

大震時火災の延焼シミュレーションシステムの要因分析による都市の耐火構造の研究

Factorial Analysis of Fire-spreading Simulation System
Under a Strong Quake and Its Application to Fire-
Protection Structural Study of Urban Areas

木俣^{*} 昇 二神^{**} 透

by Noboru KIMATA and Toru FUTAGAMI

We have developed a mesh-type, time-slicing simulation system of fire-spreading under a strong quake. In this paper, we design a series of simulation experiments according to the $L_{27}(3^{13})$ orthogonal array and try to use it as an information system for disaster prevention plannings of urban areas. And first we suggest that it is the most crucial to reduce the percentage of wooden buildings from the results of the analysis of variance. Second, drawing a diagram of factorial effects we show that it is not sufficient to reduce its average percentage but necessary to consider structural factors of the area. Third, introducing a concept of "blocked domain" we indicate that how to array it is a very important problem.

1. まえがき

木造住宅の密集地を抱えるわが国にあっては、地震時の二次災害として最も深刻なものは、火災の発生と延焼による被害である。過去の統計によれば、M8未満では地震火災の発生率は15%弱であるのに対して、M8以上では55%となっている。近年は幸運にも地震火災は発生していない。それにはいろいろな理由が考えられるが、発生した地震規模がM8以下であったことも大きな理由の1つである。即ち、わが国にあっては、依然として地震火災は最も危険な二次災害の候補であり、十分な対策が必要であるといえよう。

対策としては、避難計画の策定と都市の不燃化計画の推進が考えられる。著者らは、このような大震

時には水利網もアプローチ道路網も大きな被害を受けているため、消火活動は大幅に制限されるとして、そのような仮定のもとで大震時の火災延焼のシミュレーションシステムの開発を行ない、このシステムを利用して地震火災対策の研究を行なうことを試みてきた[3]、[4]、[7]。このシステムは、浜田らの延焼速度式に基礎を置く、メッシュ型の一定時間増分法によるものである。その実火災の再現性については福光大火（富山県）と酒田大火（山形県）を対象としてシミュレーションを実施し、いずれもかなりの水準にあることを示した[4]、[7]。また、このシステムの規定要因についても、実験計画法による分析を行い、各パラメータの設定と入力データに関する要求精度として報告している[4]、[7]。

以上のように、本システムは、計画情報システムとしての検証を一応終えている。次の課題は、その

* 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）
** 学生員 工修 金沢大学大学院博士課程

避難計画と都市不燃化計画への活用研究である。著者は、本システムを避難路の安全性評価のためのサブシステムとして、また指定避難場所の火災に対しての安全収容人数の算定のためのサブシステムとして活用することを、既に試みている。〔5〕、〔6〕。これらは、避難計画への活用研究に属する。一方、上述の規定要因の分析とは、実験計画法に基づく一連のシミュレーション実験の結果に基づき、分散分析を実施し、本システムの出力である延焼面積の大小を規定する要因の寄与率を明らかにすることである。その結果は、本システムを情報システムとして使用する場合のデータの要求精度を示すと同時に、どの要因を制御すれば延焼拡大を防ぐことができるかという都市の不燃化計画のための基礎情報ともなる。

例えば、木造建物混成比（ P ）、防火木造率（ β ）、建ペイ率（ R ）、風向（ WD ）、および風速（ WV ）という5要因2水準による分析〔4〕では、計画要因の寄与率は、

$$P = 62, \beta = 12, R = 3\%$$

となっている。これより、木造建物の混成比をまず下げ、次に防火木造の比率を増やすことが都市の不燃化には有効であること、しかし、建ペイ率を下げることはあまり有効でないことなどが示唆される。一方、上記要因にメッシュ・マップ（ M ）という都市構造を示す要因を加えた6要因2水準による分析〔7〕では、

$$P = 48, M = 12, R = 3\%$$

となる。これによれば、木造建物の混成比を下げることも大切だが、それと同程度に都市構造そのものの不燃化を考えていくことが肝要であるといえよう。

このように、火災の延焼シミュレーションシステムの要因分析によって、都市の不燃化計画のための基礎的情報を得ることができるが、文献〔4〕や〔7〕の分析では、各要因が2水準であるため十分な分析ができない。そこで、本論文では、まずこの分析を3水準で実施し、分散分析に加えて要因効果図をも描くことにより、各要因の規定力のより正確な把握を試みる。そして、その結果を用いて、メッシュ・マップで示される都市構造を含む火災延焼の拡大を阻害する諸要因に関する基礎的な研究を試みる。

2. 火災延焼シミュレーションシステムと実験計画

2.1 シミュレーションシステムとその規定要因

本シミュレーションシステムは、1.でも述べたように、メッシュ型の一定時間増分法による視覚型のシステムで、その詳細については既にいくつか発表している〔3〕、〔4〕、〔7〕。ここでは、その基本構造についてのみ簡単に説明しておく。

まず、本システムでは、正方メッシュを採用し、メッシュの基本構造としては、A：可燃メッシュ、B：不燃メッシュ、□：道路・河川・空地メッシュの三種類を想定している。そして、1）一次近傍への延焼、2）風下二次近傍への延焼、および、3）飛火延焼の3つのパターンの延焼拡大と、4）鎮火のメカニズムを組み入れている。次に、1）と2）については、基本的には浜田・堀内・藤田らの延焼速度式を採用している。これは、風速、家屋長、隣棟間隔、延焼限界距離、および延焼速度比をパラメータとする式で、基本形は風下、風横、風上で定義されている。本システムでは、メッシュ化との関連で、藤田の方法に従って8方向に拡張したものを使用している。一方、3）については、新しい火出点の追加という形式で対処するにとどまっている。そして、4）については、家屋長と防火木造率をパラメータとする経験式を採用して、メッシュ毎に計算するようにしている。

次に、本システムではメッシュ化との関連で、上述の家屋長と隣棟間隔については、メッシュ長と建ペイ率を用いて書変えた式を使用している。また上述の延焼速度比（ N ）についても、木造、防火木造、および耐火造建物の混成比をそれぞれ p 、 q 、および r として、

$$N = \frac{p + q}{p + q/0.6} \cdot (1-r) \\ (p+q+r=1)$$

と定義されているが、メッシュ・データをカラーの航空写真で作成する場合の識別精度との関連で、木造建物混成比を P 、防火木造率を β として、

$$P = (p + q), \quad p = (1 - \beta) P, \quad q = \beta P$$

としている。

以上の説明からわかるように、本システムを規定する要因としては、

1) 延焼ならびに鎮火式に関するもの：

P：木造建物混成比

β ：防火木造率

R：建ペイ率

2) 都市構造に関するもの：

M：メッシュ・マップ

3) 気象条件に関するもの：

WD：風向

WV：風速

の6個のものが考えられる。

2. 2 要因水準の設定と実験計画

上の6個の要因の中で、風向のみは2水準とし、それ以外については、各々3水準を想定し、直交表 $L_{27}(3^{13})$ を用いてシミュレーション実験を実施することを計画する。

まず、木造建物混成比 (P) については、最高を現状値とし、以下その10%減、20%減という3水準を想定する。最低値を現状の20%減に抑えたのは、下げすぎるとメッシュ属性が可燃 (A) から不燃 (B) に変化し、メッシュ・マップの構造が変わり、実験の整合性が崩れる可能性があることを考慮したためである。防火木造率 (β) については、新築家屋が多くの場合防火造であることを考慮して20%、40%、60%の3水準とした。建ペイ率 (R) については、逆に、現在の都市の過密化傾向を考慮して、最高を現状値として、その10%減、20%減の3水準とした。

次に、都市構造に関する要因であるメッシュ・マップ (M) については、それが他の要因とは異なり二次元的な広がりをもつものであるため、数値的に表現することは困難で、本研究では、金沢市の彦三地区と寺町地区を対象として作成したメッシュ・マップ、および酒田大火のシミュレーション・マップそのものを3水準として使用する。その水準としては、今までの分析で常に最も大きな寄与率を占めている木造建物混成比 (P) に着目し、平均木造建物混成比の大きさの順に M_1 ：寺町、 M_2 ：彦三、 M_3 ：酒田 と一応定めることにした。

最後に、風向 (WD) については、直交する東と

北の2水準とする。風速 (WV) については、金沢市の月最大風速の平均値に近い 10 m/s を最大とし、それから順次 2 m/s 減の3水準とした。

以上を整理したのが表1である。これらを直交表 $L_{27}(3^{13})$ に割付ける。この場合、要因Mについては、その水準の変更に際しては、2. 1で述べたように、可燃メッシュには木造建物混成比と建ペイ率が定義されているため、結局3つの 20×20 のデータ・マトリックスの読み込みを必要とする。従って、この要因の水準を度々変更することは得策ではない。そこで、この要因を一次因子として、直交表の1列目に割り付ける必要がある。交互作用としては、 $M \times WD$ を一応考えるとして、結局、図1のように各要因を割り付けた。

この要因割付けを用い、直交表 $L_{27}(3^{13})$ に従って各要因の水準を設定し、本シミュレーション・システムによる火災延焼のシミュレーション実験を実施する。特性値としては、本分析では「出火時刻からある定められた時間経過後の焼失メッシュ数」を使用する。この場合、その時刻での延焼が既にメッシュ端に達していれば不正確なデータとなるためこの実験計画で最も延焼すると考えられる要因水準の組合せに対して、予めシミュレーションを実施し、その時間を120分後とすることに決定した。

初期出火点は1箇所とし、メッシュ・マップの中央付近の可燃メッシュをランダムに選定する。この出火点を使用し、直交表 $L_{27}(3^{13})$ に従って各要因の水準を設定して、27回を1組とする120分間のシミュレーションを実施する。本分析では、このような実験を出火点を変えて2回繰り返すことと

表1 要因の水準

要 因		水 準		
		1	2	3
M	メッシュ・マップ	寺 町	彦 三	架 空
WV	風 速	10	8	6
WD	風 向	EE	NN	NN
R	建 ペ イ 率	現状値	-10%	-20%
P	木造建物混成比	現状値	-20%	-40%
β	防 火 木 造 率	20%	40%	60%

した。

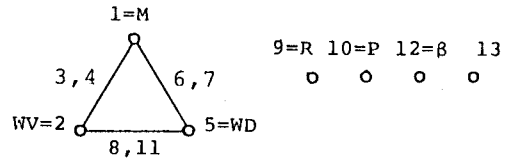
このように本分析では、120分間のシミュレーションを合計54回実施することになる。従って、シミュレーションの実行とデータ採取を出来るだけ自動化することを考えた。まず、初期出火点については、予め2個選定しておき、それらのメッシュ座標を使用する。メッシュ・マップ以外の各要因の水準の変更は、直交表と表1の数値を用いてプログラムの容易に行なえる。そのメッシュ・マップも同一のフロッピーに格納しておけば、直交表のデータに従って自動的に読み込みができる。なお、この読み込みは、前述したようにこの要因を第一因子として直交表の第一列に割付けてあるため、実験No. 1～9, 10～18, 19～27では同一であり、3回だけ行なえばよい。

最後に、データの採取については、焼失メッシュの座標を[*I*, *J*]とすれば、本シミュレーションシステムでは、それに対応するメッシュの状態変数MM[*I*, *J*]が8(延焼可能状態)か9(鎮火状態)となるということを利用すれば、120分後のMM[*I*, *J*]を調べる形で自動化できる[3]。

3. シミュレーションシステムの要因分析

3.1 分散分析表による考察

表2に、上述の方法による27回を1組とする2回の繰返し実験の結果を示す。この実験では、焼失メッシュ数の平均値は、33個、最大値は、実験No. 1の2回目の119個、最小値は、No. 15と17のいずれも2回目の5個である。即ち、特性



ただし

$$\begin{aligned} M \times WD &= 6, 7 \\ e_1 &= 3, 4 \\ e_2 &= 8, 11, 13 \end{aligned}$$

図1 要因割付図

値にはかなり大きな差があり、要因の水準の違いが焼失面積に大きく影響していることが推測される。そこで、まず分散分析を実施し、その影響度の定量化を行なう。

この実験は、図1の要因割付け図からいえば、形式的には分割実験法である。そこで、一次因子については、一次誤差で、二次因子については二次誤差で検定をまず行なった。その結果、要因WDのms(平均二乗和)が極端に小さいため、これを二次誤差にプールすることにした。次に、このプールされた二次誤差で一次誤差の検定を行なった。その結果棄却率1%では有意差が認められなかったため、最終的には一次誤差を二次誤差にプールして、これによる各要因の検定を行なうことにした。表3にその結果を示す。

この表により、以下のような結論を得た：

- 1) 木造建物混成比(P)は、約50%と第一位の寄与率を占め、本システムで最も重要な要因

表2 実験結果

N ₀	(1)	(2)	N ₀	(1)	(2)	N ₀	(1)	(2)
1	106	119	10	10	7	19	34	43
2	54	65	11	35	33	20	32	38
3	16	25	12	35	33	21	81	67
4	25	37	13	27	24	22	16	24
5	16	26	14	16	14	23	64	60
6	66	80	15	9	5	24	36	42
7	10	12	16	11	7	25	66	67
8	62	69	17	9	5	26	27	31
9	36	41	18	18	18	27	10	13

表3 分散分析結果

要因	ss	df	ms	F	判定	寄与率
M	9326.34	2	4663.17	27.85	**	27.6
WV	3133.00	2	1566.50	9.36	**	9.2
M*WV	200.16	2	100.08	0.60		0.6
R	2488.12	2	1244.06	7.43	**	7.4
P	17127.40	2	8563.70	51.15	**	50.7
β	1176.45	2	588.23	3.51		3.5
e2	2103.48	14	150.25			1.0
T		26				100.0

である。

- 2) メッシュ・マップ (M) は、27%強の寄与率を占め、第二位の要因である。
- 3) 風速 (WV) は約9%、建ペイ率 (R) は約7%の寄与率を占め、第三、第四の要因である。
- 4) 本分析では、以上の4要因のみが、共に1%の棄却率で有意となっている。
- 5) 防火木造率 (β) は4%弱の寄与率をもつが、本分析では5%の棄却率でも有意となっていない。
- 6) 風向 (WD) はほとんど有意には影響しない。風向とメッシュ・マップとの相互作用 ($WD \times M$) についても同様である。

3. 2 要因効果図による考察

上述の分析結果を都市不燃化計画に適用すれば、われわれは、木造建物混成比を下げ、防火木造率を上げ、また、メッシュ・マップの構造を改造することは、都市の不燃化に有効な手段であるとする事ができるであろう。しかし、この分散分析表による考察では、これらの改善策がどのような形できいてくるのか、これ以上は明らかにすることは出来ない。そこで、次に、要因の効果図を作成し、これらの点についてさらに考察する。

これは、 x_i を当該の要因の水準 i における特性値の平均値、 S_e を誤差分散、 Φ_e を誤差分散の自由度、 n_e を有効反復回数とすれば、

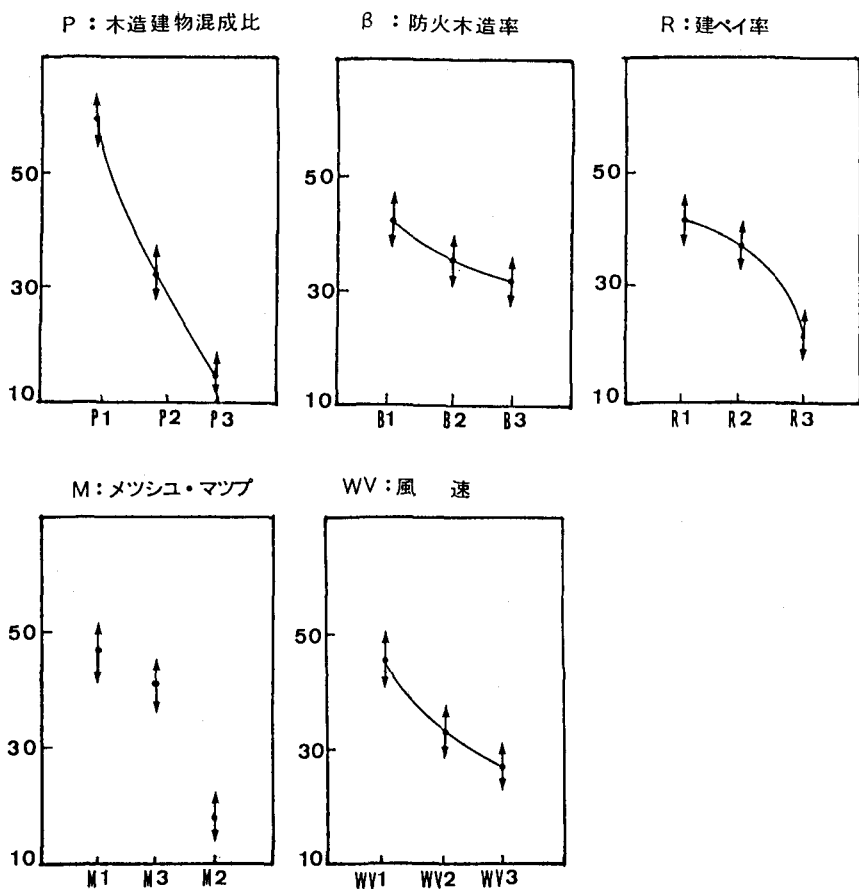


図2 要因効果図

$$\mu_i = x_i \pm \sqrt{F_{\phi_e}^1(\alpha) \cdot S_e / n_e \cdot \phi_e}$$

で推定される値を使用して、各要因の影響度を図示しようというものである。この式に従って各要因について計算した結果を図2に示す。ここでは、メッシュ・マップ(M)以外の要因は理論的には連続値であるので、水準間を補間した形で示している。なお、風向(WD)については、上の分析ではほとんど影響しないという結果になったため省略してある。

まず、木造建物混成比(P)の要因効果図について考察する。これは、かなり急な右下がりのグラフとなっている。即ち、木造建物混成比を下げれば、比例的に燃え難くなり、ある一定値を越えれば全く燃えなくなることを示している。このことは、モデル的には、木造建物混成比が25%をかなり下回れば、そのメッシュの属性は、“不燃”となり、燃えなくなることに対応している。防火木造率(β)については、右下がりの下に凸なグラフとなっている。これは、防火木造率を増やすことは不燃化につながるが、その効果は減滅することを示している。このことは、モデル的には、防火木造率は木造建物に対応する比率として定義しているため、たとへ β が1となっても、メッシュ属性は、“可燃”のままであることに対応している。ちなみに、この両者では水準1と水準3との間の差は、寄与率が50%と大きい前者の方が、寄与率が4%弱と小さい後者より大きくなっている。一方、建ペイ率(R)については、やはり右下がりであるが、上に凸なグラフとなっている。これも、建ペイ率を下げれば、最終的には燃えなくなることを示している。モデル的には、やはりメッシュ属性が“不燃”あるいは“空地”となることに対応している。これらの考察より、曲線で補間することは妥当であるといえよう。

次に、メッシュ・マップ(M)の要因効果図について考察する。まず、これ以外の全ての要因の効果図においては、横軸は表1の水準の順序通りになっている。しかし、この要因効果図では、 M_1 、 M_3 、 M_2 となっており、この順序関係は保持されていない。著者は、2.2で、この要因については、他の要因のように数値で水準化することは困難であるが、今までの研究結果より、常に最も寄与率が大きいと

いう結果が得られている木造建物混成比に着目し、その平均値の大きさの順によって一応水準化するとした。今回の分析でも木造建物混成比については、やはり最も大きな寄与率を占める要因であるという結果になっている。以上を総合すれば、木造建物混成比の大小は、都市の燃え難くさと関係しているが、しかし、その平均値だけではどちらがどうだとは言えず、メッシュ・マップの構造的要因も関係していることが分る。

本研究における大きな関心はこの点にあるが、それについては、次節で考察するとして、最後に、風速(WV)の要因効果図について考察する。このグラフは、防火木造率のグラフと同形である。即ち、風速が小さくなれば延焼面積も小さくなるが、その度合は減滅し、風速が零となっても延焼することを示している。このことは、モデル的には、延焼速度式が風速が零のときにも一定の値を持つことと対応している。これについても曲線による補間は妥当といえよう。

以上のように、各要因を3水準にし、要因効果図を描くことにより、シミュレーション結果とモデルの理論的構造との整合性を確認するとともに、各要因の影響の仕方をより詳しく把握することが出来た。また、メッシュ・マップについては、平均値ではなく構造的な違いに着目する必要があることを示唆することができた。

4. メッシュ・マップの水準化と防火構造の考察

3. では、要因効果図による考察の結果として、メッシュ・マップの燃えやすさの違いは、その平均値的な特性では説明できない可能性があることを指摘した。本節では、まず、このことを表3の寄与率や図2の要因効果図に基づく次のような4つの仮説を用いて、さらに検討してみる。

仮説1：木造建物混成比(P)が大きいメッシュ・マップほど焼失面積が大きい。

仮説2：建ペイ率(R)が高いメッシュ・マップほど焼失面積が大きい。

仮説3：可燃メッシュ(A)が多いメッシュ・マップほど焼失面積が大きい。

仮説4：不燃メッシュ(B)が多いメッシュ・マ

ップほど焼失面積が小さい。

これらの仮説については、いずれも一応首肯されるものであろう。

さて、メッシュ・マップの焼失面積による水準化は、要因効果図によれば、 M_1 、 M_3 、 M_2 の順となる。図3の中央のMの軸は、この M_1 、 M_2 との差によって正規化したメッシュ・マップの水準化を示している。この図の左側の各軸は、3つのメッシュ・マップにおける上述の該当する各仮説の変量の平均値を、同様に正規化して示したものである。この図によれば、P、R、Aによる水準化では、 M_2 と M_3 との順序関係が逆転しており、Bによる水準化では、全く別の順序となり、いずれの仮説も平均値を用いる限りでは、焼失面積によるメッシュ・マップの水準化を説明できないことがわかる。特に、分散分析の結果では50%もの寄与率を占める木造建物混成比についても、このことがいえることは強調してもよいだろう。

そこで、次に、メッシュ・マップの構造的な特性を考慮した考察を試みる。延焼の拡大は、一般に不燃メッシュや道路・河川・空地メッシュによって阻害される。このことに注目して、まず、「一群の可燃メッシュが、不燃メッシュや道路・河川・空地メッシュによって、ほぼ閉鎖されている領域」を“ブロック”と定義し、この構造的な特性による考察を察を試みる。

この定義には、“一群の”とか“ほぼ”といった操作可能なあいまいさが含まれている。ここでは、“一群の”を4個以上として、“ほぼ”とは、開い

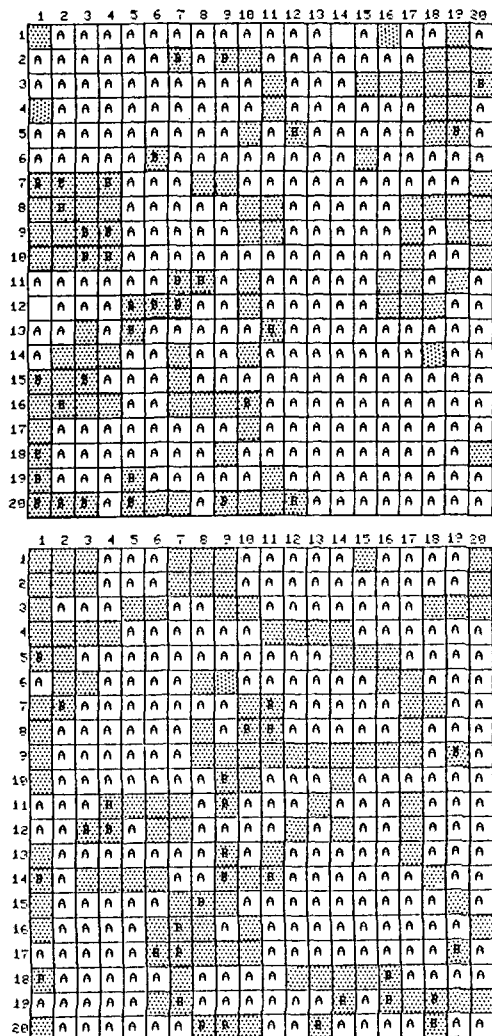


図4 メッシュ・マップのブロック化

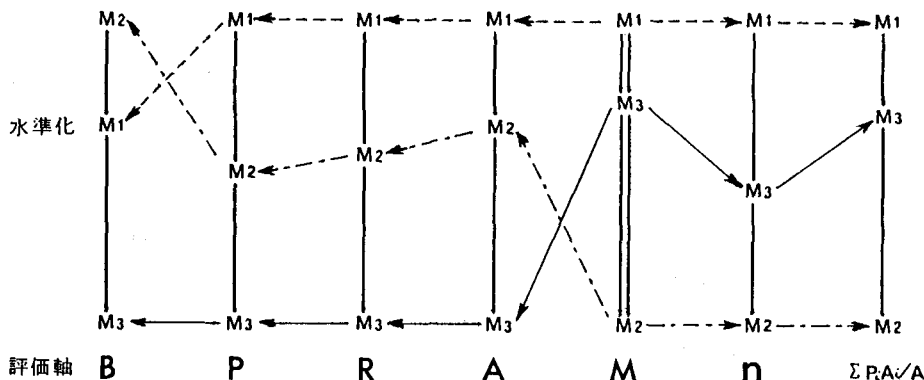


図3 メッシュ・マップの構造分析

ているところが1) 合計で4個以下で、かつ2) 連続していない状態と定義する。そして、各メッシュ・マップに対して、

n : ブロックの数

A : 可燃メッシュの総数

A_i : ブロック i 中の可燃メッシュの数

P_i : 同木造建物混成比の平均値

とおき、考察を進める。

紙面の制約のため、 M_1 と M_2 のメッシュ・マップと、上述の定義を適用したブロック化のみを図4に示す。同様の作業を M_3 に対しても行ない、上記の変数を求め、やはり正規化して示したものが、図3の右側の2つの軸である。第一の軸はブロックの数のみによる水準化であるが、一応焼失面積による水準化の順序関係と同一となるが、相対距離関係からみれば十分とはいえない。第二の軸は、ブロックの大きさ (A_i / A) と木造建物混成比 (P_i) の分布を考慮した1つの水準化である。この方法は、かなり焼失面積による水準化の順序関係と相対距離関係にかなり対応したものが得られた。

以上の分析では十分とは言えないが、しかし、都市不燃化計画に際しては、木造建物混成比や建ペイ率対策に加えて、都市のブロック化とその配置を検討していくことが重要であることを示唆することは出来たと思う。今後の課題は、1つは、メッシュ・マップの水準を増やし、さらに、出火点を全くランダムにし、繰り返し回数を増やすことによって、これらの分析精度を向上させることである。第2には、地区特性との関連で出火危険を検討することである。第3には、メッシュ長の大小によるブロック化の実効果を分析し、ブロックの定義を再検討することである。そして、これらを総合してブロックを具体的に構成するための体系的なシミュレーション実験法を開発することであろう。

5. あとがき

本研究では、大震時の火災延焼のシミュレーションシステムの分割実験法による3水準のシミュレーション実験を実施し、分散分析と要因効果図を作成し、都市不燃化計画のための情報に関する基礎的な検討を試みた。そして、まず、分散分析の結果より、

木造建物混成比を下げることは非常に有効な手段であること、また、建ペイ率を下げることも有効であることを、数値的に示した。さらに、その場合、単に平均的な木造建物混成比や建ペイ率を目標とするのではなく、都市の有効なブロック化との関係が非常に重要になることを、要因効果図を用いることによって明らかにした。本研究は、都市不燃化計画への火災延焼シミュレーションシステムの活用に関する最初の試みであり、不十分なところがいくつかあるが、ブロック化の効果を分析的に明らかにする手掛りは提供することが出来たのではないかと思っている。今後の課題は、このような分析をさらに進め、有効なブロック化の具体的な方法論を構築していくことにあると考えている。なを、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，11-5，501～507，1976。
- 2) 堀内三郎；建築防火，朝倉書店，1976。
- 3) 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，15-2，127～138，1982。
- 4) 木俣 昇；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，土木計画学研究・論文集，2，125～132，1985。
- 5) 木俣 昇；ISM法に支援された大震時避難路の安全性評価システムに関する研究，JORSJ，28-1，31～50，1985。
- 6) 木俣昇，二神透；火災延焼シミュレーションモデルによる避難場所の有効面積算定システムに関する基礎的研究，金沢大学工学部紀要，19-2，55～62，1986。
- 7) 木俣 昇；大震時避難計画のためのメッシュ型火災延焼シミュレーション・システムに関する検証，JORSJ，30-1，59～86，1987。