

防災緑地網整備計画のための火災延焼シミュレーション・ システムの拡張化に関する基礎的研究

Development of Extended Simulation System for a Plan of
Fire Prevention Buffer Green Belt

二神 透*, 木俣 昇**

By Toru FUTAGAMI and Noboru KIMATA

1. まえがき

木造住宅に対する指向性の強いわが国では、市街地火災の危険性は大きな脅威である。日本海側では、過去に何度も、フェーン現象下での大火を経験している^{1),2)}。また、地震時の火災危険性も常に指摘されているところである³⁾。しかし、近年、大火といわれる市街地火災は発生していないし、都市直下型の大規模な地震火災も、1948年6月28日の福井地震以来発生していない⁴⁾。これは、都市の防災化計画がもたらした成果ともいえるが、今般の阪神大地震は、それでも地震火災危険は依然として内在していることを強烈に示したものといえよう。

フェーン現象時の強風下での大火では、消火のための放水は霧散し、消防力は大きく低下する。また、飛び火がすさまじく、同時炎上火災となる^{1),2)}。地震時火災も、時間帯によっては同時多発火災となり、また、消防車の現場到着の困難化、消火水利網の損傷により、やはり消防力は極度に低下する。このような火災に対しては、都市そのものを火災の延焼を阻止する構造に改造する計画で対処せざるをえない。

火災の延焼を阻止する要素としては、耐震・耐火建築群、延焼限界距離を越える空地、および防火樹木林が考えられる。従来の防火都市計画では、この前二者による火災の延焼阻止が目指されていたが、樹木の延焼阻止力も早くから指摘されている。岩河

の焼け止まり線の分析では、緑地の焼け止まり率は、平均でも31.5%となっている⁵⁾。また、今般の阪神大地震に伴う火災でも、樹木の防火力がいろいろなところで見られることが報道されている。防災緑地整備構想とは、この樹木の防火性を活用して、耐震・耐火建物群、道路・河川などの空地、および公園・緑地などの樹木より成る防火帯を形成して、都市をブロック化しようという発想である。

著者らは、消防力が大きく低下し、しかも同時多発型である市街地火災を取り扱うために、まず、延焼速度式に立脚したメッシュ型のシミュレーション・システムを開発した⁶⁾。そして、酒田大火の再現性実験によってシステムの妥当性を検証し⁶⁾、このシステムによる実験計画法に基づくシミュレーション実験を実施し、都市の防災ブロック化が延焼阻止要因として非常に有効であることや、風速が大きな拡大要因となることを明らかにしてきた⁷⁾。この結果を受けて、つぎに、著者らは、防災緑地網による都市のブロック化計画の検討のために、このシミュレーション・システムに緑地メッシュを組み入れた拡張化システムを開発してきた⁸⁾。

この拡張化システムでは、強風下での火災の風下への延焼卓越性と、樹木の防火性の強調のために、風下緑地メッシュへの延焼アルゴリズムの組入れのみを扱ってきた。しかし、今般の阪神大地震では風速が比較的小さかったが、逆に、そのために火災が大きく立ち上がり、輻射熱が大きくなって風横方向にも大きく延焼したと推測される。

本論文の目的は、このような認識の下で、緑地メッシュへの延焼アルゴリズムを見直し、風横緑地メッシュへの延焼評価を含むシステムへの拡張化にある。まず、2. では、この緑地メッシュへの延焼アルゴリズムの拡張化の基本的な考え方を示し、つ

キーワード：計画情報、防災計画、公園・緑地

*正会員 学博 愛媛大学講師 教養情報科学
(〒790 松山市文京町 3)

Tel 0899-24-7111 Fax 0899-23-1071

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

Tel 0762-34-4914 Fax 0762-34-4915

表－1 樹木の耐火力データ

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

表－2 火災と風下緑地の関係と緑地状態

	火災面と緑地の関係	緑地の状態
Case.1	$H < h$, 樹木前面に接炎	立ち消え
Case.2	$H \geq h$, 樹木前面に接炎	輻射熱計算
Case.3	$H < h$, $ND < d$	輻射熱計算
Case.4	$H \geq h$, $ND < d$	輻射熱計算
Case.5	$H \geq h$, $ND \geq d + \beta$	発火

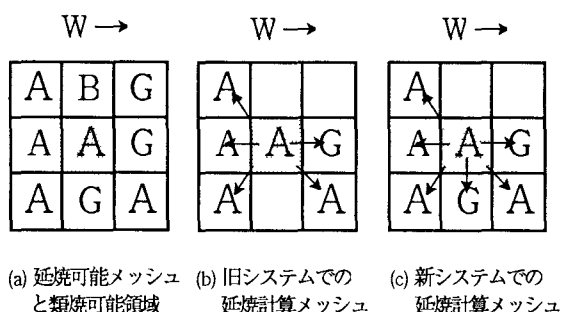
ぎに, 3. で, それをシミュレーション・システムに組み入れる工夫と手順を述べる. そして, 4. では, 土木計画学研究発表会で頂いたコメントを踏まえ, この拡張システムによる防災緑地網整備計画の検討事例と, さらに研究を要する課題について考察する.

2. 緑地メッシュの延焼アルゴリズムの拡張化

(1) 樹木の防火効果の分析

岩河⁵⁾によると, 大正12年の関東大地震から昭和52年の酒田大火までの主たる10の大火事例の分析より, 平均で31.5%の緑地の焼け止まり効果があると報告している. その中の最大は, 鳥取火災の50%であり, 最小の酒田大火でも10%の効果があると報告している. しかし, 酒田大火に関しては, 風下側の新井田川が最終的な焼け止り線となっていることを考慮すれば, 酒田大火における緑地の防火効果は大きかったといえよう³⁾. さらに, 今般の阪神大震災においても, 鷹取商店街の小グランドの樹木の防火効果や, 生け垣の延焼阻止効果などが報道されている⁹⁾.

岩河⁵⁾の, 防火樹木による実物実験によれば, 表－1に示すように防火樹木は, 輻射熱量に対する耐火力に大きな特徴があり, 木材が4,000Kcal/hm²の輻射受熱量で発火するのに対して, 常緑広葉樹は, 13,400Kcal/hm²と耐火性が高い. ただし, 口火がある場合には, 有炎口火で常緑広葉樹の引火限界輻射熱量が5,400Kcal/hm²と低下する. 一方, 防火樹木の集合体である緑地はさらに防火効果が高く, 例え緑地の一部が接炎しても前面で立ち消える. しかし, 緑地全体が炎に包まれた場合は炎上すると報告されている⁵⁾.



図－1 新旧延焼計算対象メッシュ

著者らは, 火災と風下緑地の状態との関係を, 火災高さ: H と, 樹木高さ: h , 火災の前面距離: ND , 樹木前方距離: d , 樹木後方距離: $d + \beta$ とすれば, 表－2に示すように, 5つのケースに分類している. この分類に基づいて, 火災延焼シミュレーション・システムにおける風横緑地のメッシュ状態アルゴリズムの拡張化を試みる.

(2) 緑地メッシュの判定フロー

著者らの火災延焼シミュレーション・システムの特徴は, 市街地の対象領域を正方メッシュに分割し, メッシュ内の都市構造物の占有率によって, A: 可燃メッシュ, B: 不燃メッシュ, G: 緑地メッシュ, □: 空地メッシュに分類している点にある. 従来のシステムは, 図－1の(a)の網掛けした延焼可能メッシュの一次近傍8方向の可燃メッシュと風下緑地メッシュを類焼可能領域と考え, 図－1の(b)を延焼可能計算対象メッシュとしている. しかし, 1. で述べたように, 風速: W が小さい場合, 火災領域の火災高さ: H が大きくなり, 風横緑地メッシュも輻射熱による発火危険性が高くなること

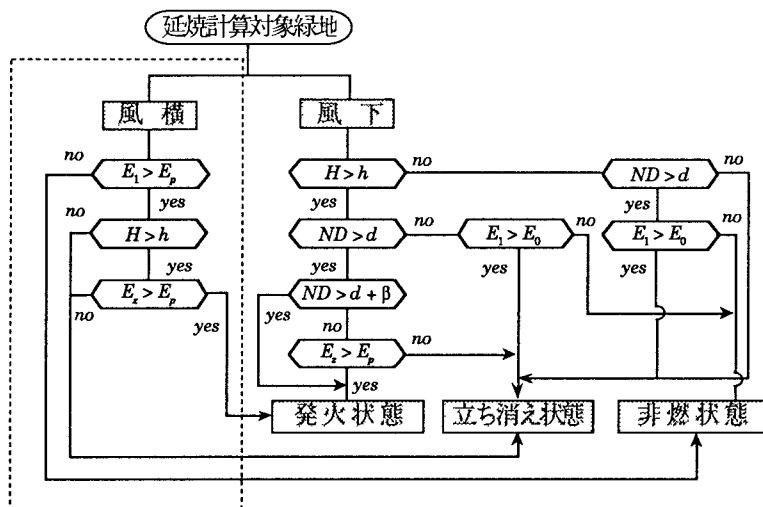


表-3 パラメータ

パラメータ	内 容
H	火炎高さ(m)
h	樹木高さ(m)
ND	火炎の前面距離(m)
d	樹木前面距離(m)
β	樹木奥行き(m)
E1	樹木前面受熱量(Kcal/hm ²)
Ez	樹木後方受熱量(Kcal/hm ²)
E0	引火受熱量(Kcal/hm ²)
Ep	発火受熱量(Kcal/hm ²)

図-2 風横緑地を含む防火効果の判別フロー

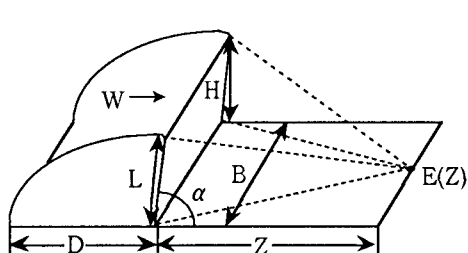


図-3 風下側の計算モデル

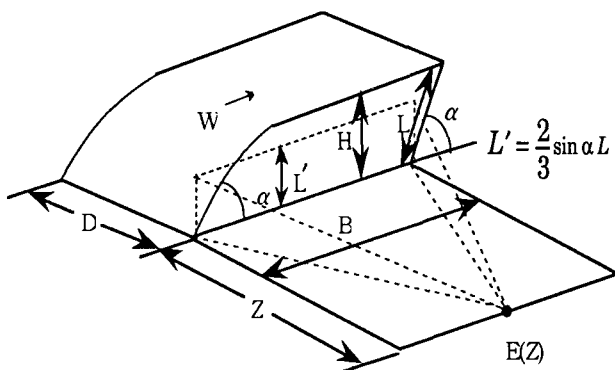


図-4 風横側の計算モデル

が予測される。そこで、図-1の(c)に示すように風横の緑地メッシュについても、延焼計算対象メッシュとして風拡張化を行う。

そこで、表-2および表-1の数値を基に、図-2に示す風横緑地メッシュの判別を含む緑地防火効果の判別フローを採用することにする。表-1の実物実験より、風横については、風下緑地の後方樹木よりもさらに口火の影響が少ないと仮定し、常緑広葉樹の発火限界輻射受熱量：Epを樹木の耐輻射限界受熱量として採用することにする。風下緑地メッシュについては、図-3の風速：Wにより α 度傾いた火炎面：L×Bのからの輻射熱計算を基礎モデルとしている¹⁰⁾。一方、風横緑地メッシュについては、図-4の風横方向の焼け止まりモデルより、輻射面の高さL'を、 $L' = \frac{2}{3} (\sin \alpha) L$ とし、L'×Bの火炎面からの前面樹木および後方樹木の輻射受熱量の

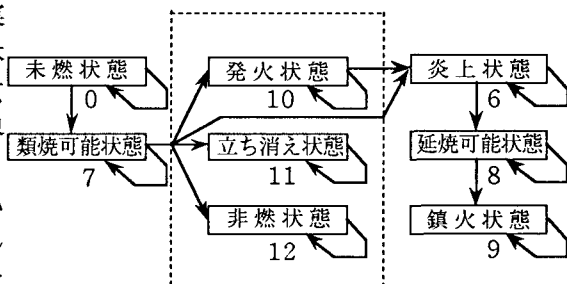


図-5 緑地メッシュの状態推移図

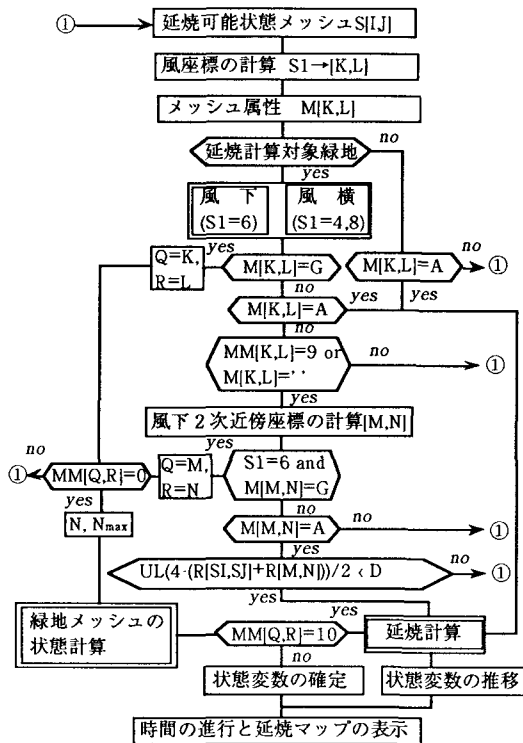


図-6 拡張化システムの基本延焼機構

算定を基礎とする¹⁾。

3. 拡張シミュレーション・システムの構成

(1) 拡張緑地メッシュアルゴリズムの組み入れ
拡張フローを組み入れるには、風下緑地メッシュと同様に、図-5に示すような、一定時間増分法(time slicing)による緑地メッシュの状態の推移図を想定する。図中の番号は、緑地の状態変数番号を示す。破線で囲まれた部分が、図-2に対応する緑地メッシュの状態を表しており、放射熱を受ける風横緑地メッシュは、発火状態、立ち消え状態、非燃状態のいずれかに推移する。

これらの緑地メッシュの状態推移は、基本的には図-2の判別フローに従ってなされる。そして、延焼計算対象緑地に対する処理に風横部分を追加する。具体的には、図-6の拡張化したシミュレーション・システムの基本アルゴリズムで、風横座標(S1=4,or,8)を追加する。基本的には、従来、延焼可

W →

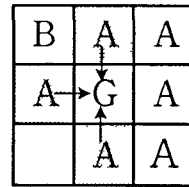


図-7 緑地メッシュの同時炎上危険

表-4 パラメータ

パラメータ	内 容
$M_t[Q,R]$	時刻tの状態値
$M_0[Q,R]$	仮状態変数
$N_0[Q,R]$	t-Δtの同時炎上奥行き
$N_t[Q,R]$	時刻tの同時炎上奥行き
$N_{max}[Q,R]$	最大可燃奥行き
$MM[Q,R]$	状態変数

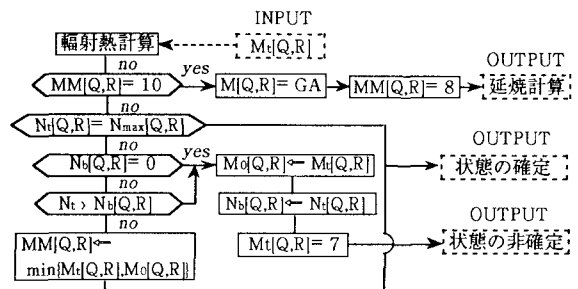
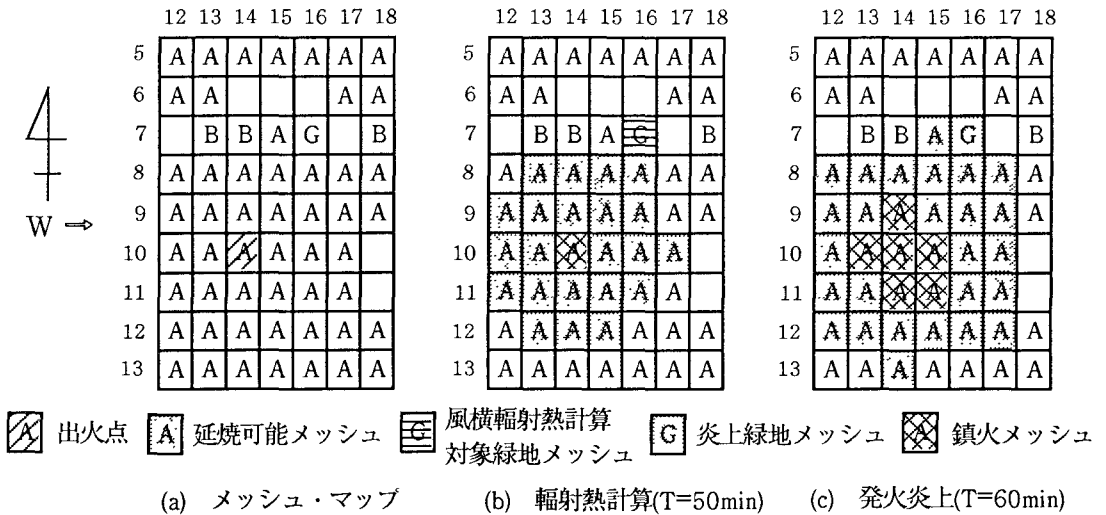


図-8 緑地メッシュの状態確定計算

能メッシュの一次近傍の風下風座標 (S1=6)のメッシュが緑地であるかどうかを判別するアルゴリズムを、風横座標(S1= 4, or, 8)に拡張し、風横対象緑地については、放射熱計算を図-4の形で行い緑地メッシュの状態を判別する。ちなみに、可燃メッシュの状態は、従来の延焼速度式を用いて0→7→6→8→9と推移する。

つぎに、同時多発火災の場合、延焼の進行あるいは出火点の関係より、図-7のように、いくつかの方向から火災が迫ることが考えられる。その結果、緑地メッシュの状態も一度の判定では定まらない。そこで、時刻tでの状態値を用いた状態の確定ルーチンが必要となる。それが、図-8である。表-4



図－9 風横緑地メッシュの発火炎上事例

に、このパラメーター一覧を示す。このルーチンが、図－6の緑地メッシュの状態計算の部分に組み込まれることになる。

(2) シミュレーションの実行と基本動作確認

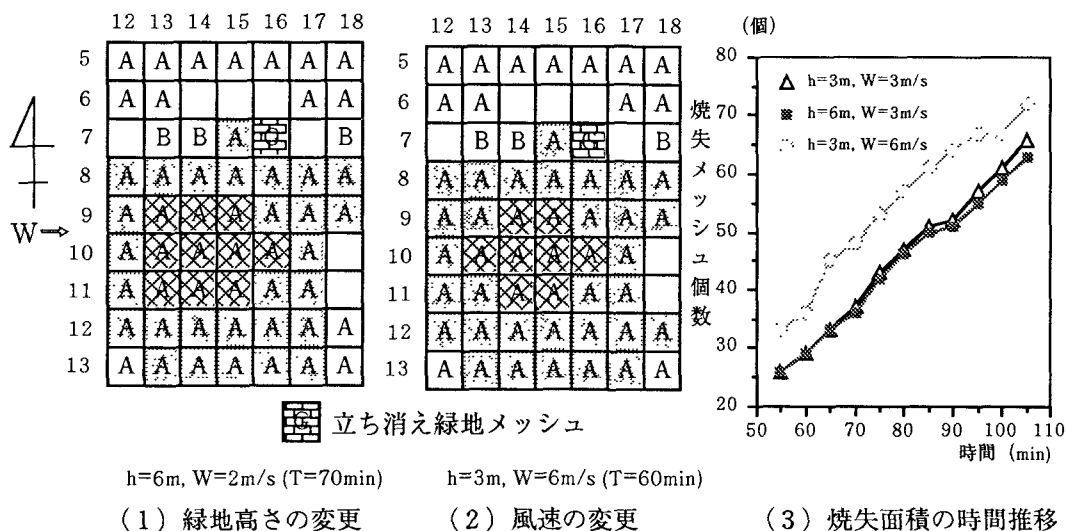
1. で述べたように従来のシステムは、延焼速度の大きい風下緑地のみを対象として、緑地メッシュの防火効果の判別を行っている。しかし、風速：Wが小さい場合、風横側でも火炎高さ：Hが大きくなり、風横の緑地が大きな輻射熱を受熱し、限界輻射受熱量以上になれば発火炎上する危険性がある。

そこで、緑地メッシュを含む仮想的なメッシュ・マップを作成し、拡張化システムの基本動作を確認するために、風横緑地メッシュの状態の推移について検討を行うことにする。紙面の制約上、図－9の(a)は、単位メッシュ長：ULを30mとした、20×20のメッシュ・マップの一部(I=12~18, J=5~13)である。図中の中央右上[I, J]=[16,7]のGが、緑地メッシュである。緑地メッシュの構成は、緑地建ぺい率40%とし、高さ3mの防火樹木を交互配列している。この緑地メッシュの風横方向からの防火効果の基本動態を確認するために、単位時間：UTを5分とし、気象条件である風向を西風、風速：Wを弱風、2m/sとしたシミュレーション実験を実施する。出火

点については、緑地メッシュ風横（南側）からの延焼拡大を想定して、出火点S[I, J]=[14,10]を与えることにする。

図－9の(b)は、時間を単位時間毎に進めた出火後50分のメッシュ・マップである。この時間に、緑地メッシュは初めて延焼可能メッシュ[I, J]=[16,8]の風横一次近傍に位置し、3. で述べた一連のアルゴリズムにより、輻射熱計算が行われている。ちなみに、この時間における緑地メッシュ後方樹木の輻射受熱量は、12,328Kcal/hm²となり、表－1の常緑広葉樹木の発火限界輻射熱量：Epより小さい。そして、同時炎上奥行き：Dもこの時間には確定していない（風横南方向に拡大している）ので、図－8の緑地メッシュの状態確定計算のフローにより、当該緑地は仮状態変数11（立ち消え状態）を持ちメッシュの状態は非確定となっている。

最後に、図－9の(c)は、さらに時間を進めた出火後60分のメッシュ・マップである。この時間には、同時炎上奥行き：Dがさらに拡大し5メッシュ(150m)となり、その結果、緑地後方樹木の輻射受熱量：Ezが13,512Kcal/hm²となり、Epを越え風横緑地メッシュは発火炎上する結果となった。発火炎上した、緑地メッシュの風下一次近傍の可燃メッシュあるいは、風下・風横緑地メッシュが類焼可能対象



図－１０ 防災緑地網構成のための基礎分析

メッシュとなる。

４．防災緑地網構成のための基礎分析

前節では、仮想的なメッシュ・マップを対象として、具体的な緑地メッシュを想定し風横緑地メッシュが発火炎上する事例を示した。本節では、具体的な防災緑地網整備計画の支援への活用として検討すべき項目を挙げ、若干の基礎的分析を試みる。

防災緑地網を構成するための検討条件としては、

- i) 緑地の構成（密集度、緑地高さ）
- ii) 気象条件（風向、風速）
- iii) 緑地、不燃建物群、オープン・スペースの組合せ

などが想定されよう。i) については、当然、緑地メッシュを構成する樹種・密度・高さなどにより、輻射熱の遮蔽効果が異なる。ii) については、風向・風速により火災の延焼状況はダイナミックに変化し、その結果、緑地メッシュと火災領域の関係も大きく変化する。iii) については、効果的な都市のブロック化を考える上で最も重要となる項目であるが、少なくとも、i) と ii) の分析が基礎となる。そこで、本節では、まず緑地網整備計画の基礎的分析として、i) と ii) のみの分析を試みる。

具体的には、前節の図－９のメッシュ・マップを対象として、緑地高さを6m、あるいは3mとした場合と、緑地高さを3mのままで、風速を2m/sと6m/sとした場合の緑地メッシュの状態の分析を行う。ここでも、紙面の制約上、緑地メッシュの状態の変化がみられた結果のみを図－１０に示す。

(1) は、図－９において、緑地建ぺい率40%の防火樹木の高さ： h を3mから6mに変更した場合のシミュレーション実験結果である。理論的には、同じ緑地建ぺい率でも、緑地高さが大きくなれば、前面の防火樹木が火炎面からの輻射熱を遮蔽し、その結果、樹木後方の輻射受熱量が小さくなり、緑地の防火効果の向上が期待できる。なお、このシミュレーション実験例では、その他の諸条件については、前節と同様に、単位時間：UTを5分とし、気象条件である風向を西風、風速： W を弱風、2m/sとし、出火点も緑地メッシュ風横からの延焼拡大を想定して、同様に出火点S[I, J]=[14, 10]を与えている。シミュレーション実験の結果、当該メッシュは、出火後50分に、風横延焼計算対象緑地メッシュとなり、(1)に示すように、出火後70分で緑地メッシュが立ち消えた。この例では、[I, J]=[16, 10]が鎮火し（鎮火状態：9）、風横緑地メッシュの同時炎上奥行きが確定（ $D=60m$ ）している。そして、このと

きの緑地後方樹木の輻射受熱量は、 $13,232\text{Kcal/hm}^2$ となっており、この値は発火限界輻射受熱量より小さく、当該緑地メッシュは、仮状態変数11（立ち消え状態）から、状態の確定（立ち消え状態）へと判定されている。ここで、風下からの延焼に着目すると、延焼可能メッシュ[I,J]=[15,7]から、緑地メッシュの後方樹木が受ける熱量は、 $6,638\text{Kcal/hm}^2$ となっており、風下側での評価も立ち消えという判定となっている。図-9の(c)と比較すると、緑地高さを3mから6mに変更することにより、前者では60分後に当該緑地が発火炎上したのに対して、後者では緑地の防火効果が認められた。

つぎに、図-10（2）は、図-9において、緑地高さ：hは3mに固定し、風速：Wを2m/sから6m/sに変更した場合のシミュレーション実験結果である。風下側では、風速が大きい場合、表-2で火災と緑地状態の関係を分類したように、状況によっては、緑地全体が炎をかぶり、発火炎上する可能性がある。これに対して、（2）のシミュレーション結果は、60分後に出火点メッシュ[I,J]=[16,10]が鎮火し、風横緑地メッシュの同時炎上奥行きが確定（D=60m）している。そして、このときの緑地後方樹木の輻射受熱量は、 $8,290\text{Kcal/hm}^2$ となっており、立ち消え状態へと判定されている。

（1）と同様に、風下からの延焼に着目すると、延焼可能メッシュ[I,J]=[15,7]から、緑地メッシュの後方樹木が受ける熱量は、 $8,965\text{Kcal/hm}^2$ となっており、風下側での評価も立ち消えという判定となっている。

最後に、図-10（3）は、それぞれのケースで焼失面積と時間の経過を示したものである。この図より、風速が大きいほど焼失面積が大きく、風速が小さく緑地高さが大きい場合は風横側の防災緑地により、若干の防災効果が認められている。

以上より、限られた分析例ではあるが、仮想的なメッシュ・マップを用いて、i)の緑地の構成である緑地高さや、ii)の気象条件である風速を変更することにより、緑地網整備計画のための基本的検討項目について考察することができた。緑地密度の構成や、風向についてもシミュレーション・システムのパラメータを容易に変更することによって、基本

的な分析が可能である。最後に、分析事例を通じて、風横緑地メッシュに対して、想定される緑地の延焼パターンに対するアルゴリズムの妥当性を示すことができた。

5. おわりに

フェーン現象時の強風下での火災や、地震時火災では、消防力は極度に低下する。しかも、同時多発火災となるために、木造市街地を抱えるわが国では、大火となる危険性がある。今般の阪神大地震の火災は、消防力の低下によって、強風時でなくても大火となる危険性を、さまざまとわれわれに示した。消防力が極度に低下し、しかも同時多発型となる火災に対しては、耐震・耐火建物、道路・河川・空地に加えて、樹木の防火力を生かした都市そのもののブロック化が最も有効なものとなる。著者らは、そのような防災緑地網整備計画構想の支援システムとして、メッシュ型の火災延焼シミュレーション・システムの開発を試みてきた。本論文では、今般の地震火災が示唆しているように、比較的風速が小さいときには、火炎が大きくなり、風横緑地への輻射延焼の危険性があることを認識し、著者らのシミュレーション・システムのアルゴリズムの拡張化とそのシステムへの組入れを試みた。

風下方向の緑地メッシュについては、火災の延焼面と緑地の樹木との位置関係、延焼面からの輻射熱と樹木の発火ないしは引火限界熱量の関係によるアルゴリズムを開発している。2.では、まず、このアルゴリズムに、風横メッシュによる風座標による探索と、焼け止まり分析に基づくこの緑地樹木への輻射熱量の算定法を組み入れることで、基本アルゴリズムの拡張化を行った。

この拡張化にともなって、緑地メッシュも、シミュレーション進行中に、複数の火炎面から輻射を受けるという状況が発生する。3.では、つぎに、この問題に対して、既開発の仮状態変数による状態確定ルーチンの拡張化を行い、シミュレーション・システムへの組入れを行った。そして、メッシュ・マップを想定し、シミュレーションを実施し、拡張システムの基本動作に問題がないことを確認した。

4. では、この拡張システムを用いて、樹木の高さと風速を変化させ、シミュレーションを実施し、本システムのより詳細な機能の確認と、防災緑地網の支援システムとしての基本的分析を試みた。そして、風横方向の緑地メッシュが、2m/sという比較的小さな風速下で炎上し、6m/sになると立ち消えとなるケースや、樹木の高さによって、立ち消えとなるケースなどを示した。土木計画学研究発表会で、加賀屋氏からもコメントを頂いたが、このシステムのアルゴリズムは、樹木の配置効果や、その一本一本の延焼を考慮するレベルのものにはなっていない。実際の、防災緑地網整備計画の支援には、そのようなレベルの情報も必要となる。そのためのマイクロなアルゴリズム化の研究が、シミュレーションの検証とともに今後の大きな課題となる。

検証ということを考えると、このご指摘には、計画情報の質とそれを補完する工夫という問題も含まれている。例えば、緑地の整備には、その維持管理のための散水システムが不可欠であろう。この散水システムの活用による緑地の耐火力を補完するといった考え方である。市街地の特性に合わせた防災緑地網の効果的な形成案の検討支援のシミュレーションに加えて、このようなマイクロな補完的手段との複合化も今後の課題と言えよう。

最後に、土木計画学研究発表会で、ご丁寧なコメントを頂いた北海道大学助教授加賀屋先生ならびにご討議いただきました皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 山形県建築士会：酒田大火災害特集，山形県建築士会，67，1978.
- 2) 福光町役場：福光大火誌，福光大火編集委員会，1978.
- 3) 都市防災計画・設計の手引ー都市防火区画とその応用ー：国土開発技術研究センター1985.
- 4) 地域防災データ総覧ー地震災害・火山災害ー，消防科学センター，1984.
- 5) 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.
- 6) 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，pp.59-86，1987.
- 7) 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に関する基礎的研究，土木計画学研究・論文集，5，pp.123-130，1987.
- 8) 木俣 昇，二神 透：防災緑地網整備計画支援のための火災延焼シミュレーション・システムの開発，土木学会論文集，IV-17，pp.193-202，1992.
- 9) 読売新聞：2月16日朝刊，1995.
- 10) 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，No.413，IV-12，pp.49-55，1990.
- 11) 日本火災学会編：火災便覧，共立出版，1984.

防災緑地網整備計画のための火災延焼シミュレーション・システムの拡張化に関する基礎的研究

二神 透, 木俣 昇

本論文では、弱風時の火災領域と防火緑地に着目し、防災緑地網整備計画を支援するためのシミュレーション・システムの拡張化を試みた。初めに、風横側の緑地防火効果をモデル化し、シミュレーション・システムに組み込むとともに、そのアルゴリズムの整合性についての検討を行った。それらの結果、風横緑地メッシュが炎上する例を提示し、アルゴリズムの論理的整合性を確認するとともに、緑地高さ、風速を取り上げ、計画支援のための基本的な特性を備えたシステムであることを示すことができた。

Development of Extended Simulation System for a Plan of Fire Prevention Buffer Green Belt

By Toru FUTAGAMI and Noboru KIMATA

In this paper, we try to extend our fire spreading simulation system for evaluation of buffer-green-zone effects in fire prevention planning. In the previous system, only the possibility of burning at the leeward green zones was considered. In the new system, the algorithm is expanded and the possibility of burning at the green zones on either side of the leeward direction is also considered. We discuss three cases of simulation and the potential of this development system.