

市街地火災延焼シミュレーションとその実火災への適用

たか なし けん いち ほそ かわ まさ ふみ
高 梨 健 一 †・細 川 直 史 †

市街地火災の延焼状況を予測する手法は従来から盛んに研究が行われてきたが、近年、計算機技術の進展によって複雑な計算を高速に行うことが可能となったため、古くから用いられてきたマクロな計算手法に加えて、燃焼現象や輻射伝熱など高度な計算を盛り込み、個々の建物の燃え広がりを計算する方式の市街地火災延焼シミュレーションが開発されている。

これらの市街地火災延焼シミュレーションは、地震時の同時多発火災による市街地火災の被害予測や、消防活動計画の事前策定、都市計画の策定などに用いられている。

本稿では、市街地火災延焼シミュレーションについて幾つかの例を紹介するとともに、平成28年12月22日に糸魚川市で発生した火災¹⁾に対し消防研究センターが開発を行ってきた市街地火災延焼シミュレーションソフトウェアを適用した結果について紹介する。

キーワード：市街地火災延焼シミュレーション、糸魚川市大規模火災

1. はじめに

従来から、市街地の火災被害を予測、再現するために、様々な延焼シミュレーションが開発されてきた。これらの市街地火災延焼シミュレーションの結果は、防災関係機関による大規模地震災害に備えた被害想定や、消防本部において延焼危険度の高い地域での火災発生を想定して消防活動計画を事前に作成するための参考情報、自治体の都市計画を担当する部局における防火対策の効果予測などに利用されている。

平成28年12月22日に糸魚川市で発生した大規模火災を受けて設置された「糸魚川市大規模火災を踏まえた今後の消防のあり方に関する検討会」の報告書²⁾においても、市街地火災延焼シミュレーションを活用した木造密集市街地における火災危険性の把握や、シミュレーション結果に基づいた関係機関との連携に関する訓練の実施などが提案されており、消防分野において更なる活用が期待されている。

本稿では、市街地火災延焼シミュレーションについて幾つかの例を紹介するとともに、糸魚川市で発生した大規模火災に対して消防研究センターの市街地火災延焼シミュレーションモデルを適用した結果について紹介する。

2. 市街地火災延焼シミュレーション

前述のとおり、従来から、様々な市街地火災延焼シミュレーションが開発され、活用されている。以前は、計算機の能力の制約により、市街地をメッシュや街区のような領域として分割し領域内を統計値に基づく均一な市街地として延焼範囲の計算を行うシミュレーション(図1)が多く用いられてきたが、近年では、計算機技術の進展により個々の建物を単位として計算を行うもの(図2)も多く提案されている。これらの市街地火災延焼シミュレーションの多くは、延焼計算に延焼速度式や燃焼・発熱現象に関わる物理モデルを用いている。

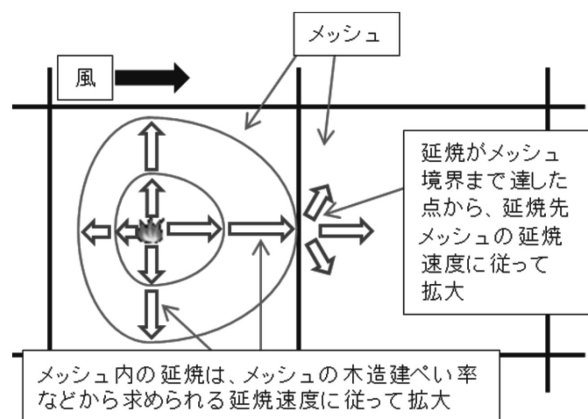


図1 領域内を均一な市街地として計算を行う市街地火災延焼シミュレーション（メッシュ単位）のイメージ

† 消防庁消防大学校 消防研究センター：〒182-8508 東京都調布市深大寺東町4-35-3
E-mail: takanasi@fri.go.jp

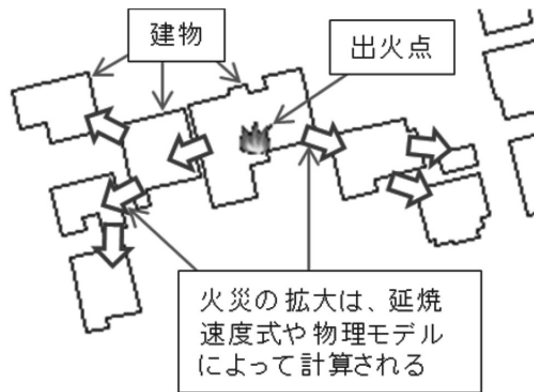


図2 個々の建物を単位として計算を行う市街地火災延焼シミュレーションのイメージ

2.1 延焼速度式を用いる方式

火災が拡大する時、その前線が進む速度を延焼速度と呼ぶ。延焼速度を求めるための延焼速度式は、物理的な根拠や通常時の市街地火災の調査結果、地震時の被害調査結果等に基づいて開発されており、木造建ぺい率や建物混成比など市街地の統計的なパラメータに基づいて延焼速度を計算する式や、出火建物とその隣接建物の位置関係や建物種別に基づいて建物間の延焼を求める式などがある。

市街地の統計的なパラメータに基づいて延焼速度を計算する式の代表的な例が、浜田式^{3),4)}である。浜田式は、当初、裸木造平屋建物が立ち並ぶ市街地の延焼を予測するために開発されたが、その後、一般の市街地に適応できるよう、建物の代表長さや隣棟間隔、風速および建物混成比（木造、防火造、耐火造）を用いて計算するよう拡張されており、メッシュ方式の延焼シミュレーションで良く用いられている^{例えば5)}。

また、東京消防庁は数度にわたって延焼速度式の開発を行っており、平成13年に東消式97の改良版として東消式2001⁶⁾が開発された。この東消式2001では、個別の建物の延焼時間を計算するマイクロ式と、広域の延焼を計算するマクロ式が定義されている。東消式2001のマイクロ式は構造別、用途レベルごとに、棟内の延焼速度式と、着火側建物構造と火元側建物階数の組合せに応じて隣棟間距離から建物間の延焼時間を求める式が開発されている。また、東消式2001のマクロ式はマイクロ式の設定結果を利用し、建ぺい率や建物種別ごとの建築面積比などを用いて表された式であり、炎上領域の拡大に合わせて延焼速度が上昇するような式となっている。東消式2001も様々な被害想定で用いられており、平成25年12月に中央防災会議首都直下地震対策検討ワーキンググループから発表された首都直下地震の被害想定⁷⁾では、250 mメッシュ単位での市街地火災延焼シミュレーションの延焼速度

式として用いられている。被害想定に用いられた手法では、出火率や消防ポンプ車の台数から放任状態となる火災の件数を予測し、放任火災をメッシュにランダムに割り当て、東消式2001を用いて燃え広がりを計算している。延焼遮断帯として道路、鉄道、河川が考慮され、出火後、メッシュ中心に延焼が到達した時点で当該メッシュが焼失したものとして計算されている。

なお、大規模地震災害の被害想定分野では、加藤らが提案しているクラスターによる方式⁸⁾も用いられている。この方式では、火災が発生した場合に相互に延焼被害を及ぼす可能性のある建物群（これをクラスターと呼ぶ）を考え、クラスターに含まれるいずれか一つの建物から出火した場合にはクラスターに含まれるすべての建物に延焼するものとして延焼被害を計算している。この方式は、火災の延焼過程を飛び越えて最終的な延焼結果を求めており、いわゆる市街地火災延焼シミュレーションとは一線を画しているが、南海トラフ巨大地震の被害想定⁹⁾や、名古屋市の被害想定¹⁰⁾などで多く用いられている。

2.2 物理モデルに基づいた方式

計算機技術の進展により、様々な要素を盛り込んだ精緻な計算を行う事が可能となったことから、建物内で発生した火災の進展に関する詳細な計算に基づいて近隣建物へ延焼するか否かを判断する方式の市街地火災延焼シミュレーションが開発されている。

例えば、建築研究所で開発された方式¹¹⁾では、耐火造、準耐火造、防火造、裸木造の建物構造ごとに火災の進展に関するシナリオを定め、シナリオの各段階において、火災区画の発熱速度、噴出火炎や合流火炎の形状、近隣建物や樹木への接炎、樹木の影響を考慮した輻射、風上側の火災家屋群からの熱気流などの計算を行っている。なお、この建築研究所の方式には、近年、火の粉の発生モデルと飛散モデルから火の粉の蓄積量を算定し、ステップごとに発生させた一様乱数と火の粉の蓄積量や受害建物の建築面積から計算される出火確率を比較して出火を判断するモデルが盛り込まれ、飛び火を予測できるよう拡張されている^{12),13)}。

また、樋本らは、一層ゾーンモデルの概念を導入して火災建物内の各部屋の現象を計算し、火災室内の高温ガスや開口噴出火炎といった熱源からの輻射熱伝達、風によって火災建物の風下側に形成される熱気流からの対流熱伝達、そして風によって飛散する火の粉について計算を行い、条件を満たした場合に、近隣建物への延焼が発生する詳細な方式での市街地火災延焼シミュレーションを行っている¹⁴⁾。この方式は、その後、西野らによって簡易化による高速化が行われている¹⁵⁾が、高々2000棟程度の建物の延焼計算に8秒

を要している状況にある。

このような物理モデルを用いたシミュレーションは、計算に時間を要することに加え、事前のデータ作成にも多大な労力と費用を要するため、大規模な市街地火災の延焼を計算することは難しいものが多い。

2.3 消防研究センターの市街地火災延焼シミュレーション

消防研究センターでは、大規模地震時の同時多発火災への対策立案や火災発生時の消防活動の方針作成への適用を念頭に、延焼速度式により一棟一棟の火災延焼を予測する方式を採用し、個々の火災に対して消防活動の効果を盛り込むことのできる市街地火災延焼シミュレーションソフトウェアの開発を行ってきた¹⁶⁾。

消防研究センターの採用した方式では、延焼速度式として風速と建物間の距離のみから建物間の延焼速度を求めることが可能な東京消防庁が開発した延焼速度式¹⁷⁾を用いているが、この式は風速に対する感度が低いことから、シミュレーションソフトウェアでは風速に応じた浜田式の増加率を用いて延焼速度の補正を行うことも可能なものとした。

また、大規模地震時の同時多発火災の対策を検討するためには様々な条件の元で多数の試行を繰り返すことが必要であり、火災発生時の消防活動の方針作成に寄与するためには出火点情報を入力すると瞬時に結果を表示できなければならない。そのため、シミュレーションソフトウェアの開発にあたっては、正確さを考慮しつつ簡略化によって高速化を目指した。簡略化の主な内容は次のとおりである。

(1) 市街地条件の簡略化

実際の都市空間には様々な建物が存在し、正確に延焼シミュレーションを行うためには、個々の建物の特徴にあわせて火災の進展を模擬する適切な計算を行う必要がある。しかし、実際の市街地火災では一般住宅の延焼被害が主であると考えられることから、全ての建物を防火木造と耐火造の2種類として耐火造は延焼しないものとした。

また、建物の階高や建物が建てられている地表の高さが延焼に影響を及ぼすことは明らかだが、全ての建物を2階建てと仮定し、全ての建物は同じ標高の土地に建設されているものと仮定して計算を単純化することとした。

(2) 延焼計算の簡略化

延焼計算の前提として、火災は出火建物の重心で発生し、延焼した建物内の火災は必ず建物の重心を経由することとした。すなわち、隣棟間の延焼には、火元建物の重心から火元建物の外壁までの屋内延焼、火元建物から延焼建物の外壁への隣棟間延焼、延焼建物内

の屋内延焼の3つの段階を経ることとした。また、重心に延焼が至った時間を全焼時間とすることとした。この前提のもとで、風速0mの際の延焼速度を用いて、異なる建物の重心間の延焼時間が最短となる経路を平均的な延焼経路として事前に計算し、どちらの建物から延焼する場合もこの延焼経路を用いることとした。この結果、延焼経路を事前計算することによりプログラムを単純化でき、延焼計算の時間を軽減した。

この方式に基づいて開発した市街地火災延焼シミュレーションソフトウェアの画面例を図3に示す。この画面から、出火点、出火時刻、風向、風速等を入力することにより、市街地火災延焼シミュレーションを実行することが可能である。なお、この市街地火災延焼シミュレーションソフトウェアには、飛び火の発生を予測する機能はないものの、大規模地震災害時には通電火災のように時間が経ってから火災が発生する場合があるため、設定する出火点ごとに出火時刻を設定することができ、飛び火の発生時刻が判っていれば事後に飛び火の影響を検証することも可能である。

また、消防活動の効果を盛り込むための方法として、延焼阻止線を設定することが可能である。延焼阻止線とは消防活動時に計画として設定する線であり、この線より先に延焼を進ませないよう消防力を投入する線といえることができる。我々のシミュレーションでは、延焼経路が設定した延焼阻止線と交差する場合に、当該延焼経路を延焼計算に利用しないことで、延焼阻止効果を実現している。

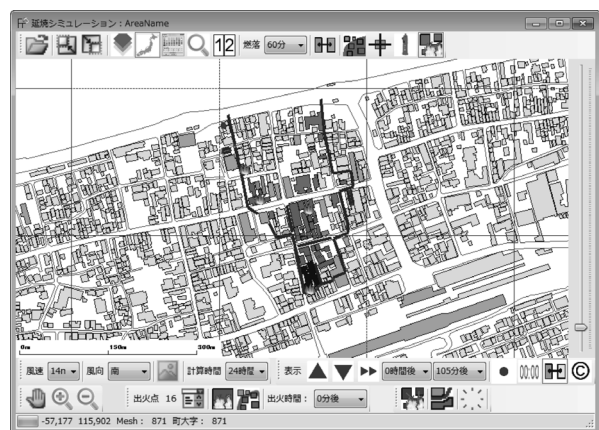


図3 市街地火災延焼シミュレーションの画面例

3. 糸魚川市大規模火災への市街地火災延焼シミュレーションの適用と考察

平成28年12月22日に糸魚川市大町1丁目で発生した火災は、木造密集市街地での消防活動困難性、強風下の飛び火による複数同時炎上火災への進展などに

より、平常時の火災としては酒田大火以来の規模の大火災となった。本節では、糸魚川市大規模火災の概要と、市街地火災延焼シミュレーションを適用した結果を示す。

3.1 糸魚川市大規模火災の概要

(1) 日 時

出火時刻：平成 28 年 12 月 22 日 10:20 頃

覚知時刻：平成 28 年 12 月 22 日 10:28

鎮圧時刻：平成 28 年 12 月 22 日 20:50

鎮火時刻：平成 28 年 12 月 23 日 16:30

(2) 被害状況

・人的被害：負傷者 17 人

(軽傷：男性 14 人，女性 2 人，中等症：男性 1 人)

※うち、煙を吸ったことによるもの 1 人

転倒によるもの 1 人

消火活動中に負傷した消防団員 15 人

・建物被害

焼損棟数 147 棟

(全焼：120 棟，半焼：5 棟，部分焼：22 棟)

焼失面積（被災エリア）：約 40 000 m²

焼損床面積：30 412 m²

(3) 活動状況

・12 月 22 日

糸魚川市消防本部 16 台 74 人

糸魚川市消防団 72 台 756 人

県内・県外応援消防隊 38 台 175 人

計 126 台 1 005 人

・12 月 23 日

糸魚川市消防本部 16 台 75 人

糸魚川市消防団 64 台 720 人

県内・県外応援消防隊 25 台 154 人

計 105 台 949 人

(4) 延焼動態

火災が拡大する際の火災の前線の動きを延焼動態と呼ぶ。現在、糸魚川市大規模火災の延焼動態を取りまとめた資料としては、糸魚川市消防本部の作成した延焼動態図と状況図（以後、「消防本部資料」と呼ぶ）²⁾のほか、国土技術政策総合研究所及び建築研究所が共同で発表した延焼動態図（以後、「国総研及び建研資料」と呼ぶ）¹⁸⁾が知られている。

消防本部資料は、映像等の記録や消防職団員の記憶から作成されたものであり、実際の状況を完全に再現したものではないとされているが、13:00 以前は空撮映像が得られていないため、原稿作成時点において 13:00 以前の全体的な延焼状況を示す公的資料は他

にない。

また、国総研及び建研資料は、Web 上に掲載された映像・画像、現地調査時に収集した住民が撮影した静止画像の他、テレビ局及び新潟県警から提供を受けた火災時の映像を基に作成されたものである。空撮映像が得られた 13:00 以降の状況について詳細に解析が行われており、消防本部資料の建物に加えて 5 か所の建物が新たに飛火発生個所として特定されている。

3.2 市街地火災延焼シミュレーションの適用結果

本節では、糸魚川市大規模火災に対して、市街地火災延焼シミュレーションを適用した結果について示す。

シミュレーション実施時の気象条件としては、風向を実際の気象条件と同じ南風とし、風速は市街地火災延焼シミュレーションソフトウェアのインターフェースの制約により 1 m/s 刻みの設定となっているため 13.9 m/s に近い値である 14 m/s とした。また、延焼経路データを作成するための地図データは、国土地理院が公開している基盤地図情報を一部修正して用いた。

(1) シミュレーション結果と資料の比較

まず、シミュレーションの妥当性を判断するために、既存の延焼動態図との比較を行った。

図 4 に市街地火災延焼シミュレーションの初期設定状況を示す。火元となる中華料理店のほか、飛び火による出火を盛り込むために国総研及び建研資料に基づいて 15 か所に時間差を持って出火点を設定した。なお、利用している地図データと実際の建物状況に差異があるため、飛び火によって出火した建物が地図データに無い場合には、なるべく近くの建物に設定した。さらに、消防研究センターの調査の結果として得られた焼け止まり線と同じ位置に延焼阻止線を設定したほか、焼損範囲内の道路 3 か所（図 4 中①～③）に



図 4 出火箇所、延焼阻止線の設定状況

延焼阻止線を設定した。図4①の道路に設定した理由は、道路北側に位置する建物の外壁が概ね健全に残っていること（写真1）、別方向からの写真（写真2）により北側から延焼が進んだと考えられたことから、消火活動等により道路を越える延焼が無かったと考えられたためである。また、図4②の道路については、近隣への聞き取り調査において、「火元付近の火災は北側道路近くまで延焼したのち火元東側の街区に延焼



写真1 図4①北側の延焼状況（道路側より撮影）



写真2 図4①北側の延焼状況（北東側建物屋上より撮影）

し、そこから南側へ燃え広がった」との主旨の証言が得られていることから、当初は消防活動により火元東側の街区への延焼が抑えられていたと考えられるため、シミュレーション結果をより実際に近づけるために延焼阻止線を設定した。さらに、図4③の道路については、消防本部の情報では、まず東側街区の火災が図4③の近くまで燃え広がる一方、かなり遅れてから西側街区へ飛び火により着火し西から東へ燃え広がったとされている。また、盛んに消防活動が行われている記録映像が残されているほか、周辺住民から提供いただいた写真から西側街区の火災が道の近くまで燃え広がった時点の東側街区の壁面を確認することができた。これらの情報から、道路両側の建物はそれぞれの街区内から延焼したものと判断し、シミュレーション結果をより実際に近づけるため延焼阻止線を設定した。

シミュレーションの結果、最終的に延焼阻止線に囲まれた範囲の防火木造建物は全て延焼した。地図データと実際の建物状況に差異があるため、数値は実際と一致しないが、焼損棟数は161棟、焼損床面積は約16164m²であった。

図5～図9に、シミュレーション結果と実際の延焼状況を示す。なお、実際の延焼状況については、図5及び図6は消防本部資料に、図7から図9は国総研及び建研資料に基づいて、比較のためにそれぞれの資料から凡その範囲を書き写したものである。

これらの結果から、シミュレーション結果のほうが延焼の進み具合が早いものの、延焼の進み方はよく一致していることが判る。シミュレーション結果の進み具合が早い理由としては、設定した風速が実際の風速より若干早い影響や、消防活動の注水によって実際の延焼速度が抑えられている可能性などが考えられる。



図5 シミュレーション結果（左）と実際の延焼状況（右）の比較（11：35）



図6 シミュレーション結果(左)と実際の延焼状況(右)の比較(12:00)



図7 シミュレーション結果(左)と実際の延焼状況(右)の比較(13:15)



図8 シミュレーション結果(左)と実際の延焼状況(右)の比較(14:00)



図9 シミュレーション結果（左）と実際の延焼状況（右）の比較（14：45）

（２） 放任火災との比較

次に、消防活動が行われず火災が放任されていた場合について、延焼阻止線を設定せずにシミュレーションを行った結果を図10に示す。なお、焼損棟数は248棟、焼損床面積は約25,383 m²であった。

この結果を、延焼阻止線を設定した範囲と比較すると、延焼地域の東側区画や南西区画で大きく延焼が広がっていることが判る。焼損棟数及び焼損床面積について比較すると、概ね1.5倍になっており、あくまでもシミュレーションの結果ではあるが、消防活動により延焼被害が2/3に抑えられたと考えることが可能である。

なお、前述のとおり、我々の延焼シミュレーションは、高速化を目指して簡略化したモデルを利用しており、飛び火を予測する機能は無い。放任火災のシミュ

レーション結果において実際の延焼範囲よりも外側に燃え広がった箇所から、今回発生しなかった別の飛び火が発生した可能性もあり、その場合には、更に延焼範囲が拡大していた可能性も十分考えられ、2/3という数字は効果を低く見積もっている可能性がある。

4. おわりに

本稿では、市街地火災延焼シミュレーションについて近年の例に基づいて紹介するとともに、平成28年12月22日に糸魚川市大町1丁目で発生した大規模火災について、消防本部資料ならびに国総研及び建研資料に基づいて消防研究センターの開発している市街地火災延焼シミュレーションを適用した結果について紹介した。

消防研究センターでは、今後も消防機関等にとって有用な市街地火災延焼シミュレーションの実現を目指して、高速化に重点を置きつつ、より精度の高い市街地火災延焼シミュレーションの開発を続けていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 総務省消防庁、新潟県糸魚川市大規模火災（第13報）、<http://www.fdma.go.jp/bn/2016/detail/985.html>
- 2) 総務省消防庁、糸魚川市大規模火災を踏まえた今後の消防のあり方に関する検討会報告書（2017）
- 3) 浜田稔、火災の延焼速度について、火災の研究1、1951
- 4) 日本火災学会、火災便覧第3版、共立出版、1997
- 5) 愛媛県、愛媛県地震被害想定調査（最終報告）第4編 建物被害（2013）
- 6) 東京消防庁、地震火災に関する地域の防災性能評価手法の開発と活用方策（2001）
- 7) 中央防災会議、首都直下地震の被害想定項目及び手法



図10 放任火災の場合の計算結果

- の概要～人的・物的被害～, http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku_wg/pdf/syuto_wg_butsuri.pdf (2013)
- 8) 加藤ら, 建物単体データを用いた全スケール対応・出火確率統合型の地震火災リスクの評価手法の構築, 地域安全学会論文集, No.8, pp.1-10 (2006)
- 9) 中央防災会議, 南海トラフの巨大地震 建物被害・人的被害の被害想定項目及び手法の概要, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/20120829_gaiyou.pdf (2012)
- 10) 名古屋市, 震災に強いまちづくり方針(本編), <http://www.city.nagoya.jp/jutakutoshi/cmsfiles/contents/0000002/2717/honpen.pdf> (2015)
- 11) 独立行政法人建築研究所, 市街地の延焼危険性評価手法の開発, 建築研究報告, No.145 (2006)
- 12) 三浦ら, 飛火を反映した市街地火災シミュレーションの構築(その1) 火の粉の発生量の実験的解明, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2011)
- 13) 岩見ら, 飛び火を反映した市街地火災シミュレーションの構築(その2) 飛火現象のモデル化とシミュレーションの構築, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (2011)
- 14) 樋本ら, 都市火災の物理的延焼性状予測モデルの開発, 日本建築学会環境系論文集, 第607号, pp.15-22 (2006)
- 15) 西野ら, 準定常的な計算法を用いた都市火災延焼性状の簡易予測モデルの開発, 日本建築学会環境系論文集, 第75巻, 第647号, pp.9-18 (2010)
- 16) 独立行政法人消防研究所, 消防活動支援情報システムの開発に関する研究報告書 (2003)
- 17) 東京消防庁, 地震時の延焼シミュレーションシステムに関する調査研究 (1989)
- 18) 国土交通省国土政策総合技術研究所および国立研究開発法人建築研究所, 平成28年(2016年)12月22日に発生した新潟県糸魚川市における大規模火災に係る建物被害調査報告書, 国土技術政策総合研究所資料, No.980 あるいは建築研究資料, No.184, (2017)