屋の焼失面積に下限のみが定められており、出火家屋の火災規模の点で平均される。

2) 火災調査書と消火活動による偏り

火災調査書は、本来燃えたものの記録であるので、火災に関係のない燃えなかった家屋は軽視され記載されない傾向がある。このことは求められた延焼確率の推定値を真の値より大きくする要因となる。出火家屋からの距離が大きくなると出火家屋から等距離にある周辺家屋の数が増えるが、調査書に記載されない燃えなかった家屋数も増えるので、家屋間距離が大きいところで、延焼確率が一層過大評価されるであろう。他方、火災時には、当然消火活動が行なわれ、延焼中の家屋のみならず未延焼の周辺家屋にまで放水が及んで延焼しにくくなるが、このことは延焼確率を過小評価する要因となる。調査書からでは放水効果は分離できない。

3) 火災規模による適用制限

火災調査書に記載されている事例は、延焼棟数が数棟以内のものが大部分である。火災規模が大きくなると、放射・飛火等の重畳作用が効いてきて、延焼確率も大きくなるから、今求めた延焼確率の推定値は大火には適用できない。

4) 延焼速度との非対応

我々の求めた延焼確率は延焼の可能性を決めるもので、延焼に要する時間とか延焼速度との

*) パーコレーション理論で、リニア・グラフの頂点をサイト、辺をボンドと呼び、頂点だけに確率を与えるのがサイト問題、辺だけに確率を与えるのがボンド問題である。

対応はついていない。

5) 気象条件の規定の困難性による偏り

火災調査書に記載されている火災時の気象によって風速を0~2.5m/s, 2.6~5.0m/s, 5.1m/s以上, 延焼方向を風上・風側・風下とデータを分類したが, 調査書に記載されている気象は, 気象庁が最寄りの消防署で観測されたもので, 火災現場の気象と必ずしも一致しないであろう。観測時刻も火災発生時刻と1時間程ずれていることもある。その為, 風上・風側・風下の各データが混じり合っていることになる。風速によって分類したデータについても同様である。その結果, 延焼確率の推定値の, 風速による違い, 延焼方向による差は真のものよりも小さいものになっていると思われる。

5. 都市火災のシミュレーション

家屋間距離の関数として求めた延焼確率を用い, 都市火災のシミュレーションを行なうに当って, 次に必要なのは, 家屋間距離 d の分布 N である。この分布は地域によって異なり, 建べい率の小さい地域では d の平均値は大きく, 家屋が密集している地域では小さい。簡単な

表4 延焼シミュレーションを行なった地域の家屋混在率および火災1件当りの延焼棟数

町名	家屋混在率	火災1件当りの延焼棟数 (100回の平均)		
		建物構造	風速 (0~2.5 m/s)	風速 (2.6~5.0 m/s)
若宮1丁目 (建べい率 55%)	木造 65%	木造	5.8棟	23.0棟
	防火造 33%	防火造	3.1棟	11.4棟
	耐火造 2%	耐火造	0棟	0棟
	合計	8.9棟	34.8棟	
若宮2丁目 (建べい率 52%)	木造 23%	木造	0.3棟	1.0棟
	防火造 75%	防火造	1.6棟	3.4棟
	耐火造 2%	耐火造	0棟	0棟
	合計	1.9棟	4.4棟	
大和田1丁目 (建べい率 56%)	木造 52%	木造	3.2棟	11.1棟
	防火造 47%	防火造	2.9棟	10.1棟
	耐火造 1%	耐火造	0棟	0棟
	合計	6.1棟	21.2棟	

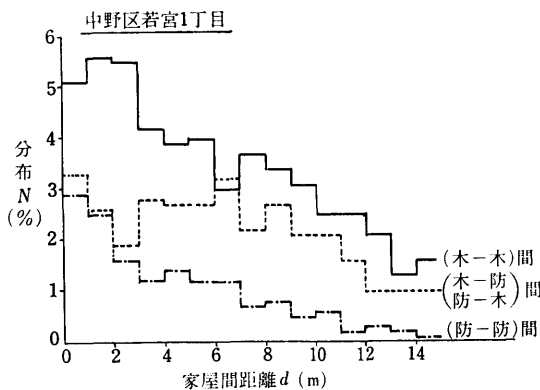


図3. 延焼シミュレーションを行なった地域の家屋間距離の分布

シミュレーションを行なう時には, 家屋間距離の分布 N がピークになる d に対応する延焼確率 P を用いてもよいし, 分布 N で重み平均した P を用いることも出来よう。

5.1 家屋間距離分布

東京都の典型的な住宅地として, 中野区若宮1丁目, 2丁目, 大和田1丁目を選んだ。これらの町は表4に掲げたように, 建べい率[5]は55%前後と大体同じで, 家屋混在率[5]を見てみると耐火造は1~2%で防火

造の比率がおよそ30%、50%、70%となっている。従って、延焼規模へ及ぼす防火造の比率の影響を比較し易い。

家屋間距離は建物構造と同様、東京都地域別建物構造図によった。隣り合った家屋を最短長さの直線で結び、その長さの分布を求める。若宮1丁目の調査結果を図3に掲げた。家屋間距離は1m刻みで集計したが、16m以上のものは切り捨てた。

5.2 延焼シミュレーション (I)

シミュレーションを簡単にする為家屋が正方格子状に並んでいるとし、延焼は最近接家屋間(4方向)でのみ可能とした。シミュレーションに用いた家屋数は441棟(21行×21列)、出火家屋は中心点(11, 11)とした。延焼確率としては、上記3町の家屋間分布を重みとして平均したものをを用いた(表5)。

各建物構造の割合は表4に示した混在率に従い、家屋の配列は演算の度に変えた。演算は次のような順序で行う。

- (イ) 乱数により建物構造別の配列を定める。
- (ロ) 隣り合う家屋の組み合わせから、その間の延焼確率を定める。
- (ハ) 乱数により火元から隣りの家屋へ延焼するかどうかを定める。
- (ニ) 延焼した家屋を第2の火元にして同様の試行を繰り返す。

演算結果の1例として、若宮1丁目、風速2.6~5m/sの場合を図4に掲げる。図中の○で囲んであるものは延焼家屋であり、M、B、Tは夫々木造、防火造、耐火造のことである。数字は延焼の順序を示し、1は火元を、0は延焼しなかったことを意味する。図4で火元の風上には延焼しておらず、風下には▽扇形に延焼し、図の下端にまで達している。家屋数を増せば、更に延焼する可能性がある。

演算結果を表4にまとめて掲げた。木造が65%も占める若宮1丁目では5m/s程度の風でも大火事の起きる可能性がある。防火造の割合が大きいと、風の有無にかかわらず、火災1件当りの延焼棟数が少なくなっているが、風速が2.6~5.0m/sになっても、若宮2丁目では、風速が0~2.5m/sのときの若宮1丁目・大和田1丁目と比べて、延焼棟数が少ないのは、防火造の比率が75%と大きく、防火造が火元になる割合が大きく、延焼確率のより小さい防火造からの延焼が支配的になった為であろう。

表5 家屋間距離の分布で重み平均した延焼確率

町名	建物構造	風速(0~2.5m/s)	風速(2.6~5.0m/s)		
			風下	風側	風上
若宮1丁目	木造 → 木造	0.44	0.61	0.50	0.42
	木造 → 防火造	0.39	0.53	0.45	0.37
	防火造 → 木造	0.17	0.38	0.21	0.12
	防火造 → 防火造	0.30	0.56	0.36	0.26
若宮2丁目	木造 → 木造	0.45	0.62	0.51	0.44
	木造 → 防火造	0.33	0.48	0.39	0.31
	防火造 → 木造	0.11	0.33	0.15	0.09
	防火造 → 防火造	0.19	0.44	0.24	0.15
大和田1丁目	木造 → 木造	0.46	0.62	0.52	0.44
	木造 → 防火造	0.39	0.54	0.46	0.38
	防火造 → 木造	0.16	0.35	0.20	0.13
	防火造 → 防火造	0.26	0.53	0.32	0.21

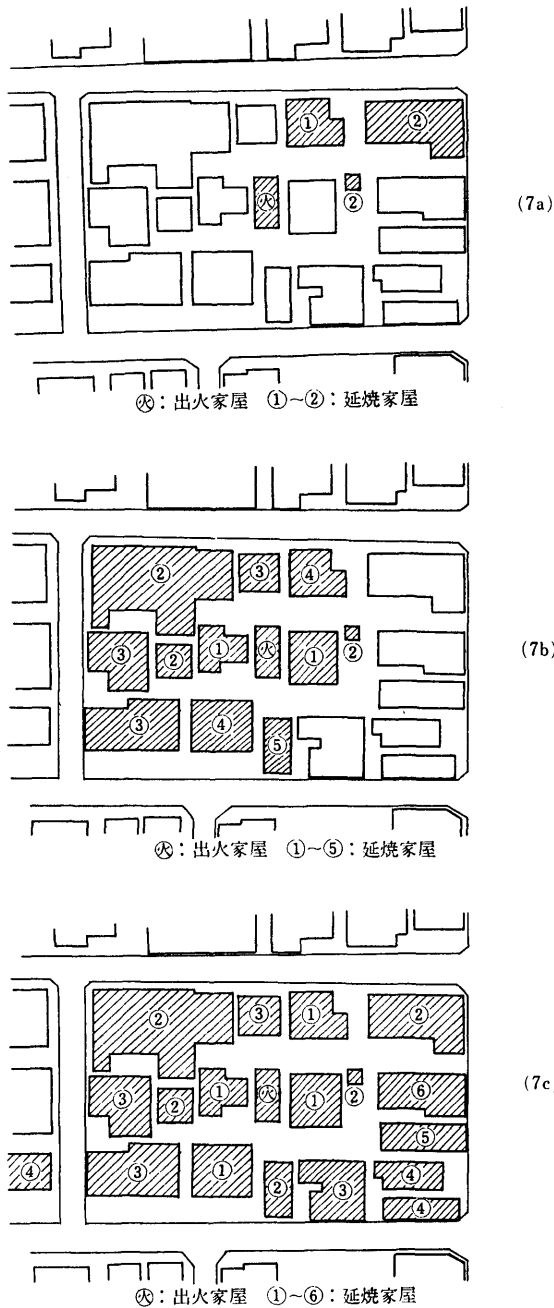


図 7. a~c 延焼シミュレーションの結果

なることが予想される。大規模火災の延焼確率を推定する試みとしては、前述の Takata のもの [4]、関東大震災の焼止り線を調べて求めたもの [8] と、輻射の重畳効果を考慮して小規模火災の延焼確率から計算したもの [9] をあげておく。

延焼確率を用いる火災シミュレーションでは、時々刻々の延焼パターンは判らない。然し、

図 7a~c は演算結果の例である。○で囲んだ数字は延焼の順序を示している。こゝでも、延焼棟数は演算の毎に大きく異なる。10回の繰返し演算の結果では、当ブロック内の家屋 18 棟の中、平均 12.5 棟、69% の家屋に延焼がおよぶ。

次に、出火家屋を図 8 に示すように (A) から (D) と変えた時の延焼棟数と焼失率 (10回の演算の平均値) を表 6 に示す。1 ブロックが全滅に近い被害を受ける場合もあり、3 棟の被害で止まる場合もあり、出火家屋の位置によって延焼規模が大いに異なる。

6. 考察と課題

延焼確率は本質的に平均的なもので、それ故、延焼確率を用いたシミュレーションの結果は、実際の火災事例に合致するものではない。パラメータの数を増やしたり、各パラメータについて細かく分類すれば、各項目のデータ数が少なくなり、結果が無意味になる虞れがある。例えば、気象条件によって火災事例を細かく分類するとして、データの数を増やす為には、火災の発生した場所を広くとるか、或いは長期間に亘る火災事例を調べる必要がある。気象条件・場所・期間は 1 種の不確定性関係にあるわけである。この特徴を考えれば、延焼確率を応用したシミュレーションは、各地域の火災危険度の相対的比較等に利用するのが適当であろう。

こゝで求めた延焼確率の推定値は、小規模火災のものであり、大規模火災の延焼確率はこれより可成り大きく

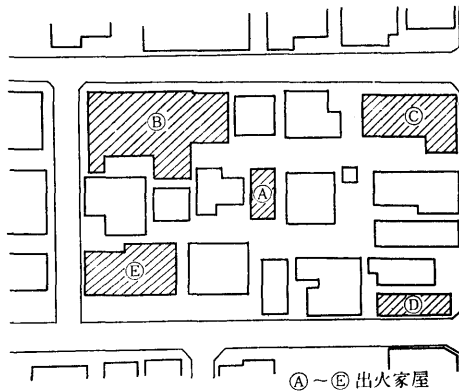


図 8. 出火家屋を①～⑤と 5ヶ所選んだ図

表 6 出火家屋を①～⑤と変えたときの
焼失棟数と焼失率

出火点	延焼棟数	焼失率
A	12.5棟	69%
B	14.9	83
C	3.0	17
D	6.7	37
E	9.5	53
平均	9.3	52

(0 ≤ 風速 ≤ 2.5m/s のとき)

出火家屋の火勢と延焼家屋の着火状態を時間的に把握して、延焼確率の時間的変化が知れれば、延焼速度との対応がつかうであろう。

家屋間距離が大きくなると、延焼確率が小さくなって延焼しにくくなるが、このことが延焼速度に何らかの影響を与えているのではないかという観点から、道路幅と延焼速度の関係を調べ、間接的に延焼確率と延焼速度との関係をみようとする試み[10]もある。

謝 辞

終りに当り、有益な御討論をいただいた研究グループの、樋口伊佐夫、伊藤栄明（統数研）、堀素夫（東工大）、堀内三郎（京大）、秋田一雄（東大）の諸先生に感謝致します。特に、樋口部長には拙稿を読んで、色々御助言を載せました。お礼申し上げます。

参 考 文 献

- [1] 樋口伊佐夫等 (1974) 浸害の伝播に関する統計的研究, 研究集会資料 (昭和 49 年).
- [2] 堀素夫 (1972) 浸透の理論とその応用, 日本統計学会誌第 3 巻第 1 号, 19-28.
- [3] 佐々木弘明・神忠久 (1977) 都市火災の延焼確率, 災害科学研究会編「災害の科学」IX, 220.
- [4] 例えば
Cohn, B.M. et al. (1965) *A System for Local Assessment of the Conflagration Potential of Urban Areas*, Gage Babcock & Associates, Inc.
Crowley, J.W. et al. (1968) *A Computer Model to Assess the Extent of Nuclear Fire Damage in Urbanized Area*, System Sciences, Inc.
Takata, A.N. et al. (1968) *Development and Application of A Complete Fire-Spread Model*, IIT Research Institute.
- [5] 東京消防庁 (1972) 東京消防庁統計書 (昭和 47 年).
- [6] 東京消防庁 (1973) 東京都の市街地状況調査報告書 その 2 (昭和 48 年度).
- [7] 神忠久, 佐々木弘明, 橋房夫 (1974) 都市における延焼確率とその地域適用性について (その 3), 日本火災学会昭和 49 年度研究発表会概要集, 87-89.
- [8] 神忠久 (1976) 大規模火災における延焼確率, 日本建築学会昭和 51 年度大会学術概要集, 1269-1270.
神忠久 (1977) 大規模火災時に道路を飛びこして延焼する確率, 火災第 27 巻第 1 号, 36-41.
- [9] 橋房夫 (1976) 延焼と地域特性—火災が道路を越えてもえ移る確率, 日本火災学会昭和 51 年度秋季研究協議会講演概要集, 66-85.
- [10] 佐々木弘明 (1976) 道路幅と延焼速度 (I) (II), 日本火災学会昭和 51 年度研究発表会概要集, 78-79, 日本建築学会昭和 51 年度大会学術概要集 1271-1272.