

地震発生時の住宅密集地における多発火災拡大モデル

2004MM069 澤田貴之 2004MM072 清水沙紀

指導教員: 伏見正則

1 はじめに

1.1 背景

平成7年の阪神淡路大震災では261件の建物から出火し、火災被害は7483棟に及んだ。地震発生時は早朝で火気を多く使用する時間帯ではなく、風速も2m/秒と通常の半分程度であったため、火災は想定される被害としては小さかったと考えられている。しかし、通常の消防力を超える火災の発生や建物の倒壊による道路閉塞、交通渋滞などによって消火活動は滞り、放任状態となった火災は木造住宅密集地を焼き尽くしていった。

阪神淡路大震災のような大地震発生時に、大規模な火災が発生する可能性のある住宅密集地は名古屋市内にも存在している。また、近い将来東海・東南海・南海地震などの巨大地震が発生すると言われていることから、名古屋市では道路・公園および防災拠点施設等の地区公共施設の整備とあわせて、建築物の耐震不燃化が推進されている。そこで、本論文では名古屋市内の1部地域を対象として多発火災の拡大過程のシミュレーションを行い、名古屋市が進める対策事業が市街地火災拡大にどのような影響を与えるのか、またどのような防災対策が効果的であるかなどを検討していく。

1.2 先行研究紹介

本論文は、廣井・栗田による「市街地性状の異なる地域における火災拡大モデル」[1]を参考にしている。これは、簡便で扱いやすく、異なる特性を持つ市街地を含む都市平面に対して、簡易的なシミュレーションを行うことのできる確定論的数理モデルを作成していくための基礎を追求した研究である。

2 火災拡大現象のモデル化

2.1 記号の定義

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、道路網で囲まれた街区を1つのゾーンとして、ゾーン番号を i とする($i = 1, 2, \dots, n$)。はじめに、時刻 t における炎上率や焼失率などを次のように定義する。

- $f_i(t)$: ゾーン i の燃えている面積の割合(炎上率)
- $g_i(t)$: ゾーン i の燃え尽きている面積の割合(焼失率)
- $W_i(t)$: ゾーン i の火災が鎮火・消火することによる炎上面積減少指標(消火率)
- $R_i(t)$: ゾーン i の同一ゾーン内での延焼による炎上面積増加指標(同一ゾーン内での延焼)
- $S_{ij}(t)$: ゾーン i がその隣接ゾーン j によって延焼されることによる炎上面積増加指標(道路を横断して行くゾーン間の延焼)

2.2 定式化

ゾーン i における時刻 $t + \Delta t$ の炎上率は、時刻 t における状況に基づいて

$$f_i(t + \Delta t) = f_i(t) + R_i(t) \cdot f_i(t) \cdot \Delta t + \sum_{j \in J} S_{ij}(t) \cdot f_j(t) \cdot \Delta t - f_i(t) \cdot W_i(t) \cdot \Delta t \quad (1)$$

のように表せる。ただし、 J は全てのゾーンの集合とする。また、ゾーン i における時刻 $t + \Delta t$ の焼失率も(1)式と同様にして

$$g_i(t + \Delta t) = g_i(t) + f_i(t) \cdot W_i(t) \cdot \Delta t \quad (2)$$

のように表すことができる。

(1)式を変形すると

$$\frac{f_i(t + \Delta t) - f_i(t)}{\Delta t} = R_i(t) \cdot f_i(t) + \sum_{j \in J} S_{ij}(t) \cdot f_j(t) - f_i(t) \cdot W_i(t) \quad (3)$$

が得られる。ここで、微小時間 Δt を極めて小さいものと考え、0に収束するものとして $\Delta t \rightarrow 0$ とすると、(3)式の左辺は炎上率の時間に関する微分値とすることができる。これにより

$$f'_i(t) = R_i(t) \cdot f_i(t) + \sum_{j \in J} S_{ij}(t) \cdot f_j(t) - f_i(t) \cdot W_i(t) \quad (4)$$

を得ることができる。同様にして、(2)式から

$$g'_i(t) = f_i(t) \cdot W_i(t) \quad (5)$$

を得られる。

これら(4)、(5)式で表される n 次の連立微分方程式によってゾーン i における時刻 t の炎上率および焼失率の導関数を得ることができる。

2.3 仮定

実際にシミュレーションを行うにあたって、 $R_i(t)$ および $S_{ij}(t)$ などの炎上面積増加指標は、燃え移る可能性のある面積の割合 $a_i - f_i(t) - g_i(t)$ の影響のみを受ける(a_i はゾーン i における可燃領域率)と仮定する。例えば、ゾーン内においての火災拡大による炎上面積の増加率 $R_i(t) \cdot f_i(t)$ は可燃領域率と炎上率の積 $\{a_i - f_i(t) - g_i(t)\} \cdot f_i(t)$ に比例すると考えるのである。これは、火災が大きくなればなるほどその火災を拡大させる力が大きくなる反面、可燃物がなくなるにしたがって火災拡大の力が頭打ちになるとの仮定から生み出されたものである。この仮定は、微

分方程式論の分野においてロジスティック成長と呼ばれており、限界のある成長を記述するための一般的なモデルとしてよく知られている。この仮定を置くことで、炎上率と焼失率の和が、可燃領域率を最大値とする一定範囲内に収まることになり、火災拡大現象をより詳細に表現することができると考えられる。なお、本論文では消火率 $W_i(t)$ と炎上面積増加指標 $R_i(t)$ および $S_{ij}(t)$ は係数 w_i 、 r_i 、 s_{ij} とする。

以上を仮定すると、(4)、(5)式を書き換えて

$$f'_i(t) = \{a_i - g_i(t) - f_i(t)\} \cdot r_i \cdot f_i(t) + \{a_i - g_i(t) - f_i(t)\} \cdot \sum_{j \in J} s_{ij} \cdot f_j(t) - f_i(t) \cdot W_i(t) \quad (6)$$

$$g'_i(t) = f_i(t) \cdot w_i \quad (7)$$

によって火災拡大現象を表すことができる。

3 モデルの基本設定

3.1 対象地域

対象地域には名古屋市中村区の米野地区(図1の黒枠内)を選定した。

名古屋市には、国土交通省が住宅密集地の効果的かつ効率的な改善に資するために設定した「地震時において大規模な火災の可能性があり、重点的に改善すべき密集市街地」の抽出基準の1つである「住宅密度80戸/ha以上」に該当する住宅密集地は見当たらない。しかし、名古屋市は同市の定めた地区総合整備地区内であり、かつ不燃面積率40%未満(平成23年推計値)など、密度要件を除く国の抽出基準に準じて抽出した地区を対象として住宅密集地の整備を進めている。米野地区は整備の対象地域であり、「防災公園米野公園事業」や「都市防災不燃化促進事業」が進められている。また、黄金通や太閤通といった道路の幅員が30m以上ある広い道路とJR関西本線や近鉄名古屋線などの線路に囲まれ、これらの道路や線路が延焼遮断帯として機能すると考えることができる独立性の高い地域である[2]。



図 1: 名古屋市中村区米野地区

3.2 ゾーン

ゾーンの境界は対象地域内の幅員が3m以上の道路と定義する。道路の幅員は名古屋市が管理する道路の路線名、幅員等を地図上にまとめた道路認定図を公開しているWebサイトの「路線をクリックして情報を表示」という機能で表示される値を用いる。幅員の表示がない場合は「区間をクリックして幅員を表示」という機能で表示される値を用いることとする。なお、このWebサイトで幅員が公開されていない道路に関しては、現地で測定した値を用いる。

以上の定義のもと、米野地区内の3m以上の道路を抽出して作成したゾーンを図2に示す。

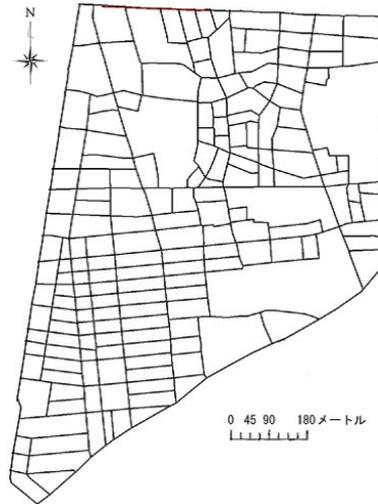


図 2: ゾーン

3.3 火災延焼ネットワーク

火災延焼ネットワークとは代表点を頂点、火災が延焼する可能性のある代表点同士を結んだものを枝としたグラフである。「火災が延焼する可能性のある代表点」とは、隣接しているゾーンの代表点を指し、この火災延焼ネットワークを通してのみゾーン間での延焼が起こり、当該道路網の外側からは火災が延焼してこないものと仮定する。代表点や代表点間の距離の算出方法については4章で説明する。

以上を踏まえて作成した火災延焼ネットワークを図3に示す。図中の黒色の線はゾーン、点は代表点、灰色の線は火災延焼ネットワークを表す。

4 パラメータの設定

4.1 消火率

消火率 w_i は鎮火、もしくは消火によって火災が縮小していく指標である。消火率にはゾーンごとの特性を反映した値を与えることができるため、なんらかの消火に関する実験データ等からその値を推測する必要がある。本論文では名古屋市が公表している「消防活動の困難性の評価」を利用してゾーンごとに危険度を設定し、参考文献[1]で使用されている1時間あたり0.02という値を危険度3として、表1に示す値を用いる。



図 3: 火災延焼ネットワーク

表 1: 消火率

危険度	消火活動困難区域率	消火率
1	20%未満	0.02×1.5
2	20%以上40%未満	0.02×1.25
3	40%以上60%未満	0.02
4	60%以上80%未満	0.02×0.75
5	80%以上	0.02×0.5

4.2 同一ゾーン内における炎上面積増加指標

炎上面積増加指標 r_i は同一ゾーン内で延焼する程度を表す指標であり、火災拡大過程がゾーン内のどの点においても同様であるという仮定のもと作成される値である。この指標には過去さまざまなものが提案されているが、本論文では参考文献[1]で使用されている、すべてのゾーンにおいて1時間あたり0.1という値を用いる。

4.3 ゾーン間における炎上面積増加指標

炎上面積増加指標 s_{ij} は道路を横断して延焼する程度を表す指標である。一般に、道路を越えて延焼する火災は、その時の風向きや風速に大きく依存することが知られている。また、沿道の不燃領域率や道路内に停車・駐車している自動車の数などの影響も受けると考えられているため[2]、その市街地火災拡大過程を具体的な数式で表すことは非常に困難である。よって、延焼遮断に関する先行研究等から値を推測する必要があるが、本論文ではゾーン i とゾーン j の代表点間の距離を延焼速度(0.5[m/min]とする)で割ったものの逆数を用いる[1]。 s_{ij} を求めるために必要な代表点の座標と代表点間の距離の算出方法は4.3.1、4.3.2節で述べる。

4.3.1 代表点の座標

各ゾーンの代表点は各々のゾーンの重心を用い、重心座標は下記の方法によって計算する。その際必要となる頂点座標は、地図上のクリックした地点の経緯度(世界測地系)を表示する機能のあるWebサイトで表示される値を

用いる。

ある1つのゾーン A を多角形と考え、 m 個の頂点を定義し、それらの頂点番号を k ($k = 1, 2, \dots, m$)、頂点座標を (x_k, y_k) とする。まず、ゾーン A の反時計回りの周を C_A と表すと、ゾーンの面積 S_A は次式で求めることができる。ただし、 $x_{m+1} = x_1$ 、 $y_{m+1} = y_1$ とする。

$$\begin{aligned}
 S_A &= \int_A dx \cdot dy = \oint_{C_A} x \cdot dy \quad (\text{Greenの定理}) \\
 &= \sum_{k=1}^m \int_{(x_k, y_k)}^{(x_{k+1}, y_{k+1})} x \cdot dy \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (x_{k+1} + x_k) \cdot (y_{k+1} - y_k)
 \end{aligned}$$

次に、ゾーン A の重心座標 (x_G, y_G) は、これを元にして

$$\begin{aligned}
 x_G &= \frac{1}{S_A} \int_A x \cdot dx \cdot dy = \frac{1}{S_A} \oint_{C_A} \frac{x^2}{2} \cdot dy \\
 &= \frac{1}{6S_A} \sum_{k=1}^m (y_{k+1} - y_k) \cdot (x_{k+1}^2 + x_{k+1} \cdot x_k + x_k^2)
 \end{aligned}$$

と導出される。

y_G も同様にして求める。

4.3.2 代表点間の距離

火災延焼ネットワークの2つの代表点間の距離は、各ゾーンの代表点の経緯度から求める。実際の地球の形状は長半径が6377397.15m、短半径が6356078.96mの回転楕円体だが、本論文では日本付近における曲率半径6370kmの球体と仮定して計算を行う。

地球の半径を $R = 6370\text{km}$ として、ゾーン A の代表点 a の経緯度 (λ_1, ψ_1) とゾーン B の代表点 b の経緯度 (λ_2, ψ_2) から地球の中心より見た a 、 b 点間の角度 δ [°]を求める。

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$$

$$\cos \delta = \sin \psi_1 \cdot \sin \psi_2 + \cos \psi_1 \cdot \cos \psi_2 \cdot \cos \Delta\lambda$$

a 、 b 点間の距離 S [km]は、これを元にして

$$S = \frac{R \cdot \delta \cdot \pi}{180}$$

と導出される。

4.4 可燃領域率

可燃領域率 a_i は燃える可能性のある面積の割合である。可燃領域率を算出するためには、市街地面積や構造別建築面積等のデータが必要となる。しかし、それらのデータを入手することができなかったため、本論文ではGoogleマップの航空写真から各ゾーンの建築物の割合を目視で数値化して可燃領域率として用いる。

5 火災拡大過程のシミュレーション

5.1 火災発生ゾーンの選定

火災が発生するゾーンはランダムで20~30箇所選定する。また、初期火災割合として0.005を用いる。この火災発生ゾーン数および初期火災割合は早い段階で結果を得たいという都合上設定した値である。

5.2 防災公園米野公園事業

米野公園は、名古屋市が地震に対する都市防災対策の一環として整備を進めている公園の1つである。この米野公園には火災による延焼を防ぎ、避難や復旧・復興活動の拠点となることが期待されている。そこで、米野公園の完成が米野地区内の火災拡大にどのような影響を与えるのかを考察するため、シミュレーションを行う。

本論文では「米野公園の完成 = 該当ゾーンの可燃領域率が0」と考える。まず、米野公園の完成前と完成後の火災発生から5時間後の炎上率を比較して、その差が比較的大きいゾーンを抽出した。次に、抽出されたゾーンの火災発生から10時間後までの炎上率と焼失率をグラフにまとめ、その結果を比較した。

5.3 考察

抽出されたゾーンはいずれも米野公園付近のゾーンであり、米野公園完成後は総じて延焼が緩やかになっていた。したがって、米野公園には延焼を遅らせる効果があると考えられる。また、2面を公園に囲まれたゾーンに特に大きな差が認められることから、ゾーンの隣接関係が火災拡大に大きな影響を与えていると考えることができる。

米野公園を活かした対策としては、米野公園北側の道路(権現通)の周辺の不燃化が挙げられる。権現通は幅員が14~15mほどの道路であり、延焼遮断帯候補の選定基準の1つである「幅員15m以上の道路」にわずかに及ばない。しかし、米野公園と権現通周辺の不燃化によって、延焼遮断帯としての効果を期待することができるのではないかと考えられる。

5.4 都市の不燃化

5.3節では権現通周辺の不燃化による延焼遮断帯の形成を提案したが、幅員が3m以上の道路をゾーン境界とする本論文の定義では権現通周辺に面積の大きいゾーンが集中しているため、道路周辺の不燃化を表現することができない。そこで、道路周辺の不燃化が火災拡大にどのような影響を与えるのかを考察するため、単純なモデルを用いてシミュレーションを行った。

その結果、火災発生ゾーンとの間に不燃化地帯を挟んだゾーンと不燃化地帯と隣接するゾーンにおいて延焼遅延効果を確認することができた。

6 火災延焼ネットワークの問題点

図2に示したゾーンには周囲のゾーンに比べて面積が大きいゾーンが存在する。これらのゾーンではゾーン同士の距離、すなわち道路の幅員は他のゾーンと比較しても大きな差は認められない。しかし、代表点間の距離は他のゾーンに比べて圧倒的に長くなっている。本論文では代表点間の距離はゾーン間における炎上面積増加指標 s_{ij} と密接な関わりを持っているため、これらのゾーンの炎上面積増加指標を、他のゾーンと同様に代表点間の距離を用いて求めることが妥当であると言えるかは疑問である。したがって、次のような基準を設け、該当するゾーンの延焼経路上に中継点を作成し、その影響について考

察する。なお、中継点には火災の延焼経路とゾーン境界の交点から代表点の間の中点を用いる。

1. 長さが150m以上ある延焼経路が2つ以上あるゾーン
2. 1の条件に当てはまるゾーンを除いた延焼経路の長さの平均が100m以上ある、かつ延焼経路とゾーン境界の交点から代表点間の距離が50m以上あるゾーン

また、延焼経路の中には他のゾーンを横切っているものがいくつか存在するが、中継点を作成する経路を除いてそのまま使用する。中継点を作成する経路については中継点の位置を調整することで解消する。

以上を踏まえ、該当するゾーンにおける中継点を作成する前後の火災発生から10時間後までの炎上率と焼失率をグラフにまとめ、その結果を比較した。なお、中継点を作成するゾーンの炎上率と焼失率は、代表点と各延焼経路の中継点を平均した値と代表点のみの値の2種類を用意した。

6.1 考察

該当するゾーンにおいて初期火災割合が0の時、中継点を作成し、代表点と各延焼経路の中継点の平均した値を用いた場合の延焼が最も緩やかとなった。また、中継点を作成した場合は、どちらの値を用いても初期火災割合によって延焼の仕方が大きく異なるのに対し、中継点を作成していない場合にはほとんど差がみられない。さらに、中継点を作成して代表点のみを用いた場合には、他の2つに比べて短時間のうちに急激に延焼していた。

以上から、中継点の有無が該当ゾーンの炎上率と焼失率の値に大きな影響を与えていると考えることができる。

7 おわりに

本論文では火災の拡大現象を微分方程式で記述し、名古屋市中区米野地区の火災拡大過程や防災対策の効果等を分析した。その結果、米野公園に周辺の延焼遅延効果が期待できること、道路周辺の不燃化が火災拡大抑制に効果的であることが確認された。また、周囲のゾーンに比べて面積が大きいゾーンに中継点を作成すると、結果が大きく異なることが分かった。

今後の課題として、各指標 特に、すべてのゾーンで一律としている同一ゾーン内における炎上面積増加指標 r_i と、耐火率や木造建築面積など本来可燃領域率に大きく関わる値を無視している可燃領域率 a_i については、より現実的・実用的な結果を得るために具体的なデータを入手する必要がある。また、中継点を作成した場合にゾーンの炎上率や焼失率としてどの値を用いることが妥当であると言えるのかを検討する必要がある。

参考文献

- [1] 廣井悠, 栗田治: 市街地性状の異なる地域における火災拡大モデル, 都市計画論文集, No. 39-3, pp. 99-103, 2004.
- [2] 都市防災実務ハンドブック編集委員会編: 改訂 都市防災実務ハンドブック(震災に強い都市づくり・地区まちづくりの手引き), ぎょうせい, 2005.