

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

A Method for The Integrated Earthquake Fire Risk Evaluation Based on The Single Building Fire Probability Applying to Any Different Map-Scale

加藤 孝明¹, 程 洪², 亜力坤 玉素甫², 山口 亮³, 名取 晶子³

Takaaki KATO¹, Cheng HONG², Yalkun Yusuf², Makoto YAMAGUCHI³ and Akiko NATORI³

¹ 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻

Department of Urban Engineering, the University of Tokyo

² (株)グロシス・ジャパン

GLOSIS Japan, Co., Ltd.

³ 損害保険料率算出機構

Non-Life Insurance Rating Organization of Japan

It is not an easy work for creating a fire risk evaluation method that can be applied to different map-scale from a single building to the whole region of Japan. Comparing with the traditional simulation method using the urban index or mesh-data, the burned probability of each single building is calculated in our method. Therefore, our output reflects the actual urban spatial characteristics and fits for any general-purpose with no margin of error. It is possible to amount to different totaled-unit and to get the numbers of burned houses and area. Besides it is also an appropriate way to convey the fire risk information to the citizens by showing the cluster data from this simulation also named Fired Fate Community.

Key Words: fire risk evaluation, urban disaster, burned probability, urban fire-spread, earthquake, GIS.

1. はじめに

中央防災会議¹⁾の発表にみられるように地震火災の危険性は依然として高い。

地震火災のリスクを把握することは、国レベル、都道府県レベル、市民レベルいずれにおいても、対策検討において重要である。国レベルでは、全国に6,000haあると言われる重点密集市街地²⁾の地震火災の危険性を低減させる戦略の検討において基礎資料として欠かせない。都道府県レベルにおいても、防災意識の啓発、都市計画的な対策の検討、防災まちづくり等の事業の推進に必要とされる。市民レベルにおいても、自宅の不燃化、難燃化、共同建替えといった個人レベル、まちレベルの対策について意思決定する際の重要な情報となる。いずれのレベルの対策においても、リスクの軽減とコストのバランスが意思決定の決め手になる。したがって、対策の検討で必要とされる地震火災リスクに関する情報は、地震発生の確率と同様、地震火災による被害を受ける確率、或いは、被害の期待値として表されるものであることが望ましい。

従来、地震火災リスクに関する情報は、被害想定という形で示されることが多い。被害想定では、ある特定の出火点を設定し、そのときの延焼動態が示される。こ

で示された被害は、ある特定の場所から出火した場合のシナリオである。具体的な応急対応活動を検討していくためには不可欠な情報であるが、起こりうる被害状況像の一つと理解すべきものである。本来、出火は確率事象であるが、被害想定では、その構造から出火の確率性が排除されている。地震火災リスクの評価においては、出火の確率性を考慮し、出火と延焼とを統合した形で与えられる地震火災被害を受ける可能性を評価することが課題といえる。また被害想定の外に、東京都の地域危険度³⁾のように地域間の相対的な危険度ランクで表されることがあるが、絶対値で示された方が具体的な対策の検討に結びつきやすい。

また、リスクコミュニケーション上の観点も重要である。特に市民レベルにおいては重要である。地震火災リスクに関する情報は、分かりやすく、かつ、リアリティをもって伝わるものであることが不可欠である。また、他人事ではなく自分の問題としてリスクを理解できるような形で示されるものが期待されている。

一方、地震火災の評価に関わる技術環境は、市街地のデジタル地図の整備の進展、コンピューターの処理能力の向上等、従来の手法が考案された時代と比較し、格段に進歩している。こうした状況をふまえて、今の時代にあった新たな手法を開発する時期にきていると言える。

本研究では、こうした背景をふまえ、多様なニーズに対応する精度の高い地震火災リスクの実用的な評価手法を構築することを目的とする。なお、全スケール対応・出火確率統合型とは、具体的には、国レベルから市民レベルまでのニーズに対応し得る統一的な方法、かつ、延焼だけではなく、出火の可能性を考慮した延焼火災の危険性を絶対値で出力できる評価方法を指す。ここで言う地震火災リスクとは、火災被害にあう確率、或いは、火災被害の期待値と定義する。

既存方法としては、簡便な延焼危険の評価を目的とした市街地指標を説明変数とする関数形による方法^{4),5),6)}、延焼動態の描出、解明を目的としたシミュレーションによる方法^{7),8),9),10)}がある。前者に関しては、市街地指標を入力すれば焼失率が算定できるという高い汎用性の一方で、市街地を平均像としてモデル化しているため、市街地の空間特性が十分反映されないという限界がある。後者に関しては、市街地データに基づいた延焼動態を時系列で描けるという一方、特定の出火点位置に対する延焼被害像を描出するものであり、出火点位置への依存性が高いといった限界を指摘できる。このように既存手法は、その開発目的の違いから地震火災リスクを評価するものとして一長一短がある。本研究が提示する評価手法は、こうした既存手法の技術的蓄積と長所を活かしつつ、短所を緩和するものと位置づけられる。

本評価手法を構築する上でのアイデアは、シミュレーション手法が出火点を設定し、そこから逐次、延焼状況を記述していたのに対して、建物間の延焼過程を動的に扱わないことで、先に市街地全領域に対して最終的に延焼する建物群をあらかじめ確定し、建物群から出火する確率を与えることにより建物の焼失確率を求めるという発想にある。これにより、市街地の空間特性を如実に反映する建物単体データの利用と全国スケールの広い範囲を対象とすることを両立し、同時に、出火点位置に依存しない、かつ、各建物の焼失確率という加工性に優れた出力を得ることができるようになった。また、既存手法では出火と延焼が別々に取り扱われていたが、この方法では、各建物の出火確率と焼失確率が論理的につながり、出火から延焼までを統合的に取り扱うことができるようになった。なお、火災初期の段階で消防力によって消火される火災については出火確率で考慮することとし、本研究では、消防力が対応できない火災を対象とする。

本論文では、既存手法を整理し、本研究の評価手法の位置づけを明確にした上で、本研究の評価手法について述べる。次に本研究をすすめる過程で作成した全国の建物データを対象とした地震火災リスク評価システムを用いて、全国を対象とした本評価手法による評価例を示し、本評価手法による評価結果の汎用性、有用性について述べる。なお、本論文では、上記のように評価手法の構築に主眼を置く。本評価手法による評価結果の特性や地震火災リスクの地域分布等、評価結果の分析については別稿に譲ることにしたい。

2. 既存手法の整理と必要とされる評価手法

(1) 既存手法の整理

地震時の延焼危険に関する評価手法としては、市街地指標を説明変数とする関数による方法^{4),5),6)}、シミュレーションによる方法に大別される。さらにシミュレーションによる方法は、その使用データの違いから、メッ

シュデータを利用する方法¹⁾、建物単体データを利用する方法^{6),9),10)}に大別される。以下では、各方法の特徴と今回の評価において予想される問題点について整理する。

a) 市街地指標を説明変数とする関数による方法

市街地と延焼過程を単純にモデル化することによって得られた市街地指標と延焼危険との関係をもとに、統計から簡単に入手できる市街地指標の値から延焼危険を求めるという方法である。代表的な方法としては、「不燃領域率⁴⁾」による方法、「木防建蔽率⁵⁾」による方法がある。例えば、不燃領域率による方法では、市街地を「101×101の正方格子の交点上に不燃領域と可燃領域がその比率に応じてランダムに存在するもの」とモデル化(図1左)し、延焼過程を「正方格子の縦横に可燃建物があれば、延焼する」とモデル化した上で、数値シミュレーションを用いて不燃領域率と焼失率との関係を求めたもの(図1右)を基礎としている。市街地、延焼過程ともに簡便に捉えて構築された手法である。

この方法では、評価の対象区域の不燃領域率さえ得ることができれば、図1右に示された関係から容易に焼失率を求められることができる。当然のことながら、不燃領域率が同じであれば、同じ評価結果となる。例えば、木造建物で構成される比較的低密な住宅地と、学校等の大規模な不燃領域が散在する密集住宅地では、明らかに市街地特性は異なっており、延焼危険に差異がみられると推察されるが、両者の不燃領域率は一致し得る。

またこの他に、評価単位の大きさによって誤差が生じるという指摘がある¹¹⁾他、評価単位のとりの違いによっても評価誤差が生じる。例えば、評価単位の境界にある学校を評価対象に入れる場合と入れない場合で、不燃領域率は異なる。

以上のように市街地指標を用いる方法は、延焼危険を簡便かつ大局的に捉える方法としては有用であり、広い範囲を対象にし得るが、市街地の空間特性が反映されない等、評価精度に限界が見られる。

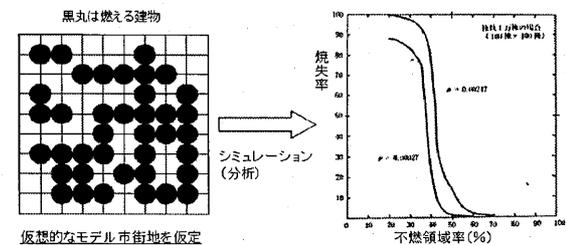


図1 市街地指標による評価方法の構築方法

b) シミュレーションによる方法

シミュレーションによる方法は、延焼動態に着目したもので、市街地データを入力データとし、シミュレーションプログラムを動かすことによって時系列で焼失範囲を得るものである。古典的にはメッシュデータを用いた方法、近年では建物単体データを用いた方法がある。

メッシュデータでは、メッシュ領域の統計値を基礎データとしているため、メッシュ内は均一な市街地として扱われる。そのため、延焼遮断機能が期待できる広幅員の幹線道路や大規模なオープンスペースがメッシュ内に存在する場合、こうした空間要素が延焼性状に反映されにくい。図2は、メッシュ内に延焼遮断効果のある広幅員の幹線道路がある場合の例である。図郭中央の南北の幹線道路は十分な幅員があるため、道路左側からの延焼火災はこの道路で遮断される(図2-(b)-1)。しかしメッシュデータを用いた方法では、メッシュ内では均一な

市街地特性となるため幹線道路が表現されない(図2-(a)-2)。その結果、その効果は延焼速度の低下として現れるが、幹線道路を越えて延焼が拡大するという結果となる(図2-(b)-2)。

建物単体データを用いた方法は、デジタルマップの整備とコンピューターの性能向上に伴って、近年、一般化した。「燃え草」の最小単位である建物がデータ化されているので、精緻なシミュレーションが可能である。しかし、コンピューターの計算速度が向上したとは言え、計算時間の制約⁽²⁾から広い範囲の市街地を対象とするのが困難であること、出火点の近傍の状況によって燃え広がり方が異なるため評価結果が出火点の位置に依存することが短所として挙げられる。図3は、出火点の位置によって評価結果が変わる例である。直近に空地がある建物を出火点とした場合と建て詰まった無接道建物を出火点にした場合とでは、延焼状況は異なる。図3(a)、(b)は、3時間後、6時間後の結果である。左図では、ほぼ全域が延焼するのにに対して、右図では、出火建物の北側に道路があり、出火当初は北側に延焼せず、両者の6時間後の焼失範囲は大きく異なる⁽³⁾。

こうした弊害をなくすためには、考え得るすべての出火パターンについてシミュレーションを行い、その結果を平均してその区域の延焼危険とするという方法が考えられるが⁽²⁾、多大な計算時間が必要とされ、現在の技術環境では、広い範囲を対象とすることは不可能である(図4)。

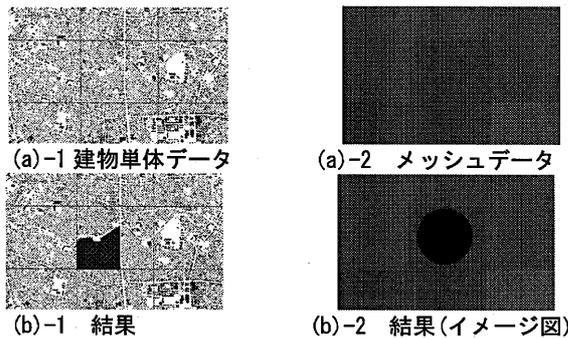


図2 メッシュデータによるシミュレーション手法の限界

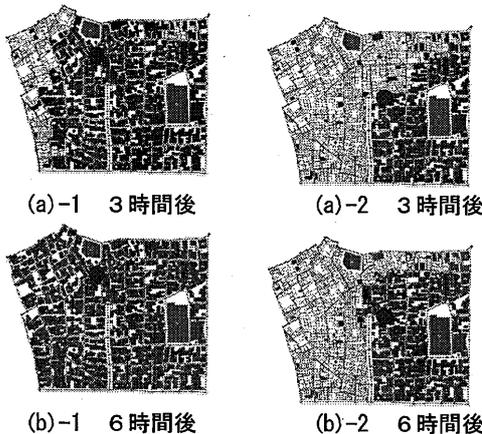


図3 建物単体データによるシミュレーション手法の限界(1)：出火点の違いにより結果が異なる。図中赤丸が出火点。赤色建物は炎上中、黒色建物は焼失済みを表す。風速・風向は同じ設定である。



図4 建物単体データによるシミュレーション手法の限界(2)：地区内から1件出火するとし、すべての出火パターンについてシミュレーションを行い、3時間までの焼失棟数で出火建物を色分けした図である。こうした計算には、多大な計算時間を要する。

3. 本研究における地震火災リスクの評価手法の考え方

このように既存手法は一長一短がある。本研究が提示する評価手法は、既存の手法の短所を緩和し、長所を活かしたものである(図5)。なお、図5の縦軸は、計算負荷を表し、上へ行くほど、広い区域を対象とすることが可能であり、対象区域が同じ場合、上へ行くほど、計算速度が速くなることを表している。

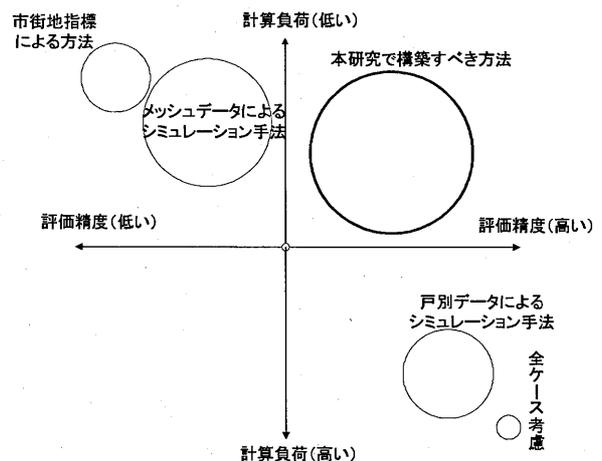


図5 既往手法に対する本手法の位置づけ

本研究における延焼リスクの評価手法の特徴は、①デジタルマップの整備がすすみ、GISの汎用性が高まっているという現在の状況をふまえ、建物単体データを用いることによって市街地特性を評価に反映させていること、②シミュレーションによる方法と比べ延焼過程を簡素にモデル化することによって広範囲を対象とすることを可能にしたこと、③出火確率との連動性を確保していること、である。

本手法のアイデアは、隣棟間の確定的な延焼過程モデル(後述する延焼限界距離 d)を用いて、先に最終的に燃え尽きる建物群(クラスターと呼ぶ)を確定することである(図6)。そうすることで、個々の建物群について、建物群内から出火する確率が与えられれば、建物群を構成する各建物の焼失確率が求められるようになる。本研究では、こうして求められる焼失確率を地震火災リスクと呼ぶ。

本研究の地震火災リスクは、個々の建物について計算されるので、集計単位の取り方に結果が依存せず、任意の集計単位で出力可能である。焼失棟数の期待値を知りたいければ、メッシュ、町丁目、町会、消防署管轄等、都合の良い集計単位で各建物の焼失確率の和を求めればよい。焼失率を求めたければ、総数で除すればよい。また各建物の焼失確率と延床面積を乗ずることで、焼損面積の期待値等を求めることができる。多様な値に加工できる加工性、汎用性に優れた出力を行うことができる。

本研究の考え方は、国土交通省総合技術開発プロジェクト「防災まちづくりにおける評価技術・対策技術の開発（以下、総プロ）」⁶⁾のマクロ評価方法が基づく「CVF (Covering Volume Fraction)¹³⁾」の考え方を基本とし、これを発展させたものと位置づけられる。違いは、①総プロのマクロ評価が基づく「延焼限界距離 d 」に風速、風向を考慮できるようにしたこと、②「延焼限界距離 d 」が対1棟の延焼であったのに対して、対複数棟の延焼に拡張したこと、③各建物の焼失率とクラスターからの出火とを統合化したこと、④日本全国レベルの広域のスケールで技術的に実現したことである。

なお、本研究では、全国すべての建物（約 6,250 万ポリゴン）をデータベース化し、標準地域メッシュ（第三次地域区画）で出火率が与えられれば、数秒単位で焼失確率を求めるシステムも構築している。

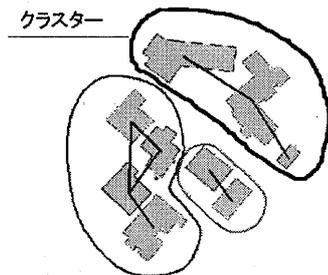


図6 クラスターの生成：隣棟間が延焼限界距離 d 以内の建物は同じクラスターになる。

評価方法の全体フローを図7に示す。まず、基礎データとして、構造属性付きの建物単体のポリゴンデータを準備する必要がある。例えば、東京都においては整備されている。こうしたデータをもとに、延焼に影響するパラメーターである風速、風向を各建物に割り当て、構造と風速・風向を属性値として持つ建物単体のポリゴンデータを作成する。

次に各建物について隣棟間距離と角度を計算し、隣棟間距離と本研究で定義される風速風向別・構造別延焼限界距離との比較をすべての建物ポリゴンデータに対して行い、延焼限界距離以内の建物で形成されるクラスターを作成する。このクラスターは、内部で出火すればすべて延焼する、いわば「運命共同体」と言えるものである。

最後に各建物の出火確率よりクラスター内で1件以上、出火する確率を計算する。クラスター内の建物が焼失する確率がクラスター内での出火確率と同じであることを利用し、各建物の焼失確率を求める。各建物の焼失確率を任意のポリゴンで集計することによって、集計単位毎の焼失棟数の算定を行うというものである。

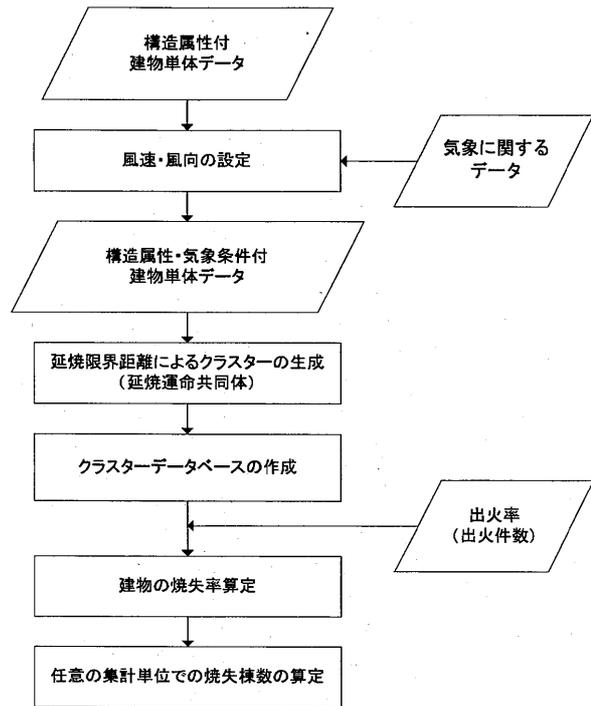


図7 本研究の評価フロー（全体）

4. 評価手法の詳細

(1) 延焼限界距離のモデル

a) 延焼限界距離に関する既往モデル

延焼限界距離を明示的に表したものとして、古典的には、浜田式の延焼速度式におけるものがある。浜田式系列は構造別に3つの式がある。木造、防火造、簡易耐火造に対して各々同じ構造のモデル式が与えられている。各々、浜田式¹⁴⁾、堀内式¹⁵⁾、室崎式¹⁶⁾が対応する。延焼限界距離は、浜田式の延焼限界距離を1とすると、堀内式では1/2、室崎式では1/4である。延焼限界距離は、風下、風横、風上の方向別に設定されている。

最近では、国土交通省・総プロのマクロ評価モデル⁶⁾の「延焼限界距離 d 」がある。マクロ評価モデルは都市レベルの延焼危険評価を行い、町丁目程度を1単位として危険な区域を抽出することを目的に開発されたものである。マクロ評価モデルでは、構造別に延焼限界距離を設定し、延焼限界距離内にある建物が連担してできる建物群に着目し、その大きさをもって延焼危険としている。ここで示された延焼限界距離は以下のように設定されている。

- ① 建築基準法の延焼のおそれのある部分の設定根拠となった火災温度4級曲線より、裸木造の延焼限界距離を12mとし、
- ② 浜田式、堀内式、室崎式の各延焼限界距離の比より、防火造、準耐火造の延焼限界距離を6m、3mとし、
- ③ 一辺長10mを標準家屋とし、炎上建物の立面を炎と仮定し、家屋面積が異なるときには隣棟2階軒下の受熱点の鉛直面における炎の形態係数が一致する距離を求めることによって家屋面積が異なる建物に拡張する。こうして定義された「延焼限界距離 d 」を以下の式で表している。

$$d = kA^r \quad -[1]$$

ただし、 A : 建物の一辺長（建築面積の平方根で近似）．
係数 k , 乗数 r は、構造別に与えられる．耐火造の延焼
限界距離をゼロとしている．ここでの延焼は、対 1 棟を
前提としたものである．

b) 延焼限界距離のモデル化

本研究では、「防災まちづくり」総プロで定義された
延焼限界距離 d の考え方を基本とし、それを拡張した新
たな「延焼限界距離 d' 」を定義する．

総プロ延焼限界距離との違いは、地域特性として気候
の違いを考慮するために風速を組み込んでいること、対
複数棟火災を考慮していることである．炎上建物とその
近傍の建物に着火した状況を想定し、この状況における
延焼限界距離を定義している．

本研究における延焼限界距離 d' は、以下のステップで
モデル化した．まず、風速を考慮できるような炎の想定
と輻射熱の受熱点の設定を行う．次に対 1 棟の延焼を前
提とした延焼限界距離を導出する．具体的には、建物幅、
炎の傾きを考慮した対 1 棟の延焼限界距離である．最後
に複数棟火災を想定して延焼限界距離 d' の補正を行う．
これを本研究における延焼限界距離 d' とした．

c) 炎の想定と輻射熱の受熱点の設定

炎の想定と輻射熱の受熱点の設定について述べる．建
物の階高を一律 3m とし、炎は、壁面上端部のさらに上
方 2m まで上がると想定する（図 8）．火災初期では、
開口部からの炎が噴出するが、その後、屋根が燃えぬけ、
建物全体が炎に覆われ炎上することから、この長さはこ
の二つの燃焼状況の平均的な炎の高さを想定したもので
ある．受熱点は、2階軒裏、高さ 6m とする．なお、総
プロ・マクロ評価における炎の設定の違いは、炎の高さ
が階高のプラス 2m となっている点である．

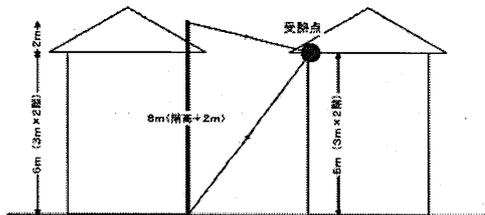


図 8 炎の想定と輻射熱の受熱点の設定

一般に風が吹くと延焼限界距離は大きくなる．これは、
風下方向に炎が傾くことに起因する．風速を考慮するた
めには、風速と炎の傾きとの関係を定めればよい．風速
と炎の傾きについては、文献 4) をはじめとして数多く
の研究がある．ここでは、簡便性より、炎の長さを一定
とする文献 4) のものを採用する．文献 4) では、風速 v
と炎の傾き θ (炎が地面となす角度、単位：ラジアン)
との関係は以下の式で与えられている．

$$\sin \theta = \begin{cases} 1 & 0 \leq v < 2 \\ (2/v)^{0.2} & 2 \leq v \end{cases} \quad \text{---[2]}$$

なお、風による炎への影響は、風下のみとし、風側、風
上については、炎は風速に関わらず直立するものとする．
風下方向の風向に対して平行でない方向については楕円
近似を行うものとする．

d) 対 1 棟の延焼限界距離の導出

次に各構造について「防災まちづくり」総プロ・マク
ロ評価で定義された延焼限界距離に対応する形態係数
(これを限界形態係数と呼ぶ) に一致する隣棟間距離を
求め、これを延焼限界距離 d' とする．ここでは、建物幅

A を 4m から 50cm 刻みで、23.5m まで設定し、炎の角度
に対応する方程式を数値的に解くことによって求めた．
得られた結果を「防災まちづくり」総プロ・マクロモデ
ルと同形の関数 $d = kA^r$ で表すこととした．求めた係数
を表 2 に示しておく．なお、限界形態係数は表 1 の通り．

表 1 構造別限界延焼限界距離の係数・乗数等

	火災温度 4 級曲線	限界形態係数
木造	12m	0.1428
防火造	6m	0.3718
準耐火造	3m	0.6579
耐火造	—	∞

表 2 構造別・炎の傾き別延焼限界距離の係数

角度 θ	木造		防火造		準耐火造	
	k	r	k	r	k	r
90	3.79	0.49	2.03	0.46	1.28	0.35
85	4.06	0.48	2.43	0.41	1.82	0.27
80	4.30	0.46	2.84	0.36	2.38	0.21
75	4.54	0.44	3.25	0.32	2.95	0.16
70	4.77	0.42	3.67	0.32	3.52	0.12
65	4.98	0.41	4.11	0.29	4.09	0.08
60	5.14	0.39	4.60	0.24	4.63	0.05
55	5.24	0.37	5.08	0.14	5.07	0.02

e) 対複数棟の延焼限界距離 d' の導出

最後に複数棟火災を想定し、延焼限界距離を補正する．
複数棟火災として、図 9 に示すような正方格子状に受熱
建物の正面を中心に奇数棟 ($2N + 1$) が立ち並ぶ市街地
を想定する．受熱建物に面する建物が一列分、炎上して
いるものとする．

ここで、建蔽率を $m\%$ とし、 N を変えて、受熱建物に
延焼しない最小の隣棟間距離、すなわち延焼限界距離 d'
を求めてみる．なお、建物幅は、住宅・土地統計調査¹⁸⁾
より得られた住宅の平均建築面積 83 m^2 の平方根とした．
結果を図 10 に示す．受熱建物に对面する炎上建物列の棟
数 $2N + 1$ の N に対する、対 1 棟の延焼限界距離に対す
る比率である．

このグラフをみると、受熱建物正面近くの炎上建物の
影響は大きいですが、正面から離れるにつれ、炎上建物の影
響は、小さくなるのが読み取れる．これは、正面から
離れるに従い、受熱建物への輻射熱算定の基礎となる形
態係数が急減するためである．概ね 4 列目 (横軸 $N = 4$)
以上では、対 1 棟の延焼限界距離に対する比率は、ほと
んど増加せず、ほぼ同じ値をとった．建蔽率、構造によ
って延焼限界距離の比率は異なっており、木造、防火造、
準耐火造、それぞれ、1.5~2.2, 1.2~1.5, 1.1~1.2 程
度であった．

ここでは、すべての建物について一律に補正すること
とし、木造、防火造、準耐火造の構造比率を仮定し、構
造比率で重み付けをした平均値を算出することとした．
建物ストックの構造比率については、準耐火造の比率が
分かり、かつ、全国を対象とした統計データが存在しな
い．そこで、ここでは防火構造区分が調査されている東
京都土地利用現況調査 (平成 8 年) (表 3) を参考に構
造比率を、木造、防火造、準耐火造、順に 15%, 70%,
15% と仮定することにした．図 10 に示された各構造の単
体火災に対する延焼限界距離の比率より、ここで仮定し
た構造比率によって重み付け平均を求めた．結果は、各

建蔽率で表4のようになった。建蔽率の違いにより若干幅があるが、ここでは、対複数棟の延焼限界距離 d^* を対1棟の延焼限界距離の1.5倍と定めることにした。

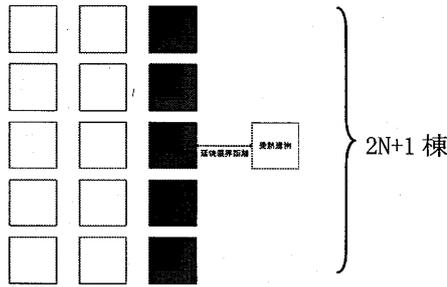


図9 市街地及び複数棟火災の想定

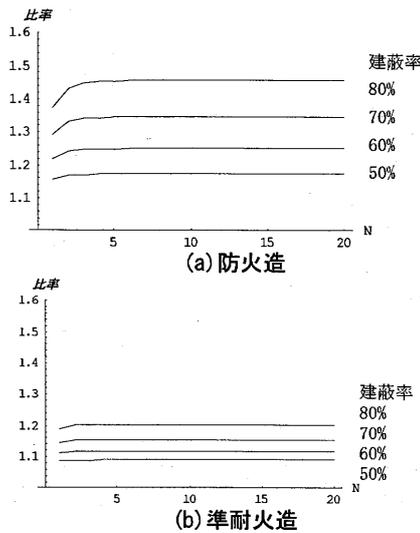


図10 複数棟火災の延焼限界距離の延焼限界距離 d^* に対する比率：横軸は N 、縦軸は $N=1$ に対する延焼限界距離の比率である。

表3 東京都土地利用現況調査（平成8年）による構造比率

	木造	防火造	準耐火造
棟数	197,065	957,949	210,717
構成比	15.4%	70.1%	14.4%

表4 複数棟火災の延焼限界距離の「延焼限界距離 d^* 」に対する比率の構造比率による重みつき平均

受熱建物に 対面する 建物数 $(2N+1)$ の N	建蔽率			
	50%	60%	70%	80%
$N=5$	1.23	1.31	1.41	1.51
$N=10$	1.23	1.32	1.41	1.52
$N=20$	1.23	1.31	1.41	1.52

(2) 隣棟延焼経路の確定と隣棟間距離の計算、及び、クラスターの作成

クラスターの作成に先立ち、延焼する可能性のある隣棟建物を特定し、隣棟間距離と角度を計算し、その結果をデータベース化しておく。クラスター作成の計算時間を短縮するためである。この計算は最も時間を要する部分である。計算アルゴリズムについては、計算時間と精度のバランスを考慮して検討した結果、次のような方法をとることとした。

Step1-1: 50m メッシュで分割されている。当該建物が含まれる 50m メッシュを中心とする上下左右 5×5 のメッシュに含まれる建物を隣棟候補建物とする。ただし、重心間距離が 200m 以上の建物を除く(4)。

Step1-2: 対象建物と隣棟候補建物の中で、建物ポリゴンの重心間及び最寄点間に線を描き、いずれかの線が途中で別の建物の辺に遮られない場合、隣棟建物とする。なお、隣棟間の最寄頂点間距離が 3m 以内の場合、無条件に隣棟とした。

Step2-1: 隣棟の方向を測定する。対象建物と隣棟建物の中で、建物ポリゴンの重心間の線を描き、その方向を隣棟間の方向とする。

Step2-2: 隣棟間距離を計算する。対象建物と隣棟建物の距離を測定する。相互の位置関係により、頂点間の最短距離、或いは、頂点-辺間の最短距離となる。クラスターの作成は、隣棟間距離と延焼限界距離 d^* とを比較し、隣棟間距離が延焼限界距離 d^* 以下であれば、同じクラスターに属するとして探索を行う。なお、隣棟間で構造が異なる場合、延焼限界距離 d^* は、両者の延焼限界距離の平均値とすることとする。

(3) 出火確率の割り当て

本研究では、出火確率は外から与えられるものとし、個々の建物に出火確率を与える方法としている。

現在、出火率の評価手法としては様々なものがあり、多様な集計単位、形式（出火件数等）で出力される。本研究の場合、最終的には個々の建物の出火確率が与えられればよいので、任意の出力単位、形式に対応可能である。例えば、標準地域メッシュ（第三次地域区画）で出火件数が出力された場合、個々の建物の出火確率は、メッシュ内の建物の出火確率は一様と仮定し、メッシュ内の建物の建物数の総数で出火件数を除すればよい。

(4) 焼失確率と与えられた集計単位における焼失棟数の期待値の算定

建物の焼失確率は、その建物が属するクラスターから1件以上出火する確率に等しい。クラスターを構成する建物を n 棟、クラスターに属する建物 i の出火確率を p_i とすると、建物の焼失確率 P は、以下ようになる。

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad \text{---[3]}$$

集計単位における焼失棟数の期待値 χ は、集計単位に含まれる建物の焼失確率 P_j の総和に等しくなることから、以下の式で表される。

$$\chi = \sum P_k \quad \text{---[4]}$$

なお、ここでの集計単位は行政区、町会、メッシュ等、それに含まれる建物が特定できれば、任意のものに対応可能である。

ここで、計算時間の縮減を図るために P について近似計算を行うこととした。すべてのクラスターについて同様の計算を行えば、すべての建物の焼失確率が求められる。近似式は以下のとおり。

$$P = 1 - \exp(-n \bar{p}) \quad \text{---[5]}$$

ただし、 \bar{p} は、集計単位内の出火率の平均値である。

以下の条件で、建物の焼失確率 P を式[3]、式[5]により計算し、その結果を比較することによって近似の精度を検証した。

- ・ 1 クラスターに4つの異なる出火確率が与えられている場合を想定し、
- ・ 出火確率 p_i を 0.00001~0.0001 の区間で、棟数を 1~1000 の区間で各々ランダムに与える。

図 11 は、10,000 回の計算結果を示したものである。厳密値と近似値がほぼ一致し、近似の妥当性が確認された。

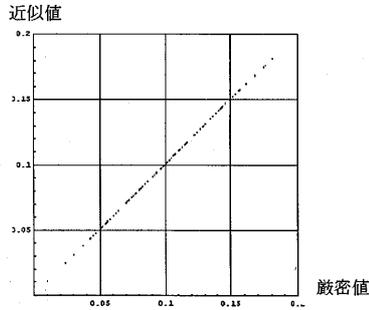


図 11 焼失確率の近似精度の検証

5. 全国の地震火災リスク算定システムの構築

(1) 使用データ

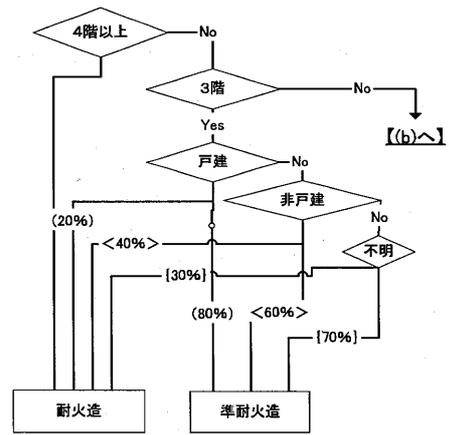
今回の計算では、現在市販されているデジタルマップのうち、建物属性の多様性、データ変換の容易性、操作性等を総合的に勘案し、ダイケイ・テレマップを用いることとした。このデータは、平成 15 年 7 月現在で全国の 3,204 市町村のうち 3,052 市町村をカバーしており、面積カバー率 95.7% と、ほぼ全国をカバーしている。

また、風速・風向データについては、「気象情報データベース・アメダス」(財)気象情報支援センター)を利用することとした。このデータベースは、過去 29 年間(1976-2004)の気象情報がデータベース化されている。風速・風向が揃っている観測点の総数は、すでに廃止された観測台も含め合計 976 箇所である。風に関するデータとしては、1 日平均風速、1 日平均風向、1 日最大風速が得られる。

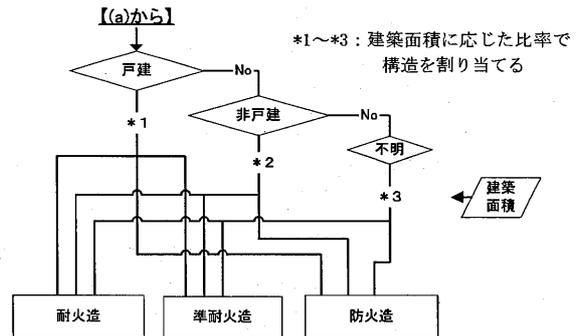
(2) 構造の割り当て

ダイケイ・テレマップでは、建物属性として建物種別(ビル・アパート、戸建建物、事業所、不明)と階数(3階建て以上の建物についての階数)が与えられているが、構造属性はない。そこで、簡便法として、ダイケイ・テレマップの二つの建物属性を手掛かりに、構造が既知のデータ^⑥との比較を通して以下の手順で構造の推計を行うことにした(図 12)。以下では、ビル・アパート及び事業所を非戸建住宅と呼ぶ。

なお、ここでは、データの制約上、木造をすべて防火造とみなすこととした。



(a) 3階以上の構造割り当て



(b) 2階以下の構造割り当てフロー

- ① 4階以上は耐火建物とする。
- ② 3階の戸建は、防火造 0%、準耐火造 80%、耐火造 20%とする。
- ③ 3階の非戸建は、防火造 0%、準耐火造 60%、耐火造 40%とする。
- ④ 3階の不明は、防火造 0%、準耐火造 70%、耐火造 30%とする。
- ⑤ 2階以下の戸建については、表 5 に示す建築面積別耐火・準耐火の棟数比(耐火造 q_{1i} 、準耐火造 q_{2i} とする)を標準的な値と仮定する。ダイケイ・テレマップから得られる建築面積別棟数 n_i を求め、住宅・土地統計調査の都道府県データ¹⁸⁾の戸建住宅の戸数(3階以上を含む)の非木造比率 Q に適合するように地域係数 k を求める。定義は以下のとおり。

$$\text{地域係数} : k = \frac{(\sum n_i)Q}{\sum n_i(q_{1i} + q_{2i})} \quad \text{---[6]}$$

地域係数 k は、地域による耐火造率、準耐火造率の多寡を都道府県全体の非木造比率 Q を用いて補正するための係数である。補正後の建築面積別耐火造率、準耐火造率は、地域係数 k を用いて、 kq_{1i} 、 kq_{2i} となる。ここで求められた建築面積別構造比率に応じて、コンピューターで発生した乱数により、ランダムに構造を割り当てた。

- ⑥ 2階以下の非戸建については、表 6 に示す建築面積別耐火・準耐火の棟数比を標準的な値と仮定する。
- ⑦ 2階以下の不明については、データ分析より、2階以下の戸建と2階以下の非戸建の多くの点で中間的な性質を持っていることから、建築面積別構造比率を両者の平均と仮定した。

なお、構造の割り当て方法については更なる検討の余地がある。東京都都市計画 GIS のように構造属性が与え

られているデータが入手できる場合、その地域に限っては構造推計を行う必要はない。

表5 2階以下の戸建住宅の構造割り当てのための構造比の仮定⁽⁶⁾

建築面積	耐火造	準耐火造
-75 m ²	$q_{11} = 2.0$	$q_{21} = 10.0$
75-100 m ²	$q_{12} = 2.0$	$q_{22} = 15.0$
100-200 m ²	$q_{13} = 3.0$	$q_{23} = 20.0$
200 m ² -	$q_{14} = 3.0$	$q_{24} = 20.0$

表6 2階以下の非戸建住宅の構造割り当てのための構造比の仮定⁽⁶⁾

建築面積	耐火造	準耐火造
-75 m ²	$q_{11} = 4.0$	$q_{21} = 20.0$
75-100 m ²	$q_{12} = 4.0$	$q_{22} = 30.0$
100-200 m ²	$q_{13} = 6.0$	$q_{23} = 40.0$
200 m ² -	$q_{14} = 12.0$	$q_{24} = 50.0$

(3) 風速・風向の割り当て

各建物に最寄りの観測点の風速・風向データを割り当てた。本システムでは、任意の風速・風向下における地震火災リスクを求めることが可能である。計算時間の制約がなければ、風速・風向の出現確率を取り込んだ地震火災リスクを求めることも可能である。なお、ここでは、データの安定性を考慮し、通算15ヵ年以上の観測実績のある826箇所の観測台のデータを使用することし、地上10mの風速に補正⁽⁶⁾して利用した。

(4) 計算時間

パソコンでの計算時間は、アルゴリズムの工夫等により縮減を図った。隣棟間計算では、約6,250万棟の建物に対してのべ1週間程度、クラスター計算では、のべ12時間程度という結果となった。地震火災リスクの算定においては、全国を対象として標準地域メッシュ（第三次地域区画）に出力する場合、風速・風向1ケースにつき、焼失率を数十秒～最大10分程度で計算できる水準となった⁽⁷⁾。十分な実用性が確保されていることが確認された。

6. 算定例

ここでは、計算結果の例をすべてのスケールで示しておく。なお、評価結果についての考察は本論文の主眼ではないので簡潔に述べるに留める。

今回の試算では、風向・風速データとして、総計算時間の制約から、年間の最頻風向の平均風速下における地震火災リスクを算定することとした。

図13は、各建物からの出火確率を全国一律として試算した結果である。ここでは、文献19)を参考に、1,000galのときの戸建住宅の冬の夕方出火率である0.00048を与えた。表示単位は標準地域メッシュ（第三次地域区画）とした。各都市圏の地域特性をふまえた結果が読み取れる。また、図14に出火率を東海・東南海・南海地震の想定結果⁽⁸⁾とした場合の焼失率の試算結果を示す。焼失率分布は、出火率分布と比較し、震源からの距離の影響が相対的に小さい。こうした分析を数分単位

で行うことができる。

図15は東京都での算定結果である。メッシュ、建物、更に一部地域をズームアップしたものを掲載しておく。町丁目、町会、消防署所管轄区域等、ポリゴンデータが与えられれば、任意の集計単位で表示が可能である。

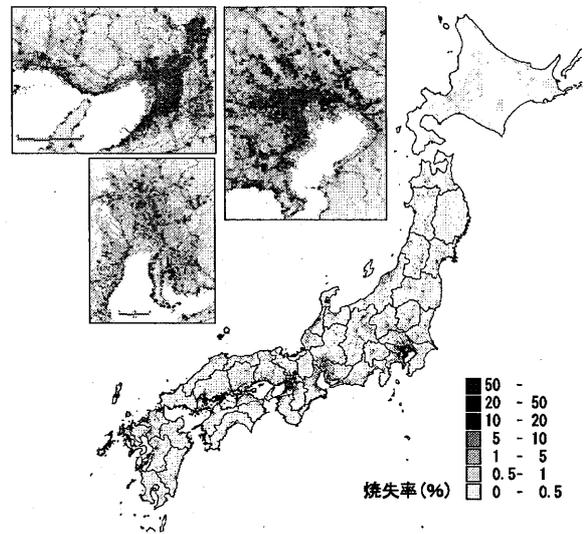


図13 全国スケールの地震火災リスク（標準地域メッシュ（第三次地域区画）：出火率を一律0.00048とした場合

7. 市民へのリスク伝達・市民のリスク共有における効果

地震火災のリスクを低減させるためには、まち全体としての不燃化・難燃化の促進、道路整備等による延焼遮断効果の向上が必要である。個人の努力だけでは無意味であり、地域・まちぐるみでの取り組みが不可欠である。これが建物倒壊リスクの軽減とは異なる点である。

ここでは、今回の評価手法による結果を市民へのリスク伝達、リスク共有において用いた事例⁽⁹⁾から得た効果について述べる。市民へのリスク伝達、リスク共有において重要なことは、自分の問題として直感的にリスクを認識できるかどうか、対策の方向性を感じ取れるかどうか、つまり、まち・地域ぐるみでの取り組みの必要性を感じ取れるかどうかの二点と考えている。

本研究の手法では、自分の問題として火災リスクを認識しやすい。市民は、自分の家が分かるスケールの図面によって自分の問題として地震火災の問題を認識し、大地震の発生の可能性を自分で見積もりさえすれば、自宅の焼失確率という値から火災被害にあう可能性を読み取ることができるようになる。

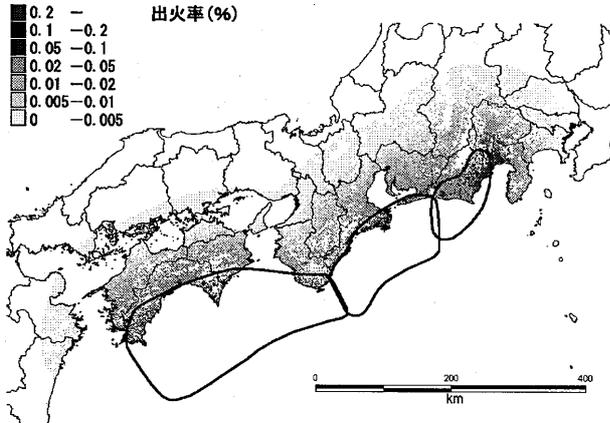
また、クラスターの図示は、まち・地域での取り組みを喚起することが可能である。図16(a)、図17(a)は、ひとつのクラスターを同じ色で表したものである。クラスターを市民向けには「延焼運命共同体」と呼ぶことにしている。この図をみると「自分の家を不燃化・難燃化する、或いは、耐火・準耐火造だから安心」というような個人レベルの発想は生じ得ず、まち・地域全体を考慮する視点の重要性を一目で理解できる。同じクラスター内での出火防止策やクラスターの分節化が必要であるという対策の方向性についても容易に理解することができる。市民へ提示した事例では、クラスターが対象町会を越えて広がっており、市民側から自発的に「うちの町会だけ

ではだめだ、近隣町会との連携が必要である」という言葉が寄せられ、本手法の有効性が確認されたと考えられる。

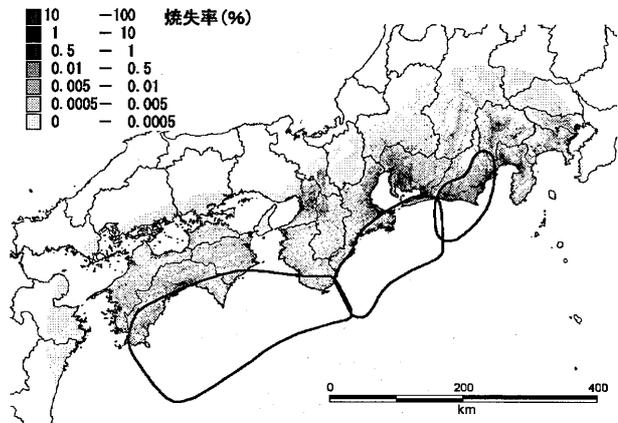
8. まとめと課題

本手法の特徴をまとめると、

- ・ 建物単体から全国スケールまで統合的に適用できる手法である。

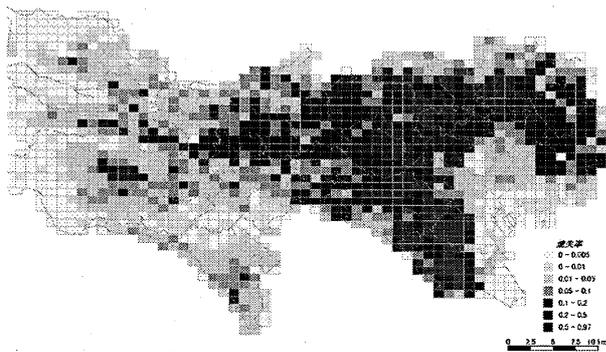


(a) 出火率 (%)

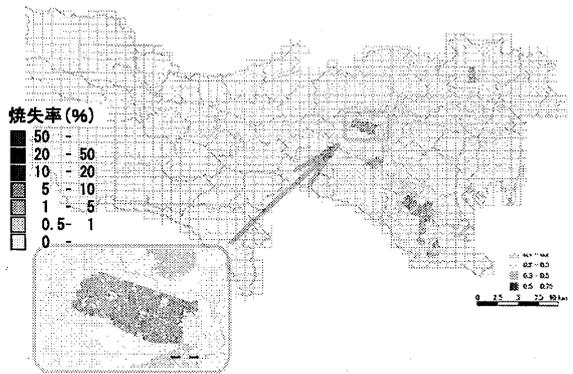


(b) 焼失率 (%)

図14 東海・東南海・南海地震の地震火災リスクの試算例：標準地域メッシュ（第三次地域区画）

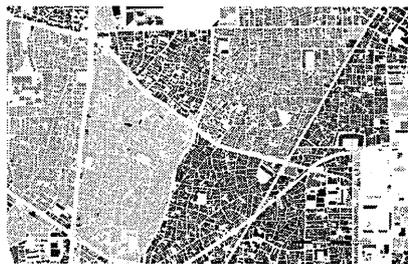


(a) 焼失率 (%)：標準地域メッシュ（第三次地域区画）



(b) 各建物の焼失確率：建物単位⁽¹⁰⁾

図15 東京都における評価結果（首都直下地震）



(a) 延焼運命共同体（クラスター）

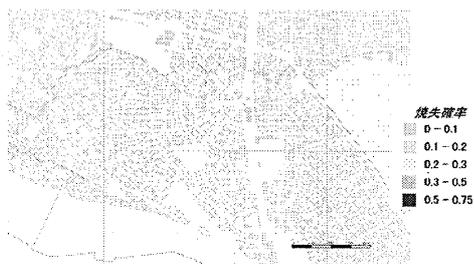


(b) 焼失確率

図16 東京都下町の典型的市街地⁽¹⁰⁾



(a) 延焼運命共同体（クラスター）



(b) 焼失確率

図17 東京都山の手住宅地⁽¹⁰⁾

- ・建物単体デジタルマップを用いているので、従来手法である、市街地指標による方法やメッシュデータを用いたシミュレーション手法と比較し、市街地の空間特性が反映することができる。
- ・出火確率をふまえた焼失確率という絶対値が示されるので、火災リスクの評価として適した手法となっている。
- ・建物単位で焼失確率が計算されるので、行政界、メッシュ、町丁目、消防署管轄区等、任意の集計単位で集計可能であり、汎用性が高い。またその際の誤差は生じない。また、加工性に優れており、焼失率、焼失棟数、焼損面積等に変換可能である。
- ・計算過程で生じる中間データであるクラスターを「延焼運命共同体」と呼んで図示することによって、市民へのリスク伝達、市民とのリスク共有において有効な手段となる。

と言える。既存の手法の長所を活かし、短所を緩和した、現在の技術的環境で行い得る手法と位置づけられる。

本手法の今後の発展の方向性については、パソコンの速度向上、メモリー管理の制約の低減等、今後、技術環境が進歩すれば、精度向上の余地が生じると考えられる。本研究では、コンピューターの計算能力の制約により、延焼限界距離を複数棟火災に対応したものを一律、用いてクラスターを作成したが、単体火災から複数棟火災に至る段階のクラスター、複数棟火災に至った後形成されるクラスターの二段階で取り扱うことが可能になるであろう。

最後に本手法の利用上の注意を述べたい。リスクの経年比較を行う場合である。本手法では、延焼過程が延焼限界距離モデルで記述されているという性質上、デジタルマップが内包する建物ポリゴンの位置の誤差に評価結果が影響される。そのため、経年比較の際に利用する新旧デジタルマップのポリゴンデータの継続性を意識しておく必要がある。本研究で開発したシステムで採用したマップでは、更新の際に経年変化のあった建物を書き足すので問題ないが、行政が整備する都市計画基本図のように数年に一度、全面的に作り変えられる場合、新旧の図面で、実際には更新されていない建物の建物外形線の位置が変わることがある。その場合、図面が変わったことにより評価結果が変わる可能性がある。経年で利用する場合、マップの誤差が評価結果へ与える影響について定量的に検証を行った上で利用する必要がある。

謝辞：研究作業を支援いただいた(株)グロシス・ジャパンの鴨川美紀氏、東京消防庁の吉沢亮氏(当時、東京大学工学部への派遣研修生)、また市民への情報提供を行っていただいたマヌ都市建築研究所の神谷秀美氏にここに記して謝意を表する。

補注

- (1) 例えば、文献 7)、8)等多数。
- (2) 例えば、筆者らが開発した簡便なアルゴリズムを用いた延焼シミュレーションでも 10 万棟を対象とした場合、1 ケースで 10 分程度の計算が必要である。
- (3) 文献 23)のシステムを用いた場合。
- (4) この距離が小さいと隣棟の取りこぼしが多くなる。一方、大きいと計算時間が膨大になる。実際に距離を変えて試算し、今回の設定が最も効率的であるとの結論を得た。
- (5) 平成 8 年東京都荒川区のデータに基づく。
- (6) 観測点の標高より、以下の式を用いて地上 10m の風速に補正して用いた。

$$\frac{V_h}{V_{h_0}} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^p$$

V_h, V_{h_0} : 地上からの高さ h, h_0 (m)における風速, $h_0=0$,
 p : 定数。今回の計算では、 $p=1/7$ とした。

- (7) Pentium4 3GHz, Memory1Gb を用いた場合である。
- (8) 損害保険料率算出機構の試算による。
- (9) 東北芸術工科大学高野公男教授、マヌ都市建築研究所神谷秀美氏らによる町会への提示。なお、ここで利用したデータは地元自治体のデータである。
- (10) 株式会社ゼンリン・許諾番号 Z06A-第 2601 号。
- (11) 本研究は、損害保険料率算出機構の研究(2002-2003, 2005)の一環として行われたものである(地震保険研究 6, http://www.nliro.or.jp/disclosure/q_kenkyu/index.html)。

参考文献

- 1) 内閣府首都直下専門委員会資料, 2005
- 2) 国土交通省都市・地域整備局都市防災対策室:平成 15 年 7 月 11 日発表資料, http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha03/07/070711_.html
- 3) 東京都:地域危険度測定調査(第 5 回)報告書, 1997
- 4) 建設省:都市防火対策手法の開発報告書, 1982
- 5) 糸井川栄一・塚越功・青木義次:防火地域性と市街地の防火目標に関する一考察,都市計画学会学術発表会論文集 no. 22, 1991
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所:総合技術開発プロジェクト「防災まちづくりにおける評価技術・対策技術の開発」, 2003
- 7) 小林正美:シミュレーションモデルによる都市の防災化の研究,都市計画学会学術研究発表会論文集, 1974
- 8) 藤田隆史:大震災火災時における住民避難の最適化-火災延焼シミュレーション,計測自動制御学会学術講演集, 1974.
- 9) 南部世紀夫, 忠末裕美, 小出治:戸別延焼シミュレーションとその立体的表現について,第 11 回日本建築学会情報システム利用技術シンポジウム, 1989
- 10) 樋本圭介:都市火災の物理的延焼性状予測モデルの開発,京都大学博士論文, 2005
- 11) 加藤孝明, 久貝壽之他:市街地延焼からみた市街地整備のための性能基準に関する基礎的考察(その 2) -有限領域への展開-,日本建築学会計画系論文集, vol. 525, 241-248, 1999
- 12) 加藤孝明:延焼シミュレーションによる防災まちづくり施策の代替案評価の試み,総合都市研究,第 75 号, 71-78, 2001
- 13) 加藤孝明:延焼危険から見た市街地の防災性能の評価理論に関する基礎研究,東京大学博士論文, 1999
- 14) 浜田稔:火災の延焼速度について,火災の研究 I, 35-44, 1951
- 15) 堀内三郎:新版建築防火,朝倉書店, 183-188, 1994
- 16) 室崎益輝:市街地の難燃化効果と新延焼速度式に関する研究,日本建築学会近畿支部研究報告集,第 22 号計画系, 417-420, 1982
- 17) 加藤孝明, ヤルコンユスフ他:防災まちづくりのための防災性評価システムの開発-延焼危険と消防活動困難性に着目して,日本建築学会技術報告集, No. 534, 2001
- 18) 総務省総務局:平成 10 年住宅・土地統計調査, <http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/>
- 19) 東京都火災予防審議会:直下の地震を踏まえた新たな出火要因及び延焼性状の解明と対策, 1997
- 20) 気象庁観測技術資料:日本各地の年最大風速,日本気象協会第 34 号, 1971.
- 21) 気象ハンドブック編集委員会:気象ハンドブック, 1979.
- 22) 日本建築学会:建築荷重指針同解説,日本建築学会, 1983.
- 23) 加藤孝明, 他:防災まちづくり支援システムの役割と機能,日本建築学会技術報告集, No. 537, 2002

(原稿受付 2006.05.26)

(登載決定 2006.09.16)