

大震時避難計画のための火災延焼シミュレーション・システムに関する研究\*

A study on Fire Spreading Simulation System for Evacuation  
Planning in a Strong Earthquake

木俣 昇\*\*

by Noboru KIMATA

We have developed a fire spreading simulation system based on Hamada and Fujita's models. In this paper, we try to verify the system as a information system for evacuation plannings in a strong earthquake.

First, we estimate factorial effects of main factors which effect the result of simulation by this system, using the  $L_{16}$  table of orthogonal arrays, and show that "wind-velocity" has the biggest effect and "building-to-land-ratio" the secondary.

Next, we simulate the Fukumitsu Big Fire by this system and indicate that the system has a tendency to overestimate the leeward spreading of a fire and underestimate the windward spreading.

## 1. まえがき

大震時の二次災害として、火災の発生とその延焼にともなう危険性が、過去の経験からもまた最近の研究からも指摘されている。各自治体では、これに対処するために、指定避難場所を設定したり、避難訓練を実施している。また、避難場所の安全性評価やその配置計画、避難シミュレーションといった研究もなされてきている（〔9〕、〔10〕、〔11〕）。しかし、避難路そのものの安全性の研究は、あまりなされていない。

都市が過密化してくるのにもなって、火災延焼に対しても安全な広域指定避難場所は、遠隔な場所となってくる。ここへの二次避難ということを考えれば、避難路は当然長くなり、その安全性評価には

組織的な情報が必要となる。それは、行政の責任でなされ、避難訓練にも反映されていかなければならない仕事といえよう。

著者は、このような考え方にもとづいて、避難路の安全性を評価するための情報システムとして、

i) 避難路の物理的特性との関連で、事前にある程度予測できるものと、

ii) 火災発生位置と気象条件との関連で、事後的に判断すべきものとに分けて開発してきた。

i) としては、避難路の特性として、幅員、交通量、地盤タイプ、橋梁の有無、周辺の建物の種類などを選定し、それらの特性値によってベクトル表示されたサンプル避難路の安全性を、V I S M S の支援のもとで一対比較し、まず、安全性順位図を作成し、その結果を3群判別関数モデルによって数値化するというシステムを提案してきた（〔5〕〔6〕）。本論文では、ii) の火災の延焼にともなう安全

\* キーワーズ：シミュレーション，避難計画

\*\* 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部基礎工学教室 (〒920 金沢市小立野 2-40-20)

性の評価のためのシミュレーション・システムについて報告する。

## 2. 延焼シミュレーション・システムの概要

避難計画のための避難路評価システムとしては、耐震・耐火建物や防災緑地・河川・道路・空地等の空間が、どの程度の規模で、どのような位置に配置されていれば、どのような効果があるかが、計画者や行政、さらには住民にも、容易に、しかも操作的に検討することができる操作性が備わっていることが望まれる。火災延焼のシミュレーション・モデルとしては、既に、佐々木・神のモデル [12]、藤田のモデル [1]、岡田らのモデル [11] 等が発表されている。しかし、いづれも上記の観点からすれば不十分といわざるをえないだろう。

著者は、そこで、現象論的には、これらの諸モデルと同様に、浜田の延焼速度式とその諸拡張式に立脚し、かつ、上記機能を備えたものとして、視覚型のマップ・イメージでの入・出力系をもつメッシュ形のシミュレーション・システムの開発を行ってきた。その基本動作に関しては、文献 [5] に報告している。ここでは、まず、このシステムの概要を説明する。

### (1) 延焼速度式と延焼パターン

本システムでは、まず、市街地をメッシュに分割し、図1に示すような3種類の型の延焼を考慮している。その基本となるものが、いわゆる延焼速度式である。図1の(1)からもわかるように、8方向の速度が必要となるが、本システムでは、浜田の延焼速度式を任意方向へ拡張した藤田の式を用い、表1のように定めた。この表の $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ は、

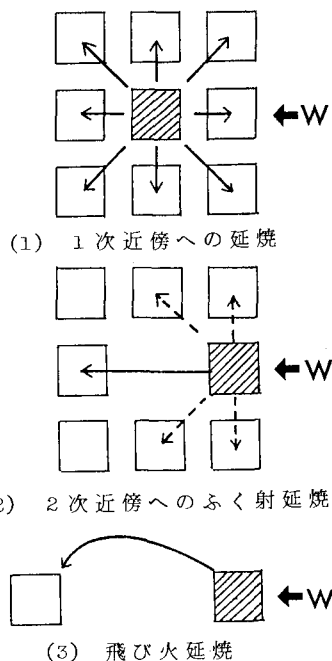


図1 延焼の3つのタイプ

表1 延焼速度式

方 向	延 焼 速 度 式 (m/min)
風 下	$V_1(t) = \frac{1}{P+(1-P)/0.6} V_1(t)$
風 下 45°	$V_1'(t) = \frac{\sqrt{2}}{P+(1-P)/0.6} \sqrt{1/V_1^2(t)+1/V_2^2}$
風 横	$V_2 = \frac{1}{P+(1-P)/0.6} V_2$
風 上	$V_3 = \frac{1}{P+(1-P)/0.6} V_3$
風 上 45°	$V_3' = \frac{\sqrt{2}}{P+(1-P)/0.6} \sqrt{1/V_3^2+1/V_2^2}$

表2 浜田の延焼速度式

方 向	経過時間	延 焼 速 度 式 (m/min)	延焼限界距離 (m)
風 下	0 ~ 10 min	$V_1(t) = \frac{UL(1 + 0.1W + 0.07W^2)}{3 + 3a/8 + 8d/D_1} (=V_1)$	$D_1 = 5+W/2$
	10 ~ 30	$V_1(t) = 1.2 V_1$	$D_1 = 1.5(5+W/2)$
	30 ~ 60	$V_1(t) = 1.4 V_1$	$D_1 = 3.0(5+W/2)$
	60 ~	$V_1(t) = 1.6 V_1$	$D_1 = 5.0(5+W/2)$
風 横	-	$V_2 = \frac{UL(1 + 0.005W^2)}{3 + 3a/8 + 8d/D_2}$	$D_2 = 5+W/4$
風 上	-	$V_3 = \frac{UL(1 + 0.002W^2)}{3 + 3a/8 + 8d/D_3}$	$D_3 = 5+W/5$

表2に与えられている。また、 $p$ は、当該メッシュにおける木造建物の混成比である。

一方、表2の $W$ は、風速 ( $m/s$ ) であり、 $a$ は建物長 ( $m$ )、 $d$ は隣棟間隔 ( $m$ ) である。そして $D$ は、延焼限界距離であり、表2の右欄に示されている。これは、図1の(2)の風下二次近傍へのふく射延焼の判定に用いられる。図1の(3)の飛び火延焼については、まだ確率論的に取り処えるレベルには達していないため、本研究では、後述するように、“出火点の追加”という形で対処することになっている。

最後に、市街地メッシュの属性区分としては、情報システムとしての要件と、データの入手可能性とから、次に示す4種類としている。上述の $p$ は、この中の可燃メッシュに対して定義される。

- “A”：可燃メッシュ
- “B”：耐火造メッシュ
- “ ”：道路・河川・空地メッシュ
- “\*”：避難路メッシュ

(2) シミュレーション事例

本システムの基本フローは、メッシュ・マップの作成部分と延焼シミュレーションの実行部分に分かれる。メッシュ・マップの作成に関しては、カラーの航空写真を用いて、まず、メッシュ属性を決定する。そして、次に、ドット・カウンターを用い、可燃メッシュのみについて、木造混成比および建ぺい率を求め、入力する。先に述べた建物長 ( $a$ )、および隣棟間隔 ( $d$ ) は、建ぺい率とメッシュ長を用いて逆算される。

延焼シミュレーションは、シミュレーションの単位時間をまず設定し、次に、風向、風速を入力し、最後に、出火点メッシュの座表を入力すれば、設定された単位時間毎に延焼計算が実行され、CRT上のメッシュ・マップに延焼部分が表示されてくる。本システムでは、出火点の設定はいくつでも可能である。また、途中で追加することも可能である。飛び火については、まだ十分な資料がないこともあって、本システムではこのルーチンで対処することになっている。風向、風速についても、同様に途中でも変更できる。それは、多くの大火で、風向、風速が途中で変わっているという事実があり、このことをも考慮する必要があると判断したからである。

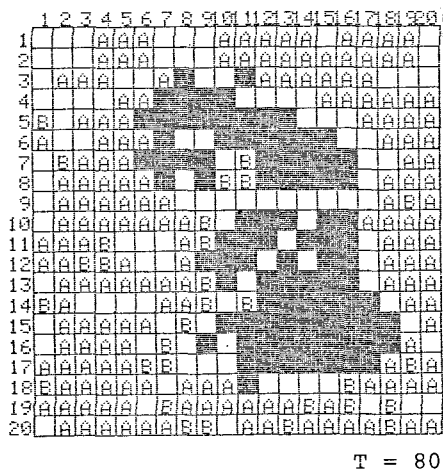
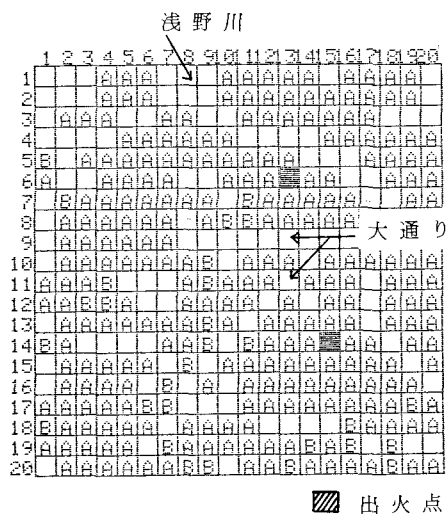


図2 シミュレーション事例

図2は、金沢市彦三地区におけるシミュレーション事例を示したものである。この事例では、メッシュ長を50mとし、単位時間を10分としている。

まず、図2の(1)が、この地区のメッシュ・マップである。出火点は、[6, 13]と[14, 15]の2地点とし、風を13.7(m/s)の東風としてシミュレーションを開始し、80分、および120分の時点での延焼マップを示している。これらの出力図より、この地区の中央を走る二つの大通りは、80分後にはその両側が延焼状態となり、避難路としての使用が危うくなることや、風上側で、しかも浅野川で分離されている地区でも、2時間後には延焼する危険性があることなどは、誰れにでも容易に読み取ることができるだろう。また、中央や左下方の耐火建物群や道路・空地等が、延焼の拡大を阻止する要因として働いている様子も、十分に理解することができるだろう。

以上のように、本システムは、先に述べた避難計画のための情報システムとしての操作性の要件をかなり満すものとなっている。本論文では、もう一つの要件となる情報の信頼性について検討する。

### 3. 実験計画法による要因分析

本システムによるシミュレーション結果は、多くの要因によって支配されている。従って、シミュレーション結果の有用性を評価するためには、これらの要因の設定に関する信頼度と、それらの要因の寄与率とを知ることが必要となる。これらの中で、システム・パラメータ的な単位時間々隔(DT)や、メッシュ長(UL)の拡大にともなう近似誤差の影響については、前述の[5]で分析した。そして、ULが50m程度ならば、適切なDTを用いれば、シミュレーション結果への影響は、ほとんど問題に

ならないことを示している。

本節では、これらの結果を踏まえ、かつ、メッシュ・マップの基本構造は所与としたうえで、本シミュレーション・システムの主要因である木造建物の混成比(p)、建ベイ率(R)、風向(WD)、および風速(WV)について、それらのシミュレーション結果への影響を実験計画法を用いて分析する。

まず、メッシュ・マップの基本構造としては、前節の事例と同様に、金沢市の彦三地区のものをを用いる。メッシュ長(UL)としては、“大火”と呼べる程度の領域のシミュレーションを行なうために、先に述べた有効メッシュ長の最大値に近い50mを用いる。

次に、可燃メッシュ上の木造混成比(p)と、建ベイ率(R)については、それぞれの現状値と、それらの20%減の2水準を用いる。これは、現状値が既に大きな値になっていること、また、これらを防見的見地より下げる傾向にあることに対応している。最後に、風向(WD)、風速(WV)については、p、Rと同様に表3に示す2水準を用いることとする。そして、これらの四つの要因を、図3に示すL<sub>16</sub>(2<sup>15</sup>)の線点図を用いて割り付け、直交表に従ってシミュレーションを行なう。

シミュレーション結果を表現するための特性値としては、いくつかのものが考えられる。例えば、一定時間後の延焼メッシュ数とか、延焼面の長軸と短軸との比とかがそれである。ここでは、前者を用いた分析について報告する。なお、出火点については1個とし、常にメッシュ・マップ中央に設定していることを断わっておく。

表3 因子の水準値

水準 因子	1	2
P	20%減	現状値
R	20%減	現状値
WV	3.5 (m/s)	8.0 (m/s)
WD	西	北

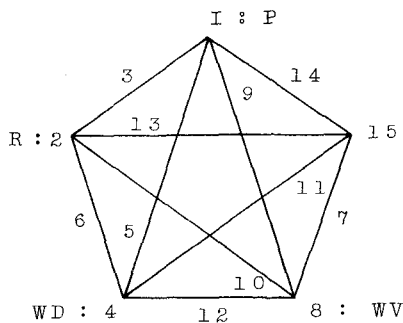


図3 要因の割付け図

まず、表4に、延焼メッシュ数を特性値とした場合の分散分析表を示す。この表より、風速(WV)が、圧倒的な寄与率をもっていることがわかる。そして、建ペイ率(R)が次にきて、木造混成比(p)と風向(WD)が続いていることがわかる。要因間の交互作用については、危険率5%にして、やっと木造混成比と建ペイ率(p×R)が有意となっている。

このことより、延焼面積を問題にするときには、風が最大の要因となり、この関連データの精度が、シミュレーション結果の信頼性を大きく規定するといつてよい。

次に、建ペイ率と木造建物の混成比の寄与率についてであるが、ここでの結果は、本分析では所与としたメッシュ・マップの構造そのものにも関連していると考えるのが妥当であろう。これらのものが、いわゆる延焼阻止要因であることを考えれば、防災計画の作成にとって、これらの要因の寄与率をより正確に検討していく必要があるだろう。

それには、この2次元的な要因を用いるための工夫が必要となる。分散などの指標を用いて1次元化するということも考えられるが、むしろこの要因を水準の変更が困難な1次因子として、分割法を用いるべきであろう。

以上の分析より、本シミュレーション・システムでは、風速に関するデータの設定が、結果に大きな影響を与えることがわかった。この意味では、風速と密接な関係にある飛び火の問題が、重要な課題となる。また、大火の場合には、特殊な風が吹くとされる。これも重要な要素であるが、まだ十分には解明されていない。

避難計画では、危険を最大限に回避する工夫が大切となる。これらの要素については、最も危険な状態をもシミュレートできるということで、一応よしとせざるをえないだろう。

また、木造混成比と建ペイ率のデータについてはこの寄与率からみて、本分析で使用した航空写真とドット・カウンターによる方法で十分である。

#### 4. 福光大火による検証

第2節、第3節では、本シミュレーション・システムの情報機能とそのシステム特性について説明してきた。本節では、本システムが、実際の火災の延焼をどの程度再現することができるか、という問題について検討する。

##### (1) 福光大火の概要

福光町は、富山県の西南部に位置し、町の西南に医王山があり、三月下旬にはフェーン現象にともなう“医王おろし”が吹く。町は、木製バットや家具の製造を主とする木工の町として知られている。

この町は、江戸時代よりしばしば大火に見舞われている。本節では、昭和54年4月に発生した大火を事例として用いる。

この大火は、午後4時前に製材所より出火した火が、平均風速 10.7 mの西風にあおられ、飛び火しながら600 m以上延焼し、116棟が焼失したというものである。消防力は投入されたが、木工の町であり、しかも強風であったため火勢が強く、その上に道路も狭かったため、前半はあまり有効な消火活動ができなかったとされている。図4に最終的なその延焼地図を示しておく[2]。

以上のように、この火災では、大震時火災に近い

表4 分散分析表 ( \*\* 1%有意, \* 5%有意)

因子	S	$\phi$	S / $\phi$	F <sub>0</sub>	判定	$\rho$ %
P	115.6	1	115	27.8	**	5.8
R	175.6	1	175	42.2	**	8.9
WV	1425.1	1	1425	342.4	**	73.7
WD	115.6	1	115	27.8	**	5.8
P × R	52.6	1	52	12.63	*	2.5
e	44.6	10	5	—		
T	1929.1	15				

条件での延焼となっている。また、延焼規模も一応大火の部類に入るし、さらに、必要なメッシュ・データや、風、飛び火データ等が比較的容易に入手できる。このような理由によって、福光大火を本システムの検証のための事例として選定した。

#### (2) 福光大火のシミュレーション事例

まず、単位メッシュ長 (UL) を 40 m とし、福光町の 1/4000 の地図を用いて、20×20 のメッシュ・マップを作成した。メッシュ属性については、地図上のデータだけで決定するのではなく、現地調査の結果も利用した。

木造建物の混成比については、現地での聞き取り調査によって、一律に 100% ( $p=1.0$ ) とした。建ぺい率については、前記地図を用い、ドット・カウンターで算定した。なお、国道 304 号線をはさんだ向い側、メッシュ・マップでいえば、10 行目以下は、全く延焼していない。しかし、本シミュレーションでは、13 行目まではデータ化している。

風速、風向については、飛び火の観測と同時に記録されていて、4 時半頃までは、比較的正確なデータがある。それによれば、風向は西で、風速は最初は 10.7 で、4 時過より 4 時半過までは 11.3 となっている。その後は、少し風速が弱まったということであるが、正確な値はわからなかった。そこで、本シミュレーションでは、以後の風速を 10.0 と仮

定した。

[9, 2] より出火した火災は、17 分後に [7, 6] へ、23 分後に [9, 6] へ、28 分後に [6, 12] と [7, 14] へ、さらに 33 分後には、[5, 9] へと飛び火している。このような飛び火をタイミングよく組み入れるために、シミュレーションの単位時間 (DT) は、1 分に設定することにした。

以上のような諸パラメータ値と、飛び火動態とを用いて、本システムによる福光大火のシミュレーションを実施した。一方、シミュレーション結果の検証を行なうために、4 時半頃とされる延焼記録に基づいて、実火災の延焼メッシュ図を作成した。図 5 の実線による表示部分がそれである。

この時刻を選定したのは、最も寄与率が大きいの風速 (WV) に関するデータが正確であることと、延焼パターンを比較するために必要な量の延焼が生起していることによる。また、この作成作業では、半焼となっているものも含めている。なお、図 5 の [7, 9] は、空地メッシュ (" ") である。

出火時刻は、正確には 3 時 58 分である。従って 4 時半は、シミュレーション時間では  $T=38$  に相当する。そこで、まず、この時刻のシミュレーション結果を、図 5 に破線で記入した。

両者を比較すれば、まず、風下側の最長延焼面メッシュは一致しているが、風上側では食い違いがあ

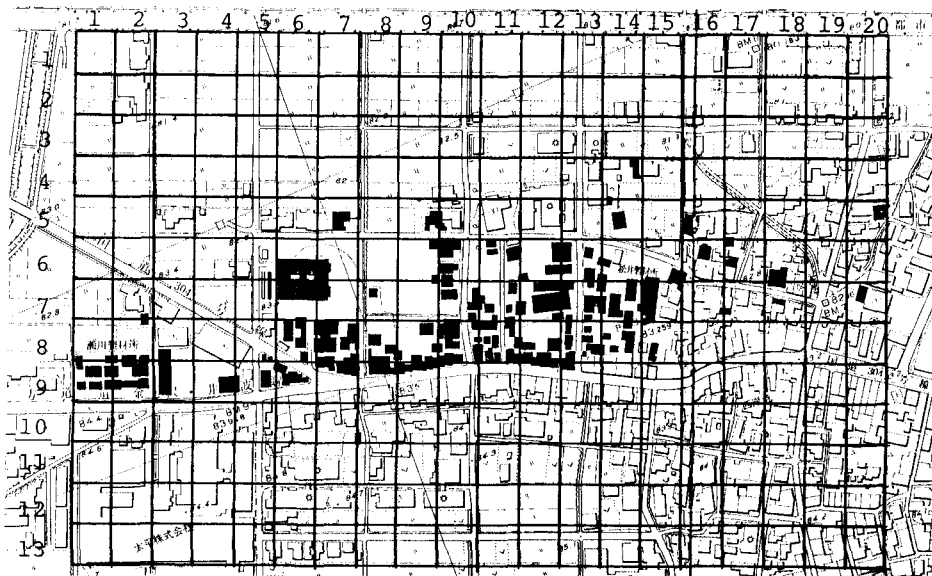


図 4 福光大火の延焼図

ることがわかる。また、延焼メッシュ数について比較すれば、福光大火の方が38であるのに対して、シミュレーションの方では、33と5個少ないことがわかる。

記録の方では、4時半頃という幅のある表現となっていた。そこで、次に、5分後の $T=43$ のシミュレーション結果を取り上げ、図5に一点破線で記入してみた。延焼メッシュ数は、今度は44と大きくなっている。一方、延焼パターンは、この場合の方がより近くなっている。しかし、詳しく比較すれば、風下方向については6ヶ所、風横方向については3ヶ所、シミュレーションの方が多く延焼している。それに対して、風上方向については、逆に、シミュレーションの方が3ヶ所少なくなっている。

以上より、4時半頃の状況は、この中間にあるとみなせば、この場合、本シミュレーション・システムでは、風下、および風横方向への延焼に関しては過大評価に、風上方向については過小評価になる可能性があると推測される。なお、国道304号線をはさんだ向い側については、シミュレーションでは、[10, 1]と[10, 6]とが延焼している。前者は、出火点メッシュの近傍であり、実火災では、初期であり、防火活動が可能であったと考えれば、シミュレーション結果に反して延焼していないことに対して説明がつかだろう。後者については、図4を見ればわかるように、このメッシュの所で国道が曲っ

ている。そのため、このメッシュの建ベイ率が、この行の他のメッシュに比べて大きくなっている。このことが、このような結果をもたらしたといえる。

このように、延焼速度式の性向やメッシュの掛け方にさらに研究すべき課題が残されているが、全体的に見れば、本システムは大震時火災の延焼を検討し、避難路の安全性を評価するための情報システムとして活用するという見地からすれば、実火災との対応性からも一応の水準にあるといえるだろう。

## 5. あとがき

本論文では、大震時避難計画のための情報システムの一つとして、著者が開発してきた火災延焼のシミュレーション・システムについて報告した。まず第2節では、本システムの基本的な構造を概説するとともに、情報システムとしての機能的要件充足性について報告した。そして、本システムが、計画者や行政、さらには住民にとっても、十分に有用なものであることを、シミュレーション事例を用いて説明した。

第3節では、まず、メッシュ長が50 m程度ならば、メッシュ・モデル化にともなう近似誤差はほとんどない、というシステム特性の分析結果を紹介するとともに、他の要因についても、実験計画法を用いて、それらのシミュレーション結果への影響とい

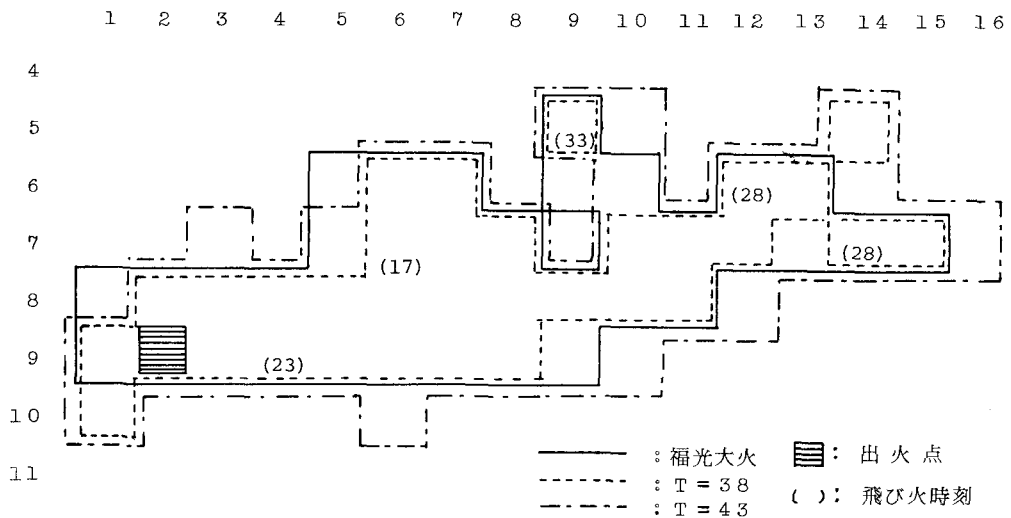


図5 福光大火のシミュレーション結果

う形で分析した。そして、風速が圧倒的な寄与率をもち、次に、建ペイ率が続き、その後、木造建物の混成比と風向が並ぶという結果を示した。

この分析では、メッシュ・マップの基本構造を所与としている。この構造が、上記分析を規定している。この点については、分割法を用いて、さらに研究していく必要があることを述べた。

以上は、本システムのシステム特性についての検討であった。それに対して、第4節では、福光大火という実火災との対応による検証を試みた。そして本システムは、風下、および風横方向では過大評価に、風上方向では過小評価きみになること、メッシュのかぶせ方によって若干の誤差がでることなどを示すとともに、本システムが、実火災との対応性においても、一応の水準にあることを明らかにした。

今後の課題としては、一つは、本システムの拡張化に属する飛び火の組み入れと、風の内成化がある。いま一つは、出火点や飛び火といった確率的要素、メッシュのかぶせ方による誤差等の分析のための繰り返し実験の実行と、延焼阻止要因として重要な建ペイ率と木造混成比の寄与率の推定のための分割実験などがそれである。前者については、未だ十分なデータもなく、早急な解決は望めそうもない。しかし、後者については、実行可能でもあるし、また、実行にも値するといえるだろう。

最後に、本研究は、一部文部省の科学研究費による補助を受けてなされたことを付記しておく。

## 参考文献

- 1) 藤田隆史：大震火災時における住民避難の最適化—火災の延焼シミュレーション—、計測自動制御学会論文集、11—5、pp. 501—507、1975.
- 2) 福光大火編集委員会：福光大火誌、富山県福光町、1980.
- 3) 堀内三郎：建築防災、朝倉書店、1972.
- 4) 小林正美：シミュレーションモデルによる都市の防災化の研究、都市計画、別冊—9、pp. 97—102、1974.
- 5) 木俣 昇：大震時避難路の安全性評価のためのシステムズ・アプローチ、金沢大学工学部紀要、14—2、pp. 11—20、1981.

6) 木俣 昇：VISMSに支援された情報処理システムの“客観性”の水準について、土木計画学研究発表会講演集、4、pp. 252—255、1982.

7) 木俣 昇：大震時火災の延焼シミュレーション・システムの開発について、金沢大学工学部紀要 15—2、pp. 21—32、1982.

8) 水野弘之、堀内三郎：地震時の出火件数の予測に関する研究、建築学会論文報告集、250、pp. 81—90、1976.

9) 日本火災学会編：火災便覧、共立出版、1984

10) 太田 裕、鏡味洋史：地震時避難場所の配置計画の検討、地震、2—32、pp. 25—39、1979.

11) 岡田光正、他：大震火災による人的被害の推定と都市の安全性に関する研究、建築学会論文報告集 257、pp. 141—148、1979、同 308、pp. 110—119、1981.

12) 佐々木弘明、神忠久：都市火災の延焼確率とそのシミュレーション、消防研究所報告、47、pp. 9—27、1973.