

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

木俣 昇*・二神 透**

本論文では、オープン・スペース、高層耐火建物、緑地帯の一体的整備による都市の耐火化を目指す防災緑地網整備計画を支援するために、著者らの既開発の火災延焼シミュレーション・システムに、新たに緑地メッシュを導入し、拡張化することを試みている。そのために、樹木の防火実験と、火災の形状モデルを整理し、緑地メッシュの状態推移判定アルゴリズムを提案している。また、金沢市の実データを用いたシミュレーション実験により、本拡張システムの諸動作確認をするとともに、今後の課題を明らかにしている。

Keywords : simulation, time slicing, fire prevention planning, buffer green

1. まえがき

木造住宅嗜好が根強い我が国では、市街地火災対策は重要な課題である。その対策の一つに、防災緑地網の整備計画があげられている。これは、道路、河川、公園、耐火建物群に加え、防災緑地を一体的に整備することによって延焼遮断帯を構成し、都市全体の耐火性能を高めようとする計画である¹⁾。特に、金沢市のような歴史的町並みを残す地方中核都市においては、緑地網を整備することは景観面においても魅力ある計画である。しかし、緑地網の防火効果については、緑地の焼け止まりの調査研究^{2),3)}、樹木の延焼に関する実験的研究^{2),3)}、および部分的な防火判定モデルの研究^{1)~4)}はあるが、市街地全体の地域構造を視野にいれた基本計画の作成を支援する研究の欠如のため、パイロット的事業の段階に留まっている。本研究では、著者らが開発してきたメッシュ型の市街地火災延焼シミュレーション・システムに、防災緑地メッシュを導入し、システムを拡張することによって、この課題にアプローチすることを試みる。

既開発システムは、メッシュ型のシミュレーション・システムであり、樹木の防火効果は、新たに緑地メッシュを定義し、その延焼アルゴリズムを作成することによってシステムに組み入れられる。そのため、まず、岩河らの実験結果^{2),3)}を参考に、緑地メッシュの延焼動態のモデル化を試みている。このモデル化では、緑地メッシュは、火災地区的規模、火炎の高さ、火炎の傾き、および緑地メッシュの構成によって、発火、立ち消え、非燃のいずれかの状態に推移する。この中で、火災地区的規模は、シミュレーションで内生的に決行できる。また、メッシュの構成は、データとして与えられる。しかし、火炎

の高さと火炎の傾きについては、新たにサブ・モデルを導入する必要がある。そこで、本研究では、次に、浜田のモデル式⁸⁾、P. H. Thomas のモデル式⁹⁾、および岩河のモデル式¹⁰⁾をその候補として、それぞれの特性を比較検討している。

最後に、これらの特性を認識した上で、P. H. Thomas のモデル式を採用し、具体的に既開発システムにこの緑地メッシュを組み入れるためのアルゴリズムの開発を試みる。そして、この拡張システムを用いて、実際にシミュレーション実験を実施し、緑地メッシュの延焼動態を詳しく検討し、モデル化に際して想定した挙動との整合性を確認するとともに、防災緑地網の基本計画支援システムとしての今後の研究課題を整理する。

2. 緑地メッシュの延焼モデル

(1) 樹木の防火特性

山林火災のイメージから、樹木は燃焼しやすいと考えられがちである。しかし、山林火災は特殊な状況のもとで発生する火災であり、Hoffmann⁴⁾によれば、山林火災は湿度に大きく規定され、湿度 60% 以上のときは、燃焼も延焼もしくなく、30~40% のときに、はじめて延焼が起こると報告されている。また、山林火災の延焼過程の特徴は、下草などの地表火から、樹葉火、樹幹火の過程を経て、飛火を伴い延焼拡大するもので、多くの実山林火災では、特に燃えやすいヒノキ、マツ、雜木等がある場合に大きな被害となっていることが報告^{11),12)}されている。

一方、庭木や街路樹などの大きな樹木が、点として、あるいは線として実火災において防火効果を発揮していることが報告²⁾されている。例えば、表-1 は、関東大震災以降(10 件)の大火灾例の緑地の焼け止まりデータ²⁾であるが、鳥取火災では焼け止まり総延長の実に 50.0% が緑地関連によるものである。平均でも、31.5%

* 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)

** 正会員 学博 富山大学助手 工学部電子情報工学科

表一 緑地関連による焼け止まりデータ²⁾

大火の名称	発生年	風速(m/s)	緑地焼止まり率
関東大震火災	大正12	11.3～21.8	33.3%
静岡	昭和15	18.0～22.0	25.4
那珂湊	〃22	2.2	33.3
福井	〃23	3.0	48.1
熱海	〃25	2.2	38.5
鳥取	〃27	7.9～10.8	50.0
岩内	〃29	4.2～21.7	21.3
新潟	〃30	5.0～20.0	20.4
能代	〃31	11.5～14.5	33.7
酒田	〃51	10.0～26.4	10.5
平均			31.5

となっており非常に延焼防止効果をもっていることが分かる。

岩河^{2),3)}は、この樹木の防火効果に着目し、各種実験を行い、その防火機構を明らかにしている。それによれば、一般に防火樹木と言われている樹木には、難燃性を示す耐火力と難透熱性を示す耐火力があると報告されている。

まず難燃性について、樹木単体の防火効果として、樹木が炎に包まれた状態、一部接炎した場合、輻射熱のみを受ける場合という3つの可能な状態に分類して、以下岩河の実験結果を引用し整理する。

a) 樹木が炎の中に入った場合

昭和55年10月に、立川において実大火災実験がなされている。点火時の気象は、晴、気温23°C、湿度42%，風 北風2.7m/sec、最高時6.3m/secで、実験では、正面幅40m、奥行10mの4軒長屋で、それらの中央2軒のみ二階建、建築面積428m²の木造モルタル家屋が用いられた。

実験用の防火樹木は、高さの異なる2本のイヌツゲ(それぞれ、高さ2.5mと、3.0m、樹木の最大横幅を表す葉張は、ともに1.5m)である。この文献には、緑地の防火効果判定の際に重要なパラメータとなる、炎上家屋の炎の形状については、残念ながら記述がない。用いられた家屋は、点火後約40分間同様な延焼状態を保ったと報告されている。

炎上家屋の炎の輻射熱量は44,000kcal/m²h、室内温度の最高値は1,100°C、吹き出した炎の温度は700°Cの状態で、それぞれのイヌツゲが炎の中にはいる。このとき、ともに葉を焼き尽くすに約6分、次に枝が5分、発火後約11分で主幹を残すのみになった。しかし、如何に炎に包まれようとも、樹木全体が一気に燃えてしまうことはなかったと報告されている。

b) 樹葉が接炎した場合

実験日時、場所、実験状況は不明である。炎上建物から0.5mの位置にある、高さ4m、葉張2.5mのモッコクの例では、受熱後13分に接炎、前面1/3が一気に炎

表二 樹木耐火力データ^{2),4)}

	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	—	—	—

として立ち消えた。炎上建物は、約30分で崩壊したが、樹木後面は緑を保っていたと報告されている。樹木が接炎した場合、温度、輻射熱の限界を越えるが、第1層の葉が第2層以下の葉を熱から遮蔽することや、樹木自体の冷却、放熱などにより、立ち消えすると分析されている。

c) 樹木が輻射熱のみを受けた場合

種々の樹葉を対象とした実験によれば、樹木が輻射熱のみを受ける場合は、20,000kcal/m²h以下の熱では有炎発火ではなく、火の粉などの口火がある場合は、5,000kcal/m²hまでの輻射受熱量に対しては耐火力があると報告されている。表二に樹木の耐火力である発火限界値および引火限界値、および、木材と比較するために木材の耐火力を示す。この表より、樹木は木材に対して卓越した耐火力を持つこと、また針葉樹と常緑広葉樹では、発火限界値に1,400kcal/m²hもの差があり、防災緑地としては、常緑広葉樹の活用が望ましいと言えよう。

次に、樹木の持つ難透熱性について整理する。建築研究所実大火災実験棟内の輻射炉を用いて、樹木の輻射熱遮蔽効果実験がなされている。

用いられた防火樹木は、高さ1.2m、葉張0.3mのカイズカイブキである。これを、輻射炉(1,400kcal/m²h)の前面50cmが前面樹木とし、まず樹木の隙間については、①樹木間の隙間なし、②葉張の1/2の隙間有り、③葉張分の隙間有り、次に配種として、①正列配置、②交互配置、列数として、①1列、②2列、③3列の各パターンを組み合わせた輻射熱遮蔽率が測定されている。その結果^{2),3)}が、表三である。

この表より、樹木の配置方法は、交互配置が有効であること、たとえ正列配置であっても、樹木の奥行きがある程度大きければ、遮蔽効果が高いこと、樹木の密度が大きいほどその効果が高いことが分かる。

(2) 防火緑地の延焼モデル化

以上(1)に述べた、3つの樹木難燃性実験の結果を整理すると、樹木が炎上する条件は、火炎に包まれるか、許容以上の輻射熱を受ける場合に限られ、それ以外の場合は、立ち消えか、全く燃えないと想定できる。これらの判定は、火災の規模、火炎の高さ、火炎の傾き、および樹木側の条件によって異なる。岩河は、樹木の防火効

表-3 樹木の輻射熱遮蔽効果^{2),3)}

隙間	配植	1列	2列	3列
無し	正列	73.0%	89.2%	94.6%
	交互		94.6	94.6
葉張 1/2	正列	48.7	67.6	78.4
	交互		86.5	94.6
葉張	正列	24.3	40.6	48.7
	交互		56.8	91.9

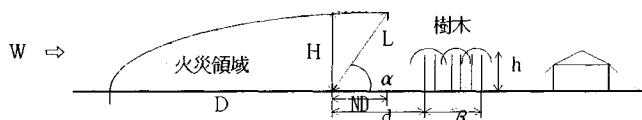


図-1 防災緑地のモデル化

果を判定するのに、遮蔽効果に着目し、同時炎上奥行きの最大を 50 m として、樹木の後方にある可燃建物の延焼可能性を輻射熱計算に基づいて行うアルゴリズムを提案している^{2),4)}。本論文では、1. の目的で述べたように、十分に奥行きがあり遮蔽効果のある緑地メッシュを想定している。それゆえ、後方メッシュの延焼は、緑地メッシュの炎上によってのみ発生するとし、その判定のアルゴリズム化を、(1) の分析に基づいて、図-1 のようにモデル化する。

すなわち、防災緑地を平均高さ h (m) の防火樹木が奥行き β (m) で、3 列以上交互配置された地帯と定義する(幅についてはシミュレーション・モデル化のときに述べる)。そして、風速 $W(m/sec)$ で、同時炎上奥行き $D(m)$ 、火炎の高さ $H(m)$ 、火炎の長さ $L(m)$ 、火炎の傾き α の火炎が、その前面 $ND(m)$ に位置している状況を考える。

このモデル図を適用すれば、防災緑地の延焼判定は、図-2 の 5 ケースに分けられる。

ケース 1 は、火炎の高さが樹木の高さより低く、しかも火炎の前面距離 ($ND=H/\tan\alpha$) が、樹木の前面位置 $d(m)$ より小さく、前面樹木から離れている場合である。この場合には、前面樹木への輻射熱計算: $E_1(kcal/m^2h)$ を実施し、それが耐火受熱量以下ならば非燃とする。それ以上でも、(1) の c) の樹木の防火特性データより立ち消えとする。

ケース 2 は、火炎の高さは樹木高さより低いが、火炎の前面距離が d より大きく、接炎している場合である。このときにも、(1) の b) のデータより立ち消えとする。

ケース 3, 4, 5 は、火炎の高さが樹木高さより高い場合である。ケース 3 では、前方樹木、後方樹木への輻射

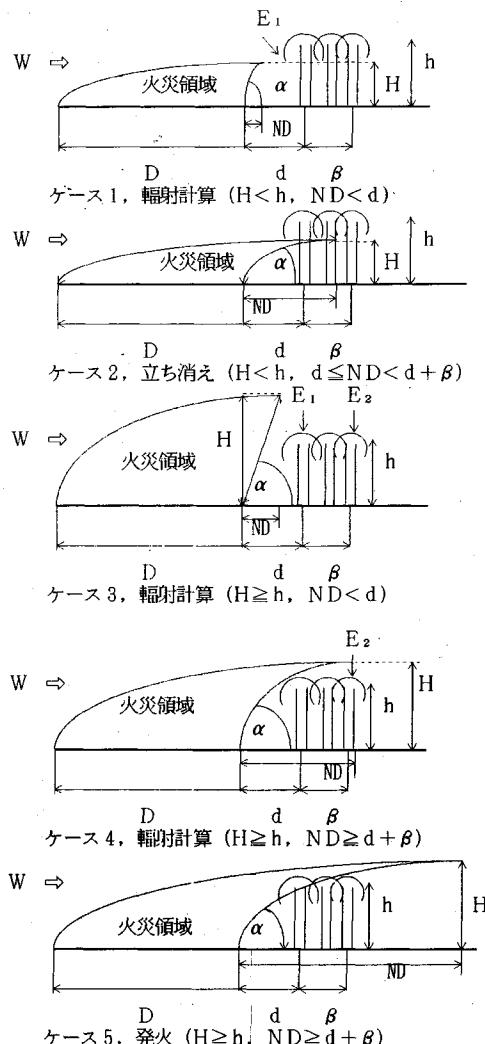


図-2 火災と緑地の関係図

熱計算: E_1 , $E_2(kcal/m^2h)$ を実施し、耐火受熱量の関係で、発火、立ち消え、非燃の判断をする。ケース 4 は、後方樹木についてのみ輻射熱計算を実施し、同様の判断をする。ケース 5 では、樹木が炎につつまれており、(1) の a) のデータより発火とする。

以上をまとめたのが、図-3 のフローである。記号の説明は、表-4 に示す。なお、緑地前方の樹木は火炎に近いため多くの有炎口火を受けるとして、表-2 の常緑広葉樹の、有炎口火がある引火受熱量: $E_0(kcal/m^2h)$ を、一方、緑地後方では、発火受熱量: $E_p(kcal/m^2h)$ を判定値として採用する。

(3) サブ・モデルの検討

上述したように、緑地の防火効果の算定に関しては、火炎高さ H 、火炎の前面距離 ND が大きな規定要因である。 ND は、 $ND=H/\tan\alpha$ で決定される。また、 α は、

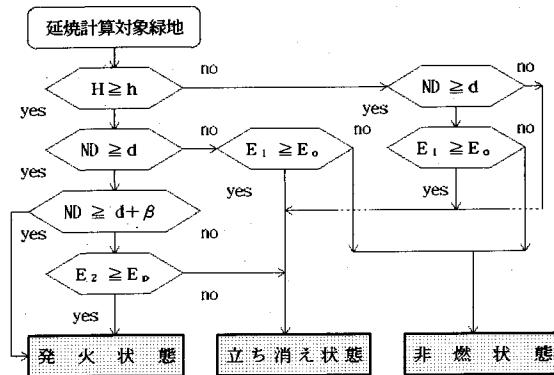


図-3 緑地防火効果の判別フロー

$\sin\alpha = H/L$ で求まる。従って、図-1の、 H 、 L 、 α 内の二つが推定できるモデルが必要となる。これらの推定には、浜田の式⁸⁾、P. H. Thomas の式⁹⁾、および岩河の式¹⁰⁾が利用できる。

浜田のモデルは一軒の建物の炎上実験に基づく実験式であり、火炎の傾きを直接与えるもので、式(1)となっている。

$$\alpha_1 = \tan^{-1}(4 \cdot D/W^2) \quad (1)$$

ここで、 D : 同時炎上奥行き (m)、 W : 風速 (m/sec)

次に、P. H. Thomas のモデルは、クリップを延焼した実験に基づく実験式であり、火炎の高さ、火炎の長さを与えるもので、式(2)、(3)となっている。

$$H_2 = 56 \cdot D(mf^2/\rho W)(W^2/gD)^{0.13} \quad (2)$$

$$L_2 = 70 \cdot D(mf/g\rho^2 D)^{0.43}(W^2/gD)^{-0.11} \quad (3)$$

ここで、 g : 重力加速度、 ρ : 気体密度、 mf : 重量燃焼速度である。

岩河のモデルでは、火炎の高さと火炎の傾きを与えるもので、市街地特性を考慮した、式(4)、(5)となっている。また、同時炎上奥行きと同時延焼奥行きを区別するところに特徴がある。

$$H_3 = 4.7\beta(D^3/W)^{0.2} \quad (4)$$

$$\alpha_3 = \sin^{-1}(2/W)^{0.2} \quad (5)$$

$$\text{ここで, } \beta = 0.0133(D_0 - 10) \cdot (\psi - 0.1) + 3.981/D^{0.6}$$

$$\psi = (1 - 0.6 C) \cdot r$$

$$D = \min(D_0, 50, 1.179\psi^3 + 10)$$

β : 発熱速度の比率係数

ψ : 市街地係数

C : 全建築面積に対する耐火造建築面積比率

r : 全建物建ぺい率

これらのモデルを用いて、火炎の高さ H 、火炎の傾き α 、火炎の前面距離 ND を算定し、比較する。ここで、浜田の式の場合は、火炎の傾きは式(1)で算定し、高さは、P. H. Thomas の L_2 を用いて

表-4 パラメーター一覧

パラメータ	内 容
H	火炎高さ (m)
h	樹木高さ (m)
ND	火炎の前面位置 (m)
d	樹木前面距離 (m)
β	樹木奥行き (m)
E_1	樹木前面受熱量 (Kcal/m ² h)
E_2	樹木後方受熱量 (Kcal/m ² h)
E_o	引火受熱量 (Kcal/m ² h)
E_p	発火受熱量 (Kcal/m ² h)

$$H_1 = L_2 \cdot \sin(\alpha_1) \quad (6)$$

で求まる。また、P. H. Thomas の式の場合は、 H_2 、 L_2 を式(2)、(3)で算定し、火炎の傾き α_2 は、

$$\alpha_2 = \sin^{-1}(H_2/L_2)$$

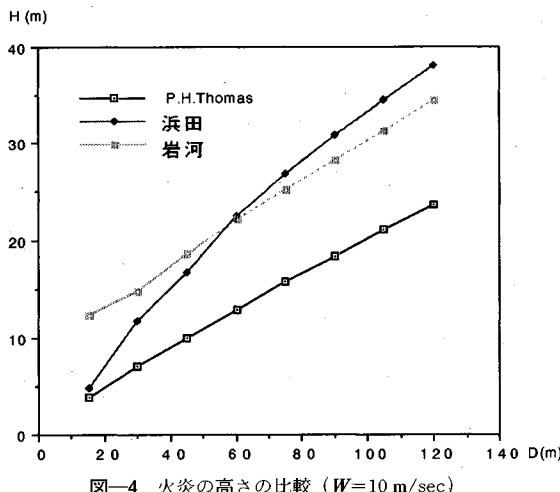
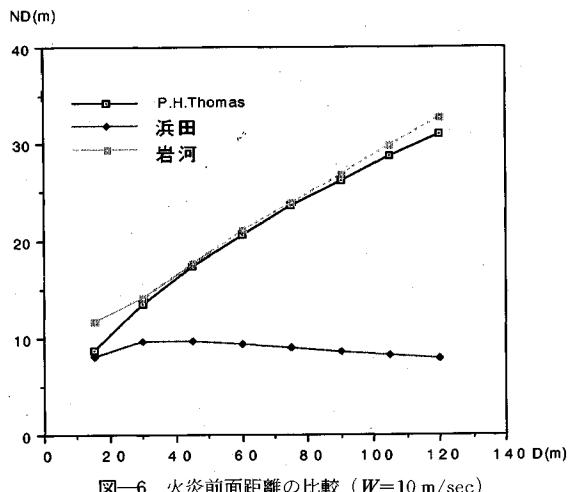
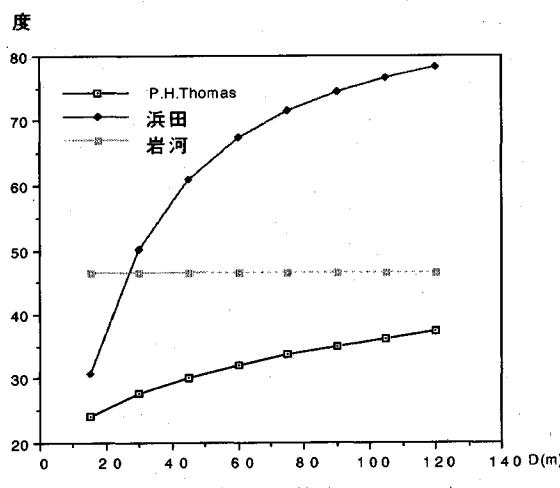
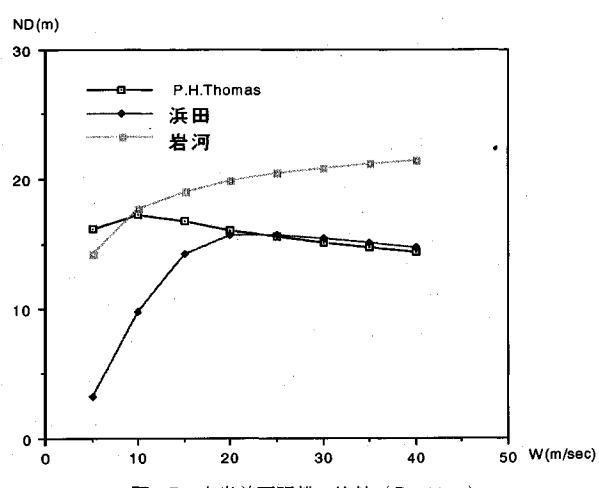
で求める。

式(2)、(3)、(4)の算定に際しての諸パラメータは、火災便覧を参考に平均建物階数による補正建ぺい率 F は 1.7 階、重量燃焼速度 mf は $(160 \text{ g/cm}^2 \text{ sec})^{1/3}$ ¹³⁾ とし、建ぺい率については、一応 60% と想定した。市街地係数 ψ については、純木造市街地を想定 ($C=0$) し、 $\psi=r$ として与えることにした。

著者らは、避難場所における火災によるリスク評価の研究^{14), 15)}において、輻射熱算定システムの要因分析を実施しているが、その結果によれば、火炎の奥行きが、最も重要な要因であり、次に風速が第二の規定要因であった。火炎の奥行きは、火炎の進行とともにダイナミックに変化する要因でもある。そこで、同時炎上奥行き D と風速 W をパラメータとして、上記モデルの比較・算定を行う。

図-4, 5, 6 は、風速を 10 m/sec として、同時炎上奥行きを変化させたときの各モデルによる火炎の高さ H 、火炎の傾き α 、火炎の前面距離 ND の算定結果である。ここで、岩河のモデルでは、前述したように、同時炎上奥行きと同時延焼奥行きの概念が区別され、最大値は 50 m とされているので、グラフでそれ以上の所については破線で示している。

まず、火炎の高さについては、 $D \leq 50$ m では、岩河のモデルが最も高くなる。50 m 前後では、岩河のモデルと浜田のモデルとほぼ等しい。P. H. Thomas のモデルは、常に低い値を示し、50 m 前後では他より 8 m ばかり低くなることが分かる。次に、火炎の傾きについては、岩河のモデルには D がパラメータとして含まれておらず、一定となる。浜田のモデルも、P. H. Thomas のモデルも D が大きくなるとともに増大し、火炎が立ってくる。特に浜田のモデルではこの傾向が顕著である。50 m 前後では、P. H. Thomas のモデルでは 30 度と最も傾き、浜田のモデルでは 60 度と最も立ち、岩河のモ

図-4 火炎の高さの比較 ($W=10 \text{ m/sec}$)図-6 火炎前面距離の比較 ($W=10 \text{ m/sec}$)図-5 火炎の傾きの比較 ($W=10 \text{ m/sec}$)図-7 火炎前面距離の比較 ($D=30 \text{ m}$)

モデルではその中間の傾きとなる。最後に、火炎の前面距離については、P. H. Thomas のモデルと岩河のモデルは、ほぼ同じ特性を示す。それに対して、浜田のモデルは三つの中で最も小さく、50 m 前後で最も前進するがそれ以後は逆に後退する。これは、火炎の傾きの図から分かるように、火炎が垂直に立ってくるためである。

同時炎上奥行きを 30 m として、風速を変化させた場合についても同様の検討を行った。紙面の制約のため、火炎の前面距離の結果のみを図-7 に示す。風速が 5~15 m/sec の範囲では、P. H. Thomas のモデルと岩河のモデルとでは大きな差はない。しかし、ここでも浜田のモデルは三つの中で最も小さな値となっている。

以上の分析より、まず、浜田のモデルを使用すれば、火炎の前面距離が小さく、あまり延焼しないモデルとなることが予想される。P. H. Thomas のモデルと岩河のモデルは前面距離に関してはほぼ同じ特性を示す。火炎の高さに関しては、岩河のモデルのほうが大きな値を示

す。従って、岩河のモデルのほうが燃えやすいモデルとなる。一方、このモデルには、火炎の傾き算定に同時に炎上奥行きが含まれていない。緑地メッシュのより一般的なアルゴリズム化を考え、次節では、P. H. Thomas のモデルによる火炎高さ H と、火炎の前面距離 ND の算定方法を採用して、具体的なアルゴリズムの開発と、その実シミュレーション結果について説明する。

3. 火災延焼シミュレーション・モデルの構成

(1) 緑地メッシュの導入

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、市街地を、可燃メッシュ、耐火造メッシュ、河川、道路、オープン・スペース等の空地メッシュの三属性に分類し、浜田らの延焼速度式を用いて、一定時間増分法 (time slicing) でアルゴリズムを構成し、一定時間 (Δt) 毎に、火災の延焼拡大状況をシミュレートするシステムであった。このシステムに、図-8 に示

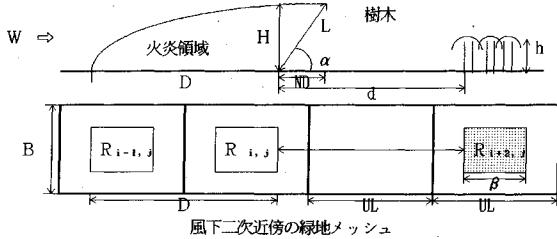
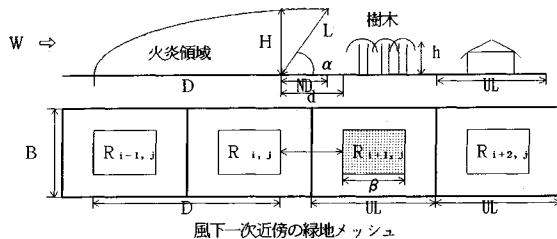
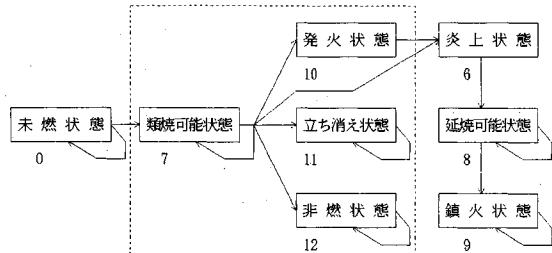


図-8 防災緑地のメッシュ・モデル化

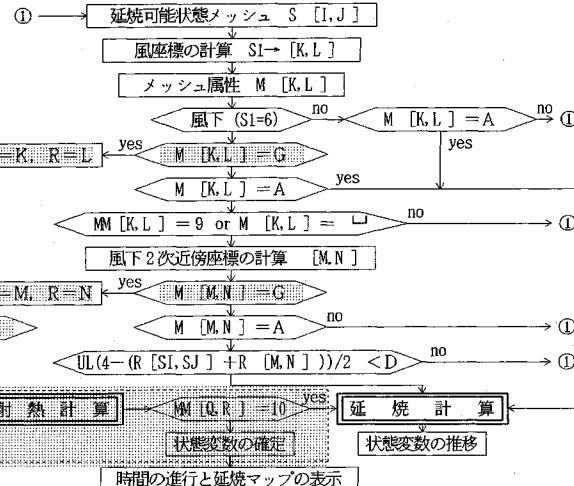


注) 数字は状態変数番号を示す。

図-9 緑地メッシュの状態推移図

表-5 パラメータ一覧

パラメータ	内 容
D	延焼限界距離 (m)
N	同時炎上奥行き (個)
N _{max}	最大可燃奥行き (個)



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

図-10 緑地を組み入れたシミュレーションの基本アルゴリズム

すのような防災緑地メッシュの区分を設け、図-3に示した判定フローで防災緑地メッシュについてもシミュレートできるシステムに拡張化することを考える。

まず、既開発システムとの対応で、緑地メッシュについても、図-9に示すような一定時間増分法による状態推移図を想定する。この状態推移は、具体的には図-3の判定フローに従ってなされる。図-10は、既開発のシステムにこの緑地メッシュの推移を組み入れたシミュレーションの基本アルゴリズムである。網掛けされた部分が、緑地メッシュ導入に伴う変更点である。

延焼計算対象緑地メッシュが延焼可能メッシュの風下一次近傍ないしは空地をはさむ二次近傍に入ると(図-8参照)，輻射熱計算を伴う状態確定アルゴリズムに入

ることを示している。次項では、このアルゴリズムについて説明する。

(2) 緑地メッシュの延焼アルゴリズムの組入れ

緑地メッシュの受熱量は、火災領域の大きさ、具体的には同時炎上奥行き D によって変化する。そして、 D は時間とともに変化する。従って、この変化を考慮に入れた状態推移アルゴリズムが必要となる。それが図-11である。

ここでは、当該緑地メッシュに対する最大可燃奥行き N_{max} 、当時間の同時炎上奥行き N_t 、($t - \Delta t$) 時の同時炎上奥行き N_b を用いて判定している。例えば、最大可燃奥行き N_{max} 、同時炎上奥行き N_t が一致していれば、同時炎上奥行きは、これ以上拡大せず、従って緑地メ

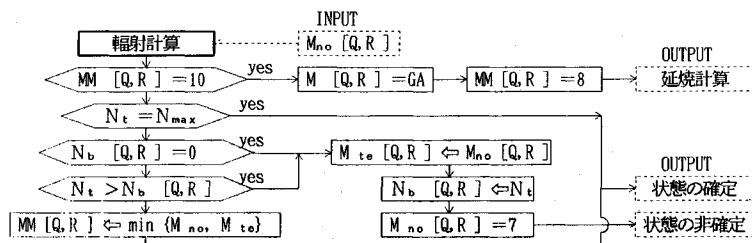


図-11 緑地メッシュの状態確定のアルゴリズム

表-6 パラメータ一覧

パラメータ	内 容
$M_{no} [Q,R]$	時刻 t の状態値
$M_{te} [Q,R]$	仮状態変数
$N_b [Q,R]$	$t - \Delta t$ の同時炎上奥行き
$N_t [Q,R]$	時刻 t の同時炎上奥行き

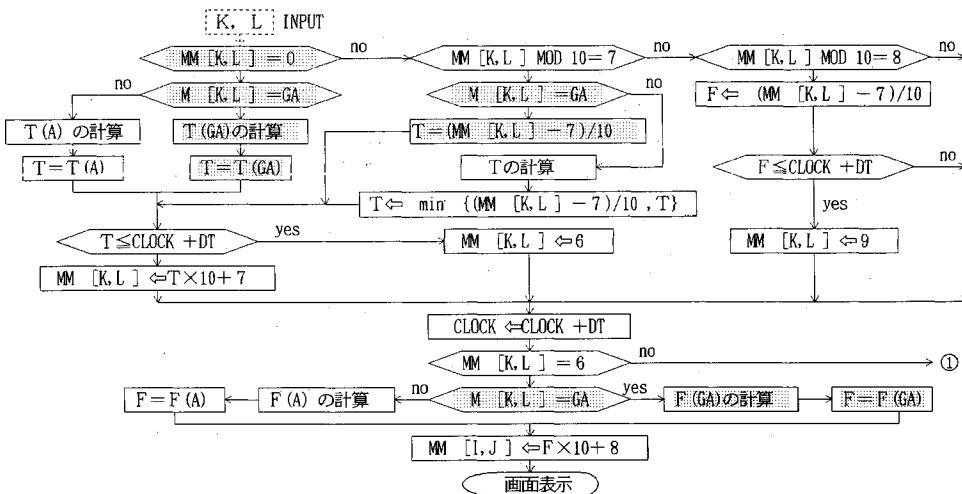


図-12 拡張延焼計算のアルゴリズム

シユの状態は確定する。あるいは、現時刻の同時炎上奥行き N_t が、 $(t - \Delta t)$ 時の同時炎上奥行き N_b より小さい場合も、緑地メッシュは、 $(t - \Delta t)$ 時の状態か現在の状態で確定する。

これに対して、時刻 t の同時炎上奥行き N_t が、 $(t - \Delta t)$ 時の同時炎上奥行き N_b より増加していれば、現時刻では状態は確定できない。そこで仮状態変数 M_{te} という概念を新たに導入して、現在の状態値 M_{no} を入れるようにしている。

このアルゴリズムによって、炎上と判定された緑地メッシュは、図-10に示してあるように、次に、延焼計算アルゴリズムで処理される。ここで、可燃メッシュのそれと区別するために、メッシュの属性を G から GA に変更している。図-12に、緑地メッシュの炎上に伴う延焼計算のアルゴリズムの変更点を示している。

ここでも、網掛け部分がそれである。すなわち、 $M = GA$ とされたメッシュについて、類焼時刻 $T(GA)$ 、鎮火時刻 $F(GA)$ を可燃メッシュのそれとは別の速度式で計算するアルゴリズムとして行っている。現段階では、緑地に関するこれらのデータが見当たらないので、緑地メッシュが発火状態と判定された後に、時間を Δt 進めて緑地の状態を炎上状態に推移し、延焼速度にタイムラ

表-7 パラメータ一覧

パラメータ	内 容
$T(A)$	可燃メッシュ類焼時刻 (min)
$T(GA)$	緑地メッシュ類焼時刻 (min)
$F(A)$	可燃メッシュ鎮火時刻 (min)
$F(GA)$	緑地メッシュ鎮火時刻 (min)

グ的な抵抗を入れるだけにしている。しかし、システム的には、これらが入手できれば、可燃メッシュと緑地メッシュを識別して延焼計算、鎮火計算が行えるようなアルゴリズムとなっている。

(3) シミュレーション事例による考察

本システムは、緑地メッシュが、発火状態、立ち消え状態、非燃状態の3つの状態に推移するとして、モデル化を行っている。それらの判定方法およびアルゴリズムは、上述したとおりである。ここでは、さまざまな緑地の配置を想定し、拡張化されたシステムの理論的動作確認について検討する。

まず、金沢市寺町地区を対象地域として選定した。この地域は、江戸時代に形成された古い町並みを残し、地名のとおり寺院が密集しており、それらの境内には古くからの樹木が存在する緑豊かな地域である。一方、この

40	A		A	A	A	A	A	A	G		G	A	A	A	A	A
39		A	A		A	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A
38	G	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	A	A	A	A	G
37	B	A	G	A	A	A	A	A	A	A	B	G	A	A	A	A
36	A	G	G	A	G	A	A	A	A	A	G	A	A	A	A	A
35	A	G	G	A	A	A	A	G	A	A	A	A	A	A	A	A
34	A	G	A	B	A	A	G	A	A	A	A	A	A	A	A	A
33	A	G			A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
32	A	A	A		A	A	G	A	A	G	A	A	A	A	G	A
31	G	G	A		G	A	A	A	G	A	B	A	A	A	A	A
30	B	G	A		A	G	G	A	A	A	G	G	A	A	A	A
29	G	G	G	G	A	A	A	A	G	A	A	G	A	A	A	A
28	G	G	G	G	G	A	A	G	G	A	A	A	A	A	A	G
27	A	A	A	A	A	A	G	A	A	A	G	G	A	A	A	A
26		G	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
25	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	G	B	A	G	A	G

図-13 シミュレーションの実施事例（出火後 50 分）

40	A		A	A	A	A	A	A	G		G	A	A	A	A	A
39		A	A		A	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A
38	G	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	A	A	A	G	
37	B	A	G	A	A	A	A	A	A	A	B	G	A	A	A	A
36	A	G	G	A	G	A	A	A	A	A	G	A	A	A	A	A
35	A	G	G	G	G	A	A	G	G	A	A	A	A	A	A	A
34	A	G	G	G	G	A	A	G	G	A	A	A	A	A	A	G
33	A	G	A	B	A	A	G	A	A	A	A	A	A	A	A	A
32	A	A	A		A	A	A	G	A	G	A	A	A	A	A	A
31	G	G	A		G	A	A	A	G	A	B	A	A	A	A	A
30	B	G	A		A	G	G	A	A	G	A	A	A	A	A	A
29	G	G	G	G	A	A	A	G	A	A	G	A	A	A	A	A
28	G	G	G	G	G	A	A	G	G	A	A	A	A	A	A	G
27	A	A	A	A	A	A	G	A	A	A	G	G	A	A	A	A
26		G	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
25	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	G	B	A	G	A	G

図-14 シミュレーションの実施事例（出火後 60 分）

[A] 可燃メッシュ	[A] 炎上メッシュ	[G] 発火メッシュ
[B] 耐火造メッシュ	[B] 鎮火メッシュ	[■] 立ち消えメッシュ
[L] 空地メッシュ		[C] 非燃メッシュ
[G] 緑地メッシュ		[■] 鎕火メッシュ
マップの初期状態	可燃メッシュ	緑地メッシュ

図-15 メッシュ延焼状態の凡例

地域は木造家屋密集地帯であり、本システムの基本特性を分析するにあたり好都合な条件を備えている。そこで、著者らはこの地域を対象として、上記アルゴリズム確認のためのシミュレーションを実施した。

まず、この対象地域を中心としたカラー航空写真に、単位メッシュ長 25 m (40×40, 1 km 四方) の正方形メッシュを掛け、各メッシュの建ぺい率、防火木造混成比、耐火建物混成比、防火樹木混成比の都市構造データを採取し、メッシュ・マップを作成した。緑地メッシュの判定は、小林の方法¹⁶⁾を参考に、可燃メッシュと同じく 25% の占有率とした。

次に、シミュレーションの実行時のパラメータの設定

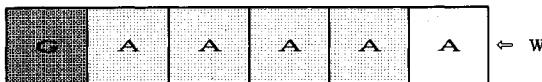
について説明する。まず、単位メッシュ長 $UL : 25$ (m)、単位時間 $DT : 5$ (min)、風向については、緑地を抱える寺院群側から大通りへの防火効果を見るために西風、風速は、北陸地方でしばしば観測される 10.0 m/sec を想定した。出火点は、[6, 33]と中央よりやや右よりとし、シミュレーション時間は 60 分に設定した。

図-13, 14 は、出火後 50 分と 60 分の延焼マップである。この図は、画面左下を原点座標とする 40×40 の地域の一部である。中央右側の連続的空地部分は大通りで、その左側に緑地と空地を多く持つ寺院群がある。風は、このメッシュ・マップでいえば、左から右に吹いていることになる。また、メッシュの属性および、メッシュの延焼状態の凡例を、図-15 に示している。

図-13 より、出火後 50 分には出火点[6, 33]近傍の可燃メッシュは、すでに鎮火し、延焼面は、大通りに達していることが分かる。この間に立ち消えた緑地メッシュは、[7, 32], [7, 34], [10, 32]の三つである。いずれの緑地メッシュも、同時に炎上舆情が確定し、火炎高さより緑地高さが大きいため状態が確定している。炎上した緑地メッシュは、[9, 35], [9, 31], [11, 35]

1) 20分後炎上

緑地 出火点



火炎高さ 11.0 m

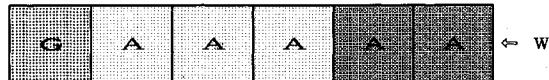
樹木高さ 9.0 m

炎前面距離 6.12 m

緑地後方輻射受熱量 13,527 Kcal/m²·h 同時炎上奥行き 4個(100m)

2) 25分後立ち消え

緑地 鎮火 出火点



火炎高さ 10.5 m

樹木高さ 9.0 m

炎前面距離 6.02 m

緑地後方輻射受熱量 11,375 Kcal/m²·h 同時炎上奥行き 3個(75m)

図-16 出火点のパターンに伴う緑地の防火効果事例

[8, 33]の4つであり、緑地メッシュ[8, 33]は、すでに鎮火状態に推移している。このケースでは、いずれの緑地メッシュも、火炎の前面距離が緑地の奥行きより大きくなり炎上状態に推移している。一方、緑地メッシュ[11, 33]は、この時間に延焼計算の対象に入り、類焼可能状態となり、状態は確定していない。

図-14の、出火後60分では、緑地メッシュ[11, 33]の風上[9, 33]の可燃メッシュが鎮火して、立ち消え状態に推移した。また、大通り右側の緑地メッシュ[13, 36], [13, 30], [13, 29]は、空地を挟む風下二次近傍の輻射計算の結果、立ち消え状態に推移している。

このシミュレーションでは、発火炎上した緑地は4メッシュ、立ち消えた緑地は4メッシュ、非燃は3メッシュとなっている。このように、本シミュレーション事例では、同時炎上奥行きが時間とともにダイナミックに変化し、アルゴリズムに従った緑地メッシュの状態の推移を確認することができた。

最後に、出火点のパターンと緑地の位置関係による防火効果の影響についての実験を試みる。

図-16は、緑地メッシュに対して、その風上に5つの可燃メッシュが存在する場合について、出火点の位置を変えてシミュレーションを実施した結果の直接関係する部分のみを示したものである。この対象とする緑地の構成は、緑地建ぺい率70%、樹木高さ9.0mである。

まず、1)のケースは、左端にある緑地と接するメッシュを出火点にいた場合で、時間の進行とともに同時炎上奥行きが後方に拡大し、20分後にそれが4メッシュとなつたとき、火炎の高さ11.0mと樹木高さより大きく、緑地メッシュ後方樹木の輻射受熱量が、発火限界値を超える13,527 kcal/m²·hとなり、発火・炎上した。

一方、2)のケースは、緑地より5つ前のメッシュを出火点としたもので、25分後に炎上メッシュはともに鎮火して、同時炎上奥行きが確定し、火炎の高さが10.5mとこのケースでも火炎の高さは樹木高さより大きいが、このときの緑地後方樹木の輻射受熱量は、11,375 kcal/m²·hと限界値以下となり、こちらは立ち消えとなった。ただし、鎮火は文献17)の式によって判定している。

これらの結果より、構成したアルゴリズムに従った緑地の状態の推移を確認するとともに、同じ構成の緑地帯でも出火点の位置などに伴う延焼形態の相違により、異なる結果となることをうまくシミュレートしていることが分かった。このことは、モデルの構成上、十分に予想される結果であるが、さらにシミュレーションケースを増すことによって、本シミュレーションのアルゴリズムの妥当性を検討する十分な例となろう。

4. あとがき

本論文では、オープン・スペース、高層の耐火建物、および緑地帯を体系的に配置・整備し、都市の耐火性を向上させようとする防災緑地整備計画の支援のために、既開発の火災延焼シミュレーション・システムに、緑地の防火効果を組み入れた拡張システムの開発を試みた。まず、樹木の防火特性に関する実験データを整理し、防災緑地の発火、立ち消え、非燃の判定を、風向、風速、火災地区の同時炎上奥行き、火炎の高さ、火炎の傾き、および防火樹木の限界受熱量を用いてモデル化した。そして、この判定に必要となる火炎の高さ、火炎の傾きの算定法として、浜田の式、P.H. Thomasの式、および岩河の式を比較・検討し、浜田のモデルを使用すれば、火炎の前面距離が小さく、あまり延焼しないモデルとなることが予想されること、P.H. Thomasのモデルと岩河のモデルは前面距離に関してはほぼ同じ特性を示すこと、また、火炎の高さに関しては、岩河のモデルの方が大きな値を示すことなどが明らかになった。次に、それらの特性の認識の上で緑地メッシュのより一般的なアルゴリズム化を考え、P.H. Thomasの式を採用し、このモデルを既開発のシステムに組み入れたアルゴリズムを開発した。既開発のシステムでは、可燃メッシュ間の延焼であり、メッシュ状態の推移は、延焼速度計算式による純粋な一定時間増分法のアルゴリズムで表現できた。しかし、緑地メッシュの状態推移には、火炎の高さ、火炎の傾き、輻射受熱といったダイナミックに変化する値が関与する。そこで、既開発のシステムのアルゴリズムとの整合性をとるために、緑地メッシュについても状態推移図によるモデル化を行い、状態判定計算と状態確定

のためのアルゴリズムを構成した。

最後に、本拡張システムの確認計算をメッシュ長25mの40×40のマップを用いて実施した。そして、その動作特性を確認するとともに、緑地メッシュの種々の状態下での状態推移を、実シミュレーションで具体的に現出し、その論理的妥当性を分析的に示すことができた。

しかし、今後の課題も多くある。このシミュレーションでは、①可燃—可燃、②可燃—緑地、③緑地—可燃、④緑地—緑地、の4つのパターンの延焼が考えられる。本システムでは、①と②については、データをもとに、前者は延焼速度式で、後者はここで開発したモデルで、一応、アルゴリズム的に対応している。しかし、③と④については、アルゴリズムに表現はされているが、データを欠き、実質的には機能していない。この部分の充実がまず必要であろう。つぎに、火炎の高さ、火炎の傾きについても、実火災とのより詳細な検討が必要である。また、ここでは、火炎が定常的に傾いているとしているが、実火災ではゆらめきがある。これを、アルゴリズムに反映することも、今後の課題であろう。

さらに、実火災との検証の問題が残されている。本論文で取り上げた3つのモデルについて、火炎の高さ、熱気流など、実火災データや、実験データより、総合的なモデルの検証が望まれる。特に、岩河のモデルでは、同時に炎上奥行きと、同時に延焼奥行きを区別しており、この点についても、アルゴリズム化し検討したいと考えている。

最後に、著者らはシステム研究を専門にしており、火災については文献等いわゆる二次的データしか有していない。この分野の専門家諸兄から御教示を是非お願いしたい。

- 国土開発技術研究センター、1985.
- 2) 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.
- 3) 岩河信文：樹木の防災効果について、公園緑地、38-2, pp. 32~40, 1977.
- 4) 日本火災学会編：火災便覧、共立出版、pp. 420~421, 1984.
- 5) 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, pp. 125~132, 1985.
- 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：シミュレーションによる防災緑地網整備計画の支援システムに関する研究、土木情報システムシンポジウム講演集〔査読論文〕、15, pp. 175~182, 1990.
- 8) 同上4), p. 150.
- 9) 同上4), p. 152.
- 10) 同上2), p. 171.
- 11) 岡上正夫・井上 桂：森林火災の研究（第1報）焼止り線の研究、日本火災学会論文集、4-2, pp. 52~54, 1955.
- 12) 井上 桂・岡上正夫：森林火災の研究—第2報—北海道の森林火災の予防（其の2）、日本火災学会論文集、5-1, pp. 23~24, p. 8, 1955.
- 13) 同上4), p. 360.
- 14) 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.
- 15) 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、金大工学部紀要、19-2, pp. 52~62, 1986.
- 16) 小林正美：シミュレーションモデルによる都市防災化の研究、都市計画、別冊—9, pp. 97~102, 1974.
- 17) 同上4), p. 359.

(1991.9.18受付)

参考文献

- 1) 都市防災計画・設計の手引—都市防火区画とその応用—,

EXPANSION OF THE FIRE SPREADING SIMULATION SYSTEM FOR FIRE PREVENTION BUFFER GREEN BELT PLAN

Noboru KIMATA and Toru FUTAGAMI

We have developed a simulation system of fire spreading in urban area. In this paper, we try to expand the system to evaluate effects of buffer green zone for fire prevention plan. First, we propose a model which determines the burning state of buffer green zone based on several experimental data of fire resistance of trees. In this model, three states, fired, half-burnt, and unfired, are identified using the scale of conflagration, the wind velocity, the height and the angle of flare, and the exposure limits of heating of trees. Second, we discuss three models for calculation of the height and the angle of flare and select P.H. Thomas' formula as suitable for our system. Lastly, we develop a time-slicing algorithm of this model and embed it into the fire spreading simulation system mentioned above, and demonstrate effects of buffer green zone in Kanazawa city applying the expanded system.