

火災延焼シミュレーション・システムによる 都市のブロック化計画に関する基礎的研究

金沢大学大学院 学生員〇二神 透
金沢大学工学部 正 員 木俣 昇

1. まえがき

わが国の都市は、密集木造市街地を抱えており、地震時の同時多発火災の危険性が高い。このような地域に対して、住宅の耐火・不燃化、建ぺい率の規制、避難路、避難場所の整備などの都市防火対策が行われている。著者らは、火災延焼シミュレーション・システムの開発を行い、このシステムを用いて火災の延焼拡大を抑制する都市構造要因の分析を試みてきた。^{1), 2), 3)} その結果、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、また建ぺい率を下げることも有効であることを定量的に示すことができた。一方、これらの手段の他に都市構造そのものが都市の耐火性に大きく影響することを示唆することができた。そこで、著者らは都市の耐火構造に着目し、耐火造建物や、河川、オープンスペースなど、一連の不燃性都市構造で、市街地を防火区画に分断するブロック化計画を提示した。この計画の概念は、ある区画で火災が発生しても、他の区画への延焼拡大を阻止し、都市全体の人的、物的被害を最小限に抑えることにある。

前論文では、都市全域のブロック化の基本戦略決定を目的とした、広域火災延焼シミュレーション・システムへの拡張化を試みた。⁴⁾ このシステムを用いて、金沢市を対象に地震火災分析を行い、地盤や木造市街地の連続性を考慮した、ブロック化の基本戦略を決定した。本論文の目的は、このマクロな基本戦略に対する具体的なブロックの構成方法の構築である。ブロック化の基本戦略は、50 m 四方のメッシュ・サイズで構成されている。この計画案を実行可能とするには、メッシュ・サイズを25 m 程度

に細密化して、ブロック化の実現可能な構成を考える必要があろう。また、この程度のメッシュ・サイズであれば、防火緑地もブロック化の構成要素として取り扱える。特に、金沢市のような観光都市では、歴史的、伝統環境を重視した防火対策が望まれるため、緑地によるブロック化は、防火効果と景観面での効果が期待できよう。

緑地の防火効果については、火災旋風の抑制、輻射熱の遮蔽効果などの点で防災効果は高く、緑の防火壁としての役割が認められている。しかし、緑地は樹木の集合体であり、その種別、配置、火災の状況によれば、可燃物の集合体とも考えられる。そこで、著者らは、樹木の火災特性分析を行い、緑地防火効果をモデル化し、シミュレーション・システムへの緑地防火効果の組み入れを試みる。

そして、本論文では、金沢市を対象とした都市のブロック化計画の基本戦略をもとに、ブロック化の具体的な構成方法の適用例として、市の歴史的環境保存地区である主計地区を対象とした計画案の作成と火災延焼シミュレーション・システムによる計画案の評価について報告する。

2. 緑地の防火効果

2.1 防火樹木の火災特性

防火樹木とは、難燃性を示す耐火力と、輻射熱を遮蔽する遮蔽力を有する樹木である。しかし、防火樹木といえども火炎の接触があれば炎上する。本節では、まず防火樹木の輻射熱に対する耐火力について述べる。

一般に都市火災は、山型の炎が多数林立する形状を呈するとされる。都市火災の同時炎上奥行きをD

(m) , 火炎幅を B (m) として、この火面を矩形で近似すれば、防火樹木と火炎との物理的關係は、図1のようにモデル化される。ここで、 W (m/s) は風速、 H (m) は炎の高さ、 L (m) は炎の長さ、 Θ は炎の傾き、 ND (m) は炎の前面距離、 h (m) は樹木の高さ、 β (m) は樹木の奥行きである。ここで、火炎幅を B (m) とすれば防火樹木は、 $L \times B \cdot (\text{m}^2)$ の火炎面からの輻射熱を受熱する。いま、図1の火炎面から緑地の前面防火樹木までの距離を d (m) とすれば、高さ h の地点の防火樹木の輻射受熱量は、 L と B と Θ をパラメータとして、 $E(L, B, \Theta, d, h)$ Kcal/m²h で表される。同様に、緑地後方の防火樹木の輻射受熱量は、 $E(L, B, \Theta, d + \beta, h)$ Kcal/m²h で算定される。^{5), 6)} 都市火災における緑地防火効果は、防火樹木の輻射受熱量、 $E(L, B, \Theta, d, h)$ 、 $E(L, B, \Theta, d + \beta, h)$ と樹木の耐火限界輻射熱量を比較することにより判定することができる。

この耐火限界値については、既存研究により明らかになっている。^{7), 8)} 表1は、防火樹木の種別と輻射熱のみを受熱する場合の発火限界輻射熱量と、飛び火のように口火を与えた場合の引火限界輻射熱量を示したものである。ここで、落葉広葉樹については枝葉が存在している状態での数値である。表1より、輻射熱のみを受ける樹木の耐火限界値は、防

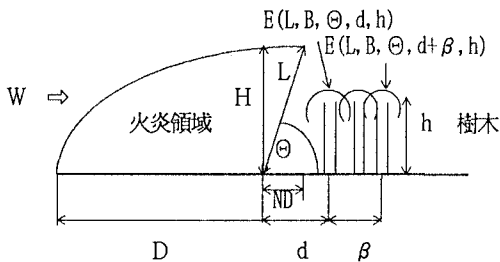


図1 樹木の耐火力のモデル図

表1 樹木の耐火限界値

	常緑広葉樹	落葉広葉樹	針葉樹	木材
発火限界 輻射熱 (Kcal/m ² h)	13,400	13,900	12,000	4,000
引火限界 有炎口火	5,400	—	5,800	2,500
無炎口火	5,700	—	—	—

火樹木の種別に係わらず12,000 Kcal/m²h 以上と、木材と比較すれば発火限界値はかなり高い。有炎口火が与えられても常緑広葉樹でも5,400 Kcal/m²h以上と、木材と比較すればかなり高い熱量でなければ引火しない。これらより、防火樹木としては、発火限界値が高く、一年を通じて枝葉のある常緑広葉樹が適していると考えられる。

次に、防火樹木の輻射熱遮蔽力について述べる。樹木の配置による輻射熱遮蔽効果は、樹木を3列に隙間なく整列に配置した場合、輻射熱の遮蔽効果は、94.6%、同じく3列に一本分の隙間をおいて交互に配置した場合、91.9%の遮蔽効果があると報告されている。⁵⁾ このように、防火樹木を配置することによって、それらの相乗効果による高い輻射熱遮蔽効果が期待できる。

以上より、本論文で扱う緑地とは、常緑広葉樹を主とするある程度の密度を持つ緑地帯とする。

2.2 緑地防火効果のモデル化

図1の樹木の耐火力のモデル化と、表1の樹木の耐火限界値を基に、緑地の防火効果の判定フローを図2のように概念化した。ここで、緑地の前面樹木は、火炎領域に近いため飛び火を受け、かなりの有炎口火を受けると仮定し、有炎口火の引火限界値を防火樹木の耐火限界値とする。一方、緑地の後方樹木は火炎からある程度離れているため、輻射熱のみを受けると仮定し、発火限界値を防火樹木の耐火限界値とする。

緑地防火効果の判定は、まず火炎の高さ H (m) と樹木の高さ h (m) を比較して、火炎の高さが小さければ、緑地は輻射熱の遮蔽効果が高いため、当該緑地は非燃であるとする。次に、火炎の高さが樹木の高さより大きく、地上からの火炎の水平前面距離 ND (m) が緑地の前面樹木までの距離 d (m) より小さければ、輻射受熱計算 $E(L, B, \Theta, d, h)$ を行い、この値が有炎口火を受ける樹木の引火限界値 E_p (Kcal/m²h) よりも小さければ、やはり当該緑地は非燃であるとする。次に、炎が緑地全体を包み込んでいれば、緑地は全体が炎の接触、または耐火限界よりも高い輻射熱を受けるため炎上するとする。次に、緑地後方の樹木の輻射受熱量 $E(L, B, \Theta, d + \beta, h)$ が、発火限界輻射熱 E_o (Kcal/m²h) よりも大

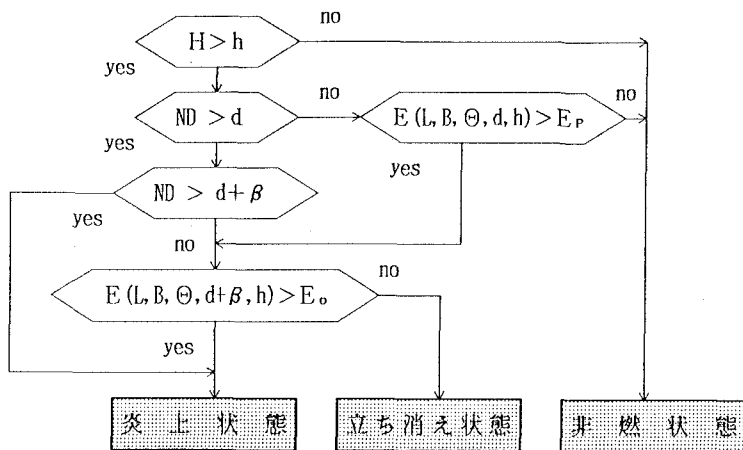


表2 パラメータ

パラメータ	内 容
D	同時炎上奥行き
B	火 炎 幅
W	風 速
L	火炎長さ
Θ	火炎の傾き
H	火炎高さ
h	緑地の高さ
d	前面距離
β	緑地の奥行き
ND	火炎の前面距離
E_p	引火限界放射熱量
E_o	発火限界放射熱量

図2 緑地の防火効果判定フローの概念図

きければ、緑地は延焼する。他の場合は、緑地は一部炎上して立ち消えるとする。

防火樹木の火災特性分析を基に、以上のようにして緑地の防火効果のモデル化を行った。次に、火災延焼シミュレーション・システムへの緑地防火効果のモデル化を試みる。著者らが開発を行ってきた火災延焼シミュレーション・システムは、メッシュ・モデル化を採用している。メッシュ・モデル化とは、メッシュ内の建物を集約化したモデルである。そこで、緑地についても、図3に示すようにメッシュ・モデル化を行い緑地メッシュとして取り扱う。ここで、火災領域から放射される熱量は、風下側で卓越している。そこで放射熱計算は、可燃領域の風下一次近傍もしくは、オープンスペース（鎮火も含む）を一次近傍に持つ、風下二次近傍の緑地メッシュに対して行うとしてモデル化した。

図の火災領域については、火災延焼シミュレーション・システムを用いれば決定する。この火災領域の火炎面に対して放射熱計算を行えば、緑地の放射受熱量が求まる。この放射受熱計算の入力パラメータとなる同時炎上奥行き、火災前面から緑地の前面樹木までの距離、後方樹木までの距離は、単位メッシュ長 $UL(m)$ と各メッシュの建ベイ率 $R_{i,j}$ を書き換えて算定できる。

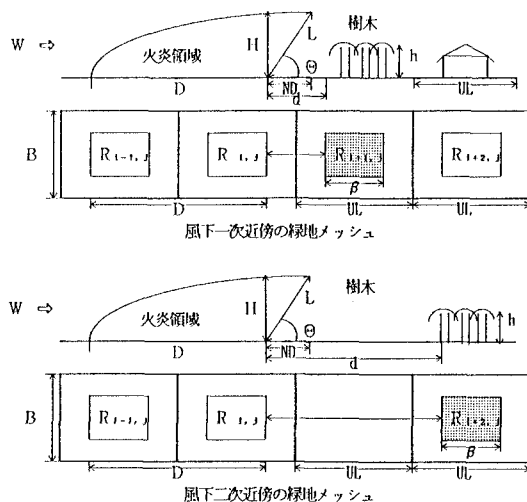


図3 都市火災における緑地のメッシュモデル化

3. 火災延焼シミュレーション・システムの拡張

3.1 メッシュ属性と状態の拡張

従来のシステム¹⁾では、メッシュの属性は、木造建物の占有率の高い”可燃メッシュ”，耐火建物の占有率が高い”耐火造メッシュ”，オープンスペースの占有率が高い”空地等メッシュ”の3属性である。可燃メッシュについては、メッシュの木造建物混成比 $P[I, J]$ ，建ベイ率 $R[I, J]$ ，防火建物混成比 $RB[I, J]$ が基本データとして入力されている。可燃メッシュ間の延焼計算は、これらのデータと風速をパラメータとした、浜田らの延焼速度式を

用いて算定している。拡張化システムでは、2.2でモデル化した緑地を、メッシュ属性として取り入れた。この緑地メッシュの基本データは、防火樹木混成比PG [I, J] , 緑地建ぺい率RG [I, J] , 防火樹木高さH [I, J] である。ここで、緑地メッシュについては、防火効果判定の結果、可燃か非燃かの属性変更が生じる。そこで、可燃と判断された緑地メッシュについては、メッシュの属性が” G ” から” GA ” に書き換えられる。これについては、次節で概説する。

火災延焼シミュレーション・システムは、可燃メッシュ、緑地メッシュの状態推移を用いて表現される。図4は、シミュレーションの基礎となる状態推移を一定時間増分法 (time slicing) でモデル化したものである。これらのメッシュは、” 未燃状態 ” よりスタートして、時間の経過とともに” 類焼可能状態 ” , ” 炎上状態 ” , ” 延焼可能状態 ” , ” 鎮火状態 ” に推移する。ここで、” 延焼可能状態 ” とは、他のメッシュへの延焼ポテンシャルを有する状態である。この状態メッシュの一次近傍に位置する可燃メッシュは、” 類焼可能状態 ” か ” 炎上状態 ” かに推移し、” 炎上状態 ” であれば、時間を Δt 進めて延焼可能状態に推移する。緑地メッシュについては、” 類焼可能状態 ” に推移すると放射熱計算を行う。そこで、拡張システムでは、状態変数として、” 立ち消え状態 ” , ” 不燃状態 ” を定義している。即ち、” 類焼可能状態 ” に推移した緑地メッシュは、” 立ち消え状態 ” , ” 非燃状態 ” , ” 炎上状態 ” に推移

するか、” 類焼可能状態 ” かのいずれかの状態変数を持つ。

3.2 延焼計算メカニズムの拡張

1) 拡張システムの基本概念

図5に火災延焼シミュレーション・システムの延焼機構基本概念図を示す。本システムはメッシュ・モデルを採用しているために、風向に対して8方向の延焼計算が必要となる。延焼計算は、可燃メッシュ、あるいは放射熱計算により炎上状態と判定された緑地メッシュが対象となる。いま、出火点ないしは、延焼可能メッシュの座標を $S [I, J]$ とする。風向と風座標 ($S1$) を与えて、一次近傍座標 $[K, L]$ を計算する。 $[K, L]$ が風下でなく、メッシュ属性 $M [K, L]$ が可燃メッシュであれば、従来どうり風座標に対応する延焼速度式を用いて延焼計算を行い、状態が推移する。一方、 $[K, L]$ が風下であれば、 $M [K, L]$ が緑地メッシュかどうかチェックする。緑地メッシュであれば、座標 $[K, L]$ が $[Q, R]$ に書き換えられ、状態変数 $MM [Q, R]$ をチェックし、未燃状態であれば、同時炎上奥行きとメッシュ・データを放射熱計算のインプットデータに変換して放射熱量の算定を行う。放射熱計算の結果、炎上状態と判断されると補正延焼速度式による延焼計算が行われる。一方、 $M [K, L]$ が、可燃メッシュであれば、従来どうり風下の延焼速度式による延焼計算が行われ状態が推移する。

一方、 $[K, L]$ が、鎮火もしくは、オープンスベ

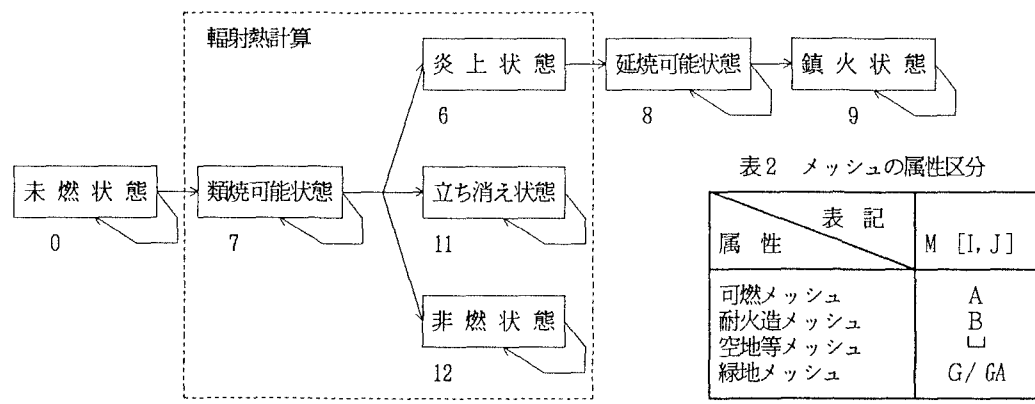


図4 緑地メッシュの状態推移図

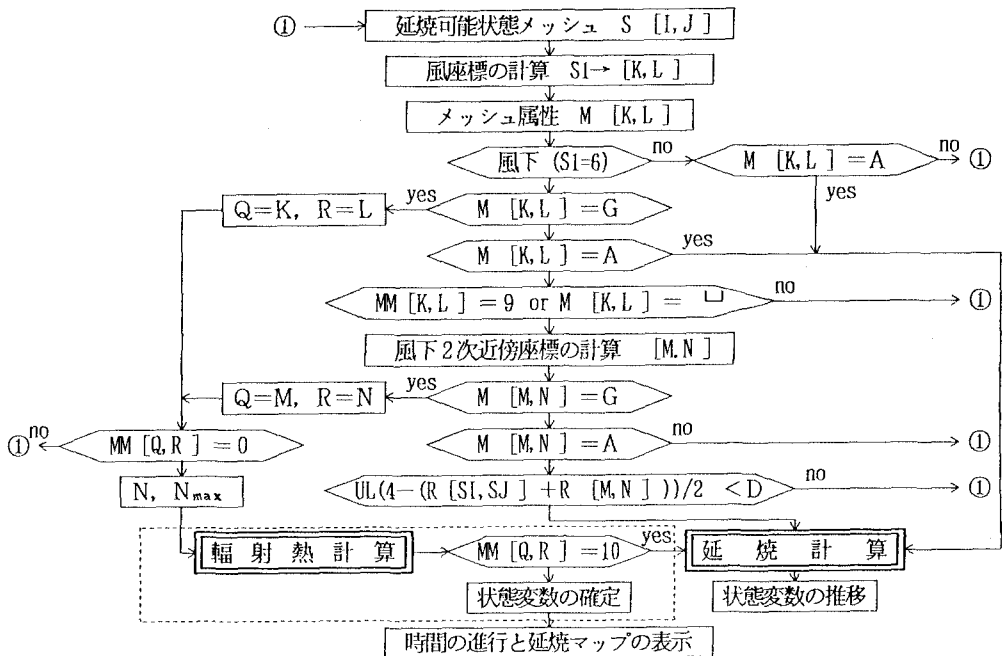


図5 火災延焼シミュレーション・システムの延焼機構基本概念図

ースであれば、風下二次近傍座標 $[M, N]$ をチェックし、 $M[M, N]$ が緑地メッシュであれば、一次近傍と同様な操作が行われる。一方、風下二次近傍 $M[M, N]$ が可燃メッシュであれば、従来どうり延焼限界距離と隣棟間隔をチェックして、延焼計算を行うか否かが判定される。

この一連の操作を、すべての風方向と延焼可能状態のメッシュ $S[I, J]$ について行う。最後に、時間を Δt 進めて延焼マップに、“延焼可能状態”、“鎮火状態”、“立ち消え状態”、“非燃状態”を色別で表示する。

破線で囲まれた輻射熱計算と状態推移の確定のフロー、延焼速度式の各サブシステムについては、次項で概説する。

2) 緑地メッシュの状態確定アルゴリズム

輻射熱計算による状態の推移と状態確定計算のアルゴリズムを、図6に示す。延焼可能状態メッシュの風下一次近傍、あるいは二次近傍の緑地メッシュの状態変数 $MM[Q, R]$ が未燃状態であれば、 $M[Q, R]$ に帯する最大可燃奥行き N_{max} 、同時炎上

奥行き N を算定し、輻射熱計算を行う。この結果、炎上状態と判断されると、属性を“G”から“GA”に書き換える。これについては、さらに次項で述べる。一方、 $MM[Q, R]$ が炎上状態でなければ、“非燃”か“立ち消”の状態変数を持つ。しかし、延焼が拡大すれば、炎上状態へと状態の推移が起こる可能性がある。この状態を確定する方法として、図6に示すような、仮状態変数 $MN[Q, R]$ と $t - \Delta t$ 時の同時炎上奥行き変数 $G_N[Q, R]$ を新たに設定した。図6の状態の確定アルゴリズムでは、まず最大可燃奥行き N_{max} と同時炎上奥行き N を比較する。もしもこの値が等しければ、同時炎上奥行き N は確定しているため、現在の状態変数 $MM[Q, R]$ が確定状態変数である。

これに対して、現時刻 t の同時炎上奥行き N が、 $t - \Delta t$ 時の同時炎上奥行き $G_N[Q, R]$ より増加していれば、現時刻では状態は確定していない。そこで仮状態変数 $MN[Q, R]$ に現時刻の状態変数 $MM[Q, R]$ を入れる。次に、現在の同時炎上奥行き N を $G_N[Q, R]$ に入れて、状態変数 $MM[Q, R]$ は初期化する。この操作により、時間を Δt 進

めた $t + \Delta t$ 後も状態が非確定な緑地メッシュについては、輻射計算が行われることになる。

一方、前者とは逆に、現時刻の同時炎上奥行き N が、 $t - \Delta t$ 時の同時炎上奥行き $G_N [Q, R]$ より減少すれば、 $t - \Delta t$ 時の状態が確定状態である。そこで、仮状態変数を $MN [Q, R]$ を現時刻における状態変数 $MM [Q, R]$ に書き換え、状態が確定される。

3) 延焼計算のアルゴリズム

延焼計算によるメッシュの状態更新は、図4に示したメッシュの状態推移図に従って、延焼可能時刻 T と $CLOCK$ とを比較して計算が行われる。図6に示すフローは基本的には、従来どうりの延焼可能メ

ッシュと属性 $M [K, L]$ 間の延焼可能時刻 T (あるいは鎮火時刻 F) を算定する延焼計算のアルゴリズムである。¹⁾ 従来のシステムでは、延焼計算の対象となるメッシュ属性は可燃メッシュのみであった。これに対して、拡張化システムでは、“炎上状態”に推移した緑地メッシュ $M [K, L] = "GA"$ についても延焼計算を行う必要がある。ここで問題となるのは、可燃メッシュと緑地メッシュには、可燃物の構成要素が異なるため、当然のことながら延焼速度式や燃え落ち時間算定式のパラメータが異なると考えられる。そこで、図7に示すように $M [K, L]$ が可燃メッシュか、あるいは緑地メッシュかを判定した後に、延焼可能時刻、鎮火時刻の計算を行うようにした。

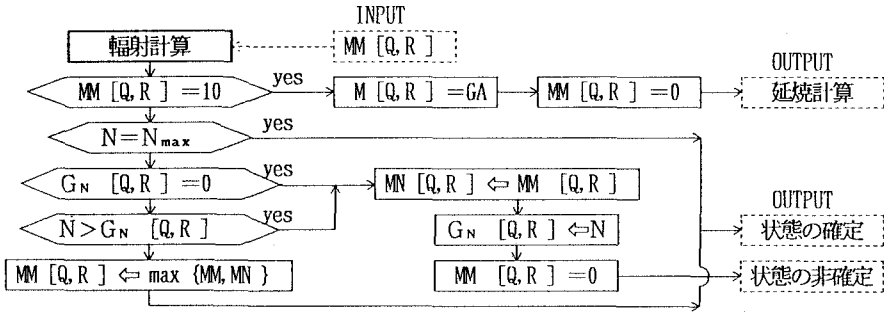


図6 輻射熱計算による状態確定のアルゴリズム

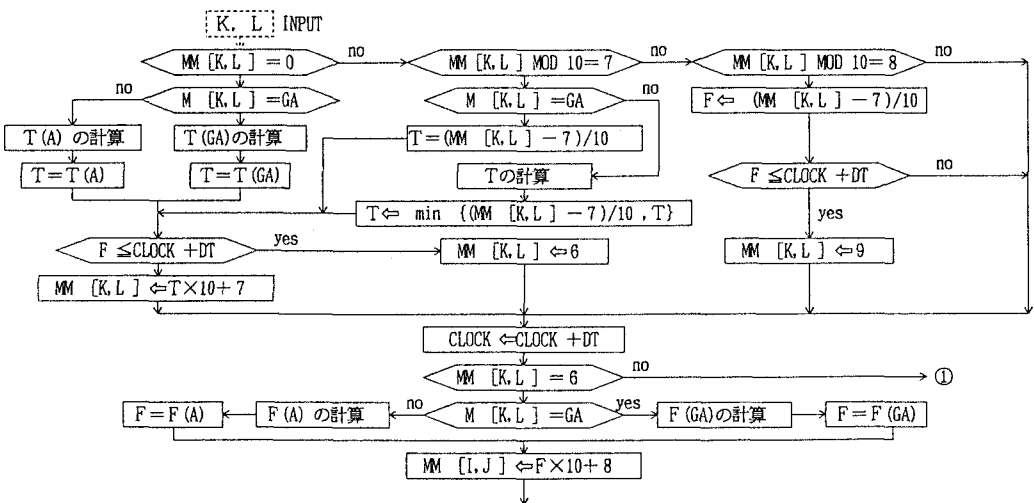


図7 延焼計算のアルゴリズム

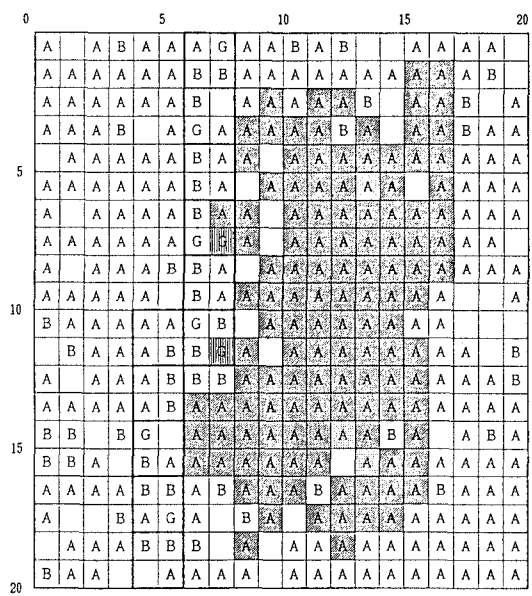
これらの一連のアルゴリズムによって、緑地の防火効果のシミュレーション・システムへの取り入れが可能となった。

4. システムの適用事例と考察

地震火災危険分析の結果、金沢市の伝統環境保存地区である、主計町周辺は、周辺の木造建物密集地区と連担しているため火災の延焼拡大危険性が高いことが明らかになった。そこで、この地区を分断する形で金沢市全体のブロック化計画案の基本戦略の作成を試みた。具体的には、不燃メッシュ、空地メッシュ、建ぺい率の低い可燃メッシュを用いて基本戦略を決定した。この基本戦略の具体的なブロックの構成を行うために、当該地区の詳細メッシュ・マップを作成した。このメッシュ・マップを用いて、ブロック化の基本戦略の構成要素の配置を基に、緑地メッシュ、耐火造メッシュ、空地メッシュによるブロックの構成再配置を行った。基本的には、金沢市の卓越風が東風であることを考慮し、風方向に可燃メッシュが連続しないように配慮した。また、ブロック周辺の可燃メッシュの構成に着目し、最大可燃奥行きが小さい箇所については、緑地メッシュで

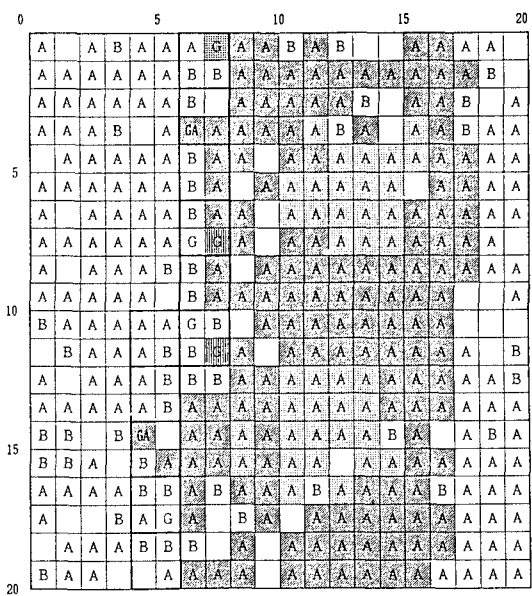
ブロックを構成した。逆に、最大可燃奥行きの大きい箇所については、オープンスペース、耐火建物でブロック化を行った。さらに、風下二次近傍で放射計算に入る可燃メッシュについては、意識的に緑地を配置した。これは、さまざまなケースのブロック化のパターンを想定し、拡張化されたシステムの論理的動作確認とともに、情報システムとしての有効性を検討するためである。

作成した代替案に対して、風向を東風、風速を10m/s，単位時間 Δt を5分とし、出火点 $S[I, J]$ を $[14, 6]$ ， $[13, 15]$ の二点を想定しシミュレーション実験を実施した。出火後、70分と100分後の出力事例を、図8、図9にそれぞれ示す。図中、左の上から下にかけての、太い線が全体画面で決定した、ブロック化の基本戦略であり、”G”は新たに配置した緑地メッシュによる計画案である。図の左がわの濃い網かけが延焼可能状態のメッシュを表している。CRT画面上では、赤色で表示している。薄い網かけは、鎮火状態のメッシュで、同じく青色で表示している。出火後70分に同時延焼火災領域が中央の2つの緑地の一次近傍に入り、放射計算が行われた。この結果、延焼可能メッシュの風上一



70 分後

図8 細密シミュレーション結果 (1)



100 分後

図9 細密シミュレーション結果 (2)

次近傍がオープンスペースであるため、同時炎上奥行きが確定した。ここで緑地メッシュの状態が推移し、“非燃メッシュ”として画面に表示された。

出火後100分には、すべての緑地メッシュの一次近傍まで延焼が拡大している。図中、上方の緑地メッシュ[8,1]は、この時間に最大可燃奥行きと同時に炎上奥行きが等しくなり、状態が確定し、“立ち消えメッシュ”へと状態が推移した。一方、[7,4]の緑地メッシュは、“炎上状態”に推移すると同時に、メッシュの属性が“GA”に変更され、緑地の補正速度式による延焼計算が行われ、延焼可能メッシュとして赤色で表示された。さらに、[5,15]の緑地メッシュについても、風下二次近傍の輻射計算が行われ、“炎上状態”へと状態が推移し延焼可能メッシュとして表示された。

これらの結果より、延焼可能メッシュの風下一次近傍ないしは、二次近傍の緑地メッシュについて輻射計算が行われ、状態の推移、状態の確定のアルゴリズムに従って、緑地の状態推移が確実に行われていることが認められた。また、“炎上状態”の緑地メッシュについては、延焼計算が行われ、CRT画面への表示が確認できた。

一方、ブロック化代替案の評価については、同時炎上奥行きが1メッシュ程度なら非燃、2メッシュ程度なら立ち消え、4メッシュ以上連続する場合は、例えば風下二次近傍の緑地メッシュであっても、高い輻射受熱量による延焼危険性があることを示すことができた。また、この計画案では炎上した2つの緑地の風下側が可燃メッシュであるため、風下方向に延焼拡大することが明らかになった。

5. あとがき

本論文では、都市のブロック化の具体的な手段として、詳細画面を用いて、緑地、耐火建物、オープンスペースを総合的に利用したブロック化案を評価するシステムを提案した。そのために、まず樹木の火災特性の分析を行い、樹木の延焼の可否は輻射熱計算によって判定可能であるとして、樹木の防火効果のモデル化を行った。次に、この概念を樹木の集合体である緑地へと拡張化し、緑地のメッシュ・モデル化を行った。そして、それを火災延焼シミュレーション・システムへの組み込みを行うために、メ

ッシュ属性と状態変数の拡張化、輻射熱計算による緑地メッシュ防火効果判定アルゴリズム、状態の確定アルゴリズムの工夫を行った。そして、最後に、金沢市を対象としてシステムの適用を行った。

この適用による最大の成果は、著者らが提案したシステムが論理的に実行可能なシステムであることを明示できたことである。また、緑地が有効なブロック化の手段として活用できることを示唆することができた。

今後の課題としては、緑地の延焼パラメータの精度の向上と、実用的な都市防火計画支援システム化が考えられる。前者については、著者らは素人であり専門家の協力をお願いしたい。後者については、マルチウィンドーによる、詳細画面の同時複数表示、地図情報の表示などが考えられる。

参考文献

- 1) 木俣 昇：大震時火災の延焼シミュレーション・システムの開発について，金大工紀要，15-2，pp.127～138，1982.
- 2) 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.
- 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に関する研究，土木計画学・研究論文集，5，pp.123～130，1987.
- 4) 木俣昇，二神透：広域火災延焼シミュレーションシステムによる地震火災危険の分析，土木学会第13回電算機利用シンポジウム，pp.131～138，1988.
- 5) 日本火災学会編：火災便覧，共立出版，1984.
- 6) 木俣昇，二神透：避難場所の火災リスク評価に関するシステム論的研究，土木学会論文集，1989，1月。投稿中
- 7) 岩河信文：都市における樹木の防火機能に関する研究，建築研究報告，No.105，1984.
- 8) 高原栄重，青木久宣：防災緩衝緑地計画，都市計画107，pp.27～34，1983.