

火災延焼消火シミュレーション

渡辺一郎・福井隆文

国立防災科学技術センター

The Simulation of Fire Expanding and Extinguishment

By

I. Watanabe and T. Fukui

National Research Center for Disaster Prevention, Tokyo

Abstract

Our final aim is to estimate the damage done by the earthquake. But it is too difficult because there are many unknown factors: namely, the degree of earthquake, the number of outbreaks of fire, the wind direction and speed, the population density, and the number of places for refuge. So we attempted to study the simulation of the expanding and extinguishing of fires first of all.

Our basic standpoint of this simulation is as follows:

- (1) to make the model as simple as possible,
- (2) to make the model as general as possible.

Therefore, we divided the object areas into square meshes and assumed that the various parameters are similar in each of the meshes.

As the basic equation for the combustion, we adopted next equation:

$$K = \alpha \cdot t \cdot \exp(-t/\beta),$$

where K is supposed to represent the radiant heat of combustion.

By the way, if almost all of the houses at a mesh is made of wood, a fire breaks out easily in this mesh, when the values of K in the neighboring meshes are larger. So it is assumed that a new parameter L (i, j) is small in these meshes, and that if the values of K in the neighboring meshes become as follows:

$$K > L(i, j),$$

a fire breaks out in this mesh (i, j).

As for the reasons of the extinguishment of fires, we consider the factors as follows:

- (1) activities of the fire brigade and pump,
- (2) height difference between the ground surfaces,
- (3) change of wind direction,
- (4) existence of rivers, fireproof buildings and vacant grounds.

We introduced a new parameter D to each of the meshes as extinguishing power for neighboring meshes.

Local winds like ascending currents are considered to be generated by height differences. It is assumed that L is large at meshes in which there are fireproof buildings or rivers.

By considering the wind speed in addition to these basic ideas, we could get some results that fairly fit for empirical facts.

1. はじめに

われわれの最終目的は、地震の際に発生する火災等により、被害がどの程度発生するかというシミュレーションを行なうことである。しかし、そのためには、地震の規模による倒壊の程度、火災発生程度、風向、風速による延焼の程度、人口密度、空地の状況による避難の難易など、多くの未知の要因を盛り込んだ、非常に大規模なシミュレーションを実施しなければならず、容易なことではない。

そこで、これらをいくつかのステップにわけて、段階的にシミュレーションを進めてゆくこととし、

まず、地震とは一応切り離して、一つの火災が発生したとき、それがどのように延焼してゆくかを、さらにどのように焼け止まるか考えた。

この問題は、特に木造建築の場合、先人の非常な努力の結果、多くのデータが集積されているので、この結果に合致するよう努めた。

2. シミュレーションについての基本的な考え
われわれが採用したシミュレーションの基本的な考えは次の通りである。

- (1) できるだけ簡単なモデルにする。パラメータもタもできるだけ少なくして、現実に近いシミュレーションができるように努める。

- (2) できるだけ一般的なモデルとし、いろいろな地域に適用できるものとする。
- (3) モデルを作るに際して、その物理的意味を考慮することはもちろんであるが、あまりに物理的な意味にこだわって、モデルを複雑にしないようにする。

したがって、対象とする地域を正方形のメッシュに分け、そのメッシュ内では、空地率、燃焼速度、延焼しやすさ、高低差などのパラメータは一定であるとした。

メッシュの大きさは、一辺200m角としたが、これもパラメータとして変更できる。

3. 燃焼の大きさと燃焼エネルギー

たとえば、一つの木造家屋において火災が発生し、すべて燃焼し終るまで温度の時間的变化は、図-1のようになると言われている。⁽⁸⁾ 最初なだらかな部分は、5~10分間つづく。

われわれはこの曲線を火災シミュレーションの基本と考え、これを次の式(1)で近似することにした。

$$K = \alpha \cdot t \cdot \exp(-t/\beta) \quad (1)$$

ここで、 α 、 β はパラメータ、 t は時間である。(実は、この式では初期のなだらかな部分をうまくあらわせないが、モデルを簡単にするため無視することにした)

(1)式を図示したものが図-2である。

さて、ここで風速の影響を考慮しなければならない。今、風速が a m/sのときの K の時間的变化が図-2のa曲線であるとするとき、 a m/sより風速の大きい b m/sの場合には、b曲線のようにになると考える。

このようにした根拠は、

- (1) 風速が大となれば、たとえば、最大温度に達する時間は早くなり、最大温度も高くなるであろう。
- (2) K を0から無限大まで積分したものを、“燃焼全エネルギー”のように考えれば、風速が変化しても燃焼全エネルギーは変化しないであろう。

ということである。(実は、(1)と(2)とでは K の物理的意味を少しちがったものと考えているが、この点も深く追求しないことにする。 K をたとえば、燃焼による発散エネルギーのように考えればよいかもしれない。)

風速のちがいによって K を図-2のa、b曲線のように変化させるには、(1)式のかわりに次の(2)式を用いればよい。

$$K = \alpha_0 \cdot f(WS) \cdot (t_0 \cdot f(WS)) \cdot \exp(-t_0 \cdot f(WS)/\beta) \quad (2)$$

ここで α_0 は風速 ws が0のときの α であり、 t_0 は風速 ws が0のときの時間のきざみである。すなわち、風速が大となれば基本の曲線(WS が0のとき)に対して、時間 t を $f(WS)$ 倍だけ早くとったものにし、 $\alpha_0 \cdot f(WS)$ 倍したものを用いればよい。

さて、 $f(WS)$ の形であるが、この決定にあたっては次のことを考慮した。

- (1) $WS=0$ なら、もちろん $f(WS)=1.0$ である。
- (2) WS が非常に大きくなっても、最大温度あるいは、最大発散エネルギーはあまり大きくならないであろう。⁽⁹⁾ 経験的事実もある。
- したがって、 $f(WS)$ は、図-3のようになるとし、式としては(3)を用いることにした。

$$f(WS) = \frac{A_1 + A_2 \cdot WS}{A_1 + WS} \quad (3)$$

A_1 の値を変化させることにより、曲線の形を変えることができる。

$A_1=20.0$ 、 $A_2=3.0$ 、 $\alpha_0=1.0$ 、 $\beta=1.0$ 、風速 WS が0のときの時間のきざみ t_0 を0.1としたとき、 WS 、 t と K の関係を示したものが図-4である。

なお、たとえばガソリン・スタンドがある場所など、燃焼全エネルギーおよび最大値が大きい所では、 α_0 を大きくすればよい。(α_0 を場所により変更してのシミュレーションはまだ行っていない。)

4. 延焼

延焼の原因として、

- (1) 輻射熱
(2) 飛び火

の二つが挙げられているが、⁽⁸⁾飛び火をシミュレートすることはむずかしいので、とりあえず輻射熱だけを考えることにする。

前述の K を発散エネルギーとすれば、それがそのまま輻射熱と等しいとすることはできないが、

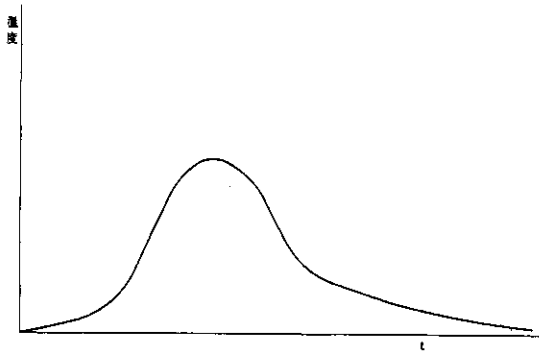


図-1 燃焼温度の変化

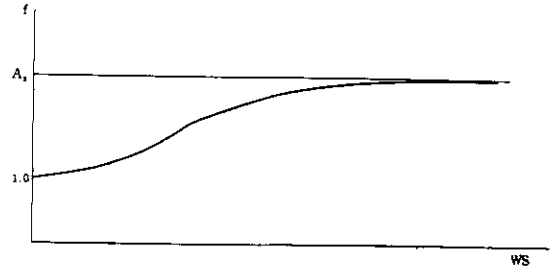


図-3 fの形

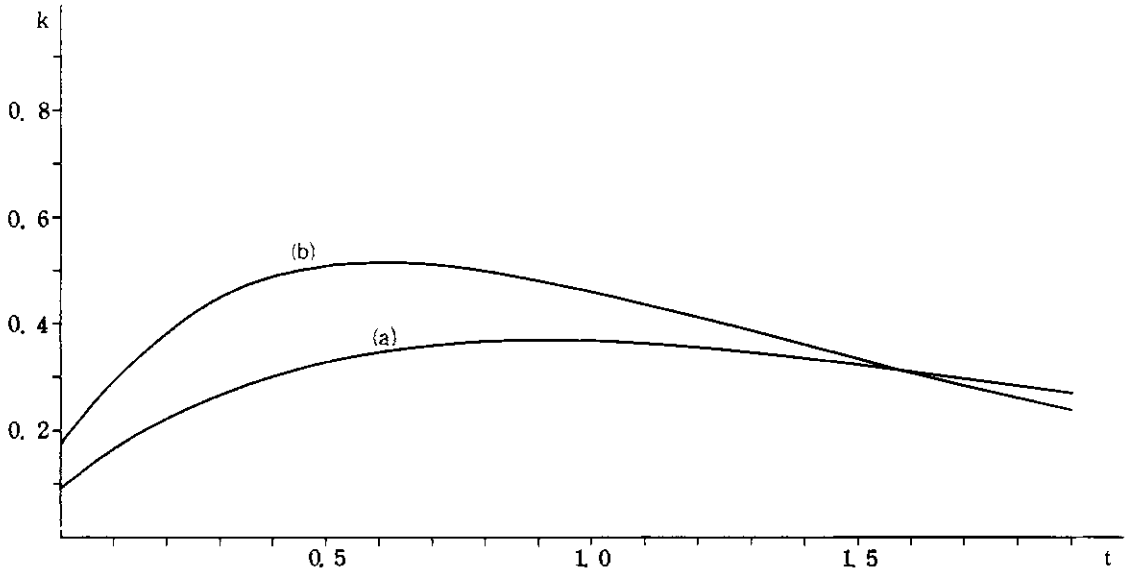


図-2 燃焼の基本形K

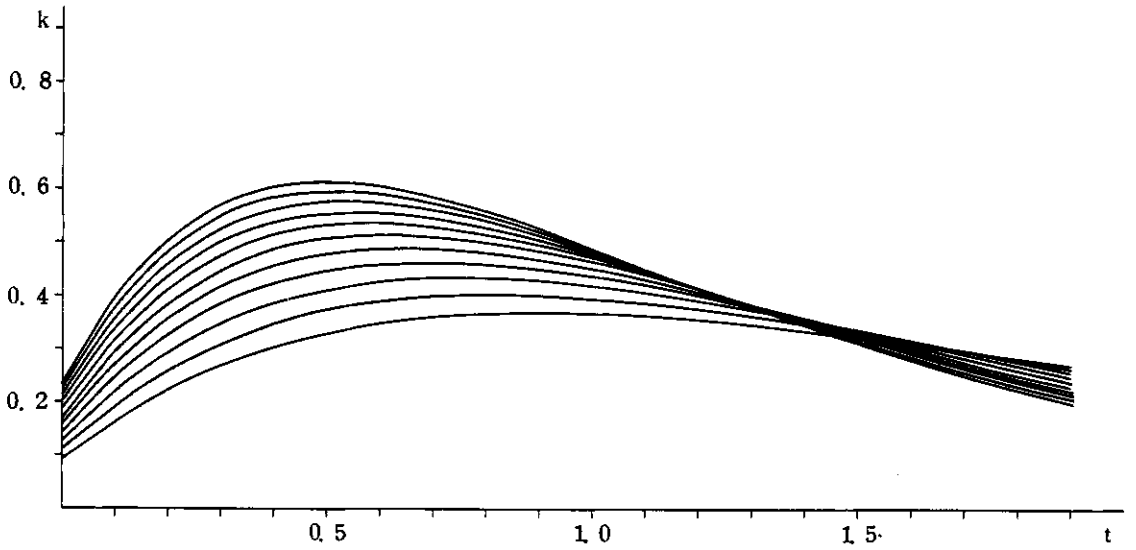


図-4 Kの変化

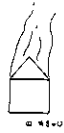


図-5 風速による 焰の変化

K_0	1.0
K_1	1.0
K_2	0.1
K_3	24.0
K_4	3.0
K_5	0.3
K_6	1.4
K_7	1.2
K_8	0.4
K_9	0.3
K_{10}	0.1
K_{11}	0.4

表1



図-6 延焼度の相異



図-7 延焼しやすさの相異

関係はあるとしてよいであろう。そこで、あるメッシュに火災が発生し、 K がある程度大きくなったら、隣接するメッシュに延焼すると考えてよい。しかし、もし木造建築ならば、隣接するメッシュの K が小さくても延焼するし、鉄筋などであれば、 K が大きくならなければ延焼しないであろう。そこで、メッシュに対して、“延焼されやすさ”というパラメータを導入し、 $L(i, j)$ とする。

(i, j はメッシュのマトリックス番号)

かくて、メッシュ(i, j)では、隣接するメッシュのいずれかの K が

$$K > L(i, j) \quad (4)$$

となったなら発火するとするのである。

さて、ここで風向と風速の影響を入れなければならない。風向と風速が変化したときの焰の様子は、図-5のようになると考えられる。そして、図-6のように、(i, j)メッシュが火災のとき、図示の方向から風が吹けば、⊙, ○, □, △,

×という順に延焼しやすいとしてよいであろう。

さらに、図-6を逆にみて、図-7の(i, j)メッシュは、隣接する八つのメッシュに火災が発生しているとき、その場所が⊙であればもっとも延焼しやすく、×のところであればもっとも延焼しにくいことになる。しかも、隣接する八つのメッシュに、二つ以上火災が起きているときには、一個所のときより延焼しやすいであろう。

そこで、(4)式を変更して

$$\sum_{8 \text{ 箇所}} K(WS) \cdot g(WS, x) > L(i, j) \quad (5)$$

となれば、(i, j)メッシュに火災が起るとした。

ここで、 x はメッシュ(i, j)に隣接するメッシュの(i, j)メッシュに対する位置関係を示すパラメータで、たとえば⊙のメッシュなら $x = 3.0$ 、△印のメッシュでは $x = 0.1$ というように定める。なお、8箇所を“加える”という必然性はないのであるが、便宜上、簡単にするためにこのようにした。

$g(WS, x)$ の形を決めるのが次の仕事である。

- (1) $WS = 0$ なら、 g は x にも関係しない定数である。すなわち、風速0なら図-5の(1)のようになるから、周囲の影響は等しい。
- (2) WS が大になっても、また x が大になっても、 g は大きくなる。

ということから、われわれは

$$g = B_1 \cdot x \cdot WS + B_2 \quad (6)$$

とした。 $B_1 = 0.1$ 、 $B_2 = 1.0$ 、としたときの WS, x に対する g の変化を図-8に示す。

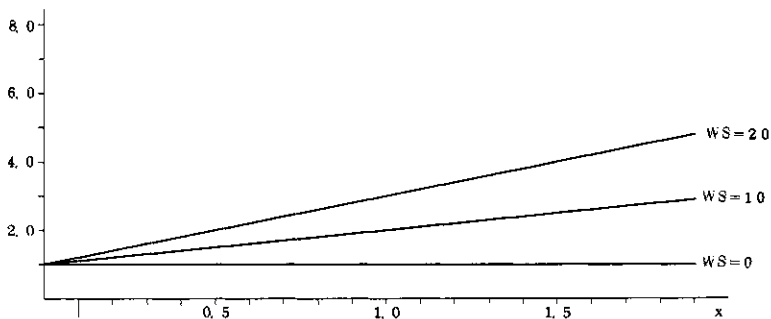


図-8 g の変化

5. L一定，風向一定としたときの延焼

以上のような考え方で，まずLと風向が一定の場合を計算してみた。パラメータの値を表-1に示す。

一個所だけ火災がなんらかの原因で発生したときの延焼の様子を示したものが図-9である。風速WSは5，10，15と変化させ，Lはすべてのメッシュで1.0とした。各メッシュの数字はKの値である。

コンピュータでのデジタル的な計算であり，時間きざみも飛んでいるから少し不明瞭にはなっているが，時間とともに延焼してゆく様子が図-10のような卵形であり，さらに風速が大となるととがった卵形となっており，経験的な事実と一致する。⁽¹⁾

また，風下，風側，風上への延焼速度を計算し図示したものが図-11である。ただし，メッシュの一边を200m， $\Delta t_0=0.1$ に対する実時間を30分とした。

図-11のWSが5，10のときの値は，経験的な値と類似している。⁽¹⁾ただ，WS=10とWS=15の差がほとんどないが，これは，WS=10のとき，単位時間ごとに次のメッシュに延焼しているからである。デジタル・シミュレーションの一つの限界であると考えられよう。

6. 消火

火災が消える原因としては，

- (1) 消防団その他による消火活動
- (2) 風速と風向の変化
- (3) 延焼しにくい地帯の存在(広い道路，樹木，不燃建築など)
- (4) 川や空地の存在
- (5) 高低差

などが挙げられている。^{(3),(4)} 実際には，これらのうちの一つの原因によって消えるのではなく，いくつかの原因が重なって消えるのである。そこで，シミュレーションにおいてもこれらをすべて考慮することとした。

6.1 消火活動

メッシュごとに消火活動能力パラメータD(i, j)を定め，単位時間ごとに，前記のKからDを引くこととした。ただし，次の条件をいれる。

- (i) 火災の発生したメッシュではD=0とする。
- (ii) 風上が発火しているメッシュでもD=0とする。

(iii) 火災の発生したメッシュに隣接する(風下を除いた)3カ所のメッシュの消火活動によりKが減少するものとする。

(iv) あるメッシュに隣接する2カ所以上のメッシュが発火したときには，消火能力は等分に分散される。たとえば図-12のような場合，○印のメッシュの消火能力Dは半分となる。

上記の条件では，消防車などの移動を考慮していないので非現実であるが，モデルを簡単にするためと，地震の際には，消防車などの移動は著しく阻害されるであろうと考えて，このような条件を採用することとした。

図-9と同じパラメータで，風速WSが5と10の場合につき，消火活動能力D(i, j)をすべてのメッシュにおいて0.02としたときの結果を図-13に示す。風下からは消火できないので，消火能力がこの程度ならば，すべてを消火することはできないが，横および風上からの消火活動により，図-9より多少卵形が細く，風上側がつぶれた形になる。Kの値が-1.0という所は完全に消火できた所である。(△印の所は消火できた地点である。)(図-14)

6.2 風向と風速

風速を変えたときのKの値の算出法についてはすでに述べた。風向が変わったときには，すでに延焼しているメッシュにあらためて延焼したり，また火勢が大きくなることはないとした。

図-9と同じパラメータで，消火活動能力はないとし，風向が途中から90°変わった場合の結果を図-15に示す。(風速は5m/sとする。)

この場合には，図-16に示すように，扇状にひろがり，経験的な事実と一致する。⁽²⁾

6.3 延焼しにくい地帯，川や空地

Lの値を操作することによって，このような地帯を表現することとした。

他のパラメータを図-9と同じ値にし，各メッシュのLを図-17のようにしたときの結果を図-18に示す。Lが大きい所では延焼が止まるか，遅くなっている。

6.4 高低差

図-19(1)のように高低差があるとき，図示のような風があると，風速が大となったと同じような効果となって延焼がひどくなる。また，このような高低差があると，上昇気流の一種として局地的に低い方から高い方へ風が吹く。逆に図-19⁽²⁾

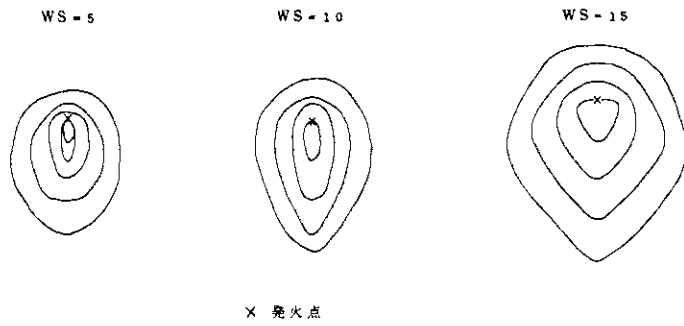


図 - 1 0 延焼の様子

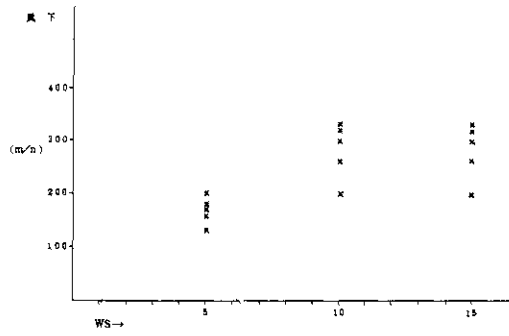


図 - 1 1 延焼速度(1)

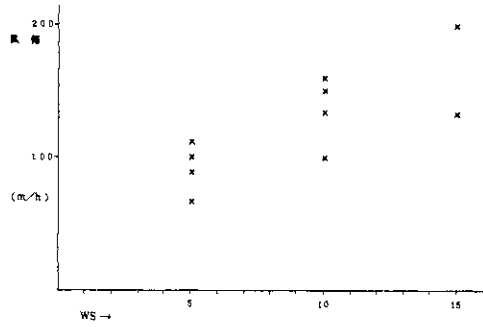


図 - 1 1 延焼速度(2)

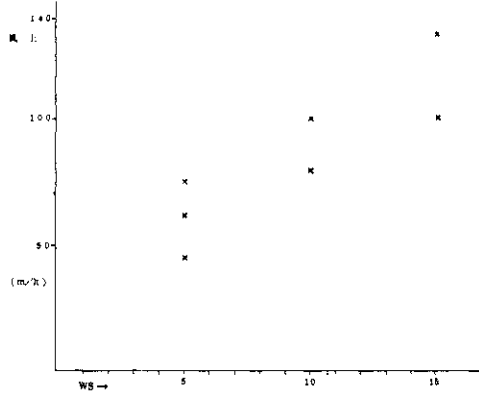
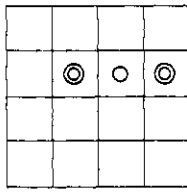


図 - 1 1 延焼速度(3)



◎ 発火点

図-12 消火能力の分散

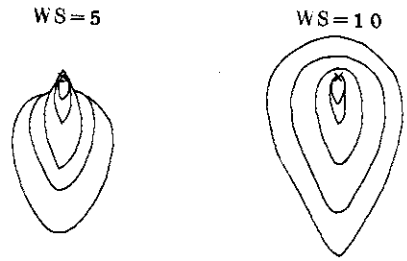


図-14 消火活動による延焼範囲の変化

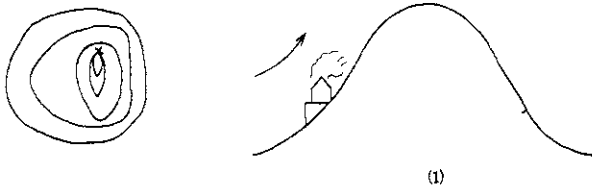


図-16 風向の変化による延焼範囲

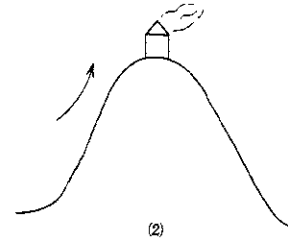


図-19 高低差の影響

のようなときには延焼がおそくなる。したがって、図19(1)、(2)のもっとも高い所で焼け止った例が過去にもたびたびあった。

そこで新しいパラメータとして、 (i, j) メッシュの高さ、 $H(i, j)$ を導入し、延焼の条件(5)式を次のように変更することとした。

$$\sum_{8\text{個所}} \tilde{K}(WS) \cdot g(WS, x) \cdot h(H(i, j)) > L(i, j) \quad (7)$$

ここで、 K は、消去活動を考慮して、 D を引いたあとの K である。

関数 h の形は、隣接するメッシュの高さ $H(i_s, j_s)$ とそのメッシュの $H(i, j)$ との関係が、

- (i) $H(i, j) = H(i_s, j_s)$ なら 1.0
- (ii) $H(i, j) > H(i_s, j_s)$ なら 1.0より大
- (iii) $H(i, j) < H(i_s, j_s)$ なら 1.0より小

と考えればよいので、

$$h = 1.0 + m \cdot (H(i, j) - H(i_s, j_s)) \quad (8)$$

とした。

他のパラメータを図-9と同じとし、消火活動能力 D を0、式(8)の m を1.0、高さを示すパラメータを図-20のようにしたときの延焼の様子を図-21に示す。

7. おわりに

以上のように、火災の延焼と消火について、そ

の様子をシミュレートする手掛りは得られた。しかし、実際の地域において、 α 、 β 、 L 、 D 、 m などをどのように定めたらよいか。さらに、火災発生ときの避難の様子をどのようにシミュレートすればよいかなど、まだまだ多くのことをなさなければならない。

特に注意しなければならないのは、このシミュレーションモデルが妥当であるかどうかは、過去の経験と実際の火災の様子によってのみ検証できるということである。したがって、このシミュレーションを用いて、「火災被害の予測」を安易に行なうことはつしまなければならない。ここでは中間報告として、これまで得られた結果をまとめた。

なお、火災の状況について有益な話をさせていただき、また貴重な文献をわれわれに貸与して下さった、前気象研究所長、二松学舎大学、島山教授、多くの御指導と御助言をいただいた当センター菅原所長に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 島山久尚(1947): 火災と気象-防災科学-
- 2) 島山久尚(1967): 気象条件によって助長される災害-気象災害, 第5章-
- 3) 日本火災学会(1955): 火災便覧
- 4) 損害保険料率算定会: 大火-調査資料, 昭和21年-27年-

MS=5.00 T=1	MS=5.00 T=2	MS=5.00 T=3	MS=5.00 T=4	MS=5.00 T=5	MS=5.00 T=6	MS=5.00 T=7	MS=5.00 T=8	MS=5.00 T=9	MS=5.00 T=10	MS=5.00 T=11	MS=5.00 T=12	MS=5.00 T=13	MS=5.00 T=14	MS=5.00 T=15	MS=5.00 T=16	MS=5.00 T=17	MS=5.00 T=18	MS=5.00 T=19	MS=5.00 T=20	MS=5.00 T=21	MS=5.00 T=22	MS=5.00 T=23	MS=5.00 T=24	MS=5.00 T=25	MS=5.00 T=26	MS=5.00 T=27	MS=5.00 T=28	MS=5.00 T=29	MS=5.00 T=30	MS=5.00 T=31	MS=5.00 T=32	MS=5.00 T=33	MS=5.00 T=34	MS=5.00 T=35	MS=5.00 T=36	MS=5.00 T=37	MS=5.00 T=38	MS=5.00 T=39	MS=5.00 T=40	MS=5.00 T=41	MS=5.00 T=42	MS=5.00 T=43	MS=5.00 T=44	MS=5.00 T=45	MS=5.00 T=46	MS=5.00 T=47	MS=5.00 T=48	MS=5.00 T=49	MS=5.00 T=50	MS=5.00 T=51	MS=5.00 T=52	MS=5.00 T=53	MS=5.00 T=54	MS=5.00 T=55	MS=5.00 T=56	MS=5.00 T=57	MS=5.00 T=58	MS=5.00 T=59	MS=5.00 T=60	MS=5.00 T=61	MS=5.00 T=62	MS=5.00 T=63	MS=5.00 T=64	MS=5.00 T=65	MS=5.00 T=66	MS=5.00 T=67	MS=5.00 T=68	MS=5.00 T=69	MS=5.00 T=70	MS=5.00 T=71	MS=5.00 T=72	MS=5.00 T=73	MS=5.00 T=74	MS=5.00 T=75	MS=5.00 T=76	MS=5.00 T=77	MS=5.00 T=78	MS=5.00 T=79	MS=5.00 T=80	MS=5.00 T=81	MS=5.00 T=82	MS=5.00 T=83	MS=5.00 T=84	MS=5.00 T=85	MS=5.00 T=86	MS=5.00 T=87	MS=5.00 T=88	MS=5.00 T=89	MS=5.00 T=90	MS=5.00 T=91	MS=5.00 T=92	MS=5.00 T=93	MS=5.00 T=94	MS=5.00 T=95	MS=5.00 T=96	MS=5.00 T=97	MS=5.00 T=98	MS=5.00 T=99	MS=5.00 T=100
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------

