1998年度日本オペレーションズ・リサーチ学会
春季研究発表会

同時多発出火時の避難と街区面積に関する基礎的考察

02004050 筑波大学 *石井 儀光 ISHII Norimitsu
01102840 筑波大学 腰塚 武志 KOSHIZUKA Takeshi

1. はじめに

阪神淡路大震災にみられるように都市で同時多発出火が起こったような状況を考える．通常の火災であれば消火活動によって延焼をくい止めることが可能であるが，地震に伴う同時多発出火の場合は全ての延焼をくい止めることは困難であると予想される．阪神大震災の場合にも十分な消火活動ができなかったと言われているが，文献[5]に見られる延焼動態の調査結果を見ると．広幅員の道路が延焼遮断帯として少なからず延焼の阻止に貢献していることが分かる．そこで本研究では矩形領域Dの領域外には延焼が拡大しないと仮定し，出火点の密度ρおよび避難速度に対する延焼速度の比αが与えられたときにその領域内で火災に巻き込まれてしまう人の割合をある値以下にするために必要とされる領域Dの境界の長さと面積について考察する．

2. 被害率の導出

まず，本研究では都市領域の中で人は一様に分布しており，速度vで移動するものとする．都市内で平均的に密度ρで出火点が一様にランダムに分布し，時刻$T=0$で出火すると同心円状に拡大を開始する．延焼領域の半径が拡大する速度を人の歩行速度のα倍とすると，時刻tにおける延焼領域の半径はαvtと表される．ここでは避難者の移動距離の分布に着目したいので移動距離lを$l=vt$と定義し，明示的に時間tを用いることなく，被災距離lで移動距離と同時に時間の経過も示すこととする．なお，避難者は出火と同時に任意の方向に向かって直線的に避難を開始する．これらの仮定の下で避難者が延焼領域に入るまでの移動距離がl以下である確率$F(l)$および確率密度関数(以下，距離分布と呼ぶ)$f(l)$は，文献[1]より，

$$F(l) = 1-e^{-\rho\beta l^2} \quad (1)$$

$$f(l) = 2\rho\beta l\, e^{-\rho\beta l^2} \quad (2)$$

と表せる．ただし，表記を見やすくするために

$$\beta=\alpha\sqrt{1-\alpha^2}+(\pi-\arccos\alpha)\alpha^2 \quad (3)$$

とおいている．

次に，長辺a, 短辺bの矩形領域D内の任意の地点から境界に辿り着くまでの距離Rがr以下である確率$G(r)$およびrの距離分布$g(r)$を避難の状況別に3つ示す．まず最初に，避難すべき方向に関する情報が何もなかったとして，初期地点から任意の方角に向かって半直線上を移動した場合は文献[2]より，

(i) $0\leq r\leq b$のとき

$$G_1(r) = \frac{1}{\pi ab}\{-r^2+2(a+b)r\} \quad (4)$$

$$g_1(r) = \frac{2}{\pi ab}(-r+a+b) \quad (5)$$

(ii) $b<r\leq a$のとき

$$G_1(r) = \frac{1}{2\pi ab}\Big(4ar-4a\sqrt{r^2-b^2} -4ab\arcsin\frac{b}{r}+2b^2+2\pi ab\Big) \quad (6)$$

$$g_1(r)=\frac{2}{\pi ab}\left(a-\frac{ar}{\sqrt{r^2-b^2}}+\frac{ab^2}{r\sqrt{r^2-b^2}}\right) \quad (7)$$

(iii) $a<r\leq\sqrt{a^2+b^2}$のとき

$$G_1(r) = \frac{1}{\pi ab}\Big\{r^2-2a\sqrt{r^2-b^2}-2b\sqrt{r^2-a^2} +4ab(\arccos\frac{a}{r}-\arcsin\frac{b}{r}) +a^2+b^2+\pi ab\Big\} \quad (8)$$

$$g_1(r) = \frac{2}{\pi ab}\left\{r\left(1-\frac{a}{\sqrt{r^2-b^2}}-\frac{b}{\sqrt{r^2-a^2}}\right) +\frac{ab}{r}\left(\frac{a}{\sqrt{r^2-a^2}}+\frac{b}{\sqrt{r^2-b^2}}\right)\right\} \quad (9)$$

である．

次に，領域内の道路網を考慮すると任意の方向への直線移動は困難であるから，境界線に対するレクティリニアな移動で境界まで避難する場合を考えると，

(i) $0\leq r\leq b$のとき

$$G_2(r) = \frac{a+b}{2ab}r \quad (10)$$

$$g_2(r) = \frac{a+b}{2ab} \quad (11)$$

(ii) $b<r\leq a$のとき

$$G_2(r) = \frac{1}{2a}r \quad (12)$$

$$g_2(r) = \frac{1}{2a} \quad (13)$$

となる．

次に，上記のレクティリニアな移動の場合で，避難開始地点から最も近い境界の方角を知っている場合には最短距離で避難できるので，

$0\leq r\leq\frac{a}{2}$のとき

$$G_3(r) = \frac{1}{ab}\left\{-4r^2+2(a+b)r\right\} \quad (14)$$

$$g_3(r) = \frac{1}{ab}\{-8r+2(a+b)\} \quad (15)$$

となる．

次に，領域Dにおいて境界にたどり着く前に延焼領域に入ってしまう場合の距離分布は，文献[2]より，前出の2つの距離分布の合成関数として，

$$h(l) = f(l)(1 - G(l)) \tag{16}$$

と，求められる．よって，この距離分布を距離lで積分することによって，最終的に無事に避難することができない割合が計算できる．この割合を被害率Hと呼ぶことにする．

ここでは，レクティリニアに避難する場合の例を示す．領域Dを一辺aの正方形として，最も近い境界の方向が分からずに移動する場合の被害率H_1を計算すると，

$$\begin{aligned} H_1 &= \int_0^a f(l)(1 - G_2(l))\mathrm{d}l \\ &= 1 - \frac{\sqrt{\pi}\cdot Erf(a\sqrt{\rho\beta})}{2a\sqrt{\rho\beta}} \end{aligned}$$

である．なお，

$$Erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^z e^{-r^2}\mathrm{d}r \tag{17}$$

である．そこで，$\rho\beta$が十分小さいと仮定して，級数展開によって$Erf(a\sqrt{\rho\beta})$を近似的に，

$$Erf(a\sqrt{\rho\beta}) \simeq \frac{2a\sqrt{\rho\beta}}{\sqrt{\pi}} - \frac{2a^3\sqrt{\rho\beta}}{3\sqrt{\pi}} \tag{18}$$

とおくと，

$$\begin{aligned} H_1 &\simeq \frac{a^2\rho\beta}{3} \\ &= \frac{\beta}{3}\rho a^2 \end{aligned} \tag{19}$$

と求められる．ここでρa^2は領域内の出火点の個数であるから，被害率が出火点の個数に比例するという大変簡単な関係式を得ることができた．また，aをρとβの関数$a(\rho,\beta)$と考えると上式より，

$$a(\rho,\beta) = \sqrt{\frac{3H_1}{\rho\beta}} \tag{20}$$

となり，正方形の街区の場合，ρとβが与えられたときに被害率をH_1以下にするためには，1辺の長さが$a(\rho,\beta)$以下になるように広幅員の道路を配置すればよいということが分かる．

次に，最も近い境界の方角を知っていて最短距離で避難できる場合について考えると，被害率H_2は，

$$\begin{aligned} H_2 &= \int_0^{\frac{a}{2}} f(l)(1 - G_3(l))\mathrm{d}l \\ &= 1 + \frac{4}{a^2\rho\beta} - \frac{4}{a^2\rho\beta e^{\frac{1}{4}a^2\rho\beta}} \\ &\quad - \frac{2\sqrt{\pi}}{a\sqrt{\rho\beta}}\cdot Erf(\frac{1}{2}a\sqrt{\rho\beta}) \end{aligned} \tag{21}$$

である．ここで先ほどと同様に$Erf(a\sqrt{\rho\beta})$を近似すると，

$$H_2 = \frac{1}{6}a^2\rho\beta - \frac{4}{a^2\rho\beta}(1 - e^{-\frac{1}{4}}a^2\rho\beta) - 1 \tag{22}$$

である．ここで更に級数展開による近似を行うと，$\rho\beta$が十分に小さいところでは，

$$\begin{aligned} H_2 &\simeq \frac{\beta}{24}\rho a^2 && (23) \\ &= \frac{1}{8}H_1 && (24) \end{aligned}$$

と近似でき，これも出火点の個数に比例する簡単な式で表現することができることが分かる．また，a,ρ,βの設定がH_1のときと同じであっても，最短距離で避難できる場合とそうでない場合とでは被害率に約8倍の差がでてしまうことが分かり，避難の際に自分が進むべき方向が分かっていることの重要さが示せたのではないだろうか．ただし，$\rho\beta$が大きくなってくると，

$$\begin{aligned} H_2 &\simeq \frac{\beta}{6}\rho a^2 - 1 \\ &= \frac{1}{2}H_1 - 1 \end{aligned} \tag{25}$$

となるので注意が必要である．具体的な使い分けの基準については今後明らかにしていくつもりである．

3. おわりに

本研究では有限な都市領域の中でその出火密度とそのときの風速が予測できる場合に，火災に巻き込まれてしまう人の割合をある値以下にとどめるために必要とされる街区の境界の面積と長さを導出する1つの方法を示した．火災と避難に対して簡単な仮定をおくことによって，被害率と出火点の個数との関係を導くことができたが，パラメータρ,βについての考察や延焼，避難モデルの妥当性についてはまだ課題が多いので今後更に研究を進めていく予定である．

4. 参考文献

[1] 石井儀光，腰塚武志(1997):不通領域がある場合の移動距離の分布について．日本OR学会春季研究発表会アブストラクト集,pp.16-17.

[2] 石井儀光，腰塚武志(1997):有限領域内の直線的避難距離について．日本OR学会秋季研究発表会アブストラクト集,pp.158-159.

[3] 腰塚武志(1985):都市施設の密度と利用者からの距離との関係について．日本都市計画学会学術研究論文集,pp.85-90.

[4] 日本建築学会編(1992):建築・都市計画のためのモデル分析の手法．井上書院．

[5] 日本火災学会編(1996):1995年兵庫県南部地震における火災に関する調査報告書．日本火災学会．