

広域火災シミュレーション・システムによる地震火災危険の分析

金沢大学工学部 正員 木俣 昇
金沢大学大学院 学生員 ○ 二神 透

1. まえがき

大地震の可能性が指摘されて久しい。最近発行された「防災白書」には、特に都市の地震時危険性が指摘されている。しかし、新聞は、「定量的分析に欠けるため、どのように危険なのかが今一つ伝わってこない」と評している。市民の防災意識調査でも、危険性を認識しているとする人が多い割には、具体的な対策は考えていないと答えている人が多いが、ここにも危険性が具体的には把握されていないことが示唆されている。地震時防災計画を今後もさらに実効あるものとして推進していくためには、その危険性をできるだけ具体的に提示し、人々の認識を新たにする努力が必要であろう。木造家屋に住むことを好むわが国では、地震時に最も心配となるのは、依然として地震火災の発生とその延焼危険であろう。本論文では、この問題を取り上げ、著者らが開発してきた視覚的なメッシュ型火災延焼シミュレーション・システムの広域化と、その地震火災危険分析への適用システムについて報告する。

著者らのシミュレーション・システムでは、視覚的な情報提示性を特徴としている。それは、住民に火災の延焼の形態を視覚的に提示することによって、例えば避難路に想定されている道路も、火災の発生パターンによっては十数分後には危険になることを具体的に理解してもらうのに役立つ。しかし、その特徴を保持するためには、現在のシステムでは1画面に20×20程度のメッシュ・マップ表示が限度となっている。また、使用している延焼速度式の特性との関連で、1メッシュのサイズは50m×50mが上限となる。そのために、シミュレーション領域は、

1km×1kmに制約されている。

そこで、このシステムを広域化し、同時多発の地震火災の危険性分析に必要な4km×4km程度の範囲のシミュレーションが可能となるようにする必要がある。われわれは、視覚性を保持したまま広域化する手段として、本システムを「全体図」とその任意の「拡大部分図」を、選択的に表示できる方式に改良した。この広域シミュレーション・システムについて、まず報告する。

このシステムを地震火災危険のより具体的な分析に活用するためには、さらに次の二つの課題を解決しなければならない。即ち、広範な対象地域の膨大なメッシュ・データの採取の入力化と、地盤特性などを考慮した出火確率の具体化のシステムの確立である。そこで、次に、航空写真を用いたメッシュ・データ作成システムと、既存研究に基づく出火確率の算定システムについて、その基本システムを提示する。最後に、これらのシステムを統合し、金沢市の地震火災危険の分析とその危険回避対策の検討に適用することを試み、今後の課題を明らかにする。

2. 火災延焼シミュレーションシステムの広域化

2.1 メッシュ型火災延焼シミュレーションシステムの概要

火災については、建物内での拡大と建物間での延焼が区別され、研究されてきている。浜田、堀内らは、後者についての延焼速度の経験式の研究を行っている。⁵⁾ 著者らは、この延焼速度式に基礎を置くメッシュ型のシミュレーション・システムの開発を試みてきた。^{1) 2) 4)} 本節では、このシステムの基本構造とその特徴についてまず概説する。

われわれが対象とするのは、かなりの広がりを持つ地域での火災の延焼である。そこで、都市をメッシュ・モデル化して、建物が集まったメッシュ間の延焼を考えている。まず、各メッシュは、表1に示すように、その構成によって、木造が主な”可燃メッシュ”、耐火造が主な”不燃メッシュ”、道路・河川・空地などの”空地メッシュ”の3種類に区別している。そして、それらの中で図1に示すように、炎上メッシュの一次近傍および風下二次近傍メッシュへの輻射延焼と、風下メッシュへの飛び火延焼を考えている。

前二者については、上述した浜田、堀内らの延焼速度式が適用できる。ただし、われわれのシステムでは、メッシュ・モデル化との関連で、パラメータである建物長と隣棟間隔は、メッシュ長とメッシュ建ぺい率を用いて書き直したものを使用している。本シミュレーション・システムのパラメータを明示するために、風下方向の式を以下に示す。

$$V_1 = N \cdot \frac{(1 + 0.1W + 0.007W^2)}{(C_1 + C_2a + C_3d/D_1)} \quad (1)$$

$$N = \frac{(p + q)(1 - r)}{p + q/0.6} \quad (2)$$

$$a = UL \sqrt{S_i} \quad (3)$$

$$d = UL(1 - (\sqrt{S_i} + \sqrt{S_j})/2) \quad (4)$$

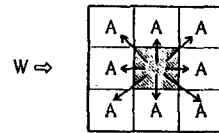
ここで、まず、Wは風速 (m/s)、aは建物長 (m)、dは隣棟間隔 (m)、D₁は延焼限界距離 (m)、c₁は係数である。そして、Nは、延焼速度式を混成市街地に適用するための補正係数で、p、q、rは、それぞれ当該メッシュの木造、防火木造、耐火造建物の混成比 (p + q + r = 1) である。次に、S_iはメッシュ i の建ぺい率、ULはメッシュ・マップの単位メッシュ長 (m) であり、a、dは、モデルでは、式 (3)、(4) で書き直されたものが使用されている。

一方、飛び火については、十分なデータがなく、本システムでは新たな出火点の指定という形で対処することになっている。また、消火活動については、地震時には、消防車のアプローチ道路にも、水利のための水道管網にも多大の被害が予想されることもあり、考慮しないとしている。

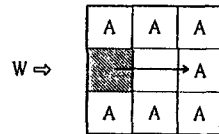
シミュレーションの進行には、メッシュの状態変数を図2のように定義し、一定時間増分法を採用している。”未燃状態”から”炎上状態”への直接の推移は、出火点の設定時のみに起こる。”炎上状態”と”延焼可能状態”との区別は、一定時間増分

表1 メッシュの属性区分

メッシュ属性 \ 表記	M [I, J]
可燃メッシュ	A
不燃メッシュ	B
空地メッシュ	—



(1) 1次近傍への延焼



(2) 2次近傍への延焼



(3) 飛び火による延焼

図1 延焼の3つのパターン

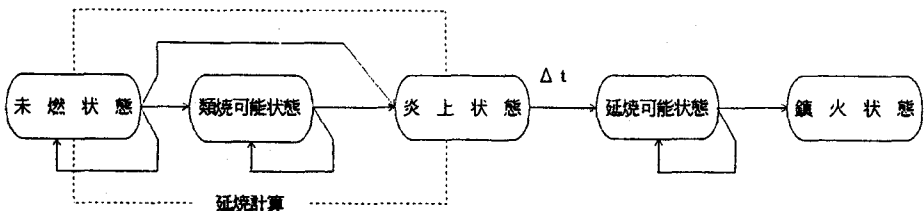


図2 可燃メッシュの状態推移図

法との関連のもので、“炎上状態”から“延焼可能状態”への書き換えは、時計が単位時間(Δt)進められた後に行われる。“類焼可能状態”とは、“延焼可能状態”にあるメッシュの一次ないしは風下側二次近傍に入った状態をいう。このメッシュに対して、延焼速度式を適用して延焼計算を実施する。時計がそのメッシュの炎上時間となれば、状態推移が起こる。そして、当該メッシュはCRT上に“赤”で表示される。“鎮火状態”への推移は、メッシュ内の建物構成と建ペイ率を考慮した鎮火式を用いて決定し、CRT上では“青”で表示するようにしてある。プログラムは、BASICで作成されている。

本システムの検証は、1976年10月の酒田市の大火と、1979年4月の富山県福光町の大火を事例とするシミュレーションによって検討を行っている。これらの事例では、10(m/s)以上の強風下での大火であったこと、木造市街地が多かったこともあり、かなりの時間、本システムの仮定と同様に、有効な消火活動はなされていない。われわれは、メッシュ長を40mとする20×20のシミュレーションを実施し、いずれの火災においても、風横側での延焼には少し問題があるが、かなりの再現性があることを確認している。²⁾⁴⁾また、上述した延焼速度式のメッシュ・

モデル化にともなう書き換えとの関連で、メッシュ長は、50m以内であることが望ましいことも分析している。¹⁾

2.2 シミュレーション・システムの広域化

上で述べたように、われわれのシステムは、地震時火災の延焼を視覚的にシミュレーションするための基本システムとしての資格を一応持っている。それは、また、地震火災に特有な同時多発性も取り扱えるシステムとなっている。しかし、同時多発型の地震火災の真の危険性を示すに必要な広さのシミュレーションが行えるシステムとはなっていない。

それは、現在のシステムが一画面でのシミュレーション・システムであり、表1に示したようなメッシュ属性記号を直接メッシュ内に表示する方式では、20×20程度のメッシュ・マップ程度が限度となっている。然るに、上述したように、メッシュ長は、50m以内という制約があるため、シミュレーション領域は1km×1kmということになる。そこで、われわれは、当面4km×4km、即ち、80×80のメッシュ・マップまでシミュレーション可能となるようにシステムの拡張化を行った。

この場合、やはり視覚性を保持することが、われ

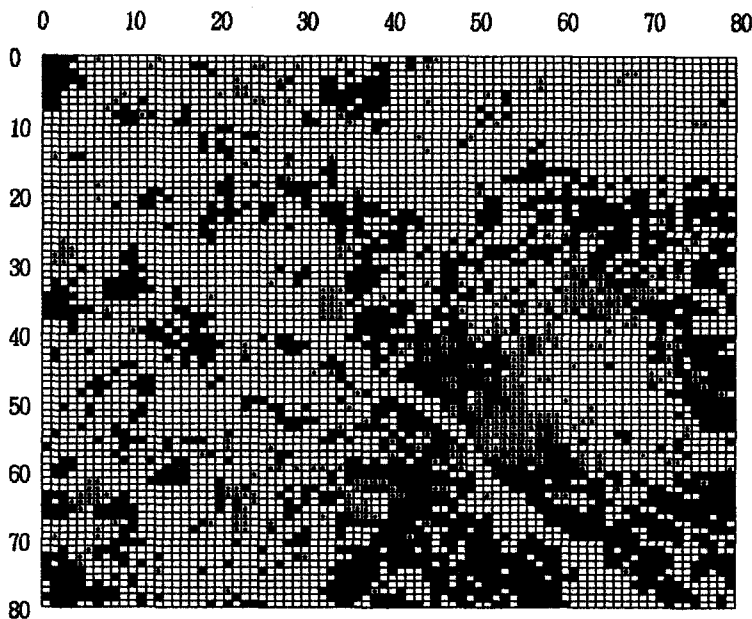


図3 80×80の全体画面

われの目的からいって肝心となる。しかし、80×80のメッシュ・マップでは、現システムのように、メッシュ属性を”記号(キャラクター)”で表示することができない。そこで、まず、全域に対応する80×80のミュレーション画面と、その任意の地区の20×20の拡大画面を選択的に表示できる方式に変更した。そして、「全体図」では、メッシュ属性区分を、図3に示すように”色”で表示することにした。即ち、図中で濃く塗られているメッシュが”可燃メッシュ”で、CRT上では実際には”緑”で表示している。一方ドットで表示されているメッシュは”不燃メッシュ”で、CRT上では”濃紺”で表示している。一方、20×20の画面では、現行のシステムと同様に”記号”を使用し、さらに特定のメッシュの構成内容を表示し、直接改定できるように改良した。それは、適用事例で述べるように、この画面を防災計画策定に利用したいためである。

シミュレーションは、2.1で説明したように時計を一定時間進めて、延焼計算を実施し、メッシュ状態変数を書き換え、CRT上のメッシュ・マップにその状態に応じた”色”を表示することによって進行する。この延焼計算は、前述したように、”類焼可能状態”にあるメッシュ、即ち、”延焼可能状態”にあるメッシュの一次ないしは二次近傍に入ったメッシュを対象にして行われる。シミュレーションの後半になると、延焼が進行し、この”延焼可能状態”にあるメッシュ数はかなり多くなる。システムの拡張化によってメッシュ数は、従来の16倍となっている。そのために、これを状態変数を手掛かりに探索する方式では、シミュレーション時間を大きくロスすることになる。そこで、”延焼可能状態”となったメッシュの座標のリストを用意し、それを逐次更新する方式に変更した。プログラムは、BASICであるが、この変更とコンパイラを使用することによって、80×80のメッシュ・マップで、出火点を5個所とした2時間のシミュレーションでも、約2分程度で実行できることを確認している。

最後に、本シミュレーション・システムによる出力事例を図4に示す。これは、シミュレーション開始1時間後の、オーバーラップする2つの区画の、それぞれの20×20の部分画面の出力を重ね合わせたも

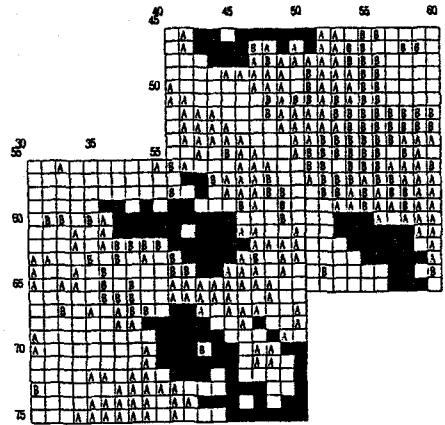


図4 20×20の部分画面の重ね合わせ図

のである。ここで、”A”は可燃メッシュ、”B”は不燃メッシュである。そして、塗りつぶされているのが延焼部分である。

この図から、部分出力間には整合性があり、拡張化がうまくいっていることが分かる。また、このサイズであれば、実地形との対応性もより具体的であり、住民が地震火災の危険性を把握するのに、計画者がその対策案を探索するのに有効な情報となることも理解されよう。

3. 地震火災危険のシミュレーション・システム

3.1 シミュレーション・システムの基本構成

2. では、地震火災の延焼状況を視覚的にシミュレーションする広域シミュレーション・システムについて説明した。このシステムを適用して、地震火災危険とその対策を具体的に分析するためには、さらにこのシステムを核とし、その入力系を含むトータル・システム化が必要となる。

広域シミュレーション・システムの説明より分かるように、このシステムの基本入力系としては、対象地域に対する

- 1) メッシュ・マップデータ作成システム
- 2) 出火確率に基づく出火点設定システム
- 3) 風向・風速設定システム

が必要となる。そして、その出力は、本論文では、

- 4) 地震火災危険評価システム

5) ブロック化案作成システム

の入力になる。そこで、トータルシステムとして、図5のような基本構成を考えた。

この入力系の中で、3)については、対象地域の気象データの入手に応じて、分単位ないしは時間単位で具体的に設定すればよい。しかし、1)と2)についてはさらにシステム化する必要がある。以下の節においては、これらについて論じる。

3.2 メッシュ・マップデータ作成システム

対象地域のデータは、航空写真からの採取が基礎となる。本システムでは、2.1で概説したように、木造建物、防火木造建物、耐火造建物の建ペイ率データが必要となる。そして、これらのデータを総合し、3種類のメッシュ属性を識別して、ファイルに登録し、表示しなければならない。広域シミュレーション・システムでは、80×80、即ち6400ものメッシュについて、これらのデータを採取し、処理しなければならない。そのためには、精度を低下させずかつ効率的な作業システムが要求される。われわれは、図6に示すようなシステムを採用する。

カラーの航空写真では、木造建物と耐火造建物との識別は十分可能である。しかし、木造と防火木造との区別はかなり困難である。著者らは、本シミュレーション・システムの規定要因の寄与率の分析を実験計画法を用いて実施し、防火木造の混成比(q)の寄与率は低く、木造建物と耐火造建物の混成比、および防火木造率(P , r , β)を基本データとして、 $p = (1 - \beta)P$, $q = \beta P$, $P + r = 1$ としても大きな誤差とはならないことを確認している。⁴⁾そこで、まず、航空写真では、木造建物と耐火造建物の建ペイ率を採取し、防火木造率は顕著な差のある地域単位でサンプル調査を行い、採取することにした。次に、航空写真から木造建物と耐火造建物の建ペイ率の採取には、航空写真に単位メッシュ長のメッシュを掛けて、視認しながらドット・カウンターにより算定するという方法を探る。

最後に、メッシュ属性の決定法について説明する。ここでは、小林の方法をシステム化したものを使用する。即ち、航空写真による採取された建ペイ率のデータを入力すれば、表2のような判別ルールによ

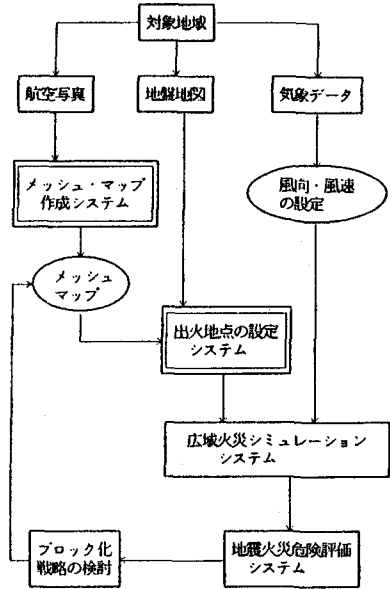


図5 地震火災危険のシミュレーション・システム

表2 メッシュ属性の判別表

	$R > P$	$P \geq R$
$R < 25\%$	—	—
$P < 25\%$	—	—
$R \geq 25\%$	B	A
$P \geq 25\%$	B	A

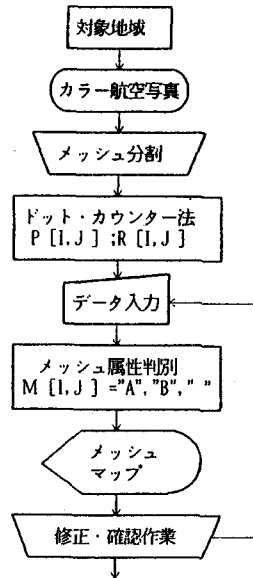


図6 メッシュ・マップデータ作成システム

って、各メッシュの属性を識別し、CRT上のメッシュ・マップに、“A”、“B”、“ ” という形で表示できるようにしている。

3.3 出火確率と出火点の設定システム

地震時の出火確率の研究は、いろいろな人によってなされてきている。それらには、地震時の建物倒壊確率と、倒壊建物からの出火確率という条件付確率の経験式を作成し、一戸の木造建物での炎上火災の発生する確率を算定しようとするものや、地震時の出火データを建物の使用目的との関係で整理し、その出火確率を推定しているものなどがある。

C.Scawthornらは、木造建物の固有周期に近い0.75秒、減衰5%の加速度応答スペクトル、SA(g)をパラメータとする式を提案している。⁶⁾このSAは、当然地盤の状態によって異なる。その値は、固有周期に対する最大加速度応答スペクトル倍率図によって求めることができる。本システムでは、この論文を基礎として、図7のようなメッシュ出火確率の算定と、出火メッシュの判定システムを考えた。

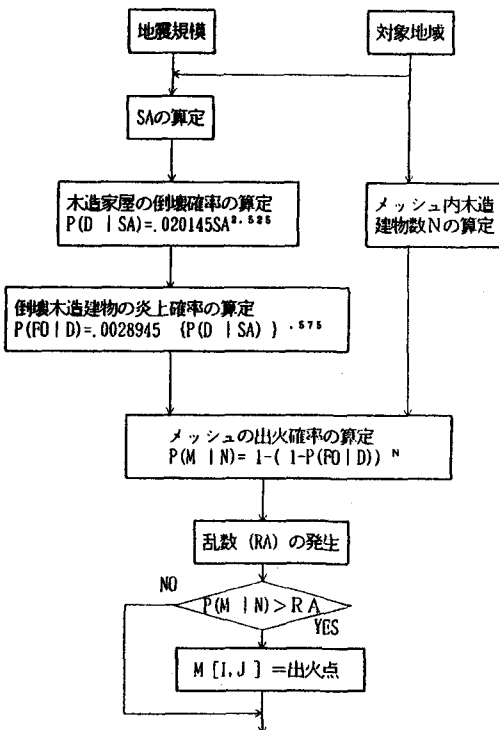


図7 出火点メッシュの判定システム

まず、われわれのモデルでは、メッシュが単位となっている。従って、「一戸の木造建物での炎上火災の発生する確率」ではなく、それを基にして「メッシュで炎上火災の発生する確率」を求める必要がある。図7の最初のステップでは、当該メッシュの地盤特性から一戸の炎上火災発生確率 P(FO|D)を、上述の文献の方法に基づいて、SAを用いて求める。第二のステップでは、木造建物混成比と平均建物長より木造建物数Nを求め、両者よりメッシュの炎上火災発生確率 P(M|N)を決定する。この決定では、メッシュ内の木造建物の少なくとも一戸が炎上すれば、メッシュも炎上するとしている。

第三のステップは、このメッシュ出火確率を用いて、地震時の同時出火点の設定を行うもので、ここでは、一様乱数RDを発生させ、各メッシュの出火確率をいき値として、メッシュの出火を判定するようにしている。この方法により、地盤特性と木造建物の密集度を考慮した出火点の設定が一応可能となる。

4. 適用事例と考察

4.1 対象地域のデータ

金沢市の測量用カラー航空写真は、1973年度撮影のものしかない。地元の新聞社は、10年後の1983年に写真集用のカラーの航空写真を撮影している。そこで、われわれは、1983年撮影の5000分の1の白黒の測量用航空写真と、1983年度のカラーの写真集を基礎資料とした。そして、1cmのメッシュを掛けて、金沢市中心部の4km四方の80×80のメッシュマップデータの採取を行った。作業は、20×20の16の領域に分割して、4名で分担した。

2.2の図3に示したものが、実は金沢市のメッシュ・マップである。上が北で、中央右下にドットで表示されている不燃メッシュ群が市街中心部であり、その廻りに濃く塗られている可燃メッシュが広がっている。左上から中央を通り右下に到る白色部分の連続は、川幅50~70mの犀川である。そして、右下中央の空白部分が、中央公園から兼六園周辺の一帯で、鉄道は上70の位置から左70の位置にかけて走っている。地盤データは、石川県の作成した地盤地図を使用した。そして、表3に従って地盤特性を分類して、図8に示す地盤メッシュ・マップを作成した。

これは、都市メッシュ・マップと重ね合わせて表示することも可能である。気象データは、金沢地方気象台のものを使用する。それによれば、最大風速が10m/sを越える風は、平均で年4回ある。風向は、冬季は南々西で、その他は東風であるが、犀川沿では、夏期には朝は北西、夕は南東の風が吹く。

4.2 地震火災危険のシミュレーション結果と考察

まず、出火確率の想定パラメータである SA を、福井地震のときの値を参考に、地盤種別に表3のように想定した。風は、南東、10 m/sとして、100回のシミュレーション実験を実施した。出火メッシュ数は、平均4.5個で、地盤別に可燃メッシュ数に対する比率を調べると、ソフトで39.5、インタームで22.7、ハードでは11.6%という結果であった。

焼失面積は、出火後2時間後のデータでは、平均107メッシュ、26.7haで、最大は292メッシュ、最小は6メッシュという結果が得られた。酒田市の大火が22haであることを考えれば、この時点でもかなりの大火であるという結果となった。

図9は、このシミュレーションで最も延焼した場合の結果を示したものである。ここでは、紙面の都合上、20×20の部分画面を合成したものを使用し、120分後のみを示している。この事例では、出火点は平均値より少し多い6点、ソフトで4点、インタームで2点の出火が発生している。このシミュレーションでは、この図の10分後即ち130分に、まず左下の2つの火災が合流した。そして、時間の経過とともに、火災が合流する気配を見せ、240分後には、

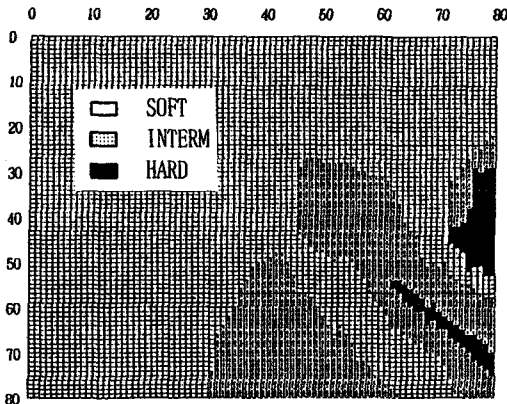


図8 地盤のメッシュ・マップ

表3 地盤の種別と SA 値

種別	地盤	SA
HARD	岩盤	0.24
INTERM	普通の地盤	0.56
SOFT	沖積層	0.80

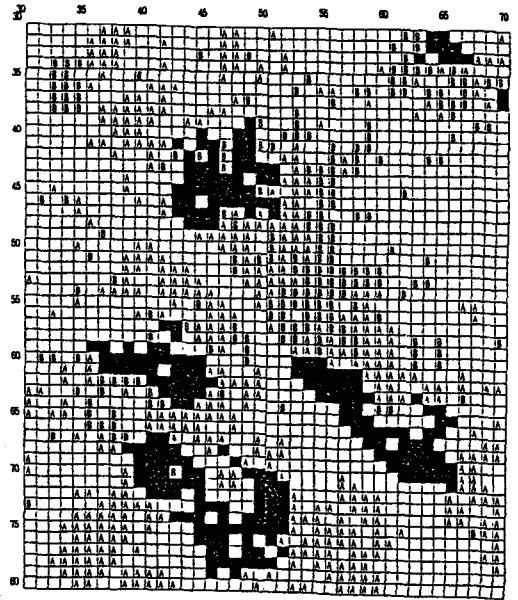


図9 シミュレーション出力事例 (120分後)

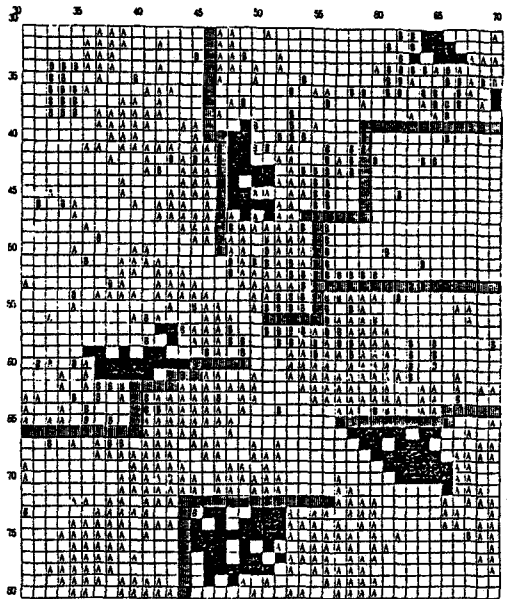


図10 ブロック化の分析

市街中心部が火面で包囲されるという状況が、カラー画面によって刻々と提示され、同時多発型の地震火災危険を強く示すことができた事例であった。

著者らは、この結果を受けて、火災の延焼を効果的にブロックする地震火災対策案を検討した。即ち、まず、80×80の全体画面を用いて、延焼パターンと地形や現在の都市構造を検討し、ブロック化の基本戦略線を決定した。そして、次に、20×20の拡張部分画面を用いて、この戦略線沿のメッシュの構成内容を調べ、建ぺい率に応じて耐火造化と防災広場化を試みた。また、その効果を定量的に検討するために、このメッシュ・マップを用いて、図9と同じ条件の下でシミュレーションも実施した。図10に、この検討経過を示す。この図で網目を掛けた帯が、ブロック化の基本戦略線であり、これに沿って28個所のメッシュ内容の変更を行っている。このメッシュ・マップに対する2時間後のシミュレーション結果では、延焼面積は292から121と約41%に減少し、また、火災が合流する危険性も少なくなっていることが分かり、有効な計画案であることが示せた。

5. あとがき

本論文では、地震火災の危険性をできるだけ具体的に提示するために、視覚的なメッシュ型の火災延焼シミュレーション・システムを核とする情報システムについて検討した。まず、著者らが開発してきたシミュレーション・システムを、その特徴である視覚性を保持したまま広域化するために、20×20の部分画面と80×80の全体画面を選択的に表示できるシステムを提案した。次に、このシステムの入力系として、航空写真とドットカウンター法によるメッシュ・マップデータ作成システムと、地盤と木造建物数を考慮した出火メッシュ判定システムを提案した。そして、最後に、金沢市を対象にして、これらのシステムの適用を行った。

この適用によって、まず、提案した2つの入力系が、実行性をもつシステムであること、また、本論文で提案した広域シミュレーション・システムが、同時多発型の地震火災の危険性を視覚的に提示するのに有効であること、さらに、全体画面と部分拡張画面が、地震火災危険の分析とその対策案の検討に

有効に使用できることなどを示した。

もちろん問題点や今後の課題として残されているものも幾つかある。一つは、シミュレーションの表示方式である。現在のシステムでは、全体画面と部分画面の選択的表示となっているが、ウィンドー形式で選択できる方式の方が便利であろう。また、より具体的、より視覚的なシステム化としては、イメージスキャナーで取り入れた地図情報と重ね合わせて表示するというのも今後の課題である。第二の課題は、多大の人力を要するメッシュ・マップデータ作成システムの改良である。ここでもイメージスキャナーの利用が考えられよう。

以上は、コンピュータ・システム化に関連する課題である。一方、出火メッシュの決定システムについては、本論文では、倒壊建物からの出火のみを考えたが、倒壊しない建物からの出火も十分考えられる。著者らは、この面では素人であり、その改良には専門家の協力をお願いしたいと考えている。

参考文献

- 1) 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，金大工学部紀要，15-2，127～138，1982。
- 2) 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。
- 3) 木俣昇，二神透：大震時火災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，土木計画学研究・論文集，5，123～130，1987。
- 4) 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，30-1，1987。
- 5) 日本火災学会編：火災便覧，共立出版，1984。
- 6) C. Scawthorn，山田善一，家村浩和，小林正美：都市における地震火災危険度の予測に関する研究，日本建築学会論文報告集，313，138～144，1982。
- 7) 水野弘之，堀内三郎：地震時の出火率と住家全壊率の関係について，日本建築学会論文報告集，247，101～110，1976。