

確率的火災拡大モデルを用いた延焼遮断効果に関する一考察

202502600 慶應義塾大学 廣井 悠 HIROI U
01107680 慶應義塾大学 栗田 治 KURITA Osamu

1. はじめに

近年、わが国において都市大火といえる大規模な市街地の延焼は1976年の酒田大火を最後に発生していない。しかし、9年前に発生した兵庫県南部地震の出火率や延焼面積を考慮すると、我々が住み暮らす都市はまだ大火の危険性を孕んでいると言えよう。

市街地を大規模火災から守るための有効な防災対策のひとつとして、延焼遮断帯の整備が考えられている。延焼遮断帯とは広幅員道路等によって火災の拡大を抑制しようという意図から生み出されたものであり、延焼を完全にシャットダウンするには最低でも45m以上の幅員が必要であるとされている。勿論全ての街区を延焼遮断帯で囲むことは現実に不可能であるため、我々は植樹帯や河川を利用して延焼伝達の経路を少しでも多く断ち切る努力をしなければならない。そこで本研究では都市防火対策の効果を概観するという目的で、市街地をゾーンに分割した上で確率モデルを用い、延焼遮断が市街地火災拡大に与える影響をうかがうことを試みる。

2. 前提と定式化

市街地火災拡大を記述するモデルを構築するため、道路網によって市街地を n 個に分割し、各ゾーンの代表点を i とする。また、その場所における炎上確率や単位時間あたりの消火率を次のように定義する：

$f(i, t)$: 時刻 t で代表点 i が燃えている確率,
 $W(i, t)$: 時刻 t で代表点 i が燃えているとき、その火災が単位時間あたりに鎮火してしまう率,
 $S(i, j, t)$: 時刻 t で代表点 i の火災が隣接ゾーンの代表点 j に単位時間あたりに燃え移る率。

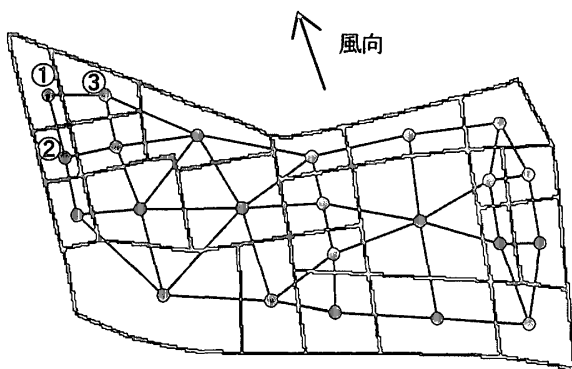


図1 ゾーン、代表点と火災伝達ネットワーク

図1は東京都文京区本郷1丁目の幅員3.0m以上の道路網をGISによって抽出し、それによって囲まれる部分をゾーンと定義して火災伝達ネットワークを描いたものである。火災伝達ネットワークとは火災が伝達する可能性のある経路を枝、代表点を頂点としたグラフのことで、例えば図1は代表点2,3から代表点1に単位時間当たり $S(2,1,t)$, $S(3,1,t)$ の率で炎が燃え移ること等を意味している。

よって時刻 $t + \Delta t$ において i が燃えている確率は、飛び火による延焼は考えないこととすると以下のように記述することができ、これより(1)式を立てることができる。

$$\begin{aligned} & \text{(時刻 } t + \Delta t \text{ に } i \text{ が燃えている確率)} \\ = & \text{(時刻 } t \text{ に } i \text{ が燃えている確率)} \\ & \times \text{(} i \text{ の火災が } \Delta t \text{ 間に鎮火しない確率)} \\ + & \text{(} i \text{ が燃えていない確率)} \\ & \times \text{(} i \text{ の隣接ゾーンの代表点が燃えていて、その} \\ & \text{少なくとも1箇所から延焼する確率)} \end{aligned}$$

これを前出の記号を用いて表すと、次式の通りである。

$$\begin{aligned} f(i, t + \Delta t) &= f(i, t) \cdot \{1 - W(i, t) \cdot \Delta t\} \\ &+ \{1 - f(i, t)\} \cdot [1 - \prod_C \{1 - f(j, t) \cdot S(j, t) \cdot \Delta t\}]. \quad (1) \end{aligned}$$

ただし C は代表点 i の隣接ゾーンの代表点 j の集合を表す($j \neq i$)。ここで、一般的に火災によって焼かれる面積が大きければ大きいほどその街区の消火が困難であることが多いと考えられるため、消火率 $W(i, t)$ は i が燃えていない確率 $\{1 - f(i, t)\}$ に比例すると仮定しよう。これに $\Delta t \rightarrow 0$ の極限操作を行うことで、 n 次の非線形連立微分方程式である(2)式が得られる。市街地火災を記述するモデルとして以降ではこの式を用いる：

$$\begin{aligned} f'(i, t) &= \frac{f(i, t + \Delta t) - f(i, t)}{\Delta t} \\ &= \{1 - f(i, t)\} \left\{ \sum_{j \in C} f(j, t) \cdot S(j, t) - f(i, t) \cdot W(i, t) \right\}. \quad (2) \end{aligned}$$

3. 数値例と応用例

ここでは、延焼遮断の整備がどの程度市街地火災の抑制に効果を上げるかに関する具体的な数値例を取り上げる。市街地火災拡大モデルは先述のものを用い、延焼遮断を図1の如き火災伝達ネットワークの1つの枝を完全に遮断するものと

定義する。以上の想定のもとで、図1で表される火災伝達ネットワークの枝がそれぞれある確率 p でランダムに遮断されるとした場合の平均炎上確率の時間推移を、 p の値によって比較検討することを試みる。図2は10%から90%の確率でランダムに遮断されるようにしてできた火災伝達ネットワークを所与として求めた、平均炎上確率 $\bar{f}(t)$ と時刻 t の関係グラフである。ここで平均炎上確率とは(2)式の非線形連立微分方程式を m 回計算して出した平均を意味しており、 k 番目の試行で得られた時刻 t での i の炎上確率を $f_k(i,t)$ とすると以下(3)式のように定義される。

$$\bar{f}(t) = \frac{\sum_k \sum_i f_k(i,t)}{m \cdot n} \quad (3)$$

また、計算に要したパラメータは全ゾーンにおいて以下の如く設定した。

単位時間当たりの消火率： $W = 0.02$ ，
 風速： $v = 4\text{m/s}$ ， 平均隣等間隔： 4m ，
 建蔽率： 60% ， 初期出火確率： $f(i,0) = 0.01$ ，
 試行回数： $m = 500$ 。

図2から、延焼遮断確率 p による炎上確率低減の効果が明らかになった。また出火から十分時間が経過した場合は、与えられた延焼遮断確率に応じた平均炎上確率の収束値があらわれる。これは代表点 i の燃焼確率 $f(i,t)$ の導関数 $\frac{d}{dt}f(i,t)$ が、 i が燃えていない確率 $\{1 - f(i,t)\}$ と隣接するゾーンから受ける影響の積であらわされると仮定している(2)式の性質によるものである。また、出火から時刻が経つにつれ飛躍的に延焼遮断の効果が増していることも図3から確認できる。

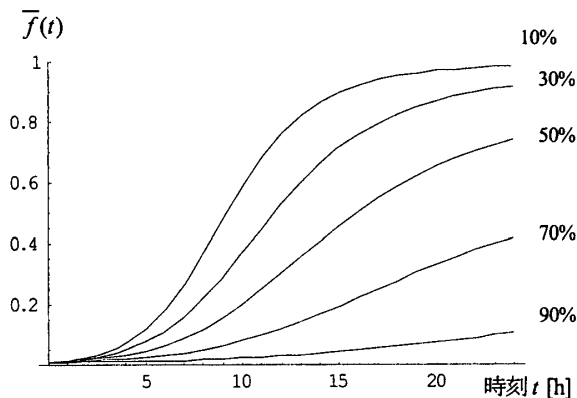


図2 平均炎上確率の時間推移 (その1)

延焼遮断確率が高いということは火災による街路の閉塞可能性が低く、消防車などの移動が楽であるため消防効率が上がるとも考えられる。よって、消火率 $W(i,t)$ が延焼遮断確率 p の影響を強く受けるようなシナリオを想定すること

もできるかもしれない。このような強い仮定のもとで描いた平均火災確率の時間推移図が図4である。このような仮定を置くことあるパラメータ設定の下では、ある点を境に急激に平均炎上確率が0に収束し始める閾値の存在が確認できる。今回の数値例では、遮断確率40%前後がそれにあたる。

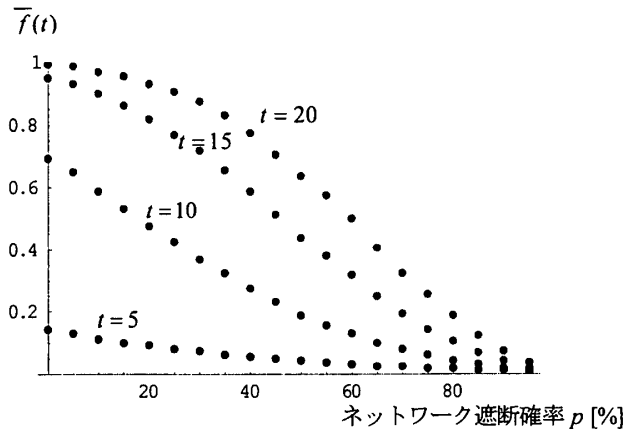


図3 ネットワーク遮断確率と平均炎上確率

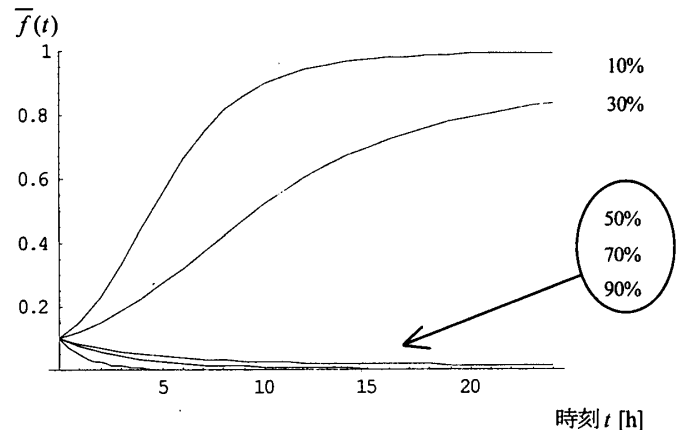


図4 平均炎上確率の時間推移 (その2)

以上に述べた数値例は、火災伝達ネットワークの遮断確率が不燃化率などと同じく都市防火性能を表す指標の一つとして用いるに耐えることを示していると考えられる。全都市の延焼遮断確率をそれぞれの市街地に適した閾値に近づけることが市街地防災対策の当面の目標であるといえるだろう。現実のネットワークにおける更なる考察が今後の課題として挙げられる。

4. 参考文献

- [1] 青木義次(1987)：「都市火災拡大の一次元離散型確率モデル」，日本建築学会計画系論文集，第381号，pp.111-121。
- [2] 廣井悠，栗田治(2003)：「格子型市街地の確率的火災拡大モデル」，2003年日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集，pp.178-179。